



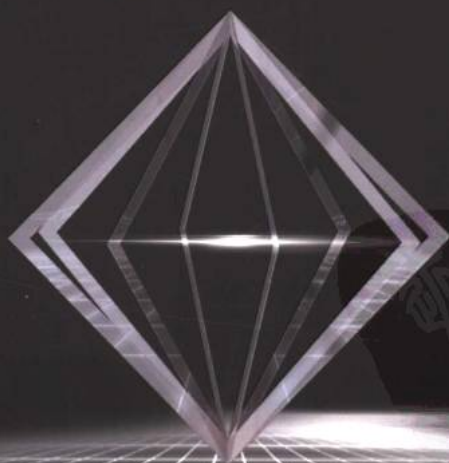
Circuit Design From The Ground Up

# 电子设计从 零开始

杨 欣 王玉凤 刘湘黔 编著

本书意在通过先学者的经验积累，给初学者指出一条电子设计的学习、实践之路。

开卷受益，是我们的心愿。



清华大学出版社



## 内 容 简 介

电子设计涉及的知识面广、难度大，初学者往往不知从何入手。本书结合了作者多年的学习与辅导经验，全面系统地介绍了进行电子设计与制作所需要的各种知识，包括模拟电路、数字电路和单片机应用基础，并结合 Multisim 仿真软件对大部分实例进行了演示。全书分为三大部分，共 17 章。第 1 章至第 8 章深入浅出地介绍了模拟电路的相关知识；第 9 章至第 11 章是数字电路部分，介绍了一些基本概念和系统开发过程中经常使用的器件；从第 12 章到结束是以 51 单片机为例的单片机应用技术介绍，其中有大量的实例和完整的程序。

本书适合电类本、专科学生作为全面掌握电子设计基础知识的参考书；也可作为无线电爱好者的实例参考用书；对于学有余力的非电类工科学生以及对电子设计感兴趣的中学生朋友来说，也是一本很好的全面了解电子设计基础知识的入门读物。

ISBN 7-302-11509-5



9 787302 115090 >

定价：32.00元



# 电子设计从零开始

杨 欣 王玉凤 刘湘黔 编著

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

电子设计涉及的知识面广、难度大,初学者往往不知从何入手。本书结合了作者多年的学习与辅导经验,全面系统地介绍了进行电子设计与制作所需要的各种知识,包括模拟电路、数字电路和单片机应用基础,并结合 Multisim 仿真软件对大部分实例进行了演示。全书分为三大部分,共 17 章。第 1 章至第 8 章深入浅出地介绍了模拟电路的相关知识;第 9 章至第 11 章是数字电路部分,介绍了一些基本概念和系统开发过程中经常使用的器件;从第 12 章到结束是以 51 单片机为例的单片机应用技术介绍,其中有大量的实例和完整的程序。

本书适合电类本、专科学生作为全面掌握电子设计基础知识的参考书;也可作为无线电爱好者的实例参考用书;对于学有余力的非电类工科学生以及对电子设计感兴趣的中学生朋友来说,也是一本很好的全面了解电子设计基础知识的入门读物。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子设计从零开始/杨欣,王玉凤,刘湘黔编著. —北京:清华大学出版社,2005.10

ISBN 7-302-11509-5

I. 电… II. ①杨… ②王… ③刘… III. 电子电路-电路设计-高等学校-自学参考资料  
IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 087663 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

http://www.tup.com.cn 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈韦凯

文稿编辑:李虎斌

封面设计:范华明

版式设计:崔俊利

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:23.5 插页:2 字数:522 千字

次:2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-11509-5/TN·267

印 数:1~5000

定 价:32.00 元

# 序

当今社会对优秀人才的评价，已不仅仅局限于其卷面分数，而更看重的是一个人的理论创新能力和解决实际问题的能力。特别对于当代大学生来说，其动手能力和工程素质的培养尤为重要。

为把握时代发展的脉搏，各高校都依据自身情况，通过各种途径增强对学生实践能力的培养。北京交通大学十分重视学生综合素质教育，除学校各学院积极开展以科技创新为主题的各种科技竞赛活动之外，学校每年还举行“挑战杯”学生课外科技作品大赛，并组织、培训学生参加国际、国内的各种科技竞赛，以鼓励优秀人才脱颖而出。

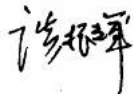
为深化高等工科教育教学改革，提高工科基础课程教学水平与人才质量，原国家教委1996年决定进行国家工科基础课程教学基地建设，北京交通大学承担了物理和电工电子教学基地的建设任务。国家工科基础课程教学基地是国家继开设重点学科和开放实验室之后，在高等工程基础教育方面实施的又一重大改革与建设项目，它代表国家同类基础课程教学的最高水平，在全国充分发挥了示范辐射作用。

《电子设计从零开始》一书的草本，作为国家工科基础课程物理教学基地学生创新实践的培训教材，在过去几年的实践检验中获得了好评。该书进一步完善后得以在清华大学出版社出版，是对本书编纂工作的充分肯定。

《电子设计从零开始》全面系统地介绍了进行电子设计与制作所需要的知识，内容丰富、结构清晰、文笔流畅。不光电类专业的学生应该读一读，物理、机械等其他专业的理工科学生也可以读一读，因为学科之间是交叉关联的。对于非电类专业的理工科学生来说，掌握一定的电子设计技能很有必要。同时，希望将来有志于成为电子设计工程师的中学生朋友也读一读，因为对于电子设计知识的初步了解，会对你们将来的大学专业学习大有裨益。

该书的作者杨欣是我校学生科技创新活动中的佼佼者，王玉凤和刘湘黔是学生科技创新实践活动的优秀辅导教师。相信他们的学识、经验和心血凝聚成的这本书，将会成为大家步入电子设计之门的一把钥匙。

北京交通大学校长：



2005.7.15.



# 前 言

---

## 一、本书的内容

本书的内容包括模拟电子电路、数字电路基础和单片机应用基础。本书通过“讲故事”的形式将这三部分内容逐步展开,并结合电路仿真软件 Multisim2001 对一些实例进行了演示和验证。

这三大部分内容是我们进行电子系统开发、电子仪器设计的基础。本书着眼技术的应用,并不苛求计算和深刻的理论理解。

## 二、本书的结构

模拟电路是数字电路和单片机应用的基础。从第 1 章一个光控报警器实例开始,我们渐渐引入模拟电子电路中常用器件的知识及它们的应用范例。之后通过分析一个又一个的实例来探讨模拟电路中如放大器、振荡器、电源电路等基本电路模块的特点。

本书的第 2 章和第 5 章是提高学习兴趣和扩展知识的一个亮点,这两部分内容在一般的模拟电子技术参考书中很少谈及。第 3 章则将动手实践的方法进行了阐述。第 4、6、7 章是模拟电子部分比较重要的内容。第 8 章是传感器应用的基础。

本书的第 9 章至第 11 章是数字电路部分。一些基本概念的讲述为电子系统开发设计提供基本思路和参考器件。第 9 章和第 10 章是数字电路理论基础。数字电路并不是本书的重点。所以谈及的内容不多。

从第 12 章到本书结束我们都在谈单片机。在某些条件下,单片机可以实现数字电路的绝大部分功能。所以利用单片机进行电子系统的开发不但可以提高效率,有时还能降低成本。单片机的内容从 LED 开始,随后逐步将 51 单片机的基本功能如中断、定时/计时器、存储、串口通信等知识展开。同时,兼顾指令系统的讲解和汇编语言基本编程思想的讨论。

最后一章是一个比较完整的单片机系统开发实例。通过本书的学习,最终完成一个综合性较强、具有一定技术含量的系统是没有问题的。

## 三、本书的对象

本书可以作为大学开展电子制作和科技创新的参考,也可作为无线电爱好者的实例参考书。本书的编写讲求通俗易懂,在阅读时应当注意提取知识点和实例中蕴含的技巧。书中还有一个特点就是插图丰富,这对理解所讲内容是很有帮助的。读者如果感兴趣,可通过 E-mail 与编者取得联系(EEdesign@163.com)。

## 四、特别感谢

王玉凤老师多年以来对我们不遗余力的帮助和支持就像对待亲子般,她的执着和乐观

精神时刻感染着我们。刘湘黔老师是一位不折不扣的优秀班主任，无论课堂内外、工作学习，他都为我们倾注了大量心血，书中许多技术细节和知识点都是他教给我们的。此外，感谢梁丽丽、张晟、周萍、赵少云和雷丽明老师，他们对编者的成长起了至关重要的作用。还要感谢的老师有：刘杰、成正维、刘文、何玉珍、杨甦、蔡天芳、周红红、于亚光、王莹和李济生等。

同时，感谢我的父母和祖父母等家人，他们多年来养育了我；我的挚友崔捷在这三年来的鼎力帮助让我渡过许多难关；曹延鹏是我的良师益友，为本书提出了许多改进的意见。同时，感谢我的朋友，他们是：赵兴东、傅予嘉、陈伟、刘长焕、张延强、张铠麟、闫冰、赵东旭等。

令我万分悲痛的是，在本书初稿定稿之时，我的姥姥不幸离开人世。

谨以此书纪念我的姥姥！

杨 欣

2005 年 4 月于北京交通大学国家工科物理教学基地

## 目 录

---

第1章 走进电子技术 .....	1
1.1 从一个例子开始 .....	1
1.1.1 电池和电池盒 .....	2
1.1.2 电阻器 .....	2
1.1.3 光敏电阻 .....	4
1.1.4 电位器 .....	4
1.1.5 第一次电路分析 .....	5
1.2 利用计算机学习电子电路 .....	6
1.2.1 Multisim2001 登场 .....	7
1.2.2 打开、新建和保存 .....	8
1.2.3 元件栏和仪器栏 .....	9
1.2.4 绘制第一张电路图 .....	11
1.2.5 用 Multisim2001 简单分析 .....	14
1.3 探索其他电子器件 .....	14
1.3.1 电容器 .....	15
1.3.2 电感器 .....	18
1.3.3 二极管 .....	19
1.3.4 三极管 .....	22
1.4 例子的最终分析 .....	29
1.4.1 第一个三极管 .....	29
1.4.2 第二个三极管 .....	30
1.4.3 “合适”的偏压 .....	30
1.4.4 例子的扩展 .....	31
第2章 收音机里蕴含的知识 .....	32
2.1 解密电磁波 .....	32
2.1.1 电磁波的简要回顾 .....	32
2.1.2 天线 .....	32
2.1.3 广播信号的传输频段 .....	33
2.1.4 收音机电路图 .....	33



2.2	向太空发射我们的声音 .....	34
2.2.1	电声元件 .....	34
2.2.2	简易扩音器 .....	36
2.2.3	调制与解调 .....	37
2.2.4	AM 与 FM .....	38
2.3	收音机的故事 .....	41
2.3.1	收音机的进化 .....	42
2.3.2	调谐 .....	43
2.3.3	检波 .....	43
2.3.4	带有放大器的收音机 .....	47
第3章	制作第一件电子作品 .....	49
3.1	制作一个测谎仪 .....	49
3.1.1	面包板 .....	49
3.1.2	插面包板 .....	50
3.1.3	万用板与印刷电路板 .....	51
3.1.4	制作印刷电路板的前奏 .....	51
3.1.5	设计第一块印刷电路板 .....	53
3.1.6	制板 .....	55
3.1.7	焊接 .....	56
3.2	为测谎仪制作一个直流稳压电源 .....	58
3.2.1	变压器 .....	58
3.2.2	电源的整流、滤波 .....	62
3.2.3	完成测谎仪的电源设计 .....	66
3.2.4	稳压 .....	67
第4章	从扩音机中学放大器 .....	72
4.1	放大器的踪影 .....	72
4.1.1	放大的必要 .....	72
4.1.2	放大器的功能 .....	73
4.1.3	放大器的分类 .....	73
4.1.4	扩音器电路图 .....	75
4.2	共射极放大器 .....	76
4.2.1	透彻分析放大器的静态工作点 .....	77
4.2.2	放大器频率特性 .....	78
4.2.3	研究放大器的方法 .....	79
4.2.4	反馈 .....	82
4.2.5	多级放大 .....	86



4.3 完成扩音机的制作 .....	90
4.3.1 电路原理分析 .....	90
4.3.2 制作与调试 .....	91
<b>第5章 制作一台多媒体音箱 .....</b>	<b>93</b>
5.1 音箱的蓝图设计 .....	93
5.1.1 5.1 声道介绍 .....	93
5.1.2 电路模块设计 .....	94
5.1.3 音箱箱体及材料选择 .....	98
5.2 电路制作 .....	101
5.2.1 前置放大器 .....	101
5.2.2 功率放大器 .....	102
5.2.3 分频器 .....	103
5.2.4 电源和布线 .....	105
5.2.5 实用音响电路大放送 .....	108
<b>第6章 振荡器的丰富多彩 .....</b>	<b>112</b>
6.1 脉冲信号波形与电路 .....	112
6.1.1 常见的脉冲信号波形 .....	112
6.1.2 微分电路与积分电路 .....	113
6.1.3 脉冲的整形 .....	116
6.1.4 无源滤波器 .....	119
6.2 振荡器面面观 .....	121
6.2.1 振荡的原理 .....	121
6.2.2 LC 振荡器 .....	122
6.2.3 RC 振荡器 .....	122
6.2.4 晶体振荡器 .....	123
6.3 制作一台电话摘机提醒器/通话限时器 .....	124
6.3.1 再谈振荡器 .....	125
6.3.2 电话摘机提醒器/通话限时器电路的调试与使用方法 .....	128
<b>第7章 集成电路 ABC .....</b>	<b>131</b>
7.1 集成电路基础知识 .....	131
7.1.1 外形特征及电路特点 .....	132
7.1.2 电路标识及型号识别 .....	134
7.1.3 分类 .....	143
7.1.4 参数及常见故障 .....	145
7.2 运算放大器的应用 .....	146
7.2.1 看看使用运放的优点 .....	147

7.2.2	了解运放的若干参数 .....	149
7.2.3	加法器和减法器 .....	150
7.2.4	同相放大器、反相放大器和差分放大器 .....	152
7.2.5	有源微分器和积分器 .....	159
7.2.6	有源滤波器 .....	160
7.2.7	常用集成运算放大器 .....	166
<b>第 8 章</b>	<b>传感器及其他器件 .....</b>	<b>168</b>
8.1	传感器的重要地位 .....	168
8.1.1	传感器有哪些 .....	169
8.1.2	接口技术浅析 .....	171
8.1.3	电桥 .....	172
8.1.4	压力传感器 .....	174
8.1.5	温度传感器 .....	175
8.1.6	光电传感器 .....	178
8.1.7	湿度传感器 .....	184
8.2	其他常用的元器件 .....	185
8.2.1	发光二极管 .....	185
8.2.2	场效应管 .....	186
8.2.3	晶闸管 .....	187
8.2.4	继电器 .....	189
<b>第 9 章</b>	<b>数字启航 .....</b>	<b>191</b>
9.1	数字系统的逻辑思想 .....	192
9.1.1	收录机和 CD 唱机 .....	192
9.1.2	数字电路的语言 .....	193
9.2	数制和编码 .....	194
9.2.1	用二进制计数 .....	194
9.2.2	十六进制数和 BCD 码的妙用 .....	195
9.3	逻辑门 .....	197
9.3.1	与门、非门和或门 .....	197
9.3.2	与非门和或非门 .....	202
9.3.3	同或门和异或门 .....	203
9.3.4	介绍数字集成电路 .....	204
<b>第 10 章</b>	<b>逻辑门的应用 .....</b>	<b>206</b>
10.1	简单的逻辑运算 .....	206
10.1.1	运算规则 .....	206
10.1.2	用布尔代数分析逻辑电路 .....	208





10.1.3	用布尔代数描述真值表 .....	210
10.1.4	卡诺图 .....	211
10.1.5	七段数码管 .....	213
10.2	组合逻辑的功能器件 .....	215
10.2.1	与或门和与或非门 .....	216
10.2.2	加法器 .....	217
10.2.3	比较器 .....	219
10.2.4	译码器 .....	220
第 11 章	翻转与计数 .....	222
11.1	触发器 .....	222
11.1.1	S-R 触发器 .....	222
11.1.2	D 触发器 .....	224
11.1.3	主从 J-K 触发器 .....	226
11.1.4	触发器应用 .....	226
11.2	触发器与振荡器 .....	230
11.2.1	施密特触发器 .....	230
11.2.2	单稳态触发器 .....	231
11.2.3	环形振荡器 .....	233
11.2.4	555 集成电路 .....	233
11.3	计数器 .....	236
11.3.1	异步计数器 .....	237
11.3.2	同步计数器 .....	240
第 12 章	单片机就在我们身边 .....	245
12.1	身边的单片机 .....	245
12.1.1	单片机在哪里 .....	245
12.1.2	单片机的特点 .....	245
12.2	开发准备 .....	246
12.2.1	单片机的发展 .....	246
12.2.2	最简单单片机系统 .....	247
12.2.3	开发工具 .....	250
12.2.4	开发过程 .....	253
第 13 章	单片机和 LED .....	256
13.1	点亮一个 LED .....	256
13.1.1	功能确定 .....	256
13.1.2	电路设计 .....	257
13.1.3	程序编写 .....	259

13.1.4	利用仿真机结合电路试验 .....	260
13.1.5	程序修改 .....	263
13.1.6	用编程器将程序烧入单片机 .....	268
13.2	MCS-51 基础知识详谈 .....	268
13.2.1	8051 单片机功能方框图 .....	269
13.2.2	存储器 .....	270
第 14 章	给单片机下命令 .....	275
14.1	指令的寻址模式 .....	275
14.1.1	单片机是怎样执行指令的 .....	275
14.1.2	寻址方式 .....	276
14.2	指令系统 .....	278
14.2.1	指令概述 .....	278
14.2.2	算术运算指令 .....	279
14.2.3	逻辑运算与传送指令 .....	281
14.2.4	数据传送指令 .....	283
14.2.5	布尔变量操作指令 .....	285
14.2.6	控制程序转移指令 .....	285
14.2.7	8051 指令集 .....	286
第 15 章	跑马灯 .....	291
15.1	开发一个跑马灯系统 .....	291
15.1.1	任务的提出及电路图 .....	291
15.1.2	多种实现方案 .....	292
15.2	定时器与计数器 .....	294
15.2.1	什么是定时/计数 .....	294
15.2.2	8051 的定时器和计数器 .....	294
15.2.3	TMOD .....	295
15.2.4	TCON .....	295
15.2.5	4 种工作模式 .....	296
15.2.6	把定时器应用于跑马灯 .....	298
15.2.7	一个计数器的例子 .....	300
第 16 章	马表与时钟 .....	302
16.1	制作一个马表 .....	302
16.1.1	任务的提出及电路图 .....	302
16.1.2	程序 .....	303
16.2	制作一个时钟 .....	304
16.2.1	预备知识 .....	304



16.2.2 任务的提出及电路图 .....	305
16.2.3 程序 .....	306
<b>第 17 章 采集我们的声音 .....</b>	<b>310</b>
17.1 系统规划 .....	310
17.1.1 声音信号 .....	310
17.1.2 设计功能 .....	311
17.2 信号采集与放大 .....	311
17.2.1 信号采集 .....	311
17.2.2 信号放大 .....	312
17.2.3 功率放大 .....	312
17.2.4 滤波器 .....	313
17.3 A/D 转换 .....	314
17.3.1 什么是 A/D .....	314
17.3.2 如何选择 A/D 器件 .....	316
17.3.3 关于 ADC080X .....	319
17.3.4 声音采集系统中的 A/D .....	322
17.4 串口通信 .....	323
17.4.1 利用串口实现跑马灯 .....	323
17.4.2 单片机与 PC 通信 .....	323
17.4.3 单片机之间的通信 .....	329
17.5 PC 端应用程序 .....	329
17.5.1 Visual Basic 串行通信控件 .....	330
17.5.2 通信实验 .....	332
17.5.3 在声音采集系统中 .....	334
<b>附录 A Multisim2001 的安装 .....</b>	<b>335</b>
<b>附录 B Multisim2001 的菜单栏 .....</b>	<b>339</b>
<b>附录 C Multisim2001 中的虚拟仪表 .....</b>	<b>342</b>
<b>附录 D 数字电路综合设计——数字钟 .....</b>	<b>351</b>
<b>附录 E ASCII 码表 .....</b>	<b>354</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>359</b>



## 第1章 走进电子技术

在本书的第1章里，我们将一起学习有关电子技术（electronic technology）的一些基础知识。确切地说，从第1章到第8章介绍的都是模拟电子电路（analog circuits）。在模拟电子电路中“行走”的都是模拟信号量，更通俗地说就是直流、交流一类的信号。读者不应因没有接触过电路设计而感觉畏惧，因为本书不涉及复杂的计算和深层次的知识，只是作简单而又实用的介绍。

电子技术是我们研制任何有价值、有技术含量的科技作品的基石。

### 1.1 从一个例子开始

电池和电池盒 电阻器 光敏电阻 电位器 第一次电路分析

我们在中学时就接触过电路图（schematic diagram），不过这些电路图都是一些只包含了电阻（resistor）、电源（power supply, electrical source）及开关（switch）的简单电路。阅读家用电器的电路原理图是我们接触电路图最简单的途径之一。不过这些电路图大都比较复杂（当然如抽油烟机、电吹风等一些简单的除外），成百上千个元器件“交织”在一起，使我们无从着手分析。

于是，我们从图1-1这样一个简单的光控报警器电路开始。

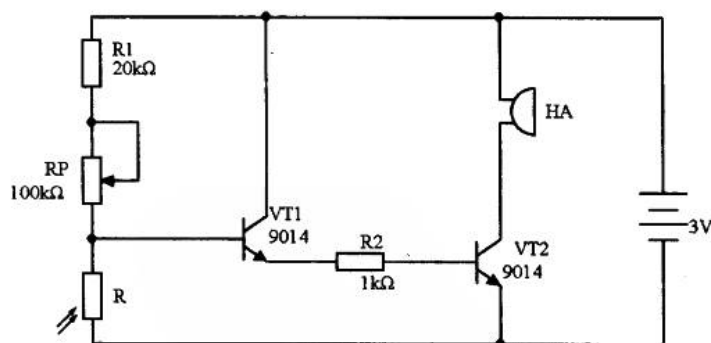


图 1-1 光控报警器电路

图1-1所示光控报警电路的功能是：当照射到光敏电阻R的光线变暗至一定程度时，蜂鸣器HA开始报警，从而达到检测光线强度控制报警的目的。电路图中，电阻和电源的电路标识我们比较熟悉。如果读者对电路比较感兴趣应该还认识电位器RP、三极管VT1和VT2等器件的标识。接下来，我们一起分析一下图1-1所示电路里包含的一些基础知识。

### 1.1.1 电池和电池盒

电源是给电路供电的。最简单的电源就是干电池（dry battery），它们的额定电压都是 1.5V。由于图 1-1 中的光控报警器的工作电压为 3V，所以可以利用电池盒（battery case）把两节干电池串联成 3V，如图 1-2 所示。

除了使用电池盒还有别的方法吗？一般的电子词典使用的钮扣电池其额定电压是 3V 的，可惜它的容量太小，对于功率较大、工作时间较长的电路不太合适。难道就没有解决的办法了吗？市场上有一种电池叫“集成电池”（也叫“层叠电池”，layer-built battery），容量较大并有多种额定电压供我们选择，常见的有 3V、6V、9V 和 15V 等几种，它们的外形如图 1-3 所示。



图 1-2 电池盒与电池的串联

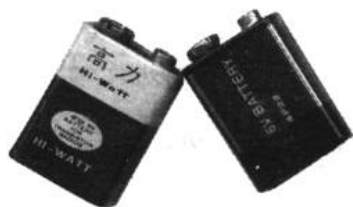


图 1-3 集成电池

有了集成电池，电路的电源问题就解决了。除此之外，我们还可以使用直流稳压电源（regulated power supply）供电的方式，即把 220V 的交流电通过变压、整流、滤波和稳压，然后输出适合电路使用的电源。关于直流稳压电源我们将在 3.2 节中介绍。

### 1.1.2 电阻器

各种材料的物体对通过它的电流都呈现出一定的阻力，这种阻碍电流的作用叫电阻，电阻器就是利用这一性质制作出来的。电阻器是电子电路中使用得最多的器件，其功能是通过分压为其他电子器件提供所需的电压和通过限流提供所需的电流。

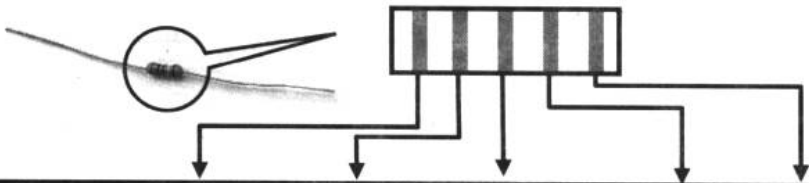
欧姆是电阻的单位，通常有 3 种单位。公式 1-1 是它们之间的换算关系。

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega \quad (1-1)$$

购买电阻器（简称电阻）时，除了需向商家提供阻值外，至少还有两项参数是需要提供的：一是电阻的功率，另一项是电阻的种类。

#### 1. 电阻的阻值

拿到一支电阻，我们会看到电阻的表面有五颜六色的色环，这不是出于美观而设计的，它标示着电阻的阻值。图 1-4 所示为常用的色环电阻标记示意图。

颜色	第一有效数	第二有效数	第三有效数	倍率	允许误差
黑	0	0	0	$10^0$	
棕	1	1	1	$10^1$	$\pm 1\%$
红	2	2	2	$10^2$	$\pm 2\%$
橙	3	3	3	$10^3$	
黄	4	4	4	$10^4$	
绿	5	5	5	$10^5$	$\pm 5\%$
蓝	6	6	6	$10^6$	$\pm 0.25\%$
紫	7	7	7	$10^7$	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	8	$10^8$	
白	9	9	9	$10^9$	
金				$10^{-1}$	
银				$10^{-2}$	

图 1-4 电阻的色环标记

比如一个电阻上的色环依次为：橙、白、黑、红、棕。那么它的阻值应该如何计算呢？前3环橙、白、黑表明阻值的前3位有效数为390，第四环为红，表明倍率为 $10^2$ ，得到阻值 $390 \times 10^2 = 39000 (\Omega) = 39 (\text{k}\Omega)$ 。要得到电阻阻值更简单的方法就是用万用表直接测量。

在电路设计中应该注意，电阻的阻值不是任意选定的，原因是为了便于工业上大量生产和使用者在一定范围内选用，国家标准（简称“国标”，national standards）规定了E24系列电阻的标称值为1.0、1.1、1.2、1.3、1.5、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、3.0、3.3、3.6、3.9、4.3、4.7、5.1、5.6、6.2、6.8、7.5、8.2、9.1乘以10、100、1000……所得到的数值；按E12系列规定，分别有标称值为1.0、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2乘以10、100、1000……所得到的数值。其中，E24系列电阻阻值允许误差为 $\pm 5\%$ ，E12系列允许误差为 $\pm 10\%$ 。除了上述的电阻值外，还有一些“非标”电阻，一般在电源电路、滤波器电路中会用到。

## 2. 电阻的功率

电阻的功率有1/16W、1/8W、1/4W、1/2W、1W、2W、5W、10W等几种，对应的电路标识如图1-5所示。一般来说，电阻的功率越大，价格越高。1/8W金属膜电阻的市场价格约为2元/百支（M $\Omega$ 级的电阻价格稍高）。同一阻值的电阻根据其功率和种类的不同，价格也不一样。

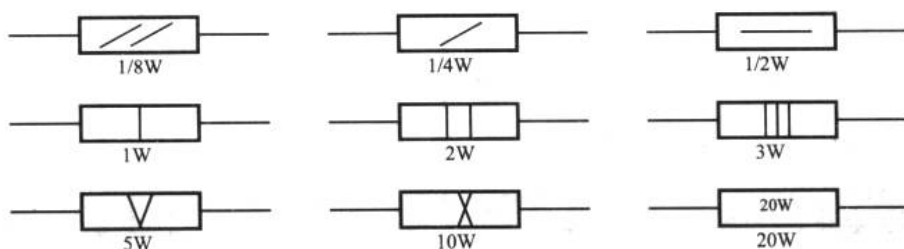


图 1-5 标有额定功率值的电阻器的电路标识

### 3. 电阻的种类

随着材料科学的发展和工艺的进步，电阻的品种不断增多。按电阻体的材料和结构特征分成绕线、非绕线 and 敏感电阻等几种（敏感电阻中的光敏电阻将在 1.1.3 节谈到）。

绕线电阻是用电阻丝在绝缘的骨架上绕制而成的。这种电阻丝一般采用具有一定电阻率的镍铬、锰铜等合金制成。绝缘骨架则是由陶瓷、塑料等材料制成，有管形、扁形等各种形状。

非绕线电阻包括了我们常用的碳膜电阻和金属膜电阻。此外，还有金属玻璃釉电阻、金属氧化膜电阻及实心电阻等。

实际应用中，如果电路没有特别说明，我们一般都采用 1/8W 的金属膜电阻。金属膜电阻的精度高、成本低，使得它在现代电子电路中应用最为广泛。

另外，在小型化电子设备如手机、计算机的电路板上，通常使用贴片式电子器件，常用的贴片器件有贴片电阻、贴片电容、贴片晶体管、贴片集成电路等，它们只是在封装上与一般直插式的不同，使用方法都是一样的。

### 1.1.3 光敏电阻

光敏电阻（photoresistor）是敏感电阻（器）的一种。敏感电阻是指那些电特性对外界温度、湿度、压力、高度等物理量反应敏感的电阻。在光控报警电路使用到了光敏电阻，所以我们在这一小节重点看看光敏电阻（其他敏感电阻将在第 8 章谈到）。

目前最常见的光敏电阻是硫化镉光敏电阻，它是利用半导体光致导电的原理制造而成的，其电路标识和外观如图 1-6 所示。这种光敏电阻的光谱特性曲线与人眼对可见光的响应曲线比较接近，其阻值随光照强度的变化而变化。在暗光条件下它的电阻可达几个  $M\Omega$ ，在强光下它的电阻仅为数百欧或数千欧。光敏电阻的光照特性的线性度一般。

市场上光敏电阻的单价在 1 元左右。光敏电阻通常在需要把光能转换成电能时（非电信号转换成电信号）使用。

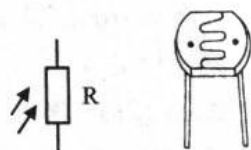


图 1-6 光敏电阻

### 1.1.4 电位器

可能以上枯燥的讲述性内容让我们有些迷糊了。不过不要紧，等我们把电位器



(potentiometer) 介绍之后, 就可以对图 1-1 的电路进行初步分析了。

在电子设备中, 某些电阻的阻值需要用户经常调整, 这些电阻我们以电位器代之。电位器实际上是一个可变电阻器。在调光灯、收音机、功放机等电器上我们常能看到电位器的身影。

从图 1-7 所示的电位器电路标识和外观图中, 我们可以看出电位器有 3 个引出端 A、B 和 P, 其中, A、B 两端为阻值固定的引脚, 其间的阻值最大, 这两个端口没有什么区别。中间的引脚 P 与两端引脚之间的电阻值则随着调节电位器的旋钮 (knob) 而改变。电位器外壳标注的阻值是该电位器所能达到的最大阻值, 亦即 A、B 端点间的电阻值。

还有一种较常用的电位器叫带开关电位器, 其电路标识如图 1-8 所示。这种电位器的旋钮可以向外拉出和推入或在旋至最小阻值时设有一旋钮开关, 以此实现开关的功能。

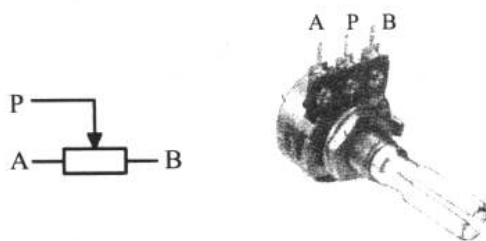


图 1-7 电位器的电路标识和外观

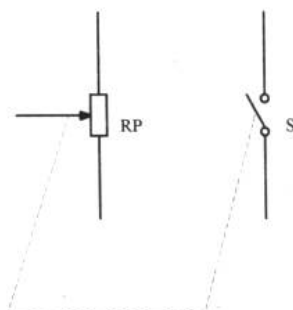


图 1-8 带开关电位器的电路标识

电位器和普通电阻一样, 除了有阻值的区别外, 还有种类和功率之分。绕线电阻器一般在大功率的场合中使用。我们通常选用碳膜电位器, 它结构简单、成本低, 能满足绝大多数的电路场合。图 1-9 所示是一些常用电位器的外观图。

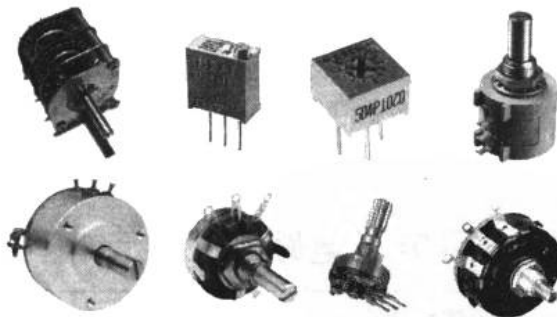


图 1-9 常见电位器外观

### 1.1.5 第一次电路分析

我们现在来对本节一开始的例子进行简单的分析。

为了避开那些读者还不熟悉的元器件, 笔者对图 1-1 进行简化后得到图 1-10 所示的电



路。现在看来，电路中只有电源、电阻  $R_1$ 、电位器  $RP$  和光敏电阻  $R$ ，它们组成了一个闭合的环路（closed loop）。

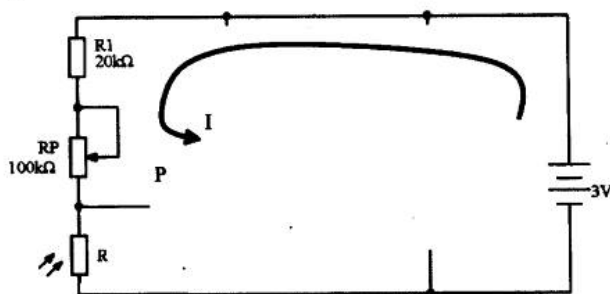


图 1-10 光控报警器电路的简化

从电源正极流出的电流先后经过以上 3 个元件后流回负极。欧姆定律告诉我们当电流流过电阻  $R_1$  时， $R_1$  分掉了一部分的电压。它分掉了多少伏的电压呢？单从图 1-10 这样一幅电路图我们不得而知。但比较明显的一点是由于  $R_1$  的分压作用，使得电位器  $RP$  和光敏电阻  $R$  上的电压肯定比电源电压要小。

电阻  $R_1$  起到了分压的作用，这种利用电阻进行分压的方法十分普遍。

从图 1-10 所示电路来看，电位器的中间引脚和一端的引脚连接在一起。这样做是很明智的，因为即使电位器的动接点与电阻体接触不良，甚至开路，也不会致使电路造成开路。通过调节电位器，我们就能使它的电阻在  $0 \sim 100k\Omega$  之间连续变化（当然是质量很好的电位器才会严格地在这个范围里变化）。

在电路中使用电位器的目的现在已经很明确了，就是在电阻  $R_1$  分压的基础上进一步分压。而电位器  $RP$  的分压效果是可以通过调节电位器的旋钮来调节的。

再来看看光敏电阻  $R$ 。根据前面的介绍我们知道它的电特性（电阻）随着照射到其上的光线强弱变化而变化。电位器与光敏电阻的连接点我们标记为  $P$ ， $P$  点是另一部分电路的入口。

由此可见，一旦电位器调定，影响  $P$  点电压的就只有光敏电阻  $R$  了。

如果此时读者开始对电路原理分析产生了兴趣，那么随着问题的深入，分析电路会越来越有意思的。

## 1.2 利用计算机学习电子电路

### Multisim2001 登场 打开、新建和保存 元件栏和仪器栏 绘制第一张电路图 用 Multisim 简单分析

从这一节开始，我们就学习如何利用 EDA（Electronic Design Automedic）软件来学习电子电路。第一节的内容都是从理论上进行把握，没有什么动手的乐趣。但现在就开始进入焊接电路的程序又为时过早。有没有折衷的办法呢？

此时，计算机给我们带来了很大的帮助。下面，我们就开始学习 Multisim2001 以实现动手的愿望。



### 1.2.1 Multisim2001 登场

什么是 Multisim2001? 这是一款非常实用的电路仿真软件, 它是继 Interactive Image Technologies 公司推出的 EWB (Electronics Workbench) 后出现的高级版本。

电路仿真就是把设计好的电路图通过软件的用户界面“输入”到计算机中, 而计算机通过分析电路的连接和功能把电路的“输出”和工作状态信息在显示器上显示出来。

更简单地讲, 如果有图 1-11 所示的电路图, 可以把它“输入”计算机中, 通过计算机处理后把电阻 R 两端的电压值通过虚拟电压表显示出来。仿真使我们可以不用实际搭接电路也能对电路进行在线实时分析, 这就是仿真的意义所在。

如果读者留心的话, 会发现图 1-11 正是图 1-10 的延续 (这里先用电阻 R 替代光敏电阻)。利用 Multisim2001 即可印证上一小节结尾部分对已知器件的分析结果。

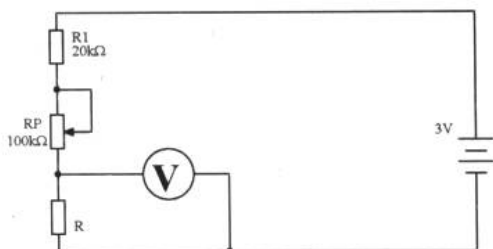


图 1-11 电路例子

现在我们打开计算机, 使用 Multisim2001 这个强有力的工具开始实践我们的设想 (关于该软件的安装请见附录 A)。图 1-12 所示是 Multisim2001 的启动界面。界面分为菜单栏 (附录 B 中有菜单栏的中文对应名称)、工具栏、元件栏、仪器栏、电路窗口和仿真开关等几个部分。现在, 我们从最简单的操作开始学习这个软件。随着问题的深入, 在以后的章节中会经常使用 Multisim2001, 到时, 读者就会发现它巨大的魅力了。

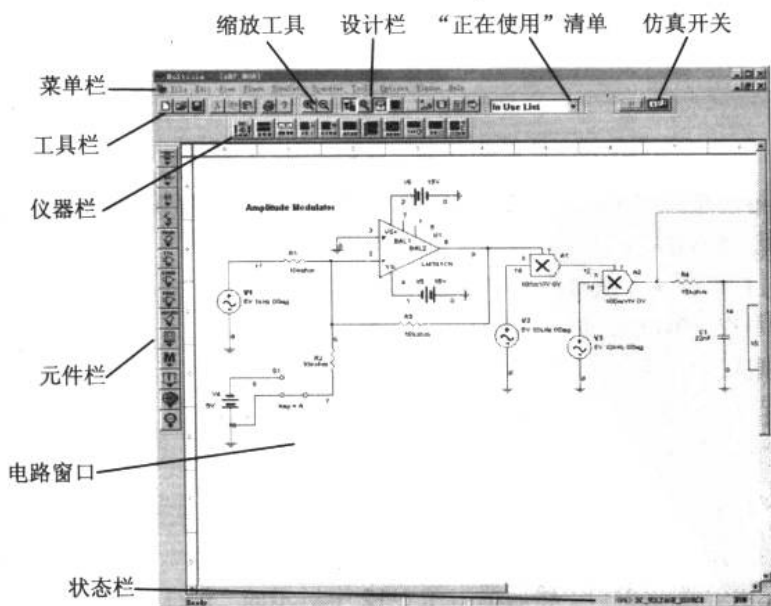



图 1-12 Multisim2001 的工作界面

## 1.2.2 打开、新建和保存

新建、打开和保存在工具栏中的按钮依次是：。单击“打开”按钮，在弹出的对话框中，可以找到 Multisim2001 安装目录下的 Samples 文件夹，打开其中的 25DB\_AMP 文件。这时电路窗口中显示的就是 25DB\_AMP 的电路图，如图 1-13 所示。

电路窗口除了电路图外，还有该电路的描述性信息。左下角信息“Class B Audio Amplifier with complementary output stage with a gain of 25 dB”的意思是“带 25dB 增益补偿输出的乙类音频放大器”。关于这个绕舌名字的由来我们将从后边的章节得到答案。

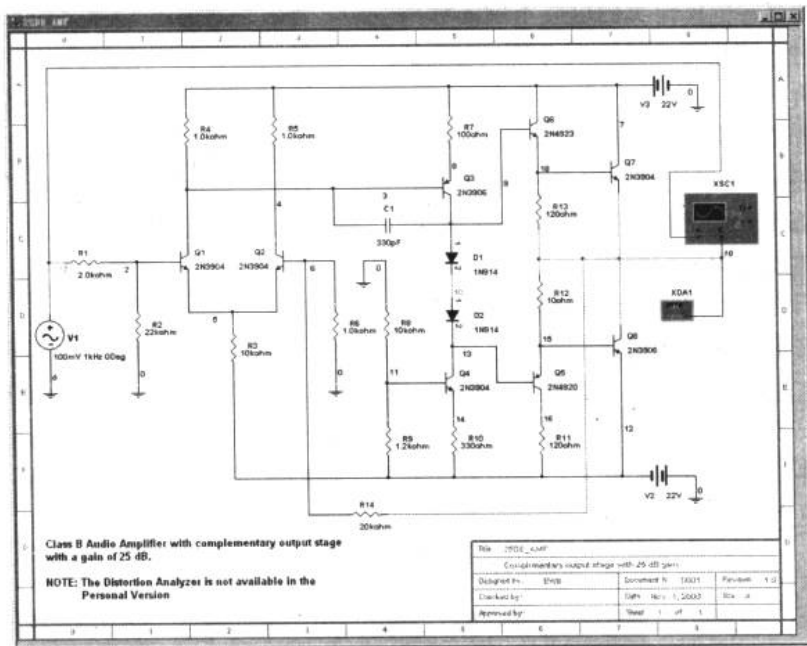


图 1-13 带 25dB 增益补偿输出的乙类音频放大器

有一点值得注意，在 Multisim2001 里所使用的默认电阻标识与我们常见的略有不同，其中一些器件使用的是 ANSI（美国国家标准化组织）定义的标识。如图 1-14 所示的标识与我们平时使用的电阻标识是完全等效的，图中的 1.0kohm 即为 1.0k $\Omega$ 。

在打开的电路中，我们可以在电路窗口中右击，在弹出的快捷菜单中可以改变背景、器件、导线、说明文件等的颜色，也可以改变导线宽度等参数。

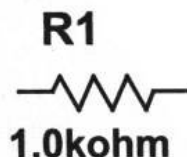


图 1-14 ANSI 中的电阻标识

### 1. 虚拟示波器

在图 1-13 所示电路图的右侧有一个虚拟仪器 XSC1，这是一台虚拟示波器。双击 XSC1 的图标，打开示波器观察窗口。然后单击图 1-12 中所示的“仿真开关”按钮打开仿真开关，将会在示波器观察窗口中看到如图 1-15 所示的波形曲线。示波器的标识如图 1-16 所示。



这时，我们再单击一次仿真开关或其左边的暂停开关（想想这两个开关的区别），放大器停止工作。这时，在示波器上就得到了前一段时间内采集到的输入和输出信号波形。

如果已知幅度较小的正弦波是输入信号，而幅度较大的是输出信号，读者还会对“放大”这个词疑惑吗？应该不会了。从图 1-13 中可以看到，示波器的 Channel A 连接了电路的输入信号端，Channel B 连接了电路的输出端。这样，电路的输入输出关系一目了然，电路的确对信号进行了放大。

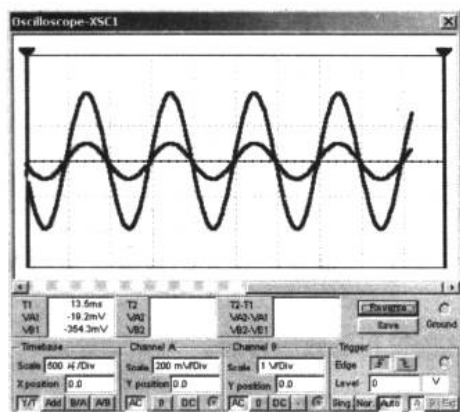


图 1-15 音频放大器波形图

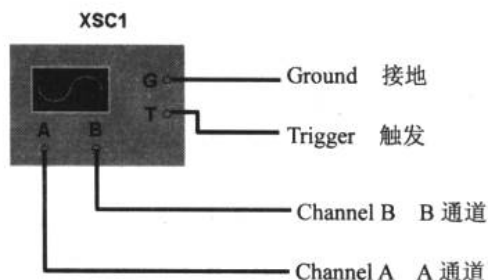


图 1-16 示波器在 Multisim2001 中的标识

在 Multisim2001 的安装目录中，Samples 文件夹下有软件自带的一些电路例子。有时读者可以逐一地打开看看。

## 2. 创建自己的第一张电路图

如果读者觉得只打开别人做好的电路没什么意思，那么从现在开始，我们来创建自己的第一张仿真电路图。为了和前面的知识相呼应，我们就描绘一张如图 1-17 所示的电路图。下面进一步研究本节一开始我们提出的问题：用 Multisim2001 观察电阻 R 的阻值和其两端电压的定量关系。

单击工具栏中的“新建”按钮，Multisim2001 就生成了一个新的电路窗口。我们应该养成两个良好的习惯：一是给文件起一个让我们在一年之后看到文件名还能想起电路内容的文件名，二是在仿真过程中随时保存我们的工作进程。单击“保存”按钮，在弹出的对话框中选择保存路径，在文件名文本框里输入“Light\_Control”，单击“确认”按钮完成保存。

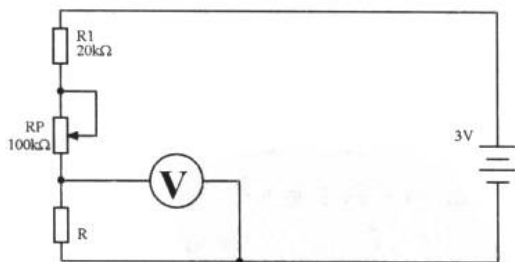


图 1-17 第一张电路图

### 1.2.3 元件栏和仪器栏

Multisim2001 既然是一种 EDA 工具，其中必然包含了各种各样的电子元件供我们使用。

## 1. 元件的主要类型

下面先在图 1-18 中浏览一下元件栏中的元件名称。

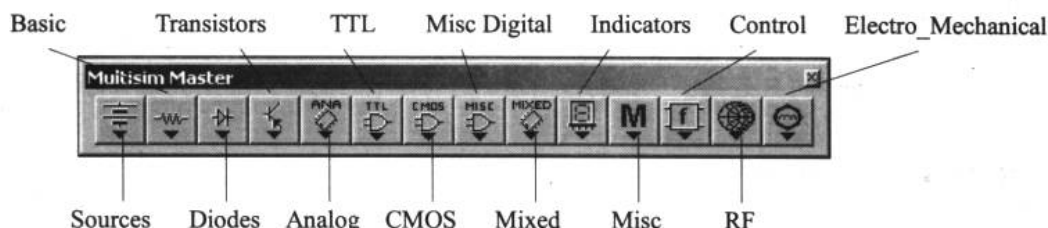


图 1-18 Multisim2001 的元件栏

- ✦ Sources（有源器件）：主要是各种交直流有源器件。
- ✦ Basic（基本器件）：有电阻、电容、电感、电位器、可变电容和变压器等。
- ✦ Diodes（二极管类）：主要有普通二极管、稳压二极管、发光二极管、全桥和可控硅。
- ✦ Transistors（三极管类）：有三极管、达林顿管和场效应管等。
- ✦ Analog（模拟类 IC）：主要是各类运算放大器。
- ✦ TTL（Transistor-Transistor Logic，晶体管-晶体管逻辑电路）：集合了 74 系列 TTL 集成电路。
- ✦ CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor，互补型金属氧化物半导体电路）：集合了 74 和 4000 等系列的 CMOS 集成电路。
- ✦ Misc Digital（复合数字类 IC）：有存储器等复合集成电路。
- ✦ Mixed（混合类 IC）：主要有数模转换、模数转换和 555 集成电路等。
- ✦ Indicators（指示器件）：有电流表、电压表、数码显示器、指示灯和蜂鸣器等。
- ✦ Misc（多功能器件）：主要有保险丝、电子管和晶振等。
- ✦ Control（控制器件）：乘法器、除法器、积分器、微分器和限幅器等。
- ✦ RF（射频器件）：包括射频电感、电容和晶体管等。
- ✦ Electro\_Mechanical（电子机械器件）：有感应和记忆开关等器件。

## 2. 仪器的主要类型

仪器栏中的主要仪器如图 1-19 所示，其具体介绍可见附录 C。

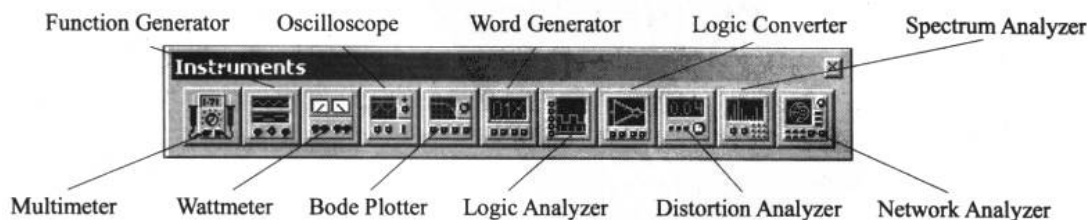


图 1-19 Multisim2001 的仪器栏

- ✦ Multimeter（万用表）：用于测量电压、电流和电阻。



- ✦ Function Generator (函数信号发生器): 产生各种频率的正弦波、锯齿波和方波。
- ✦ Wattmeter (功率计): 用于测量功率。
- ✦ Oscilloscope (双通道示波器): 显示信号的幅度和频率变化。
- ✦ Bode Plotter (波特计或扫频仪): 分析电路频率响应特性。
- ✦ Word Generator (字信号发生器): 产生 16 位二进制数字信号。
- ✦ Logic Analyzer (逻辑分析仪): 用方波来显示控制点的逻辑状态。
- ✦ Logic Converter (逻辑转换器): 用于真值表、逻辑表达式及逻辑电路之间的转换。
- ✦ Distortion Analyzer (失真度分析仪): 可对 20Hz~100kHz 信号的失真量进行测量。
- ✦ Spectrum Analyzer (频谱分析仪): 用于测量幅频特性。
- ✦ Network Analyzer (网络分析仪): 用于测量电路的散射参数。

关于以上元件和仪器的解释,读者可能还了解不多,随着问题的继续,我们可以在需要的时候再回顾。在接下来的话题里,我们重点使用有源器件和基本器件,以及用于电路测量的电压表。关于几种重要的仪表的使用方法见附录 C。

## 1.2.4 绘制第一张电路图

初步认识了元件栏和仪器栏后,我们就可在刚才生成的 Light\_Control 文件中绘制如图 1-17 所示的电路图,并研究如下问题:用 Multisim2001 观察电阻 R 的阻值和其两端电压的定量关系。

### 1. 放置电源

单击元件栏中的 Sources 按钮,在弹出的窗口里单击电池组的标识,移动鼠标至电路窗口的适当位置后单击。这样,就把电源放置好了,如图 1-20 所示。如果单击器件标识后想放弃放置,则右击即可取消。

电源的默认电压是 12V 的,而我们需要的是 3V。双击电路窗口中刚刚放置好的电源,弹出如图 1-21 所示的对话框。在 Value 标签中的 Voltage (V) 文本框中输入“3”,单位设置为“V”,单击“确定”按钮,电路窗口中的电源电压即可变成 3V。

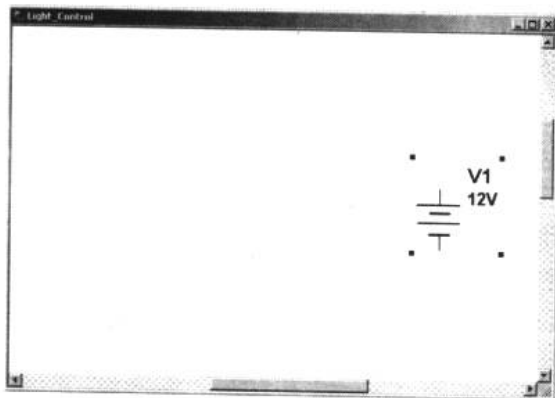


图 1-20 电源的放置

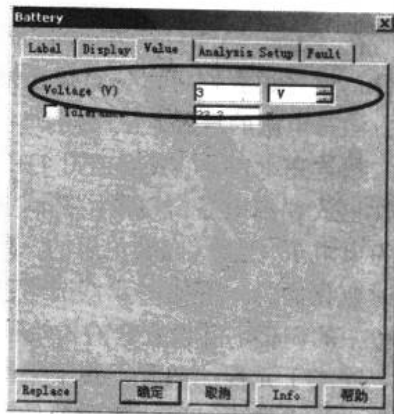


图 1-21 电池属性对话框



## 2. 放置其他器件

通过对电源放置和参数的设定，我们初步了解了 Multisim2001 的使用方法。在元件栏和仪器栏中的所有器件和仪器都是这样放置和调整参数的。

接下来，单击 Basic 按钮，将弹出如图 1-22 所示的基本器件栏。在器件栏中前 7 行器件中，左右两列是对应的。

左边一列是实际器件按钮，也就是说如果单击左列的器件将会弹出一个型号选择对话框。比如我们单击第一行左列的电阻器件的按钮，将会弹出如图 1-23 所示的型号选择对话框。在对话框中的 Component Name List 列表框里是由国标 E24 定义可选择的电阻型号。根据图 1-17 所示，我们选择 20kohm 即  $20k\Omega$  的电阻，单击 OK 按钮，然后在电路窗口的适当位置放置电阻 R1。由于默认电阻放置方向为横向，所以在电阻 R1 上右击，从弹出的快捷菜单中选择“90 Clockwise”命令进行器件的旋转，如图 1-24 所示。同时，还可以使用快捷键 Ctrl+R 进行对应操作（我们还可以在弹出的快捷菜单中逐一选择，看看会出现什么效果）。

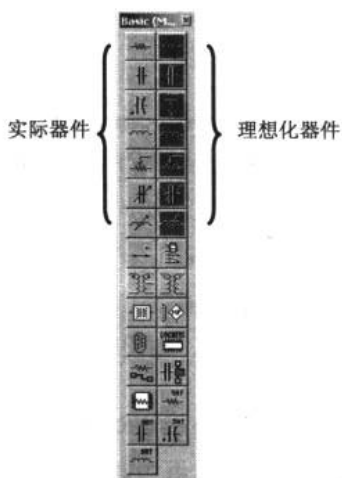


图 1-22 基本器件栏

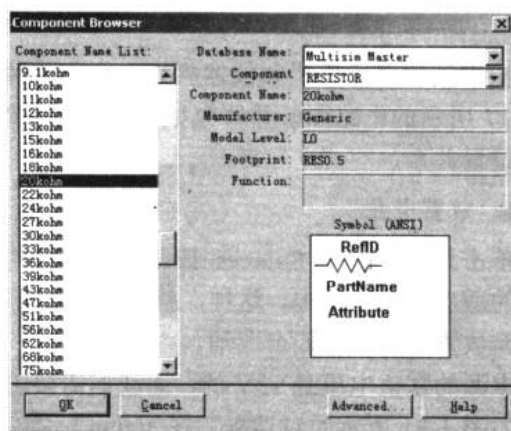


图 1-23 型号选择对话框

在 Basic 器件栏右边一列的器件是理想化的器件，就是说我们可以任意设定器件的参数。设置方法与电源的设置方法相同。

放置完 R1 后，我们把图 1-17 电路中的其他器件也放置到电路窗口中，并调整它们的取值。因为电阻 R 是替代光敏电阻的，所以它的阻值是随时变化的。一开始，我们选用理想化器件以便实验中的调整，并设置它的初始阻值为  $10k\Omega$ 。

完成了元件的放置，接下来就开始把它们连接起来（当然也可以边放置器件边连接导线）。我们从电源正极开始。把鼠标移至电源正极引脚

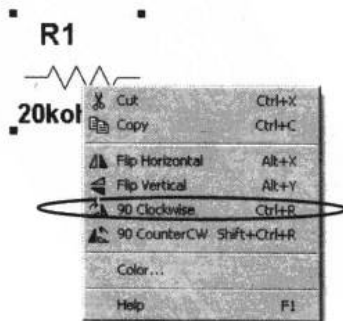


图 1-24 右键菜单



附近,当鼠标指针变成“◆”时,表明导线已经和正极连接,这时单击鼠标并向电阻 R1 的上端引脚处移动,在该引脚上再次单击。这样,一条漂亮、神奇的导线就连接好了。注意,如果连接好的导线出现橙色(默认的虚连接),表明这是一条无效的导线需重新连接。这时,电源正极和电阻 R1 的一端建立了电气连接,如图 1-25 所示(为了清楚显示,笔者把导线线宽设为“2”,以下同)。如果想删除已经连接好的导线,则在其上单击然后按 Delete 键即可。

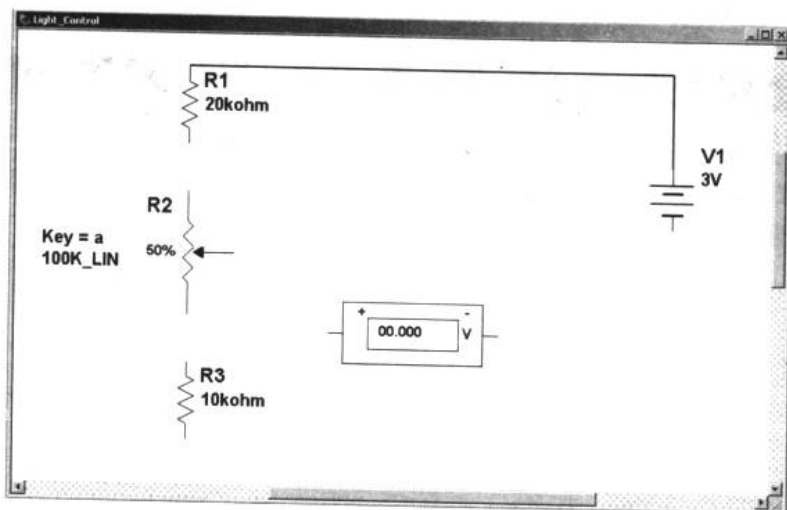


图 1-25 连接电源正极和电阻一端

按照图 1-17 所示把电路连接完。注意,一个公共的工作接地是必要的,这个接地我们可以在 Sources 元件栏中找到。最终的效果如图 1-26 所示。千万注意把画好的电路保存起来。

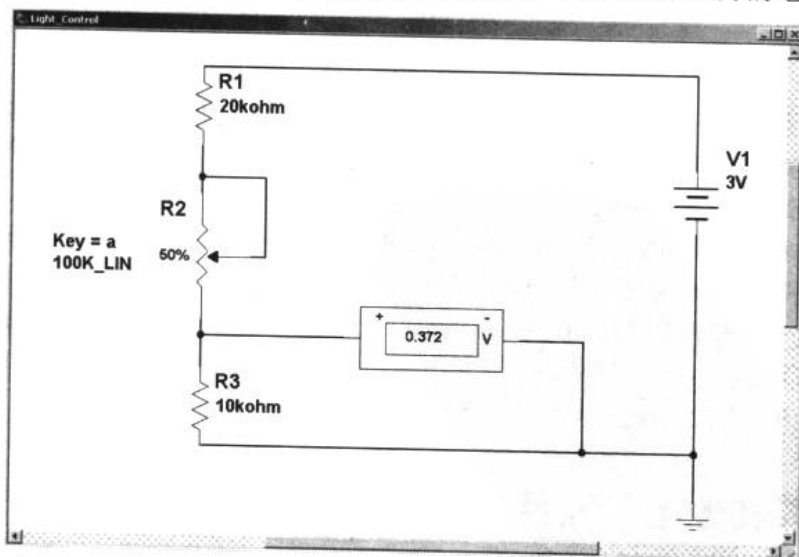


图 1-26 在 Multisim2001 中完成的第一张电路图

## 1.2.5 用 Multisim2001 简单分析

我们打开仿真开关，电压表很快显示出电阻  $R$  上的电压来。通过改变电阻  $R$  的值来模拟光敏电阻阻值的改变。可得到如表 1-1 所示的实验数据。注意，在改变电阻  $R$  前最好先把仿真开关关闭。

表 1-1 电阻  $R_1$  阻值与电压关系表

电阻 $k\Omega$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
电压 $V$	0.3717	0.6565	0.8815	1.064	1.215	1.341	1.449	1.542	1.624	1.695

利用 MATLAB 软件把表 1-1 中的数据绘制成如图 1-27 所示的曲线，这就对所要研究的问题有了个明确的答案。

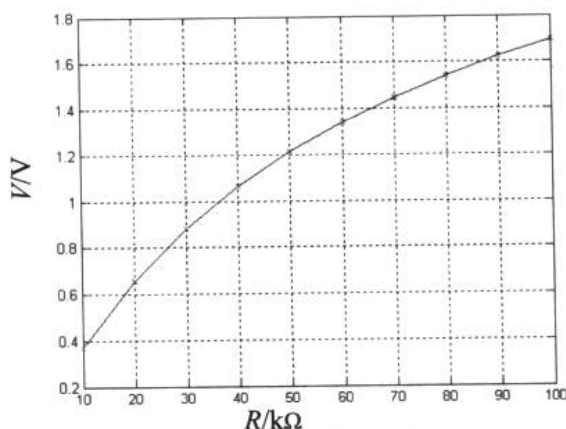


图 1-27 电阻与电压关系曲线

问题进行到现在，我们可以看到 Multisim2001 的方便之处了，不过它的功能远不止这些。除了对模拟电路的仿真外，还可以对数字电路进行仿真。随着学习的深入，我们会使用到 Multisim2001 越来越多的功能。

在本节结束时，我们掌握了 Multisim2001 的初步使用方法，并能绘制一些简单的电路。我们可以在闲暇时打开这个软件，利用原有的电子学知识绘制一些简单的电路，并尽可能多地使用到这一节没有介绍过的元件或仪器。另外，Multisim2001 的帮助系统是我们学习这个软件的好帮手，读者可以随时浏览其中感兴趣的部分。有一点很重要：无论是学硬件还是软件，动手实践才能使我们真正掌握其中的奥妙。

## 1.3 探索其他电子器件

电容器 电感器 二极管 三极管

在前面两节里，我们利用 Multisim2001 简单地对光控报警器的部分电路进行了分析。



之所以只是部分分析,是因为我们所认识的电子器件还不全面,无法进行全面的分析。在这一节里,我们来看看除电阻、电位器以外的常见电子器件。在本书的后面章节里将会认识更多的电子器件。

### 1.3.1 电容器

#### 1. 电容器的“隔直流通交流”特性

电容器(capacitor)是一种储能元件。在中学我们知道,电容器的原始模型就是两块平行放置的互相不接触的金属板。如图1-28所示,把电容器两端接到电池的正、负极上,闭合开关S,电容器进行充电(charge)。在充电过程中,电路里有电流流动。原因是接正极的金属板上的电子会被电池的正极吸引过去,而接负极的则从电池负极得到电子。当电容器上的电压和电池的电压相等时,充电过程停止,电路中不再有电流流动,电容器相当于开路。这也就是电容器能“隔断”直流的道理所在。

可见,电容器的容量越大,充电的时间越长,电路里持续电流的时间也就越长。

当我们把开关断开后,电容器开始通过电阻R放电(discharge),电流的方向与充电时的电流方向相反。随着放电过程的进行,两金属板间电压降低,直到它们之间的电势差为0时放电停止。

如果给电容器两端接上交流电,电容器两端则交替地进行充电和放电,电路中就会不断地有电流在流动。这就是电容器能“通过”交流的原理。

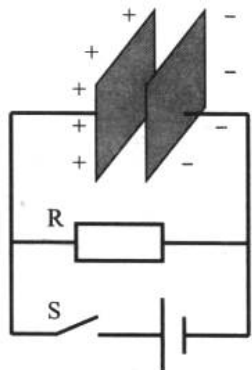


图1-28 电容的特性示意图

**例 1.3.1** 用 Multisim2001 连接并仿真图1-29中的两个电路,研究电容器的特性。

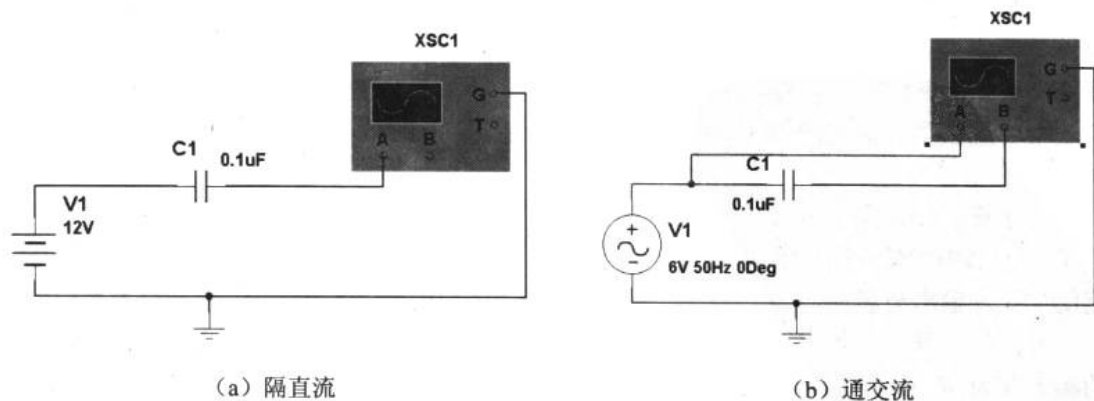


图1-29 电容器的“隔直通交”特性研究电路

在图1-29(a)所示的实验中,双击示波器XSC1弹出示波器观察窗口。打开仿真开关

后让我们失望的是似乎示波器没有任何变化。这是由于电容 C1 的隔直流特性使得 V1 的电压无法加到示波器上，于是，示波器的读数是在零点处为一水平直线，而这条直线与示波器观察窗口的水平标尺重合了。要想看到这条表示 0V 电压的波形，我们可以把通道的 Y position 参数进行修改，将波形向上或向下平移使其离开水平标尺，如图 1-30 所示。图 1-29 (a) 的实验结果表明电容起到了隔直流的作用。

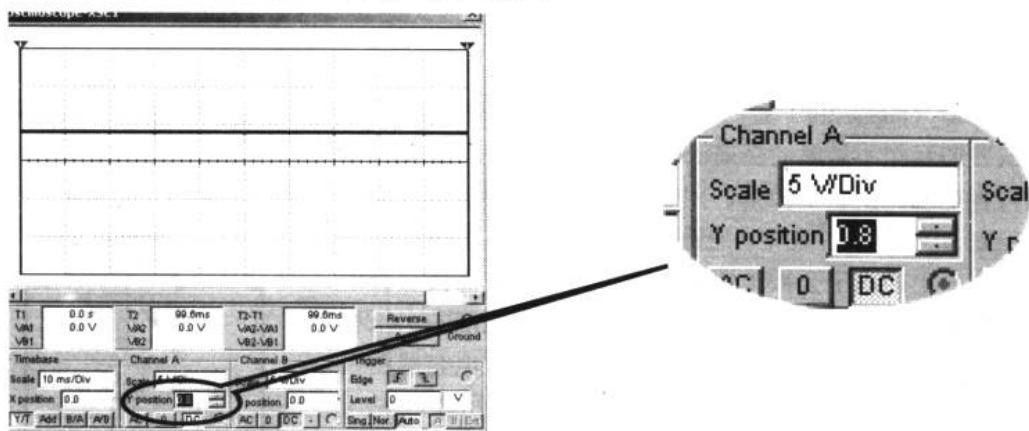


图 1-30 调整 Y position 参数

在图 1-29 (b) 中，我们使用了一个新器件，它是 AC Voltage Source (交流电压源) V1。通过调节它的参数，可以得到任意电压、任意频率的交流电源。在这个例子中，我们设定它的电压为 6V，频率为 50Hz。设定方法与电阻值的设定类似。为了步入更深一层，这里使用了示波器的两个通道来演示。Channel A 直接与交流源相接，Channel B 与电容的一端相接。右击 Channel A 上的导线，从弹出的快捷菜单中选择 Color 命令，在颜色对话框中改变这条导线的颜色。这样，我们就可以在示波器里得到不同颜色的波形曲线，以区别输入输出波形。我们选取红色作为 Channel A 的颜色。

根据“通交流”的特性，我们应该能猜到图 1-29 (b) 中示波器 Channel A 和 Channel B 的波形不应该有很大差别。双击示波器 XSC1，弹出示波器观察窗口，打开仿真开关，观察示波器。又令我们失望的是在示波器上只出现了一条黑色的正弦波曲线。Channel A 的红色波形哪里去了？仍然调整 Y position 参数，可以得到的图 1-29 (b) 的实验结果如图 1-31 所示。

为了看得更清楚，这里把输出波型加粗了（本书中的输入输出波形曲线中，加粗的都代表输出波形）。

关闭仿真开关，我们把交流电压源 V1 的频率变为 50kHz，然后打开开关，结果出现黑压压的一片东西，毫无波形曲线的美感。在示波器观察窗里，可以调节 Timebase 栏中的 Scale 值，直到出现能让我们接受的

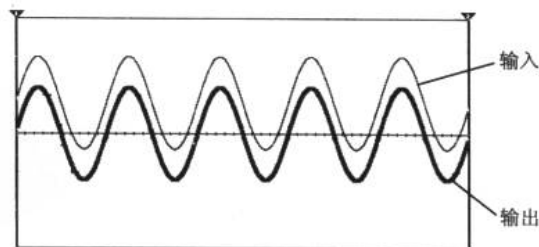


图 1-31 实验结果



曲线为止。Timebase 是扫描时间基线, 改变它的范围就会改变扫描的时间(这些知识应该在高中的实验中就得到了强化)。

如果想停下来观察或计量某段波形可以单击仿真开关旁边的暂停按钮, 以暂停电路的工作。然后通过拖动示波器观察窗口中的水平滚动条进行观察。思考一下窗口波形显示区域两侧的滑动标尺有什么用途?

再次提醒读者, 在 Multisim2001 中对电路进行仿真, 一定要添加至少一个工作接地, 并将电路中元器件的接地端全部与该地线相连。

## 2. 电容器的分类

电容器主要可以分为固定电容器和可变(或半可变)电容器。

### (1) 固定电容器

固定电容器又分为无极性电容器和有极性电容器。这两类电容器的外形和电路标识我们可以通过图 1-32 和图 1-33 来了解。



图 1-32 常用无极性电容器及其电路标识



图 1-33 常用有极性电容器——电解电容

固定电容器有电容容量、额定直流电压及允许误差等参数。

电容的单位换算如下:

$$1\text{F}=10^6\mu\text{F}=10^9\text{nF}=10^{12}\text{pF} \quad (1-2)$$

无极电容器的外壳上有表示容量的数字。比如在电容上看到“104”, 则前两位表示有效数, 后一位为倍率, 单位为  $\text{pF}$ 。计算方法与电阻类似, 得到的结果是  $104=10 \times 10^4 \text{pF}=0.1\mu\text{F}$ 。

而电解电容在其外壳上直接印有容量及额定直流电压值。使用时请注意选择额定电压值。极性的识别如图 1-34 所示。电解电容的常见额定电压有 6.3V、10V、16V、25V 和 50V 等几种, 在选择器件时应保证其额定电压值至少比电路的最大电压大一级。比如电路的最



高电压为 9V，我们可选 10V 或 16V 的电解电容。等容量的电解电容其额定电压越高，价格也越贵。容量越大，电解电容的体积也就越大。大容量电解电容一般在交流滤波或储能等电路中使用，在使用时应特别注意它的极性。如果反接电压较高，在很短的时间内将会引起器件的爆炸。



图 1-34 电解电容的极性

## (2) 可变电容器

可变电容器是容量可以调节的电容器。现在比较普遍的应用是在收音机或无线发射机等射频电路中进行调谐。可变电容器按介质不同可分为空气介质和有机薄膜介质两种。图 1-35 所示是可变电容器的外观和电路标识。

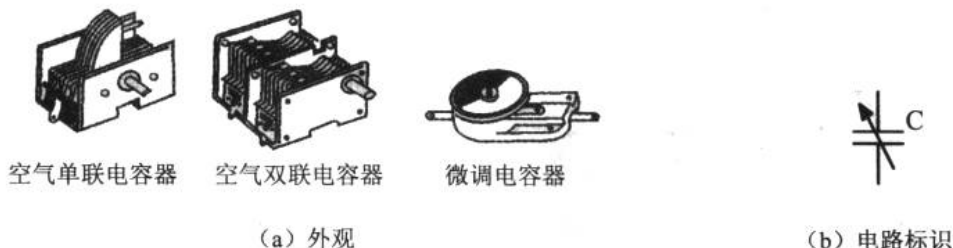


图 1-35 可变电容器

在电容器这个话题中，我们应该主要把握“隔直通交”的概念。

## 1.3.2 电感器

电感器 (inductor) 就是阻止电流变化的器件。

在电路中，电感通常用“L”表示，电感量的国际单位是“H”，除此之外还有“mH”和“μH”两个常用单位。电感的单位换算为：

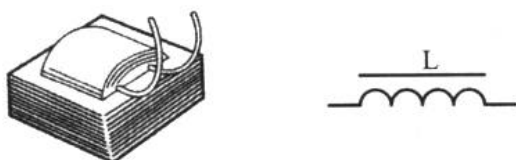
$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H} \quad (1-3)$$

电感元件也是一种储能元件，它把电能转换成磁能并储存起来。电感元件的特点就是对直流呈现很小的阻抗，对交流呈现较大的阻抗，且阻抗大小与所通过交流信号的频率有关，一般是通过交流信号频率越高，其阻抗越大。

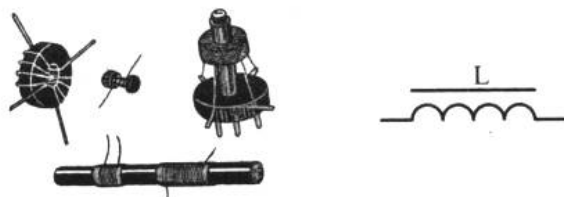
如图 1-36 所示为一些常用电感器的外形和对应的电路标识。



(a) 普通电感器及电路标识



(b) 带铁芯电感器及电路标识



(c) 带磁芯电感器及电路标识

图 1-36 常见电感器及电路标识

### 1.3.3 二极管

#### 1. 二极管

打开任何一本比较系统地介绍电子技术的图书，都会在介绍二极管 (diode) 之前对物质的导电特性、半导体的种类和特点、PN 结等预备知识作详细的说明。这部分知识对了解二极管的电气性能和工作原理固然有相当重要的作用，但本书更侧重的是器件应用方面的知识，所以忽略了上述几点预备知识。虽然这样，对我们使用二极管也不会有太大的影响。

两种常用的二极管的外观及电路标识如图 1-37 所示。



(a) 普通二极管及标识



(b) 稳压二极管及标识

图 1-37 二极管的电路标识及外观

二极管外壳的一端都有一个环形的标记，代表二极管的负极。注意，二极管是有正负极之分的，如果把二极管的极性接错，有可能将二极管或电路中的其他元件烧毁。

## 2. 二极管的单向导电特性

就像记住电容器的“隔直流通交流”特性一样，我们必须把二极管和“单向导电性”紧密地联系在一起。下面将通过两个实例来体会二极管的这种特性。

**例 1.3.2 单向导电特性研究一：用 Multisim2001 连接图 1-38 所示的电路，观察输入信号  $V_i$  和输出信号  $V_o$  之间的关系。**

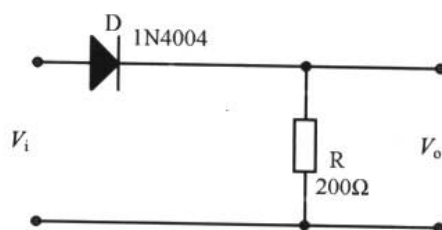


图 1-38 二极管的单向导电特性研究一

我们在这个实验中需要使用一个叫 Function Generator (函数信号发生器) 的虚拟仪器。顾名思义，它能产生幅值 (amplitude)、频率 (frequency)、占空比 (duty cycle) 和偏置电压 (offset) 都可调节的正弦波、三角波或方波。连接好的电路如图 1-39 所示。利用函数信号发生器作为电路的输入信号，双击 XFG1 设定其为 Frequency = 1kHz、Duty cycle = 50%、Amplitude = 6V、Offset = 0 的正弦波。在以后的例子里，如果没有特殊说明，Duty cycle 和 Offset 的值都接受默认设置。

图 1-39 所示是在 Multisim2001 中连接好的电路图，注意，为了使电路图简捷，我们使用了多个工作接地的画图方法。

双击示波器 XSC1，弹出示波器观察窗口。打开仿真开关，波形如图 1-40 所示。

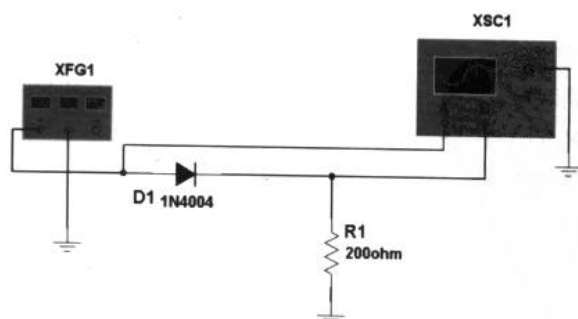


图 1-39 二极管单向导电特性研究电路图

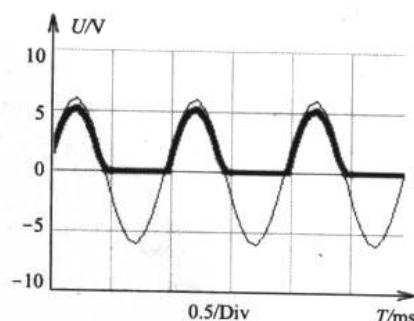


图 1-40 实验结果

实验结果表明，输出信号中缺少了正弦信号的负半周期，二极管 D1 只在正弦信号的正半周导通，这说明了二极管具有单向导电性。如果读者能尝试输入三角波和方波就能了解



二极管是否只对正弦波具有单向导电性了。这种发散的思维很重要。

结论是：二极管的单向导电性得到了充分肯定。

如果把例 1.3.2 中的二极管正负极对调会产生什么效果呢？我们可以在 Multisim2001 中连接如图 1-41 所示的电路，并观察输入输出波形的关系。

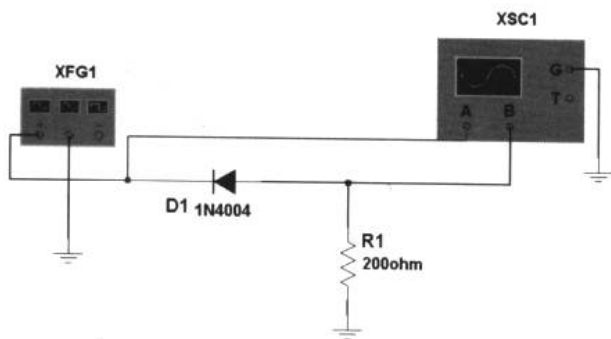


图 1-41 二极管的单向导电特性研究二

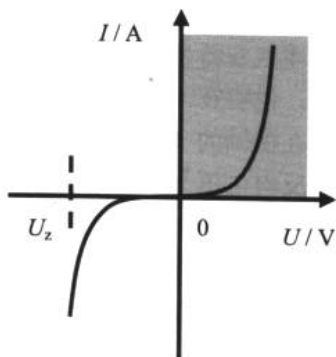


图 1-42 二极管伏安特性曲线

### 3. 二极管的伏安特性

这是一个比较“理论”的话题，在使用二极管前我们必须面对它。

二极管的伏安特性是指加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的关系，它表现为一条曲线，如图 1-42 所示。

#### (1) 正向偏压和反向偏压

伏安曲线的阴影部分我们称之为正向导通区。对应的电路连接方法与图 1-39 所示类似，二极管正极与电源正极相连，负极与电源负极相连。这种连接方法又可叫做“加正向偏压”；反之叫做“加反向偏压”，如图 1-41 所示。

#### (2) 正向特性

正向特性的起始部分，正向电流几乎为 0。这是由于外加正向电压很小，二极管没有导通（二极管不导通的本质机理可以通过对 PN 结知识的学习来回答，本书略），呈现很高的电阻。这段区有个名称——死区。随着外加正向电压的升高，二极管开始导通，电路的电流开始逐渐变大。

对应于二极管开始导通时的外加正向电压称为死区电压，锗管的死区电压约为 0.1V，硅管约为 0.5V。关于锗管和硅管的区分可以根据二极管的型号来查询器件手册，也可将万用表拨到  $R \times 100\Omega$  档或  $R \times 1k\Omega$  档，表笔的正极接二极管的负极，负极接二极管的正极。测量结果阻值较小的管子是锗管，阻值较大的管子是硅管。

#### (3) 二极管的管压降

有了死区的概念后，对管压降就比较好理解了。如果说锗管的死区电压约为 0.1V，那让锗管正常工作的正向电压应该大于 0.1V。实际测量得到的结果是，要让锗管正常导通的电压为 0.2V~0.3V。这个电压值我们称为二极管的管压降。

结论是：二极管的管压降是指当外加正向偏置电压时，二极管能进入正常导通状态时所必须的最小外加电压。

另外，我们实测得到硅管的管压降为  $0.6\text{V} \sim 0.7\text{V}$ 。

#### (4) 反向特性和击穿特性

刚才说过，加到二极管上的电压有“正向偏压”和“反向偏压”两种方式。加正向偏压时的特性就是正向特性，我们已经谈论过了。现在来看看反向特性，对应图 1-43 的伏安特性曲线的左半部分。

在伏安特性曲线中，如果外加反向电压不超过一定范围，电路中的电流几乎没有什么变化。说明在一定的电压内，二极管几乎不导通。

在横轴的  $U_Z$  处开始，电流反向增大得很快，这是因为外加反向电压超过了二极管的最大反向电压  $U_{RM}$ ，进而把二极管击穿。注意，反向击穿并不一定把二极管烧毁。

如果拿到一个二极管怎么才能知道它的最大反向电压呢？这是关于二极管工程参数的问题，必要时可以参考器件手册或上网查询。

#### 4. 稳压二极管

在本小节的最后，我们来看看稳压二极管（voltage stabilizing diode）的用途。在二极管的反向特性里我们知道当反向电压超过  $U_Z$  后，二极管被击穿。此后二极管的电流在很大的范围里变化，而二极管的两端电压变化却很小，于是起到了稳压的作用。这一点从伏安特性曲线上也能看出来。

可见“稳压”是利用了二极管的反向击穿特性。在选择稳压二极管时，只需根据电路要求选择稳压值即可。图 1-43 所示是常用稳压二极管的典型稳压值和价格。

稳压二极 管 系 列	2V	0.10	4.3V	0.10	7.5V	0.10	13V	0.10	27V	0.10
	2.2V	0.10	4.7V	0.10	8V	0.10	14V	0.10	28V	0.10
	2.4V	0.10	5.1V	0.10	8.2V	0.10	15V	0.10	30V	0.10
	2.7V	0.10	5.6V	0.10	8.5V	0.10	16V	0.10	33V	0.10
	3V	0.10	6.2V	0.10	9.1V	0.10	18V	0.10	36V	0.10
	3.3V	0.10	6.8V	0.10	10V	0.10	20V	0.10	39V	0.10
	3.6V	0.10	7V	0.10	11V	0.10	22V	0.10	43V	0.10
	3.9V	0.10	7.2V	0.10	12V	0.10	24V	0.10		
普通1/2W 稳 压二极管系列	2V	0.10	4.3V	0.10	7.5V	0.10	13V	0.10	27V	0.10
	2.2V	0.10	4.7V	0.10	8V	0.10	14V	0.10	28V	0.10
	2.4V	0.10	5.1V	0.10	8.2V	0.10	15V	0.10	30V	0.10
	2.7V	0.10	5.6V	0.10	8.5V	0.10	16V	0.10	33V	0.10
	3V	0.10	6.2V	0.10	9.1V	0.10	18V	0.10	36V	0.10
	3.3V	0.10	6.8V	0.10	10V	0.10	20V	0.10	39V	0.10
	3.6V	0.10	7V	0.10	11V	0.10	22V	0.10	43V	0.10
	3.9V	0.10	7.2V	0.10	12V	0.10	24V	0.10		

图 1-43 稳压二极管型号和价格

### 1.3.4 三极管

#### 1. 开始认识三极管

我们在前面介绍 Multisim2001 时打开的图 1-13 “带 25dB 增益补偿输出的乙类音频放大器”电路中，就有三极管（transistor）的身影。

三极管的内部结构本书不作介绍。3 个引脚 b、c、e 分别称为基极（base）、集电极（collector）和发射极（emitter）。三极管分为 NPN 型和 PNP 型两种，如图 1-44 所示。这两种三极管的工作原理相同，不同的只是连接电源的极性和管内电流方向不同。我们在以下的介绍中以 NPN 型为例。

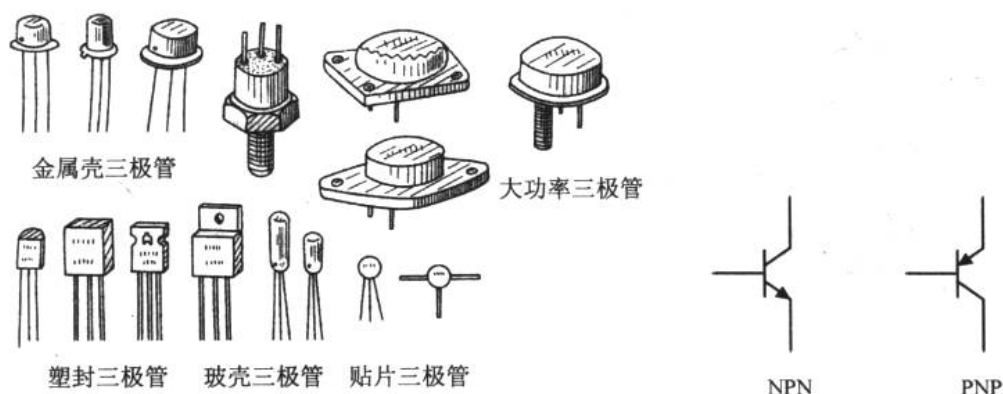


图 1-44 常用的三极管外观和电路标识

**例 1.3.3** 在 Multisim2001 中连接如图 1-45 所示的电路，观察电流表 A1 和 A2 的示数。总结三极管的电气性能。

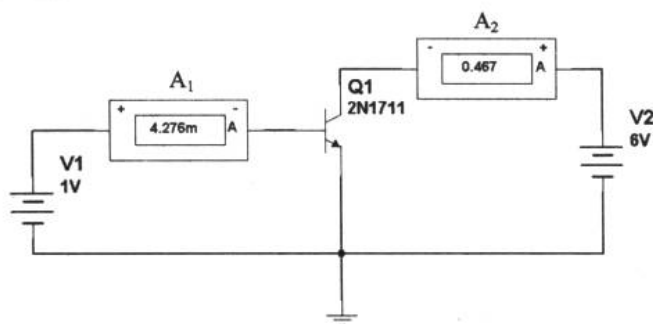


图 1-45 三极管电流放大电路

打开仿真开关后，我们得到的实验结果为：A1 的读数为 4.276mA，A2 的读数为 0.467A。这意味着什么？三极管的基极电流即 A1 的读数，三极管的集电极电流即 A2 的读数。由此可以看出集电极电流远远大于基极电流，这就是三极管的电流放大功能。

结论是：三极管是一个具有电流放大功能的元件。

## 2. 三极管的电流放大作用

由例 1.3.3 得到了三极管具有电流放大作用的结论。如果读者对这个概念不太理解，那我们就用一幅画来强化读者的记忆。

图 1-46 所示的水管阀门是由手柄控制的，而手柄只要微微地扭动就能控制水管中水流的变化。三极管接在电路中，集电极“流向”发射极的电流受到基极这个“手柄”的控制，基极很小的电流变化会引起集电极到发射极之间很大的电流变化。基极的电流一旦切断，集电极到发射极也就没有电流了。

这个比喻回归到电路上就可以得到如图 1-47 所示的描述。



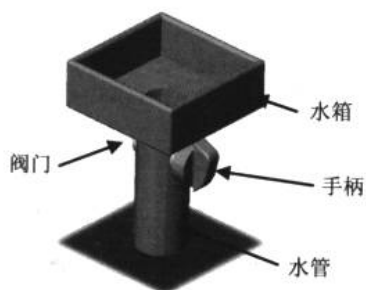


图 1-46 形象的比喻

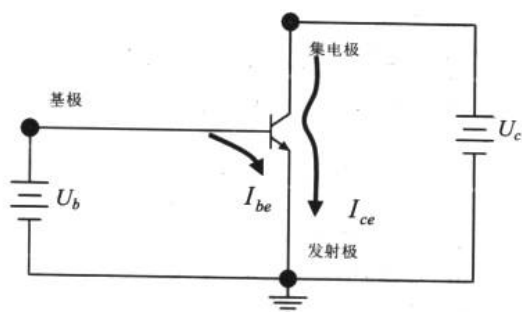


图 1-47 三极管电流放大作用的描述

### 3. 三极管的电流放大系数

如果读者理解了三极管的电流放大作用，也许又会要问：三极管电流放大的倍数是如何确定的？

在一些带晶体管放大倍数测量功能的数字万用表上会看到一个 8 孔的圆形插座，如图 1-48 所示。

从上面的“PNP”和“NPN”字样我们就能猜出这是用于测量三极管的。这个插座测量的是三极管的电流放大倍数  $h_{FE}$  的。

在测量三极管的  $h_{FE}$  值前，先判断三极管的种类（是 NPN 还是 PNP）和管脚排布。三极管的管脚排布是有一定规律的，可以参考三极管手册或上网查询。把三极管的 3 个管脚按插座所对应的标识插入，这时的读数就是该管的  $h_{FE}$  值。如果管脚弄错则得不到正确的读数（根据这一点可以利用万用表来判断三极管的种类和管脚排布。读数中以  $h_{FE}$  值最大时对应的三极管管脚排布为准）。

笔者用万用表测量一支手头上的三极管 9014（NPN）的  $h_{FE}$  值，可以看到万用表示数如图 1-49 所示。不同厂家、不同批次的同一型号器件，其  $h_{FE}$  有可能不同。

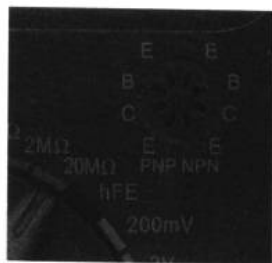


图 1-48 三极管电流放大系数测量插座



图 1-49 某支三极管 9014 的  $h_{FE}$  值测量结果（万用表型号：胜利 VC9805A）

三极管的电流放大系数  $h_{FE}$  是怎么测算出来的呢？公式 1-4 就是这个参数的测算方法。

$$h_{FE} = \frac{I_c}{I_b} \quad (1-4)$$



公式中,  $I_c$  和  $I_b$  分别是三极管集电极和基极电流。所以  $h_{FE}$  有个描述性名称: 基极-集电极电流放大系数。除此之外, 三极管还有一个表征电流放大系数的量—— $h_{FB}$ ——集电极-发射极电流放大系数, 其测算方法如公式 1-5 所示。

$$h_{FB} = \frac{I_c}{I_e} \quad (1-5)$$

#### 4. 三极管的截止、饱和和放大

对这个话题开始探讨之前有必要说明, 我们忽略了一个比较重要的问题——关于三极管输入输出特性曲线研究。但这个忽略并不影响我们对三极管的 3 种工作状态的谈论。

##### (1) 截止

还记得图 1-46 那个形象的水管比喻吗? 我们把水箱当作三极管的集电极, 而手柄当作基极, 水管下端的出水口当作发射极, 如图 1-50 所示。水管里的水流就相当于三极管的 c 和 e 间的电流。作一个简单的比喻便是: 三极管的截止相当于阀门的关闭。

专业些的解释为: 由于 b 和 e 间没有处于正向偏置, 使得三极管没有工作, 即 c 和 e 间不导通, 这种状态就是截止态。此时  $I_c$  接近 0。

##### (2) 饱和

当  $U_{ce} = U_{be}$  时, 即  $U_{cb} = 0$ ,  $I_b$  对  $I_c$  的控制作用不复存在, 三极管的放大作用消失, 这种工作状态称为临界饱和。当  $U_{ce} < U_{be}$ , 即发射结 (基极与发射极在三极管内部的交界形成的区域) 和集电结 (基极与集电极在内部的交界区域) 都处在正向偏置状态, 这时的三极管为过饱和状态。

三极管进入截止或饱和状态后, 线性关系  $I_c = h_{FE} \cdot I_b$  不复存在, 三极管不在正常工作的状态上。此时, 电路处于非线性工作状态。

##### (3) 放大

“放大”是我们希望三极管在电路中充当的角色。在这种工作状态下, 发射结处于正向偏置, 集电结处于反向偏置。

放大状态下有个有益的特点, 即  $I_c = h_{FE} \cdot I_b$ 。

对三极管的 3 种工作状态了解之后, 我们就可以对图 1-51 所示三极管的输出特性曲线有个了解。

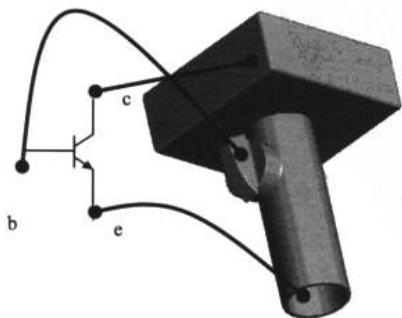


图 1-50 形象的“三极管”

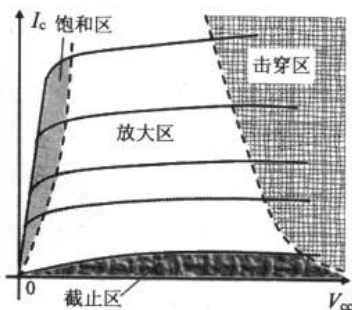


图 1-51 三极管的输出特性曲线

## 5. 实践三极管的工作状态

通过上面的学习，我们初步了解了三极管的3种工作状态。现在通过一个具体的例子来加深印象。

**例 1.3.4** 用 Multisim2001 连接图 1-52 所示的电路，通过调节输入电压、电阻阻值和电源电压观察三极管的3种工作状态。

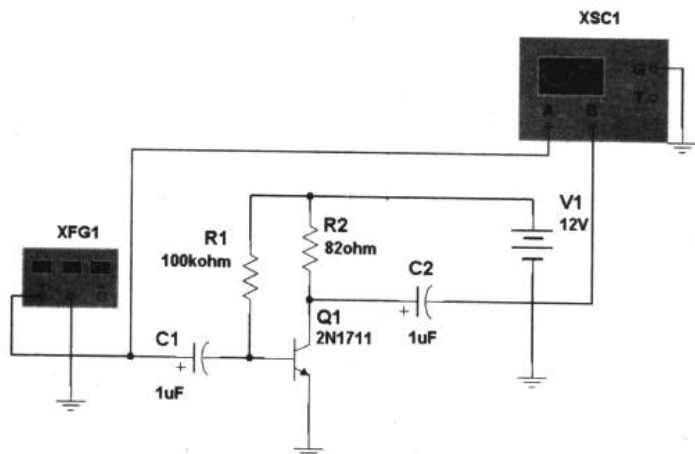


图 1-52 三极管3种工作状态实验电路（图中为放大时的元件参数）

我们把信号发生器的幅度设为 100 mV，频率为 100 Hz。

### （1）放大

元件参数如图 1-52 所示。调整示波器观察窗口中 Channel A 和 Channel B 的 Scale 值（本实例中取两个通道的 Scale=500mV/Div），使得输入输出波形的幅度适中，以便于观察。从图 1-53（a）中可以清楚地看到，三极管对输入的信号进行了幅度放大。

### （2）截止

固定输入电压、频率不变，调节电阻  $R1=560k\Omega$ ，使电路进入截止区。这时的波形图如图 1-53（b）所示，为截止失真波形。

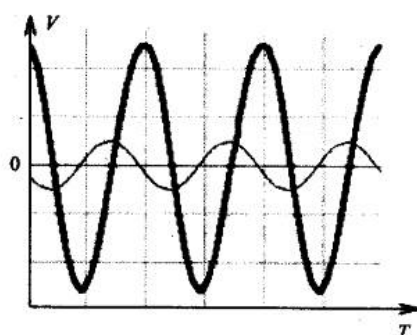
### （3）饱和

固定输入电压、频率不变，调节电阻  $R1=100k\Omega$ ， $R2=2k\Omega$ ，使电路进入饱和区。这时的波形图如图 1-53（c）所示，为饱和失真波形。

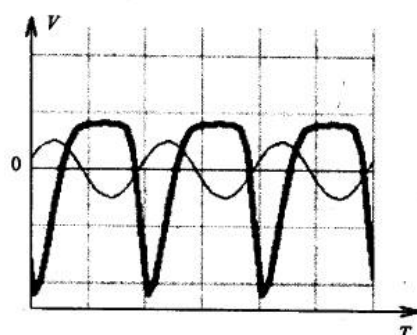
## 6. 三极管的频率参数

在上面的仿真中，可能读者会把信号发生器的频率进行必要的改变，这种发散的思维很好。在这个电路里，频率在一定的范围内是可以任意设定的。如果超出这一范围，输出信号的波形将会失真，这是因为三极管具有频率特性（当然，与外围电路也有关系）。频率特性是一项重要的技术指标，指三极管电流放大能力与工作频率之间的关系。

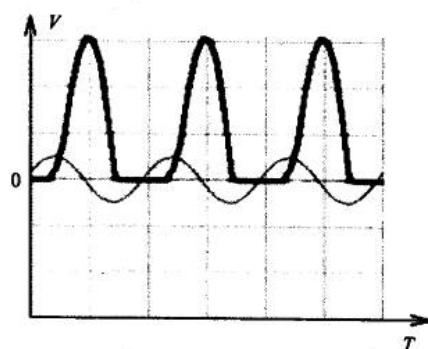
三极管的主要频率参数有两个。



(a) 三极管工作在放大区



(b) 三极管工作在截止区



(c) 三极管工作在饱和区

图 1-53 实验结果

(1) 共发射极截止频率  $f_B$ 

三极管的  $h_{FE}$  值与工作频率有如图 1-54 所示的关系。

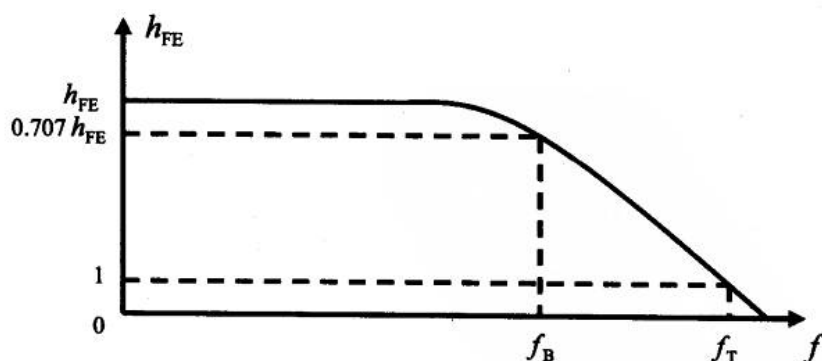


图 1-54 三极管的频率特性

当频率升高时,  $h_{FE}$  值下降。 $h_{FE}$  值下降到低频时的 0.707 倍所对应的频率称为共发射极截止频率 (cutoff frequency), 也可称为“截频”, 对应图 1-54 中的  $f_B$ 。

(2) 特征频率  $f_T$

当  $h_{FE}$  值下降到 1 时 (即放大倍数为 1) 所对应的频率称为特征频率  $f_T$ 。当工作频率超过  $f_B$  后, 三极管就失去了对电流的放大能力。

7. 常用三极管

表 1-2 提供了一些常用的三极管及其技术参数, 技术参数中 N 代表 NPN 型, P 代表 PNP 型。例如, 9018 的技术参数为 “N20V 0.05A”, 说明三极管 9018 为 NPN 型, 且额定电压和电流分别为 20V 和 0.05A。

表 1-2 常用三极管及技术参数

产品名称	型号规格	技术参数	产品名称	型号规格	技术参数
小功率三极管			中功率三极管		
	9011	N25V 0.05A		2SC1008	N80V 0.7A
	9012	P25V 0.1A		2SC1507	N300V 0.2A
	9013	N25V 0.1A		2SC1815	N60V 0.15A
	9014	N25V 0.1A		2SC2073	N150V 1.5A
	9015	P 20V 0.1A		2SC2229	N200V 0.05A
	9018	N20V 0.05A		2SC2233	N200V 4A
	2N222	N60V 0.8A		2SC2235	N120V 0.8A
	2N222A	N60V 0.8A		2SC2655	N60V 2A
	2N2907	P60V 0.6A		2SC2373	N200V 7.5A
	2N2907A	P60V 0.7A		2SC2383	N160V 1A
	2N3055	N100V 15A		2SC3039	N500V 7A
	2N3904	N60V 0.8A		2SC3198	N60V 0.015A
	2N3906	N40V 0.2A		2SC3225	N40V 2A
	2N4401	N40V 0.6A		2SC3280	N160V 12A
	2N5401	P130V 0.6A		2SC3358	N20V 0.1A
	2N5551	N180V 0.6A		2SC3692	N100V 7A
	2N5886	N80V 25A		2SC3749	N800V 3A
	2SA1015	P50V 0.15A		2SC3858	N200V 17A
	2SA1226	P40V 0.03A		2SC8050	N25V 1A
	2SA13	P20V 2A		2SC8550	P25V 1A
	2SA1301	P160V 12A		2SD401	N200V 2A
	2SA1315	P80V 2A		2SD478	N200V 2A
	2SA1494	P200V 17A		2SD627	N1500V 3A
	MPSA42	N300V 0.5A		2SD880	N60V 3A
	2SA684	P60V 15A		2SD869	N1500V 3.5A
	2SA733	P50V 0.1A		2SD965	N40V 5A
	2SA768	P60V 4A		2SD882	N40V 3A
	2SA940	P150V 1.5A		2SD1094	N1000V 10A
	2SA966	P30V 1.5A		2SD1111	N80V 0.7A



续表

产品名称	型号规格	技术参数	产品名称	型号规格	技术参数
大功率三极管	2SB1142	P60V 2.5A	达林顿三极管	2SD1397	N1500V 3.5A
	2SB546	P200V 2A		2SD1398	N1500V 5A
	2SB566	P50V 4A		2SD1403	N1500V 6A
	2SC945	N50V 0.1A		2SD1426	N1500V 3.5A
	2SD1427	N1500V 5A		TIP122	N100V 8A
	2SD1431	N1500V 5A		TIP122	N100V 5A
	2SD1439	N1500V 3A		TIP137	P100V 8A
	2SD1445	N40V 10A		TIP142	N100V 10A
	2SD1453	N1500V 3A		TIP147	N100V 10A
	2SD1884	N1500V 5A		TIP2955	P60V 15A
	2SK30A	P50A 6mA		TIP3055	N60V 15A
	2SK301	NFET55V		MJ862	N100V 5A
	BD235	N60V 2A		MG2955	P60V 15A
	BD236	P60V 2A		MG10005	N325V 10A
	BD237	N100V 2A		MG10012	N400V 10A
	BD238	P100V 2A		MJ10015	N400V 50A
	BD241	N45V 3A		MJ10016	N50V 50A
	BD243	N45V 6A		MJ10023	P850V 20A
	BD682	P100V 4A		MJ10025	N850V 20A
	BF869	N250V 0.1A		MJ11015	P120V 30A
	MJE13003	N400V 1.5A		MJ11016	N120V 30A
	MJE13005	N400V 4A		MJ11033	P120V 5A
	MJE13007	N400V 8A		MJE1305	N70V 10A

## 1.4 例子的最终分析

### 第一个三极管 第二个三极管 “合适”的偏压 例子的扩展

终于到了本章的最后一节，在这一节里，我们要完成本章一开始提出的光控报警器电路例子的最终分析。

#### 1.4.1 第一个三极管

我们先来看看光控报警器中 VT1 扮演了什么角色。

很明显，图 1-55 中的 VT1 和 VT2 是 NPN 型三极管。所以，如果 VT1 的基极得到合



适的偏压（偏置电压），它就具有电流放大的作用，电流就会从 VT1 的集电极流向发射极。那这个“合适”的偏压是多少呢？我们一会再研究这个问题。

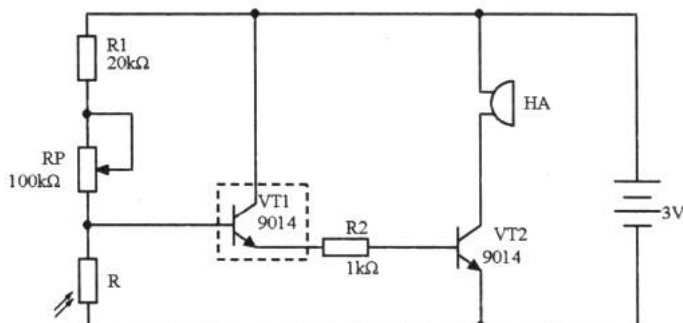


图 1-55 光控报警器的第一个三极管

## 1.4.2 第二个三极管

现在我们知道，VT1 如果开始工作，意味着将有电流从 VT1 的集电极流向发射极。VT2 的基极通过电阻 R2 与 VT1 的发射极连接，于是从电源正极流过来的电流经过 R2 分压后形成  $I_{b2}$  流进了 VT2。由于三极管的基极和发射极间有电阻存在（三极管任何两极间都有电阻存在），所以在 VT2 的基极产生了偏置电压，即  $U_{be}$ 。

与 VT1 的情况一样，加在 VT2 上的偏置电压一旦达到 VT2 正常工作时所需的电压值，VT2 开始正常工作。VT2 的集电极和发射极导通，于是电流从电源正极经过蜂鸣器 HA 并通过 VT2 的集电极和发射极流入电源负极。形成了电流的闭合回路，蜂鸣器 HA 发出“嘀……”的报警声。此时的电流走向如图 1-56 所示。

至此，我们解决本章一开始所遇到的问题。通过对光控报警器电路的分析，我们对一些常用的元件也有了更深刻的认识。

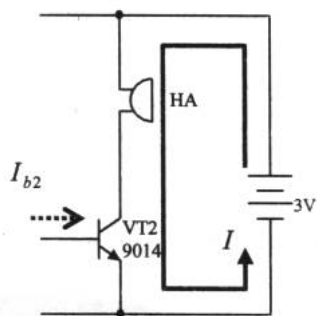


图 1-56 光控报警器的第二个三极管

## 1.4.3 “合适”的偏压

VT1 基极上这个“合适”的偏压，是整个电路工作的关键，也是“光控”的立足点所在。

1.2 节中对光控报警器部分电路的分析，我们得到了如图 1-57 所示的曲线。曲线表明了光敏电阻上的电压随着电阻值的增大而增大。使 VT1 工作的偏置电压很可能就是这连续增大电压中的某一个值。在 1.1.3 节中我们还知道光敏电阻的阻值越大，说明光强越小。所



以这个“合适”的电压来自光线的强度。当光线慢慢变暗，光敏电阻阻值变大，其上的电压也就增大。某一时刻电压值达到了 VT1 工作所需的偏置电压，电路开始工作，蜂鸣器就开始报警。

那这个光照“点”如何掌握呢？我们可以通过调节电位器 RP 的阻值，影响图 1-57 所示的曲线，来提早或延缓 VT1 到达工作状态的时机。

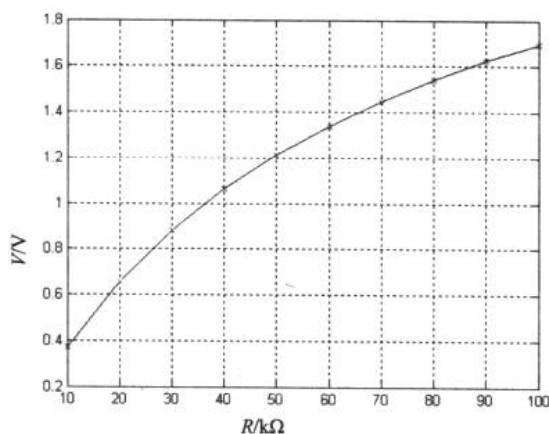


图 1-57 光敏电阻上的电阻及其上电压的关系

#### 1.4.4 例子的扩展

完成了第一张电路图的分析之后，我们来看看关于这个简易的光控报警器电路的扩展。

我们的目的是“光控”，至于控制所达的目的可以多种多样。比如在天色渐晚的时候，控制路灯亮起来。于是，我们把蜂鸣器换成了继电器 K（当然，使用继电器控制路灯在国际上并不一定是流行的做法），如图 1-58 所示。并且，为了安全起见，在继电器的两端并联了一个二极管 D1。这个二极管的作用是避免当三极管 VT2 由导通状态变成截止状态时，继电器线圈内产生的一个高电压将 VT2 击穿。

我们把蜂鸣器的鸣叫改成了继电器动作的“咔哒”声和利用触点开关控制用电器的的工作状态（继电器还会在 8.2.4 中学习）。这样一来，就极大地扩展了“光控”在生活、工业中的应用。

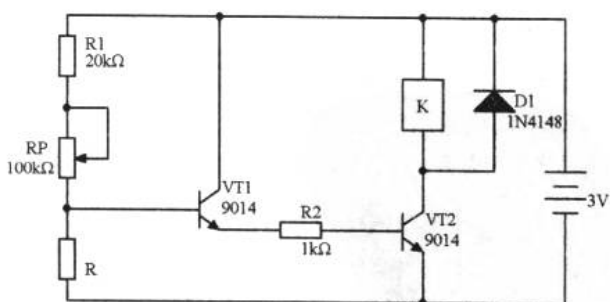


图 1-58 光控报警器电路扩展（省略继电器的触点开关）



## 第2章 收音机里蕴含的知识

在第2章里，我们将围绕一台收音机里蕴含的知识来学习电磁波基础知识、调制、解调以及放大器基础知识，并通过分析一台三管直放式收音机电路图，来学习更多电子技术中重要的知识。

### 2.1 解密电磁波

电磁波的简要回顾 天线 广播信号的传输频段 收音机电路图

电磁波（electromagnetic wave）的发现打开了无线电技术发展的新篇章。从第一次使用无线电波飞越大洋通信以来，人们从来没有放弃过使用电磁波这种信息传递的载体。在这一节里，我们先回顾电磁波的概念，以便后面展开收音机如何接收广播信号的话题。

#### 2.1.1 电磁波的简要回顾

图2-1所示为电磁波的形成和传播模式图。天线（antenna）中变化的电流产生电场。从电场和磁场相互感应的特性可知，有电场就会感应出磁场，有磁场又会感应出电场。这种交替产生的电磁场就会在空中形成电波并传输出去。

#### 2.1.2 天线

收音机中常常使用的天线有两种：磁棒天线和金属天线。

##### 1. 磁棒天线

磁棒天线实际上就是我们在第1章里看到的电感元件的一种，它是通过在铁氧体磁棒上绕制漆包线而成的。铁氧体是一种磁性材料，线圈绕在其上可以增加电感量。图2-2所示为磁棒天线的外观，我们拆开普通收音机就能看到它的身影。

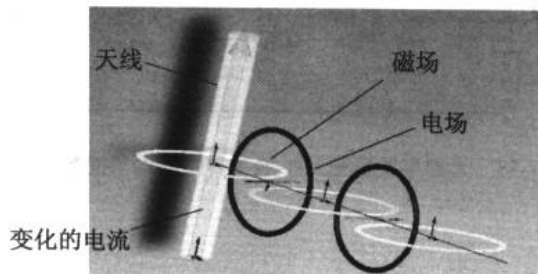


图 2-1 电磁波的形成和传播模式图

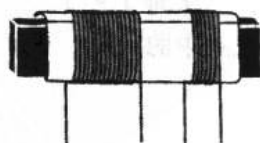


图 2-2 磁棒天线



## 2. 金属天线

在过去没有有线电视的年代，我们使用金属天线（又叫拉杆天线）来接收电视节目信号。这种天线都是空心的（考虑一下为什么）。

无论是金属天线还是铁氧体的磁棒天线，其工作原理都是相同的：传输的电磁波遇到导体就会在其上感应出电流。这种感应就把空中的电磁载波中的信号“下载”到了接收机里，然后通过调谐、检波和放大等处理将原始信号还原出来。

### 2.1.3 广播信号的传输频段

我们常常听到的电磁波传输频段有 VHF 频段、中波 (medium wave) 和短波 (shortwave) 3 种。

#### 1. VHF 频段

VHF 频段为 30MHz~300MHz，该频段中，调频 (FM, frequency modulation) 为立体声广播的频段，其频段为 87.5MHz~108MHz（某些校园广播频段低于 87.5MHz）。VHF 频段上的电磁波会穿透电离层 (ionized layer)，所以只能以直线传输的方式来传播。我们日常收听的城市电台广播都是采用 FM 方式传输的。

#### 2. 中波

中波覆盖的频率为 500kHz~1.6MHz，中波广播节目的频率范围是 525kHz~1.605MHz。中波广播将声音信号通过调幅方式 (AM, amplitude modulation) 以地面波的形式传送出去。这个频段的电磁波遇到电离层时会反射。在夜间，反射的效果比白天好，因此在晚上，中波广播传播的距离比较远。

#### 3. 短波

短波 (1MHz~30MHz) 可以穿透电离层的 E 层，但是遇到 F 层会反射。由于反射角大，短波可以传输得很远，所以常用于洲际广播。

### 2.1.4 收音机电路图

回顾了电磁波的基础知识后，我们来看看本章需要关注的电路图，如图 2-3 所示。如果读者能根据前一章的知识进行一下分析是很有益处的，尽管分析得可能不完整或不正确，但随着问题的深入，图 2-3 所示的三管直放式收音机电路中蕴含的问题将逐一被解答。

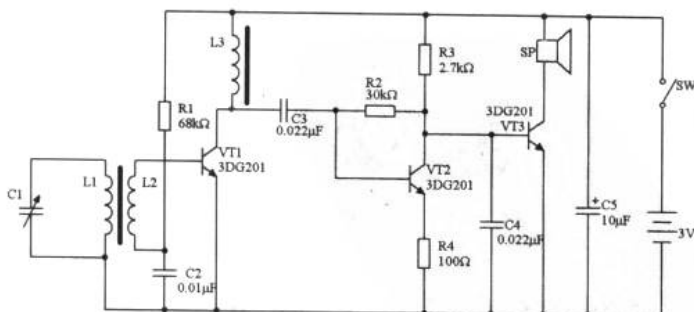


图 2-3 三管直放式收音机电路图

## 2.2 向太空发射我们的声音

### 电声元件 简易扩音器 调制与解调 AM 与 FM

自从 1837 年 Samuel Morse 发明电报以来，通信这个新兴的领域开始起步。电话的出现归功于 Alexander Graham Bell，他在 1876 年成功地利用电话进行通信。1894 年，一套完整的无线通信系统由 Guglielmo Marconi 发明。到了 20 世纪，电子技术的蓬勃发展极大地促进了通信技术的提高。1908 年，Lee DeForest 发明的真空三极管比较完美地解决了无线通信的诸多实际的技术难题，同时赋予电子放大器新的生命。1948 年，Shockley、Brattain 和 Bardeen 发明了晶体管，出现了一次电子技术的革命。到了现代，大规模集成电路和计算机技术在通信中的应用使得这个领域达到了前所未有的高度。

这一小节里，我们利用现有的知识，制作一台小型的发射机，把我们的声音向太空发射。

#### 2.2.1 电声元件

科技发展到今天，还没有找到一种方法，能直接将声音传播到很远的地方。因为声音在传播时随着距离的增加而迅速衰减。

如果将声音转换成电信号，情况就大为不同了。电信号可以通过导线或电磁波的形式传输，一旦衰减可以通过放大器进行放大，再在接收端把电信号还原成声音。

##### 1. 话筒

话筒 (mike) 又称为传声器，是一种将声音信号转换为电信号的电声元件。根据话筒的换能原理可以分为动圈式话筒、电容式话筒、驻极体话筒、炭粒式话筒等。按输出的阻抗可分为低阻型 ( $R < 2k\Omega$ ) 和高阻型 ( $R > 2k\Omega$ )。

驻极体话筒 (electret condenser microphone) 是电子制作中最常用的话筒种类。楼道里的声控延时路灯里使用的声控器件就是驻极体话筒，它的外观及电路标识如图 2-4 所示。

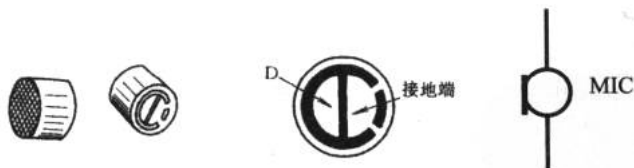


图 2-4 驻极体话筒的外观和电路标识

常用的驻极体话筒是二端式的，在话筒的底面有两个焊点，其中一个焊点与驻极体话筒的外壳是短路的（如图 2-4 所示）。我们在鉴别极性时可以根据这个特点用万用表测量驻极体话筒的外壳和其中一个焊点，短路者为负极，另一个为正极。在电路中，驻极体话筒的负极一般都与工作地（一般为电源负极）相连。

在检测驻极体话筒时，可把万用表置于电阻档的“ $R \times 1k\Omega$ ”上（如果是数字式万用表



可以放置在“20 k $\Omega$ ”或量程相近的档位上)。向话筒吹气,这时万用表的读数就会发生变化(向任何话筒吹气都会对器件造成不良的影响)。

## 2. 扬声器

扬声器(loudspeaker)也叫喇叭,是电声转换器件。常见的扬声器外观和电路标识如图2-5所示。

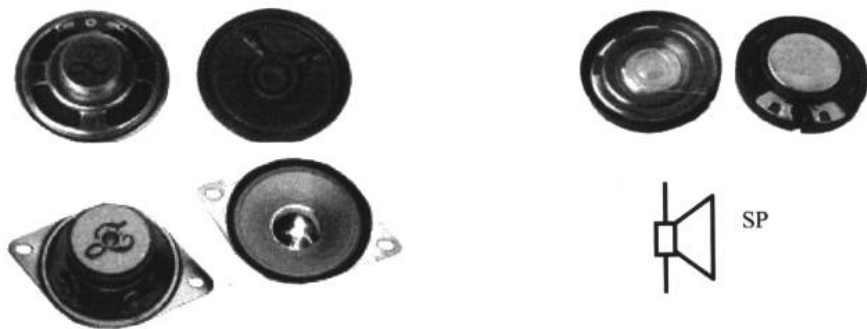


图2-5 常见的扬声器和电路标识

我们常常在扬声器的铭牌上看到如图2-6所示的标识,这说明这个扬声器的功率是0.5W,阻抗为8 $\Omega$ 。



图2-6 扬声器的参数

## 3. 耳机

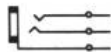
耳机(earphone)这个元件恐怕我们再熟悉不过了。图2-7(a)所示是一个单声道耳机的电路标识,而图2-7(b)和图2-7(c)是立体声耳机的插头和插座及标识。



(a) 单声道耳机的电路标识



(b) 立体声耳机插头



(c) 立体声耳机插座及标识

图2-7 耳机及插头、插座

## 4. 压电陶瓷片

压电陶瓷片又称晶体式扬声器,它是利用压电效应(piezoelectric effect)制成的。当



在晶体材料表面上加上音频电压时,晶体便能产生和音频电压相应的振动,从而发出声音。其外观和电路标识如图 2-8 所示。

压电陶瓷片结构简单,电声转换效率高,没有线圈和磁铁,压电陶瓷片的直径有  $\phi 20$ ,  $\phi 27$ , ...,  $\phi 55$  等几种,是一种价格低廉的电声器件。但它的阻抗高(约为  $9\text{k}\Omega$ )、功率小、音质较差,比较适合用在电子表、小闹钟等电子产品中。



图 2-8 压电陶瓷片的外观和电路标识

## 2.2.2 简易扩音器

要把我们的声音发射到太空得从一个简单的扩音器(amplifier)开始,这似乎与向太空发射电磁波不太相干,但其实是必要的一个环节。

我们分析一下图 2-9 所示的简易扩音器的电路图。

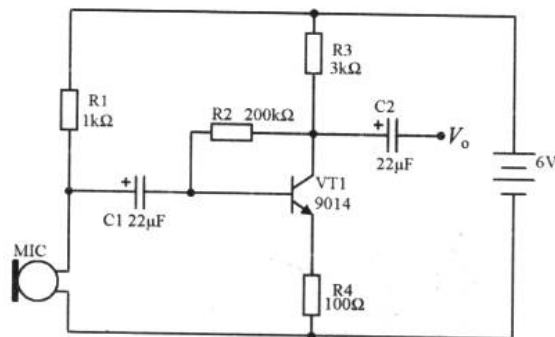


图 2-9 简易扩音器电路图

有了第 1 章的分析基础,我们很容易就知道电阻  $R_1$  是一个偏置电阻,它使得三极管  $VT_1$  工作在放大区。电容  $C_1$  和  $C_2$  是耦合电容(信号的传递叫耦合),电阻  $R_2$  是反馈电阻(反馈将在 4.2.4 节介绍)。图中的 MIC 是话筒, $V_o$  是电路的输出端。2.2.1 节已经介绍了电声元件,与光敏电阻有所不同的是,话筒把声音信号转换成电信号。话筒接收到的声波越强,它呈现的电阻就越大。于是在  $VT_1$  的基极就产生了一个与声音相关的电信号,这个信号就是我们对话筒说话的内容。通过  $VT_1$  的电流放大,在  $V_o$  端输出一个放大后的电信号。

这一节的学习中我们有个小小的遗憾,即不能使用 Multisim2001 对电路进行直接仿真。因为在 Multisim2001 中并没有 MIC 这个器件,所以 EDA 软件不能接收我们的声音并送到电路里。如果我们能利用合适的话筒把声音信号转换成电信号,接着进行放大和滤波的工作,通过 A/D(模/数)转换输入计算机,然后改进 Multisim2001 与硬件接口的环境,使 Multisim2001 的仪器元件栏里多一个 MIC 的元件,那么我们将成为虚拟仪器开发的高手(似乎有些超越目前我们的能力,但相信我们今后会有这个能力,尤其是在完成这 17 章的学习之后)。

难道我们就不能使用 Multisim2001 对类似的电路进行仿真和分析了吗?答案是我们仍



可使用 Multisim2001 进行近似仿真。在 Multisim2001 中连接如图 2-10 所示的电路。

在图 2-10 所示的仿真电路中，我们使用电位器 R5 来代替 MIC。因为在上一小节我们知道 MIC 的作用是把声音的变化变成电阻的变化，从而对电信号进行相关影响。所以，通过电位器来模拟 MIC 的功能是可行的。

这种方法的根据是：电位器 R5 旁标注的文字“Key=a”表明按键盘上的 A 键，电位器的阻值按 5% 的速度减少。这个百分比可通过双击电位器，从弹出的属性对话框中修改。若要增大，按 Shift+A 键，阻值将以 5% 的速度增加。电位器变动的数值大小直接以百分比的形式显示在一旁。这样一来，启动仿真开关，反复按键盘的 A 键和 Shift+A 键就能使 R5 的电阻变化，从而实现某种程度的模拟。

图 2-11 所示为笔者利用这个方法验证了电路设计的结果。从示波器显示的波形来看，输出与输入的确存在着某种关联。

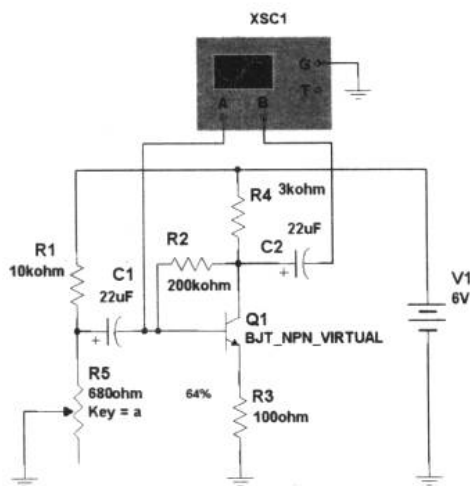


图 2-10 在 Multisim2001 中的近似电路

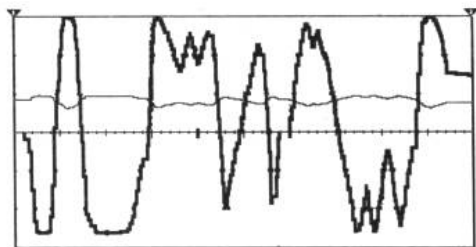


图 2-11 近似电路的实验结果

### 2.2.3 调制与解调

在这一小节里，我们来看看调制 (modulation) 与解调 (demodulation) 的一些基本概念。

我们从 2.1 节知道，只要在天线中有变化的电流，就会在空间产生并传播电磁波。电视和广播节目信号的发射就是以这种简单的方式进行的。但发射出的电磁波并不是直接的声音或图像信号，而是将这些信号调制后发射。那么什么是调制？为什么要调制后发射呢？

#### 1. 调制的理由

不把声音或图像信号直接通过天线发送出去，主要的原因是这些信号的频率较低、传输距离有限。我们在物理学里知道，波的强度与其频率的 4 次方成正比，可见高频信号强度高、传输距离远。

另外，频率越低，发射天线的尺寸越大。例如，发射  $f=1\text{kHz}$  的信号最短的天线长度

为  $\lambda/4$ 。而波长  $\lambda = \text{光速}/f = 3 \times 10^5 / (1 \times 10^3) = 300\text{km}$ ，所以天线需要  $300\text{km} / 4 = 75\text{km}$  的长度。再有，若全世界的电台、电视台都把自己的声音和图像信号直接发射到天空中，则将形成严重的相互干扰。这些不利的因素就是调制的理由。

## 2. 调制的种类

常用的调制方式有：幅度调制（调幅，amplitude modulation, AM）、频率调制（调频，frequency modulation, FM）和相位调制（调相，phase modulation, PM）等方式。本小节我们以 AM 和 FM 的介绍为主。

## 3. 如何进行声音信号的调制

既然低频的声音信号不能直接发送并传输，那么我们就想办法借助高频信号实现。这个办法就是把有用的低频信号和高频周期性信号进行某种“结合”，这种“结合”就叫“调制”。

调制的方法就是将声音信号调制到载波（carrier）上。载波是一种“运输工具”，它把低频的声音信号“运送”到远方。

在接下来的 2.2.4 节里，我们通过两个具体的电路例子来学习 AM 和 FM 对声音信号进行调制的过程。

## 4. 解调

解调的过程正好相反。天线接收到高频载波后，通过选频和检波后得到了低频信号的原来面貌。选频和检波我们将在后面收音机的例子讲解中逐步展开。

# 2.2.4 AM 与 FM

## 1. AM 调制

下面通过一个实例来学习 AM 调制的内容。

**例 2.2.1** 利用 Multisim2001 连接图 2-12 所示的电路，观察信号波、载波和调制波的波形。

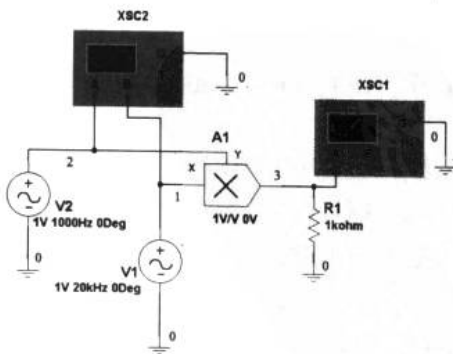


图 2-12 AM 调制的研究电路图

在例 2.2.1 中，我们使用了一个新的器件——乘法器（multiplying unit）。乘法器 A1



能对输入信号  $X$  和  $Y$  做乘法运算。在图 2-12 中, 结点 3 是乘法器的输出端, 其输出信号为  $V_3 = V_x * V_y$ 。虚拟示波器 XSC1 用来观察 AM 信号, 而 XSC2 的 Channel A 和 Channel B 分别输入的是声音信号和载波信号。图 2-13 所示为实验的结果。

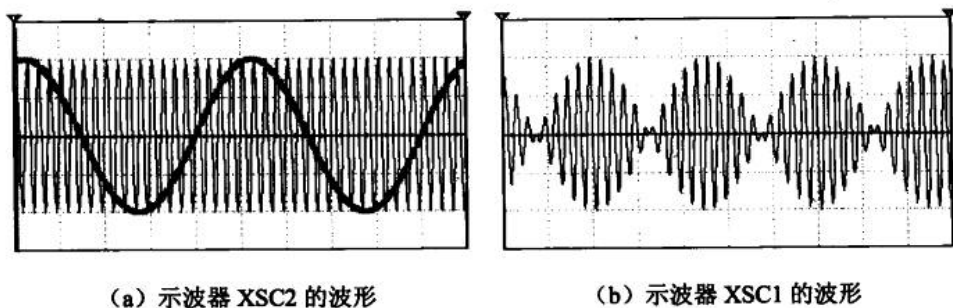


图 2-13 AM 的实验结果

图 2-13 (a) 中, 较粗的正弦信号我们假设为声音信号, 它由交流源 V2 提供。交流源 V1 提供的则是高频载波信号。通过乘法器相乘之后, 输出了图 2-13 (b) 所示的波形, 这个波形就是 AM 信号。我们用图 2-14 所示的示意图来描述这个过程。

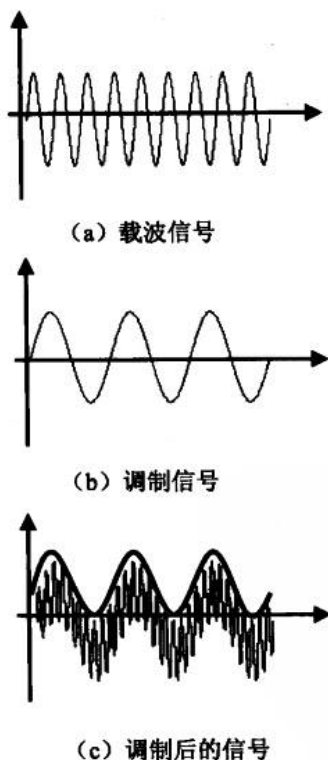


图 2-14 AM 信号的产生示意图

可见, AM 是用调制信号 (例如声音、图像) 去控制载波的振幅, 使振幅随着调制信号瞬时值线性地变化, 而载波的频率和初相位则保持不变。



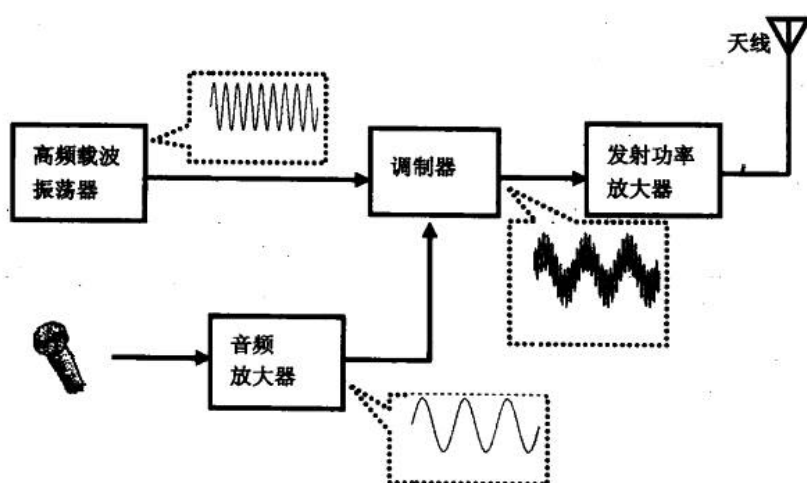


图 2-15 幅度调制及发射过程示意图

载波信号是由高频载波振荡器（在第 6 章将有介绍）产生的，这是一个幅度恒定、频率不变的正弦信号；声音信号经由话筒变成了与声音相关的电信号。然后这两个信号都送到调制器中进行调制，调制后的信号就成了调制波，其特点是频率等于载波信号但幅度的变化等于声音信号。

这样，我们把低频声音信号中携带的信息加载到了载波上。这个高频的载波经过功率放大后就可以从天线发射并传得很远。这个过程可以用图 2-15 来描述。

## 2. FM 调制

与 AM 不同的是，FM 是指载波的频率受调制信号控制，并随调制信号作线性变化的一种调制。调频获得的已调波叫调频波。我们可以从图 2-16 中理解 FM 的定义。

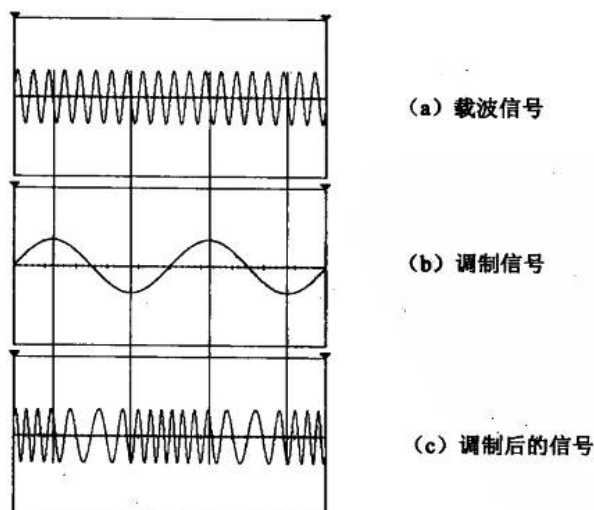


图 2-16 频率调制示意图

FM 的载波是一个高频正弦波，如图 2-16 (a) 所示，我们假设信号也是正弦波。通过



调制后得到的信号如图 2-16 (c) 所示。纵观这 3 个信号的波形可以发现, FM 信号的幅度一直没有改变, 变化的只是频率。在正弦信号的下降部分, 调制信号的频率变小, 而在其他时刻, 其频率与载波的频率相等。

AM 与 FM 都是比较流行的广播方式, AM 由于信息蕴含在幅度变化之间, 在传播过程中容易受到干扰而丢失信息; 而 FM 的信息蕴藏在频率变化之间, 与信号的幅度无关, 所以, 即便信号的幅度受到干扰也不会丢失信息。所以, FM 广播的保真度和可靠性较 AM 高, 但 FM 的发射与接收设备要比 AM 复杂。

我们通过完成下面的实例来了解 FM 电路的简单特征。

**例 2.2.2 制作微型无线话筒电路 (如图 2-17 所示), 并了解 FM 电路的基本结构。**

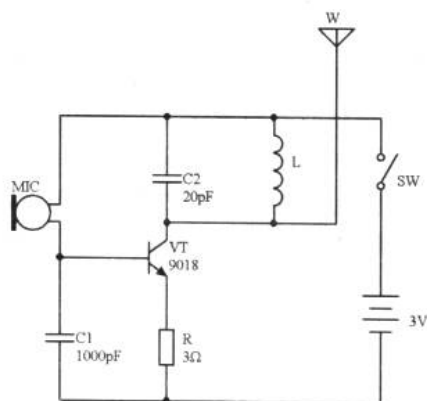


图 2-17 微型无线话筒电路图

这是一个体积很小的微型调频无线话筒。它具有电路简单、调试容易、灵敏度高的特点。发射频率在 88MHz~108MHz 范围内, 可用普通的调频收音机接收。

我们来分析一下它是如何把声音信号发射出去的。电路仅使用一支三极管 VT, 它与电感 L、电容 C2 构成高频振荡器 (第 6 章有相关的介绍)。语音信号由驻极体话筒 MIC 拾取并变成电信号, 电信号经过 VT 放大并对其进行调制, 调制后的调频信号由天线 W 发射出去。高频振荡频率由 L 和 C2 决定。

通过调整电感 L 和电容 C2, 我们可以用调频收音机接收到天线传送出来的信号。对于从天线发射出来的信号, 我们应该知道它是一个基于图 2-16 (c) 的频率调制波。这种调频波通过收音机解调就可以还原出声音。

如果增加这台无线话筒的发射功率, 就可以把声音向太空以调频的方式发射出去。

## 2.3 收音机的故事

### 收音机的进化 调谐 检波 带有放大器的收音机

在前两节里, 我们了解了电磁波、调制与解调的常识。这些知识的理解对我们进行电路设计和电路制作都有很大的帮助, 特别是对于有志于从事无线电通信的人来说, 这些都



是基础的理论知识。在这一节里，我们重点分析一台三管直放式收音机的工作原理，并引出放大器的概念。

### 2.3.1 收音机的进化

#### 1. 最原始的收音机

人类有史以来最简单的收音机（radio）是什么样子？图 2-18 就是，这可能会出乎读者的意料。

最早的收音机的零件非常少，一个高阻抗的耳机，一个检波器，安装一个天线，再从自来水管接一个地线。将耳机的两端和矿石检波器并联，并联后的两端一端接天线，另一端接地线。

今天，我们习惯把那些不使用电源，电路里只有一个半导体元件的收音机统称为“矿石收音机”。“矿石收音机”源于早期的检波器元件是直接天然矿石做成，使用时需要通过一根金属探针调整其在矿石上的压力和方位而得名。矿石收音机是所有无线电接收设备里最简单的一种，要求耳机阻抗足够高、水管的朝向良好、离电台相当近，才有可能接收到广播。这台收音机不能进行频道的选择。图 2-19 所示为最早个人使用的矿石收音机的耳机（1969 年）。

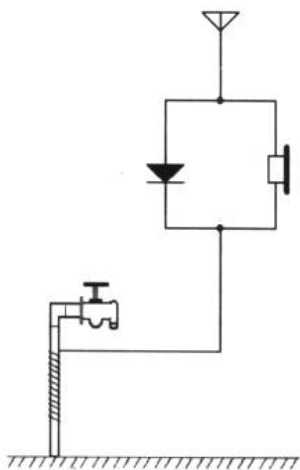


图 2-18 最简单的收音机

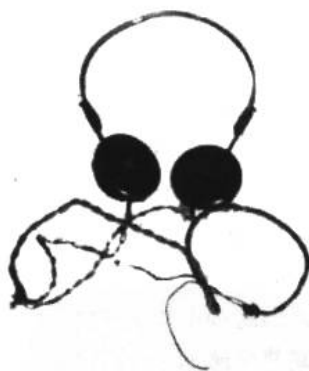


图 2-19 最早使用的矿石收音机的耳机

#### 2. “进化”的收音机

可能在发达的现代社会，图 2-18 所示的如此简单的收音机派不上什么用场了。不过图 2-20 所示的收音机电路图我们就需要看清楚了，因为它“麻雀虽小，五脏俱全”。

线圈  $L$  和可变电容  $C1$  组成一个调谐电路（2.3.2 节中将会谈到），它能从天线接收下来的许多信号中选择一个需要的电台信号，再通过二极管  $D$  的检波把高频载波中携带的音频信号取出，由耳机把音频电流转变为声音。

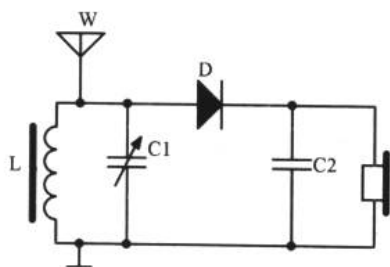


图 2-20 收音机的原始模型

由于这个电路中没有电源和放大器，所以要架设良好的天线并埋设可靠的地线才能尽可能多地接收空中微弱的电磁波信号，而且还要使用灵敏度较高、阻抗较高的耳机来收听。

### 2.3.2 调谐

公式 2-1 是 LC 回路谐振频率 (resonance frequency) 的计算式，LC 回路的谐振频率可由此计算出来。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-1)$$

图 2-21 中，可变电容的主要作用是改变回路的谐振频率。这一点从公式 2-1 中可以直观地看到。一旦调谐 (tune) 电路的谐振频率改变，那么它接收天空中哪种频率的电磁波也就确定了——进入电路里的必定是频率与谐振频率  $f$  接近的电磁波。

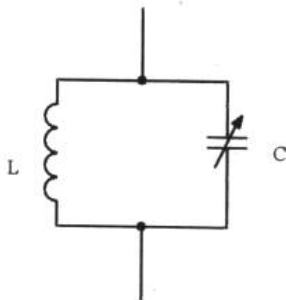


图 2-21 调谐电路

### 2.3.3 检波

检波 (demodulation) 过程实际就是解调，是调制的逆过程。电磁波通过调谐电路后，某一频率的载波就流入了收音机的电路里，这时它的形态是如图 2-22 所示的载波信号 (以 AM 信号为例，并假设调制信号为正弦波)。



图 2-22 通过调谐后的信号

在 2.2.3 节中我们就说过,这种看似复杂的信号里蕴含着我们将要听到的声音信号。只要通过检波器,我们就能把声音真实地还原出来。所以说,检波是指从高频调幅波中检出调制信号的过程,它是由检波器来完成的,如图 2-23 所示。调谐电路、检波器和放大器都是收音机的基本组件。



图 2-23 检波过程示意图

通过前面的认识我们知道调制有幅度调制和频率调制,对应形成的载波有幅度调制载波和频率调制载波。所以,要针对不同的载波来设计检波器。实际上,检波电路的设计是比较有学问的,分析和设计检波器需要有较好的电路综合知识。本节我们只了解调幅信号检波和调频信号检波的基本常识。

### 1. 调幅信号的检波

图 2-24 是调幅信号检波原理图。当输入检波器的高频信号为正半周时,电容  $C_2$  对高频信号的阻抗很小,所以高频电压几乎全部加在了二极管  $D_1$  上,二极管  $D_1$  由于正向偏置而导通。

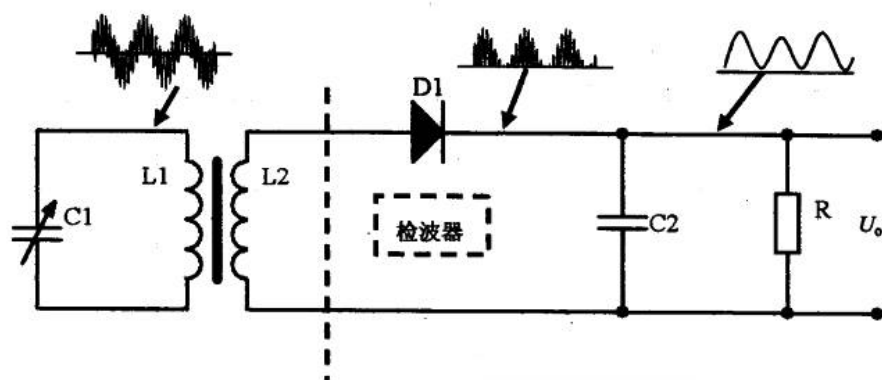


图 2-24 调幅信号检波原理图

二极管  $D_1$  导通使得电容  $C_2$  开始充电,使它两端电压很快地接近输入信号的峰值。这个电压对二极管  $D_1$  来说是反向电压。当输入高频信号正半周峰值逐渐减小时,只要高频信号电压小于电容上的电压,二极管  $D_1$  便截止。

接着,电容  $C_2$  开始向负载  $R$  放电,由于  $R$  阻值比较大,  $RC$  时间常数远大于高频信号的周期,所以放电很慢,电容两端电压下降很慢。当电容  $C_2$  上的电压下降不多时,高频载波的第二个正半周电压又超过电容  $C_2$  上的电压,二极管  $D_1$  开始重新导通,电容再次充电至第二个调频信号的峰值。

如此反复循环,只要适当选择  $R$ 、 $C_2$  和二极管  $D_1$ ,使放电时间常数  $RC$  足够大,就可使电容两端电压的幅度与输入电压幅度相当接近(但不可能完全重合),即输出电压  $U_o$ 。



跟随高频信号的峰值变化。输入的信号是调幅波，输出端就得到近似于调幅波包络线的输出电压，所以 AM 信号的检波也叫做包络检波。

下面通过一个实例来理解二极管的包络检波的内容。

**例 2.3.1** 在 Multisim2001 中连接如图 2-25 所示的电路，观察二极管的包络检波。

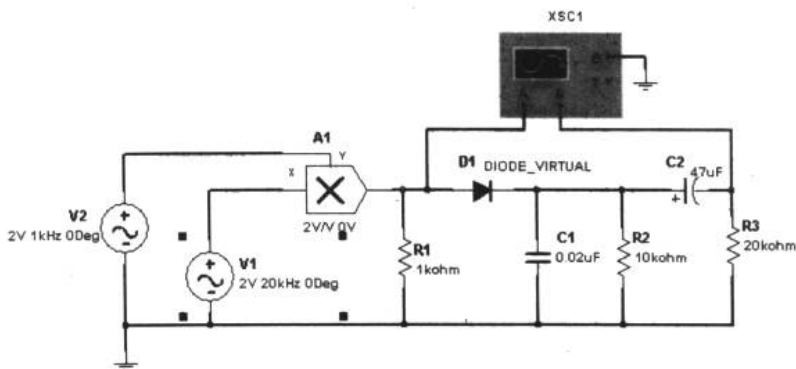


图 2-25 二极管包络检波实验电路图

器件的设置如图 2-25 所示。V1 和 V2 分别产生载波和信号波，通过乘法器后得到 AM 信号，通过二极管包络检波后得到如图 2-26 所示的检波效果。

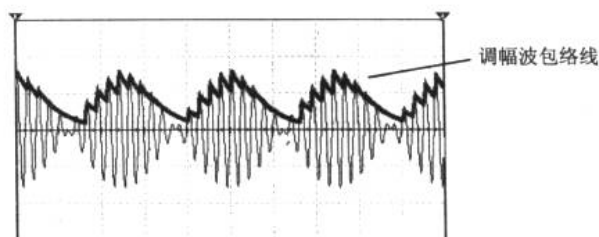


图 2-26 包络检波效果图

## 2. 调频信号的检波

我们知道调频信号是载波的频率随调制信号变化的一种调制信号。如果能把调频信号变成调幅信号，我们就能利用图 2-24 的调幅信号检波电路来完成信号的解调。

对调频信号的调频至调幅变换可通过一个叫“鉴频器”的电路来完成。鉴频器内有两个部分，一部分将调频信号变成调幅信号，另一部分是调幅检波，如图 2-27 所示。

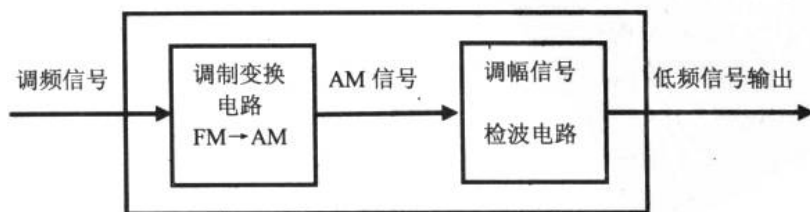


图 2-27 鉴频器的内部组成

图 2-28 中,  $L2$  和  $C2$  组成 LC 谐振回路, 谐振频率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。为了实现把等幅的调频波转换成调频调幅波, 必须使 LC 谐振回路工作在失谐的情况下, 即保证 LC 并联电路的谐振频率大于或小于调频信号的中心频率 (即载波频率)。这样频率的变化才能转换成振幅的变化。

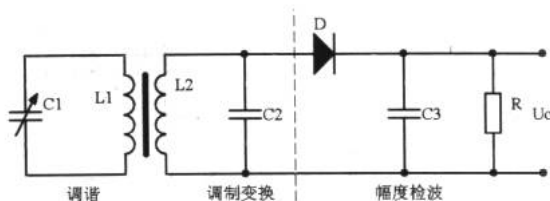


图 2-28 鉴频器电路原理图

在进行例 2.3.2 之前, 我们看看 Multisim2001 中 Sources (有源器件) 的几个常用器件: 。这 4 个有源器件的名称分别为: 时钟电压源、调幅信号源、调频电压源和调频电流源。其中, 调幅信号源和调频电压源可以直接产生 AM 和 FM 信号。

**例 2.3.2** 在 Multisim2001 中连接如图 2-27 所示的电路, 加深对 FM 信号的解调过程的理解。

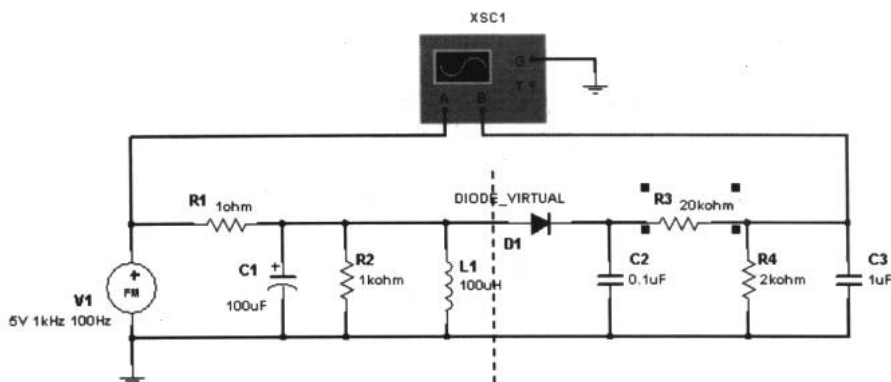


图 2-29 鉴频器原理实验电路图

FM 电压源 V1 产生 FM 信号, 其中心频率为 1kHz, 调制信号频率为 100Hz, 幅值为 5V。图 2-29 中, 虚线左侧由  $L1$  和  $C1$  构成频-幅变换电路, 它将调频波转变成调幅波, 使其幅度的变化正比于调频波的变化, 至于它的载波则仍是调频波, 因此实际上是一个调幅的调频波要对调频波进行检波, 即鉴频, 以获得原调制信号; 虚线右侧的  $D1$ 、 $R3$ 、 $R4$  和  $C2$  组成包络检波电路; 这个一般的幅度检波器检出波形的幅度变化部分, 即其包络, 这就是我们所需要的、并与原来调频波频率变化成正比的信号。

图 2-30 所示为这个实验的结果, 从中我们清楚地看到了 FM 信号的解调过程。输出解调信号反映了调频波的变化情况, 即跟踪了输入信号的频率, 起到了鉴频的作用。

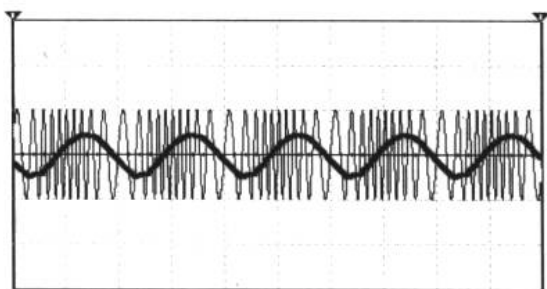


图 2-30 FM 解调实验结果

### 2.3.4 带有放大器的收音机

在 2.1.4 节里，我们就把本章值得关注的例子——三管直放式收音机拿出来了，那时只是希望读者能对电路图进行简单的分析。现在我们彻底地分析一下这张电路图（如图 2-31 所示）。

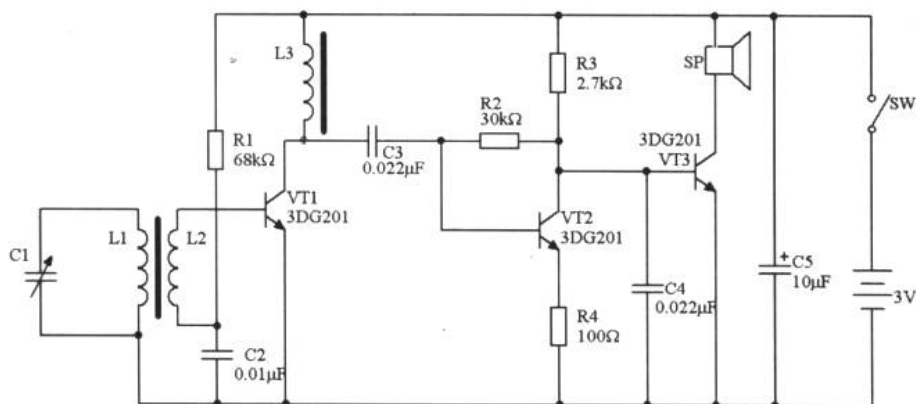


图 2-31 三管直放式收音机电路图

在三管直放式收音机的电路图中，我们使用了 2.1.2 节中介绍的磁性线圈作为接收的天线。这样的磁性线圈一般都需要我们自制，制作的方法我们在下一章将会谈到。图 2-32 所示为线圈 L1 和线圈 L2 缠绕在磁棒上的示意图。其中 L1 就是这台收音机的接收天线。

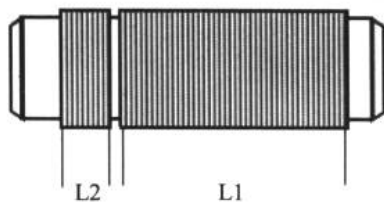


图 2-32 磁棒上的线圈

L1 与可变电容 C1 组成调谐电路，用于选择需要的电台信号。由于线圈 L1 和 L2 都缠



绕在磁棒上, 根据互感作用, 经过选择后的高频信号由线圈 L1 耦合到线圈 L2 上, 然后由三极管 VT1 等组成的高频放大器, 把接收到的微弱高频信号直接进行放大。高频放大器之所以没有直接接到线圈 L1 上, 主要是为了阻抗匹配(阻抗匹配将会在 3.2.1 节中提到)和减小三极管 VT1 对天线调谐电路的影响。

电阻 R1 为三极管 VT1 工作提供电流。电容 C2 是旁路电容, 使高频电流通过它与负极相连, 高频扼流圈 L3 是高频放大器的负载。放大后的高频信号通过电容 C3 耦合到三极管 VT2 的基极上。这时, 三极管 VT2 的功能类似于检波电路中的二极管, 由 VT2 进行检波, 把高频载波信号中携带的音频信号提取出来。电阻 R2 为三极管 VT2 工作提供电流, 电阻 R3 是三极管 VT2 的负载电阻。电阻 R4 是发射极反馈电阻(反馈的概念将在第 4 章中谈到), 它可以稳定三极管 VT2 的工作点。电容 C4 可以滤掉检波后不需要的高频部分, 然后由三极管 VT3 将音频信号进行放大, 驱动扬声器 SP 发声, 电容 C5 为电源滤波电容, 保证收音机稳定工作。

由于直放式收音机的电路比较简单, 灵敏度不高, 在钢筋水泥的建筑中收听效果不是很好。

分析中, 我们谈到三极管 VT2 用于检波, VT1 和 VT3 充当了放大器的角色。可见, 在电子电路中, 放大器占据了十分重要的地位。随着问题的继续, 我们还会接触到各种各样的放大器。

## 第3章 制作第一件电子作品

前两章里，我们了解了电子技术的一些基础知识。在学习过程中，遇到困难是肯定的，但一定不要放弃。模拟电子技术的学习进展到现在，我们已经掌握了一些基础知识，现在该是动手实践的时候了。

### 3.1 制作一个测谎仪

面包板 插面包板 万用板与印刷电路板 制作印刷电路板的前奏 设计第一块印刷电路板 制板焊接

这一节将介绍一些常用实验器材的使用方法，任何电路实验都是这样开始的。如果希望弄清楚这些内容就必须动起手来。

#### 3.1.1 面包板

在电子实验中，我们常常把电子元件插到面包板（bread board）上，或焊接到万用板上，再利用导线完成元件与元件之间的电气连接。所以在制作一个测谎仪之前，有必要了解一些制作的准备工作。

面包板和食物绝对没有任何关系，这是一种电路实验常用的工具。我们设计的任何电路一般都先要在面包板上实验，观察电路实验的效果并以此对电路进行改进。图 3-1 所示为面包板的外观。

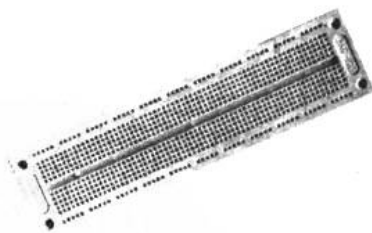


图 3-1 面包板外观

面包板的表面有整齐排列的插孔。常用的面包板纵向有标识为 A~J 的 10 个孔，横向上有 0~70 的标号。面包板每一纵行上孔 A~E 是导通的，孔 F~J 也是导通的。这样，面包板就被中间槽分成上下两区，这两个区是绝缘的。同时，纵行间也是绝缘的。在面包板上、下边还有 X 行和 Y 行插孔，它们每 4 组间是导通的。X、Y 行通常作为电源节点和地线节点使用，如图 3-2 所示。

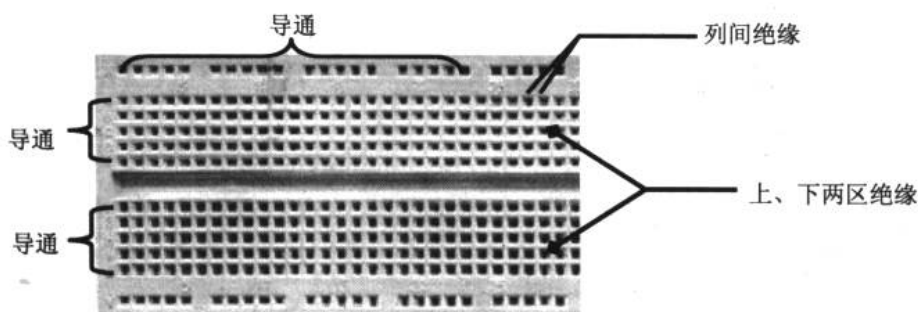


图 3-2 面包板的特点

### 3.1.2 插面包板

现在我们开始实际制作第一个电路，这个电路是一个测谎仪的简易版本。

人在说谎时，一般都会产生紧张心理，其外在表现为出汗而使皮肤电阻降低。利用这一心理和生理反应，我们可以设计制作一个趣味测谎仪。

图 3-3 所示为测谎仪的电路图，三极管 VT1 和 VT2 组成互补音频振荡器（振荡器将在第 6 章中有所介绍），振荡频率由电阻 R1、电容 C 以及两个测试接触点 A、B 之间的电阻共同决定。其中，R1 与 C 为定值，而两个测试点 A、B 之间的电阻却是因人而异的变量。根据振荡器的相关知识我们可知：当 A、B 之间电阻大时，振荡频率低；A、B 之间电阻小时，振荡频率高。另外，当 A、B 之间断开时，电路停止振荡。

根据振荡器的分析，我们可以预测：当人说谎时，汗腺分泌增加，使得接触 A、B 点手指间的电阻降低，振荡频率升高，扬声器发出的声音音调变高。

原理分析过后，我们开始用面包板连接这个有趣的电路。首先，我们把所需的元件准备妥当，用万用表等仪表对所使用的器件进行检测，以保证每一个器件都是性能良好的。这是一个很重要的习惯。然后准备一些面包板专用插线，如图 3-4 所示。

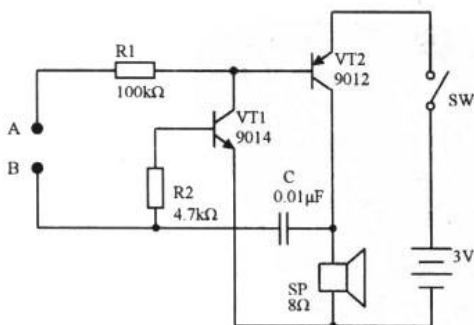


图 3-3 测谎仪电路



图 3-4 面包板插线

根据面包板内部的导通特点，把元件逐一地插入，在需要连接元件脚的地方用插线将

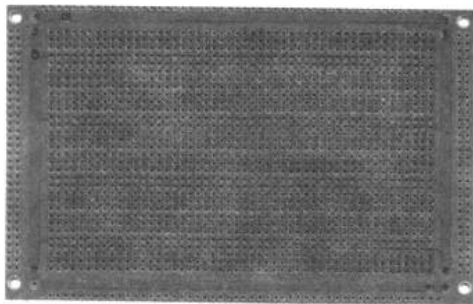


其连接。注意插元件或插线时，尽量把元件管脚或插针插至面包板的基底，以保证良好的导电性。顺便说一句，三极管 VT9012 是 PNP 型三极管。

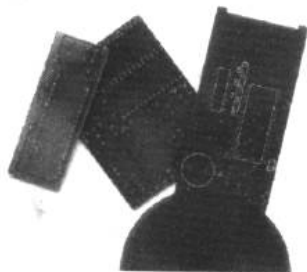
按图 3-3 将电路插接完毕后，仔细检查电路，然后就可以接通电源观察测谎仪的效果了。

### 3.1.3 万用板与印刷电路板

万用板是另一种接插元件的实验工具，它的样子和印刷电路板（printed circuit board）不太一样。万用板分成单面板和双面板两种。我们拿到一块万用板后，板子上孔间的铜箔连接清楚表明了孔之间的电气连接关系。印刷电路板是根据我们的需要定制的、具有固定电气连接关系的电路板（关于印刷电路板的制作稍后我们会看到）。图 3-5 所示为万用板和一般印刷电路板的外观。



(a) 万用板



(b) 一般的印刷电路板

图 3-5 万用板和一般电路板

当我们使用面包板把电路原理图连接出来后，就要根据电路的特点进行选择，是采用万用板焊接的形式还是通过腐蚀敷铜板制作印刷电路板来完成电路板部分的制作。如果是简单的、元件少的实验性的电路，我们可以使用万用板焊接的方式；如果元件比较多，它们之间的连接关系比较复杂，并且电路具有市场前景，我们就可以自己设计并制作印刷电路板。

使用万用板来连接电路与使用面包板很相似，只不过通过焊接导线取代插线。我们同样可以利用万用板来制作图 3-3 所示的电路。关于焊接的技巧，我们在本节的后面会学习到。

### 3.1.4 制作印刷电路板的前奏

我们现在来谈谈自制印刷电路板。我们打开一般电器的机壳，里面总会有一块电路板，上边焊接着电子元件。这块电路板就叫印刷电路板。成品电路板大多数都是大批量生产的，上边的元件也是在生产线上由机械臂焊接的。显然，在实验室条件下，自己制作印刷电路板和焊接元件是很必要的。本节和 3.1.5 小节我们就来学习制作印刷电路板和焊接元件的方法。当然，也可以使用电路设计软件 Protel 来绘制印刷电路板，然后把设计图交给电路板



加工厂加工，这样得到的印刷电路板要美观得多。

### 1. 印刷电路板设计起步

图 3-6 所示为一块工厂加工的印刷电路板，在它上面有许多的铜膜导线、焊盘和过孔。为了保证铜膜不被腐蚀和焊接时不至于搭焊，在铜膜上覆盖有阻焊剂（一般为绿色）。标准的印刷电路板印刷有元件标识，用于说明在电路板上器件的型号；过孔是双面板上正、反面电气连接；焊盘用于焊接器件引脚使之与印刷电路板的铜膜导线相连。

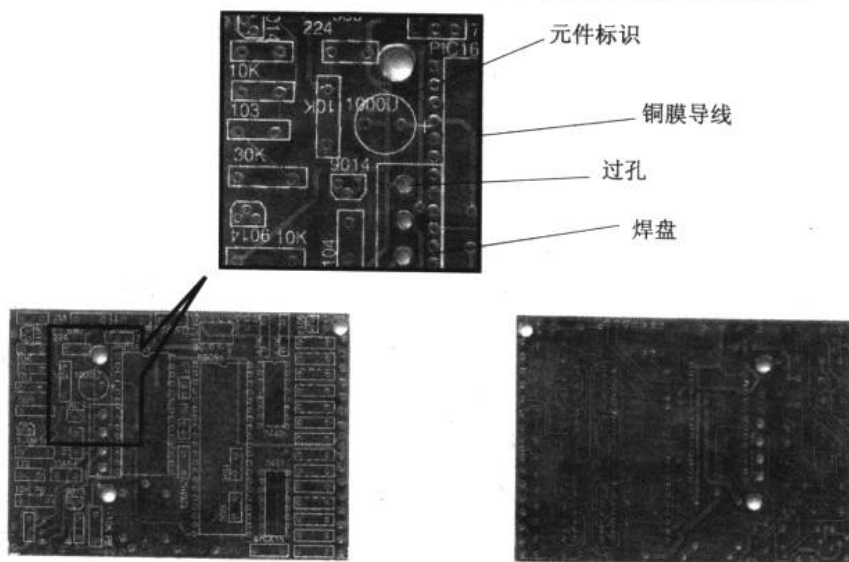


图 3-6 印刷电路板

看来我们在实验室条件下无法完成如此美观的印刷电路板了。但是，如果我们通过精心的设计和制作，同样能使印刷电路板布局合理。在自制印刷电路板前，我们首先要准备大小合适的敷铜板。敷铜板就是一块以环氧树脂为基底，表面覆盖着铜膜的板材。这是我们制作印刷电路板的材料，其厚度一般为 1.5mm。敷铜板有单面板和双面板之分，图 3-7 所示为单面敷铜板的外观图。

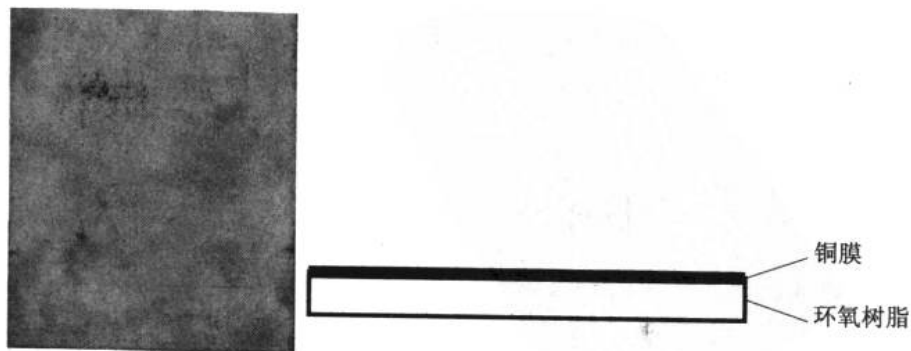


图 3-7 敷铜板



## 2. 所需材料

除了准备一块敷铜板外，我们还需要准备复写纸、圆珠笔、小号毛笔、磁漆（油漆）、三氯化铁、塑料或陶瓷容器、天那水（香蕉水）、砂纸、酒精和松香等。

### 3.1.5 设计第一块印刷电路板

在进入电路板设计之前，有一些印刷电路板设计的一般性原则是我们必须注意的。

(1) 设计印刷电路板时，电路输入端与输出端的器件应该尽量远离，如图 3-8 所示。

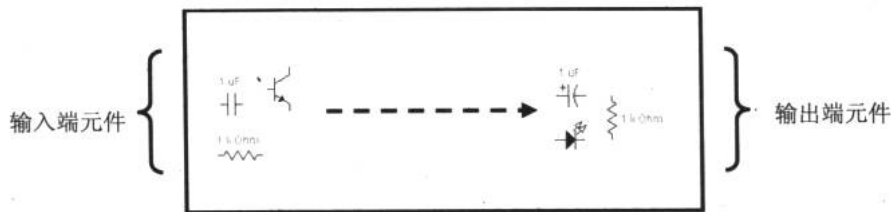


图 3-8 输入端与输出端的元器件尽量远离

(2) 输入端与输出端的信号线不能靠近，更不可以平行，如图 3-9 所示。否则可能会引起电路工作不稳定甚至自激。

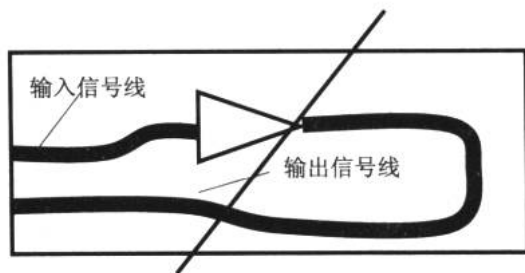


图 3-9 输入与输出端信号线不可靠近或平行

(3) 多级电路应该按信号流程逐级排列，不能互相交叉，以免引起有害耦合和互相干扰。比如第 2 章的三管直放式收音机，调谐电路、检波器和放大器应该按图 3-10 所示布线才是合理的。

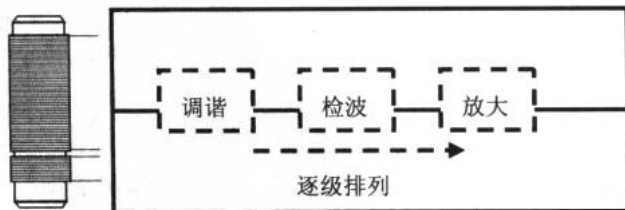


图 3-10 合理的逐级排列

(4) 电感元件应注意它们之间的互感作用。



(5) 地线不能形成闭合回路，以免因地线环流产生噪声干扰，如图 3-11 所示。

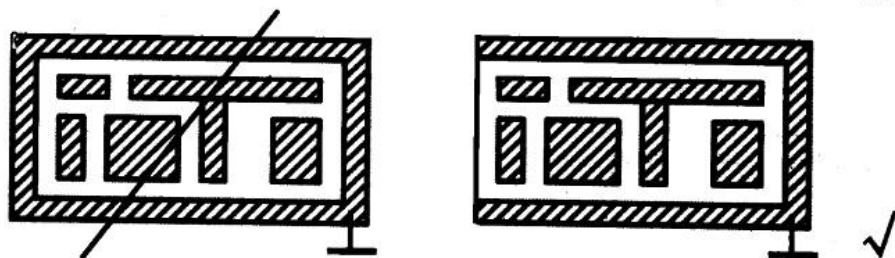


图 3-11 地线不要形成回路

(6) 在高频电路中，要采用大面积包围式地线方式，如图 3-12 所示。这样能有效防止电路自激，提高高频工作的稳定性。

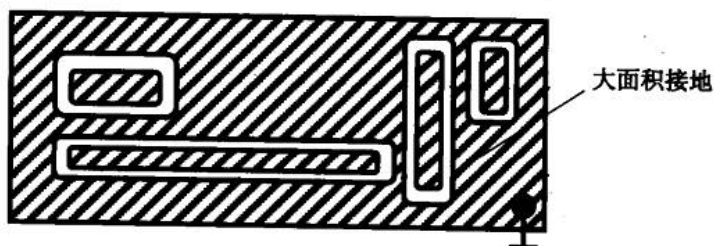


图 3-12 大面积接地

(7) 印制电路板上的线条宽度和线条间距应该尽量大些，以保证电气要求和足够的机械强度。一般的电子制作里，可使线条宽度和线条间距分别大于 1mm，如图 3-13 所示。

(8) 外壳不绝缘的元件之间应该有适当的距离，不可靠得太近，以免相碰造成短路，如图 3-14 所示。这就需要在设计印刷电路之前先把元件准备好，测量一下元件的尺寸。也可以根据器件的封装尺寸进行电路板设计。

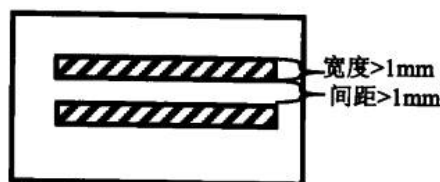


图 3-13 宽度和间距

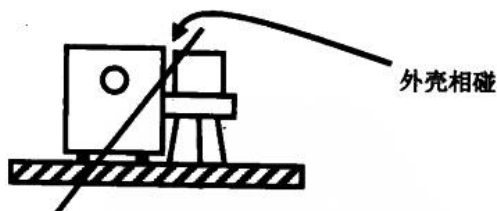


图 3-14 估计好元件间距

(9) 开关、电位器、可变电容和插座等器件应当放在外围，以方便调节。

这些原则我们浏览一下就可以了。随着制板的数目增多，我们自然会总结和积累若干制板的经验。笔者根据图 3-3 所示的测谎仪电路图设计出对应的印刷电路板，如图 3-15 所示。相信读者的设计一定会比这更合理、更美观。



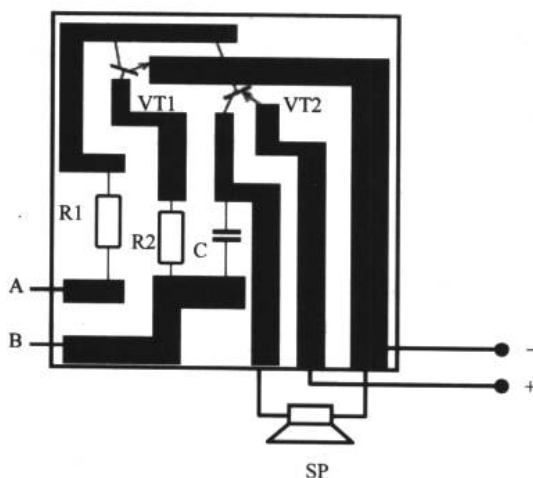


图 3-15 测谎仪印刷电路

在设计时请注意按 1:1 的比例绘制印刷电路图。我们把扬声器和电源引到了印刷电路板的外面，并使用电池盒来给测谎仪供电。

### 3.1.6 制板

我们完成了设计后，现在就开始制作印刷电路板。步骤如下：

#### 1. 描线

选择一块大小与设计的电路板差不多的单面敷铜板，按照长、宽尺寸把敷铜板裁好。用复写纸垫在有铜膜的一面，然后用圆珠笔把图 3-15 设计的铜膜导线的边缘勾画出来。然后揭去复写纸，在敷铜板的铜膜上会留下铜膜导线的轮廓。

#### 2. 涂漆

用小号毛笔把铜膜上轮廓以内的部分涂上磁漆（油漆），放置阴凉处把漆晾干。

#### 3. 腐蚀

使用塑料容器或陶瓷容器盛上清水（只要不与三氯化铁反应的容器都可以），然后加入三氯化铁的晶体（三氯化铁在一般的化工商店均有售）。水和三氯化铁的质量大约在 1:1 左右。溶液以刚好盖过敷铜板为宜，然后把涂好漆的敷铜板投入溶液中，双手端起容器轻轻晃动。注意，三氯化铁对皮肤、衣物有腐蚀性，在取用时尽量不要与之接触。使用热水腐蚀速度更快。在这一过程中，利用了化学反应  $\text{Cu} + 2\text{FeCl}_3 = 2\text{FeCl}_2 + \text{CuCl}_2$  把单质铜变成了离子， $\text{FeCl}_3$  和  $\text{Cu}$  发生氧化还原反应。

直到溶液把敷铜板上未涂漆的部分腐蚀干净后，将其从溶液中取出，用水冲洗掉敷铜板上的残余溶液。

#### 4. 去漆、打磨和涂助焊剂

清洗干净的敷铜板，这时只有被磁漆覆盖的部分保留了铜膜，其余部分已经被三氯化

铁腐蚀掉了。接着，我们用天那水（香蕉水）把磁漆洗掉，注意，天那水对呼吸道有刺激性，使用时要特别小心。洗净后，如图 3-15 所示的印刷电路板就呈现在眼前了。然后，我们用砂纸对铜膜进行打磨，以去除上面的残漆和污垢。注意，不要用力或过久打磨，以免将铜膜破坏掉。同时还要检查铜膜导线间有没有因腐蚀不完全而粘连的情况。最后，把松香磨成粉状，与酒精按质量比为 1:2 配制成助焊剂，涂在铜膜上，这样有助于元件的焊接。

### 5. 打孔

在印刷电路板需要插入元件的地方打孔，选用的钻头为  $\phi 0.7\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$  为宜。注意，在使用电钻时，要认真阅读操作规程和电钻的使用说明和注意事项。由于使用的钻头很细，打孔时应该使钻头与印刷电路板保持垂直，电钻的转速不应过高以免折断钻头，发生意外。

经过上述流程后我们就完成了第一块印刷电路板的制作。因为印刷电路板的设计和制作是有所讲究的，需要多积累经验才能使电路板布局合理，大方美观。

由于制作过程使用了有毒或有刺激性的化学制品和原料，具有一定危险性，所以应该了解清楚相关知识后再开始动手。

## 3.1.7 焊接

### 1. 焊接前奏

制作好印刷电路板后，我们就可以进行元件的焊接了。焊接需要准备一把电烙铁、焊锡、偏口钳等。电烙铁的功率在 15W~30W 间为宜，至于选择平头烙铁还是尖头烙铁完全出于个人习惯。在电烙铁的使用过程中，建议将其良好接地，具体方法可参见电烙铁的使用说明书。

所有元件在焊接前最好用小刀或什锦锉将其引脚刮净，防止因引脚的氧化导致焊接时接触不良或出现电气连接不善的问题。

元件在电路板上的安装方式有立式和卧式两种。立式安装如图 3-16 所示，这种安装方法有利于缩小整机电路板面积。卧式安装如图 3-17 所示，这种安装方法可以降低元件的安装高度，在电路板上部空间较小的条件下适用。在同一块电路板上，可以混合采用立式和卧式的安装方式。注意，在焊接时，元件与电路板应当尽量地紧贴在一起。

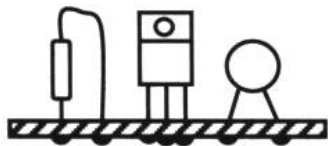


图 3-16 立式安装

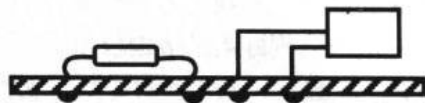


图 3-17 卧式安装

### 2. 开始焊接

现在我们焊接第一个元件。把电阻插入对应的孔中，引脚在印刷电路板上有铜膜一侧伸出。这时，我们一手拿焊锡，另一手拿电烙铁。把电烙铁头接近电阻的引脚刚刚出孔的位置，接着把焊锡凑近，然后焊锡与烙铁头同时贴到引脚的焊盘上。焊锡在烙铁的高温下迅速熔化，



使电阻的引脚和印刷电路板上的焊盘紧紧地焊接在一起。然后用偏口钳把过长的元件引脚剪去，如图 3-18 所示。注意先把焊锡熔化在电烙铁上再往电路板上焊接是不正确的。

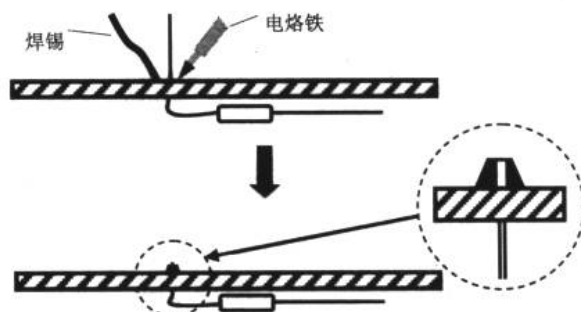


图 3-18 焊接

标准的焊点应该圆而光滑、无毛刺。像豆腐渣一样的蜂窝状焊点是虚焊的表现，在焊接过程中绝对要避免。如何得到标准、美观的焊点呢？除了凭经验控制焊锡量外，电烙铁的焊接动作也很重要。要想让焊点漂亮，惟一的方法就是多练习、多积累手法经验。在以后的焊接过程中，千万注意不要犯图 3-19 所示的问题。



图 3-19 不合格的焊点

整齐的元素、漂亮的焊点、良好的电气连接特性是印刷电路板制作追求的目标。通过经常动手制作，相信大家一定能把印刷电路板设计和制作好。图 3-20 所示为一块焊接得不错的印刷电路板的正反面。

完成了元件的焊接，电路板制作就完成了。由于这个测谎仪电路比较简单，不需要调试就能工作。如果允许，还可以制作一个外壳使其美观。把 A、B 两个接触点引到机壳上，用铆钉作为接触点，这样我们就完成了测谎仪制作的学习。

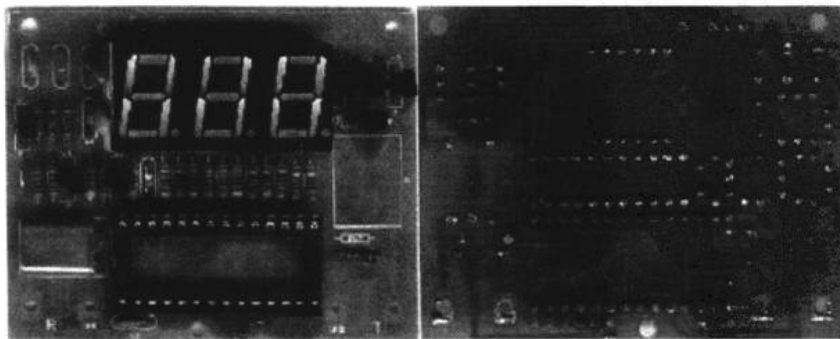


图 3-20 好看的例子——超声测距的印刷电路板

## 3.2 为测谎仪制作一个直流稳压电源

变压器 电源的整流、滤波 完成测谎仪的电源设计 稳压

通过上一节的制作实例，我们初步掌握了电子技术中关于制作的若干方法。现在，我们来看一看电子制作中一个十分重要环节——电源部分。这里所说的电源，不是像本书第1章开头所说的如电池这样的电源，而是通过变压器把市电电压降低，然后通过整流和滤波等过程得到比较稳定的电压并向电路输送的方法。在实际应用中，除了便携式的一些小型产品采用电池供电外，大多数的产品都采用直流稳压电源供电。

在这一节里，我们把目光放在电源电路所需要的元件和电路结构上，按照电流的方向把电源电路中的几个模块一一介绍，并最终为3.1节完成的测谎仪制作一个直流稳压电源。

### 3.2.1 变压器

变压器（transformer）我们并不陌生，图3-21所示为它的外观和电路标识。



图 3-21 变压器

变压器是将两组或两组以上的线圈绕制在同一个铁芯上制成的。如果绕制好的线圈中插入了铁氧体磁芯，便称为铁氧体磁芯变压器；如果插入的是铁芯，就是铁芯变压器。根据工作频率不同，变压器可分为低频变压器、中频变压器和高频变压器。低频变压器又分成电源变压器和音频变压器；中频变压器又分为单调谐式和双调谐式等；收音机中的天线线圈、振荡线圈，以及电视机天线阻抗变换器、行输出等脉冲变压器都属于高频变压器。

变压器的基本作用都是：传交流隔直流、电压变换、阻抗变换等。至于变压器的原理和内部结构恐怕没有必要在本书中描述了。下面我们就分别看看几种常见变压器在应用上的特点。

#### 1. 电源变压器

电源变压器（mains transformer）是最常见的一类变压器。电源变压器一般可分为降压变压器和升压变压器两种，这两种变压器都可以制成多绕组的形式。多绕组变压器就是在



铁芯（或其他芯材料）上绕制一个初级线圈和两个或两个以上的独立次级线圈。这种变压器一般比较难在电子市场上直接购买到，大都需要定制。多绕组变压器的一种可能电路标识如图 3-22 所示。

升、降压变压器除了有多绕组形式，还可分为单组电源型和双组电源型。双组电源型一般在放大器等需要正、负电源的电路中才会用到，我们将在第 5 章中介绍双组电源型变压器及电源电路设计。本章着重讲的是单组电源型变压器。单、双型在外观上表现为单电源的次级线圈有两根引线，而双电源的次级线圈有三根引线。在选购电源变压器时，除了需要知道电路所需要的电压外，还得确定变压器的功率。选用的功率小了，电路无法正常工作，而选用过大的功率则会增加功耗、重量、体积和成本。关于变压器的功率计算，可以参考公式  $P = IU$ ，即在电路工作时测量电源输入端的总电流，然后乘以额定电压即可。常用的电源变压器的规格、单价和功率如表 3-1 所示，在选用时可以进行参考。

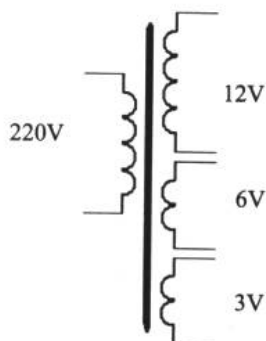


图 3-22 多绕组变压器

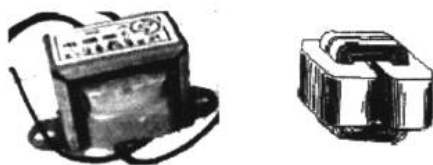
表 3-1 常用电源变压器的规格、单价和功率

规格 \ 功率		2W	3W	5W	6W	8W	10W	12W	15W	20W	25W	35W	40W	35W
规格	单价													
1.5V	单组	2.00	3.00											
1.5V	双组	2.00	3.00											
3V	单组	2.00	3.00											
3V	双组	2.00	3.00											
4.5V	单组	2.00	3.00											
4.5V	双组	2.00	3.00											
6V	单组	2.00	4.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
6V	双组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
9V	单组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
9V	双组	4.40	6.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
12V	单组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
12V	双组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	25.00
15V	单组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	30.00
15V	双组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	30.00
18V	单组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	30.00
18V	双组	4.40	5.00	6.00	6.50	7.20	8.00	9.20	14.00	14.00	19.00	19.00	25.00	30.00

电源变压器有普通立式型和环形两种。当所需功率在 50W 以上时可考虑使用环形变压器，环形变压器效率较高。两种变压器的外观如图 3-23 所示。

在连接电源变压器前，一定要注意初级和次级之分。一旦反接，轻则烧毁电源保险，重则会使变压器线圈烧毁。一般电源变压器在初级上都会标注有“220V”字样，如果没有标注可以按照下面的方法进行分辨：用万用表的电感测量档，测量线圈的电感量。电感大的为初级，应当接入市电；电感小的为次级，是输出端（相对降压变压器而言）。一般变

压器的初级引线为红色，并且较粗，这也是判断初、次级的方法。



立式变压器

环形变压器

图 3-23 两种变压器的外型

总之，对初级和次级没有十分的把握时，不应该将其接入电路中。

## 2. 音频变压器

音频变压器 (audioformer) 是工作于音频频率范围内的变压器。推挽功率放大器中的输入变压器和输出变压器都属于音频变压器 (关于功率放大的概念将在第 5 章介绍)，如图 3-24 所示。

音频变压器的用途之一是阻抗匹配。如图 3-25 所示，输出变压器把扬声器的  $8\Omega$  低阻变换为数百欧的高阻，与放大器 (第 4 章将会谈到) 的输出阻抗相匹配，使得放大器输出的音频功率最大而失真最小。

音频变压器的用途之二就是信号传输与分配。在图 3-24 中的输入变压器部分，电压从初级传输分配给了两个三极管，使两个三极管轮流分别放大正、负半周信号 (假设给其中一个三极管的信号进行了倒相)，然后再由输出变压器将输出信号合成，从而完成音频信号的推挽放大。

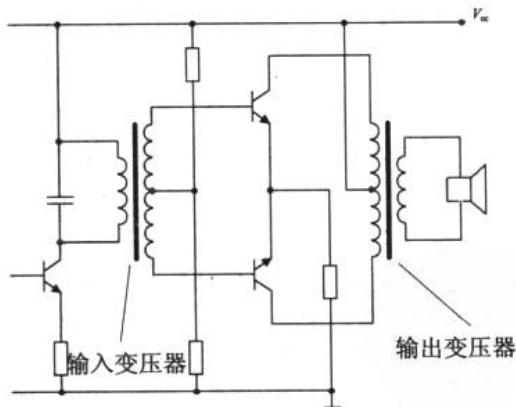


图 3-24 音频变压器的位置

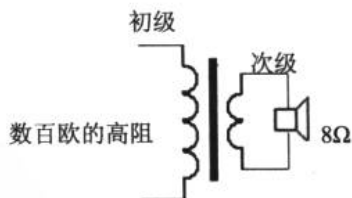


图 3-25 阻抗匹配

## 3. 中频变压器

中频变压器 (intermediate frequency transformer) 也称为中周，在超外差式收音机和电视机的中频放大电路中常常使用到。中频变压器的特点之一是拥有可以调节的磁心，以便微调电感量。图 3-26 所示为常见的中周外观。

中频变压器具有选频与耦合的作用。图 3-27 所示为超外差式收音机中放 (中频放大)



部分电路。假设中频变压器 T1、T2 的初级线圈分别与电容 C1、C2 谐振于 465kHz，关于这点我们在 2.3.2 节里有过类似的说明。因此，只有 465kHz 的中频信号得到了放大，起到了选频的作用。中频变压器还具有耦合作用，一中放输出信号通过 T1 耦合到二中放，二中放输出信号再通过 T2 耦合到检波电路中。



图 3-26 中频变压器（中周）及其电路标识

#### 4. 高频变压器

高频变压器（high frequency transformer）通常是指工作于射频（RF，Radio Frequency）范围的变压器。我们在 2.3.4 节里看到的收音机磁性天线就是一个高频变压器。在图 3-28 中，高频变压器的初级线圈与可变电容 C 组成选频回路，选出的电台信号通过初、次级之间的耦合传输到高频（高频放大）或变频电路。

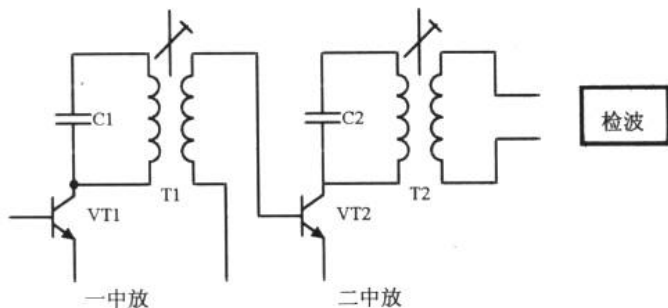


图 3-27 中频变压器的选频与耦合作用

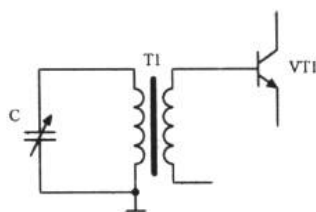


图 3-28 收音机中的高频变压器

关于变压器我们就谈到这里。其实在实际的电子制作中，最常用也最容易买到的是电源变压器。如果必须要使用非特定参数的变压器，可能大部分是需要自制的。比如在 2.3.4 节里，我们需要图 3-28 中的高频变压器作为收音机的接收天线，这就需要根据说明来自己绕制，如图 3-29 所示。这也是需要一定的技巧的。关于如何绕制线圈不是本书的重点。

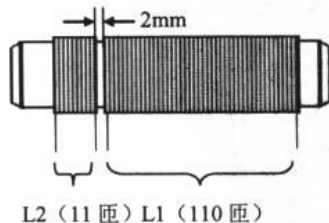


图 3-29 三管直放式收音机的高频变压器

制作说明：磁性天线的磁棒尺寸为 55mm×12.5mm×4.5mm，线圈的匝数如图 3-29 所示。线圈为两组，全部采用直径为 0.13mm 的漆包线绕制，两组线圈的间距为 2mm。如果使用圆型磁棒需要适当调整线圈的匝数，满足收音机的工作频率范围。



### 3.2.2 电源的整流、滤波

通过中学的学习,我们知道市电是 50Hz, 220V 的交流电,其波形是正弦波。变压器的作用就是把 220V 的交流电降至我们所需要的电压。在我们的测谎仪电路里,需要 3V 的电压,于是我们选用 3V 的单组电源型变压器。通过变压器变压后输出的仍是交流电,其波形依然是正弦波,如图 3-30 所示。而我们的电路需要的是直流电,那么通过怎样的电路才能把交流变成直流呢?这个问题就是这一小节要研究的问题。

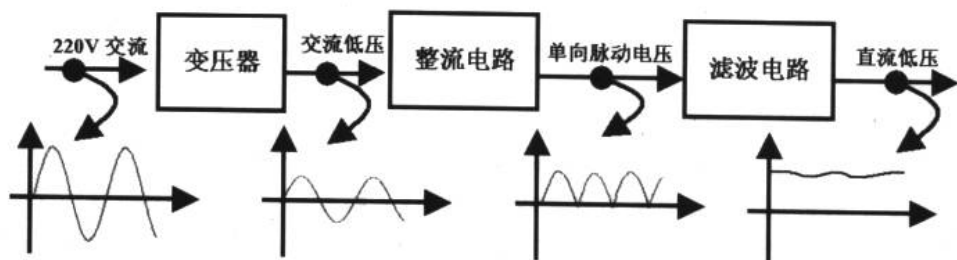


图 3-30 “电”的流向

#### 1. 整流电路

整流有 3 种形式：半波整流、全波整流和桥式整流。

##### (1) 半波整流

我们在第 1 章的例 1.3.2 中用 Multisim2001 仿真的就是一种整流电路,它叫做半波整流 (half wave rectification), 其电路结构和输入输出波形如图 3-31 所示。

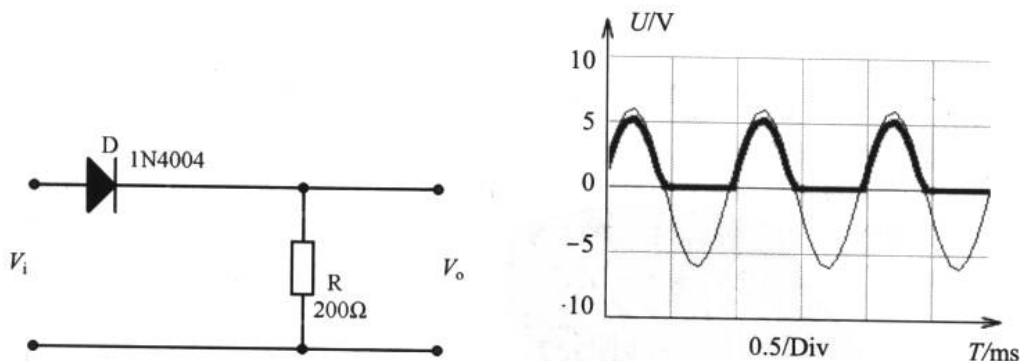


图 3-31 半波整流电路及输入输出波形

在变压器次级电压为正的半个周期内,二极管正向偏置导通。电流经过二极管 D 流向负载电阻 R, 在 R 上得到一个极性为上正下负的电压。而当次级电压为负半周时,二极管 D 反向偏置, 电流基本为 0, 所以在负载电阻 R 两端的电压为 0, 于是出现了“半个波”的输出效果。这种只在交流电电压的半个周期内才有电压输出的电路称为“半波整流”。这种整流方式在电源要求极低的情况下才会使用, 比如在一些电气指示灯上, 就采用这种整



流方式。

## (2) 全波整流

**例 3.2.1** 在 Multisim2001 中连接图 3-32 所示的电路，观察输入输出波形，体会全波整流的

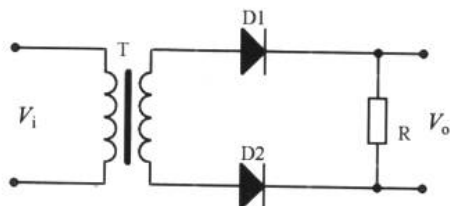
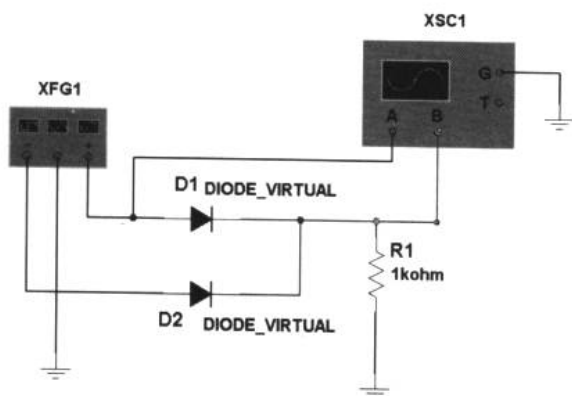
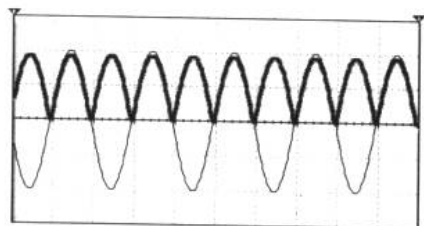


图 3-32 全波整流

我们在 Multisim2001 中连接如图 3-33 (a) 所示的电路，利用函数信号发生器的+和-输出作为变压器次级向全波整流电路提供电源。仿真得到图 3-33 (b) 所示的结果，这一结果与半波整流不同的是两个二极管把输入信号的正、负周期信号全部进行了整流，负半周期的信号“对折”到了正半周上。



(a) 电路连接图



(b) 实验结果

图 3-33 全波整流的电路连接图及输入输出波形图

## (3) 桥式整流

桥式整流是最常用的整流方式。在电源电路里，我们常能看到图 3-34 (a) 或图 3-34 (b) 所示的标识。图 3-34 (c) 为常见整流桥的外形在整流桥上，标有“~”标记的两个引脚为交流输入。

图 3-34 (a) 和图 3-34 (b) 这两种标识是等效的。桥式整流电路可以用 4 支二极管按一定规律连接而成，也可以选用全桥整流堆（也叫整流桥）。整流桥有 4 根引脚，其内部包含了 4 支二极管。使用前确定电路的最大电流值，然后购买额定电流比最大电流值稍大的整流桥即可。

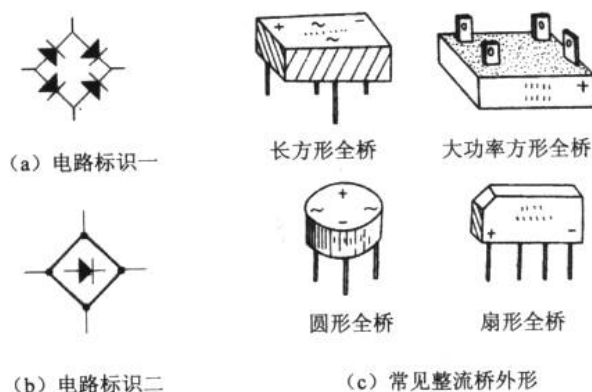


图 3-34 由二极管构成的整流桥及其外观

**例 3.2.2** 用 Multisim2001 连接图 3-35 所示的电路，观察桥式整流电路的输入输出波形，分析桥式整流的工作原理。

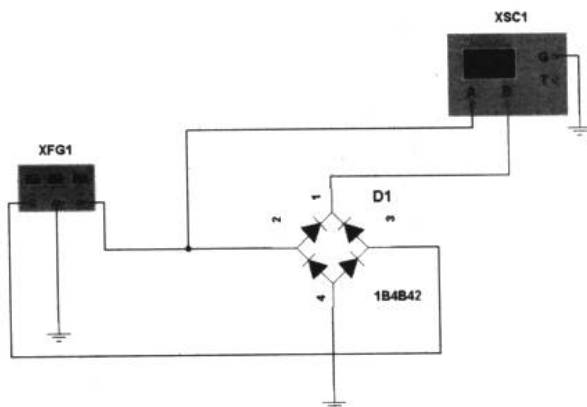


图 3-35 桥式整流电路

我们看到了和全波整流相似的结果，如图 3-36 所示。分析工作原理：当交流电正半周时，电流  $I$  经  $VD_2$ 、负载  $R$ 、 $VD_4$  形成回路，负载上电压为上正下负；当交流电负半周时，电流  $I$  经  $VD_3$ 、负载  $R$ 、 $VD_1$  形成回路，负载上电压仍为上正下负，这样便实现了全波流。图 3-37 所示说明了这一点。

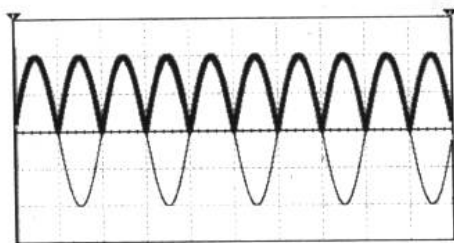


图 3-36 桥式整流的输入输出波形图

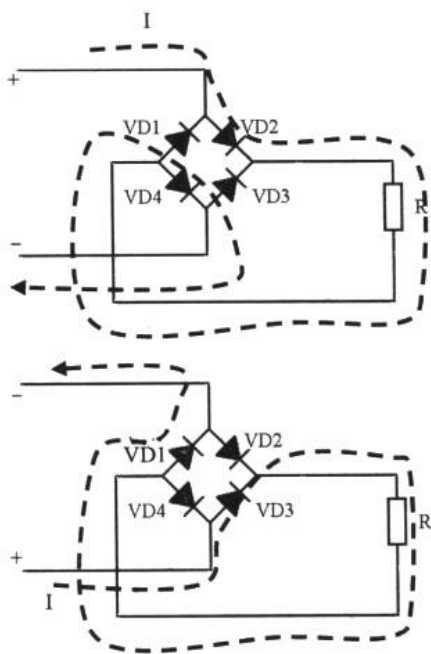


图 3-37 桥式整流的电流走向

## 2. 滤波电路

通过以上 3 种整流电路的介绍我们发现,无论哪一种整流,都无法完全把“波”的痕迹去除干净。就算是优秀的桥式整流,其输出仍然是一个直流脉动电压(既含有直流成分,也含有交流成分)。为了减少这种脉动成分,可以在整流后加上滤波电路(filter circuit)。所谓滤波(filtering)就是滤掉输出电压中的脉动成分,而尽量保留其中的直流成分。这里所说的滤波是一个狭隘的概念,只是针对电源电路中的“滤除交流杂波”而言。

如果读者还记得电容的最大特点,那么对于电源的滤波电路的分析就简单多了。

**例 3.2.3** 在 Multisim2001 中连接图 3-38 所示的电路,观察滤波电容的滤波效果。

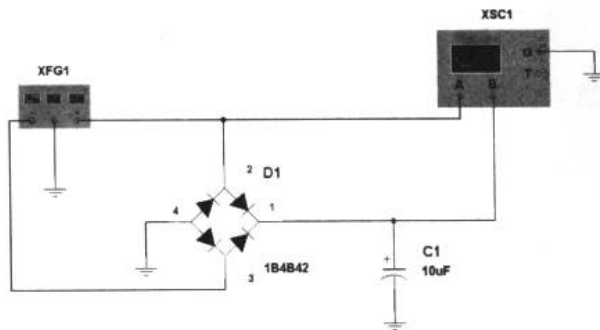


图 3-38 整流、滤波电路图

图 3-39 所示是这个实例的结果，输入的正弦交流信号通过整流和滤波后变成了直流信号。

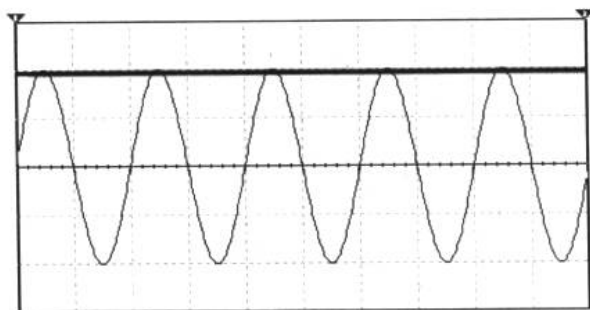


图 3-39 整流、滤波电路的输入输出波形

通过这两小节的学习，我们得出了一个简易的、原始的直流电源模型，如图 3-40 所示。

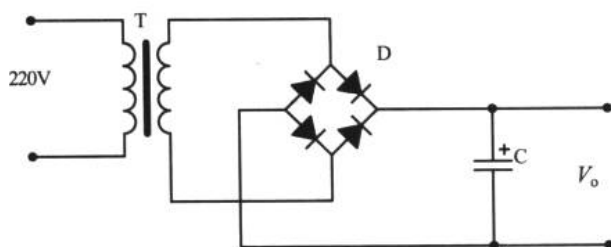


图 3-40 原始的直流电源模型

这个原始的模型足以应付一般的电子产品的供电需要了。在这个模型里，变压器的输出电压根据电路所需的输入电压来定值，整流桥的额定电流可以测量带载（接上负载）条件下干路中电流的最大值来确定，滤波电容我们选用的是电解电容，容量可以根据电路的功耗大致估计一下，简单的、功耗小的电路一般取  $47\mu\text{F} \sim 220\mu\text{F}$ ；功耗较大，或对电源质量要求较高的电路，例如音频功率放大器，应取  $1000\mu\text{F} \sim 4700\mu\text{F}$ ，甚至可以取到  $10000\mu\text{F}$  以上。电解电容的额定电压应高于变压器的输出电压值，比如变压器输出为 12V，则电解电容至少要取 16V 的（因为没有类似 13V、14V 这样的特异值）。

### 3.2.3 完成测谎仪的电源设计

#### 1. 确定变压器的输出电压

根据测谎仪电路中电源取值为 3V，确定变压器的输出电压值为 3V，采用单组电源型。

#### 2. 确定整流桥的额定电流值

由于电路功耗很低，电流很小，可选用 1A 的整流桥（似乎没有比 1A 更小的桥了）。值得一提的是，在选购整流桥时除了需要注意额定电流外，还需要考虑它的耐压值。整流桥的耐压值有 100V、400V、600V、800V 和 1000V 等几种，这里我们可取 100V 的。



### 3. 确定滤波电容的容量

电解电容常用的额定电压值有 6.3V、10V、16V、25V、50V、63V、100V、160V 和 250V 等规格。由于测谎仪电路电压比较低，因此选用 6.3V、10V 和 16V 的都可以，容量可以取 100 $\mu$ F 的。

### 4. 完成测谎仪的电源设计

笔者为测谎仪设计的一个简易的电源如图 3-41 所示。

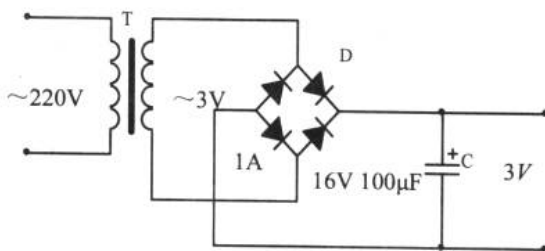


图 3-41 测谎仪电源

在电路设计时，应该把电源部分考虑进去，设计印刷电路板时同样如此。在制作产品时，一般都不直接把变压器安装在印刷电路板上（除非一些小功率的针式变压器），而是在机箱内部固定安装。所以，设计电路板时，只需要留下交流输入的过孔或焊盘即可。

## 3.2.4 稳压

为了使电源电路的介绍完整，我们在本章的结尾谈一谈稳压（voltage regulation）。

如果读者在阅读时很仔细，会感到奇怪为什么图 3-30 最后一个直流低压的输出波形出现了小幅度的波动，而其应该是直线的。这就是电压不稳造成的。

我们通过整流把交流电压变成了单方向的脉动电压，又用滤波电容尽可能地去掉脉动电压的交流成分。但是，滤波电路的输出电压和理想的直流电源还是有一定的差距。问题出在：其一，变压器的次级输出电压不稳定；其二，由于整流滤波电路存在内阻，当负载电流发生变化（比如把多媒体音箱的声音开大一些）时，整流滤波电路的内阻上的电压也发生变化，造成电路分压波动，从而导致了输出电压的不稳定。为了消除这些不良的影响，我们在对电源要求较高的电路里使用稳压电路。

稳压电路（voltage regulator circuit）是一个比较大的话题，恐怕在本书中不能铺开来讲。下面一起来分享几个典型的电路。

#### 1. 稳压管稳压电路一

图 3-42 所示为简单的并联稳压电路。稳压二极管 VD 上的电压即为输出电压，关于这一点的原因我们在 1.3.3 节的结尾部分就有过了解。这种简单并联稳压电路主要应用于输入电压变化不大、负载电流较小的场合。

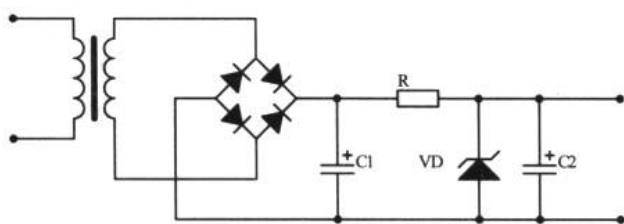


图 3-42 稳压管稳压电路一

## 2. 稳压管稳压电路二

图 3-43 所示为简单串联稳压电路。由于三极管 VT 的基极电压被稳压二极管 VD 所稳定，所以当输出电压发生变化时，三极管 VT 的  $U_{ce}$  也随之变化，从而调整了输出电压，以保持输出电压的基本稳定。这时三极管 VT 起到了调整电压的作用，所以也叫调整管。这种稳压电路的带载能力较强。

## 3. 稳压集成电路

这是我们第一次接触到集成电路的概念。

现代电子设备大都采用稳压集成电路进行稳压。稳压集成电路是一种将稳压电路中的各种元件（二极管、三极管、电阻等）集成于一个硅片上的集成电路。

稳压集成电路按端子多少可分为多端可调式、三端固定式和三端可调式等几种，其中三端式是最常用的。图 3-44 所示为三端式稳压集成电路的外观。

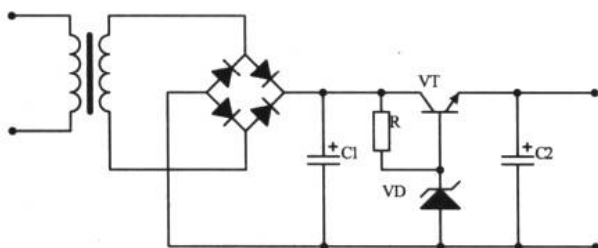


图 3-43 稳压管稳压电路二

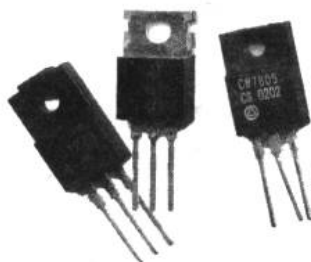


图 3-44 三端稳压集成电路外观

关于三端稳压集成电路的应用是很广泛的，下面来看看几种典型的应用电路。

### (1) 三端固定输出稳压集成电路

三端固定输出稳压集成电路也叫做三端稳压，这是一种串联调整式稳压器。它将全部电路集成在单块硅片上，整个集成块只有输入、输出和公共地线 3 个端子，使用时极为方便。典型产品有 78XX 正电压输出系列和 79XX 负电压输出系列。

78XX 和 79XX 系列三端稳压有额定电压为 5V、6V、8V、9V、10V、12V、15V、18V、20V 和 24V 共 10 种。对应的型号就是在 78 或 79 后边写上额定电压的值。比如额定电压为 8V 的型号为 7808、7908；额定电压为 15V 的为 7815、7915。这两个系列的稳压集成电路的最大输出电流为 1.5A，最大输入电压为 40V。





图 3-45 所示为三端稳压集成电路的管脚判别。其中,  $V_i$  为输入端,  $V_o$  为输出端, GND 为公共地线端。

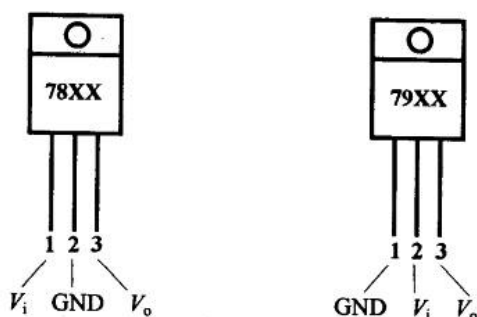


图 3-45 三端稳压集成电路的管脚

那么三端稳压集成电路是如何体现稳压效果的呢? 在图 3-46 所示的电路里, 如果输入 7808 的电压低于 8V, 那么输出的电压也会低于 8V, 这时起不到稳压的作用。当输入 7808 的电压高于 8V 时 (但不应超过 40V), 则它的输出会严格控制在 8V, 这时起到了稳压的作用。所以, 有时在电源电路里, 使用三端稳压来降低电压。图 3-47 中  $V_i$  大于 18V, 通过两个三端稳压的降压, 使得  $V_o=5V$ 。关于 79XX 系列的应用我们会在第 5 章中看到。

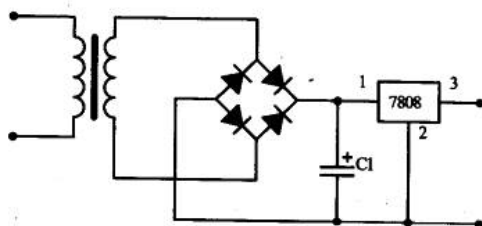


图 3-46 三端稳压集成电路的基本应用电路

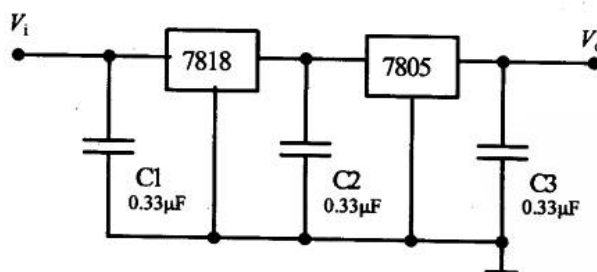


图 3-47 利用三端稳压降压

## (2) 三端可调输出稳压集成电路

三端可调稳压集成电路的输出电压可调, 稳压精度高, 其输出电压一般为 1.25V~35V 或 -1.25V~-35V 连续可调。典型的器件为 LM317 和 LM337 等, 其中, LM317 就好像 78XX 系列, 为正电压可调输出的; 而 LM337 为负电压可调输出的。正是由于它具有输出电压可调特性, 被应用于需要电压调整的电路里, 比如小功率直流电机调速器里。



在选用器件时，我们还需要注意不同型号的管子其输出电流不同。国标中的额定输出电流分为 0.1A、0.5A、1A、1.5A 和 10A 等。例如，LM317L 输出电压为 1.2V~37V，输出电流为 0.1A；而 LM317 输出电压为 1.2V~37V，输出电流为 1.5A；LM138 输出电压 1.2V~32V，输出电流为 5A；LM196 输出电压为 1.25V~15V，输出电流 10A。所以，我们要针对电路的干路最大电流和额定电压来选择器件（器件的参数可以查询手册或上网查询）。

图 3-48 所示为三端可调稳压集成电路的一般应用电路。通过调节电位器 RP，就可以使电路的输出电压连续变化。

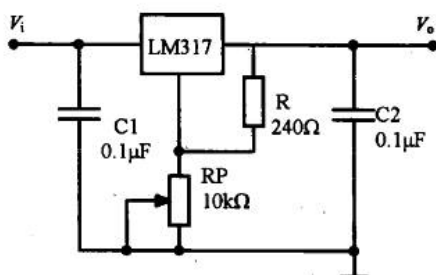


图 3-48 三端可调稳压集成电路的一般应用电路

除了上述几种三端稳压器件外，世界上还有许多著名的集成电路生产厂商推出了多种基准/稳压电路、DC/DC 电路、线性稳压电路、AC/DC 变换电路等专用集成电路。在电源设计时，需广泛收集资料，根据实际情况设计合理的电源电路。

#### 4. 开关电源

在前面介绍的电源具有电路结构简单的特点，但是这种电源电路的效率较低。如果使用了三端稳压集成电路，许多电能将白白消耗在它的发热上，因为现在许多电子产品中都采用开关电源，例如彩电、VCD 机和 DVD 机等。开关电源体积小，重量轻且效率高。图 3-49 所示的开关电源图是一个简易的开关型直流稳压电源电路图。

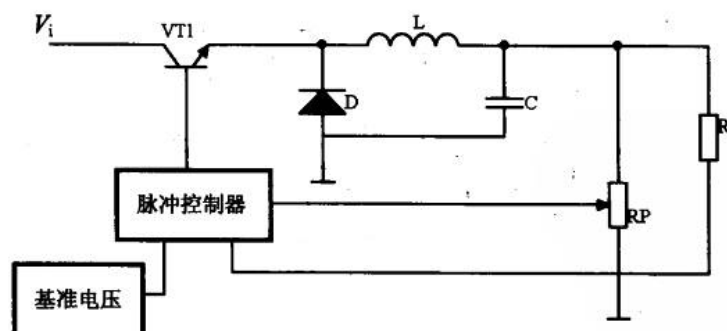
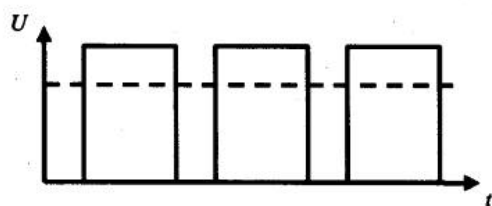


图 3-49 开关型直流稳压电源电路图

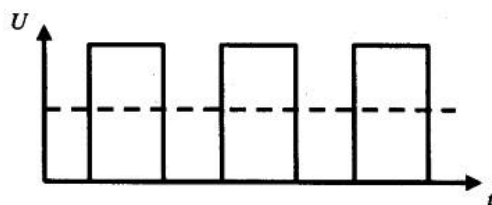
控制电路控制开关管 VT1 把输入的直流电压变成脉冲电压，然后通过电感 L 和电容 C 滤波，形成直流输出电压。脉冲控制器根据输出电压确定输出脉冲的宽度或频率，从而实现了控制开关管 VT1 发射极输出电压的脉冲宽度或频率。一旦脉冲或频率发生变化，脉冲电压输出的有效值就会变化，从而控制了经过电感 L 和电容 C 输出电压的幅度。



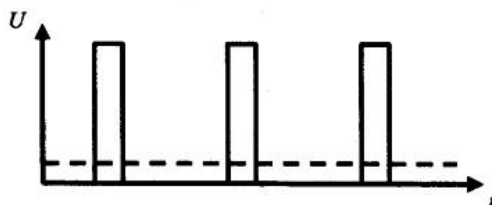
图 3-50 所示为开关电源输出的电压示意图。当电路中的开关以一定的导通和截止的时间比进行动作时，其输出的直流平均电压与导通和截止的时间有关。开关电源电路中的开关实际就是三极管 VT1，由于开关电路的输出是矩形波，要使其变成直流必须使用电感或电容。如果将开关电源的动作频率大大提高，便可使用小的电感和电容得到较好的效果。实际开关电源使用的形状频率约为 20kHz，这个频率同 50Hz 的交流频率相比就高得多，因而用于平滑滤波的电感和电容就不需要很大。



(a) 开关电源接通时间长，间隔短



(b) 开关电源接通时间与间隔大体相当



(c) 开关电源接通时间短，间隔长

图 3-50 开关型直流稳压电源电路图的输出电压（虚线代表平均的直流输出电压）

### 5. 改进的电源电路

在本章的结尾，我们把测谎仪的电源部分再作改进，如图 3-51 所示。加入的电容 C2 和 C3 是为了改善纹波特性和负载的瞬态响应。另外，SEMTECH 公司的 EZ5ZL-3.0 可将 7805 输出的 5V 降压成 3.0V。希望读者可以找到更多更好的方案来改进这个蹩足的电路。

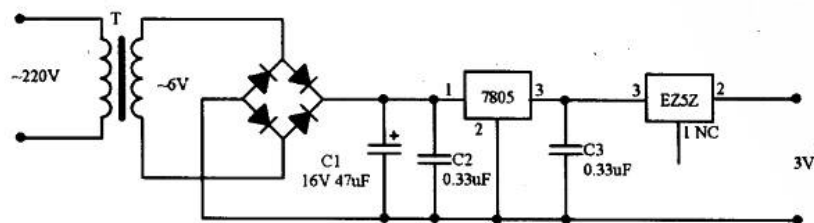


图 3-51 改进的测谎仪电源电路

## 第4章 从扩音机中学放大器

不知道读者注意到没有，前3章我们的话题里都离不开一个元件——三极管，三极管可以说是模拟电子技术中的核心器件。以后可能我们的电子制作会使用大量的集成电路，二极管和三极管的直接使用也会逐渐减少。但是，把握三极管的基本概念是模拟电子技术的关键性问题。

前面还断断续续地谈到三极管和它的显著特性——电流放大作用。在这一章里，我们将系统地学习由三极管构成的各种电路模型。

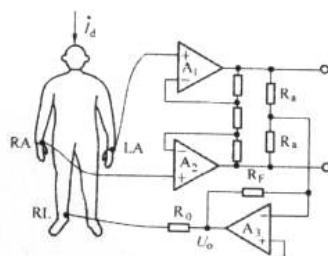
## 4.1 放大器的踪影

放大的必要 放大器的功能 放大器的分类 扩音器电路图

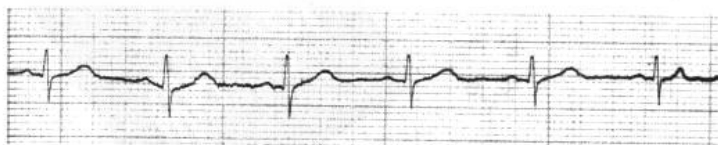
### 4.1.1 放大的必要

在生物医学工程等工程领域里，常常会使用放大器。在做心电图（ECG，electrocardiogram）时，医生会把电极放置在身体的不同位置，以采集不同部位的心电信号。如图 4-1（a）所示为心电测量的一种导联形式。

采集出来的心电信号不但频率低，幅度也很低（通常只有几十毫伏）。所以我们可以用一个叫“仪表放大器”的运算放大器来对心电信号进行放大（运算放大器将在第7章介绍），从放大器输出的信号就可以在示波器上显示了。这个输出信号的波形如图4-1（b）所示。



(a) 心电信号放大器



(b) 心电图

图 4-1 心电信号的采集及心电图



另外一个例子，空调之所以能对室内温度进行控制，是由于温度传感器将温度转换成电信号，然后由放大器把这个信号放大，输入 A/D 器件（模/数转换元件，在最后一章会谈到）由 A/D 完成模/数转换后送入单片机，单片机则根据参考温度控制压缩机的工作，进而实现对温度的控制。图 4-2 所示为某品牌空调机温度控制电路的前置放大器部分。

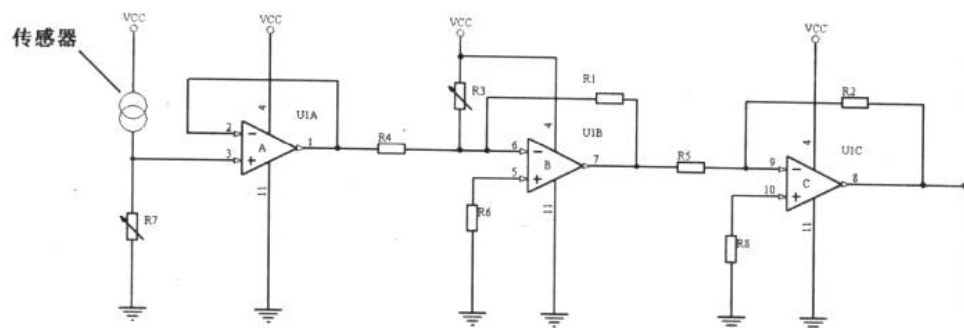


图 4-2 空调机温度控制电路放大器部分

### 4.1.2 放大器的功能

放大器（amplifier）的作用就是在电子设备中对各种信号进行放大。

例如，收录机里的磁头把磁带中的磁信号转换成电信号。这些由磁头输出的电信号十分微弱，无法直接驱动扬声器工作，应该使用放大电路对微小信号进行放大到足够的幅度后驱动负载。

图 4-3 所示为一台功放机的基本架构图，在下一章里，我们将学习自己制作一台基于这幅结构框图的多媒体音箱。

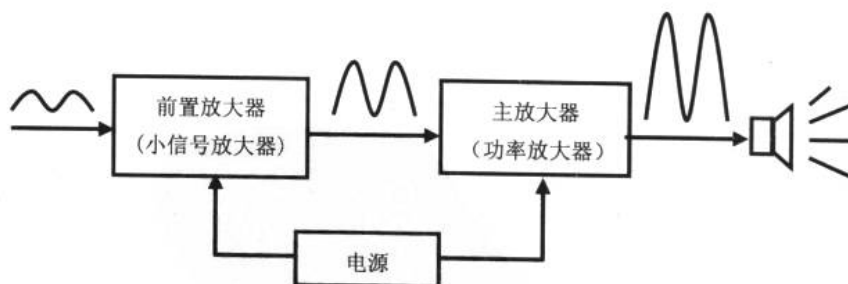


图 4-3 功放电路基本架构

### 4.1.3 放大器的分类

#### 1. 按频率分类

放大器根据所处理的信号频率分成 4 类，如表 4-1 所示。

表 4-1 放大器的分类

频率范围	种 类
20Hz 以下	直流放大器
20Hz~100kHz	低频放大器
100kHz~300MHz	高频放大器
300MHz 以上	超高频放大器

三极管所构成的放大电路具有一定的频率范围,这是由三极管的频率特性参数决定的。所以,不同的三极管及其外围元件组成的放大器有不同的频率响应范围。我们从下面一个例子来说明这一点。

**例 4.1.1** 在 Multisim2001 中连接如图 4-4 所示的电路,信号发生器的电压幅度设定为 200mV,频率  $f$  分别取 40Hz、400Hz、2kHz 和 1MHz,观察输入输出波形。

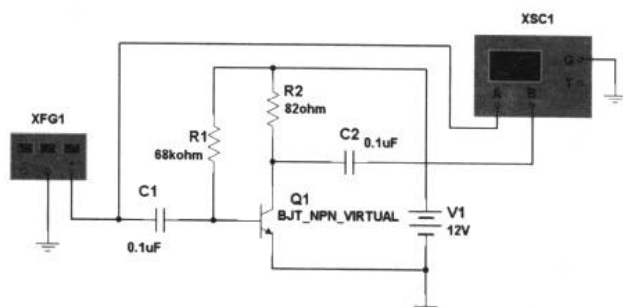


图 4-4 放大器频率范围研究电路图

在示波器观察窗口中,我们得到如图 4-5 所示的实验结果。结果表明,输入信号的频率过低或过高,放大器都不能正常工作。也就是说,某一个放大器只会对一个频率段内的信号“敏感”,对这个范围外的信号不是不能放大就是出现严重的失真。

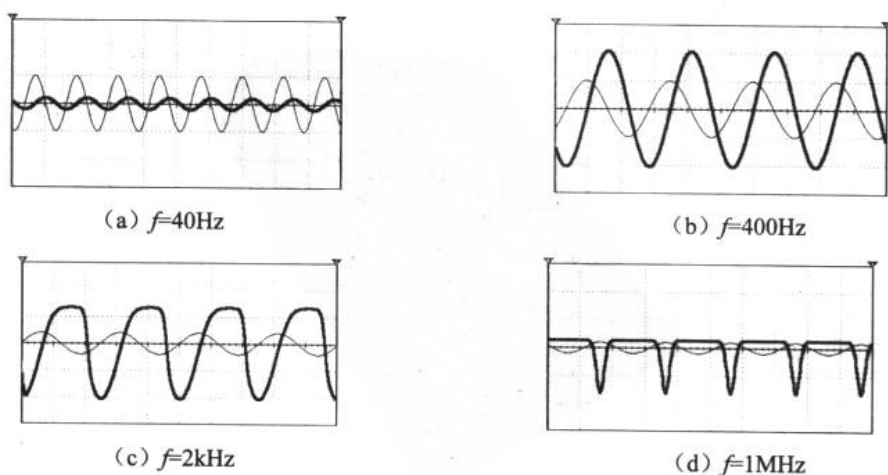


图 4-5 放大器频率范围研究实验结果



## 2. 按功率分类

放大器的输出功率在 10mW 以下的被称为小信号放大器, 大于 10mW 的被称为功率放大器。

## 3. 放大器的阻抗匹配 (impedance matching)

放大器的阻抗匹配与 3.2.1 节中谈到的变压器的阻抗匹配略有不同, 下面通过图 4-6 所示来说明放大器阻抗匹配的原理。

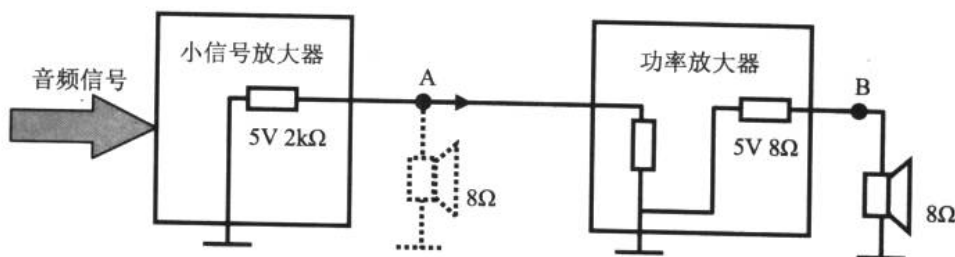


图 4-6 阻抗匹配说明图

通常小信号放大器都是电压放大器, 这种放大器输出阻抗比较高。如果我们把扬声器接在图 4-6 中的 A 点上, 而不使用功率放大, 也就是说, 我们想通过一级小信号放大器来推动扬声器工作。这种办法是否行得通, 可以利用简单的公式分析一下扬声器上获得的电压。

假设我们使用的扬声器阻抗为  $8\Omega$ 。这时, 小信号放大器的内阻和扬声器的电阻是串联关系, 于是扬声器分得的电压为:

$$5V \times \frac{8\Omega}{2k\Omega + 8\Omega} = 0.02V$$

扬声器在这个电压的驱动下发出的声音恐怕谁也听不到。可见只通过小信号放大器驱动扬声器是不可取的。

如果我们把扬声器接到图 4-6 中的 B 点上, 这时, 功率放大器起到了电流放大的作用, 其输出阻抗很低, 与扬声器的阻抗相匹配。我们再计算扬声器分得的电压和功率时, 就会得到一个相对较满意的结果了。

放大器的阻抗匹配是指放大器的输出阻抗和下一级放大器或负载的输入阻抗相等或相近。如果相差较大, 就是不匹配状态。只有匹配状态才能实现比较理想的功率传递。

### 4.1.4 扩音器电路图

本章的任务就是在分析图 4-7 所示的扩音器电路的基础上, 完成在面包板上的实验, 并自制印制电路板完成整机的调试。



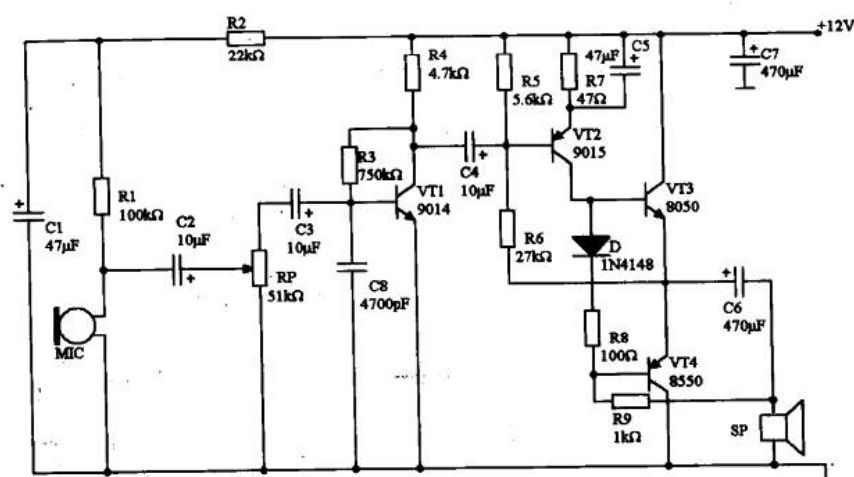


图 4-7 扩音器电路

## 4.2 共射极放大器

透彻分析放大器的静态工作点 放大器频率特性 研究放大器的方法 反馈 多级放大

放大器根据电路交流参考点的位置不同，可分为共发射极、共集电极和共基极 3 种形式，如图 4-8 所示。

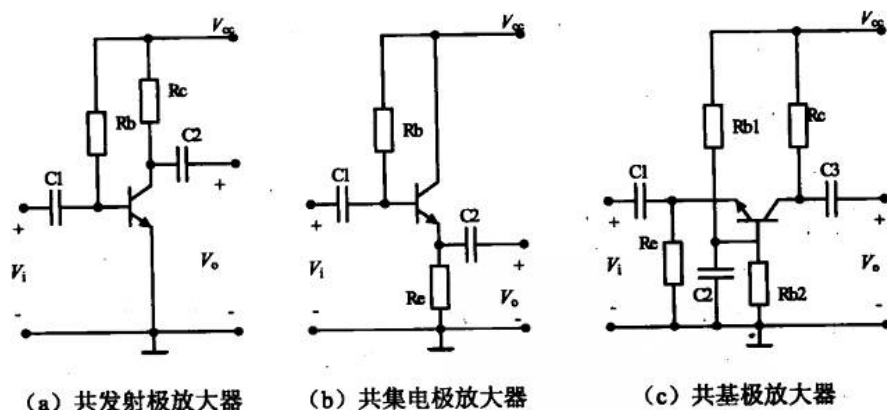


图 4-8 3 种形式的放大器

这 3 种电路形式的区分原则是：如果以发射极为交流电路参考点，叫共发射极放大器（如图 4-8 (a) 所示）；如果以集电极为交流电路参考点，叫共集电极放大器（如图 4-8 (b) 所示）；如果以基极为交流电路参考点，叫共基极放大器（如图 4-8 (c) 所示）。

在电子设备中，共发射极放大电路（也叫共射极放大电路）的使用最为频繁，所以在本节中，我们以共射极放大电路为例，了解一些有关放大器的基础知识。对放大器特性参数的深入分析和计算是大有文章的，我们只有完成电路分析课程后，才能进行这方面的



研究。

### 4.2.1 透彻分析放大器的静态工作点

什么是放大器的静态工作点？我们从图 4-9 所示电路着手对静态工作点进行探讨。

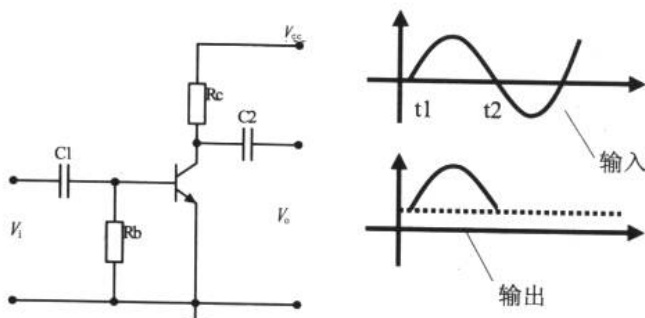


图 4-9 零偏置放大电路

我们去掉了共射极放大电路的三极管基极上的偏置电阻  $R_b$ ，这样，三极管处于零偏置的状态。我们输入一个完整的正弦波信号，在  $t_1 \sim t_2$  这段时间内，信号为正半周期，于是在基极出现偏置电流。这时，三极管导通。而在  $t_2$  之后的负半周内，三极管因得不到偏置电流而不能导通，于是丢失了对信号负半周期的放大，产生了严重的失真。

由此可见，要想把全时间周期内的信号都进行放大，必须把输入信号“抬升”到横轴的上方，所以我们引入了偏置电阻  $R_b$ ，如图 4-10 所示。

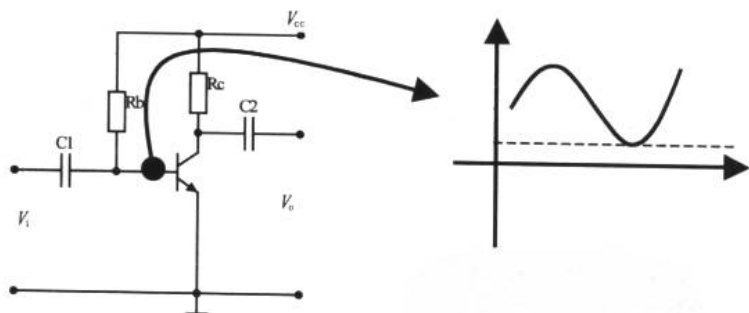


图 4-10 静态偏置电路

由于电流通过  $R_b$  加到了三极管的基极，使得三极管在还没有输入信号时就获得了一个偏置电压，这时的三极管工作在一个良好的、准备放大的状态。此时电阻  $R_b$  阻值、三极管 b、c、e 三极的电压值等电路参数就是这个电路的静态工作点 (quiescent operating point)。

当我们输入信号时，信号就会在静态工作点的基础上“变化”。所以，三极管就可以对整个时间周期内的信号进行放大了。但有一点需要注意：如果偏置电压过低，会导致原负半周信号的电压幅度值不足以使三极管导通；如果偏置电压过高，会导致原正半周信号的电压幅度值超过了偏置电压的最大值使输出信号出现失真。另一方面，三极管集电极和

发射极间的静态值也要合适, 否则也会使输出信号失真。一般通过调整  $R_c$  的值来保持输出信号与输入信号的对应性。

## 4.2.2 放大器频率特性

这并不是什么新鲜的话题了。由于三极管自身的频率特性和放大器中其他元件的参数选择决定了放大器的频率“敏感性”。在这一小节里, 我们来看看到底是什么元件在影响放大器的频率响应特性 (frequency response, 简称频响)。

### 1. 影响放大器频响的元件

在图 4-11 所示的电路里, 话筒把声音信号转换成电信号, 这是通过电阻  $R_1$  向 MIC 提供电压实现的。信号从电容  $C_1$  耦合到放大器中, 然后通过电容  $C_2$  耦合至下一级, 所以, 电容  $C_1$  和  $C_2$  是信号进出放大器的门户。

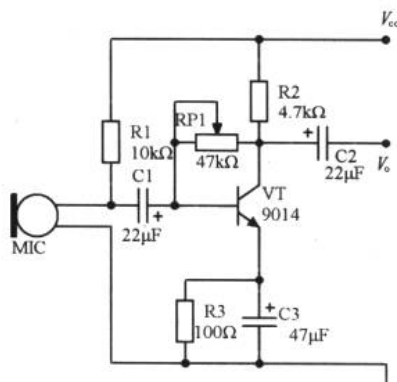


图 4-11 影响放大器频响特性的元件

在这个例子里, 采集的声音信号频率较低, 应该选择容量较大的电容 ( $C_1=C_2=22\mu\text{F}$ )。因为电容的容量越小, 对低频信号的阻抗越大。这一点与电容的“隔直通交”观点是一致的。

而发射极旁路电容  $C_3$  越大, 对低频信号越有好处。如果这个电容较小, 会使放大器的低频放大效果大打折扣。

另外, 在放大器核心器件——三极管的选择上也应该注意, 要根据放大器工作的频段范围进行选择。不同的三极管有不同的频率特性, 这需要查阅器件手册或上网查询来确定。

### 2. 幅频特性 (放大器的幅度-频率特性)

我们在 4.1.3 节刚刚谈过, 给一个确定的放大器注入不同频率的信号会有不同的输出效果。换句话说, 输入信号在一定的频率范围之内放大器才能正常工作。

幅频特性 (amplitude-frequency characteristic) 中的“幅”是指放大器的放大倍数; “频”是输入信号的频率。幅频特性就是指放大倍数随输入信号频率的变化关系。

针对某一个放大器, 我们画出它的幅频特性曲线如图 4-12 所示。

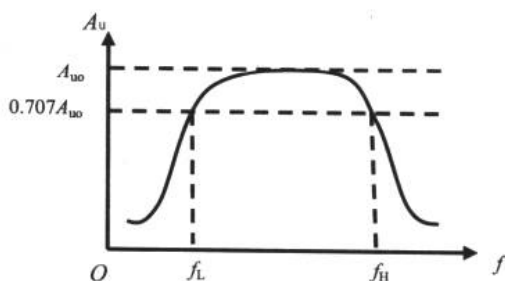


图 4-12 放大器的幅频特性曲线

在幅频特性曲线里，横轴是输入信号的频率，纵轴是放大倍数  $A_u$ 。曲线中间一段比较平坦的区域是放大器进行正常放大的区域。该区域中，放大器的放大倍数基本保持不变且值最大。如果输入信号高于或低于放大器正常放大的频率时，放大倍数就要随频率的升高或降低而减小。

在工程上定义当放大倍数数值下降到最大放大倍数  $A_{u0}$  的 0.707 时所对应的频率为上限频率  $f_H$  或下限频率  $f_L$ ，并把  $f_L \sim f_H$  之间的频率范围叫做该放大器的通频带，用  $B$  来表示：

$$B = f_H - f_L \quad (4-1)$$

### 4.2.3 研究放大器的方法

在这一小节里，我们通过几个实例来学习使用 Multisim2001 在放大器研究过程的若干方法。

**例 4.2.1** 在 Multisim2001 中连接如图 4-13 所示的电路，研究单管放大器的静态工作点和对电路进行直流扫描分析。

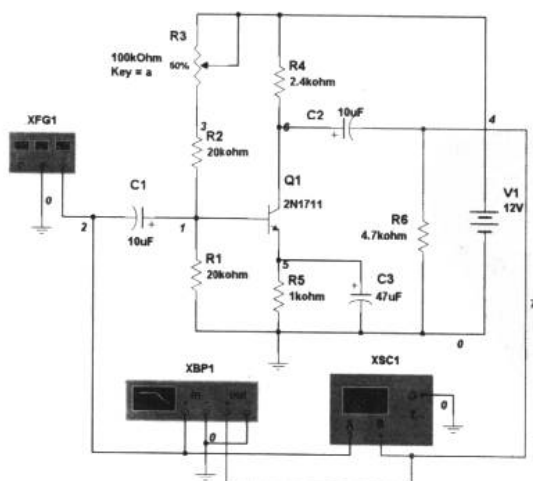


图 4-13 单管放大器的研究电路图

实验中, 设置函数信号发生器的频率为 2kHz, 幅度为 10mV。我们还使用了一种新的虚拟仪器——波特计 XBP1 (或称扫频仪), 是一种常用于测量电路幅度-频率特性的仪器。

## 1. 静态工作点分析

调整电位器 R3 大致在 50%, 使放大器工作在良好的放大工作区, 我们得到如图 4-14 所示的波形。

单击 Options→Preferences→Show node names 命令, 将会出现电路的节点编号。然后单击 Simulate→Analysis→DC operating Point...→Output variables 以选择需要仿真的变量。在这里, 我们选择 Variables in circuit 列表框下的 1~7 和 VV1#branch 节点, 单击 Plot during simulation 按钮, 将它们添加至 Selected variables for 列表框中, 以仿真所有的变量, 如图 4-15 所示。然后单击 Simulate 按钮, 系统就会显示出运行的结果, 如图 4-16 所示。

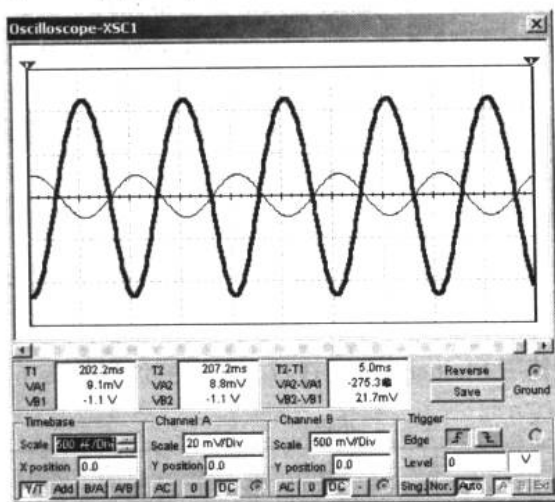


图 4-14 放大器的输入输出波形

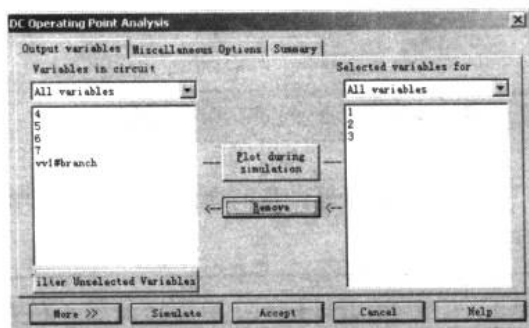



图 4-15 DC Operating Point Analysis 对话框

由图 4-16 的分析结果, 我们很清楚地看到放大器各个节点的静态工作点电压。

## 2. 直流扫描分析

直流扫描分析 (DC Sweep Analysis) 是利用一个或两个直流电源分析电路中某一节点上的直流工作点的数值变化的情况。单击 Simulate→Analysis→DC Sweep 命令, 将弹出 DC Sweep Analysis 对话框, 进入直流扫描分析状态。在对话框中, Output variables 选项卡的设置与分析静态工作点时相同, 我们选择节点 1 作为研究的变量。在 Analysis Parameters 选项卡中有 Source1 和 Source2 两个选项区域, 用于选择所需要扫描的直流电源。

在 Source1 选项区域中, Start value 文本框用于设置开始扫描的数值, Stop value 文本框用于设置结束扫描的数值, Increase 文本框用于设置扫描的增量值。本例中, 设置如图 4-17 所示。单击 Simulate 按钮, 得到如图 4-18 所示的分析结果。在分析曲线图中, 我们可以通过单击  图标显示或隐藏指针, 拖动指针可以测出节点 1 的电位随电源电压变化的情况。

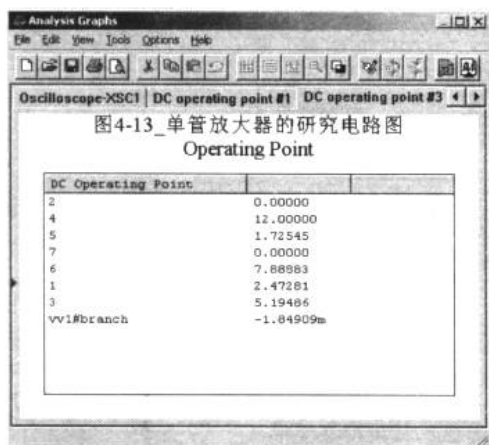


图 4-16 运行结果

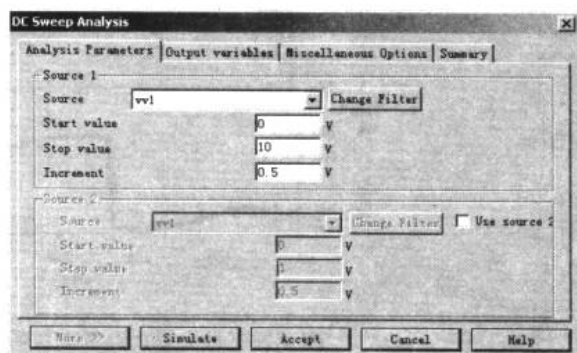


图 4-17 设置 DC Sweep Analysis 对话框

### 3. 频率特性分析

频率特性是放大器的一个重要特性。在应用中,应根据电路所要放大的信号的频率范围进行电路的设计。设计好的放大器,我们可以在 Multisim2001 中研究其幅频特性。

单击 Simulate→Analysis→AC Analysis...命令,弹出对话框,进入交流分析的状态。在 AC Analysis 对话框中,Output variables 选项卡的设置方法与前面相同,我们选择节点 7 作为研究对象。

在 Frequency Parameters 选项卡中,我们可以设置分析的起始频率 Start frequency、终点频率 Stop frequency、扫描形式 Sweep type、分析采样点 Number of points per decade 和纵向坐标 Vertical Scale。具体设置如图 4-19 所示。

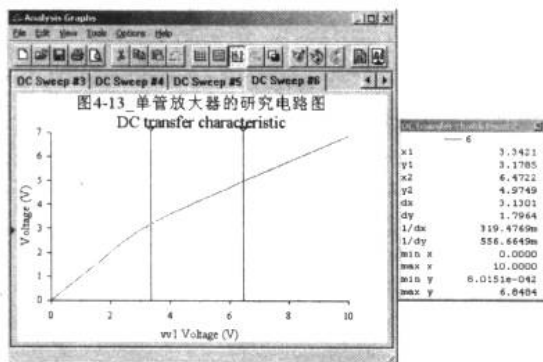


图 4-18 放大器电路节点 2 的直流扫描分析结果

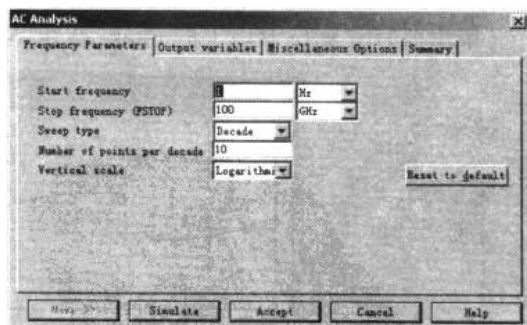


图 4-19 设置 AC Sweep Analysis 对话框

单击 Simulate 按钮,即可在分析波形图中获得节点 7 的频率特性波形。分析结果显示了幅频特性和相频特性的波形,如图 4-20 所示。

请注意,以上的节点号与在 multisim2001 中连接器件的顺序有关,在使用分析功能时,应根据实际的节点号来选择分析节点。

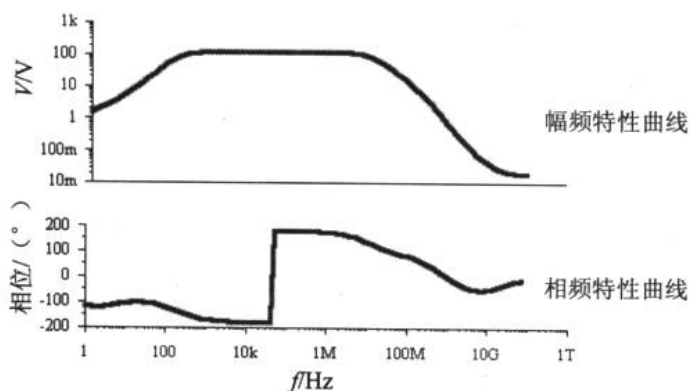


图 4-20 放大器电路节点 7 的幅频特性和相频特性波形

除了用 AC Analysis 的方法外, 我们还可以使用波特计, 它同样能实现对电路幅频特性和相频特性的观察。双击图 4-13 中的波特计, 弹出波特计窗口, 如图 4-21 所示。注意需要设置合适的水平和垂直坐标才能得到图 4-21 般的特性曲线。滑动标尺可以读出放大器在不同频率下的放大幅度。

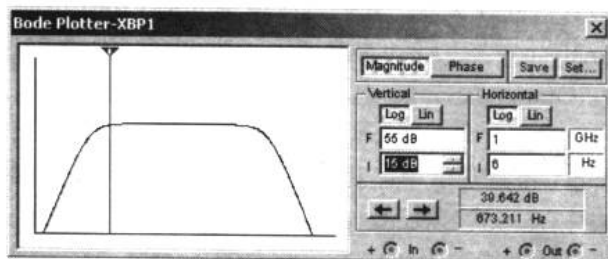


图 4-21 波特计显示的幅频特性图

单击波特计观察窗口上的 Phase 按钮, 我们就可以得到相频特性曲线, 如图 4-22 所示。

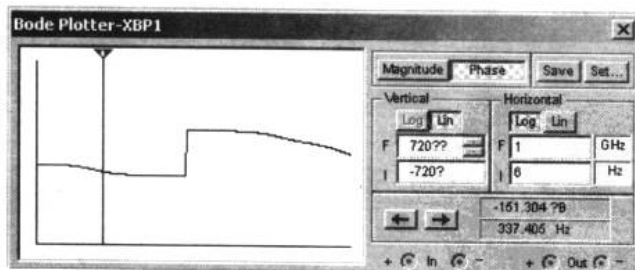


图 4-22 波特计显示的相频特性图

## 4.2.4 反馈

### 1. 反馈放大器的基本结构

反馈 (feedback) 是放大器中一个比较重要的话题。图 4-23 所示的流程图可以帮助我





们理解反馈放大器的构成。

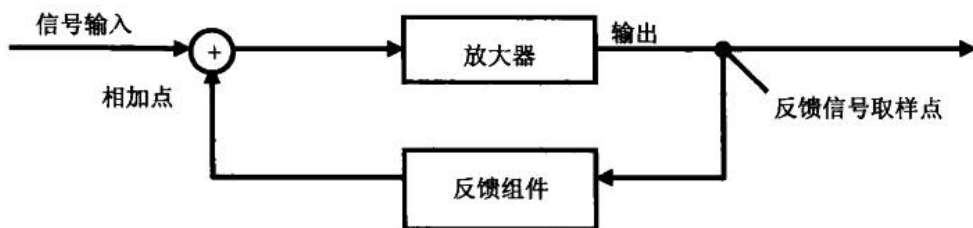


图 4-23 反馈的示意图

反馈放大器包括两个部分：一个是放大器，另一个是反馈组件。

反馈组件从放大器的输出端取得信号，通过反馈组件对信号进行处理后，在信号的输入端与原始信号相加后再送入放大器中。

可见，反馈放大器与一般放大器的区别在于反馈放大器的输入信号不只是单纯的原始信号，而是加上了反馈过来的信号。输出信号在送到负载的同时还要取出一部分送回到放大器的输入端。

由于输出信号有一部分被反馈组件“取走”，导致了放大器的放大倍数减小，但这样做的优点是提高了放大器的稳定性和频率特性。

## 2. 反馈的种类

从反馈的性质来分有正反馈（positive feedback）和负反馈（negative feedback）；按反馈的取样方式分有电压反馈（voltage feedback）和电流反馈（current feedback）；按相加点的连接方式分有串联反馈（series feedback）和并联反馈（shunt feedback）。

### （1）正反馈和负反馈

如果反馈的信号通过相加点注入输入信号里后增强了原始信号，引起放大器放大倍数的增加，则称为正反馈；否则为负反馈。

### （2）电压反馈和电流反馈

如果反馈组件并联在输出端，就是电压反馈，如图 4-24（a）所示；串联在输出端则是电流反馈，如图 4-24（b）所示。

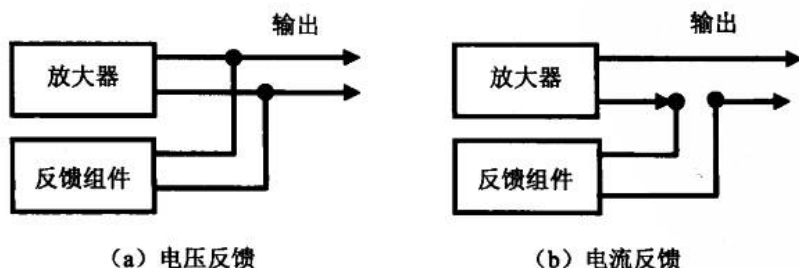


图 4-24 电压反馈与电流反馈

### （3）并联反馈和串联反馈

如果反馈组件并联在输入端，就是并联反馈；串联在输入端则是串联反馈，如图 4-25



所示。

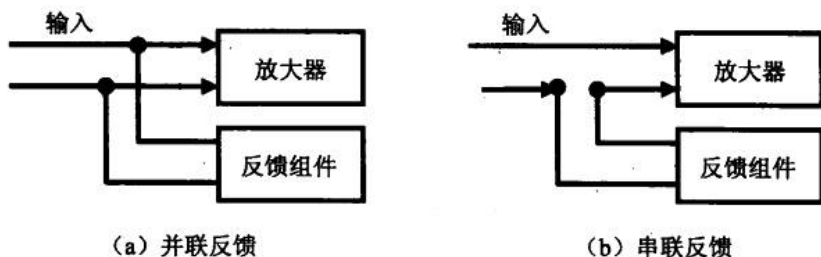


图 4-25 并联反馈与串联反馈

### 3. 在实际电路中判断反馈的类型

#### (1) 找出反馈组件

任何连接在输入和输出端之间的器件都是反馈元件。反馈组件可以是一个元件，也可以是多个元件组成。

#### (2) 反馈类型

进行反馈类型判断时，要在输入端判别是串联反馈还是并联反馈；在输出端要判别是电压反馈还是电流反馈。

常用的判别方法是“直接观察法”和“信号短路法”。直接观察法适于比较简单的反馈形式的判别。我们从图 4-26 中看到，电阻  $R_b$  连接在输出端（三极管的集电极）和输入端（三极管的基极），所以它是反馈组件。由于它和输入端和输出端都是并联的关系，所以这是一个电压并联负反馈放大器。

但并不是所有的反馈放大器都那么直观，可以让我们看出它们的反馈类型。如图 4-27 所示，虽然我们熟悉于它的电路构成形式，但并不能直接看出它的反馈类型。

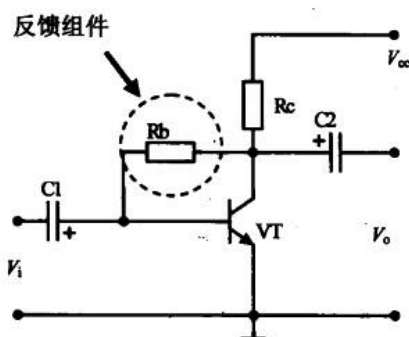


图 4-26 电压并联负反馈

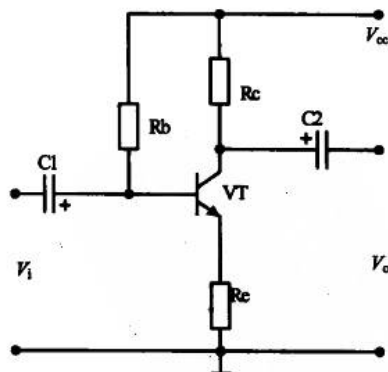


图 4-27 电流串联负反馈

这时，我们可以使用信号短路法来判别。这种方法的思想是在输入端将放大器的反馈信号对地短路；在输出端将输出信号对地短路。在输入端如果反馈信号对地短路后，输入信号无法加入放大器，则可确定为并联负反馈型；否则为串联负反馈型；在输出端，如果将输出信号对地短路，反馈信号消失，可确定为电压负反馈；否则为电流负反馈。在图 4-26



中, 电阻  $R_e$  是反馈组件。实际上反馈的相加点是  $R_e$  和地线的连接处。所以如果将反馈信号对地短路, 实际上等于将三极管的发射极对地短路, 这时输入信号仍能加到放大器上, 所以为串联负反馈。另外, 把输出端 (电解电容  $C_2$  的负极) 对地短路后, 不影响反馈组件的信号来源, 所以是电流负反馈。可见, 这是一个电流串联负反馈。

通过上述的两个实例分析, 读者能不能分析一下图 4-11 的反馈形式?

**例 4.2.2** 在 Multisim2001 中连接如图 4-28 所示的负反馈放大电路, 研究反馈放大器对输出波形的影响以及对放大倍数的影响。

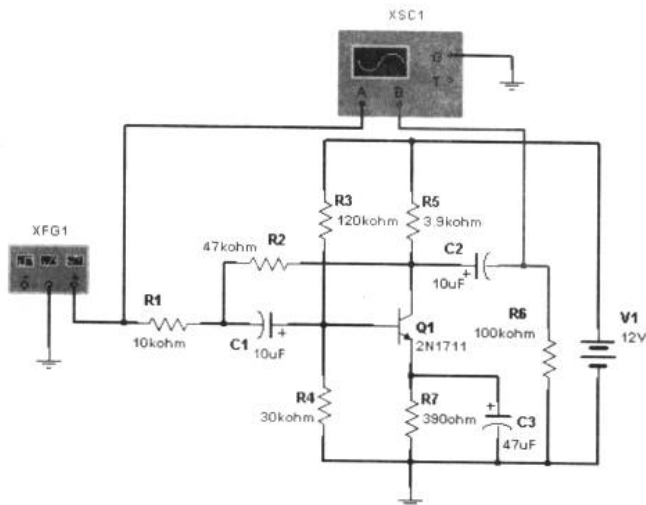


图 4-28 并联电压负反馈电路

把函数信号发生器的频率设为 1kHz, 幅值为 100mV。双击示波器, 弹出观察窗口, 我们得到了例 4.2.2 电路的正常放大波形, 如图 4-29 所示。

为了观察负反馈组件对放大电路输出波形的影响, 我们双击电阻  $R_2$ , 在属性对话框的 Fault 选项卡中, 选择 Open 单选按钮假设端点 1 开路, 即设置电阻  $R_2$  为开路状态, 如图 4-30 所示。这样, 电阻  $R_2$  在电路中就等于断开了, 于是反馈消失。这时, 我们从示波器观察窗口得到如图 4-31 所示波形。表明没有负反馈时, 输出波形的幅度较大, 但出现了明显的失真; 而引入负反馈后, 输出虽然没有失真, 但幅度减小了。

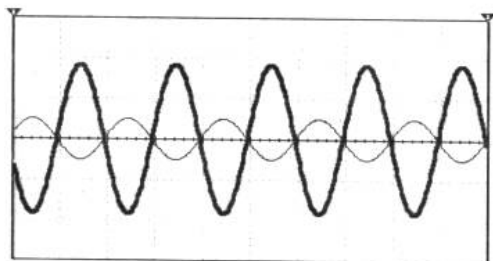


图 4-29 正常放大波形图

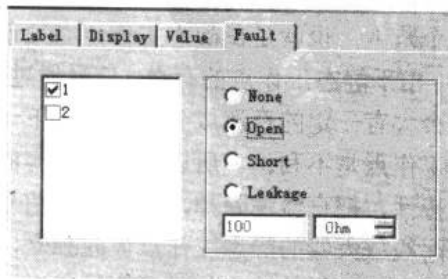


图 4-30 假设电阻开路

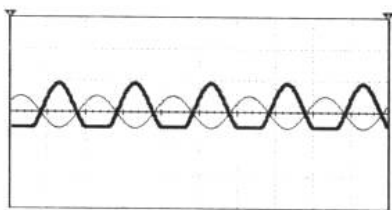


图 4-31 无反馈时的输出波形曲线

## 4.2.5 多级放大

### 1. 放大倍数和增益

放大器的放大倍数就是输出电压幅值与输入电压幅值之比，即：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (4-2)$$

如果一个放大器的放大能力很强， $A_u$  将会很大。为了方便描述，工程上常常用增益来表示放大器的放大倍数。公式 4-3 中  $A$  为放大器的增益，注意单位是 dB。

$$A = 20 \cdot \lg A_u \text{ (dB)} \quad (4-3)$$

### 2. 多级放大的必要性

读者可能在想，如果一个放大器放大的倍数不足以满足我们的需要该怎么办呢？多级放大是一种办法。实际上，我们在前面的章节里不止一次地使用了多级放大器。多级放大器应用中一个重要的内容就是解决它们之间的耦合（每级间的信号传输称为耦合）问题。常用的耦合方式有电容耦合、直接耦合和变压器耦合等。

#### (1) 电容耦合

图 4-32 中，三极管 VT1 构成了第一级放大器，VT2 则构成了第二级。很明显，电解电容 C2 将第一级放大器的输出端与第二级放大器的输入端连接在了一起。电解电容 C2 称为耦合电容。如果把 VT1 的集电极和 VT2 的基极直接连接在一起可不可以呢？

前面谈到三极管的基极必须加一定的偏置电压才能正常工作，但是这个电压不是任意加的，不能超出某个范围，也就是说静态工作点必须设置在一定范围内。由于静态工作点的存在，信号通过三极管放大后，就会含有一定的直流成分，这对于下一级放大器的静态工作点是不利的。所以利用了电容的“隔直通交”的特性，把直流滤除掉，留下交流信号的成分，最终使两级放大器的静态工作点彼此独立，互不影响。

当第一级的输出信号频率较低时，电容对它的阻抗是相当大的。这时，耦合电容的容抗对信号产生较

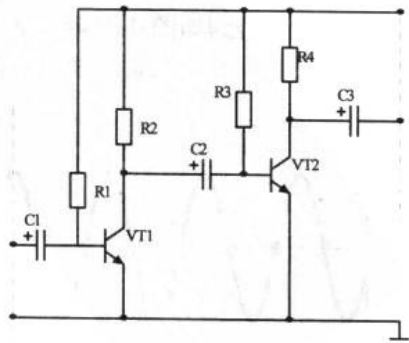


图 4-32 电容耦合多级放大电路



大的衰减,对变化缓慢的直流信号的传输是极为不利的。所以在输入信号频率较低的情况下,我们会采用直接耦合的方式。

**例 4.2.3** 在 Multisim2001 中连接如图 4-33 所示的两级放大器,研究该放大器的幅频特性和输入输出阻抗。

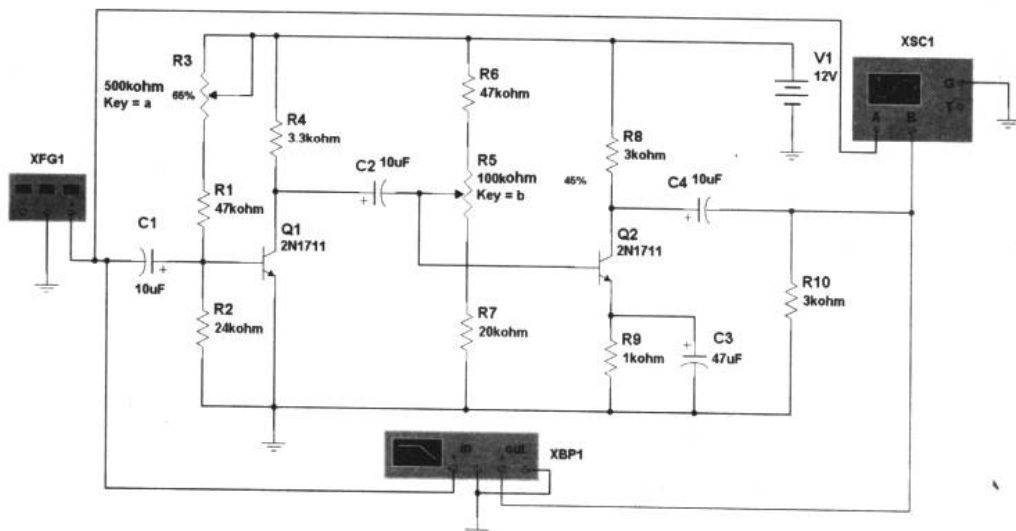


图 4-33 两级放大器电路

例 4.2.3 的两级放大器由两个三极管以及一些外围器件组成。很明显,电容 C2 是级间的耦合电容,所以这是一个电容耦合型的多级放大器。通过波特计 XBP1 我们可以得出第一级、第二级和两级的频率响应。单击 Simulate→Analysis→Pole Zero...命令可打开 Pole-Zero Analysis 对话框。在对话框中的 Analysis type 选项卡中,我们分别选中 Input Impedance 和 Output Impedance 单选按钮对电路的输入和输出阻抗进行分析。设置如图 4-34 所示。注意,Nodes 选项区域的 Input (+) 和 Output (+) 应根据实际连接电路所显示的节点编号来选择。

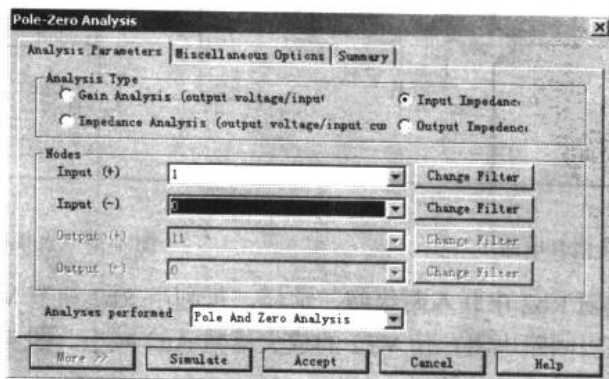


图 4-34 Pole-Zero Analysis 对话框

单击 Simulate 按钮,得到图 4-35 和图 4-36 所示的输入和输出阻抗的仿真结果。

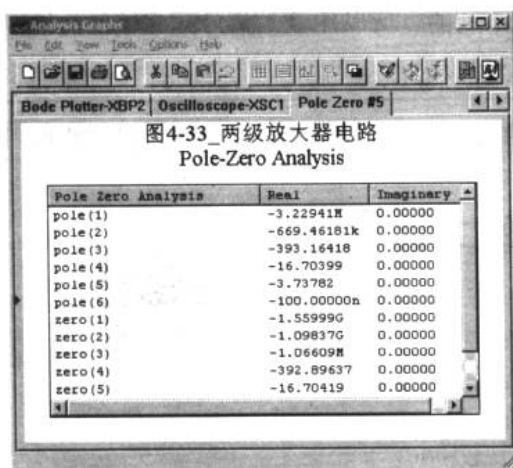


图 4-35 电路输入阻抗分析



图 4-36 电路输出阻抗分析

## (2) 直接耦合

图 4-37 所示为一个直接耦合的电路实例，其中使用了两支 NPN 型三极管。直接耦合可以避免电容对变化缓慢的信号带来不良影响，但是，这样简单地连接在一起会有什么问题呢？首先三极管 VT1 的集电极电压  $V_c$  被 VT2 的基极限制在 0.7V 左右（硅管）；其次，VT2 的基极电流  $I_{b2}$  不仅由  $R_{b2}$  决定，还包含了  $R_{c1}$  流过来的电流，VT2 的工作状态也将发生变化。

所以，把两级放大电路直接耦合，必须考虑到对各自静态工作点的影响，否则，即使接成多级放大电路，也不一定能正常工作。针对上述两个问题，需要对电路进行调整。图 4-38 为第一种调整的方法。

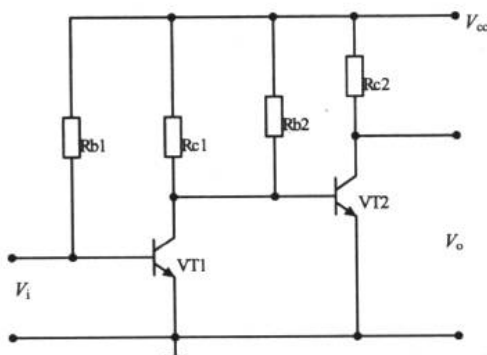


图 4-37 直接耦合电路一

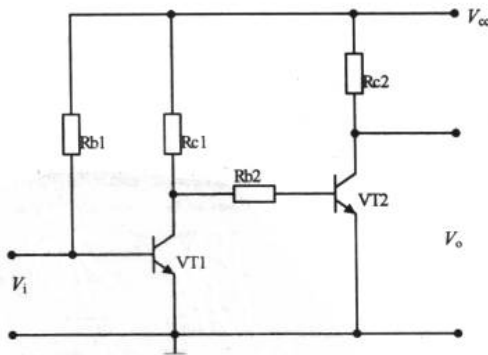


图 4-38 直接耦合电路二

图 4-38 中，把电阻  $R_{b2}$  串联入两级间。这样，可利用  $R_{b2}$  调节 VT2 的基极电流，但同时增大了 VT2 的基极回路电阻，使 VT2 的放大倍数  $A_{u2}$  减小。图 4-39 是第二种调整方法的电路图。

图 4-39 中，由于  $R_{e2}$  的存在，提高了  $V_{b2}$ ，从而保证了 VT2 的静态工作点，但是，引入  $R_{e2}$ ，同样使 VT2 的放大倍数  $A_{u2}$  减小。于是我们进行了第三次调整，如图 4-40 所示。

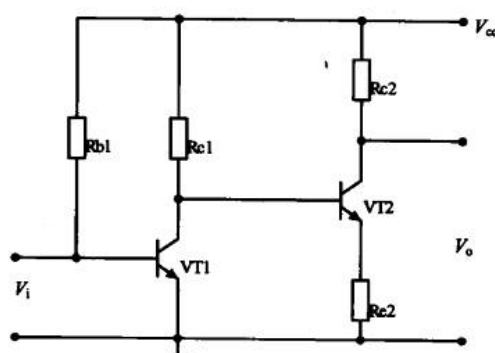


图 4-39 直接耦合电路三

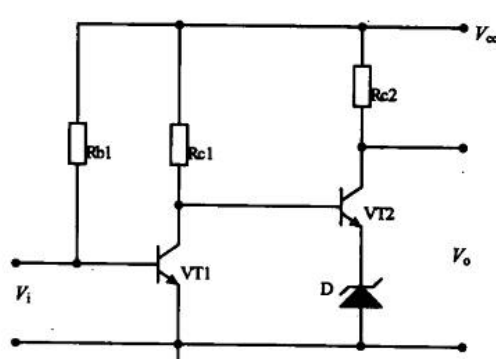


图 4-40 直接耦合电路四

图 4-40 中，稳压管  $D$  代替了  $R_{e2}$ 。由于  $D$  的动态电阻很小（一般在几十欧姆量级），这样，可使  $A_{u2}$  不致损失太大。但将导致  $VT_2$  集电极的有效电压变化范围变小。图 4-41 是第四种调整的方法。

图 4-41 中采用了 NPN 型 ( $VT_1$ ) 和 PNP 型 ( $VT_2$ ) 两种三极管构成互补电路，这种连接方式能较好地解决前后级电平配置的问题。

直接耦合电路中有一个比较致命的缺点——零点漂移，这是指当放大电路输入信号为零时，由于受温度变化，电源电压不稳等因素的影响，使静态工作点发生变化，并被逐级放大和传输，导致电路输出端电压偏离原固定值而上下漂动的现象。显然，放大电路级数愈多、放大倍数愈大，输出端的漂移现象愈严重。严重时，有可能使输入的微弱信号淹没在漂移之中，无法分辨，从而达不到预期的传输效果。因此，提高放大倍数和降低零点漂移是直接耦合放大电路的主要矛盾。

产生零点漂移的原因很多，如电源电压不稳、元器件参数变值、环境温度变化等。其中最主要的因素是温度的变化，因为晶体管是温度的敏感器件，当温度变化时，其参数  $U_{be}$ 、放大倍数等都将发生变化，最终导致放大电路静态工作点产生偏移。此外，在诸因素中，最难控制的也是温度的变化。

抑制零点漂移的措施，除了精选元件、对元件进行老化处理、选用高稳定度电源以及稳定静态工作点的方法外，在实际电路中常采用补偿和调制两种手段。

补偿是指用另外一个元器件的漂移来抵消放大电路的漂移，如果参数配合得当，就能把漂移抑制在较低的限度之内。在分立元件组成的电路中常用二极管补偿方式来稳定静态工作点。在集成电路内部应用最广的单元电路就是基于参数补偿原理构成的差动式放大电路。

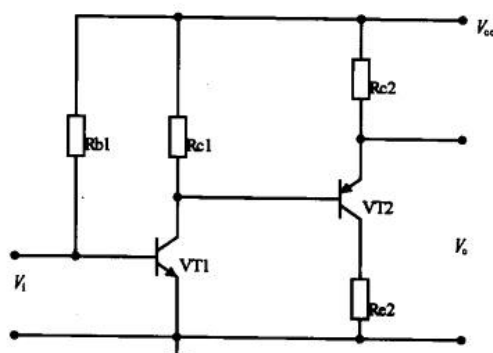


图 4-41 直接耦合电路五



调制是指将直流变化量转换为其他形式的变化量（如正弦波幅度的变化），并通过漂移很小的阻容耦合电路放大，再设法将放大的信号还原为直流成分的变化。这种方式电路结构复杂、成本高、频率特性差。

### （3）变压器耦合

将放大电路前级的输出端通过变压器接到后级的输入端或负载电阻上，称为变压器耦合。图 4-42 所示为变压器耦合共射放大电路，电阻  $R$  既可以是实际的负载电阻，也可以代表后级放大电路。

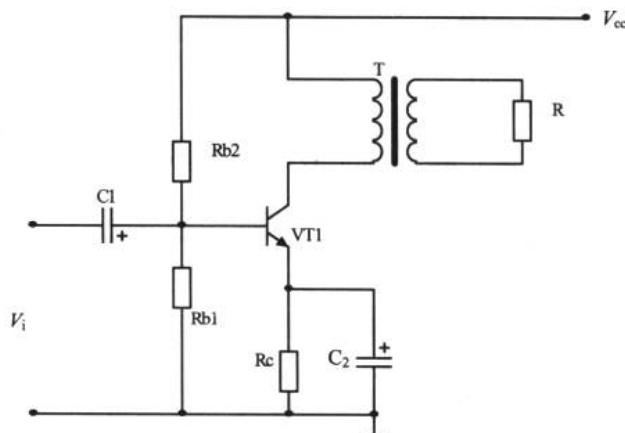


图 4-42 变压器耦合电路

变压器耦合的方式有几个特点：由于变压器是靠磁路耦合，所以它的各级放大电路的静态工作点相互独立；它的低频特性差，不能放大变化缓慢的信号；不能集成化；可以实现阻抗变换，因而在分立元件功率放大电路中得到广泛应用。

目前，只有在集成功率放大电路无法满足需要的情况下，例如需要输出大功率或实现高频功率放大时，才考虑用分立元件构成变压器耦合放大电路。

## 4.3 完成扩音机的制作

### 电路原理分析 制作与调试

在前两节，我们完成了放大器一些重要问题的了解，这一部分的内容是进行电路设计或原理分析的基础。只有牢固掌握这部分知识才能使我们电路图的“敏感性”大为提高。现在来完成本章开头讲到的任务。

#### 4.3.1 电路原理分析

在进行图 4-43 所示电路分析之前，有一点应该说明：扩音机把话筒转成的微弱电信号进行小信号放大和功率放大（功率放大是下一章的内容，但我们现在很容易就可以了解它的电路结构），最后驱动扬声器发出较大的声音。虽然在集成电路广泛应用的今天，单纯



使用三极管进行放大已经十分少见，但是这是一个很好的实践电子技术基础知识的机会。我们将在第7章介绍集成电路。

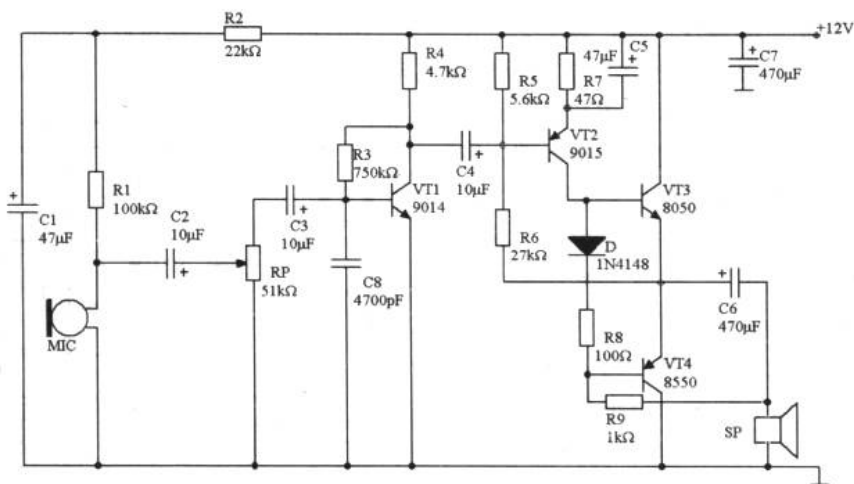


图 4-43 扩音器电路

在扩音器电路里，MIC 是驻极体话筒，电阻 R1 为它提供了一个工作电压。电阻 R2 和电解电容 C1 为滤波退耦电路，能避免自激，保证电路的稳定工作。电位器 RP 可以调节输入放大器的信号强度，所以是一个音量调节器。

通过对多级放大知识点的学习，我们看到电解电容 C2、C3 和 C4 是耦合电容，而电容 C8 是为了滤除杂波所设置的。电容 C5 是 VT2 发射旁路电容，为交流信号提供了通路，使交流信号不受反馈的影响。C6 的作用是防止直流电压加到扬声器上而产生电流噪声。C7 为电源滤波电容，这一点和 3.2.2 节中的介绍是一致的。

很明显，三极管 VT1 和电阻 R3、R4 组成了一个电压并联负反馈电路。电阻 R5 和 R6 为三极管 VT2 提供了一个稳定的工作电压。电阻 R7 为 VT2 发射极反馈电阻，它进一步保证了电路静态工作点的稳定。R8、R9 与二极管 D 是三极管 VT2 的集电极负载。调节 R8 的大小，可以改变 VT3 和 VT4 的静态工作点。

讲到这里，可能大家已经注意到 VT3 和 VT4 的连接形式对我们有些陌生，其实这是下一章的内容。它们组成了“乙类推挽功率放大器”，这是功率放大器的一种。

扩音器电路满足了我们在图 4-3 中描述的放大的基本结构，它由前置放大——VT1 和 VT2 组成的两级放大器和功率放大——VT3 和 VT4 组成的乙类推挽功率放大器构成。

### 4.3.2 制作与调试

#### 1. 调试的意义

在第3章里我们自制了一台测谎仪。由于电路十分简单，所以我们没有进行调试。以后的电子制作，特别是在模拟电子技术的应用过程中，调试是一个必不可少的工作，因为常用的模拟器件的工作点具有一定的不确定性。



正确的调试方法和耐心细致的调试操作是电路最终正常工作的保障。

## 2. 制作与调试

和上一章制作测谎仪一样，我们进行完电路的原理性把握后就可以开始着手制作电路的印刷电路板了。图 4-44 所示为扩音器的印刷电路板，以供参考。

我们把印刷电路板制作出来后，把元件焊接上去。通电前要重新检查一遍电路，特别是检查有没有把三极管的管脚弄错。为了安全起见，可先在电阻 R8 的旁边焊一导线（电路板上留有位置）。接通 12V 电源，测量三极管 VT3 的发射极电压，这个电压应为电源电压的一半左右，如果不对，可调整电阻 R6 的阻值。然后测量一下电路的工作电流，在 5mA 左右为宜。如果电流过大，应减小电阻 R8 的阻值，否则加大。

调试成功后，我们对着话筒说话，在扬声器中就会听到经过放大的声音信号。调节电位器 RP 能连续地对音调进行调节，这说明了电路正常工作。然后我们可以到市场上购买一大一小合适的塑料机壳，把电路板装进去，还可以为整机加上一个电源开关。装机时请注意，应当使话筒和扬声器的朝向相反，以免电路产生振荡而出现啸叫声。

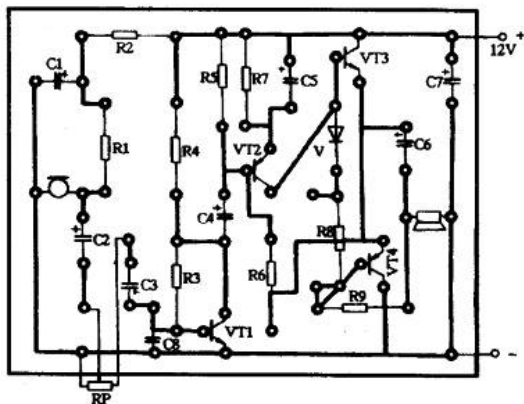


图 4-44 扩音器的印刷电路图

## 第 5 章 制作一台多媒体音箱

这一章，我们来谈一个相对轻松的话题。如果你用过 VCD 或 DVD 看电影和听音乐，你会发现除了这些光盘播放器和音箱外，还会有功放机或前置放大机等一些其他设备。这些设备将成为我们这一章的主角。

如果完成本章的学习后并实践其中的设计，我们将会拥有一台集前置放大器和功率放大器于一体的优质多媒体音箱。

### 5.1 音箱的蓝图设计

#### 5.1 声道介绍 电路模块设计 音箱箱体及材料选择

其实关于设计的整体性问题，我们已经在第 4 章中完成了。图 4-3 中我们描述了一个框架，如图 5-1 所示。

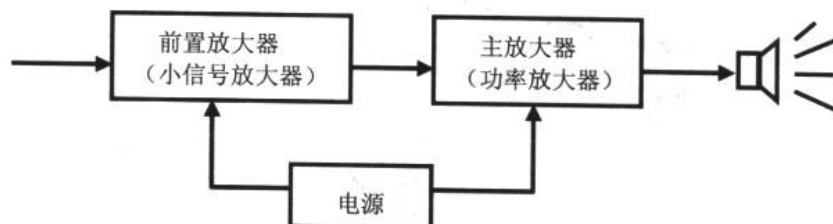


图 5-1 功放的基础框架

在这一节里，我们将设计这个基础框架的功能。注意，这时的音源不再是话筒采集的声音信号，而是我们的 CD、VCD 或 DVD 等音源设备的输出信号。

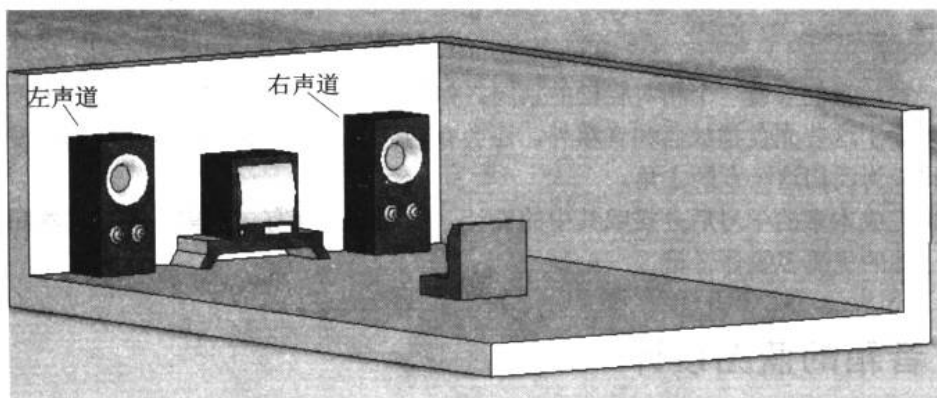
#### 5.1.1 声道介绍

今天，5.1 声道在影音视听中树立了霸主的地位。DVD 就是与 5.1 声道结伴而行的典型例子。

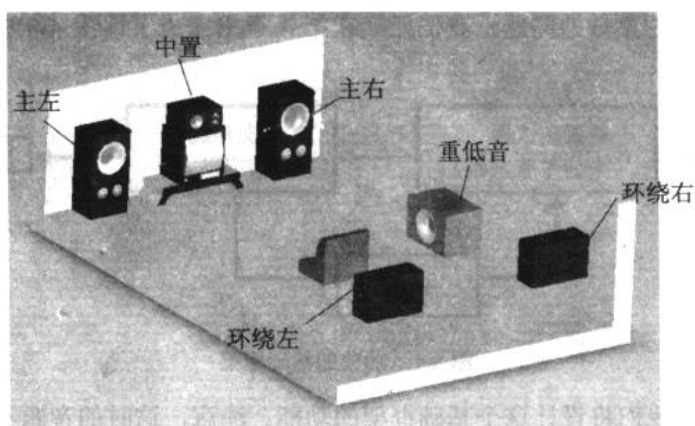
同样，在配置个人计算机时，高档主板都集成了 5.1 声道声卡。市场上也充斥着琳琅满目的 5.1 声道声卡。如果读者对 5.1 声道这个名词不太了解，这一小节将简单谈谈 5.1 声道系统。

目前 5.1 声道音效处理系统是比较完美的影音解决方案。5.1 声道就是使用 5 个扬声器和 1 个超重低音扬声器来实现一种身临其境的音乐播放方式，其首先由杜比（Dolby）公司开发，所以也叫“杜比 5.1 声道”。在 5.1 声道系统里采用主左声道（L）、中置（C）、主右声道（R）、左后环绕声道（LS）和右后环绕声道（RS）5 个方向输出声音，使人产

生犹如身临音乐厅的感觉。5 个声道相互独立，其中“.1”声道（B）则是一个专门设计的超重低音声道。正是因为前后左右都有喇叭，所以就会产生被音乐包围的真实感。图 5-2 所示为立体声和 5.1 声道的示意图。



(a) 立体声



(b) 5.1 声道

图 5-2 立体声与 5.1 声道

本章的例子围绕着以立体声为音源的音响电路设计和制作。只要了解了立体声（双声道）的音响电路制作，我们很容易就可以完成 5.1 声道的制作了。

### 5.1.2 电路模块设计

一台完整的家庭影音系统应该包含如图 5-3 所示的几个部分。

在本章中，我们把精力集中在必要的和常用的电路模块的设计和制作上。初步设计的有源多媒体音箱电路模块，如图 5-4 所示。

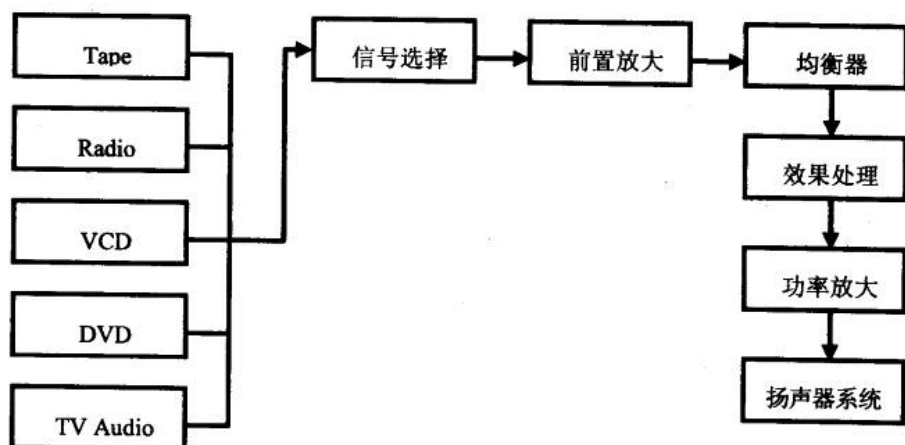


图 5-3 完整的家庭影音系统

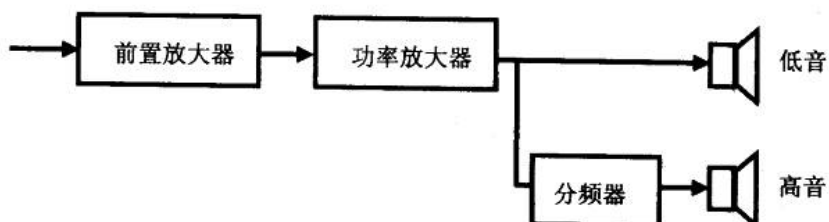


图 5-4 将要制作的音响系统电路模块

### 1. 前置放大器

前置放大器 (preamplifier) 实际上就是一个小信号放大器，这一点在上一章已经得到了证实。音响系统中，功率放大器对输入信号有一定的要求，太弱的信号功率放大器是不“理睬”的。所以，在功率放大器之前需要增加 1 至数级的放大器，将小信号逐步放大到功率放大器所需要的信号幅度。

前置放大器主要是对小信号乃至微弱信号进行放大，因此这些要求其失真系数要尽可能小。在 Hi-Fi (高保真) 音响系统中，前置放大器位于音源与功率放大器之间，对整个系统的频率特性的改善、前期音质的处理和音量的控制都有举足轻重的作用。

既然前置放大器是小信号放大器，我们就很清楚它是由三极管和一些外围元件构成的电路。不过在本章的电路设计中，我们没有使用三极管，而是用一块叫“NE5532”的集成电路代替。使用集成电路的好处是显而易见的：它免去了调整放大器的静态工作点等一系列调试过程，并且对音响系统的稳定性和音质都有很大的改善。关于集成电路的基础知识我们将在第 7 章介绍。

### 2. 功率放大器 (简称功放)

功率放大器 (power amplifier) 是电子电路中一个十分重要的部分。在音响电路中，其主要任务是将音频信号放大到足以推动扬声器。不同于前置放大器，功率放大器不仅对音频电压信号进行放大，而且放大了音频电流信号，以满足外接负载的功率需求。同时，功

率放大器还应该具有频率特性平坦、高信噪比（有用信号和噪声信号的功率比值）和优良的动态特性等功能。

音频功率放大器的类型很多，根据使用的器件不同，分为纯电子管型、晶体管型、电子管-晶体管混合型（胆石混合机）和集成电路型。在 Hi-Fi 里，公认电子管功率放大器（又称胆机，electronic tube power amplifier）的音色远优于晶体管功率放大器。但电子管功率放大器造价之高使许多发烧友望而却步。而晶体管功率放大器频响宽，是目前能输出功率最大的功率放大器。此外，集成电路功率放大器则以其制作简单、性能稳定和价格低廉而成为市场占有率最高的一种。

功率放大器与扬声器的连接方式有变压器耦合（常用于电子管功率放大器）、RC 耦合（OTL）和直接耦合（OCL）几种形式。

功率放大器根据工作状态可以分为甲类、乙类和甲乙类 3 种。

### （1）甲类功率放大器（class a power amplifier）

这是一种效率较低（一般只有 25%~35%）但音质优美的功率放大器。图 5-5 是它的典型电路图。看得出来，它实际上是一个共射极放大器。

### （2）乙类功率放大器（class b power amplifier）

乙类功率放大器是针对甲类功率放大器效率低而设计的，其放大效率在 60% 左右。它实际上是共集电极放大器。还有一种乙类功率放大器叫乙类推挽功率放大器，这种放大器在第 4 章我们已经接触过了。

在图 5-6 中看到，乙类推挽功率放大工作时，两只三极管分别负责正、负半周信号的放大。当 VT1 工作时，VT2 截止；而 VT2 工作时，VT1 截止。如同拉锯子一样，你推我拉，你拉我推，形成推挽输出。但是这种“交替”的工作会在衔接处产生一定的非线性失真，这种失真称为交越失真。

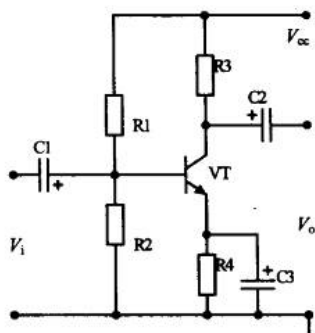


图 5-5 甲类功放

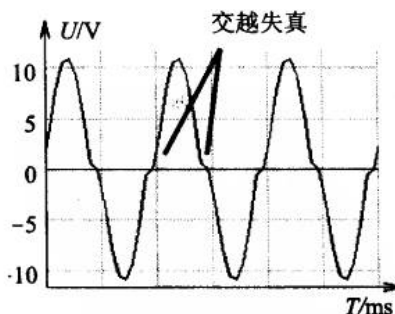
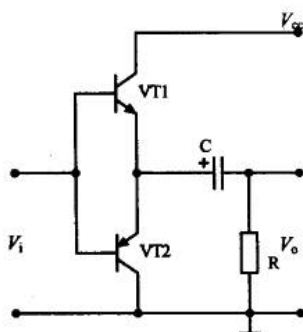


图 5-6 乙类推挽功率放大器和交越失真

### （3）甲乙类功率放大器（class c power amplifier）

为了克服甲类和乙类功率放大器各自的缺点，结合它们的优点，出现了甲乙类功率放大器。对于这种功率放大器，我们就不展开谈论了，我们更侧重于下一个问题的讨论——





集成功率放大器。

### 3. 集成功率放大器

这个问题有点超前，因为在第7章集成电路没有学习之前，大家可能对集成电路的了解不多。但不要紧，我们看看基础知识。

#### (1) 集成功率放大器 (integrated power amplifier) 的优势

从一开始的收音机到扩音器，我们完全可以不使用三极管而选择合适的集成电路来完成放大等复杂任务。在本章的多媒体音箱里，我们将不使用三极管而用集成电路来完成电路设计和制作。

先进的现代半导体制作技术，已经可以将制作一个功率放大器的所有元件，如三极管、二极管、电阻、小容量电容等一起设计在同一个硅片上。与分立元件相比，集成化的半导体线路在制作和使用上都具有很大的优越性。一是装配与调试非常方便，不再需要再对元件的选择、工作点的调整上耗费精力，而只需在集成功放块的外围接上几个必需的元件，即可构成一个完整的功率放大器；二是电路稳定性好，由于所有的元件几乎都在同一块很小的硅片上，因而它们在工作过程中几乎具有同样的温度，只需在设计时考虑到温度的热补偿即可使温度对放大器性能的影响降到最低程度，从而放大器可工作得相当稳定；三是性能比较完善，集成技术可将更多数量的晶体管做在同一块硅片上，因而可将更多的功能单元，比如过压保护、欠压保护、过流保护、输入过载保护和短路保护等电路模块集成在同一个功率放大器电路里，虽然增加了许多元件，而成本却没有显著提高，这是分立元件电路所望尘莫及的；四是价格低廉，由于集成电路的生产自动化程度不断提高，集成电路的制作成本日益降低，制作一个性能完善的集成功率放大器的成本，已经大大低于由分立元件制作的功率放大器的成本。

由于在硅片上很难做成大容量的电容，因而集成功放芯片内各级间耦合多以直接耦合为主，这点应该注意。

虽然我们这里以功率放大器为例对集成电路进行评价，其实其他各种集成电路都具备以上的优点。

#### (2) 常用的功率放大器——立体声功放 TDA1521 简介

TDA1521 是飞利浦公司出品的一款高性价比的 Hi-Fi 双声道集成功率放大芯片，其特点是：具有外围元件少、内部增益固定、通道间的增益平衡性优良、扬声器保护电路内置、过热保护、负载短路保护等。图 5-7 所示是它的外观和典型应用电路及其内部电路结构。从图中我们看到 TDA1521 的内部集成了电阻和运算放大器（运算放大器将在第7章介绍）两种元件。其实 TDA1521 内部电路也不很复杂（针对我们完成第7章的学习而言）。

这张电路图的电路标识有点与众不同，这是从飞利浦公司关于 TDA1521 的芯片资料中截取出来的。至于如何取得这些资料，读者可以到 <http://www.21ic.com> 上或搜索引擎上去搜索感兴趣的芯片的资料。

TDA1521 是单列直插型封装的集成电路，管脚从左至右依次为 1~9 脚。在使用时需要注意集成电路的致命弱点——一旦将其电源的正负极接反将会很快把它烧毁，这种烧毁是无法挽回的。



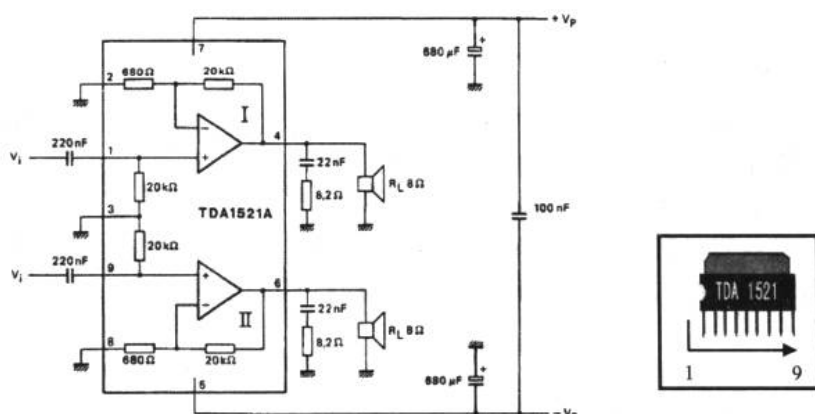


图 5-7 TDA1521 的典型应用电路及其外观

#### 4. 双电源

读者可能已经注意到了，在图 5-7 中，TDA1521 的 7 脚连接  $+V_p$ ，5 脚连接  $-V_p$ ，而电路中还有许多的公共接地点。这  $+V_p$  和  $-V_p$  是什么呢？这就是在放大器电源中常说到的“双电源”。在第 3 章中，我们知道变压器有单组电源型和双组电源型两种。单组电源型变压器的输出通过整流和滤波后得到单电源；双组电源型则得到双电源。

图 5-8 所示给出了双电源电路的基本结构。双组电源型变压器的次级线圈有 3 根引线，设变压器额定电压为  $V_p$ ，其中颜色相同的两根引线是  $+V_p$  和  $-V_p$  端，它们之间的输出信号在相位上相差  $180^\circ$ 。这两根颜色一样的电源输出线连接整流桥的交流输入端（没有极性之分）。另一根不同色的输出线是变压器的中心抽头，是电路的公共地线。如果用万用表测量双电源型变压器的输出端，在不同颜色的引线间将会得到变压器的额定电压值，同色引线间得到两倍额定输出电压值的电压。

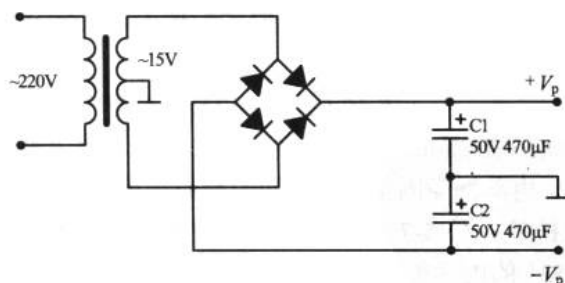


图 5-8 双电源电路

在图 5-8 中，使用两支电容电解对  $+V_p$  和  $-V_p$  进行滤波，但功率放大器电源质量要求较高，不宜使用图 5-8 中的电源来供电。在 5.2.4 节里，我们还会在电源的设计上下一番功夫。

### 5.1.3 音箱箱体及材料选择

Hi-Fi 音响设备中，担任电声转换的设备——音箱号称音响系统的喉舌，音源的最终重



新演绎全赖于此,可见其在音响中的重要地位。制作优质的发烧级音箱,除了采用优质的驱动单元(扬声器)以外,适宜的箱体结构和加工、处理工艺也有重要的意义。由于扬声器单元已由工厂制造定型,故箱体设计与制作已成为影响特定单元表现力的决定因素。

图 5-9 所示为杜希高保真音箱 M1.2 的外观和主要技术参数。

杜希 M1.2 技术参数		
音箱系列:	杜希高保真音箱	
系统类型:	两路 4 阶例相式音箱系统	
单元配置	低音:	F6
	高音:	R2CA
频率响应:	49Hz~35kHz(-3dB)	
频率范围:	39Hz~40kHz(-6dB)	
灵敏度 (2.83V/m):	88dB	
额定阻抗 ( $\Omega$ ):	8 $\Omega$	
功率范围 (W):	20W~150W	
箱体外观:	豪华天然酸技术皮	
外形尺寸 (W×D×Hmm)	232×430×325mm	
净重 (公斤/只):	13.5kg	

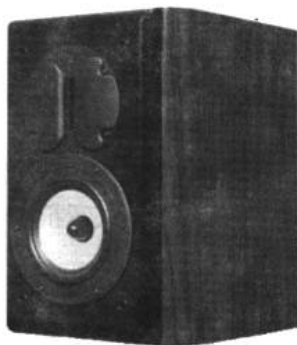


图 5-9 杜希高保真音箱 M1.2

多媒体音箱一般指有源音箱。那么什么是有源音箱呢?通常我们把将功放、电源等电路安装在音箱箱体之内的音箱称为有源音箱,而把功放等电路独立出来的音箱称为无源音箱。市场上的多媒体音箱通常只要插上电源就可以工作,其功放等电路均放置在箱体内部,所以它是有源音箱。但是,发烧级的音箱大都为无源型的。发烧友们通过选择音箱、前置放大器、均衡器和功放等设备来达到“Hi-Fi”的效果。

为了完成多媒体音箱,我们可以到市场上购买无源型的音箱。根据档次的不同,有的音箱只有一只扬声器,有的有高、低音两只,落地式的可能拥有多个扬声器组成的扬声器系统。无源音箱大都用木制材料制成。关于音箱的制作也是大有学问的,以下的一段文字描述了制作音箱的选材、制作方法和制作工艺。如果读者对音箱的制作毫无兴趣可以跳过这几页。

### 1. 音箱材料

① 选择优质的木材如红木、花梨木、桃木、檀木等名贵硬木,最好是无接缝的整板。这是音箱制作的顶级材料,但因材料难觅、价格昂贵、加工不易而常被用于极品音箱中。其次为花柳木、枣木、梓木等,这些材料密度大,木质均匀。注意新材料潮湿易变形,需干燥处理后方可应用。

② 中密度纤维板,此类板材采用最多,因为其成本低、材料易购、加工方便。但实际制作中发现其强度较差,易产生音染,并且材质细碎松软,不能用木螺钉结合,而只能用铁钉固定,在高声压下可能被震松,不利于箱体的坚固性。

③ 中密度刨花板,亦称为压模板,强度较高而成本低,加工不太方便,很多商品音箱,包括许多日本套装机配套音箱均用此材料。但其压结不实,含气隙较多,隔音性能差,最好能作特殊处理以提高隔音能力。

④ 高密度纤维板、刨花板以及胶合板。这些材料强度很高,隔音性能好,材料较易找,

是业余制作优质发烧音箱的首选材料。但成本稍高，加工也不容易。特别是高密刨花板，硬度很高，不易打钉。

⑤ 无机物如有混凝土浇筑成形，用石质板料（大理石、混凝土板、花岗岩石板、石膏板等）以特殊工艺成形，或干脆用厚重的大陶罐作箱体。具有音染小、声场稳定等优点，常为发烧高手采用。

⑥ 工程塑料、聚丙烯、增强改性环氧树脂、厚有机玻璃板等高密度高聚物（高分子聚合物），这些材料秉承了现代先进的科技材料技术，许多欧美专业音箱厂商均用此技术创制出高档、高质音箱。

⑦ 金属材料主要用于专业音箱和特殊场合，如舞台音箱、移动音箱、体育用全天候音箱、军事用全天候移动式音箱……业余爱好者由于其金属箱体谐振频较高、音染不易处理而极少采用。

## 2. 制作方法

① 板材结合。此法为绝大多数音箱包括一些极品音箱所采用的方法。其工艺成熟、简便，并适于工厂化生产。

② 浇筑成型。此法最适于混凝土及高聚物材料。

③ 掏腔法。顶级发烧音箱，将整块名贵硬木或石料掏出空腔，作为箱体。可以想象此法难度很大、成本高昂。偶尔见于欧美纪念型产品中。

## 3. 制作工艺

高保真音箱箱体内常处于急剧变化的高声压中，极易诱发杂音、谐振、造成音染，影响重放音乐的纯美，因此制作工艺十分重要。“加固消振，避免音染”为制作工艺的八字方针。

① 广泛合理使用加强筋。加强筋用于音箱中的薄弱环节。箱体内各个面所成结合角处，用足量的胶粘上硬三角木或方木棒，再加木螺钉紧固。低音喇叭背部声压级最高，极易诱发音箱振动，可在背面板正对此处粘上一块圆形硬木板加强，材料可利用面板开孔下的余料。

② 箱内添加适量吸声材料如超细玻璃棉、矿渣棉、纤维喷胶棉、真空棉等吸收声能，同时减轻箱体振动。对于密闭箱，需塞满整个箱体。对于倒相箱，前后左右上下壁贴三指宽厚的吸声材料，并于监听时作适量增减。

③ 增加箱壁声阻尼性能。较简便的方法是在箱体里面浇一层 1cm~2cm 的沥青，并贴敷多层高声阻尼材料（油毛毡、橡胶等）。

④ 箱体支撑加固。此处指的是用硬方木、多孔木板等材料将前后壁和侧壁之间牢牢支撑，使箱壁不致被高声压激励而产生讨厌的箱体音染。

⑤ 喇叭单元的固定。宜采用由外向里的固定方法以减小前腔效应。喇叭的盆架和箱体间以 5mm~10mm 橡胶垫密封隔离以免声短路，并避免盆架振动传至面板辐射干扰直接辐射声。

⑥ 采用特别的箱体内形和外形。此处并非讨论音箱的声学方式，而是针对驻波进行有效的预防。驻波的产生会严重影响声学系统的性能。为消除驻波，破坏箱体内的平行性为



其关键。如某些专业音箱采用了六边形设计或扇形设计。箱体外形对辐射特性也有较大影响。过多过锐的棱角会产生衍射和干涉,可采用较钝的面过渡角。

⑦ 完工后的音箱应加支撑,与地面“隔离”起来,避免声音虚胖、音场不稳和透明度差。支撑的方法有支撑架、金属脚钉和硬木脚钉等。

音箱制作是一门较复杂的系统工程,是介于机械工程学、声学、心理学和人机工程学之间的技术,也是艺术。以上各项措施,相辅相成,应在实际制作过程中根据具体情况,对症下药,综合使用,这样一定能制作出较满意的作品。

除了选择自己制作音箱外,还可以购买现成的音箱。有些音箱不带扬声器单元,这就需要根据经济条件和功率放大器的输出功率来选择扬声器了。在本章的例子里,低音扬声器建议选择 100W 8Ω 纸盆型的。国产的扬声器和进口的价格相比差别较大,从 50 元/对到上千元/对不等。有的音箱有高、低音扬声器的安装孔,所以除选购低音扬声器外,还得选购高音扬声器。高音扬声器可选用 3W~10W 8Ω 纸盆型的。

音箱部分的制作可以参考图 5-10 所示的设计草图。

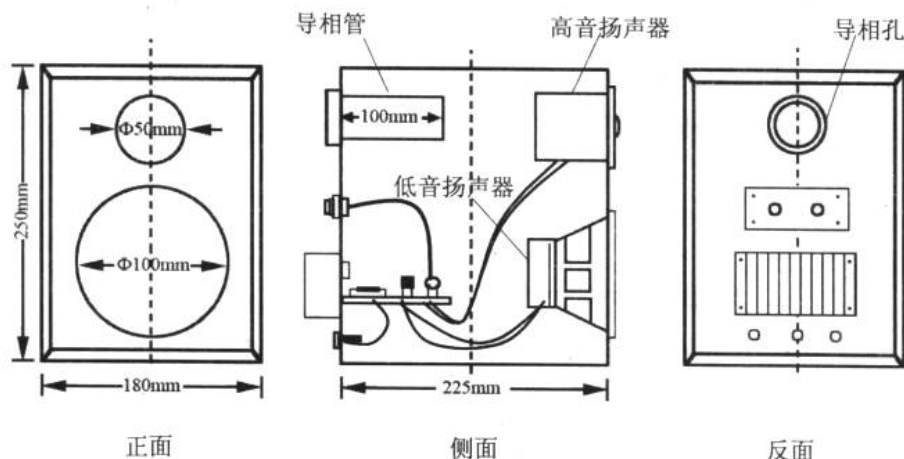


图 5-10 音箱的设计

## 5.2 电路制作

前置放大器 功率放大器 分频器 电源和布线 实用音响电路大放送

完成了这台多媒体音箱的设计,我们现在开始着手选择合适的电路。注意,完成这个例子的每个模块的电路不止 1000 种。以下的介绍都是常见的电路形式。网上、书籍里都有十分丰富的前置放大器和功率放大器等音响电路供参考。发烧友们可以寻找到更多的电路来完成多媒体音箱的制作。

### 5.2.1 前置放大器

我们在前一节的设计时曾经提到过前置放大器。一般常用的前置放大器集成电路有

LM381、LM382、LM387、LM833、NE5534 和 NE5532 等。

美国 Sigma 公司出品的单运放 NE5534 和双运放 NE5532N 被誉为“Hi-Fi 运放之皇”。这是两款性能非常优异的低噪声运算放大器。与大多数标准运算放大器相比，它们具有较好的噪声性能，较大的驱动能力，高的增益带宽积及功率带宽。它们特别适用于高质量及专业音频设备。它们的工作温度为  $0\sim+70^{\circ}\text{C}$ ，极限电源电压为  $\pm 22\text{V}$ 。

图 5-11 所示为 NE5532 的内部电路结构图及引脚图。

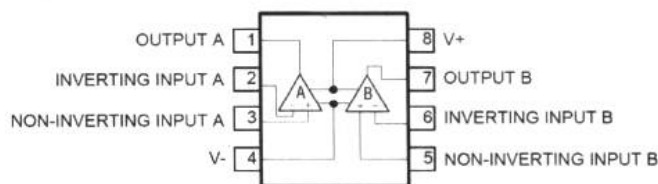


图 5-11 NE5532 的内部电路结构及引脚图

由图 5-12 所示的 NE5532 的内部电路可知，在芯片中有两个运放单元 A 和 B，这两个运放是相互独立的。8 脚和 4 脚为这个运放供电。关于运放我们将在第 7 章详细介绍。

由于我们讲解的目的是一个立体声的有源音箱，它由左右两个声道组成。所以在电路设计上，左右两个声道应该是完全对称的。图 5-12 给出了前置放大器的电路图（其中一个声道）。

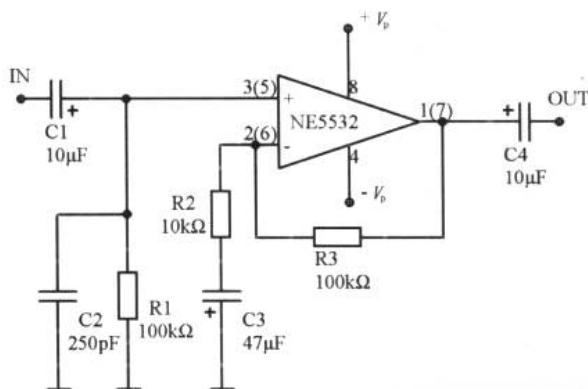


图 5-12 NE5532 组成的前置放大器

## 5.2.2 功率放大器

我们在前面已经介绍了功率放大器 TDA1521 的内部电路结构和典型的应用电路。当我们完成 5.2 节后，将能把制作一台多媒体音箱所需要的 4 个部分的电路进行连接，然后根据完成的最终电路图来设计印刷电路板。在进行电路模块之间的连接时，我们只要按照原来设计的连接顺序进行连接即可。

注意，前置放大器和功率放大器的选择不是惟一的。图 5-13 所示为一种利用三极管组成的功率放大器，它的放大功率为 50W。



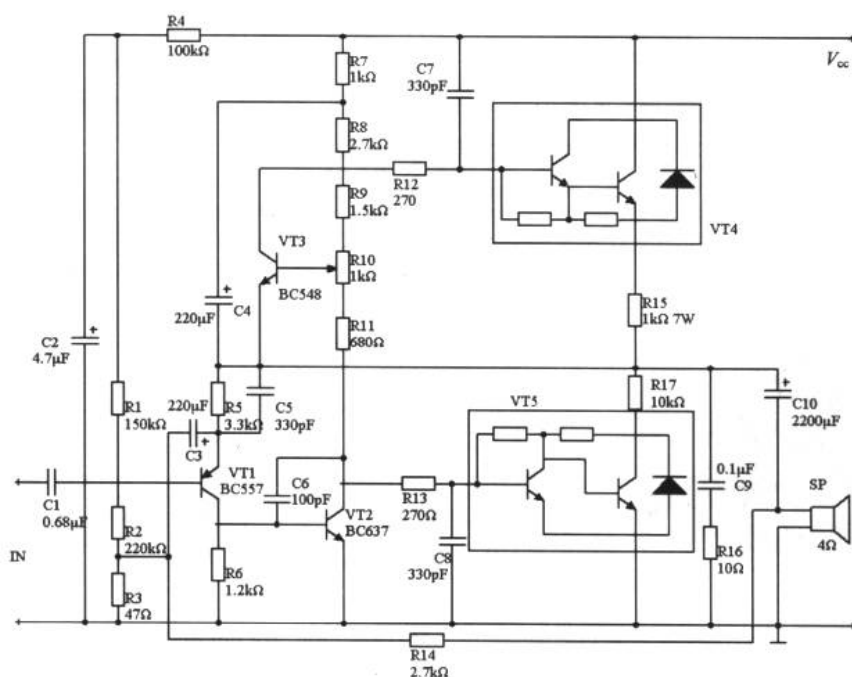


图 5-13 达林顿管功率放大器

这个功率放大器的电路复杂程度可见一斑，大家也许更喜欢 TDA1521 构成的功放电路。这个电路图可以让我们有个直观的比较，选择集成电路是简化电路结构的关键所在。

图 5-13 中，VT4 和 VT5 不是由元件分立组成的，而是由几种元件组成的。这个复合器件叫做达林顿管。图 5-14 是这种元件的基本结构，它由两个 NPN 型三极管构成，等效为一个高  $h_{FE}$  值的三极管。 $h_{FE} = h_{FE1} \cdot h_{FE2}$ 。当然达林顿管也可以由两个 PNP 型三极管或由一个 NPN 和一个 PNP 组成。

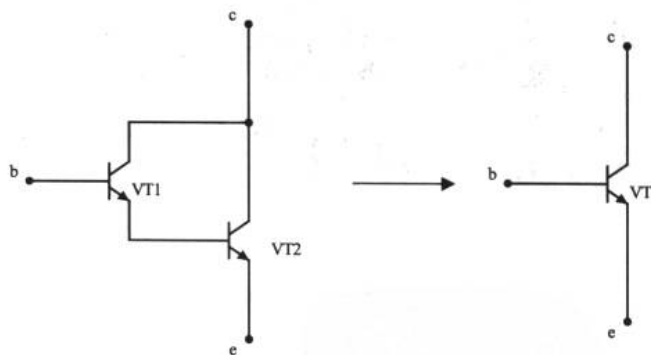


图 5-14 达林顿管的构成

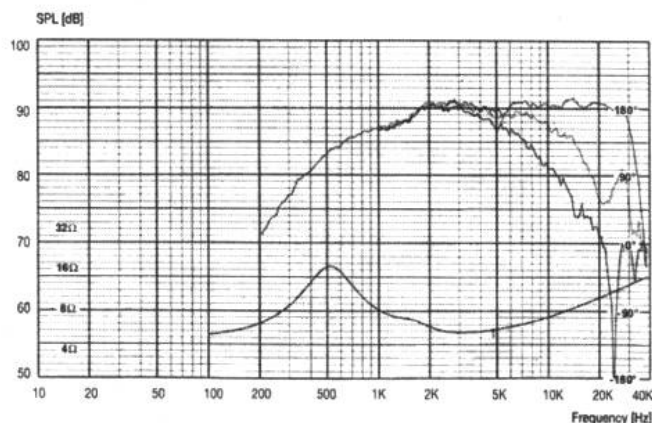
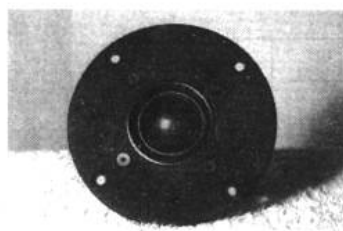
### 5.2.3 分频器

如果留心图 5-10 所示的音箱设计草图，就会发现音箱中除了有一个较大的低音扬声器外，还有一个直径较小的高音扬声器。这两只分别对高、低频率敏感的扬声器组成了音箱的扬声器系统。

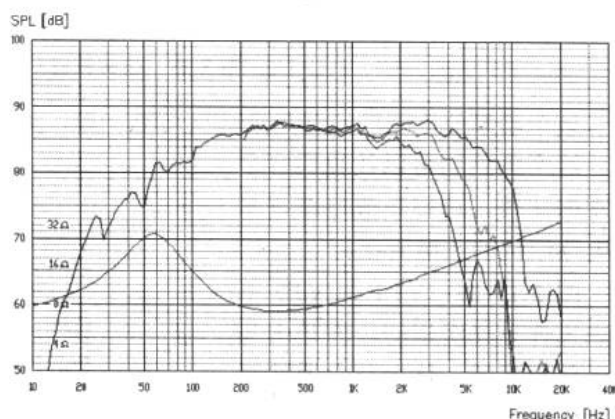
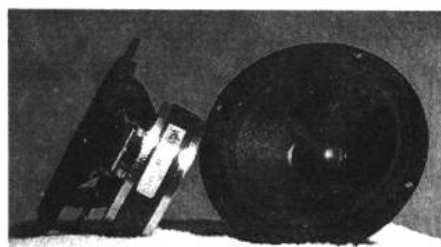
图 5-15 所示为高音扬声器和低音扬声器及它们的频率响应曲线。从图中我们可以看到，



高音扬声器对高频的响应比较好，低音扬声器则相反。为了让音质完美地显现，我们不得不同时使用这两种扬声器组成扬声器系统。但我们的功率放大电路的任一声道输出只有一个端子。那么应该把这一高一低扬声器简单地并联或串联在功放的输出端上吗？不是，这时我们要使用到一个叫分频器（frequency divider）的电路。



(a) 高音扬声器及其频响曲线（扬声器型号：Scan-Speak 9500）



(b) 低音扬声器及其频响曲线（扬声器型号：VIFA P13WH-00-08）

图 5-15 高、低音扬声器的频响测试

分频器实际上是一个频率选择组件。一个电容器就是一个最简单的分频器，如图 5-16 所示。

由功率放大器输出的音频信号首先进入低音扬声器，同时，信号通过电容 C 也进入高音扬声器。由于电容对高频信号的容抗比较小，而对低频信号的容抗较大，所以通过电容 C 到达高音扬声器的信号以高频成分为主。可见，只用一个电容就能完成信号的分频工作。

但 Hi-Fi 发烧友们并不会满足这个分频器。事实上，稍有档次的音箱里都有比这复杂的分频器。图 5-17 所示为一个稍复杂的分频器。

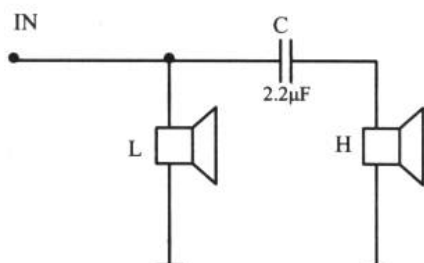


图 5-16 最简单的分频器

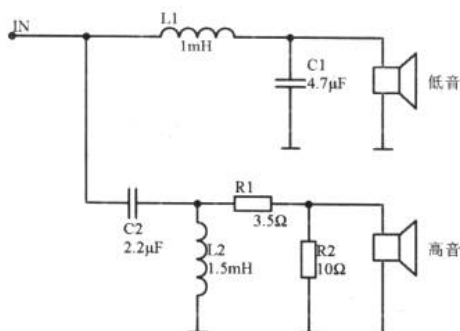


图 5-17 分频器

### 5.2.4 电源和布线

我们的问题进行到现在，可以说万事俱备，只欠东风了。多媒体音箱的各个模块电路我们都已经了解了，现在来看影响大局的两个问题——电源和布线。

#### 1. 电源

在音响系统中最好的供电方式是采用前后级分开供电，也就是说将前置放大器和功率放大器分别供电。相对来说，前置放大器对电源的纹波抑制要求高，而功率放大器更侧重于低频瞬态响应。

由于电源的设计是一个复杂的工程，针对不同的产品都会有与之相适应的电源设计方法。在这里，我们只寻求一个既能解决问题，又不失通俗的电源解决方案。

在给出这个方案之前，有几点方法是值得分享一下的：

- ① 整流时应该采用桥式整流。
- ② 滤波选用大容量的电解电容是必要的，它能够储存足够的电能来满足在音乐短时尖峰信号出现时对电量的要求，使电路不致产生削波失真。
- ③ 为防止大容量滤波电容存有一定感抗而妨碍某些高频成分的滤波，可在滤波电容旁并联一些容量递减的电解电容，并在最后并联一个高频小电容，进一步改善滤波的效果。
- ④ 采用环形变压器替代立式变压器。环形变压器的内阻小、功率大，功放里常常使用这种变压器来供电。

图 5-18 所示为一个双电源电路实例，供我们制作多媒体音箱电源时参考。在这个电路里，电容的容量按电流的流向依次递减，保证了电源的滤波效果。同时，使用了正负电源的三端稳压集成电路 7815 和 7915 进行稳压。有一点应该注意，变压器 T 的中间抽头与滤波电容的公共端连接在一起作为电路的工作地线。该电路是双电源电路的一个普遍的实例。

把前置放大器和功率放大器的 +Vp 和 -Vp 分别接到图 5-18 的 +Vp 和 -Vp 端。关于公共地线的连接，在印刷电路板设计制作时需要特别注意，在下一个问题里我们将会了解到。至此，我们的多媒体音箱完成了所有的电路的选择和设计。

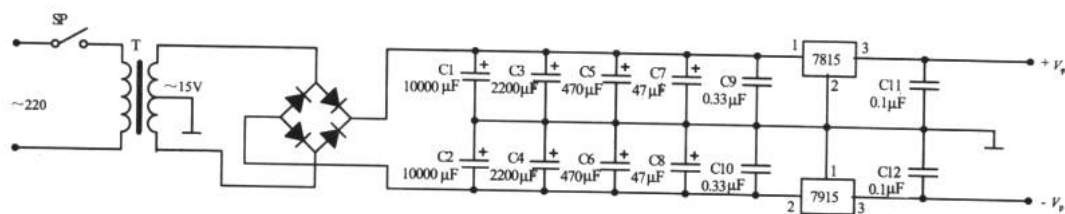


图 5-18 电源设计一例

## 2. 布线

当电路选择并设计好后，剩下的工作就是印刷电路板的布局设计与组合安装。如果布局设计不合理或组合安装不当，即使采用了优质的元器件，同样将产生严重的噪声，使音质变劣。

音频电路的噪声可分为两大类：一是放大电路自身的内部噪声，通常只能用选择低噪声的元器件加以克服；二是与放大电路本身无关，从外部混入的噪声，这种噪声与印刷电路板设计及安装有密切的关系。早在 3.1.5 节我们就把印刷电路板设计的“9 大主张”进行了说明，这里就需要遵循这些原则，否则将会产生可怕的噪声。

除了印刷电路设计时的基本原则需要考虑外，还需要补充几点：

① 最好用金属罩将变压器整个包围起来，形成一个短路环并将其接地，从而将变压器的漏磁通过地线流走。这种技术叫屏蔽，是电子产品中特别是害怕电磁干扰的设备常常使用的防护措施。

② 当信号传输的导线比较长时应采用屏蔽线，使用屏蔽线时应注意只能将屏蔽层的一端接地，禁止两端同时接地，如图 5-19 所示。

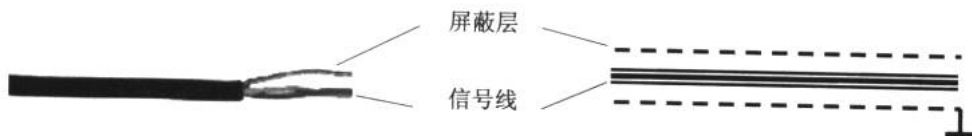


图 5-19 屏蔽线的正确连接方法

在印刷电路板设计和安装布局中，可以说接地方式的正确与否对噪声的影响最大。与电力供应系统不同，这里的接地并非指安全接地，这里的“地”也非真正意义上的地，而是音响电路中的公共零电势参考点。这里的接地即是将与公共参考点等电位的点或面用导线连接起来，这称为工作接地。接地是抑制噪声和干扰的重要手段，不合理的接地会引起严重的交流声或使放大器出现自激振荡。

常用的接地方式有两种：逐级串联一点接地法与并联一点接地法。两者都有各自的优缺点，我们分别来看一看。

图 5-20 所示为逐级串联一点接地法。各放大电路按先后次序把接地点汇集在一条地线干路上，然后一端接地。这种方式特别适合于印刷电路板，此时每块线路板上均应有输入和输出的地线点。由于铜膜也存在电阻，当有“地电流”流过时就会产生电压降，很容易干扰邻近的电路级。这个电阻越大，干扰越严重。因此我们在设计印刷电路板时，应该把



地线的铜膜尽量设计宽阔，以尽可能地降低地线电阻。同时，整个线路的最终接地以输出端接地为好，有利于抑制放大器的自激。

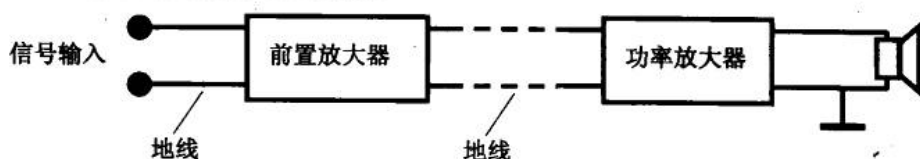


图 5-20 逐级串联一点接地法

图 5-21 所示为并联一点接地法。各电路的地电位只与本电路的地电流和地线电阻有关。这对避免地电流耦合、减少干扰是有利的。但这种接地方式将会造成接地边线过多，并且由于地线引线长，使分布电感增大，对高端的瞬态响应会有所影响。

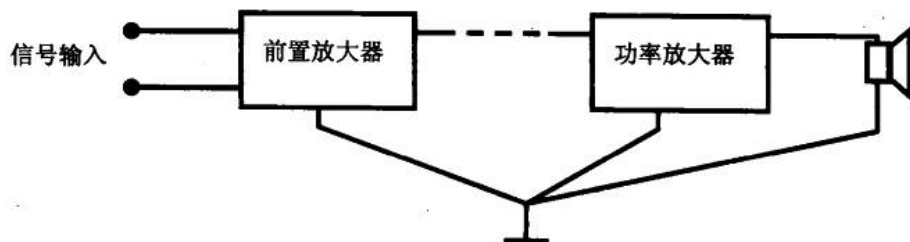


图 5-21 并联一点接地法

在实际应用中，我们的原则是在放大器的输入端、输出端及电源部分采用并联接地，即对输入部分作多路并联接地而后一点接于印刷电路板的输入接地点；板子的输出端、负载与电源的地线并联一点接于机壳（如果机壳是金属的），机壳接地可以防止外界的电磁波对电路的干扰。各级放大器间则以串联接地法为主。如图 5-22 所示为接地示意图。

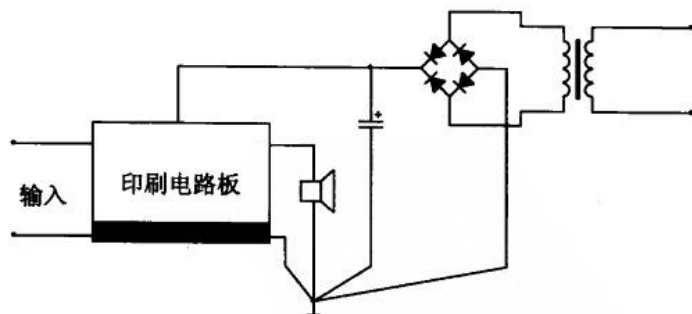


图 5-22 正确的接地

终于，我们完成了多媒体音箱的设计。如果读者能紧跟这些知识介绍的步骤而付诸实践，不但能拥有一台自制的多媒体音箱，更重要的是我们将悟到产品制作的若干思路和乐趣。在本章的介绍中，虽然以多媒体音箱为例，但前置放大器、功率放大器、电源和线路布局等知识的介绍却是大多数产品开发的基础部件，特别是地线的连接介绍更是一个非常重要的内容。

## 5.2.5 实用音响电路大放送

在多媒体音箱中，除了以上介绍的核心电路模块外，还有许多电路会对音质的改善起重要的作用。这一小节我们一起了解几个实用的音响电路。

### 1. 音量控制电路

音量的调节是音响电路中最基本的功能。最简单的音量控制器就是将一个电位器串联在前置放大器的输入端与音源之间，如图 5-23 所示。

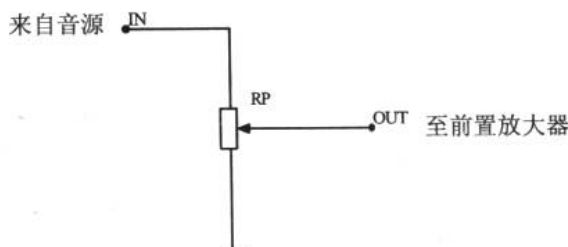


图 5-23 最简单的音量控制器

使用一支双联电位器就可以对立体声的双声道信号进行音量控制了。不过在挑选时应该特别注意双联电位器每一联的调节电阻一致性，否则将会出现左右声道不平衡的现象。

但有时即使选择了良好对称的双联电位器，音源及其他器件的质量也会造成左右道不平衡的现象。这时，设置平衡控制器就显得很有必要了。

事实上，平衡控制器的核心仍然是一个电位器，这个电位器可以是单联的也可以是双联的，其应用方式分别如图 5-24 (a)、(b) 所示。将该电路串联在音量控制器之前或之后都可以。图 5-23 和图 5-24 两种音量控制器的电位器可根据音源大小选用  $10\text{k}\Omega \sim 100\text{k}\Omega$  的。

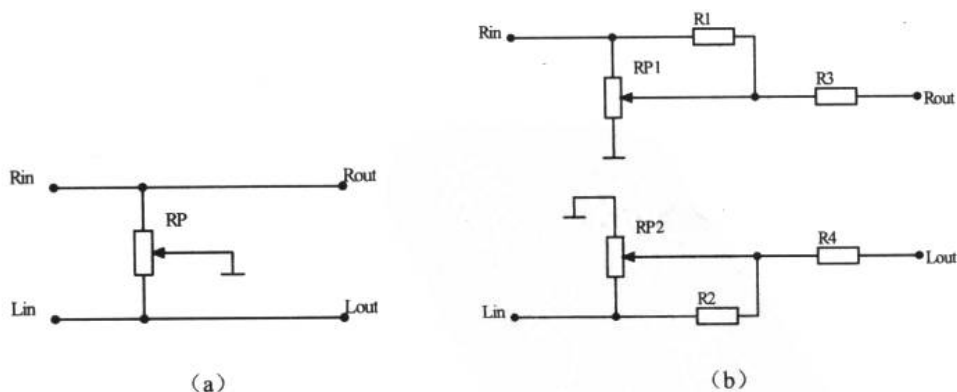


图 5-24 平衡控制器

### 2. 音调控制电路

图 5-25 所示为三通道音调控制器，其中使用了运放作为电路的核心器件（这个器件在 Analog 元件栏中可以找到，选择理想型器件进行仿真）。我们可以利用 Multisim2001 对这



个电路进行仿真，其中，信号发生器的幅度取 100mV，分别在 50Hz、500Hz 和 5kHz 中通过调节 3 个电位器以观察不同电位器对不同频率信号的控制能力。

### 3. 多频段频率均衡器

在音响系统中，要达到完美的音质控制，仅靠一两个频段的音调控制是不够的。因为在音响系统中各个环节都会有一定的缺陷。通过实际的测定，我们得到如下的结论：

要想听到厚实的低音，需将 80Hz~150Hz 频段提升 4dB~6dB；当 30Hz~300Hz 这一频段内的信号达到一定强度时，低音区就会显得宽广、丰满和柔和；300Hz~500Hz 频段的提升或衰减，将显著影响声音的厚度、力度和响度；1.2kHz 对男声的影响较大，适当提升可使声音明朗突出；2kHz~4kHz 对声源亮度的影响最大；8kHz 段若能得到适当提升，将会丰富声音的层次感，但不宜提升过多，否则将出现声音发脆、发毛和增加背景噪声；调节乐器的高音色彩可以在 9kHz~16kHz 频段进行调整。

由此可见，只有采用多频段单音调控制，才能实现完美的音调控制。在高档的专业级音响系统中，一般有 10 个以上的频率控制点，在 20Hz~20kHz 范围内进行控制。而家用的 Hi-Fi 音响系统中，通常会有 5~10 个频率控制点，因而必须选择对音色影响较大的频率段作为控制点。

对于一般家庭来说，以集成电路为核心器件制作的均衡器具有电路简单，稳定性高等特点（关于集成电路的知识将在第 7 章谈到）。东芝公司生产的 TA7796 是一款常用的图示均衡器专用 IC，它与三洋公司的 LA3600 属于同一时期的产品，两者基本上可以直接替换，只需对个别元件略作改动即可。

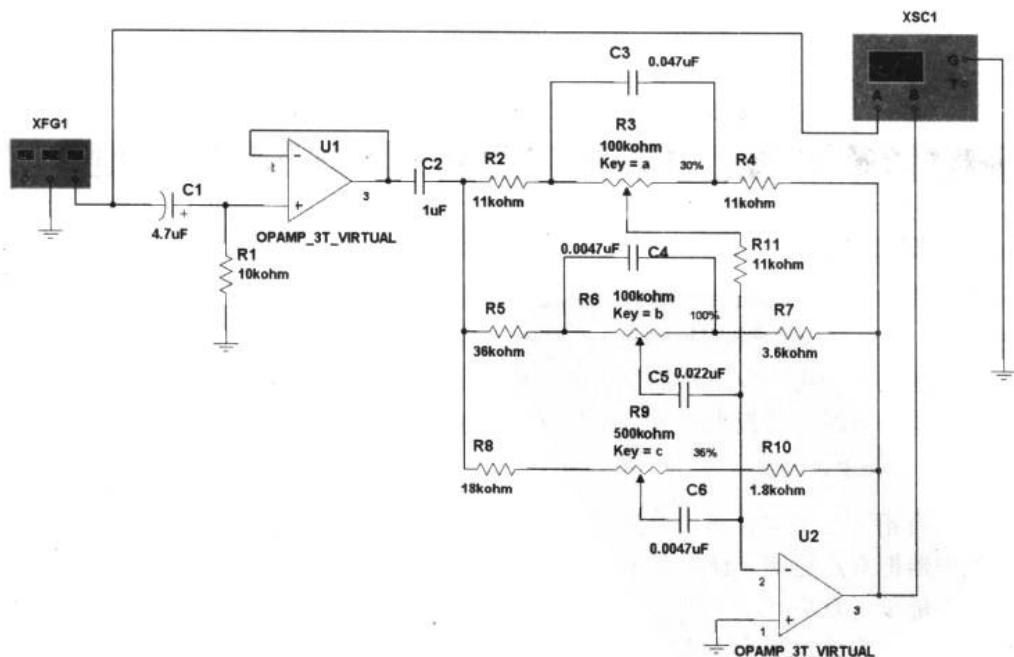


图 5-25 三通道音调控制器



这种集成电路的特点有：内含 5 组调谐电路和输出缓冲电路；工作电压可取 4V~16V；通过外接电位器可以方便地提升或衰减各频段的信号；输出噪声低，失真小。用 TA7796 或 LA3600 制作均衡器最适合于初学者。

图 5-26 所示为使用两片 TA7796 制作的一个声道十段均衡器（另一声道完全相同）。电路中 C1 和 C2 的取值如表 5-1 所示。

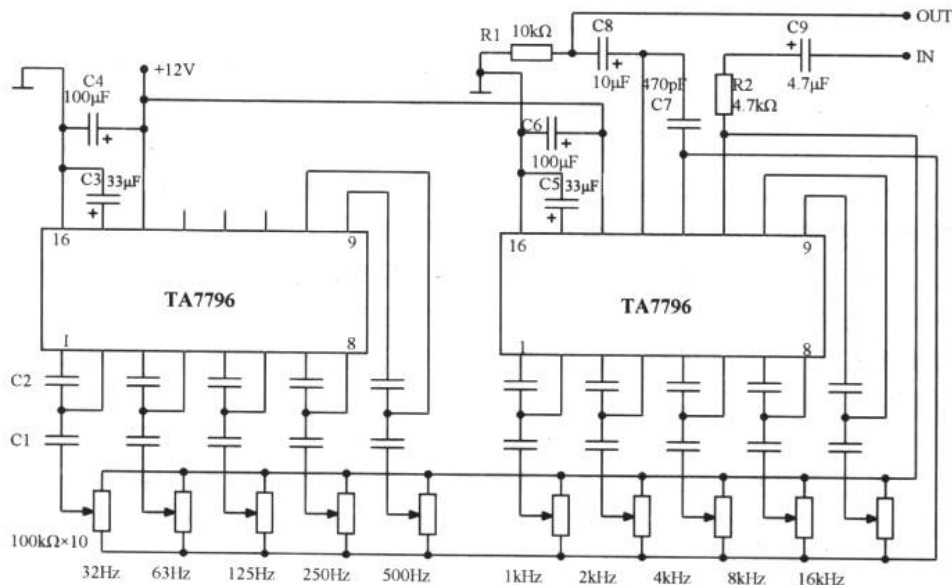


图 5-26 双片 TA7796 制作的十段均衡器

表 5-1 各频段中心频率与 C1 和 C2 的取值

$f_u$	32Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	16kHz
C1	3.3μF	2.2μF	1μF	470nF	220nF	100nF	47nF	22nF	10nF	4.7nF
C2	100nF	47nF	220nF	12nF	5.6nF	2.7nF	1.2nF	560pF	270pF	120pF

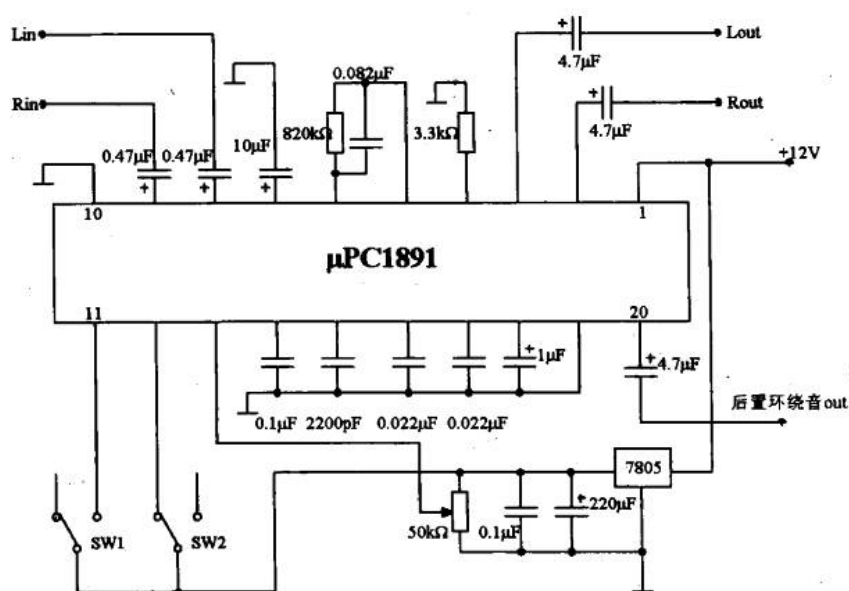
如果制作的是双声道的均衡器，可以选择双联电位器，这样做的好处是左右声道的音色处理相同。但选择电位器时应当注意两联的电阻一致性。在设计均衡器的印刷电路板时，应该结合机箱的结构考虑电位器的位置。一般来说，电位器都是在电路板的外侧，这样在机箱内固定电路板时，可把电位器的调节旋钮伸出机箱来。

#### 4. 环绕立体声处理器

从一对音箱直接播放立体声音源并不能很好地再现原有的声场。但我们可以通过环绕立体声处理器把双声道的立体声变为具有方位感、开阔感、空间感和分布感的环绕立体声。环绕立体声能使听众更具临场感，使听众仿佛被来自不同方向的声音所包围。具有这种环绕声效果的音响系统被称为环绕立体声系统。

目前，环绕立体声系统有杜比定向逻辑解码环绕声系统和模拟声场控制环绕声处理技术两种。图 5-27 就是应用这两种技术的环绕立体声处理器电路，供读者制作时参考。



图 5-27  $\mu$ PC1891 环绕声处理器

## 第6章 振荡器的丰富多彩

这是内容丰富的一章。振荡器这种电路组成在生活中随处可见。可以这么说，只要是“一闪一闪”的或能发出悦耳响声的电子产品都可能含有振荡器。

### 6.1 脉冲信号波形与电路

常见的脉冲信号波形 微分电路与积分电路 脉冲的整形 无源滤波器

为了扫清后续话题中的陌生名词和波形，第一小节我们先来学习一些简单的基础知识。

#### 6.1.1 常见的脉冲信号波形

图 6-1 所示为常见的几种脉冲波（impulse wave）的波形曲线。这些波形是模拟与数字电路中一些典型的信号形式。

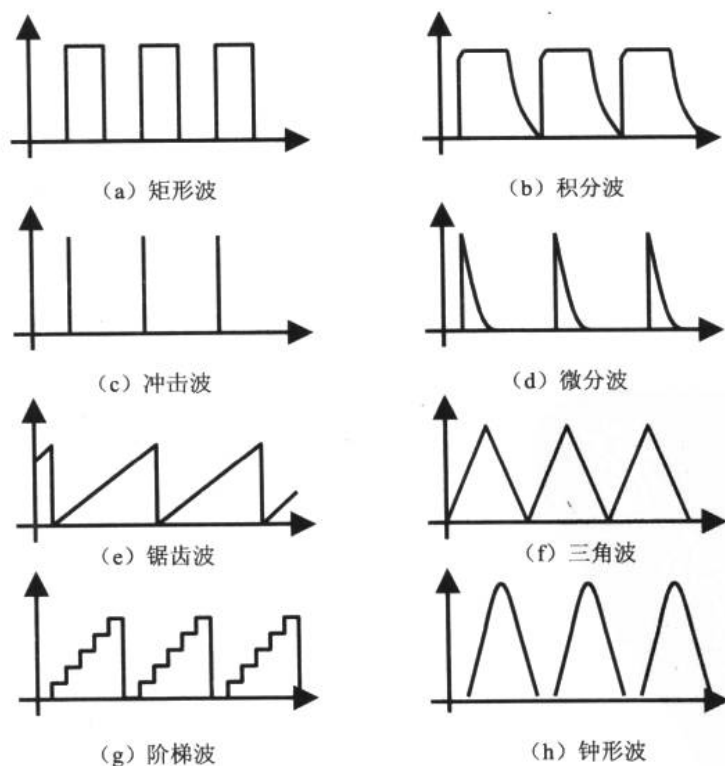


图 6-1 常见的脉冲波



任何波都可以用若干参数来描述它的特征，我们以矩形波为例来看看脉冲波的几个主要参数。

首先应该明确一点，矩形波是从低电平跳变到高电平后再由高电平跳变到低电平的周期性过程。对于理想的矩形波来说，这些跳变产生的结果是波形的垂直变化。但实际上，脉冲从一种电位跳变到另一种电位总是经历一定的时间，这个时间导致了实际的波形曲线与理想的波形之间存在差异。图 6-2 所示的是矩形波的实际情况，它和理想的矩形波形有些出入。

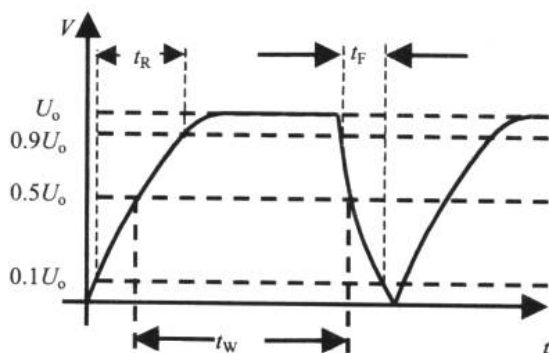


图 6-2 实际的矩形波

关于这个矩形波的主要参数如下：

- ✦ 脉冲幅度  $U_0$ ：脉冲信号所能达到的最大幅度值。
- ✦ 上升时间  $t_R$ ：脉冲从  $0.1U_0$  上升到  $0.9U_0$  所经历的时间。
- ✦ 下降时间  $t_F$ ：脉冲从  $0.9U_0$  下降到  $0.1U_0$  所经历的时间。
- ✦ 脉冲宽度  $t_w$ ：脉冲前  $0.5U_0$  到后  $0.5U_0$  的时间间隔。
- ✦ 脉冲周期  $T$ ：对一个周期性的脉冲波，周期信号指两相邻脉冲出现的时间间隔。
- ✦ 占空比  $D$ ：脉冲宽度与脉冲周期之比称为占空比， $D=t_w/T$ 。 $D=1/2$  的矩形波我们称之为方波。

### 6.1.2 微分电路与积分电路

根据信号电压对时间的微分或积分结果，对信号波形进行变换整理的电路，称为微分电路或积分电路。

#### 1. 微分电路

微分电路 (differential circuit) 可以做电压对时间的微分运算，其基本电路及输入输出的变化显示如图 6-3 所示。

当我们把图 6-3 (b) 所示的方波信号加于微分电路时，电容急剧充电。当输入电压为零时，电容器中所充的电荷开始放电，放电电流的方向与图 6-3 (a) 的方向相反，电阻  $R$  的两端出现负电压。

假设输入的脉冲宽度为  $t_w$ 。当  $t_w \ll \tau$  时, 电路输出波形呈现缓慢的曲线变化, 如图 6-3 (c) 所示; 而当  $t_w \gg \tau$  时, 输出呈现急剧变化, 如图 6-3 (d) 所示。下面通过 Multisim2001 来验证这一点。

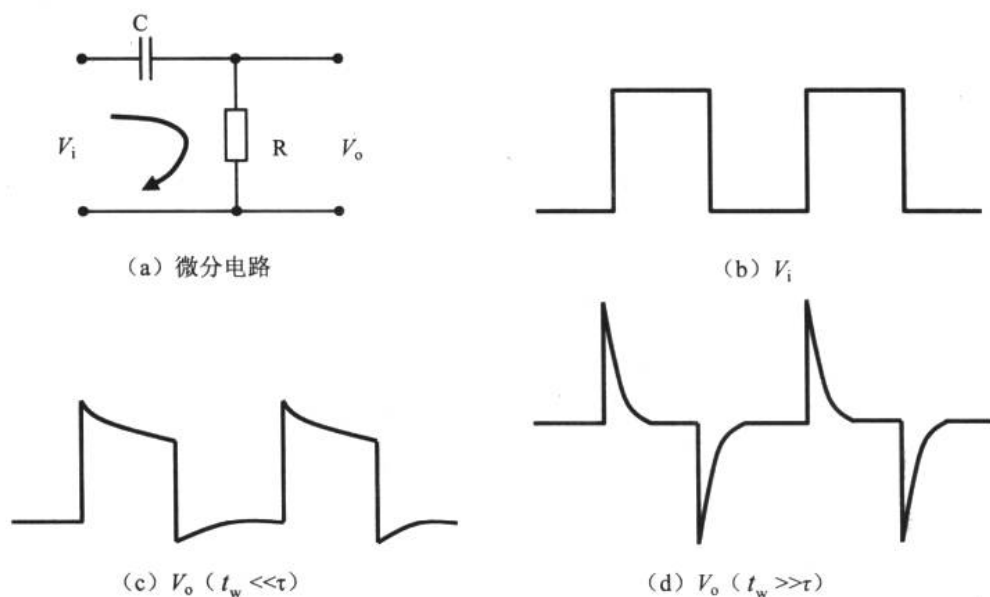


图 6-3 微分电路及其输入输出波形

我们引入一个描述 RC 电路的物理量——时间常数  $\tau$ 。

$$\tau = RC \quad (6-1)$$

**例 6.1.1** 在 Multisim2001 中连接如图 6-4 所示的电路, 通过改变电容 C 和电阻 R 的数值观察输出波形。

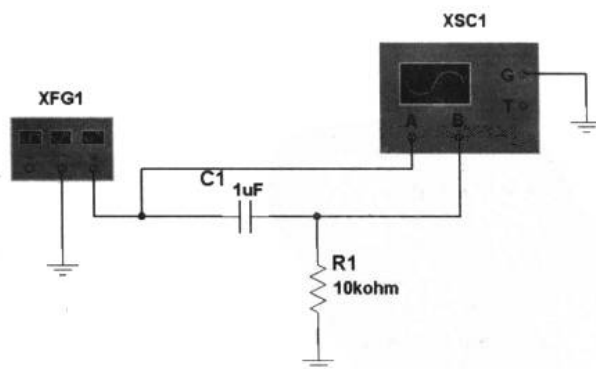


图 6-4 微分电路

取函数信号发生器的频率为 10kHz, 幅度为 1V 的方波, 则  $t_w = (1/10000)/2 = 5 \times 10^{-5} (s)$ 。根据  $t_w$  与  $\tau$  的关系, 我们先设定  $C = 1\mu F$ ,  $R = 10k\Omega$ , 这时,  $\tau = RC = 1 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3 = 10^{-2}$ ,



此时  $t_w \ll \tau$ , 所以得到如图 6-5 所示的波形。

改变电阻  $R=10\Omega$ ,  $\tau=RC=1 \times 10^{-6} \times 10 = 10^{-5}$ , 此时  $t_w \gg \tau$ , 此时将得到如图 6-6 所示的波形。

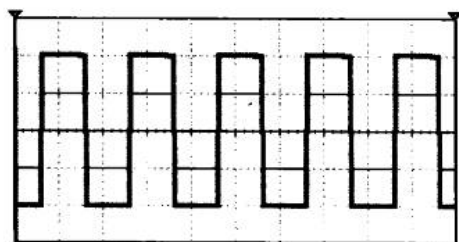


图 6-5  $V_i(t_w \ll \tau)$

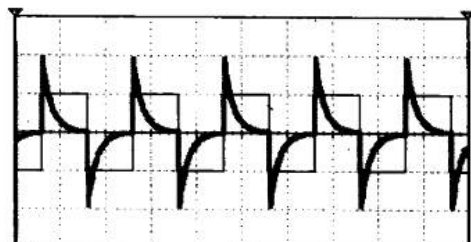


图 6-6  $V_i(t_w \gg \tau)$

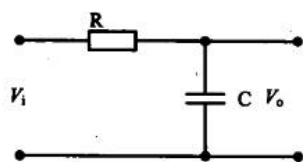
通过这个例子, 我们清楚地看到微分电路的输出波形与时间常数  $\tau$  有着密切的联系。换句话说, 输出波形与  $RC$  的取值有关。微分电路的输出电压  $V_o$  近似为输入电压  $V_i$  对时间的微分与  $RC$  的乘积, 即  $V_o = \frac{dV_i}{dt} RC$ 。微分电路主要用于提取波形的上升沿和下降沿。

可见, 只要时间常数  $\tau \ll t_w$ , 微分电路能将输入的矩形脉冲变换为尖峰脉冲输出, 这是微分电路的最大特点。

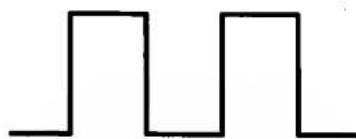
## 2. 积分电路

积分电路 (integration circuit) 是将输入电压进行对时间的积分值后进行输出的电路。图 6-7 所示为其基本电路及输入输出的变化显示波形。由于电阻  $R$  在电路的输入端, 因而当加上输入电压  $V_i$  时, 其输出的上升沿并不像微分电路那样急剧变化, 而是电位渐渐上升, 给电容充电。输入电压变为 0 时, 电容开始放电, 输出电压  $V_o$  开始缓慢下降。这一充放电过程会重复进行。

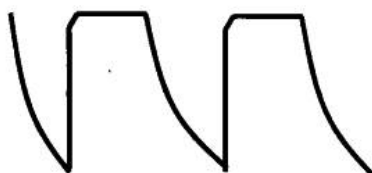
图 6-7 还给出了时间常数  $\tau$  和脉冲宽度之间关系的波形。



(a) 微分电路



(b)  $V_i$



(c)  $V_o(t_w \gg \tau)$



(d)  $V_o(t_w \ll \tau)$

图 6-7 积分电路及其输入输出波形

从图 6-7 (d) 可以看出, 只要电路的时间常数  $\tau \gg t_w$ , 积分电路就能将矩形波电压变为三角波电压。而且,  $\tau$  与  $t_w$  相差越大, 输出电压的线性越好。这一点如果读者能用 Multisim2001 来连接电路后观察, 将会大有收获。

我们的问题进展到现在, 可以开始使用实际的元件连接来代替用 Multisim2001 的仿真。Multisim2001 虽然好, 但毕竟是理想状态下的软件仿真。在电子制作的实际过程中, 会发生许多意想不到的情况。从一开始学习电子技术时就能够用信号发生器和示波器等仪器进行电路实验是十分重要的。

常用的电子实验仪器的使用不是特别困难, 只要多加练习就一定能掌握。利用仪器检测电路的方法和技巧不在本书的范围之内。

### 6.1.3 脉冲的整形

脉冲信号通过各种电路时, 会因为波形畸变失真而引起下一级电路的误动作, 因而有必要采用整形电路对信号波形进行整形或进行重新变化。这里我们只讲 4 种常用的整形电路。

#### 1. 削波电路 (限幅电路)

削波电路 (clipping circuit, limiter circuit) 是提取或削去信号相对于某基准电平的上部或下部波形的整形电路。下面从一个仿真的例子中看看两种削波电路。

**例 6.1.2** 在 Multisim2001 中连接如图 6-8 所示的两个电路, 通过观察输入输出波形理解削波电路的含义。

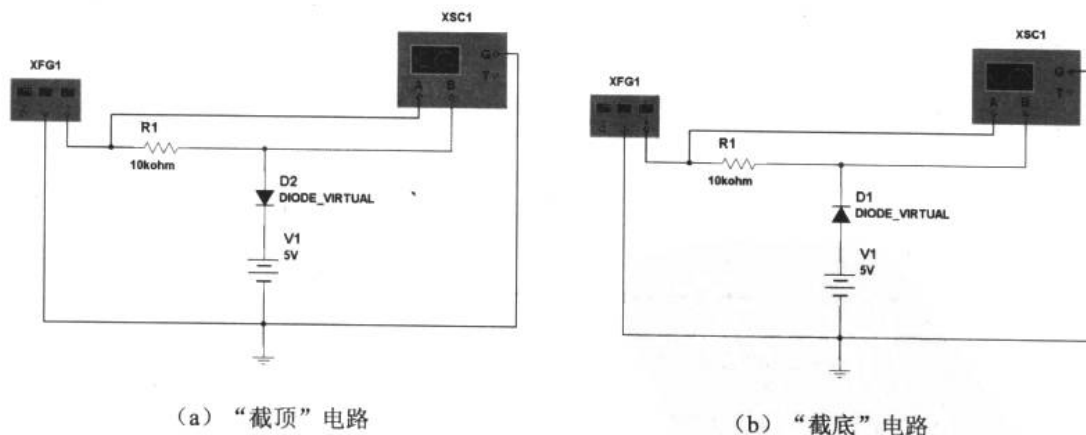


图 6-8 “截顶”和“截底”电路

设置函数信号发生器的频率为 100Hz, 幅度为 10V, 并选方波输出, 得到如图 6-9 所示的仿真结果。

通过拖动波形显示区两侧的游动标尺, 我们可以读出 Channel A 和 Channel B 在每一时刻的幅度值, 如图 6-9 所示。在图 6-8 (a) 所示的“截顶”电路 (也叫上限幅器) 中, 可



以得到输出的峰值为  $5.6\text{V}$ 。分析“截顶”电路可知，二极管的负极电势为  $5\text{V}$ ，由二极管的管压降特性我们知道，要想二极管正向导通，其正极需要有高于  $0.6\text{V}\sim 0.7\text{V}$  的电压。所以，当信号的幅度值增加至  $5.6\text{V}$  时，二极管开始导通，即将输出电压的最大值限制在  $5.6\text{V}$  上，而低于  $5.6\text{V}$  时，二极管截止，其支路相当于开路，于是在示波器上我们得到了如图 6-10 (a) 所示的输出波形。对于“截底”电路（也叫下限幅器）的分析也类似，只不过二极管在信号幅值低于  $4.3\text{V}$  时导通，将输出的最低电压限制在了  $4.3\text{V}$ ，保留了高于  $4.3\text{V}$  的信号成分，如图 6-10 (b) 所示。

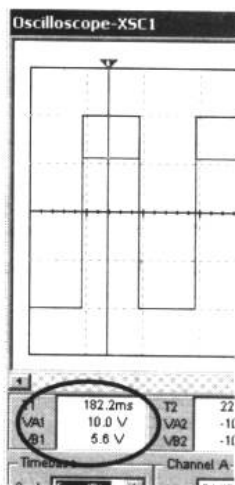


图 6-9 在示波器中观察两个通道的幅值

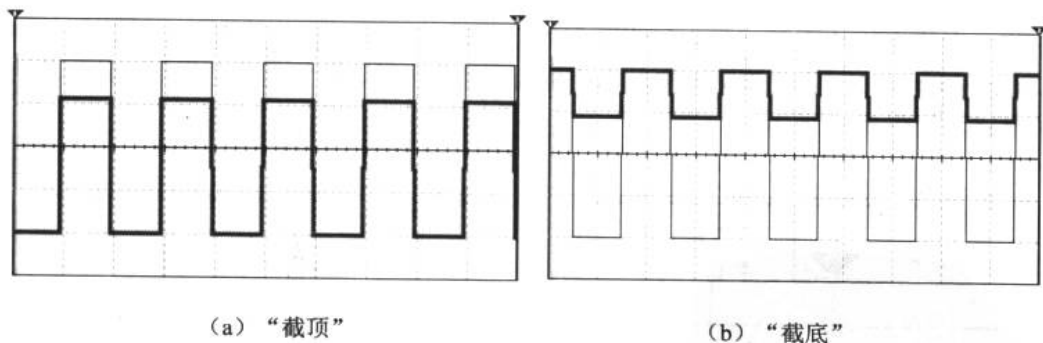


图 6-10 “截顶”和“截底”的效果

## 2. 双向限幅电路

将上、下限幅器组合在一起，就组成了如图 6-11 所示的两种双向限幅电路。图 6-12 所示为其各自的输入输出波形图。

值得注意的是，图 6-11 (a) 所示的双向限幅电路中，二极管  $D1$  的正极电势为  $-5\text{V}$ 。所以当信号的幅值低于  $-(5+0.6)\text{V}$  时，二极管导通，即把信号电压限制在了  $-5.6\text{V}$ 。于是，我们得到如图 6-12 (a) 所示的结果。图 6-12 (b) 所示的结果可根据以上的分析推导出来。



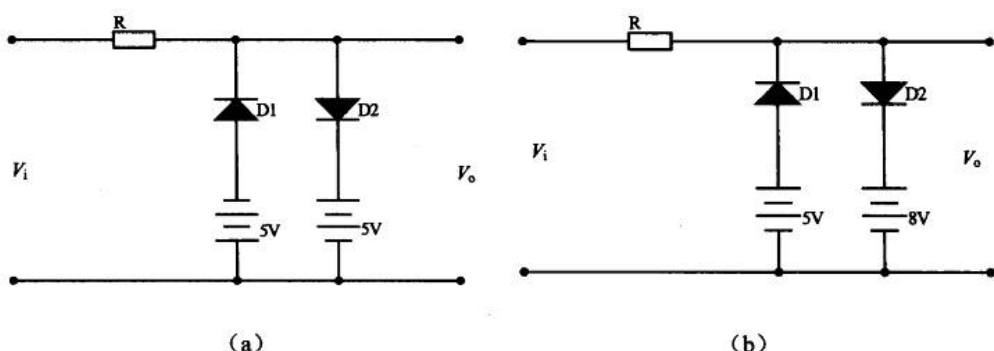


图 6-11 两种双向限幅电路

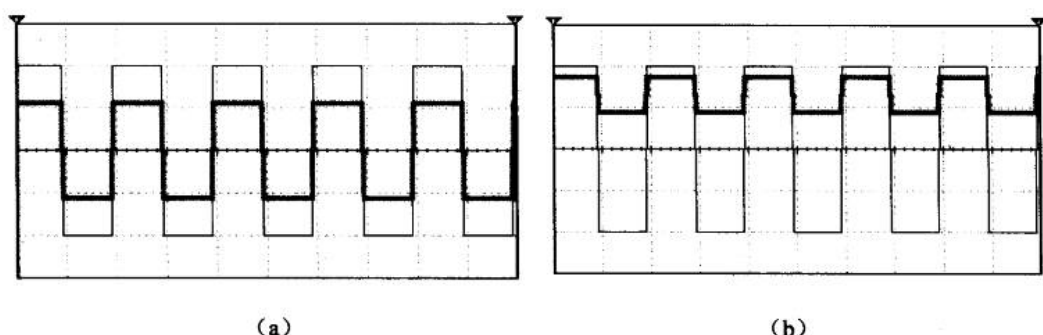


图 6-12 两种双向限幅电路的输入输出波形

### 3. 钳位电路

将一直流电压加于某信号电压上，仅使信号整体抬高或下降的电路，称为钳位电路（clamping circuit）。提高直流电平的电路称为正钳位电路，降低直流电平的电路则称为负钳位电路，如图 6-13 所示。

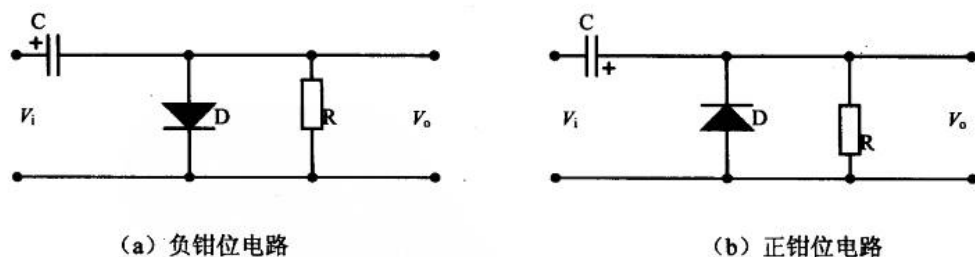


图 6-13 钳位电路

我们来分析一下负钳位电路。设输入信号如图 6-14 (a) 所示。在零时刻， $V_i = +E$ ， $V_o$  产生一个幅值为  $E$  的正跳变，此后在正半周期间，二极管  $D$  导通，电容  $C$  充电电流很大， $C$  两端电压很快接近  $E$ ，致使  $V_o = 0$ 。在正半周结束时刻，由于电容  $C$  的右端为负极性，所以  $V_o$  又发生幅值为  $-E$  的跳变。此后，在下一个方波到来之前， $V_i = 0$ ， $D$  截止，充电电容  $C$  只能通过  $R$  放电。通常， $R$  取值很大，所以  $C$  两端电压下降很慢， $V_o$  变化也很小。在第二个方波到来之时， $V_o$  又发生一个幅值为  $E$  的跳变，此后， $D$  导通，电容  $C$  又重新充电。与



第一个正半周不同的是,此时电容上储有大量电荷,因而充电持续时间更短, $V_o$ 更迅速地降低为零。以后重复上述过程, $V_o$ 的波形如图 6-14 (b)。可见, $V_o$ 的顶部基本上被限定在零电平上,整个  $V_i$  信号向负向上平移了,于是,就称该电路为负钳位电路(也叫零电平正峰钳位电路,顶部钳位电路)。

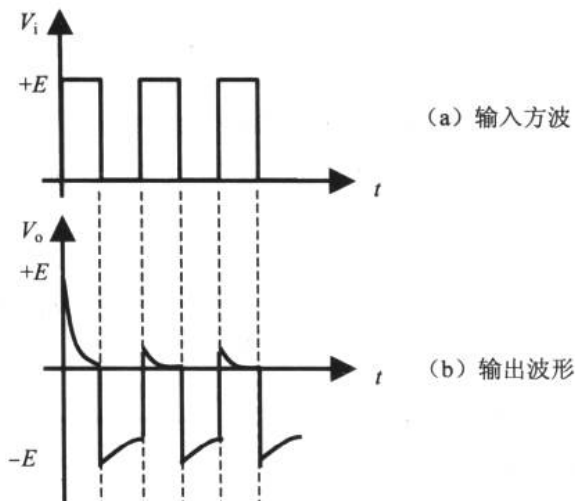


图 6-14 负钳位电路的输入输出信号

正钳位电路的分析方法与此类似,读者可以自己分析一下。

这几种波形整形电路除了能对方波进行整形外,对三角波和正弦波具有同样的效果,我们可以利用 Multisim2001 对不同形式的信号进行实验。在从事一个相对复杂的项目时,比如在包含有传感器、放大器及 A/D 转换器等复杂系统里,整形电路就有可能派上用场。

#### 6.1.4 无源滤波器

滤波器(filter)是一种频率选择电路,它能够根据实际需要滤除掉某一频率段的信号成分。这是电子设备中常用到的电路模块之一,比如在测量人体的脑电活动时,从电极输入的信号除了有微弱的脑电信号外,同时还夹杂有肌电及 50Hz 工频等干扰信号。为了能够提取其中的脑电信号,我们可以借助滤波器将非脑电频率上的干扰信号滤去,留下有用的信号。

其实无源滤波器(passive filter)的电路结构并不陌生,如图 6-15 所示就是两种滤波器的电路结构。

微分电路就是一个简单的高通滤波器(HPF, highpass filter)。为什么呢?输入信号在滤波器中要通过电容,由于电容的“隔直通交”特性,高频信号很容易就通过电容,但低频信号就不能通过。所以,微分电路成了一个简单的高通滤波器。



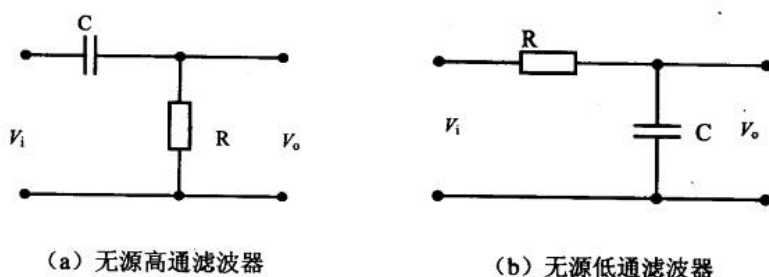


图 6-15 高通滤波器和低通滤波器

式 (6-2) 是滤波器截止频率的计算公式。从公式中看到, 截频  $f_c$  与  $RC$  乘积成反比。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6-2)$$

如果从频响曲线上看, 高通滤波器就是一个能通过高频信号的电路, 而低通滤波器 (LPF, lowpass filter) 则与之相反, 如图 6-16 所示。

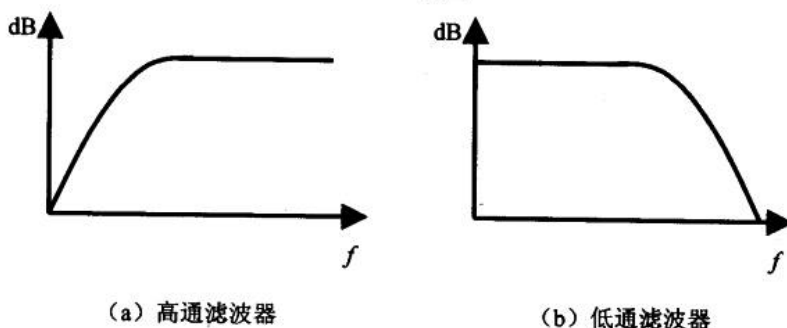


图 6-16 高通滤波器和低通滤波器的频响曲线

有一点值得了解一下, 在上一章的音响电路里, 我们介绍了均衡器, 这是一种提升某一频率段音频信号的电路。图 6-17 所示就是这种电路的简易模型。

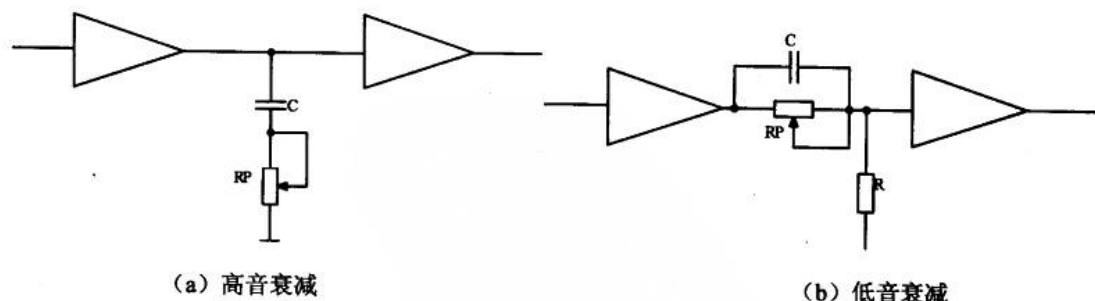


图 6-17 简易均衡器

在图 6-17 (a) 中, 信号通过  $RC$  网络时, 其中的高音 (高频信号) 通过电容  $C$  和电阻  $R$  而被衰减, 低音顺利通过进入下一级。而图 6-17 (b) 中, 情况正好相反。

有的 CD 唱机上也会有音乐的模式选择功能。比如有的人对重低音的音色比较青睐, 开启重低音的模式意味着提高音频信号的低频部分增益。这些功能的实现都是通过滤波器和放大器实现的。当然, CD 唱机中可能使用的是数字滤波。数字滤波的话题超越了本书的范围。



在本书的第7章还会对有源滤波器进行介绍。

## 6.2 振荡器面面观

振荡的原理 LC 振荡器 RC 振荡器 晶体振荡器

我们将从一个身边的现象开始了解振荡器 (oscillator)。

如果在唱卡拉 OK 时我们把话筒对准扬声器, 会产生刺耳的啸叫声, 这就是振荡 (oscillate), 如图 6-18 所示。

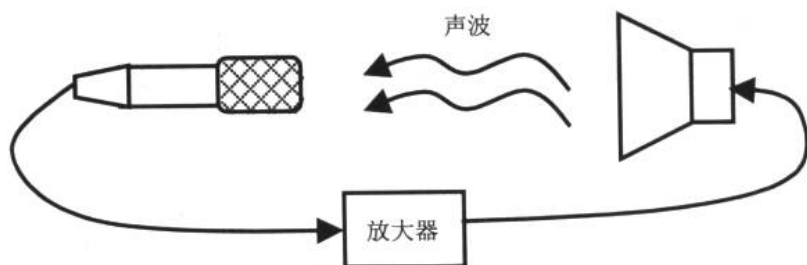


图 6-18 振荡现象

这一现象可以这样解释: 当把话筒对准扬声器时, 扬声器里发出的微小的声音被话筒捕捉到后, 变成电信号进入了放大电路里, 这个微小的信号被放大后又通过扬声器发出, 然后又被话筒捕捉到而再次进入电路。这样, 反复循环便形成了非常强的振荡, 于是出现了啸叫声。如果把话筒移走, 切断了振荡的回路就能消除振荡。

### 6.2.1 振荡的原理

从工程的角度来看振荡, 如果把已经放大的信号按照与输入同相的方式送到输入端, 称为正反馈。在正反馈电路里, 输入信号经过放大器后又注入输入端, 这样, 信号不断被放大, 如图 6-19 所示。不过, 信号不可能无限地增大, 达到某个定值就不再增大了。这个定值就是振荡的稳定状态。

可能读者会问, 既然没有外部注入信号, 为何还有信号输出呢? 其实电路并不是一下子就进入振荡状态的。一般情况下, 电路里总有噪声 (例如三极管和电阻内的热噪声), 这种噪声就好像是振荡的“种子”, 通过正反馈器件被循环放大, 于是出现了振荡现象。

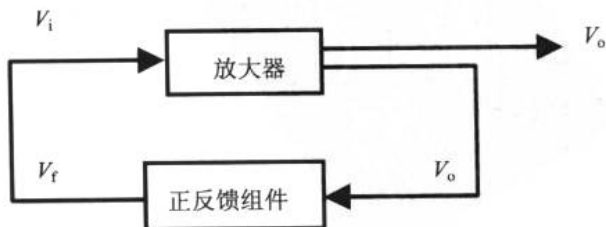


图 6-19 振荡的原理

如果振荡电路里的正反馈组件具有频率选择性,那么,特定频率的信号衰减就小,于是在输出时就会听到这一频率的音频信号。这就是电子产品模拟各种声音的理论基础。接下来,我们来看看 3 种常见的振荡器。

## 6.2.2 LC 振荡器

把在正反馈组件中采用线圈 L 和电容 C 进行频率选择的电路称为 LC 振荡器。LC 振荡器有调谐式、哈脱莱式和考尔毕兹式,下面先来看看调谐式振荡器。

图 6-20 所示为调谐式振荡器电路图。L1 和 L2 两组线圈以互感方式进行耦合。这是为了将输出的一部分信号返回到输入。L1 和 L2 的耦合方向应符合返回信号和输入信号相加的关系。在 L1 和 L2 旁边的圆点符号表示相位方向相同。振荡器的频率用式 6-3 计算。

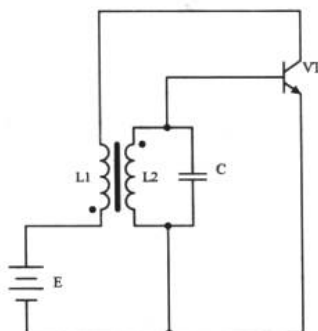


图 6-20 调谐式振荡器

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 \cdot C}} \quad (6-3)$$

## 6.2.3 RC 振荡器

将正反馈组件中采用电容 C 和电阻 R 进行频率选择的振荡电路称为 RC 振荡器。图 6-21 所示为一个典型的移相式振荡器。它是经三级 RC 反馈到输入端的。因为运算放大器的反向输入端和输出端之间有  $180^\circ$  的相位差,所以,如果用三级 RC 将相位后移  $180^\circ$ ,那么,反馈信号将和输入同相位,于是成为正反馈进行振荡。该振荡器的振荡频率可用式 6-4 推出。

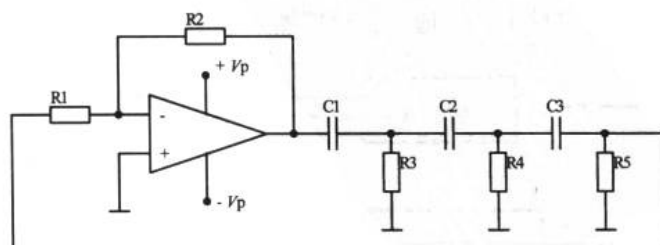


图 6-21 移相式振荡器



$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (6-4)$$

## 6.2.4 晶体振荡器

石英晶体（二氧化硅的结晶体）具有不随温度变化的固有振荡频率。因此，石英晶体振荡器的振荡频率在周围的温度、湿度和电源电压变化时几乎不变化，所以被广泛应用于彩电、计算机和遥控器中的各类振荡电路中，以及在通信系统中用于频率发生器，为数据处理设备产生时钟信号和为特定系统提供基准信号。

### 1. 石英晶体的振荡原理

#### (1) 石英晶体振荡器的结构

石英晶体振荡器是利用石英晶体的压电效应制成的一种谐振器件，它的基本构成大致是：从一块石英晶体上按一定方位角切下薄片（简称为晶片，它可以是正方形、矩形或圆形等），在它的两个对应面上涂敷银层作为电极，在每个电极上各焊一根引线接到管脚上，再加上封装外壳就构成了石英晶体谐振器，简称为石英晶体或晶体、晶振。其产品一般用金属外壳封装，也有用玻璃壳、陶瓷或塑料封装的。图 6-22 所示为一种金属外壳封装的晶振结构和外观示意图。

#### (2) 压电效应

若在石英晶体的两个电极上加一电场，晶片就会产生机械变形。反之，若在晶片的两侧施加机械压力，则在晶片相应的方向上将产生电场，这种物理现象称为压电效应。如果在晶片的两极上加交变电压，晶片就会产生机械振动，同时晶片的机械振动又会产生交变电场。在一般情况下，晶片机机械振动的振幅和交变电场的振幅非常微小，但当外加交变电压的频率为某一特定值时，振幅明显加大，比其他频率下的振幅大得多，这种现象称为压电谐振，它与 LC 回路的谐振现象十分相似。它的谐振频率与晶片的切割方式、几何形状及尺寸等有关。

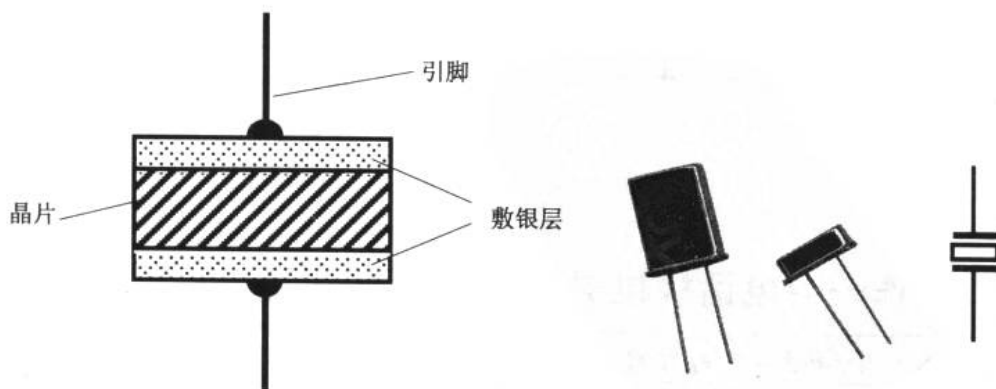


图 6-22 晶振结构、外观和电路标识

## 2. 石英晶体振荡器的主要参数

晶振的主要参数有标称频率、负载电容、频率精度及频率稳定度等。不同的晶振标称频率不同，标称频率大都标明在晶振外壳上。如常用普通晶振标称频率有：48kHz、500 kHz、503.5 kHz、1MHz~40.50 MHz 等，对于特殊要求的晶振频率可达到 1000 MHz 以上。负载电容是指晶振的两条引线连接其内部及外部所有有效电容之和，可看作晶振在电路中串接电容。

负载频率的不同决定振荡器的振荡频率不同。标称频率相同的晶振，负载电容不一定相同。因为石英晶体振荡器有两个谐振频率：一个是串联谐振晶振的低负载电容晶振，另一个为并联谐振晶振的高负载电容晶振。所以，标称频率相同的晶振互换时还必须要求负载电容一致，不能冒然互换，否则会造成电器工作不正常。

由于普通晶振的性能基本都能达到一般电器的要求，对于高档设备还需要有一定的频率精度和频率稳定度。这要根据具体的设备需要而选择合适的晶振，如通信网络、无线数据传输等系统就需要更高要求的石英晶体振荡器。因此，晶振的参数决定了晶振的品质和性能。在实际应用中要根据具体要求选择适当的晶振，因不同性能的晶振其价格不同，要求越高价格也越贵，一般选择时只要满足要求即可。

## 3. 石英晶体振荡器电路

将 LC 振荡器的 L 部分换成石英晶体，即可得到考尔毕兹晶体振荡器和哈脱莱晶体振荡器。

LC 振荡器的 L 部分用晶振置换可得到如图 6-23 所示的两种晶体振荡器（crystal oscillator）。这时，振荡器的频率与选用的晶振频率一致，即  $f_o = f_{\text{crystal}}$ 。

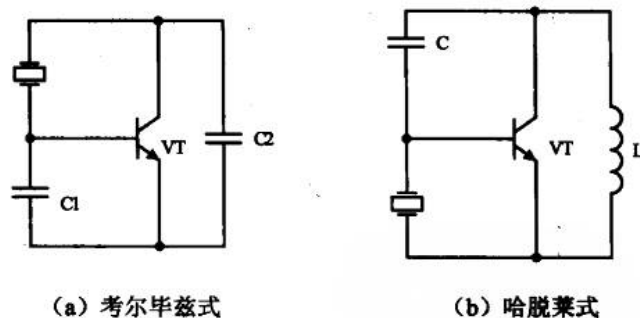


图 6-23 晶体振荡器

# 6.3 制作一台电话摘机提醒器/通话限时器

## 再谈振荡器 电话机摘机提醒器/通话限时器电路的调试与使用方法

通过前面的学习我们对振荡器有了初步的了解。这一节我们开始制作一个实际的产品，从中感受振荡器的作用。





### 6.3.1 再谈振荡器

除了上一节中提到的一些结构简单的振荡器外，多谐振荡器（multivibrator）是一种相当有用的电路。它是方波发生器、延时电路、计数器以及存储器等基本电路组成形式。多谐振荡器主要有无稳态、单稳态和双稳态等几种。

#### 1. 无稳态多谐振荡器（n. astable multivibrator）

**例 6.3.1** 制作一个如图 6-24 所示的电路，观察电路的效果。

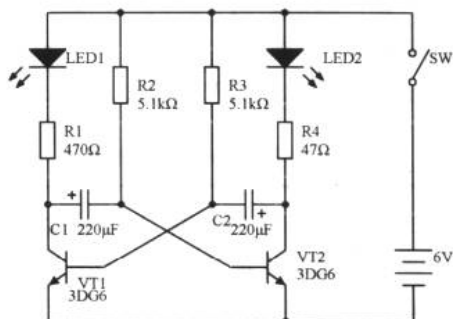


图 6-24 无稳态多谐振荡器应用

如果读者能把实际的电路连接出来，将会看到发光二极管（第 8 章将会谈到）LED1 和 LED2 交替发光。这就是无稳态多谐振荡器的一个应用举例。

在电路接通电源时，两支三极管 VT1 和 VT2 都开始“争相”导通，虽然电路是对称的，但是由于这对三极管与一对电解电容的参数不可能完全一致，所以总有一只三极管首先导通。假如三极管 VT1 先导通，在集电极与发射极间就会形成通路，电流流过 LED1 使其发光。VT1 的集电极与电源负极近似导通，呈低电平，这个低电平通过电容 C1 耦合到三极管 VT2 的基极，使 VT2 趋向截止。由于三极管 VT2 的截止，其集电极电位上升，这个上升的电压经电容 C2 的耦合又使 VT1 的导通加强，最后 VT2 干脆完全截止，VT1 完全导通。这时电路进入了一个暂稳态过程（简称暂态）。

在 VT1 导通后，电容 C1 通过电阻 R1 和已经饱和的三极管 VT1 开始充电，使 C1 的右边为正，左边为负，从而使三极管 VT2 的基极电压开始升高。当三极管 VT2 的基极电压升高到一定程度时，VT2 开始导通，这时电流流过 LED2 使其发光，VT2 的集电极电压下降。因为电容两端的电压不能突变，电容 C2 右端电压的下降使电容 C2 左端的电压跟着下降，变为负电压，强迫三极管 VT1 截止，VT1 的集电极电压又上升，再经 C1 耦合至 VT2 的基极，又形成一个正反馈，使 VT2 完全导通，VT1 完全截止，电路又处在一个暂态过程。如此往复，电路就不断在循环工作，于是我们看到 LED1 和 LED2 在交替发光。振荡的周期可用式（6-5）进行计算（推导过程略）。

$$T = 0.69 \cdot (R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2) \quad (6-5)$$

## 2. 单稳态多谐振荡器 (monostable multivibrator)

**例 6.3.2** 制作如图 6-25 所示的声控延时电动机电路, 学习单稳态多谐振荡器。

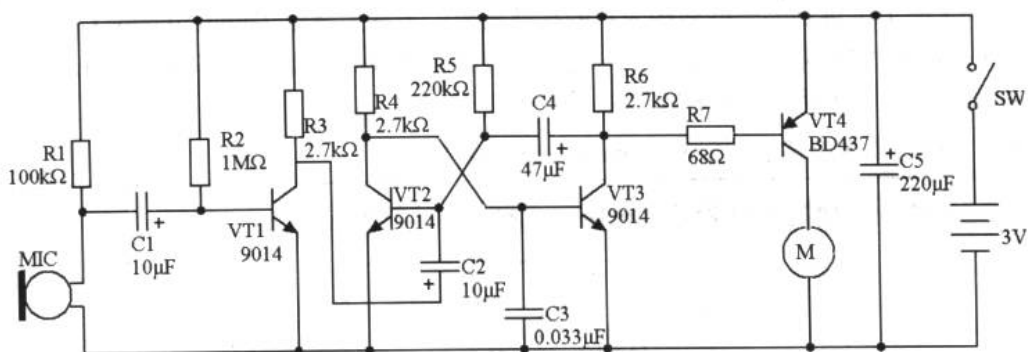


图 6-25 单稳态多谐振荡器应用

这个电路实现的功能是: 当我们对着话筒 MIC 拍手或喊叫时, 电动机 M 就会转动起来, 几秒后它又会自动停止工作。如果再次拍手, 它又重新转动, 实现了声控延时的作用。

电动机是一个十分普遍的电能-动能转换装置。它分成直流电机、交流电机和步进电机等几种, 使用得最多的是直流电机。直流电机根据转速的不同, 又可分成直流高速、直流低速和直流减速电机等几种。根据实际需要电机有 3V、6V 和 12V 等多种额定电压以供选择。图 6-26 所示为常见的直流低速电机。

由于电机的功率相对来说比较大, 在图 6-25 中, 使用三极管 VT4 对其进行驱动。还有一点读者也许已经知道, 直流电机的转速与电压有关; 转向与电压的极性有关。关于直流电机的转速和转向控制, 本书不再叙述。

现在我们回到单稳态多谐振荡器的话题上。其中三极管 VT2、VT3 及电阻、电容组成了单稳态电路。为了研究方便, 我们把单稳态电路部分单独提取出来, 如图 6-27 所示。



图 6-26 直流低速电机及电路标识

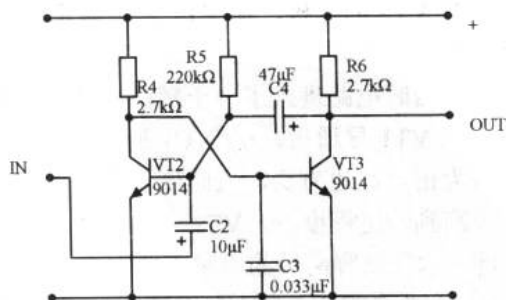


图 6-27 单稳态多谐振荡器

电阻 R5 为三极管 VT2 提供了基极电流; 而三极管 VT3 的基极电流则是从三极管 VT2 的集电极电阻上得到的。三极管 VT2 的集电极与三极管 VT3 的基极之间是直接耦合的, 而三极管 VT3 的集电极与三极管 VT2 的基极之间通过电容 C4 进行耦合。电阻 R4、R6 分



别是 VT2 和 VT3 的集电极负载。

单稳态电路的特点是它只有一个稳定状态。电路在没有信号输入时, 选择合理的  $R_4$ , 使三极管 VT2 稳定在饱和状态, 此时它的集电极电压约为 0.3V 以下。这样, 三极管 VT3 稳定在截止状态。这就是单稳态电路的稳定状态。

当一个负脉冲通过 C2 到达三极管 VT2 的基极时, 三极管 VT2 开始趋向截止, 它的集电极电流减小, 集电极电压升高。经过直接耦合, 使 VT3 的基极电压升高, VT3 开始导通, 它的集电极电压下降。此时负脉冲虽然已经消失了, 但经电容 C4 的耦合又使三极管 VT2 的基极电压进一步下降, 形成一个正反馈, 很快到达一个新的状态。此时三极管 VT2 截止, VT3 饱和导通。这就是单稳态电路的暂态过程。

单稳态电路的暂态过程是不能持久的。在此期间, 电容 C4 通过电阻 R5 进行放电, 随着放电的进行, 三极管 VT2 的基极电压逐渐升高, 当它达到 0.5V 以上时, 三极管 VT2 开始导通, 正反馈现象再次发生, 整个电路很快又回到 VT2 饱和导通、VT3 截止的稳定状态。

这个暂态期的时间长(振荡周期)为:

$$T = 0.69 \cdot R_5 \cdot C_4 \quad (6-6)$$

图 6-27 中, 电阻  $R_5$  为 220k $\Omega$ , 电容  $C_4$  为 47 $\mu$ F, 所以  $T \approx 7$  (s)。通过改变  $R_5$  或  $C_4$  的值可以改变延时时长。

电路复原后, 电容 C4 通过电阻 R6 和三极管 VT2 的发射结进行充电, 充电完成后电路才可以接收下一次的触发。

在图 6-25 中, 话筒将声音信号变为电信号。电阻  $R_1$  为驻极体话筒提供了一个工作电压。信号通过 VT1 的放大后, 变成一个负脉冲(这是因为共射极放大器是一个反相放大器, 关于反相放大器将会在下一章谈到), 使单稳态电路翻转。电容 C3 可以滤除三极管 VT3 基极上的高频杂波, 防止 VT3 的误动作。

在电路的稳态过程下, 单稳态电路中三极管 VT2 导通, VT3 截止。VT3 的集电极为高电平。接在 VT3 集电极上面的 VT4 是 PNP 型三极管, 所以 VT4 没有导通, 电机不工作。一旦外界的声音触发电路, 单稳态电路中的 VT2 的基极受到负脉冲的作用而截止, 单稳态电路处在暂态过程。这时三极管 VT3 导通, 集电极电压下降, 导致与之连接的 VT4 也导通, 电机开始工作。由于单稳态电路的暂态过程时间由电阻  $R_5$  与电容  $C_4$  决定的, 于是几秒后单稳态电路会自动恢复到稳态过程下, 于是电机停止工作。

由于电机工作时电流较大, 会对电路产生一定的干扰, 为了保证电路能稳定工作, 防止干扰信号对音频放大电路的影响, 使用电容 C5 为电源进行退耦滤波。

### 3. 双稳态多谐振荡器 (bistable multivibrator)

双稳态多谐振荡器具有两个稳定状态, 在电子开关等电路中常常使用。施密特触发器是一种常用的双稳态多谐振荡器, 它主要用来将正弦波等非脉冲信号变换为适于数字电路工作的脉冲波, 以及将波形畸变了的脉冲进行整形。

**例 6.3.3** 在 Multisim2001 中连接如图 6-28 所示的电路, 了解施密特触发器的作用。

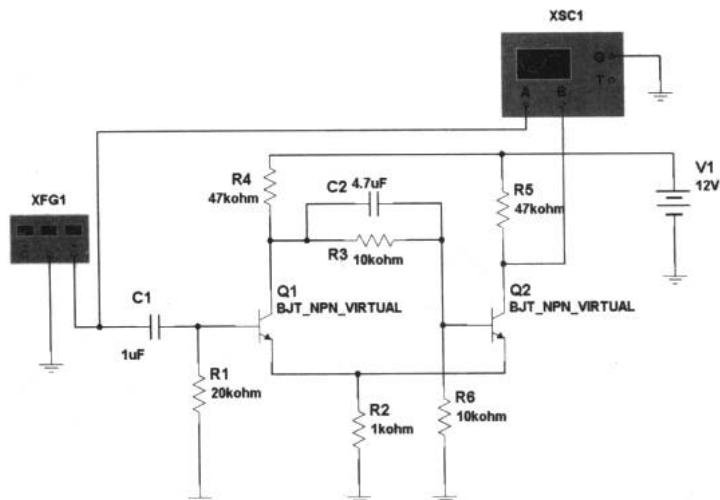


图 6-28 施密特触发器

通过 Multisim2001 仿真，结果如图 6-29 所示。很明显，当输入信号达到某规定电压值（又称为阈值或门限电平）时，其输出电位会立即跳变。因而施密特触发器常用于振幅比较器，以及将正弦波变换为方波的电路中。

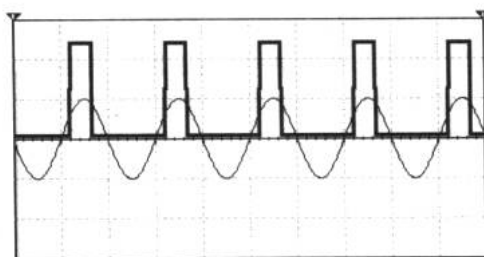


图 6-29 施密特触发器的输入输出波形图

### 6.3.2 电话摘机提醒器通话限时器电路的调试与使用方法

我们开始进入本章的实践环节。

随着社会的发展，电话已经普及到了千家万户。我们在使用电话过程中，使用后经常发生没有挂好电话的现象，外边的电话打不进来，使人很着急。电话摘机提醒器就是为解决这个问题而设计的。

这个装置的安装与使用都比较简单，直接并联在电话线上，使用方便。它不仅可作为电话摘机提醒器使用，还可以作通话限时器使用。

#### 1. 电路原理图

图 6-30 所示为它的电路原理图，我们稍后会分析这个电路的工作原理。在选择元件时，



三极管 VT2、VT3 和 VT4 可以使用放大倍数较大的（即  $h_{FE}$  较大的），而 VT6 和 VT7 则使用放大倍数较小的。为了调试的方便，电解电容 C1 先不要安装，并准备一只  $10\mu\text{F}$  的电解电容。扬声器 SP 取  $0.5\text{W}8\Omega$  的即可。

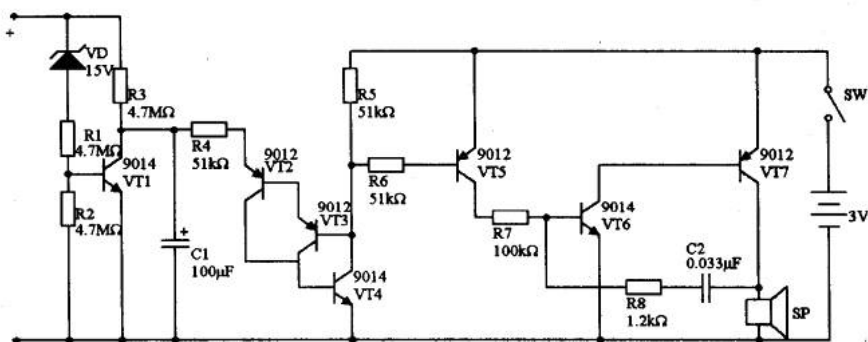


图 6-30 电话摘机提醒器/通话限时器电路图

## 2. 调试与使用方法

在前面的章节里，我们在制作过程中对电路进行调试的不多。因为那些电路大都比较简单，一接即成。但是在电子制作中特别是模拟电路的制作时，调试是必不可少的。不同的电路都有不同的调试方法，这些经验都要在实践中积累。

我们现在对这台电话摘机提醒器/通话限时器进行调试，使用的调试方法是一种十分常用的分级调试法。

根据电路信号的特点把电路分为前级和后级，如图 6-31 所示。

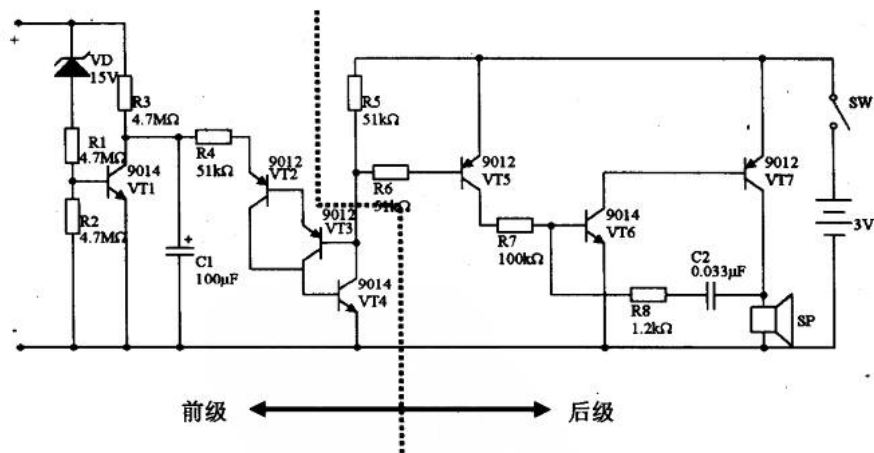


图 6-31 分级调试

电路连接完毕后，接通 3V 电源，用导线短路三极管 VT4 的集电极与发射极，这时扬声器可以发出鸣叫，这说明 VT4 以后的后级电路工作正常。对于前级的调试，可使用一 30V 电压可调的直流电源，接在电路的输入端上。当把电源电压调到 15V 以下时，扬声器会发

出鸣叫。此时再将准备好的  $10\mu\text{F}$  电解电容焊到电路板上 C1 的位置上,当输入电压调到 15V 以下时,扬声器不会立即鸣叫,而是要延迟 1min~2min 才开始鸣叫,而每次鸣叫约几十秒,再间歇 1min 左右又开始下一次鸣叫。这就是为了调试的方便,我们先用  $10\mu\text{F}$  电解电容代替 C1 进行试验的效果,以缩短试验时间。这是在电子制作调试中的常见方法。这个试验完成后,可以用  $100\mu\text{F}$  的电解电容把  $10\mu\text{F}$  的换下,这样电路的延迟时间约为 11min~16min,每次鸣叫约 80s 左右,再间歇 11min 左右又开始下一次的鸣叫。

调试完成后,可以将这个电路接到电话线上试一试。必须注意电话线上有 48V 以上的直流电压,所以要先用电压表辨别电话线的正负极性。然后将电路输入端的正负极与电话线的正负极相连接。这时,摘下话机进行试验,十几分钟后扬声器会鸣叫。

### 3. 电路工作原理

图 6-31 所示为电路图。电路主要由 3 部分组成,第一部分是由稳压二极管和三极管 VT1 等组成检测电路。当电话处于挂机状态时,电话线上的电压较高,约为 48V,三极管 VT1 导通,它的集电极电压接近 0V,使后边的开关电路不能启动。一旦摘机,电话线上的电压会下降到 10V 以下,三极管 VT1 截止,电话线上的电压通过电阻 R3 开始为电容 C1 充电。

第二部分是由电容 C1 和三极管 VT2、VT3、VT4 等组成的延时开关电路。电话没有摘机时,三极管 VT2 的发射极电压接近 0V,而三极管 VT3 的基极电压接近 3V。三极管 VT2、VT3 和 VT4 均截止。而在摘机后,随着电阻 R3 不断为电容 C1 充电,使电容 C1 的电压不断升高。当 C1 电压到达 4.2V 左右时,VT2 和 VT3 开始导通,进而促使 VT4 导通。而 VT4 的导通又加速了三极管 VT2 和 VT3 的导通,如此循环,使 VT4 的集电极电压迅速接近 0V。VT2、VT3 和 VT4 导通后,电容 C1 通过 VT2 与 VT4 的发射结进行放电,当 C1 的电压降低到 1.2V 时,VT2、VT3 和 VT4 又开始趋向截止,由于它们的正反馈作用,电路迅速恢复到截止状态,如此循环。电容 C1 和电阻 R3 的参数决定了延时长。

第三部分是鸣叫电路。VT6 和 VT7 及外围元件组成了互补多谐振荡器。所谓互补多谐振荡器就是由两种三极管和少量的电阻、电容构成的多谐振荡器(该电路工作分析从略)。当三极管 VT4 截止时,VT5 的基极得不到电流,也截止。VT6 基极得不到电流,互补多谐振荡器不工作。一旦 VT4 导通,VT5 也导通,振荡器开始工作,扬声器开始鸣叫。

此装置在电话一摘机时,电路就开始计时,所以当通话时间超过 10min 时,扬声器就会鸣叫,所以它也是一个通话限时器。



## 第7章 集成电路 ABC

自上世纪初的真空电子管发明后,电子器件至今已经历了五代的发展过程。集成电路(IC, integrated circuit)的诞生,使电子技术出现了划时代的革命,它是现代电子技术和计算机发展的基础,也是微电子技术发展的标志。

电路集成化的最初设想是在晶体管兴起不久后由英国科学家达默于1952年提出的。他设想按照电子线路的要求,将一个线路所包含的晶体管和其他必要的元件全部集合在一块半导体晶片上,从而构成一块具有预定功能的电路。

1958年,美国德克萨斯仪器公司(Texas Instruments)的一位工程师基尔比,按照上述设想,制成了世界上第一块集成电路。他使用一根半导体单晶硅制成了相移振荡器,这个振荡器所包含的4个元器件已不需要用金属导线相连,因为硅棒本身既是电子元器件的材料,又构成使它们之间相连的通路。

同年,另一家美国著名的仙童电子公司(FAIRCHILD Semiconductor)也宣称集成电路的研制成功。由该公司赫尔尼等人所发明的一整套制作微型晶体管的新工艺——“平面工艺”被移用到集成电路的制作中,使集成电路很快从实验室研制试验阶段转入工业生产阶段。

1959年,德克萨斯仪器公司首先宣布建成世界上第一条集成电路生产线。1962年,世界上出现了第一块集成电路正式商品,这预示着第三代电子器件已正式登上电子技术舞台。

不久,世界范围内掀起了集成电路的研制热潮。早期典型的硅芯片为1.25mm见方。20世纪60年代初,国际上出现的集成电路产品,每个硅片上的元件数在100个左右;1967年已达到1000个晶体管,这标志着大规模集成阶段的开端;到1976年,发展到一个芯片上可集成1万多个晶体管;进入20世纪80年代以来,一块硅片上有几万个晶体管的大规模集成电路已经很普遍了,并且正在向超大规模集成电路发展。如今,已出现属于第五代的产品,在不到 $50\text{mm}^2$ 的硅芯片上集成的晶体管数激增到200万只以上。

在信息化的今天,各种电子设备和仪器无不大量地使用集成电路,且新的、功能更强大的集成电路层出不穷。集成电路一般又可分为模拟型和数字型两种。本章重点学习模拟型集成电路,数字型集成电路将在本书的数字电路部分加以介绍。在我们进行电子制作时,应当根据成本和电路的结构来选择分立器件或是集成电路。

### 7.1 集成电路基础知识

---

外形特征及电路特点 电路标识及型号识别 分类 参数及常见故障

---

在这一节将介绍集成电路的基本概念。



### 7.1.1 外形特征及电路特点

#### 1. 内部结构

集成电路的外形识别比较简单，它比其他电子元件更有特点。图 7-1 所示为一些常见的集成电路。

如果解剖一个集成电路，将得到图 7-2 所示的内部构造图。其中芯片（chip）是集成电路的心脏。所以有时我们也用芯片来指代集成电路。管脚（pin）与芯片上的“点”相连，信号就是通过管脚进出集成电路的。民用级的集成电路使用塑料对芯片进行封装，而军工级产品则使用耐高温的陶瓷材料封装。

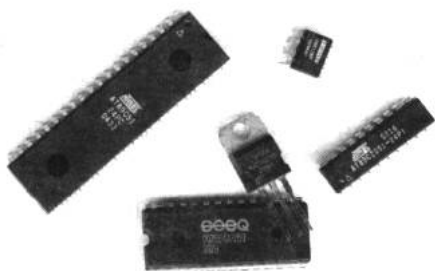


图 7-1 集成电路

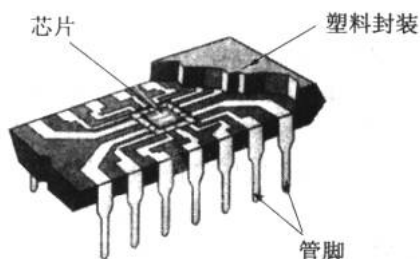


图 7-2 集成电路的内部构造

#### 2. 封装形式

笼统地说，根据在电路板上是否穿过电路板孔进行焊接，集成电路的封装可分为直插式封装和贴片式封装两种，如图 7-3 所示。



(a) 直插式



(b) 贴片式

图 7-3 两种封装形式

图 7-4 所示为常见的集成电路的外形示意图。其中图 7-4 (a) 是单列直插集成电路，所谓单列直插是指集成电路的引脚只有一列，比如我们常用的三端稳压 78XX、功率放大器 TDA1521 等就是这种形式的；图 7-4 (b) 是双列直插型的，这是比较常见的集成电路，常用的有运算放大 LM324、时基电路 NE555、数字电路 74XX 和 4XXX 系列等；图 7-4 (c) 是双列和四列扁平封装的集成电路（PLCC），高集成度的、贴片式集成电路常用这种方式；图 7-4 (d) 是金属外壳的集成电路，它的引脚分布呈圆形，这种集成电路已经比较少见。

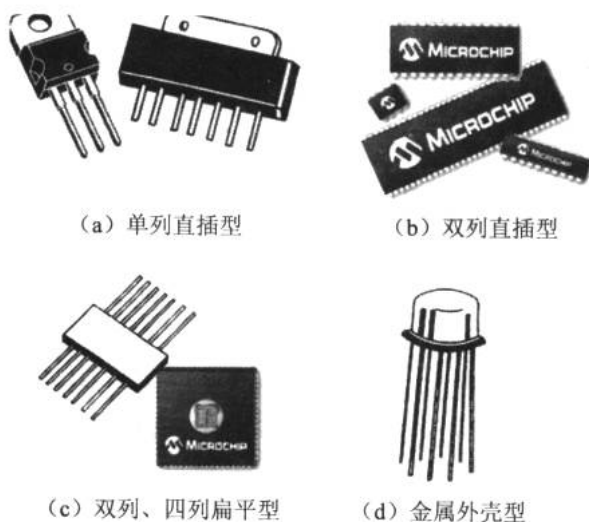


图 7-4 几种常见集成电路外形示意图

### 3. 管脚判别

集成电路上的“D”型凹槽或圆形小坑是 IC 管脚判别的依据。一般来说，正对 IC 的型号，圆形小坑对应着 IC 的 1 管脚，其他管脚依逆时针方向为 2、3……，如图 7-5 所示。另外，单列直插型 IC 的左侧第一管脚为 1 管脚，向右递增。

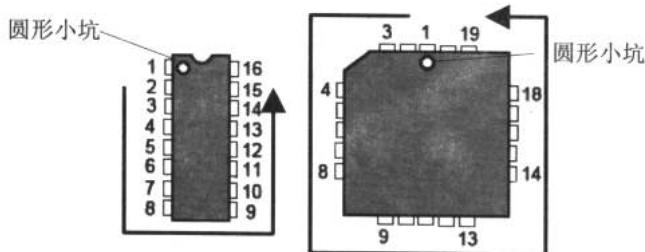


图 7-5 管脚的判别

### 4. 电路特点

由于集成电路制造工艺的特殊性，决定其具有以下几个特点：

- ✦ 集成电路内电路中，各级电路之间全部采用直接耦合形式。如果需要大容量电容作为级间耦合或其他用途，则要通过引脚来外接。
- ✦ 内电路中制造大电阻所占的硅芯片面积比较大，阻值愈大所占的面积愈大。为此，集成电路内电路中常常制造一个三极管，构成恒流源电路作为大电阻来使用。可见集成电路中的电阻是通过晶体管代替的（因为我们在第 1 章忽略了一些内容，这一点大家可能比较难以接受，但并不影响应用）。
- ✦ 集成电路内不制造容量较大的电容。对于容量很小的电容，可以通过 PN 结的结电容方式来获得（这一点还需要通过对半导体器件的特性学习来体会），不过这

种方式获得的电容容量很有限。

- ✦ 集成电路内也不制造电感，需要时需外接。
  - ✦ 集成电路里的二极管是通过三极管的一个 PN 结代替的。
- 综上所述，在集成电路中，芯片里有丰富的 PN 结。

## 7.1.2 电路标识及型号识别

### 1. 电路标识

电子元件在电路中都有特定的标识，集成电路也不例外，但是它的变化比较多。集成电路的电路标识所表达的具体含义很少，通常只能表达这种集成电路有几根引脚，至于各个引脚的作用以及集成电路的功能是什么都不能从电路标识中体现。

图 7-5 所示为 9 种常用 IC 的电路标识。

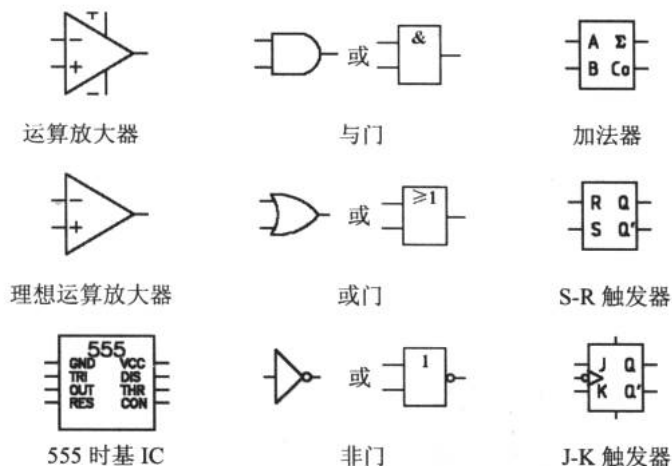


图 7-6 集成电路的电路标识 9 例（注：与、或、非门有两种标识，左为习惯用法，右为国标）

### 2. 国产集成电路的型号识别

集成电路的型号命名有国家标准，这一标准是 1979 年以后陆续制定的。在使用、检修、识别和进行电路分析时，都需要了解集成电路的型号。一般来说，集成电路的型号都印在器件的外壳上。根据最新的国标规定，国产的集成电路型号由 5 部分组成，其型号的含义如下。

C	B	XXXX	C	D
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
字头符号	电路类型	电路型号数	温度范围	封装形式

#### (1) 第一部分含义

集成电路型号中的第一部分用一个字母 C 表示符合国家标准的集成电路。

#### (2) 第二部分含义



集成电路型号中的第二部分用字母表示电路的类型，可以是一个字母，也可以是两个，具体含义如表 7-1 所示。

表 7-1 第二部分含义

字 母	电路类型
AD	模拟数字转换器
B	非线性电路（模拟开关、乘除法器、时基电路、锁相器、取样保持电路等）
C	CMOS 电路
D	音响类、电视机类电路
DA	数字模拟转换器
E	ECL 电路
F	运算放大器、线性放大器
H	HTL 电路
J	接口电路（电压比较器、电平转换器、外围驱动电路）
M	存储器
S	特殊电路（仪表电路、传感器电路、通信电路等）
T	TTL 电路
W	稳压器
$\mu$	微机电路

### （3）第三部分含义

集成电路型号中第三部分的数字或字母表示产品的代号，与国外同功能集成电路保持相同的代号，即国产的集成电路与国外的集成电路第三部分代号相同时，为全仿制集成电路。不仅电路结构、引脚分布规律等同国外产品相同，还可以直接与国外产品代换使用。

### （4）第四部分含义

集成电路型号中的第四部分用一个大写字母表示工作温度，其含义如表 7-2 所示。

表 7-2 第四部分含义

字 母	工作温度范围（℃）
C	0~70
E	-40~85
R	-55~85
M	-55~125

### （5）第五部分含义

集成电路型号中的第五部分用一个大写字母表示封装形式，其具体含义如表 7-3 所示。

表 7-3 第五部分含义

字 母	电路类型
D	多层陶瓷, 双列直插
F	多层陶瓷, 扁平
H	黑瓷低熔玻璃, 扁平
J	黑瓷低熔玻璃, 双列直插
K	金属, 菱形
P	塑料, 双列直插
T	金属, 圆形

### 3. 非国标规定的集成电路的型号识别

除国标规定的集成电路型号外, 常会遇到一些早期生产的集成电路, 它们采用了非国标规定的型号命名方法, 只有两部分组成, 此型号的第一部分用数字和字母表示厂商代号, 与国际上的集成电路型号标注方法一样; 第二部分用数字或字母表示集成电路品种代号, 也与国际上的集成电路型号标注方法一致。表 7-4 所示为国内非国标集成电路生产商的代号。

表 7-4 国内非国标集成电路生产厂家代号

厂商代号	对应厂家
D	国产集成电路标准字头
B、BO、BW、5G	北京市半导体器件五厂
BGD	北京市半导体器件研究所
BH	北京市半导体器件三厂
CA	广州音响电器厂
CH	上海无线电十四厂
CF、GF	常州半导体厂
DG	北京八七八厂
F、XFC	甘肃秦安七四九厂
F、FC、SF	上海无线电七厂
FD	苏州半导体器件总厂
FS	贵州都匀四四三三厂
FY、FZ	上海八三三一厂
LD	西安延河无线电厂
NT	南通晶体管厂
SL、5G	上海无线电十六厂
SG	长沙四四三一厂
TB	天津半导体器件厂
W	北京半导体器件五厂
X、BW	电子工业部第二十四研究所
XG	国营新光电工厂
19A	上海无线电十九厂



其实，现在使用得最多的还是国外集成电路厂商的芯片，表 7-5 所示为国外集成电路生产厂商的代号。

表 7-5 国外集成电路厂商代号

型号前缀	对应国外生产厂商
A	INTECH (美国英特奇公司)
A-	INTECH (美国英特奇公司)
AC	TEXAS INSTRUMENTS (TI, 美国德克萨斯仪器公司)
AD	ANALOG DEVICES (美国模拟器件公司)
AM	ADVANCED MICRO DEVICES (美国先进微电子器件公司)
AM	DATA-INTERFIL (美国戴特-英特锡尔公司)
AN	PANASONIC (日本松下电器公司)
AY	GENERAL INSTRUMENTS (GI, 美国通用仪器公司)
BA	ROHM (日本罗姆公司)
BX	SONY (日本索尼公司)
CA	RCA (美国无线电公司)
CA	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
CA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
CAW	RCA (美国无线电公司)
CD	FAIRCHILD (美国仙童公司)
CDP	RCA (美国无线电公司)
CIC	SOLITRON (美国索利特罗器件公司)
CM	CHERRY SEMICONDUCTOR (美国切瑞半导体器件公司)
CS	PLESSEY (英国普利西半导体公司)
CT	SONY (日本索尼公司)
CX	SONY (日本索尼公司)
CXA	SONY (日本索尼公司)
CXD	SONY (日本索尼公司)
CXK	DAEWOO (韩国大字电子公司)
DBL	PANASONIC (日本松下电器公司)
DN	AECO (日本阿伊阔公司)
D...C	GTE (美国通用电话电子公司微电路部)
EA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
EEA	THOMSON-CSF (法国汤姆逊半导体公司)
EF	THOMSON-CSF (法国汤姆逊半导体公司)
EFB	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
EGC	THOMSON-SGF (法国汤姆逊半导体公司)
ESM	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
F	FAIRCHILD (美国仙童公司)
FCM	FAIRCHILD (美国仙童公司)
G	GTE (美国微电路公司)
GD	GOLD STAR (韩国金星 (高尔达) 电子公司)

续表

型号前缀	对应国外生产厂商
GL	GOLD STAR (韩国金星(高尔达)电子公司)
GM	GOLD STAR (韩国金星(高尔达)电子公司)
HA	HITACHI (日本日立公司)
HD	HITACHI (日本日立公司)
HEF	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
HM, HZ	HITACHI (日本日立公司)
ICL, IG	INTERSIL (美国英特锡尔公司)
IR, IX	SHARP [日本夏普(声宝)公司]
ITT, JU	ITT (德国ITT半导体公司)
KA, KB	SAMSUNG (韩国三星电子公司)
KC	SONY (日本索尼公司)
KDA	SAMSUNG (韩国三星电子公司)
KIA, KID	KEC (韩国电子公司)
KM, KS	SAMSUNG (韩国三星电子公司)
L	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利SGS-亚特斯半导体公司)
L	SANYO (日本三洋电气公司)
LA	SANYO (日本三洋电气公司)
LB	SANYO (日本三洋电气公司)
LC	SANYO (日本三洋电气公司)
LC	GENERAL INSTRUMENTS (GI) (美国通用仪器公司)
LF	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
LF	NATIONAL SEMICONDUCTOR (美国国家半导体公司)
LH	NATIONAL SEMICONDUCTOR (美国国家半导体公司)
LH, LK	SHARP (日本夏普(声宝)公司)
LM	SANYO (日本三洋电气公司)
LM	NATIONAL SEMICONDUCTOR (美国国家半导体公司)
LM	SIGNETICS (美国西格尼蒂公司)
LM	FAIRCILD (美国仙童公司)
LM	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利SGS-亚特斯半导体公司)
LM	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
LM	MOTOROLA (美国摩托罗拉半导体产品公司)
LM	SAMSUNG (韩国三星电子公司)
LP	NATIONAL SEMICONDUCTOR (美国国家半导体公司)
LR, LSC	SHARP (日本夏普(声宝)公司)
M	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利SGS-亚特斯半导体公司)
M	mitsubishi (日本三菱电机公司)
MA	ANALOG SYSTEMS (美国模拟系统公司)
MAX	(美国)美信集成产品公司
MB	FUJITSU (日本富士通公司)
MBM	FUJITSU (日本富士通公司)





续表

型号前缀	对应国外生产厂商
MC	MOTOROLA (美国摩托罗拉半导体产品公司)
MC	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
MC	ANALOG SYSTEMS (美国模拟系统公司)
MF	MITSUBISHI (日本三菱电机公司)
MK	MOSTEK (美国莫斯特卡公司)
ML	PLESSEY (美国普利西半导体公司)
ML	MITEL SEMICONDUCTOR (加拿大米特半导体公司)
MLM	MOTOROLA (美国摩托罗拉半导体产品公司)
MM	NATIONAL SEMICONDUCTOR (美国国家半导体公司)
MN	PANASONIC (日本松下电器公司)
MN	MICRO NETWORK (美国微网络公司)
MP	MICRO POWER SYSTEMS (美国微功耗系统公司)
MPS	MICRO POWER SYSTEMS (美国微功耗系统公司)
MSM	OKI (美国 OKI 半导体公司)
MSM	OKI (日本冲电气有限公司)
N, NA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
NC	NITRON (美国 NITRON 公司)
NE	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
NE	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
NE	MULLARD (英国麦拉迪公司)
NE	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利 SGS-亚特斯半导体公司)
NJM	NEW JAPAN RADIO (JRC) (新日本无线电公司)
OM	PANASONIC (日本松下电器公司)
OM	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
RC	RAYTHEON (美国雷声公司)
RM	RAYTHEON (美国雷声公司)
RH-IX	SHARP [日本夏普 (声宝) 公司]
S	SIEMENS (德国西门子公司)
S	AMERICAN MICRO SYSTEMS (美国微系统公司)
SA	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
SAA	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
SAA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
SAA	GENERAL INSTRUMENTS (GI) (美国通用仪器公司)
SAA	ITT (德国 ITT-半导体公司)
SAB	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
SAB	AEG-TELEFUNKEN (德国德律风根公司)
SAF	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
SAK	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
SAS	HITACHI (日本日立公司)
SAS	AEG-TELEFUNKEN (德国德律风根公司)

续表

型号前缀	对应国外生产厂商
SAS	SIEMENS (德国西门子公司)
SDA	SIEMEIVS (德国西门子公司)
SC	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
SE	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
SE	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
SG	SILICON GENERAL (美国通用硅片公司)
SG	MOTOROAL (美国摩托罗拉半导体产品公司)
SG	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
SH	FAIRCHILD (美国仙童公司)
SI	SANKEN (日本三肯电子公司)
SK	RCA (美国无线电公司)
SL	PLESSEY (英国普利西半导体公司)
SN	MOTOROAL (美国摩托罗拉半导体产品公司)
SN	TEXAS INSTRUMENTS (TI) (德国德克萨斯仪器公司)
SND	SSS (美国固体科学公司)
SO	SIEMENS (德国西门子公司)
SP	PLESSEY (英国普利西半导体公司)
STK	SANYO (日本三洋电气公司)
STR	SANKEN (日本三肯电子公司)
SW	PLESSEY (英国普利西半导体公司)
T	TOSHIBA (日本东芝公司)
T	GENERAL INSTRUMENTS (GI) (美国通用仪器公司)
TA	TOSHIBA (日本东芝公司)
TAA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
TAA	SIEMENS (德国西门子公司)
TAA	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利 SGS-亚特斯半导体公司)
TAA	PRO ELECTRON (欧洲电子联盟)
TAA	PHILIPS (荷兰飞利浦公司)
TAA	PLESSEY (英国普利西半导体公司)
TAA	MULLARD (英国麦拉迪公司)
TBA	FAIRCHILD (美国仙童公司)
TBA	SIGNETICS (美国西格尼蒂克公司)
TBA	SGS-ATES SEMICONDUCTOR (意大利 SGS-亚特斯半导体公司)
TBA	HITACHI (日本日立公司)

#### 4. 解读进口集成电路型号

表 7-5 中,有几个厂商的集成电路是经常被使用的。这里,介绍一下这几个厂商集成电路型号组成及命名方法,供选配集成电路时参考。



## (1) SANYO (日本三洋公司)

日本三洋公司的集成电路型号由两部分组成,例如 LA 1886,第一部分的“LA”表明是三洋公司产品;第二部分是具体型号,没有具体的含义。表 7-6 所示为日本三洋公司第一部分的含义。

表 7-6 日本三洋公司集成电路型号第一部分的含义

字 母	含 义
LA	单块双极线性
LB	双极数字
LC	CMOS
LE	MNMOS
LM	PMOS, NMOS
STK	厚膜

## (2) HITACHI (日本日立公司)

日本日立公司的集成电路型号一般由以下 5 个部分组成:

HA	13	135	A	P
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
字头符号	电路使用范围	电路型号	电路性能	封装形式

第一部分有 HA、HD、HM 和 HN 几种,分别对应的含义是模拟电路、数字电路、可写存储器(RAM)和只读存储器(ROM);第二部分如果是 11、12 则表示是高频器件,如果是 13、14 则表明是音频器件;第三部分是具体型号,没有具体的含义;第四部分和第五部分的 A 和 P 分别表示改进型和塑料封装。

## (3) TOSHIBA (日本东芝公司)

日本东芝公司生产的集成电路型号由以下 3 部分组成:

TA	7271	P
第一部分	第二部分	第三部分
字头符号	电路型号	封装形式

第一部分有 TA、TC、TD 和 TM 4 种,分别对应的含义是双极线性、CMOS、双极数字和 MOS;第二部分是具体型号,没有具体的含义;第三部分有 A、C、M 和 P 4 种,分别表示改进型、陶瓷封装、金属封装和塑料封装。

## (4) PANASONIC (日本松下电器公司)

日本松下电器公司生产的集成电路型号由以下两部分组成:

AN	6151
第一部分	第二部分
字头符号	电路型号

第一部分有 AN 和 DN 两种, 分别对应的含义是模拟电路和双极性数字电路; 第二部分是具体型号, 没有具体的含义。

#### (5) MITSUBISHI (日本三菱电机公司)

日本三菱电机公司的集成电路型号由以下 5 个部分组成:

M	5	1	95	P
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
字母符号	使用范围	电路类型	电路型号	封装形式

表 7-7 所示为该公司集成电路型号各部分对应的含义。

表 7-7 日本三菱电机公司集成电路型号含义

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分	
字母	含义	数字	含义	数字	含义	电路具体型号	字母	含义
M	三菱公司集成电路	5	民用	0	CMOS		K	玻璃陶瓷
		8	军用	1	线性		P	塑料
				3	TTL		S	金属陶瓷
				10~19	线性电路			

#### (6) NEC (日本电气公司)

日本电气公司的集成电路型号由以下 5 个部分组成:

μP	C	1892	C	S
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
字母符号	电路类型	电路型号	封装形式	电路性能

表 7-8 所示为该公司集成电路型号各部分对应的含义。

表 7-8 日本电气公司集成电路型号含义

第一部分		第二部分		第三部分	第四部分		第五部分	
字母	含义	字母	含义	电路具体型号	字母	含义	字母	含义
μP	微型器件	C	线性		C	塑料封装	S	改进型
		A	分立器件		D	陶瓷双列		
		B	数字双极					
		D	CMOS 数字					

通过以上的解释, 对一般的集成电路型号有了大致的了解。在电子行业, 集成电路的应用非常广泛, 每年都有许多通用或专用的集成电路被研发与生产出来, 于是才出现了当今数以万计的各种类型的集成电路, 这些芯片的单价从几角钱到上千元不等, 从图 7-7 所示可以看到一小部分集成电路的价格。



KA9413	10.00	K588A19N	5.00	AD2580ATD	30.00	LA4180	4.00	LA5608	
KA9414	15.00	K588A20N	6.00	AD2580ATE	48.00	LA4181	2.30	LA5611	
KA9421	25.00	K588A23N	8.00	AD2582(贴片)	48.00	LA4183	3.00	LA5612	
KC591C	4.50	K588B19P	5.00	AD2583 AP	913.00	LA4185	6.00	LA5616	
KC592C	2.20	K588B20N	5.00	AD2589		LA4186	3.00	LA5617	
KC583C	2.20	K588B23N	5.00	AD2590		LA4192	3.50	LA5618	
KD9217	2.50	K588C01	5.00	AD2599		LA4200	4.00	LA5667	
KD9218	25.00	K588C02	5.00	AD2599		LA4201	6.00	LA5624	
KD9218B	45.00	K588C03	5.00	AD2599		LA4220	8.00	LA6339	
KDA031		K588C04	5.00	AD2599		LA4260	2.00	LA6338	
KDA031A		K588C05	5.00	AD2599		LA4261	4.00	LA6393	
KDA031B		K588C06	5.00	AD2599		LA4265	2.80	LA6393D	
KDA031C		K588C07	5.00	AD2599		LA4270	6.00	LA6438S	
KDA031D		K588C08	5.00	AD2599		LA4275	5.30	LA6438D	
KDA031E		K588C09	5.00	AD2599		LA4280	13.00	LA6458B6	
KDA031F		K588C10	5.00	AD2599		LA4282	8.50	LA6458E	
KDA031G		K588C11	5.00	AD2599		LA4283	5.00	LA6462	
KDA031H		K588C12	5.00	AD2599		LA4285	6.50	LA6500	
KDA031I		K588C13	5.00	AD2599		LA4287	3.00	LA6500B	
KDA031J		K588C14	5.00	AD2599		LA4289	2.00	LA6501	
KDA031K		K588C15	5.00	AD2599		LA4290	3.70	LA6501B	
KDA031L		K588C16	5.00	AD2599		LA4291	4.00	LA6510	
KDA031M		K588C17	5.00	AD2599		LA4292	10.00	LA6515	
KDA031N		K588C18	5.00	AD2599		LA4293	6.50	LA6515B	
KDA031O		K588C19	5.00	AD2599		LA4294	8.00	LA6517	
KDA031P		K588C20	5.00	AD2599		LA4295	10.00	LA6520	
KDA031Q		K588C21	5.00	AD2599		LA4296	7.00	LA6524	
KDA031R		K588C22	5.00	AD2599		LA4297	1.00	LA6525	
KDA031S		K588C23	5.00	AD2599		LA4298	1.00	LA6527	
KDA031T		K588C24	5.00	AD2599		LA4299	1.00	LA6530	
KDA031U		K588C25	5.00	AD2599		LA4300	1.00	LA6531	
KDA031V		K588C26	5.00	AD2599		LA4301	9.00	LA6532	
KDA031W		K588C27	5.00	AD2599		LA4302	9.00	LA6533	
KDA031X		K588C28	5.00	AD2599		LA4303	5.00	LA6534	
KDA031Y		K588C29	5.00	AD2599		LA4304	4.00	LA7015	
KDA031Z		K588C30	5.00	AD2599		LA4305	13.00	LA7016	
KDA032		K588C31	5.00	AD2599		LA4306	12.00	LA7017	
KDA033		K588C32	5.00	AD2599		LA4307	12.00	LA7018	
KDA034		K588C33	5.00	AD2599		LA4308	5.00	LA7025	
KDA035		K588C34	5.00	AD2599		LA4309	5.00	LA7031	
KDA036		K588C35	5.00	AD2599		LA4310	5.00	LA7034	
KDA037		K588C36	5.00	AD2599		LA4311	5.00		
KDA038		K588C37	5.00	AD2599		LA4312	5.00		
KDA039		K588C38	5.00	AD2599		LA4313	5.00		
KDA040		K588C39	5.00	AD2599		LA4314	5.00		
KDA041		K588C40	5.00	AD2599		LA4315	5.00		
KDA042		K588C41	5.00	AD2599		LA4316	5.00		
KDA043		K588C42	5.00	AD2599		LA4317	5.00		
KDA044		K588C43	5.00	AD2599		LA4318	5.00		
KDA045		K588C44	5.00	AD2599		LA4319	5.00		
KDA046		K588C45	5.00	AD2599		LA4320	5.00		
KDA047		K588C46	5.00	AD2599		LA4321	5.00		
KDA048		K588C47	5.00	AD2599		LA4322	5.00		
KDA049		K588C48	5.00	AD2599		LA4323	5.00		
KDA050		K588C49	5.00	AD2599		LA4324	5.00		
KDA051		K588C50	5.00	AD2599		LA4325	5.00		
KDA052		K588C51	5.00	AD2599		LA4326	5.00		
KDA053		K588C52	5.00	AD2599		LA4327	5.00		
KDA054		K588C53	5.00	AD2599		LA4328	5.00		
KDA055		K588C54	5.00	AD2599		LA4329	5.00		
KDA056		K588C55	5.00	AD2599		LA4330	5.00		
KDA057		K588C56	5.00	AD2599		LA4331	5.00		
KDA058		K588C57	5.00	AD2599		LA4332	5.00		
KDA059		K588C58	5.00	AD2599		LA4333	5.00		
KDA060		K588C59	5.00	AD2599		LA4334	5.00		
KDA061		K588C60	5.00	AD2599		LA4335	5.00		
KDA062		K588C61	5.00	AD2599		LA4336	5.00		
KDA063		K588C62	5.00	AD2599		LA4337	5.00		
KDA064		K588C63	5.00	AD2599		LA4338	5.00		
KDA065		K588C64	5.00	AD2599		LA4339	5.00		
KDA066		K588C65	5.00	AD2599		LA4340	5.00		
KDA067		K588C66	5.00	AD2599		LA4341	5.00		
KDA068		K588C67	5.00	AD2599		LA4342	5.00		
KDA069		K588C68	5.00	AD2599		LA4343	5.00		
KDA070		K588C69	5.00	AD2599		LA4344	5.00		
KDA071		K588C70	5.00	AD2599		LA4345	5.00		
KDA072		K588C71	5.00	AD2599		LA4346	5.00		
KDA073		K588C72	5.00	AD2599		LA4347	5.00		
KDA074		K588C73	5.00	AD2599		LA4348	5.00		
KDA075		K588C74	5.00	AD2599		LA4349	5.00		
KDA076		K588C75	5.00	AD2599		LA4350	5.00		
KDA077		K588C76	5.00	AD2599		LA4351	5.00		
KDA078		K588C77	5.00	AD2599		LA4352	5.00		
KDA079		K588C78	5.00	AD2599		LA4353	5.00		
KDA080		K588C79	5.00	AD2599		LA4354	5.00		
KDA081		K588C80	5.00	AD2599		LA4355	5.00		
KDA082		K588C81	5.00	AD2599		LA4356	5.00		
KDA083		K588C82	5.00	AD2599		LA4357	5.00		
KDA084		K588C83	5.00	AD2599		LA4358	5.00		
KDA085		K588C84	5.00	AD2599		LA4359	5.00		
KDA086		K588C85	5.00	AD2599		LA4360	5.00		
KDA087		K588C86	5.00	AD2599		LA4361	5.00		
KDA088		K588C87	5.00	AD2599		LA4362	5.00		
KDA089		K588C88	5.00	AD2599		LA4363	5.00		
KDA090		K588C89	5.00	AD2599		LA4364	5.00		
KDA091		K588C90	5.00	AD2599		LA4365	5.00		
KDA092		K588C91	5.00	AD2599		LA4366	5.00		
KDA093		K588C92	5.00	AD2599		LA4367	5.00		
KDA094		K588C93	5.00	AD2599		LA4368	5.00		
KDA095		K588C94	5.00	AD2599		LA4369	5.00		
KDA096		K588C95	5.00	AD2599		LA4370	5.00		
KDA097		K588C96	5.00	AD2599		LA4371	5.00		
KDA098		K588C97	5.00	AD2599		LA4372	5.00		
KDA099		K588C98	5.00	AD2599		LA4373	5.00		
KDA100		K588C99	5.00	AD2599		LA4374	5.00		

图 7-7 一些集成电路的价格

### 7.1.3 分类

集成电路的种类很多,下面来看看两种常见的分类方法。

#### 1. 按照使用功能划分

根据集成电路的使用功能可以分成 4 大类近 20 种。

##### (1) 模拟集成电路

所谓模拟集成电路就是用于处理模拟信号的集成电路,模拟信号是一种连续变化的信号。模拟集成电路按照电路功能可以分成下列多种。

① 运算放大器集成电路:这是应用最多的一种模拟集成电路,简称运放。

② 音响集成电路:这是用于各类音响设备中的集成电路,例如用于录音机和收音机等设备中的集成电路。

③ 视频集成电路:这是用于各类视频设备中的集成电路,例如用于电视机和影碟机等设备中的集成电路。

④ 稳压集成电路:这是用于稳压电路中的集成电路,有各种电压等级的稳压集成电路。

⑤ 非线性集成电路:这是运算集成电路的一种非线性运用方式,此时集成运放处于无反馈或带正反馈状态。

##### (2) 数字集成电路

数字集成电路将在本书的第 9 章开始学习,它所处理的都是数字信号。

① 微机集成电路:这是用于计算机中的集成电路,例如 CPU 就是一种数字集成电路。在本书后面谈到的单片机属于数字集成电路的范畴。

② 存储器集成电路:在数字电路系统中,常使用这种具有存储功能的集成电路,这是由门电路和触发器组合起来的集成电路。计算机中的内存就是这类集成电路。

### (3) 接口集成电路

这是一种重要的电路，用于各类信号之间的转换，也可用于不同类型电路之间的连接。

① 电压比较器集成电路：这是一种将模拟量按量值的大小转换成逻辑代码的集成电路。

② 电平转换器集成电路：这是一种可以用来衔接不同类型器件的集成电路，是一种转换电平的专用集成电路。比如在单片机和计算机的串口进行通信时，需要使用的 MAX232（后面章节将会谈到）。

③ 外围驱动器集成电路：这是一种微机与外围接口电路的驱动电路。

### (4) 特殊集成电路

① 消费类集成电路：这是为适应消费商品而专门设计的各种功能的集成电路，应用面相当广泛。

② 通信集成电路：这是为通信系统而设计的专用集成电路。

③ 传感器集成电路：为了配合各类传感器而设计的专用集成电路。

### 2. 按集成度划分

集成电路的集成度是指一块基片上能制作的最多元件数量，按此可划分为 4 种，如表 7-9 所示。

表 7-9 集成电路的分类

名 称	英文缩写	模拟电路中的元件数目	数字电路中的门电路数目
小规模 IC	SSI	<100	<30
中规模 IC	MSI	100~1000	30~100
大规模 IC	LSI	>1000	>100
超大规模 IC	ULSI	>100000	>1000

### 3. 按制作工艺不同划分

集成电路按其制作工艺不同可划分为半导体集成电路、膜集成电路和混合集成电路 3 类。半导体集成电路是采用半导体工艺技术，在硅基片上制作包括电阻、电容、三极管和二极管等元器件并具有某种电路功能的集成电路。膜集成电路是在玻璃或陶瓷片等绝缘物体上，以“膜”的形式制作电阻和电容等无源器件。无源元件的数值范围可以做得很宽，精度可以做得很高。但目前的技术水平尚无法用“膜”的形式制作晶体二极管和三极管等有源器件，因而使膜集成电路的应用范围受到很大的限制。在实际应用中，多半是在无源膜电路上外加半导体集成电路或分立元件的二极管和三极管等有源器件，使之构成一个整体，这便是混合集成电路。根据膜的厚薄不同，膜集成电路又分为厚膜集成电路（膜厚为  $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ ）和薄膜集成电路（膜厚为  $1\mu\text{m}$  以下）两种。在家电维修和一般性电子制作过程中遇到的主要是半导体集成电路、厚膜电路及少量的混合集成电路。

### 4. 按导电类型不同

按导电类型不同分为双极型集成电路和单极型集成电路两类。前者频率特性好，但功耗较大，而且制作工艺复杂，绝大多数模拟集成电路以及数字集成电路中的 TTL、ECL、HTL、LSTTL 和 STTL 型属于这一类。后者工作速度低，但输入阻抗高、功耗小、制作工



艺简单、易于大规模集成,其主要产品为 MOS 型集成电路。MOS 电路又分为 NMOS、PMOS 和 CMOS 型。

NMOS 集成电路是在半导体硅片上,以 N 型沟道 MOS 器件构成的集成电路,参加导电的是电子。PMOS 型是在半导体硅片上,以 P 型沟道 MOS 器件构成的集成电路,参加导电的是空穴。CMOS 型是由 NMOS 晶体管和 PMOS 晶体管互补构成的集成电路,称为互补型 MOS 集成电路,简写成 CMOS 集成电路。

#### 7.1.4 参数及常见故障

##### 1. 参数

集成电路的主要参数可以分成下列两大类。

##### (1) 电参数

这是表征集成电路性能的一组重要参数。针对不同的型号,我们可以借助器件手册来查到,或者到 Internet 上寻找集成电路的相关参数。

图 7-8 所示为集成电路 74HC138 的电参数。从图中可以知道该器件的输入最高、最低电压;输出最高、最低电压;最大输入电流;最大静态电路等参数。

DC Electrical Characteristics (Note 4)										
Symbol	Parameter	Conditions	V <sub>CC</sub>	T <sub>A</sub> = 25°C		74HC T <sub>A</sub> = - 40 to 85°C		54HC T <sub>A</sub> = - 55 to 125°C		Units
				Typ	Guaranteed Limits					
V <sub>IH</sub>	Minimum High Level Input Voltage		2.0V		1.5	1.5	1.5	V		
			4.5V		3.15	3.15	3.15	V		
			6.0V		4.2	4.2	4.2	V		
V <sub>IL</sub>	Maximum Low Level Input Voltage**		2.0V		0.5	0.5	0.5	V		
			4.5V		1.35	1.35	1.35	V		
			6.0V		1.8	1.8	1.8	V		
V <sub>OH</sub>	Minimum High Level Output Voltage	V <sub>IN</sub> = V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>  I <sub>OUT</sub>   ≤ 20 μA	2.0V	2.0	1.9	1.9	1.9	V		
			4.5V	4.5	4.4	4.4	4.4	V		
			6.0V	6.0	5.9	5.9	5.9	V		
		V <sub>IN</sub> = V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>  I <sub>OUT</sub>   ≤ 4.0 mA  I <sub>OUT</sub>   ≤ 5.2 mA	4.5V	4.2	3.98	3.84	3.7	V		
			6.0V	5.7	5.48	5.34	5.2	V		
V <sub>OL</sub>	Maximum Low Level Output Voltage	V <sub>IN</sub> = V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>  I <sub>OUT</sub>   ≤ 20 μA	2.0V	0	0.1	0.1	0.1	V		
			4.5V	0	0.1	0.1	0.1	V		
			6.0V	0	0.1	0.1	0.1	V		
		V <sub>IN</sub> = V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>  I <sub>OUT</sub>   ≤ 4.0 mA  I <sub>OUT</sub>   ≤ 5.2 mA	4.5V	0.2	0.26	0.33	0.4	V		
			6.0V	0.2	0.26	0.33	0.4	V		
I <sub>IN</sub>	Maximum Input Current	V <sub>IN</sub> = V <sub>CC</sub> or GND	6.0V		± 0.1	± 1.0	± 1.0	μA		
I <sub>CC</sub>	Maximum Quiescent Supply Current	V <sub>IN</sub> = V <sub>CC</sub> or GND I <sub>OUT</sub> = 0 μA	6.0V		8.0	80	160	μA		

图 7-8 74HC138 的芯片电参数

##### (2) 极限参数

这是保证集成电路使用中不致损坏的极限参数。表 7-10 所示为 BA314 的极限参数。



表 7-10 BA314 的极限参数

参数名称	参 数 值
电源电压	15 V
功耗	550 mW
工作环境温度	-25~75℃
储存温度	-55~125℃

## 2. 常见故障

任何器件在使用过程中都有可能会出现故障。那么，现在我们列举一些集成电路的主要故障以供参考：

### (1) 集成电路烧毁

集成电路烧毁通常是由于过电压、过电流或正负极性接反引起的。当集成电路烧毁时从外表上一般看不出什么明显的痕迹，但在芯片被烧毁的过程中，常常会伴随有发热的现象。严重时（比如给 74LS00 加上 220V 的电压，千万别去尝试），集成电路上可能会被烧出一个洞或有裂纹之类的痕迹甚至爆炸。

还有一种严重的错误是电子制作中千万要避免的，就是在给集成电路供电时极性接反。一般的集成电路在一瞬间就会被这个反向电压击毁，所以在接通集成电路的电源前要慎重地检查供电极性。

### (2) 增益严重不足

对于含有增益参数的集成电路如运算放大器来说，当集成电路发生增益严重不足时，集成电路即已基本丧失放大能力，需要更换。对于增益略有下降的集成电路，这是集成电路的一种软故障，一般检测仪器很难发现这种故障，对于这种故障可以采取减小负反馈量的方法来补救。

### (3) 噪声大

当集成电路出现噪声大的故障时，虽然能够处理信号，但会使信噪比下降，影响正常信号的处理，这时最好更换芯片。

### (4) 内部某部分电路损坏

当集成电路内部的部分电路损坏时，与电路相关的引脚上的直流工作电压已发生了很大变化，这时也需要更换器件。

### (5) 引脚折断

如果在取用时不小心将引脚折断，可以在断裂处焊上一根细钢丝，仍可使用。

## 7.2 运算放大器的应用

看看使用运放的优点 了解运放的若干参数 加法器和减法器

同相放大器、反相放大器和差分放大器 有源微分器和积分器 有源滤波器

常用集成运算放大器

集成运算放大器（integrated operational amplifier）简称集成运放或运放，是一种高增



益的直接耦合放大器，其内部包含几十至数百个晶体管、电阻和电容，但体积只有一个小功率晶体管那么大，功耗也仅有几毫瓦至几百毫瓦，但功能很多。它通常由输入级、中间放大级和输出级 3 个基本部分构成。有的运算放大器除具有+、-输入、输出电源供电端外，还有外接补偿电路端、调零端、相位补偿端、公共接地端及其他附加端等。它的放大倍数取决于外接反馈电阻，这给使用带来很大方便。

根据增益高低，运算放大器可分为低增益（开环电压增益在 60-80dB）的通用 I 型，主要产品有 F001、4E314、X50、BG301、5G922、 $\mu$ A702 等；中增益（开环电压增益在 80-100dB）的通用 II 型，主要产品有 F709、F004、4E304、 $\mu$ A7093 等；高增益（开环电压增益大于 100dB）的通用 III 型，主要产品有 F748、XFC77、4E322、 $\mu$ A741 等低功耗放大器，如  $\mu$ PC253、7XC4、5G26 和 F3078 等；低噪声运算放大器，如 F5037 和 XFC88；高速运算放大器，如国产型号有 F715、F722、4E321 和 F318，国外的有  $\mu$ A702；高压运算放大器。国产的有 F1536、BG315 和 F143；还有电流型、单电源、跨导型、静电型、程控型运算放大器等。集成化运算放大器是一种集成化的、高增益的、直接耦合的放大器。从本质来说，它的作用与使用三极管及一些外围元件构成的放大器功能并没有任何区别。

集成运算放大器作为一种通用电子元件，在放大、振荡、电压比较、模拟运算及有源滤波等各种电子电路中得到了广泛的应用。

### 7.2.1 看看使用运放的优点

#### 1. 电路结构的比较

在前面的章节里，我们已经使用过如图 7-9 (a) 所示的电路标识，它代表了电路中的一个运放单元。图 7-9 (b) 所示为一个常用运放 LM324 的外观。



图 7-9 运算放大器的电路标识及外观

在这样一个类似三角形的电路标识里，集成了若干电子元件。不同型号的运放具有不同的内部电路结构。我们以 LM324 为例进行说明，如图 7-10 所示。

集成运算放大器 LM324 是一款十分常用的运放模块，它为双列直插式封装，有 14 个引脚，如图 7-10 (a) 所示。在 LM324 的内部集成了 4 个独立的运放单元，这 4 个运放独立工作，互不影响。管脚 4 接电源正极，管脚 11 接负极，如图 7-10 (b) 所示。

取出任一运放单元进行剖析，如图 7-10 (c) 所示。在一个运放单元中，集成了若干晶体管、电容和电阻等器件，它们通过合理的组合，实现了放大器的功能。同时，由于运放中的晶体管的外围器件的型号和参数都是确定的，所以在使用运放时，不需要考虑放大器的静态工作点等问题，免去了调度电路的麻烦。所以，运算放大器大大简化了电

路的结构。

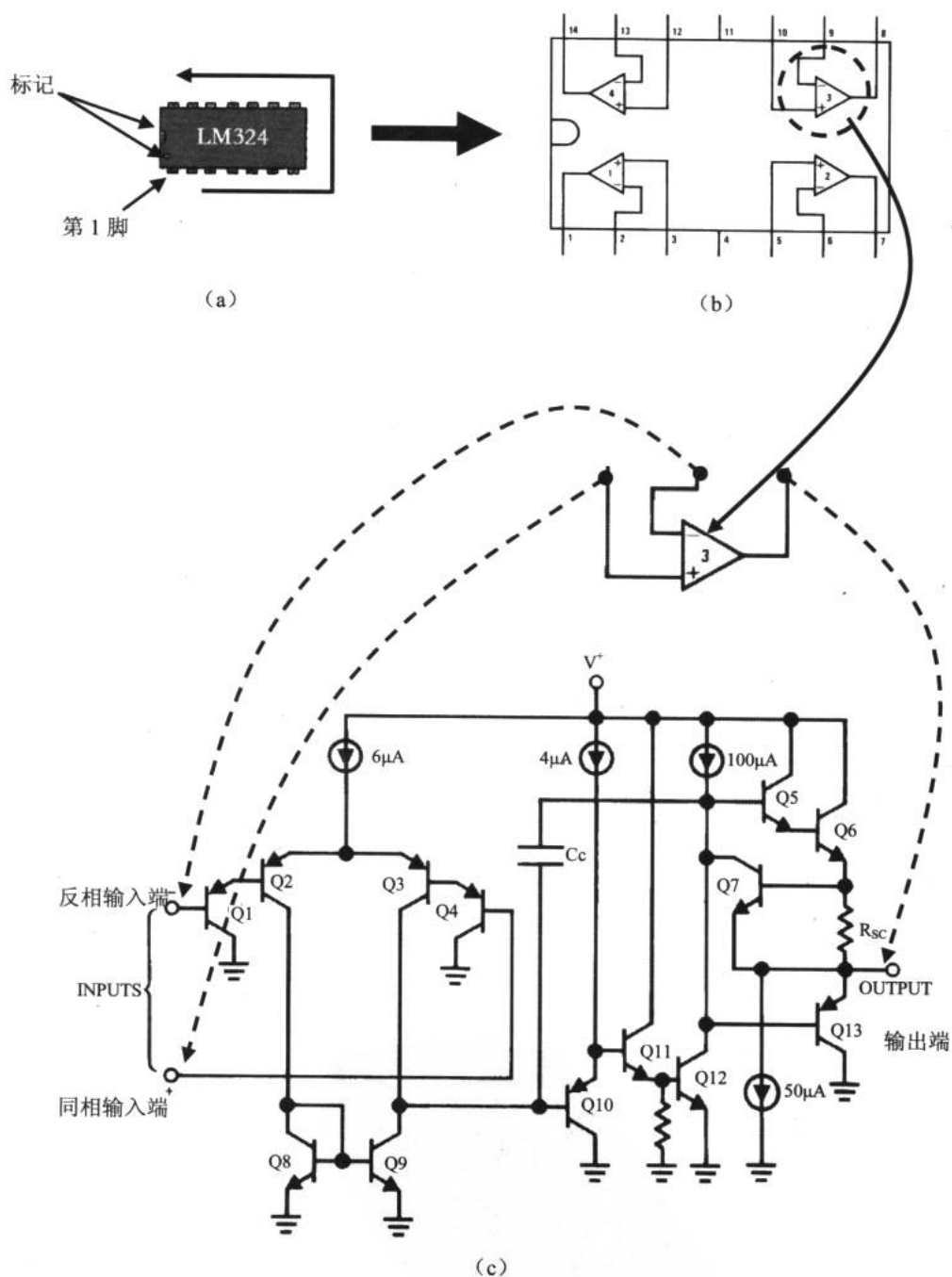


图 7-10 “解剖” LM324



## 2. 运放的使用

**例 7.2.1** 在 Multisim2001 中连接如图 7-11 所示的反相放大器，学习运放的初步使用，同时用实际的器件连接，使用信号发生器给电路注入信号，用示波器观察输入输出波形。

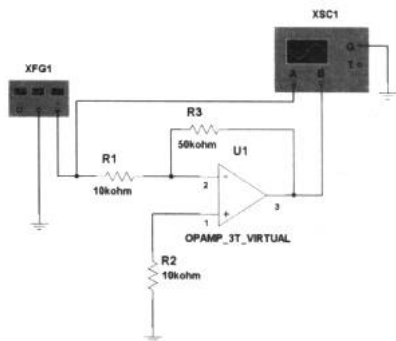


图 7-11 反相放大器

取函数信号发生器的频率为 1kHz，幅度为 100mV。调整示波器两个通道的幅度，可以得到如图 7-12 所示的输入输出波形。

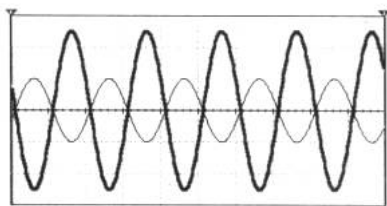


图 7-12 反相放大器的输入输出波形

为什么图 7-11 所示的电路叫做反相放大器呢？从图 7-12 所示的输入输出波形得出两个结论，其一，这个简单的放大器电路完成了前面所谈过的由三极管组成的放大器的功能，而且输出波形十分清晰；其二，输出波形正好与输入波形有  $180^\circ$  的相差，即“反相”，所以称之为反相放大器。这种放大器也是一种负反馈放大器，其反馈组件为电阻  $R_3$ 。

如果输出波形与输入波形没有相位差就是同相放大器。同相与反相放大器是两种十分常用的放大器。

### 7.2.2 了解运放的若干参数

运放的参数很多，主要有电源电压范围、最大允许功耗、单位增益带宽、转换速率和输入阻抗等。

#### 1. 电源电压范围

这里指运放正常工作所需要的电源电压的范围。通常运放需要使用双电源供电，少数运放只要求单电源。

## 2. 最大允许功耗 $P_m$

指运放在正常工作下所能承受的最大耗散功率，使用中不应使运放的功耗超过  $P_m$ 。

## 3. 单位增益带宽 $F_c$

指运放开环电压放大倍数为 1dB 时对应的频率。一般的通用运放  $F_c \approx 1\text{MHz}$ ，宽带和高速运放  $F_c$  可达 10MHz 以上。

## 4. 转换速率

指在额定负载条件下，当输入边沿陡峭的阶跃信号时，集成运放输出电压的单位时间最大变化率，即输出电压边沿的斜率  $SR$ ，如图 7-13 所示。

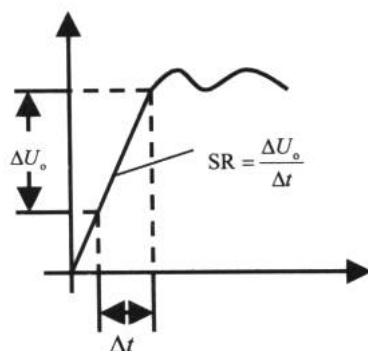


图 7-13 运放的转换速率

## 5. 输入阻抗 $Z_i$

指运放工作于线性放大区时，输入电压变化量与输入电流变化量之间的比值。这是衡量一个运放质量高低的尺度之一。采用三极管为内部电路的运放，其输入阻抗通常为几兆欧，采用场效应管的可达  $10^{12}\Omega$ 。

## 7.2.3 加法器和减法器

电子元件能否做加减法？当然可以，不但可以做一些简单的加减运算还能进行乘除和对数等复杂的运算。下面从两个例子入手了解如何用运放进行运算。

### 1. 加法器

**例 7.2.2** 在 Multisim2001 中连接如图 7-14 所示的电路，学习运放是如何做同相和反相加法的。

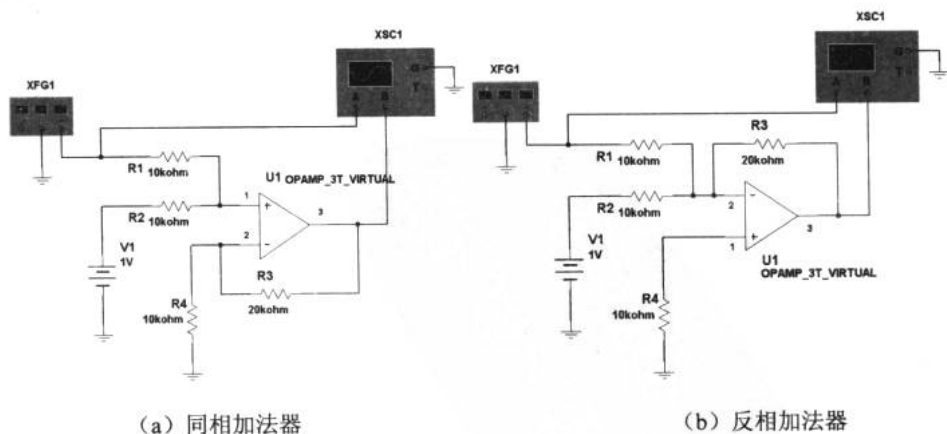
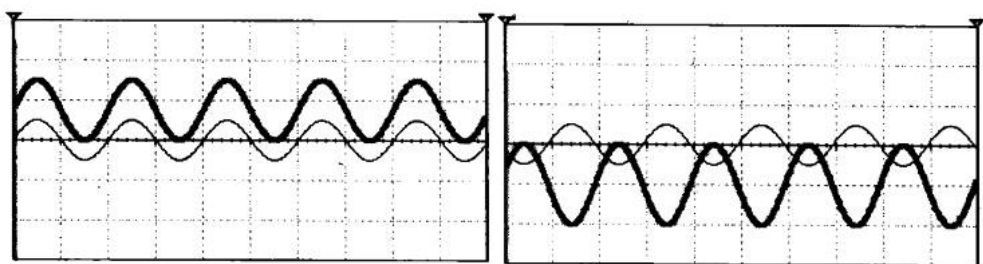


图 7-14 两种加法器



设置函数信号发生器的频率为 1kHz，幅度为 1V。图 7-15 所示为该实验的输入输出波形图。



(a) 同相加法器的输入输出波形

(b) 反相加法器的输入输出波形

图 7-15 两种加法器的输入输出波形

加法电路的功能是实现输入信号求和与放大。在图 7-15 (a) 所示的实验结果中可以看到，输入信号与 1V 的直流电平信号相加，输出信号产生 3V 的偏置，实现的是同相加法；而图 7-15 (b) 所示中，信号则向下平移了 1V，实现了减法运算，即反相加法。图 7-16 和图 7-17 所示为这两种加法器的电路，式 7-1 和式 7-2 分别为同相加法器和反向加法器的输出计算式。

所以，根据设计要求选择合适的  $R_1$  和  $R_2$  的阻值，就能设计出所需的加法器来。比如我们需要一个放大倍数为 5 倍的反相加法器，根据式 7-2 可以选择  $R_1=10\text{k}\Omega$ ， $R_2=50\text{k}\Omega$ 。顺便提一点，电阻  $R_3$  为平衡电阻，一般可以取  $10\text{k}\Omega$ ，而  $R_1$  和  $R_2$  可以比较自由地取用，一般以  $R_1$  为  $10\text{k}\Omega$  常见。这个经验也适合于运放的其他应用电路。

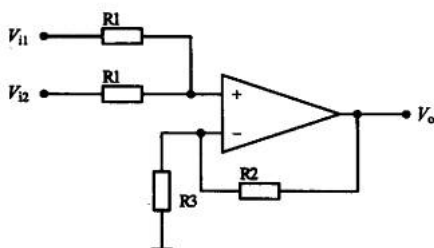


图 7-16 同相加法器

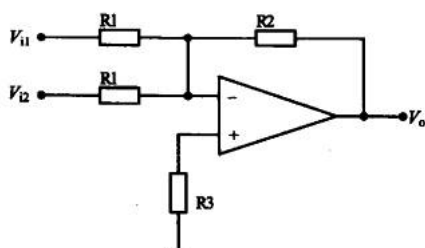


图 7-17 反相加法器

$$V_o = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (V_{11} + V_{12}) \quad (7-1)$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} (V_{11} + V_{12}) \quad (7-2)$$

## 2. 减法器

减法器电路一般有两种，一种是先对一个输入信号实现反相，再作加法运算；另一种是直接利用差分电路。

### (1) 反相电路实现减法器

这种减法器实际上是两个加法器的串联，其电路结构比较清楚，如图 7-18 所示，第一

级运放将  $V_{i1}$  反相变成  $-V_{i1}$ ，第二级运放是一个同相加法器，二级运放组成了一个减法器。

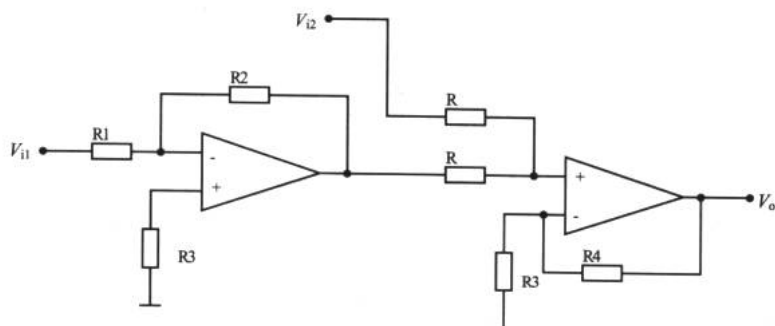


图 7-18 反相电路实现减法器

## (2) 差分电路实现减法器

差分电路实现减法器（下一小节将谈到差分放大器）典型的电路如图 7-19 所示，输出计算式如式 7-3 所示。

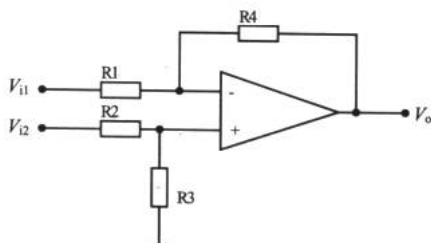


图 7-19 差分电路实现的减法器

$$V_o = \frac{R1 + R4}{R1} \left( V_{i2} \frac{R3}{R2 + R3} - V_{i1} \frac{R4}{R1 + R4} \right) \quad (7-3)$$

如果取  $R1 = R3$ ,  $R2 = R4$  就会得到一个化简的减法器输出计算式。

$$V_o = \frac{R3}{R2} (V_{i2} - V_{i1}) \quad (7-4)$$

在本书中，我们省略了所有公式的推导。如果读者对推导有兴趣，可以在完成电路分析等预备课程后再系统地学习电子线路知识，这时将会遇到大量的计算。一些常用公式能记住最好，也可以在需要时查阅。

## 7.2.4 同相放大器、反相放大器和差分放大器

同相、反相和差分放大器是 3 种常用的放大器电路结构。它们各自的电路特点如下。

### 1. 同相放大器和反相放大器

如果有了同相和反相加法器的概念，那么同相放大器（n. noninverting amplifier）与反相放大器（inverting amplifier）的理解就会变得较简单。图 7-20 所示为这两种放大器的电





路图。

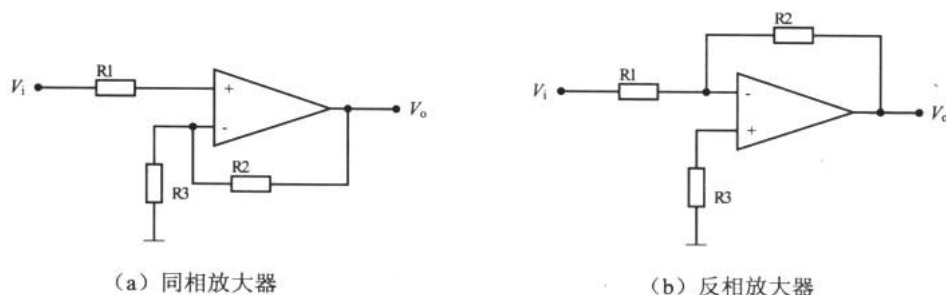


图 7-20 同相放大器和反相放大器

式 7-5 是同相放大器和反相放大器的输出计算式。

$$V_{o\text{同相}} = V_i \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \quad V_{o\text{反相}} = V_i \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (7-5)$$

反相放大器在例 7.2.1 中我们已经了解过了，现在来看一个同相放大器的例子。

**例 7.2.3** 用 Multisim2001 仿真同相放大器，电路如图 7-21 所示。

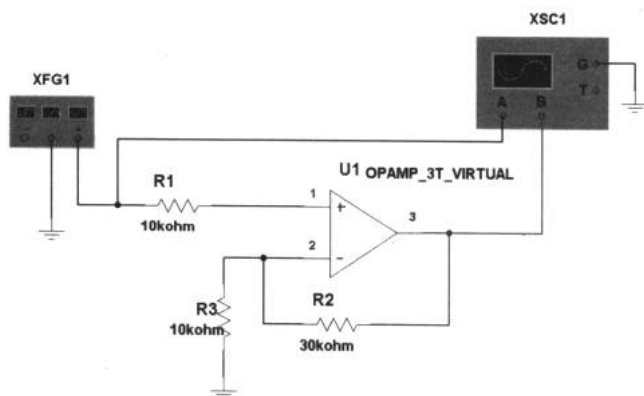


图 7-21 同相放大器

设置函数信号发生器的频率为 1kHz，幅度为 100mV。图 7-22 所示为该实验的输入输出波形图。很明显，同相放大器对输入信号进行了同相放大。

我们通过选择  $R_2$  和  $R_3$  的阻值可以对放大倍数进行调整。有一点需要注意，在 Multisim2001 中仿真是一件很理想的事，我们可以让运放进行 1000 倍或者更大倍数的放大。但在实际电路中，这几乎是很难做到的。运放的放大倍数不是任意设定的，某一运放有自己的最大增益，当放大倍数过高就会出现严重的失真，解决的办法是采用多级放大。关于多级放大我们在三极管放大器中已经介绍过了。多级放大主要的问题就是级间耦合，由于运放不存在静态工作点，所以级联起来十分简单。

如果将同相放大器的外围电阻全部去掉，我们就得到了一个很实用的电路——电压跟

随器，其电路如图 7-23 所示。

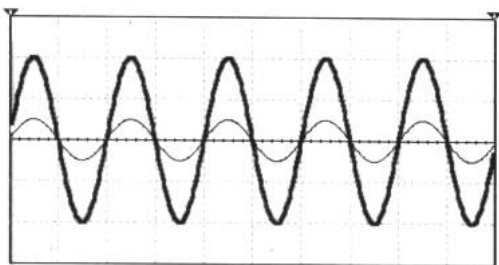


图 7-22 同相放大器输入输出波形

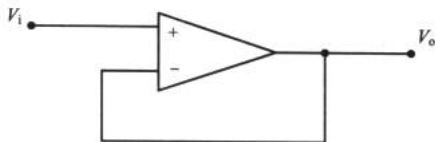


图 7-23 电压跟随器

电压跟随器实际上是一个放大倍数为 1 的同相放大器。可能读者会问这么一个电路又不能对输入信号进行放大，能有什么用处呢？在某些情况下，我们需要对一台仪器的电路板进行信号检测。例如图 7-24 所示的一块心电图机的前置放大电路板中，我们需要对前置放大电路的前级信号进行检测，以判断前级是否正常工作，如果直接使用示波器的探头接入电路中，会很难观察到我们期望的结果。这是因为示波器的输入阻抗与前级的信号不匹配，导致信号被示波器消耗了。这时，可以使用图 7-23 的电压跟随器来缓冲，将示波器的输入连接到电压跟随器的输出端，而其输入端就可以检测任何我们设想的测试点了。由于电压跟随器的放大倍数为 1，这样一来，信号的幅度仍然维持原来的值，并能在示波器上显示了。

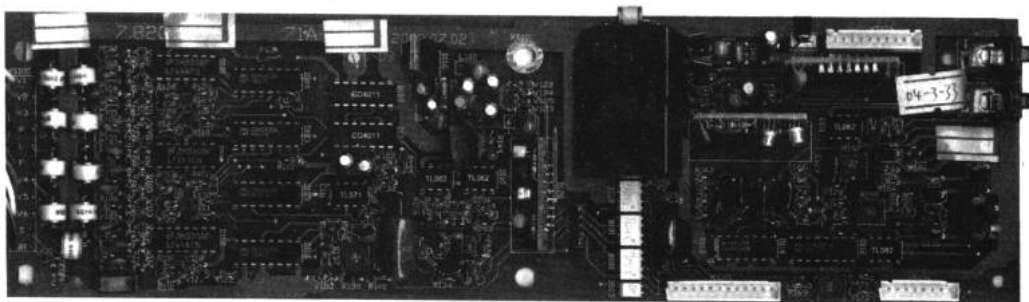


图 7-24 XD-7100 心电图机前置放大器电路板

电压跟随器除了作为一种检测工具外，在电路中也有较多的应用。我们在以后的电子制作中会经常遇到。

## 2. 差分放大器

在许多工程领域里，为了提高系统的抗干扰能力，以获取微弱的信号而采用差分放大器（difference amplifier）的形式来对信号进行放大。其实三极管也能设计成差分放大器，但这种差分放大器不如运放构成的差分放大器工作稳定。图 7-25 所示为利用仪表放大器 INA 128 和运放 OPA 2131 组成的在实验室条件下用于人体心电信号采集的一种常用方法，其中虚线框中的电路就是差分放大器。

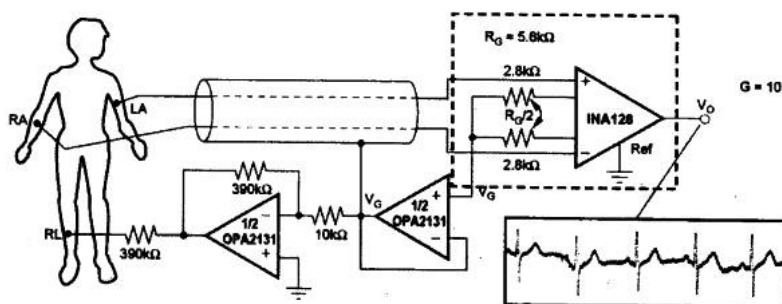


图 7-25 心电信号的采集

利用运放来设计的差分放大器有单运放差分电路和三运放差分电路两种。

### (1) 单运放差分放大器

运算放大器具有同相和反相两个信号输入端，所以十分适合用来设计差分信号放大电路。所谓单运放差分放大器，是指只用一个运放单元实现差分信号处理的电路，如图 7-26 所示，其输出计算式为式 7-6。

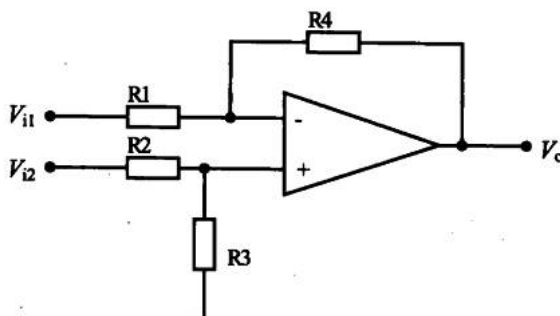


图 7-26 单运放差分电路

$$V_o = \frac{R1 + R4}{R1} \frac{R3}{R2 + R3} V_{i2} - \frac{R4}{R1} V_{i1} \quad (7-6)$$

由于在前面我们忽略了由三极管组成的差分放大电路，我们现在来看看差分放大电路中蕴含的一些知识点。

我们曾经说过在放大器级联时，如果采用直接耦合的方式，前一级的静态输出将成为下一级电路的输入，这个静态电压将会影响下一级的放大工作。但如果采用电容耦合，这个直流成分虽然能够被滤除掉，但电路就只能对交流信号放大而不能对低频信号或直流信号进行放大了。

为了解决这一矛盾，差分放大器应运而生。设两个输入信号为  $V_{i1} = V_1 + V_c$  和  $V_{i2} = V_2 + V_c$ 。其中， $V_c$  称为共模信号，而  $V_1$  和  $V_2$  称为差模信号。有个重要的衡量差分放大器的参数叫共模抑制比 (K<sub>c</sub>)，其定义为差模信号放大倍数与共模放大倍数之比，一般用对数表示，单位是 dB。这是一个反映放大器对共模信号的抑制能力的参数，共模抑制比越大表明器件的性能越好。

**例 7.2.4** 在 Multisim2001 中连接如图 7-27 所示的电路，观察差分放大器对共模信号的抑制作用。

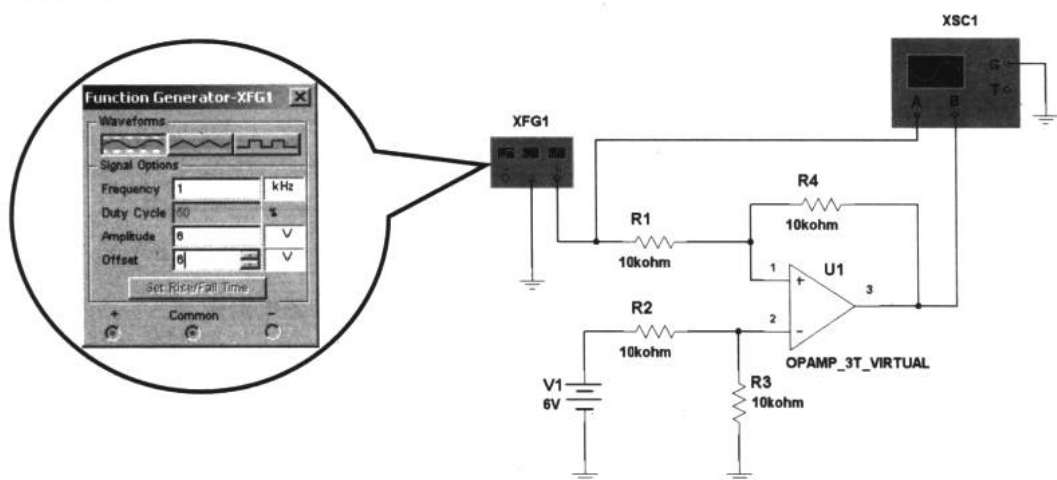


图 7-27 差分放大器的共模信号的抑制作用

我们把所有电阻设定为  $10\text{k}\Omega$ ，信号发生器的频率为  $100\text{Hz}$ ，电压幅度为  $6\text{V}$ ，并加上  $6\text{V}$  的偏置电压 (Offset) 作为同相输入，反相输入一个  $6\text{V}$  的直流电压  $V1$ ，如图 7-27 所示。得到输入输出波形如图 7-28 所示，从中我们可以看到差分放大器对共模信号 ( $6\text{V}$  的直流电平信号) 的抑制作用，原本输入信号含有的直流成分被抑制掉了。

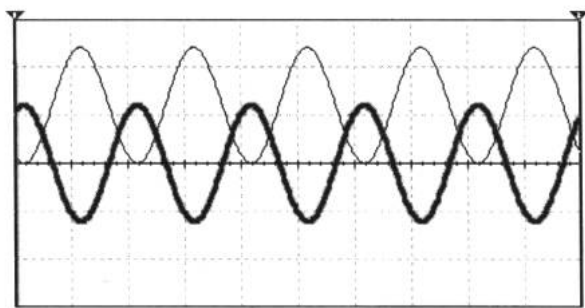


图 7-28 单运放差分放大器的输入输出波形

## (2) 三运放差分放大器

这是一种相当重要的放大器。图 7-29 所示为三运放差分放大器的典型电路图。图中，运算放大器  $A1$  和  $A2$  叫做“输入放大部分”； $A3$  叫做“差分放大部分”。三运放差分放大器有相当高的输入阻抗，一般可达  $10\text{M}\Omega$  以上（这是由于运放的同相和反相输入端有相当高的阻抗，在输入放大部分的两个运放的输入端串联在一起，更加大了输入阻抗），同时也具有相当高的共模抑制比。

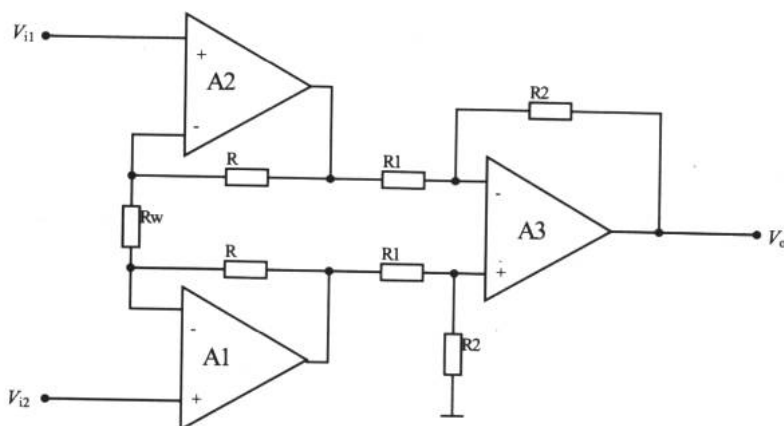


图 7-29 三运放差分放大器

由于输入放大部分与差分放大部分的放大倍数公式是已知的, 所以免去推导过程, 得到描述三运放差分放大器放大输出与输入的关系式 7-7。

$$V_o = \frac{R2}{R1} \left( 1 + \frac{2R}{R_w} \right) (V_{i2} - V_{i1}) \quad (7-7)$$

从式 7-7 中我们可以得到三运放差分放大器能抑制共模信号的原因: 假设  $V_{i1} = V_{i2} = V_c$ , 把这个共模输入信号代入公式中, 很明显  $V_o = 0$ , 所以这个共模信号根本得不到放大。

目前电子产品中使用的差分放大器有现成的芯片, 其内部集成了 3 个运放和电阻等元件。比如仪表放大器 INA 128 和 INA 129 的内部结构如图 7-30 所示。

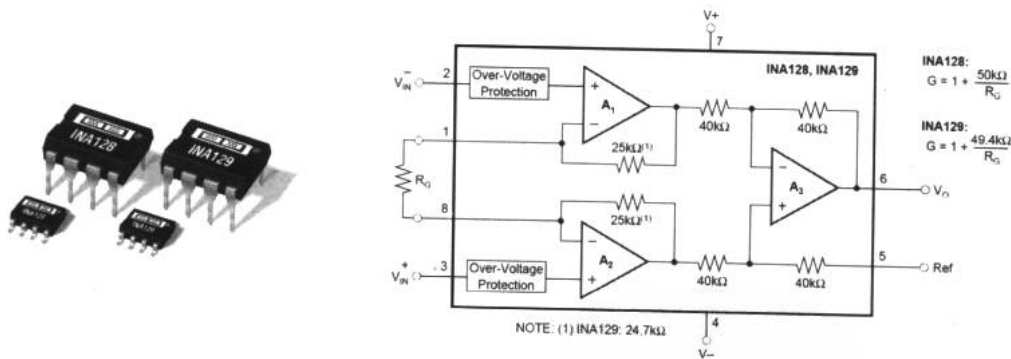


图 7-30 INA 128 和 INA 129 的内部电路

通过调整芯片的 1、8 管脚间的电阻可以实现对放大倍数的控制。三运放差分放大器的共模抑制比常常可以达到 100dB 以上。另外, 还必须注意共模信号的幅度一般比较大, 需要考虑运算放大器对输入信号的最大承受能力, 使每个输入端的最大输入信号幅度在允许范围内。至于这个范围需根据具体器件进行查询。

INA 128 的一个具体的应用如图 7-31 所示。通过左、右手的肢体导联, 将心电信号输入差分放大器 INA 128 的正、负输入端, 并接上右腿驱动 RL, 在输出端我们可以用示波器

观察到人体的心电信号。

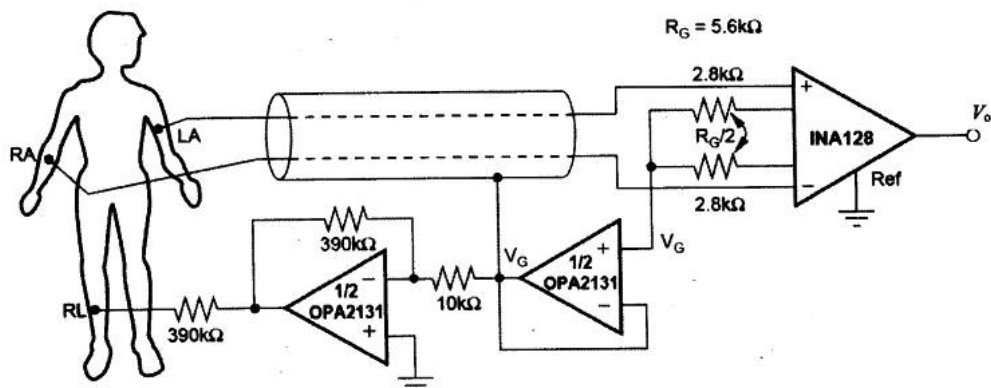


图 7-31 利用 INA128 检测心电信号

差分放大器还常常用于传感器输出信号的放大。图 7-32 所示为一个电阻电桥测量电路，是工程实际中常常用的传感器接口结构（传感器将在下一章谈到）。图中  $R_i = r + \Delta r$ ，是电阻性的传感器件，比如我们前面介绍的光敏电阻和驻极体话筒等。当非电量发生变化时， $R_i$  按一定的比例变化，使电阻电桥的输出电压发生变化。这个输出电压信号是由差模信号（两输出端之间的电压信号）和共模信号（每一输出端静态时的对地电压）所组成的。这时，把这个信号输入差分放大器中，其输出则反映了  $R_i$  的变化量。

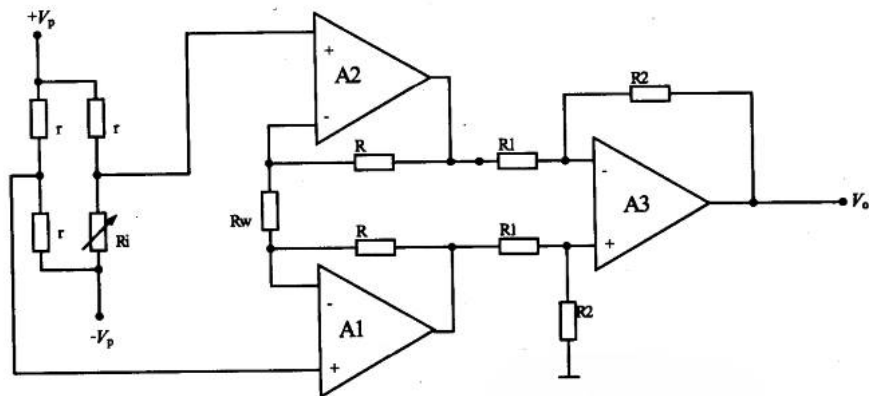


图 7-32 电阻电桥测量电路

式 7-8 给出了测量的输出电压。有一点应该注意，需要满足  $\Delta r \ll r$  条件。同时，在电路里我们没有考虑电桥  $r$  不对称所引起的误差（电桥将在下一章谈到），也没有考虑差分放大器非理想特性的影响。除此之外，应该注意电路的一个基本特点，就是通过电桥向运算放大器提供了偏置电路，这是十分重要的。

$$V_o = -\frac{R2}{R1} \left( 1 + \frac{2R}{Rw} \right) \frac{5\Delta r}{2r} \quad (7-8)$$



## 7.2.5 有源微分器和积分器

### 1. 有源微分器

有源微分器实际上可以被看作是一种隔离直流电压信号的电路，如图 7-33 所示。从电路图上我们知道对于直流信号，电容  $C$  相当于开路状态，而高频信号则可顺利通过电容。

### 2. 有源积分器

有源积分器可以看成一种低通滤波器，如图 7-34 所示。对于高频信号，如果把电容看成是短路状态，则高频信号的增益为 0，而低频信号的增益很大，直流信号的增益为无穷大。当使用积分器对直流信号进行积分处理时，电路将会很快达到饱和输出电压，因此，应当尽量避免对直流信号进行积分。

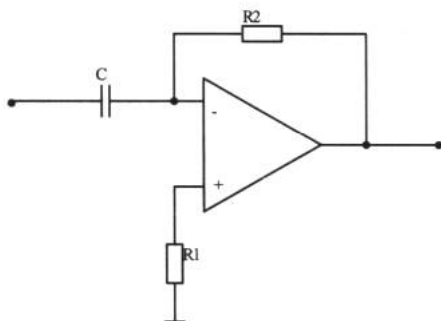


图 7-33 有源微分器电路

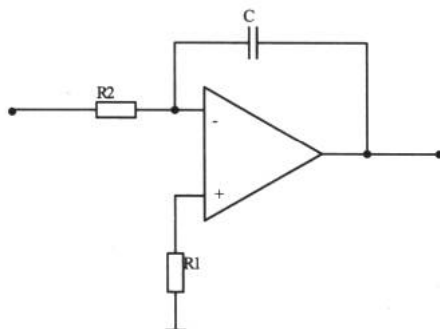


图 7-34 有源积分器电路

**例 7.2.5** 用 Multisim2001 连接如图 7-35 和图 7-36 所示的有源微分器和积分器，观察电路的输入输出波形。

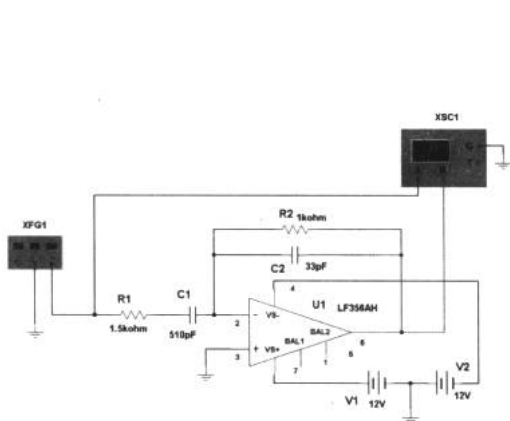


图 7-35 有源微分器电路

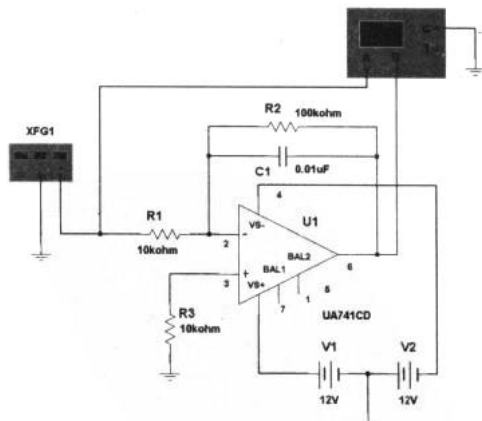


图 7-36 有源积分器电路

设置函数信号发生器的频率为 1kHz，幅度为 1V。在微分器中输入三角波，而积分器



输入方波。从图 7-37 和图 7-38 中我们可以清楚地看到微分器和积分器的作用效果。在本实验中，我们用两个 12V 电池组向运放供电。两个电池组的正、负相连与零电势点（地线）相通，这样，V1 的正极为 12V，V2 的负极为 -12V，满足双电源供电的条件。

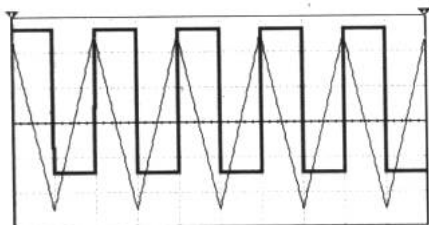


图 7-37 有源微分器电路输入输出波形

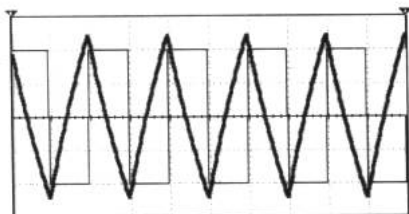


图 7-38 有源积分器电路输入输出波形

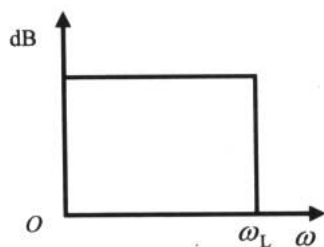
## 7.2.6 有源滤波器

在前面的 RC 电路里，我们介绍了无源滤波器，现在我们来看看在实际应用中广泛使用的有源滤波器（active filter）。

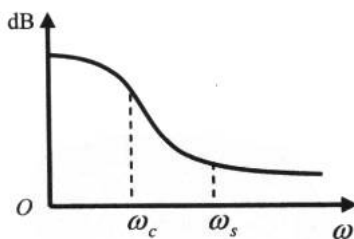
任何一个含有信号处理的电子系统都具有自己的工作频带宽度，频率特性反映出了电子系统的这个基本特点。而滤波器，就是根据电路参数对电路频带宽度的影响而设计出来的应用电路。常见的滤波器有高通滤波器 HPF、低通滤波器 LPF、带通滤波器 BPF、带阻滤波器 BEF 和全通滤波器 APF。

### 1. 低通滤波器

低通滤波器（LPF）就是让指定截止频率的低频分量顺利通过，而使高频分量受到很大的衰减的电路。图 7-39（a）所示为理想低通滤波器的幅频特性，在实际中，这种滤波器几乎不可能存在。图 7-39（b）所示为实际的一种低通滤波器的幅频特性，该低通滤波器的通带为  $0 \leq \omega \leq \omega_c$ ，过渡带为  $\omega_c \leq \omega \leq \omega_s$ ，阻带为  $\omega \geq \omega_s$ 。



（a）理想低通滤波器



（b）实际的低通滤波器

图 7-39 低通滤波器

无源滤波器由 RC 电路组成，这种电路的缺点是输入阻抗小且不能对信号进行放大。前面谈到电压跟随器能有效地提高输入阻抗，我们把无源滤波器和电压跟随器进行一下结合，得到了图 7-40 所示的一阶有源低通滤波器。对于该低通滤波器的幅频特性与相频特性



我们可以使用 Multisim2001 中的 AC Analysis 功能进行分析。

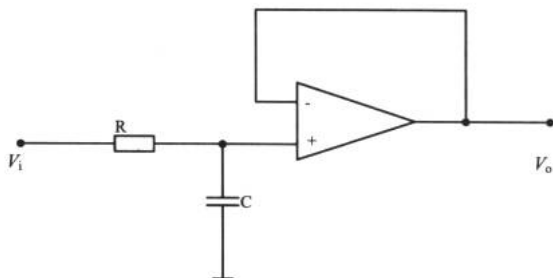


图 7-40 一阶有源低通滤波器 (一)

除了图 7-40 所示的一阶有源低通滤波器外, 还有一种常用的低通滤波器, 见例 7.2.6。

**例 7.2.6** 用 Multisim2001 连接如图 7-41 所示的有源低通滤波器, 观察电路的频率特性。

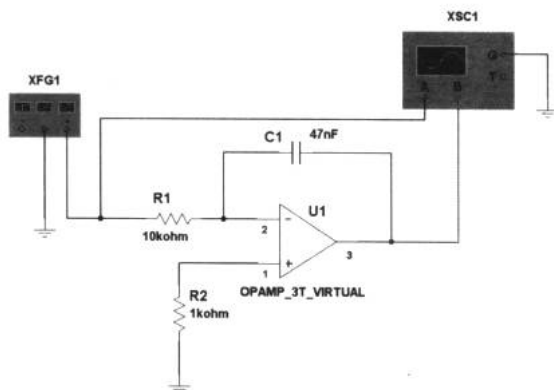


图 7-41 一阶有源低通滤波器 (二)

使用 Multisim2001 的 AC Analysis 功能对该低通滤波器进行分析, 我们很容易得到电路的幅频特性和相频特性曲线, 如图 7-42 所示。

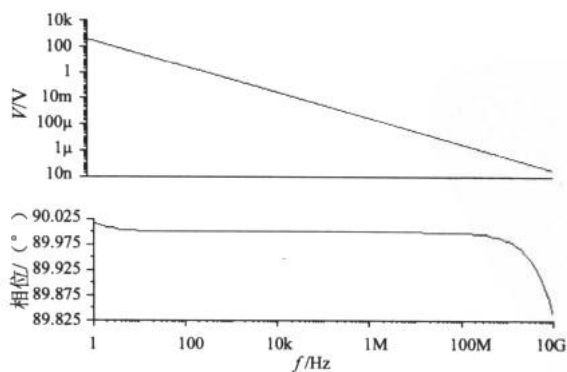


图 7-42 一阶有源低通滤波器的幅频特性和相频特性曲线

如果把以上两种低通滤波器进行“结合”，就得到了二阶有源低通滤波器，如图 7-43 所示。电阻  $R_2$  和电容  $C_2$  相当于一个无源滤波器，电阻  $R_1$  和电容  $C_1$  与运放组成了类似图 7-41 所示的一阶有源低通滤波器。反馈组件  $R_4$  可以控制该滤波器的增益。其幅频特性和相频特性曲线如图 7-44 所示。类似这样的由两个电容组成的滤波器称为二阶低通滤波器。

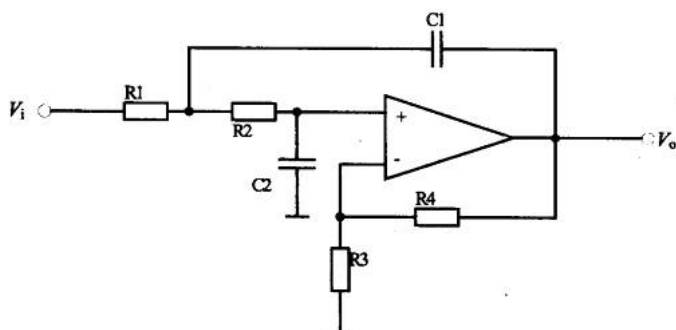


图 7-43 二阶有源低通滤波器

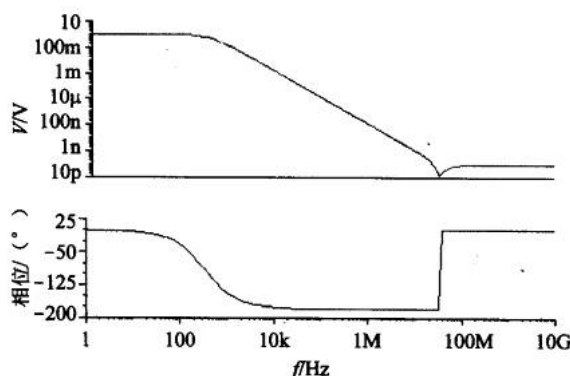


图 7-44 二阶有源低通滤波器的幅频特性和相频特性曲线

比较二阶有源低通滤波器和一阶有源低通滤波器的幅频特性曲线我们知道，二阶低通滤波器对频率的选择特性比一阶的好。因为二阶低通滤波器对截止频率以下的信号并没有什么衰减，而对截止频率以上的信号有一个比较明显的衰减。所以，在信号处理电路中一般都采用高阶的滤波器。对于图 7-43 所示的二阶有源低通滤波器可使用式 7-9 来计算截止频率。

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (7-9)$$

如果取  $R_1 = R_2 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , 就得到简化式 7-10。假如我们现在要设计一个二阶低通滤波器，要求其截止频率  $f=1\text{kHz}$ ，假设电容  $C_1=C_2=C=0.01\mu\text{F}$ ，根据  $R = \frac{1}{\omega_c C} = \frac{1}{2\pi f C}$  得电阻  $R=15924\Omega$ ，于是可选  $R_1=R_2=16\text{k}\Omega$ 。



$$\omega_c = \frac{1}{R \cdot C} \quad (7-10)$$

## 2. 高通滤波器

高通滤波器 (HPF) 的功能是: 让高于指定频率  $\omega_c$  的频率分量顺利通过, 而使自直流到指定阻带频率  $\omega_s$  的低频分量受到衰减。理论上说, 高通滤波器在频率无穷大时也应该是通带, 但实际上由于寄生参数的影响及器件的带宽限制, 当频率增高到一定值, 幅值也将下降。幅频特性如图 7-45 所示。

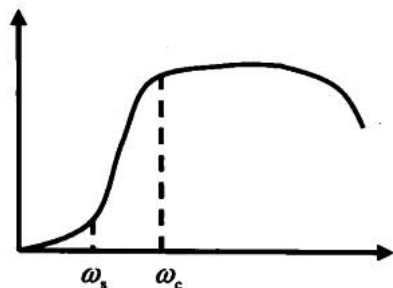


图 7-45 高通有源滤波器的幅度频率特性曲线

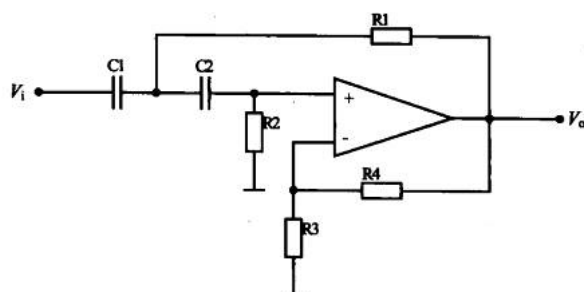


图 7-46 二阶有源高通滤波器

图 7-46 所示为一个典型的二阶有源高通 Butterworth 滤波器。它的截止频率的计算式与式 7-9 在形式上是一致的, 简化公式也形如式 7-10。图 7-47 所示为二阶有源高通滤波器的幅频特性和相频特性曲线。

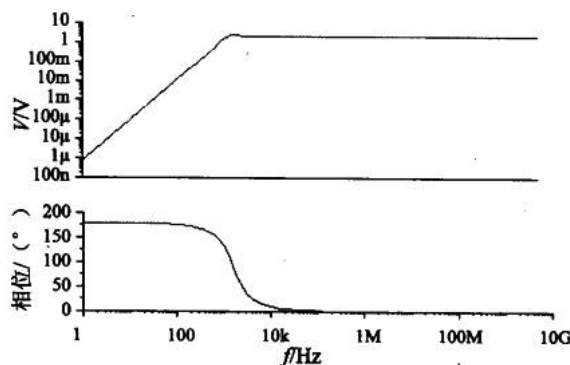


图 7-47 二阶有源高通滤波器的幅频特性和相频特性曲线

## 3. 带通滤波器

带通滤波器 (BPF) 就是让有限带宽 ( $\omega_L \leq \omega \leq \omega_H$ ) 内的频率分量顺利通过, 而让此频率范围外的其他分量衰减。带通滤波器的带宽定义为:

$$BW = \omega_H - \omega_L \quad (7-11)$$

我们可以利用高通滤波器和低通滤波器来组合成带通滤波器, 这种想法是基于图 7-48 所示的这 3 种滤波器的幅频特性响应的比较而得的。利用高通和低通滤波器构成

带通滤波器的条件是低通滤波器的截止角频率 $\omega_H$ 大于高通滤波器的截止角频率 $\omega_L$ ,两者覆盖的通带就提供了一个带通响应。图 7-48 (c) 所示为实际当中带通滤波器的频率特性曲线。

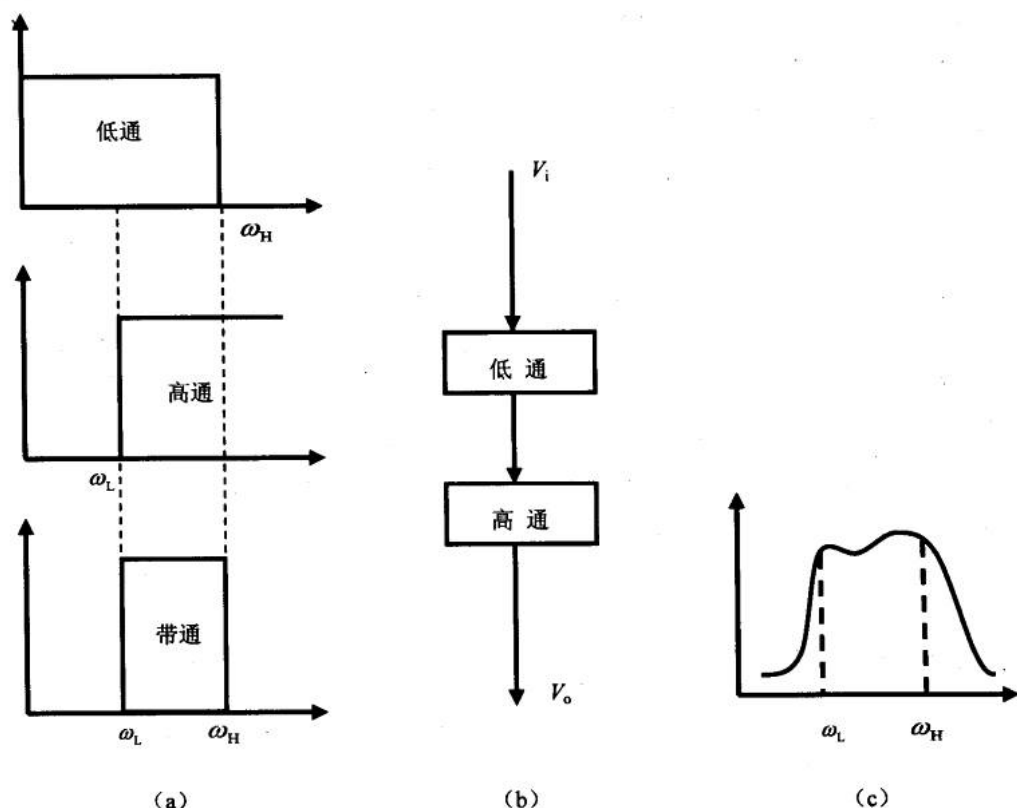


图 7-48 带通滤波器的构成示意图

由高通和低通滤波器的组合所提供的带通特性,我们得到了图 7-49 所示的一种典型的带通滤波器电路。

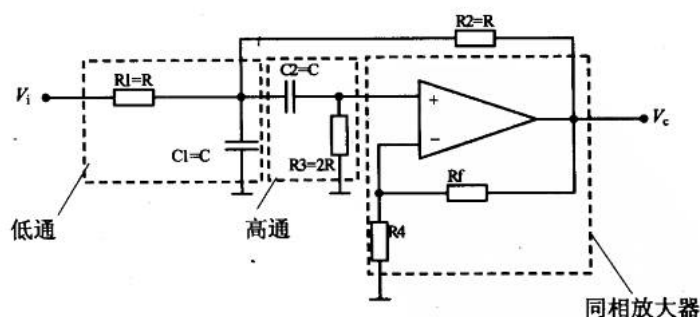


图 7-49 带通滤波器

通过例 7.2.7 可以学习到带通滤波器的设计。



**例 7.2.7** 带通滤波器电路如图 7-49 所示。设计要求：中心频率  $f_o=1\text{kHz}$ ，通带宽度  $BW=100\text{Hz}$ ，试计算和选择该电路的电容和电阻值。

可以先选定  $C=0.01\mu\text{F}$ ，则有  $R=\frac{1}{\omega_o C}=\frac{1}{2\pi f_o C}=\frac{1}{2\pi \times 1000 \times 0.01 \times 10^{-6}}=15915\Omega=15.915\text{k}\Omega$  所以，可取  $R_1=R_2=R=15.915\text{k}\Omega$ ， $R_3=2R=31.83\text{k}\Omega$ 。这样，我们完成了低通和高通部分器件的取值。再来看看同相放大器部分。在此之前，有两个公式需要用到，它们是：

$$BW = \frac{f_o}{Q} \quad (7-12)$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} \quad (7-13)$$

由同相放大器的公式 7-13 可知  $A_{VF} = V_o/V_i = 1 + R_f/R_4$ ，这时应该注意  $A_{VF} < 3$ 。所以把  $f_o$  和  $BW$  代入以上式子，得  $R_f=1.9R_4$ 。从运放工作的稳定性出发，与运放输入相连的外接电阻应该满足一定的平衡条件，即  $R_f$  或  $R_4$  要与  $R_3$  取值相同。所以可使  $R_4=R_3=2R=31.83\text{k}\Omega$ ，则  $R_f=60.477\text{k}\Omega$ 。在实际当中，可以选择阻值相近的器件。

#### 4. 带阻滤波器

带阻滤波器 (BEF) 与带通滤波器正好相反，带通是让某一频带宽度的信号通过，而带阻是阻止某一频带宽度的信号。图 7-50 所示为带阻滤波器的频率特性图，其中， $\omega_c$  为中心频率。

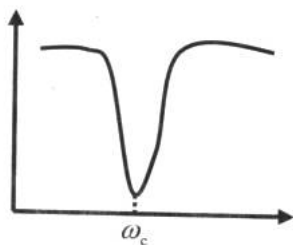


图 7-50 带阻滤波器的频率特性

在传感器信号传送或其他模拟信号的处理过程中，常会被  $50\text{Hz}$  的工频信号干扰，因为我们使用的市电就是  $50\text{Hz}$  的交流电。这时，可以使用带阻滤波器滤除这个工频干扰。有时我们把  $50\text{Hz}$  的带阻滤波器叫做  $50\text{Hz}$  陷波器。陷波器是带阻滤波器的一个特例，典型的设计如图 7-51 所示。

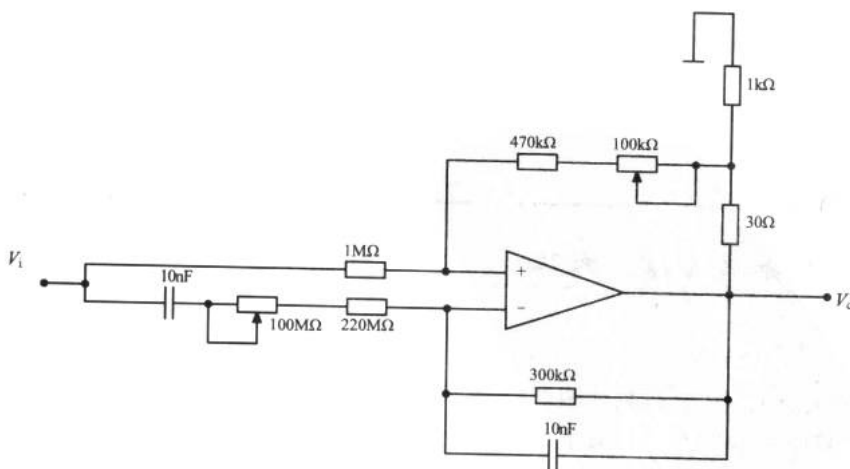


图 7-51  $50\text{Hz}$  陷波器

使用 Multisim2001 仿真图 7-51 所示的 50Hz 陷波器，并利用 AC Analysis 功能分析电路的频率特性，可得到图 7-52 所示的频率响应曲线。使用游标可以读出频率响应曲线中对 50Hz 信号的衰减最大，同时，也可以利用波特计进行测量。

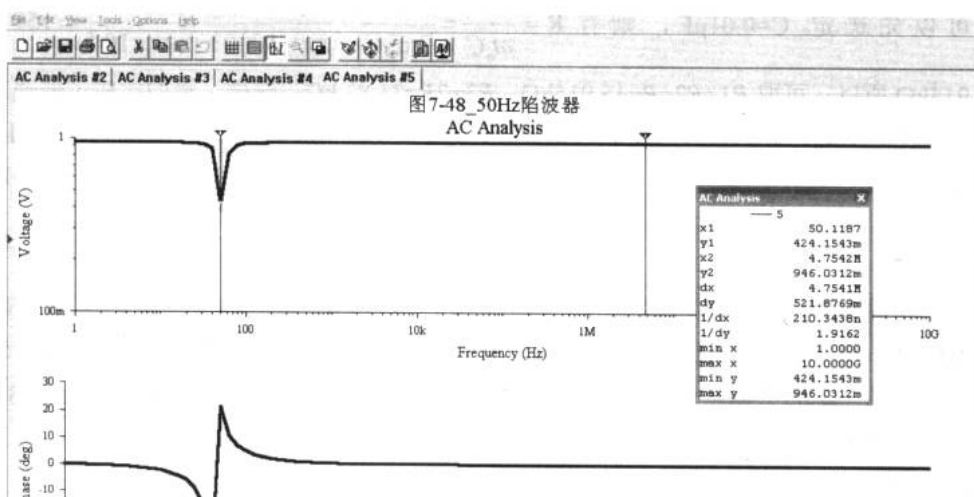


图 7-52 50Hz 陷波器的频率响应曲线

通过上面的学习，对滤波器的了解将告一段落。读者可能对于为什么不使用简单的 RC 组成的无源滤波器却使用运算放大器感到不解。表 7-11 可以帮助大家进行理解。

表 7-11 无源滤波器与有源滤波器的比较

比较指标	无 源	有 源
尺寸、重量和价格	受电感器的限制	无电感器
调谐	必须调整 L 或 C	只用一个电阻器进行调整
带宽	受电感器 Q 的限制	容易做到 $Q > 100$
频带性能		
次音频 ( $< 10\text{Hz}$ )	不具有	极好
音频	获得不方便	极好
射频 ( $> 100\text{kHz}$ )	好	好
增益	无增益	可调
输入和输出的阻抗匹配	必须匹配	不需要匹配

## 7.2.7 常用集成运算放大器

### 1. 单运放集成电路

单运放集成电路引脚排列如图 7-53 所示，1、5 脚为外接调零端。常用的型号有 TL081、LF351、LM318 和  $\mu\text{A}741$  等，如表 7-12 所示。



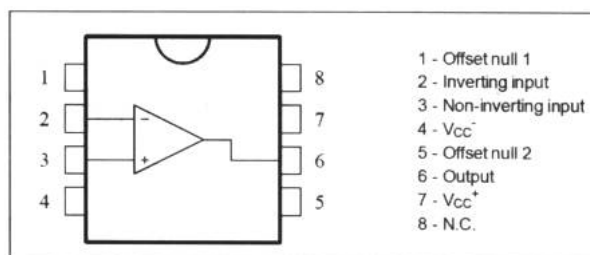


图 7-53 单运放

表 7-12 常用单运放参数

型 号	输入阻抗	电源电压	最大功耗	带 宽
TL081	$10^{12}\Omega$	$\pm 3 \sim \pm 15V$	680mW	3MHz
LF351	$10^{12}\Omega$	$\pm 3 \sim \pm 15V$	500mW	4MHz
LM318	$3M\Omega$	$\pm 3 \sim \pm 15V$	500mW	4MHz
$\mu A741$	$2M\Omega$	$\pm 12 \sim \pm 15V$	500mW	1MHz

## 2. 双运放集成电路

双运放集成电路的引脚如图 7-54 所示, 内含两个参数一致、互相独立的运放单元。常用的型号有 LM358、TL082、LF353 和 OPA2604 等。图 7-54 所示为 8 管脚双运放的典型内部结构图。

## 3. 四运放集成电路

四运放集成电路的引脚如图 7-55 所示, 内含 4 个参数一致、互相独立的运放单元。常用的型号有 LM324、TL084、LF347 和 OPA4131 等。

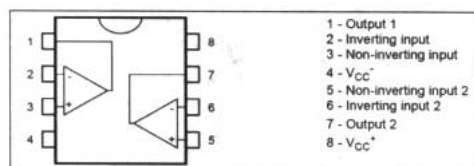


图 7-54 双运放

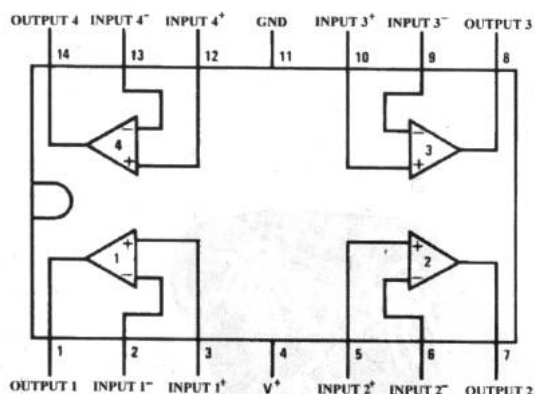


图 7-55 四运放

## 第8章 传感器及其他器件

本章是模拟电子技术的最后一章。通过这一章的学习，我们将能识别电路图上的几乎所有器件。虽然这是一个介绍性的章节，但是它仍是前7章的必要补充，也是完整电子应用技术的重要环节之一。

### 8.1 传感器的重要地位

传感器有哪些 接口技术浅析 电桥 压力传感器 温度传感器 光电传感器 湿度传感器

传感器这个话题我们在前面已经有所涉及，比如光敏电阻和驻极体话筒是两种比较常见的传感器。

我们的生活中到处存在着非电信号。比如我们的血压就是一个非电信号。电子血压计中，压力传感器把这种非电信号转换成电信号，交由电路进行处理和显示；电子体温计则通过温敏器件把温度这种非电信号转换成电信号。在工业上，传感器的应用更为广泛，比如图8-1所示为一个制药厂进行药丸装瓶的控制图。

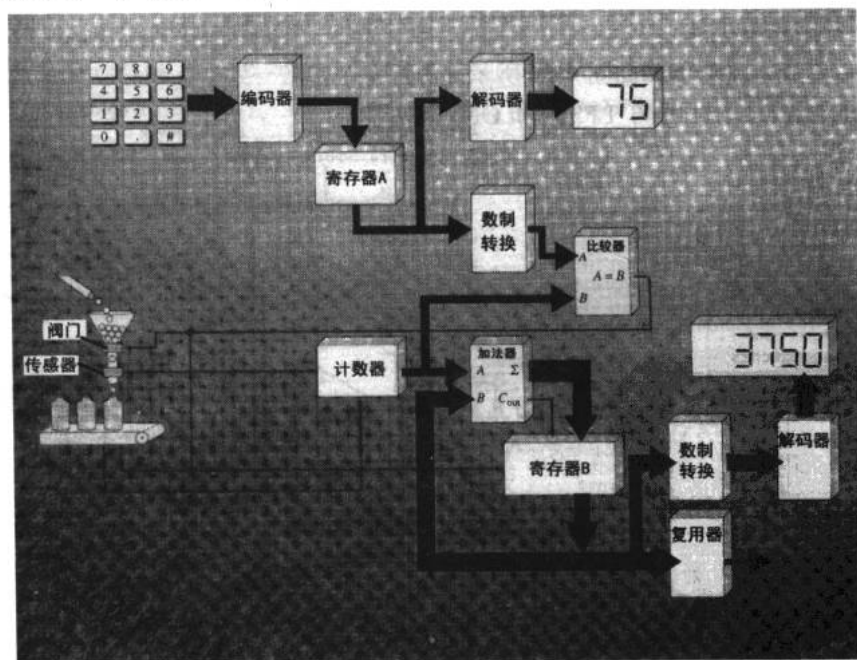


图 8-1 传感器的应用



在图 8-1 左侧的漏斗颈上有个传感器 (sensor)，这个传感器应该是光电传感器。当阀门 (valve) 打开时，每粒药丸通过传感器时都会使其输出一个脉冲，通过后续的电路进行计数、显示及控制等工作。可见，传感器是系统功能实现的重要环节。

我们来给传感器下个定义：能把被测物理量或化学量转换为与之有确定对应关系的电量输出的装置称为传感器，也叫换能器。传感器输出的信号有不同形式，如电阻式、电容式及开关量等。

### 8.1.1 传感器有哪些

传感器几乎与人的感官一一对应。它把自然界的各种物理量或化学量精确地变换为电信号，再经电子电路或计算机进行处理，从而对这些量进行监测或控制。

例如，相当于视觉的是光敏传感器，有半导体光敏传感器、光敏电阻、CCD 传感器和光电倍增管等；相当于听觉的是力敏传感器，有电容式话筒和陶瓷传感器等；相当于触觉的是温敏传感器，有热敏电阻、半导体热敏器件和热电偶等；相当于嗅觉的是气敏传感器，有半导体传感器和燃烧式传感器；相当于味觉的是味觉传感器，有离子传感器。此外，还有检测位移量、速度、流量、磁场及射线的传感器等。

我们来看看几种常见的传感器。

#### 1. 最简单的传感器

恐怕世界上没有比图 8-2 更简单、更容易让人理解的传感器了。

这种传感器是一种简易的温度传感器，一般适用于常温区的温度测量，或用于简单的温度控制系统中。在器件上有温度选择游标，用来设定待控温度值。如将游标设在  $50^{\circ}\text{C}$ ，当温度低于  $50^{\circ}\text{C}$  时，游标处的金属触片与水银没有接触，即 A、B 两点断开，否则两点接通，起到了监视温度的作用。

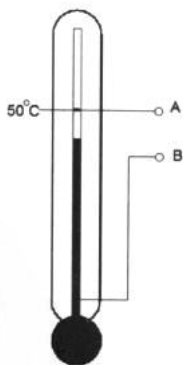


图 8-2 接触式水银温控器

#### 2. 常用的光电传感器

图 8-3 所示为一种十分常见的光电传感器 (photoelectric sensor)。在一个塑料的小盒子里，装进了红外发射管、接收管和驱动电路。

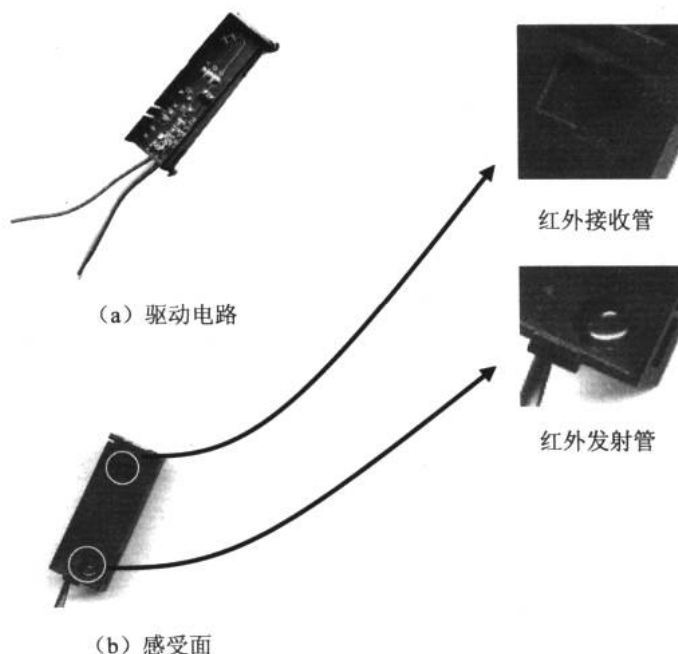


图 8-3 “解剖”光电传感器

这个传感器的感受面上有一个红外发射管和接收管。当在传感器加上工作电压时，红外发射管发出红外线（不可见），如果红外线遇到障碍物就会反射回来并被接收管接收到，如图 8-4 所示。此时驱动电路就会在传感器的输出信号引脚上触发一个信号，可以是高电平或是低电平。这取决于驱动电路的设计，这个电平的变化交由后续的电路进行识别。

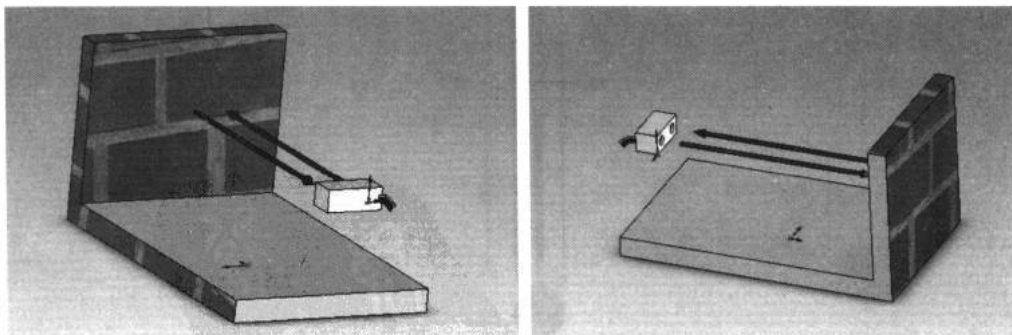


图 8-4 光电传感器工作过程示意图

### 3. 霍耳接近开关

霍耳接近开关是根据霍耳效应原理制成的自动化开关器件。大多数产品采用圆管形防水设计，如图 8-5 所示。在轻工、化工、纺织、印刷、机械、冶金、电信、交通、自控和



电子计算机等领域有广泛的应用。这种传感器的一般特点是：响应频率高、重复定位精度高、抗干扰能力强和高可靠性等。

当有磁铁接近霍尔接近开关时，霍尔接近开关就会输出一个开关量，所以我们可以利用这个功能来进行速度的测算。如图 8-6 所示为一个简易的自行车测速装置。在自行车车轮上安装一块磁铁，在前叉上相应位置安装霍尔接近开关，每当车轮转过一圈时，磁铁与霍尔接近开关接近一次，从而输出一个开关量。通过后续电路可以对这个开关量进行计数，进而计算出转速。

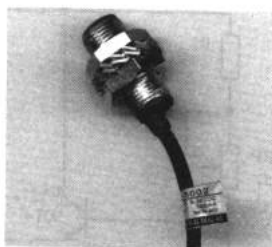
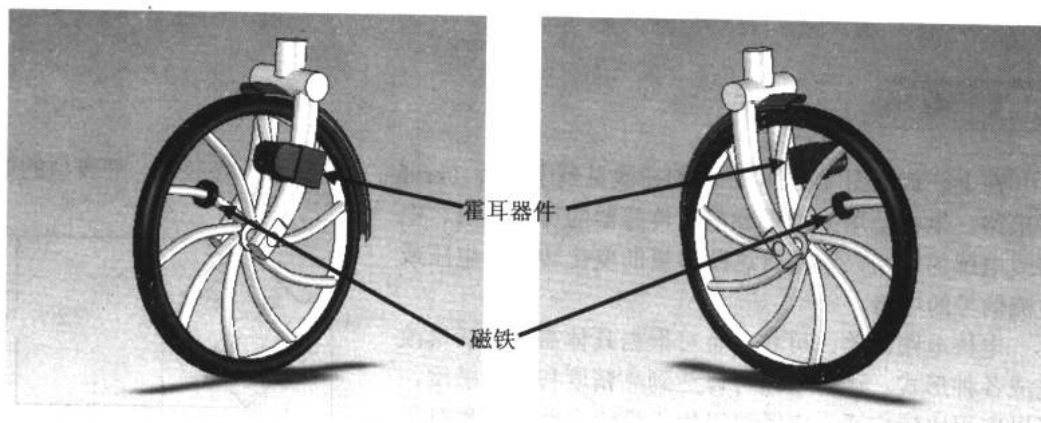


图 8-5 霍尔接近开关



输出的计数脉冲：



图 8-6 简易的自行车测速装置

### 8.1.2 接口技术浅析

上一小节我们提到光电传感器的驱动电路，这个驱动电路就是一个接口。那么什么是接口呢？

世界上最简单的接口并不是光电传感器这个复杂的驱动电路，而是我们在第 1 章就接触过的光控报警器中的一部分电路，现在请读者来辨认一下图 8-7 中哪一部分是接口？

电阻  $R_1$  和电位器  $RP$  为光敏电阻提供工作电压，使光敏电阻以电压量的形式输出，从而为后续电路提供电信号，所以它们就是光敏电阻的接口，如图 8-8 所示，该接口把传感器电阻的变化转换成电压的变化。

所谓接口电路，是把传感器与后续有关电路相联系，构成实用传感器系统的电路。

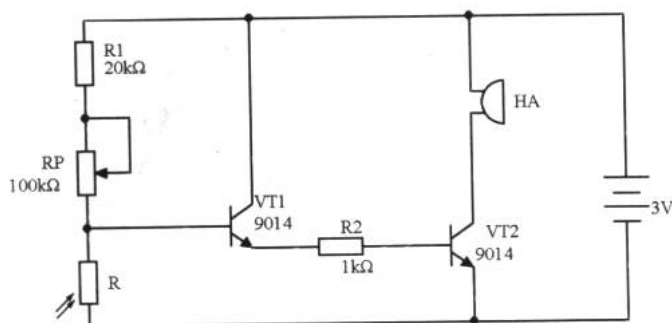


图 8-7 再画光控报警器

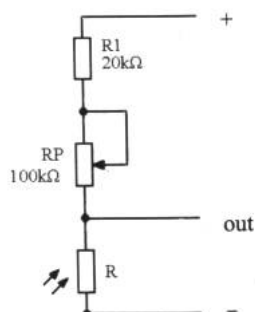


图 8-8 光敏电阻的接口

### 8.1.3 电桥

在上一章的图 7-32 中，我们初次见到了电桥（bridge），图 8-9 所示为一种典型的电桥电路，电桥是用来测量参量式传感器的可变电阻、电容或电感的电路，它是将这些参量的变化转换为电压或电流信号的电路。

电桥电路简单、可靠，且可根据具体需要灵活地改变成各种形式。这种电路可以达到高精度和高灵敏度，所以应用比较广泛。它既可以用于直流电路中，也可用于不同频率的交流电路中。

#### 1. 电桥原理

图 8-9 所示的电桥是一种常用的桥式测量电路。R1、R2、R3 和 R4 四个电阻依次接在 A、B、C、D 之间，构成电桥的 4 个桥臂。电桥的对角 AC 接电源，电源电压为 E；对角 BD 为电桥的输出端，其输出电压用  $U_{bd}$  表示。可以证明  $U_{bd}$  与桥臂电阻有如下关系：

$$U_{bd} = E \left( \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R4}{R3 + R4} \right)$$

若 4 个桥臂电阻的初始值为  $R1 = R2 = R3 = R4$ ，此时输出电压  $U_{bd} = 0$ ，电桥处于平衡状态。如果桥臂电阻的阻值发生改变，设各电阻的变化量分别为  $\Delta R1$ 、 $\Delta R2$ 、 $\Delta R3$ 、 $\Delta R4$ ，则输出电压的相应变化为：

$$U_{bd} + \Delta U_{bd} = E \left( \frac{R1 + \Delta R1}{R1 + R2 + \Delta R1 + \Delta R2} - \frac{R4 + \Delta R4}{R3 + R4 + \Delta R3 + \Delta R4} \right)$$

在桥臂电阻改变较小的情况下，可以证明桥路输出电压为：

$$\Delta U_{bd} = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right)$$

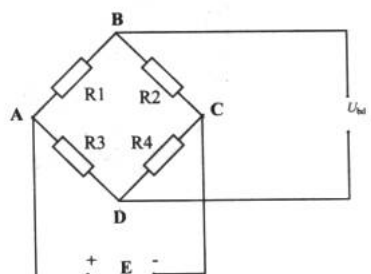


图 8-9 桥式测量电路



如果  $\Delta R$  仅由机械变形引起, 与温度影响无关, 而且 4 个桥臂电阻的灵敏系数  $K_s$  相等时,  $\Delta U_{bd}$  可以写成:

$$\Delta U_{bd} = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

如果供桥电压  $E$  不变, 那么电阻的机械变形引起的电压输出  $\Delta U_{bd}$  与 4 个桥臂的应变值  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$  成线性关系。式中各  $\varepsilon$  是代数值, 其符号由变形方向决定。一般拉应变为“正”、压应变为“负”。根据这一特性, 相邻两桥臂的  $\varepsilon$  ( $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$  或  $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_4$ ) 符号一致时, 两应变相抵消; 如符号相反, 则两应变的绝对值相加。

相对两桥臂的  $\varepsilon$  ( $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  或  $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ ) 符号一致时, 两应变的绝对值相加; 如符号相反, 则两应变相抵消。

实验如果能很好地利用电桥的这一特性, 合理地设计电桥, 就能把桥臂电阻的变化通过电桥的输出电压直接体现出来, 从而有效地提高测量灵敏度, 并减少测量误差。

## 2. 组桥方式

电桥的输出电压  $U_{bd}$  与桥臂电阻变化的函数可有下列几种情况。

### (1) 单臂电桥

一个桥臂电阻有变化, 其他的无变化, 此时的电路为单臂电路。例如桥臂电阻  $R_1$  有  $\Delta R_1$  的变化, 成为  $R_1 + \Delta R_1$ , 则电桥的输出电压为:

$$U_{bd} = E \left[ \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right] \quad (8-1)$$

如果取  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ , 可得到简化式:

$$U_{bd} = E \left( \frac{\Delta R_1}{4R_1 + 2\Delta R_1} \right) \quad (8-2)$$

对于测量微电阻变化时, 有  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 则

$$U_{bd} \approx E \left( \frac{\Delta R_1}{4R_1} \right) \quad (8-3)$$

### (2) 双臂电桥

如果相邻两个桥臂电阻变化, 电桥输出电压为:

$$U_{bd} = E \left[ \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - (R_2 + \Delta R_2)R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + R_4)} \right] \quad (8-4)$$

若满足  $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ ,  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ , 如图 8-10 所示, 称为差动电桥, 则

$$U_{bd} = E \left( \frac{\Delta R_1}{2R_1} \right) \quad (8-5)$$

由式 (8-5) 可知, 差动电桥输出电压  $U_{bd}$  与  $\Delta R_1$  成线性关系, 且幅度是单臂电桥的 2 倍。

### (3) 全臂电桥

4 个桥臂电阻均有变化时, 设  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , 且  $\Delta R_1 \ll R_1$ ,  $\Delta R_2 \ll R_2$ ,  $\Delta R_3 \ll R_3$ ,  $\Delta R_4 \ll R_4$ , 则电桥输出电压为:



$$U_{bd} = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8-6)$$

当  $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$ ，即四臂工作差动电桥，如图 8-11 所示，则有：

$$U_{bd} = E \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \quad (8-7)$$

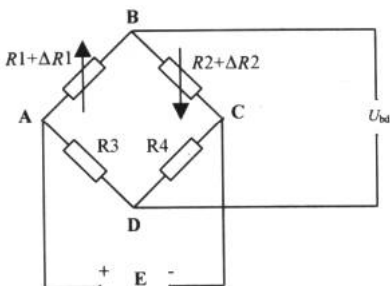


图 8-10 双臂差动电桥

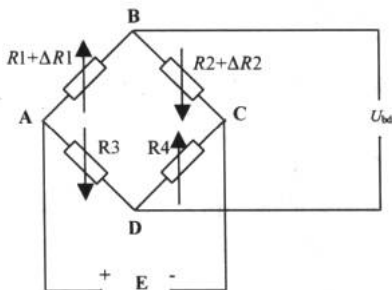


图 8-11 四臂差动电桥

由式 (8-7) 可见，四臂差动电桥的输出电压是单臂电桥的 4 倍。

#### 8.1.4 压力传感器

压力传感器是使用最广泛的一种传感器，它是检测气体、液体及固体等所有物质间作用力能量的总称，也包括测量高于大气压的压力计以及测量低于大气压的真空气。

压力传感器的种类很多，传统的测量方法是利用弹性元件的形变和位移来表示，但它的体积大、笨重、输出非线性。随着微电子技术的发展，利用半导体材料的压阻效应和良好的弹性，研制出了半导体压力传感器，主要有硅压阻式和电容式两种，它们具有体积小、重量轻、灵敏度高优点，因此半导体力敏传感器得到了广泛应用。

我们通过一个实际的例子来学习压力传感器和电桥的应用。在临床诊断、外科手术和病人监护中，人体内各种压力参数的准确测量往往至关重要，其中以血压的检测最为常见。图 8-12 所示为一种常用的无创血压检测方法。

这种间接（无创）血压测量方法是由俄国军医柯罗特科夫（Korotkoff）创立的，所以又名柯氏音法。测量时，用袖带充气，阻断动脉血流，然后缓慢放气，在阻断动脉点的下游监听是否出现血流，当开始监听到柯氏音时，即开始有血流通过时，袖带内的压力为动脉内的收缩压，当血流完全恢复正常时，袖带内的压力为动脉内的舒张压。

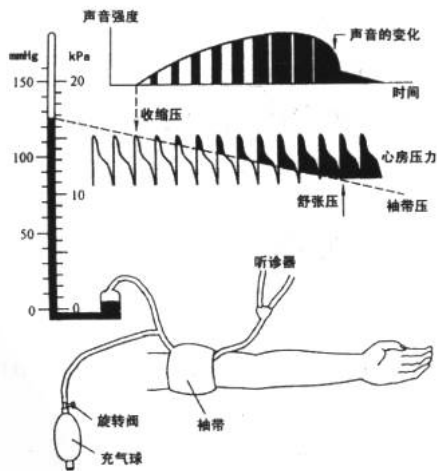


图 8-12 柯氏音法无创血压测量



图 8-12 所示为常规间接测量,所使用的压力传感器是最普通的水银压力计。这种测量方法要求医务工作者工作时专心致志,且测量的精度取决于人的经验。为了排除人为因素,得到客观的结果,使用压力传感器系统来检测血压的方法出现了。图 8-13 所示为一种电子血压计的前置级电路。 $V_{o1}$  输出的是直流电平值,它与血压值成正比。 $V_{o2}$  输出的是脉搏的振荡信号,可用于收缩压和舒张压的识别。

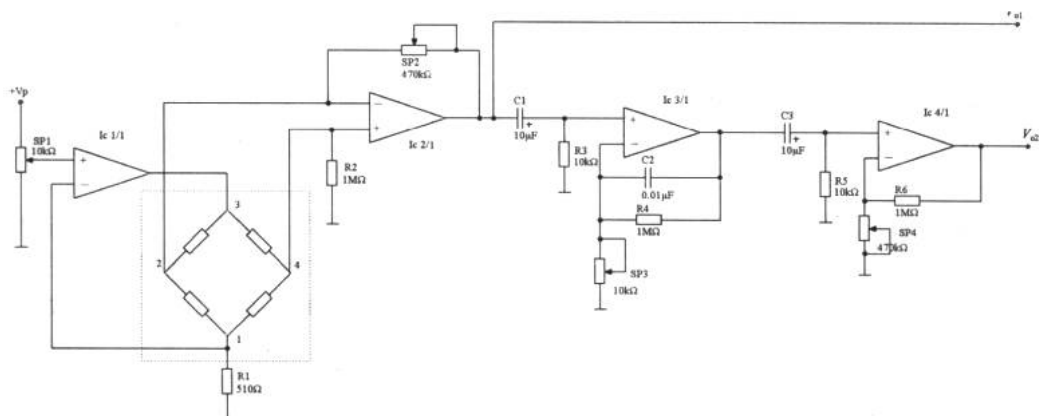


图 8-13 电子血压计的前置电路

在虚线框中,使用了电桥法进行压力的检测,电桥把压力的变化转换成了电压的变化。Motorola 公司的 MPX 系列压力传感器可以胜任图 8-13 的信号检测任务。图 8-14 所示为 MPX 50 型压力传感器。

MPX 50 有 4 个引脚,1 脚是接地端,2、4 脚分别是+Output 和 -Output,3 脚为器件提供工作电压。

在制作时,利用胶管把袖带和压力传感器的入口连接起来,这样,压力传感器就可以对袖带中的压力进行测量了,如图 8-15 所示。

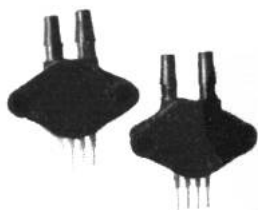


图 8-14 Motorola MPX 50 压力传感器



图 8-15 压力传感器与袖带的连接

### 8.1.5 温度传感器

广义来说,一切随温度变化而物体性质也发生变化的物质均可作为温度传感器的材料。

常用的温度传感器有热电偶、热电阻和集成温度传感器等。

### 1. 热电偶

热电偶 (thermocouple) 的原理是当两种不同的金属组成回路时, 若两个接触点温度不同, 则回路中就有电流通过, 称为温差电现象或塞贝克效应 (seebeck effect)。热电偶传感器就是利用这种效应制成的热敏传感器, 这种传感器有很大的温度敏感范围, 一般在  $-180 \sim 2800^{\circ}\text{C}$  内均可使用; 测量的准确度和灵敏度都很高, 尤其在高温范围内有较高的精度。

常用热电偶一般做成棒型, 其整体主要由热电极、绝缘管、保护管及接线盒等几部分组成, 其中热电极是测温的敏感器件。图 8-16 所示为生物医学测量用的铠装和针状热电偶温度传感器。

图 8-16 所示的热电偶具有许多优点: 测量端热容量小且受热面积很小, 所以可测定空间任一点的温度; 响应时间短, 小于  $1\text{ms}$ ; 易于制造, 稳定性好, 可以把热电偶做在导管内或注射针内。在石英纤维上真空沉积两种金属, 可制成更小的热电偶, 热时间常数可达  $\mu\text{s}$  级, 可测量细胞内瞬时温度。热电偶温度计的缺点是输出电压小、灵敏度低, 并需要一个准确的参考温度。为了提高灵敏度, 增加输出电压, 可把许多热电偶串联起来, 使奇数的接触点都测量同一温度, 而使偶数的接触点保持同一参考温度。这种多接触点的热电偶称为热电堆。

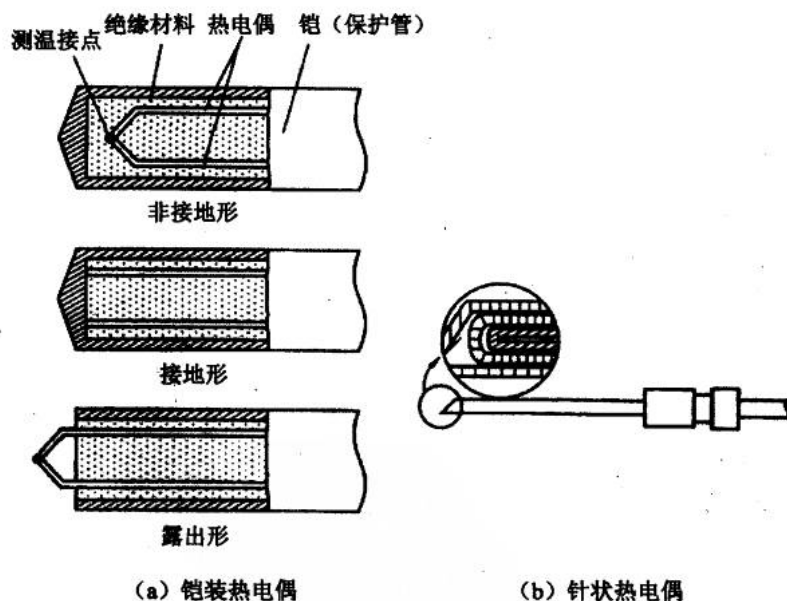


图 8-16 生物医学测量用热电偶温度传感器

### 2. 热敏电阻

热敏电阻 (thermistor) 传感器主要是利用温度变化时传感器电阻发生变化的原理测量温度, 这种温度传感器在常温 and 较低温区范围内有比热电偶更高的灵敏度。根据制作材料



的不同,热敏电阻有铂电阻、铜电阻和半导体热敏电阻等几种。图 8-17 所示为一些常用的热敏电阻外形图。

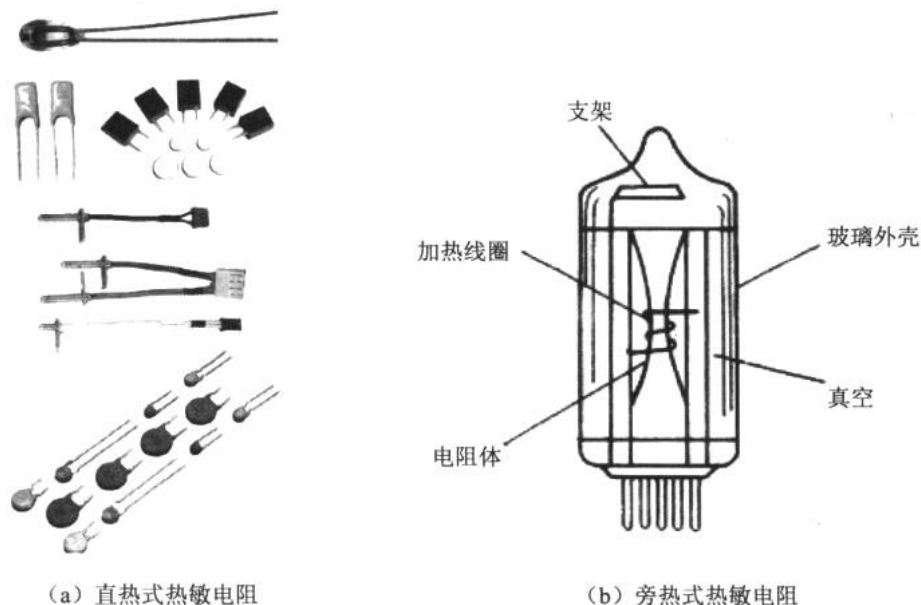


图 8-17 常见热敏电阻外形

### 3. 集成温度传感器

AD590 是一种二端式的集成温度传感器,其外观及引脚如图 8-18 所示。从 AD590 的测温与电流的关系可以看出它是一个线性度较好的电流型的温度传感器。

摄氏温度/ $^{\circ}\text{C}$	AD590 电流/ $\mu\text{A}$	经 $10\text{k}\Omega$ 电压/ $\text{V}$
0	273.2	2.732
10	283.2	2.832
20	293.2	2.932
25	298.2	2.982
30	303.2	3.032
40	313.2	3.132
50	323.2	3.232
60	273.2	3.732
100	373.2	3.732

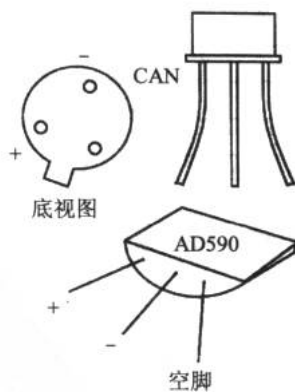


图 8-18 AD590 集成温度传感器

使用 AD590 进行温度测量时,可使用图 8-19 所示的测温电路进行接口。当 AD590 所测温度发生  $1^{\circ}\text{C}$  的变化时,流过其所在回路的电流即产生  $1\mu\text{A}$  的变化。通过一级跟随器和

两级放大器，将 AD590 的微小信号进行放大以供后续电路的使用。

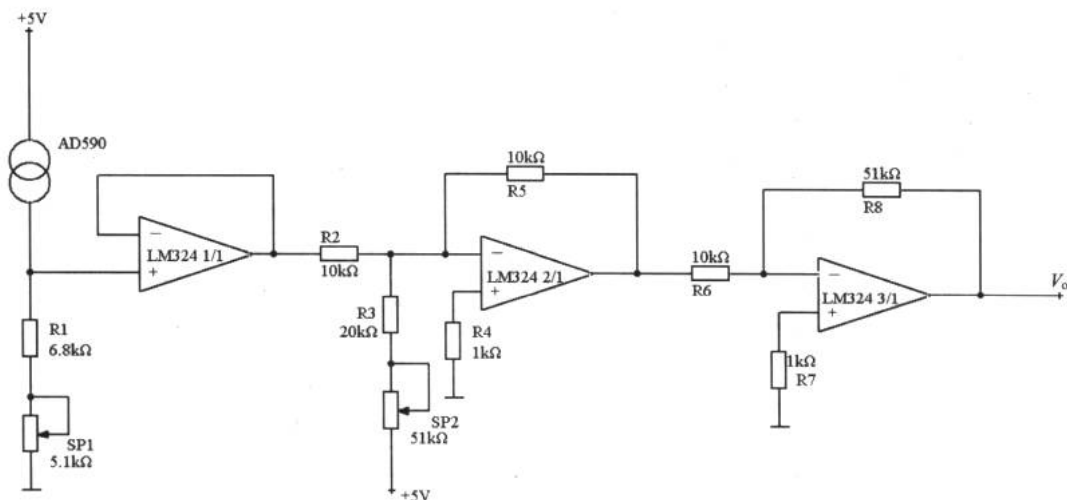


图 8-19 AD590 的接口电路

除了上面介绍的几种常用温度传感器外，还有热辐射高温传感器和光导纤维温度传感器等。我们在进行选择和使用时应注意以下几点：

- ✦ 明确被测对象的温区范围，如果被测对象的温度较高，可选用热电偶或辐射式传感器。
- ✦ 如果被测对象的测温精度要求很高，而且可用接触方式进行或可使传感器较接近被测对象的，宜选用热电偶作为温度传感器。
- ✦ 对于只能非接触方式测量的，而被测对象为运动的高温物体，宜选用辐射式高温或光导纤维温度传感器。
- ✦ 在常温区测量且信号的输送距离比较长时，可选用集成温度传感器。
- ✦ 在测温范围窄、精度要求不高时，如在空调机、冰箱及一般家用电器中可选用热敏电阻。
- ✦ 在低温区的温度测量，选用适用低温的热电偶或铂电阻。

### 8.1.6 光电传感器

光电传感器的作用是将光信息转换为电信号，它是一种利用光敏器件作为检测元件的传感器。光电传感器对光的敏感主要是利用半导体材料的电学特性受光照射后发生变化的原理，即利用光电效应（Photoelectric effect）。光电效应分为两种，一是外光电效应，即在光线作用下，物体内的电子受激逸出物体表面向外发射的现象，利用这类效应的传感器主要有光电管和光电倍增管等；二是内光电效应，受光照射的物体电导率发生变化或产生光电动势的效应。

常用的光电传感器有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光电池和光电倍增管等。



在第1章就谈到的光敏电阻就是一种光电传感器，现在，我们从光敏二极管开始讲述。

### 1. 光敏二极管

图8-20所示为常见的光电二极管 (Photodiode) 及电路标识。光敏二极管也叫光电二极管。用得最多的是硅材料的光电二极管。

#### (1) 光电二极管的使用

光电二极管管脚有正负之分，新购买的器件管脚较长的是正极，也可以用万用表进行极性判别。

光电二极管通常工作在反向电压状态，如图8-21所示。无光照射时，光电二极管 VD 截止，反向电流  $I=0$ ，负载电阻  $R$  上的输出电压  $U_o=0$ 。当有光照时，VD 反向电流  $I$  明显增大并随光照强度的变化而变化，这时输出电压  $U_o$  也较大并随光照强度的变化而变化，从而实现了光电转换。光电二极管在光控、红外遥控、光探测、光纤通信、光电转换及光电耦合等方面有广泛的应用。



图 8-20 常见光电二极管及电路标识

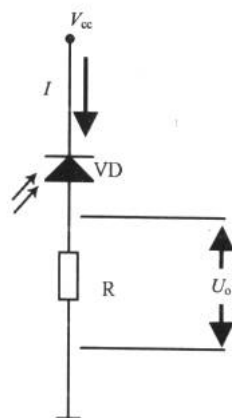


图 8-21 光电二极管的使用

#### (2) 光电对管

光电对管又称红外对管，这是一种非常常用的光电器件。所谓对管就是由一对二极管组成的包括了红外线发射和接收的器件。当对管以近似直线的位置相对时，接收管才会有一个比较明显的阻值变化，如图8-22所示。一般来说，这种对管的有效距离为数米，如果想扩大感应距离可加装透镜。把接收管连接成如图8-21所示的电路，就可以组成一个光电触发系统。

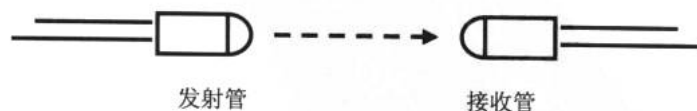


图 8-22 红外对管的使用

### 2. 光电三极管

光电三极管 (Phototransistor) 是在光电二极管的基础上发展起来的光电器件，它不仅

能实现光电转换，而且还具有放大功能，因而使用更方便、更广泛。图 8-23 所示为光电三极管的外观及电路标识。

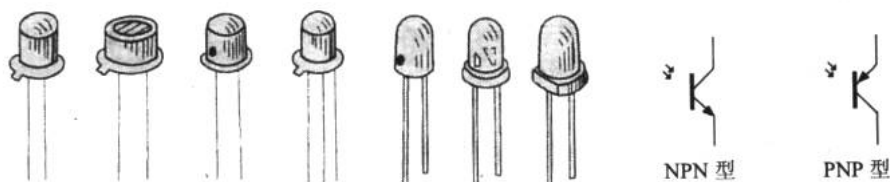


图 8-23 光电三极管的外观及电路标识

光电三极管分为 NPN 型和 PNP 型。光电三极管的基极即为光窗口，因此大多数光电三极管只有发射极 e 和集电极 c 两个管脚，也有部分光电三极管基极 b 有引出管脚作为温度补偿用。一般新购的器件管脚较长的是 e 极。

光电三极管可以等效为光电二极管和普通三极管的组合，如图 8-24 所示。

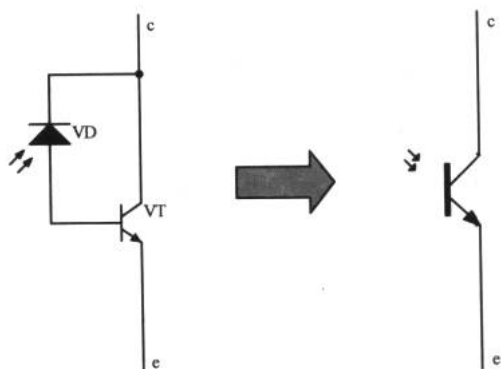


图 8-24 光电三极管

图 8-25 所示为一个光电三极管应用的例子，它与第 1 章介绍的光控报警器的扩展电路图 1-58 有异曲同工之妙，光电三极管 VT1 受一定光强的光线照射后，其集电极与发射极导通，这使得三极管 VT2 获得偏置而导通，继电器的控制端 K 工作，从而控制触点开关的电路工作。

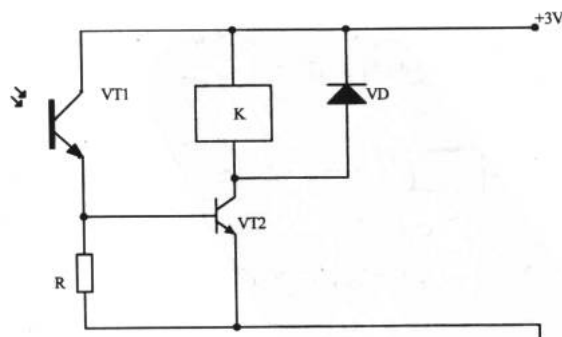


图 8-25 光电三极管的应用一例





### 3. 光电耦合器（光耦）

#### （1）光耦的基本结构和特点

我们通过自制一个光电耦合器（optoelectronic coupler）来了解它的内部结构。

#### 例 8.1.1 制作一个光电耦合器，结构如图 8-26 所示。

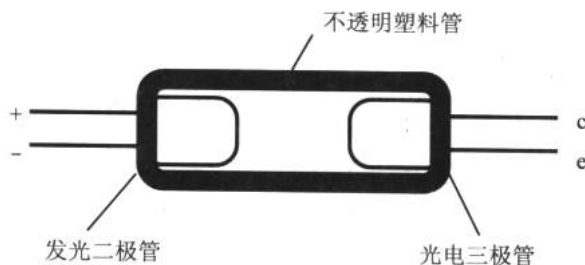


图 8-26 结构示意图

用一个发光二极管（本章后面将谈到）和一个光电三极管，可以制成简单的光电耦合器。如图 8-26 所示，取一截内径比发光二极管和光电三极管直径略粗的不透明塑料管，左侧放入发光二极管，右侧放入光电三极管，发光二极管的发光面就正对光电三极管的受光面，两者相距为数毫米，再用环氧树脂将两个管子及塑料管胶封牢固即可。这样就完成了一个光电耦合器的制作。

通过这个简单的光耦我们知道，光电耦合器是以光为媒介传输电信号的一种电—光—电转换器件。它由发光源和受光器两部分组成。把发光源和受光器组装在同一密闭的壳体内，彼此间用透明绝缘体隔离。发光源的引脚为输入端，受光器的引脚为输出端，常见的发光源为发光二极管，受光器为光敏二极管、光敏三极管等。光电耦合器的种类较多，常见有光电二极管型、光电三极管型、光敏电阻型、光控晶闸管型（晶闸管将在本章稍后介绍）、光电达林顿型和集成电路型等。图 8-27 所示为常见光耦的外观和内部结构。

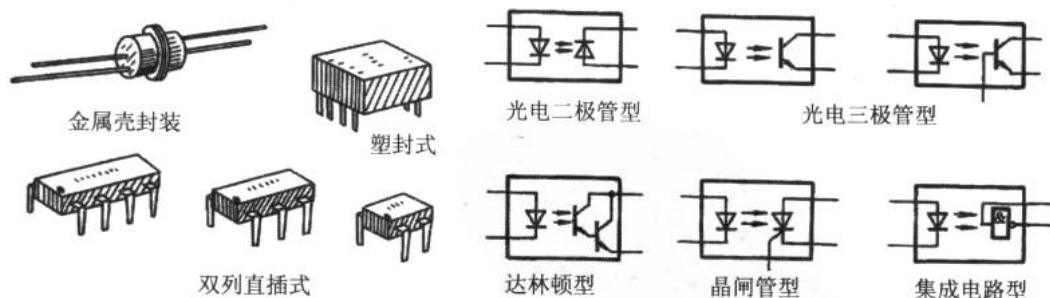


图 8-27 光耦的外观和不同种类的电路标识

光耦的封装形式多种多样，图 8-28 所示为常用的光耦及引脚。

#### （2）工作原理和特性

在光电耦合器输入端加电信号使发光源发光，光的强度取决于激励电流的大小，此光

照射到封装在一起的受光器上后, 因光电效应而产生了光电流, 由受光器输出端引出, 这样就实现了电—光—电的转换。

光耦的基本工作特性是:

① 共模抑制比很高。在光电耦合器内部, 由于发光管和受光器之间的耦合电容很小 (2pF 以内), 所以共模输入电压通过极间耦合电容对输出电流的影响很小, 因而共模抑制比很高。

② 输出特性。光电耦合器的输出特性是指在一定的发光电流  $I$  下, 光敏管所加偏置电压  $V_{ce}$  与输出电流  $I_o$  之间的关系。当  $I=0$  时, 发光二极管不发光, 此时的光敏晶体管集电极输出电流称为暗电流, 一般很小; 当  $I>0$  时, 在一定的  $I$  作用下, 所对应的  $I_o$  基本上与  $V_{ce}$  无关。 $I_o$  与  $I$  之间的变化成线性关系, 这与普通晶体三极管输出特性相似。

### (3) 应用电路

应用一: 开关电路

图 8-29 (a) 所示电路中, 当输入信号  $U_i$  为低电平时, 晶体管 VT1 处于截止状态, 光耦耦合器 B1 中发光二极管的电流近似为零, 输出端  $U_o$  间的电阻很大, 相当于开关“断开”; 当  $U_i$  为高电平时, VT1 导通, B1 中发光二极管发光,  $U_o$  间的电阻变小, 相当于开关“接通”。该电路因  $U_i$  为低电平时, 开关不通, 故为高电平导通状态。同理, 图 8-29 (b) 所示电路中, 因无信号 ( $U_i$  为低电平) 时, 开关导通, 故为低电平导通状态。

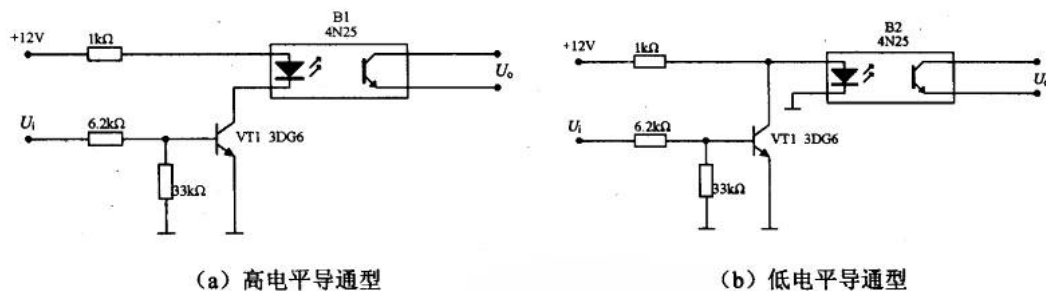


图 8-29 开关电路

应用二: 隔离耦合电路

为什么电路里要进行隔离耦合呢? 比如说脑电 (EEG) 采集时, 为了人体安全, 采用浮地形式, 以便实现人体与电气的隔离, 如图 8-30 所示。所谓浮地, 即信号在传递的过程中, 不是利用一个公共的接地点逐级地往下面传送, 而是利用光电耦合的方式进行。信号从浮地部分传递到接地部分, 两部分之间没有电路上的直接联系, 通过地线构成的漏电流完全被抑制。因此, 不但保障了人体的绝对安全, 而且消除了地线中的干扰电路。

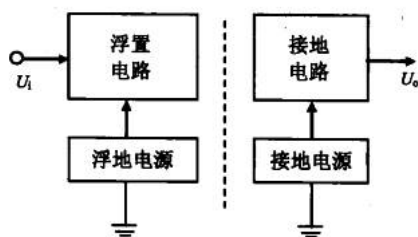


图 8-30 电气隔离

图 8-31 所示为一个典型的交流耦合放大电路。适当选取发光回路限流电阻  $R_1$ ，使 B1 的电流传输比为一常数，即可保证该电路的线性放大作用。

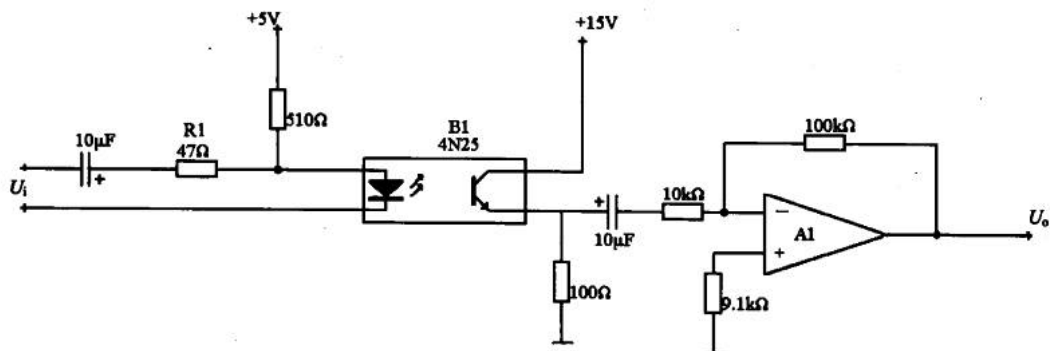


图 8-31 隔离耦合电路

#### 应用三：低压控制高压

图 8-32 所示为一台交流电钻控制电路。当按下开关 SW 时，光电耦合产生输出电流，电压通过  $R_5$  加至晶闸管 VS 的控制极（晶闸管将在 8.2.3 节中谈到），使双向晶闸管 VS 导通，电钻电机 M 转动。由于光耦的隔离作用，只需控制  $3V$  低压直流电即可间接控制交流  $220V$ ，起到了保护使用者人身安全的作用。

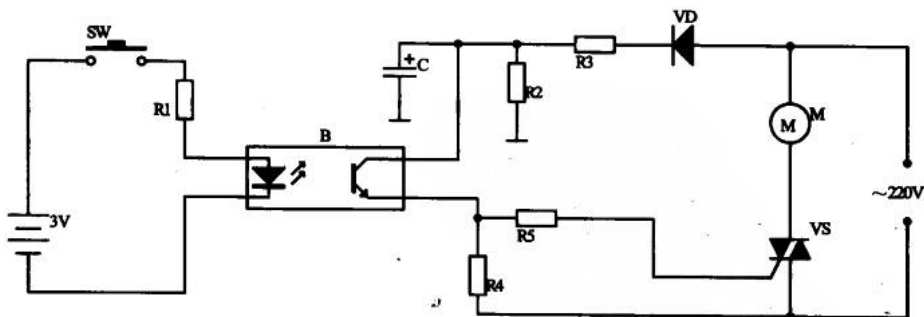


图 8-32 低压控制高压电路

#### 4. 光电池

光电池 (photocell) 是一种把光能转换成电能的半导体光电器件，其工作原理是光生

伏特效应。它也叫太阳能电池，是一种未来的清洁能源之一。常用的光电池有硅光电池和硒光电池等。光电池的输出电流一般与其受光面积有关，受光面积越大，输出电流也越大。

### 5. 光电倍增管

光电倍增管 (photomultiplier) 是把微弱的光输入转换成电子流并使电子流获得放大的电真空器件，它是最灵敏的光检测器。

## 8.1.7 湿度传感器

湿度传感器 (moisture sensor) 常用于化纤、造纸、仓库、育种、机房及家电等各个领域，并随着精密加工和制造技术对环境要求的提高得到广泛应用。常用的湿度传感器有毛发湿度计、LiCl 湿敏元件、高分子湿度传感器、金属氧化物湿敏元件和干湿球湿度计等。

湿度传感器分为电阻式和电容式两种，其基本形式都是在基片涂覆感湿材料形成感湿膜。空气中的水蒸气吸附于感湿材料后，元件的阻抗和介质常数发生很大的变化，从而制成湿敏元件。

国内外各厂家的湿度传感器产品水平不一，质量价格也相差较大。湿度传感器具有如下特点。

#### (1) 精度和长期稳定性

湿度传感器的精度应达到  $\pm 2\% \sim \pm 5\% \text{RH}$ ，达不到这个水平很难作为计量器具使用。湿度传感器要达到  $\pm 2\% \sim \pm 3\% \text{RH}$  的精度是比较困难的，通常产品资料中给出的特性是在常温 ( $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) 和洁净的气体中测量的。在实际使用中，由于尘土、油污及有害气体的影响，使用时间一长，会产生老化，精度下降，湿度传感器的精度水平要结合其长期稳定性去判断。一般说来，长期稳定性和使用寿命是影响湿度传感器质量的头等问题，年漂移量控制在  $1\% \text{RH}$  水平的产品很少，一般都在  $\pm 2\%$  左右，甚至更高。

#### (2) 湿度传感器的温度系数

湿敏元件除对环境湿度敏感外，对温度也十分敏感，其温度系数一般在  $0.2\% \sim 0.8\% \text{RH}/^\circ\text{C}$  范围内，而且有的湿敏元件在不同的相对湿度下，其温度系数又有差别，这需要在电路上加温度补偿或采用软件补偿。多数湿敏元件难以在  $40^\circ\text{C}$  以上正常工作。

#### (3) 湿度传感器的供电

金属氧化物陶瓷、高分子聚合物和氯化锂等湿敏材料施加直流电压时，会导致性能变化，甚至失效，所以这类湿度传感器不能用直流电压或有直流成分的交流电压，必须是交流电供电。

图 8-33 所示为两一款常用的湿度传感器的技术参数和外形，以供参考。

至此，我们完成了传感器部分的了解。在传感器这门学科里，还有许多值得注意的问题。一是传感器的放大器设计，这是应用传感器关键的一步，它决定了系统的测量精度等因素；另一点不可忽略的是传感器的非线性漂移问题，随着温度、压力、湿度等外界条件的改变，大部分传感器的转换将出现非线性的问题，这时，可以通过设计补偿电路来解决。这也是一个大有学问的问题。



	H2000	H2100
响应时间 (从 11%...75%RH 达到 90%满量程)	3 秒	3 秒
工作范围	0...75%RH	
湿度	0...+40℃	
温度	0.04...10bars	
压力	35g 水/干燥空气质量(kg)	
混合比例	500pF±10%	
标准电容 C75@25℃, 75%RH	1.6pF/%RH	
精度 (11%...75%)	±1%RH	
线性 (11%...75%RH)	<20 米/秒	
最大空气速度 (没有保护)	2%RH	
磁滞	0.02	
D 因素 (损失模拟值)	5VAC	
电源电压 (波峰到波峰)	无直流元件	
工作频率范围	5...300kHz	
保护盖	没有	有
重量	0.1 克	1 克



图 8-33 H2000/2100 型相对湿度传感器

## 8.2 其他常用的元器件

### 发光二极管 场效应管 晶闸管 继电器

我们来到了模拟电子技术部分的最后一节。这一节介绍一些常用的器件，以便读者在实际应用中能有个比较全面的参考。

#### 8.2.1 发光二极管

发光二极管(LED)是一种会发光的、具有一个 PN 结的半导体器件，它与普通二极管一样具有单向导电性。当有足够的正向电流通过它时，便会发光。按发光的光谱不同可分为可见光和红外光两种。其中可见光 LED 包括红、绿、黄、白、蓝、橙等颜色。红外 LED (即光电二极管)在前面已作介绍，除了只能发出一种颜色光的 LED 外，还有双色和三色 LED。发光二极管的直径有  $\phi 2$ 、 $\phi 3$ 、 $\phi 4$  等多种规格。

一般的发光二极管额定电压为直流 2.7V 左右，高亮度发光二极管为直流 1.8V 左右。高于 5V 的电压很容易会把发光二极管烧毁。图 8-34 所示为一些常见的发光二极管和它的电路标识。



图 8-34 发光二极管及其电路标识

## 8.2.2 场效应管

场效应管 (field effect tube) 也是一种重要的器件, 它是一种利用场效应原理工作的半导体器件。和三极管相比, 场效应管具有输入阻抗高、噪声低、动态范围大、功耗小及易于集成等特点, 可应用于信号放大、功率放大、信号驱动及振荡器中。

场效应管有栅极 G、源极 S 和漏极 D 3 个工作电极。场效应管有结型 (JFET) 和绝缘栅型 (MOSFET) 两种, 每种类型的场效应管都有 N 沟道和 P 沟道两种导电结构。场效应管与三极管在外观上有相似之处。图 8-35 所示为这两种管子的电路标识。

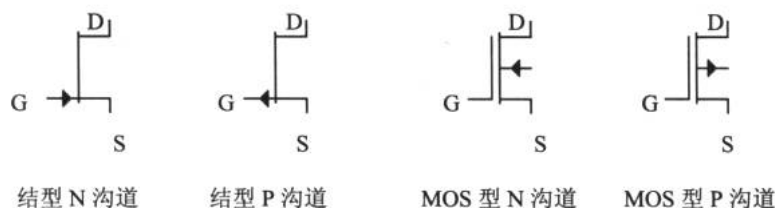


图 8-35 场效应管的电路标识

场效应管的栅极 G、源极 S 和漏极 D, 相当于三极管的基极 b、发射极 e 和集电极 c。由于场效应管的源极 S 和漏极 D 是对称的, 实际使用中可以互换。图 8-36 所示为一个应用场效应管的放大器电路图。

**例 8.2.1** 在 Multisim 2001 中连接如图 8-36 所示的电路, 观察场效应管放大器的输入输出波形。

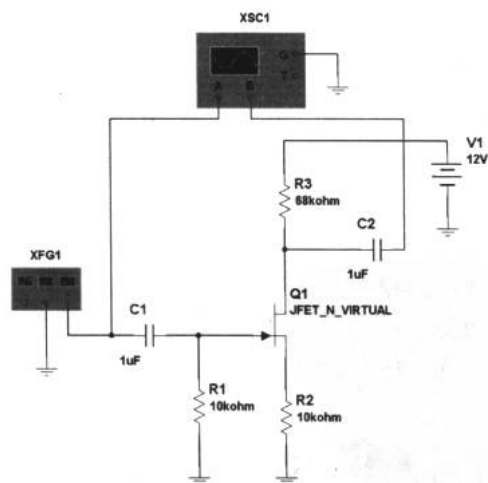


图 8-36 场效应管放大器

设信号发生器的频率为 1kHz, 幅度为 100mV。从图 8-37 所示的输入输出波形图上很明显地看到场效应管放大器的放大效果与三极管放大器或运放的效果基本相同。

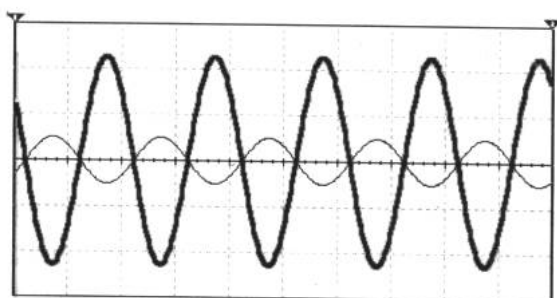


图 8-37 场效应管放大器的输入输出波形

场效应管具有很高的输入阻抗，所以它非常适合作阻抗变换，同时，在稳压电路中它也有重要作用。关于更多场效应管的应用可以查阅其他的资料。

### 8.2.3 晶闸管

晶闸管 (thyristor) 是晶体闸流管的简称，原名为可控硅 (silicon controlled)，这是一种具有 3 个 PN 结的功率型半导体器件。

#### 1. 晶闸管的分类

晶闸管的种类较多，按控制特性可分为单向晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管、正向阻断晶闸管、反向阻断晶闸管、双向触发晶闸管和光控晶闸管等；按电流大小可分为小功率管、中功率管和大功率管；按关断速度可分为普通晶闸管和高频晶闸管。图 8-38 所示为几种晶闸管的电路标识及外观。

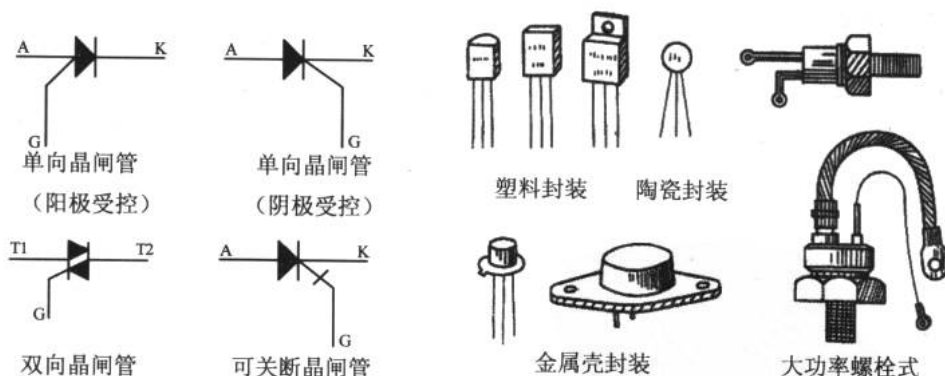


图 8-38 晶闸管

#### 2. 晶闸管的作用

单向晶闸管的 3 个电极是阳极 A、阴极 K 和控制极 G。双向晶闸管的 3 个电极是两个主电极 T1、T2 和控制极 G，不但具有一般二极管单向导电的整流作用，而且还可以对导通电流进行控制。



### (1) 单向晶闸管

在图 8-39 中我们看到,单向晶闸管可以等效为 PNP 和 NPN 两种三极管组成的复合管。如果在晶闸管的 A、K 间加上正电压后,管子并不导通。当在控制极 G 加上正电压时, VT1 和 VT2 相继迅速导通。此时,即使去掉控制极 G 上的电压,管子仍维持导通状态。

### (2) 双向晶闸管和可关断晶闸管

双向晶闸管可以等效为两个单向晶闸管反向并联,它可以控制双向导通电流,因此除控制极 G 外的两个电极不再分阳极和阴极,而称之为主电极 T1、T2,如图 8-40 所示。普通晶闸管导通后控制极即不起作用,要关断必须切断电源,使流过晶闸管的正向电流小于维持电流。而可关断晶闸管克服了以上缺陷,当控制极 G 加上正脉冲电压时晶闸管导通;加上负脉冲时晶闸管关断。

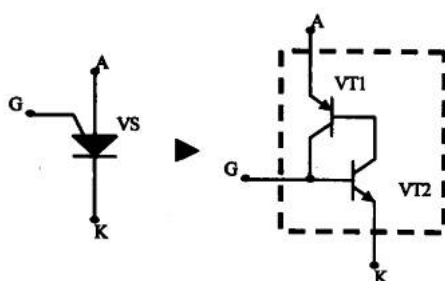


图 8-39 单向晶闸管工作原理

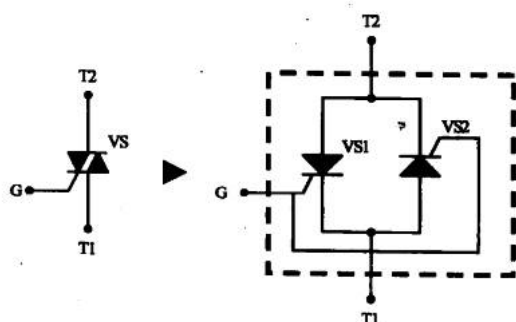


图 8-40 双向晶闸管

### (3) 晶闸管的应用

晶闸管具有以小电流（电压）控制大电流（电压）的作用，在无触点开关、可控整流、逆变（将直流变成交流）、调光及调压等方面得到广泛应用。

#### 应用一：无触点开关

如图 8-41 所示，一开始开关 S 闭合，当传感器检测到异常情况时，输出一脉冲  $U_m$  至晶闸管 VS 的 G 极，VS 导通使报警器报警，直到有关人员到场并切断开关 S 才会停止报警。

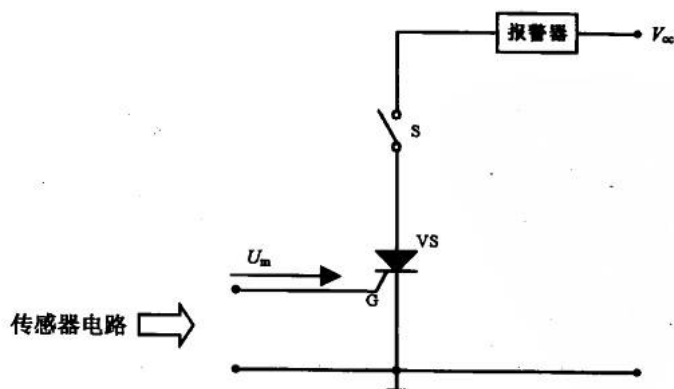


图 8-41 无触点开关



### 应用二：交流调压

如图 8-42 所示, RP、R 和 C 组成充放电回路, C 上电压作为双向晶闸管 VS 的触发电压。调节 RP 可改变 C 的充电时间, 也就改变了 VS 的导通角, 达到交流调压的目的。

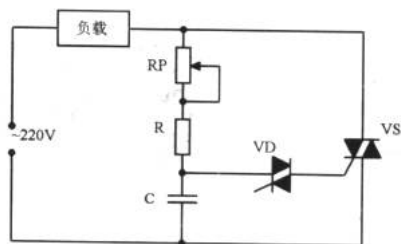


图 8-42 晶闸管交流调压电路

## 8.2.4 继电器

继电器 (relay) 是一种非常常见的器件, 在这里我们只对电磁式、干簧式和固态这 3 种常用的继电器作简单的介绍。

### 1. 电磁式继电器

电磁式继电器是常用的继电器, 图 8-43 所示为其内部结构图。开关 S 闭合时, 低压电路接通, 电磁铁将衔铁吸下来, 使动、静触点接触, 高压电路闭合。当开关 S 断开时, 电磁铁失去磁性, 弹簧把衔铁拉起来, 切断高压电路。电磁继电器的作用可描述为: 低压电路控制高压电路, 小电流控制大电流, 远距离控制近距离。

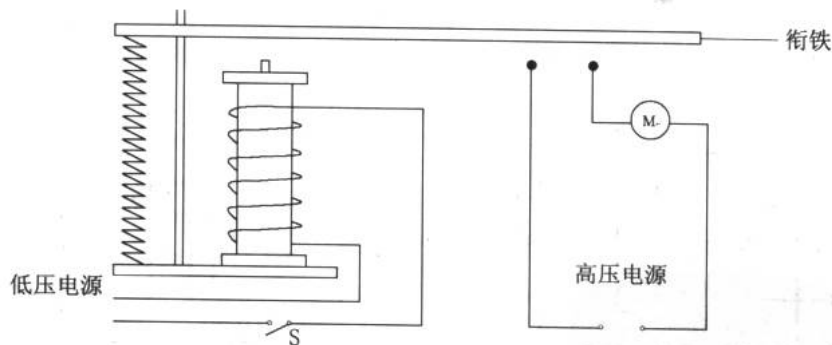


图 8-43 继电器工作过程

图 8-44 所示为常用的电磁式继电器外观。从继电器的外壳上我们就能看出该继电器的额定工作电压及接点负荷等参数。

### 2. 干簧式继电器

它由干簧管和线圈组成, 其结构如图 8-45 所示。当低压控制线圈通电后, 由于电磁感应在线圈中产生磁场, 使干簧管中的衔铁互相接触而导通, 从而实现了低压控制高压和电

气隔离的目的。

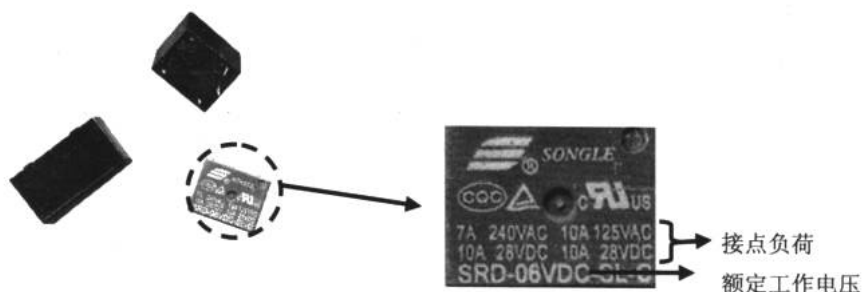


图 8-44 继电器

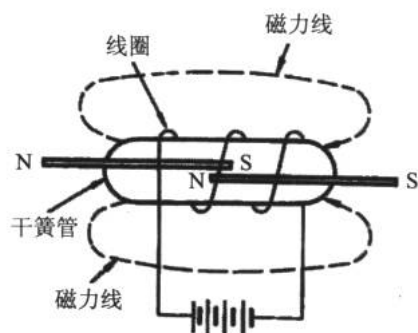


图 8-45 干簧式继电器

### 3. 固态继电器

固态继电器依靠光电耦合实现控制电路与被控电路之间的隔离。图 8-46 所示为两种固态继电器。

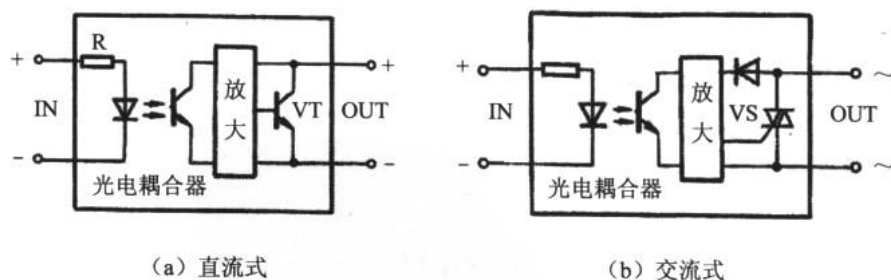


图 8-46 固态继电器

## 第9章 数字启航

前8章我们完成了模拟电子电路的学习,现在将开始一个全新的话题——数字电路。数字电路与模拟电路在应用上有着较大的区别,如果打好数字电路的基础,会发现其实数字系统在一定程度上比模拟系统简单,而且能在设计上做到游刃有余。

数字计算机的概念要追溯至19世纪30年代,Charles Babbage发明了原始的机械式计算器。第一台功能型数字计算机由哈佛大学于1944年研制出来,但该机型仍为机械式的计算机。现代数字电子学始于1946年,其标志是一台以真空电子管为核心器件的电子数字计算机(ENIAC)。虽然ENIAC这台庞大的机器占据了整间屋子,但它的计算能力还比不上现在我们手中任何一台计算机。

“数字”这个名词起源于计算机的执行操作,很长一段时间,数字电路的应用仅限于计算机系统。今天,数字电子技术在许多领域得到了广泛的应用,比如在数字电视、数字通信、雷达系统、数字医疗系统、工业控制和数字式生活消费器等中都得到了深入的应用。数字电子技术也从原来的以真空电子管为核心器件向规模型数字集成电路发展。

在本书中,数字电路部分作为模拟和单片机知识的中间体系,有着承上启下的作用。如果不对数字电路进行了解,在单片机的某些问题上就会不好理解。但本书并不侧重复杂数字系统的设计,更不会对VHDL语言上纠缠,只希望在这有限的篇幅里把所需的内容展开一下。

完整的数字系统知识体系至少应该包括以下方面,我们将在以后的章节中关注一半以上的内容。

- ✦ 数字系统、逻辑操作和编码
- ✦ 逻辑门
- ✦ 布尔代数和逻辑简化
- ✦ 组合逻辑
- ✦ 组合逻辑功能器件
- ✦ 可编程逻辑器件
- ✦ 触发器
- ✦ 计数器
- ✦ 寄存器
- ✦ 可编程器件的时序
- ✦ 存储器
- ✦ 数字接口
- ✦ 微处理器
- ✦ 数字集成电路技术

## 9.1 数字系统的逻辑思想

收录机和CD唱机 数字电路的语言

### 9.1.1 收录机和CD唱机

数字系统说白了就是在“玩转”0和1这两个数字，这一点将会从数字系统的学习过程中体会。从某种意义上说，0和1这两个数字将会贯穿数字系统和单片机的全部内容。看来0和1大有奥妙，那么到底这里的0和1指的是什么呢？

#### 1. 比较收录机和CD唱机

通过前面模拟电路的学习，我们深知一台收录机要想把磁带中的声音信号还原出来至少需要经过如图9-1描述的几个部分。



图 9-1 收录机系统

磁带的磁信息被磁头拾起，然后转换成电信号。这个不断改变幅度和频率的电信号携带着声音信息经过放大器放大后，驱动喇叭发出声音。这个系统中，最后被送进喇叭的信号与磁带中的磁场信号有着某种特定的关系，这就是模拟电路中的情况。

图9-2所示为CD唱机的工作过程。在CD唱片上存储着由0和1组成的数字式音乐信息。在CD唱机里，激光二极管和采集系统把CD上的数字信息变成了二进制代码并送进数模转换器（D/A）中，D/A把二进制信号变成模拟信号，然后通过放大器放大后驱动喇叭工作。



图 9-2 CD唱机系统

二进制代码是什么？就是一系列的0、1数字组成的代码。这些代码为什么蕴含着声音



信号呢？这就是数字系统需要研究的问题。

## 2. 二进制

在二进制系统 (binary system) 里，把 0 和 1 组成的序列叫二进制序列。序列中的每一个 0 或 1 叫做位 (bit)。比如，10110010 这一序列有 8 位 (8 bit)。在数字系统中，“1”代表高电平，“0”代表低电平。

那“1”有多高？“0”有多低？能不能用具体的电压来描述？

用来表示 1 和 0 的电压值叫做逻辑电平。我们用一个电平表示 1 (HIGHT)，用另一个电平来表示 0 (LOW)。这个高和低没有绝对的电压值，所以我们才称之为“逻辑”。尽管这样，我们仍能从图 9-3 中把 HIGH 和 LOW 区别开来，因为它们之间由一个电压分隔区域分隔开来。同时，我们看到 HIGH 和 LOW 也有各自的区域，在通常情况下的 HIGH 和 LOW 区域的电平值如图 9-3 所示。如果电压在分隔区，将不会被数字系统识别而引起逻辑混乱。

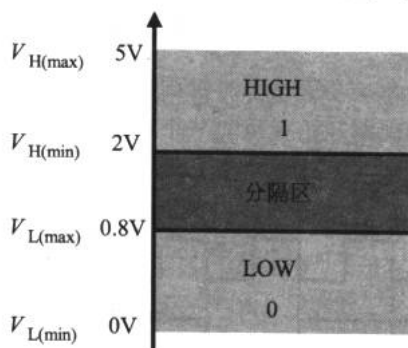


图 9-3 逻辑电平

## 9.1.2 数字电路的语言

如果把二进制的 1 和 0 比作单词，那么数字电路的语言就是由这些简单的数字组成的数字序列。为了研究的直观性，人们还在描述这门语言时使用了数字波形。

### 1. 脉冲 (pulse)

图 9-4 所示为两种脉冲，与前面介绍的矩形波一样，脉冲也有上升沿和下降沿。

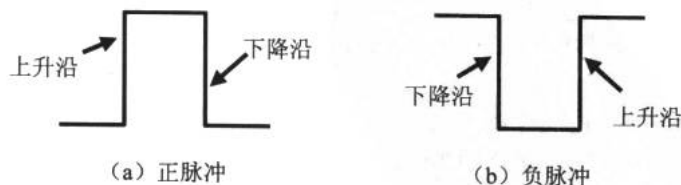


图 9-4 理想的脉冲

### 2. 数字波形的参数

通常我们用周期 (cycle)、频率 (frequency) 和占空比 (Duty cycle) 来对一个波形进

行描述。例如在图 9-5 中，波形的周期  $T=20\text{ms}$ ，频率  $f=1/T=50\text{Hz}$ ，占空比  $D_c = t_w / T = 2 / 20 = 10\%$ 。

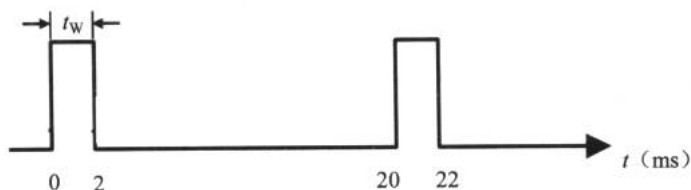


图 9-5 周期、频率和占空比

### 3. 时钟脉冲

时钟脉冲 (clock pulse) 是数字系统中数字器件工作的时序基础，包括单片机在工作时，都会有一个统一的时钟信号。时钟信号可由占空比 50% 的方波信号充当，其频率根据实际需要确定。

例如某数字电路的输出为：在第一个时钟周期开始时为高电平，第三个时钟周期开始时为低电平，从第四个时钟周期开始就每隔一个时钟周期转换一次电平，反映在波形上如图 9-6 所示。

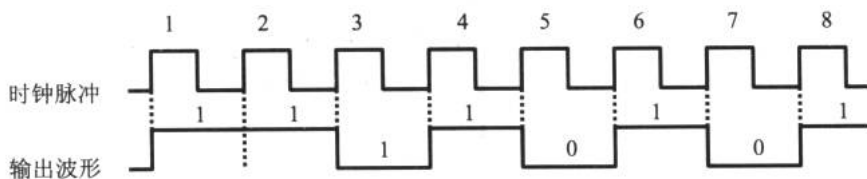


图 9-6 时钟脉冲

## 9.2 数制和编码

### 用二进制计数 十六进制数和 BCD 码的妙用

在数字电路中除了常见到二进制数以外，还会遇到十六进制数 (hex)。这一节，我们来看看二进制和十六进制数在数字系统中的作用，并谈谈编码的基础问题。

#### 9.2.1 用二进制计数

图 9-7 所示为应用二进制计数的一个例子。图的左侧是一个传送带运输着小球进行装箱的装置，假设每个箱子装入 9 个球为满，每下落一个球传感器就向外发送一个脉冲，脉冲进入到计数器 (counter) 中。这个例子里使用的计数器是一个“串—并”计数器 (第 11 章将会谈到)，计数器从 0 开始，每接收到 1 个时钟脉冲其输出端就加 1，并以并行方式输出，于是它把串行输入的脉冲信号变成并行输出的高低电平。这个并行的高低电平送到编码器 (decoder) 中进行编码后进入七段数码管进行显示。





我们看离计数器最近的一列二进制数，它是 0000。从 0000 开始向编码器端的二进制数由 0000 增加到了 1001，而 1001 就是 9 的二进制数。可见，计数器通过串并转换把计数信息向外发送至编码器中。这就是二进制计数的方法。

一开始读者可能很不习惯这种计数的方法，但在数字系统中，这种串并转换和并行传送的方法是很常见的。

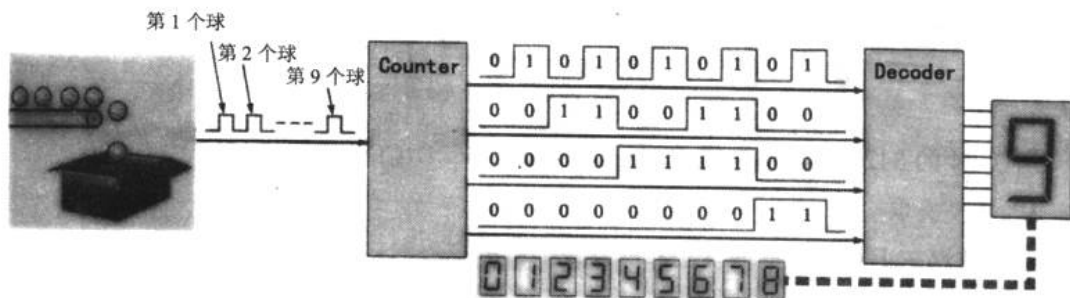


图 9-7 应用二进制计数

## 9.2.2 十六进制数和 BCD 码的妙用

### 1. 十六进制数

十六进制数由 16 个数组成。在大多数的数字系统中都把二进制数转换成十六进制进行传输和存储。表 9-1 所示为十进制、二进制和十六进制的比照表。十六进制数后面常常用“H”来标志，比如十六进制数 38H、4EH 等。

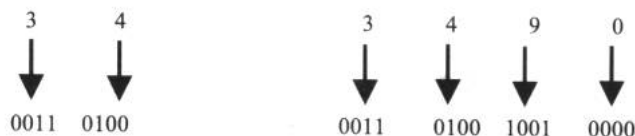
表 9-1 十进制、二进制和十六进制

十 进 制	二 进 制	十六进制
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

## 2. BCD 码

BCD 是 binary coded decimal 的缩写，意思是“二进制编码的十进制数”。8421 码是一种常用的 BCD 编码，基本的 8421 码实际上就是二进制数的 0000~1001 这 10 个数。

例如，十进制 34 和 3490 的 8421BCD 编码方法如下：



所以 34 的 8421BCD 码为 00110100，3490 的 8421BCD 码为 0011010010010000。

## 3. 字模提取

在公共汽车上和车站里的 LED 屏以及手机屏幕等显示器显示的图形都是通过点阵来实现的。如果把这些显示的图形放大，就会将组成图形的每一个点看得一清二楚，如图 9-8 所示。

目前最常见的文字点阵有 5×7 和 15×16 等几种。图 9-8 中的英文字母 A 为 5×7 阵，即“A”由 5 列 7 行的点信息组成。现在我们来为字母 A 进行编码，约定编码方向为从下到上，从左到右，并用 1 表示点，0 表示空格，就得到第一列的二进制编码 111 1100，如表 9-2 所示。同样我们可以得到其余 4 列的编码。为了传输和存储的方便，我们的编码位数应该为 2<sup>n</sup> 位。比如 4 位、8 位、16 位、32 位、64 位……。我们在表 9-2 的第一列编码 111 1100 最前面添加一个 0 以补齐 8 位，即 0111 1100。这就是第一列的 8421BCD 编码，把它换算成十六进制可得 7CH。

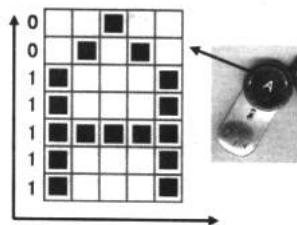


图 9-8 放大点阵

表 9-2 “A” 的编码

行 \ 列	1	2	3	4	5
1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0
3	1	0	0	0	1
4	1	0	0	0	1
5	1	1	1	1	1
6	1	0	0	0	1
7	1	0	0	0	1

根据上述方法，我们把 5×7 的字母 A 编码完毕：

7CH 12H 11H 12H 7CH

这个编码是我们进行传输和存储等处理的基础，也是把非数字量变成数字量的桥梁。如果把 7CH、12H、11H、12H 和 7CH 这 5 个十六进制数存储在内存单元中，如图 9-9 所示。在显示“A”这个字符时，控制器从内存的较高地址中取出第一列的编码 7CH 送至屏



幕显示，接着地址加 1，取第二列的编码 12H 至屏幕显示，直到取完“A”字符的全部编码。

.....
7CH
12H
11H
12H
7CH
.....

图 9-9 字符编码的存储

## 9.3 逻辑门

与门、非门和或门 与非门和或非门 同或门和异或门 介绍数字集成电路

用以实现基本逻辑运算和复合逻辑运算的单元电路统称为门电路。常用的门电路在逻辑功能上有与门、或门、非门、与非门、或非门、与或非门及异或门等几种。

### 9.3.1 与门、非门和或门

#### 1. 与门 (AND Gate)

最简单的与门可以用二极管和电阻组成，如图 9-10 所示。

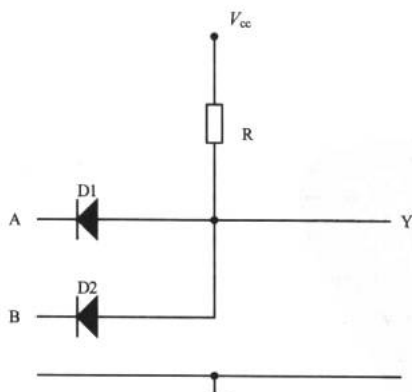


图 9-10 与门电路

设  $V_{cc}=5V$ ，A、B 输入端的高、低电平分别为  $V_H=3V$ ， $V_L=0V$ ，二极管 D1、D2 的正

向导通压降为 0.7V。如果 A、B 当中只要有一个是低电平 0V，则必有一个二极管导通，使 Y 为 0.7V。只有 A、B 同时为高电平 3V 时，Y 才为 3.7V。可见，当输入 A、B 同时为高电平时，即逻辑 1 时，与门的输出才为高电平。

在数字电路中，各种逻辑门均有相应的芯片，图 9-11 所示为常用的与门芯片型号和电路标识。

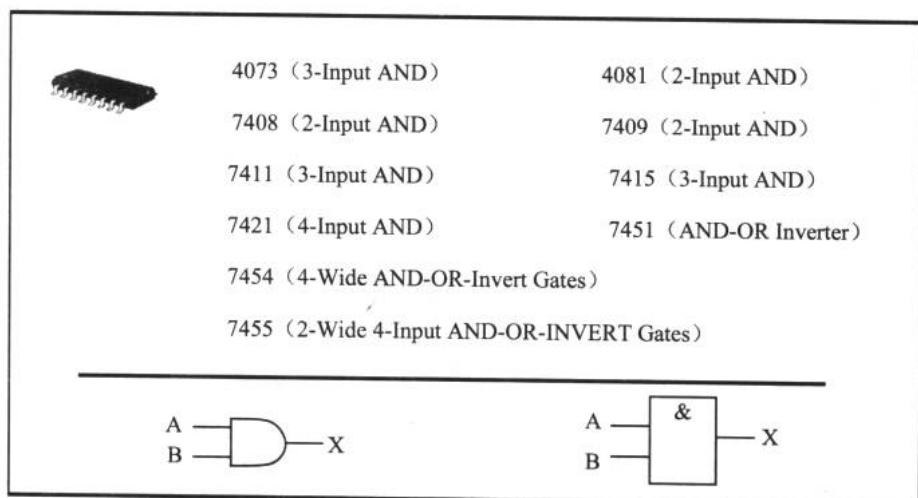


图 9-11 常用与门芯片型号和电路标识

**例 9.3.1** 在 Multisim2001 中连接如图 9-12 所示的电路，了解与门的作用。

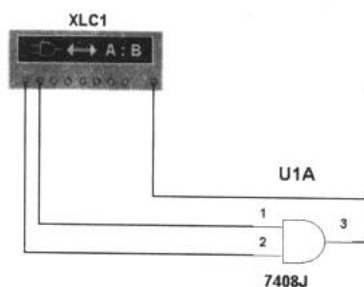




图 9-12 检测与门的作用

在例 9.3.1 中，我们使用了一个新的虚拟仪器——Logic Converter（逻辑转换仪），它是 Multisim 中特有的仪器。双击 Logic Converter，弹出了它的观察窗口。单击  按钮，在真值表区得到逻辑电路的真值表，如图 9-13 (a) 所示。

在数字电路里，像图 9-13 (b) 所示这样把输入输出信号的所有情况列在一张表里，反映出电路的输入输出情况的表叫真值表。从表中可以看出，与门相当于对输入信号进行了一次乘法。只有输入全为 1 时输出才是 1。这就是与门的作用： $X = A \cdot B$ 。Logic Converter 还能将逻辑电路的表达式反应出来，单击  按钮，就在逻辑表达式栏中得到反应



该电路逻辑功能的表达式“ $AB$ ”，可见，与门完成了一个相乘的运算。

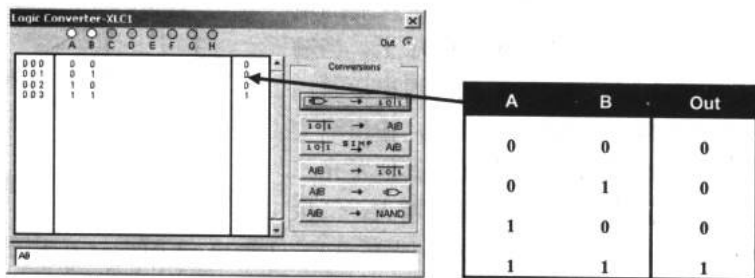


图 9-13 Logic Converter

## 2. 非门 (NOT Gate、Inverter)

图 9-14 所示为常用的非门芯片型号和电路标识。

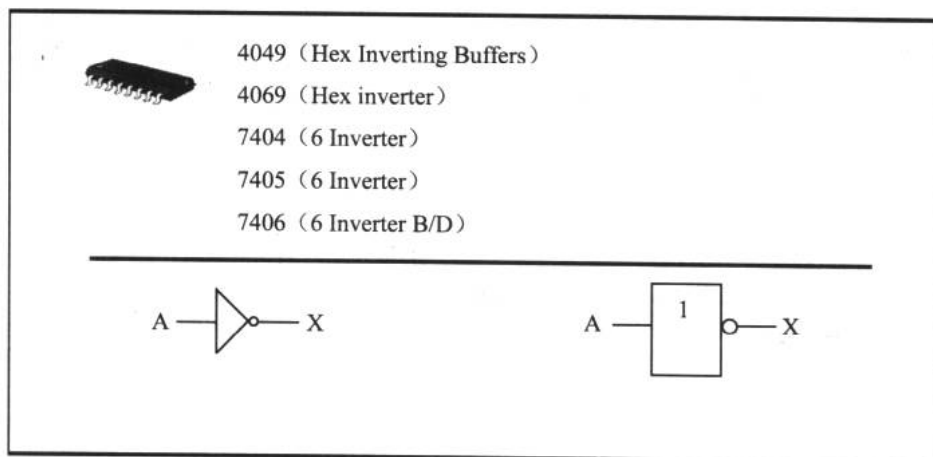


图 9-14 常用非门芯片型号和电路标识

非门就是将输入电平反向后输出。表 9-3 所示为一张世界上最简单的真值表，它反映了非门的输入输出关系： $X = \overline{A}$ 。

表 9-3 非门真值表

A	X
0	1
1	0

非门的主要应用是反相器，如图 9-15 所示，它是最简单的门电路，它只有一个输入端和一个输出端，输入和输出都只有高电平和低电平两种相反的状态，反相器输出与输入之间特定的逻辑关系就是输入为 1，则输出为 0；输入为 0，则输出为 1，即输出总是输入的否定。

根据反相器的特点，我们可以制作一个简易的电平指示器，如图 9-16 所示。功率放大器输出到扬声器的信号引到电平指示器输入端的电位器 RP 上，经 RP 分压后加到二极管 VD1 上。当输入信号的幅度逐渐增大到超过 VD1 的导通电压时，D1（非门 1）的输入端变为高电平“1”，输出端变为低电平“0”，D1 开启，LED1 发光，其他发光二极管仍不发光。随着输入信号的幅度继续增大，二极管 VD2、VD3……依次导通，D2、D3……先后开启，LED2、LED3……逐级点亮。信号幅度大小不同，发光二极管点亮的个数也不同，直观地显示出音频电平的变化情况。

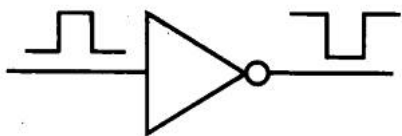


图 9-15 反相器

在图 9-16 所示电路中，我们可以选择非门 CD4069，其内部结构如图 9-17 所示。其中 7 脚为接地端，14 脚接电源正极。在 CD4069 中有 6 个非门单元，电平指示器中使用的 6 个非门完全可以使用一片 CD4069。

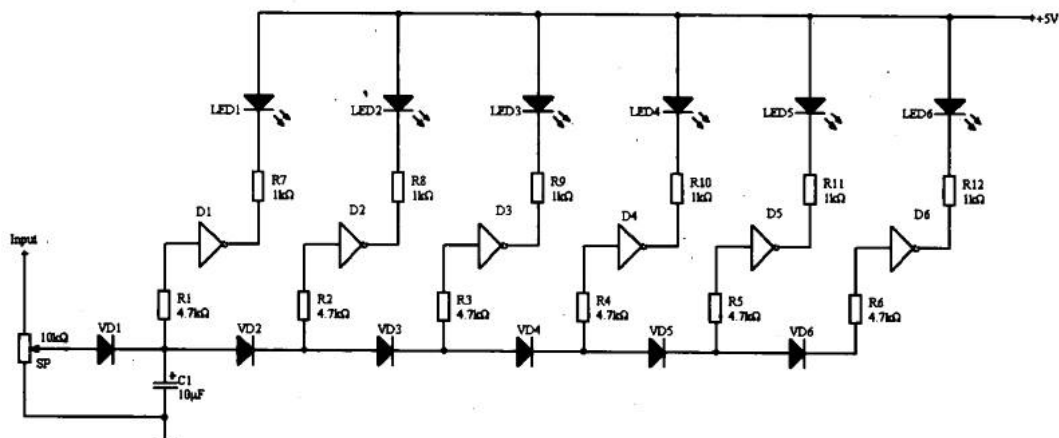


图 9-16 电平指示器

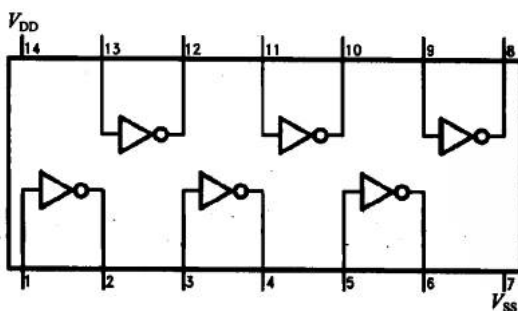


图 9-17 CD4069

### 3. 或门 (OR Gate)

图 9-18 所示为常用的或门芯片型号和电路标识，其真值表如表 9-4 所示。

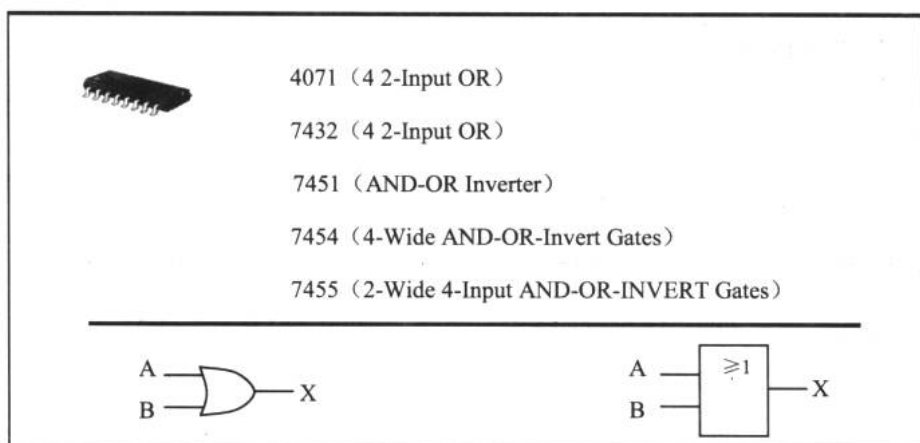


图 9-18 常用或门芯片型号和电路标识

表 9-4 或门真值表

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

或门做的是加法： $X = A + B$ 。只要输入有 1 其输出就为 1。图 9-19 所示为一个或门的简单应用实例。这个系统能使用在一个房间里，这个房间有一扇门和两扇窗口。在门和窗口的传感器能在门或窗打开时发送一个高电平，在关闭时发送一个低电平。只有门和窗都是关闭的，或门的 3 个输入端为低电平，所以输出也为低电平。一旦门或窗被打开，在输入端会出现一个高电平，这时，输出就为高电平，与或门相连的报警电路被使能，发出警报。

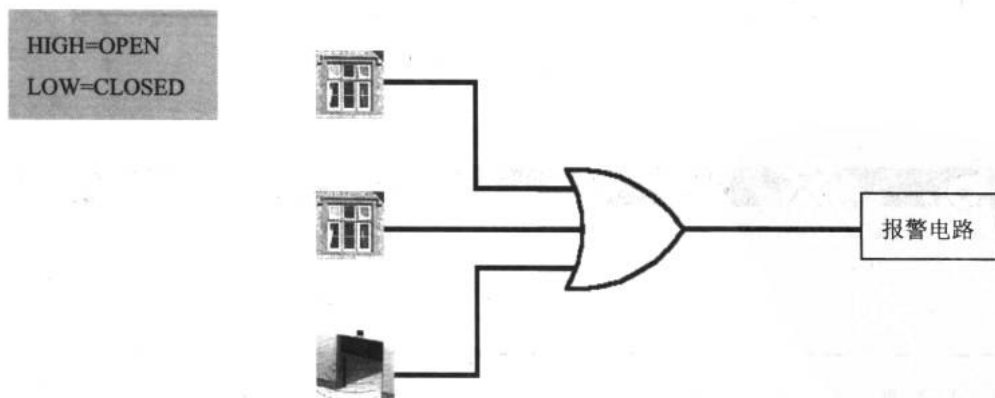


图 9-19 或门的应用

### 9.3.2 与非门和或非门

#### 1. 与非门 (NAND Gate)

图 9-20 所示为与非门的典型芯片型号和电路标识, 表 9-5 所示为其真值表。与非门实际上是在与门的输出端再添加一个非门而构成的。

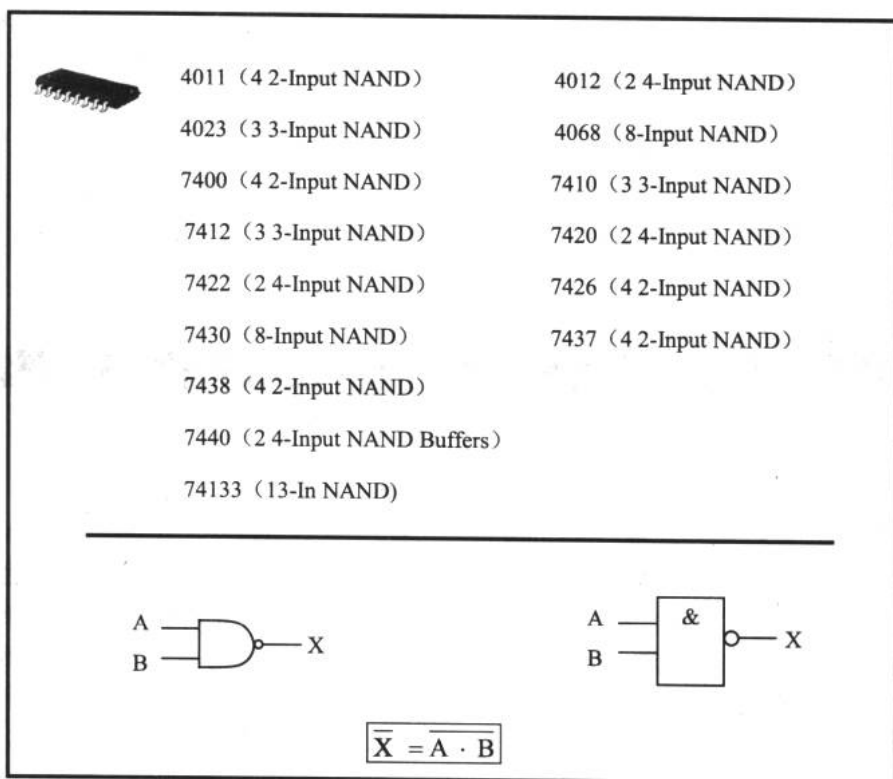


图 9-20 常用的与非门的芯片型号和电路标识

表 9-5 与非门真值表

A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

图 9-21 所示为一个与非门的应用实例。水箱 A 和 B 中的水如果高于标定水位时, 传感器就呈高电平, 此时在与非门的输出端出现了低电平, 于是发光二极管点亮。当任一水箱的水位过低时, 在与非门输出端出现高电平, 发光二极管熄灭。所以, 可以根据发光二





极管的亮灭情况来判断水箱的水位情况。

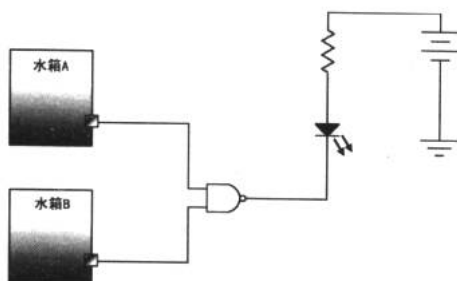


图 9-21 与非门的应用

## 2. 或非门 (NOR Gate)

图 9-22 所示为常用的或非门芯片型号和电路标识, 其真值表如表 9-6 所示。

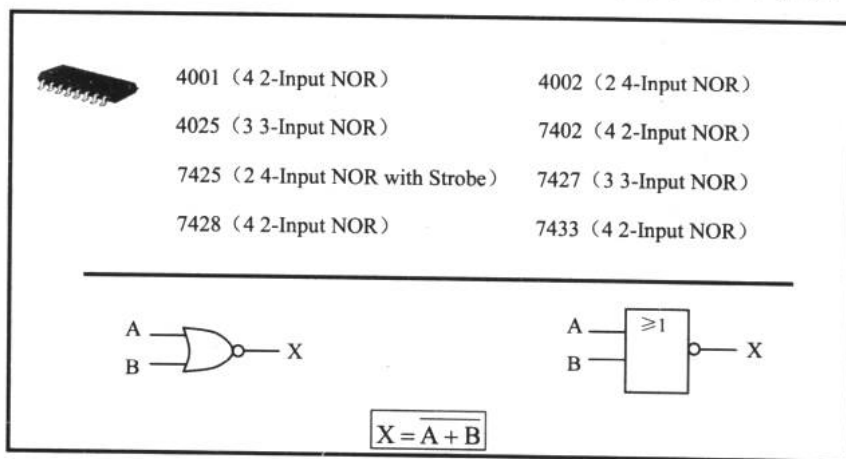


图 9-22 常用的或非门芯片型号和电路标识

表 9-6 或非门真值表

A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

### 9.3.3 异或门和异或非门

#### 1. 异或门 (XOR Gate)

图 9-23 所示为异或门芯片型号和电路标识, 其真值表如表 9-7 所示。

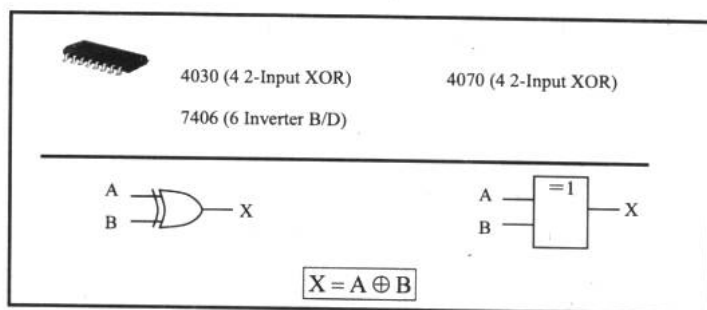


图 9-23 常用的异或门芯片型号和电路标识

表 9-7 异或门真值表

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

## 2. 异或非门 (XNOR Gate)

图 9-24 所示为常用的异或非门的芯片型号和电路标识，其真值表如表 9-8 所示。

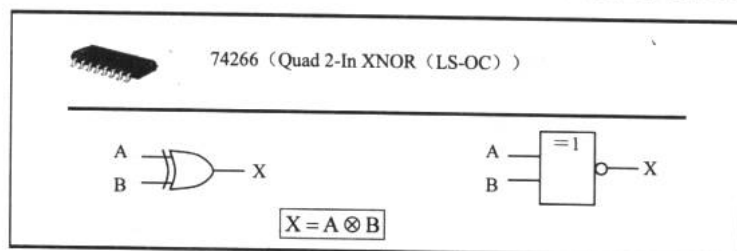


图 9-24 常用的异或非门芯片型号和电路标识

表 9-8 异或非门真值表

A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

## 9.3.4 介绍数字集成电路

### 1. CMOS 和 TTL

数字集成电路根据制作工艺的不同分为 CMOS、TTL 和 ECL 3 种，其中 CMOS 和 TTL



比较常用。

### (1) CMOS 型

CMOS 在数字芯片领域的主导地位是 TTL 所不能及的。当代的大规模集成电路和微处理器全是青一色的 CMOS 型。CMOS 型具有开关速度快、功耗低的特点。CMOS 型根据额定电压的不同分为两种：

#### ① 5V 型

- ✦ 74HC 和 74HCT 系列——高速 CMOS。
- ✦ 74AC 和 74ACT 系列——超级 CMOS。
- ✦ 74AHC 和 74AHCT 系列——超级高速 CMOS。

#### ② 3.3V 型

- ✦ 74LV 和 74LVC 系列——低电压 CMOS。
- ✦ 74ALVC 系列——超低电压 CMOS。

### (2) TTL 型

要说 TTL 存在的优势就是它不像 CMOS 芯片那么娇气。CMOS 的缺点就是很容易被静电击穿而损坏，所以在实验和存放时都要注意防止静电。以下是几种 TTL 型芯片：

- ✦ 74——标准 TTL。
- ✦ 74S——肖特基势垒 TTL。
- ✦ 74AS——超级肖特基势垒 TTL。
- ✦ 74LS——低电压肖特基势垒 TTL。
- ✦ 74ALS——超级低电压肖特基势垒 TTL。
- ✦ 74F——快速 TTL。

## 2. 逻辑门的封装

前面 3 个小节我们把基本的逻辑门及其电路标识做了介绍，这些逻辑门被封装在数字集成电路里。常见的 74 系列和 4 系列都是数字集成电路。数字集成电路的内部结构是具有一定规律的。图 9-25 所示可以作为使用时的参考，其余型号的内部结构可以在 Multisim2001 或上网查询到。

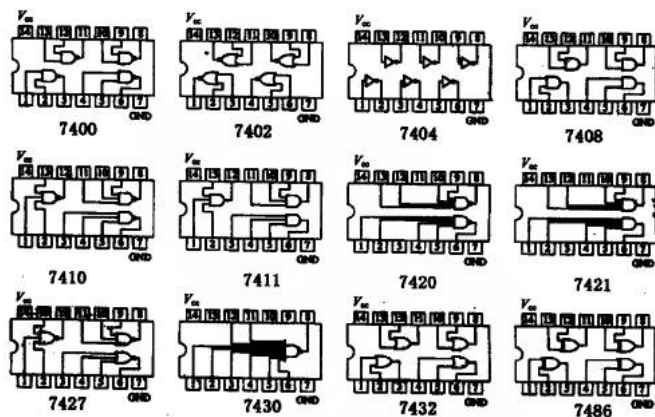


图 9-25 常见数字集成电路的管脚

## 第 10 章 逻辑门的应用

1835 年, 20 岁的 George Boole (乔治·布尔) 开办了一所私人授课学校。为了给学生开设必要的数学课程, 他兴趣浓厚地读起了当时一些介绍数学知识的教科书。不久, 他就感到惊讶, 这些东西就是数学吗? 实在令人难以置信。于是, 这位只学过初级数学的青年自学了艰深的《天体力学》和很抽象的《分析力学》。由于他对代数关系的对称和美有很强烈的感觉, 在孤独的研究中, 他首先发现了不变量, 并把这一成果写成论文发表。这篇高质量的论文发表后, 布尔仍然留在小学教书, 但是他开始和许多第一流的英国数学家交往或通信, 其中有数学家、逻辑学家德·摩根。摩根在 19 世纪前半叶卷入了一场著名的争论, 布尔知道摩根是对的, 于是在 1848 年出版了一本薄薄的小册子来为朋友辩护。这本书是他 6 年后更伟大的东西的预告, 它一问世, 立即激起了摩根的赞扬, 肯定他开辟了新的、棘手的研究科目。布尔此时已经在研究逻辑代数, 即布尔代数。他把逻辑简化成极为容易和简单的一种代数, 在这种代数中, 适当的材料上的“推理”, 成了公式的初等运算的事情, 这些公式比过去在中学代数第二级课程中所运用的大多数公式要简单得多。这样, 就使逻辑本身受数学的支配。为了使自己的研究工作趋于完善, 布尔在此后 6 年的漫长时间里, 又付出了不同寻常的努力。

1854 年, George Boole 发表了一篇题为《An Investigation of the Laws of Thought, on Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities》的论文。后演化形成了今天的布尔代数。布尔代数是描述和研究数字电路的一个系统的、方便的工具。Claude Shannon (香农) 第一次运用布尔代数分析数字电路, 并于 1938 年在麻省理工学院写了《A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits》。他们对布尔代数的研究使其成为数字系统设计的一种强有力的工具。

这一章我们来了解布尔代数和一些常用的组合逻辑功能器件。

### 10.1 简单的逻辑运算

---

运算规则 用布尔代数分析逻辑电路 用布尔代数描述真值表 卡诺图 七段数码管

---

这一节是整个数字电路的设计基础, 数字系统设计的基本思想和方法都蕴含在其中。

#### 10.1.1 运算规则

##### 1. 加法和乘法

在上一章我们从与门和或门的学习中了解了最简单的两种逻辑运算——与和或。与运算相当于乘法, 或运算相当于加法。对应的结果称为“积”、“和”。其运算规则如图 10-1



所示。

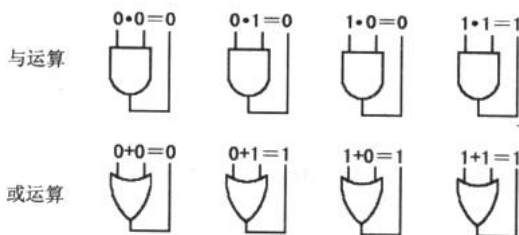


图 10-1 与、或逻辑运算

**例 10.1.1** 假设  $A=1$ ,  $B=0$ ,  $C=1$ ,  $D=0$ 。计算  $\overline{A}BCD$ 。

解：由  $B=0 \Rightarrow \overline{B}=1$ , 同理  $\overline{D}=1$ 。

于是有： $\overline{A}BCD=1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1=1$

## 2. 布尔代数运算法则

### (1) 交换律和结合律

布尔代数的交换律和结合律与一般代数中的情况是一样的，分别如图 10-2、图 10-3、图 10-4 和图 10-5 所示。

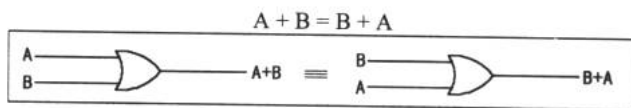


图 10-2 加法交换律

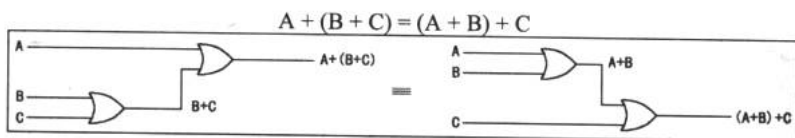


图 10-3 加法结合律

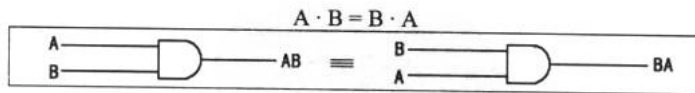


图 10-4 乘法交换律

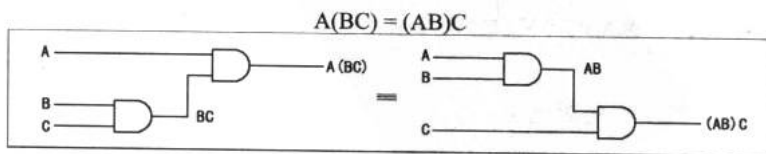


图 10-5 乘法结合律

### (2) 分配律

这一条规则与一般代数学中的规则也是一致的, 即  $A(B+C)=AB+AC$ 。等式左边  $A(B+C)$  根据运算规则先做加法后做乘法。或门可以做加法而与门可以完成乘法, 于是图 10-6 就是完成  $A(B+C)$  的逻辑门组合。

用类似的分析方法, 可以知道  $AB+AC$  实际上是先分别做  $AB$  和  $AC$  的乘积然后再相加, 于是得到  $AB+AC$  的逻辑门组合, 如图 10-7 所示。

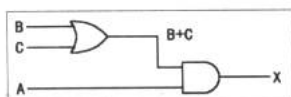


图 10-6 逻辑电路:  $A(B+C)$

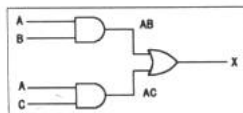


图 10-7 逻辑电路:  $AB+AC$

根据结合律的性质, 以上两个运算是等价的, 于是表达式  $A(B+C)=AB+AC$  的逻辑电路也是等价的, 如图 10-8 所示。

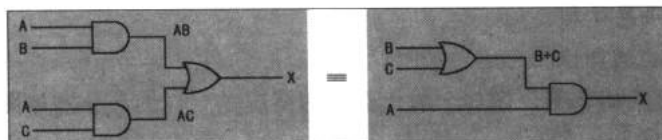


图 10-8 逻辑电路:  $A(B+C)=AB+AC$

### 3. 布尔代数的性质

除了以上几种基本的布尔代数运算性质外, 我们把其余的性质列于表 10-1 中, 以供在化简组合逻辑电路时应用。具体的推导过程本书从略。

表 10-1 布尔代数的性质

基本定律	$A+0=A$	$A \cdot 0=0$	$\overline{\overline{A}}=A$
	$A+1=1$	$A \cdot 1=A$	
	$A+A=A$	$A \cdot A=A$	
	$A+\overline{A}=1$	$A \cdot \overline{A}=0$	
摩根定律	$\overline{A \cdot B \cdot C \cdots} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C} \cdots$		$\overline{A+B+C \cdots} = \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \cdots$
吸收律	$A+AB=A$		
	$A(A+B)=A$		
	$A+\overline{A}B=A+B$		
	$(A+B)(A+C)=A+BC$		

## 10.1.2 用布尔代数分析逻辑电路

### 1. 利用布尔运算法则化简电路

布尔代数通过简单的式子对逻辑电路的组合进行描述, 从式子我们可以对电路的输入输出关系一目了然。



**例 10.1.2** 用布尔代数描述图 10-9 所示的逻辑电路输入输出关系式。

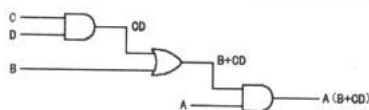


图 10-9 逻辑电路一例

我们从左往右看，遇到的第一个“门”是与门，它完成了  $C \cdot D$  的运算；接着是一个或门，它完成了  $B+(C \cdot D)$  的运算；最后又是一个与门，它完成了最后一步运算： $A \cdot (B+(C \cdot D))$ ，输出  $X = A(B+CD)$ 。

图 10-9 这个具有 4 个输入的组合逻辑电路实现了  $A(B+CD)$  的逻辑运算。我们可以利用 Multisim2001 中的 Logic Converter（逻辑转换仪）生成这个组合逻辑电路的真值表，如表 10-2 所示。

表 10-2 真值表

A	B	C	D	X
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

**例 10.1.3** 利用布尔运算法则对图 10-10 所示的逻辑门电路进行化简。

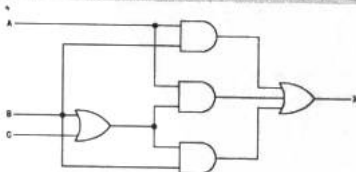


图 10-10 逻辑电路一例

与上例观察方法类似，我们可以得到描述输入输出关系的式子： $X = AB + A(B+C) + A$

$B(B+C)$ 。观察这个式子，运用布尔代数的性质化简：

$$X = AB + A(B+C) + B(B+C) = AB + (A+B)(B+C) = AB + B + AC = (A+1)B + AC = B + AC。$$

所以得到  $X = B + AC$ 。这个关系式要比原电路所反映出来的关系简单得多，看来图 10-10 是一个“冗余的”电路。根据  $X = B + AC$  我们可以得到化简后的电路，如图 10-11 所示。

## 2. 标准的布尔代数表达式

所有的布尔表达式都可以化成两种标准的书写形式，一种是积的和的形式，另一种是和的积的形式。将非标准形式化成标准形式有利于交流和对系统的分析。

### (1) 积的和 (SOP)

积的和这一标准形式就是形如  $AB + C$ 、 $ABC + CDE + C$  等形式的布尔运算式。在逻辑上就是先做“和”中的“积”，体现在电路上就是先完成与运算，再做或运算。图 10-12 所示为一个 SOP 的例子，3 个与门分别完成  $AB$ 、 $BCD$ 、 $AC$  的积，再由一个或门完成  $AB+BCD+AC$  的“相加”运算。

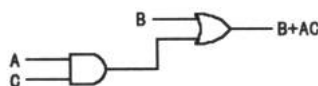


图 10-11 对图 10-10 逻辑电路的化简

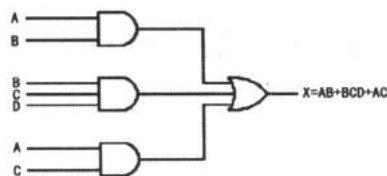


图 10-12 SOP:  $AB + BCD + AC$

### (2) 和的积 (POS)

形如  $(A+B)(C+D)$  的布尔表达式称为和的积。从逻辑上看，它先完成的是或的运算，然后进行与的运算。图 10-13 所示为一个 POS 的例子。3 个或门分别完成  $A+B$ 、 $B+C+D$  和  $A+C$  的运算，后由与门完成  $(A+B)(B+C+D)(A+C)$  的“乘积”运算。

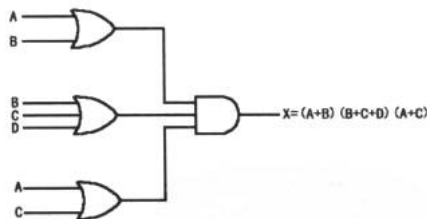


图 10-13 POS:  $(A+B)(B+C+D)(A+C)$

## 10.1.3 用布尔代数描述真值表

看来使用布尔代数描述一个组合逻辑电路是一件很方便的事，而真值表能罗列任何数字电路的输入输出情况。于是我们可以看出布尔代数、逻辑电路和真值表之间有着千丝万缕的联系。





## 1. 用 SOP 描述真值表

规则：把真值表中所有使  $X = 1$  时的输入相乘后相加。

## 例 10.1.4 把真值表 10-3 中的输入输出用 SOP 描述出来。

表 10-3 真值表

A	B	C	X
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

根据规则，使输出  $X$  为 1 对应的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的表达式进行相加，它们分别是  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}$ 、 $\overline{A}\overline{B}C$ 、 $\overline{A}B\overline{C}$  和  $ABC$ 。于是得到

$$X = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + ABC。$$

## 2. 用 POS 描述真值表

规则：把真值表中所有使  $X = 0$  时的输入相加后相乘。

于是我们得到表 10-3 的 POS 描述式： $X = (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C})(\overline{A} + \overline{B} + C)(\overline{A} + B + \overline{C})(A + B + \overline{C})$ 。

## 10.1.4 卡诺图

卡诺图 (karnaugh map) 是一种化简布尔代数表达式的最优方法 (至少目前是这样的)。从例 10.1.3 看到化简表达式的最直接收获就是使逻辑电路形式简化。如果单纯使用运算法则和性质，有一些复杂的表达式是不太好化简的，而卡诺图堪称化简逻辑电路的万能方法。由于本书的目的不是突破复杂表达式的简化，所以我们的介绍比较简单。

## 1. 卡诺图

## (1) 三变量卡诺图

三变量卡诺图是用来化简 3 个输入、一个输出的布尔表达式的。卡诺图有横竖两个方向，习惯上竖向表示  $AB$ ，横向表示  $C$ 。每一个格子里代表着一个布尔代数的表达式，如图 10-14 所示，第一行第一列的格子中， $ABC$  这 3 个输入变量均为 0，所以，该格表示  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}$ ，如图 10-14 (b) 所示。同理，可以把格子用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的不同表达式填满。

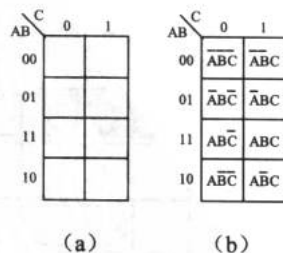


图 10-14 三变量卡诺图



## (2) 四变量卡诺图

四变量卡诺图比三变量卡诺图多了一个输入, 如图 10-15 所示。格子中的表达式填法与三变量卡诺图是相同的。

CD \ AB	00	01	11	10
00				
01				
11				
10				

CD \ AB	00	01	11	10
00	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}$	$\overline{A}\overline{B}C\overline{D}$	$\overline{A}B\overline{C}\overline{D}$	$\overline{A}BC\overline{D}$
01	$\overline{A}\overline{B}C\overline{D}$	$\overline{A}\overline{B}CD$	$\overline{A}BC\overline{D}$	$\overline{A}BCD$
11	$A\overline{B}\overline{C}\overline{D}$	$A\overline{B}C\overline{D}$	$AB\overline{C}\overline{D}$	$ABC\overline{D}$
10	$A\overline{B}C\overline{D}$	$A\overline{B}CD$	$AB\overline{C}\overline{D}$	$ABCD$

图 10-15 四变量卡诺图

## 2. 用卡诺图化简 (化简 SOP)

我们通过一个简单的例子来说明卡诺图的化简是怎么进行的。

**例 10.1.5** 利用卡诺图化简表达式:  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}BC\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + AB\overline{C}\overline{D} + ABC\overline{D}$ 。

这是一个 SOP 的表达式。注意, 化简 SOP 和 POS 的方法是不同的。

首先, 把 SOP 表达式中的每一项都按四变量卡诺图的填充方法填到卡诺图中, 并在与表达式对应的格子里填 1。例如第一项  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}$ , 对应卡诺图的第一行、第一列的格子, 所以在该格填 1, 其他项类似, 于是得到图 10-16。

接着进行画圈。画圈有 3 个原则: 其一, 只能圈相邻的偶数个“1”或只圈 1 个“1”; 其二, 圈的“1”要尽可能的多; 其三, 可以重复圈“1”。

在图 10-16 中, 左上角的 4 个“1”满足上述条件, 应当圈起来。而第二行的 4 个“1”, 虽然与刚才圈的“1”有重合, 但为了尽可能多的圈入“1”, 所以, 将第二行的 4 个“1”圈起来。剩下的两个“1”也圈起来, 如图 10-17 所示。

CD \ AB	00	01	11	10
00	1	1		
01	1	1	1	1
11				
10		1	1	

图 10-16 填卡诺图

CD \ AB	00	01	11	10
00	1	1		
01	1	1	1	1
11				
10		1	1	

图 10-17 圈“1”

CD \ AB	00	01	11	10
00	1	1		
01	1	1	1	1
11				
10		1	1	

图 10-18 提取不变的输入



然后把各个圈中不变的输入项进行 SOP, 如图 10-18 所示, 在左上角圈入的 4 个“1”中, 对应的表达式为  $\overline{A}BCD$ 、 $\overline{A}BC\overline{D}$ 、 $\overline{A}B\overline{C}D$ 、 $\overline{A}B\overline{C}\overline{D}$ , 从中提取出不变的输入项  $\overline{A}C$ , 同样, 得另两个圈中的不变输入项  $\overline{A}B$  和  $\overline{A}BD$ 。于是得到化简的结果为:  $\overline{A}C + \overline{A}B + \overline{A}BD$ 。

有两点问题比较特殊, 一是如果在填充卡诺图时有在一个格子里重复填“1”的情况就只填一次; 二是在画圈时所谓的相邻是指空间上的相邻。如图 10-19 所示, 该卡诺图的表达式为:  $\overline{D} + BC + \overline{A}BC$ 。

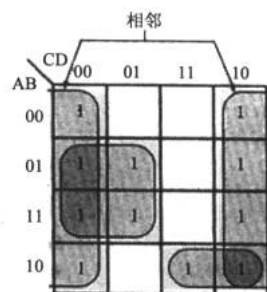


图 10-19 相邻

### 10.1.5 七段数码管

本节最后我们再了解一个新的器件——七段数码管 (seven segment LED)。

#### 1. 基本情况

图 10-20 所示为两个不同尺寸的七段数码管。图 10-21 中, 我们给组成七段数码管的每一段起了名字, 它们分别为 a、b、c、d、e、f、g, 小数点位为 dot。通过使不同组合的段发光, 组成了 0~9 和一些英文字母的效果, 如图 10-22 所示。

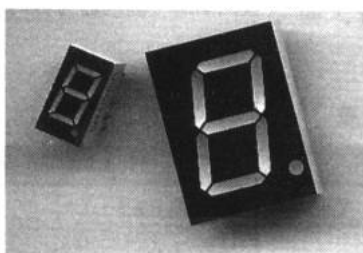


图 10-20 七段数码管

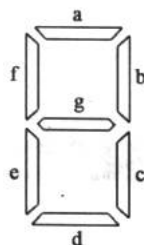


图 10-21 七段数码管的排列

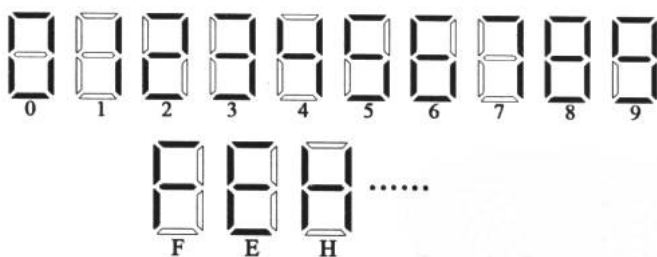


图 10-22 七段数码管的显示

七段数码管的发光原理和普通的发光二极管是一致的, 所以我们可以把七段数码管的 7 段看成 7 个发光二极管。a~f 代表了不同位置上的发光二极管。根据内部的共连端子不同, 七段数码管有共阳 (共阳极) 和共阴 (共阴极) 两种, 如图 10-23 所示。共阳是指每一段发光二极管的阳极相连, 由阴极控制某段的亮灭, 共阴则正好相反。



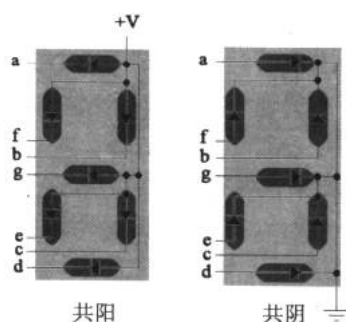


图 10-23 共阳和共阴

## 2. 使七段数码管发光

根据 7 段不同的位置, 我们得到 0~9 数字的发光段如表 10-4 所示。

通常, 不直接控制这 7 段不同组合的发亮来显示数字, 而是使用一个译码器 7447 来对数字进行编码, 如图 10-24 所示。这样一来, 只要控制 7447 输入端的 4 位二进制数就能在数码管上得到相应的 10 进制数, 如表 10-5 所示。

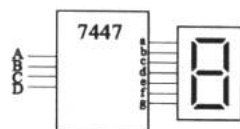


图 10-24 编码器与数码管的连接

表 10-4 发光段表

数 字	亮 段
0	a,b,c,d,e,f
1	b,c
2	a,b,d,e,g
3	a,b,c,d,g
4	b,c,f,g
5	a,c,d,f,g
6	a,c,d,e,f,g
7	a,b,c
8	a,b,c,d,e,f,g
9	a,b,c,d,f,g

表 10-5 7447 真值表

显 示	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1



续表

显示	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

通过一个例子，我们可以感觉一下使用 7447 驱动 LED 的效果。在例 10.1.6 中，使用了一个计数器——74163（在 11 章将会介绍），其功能是在输出端产生一个按时序递增的二进制数，通过 7447 的编码，就能在 LED 上看到十进制数了。

**例 10.1.6** 在 Multisim2001 中连接如图 10-25 所示的电路，学习编码器 7447 的使用。

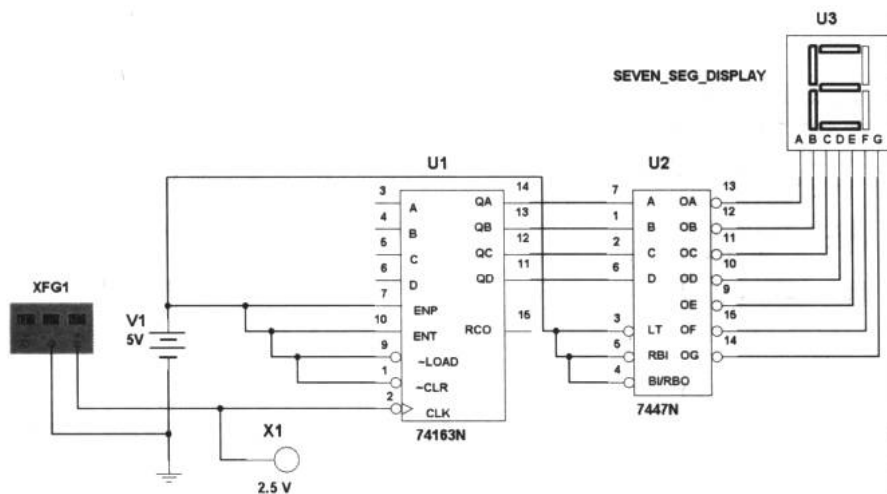


图 10-25 编码器 7447 的使用

在例 10.1.6 中，使用函数信号发生器作为时钟信号为系统提供时序脉冲。设置函数信号发生器的频率为 1Hz，幅度为 5V，输出波形为方波。同时，使用逻辑灯 X1 作为时钟脉冲指示器。

打开电源开关，将会看到 LED 从 0 开始，每 1 秒加 1，到 9 后又循环开始计数。在 Multisim2001 中，有的 LED 已经和编码器集成在一起，只有 4 个端子，即 A、B、C、D，在使用时，就不需要再连接 7447 了，十分方便。

## 10.2 组合逻辑的功能器件

与或门和与或非门 加法器 比较器 译码器

这一节主要介绍一些中规模组合逻辑电路。所谓组合逻辑电路，就是把几种基本的逻辑

辑门通过不同的组合形式封装在一个芯片中，实现所需的复合逻辑功能。这些组合逻辑电路数字系统和单片机设计开发中常常被使用到。

## 10.2.1 与或门和与或非门

### 1. 与或门 (AND-OR Gate)

图 10-26 所示为常用的与或门芯片型号及其电路图。

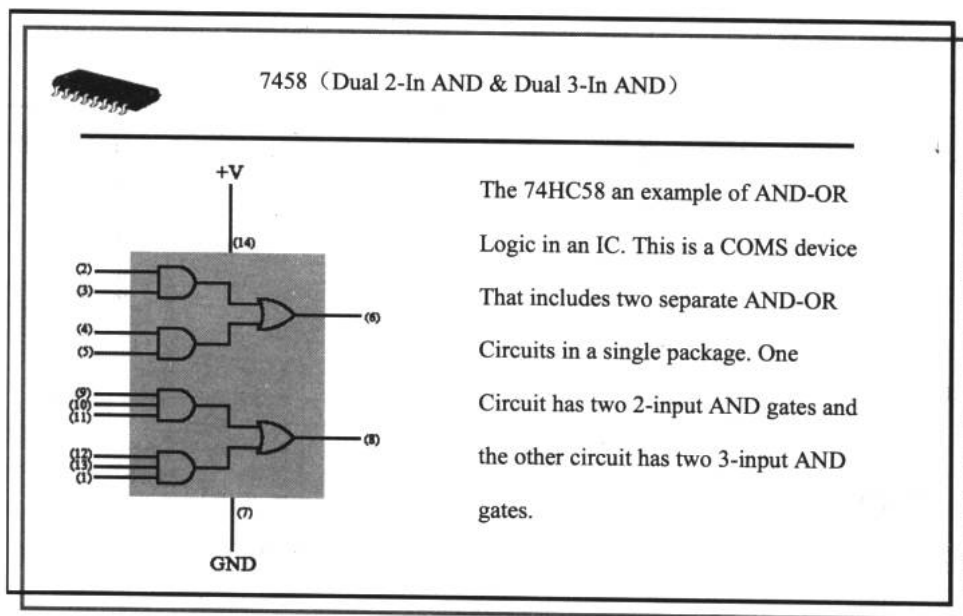


图 10-26 7458 与或门芯片电路

图 10-27 所示为由两个与门和一个或门组成的与或门。根据这个简单的组合逻辑关系，我们很容易得到与或门的逻辑表达式  $X=AB+CD$ 。也可以从真值表得到一个结论：一个 4 输入的与或门输出为 1 的必要条件是 A、B 同为 1 或 C、D 同为 1。

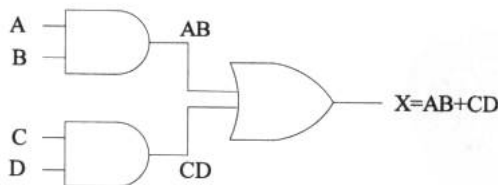


图 10-27 与或门

### 2. 与或非门 (AND-OR-INV Gate)

图 10-28 所示为常用与或非门芯片型号及其电路图。

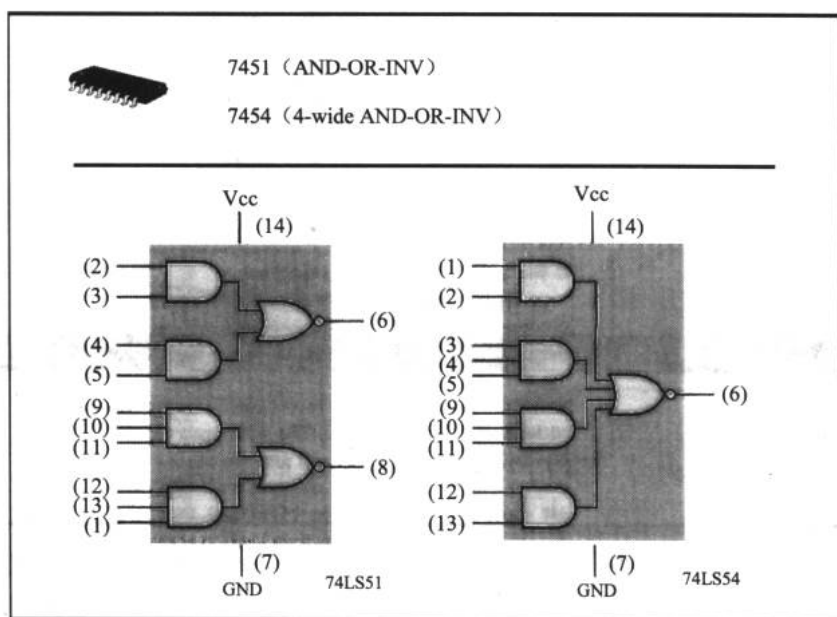


图 10-28 常用与或非门芯片型号及其电路图

在与或门的输出端再加一个非门，就能实现与或非的逻辑关系了。与或非门逻辑结构如图 10-29 所示。利用 Multisim2001 的逻辑转换仪，我们还可以得到与或非门的真值表。

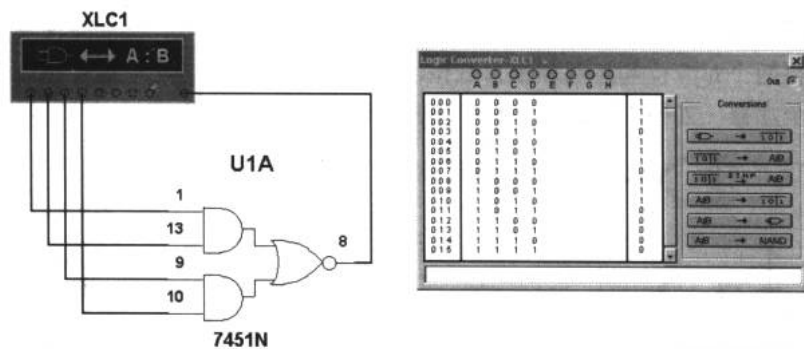


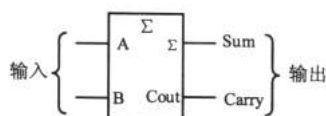
图 10-29 与或非门

## 10.2.2 加法器

加法器是一个应用广泛的器件。这一小节将会了解两种常用加法器——半加器(half-adder)和全加器(full-adder)的功能和以其为基本单元的加法芯片。

### 1. 半加器

图 10-30 所示为半加器的逻辑符号，表 10-6 所示是其真值表。



0 + 0 =	0
0 + 1 =	1
1 + 0 =	1
1 + 1 =	10

图 10-30 半加器

表 10-6 半加器的真值表

A	B	进位 $C_{out}$	和 $\Sigma$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

半加器的输入 A、B 端是一个二位二进制输入端，输出端由进位  $C_{out}$  与和  $\Sigma$  组成。半加器完成了一个二位二进制数的加法运算。分别来看， $C_{out}$  与  $\Sigma$  有如下的计算式：

$$C_{out} = AB \quad \Sigma = A \oplus B \quad (10-1)$$

根据式 10-1，半加器的输出由与运算和同或运算组成。于是设计出半加器的逻辑电路，如图 10-31 所示。

## 2. 全加器

全加器在将两个多位二进制数相加时，除了最低位以外，每一位都应该考虑来自低位的进位，即将两个对应位的加数和来自低位的进位 3 个数相加。这种运算称为全加，所用的电路称为全加器，如图 10-32 所示，对应的真值表如表 10-7 所示。

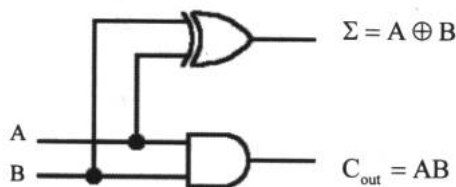


图 10-31 半加器逻辑电路

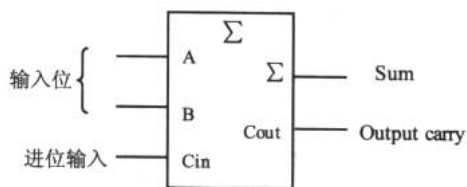


图 10-32 全加器

表 10-7 全加器真值表

A	B	$C_{in}$	$C_{out}$	$\Sigma$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0





续表

A	B	C <sub>in</sub>	C <sub>out</sub>	Σ
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

## 3. 并行二进制加法器

图 10-33 所示为一种常见的并行二进制加法器。顾名思义, 它能做双输入的四位二进制数的加法运算。

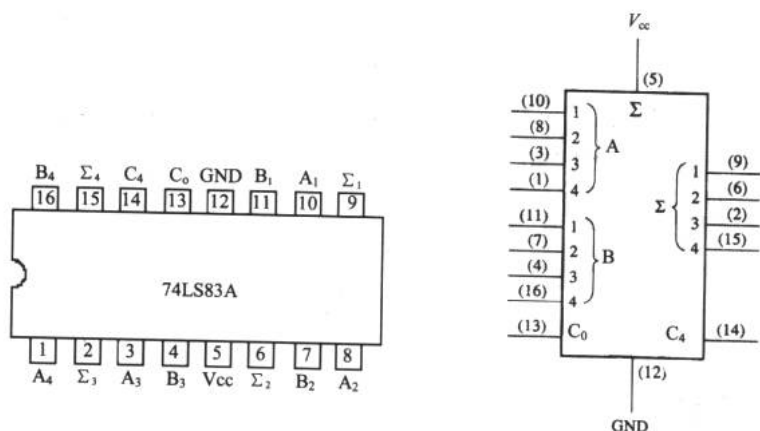


图 10-33 四位并行加法器的逻辑符号和逻辑功能图

74LS83A 和 74LS283 是两种常用的四位并行加法器。在图 10-33 中, 5 脚接正极, 12 脚接负极, 14 脚是进位输出端。表 10-8 是四位并行加法器的真值表。其中  $A_n$  和  $B_n$  代表输入端 A 和 B 的 4 个引脚,  $\Sigma_n$  和  $C_4$  分别代表和与进位标志。

表 10-8 全加器的输入输出关系表

$C_0$	$A_n$	$B_n$	$\Sigma_n$	$C_4$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

可见, 四位并行加法器完成了  $A_n + B_n + C_0$  的运算, 并通过  $\Sigma_n$  和  $C_4$  将结果输出。

## 10.2.3 比较器

在数字系统中, 常常需要比较两个数字的大小, 为完成这一功能而设计的各种逻辑电

路称为比较器 (comparator)。

74LS85 是一个中规模的比较器集成电路, 管脚和逻辑功能如图 10-34 所示。它有 A 和 B 两组输入端, 与加法器一样, 都具有四位二进制的输入端口。值得注意的是它有 3 个级联输入端:  $A < B$  (2 脚)、 $A = B$  (3 脚) 和  $A > B$  (4 脚), 这些端口使得比较器的多级联接成为可能 (关于级联的内容我们不作过多研究)。如果在 A 端输入 1001, B 端输入 1010, 我们将会比较器的  $A < B$  (2 脚) 输出端得到高电平, 而其他两个输出端将呈低电平; 如果 A 端输入 1011, B 端输入 1111,  $B > A$ , 所以在  $B > A$  (4 脚) 得到高电平。

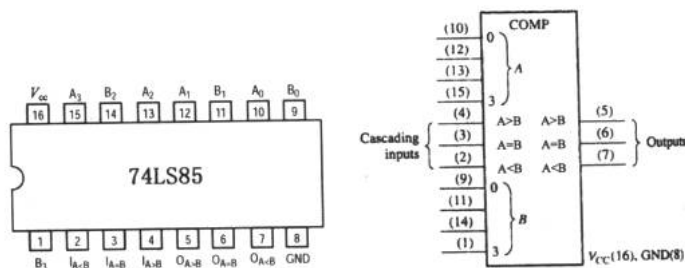


图 10-34 比较器 74LS85

## 10.2.4 译码器

译码器 (decoder) 的逻辑功能是将每个输入的二进制代码译成对应的输出高、低电平信号。因此, 译码是编码的反操作。

74HC138 是由与非门组成的 3 线-8 线译码器 (3-8 译码器), 图 10-35 所示为它的标识, 表 10-9 所示为其真值表。

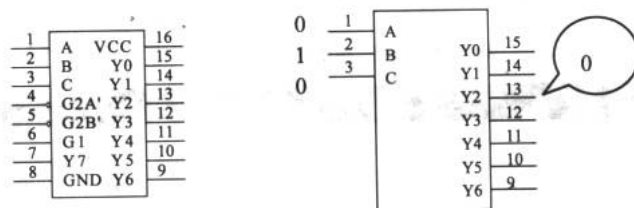


图 10-35 3-8 译码器 74HC138

表 10-9 译码器真值表

G2A'	G2B'	G1	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	1	X	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	1
X	X	0	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1



续表

G2A'	G2B'	G1	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

3-8 译码器根据输入的三位二进制数所指示的地址, 在对应的输出端输出低电平。G2A、G2B 和 G1 是使能端。3-8 译码器的功能从表 10-9 中可以清楚地看到。注意, 译码器是一种相当有用的器件。例如在图 10-36 所示的计算机 I/O 系统中, 计算机通过 I/O 地址来选通外设进行工作。

通过对前 4 小节的了解, 我们对一些常用的组合逻辑的功能器件有了初步印象。在数字系统中除了前面几种常用的器件外, 还有编码器、选择器和分配器等功能器件。本书对这些内容从略。

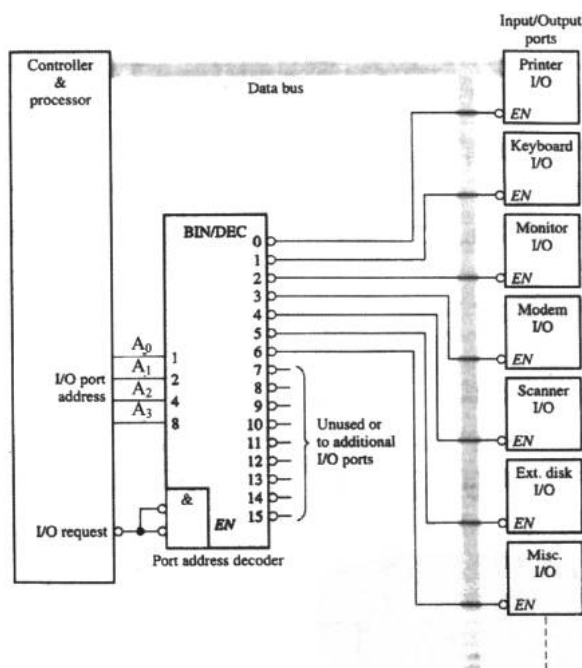


图 10-36 计算机 I/O 的片选示意图



## 第 11 章 翻转与计数

不管是前面所了解的简单逻辑电路也好，还是具有组合逻辑功能的器件也罢，它们的输入输出与时间并没有太大的关系。比如在任何时刻往加法器的输入端送入加数与被加数，它就几乎同时在输出端输出运算结果。

相对组合逻辑电路来说，时序逻辑电路是另一类常用的数字电路。这类电路的某一时刻的输出状态，不仅与当时的输入变量的状态有关，而且还与系统前一刻的状态有关。时序逻辑电路的特点表明它具有记忆功能，一般来说，时序逻辑电路由组合逻辑电路和存储单元或反馈延迟电路组成。

从这一章开始，我们来看看时序逻辑电路中的两种常见器件——触发器和计数器。

### 11.1 触发器

**S-R 触发器 D 触发器 主从 J-K 触发器 触发器应用**

触发器是一种典型的具有双稳态暂时存储功能的器件。在各种复杂的数字电路中不但需要对二进制信号进行运算，还经常需要将这些信号和运算结果保存起来。为此需要使用具有记忆功能的基本逻辑单元。能存储 1 位二进制信号的基本单元电路称为触发器。

#### 11.1.1 S-R 触发器

##### 1. S-R 触发器和它的真值表

图 11-1 所示为基本 S-R (Set-Reset) 触发器 (trigger) 的逻辑电路图。电路是由两个与非门交叉耦合组成的， $\bar{R}$  和  $\bar{S}$  是信号输入端， $Q$  和  $\bar{Q}$  为触发器的输出端，在正常条件下两个输出端保持相反状态。一般规定触发器的输出状态由  $Q$  端决定，即当  $Q=1$  时，触发器为 1 状态；当  $Q=0$  时触发器为 0 状态。

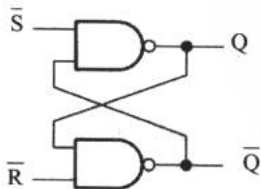


图 11-1 S-R 触发器的逻辑电路图

我们在此忽略对 S-R 触发器真值表的分析过程，而将它直接列于表 11-1 中。



表 11-1 S-R 触发器真值表

输 入		输 出		解 释
$\bar{S}$	$\bar{R}$	Q	$\bar{Q}$	
1	1	NC	NC	不翻转
0	1	1	0	置 1
1	0	0	1	置 0
0	0	1	1	非法

如果读者对这个真值表没有什么把握,那么可以看看用波形曲线来描述的 S-R 触发器输入输出关系,如图 11-2 所示。

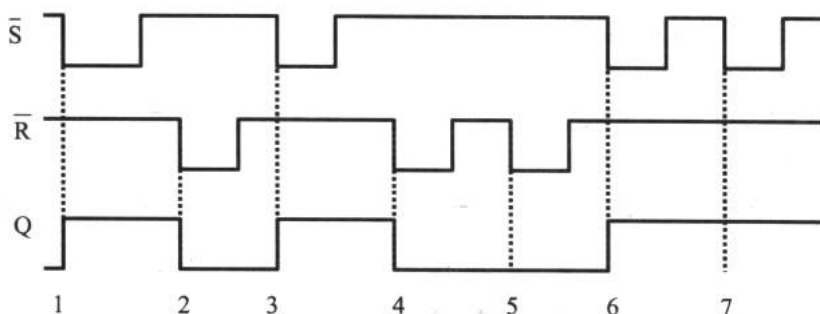


图 11-2 S-R 触发器输入输出波形曲线

在标号 1 前, Q 为低电平, 标号 1 处  $\bar{S}$  变为低电平, 同时  $\bar{R}$  保持高电平时, 根据真值表知道这时是触发器的“置 1”时刻, 于是输出 Q 从低电平翻转成高电平; 在标号 2 处, 对应为触发器的“置 0”时刻, 输出 Q 又从高电平向低电平翻转。我们可以按表 11-1 所示的几种情况完成其他时刻的分析。

从这个简单的例子我们对触发有了感性的认识。所谓触发, 就是在输入端信号的触发作用下, 触发器的输出端进行电平的翻转的过程。

## 2. 应用 S-R 触发器

可能读者会问, 这个翻转到底有什么作用? 让我们从下面一个实际的应用中进行解答。

图 11-3 (a) 中, 一旦开关从 1 打到 2 上, 输出端会出现低电平。但是事实并不是想象中那么完美, 由于拨动开关时手的抖动和开关接触点的接触不良, 都会导致在接触到 2 上时出现短暂的跳变接触。这样, 在输出端会出现一个抖动的变化过程。这对于某些电路是不利的, 会造成电路的误动作。为了解决这个问题, 我们利用 S-R 触发器按图 11-3 (b) 所示的电路连接方式与开关相连。一开始, 开关在 1 的位置上,  $\bar{R}$  接低电平, 触发器置 0。当开关打向 2 的过程中,  $\bar{R}$  通过电阻 R2 与高电平接通, 在开关接触到 2 的一瞬间,  $\bar{S}$  与低电平接通, 这时触发器置 1, 输出 Q 为高电平。此时即使开关发生抖动也不会影响 Q 输出高电平, 于是我们通过一个 S-R 触发器实现了开关的稳定切换。

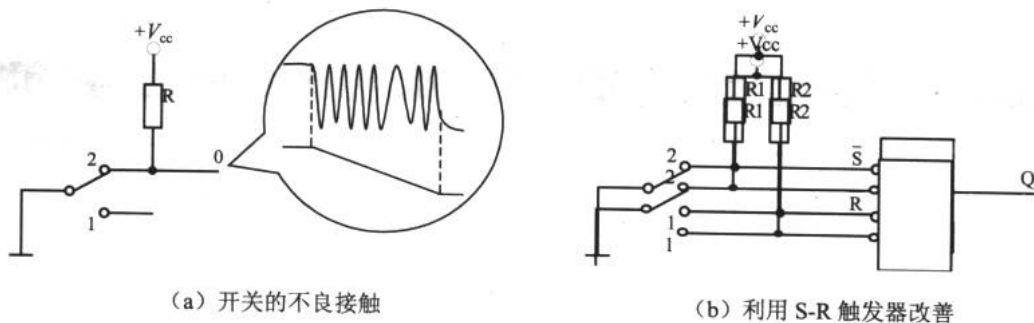


图 11-3 应用 S-R 触发器的一个例子

### 3. 一种常用的 S-R 触发器

74LS279 是一种常用的 S-R 触发器，在芯片内部具有 4 个独立的 S-R 触发器单元，其中有两个单元具有双  $\bar{S}$  输入结构，如图 11-4 所示。

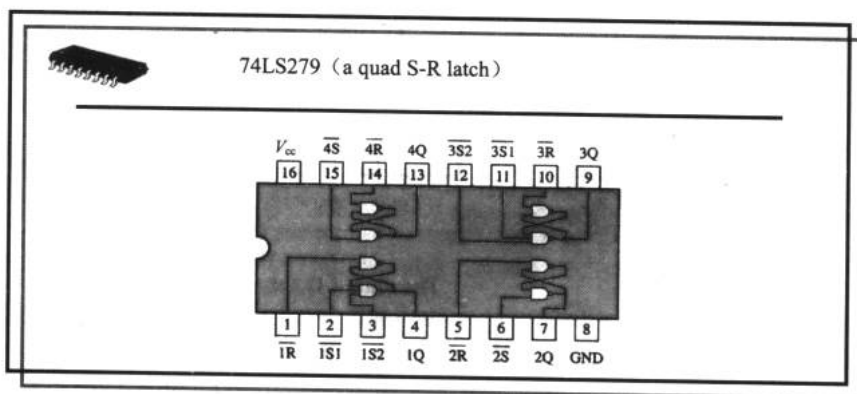


图 11-4 74LS279 触发器

## 11.1.2 D 触发器

### 1. D 触发器

D 触发器只有一个信号输入端，称为 D 端。比较常用的是维持阻塞型 D 触发器。图 11-5 所示为它的逻辑符号，表 11-2 所示为它的真值表。

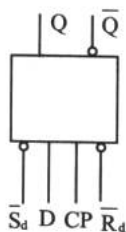


图 11-5 D 触发器逻辑符号



表 11-2 D 触发器真值表

D	$Q_n$	$Q_{n+1}$	输出状态说明
0	0	0	与输入端 D 的状态完全相同
0	1	0	
1	0	1	
1	1	1	

符号中 CP 是时钟脉冲的输入端, 这是一个需要提供时钟脉冲才能正常工作的器件。CP 端的箭头表明它属于脉冲上升沿触发,  $\bar{R}_d$ 、 $\bar{S}_d$  分别为直接置 0、置 1 端。我们通过图 11-6 描述的 D 触发器的输入输出波形曲线来对其进行感性的认识。

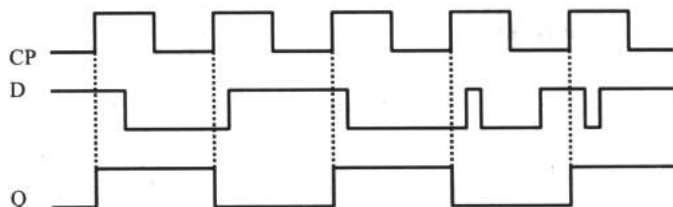


图 11-6 D 触发器的工作波形

从图 11-6 我们看到, 只有当时钟脉冲上升时触发器才会翻转且翻转输出的信号与 D 输入端一致, 所以我们叫它边缘触发的触发器。

## 2. D 触发器实例

可以利用 D 触发器制作一个四路抢答器。在 Multisim2001 中连接如图 11-7 所示电路, 把按钮开关的“Key”分别设置为 A、B、C、D, 以代表不同的抢答开关。

4042BP 是一个四锁存的 D 型触发器, 电路中, 还包含了双 4 输入端与非门 4012BD、4 个两输入端或非门 4001BD 和六同相缓冲/变换器 4010BC1。

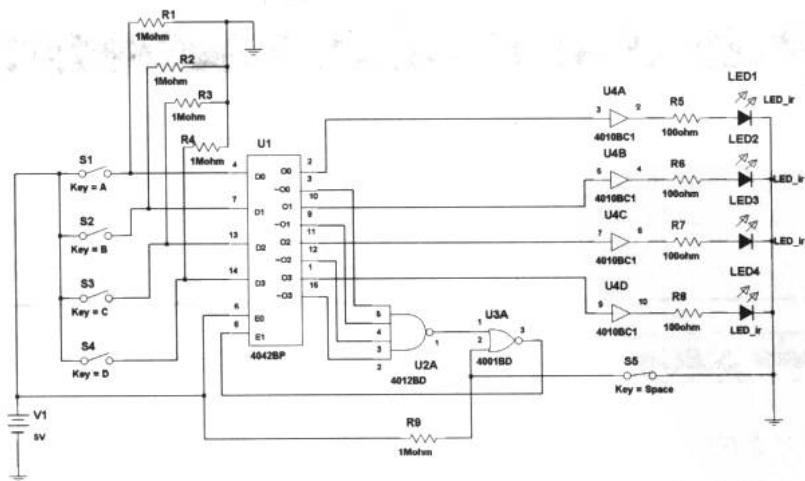


图 11-7 D 触发器应用实例——四路抢答器

电路工作时, 4042BP 的极性端 E0 (5 脚) 处于高电平, E1 (6 脚) 端电平由  $\overline{Q}0 \sim \overline{Q}3$  和复位开关 S5 产生的信号决定。当 S5 断开时, 4001BD 的 2 脚经上拉电阻 R9 接电源正极, 由于 S1~S4 均为关断状态, D0~D3 通过电阻 R1~R4 接地, 所以  $\overline{Q}0 \sim \overline{Q}3$  为高电平状态, 于是 E1 端为低电平, 锁存了前一次工作时的数据。

复位开关 S5 闭合, 4001BD 的 2 脚接地, 4012BP 的输出端 1 脚也为低电平, 所以 E1 端为高平。以后, E1 的状态完全由 4042BP 的  $\overline{Q}$  输出端电平决定。一旦抢答开关 S1~S4 有一个闭合, 则 Q0~Q3 中必有一端最先处于高电平状态, 相应的 LED 被点亮, 指示出第一个按下按钮的选手。同时, 4012BD 的 1 脚为高电平, 迫使 E1 为低电平, 第一个信号被锁存, 电路对以后按下按钮产生的信号不再响应。

### 11.1.3 主从 J-K 触发器

主从 J-K 触发器是另一类脉冲沿触发的触发器。之所以称为主从, 是因为在触发器内部有两个部分, 如图 11-8 所示, 左侧为主触发器, 右侧为从触发器。主触发器是一个基本的脉冲触发型的触发器, 而从触发器的脉冲信号与主触发器是反相的。

主从 J-K 触发器的真值表如表 11-3 所示。

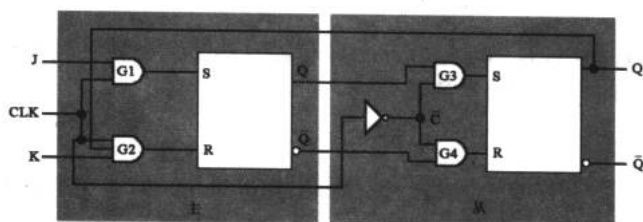


图 11-8 主从 J-K 触发器的内部结构

表 11-3 主从 J-K 触发器的真值表

输 入			输 出		说 明
J	K	CLK	Q	$\overline{Q}$	
0	0	↑	$Q_0$	$\overline{Q}_0$	不翻转
0	1	↑	0	1	置 0
1	0	↑	1	0	置 1
1	1	↑	$\overline{Q}_0$	$Q_0$	反相

### 11.1.4 触发器应用

#### 1. 并行数据存储

并行数据存储器是数字系统中一种最常见的模块, 它对一组并行的二进制数进行存储





待用。在图 11-9 中使用了 4 个 D 触发器（当然也可以选用别的触发器来存储并行数据），4 位二进制数分别输入 4 个触发器的输入端 D，而 4 个 D 触发器由同一个时钟脉冲控制。根据输入输出波形我们可以清楚看到，触发器的  $\overline{\text{CLR}}$  是清 0 端，低电平有效。一旦在这个脚上输入低电平，触发器的输出就会变成低电平。 $\overline{\text{CLR}}$  不但在触发器中有，在计数器等其他数字集成电路中都会看到。

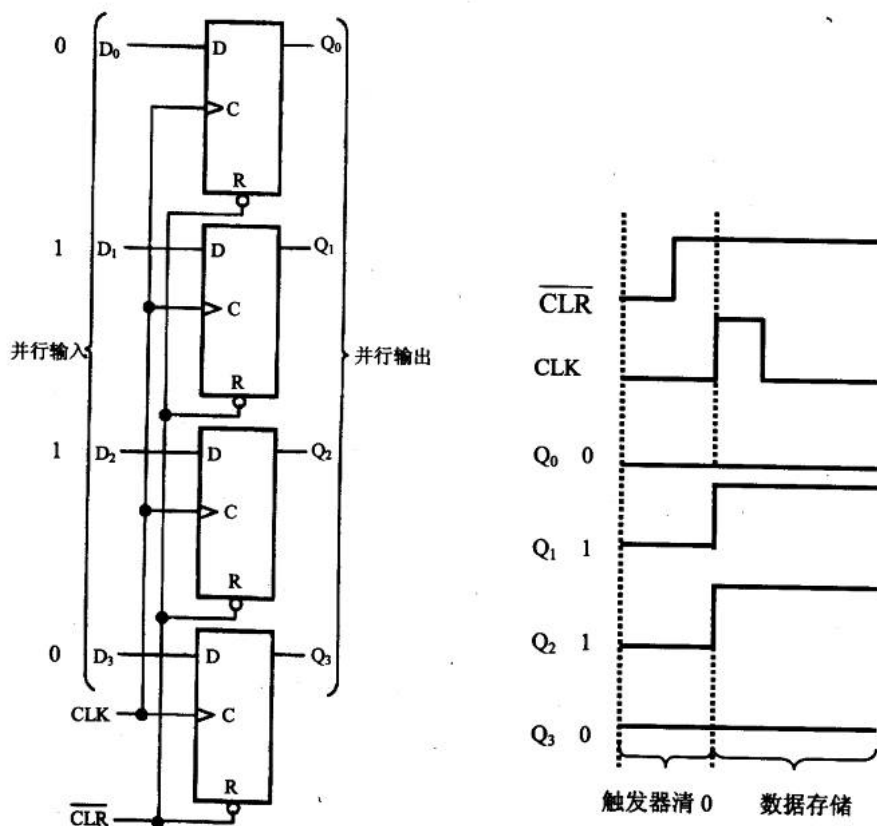


图 11-9 利用 D 触发器来存储并行数据

## 2. 串入-并出移位电路

8 位串入-并出移位寄存器电路主要用于数字系统或计算机中对输入数据进行排队，使数据按先后次序传送。我们在 Multisim2001 中连接如图 11-10 所示的电路。电路由两个 4 位串入-并出移位寄存器（4015BD）组成。

电路中，4015BD 的两个移位寄存器为串行级联，构成 8 位串行输入并行输出形式。前级 U2A 的数据输入端 D1 接电源正极，始终为高电平，在末级 U2B 输出端 2D 与 4013BD 的 D1 相连，其输出 O1 与 U2A 的复位端 MR1 和 U2B 的 MR2 相连。这样，在时钟脉冲 CP 的作用下，高电平“1”将逐次移位通过每级寄存器，当高电平到达 4013BD 的 D1 端时，O1 输出高电平使移位寄存器全部复位。因此，在两个时钟脉冲后，复位消失，同时高电平再一次进入寄存器中。

关于 4013BD 和 4015BD 的真值表, 可以在 Multisim2001 的 Help 文件中找到, 结合以上的分析, 我们就能知道串入-并出移位电路的工作原理了。设置函数信号发生器的频率为 1Hz, 幅度为 5V, 波形为方波。打开电源开关, 将会看到发光二极管被依次点亮, 后全部熄灭, 再依次点亮……如此循环。

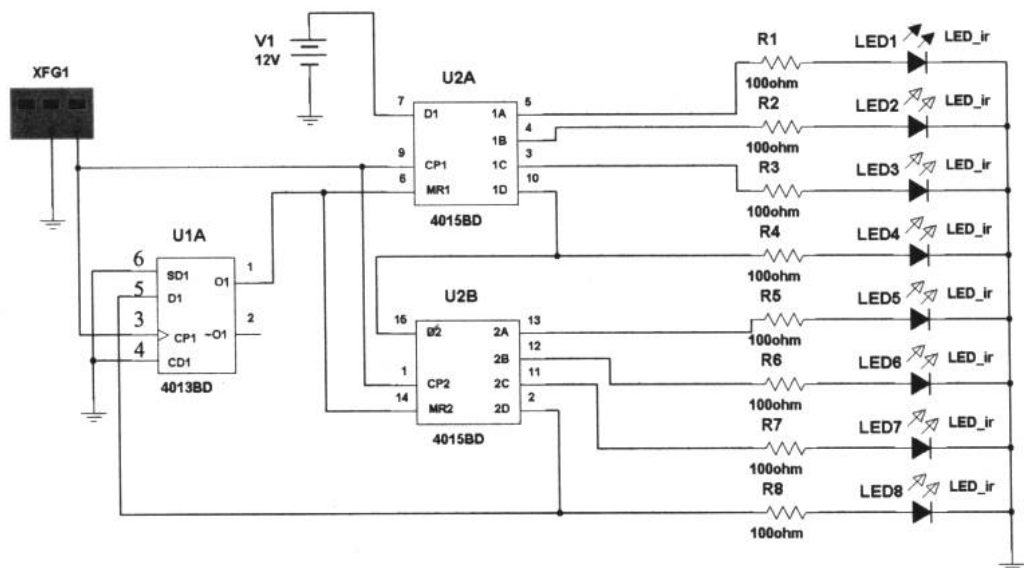


图 11-10 8 位串入-并出移位寄存器电路

### 3. 分频器

分频器是利用触发器的翻转特性, 将输入的时钟信号进行频率变换后输出的电路。通过不同的组合形式, 可以构成二分频器、三分频器及四分频器等。下面我们利用 J-K 触发器来连接分频器电路。

**例 11.1.1** 在 Multisim2001 中连接如图 11-11 所示的二分频器和图 11-12 所示的三分频电路, 观察输入输出波形。选用 J-K 触发器。

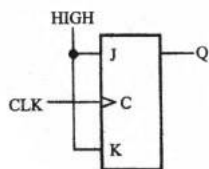


图 11-11 二分频器

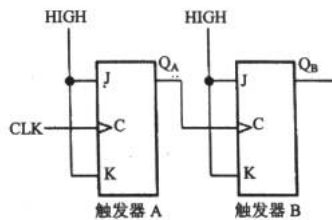


图 11-12 三分频器

在 Multisim2001 中, 我们可以把电源的正极当作“HIGH”, 负极与地线连接后作为“LOW”。函数信号发生器作为 CLK 源, 选择方波作为输入信号, 幅度取 5V, 频率 50Hz。



J-K 触发器可选用 74112, 注意从器件的帮助文件中获得器件使用方法。打开电源开关分别得到二分频器和三分频器的输入输出波形, 如图 11-13 所示。很明显, 分频器把输入信号的频率减小了。

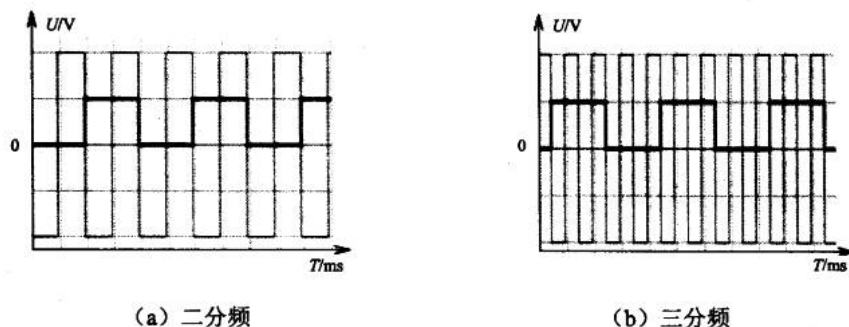


图 11-13 分频

#### 4. 计数

另一种利用触发器电路模块的例子就是计数器了, 这是一种相当常见的电路形式。我们同样以 J-K 触发器作为基本器件来组成计数器, 如图 11-14 所示。

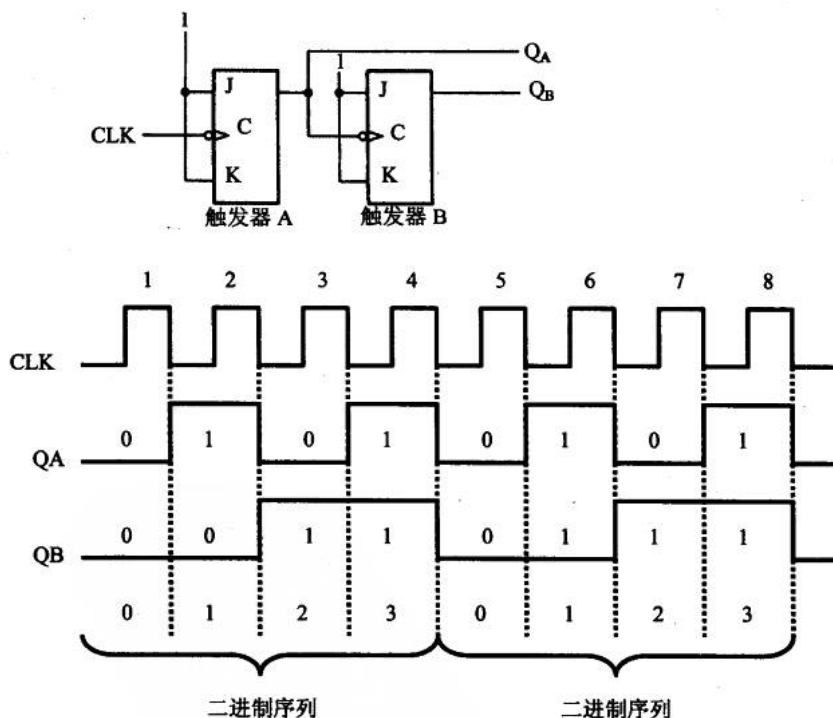


图 11-14 计数

图 11-14 所示的电路是一个四进制的计数器, 以 4 个时钟脉冲为循环进行计数。关于计数器我们还会在本章稍后继续了解。

## 11.2 触发器与振荡器

施密特触发器 单稳态触发器 环形振荡器 555 集成电路

在前面我们已经了解了如何利用三极管及一些外围器件组成各种振荡器（包括施密特触发器）。在这一节里，我们来看看含有数字器件的振荡器。

### 11.2.1 施密特触发器

在 6.3.1 节里，我们使用三极管连接了一个施密特触发器，它把正弦波信号变成了矩形波。施密特触发器是脉冲波形变换中经常使用的一种电路，它在性能上有两个重要的特点：

第一，输入信号从低电平上升过程中，电路状态转换时对应的输入电平与输入信号从高电平下降过程中对应的输入电平不同。

第二，在电路状态转换时，通过电路内部的正反馈过程使输出电压波形的边沿变得陡峭。

利用这两个特点不仅能将变化缓慢的信号波形整形为边沿陡峭的矩形波，而且可以将叠加在矩形脉冲高、低电平上的噪声有效地清除。

#### 1. 门电路组成的施密特触发器

将两级反相器（CMOS 门电路 74HC04D）串联，同时通过分压电阻把输出端的电压反馈到输入端，就构成了如图 11-15 所示的施密特触发器。在 Multisim2001 连接该电路，观察输入输出波形，如图 11-16 所示。

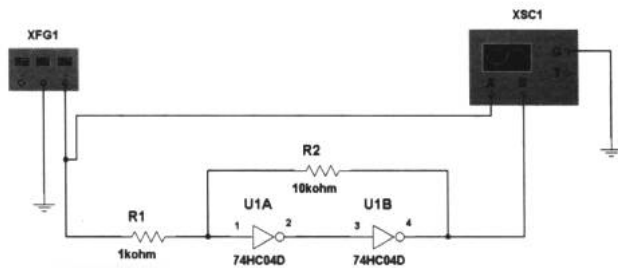


图 11-15 门电路组成的施密特触发器

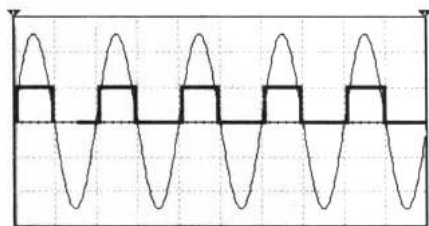


图 11-16 施密特触发器的输入输出波形



施密特触发器的应用非常广泛,在实际当中,TTL 和 CMOS 电路都有单片集成的施密特触发器产品,如 74132、40106、7414 和 4093 等。施密特触发器在电路中的标识如图 11-17 所示。

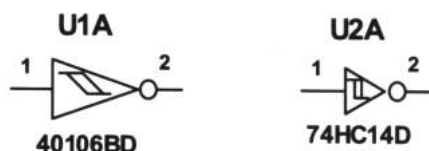


图 11-17 施密特触发器的电路标识

## 2. 施密特触发器的应用

### (1) 脉冲整形

在数字系统中,矩形脉冲经传输后往往发生波形畸变,图 11-18 所示为两种常见的畸变波形。

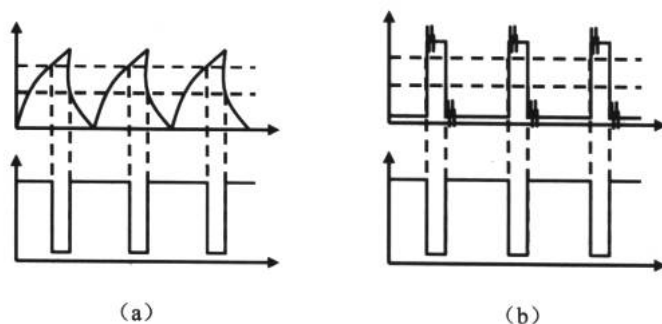


图 11-18 波形畸变

图 11-18 (a) 所示的畸变源于信号传输线上的电容。当传输电容过大,波形的上升和下降沿将明显变坏。当传输线较长,而且接收端的阻抗与传输线的阻抗不匹配时,在波形的上升沿和下降沿将产生振荡现象,如图 11-18 (b) 所示。无论出现上述哪一种情况,都可以通过施密特触发器整形而获得较理想的矩形脉冲波形。

### (2) 脉冲鉴幅

若将一系列幅度各异的脉冲信号加到施密特触发器的输入端时,只有那些幅度大于某一门限的脉冲才会在输出端产生输出信号。因此,施密特触发器能将幅度大于某一门限的脉冲选出,具有脉冲鉴幅的能力,如图 11-19 所示。

## 11.2.2 单稳态触发器

单稳态触发器只有一种稳定状态,这一点我们在前面已经了解过了。当向单稳态电路输入一定的触发信号,电路就会向着不稳定状态翻转。这个不稳定状态会持续一段时间,然后电

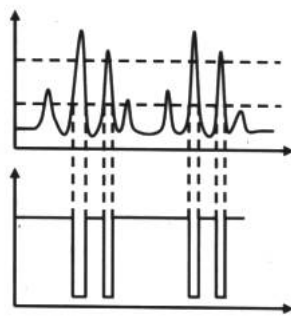


图 11-19 脉冲鉴幅



路又会恢复稳定状态。

由于具备这些特点，单稳态触发器被广泛应用于脉冲整形、延时和定时等电路中。

### 1. 一个简单的单稳态电路

我们来分析一下图 11-20 所示的这个简单的单稳态电路的工作过程：当触发信号（高电平）从或非门 G1 的一个输入端进入后，G1 输出低电平。这个由高向低的跳变可以通过电容 C 到达非门 G2，并使它输出高电平。由于 G2 的输出与 G1 的一个输入端相连，于是输出的高电平进入 G1，虽然这时触发信号已经不存在了，但 G1 仍能继续输出低电平。根据这个过程，单稳态电路的输出 Q 在一段时间内保持高电平。

在此过程中，电容 C 通过电阻 R 开始充电，其两端电压逐渐升高。选定 RC 常数后，这个充电时间就是确定的。当电容 C 两端电压充至一定值时，在 G2 输入端出现高电平，输出 Q 又变成低电平。

所以，G2 输出高电平全依赖于触发信号。这个高电平的持续时间由 RC 时间常数决定，这就是一个单稳态电路的工作过程。图 11-21 所示为单稳态电路的逻辑图。

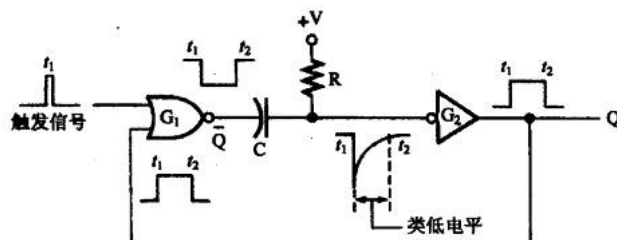


图 11-20 一个简单的单稳态电路

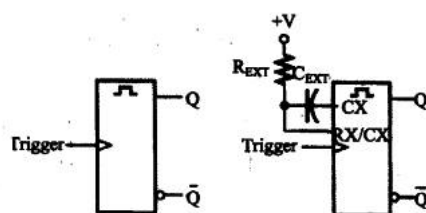


图 11-21 单稳态电路的逻辑图

### 2. 非可再触发型单稳态电路

非可再触发型单稳态电路不会单纯根据触发信号的跳变而翻转。图 11-22 所示为两种情况下非可再触发型单稳态电路的输入输出波形，我们可以很清楚地理解这个绕舌的单稳态电路的含义了。非可再触发型单稳态电路的代表器件是 74121 和 74221 等。

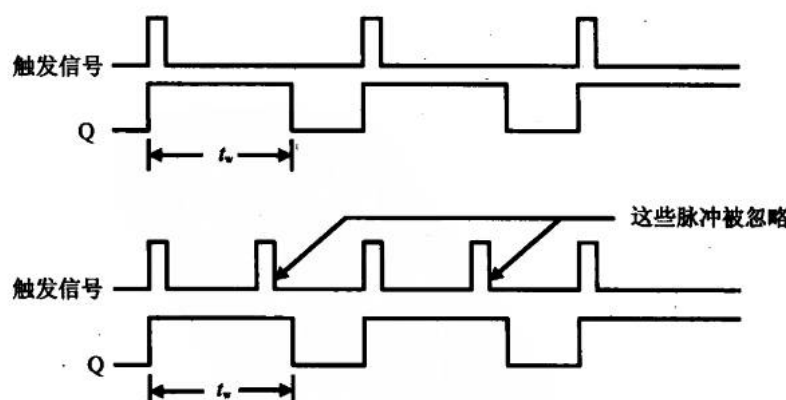


图 11-22 非可再触发型单稳态电路的输入输出波形



### 3. 集成单稳态触发器

鉴于单稳态触发器的应用十分普遍, 在 TTL 电路和 CMOS 电路的产品中, 都包括了集成型的单稳态触发器件。使用这些器件只需要很少的外围器件就能构成一个性能不错的单稳态触发器, 如图 11-23 所示。

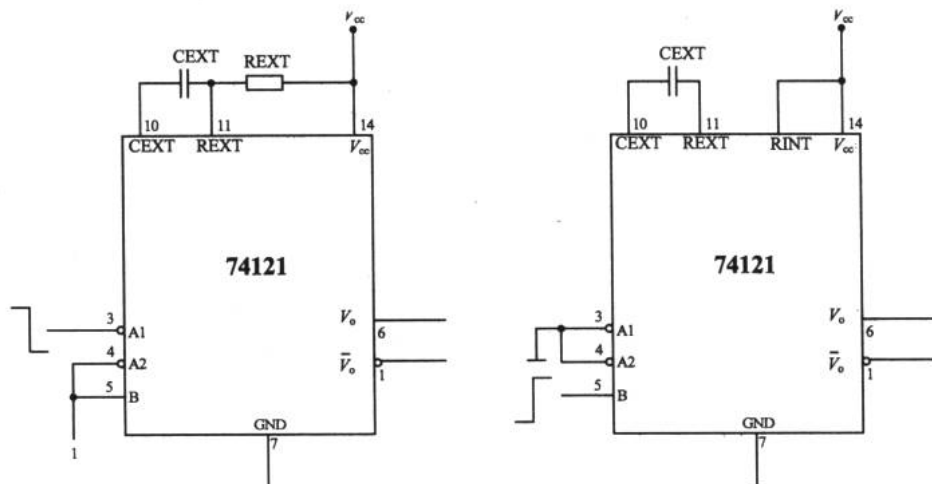


图 11-23 集成单稳态触发器 74121 应用电路

### 11.2.3 环形振荡器

利用闭合回路中的正反馈作用可以产生自激振荡, 利用闭合回路中的延迟负反馈同样也能产生自激振荡, 只要负反馈信号足够强。

环形振荡器就是利用延迟负反馈产生振荡的。它是利用门电路的传输延迟时间将奇数个反相器首尾相接而构成的。

图 11-24 所示为一个最简单的环形振荡器, 它由 3 个非门首尾相连组成。这个电路没有稳定状态, 因为在静态下任何一个非门的输入和输出都不可能稳定在高电平或低电平, 而只能处于高、低电平之间, 所以处于放大状态。

假设由于某种原因 V11 产生了微小的正跳变, 经过 G1 的传输延迟并由 V12 产生一个幅度更大的负跳变, 同样, 由 G2 延迟后由 G3 输出了一个更大的负跳变, 并反馈到 G1 的输入端。因此, 经过 3 次时间延迟后, V11 又自动跳变为低电平。可以推想, 再经过 3 次延迟, V11 又将跳变为高电平。如此周而复始, 就产生了较强的自激振荡。

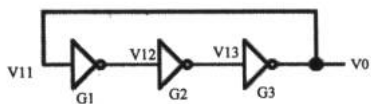


图 11-24 环形振荡器

### 11.2.4 555 集成电路

555 是一种应用很广泛的集成电路。如果到网上寻找或到书店去查阅, 将会发现关于

它的应用电路不下 1000 种。之所以它有诸多应用电路，是因为它被轻易地设置在单稳态多谐振荡器或无稳态多谐振荡器工作状态下。图 11-25 所示为 NE555 的管脚图。

我们来看看 555 的内部结构。之所以称为 555 是因为在集成电路中的基准电压电路是由 3 个误差极小的  $5k\Omega$  电阻组成的，如图 11-26 所示。

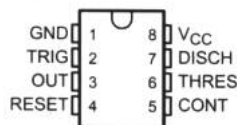


图 11-25 NE555 管脚图

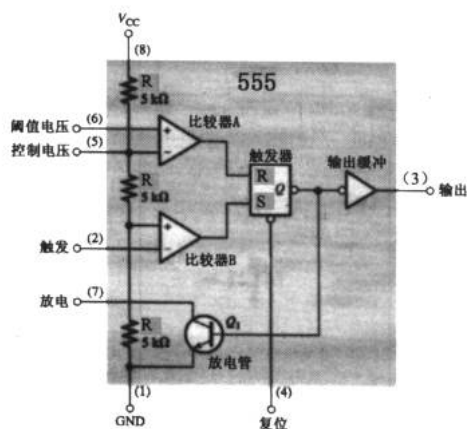


图 11-26 555 的内部结构

### 1. 单稳态模式

由 555 所组成的单稳态触发器如图 11-27 所示。为分析方便起见，设当电源  $V_{CC}$  加上后，触发端 2 脚无触发信号，即在稳定状态，输出  $V_o$  为低电平。触发器输出高电平，放电管 Q1 导通，定时电容 C2 上的电压为 0。由于 555 的 6、7 脚短接，故比较器 A 的同相输入端（6 脚）也被箝至等于 Q1 的饱和压降  $V_{ce}$  的电位。555 内的 3 个  $5k\Omega$  电阻的分压网络，使比较器 A 的反相端和比较器 B 的同相端分别偏置在  $2/3V_{CC}$  和  $1/3V_{CC}$  上，这两个电位就是比较器翻转与否的门限电压值。

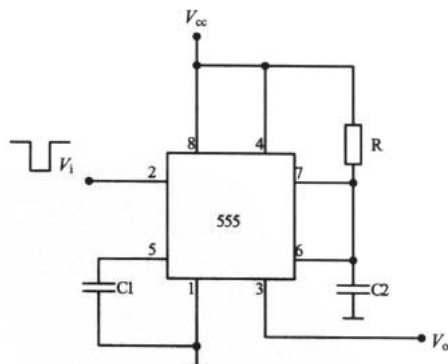


图 11-27 单稳态振荡器

当 2 脚加进低于  $1/3V_{CC}$  的负向脉冲时，下比较器 B 输出高电平，触发器被置 0，输出低电平，放电管 Q1 截止。同时，555 的输出端 3 脚变为高电平。此时，电路处于置位阶段，进入暂稳态。





当触发脚的输入脉冲消失后, 比较器 B 虽然输出为低电平, 但触发器的输出仍保持不变, 故 555 的输出仍为高电平。当 C2 上的电压充电到  $2/3V_{cc}$  时, 即比较器 A 的同相端电压达到  $2/3V_{cc}$  时, 输出为高电平, 触发器被复位, 且输出变为高电平, Q1 再次饱和导通, 电容 C2 通过 Q1 放电, 其电压很快变成 0V, 电路又恢复至稳态。

## 2. 无稳态模式

由 555 构成的无稳态电路如图 11-28 所示。当接通电源后, 由于 C1 上电压不能突变, 故 555 处于置位状态, 输出端 3 脚呈高电平, 放电管 Q1 截止, 通过 R1 和 R2 对 C1 充电, 2 脚电位随 C1 的电压升高。

C1 上的电压随时间增加, 当达到  $2/3V_{cc}$  阈值电平时, 比较器 A 翻转, 使 S-R 触发器置 1, 输出  $V_o$  为低电平。此时, 放电管 Q1 饱和导通, C1 上的电荷通过 R2 至 Q1 放电。当 C1 放电使其电压降至  $1/3V_{cc}$  时, 比较器 A 翻转, S-R 触发器复位, 输出端为高电平。以上过程重复出现, 形成无稳态多谐振荡。

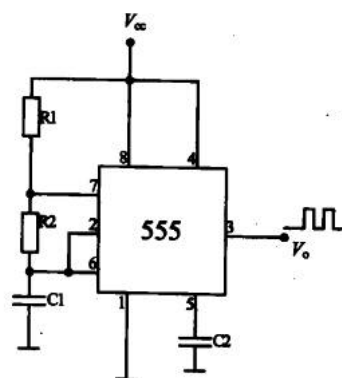


图 11-28 无稳态多谐振荡器

## 3. 555 应用实例一: 多种波形发生器

以 555 为核心元件的多种波形发生器电路如图 11-29 所示。电路由 555 和 C1 及恒流充放电回路组成多谐振荡器。IC2 使用 5G28C 作为高输入阻抗的电压跟随器, 起到隔离和阻抗匹配的作用。振荡器的充放电均为恒流源充放, 因而其锯齿波有良好的线性。RP1 和 RP2 分别用于调节充电和放电时间常数, 调节占空比。

图示参数的周期为 0.2ms~60s。当 K1 闭合时, 形成锯齿波, 其周期为三角波的一半。

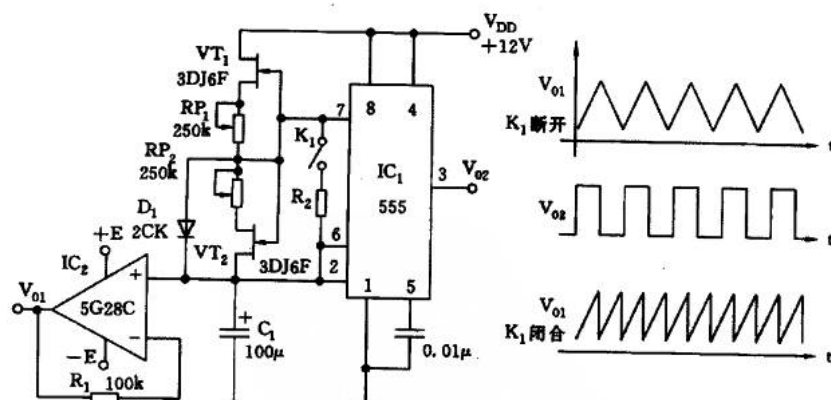


图 11-29 多种波形发生器及仿真结果

## 4. 555 应用实例二: 触摸延时开关

触摸延时开关适用于宿舍楼和办公楼的楼梯及过道灯的定时自动关灯控制或洗手间等

场合。延时开关由降压整流器、定时开关和可控硅控制电路等组成，如图 11-30 所示。

由 D1~D4 组成桥式整流器，并经 R1、D5、C1 和 DW 得到约 4.5V 的稳压直流电源，作为 555 集成电路的供电电压。

555 和 R4、C2、R3 等组成一个单稳态延时电路。R3 末端的金属片 M 紧贴开关的面板按钮，平时无人按压，M 无感应信号，555 处于复位状态，即输出端 3 脚为低电平。当有人触动金属片 M 时，人体的感应信号经 R3 加至 555 的触发端 2 脚，使 555 置位，即输出端转呈高电位，触发双向可控硅，从而使灯 H 点亮，即延时开始。

555 单稳态电路的延时即单稳态电路的暂态过程时长为  $t=1.1R_4C_2$ 。图示参数的延时时长为 100 秒。调节 R4、C2 的时间常数，可改变灯亮的持续时间。

可控硅应选用反向击穿电压不低于 400V 的双向可控硅，如 3CTS1 等。

#### 5. 555 应用实例三：单电源变换为双电源电路

图 11-31 中，由单电源供电，正电压源由 IC2 稳压输出，接地端 3 脚采用两支二极管提升，使输出为 +7.4V。

555 和 R1、RP1、C1 组成无稳态多谐振荡器，振荡频率为  $f=1.44/(R_1+RP_1)C_1$ ，图示参数的振荡频率为 1kHz~70kHz，可通过调节 RP1 来改变。经整流滤波后加至 IC3，同样采用接地端提升法使输出电压为 -7.4V。变换后的正负电压源，在输出负载电流为 150mA 的情况下，其纹波电压不大于 5mV。

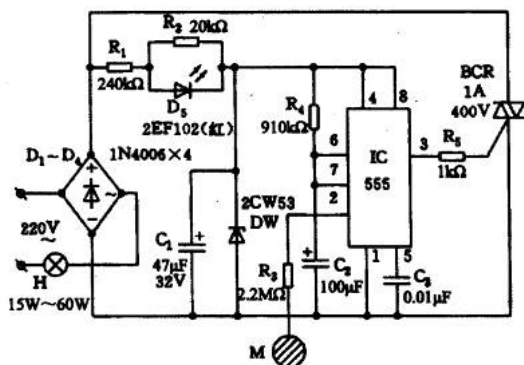


图 11-30 触摸延时开关电路

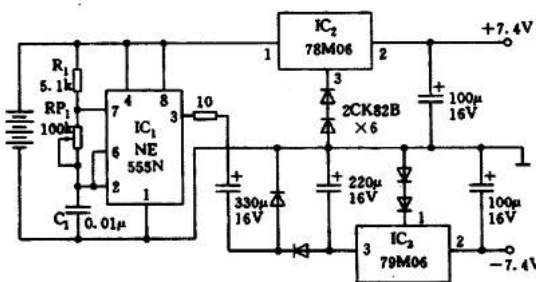


图 11-31 单电源变换双电源电路

## 11.3 计数器

### 异步计数器 同步计数器

正如 11.1.4 节提到的那样，多个触发器的级联能够实现计数的功能，这样的触发器组



合我们称之为计数器。计数器的计数位数与触发器级联的个数有关。

根据计数器所加的时钟信号方式可分为异步计数器和同步计数器两大类。异步计数器就是级联的各个触发器并不是同一时钟信号源，而是采用后一级的时钟信号来自前一级的输出的形式；同步计数器就是所有级联的触发器均使用一个时钟信号源。

### 11.3.1 异步计数器

#### 1. 2-bit 二进制异步计数器

图 11-32 所示为利用两个 J-K 触发器组成的 2-bit 二进制异步计数器，该计数器的输出为  $Q_0$ 、 $Q_1$ 。注意，时钟信号 CLK 只输入其中一个触发器 FF0 里，而另一个触发器 FF1 的时钟信号来自 FF0 的输出端  $\bar{Q}_0$ 。

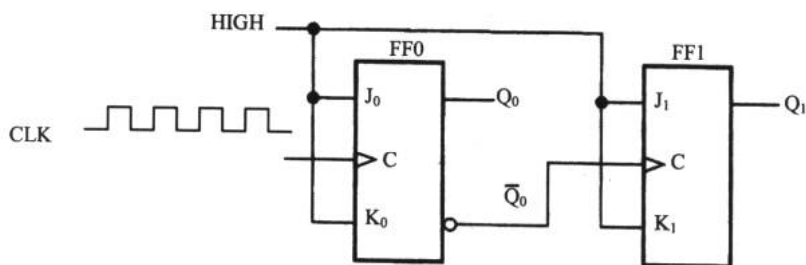


图 11-32 2-bit 二进制异步计数器

分析时序电路时，我们称描述时序电路输入输出关系的曲线为时序图。如图 11-33 所示为该异步计数器的时序图。

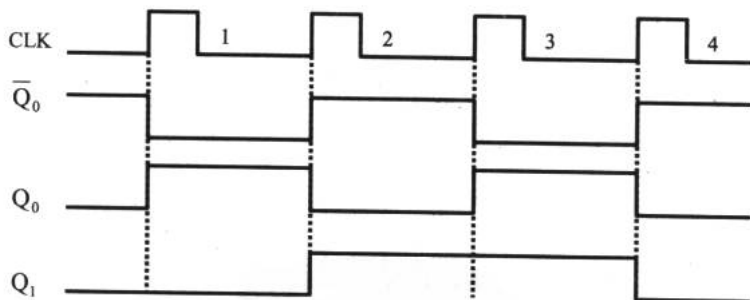


图 11-33 2-bit 二进制异步计数器的时序图

从图 11-33 这个时序图中我们可以分析：当时钟脉冲第一个上升沿到来时，FF0 翻转， $Q_0$  输出高电平， $\bar{Q}_0$  输出低电平。当第二个上升沿到来时， $Q_0$  变成低电平而  $\bar{Q}_0$  则输出高电平并触发 FF1 翻转， $Q_1$  输出高电平。以此循环，就得到 2-bit 二进制异步计数器的二进制数序列表，如表 11-4 所示。

表 11-4 2-bit 二进制异步计数器真值表

时钟脉冲	$Q_1$	$Q_0$
一开始	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1
4 (循环)	0	0

注意观察  $Q_1$  和  $Q_0$  组成的两位二进制数，从 00 开始，每个脉冲到来输出加 1，达到 11 后，又从 00 开始循环计数。

## 2. 3-bit 二进制异步计数器

有了上面的基础，对 3-bit 二进制异步计数器的解释就简单了。我们一起来看看 3-bit 二进制异步计数器的逻辑电路图（如图 11-34 所示）、时序图（如图 11-35 所示）和真值表（如表 11-5 所示）。

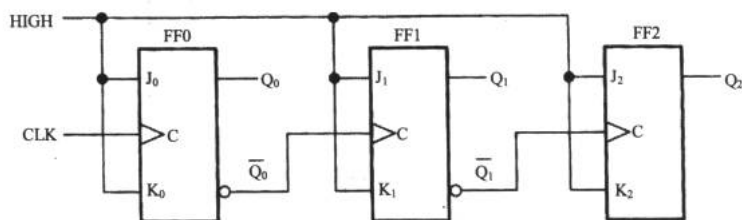


图 11-34 3-bit 二进制异步计数器

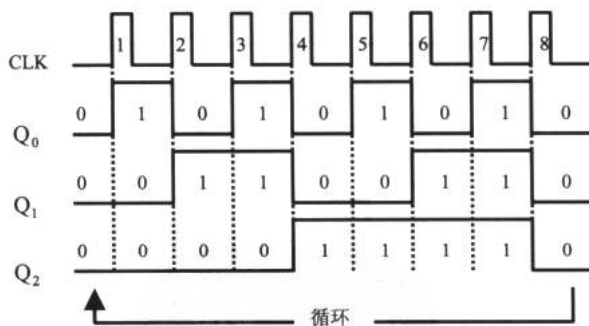


图 11-35 3-bit 二进制异步计数器的时序图

表 11-5 3-bit 二进制异步计数器真值表

时钟脉冲	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
一开始	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0



续表

时钟脉冲	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8 (循环)	0	0	0

### 3. 4-bit 二进制异步计数器

74LS93 是一个典型的二进制异步计数器, 它由 4 个主从 J-K 触发器构成, 如图 11-36 所示。

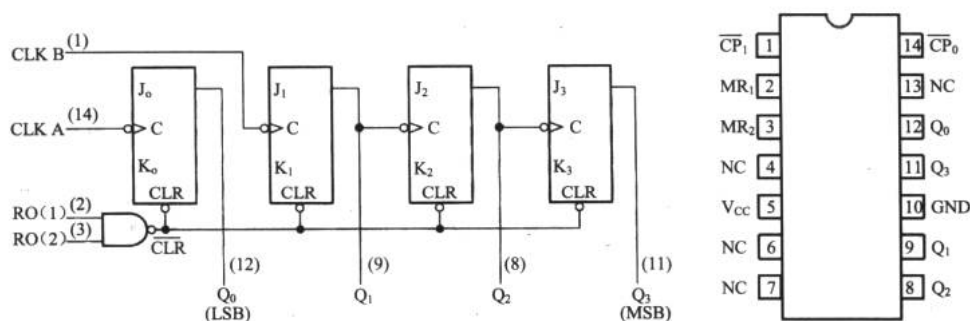


图 11-36 二进制异步计数器 74LS93

**例 11.3.1** 在 Multisim2001 中利用 74LS93 组成模 16 和模 10 计数器, 其中组成的模 16 计数器如图 11-37 所示。

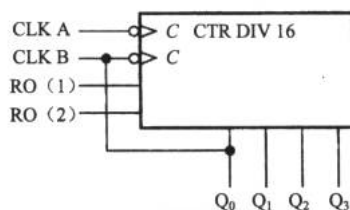


图 11-37 利用 74LS93 组成模 16 计数器

模 16 计数器就是每 16 个脉冲循环一次 (逢 16 进一) 的计数器。把 74LS93 的  $Q_0$  与 CLK B 连接就可以得到设计要求 (原因可以结合 74LS93 的内部结构图进行分析)。74LS93 的 RO (1) 和 RO (2) 是清 0 端, 当这两个端口均接高电平时计数器清 0 而不能计数。只有任一端不为高电平时计数器计数。

为了明显地看到计数器的计数结果, 我们使用虚拟逻辑分析仪进行电路仿真。在 Multisim2001 中连接的模 16 计数器, 如图 11-38 所示。

我们利用信号发生器作为时钟信号源，选择方波输出，频率为 1Hz，幅度为 5V。双击逻辑分析仪，单击 Clock 栏中的 Set..按钮，在 Clock setup 对话框中设置 Clock Rate 为 1Hz，同时，把 Pre-trigger Samples 即预采集数设为最小值 1，如图 11-39 所示。

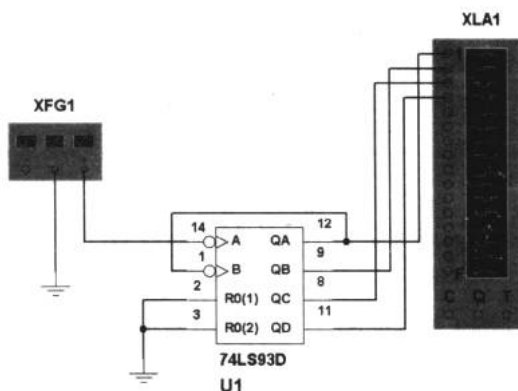


图 11-38 模 16 计数器

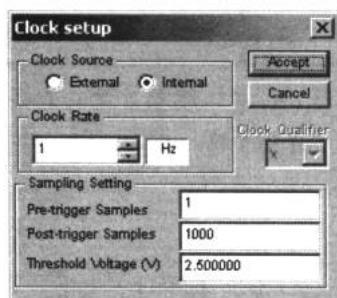


图 11-39 设置逻辑分析仪的时钟

然后打开开关，我们将从逻辑分析仪的 16 道逻辑记录轨的前 4 道上得到观察的结果，如图 11-40 所示。模 16 计数器的 4 位输出端由 0000 开始，每个时钟脉冲加 1，加至 1111 后又循环计数。

看来图 11-38 所示的电路确实完成了模 16 的计数工作。按照同样的分析方法，把  $Q_0$  与 CLK B 相连， $Q_1$  与 RO (2) 相连， $Q_3$  与 RO (1) 相连，可得到模 10 计数器的电路连接图，如图 11-41 所示。

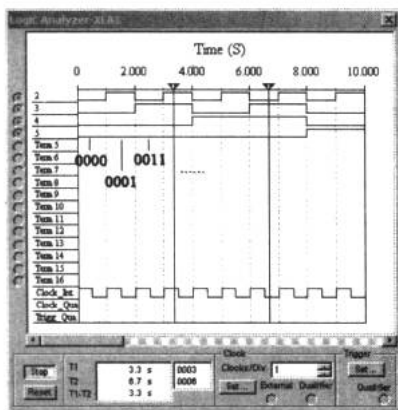


图 11-40 模 16 计数器时序图

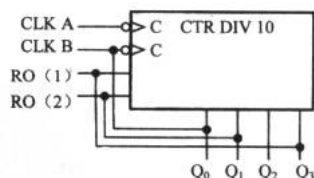


图 11-41 利用 74LS93 组成的模 10 计数器

### 11.3.2 同步计数器

有了异步计数器的基础，我们对同步计数器的理解就不难了。同步计数器也有 2-bit、3-bit 和 4-bit 同步计数器等几种基本形式。



### 1. 2-bit 同步计数器

图 11-42 所示为这种计数器的逻辑结构图。同步计数器与异步计数器最大的不同点在于不同级的触发器的时钟信号是同源的。

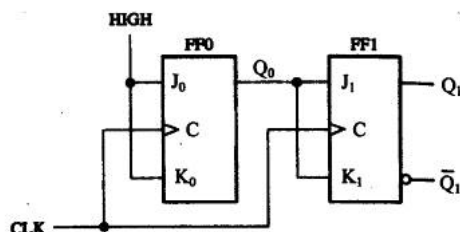


图 11-42 2-bit 同步计数器

对图 11-43 所示的 2-bit 同步计数器的时序进行分析：假设两个触发器都初始在 0 状态，即触发器被置 0，则在第一个上升沿加到 CLK 端时，触发器 FF0 翻转， $Q_0$  输出高电平。由于 FF1 的 J、K 控制端均与  $Q_0$  连接，所以在第一个上升沿到来之际，FF1 的 J、K 均为低电平，故而 FF1 不翻转。当第二个上升沿到来时，FF0 再次翻转我们并不奇怪，但这个翻转比时钟信号的上升沿到来要稍稍晚一些，因为任何电路在信号处理过程中总存在着时延问题。在第二个上升沿到来之际的很短时间里，FF1 的控制端 J、K 仍然随着  $Q_0$  呈现高电平，于是 FF1 翻转， $Q_1$  出现高电平。以后的翻转变化的分析方法类似。如果我们放大上升沿 2 时刻的时序图就会得到如图 11-44 所示的微小变化。

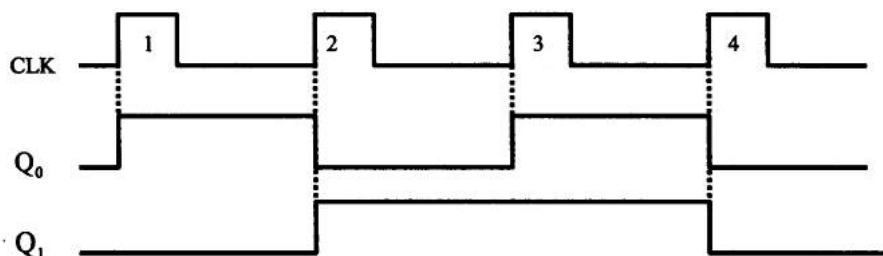


图 11-43 2-bit 同步计数器的时序图



图 11-44 上升沿 2 时刻发生了什么

## 2. 3-bit 同步计数器

图 11-45 所示为一个 3-bit 同步计数器。由于  $J_0$  和  $K_0$  接高电平，于是  $Q_0$  随着每个时钟脉冲进行高低电平的转换；因为  $J_1$  和  $K_1$  与  $Q_0$  相连，所以  $Q_1$  会在每次  $Q_0$  为 1 时进行翻转。由于与门的作用，触发器 FF2 只会当  $Q_0$  和  $Q_1$  同为 1 时翻转。于是，我们得到表 11-6 所示的 3-bit 同步计数器真值表。

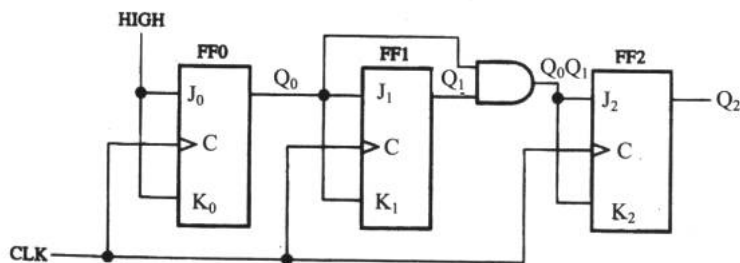


图 11-45 3-bit 同步计数器

表 11-6 3-bit 同步计数器真值表

时钟脉冲	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
一开始	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8 (循环)	0	0	0

## 3. 4-bit 同步计数器——74HC163

74HC163 是一种 4-bit 同步计数器芯片。图 11-46 所示为 74HC163 的引脚说明。读者可以根据图 11-47 所示的这个复杂的时序图连接一个电路来观察 74HC163 的工作过程。

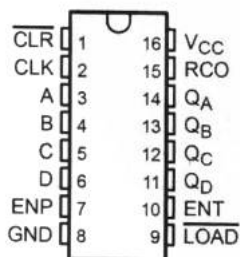


图 11-46 74HC163 的引脚图



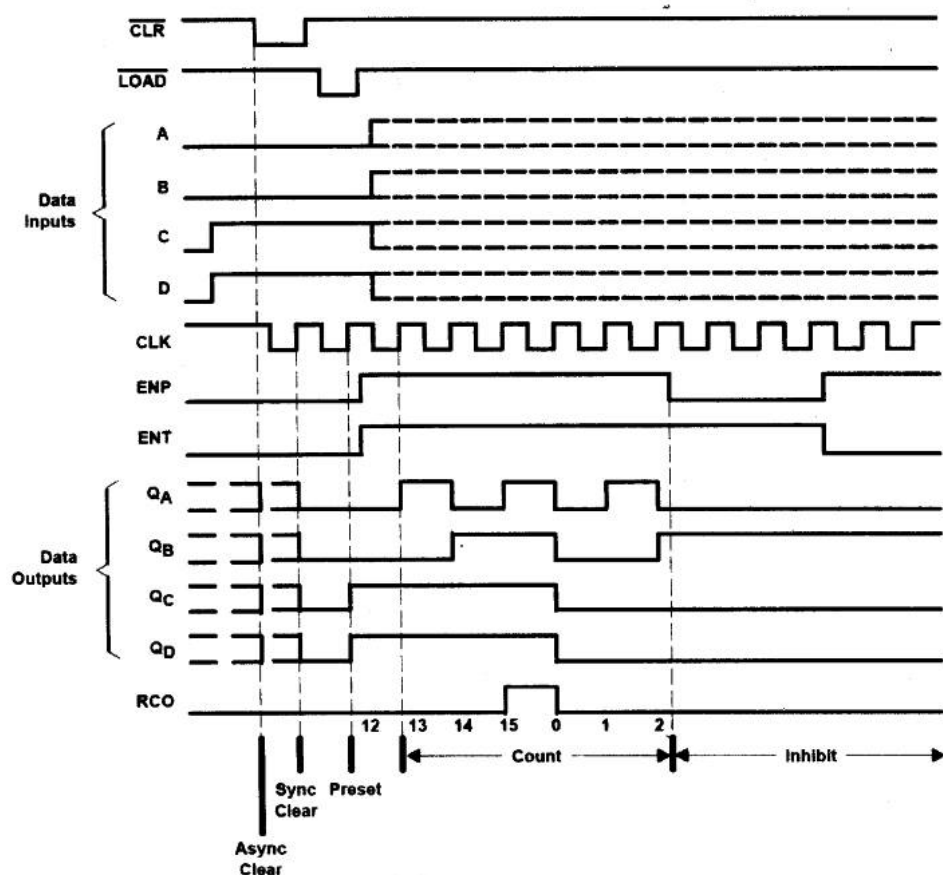


图 11-47 74HC163 的时序图

#### 4. 同步前/后向计数器

话题到现在，已经介绍了不少常用的计数器。读者可能会问计数器难道只能进行加 1 的运算吗？如果电路需要“-1”计数怎么办呢？前/后向计数器 74LS190 就是一种能“加”能“减”的计数器，如图 11-48 所示。

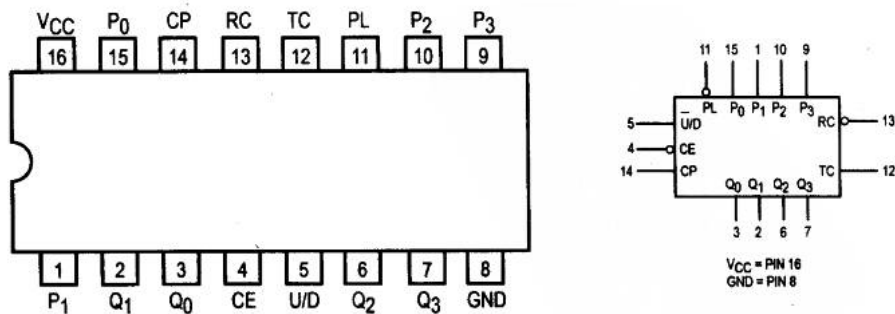


图 11-48 74LS190

通过上网查询或浏览 Multisim2001 的帮助文档, 我们就能掌握 74LS190 的使用方法。有一点值得在本章快要结束时说明一下: EWB5.0 是一款较 Multisim2001 早的电路仿真软件, 虽然版本较早, 编者个人以为 EWB 仍然有它独具特色的一面。图 11-49 所示为 EWB 和 Multisim2001 中关于 74LS190 这个器件的帮助文档, 从某种角度来看, EWB 的帮助文档似乎更清晰易懂。看来 IIT 公司在推出 Multisim2001 时, 感觉电路设计者的水平在 EWB 之后有了明显的提高, 于是将帮助文件模糊化了。所以, 我们可以在必要的时候参考 EWB 中的帮助文档。

74190 (Sync BCD up/down Counter)

Up/Down Counter truth table:

CTEN	D/U	CLK	LOAD	A	B	C	D	QA	QB	QC	QD	MAX/MIN	RCD
0	X	X	0	X	X	X	X	A	B	C	D	1*	2*
0	1	POS	1	X	X	X	X	Count Down				1*	2*
0	0	POS	1	X	X	X	X	Count Up				1*	2*
1	X	X	X	X	X	X	X	Qa0	Qb0	Qc0	Qd0	1*	2*

- 1\* = during the UP count MAX/MIN goes HIGH at count 9, during the DOWN count MAX/MIN goes HIGH at count 0.  
 - 2\* = during the UP count RCD goes LOW at count 9, during the DOWN count RCD goes LOW at count 0.

(a) EWB 中的帮助文档

74x190 (Sync BCD up/down Counter)

This device is a synchronous BCD, reversible up/down counter.  
 Counter TC and RC truth table:

INPUTS			TERMINAL COUNT STATE				OUTPUTS	
U/D	CE	CP	Q0	Q1	Q2	Q3	TC	RC
1	1	X	1	X	X	1	0	1
0	1	X	1	X	X	1	1	1
0	0		1	X	X	1	1	
0	1	X	0	0	0	0	0	1
1	1	X	0	0	0	0	1	1
1	0		0	0	0	0	1	

1 = High voltage level  
 0 = Low voltage level  
 X = Don't care  
 = Low pulse

(b) Multisim2001 中的帮助文档

图 11-49 74LS190 的帮助文档

至此我们对计数器的了解就结束了, 如果读者觉得它很有用或是想利用纯数字电路制作一个实用的电路, 可以参考附录 D 中的数字时钟设计制作一个电子时钟。

## 第 12 章 单片机就在我们身边

从这一章开始，我们将进入一个全新的话题——单片机。

### 12.1 身边的单片机

单片机在哪里 单片机的特点

#### 12.1.1 单片机在哪里

单片机就隐藏在我们日常生活的许多常用设备中，如计算机、电子表、计算器、游戏机、数码相机、MP3、遥控器等。我们可以试着打开一些设备的外壳来寻找单片机的身影，如图 12-1 所示。



(a) 鼠标中的单片机



(b) 遥控器中的单片机



(c) 键盘中的单片机



(d) 万年历中的单片机

图 12-1 单片机在这里

#### 12.1.2 单片机的特点

如果读者对微机的硬件结构有所了解，就会知道一台完整的计算机除了有 CPU 外，还有内存、硬盘、键盘、鼠标、接口、显示器和主板等设备。它们有机地组合在一起，实现特定的功能。单片机可以比作一个“简易”的 CPU，而单片机系统可以说是一个功能简单的“计算机”，如图 12-2 所示为一单片机系统电路板。

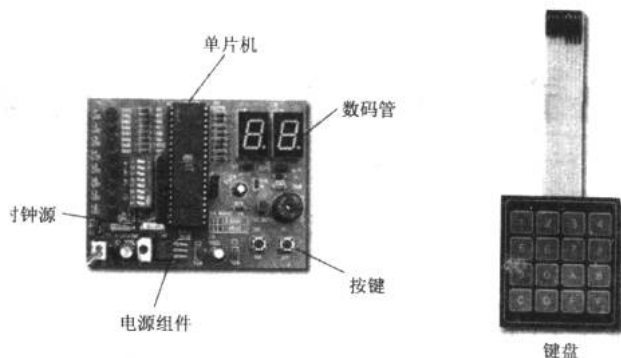


图 12-2 单片机系统电路板

单片机的系统没有类似计算机的显示器，若有显示的必要，会以发光二极管、七段数码管或液晶显示器（LCD）等代替。

单片机的系统里很少连接计算机的标准键盘，如果有需要，通常会以几个简单的按键或小键盘替代。

单片机系统没有硬盘这样大的存储器，更不会有 CD-ROM。如果有在掉电后保存数据的需要，可以在系统中添加 EEPROM（即 E<sup>2</sup>PROM，电可擦除只读存储器）或 Flash 模块。同时，可以使用外扩的数据存储器（RAM）模块来存储工作数据。

单片机没有专门的主板，通常是由根据要求所设计的电路板代替，我们可以自己设计并制作这种系统板。

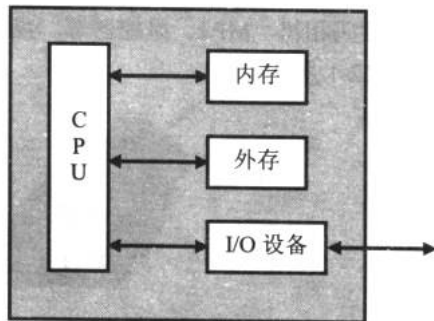


图 12-3 单片机系统

单片机系统虽然简单，但是它仍然是一个不折不扣的典型微机系统，它具有组成计算机系统的 3 个要素：CPU、内存与 I/O，如图 12-3 所示。

## 12.2 开发准备

单片机的发展 最简单单片机系统 开发工具 开发过程

### 12.2.1 单片机的发展

单片机的发展历史并不长，但其发展速度很快，大体经历了 4 个发展阶段：

（1）第一阶段是单片机初级阶段，时间在 1971—1974 年。

1971 年，Intel 公司首次宣布推出 4004 的 4 位微处理器。1974 年 12 月，仙童公司推出了 8 位单片机 F8，从此开创了单片机发展的初级阶段。

（2）第二阶段是低性能单片机阶段，时间在 1974—1978 年。



1976 年, Intel 公司推出了 MCS-48 单片机, 极大地促进了单片机的变革。1977 年, GI 公司推出了 PIC1650, 但这个阶段的单片机仍然处于低性能阶段。

(3) 第三阶段是高性能单片机阶段, 时间在 1978—1983 年。

1978 年, Zilog 公司推出 Z8 单片机, 该公司的 Z80 CPU 与 Z8 单片机指令类似, 曾在其后的单片机市场上流行多年。1980 年, Intel 公司在 MCS-48 基础上, 推出了 MCS-51, 它使单片机的应用跃上了一个新台阶。此后, 各公司的 8 位单片机迅速发展起来。

(4) 第四阶段是单片机的发展、巩固、提高阶段, 时间从 1983 年到现在。

1983 年, Intel 公司开始推出 MCS-96 系列 16 位单片机。1988 年, Intel 公司又推出了 MCS-96 系列中的 8090/8398/8798 单片机, 使 MCS-96 系列单片机的应用更为广泛。20 世纪 90 年代, 是单片机制造业大发展的时期, 这个时期的 Motorola、Intel、ATMEL、TI、三菱、日立、飞利浦、LG 等公司也开发了一大批性能优越的单片机, 极大地推动了单片机的应用。近年来, 又有不少新型的单片机涌现出来, 出现了单片机市场丰富多彩的局面。

我们在本书单片机部分的学习, 采用 ATMEL 公司的 AT89C51 型单片机为例。如图 12-4 所示是 ATMEL AT89C51 的外观, 图示为 DIP 和 PLCC 的封装形式。



(a) DIP



(b) PLCC

图 12-4 ATMEL AT89C51 外观

## 12.2.2 最简单片机系统

### 1. 单片机的内部结构

我们可能会从图 12-4 所示感觉单片机很像集成电路, 如果非把它看成集成电路也未尝不可。如图 12-5 所示是 89C51 单片机的几种封装的引脚图。

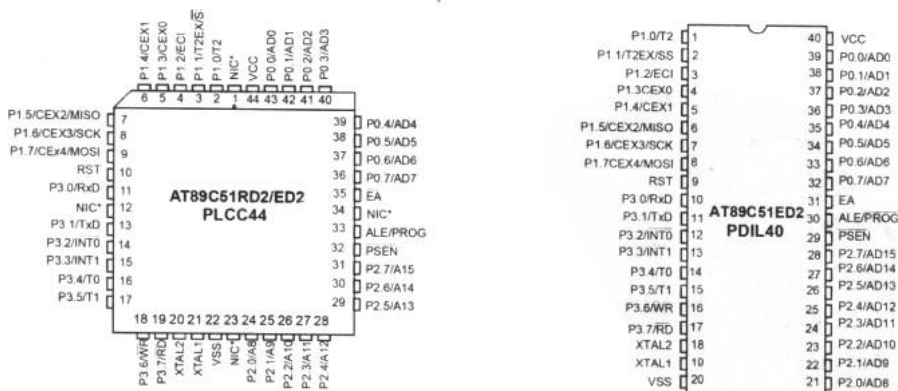
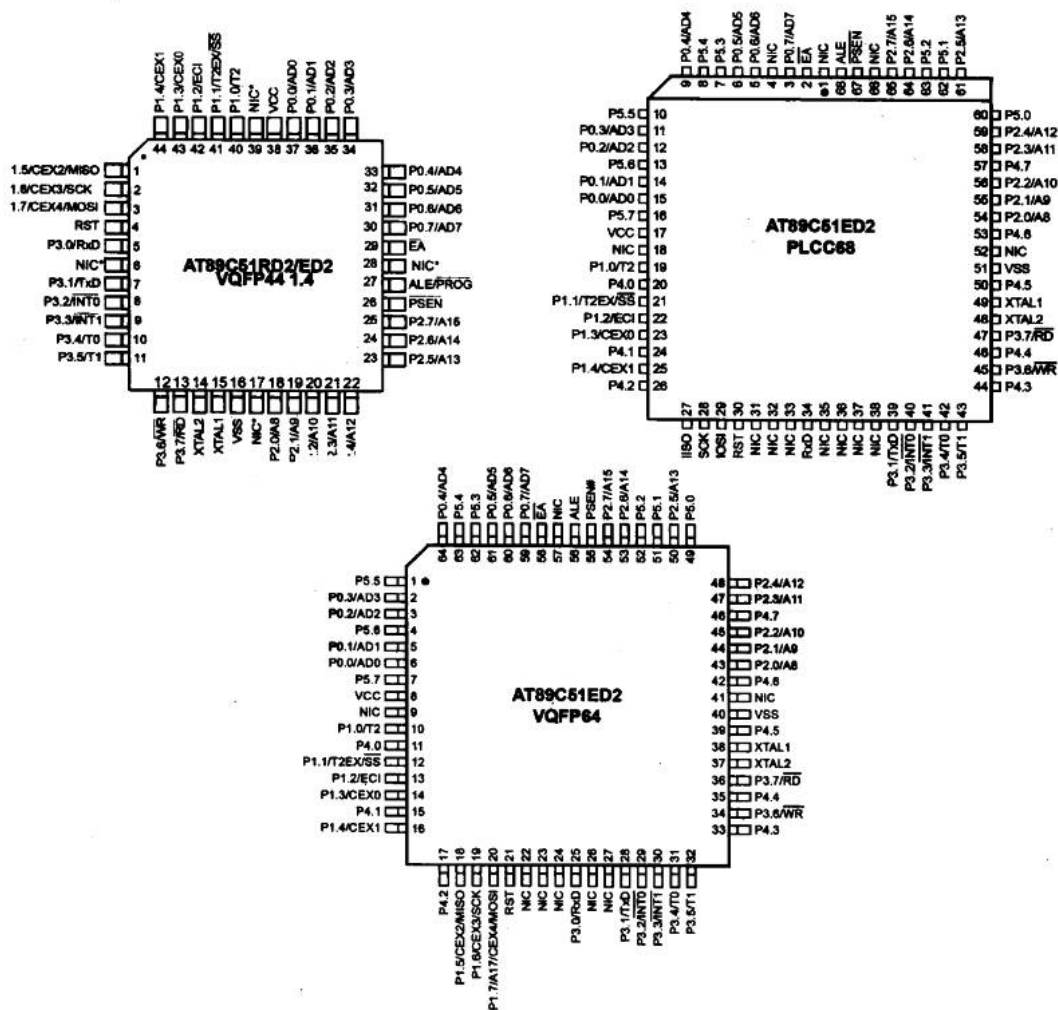


图 12-5 89C51 单片机封装图



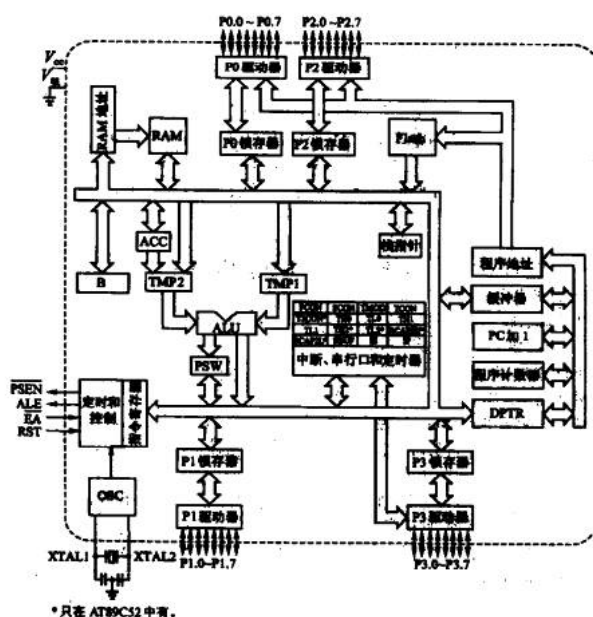


图 12-6 AT89C51 单片机的结构框图

(1) 供电 (+V<sub>cc</sub>, GND)

40 管脚和 20 管脚分别为电源端和接地端。AT89C51 与 TTL 数字集成电路一样，都采用单 5V 供电。

## (2) 时钟信号 (XTAL1、XTAL2)

还记得前面我们谈过的晶振吗？单片机的 XTAL1 (18 管脚) 和 XTAL2 (19 管脚) 接外部晶振，晶振的频率决定了该系统的时钟频率。比如晶振频率选择 12MHz，那么单片机工作的频率就是 12MHz。电容 C1、C2 可选取 20~40pF 的。除了如图 12-8 所示的内部时钟外，还可以利用外部信号源向单片机提供时钟信号，这种方法在本书中不涉及。

## (3) 复位 (RST)

第 9 管脚是 AT89C51 的复位端。复位端与计算机上的 RESET 键功能很相似，当应用程序停止

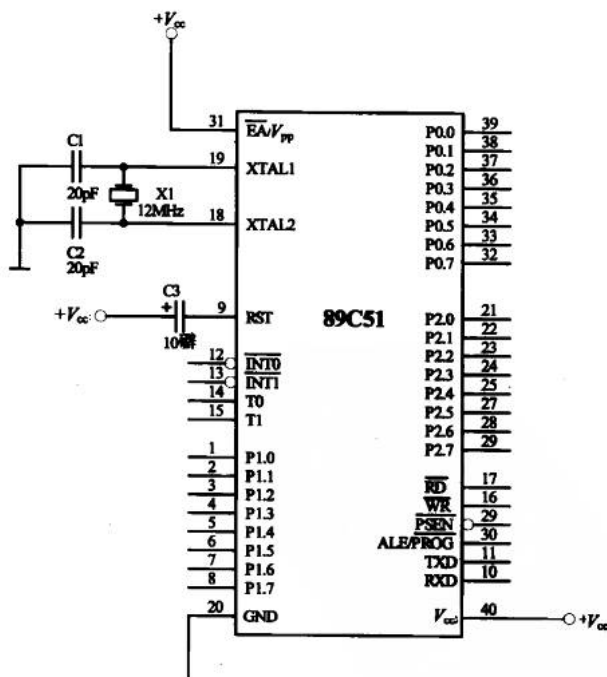


图 12-7 最简系统图

响应或死机时，只要按一下复位键，计算机就会重新启动。单片机上的复位和这个过程相似，无论单片机在执行什么程序，如果触发复位就会使其回到程序的起始地址进行执行。

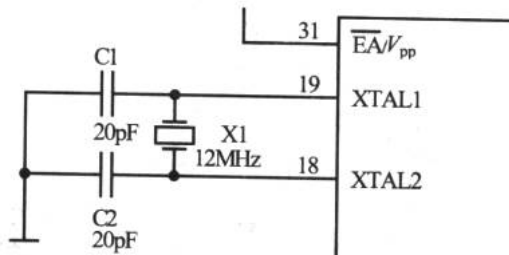


图 12-8 内部时钟

最简单的复位电路就是在 RST 端与  $+V_{cc}$  之间串联一个  $10\mu\text{F}$  电容，当单片机上电时，电容两端没有储存电荷，视同短路，所以 RST 维持在高电平上，当电容开始充电，使 RST 逐渐降低到低电平，此时系统就开始工作了。

根据单片机的复位时间要求，只使用一个电容的复位电路可靠性不高，所以图 12-9 所示是两种较好的复位电路。其中，图 12-9 (b) 的按钮开关 S 用作手动复位时使用。

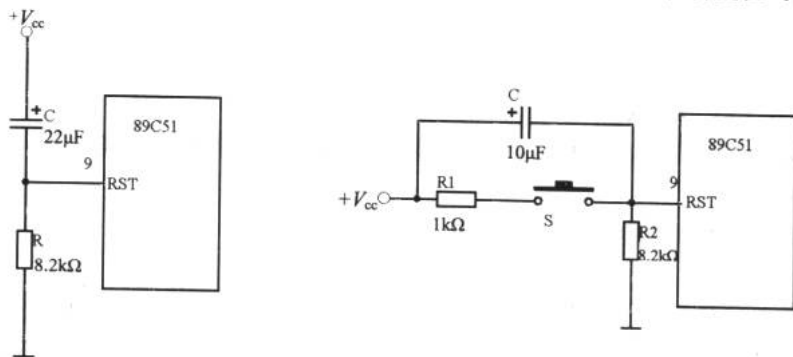


图 12-9 两种常用的复位电路

#### (4) 外部访问允许端 ( $\overline{\text{EA}}/V_{pp}$ )

除了电源、时钟和复位外，在最简系统中还有一个值得注意的地方，那就是第 31 管脚接高电平。这个管脚叫外部访问允许端。如果它接高电平，单片机则执行内部程序存储器中的程序；如果它接低电平，则访问的是外部程序存储器（0000H~FFFFH）。由于在最简系统中没有外接存储器，所以将  $\overline{\text{EA}}/V_{pp}$  接高电平。

### 12.2.3 开发工具

#### 1. 仿真机与编程器

进行单片机系统开发之前，我们需要两台开发仪器，一个叫仿真机，另一个叫编程器，





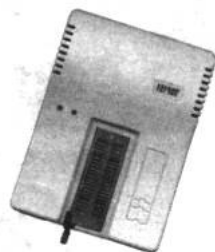
如图 12-10 所示。

如果读者立志进行单片机系统开发,恐怕这两样东西不可或缺。仿真机的价格从 800~6000 元不等;编程器则从 100~8000 元不等。对于初学者来说,不需要追求高价格的产品。高价位的产品应用于大规模生产,在实验室条件下,尽量使两者价格之和在 1200~2000 元为宜。

选购仿真机和编程器时应该注意需要仿真的单片机型号,如本书中以 89C51 为例。除了 51 单片机外,还有 AVR、PIC 等许多单片机,在选购开发工具时,要确定仿真和编程的对象是什么;另外,需要注意是否为正规厂家的产品,对售后质量的保证和技术支持是很重要的,最好选择大厂家的产品。



(a) InsightSE-52 仿真机



(b) Top151 编程器

图 12-10 仿真机和编程器

## 2. 自制仿真机与编程器

除了选购成品的仿真机和编程器外,许多单片机“大虾”(行业术语,专指单片机高手)还设计并自制了仿真机和编程器。如果读者有兴趣,也可以自制一套单片机的开发工具。

### (1) 仿真机

图 12-11 和图 12-12 所示分别为自制仿真机的电路图和成品图,读者还可以上网找到更多关于自制的资料。

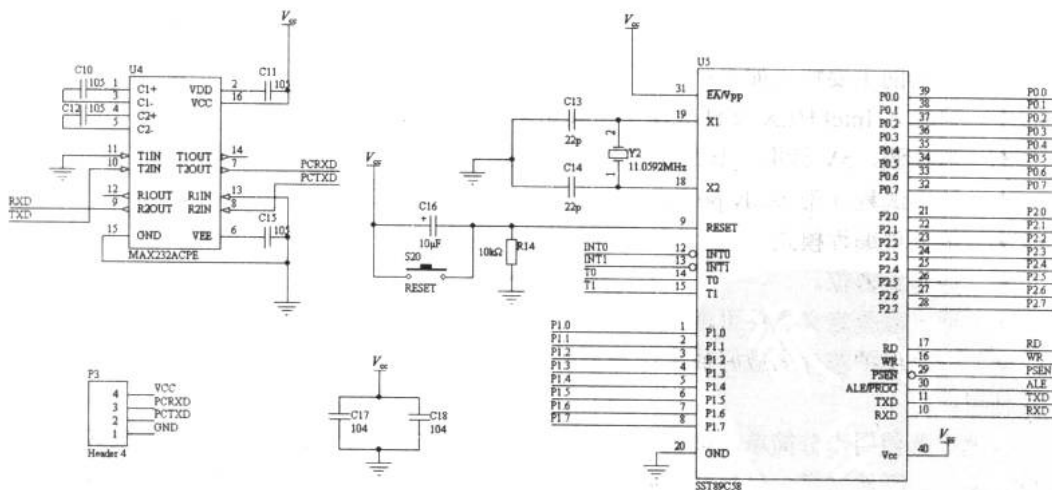


图 12-11 自制仿真机电路图

### (2) 编程器

比起仿真机,编程器更适合于自制。以下是一个编程器自制的实例,以供参考。



图 12-13 所示是一款由德国的 Peter Dannegger 设计的 51 编程器，成本只需要几十元，这个编程器连接在计算机的串口上，编程器从计算机接收数据。编程软件能够运行在 DOS 或 Windows 操作系统下。

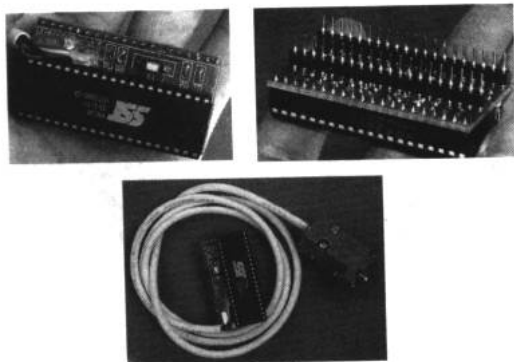


图 12-12 自制仿真机成品图

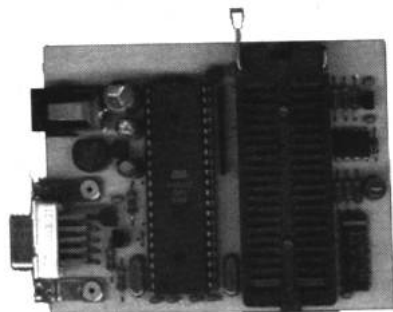


图 12-13 自制编程器

该编程器支持以下器件的编程：

- ✦ AT89C51 / AT89C52
- ✦ AT89S8252 / AT89S53
- ✦ AT89C1051 / AT89C2051 / AT89C4051
- ✦ AVR: AT90S1200 / AT90S2313
- ✦ AVR: AT90S2343 / ATTINY12
- ✦ AVR: ATTINY15L
- ✦ I2C-EEPROM: 24C02, 24C04, 24C08, 24C16, 24C32, 24C64, 24C128, 24C256, 24C512

该编程器的主要特点如下：

- ✦ 可输入 Intel HEX 文件（BIN 格式可转换）。
- ✦ 自检测，5V 读取，如果加密，有出错提示。
- ✦ 快速编程（带 ready polling）。
- ✦ 批处理编程模式。
- ✦ 烧写加密位。
- ✦ 通过修改定义文件可增加编程单片机种类（PC 程序不能修改）。
- ✦ 充分保护芯片未放好或未选择型号。

使用：

该编程器使用十分简单。批处理文件 proflash.bat 在生成 HEX 批处理编程模式之后可以自动调用。既然这样，目标元件必须在编程之前放置在编程器中。或者将 uniprogram.ini 与 uniprogram.exe 放在同一个目录下，依照提示步骤操作。对 AVR 器件，FLASH 和 EEPROM 一起写入，如果只给出一个文件名，用于 EEPROM hex 文件的第二个文件名将通过转换扩展名.eep 来建立，用户也可给出两个不同的文件名。用逗号可定义一个或两个文件名空缺。选择器件可以自动选择，也可手动选择。



该编程器还有一些其他特征，如下：

- ✦ 成功编程后给出提示信息。
- ✦ 内置病毒检查。
- ✦ 波特率检测必须给出一个范围，例如 22800-115200 。
- ✦ 选择器件可以给出数字（输入定义文件）或型号（例如 89C51）。
- ✦ 有一个分开的批处理文件用于编程 I2C-EEPROM，不能自动检测。编程只能用于单字节模式，像 24C512 需要较长时间。

该编程器的电路图及 PCB 如图 12-14、图 12-15 和图 12-16 所示。

以下文件读者可与编者通过 E-mail（EEdesign@163.com）联系索取：编程器软件 Unipro.exe for MSDOS3.3 until Windows9x、批处理模式编程和设备定义文件（Proflash.bat 文件）、I2C-EEPROM 批处理文件（P24cxx.bat 文件）、通信协议（Protocol.txt）。

#### 12.2.4 开发过程

单片机系统的开发过程一般遵循图 12-17 所示的流程进行。

我们将会在下一章开始用实例对单片机系统开发的过程进行讲解，其中包括仿真机的使用、编程器的使用和汇编语言的编写等。由于在前面我们已经掌握了电路板设计制作的常识，所以以后将忽略对电路图的分析和电路板制作的说明。



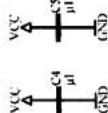


图 12-14 电路图

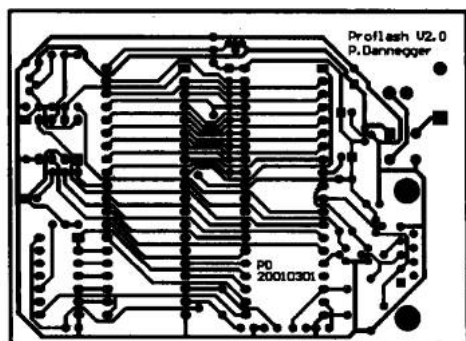


图 12-15 单面板 PCB 底层图

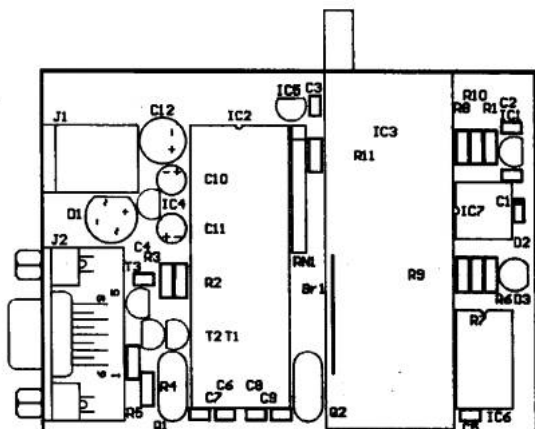


图 12-16 单面板 PCB 元件图

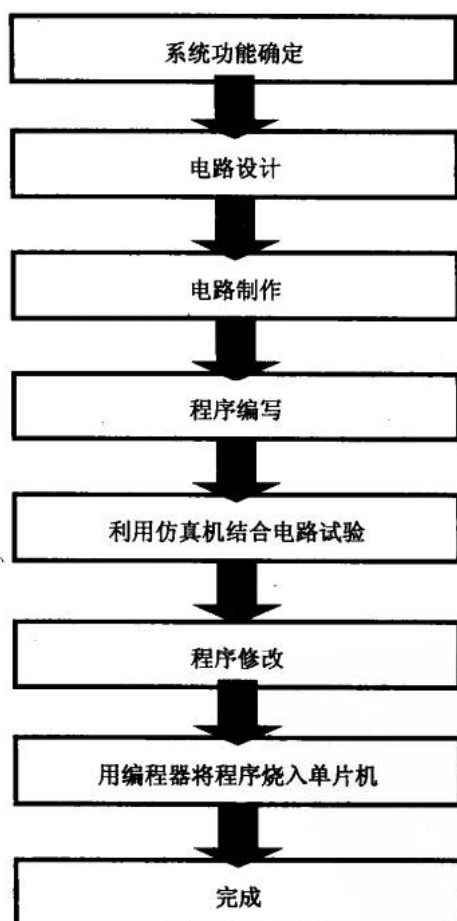


图 12-17 单片机系统的一般开发过程

## 第 13 章 单片机和 LED

从这一章起，我们开始进入单片机的全面学习。

LED 可谓是一个最简单的“显示器”，亮与灭构成了它的显示状态。LED 是单片机系统中最常用的指示器件。

### 13.1 点亮一个 LED

---

功能确定 电路设计 程序编写 利用仿真机结合电路试验 程序修改  
用编程器将程序烧入单片机

---

这一节介绍一个简单单片机系统开发的过程：功能确定→电路设计→程序编写→利用仿真机结合电路试验→程序修改→用编程器将程序烧入单片机。

任何单片机系统的开发，都应该遵循这样的过程。从一开始，形成一个有条理、有步骤的系统设计过程的概念是很重要的。

#### 13.1.1 功能确定

##### 1. 任务

确定系统任务是一个十分重要的环节。在开发前必须要清楚系统到底要实现什么功能，然后才能根据这个明确的目的设计硬件电路和程序。

在本节的“点亮一个 LED”任务中，要求实现两个十分简单的功能：第一，当单片机接通电源后与单片机某一 I/O 口连接的 LED 发光；第二，连接一个按键，当按下该按键后，LED 闪烁 5 次后继续发光。

##### 2. 解释一

LED 与单片机的某一 I/O 口连接，这样才能实现单片机对它的控制。那么什么是 I/O 口？如图 13-1 所示，我们看到 89C51 的管脚 1~8 分别标注 P1.0~P1.7；管脚 10~17 为 P3.0~P3.7；管脚 21~28 为 P2.0~P2.7；管脚 32~39 为 P0.7~P0.0。

P0、P1、P2 和 P3 这 4 组（每组 8 个）端口的结构称为单片机的 I/O 口。I/O 就是 Input/Output 的意思，可见它们具有输入、输出双重功能，所以又叫单片机的双向 I/O 端口。

每个端口都由锁存器、输出驱动器和输入缓冲器组成，除了 P0 口外，其余 I/O 口均有内置的上拉电阻，如图 13-2 所示。当单片机控制系统与外部设备交换信息时，都是通过端口锁存器进行的。4 个 I/O 端口都可作为输入输出使用，其中 P0 口和 P2 口还常用于对外部存储器的访问。P3 口具有双重功能，它除了可用作普通的 I/O 口外，还可以提供其他



的功能, 如表 13-1 所示。

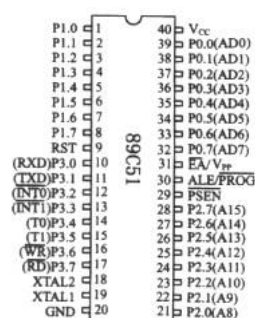


图 13-1 单片机的 I/O 口

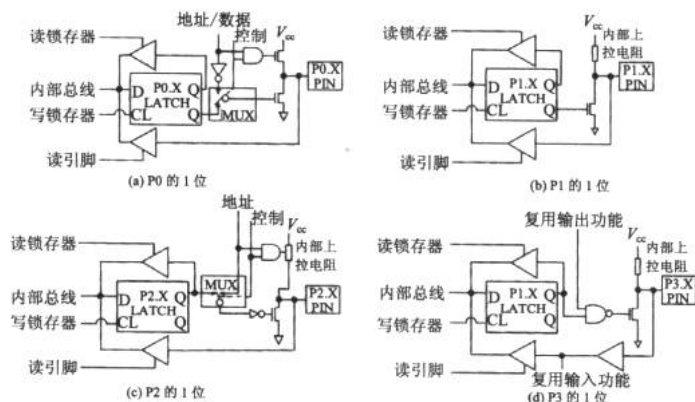


图 13-2 I/O 口结构

### 3. 解释二

关于设计要求的第二点, 就是利用按键控制 LED。一旦按下连接在单片机系统中的按键, LED 就闪烁 5 次, 然后恢复正常状态。

整个过程为: 当单片机上电复位后, LED 就被点亮。如果不去按按键, LED 就维持在一个稳定的工作状态下。当按键按下, 这个工作状态被打乱, 而进行了一个新的工作状态——LED 闪烁 5 次。这个新的工作状态由按键通知单片机, 然后由单片机作出改变工作状态的决定。

表 13-1 中, 有两个外部中断口 P3.2 和 P3.3。是不是能利用其中一个端口来实现设计的功能呢? 我们将在下一小节中得到答案。

表 13-1 P3 口的复用功能

端口管脚	复用功能
P3.0	RXD (串行接收端)
P3.1	TXD (串行发送端)
P3.2	$\overline{\text{INT0}}$ (外部中断输入一)
P3.3	$\overline{\text{INT1}}$ (外部中断输入二)
P3.4	T0 (定时器 T0 外部输入)
P3.5	T1 (定时器 T1 外部输入)
P3.6	$\overline{\text{WR}}$ (外部数据存储器写脉冲输出)
P3.7	$\overline{\text{RD}}$ (外部数据存储器读脉冲输出)

## 13.1.2 电路设计

### 1. 设计原则

图 13-3 所示为一个最简的单片机系统。任何复杂的单片机系统电路都是在这个基础上

通过添加模块设计出来的。

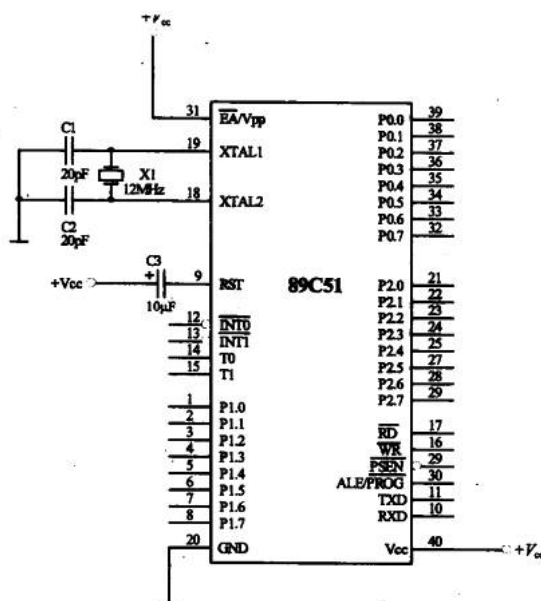


图 13-3 单片机的最简系统

## 2. 添加任务模块

根据任务要求，需要添加一个 LED 和一个按键。图 13-4 所示为本任务的电路图。

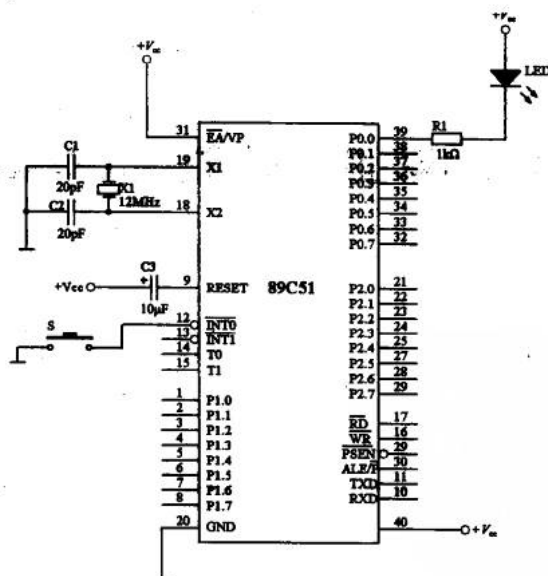


图 13-4 “点亮一个 LED” 任务的电路图

通过前面的学习，我们知道当加到 LED 两端的电压差超出其导通压降时开始工作，





LED 的导通压降一般为 1.7V~1.9V。此外，工作电流也是 LED 工作的条件。

为什么要在二极管上串联一个电阻呢？这个电阻的作用在于限制通过二极管的电流，从而达到减少功耗或者满足端口对最大电流的限制。

一般二极管的点亮电流为 5mA~10mA。在 5V 电压的驱动时，通过 1kΩ 电阻的分压，电流大致为 3mA~5mA。当然为了更亮一些，可以减小电阻值，但是二极管的电流不要超出单片机的 I/O 口的最大电流。

按键 S 实际上决定了单片机的  $\overline{\text{INT0}}$  是否与地线短接。我们看到  $\overline{\text{INT0}}$ 、 $\overline{\text{INT1}}$  和  $\overline{\text{PSEN}}$  端都有一个小泡泡，这说明这些管脚是低电平使能的（低电平有效的）。所以触发中断的条件是  $\overline{\text{INT0}}$  接地，这就是按键设计的原始思路。

### 13.1.3 程序编写

#### 1. LED 部分

根据上一小节我们对 LED 发光的条件分析并结合电路图，可以设想在 P0.0 脚输出一个持续的低电平就能使 LED 发光。那么这个低电平怎么才会产生呢？通过程序来控制。

还记得编程器吗？它的作用就是把设计好的程序烧入单片机中。一旦单片机上电后就会执行烧入的程序。所以，在单片机中写入“在 P0.0 脚输出低电平”这样的指令，这样就能达到我们的目的。

“在 P0.0 脚输出低电平”翻译成单片机的语言就是：

程序 13-1

```
MOV      P0, #00H      ;在 P0 口输出低电平
```

这就是我们写的第一条单片机语言——汇编语言。这是一种低级语言，是与硬件直接打交道的语言。

#### 2. 谈谈汇编语言

为了我们的话题能顺利地进行下去，下面先来谈谈汇编语言。

汇编语言是指令系统最基本的书写方式。指令由标号、助记符、目的操作数、源操作数及注释组成：

```
START:    MOV      P0,      #00H      ; 在 P0 口输出低电平
(标号: )  助记符    目的操作数,  源操作数 ; 注释
```

标号可以是以英文字母开头的字母、数字或某些特殊符号的序列，例如：“DELAY0:”。某条指令一旦赋予标号，则在其他指令的操作数中即可引用该标号作为引用地址。

助记符用来表达指令的操作功能。指令“MOV”相当于“Move”，功能是把源操作数“移向”目的操作数中。MOV P0, #00H 的意思是把数 00H 从 P0 口送出去。“00H”是一个十六进制数，表示成二进制为“00000000B”。这 8 个 0 从 P0 口输出就会使 P0.0~P0.7 呈现低电平，于是满足了 LED 点亮的条件。

分号“;”后是注释语句,用来提高程序的可读性和调试的方便,注释语句是不会被编译执行的。

如果只写上这条指令,则LED能亮多久?在晶振为12MHz的情况下,LED只能亮 $2\mu\text{s}$ 。这是为什么呢?MCS-51单片机的一个机器周期含有6个状态周期,而每个状态周期为2个振荡器周期,因此一个机器周期共有12个振荡器周期。如果晶振的频率为12MHz,则一个振荡器周期为 $1/12\mu\text{s}$ ,所以一个机器周期为 $1\mu\text{s}$ 。执行不同的指令会消耗不同的机器周期,“MOV P0, #00H”这条指令需要2个机器周期,所以耗时 $2\mu\text{s}$ , $2\mu\text{s}$ 一过,LED就会因程序的结束而熄灭。

为了达到长时间点亮LED的目的,我们必须告诉单片机重复执行这条指令。以下是完整的点灯程序:

程序 13-2

	ORG	00H	; 起始地址
START:			; 标号
	MOV	P0, #00H	; 输出至 P0
	JMP	START	; 跳回 START
	END		; 程序结束

以上这个简单的汇编程序是点亮这只LED的指令,为了便于理解我们在每条指令后加了注释。“ORG 00H”和“END”这两条指令是很多程序的开始和结束的标记,不要感觉奇怪。“JMP START”的意思就是跳回到标号“START”继续执行。这个程序是一个死循环,虽然能保证LED自程序开始执行一直点亮,但我们在程序设计时应该尽量避免死循环的出现。

### 13.1.4 利用仿真机结合电路试验

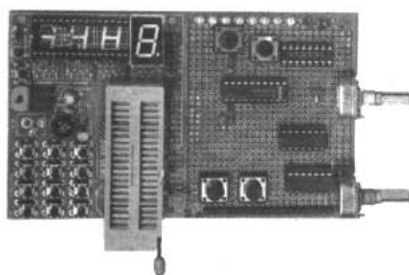
#### 1. 实验板

在学习单片机之初,我们可以选用单片机的专用实验板。这些实验板可以很方便地连接电路以供学习和调试。

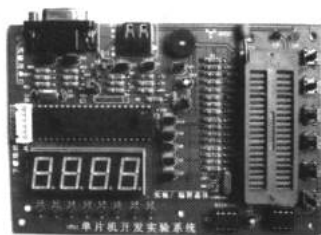
市场上的单片机实验板(也叫单片机开发板)种类较多,有针对基本实验的带按键的实验板,有针对串口通信实验的串口实验板,还有单片机控制步进电机的电机实验板等。使用实验板的好处是在其上已经焊接好了最简单单片机系统所需的电容和晶振等器件,有的还有LED、LCD和通信接口等,在调试系统过程中,方便随时改动。实验板附有电路原理图和使用方法,在使用时可以参考一下,图13-5所示为一些常用的单片机实验板。

#### 2. 开始仿真

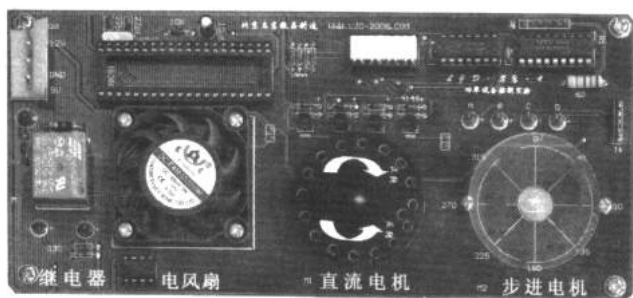
无论是使用自制的印刷电路板还是现成的实验板,在进行单片机系统开发时一个十分重要的环节就是仿真。前面介绍的Multisim2001进行的是软件仿真,接下来,我们将要在实验板上进行“软硬结合的仿真”。



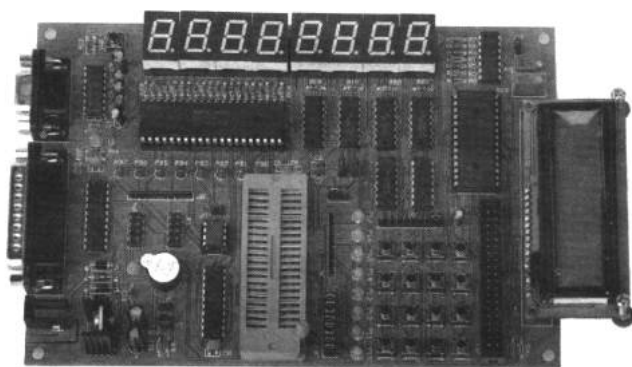
(a) 通用型



(b) 串口通信型



(c) 电机控制型



(d) 豪华型

图 13-5 几种单片机实验板

我们以 Insight SE-52 型仿真机结合 MedWin 仿真开发系统软件为例进行以后的话题。其他的仿真机和仿真软件与它的基本功能相同。

MedWin 是一款界面简洁的高性能单片机程序集成开发环境，集编辑、编译/汇编、在线及模拟调试为一体，Windows 风格的用户界面，支持 Franklin/Keil C 扩展 OMF 格式文件、支持所有变量类型及表达式，是一个较理想的 51 单片机开发工具。图 13-6 所示为 MedWin 集成开发环境窗口界面。该软件可从万利电子有限公司（南京）的网站上免费下载，网址为：<http://www.manley.com.cn>。

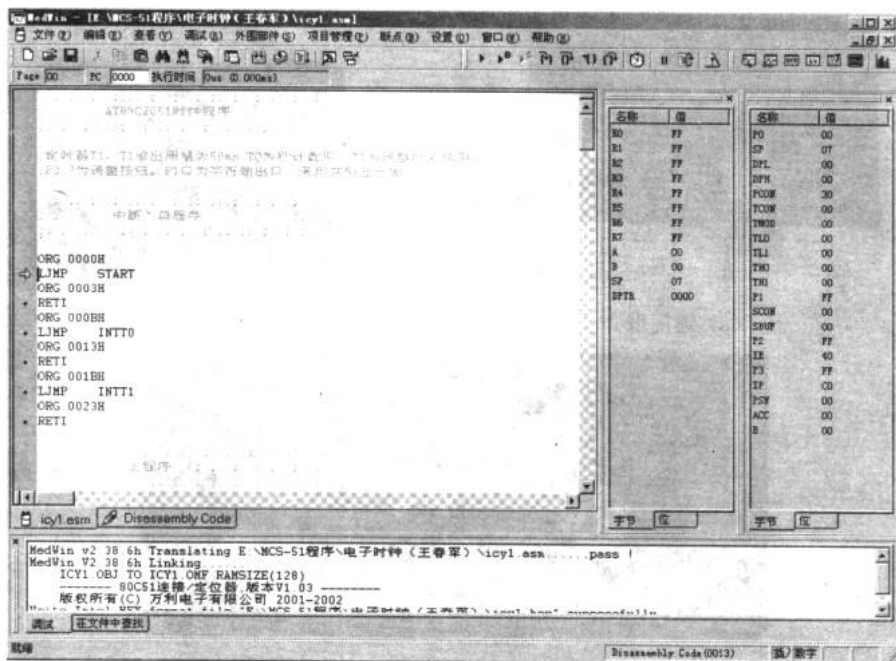



图 13-6 MedWin 集成开发环境窗口界面

至于如何安装、配置和使用仿真机及其软件可以参考仿真机附带的说明书。下面我们开始使用仿真机进行第一个任务的实验。

首先，接通仿真机电源，打开 MedWin，新建一个 LED.asm 文件，在其中输入程序 13-2 并编译。如果系统提示出错则根据提示检查程序，当编译通过后可将代码装入仿真机。这时在 MedWin 的调试窗口将出现如图 13-7 所示内容。



图 13-7 装入仿真机

这时，把仿真机的仿真头插入实验板的单片机插座中，然后单击  按钮，程序开始运行，如图 13-8 所示。如果电路连接和程序都没有问题，LED 就会被点亮，否则需要重新检查电路或程序。

我们利用仿真机完成了第一个任务的仿真工作。仿真机的仿真头相当于一个可以随时改写程序的单片机，这样一来我们可以随时对程序进行改写并在实验板上运行、调试并观察效果，这极大地提高了系统开发的效率。关于仿真机和仿真软件的更多功能可以参考产



品说明书。

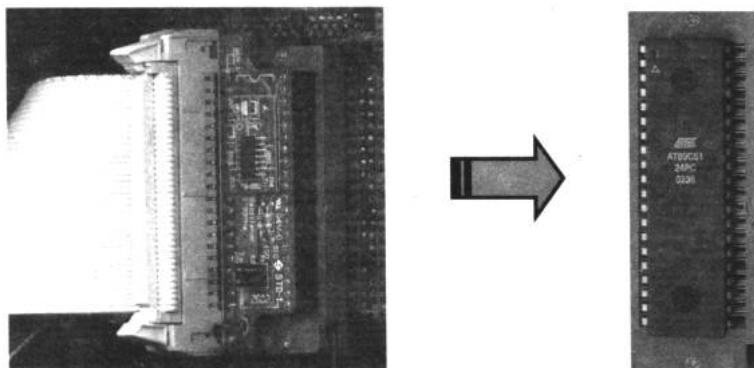


图 13-8 仿真机与单片机

### 13.1.5 程序修改

#### 1. 谈谈中断

在上一节，我们完成了点亮一只 LED 的任务，可以说第一个实验已经完成了一半。接下来看看如何实现按下按键后 LED 闪烁 5 次的任务。

前面已经提到有可能使用中断来完成这个任务，下面就先来看看中断。

##### (1) 为何要有中断

有人说：学会写中断程序才算是程序对微机有充分的了解。其实我们日常使用的 PC 机就是大量使用中断的一个很好的例子，只要我们一开机，每秒就有数十个中断信号源源不断地传送到 CPU 上，请求 CPU 进行服务处理，只有妥善地处理这些要求，才能使 PC 正常运行。

##### (2) 51 单片机的中断使能寄存器 IE

越了解 51 单片机的中断则越能有效地控制程序，并且可以减少程序开发及排错的时间。51 单片机有 5 个中断源，即 2 个外部中断（ $\overline{\text{INT0}}$ 、 $\overline{\text{INT1}}$ ）、2 个定时器中断（TIMER0、TIMER1）和 1 个串口中断（UART）。51 单片机的内部提供了一个中断使能寄存器 IE，这是一个 8 位的特殊功能寄存器，其每位对应的功能如下：

EA	无效位	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0
----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----

- ✦ EA：如果 EA=0 时，屏蔽所有的中断，也就是说任何中断都不起作用；如果 EA=1，则各中断由各个中断位加以设定。
- ✦ ET2：ET2=1 时，使能 TIMER2 溢出或捕获中断（8052 单片机才有此功能）。
- ✦ ES：ES=1 时，使能串口的中断。
- ✦ ET1：ET1=1 时，使能 TIMER1 的中断。
- ✦ EX1：EX1=1 时，使能外部 INT1 的中断。
- ✦ ET0：ET0=1 时，使能 TIMER0 的中断。



✦ EX0: EX0=1 时, 使能外部 INT0 的中断。

根据前面设计的按钮控制电路, 如图 13-9 所示。按键连接到了  $\overline{\text{INT0}}$  上, 所以使用的是外部中断  $\overline{\text{INT0}}$ 。

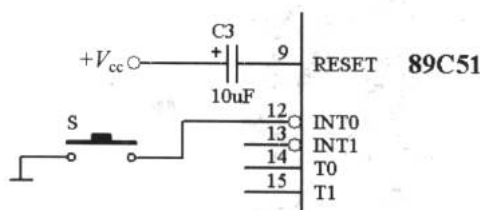


图 13-9 中断

于是告诉单片机要打开外部中断  $\overline{\text{INT0}}$ , 以下是指令:

程序 13-3

```
MOV    IE, #10000001B    ;  $\overline{\text{INT0}}$  中断使能
```

程序 13-3 是把立即数“10000001”送入特殊功能寄存器 IE 中, 则此时 IE 的最高位 EA 和最低位 EX0 被置 1, 则外部中断  $\overline{\text{INT0}}$  被打开, 51 单片机接收到 IE 中的命令后, 一旦接收了中断命令就会跳至某一特定地址去执行其中的中断子程序, 这些地址也就是 51 单片机的 5 个中断源的中断子程序的起始地址, 表 13-2 所示为 51 单片机的中断矢量表。

表 13-2 中断矢量表

中 断 源	中断标志位	矢量地址
INT0	IE0	0003H
TIMER0	TF0	000BH
INT1	IE1	0013H
TIMER1	TF1	001BH
UART	TI/RI	0023H

### (3) 51 单片机的中断优先级控制寄存器 IP

除了中断使能寄存器 IE 外, 还有一个重要的特殊功能寄存器 IP。IP 是一个中断优先级控制寄存器。既然 51 单片机可以开放 5 个不同的中断, 如果其中的两个或两个以上中断同时提出服务请求时, 那单片机会响应哪一个呢? 这就需要通过 IP 的设定来确定。以下是 IP 的 8 位对应功能。

无效位	无效位	PT2	PS	PT1	PX1	PT0	PX0
-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----

- ✦ PT2: 定义 TIMER2 的优先权 (8052 单片机才有此功能)。
- ✦ PS: 定义串口的优先权。
- ✦ PT1: 定义 TIMER1 的优先权。
- ✦ PX1: 定义外部  $\overline{\text{INT1}}$  的优先权。
- ✦ PT0: 定义 TIMER0 的优先权。



✦ PX0: 定义外部  $\overline{\text{INT0}}$  的优先权。

所以我们告诉单片机要优先打开外部中断  $\overline{\text{INT0}}$ 。指令如下:

程序 13-4

```
MOV      IP, #00000001B      ;  $\overline{\text{INT0}}$  中断使能优先
```

#### (4) 外部中断与 TCON

外部中断要求的方式有电平触发和下降沿触发两种, 由控制寄存器 TCON 内的 IT0 和 IT1 两个位来控制。TCON 寄存器各位功能对应如下:

TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- ✦ TF1: TIMER1 溢出标志位, 当 TIMER1 溢出时 TF1 会被设为 1; 当 CPU 执行中断子程序时, TF1 会自动清除为 0。
- ✦ TR1: TIMER1 的启动计时, 由软件设定, 1 为启动计时, 0 为停止计时。
- ✦ TF0: TIMER0 溢出标志位, 当 TIMER0 溢出时 TF0 会被设为 1; 当 CPU 执行中断子程序时, TF0 会自动清除为 0。
- ✦ TR0: TIMER0 的启动计时, 由软件设定, 1 为启动计时, 0 为停止计时。
- ✦ IE1: 外部  $\overline{\text{INT1}}$  中断标志位, 当产生中断时, 会设定 IE1 为 1。
- ✦ IT1:  $\overline{\text{INT1}}$  中断触发型态控制, IT1=0 为电平触发中断, IT1=1 为下降沿触发中断。
- ✦ IE0: 外部  $\overline{\text{INT0}}$  中断标志位, 当产生中断时, 会设定 IE0 为 1。
- ✦ IT0:  $\overline{\text{INT0}}$  中断触发型态控制, IT0=0 为电平触发中断, IT0=1 为下降沿触发中断。

通过设置 TCON 可以选择中断的触发方式, 这两种方式的解释如下:

解释一: 电平触发即 51 单片机每执行完一个指令都将  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  的信号读入 IE0/IE1, 因此 IE0/IE1 的中断请求信号随着  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  变化。如果送入  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  的中断请求信号时, 51 单片机未能即时检查到, 而  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  的信号也产生变化, IE0/IE1 的信号也发生变化, 这样就会漏掉  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  的中断要求。

解释二: 下降沿触发即只要检测到送至  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  上的信号由高电平变为低电平时, 中断请求标志位 IE0/IE1 就被设定为 1, 并且一直维持着 1, 直到此中断请求被接收为止, 且必须用软件来清除 IE0/IE1。

我们先使用电平触发方式初始化外部中断的方法来完成这一任务, 见程序 13-5。

程序 13-5

```
MOV      TCON, #00000000B      ;  $\overline{\text{INT0}}$  为电平触发
```

## 2. 谈谈延时

完成了中断的初始工作, 只能说完成了“按下按键后 LED 闪烁 5 次”任务的一大半工作。接下来看看闪烁是怎么做到的, 见程序 13-6。



程序 13-6

```

DELAY:
    MOV    R4, #20
D1:     MOV    R5, #248
        DJNZ   R5, $
        DJNZ   R4, D1
    
```

$2 + 2 \times 248 = 498$        $20 \times (498 + 2) + 2 = 10002$

程序 13-6 是一个延时 10ms 的程序。在标号“DELAY:”里，指令“MOV R4,#20”向 R4 寄存器中送入十进制数 20，此时 R4=20。指令“MOV R5,#248”向特殊功能寄存器 R5 里放入十进制数 248，“DJNZ R5,\$”的含义是将寄存器 R5 的内容减 1，不等于 0 则重新执行本行语句。“\$”是一个表示“本行”的符号。由于 DJNZ 执行时间为两个机器周期，所以执行完“DJNZ R5,\$”所耗 CPU 时间为  $2 \times 248$  个机器周期。加上前一条指令共花去  $2 + 2 \times 248 = 498$  个机器周期。“DJNZ R4, D1”的意思是将寄存器 R4 的内容减 1，不等于 0 则跳回标号 D1 处继续执行。由于 R4 预先装入了 20，所以这 4 条指令共花去了  $20 \times (498 + 2) + 2 = 10002$  个机器周期。如果使用的是 12MHz 的晶振，1 个机器周期为  $1\mu s$ ，则程序 13-6 所花的时间为  $10002 \text{ 个机器周期} \times 1\mu s = 10.002ms$ 。

假设我们让 LED 每次点亮 200ms，熄灭 200ms，这一部分的完整程序如下：

程序 13-7

```

ORG    00H
START:
    MOV    R2, #5           ; 闪烁 5 次
LOOP:
    MOV    P0, #0FEH        ; P0.0 输出低电平，LED 发光
    CALL   DELAY            ; 调用延时子程序
    MOV    P0, #0FFH        ; P0.0 输出高电平，LED 熄灭
    CALL   DELAY            ; 调用延时子程序
    DJNZ   R2, LOOP         ; 不到 5 次就跳回 LOOP 循环执行
    JMP    $               ; 停机
DELAY:
    MOV    R3, #20          ; 200ms
D1:
    MOV    R4, #20          ; 10ms
D2:
    MOV    R5, #248
    DJNZ   R5, $
    DJNZ   R4, D2
    DJNZ   R3, D1
    RET                    ; 子程序返回符
    
```

如果在实验板上运行程序 13-7，将会看到 LED 闪烁 5 次后熄灭。注意指令“CALL DELAY”，单片机执行到该语句时，将会跳转至以 DELAY 为标号的子程序段继续执行，





当执行至子程序段的“RET”时又跳回主程序往下执行，如图 13-10 所示为是一个形象的比喻。

### 3. 完成我们的任务

通过对中断和延时的学习，我们现在完全有能力完成第一个单片机系统的程序设计了，见程序 13-8。程序初始化阶段，设置主程序的入口地址“ORG 00H”和 INT0 中断子程序的入口地址“ORG 03H”。“START”是主程序段，其中前 3 行是设置 IE、IP 和 TCON 对中断的初始化。“SHINE”程序段是点亮 LED 的程序。“EXT0”是中断服务程序段。当按键被按下后，单片机被告知中断服务请求，系统则从“SHINE”的循环中跳出来，进入“EXT0”程序段中执行中断程序，完成闪烁 5 次任务后，由 RETI 指令告知单片机，中断程序执行完毕，返回主程序继续执行。

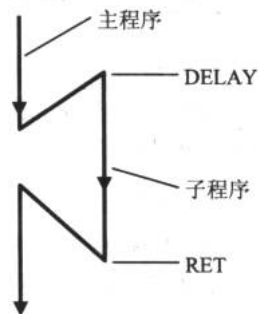


图 13-10 程序执行的顺序

程序 13-8

```

ORG      00H          ; 主程序起始地址
JMP      START        ; 跳到主程序 START
ORG      03H          ; INT0 中断子程序入口地址
JMP      EXT0         ; 中断子程序

START:
MOV      IE, #10000001B ; 外部中断 INT0 使能
MOV      IP, #00000001B ; INT0 中断优先
MOV      TCON, #00000001B ; INT0 为电平触发

SHINE:
MOV      P0, #0FEH     ; P0.0 输出低电平，LED 发光
JMP      SHINE         ; 持续发光

EXT0:
MOV      R2, #5        ; 闪烁 5 次

LOOP:
MOV      P0, #0FEH
CALL    DELAY
MOV      P0, #0FFH
CALL    DELAY
DJNZ    R2, LOOP
RETI                    ; 返回主程序符号

DELAY:
MOV      R3, #20
D1:
MOV      R4, #20
D2:
MOV      R5, #248
DJNZ    R5, $
DJNZ    R4, D2
DJNZ    R3, D1
RET                    ; 延时返回
END                    ; 结束

```

### 13.1.6 用编程器将程序烧入单片机

如果读者跟着动手实践到现在，就会对单片机系统的开发有一个感性的认识。

如果程序 13-8 顺利通过，并且在实验板上实现了预期的效果，接下来就可以把程序烧入单片机中，完成第一个单片机系统的开发工作。

#### 1. 编程器

编程器提供把程序烧入单片机的功能，连接好编程器电源和与计算机的通信线，把单片机插入插座中，如图 13-11 所示。在编程器附带的烧录软件中打开编译好的“.hex”或“.bin”文件，设置操作，就可以把程序烧入单片机中。关于烧录的过程可以参考具体的编程器的使用手册。图 13-12 所示为 TOP151 型通用编程器的附带烧录软件。

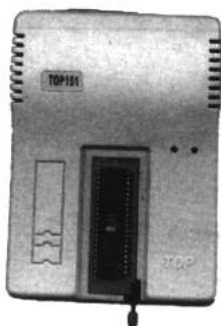


图 13-11 插入单片机

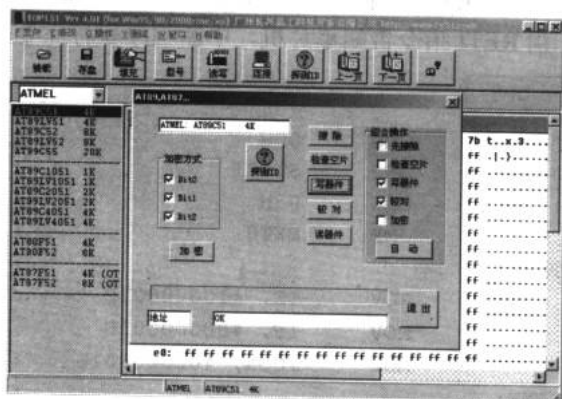


图 13-12 TOP151 通用编程器的附带软件

#### 2. 完成第一个单片机系统

烧好 51 单片机后，将仿真头从实验板上拔下，换上烧制好的单片机接通电源。如果前面的所有步骤都是正确的，那么我们的第一个单片机系统——“点亮一个 LED”就大功告成了。

## 13.2 MCS-51 基础知识详谈

### 8051 单片机功能方框图 存储器

Intel 公司在 20 世纪 80 年代初发布了用以取代先前功能简单的 8048 与 8049 微控制器的 MCS-51 系列单片机，其代表的芯片包括 8051、8031、8052 和 8032 等，我们统称为 MCS-51 单片机。这些芯片结合了传统 8 位 CPU 的诸多特点并将必要的 I/O 嵌入 CPU 中。除此之外，增加了足够的 ROM 及存储空间，使得单片机的线路变得非常简洁，单片机的设计工程师们恨不得用户只要加上石英晶体振荡器后单片机系统就可以正常工作。表 13-3 所示为 MCS-51 系列单片机的基本资料。



表 13-3 MCS-51 系列单片机

型号	片内 ROM	片内 RAM	片外 RAM	片外 ROM	计数器	频率 (MHz)	典型指令周期 ( $\mu\text{s}$ )
8051	4K	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
8751	4K	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
8031	—	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
8052AH	8K	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1
8752AH	8K	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1
8032AH	—	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1
80C51	4K	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
80C31	—	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
87C51	4K	128	64K	64K	$2 \times 16$	2-12	1
80C252	8K	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1
87C252	8K	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1
83C252	—	256	64K	64K	$3 \times 16$	2-12	1

### 13.1.7 单片机功能方框图

单从上一节的例子看, 51 单片机具有延时和中断的功能。那它还有什么其他的功能呢? 下面结合图 13-13 进行了解。

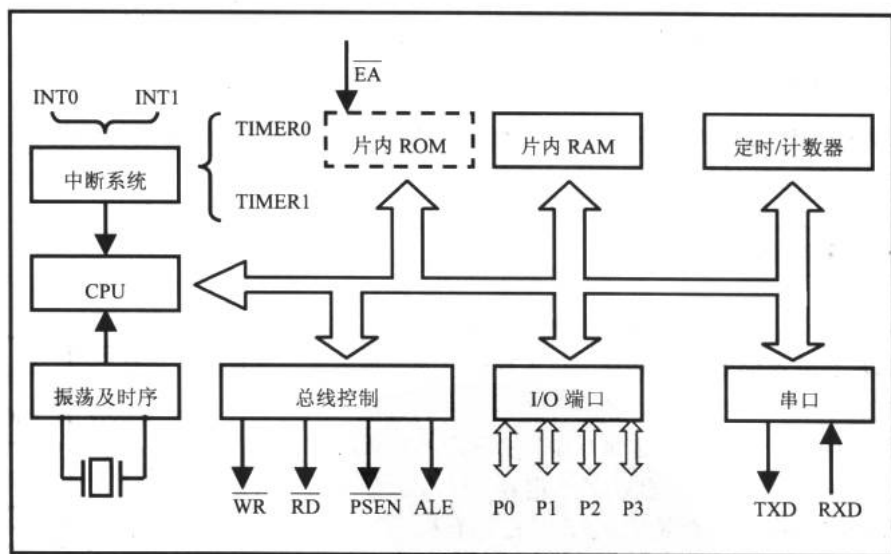


图 13-13 51 单片机内部方框图

#### 1. 振荡及时序单元 (OSC)

51 单片机内部有晶体振荡电路, 只要在外加上晶振, 即可产生频率非常稳定的振荡信号, 这个振荡信号是 51 单片机进行一切工作的时序源。

## 2. 片内 RAM (内部数据存储器)

当程序在运行时,有些数据是经常在变动的,例如 LED 的显示状态或显示值等,它会因 I/O 测量的结果而变动。这些值就暂时放置在此区域中,供其他程序进一步读取,这也代表此区域是可以随时读写的。8051 单片机提供 128 个字节可读写的数据存储单元,8052 单片机提供 256 个字节的数据存储单元,这个数据区域中有一段 16 个字节共 128 位的区域是可以进行位寻址的,MCS-51 系列单片机有相当强的位处理指令,可以妥善、有效地运用该数据存储器。

## 3. 片内 ROM (内部程序存储器)

这段区域用于存放我们写的程序。8051 单片机提供了 4096 个字节(4KB)的程序存储器,8052 则提供 8KB 的程序存储器,而 8031 和 8032 则不含此单元。片内 ROM 可以使 CPU 能够选择由内部程序存储器的程序区启动。

## 4. 定时/计数器 (Timer/Counter)

51 单片机有 2 个定时/计数器,而 52 则有 3 个定时/计数器,每个定时/计数器又有多种模式的选择,详细的功能稍后会有介绍。

## 5. 串口 (COM)

单片机可通过串口与外部的计算机或单片机等设备连接并交换信息,也可以通过此接口进行 I/O 的扩充。

## 6. I/O 端口

51 单片机有 4 个 I/O 端口,P0、P1、P2 和 P3,其中 P3 又具有双重功能。

## 7. 控制总线

当程序的空间超出单片机内部程序空间的限制时,会通过控制总线的控制端口向外部送出地址线信号和控制信号。

### 13.1.8 存储器

8051 单片机的存储器采用的是哈佛 (Harvard) 结构,即程序存储器和数据存储器截然分开,并各有自己的寻址方式、寻址空间和控制系統。

这种结构对于单片机“面向控制”的应用方向极为方便。在 8051 单片机中,不仅在片内驻留了一定容量的程序存储器和数据存储器及众多的特殊功能寄存器,而且还具有极强的外部存储器扩展能力,寻址范围分别可达 64KB,寻址和操作简单方便。

#### 1. 程序存储器 (ROM)

图 13-14 所示为 8051 单片机程序存储器结构图:

##### (1) 澄清基本概念

8051 单片机的内部程序存储器容量为 4KB,当所需容量大于 4KB 时,可以在外部对



图 13-14 程序存储器结构

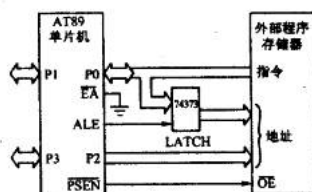


程序存储器进行扩充。其选择方式是由单片机的  $\overline{EA}$  端 (31 脚) 电平来决定的。 $\overline{EA}$  高电平时是读取内部 ROM 的地址, 即为 0000H~0FFFH 共 4KB 的数据, 若超过 4KB 时, CPU 将自动到外部读取。内、外部程序存储器最大总容量为 64KB。

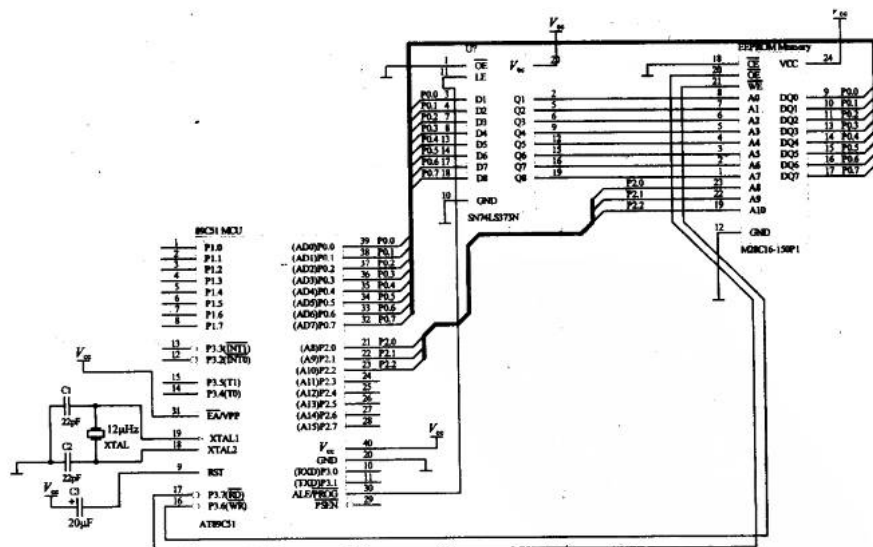
如果  $\overline{EA}$  接低电平, 则完全读取外部 ROM 的数据。同时, 当读取外部程序存储器时,  $\overline{PSEN}$  端 (29 脚) 呈现低电平, 以使外部程序存储器使能; 而读取内部程序存储器时,  $\overline{PSEN}$  保持高电平。通常  $\overline{PSEN}$  引脚与外部 ROM 的 OE 端相连, 以选通外部 ROM, 见图 13-15(a)。

## (2) 针对外部程序存储器

读取外部程序存储器时, P0 端口和 P2 端口的 16 条 I/O 线作为地址总线, 其中 P0 是多工的, 它送出低 8 位的地址码, 也读取指令代码, 如图 13-15(a) 所示。工作时 P0 首先送出低 8 位地址码, 然后变成浮接 (高阻抗), 等待读取外部程序存储器送出的指令码。所以当 P0 送出低 8 位地址码时, CPU 的地址锁存使能 ALE 端 (30 脚) 也送出使能信号, 使地址锁存器使能 (代表性芯片有 8282/8212/74373), 而将低 8 位地址码锁住。当然在 P0 送出低 8 位地址码时, P2 同时也送出高 8 位地址码。由于 P2 并非多工, 所以 P2 不需要加地址锁存器。当 16 位地址寻址后,  $\overline{PSEN}$  送出一个低电平信号使外部 ROM 使能, 外部 ROM 会将指令码送入 CPU。实际的电路如图 13-15(b) 所示。



(a) 连接示意图



(b) 电路图

图 13-15 访问外部程序存储器

## 2. 数据存储器 (RAM)

图 13-16 所示为 8051 单片机的数据存储器结构图。



图 13-16 数据存储器结构

### (1) RAM 的 00H~7FH

00H~7FH 是较低的 128 字节，其中最低的 32 字节 (00~1FH) 被分为 4 个寄存器组 (register bank)，分别为 RB0、RB1、RB2 和 RB3，由程序状态字寄存器 (PSW) 中的 RS1 和 RS0 来选择对哪一个寄存器组进行操作。20H~7FH 可供我们直接使用，比如指令“MOV 22H, #00H”把立即数 00H 送入 RAM 中的 22H 地址上。00H~7FH 的结构如图 13-17 所示。

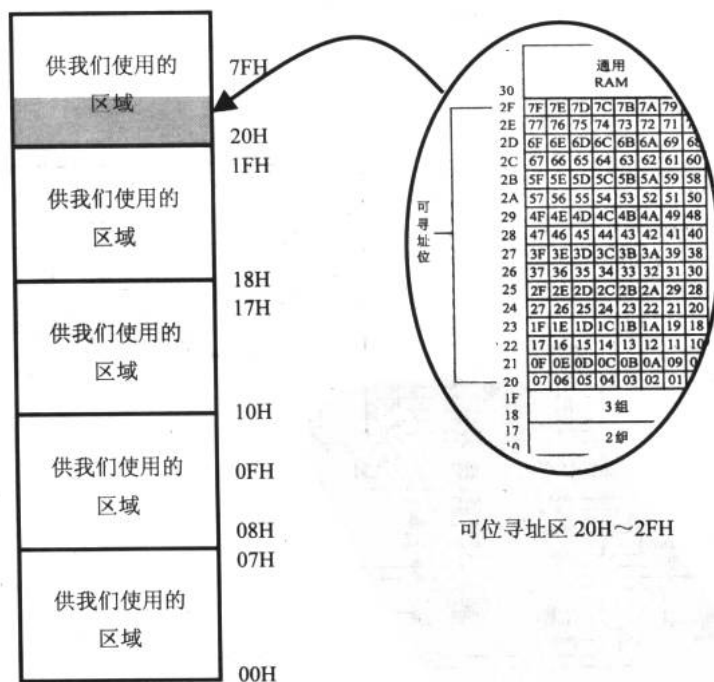


图 13-17 RAM 的 00H~7FH



## (2) RAM 的 80H~FFH (特殊功能寄存器区)

这高 128 字节在 8031/51 中是一些特殊功能寄存器 (SFR) 的地址, 具体寄存器和地址的对应如图 13-18 所示。

字节地址	位地址	特殊功能寄存器
FF		
F0	F7 F6 F5 F4 F3 F2 F1 F0	B
E0	E7 E6 E5 E4 E3 E2 E1 E0	ACC
D0	D7 D6 D5 D4 D3 D2 — D0	PSW
B8	— — — BC BB BA B9 B8	IP
B0	B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 B0	P3
A8	AF — — AC AB AA A9 A8	IE
A0	A7 A6 A5 A4 A3 A2 A1 A0	P2
99	不可寻址位	SBUF
98	9F 9E 9D 9C 9B 9A 99 98	SCON
90	97 96 95 94 93 92 91 90	P1
8D	不可寻址位	TH1
8C	不可寻址位	TH0
8B	不可寻址位	TL1
8A	不可寻址位	TL0
89	不可寻址位	TMOD
88	8F 8E 8D 8C 8B 8A 89 88	TCN
87	不可寻址位	PCON
83	不可寻址位	DPH
82	不可寻址位	DPL
81	不可寻址位	SP
80	87 86 85 84 83 82 81 80	P0

图 13-18 特殊功能寄存器区

我们从特殊功能寄存器区的 80H 开始逐一了解这些特殊功能寄存器。

- ✦ P0 (80H, 可位寻址): 端口 P0。
- ✦ SP (81H): 堆栈指针。8051 利用 SP 指示最近一次存入堆栈内的地址。每当我们在程序中调用其他子程序时, 原程序的返回地址就会自动压入堆栈中。当子程序执行到 RET 指令时, CPU 会自动由堆栈中取回原先存入的返回地址, 继续执行原程序。每当 CPU 将 8 位值存入堆栈时, 我们称之为压栈 (PUSH), 这时 SP 值会增加 1, 反之由堆栈中取回值时, 称为出栈 (POP), 此时 SP 减少 1。在写程序时, 有时会在起始状态阶段设置 SP 的值, 以便程序有足够的堆栈空间。
- ✦ DPL 和 DPH (82H 和 83H): 数据指针。由 DPL 和 DPH 组成一个 16 位的数据指针寄存器 DPTR。8051 中只有一个 16 位的地址指针, 这就是 DPTR。所以程序中 DPTR 的使用频率很高, 在以后的实例中会看到。
- ✦ PCON (87H): 电源控制寄存器, 其各位对应功能如下: PCON 中只有与串口通信有关的控制位是波特率选择位, 它是 PCON 的最高位——SMOD——双倍波特率位; GF1 和 GF0 无太大意义; PD 为电源下降位, 等于 1 时进入掉电状态; IDL 为待机方式位, 等于 1 时进入空闲工作 (待机) 方式。

SMOD	无效	无效	无效	GF1	GF0	PD	IDL
------	----	----	----	-----	-----	----	-----



- ✦ TCON (88H, 可位寻址): 定时/计数器控制寄存器。这个寄存器可以控制定时/计数器的打开或关闭。若一经打开且计数到溢位时, TCON 上也有对应的位被设成 1, CPU 必须针对此位的状态, 决定是否重新设置定时/计数值。这个寄存器将会在定时/计数器的实例中谈到。
- ✦ TOMD (89H): 定时/计数器方式控制寄存器。通过对 TOMD 的设置来实现定时/计数器的工作模式。
- ✦ TL0、TL1、TH0、TH1 (8AH~8DH): 定时/计数器寄存器。TL0 与 TH0 组合成一个 TIMER0, TL1 与 TH1 组合成一个 TIMER1。当程序允许定时/计数器运行时, 上述的寄存器中存放着最近的一个定时/计数值。51 单片机的计数器都是增值型的 (Up Counter), 当数到达最大值会产生一个定时/计数溢出的标志, 此标志也可当成一个中断请求信号, 向 CPU 提请中断服务。
- ✦ P1 (90H, 可位寻址): 端口 P1。
- ✦ SCON (98H, 可位寻址): 串口控制寄存器。此寄存器主要用于设置串行通信的模式。当串口数据已经发送完毕或已经接收妥当时, 会有对应的位被设置成 1, 这个同样可作为中断请求信号, 向 CPU 提请中断。
- ✦ SBUF (99H): 串口缓冲寄存器。所有待发送和刚进入串口的数据都存放在此寄存器中。51 单片机的串口通信是非常简单的, 只要设置完通信控制字后, 执行一个 “MOV SUBF,A” 就能把数据从串口发送出去。
- ✦ P2 (A0H, 可位寻址): 端口 P2。
- ✦ IE (A8H, 可位寻址): 中断使能寄存器。在第一个实例中已经详细介绍过了, 此寄存器内含系统允许中断的中断源设置值。
- ✦ P3 (B0H, 可位寻址): 端口 P3。
- ✦ IP (B8H, 可位寻址): 中断优先级控制寄存器。这个寄存器中存放中断时的优先顺序表, 若对应的位设成 1 时, 代表该中断有较高的中断优先权。
- ✦ PSW (D0H, 可位寻址): 程序状态字。用来存放 CPU 状态, 改变它的值可以改变 CPU 运行状态。下面是 PSW 的每一位对应的含义。其中, CY 为进位标志, 在算术运算中进行或借位时, CY=1; AC 为辅助进位标志位; RS0、RS1 为工作寄存器组选择位; OV 为溢出标志位; P 为奇偶校验标志位。其余位意义不大。

CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	无效	P
----	----	----	-----	-----	----	----	---

- ✦ ACC (E0H, 可位寻址): 累加器。累加器是众多寄存器中最重要的一个寄存器。通常以简写 ACC 代表累加器。51 单片机指令中有许多指令和累加器有关, 也有多个指令必须通过累加器。
- ✦ B (F0H, 可位寻址): B 寄存器。B 寄存器是一个一般用途的工作寄存器, 当使用乘除指令时才会使用到。



## 第 14 章 给单片机下命令

MCS-51 单片机所能执行的指令的集合就是它的指令系统。指令常以英文名称或缩写形式来作为助记符，以助记符形式表示的指令就是汇编语言。除了汇编语言外，MCS-51 单片机也支持 C 语言。本书并不涉及单片机的 C 语言编程。

### 14.1 指令的寻址模式

#### 单片机是怎样执行指令的 寻址方式

我们学习单片机必须熟练掌握 51 单片机的几种寻址模式。有些指令有相同的效果但是指令的执行时间却不同，原因就在于寻址模式的不同。当我们深刻理解其中的差异后，就可以写出简捷、明快的程序来。

#### 14.1.1 单片机是怎样执行指令的

##### 1. 寻址初步

前面谈到了晶振产生的信号会送到单片机，作为系统的时钟信号。这个时钟信号就是单片机的工作时序。

一个机器周期由 6 个状态（S1~S6）组成，每个状态又持续 2 个振荡周期（分别为 P1 和 P2）。这样，一个机器周期由 12 个振荡周期组成。如果采用 12MHz 的晶振，则每个机器周期为 1 $\mu$ s。我们把写好的程序烧在单片机的程序存储器中，单片机在执行时便按顺序一条一条地向外取指令来运行。

单片机的指令执行大致为以下 5 个步骤：

步骤 1：抓取指令。这是指单片机通过地址线、数据线和控制总线向 ROM 读取指令和等待处理的过程。

步骤 2：单片机内部数据处理。将步骤 1 抓取到的数据和某个寄存器做运算。

步骤 3：运算后结果再做逻辑上或标志（flag）上的处理。

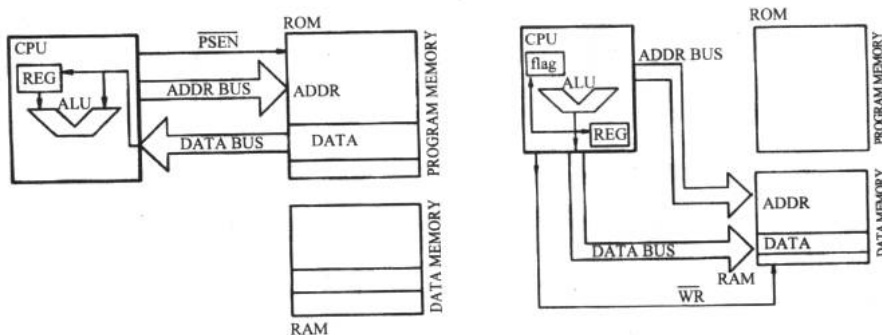
步骤 4：依照判断的结果进行转移，条件为真时如何动作，条件为假时如何动作。

步骤 5：将结果保存到其他寄存器或存储器中。

说得简单一些，上述的步骤其实就是抓取数据、处理数据和存储数据。而单片机到哪个地址抓取数据及将数据存往何处，也就是我们所说的寻址模式（Addressing Mode）。在上一章的实例中谈到 MOV 指令，正是寻址模式的最好例子。

图 14-1 所示为 51 单片机执行指令的过程。单片机读取指令时，先送出地址线给 ROM，ROM 通过数据线把数据送回给 CPU，如图 14-1（a）所示。CPU 经过运算后得出结果，有

可能暂时存放在寄存器区或转存到 RAM 中，如图 14-1 (b) 所示。



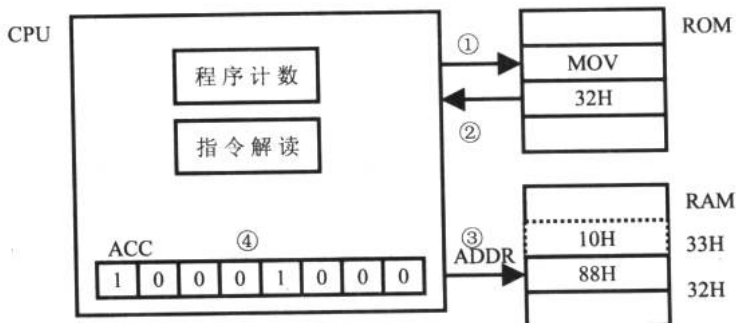
(a) CPU 抓取指令或数据

(b) 存放数据、运算结果

图 14-1 51 单片机执行指令过程

## 2. 寻址一例

假设程序里有一条指令是“MOV A, 32H”，这是把地址 32H 的内容传递给 ACC 累加器的指令。当程序执行到 MOV 这个助记符时，就知道要把某个位置内的值传递给 ACC，于是单片机会自动往下抓取另一字节的值即地址 32H 中的内容，在得到 32H 中的内容后，再把这个内容传递到 ACC 中。图 14-2 所示为这个过程的示意图。



① 读取助记符“MOV”；② 获知目标地址 32H；③ 取目标地址 32H 中的内容；④ 数据送于累加器 ACC 中。

图 14-2 寻址示意图

这些数据转来转去的动作都在一个机器周期内（约  $1\mu\text{s}$ ）完成。在这整个过程中，最为重要的是单片机取得“MOV”这个指令。这个指令看似简单，实际上却代表了该指令的寻址模式与指令长度。

## 14.1.2 寻址方式

从这一小节开始我们来逐一地学习单片机的 7 类寻址方式。

### 1. 直接寻址

直接寻址 (Direct Addressing)：单片机直接将某个地址内的值传递给某个寄存器。寻



址空间为内部 RAM 和特殊功能寄存器。例如：

```
MOV  A, 30H      ; 把 30H 地址内的数据传递给累加器 ACC
MOV  20H, B       ; 把寄存器 B 的值存入 20H 地址内
ADD  A, 60H       ; ACC 和 60H 地址内的数据相加，结果存放在 ACC
MOV  A, B         ; 把寄存器 B 中的数据传给累加器 ACC
```

## 2. 间接寻址

间接寻址 (Indirect Addressing)：单片机利用寄存器 R0、R1、SP 和 DPTR 作为指针，间接取得该指针所指地址中的数据。采用这种寻址模式的指令中，会有一个“@”符号。寻址空间为内、外部 ROM 和 RAM 的任一地址。

```
MOV  R0, #50H     ; 寄存器 R0=50H，把 R0 指向 50H
MOV  A, @R0        ; 利用间接寻址，取得 R0 所指的 RAM 中地址的内容，
                  ; 并存入 ACC 中
MOV  DPTR, #7000H ; 寄存器 DPTR=7000H
MOVB A, @DPTR      ; 利用间接寻址法，取得 DPTR 所指的外部 RAM 地址
                  ; 的内容，并将值传给 ACC
```

DPTR 的内容被设定为 7000H，即 DPTR 的高位字节 DPH=70H，低位字节 DPL=00H。当遇到 MOVX 指令时，CPU 知道要做外部 RAM 的读取，所以接下来会通过 P0 和 P2 口把完整的地址码送出，并读回外部 RAM 送回的数据。

## 3. 寄存器寻址

寄存器寻址 (Register Addressing)：51 单片机除了最常使用的寄存器 ACC 外，使用频率第二高的就是 R0~R7 共 8 个寄存器。在 51 单片机中共有 4 组 R0~R7 寄存器，使用时靠 PSW 状态寄存器中的 RS1 和 RS0 来决定使用哪一组。

由于 CPU 处理时 R0~R7 的使用机率很高，所以在 51 指令系统中有许多与 R0~R7 有关的指令，我们可以通过 R0~R7 共 8 个寄存器做数据的搬运或加减等。这些指令我们统统归类为寄存器寻址。例如：

```
MOV  A, R0        ; 将 R0 的值传给累加器 ACC
ADD  A, R5        ; 将 ACC 与 R5 值相加，并把结果放在 ACC 中
MOV  R7, A        ; 将 ACC 的值放入 R7 寄存器中
```

## 4. 立即寻址

立即寻址 (Immediate Addressing)：当我们想要往寄存器或某个地址中直接存入某个值时，就可采用立即寻址法。这种指令当中会在立即数前加上一个“#”号。寻址空间为 ROM。例如：

```
MOV  A, #3FH      ; 将 3FH 值存入 ACC 中
MOV  A, #0F3H     ; 将 F3H 值存入 ACC 中
MOV  33H, #10H    ; 将 10H 值存入地址为 33H 的 RAM 中
MOV  R0, #0FFH    ; R0=FFH
MOV  DPTR, #2046H ; DPTR=2046H
```

## 5. 相对寻址

相对寻址是将程序计数器 PC 中的当前值与指令第二字节给出的数相加，其结果作为转移指令的转移地址。转移地址也称为转移目的地址，PC 中的当前值称为基地址，指令第二字节给出的数称为偏移量。因为目的地址是相对于 PC 中的基地址而言的，所以这种寻址方式称为相对寻址。寻址空间为 ROM。例如：

```
JC      80H      ; 进位标志 C=1 时，以 PC 中的当前值为基地址，加
                ; 上偏移量 80H 后得到的结果作为该转移指令的目
                ; 的地址
```

## 6. 基址变址寻址

在编写程序中，我们常常要做查表的操作。一般的做法是利用 PC 或 DPTR 作为基地址，然后将这个基址加上 ACC 的值，得到一个地址值，然后由此地址值取出其中的内容，完成一次查表操作。而 ACC 的值就是变址的值。关于查表程序的设计我们将在后面谈到。寻址空间为 ROM 和 RAM。例如：

```
MOV     DPTR, #2046H ; DPTR=2046H
MOVC    A, @A+DPTR  ; 把 ACC 和 DPTR 的值相加得到一个地址
                ; 到这个地址中取值并存入 ACC 中
```

## 7. 位寻址

对一些内部 RAM 和特殊功能寄存器进行位操作时的寻址。在进行位操作时，借助于进位标志 C 作为位操作累加器，指令操作数域直接给出该位的地址，然后根据操作码的性质对该位进行位操作。

# 14.2 指令系统

**指令概述** 算术运算指令 逻辑运算与传送指令 数据传送指令  
布尔变量操作指令 控制程序转移指令 8051 指令集

不得不承认指令的学习是单片机学习中最枯燥无味的，但这是跨入单片机系统开发的必经之路，现在不必急于弄懂所有的指令，只要先熟悉一些最常用的指令即可。如果在今后的系统开发时有需要，再回头学习相关的指令。

51 单片机的指令总共有 111 个，比起其他的 CPU 这个总数并不为多。实际应用中，常用的指令不过 50 个，所以在学习指令时，可以先浏览整个指令集一两次，大概知道有哪些指令，它们有什么用。然后在实际写程序时再回头加深理解，只要经过几次反复就能掌握指令的运用。

## 14.2.1 指令概述

我们在点亮 LED 的实例中已经对指令有了感性的认识，也了解了指令的组成。在 51



单片机的 111 个指令里，最常用的单指令有 49 个，双字节指令有 45 个，剩下的 17 个为三字节指令。在写程序时，仍然以单字节和双字节指令为主。

CPU 在执行程序时，它拿取第一个字节的数据时，自然将此字节认定为功能助记符，也即此字节一定是一个指令。经过内部的处理后，CPU 自动判断该指令是否到此为止，若是，则该字节是一个单字节指令；若不是，则判断是否还要抓取一个或两个字节的的数据。另外由 CPU 的执行架构来看，单字节指令的执行处理速度最快，双字节指令和三字节指令次之。

51 单片机指令系统按执行功能分为 5 大类：算术运算指令、逻辑运算与传送指令、数据传送指令、布尔变量操作指令和程序分支指令。

### 14.2.2 算术运算指令

算术运算指令在程序中的使用率相当高，其中又以 ADD（相加）和 INC（加 1）的使用最为频繁。在特殊功能寄存器 PSW 中有进位 CY、溢出 OV 和辅助进位 AC 3 个重要的标志，一些算术运算指令会影响其中的标志位。下面具体来看看每一种指令。

#### 1.ADD

注：Ri 表示 R0 或 R1；Rn 表示 R0~R7 的其中之一。下同。

ADD A, Rn	将累加器与寄存器的内容相加，结果存回累加器
ADD A, direct	将累加器与直接地址的内容相加，结果存回累加器
ADD A, @Ri	将累加器与间接地址的内容相加，结果存回累加器
ADD A, #data	将累加器与常数相加，结果存回累加器

说明：

① 如果相加后的结果，位 3 有进位则 PSW 状态字的辅助进位标志位 AC=1，位 7 有进位则 PSW 的进位标志位 CY=1，类似二位数十进制加法，个位数相加超过 10 进 1 至十位数（AC=1），十位数相加超过 10 进 1（CY=1）。例如：

$$\begin{array}{r}
 \text{F} \quad \text{D} \\
 + \quad 2 \quad 6 \\
 \hline
 2 \quad 3
 \end{array}
 \quad \text{CY}=1, \text{AC}=1
 \quad \longleftrightarrow \quad
 \begin{array}{r}
 1111 \quad 1101 \\
 + \quad 0011 \quad 0110 \\
 \hline
 1 \quad 0010 \quad 0011
 \end{array}$$

↑                      ↑  
 位 7 进位, CY=1      位 3 进位, AC=1

② 在加减时状态字中的溢出标志位 OV 产生的变化是：如果位 6 有进位而位 7 没有进位，或者位 7 有进位而位 6 没有，则置“1”溢出标志 OV，否则 OV 清“0”。溢出标志位 OV 的状态，只有在带符号数加法运算时才有意义。当两个带符号数相加时，OV=1，表示加法运算超出了累加器 A 所能表示的带符号数的有效范围（-128~+127），即产生了溢出，因此运算结果是错误的；否则运算是正确的，即无溢出产生。比如说执行指令“ADD A, R0”，其中，(A)=53H，(R0)=FCH，则运算过程为：

$$\begin{array}{r}
 0101\ 0011 \\
 +\ 1111\ 1100 \\
 \hline
 1\leftarrow 0100\ 1111
 \end{array}$$

结果为: (A)=4FH, Cy=1, AC=0, OV=0。

## 2. ADDC

ADDC A, Rn	将累加器与寄存器的内容及进位 CY 相加, 结果存回累加器
ADDC A, direct	将累加器与直接地址的内容及进位 CY 相加, 结果存回累加器
ADDC A, @Ri	将累加器与间接地址的内容及进位 CY 相加, 结果存回累加器
ADDC A, #data	将累加器与常数及进位 CY 相加, 结果存回累加器

## 3. SUBB

SUBB A, Rn	将累加器的值减寄存器的值减借位 CY, 结果存回累加器
SUBB A, direct	将累加器的值减直接地址的值减借位 CY, 结果存回累加器
SUBB A, @Ri	将累加器的值减间接地址的值减借位 CY, 结果存回累加器
SUBB A, #data	将累加器的值减常数的值减借位 CY, 结果存回累加器

说明:

① 如果相减后的结果, 位 3 有借位, 则 PSW 状态字的辅助借位标志 AC=1, 位 7 有借位, 则 CY=1。类似二位数的十进制减法, 个位数相减不够, 向十位数借 1 (AC=1), 十位数相减不够 CY=1。

② PSW 中 OV 溢出标志位, OV=1 表示溢出; OV=0 表示未溢出。溢出标志位的值可由结果值位 7 的借位与位 6 的借位做 XOR 的逻辑判断得到。

③ SUBB 减法指令连借位 CY 一起减, 若不想减 CY, 就先将 CY 清 0。

## 4. INC

INC A	将累加器的值加 1
INC Rn	将寄存器的值加 1
INC direct	将直接地址的内容加 1
INC @Ri	将间接地址的内容加 1
INC DPTR	将数据指针寄存器值加 1

说明:

① 如 FFH 加 1 后为 00H, 进位标志位 CY 受影响。

② INC DPTR: 若数据指针寄存器低位字节 DPL=FFH, 加 1 后 DPL=00H; 而高位字节 DPH 的值增加 1, 进位标志位受影响。另外, 可对 DPL 和 DPH 分别进行 INC 运算。

## 5. DEC

DEC A	将累加器的值减 1
DEC Rn	将寄存器的值减 1
DEC direct	将直接地址的内容减 1
DEC @Ri	将间接地址的内容减 1



说明：如果 00H 减 1 后为 FFH，借位标志位 CY 不受影响。

## 6. MUL

MUL	AB	将累加器的值与 B 寄存器的值相乘。乘积的低位字节存回累加器，高位字节存回 B 寄存器
-----	----	---

说明：

① 作无符号 8 位整数运算执行时，将累加器的值与 B 寄存器的值相乘所得的 16 位值的高 8 位存入 B 寄存器，低 8 位存入累加器。

② 若相乘后所得的积越过 255 (FFH)，OV=1，否则 OV=0。

③ 执行时，C 会被清除为 0。

例如：ACC=66H，B=77H

执行结果：2F6AH>FFH ACC=6AH B=2FH CY=0 OV=1

再如：ACC=66H，B=02H

执行结果：0CCH<FFH ACC=CCH B=00H CY=0 OV=0

## 7. DIV

DIV	AB	将累加器的值除以 B 寄存器的值。结果是商存回累加器，余数存回 B 寄存器
-----	----	---------------------------------------

说明：

① 做无符号的除法运算。

② 执行后，进位 C 及溢出标志位 OV 被清除为 0。

例如：ACC=66H，B=04H

执行结果：ACC=19H B=02H CY=0 OV=0

## 8. DA

DA	A	将累加器 A 做十进制调整
----	---	---------------

说明：

① 若低 4 位>9 或 AC=1，则低 4 位+06H。

② 若高 4 位>9 或 CY=1，则高 4 位+60H。

例如：ACC=49 R1=88

ADD A,R1 ; 执行结果：ACC=D1H CY=0 AC=1

DA A ; 执行结果：CY=1 ACC=37

### 14.2.3 逻辑运算与传送指令

51 单片机有相当强的逻辑运算能力，可对 8 位数据做 AND、OR、XOR 和数据旋转等操作。这些运算的中心仍然是累加器 ACC，所有 RAM 上的数据以及寄存器都可与累加器做逻辑运算，结果则在累加器 ACC 上。



## 1. ANL

ANL	A, Rn	将累加器的值与寄存器的值做 AND 判断, 结果存回累加器
ANL	A, direct	将累加器的值与直接地址的内容做 AND 运算, 结果回送累加器
ANL	A, @Ri	将累加器的值与间接地址的内容做 AND 运算, 结果回送累加器
ANL	A, #data	将累加器的值与常数做 AND 运算, 结果回送累加器
ANL	direct, A	将直接地址的内容与累加器的值做 AND 判断, 结果存回该地址
ANL	direct, #data	将直接地址的内容与常数的值做 AND 判断, 结果存回直接地址
ANL	C, bit	将进位 CY 与直接地址的某位做 AND 判断, 结果存回进行 CY
ANL	C, /bit	将进位 CY 与直接地址的某位的反相值做 AND 判断, 结果存回 CY 中

说明: 以上操作均不影响任何标志位。

## 2. ORL

ORL	A, Rn	将累加器的值与寄存器的值做 OR 判断, 结果存回累加器
ORL	A, direct	将累加器的值与直接地址的内容做 OR 运算, 结果回送累加器
ORL	A, @Ri	将累加器的值与间接地址的内容做 OR 运算, 结果回送累加器
ORL	A, #data	将累加器的值与常数做 OR 运算, 结果回送累加器
ORL	direct, A	将直接地址的内容与累加器的值做 OR 判断, 结果存回该地址
ORL	direct, #data	将直接地址的内容与常数的值做 OR 判断, 结果存回直接地址
ORL	C, bit	将进位 CY 与直接地址的某位做 OR 判断, 结果存回进行 CY
ORL	C, /bit	将进位 CY 与直接地址的某位的反相值做 OR 判断, 结果存回 CY 中

说明: 以上操作均不影响任何标志位。

## 3. XRL

XRL	A, Rn	将累加器的值与寄存器的值做 XOR 判断, 结果存回累加器
XRL	A, direct	将累加器的值与直接地址的内容做 XOR 运算, 结果回送累加器
XRL	A, @Ri	将累加器的值与间接地址的内容做 XOR 运算, 结果回送累加器
XRL	A, #data	将累加器的值与常数做 XOR 运算, 结果回送累加器
XRL	direct, A	将直接地址的内容与累加器的值做 XOR 判断, 结果存回该地址
XRL	direct, #data	将直接地址的内容与常数的值做 XOR 判断, 结果存回直接地址

说明: 以上操作均不影响任何标志位。

## 4. CLR

CLR	A	清除累加器的值为 0
CLR	C	清除进位 CY 为 0
CLR	bit	清除直接地址的某位为 0

说明:

① 以上操作均不影响任何标志位。

② bit 对象包括: RAM 的 20H~2FH、B 寄存器、ACC、PSW、中 IP、IE、SCON、





TMOD、TCON、P0、P1、P2、P3。

例如：CLR 21H.5 ; 清除地址 21H 内容的位 5 为 0

CLR ACC.2 ; 清除 ACC 位 2 的内容为 0

### 5. CPL

CPL	A	将累加器的值反相
CPL	C	将进位 CY 的值反相
CPL	bit	将直接地址的某位值反相

### 6. RL、RLC、RR、RRC

RL	A	把累加器的值左移 1 位
RLC	A	将累加器含进位 CY 左移 1 位
RR	A	将累加器的值右移 1 位
RRC	A	将累加器含进位 CY 右移 1 位

说明：

① 执行 RL A 时，位 7 的值被移到位 0 上；执行 RR A 时，位 0 的值被移到位 7 上。

② 执行 RLC A 时，位 7 的值被移到 CY 上，而 CY 移到位 0 上；执行 RRC A 时，位 0 的值被移到 CY 上，而 CY 移到位 7 上。

### 7. SWAP

SWAP	A	将累加器的高 4 位与低 4 位的内容交换
------	---	-----------------------

例如：MOV A, #46H ; ACC=46H

SWAP A ; ACC=64H

## 14.2.4 数据传送指令

数据传送指令是以 MOV 指令为核心的，如果学会了 MOV 指令就熟悉了一半的 51 单片机指令。另外要特别注意的指令是 MOVX，它是我们与外部 RAM 或 I/O 沟通的工具。

### 1. MOV

MOV	A, Rn	将寄存器的内容载入累加器
MOV	A, direct	将直接地址的内容载入累加器
MOV	A, @Ri	将间接地址的内容载入累加器
MOV	A, #data	将常数载入累加器
MOV	Rn, A	将累加器的内容载入寄存器
MOV	Rn, direct	将直接地址的内容载入寄存器
MOV	Rn, #data	将常数载入寄存器
MOV	direct, A	将累加器的内容存入直接地址
MOV	direct, Rn	将寄存器的内容存入直接地址
MOV	direct1, direct2	将直接地址 2 的内容存入直接地址 1
MOV	direct, @Ri	将间接地址的内容存入直接地址

MOV direct, #data	将常数存入直接地址
MOV @Ri, A	将累加器的内容存入某间接地址
MOV @Ri, direct	将直接地址的内容存入某间接地址
MOV @Ri, #data	将常数存入某间接地址
MOV DPTR, #data16	将 16 位的常数存入数据指针寄存器
MOV C, bit	将直接地址的某位值存入进位 CY
MOV bit, C	将进位 CY 的值存入直接地址的某位

说明：以上操作均不影响任何标志位。

## 2. MOV DPTR, #addr

MOV DPTR, #data16	将 16 位的常数存入数据指针寄存器
-------------------	--------------------

说明：

- ① 16 位地址码载入到数据指针寄存器，高 8 位存入 DPH，低 8 位存入 DPL。
- ② 程序建表时，常配合“MOVC A, @A+DPTR”使用。
- ③ 作为外部储存的 16 位地址，配合“MOVX A, @DPTR”或“MOVX @DPTR, A”存取外部存储器的内容。

## 3. MOVC

MOVC A, @A+DPTR	累加器的值再加 DPTR 的值为其所指定地址，将该地址的内容读入累加器
MOVC A, @A+PC	累加器的值再加程序计数器 PC 的值作为其所指定地址，将该地址内容读入累加器

说明：这两个指令我们会在查表的实例中加以介绍。

## 4. MOVX

MOVX A, @Ri	将间接地址所指定外部存储器的内容读入累加器
MOVX A, @DPTR	将 DPTR 所指定外部存储器的内容读入累加器
MOVX @Ri, A	将累加器的内容写入间接地址所指定的外部存储器
MOVX @DPTR, A	将累加器的内容写入 DPTR 所指定的外部存储器

## 5. PUSH 和 POP

PUSH direct	将直接地址的内容压入堆栈区
POP direct	从堆栈区取回该直接地址的内容

## 6. XCH

XCH A, Rn	将累加器的内容与寄存器的内容互换
XCH A, direct	将累加器的内容与直接地址的内容互换
XCH A, @Ri	将累加器的值与间接地址的内容互换

## 7. XCHD

XCHD A, @Ri	将累加器的低 4 位与间接地址的低 4 位互换
-------------	-------------------------



### 14.2.5 布尔变量操作指令

51 指令中, 对于单一位的处理指令包括清除、设置、取反、AND 运算和 OR 运算, 不过并没有 XOR 异或指令, 整个布尔变量操作指令皆以 CY 标志为重心, 而且 AND 和 OR 运算都是和 CY 做处理。除此之外, 也可使用 JB 或 JNB 指令做条件式转移, 对布尔变量操作指令理解得越透彻, 就越能充分利用内部的 RAM 空间, 同时又能有效地节省程序空间。

这一类的指令比较简单, 读者可以从本章最后的指令系统表中得到相应的了解。

### 14.2.6 控制程序转移指令

控制程序转移指令中, 比较重要的是 LCALL、LJMP、CJNE、DJNZ 等指令, 熟悉这些指令后可以使我们写的程序更为简捷。

#### 1. ACALL 和 LCALL

ACALL	addr11	调用 2KB ROM 范围内的子程序
LCALL	addr16	调用 64KB ROM 范围内的子程序

说明:

① ACALL 指令只占用 2B, 不过它有一个限制: 只能调用到与 PC 相同的 2KB 程序空间区域。8051 单片机内部有 4KB 的程序空间, 若分成两份, 则分别占用 0000H~07FFH 与 0800H~0FFFH。如果程序的 PC 值小于 0800H, 它就没法调用放在后段的子程序, 反之亦然。这条指令的存在价值就是减少程序的空间, 如果程序做了 100 次的子程序调用, 选用 ACALL 就会比 LCALL 少 100B 的空间。

② LCALL 调用就没有相同 2KB 位置的限制, 所以它可以调用到整个 64KB 的程序空间。LCALL 指令需要 3B 的存放空间。如果程序产生的二进制文件空间 (编译后的\*.bin 文件) 小于 2048B, 那么程序的调用可以全部采用 ACALL, 若超过 2048B 可能有部分调用要改成 LCALL 才行。

③ 注意, 虽然我们分析了 ACALL 和 LCALL 的区别, 但在写程序时完全可以都写成 CALL, 这样交由程序来判断调用的范围。之所以分别谈谈, 是因为有些汇编程序可能没有 CALL 的功能。

#### 2. RET 和 RETI

RET	从子程序返回
RETI	从中断服务程序返回

#### 3. SJMP、AJMP、LJMP

SJMP	rel	短转移
AJMP	addr11	2KB 限制转移
LJMP	addr16	64KB 长距离转移

#### 4. JMP

JMP	@A+DPTR	间接式转移
-----	---------	-------

#### 5. JZ 和 JNZ

JZ	rel	如果 ACC=0 则转移
JNZ	rel	如果 ACC≠0 则转移

#### 6. CJNE

CJNE	A, direct, rel	将累加器的内容与直接地址的内容比较, 若不相等则跳至 rel 所指的相关地址
CJNE	A, #data, rel	将累加器的内容与常数比较, 若不相等则跳至 rel 所指的相关地址
CJNE	Rn, #data, rel	将寄存器的内容与常数比较, 若不相等则跳至 rel 所指的相关地址
CJNE	@Ri, #data, rel	将间接地址的内容与常数比较, 若不相等则跳至 rel 所指的相关地址

说明(以执行 CJNE A, #data, rel 为例):

- ① 当累加器的值等于 #data 值时, 进位 CY=0, 执行下一个指令。
- ② 当累加器的值小于 #data 值时, 进位 CY=1, 且跳至 rel 的相关地址。
- ③ 当累加器的值大于 #data 值时, 进位 CY=0, 且跳至 rel 的相关地址。

#### 7. DJNZ

DJNZ	Rn, rel	将寄存器的内容减 1, 不等于 0 则跳至 rel 所指的相关地址
DJNZ	direct, rel	将直接地址的内容减 1, 不等于 0 则跳至 rel 所指的相关地址

#### 8. NOP

NOP		不做任何动作
-----	--	--------

### 14.2.7 8051 指令集

8051 指令集的相关指令及其说明如表 14-1~表 14-5 所示。

表 14-1 算术运算指令及其说明

指 令	说 明	字 节	机器周期
ADD A,Rn	将 Rn 的内容加到 A	1	1
ADD A,direct	将直接寻址的 RAM 内容加到 A	2	1
ADD A,@Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容加到 A	1	1
ADD A,#data	将立即数据加到 A	2	1
ADDC A,Rn	将 Rn 的内容及 C 加到 A 中	1	1
ADDC A,direct	将直接寻址 RAM 内容及 C 加到 A	2	1
ADDC A,@Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容及 C 加到 A	1	1



续表

指 令	说 明	字 节	机器周期
ADDC A,#data	将立即数及 C 加到 A	2	1
SUBB A,Rn	将 A 内容减去 Rn 内容及 C	1	1
SUBB A,direct	A 内容减去直接寻址 RAM 内容及 C	2	1
SUBB A,@Ri	A 内容减去 Ri 所寻址的 RAM 内容及 C	1	1
SUBB A,#data	A 内容减去立即数据及 C	2	1
INC A	累加器 A 的内容加 1	1	1
INC Rn	将 Rn 的内容加 1	1	1
INC direct	将直接寻址的 RAM 内容加 1	2	1
INC @Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容加 1	1	1
DEC A	累加器 A 的内容减 1	1	1
DEC Rn	将 Rn 的内容减 1	1	1
DEC direct	将直接寻址的 RAM 内容减 1	2	1
DEC @Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容减 1	1	1
INC DPTR	DPTR 内容加 1	1	2
MUL AB	乘法运算 A×B	1	4
DIV AB	除法运算 A/B	1	4
DA A	累加器 A 做 BCD 调整	1	1

表 14-2 逻辑运算指令及其说明

指 令	说 明	字 节	机器周期
ANL A,Rn	将 Rn 的内容与 A 做 AND 运算	1	1
ANL A,direct	直接寻址的 RAM 内容与 A 做 AND 运算	2	1
ANL A,@Ri	Ri 所寻址的 RAM 内容与 A 做 AND 运算	1	1
ANL A,#data	立即数与 A 做逻辑 AND 运算	2	1
ANL direct,A	A 与直接寻址的 RAM 内容做 AND 运算	2	1
ANL direct,#data	立即数与直接寻址的 RAM 内容做 AND 运算	3	2
ORL A,Rn	将 Rn 的内容与 A 做 OR 运算	1	1
ORL A,direct	直接寻址的 RAM 内容与 A 做 OR 运算	2	1
ORL A,@Ri	Ri 所寻址的 RAM 内容与 A 做 OR 运算	1	1
ORL A,#data	立即数与 A 做逻辑 OR 运算	2	1
ORL direct,A	A 与直接寻址的 RAM 内容做 OR 运算	2	1
ORL direct,#data	立即数与直接寻址的 RAM 内容做 OR 运算	3	2
XRL A,Rn	将 Rn 的内容与 A 做 XOR 运算	1	1
XRL A,direct	直接寻址的 RAM 的内容与 A 做 XOR 运算	2	1
XRL A,@Ri	所寻址的 RAM 内容与 A 做 XOR 运算	1	1

续表

指 令	说 明	字 节	机器周期
XRL A,#data	立即数与 A 做逻辑 XOR 运算	2	1
XRL direct,A	A 与直接寻址的 RAM 内容做 XOR 运算	2	1
XRL direct,#data	立即数与直接寻址的 RAM 内容做 XOR 运算	3	2
CLR A	累加器 A 的内容清除为 0	1	1
CPL A	累加器 A 中的各个位所向	1	1
RL A	累加器 A 向左旋转一个位	1	1
RLC A	A 连同 C 向左旋转一个位	1	1
RR A	累加器 A 向右旋转一个位	1	1
RRC A	A 连同 C 向右旋转一个位	1	1
SWAP A	A 中的高 4 位与低 4 位互换	1	1

表 14-3 数据传送指令及其说明

指 令	说 明	字 节	机器周期
MOV A,Rn	将 Rn 的内容传送到 A	1	1
MOV A,direct	将直接寻址的 RAM 内容传送到 A	2	1
MOV A,@Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容传送到 A	1	1
MOV A,#data	将立即数传送到 A	2	1
MOV Rn,A	将 A 的内容传送到 Rn	1	1
MOV Rn,direct	将直接寻址的 RAM 内容传送到 Rn	2	2
MOV Rn,#data	将立即数传送到 Rn	2	1
MOV direct,A	A 的内容传送到直接寻址的 RAM	2	1
MOV direct,Rn	Rn 的内容传送到直接寻址的 RAM	2	2
MOV direct,direct	直接寻址的 RAM 内数据传送	3	2
MOV direct,@Ri	Ri 所寻址的 RAM 内容传送到直接寻址的 RAM	2	2
MOV direct,#data	将立即数传送到直接寻址的 RAM	3	2
MOV @Ri,A	A 的内容传送到 Ri 所寻址的 RAM	1	1
MOV @Ri,direct	直接寻址的 RAM 内容传送到 Ri 所寻址的 RAM	2	2
MOV @Ri,#data	立即数据传送到 Ri 所寻址的 RAM	2	1
MOV DPTR,#data16	将 16 位的常数数据放入 DPTR	3	2
MOVC A,@A+DPTR	程序内存内部的数据传送到 A	1	2
MOVC A,@+PC	程序内存内部的数据传送到 B	1	2



续表

指 令	说 明	字 节	机器周期
MOVX A,@Ri	读取 Ri 所寻址的外部数据存储器内容到 A	1	2
MOVX A,@DPTR	读取指针寄存器 DPTR 所寻址的外部数据存储器内	1	2
MOVX @Ri,A	将 A 的内容写 Ri 所寻址的外部数据存储器内	1	2
MOVX @DPTR,A	将 A 的内容写到指针寄存器 DPTR 所寻址的外部数据存储器内	1	2
PUSH direct	将数据放入堆栈区	2	2
POP direct	由堆栈区取回数据	2	2
XCH A,Rn	累加器 A 的内容与将 Rn 的内容交换	1	1
XCH A,direct	累加器 A 的内容与直接寻址的 RAM 内容交换	1	2
XCH A,@Ri	将累加器 A 的内容与 Ri 所寻址的 RAM 内容交换	1	1
XCHD A,@Ri	将 Ri 所寻址的 RAM 内容与 A 内容低 4 位互换	1	1

表 14-4 布尔运算指令及其说明

指 令	说 明	字 节	机器周期
CLR C	进位标志清除为 0	1	1
CLR bit	将指定的位清除为 0	2	1
SETB C	将进位标志设置为 1	1	1
SETB bit	将指定的位设置为 1	2	1
CPL C	将进位标志位反向	1	1
CPL bit	将指定的位反向	2	1
ANL C,bit	将指定的位与 C 做逻辑 AND 运算	2	2
ANL C,/bit	将指定的位反向与进位标志 C 做逻辑 AND 运算	2	2
ORL C,bit	将指定的位与 C 做逻辑 OR 运算	2	2
ORL C,/bit	将指定的位反向后与进位标志 C 做逻辑 OR 运算	2	2
MOV C,bit	将位 bit 复制到进位标志 C	2	1
MOV bit,C	将进位标志 C 复制到位 bit	2	2
JC rel	若进位标志 C 为 1 则转移	2	2
JNC rel	若进位标志 C 为 0 则转移	2	2
JB bit,rel	若位为 1 则转移	3	2
JNB bit,rel	若位为 0 则转移	3	2
JBC bit,rel	若位为 1 则清除为 0 并转移	3	2



表 14-5 条件转移指令及其说明

指 令	说 明	字 节	机器周期
ACALL addr11	调用 2KB 以内的子程序	2	2
LCALL addr16	调用整个 64KB 以内的子程序	3	2
RET	子程序执行完毕后返回主程序	1	2
RETI	中断程序执行完毕后返回主程序	1	2
AJMP addr11	转移至 2KB 以内程序继续执行	2	2
LJMP addr16	转移至 64KB 以内程序继续执行	3	2
SJMP rel	转移至相对地址继续执行	2	2
JMP @A+DPTR	间接转移至某一地址执行程序	1	2
JZ rel	累加器的内容为 0 则转移	2	2
JNZ rel	累加器的内容不为 0 则转移	2	2
CJNE A,direct,rel	将直接寻址的 RAM 内容与 A 做比较, 不相等则转移	3	2
CJNE A,#data,rel	将立即数据与 A 做比较, 不相等则转移	3	2
CJNE Rn,#data,rel	将立即数据与 Rn 的内容做比较, 不相等则转移	3	2
CJNE @Ri,#data,rel	将立即数据与 Ri 所寻址的 RAM 内容做比较, 不相等则转移	3	2
DJNZ Rn,rel	将寄存器 Rn 的内容递减, 若不等于 0 则转移	3	2
DJNZ direct,rel	将直接寻址的 RAM 内容递减, 若不等于 0 则转移	3	2
NOP	不执行任何动作	1	1



# 第 15 章 跑 马 灯

第 14 章为我们积累了足够的单片机基础知识。有了这些基础知识，在单片机系统开发中就能得心应手。

这一章，我们从跑马灯开始谈起，并引入定时器与计数器。

## 15.1 开发一个跑马灯系统

### 任务的提出及电路图 多种实现方案

夜晚，美丽的霓虹灯装点着城市，有的如高山流水，有的如彩虹飞舞，这些丰富多彩的景象背后都是单片机的功劳。在这一节实验一个简单的跑马灯系统，以模仿多变的霓虹灯。

#### 15.1.1 任务的提出及电路图

为了达到既能演示效果，又便于制作的目的，我们设计采用 8 只 LED 来实现跑马灯。电路如图 15-1 所示。

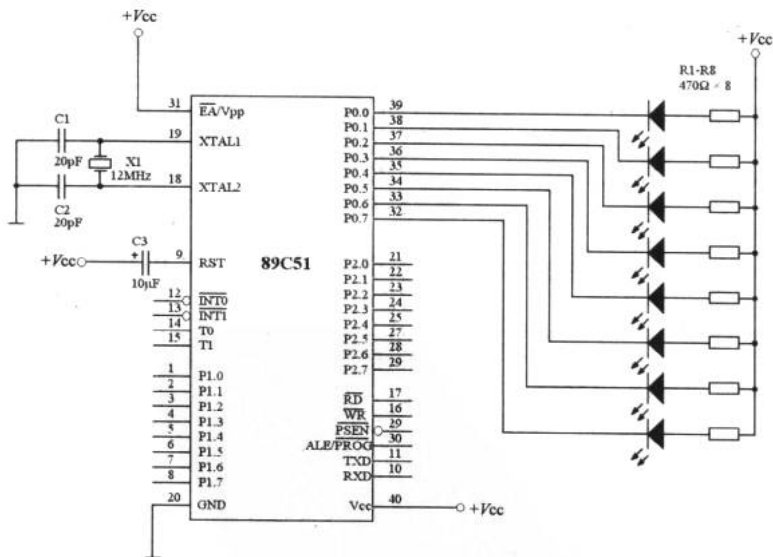


图 15-1 跑马灯电路

该跑马灯的最终效果是 LED 做单一的左移和右移，由图 15-1 可知，LED 的负极与单

低电平→……（循环）。

### 15.1.2 多种实现方案

序 15-1 是一种写法, 读者可以按自己的思路来设计程序。程序 15-1 的思路是:

初始化→左移 7 位→右移 7 位——

### 1. 原始的程序

### 程序 15-1

```

ORG      00H

START:
MOV      A, #0FFH      ; ACC=FFH, 设置左移初始值
CLR      C              ; 清进位 CY
MOV      R0, #8         ; R0 设置左移 8 位
;;;;;;;;;;;;;程序初始化;;;;;;;;;;;;;

LOOP:
RLC      A              ; 左移一位
MOV      P0, A          ; 输出至 P0 口
CALL     DELAY          ; 延时
DJNZ     R2, LOOP       ; 是否左移了 7 次, 如果不是则跳回 LOOP
MOV      R0, #7         ; 右移 7 次
;;;;;;;;;;;;;左移 7 位;;;;;;;;;;;;;

LOOP_1:
RRC      A              ; 右移一位
MOV      P0, A          ; 输出至 P0 口
CALL     DELAY          ; 延时
DJNZ     R2, LOOP_1     ; 是否右移了 7 次, 如果不是则跳回 LOOP_1
JMP      START          ; 重复执行该程序
;;;;;;;;;;;;;右移 7 位;;;;;;;;;;;;;

DELAY:
MOV      R3, #20
D1:
MOV      R4, #20
D2:
MOV      R5, #248
DJNZ     R5, $
DJNZ     R4, D2
DJNZ     R3, D1

```



程序 15-1

```
RET
END
```

程序 15-1 是一个简单明了的控制跑马灯的程序。如果读者在 MedWin 中输入并在硬件电路上实验, 就会轻而易举地掌握程序的设计思路。

## 2. 利用取表方式控制跑马灯

取表是单片机程序设计中一种十分常用的方法。这里的表是存放于 ROM 中的一组十六进制 (也可以是二进制等) 代码。取表, 就是程序通过寻址将这些代码传送到累加器或其他寄存器中使用的过程。取表程序的优点是预先存放所需数据, 在程序需要时调用, 这样一来, 程序简洁, 易于调试。

程序 15-2 就是一个利用取表方式设计的程序, 其中标号 “TABLE” 是表所在位置。该程序的设计思路是:

初始化 → 装表 → 取表判断 → 显示



程序 15-2

```
ORG      00H

START:    MOV     DPTR, #TABLE          ; 将表 TABLE 的地址存入 DPTR
          ;;;;;;;;;;装表;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

LOOP:     CLR     A                     ; 清除 ACC
          MOVC    A, @A+DPTR            ; 基址加变址寻址, 取出表数据
          CJNE    A, #01H, LOOP_1       ; 如果取出 01H 表明取完, 否则
          JMP     START                 ; 跳回 START
          ;;;;;;;;;;取表判断;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

LOOP_1:   MOV     P0, A                 ; 将 A 输出至 P0 口
          MOV     R3, #20                ; 延时 0.2 秒
          CALL    DELAY                 ; 调子程序
          INC     DPTR                  ; 数据指针加 1, 取下一个码
          JMP     LOOP
          ;;;;;;;;;;显示;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

DELAY:    MOV     R4, #20

D1:       MOV     R5, #248
          DJNZ    R5, $
          DJNZ    R4, D1
          DJNZ    R3, DELAY
          RET
```

程序 15-2

```

;::::::::::::::::::::::::::::::::::::;以下是该程序的表;::::::::::::::::::::::::::::::::::::;
TABLE:
    DB      0FEH, 0FDH, 0FBH, 0F7H      ; 左移
    DB      0EFH, 0DFH, 0BFH, 07FH
    DB      07FH, 0BFH, 0DFH, 0EFH      ; 右移
    DB      0F7H, 0FBH, 0FDH, 0FEH
    DB      01H                          ; 结束码
END
    
```

程序 15-2 中利用“MOV DPTR, #TABLE”使数据指针寄存器指到表的开头；利用“MOVC A, @A+DPTR”指令，根据累加器的值再加上 DPTR 的值，就可以使程序计数器 PC 指到表格内所要取出的数据。利用表来做程序的方法是很常见的，也是很有效率的。除了以上两种方法，读者还有其他方法吗？

## 15.2 定时器与计数器

什么是定时/计数 8051 的定时器和计数器 TMOD TCON 4 种工作模式  
把定时器应用于跑马灯 一个计数器的例子

定时与计数是单片机的专长之一，利用这个功能可以产生定时中断，或对待测信号定时或计数。这一小节里，我们来看看与定时器和计数器相关的寄存器设置与它们的应用。

### 15.2.1 什么是定时/计数

在微机的控制领域中，定时和计数占了相当重要的地位，例如让 CPU 每隔一段时间就做一次中断，就是定时器（timer）的典型应用；又比如对某数字信号的发生次数做计数，则是计数器（counter）的一种应用。

定时和计数有何不同呢？对单片机而言二者是一样的，主要的差别是信号源的不同。假如 CPU 的时钟信号源是晶振提供的，则是定时功能；如果时钟信号源为外部输入的数字信号，则频率未知且不一定保持稳定，所以 CPU 记录的是该输入信号的发生次数，因此这时称为计数。

### 15.2.2 8051 的定时器和计数器

8051 系列单片机内部包含两个定时/计数器，分别是 TIMER0 和 TIMER1。这两个 TIMER 统一由定时/计数器方式控制寄存器 TMOD 和 TCON 来掌握，如图 15-2 所示。当这些 TIMER 被设置成定时功能时，内部的功能单元随着每个机器周期而增加 1。若系统使用的振荡频率是 12MHz，则此时的定时分辨率是 1μs。

当 TIMER 被设置成计数器时，它通过外部输入点 T0 和 T1 信号，每当这些信号发生



跳变时, 内部的功能单元增加 1, 这个加 1 的动作完全以硬件方式做成, 与软件没有关系。我们可以从图 15-2 中对 CPU 内部的定时/计数器有个结构上的了解。

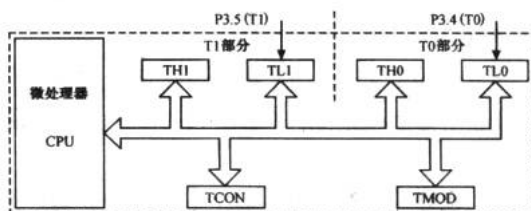
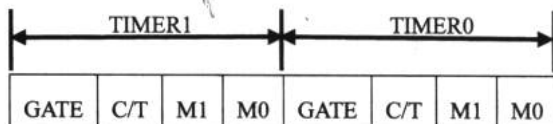


图 15-2 51 单片机中的定时/计数器

8051 的 TIMER0 和 TIMER1 分别有 4 种模式可供切换使用, 我们将逐步展开这个话题。

### 15.2.3 TMOD

8051 上的 TIMER0 和 TIMER1 的功能是相同的, 这两个定时/计数器的工作方式由定时/计数器方式控制寄存器 TMOD 上的 4 个位来控制。



- ✦ GATE 是允许或禁止 TIMER 动作的硬件控制点。当 TRX (在 TCON 中代表 TR0 或 TR1, 后同) = 1 且 GATE=1 时, 定时器只在  $\overline{\text{INT0}}/\overline{\text{INT1}}$  引脚为高电平时才会计时; 当 GATE=0 时, 则定时器在 TRX=1 时开始计时。
- ✦ C/T 决定 TIMER 是定时还是计数, C/T=0 为定时, C/T=1 为计数。
- ✦ M1 和 M0 决定了定时器的工作方式, 如表 15-1 所示。

表 15-1 定时器工作方式

M1	M0	工作方式	功 能
0	0	MODE0	13 位定时/计数器
0	1	MODE1	16 位定时/计数器
1	0	MODE2	8 位定时/计数器自动载入
1	1	MODE3	(TIMER0) TL0 为 8 位定时/计数器, 由 T0 控制; TH0 为另一个 8 位定时器, 由 T1 控制
1	1	MODE3	(TIMER1) 定时/计数器停止工作

### 15.2.4 TCON

定时/计数器控制寄存器 TCON 有 4 种功能: 设置或禁止 TIMER 工作、TIMER 溢位时的状态显示、外部中断信号的定义以及外部中断信号成立时的状态指示。以下是 TCON 寄存器的各位名称及功能描述:

TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- ✦ TF1: TIMER1 的溢出标志位。当 TIMRE1 溢出时, 会被设定为 1; 当执行中断子程序时, 会清除为 0。
- ✦ TR1: TIMER1 的启动位。TR1=1 时为启动, TR1=0 时为停止。
- ✦ TF0: TIMER0 的溢出标志位。当 TIMRE0 溢出时, 会被设定为 1; 当执行中断子程序时, 会清除为 0。
- ✦ TR0: TIMER0 的启动位。TR0=1 时为启动, TR0=0 为停止。
- ✦ IE1:  $\overline{\text{INT1}}$  的中断标志位。当中断发生时, 硬件会将此位置 1, 产生一个请求服务的中断信号。当 CPU 响应该中断时, 会将其清为 0。
- ✦ IT1:  $\overline{\text{INT1}}$  的中断方式控制。IT1=1 时为下降沿触发, IT1=0 时为电平触发方式。
- ✦ IE0:  $\overline{\text{INT0}}$  的中断标志位。当中断发生时, 硬件会将此位置 1, 产生一个请求服务的中断信号。当 CPU 响应该中断时, 会将其清为 0。
- ✦ IT0:  $\overline{\text{INT0}}$  的中断方式控制。IT0=1 时为下降沿触发, IT0=0 时为电平触发方式。

### 15.2.5 4 种工作模式

TIMER 共有 4 种工作模式, 我们逐一对其进行简单介绍。

#### 1. TIMER 模式 0

当 TIMER 被设置成模式 0 时, 计数器的宽度只有 13 位, 其中 TH 占 8 位, TL 占 5 位, 所以真正要存入的计数值应该是:

TL = (8192 - 计数值) 除以 32 取其余数值

TH = (8192 - 计数值) 除以 32 取其商

在该模式下, 如果系统频率为 12MHz, 则最长计时时间为 8.192ms。在 51 单片机的汇编语言中, 我们根据上述两条公式对 TIMER 进行初始的指令为 (以 TIMER0 为例, 计数值取 2000):

```
MOV    TL0,#(8192-2000)MOD 32
```

```
MOV    TH0,#(8192-2000)/32
```

完整的 MODE0 设置步骤如表 15-2 所示。

表 15-2 完整的 MODE0 设置步骤

步 骤	指 令	注 释
1.	MOV    TMOD, #00000000B	TIMER0 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV    TMOD, #00000000B	TIMER1 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV    TMOD, #00000100B	TIMER0 设定计数工作方式 (T0 输入)
	MOV    TMOD, #01000000B	TIMER1 设定计数工作方式 (T1 输入)
2.	SETB   TR0 / SETB   TR1	启动 TIMER0/启动 TIMER1
3.	MOV    TL0, #(8192-2000) MOD 32	以 TIMER0 为例, 计数值取 2000
	MOV    TH0, #(8192-2000)/32	
4.	JBC    TF0 / JBC    TF1	检查 TF0 是否溢出/检查 TF1 是否溢出



## 2. TIMER 模式 1

模式 1 与模式 0 几乎相同, 惟一的差别是计数的宽度改成了 16 位, 其余特点都保留。模式 1 下计数器的最大值为 65536, 若系统的频率是 12MHz 时, 则定时可达 65.536ms。不过模式 1 和模式 0 都有一个问题, 就是计数器均没有自动载入的功能, 如果我们要做重复性的定时动作, 就必须由程序强行载入。

完整的 MODE1 设置步骤如表 15-3 所示。

表 15-3 完整的 MODE1 设置步骤

步 骤	指 令	注 释
1.	MOV TMOD, #00000001B	TIMER0 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV TMOD, #00010000B	TIMER1 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV TMOD, #00000101B	TIMER0 设定计数工作方式 (T0 输入)
	MOV TMOD, #01010000B	TIMER1 设定计数工作方式 (T1 输入)
2.	SETB TR0 / SETB TR1	启动 TIMER0/启动 TIMER1
3.	MOV TL0, #(65536 - 2000)MOD 256	以 TIMER0 为例, 计数值取 2000
	MOV TH0, #(65536 - 2000) / 256	
4.	JBC TF0 / JBC TF1	检查 TF0 是否溢出/检查 TF1 是否溢出

## 3. TIMER 模式 2

在模式 2 下, 计数器宽度仅有 8 位, 最大计数值只到 256, 但是此模式具有自动载入功能。这时, 计数动作由 TL 负责, 而 TH 不负责计数但负责存储重新载入的定时值 (8 位), 当 TL 计数到最大值而产生溢出时, 除了 TF 会被设成 1 外, CPU 内部自动将 TH 上的值载入 TL 内部, 继续使 TL 计数。这个功能使得利用程序载入的时间减少了, 同时降低了计数误差。

完整的 MODE2 设置步骤如表 15-4 所示。

表 15-4 完整的 MODE2 设置步骤

步 骤	指 令	注 释
1.	MOV TMOD, #00000010B	TIMER0 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV TMOD, #00100000B	TIMER1 设定定时工作方式 (内部输入)
	MOV TMOD, #00000110B	TIMER0 设定计数工作方式 (T0 输入)
	MOV TMOD, #01100000B	TIMER1 设定计数工作方式 (T1 输入)
2.	SETB TR0 / SETB TR1	启动 TIMER0/启动 TIMER1
3.	MOV TL0, #(256 - 100)	以 TIMER0 为例, 计数值取 100
	MOV TH0, #(256 - 100)	
4.	JBC TF0 / JBC TF1	检查 TF0 是否溢出/检查 TF1 是否溢出

## 4. TIMER 模式 3

模式 3 与前面所谈的模式都不一样。TIMER0 工作在 MODE3 时会分成两个独立的 8 位定时器。TL0 为一个独立的 8 位定时器, 由 TIMER0 所控制。而 TH0 则为另一个 8 位的定时器, 由 TIMER1 的 TR1 所控制, 且 TH0 控制了 TIMER1 的中断 TF1。若 TIMER1 工

作在 MODE3 时, 会使 TIMER1 停止计时。

完整的 MODE3 设置步骤如表 15-5 所示。

表 15-5 完整的 MODE3 设置步骤

设定 MODE3 的步骤 (TL0)	设定 MODE3 的步骤 (TH0)
1. MOV TMOD, #00000011B ; 设定计时工作方式 (内部输入), 或 1. MOV TMOD, #00000111B ; 设定计数工作方式 (T0 输入)	1. MOV T0MD, #00000011B ; 设定计时工作方式 (内部输入)
2. SETB TR0 ; 启动定时器 TIMER0	2. SETB TR1 ; 启动定时器 TIMER0
3. MOV TL0, #(256-100); 计数值 100	3. MOV TH0, #(256-100); 计数值 100
4. JBC TF0 ; 检查 TF0 是否溢出	4. JBC TF1 ; 检查 TF1 是否溢出

### 15.2.6 把定时器应用于跑马灯

我们在 15.1.2 中通过两种方法实验了跑马灯。既然定时器具有定时的功能, 我们何不利用它来实现延时程序呢?

程序 15-3 以定时器的模式 1 工作方式为例来完成跑马灯的程序设计, 与前面不同的只是延时子程序由计时器取代了。

程序初始化阶段, 通过设定 TMOD, 使 TIMER 工作在模式 1 下, 当调用延时子程序 DELAY 时, 指令“SETB TR0”启动 TIMER0 开始计时, RECOUNT 部分装载计数初值, LOOP\_2 判断 TIMER 是否溢出, LOOP\_3 则是进行重复计时以达到所需延时时长的目的。

程序 15-3

```

ORG      00H
MOV      TMOD, #01H          ; 设定 TIMER0 工作在模式 1 下
START:
CLR      C                   ; 清进位 CY
MOV      A, #0FFH            ; ACC=FFH, 左移初始值
MOV      R2, #8              ; 左移 8 次
LOOP:
RLC      A                   ; 左移一位
MOV      P0, A               ; 输出至 P0 口
MOV      R3, #20             ; 延时 0.2 秒
CALL     DELAY
DJNZ     R2, LOOP            ; 是否左移了 8 次? 不是则循环
MOV      R2, #7              ; 右移 7 次
LOOP_1:
RRC      A                   ; 右移一位
MOV      P0, A               ; 输出至 P0 口
MOV      R3, #20
CALL     DELAY
DJNZ     R2, LOOP_1
JMP      START              ; 循环
    
```





程序 15-3

```

;;;;;;;;;;;;;;以下是利用计时器延时的子程序;;;;;;;;;;;;;;
DELAY:
    SETB    TR0                      ; 启动 TIMER0 开始计时
RECOUNT:
    MOV     TH0, #(65536-2000) MOD 256 ; 计数初值 2000
    MOV     TH0, #(65536-2000) / 256
LOOP_2:
    JBC     TF0, LOOP_3              ; TF0 是否为 1, 是则跳到 LOOP_3
    JMP     LOOP_2                  ; 不是表明计时还没完成, 循环等待
LOOP_3:
    DJNZ    R3, RECOUNT             ; R3 为重重复计时的次数
    CLR     TR0                      ; 停止计数
    RET
END

```

还有一种比较实用的控制跑马灯的方法——计时中断法。其思想是令 TIMER0 工作在 MODE1 (16 位定时器) 模式下, 每隔 10000 $\mu$ s 产生一次中断, 而中断 100 次就是 1 秒。

定时器在 FFFFH 时, 再加 1 会变 0000H 而产生溢出, 并设定中断标志位 TF0 为 1, 以对 CPU 提出中断请求。因此在中断产生时, 定时器内部的 16 位全部为 0, 若在此时不重新设定定时器的计数值, 则定时器就从 0000H 开始计数, 当下次溢出产生时, 共计数  $2^{16}=65536$  个脉冲 (65536 $\mu$ s), 所以在定时器溢出时, 必须重新设定计数值。具体程序见程序 15-4。

程序 15-4

```

ORG     00H                      ; 主程序起始地址
JMP     START                    ; 跳至主程序
ORG     0BH                      ; TIMER0 中断起始地址
JMP     TIM0                     ; 跳至中断子程序 TIM0

START:
    MOV     TMOD, #01H            ; TIMER0 工作在 MODE1
    MOV     TH0, #(65536-10000)   ; 定时初值, 10000 微秒
    MOV     TL0, #(65536-10000)
    SETB    TR0                  ; 启动 TIMER0
    MOV     IE, #10000010B       ; TIMER0 中断使能
    MOV     R5, #100              ; 设中断 100 次即 1 秒
    MOV     P1, #0FEH            ; 左移初始值
    JMP     $                    ; 停机等待

TIM0:
    PUSH    ACC                  ; 累加器压栈
    MOV     TH0, #(65536-10000)   ; 重设定定时值
    MOV     TL0, #(65536-10000)
    DJNZ    R5, LOOP              ; 中断不到 100 次, 跳到 LOOP
    MOV     R5, #100              ; 重设 100 次
    MOV     A, P0                 ; 读入 P0 的数据至 A

```

### 程序 15-4

	RL	A	; ACC 值左移一位
	MOV	P0, A	; 输出至 P0
LOOP:			
	POP	ACC	; 从堆栈取回 ACC 值
	RETI		; 返回主程序
	END		

### 15.2.7 一个计数器的例子

在这个实例中，我们将 TIMER 设置在模式 2 下。当 T0 每输入 4 次，P0 口的 LED 就会做 BCD 码加 1 的变化。电路图如图 15-3 所示。

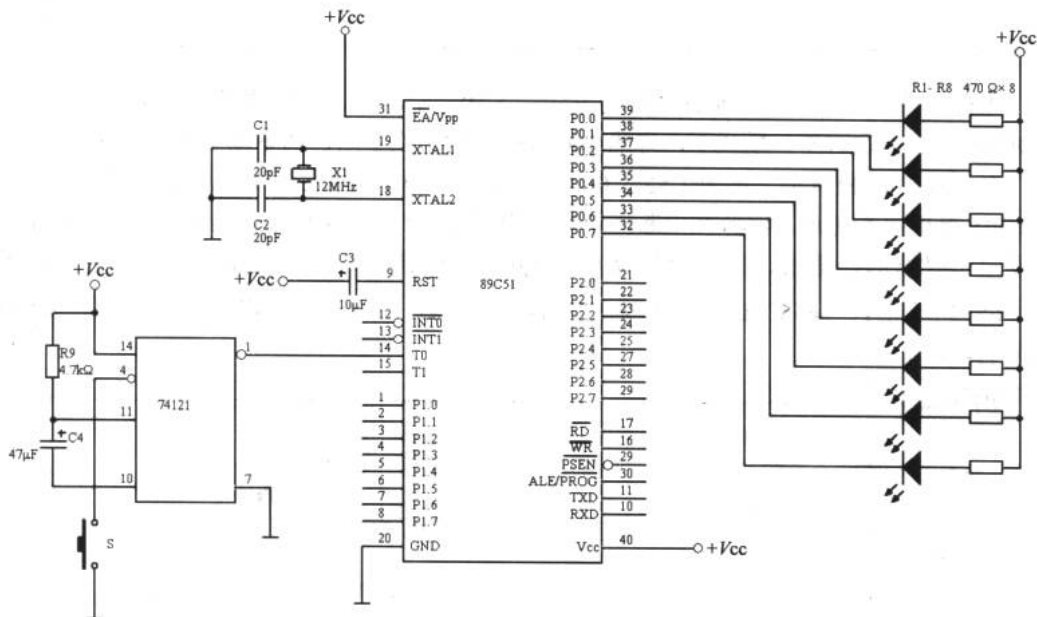


图 15-3 一个计数器的例子

我们在前面已经谈到开关在导通的瞬间会产生一系列微妙的杂波信号，这些信号足以使单片机这个精密的系统感知，以致产生误动作。于是使用数字芯片 74121，其作用是向 T0 口提供一个稳定的脉冲信号。图 15-4 所示为它的内部电路图。当我们把程序 15-5 运行起来后，每按下 S 键 4 次，就会使 LED 做一个 BCD 码的加 1 变化。

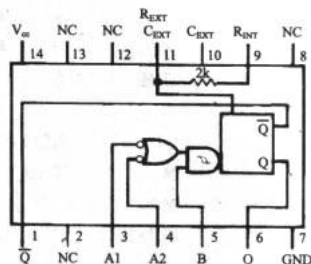


图 15-4 74121



程序 15-5

```
START:  ORG      00H
        MOV      R2, #00H          ; 计数初始值
        MOV      TMOD, #00000110B ; 计数工作方式下, 模式 2
LOOP:   MOV      TH0, #(256-4)      ; 计数 4 次
        MOV      TL0, #(256-4)
        SETB     TR0                ; 启动计数器
LOOP_1: JBC      TF0, LOOP_2         ; 溢出则跳至 LOOP_2
        JMP      LOOP_1             ; 否则循环
LOOP_2: MOV      A, R2
        ADD      A, #01H            ; BCD 码加 1
        DA       A                  ; 十进制调整
        MOV      R2, A              ; 存入 R2
        CPL      A                  ; 将 ACC 中的值反相
        MOV      P0, A              ; 输出至 P0 口
        JMP      LOOP               ; 循环
END
```

## 第 16 章 马表与时钟

本章介绍一些单片机系统开发中基础的方法。

## 16.1 制作一个马表

### 任务的提出及电路图 程序

这是一个不错的实例，简单的电路和清晰的程序是单片机系统 I/O 接口应用的一个好例子。

### 16.1.1 任务的提出及电路图

我们的任务是让两位七段数码管在开机时显示“00”，第一次按下按键后开始计时，第二次按下后计时停止，第三次按下后数码管清0。该马表最大计时99秒，电路如图16-1所示。

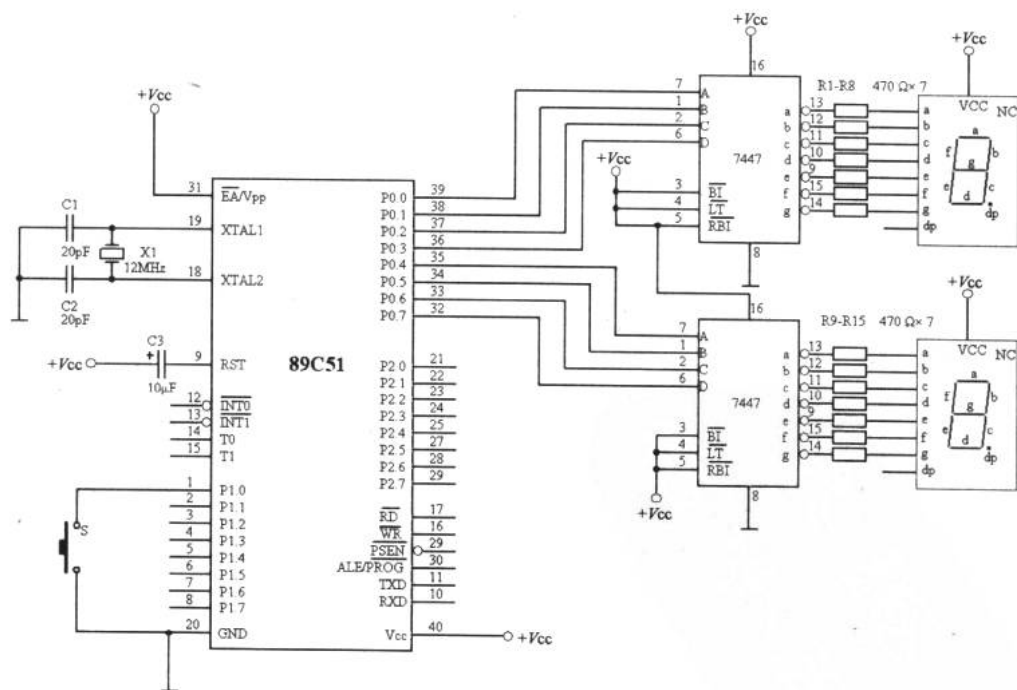


图 16-1 马表电路



使用两个七段数码管编码器 7447 来为数码管编码。两个 7447 占用了 P0 端口的 8 个位, 其中 P0.0~P0.3 产生马表个位数编码, 而 P0.4~P0.7 产生高位编码。两个数码管为共阳型。另外, 按键开关 S 与 P1.0 相连, 作为计时/暂停/复位按键。

### 16.1.2 程序

程序 6-1 是该马表的单片机程序。它由初始化、按键判断、计时、延时和消除抖动的程序段组成。

在 START 程序段中, “MOV P0,#00H”使马表一开机, 数码管就显示“00”秒。“JB P1.0,\$”对按键进行判断。由于按键可能会因接触不良而产生误触发, 于是消除抖动程序段 FILTER 起到了软件消除抖动的作用, 方法是利用延时 30ms 把按键误动作的过程过滤掉。当按下并放开按键 S 后, 系统开始正常计时。这与 15.2.7 节中利用 74121 硬件消除抖动的目的是一样的。

在 PRESS\_1 程序段中, 利用延时使 LED 每 1 秒加 1, “DA A”是一个进行十进制调整的指令。如果在计时过程中又按下按键 S, 则 PRESS\_2 程序段开始执行。第二次按键之后, 进入 PRESS\_3 程序段。指令“JB P1.0,\$”在等待第三次按键信号, 此时, 系统处于停机(待机)状态。直到第三次按下按键后, 程序段 PRESS\_4 执行, 程序又从头开始执行。

程序 16-1

```

ORG      00H

START:
MOV      P0,#00H      ; 显示“00”
JB       P1.0,$       ; 有键按下则继续
CALL     FILTER       ; 消除开关的抖动
JNB      P1.0,$       ; 判断有没有放开按键
MOV      R0,#00H      ; 计时初始值

PRESS_1:
MOV      A,R0         ; 将初始值载入 ACC
MOV      P0,A         ; 输出至 P0
MOV      R5,#10       ; 延时 1 秒

ADD_1:
MOV      R6,#200      ; 延时用寄存器
CALL     DELAY        ; 调延时子程序
DJNZ     R5,PRESS_1
MOV      A,R0
ADD      A,#01H       ; 计时值加 1
DA       A            ; 十进制调整
MOV      R0,A         ; 返回计时用寄存器
JMP      PRESS_1      ; 重复计时动作

PRESS_2:
CALL     FILTER       ; 消除开关的抖动
JB       P1.0,PRESS_3 ; 如果放开按键, 则跳至 PRESS_3
JMP      PRESS_2

```

程序 16-1

```

PRESS_3:                                ; 第三次按按键
        JB      P1.0,$
        CALL    FILTER                  ; 消除开关的抖动
PRESS_4:
        JB      P1.0,START              ; 放开按键则跳至 START 清 0
        JMP     PRESS_4
DELAY:   ; 延时子程序
        MOV     R7,#248
        JNB     P1.0,PRESS_2
        DJNZ    R7,$
        DJNZ    R6,DELAY
        RET
FILTER:   ; 消除抖动, 30ms 延时子程序
        MOV     R6,#60
D1:
        MOV     R7,#248
        DJNZ    R7,$
        DJNZ    R6,D1
        RET
END
    
```

## 16.2 制作一个时钟

预备知识 任务的提出及电路图 程序

### 16.2.1 预备知识

#### 1. 静态显示方式

在马表制作的实例中,我们利用 7447 作为单片机 I/O 口与七段数码管的接口。由于只计数到“99”,因此两位数码管就够了。这种显示方式叫做静态显示方式。各位数码管的共阳极(或共阴极)连接在一起并接电源正极(或负极)。每位数码管的段选线(a~dp)分别通过 7447 与一个 8 位 I/O 口相连。之所以称之为静态显示,是由于显示器中的各位相互独立,而且各位的显示字符一经确定,相应 I/O 口的输出将维持不变,直到显示另一个字符为止,也正因为如此,静态显示器的亮度较高。图 16-2 所示为一个 4 位静态数码管显示器模式电路,该电路各位可独立显示,只要在该位的段选线上保持段选码电平,该位就能保持相应的显示字符。由于各位分别由一个 8 位输出口控制段选码,故在同一时间里,每一位显示的字符可以各不相同。这种显示方式接口,编程容易且管理简单,不足的是占用 I/O 的线资源较多。比如在一个电子时钟里至少应该包含时、分、秒这 3 个单位,每个单位将会有两个七段数码管。如果仍然按照马表的思路,每个 I/O 口控制两个数码管,那就需要 3 个 I/O 口,那么一个 51 单片机的 I/O 口将会被全部占用。如果系统中除了显示部



分外还有别的设备存在, 那么一个 51 单片机的 I/O 口将不够用。

## 2. 动态显示方式

在多位显示时, 为了简化硬件电路, 通常将所有位的段选线相应地并联在一起, 由一个 8 位 I/O 口实现控制, 形成段选线的多路复用。而各位的共阳极或共阴极分别由相应的 I/O 口线控制, 实现各位的分时选能。图 16-3 所示为一个 4 位动态显示器电路。

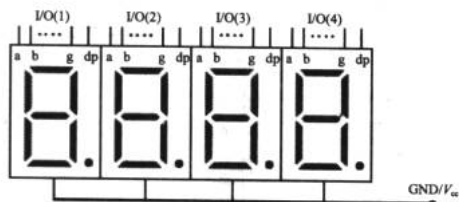


图 16-2 4 位静态数码管显示器电路

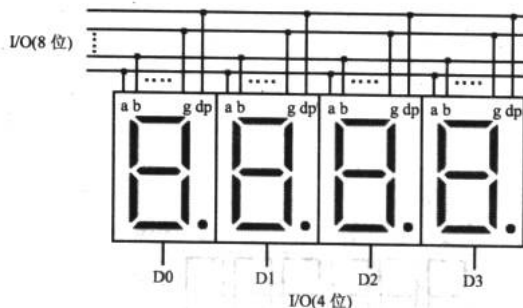


图 16-3 4 位动态显示器电路

其中段选线占用一个 8 位 I/O 口, 而位选线占用一个 4 位 I/O 口。由于各位的段选线并联, 段选码的输出对各位来说都是相同的。因此, 同一时刻, 如果各位位选线都处于选通状态, 4 位都显示相同的字符。若要各位能够显示出与本位相应的显示字符, 就必须采用扫描显示方式, 即在某一时刻, 只让某一位的位选线处于选通状态, 而其他各位的位选线处于关闭状态。同时, 段选线上输出相应位要显示字符的字形码, 这样同一时刻 4 位中只有选通的那一位显示出字符, 而其他 3 位则是熄灭的。同样, 在下一个时刻, 只让下一位的位选线处于选能状态, 而其他各位的位选线处于关闭状态。同时, 在段选线上输出相应位将要显示字符的字形码, 则同一时刻, 只有选通位显示出相应的字符, 而其他各位则是熄灭的。如此循环下去, 就可以使各位显示出将要显示的字符, 虽然这些字符是在不同时刻出现的, 而同一时刻只有一位显示, 其他各位熄灭。但由于人眼有视觉暂留现象, 只要每位显示间隔足够短, 则可造成多位同时亮的假象, 达到显示的目的。

我们采用动态扫描显示的方法时要注意三点: 其一, 点亮时要让数码管得到最大的顺向电流, 通常一段数码管需要 10mA。在做 4 位的扫描时, 每一段数码管的平均电流只有 1/4 电流最大值。因此扫描时要得到适当的亮度最好有 30mA 以上的瞬间电流, 即将限流电阻取 20~100Ω。其二, 在切换至下一位显示时, 应把上一位关闭一段时间 (约 50μs), 再将下一位扫描信号送出, 以免上一位的显示数据在下一位出现残影, 即避免“鬼影”的产生。第三, 扫描频率必须高于视觉暂留频率 16Hz 以上 (即 62ms 以上)。

### 16.2.2 任务的提出及电路图

这是一个比较实用的数字时钟系统, 电路如图 16-4 所示。与 P0.0 相连的按键 S1 控制“秒”的调整, 每按下一次加 1 秒; 与 P0.1 相连的按键 S2 控制“分”的调整, 每按下一次加 1 分; 与 P0.2 相连的按键 S3 控制“时”的调整, 每按下一次加 1 小时。

数码管 D1 和 D2 为秒位, D3 和 D4 为分位, D5 和 D6 为时位。6 个数码管通过 7447 与单片机的 P1.0~P1.3 相连, P1.4~P1.6 作为选通地址线。74138 是一个 3-8 译码器, 其输出端与驱动三极管 VT1~VT6 的基极相连, 当某一位数码管被选通后, 74138 对应的输出端出现低电平, 则相应的三极管 (PNP 型管) 导通, 数码管被点亮。

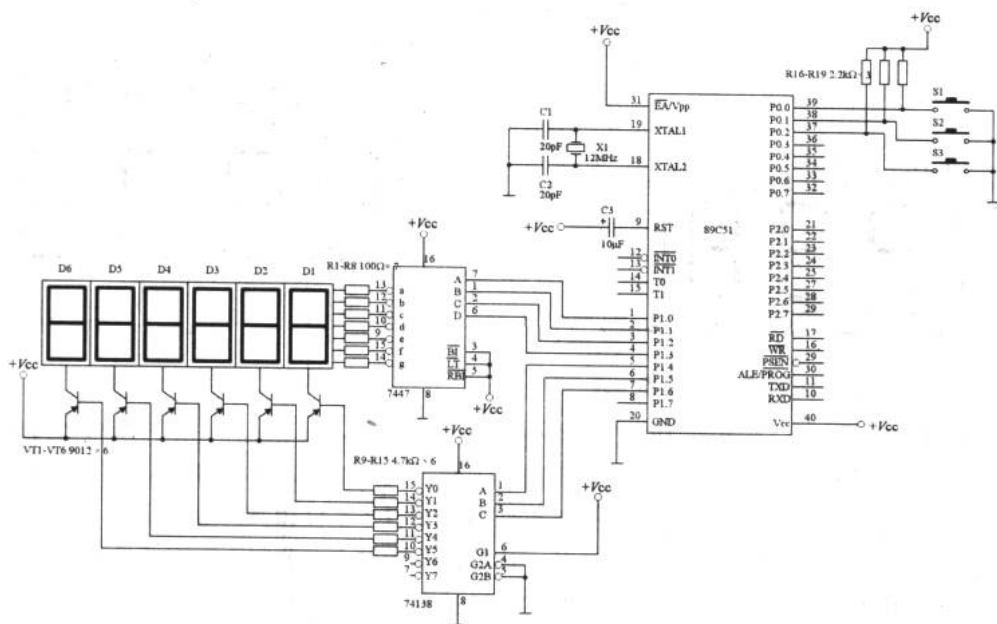


图 16-4 时钟电路

在该时钟电路中, 采用动态扫描的方法来驱动数码管。为了提高亮度, 我们把限流电阻 R1~R8 换成了 100Ω 的。译码器 74138 起到了片选的作用, 从而控制在某一时间内某一位的七段数码管发光。

### 16.2.3 程序

该实例的程序与注释如程序 16-2 所示。

程序 16-2

```

ORG      00H                ; 主程序起始地址
JMP      START
ORG      0BH                ; TIMER0 中断入口地址
JMP      TIM0

START:
MOV      SP, #70H           ; 把堆栈设置在 70H
MOV      25H, #00H         ; 地址 25H 作为显示寄存器, 初始值 00
MOV      2AH, #12H         ; “时” 寄存器地址为 2AH, 初始值 12H
MOV      2BH, #00H         ; “分” 寄存器地址为 2BH, 初始值 00H
    
```





程序 16-2

```

MOV    2CH, #00H                ; “秒” 寄存器地址为 2CH, 初始值 00H
MOV    TMOD, #00000001B         ; 设 TIMER0 为 MODE1 下
MOV    TH0, # (65536-4000)      ; 计时中断为 4000μs
MOV    TL0, # (65536-4000)
MOV    IE, #10000010B          ; TIMER0 中断使能
MOV    R4, #250                 ; 中断 250 次
SETB   TR0                      ; 开 TIMER0

LOOP:   JB    P0.0, NOPRESS_2    ; 如果 S1 按下, 继续执行, 否则跳至
                                   ; NOPRESS_2 检查 S2
        CALL  FILTER            ; 消除抖动
        MOV   A, 2CH            ; 将“秒”载入 A 中
        ADD   A, #01H          ; A 中内容加 1
        DA    A                 ; 十进制调整
        MOV   2CH,             ; 将 A 中的内容存回“秒”
        CJNE  A, #60H, OPRESS_1 ; 是否等于 60 秒, 不是则跳至 NOPRESS_1
        MOV   2CH, #00H        ; 是则清除“秒”

NOPRESS_1:
        JNB   P0.0, $           ; 判断 S1 是否放开
        CALL  FILTER            ; 消除抖动

NOPRESS_2:
        JB    P0.1, NOPRESS_4   ; S2 若按下, 继续执行, 否则跳至 NOPRESS_4
        CALL  FILTER            ; 消除抖动
        MOV   A, 2BH            ; 将“分”载入 A
        ADD   A, #01H          ; A 的内容加 1
        DA    A                 ; 十进制调整
        MOV   2BH, A            ; 将 A 内容返回“分”中
        CJNE  A, #60H, NOPRESS_3 ; 判断是否 60 分, 不是则跳至 NOPRESS_3
        MOV   2BH, #00H        ; 是则清除“分”为 00

NOPRESS_3:
        JNB   P0.1, $           ; 判断 S2 是否放开
        CALL  FILTER            ; 消除抖动

NOPRESS_4:
        JB    P0.2, LOOP        ; S3 若按下, 继续执行, 否则跳至 LOOP
        CALL  FILTER            ; 消除抖动
        MOV   A, 2AH            ; 将“时”载入 A
        ADD   A, #01H          ; A 的内容加 1
        DA    A                 ; 十进制调整
        MOV   2AH, A            ; 将 A 内容返回“时”中
        CJNE  A, 24H, NOPRESS_5 ; 是否等于 24, 不是则跳至 NOPRESS_5
        MOV   2AH, #00H        ; 是则清除“时”

NOPRESS_5:
        JNB   P0.2, $           ; 判断 S3 是否放开
        CALL  FILTER            ; 消除抖动
        JMP   LOOP              ; 跳至 LOOP

TIM0:   MOV    TH0, # (65536-4000) ; 重设计时 4000μs
        MOV    TL0, # (65536-4000)

```

程序 16-2

```

PUSH    ACC                ; 将 A 的值压栈, 即在堆栈中暂存 A 中的值
PUSH    PSW                ; 将 PSW 压栈
DJNZ    R4, COUNT_1S      ; 计时 1s
MOV     R4, #250           ; 把立即数 250 转移至 R4
CALL    CLOCK              ; 调计时子程序
CALL    DISP               ; 调显示子程序

COUNT_1S:
CALL    SCAN               ; 调用扫描子程序
POP     PSW                ; 至堆栈取回 PSW 的值 (弹栈)
POP     ACC                ; 至堆栈取回 ACC 的值
RETI                      ; 计时中断返回

SCAN:
MOV     R0, #28H           ; (28H) 为扫描指针
INC     @R0                ; 扫描指针加 1
CJNE    @R0, #6, WITHADD   ; 判断是否扫描完 6 个显示器,
                           ; 不是则跳至 WITHADD
MOV     @R0, #00H          ; 扫描完则设扫描指针为 0

WITHADD:
MOV     A, @R0             ; 扫描指针载入 A
ADD     A, #20H            ; A 加常数 20H (显示寄存器地址) 等于各时间
                           ; 显示区地址
MOV     R1, A              ; 存入 R1 等于各时间显示地址
MOV     A, @R0             ; 扫描指针存入 A
SWAP    A                  ; A 的高低 4 位交换
ORL     A, @R1             ; 扫描值加显示值
MOV     P1, A              ; 输出至 P1
RET                      ; 子程序返回

CLOCK:
MOV     A, 2CH             ; 把“秒”送入 A
ADD     A, #01H            ; 秒加 1
DA      A                  ; 十进制调整
MOV     2CH, A             ; 存入秒寄存器
CJNE    A, #60H, RESIGN    ; 判断是否超过 60 秒, 不是则跳至 RESIGN
MOV     2CH, #00H          ; 是则清除为 00
MOV     A, 2BH             ; 把“分”送入 A
ADD     A, #01H            ; 分加 1
DA      A                  ; 十进制调整
MOV     2BH, A             ; 存入分寄存器
CJNE    A, #60H, RESIGN    ; 判断是否超过 60 分, 不是则跳至 RESIGN
MOV     2BH, #00H          ; 是则清除为 00
MOV     A, 2AH             ; 把“时”送入 A
ADD     A, #01H            ; 时加 1
DA      A                  ; 十进制调整
MOV     2AH, A             ; 存入时寄存器
CJNE    A, #24H, RESIGN    ; 判断是否超过 24 时, 不是则
                           ; 跳至 RESIGN
MOV     2AH, #00H          ; 是则清除为 00

RESIGN:
RET                      ; 返回
    
```



程序 16-2

```

DISP:
    MOV    R1, #25H          ; (25H) 为显示寄存器, R1=25H
    MOV    A, 2CH            ; 将秒寄存器内容存入 A
    MOV    B, #10H          ; B=10H
    DIV    AB                ; A 除以 B, 商存入 A, 余数存入 B
    MOV    @R1, B            ; 将 B 内容存入 (25H)
    INC    R1                ; R1=26H
    MOV    @R1, A            ; 将 A 的内容存入 (26H)
    INC    R1                ; R1=27H
    MOV    A, 2BH            ; 将分寄存器内容存入 A
    MOV    B, #10H          ; B=10H
    DIV    AB                ; A 除以 B, 商存入 A, 余数存入 B
    MOV    @R1, B            ; 将 B 内容存入 27H
    INC    R1                ; R1=28H
    MOV    @R1, A            ; 将 A 的内容存入 (28H)
    INC    R1                ; R1=29H
    MOV    A, 2AH            ; 将时寄存器内容存入 A
    MOV    B, #10H          ; B=10H
    DIV    AB                ; A 除以 B, 商存入 A, 余数存入 B
    MOV    @R1, B            ; 将 B 的内容存入 (29H)
    INC    R1                ; R1=2AH
    MOV    @R1, A            ; 将 A 的内容存入 (2AH)
    RET                      ; 子程序返回

FILTER:
    MOV    R6, #60H          ; 5ms 延时消除抖动

D1:
    MOV    R7, #248
    DJNZ   R7, $
    DJNZ   R6, D1
    RET
    END

```

# 第 17 章 采集我们的声音

在最后一章里，我们将从一个实际的工程开始，继续对单片机的其他知识进行学习。同时，应用模拟和数字电路的知识完成我们这个比较复杂的项目。

## 17.1 系统规划

声音信号 设计功能

### 17.1.1 声音信号

如果读者使用过 Windows 中的录音机或其他录音软件录制并保存过自己的声音文件，除了闲暇时打开听听外，有没有想过看看这个声音文件的波形是什么样子的？图 17-1 所示为编者发出“热烈欢迎”4个字的声音波形。

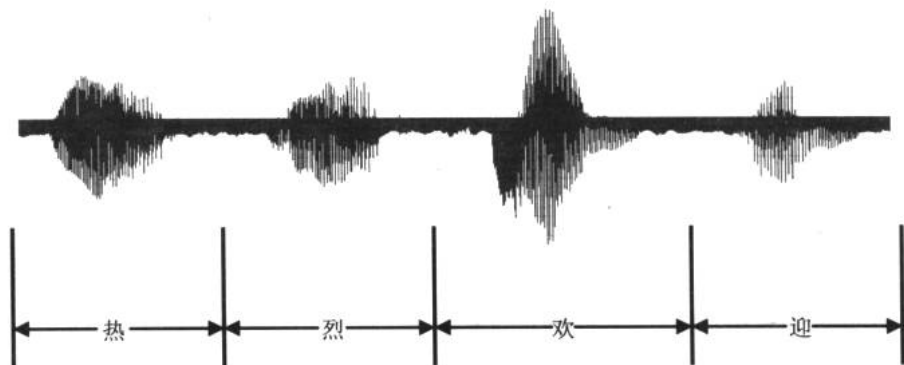


图 17-1 “热烈欢迎”4个字的声音波形

读者可能会觉得这些密密麻麻的波形没有什么价值，但把某段波形进行时间放大，将会得到如图 17-2 所示的波形曲线。

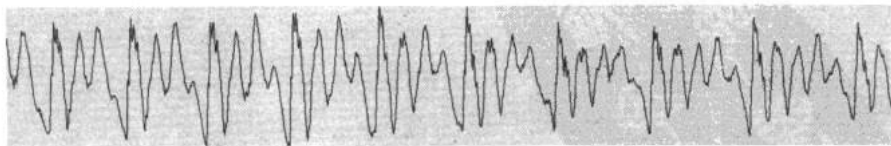


图 17-2 “热”字波形放大截选

这些由不同频率正弦波叠加而成的波形就是语音信号在时域（time domain）上的表示。计算机是一个数字化的设备，像上面那些模拟信号的波形，计算机是不认识的。那为



什么我们对着 MIC 说话, 软件就能给我们录音呢? 这都是声卡的功劳。声卡的最大特点就是它是一个模数 (A/D) 转换器。在本章的第三节我们会专门学习 A/D 的知识。通过声卡, 声音变成了离散的数字量, 于是被计算机识别并存储。当我们回放录制的声音时, 计算机把以数字量存储的声音信号又转换成模拟量 (D/A, 数模转换), 然后驱动喇叭发出声音。这就是计算机中声音采集与播放的简单描述。

### 17.1.2 设计功能

本章将要实现的声音采集系统的功能是: 利用驻极体话筒采集声音信号, 接着进行放大和 A/D 变换, 然后通过单片机的串口向计算机发送。最后在计算机端的应用程序接收这些信号并显示。

该系统根据所实现的功能分为以下几个模块, 如图 17-3 所示。

- ✦ 模块一: 信号采集。
- ✦ 模块二: 信号放大与滤波。
- ✦ 模块三: A/D。
- ✦ 模块四: 51 单片机。
- ✦ 模块五: 串口通信。
- ✦ 模块六: 计算机端应用程序。

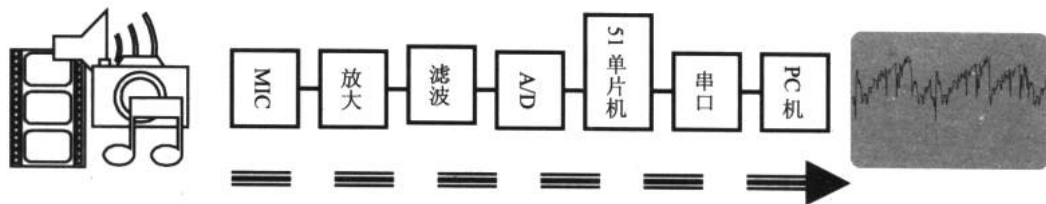


图 17-3 声音信号的“旅行”

## 17.2 信号采集与放大

信号采集 信号放大 功率放大 滤波器

信号的采集是该系统的喉舌, 这个部分质量的好坏直接影响整个系统的最终效果。通常信号的采集与放大可以利用模拟器件进行。在这个部分, 我们主要解决的问题有: 传感器的选择、放大器的设计、滤波器设计及阻抗匹配等问题。

### 17.2.1 信号采集

采集对象是大家十分熟悉的声音信号, 至于如何把声音这种非电信号转换成电信号的方法我们在模拟电路部分已经谈过, 在此给出一个参考电路, 如图 17-4 所示。

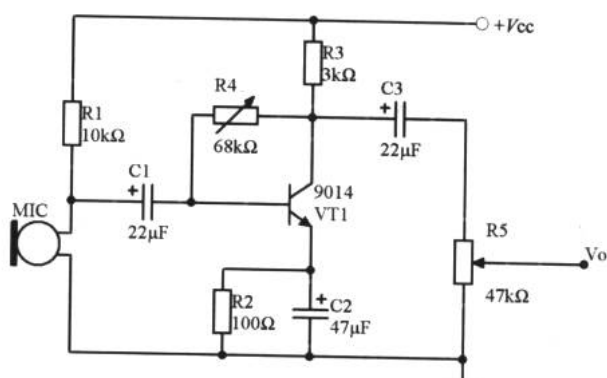


图 17-4 声音信号的采集和前置放大

## 17.2.2 信号放大

从前置放大输出的信号幅度较小且干扰较大, 不适合后续处理的需要, 所以, 得通过信号放大器将微弱的声音信号进行放大。关于信号放大的电路设计不胜枚举, 图 17-5 所示为一个十分通用的放大器。

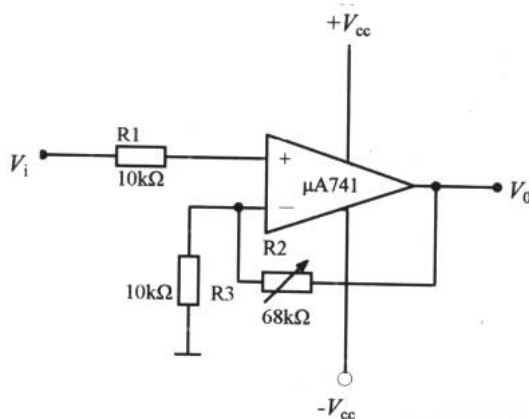


图 17-5 信号放大器

## 17.2.3 功率放大

如果需要通过喇叭或耳机把采集到的声音播放出来, 可以在前置放大级后加上一个功率放大器。功率放大器与信号放大器是并联的关系。图 17-6 所示为一个功率放大器的例子, 以供参考。

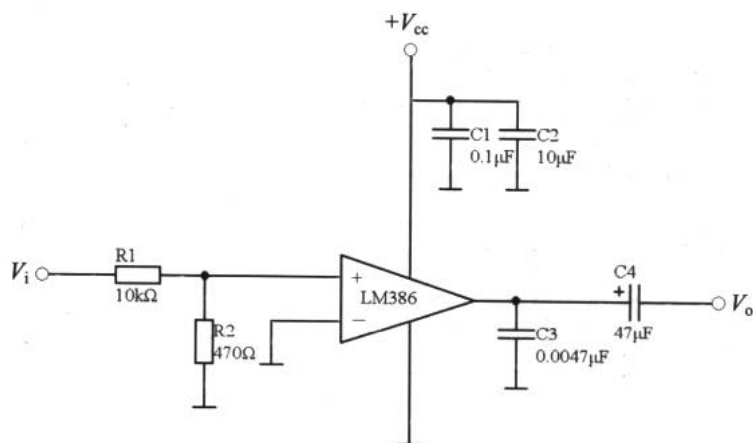


图 17-6 功率放大器

### 17.2.4 滤波器

采集到的声音大都集中在低频。如果要求采集到的信号有较高的质量,不希望高频成分混入,可以设计一个有源低通滤波器来滤除高频噪声。关于设计方法和计算公式我们在前面已经介绍过了,这里只需要注意滤波器应该连接在前置放大之后、A/D 之前即可。图 17-7 所示为一个有源二阶低通滤波器电路。

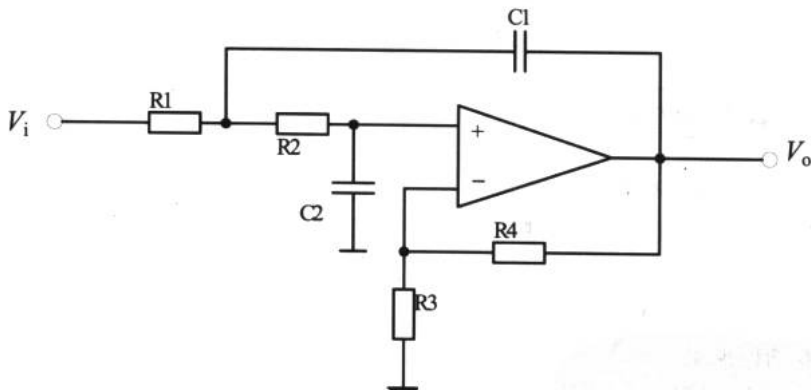


图 17-7 有限增益低通滤波器

在工程应用领域,特别是在对信号要求较高的场合,除了使用运算来搭建滤波器外,常常使用集成型的有源滤波器。图 17-8 所示为以 LTC1068 为核心器件的有源滤波器应用电路及频响特性曲线。这种滤波器内部集成了多个二阶滤波器,具有低噪声、低功耗等特点,但价格相对较高。

关于如何使用集成滤波器,读者可以参考器件的手册。

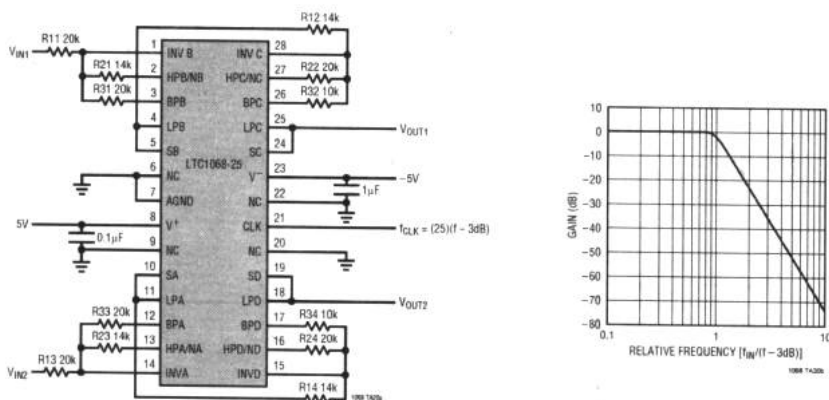


图 17-8 集成有源低通滤波器

## 17.3 A/D 转换

什么是 A/D 如何选择 A/D 器件 关于 ADC080X 声音采集系统中的 A/D

在单片机的实时测控和智能化仪表等应用系统中，传感器负责把非电信号如温度、压力、流量、速度及声音等转换成电信号，这时的信号为模拟信号，无法被数字系统识别与处理。为了解决这个问题，需要一个将模拟量向数字量转换的器件——A/D（模数转换器），通过 A/D 后，信号才能输入到单片机或微机中进行处理。如有必要再将处理结果经 D/A 转换器件变换成模拟量输出，实现对被控对象的控制。

### 17.3.1 什么是 A/D

图 17-9 所示为一个价格低廉的 A/D 转换器件——ADC0804 的典型应用电路。

ADC0804 的 6 脚 ( $V_i+$ ) 和 7 脚 ( $V_i-$ ) 是差动模拟电压输入端。输入单端正电压时， $V_i-$  接地；而差动输入时，直接接入  $V_i+$  和  $V_i-$ 。在图 17-9 中，利用一个  $10\text{k}\Omega$  的电位器 WR 产生连续变化的模拟信号。通过调节 WR 使得  $V_i+$  的电压从  $0 \sim +V_{cc}$  连续变化。

ADC0804 的 11 脚~18 脚是 8 位数字量输出。如果读者能从表 17-1 中体会到模数转换的真正含义，那我们的话题就简单了。

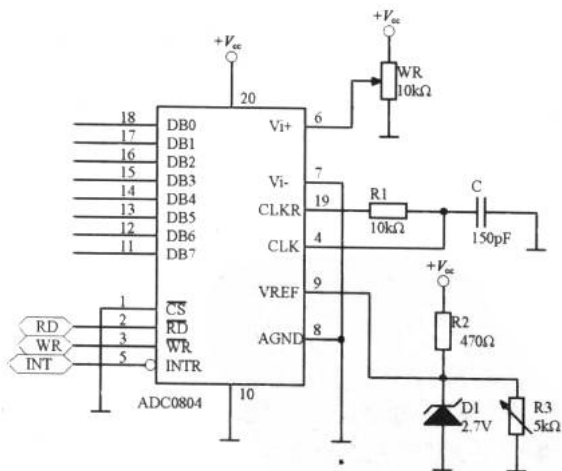


图 17-9 ADC0804 的应用电路





表 17-1 ADC0804 电压输入与数字输出的关系

十六进制	二进制	高 4 位字节电压	低 4 位字节电压
F	1111	4.800	0.300
E	1110	4.480	0.280
D	1101	4.160	0.260
C	1100	3.840	0.240
B	1011	3.520	0.220
A	1010	3.200	0.200
9	1001	2.880	0.180
8	1000	2.560	0.160
7	0111	2.240	0.140
6	0110	1.920	0.120
5	0101	1.600	0.100
4	0100	1.280	0.080
3	0011	0.960	0.060
2	0010	0.640	0.040
1	0001	0.320	0.020
0	0000	0	0

表 17-1 中，低 4 位字节指的是 DB0~DB3，高 4 位字节指的是 DB4~DB7。如果在  $V_{i+}$  输入 3V 的电压，DB0~DB7 应该输出什么呢？在表中找到 3 (V) 的组成加数，即  $3 \text{ (V)} = 2.880 + 0.120$ ，对应高 4 位的二进制代码为 1001，低 4 位代码为 0110，所以输出为 10010110。

可见，A/D 器件完成了一个模拟电压向数字量转换的工作。回到前面的内容，如果输入  $V_{i+}$  的不是一个固定的电压值，而是一个周期变化的正弦波（正向），通过设定 A/D 器件的采样频率，就可以把这个连续变化的电压转换成离散的数字量了，如图 17-10 所示。

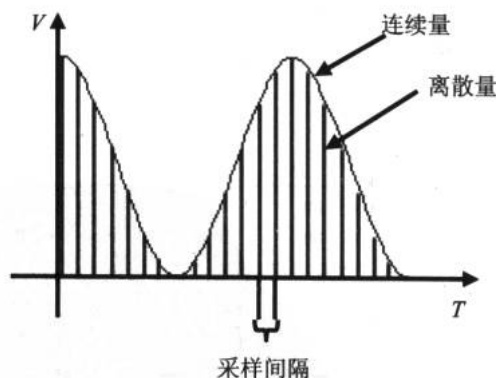


图 17-10 模拟量→数字量

注意，采样定理告诉我们采样频率不得小于信号最高频率的 2 倍。如果不遵循这条定理，采集到的离散信号毫无价值。比如要采集的语音信号频率范围为 20Hz~2kHz，采样频率至少应取 4kHz。

### 17.3.2 如何选择 A/D 器件

A/D 转换电路和电子计算机一样,也经历了电子管——晶体管——中小规模和大规模集成电路 3 个阶段,形成了组件型、混合集成型及单片集成型等几种器件结构。随着超导技术的发展,超导型集成 A/D 转换器已于近年研制成功,为 A/D 转换的超高速应用创造了条件。

#### 1. 常用 A/D 器件

A/D 器件按照输出位数分为 4 位、6 位、8 位、10 位、12 位、14 位、16 位和 BCD 输出的  $3\frac{1}{2}$  位、 $4\frac{1}{2}$  位及  $5\frac{1}{2}$  位等几种。按照转换速度可以分为超高速 ( $T_r \leq 1\text{ns}$ )、高速 ( $T_r \leq 1\mu\text{s}$ )、中速 ( $T_r \leq 1\text{ms}$ ) 和低速 ( $T_r \leq 1\text{s}$ ) 等几种不同转换速度的芯片。为适应系统集成的需要,有些转换器还将多路转换开关、基准电压源、二/十进制译码器和转换电路集成在一个芯片内,为用户提供了很多方便。表 17-2 所示为常用的 A/D 器件的结构和功能等信息。

表 17-2 常用 A/D 的主要性能

芯片型号	分辨率	转换时间	转换误差	模拟输入范围	数字输出电平	要否外部时钟	基准电压	工作电压 ( $V_{cc}$ )	说明
ADC0801 ADC0802/0803 ADC0804/0805	8 位	100 $\mu\text{s}$	$\pm 1/4\text{LSB}$ $\pm 1/2\text{LSB}$ $\pm 1\text{LSB}$	一般为 0~+5V	TTL 电平	可以不要	可不外接或 $V_{\text{REF}}$ 为 1/2 量程值	单电源+5V	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
ADC0808 ADC0809	8 位	典型值 100 $\mu\text{s}$	$\pm 1/2\text{LSB}$ $\pm 1\text{LSB}$	0~+5V 8 通道输入	TTL 电平	要	$V_{\text{REF}(+)} \leq V_{\text{CC}}$ $V_{\text{REF}(-)} \geq 0\text{V}$	单电源+5V	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
ADC0816 ADC0817	8 位	典型值 100 $\mu\text{s}$	$\pm 1/2\text{LSB}$ $\pm 1\text{LSB}$	0~+5V 16 通道输入	TTL 电平	要	$V_{\text{REF}(+)} \leq V_{\text{CC}}$ $V_{\text{REF}(-)} \geq 0\text{V}$	单电源+5V	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
AD570 AD571	8 位 10 位	25 $\mu\text{s}$	$\pm 1/2\text{LSB}$ $\pm 1\text{LSB}$	0~10V $\pm 5\text{V}$	TTL 电平	不要	不需外供	+5V (+15V) 和 -15V	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
ADC1210 ADC1211	12 位或 10 位	30 $\mu\text{s}$ (10 位) 100 $\mu\text{s}$ (12 位)	$\pm 3/4\text{LSB}$ $\pm 2\text{LSB}$	0~+5V 0~+5V $\pm 5\text{V}$	CMOS 电平 (由 $V_{\text{REF}}$ 决定)	要	+5V~+15V	+5V~ $\pm 15\text{V}$	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
AD574A AD674A AD1674	12 位或 8 位	25 $\mu\text{s}$ 15 $\mu\text{s}$ 10 $\mu\text{s}$	$\leq \pm 1\text{LSB}$ $\leq \pm 1\text{LSB}$ $\leq \pm 1\text{LSB}$	0~+10V 0~+20V $\pm 5\text{V}, \pm 10\text{V}$	TTL 电平	不要	不要	$\pm 15\text{V}$ 或 $\pm 12\text{V}$ 和 +5V	逐次逼近 $\mu\text{P}$ 兼容
AD578	12 位或 10 位或 8 位	3 $\mu\text{s}$	$\leq \pm 3/4\text{LSB}$	0~+10V 0~+20V $\pm 5\text{V}, \pm 10\text{V}$	TTL 电平	不要	不要	+5V 和 $\pm 15\text{V}$	逐次逼近 高速
AD678 AD1678	12 位	5 $\mu\text{s}$	$\leq \pm 1\text{LSB}$	0~+10V $\pm 5\text{V}$	TTL 电平	不要	不要	+5V 和 $\pm 12\text{V}$	带采保器
AD679 AD1679	14 位	10 $\mu\text{s}$	$\leq \pm 2\text{LSB}$	0~+10V $\pm 5\text{V}$	TTL 电平	不要	不要	+5V 和 $\pm 12\text{V}$	带采保器



续表

芯片型号	分辨率	转换时间	转换误差	模拟输入范围	数字输出电平	要否外部时钟	基准电压	工作电压 ( $V_{CC}$ )	说明
ADC1143	16 位	$\leq 100\mu s$	$\leq \pm 0.06\%$	+5V, +10V, +20V, $\pm 5V$ , $\pm 10V$	TTL 电平	不要	不要	+5V 和 $\pm 15V$	
5G14433	$3\frac{1}{2}$ 位 (BCD 码)	$\geq 100ms$	$\pm 1LSB$	$\pm 0.2V$ , $\pm 2V$	TTL 电平	可以不要	200mv 2V	$\pm 5V$	双积分
ICL7135	$4\frac{1}{2}$ 位 (BCD 码)	100ms 左右	$\pm 1LSB$	-2V~+2V	TTL 电平	要	$V_{REF}$ 为 1/2 量程值	$\pm 5V$	双积分
ICL7109	12 位	$\geq 300ms$	$\pm 2LSB$	-4V ~+4V	TTL 电平	可以不要	$V_{REF}$ 为 1/2 量程值	$\pm 5V$	双积分
ICL7104	16 位	250ms	$\leq \pm 1LSB$	$\pm 4V$	TTL 电平	可以不要	$V_{REF}$ 为 1/2 量程值	+5V 和 $\pm 15V$	积分型
AD7555	$5\frac{1}{2}$ 或 $4\frac{1}{2}$ 位	1.76s 0.61s	$\pm 1$ 或 $\pm 10$	$\pm 2V$	TTL 电平	要	$V_{REF}=4.096V$	$\pm 5V$	4 斜率积分、兼容

## 2. 如何确定 A/D 器件的位数 (分辨率)

A/D 器件的位数与整个测量系统所要测量控制的范围和精度有关,但又不能惟一确定系统的精度。因为系统精度涉及的环节很多,有传感器变换精度、信号处理电路精度等。在选择 A/D 器件时,应该本着器件位数至少要比总精度要求的最低分辨率高一位的原则。实际选取时注意与其他环节所能达到的精度相适应就可以了,否则过高的位数会使成本过高。从图 17-11 所示我们能看出 A/D 器件价格的参考, A/D 器件随着位数和转换时间等性能的不同,价格从几元至上千元不等。

对 A/D 器件位数的另一点考虑是如果单片机是 8 位的(如 51 单片机),则采用 8 位以下的 A/D 接口电路最简单。如果 A/D 位数超过 8 位就要增加缓冲器接口,数据要分两次读出,这无疑增加了电路的复杂程度。

## 3. 如何确定 A/D 器件的转换速率

A/D 从启动转换到转换结束并输出稳定的数字量需要一定的时间,这就是 A/D 的转换时间。转换时间的倒数就是转换速率。如果用转换时间为  $100\mu s$  的集成 A/D,其转换速率为  $1/100\mu s=10^4$  次/秒。根据采样定理和实际需要,一个周期的波形采 10 个点,那么这样的 A/D 最高也只能处理 1kHz 的信号。对一般微处理机而言,要在  $10\mu s$  内完成 A/D 转换以外的的工作,如读数据、再启动、存数据、循环计数等已经比较困难。要继续提高采集数据的速度就不能用 CPU 来控制,必须采用直接存储器访问 (DMA) 技术来实现。关于 DMA 技术本书从略。

ADC	
ADC - ET12BC	2150.00
ADC - EK12DC	2450.00
ADC - HS12BMM	2875.00
ADC08AQ	
ADC0802LCN	6.00
ADC0803LCN	40.00
ADC0804LCN	6.00
ADC0804KN	10.00
ADC0805LCN	8.00
ADC0808LCN	13.00
ADC0809LCN	13.00
ADC0809CCN	15.00
ADC0816LCN	40.00
ADC0816CCN	65.00
ADC0817LCN	40.00
ADC0820BCN	55.00
ADC0817CCN	68.00
ADC0820LCN	
ADC0831CCN	15.00
ADC0832CCN	13.00
ADC0832LCN	12.00
ADC0834(贴片)	20.00
ADC0838CCN	34.00
ADC0838LCN	45.00
ADC0841CCN	35.00
ADC0841CCVPLCC	45.00
ADC0844CCN	35.00
ADC0848BCN	35.00
ADC0881	8.00
ADC1001CCJ - I	120.00
ADC1005CCN	
ADC1205CCJ	
ADC1210LCN	1280.00
ADC1211HCD	
ADC12441CJ	
ADC674AJH	480.00
ADC700	
ADC71KH	
ADC774JK	
ADC800	56.00
ADC80 - 1	580.00
ADC80 - 12	960.00
ADC80AC	
ADC815MC	
ADC - 826MCDA	2500.00
ADC826KD	1500.00
ADC84KG	
ADC84KG - 12	450.00
ADC85 - 12	1680.00
ADC881 - 21280	

图 17-11 A/D 器件价格参考

#### 4. 如何决定是否要加采样保持器

原则上直流和变化非常缓慢的信号可不用采样保持器,而其他情况都要加采样保持器。根据分辨率、转换时间及信号带宽的关系我们得到如下的参考:如果 A/D 转换时间是 100ms、8 位时、没有采样保持器时,信号的允许频率是 0.12Hz;如果 A/D 是 12 位时,该频率为 0.0077Hz。如果转换时间是 100 $\mu$ s, A/D 为 8 位时,该频率为 12Hz;12 位时是 0.77Hz。

#### 5. 工作电压和基准电压

有些早期设计的集成 A/D 器件需要 $\pm 15$ V 的工作电压,现在大都为+12V~+15V 范围。如果与单片机系统相连则可选用 5V 工作电压的芯片。

基准电压是提供给 A/D 转换器在转换时所需要的参考电压,这是保证转换精度的基本条件。在要求较高精度时,基准电压要单独用高精度稳压电源供给。

图 17-12 中画圈的是 ADC0804 的基准电压部分。

#### 6. 正确选用 A/D 有关量程的引脚

A/D 的模拟量输入有时是双极性的,有时是单极性的。输入信号最小值有从 0 开始,也有从非 0 开始的。有的 A/D 器件提供了不同量程的引脚,只有正确使用,才能保证转换精度。

有的 A/D 器件,在设计时已经考虑到单极性与双极性的兼容性;片内设置了偏置电路,只要通过很简单的外围电路或加上逻辑控制电平信号,就可以实现半量程的偏置;接受双极性模拟电压输入信号,输出二进制偏移码。图 17-13 所示为两种 A/D 器件接成双极性工作方式的示意图。

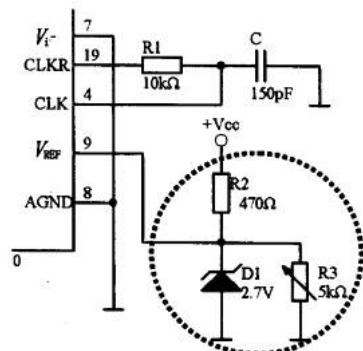
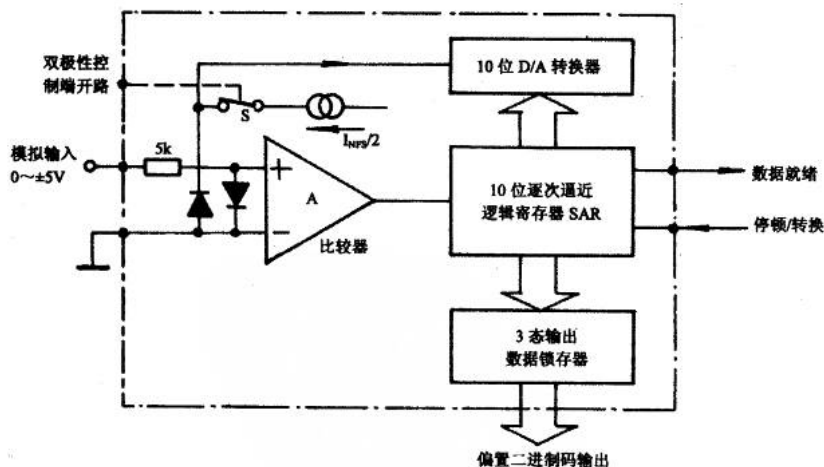
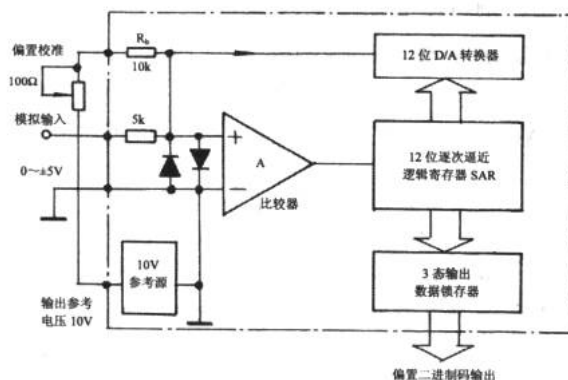


图 17-12 ADC0804 的基准电压电路



(a) AD570

图 17-13 双极性输入示意图



(b) AD574

图 17-13 双极性输入示意图 (续)

图 17-13 (a) 表示内部半量程偏置电流是通过模拟开关 S 控制其是否与输入模拟信号叠加的, A/D 选用的是 AD570 或 AD571。如果双极性控制端与地线相连, 则 S 断开, A/D 器件作单极性输入; 如果双极性控制端悬空或接高电平, 则 S 导通, 半量程偏置电流被引入输入端, A/D 即可作双极性变换。输出偏置二进制码。

图 17-13 (b) 中, 通过外接电路进行偏置电压的调整。内部参考电源 (10V) 经过外部连接到偏置电阻  $R_b$  (10k $\Omega$ ) 产生 1mA 的电流。偏置校准电位器 (100 $\Omega$ ) 使得偏置的调整更精确。

有些低价位的 A/D 器件, 如前面谈到的 ADC0804~0805、ADC0808/0809 等, 没有设置片内的偏置电路, 但是其模拟输入端允许进行电流或电压叠加, 在这种情况下, 可以通过外接简单的偏置电路, 把单极性的 A/D 变成具有双极性的偏置二进制码的器件。这种做法, 与加法器很相似, 典型的电路连接如图 17-14 所示。

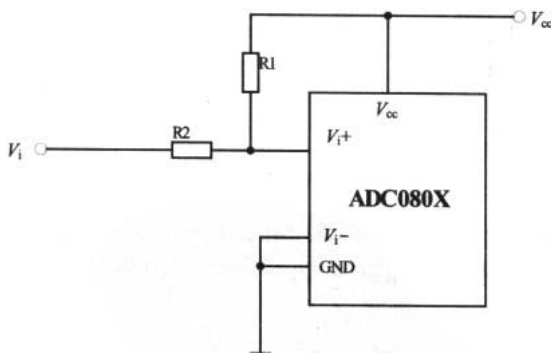


图 17-14 单极性向双极性转变

### 17.3.3 关于 ADC080X

ADC080X 系列 A/D, 如器件 ADC0801、ADC0802、ADC0803、ADC0804 及 ADC0805

等是当前最流行的中速廉价型单通道 8 位全 MOS A/D 转换器，该集成 A/D 器件是美国国家半导体公司（National Semiconductor Corporation）的产品。这个系列的 5 个不同型号产品的结构原理基本相同，但非线性误差不同，其最大非线性误差 ADC0801 为  $\pm 1/4\text{LSB}$ 、ADC0802 为  $\pm 1/2\text{LSB}$ ，ADC0804/0805 为  $\pm 1\text{LSB}$ 。显然 ADC0801 的精度最高，但市场售价也最高。

### 1. ADC080X 芯片的引脚功能及应用特性

ADC080X 系列是 20 引脚双列直插式封装芯片，其特点是内含时钟电路，只要外接一个电阻和一个电容就可由自身提供时钟信号，也可自行提供  $V_{\text{REF}}/2$  端的参考电压。图 17-15 所示为该系列芯片的引脚图。

$\overline{\text{CS}}$ （1 脚）和  $\overline{\text{WR}}$ （3 脚）用来控制 A/D 器件的启动信号。 $\overline{\text{CS}}$  和  $\overline{\text{RD}}$ （2 脚）用来读 A/D 转换的结果，当它们同时为低电平时，输出数据锁存器 DB0~DB7 各端上出现 8 位并行二进制数码。

CLK IN（4 脚）和 CLK R（19 脚）两端外接一对电阻电容即可产生 A/D 转换所要求的时钟，其振荡频率为  $f_{\text{CLK}} \approx 1/1.1RC$ 。其典型应用参数为： $R=10\text{k}\Omega$ ， $C=150\text{pF}$ ， $f_{\text{CLK}} \approx 650\text{kHz}$ ，转换时间为  $100\mu\text{s}$ 。若采用外部时钟，则外部  $f_{\text{CLK}}$  可从 CLK IN 端送入。

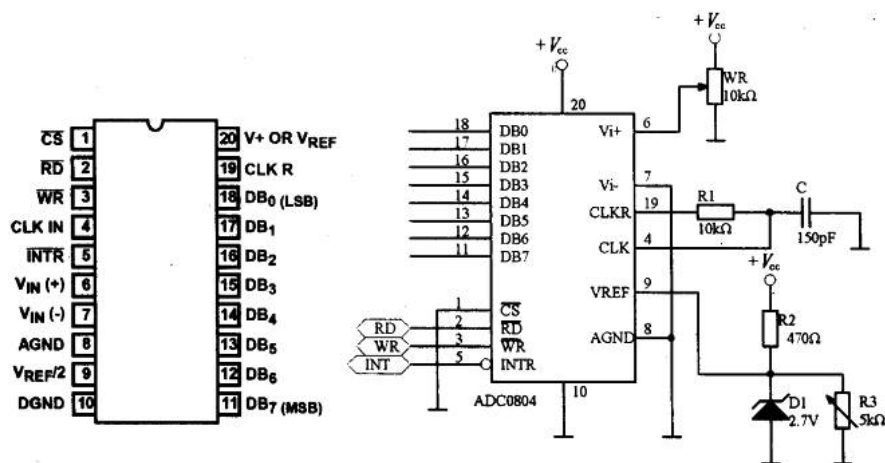


图 17-15 ADC080X 引脚图

$\overline{\text{INTR}}$ （5 脚）是转换结束信号输出端，输出跳转为低电平表示本次转换已经完成，可作为微处理器的中断或查询信号。如果将  $\overline{\text{CS}}$ 、 $\overline{\text{WR}}$ 、 $\overline{\text{INTR}}$  端相连，则 A/D 器件就处于自动循环转换状态。

图 17-16 所示为 ADC080X 的工作时序图。

$V_{\text{in}}(+)$  和  $V_{\text{in}}(-)$  是模拟信号输入端。允许此信号是差分的或不共地的电压信号。如果输入电压  $V_{\text{in}}$  的变化范围从  $0\text{V} \sim V_{\text{max}}$ ，则芯片的  $V_{\text{in}}(-)$  接地，输入电压加到  $V_{\text{in}}(+)$  引脚。在共模输入电压允许的情况下，输入电压范围可以从非  $0\text{V}$  开始，即  $V_{\text{min}} \sim V_{\text{max}}$ 。此时芯片的  $V_{\text{in}}(-)$  端应该接入等于  $V_{\text{min}}$  的恒值电压上，而输入电压  $V_{\text{in}}$  仍然加到  $V_{\text{in}}(+)$  上。

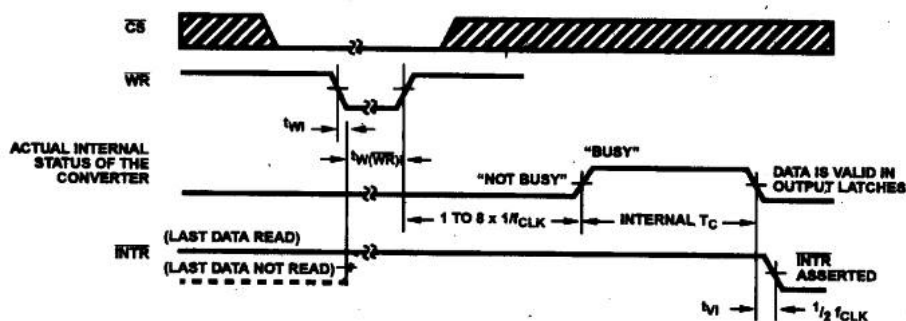


图 17-16 ADC080X 的工作时序图

AGND 和 DGND 是模拟地和数字地引脚。

$V_{REF}/2$  端是参考电压输入端, 该端电压值应为输入电压范围的  $1/2$ 。所以输入电压的范围可以通过调整  $V_{REF}/2$  引脚处的电压加以改变, 转换器的零点无需调整。例如, 输入电压的范围是  $0.5V \sim 3.5V$ , 在  $V_{REF}/2$  端应加上  $1.5V$  的电压 ( $0.5V \sim 3.5V$  的范围是  $3V$ , 所以取  $1/2$ , 得到  $1.5V$ )。当输入电压是  $0V \sim 5V$  时, 可调整  $V_{REF}/2$  端电压为  $2.5V$ 。

## 2. ADC080X 与 51 单片机接口设计

ADC080X 由于具有三态输出锁存器, 可直接驱动数据总线, 故与 51 单片机的接口电路十分简单, 只要把 8 位数据线、 $\overline{CS}$ 、 $\overline{WR}$ 、 $\overline{INTR}$  与单片机相应的端子连接就能得到 A/D 系统, 如图 17-17 所示。

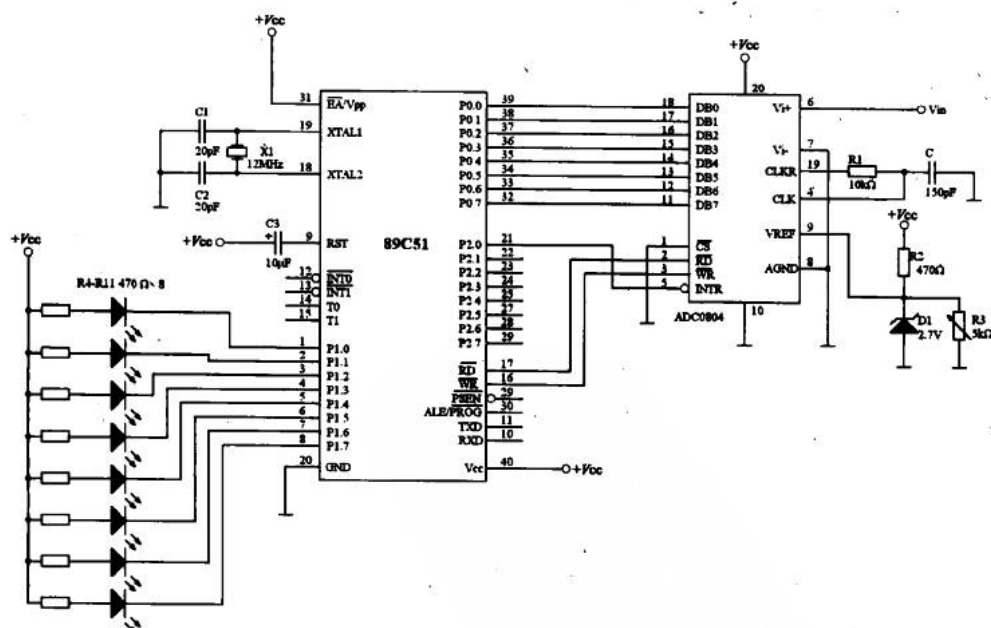


图 17-17 ADC080X 与 51 单片机的接口

我们在 P1 口放置了 8 支 LED，是为了清楚地演示 A/D 的转换效果。我们在 A/D 的  $V_i(+)$  输入 0~5V 的电压，就会看到 8 支 LED 根据电压的大小作相应的二进制变化。程序 17-1 是这个演示的程序。

程序 17-1

```

START:  ORH      00H
        MOVX     @R0, A      ;使 P0 高阻, ADC0804 开始转换
        JB      P2.0, $      ;检测 INTR 是否为 0, 是则转换完成
        MOVX     A, @R0      ;将转换好的数据载入累加器
        CPL      A           ;反相
        MOV      P1, A       ;从 P1 口输出
        CALL     DELAY       ;延时 50ms
        JMP      START       ;循环

DELAY:
        MOV      R6, #100

D1:      MOV      R5, #248
        DJNZ     R5, $
        DJNZ     R6, D1
        RET
        END
    
```

### 17.3.4 声音采集系统中的 A/D

有了前三小节的预备知识，我们再来设计声音采集系统中的 A/D 部分电路就比较容易了。A/D 的输入信号取自信号放大级的输出，如图 17-18 所示。可见 A/D 在采集放大电路和单片机之间起到了桥梁的作用。

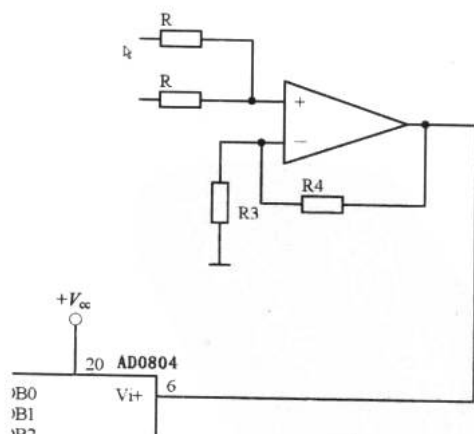


图 17-18 A/D 与前级的连接





## 17.4 串口通信

### 利用串口实现跑马灯 单片机与 PC 通信 单片机之间的通信

串口通信赋予了 51 单片机独特的魅力。无论是通过 A/D 采集后的数据还是单片机通过程序生成的信号，都可以通过串口与其他设备进行共享。不但是两片单片机之间可以利用串口通信，就连计算机的高级应用程序同样能和单片机通过串口进行交互。

这一节我们从 3 种常见的串口通信应用实例中来学习单片机的串口通信。

#### 17.4.1 利用串口实现跑马灯

图 17-19 所示为利用单片机串口 TXD 和 RXD 实现跑马灯的电路图。电路中单片机的 RXD 和 TXD 两个端口扩充成 8 个端口，程序利用取表的方式，通过串口把数据向 8 位移位寄存器 74164 发送，使 8 个 LED 左移 1 次，右移 1 次。程序 17-2 是串口实现跑马灯的程序。下一小节我们将学习程序中新的指令。

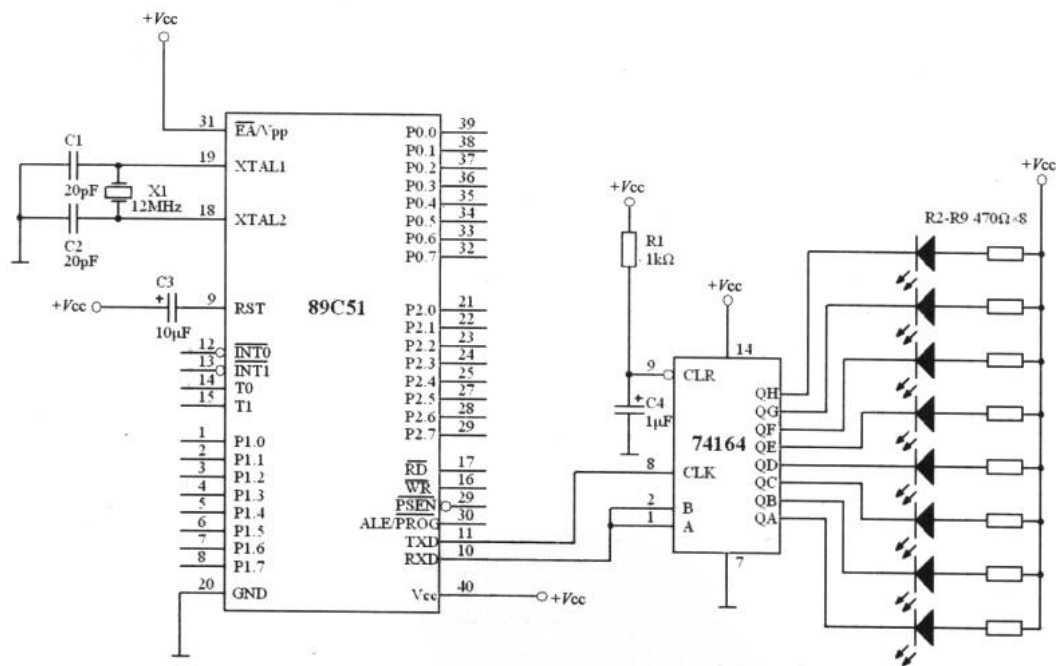


图 17-19 串口实现跑马灯

#### 17.4.2 单片机与 PC 通信

51 单片机的串口是全双工的 UART，它可同时发送和接收数据。这是通过设置特殊功

能寄存器 SCON 和 SBUF 的操作实现的。

程序 17-2

```

ORH      00H
MOV      SCON, #00000000B      ;设定 UART 为 MODE0
START:
MOV      DPTR, #TABLE          ;DPTR 指到 TABLE 的开头
LOOP:
CLR      A                    ;清零 ACC
MOVC     A, @A+DPTR            ;到 TABLE 取数据
CJNE     A, #88H, SEND        ;遇到结束码 88H 则结束
JMP      START                ;重新开始
SEND:
CPL      A                    ;反相
MOV      30H, A                ;将 ACC 的内容存入 30H
MOV      SBUF, 30H            ;从串口发送出去
LOOP_1:
JBC      TI, LOOP_2           ;发送完 TI=1, 跳至 LOOP_2
JMP      LOOP_1               ;否则循环等待
LOOP_2:
CALL     DELAY                ;延时 0.2 秒
INC      DPTR                 ;数据指针加 1
JMP      LOOP                 ;循环
DELAY:
MOV      R5, #20
D1:
MOV      R6, #20
D2:
MOV      R7, #248
DJNZ     R7, $
DJNZ     R6, D2
DJNZ     R5, D1
RET
TABLE:
DB       01H, 02H, 04H, 08H    ;左移
DB       10H, 20H, 40H, 80H
DB       80H, 40H, 20H, 10H    ;右移
DB       08H, 04H, 02H, 01H
DB       88H                    ;结束码
END

```

### 1. 串行控制寄存器 SCON

在程序 17-2 中, 我们看到一个新的控制寄存器 SCON, 看来它与单片机串口通信有关。SCON 是串行控制寄存器, 其各位名称和功能如下:

SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	TI	RI
-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----

★ SM0 和 SM1: 串口工作模式选择。



- ✦ SM2: 当串口为模式 2 或 3 时, 使能多处理器通信的功能。这两种模式下如果 SM2=1, 则当接收到第 9 位数据位为 0 时, RI (接收中断标志位) 不动作。在模式 1 下, 如果 SM2=1, 则当接到的停止位不正确时, RI 也不动作。在模式 0 时, SM2 必须为 0。
- ✦ REN: 由软件设定或清除, 以决定是否接收串口输入数据。REN=1 接收数据, REN=0 发送数据。
- ✦ TB8: 在模式 2 或 3 时, 发送时的第 9 数据位由软件控制。
- ✦ RB8: 在模式 2 或 3 时, 发送时的第 9 数据位放入此位。在模式 1 时, 若 SM2=0, 则 RB8 为接收到的停止位。模式 0 时, RB8 无效。
- ✦ TI: 发送中断标志位。在模式 0 下, 当第 8 位结束时, 硬件会将其设为 1; 在其他模式下, 在停止位开始时由硬件设定。
- ✦ RI: 接收中断标志位。在模式 0 下, 当第 8 位结束时, 硬件会将其设为 1; 在其他模式下, 在停止位的一半时由硬件设定。

## 2. 串口通信的 4 种工作模式

### (1) MODE0

该模式下, 只发送或接收 8 位数据, 数据由 RXD 引脚输出或接收, 而 TXD 作为发送或接收的移位脉冲, 其移位脉冲的频率固定为晶振频率的 1/12。

将要发送的 8 位数据存入 SBUF 寄存器, UART 自动将 SBUF 中的数据转换成 8 位串行数据输出。当第 8 位数据发送结束后, 会设定 TI 为 1, 这时, 可用指令“JBC TI, LOOP”来检测并清除 TI 为 0。

作为串行接收外部数据时, 只要设 TI=0、REN=1, UART 就以串行方式接收数据。当 8 个位的数据接收完毕后, UART 将其存入 SBUF, 同时设 RI=1, 可用指令“BC RI, LOOP”来检测并清除 RI 为 0。

MODE0 的初始化方法见程序 17-3。

程序 17-3

```

;;;;;;;;;;;;;发送数据;;;;;;;;;;;;;
MOV          SCON, #00000000B      ;发送数据工作方式
JBC          TI, LOOP              ;发送是否完毕

;;;;;;;;;;;;;接收数据;;;;;;;;;;;;;
MOV          SCON, #00010000B      ;接收数据工作方式
JBC          RI, LOOP              ;接收是否完毕

```

### (2) MODE1

该模式下, 发送或接收 10 位的数据, 此 10 个位分别是 1 个起始位“0”、8 个数据位和 1 个停止位“1”。MODE1 的波特率 (发送数据的速率) 是可变的, 由 TIMER1 工作在定时器的 MODE2 模式下, 通过设定 TH1 来确定。

当 UART 接收到 8 位数据后, 会使 SCON 寄存器内的 RI 位设定为 1, CPU 只要检查

RI=1 就知道 UART 已接收到数据。

发送数据时, 当 8 位都输出完毕后, SCON 寄存器的 TI 位会被设定为 1, CPU 只要检测到 TI=1 就知道可以再发送下一个字节。

控制波特率的寄存器就是电源控制寄存器 PCON, 在第 13 章已经介绍过了。在串口通信中我们只对 SMOD 位感兴趣。当串口工作在模式 1、2、3 时, 同时使用 TIMER1, 如果 SMOD=1 则为双倍波特率。以下是 SMOD 在 PCON 中的位置:

SMOD	无效	无效	无效	GF1	GF0	PD	IDL
------	----	----	----	-----	-----	----	-----

MODE1 的初始化方法, 如程序 17-4 所示。

程序 17-4

```

;;;;;;;;;;设定波特率;;;;;;;;;;
MOV    TMOD, #00100000B      ;设定 TIMER1 的 MODE2
MOV    PCON, #10000000B      ;设 SMOD=1

;;;;;;;;;;接收数据;;;;;;;;;;
MOV    SCON, #01010000B      ;MODE1, 接收, REN=1
JBC    RI, LOOP              ;接收是否完毕

;;;;;;;;;;发送数据;;;;;;;;;;
MOV    SCON, #01000000B      ;MODE1, 发送, REN=0
JBC    TI, LOOP              ;发送是否完毕
    
```

### (3) MODE2

该模式共发送或接收 11 位数据。这 11 位数据由 1 个起始位“0”、8 个数据位、1 个 TB8 (于 SCON 内) 位和 1 个停止位组成, 其发送速率为系统频率的 1/32 或 1/64。

### (4) MODE3

该模式与 MODE2 的功能几乎完全一样, 但是 MODE3 的波特率可变 (由 TIMER1 控制) 而 MODE2 不能变。

## 3. 串口通信波特率的计算

51 单片机串口通信的波特率随串口工作方式的不同而异, 它除了与系统的振荡频率、PCON 的 SMOD 位有关外, 还与定时器 T1 的设置有关。

我们在前面已经对 UART 的 4 种工作模式进行了介绍, 这里需要补充的就是每种工作模式下波特率的设置方法。

### (1) MODE0

$$\text{波特率} = \text{晶振频率} / 12$$

如果晶振为 12MHz, 则波特率为 1MHz。

### (2) MODE2

$$\text{波特率} = \frac{2^{\text{SMOD}}}{64} \times \text{晶振频率}$$



如果晶振为 12MHz, SMOD=0 时, 波特率为 187.5kHz; SMOD=1 时, 波特率为 375kHz。

(3) MODE1 和 MODE3

$$\text{波特率} = \frac{2^{\text{SMOD}}}{32} \times \frac{\text{晶振频率}}{12 \times [256 - (\text{TH1})]}$$

表 17-3 所示为常用的各种波特率。

表 17-3 常用的波特率

波特率 (bps)	晶振频率 (MHz)	SMOD	C/T	TIMER1	
				模式	自动载入 (TH1)
4800	12	1	0	2	F3H
2400	12	0	0	2	F3H
1200	12	1	0	2	F6H
19200	11.059	1	0	2	FDH
9600	11.059	0	0	2	FDH
4800	11.059	0	0	2	FAH
2400	11.059	0	0	2	F4H
1200	11.059	0	0	2	E8H
600	12	0	0	2	CCH

#### 4. 硬件连接

计算机的 RS-232 卡提供串口供外设与之通信。在一般的计算机机箱后我们都能找到如图 17-20 所示的串口。

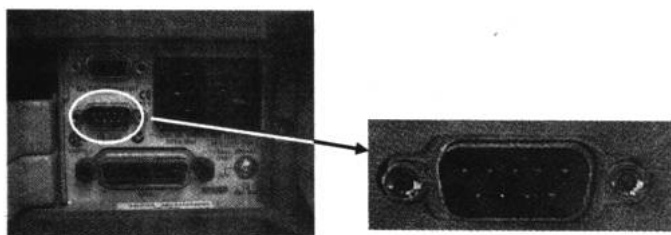


图 17-20 串口

其实单片机与 PC 机的串口连接很简单, 图 17-21 是串口通信的电路图和 MAX232 的内部结构图。MAX232 是一个电平变换芯片, 它是单片机与串口连接的桥梁。

由于计算机端的串口一般都为公头, 所以与 MAX232 的 7、8 脚相连的串口可选用母头。这样, 当把这一对串口对插上后, 就完成了单片机系统与 PC 机的硬件连接。

#### 5. 程序

(1) 单片机接收数据程序

程序 17-5 是一个 51 单片机通过串口接收计算机数据的例子。

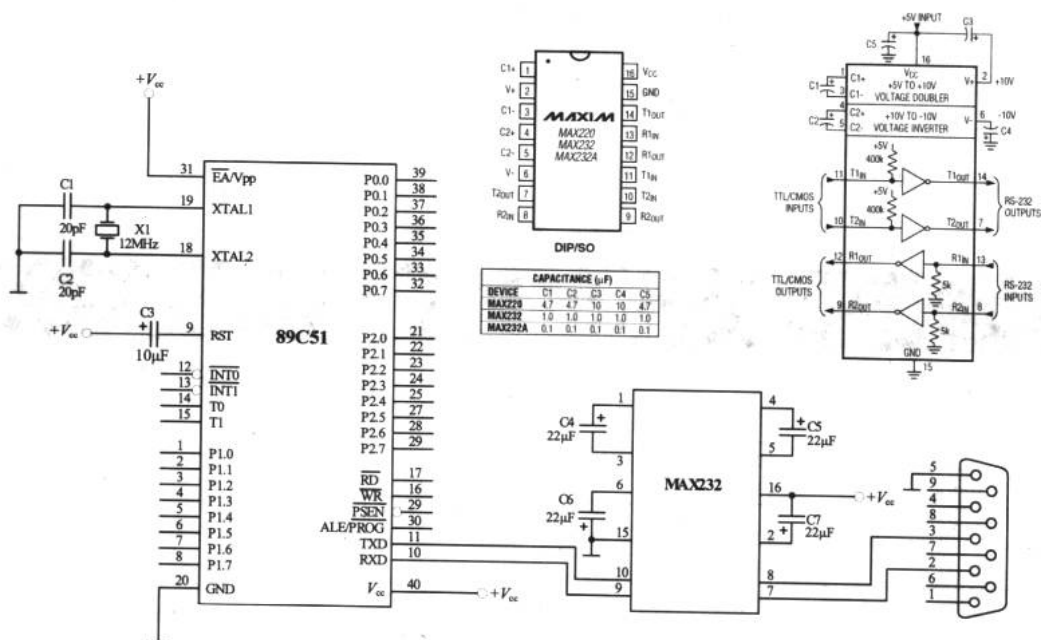


图 17-21 单片机系统串口通信电路图

#### 程序 17-5

```

ORG      00H

START:
    MOV    SP, #60H           ;设置堆栈
    MOV    SCON, #50H         ;串口 MODE1, SM1=1, REN=1
    MOV    TMOD, #20H         ;TIMER1 工作在 MODE2
    MOV    TH1, #0F3H         ;波特率 2400
    SETB   TR1                ;启动 TIMRE1

LOOP:
    JB     RI, UART           ;检测 RI, 等于 1 表示接收到
    JMP    LOOP               ;循环等待

UART:
    MOV    A, SBUF            ;从 SBUF 把数据载入 ACC
    ; .....
    ;;; 此处写所需的处理程序;;;
    ; .....
    CLR    RI                 ;清除 RI=0
    JMP    LOOP               ;返回等待

END
    
```

#### (2) 单片机发送数据程序

发送数据时, 在初始化串口通信的程序与程序 17-5 的“START”部分完全相同, 区别只是发送数据不需要“LOOP”部分循环等待。一旦想把准备好的数据往外发送, 只需将数



据载入 ACC 中, 然后用指令“MOV SBUF, A”即完成了数据的发送。程序 17-6 是一个最简单的发送程序, 它把 42H 这个立即数重复并反相后发送给 PC 机。

程序 17-6

```

ORG      00H

START:
MOV      SP, #60H
MOV      SCON, #50H
MOV      TMOD, #20H
MOV      TH1, #0F3H
MOV      TL1, #0F3H
SETB     TR1

UART:
MOV      A, #42H           ;把 42H 送入 A 中
MOV      SBUF, A           ;A 的内容送入缓冲区并从串口发送出去
CPL      A                 ;反相
CLR      RI                 ;清 RI
JMP      UART              ;返回重复发送
END

```

### 17.4.3 单片机之间的通信

如果我们把两个单片机的 RXD 和 TXD 交叉连接就构成了一个简单的双机通信链路, 如图 17-22 所示。

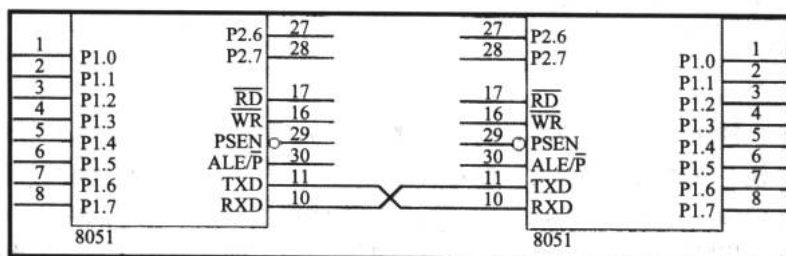


图 17-22 两个 51 单片机相连

至于单片机与单片机之间的通讯程序与前面谈到的单片机与计算机连接时的程序没有什么不同, 我们就不再展开了。其实无论是哪个具体的知识点。如果读者能亲自实验就能探索到许多书上没有的知识和技巧。

## 17.5 PC 端应用程序

**Visual Basic 串行通信控件 通信实验 在声音采集系统中**

Microsoft 的 Visual Basic 语言为我们提供了方便的串口通信控件 MSComm。正是有了

MSComm 口和 VB 语言, 才使得串口应用程序的开发变得如此简单。

## 17.5.1 Visual Basic 串行通信控件

### 1. 添加控件

在 VB 集成开发环境中, 首先新建一个工程或窗体, 单击“工程”菜单, 选择其中的“部件”命令, 在“部件”对话框中选中 Microsoft Comm Control 6.0 复选框, 单击“确定”按钮, 如图 17-23 所示。

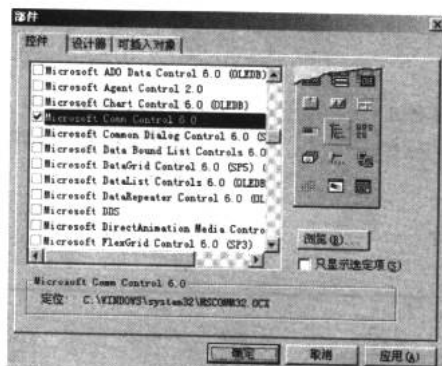


图 17-23 “部件”对话框

这样, 就把 MSComm 控件添加到了工具栏中。把一个类似电话机图标的 MSComm 控件 ( ) 放置在窗体中, 完成控件的添加。

### 2. 控件属性说明

#### (1) CommPort

CommPort 属性用于设置或返回通信连接端口号。程序在初始化时必须指定所要使用的串口号, 以便在程序运行期间对特定串口进行读写操作。同时, 程序也可借助此属性返回所使用的连接端口号码。注意, 最大的端口号不能超过 16, 如图 17-24 所示。

如何确定使用哪个端口呢? 我们可以从“控制面板”的“系统”中的“设置管理器”中看到系统开放的端口号。单片机等的串口连接在哪个端口上, 就在 CommPort 属性中填写该端口号, 如图 17-25 所示。

#### (2) Settings

Settings 属性用于设置初始化参数。默认值是“9600, n, 8, 1”。这个由逗号分隔的参数分别代表了波特率、奇偶校验位检查方式、数据位数和停止位数。

波特率可选值包括: 110、300、600、1200、2400、9600、14400、19200、28800 及 38400 等几种。在设置时需要注意与单片机 UART 设置的波特率一致, 否则无法正常接收和发送数据。

表 17-4 所示为合法的奇偶校验位设置。

正确的数据位数值有: 4、5、6、7 和 8。





正确的停止位数值有：1、1.5 和 2。

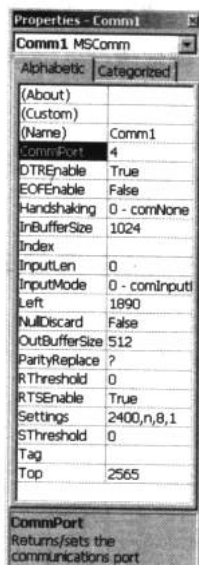


图 17-24 CommPort 属性

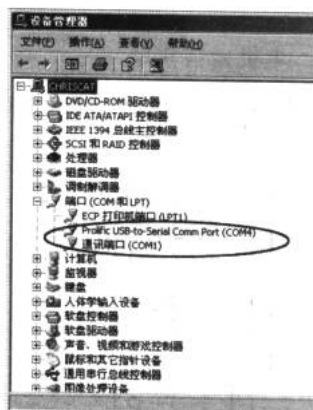


图 17-25 系统开放端口

表 17-4 合法的奇偶校验位设置

设 置	说 明
e	偶数
m	记号
n	默认值
none	无奇偶校验
o	奇数
s	空白

### (3) PortOpen

PortOpen 属性用于设置或返回通信端口的状态。使用串口通信前必须先把端口打开，而在使用完毕后，应当养成关闭端口的好习惯。

### (4) Input

Input 属性用于从输入缓冲区返回并删除字符。例如：Buffer\$=MSComm1.Input 将输入缓冲区的字符读入 Buffer 字符串变量中。

### (5) Output

Output 属性用于将要发送的数据输入传输缓冲区。例如：MSComm1.Output="I See You"。一般的数据均是在送达输出缓冲区后随即被送出的，当 MSComm 控件设置有发送阈值属性时，则会生成 SThreshold 事件。

### (6) InputLen

InputLen 属性用于指定由串口读入的字符串长度或字节数，在需要指定读入输入缓冲

区的字符长度时设置该属性。例如：MSComm1.InputLen=10，则当程序执行 Input 命令时，只会读取 10 个字符。如果在输入缓冲区中有 55 个字符，而设置 InputLen=10，由于每一次的 Input 命令只能读 10 个字符，所以需要执行 6 次 Input 才能把缓冲区的数据读入完。

## 17.5.2 通信实验

### 1. 实验一：本机通信实验

我们可以利用两台 PC 机进行通信的实验，硬件上的连接方法如图 17-26 所示。

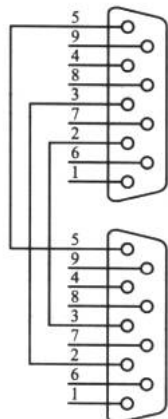


图 17-26 两机通信

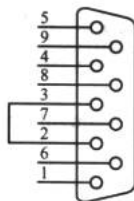


图 17-27 本机通信

如果条件不允许，也可利用一台计算机完成通信实验。做法是把串口的 2 和 3 脚短接，这样，2 脚是接收数据端，3 脚是发送数据端，就实现了本机发送的数据由本机接收的效果。连接方法如图 17-27 所示。

完成硬件连接后，开始编写通信程序。在 VB 集成开发环境中，新建一个 Visual Basic 工程，并在窗体上放置一个 MSComm 控件，作为串口通信的通道。在其属性窗口中，将其 Name 属性更改为 Comm1，并更改 CommPort 属性值为 2（假如正在使用 COM2 口）。再按照图 17-28 所示放置一些控件，其中控件的名称如标注所示。

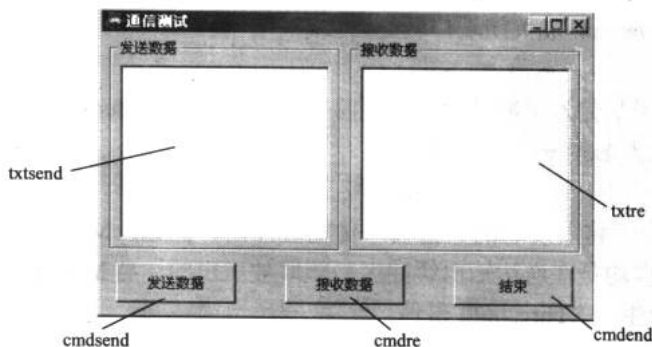


图 17-28 串口通信程序界面



完整的代码如下:

程序17-7

```
Private Sub cmdend_Click()      ' “结束” 按钮事件
Comm1.PortOpen = False      ' 关闭串口
End                            ' 结束系统
End Sub

Private Sub cmdre_Click()      ' “接收数据” 按钮事件
Dim buf$                     ' 定义缓冲区
buf = Trim(Comm1.Input)      ' 接收数据
If Len(buf) = 0 Then
txtre.Text = "Nothing"
Else
txtre.Text = buf
End If
End Sub

Private Sub cmdsend_Click()    ' “发送数据” 按钮事件
Comm1.Output = Trim(txtsend.Text) ' 发送 txtsend.Text 中的数据
End Sub

Private Sub Form_Load()        ' 加载窗体事件
Comm1.PortOpen = True        ' 打开串口
End Sub
```

编译并运行, 在发送数据的文本框控件中输入“I See You”, 然后单击“发送数据”按钮, 这时, “I See You”这个字符串就从串口的3脚发送, 然后进入2脚, 随之进入串口缓冲区。这时, 单击“接收数据”按钮就会在接收数据控件中显示“I See You”, 如图17-29所示。

## 2. 实验二: 与单片机联机实验

把图17-17中连接好的串口插入计算机的串口上, 先在计算机端运行串口通信程序17-7, 然后在单片机端运行程序17-6(这个顺序不能倒)。单击“接收数据”按钮, 就会在接收数据文本框控件中显示单片机发送来的数据, 如图17-30所示。



图 17-29 通信测试

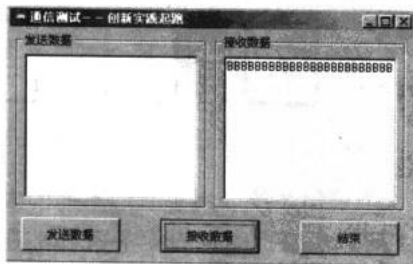


图 17-30 接收来自单片机的数据



之所以接收到一串字母“B”是因为程序 17-6 向串口发送“42H”，这正是字母“B”对应的 ASCII 码。ASCII 码表参见附录 E。

通过这两个小实验，我们就能完成一些简单的双机互联的系统设计了。当然，为了描述声音采集系统的波形曲线，还得具备一些 VB 编程的其他知识，但这些知识不在本书谈论范围之内，从略。图 17-31 所示为编者编制的一个界面，以供参考。

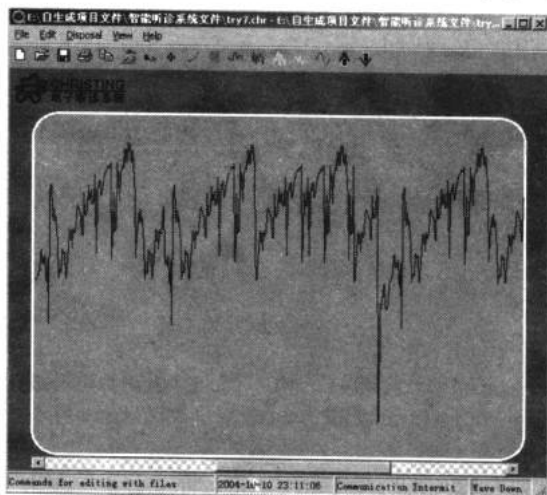


图 17-31 采集系统界面

### 17.5.3 在声音采集系统中

我们的话题进行到现在，已经把单片机的主要功能谈完了。通过最后一个知识点——与 PC 机互联的学习，我们已经能胜任完成声音采集系统的全部设计工作了。此时，我们再看看图 17-32 所示的整个系统的框图，是不是有更深刻的体会呢？

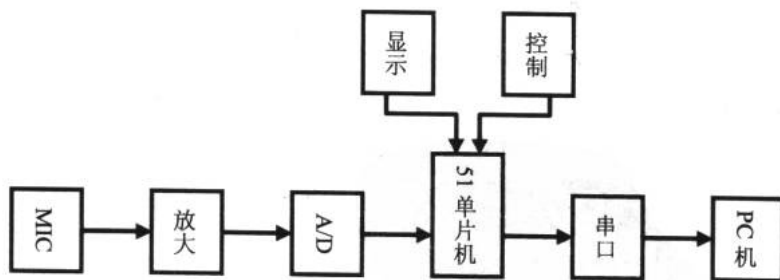


图 17-32 采集系统结构框图

这个采集系统应用了我们本书的大部分内容，包括模拟电路、数字电路和单片机的知识。之所以没有把所有的程序和系统的电路图一一介绍，是因为系统的设计并不是惟一的。程序的书写也因人而异，没有必要让编者那些拙劣的电路图和程序代码影响读者的创造力。

希望通过这本书的讲述，能让大家在创新实践科技活动中跑起来。

# 附录 A Multisim2001 的安装

为了帮助读者正确安装和使用 Multisim2001, 本附录将详细介绍安装的全过程。

## A1 安装环境要求

Multisim2001 的安装环境要求如下:

- ✦ 操作系统: Windows95/98/2000/NT4.0/XP。
- ✦ CPU: Pentium166 或更高档次的 CPU。
- ✦ 内存: 至少 32MB (最好在 128MB 以上)。
- ✦ 显示器分辨率: 至少 800 像素×600 像素。
- ✦ 光驱: 配备 CD-ROM 光驱 (没有光驱时可通过网络安装)。
- ✦ 硬盘: 可用空间至少 200MB。

下面将以 Multisim2001 在 Windows XP 环境下的安装为例, 逐步介绍安装过程。在不同版本的 Windows 操作系统下安装提示信息和过程略有不同, 但只要按照提示操作即可顺利安装。

## A2 安装 Multisim2001 程序

### A2.1.1 安装步骤

安装过程分为两个阶段, 下面就一一向读者讲述具体的安装方法。

第一阶段, 首先运行 SETUP.EXE 进行安装, 安装程序会自动检查系统配置是否满足安装 Multisim 的要求, 如图 A1 所示。检查完毕会出现安装程序说明界面, 如图 A2 所示。

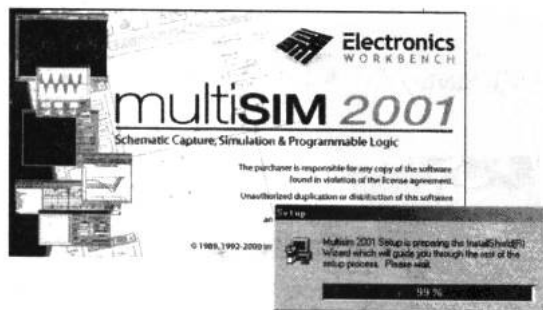


图 A1 Multisim 2001 安装程序启动画面

单击 Next 按钮, 将会出现一个版权声明对话框, 如图 A3 所示, 要想成功安装必须遵守其声明, 单击 Yes 按钮继续。

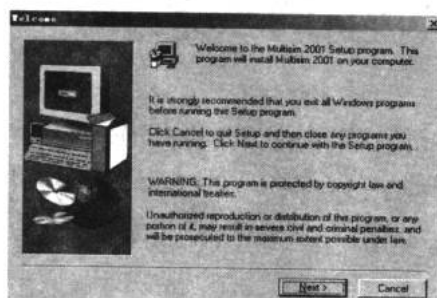


图 A2 Multisim 2001 安装程序操作说明

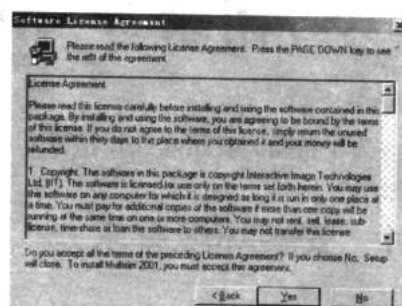


图 A3 软件声明对话框

在继续安装之前, 安装程序会升级 Windows 系统文件, 单击图 A4 中的 Next 按钮, 安装程序会自动更新系统文件。当系统文件更新完毕后, 会出现图 A5 所示的对话框, 该对话框提示您是否要重新启动以便下一步的安装。这里我们选中 “Yes, I want to restart my computer now.” 选项, 然后单击 Finish 按钮重新启动计算机。

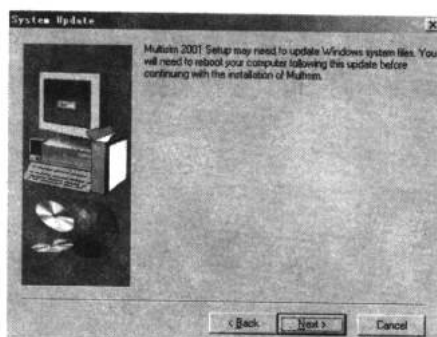


图 A4 提示系统更新对话框

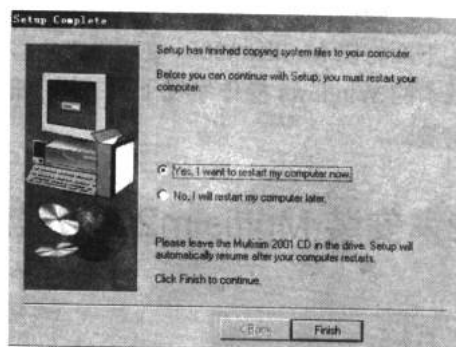


图 A5 提示第一阶段安装完成对话框

到此为止第一阶段的安装已经结束, 接下来就要进行第二阶段的安装。

Multisim 的安装具有鲜明的特色, 与其他软件截然不同。系统重新启动后, Multisim 的安装程序并不会自动继续执行安装, 必须靠手动来重新启动安装程序。第二阶段的安装步骤如下。

在 “开始” 菜单中选择 Startup 项, 然后单击 Continue Setup, 安装程序将被重新启动, 如图 A6 所示。

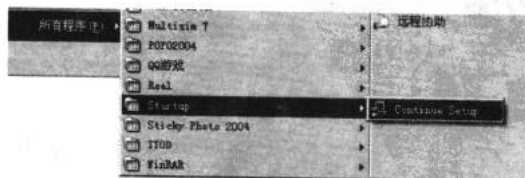


图 A6 重新启动安装程序



连续单击 Next 或 Yes 按钮, 直到出现图 A7 所示的 User Information 对话框。

在图 A7 所示对话框的 Name 文本框中输入用户姓名, Company 文本框中输入所属公司或单位名称, Serial 文本框中输入软件序列号, 该序列号可以在安装光盘包装盒上找到, 单击 Next 按钮。如果序列号正确, 将出现一个对话框, 告知序列号验证的正确性。单击 Next 按钮继续下一步。

在 Enter Information 对话框中, 要求输入功能码 (Feature Code)。并非所有版本的 Multisim 都有功能码 (如教育版就没有)。用户可以忽略此项, 直接单击 Next 按钮跳过 (忽略功能码输入后, 系统的使用会受到一些限制)。

在 Choose Destination Location 对话框 (如图 A8 所示) 中, 选择安装的路径。可选择默认的 C:\Multisim, 或单击 Browse 按钮进行自定义路径的选择, 改动完成后单击 Next 按钮继续执行。

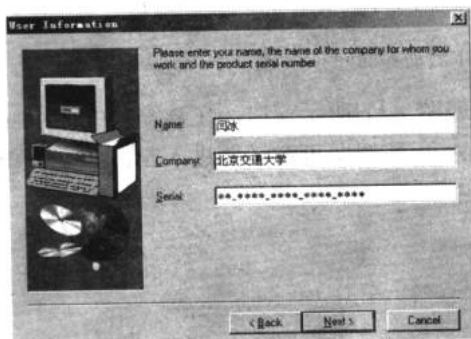


图 A7 User Information 对话框

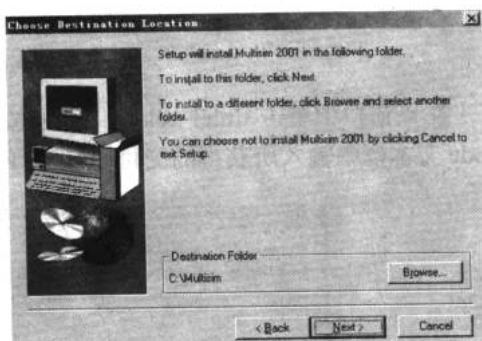


图 A8 Choose Destination Location

在 Select Program Folder 对话框中指定程序文件夹的名称。默认名称为 Multisim2001, 一般情况下不需要改动, 单击 Next 按钮继续执行安装程序。此时, 安装程序将开始复制文件, 并在屏幕上显示复制进程, 如图 A9 所示。

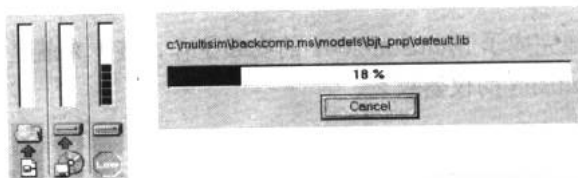


图 A9 显示复制文件进度

文件复制完毕后, 单击 OK 按钮, 安装程序显示出 Setup Complete 对话框, 单击其中的 Finish 按钮, 安装程序结束。

## A2.1.2 激活 Multisim2001

安装程序完成之后, Multisim2001 就可以打开使用了, 但在激活之前是有时间限制的 (15 天), 过了这个期限就不能再使用了。为了不受使用期限的限制, 下面我们来激活它。

在激活时需要输入一个交付码 (Release Code)，交付码的获得比较麻烦，用户需要购买正版 Multisim，然后在 EWB 网站注册，由 NI 公司用 E-mail 形式交付给用户使用。获得交付码之后，运行 Multisim2001，出现 Multisim2001 的启动界面，如图 A10 所示。



图 A10 Multisim 2001 启动界面

在该窗口中单击 Enter release code 按钮，出现图 A11 所示窗口，在该窗口的 Release Code 文本框中输入所获得的交付码，然后单击 Continue 按钮即可激活并进入 Multisim2001。

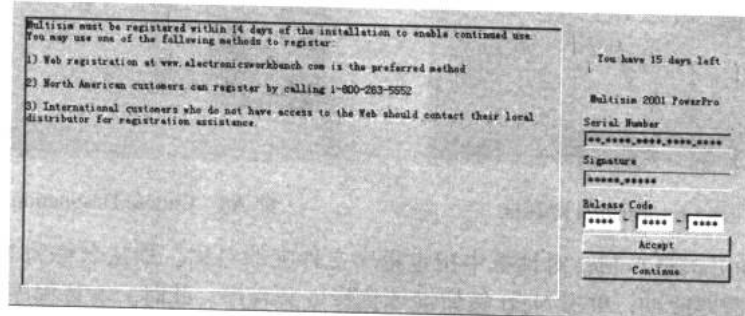


图 A11 提示输入 Release Code 界面

至此，我们成功地完成了 Multisim 2001 的安装工作，接下来就是如何使用了。在附录 C 中，将详细介绍 Multisim 的仪器仪表。



## 附录 B Multisim2001 的菜单栏

### 【File】文件

New 新建文件  
Open... 打开文件  
Close 关闭文件  
Save 保存  
Save As... 保存为  
New Project... 新建工程  
Open Project... 打开工程  
Save Project 保存工程  
Close Project 关闭工程  
Version Control... 版本控制  
Print Circuit 打印电路图  
Print 打印  
Print Preview 打印预览  
Print Circuit Setup 打印电路设置  
Print Reports 打印报表  
Bill of Materials 元件清单  
Database Family List 元件库列表  
Component Detail Report 元件详细资料  
Print Instruments 打印仪表结果  
Print Setup... 打印机设置  
Recent Files 最近的文件  
Recent Projects 最近的工程  
Exit 退出

### 【Edit】编辑

Undo 撤销  
Cut 剪切  
Copy 复制  
Paste 粘贴  
Delete 删除  
Select All 全选

Flip Horizontal 水平翻转

Flip Vertical 垂直翻转

90 Clockwise 顺时针 90 度翻转

90 CounterCW 逆时针 90 度翻转

Update Subcircuits Symbols 更新子电路符号

Renumber Components 元件重新编号

Component Properties... 元件属性

### 【View】窗口显示

Toolbars 工具栏

Component Bars 元件库

Project Workspace 工程工作区域

Status Bar 状态栏

Show Simulation Error/Audit Trail 显示仿真  
错误记录/检查仿真界面

Show XSpice Command Line Interface 显示  
XSpice 命令行界面

Show Grapher 显示图表

Show Simulate Switch 显示仿真开关

Show Text Description Box 显示文本描述框

Show Grid 显示栅格

Show Page Bounds 显示纸张边界

Show Title Block and Border 显示标题栏和  
边界

Zoom In 放大

Zoom Out 缩小

Find... 查找

### 【Place】放置

Place Component... 放置元件

Place Junction 放置节点

Place Bus 放置总线

Place Input/Output 放置输入/输出端  
Place Hierarchical Block 放置分等级块电路  
Place Text 放置文本  
Place text Description Box 放置文本描述框  
Replace Component... 替换元件  
Place subcircuit 放置子电路  
Replace by Subcircuit 用子电路替代

### 【Simulate】仿真

Run 运行  
Pause 暂停  
Default Instrument Settings... 默认仪表设置  
Digital Simulation Settings... 数字仿真设置  
Instruments 选择仿真仪表  
Multimeter 数字万用表  
Function Generator 函数信号发生器  
Wattmeter 功率计(瓦特计)  
Oscilloscope 双踪示波器  
Bode Plotter 波特图仪(与扫频仪类似)  
Word Generator 字信号发生器(数字电路用)  
Logic Analyzer 逻辑转换仪(数字电路用)  
Logic Converter 逻辑分析仪(数字电路用)  
Distortion Analyzer 失真度分析仪  
Spectrum Analyzer 频谱分析仪  
Network Analyzer 网络分析仪  
Analyses 选择分析方法  
DC Operating Point... 直流工作点分析  
AC Analysis... 交流分析  
Transient Analysis... 瞬态分析  
Fourier Analysis... 傅里叶分析(频谱分析)  
Noise Analysis... 噪声分析  
Distortion Analysis... 失真分析  
DC Sweep 直流扫描分析  
Sensitivity... 灵敏度分析  
Parameter Sweep... 参数扫描分析  
Temperature Sweep... 温度扫描分析  
Pole Zero... 极点-零点分析

Transfer Function... 传输函数分析  
Worst Case... 最坏情况分析  
Monte Carlo... 蒙特卡罗分析  
Trace Width Analysis... 线宽分析  
Stop Analysis 停止分析  
RF Analyses 射频分析  
Postprocessor... 后处理器  
VHDL Simulation VHDL 仿真  
Verilog HDL Simulation Verilog HDL 仿真  
Auto Fault Option... 自动设置电路故障  
Global Component Tolerances... 全局元件容差设置

### 【Transfer】文件输出

Transfer to Ultiboard 传送给 Ultiboard  
Transfer to other PCB Layout 传送给其他 PCB 软件  
Backannotate from Ultiboard 从 Ultiboard 返回注释  
Export Simulation Results to MathCAD 仿真结果输出到 MathCAD  
Export Simulation Results to Excel 仿真结果输出到 Excel  
Export Netlist 输出网表

### 【Tools】工具

Create Component... 创建元件  
Edit Component... 编辑元件  
Copy Component... 复制元件  
Delete Component... 删除元件  
Database Management... 元件库管理  
Update Components 升级元件  
Remote Control/Design Sharing 远程控制/设计共享  
EDAparts.com 连接 EDAparts.com 网站

### 【Options】选项

Preferences 参数选择



Circuit 电路

Workspace 工作区域

Wiring 连线

Component Bin 元件相关项

Font 字体

Miscellaneous 杂项

Modify Title Block... 修改标题栏内容

Global Restrictions... 全局限制设置

Circuit Restrictions... 电路限制设置

【Window】 窗口

Cascade 层叠

Tile 平铺

Arrange Icons 重排图标

【Help】帮助

Multisim Help 帮助主题目录

Multisim Reference 帮助主题索引

Release Notes 版本注释

About Multisim... 关于 Multisim

In Use List 正在使用的元件清单

# 附录 C Multisim2001 中的虚拟仪表

## C1 仪器仪表的基本操作

Multisim 的仪器库存放有数字万用表、函数信号发生器、示波器、波特计、字符信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换仪、瓦特表、失真度分析仪、网络分析仪和频谱分析仪共 11 种仪器仪表可供使用, 仪器仪表以图标方式存在, 每种类型下又有多台, Multisim 仪器仪表库的图标及功能见第 1 章的图 1-19。

### 1. 仪器的选用与连接

选择仪器时, 用鼠标将仪器库中被选用的仪器图标“拖放”到电路工作区即可。将仪器图标上的连接端(接线柱)与相应电路的连接点相连即完成电气连接。

### 2. 仪器参数的设置

用鼠标双击仪器图标即可打开仪器面板。可以用鼠标操作仪器面板上相应按钮及参数来设置对话框的数据。在测量或观察过程中, 可以根据测量或观察结果来改变仪器仪表参数的设置, 如示波器、函数信号发生器等。

## C2 常用仪器仪表

### C2.1.1 数字万用表 (Multimeter)

数字万用表是一种用来测量交直流电压、交直流电流、电阻及电路中两点之间的分贝损耗, 可自动调整量程的数字显示的多用表。

用鼠标双击数字万用表图标, 可以放大数字万用表。用鼠标单击数字万用表面板上的“设置”(Setting)按钮, 则弹出参数设置对话框, 在此对话框内可以设置数字万用表的电流表内阻、电压表内阻、欧姆表电流及测量范围等参数。

### C2.1.2 函数信号发生器 (Function Generator)

函数信号发生器是可提供正弦波、三角波和方波这 3 种不同波形信号的电压信号源。用鼠标双击函数信号发生器图标, 可以放大函数信号发生器的面板。



### C2.1.3 瓦特表 (Wattmeter)

瓦特表用来测量电路功率，交流或直流均可测量。用鼠标双击瓦特表图标，可以放大它的面板。电压输入端与测量电路并联连接，电流输入端与测量电路串联连接。

### C2.1.4 示波器 (Oscilloscope)

示波器是用来显示点信号波形的形状、大小和频率等参数的仪器。用鼠标双击示波器图标，放大的示波器面板如图 C1 所示，面板上各按键的作用、调整方法及参数设置与实际示波器类似。

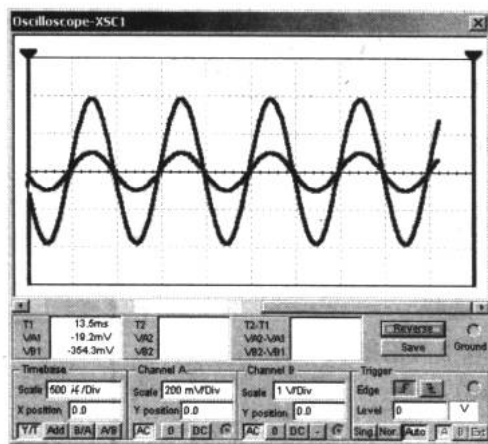


图 C1 示波器

#### 1. 时基 (Time base) 控制部分的调整

##### (1) 时间基准

X 轴刻度显示示波器的时间基准，其基准为  $0.1\text{ns}/\text{Div} \sim 1\text{s}/\text{Div}$ ，可自行选择。

##### (2) X 轴位置 (X Position)

X 轴位置控制 X 轴的起始点。当 X 的位置调到 0 时，信号从显示器的左边缘开始，正值使起始点右移，负值使起始点左移。X 位置的调节范围为  $-5.00 \sim +5.00$ 。

##### (3) 显示方式

显示方式选择示波器的显示，可以从“幅度/时间(Y/T)”切换到“A 通道/B 通道(A/B)”、“B 通道/A 通道(B/A)”或 Add 方式。

- ✦ Y/T 方式：X 轴显示时间，Y 轴显示电压值。
- ✦ A/B、B/A 方式：X 轴与 Y 轴都显示电压值。
- ✦ Add 方式：X 轴显示时间，Y 轴显示 A 通道和 B 通道的输入电压之和。

## 2. 示波器输入通道 (Channel A/B) 的设置

### (1) Y 轴刻度 (Scale)

Y 轴电压刻度范围为  $10\mu\text{V}/\text{Div} \sim 5\text{kV}/\text{Div}$ , 可根据输入信号大小来选择 Y 轴刻度值的大小, 使信号波形在示波器显示屏上显示出合适的幅度。

### (2) Y 轴位置 (Y Position)

Y 轴位置控制 Y 轴的起始点。当 Y 的位置调到 0 时, Y 轴的起始点与 X 轴重合; 如果将 Y 的位置增加到 1.00, Y 轴原点位置从 X 向上移一大格; 若将 Y 的位置减小到 -1.00, Y 轴原点位置从 X 向下移一大格。Y 的位置的调节范围为  $-3.00 \sim +3.00$ 。改变 A、B 通道的 Y 的位置有助于比较或分辨两通道的波形。

### (3) Y 轴输入方式

Y 轴输入方式即信号输入的耦合方式。当用 AC 耦合时, 示波器显示信号的交流分量。当用 DC 耦合时, 显示的是信号的 AC 和 DC 分量之和。

当用 0 耦合时, 在 Y 轴设置的原点位置显示一条水平直线。

## 3. 触发方式 (Trigger) 的调整

### (1) 触发信号选择

触发信号一般选择自动触发 (Auto)。选择 Sing 为脉冲触发, 选择 Nor 为一般脉冲触发。Sing 和 Nor 属于外触发方式。

### (2) 触发沿 (Edge) 选择

触发沿可选择上升沿或下降沿触发。

### (3) 触发电平 (Level) 选择

选择触发电平的范围。

## 4. 示波器显示波形读数

用鼠标将垂直光标拖到需要读取数据的位置, 就可以显示出波形读数的精确值。用鼠标单击 Reverse 按钮可改变示波器屏幕的背景颜色, 单击 Save 按钮可按 ASCII 码格式存储波形读数。

## C2.1.5 波特计 (Bode Plotter)

波特计可以测量和显示电路的幅频特性与相频特性, 在功能上类似于扫频仪。用鼠标双击波特计图标, 将看到放大的面板如图 C2 所示。

### 1. 坐标设置

在垂直 (Vertical) 坐标或水平 (Horizontal) 坐标控制面板图框内, 按下 Log 按钮, 则坐标以对数 (以 10 为底) 的形式显示; 按下 Lin 按钮, 则坐标以线性的结果显示。

水平 (Horizontal) 坐标轴总是显示频率值。它的标度 ( $1.0\text{Hz} \sim 10.0\text{GHz}$ ) 由水平轴的初始值 (I Initial) 或终值 (F Final) 决定。

在信号频率范围很宽的电路中, 分析电路频率响应时, 通常选用对数坐标 (以对数坐



标所绘出的频率特性曲线称为波特图)。

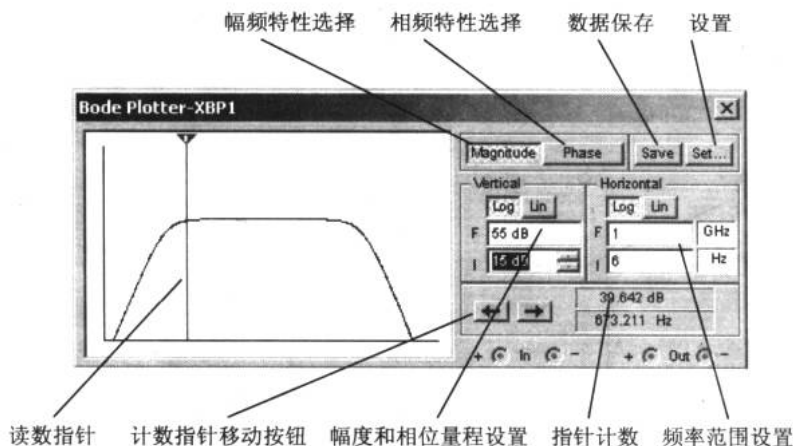


图 C2 波特计

垂直坐标当测量电压增益时,垂直轴显示输出电压与输入电压之比,若使用对数基准,则单位是分贝;如果使用线性基准,显示的是比值。当测量相位时,垂直轴总是以度为单位显示相位角。

## 2. 坐标数值的读出

要得到特性曲线上任意点的频率、增益或相位差,可用鼠标拖动读数指针(位于波特计中的垂直光标),或者用“读数指针移动”按钮来移动读数指针(垂直光标)到需要测量的点,读数指针与曲线的交点处的频率和增益或相位角的数值显示在读数框中。

## 3. 分辨率设置

Set 用来设置扫描的分辨率,用鼠标单击 Set 按钮,出现分辨率设置对话框,数值越大分辨率越高。

### C2.1.6 字信号发生器 (Word Generator)

字信号发生器是能产生 16 路(位)同步逻辑信号的一个多路逻辑信号源,用于对数字逻辑电路进行测试。用鼠标双击字信号发生器图标,放大的字信号发生器图标如图 C3 所示。

## 1. 字信号的输入

在字信号编辑区,32bit 的字信号以 8 位 16 进制数编辑和存放,可以存放 1024 条字信号,地址编号为 0000~03FF。

字信号输入操作时将光标指针移至字信号编辑区的某一位,用鼠标左键单击后,由键盘输入二进制数码的字信号,光标自左至右,自上至下移位,可连续地输入字信号。

也可以在面板下部标有 Binary 的文本框内输入二进制码。在字信号地址 Address 编辑区可以编辑或显示与字信号地址有关的信息。在 Edit 区显示当前正在编辑的字信号的地址;

在 Current 区显示当前正在输入的字信号的地址；Initial 区和 Final 区分别用于编辑和显示输入字信号的首地址和本地址。字信号发生器被激活后，字信号按照一定的规律逐行从底部的输入端送出，同时在面板的底部对应于各输入端的 16 个小圆圈内，实时显示输入字信号各个位的值。

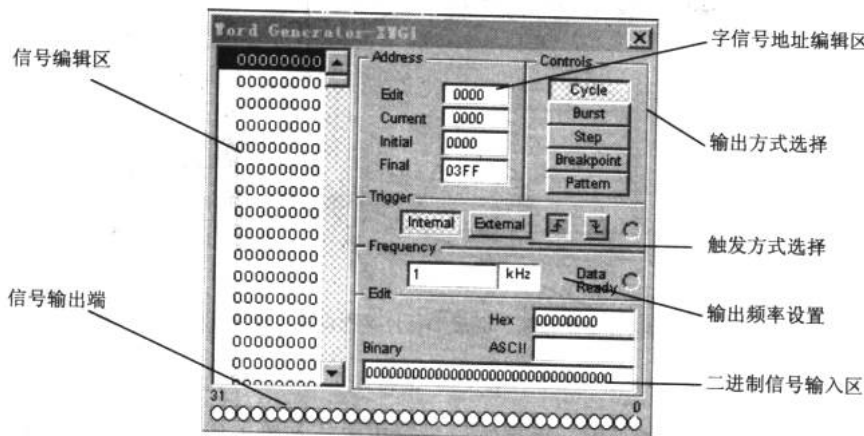


图 C3 字信号发生器

## 2. 字信号的输入方式

字信号的输入方式分为 Step（单步）、Burst（单帧）和 Cycle（循环）3 种方式。用鼠标单击一次 Step 按钮，字信号输入一条。这种方式可用于对电路进行单步调试。

用鼠标单击 Burst 按钮，则从首地址开始至本地址连续逐条地输出字信号。

用鼠标单击 Cycle 按钮，则循环不断地进行 Burst 方式的输出。

Burst 和 Cycle 情况下的输出节奏由输出频率的设置决定。

## 3. 字信号的触发方式

字信号的触发分为 Internal（内部）和 External（外部）两种触发方式。当选择 Internal（内部）触发方式时，字信号的输出直接由输出方式按钮（Step、Burst、Cycle）启动。当选择 External（外部）触发方式时，则需接入外触发脉冲，并定义“上升沿触发”或“下降沿触发”，然后单击输出方式按钮，待触发脉冲到来时才启动输出。此外在输出端还可以得到与输出字信号同步的时钟脉冲输出。

## 4. 字信号的存盘、重用、清除等操作

用鼠标单击 Pattern 按钮，弹出 Pre-setting patterns 对话框，对话框中的 Clear buffer（清字信号编辑区）、Open（打开字信号文件）和 Save（保存字信号文件）3 个选项用于对编辑区的字信号进行相应的操作。字信号存盘文件的后缀为“.DP”。对话框中的 UP Counter（按递增编码）、Down Counter（按递减编码）、Shift right（按右移编码）和 Shift left（按左移编码）4 个选项用于生成按一定规律排列的字信号。例如选择 UP Counter（按递增编码），则按 0000~03FF 排列；如果选择 Shift right（按右移编码），则按 8000, 4000, 2000 等逐步右移一位的规律排列，其余依此类推。





### C2.1.7 逻辑分析仪 (Logic Analyzer)

逻辑分析仪用于对数字逻辑信号的高速采集和时序分析,可以同步记录和显示 16 路数字信号。逻辑分析仪的面板如图 C4 所示。

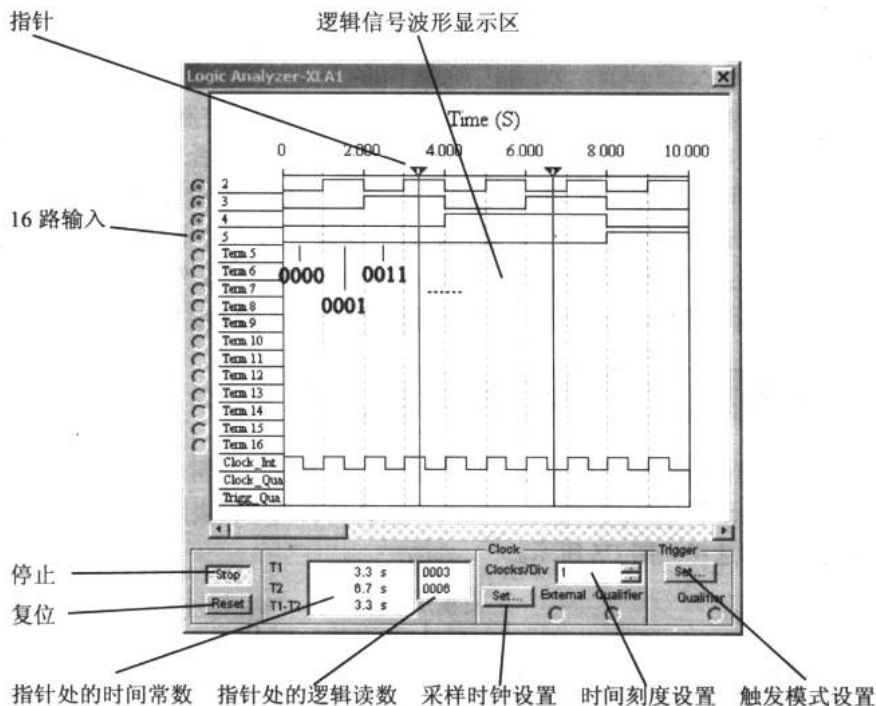


图 C4 逻辑分析仪

#### 1. 数字逻辑信号与波形的显示、读数

面板左边的 16 个圆圈对应 16 个输入端,各路输入逻辑信号的当前值在小圆圈内显示,按从上到下排列依次为最低位至最高位。16 路输入的逻辑信号的波形以方波形式显示在逻辑信号波形显示区。通过设置输入导线的颜色可修改相应波形的显示颜色。波形显示的时间轴刻度可通过面板下边的 Clock/division 设置;读取波形的数据可以通过拖放读数指针完成。在面板下部的两个方框内显示指针所处位置的时间读数和逻辑读数(4 位十六进制数)。

#### 2. 触发方式设置

单击 Trigger 区的 Set 按钮,可以弹出触发方式对话框。触发方式有多种选择,在对话框中可以输入 A、B、C 3 个触发字。逻辑分析仪在读到一个指定字或几个字的组合后触发。触发字的输入可单击标为 A、B 或 C 的编辑框,然后输入二进制的字(0 或 1)或者 x, x 代表该位为“任意”(即 0、1 均可)。用鼠标单击对话框中 Trigger combinations 文本框右边的按钮,弹出由 A、B、C 组合的 8 组触发字,选择 8 种组合之一,并单击 Accept (确认)按钮后,在 Trigger combinations 文本框中就被设置为该种组合触发字。

3 个触发字的默认设置均为 xxxxxxxxxxxxxxxx, 表示只要第一个输入逻辑信号到达, 无论是什么逻辑值, 逻辑分析仪均被触发, 并开始波形的采集, 否则必须满足触发字条件才被触发。此外, Trigger qualifier (触发限定字) 对触发有控制作用。若该位设为 x, 触发控制不起作用, 触发完全由触发字决定; 若该位设置为“1” (或“0”), 则仅当触发控制输入信号为“1” (或“0”) 时, 触发字才起作用, 否则即使触发字组合条件满足也不能引起触发。

### 3. 采样时钟设置

用鼠标单击对话框面板下部 Clock 区的 Set 按钮, 弹出时钟控制对话框。在对话框中, 波形采集的控制时钟可以选择内时钟或者外时钟; 上升沿有效或者下降沿有效。如果选择内时钟, 内时钟频率可以设置。对 Clock qualifier (时钟限定) 的设置决定时钟控制输入对时钟的控制方式。若该位设置为“1”, 表示时钟控制输入为“1”时开放时钟, 逻辑分析仪可以进行波形采集; 若该位设置为“0”, 表示时钟控制输入为“0”时开放时钟; 若该位设置为“x”, 表示时钟总是开放的, 不受时钟控制输入的限制。

## C2.1.8 逻辑转换仪 (Logic Converter)

逻辑转换仪是 Multisim 特有的仪器, 它能够完成真值表、逻辑表达式和逻辑电路 3 者之间的转换, 包括从逻辑电路到真值表的转换和从真值表到逻辑表达式的转换。逻辑转换仪面板及转换方式的选择如图 C5 所示。

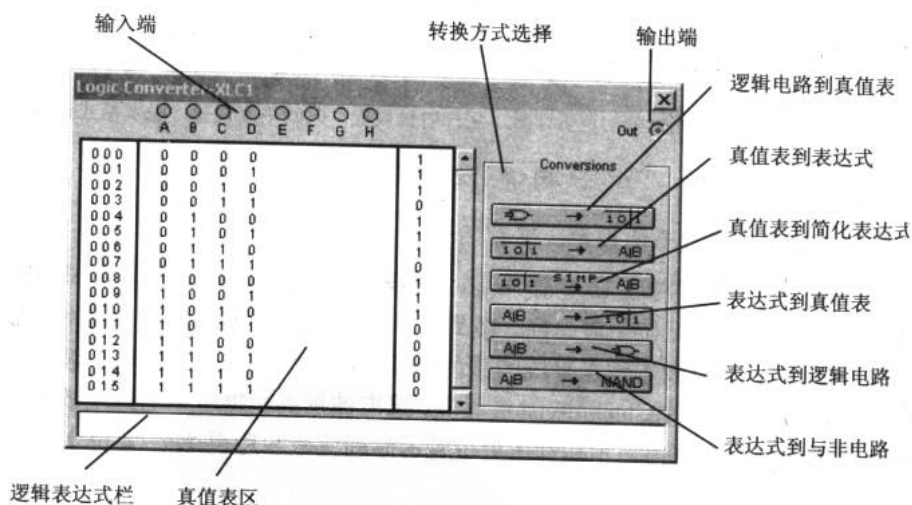


图 C5 逻辑转换仪

## C2.1.9 失真度分析仪 (Distortion Analyzer)

失真度分析仪是一种用来测量电路信号失真的仪器, Multisim 提供的失真度分析仪频



率范围为 20Hz~20kHz, 失真度分析仪的面板如图 C6 所示。

在 Control Mode (控制模式) 区域中, THD 设置分析总谐波失真, SINAD 设置分析信噪比, Settings 设置分析参数。

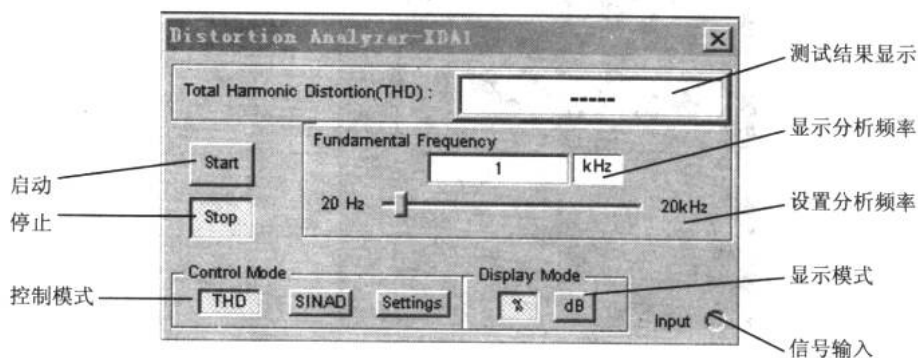


图 C6 失真分析仪

### C2.1.10 频谱分析仪 (Spectrum Analyzer)

频谱分析仪用来分析信号的频域特性, Multisim 提供的频谱分析仪频率范围上限为 4GHz, 频谱分析仪面板如图 C7 所示。

在图 C7 所示的频谱分析仪面板中, 分为 5 个区。

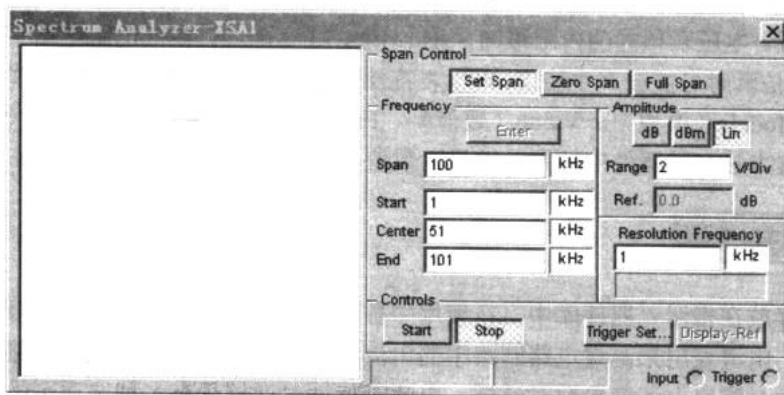


图 C7 频谱分析仪

### C2.1.11 网络分析仪 (Network Analyzer)

网络分析仪是一种用来分析双端口网络的仪器, 它可以测量衰减器、放大器、混频器、功率分配器等电子电路及元件的特性。Multisim2001 提供的网络分析仪可以测量电路的 S 参数并计算出 H、Y、Z 参数。网络分析仪面板如图 C8 所示。

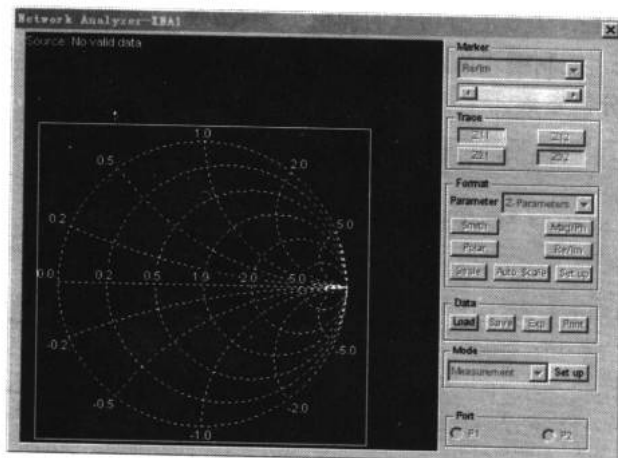


图 C8 网络分析仪

### C2.1.12 电压表

电压表存放在指示元器件库中，在使用中数量没有限制。单击旋转按钮可以改变其引出线的方向。电压表用来测量电路中两点间的电压，测量时，将电压表与被测电路的两点并联。

电压表交、直流工作模式及其他参数设置，可双击电压表图标，在弹出的电压表参数对话框中设置。电压表预置的内阻很高，在  $1\text{M}\Omega$  以上。因此，在低电阻电路中使用极高内阻的电压表，仿真时可能会产生错误。电压表特性对话框具有多种选项可供设置，包括 Label（标识）、Models（模型）、Value（数值）、Fault（故障设置）和 Display（显示）内容的设置，设置方法与元器件中标签、编号、数值、模型参数的设置方法相同。

### C2.1.13 电流表

电流表存放在指示元器件库中，在使用中数量没有限制。单击旋转按钮可以改变其引出线的方向。电流表用来测量电路回路中的电流，测量时将它串联在被测电路回路中。双击电流表图标，弹出电流表参数对话框。电流表特性对话框具有多种选项可供设置，包括 Label（标识）、Models（模型）、Value（数值）、Fault（故障设置）和 Display（显示）内容的设置，设值方法与元器件中标签、编号、数值、模型参数的设置方法相同。

## 附录 D 数字电路综合设计——数字钟

数字钟是用数字集成电路构成的、由数码显示的一种现代计时器，与传统机械表相比，它具有走时准确、显示直观、无机械传动装置等特点，因而广泛用于车站、码头、机场和商店等公共场所。在控制系统中，数字钟也常用来作定时控制的时钟源。

### 1. 任务要求

(1) 设计一个具有“时”、“分”、“秒”的十进制数字显示（小时从 00~23）的计时器。

(2) 具有手动校时、校分的功能。

(3) 用 74 系列中小规模集成器件去实现。

### 2. 数字计时器的基本工作原理

数字计时器一般都由振荡器、分频器、译码器和显示器等几部分组成。其中，振荡器和分频器组成标准秒信号发生器，由不同进制的计数器、译码器和显示器组成计时系统。秒信号送入计数器进行计数，把累积的结果以“时”、“分”、“秒”的数字显示出来。

“时”显示由二十四进制计数器、译码器和显示器构成；“分”和“秒”显示分别由六十进制计数器、译码器和显示器构成。数字钟原理框图如图 D1 所示。

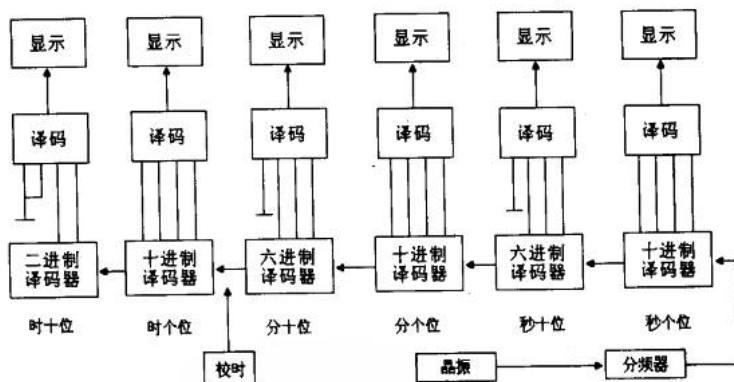


图 D1 数字钟原理图

#### (1) 振荡器

振荡器是计时器的核心，振荡器的稳定性和频率的精准度决定了计时器的准确度，因此通常选用石英晶体来构成振荡器电路。一般来说，振荡器的频率越高，计时的精度就越高，但耗电量将增大。所以在设计电路时，一定要根据需要设计出最佳电路。

图 D2 所示电路的振荡频率是 1.5MHz，把石英晶体串接于由非门 U1A 和 U1B 组成的振荡反馈电路中，非门 U1C 使振荡器整形缓冲。凭借与石英晶体串联的微调电容 C1，可

以对振荡器频率做微量的调节。

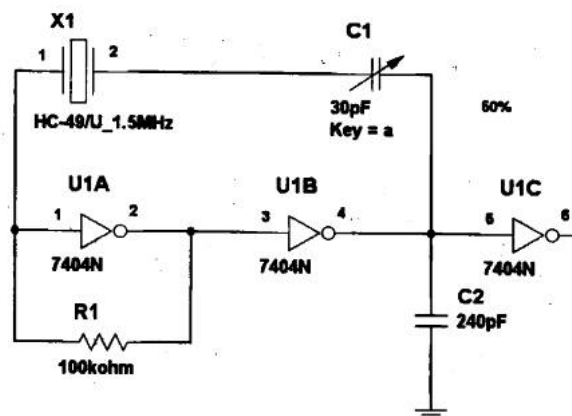


图 D2 振荡器

## (2) 分频器

分频器的功能主要有两个：一是产生标准秒脉冲信号，二是可提供功能扩展电路所需要的信号。选用中规模计数器 74LS90D 就可以完成上述功能。用 74LS90D 构成的分频电路如图 D3 所示。

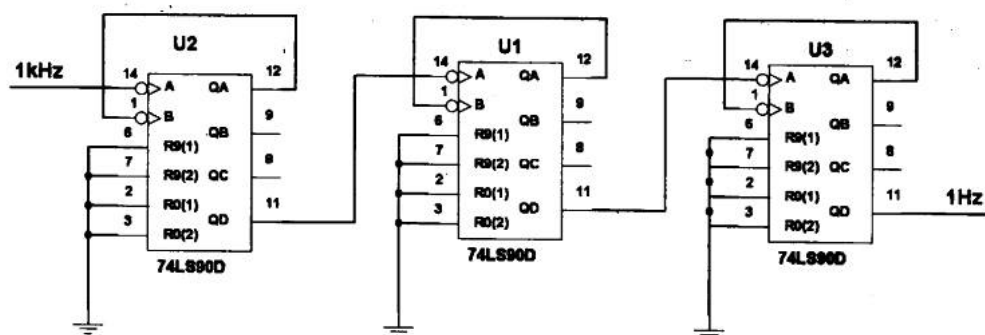


图 D3 分频器

将 3 片 74LS90D 进行级联，每片为 1/10 分频器，3 片级联正好获得 1Hz 标准秒脉冲信号。如果振荡频率为 100kHz，就需要 5 片 74LS90D 进行级联。

## (3) 计数器

根据图 D1 所示方框图可清楚地看到，显示“时”、“分”、“秒”需要 6 片中规模计数器。其中，“分”、“秒”为计时各为六十进制计数器，“时”为计时为二十四进制计数器。六十进制计数器和二十四进制计数器都选用 74LS90D 集成块来实现，实现的方法采用反馈清零法。六十进制和二十四进制计数器如图 D4、图 D5 所示。

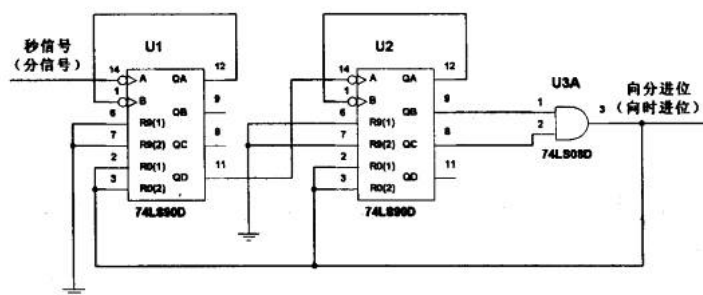


图 D4 六十进制计数器

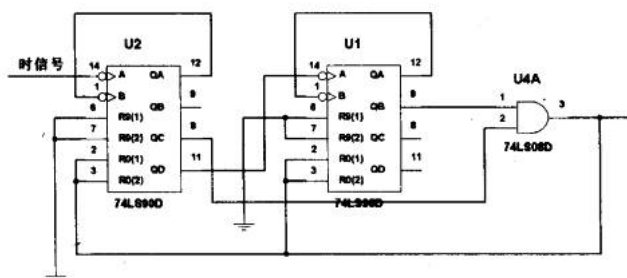


图 D5 二十四进制计数器

#### (4) 校时电路

当刚接通电源或计时出现误差时，都需要对时间进行校正。校正电路如图 D6 所示。

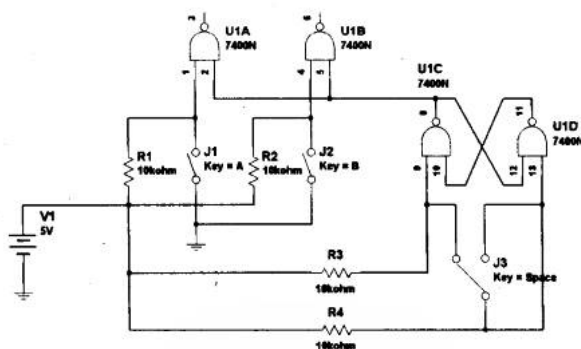


图 D6 校正电路

J1、J2 分别是时校正、分校正开关。不校正时，J1、J2 是闭合的。当校正时位时，需要把 J1 打开，然后用手拨动 J3，来回拨动一次，就能使时位增加 1，根据需要去拨动开关，校正完毕后再把 J1 开关合上。校正分位和校正时位的方法是一样的。

#### (5) 画出原理总图

原理总图如插图 D7 所示。图中元器件如下：

11 片 74LS90D；3 片 74LS04；2 片 74LS08；4 片 7400。

## 附录 E ASCII 码表

十进制	八进制	十六进制	二进制	键盘值
000	000	000	00000000	NUL(Null char.)
001	001	001	00000001	SOH(Start of Header)
002	002	002	00000010	STX(Start of Text)
003	003	003	00000011	ETX(End of Text)
004	004	004	00000100	EOT(End of Transmission)
005	005	005	00000101	ENQ(Enquiry)
006	006	006	00000110	ACK(Acknowledgment)
007	007	007	00000111	BEL(Bell)
008	010	008	00001000	BS(Backspace)
009	011	009	00001001	HT(Horizontal Tab)
010	012	00A	00001010	LF(Line Feed)
011	013	00B	00001011	VT(Vertical Tab)
012	014	00C	00001100	FF(Form Feed)
013	015	00D	00001101	CR(Carriage Return)
014	016	00E	00001110	SO(Shift Out)
015	017	00F	00001111	SI(Shift In)
016	020	010	00010000	DLE(Data Link Escape)
017	021	011	00010001	DC1(XON) (Device Control1)
018	022	012	00010010	DC2(Device Control2)
019	023	013	00010011	DC3(XOFF)(Device Control3)
020	024	014	00010100	DC4(Device Control4)
021	025	015	00010101	NAK(Negative Acknowledgement)
022	026	016	00010110	SYN(Synchronous Idle)
023	027	017	00010111	ETB(End of Trans. Block)
024	030	018	00011000	CAN(Cancel)
025	031	019	00011001	EM(End of Medium)
026	032	01A	00011010	SUB(Substitute)
027	033	01B	00011011	ESC(Escape)
028	034	01C	00011100	FS(File Separator)
029	035	01D	00011101	GS(Group Separator)
030	036	01E	00011110	RS(Request to Send)(Record Separator)
031	037	01F	00011111	US(Unit Separator)
032	040	020	00100000	SP(Space)
033	041	021	00100001	!(exclamation mark)
034	042	022	00100010	"(double quote)





续表

十进制	八进制	十六进制	二进制	键盘值
035	043	023	00100011	#(number sign)
036	044	024	00100100	\$(dollar sign)
037	045	025	00100101	%(percent)
038	046	026	00100110	&(ampersand)
039	047	027	00100111	'(single quote)
040	050	028	00101000	((left/opening parenthesis)
041	051	029	00101001	)(right/closing parenthesis)
042	052	02A	00101010	*(asterisk)
043	053	02B	00101011	+(plus)
044	054	02C	00101100	,(comma)
045	055	02D	00101101	-(minus or dash)
046	056	02E	00101110	.(dot)
047	057	02F	00101111	/(forward slash)
048	060	030	00110000	0
049	061	031	00110001	1
050	062	032	00110010	2
051	063	033	00110011	3
052	064	034	00110100	4
053	065	035	00110101	5
054	066	036	00110110	6
055	067	037	00110111	7
056	070	038	00111000	8
057	071	039	00111001	9
058	072	03A	00111010	:(colon)
059	073	03B	00111011	;(semi-colon)
060	074	03C	00111100	<(less than)
061	075	03D	00111101	=(equal sign)
062	076	03E	00111110	>(greater than)
063	077	03F	00111111	?(question mark)
064	100	040	01000000	@(AT symbol)
065	101	041	01000001	A
066	102	042	01000010	B
067	103	043	01000011	C
068	104	044	01000100	D
069	105	045	01000101	E
070	106	046	01000110	F
071	107	047	01000111	G
072	110	048	01001000	H
073	111	049	01001001	I
074	112	04A	01001010	J

续表

十进制	八进制	十六进制	二进制	键盘值
075	113	04B	01001011	K
076	114	04C	01001100	L
077	115	04D	01001101	M
078	116	04E	01001110	N
079	117	04F	01001111	O
080	120	050	01010000	P
081	121	051	01010001	Q
082	122	052	01010010	R
083	123	053	01010011	S
084	124	054	01010100	T
085	125	055	01010101	U
086	126	056	01010110	V
087	127	057	01010111	W
088	130	058	01011000	X
089	131	059	01011001	Y
090	132	05A	01011010	Z
091	133	05B	01011011	[(left/opening bracket)
092	134	05C	01011100	\(back slash)
093	135	05D	01011101	](right/closing bracket)
094	136	05E	01011110	^(caret/cirumflex)
095	137	05F	01011111	_(underscore)
096	140	060	01100000	,
097	141	061	01100001	a
098	142	062	01100010	b
099	143	063	01100011	c
100	144	064	01100100	d
101	145	065	01100101	e
102	146	066	01100110	f
103	147	067	01100111	g
104	150	068	01101000	h
105	151	069	01101001	i
106	152	06A	01101010	j
107	153	06B	01101011	k
108	154	06C	01101100	l
109	155	06D	01101101	m
110	156	06E	01101110	n
111	157	06F	01101111	o
112	160	070	01110000	p
113	161	071	01110001	q
114	162	072	01110010	r



续表

十进制	八进制	十六进制	二进制	键盘值
115	163	073	01110011	s
116	164	074	01110100	t
117	165	075	01110101	u
118	166	076	01110110	v
119	167	077	01110111	w
120	170	078	01111000	x
121	171	079	01111001	y
122	172	07A	01111010	z
123	173	07B	01111011	{(left/opening brace)
124	174	07C	01111100	(vertical bar)
125	175	07D	01111101	} (right/closing brace)
126	176	07E	01111110	~ (tilde)
127	177	07F	01111111	DEL(delete)

前 32 个控制字符的详细解释:

NUL (null)

SOH (start of heading)

STX (start of text)

ETX (end of text)

EOT (end of transmission) - Not the same as ETB

ENQ (enquiry)

ACK (acknowledge)

BEL (bell) - Caused teletype machines to ring a bell. Causes a beep in many common terminals and terminal emulation programs.

BS (backspace) - Moves the cursor (or print head) move backwards (left) one space.

TAB (horizontal tab) - Moves the cursor (or print head) right to the next tab stop. The spacing of tab stops is dependent on the output device, but is often either 8 or 10.

LF (NL line feed, new line) - Moves the cursor (or print head) to a new line. On Unix systems, moves to a new line AND all the way to the left.

VT (vertical tab)

FF (form feed) - Advances paper to the top of the next page (if the output device is a printer).

CR (carriage return) - Moves the cursor all the way to the left, but does not advance to the next line.

SO (shift out) - Switches output device to alternate character set.

SI (shift in) - Switches output device back to default character set.

DLE (data link escape)

DC1 (device control 1)

DC2 (device control 2)	1101110	72	73	74
DC3 (device control 3)	0011110	66	67	68
DC4 (device control 4)	1011110	70	71	72
NAK (negative acknowledge)	0101110	62	63	64
SYN (synchronous idle)	1011110	70	71	72
ETB (end of transmission block) - Not the same as EOT	1101110	72	73	74
CAN (cancel)	0101110	62	63	64
EM (end of medium)	0011110	66	67	68
SUB (substitute)	1011110	70	71	72
ESC (escape)	1101110	72	73	74
FS (file separator)	0111110	58	59	60
GS (group separator)	1011110	70	71	72
RS (record separator)	0101110	62	63	64
US (unit separator)	1101110	72	73	74

## 参 考 文 献

1. 阮秋琦. 数字图像处理学. 北京: 电子工业出版社, 2001
2. 仵洁. Visual Basic. 北京: 人民邮电出版社, 2002
3. 陈永甫. 新编 555 集成电路应用 800 例. 北京: 电子工业出版社, 2001
4. 彭承琳. 生物医学传感器原理及应用. 北京: 高等教育出版社, 2000
5. 汪晓平等. Visual Basic 网络通信协议分析与应用实现. 北京: 人民邮电出版社, 2003
6. 胡斌. 集成电路识图轻松入门. 北京: 人民邮电出版社, 2002
7. 庄天戈. 计算机在生物医学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999
8. 藤井信生. 电子实用手册. 北京: 科学出版社, 2001
9. 蔡坚勇. 青少年音响电路制作指南. 福州: 福建科学技术出版社, 1997
10. 康华光等. 电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 1999
11. 雷丽文等. 微机原理与接口技术. 北京: 电子工业出版社, 1997
12. 杨忠煌等. 单芯片 8051 实务与应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
13. 求是科技. 单片机典型模块设计实例导航. 北京: 人民邮电出版社, 2004
14. 陈明荧. 8051 单片机课程设计实训教材. 北京: 清华大学出版社, 2004
15. 余永权. ATME89 系列单片机应用技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
16. 傅吉康. 怎样选用无线电元件. 北京: 人民邮电出版社, 1993
17. 周海. 初级电子制作精选. 北京: 人民邮电出版社, 2001
18. 吴金戌等. 8051 单片机实践与应用. 北京: 清华大学出版社, 2003
19. 门宏. 图解电子技术快速入门. 北京: 人民邮电出版社, 2004
20. 何希才. 新型集成电路及应用实例. 北京: 科学出版社, 2003
21. 韩广兴. 电子元器件与实用电路基础. 北京: 电子工业出版社, 2004
22. 门宏. 精选电子制作图解 66 例. 北京: 人民邮电出版社, 2001
23. 梁明理等. 电子线路. 北京: 高等教育出版社, 2001
24. 孙指乐等. 精选无线电小制作 24 例. 北京: 人民邮电出版社, 1990
25. 任致程. 经典晶体管电子线路 300 例. 北京: 机械工业出版社, 2002
26. 蔡建新等. 生物医学电子学. 北京: 北京大学出版社, 1997
27. 魏海明. 实用电子电路 500 例. 北京: 化学工业出版社, 2003
28. 何利民. MCS-51 系列单片机应用系统设计系统配置与接口技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003
29. 中国计量出版社组. 测量与传感电路. 北京: 中国计量出版社, 2001
30. 程昱. 精通 Protel DXP 电路设计. 北京: 清华大学出版社, 2004
31. 倪维桢. 数据通信原理. 北京: 中国人民大学出版社, 2003

32. 邓辛恺. 现代医学仪器设计原理. 北京: 科学出版社, 2004
33. 范逸之等. Visual Basic 与 RS-232 串行通信控制. 北京: 清华大学出版社, 2003
34. 李华等. MCS-51 系列单片机实用接口技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993
35. 林仲茂等. 8051 单片机彻底研究基础篇. 北京: 人民邮电出版社, 2004
36. 谢宜仁等. 单片机实用技术问答. 北京: 人民邮电出版社, 2003
37. Thomas L F. 数字基础. 北京: 科学出版社, 2002
38. Charles P. Microsoft C#Windows 程序设计. 北京: 北京大学出版社, 2002
39. 黄智伟. 基于 Multisim2001 的电子电路计算机仿真设计与分析. 北京: 电子工业出版社, 2004
40. Gary M M, Jeffrey S B. Modern Electronic Communication. 北京: 科学出版社, 2004
41. 蒋卓勤, 邓玉元. Multisim2001 及其在电子设计中的应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
42. 张银华. 音箱业余设计和制作实例. 北京: 人民邮电出版社, 1991