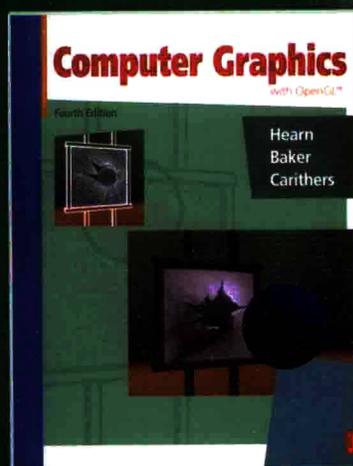


# 计算机图形学

## (第四版)

Computer Graphics with OpenGL  
Fourth Edition



Donald Hearn

[美] M. Pauline Baker 著

Warren R. Carithers

蔡士杰 杨若瑜 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外计算机科学教材系列

# 计算机图形学 (第四版)

Computer Graphics with OpenGL

Fourth Edition

Donald Hearn

[美] M. Pauline Baker 著

Warren R. Carithers

蔡士杰 杨若瑜 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是一本内容丰富、取材新颖的计算机图形学著作,在前一版的基础上进行了全面扩充,增加了许多新的内容,覆盖了近年来计算机图形学的最新发展和成就。全书层次分明、重点突出,并附有使用 OpenGL 编写的大量程序及各种效果图,是一本难得的优秀教材。全书共分为 24 章及 3 个附录,全面系统地讲解了计算机图形学的基本概念和相关技术。作者首先对计算机图形学进行综述;然后讲解二维图形的对象表示、算法及应用,三维图形的相关技术、建模和变换等;接着介绍光照模型、颜色模型和动画技术。本书还新增了有关分层建模与动画的介绍,以及对 OpenGL 的全面介绍;最后的附录给出了计算机图形学中用到的基本数学概念、图形文件格式及 OpenGL 的相关内容等。

本书可作为信息技术等相关专业本科生和研究生的教材或参考书,也可作为计算机图形技术人员的参考资料。

Authorized translation from the English language edition, entitled COMPUTER GRAPHICS WITH OPENGL, FOURTH EDITION, 9780136053583 by Donald Hearn, M. Pauline Baker, and Warren R. Carithers, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2011 Pearson Education Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2014.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-3684

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学:第4版/(美)赫恩(Hearn,D.), (美)巴克(Baker,M.P.), (美)卡里瑟斯(Carithers,W.R.)著;蔡士杰,杨若瑜译. —北京:电子工业出版社,2014.11

书名原文:Computer Graphics with OpenGL, Fourth Edition

(国外计算机科学教材系列)

ISBN 978-7-121-24614-2

I. ①计… II. ①赫… ②巴… ③卡… ④蔡… ⑤杨… III. ①计算机图形学-高等学校-教材  
IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 245290 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:43.5 字数:1252 千字 彩插:8

版 次:2002 年 5 月第 1 版(原著第 2 版)

2014 年 11 月第 3 版(原著第 4 版)

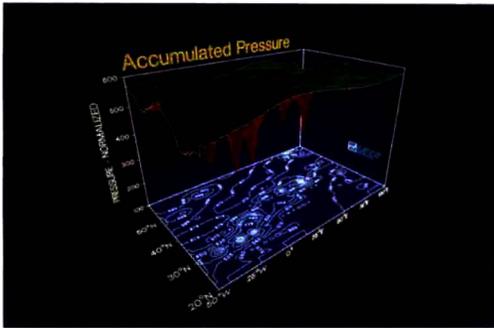
印 次:2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

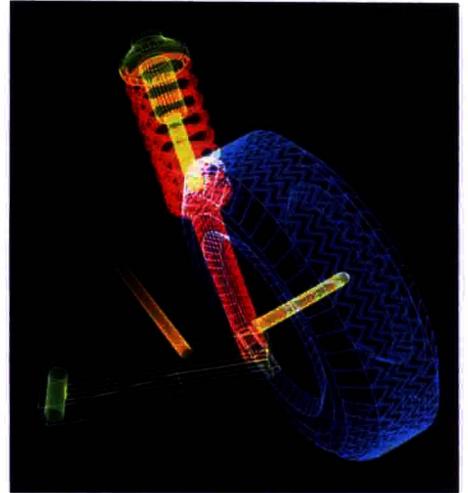
凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。



彩图 1 地平面上绘制二维等高线图，上面用曲面形式绘制高度场(美国加州圣迭戈 ISSCO Graphics 公司提供)



彩图 2 汽车轮胎安装的彩色线框图显示 (Evans & Sutherland 公司提供)

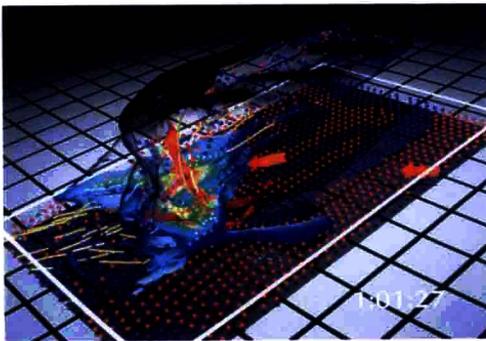


(a)



(b)

彩图 3 楼宇设计的三维绘制：(a)一座住宅关于结构问题的剖切模型(Dorling Kindersley 提供)；(b)一座现代豪华住宅的外观(Zastol'skiy Victor Leonidovich/Shutterstock 提供)



彩图 4 暴风雨内部气流的数值模型 [美国国家超级计算应用中心(NCSA)和伊利诺伊大学理事会提供]



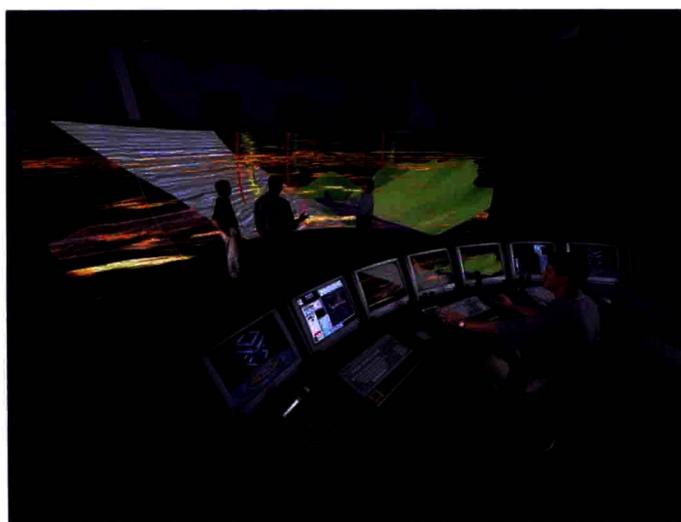
彩图 5 虚拟现实环境 CAVE 中科学家与分子结构的立体图进行交互 (NCSA 和伊利诺伊大学理事会提供)



彩图 6 Time Arts 公司的 John Derry 用无线压感触笔和 Lumena gouache-brush 软件创作的电子水彩画 (John Derry 提供, 经授权后重新印制)



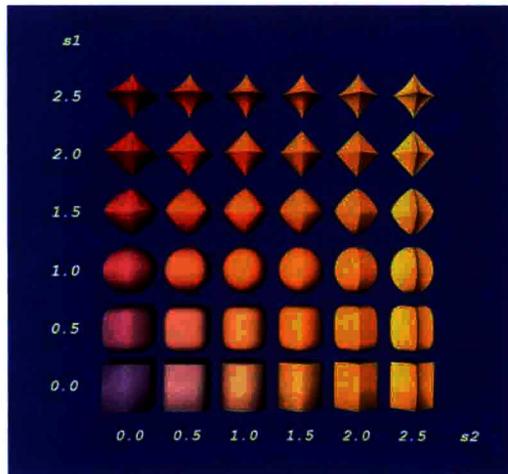
彩图 7 NASA 飞机场控制塔模拟器的 360 度观察屏幕, 称为 FutureFlight Central Facility (SGI 公司提供)



彩图 8 展示在 25 英尺半圆屏幕上的地球物理可视化, 水平范围 160 度, 垂直范围 40 度 (SGI 公司提供)



彩图 9 通过透视投影、光照效果和选择表面特征生成的真实感房间显示(加州理工学院的 John Snyder、Jed Lengyel、Devendra Kalra 和 Al Barr 提供。© 1992 Caltech)



彩图 10  $r_x = r_y = r_z$ 、参数值  $s_1$  和  $s_2$  的范围从 0.0 到 2.5 的超椭球面图示



(a)

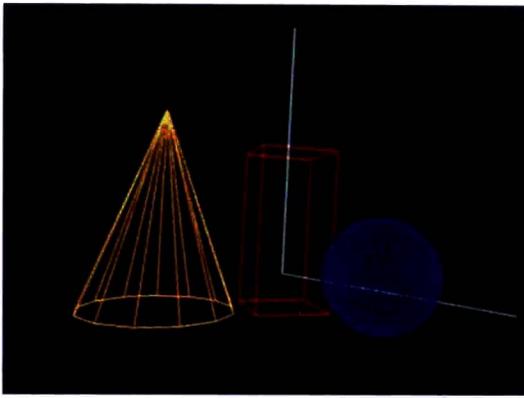


(b)

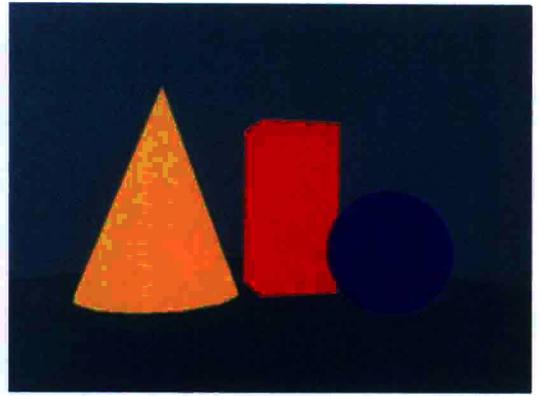


(c)

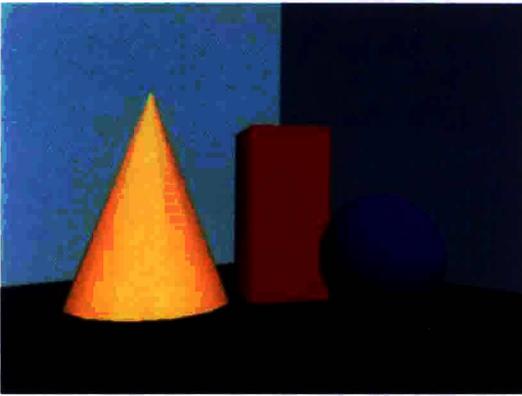
彩图 11 使用能量函数最小化模拟(a)棉、(b)毛、(c)塑料的特征(Rensselaer 工业学院设计研究中心的 David E.Breen 和 Donald H.House 提供)



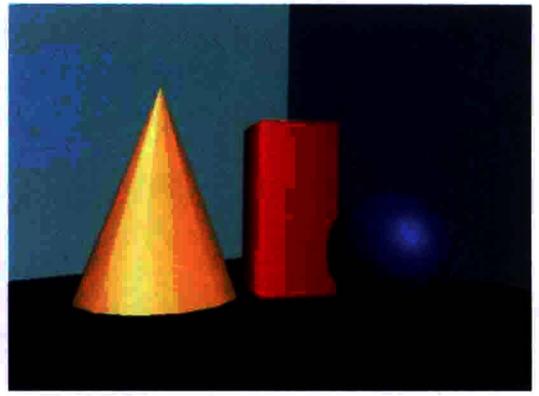
(a)



(b)

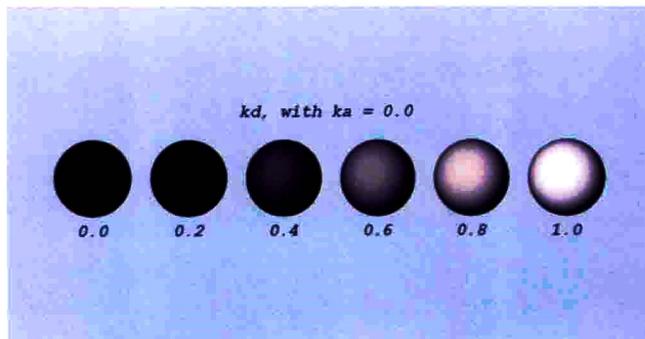


(c)



(d)

彩图 12 (a)中为一场景的线框图；(b)中只考虑环境光效果，使用不同颜色来表示每个物体的不同的表面；(c)中的光照效果考虑了从单个点光源产生的(设置表面 $k_s=0$ )环境光和漫反射；(d)中的光照效果是在单点光源场景中同时考虑环境光、漫反射和镜面反射的结果



彩图 13 漫反射系数 $k_d$ 介于0和1之间时球面在单个点光源照明下产生的漫反射



彩图 14 一个黑色尼龙坐垫表面的光线反射，它选用织布材质，并由 Monte-Carlo 光线跟踪法绘制而成(康奈尔大学计算机图形学项目组 Stephen H.Westin 提供)



彩图 15 一个茶壶的光线反射，其反射参数设置为模拟磨光的铝表面，采用 Monte-Carlo 光线跟踪法绘制而成(康奈尔大学计算机图形学项目组 Stephen H.Westin 提供)



彩图 16 长号的光线反射，其反射参数设置为模拟光滑黄铜表面(SOFTIMAGE 公司提供)



(a)

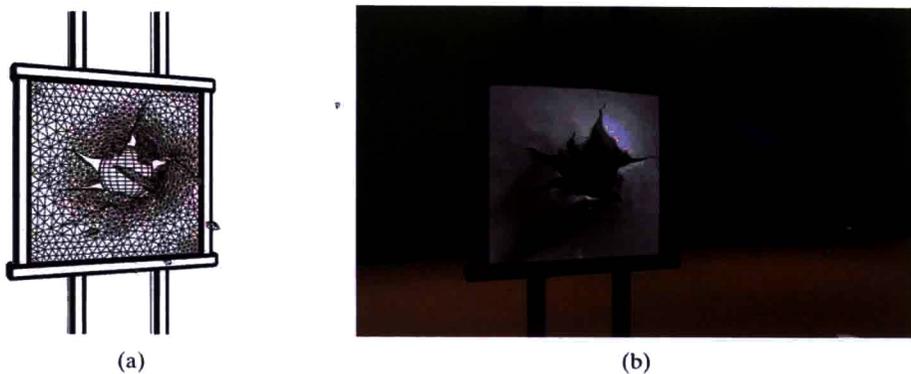


(b)



(c)

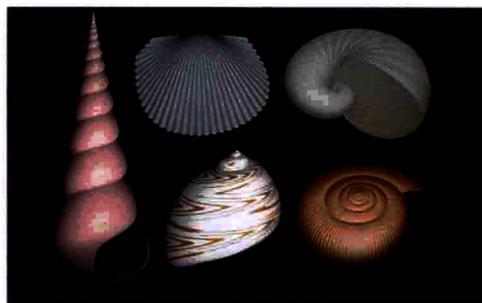
彩图 17 (a) 一个对象的多边形网格近似；(b) 平面明暗处理；(c) Gouraud 表面绘制



彩图 18 对一个方形板被一个刚体子弹击碎的效果进行仿真时的建模和渲染阶段：(a) 场景的线框图；(b) 最终渲染的效果 (James F. O'Brien 提供)



(a)



(b)



(c)



(d)

彩图 19 展示用计算机图形学为各种对象生成表面细节的场景：(a) 带有刺和花的仙人掌 (Calgary 大学的 Deborah R. Fowler、Przemyslaw Prusinkiewicz 和 Johannes Battjes 提供)；(b) 有各种图案和凹槽表面的海洋贝壳 (Calgary 大学的 Deborah R. Fowler、Hans Meinhardt 和 Przemyslaw Prusinkiewicz 提供)；(c) 满桌水果 (SOFTIMAGE 公司提供)；(d) 用纹理映射方法生成的棋子和棋盘的表面图案 (SOFTIMAGE 公司提供)



彩图 20 一个使用实体纹理方法的对象特征建模的场景(犹他大学计算机科学系 Peter Shirley 提供)

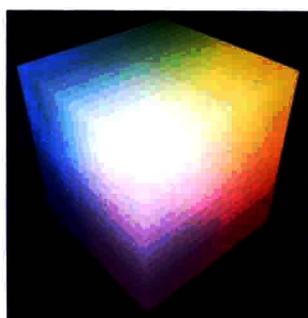


(a)

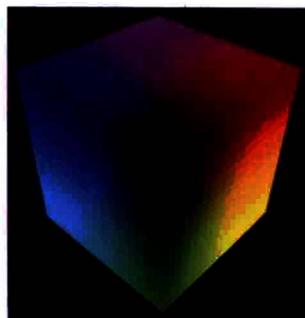


(b)

彩图 21 使用凹凸映射方法绘制表面粗糙的物体 [(a)和(b)分别由犹他大学计算机科学系 Peter Shirley 与 SOFTIMAGE 公司提供]

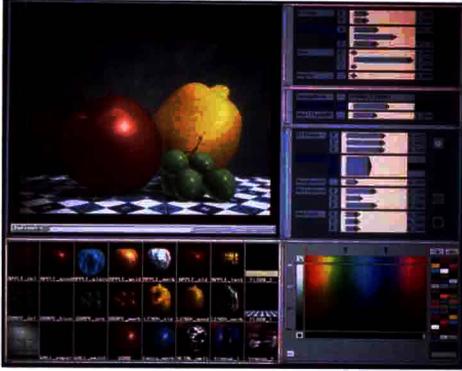


(a)



(b)

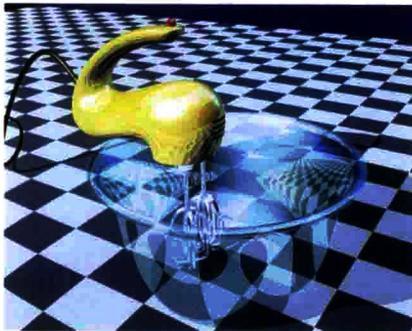
彩图 22 RGB 颜色立方体的视图: (a)从白到黑的灰度对角线; (b)从黑到白的灰度对角线



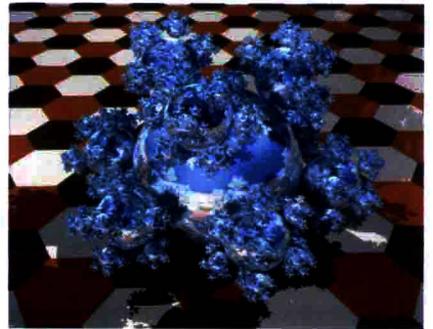
彩图 23 展示美术师绘画软件的一种界面的屏幕布局(Thomson Digital Image 提供)



彩图 24 使用称为 BOOM (Fake Space 实验室) 的头盔立体显示器和数据手套 (VPL 公司), 研究员交互地操纵 Harrier 喷气式飞机四周的不稳定气流中的探针。软件由 Steve Bryson 开发, 数据由 Harrier 提供 (NASA Ames 研究中心 Sam Usselton 提供)



彩图 25 一个被光线跟踪的场景, 显示由物体表面生成的全局反射和透射光照效果 (Evans & Sutherland 提供)



彩图 26 由 7381 个球面和 3 个光源绘制而成的 Spheraflake (Eric Haines 3D 公司提供, 经授权后重新印制)



(a)



(b)

彩图 27 一个由 5 个光源照明的室内场景。(a) 用光线跟踪光线缓存技术来处理阴影光线, (b) 为 (a) 中部分室内场景以表示全局光照效果。室内场景由 1298 个多边形、4 个球、76 个圆柱体和 35 个四面体建模生成, 在 VAX 11/780 上的绘制时间为 246 分钟, 而不使用光线缓存则需 602 分钟 (Eric Haines 提供, 经授权后重新印制)



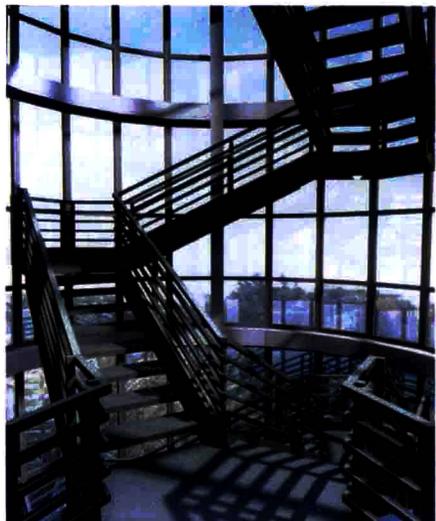
彩图 28 结合光线跟踪和辐射度方法生成的场景的聚焦、反走样及光照效果，真实感的物理光照模型用于生成包括酒瓶阴影中的液体的折射效果 (犹他大学计算机科学系 Peter Shirley 提供)



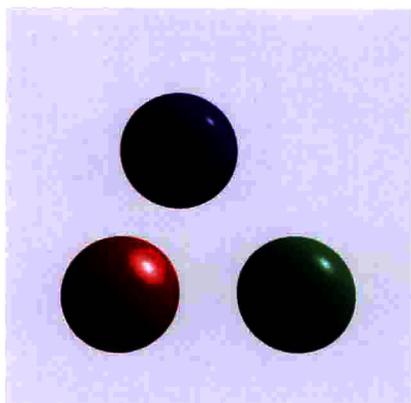
彩图 29 John Wallace 与 John Lin 使用 Hewlett-Packard Starbase Radiosity & Ray Tracing 软件采用逐步求精辐射度方法绘制出来的 Chartres 大教堂的正厅，其中辐射度形状因子由光线跟踪技术计算出来 (Autodesk 公司 John Wallace 提供，经授权后重新印制)



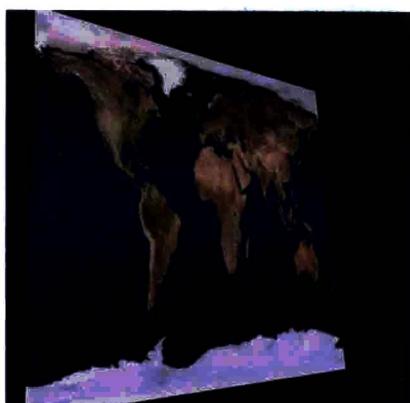
彩图 30 使用逐步求精辐射度方法绘制的建构主义博物馆场景 (康奈尔大学计算机图形学项目, Shenchang Eric Chen、Stuart I. Feldman 和 Julie Dorsey 提供，经授权后重新印制)



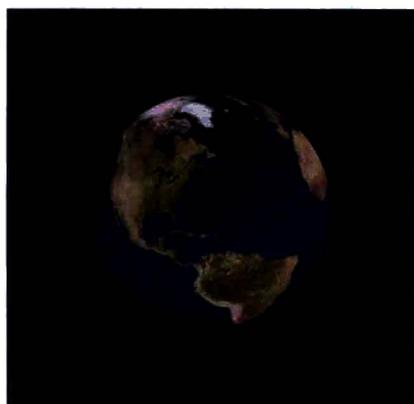
彩图 31 使用逐步求精辐射度方法模拟康奈尔大学的工程理论中心大楼里的楼梯 (康奈尔大学计算机图形学项目, Keith Howie 和 Ben Trumbore 提供，经授权后重新印制)



彩图 32 用 GLSL 着色器实现 Phong 绘制的例子。每个球体有自己的材质参数，场景用单个白色的方向光源照明



彩图 33 将地球表面纹理映射到一个方形区域的结果(地球表面图案由 James Hastings-Trew 提供)



彩图 34 将地球表面纹理映射到一个球体表面的结果(地球表面图案由 James Hastings-Trew 提供)



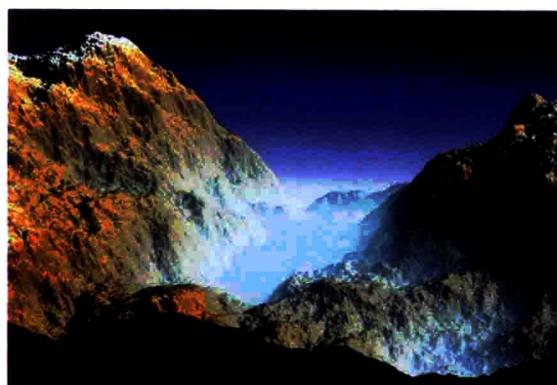
彩图 35 地球表面纹理的凹凸映射效果，原图案的颜色信息用来控制表面法向量的变化(地球表面图案由 James Hastings-Trew 提供)



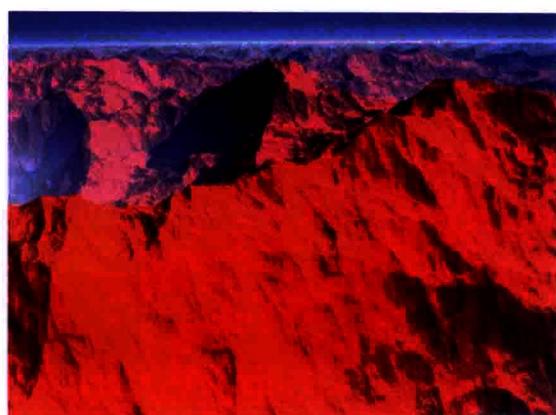
彩图 36 使用多个物体来模拟一场景，分形叶附在一棵树上，几棵树形成树丛。草丛用多个绿色锥体来模拟(John C. Hart 提供，经授权后重新印制)



彩图 37 分形树林由叶、松针、草地和树茎等多个物体模拟生成(John C. Hart 提供, 经授权后重新印制)



(a)

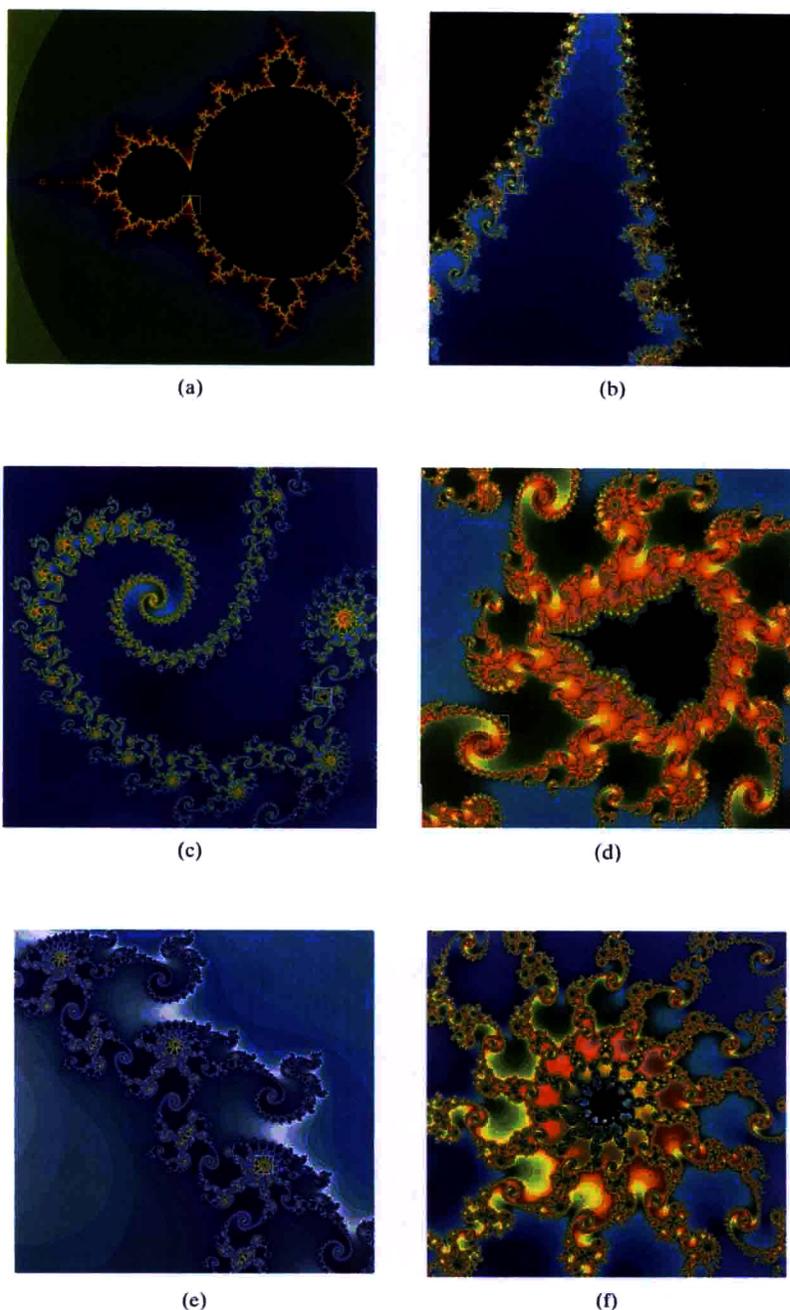


(b)

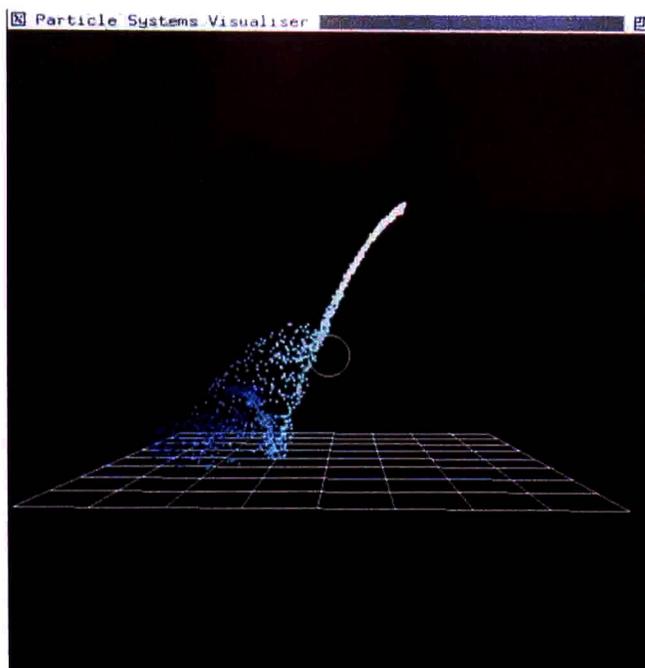


(c)

彩图 38 使用分形布朗运动模拟的地面特征变化 [(a)由 R. V. Voss 和 B. B. Mandelbrot 提供; (b)和(c)由耶鲁大学数学和计算机科学系 Ken Musgrave 与 Benoit B. Mandelbrot 提供]



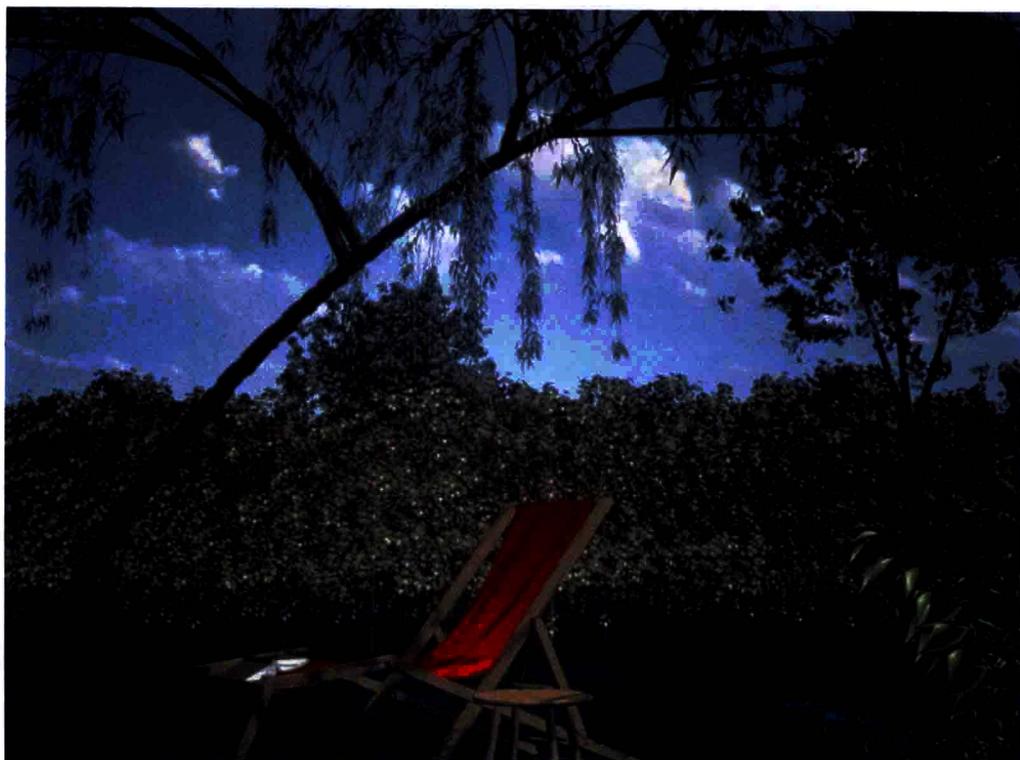
彩图 39 按变换 (23.11) 绘制的分形边界的放大显示。从 Mandelbrot 集的一个显示开始，对于 (a) 中的黑色区域及其周围区域，放大选定边界区域 (b) 到 (f)。白色方框表示选定的下一个要放大的窗口 (Brian Evans 版权所有，经授权后重新印制)



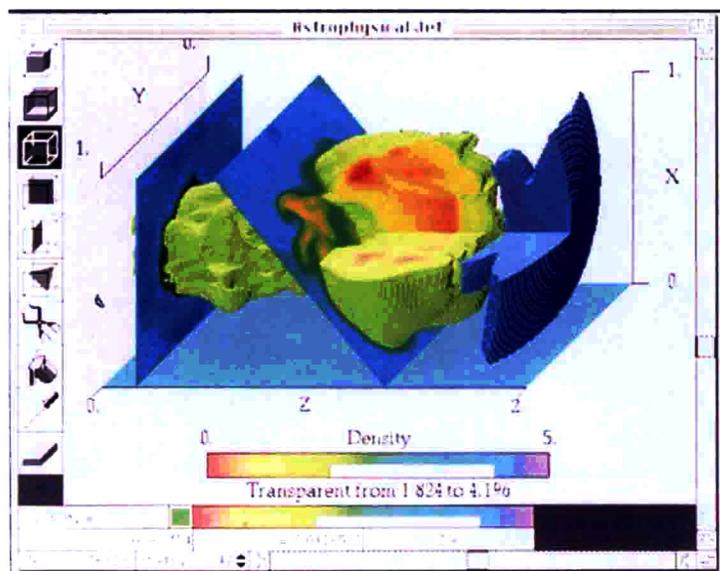
彩图 40 瀑布撞击一石头(圆形)的效果模拟。水被石头阻挡, 然后散落到地面(Toby Howard 提供, 经授权后重新印制)



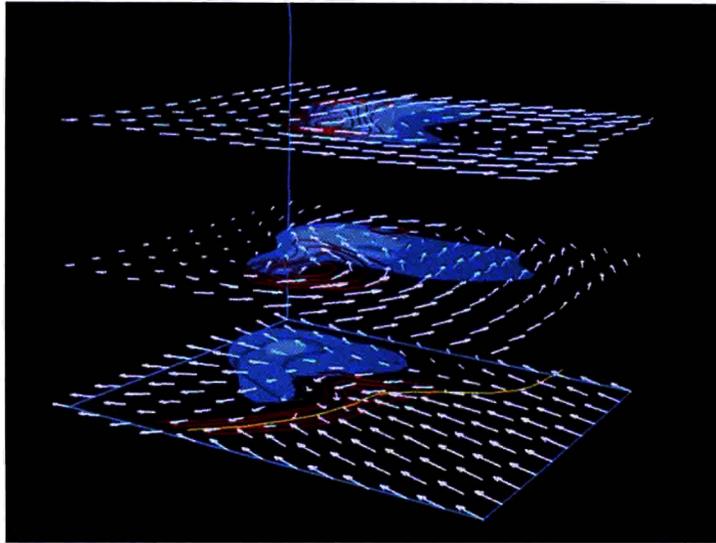
彩图 41 标题为 Road to Point Reyes 的一个场景, 显示了用粒子系统建模的草、分形山和纹理映射后的表面(Pixar 提供。© 1983 Pixar)



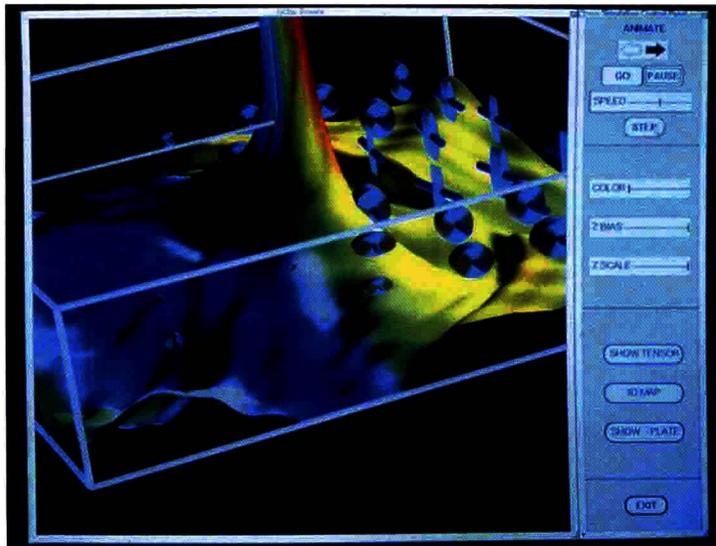
彩图 42 使用 TDI-AMAP 软件包生成的真实场景，由超过 100 种的各种树和植物组成，使用了基于植物学法则的程序 (Thomson Digital Image 提供)



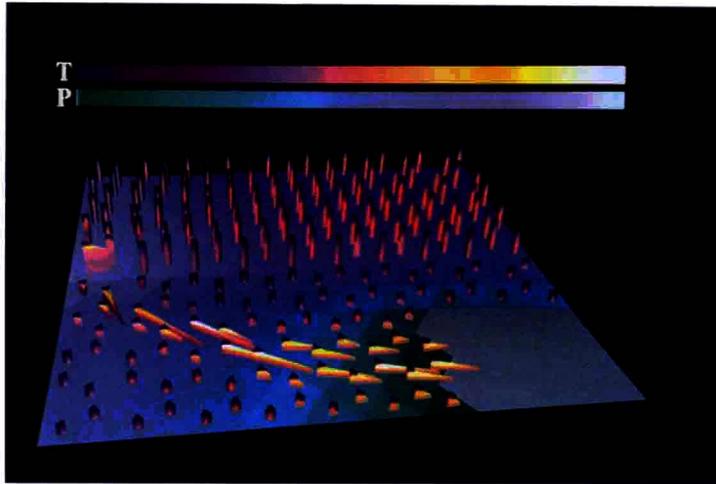
彩图 43 三维数据集的剖面部分 (Spyglass 公司提供)



彩图 44 在剖面上的向量域的箭头表示  
(NCSA 和伊利诺伊大学理事会提供)



彩图 45 利用椭圆以及在受力物质表面上的椭圆盘表示应力  
和应变张量(NCSA 和伊利诺伊大学理事会提供)



彩图 46 使用点符的时变型多变量数据域的可视化(动画中的一帧)。点符的楔形部分指示了向量在每一点的方向(NCSA 和伊利诺伊大学理事会提供)

## 译者序

交互式计算机图形学的飞速发展令人兴奋，其广泛的应用使科学、艺术、工程、商务、工业、医药、政府、娱乐、广告、教学、培训和家庭等各方面均获得巨大收益。由 Donald Hearn 和 M. Pauline Baker 合著的《计算机图形学》初版于 1986 年，在 1994 年进行了部分修改，1997 年又将其重写，推出了第二版。2004 年，两位作者再次对本书进行了大幅度的修改，推出了第三版。本书第二版和第三版的中文翻译版在国内深受广大读者的欢迎。2011 年作者在总结多年教学实践的基础上，对第三版再次进行了从内容到习题的全面扩充，覆盖了计算机图形学的最新进展，并对主题顺序进行了更合理的组织，推出了现在的第四版。

为了适应计算机图形学的发展并促进其应用，几乎所有的高等学校均已开设了计算机图形学课程，人们都希望有更新、更好的计算机图形学教材。基于对本书不断修改、越来越完善的认同，我们继续把本书第四版介绍给国内读者，希望能对计算机图形学的教学、研究与应用起到积极的作用。本书由蔡士杰和杨若瑜共同翻译。蔡士杰翻译了第 1 章~第 13 章，杨若瑜翻译了其 余部分。由于译者的水平有限，书中难免出现错误和不妥之处，敬请读者不吝赐教。

# 前 言<sup>①</sup>

计算机图形学是最激动人心且快速增长的现代技术之一。自本书第一版出版以来，计算机图形学已成为应用软件和普通计算机系统标准中的标准特性。计算机图形学方法已被应用到许多产品的设计之中，如培训仿真、音乐视频和电视广告制作、体育图片、数据分析、科学研究、医疗等。这些应用领域现在已使用大量的技术和硬件设备或正在研发新的技术与硬件设备。如今多数的计算机图形学研究重点仍在于增强有效性、现实性和图片生成的速度方面。这些领域的复杂材质如头发、布料和液压传动研究的现实渲染的困难性，以及图像处理、动画和表面表示，仍是研究人员关注的焦点。作为商品的高级图形硬件的可用性，意味着任何计算机实际上可生成高质量的图像，并且可编程图形处理的使用与提高效率是人们日益关注的研究领域之一。

## 第四版的新特性

过去几年来授课时的各种讲义内容已添加到了第四版中，包括计算机图形学导论、高级计算机图形学、科学可视化、相关专题和项目课程等。

- 罗切斯特理工大学的 Warren R. Carithers 教授加入了本书的编写。
- 新增了通过 OpenGL Shading Language (GLSL) 来介绍可编程着色器一章。
- 给出了 OpenGL 演化的内容，并简要介绍了 OpenGL 3. x 和 4. x 的不同，以及 CPU 体系结构的过去、现在与将来。
- 解释了在非 C 和 C++ 语言(如 Java 和 Python 语言)中使用 OpenGL 的方法。
- 将图元和属性的实现算法组织到单独的一章中。
- 将光照模型、纹理映射和全局照明的内容重新组织到更为紧凑的几章中。
- 更早地探讨了分层建模和动画的内容。
- 重新组织了关于三维对象表示的内容。
- 重新组织了关于二维和三维变换及查看的内容。
- 150 道新增习题。

## 灵活的主题顺序

计算机图形学导论课程是使用许多方法和主题集来讲授的，我们充分重组了许多章节的内容和顺序，以便更灵活地呈现各个主题。名义上，图元和属性的实现方法已经组合为单独的一章，而涉及许多主题的较大章节则拆分为几个更小的章节，以便重点探讨各个主题的内容。

## 150 道新习题和新习题集

与前一版相比，第四版修订或替换了 150 道习题，并在每章的习题部分创建了名为“*In More Depth*”(附加综合题)的一个新特性。许多情形下，这些习题衔接了各章的内容，允许学生以一种高级的方式来开发 OpenGL 程序。

---

<sup>①</sup> 中文翻译版中的一些字体、正斜体、图示等沿用了英文原版的写作风格，特此说明。

## OpenGL 的变化

在使用可编程 GPU 的情形下，许多图形 API(包括 OpenGL)正在转为使用可编程着色器来对强大的硬件提供直接访问。相应地，书中也添加了相关的内容，这些内容以一种灵活的方式来表现，新增了一个附录来专门介绍 OpenGL 的演化、OpenGL 在非 C 和 C++ 语言中的使用、GPU 的性能等。自本书前一版出版以来，OpenGL 的性能已经在很大程度上得到了改观。当时，OpenGL 推出仅十多年，并且刚发布的版本为 OpenGL 1.5。尽管当时 OpenGL 的功能已经很强大，但仍是使用原始的定点函数流水线模型实现的。自那以后，OpenGL 的内部组成得到了很大提升，可以更好地使用当前的图形硬件，进而这些提升导致了 OpenGL API 的重要变化。

在准备本书的这一版时，我们讨论过是否需要完全修订关于 OpenGL 及新 API 的内容。经过与教师的仔细探讨及沟通，我们决定在这一版的讨论中继续使用最初的接口和例子，原因如下：

- 本书提供的只是 OpenGL 的简单介绍，并且最初的 API 对于选修图形学的学生来说更易于掌握。
- 在现在及可以预见的将来，仍有大量使用最初 API 的原有 OpenGL 代码。
- OpenGL 的最新版仍以一种兼容的方式支持最初的 API。
- 对于几种流行的操作系统，唯一可用的 OpenGL 实现仅支持最初的 API。

## 关于封面

原版书的封面图像是一块方形板被钢弹击中时破裂的静态仿真画面。这一仿真是使用有限元代码计算的，有限元代码动态地重构了仿真过程中的格网。重新划分格网也调整了仿真格网的分辨率，因此足以解决破裂这一复杂的物理效果。这一方法的详细描述，请参阅 Martin Wicke、Daniel Ritchie、Bryan M. Klingner、Sebastian Burke、Jonathan R. Shewchuk 和 James F. O'Brien 于 2010 年 7 月在学报 ACMSIGGRAPH 上发表的文章“Dynamic Local Remeshing for Elastoplastic Simulation”。

## 编程示例

第四版中提供了 20 多个完整的 C++ 程序，这些程序使用了 OpenGL、GLU 和 GLUT 库文件。这些程序演示了基本的构图技术、二维和三维几何变换、二维和三维查看方法、透视投影、样条生成、分形方法、交互式鼠标输入、选取操作、菜单和子菜单显示及动画技术的应用。此外，给出了 100 多个 C++/OpenGL 程序段，用来演示剪切、光照效果、表面渲染、纹理映射、可编程着色和许多其他计算机图形学方法的算法实现。

## 先修课程要求

我们假定读者之前并不了解计算机图形学，但要求读者具备计算机编程和基本的数据结构知识，如数组、指针列表、文件和记录等。在计算机图形学算法中，使用了许多数学方法，它们在附录 A 中进行了详细描述。附录 A 中包含的数学主题有解析几何、线性代数、矢量和张量分析、复数、四元法、基本积分学和数值分析等。第四版既可作为之前无计算机图形学背景的学生教材，也可作为图形专业人士的参考书。本书的重点在于设计、使用和理解计算机图形系统时所需的基本原理，并且提供了大量的示例程序来演示每个主题的方法与应用。

## 课程教学建议

### 一学期或两学期课程

对于一学期的课程,可根据课程设置的要求,选择讲授关于二维方法的主题,或组合讲授二维与三维方法的主题。对于两学期的课程,可在第一学期介绍基本的图形学概念与算法,然后在第二学期介绍高级的三维方法。

对于本科生的计算机图形学导论课程,可选择讲授第2章至第10章及第17章至第20章的内容。从这些章节中,仅选择关于二维或三维(或二维和三维的组合)方法的小节,以及关于光照和彩色的有限内容。另外一些主题,如分形表示、样条曲线、纹理映射或深度缓存,可在第一次计算机图形学课程中介绍。

对于导论性研究生课程或高年级本科生课程,则要将重点放在三维查看、三维建模、光照模型和表面渲染方法上。但一般来说,两学期的课程可以更好地覆盖二维和三维计算机图形学方法的基础知识,包括样条表示、表面渲染和射线追踪等。

对于具备基本计算机图形学知识的学生,可以在一两个领域开设专题课程,如可视化技术、分形几何、射线追踪、辐射度和计算机动画。

### 自学者

对于自学者,可学习前面的几章来了解图形学的基本概念,然后从后面的几章中选学相关的主题。

## 章节内容

第1章通过研究人们使用图形软件生成的各类图片来说明计算机图形学应用的多样性。第2章给出计算机图形学的基本词汇,并简单介绍图形系统的硬件和软件组成。第3章详细介绍 OpenGL,并给出一个完整的 OpenGL 示例程序。第4章至第6章介绍简单对象表示与显示的基本方法,并探讨生成基本图片成分(如多边形和圆)的方法,以及设置对象颜色、大小和其他属性的方法。第4章和第5章介绍这些主题并探讨它们在 OpenGL 中的使用;第6章介绍绘制图元并修改属性的底层算法。第7章和第8章讨论在二维场景中执行几何变换(如旋转和缩放)和查看变换的算法。第9章和第10章讨论在三维场景中执行几何变换和查看变换的算法。第11章介绍复杂系统的分层建模方法。第12章介绍计算机动画技术。第13章、第14章和第15章讨论复杂对象(如二次曲面、样条和实心几何体)的显示方法。第16章介绍在三维场景中识别可视对象的各种计算机图形学技术。第17章介绍照明模型和对场景应用光照条件的方法。第18章介绍表示表面细节的纹理与方法。第19章介绍计算机图形学中有用的各种彩色模型和设计彩色的考虑因素。第20章介绍交互式图形输入和设计图形用户界面的方法。第21章介绍与全局照明相关的概念。第22章介绍可编程着色器。第23章介绍分形、粒子系统和其他建模技术。第24章讨论数据集的可视化。

## 教学资源<sup>①</sup>

以下受保护的教学资源可通过出版商的网站 <http://www.pearsonhighered.com/hearn> 获得。关于用户名和密码等信息,请与 Pearson 公司的销售代表联系。

<sup>①</sup> 申请方式请参见目录后的“教学支持说明”。

- 教师习题解答手册。
- 可下载的源代码。
- 图形与图像的幻灯片。

## 致谢

过去几年来，许多人以各种方式对本书做出了贡献。

对于提供照片和其他内容的单位与个人，我们表示衷心的感谢。还要感谢参加各种计算机图形学和可视化课程的学生所提供的意见。感谢那些为本书内容提供建议、意见的同仁，也向未能成功递交建议与意见的同仁表示歉意。

感谢 Ed Angel、Norman Badler、Phillip Barry、Brian Barsky、Hedley Bond、Bart Braden、Lara Burton、Robert Burton、Greg Chwelos、John Cross、Steve Cunningham、John DeCatrel、Victor Duvaneko、Gary Eerkes、Parris Egbert、Tony Faustini、Thomas Foley、Thomas Frank、Don Gillies、Andrew Glassner、Jack Goldfeather、Georges Grinstein、Eric Haines、Robert Herbst、Larry Hodges、Carol Hubbard、Eng-Kiat Koh、Mike Krogh、Michael Laszlo、Suzanne Lea、Michael May、Nelson Max、David McAllister、Jeffrey McConnell、Gary McDonald、C. L. Morgan、Greg Nielson、James Oliver、Lee-Hian Quek、Laurence Rainville、Paul Ross、David Salomon、Günther Schrack、Steven Shafer、Cliff Shaffer、Pete Shirley、Carol Smith、Stephanie Smullen、Jeff Spears、William Taffe、Wai Wan Tsang、Spencer Thomas、Sam Uselton、David Wen、Bill Wicker、Andrew Woo、Angelo Yfantis、Marek Zaremba 和 Michael Zyda。

特别感谢那些为本书提供其他内容的同仁，包括 Rosario Leonardi (PERCRO Scuola Superiore Sant'Anna)、Paul Nagin (Chimborazo Publishing, Inc.)、James O'Brien (University of California, Berkeley)、Emanuele Ruffaldi (PERCRO Scuola Superiore Sant'Anna) 和 Graham Sellers (Advanced Micro Devices, Inc.)。

还要感谢我们的审阅者 Emmanuel Agu (Worcester Polytechnic Institute)、Ye Duan (University of Missouri, Columbia)、John Hart (University of Illinois)、JongKwanLee (Bowling Green State University)、StephenMann (University of Waterloo)、Timothy Newman (University of Alabama, Huntsville)、Amar Raheja (California State Polytechnic Institute, Pomona)、AdrianRusu (Rowan University)、Jergen Schulze (University of California, San Diego)、Soon Tee Teoh (San Jose State University)、Iren Valova (University of Massachusettes, Dartmouth)、Stephen Wismath (University of Lethbridge) 和 Dana Wortman (University of Colorado, Colorado Springs)。

最后，感谢本书的编辑与印制人员 Tracy Dunkelberger、Melinda Haggerty、Marilyn Lloyd 和 Martha Wetherill，感谢你们在第四版的出版过程中所给予的帮助、建议、鼓励、细致和耐心。

## 关于作者

**Donald Hearn** 从 1985 年开始任教于美国伊利诺伊大学 Urbana-Champaign 分校的计算机科学系。Hearn 博士担任过多门课程的教学工作，包括计算机图形学、科学计算可视化、计算科学、数学和应用科学等。他还指导过多个研究项目并在相关领域发表了许多学术论文。

**M. Pauline Baker** 是美国印第安纳大学-普度大学 Indianapolis 联合分校(IUPUI)信息学院的教授。Baker 教授主持印第安纳大学可视化和交互空间渗透技术实验室的相关工作，也是伊利诺伊大学美国国家超级计算应用中心(NCSA)的主任。Baker 教授在康奈尔大学获得心理学学士学位，在 Syracuse 大学获得教育学硕士学位，并在伊利诺伊大学获得计算机科学博士学位。

**Warren R. Carithers** 于 1981 年加入美国罗切斯特理工学院计算机科学系。除了担任多个院系计算机图形学课程的授课之外，Carithers 教授还讲授其他领域的课程，包括操作系统、计算机体系结构与组织、系统软件、编程语言设计和计算机安全等。



北京培生信息中心  
北京市东城区北三环东路 36 号  
北京环球贸易中心 D 座 1208 室  
邮政编码: 100013  
电话: (8610) 57355171/57355169/57355176  
传真: (8610) 58257961

Beijing Pearson Education  
Information Centre  
Suit 1208, Tower D, Beijing Global Trade Centre,  
36 North Third Ring Road East,  
Dongcheng District, Beijing, China 100013  
TEL: (8610) 57355171/57355169/57355176  
FAX: (8610) 58257961

尊敬的老师:

您好!

为了确保您及时有效地申请教辅资源, 请您务必完整填写如下教辅申请表, 加盖学院公章后将扫描件用电子邮件的形式发送给我们, 我们将会在 2-3 个工作日内为您开通属于您个人的唯一账号以供您下载与教材配套的教师资源。

请填写所需教辅的开课信息:

采用教材				<input type="checkbox"/> 中文版 <input type="checkbox"/> 英文版 <input type="checkbox"/> 双语版
作者		出版社		
版次		ISBN		
课程时间	始于 年 月 日	学生人数		
	止于 年 月 日	学生年级	<input type="checkbox"/> 专科 <input type="checkbox"/> 本科 1/2 年级 <input type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> 本科 3/4 年级	

请填写您的个人信息:

学 校			
院系/专业			
姓 名		职 称	<input type="checkbox"/> 助教 <input type="checkbox"/> 讲师 <input type="checkbox"/> 副教授 <input type="checkbox"/> 教授
通信地址/邮编			
手 机		电 话	
传 真			
official email(必填) (eg:XXX@ruc.edu.cn)		email (eg:XXX@163.com)	
是否愿意接受我们定期的新书讯息通知: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			

Publishing House of Electronics Industry  
电子工业出版社: www.phei.com.cn  
www.hxedu.com.cn  
北京市万寿路 173 信箱高等教育分社(100036)  
联系电话: 010-88254555  
E-mail: Te\_service@phei.com.cn

系 / 院主任: \_\_\_\_\_ (签字)

(系 / 院办公室章)

\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

# 目 录

<b>第 1 章 计算机图形学综述</b> .....	1
1.1 图和表 .....	1
1.2 计算机辅助设计 .....	1
1.3 虚拟现实环境 .....	2
1.4 数据可视化 .....	3
1.5 教学与培训 .....	3
1.6 计算机艺术 .....	3
1.7 娱乐 .....	4
1.8 图像处理 .....	4
1.9 图形用户界面 .....	5
1.10 小结 .....	5
参考文献 .....	5
<b>第 2 章 计算机图形硬件</b> .....	6
2.1 视频显示设备 .....	6
2.2 光栅扫描系统 .....	14
2.3 图形工作站和观察系统 .....	17
2.4 输入设备 .....	18
2.5 硬拷贝设备 .....	21
2.6 图形网络 .....	22
2.7 因特网上的图形 .....	22
2.8 小结 .....	23
参考文献 .....	23
练习题 .....	23
附加综合题 .....	24
<b>第 3 章 计算机图形软件</b> .....	26
3.1 坐标表示 .....	26
3.2 图形功能 .....	27
3.3 软件标准 .....	28
3.4 其他图形软件包 .....	28
3.5 OpenGL 简介 .....	29
3.6 小结 .....	35
参考文献 .....	35
练习题 .....	36
附加综合题 .....	36

<b>第4章 输出图元</b> .....	37
4.1 坐标系统 .....	37
4.2 OpenGL 中指定二维世界坐标系统 .....	38
4.3 OpenGL 画点函数 .....	39
4.4 OpenGL 画线函数 .....	40
4.5 OpenGL 曲线函数 .....	42
4.6 填充区图元 .....	42
4.7 多边形填充区 .....	43
4.8 OpenGL 多边形填充区函数 .....	51
4.9 OpenGL 顶点数组 .....	55
4.10 像素阵列图元 .....	57
4.11 OpenGL 像素阵列函数 .....	58
4.12 字符图元 .....	61
4.13 OpenGL 字符函数 .....	62
4.14 图形分割 .....	63
4.15 OpenGL 显示表 .....	63
4.16 OpenGL 显示窗口重定形函数 .....	65
4.17 小结 .....	67
示例程序 .....	69
参考文献 .....	76
练习题 .....	76
附加综合题 .....	77
<b>第5章 图元的属性</b> .....	78
5.1 OpenGL 状态变量 .....	78
5.2 颜色和灰度 .....	78
5.3 OpenGL 颜色函数 .....	80
5.4 点的属性 .....	84
5.5 OpenGL 点属性函数 .....	84
5.6 线的属性 .....	85
5.7 OpenGL 线属性函数 .....	86
5.8 曲线属性 .....	88
5.9 填充区属性 .....	88
5.10 OpenGL 填充区属性函数 .....	89
5.11 字符属性 .....	93
5.12 OpenGL 字符属性函数 .....	95
5.13 OpenGL 反走样函数 .....	96
5.14 OpenGL 询问函数 .....	96
5.15 OpenGL 属性组 .....	97
5.16 小结 .....	97
参考文献 .....	99

练习题 .....	99
附加综合题 .....	100
<b>第6章 实现图元及属性的算法 .....</b>	<b>101</b>
6.1 画线算法 .....	101
6.2 并行画线算法 .....	107
6.3 帧缓存值的装载 .....	108
6.4 圆生成算法 .....	109
6.5 椭圆生成算法 .....	114
6.6 其他曲线 .....	121
6.7 并行曲线算法 .....	123
6.8 像素编址和对象的几何要素 .....	123
6.9 直线段和曲线属性的实现 .....	126
6.10 通用扫描线填充算法 .....	129
6.11 凸多边形的扫描线填充 .....	133
6.12 曲线边界区域的扫描线填充 .....	133
6.13 不规则边界区域的填充方法 .....	133
6.14 填充模式的实现方法 .....	136
6.15 反走样的实现方法 .....	138
6.16 小结 .....	144
参考文献 .....	144
练习题 .....	145
附加综合题 .....	147
<b>第7章 二维几何变换 .....</b>	<b>148</b>
7.1 基本的二维几何变换 .....	148
7.2 矩阵表示和齐次坐标 .....	153
7.3 逆变换 .....	155
7.4 二维复合变换 .....	155
7.5 其他二维变换 .....	165
7.6 几何变换的光栅方法 .....	168
7.7 OpenGL 光栅变换 .....	170
7.8 二维坐标系间的变换 .....	170
7.9 OpenGL 二维几何变换函数 .....	172
7.10 OpenGL 几何变换编程示例 .....	174
7.11 小结 .....	176
参考文献 .....	177
练习题 .....	177
附加综合题 .....	178
<b>第8章 二维观察 .....</b>	<b>179</b>
8.1 二维观察流水线 .....	179

8.2	裁剪窗口 .....	180
8.3	规范化和视口变换 .....	182
8.4	OpenGL 二维观察函数 .....	185
8.5	裁剪算法 .....	191
8.6	二维点裁剪 .....	192
8.7	二维线段裁剪 .....	192
8.8	多边形填充区裁剪 .....	201
8.9	曲线的裁剪 .....	208
8.10	文字的裁剪 .....	209
8.11	小结 .....	210
	参考文献 .....	212
	练习题 .....	212
	附加综合题 .....	213
<b>第9章</b>	<b>三维几何变换 .....</b>	<b>214</b>
9.1	三维平移 .....	214
9.2	三维旋转 .....	215
9.3	三维缩放 .....	224
9.4	三维复合变换 .....	226
9.5	其他三维变换 .....	228
9.6	三维坐标系间的变换 .....	230
9.7	仿射变换 .....	230
9.8	OpenGL 几何变换函数 .....	230
9.9	OpenGL 几何变换编程示例 .....	231
9.10	小结 .....	233
	参考文献 .....	234
	练习题 .....	234
	附加综合题 .....	235
<b>第10章</b>	<b>三维观察 .....</b>	<b>236</b>
10.1	三维观察概念综述 .....	236
10.2	三维观察流水线 .....	238
10.3	三维观察坐标系参数 .....	239
10.4	世界坐标系到观察坐标系的变换 .....	241
10.5	投影变换 .....	242
10.6	正投影 .....	243
10.7	斜投影 .....	247
10.8	透视投影 .....	251
10.9	视口变换和三维屏幕坐标系 .....	261
10.10	OpenGL 三维观察函数 .....	262
10.11	三维裁剪算法 .....	266
10.12	OpenGL 任选裁剪平面 .....	271

10.13 小结 .....	271
参考文献 .....	272
练习题 .....	272
附加综合题 .....	274
<b>第 11 章 层次建模 .....</b>	<b>275</b>
11.1 基本建模概念 .....	275
11.2 建模软件包 .....	277
11.3 通用层次建模方法 .....	277
11.4 使用 OpenGL 显示列表的层次建模 .....	279
11.5 小结 .....	280
参考文献 .....	280
练习题 .....	280
附加综合题 .....	281
<b>第 12 章 计算机动画 .....</b>	<b>282</b>
12.1 计算机动画的光栅方法 .....	282
12.2 动画序列的设计 .....	283
12.3 传统动画技术 .....	284
12.4 通用计算机动画功能 .....	285
12.5 计算机动画语言 .....	285
12.6 关键帧系统 .....	286
12.7 运动的描述 .....	290
12.8 角色动画 .....	291
12.9 周期性运动 .....	293
12.10 OpenGL 动画子程序 .....	293
12.11 小结 .....	296
参考文献 .....	297
练习题 .....	297
附加综合题 .....	298
<b>第 13 章 三维对象的表示 .....</b>	<b>299</b>
13.1 多面体 .....	299
13.2 OpenGL 多面体函数 .....	299
13.3 曲面 .....	302
13.4 二次曲面 .....	302
13.5 超二次曲面 .....	304
13.6 OpenGL 二次曲面和三次曲面函数 .....	305
13.7 小结 .....	309
参考文献 .....	310
练习题 .....	310
附加综合题 .....	310

<b>第 14 章 样条表示</b> .....	312
14.1 插值和逼近样条 .....	312
14.2 参数连续性条件 .....	313
14.3 几何连续性条件 .....	314
14.4 样条描述 .....	314
14.5 样条曲面 .....	315
14.6 修剪样条曲面 .....	315
14.7 三次样条插值方法 .....	316
14.8 Bézier 样条曲线 .....	322
14.9 Bézier 曲面 .....	328
14.10 B 样条曲线 .....	329
14.11 B 样条曲面 .....	336
14.12 beta 样条 .....	337
14.13 有理样条 .....	338
14.14 样条表示之间的转换 .....	339
14.15 样条曲线和曲面的显示 .....	340
14.16 OpenGL 的逼近样条函数 .....	343
14.17 小结 .....	351
参考文献 .....	352
练习题 .....	352
附加综合题 .....	354
<b>第 15 章 其他三维对象的表示</b> .....	355
15.1 柔性对象 .....	355
15.2 扫描表示法 .....	356
15.3 结构实体几何法 .....	357
15.4 八叉树 .....	359
15.5 BSP 树 .....	361
15.6 基于物理的方法 .....	361
15.7 小结 .....	362
参考文献 .....	362
练习题 .....	363
附加综合题 .....	363
<b>第 16 章 可见面判别算法</b> .....	364
16.1 可见面判别算法的分类 .....	364
16.2 后向面判别 .....	364
16.3 深度缓存算法 .....	365
16.4 A 缓存算法 .....	368
16.5 扫描线算法 .....	369
16.6 深度排序算法 .....	370
16.7 BSP 树算法 .....	372

16.8	区域细分算法	373
16.9	八叉树算法	375
16.10	光线投射算法	376
16.11	可见性检测算法的比较	376
16.12	曲面	377
16.13	线框图可见性算法	378
16.14	OpenGL 可见性检查函数	379
16.15	小结	381
	参考文献	382
	练习题	382
	附加综合题	384
<b>第 17 章</b>	<b>光照模型与面绘制算法</b>	<b>385</b>
17.1	光源	385
17.2	表面光照效果	388
17.3	基本光照模型	389
17.4	透明表面	396
17.5	雾气效果	398
17.6	阴影	399
17.7	照相机参数	399
17.8	光强度显示	399
17.9	半色调模式和抖动技术	402
17.10	多边形绘制算法	407
17.11	OpenGL 光照和表面绘制函数	410
17.12	小结	417
	参考文献	419
	练习题	419
	附加综合题	420
<b>第 18 章</b>	<b>纹理与表面细节添加方法</b>	<b>421</b>
18.1	用多边形模拟表面细节	421
18.2	纹理映射	421
18.3	凹凸映射	425
18.4	帧映射	426
18.5	OpenGL 纹理函数	426
18.6	小结	435
	参考文献	436
	练习题	436
	附加综合题	436
<b>第 19 章</b>	<b>颜色模型和颜色应用</b>	<b>437</b>
19.1	光的特性	437

19.2	颜色模型	438
19.3	标准基色和色度图	439
19.4	RGB 颜色模型	442
19.5	YIQ 颜色模型	443
19.6	CMY 和 CMYK 颜色模型	444
19.7	HSV 颜色模型	445
19.8	HLS 颜色模型	448
19.9	颜色选择及其应用	448
19.10	小结	449
	参考文献	449
	练习题	450
	附加综合题	450
<b>第 20 章</b>	<b>图形用户界面和交互输入方法</b>	<b>451</b>
20.1	图形数据的输入	451
20.2	输入设备的逻辑分类	451
20.3	图形数据的输入功能	454
20.4	交互式构图技术	455
20.5	虚拟现实环境	458
20.6	OpenGL 支持交互式输入设备的函数	458
20.7	OpenGL 的菜单功能	471
20.8	图形用户界面的设计	475
20.9	小结	478
	参考文献	479
	练习题	480
	附加综合题	481
<b>第 21 章</b>	<b>全局光照</b>	<b>483</b>
21.1	光线跟踪方法	483
21.2	辐射度光照模型	493
21.3	环境映射	498
21.4	光子映射	499
21.5	小结	500
	参考文献	500
	练习题	501
	附加综合题	501
<b>第 22 章</b>	<b>可编程着色器</b>	<b>502</b>
22.1	着色语言的发展历史	502
22.2	OpenGL 渲染流水线	505
22.3	OpenGL 着色语言	508
22.4	着色器效果	517

22.5 小结 .....	524
参考文献 .....	524
练习题 .....	525
附加综合题 .....	525
<b>第 23 章 基于算法的建模 .....</b>	<b>527</b>
23.1 分形几何方法 .....	527
23.2 粒子系统 .....	545
23.3 形状语法和其他过程方法 .....	546
23.4 小结 .....	547
参考文献 .....	547
练习题 .....	548
附加综合题 .....	548
<b>第 24 章 数据集可视化 .....</b>	<b>549</b>
24.1 标量场的可视化表示 .....	549
24.2 向量场的可视表示 .....	551
24.3 张量场的可视表示 .....	551
24.4 多变量数据场的可视表示 .....	551
24.5 小结 .....	552
参考文献 .....	552
练习题 .....	552
附加综合题 .....	552
<b>附录 A 计算机图形学的数学基础 .....</b>	<b>553</b>
<b>附录 B 图形文件格式 .....</b>	<b>582</b>
<b>附录 C OpenGL 的世界 .....</b>	<b>595</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>620</b>
<b>索引 .....</b>	<b>636</b>
<b>OpenGL 函数索引 .....</b>	<b>676</b>

# 第 1 章 计算机图形学综述

计算机已经成为快速、经济地生成图片的强大工具。实际上已经没有哪个领域不能从使用图形显示中获益，因此也就不奇怪为什么计算机图形学的应用是那么广泛。虽然早期的工程和科学上的应用必须依赖于昂贵而笨重的设备，但是计算机技术的发展已经将交互式计算机图形学变成了一种实用工具。现在，我们可以看到计算机图形学已经频繁地应用于多种领域，如科学、艺术、工程、商务、工业、医药、政府、娱乐、广告、教学、培训和家庭等各方面的应用。我们还可以通过因特网将图像传播到世界各地。在深入了解计算机图形学如何工作以前，我们先简要地了解一下图形学的应用。

## 1.1 图和表

计算机图形学的一个早期应用是显示简单的数据图，通常在字符打印机上进行绘制。数据绘图现在仍然是最普遍的图形应用之一，但是如今可以很容易地为打印报告或使用 35 mm 幻灯片、透明胶片和动感视频的演示而生成能展现高度复杂数据关系的图片。在研究报告、管理总结、消费信息公报和其他类型的出版物中，常常使用图和表来总结财政、统计、数学、科学、工程和经济数据。现在有各种商业图示软件包、工作站设备和服务部门，专门用来将屏幕显示转换成用于演示和存档的电影、幻灯片或投影用的透明胶片。典型的数据绘图有折线图、直方图、饼图、曲面图、等高线图，以及其他给出二维、三维或多维空间中多个参数之间关系的显示图。

三维的图和表用来增加显示的信息量，有时仅仅是为了改善效果，表达出引人注目的数据之间的相互关系。彩图 1 是一个以曲面方式绘制的三维图例子，展示了一个高度场曲面和它的二维等高线投影。

在项目管理中，经常使用时间图和任务网络分布来制订日程表及管理项目进展。

## 1.2 计算机辅助设计

尽管现在几乎所有的产品都已经使用计算机进行设计，但是计算机图形学的主要应用还是在设计过程中，尤其是在工程和建筑系统中。简称为 CAD 的计算机辅助设计(computer-aided design)或简称为 CADD 的计算机辅助绘图和设计(computer-aided drafting and design)方法，现在已频繁地应用于大楼、汽车、飞机、轮船、宇宙飞船、计算机、纺织品、家庭用品和许多其他产品的设计中。

在某些设计中，对象首先是以线框轮廓的形式显示出来，从而展现其整个外形及该对象的内部特征。显示线框图可以让设计者很快地看到对设计的外形进行调整的结果，而不用等待对象表面全部生成。彩图 2 给出了在设计应用方面的一个线框图例子。

CAD 应用软件包通常为设计者提供多窗口环境。不同的显示窗口展示对象的局部放大或不同视图。

电路及通信网络、供水系统等设施都通过少量图形的反复布局来构建。在设计中使用的图形代表不同的网络或电路部件。而用于机械、电气、电子及逻辑电路的标准图形，则通常由设计软件包提供。在其他一些应用中，设计者可以设计个性化的符号来构建网络或电路。通过依次在布局图中安放部件，并由图形软件包自动提供部件之间的联系来完成对该系统的设计。这使

得设计者能够快速测试不同的电路设计方案,从而减少系统需要使用的部件数量或空间。

CAD 应用中还经常使用动画。在视频监视器上显示线框式的实时动画,对于测试汽车及系统的性能是很有用的。因为线框图的显示并不需要绘制表面,其每帧的计算可快速完成,从而使屏幕上的运动平稳。线框图显示还可让设计者观察飞行器的内部结构,以及在运动时内部构件的变化情况。

在对象设计完成或将要完成的时候,应用逼真的光照模型和曲面绘制技术,可以生成最终产品的外形图。在汽车和其他交通工具的广告中也使用特殊的光照效果及背景场景来产生真实感效果的显示。

制造过程也和设计对象的计算机描述联系起来,因此使用计算机辅助制造技术(computer-aided manufacturing, CAM),可以实现产品安装的自动化。例如,电路板布局可转换成构造该电路图的各个过程的描述。某些机械零件按照指定如何使用机床来加工表面的描述,即指定机床加工一个零件时在表面上的路径来制造。而数控机床则按该指定路径来加工零件。

建筑设计师使用交互式图形技术来设计平面布局,图 1.1 给出了房间、门、窗户、楼梯、架子、柜台等的位置及其他建筑特征。面对监视器上显示的大楼平面布局图,电气设计师可以实验布线设计、电源插座和防火警报系统的不同安排。同样也可以使用设备布置软件来优化一个办公室或车间的空间使用。

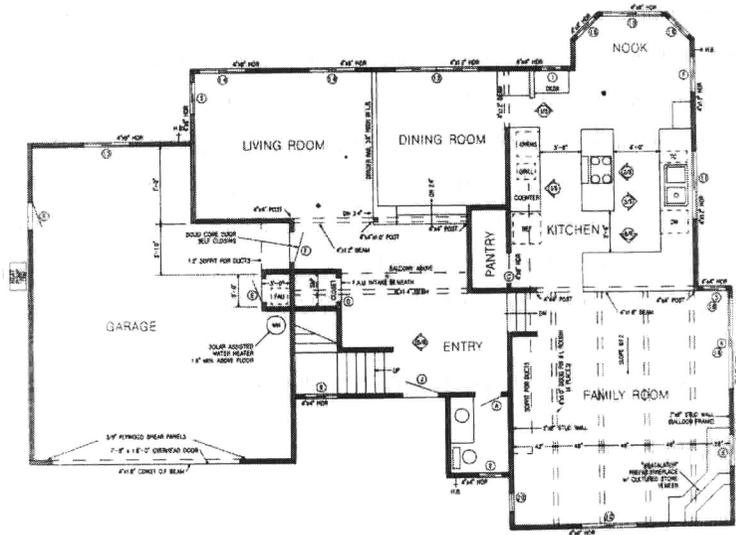


图 1.1 大楼的建筑 CAD 平面布局(Rogue Wave Software 公司提供)

彩图 3 给出了建筑设计的逼真显示例子,这样可以使建筑设计师和他们的客户一起研究学校或工业区的一座或一群大楼的外貌。除了大楼外貌的真实感显示以外,建筑 CAD 软件包还可提供三维的室内布局和光照的功能。

还有许多其他类型的系统和产品也使用了通用 CAD 软件包或专门开发的 CAD 软件进行设计。

### 1.3 虚拟现实环境

计算机图形学的一个最新应用是生成虚拟现实环境(virtual-reality environment),在此环境中用户可与三维场景中的对象进行交互。该环境中专门的硬件设备提供三维观察效果,并允许用户在场景中拾取对象。

虚拟现实环境中的动画常用来训练大型设备的操作员或分析各种机舱配置和控制安排的有效性。例如,用于训练拖拉机驾驶员的虚拟现实环境可能包括一组和头盔结合的拖拉机模拟控制,头盔中显示出前铲斗或反向铲的立体视图,就好像驾驶员坐在真的拖拉机驾驶座上那样。这使设计者可以了解在驾驶员位置可能看不到的前铲斗和反向铲的各种位置,以便在整个设计中更好地考虑它们。

有了虚拟现实系统,设计者和其他人可以使用各种方式移动对象并与之进行交互。人们可以通过仿真方式“走入”房间或围绕大楼转圈欣赏特定设计的整体效果,从而测试建筑设计。我们甚至可以借助于一种专门的手套从场景中“抓取”对象、将其放回场景或从一处移到另一处。

## 1.4 数据可视化

为科学计算、工程和医药数据集或过程生成图形表示,通常称为科学计算可视化(scientific visualization)。而术语商务可视化(business visualization)则用在与贸易、工业和其他非科学计算领域相关的数据可视化中。

研究员、分析员和其他有关人员经常要分析大量的信息或研究高度复杂过程的行为。例如,计算机上进行的数值模拟可以不断生成包含成千上万数值的数据文件。同样,卫星摄像机等也在快速地积聚大量的数据文件,这要比数据得到解释的速度快得多。扫描大容量数据以确定趋势及相互关系是一个乏味和低效的过程。但是,如果将这些数据转换成可视形式,则趋势和模式就可以立刻呈现出来。一旦我们按这种方法绘出密度值,就可以很容易地看到整个数据模式。

数据集的类型有许多种,而高效的可视化方法依赖于数据的特征。一组数据可以包含标量、向量、高次张量或这些数据类型的组合。数据集可能分布在二维、三维或更高维的空间区域。颜色编码仅仅是数据集可视化的一种方法。另外还有等值线、常数值表面或其他空间区域的绘制,以及专门设计用来表达不同数据类型的形态等绘制技术。

可视技术还用于帮助理解与分析复杂的过程和数学函数。科学家们还正在开发对一般数据进行可视化的方法。

彩图4和彩图5给出了另外一些可视化应用例子。彩图4给出了雷暴雨的数值模型,彩图5给出了一个科学家在虚拟现实环境中交互观察分子结构的情景。

## 1.5 教学与培训

计算机生成的物理模型、财政模型和经济模型常用做教学的辅助工具。物理过程、生理功能、人口趋势模型或设备的模型等都可以帮助学员理解系统的操作。

有些方面的培训要设计专门的硬件系统。例如,用于船长、飞行员、大型设备操作员和空中交通管制人员实习与培训的模拟系统就是这样一种专用系统。有些模拟器没有显示屏幕——例如,一个飞行模拟器可能只有用于仪表飞行的控制板——但是大多数模拟器配有用于模拟外部环境虚拟显示的屏幕。

## 1.6 计算机艺术

美术和商务艺术也都应用计算机图形学的方法。艺术家使用各种计算机方法,包括专用硬件、商业化的软件包(如Lumena)、符号数学程序(如Mathematica)、CAD软件包、桌面出版软件和动画软件来设计物体的外形及描述物体的运动。

画笔程序(paint brush program)是艺术家和设计师可在监视器上“绘”画的计算机化工具的一个例子。实际上,绘画是以电子方式画在带有触笔的数据板上,该触笔能模拟不同的笔划、粗细及颜色。

彩图 6 中的水彩画使用配有无绳压感触笔的画笔系统生成。触笔将变化的手的压力转换成各种笔划粗细、尺寸和颜色等级；另外还有软件允许艺术家创作模拟不同的干燥时间、水分和轨迹的水彩画、粉笔画或油画效果。

美术家使用各种计算机技术来生成图像，包括混合地使用三维建模软件包、纹理映射软件、绘图软件及 CAD 软件，以及不需美术家干预就能生成“自动美术”的 CAD 软件。

还可以生成“数学”美术。艺术家可混合使用数学函数、分数维过程、软件、喷墨打印机和其他系统来生成各种三维和二维形状及立体感图像。另一个通过数学关系生成电子画的例子是通过改变与作曲中的频率变化和其他参数相关的绘画特征来集成视频和音频。

商务艺术也将这些“绘画”方法用于标牌等商用美术设计、图文组合的页面布局设计及电视广告等领域。和许多其他计算机图形应用一样，商务艺术显示常使用照相式逼真技术来绘制设计图、产品和场景的图片。

电视商业片中也经常使用计算机动画。电视广告一帧一帧地绘制生成，每帧以独立的图像文件来存储。通过将后继帧中的物体位置相对于前一帧进行微小的移动来实现对动画中运动的模拟。绘制好动画序列中的所有帧以后，将这些帧传送到胶片上或存储到视频缓存中以备重播。电影动画需要每分钟顺序播放 24 帧。如果在视频显示器上重播动画，则需每分钟 30 帧。

将一个物体转换为另一个的变形(morphing)技术是许多电视商业中常用的一种图形方法。在电视商业中使用该方法可将一个油桶变成一个汽车引擎，将一部汽车变成一只老虎，将一潭水变成一只轮胎，将一个人的脸变成另一个人的脸。

## 1.7 娱乐

电视产品、动画片和音乐视频等也频繁地使用计算机图形方法。有时将图形场景与演员及实际场景相混合，有的电影则完全由计算机绘制和动画技术生成。

许多电视剧经常使用计算机图形方法来产生特技效果。有些电视节目也使用动画技术将计算机生成的人、动物或卡通人物与真正的演员在场景中混合，或者将一个演员的脸变换成另外的形状。许多节目使用计算机图形学来生成大楼、地表特征或场景的背景等。

计算机生成的特技效果、动画、人物素描和场景广泛地应用于当代电影中。许多获奖电影的制作者使用先进的计算机建模和面绘制方法使日常的玩具、灯泡和餐具等成为有生命的“角色”。还有一些电影使用计算机建模、绘制和动画生成完整的拟人化角色。照相级真实感技术为电影中计算机生成的演员提供肌肤色调、真实感的面部特征和皮肤缺陷(如痣、光点、雀斑和粉刺)等。

计算机图形方法还可用来仿真真正的演员。使用记录演员脸部特征的数字文件，动画程序可生成包含这个人的计算机复制品的电影片段，或数字化地用一个演员取代另一个演员。

音乐录像片中按照多种不同的方式使用图形学。可以将图形对象混合进实景中，图形学和图像处理技术也可用来将一个人或对象变成另一个(变形)。

## 1.8 图像处理

照片和电视扫描片等现有图片的修改或解释称为**图像处理**(image processing)。尽管在计算机图形学和图像处理中所使用的技术有所重叠，但两种领域着重于本质上不同的操作。在计算机图形学中，计算机用来生成图形；而图像处理技术用来改善图片质量、分析图像或为机器人应用识别可视图形。然而，图像处理技术经常应用于计算机图形学，计算机图形学方法也频繁应用于图像处理。

一般而言，照片或其他图片在使用图像处理方法之前先数字化成一个文件。然后使用数字

方法重新安排图片的各部分、提高颜色分离度或改善着色质量。这些技术被广泛地应用于商务艺术应用,包括对照片的某部分和其他美术作品进行调色或重新安排。类似的方法还用于分析地球的卫星照片或银河星系的望远镜记录。

医学上也广泛地将图像处理技术应用于图片增强、层析 X 射线造影术和外科手术模拟等方面。层析 X 射线造影术是一种 X 射线照片技术,它可将生理系统的剖面显示出来。计算机控制 X 射线断层造影术(computed X-ray tomography, CT)、定位发射造影术(position emission tomography, PET)和计算机轴向造影术(computed axial tomography, CAT)等均使用投影方法从数字数据中重建剖面。这些技术也用于在进行外科手术时监视身体的内部功能和显示剖面。其他医学图像技术包括超声波和核子医学扫描仪。超声波扫描仪使用高频声波代替 X 射线来产生数字数据。核子医学扫描仪从吸收的放射性核素的放射过程中收集数据并绘制彩色图像。

图像处理和计算机图形学在许多医学应用中常常结合在一起,用于对机体功能进行建模和研究、设计人造肢体及计划和练习手术等。最后一种应用称为计算机辅助手术(computer-aided surgery)。通过使用图像技术可以获得身体的二维剖面图,然后使用图形方法模拟实际的手术过程,从而观察和管理每一剖面,并实验不同的手术位置。

## 1.9 图形用户界面

现在的应用软件提供**图形用户界面**(graphical user interface, GUI)是非常普遍的。GUI 的主要部分是一个允许用户显示多个矩形屏幕区域窗口的窗口管理程序。每一个屏幕显示区域可以进行不同的处理,展示图形或非图形信息,并且显示窗口可以用多种方法激活。可以通过使用鼠标之类的交互式点击设备将屏幕光标定位到某系统的显示窗口区域,并按下鼠标左键来激活该窗口。有的系统还可以通过点击标题条来激活显示窗口。

界面提供菜单和图标用于选择显示窗口、处理选项或参数值。图标是一个设计成能暗示所选对象的图形符号。图标的优点是它比相应的文本描述占用较少的屏幕空间,如果设计得好,可以很容易地理解。一个显示窗口与相应的图标表示可以相互转换,而菜单中可以包含一组文字描述或图标。

## 1.10 小结

本章综述了计算机图形学技术应用的许多领域,包括数值图、CAD、虚拟现实、科学计算可视化、教育、艺术、商务、图像处理和 GUI。但是还有许多其他领域没有提到,我们也无法将其他应用领域的例子都放进本书。后面几章将对本章讨论的应用及其他一些应用中使用的设备和方法进行探讨。

## 参考文献

图形方法在艺术、科学、数学和技术等方面的应用在 Bouquet(1978)、Yessios(1979)、Gardner and Nelson(1983)、Grotch(1983)、Tufte(1983, 1990)、Wolfram(1984)、Huitric and Nahas(1985)、Glassner(1989)和 Hearn and Badker(1991)等文献中讨论。图形方法在音乐可视化中的应用参见 Mitroo, Herman, and Badler(1979)。多个工业领域的 CAD 和 CAM 在 Pao(1984)中有详细讨论。飞行仿真中的图形技术请参见 Schachter(1983)。Fu and Rosenfeld(1984)讨论了视觉的模拟,Weinberg(1978)报道了宇宙飞船的仿真。图符和符号概念在 Lodding(1983)和 Loomis, et al.(1983)中给出。关于医学应用的更多信息请参考 Hawrylyshyn, Tasker, and Organ(1977)、Preston et al.(1984)和 Rhodes et al.(1983)。

## 第 2 章 计算机图形硬件

现在,计算机图形学的功能与应用已经得到了广泛承认,大量的图形硬件和软件系统已经应用到了几乎所有的领域。通用计算机甚至许多手持计算器也已经普遍具备二维及三维应用的图形功能。在个人计算机上也可以配用多种交互输入设备及图形软件包。对于高性能应用,可以选择许多高级的专用图形硬件系统和技术。本章将探讨图形硬件和图形软件包的基本特性。

### 2.1 视频显示设备

图形系统一般使用视频显示器作为其基本的输出设备。一直以来,大部分视频监视器的操作是基于标准的阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)设计的,但是也已经出现一些其他技术。近年来,平板显示(flat-panel)由于其耗电少和薄型设计而变得越来越流行。

#### 2.1.1 刷新式 CRT

图 2.1 给出了 CRT 的基本工作原理。由电子枪发射出的电子束(阴极射线)通过聚焦系统和偏转系统,射向屏幕上涂覆有荧光层的指定位置。在电子束轰击的每个位置,荧光层都会产生一个小亮点。由于荧光层发射的光会很快衰减,因此必须采用某种方法来保持屏幕图像。一种方法是将图形信息作为电荷分布存储在 CRT 上。这种电荷分布用来保持荧光粉处于激活状态。但现在用得较多的维持荧光粉亮度的办法是快速控制电子束反复重画图像。这类显示器称为刷新式 CRT(refresh CRT),在屏幕上重复画图的频率称为刷新频率(refresh rate)。

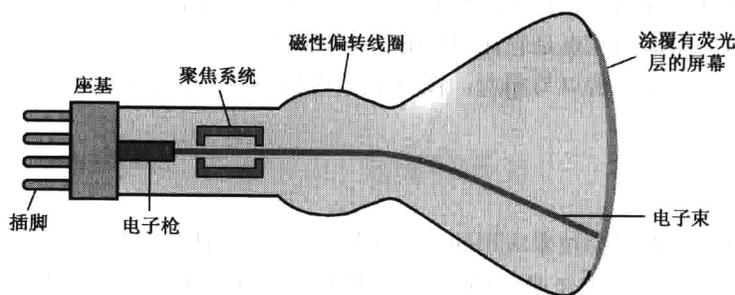


图 2.1 磁性偏转 CRT 的基本设计

CRT 电子枪的主要元件是受热激发的金属阴极和控制栅极(参见图 2.2)。通过给称为灯丝的线圈通电来加热阴极,引起受热的电子“沸腾出”阴极表面。在 CRT 封装内的真空中,带负电荷的自由电子在较高的正电压的作用下加速冲向荧光屏。该加速电压可由 CRT 封装内靠近荧光屏处充以正电荷的金属涂层生成,或者采用加速阳极(参见图 2.2)。有时,电子枪结构中把加速阳极和聚焦系统放在同一部件中。

电子束的强度受设置在控制栅极上的电压电平控制。控制栅极是一个金属圆筒,紧挨着阴极安装。若在控制栅极上加上较高的负电压,则将阻止电子活动从而截断电子束,使之停止从控制栅极末端的小孔通过。而在控制栅极上施以较低的负电压,则仅仅减少了通过的电子数量。由于荧光层发射光的强度依赖于轰击屏幕的电子数量,因此可以通过改变控制栅极的电压来控制显示的光强。我们使用图形软件命令来设定各个屏幕位置的亮度级,这将在第 3 章进行讨论。

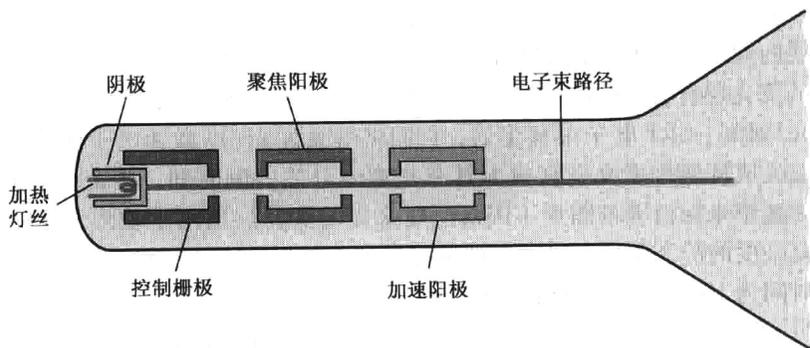


图 2.2 带加速阳极的电子枪工作原理

CRT 的聚焦系统用来控制电子束在轰击荧光层时会聚到一个小点。否则，由于电子互相排斥，电子束在靠近屏幕时会散开。聚焦既可以用电场实现，也可以用磁场实现。对于静电聚焦，电子束通过如图 2.2 所示的带正电荷的金属圆筒，该圆筒形成一个静电透镜。静电透镜的作用是使电子束聚焦在屏幕的中心，正如光学透镜将光束聚焦在指定的焦距一样。类似透镜的聚焦效果，可以由环绕 CRT 封装外部安装的线圈所形成的磁场来完成。磁性聚焦透镜能在屏幕上产生最小尺寸的亮点。

在高精度系统中，还使用附加的聚焦硬件，以保持电子束能聚焦到所有屏幕位置。因为多数 CRT 弯曲部分的直径大于从聚焦系统到屏幕中心的距离，所以电子束到屏幕不同点所经过的距离是不同的。因此，电子束只能在屏幕中心正确聚焦。当电子束移到屏幕边框时，所显示的图像会变得模糊。系统可按电子束的屏幕位置来调整聚焦，从而弥补这一缺陷。

电子束的偏转受电场或磁场控制。CRT 通常配备一个装在其封装外部的磁性偏转线圈，如图 2.1 所示。使用两对线圈，将它们成对地安装在 CRT 封装的颈部，一对安装在颈部的顶部和底部，另一对设置在颈部两侧。每对线圈产生的磁场造成横向偏转力，该力正交于磁场方向，也垂直于电子束的行进方向。一对线圈实现水平偏转，另一对则实现垂直偏转。调节通过线圈的电流可得到适当的偏转量。当采用静电偏转时，则在 CRT 封装内安装两对平行极板。一对为水平放置，控制垂直偏转；另一对为垂直放置，控制水平偏转(参见图 2.3)。

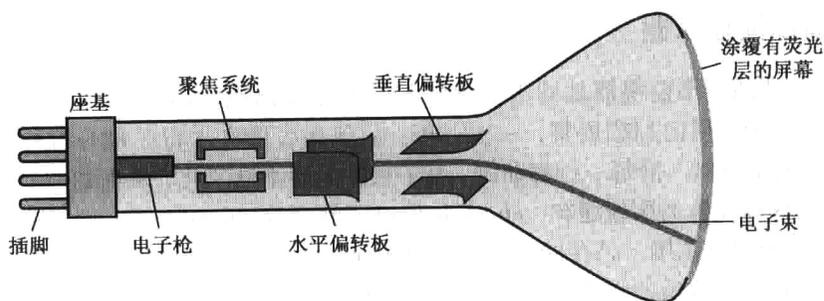


图 2.3 CRT 内电子束的静电偏转

通过将 CRT 电子束的能量转移到荧光层，就可以在屏幕上形成亮点。当电子束的电子撞击到荧光层并停止运动时，其动能被荧光层吸收。电子束能量的一部分因摩擦而转换为热能，余下部分导致荧光层原子的电子跃迁到较高的量子能级。经过一段短暂的时间之后，“激活”的荧光层电子释放了较小的量子光能，开始回落到自身的稳定状态。我们在屏幕上看到的是所有的电

子光发射的组合效应:发光点随所有激活的荧光层电子转移到自身的基本能级后,会很快衰减。荧光层发射光线的频率(或颜色)同被激活量子态与基本状态之间的能级差成正比。

CRT 采用的荧光层有着不同的类型。除了颜色之外,这些荧光层之间的主要差异是它们的余辉(persistence)时间: CRT 电子束移走后,它们将继续发光(即激活电子转为基本态)多长时间。余辉时间定义成从屏幕发光到衰减为其原亮度十分之一的的时间。较短余辉时间的荧光层,需要较高的刷新速率来保持屏幕图形不闪烁。短余辉的荧光层适用于动画,而长余辉荧光层则适用于显示高复杂度的静态图形。虽然有的荧光层的余辉时间大于一秒,但是对于图形监视器,通常采用余辉时间为 10 ~ 60 ms 的材料制成。

图 2.4 表明了屏幕上一个亮点的亮度分布。亮点中心位置的亮度最大,并按高斯分布向亮点的边缘衰减。这个分布依赖于 CRT 电子束横截面的电子密度分布。

CRT 无重叠显示的最多点数称为分辨率(resolution)。虽然它常常简述为每个方向的总点数,但更精确的分辨率定义是在水平和垂直方向上每厘米可绘制的点数。亮点的强度满足高斯分布(参见图 2.4),因此要使两个相邻亮点保持区别,其间隔应大于亮点强度在最大强度值的 60% 时的直径。这种覆盖位置如图 2.5 所示。亮点尺寸也依赖于亮度。当每秒有更多的电子加速飞向荧光层时, CRT 电子束的直径及发光亮点的面积增大。此外,增大的激活能量趋向于传播到邻近的荧光原子,而不是正对着电子束的路径,这就进一步加大了亮点直径。因此, CRT 的分辨率取决于荧光层的类型、显示的亮度、聚焦系统及偏转系统。典型的高质量系统分辨率为  $1280 \times 1024$ ,在许多系统中还要用到更高的分辨率。高分辨率系统常常称为高清晰度系统(high-definition system)。图形监视器的物理尺寸是由屏幕对角线的长度给定的。可从 12 英寸(1 英寸 = 2.54 厘米)到 27 英寸或更大一些。CRT 监视器可与各类计算机系统相连接,因此可实际绘制的屏幕点数依赖于与它相连接的系统的的能力。



图 2.4 CRT 屏幕上发光荧光层亮点的亮度分布

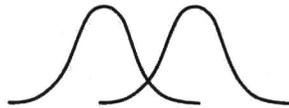


图 2.5 当两个荧光发光亮点间隔大于亮点亮度衰减到最大值的 60% 时亮点的直径时,两亮点是可区分的

## 2.1.2 光栅扫描显示器

使用 CRT 的普通图形监视器是基于电视技术的光栅扫描显示器(raster-scan display)。在光栅扫描系统中,电子束横向扫描屏幕,一次一行,从顶到底依次进行。每一行称为一个扫描行(scan line)。当电子束横向沿每一行移动时,电子束的强度不断变化,从而建立亮点组成的一个图案。图形定义保存在称为刷新缓存(refresh buffer)或帧缓存(frame buffer)的存储器中,这里的帧(frame)是指整个屏幕范围。该存储器保存一组对应屏幕所有点的强度值。电子束在屏幕上逐点移动时由从刷新缓存取出的强度值控制其强度。这样,如图 2.6 所示,在屏幕上“画图”是每次一行。每个可由电子束点亮的屏幕点称为一个像素(pixel 或 pel, 是 picture element 的简写)。由于刷新缓存用来存储屏幕颜色值,因此它也称为颜色缓存(color buffer)。除了颜色以外,像素的其他信息也存储在缓存中,因而不同的缓存区域有时统称为“帧缓存”。光栅扫描系统对于屏幕的每一点都有存储强度信息的能力,从而使之较好地适用于包含细微阴影和彩色模式的场景的逼真显示。家用电视和打印机是另一类使用光栅扫描方式的例子。

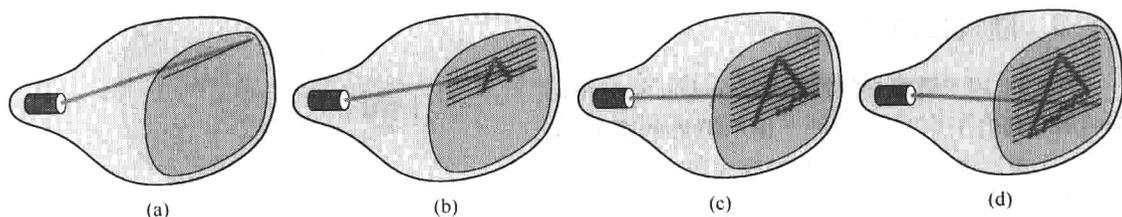


图 2.6 光栅扫描系统将对象作为沿每一条扫描线的离散点集来显示

光栅系统常用称为分辨率的像素个数作为其特征。视频显示器的另一特征是**纵横比**(aspect ratio), 定义为系统能显示的像素列数除以行数的结果(有时术语纵横比用来表示扫描行数被像素列数除的结果)。纵横比还可用在屏幕上显示水平和垂直方向相同长度线段所需的点数之比来描述。因此, 纵横比为  $4/3$  表示用 4 点绘出的水平线与用 3 点绘出的垂直线有相同的物理长度, 如相同的厘米数。类似地, 任意矩形(包括整个屏幕)的纵横比可用其宽度除以高度所得的结果来描述。

光栅系统可以显示的颜色或灰度等级依赖于 CRT 使用的荧光粉类型及每一像素对应的帧缓存中的位数。对于一个简单的黑白系统来说, 每一个屏幕点或亮或暗, 因此每个像素只需一位来控制屏幕位置上的亮度。该位取值为 1, 表示电子束在该位置时开通, 取值为 0 表示电子束在该位置时关闭。如果要使电子束除了“开”、“关”两状态之外有更多的强度等级, 那么就需要提供附加位。在高性能系统中每一像素可多达 24 位, 这时分辨率为  $1024 \times 1024$  的屏幕要使用 3 MB 容量的刷新缓存。每像素的位数有时也称为**缓存深度**(depth)或**位平面**(bit plane)数。每像素一位的帧缓存通常称为**位图**(bitmap), 而每像素多位的帧缓存称为**像素图**(pixmap), 但是这些术语也用来表述任意个二进制值的阵列或彩色阵列像素图。

当刷新频率不太低时, 我们会感觉到刷新过程中相邻两帧的内容是平稳过渡的。在每秒 24 帧以下时, 我们会感觉到屏幕上相邻图像之间有间隙, 即图像出现闪烁。例如, 早期的无声电影以每秒 16 帧的速率拍摄, 因而放映时有闪烁现象。在 20 世纪 20 年代开发有声系统时, 电影速率已增加到每秒 24 帧, 因而消除了闪烁及演员的不稳定运动。早期的光栅计算机系统按每次刷新 30 帧来设计, 因而产生了较好的结果, 但由于监视器上的显示技术与电影有着根本的不同, 因此图片质量的改善还依赖于监视器更高的刷新频率。电影放映机可以通过持续放映一帧直到下一帧开始放映来保持显示结果的连续性。但是在视频监视器上, 荧光点在点亮后立即开始衰退。因此, 现在多数扫描显示器使用每秒 60 ~ 80 帧的刷新频率, 部分系统达到每秒 120 帧的刷新频率。有些图形系统设计成使用可变刷新频率。例如, 为立体显示应用选择高刷新频率, 使其在交替显示场景的两个视图时不会闪烁。这一类应用通常使用多个帧缓存的方法。

有时, 刷新频率以每秒多少周期或赫兹(Hz)为单位进行描述, 其中一个周期对应于一帧。因此, 我们可以将每秒 60 帧的刷新频率简单地称为 60 Hz。在每条扫描线末端, 电子束返回到屏幕的左边, 然后又开始显示下一条扫描线。刷新每条扫描线后, 电子束返回到屏幕左端, 这称为电子束的**水平回扫**(horizontal retrace)。而在每帧(以一秒的  $1/80$  到  $1/60$  显示)的终止处, 电子束返回(**垂直回扫**, vertical retrace)到屏幕的左上角, 开始显示下一帧。

在某些光栅扫描系统和 TV 中, 采用了**隔行**(interlaced)刷新方式分两次显示每一帧。第一次, 电子束从顶到底, 一行隔一行地扫描。垂直回扫后, 电子束再扫描另一半扫描线(参见图 2.7)。这种隔行扫描方式使得在逐行扫描所需时间的一半时, 就能看到整个屏幕显示。隔行扫描技术主要用于较慢的刷新频率。例如, 对于一个老式的、每秒 30 帧的非隔行扫描显示器, 可能会注意到它产生了闪烁。但是, 采用隔行扫描, 两次扫描中的每一次可以用  $1/60$  秒完成, 也就是刷新频率接近每秒 60 帧。这是避免闪烁且提供相邻扫描线包含类似显示信息的有效技术。

### 2.1.3 随机扫描显示器

当CRT用于**随机扫描显示器**(random scan display)时,其电子束只在屏幕上显示图形的部分移动。电子束逐条地跟踪图形的组成线条,从而生成线条图。因此,随机扫描显示器也称为**向量显示器**(vector display)、**笔划显示器**(stroke-writing display)或**笔迹显示器**(calligraphic display)。图形的组成线条由随机扫描系统按任意指定的顺序绘制并刷新(参见图2.8)。笔式绘图仪也以类似的方式工作,它是随机扫描、硬拷贝设备的一个例子。

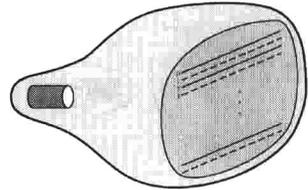


图2.7 光栅扫描显示的隔行扫描线,首先显示偶数(实线)扫描线上所有的点,然后显示奇数扫描线(虚线)的所有点

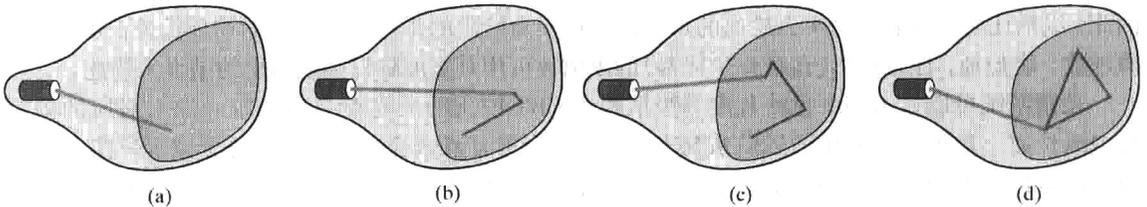


图2.8 随机扫描系统以任意指定的顺序画出对象的组成线条

随机扫描系统的刷新频率依赖于显示的线数。这时图形的定义是存放在称为刷新显示文件存储区的一组画线命令。刷新显示文件称为**显示列表**(display list)、**刷新显示文件**(refresh display file)、**向量文件**(vector file)或**显示程序**(display program)。为了显示指定的图形,系统周期地按显示文件中的一组命令依次画出其组成线条。当所有画线命令处理完后,系统周期地返回到该列表的第一条画线命令。随机扫描显示器设计成每秒30~60次画出图形的所有线条。高性能的向量系统在这样的刷新速率中能处理约100 000条短线。当显示的线条很少时,则延迟每个刷新周期,以避免刷新速率超过每秒60帧。否则,线条的刷新过快,可能会烧坏荧光层。

随机扫描系统用于画线应用,如建筑和工程布局图等,它不能显示逼真的有阴影的场景。由于图形定义是作为一组画线命令来存储而非所有屏幕点的强度值,所以向量显示器一般具有比光栅系统更高的分辨率。另外,向量显示器的CRT电子束直接按线条路径画线,因而生成光滑线条。相比之下,光栅系统通过显示一组离散点来画线,因而生成锯齿状线条。但是,光栅系统极大的灵活性和提高的画线能力还是淘汰了向量技术。

### 2.1.4 彩色CRT监视器

CRT监视器利用能发射不同颜色光的荧光层的组合来显示彩色图形。不同荧光层的发射光组合起来,可以生成一种按其比例而定的可见颜色。

显示彩色图形的一种方法是在屏幕上涂上多层不同的荧光粉。发射颜色由电子束在荧光层中的穿透深度决定。这种方法称为**电子束穿透法**(beam-penetration),它常用于红、绿两层结构。速度慢的电子束只激活外面的红色层,速度快的电子束能穿过红色层并激活里面的绿色层。而中速的电子束通过发射红、绿光的组合来生成两种另外的颜色:橙色和黄色。电子的速度,也就是屏幕上任意一点的颜色,受电子束的加速电压控制。电子束穿透法是随机扫描监视器生成彩色图形的廉价途径,但是只能有较少的颜色种类,而且图形质量不如其他方法的好。

**荫罩法**(shadow-mask)常用于光栅扫描系统(包括彩色电视机),因为它能产生的彩色范围比电子束穿透法大得多。这种方法基于我们熟悉的由红、绿、蓝三原色来组合颜色的原理,称为

**RGB 颜色模型 (RGB color model)**。对于每个像素位置，荫罩 CRT 有三个荧光彩色点：一个荧光点发射红光，另一个发射绿光，而第三个发射蓝光。这类 CRT 有三支电子枪，与每个彩色点一一对应，而荫罩栅格位于紧靠涂覆有荧光层的屏幕之后。由于人眼可将三点发出的光结合成一种组合色，因此三种荧光粉发射出的光生成像素位置的一个小颜色点。图 2.9 给出了通常用于彩色 CRT 系统的 delta-delta 荫罩法。其中的三支电子束一起被偏转、聚焦并发射到荫罩上。荫罩上有按荧光点模式分布的一系列孔。当三支电子束通过荫罩上的孔时，将激活一个点三角形，从而在屏幕上显示一个小的彩色亮点。荧光点以三角形排列，并使每支电子束通过荫罩时，只能激活与之对应的彩色点。三支电子枪的另一配置结构是按线 (in-line) 排列。其中，三支电子枪及屏幕上相应的 RGB 彩色点都沿扫描线而不是成三角形模式排列。这种电子枪的按线排列容易保持对齐状态，通常用于高分辨率的彩色 CRT。

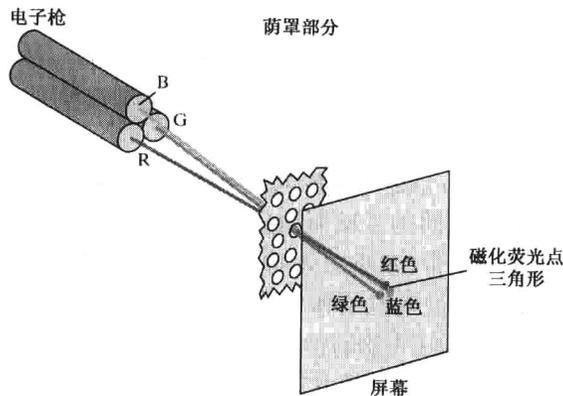


图 2.9 delta-delta 荫罩 CRT 的工作原理。与屏幕上的三角形彩色点模式对应的三支电子枪由荫罩控制指向每个点三角形

改变三支电子束的强度等级，可以改变荫罩 CRT 显示的颜色。关掉三支枪中的两支，我们只能得到来自单个激活荧光点的颜色(红、绿、蓝)。在以相同的电子束强度激活三点时，我们将看到白色。黄色由相同强度的绿点和红点产生，品红由相同强度的蓝点和红点产生。而当蓝点和绿点的激活程度相同时，将呈现青色。在某些低价格系统中，电子束只能置为开或关，因此只能显示八种颜色。较高级的系统可以为电子束设置中间强度等级，这样就允许生成几百万种不同的颜色。

彩色图形系统可以根据配用多种 CRT 显示设备进行设计。某些廉价的家用计算机系统和电视游戏机则设计成能配用彩色电视机和 RF (radio-frequency, 无线电频率) 调制器。RF 调制器的作用是模拟广播电视台的信号。这意味着必须组合图形的颜色和亮度信息，并叠加到广播频率载波信号上作为电视机的输入。然后，电视机中的电路从 RF 调制器接收这种信号，抽取图形信息，并在屏幕上进行显示。正如我们可以预料的，由于 RF 调制器和 TV 电路对图形信息的额外处理，将会降低图像显示的质量。

**合成式监视器 (composite monitor)** 是用于允许广播电路旁路的电视适配设备。这些显示设备仍然要求组合图形信息，但无须载波信号。它将图形信息组合为合成信号，然后由监视器分离，所得图形的质量仍然不是太好。

人们将图形系统的彩色 CRT 设计成 **RGB 监视器 (RGB monitor)**。这些监视器采用荫罩法且不经任何中间处理，直接从计算机系统取得每支电子枪(红、绿和蓝)的强度等级。在高质量的光栅图形系统的帧缓存中，每个像素对应 24 位，每支电子枪允许 256 级电压设置，因而每个像素有近 1700 万种颜色可供选择。每个像素具有 24 个存储位的 RGB 彩色系统通常称为**全彩色系统 (full-color system)** 或**真彩色系统 (true-color system)**。

### 2.1.5 平板显示器

虽然多数图形监视器还是采用 CRT 构造,但是其他一些技术可能很快要替代 CRT 监视器。**平板显示器**(flat-panel display)代表一类相比 CRT 能减小体积、减轻重量并节省功耗的视频设备。平板显示器的一个有意义的特性是比 CRT 要薄,可以把它们挂在墙上或戴在手腕上。有些平板显示器上甚至还可以进行书写,因此它们可用于袖珍式笔记本。平板显示器另外还用于小型 TV 监视器、计算器、袖珍式视频游戏机、膝上型计算机、航空座椅上的电影屏幕、电梯内的告示牌,以及在要求不高的便携式监视器的应用场合中作为图形显示器。

我们可以把平板显示器分为两类:**发射显示器**(emissive display)和**非发射显示器**(nonemissive display)。发射显示器是将电能转换为光能的设备。等离子体显示板、薄膜光电显示器及发光二极管都是发射显示器的实例。平板 CRT 也已发明出来,其中的电子束以平行于屏幕的方向加速,然后偏转 $90^\circ$ 轰击屏幕。但是,还未证实平板 CRT 同其他发射设备一样可以实际应用。非发射显示器利用光学效应将太阳光或来自某些其他光源的光转换为图形模式。液晶设备是非发射平板显示器的最重要的例子。

**等离子体显示板**(plasma panel)也称**气体放电显示器**(gas-discharge display),通过将通常包含氖气的混合气体充入两块玻璃板之间的区域而构成。一块玻璃板上放置一系列垂直导电带,而另一块玻璃板上构造一组水平导电带(参见图 2.10)。在成对的水平和垂直导电带上施加点火电压,导致两导电带交叉点处的气体进入电子和离子的辉光放电等离子区。图形的定义存储在刷新缓存中,点火电压以每秒 60 次的速率刷新像素位置(导电带的交叉处)。使用交变电流方法快速提供点火电压,可以得到较亮的显示。像素之间的分隔是由导电带的电场提供的。等离子体显示板有一个缺点,即它是一种严格的单色设备,但现在已开发出能显示彩色和灰度等级的等离子显示器。

**薄膜光电显示器**(thin-film electroluminescent display)具有与等离子体显示板类似的结构。不同之处是它在玻璃板之间的区域充以荧光物,诸如硫化锌与锰的胶状物,而不再是气体(参见图 2.11)。当一个足够高的电压加到一对交叉的电极时,荧光层在两电极交叉区域成为一个导电体。电能由锰原子吸收,然后释放能量成为一发光亮点,这类似于等离子体显示板的辉光放电的等离子体效应。光电显示器比等离子体显示板需要更多的功耗,而且难以达到好的颜色和灰度等级显示。

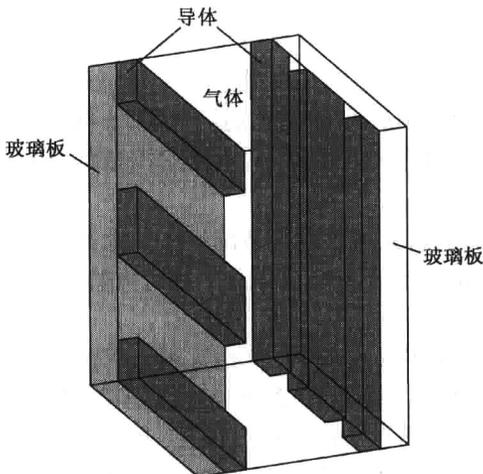


图 2.10 等离子体平板显示设备的基本设计

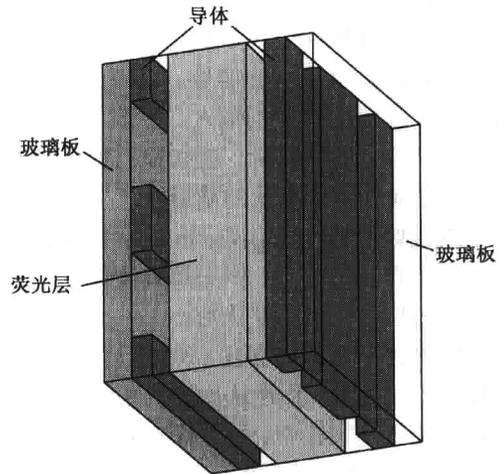


图 2.11 薄膜光电显示设备的基本设计

第三类发射设备是**发光二极管**(light-emitting diode, LED)。二极管以矩阵排列形成显示器的像素位置,图形的定义存储在刷新缓存中。如同CRT的扫描线刷新一样,信息从刷新缓存读出,并转换为电压电平,然后应用于二极管,在显示器上产生发光图案。

**液晶显示器**(liquid-crystal display, LCD)通常用于小型系统,如膝上型计算机及计算器(参见图2.12)。这些非发射设备生成图形的原理是,通过能阻塞或传递光的液晶材料,传递来自周围的或内部光源的偏振光。

术语**液晶**(liquid crystal)是指这些化合物具有晶状结构的分子,并且可以像液体那样流动。平板显示器通常使用线状的液晶化合物,它们趋向于保持杆状分子的长轴排列。因此平板显示器可用线状的液晶构成,如图2.13所示。其中有两块玻璃板,每块都有一个光偏振器,与另一块形成合适的角度,内部充以液晶材料。在一块板上排放水平透明导体行,而另一块板上则放置垂直透明导体列。行、列导体的交叉处定义一个像素位置。通常,分子按图2.13中所示的“开态”排列。经过该材料的偏振光被扭曲,使之通过对面的偏振器,从而将光反射给观察者。如果要关掉像素,我们可以将电压置于两交叉导体,使分子对齐,从而不再扭曲偏振光。这类平板显示设备可视为**无源矩阵**(passive-matrix)LCD。图形的定义存储在刷新缓存,以每秒60帧的速率刷新屏幕,与发射设备相同。使用固态电子设备时,通常也利用背光,因而系统不完全依赖于外部光源。可以使用不同的材料或染料来显示颜色,并在每个屏幕位置放置一个三合一的彩色像素。构成LCD的另一种办法是在每个像素位置放置一个晶体管,并采用薄膜晶体管技术。晶体管用来控制像素位置的电压,并阻止液晶单元慢性漏电。这些设备称为**激活矩阵**(active-matrix)显示器。

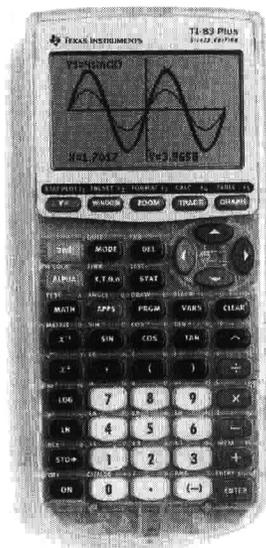


图2.12 带LCD屏幕的掌式计算器 (Texas Instruments 提供)

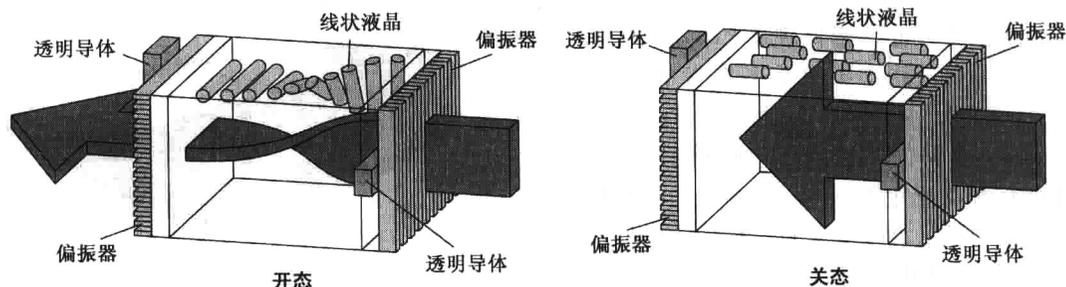


图2.13 多数LCD显示设备使用的光扭曲、快门效应

### 2.1.6 三维观察设备

显示三维场景的图形监视器的设计,采用了从振动的柔性镜面反射CRT图像的技术。此类系统的操作原理如图2.14所示。当变焦反射镜振动时改变焦距长度。这些振动是同CRT上对象的显示同步的。因此,将该对象上的每一点从镜面反射到空间位置,对应于该点到指定观察位置的距离。这样就允许我们围绕着一个对象或场景行走,并从不同的角度进行观察。

除了显示三维图像,这些系统也能显示选定对象在不同深度横截面的二维“切片”,例如在医学应用中分析来自超声波造影和CAT扫描设备的数据;在地质应用中,可以分析地形的地震数据,在设计应用中引入实体对象,以及分子系统和地形系统的三维仿真应用。

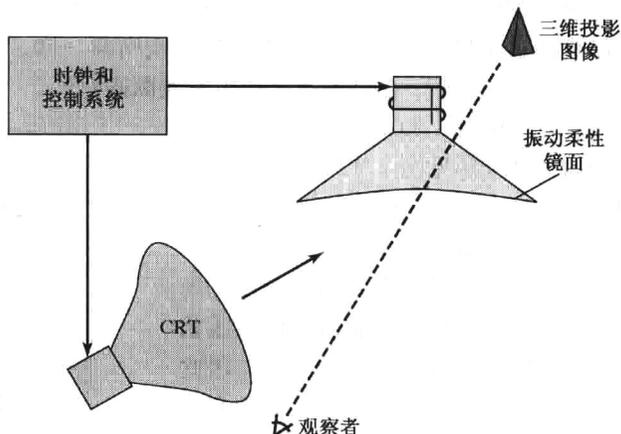


图 2.14 采用振动反射镜的三维显示系统的操作, 振动反射镜通过改变焦距长度来匹配场景中点的深度

### 2.1.7 立体感和虚拟现实系统

表示三维对象的另一种技术是显示具有立体感的视图。这种方法并不生成真实的三维图像, 而是为观察者的每只眼睛给出不同的视图来提供三维效果, 从而使场景带有深度。

为得到具有立体感的投影, 首先需要得到从相对于每只眼睛(左眼与右眼)的观察方向上产生的有关场景的两个视图。可以通过指定不同的观察位置, 并由计算机生成场景来获得这两个视图, 或者用一对立体照相机拍摄某些对象或场景来获得这两个视图。当我们同时用左眼得到左视图、右眼得到右视图时, 则两个视图合成为单个图像, 并感觉到场景带有深度。

产生立体感效果的途径之一是使用光栅系统在不同的刷新周期交替显示两种视图。通过眼镜观察屏幕, 每个镜片设计成高速交替的快门, 这种快门能同步阻止另一视图的显示, 图 2.15 是使用液晶快门和使眼镜与屏幕视图同步的红外线发射器的一种设计。

立体感视图也是**虚拟现实**(virtual-reality)系统的一个组成部分。用户可以步入场景并同环境进行交互。带有生成立体感视图的光学系统的头套可用来连接交互输入设备, 从而定位并操纵场景中的对象。头套内的传感系统跟踪观察者的位置, 以便在观察者“走进”并同显示进行交互时, 能看见对象的正面和背面。另一种生成虚拟环境的方法是使用投影仪在布局好的墙上生成场景, 观察者使用头套和戴在右手的数据手套同虚拟场景进行交互(参见 2.4 节)。



图 2.15 观察立体感三维场景的眼镜 (XPAND, X6D USA公司提供)

低成本交互虚拟现实环境可以用视频监视器、立体眼镜和头部跟踪设备构建。跟踪设备放置在视频显示器的顶部, 并用来监视头部的运动。因此, 对场景的观察位置可跟随头部位置的变化而变化。

## 2.2 光栅扫描系统

交互式光栅图形系统通常使用几个处理部件。除了中央处理器(CPU)之外, 还使用一个**视频控制器**(video controller)或**显示控制器**(display controller)来控制显示设备的操作。简单光栅系

## 有关此电子图书的说明

本人由于一些便利条件，可以帮您提供各种中文电子图书资料，且质量均为清晰的 PDF 图片格式，质量要高于网上大量传播的一些超星 PDG 的图书。方便阅读和携带。只要图书不是太新，文学、法律、计算机、人文、经济、医学、工业、学术等方面的图书，我都可以帮您找到电子版。所以，当你想要看什么图书时，可以联系我。我的 QQ 是：**89039855**，大家可以在 QQ 上联系我。

此 PDF 文件为本人亲自制作，请各位爱书之人尊重个人劳动，敬请您不要修改此 PDF 文件。因为这些图书都是有版权的，请各位怜惜电子图书资源，不要随意传播，否则，这些资源更难以得到。