

第一章 ANSYS 8.1 简介

1.1 ANSYS 8.1 软件介绍

ANSYS 是一种应用广泛的通用有限元工程分析软件,功能完备的前后处理器使 ANSYS 易学易用、强大的图形处理能力及得心应手的实用工具使得使用者轻松愉快、奇特的多平台解决方案使用户物尽其用,多种平台支持 (NT、LINUX、UNIX) 和异种异构网络浮动,各种硬件平台数据库兼容,使其功能一致,界面统一。目前,ANSYS 已经广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。

ANSYS 软件含有多种分析能力,包括从简单线性静态分析到复杂非线性动态分析。用来求结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解答。它包含了前处理、解题程序以及后处理和优化等模块,将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合,已成为现代工程学问题必不可少的有力工具。

1.1.1 ANSYS 的发展

ANSYS 公司是由美国匹兹堡大学力学系教授、有限元法的权威、著名的力学专家 John Swanson 博士于 1970 年创建而发展起来的,总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡,目前是世界 CAE (Computer Aided Education) 行业最大的公司之一。

ANSYS 软件的最初版本与今天的版本相比有很大的不同,它仅仅提供了热分析及线性结构分析功能,而且是一个批处理程序,只能在大型计算机上使用。20 世纪 70 年代初加入了非线性、子结构等功能;20 世纪 70 年代末,图形技术和交互操作方式应用到了 ANSYS 当中,使得 ANSYS 的使用进入了一个全新的阶段。

经过 30 多年的发展,今天的 ANSYS 软件更加趋于完善,功能更加强大,使用也更加方便。最新版本 ANSYS 8.1 的推出增加了一些如模态综合法、非线性诊断技术(专家系统)以及多物理场功能等,性能上有了很大的改进和提高。

1.1.2 ANSYS 功能简介

ANSYS 是一个通用的有限元分析软件,它的能用性就表现它多种多样的分析能力,包括从简单的线性静态分析到复杂的非线性动态分析。而且,ANSYS 还具有产品的优化设计、估计分析等附加功能。

ANSYS 软件能够提供的分析类型如下:

1. 结构静力分析

用来求解外荷载引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且可以进行非线性分析,如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触问题的分析。

2. 结构动力分析

结构动力分析用来求解随时间变化的荷载对结构或部件的影响。与静力分析不同，动力分析要考虑随时间变化的力载荷以及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行结构动力学分析的类型包括：瞬态动力分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

3. 结构非线性分析

结构非线性问题分析材料非线性、几何非线性、和单元非线性三种。ANSYS 程序可以求解静态和瞬态的非线性问题。

4. 结构屈曲分析

屈曲分析是用来确定结构失稳的载荷大小与在特定的荷载下结构是否失稳的问题。ANSYS 中是稳定性分析主要分为线性分析和非线性分析两种。

5. 热力学分析

ANSYS 可处理热传递的三种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的三种基本类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还可以进行模拟材料的固化和熔解过程的分析，以及模拟热与结构应力之间的关系的耦合问题的分析。

6. 电磁场分析

主要用于电磁场问题的分析，如电感、电容、磁能量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。

7. 声声分析

声场分析主要用来研究主流体（气体、液体等）介质中声音的传播问题，以及在流体介质中固态结构的动态响应特性。

8. 压电分析

压电分析主要可以进行静态分析、模态分析、瞬态分析和谐波响应分析等，可用于研究压电材料结构在随时间变化的电流和机械荷载响应特性。主要适用于谐振器、振荡器以及其它电子材料的结构动态分析。

9. 流体动力学分析

ANSYS 中的流体单元能进行流体动力学分析，分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率。并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分析的图形显示。

1.1.3 ANSYS8.1 的新特性

ANSYS 8.1 继承了以前各版本的基本功能，并在此基础上做了进一步的加强。ANSYS 8.1 主要新增功能有：

1. 新的视图工具栏

新版本界面中增加了全新的视力工具栏，可以方便地对模型进行放大、缩小、平移等操作。此工具栏固定于操作界面右侧，无需用户再从应用菜单调用。关于此工具栏的操作方法，将在以后的章节里详细介绍。

2. 视图窗口增加右键菜单

新版本中开始在视图窗口中设置右键菜单，主要功能是调节视图窗口显示模式，配合视图工具栏使用，使用户能够快速地与实现图形交互。

3. 新单元与新材料

新版本增加了几种新的单元，如 BEAM188/189、SHELL181、SHELL208 等，同时还增加了新材料：形状记忆合金，使 ANSYS 能够更加精确地模拟航空航天、医学等领域的问题。

4. 新的并行求解器

新版本应用了新的并行式求解器：分布式 PCG 和分布式 JCG，使得运算超大规模的非线性问题，速度更快，稳定性更高。

5. 截面和表面结果后处理功能

新版本增加了新的后处理功能，可以输出截面或者球面上的全力和平均应力；可以输出密封体积上的净电荷；可以输出通过截面的磁能量、热流量等。

此外，ANSYS8.1 的新增功能还有：新增模态综合法、新的接触算法——拉格朗日乘法、新的接触方式——边装配方式、非线性诊断技术（专家系统）、低频电磁场循环对称分析、E-B 耦合场粒子轨迹、新压电/压阻直接耦合单元和新的多物理场求解器等。

说明：有条件的读者可以访问 ANSYS 的官方网站，了解 ANSYS 软件发展的最新动态。网址是：

<http://www.ansys.com> (英文)

<http://www.ansys.com.cn> (中文)

1.2 启动 ANSYS8.1

说明：本书所有例子的操作环境为：windows2000 系统，使用最新版本的 ANSYS 8.1。

本书假定读者已经正确安装了 ANSYS，现在正式进入 ANSYS 的使用和学习中。

ANSYS8.1 的启动基本上有两种：向导式启动和直接启动。用户在进行一个有限元分析之前，必须要定义一个工作目录（硬盘的一个物理路径），ANSYS 会把生成的分析文件全部存放在这个工作目录下，方便管理和查找。向导式启动给用户设置工作路径、产品模块等启动选项成为可能。如果用户已经设置好了这些启动选项，为了节省时间，单击【开始】|

【程序】|【ANSYS 8.1】|【ANSYS】即可按设好的选项启动 ANSYS 了。对于首次使用的用户，作者推荐使用向导式启动。

下面就重点对这种启动方式进行简要地介绍：

(1) 单击【开始】|【程序】|【ANSYS 8.1】|【Configure ANSYS Products】，如图 1.1 所示。



图1.1 程序启动菜单

(2) 弹出启动交互式界面，如图 1.2 所示。可以看到界面上有四个标签，分别为【Launch】、【File Management】、【Customization】和【Preference】。按如下步骤进行设置：

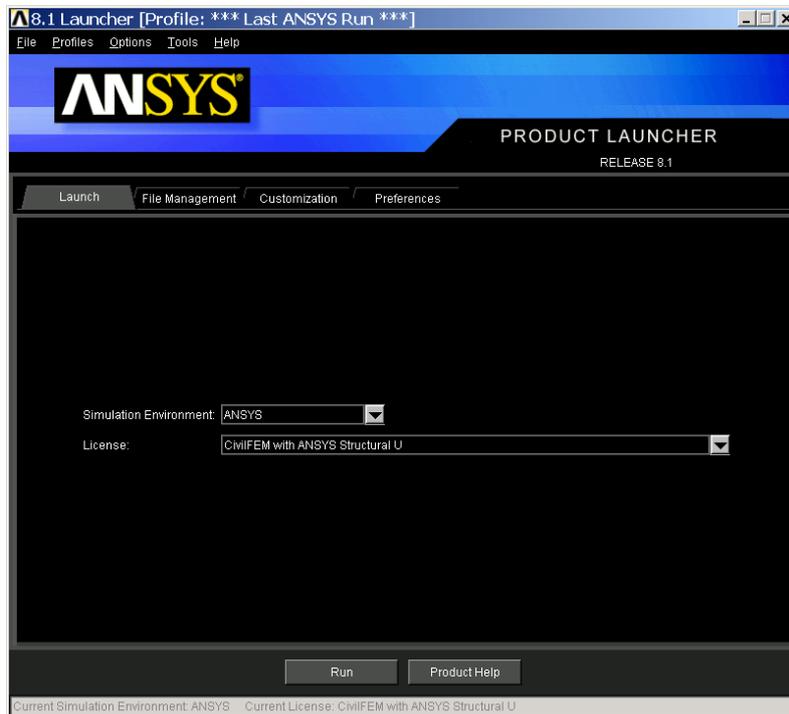


图1.2 ANSYS启动交互界面

- 选择【Launch】标签，选择 ANSYS 的启动产品，常用为【ANSYS/Mechanical U】。
- 选择【File Management】标签，设定工作目录和工作文件名。程序默认为上次运行定义的工作文件名，如果是第一次运行程序默认名为 File。
- 选择【Customization】标签，设置整个工作空间和数据库所占的交换空间的大小。如果不设置，ANSYS 会根据不同的计算机配置自动选择。
- 选择【Preference】标签，选择程序语言环境，默认为【en-us】。

(3) 设置完后，单击图 1.2 上的【RUN】按钮，即可打开 ANSYS 程序主界面。

说明：用户也还可以能过命令的方式直接启动 ANSYS，操作为：单击【开始】|【运行】菜单，在弹出的【运行】对话框中输入"C:\Program Files\Ansys Inc\V81\ANSYS\bin\intel\ansys81"（包括双引号，"C:\Program Files"为程序的安装目录）即可。

1.3 ANSYS8.1 常用图形界面

在 ANSYS 启动后，就可以看到程序的用户界面（GUI）了，如图 1.3 所示。它的结构基本包括以下几个方面：

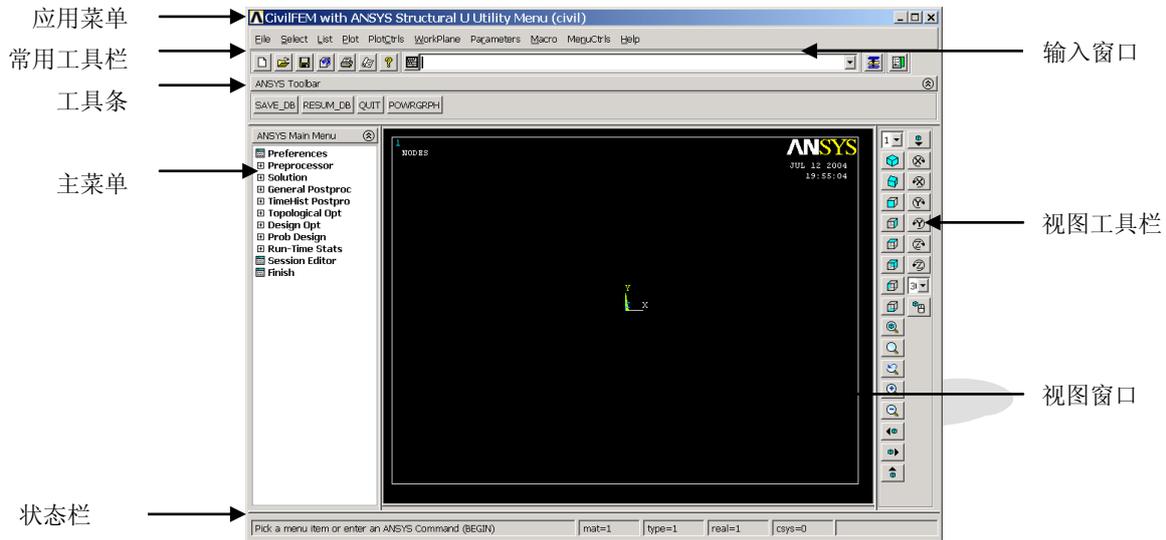


图1.3 ANSYS用户界面

1.3.1 应用菜单

ANSYS 的应用菜单（Utility Menu）窗口，包括文件管理（【File】）、选择（【Select】）、列表（【List】）、图形（【Plot】）、图形控制（【PlotCtrls】）、工作平面（【WorkPlane】）、参数设置（【Parameters】）、宏（【Macro】）、菜单控制（【MenuCtrls】）、帮助（【Help】）共 10 个下拉菜单。每个菜单可直接完成某项功能或弹出菜单窗口。

说明：本书中以“【Utility Menu】|【XXX】”表示的菜单均指这种主应用菜单，以后不再特别说明。

下面简单介绍一下这些菜单的功能，对于一些常用菜单详细的用法将贯穿在以后的各章中分别讲述：

- **【File】** 菜单：主要主文件的读写和模型数据库的相关操作，如图 1.4 所示。例如：**【Change Jobname】** 命令用于改写工程名称；**【Save as Jobname.db】** 用于存储数据库；**【Read Input from..】** 用于读取命令流文件等。



图1.4 【File】菜单

- **【Select】菜单**: 主要用于对图形实体进行选择操作, 如图 1.5 所示。例如: **【Entities...】** 命令用于选择实体 (点、线或面等); **【Component Manager...】** 用于组件的管理和修改等。



图1.5 【Select】菜单

- **【List】菜单**: 主要用于列表显示数据库中的数据, 如图 1.6 所示。例如: **【Lines...】** 命令用于列表显示线的的数据信息; **【Components】** 命令用于列表显示组件的数据信息等。



图1.6 【List】菜单

- **【Plot】** 菜单：主要用于图形显示实体（点、线、面、体和单元等），如图 1.7 所示。例如：**【Lines】** 命令用于在图形视窗中显示线；**【Components】** 命令用于在图形视窗中显示组件等。

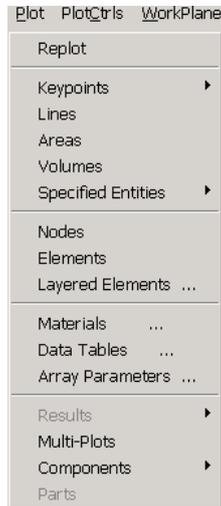


图1.7 【Plot】菜单

- **【PlotCtrls】** 菜单：主要用于控制图形显示的方式，如图 1.8 所示。例如：**【Pan Zoom Rotate...】** 命令用于控制模型在图形视窗中的平移、缩放和旋转操作；**【Numbering...】** 用于控制图形视窗中图元编号的显示等。



图1.8 【PlotCtrls】菜单

- **【WorkPlane】** 菜单：主要用于对工作平面和坐标系的设置，如图 1.9 所示。例如：

【Display Working Plane】命令用于显示工作平面；【Change Active CS to】命令用于改变当前活动坐标系等。

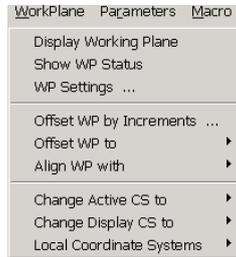


图1.9 【WorkPlane】菜单

- 【Parameters】菜单：主要用于分析过程中的参数设置，如图 1.10 所示。例如：【Scalar Parameters...】命令用于标题参数的设置；【Array Parameters】命令用于数组参数的设置等。



图1.10 【Parameters】菜单

- 【Macro】菜单：主要用于对宏的定义和编写，如图 1.11 所示。例如：【Create Macro...】命令用于创建宏；【Edit Abbreviations...】用于编辑缩写等。

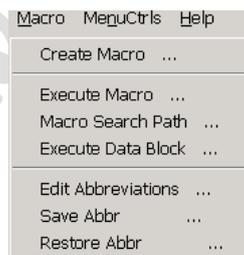


图1.11 【Macro】菜单

- 【MenuCtrls】菜单：主要用于控制菜单显示和工具条按钮，如图 1.12 所示。例如：【Color Selection...】命令用于颜色设置；【Edit Toolbar...】命令用于编辑工具栏中按钮等。



图1.12 【MenuCtrls】菜单

- 【Help】菜单：主要用于帮助信息的查找，如图 1.13 所示。



图1.13 【Help】菜单

1.3.2 工具条

ANSYS 可以将常用的命令制成工具按钮的形式，方便调用。工具条中几个缺省的按钮分别为：**SAVE_DB**（保存数据）、**RESUM_DB**（恢复数据）、**QUIT**（退出程序）和 **POWRGRPH**（增强图形）。

可以使用【MenuCtrl】|【Edit Toolbar】菜单命令来创建工具按钮，单击此菜单后将出现如图 1.9 所示的对话框。工具按钮的命令格式为：***ABBR,SAVE_DB,SAVE**，其中*ABBR 是前缀，SAVE_DB 是工具条中按钮的名称，SAVE 为 ANSYS 的内部命令。

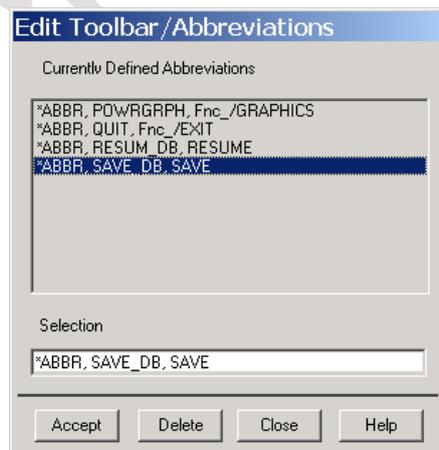


图1.14 编辑工具按钮

1.3.3 输入窗口

输入窗口 (Input) 主要是用来输入命令行命令的, 输入相应的 ANSYS 内部命令, 还会提示相关的参数信息。单击右边的  按钮, 则以前执行的命令将会出现在下拉列表中。选中某一行命令并单击, 则该命令即出现在输入框中, 此时可以对其进行适当的编辑。

单击输入窗口左边的  按钮, 将弹出如图 1.15 所示的命令输入窗口, 在其下侧的文本框中输入命令, 回车后即可执行, 上侧的文本框用于显示命令记录。单击  按钮, 将恢复默认的输入窗口。



图1.15 命令输入窗口

说明: 本书中例题中提拱的命令流, 均可在此窗口中输入, 并实现相应的功能, 以后不再特别说明。

1.3.4 主菜单

主菜单 (Main Menu) 是使用 GUI 模式进行有限元分析的主要操作窗口, 包含了 ANSYS 的主要功能: Preferences (参数选择)、Preprocessor (前处理模块)、Solution (求解计算模块)、General Postprocessor (通用后处理器)、Time Postprocessor (时间历程后处理器) 和 Design Opt (优化设计模块) 等, 如图 1.16 所示。



图1.16 主菜单

菜单前带  表示单击该菜单将弹出相应的对话框; 菜单前带  的表示该菜单为折叠菜

单，单击它可以展开，展开后将变为，再次单击，菜单重新折叠；菜单前带表示单击该菜单将弹出图形拾取对话框。

说明：本书中以“Main Menu>XXX>XXX”的表示的菜单均指此窗口中的菜单，以后不再特别说明。

1.3.5 图形窗口

图形窗口用来显示由 ANSYS 创建或传递到 ANSYS 的模型以及分析结果等图形信息。关于图形显示的设置，都在应用菜单的【Plot】菜单命令中，此菜单中可以执行重绘图形、显示关键点、线、面或体号等显示操作。

1.3.6 视图工具栏

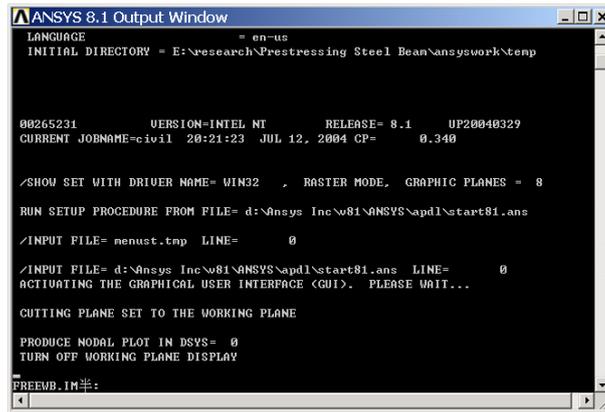
此工具栏是在 ANSYS8.0 版本中开始出现的，主要功能是对图形窗口的模型进行视图的变换，如放大（）、缩小（）、平移（、、和）、三维视角切换（或）等。用户也可以选择【PlotCtrl】|【Pan Zoom Rotate】菜单，打开一个相似的对话框，它也能实现相应的操作，是以前的版本中常用的一个工具，目前基本可以被视图工具栏所代替。

视图工具栏常用按钮功能介绍：

- ：切换到等视轴图模式
- ：切换到斜视轴图模式
- ：切换到前视图模式
- ：切换到右视图模式
- ：切换到顶视图模式
- ：切换到后视图模式
- ：切换到左视图模式
- ：切换到下视图模式
- ：切换到全局视角模式
- ：放大模型
- ：缩小模型
- ：模型向左移动
- ：模型向右移动
- ：模型向上移动
- ：模型向下移动
- ：动态查看模型切换（按下为动态模式）

1.3.7 输出窗口

和主界面一起启动的还有一个 DOS 输出窗口，如图 1.17 所示。它主要用来显示 ANSYS 的文本输出。启动后通常会在主窗口后面，当用户想要查看时，激活它就可以了。此外 ANSYS 将输出信息存放在记事本文件中，这些文件存放在 ANSYS 的工作目录下，文件名称和工程名称相同，后缀为 txt 和 err（存放错误信息）。



```
ANSYS 8.1 Output Window
LANGUAGE = en-us
INITIAL DIRECTORY = E:\research\Prestressing Steel Beam\ansyswork\temp

00265231      VERSION=INTEL NT      RELEASE= 8.1      UP20040329
CURRENT JOBNAME=civil  20:21:23  JUL 12, 2004  CP=      0.340

/SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32      ,  RASTER MODE,  GRAPHIC PLANES = 8

RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= d:\ansys Inc\81\ANSYS\apdl\start81.ans

/INPUT FILE= nenust.tmp  LINE=      0

/INPUT FILE= d:\ansys Inc\81\ANSYS\apdl\start81.ans  LINE=      0
ACTUATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI). PLEASE WAIT...

CUTTING PLANE SET TO THE WORKING PLANE

PRODUCE NODAL PLOT IN DSVS= 0
TURN OFF WORKING PLANE DISPLAY

FREEVB.IN#:
```

图1.17 输出窗口

1.4 第一个有限元分析实战

本节将从有限元基本构架入手，结合一个线性静态问题的实例，介绍使用 ANSYS 进行有限元分析的基本过程。

1.4.1 有限元法的基本架构

1. 有限元的基本思想

目前在工程领域内常用的数值模拟方法有：有限元法、边界元法、离散单元法和有限差分法，就其广泛性而言，主要还是有限单元法。它的基本思想是将连续的结构离散成有限个单元，并在每一个单元中设定有限个节点，将连续体看作是只在节点处相连续的一组单元的集合体；同时选定场函数的节点值作为基本未知量，并在第一单元中假设一近插值函数以表示单元中场函数的分布规律；进而利用力学中的某些变分原理去建立用以求解节点未知量的有限元法方程，从而将一个连续域中的无限自由度问题转化为离散域中的有限自由度问题。一经求解就可以利用解得的节点值和设定的插值函数确定单元上以至整个集合上的场函数。有限元法求解的基本过程如图 1.18 所示。

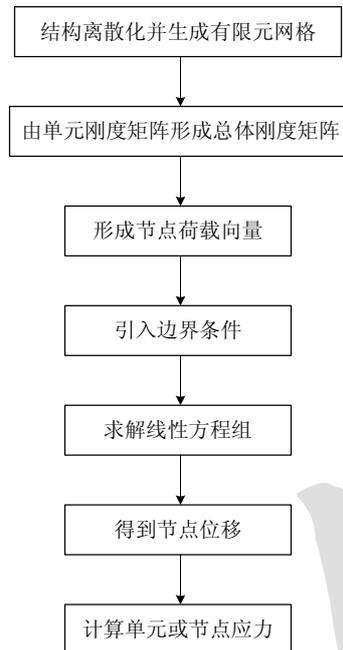


图1.18 有限元求解过程

2. 有限元的基本构成

(1) 节点 (Node): 就是考虑工程系统中的一个点的坐标位置, 构成有限元系统的基本对象。具有其物理意义的自由度, 该自由度为结构系统受到外力后, 系统的反应。

(2) 单元 (Element): 单元是节点与节点相连而成, 单元的组合由各节点相互连接。不同特性的工程问题, 可选用不同种类的单元, ANSYS 提供了一百多种单元, 单元的选择正确与否直接影响了求解的精度, 故使用时必须慎重选用单元型号。

ANSYS 中常用的有限单元有 Link 单元、Beam 单元、Block 单元和 Plane 单元:

- Link 单元: 此单元为线性单元, 有两个节点, 每个节点有三个位移自由度, 主要用于桁架结构的模拟。
- Beam 单元: 此单元主要用于分析细长结构梁的弯曲问题。与 Link 单元相比, 梁单元增加了转动自由度。
- Block 单元: 此单元主要为四边形单元或者六面体单元, 默认情况下每个节点只有位移自由度而没有转动自由度。
- Plane 单元: 此单元主用于模拟空间的薄壁问题, 每个节点有六个自由度。

此外, ANSYS 程序的单元库中还有 Mass 单元、Pipe 单元和 Shell 单元等。关于具体某个单元的特性和使用方法, 可参考 ANSYS 自带的帮助文档。

(3) 自由度 (Degree Of Freedom): 上面提到节点具有某种程度的自由度, 以表示工程系统受到外力后的反应结果。要知道节点的自由度数, 请查看 ANSYS 自带的帮助文档, 那里对每种单元类型都做了详尽的介绍。

1.4.2 提出问题

ANSYS 软件有分析多种有限元问题的能力，包括简单的线性静态分析到复杂的非线性动态分析。本节旨在向读者介绍适用于大多数分析的一般步骤，以期读者能够亲自操作快速地熟悉 ANSYS 的使用。一个典型的 ANSYS 分析过程可分为以下六个步骤：

- 定义参数
- 创建几何模型
- 划分网格
- 加载数据
- 求解
- 结果分析

下面通过一个简单的静力问题分步介绍 ANSYS 的详细操作方法。

一个厚度为 20mm 的带孔矩形板受平面内张拉，形状如图 1.19 所示。左边固定，右边受一荷载 $P=20\text{N/mm}$ 作用，求其变形情况。

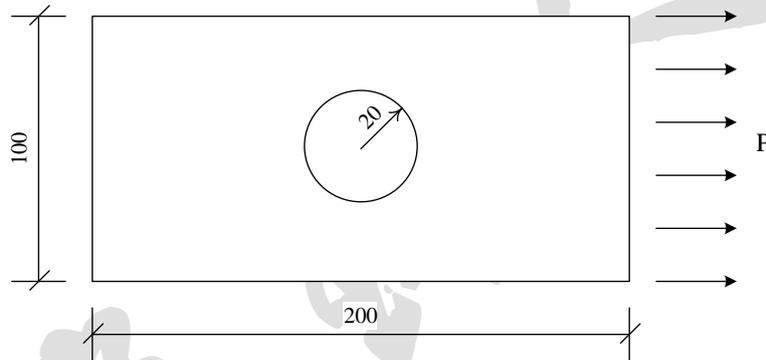


图1.19 带孔矩形板张拉示意

显然，这是一个平面应力问题，模型生成的方法可以从高级到低级，先生成二维实体模型，接着使用节点和单元的自动分网功能。

1.4.3 定义参数

在建立模型和分网之前，需要一些准备工作，包括：指定工程名和分析标题、定义单位、定义单元类型、定义单元实常数和定义材料参数等。本步主要是对这些前期工作进行操作。

1. 指定工程名和分析标题

(1) 启动 ANSYS，单击【File】|【Change Jobname】菜单，弹出如图 1.20 所示的【Change Jobname】对话框。

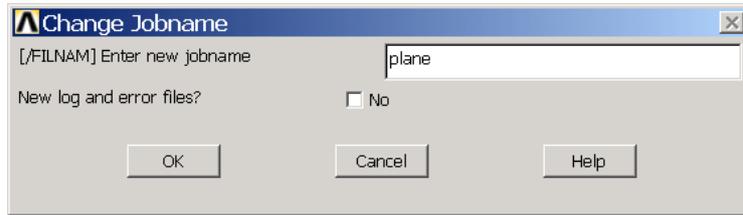


图1.20 【Change Jobname】对话框

(2) 在【Enter new jobname】输入框中输入“plane”，并单击【OK】按钮。

说明：每创建一个新的工程时，最好都重新定义工名称，可以为工程命名为有意义的名称，便是记忆，也确保不被别的文件覆盖。

(3) 单击【File】|【Change Title】菜单，弹出如图 1.21 所示的【Change Title】对话框。



图1.21 【Change Title】对话框

(4) 在【Enter new title】输入框中输入“2D Plane Stress Bracket”，并单击【OK】按钮。

2. 定义单位

ANSYS 软件没有为系统指点唯一的单位，除了磁场分析外，可以在工程分析中使用任意一种单位制，只是用户在使用中要注意保证所有数据使用同一单位制就可以了。因此用户可以根据自己的习惯使用国际单位制或者工程单位制。

操作方法：在 ANSYS 主界面的输入窗口（Input）中输入“/UNIT,SI”，回车即可。

说明：ANSYS 中此操作只提供命令流输入模式，不提供 GUI 模式。使用/UNITS 的命令格式为/UNITS,Label。其中 Label 是用户可以定义的单位制，有 USER（用户自定义单位，是缺省设置）、SI（国际单位制）、BFT（以英尺为基础的单位制）等。

3. 定义单元类型

在 ANSYS 建模之前定义单元类型是必须的，因为单元类型决定了单元的自由度数和单元位于二维空间还是三维空间。

ANSYS 程序的单元库中有超过一百多种适合于不同问题的单元类型。每一种单元都有自己特定的编号和单元类型名，如 SOLID45、SHELL43 等。其中编号是唯一的。本例的操作方法如下：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，弹出如图 1.22 所示的【Element Types】对话框。

(2) 单击【Element Types】对话框中的【Add】按钮，接着弹出如图 1.23 所示的【Library of Element Types】对话框。

(3) 选择左边输入框中的【Solid】，然后选择右边输入框中的【8node 82】，单击【OK】确认。

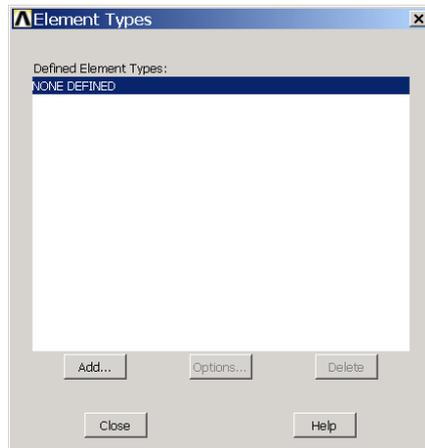


图1.22 【Element Types】对话框

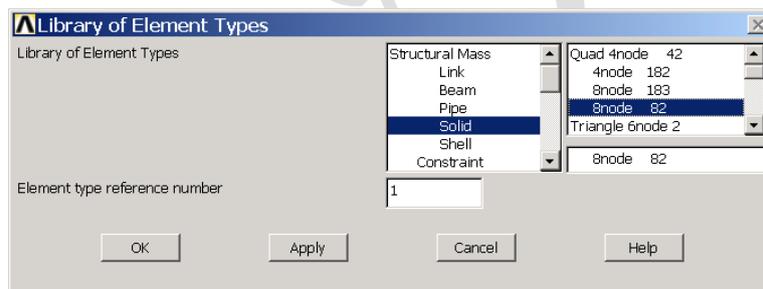


图1.23 【Library of Element Types】对话框

(4) 回到【Element Types】对话框，如图 1.24 所示。

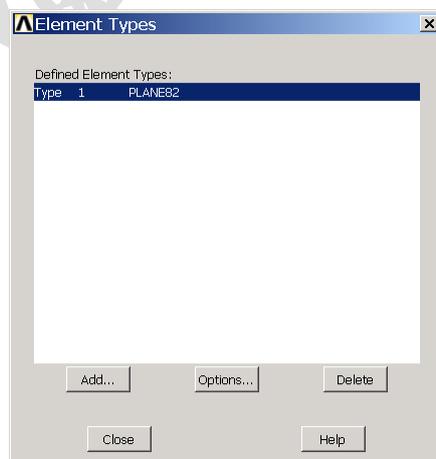


图1.24 【Element Types】对话框

(5) 单击【Element Types】对话框上面的【Options】按钮，弹出如图 1.25 所示的【PLANE82 element type options】对话框。

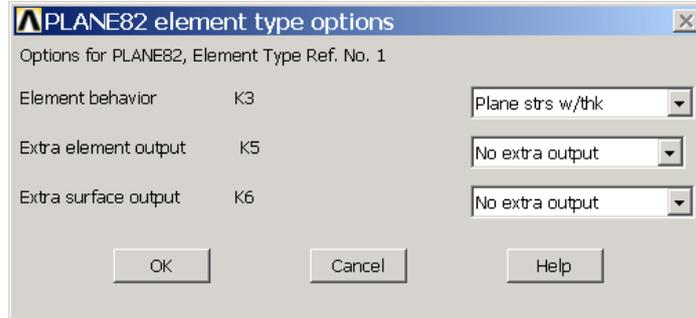


图1.25 【PLANE82 element type options】对话框

(6) 在【Element behavior】的下拉菜单中选择【Plane strs w/thk】，并单击【OK】确认。

说明：Plane82 是具有八个节点的四边形单元，比普通的四节点四边形单元（如 Plane42）更适合模拟边界问题；本例中需要单元厚度上的应力，所以要进行第（6）步的操作。

(7) 再次回到【Element Types】对话框，单击【Close】按钮结束即可。至此，单元类型定义完毕。

4. 定义单元实常数

单元实常数是和单元类型相关的参数。是否需要定义单元实常数，根据所选的单元类型而定。不同类型的单元，也有不同的实常数。此例中，Plane82 单元只需定义一个厚度(Thk)实常数即可。操作方法如下：

(1) 在 ANSYS 程序主界面单击 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete 菜单，弹出如图 1.26 所示的【Real Constants】对话框。

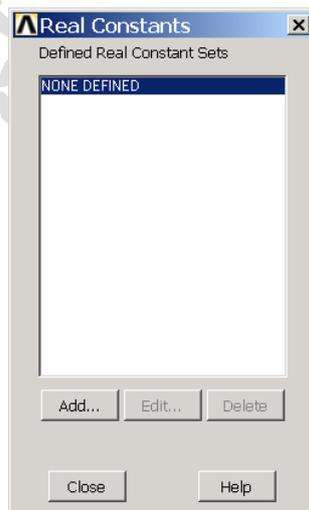


图1.26 【Real Constants】对话框

(2) 单击【Real Constants】对话框中的【Add】按钮，进入下一个【Choose Element Type】对话框，选择【Plane82】单元，然后单击【OK】。

(3) 接着弹出【Real Constant Set Number 1,for Plane82】对话框，如图 1.27 所示。

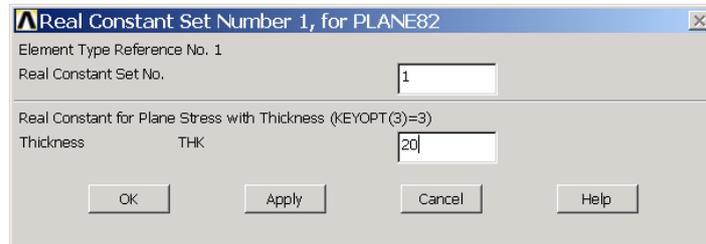


图1.27 【Real Constant Set Number 1,for Plane82】对话框

(4) 在【THK】输入框中输入【20】，定义厚度 20mm，然后单击【OK】按钮。

(5) 回到【Real Constants】对话框，单击【Close】关闭即可。

5. 定义材料参数

在定义单元类型和实常数之后，还需要定义结构的材料特性，根据应用范围不同材料特性有如下三种：

- 线性和非线性
- 各向同性、正交异性、各向异性
- 不随温度变化和随温度变化

本例中只考虑线性材料特性，主要输入的是弹性模量和泊松比，对于其它几种材料特性的输入方法，请参加后面的章节。本例的操作方法如下：

(1) 在 ANSYS 程序主界面，单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，弹出如图 1.28 所示的【Define Material Model Behavior】对话框。

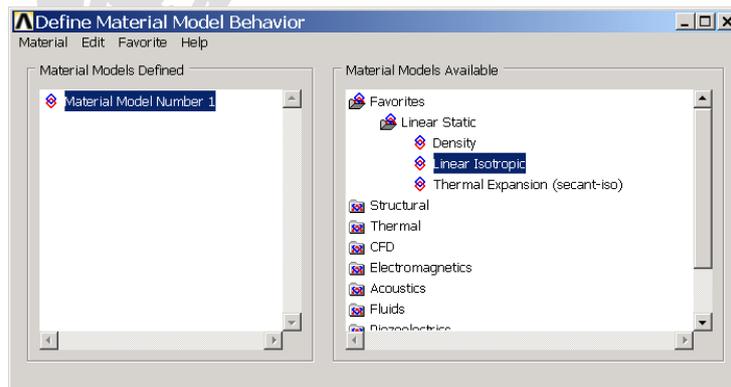


图1.28 【Define Material Model Behavior】对话框

说明：在这些对话框中，根据学科领域将材料的特性分为结构特性、热特性、计算液体特性、电磁特性、声学特性、液体特性、压电体特性。每种学科对材料有相应的要求，这在以后讲到时再详细阐述。

(2) 选择图 1.28 对话框右侧的 Favorites>Linear static>Linear Isotropic 菜单，并双击【Isotropic】，接着弹出如图 1.29 所示的【Linear Isotropic Properties for Material...】对话框。

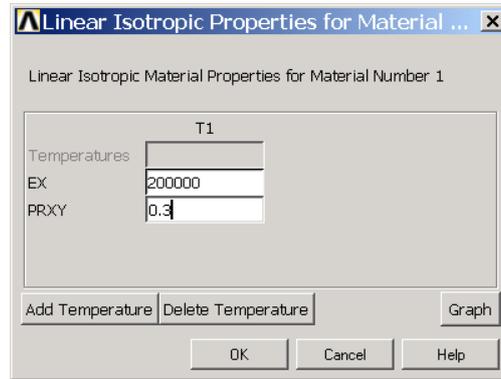


图1.29 【Linear Isotropic Properties for Material...】对话框

(3) 在【EX】中输入弹性模量【200000】，在【PRXY】中输入泊松比【0.3】，单击【OK】确定。

(4) 回到【Define Material Model Behavior】对话框后，直接单击关闭即可，至此，材料参数设置完毕。

1.4.4 创建几何模型

定义了参数之后，分析的下一步就可以建立所需的几何模型。

对于此例可以先绘制一个矩形和圆形，然后对其进行布尔操作，即可得到所要的几何模型。本例的操作方法如下：

(1) 在 ANSYS 的主界面，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners 菜单，弹出如图 1.30 所示的对话框。

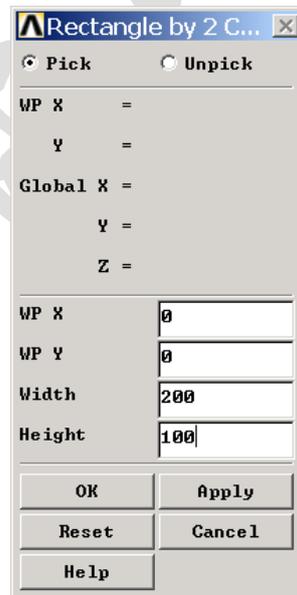


图1.30 创建矩形对话框

(2) 按图 1.23 所示填写相应数据,【Width】中输入【200】,【Height】中输入【100】,并单击【OK】按钮。这样将绘制一个左下角点位于坐标原点,右上角点位于 200, 100, 0 的矩形。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle 菜单,弹出如图 1.31 所示的对话框。

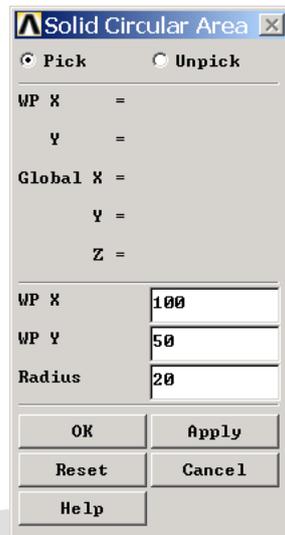


图1.31 创建圆形对话框

(4) 按上图所示填写相应数据,【WP X】中输入【100】,【WP Y】中输入【50】,并单击【OK】按钮。这样将绘制一个圆心位于矩形形心,半径为 20 的圆。此时的图形窗口如图 1.32 所示。

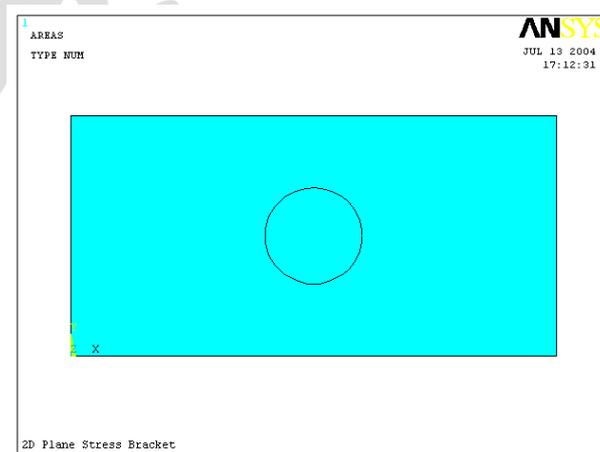


图1.32 几何图形示意

(5) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas 菜单,弹出如图 1.33 所示的对话框。

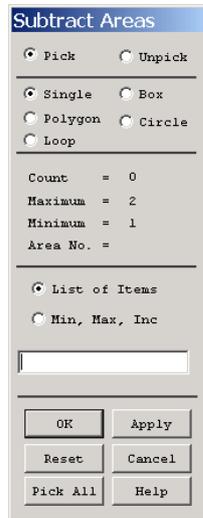


图1.33 实体拾取对话框



图1.34 多实体拾取对话框

(6) 用鼠标在矩形上单击，弹出如图 1.34 所示的对话框，单击【OK】按钮，选中矩形。

(7) 再次出现图 1.33 的对话框，再用鼠标在圆形上单击，同样弹出如图 1.34 所示的对话框，此时单击【Next】，选中圆形，并单击【OK】按钮。

(8) 接着单击【OK】按钮，程序就会对两个图形进行布尔减运算，得到的几何模型如图 1.35 所示。

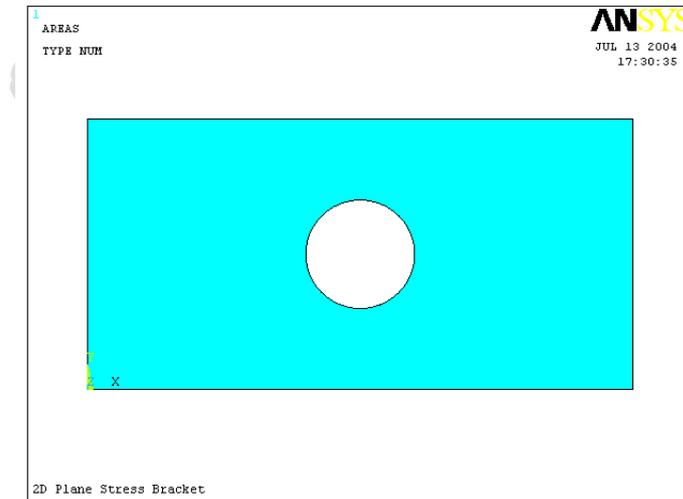


图1.35 建立的几何模型

(9) 单击工具栏中的【SAVE_DB】按钮存盘。

1.4.6 划分网格

模型的几何实体建成之后，就可以对其进行网络划分了。网络划分可以手动或自动，

也可以二者结合。一般对于规则的形体，自动网格划分效率较高，也能达到精度要求。在网格划分中，可以控制程序生成单元的大小和形状。本例的操作方法如下：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Layers>Picked Lines** 菜单，弹出实体拾取对话框，用鼠标选中矩形的四条边线，单击【OK】按钮。

说明：如果因用户操作不当出现误选，可以单击一下鼠标右键（此时选择键头方向朝下），然后再次用左键单击某实体，则此实体将被取消选择。

(2) 接着弹出如图 1.36 所示的对话框，在【Element edge length】输入框中输入【25】，其它留空，并单击【OK】按钮。

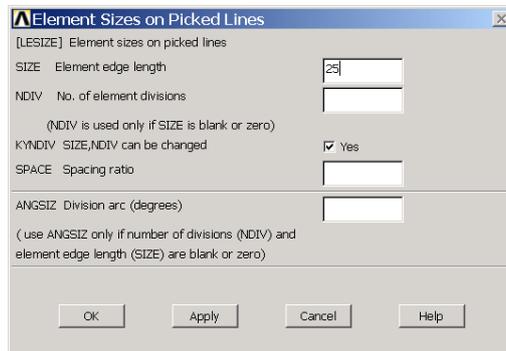


图1.36 【Element Size on Picked Lines】对话框

(3) 再次单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Layers>Picked Lines** 菜单，弹出实体拾取对话框，用鼠标选中圆形的四条边线，单击【OK】按钮。

说明：如果因用户操作不当出现误选，可以单击一下鼠标右键（此时选择键头方向朝下），然后再次用左键单击某实体，则此实体将被取消选择。

(4) 接着在【Element Size on Picked Lines】对话框中，将【No. of element divisions】输入框设为【2】，其它留空，并单击【OK】按钮。

(5) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free** 菜单，弹出实体拾取对话框，然后单击对话框上的【PickAll】按钮，程序即开始进行网格划分。最后形成如图 1.37 所示的网格图形。

(6) 单击工具栏中的【SAVE_DB】按钮存盘。

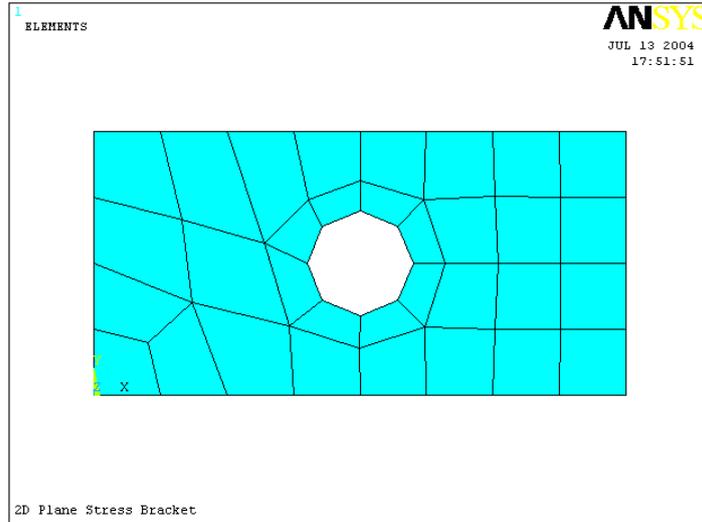


图1.37 网格划分结果

1.4.7 加载数据

划分网格之后要做的工作就是添加荷载和约束数据。这里的荷载包括边界条件（约束、支撑或边界场的参数）和其它外部或内部作用荷载。这些荷载绝大多数可以施加到实体模型（关键点、线和面）或有限元模型（节点和单元）上。关于荷载类型的细节以及如何将荷载施加到模型上，本书将在后面详细介绍。本例的操作方法如下：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines** 菜单，弹出实体拾取对话框，用鼠标选中矩形的左边线，并单击【OK】按钮。

(2) 接着出现如图 1.38 所示的对话框，选择约束【All DOF】，并设置【Displacement value】为【0】，单击【OK】按钮，约束全部位移自由度。

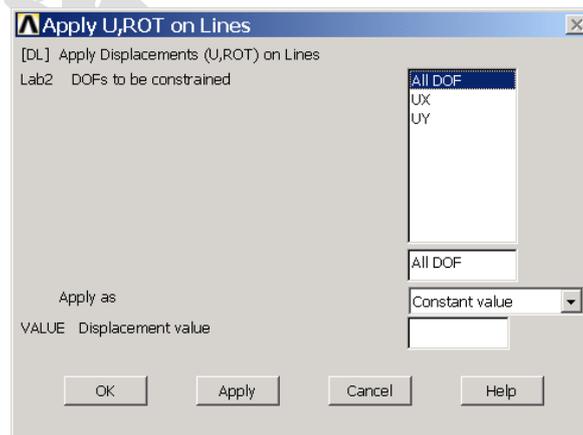


图1.38 施加边界条件

(3) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On**

Lines 菜单, 弹出实体拾取对话框, 用鼠标选中矩形的右边线, 并单击【OK】按钮。

(4) 接着出现如图 1.39 所示的对话框, 设置【Load PRES value】为【-1】, 并单击【OK】按钮, 施加均布压力。

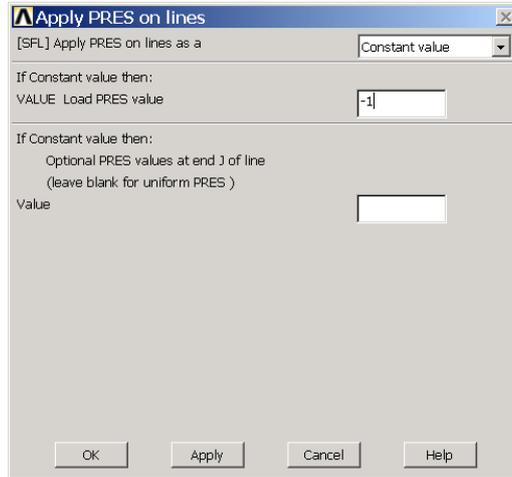


图1.39 定义外荷载

说明: 由于板厚为 20mm, 20N/mm 的线荷载相当于 1MPa 的面荷载, 负号表示荷载方向垂直与表面向外。

(5) 至此, 在视图窗口中就可以得到模型的约束信息了, 如图 1.40 所示。

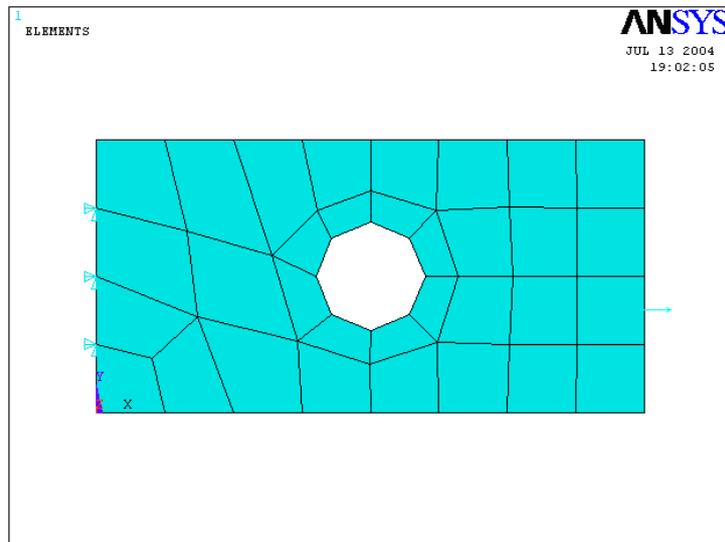


图1.40 模型约束信息

(6) 单击工具栏中的【SAVE_DB】按钮存盘。

1.4.8 求解

求解的工作主要在求解模块 (SOLUTION) 中进行, 其操作方法如下:

(1) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，将弹出如图 1.41 所示的窗口。其中【/STATUS Command】窗口里面包括了所要计算模型的求解信息和荷载步信息。

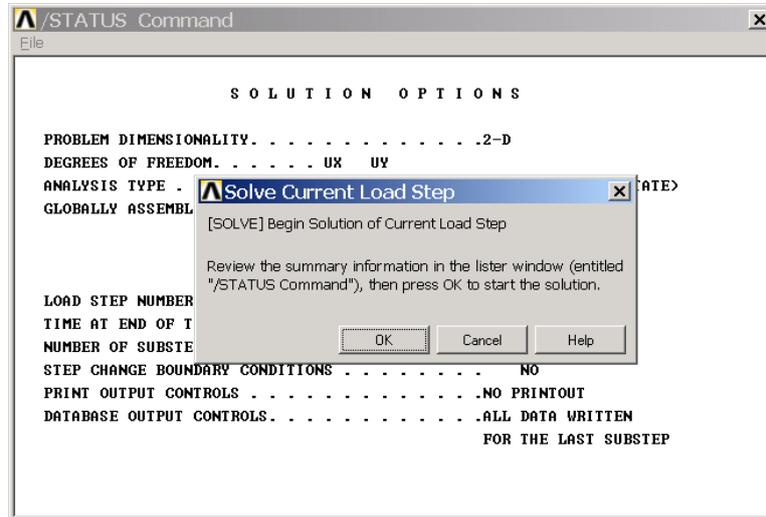


图1.41 求解信息窗口

(2) 单击【Solve current Load Step】对话框中的【OK】按钮，程序开始计算。

(3) 计算完毕后，会出现提示信息【Solution is done!】，如图 1.42 所示，单击【Close】按钮关闭即可。



图1.42 计算结束提示信息

1.4.9 结果分析

完成计算以后，可以能过 ANSYS 的后处理模块来查看计算得到的结果。经常用到的结果查看有：显示变形图、显示 Von Mises 等效应力、列出模型反力值等。另外，后处理中可以查看的结果还有很多，用户可以根据自己的需要去查看结果。本书后面的章节会对后处理做详细的介绍。

1. 显示变形图

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set 菜单，读入最初的结果文件。

(2) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 菜单，弹出【Plot Deformed Shape】对话框，如图 1.43 所示。

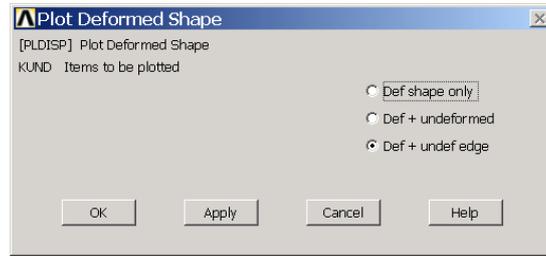


图1.43 【Plot Deformed Shape】对话框

- (3) 选择【Def + underf edge】，并单击【OK】按钮。
 (4) 这时出现如图 1.44 所示的最终变形图。

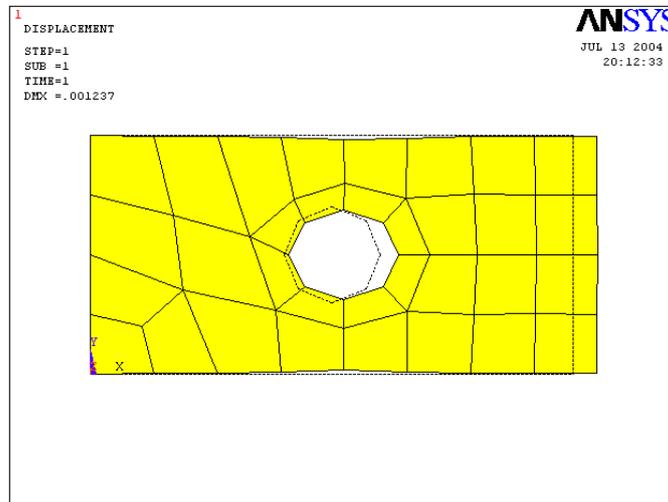


图1.44 变形图

说明：ANSYS 还可以使用动画方式显示模型的变形过程，单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Deformed Shape】菜单，在出现的对话框中选择【Def + undeformed】，并单击【OK】按钮，这时将出现模型受力变形的过程动画。同时出现一个工具窗口，可以对动画播放的速度进行控制。

2. 显示显示Von Mises等效应力

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 菜单，弹出如图 1.45 所示的对话框。

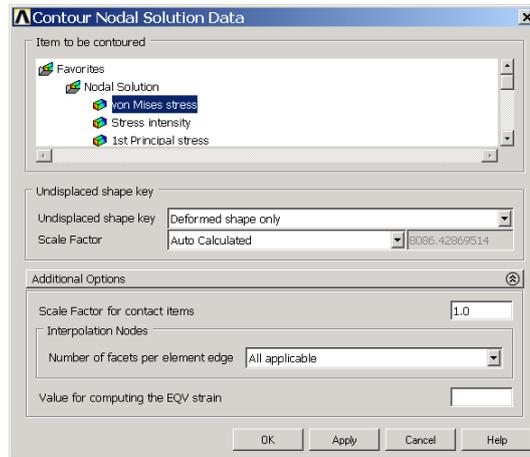


图1.45 选择等值线数据

(2) 选择 Favorites>Nodal Solution>Von Mises Stress, 并展开【Addattional Options】折叠菜单, 设置【Interpolation Nodes】为【All applicable】, 单击【OK】按钮。

(3) 这时出现如图 1.46 所示的等效应力图。

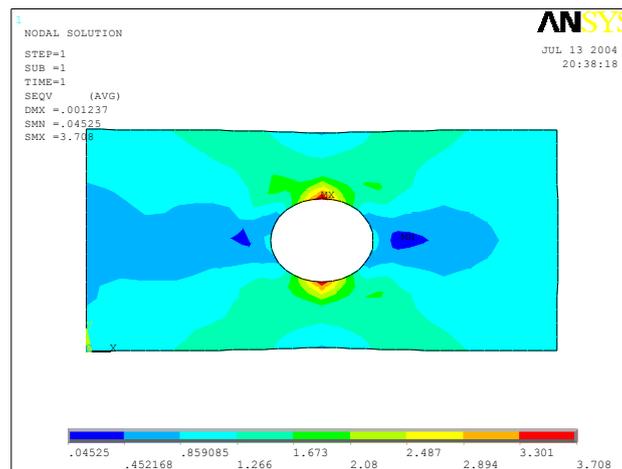


图1.46 等效应力图

说明: 对于应力同样可以显示动画模式, 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Deformed Results】菜单, 在出现的对话框中选择 von Mises 等效应力, 并单击【OK】按钮即可。

3. 列出模型反力值

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solu 菜单, 在出现的对话框中选择【All items】, 显示所有力和位移值。

说明: 所有的力和位移包括 FX、FY、FZ、F 和 MX、MY、MZ、M。这里显示的只有 FX 和 FY 两项, 对于这个分析过程其它力是不存在的。

(2) 最后得到的模型反力如图 1.47 所示。

```

PRRSOL Command
File
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE    FX          FY
  1    -129.21    -54.581
 26    -126.44     45.043
 42    -339.75     19.281
 43    -154.82     11.604
 44    -308.32     5.7141
 45    -143.90     4.1459
 46    -308.41    -4.0916
 47    -165.72    -21.377
 48    -331.43    -5.7377

TOTAL VALUES
VALUE   -2000.0    -0.60139E-11

```

图1.47 模型反力表

1.5 ANSYS8.1 程序结构分析

1.5.1 ANSYS8.1 架构

ANSYS 软件的功能的强大和它的模块化结构是分不开的，图 1.48 是 ANSYS 常见模块的结构示意图。

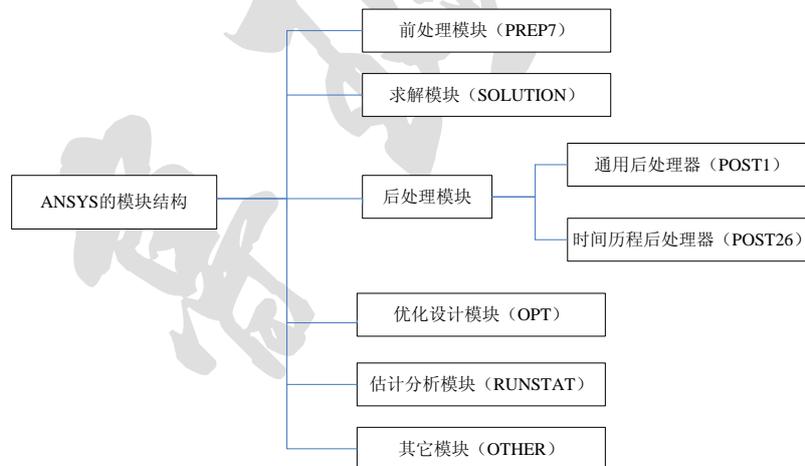


图1.48 ANSYS模块化结构图

在进行有限元分析过程中，用得最多的是以下三种基本模块：

- 前处理模块
- 分析计算模块
- 后处理模块

下面对这三种基本模块的进行简要的介绍。

1. 前处理模块 (PREP7)

前处理模块提供了一个了一个强大的实例建模及网络划分工具，利用这个模块用户可

以方便地构造有限元模型。这部分主要实现三种功能：参数定义、实体建模和网络划分。

(1) 参数定义

在进行有限元分析过程中，首先要做的就是对所建的模型进行适当的参数定义。这里的参数包括使用的单位制、所要使用的单元类型、单元的实常数以及材料特性等。

单位制的定义不是必要的，只要用户输入的数据单位统一即可。

单元类型的定义是进行网格划分的前提，只有定义了适当的单元网格划分工作才能正常地进行。如果必要每种单元还可能有不同的实常数要定义。

材料特性指的是每种材料的性质参数，例如在一个线性分析中，最基本的就是材料的弹性模量和泊松比。如果有多种材料参数，ANSYS 给每组材料特性一个数字编号，并用这些编号还进行材料实别。

(2) 实体建模

ANSYS 程序提供了两种建模方式：从低级到高级建模和从高级到低级建模。

从低级到高级进行实体建模时，用户按照图元的等级由点到线，由线到面，由面到体进行。程序提供了许多高级图元，如球体、圆柱、棱柱等，称为基元，生成这些高级图元时，程序会自动生成相应的面、线和关键点。直接用这些基元并进行适当的布尔运算操作来建立模型的方法就是从高级到低级建模。

(3) 网格划分

ANSYS 提供了功能强大、使用方便的高质量网络划分工具。从使用角度来讲，网格划分可分为系统智能划分和人工控制划分两种。从网格划分的功能来讲，则主要包括四种划分方式：延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格；映像划分允许用户将几何模型分解成简单的几个部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映像网格；程序提供的自由划分功能，可对复杂的模型直接进行划分，避免了用户分别划分导致网格不匹配带来的麻烦。自适应划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析并估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直至误差低于用户定义的值或用户定义的求解次数为至。

2. 求解模块 (SOLUTION)

模型在前处理模块中建立完成后，就可以利用求解模块得到分析结果。在这个模块中，用户可以定义分析类型、分析选项、荷载数据和荷载步选项，然后进行有限元求解。

(1) 定义分析类型、分析选项和荷载步

用户可以根据自己的要计算的响应来选择分析类型。例如，如果要计算固有频率和模态，就必须选择模态分析。在 ANSYS 中，可以进行下列类型的分析：静态、瞬态、调谐、模态、谱、挠度和子机构。

分析选项允许用户自定义分析的求解方法。例如，大变形的打开和关闭以及 Newton-Raphson 算法的选择等。

荷载步选项是用来更改加荷方式的。例如，子步数、荷载步的结束时间和输出控制等。荷载步的指定应该根据所选的分析类型适当选取。

(2) 荷载数据

一般所谓的荷载应包括边界条件及其他外部或内部的荷载。在 ANSYS 中，常用的荷载主要有：

- 自由度 (DOF) 约束
- 力
- 表面分布荷载
- 体积荷载
- 惯性荷载
- 耦合场荷载

3. 后处理模块 (POST1和POST26)

后处理模块的主要是用来查看分析结果的。此模块主要包括两个部分：通用后处理器 (POST1) 和时间历程后处理器 (POST26)。通过这些处理器，用户可以很容易地得到位移、应力、应变、温度等的图形和数字显示。

(1) 通用后处理器 (POST1)

此模块可以用于查看整个模型或者部分选定模型的结果，还可以查看某个特定时间步内的结果。结果的形式可以是等值线图，也可以是列表的形式。另外还提供了很多其它功能，如误差估计、荷载工况组合、结果数据计算和路径操作等。

(2) 时间历程后处理器 (POST26)

此模块的主要功能是查看模型的特定点在所有时间步内的结果。利用它用户可以获得结果数据对时间 (或频率) 的关系曲线以及列表。例如，绘制时间-位移曲线或列表等。另外此模块也提供了许多曲线代数运算功能。

1.5.2 ANSYS8.1 文件格式

ANSYS 在分析过程中需要对文件进行读写操作，所有的文件都存放在用户选择的工作目录中，文件格式为 `jobname.ext`，其中 `jobname` 是用户在启动设置界面设定的工作文件名，`ext` 是由 ANSYS 定义的扩展名，用于区分文件的用途和类型，默认的工作文件名是 `file`。

图 1.49 为 1.4 节实例生成的文件列表。

名称 ▲	大小	类型	修改时间
plane.db	1,216 KB	ANSYS, Inc	2004-7-15 21:57
plane.dbb	1,216 KB	ANSYS, Inc	2004-7-15 21:37
plane.emat	128 KB	EMAT 文件	2004-7-13 20:11
plane.err	112 KB	ERR 文件	2004-7-15 21:57
plane.esav	64 KB	ESAV 文件	2004-7-13 20:11
plane.full	64 KB	FULL 文件	2004-7-13 20:11
plane.ldhi	3 KB	LDHI 文件	2004-7-12 10:19
plane.log	34 KB	文本文档	2004-7-15 21:57
plane.mntr	1 KB	MNTR 文件	2004-7-13 19:46
plane.opt	2 KB	OPT 文件	2004-7-15 21:37
plane.osav	64 KB	OSAV 文件	2004-7-12 10:19
plane.PVTS	1 KB	PVTS 文件	2004-7-13 19:46
plane.rdb	1,280 KB	RDB 文件	2004-7-12 10:19
plane.rst	128 KB	RST 文件	2004-7-13 20:11
scratch.hlp	0 KB	帮助文件	2004-7-15 21:55

图1.49 ANSYS的文件

由于在开始时，用户已经更改了工作文件名为 `plane`，所以工作目录中的文件大都是 `plane.ext` 的格式。表 1.1 描述了每个文件的内容：

表1.1 ANSYS文件内容简表

文件名	文件类型	内容
<code>plane.db</code>	二进制	数据库文件
<code>plane.dbb</code>	二进制	数据库备份文件（当非线性分析不正常终止时产生）
<code>plane.emat</code>	二进制	单元矩阵
<code>plane.err</code>	文本	错误或警告信息
<code>plane.esav</code>	二进制	单元存储数据（当非线性分析不能向上兼容时产生）
<code>plane.full</code>	二进制	装配的整体刚度和质量矩阵
<code>plane.ldhi</code>	文本	荷载步中荷载和边界条件
<code>plane.log</code>	文本	命令行输入历史记录
<code>plane.mntr</code>	二进制	监视文件
<code>plane.opt</code>	文本	优化数据
<code>plane.osav</code>	二进制	单元存储文件的备份
<code>plane.rdb</code>	二进制	第一荷载步第一子步起始时的数据状态
<code>plane.rst</code>	二进制	结构或耦合场分析得到的结果文件

还有一些不常见的文件格式，如果用户遇到可以参考 ANSYS 自带的帮助文档，对于初级用户，知道这些常见文件的意义已经足够了。

第二章 建立有限元模型

在对具体问题进行有限元分析时，首先要做的就是针对该问题建立适当的有限元模型。由节点和单元构成的有限元模型与结构系统的几何外型基本是一致的。有限元模型的建立可分为直接法和间接法，直接法为直接根据结构的几何外型建立节点和单元，因此直接法只适应于简单的结构系统。而间接法适应于节点及单元数目较多的复杂几何外型结构系统。该方法通过点、线、面、体积，先建立有限元模型，再进行实体网格划分，以完成有限元模型的建立。

本章主要从坐标系和工作平面这些基本概念开始，详细介绍节点和单元的定义方法，使读者尽快地掌握直接法构建有限元模型的基本思路。关于间接法（实体模型）有限元的建立的问题将在下一章中详细介绍。

2.1 坐标系与工作平面

在进行 ANSYS 有限元建模过程中，坐标系的选择和工作平面的使用是必不可少的。ANSYS 中常用到的坐标系主要有以下几种：

- 总体和局部坐标系（Global CS and Local CS）
- 活动坐标系（Active CS）
- 显示坐标系（Display CS）
- 节点坐标系（Nodal CS）
- 单元坐标系（Element CS）
- 结果坐标系（Results CS）

工作平面（Working Plane）是创建几何模型的参考(X,Y)平面，在前处理模块中用来辅助建模(几何模型或网格)。

对于初学者来讲，本节的内容不一定要全部掌握，但至少应该了解这些坐标系的基本概念以及它们之间的关系，以后操作中遇到不至于混乱就行了。

2.1.1 全局坐标系和局部坐标系

全局坐标系和局部坐标系用来定位几何体。当定义一个关键点或者节点时，默认情况下，其坐标系为全局笛卡尔坐标系。可是对于有些模型，利用其他坐标系可能更加方便。ANSYS 已经预定义了笛卡尔坐标系、柱坐标系和球坐标系三种全局坐标系，而且还允许用户根据自己的需要和习惯定义自己的坐标系，这就是局部坐标系。

1. 全局坐标系

全局坐标系被认为是一个绝对的参考系。空间任何一点通常可用笛卡尔坐标（Cartesian）、圆柱坐标（Cylinder）或球面坐标（Sphericity）来表示该点的坐标位置，不管哪种坐标系都需要三个参数来表示该点的正确位置。每一坐标系统都有确定的代号，它们可由坐标系号来识别：0 是笛卡尔坐标系、1 是柱坐标系、2 是球坐标系、5 是 Y 向柱坐标

系。上述的四个坐标系统又称为整体坐标系统，如图 2.1 所示。

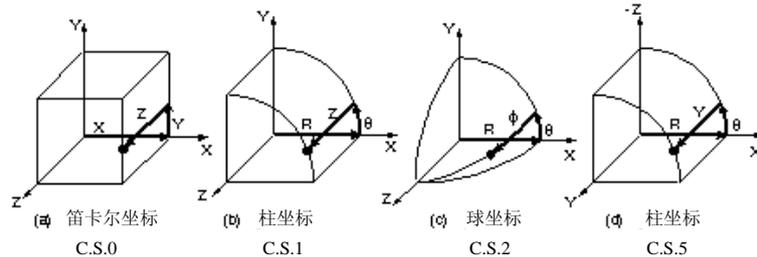


图2.1 全局坐标系

在 ANSYS 中，用户可以定义多个坐标系，但某一时刻只能有一个坐标系处于活动状态，这个坐标系称为活动坐标系。默认情况下，全局笛卡尔坐标系是处于活动状态的。如果要将活动坐标系改为其他的全局坐标系，可选择如下的菜单：**【Utility Menu】|【Workplane】|【Change active CS to】**，其子菜单如图 2.2 所示。

图 2.3 是在 ANSYS 中建立的一个圆台实体，圆台底面上显示的即为全局坐标系的坐标轴。圆台底面位于全局笛卡尔坐标系的 X-Y 平面上，Z 轴为其对称轴，底面半径 100，顶面半径 50，高 300。现在在圆台的顶面边缘与 X 轴成 60° 角的位置上建立一个关键点（如图 2.3 中的数字 9 的位置），若用笛卡尔坐标系显然不好表达，但用圆柱坐标系则非常方便，其圆柱坐标为 $(50, 60, 300)$ 。具体操作步骤如下：

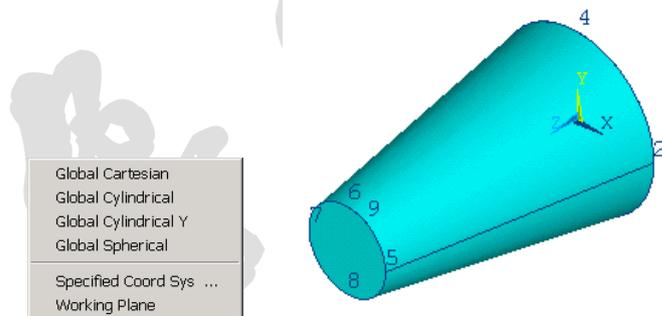


图2.2 改变活动坐标系菜单

图2.3 激活圆柱坐标系插入一个关键点

(1) 复制光盘目录“\ch02\ex1\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex1.db”。

(2) 单击 **【Utility Menu】|【Workplane】|【Change active CS to】|【Global Cylindrical】** 菜单，设置当前活动坐标系为全局柱坐标系。

(3) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS** 菜单，这时弹出 **【Create Keypoints in Active Coordinate System】** 对话框，如图 2.4 所示。

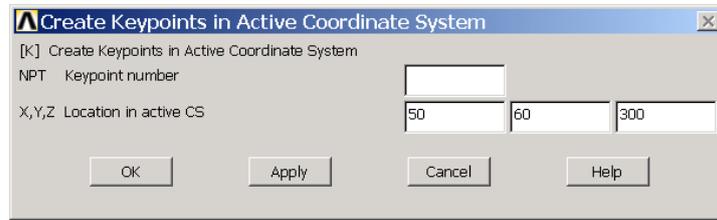


图2.4 用柱坐标系创建关键点

(4) 在【Location in active CS】中按圆柱坐标 (R, θ, Z) 的格式输入【50】、【60】和【300】，单击【OK】按钮，关键点 9 就创建完成了。

2. 局部坐标系

在某些情况下可通过辅助节点来定义局部坐标系。局部坐标系和全局坐标系一样，可以是笛卡尔坐标系 (C.S.0)、柱坐标系 (C.S.1) 和球坐标系 (C.S.2) 中的任何一种坐标系，还可以建立环形坐标系，如图 2.2 所示。它是用户在特定位置定义特定几何模型时，为了方便与准确而建立的局部区域的坐标系。

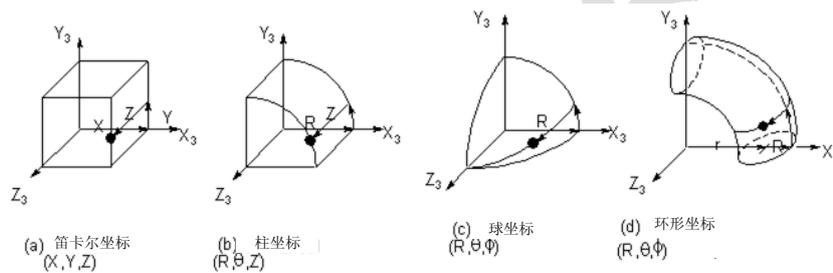


图2.5 局部坐标系

以图 2.3 所示的圆台为例，需要在圆台顶面建立一个局部柱坐标系，原点位于 8 号点处，X 方向沿全局笛卡尔坐标系的 Y 轴正向，如图 2.6 所示。具体操作步骤如下：

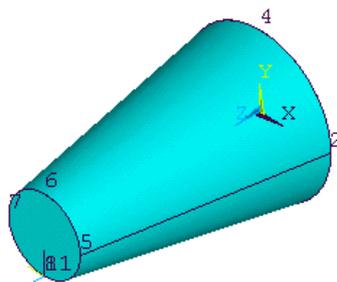


图2.6 建立的局部坐标系

- (1) 单击工具条上的 `RESUM_DB` 按钮，恢复数据库文件“ex1.db”。
- (2) 单击【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Local Coordinate Systems】|【Creat Local CS】|【By 3 Keypoints】菜单。
- (3) 接着弹出对象拾取对话框，用鼠标在图 2.3 所示的圆台顶面依次选择 8、6 和 7 点，

单击【OK】按钮。这样8号点就自动成为局部坐标系的原点。

(4) 弹出如图2.7所示的【Create CS By 3 KPs】对话框，在【Ref number of new coord sys】文本框中输入局部坐标系的标识号，本例使用默认的11即可。在【Type of coordinate system】下拉列表框中选择所采用的局部坐标系，本例中选择【Cartesian 0】（直角坐标系），并单击【OK】按钮确认。

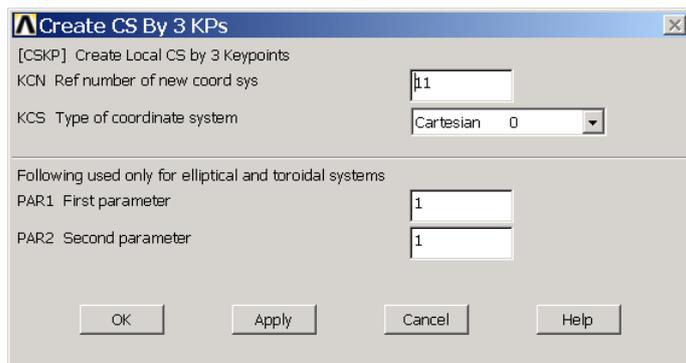


图2.7 创建局部坐标系对话框

这样就在8号关键点处生成了一个识别号为11的局部直角坐标系。如果要使用这个局部坐标系，就得把它设成当前的活动坐标系。操作如下：

(1) 单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Change active CS to】|【Specified Coord Sys】菜单，弹出如图2.8所示的对话框。

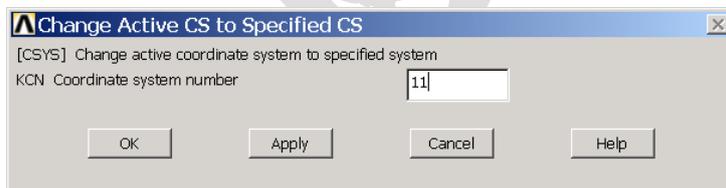


图2.8 激活局部坐标系

(2) 【Coordinate system number】文本框中输入局部坐标系的标识号11，并单击【OK】按钮即可。

说明：当用户定义了一个新的局部坐标系时，这个新的局部坐标系自动处于活动状态，当前的活动坐标系标识号可以在ANSYS的状态栏看到，如图2.9所示。在ANSYS程序运行的任何时候，用户都可以单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Change active CS to】|【Specified Coord Sys】菜单激活某个坐标系。



图2.9 状态栏提示

常用的局部坐标系操作还有：

- 全局笛卡尔坐标定义局部坐标系：【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Local Coordinate Systems】|【Creat Local CS】|【At Specified Loc】
- 通过已有节点定义局部坐标系：【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Local Coordinate

Systems】|【Creat Local CS】|【By 3 Nodes】

- 删除局部坐标系:【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Local Coordinate Systems】|【Delete Local CS】
- 查看所有的全局坐标系和局部坐标系:【Utility Menu】|【List】|【Other】|【Local Coord Sys】

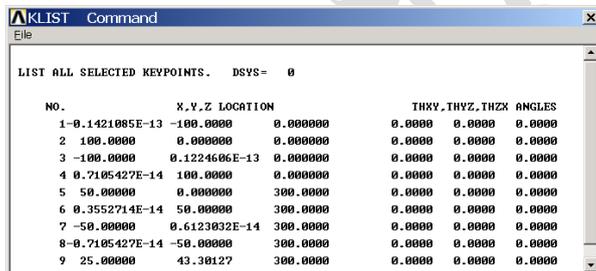
2.1.2 显示坐标系

显示坐标系是程序列表显示或者图形显示结果时所用的坐标系。在默认情况下,即使是在其他坐标系中定义的节点和关键点,其列表都显示它们的全局笛卡尔坐标。显示坐标系对列表圆柱和球节点坐标非常有用(例如,径向,周向坐标)。

再来看上一节中建立的圆台的例子,当在柱坐标系下生成了关键点 9 之后,如果想查看关键点 9 的位置坐标,单击【Utility Menu】|【List】|【Keypoints】|【Coordinates only】菜单,将弹出如图 2.10 所示的对话框。从图中可以看出,尽管用户是在总体柱坐标系下建立的关键点 9,ANSYS 列表显示的关键点 9 的坐标仍是全局笛卡尔坐标值。

为了查看方便,用户可以改变当前的显示坐标系,下面我们同样以上一节中建立的模型为例,操作如下:

(1) 单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Change Display CS to】|【Global CyLindrical】菜单,如图 2.11 所示。



NO.	X,Y,Z LOCATION	THXY,THYZ,THZX ANGLES
1	-0.1421085E-13 -100.0000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
2	100.0000 0.000000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
3	-100.0000 0.1224506E-13 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
4	0.7105427E-14 100.0000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
5	50.00000 0.000000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
6	0.3552714E-14 50.00000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
7	-50.00000 0.6123932E-14 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
8	-0.7105427E-14 -50.00000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
9	25.00000 43.30127 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000

图2.10 列出关键点的全局直角坐标

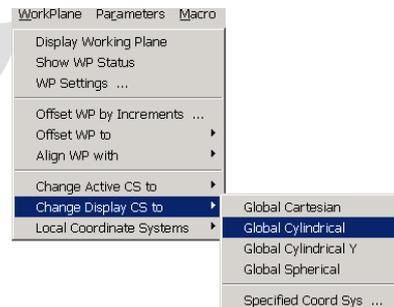
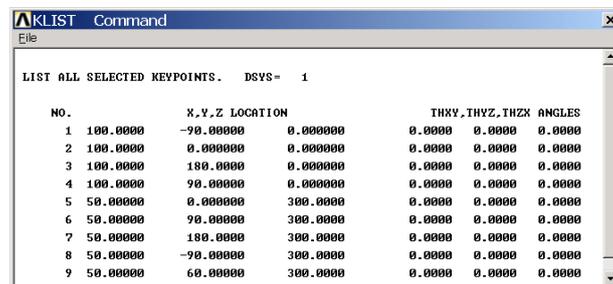


图2.11 改变显示坐标系

(2) 接着会弹出关键点坐标列表,如图 2.12 所示。



NO.	X,Y,Z LOCATION	THXY,THYZ,THZX ANGLES
1	100.0000 -90.00000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
2	100.0000 0.000000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
3	100.0000 180.0000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
4	100.0000 90.00000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000
5	50.00000 0.000000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
6	50.00000 90.00000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
7	50.00000 180.0000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
8	50.00000 -90.00000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000
9	50.00000 60.00000 300.0000	0.0000 0.0000 0.0000

图2.12 列出关键点的柱坐标

图 2.12 中显示的关键点坐标值均为全局柱坐标系下的坐标值,如果用户想切换到全局

笛卡尔坐标系下来显示，单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Change Display CS to】|【Global Cartesian】菜单即可。

注意：改变显示坐标系同样会影响图形显示。除非用户有特殊的需要，一般在以非笛卡尔坐标列表节点坐标之后将显示坐标系恢复到总体笛卡尔坐标系，以免出现混乱。

2.1.3 节点坐标系

每一个节点都有一个附着的坐标系，称为节点坐标系。全局和局部坐标系用于几何全的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。

默认情况下，节点坐标系总是笛卡尔坐标系，并与全局笛卡尔坐标系平行，与定义结点的活动坐标系无关，如图 2.13 所示。节点力和节点边界条件（约束）指的是节点坐标系的方向。

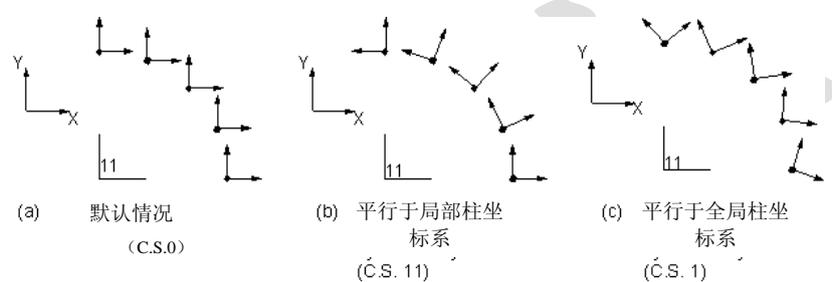


图2.13 节点坐标系

如果要按角度旋转一个节点的坐标系，单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> Rotate Node CS> By Angles 菜单，弹出对象拾取对话框，选择要旋转坐标系的节点后，单击【OK】按钮。接着弹出如图 2.14 所示的对话框，其中【THXY】、【THXZ】和【THZX】分别表示绕笛卡尔坐标的 Z 轴、X 轴和 Y 轴旋转的角度。

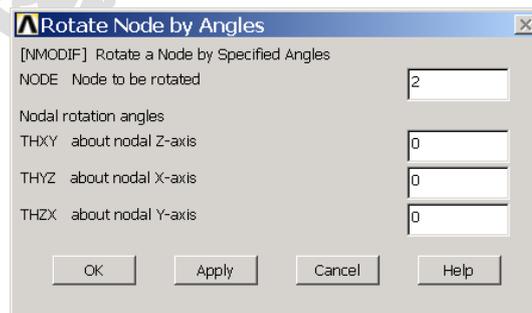


图2.14 按角度旋转节点坐标系

常用的节点坐标系操作还有：

- 将节点坐标系旋转到当前活动坐标系的方向：Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> Rotate Node CS> To Active CS
- 列出节点坐标系相对于全局笛卡尔坐标系的旋转角度：【Utility Menu】|【List】|【Nodes】

注意：时间历程后处理器/POST26 中的结果数据是在节点坐标系下表达的。而通用后处理器/POST1 中的结果是按结果坐标系进行表达的。

2.1.4 单元坐标系

每个单元都有它自己的单元坐标系，它主要用于规定正交材料特性的方向和面力结果（如应力和应变）的输出方向，对后处理也是很有用的（如提取梁和壳单元的膜力）。所有的单元坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则：

- 线单元的 X 轴通常从该单元的 I 节点指向 J 节点，如图 2.15 左所示。
- 壳单元的 X 轴通常也是从该单元的 I 节点指向 J 节点方向。Z 轴过 I 点且与壳面垂直，其正方向由单元的 I、J 和 K 节点按右手定则确定，Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴。如图 2.15 右所示。
- 二维和三维实体单元的单元坐标系总是平行于全局笛卡尔坐标系。

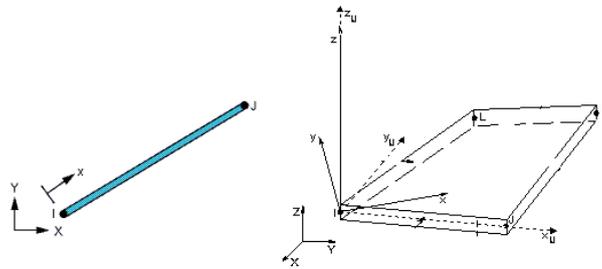


图2.15 线单元和壳单元的单元坐标系

并不是所有的单元都符合上面的规则，对于特定的单元坐标系的方向请读者参考 ANSYS 的帮助文档。

对于面单元或体单元而言，可用下列命令将单元坐标系方向调整到已定义的局部坐标系上：Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes

注意：有些单元可以利用关键字（KEYOPT）选项来修改单元坐标系的方向，如果既用了关键字命令又用了 ESYS 命令，则关键字命令的定义有效。

2.1.5 结果坐标系

结果坐标系用于显示计算的结果数据（如位移、梯度、应力和应变等）。结果坐标系默认平行于笛卡尔坐标系，这意味着缺省情况下，位移、应力和支座反力将按照总体笛卡尔在坐标系表达，无论节点和单元坐标系如何设定。

用户可以将活动的结果坐标系旋转到另一个坐标系（如全局柱坐标系或某个定义的局部坐标系），当用户对这些结果数据进行列表显示时，这些数据将按结果坐标系显示。改变结果坐标系的操作方法：Main Menu> General Postproc> Options for Output

注意：时间历程后处理器（POST26）中的结果总是以节点坐标系表达。

2.1.6 工作平面

尽管屏幕上的光标只表示一个点，但实际上它代表的是空间中垂直于屏幕的一条直线。为了能用光标拾取一个点，首先必须定义一个假想的平面，当该平面与光标所代表的垂线相交时，就能唯一地确定空间中的一个点。ANSYS 中这个假想的平面叫做工作平面(Working Plane)。从另一个角度讲，工作平面就如同一个绘画板，可按用户要求进行移动和旋转，工作平面可以不平行于屏幕，如图 2.16 所示。

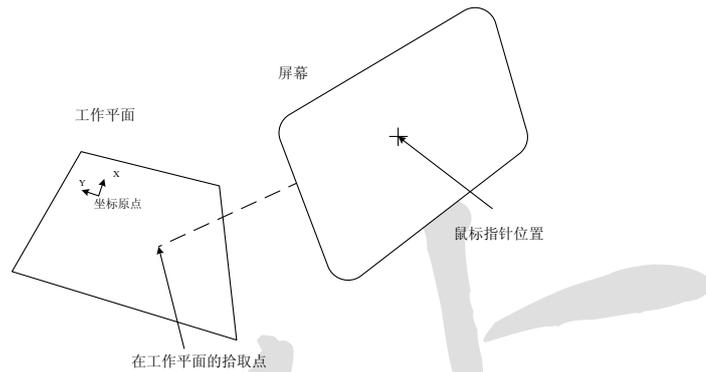


图2.16 工作平面示意图

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系、捕捉增量和栅格显示。同一时刻只能定义一个工作平面，工作平面独立于坐标系，可以随意的移去和旋转。进入 ANSYS 程序后，有一个默认的工作平面——全局笛卡尔坐标系的 X-Y 平面，工作平面的 X 轴和 Y 轴分别为全局笛卡尔坐标系的 X 轴和 Y 轴。工作平面的常用操作有：显示工作平面、移动工作平面、旋转工作平面、定义工作平面等。关于工作平面其它高级操作，请读者参考 ANSYS 自带的帮助文档。

1. 显示和移动工作平面

默认情况下，ANSYS 主界面上只显示全局笛卡尔坐标系，当单击【Utility Menu】|【Work Plane】|【Display Working Plane】菜单，在界面上将显示工作平面坐标系，它和全局笛卡尔坐标系重合，三个坐标轴分别为 WX、WY 和 WZ，如图 2.17 所示。

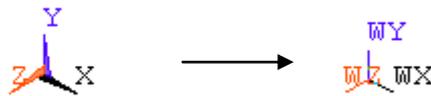


图2.17 显示工作平面

用户可以根据自己的需要把工作平面移动到想要的位置，假如想把工作平面原点移动到全局笛卡尔坐标系的 (10, 0, 0) 点，可以执行如下操作：

(1) 启动 ANSYS，单击【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Offset WP to】|【XYZ Locations】菜单，弹出如图 2.17 所示的对话框。

(2) 按图 2.18 在文本框中输入【10,0,0】，表示所要移动到的坐标点，并单击【OK】

按钮。这时用户可以看到，视图窗口中的全局坐标系和工作平面已经分离。

(3) 单击【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Offset WP to】|【Global Origin】菜单，可把工作平面还原到笛卡尔坐标系的原点。

其它常用的移动工作平面的操作还有：

- 将工作平面的原点移到某关键点位置

GUI: 【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Offset WP to】|【Keypoints】

- 将工作平面的原点移到某节点位置

GUI: 【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Offset WP to】|【Nodes】

说明：要获得工作平面状态（即位置、方向和增量），可单击【Utility Menu】|【List】|【Status】|【Working Plane】菜单。

2. 旋转和平移工作平面

ANSYS 中提供了一个专门的工作平面旋转和偏移的工具，单击【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Offset WP by Increments】菜单可以调出它，如图 2.19 所示。在【X,Y,Z Offsets】文本框中按格式输入平移增量，在【XY,YZ,ZX Angles】文本框中按格式输入旋转增量，然后单击【OK】按钮，即可实现工作平面的平移和旋转。例如：在【XY,YZ,ZX Angles】文本框中输入【90,0,0】，则工作平面将绕全局笛卡尔坐标系的 Z 轴旋转 90°。

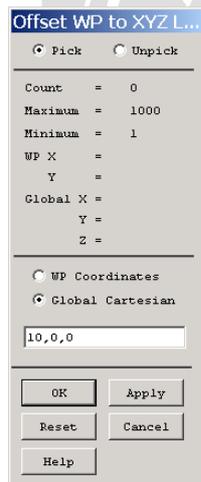


图2.18 移动工作平面到指定坐标点

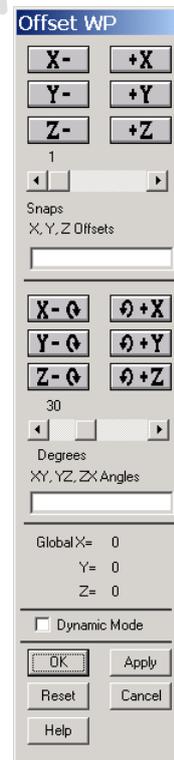


图2.19 工作平面旋转对话框

3. 定义工作平面

移动工作平面和定义工作平面的区别在于，前者通过平移或旋转将原来的工作平面变换到指定的位置或旋转某个角度，并不直接定义坐标轴的方向，而后者通过指定某些点位或直接依照已有的坐标系直接定义工作平面的原点和坐标轴方向。

如图 2.20 所示的正方形板，长和高均为 200，要以其中心为原点建立工作平面，工作平面的 X 轴沿中心指点关键点 2，可以通过三个关键点来定义工作平面，操作步骤如下：

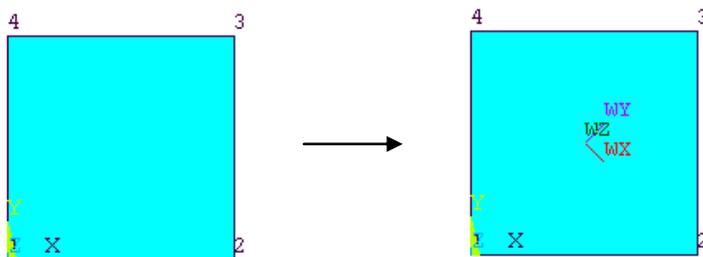


图2.20 定义工作平面

(1) 复制光盘目录“\ch02\ex2\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex2.db”。

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 菜单，输入关键点中心点的坐标 (100,100,0)，单击【OK】按钮，创建一个编号为 5 的关键点。

(3) 单击【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Keypoints】菜单，弹出图形拾取对话框，依次用鼠标选择关键点 5、2 和 3，然后单击【OK】按钮。此时，可以看到工作平面已经移到了中心点，如图 2.20 所示。

用户还可以使用下列方法定义一个新的工作平面：

- 三点定义一个工作平面：【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【XYZ Locations】
- 三节点定义一个工作平面：【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Nodes】
- 通过线上一点的垂直平面定义工作平面：【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Plane Normal to Line】
- 通过现有坐标系的 X-Y 平面定义工作平面：
 - 【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Active Coord Sys】
 - 【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Global Cartesian】
 - 【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Align WP with】|【Specified Coord Sys】

2.2 节点定义

有限元模型是由节点和单元相连接而成的，所以定义节点就是为结构中一个点指定一个编号和坐标位置。用直接法建模时，必须先生成单元的节点才能定义单元。ANSYS 中对节点的相关操作主要包括：

- 生成节点
- 节点的复制与填充

- 查看节点
- 删除节点
- 移动节点

本节将结合这些常用的节点操作生成如图 2.21 所示的 7 个节点。ANSYS 中还提供了许多其它高级的节点操作方法（如计算节点间距离、读写节点数据文本文件等），读者可以参考 ANSYS 自带的帮助文档。

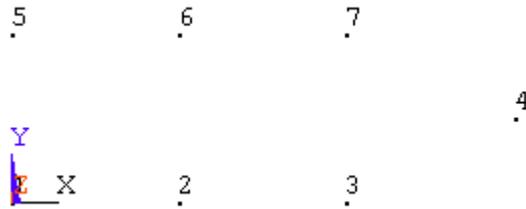


图2.21 节点的定义

2.2.1 生成节点

用户可以按以下步骤在当前活动坐标系中生成节点：

(1) 启动 ANSYS，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS 菜单，弹出如图 2.22 所示的【Create Nodes in Active Coordinate System】对话框。

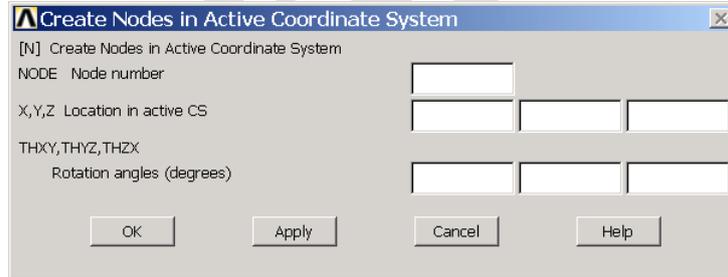


图2.22 生成节点

(2) 在【Node number】文本框中输入节点号【1】，在【Location in active CS】文本框中分别输入节点 X、Y 和 Z 坐标 (0,0,0) 或留空，单击【Apply】按钮应用，即可生成所要的节点 1。

(3) 重复步骤 (2) 的操作，定义节点 4 的坐标为 (30,0,0)，然后单击【OK】按钮。至此我们生成了两个节点：节点 1 和节点 4。如图 2.23 所示。



图2.23 节点1和节点4

说明：若已经知道了节点坐标，直接用命令 N 生成节点有时会更加方便。对于本例，可以直接在命令行窗口  输入以下命令：

```
N, , 0, 0, 0
N, 4, 30, 0, 0
```

ANSYS 中常用的生成节点的方法还有：

- 在工作平面里定义单个节点：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>On Working Plane
- 在已有的关键点处定义节点：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>On Keypoint

2.2.2 节点填充及复制

下面接着用节点的填充和复制功能来生成其它节点。操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>Fill between Nds 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标选择节点 1 和节点 4，然后单击【OK】按钮。

(2) 接着弹出如图 2.24 所示的对话框，保持默认设置，单击【OK】按钮。

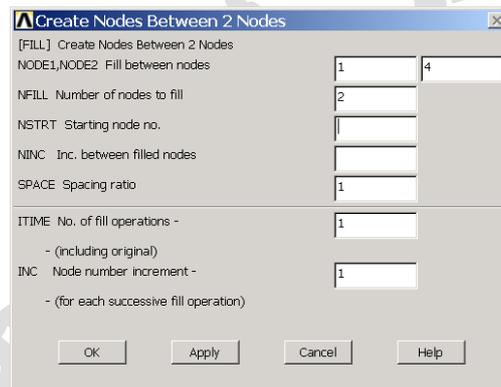


图2.24 节点填充对话框

(3) 此时可以看到图形视窗中已经在节点 1 和节点 4 之间自动生成了节点 2 和节点 3，而且等间距排列。如图 2.25 所示。



图2.25 填充生成的节点

说明：节点填充可以是等间距的也可以是不等间距的，中间的间隔由图 2.24 中的【Spacing ratio】文本框中的数字控制，默认是等间距的。

(4) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标选择所有节点，然后单击【OK】按钮。

(5) 接着弹出如图 2.26 所示的【Copy nodes】对话框。在【Total number of copies】文本框中输入【2】，在【Y-offset in active CS】文本框中输入【10】，然后单击【OK】按钮确认。

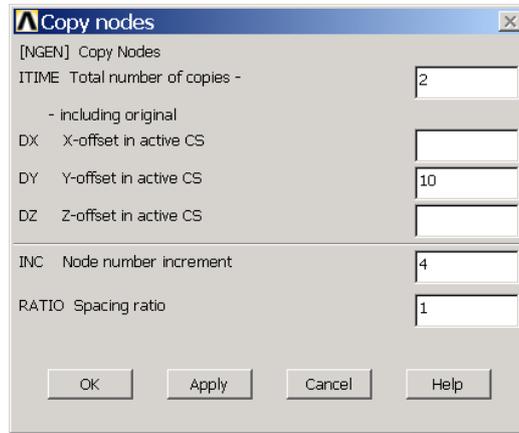


图2.26 复制节点对话框

(6) 此时可以看到图形视窗中已经自动生成了节点 5 到节点 8，总共 8 个节点，如图 2.27 所示。

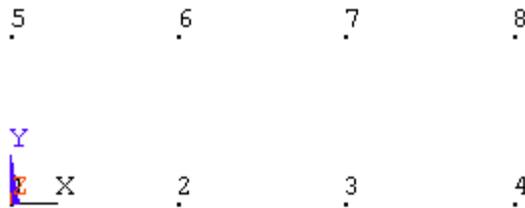


图2.27 复制生成的节点

2.2.3 查看节点

ANSYS 中节点的查看主要有两种方式：列表查看和图形查看。

1. 列表查看

列表查看将现有笛卡尔坐标系下节点的资料显示于一个新窗口中，使用者可检查建立的坐标点是否正确，并可将资料保存为一个文件。如欲在其它坐标系统下显示节点资料，可以先改变显示坐标系，例如圆柱坐标系统，执行命令 `DSYS,1`。操作方法：

- 【Utility Menu】|【List】|【Nodes】
- 【Utility Menu】|【List】|【Picked Entities】|【Nodes】

对于本节中的例子，单击【Utility Menu】|【List】|【Nodes】菜单后，弹出如图 2.28 所示的对话框，选择【Coordinates only】并单击【OK】按钮。

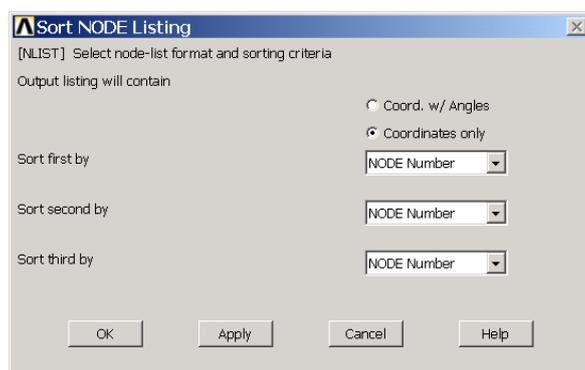


图2.28 查看节点列表选项

接着弹出列表查看结果如图 2.29 所示。

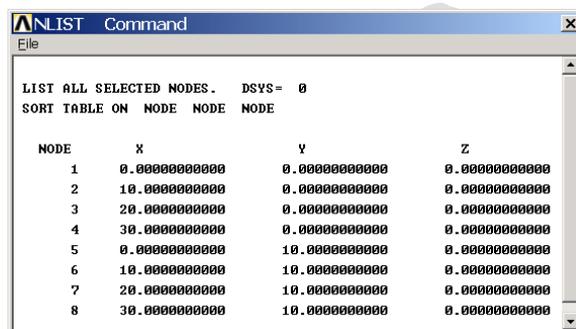


图2.29 列表查看节点

2. 图形查看

图形查看是将现有笛卡尔坐标系下节点显示在视图窗口中，以供使用者参考及查看模型的建立。模型的显示为软件的重要功能之一，以检查建立的对象是否正确。有限元模型的建立过程中，经常会检查各个对象的正确性及相关位置，包含对象视角、对象号码等，所以图形显示为有限元模型建立过程中不可缺少的步骤。用户可以单击【Utility Menu】|【Plot】|【Nodes】菜单，显示节点。无论在什么时候，如要用户想显示节点编号，请执行以下操作：

(1) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering...】菜单，弹出如图 2.30 所示的对话框。

(2) 单击【Node numbers】的【off】标签为【On】，并确认【Replot upon OK/Apply?】下拉列表框选中【Replot】，单击【OK】按钮。即可在视图窗口看到节点的编号。

说明：以上操作也可显示关键点、线、面、体以及单元的编号，只需在图 2.30 的对话框中的相应的对象后面打勾就行了。本书后面章节中所遇到此种操作不再详述。

2.2.4 删除节点

对于本节开始提到的例子，节点 8 显然是不需要的，用删除节点命令将其删除即可，操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Delete> Nodes 菜单，弹出如图 2.31 所示的图形拾取对话框。

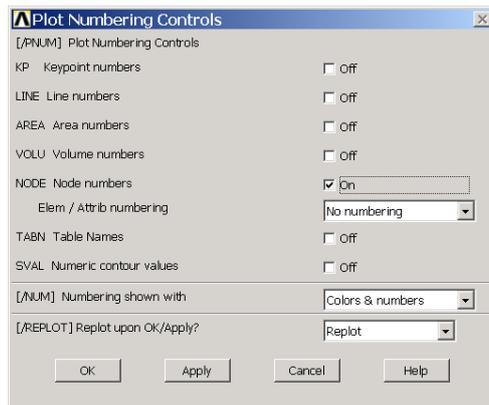


图2.30 图形对象编号显示控制

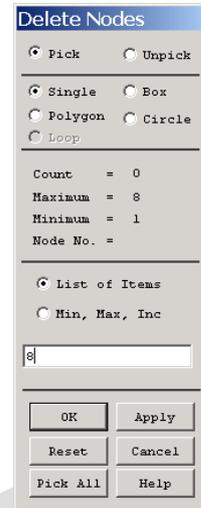


图2.31 拾取要删除的节点

(2) 在文本框中输入节点号【8】，或者用鼠标在视图窗口中选择节点 8，然后单击【OK】按钮确认，此时节点 8 已经从模型中删除了，如图 2.32 所示。

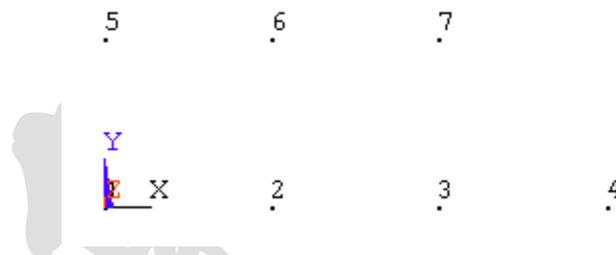


图2.32 删除8号结点

注意：删除节点后，定义在节点上的任何边界条件（如位移、力等）及任何耦合或约束方程也将被删除。

2.2.5 移动节点

下面向上移动 4 号节点到适当的位置，操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Nodes>Set of Nodes 菜单，弹出如图 2.33 所示的图形拾取对话框。

(2) 在文本框中输入节点号【4】，或者用鼠标选择图形视窗中的节点 4，然后单击【OK】按钮。接着弹出如图 2.34 所示的【Move Set of Nodes】对话框。

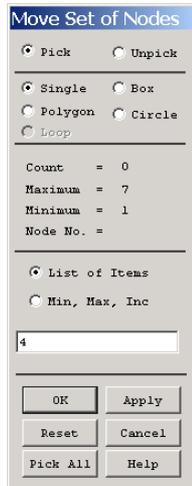


图2.33 拾取要移动的节点

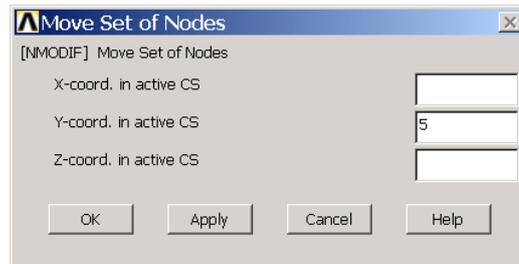


图2.34 节点移动设置

(3) 在【Y-coord in active CS】文本框中输入节点在当然活动坐标系中的 Y 轴坐标值【5】，单击【OK】确认。至此，形成的节点模型即如图 2.21 所示。

如果要移动一个节点到坐标系表面的一个交点，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling > Move / Modify>Nodes>To Intersect 菜单即可。

2.3 单元定义

当节点定义完成后，必须将结构按照节点连接成单元，并完成其有限元模型。单元选择正确与否，将决定其最后的分析结果。

ANSYS 提供了 120 多种不同性质与类别的元素，每一个元素都有其固定的编号，例如 Link1 是第 1 号单元、Solid45 是第 45 号元素。每个单元前的名称可判断该元素适用范围及其形状，基本上单元类别可分为 1-D 线元、2-D 平面元素及 3-D 立体元素。1-D 线单元由两点连接而成，2-D 单元由三点连成三角形或四点连成四边形，3-D 单元可由八点连接成六面体、四点连接成角锥体或六点连接成三角柱体。每个单元的用法在 ANSYS 的帮助文档中都有详细的说明。

上一节已经提到，定义一个单元之前必须已经定义了该单元所需的最少节点，而且还要先给单元指定合适的单元属性（实常数和材料特性）。因此，在 ANSYS 中单元的定义一般可分为以下四个步骤：

- 定义单元类型
- 定义实常数
- 定义材料特性
- 生成单元

本节仍结合上节中生成的节点模型，来详细讲解单元的定义过程。这里使用 Shell63 单元，最后生成的单元如图 2.35 所示。

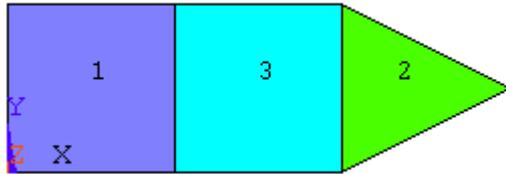


图2.35 单元的定义

2.3.1 定义单元类型

单元类型 (Element Type) 为结构系统中用到的单元类型种类, 例如桌子可由桌面平面单元各桌脚梁单元构成, 故有两个单元类型。定义单元类型就是从 ANSYS 的单元库中选择某个单元, 并定义该结构分析所使用的单元号码。现为上节中定义的节点定义单元类型, 其操作步骤如下:

(1) 复制光盘目录 “\ch02\ex3\” 中的文件到工作目录, 启动 ANSYS, 单击工具栏上的  按钮打开数据库文件 “ex3.db”。

说明: 用户也可以接着上节中生成的模型进行操作。

(2) 单击 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 菜单, 弹出如图 2.36 所示的对话框。

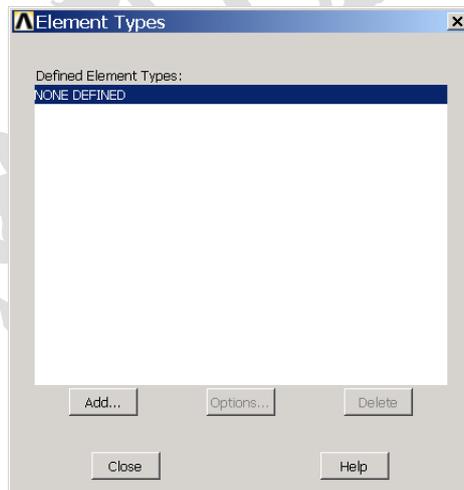


图2.36 单元类型对话框

(3) 单击【Add...】按钮, 弹出如图 2.37 所示的对话框。

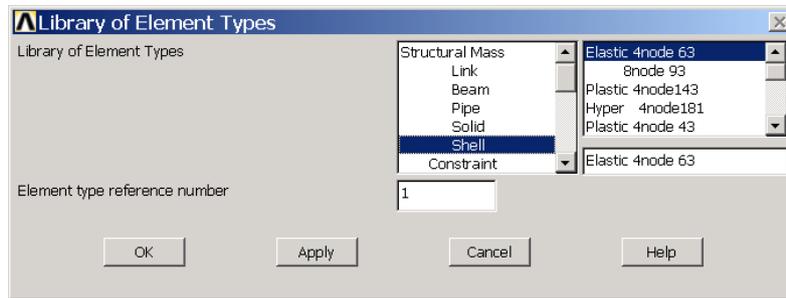


图2.37 选择单元类型

(4) 在如图 2.37 所示的对话框左侧的列表中选择【Shell】，在右侧的列表框中选择【Elastic 4node 63】，单击【OK】按钮确认。

说明：图 2.36 所示的对话框左侧列表框中显示的是单元的分类，右侧列表框为单元的特性和编号，选择单元时应该先明确自己要定义的单元类型，如此例中的 Shell，然后就很容易从右边的列表框中找到合适的单元了。

(5) 再次回到单元类型对话框，单击【Close】按钮关闭即可。这样即设置了一个 Shell63 的单元类型。

2.3.2 定义实常数

所谓“实常数”，是指某一单元的补充几何特征，如梁单元的面积、壳单元的厚度等。所带的参数必须与单元表的顺序一致。

对于本例中的定义的 Shell63 单元，主要是定义 Shell63 单元的厚度，操作如下：

(1) 单击 Main Menu > Preprocessor > Real Constants 菜单，弹出如图 2.38 所示的对话框。

(2) 单击【Add...】按钮，弹出如图 2.39 所示的对话框，选中【Type 1 SHELL63】，单击【OK】按钮。

(3) 接着弹出如图 2.40 所示的对话框，在【Shell thickness at node I TK(I)】至【at node L TK(L)】的 4 个文本框中都输入【5】，表示壳单元的厚度在每个节点处均为 5（也可只在第一个文本框中输入【5】，其它留空，默认情况取为等厚），然后单击【OK】按钮。



图2.38 设置实常数



图2.39 选择Shell63单元

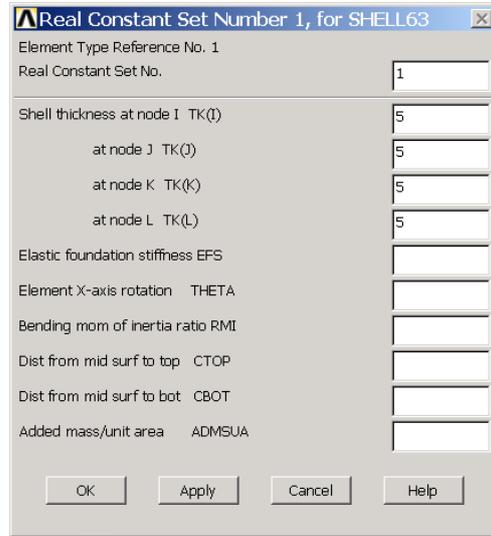


图2.40 设置Shell63单元的实常数

注意：不是所有单元都需要实常数的定义，而且不同的单元通常有不同的常数与之对应，具体一种单元应该定义什么样的实常数，请查阅 ANSYS 自带的帮助文档。

2.3.3 定义材料特性

定义材料的特性（Material Property），就是定义结构的一些物理性质，例如弹性模量、密度、泊松比、剪切模数、热膨胀系数等。何种单元具备何种属性在 ANSYS 帮助文档的单元属性表中均有说明。本例的操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 菜单，弹出如图 2.41 所示的【Define Material Model Behavior】对话框。

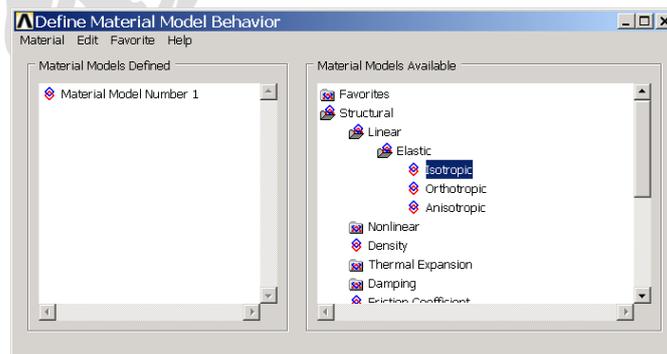


图2.41 定义材料特性

(2) 依次打开右边列表框中的【Structural】|【Linear】|【Elastic】|【Isotropic】菜单，表示将材料属性设置为各向同性的线弹性材料，最后双击【Isotropic】菜单。

(3) 接着弹出如图 2.42 所示的【Linear Isotropic Properties for Material Number 1】对话框，在【EX】文本框中输入【200E6】，表示将材料的弹性模量设为 200E6；在【PRXY】文本框中输入【0.3】，表示将材料的泊松比设置为 0.3，然后单击【OK】按钮确认。

(4) 再次回到定义材料特性对话框，单击 **X** 按钮关闭即可。

对于非线性材料特性的定义，需要激活一个材料特性表，本书将在以后的章节中详细介绍。

2.3.4 生成单元

一旦定义了必要的节点并设置好了材料特性，就可以定义单元了。

可以通过确定的单元节点定义单元，这时必须输入的节点数和节点输入顺序由单元类型决定。节点输入顺序决定了单元的法向方向。例如，二维梁单元 **Beam3** 要求两个节点 (I、J)，三维块单元 **Solid45** 要注 8 个节点 (第一个面 I、J、K、L 节点，对面的 M、N、O、P 节点)。

生成单元时，一定要确认单元类型属性指针、单元实常数属性指针、单元材料属性指针以及单元坐标系属性指针设置正确。用户可以单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes** 菜单来设置这些指针。

当用户只定义了一种单元类型、实常数和材料属性时，程序默认将这些单一的属性付给待定义的全部单元，如本节中的例子，当单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes** 菜单时，将弹出如图 2.43 所示的对话框。

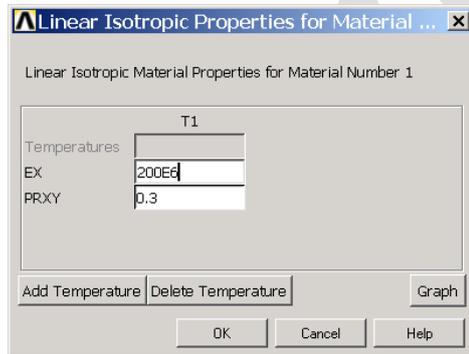


图2.42 设置线弹性材料相关属性

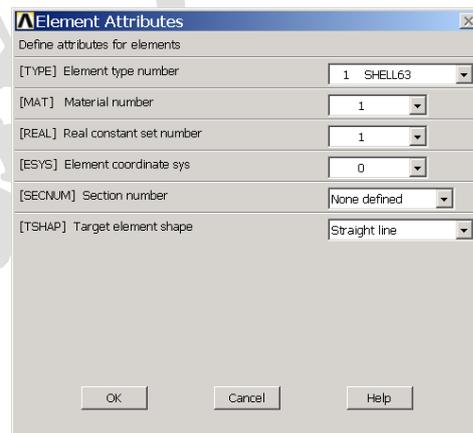


图2.43 指定单元各项属性指针

从图 2.43 中可以看出，ANSYS 已经默认为待定义的单元赋予了各项单元属性。接下来我们只要生成单元就行了，具体操作步骤如下：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes** 菜单，弹出图形拾取对话框。

(2) 用鼠标在视图窗口中依次选择节点 1、2、6 和 5，然后单击 **【Apply】** 按钮即生成了单元 1；再次用鼠标在视图窗口中依次选择节点 3、4 和 7，然后单击 **【OK】** 按钮，即定生成单元 2。如图 2.44 所示。



图2.44 选择节点定义单元

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>Auto Numbered 菜单，弹出图形拾取对话框。

(4) 用鼠标在视图窗口中选择单元 1，然后单击【OK】按钮，接着弹出如图 2.45 所示的对话框。

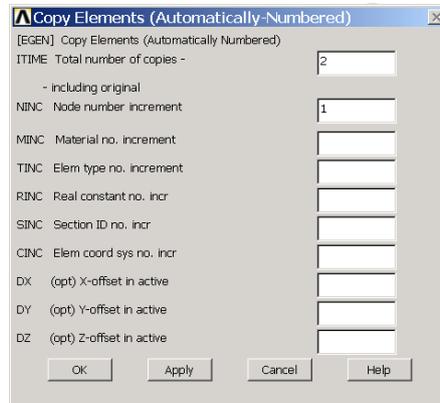


图2.45 复制单元对话框

(5) 保持默认的参数不变，单击【OK】按钮，则在单元 1 和单元 2 的中间复制了一个单元 3，它具有单元 1 同样的各种属性。

这时所有的单元已经生成完毕，但是没有像图 2.34 那样显示了单元的编号，如想查看单元编号，用户只需单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering...】菜单，弹出如图 2.46 所示的对话框。在【Elem/Attrib membering】下拉列表中选择【Element numbers】选项，并确认【Replot upon OK/Apply】下拉列表中选中【Replot】，单击【OK】按钮即可。

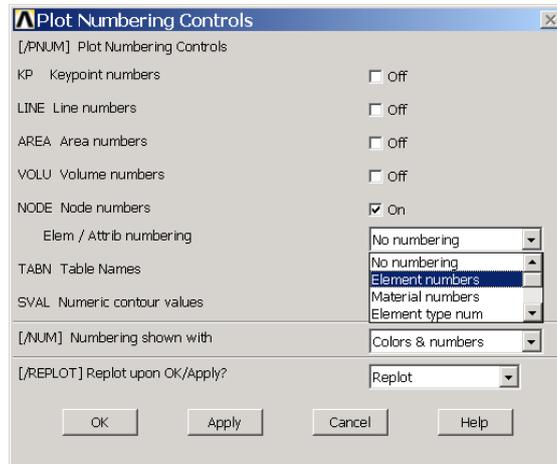


图2.46 显示单元编号

和节点的操作类似，ANSYS 中也提供了单元的列表查看、图形显示和删除功能，相应的 GUI 操作路径为：

- 列表查看单元：Utility Menu>List>Elements>Attributes Only
- 图开显示单元：Utility Menu>Plot>Elements
- 删除单元：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Elements

另外，ANSYS 还提供一些特殊的生成单元的方法，如映像生成单元、手工编号生成单元等。由于不常用，本书不再讲述。

第三章 实体模型的建立

在上一章里已介绍了有限元建模的直接法，但该方法对复杂的结构，不但费时而且容易出错。使用间接法建立实体模型可以很大程序地减少工作量。和一般的 CAD 软件一样，ANSYS 中的实体也是用点、线、面和体组合而成。只是 ANSYS 中的实体操作功能不如某些专业的 CAD 系统方便罢了，但利用它完全可以建立用户想得到的模型。

本章从实体模型的基本概念讲起，详细讲述了如何利用 ANSYS 的实体建模功能建立问题的几何模型。包括：自底向上建模、自顶向下建模、布尔运算、编辑图元和运用组件和部件。对于几何模型建立后的网格划分问题，将在下一章中详细讨论。

3.1 实体模型概述

实体模型是由点、线、面和体组合而成的，这些基本的点、线、面和体在 ANSYS 中通常称为图元。直接生成实体模型的方法主要有自底向上和自顶向下两种。

实体模型几何图形定义之后，可以由边界来决定网格，即每一线段要分成几个单元或单元的尺寸是多大。定义了每边单元数目或尺寸大小之后，ANSYS 程序即能自动产生网格，即自动产生节点和单元，并同时完成有限元模型。

下面简单介绍一下利用实体模型快速得到有限元模型的思路。

1. 自底向上建模

有限元模型的顶点在 ANSYS 中通常称为关键点 (Keypoint)，关键点是实体模型中最低级的图元。自底向上建立实体模型时，首先要定义关键点，再利用这些已有的关键点定义较高级的图元 (线、面或体)，这样由点到线，由线到面，由面到体，由低级到高级。如图 3.1 所示。

2. 自顶向下建模

和自底向上建模方式相反，ANSYS 允许用户通过汇集线、面、体等几何体的方法构造模型。当用户直接建立一个体时，ANSYS 会自动生成所有从属于该体的低级图元。这种一开始就从较高级图元开始建模的方法就叫做自顶向下建模，如图 3.2 所示。

当然，用户也可以根据自己的需要和习惯结合自底向上和自顶向下两种建模方法，需要注意的是，自底向上建模是在活动坐标系上定义的，而自顶向下建模是在工作平面内定义的。

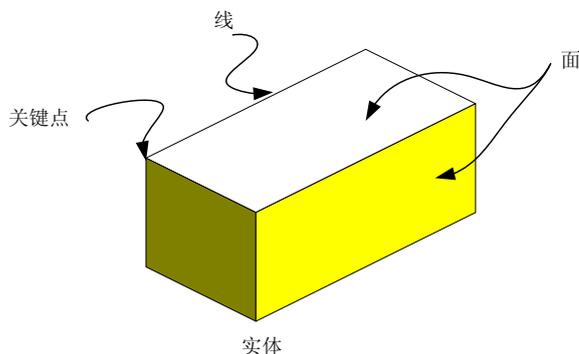


图3.1 自底向上建模

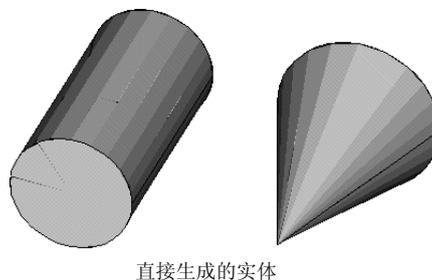


图3.2 自顶向下建模

3. 使用布尔运算

不是所有遇到的实体都能够通过 ANSYS 的实体工具直接生成，对于有些几何特征复杂的实体，用户可以借助强大的布尔运算操作来完成。

用户可以使用求交、相减或其他布尔运算，直接用较高级的图元生成复杂的形体。布尔运算对于自底向上或者自顶向下的方法生成的图元均有效。图 3.3 即是通过布尔运算操作得到的复杂几何体。

4. 移动和复制实体模型

一个复杂的面或体在模型中重复出现时，用户可以利用 ANSYS 的移动和复制功能快速实现。而且，在方便的位置生成几何体，然后将其移动到所需之处，这样往往比直接改变工作平面生成所需的体更为方便。图 3.4 显示了复制得到的图元。

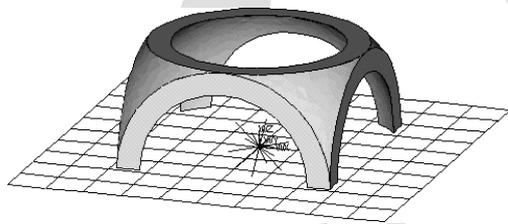


图3.3 使用布尔运算生成的体

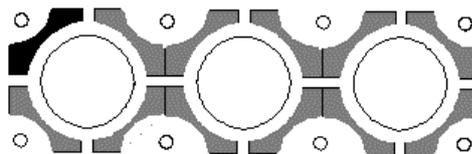


图3.4 复制一个面

3.2 自底向上建模

自底向上建模的思路是：由建立最低图元的点到最高图元的体积，即建立点，再由点连成线，然后由线组合成面，最后由面积组合建立体。

3.2.1 定义关键点

关键点是指在绘图区的一个几何点，它本身不具有物理属性。实体模型建立时，关键点是最小的图元对象，关键点即为结构中一个点的坐标，点与点连接成线也可直接组合成面积及体积。关键点的建立按实体模型的需要而设定，但有时会建立些辅助点以帮助其它

命令的执行，如圆弧的建立。在 ANSYS 中定义关键点方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用方法：

1. 在活动坐标系中定义关键点

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> In Active CS** 菜单，弹出如图 3.5 所示的【Create Keypoints in Active Coordinate System】对话框。以当前激活坐标系为参照系输入关键点的坐标，如：(2,0,0)，单击【OK】按钮，则 1 号关键点被创建。

2. 在工作平面中定义关键点

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> On Working Plane** 菜单，弹出如图 3.6 所示的【Create KPs on WP】对话框。此时可直接在视图窗口中单击，即可定义关键点。如果想准确定位关键点的位置，也可以在图 3.6 所示的对话框中选择【WP Coordinates】，然后在文本框中输入关键点在工作平面上的坐标即可，如 (0,5)，然后单击【OK】按钮，则 2 号关键点被创建。

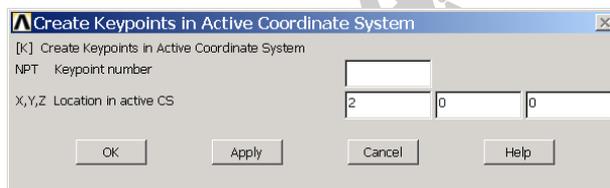


图3.5 在活动坐标系中定义关键点

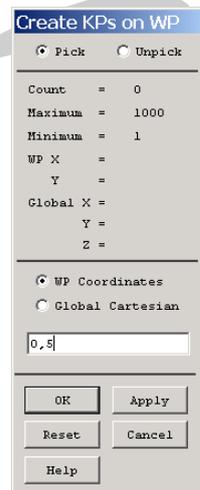


图3.6 在工作平面上定义关键点

3. 在已知线上给定位置定义关键点

(1) 以上已经定义了两个关键点，把这两个关键点连起来就生成了线。用户可以直接在输入窗口中输入以下命令：**L,1,2**。关于线定义的 GUI 操作，将在下一小节中详细介绍。

(2) 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> On Line** 菜单，弹出图形拾取对话框。用鼠标在视图窗口中单击选中刚才生成的线，然后单击【OK】按钮。接着弹出如图 3.7 所示的对话框，此时在线上任一点单击鼠标，即可在单击的位置生成一个关键点。这个关键点的编号为 3。

4. 在两关键点间填充关键点

接着上面的操作，单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> Fill between KPs** 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中依次选择关键点 1 和 3，然后单击【OK】按钮，接着弹出如图 3.8 所示【Create KP by Filling between KPs】的对话框。



图3.7 在线上定义关键点

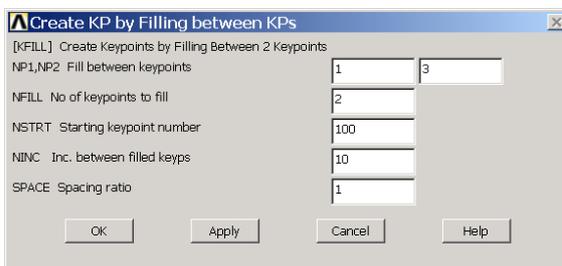


图3.8 填充关键点

在【Create KP by Filling between KPs】对话框中，【No of keypoints to fill】文本框中输入【2】，表示要填充的关键点数量；【Starting keypoint number】文本框中输入【100】，表示要填充关键点的起始编号；【Inc. between filled keys】文本框中输入【10】，表示要填充关键点编号的增量；【Spacing ratio】中输入1，表示关键点间隔的比率，应为0~1之间的一个数。单击【OK】按钮，即在关键点1和3之间填充了两个关键点100和110。

5. 由三点定义的圆弧的中心生成一个关键点

能过三点定义的圆弧中心生成关键点，要求三个已知的关键点不在同一条线上，否则会弹出如图3.9所示的对话框。为此，可再按以上介绍的方法在笛卡尔坐标系的原点创建一个关键点4，或直接在输入窗口输入以下命令：K,4。

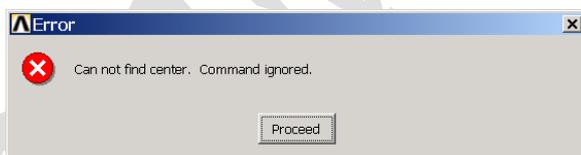


图3.9 三点共线时的错误提示

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> KP at Center>3 keypoints 菜单，然后弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中依次选择关键点4、100和110，然后单击【OK】按钮确认。这时将在关键点4、100和110所在圆弧的中心处生成新的关键点5。最后生成的关键点如图3.10所示。

注意：此操作只能在笛卡尔坐标系下使用。

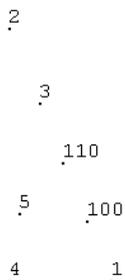


图3.10 关键点的定义

ANSYS 还提供了一些其它生成关键点的方法，读者可自己练习操作：

- 在已有两个关键点之间生成关键点：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>KP between KPs。
- 在已有节点处定义关键点：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Node。

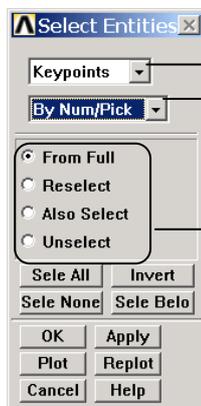
3.2.2 选择、查看和删除关键点

1. 选择关键点

单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出如图 3.11 所示的实体选择对话框。在选择对象下拉列表框中选择【Keypoints】，在选择方式的下拉列表框中选择【By Num/Pick】，在选择集操作框中选择【From full】，单击【OK】按钮，弹出图形拾取对话框，用鼠标在视图窗口中拾取要选择的关键点即可。

下面介绍一下实体选择对话框中一些选项的功能：

- 选择对象可以是节点（Nodes）、单元（Elements）、体（Volumes）、面（Areas）、线（Lines）和关键点（Keypoints）。如图 3.12 所示。
- 选择方式主要有：【By Num/Pick】（通过编号或鼠标拾取）、【Attached to】（按关联方式选取）、【By Location】（按位置选取）和【By Attributes】（按属性进行选取）等。如图 3.13 所示。



选择对象
选择方式

选择集操作

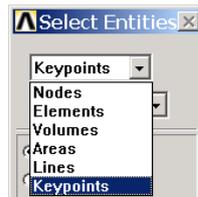


图3.11 实体选择对话框

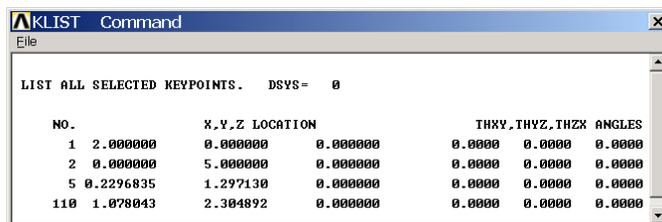
图3.12 选择对象

图3.13 选择方式

- 选择集操作的方式有：【From Full】（从全体集中选取）、【Reselect】（在当前选择集中再次选取）、【Also Select】（选取对象附加到当前选择集中）和【Unselect】（选择的对象将从当前选择集中移除）。

2. 查看关键点

选择一部分关键点后，以后的所有操作都是对当前的选择集进行操作，单击【Utility Menu】|【List】|【Keypoints】|【Coordinates only】菜单，将列表显示选择集中的关键点信息（只有坐标信息），如图 3.14 所示。



NO.	X,Y,Z LOCATION			THXV,THYZ,THZX ANGLES		
1	2.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.000000	5.000000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2296835	1.297130	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000
110	1.078043	2.304892	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000

图3.14 列表查看关键点

要图形显示关键点，单击【Utility Menu】|【Plot】|【Keypoints】|【Keypoints】菜单即可。要显示关键点的编号，单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering】菜单，按上一章介绍的方法把关键点的编号打开即可，或直接输入命令：/PNUM,KP,1。

3. 删除关键点

单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Keypoints 菜单，将弹出如图 3.15 所示的图形拾取对话框。选择适当的拾取方式，用鼠标在图形视窗中选择待删除的关键点即可。

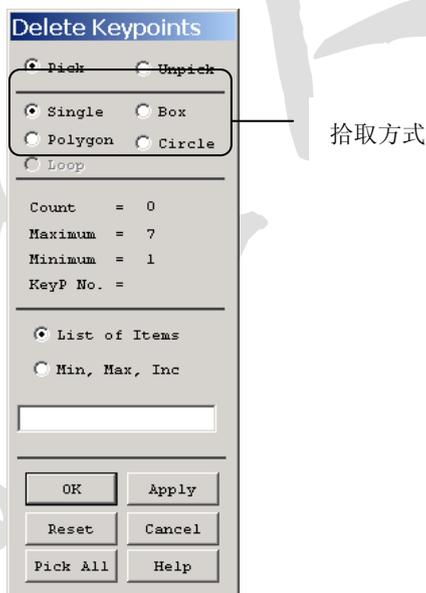


图3.15 拾取待删除的关键点

几种拾取方式说明：【Single】表示逐个选择；【Box】表示矩形区域框选；【Polyon】表示多边形框选；【Circle】表示圆形框选。

3.2.3 定义线

连接两个或多个关键点即成一个线图元。在 ANSYS 中，线是一个向量，不仅有长度，还有方向。线可以是直线，也可以是弧线。建立实体模型时，线为面或体的边界，由点与点连接而成，构成不同种类的线段，例如直线、曲线、圆、圆弧等，也可直接由建立面积或体积而产生。线的建立与坐标系统有关，直角坐标系为直线，圆柱坐标下是曲线。

在 ANSYS 中定义线的方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用方法：

1. 在指定两个关键点之间生成直线或三次曲线

(1) 按上一小节讲的关键点的定义方法，先在工作平面内定义任意两个关键点 1 和 2。

(2) 单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord** 菜单，弹出如图形拾取对话框，然后用鼠标依次在图形视窗中选择关键点 1 和 2 即生成一条线 L1。

以上操作是在默认的全局笛卡尔坐标系下完成的，下面改在柱坐标系下进行同样的操作：

(1) 单击 **【Utility Menu】|【WorkPlane】|【Change Active CS to】|【Global Cylindrical】** 菜单，改变当前活动坐标系为柱坐标系。

(2) 单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord** 菜单，弹出如图形拾取对话框，然后用鼠标依次在图形视窗中选择关键点 1 和 2，此时又生成了一条弧线 L2。如图 3.16 所示。

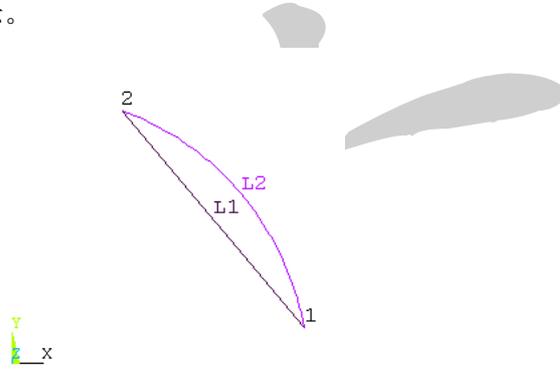


图3.16 指定两个关键点定义线

ANSYS 在各种坐标系下对于“直线”的定义是不同的，在笛卡尔直角坐标系中，程序需要保证在线条方向上， dX/dL 、 dY/dL 和 dZ/dL 三个量需要保持不变；在柱坐标系中，同样要保持 dR/dL 、 $d\theta/dL$ 和 dZ/dL ，这时 ANSYS 将生成一条螺旋线或弧线（如图 3.16），这被认为是柱坐标系下的“直线”。

ANSYS 还提供了一个创建真正直线的方法：

GUI: **Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > Lines > Straight Line**

说明：不管当然的活动坐标系是何种坐标系，此操作都能保证生成的线为直线，读者可自己验证。

2. 通过两个关键点外加一个半径生成弧线

单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > By End KPs & Rad** 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择圆弧的起止点，再选择某关键点表明圆弧在哪一侧生成，单击 **【OK】** 按钮确认，接着会弹出如图 3.17 所示的对话框。在 **【Radius of the arc】** 文本框中输入弧线的半径，单击 **【OK】** 按钮即可。

图 3.18 弧线生成示意图。

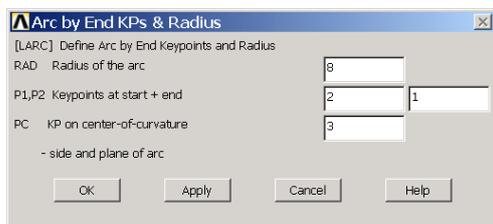


图3.17 通过指定端点和半径建立弧线



图3.18 弧线的生成

3. 生成圆弧线

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Arcs> By Cent & Radius 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择一关键点做为圆弧的圆心，再在图形视窗中任意选择一点定出圆弧的半径和起始点，然后单击【OK】按钮，将弹出如图 3.19 所示的对话框。

(2) 按图 3.19 所示，在【Arc length in degrees】文本框中输入圆弧的度数【180】，表示半圆；在【Number of lines in arc】文本框中输入【2】，表示将弧段分成两段弧线，分别编号。然后单击【OK】按钮确认，得到如图 3.20 所示的弧线。

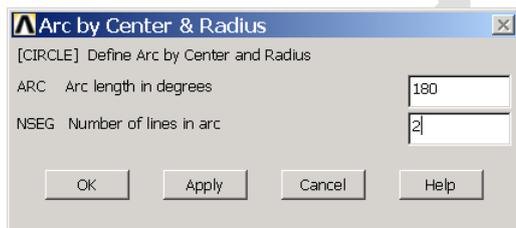


图3.19 生成圆弧线

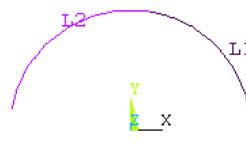


图3.20 通过圆心和半径生成圆弧线

说明：此操作产生的圆弧线为圆的一部分，依参数状况而定，与目前所在的坐标系无关，点的编号和圆弧的线段编号会自动产生。

4. 在两条线之间生成倒角线

假设用户已经建立了两条相交的线，则对其进行倒角的操作如下：

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Line Fillet 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择两条相交的线，然后单击【OK】按钮，接着弹出如图 3.21 所示的对话框。

(2) 按图 3.21 所示，在【Fillet radius】文本框中输入【0.5】，表示弧段半径；在【Number to assign-】文本框中输入【10】，表示在弧段中心处生成关键点的编号。然后单击【OK】按钮。得到弧线如图 3.22 所示。

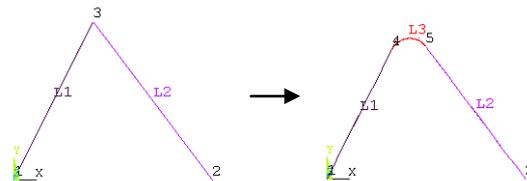
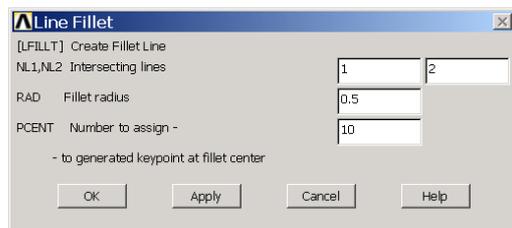


图3.21 指定全角弧段的半径

图3.22 两线之间产生倒角

说明：执行此操作的两条线必须有一个共同的交点，才能产生倒角线。

ANSYS 还提供了一些其它生成线的方法，读者可自己练习操作：

- 通过一系列关键点生成多义线：GUI：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Splines>Segmented Spline
- 生成与一条线成一定角度的线：GUI：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>At angle to line

3.2.4 选择、查看和删除线

1. 选择线

和选择关键点类似，单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出实体选择对话框（如图 3.11 所示），在选择对象下拉列表框中选择【Lines】选项即可。

2. 查看线

列表查看线的操作：单击【Utility Menu】|【List】|【Lines】菜单，弹出如图 3.23 所示的对话框。选择【Attribute format】（属性格式），然后单击【OK】按钮即可。

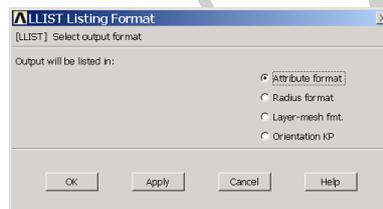


图3.23 选择列表格式

图形显示线的操作：单击单击【Utility Menu】|【Plot】|【Lines】菜单，即可将选择集中的线在图形视窗中绘出。要显示关键点的编号，单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering】菜单，按上一章介绍的方法把关键点的编号打开即可，或直接输入命令：/PNUM,LINE,1。

3. 删除线

单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Lines Only 菜单，弹出如图 3.24 所示的图形拾取对话框。选择合适的拾取方式，然后用鼠标在图形视窗中选择要删除的线，单击【OK】按钮即可。其中【Loop】拾取方式表示以封闭路径的方式选择线。

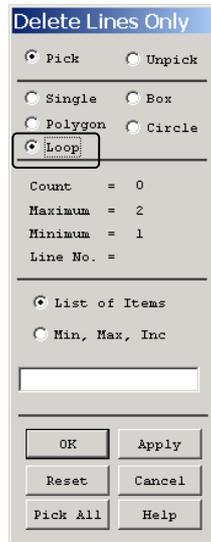


图3.24 拾取等删除的线

注意：此菜单删除线生仍保留线上关键点，要删除线及附着在线上的关键点，可单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below 菜单。

3.2.5 定义面

实体模型建立时，面为体的边界。面的建立可由关键点直接相接或线围接而成，并构成不同数目边的面。也可直接建构体积而产生面积，如要进行对应网格化，则必须将实体模型建构为四边形面积的组合，最简单的面积为三点连接成面。在 ANSYS 中定义面的方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用方法：

1. 通过关键点生成面

(1) 启动 ANSYS，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Working Plane 菜单，随意在图形视窗中定义 5 个关键点，如图 3.25 左所示。

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择建立好的关键点，单击【OK】按钮即可。如图 3.25 右所示。

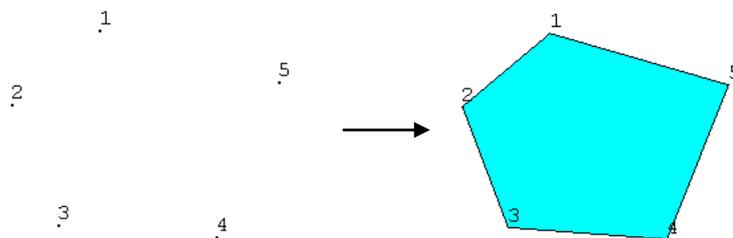


图3.25 由点生成面

注意：以关键点围成面时，关键点必须以顺时针或逆时针输入，面积的法向按点的顺序依右手定则决定。

2. 通过边界线定义一个面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Arbitrary> By Lines** 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择已经定义好的边界线，单击【OK】按钮即可。

3. 沿一定路径拉伸一条（或几条）线生成面

如图 3.26 所示，L1~L5 位于默认的工作平面内，L6 是拉伸路径，其操作如下：

(1) 复制光盘目录“\ch03\ex1\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex1.db”。

(2) 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Extrude> Along Lines** 菜单，弹出图形拾取对话框，先依次选择 L1~L3 作为被拉伸的对象，然后再选择 L6 作为拉伸路径，然后单击【OK】按钮确认。

(3) 再次单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Extrude> Along Lines** 菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择 L4~L5 作为被拉伸对象，然后再选择 L6 作为拉伸路径，单击【OK】按钮。拉伸后生成的面如图 3.27 所示。

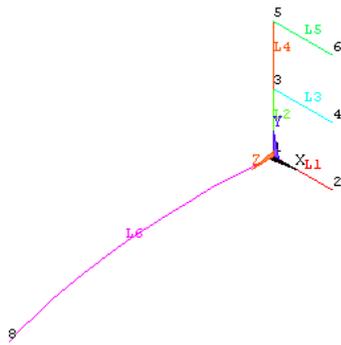


图3.26 建立被拉伸的线及路径

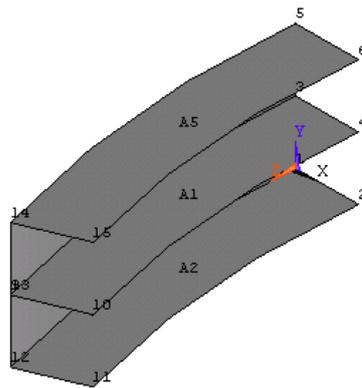


图3.27 经拉伸生成的面

注意：进行拉伸操作时，如果选择的拉伸对象太多可能会不成功，用户可以选择少一些拉伸对象再次拉伸。

4. 对面进行倒角

以图 3.27 生成的面为例，操作如下：

(1) 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Area Fillet** 菜单，弹出图形拾取对话框，选择想要倒角的两个面，然后单击【OK】按钮，弹出如图 3.28 所示的对话框。

(2) 在【Fillet radius】文本框中输入弧面半径【0.5】，单击【OK】按钮确认。生成的面如图 3.29 所示。

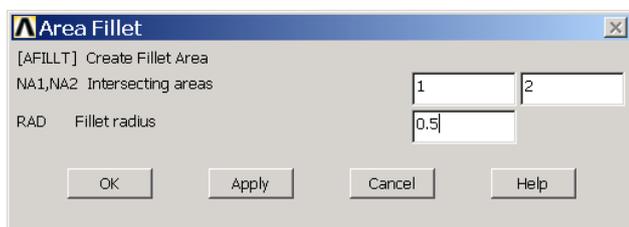


图3.28 对面进行倒角设置

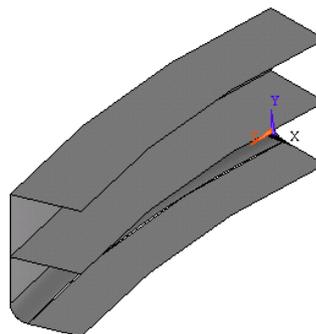


图3.29 对相交面进行倒角

ANSYS 还提供了一些其它生成面的方法，读者可自己练习操作：

- 绕轴旋转一条线生成面

GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>About Axis

- 通过引导线生成蒙皮似的光滑曲面

GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Skinning

3.2.6 选择、查看和删除面

1. 选择面

和选择关键点类似，单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出实体选择对话框（如图 3.11 所示），在选择对象下拉列表框中选择【Areas】选项即可。

2. 查看面

列表查看面的操作：单击【Utility Menu】|【List】|【Areas】菜单即可。

图形显示面的操作：单击单击【Utility Menu】|【Plot】|【Areas】菜单，即可将选择集中的面在图形视窗中绘出。要显示关键点的编号，单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering】菜单，按上一章介绍的方法把关键点的编号打开即可，或直接输入命令：/PNUM,AREA,1。

3. 删除面

单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas Only 菜单，弹出图形拾取对话框。选择合适的拾取方式，然后用鼠标在图形视窗中选择要删除的面，单击【OK】按钮即可。

注意：此菜单删除面时仍保留面上的线及关键点，要删除面及附着在面上的低级图元，可单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Area and Below 菜单。

3.2.7 定义体

体为最高图元，最简单体定义由关键点或面组合而成。由关键点组合时，最多由八点形成六面体，八点顺序为相应面顺时针或逆时针皆可，其所属的面、线，自动产生。以面

组合时，最多为十块面围成的封闭体积。也可由原始对象建立，例如：圆柱、长方体、球体等可直接建立。在 ANSYS 中定义体的方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用方法：：

1. 通过关键点定义体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> Through KPs 菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择关键点，则原有的关键点即成为体的角点。

说明：点的输入必须依连续的顺序，以八点面言，连接的原则为相对应面相同方向。如图 3.30 所示，对于正六面体可以是 V,1,2,3,4,5,6,7,8 或 V8,7,3,4,5,6,2,1。

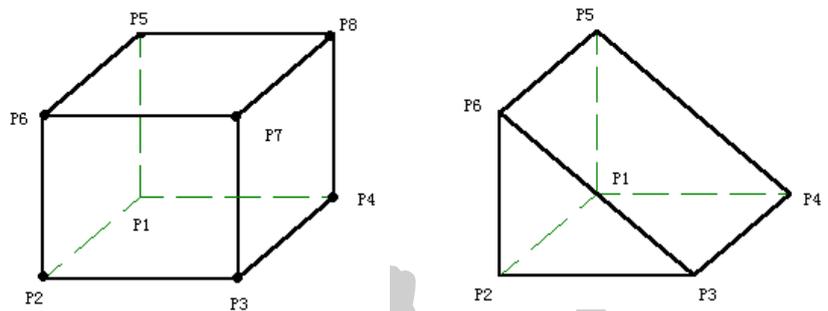


图3.30 由关键点生成体

2. 通过边界面定义体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> By Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择面，则原有的面将成为体的边界面。

说明：至少需要输入四个面才能围成一个体，面编号可以是任何次序输入，只要该组面能围成封闭的体即可。

3. 将面沿某个路径拖拉生成体

单击 Main Menu> Preprocessor> Operate> Extrude> Along Lines 菜单，弹出图形拾取对话框，然后选择等拉伸的面，单击【OK】按钮，再选择拉伸路径，单击【OK】按钮确认即可。如图 3.31 所示。

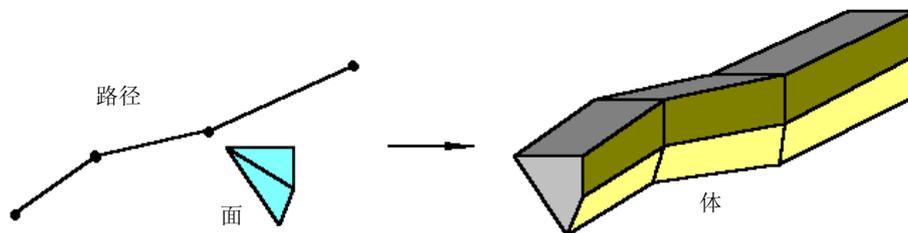


图3.31 拖拉面生成体

3.2.8 选择、查看和删除体

1. 选择体

和选择关键点类似，单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出实体选择对话框（如图 3.11 所示），在选择对象下拉列表框中选择【Volumes】选项即可。

2. 查看体

列表查看体的操作：单击【Utility Menu】|【List】|【Volumes】菜单即可。

图形显示体的操作：单击单击【Utility Menu】|【Plot】|【Volumes】菜单，即可将选择集中的面在图形视窗中绘出。要显示关键点的编号，单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Numbering】菜单，按上一章介绍的方法把关键点的编号打开即可，或直接输入命令：/PNUM,VOLU,1。

3. 删除体

单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volumes Only 菜单，弹出图形拾取对话框。选择合适的拾取方式，然后用鼠标在图形视窗中选择要删除的体，单击【OK】按钮即可。

注意：此菜单删除体时仍保留体上的面、线和关键点，要删除体及附着在面上的低级图元，可单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume and Below 菜单。

3.3 自顶向下建模

自顶向下建模的思路是：利用 ANSYS 内部已经存在的常用实体轮廓（ANSYS 中叫做体素），如矩形面、圆形面、六面体和球体等，直接生成用户想要的模型。因为这些体素都是高级图元，当生成这些高级图元时，ANSYS 会自动生成所有必要的低级图元，包括关键点。自顶向下建模的操作主要包括：

- 建立面原始对象：包括矩形、圆形和正多边形，如图 3.32 所示
- 建立体原始对象：包括长方体、圆柱、棱柱、球、锥体和环体等，如图 3.33 所示。

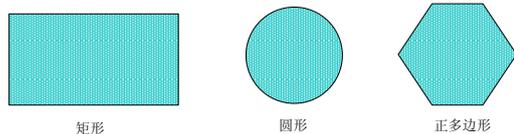


图3.32 常用的面原始对象

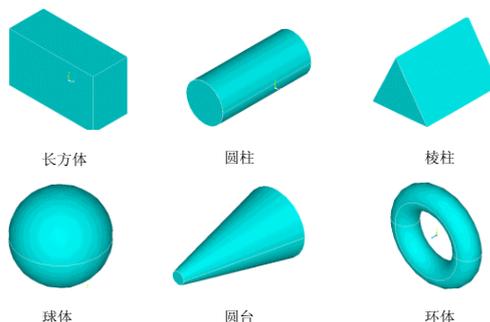


图3.33 常用体原始对象

3.3.1 建立矩形面原始对象

1. 在工作平面上任意位置生成一个长方形面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By Dimensions** 菜单, 弹出如图 3.34 所示的对话框。在【**X-coordinates**】文本框中分别输入左下角点和右上角点的 X 坐标; 在【**Y-coordinates**】文本框中分别输入左下角点和右上角点的 Y 坐标, 单击【**OK**】按钮确认即可。

2. 通过定义矩形的角点与边上生成矩形面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By 2 Corners** 菜单, 弹出如图 3.35 所示的对话框。在【**WP X**】和【**WP Y**】文本框中输入矩形某角点的 X 坐标和 Y 坐标 (工作平面下); 在【**Width**】文本框中输入矩形的宽, 在【**Height**】文本框中输入矩形的高, 然后单击【**OK**】按钮即可。用户也可以直接在图形视窗用鼠标直接绘出矩形面。

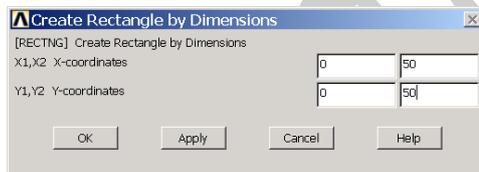


图3.34 通过定义角点坐标创建矩形

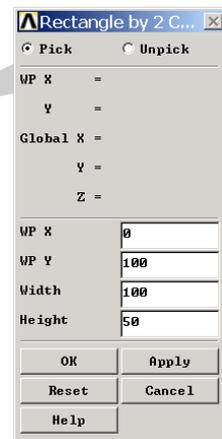


图3.35 选择角点和边长定义矩形面

3. 通过中心和角点生成矩形面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By Centr & Cornr** 菜单, 操作与通过角点和边长生成矩形面类似。

3.3.2 建立圆或环形面原始对象

1. 生成以工作平面原点为圆心的圆 (环) 形面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> By Dimensions** 菜单, 弹出如图 3.35 左所示的【**Circular Area by Dimensions**】对话框, 在【**Outer radius**】文本框中输入圆的外径值; 在【**Optional inner radius**】文本框中输入圆的内径值; 在【**Starting angle**】文本框中输入起始角度; 在【**Ending angel**】文本框中输入终止角度。单击【**OK**】按钮, 得到的圆环如图 3.36 右所示。

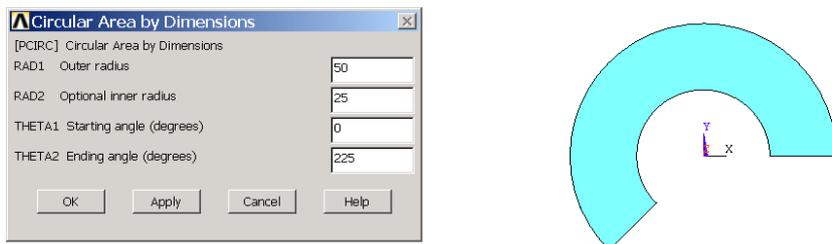


图3.36 以工作平面原点为圆心定义圆环

2. 在工作平面任意位置生成圆（环）形面

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> Partial Annulus 菜单，弹出如图 3.37 所示的对话框，在【WP X】和【WP Y】文本框中分别输入圆心的 X 和 Y 坐标；在【Rad-1】和【Rad-2】文本框中分别输入圆的内径和外径；在【Theta-1】和【Theta-2】文本框中分别输入圆的起始和终止角度。然后单击【OK】按钮。

如果用户想创建整个圆环可单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> Annulus 菜单，想创建实心圆可单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> Solid Circle 菜单，其操作和创建部分圆环类似。

3. 通过端点生成一个圆形区域

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> By End Points 菜单，弹出如图 3.38 所示的对话框。在【WP XE1】和【WP YE1】文本框中分别输入一个端点的 X 和 Y 坐标；在【WP XE2】和【WP YE2】文本框中分别输入另一个端点的 X 和 Y 坐标，则以这两点连线为直径的圆就唯一确定了，单击【OK】按钮即可。

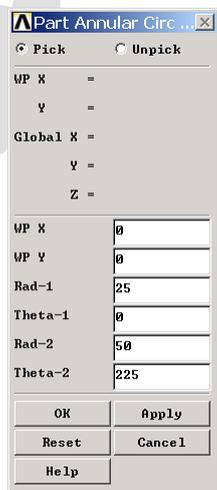


图3.37 在工作平面创建部分圆环

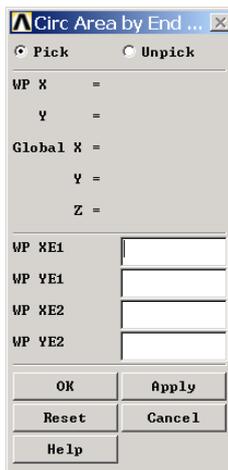


图3.38 通过端点生成圆

3.3.3 建立正多边形面原始对象

1. 以工作平面的原点为中心生成一个正多边形面

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> By Inscribed Rad 菜单，弹

出如图 3.39 左所示的对话框。在【Number of sides】文本框中输入多边形的边数；在【Minor (circumscr) radius】文本框中输入多边形内接圆的半径。单击【OK】按钮即可，生成的多边形如图 3.39 右所示。

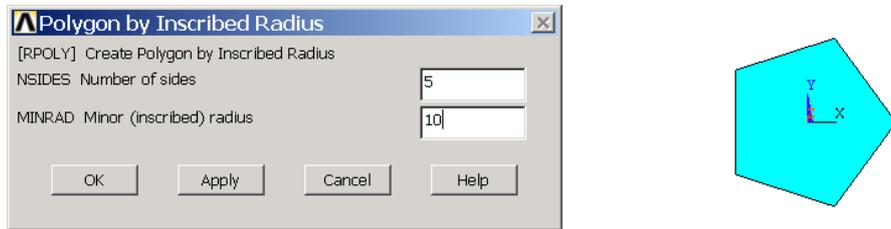


图3.39 以工作平面原点为中心生成多边形面

如果用户想按多边形的外接圆半径创建多边形面可单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> By Circumscr Rad** 菜单；按多边形的边长创建多边形面可单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> By Side Length** 菜单，其操作和以上类似。

2. 在工作平面的任意位置处生成一个正多边形面

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Hexagon** 菜单，弹出如图 3.40 所示的对话框。在【WP X】和【WP Y】文本框中分别输入多边形中心的 X 和 Y 坐标；在【Radius】文本框中输入外接圆的半径；在【Theta】文本框中输入方向角。单击【OK】按钮即可生成一个中心位于 (50,0) 的正六边形。

生成其他正多变形的方法如下：

- 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Octagon** 菜单生成正八边形；
- 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Pentagon** 菜单生成正五边形；
- 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Septagon** 菜单生成正七边形；
- 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Square** 菜单生成正方形；
- 单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Polygon> Triangle** 菜单生成正三角形。

注意：（1）由命令或 GUI 途径生成的面位于工作平面上，方向由工作平面坐标系而定；

（2）所定义的面面积必须大于 0，不能用退化面来定义线。

3.3.4 建立长方体原始对象

1. 通过对角点生成长方体

单击 **Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By Dimensions** 菜单，弹出如图 3.41 所示的对话框。在【X-coordinates】、【Y-coordinates】和【Z-coordinates】

文本框中分别输入两个对角点的 X、Y 和 Z 坐标，单击【OK】按钮即可。

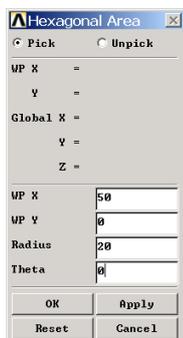


图3.40 在工作平面任意位置创建正交边形

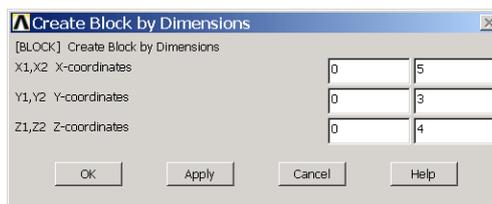


图3.41 通过对角点生成长方体

2. 通过底面的两个角点和高生成长方体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By 2 Corners & Z 菜单，在弹出的对话框中输入一个角点的坐标和长宽高，单击【OK】按钮即可。

3. 通过中心及角点生成长方体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By Centr,Corner,Z 菜单，在弹出的对话框中输入底面中心点坐标和长宽高，单击【OK】按钮即可。

3.3.5 建立柱体原始对象

1. 以工作平面原点为圆心生成圆柱体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 菜单，弹出如图 3.42 左所示的对话框。在【Outer radius】文本框中输入圆柱体的外径；在【Optional inner radius】文本框中输入圆柱体的内径（可选，默认为 0）；在【Z-coordinates】输入圆柱顶面与底面的 Z 坐标；在【Starting angle】和【Ending angle】文本框中分别输入圆柱截面的起止角度。然后单击【OK】按钮确认即可。

2. 在工作平面任意处生成圆柱体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> Hollow Cylinder 菜单，弹出如图 3.43 所示的对话框。在【WP X】和【WP Y】文本框中输入圆柱底面中心的 X 坐标和 Y 坐标（工作平面下）；在【Rad-1】和【Rad-2】文本框中分别输入圆柱的内外径；在【Depth】文本框中输入圆柱的高，然后单击【OK】按钮即可。

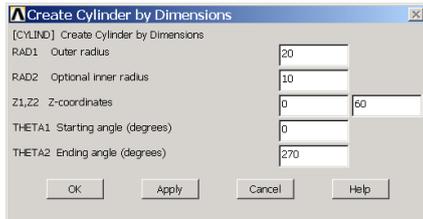


图3.42 以工作平面原点为圆心生成圆柱体

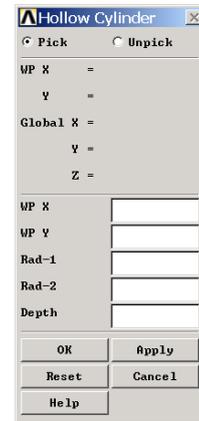
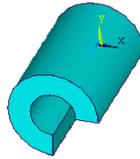


图3.43 在工作平面任意处生成圆柱

用户还可以单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Partial Cylinder** 菜单生成半圆柱；单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder** 菜单生成实心圆柱。

3. 通过端点生成圆柱体

单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By End Pts & Z** 菜单，弹出图形拾取对话框，选择两个端点以定义圆柱截面直径，再选择高来定义圆柱。

3.3.6 建立多棱柱原始对象

1. 以工作平面的原点为圆心生成正棱柱

单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > By Circumscr Rad** 菜单，弹出如图 3.44 左所示的对话框。在【Z-coordinates】文本框中输入棱柱的顶面和底面 Z 坐标；在【Number of sides】文本框中输入截面边数；在【Major (circumscr) radius】文本框中输入截面外接圆的半径。单击【OK】按钮确认即可。

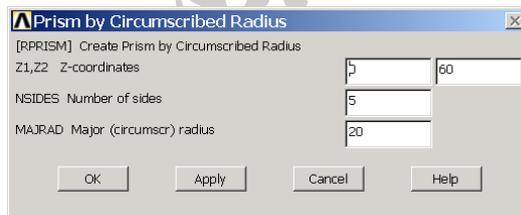
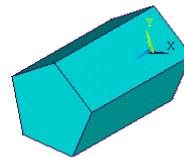


图3.44 在工作平面生成正棱柱



用户还可以单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > By Inscribed Rad** 菜单按内接圆半径生成棱柱；单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > By Side Length** 菜单按截面边长生成棱柱。

2. 在工作平面任意位置处生成多棱柱

生成其他多棱柱的方法如下：

- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Hexagonal 菜单生成正六棱柱；
- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Octagonal 生成正八棱柱；
- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Pentagonal 生成正五棱柱；
- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Septagonal 生成正七棱柱；
- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Square 生成立方体；
- 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Prism> Triangular 生成正三棱柱。

3.3.7 建立球体或部分球体原始对象

1. 以工作平面原点为中心生成球体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Sphere> By Dimensions 菜单，弹出如图 3.45 左所示的对话框。在【Outer radius】文本框中输入球的外径值；在【Optional inner radius】文本框中输入球的内径值；在【Starting angle】文本框中输入起始角度；在【Ending angle】文本框中输入终止角度。单击【OK】按钮即可。

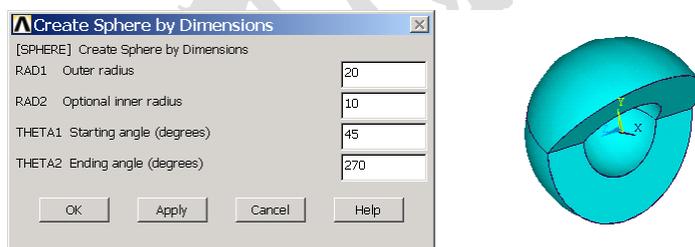


图3.45 以工作平面原点为中心生成球体

2. 在工作平面任意位置生成球体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Sphere> Hollow Sphere 菜单生成空心球体；单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Sphere> Solid Sphere 菜单生成实体球体。

3. 以直径的端点生成球体

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Sphere> By End Points 菜单，弹出图形拾取对话框，选择两个端点以定义球截面直径来定义圆柱。

3.3.8 建立锥体或圆台原始对象

单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cone> By Dimensions 菜单，弹出如图 3.46 所示的对话框。在【Bottom radius】文本框中输入底面半径；在【Optional

top radius】文本框中输入顶面半径（可选，默认为0）；在**【Z-coordinates】**文本框中分别输入底面和顶面的Z坐标；在**【Starting angle】**和**【Ending angle】**文本框中分别输入圆台的起止角度。单击**【OK】**按钮确认即可。

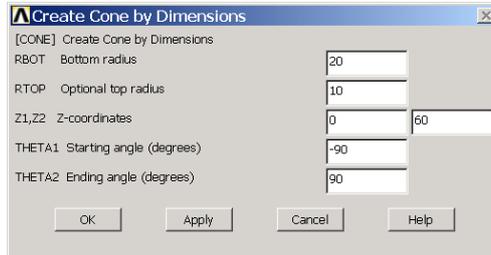


图3.46 以工作平面原点为中心生成圆台

3.3.9 建立环体或部分环体原始对象

单击 **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Torus** 菜单，弹出如图 3.47 左所示的对话框。在**【Outer radius】**文本框中输入圆环的外径；在**【Optional inner radius】**文本框中输入圆环的内径；在**【Major radius of torus】**文本框中输入圆环的主半径；在**【Starting angle】**和**【Ending angle】**文本框中分别输入圆环的起止角度。单击**【OK】**按钮确认即可。

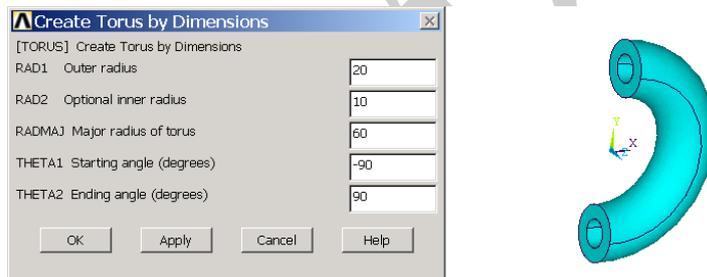


图3.47 生成部分圆环

注意：上述操作定义的体都是相对于工作平面的。

3.4 布尔运算

布尔运算就是对生成的实体模型进行诸如交、并、减等的逻辑运算处理。这样就给用户快速生成复杂实体模型提供了极大的方便。

无论是自顶向下还是自底向上建立的实体模型，在 ANSYS 中都可以对其进行布尔运算。应当注意的是通过连接生成的图元对布尔运算无效。完成布尔运算后，紧接着就是实体模型的加载和单元属性的定义。如果用布尔运算修改了已有的模型，应该注意的是重新进行单元属性和荷载的定义。

3.4.1 布尔运算的基础设置

在介绍布尔运算的操作之前，用户有必要了解对布尔运算的相关设置。要对布尔运算

进行设置，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Settings 菜单，将弹出如图 3.48 所示的【Boolean Operation Settings】对话框。

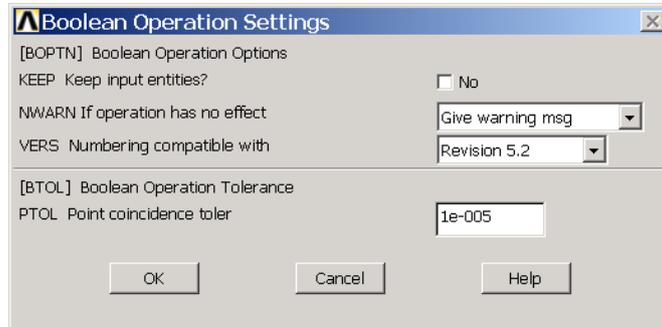


图3.48 布尔运算的设置

设置说明：

- **【KEEP】**：是否保留原始图元
- **【NWARN】**：是否弹出警告信息
- **【VERS】**：选择对布尔操作的图元进行编号时的程序版本
- **【PTOL】**：布尔操作时容许误差值

对两个或多个图元进行布尔运算时，需要用户确定是否保留原始图元，如图 3.49 所示。在图 3.48 所示的【Boolean Operation Settings】对话框中，选中【Keep input entities】右边的框（显示为【Yes】）即可设置为保留原始图元，取消息选择（显示为【No】）即设置为不保留。

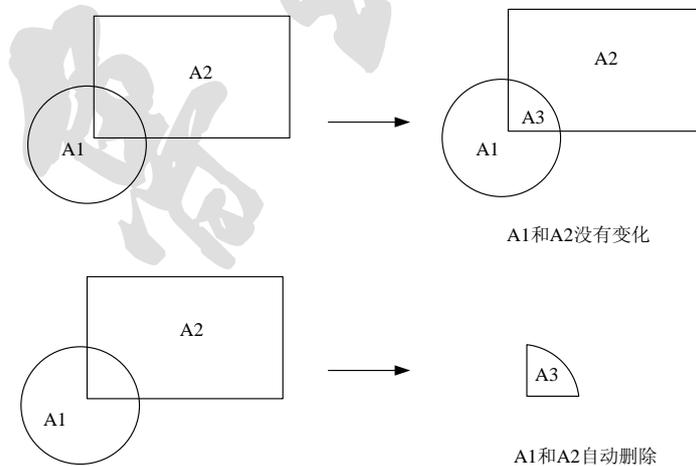


图3.49 布尔运算的保留选项

注意：一般来说，对依附于高级图元的低级图元进行布尔运算是允许的；不能对已划分网格的图元进行布尔运算，必须进行布尔运算时可先将网格从实体中清除。

ANSYS 中常用的布尔运算有如下几种：交运算、加运算、减运算、工作平面减运算、搭接、分割和粘接（或合并）。

3.4.2 交运算

交运算就是由每个初始图元的共同部分形成一个新的图元。这个新的图元可能与原始的图元有相同的维数，也可能低于原始的维数。例如两条线的交运算可能得到的只是一个（或几个）关键点，也可能是一条（或几条）线。ANSYS 中提供的交运算主要有普通相交和两两相交。普通相交的常用操作方法：

1. 线与线相交（如图3.50）

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Common> Lines

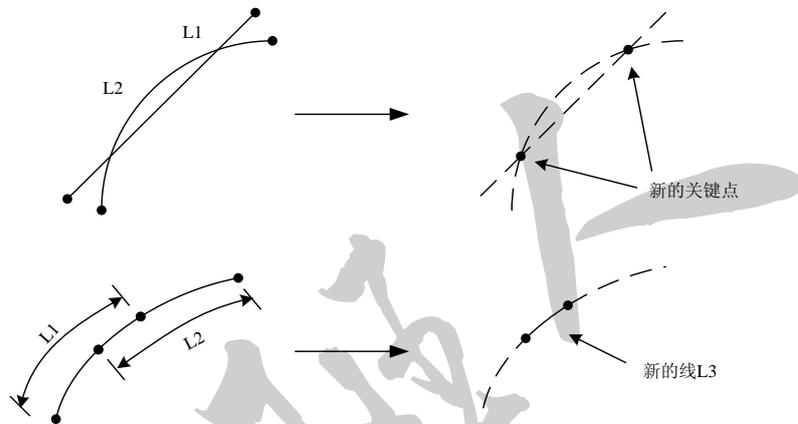


图3.50 线线相交

下面介绍一下线线相交的操作方法，其它交运算的操作与此类似，以后不再详述：

(1) 复制光盘目录“\ch03\ex2\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex2.db”。

(2) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Common> Lines 菜单，将弹出如图 3.51 左所示的图形拾取对话框，选择适当的图形拾取方式，然后在图形视窗中选择要进行交运算的线，单击【OK】按钮确认。交运算的结果如图 3.51 右所示。

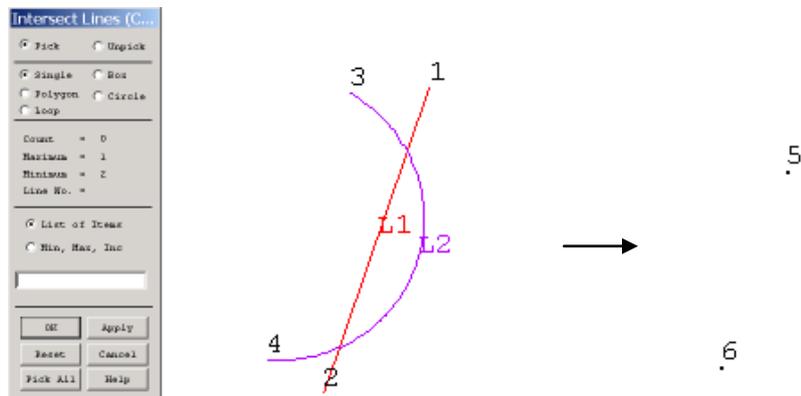


图3.51 线线相交

2. 面与面相交 (如图3.52)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Common> Areas

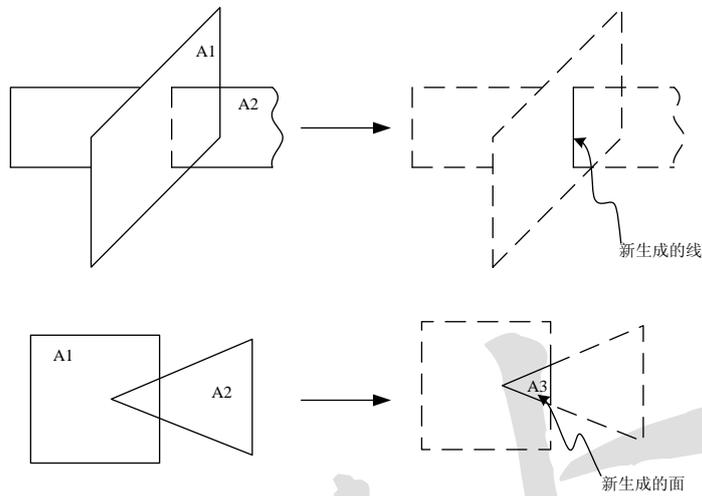


图3.52 面与面相交

3. 体与体相交 (如图3.53)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Common> Volumes

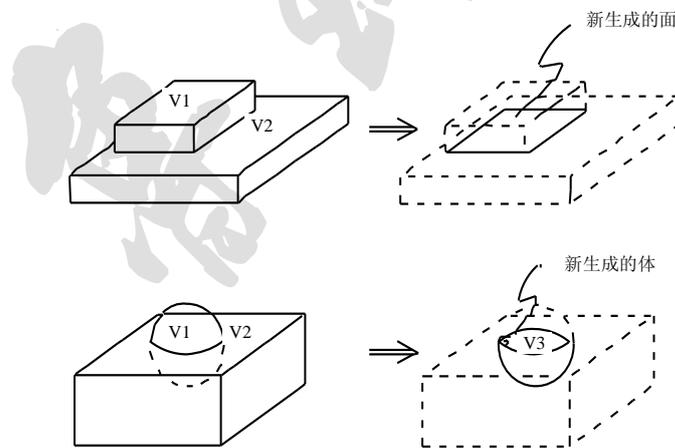


图3.53 体与体相交

4. 线与面相交 (如图3.54)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Line with Area

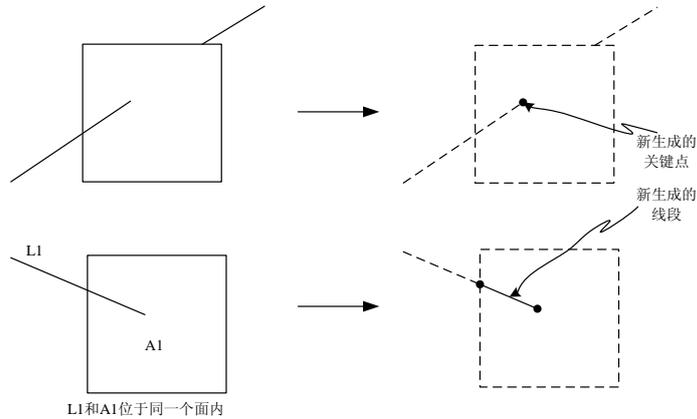


图3.54 线于面相交

5. 面与体相交 (如图3.55)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Area with Volume

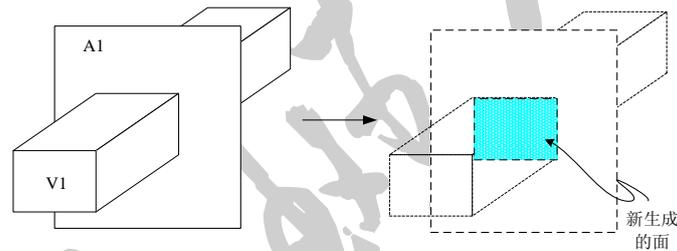


图3.55 面与体相交

6. 线与体相交 (如图3.56)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Intersect> Line with Volume

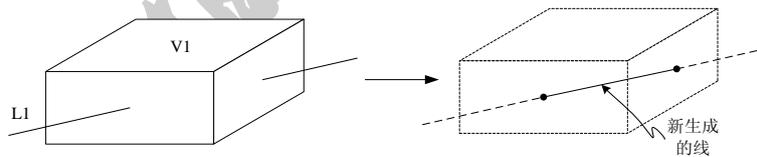


图3.56 线与体相交

说明: 两两相交运算只能在同一级别的图元中进行, 即只能进行线不线之间、面与面之间以及体与体之间的两两相交。

3.4.3 加运算

加运算的结是将所有参加运算的实体都包含在内, 这种运算也称为并或和。在 ANSYS 程序中只能对三维实体或二维共面的面进行加运算, 运算得到的实体是一个单一实体。加运算的操作方法和交运算类似, 单击相应的菜单, 弹出图形拾取对话框, 选择要进行加运

算的图元，单击【OK】按钮即可。

1. 面面相加生成一个新面（如图3.57）

GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas

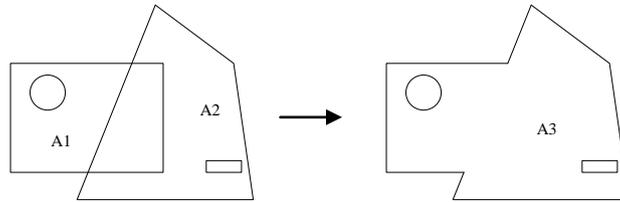


图3.57 面与面相加

2. 体体相加生成一个体（如图3.58）

GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Volumes

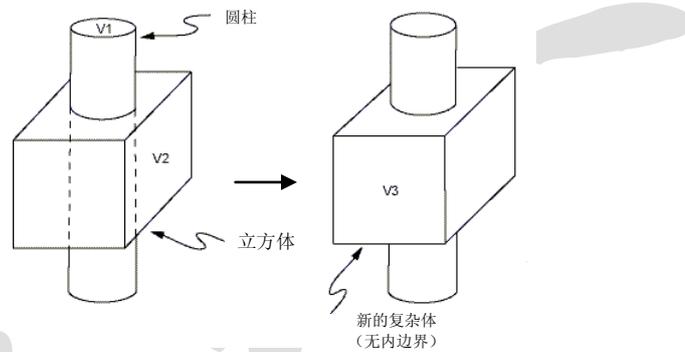


图3.58 体与体相加

3.4.4 减运算

从一个图元中去除另一个图元重叠的运算叫做减运算。和其它运算相比，减运算要复杂一些。如果从某一个图元（E1）减去另一个图元（E2），其结果有两种可能：一是生成一个新的图元 E3，E3 与 E1 同一级别，且与 E2 无搭接部分；另一种情况是 E1 和 E2 的搭接部分是个低级图元，这时结果是将 E1 分成两个或多个新的图元。

1. 线与线的减运算（如图3.59）

GUI: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Lines

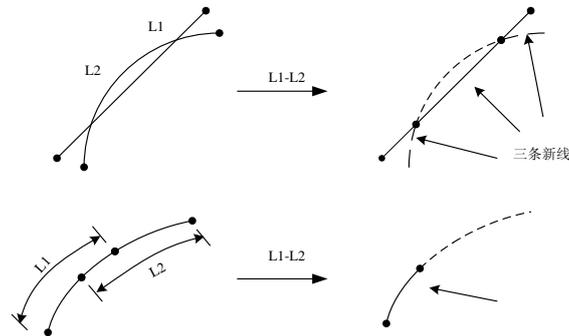


图3.59 线与线的减运算

下面介绍一下线减去线的操作方法，其它减运算的操作与此类似，以后不再详述：

(1) 复制光盘目录“\ch03\ex3\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex3.db”。

(2) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Subtract> Lines 菜单，弹出如图 3.60 左所示的对话框，然后在图形视窗中选择 L1，单击【OK】按钮，再选择 L2，单击【OK】按钮，表示 L1 减去 L2，最后得到的运算结果如图 3.60 右所示。

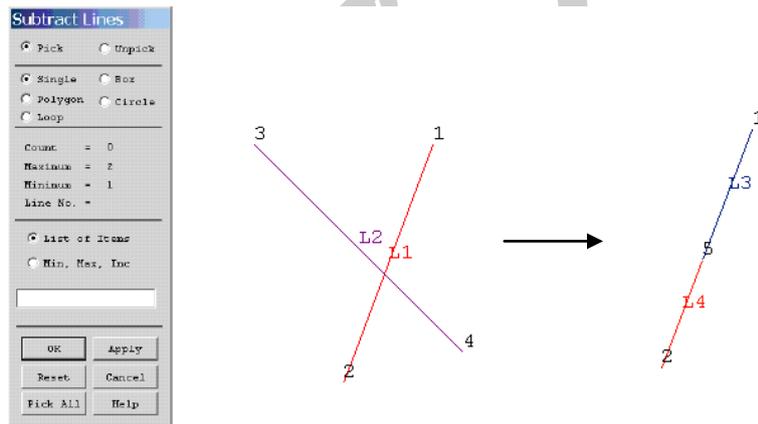


图3.60 线与线的减运算示例

2. 面与面的减运算（如图3.61）

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Subtract> Areas

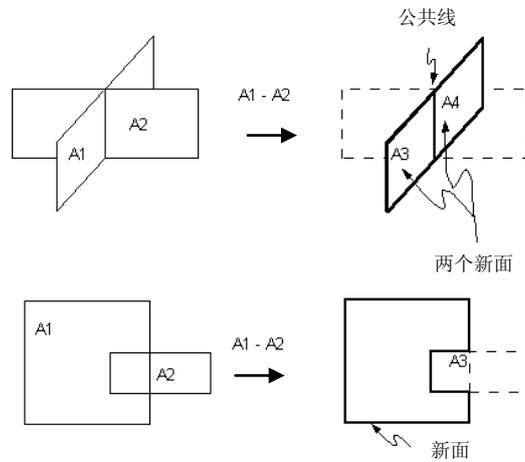


图3.61 面与面的减运算

3. 体与体的减运算 (如图3.62)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Subtract> Volumes

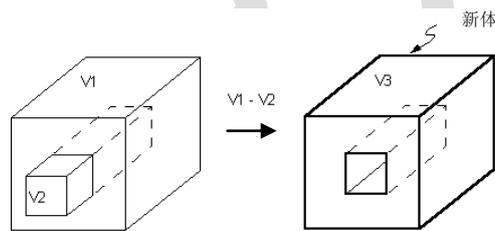


图3.62 体与体的减运算

4. 线减去面的运算 (如图3.63)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Line by Area

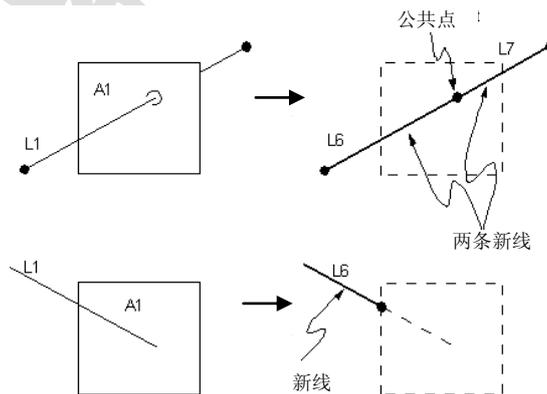


图3.63 线减去面的运算

5. 线减去体的运算 (如图3.64)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Line by Volume

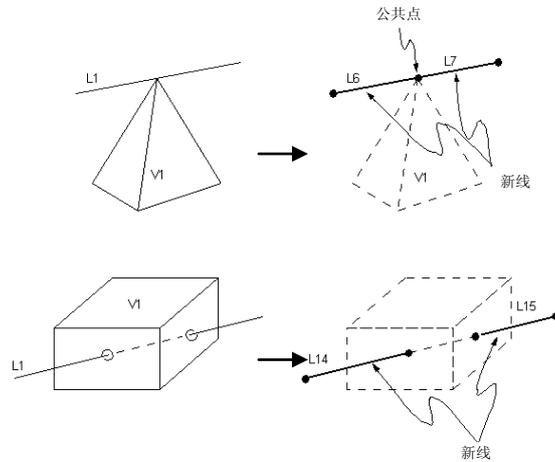


图3.64 线减去体的运算

6. 面减去体的运算 (如图3.65)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Area by Volume

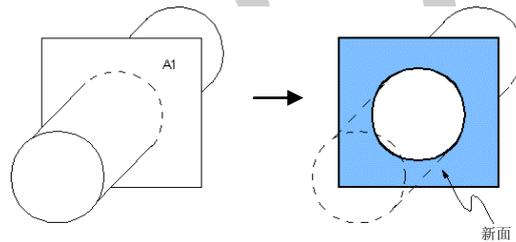


图3.65 面减去体的运算

7. 面减去线的运算 (如图3.66)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Area by Line

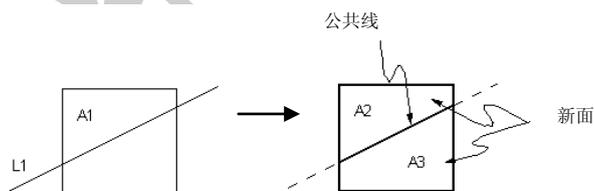


图3.66 面减去线的运算

8. 体减去面的运算 (如图3.67)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Volume by Area

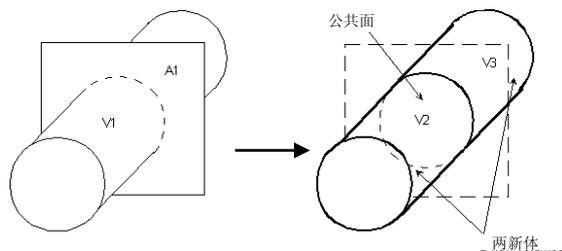


图3.67 体减去面的运算

3.5.5 工作平面减运算

工作平面也可以用来做减运算，用户可以用工作平面将一个图元割成两个或几个图元。如图 3.71 左所示，工作平面穿过其中部，要进行减运算，可按如下操作进行：

(1) 复制光盘目录“\ch03\ex4\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮打开数据库文件“ex4.db”。

(2) 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Volu by WrkPlane 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择柱体，然后单击【OK】按钮，即把柱体沿工作平面切成了两个，如图 3.68 右所示。

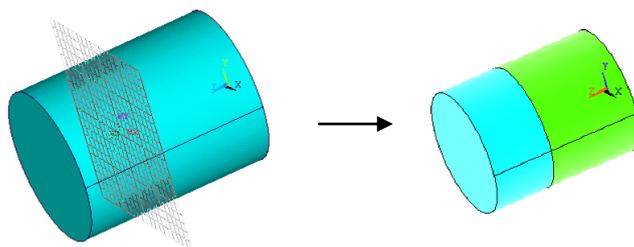


图3.68 工作平面对体的减运算

说明：工作平面减运算通常针对还没有被划分网格的实体模型。

用户还可以单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Line by WrkPlane 菜单用工作平面切割线；单击 Main Menu> Preprocessor> Operate> Divide> Area by WrkPlane 菜单用工作平切割面。

3.5.6 搭接

搭接运算的功能是将两个或多个图元连接，以生成三个或更多个新的图元。搭接运算在搭接域周围与加运算非常类似，搭接运算生成的是多个相对简单的区域，而加运算生成的是一个相对复杂的区域。因此，搭接生成的图元比加运算生成的图元更容易进行网格划分。

搭接运算的操作方法和其它运算类似，单击相应的菜单，弹出图形拾取对话框，选择要进行搭接运算的图元，单击【OK】按钮即可。

注意：搭接部分与原图元的级数必须相同，搭接运算才能生效。

1. 线与线搭接 (如图3.69)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Overlap> Lines

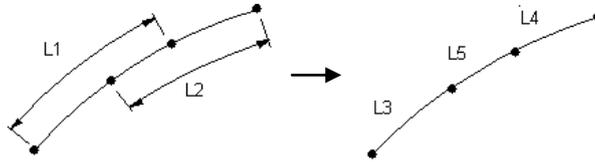


图3.69 线与线搭接

2. 面与面搭接 (如图3.70)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Overlap> Areas

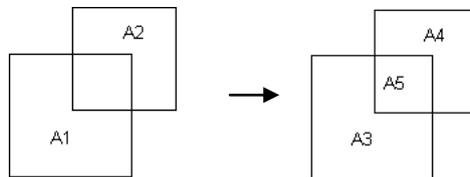


图3.70 面与面搭接

3. 体与体搭接 (如图3.71)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Overlap> Volumes

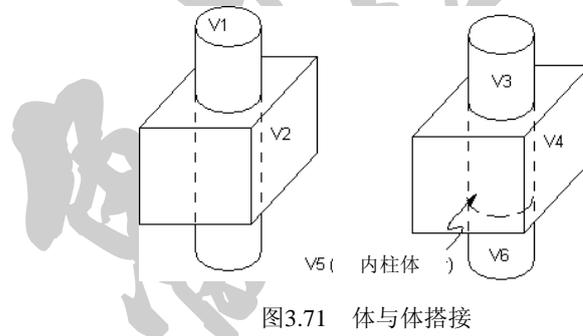


图3.71 体与体搭接

3.5.7 分割

分割运算的功能是将两个或多个图元连接以生成三个或更多新的图元集合。如果分割区域与原始图元有相同的等级，那么分割结果与搭接结果相同；但分割运算不会删除与其他图元没有重叠部分的图元。如图3.74所示，V3与V1、V2并无重叠，运算后V3仍保留。

分割运算的操作方法和其它运算类似，单击相应的菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择要进行运算的图元，单击【OK】按钮即可。

1. 线分割线 (如图3.72)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Partition> Lines

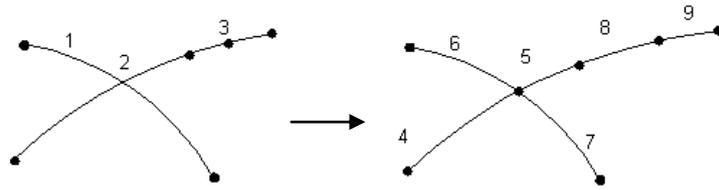


图3.72 线分割线

2. 面分割面 (如图3.73)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Partition> Areas

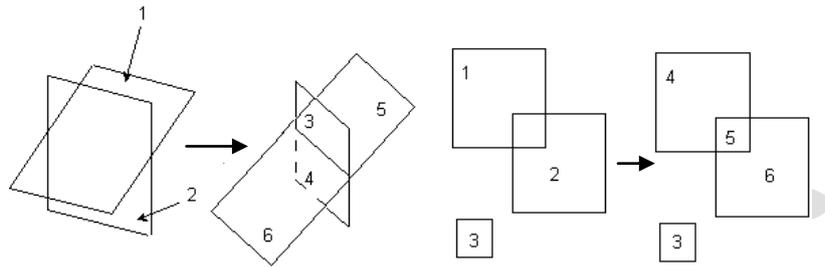


图3.73 面分割面

3. 体分割体 (如图3.74)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Partition> Volumes

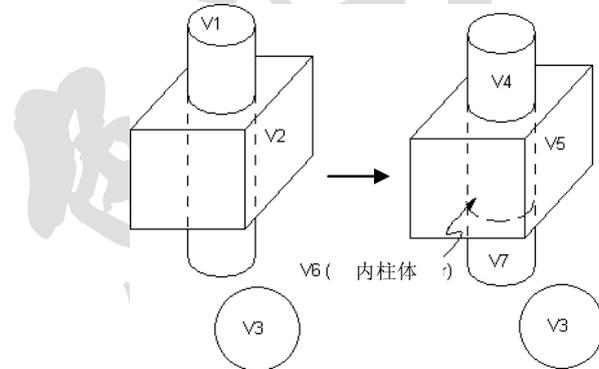


图3.74 体分割体

3.5.8 粘接 (或合并)

粘接命令的功能与搭接类似，只是图元之间仅在公共边界处相关，且工作边界的图元等级低于原始图元。粘接运算后的图元仍然保持相互独立，只是它们在交界处共用低级图元。如线线粘接，结果是两线在交界处共用一个关键点。

粘接运算的操作方法和其它运算类似，单击相应的菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择要进行运算的图元，单击【OK】按钮即可。

1. 粘接线 (如图3.75)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Glue> Lines

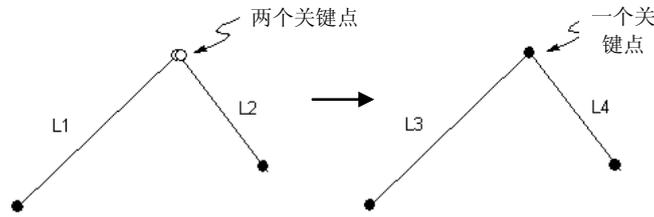


图3.75 粘接线

2. 粘接面 (如图3.76)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Glue> Areas

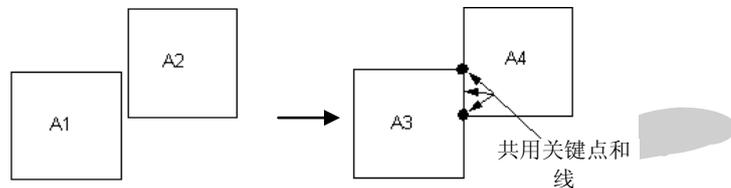


图3.76 粘接面

3. 粘接体 (如图3.77)

GUI: Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Glue> Volumes

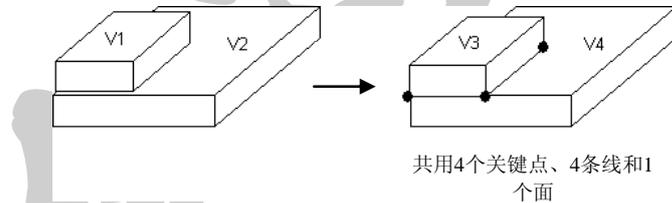


图3.77 粘接体

3.5 编辑图元

图元生成后,有时用户需要对其进行适当的编辑和修改。ANSYS 提供了对图元进行移动、复制、镜像和缩放等编辑功能。这样就不需要每次都一步一步从头开始生成图元,而可以在已经创建的复杂图元(如通过布尔运算得到的图元)的基础上进一步编辑。

3.5.1 移动图元

在 ANSYS 的自顶向下建模过程中,有些命令只能直接在工作平面的原点处生成相应的图元。如果用户已经对图元的形体构造满意,但想把图元放到其他位置上,就可以考虑使用移动图元的操作。用户可以先生成模型,再将其移动到合适的位置。

下面以一个圆面的移动为例来介绍移动图元的操作步骤:

(1) 启动 ANSYS, 单击 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Circle> Solid

Circle 菜单，在工作平面原点处生成一个半径为 10 的圆面。

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Areas>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，在视图窗口中选择上一步中生成的圆面，单击【OK】按钮，接着弹出如图 3.78 所示的对话框。

(3) 在【X-offset in active CS】和【Y-offset in active CS】文本框中分别输入【10】，设置面在当前活动坐标系中的移动增量。单击【OK】按钮确认。移动后的圆面如图 3.79 所示。



图3.78 面移动增量设置

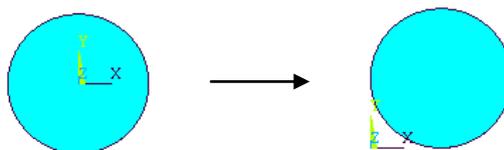


图3.79 面的移动

用户还可以单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Keypoints>Set of KPs 菜单移动关键点；单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Lines 菜单移动线；单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Volumes 菜单移动体。

3.5.2 复制图元

如果用户建模过程中遇到某一图元重复出现多次，即可考虑使用复制图元的功能。这时只需要对重复的图元生成一次，然后在需要的位置或方向上复制即可。以前面生成的圆面为例来介绍复制图元的操作步骤：

说明：复制高级图元时，附属于其上的低级图元将一起被复制。

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框。接着在图形视窗中选择生成的圆面，单击【OK】按钮，弹出如图 3.80 所示的设置对话框。

(2) 在【Number of copies】文本框中输入复制的数量【4】(包括现有的图元)，在【X-offset in active CS】文本框中输入当前活动坐标系中的 X 增量【20】，然后单击【OK】按钮确认。此时已经新生成三个圆面，位置如图 3.81 所示。

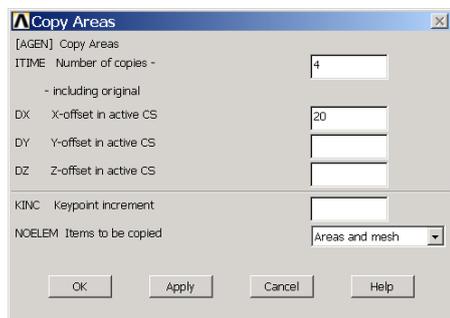


图3.80 复制面的设置

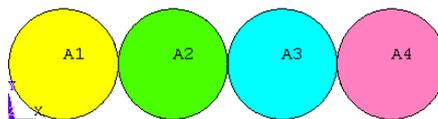


图3.81 复制生成面

用户还可以单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints 菜单复制关键点；

单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Lines** 菜单复制线；单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Volumes** 菜单复制体。

3.5.3 镜像图元

有些模型中，图元是对称分布的，用户可以先生成一部分模型，然后利用镜像图元功能生成另外一部分模型。此功能对于复杂实体模型非常有用。接着上面生成的四个圆面介绍操作步骤：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Areas** 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择所有的面，单击【OK】按钮确认。接着弹出如图 3.82 所示的设置对话框。

(2) 选择【Plane of symmetry】(对称平面)为【X-Z plane】，设置 X-Z 平面为对称平面；在【Existing areas will be】下拉列表框中选择【Copied】。然后单击【OK】按钮确认。此时新生成了四个圆面，如图 3.83 所示。

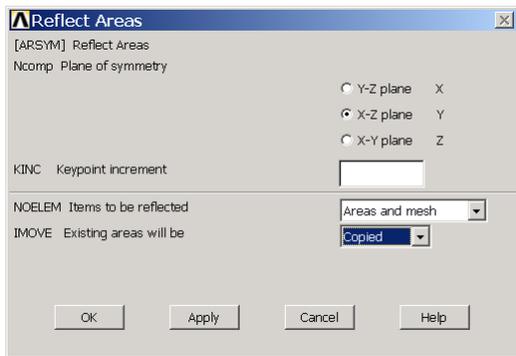


图3.82 面镜像设置

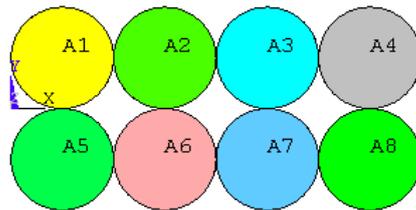


图3.83 镜像生成面

说明：如在图 3.85 的对话框中，选择【Existing areas will be】为【Moved】，则原始的面将被删除，相当于移动镜像。

用户还可以单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Keypoints** 菜单镜像关键点；单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Lines** 菜单镜像线；单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Volumes** 菜单镜像体。其设置与镜像面类似，不再详述。

3.5.4 缩放图元

已生成的图元还可以进行放大和缩小。ANSYS 用当前活动坐标系的坐标轴方向来定义图元缩放的方向。如在全局笛卡尔坐标系下，则运用实体的 X、Y 和 Z 坐标；在柱坐标系下，X、Y 和 Z 坐标分别代表 R、 θ 和 Z；在球坐标系下，X、Y 和 Z 则分别代表 R、 θ 和 ϕ 。接着上面生成的圆面介绍缩放的操作步骤：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Scale>Areas** 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择 A1~A4 四个圆面，单击【OK】按钮，将弹出如图 3.84 所示

的设置对话框。

(2) 在【Scale factors】三个文本框中分别输入当前坐标系所代表的 X、Y 和 Z 方向的缩放因子（取值为 0~1 之间），如【0.8】、【0.8】和【1】；在【Existing areas will be】下拉列表框中选择【Moved】，删除原来的面。然后单击【OK】按钮确认即可。缩放后的结果如图 3.85 所示。

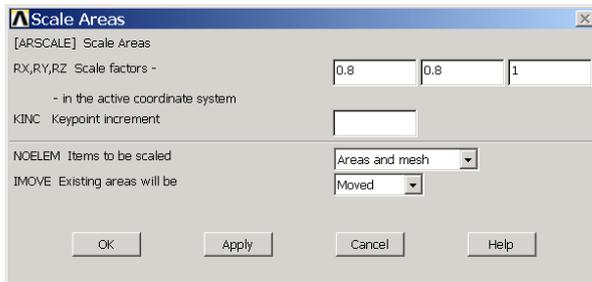


图3.84 缩放面的设置

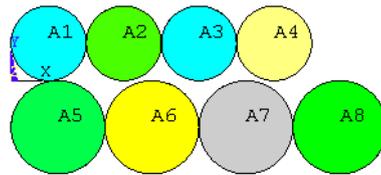


图3.88 面的缩放

用户还可以单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Scale>Keypoints 菜单缩放关键点；单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Scale>Lines 菜单缩放线；单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Scale>Volumes 菜单缩放体。其设置与缩放面类似，不再详述。

3.5.5 将图元转换坐标系

如果用户需要将图元从一个坐标系转换到另一个坐标系，可考虑使用些功能。下面以面为例介绍操作步骤：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Transfer Coord>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，选择要转换坐标系的面，单击【OK】按钮，将弹出如图 3.86 所示的对话框。

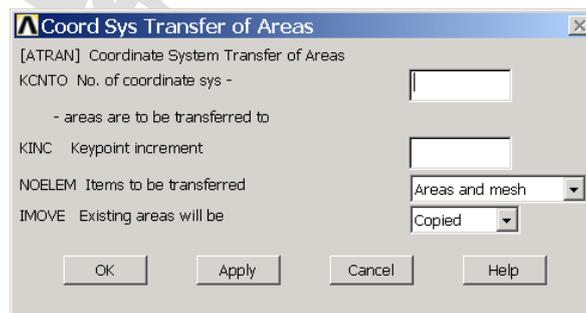


图3.86 转换坐标系设置

(2) 在【No. of coordinate sys】文本框中输入转换的坐标系号，如定义了编号为 11 的局部坐标系，可输入【11】。单击【OK】按钮确认即可。

用户还可以单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Transfer Coord>Keypoints 菜单对关键点进行坐标转换；单击 Main Menu>Preprocessor>

Modeling>Move / Modify>Transfer Coord>Lines 菜单对线进行坐标转换；单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Transfer Coord>Volumes 菜单对体进行坐标转换。

3.6 运用组件和部件

组件（Components）是用于方便选择或者取消选择的一些几何实体的集合。一个实体可以是以下几种实体类型：节点、单元、关键点、线、面和体，而一个组件只能是一种实体类型。一个实体可以同时属于不同的组件。用户使用组件可以方便地在 ANSYS 的各个模块进行选择和取消选择。

组件可以进一步组合成为部件（Assemblies），也就是说部件是组件的集合。部件也是为了方便用户选择。无论是组件还是部件，当删除或组件或部件中的实体后，组件或部件都会自动更新。

3.6.1 组件和部件的操作

假定用户已经建立了一个体，要进行组件和部件的操作，单击【Utility Menu】|【Select】|【Components Manager】菜单，弹出如图 3.87 所示的组件管理对话框。在这个对话框中，用户可以对组件和部件进行相应的操作，如定义组件、定义部件、删除组件或部件、选择组件或部件和取消选择组件或部件等。

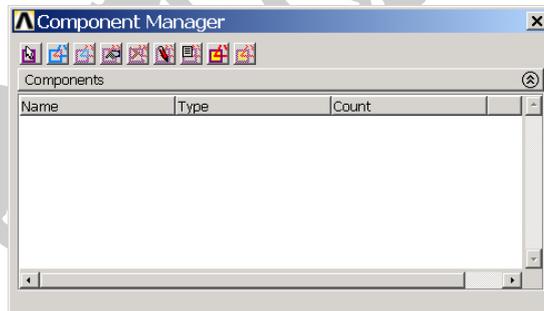


图3.87 组件管理对话框

1. 定义组件

单击  按钮，弹出如图 3.88 所示的【Create Component】对话框。在【Create from】中选择定义组件的类型（体、面、线、关键点、单元或节点）；在下部文本框中输入要定义组件的名称（用户可以随意选择，易记就行如【volu_1】）；中间的【Pick entites】为选择方式，如果选中，则会弹出图形拾取对话框，等待用户用鼠标选择相应类型的实体，如果未选中，则默认把当前选择集中的实体定义为组件。按上述操作定义了三个组件后的组件管理器如图 3.89 所示。

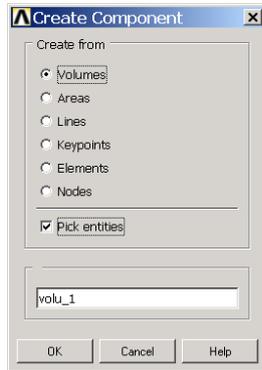


图3.88 定义组件

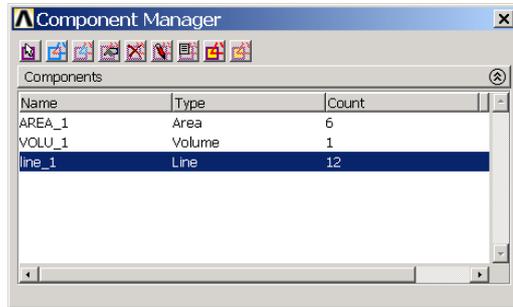


图3.89 组件定义结果

2. 定义部件

首先按【SHIFT】键选中要生成部件的组件，单击按钮，弹出如图 3.90 所示的【Create Assembly】对话框。在【Assembly name】文本框中输入部件名称，单击【OK】按钮即可。

3. 修改组件或部件名称

先选中要修改的组件或部件，然后单击按钮，弹出如图 3.91 所示的对话框，在文本框中输入新的组件或部件名，单击【OK】按钮即可。

4. 删除、显示组件或部件

- 删除组件或部件：先选中要删除的组件或部件，单击按钮即可。
- 显示组件或部件：先选中要显示的组件或部件，单击按钮图形显示组件或部件；单击按钮列表显示组件或部件。

3.6.2 通过组件和部件选择实体

用户定义组件或部的目的就是为了解选择方便，选择的方法如下：

- (1) 单击【Utility Menu】|【Select】|【Components Manager】菜单，打开组件管理器。
- (2) 在列表框中选中要选择的组件或部件，然后单击按钮即可；如要从当前选择集中取消选择某个组件或部件，选中组件，单击按钮即可。

此外 ANSYS 还提供了另外一种对组件和部件选择的方式，读者可以自己试着操作。其菜单路径为【Utility Menu】|【Select】|【Comp/Assembly】，如图 3.92 所示。

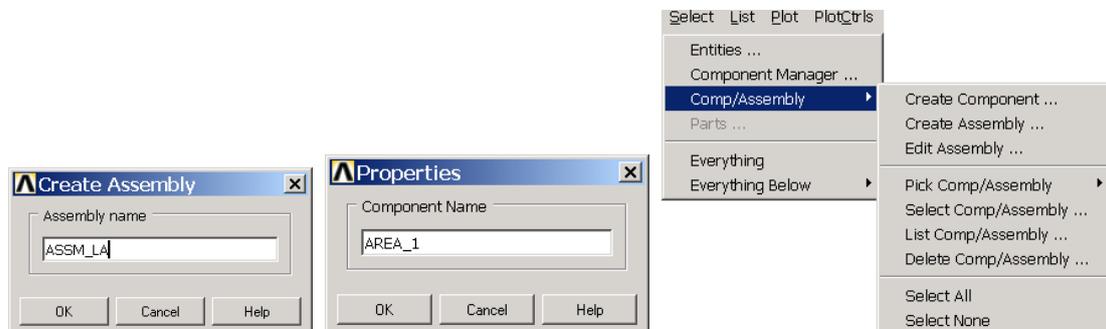


图3.90 定义部件

图3.91 修改名称

图3.92 组件与部件操作菜单



第四章 网格划分

在上一章中介绍了如何建立实体模型，要进行有限元分析，还需要将实体模型转化为能够直接计算的网格，这种转化就叫网格划分。

ANSYS 以数学的方式表达结构的几何形状，用于在里面填充节点和单元，还可以在几何边界上方便的施加载荷，但是几何实体模型并不参与有限元分析，所有施加在有限元边界上的载荷或约束，必须最终传递到有限元模型上（节点和单元）进行求解。

本章从网格划分的基本过程讲起，详细介绍如何进行单元、节点的生成控制，如何对不同图元进行网格划分，以及如何检查和修改网格。最后简单介绍一下网格划分的高级操作自适应网格划分。

4.1 网格划分的过程

以前的例子中已经提到，在网格划分之前，需要进行单元的属性设置。归纳起来，网格划分生成节点和单元的过程主要包括三个步骤：

- 定义单元属性
- 定义网格划分控制
- 生成网格

其中定义网格控制不是必需的，因为默认的网络生成控制对多数模型生成都是合适的。可定义单元属性对于网格划分来说是必不可少的，它不仅影响到网格划分，而且对求解的精度也有很大影响。定义单元属性的操作主要包括定义单元类型、定义实常数和定义材料参数等。

4.1.1 定义单元类型

有限元分析过程中，对于不同的问题，需要应用不同特性的单元，同时每一种单元也是专门为有限的问题而设计的。因此，在进行有限元分析之前，选择和定义适合自己问题的单元类型是非常必要的。单元选择不当，直接影响到计算能否进行和结果的精度。

ANSYS 的单元库中提供了 100 多种单元类型，几乎能解决大部分常见问题。每个单元都有唯一的编号，并按类型进行了分类，如 BEAM3、SHELL43 和 SOLID96 等。表 4.1 列出了静力分析时常用到单元类型。

表4.1 常用单元类型表

类别	形状和特性	单元类型
杆	普通 双线性	LINK1, LINK8 LINK10
梁	普通 截面渐变 塑性 考虑剪切变形	BEAM3, BEAM4 BEAM54, BEAM44 BEAM23, BEAM24 BEAM188, BEAM189
管	普通	PIPE16, PIPE17, PIPE18

	浸入 塑性	PIPE59 PIPE20,PIPE60
2-D 实体	四边形 三角形 超弹性单元 粘弹性 大应变 谐单元 P 单元	PLANE42,PLANE82,PLANE182 PLANE2 HYPER84,HYPER56,HYPER74 VISCO88 VISO106,VISO108 PLANE83,PPNAE25 PLANE145,PLANE146
3-D 实体	块 四面体 层 各向异性 超弹性单元 粘弹性 大应变 P 单元	SOLID45,SOLID95,SOLID73,SOLID185 SOLID92,SOLID72 SOLID46 SOLID64,SOLID65 HYPER86,HYPER58,HYPER158 VISO89 VISO107 SOLID147,SOLID148
壳	四边形 轴对称 层 剪切板 P 单元	SHELL93,SHELL63,SHELL41,SHELL43,SHELL181 SHELL51,SHELL61 SHELL91,SHELL99 SHELL28 SHELL150

关于单元类型选择的问题,不是本书的讲解范围,读者可参考 ANSYS 自带的帮助文档。下面用 GUI 的方式介绍定义单元类型的常用操作步骤:

(1)启动 ANSYS,单击 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 菜单,弹出如图 4.1 所示的【Element Types】对话框。此时列表框中显示【NONE DEFINED】表示没有任何单元被定义。

(2)单击【Add...】按钮,弹出【Library of Element Types】对话框,如图 4.2 所示。可以看到,列表框中列出了单元库中的所有单元类型。左侧列表框中显示的是单元的分类,右侧列表框为单元的特性和编号,选择单元时应该先明确自己要定义的单元类型,如 Beam、Shell 和 Link 等,然后就很容易从右边的列表框中找到合适的单元了。

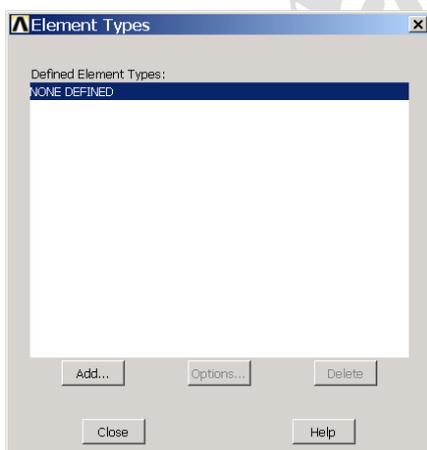


图4.1 单元类型对话框

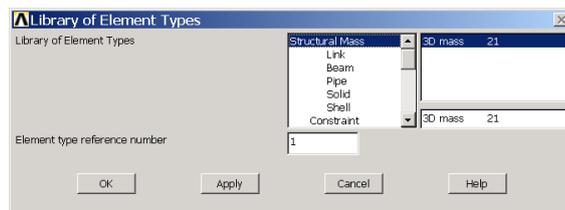


图4.2 单元类型库对话框

(3) 在左侧列表框中选择【Shell】，则右侧列表框中将显示所有的 SHELL 单元，如【Elastic 4node 63】即为 SHELL63 单元。选中此单元，并在【Element type reference number】文本框中输入单元参考号，默认为“1”，单击【OK】按钮即可。如图 4.3 所示。

(4) 此时，单击【Apply】按钮，可继续添加别的单元类型，同时【Element type reference number】文本框中的数值将自动变为【2】。用户可以仿前面介绍的方法，定义一个 BEAM3 单元，单击【OK】按钮后，返回单元类型对话框，如图 4.4 所示。

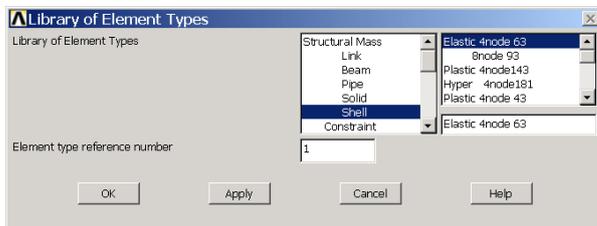


图4.3 选择SOLID42单元

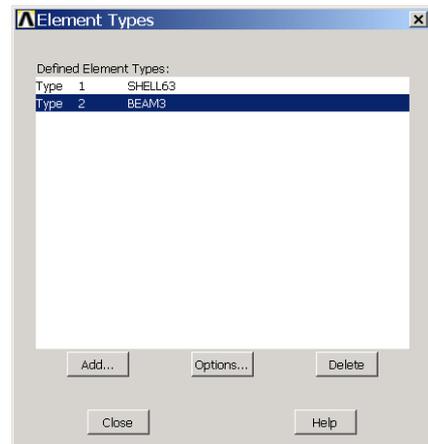


图4.4 定义的单元类型

(5) 如用户想删除单元类型，在图 4.4 所示的对话框中选中单元，单击【Delete】按钮即可。

对于不同的单元有不同的选项设置。例如刚才定义的 BEAM3 单元，在图 4.4 所示的对话框中，选中 BEAM3，单击【Options...】按钮，将弹出如图 4.5 所示的【BEAM3 element type options】对话框。BEAM3 单元只有三个选项，分别为【K6】、【K9】和【K10】，选项的设置不再详述。

用户还可以单击【Utility Menu】|【List】|【Properties】|【Element Types】菜单，列表显示所有定义的实常数数值，如图 4.6 所示。

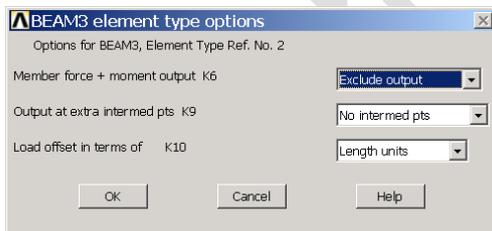


图4.5 BEAM3单元选项

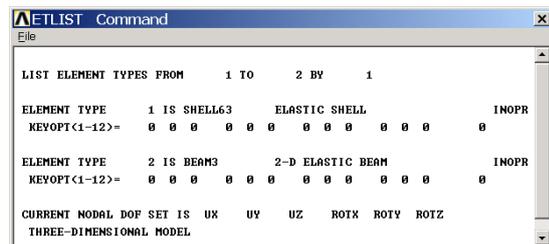


图4.6 列表显示单元类型

4.1.2 定义实常数

实常数的设置是依赖于单元类型的，如 BEAM 单元的横截面特性、SHELL 单元的厚底设置等。下面以 BEAM3 单元为例，介绍 BEAM 单元的实常数设置步骤：

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Real Constants 菜单，弹出如图 4.7 所示的【Real Constants】对话框。此时列表框中显示【NONE DEFINED】表示没有任何实常数被定义。

(2) 单击【Add...】按钮，弹出如图 4.8 所示的对话框。

(3) 选中【Type 2 BEAM3】，单击【OK】按钮，弹出如图 4.9 所示的【Real Constants for BEAM3】对话框。在【AREA】文本框中输入截面面积；在【IZZ】文本框中输入惯性矩；在【HEIGHT】文本框中输入截面高度；在【SHEARZ】文本框中输入剪切变形常数；在【ISTRN】文本框中输入初应变值；在【ADDMAS】文本框中输入单位长度质量。单击【OK】即可。



图4.7 实常数对话框

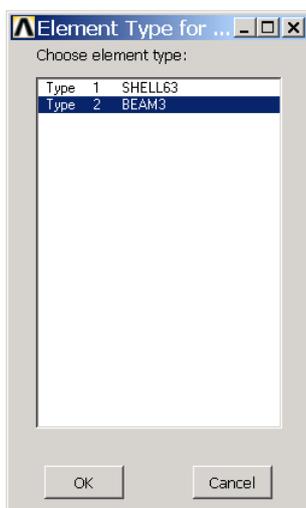


图4.8 选中BEAM3单元

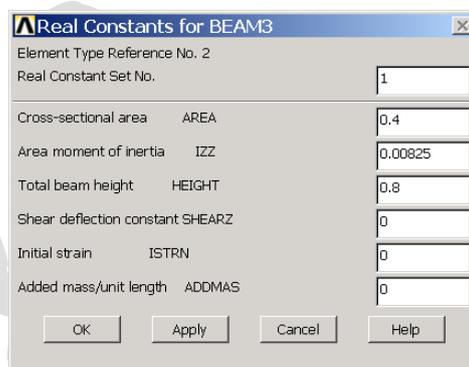


图4.9 BEAM3单元实常数设置

(4) 最终得到的实常数如图 4.10 所示。此时，单击【Edit...】按钮可以对其进行再编辑；单击【Delete...】按钮可将其删除。

用户还可以单击【Utility Menu】|【List】|【Properties】|【All Real Constants】菜单，列表显示所有定义的实常数值，如图 4.11 所示。



图4.10 定义后的实常数

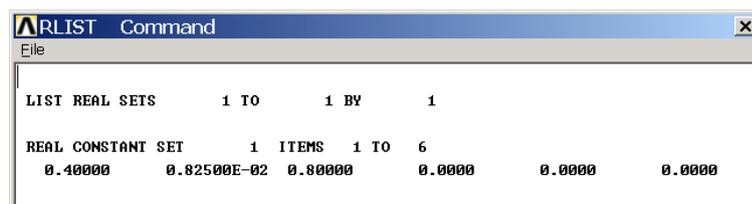


图4.11 列表显示实常数

对于 BEAM 单元, ANSYS 还提供了方便的创建截面的工具来输入截面尺寸, 用户可以选择截面库中已有的截面类型或自己定义新的截面类型, 程序可以自动计算出截面面积和惯性矩等参数, 极大地方便了梁单元实常数的定义。下面我们为 BEAM3 单击建立一个槽形截面, 操作如下:

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Sections> Beam> Common Sections 菜单, 弹出如图 4.12 所示的【Beam Tool】对话框。在【Name】文本框中输入截面名称, 如【sec_cao】; 在【Sub-Type】下拉列表框中选择 , 槽形截面的几何参数将出现在对话框中, 分别输入【W1】、【W2】、【W3】、【t1】、【t2】和【t3】参数, 单击【OK】按钮即定义了一个截面。

(2) 用户可以在【Beam Tool】对话框中单击【Preview】按钮, 将在图形视窗中显示所定义截面的几何参数, 如图 4.13 所示。图中  表示截面的几何中心,  表示截面的剪心, 在图的右侧列出截面的几何特性, 如截面面积和惯性矩等。

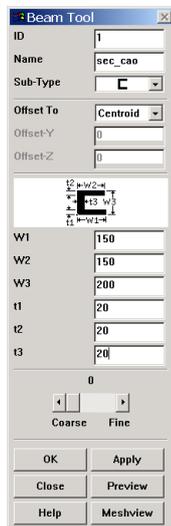


图4.12 BEAM单元截面设置工具

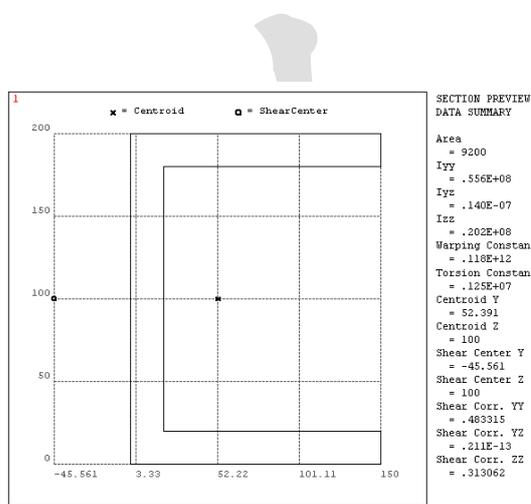


图4.13 槽形截面几何参数

说明: ANSYS的截面库中还提供了矩形 ()、圆形 ()、管形 ()、工字形 () 和角钢 () 等多种截面类型。用户可以选择在【Sub-Type】下拉列表框中选择  设置自定义截面。

4.1.3 定义材料参数

定义材料参数就是输入进行有限元分析的材料本构关系。根据分析问题的不同, 材料参数可以简化为直线型、双折线, 曲线等, 还可以随温度变化设置不同的本构关系。下面以常用的线性和非线性材料参数定义方法, 其它的操作与此类似。

1. 定义线性材料参数

假设材料是各向同性的线弹性材料, 其材料参数的定义步骤如下:

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单, 弹出【Define Material Model Behavior】对话框, 如图 4.14 所示。在右侧列表框中依次选择【Structural】|【Linear】|【Elastic】|【Isotropic】选项。

(2) 双击【Isotropic】将弹出如图 4.15 所示的【Linear Isotropic Material Properties for Material...】对话框。在【EX】文本框中输入弹性模量“2E11”，在【PRXY】文本框中输入泊松比“0.3”。

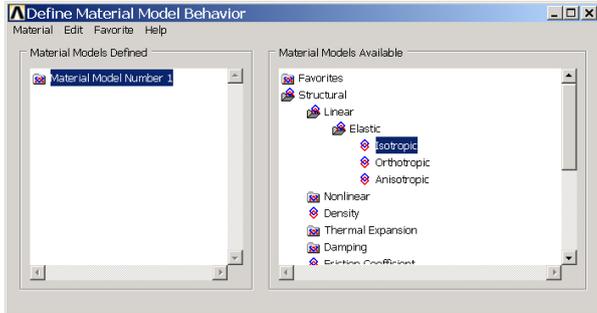


图4.14 定义材料参数对话框

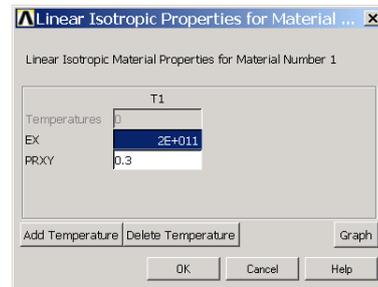


图4.15 设置弹性模量和泊松比

(3) 单击【Add Temperature】按钮，可以输入弹性模量和泊松比，如图 4.16 所示。

(4) 单击【Graph】按钮，打开图 4.17 所示的下拉菜单。

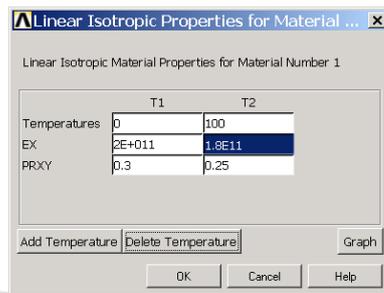


图4.16 输入随温度变化的弹性模量和泊松比



图4.17 【Graph】下拉菜单

(5) 选择【EX】选项后，将在图形视窗中显示材料弹性模量随温度的变化曲线，如图 4.18 所示。用户还可以选择【PRXY】选项，在图形视窗中显示泊松比与温度的关系曲线。

(6) 要删除 T2 温度，可在图 4.16 所示的对话框中选中 T2，单击【Delete Temperature】按钮即可删除改列数据。此时材料的弹性模量和泊松比将不随温度变化。

(7) 接着单击【OK】按钮，返回【DDefine Material Model Behavior】对话框，如图 4.19 所示。左侧的列表框中已经出现了【Linear Isotropic】，表示已经定义了一种各项同性线弹性材料。

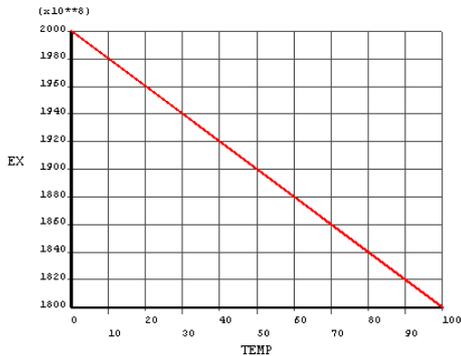


图4.18 弹性模量随温度变化曲线

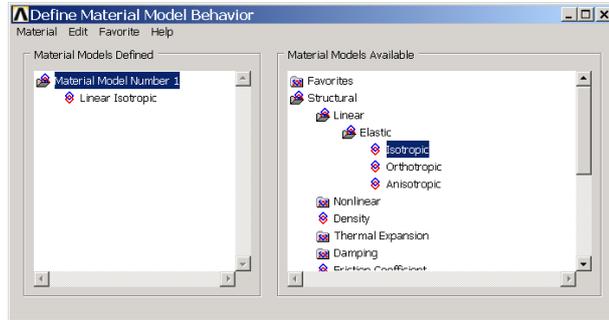


图4.19 材料参数定义表

说明：用户还可以在图 4.19 所示对话框中单击左上角的菜单【Material】|【New model...】，定义新的材料参数，单击后将弹出如图 4.20 所示的对话框，在【Define Material ID】文本框中输入材料 ID 号（程序会自动编号，用户也可以自己定义），单击【OK】按钮，重复以上步骤进行定义。



图4.20 定义材料ID

2. 定义非线性材料参数

下面新建一个材料模型，定义一个较为复杂的非线性材料参数，操作如下：

(1) 在【Define Material Model Behavior】对话框中，单击左上角的菜单【Material】|【New model...】选项，弹出【Define Material ID】对话框，输入材料 ID 号，单击【OK】按钮。

(2) 如图 4.21 所示，在选中材料 2 的基础上，依次双击【Structural】|【Nonlinear】|【Inelastic】|【Rate Independent】|【Isotropic Hardening Plasticity】|【Mises Plasticity】|【Multilinear】菜单，弹出如图 4.22 所示的提示框。提示在进行非线性材料参数输入之前应先定义弹性材料属性。

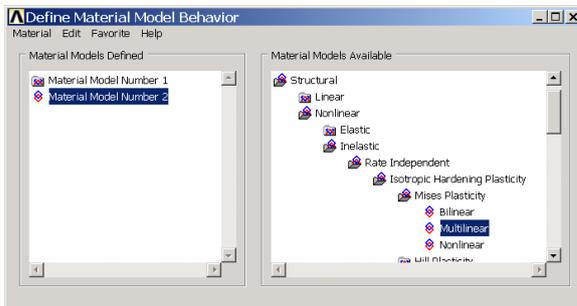


图4.21 定义非线性材料



图4.22 非线性材料定义提示

(3) 单击【确定】按钮，将弹出【MultiLinear Isotropic Material Properties for Material...】

对话框，仿前面的步骤输入弹性模量“2.0e11”和泊松比“0.3”，单击【OK】按钮。

(4) 接着弹出如图 4.23 所示的数据点输入对话框。在【STRAIN】文本框中输入应变【0.001】，在【STRESS】文本框中输入应力【206E6】。

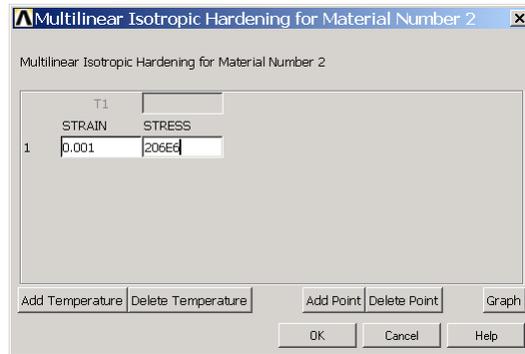


图4.23 数据点输入对话框

(5) 单击【Add Point】按钮，依次添加如图 4.24 所示的数据点。

说明：单击【Delete Point】按钮可以删除相应的数据点。

(6) 单击【Graph】按钮，可在图形视窗中显示材料的应力应变关系曲线。如图 4.25 所示。

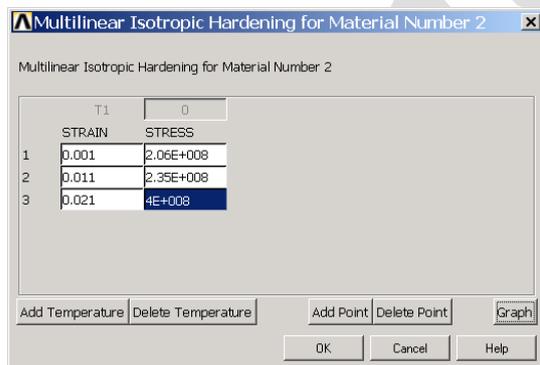


图4.24 添加数据点

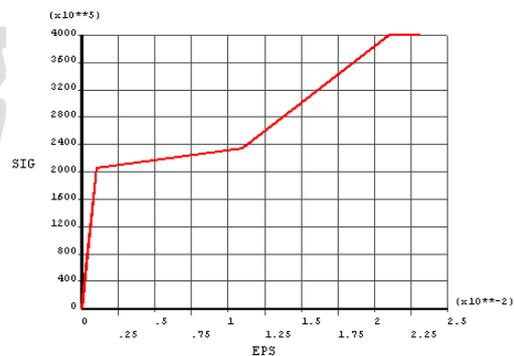


图4.25 非线性应力应变曲线

(7) 单击【OK】按钮完成材料模型 2 的定义。

说明：ANSYS 提供了多种材料模型的定义，适用于不同的问题，但步骤都和以上介绍的类似。

4.2 网格划分控制

定义了单元属性，理论上就可以按 ANSYS 的默认网格控制来进行网格划分。但有时按默认的网络控制来划分会得到较差的网格，如图 4.26 左所示，这样的网格往往会导致计算精度的降低甚至不能完成计算。这时用户可以使用本节讲到的网格划分控制功能得到满意的网格，如图 4.26 右所示。

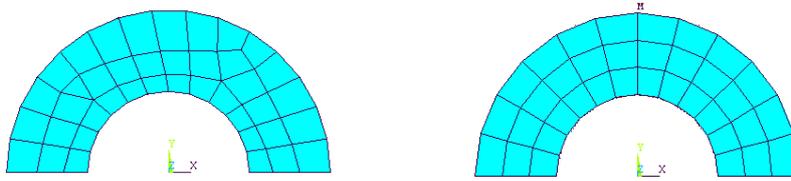


图4.26 同一实体不同的网格划分

网格划分控制能建立用于实体模型划分网格的因素，如单元形状、中间节点位置、单元大尺寸控制等。这一步骤在整个分析过程中是非常重要的，对分析结果的精确性和正确性有决定性影响。

4.2.1 分网工具

ANSYS 提供了一个强大的分网工具栏，包括单元属性选择、单元尺寸控制、自由划分与映射划分等网格划分可能用到的所有命令，使用户可以方便地进行常用的网格划分控制的参数设置。用户可以单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单，打开分网工具对话框，如图 4.27 所示。

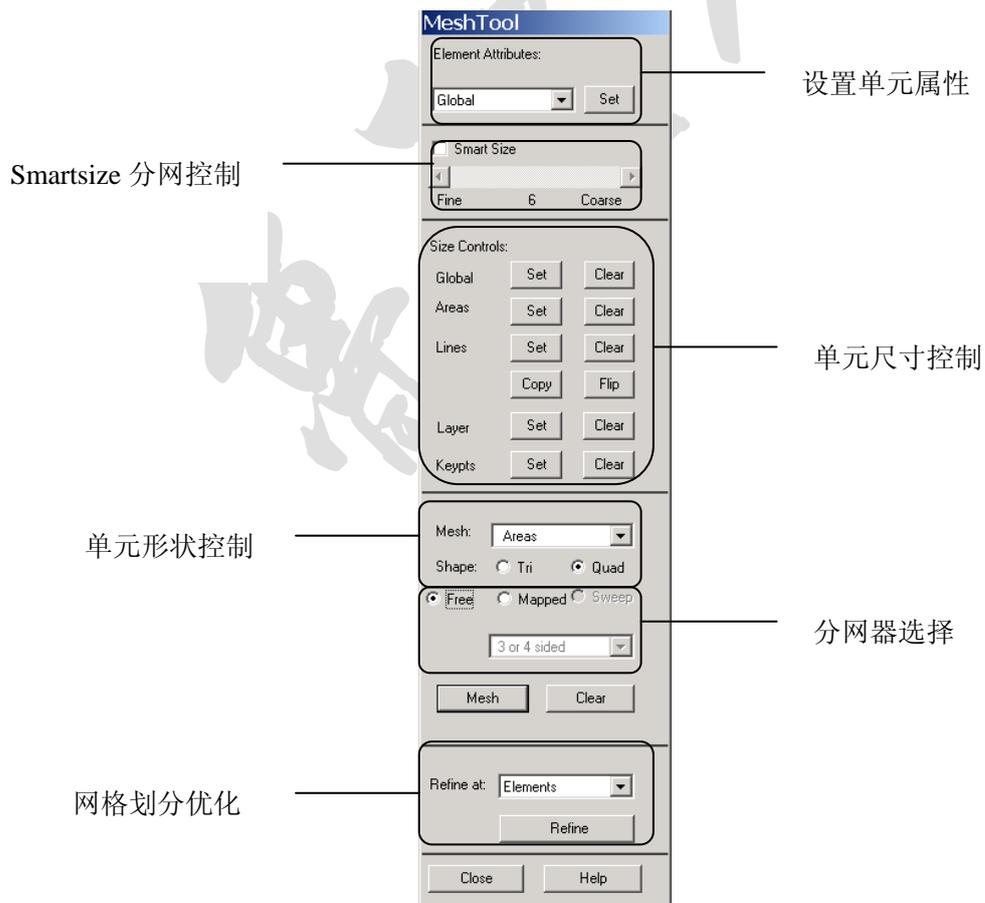


图4.27 分网工具对话框

下面对该对话框的主要功能做简要介绍，具体用法会在后面结合实例讲到：

- 设置单元属性：在【Element Attributes】下拉列表框中可以选择【Global】、【Volumes】、【Area】、【Lines】或【Keypoint】选项进行属性设置。选中【Global】，单击  按钮，将弹出如图 4.28 所示的【Meshing Attributes】对话框，可在该对话框中设置对应的单元类型、材料属性、实常数、坐标系及单元截面（如果定义了 BEAM 单元或 SHELL 单元，才会有单元截面项）。

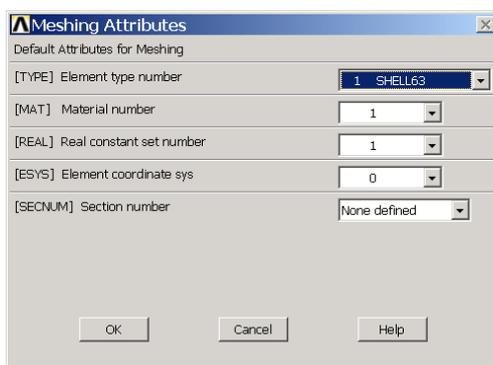


图4.28 分网属性对话框

- Smartsize 分网控制：只有当【Smart Size】复选框选中时，Smart Size 选项才打开。用户可以通过托动下方的滑块来设置 Smartsize 分网水平的大小。Smartsize 值越小，网格划分效果越好。
- 单元尺寸控制：在【Size Controls】选项组里，提供了对于【Global】、【Volumes】、【Areas】、【Lines】或【Keypoint】进行单元尺寸设置和网格清除的功能。
- 单元形状控制：在【Mesh】下拉列表框中可以选择网格划分的对象类型，如【Volumes】、【Areas】、【Lines】或【Keypoint】。当在下拉列表中选择【Areas】时，【Shape】选项组的内容将变为【Tri】（三角形）和【Quad】（四边形），可以控制用三角形还是四边形单元对面进行划分；当在下拉列表中选择【Volumes】时，【Shape】选项组的内容将变为【Hex】（六面体）和【Tet】（四面体），可以控制用六面体还是四面体单元对体进行划分。
- 分网器选择：在此处用户可以选中【Free】（自由分网）或【Mapped】（映射分网）单选按钮以决定使用哪个分网器进行网格划分。
- 网格划分优化：在【Mesh Tool】对话框的最下方，用户可以在【Refine at】下拉列表框中选择【Nodes】、【Elements】、【Keypoint】、【Lines】、【Areas】或【All Elems】，然后单击  按钮开始进行网格细化操作。

4.2.2 Smartsize 分网控制

Smartsize 是 ANSYS 提供的强大的自动分网工具，它有自己的内部计算机制，使用 Smartsize 在很多情况下更有利于在网格生成过程中生成形状合理的单元。在自由分网时，建议用户使用 Smartsize 还控制网格的大小。

Smartsize 算法首先对待划分网格的面或体的所有线估算单元边长。然后对几何体中的弯曲近似区域的线进行细化。由于所有的线和面在网格划分开始时已经指定大小，生成网格的质量与待划分网格的面或体顺序无关。

如果用四边形单元来给面划分网格，**Smartsize** 尽量给每一个面平均分配线数以使全部划分为四边形。网格为四边形时，如果生成的单元形状很差或在边界出现奇异域，应该考虑使用三角形单元。

1. Smartsize的基本控制

基本控制是指用 **Smartsize** 的分网水平值（大小从 1 到 10）来控制网格划分大小。程序会自动地设置一套独立的控制值来生成想要的大小，其中默认的分网水平是 6。用户可以按自己的需要修改。

修改方法为在图 4.27 所示的【Mesh Tool】对话框中的 **Smartsize** 项调节滑块即可。用户还可以单击菜单 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>SmartSize>Basic**，将弹出如图 4.29 所示的【Basic SmartSize Settings】对话框。在【Size Level】下拉列表中从 1（细）到 10（粗糙）选择一个级别，单击【OK】按钮即可。

图 4.30 显示了不同 **Smartsize** 水平值下的网格划分结果，从中可以看出 **Smartsize** 的强大功能。

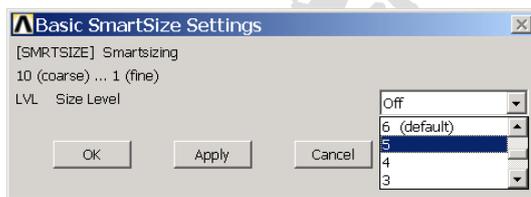


图4.29 Smartsize基本设置

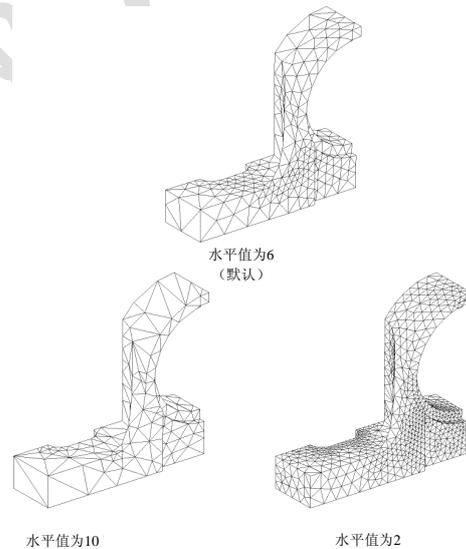


图4.30 Smartsize水平值的控制效果

2. Smartsize的高级控制

当用户需要对 **Smartsize** 做特殊的分网设置时，就需要使用高级控制技术了。**Smartsize** 的高级控制给用户提供了人工控制网格质量的可能，如用户可以改变诸如小孔和小角度处的粗化选项。

单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>SmartSize>Adv Opts** 菜单，将弹出如图 4.31 所示的【Advanced SmartSize Settings】对话框。该对话框的参数设置如下：

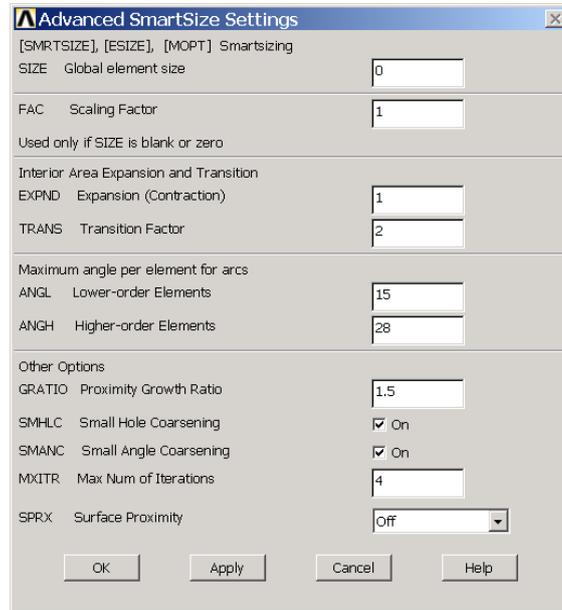


图4.31 Smartsize的高级控制

- **【FAC】**：用于计算默认网格尺寸的比例因子。当用户没有使用类似于 **ESIZE** 的命令对对象划分网格作出特殊指定时，该值的设置直接影响到单元的大小。取值范围为 0.2~5.0。图 4.32 显示了此参数的设置效果。

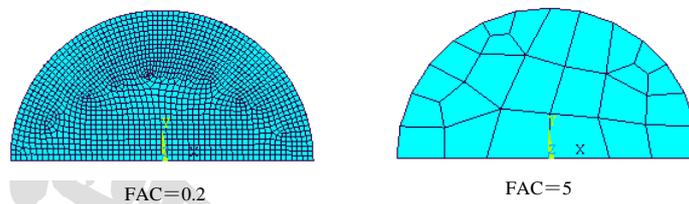


图4.32 FAC参数的控制效果

- **【EXPND】**：分网胀缩因子。该值决定了面内部单元尺寸与边缘处的单元尺寸的比例关系。取值范围为 0.5~4。图 4.33 显示了此参数的设置效果

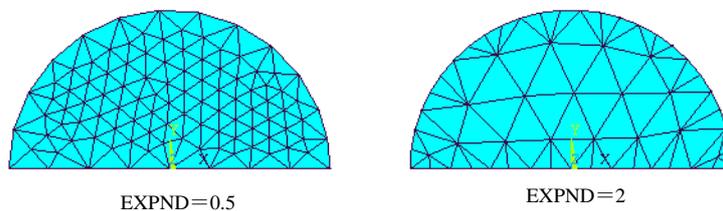


图4.33 EXPND参数的控制效果

- **【TRANS】**：分网过滤因子。该值决定了从面的边界上到内部内部单元尺寸胀缩的速度。该值必须大于 1 而且最好小于 4。

- **【ANGL】**：对于低阶单元，该值设置了每单元边界过渡中允许的最大跨越角度。ANSYS 默认为 22.5° （Smartsize 的水平值为 6 时）。

其它参数如**【GRATIO】**、**【SMHLC】**、**【SMANC】**等，在一般情况下接受默认即可，本书不再一一介绍。

说明：当在**【Mesh Tool】**对话框中选了**【Smart Size】**复选框，并拖动滑块进行了 Smartsize 水平设置后，高级控制对话框中的值将自动恢复为默认值。因此，在高级控制对话框中修改了参数后，应马上进行网格划分。

4.2.3 尺寸控制

图 4.27 所示的分网工具提供了专门的单元尺寸控制选项，如图 4.34 所示。它可以对面、线、层和关键点的单元大小进行设置，还可以对全局单元尺寸进行设置。如图 4.35 所示的圆环，外径和内径分别为 20 和 10。用全局单元尺寸控制其网格划分的操作如下：

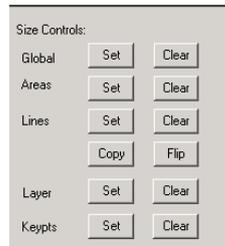


图4.34 尺寸控制选项

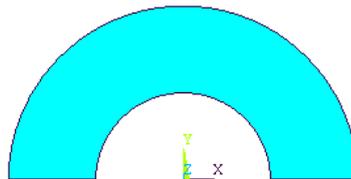


图4.35 几何模型

(1) 复制光盘目录“\ch04\ex1\”中的文件到工作目录，运行 ANSYS，然后单击工具栏上的  按钮，打开数据库文件“ex1.db”。

(2) 单击 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 菜单打开如图 4.27 所示的**【Mesh Tool】**对话框，并设置好单元属性。

(3) 单击图 4.34 中**【Global】**右边的  按钮，弹出如图 4.36 所示的对话框。

(4) 在**【Element edge length】**文本框中输入单元大小“3”，单击**【OK】**按钮，回到**【Mesh Tool】**对话框。

说明：要清除全局单元尺寸控制，单击图 4.34 中**【Global】**右边的  按钮即可。

(5) 在图 4.27 所示的对话框中，定义单元形状控制为**【Quad】**；分网器选择**【Free】**。然后单击  按钮，弹出图形拾取对话框，再用鼠标在图形视窗中选择要划分的圆环，单击**【OK】**按钮。得到划分的网格如图 4.37 所示。

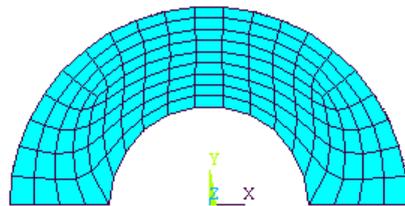
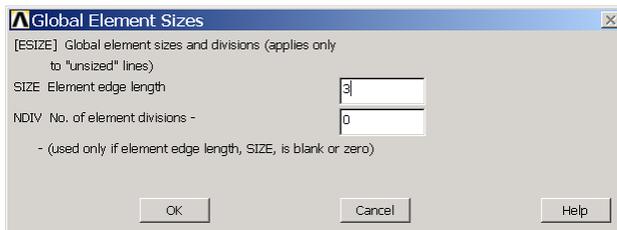


图4.36 全局单元尺寸设置

图4.37 全局控制单元尺寸分网

用户还可以用线来控制单元尺寸的大小，其操作如下：

(1) 单击工具条上的 **RESUM_DB** 按钮，重新打开数据库文件 “ex1.db”。

(2) 单击 **Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool** 菜单打开如图 4.27 所示的 **【Mesh Tool】** 对话框，并设置好单元属性。

(3) 单击图 4.34 中 **【Lines】** 右边的 **Set** 按钮，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择圆环的内外弧线，然后单击 **【OK】** 按钮。接着弹出如图 4.38 所示的对话框。

(4) 在 **【No. of element divisions】** 文本框中输入线上的单元划分个数 “12”，其它保持不变，单击 **【OK】** 按钮。

(5) 再次单击图 4.34 中 **【Lines】** 右边的 **Set** 按钮，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择圆环的两条下边线，然后单击 **【OK】** 按钮。在弹出的 **【Element Sizes on Picked Lines】** 对话框中，设置 **【No. element divisions】** 为 “3”，并单击 **【OK】** 确认。至此，线上单元边长设置完毕，结果如图 4.39 所示。

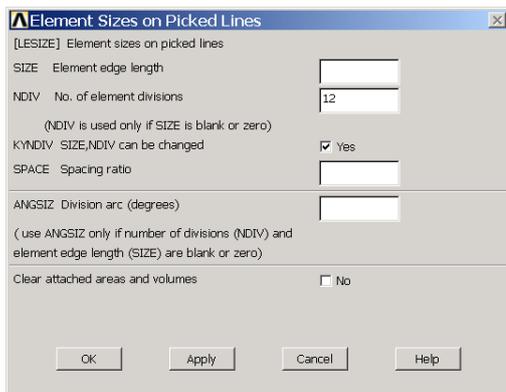


图4.38 设定线上单元边长

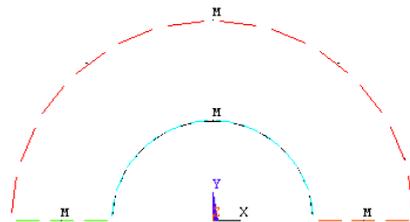


图4.39 设置好线上单元边长的模型

(6) 在图 4.27 所示的对话框中，定义单元形状控制为 **【Quad】** 选项；分网器选择 **【Free】** 单选按钮。然后单击 **Mesh** 按钮，弹出图形拾取对话框，再用鼠标在图形视窗中选择要划分的圆环，单击 **【OK】** 按钮。得到的划分网格如图 4.40 所示。

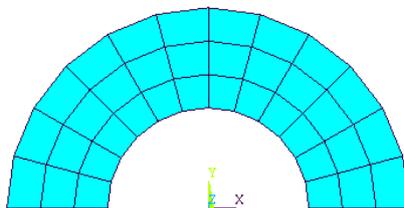


图4.40 线控制单元尺寸分网

分网工具还可以对面和关键点进行单元尺寸控制，其操作与线类似不再详述。

4.2.4 单元形状控制

在对同一个网格区域的面单元可以是三角形或四边形，体单元可以是六面体或四面体形状。因此在进行网格划分之前，用户应该决定是使用 ANSYS 对于单元形状默认设置，还是自己指定单元形状。

当用四边形单元进行分网时，结果中还可能包含有三角形单元，这就是单元划分过程中产生的单元“退化”现象。比如：PLANE82 单元是二维的结构单元，具有 8 个节点（I、J、K、L、M、N、O、P），默认情况下，PLANE82 具有四边形的外形，但当节点 K、L 和 O 定义为同一个节点时，原来的四边形单元即“退化”为三角形单元，如图 4.41 所示。

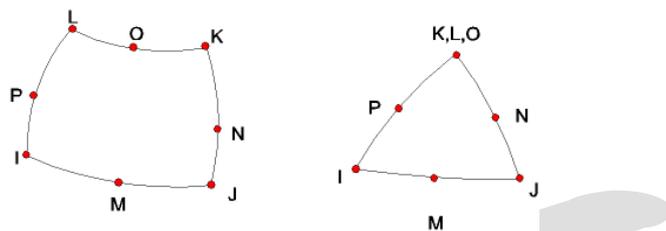


图4.41 单元的退化

当在划分网格前指定单元形状时，不必考虑单元形状是默认的形式还是某一单元的退化形式。相反，可以考虑想要的单元形状单元本身的最简单形式。用分网工具指定单元形状的操作如下：

(1) 单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单打开如图 4.27 所示的【Mesh Tool】对话框。

(2) 在【Mesh】下拉列表框中选择需要划分的对象类型。当选择面分网时，在【Shape】选项组中选择【Quad】（四边形）或【Tri】（三角形）选项；当选择体分网时，可选择【Tet】（四面体）或【Hex】（六面体）选项。

(3) 单击  按钮对模型进行网格划分。

用户还可以打开【Mesher Options】（分网器选项）对话框进行单元形状设置，操作如下：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesher Opts 菜单，弹出如图 4.42 所示的【Mesher Options】（分网器选项）对话框。

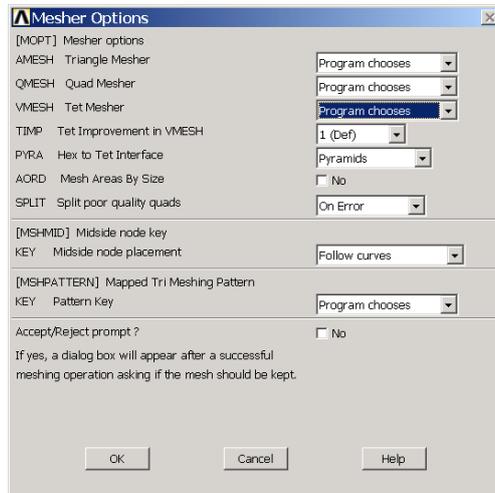


图4.42 分网器选项对话框

(2)在【Mesher Options】对话框中有【Triangle Mesher】(三角形分网器)、【Quad Mesher】(四边形分网器)和【Tet Mesher】(四面体分网器)等下拉列表框。选择合适的分网器,单击【OK】即可。

4.2.5 分网器选择

在进行一般的网格控制之前,用户应该考虑好本模型使用自由分网(Free)还是映射分网(Mapped)。

自由分网对于单元没有特殊的限制,也没有指定的分布模式,而映射分网则不但对单元形状有所限制,而且对单元排布模式也有要求。映射面网格只包含四边形或三角形单元,映射体网格只包含六面体单元。映射网格具有规则的形状,明显成排地规则排列。因此,如果想要这种网格类型,必须将模型生成具有一系列相当规则的体或面,才能进行映射分网。如图4.43所示。

前面已经讲过,自由分网主要是使用 Smartsize 进行控制,要进行自由分网单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单菜单打开【Mesh Tool】对话框,参考图4.44,通过选择【Free】单选按钮,使用自由分网模式。

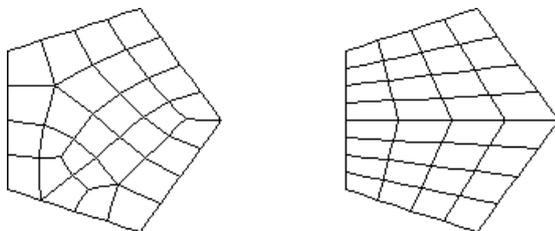


图4.43 自由分网(左)与映射分网(右)



图4.44 自由分网选择模式

说明:使用【Mesh Tool】对话框的优点在于,用户选择了单元的形状时,ANSYS会自动将对于此单元形状不可用的分网模型的相应按钮置于不可用状态。

下面以一个简单的五边形面（如图 4.45 所示）为例，介绍映射分网的操作：

（1）复制光盘目录“\ch04\ex2\”中的文件到工作目录，运行 ANSYS，然后单击工具栏上的  按钮，打开数据库文件“ex2.db”。

（2）单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单菜单打开【Mesh Tool】对话框。

（3）在图 4.44 所示的分网模式栏，选择【Mesh】下拉列表为【Area】，表示对面进行划分；选择【Shape】单选按钮为【Quad】，表示选择四边形单元形状；接着选择分网模式为【Mapped】，使用映射分网。然后单击  按钮。

（4）接着弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择刚才建立的五边形面，单击【OK】按钮。此时，将弹出错误提示对话框（如图 4.46），表示当前面是不规则的，不能够进行映射分网。造成这个错误的原因是该面的边界线的数目超过了 4。

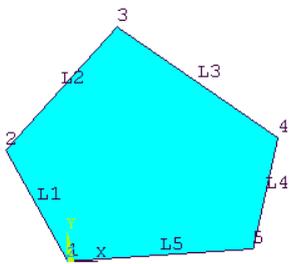


图4.45 待进行分网的五边形面

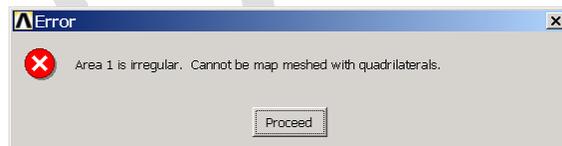


图4.46 对五边形面进行映射分网时的提示

注意：对面进行映射分网时，要求边的边界由 3 或 4 条线组成，当边界线数据大于 4 时可通过线的连接使其满足映射网格划分的要求。下面进行线的连接操作，使五边形面满足映射分网的要求。

（5）单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing> Concatenate>Lines 菜单，弹出如图 4.47 左所示的线拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择 L2 和 L3（参考图 4.45），然后单击【OK】按钮。连接线后得到如图 4.47 右所示的模型，可以看出 L2 和 L3 已经合并成了 L6。

说明：当对线进行连接后，用户还可以单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Concatenate>Del Concats>Lines 菜单来取消刚才所做的连接。

（6）此时再在【Mesh Tool】对话框中选择【Mapped】单选按钮，并在该按钮下的下拉列表框选中【3 or 4 sided】选项，然后单击  按钮，如图 4.48 所示。

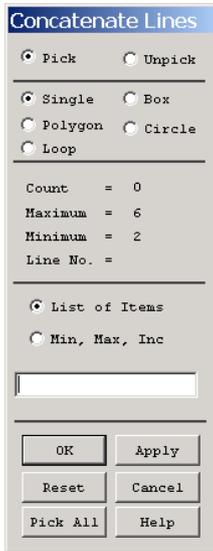


图4.47 进行线的连接

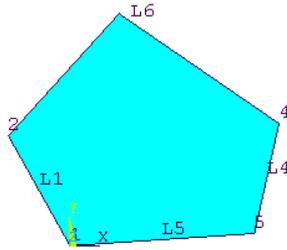


图4.48 选择映射分网

(7) 接着弹出面拾取对话框，在图形视窗中选择五边形面，单击【OK】按钮即可。得到的映射分网结果如图 4.49 所示。

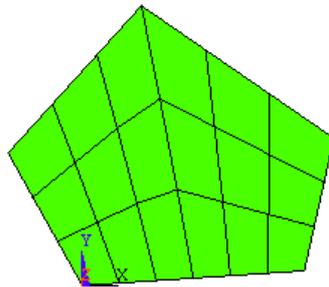


图4.49 五边形面映射分网结果

说明：用户可以通过上一小节介绍的全局尺寸控制的方法，在图 4.50 左所示的对话框中设置边界上的单元个数（当【Element edge length】文本框中输入【0】时有效）。如图 4.50 左所示设置后，重新用映射分网可得到如图 4.50 右所示的网格。

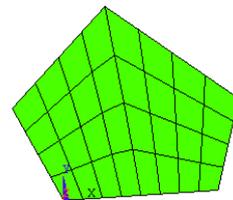
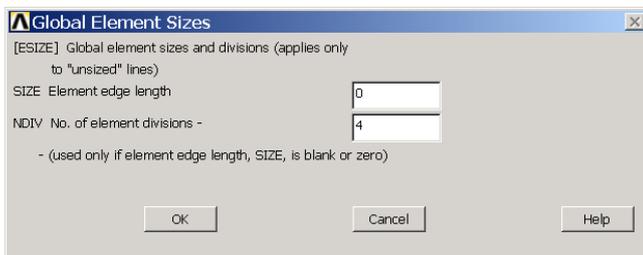


图4.50 全局控制单元尺寸

注意：还可以用边界线来控制映射分网的尺寸，但应该保证面一组对边上必须有相等的单元划分数或单元划分数符合过渡分网模式（可参考帮助文档）；如果面的边界由3条线组成，则各边上的单元划分数必须相等。

ANSYS 还提供了一种面映射划分的简化操作，可以不用对线进行连接操作，步骤如下：

- (1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复数据库中的数据。
- (2) 单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单菜单打开【Mesh Tool】对话框。然后按图 4.51 所示的设置选择【Pick corners】选项，然后单击 **Mesh** 按钮。
- (3) 接着会弹出关键点拾取对话框，按图 4.52 选取关键点 1、2、4 和 5，单击【OK】按钮即可生成相同的映射网格。



图4.51 选择角点映射分网

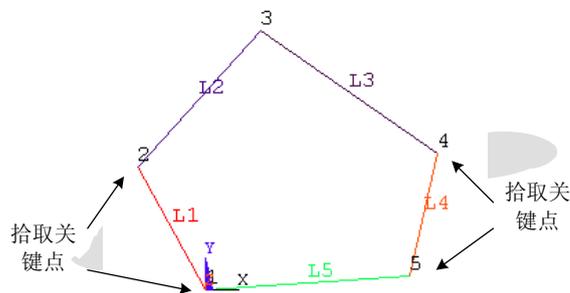


图4.52 通过角点选择进行映射分网

对于体的映射分网操作与面类似，本书不再详述，但需注意以下几点：

- 体模型应为六面体、楔形体或棱柱体（5个面）、四面体。
- 体模型的对边上应具有相等的单元划分数目，或虽然对边上的划分数目不相等但应符合某个过渡映射模式。
- 棱柱体的棱边上具有相同的划分数，上下面的边缘具有相等的并为偶数的划分数。
- 四面体的各边上应具有相同的并为偶数的划分数。

4.3 实体模型网格化

前几节中已经介绍了定义实体模型相关属性和进行分网时相关控制（包括常用的自由分网和映射分网），这些大都是分网的准备工作。准备完成后就可以对实体模型进行分网网格操作了。本节将按实体模型的不同类别分别介绍网格划分的操作，对于线的网格划分还要介绍梁单元的特殊操作。

在进行分网前，建议用户打开“接受/拒绝分网”提示功能，它使得用户可以方便地放弃某个不令人满意的网格划分，其操作为：

- (1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesher Opts 菜单，弹出如图 4.43 所示的对话框，参考图 4.53 选中【Accept/Reject prompt】右边的【Yes】复选框。

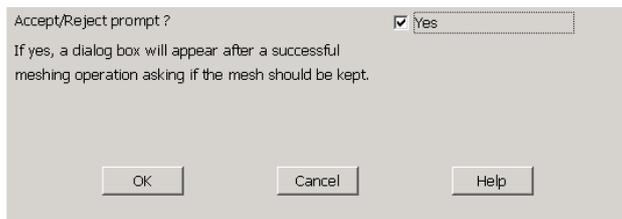


图4.53 打开“接受/拒绝分网”提示

(2) 当用户进行网格划分操作后，将弹出如图 4.54 所示的对话框。当【Accept Current Mesh?】右边【Yes】复选框被选中，表示用户接受当前的网格划分；如果不接受当前的网格划分，取消复选框的选择，单击【OK】按钮，程序将放弃刚才的网格划分操作。



图4.54 选择是否接受分网

4.3.1 关键点网格划分

ANSYS 中提供了质点单元，如 Mass21 等，可以用其对关键点进行网格划分。其操作步骤如下：

(1) 做好网格划分的准备工作，包括定义关键点、定义单元、定义实常数和定义材料参数。

(2) 单击 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Keypoints 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择要进行网格划分的关键点，然后单击【OK】按钮即可。

用户还可以在命令输入窗口中输入 KMESH 命令完成对关键点的网格划分。假如要对关键点 1 到 10 进行网格划分，在输入窗口中输入“KMESH, 1, 10”，然后回车即可。

4.3.2 线网格划分

对线进行网格划分，可以用 LINK 单元，也可以用 BEAM 梁单元。其中用 LINK 单元进行划分的操作比较简单，操作如下：

(1) 做好网格划分的准备工作，包括定义线、定义单元、定义实常数和定义材料参数。

(2) 单击 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择要进行网格划分的线，然后单击【OK】按钮即可。

用户还可以在命令输入窗口中输入 LMESH 命令完成对线的网格划分。假如要对线 1 到 10 进行网格划分，在输入窗口中输入“LMESH, 1, 10”，然后回车即可。图 4.55 为用 LINK10 单元划分得到的四个线单元。

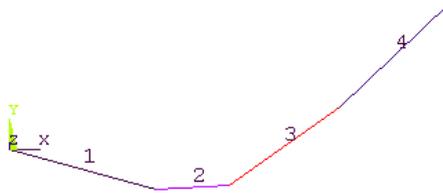


图4.55 线的网格划分

BEAM 梁单元的网格划分比较复杂，常用的相关操作主要有定义梁截面、控制截面分网等。其中定义梁截面的操作已经在 4.1 节讲过了，下面重点介绍对定义的截面进行控制分网的方法。

梁截面的分网精度是可以控制的。如图 4.56 所示，在定义截面的几何尺寸时，可以通过拖动截面参数文本框下的滑块进行网格划分粗细程序的调节。调节级别分为 0~5 级，0 表示最为粗糙的划分，5 表示最细的划分。单击图 4.56 中的 **Meshview** 按钮将在图形视窗中绘出截面网格划分结果。图 4.57 显示了 0 级（左）和 5 级（右）网格划分的结果。

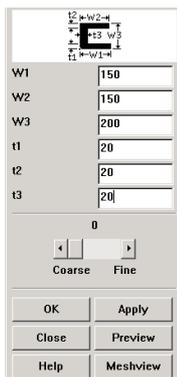


图4.56 控制截面分网

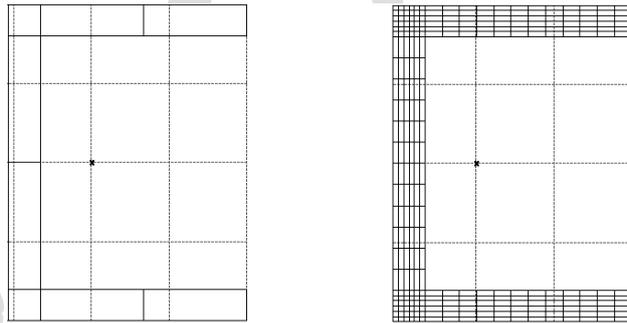


图4.57 截面分网结果对比

4.3.3 面网格划分

ANSYS 单元库中的 **PLANE** 单元和 **SHELL** 单元都可以用来对面进行网格划分。其操作方法如下：

- (1) 做好网格划分的准备工作，包括定义面、定义单元、定义实常数和定义材料参数。
- (2) 单击 **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free** 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择要进行网格划分的面，然后单击 **【OK】** 按钮即可。若要使用映射分网，可单击 **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided** 菜单（按边线映射分网）或单击 **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > By Corners**（按角点映射分网）。

用户还可以在命令输入窗口中输入 **AMESH** 命令完成对面的网格划分。假如要对选择集中所有面进行划分，在输入窗口中输入“**AMESH, All**”，然后回车即可。图 4.58 显示了一个对面网格划分的结果。

4.3.4 体网格划分

ANSYS 单元库中的 SOLID 单元可以用来对面进行网格划分。其操作方法如下：

(1) 做好网格划分的准备工作，包括定义体、定义单元、定义实常数和定义材料参数。

(2) 单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Volumes> Free 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择要进行网格划分的面，然后单击【OK】按钮即可。若要使用映射分网，可单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Volumes> Mapped> 4 to 6 sided 菜单。

用户还可以在命令输入窗口中输入 VMESH 命令完成对体的网格划分。假如要对选择集中所有体进行划分，在输入窗口中输入“AMESH, All”，然后回车即可。图 4.59 显示了一个对体网格划分的结果。

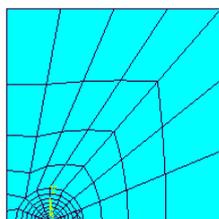


图4.58 面的网格划分

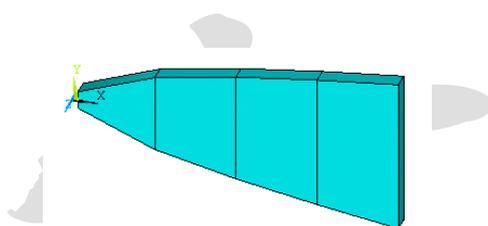


图4.59 体的网格划分

对于体的网格划分，ANSYS 还提供了一种扫掠分网功能。扫掠分网是指从一个边界面（称为源面）网格扫掠贯穿整个体将未划分网格的体划分成规则的网格，如图 4.60 所示。如果源面网格由四边形网格组成，扫掠成的体将生成六面体单元；如果源面由三角形网格组成，扫掠成的体将生成楔形单元；如果源面上既有四边形单元又有三角形单元，则扫掠后生成的体中将同时包含六面体单元和楔形单元。

下面以图 4.61 所示的实体为例，介绍扫掠分网的操作：

(1) 复制光盘目录“\ch04\ex3\”中的文件到工作目录，运行 ANSYS，然后单击工具栏上的  按钮，打开数据库文件“ex3.db”。

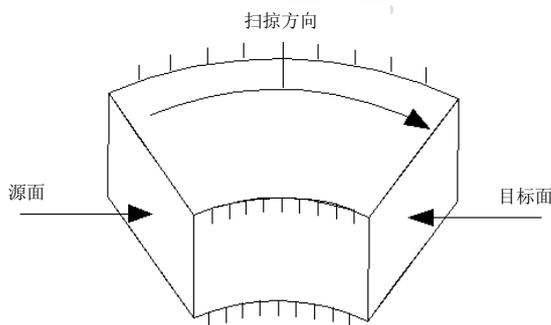


图4.60 扫掠分网示意

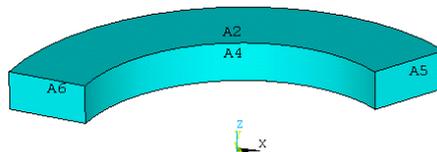


图4.61 待扫掠分网的实体模型

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes 菜单，弹

出图形拾取对话框，在图形视窗中选择生成的体，单击【OK】按钮，弹出如图 4.62 所示的对话框。按图 4.62 对体进行属性设置。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep Opts 菜单，弹出如图 4.63 所示的对话框。该对话框中的选项含意如下：

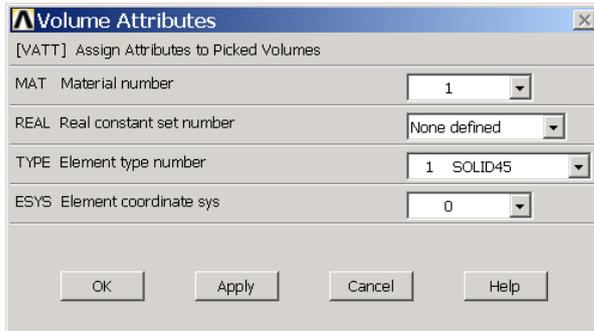


图4.62 对体进行属性设置

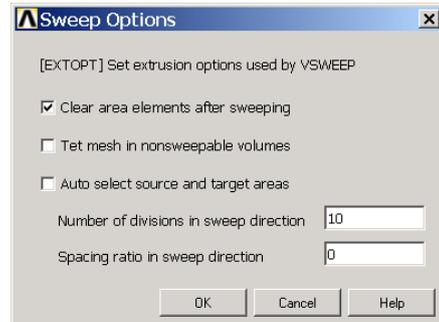


图4.63 扫掠分网设置对话框

- **【Clear area elements after sweeping】**：在扫掠分网后将面单元清除。选中此选项。
- **【Tet mesh in nonsweepable volumes】**：在不可进行扫掠分网的体中以四面体单元填充。
- **【Auto select source and target areas】**：自动选择源面和目标面。在默认情况下复选框是选中的，要进行源面的预分网，请取消此选项。取消后，下面两个文本框才可用，在**【Number of divisions in sweep direction】**文本框中输入扫掠方向上的单元划分数量**【10】**，并单击**【OK】**按钮。

(4) 对源面 (A6) 进行预分网设置。假定要把源面划分为 4×6 的四面表网格，则分别将源面两条边界上的单元划分设置为 4 和 6 即可。单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Layers>Picked Lines 菜单，将弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择 A6 面的上边线，单击**【OK】**按钮后将其单元划分数目设为 6。

(5) 重复 (4) 的操作，将面 A6 左边线的单元划分数目设为 4。此时的模型如图 4.64 所示。

(6) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep 菜单，弹出图形拾取对话框，先选中图形视窗中的实体，单击**【OK】**按钮，再选中源面 A6 并单击**【OK】**按钮，接着选中目标面 A5 并单击**【OK】**按钮。最后得到的网格如图 4.65 所示。

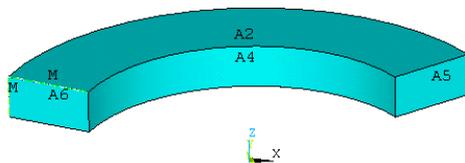


图4.64 定义源面划分设置

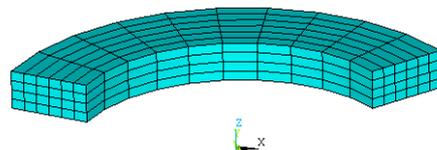


图4.65 扫掠分网结果

说明：本步用命令方式实现很简单，在命令输入窗口中输入“VSWEEP, 1, 6, 5”回车即可。

4.3.5 网格修改

当完成了网格划分之后，可能由于某种原因还需要修改已经得到的有限元网格。可用下列方法对网格进行修改：

- 用新的单元尺寸重新定义划分网格
- 用“接受与拒绝”（accept/reject）提示对话框放弃生成的网格，然后重新划分
- 清除网格，重新定义网格控制并重新划分网格
- 细化局部网格
- 改进网格（只适用于四面体单元网格）

其中，最主要的就是如何对有限元模型的局部进行网格细化。网格细化的过程实际上是将原有的单元进行了劈分，在默认情况下，细化区域内的节点会得到平滑处理（即它们的位置会被调整）以改善单元的外形。

下面以面的细化为例介绍网格细化的 GUI 操作方法，图 4.66 是用默认的 Smartsize（水平值为 6）自由分网得到的面分面结果，要对其进行局部细化，操作步骤如下：

（1）单击 Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool 菜单，打开如图 4.27 所示分网工具对话框。在下面的【Refine at】下拉列表框中可以选择【Nodes】（节点）、【Elements】（单元）、【Keypoints】（关键点）、【Lines】（线）、【Areas】（面）和【All Elems】（所有单元），如图 4.67 所示。

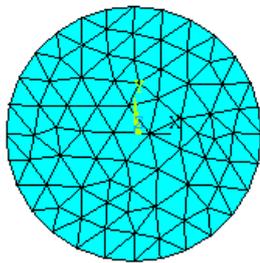


图4.66 自由分网结果

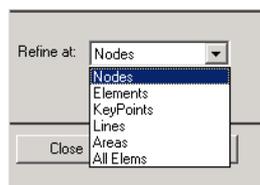


图4.67 网格细化对象选择

（2）单击工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮，保存当前的自由分网结果供以后使用。

（3）在图 4.67 所示的对话框中选择【Refine at】下拉列表框为【Nodes】，单击 **Refine** 按钮，弹出图形拾取对话框，然后在图形视窗中随意拾取一个节点，单击【OK】按钮，将弹出如图 4.68 所示的对话框。

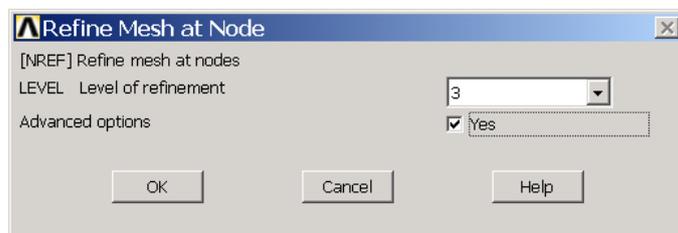


图4.68 设置细化级别

(4) 在【Level of refinement】下拉列表框中选择适当的细化级别，如【3】（级别分为1~5，1细化程序最轻，5细化程序最高）。选中【Advanced options】右边的【Yes】复选框，表示将进行细化的高级设置。单击【OK】按钮。

(5) 接着弹出如图 4.69 所示的细化高级设置对话框。设置参数如下：在【Depth of refinement】文本框中输入细化深度【1】；在【Postprocessing】下拉列表框中选择【Cleanup+Smooth】，表示进行清理与平滑化操作。然后单击【OK】按钮。

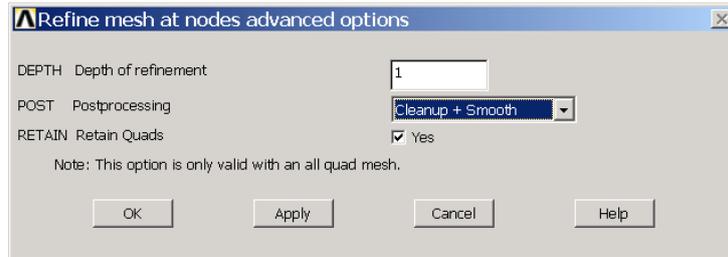


图4.69 细化高级设置对话框

说明：细化深度是指从用户指定的实体向周围细化单元的单元层数，深度越大，细化的范围也就越大。

(6) 此时可得到节点细化的结果，如图 4.70 所示。

以上是对节点周围进行细化的操作，利用其它对象进行细化的操作与此类型，只需在第（1）步中选择相应的对象即可，不再详述步骤。以下是对不同对象进行细化后的结果：

- 对单元周围进行细化如图 4.71 所示。

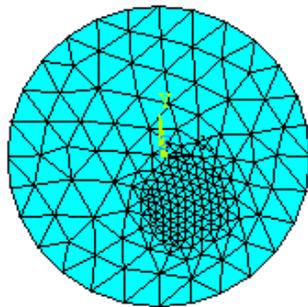


图4.70 对某一节点进行细化

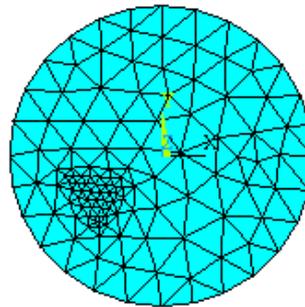


图4.71 对单元周围进行细化

- 对关键点周围进行细化如图 4.72 所示。
- 对线周围进行细化如图 4.73 所示。

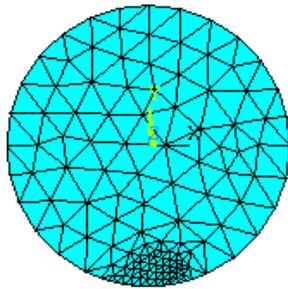


图4.72 对关键点周围进行细化

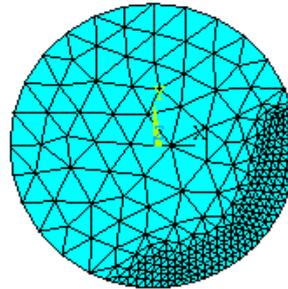


图4.73 对线周围进行细化

- 对整个面进行细化如图 4.74 所示。

4.4 网格检查

不好的单元形状会使分析结果不准。因此，ANSYS 程序提供了单元检查功能以提醒用户网格划分操作是否生成了不好的单元。由于没有通用的判断网格好坏的准则，所以单元形状的好坏最终还是由用户自己来判别，ANSYS 的网格检查功能只是一个辅助工具。

4.4.1 设置形状检查选项

ANSYS 为单元提供了许多形状检查项目，要对它们进行设置，可单击 Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Toggle Checks 菜单，弹出如图 4.75 所示的【Toggle Shape Checks】对话框，单击想要打开或关闭的个别检测项目，然后单击【OK】按钮即可。其中各个形关检查选项的含意如下：

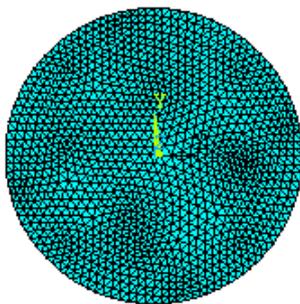


图4.74 对面进行细化

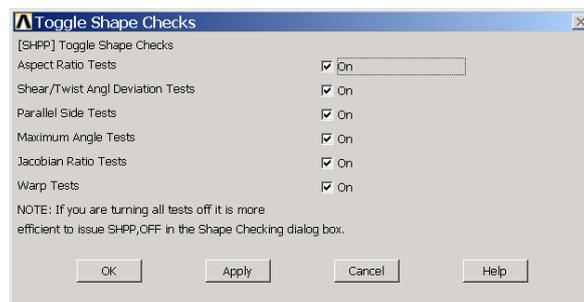


图4.75 形状检查选项

- **【Aspect Ratio Tests】**：纵横比检查
- **【Shear/Twist Angl Deviation Tests】**：SHELL28 拐角处偏角检查
- **【Paralled Side Tests】**：平行度偏差检查
- **【Maximum Angle Tests】**：最大扭角检查
- **【Jacobian Ration Tests】**：Jacobian 比率检查

- **【Warp Tests】**：扭曲因子检查

默认情况下上述检查项目都是打开的，如果用户想全部关闭这些项目，可单击 **Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Shape Checking** 菜单，在弹出的图 4.76 所示的对话框中选择 **【Level of shape checking】** 下拉列表框为 **【off】**，并单击 **【OK】** 即可。



图4.76 形状检查控制对话框

4.4.2 设置形状限制参数

如果 ANSYS 的默认形状限制参数不适合用户的要求，可按下述操作来改变其中的一些参数：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Shape Checking** 菜单，出现如图 4.76 所示的 **【Shape Checking Controls】** 对话框。

(2) 选中 **【Change Settings】** 右边的 **【Yes】** 复选框，然后单击 **【OK】** 按钮，将出现改变形状限制参数对话框，如图 4.77 所示。

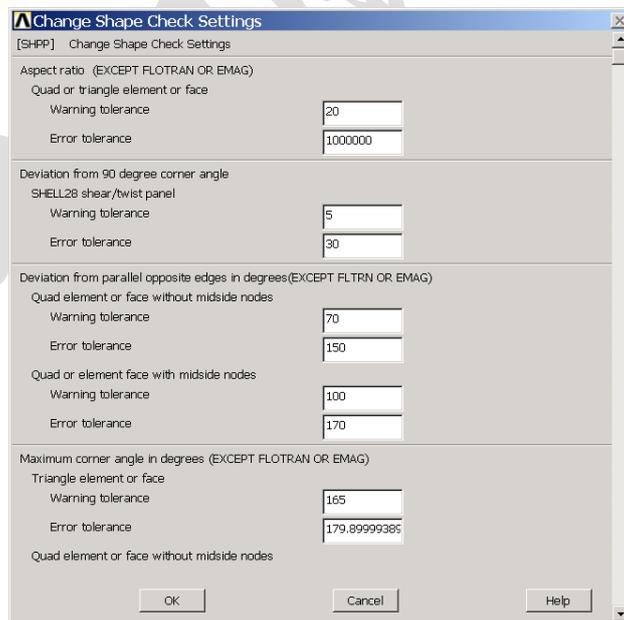


图4.77 改变形状限制参数对话框

(3) 用鼠标拖动窗口右侧的滚动条 () 可在所列范围上下移动。改变想应的参数设置后，单击 **【OK】** 按钮即可。

说明：用户可在图 4.76 所示的对话框中选择【Level of shape checking】下拉列表框为【Status】，然后单击【OK】按钮，将列表显示当前的形状限制参数，如图 4.78 所示。

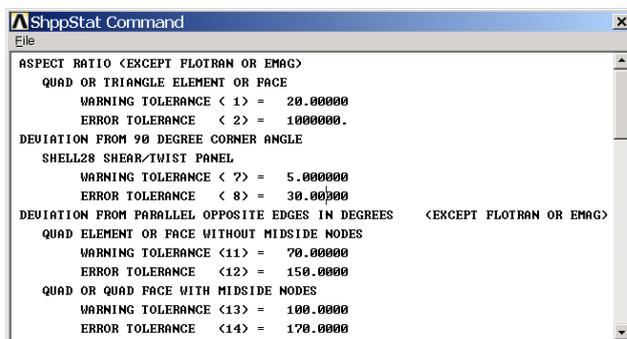


图4.78 列表显示形状限制参数

4.4.3 确定网格质量

用户设置好了形状限制参数后，程序就可以对当前生成的网格进行检查了。要查看形状查看结果，可击 Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Shape Checking 菜单，在弹出的图 4.76 所示的对话框中选择【Level of shape checking】下拉列表框的【Summary】选项，并单击【OK】按钮，接着弹出检查结果窗口，如图 4.79 所示。

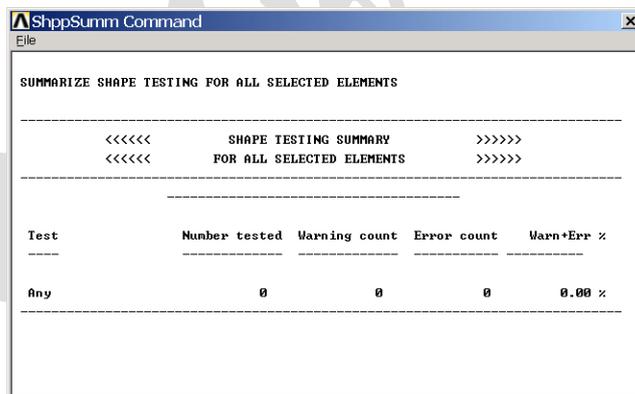


图4.79 网格质量检查结果

4.5 自适应网格

ANSYS 程序提供了近似的技術，它可以自动估计特定分析类型中因为网格划分带来的误差。通过这种误差估计，程序可以确定网格是否足够细。如果不够的话，程序将自动细化网格以减少误差。这一自动估计网格划分误差并细化网格的过程就叫做自适应网格划分，然后通过一系列的求解过程使得误差低于用户指定的数值（或直到用户指定的最大求解次数）。

下面以一个热力学问题为例，介绍自适应网格划分的操作步骤，如图 4.80 所示。要求结构在热荷载作用下的 E 点温度，其几何参数如图所示。在光盘的“\ch04\ex4\”目录中可

以找到此例的数据库文件，其 GUI 操作步骤如下：

(1) 启动 ANSYS，并单击【Utility Menu】|【File】|【Change Title】菜单，修改分析标题为“TWO DIMENSIONAL HEAT TRANSFER WITH CONVECTION”。

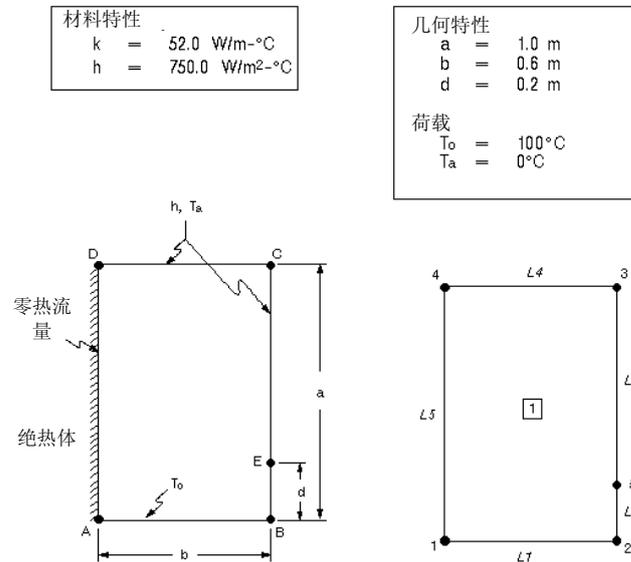


图4.80 示例问题描述

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，如图 4.81 所示，定义 PLANE55 单元。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，弹出如图 4.82 所示的对话框，在右侧的列表框中选择【Thermal】|【Conductivity】|【Isotropic】菜单项。

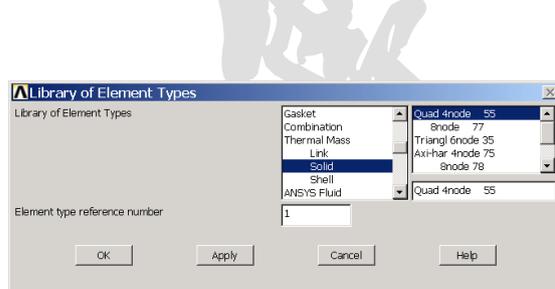


图4.81 定义PLANE55单元

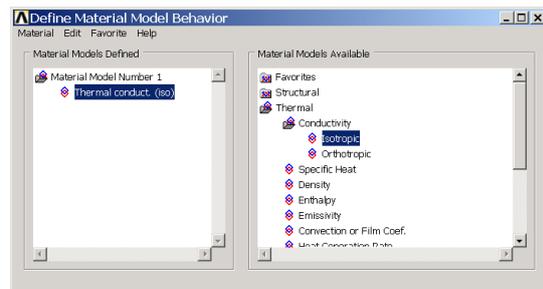


图4.82 定义材料参数

(4) 双击【Isotropic】菜单，弹出如图 4.83 所示的对话框。在【KXX】文本框中输入【52】，然后单击【OK】确认。

(5) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 菜单，按以下坐标分别定义 1~5 号关键点：(0, 0, 0)、(0.6, 0, 0)、(0.6, 1, 0)、(0, 1, 0)、(0.6, 0.2, 0)。得到模型如图 4.84 所示。

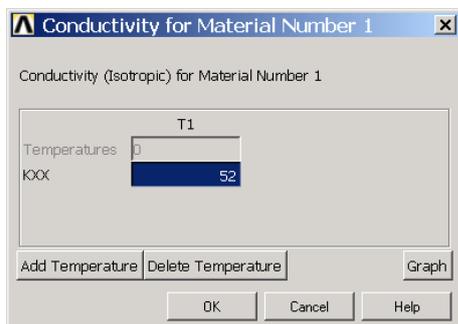


图4.83 输入材料参数值

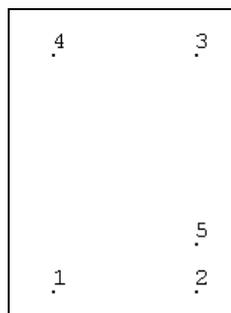


图4.84 定义关键点

(6) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>In Active Coord 菜单, 分别连接关键点 1 和 2、关键点 2 和 5、关键点 5 和 3、关键点 3 和 4、关键点 4 和 1。

(7) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines 菜单, 以刚才定义的线为边界生成面。如图 4.85 所示。

(8) 单击 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Thermal>Temperature >On Keypoints 菜单, 选择关键点 1 和 2, 然后弹出如图 4.86 所示的对话框。在【DOFs to be constrained】列表框中选中【TEMP】选项, 并在【Load TEMP value】文本框中输入“100”, 确认【Apply TEMP to nodes】后面【Yes】复选框选中, 单击【OK】按钮。

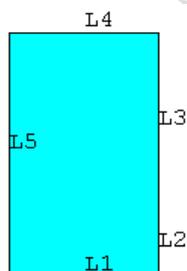


图4.85 几何模型

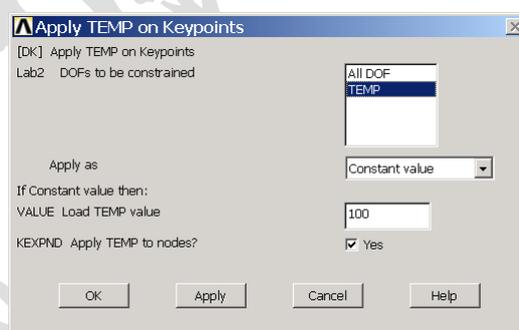


图4.86 定义温度荷载

(9) 单击 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Thermal>Convection>On Lines 菜单, 选择线 L2、L3 和 L4, 然后弹出如图 4.87 所示的对话框。在【Film coefficient】文本框中输入“750”, 单击【OK】按钮。

(10) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>SmartSize>Basic 菜单, 在弹出的对话框中, 选择【Size Level】下拉列表框的【Off】选项, 关闭 Smartsize 自动分网功能。

(11) 以上已经建立了模型并定义了边界条件, 下面就可以进行自适应网格划分了, 单击 Main Menu>Solution>Solve>Adaptive Mesh 菜单, 弹出如图 4.88 所示的对话框。在【Number of solutions】文本框中输入“10”, 表示循环 10 次; 在【Thermal】文本框中输入“5”, 表示误差控制在 5%; 在【Min. size change factor】和【Max. size change factor】文本框中分别输入“0.2”和“1”, 表示网格大小比例在 0.2 到 1 之间循环。然后单击【OK】按

钮，即开始自适应网格划分。

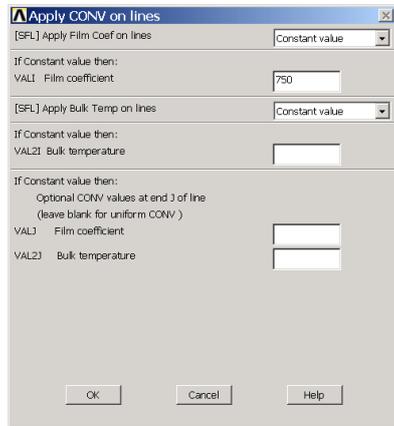


图4.87 定义边界条件

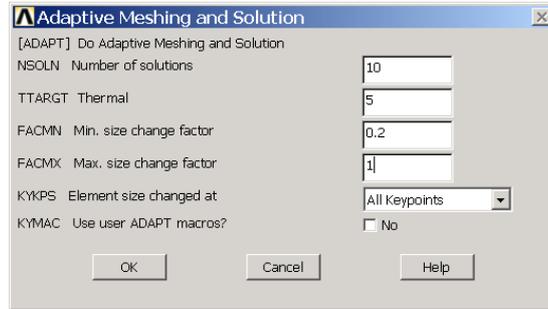


图4.88 自适应网格划分选项

(12) 待自适应网格划分计算结束后，单击【Utility Menu】|【Plot】|【Elements】菜单将显示自适应网格结果，如图 4.89 所示。

(13) 下面可查看分析结果，单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 菜单，按图 4.90 选择温度场结果，并单击【OK】按钮。最终得到的温度场分布如图 4.91 所示。

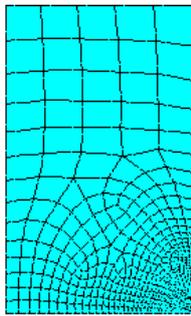


图4.89 自适应网格结果

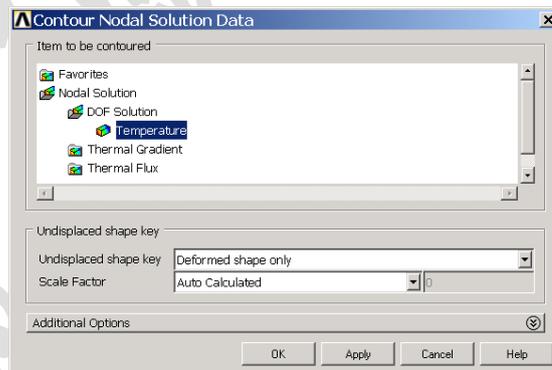


图4.90 选择温度场数据

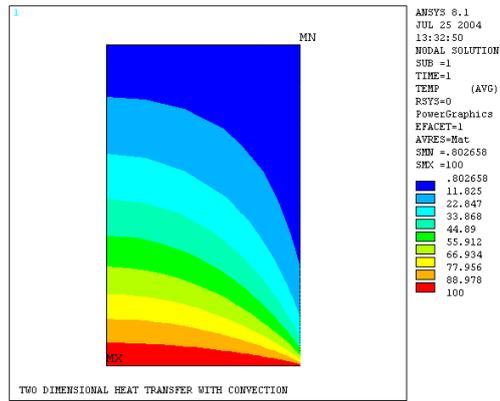


图4.91 温度场分布图

解

第五章 加载与求解

当建立了有限元模型之后，就可以对模型施加荷载并进行求解。施加荷载是进行有限元分析的关键一步，可以直接对实体模型施加荷载，也可以对网格划分之后的有限元模型施加荷载；当施加荷载完毕并且对模型进行了网格划分之后，就可以选择适当的求解器对问题进行求解。

5.1 荷载和荷载步

在 ANSYS 中对模型施加荷载，可以使用多种方法，而且通过荷载步选项，可以控制求解过程中如何使用荷载。

5.1.1 荷载分类

ANSYS 中荷载 (Loads) 包括边界条件和模型内部或外部的作用力。不同学科中的荷载如下：

- 结构分析：位移、力、弯矩、压力、温度和重力等；
- 热分析：温度、热流速率、对流和无限表面等；
- 磁场分析：磁势、磁能量、磁场段、源流密度和无限表面等；
- 电场分析：电势（电压）、电流、电荷和电荷密度等；
- 流场分析：速度和压力等。

以特性而言，荷载可分为六大类：位移 (DOF) 约束、力 (集中载荷)、表面载荷、体积载荷、惯性力和耦合场载荷。

- 位移约束 (DOF constraint) 将给定某一自由度一已知值。例如，结构分析中约束被指定为位移和对称边界条件；在热力学分析中指定为温度和热通量平行的边界条件。
- 力 (Force) 为施加于模型节点的集中荷。如在模型中被指定的力和力矩。
- 表面载荷 (Surface load) 为施加于某个面的分布载荷。例如在结构分析中为压力。
- 体积载荷 (Body load) 为体积或场荷载。如结构分析中的温度。
- 惯性载荷 (Inertia loads) 为由物体惯性引起的载荷。如结构分析中的重力加速度、角速度和角加速度。
- 耦合场载荷 (Coupled-field loads) 为以上载荷的一种特殊情况，指从一种分析得到的结果用作为另一种分析的荷载。例如，将磁场分析中计算得到的磁力作为结构分析中的力荷载。

5.1.2 荷载步、子步和平衡迭代

荷载步是指分步施加的荷载，可以使用不同的荷载步来施加不同的荷载组合，如图 5.1 所示。例如，在第一荷载步中施加风荷载，在第二荷载步中施加重力荷载，在第三荷载步中施加风和重力荷载以及一个不同的边界条件等。

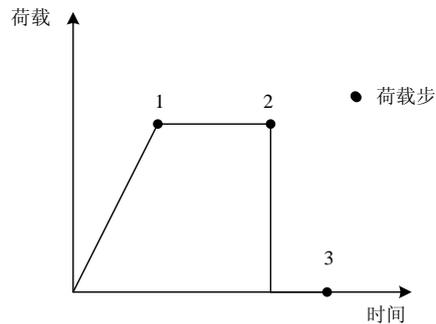


图5.1 多个荷载步

子步是执行求解荷载步过程中的点。对于不同的分析类型，子步的作用不同：

- 在非线性静态或稳态分析中，使用子步逐渐施加荷载以便能获得精确解。
- 在线性或非线性瞬态分析中，使用子步是为满足瞬态时间累积法则（为获得精确解，通常规定一个最小的时间步长）。
- 在谐波分析中，使用子步可获得谐波频率范围内多个频率处的解。

平衡迭代是指在给定子步下为了收敛而计算的附加解。平衡迭代仅应用于收敛起着很重要作用的非线性分析（静态或瞬态）中的迭代修正。

例如：对于二维非线性静态磁场分析中，为了获得精确解通常可使用两个荷载步：第一个荷载步将荷载逐渐加到 5 到 10 个子步上，每个子步仅使用一次平衡迭代；第二个荷载步中，得到最终收敛解，且仅有一个使用 15~25 次平衡迭代的子步。如图 5.2 所示。

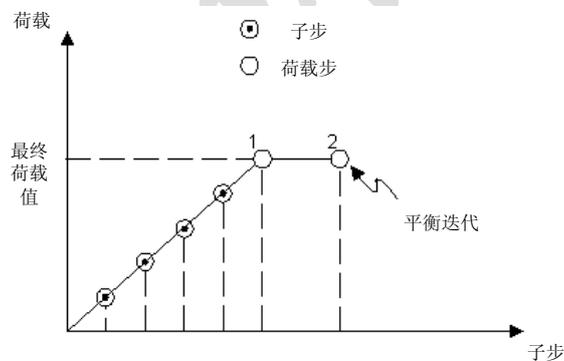


图5.2 荷载步、子步和平衡迭代

5.1.3 荷载的显示

如果用户对模型施加了荷载，可使用以下方法显示荷载：

- (1) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Symbols】菜单，将弹出如图 5.3 所示的对话框。

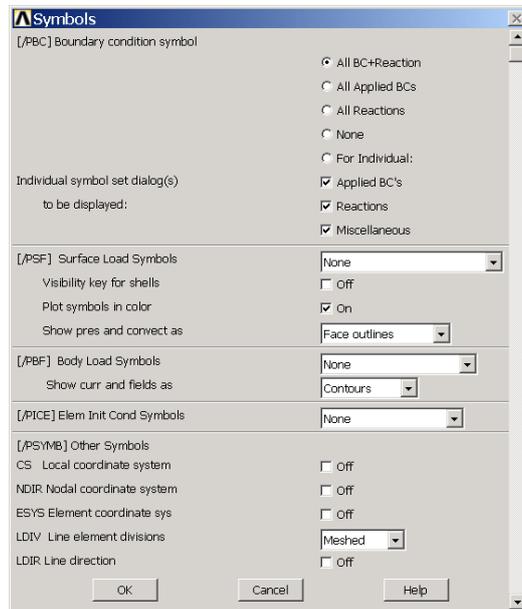


图5.3 【Symbols】对话框

(2) 在【Boundary condition symbol】单选列表中选中【All BC+Reaction】选项，然后单击【OK】按钮即可。

说明：在【Boundary condition symbol】单选列表中选中【None】选项，可关闭荷载显示。

5.1.4 荷载步选项

荷载步选项（Load step options）是用于表示控制荷载应用的选项（如时间、子步数、时间步及荷载阶跃或逐渐递增等）的总称。单击 Main Menu> Solution> Load Step Opts 菜单可展开荷载步选项菜单，如图 5.4 所示。

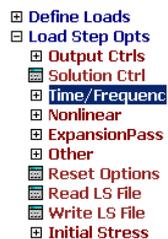


图5.4 荷载步选项菜单

说明：如果用户展开的荷载步选项菜单不完全，单击 Main Menu> Solution> Unabridged Menu 菜单即可。

展开荷载步选项菜单后，单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step 菜单，可弹出如图 5.5 所示的对话框。在【Time at end of load step】文本框中输入终止荷载步时间（如 1 或 2 等），在【Time step size】文本框中输入时间步大小，在【Stepped or ramped b.c.】单选列表框中选择逐步加载（Ramped）或阶跃加载（Stepped）模式。

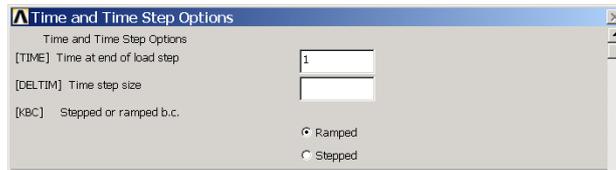


图5.5 时间与时间步选项

- 如果是逐步加载，在每个荷载子步中荷载将逐渐增加，且全部荷载出现在荷载步结束时，如图 5.6 (a) 所示。
- 如果是阶跃加载，全部荷载施加于第一个荷载子步，且在荷载步的其余部分，荷载保持不变，如图 5.6 (b) 所示。

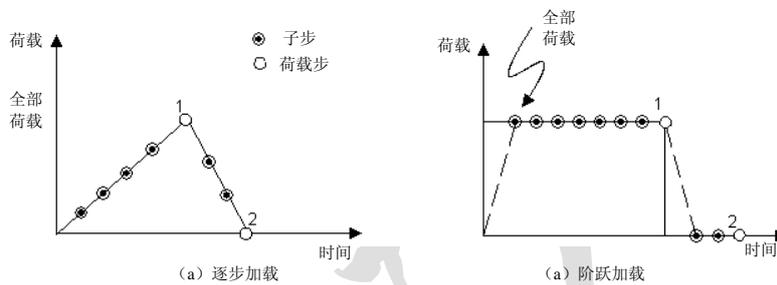


图5.6 逐步加载与阶跃加载

荷载步选项还可以心控制非线性分析中的收敛公差和结构分析中的阻尼规范等，本书不再详述。

5.2 位移约束

位移约束又称 DOF 约束，是对模型在空间中的自由度的约束。位移约束可施加于节点、关键点、线和面上，用来限制对象某一方向上的自由度。每个学科中可被约束的相应自由度不同，如表 5.1 所示。

表5.1 不同学科中的位移约束

学科	自由度	ANSYS 标识符
结构分析	平动	UX、UY、UZ
	转动	ROTX、ROTY、ROTZ
热分析	温度	TEMP
磁场分析	矢量势	AX、AY、AZ
	标量势	MAG
电场分析	电势	VOLT
流场分析	速度	VX、VY、VZ
	压力	PRES
	湍流动能	ENKE
	湍流扩散率	ENDS

5.2.1 约束操作

下面以图 5.7 所示的矩形梁为例，介绍位移约束的常用操作。

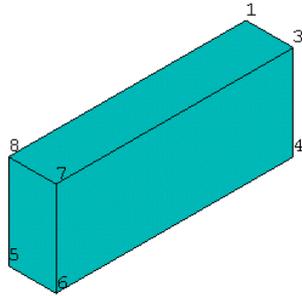


图5.7 矩形梁

(1) 启动 ANSYS，单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By 2 Corners & Z 菜单，在弹出的对话框中输入【Width】为【10】，【Height】为【20】，【Depth】为【50】，单击【OK】按钮得到如图 5.7 所示的实体模型。

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，按第四章介绍的方法定义单元类型为 SOLID65。

(3) 单击工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮保存当前模型，本章以后还要用到此模型。本模型的数据库文件在光盘的“/ch05/ex1/”目录下。

注意：在没有单元类型定义之前，位移约束的施加菜单为不可见状态。因此，建议读者在进行有限元分析时首先定义单元类型及实常数等属性。

(4) 接下来对关键点 5 施加所有位移约束。单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints 菜单，弹出如图 5.8 所示的图形拾取对话框。在文本框中输入【5】或者用鼠标在图形视窗中选择关键点 5，然后单击【OK】按钮。

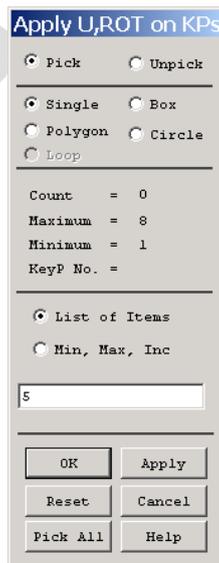


图5.8 选择待施加约束的关键点

(5)接着弹出如图 5.9 所示的【Apply U,ROT on KPs】对话框。在【DOFs to be constrained】列表框中选中【ALL DOF】，其它保持不变，然后单击【OK】按钮即对关键点 5 约束了各方向的自由度。

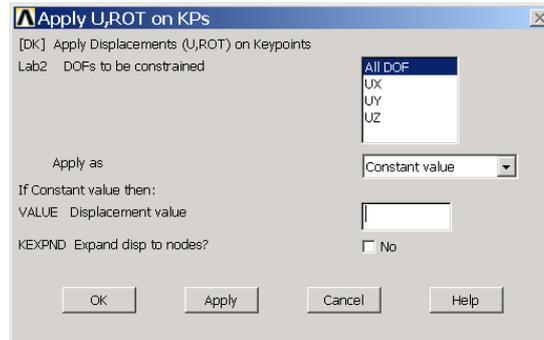


图5.9 约束所有自由度

说明：在【Displacement value】文本框中需输入位移约束值，默认值为【0】，因此用户置空即表示位移约束值为【0】，用户还可以设置为其它值，正值表示沿笛卡尔坐标正向，负值表示沿笛卡尔坐标负向。

(6) 重复以上两步，按图 5.10 所示进行设置，为关键点 6 约束 UY 和 UZ 方向的自由度。

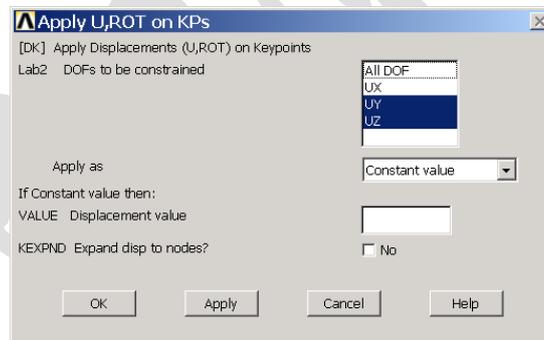


图5.10 约束UY和UZ

注意：【DOFs to be constrained】列表框为多选列表框，可同时选中多个自由度，选中的项会自动变为深色，如图 5.10 所示。

施加完约束的模型如图 5.11 所示。

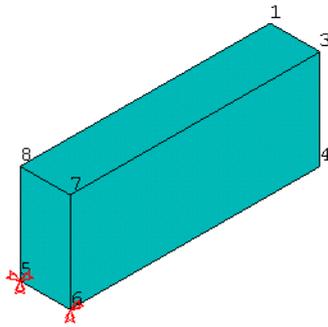


图5.11 施加完约束的模型

用户可单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Displacement>On Keypoints** 菜单来删除关键点的施加的位移约束。当弹出图形拾取对话框后，选中要删除约束的关键点，单击【OK】按钮，接着弹出如图 5.12 所示的【Delete KP Constraints】对话框，在【DOFs to be deleted】下拉列表框中选中要删除的约束方向，单击【OK】按钮即可。



图5.12 删除位移约束

说明：一般删除位移约束后，图形视窗中仍显示该约束的附号，此时用户从右键菜单中选择【Replot】刷新即可，如图 5.13 所示。



图5.13 图形视窗右键菜单

用户还可以对节点、线、面施加相应的位移约束，其操作与关键点类型，不再详述。

5.2.2 对称和反对称约束

如果有限元模型本身具有对称或反对称的特性，则用户可以使用对称或反对称约束来简化模型。对于结构分析，对称边界条件指平面外移动和平面内的旋转被设置为 0，而反对称边界条件指平面内移动和平面外旋转被设置为 0，如图 5.14 所示。

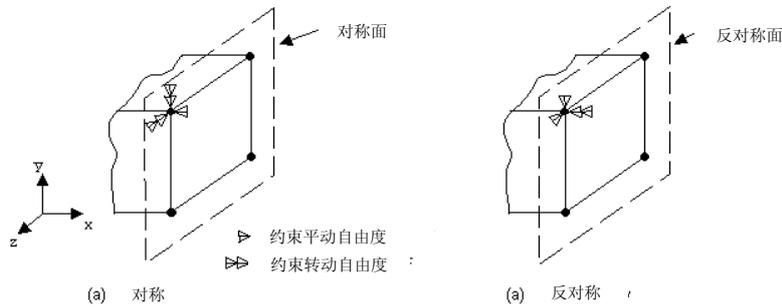


图5.14 对称与反对称约束

以上一小节中建立的矩形梁模型为例，介绍施加对称约束的操作方法：

- (1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.2.1 节中保存的模型数据库。
- (2) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural >Displacement>Symmetry B.C.>On Areas 菜单，弹出【Apply SYMM on Areas】对话框，在图形视窗中选中左侧端面。
- (3) 单击【OK】按钮对称约束即施加完毕，如图 5.15 所示，对称边界上标有 S 标记。

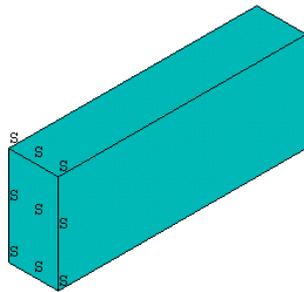


图5.15 对面施加对称约束

说明：用户可单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Antisymm B.C.>On Areas 菜单对面施加反对称约束。施加过反对称约束的边界上将标有 A 标记。

用户还可以对节点、线施加相应的对称或反对称约束，其操作与面类型，不再详述。

5.2.3 耦合自由度

当用户需要使两个或更多的自由度取相同的值时，可以使用耦合自由度的方法。由于只能对节点的自由度进行耦合，因此在进行自由度耦合之前应先划分网格。以前面的矩形梁为例，对其端面的节点自由度进行耦合操作：

- (1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.2.1 节中保存的模型数据库。
- (2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 菜单，选择图形视窗中的体，单击【OK】按钮，可得到如图 5.16 所示的网格。

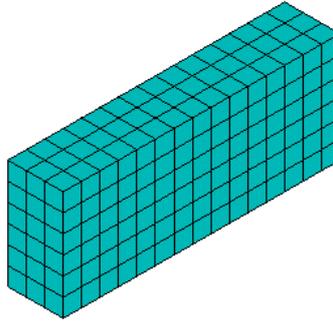


图5.16 矩形梁单元图

(3) 单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出如图 5.17 所示的实体选择对话框。在最顶上的下拉列表框中选择【Nodes】，在接下来的下拉列表框中选择【By Location】，并选中【Z coordinates】单元框，然后在【Min,Max】文本框中输入 Z 向的坐标【50】，单击 **Select All** 按钮。这样就选中了左端面上的所有节点。



图5.17 按位置选择节点

(4) 单击 Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Couple DOFs 菜单，弹出图形拾取对话框，单击 **Pick All** 按钮，接着弹出如图 5.18 所示的对话框。



图5.18 耦合自由度

(5) 在【Set reference number】文本框中输入耦合集的编号【1】，在【Degree-of-freedom label】下拉列表框中选择【UZ】约束 Z 向的自由度。耦合后的结果如图 5.19 所示。

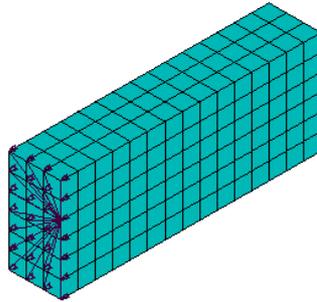


图5.19 自由度耦合结果

说明：只允许对 UX、UY 和 UZ 三个方向自由度进行耦合操作。

如要删除定义的自由度耦合，可单击 **Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Del Coupled Sets** 菜单，弹出如图 5.20 所示的对话框。在【Range of sets】三个文本框中分别输入耦合集的起始编号、终止编号和步长，并单击【OK】按钮即可。



图5.20 删除耦合自由度

5.2.4 约束方程

约束方程不仅可以实现节点线位移的耦合，而且可以实现节点线位移与角位移的耦合。单击 **Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Constraint Eqn** 菜单，弹出如图 5.21 所示的约束方程对话框。图 5.21 所示的约束方程为： $5*(UX_1) + 2*(UY_{10}) + 3*(UZ_{20}) = 0$ ，其中 UX_1、UY_10 和 UZ_20 分别表示节点 1 的 UX 位移、节点 10 的 UY 位移和节点 20 的 UZ 位移。

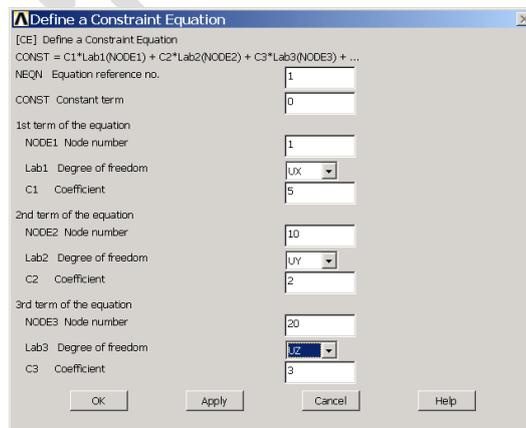


图5.21 设置约束方程

用户可单击 **Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Del Constr Eqn** 菜单删除定义的约束方程。

5.3 集中荷载

在结构分析中，集中荷载主要包括力和力矩，相应的标识符为 **FX**、**FY**、**FZ**、**MX**、**MY**、**MZ**。用户可以对节点或关键点施加集中荷载。

5.3.1 施加力和力矩

以图 5.7 所示的矩形梁为例，在关键点 7 和 8 上施加竖向的集中荷载的步骤如下：

(1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.2.1 节中保存的模型数据库。

(2) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints** 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选中关键点 7 和 8，然后单击 **【OK】** 按钮，弹出如图 5.22 所示的对话框。

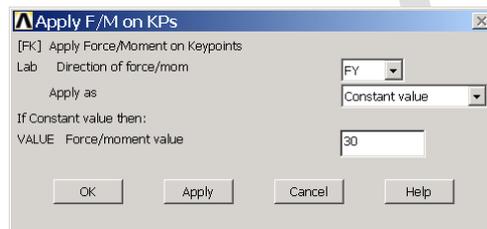


图5.22 对关键点施加力

(3) 接着在 **【Direction of force /mom】** 下拉列表框中选择 **【FY】**，在 **【Force/moment value】** 文本框中输入力的大小 **【30】**，然后单击 **【OK】** 按钮即可。结果如图 5.23 所示。

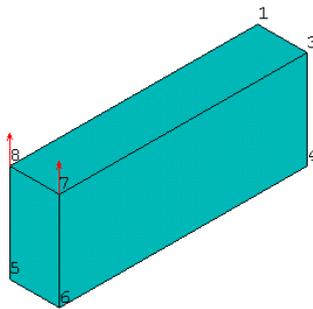


图5.23 施加Y向的集中力

说明：如果在 **【Force/moment value】** 文本框中输入负值，表示力的方向沿坐标轴负向。

5.3.2 重复设置力和力矩

在默认的情况下，在同一个位置重新设置力或力矩，则新的设置将取代原来的设置。例如对上面的矩形梁，在关键点 7 和 8 重新设置了方向向下的集中荷载-30，将取代原来的

FY=30 的设置，其操作如下：

(1) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Settings>Replace vs Add>Forces** 菜单，弹出如图 5.24 所示的设置对话框。在【New force values will】下拉列表框中选中【Replace existing】选项，然后单击【OK】按钮，则以后进行重复设置力时新的力将替代原有的力。

说明：【New force values will】下拉列表框中的【Add to existing】表示新的力将累加到原来的力上；【Be ignored】表示新设置的力将被忽略。

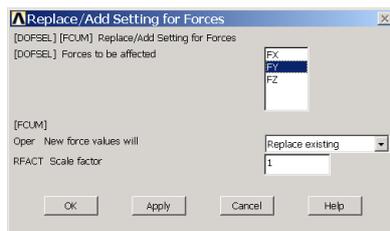


图5.24 重复设置力对话框

(2) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints** 菜单，重新设置关键点 7 和 8 的 $FY = -30$ 即可。

5.3.3 比例缩放力和力矩

有时用户需要对集中荷载进行比例缩放，其操作方法为：

单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Operate>Scale FE Loads>Forces** 菜单，弹出如图 5.25 所示的对话框。在【Forces to be scaled】列表框中选择待缩放的标识，如【FY】；在【Scale factor】文本框中输入缩放比例【0.5】，然后单击【OK】按钮即可。

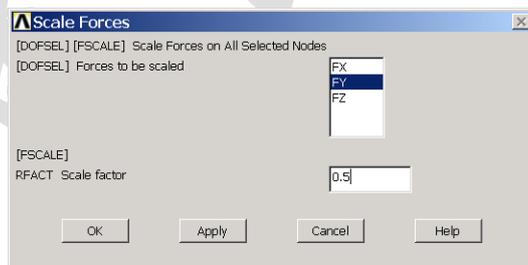


图5.25 比例缩放力

注意：只有将荷载直接加到节点上或者将荷载转换之后，比例缩放操作才起作用，详见下一小节操作。

5.3.4 转换力和力矩

要将施加在实体模型上的力或力矩转换到有限元模型上，可按以下操作：

(1) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free** 菜单，选择图形视窗中的体，单击【OK】按钮对体进行网格划分。

(2) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Operate>Transfer to FE>Forces** 菜单，弹出如图 5.26 所示的对话框。

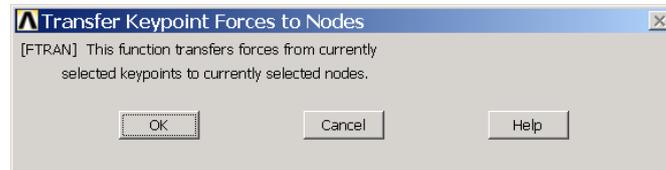


图5.26 转换力对话框

(3) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Operate>Scale FE Loads>Forces** 菜单，并按图 5.25 进行设置，单击 **【OK】** 按钮关闭对话框。

(4) 单击 **【Utility Menu】|【List】|【Loads】|【Forces】|【On All Nodes】** 菜单，将列表显示节点上集中荷载值，如图 5.27 所示。可以看出，力的大小都缩小为原来的 0.5 倍了。

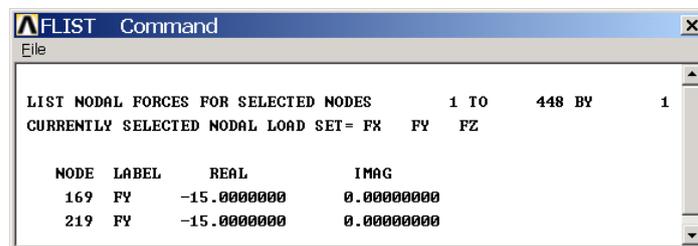


图5.27 列表显示节点上的集中力

5.4 表面荷载

表面荷载是结构分析中常见的一种形式。在 ANSYS 中，不仅可以将表面荷载施加到线和面上，还可以施加到节点和单元上；可以施加均布的荷载，也可以施加线性变化的荷载，还可以施加按一定函数关系变化的荷载。

5.4.1 基本操作

以图 5.7 所示的矩形梁为例，操作如下：

(1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.2.1 节中保存的模型数据库。

(2) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas** 菜单对面施加表面荷载。选中要定义表面荷载的面，然后单击 **【OK】** 按钮，接着弹出如图 5.28 所示的对话框。在 **【Apply PRES on areas as a】** 下拉列表框中选择 **【Constant value】** 选项，在 **【Load PRES value】** 文本框中输入荷载值（如 **【100】**），单击 **【OK】** 按钮即可。

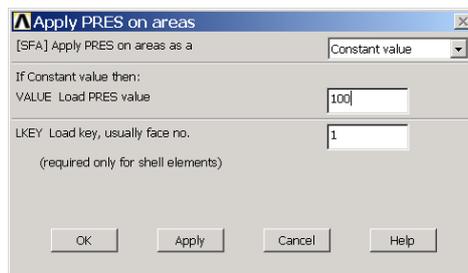


图5.28 施加表面荷载

用户还可以单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines** 菜单对线施加表面荷载；单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply> Structural>Pressure>On Nodes** 菜单对节点施加表面荷载；单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Elements** 菜单对单元施加表面荷载。

注意：ANSYS 程序是根据单元和单元面来存储在节点上的面荷载。因此，如果对同一表面使用节点面荷载命令和单元面荷载命令，则最后施加的面荷载命令有效。

5.4.2 梁单元上的压力荷载

梁单元是一种线单元，可以在其上施加侧向的压力荷载，其大小为每单位长度的力，压力可以沿长度线性变化。下面以简支梁为例介绍在梁单元上施加压力的相关操作：

- (1) 重新启动 ANSYS，定义单元类型 BEAM3，并按图 5.29 设置实常数。

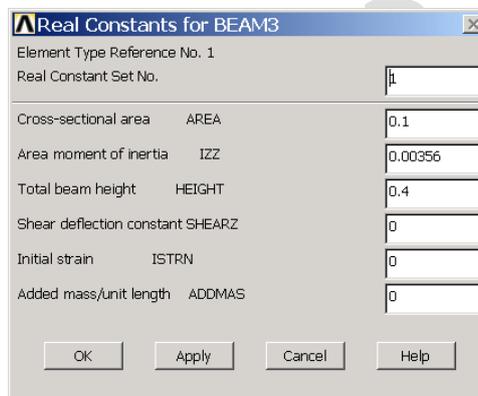


图5.29 设置实常数

- (2) 建立关键点 1 和 2，坐标分别为 (0, 0) 和 (0, 10)，并连接生成线。

(3) 划分网格，把直线分成 5 段。并在梁左端结点上施加 UX 和 UY 方向的位移约束，在梁右端端点上施加 UY 方向的位移约束，如图 5.30 所示。此模型在光盘的“\ch05\ex2\”目录下也可以找到。

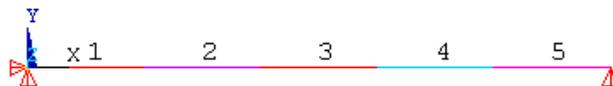


图5.30 简支梁单元模型

(4) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Beams** 菜单，弹出图形拾取对话框，选择单元 1，单击【Apply】按钮，接着弹出如图 5.31 所示的【Apply PRES on Beams】对话框。

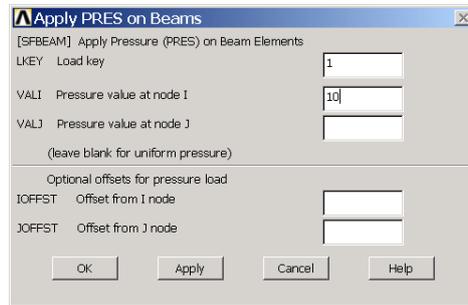


图5.31 对梁单元施加面荷载

(5) 在【Pressure value at node I】文本框中输入【10】，其它文本框留空，单击【Apply】按钮，则单元 1 被施加了均布荷载，如图 5.32 所示。

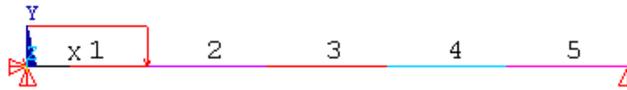


图5.32 施加均布荷载

(6) 接着选取单元 2 和 3，在【Apply PRES on Beams】对话框中设置【Load key】文本框为 1，【Pressure value at node I】文本框中输入【10】，【Pressure value at node J】文本框中输入【0】，其它留空，单击【Apply】按钮，则单元 2 和 3 被施加了三角形荷载，如图 5.33 所示。

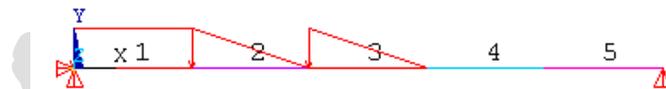


图5.33 施加三角形荷载

说明：【Load key】用于设置压力荷载的类型，设置为 1 表示从节点 I 到节点 J 的法向力，正值表示沿单元坐标系-Y 法向；设置为 2 表示从节点 I 到节点 J 的切向力，正值表示沿单元坐标系+X 切向；设置为 3 表示节点 I 端部轴向力，正值表示沿单元坐标系+X 轴向；设置为 4 表示节点 J 端部轴向力，正值表示沿单元坐标系-X 轴向。

(7) 接着选取单元 4，在【Apply PRES on Beams】对话框中设置【Load key】文本框为 1，【Pressure value at node I】文本框中输入【10】，在【Offset from I node】文本框中输入【0.5】，单击【Apply】按钮，结果如图 5.34 所示。可以看出单元 4 上的荷载在 I 节点端有部分偏移。

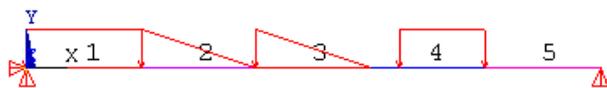


图5.34 施加节点I偏移荷载

(8) 接着选取单元 5，在【Apply PRES on Beams】对话框中设置【Load key】文本框为 1，【Pressure value at node I】文本框中输入【10】，在【Offset from J node】文本框中输入【0.5】，单击【Apply】按钮，结果如图 5.35 所示。可以看出单元 8 上的荷载在 J 节点端有部分偏移。

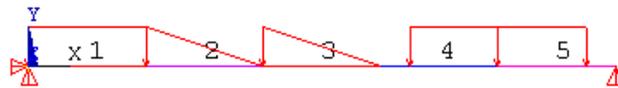


图5.35 施加节点J偏移荷载

5.4.3 指定斜率

要指定线性变化的压力，可以使用指定斜率功能，用于随后施加的表面荷载。

例如要对图 5.36 所示的矩形面施加线性变化的压力，可在笛卡尔坐标系中 Y 方向指定其斜率。其具体操作步骤如下：

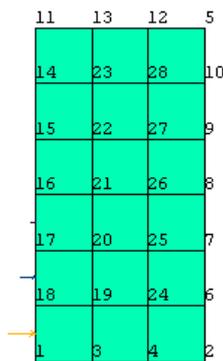


图5.36 矩形面模型

- (1) 重新启动 ANSYS，定义单元类型 SHELL43，并建立边长为 20 和 40 的矩形面。
- (2) 按图 5.36 所示进行网格划分，并打开节点号显示。
- (3) 单击工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮保存当前模型，本章以后还要用到此模型。此模型在光盘的“\ch05\ex3\”目录中也可以找到。
- (4) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Settings>For Surface Ld>Gradient 菜单，弹出如图 5.37 所示的【Gradient Specification for Surface Loads】对话框。

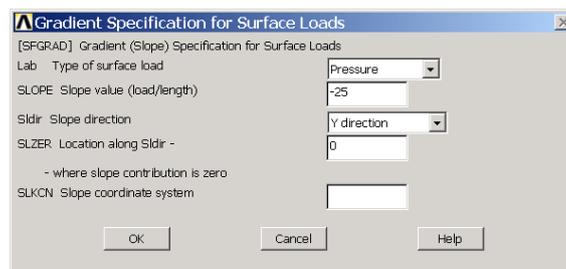


图5.37 指定斜率对话框

(5)在【Type of surface load】下拉列表框中选择【Pressure】;在【Slope value(load/length)】文本框中输入【-25】,在【Slope direction】下拉列表框中选择【Y direction】,并在【Location along Sidir-】文本框中输入【0】,表示压力沿 Y 的正方向每个单位长度下降 25。单击【OK】按钮关闭对话框。

(6)单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Nodes 菜单,弹出图形拾取对话框,用鼠标在图形视窗中选择节点 1、18、17 和 16,单击【OK】按钮,接着弹出如图 5.38 所示的对话框。在【Load PRES value】文本框中输入【500】,单击【OK】按钮关闭对话框。

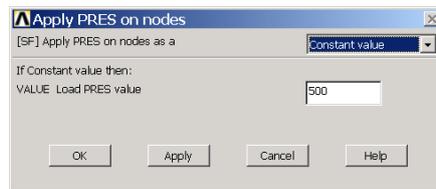


图5.38 对节点施加荷载

(7)至此线性变化的荷载已经施加完毕。单击【Utility Menu】|【List】|【Loads】|【Surface Loads】|【On Picked Nodes】菜单,依次选择节点 1、18、17 和 16,然后单击【OK】按钮即可列表显示压力荷载,如图 5.39 所示。

ELEMENT	LKEY	FACE	NODES	REAL	IMAGINARY
1	6	1	1	500.000000	0.000000
			18	333.333333	0.000000
4	6	18	18	333.333333	0.000000
			17	166.666667	0.000000
7	6	17	17	166.666667	0.000000
			16	0.000000	0.000000

图5.39 列表显示表面荷载

注意: 指定了斜率后,对所有随后的荷载施加都起作用。要去除指定的斜率,可在命令输入窗口中输入“SFGRAD”然后回车即可。

5.4.4 函数加载

有些荷载是按一定的函数关系非线性变化的,对于这种荷载的施加就要用到函数加载的方法。

还以图 5.36 所示的矩形板模型为例,对节点 1、2、3 和 4 施加函数荷载,具体操作步骤如下:

- (1)单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮,恢复 5.4.3 节中保存的模型数据库。
- (2)单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】菜单,弹出如图 5.40 所示的对话框。

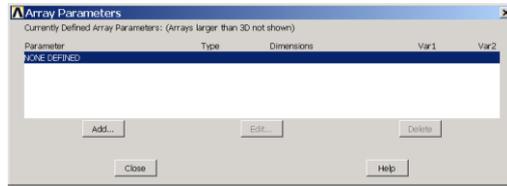


图5.40 数组管理对话框

(3) 单击 **Add...** 按钮，接着弹出如图 5.41 所示的对话框。在 **【Parameter name】** 文本框中输入数组名 **【pres_1】**，在 **【No.of rows,cols,planes】** 文本框中分别输入 **【4】**、**【1】** 和 **【1】**，然后单击 **【OK】** 按钮，回到图 5.40 的数组管理对话框。

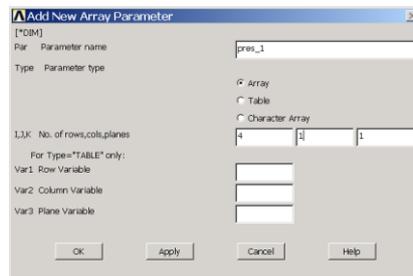


图5.41 设置数组

(4) 选中刚才定义的数组 **pres_1**，然后单击 **Edit...** 按钮，弹出如图 5.42 所示的对话框，并按图所示输入四个数据。然后单击 **【File】|【Apply/Quit】** 菜单，关闭对话框。至此定义了一个四维数组。

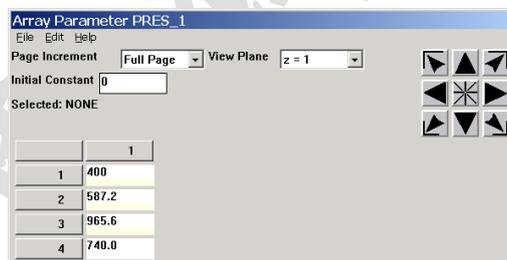


图5.42 定义数组数据点

(5) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Settings>For Surface Ld>Node Function** 菜单，弹出 **【Function of Surface Load vs Node Number】** 对话框，如图 5.43 所示。

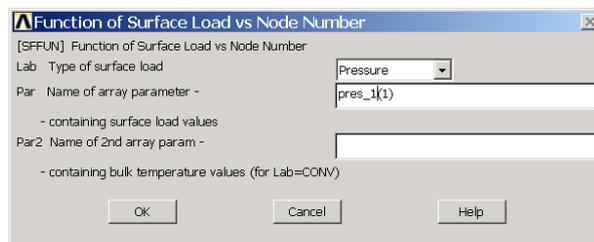


图5.43 设置函数对话框

(6) 在【Name of array parameter -】文本框中输入【pres_1(1)】，然后单击【OK】按钮确认。

(7) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Nodes 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标在图形视窗中选择节点 1、3、4 和 2，单击【OK】按钮，接着弹出如图 5.44 所示的对话框。在【Load PRES value】文本框中输入【100】，单击【OK】按钮关闭对话框。

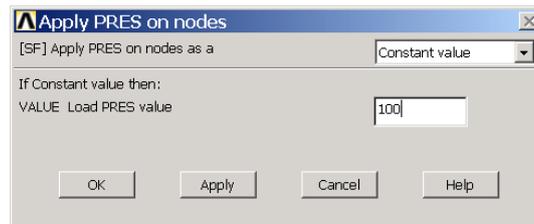


图5.44 对节点施加荷载

(8) 至此按函数变化的荷载已经施加完毕。单击【Utility Menu】|【List】|【Loads】|【Surface Loads】|【On Picked Nodes】菜单，依次选择节点 1、3、4 和 2，然后单击【OK】按钮即可列表显示压力荷载，如图 5.45 所示。

ELEMENT	LKEY	FACE	NODES	REAL	IMAGINARY
1	3	3	3	1065.60000	0.00000000
			1	500.000000	0.00000000
2	3	4	4	840.000000	0.00000000
			3	1065.60000	0.00000000
3	3	2	2	687.200000	0.00000000
			4	840.000000	0.00000000

图5.45 列表显示节点荷载

说明：节点 1 上的荷载对应于 pres_1(1) 的值，节点 2 上的荷载对应于 pres_1(2) 的值，以此类推。

5.4.5 表面效应单元

有时可能需要施加一个所使用的单元不能接受的表面荷载。如：要在结构实体单元上施加均匀布切向压力；在热分析实体单元上施加辐射指定等。这时，可以使用表面单元作为媒介，即将表面单元覆盖在欲施加荷载的表面，然后将荷载施加在表面单元上。

对于二维模型，可供使用的表面单元有 SURF151 和 SURF153；对三维模型，可供使用的表面单元有 SURF152 和 SURF154。由于表面效应单元不太常用，本书在此不详细介绍。

5.5 体荷载

体荷载是作用于模型体积上的荷载。结构分析中的体荷载主要有温度和惯性荷载。

5.5.1 施加体荷载

对于节点施加体荷载的操作如下：

- (1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.4.3 节中保存的模型数据库。
- (2) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature> On Nodes** 菜单，弹出图形拾取对话框，选择适当的节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出如图 5.46 所示的对话框。

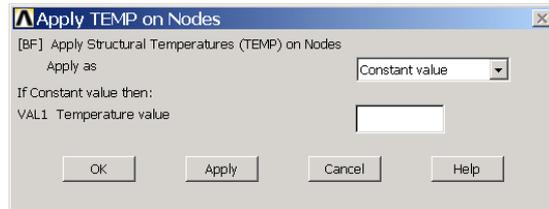


图5.46 施加温度荷载

- (3) 在 **【Temperature value】** 文本框中输入温度值，单击 **【OK】** 按钮即可。
- (4) 单击 **【Utility Menu】|【List】|【Loads】|【Body】|【On All Nodes】** 菜单，可列表显示节点的体荷载。

用户可以对单元、关键点、线、面和体施加体荷载，操作类似，在此不再详述。有关体荷载的施加位置读者可参考 ANSYS 自带的帮助文档。

5.5.2 惯性荷载

惯性荷载中最常见的是重力荷载。下面简单介绍一下重力荷载的施加步骤：

- (1) 单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮，恢复 5.4.3 节中保存的模型数据库。
- (2) 建立好有限元模型后，单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity** 菜单，弹出如图 5.47 所示的 **【Apply (Gravitational) Acceleration】** 对话框。

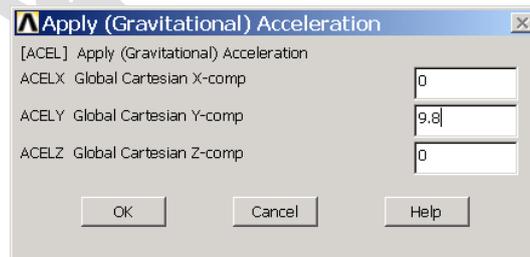


图5.47 施加重力荷载

- (3) 在 **【Global Cartesian Y-comp】** 文本框中输入重力加速度 **【9.8】**，然后单击 **【OK】** 按钮即可。此时图形视窗中会有一个向上的箭头表示加速度场的方向。

注意：此命令用于对物体施加一个加速度场（非重力场），因此，要施加作用于负 Y 方向的重力，应指定一个正 Y 方向的加速度；输入加速度值时应注意单位的一致性。

- (4) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Inertia>Gravity** 菜单，

弹出如图 5.48 所示的对话框，单击【OK】按钮后，将删除定义的惯性荷载。



图5.48 删除惯性荷载

5.6 特殊荷载

除了以上介绍的常见荷载外，在 ANSYS 中还提供了一些特殊荷载的施加方法。如耦合场荷载、轴对称荷载和预应力荷载等。

5.6.1 耦合场荷载

在耦合场分析中，通常包含将一个分析中的结果数据施加于第二个分析并作为第二个分析的荷载。例如，可以将热力分析中计算得到的节点温度施加于结构分析中做为体荷载。要施加这样的耦合场荷载，按以下方法操作：

(1) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>From Therm Analy 菜单，弹出如图 5.49 所示的【Apply TEMP from Thermal Analysis】对话框。

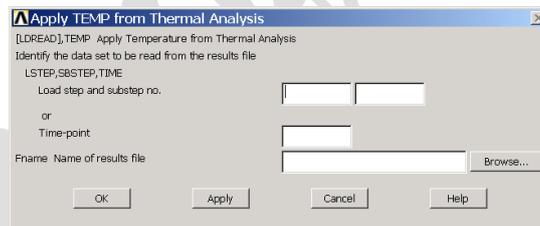


图5.49 从热力学分析中读取温度荷载

(2) 在【Load step and substep no.】文本框中输入荷载步和子步数，单击 Browse... 按钮，选择热力学分析生成的结果文件，单击【OK】按钮即可。

5.6.2 轴对称荷载

对于轴对称的协调单元（如 PLANE25、SHELL61、PLANE75 等）要求其荷载以程序能作为傅立叶级数来说明的形式施加。对这些单元，可单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>For Harmonic Ele 菜单，接着弹出如图 5.50 所示的【Loading Term for Harmonic Elements】对话框。进行适当设置后，单击【OK】按钮。然后再用其它的荷载施加命令对模型进行施加荷载。

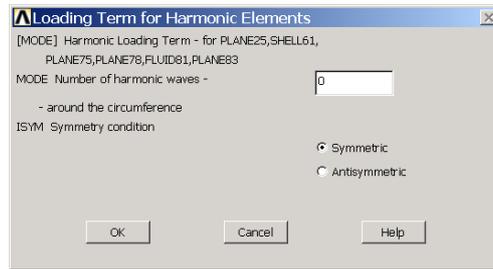


图5.50 施加轴对称荷载

5.7 求解

荷载施加完成后，即可进行有限元的求解。通常有限元求解的结果为：

- 节点的自由度值——基本解
- 原始解的导出解——单元解

ANSYS 提供了多种求解有限元方程的方法：直接解法（frontal direct solution）、稀疏矩阵法（sparse direct solution）、雅可比共轭梯度法（Jacobi Conjugate Gradient 简称 JCG）、不完全乔类斯基共轭梯度法（Incomplete Cholesky Conjugate Gradient 简称 ICCG）、条件共轭梯度法（Preconditioned Conjugate Gradient 简称 PCG）和自动迭代法（automatic iterative solver 简称 ITER）等。这就要注用户在进行求解之前合理地选择适当的求解方法进行求解。

5.7.1 选择合适的求解器

进行求解时，程序默认的求解器是直接解法，用户如果想改变求解器，可按下述步骤操作：

（1）单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls 菜单，弹出求解控制对话框，选择其中的【Sol'n Options】标签，如图 5.51 所示。

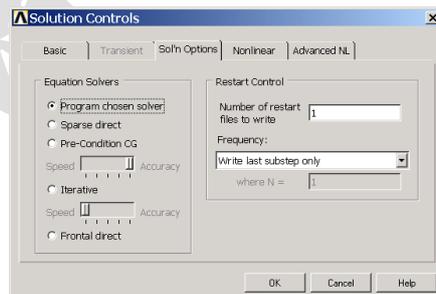


图5.51 求解控制对话框

（2）在【Equation Solvers】单选列表框中选择适当的求解器，单击【OK】按钮即可。用户还可以通过以下方法来选择求解器，操作如下：

- （1）单击 Main Menu> Solution> Unabridged Menu 菜单展开求解模块的隐藏菜单。
- （2）单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，弹出【Static or Steady-State Analysis】对话框。在【Equation Solver】下拉列表框中选择适当的求解器，单

击【OK】按钮即可。如图 5.52 所示。

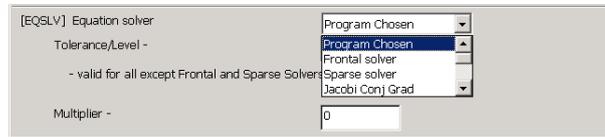


图5.52 选择求解器

表 5.2 提供了选择求解器时的一般准则，供用户参考。

表5.2 求解器选择准则

解法	适用场合	模型大小	内存使用	硬盘使用
直接解法	要注稳定性（非线性分析）或内存受限制	低于 50 000 自由度	低	高
稀疏矩阵法	要求稳定性和求解速度（非线性分析）；线性分析收敛很慢时（尤其对病态矩阵，如形状不好的单元）	自由度为 10 000~500 000（多用于板壳和梁模型）	中	高
雅可比共轭梯度法	在单场问题（如热、磁、声等）中求解速度很重要时	自由度为 50 000~1 000 000 以上	中	低
不完全乔类斯基共轭梯度法	在多物理场模型中求解速度很重要时，其它迭代很难收敛的模型	自由度为 50 000~1 000 000 以上	高	低
条件共轭梯度法	当求解速度很重要的情况（大型模型的线性分析），尤其适合实体单元的大型模型	自由度为 50 000~1 000 000	高	低

5.7.2 求解多步荷载

对于多荷载步的求解，一般有三种方法：

- 多重求解法
- 荷载步文件法
- 矩阵参数法

本书仅介绍前两种常用的方法：多重求解法和荷载步文件法。

1. 多重求解法

多重求解方法是最常用的方法，它的步骤是在每个荷载步定义好后就执行 SOLVE 命令。它的缺点是在交互使用时必须等到每一步求解结束后才能定义下一荷载步。

其操作的命令流格式如下：

```

/SOLU          !进入求解模块
...
!荷载步 1
D, ...
SF, ...
SOLVE         !求解荷载步 1
!荷载步 2
F, ...
SF, ...
...

```

SOLVE !求解荷载步 2

2. 荷载步文件法

荷载步文件法是将每一荷载步写入到荷载步文件中，然后通过一条命令就可以读入每个荷载步文件并获得解答。要求解多荷载步，单击 Main Menu>Solution>Solve>From LS Files 菜单，弹出如图 5.53 所示的对话框。在【Starting LS file number】、【Ending LS file number】和【File number increment】文本框中分别输入荷载步文件的最小序号、最大序号和序号增量，单击【OK】按钮即可。

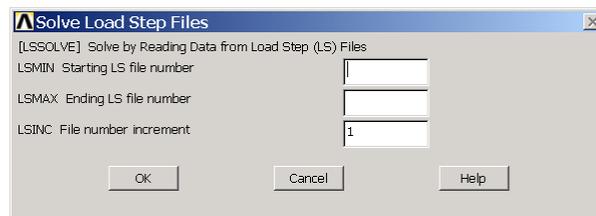


图5.53 读入荷载步文件

其操作的命令流格式如下：

```

/SOLU          !进入求解模块
...
!荷载步 1
D, ...
SF, ...
...
NSUBST, ...   !荷载步选项
KBC, ...
OUTRES, ...
OUTPR, ...
...
LSWRITE       !写荷载步文件: Jobname.s01
!荷载步 2
D, ...
SF, ...
...
NSUBST, ...   !荷载步选项
KBC, ...
OUTRES, ...
OUTPR, ...
...
LSWRITE       !写荷载步文件: Jobname.s02
...
LSSOLVE, 1, 2 !开始求解荷载步文件 1 和 2

```

5.7.3 中断和重新启动

用户可以中断正在运行的 ANSYS 求解。在一个多任务操作系统中完全中断一个非线性分析时，会产生一个放弃文件，命名为 Jobname.abt。在平衡方程迭代的开始，如果 ANSYS 程序发现在工作目录中有这样一个文件，分析过程将会停止，并能在以后重新启动。

有时在第一次运行完成后也许要重新启动分析过程，例如想将更多的荷载步加到分析中。重新启动的操作步骤如下：

(1) 启动 ANSYS 程序，单击【Utility Menu】|【File】|【Change Jobname】菜单，设定一个与第一次运行时相同的工作名。

(2) 单击 Main Menu>Solution 菜单，进入求解模块，然后单击工具栏上的 **RESUM_DB** 按钮恢复数据库文件。

(3) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Restart 菜单，指定为重新启动分析。

(4) 按需要修正荷载或附加荷载。

说明：新加的坡道荷载从零开始增加，新施加的体积荷载从初始值开始。删除重新加上的荷载可视为新施加的荷载，而不用调整；待删除的表面荷载和体积荷载，必须减小到零或初始值，以保持 Jobname.ESAV 文件和 Jobname.OSAV 文件的数据库一致。

(5) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Reuse Tri Matrix 菜单，弹出如图 5.54 所示的对话框。选择是否要重新使用三角化矩阵。

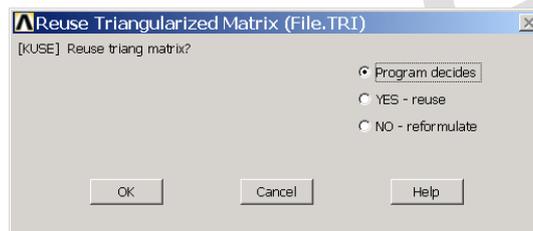


图5.54 选择是否重新使用TRI文件

说明：默认情况下程序为重新启动计算新的三角化矩阵，用户可以通过此命令使程序使用原有的矩阵，这样可以节省大量计算时间。然而，仅在某些条件下才能使用 Jobname.TRI 文件，尤其当规定的自由度约束没有发生改变，且为线性分析时。

(6) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，进行重新求解。

5.8 估计运行时间和文件大小

对大模型或有复杂的非线性选项，了解分析求解所需要的时间及分析文件的大小等信息是很必要的。ANSYS 可在 RUN-TIME STAT 模块中估算这些信息。RUN-TIME STAT 模块能够根据数据库中的信息估计运行时间和其它统计量。因此，必须在进入 RUN-TIME STAT 模块之前定义好模型的几何量、荷载项及分析选项等。

估计运行时间的操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>Run-Time Stats>System Settings 菜单，弹出如图 5.55 所示的【System Settings for Runtime Estimates】对话框。其中【MIPS】为每秒钟执行的指令数，以百万条计；【MELOPS】为每秒钟进行的浮点运算数，以百万条计。如无需修改单击【OK】按钮。

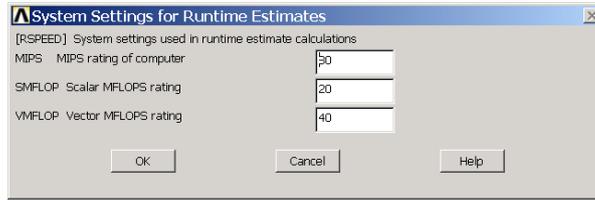


图5.55 获得系统运算的速度信息

(2) 单击 Main Menu>Run-Time Stats>Iter Setting 菜单，弹出如图 5.56 所示的【Iteration Setting for Runtime Estimates】对话框。如无需修改单击【OK】按钮。

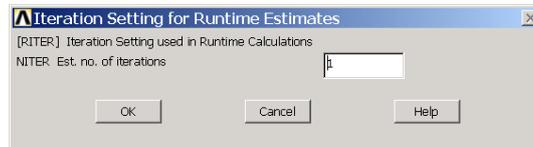


图5.56 迭代次数或荷载步数

(3) 单击 Main Menu>Run-Time Stats>Individual Stats 菜单，弹出如图 5.57 所示的对话框。选中【Runtime estimate】复选框，并单击【OK】按钮。

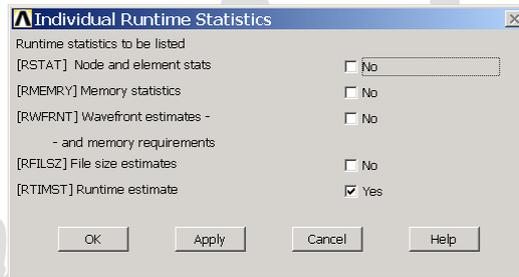


图5.57 估算运行时间

(4) 接着将弹出运行时间估算结果，如图 5.58 所示。

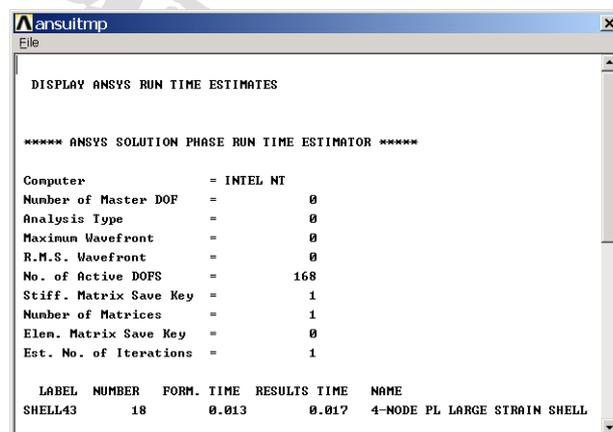
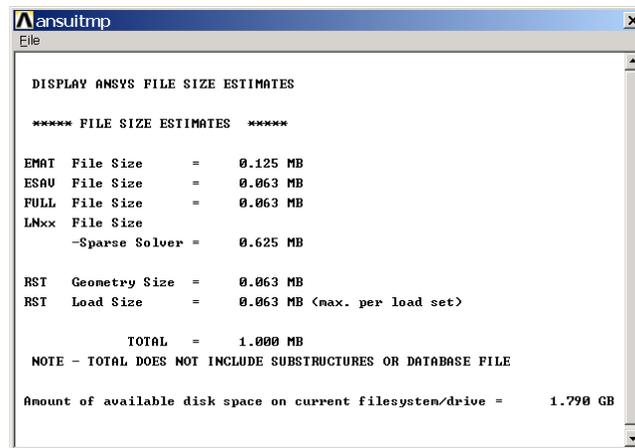


图5.58 运行时间估算结果

要估算文件大小，在上述操作步骤(3)中的对话框中选择【File size estimates】复选框，

单击【OK】按钮即可。图 5.59 为估算得到的文件大小结果。



```
ansuitmp
File
DISPLAY ANSYS FILE SIZE ESTIMATES

***** FILE SIZE ESTIMATES *****

EMAT File Size = 0.125 MB
ESAU File Size = 0.063 MB
FULL File Size = 0.063 MB
LNxx File Size
-Sparse Solver = 0.625 MB

RST Geometry Size = 0.063 MB
RST Load Size = 0.063 MB (max. per load set)

TOTAL = 1.000 MB
NOTE - TOTAL DOES NOT INCLUDE SUBSTRUCTURES OR DATABASE FILE

Amount of available disk space on current filesystem/drive = 1.790 GB
```

图5.59 估算文件大小结果

第六章 通用后处理器

对模型进行有限元分析后,通常需要检查求解结果,这种检查在 ANSYS 中称为后处理。本章和第七章将分别介绍 ANSYS 中的两个后处理器:通用后处理器 (POST1) 和时间历程后处理器 (POST26)。

6.1 后处理器概述

后处理可能是分析中最重要的一环,因为在任何一个分析中用户总是试图搞清楚作用荷载如何影响设计、单元划分是否合理等。

ANSYS 中提供了两个后处理器:通用后处理器 (POST1) 和时间历程后处理器 (POST26)。前者用于查看某一荷载步或者子步 (或特定时间、频率) 的结果,例如:在静态结构分析中,可显示荷载步 2 的应力分布情况等;后者用于查看指定点的特定结果随时间、频率或其它项的变化情况,例如:在非线形结构分析中,可以用图形显示某一特定节点的受力与其变形的关系曲线。

ANSYS 会把求解得到结果数据保存在单独的结果文件中,对于结构分析结果文件通常是 Jobname.RST,对于热分析结果文件通常是 Jobname.RTH。进行后处理时,就是从这些结果文件中读取数据,从而输出图形、列表等结果。

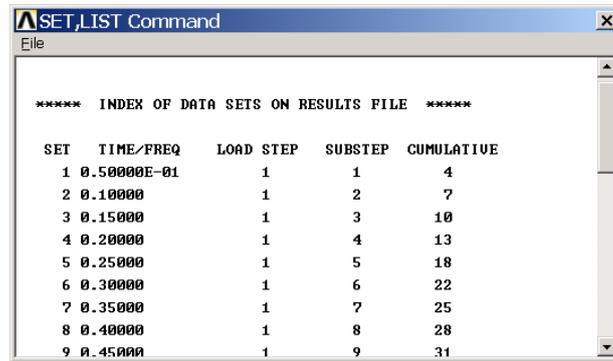
本章主要讲述通用后处理器 (POST1),它有许多功能,包括从简单的图形显示到针对更为复杂数据操作的单元表、路径及荷载工况组合等。进入通用后处理器可单击 Main Menu>General Postproc 菜单或直接在命令流输入窗口中输入 “/POST1” 即可。

6.1.1 读取结果数据

要想显示了查看数据,首先要将计算结果读入到数据库中。要这样做,数据库中首先要有模型数据 (节点和单元等)。若数据库中没有数据,需要用户单击工具栏上的  按钮读取数据文件 Jobname.db。数据库包含的模型数据应与计算模型相同,否则可能会无法进行后处理。下举例介绍读取结果数据的操作:

(1) 将光盘目录 “\ch06\data\” 中的文件复制到工作目录,启动 ANSYS,单击工具栏上的  按钮,打开数据库文件 “beam.db”。

(2) 单击 Main Menu>General Postproc>Results Summary 菜单查看计算得到数据集合情况,如图 6.1 所示。可参考此表有目的地读入某个荷载步的结果。



***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000E-01	1	1	4
2	0.10000	1	2	7
3	0.15000	1	3	10
4	0.20000	1	4	13
5	0.25000	1	5	18
6	0.30000	1	6	22
7	0.35000	1	7	25
8	0.40000	1	8	28
9	0.45000	1	9	31

图6.1 计算结果数据情况

(3) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set 菜单，可读入最后一子步的结果数据。接下来就可以显示了查看最后一子步的结果数据了，显示的操作将在 6.2 节中详细讲述。

读取结果数据菜单，如图 6.2 所示。常用的读取结果数据的菜单还有：



图6.2 读取数据菜单

- **【First Set】**：单击此菜单，可读入第一子步的结果数据。
- **【Next Set】**：单击此菜单，可读入当前子步的下一子步的结果数据。
- **【Previous Set】**：单击此菜单，可读入当前子步的上一子步的结果数据。

此外，用户还可以按如下几种方式读取结果数据：

1. 选择子步直接读取

用户可以直接选择某一子步的数据进行读取。操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Pick 菜单，将弹出如图 6.3 所示的对话框。

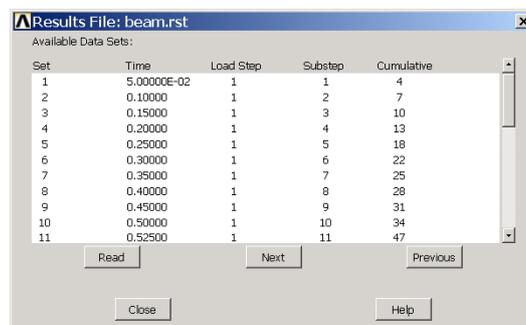


图6.3 选取子步数据

(2) 选中某一子步，然后单击 **Read** 按钮即可把该子步数据读入数据库。

2. 按子步号读取

如果用户已经知道待读取数据的子步号，可用此方法操作，操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Load Step 菜单，弹出如图 6.4 所示的对话框。

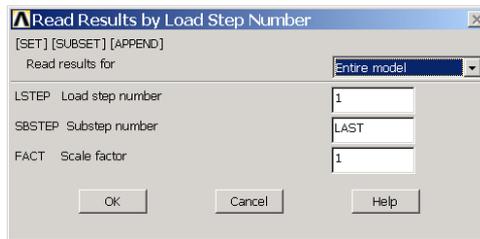


图6.4 按荷载步号读取结果数据

(2) 在【Read results for】下拉列表框中选择读取的数据结果类型，在【Load step number】文本框中输入荷载步，在【Substep number】文本框中输入子步，单击【OK】按钮即可读入相应的结果数据。

说明：在【Read results for】下拉列表框中，【Entire model】表示读入全部结果数据；【Selected subset】表示以替换的方式读入所选择的数据；【Subset-append】表示以追加的方式读入所选择的数据。

3. 按时间频率读取

用户还可以按时间频率来读取数据结果，操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Time/Freq 菜单，弹出如图 6.5 所示的对话框。

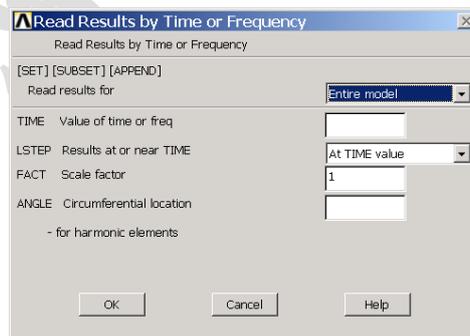


图6.5 按时间/频率读取结果数据

(2) 在【Read results for】下拉列表框中选择读取的数据结果类型，在【Value of time or freq】文本框中输入要读入数据的时间或频率点，在【Results at or near TIME】下拉列表框中选择【AT TIME value】，单击【OK】按钮即可。

说明：如果指定的时间或频率不在结果中，ANSYS 将采用线性插值的方法读入结果。

4. 按结果数据集号读取

如果用户知道待读取的结果数据集号，可选择些操作，具体步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Set Number 菜单，弹出如图 6.6 所示的对话框。

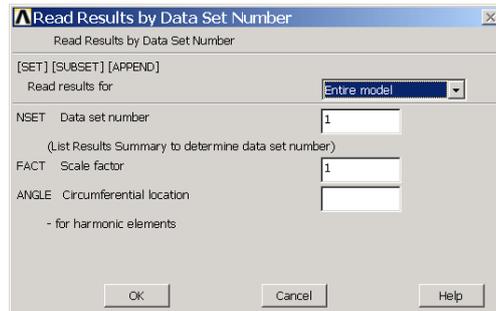


图6.6 按数据集读取结果数据

(2) 在【Read results for】下拉列表框中选择读取的数据结果类型，在【Data set number】文本框中输入要读取的结果数据集号，然后单击【OK】按钮即可。

6.1.2 数据替换与追加

当把数据结果读入数据库时，可以选择替换现在数据库还是追加到现在数据库。在图 6.4、图 6.5 和图 6.6 所示的对话框中，都有【Read results for】下拉列表框项，展开它如图 6.7 所示。

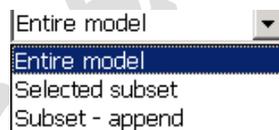


图6.7 数据替换与追加

其中，【Selected subset】表示以替换的方式读入所选择的数据；【Subset-append】表示以追加的方式读入所选择的数据。

6.1.3 选择结果数据

有时用户并不需要读入计算得到的所有结果数据，这时可以在读入结果文件之前选择读取的数据项目。选择结果数据的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Data & File Opts 菜单，将弹出如图 6.8 所示的【Data and File options】对话框。

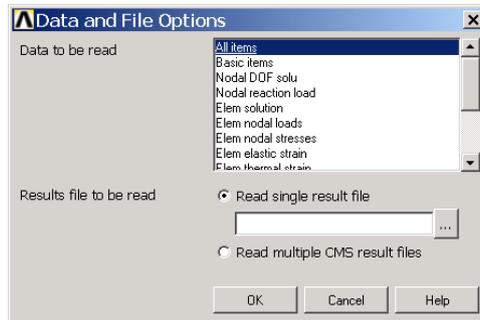


图6.8 选择结果数据

(2) 在【Data to be read】列表框中选择想要读取的数据项目（默认为【All items】），单击【OK】按钮即可。在此对话框中，用户还可以单击...按钮手动指定结果文件。

(3) 选择好了结果数据后，接着可单击图 6.2 所示的相应菜单读取数据即可。此步骤还应注意选择数据替换还是追加。

6.1.4 输出控制

输出控制主要是用来设置显示结果的一些选项，如结果坐标系、主应力计算方式等。改变结果坐标系的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Options for Outp 菜单，可弹出输出控制对话框，如图 6.9 所示。

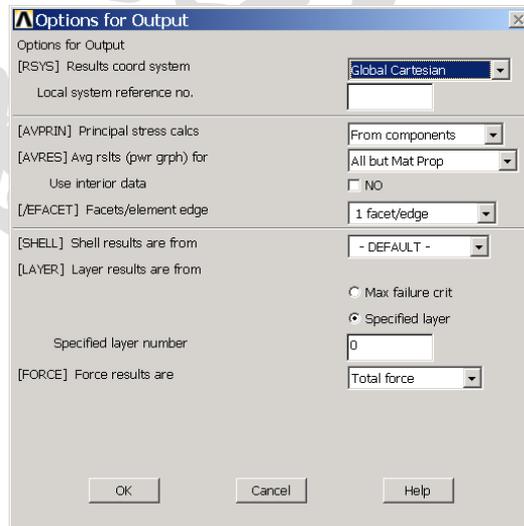


图6.9 输出控制对话框

(2) 在【Results coord system】下拉列表框中选择适当的结果坐标系，单击【OK】按钮确认。

说明：图 6.9 所示的对话框中，【Principal stress calcs】下拉列表用于选择主应力计算方式；【Facets/element edge】下拉列表框用于指定每个单元边界上小平面的数目；【Shell results are from】下的列表框用于选择壳单元输出结果的面，可选择上表面（默认）、中面、下表面。

6.2 图形显示

把所需的结果读入到数据库中后，可能过图形显示功能直观地查看求解结果。通用后处理器提供了以下几种图形显示：

- 变形图
- 等值线图
- 矢量图
- 粒子轨迹图
- 破裂和压碎图

单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results 可展开图形绘制菜单，如图 6.10 所示。下面将分别介绍各种图形的显示操作。



图6.10 图形绘制菜单

6.2.1 绘制变形图

还以光盘中提供的模型为例，绘制变形图的操作如下：

(1) 将光盘目录“\ch06\data\”中的文件复制到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮，打开数据库文件“beam.db”。

(2) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set 菜单，读取最后一个子步结果。

(3) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 菜单，弹出如图 6.11 所示的【Plot Deformed Shape】对话框。

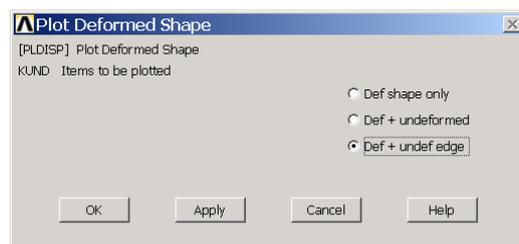


图6.11 绘制变形图选项

说明：【Def shape only】单选按钮表示不显示未变形的结构；【Def + undeformed】单选按钮表示变形后和未变形的结构同时显示；【Def + undef edge】单选按钮表示显示变形后的结构和未变形时的结构边界。

(4) 选择【Def + undef edge】单元框，单击【OK】按钮，然后单击显示控制工具栏中的按钮，即可在图形视窗中绘制变形图。如图 6.12 所示。

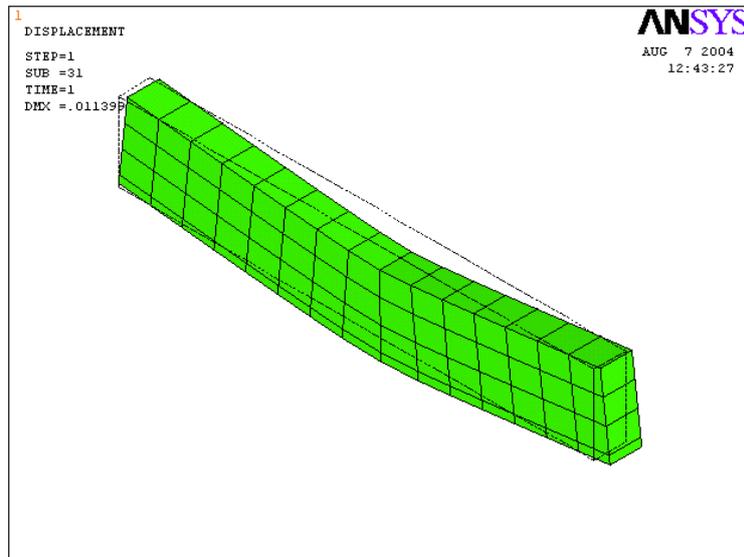


图6.12 绘制的变形图

当计算得到的变形过小时，程序会自动对变形进行放大以显示变形的趋势。用户可以通过以下操作来显示实际变形的比例：

(1) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Style】|【Displacement Scaling】菜单，弹出如图 6.13 所示的对话框。

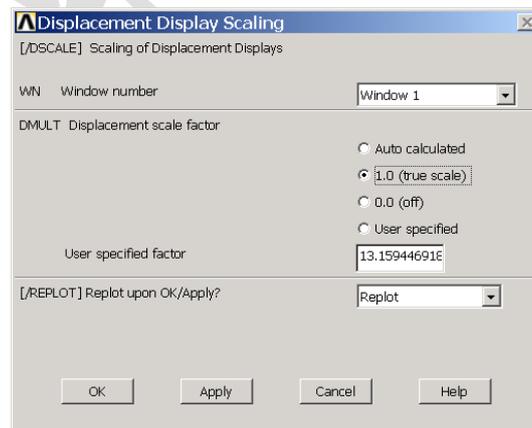


图6.13 控制变形缩放比例

(2) 在【Displacement scale factor】单选列表中选中【1.0 (true scale)】，确保【Replot

upon OK/Apply?】下拉列表框选中【Replot】，然后单击【OK】按钮即可显示结构的实际变形。如图 6.14 所示。

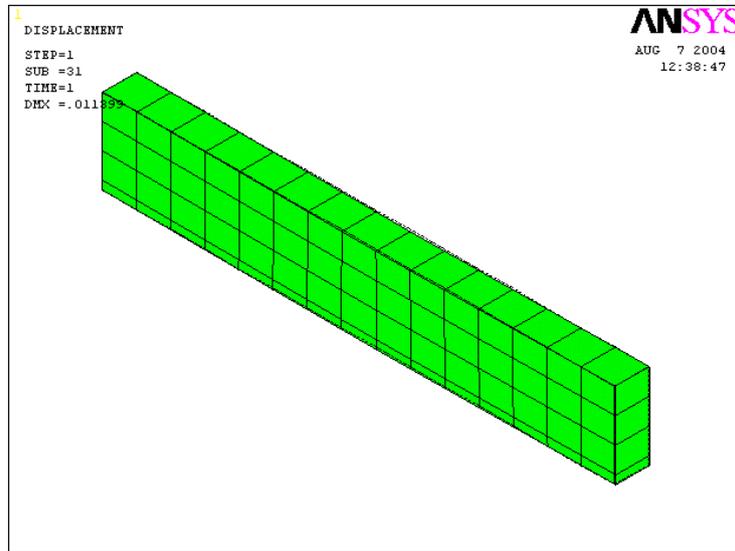


图6.14 按实际变形比例显示变形图

说明：在图 6.13 所示的对话框中用户选中【User specified】单选项，并在【User specified factor】文本框中输入缩放比例，可实现用户自定义比例显示变形图。

6.2.2 绘制等值线图

等值线图非常适合表现应力、温度等结果在模型上的分布情况。在 ANSYS 中结点结果、单元结果、单元表等都可以用等值线图的形式显示，下面介绍一下用等值线图显示结点结果和单元结果的常用操作步骤，关于单元表的显示将在下一节详细介绍：

1. 图形显示结点结果

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 菜单，弹出【Contour Nodal Solution Data】对话框，如图 6.15 所示。

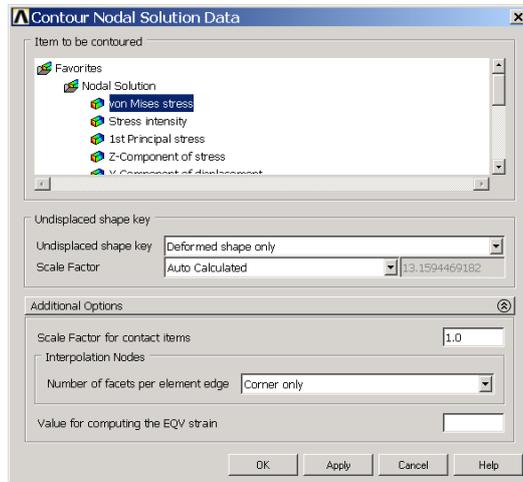


图6.15 选择节点结果

说明：单击  按钮，可展开和隐藏附加的选项。

(2) 在【Item to be contoured】列表框中依次选择【Favorites】|【Nodal Solution】|【von Mises stress】，其它保持不变，单击【OK】按钮即可显示结点 Mises 应力的等值线图。如图 6.16 所示。

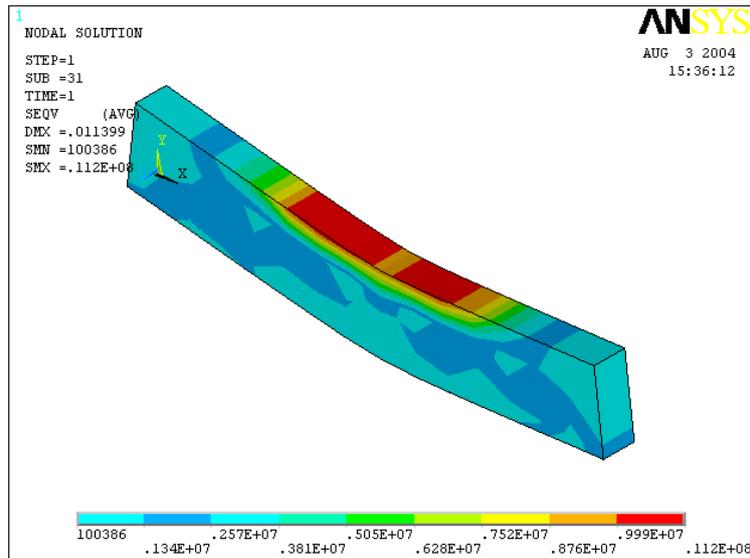


图6.16 结点应力等值线图

图 6.15 中其它选项的说明：

【Undisplaced shape key】下拉列表中有三个选项：

- 【Deformed shapy only】：只显示变形后的结构。
- 【Deformed shape with undeformed model】：显示变形后的等值线图及未变形的结构。

- 【Deformed shape with undeformed edge】：显示变形后的等值线图及未变形的结构边界。

【Scale Factor】下拉列表框用于设置显示变形比例因子，和显示变形图时的控制类似。

【Interpolation Nodes】下拉列表框中有三个选项：

- 【Corner only】：将单元边界设成 1 段，不显示中间节点。
- 【Corner + midside】：将单元边界设成 2 段，显示中间节点。
- 【All applicable】：将单元边界设成 4 段。

【Eff Nu for EQV strain】文本框用于设置矢量的平均算法，默认为 0，即先计算节点的值，然后对单元进行平均；如果取 1，则反过来，先求单元的值，再对节点平均。

2. 图形显示单元结果

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu 菜单，弹出【Contour Element Solution Data】对话框，如图 6.17 所示。

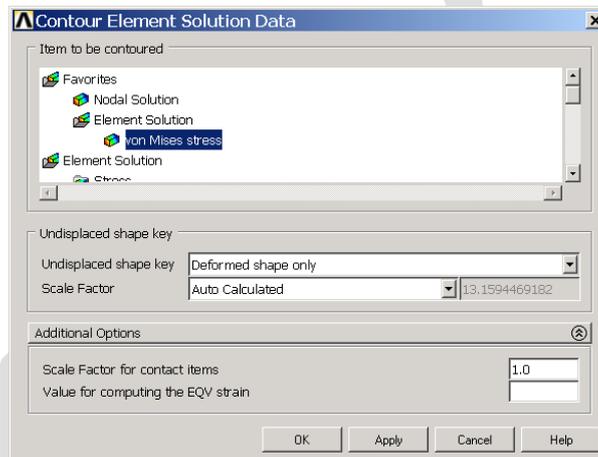


图6.17 选择单元结果

(2) 在【Item to be contoured】列表框中依次选择【Favorites】|【Element Solution】|【von Mises stress】，其它保持不变，单击【OK】按钮可绘制出单元 Mises 应力的等值线图。如图 6.18 所示。

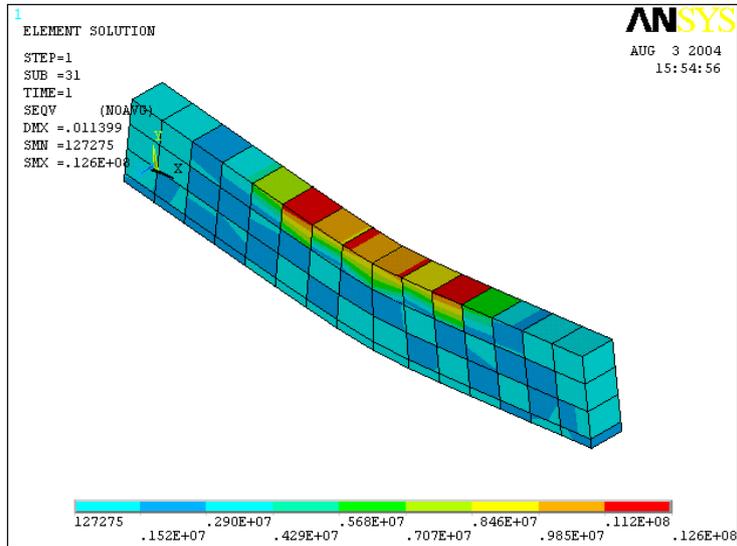


图6.18 单元应力等值线图

图 6.17 中其它选项的意义和图 6.15 类似，不再详述。

6.2.3 绘制矢量图

矢量图是用箭头显示模型中某个结果的大小和方向变化。绘制矢量图可按以下步骤操作：

(1) 单击 **Main Menu>General Postproc>Plot Results>Vector Plot>Predefined** 菜单，弹出如图 6.19 所示的【**Vector Plot of Predefined Vectors**】对话框。

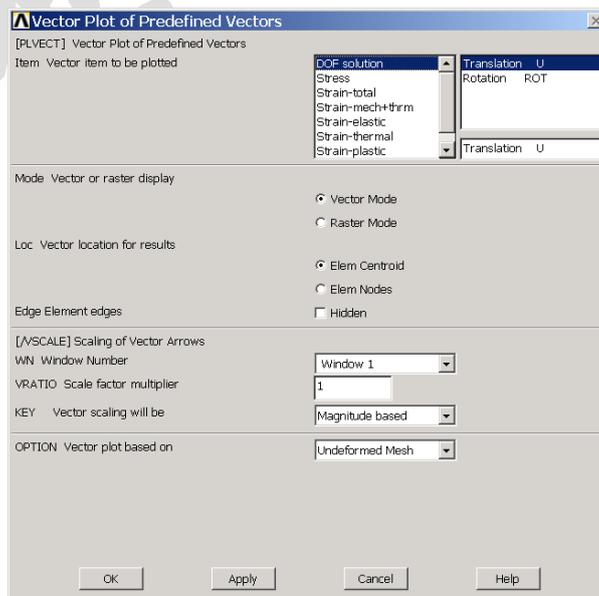


图6.19 矢量图选项对话框

(2) 在【Vector item to be plotted】列表框中选择要输出的矢量，如【Translation U】(位移矢量)，其它保持不变，单击【OK】按钮即可得到位移矢量图，如图 6.20 所示。

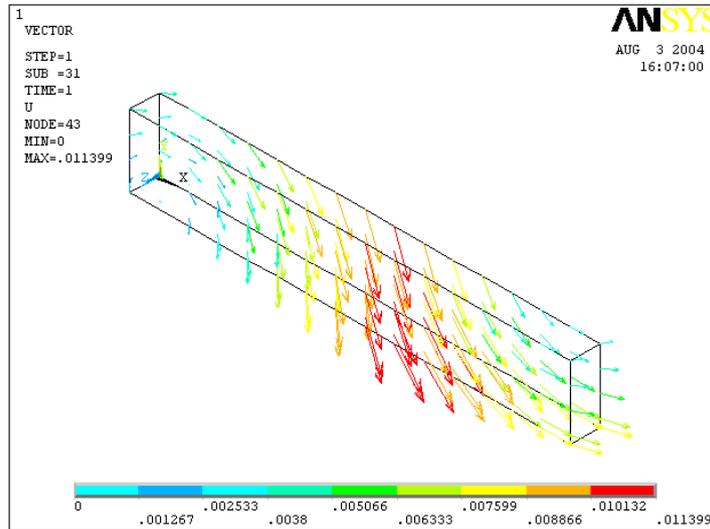


图6.20 位移矢量图

图 6.19 所示的对话框中其它选项说明：

【Vector or raster display】选项组有两个单选按钮：

- 【Vector Mode】：矢量模式（默认）。
- 【Raster Mode】：光栅模式。

【Vector location for results】选项组有两个单选按钮：

- 【Elem Centroid】：箭头位于单元质心（默认）。
- 【Elem Nodes】：箭头位于节点处。

【Element edges】复选框用于设置是否隐藏单元边缘。

【Vector scaling will be】下拉列表框有两个选项，用于控制箭头大小：

- 【Magnitude based】：按矢量的大小显示箭头长度（默认）。
- 【Uniform】：统一箭头长度。

【Vector plot based on】下拉列表框有两个选项：

- 【Underformed Mesh】：基于未变形的网格（默认）。
- 【Deformed Mesh】：基于变形的网格。

此外，用户还可以生成自定义的矢量图，其操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Vector Plot>User-defined 菜单，弹出如图 6.21 所示的对话框。

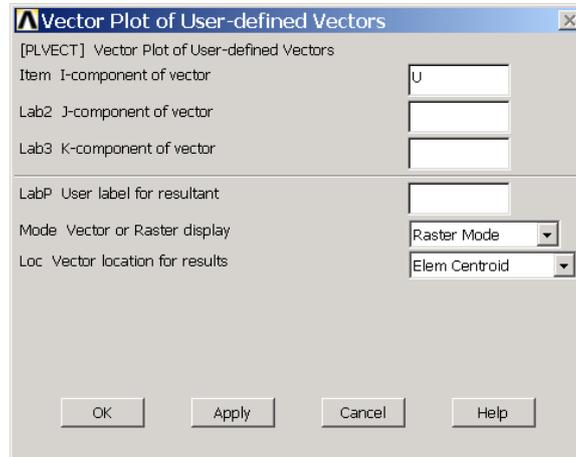


图6.21 自定义矢量图选项

(2) 在【I-component of vector】文本框中输入 ANSYS 预定义的矢量（如【U】）或用户自定义的矢量的 i 分量，选择适当的显示模式，然后单击【OK】按钮确认即可。

6.2.4 绘制粒子轨迹图

粒子轨迹图用于显示流体中粒子的运行情况。由于流体分析不是本书的重点，在此仅简单介绍一下绘制粒子轨迹图常用的菜单路径：

- 在轨迹上定义一点
GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Defi Trace Pt
- 在单元上显示流动轨迹
GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Plot Flow Tra
- 列出轨迹点
GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>List Trace Pt
- 生成粒子流动画序列
GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Particle Flow

6.2.5 绘制破裂和压碎图

破裂图和压碎图是 SOLID65（混凝土）单元专有的。本章光盘中提供的例子即是用 SOLID65 单元得到的，要绘制破裂和压碎图，可按以下步骤操作：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>ConcPlot> Crack/Crush 菜单，弹出如图 6.22 所示的对话框。



图6.22 显示混凝土压碎图

(2) 在【Plot symbols are located at】下拉列表框中选择【element centroid】，然后单击【OK】按钮。

(3) 此时如看不出压碎情况，可单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Device Options】菜单，在弹出的【Device Options】对话框中，设置【Vector mode (wireframe)】后面的复选框为【ON】，如图 6.23 所示。

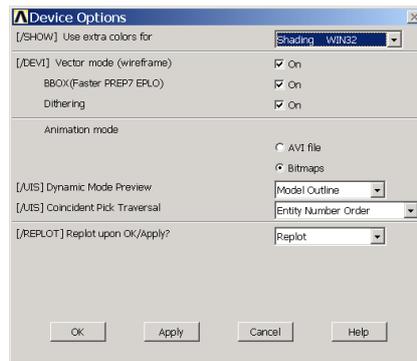


图6.23 设置显示模式

(4) 设置完后，单击【OK】按钮即可看到如图 6.24 所示的压碎图，其中小圆圈表示破碎区域。

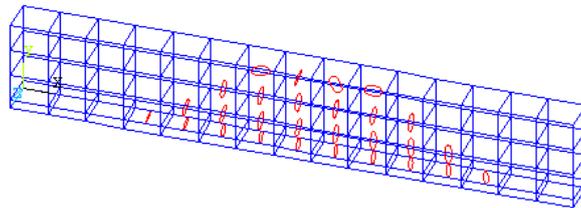


图6.24 混凝土压碎图

6.3 单元表

单元表 (Element Table) 是 ANSYS 中查看计算结果的一个很有用的辅助工具。它主要有两个功能：第一，它可以对结果数据进行适当的数学运算；第二，它可以访问一些其它方法无法访问的单元结果。

6.3.1 定义单元表

要使用单元表 (进行数据处理或者访问特殊的单元结果)，首先要定义单元表。假设用户已经完成了计算并读入结果数据，定义单元表的基本操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 菜单，弹出如图 6.25 所示的【Element Table Data】对话框。

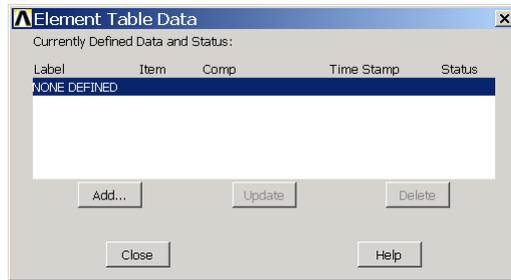


图6.25 单元表管理对话框

(2) 单击 **Add...** 按钮，接着弹出【Define Additional Element Table Items】对话框，如图 6.26 所示。

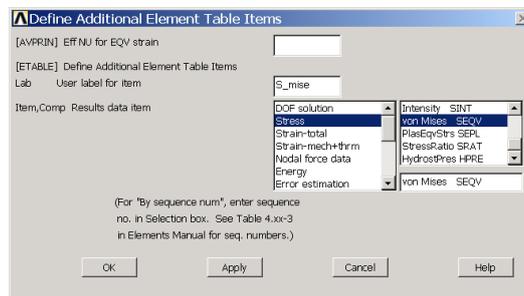


图6.26 定义单元表

(3) 在【User label for item】文本框中输入单元表的唯一标识，如【S_mise】；在【Results data item】列表框中选择存入单元表中的结果项，如在左侧列表框中选择【Stress】，并在右侧列表框中选择【von Mises SEQV】，表示把 Mises 等效应力结构存入单元表中。然后单击【OK】按钮即定义了一个名为 S_mise 的单元表。

说明：【User label for item】列表框中的输出项目很多，而且对于不同的单元输出项目可能会不同，因此建议用户在定义单元表之前，最好查阅 ANSYS 的帮助文档确认要定义的单元输出项存在。

有此特殊的单元输出项，必须通过单元表的形式才能查看。这就要求查看之前先把这些输出项定义成为单元表。定义这种单元通常需要从帮助文档中查到相应单元输出项的序号，然后通过序号来定义。

例如：要查看 SOLID65 单元的输出项 EPEL（主弹性应变），查帮助知钢筋的相应输出项序号为“SMISC 1”，按序号定义单元表的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 菜单，弹出【Element Table Data】对话框。

(2) 单击 **Add...** 按钮，接着弹出【Define Additional Element Table Items】对话框。选择左侧列表框中选择【By sequence num】，并在右侧列表框中选择【SMISC】，然后在下面的文本框中输入【SMISC, 1】，单击【OK】按钮即可。如图 6.27 所示。

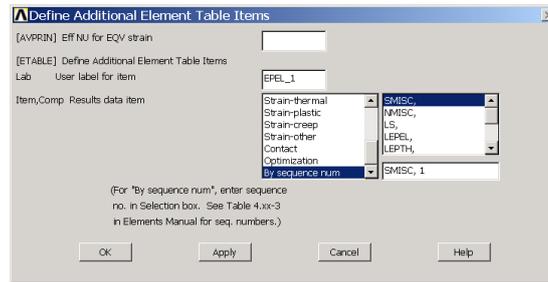


图6.27 按序号定义单元表

(3) 定义单元表完成后的结果如图 6.68 所示。要删除单元表，单击 **Delete** 按钮即可；如果重新读入了不同荷载步的数据结果，单元表不会自动刷新，此时单击 **Update** 按钮可更新选中的单元表。

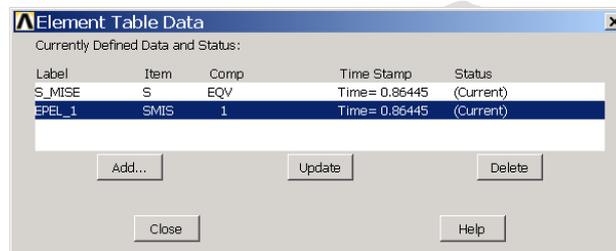


图6.28 单元表管理对话框

6.3.2 单元表的操作

定义了单元表后，可对单元进行适当的数学运算。ANSYS 中提供了绝对值、乘、加以及比较等多种数学运算方法。下面以加法为例计算两个单元表的和并生成新的单元表：

(1) 假设已经按上一小节的操作定义了两个单元表 S_MISE 和 EPEL_1。单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Add Items 菜单，弹出如图 6.29 所示的【Add Element Table Items】对话框。

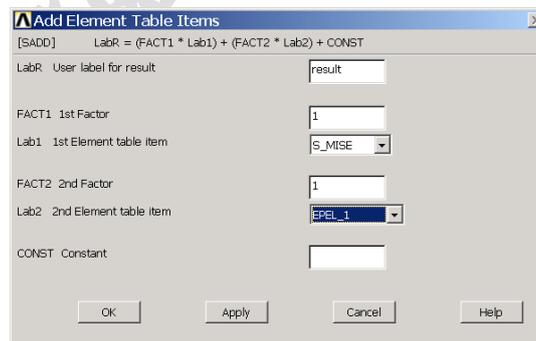


图6.29 单元表的数学运算

(2) 在【User label for result】文本框中输入结果单元表的名称，如【result】；在【1st Element table item】下拉列表框中选择【S_MISE】；在【2nd Element table item】下拉列表框

中选择【EPEL_1】。然后单击【OK】按钮即可。

(3) 再次单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 菜单可看到新生成的单元表，如图 6.30 所示。

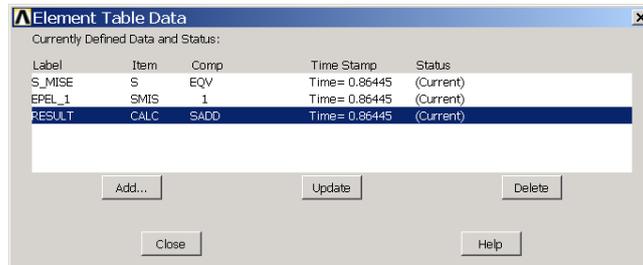


图6.30 单元表管理对话框

6.3.3 显示单元表

单元表可以用等值线图的形式显示，也可以列表显示。

图形显示的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot Elem Table 菜单，弹出如图 6.31 所示的【Contour Plot of Element Table Data】对话框。

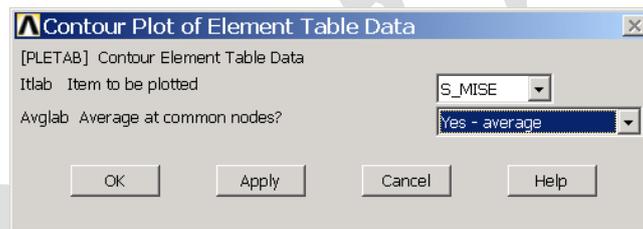


图6.31 图形显示单元表

(2) 在【Item to be plotted】下拉列表框中选择要显示的单元表名称，如【S_MISE】；在【Average at common nodes】下拉列表框中选择【Yes - average】，表示在公共节点处平均结果。然后单击【OK】按钮即可图形显示单元表数据，如图 6.32 所示。

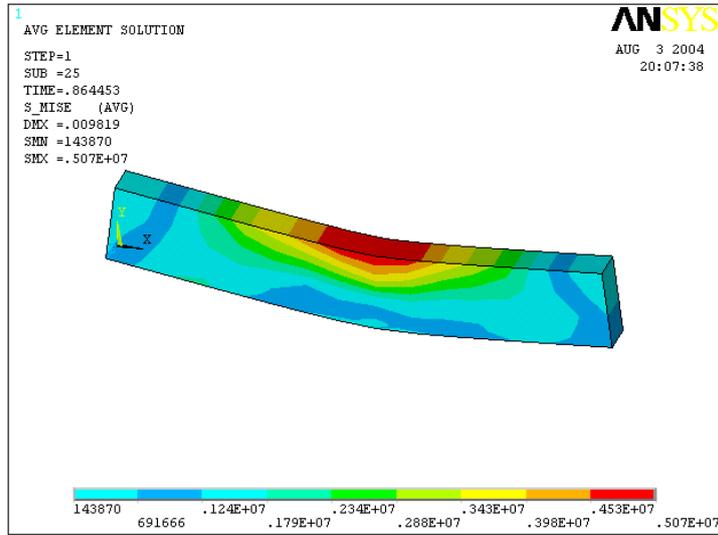


图6.32 单元表等值线图

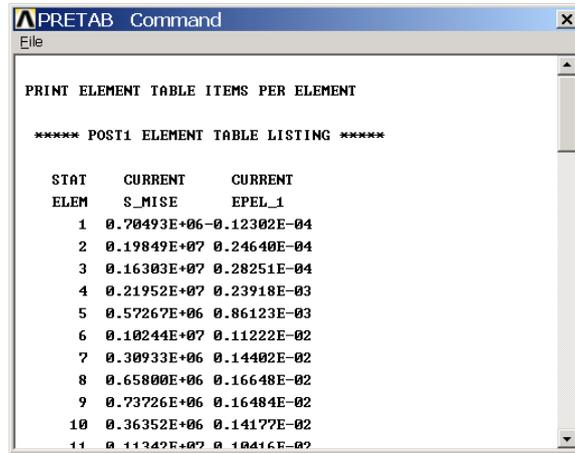
列表显示单元表的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>List Elem Table 菜单，弹出如图 6.33 所示的对话框。



图6.33 列表显示单元表

(2) 在【Items to be listed】列表框中选中想要显示的单元表（可多选），如【S_MISE】和【EPEL_】，然后单击【OK】按钮。接着弹出列表显示结果，如图 6.34 所示。



```

PRETAB Command
File
PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT      CURRENT      CURRENT
ELEM      S_MISE      EPEL_1
1  0.70493E+06-0.12302E-04
2  0.19849E+07  0.24640E-04
3  0.16303E+07  0.28251E-04
4  0.21952E+07  0.23918E-03
5  0.57267E+06  0.86123E-03
6  0.10244E+07  0.11222E-02
7  0.30933E+06  0.14402E-02
8  0.65800E+06  0.16648E-02
9  0.73726E+06  0.16484E-02
10 0.36352E+06  0.14177E-02
11 0.11242E+07  0.10416E-02

```

图6.34 单元表列表显示结果

6.4 使用路径

路径 (Path) 是通用后处理器的又一个强大的功能。借助路径能够虚拟映射任何结果数据到模型的任意路径上。这样就可以沿路径执行许多数据运算, 以及以图形或列表方式查看结果项沿路径的变化情况。

6.4.1 定义路径

要查看某结果项沿路径的变化情况, 首先要定义路径。可以通过在工作平面上拾取节点、位置或填写特定的坐标位置表来定义路径。

下图是通过节点定义的一条路径 PATH1, 其操作步骤如下:

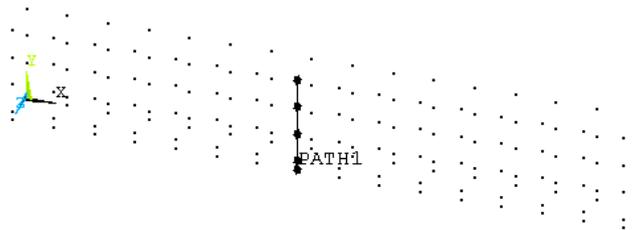


图6.35 定义路径

(1) 将光盘目录 “\ch06\data\” 中的文件复制到工作目录, 启动 ANSYS, 单击工具栏上的  按钮, 打开数据库文件 “beam.db”。

(2) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set 菜单, 读取最后一个子步结果。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Define Path>By Nodes 菜单, 弹出图形拾取对话框, 依次在图形视窗中选择路径经过的节点, 然后单击 **【OK】** 按钮, 接着弹出如图 6.36 所示的 **【By nodes】** 对话框。

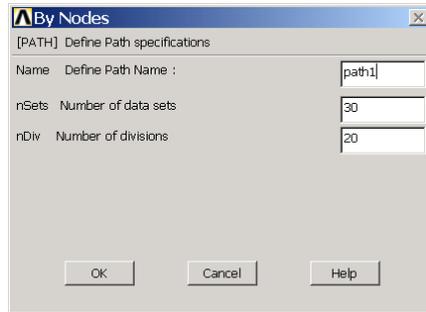


图6.36 按节点定义路径

(4) 在【Define Path Name】文本框中输入路径名【path1】，单击【OK】按钮。

说明：【Number of data sets】文本框中应输入映射到该路径上的数据组数（默认为 30，最小为 4，无最大值）；【Number of divisions】文本框中应输入相邻点的子分数（默认为 20 无最大值）。

(5) 单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Map onto Path 菜单，弹出如图 6.37 所示的【Map Result Items onto Path】对话框。

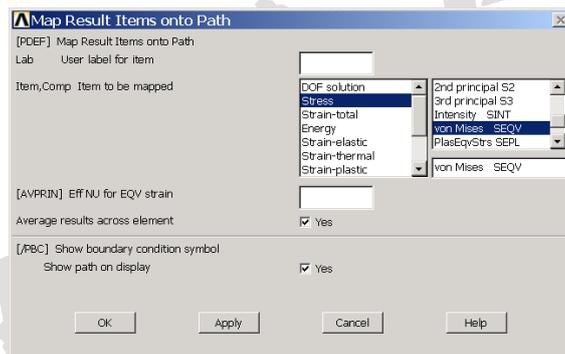


图6.37 映射数据到路径

(6) 在【Item to be mapped】列表框中选择要映射的结果项，如【von Mises SEQV】；选择【Show path on display】后面的复选框为【Yes】。然后单击【OK】按钮即可显示定义的路径。如图 6.35 所示。

说明：如果路径不再显示，用户可单击 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Plot Paths 菜单重新显示。

用户还可以通过工作平面、位置等定义路径，再此不再详述，其菜单位置如图 6.38 所示。

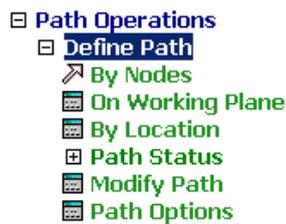


图6.38 定义路径菜单

注意：一个模型中可以定义多个路径，但是一次只有一个路径为当前路径。单击 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Recall Path 菜单可改变当前路径，如图 6.39 所示。

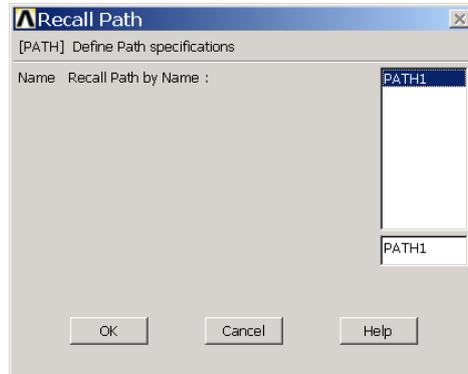


图6.39 改变当前路径

6.4.2 观察沿路径结果

可以通过图形和列表的方式显示沿路径的数据结果。

图形显示路径结果的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Graph 菜单，弹出如图 6.40 所示的【Plot of Path Items on Graph】对话框。

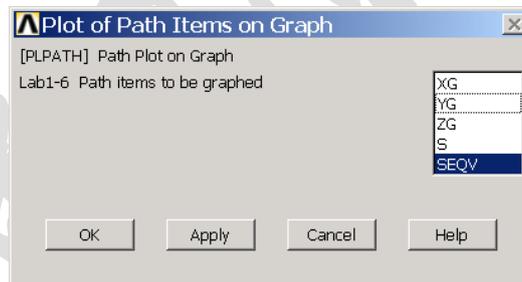


图6.40 图形显示路径结果

(2) 在【Path items to be graphed】列表框中选择我们上一小节中定义的【SEQV】，然后单击【OK】按钮。得到如图 6.41 所示的曲线图。其中，横坐标为【S】，也就是距起始路径点的路径长度；纵坐标为【SEQV】结果项。

说明：【XG】、【YG】、【ZG】和【S】为默认定义四个几何量。

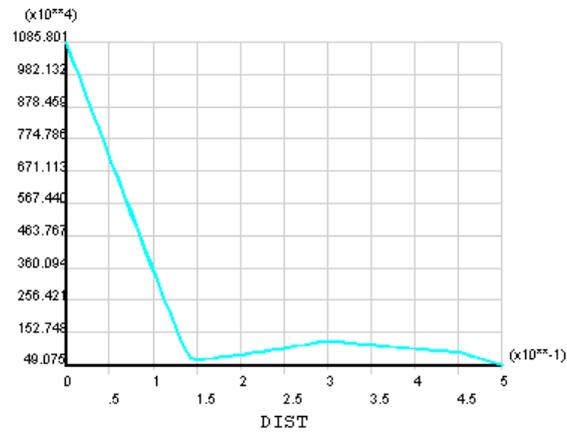


图6.41 图形显示路径数据

用户还可以改变横坐标的数据项，例如要用【YG】项作为横坐标，其操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>Path Range 菜单，弹出如图 6.42 所示的【Path Range for Lists and Plots】对话框。

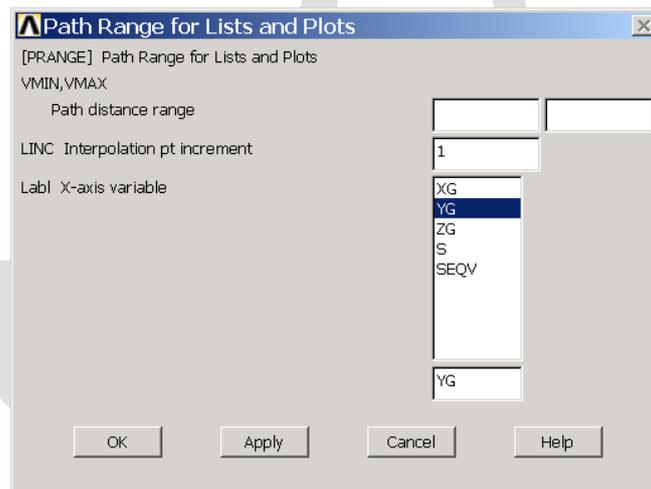


图6.42 选择横坐标数据项

说明：【Path distance range】文本框用于设置横坐标的起止范围；【Interpolation pt increment】文本框用于设置增量步的大小，默认为 1。

(2) 在【X-axis variable】列表框中选择【YG】，单击【OK】按钮即可。得到的数据曲线如图 6.43 所示。

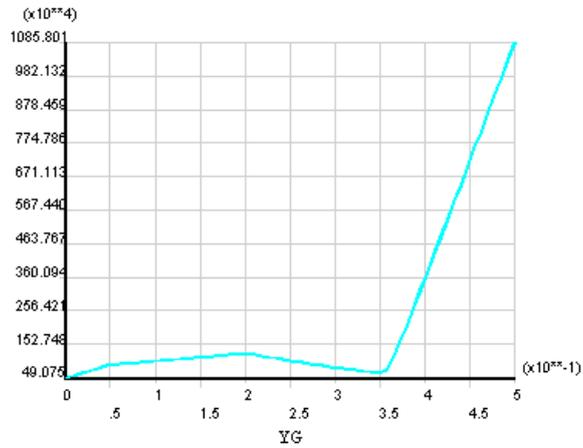


图6.43 改变横坐标数据项

另外用户可单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Geometry 菜单直接在几何图形上显示路径数据。如图 6.44 所示。

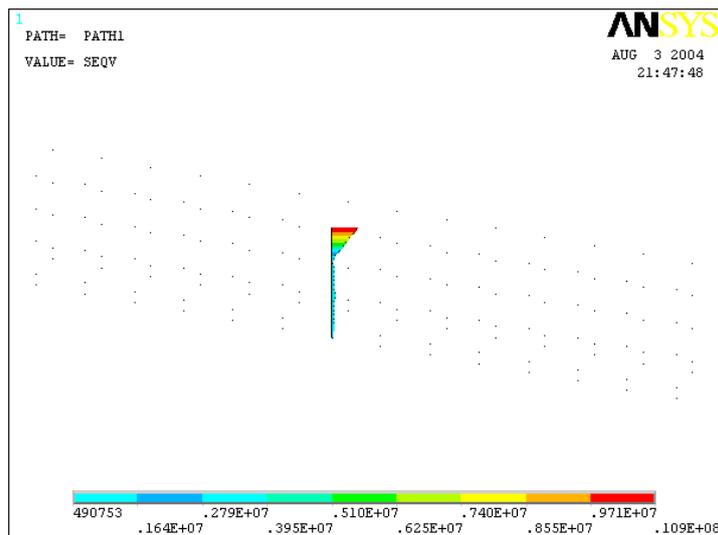


图6.44 在几何图形上显示路径数据

列表显示路径结果的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>List Path Items 菜单，弹出如图 6.45 所示的对话框。

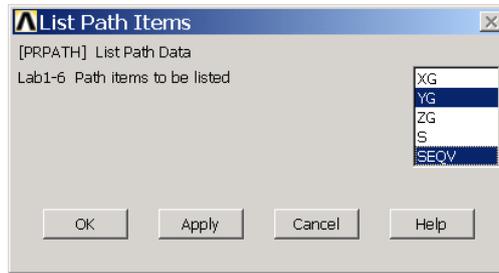


图6.45 列表显示路径数据

(2) 在【Path items to be listed】列表框中选择要显示的结果项，如【YG】和【SEQV】，然后单击【OK】按钮即可列表显示路径结果，如图 6.46 所示。

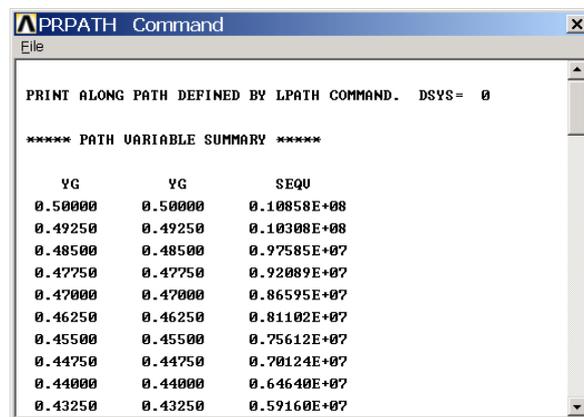


图6.46 列表显示路径结果

6.4.3 进行沿路径数学运算

和单元表的操作类似，也可以对路径数据项进行相应的数据运算。下面以求正弦的运算为例介绍其操作步骤，其它运算类似不再详述：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Sine 菜单，弹出如图 6.47 所示的【Sine of Path Items】对话框。

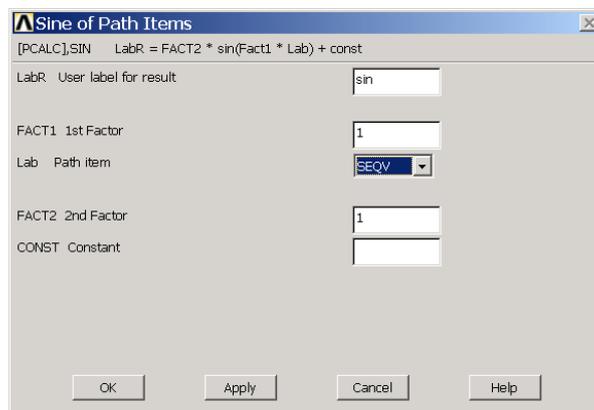


图6.47 对路径进行数据运算

(2) 在【User label for result】文本框中输入新生成的路径数据项名称，如【sin】；在【Path item】下拉列表框中选择【SEQV】。然后单击【OK】按钮即生成了新的路径数据项SIN。

6.5 荷载工况

在典型的后处理中，每次只能读入一组数据结果（如荷载步 1）进行处理，读入新的数据将更新数据库中原有的数据结果。如果要在两组数据之间执行操作，则需要用到荷载工况功能。

荷载工况是一组赋以任意参考号的结果数据。例如，可以将荷载步 3、子步 4 的一组数据定义为荷载工况 1，将时间为 1.5 时的一组数据定义为荷载工况 2。最多可定义 99 个荷载工况，且在数据库中一次只能存储一个荷载工况。

6.5.1 定义荷载工况

定义荷载工况的操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>General Postproc>Load Case>Create Load Case 菜单，弹出如图 6.48 所示的【Create Load Case】对话框。

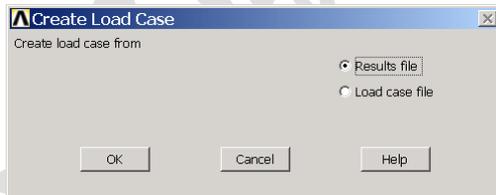


图6.48 定义荷载工况

(2) 选择【Results file】单选按钮，表示从结果文件中定义荷载工况，单击【OK】按钮。接着弹出如图 6.49 所示的【Create Load Case from Results File】对话框。

说明：【Load case file】单选按钮表示从荷载工况文件中定义荷载工况，需要生成荷载工况文件。

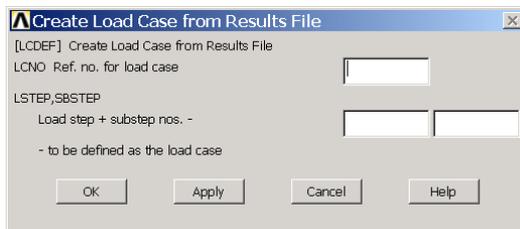


图6.49 从结果文件定义荷载工况

(3) 在【Ref. no. for load case】文本框中输入荷载工况参考号，可以是 1~99 之间的整数；在【Load step + substep nos.】文本框中分别输入荷载步号和子步号。单击【OK】按钮即可。

6.5.2 荷载工况的读写

定义了荷载工况后，就可以对荷载工况进行读取操作。读取荷载工况的操作如下：

(1) 单击 **Main Menu>General Postproc>Load Case>Read Load Case** 菜单，弹出如图 6.50 所示的【**Read Load Case**】对话框。

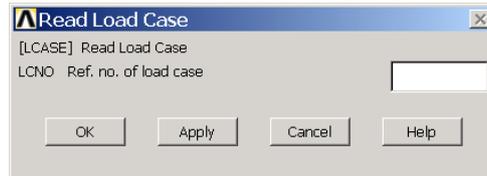


图6.50 读取荷载工况

(2) 在【**Ref. no.of load case**】文本框中输入荷载工况的参考号，单击【**OK**】按钮可读取相应的荷载工况。

如果要将当前的荷载工况写入荷载工况文件中，可按以下步骤操作：

(1) 单击 **Main Menu>General Postproc>Load Case>Write Load Case** 菜单，接着弹出如图 6.51 所示的【**Write Load Case from Database to Load Case File**】对话框。



图6.51 写入荷载工况文件

(2) 在【**Ref. no.of load case**】文本框中输入新的荷载工况的参考号；在【**Load case file**】文本框中输入荷载工况文件名。单击【**OK**】按钮即将当前荷载工况写入到一个新的荷载工况文件中。

6.5.3 荷载工况数学运算

两个荷载工况之间同样可以进行一系列数据运算，从而产生新的数据结果。ANSYS 中提供了求和 (Add)、求差 (Subtract)、求平方 (Square)、求平方根 (Square Root) 等运算操作，下面以求差运算为例，介绍其操作方法，其它不再详述：

(1) 假设已经将读入了荷载工况 2。单击 **Main Menu>General Postproc>Load Case>Subtract** 菜单，弹出如图 6.52 所示的【**Subtract Load Cases**】对话框。

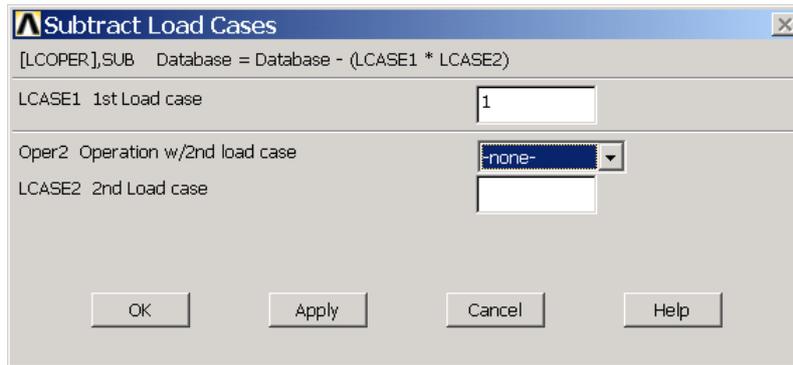


图6.52 荷载工况数据运算

(2) 在【1st Load case】文本框中输入荷载工况参考号【1】，其它设置不变，表示从当前数据库中减去荷载工况 1 的数据。单击【OK】按钮即可。

说明：进行过数学运算后，可以将当前的数据写入一个新的荷载工况文件中。

第七章 时间历程后处理器

时间历程后处理器（POST26）可用于查看模型中指定点的分析结果随时间、频率等的变化关系。它可以完成从简单的图形显示和列表、微分和响应频谱的生成等操作，例如在非线性分析中以图形显示荷载和位移的关系。

在时间历程后处理器中用户还可以生成结构随时间的变形动画。本章将从基本的变量定义与操作讲起，详细介绍时间历程后处理器的使用。

7.1 定义和存储变量

时间历程后处理器的大部分操作都是对变量而言的，变量是结果数据与时间（或频率）的简表。这些结果数据可以是某节点处的位移、力、单元应力、单元热流量等。因此要在时间历程后处理器中查看结果，首先要把待查看的结果数据定义并存储为一个变量。

下面举例介绍定义变量的基本操作：

（1）将光盘目录“\ch06\data\”中的文件复制到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的按钮，打开数据库文件“beam.db”。

（2）单击 Main Menu>TimeHist Postpro 菜单，即弹出【Time History Variables】对话框，如图 7.1 所示。对变量的定义、存储、数学运算及显示等操作都可以在此对话框中操作，因此作者建议用户熟悉此对话框的操作。

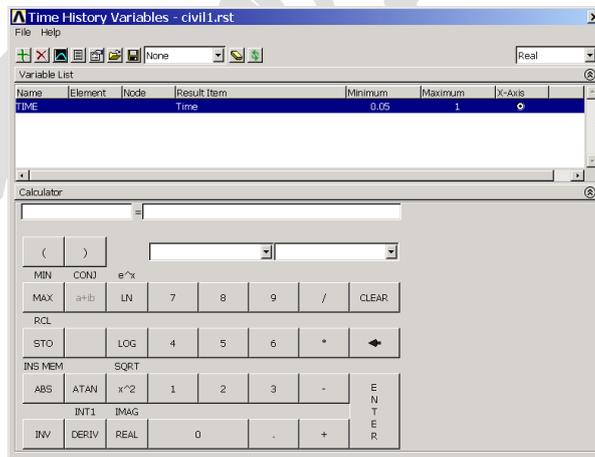


图7.1 变量查看对话框

说明：如果无意中关闭【Time History Variables】对话框，单击 Main Menu>TimeHist Postpro> Variable Viewer 菜单可重新打开。

（3）单击【Time History Variables】对话框中的按钮，将弹出如图 7.2 所示的【Add Time – History Variable】对话框。

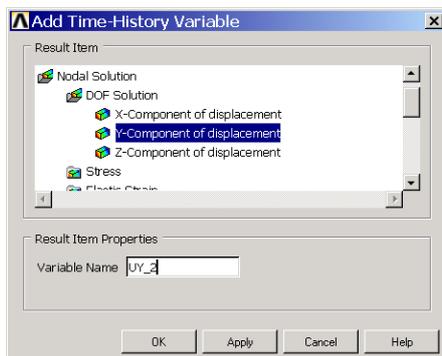


图7.2 选择结果项目

(4) 在【Result Item】列表框中选择要查看的结果项目。例如【Nodal Solution】|【DOF Solution】|【Y-Component of displacement】，接着在【Result Item Properties】选项组中将出现一个文本框，其中程序已自动为变量定义了一个名子【UY_2】，如无需修改单击【OK】按钮确认。

(5) 接着会弹出如图 7.3 所示的图形拾取对话框。在文本框中输入要查看的节点编号或者直接用鼠标在图形视窗中选择节点，然后单击【OK】按钮。

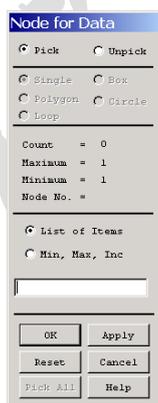


图7.3 图形拾取对话框

注意：当用鼠标选取节点时，可能【Time History Variables】对话框会挡住图形视窗中的模型，这时把【Time History Variables】移开即可，不要关闭些对话框，否则定义变量将会失败。

(6) 接着会回到【Time History Variables】对话框，如图 7.4 所示。从【Variable List】列表框中可以看到已经定义了一个新的变量 UY_2，其中存储的是节点 41 的 Y 方向位移。重复以上步骤可以继续定义变量，默认情况下可定义 10 个变量。

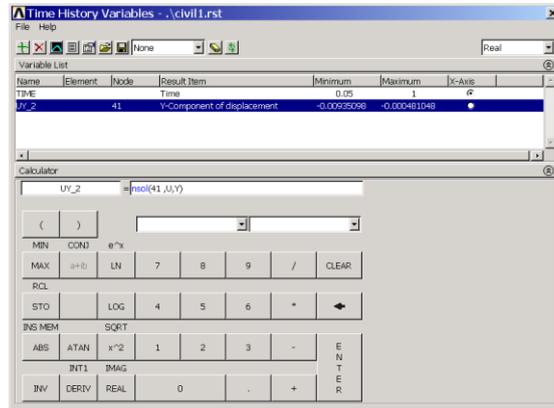


图7.4 定义生成的变量

说明：在【Time History Variables】对话框中删除变量的方法为：选中要删除的变量，然后单击  按钮即可。

用户还可以单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables 菜单来定义变量（如图 7.5 所示），在此不再详述。

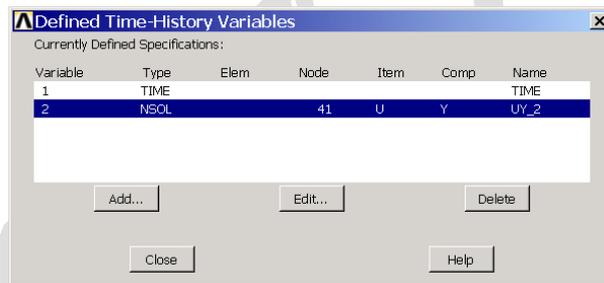


图7.5 定义变量对话框

存储变量的其本操作如下：

(1) 在图 7.4 的【Time History Variables】对话框中，选中变量【UY_2】，然后单击  按钮，将弹出如图 7.6 所示的对话框。

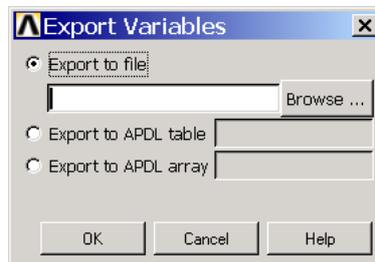


图7.5 存储变量

(2) 在【Export Variables】对话框中有三种存储变量的方式：

- 存储为文件：选中【Export to file】单选按钮，然后在文本框中输入要保存的文件名，文件的扩展名可以是*.csv（可用 EXCEL 打开）或*.pm（可用记事本打开），

单击【OK】按钮即可。

说明：默认把文件保存在工作目录下，单击 Browse ... 按钮可改变保存路径。

- 存储为 APDL 表：选中【Export to APDL table】单选按钮，然后在文本框中输入表名，单击【OK】按钮即可。

说明：存储完成后单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】菜单，选中生成的表，单击【Edit...】按钮，可查看存储的 APDL 表，它以时间或频率为索引，如图 7.6 所示。

Row	Column
	7.889e-031
0.5	-0.00475568
0.525	-0.00498586
0.55	-0.00521605
0.5875	-0.00556134
0.6125	-0.00579152
0.6375	-0.00602171
0.675	-0.00636325
0.7	-0.00659485
0.725	-0.00682494

图7.6 生成的APDL表

- 存储为 APDL 数组：选中【Export to APDL array】单选按钮，然后在文本框中输入数组名，单击【OK】按钮即可。

说明：存储完成后单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】菜单，选中生成的数组，单击【Edit...】按钮，可查看存储的 APDL 数组，它以 1、2、3 等为索引，如图 7.7 所示。

Index	Value
	1
1	-0.00048104
2	-0.00095422
3	-0.00146285
4	-0.00193612
5	-0.00244654
6	-0.00291453
7	-0.00337455
8	-0.00383492
9	-0.00429530
10	-0.00475568

图7.7 生成的APDL数组

变量存储完成后，可以通过以下操作进行导入：

- (1) 在【Time History Variables】对话框中单击  按钮，弹出如图 7.8 所示的【Import Data】对话框。

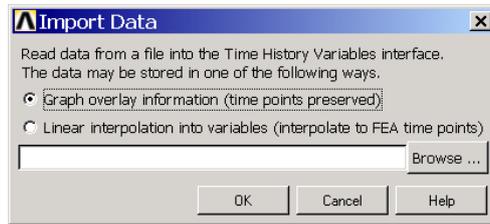


图7.8 导入变量对话框

(2) 单击 **Browse ...** 按钮选择变量文件 (*.csv 或 *.prn) 路径, 然后单击 **【OK】** 按钮即可。

说明: 在导入变量文件时, 选择 **【Linear interpolation into variables】** 单选按钮, 则文件中的变量数据会被添加到变更列表框中。

7.2 变量的操作

时间历程后处理器还可以对定义好的变量进行一系列的操作, 主要包括数据运算、变量与数组的相互赋值、数据平滑及生成响应频谱等。

7.2.1 数学运算

有时, 对定义的变量进行适当的数学运算是必要的。例如, 在瞬态分析时定义了位移变量后, 可以对该变量进行时间求导, 得到速度和加速度等。**【Time History Variables】** 对话框中提供了一个非常方便的数据运算工具集, 如图 7.9 所示。



图7.9 数学运算工具

下面假设用户已经定义了两个位移变量 UY_2 和 UY_3, 要通过数学运算得到一个新变量 $\alpha = (UY_3 - UY_2) / 1.5$, 其操作步骤如下:

- (1) 在变量名输入框中输入 **【alpha】**, 在表达式输入框中输入 **【(-)/1.5】**。
- (2) 把活动光标移到“-”前面, 然后在变量下拉列表框中选择 **【UY_3】**; 再把光标移动到“-”后面, 在变量下拉列表框中选择 **【UY_2】**, 最后得到的表达式, 如图 7.10 所示。

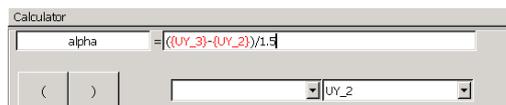


图7.10 数据运算表达式

(3) 单击  按钮或直接按回车键即可生成新的变量 alpha，如图 7.11 所示。

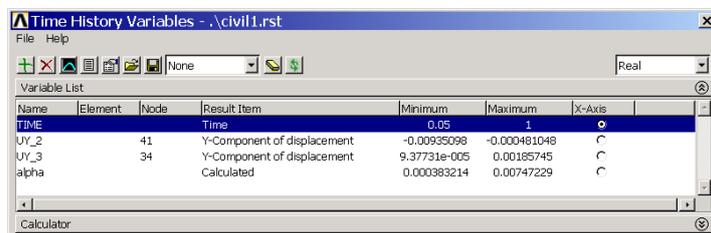


图7.11 数学运算生成新的变量

此外，用户还可以单击 **Main Menu>TimeHist Postpro>Math Operations** 菜单项完成同样的数学运算，该菜单如图 7.12 所示，用法不再详述。



图7.12 数学运算菜单项

7.2.2 变量与数组相互赋值

在时间历程后处理器，变量可以保存到数组中，也可以将数组中的数据输入到变量中。将变量保存到数组中的操作如下：

(1) 首先定义一个空的数组。单击 **【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】** 菜单，弹出如图 7.13 所示的对话框。

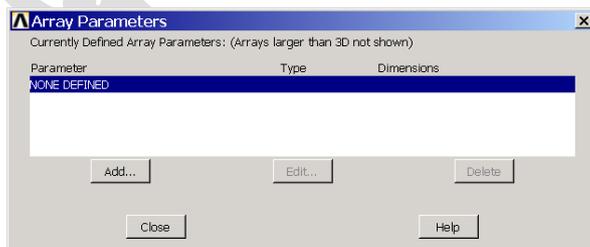


图7.13 定义数组对话框

(2) 单击  按钮，接着弹出如图 7.14 所示的对话框。在 **【Parameter name】** 文本框中输入数组名 **【arr1】**，在 **【No. of rows,cols,planes】** 文本框中分别输入 **【50】**、**【1】** 和 **【1】**，然后单击 **【OK】** 按钮。至此已经定义了一名为 arr1 的空数组。

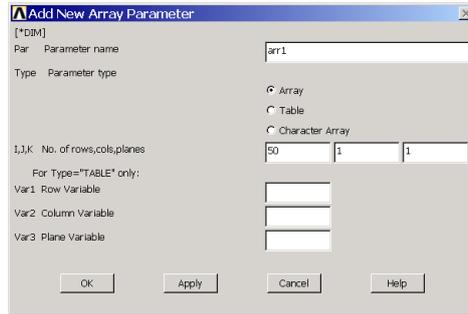


图7.14 设置数组

(3) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Table Operations>Variable to Par 菜单，弹出如图 7.15 所示的【Move a Variable into an Array Parameter】对话框。

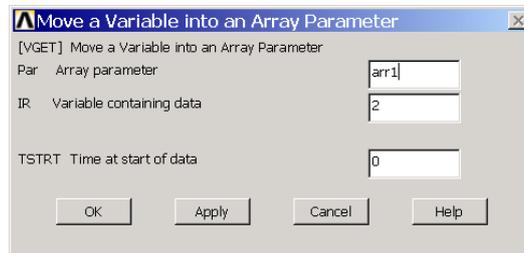


图7.15 将变量赋给数组

(4) 在【Array parameter】文本框中输入刚才定义的数组名【arr1】；在【Variable containing data】文本框中输入变量的参考号【2】（即【Time History Variables】对话框中变量列表框中的第 2 个变量）；在【Time at start of data】文本框中输入变量的起始时间【0】。然后单击【OK】按钮。

(5) 再次单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】菜单，选中【arr1】数组并单击 Edit... 按钮，可查看数组中的数据如图 7.16 所示。

	1
1	-0.00048104
2	-0.00095422
3	-0.00146285
4	-0.00193612
5	-0.00244654
6	-0.00291453
7	-0.00337455
8	-0.00383492
9	-0.00429530
10	-0.00475568

图7.16 arr1数组

将数组中的数据输入到变量的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Table Operations>Parameter to Var 菜单，弹出如图 7.17 所示的【Move an Array Parameter into a Variable】对话框。

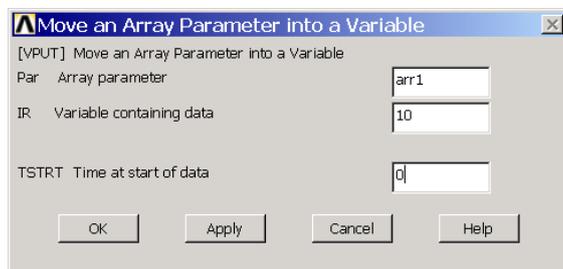


图7.17 数组转化为变量

(2) 在【Array parameter】文本框中输入数组名【arr1】；在【Variable containing data】文本框中输入要生成的变量的参考号【10】；在【Time at start of data】文本框中输入起始时间点【0】。然后单击【OK】按钮。

注意：如果变量参考号与已定义的变量重复，则原来的变量数据将被覆盖。

(3) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro> Variable Viewer 菜单可查看新生成的变量，如图 7.18 所示。

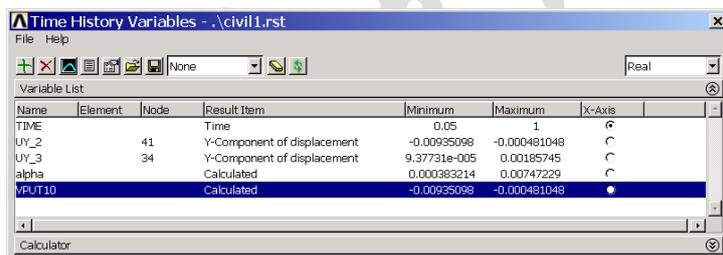


图7.18 生成的VPUT10变量

7.2.3 数据平滑

若进行一个会产生很多噪声数据的分析，如动态分析，则用户通常需要平滑响应数据。通过消除一些局部的波动，而保持响应的整体特征来使用户更好地理解 and 观察响应。其操作如步骤如下：

(1) 单击 Main Menu> TimeHist Postpro> Smooth Data 菜单，弹出如图 7.19 所示的【Smoothing of Noisy Data】对话框。

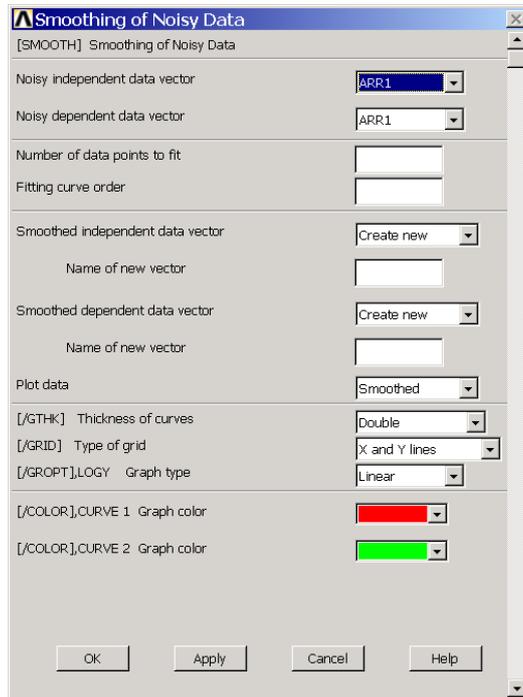


图7.19 数据平滑对话框

(2) 在【Noisy independent data vector】和【Noisy dependent data vector】下拉列表框中分别选择独立变量（数组）和受约束变量（数组）；在【Number of data points of fit】文本框中输入平滑数据点的数目，留空表示平滑所有数据点；在【Fitting curve order】文本框中输入平滑函数的最高阶数，默认的阶数为数据点数目的一半。然后单击【OK】按钮即可。

说明：该操作仅适合静态或瞬态分析的结构数据，并且不适合对复变量进行操作。

7.2.4 生成响应频谱

生成响应频谱的功能允许用户在给定的时间历程中生成位移、速度、加速度响应谱，频谱分析中的响应谱可用于计算结构的整个响应。其操作步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Generate Spectrm 菜单，将弹出如图 7.20 所示的【Generate a Response Spectrum】对话框。

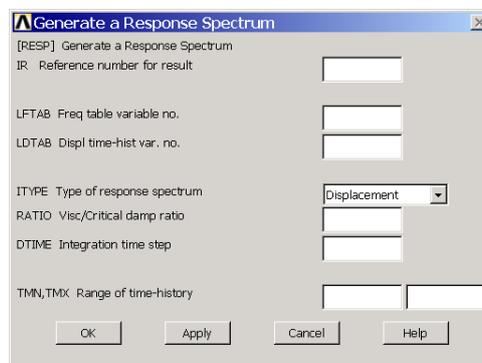


图7.20 生成响应频谱

(2) 在【Reference number for result】文本框中输入结构的参考号；在【Freq table variable no.】文本框中输入响应谱频率变量编号；在【Displ time-hist var. no.】文本框中输入位移时间历程变量编号；在【Type of response spectrum】下拉列表框中选择响应谱的类型；在【Range of time-history】文本框中输入时间历程的范围。然后单击【OK】按钮即可。

7.3 查看变量

时间历程后处理器中同样有两种方式查看变量：图形显示和列表显示。本节将分别介绍。

7.3.1 图形显示

在【Time History Variables】对话框中，选中要显示的变量，然后单击按钮，即可在图形视窗中显示变量的变化曲线，如图 7.21 所示。其中 X 轴为时间变量【TIME】，Y 轴为显示的变量数据。

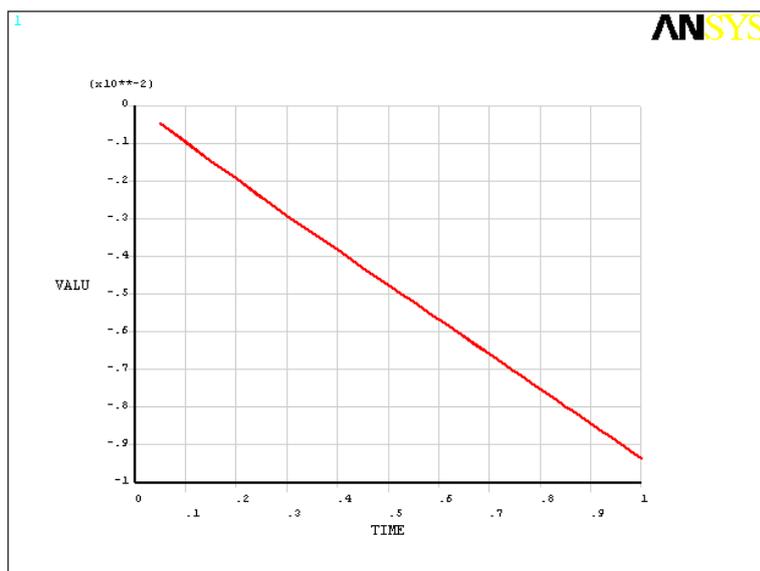


图7.21 绘制时间历程曲线

说明：在【Time History Variables】对话框中按住 Ctrl 键可同时选中多个变量，单击按钮即在图形视窗中同时显示多条曲线。

如果想以定义的变量为 X 轴，可按以下步骤操作：

(1) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro> Variable Viewer 菜单，弹出如图 7.22 所示的【Time History Variables】对话框。

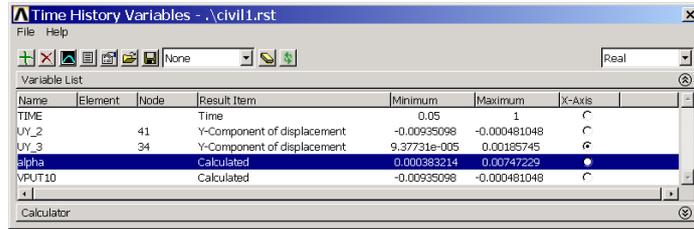


图7.22 变量管理对话框

(2) 在【Variable List】列表框中，选中变量【UY_3】变量中【X-Axis】列的单选按钮；接着选中【alpha】变量，并单击按钮，将得到如图 7.23 所示的关系曲线。可以看出坐标轴标签并没有改变，下面的操作将修改坐标轴标签。

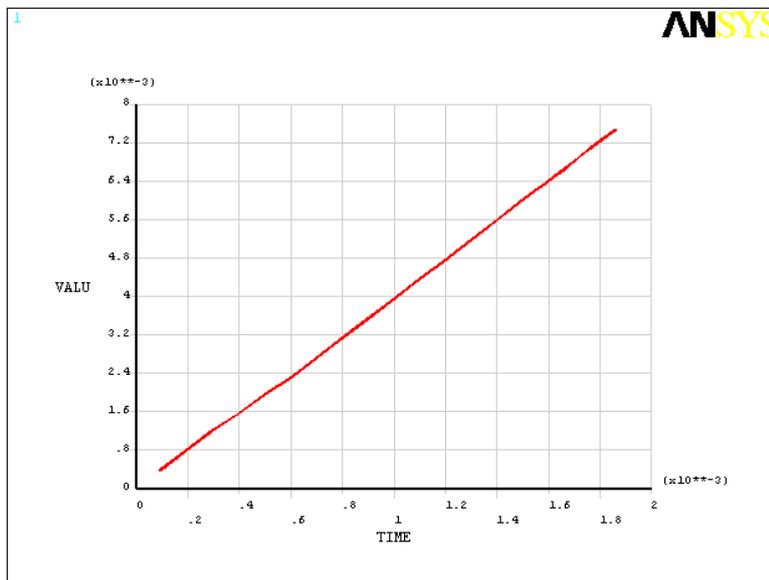


图7.23 ALPHA与UY_3的关系曲线

(3) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Style】|【Graphs】|【Modify Axes】菜单，弹出如图 7.24 所示的【Axes Modifications for Graph Plots】对话框。

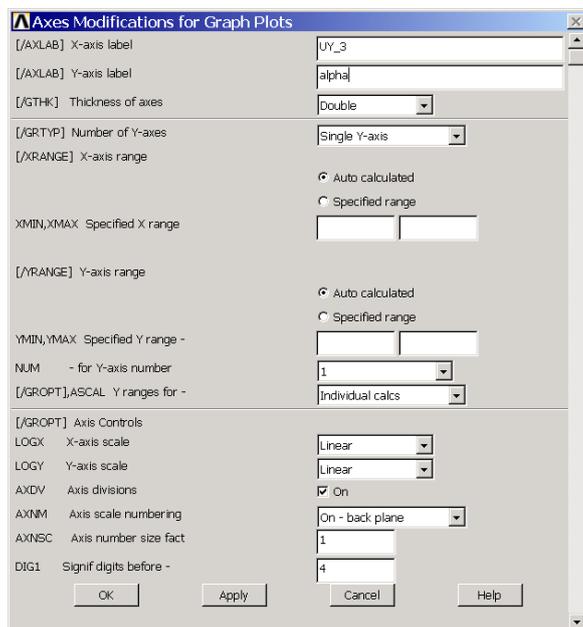


图7.24 修改坐标轴标签

(4) 在【X-axis label】文本框中输入 X 轴的标签【UY_3】，在【Y-axis label】文本框中输入 Y 轴的标签【alpha】，然后单击【OK】按钮关闭对话框。

(5) 在图形视窗中单击鼠标右键，选择【Replot】菜单，将重新绘制关系曲线，如图 7.25 所示。可以看出此时坐标轴标签已经修改过来了。

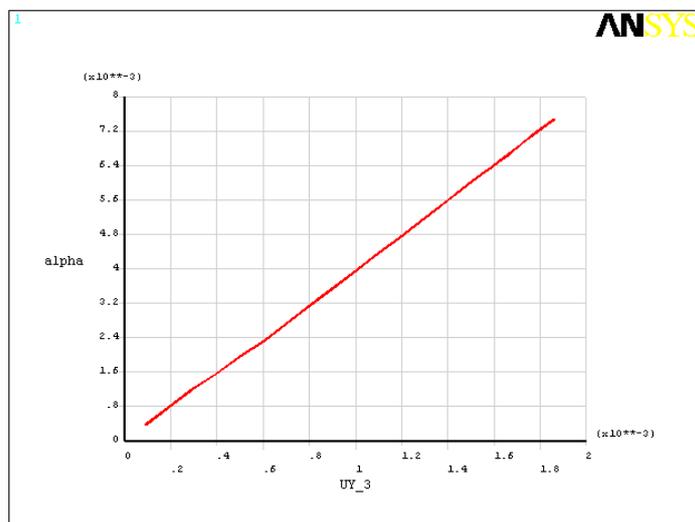


图7.25 修改后的坐标轴标签

此外，用户还可以单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables 菜单来图形显示变量。单击该菜单，将弹出如图 7.26 所示的对话框。在文本框中输入变量单击【OK】按钮即可，一次最多可输出 10 个变量。

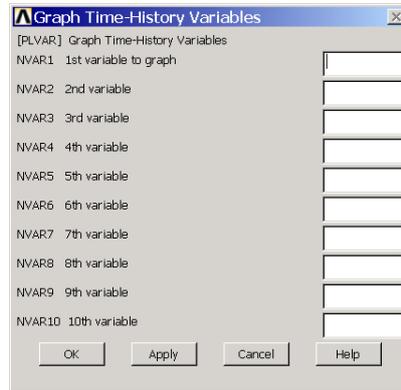


图7.26 图形显示变量对话框

7.3.2 列表显示

在【Time History Variables】对话框中，选中要显示的变量，然后单击  按钮，即可列表显示相应变量，如图 7.27 所示。

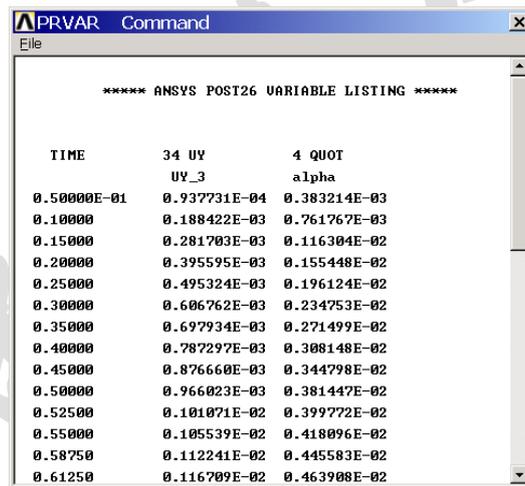


图7.27 列表显示变量数据

说明：在【Time History Variables】对话框中按住 Ctrl 键可同时选中多个变量，单击  按钮可同时显示多个变量。

此外，用户还可以单击 Main Menu>TimeHist Postpro>List Variables 菜单来列表显示变量。单击该菜单，将弹出如图 7.28 所示的对话框。在文本框中输入变量单击【OK】按钮即可，一次最多可输出 6 个变量。

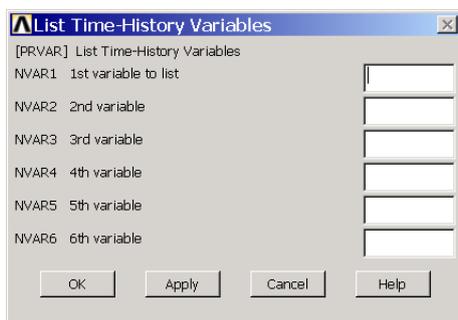


图7.28 列表显示变量

要列表显示变量的极值可按下述步骤操作：

(1) 单击 **Main Menu>TimeHist Postpro>List Extremes** 菜单，弹出如图 7.29 所示的【】对话框。

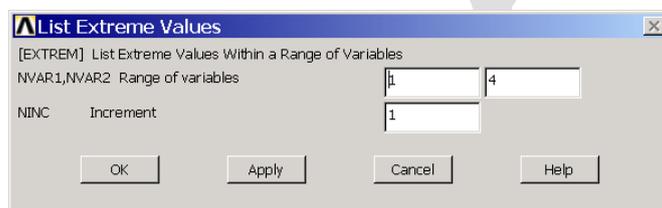


图7.29 列表显示变量极值

(2) 在【**Range of variables**】文本框中输入变量号的起止范围，如【**1**】和【**4**】；在【**Increment**】文本框中输入增量步长，默认为【**1**】。然后单击【**OK**】按钮即可列表显示变量极值，如图 7.30 所示。

POST26 SUMMARY OF VARIABLE EXTREME VALUES						
UARI TYPE	IDENTIFIERS	NAME	MINIMUM	AT TIME	MAXIMUM	AT TIME
1 TIME	1 TIME	TIME	0.5000E-01	0.5000E-01	1.000	1.000
2 NSOL	41 UY	UY_2	-0.9351E-02	1.000	-0.4810E-03	0.5000E-01
3 NSOL	34 UY	UY_3	0.9377E-04	0.5000E-01	0.1857E-02	1.000
4 OPER	4 QUOT	alpha	0.3832E-03	0.5000E-01	0.7472E-02	1.000

图7.30 显示变量极值

7.4 动画技术

ANSYS 的后处理的另一个强大功能就是动画技术，它可以动态地显示模型随时间的变化情况，多用于非线性或与时间有关的分析中。

7.4.1 直接生成动画

(1) 单击【**Utility Menu**】|【**PlotCtrls**】|【**Redirect Plots**】|【**To Segment Memory**】菜单，弹出如图 7.31 所示的【**Redirect Plots to Animation File**】对话框。

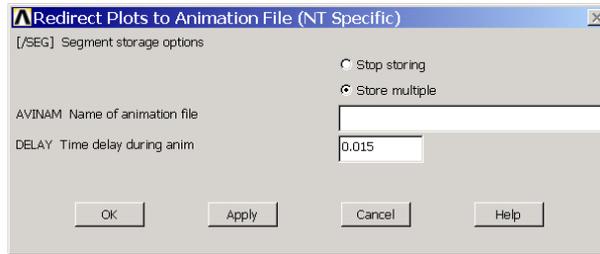


图7.31 直接生成动画

(2) 选择【Store multiple】单选按钮，然后在【Name of animation file】文本框中输入动画文件的名称（默认为工作文件名，扩展名为*.avi），在【Time delay during anim】文本框中输入时间间隔（默认为 0.015 秒）。单击【OK】按钮后，ANSYS 会自动在记录用户在通用后处理器（POST1）和时间历程生处理器（POST26）中的图形操作，并保存在动画文件中。

(3) 要停止动画录制，再次单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Redirect Plots】|【To Segment Memory】菜单，在图 7.31 所示的对话框中选择【Stop storing】单选按钮即可。

7.4.2 通过动画帧显示动画

ANSYS 还提供了一个专门在图形视窗中显示动画的菜单，它的路径是【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】，子菜单如图 7.32 所示。

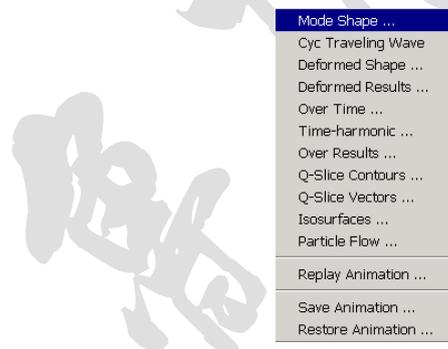


图7.32 Animate子菜单

下面以结果等值线动画为例介绍显示动画的操作：

(1) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Over Time】菜单，弹出如图 7.33 所示的对话框。

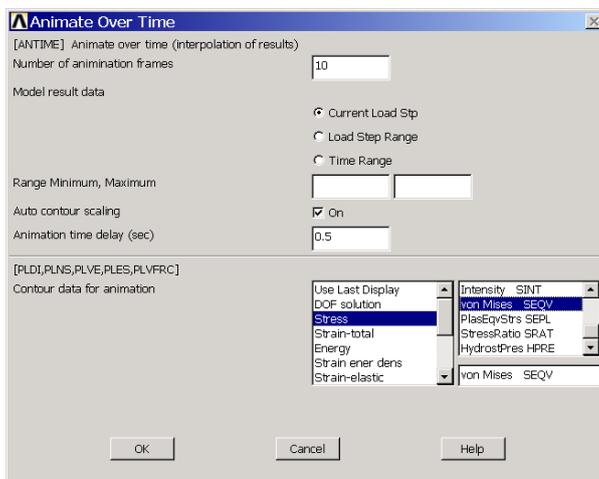


图7.33 通过控制帧显示动画

(2) 在【Number of animation frames】文本框中输入动画帧数【10】；在【Model result data】单选列表项中选择【Current Load Stp】单选按钮，表示显示当前荷载步动画；在【Animation time delay (sec)】文本框中输入帧时间间隔【0.5】；在【Contour data for animation】列表框中选择要图形显示的结果项【von Mises SEQV】。然后单击【OK】按钮，即可在图形窗中显示动画。

说明：当前显示的动画会自动保存在工作目录下，文件名与工作文件名相同。

其它 Animate 子菜单的功能如下：

- 【Mode Shape】：显示变形模式下动画。
- 【Cyc Traveling Wave】：显示循环动画。
- 【Deformed Shape】：显示模型变形动画。
- 【Time - harmonic】：显示谐分析动画。
- 【Over Results】：显示结果数据的等值线动画。
- 【Q-Slice Contours】和【Q-Slice Vector】：显示模型剖切面等值线或矢量图动画。
- 【Isosurfaces】：显示模型的变形等值面动画。
- 【Particle Flow】：显示粒子流或者带电粒子运动动画。

7.4.3 动画播放

再次播放动画，可按以下步骤操作：

(1) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Replay Animation】菜单，显示动画的同时会伴随一个控制窗口，如图 7.34 所示。



图7.34 动画控制窗口

说明：其中，【Forward/Backward】单选按钮表示循环播放；【Forward Only】单选按钮表示仅向前播放。

(2) 单击 **Stop** 按钮停止动画播放，单击 **Close** 按钮关闭对话框。

第八章 ANSYS 参数化设计语言 (APDL)

本书前面各章讲的都是基于 GUI 方式的操作，可以看出 GUI 方式的操作直观易懂，但对于经常重复的步骤，就显得繁琐、效率不高。ANSYS 中提供了另外一种完全可以替代 GUI 操作的方法：命令流方式。命令流中使用的语言就是本章要讲的 APDL 参数化设计语言。

由于 APDL 的复杂性，本章不可能一概而全，只选择最基本的部分加以介绍，目的在于使读者快速入门，对于更深入的使用方法请参考 ANSYS 的帮助文档。本章主要包括以下内容：

- APDL 简介
- 使用参数
- 使用工具笨
- APDL 宏语言

8.1 APDL 简介

APDL 是 ANSYS 参数化设计语言 (ANSYS Parametric Language) 的简称。APDL 编写的脚本程序可以自动完成大部分 GUI 操作任务，甚至可以完成某些 GUI 无法实现的功能。同时 APDL 还具有一些其它特性：重复执行一条命令、宏语言、if-then-else 分支语句、do-loop 循环等。而且，它还是某些高级操作（如优化设计和自适应网格划分）的基础。可见，使用 APDL 会给用户日常的分析操作带来极大的方便。

本章将通过简单例子使读者快速掌握 APDL 的基础：参数使用、宏、分支循环等。当读者慢慢熟悉了它的使用后，可能会发现它更多的优点。

下面是一个简单的循环语句，在命令流窗口中输入下列语句，即可同时生成 100 个节点，如果用 GUI 方式来操作，则要连续单击创建节点命令 100 次：

```
/PREP7
*DO, I, 1, 100
N, I, I, I
*ENDDO
```

8.2 使用参数

参数就是 APDL 中的变量。ANSYS 中的参数主要有：标量参数和数组参数。下面分别介绍其使用方法。

8.2.1 标量参数

APDL 中的参数和 C 语言中的变量类似，标量参数相当于 C 语言中的普通变量。标量参数可分为数值参数和字符参数两种。标量参数在使用之前无须显式声明，而数组参数则必须声明其大小。

1. 定义标量参数

用户可以使用*SET 命令来定义标量参数，在命令流输入窗口中输入以下语句，然后按 Enter 键即可：

```
*SET,ABC,-24
*SET,QR,2.07E11
*SET,XORY,ABC
*SET,CPARM,'CASE1'
```

这四条语句定义三个数值参数（ABC、QR 和 XORY）和一个字符参数（CPARM）。定义数值型参数时，不必声明参数是整型还是实型，ANSYS 默认是双精度类型；定义字符型参数时要求被赋的值包括在单引号内。

一般字符型参数用来提供文件名和扩展名，先把文件名或扩展名赋给字符参数，然后在用到该文件名或扩展名的地方可以用字符参数来代替。还可以用“=”替代“*SET”命令直接给参数赋值，上面的语句也可改写为：

```
ABC=-24
QR=2.07E11
XORY=ABC
CPARM='CASE1'
```

按上面两种方法的任何一种定义了参数后，用户可以通过 GUI 的方式查看定义的参数，操作为：单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，弹出如图 8.1 所示的【Scalar Parameters】对话框。【Items】列表框中列出了用户刚才定义四个标量参数。

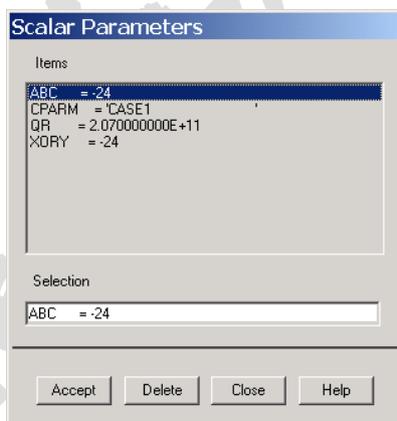


图8.1 标量参数对话框

在【Scalar Parameters】对话框中也可以定义参数，在【Selection】文本框中输入一个新的参数赋值语句（如：RED=100），然后单击 按钮即可。

参数命名时必须符合以下规则：

- 必须以字母开头；
- 只能由字母、数字和下划线组成；
- 字符个数不能超过 8 个。

下面的参数名是非法的：BIG_VALUE（超过 8 个字符）、5SET（以数字开头）和 M#TY（含有无效字符‘#’）。

此外给参数命名时还应注意以下几点：

- 不能用 ANSYS 保留的关键字作为参数名，如 UX、UY、ALL、PICK、CHAR 和 ARRAY 等；
- 名称为 ARG1~ARG9 和 AR10~AR99 的参数均为 ANSYS 保留作为宏程序的局部参数使用，所以不能用来定义用户参数；
- 参数名不能与工具栏按钮名相同。

2. 列表显示参数

定义了参数后，可以使用*STATUS 命令把参数显示出来。在命令流输入窗口中输入“*STATUS”命令，然后按 Enter 键，将列表显示所有已定义的参数，如图 8.2 所示。

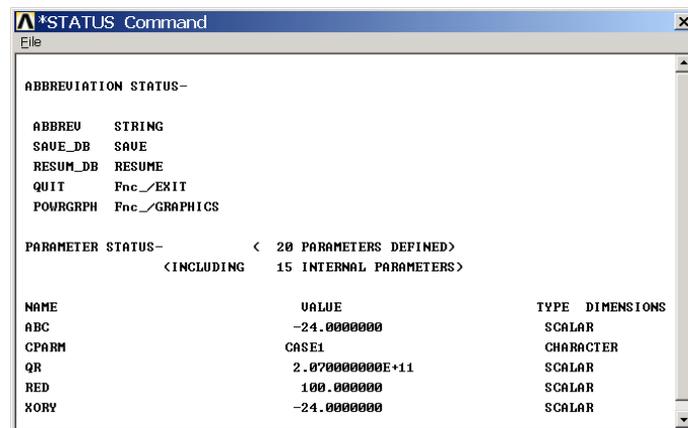


图8.2 列表显示参数

用户还可以单击【Utility Menu】|【List】|【Status】|【Parameters】|【All Parameters】菜单来列表显示参数。

3. 删除标量参数

同参数的定义一样，也有多种方法来删除已定义的参数。最简单的方法就是重新赋值给参数。用*SET 和“=”命令都行，例如以下命令将删除参数 ABC 和 CPARM：

```
*SET, ABC,
CPARM=
```

把一个数值参数赋 0 值并不能删除数值参数；把一个字符参数符空格（' '）也不能删除字符参数。例如以下命令没有删除参数，而是给参数重新进行了赋值：

```
*SET, ABC, 0
CPARM=' '
```

命令*DEL 也可用来删除一个或多个甚至所有用户定义的参数，例如：

```
*DEL, ALL !删除所有用户定义的参数
*DEL, ABC !删除参数 ABC
```

另外一种删除参数的方法就是单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，在【Scalar Parameters】对话框中选要删除的参数，然后单击 按钮即可。

8.2.2 数组参数

APDL 参数的另一大类型就是数组参数。与标量参数不同，每个数组参数代表着一组值。

数组参数按维数可分为：一维数组、二维数组和三维数组。如图 8.3 所示。

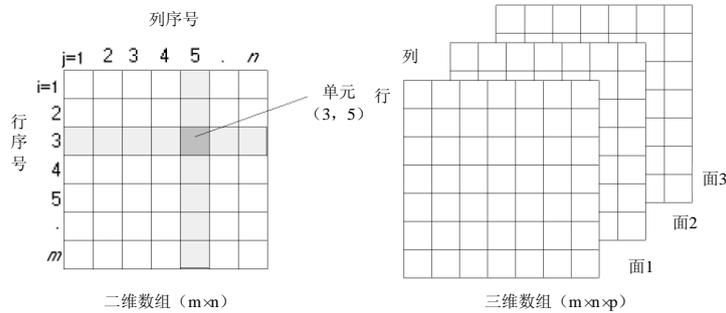


图8.3 数组结构示意图

数组参数按数据类型可分为：

- 一般数组参数（ARRAY Parameter）：默认声明的参数均为该类型。行、列、面的索引均为从 1 开始的连续整数，元素值可为整数或实数。
- 字符数组参数（CHAR Array Parameter）：元素值为字符串（由不多于 8 个的字母或数字组成）。其行、列、面的索引同一般数组参数。
- 表数组参数（TABLE Array Parameter）：这是一种特殊的数值型数组参数，它允许程序通过线性插值计算数组已确定元素之间的任何值。行、列、面的索引可定义为任何实数。元素值可以是整数或实数。

8.2.3 数组参数的定义

定义数组参数首先要声明参数的类型和尺寸。以下语句为用 *DIM 命令定义的几个不同类型的数组：

```
*DIM, AA, , 4           !定义参数 AA 为 ARRAY 类型，维数为 4×1×1
*DIM, BB, ARRAY, 3, 3  !定义参数 BB 为 ARRAY 类型，维数为 3×3×1
*DIM, CC, CHAR, 4      !定义参数 CC 为 CHAR 类型，维数为 4×1×1
*DIM, DD, TABLE, 5    !定义参数 DD 为 TABLE 类型，维数为 5×1×1
```

*DIM 命令的语法框式为：

```
*DIM, Par, Type, IMAX, JMAX, KMAX, Var1, Var2, Var3
```

其中：

- Par: 参数名，要符合前述的参数命名规则；
- Type: 指明数组型参数类型；
- IMAX: 行数，默认为 1；
- JMAX: 列数，默认为 1；
- KMAX: 面数，默认为 1；
- Var1~Var3: 只在定义表数组参数时使用，分别是行、列和面的标签。

定义完数组后，可以单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Define/Edit】菜单，弹出如图 8.4 所示的对话框。在列表框中可以看到用户刚才用命令流方式定义的四个数组。单击 按钮可以继续定义新的数组。

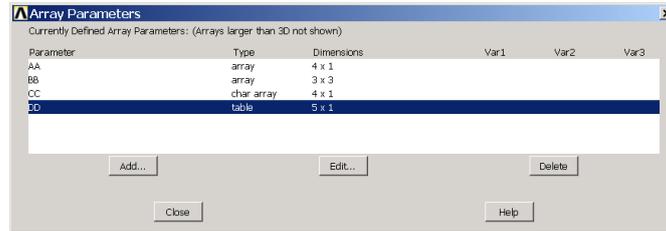


图8.4 数组参数管理对话框

定义数组后，一般数组和表数组参数的元素初值默认为 0（表数组参数第 0 行第 0 列的元素初值为一接近于 0 的极小值）；字符型数组参数的各元素初值默认为空（Blank Value）。

8.2.4 数组参数的赋值

可以通过 4 种方法给数组赋值：

1. 用 *SET 命令或 “=”

以下语句定义了一个名为 XYZ 的一维数组：

```
*DIM, XYZ, , 12
XYZ (1)=59.5, 42.494, -9.01, -8.98, -8.98, 9.01, -30.6, 51
XYZ (9)=-51.9, 14.88, 10.8, -10.8
```

可以看出使用 “=” 一次可以给多个元素赋值，但每个 “=” 至多可给 10 个元素赋值。在图 8.4 所示的数组参数对话框中选中刚才定义的 XYZ 数组，并单击 Edit... 按钮，可查看赋值后的结果，如图 8.5 所示。单击 ▼ 按钮可以向下滚动。

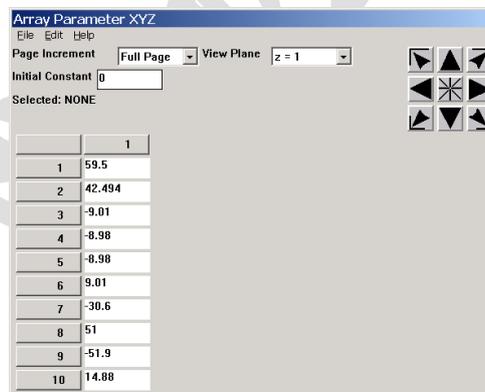
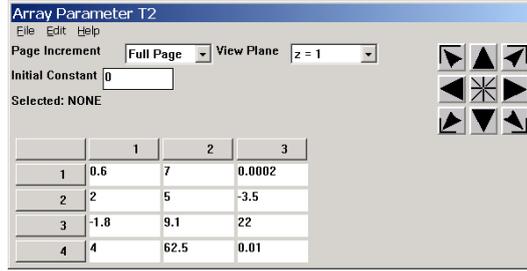


图8.5 赋值后的一维数组

以下语句定义了一个名为 T2 的二维数组：

```
*DIM, T2, , 4, 3
T2 (1, 1)=.6, 2, -1.8, 4           !定义元素 (1, 1), (2, 1), (3, 1), (4, 1)
T2 (1, 2)=7, 5, 9.1, 62.5       !定义元素 (1, 2), (2, 2), (3, 2), (4, 2)
T2 (1, 3)=2E-4, -3.5, 22, .01   !定义元素 (1, 3), (2, 3), (3, 3), (4, 3)
```

GUI 方式查看赋值后的结果，如图 8.6 所示。



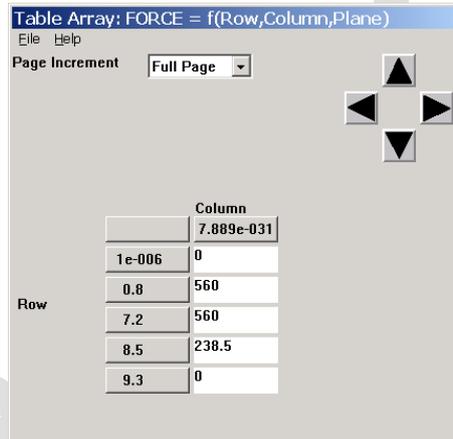
	1	2	3
1	0.6	7	0.0002
2	2	5	-3.5
3	-1.8	9.1	22
4	4	62.5	0.01

图8.6 赋值后的二维数组

以下语句定义了一个名为 **FORCE** 的表数组：

```
*DIM, FORCE, TABLE, 5
FORCE (1)=0, 560, 560, 238.5, 0
FORCE (1, 0)=1E-6, .8, 7.2, 8.5, 9.3
```

其中，第二行定义了该表的列索引值（0）和各元素值，第二行则定义了该表的行索引值，没有指定该表的面索引值。GUI 方式查看赋值后的结果，如图 8.7 所示。



	Column
1e-006	7.889e-031
0.8	560
7.2	560
8.5	238.5
9.3	0

图8.7 赋值后的表数组

以下语句定义了一个名为的字符数组：

```
*DIM, RESULT, CHAR, 4
RESULT (1)='SX', 'SY', 'SZ'
*SET, RESULT (4), 'S4'
```

字符型数组不可用 GUI 方式查看。

2. 用 *VFILL 命令

*VFILL 命令可以用来填充一个一般数组或表数组的列向量。例如以下语句将得到如图 8.8 所示的数组。

```
*DIM, DTAB, ARRAY, 4, 3           ! 定义名为 DTAB 的 4×3 数组
*VFILL, DTAB (1, 1), DATA, -3, 8, -12, 57   ! 四个值被赋给数组第一列
*VFILL, DTAB (1, 2), RAMP, 2.54, 2.54       ! 用首项为 2.54 公差为 2.54 的等差数列填充列 2
*VFILL, DTAB (1, 3), RAND, 1.5, 10         ! 用 1.5 到 10 之间的随机数填充列 3
```

	1	2	3
1	-3	2.54	2.79901204
2	8	5.08	6.11392418
3	-12	7.62	6.70205516
4	57	10.16	4.11487684

图8.8 *VFILL命令填充的数组

*VFILL 命令的语法格式如下：

*VFILL,ParR,Func,CON1,CON2,CON3,CON4,CON5,CON6,CON7,CON8,CON9, CON10

其中：

ParR: 数值数组参数的向量名，如 DTAB (1, 1)；

Func: 赋值函数，如 RAMP、RAND 等；

CON1~CON10: 与 Func 相关的参数。

用户还可以单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Fill】菜单，通过 GUI 方式完成此命令。单击该菜单后，会弹出如图 8.9 所示的对话框，可以选择相应的赋值函数进行操作，在此不再详述。

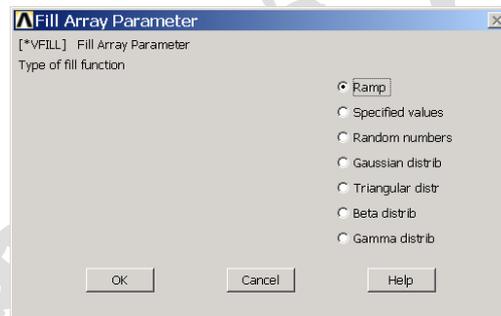


图8.9 数组向量赋值对话框

3. 用*VEDIT命令

*VEDIT 命令用来交互式地编辑一般数组或表数组。

假设已经定义了数值型一维数组 AA，在命令流输入窗口中输入下面的语句：

```
*VEDIT, AA
```

将弹出如图 8.10 所示的对话框。单击行号或列号按钮即可选中行或列，然后选择菜单【Edit】|【Initialize】，则将选中的行或列重新赋值为【Initial Constant】文本框中的值。单击【File】|【Apply/Quit】菜单保存并退出。

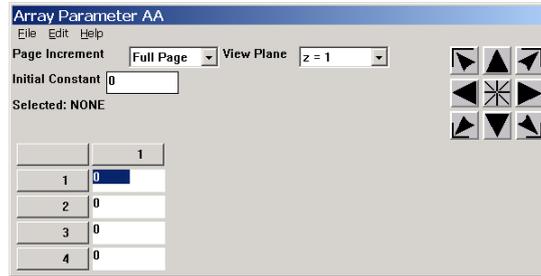


图8.10 编辑AA数组

4. 用*VREAD或者*TREAD命令

*VREAD 或*TREAD 命令可将数据文件填充到数组中去，以下为使用*VREAD 命令的一个例子：

(1) 建立一个文本文件，命名为 dataval，内容如下（数据之间的空格数为 3 个）：

```
1.5   7.8   12.3
15.6  -45.6  42.5
```

注意：数据文件必须保存为 ASCII 编码格式，才能被 ANSYS 正确读取。

(2) 在命令流输入窗口中输入以下命令定义一个数组。

```
*DIM, EXAMPLE, , 3, 2
```

(2) 接着单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Array Parameters】|【Read from File】菜单，弹出如图 8.11 所的对话框。

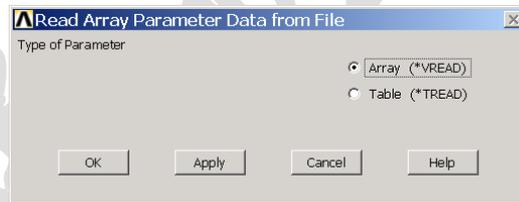


图8.11 选择参数类型

(3) 选择【Array (*VREAD)】单选按钮，单击【OK】按钮，接着弹出如图 8.12 所示的对话框。

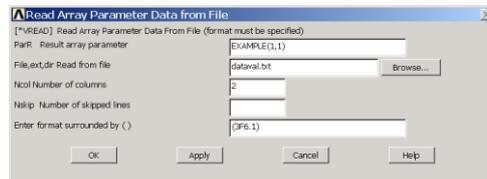
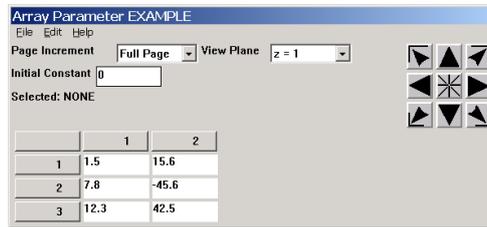


图8.12 从文件写入数组

(4) 在【Result array parameter】文本框中输入【EXAMPLE(1,1)】，表示将数据读入数组 EXAMPLE 中；在【Read form file】文本框中输入文件名【dataval.txt】；在【Number of columns】文本框中输入数组列数【2】；在【Enter format surrounded by ()】文本框中输入数据格式【(3F6.1)】，此处一定要与数据文件的数据格式相符合，否则可能读入数据出错。单

击【OK】按钮，完成数据的读入。得到的数组如图 8.13 所示。



	1	2
1	1.5	15.6
2	7.8	-45.6
3	12.3	42.5

图8.13 读入的数组

图 8.12 所示的对话框中的数据格式的输入必须按照正确格式，其格式为：

Fw.d

其中 w 指数据宽度，d 指小数位数。如前面的 F6.1，就表示数据宽度为 6，小数点位数为 1，这是与数据文件的格式相对应的。

实现上述操作的命令流语句如下，只是它不能直接在命令流窗口执行，但可以将其用在宏文件中。关于宏的用法，将在后面的章节中讲到：

```
*VREAD, EXAMPLE (1, 1), dataval, ,, JIK, 3, 2
(3F6.1)
```

*TREAD 命令不太常用，在此不再详述。

8.2.5 数组的图形显示

可以用 *VPLOT 命令图形显示数组参数。

假设已经定义并赋值了几个数组。如下所示，TABLEVAL 和 TABLE2 为表型数组参数；ARRAYVAL 为数值型一般数组参数。

$$\text{TABLEVAL} = \begin{matrix} 0 & 3 & 9 \\ 4 & \begin{bmatrix} 6 & 12 \\ 8 & 6 \end{bmatrix} \\ 7 & \\ 15 & \begin{bmatrix} 10 & 3 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{TABLE2} = \begin{matrix} 0 & 40 \\ 19 & \begin{bmatrix} 70 \\ 80 \\ 95 \end{bmatrix} \\ 88 & \\ 99 & \end{matrix} \quad \text{ARRAYVAL} = \begin{bmatrix} 6 & 12 \\ 8 & 6 \\ 10 & 3 \end{bmatrix}$$

在命令流窗口中输入以下命令：

```
*VPLOT, , ARRAYVAL (1, 1), 2
```

将得到如图 8.14 所示的图形。

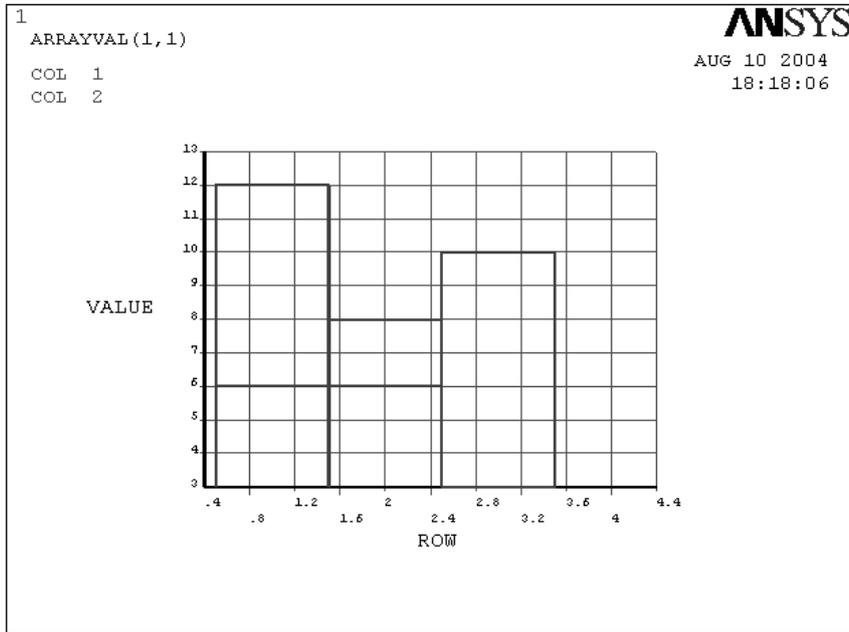


图8.14 图形显示ARRAYVAL数组

在命令流窗口输入以下命令：

```
*VPLOT,,TABLEVAL(1,1),2
```

将得到如图 8.15 所示的图形。可以看出对于一般数组，由于没有排序，所以是以柱状图显示相关数据，而对于表型数组参数则显示为折线图。

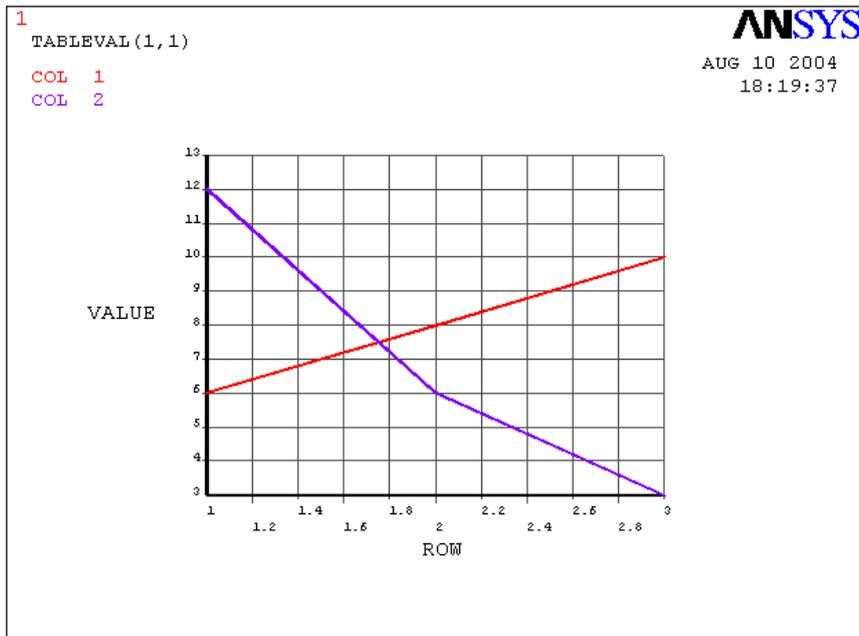


图8.15 图形显示TABLEVAL数组

如指定横坐标，可在命令流窗口中输入以下命令：

```
*VPLOT, TABLE2 (1), TABLEVAL (1, 1), 2
```

将得到如图 8.16 所示的图形。

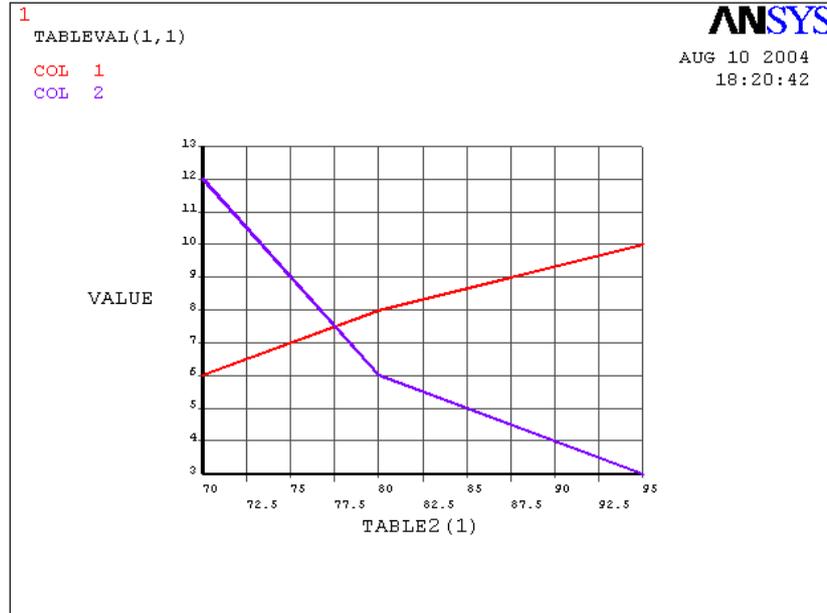


图8.16 改变横坐标后的图形显示

*VPLOT 的语法格式为：

```
*VPLOT, ParX, ParY, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8
```

其中：

ParX：数组参数名（并指明列号），其列向量值将作为图形显示的横坐标。为空时横坐标值为行号；

ParY：数组参数名，其列向量值将会与 **ParX** 值对应绘制在图上。（必须指明起始元素的位置）

Y2~Y8：指明 **ParY** 要相对于 **Parx** 显示的列的下标。

8.2.6 参数表达式

APDL 中参数可以进行一系列数学运算和逻辑运算，常用的运算符如表 8.1 所示。

表8.1 APDL参数运算符

运算符	含义
+	加
-	减
*	乘
/	除
**	求幂

>	大于
<	小于

所谓参数表达式，就是由参数、常数和运算符组成的式子，可以用小括号进行嵌套。

例如：

```
X=A+B
P=(R2+R1)/2
D=-B+(E**2)-(4*A*C)      !计算 D = -B + E2 - 4AC
XYZ=(A<B)+Y**2           !如果 A 小 B 则 XYZ = A + Y2, 否则 XYZ = B + Y2
INC=A1+(31.4/9)
M=((X2-X1)**2-(Y2-Y1)**2)/2
```

上述运算的优先级顺序如下：

- 括号运算
- 求幂运算（从右往左）
- 乘和除（从左往右）
- 一元运算（如-A、+B）
- 加和减（从左往右）
- 逻辑运算（从左往右）

说明：括号的嵌套最多可为四层，每个括号里最多可进行9次运算；表达式中尽量不要有空格，尤其在“*”前，否则“*”后面的表达式将作为注释而不进行运算。

8.2.7 数学函数

APDL 提供了丰富的数据函数，包括数学运算和字符运算，常用的如表 8.2 所示。

表8.2 常用数学函数

函数表达式	含义
ABS (x)	求 x 的绝对值
SIGN (x,y)	返回值大小等于 x , 符号同 y (y=0 时返回正数)
EXP (x)	指数函数 e ^x
LOG(x)	自然对数 ln (x)
LOG10(x)	常用对数 lg (x)
SQRT(x)	求 x 的平方根
NINT(x)	求最接近 x 的整数
MOD(x,y)	求 x/y 的余数 (y=0 时返回 0)
RAND(x,y)	产生在 x~y 之间的随机数
GDIS(x,y)	正态分布函数，平均值为 x，放差为 y
SIN(x), COS(x), TAN(x)	三角函数，默认情况下 x 的单元为弧度，可用*AFUN 命令转换为角度
SINH(x), COSH(x), TANH(x)	双曲函数
ASIN(x), ACOS(x), ATAN(x)	反三解函数，默认情况下返回值为弧度
ATAN2(y,x)	反双曲函数，默认情况下返回值为弧度
VALCHR (CPARM)	字符参数 CPARM 数值(如果 CPARM 含有非数字字符则返回 0)
CHRVAL (PARM)	返回数值参数 PARM 的字符值，小数位数取决于量级
UPCASE CPARM	将字符串 CPARM 转换为大写
LWCASE (CPARM)	将字符串 CPARM 转换为小写

下面是一些例子:

```

PI=ACOS(-1)
Z3=COS(2*THETA)-Z1**2
R2=SQRT(ABS(R1-3))
X=RAND(-24,R2)           !X 等于-24 到 R2 之间的随机数
*AFUN,DEG                !把角度单位转换成度数
THETA=ATAN(SQRT(3))      !THETA 等于 60 度
PHI=ATAN2(-SQRT(3),-1)  !PHI 等于-120 度
*AFUN,RAD                !把角度转换成弧度
CHNUM=CHRVAL(X)          !CHNUM 等于 X 字符值
UPPER=UPCASE(LABEL)     !UPPER 等于 LABEL 的大写字母

```

8.3 使用工具条

利用 APDL 可以对 ANSYS 的工具条进行修改和更新。这样用户就可以按照自己的习惯来设置 ANSYS 的操作环境。

8.3.1 工具条基本操作

ANSYS 默认的工具条如图 8.17 所示。用户可以根据需要把一些常用的 ANSYS 函数或宏命令（将在下一节中介绍）添加到工具条上，这可以通过定义代替 ANSYS 命令、GUI 函数名或宏程序的缩略命令（即按钮名）来实现，这些缩略命令由不超过 8 个的字符组成。例如，默认的 SAVE_DB 是 SAVE 命令的缩略名，QUIT 是函数 Fnc_EXIT 的缩略名等。

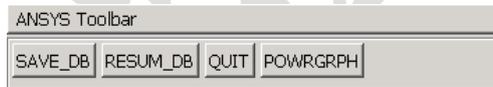


图8.17 默认的工具条

下面的操作步骤可以在工具条中生成一个名为 NEWBAR 按钮:

(1) 在命令流输入窗口中输入以下语句，然后按 Enter 键:

```
*ABBR,NEWBAR,MAC1
```

(2) 单击【Utility Menu】|【MenuCtrls】|【Update Toolbar】菜单，可以看到工具条上的按钮会多了一个，如图 8.18 所示。单击它 **NEWBAR** 将不发性任何响应，因为用户没有定义 MAC1 命令。



图8.18 添加新按钮

使用*ABBR 命令的语法如下:

```
*ABBR,Abbr,String
```

其中:

Abbr: 按钮缩略名，不能超过 8 个字符;

String: Abbr 按钮所代表的宏程序或命令的名字。

用户还可以通过 GUI 的方式添加新的按钮，单击【Utility Menu】|【MenuCtrls】|【Edit

Toolbar】或者【Utility Menu】|【Macro】|【Edit Abbreviations】菜单，将弹出如图 8.19 所示的【Edit Toolbar/Abbreviations】对话框。

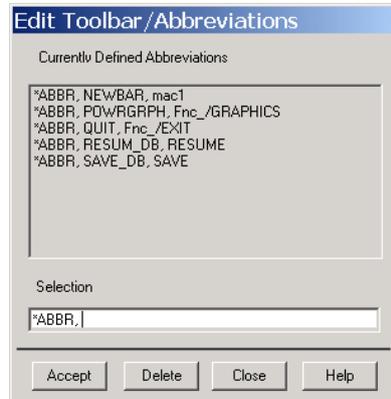


图8.19 按钮编辑对话框

在【Selection】文本框中输入“*ABBR,NEWBAR,MAC1”，然后单击 **Accept** 按钮，同样可以在工具条中添加新按钮 NEWBAR。要删除按钮，可选中相应的命令，然后单击 **Delete** 按钮即可。

用户定义的工具条不会被 ANSYS 自动保存，单击工具条上的 **RESUM_DB** 按钮可恢复到默认状态。要保存工具条的定义，可单击【Utility Menu】|【MenuCtrls】|【Save Toolbar】菜单，将弹出如图 8.20 所示的【Save Toolbar/Abbreviations】对话框。在文本框中输入文本名，然后单击【OK】即可导出工具条文件。



图8.20 保存工具条

工具条文件的内容如下：

```

/NOPR
*ABB,SAVE_DB ,SAVE
*ABB,RESUM_DB,RESUME
*ABB,QUIT ,Fnc_/EXIT
*ABB,POWRGRPH,Fnc_/GRAPHICS
*ABB,NEWBAR ,mac1
/GO

```

其中，/NOPR 命令使其后的命令不写入日志文件，/GO 命令使其后的命令写入日志文件，*ABB 为*ABBR 命令的缩写。

工具条文件可以用文本编辑修改，修改好后，可以从文件中恢复。单击【Utility Menu】|【MenuCtrls】|【Resore Toolbar】菜单，弹出如图 8.21 所示的对话框。在【Resore from file】

文本框中输入工具条文件名，然后单击【OK】即可。

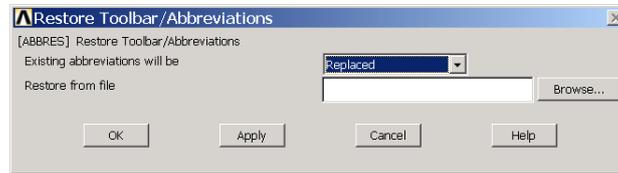


图8.21 从文件中恢复工具条

8.3.2 嵌套按钮

为了充分利用工具条上的有限空间，有时用户需要把按钮嵌套起来。嵌套按钮的操作很简单，只要把*ABBR 命令的 String 参数改为存有按钮定义的工具条文件的名称即可。下面是一个按钮嵌套的例子：

(1) 用文本编辑器定义一个名为 second.abbr 的文件，并保存于工作目录下，内容如下：

```
/NOPR
*ABB,SAVE_DB ,SAVE
*ABB,RESUM_DB,RESUME
*ABB,QUIT    ,Fnc_/EXIT
*ABB,POWRGRPH,Fnc_/GRAPHICS
*ABB,NEWBAR1,mac1
*ABB,NEWBAR2,mac2
*ABB,NEWBAR3,mac3
*ABB,RETURN,ABBRES,NEW,first,abbr
/GO
```

(2) 再用文本编辑器定义一个名为 first.abbr 的文件，并保存于工作目录下，内容如下：

```
/NOPR
*ABB,SAVE_DB ,SAVE
*ABB,RESUM_DB,RESUME
*ABB,QUIT    ,Fnc_/EXIT
*ABB,POWRGRPH,Fnc_/GRAPHICS
*ABB,NEWBAR  ,abbres,new,second,abbr
/GO
```

(3) 单击 **Utility Menu】|【MenuCtrls】|【Resore Toolbar】** 菜单，导入 first.abbr 工具条文件，将得到如图 8.22 左所示的按钮，单击 **NEWBAR** 按钮，将变为图 8.23 所示的按钮，单击 **RETURN** 按钮可回到未展开状态。

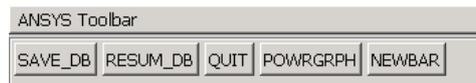


图8.22 未展开的工具按钮



图8.23 展开后的工具按钮

8.4 APDL 宏语言

宏实际上就是一系列的 APDL 控制语句的集合。把一系列 ANSYS 命令语句存到一个文件当中，并将扩展名定义为*.mac，即形成了一个宏文件。在 ANSYS 的前生处理中，利用宏可以完成大量的程序化操作，用户也可以用宏创建用户自己的命令，从而方便 ANSYS 的使用。

下面是一个简单的宏，在一个长方体中挖去一个角：

```
/prep7
/view,,-1,-2,-3
block,,4,,3,,2
sphere,1
vsbv,1,2
finish
```

把这些命令存成一个名为 mymacro.mac 文件，放在工作目录下，然后在命令流窗口中输入下面的语句：

```
*use,mymacro
```

宏命令将被执行，得到图 8.24 所示的效果。

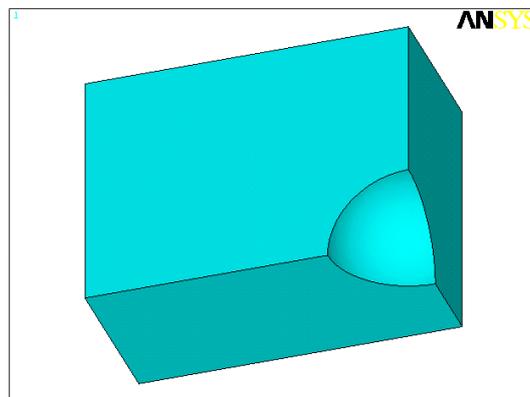


图8.24 一个简单的宏

上面只是一个简单的例子，实用性不大。但它给用户一个扩展的思路：比如对于参数化分析，考虑几何尺寸对承载性能的影响，则可将模型的尺寸设为参数，并建立一个宏文件，对不同的尺寸，只需要改变几个参数，然后运行宏即可生成新的模型，可省掉大量的重复操作。

8.4.1 宏的创建

ANSYS 另提供了多种创建宏的方法，对于较简单的宏，可以在 ANSYS 中直接生成；对于比较复杂的宏，最好通过文本编辑器创建，而且最好是在已有宏的基础上加以修改，

这样不容易出现错误。在 ANSYS 中常用的创建宏的方法有四种：

1. 通过*CREATE命令创建

在命令流窗口中依次输入下列语句即可创建一个名 `matprop.mac` 为宏：

```
*CREATE,matprop,mac
MP,EX,1,2.07E11
MP,NUXY,1,.27
MP,DENS,1,7835
MP,KXX,1,42
*END
```

`*CREATE` 命令要求与 `*END` 命令配合使用，二者之间的命令属于宏文件的内容。第一行中的 `matprop` 代表宏文件名，`mac` 代表宏文件的扩展名。如果 `matprop.mac` 文件已经存在，该文件将被覆盖。

虽然是在命令流窗口中输入，但其中的语句并不执行，只是写入了宏文件，其中对参数的操作命令也不会替代当前的参数值。例如：当前已经有参数 `B=10`，宏语句中有一条 `B=20` 的命令，则宏文件不会把 `B` 值改为 20。

注意：不能在 `*DO` 循环语句中使用 `*CREATE` 命令。

2. 通过*CFOPEN、*CFWRITE和*CFCLOSE命令创建

在命令流窗口中依次输入下列语句即可创建一个名 `model.mac` 为宏：

```
*CFOPEN,model,mac
*CFWRITE,/prep7
*CFWRITE,/view,,-1,-2,-3
*CFWRITE,block,,a,,b,,c
*CFWRITE,sphere,1
*CFWRITE,vsbv,1,2
*CFWRITE,finish
*CFCLOSE
```

第一行用 `*CFOPEN` 命令打开一个名为 `model.mac` 的宏文件，接着用 `*CFWRITE` 命令写入宏命令，最后一行用 `*CFCLOSE` 命令关闭宏文件。

和 `*CREATE` 命令不同的是，用此方法在写入文件时参数的操作将代入参数当前的值而不是参数名。例如：上面的第四行宏命令的 `a`、`b` 和 `c` 即为参数名，如果当前 `a=4`，`b=3`，`c=2`，则实际写入文件的内容将是：

```
*CFWRITE,block,,4,,3,,2
```

3. 通过/TEE命令创建

在命令流窗口中依次输入下列语句即可创建一个名为 `lines.mac` 为宏：

```
/TEE,new,lines,mac
/prep7
k,1
k,2,0.1
k,3,0.2
k,4,0.2,0.2
k,5,0.1,0.2
k,6,,0.2
/TEE,END
/TEE,append,lines,mac
l,1,2
l,2,3
```

```
1,4,5
1,5,6
1,2,5
/TEE,END
```

第一行中“/TEE,NEW,lines,mac”是创建一个新的宏文件，名为 lines.mac，接下来输入的句子将被输入到宏文件中，同时所有的命令会被执行，直到遇到“/TEE,END”语句为止；中间的“/TEE,append,lines,mac”是继续追加新的命令到 lines.mac 宏文件中，接下来的句子也将被执行并存入宏文件，直到遇到“/TEE,END”语句为止。

宏语句中如有参数操作，参数也会被更新，但存入文件的命令语句代入的是参数名，而不是参数值。

4. 单击【Utility Menu】|【Macro】|【Create Macro】菜单创建

单击【Utility Menu】|【Macro】|【Create Macro】菜单，将弹出如图 8.25 所示的【Create Macro】对话框。

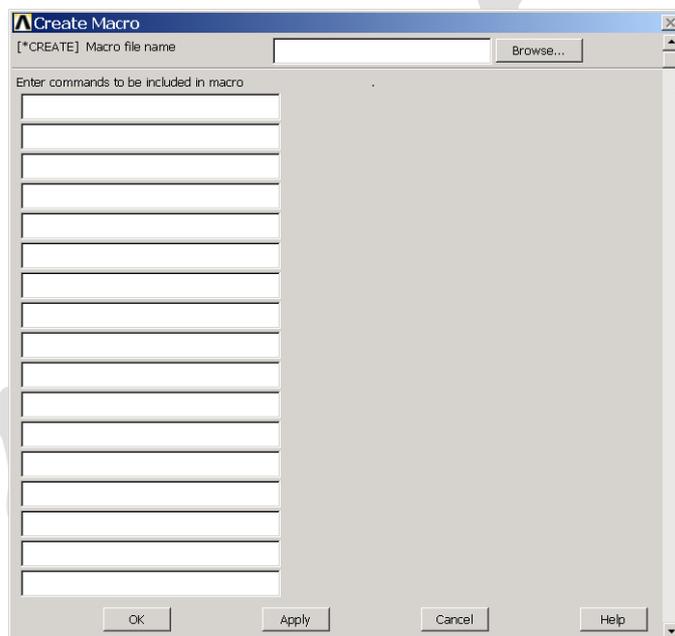


图8.25 创建宏对话框

在【Macro file name】文本框中输入宏文件名，在【Enter commands to be included in macro】文本框中输入宏语句，单击【OK】按钮即可。

该对话框和*CREATE 命令一样，参数值不会被替换。不能用这个对话框来打开已经存在的宏，且如果输入的宏文件已经存在，则该宏将被覆盖。

8.4.2 宏的运行

运行宏程序之前，首先该宏文件应该在当前宏的搜索路径下，默认的搜索路径有如下几项：

- ANSYS8.1 安装文件夹下的/ansys_inc/v80/ansys/apdl 目录

- 由环境变量 ANSYS_MACROLIB 定义的目录或程序的注册目录
- 由环境变量\$HOME 定义的目录
- 当前的工作目录

如果要运行的宏不在上述目录中，则需要重新设定当前宏的搜索目录，单击【Utility Menu】|【Macro】|【Macro Search Path】菜单，在图 8.26 所示的对话框中输入搜索路径，单击【OK】按钮。



图8.26 修改搜索路径

用户可以使用*USE 命令来运行宏文件，例如对于在搜索路径之内的宏文件 mymacro.mac，直接在命令流窗口中输入下列命令即可运行该宏：

```
*USE, mymacro
```

*USE 命令的语法格式为：

```
*USE, Name, ARG1, ARG2, ARG3, ARG4, ARG5, ARG6, ARG7, ARG8, ARG9, ARG10,  
AR11, AR12, AR13, AR14, ARG15, AR16, AR17, AR18
```

其中：

Name: 宏文件名；

ARG1~ARG18: 执行宏的参数（最多 18 个）。

对于位于搜索路径内的宏文件，直接在命令流窗口中输入宏文件名也可运行该宏。

运行宏的 GUI 方式为菜单【Utility Menu】|【Macro】|【Execute Data Block】，单击该菜单，将弹出如图 8.27 所示的【Execute “Unknown Command” Macro】对话框。在【Name of macro to be executed】文本框中输入宏文件名，在【Argument1】等文本框中输入宏参数，然后单击【OK】按钮即可。

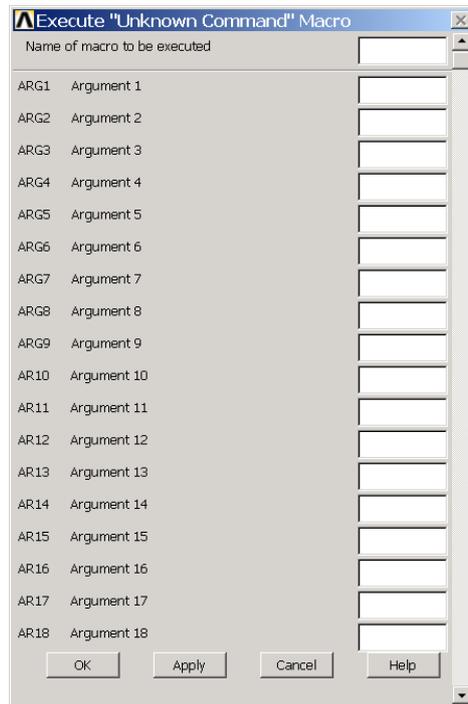


图8.27 运行宏对话框

8.4.3 APDL 程序控制

通常情况下，APDL 命令将顺序执行，对于需要重复进行的操作，如果采用重复输入命令的方法则相当麻烦，APDL 提供了循环语句可以简化这样的程序。常用的 APDL 程序控制包括：

1. 宏的嵌套

下例是两个宏文件，执行宏 `mystart` 将调用另一个宏 `mysphere`：

宏 `mystart` 如下：

```
*CREATE,mystart,mac
/prep7
/view,,-1,-2,-3
mysphere,1.2
finish
*END
```

宏 `mysphere` 如下：

```
*CREATE,mysphere,mac
sphere,arg1
*END
```

APDL 宏程序允许多达 20 层的嵌套调用，被调用的宏执行完后返回到其上一级宏程序中继续执行，其过程类似于 FORTRAN 的 CALL 子过程调用或函数调用。

2. 宏内无条件转移

下面是一个无条件转移的例子：

```
/prep7
```

```

k,1
k,2,0.1
k,3,0.2
k,4,0.2,0.2
k,5,0.1,0.2
k,6,,0.2
*GO,:BRANCH1
l,1,2
l,2,3
l,4,5
l,5,6
:BRANCH1
l,2,5

```

在遇到*GO 命令的行，程序将无条件跳转到“:”后的标签处继续执行，从而跳过了中间的一些划线命令，标签文字不得超过 8 个字符。

执行带有*GO 命令的宏时，会弹出如图 8.28 所示的警告对话框。提示最好不要在宏中使用无条件转移语句，推荐采用循环语句来控制。

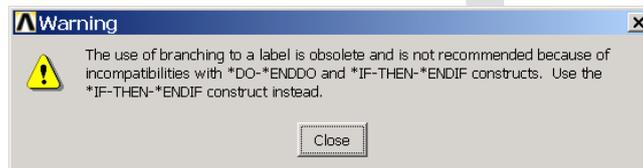


图8.28 警告对话框

3. 宏内条件转移

*IF 命令可以实现宏内的条件转移，其语法格式如下：

```
*IF, VAL1, Oper, VAL2, Base
```

其中，VAL1 和 VAL2 为条件判断的两个数据；Oper 为比较操作符，常用的有 EQ（等于）、NE（不等于）、LT（小于）、GT（大于）、LE（小于等于）、GE（大于等于）、ABLT（取绝对值后小于）和 ABGT（取绝对值后大于）等；Base 表示条件判断为真时要执行的操作。

*IF 命令可与*ELSEIF 和*ELSE 配合使用形成更为复杂的条件转移语句，下面命令语句的执行过程如图 8.29 所示。

```

*IF, A, EQ, 1, THEN
!Block1
...
*ELSEIF, A, EQ, 0
!Block2
...
*ELSEIF, A, EQ, -1
!Block3
...
*ELSE
!Block4
...
*ENDIF
!Continue

```

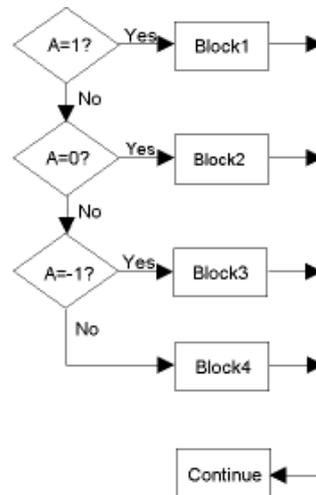


图8.29 条件转移示意图

4. 重复执行命令

下面命令是一个重复执行的例子：

```
E,1,2
*REPEAT,5,0,1
```

第一行 E 命令由节点 1、2 生成单元，第二行的 *REPEAT 命令使其共执行 5 次（包括其初次执行），从第二次开始，每一次执行时第二个节点的号将按 1 递增，第一个节点不变（按 0 递增），最后将生成 5 个单元：1-2、1-3、1-4、1-5 和 1-6。

说明：大部分以斜线（“/”）或星号（“*”）开头的命令以及宏程序命令不能用该命令重复执行，但以斜线开头的图形操作命令可以重复执行。另外，应避免使用 *REPEAT 重复执行那行需要交互操作的命令。

5. 循环语句

下面命令是一个简单的循环语句：

```
*DO,I,1,5
LSREAD,I      !读入荷载步 I
OUTPR,ALL,NONE !改变输出控制
ERESX,NO
LSWRITE,I     !写荷载步 I
*ENDDO
```

第一行用 *DO 命令使 I 从 1 到 5 依次取值，*DO 和 *ENDDO 之间的命令将依次循环执行。此外，循环语句还可以和 *IF、*EXIT、*CYCLE 命令组合使用来控制程序流程。遇到 *EXIT 命令将退出最近一层 *DO 循环；遇到 *CYCLE 命令将跳过 *CYCLE 和 *ENDDO 间的所有命令，直接开始下一次循环。

8.4.4 设置用户交互界面

利用 APDL 还可以设置一些用户自定义的交互界面，常用的有以下几种：

- 生成提示用户输入窗口
- 创建多参数赋值对话框

- 生成信息提示框
- 生成状态条

下面分别加以介绍。

1. 生成提示用户输入窗口

在命令流窗口中输入以下命令：

```
*ask,param1,'username (enclose the username in single quotes)'
```

然后按 **Enter** 键后，将弹出如图 8.30 所示的对话框。



图8.30 提示用户输入对话框

*ASK 命令用于在宏中弹出一个窗口以提示用户输入一个参数值。文本框中输入的内容可以是一个数值、不超过 8 个字符的字符串（用单引号括起来）或一个表达式等。

*ASK 命令的基本语法格式如下：

```
*ASK,Par,Query,DVAL
```

其中：

Par: 标量参数名；

Query: 提示用户输入的文本，最多 32 个字符，不可使用中文；

DVAL: 设定参数的默认值，如果用户没有输入数据时，**Par** 将取此值。

2. 创建多参数赋值对话框

创建包含以下语句的宏：

```
multiplro,'start',3  
*cset,1,3,dx,'Enter DX Value',0.0  
*cset,4,6,dy,'Enter DY Value',0.0  
*cset,7,9,dz,'Enter DZ Value',0.0  
*cset,61,62,'The MYOFFSET macro offsets the',' selected nodes along each'  
*cset,63,64,'of the three axes. Fill in the ',' fields accordingly.'  
multiplro,'end'
```

运行该宏后，将弹出如图 8.31 所示的对话框。

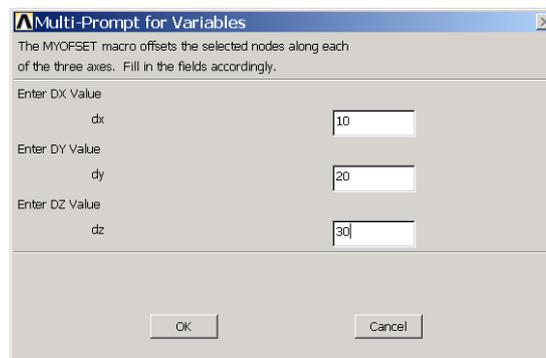


图8.31 生成的参数输入对话框

在三个文本框中分别输入数值，然后单击【OK】按钮，即给 DX、DY 和 DZ 三个参数赋了数值。在命令流窗口中输入“*STATUS”，可查看参数状态，如图 8.32 所示。

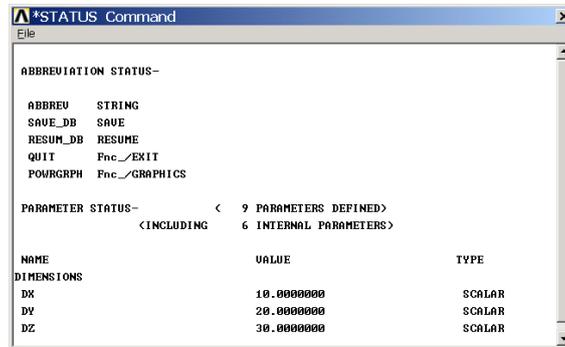


图8.32 用参数赋值对话框给参数赋值

上例中使用 MULTIPRO 命令生成了一个多参数赋值对话框，其基本语法格式为：

```
MULTIPRO,'start',Prompt_Num
*CSET,Strt_Loc,End_Loc,Param_Name,'Prompt_String',Def_Value
MULTIPRO,'end'
```

其中：

- 'start': 该字符串表示 MULTIPRO 命令的开始；
- Prompt_Num: 表示后面*CSET 提示的数目，只有当至少一个*CSET 命令没有 Def_Value 或者 Def_Value 值为 0 时才需要该参数。
- Strt_Loc,End_Loc: End_Loc=Strt_Loc+2，第一个*CSET 命令的 Strt_Loc=1，后面的*CSET 命令的 Strt_Loc 等于前一个*CSET 命令的 End_Loc+1；
- Param_Name: 用于接受用户输入数据的参数名；
- 'Prompt_String': 提示字符串；
- Def_Value: 参数缺省值。

开始的例子中最生两行*CSET 命令是一种行列的用法，它的作用是在对话框中添加提示。一个 MULTIPRO 结构中最多可以有两个这样的命令，其格式如下：

```
*CSET,61,62,'Help_String','Help_String'
*CSET,63,64,'Help_String','Help_String'
```

其中：

'Help_String': 提示字符串，一个'Help_String'最多包含 32 个字符串。

3. 生成信息提示框

下面的语句将创建一个名为 msg.mac 的宏：

```
*create,msg,mac
*msg,ui,1,0,0
number:%i%/&
Keypoint UX:%i%/&
Keypoint UY:%i%/
*end
```

运行该宏后，将得到如图 8.33 所示的对话框。



图8.33 信息提示框

上例中*MSG 命令的功能是生成信息提示框，后面的几行是提示信息的格式。*MSG 命令的语法格式为：

```
*MSG,Lab,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4,VAL5,VAL6,VAL7,VAL8
```

其中：

Lab: 消息提示框的标志，主要有以下几个选项：

- INFO: 输出不带标题的消息，默认值；
- NOTE: 输出以 NOTE 作为标题的消息；
- WARN: 输出以 WARNING 作为标题的消息，同时消息将写入出错文件；
- ERROR: 输出以 ERROR 作为标题的消息，同时消息将写入出错文件；
- FATAL: 输出 FATAL ERROR 作为标题的消息，同时消息将写入出错文件，并终止 ANSYS 运行；
- UI: 输出以 NOTE 作为标题的消息，并显示对话框。

VAL1~VAL8: 消息中包含的数字或字符，数字默认为双精度型。

在*MSG 命令之后，要求指定消息的格式，该格式最多可包含 80 个字字符，包括文本和数据。数据描述符的格式如下：

- %i: 整型数据；
- %g: 双精度数据；
- %c: 字符数据；
- %/: 分行符。

对于多行信息，在行末用“&”连接，如图 8.33 所示的例子。

4. 生成状态条

下面的语句创建了一个名为 status.mac 的宏：

```
*create,status,mac
fini
/clear
/prep7
*abset,'This is a Status Bar',BOTH
*do,i,1,100
  n,i,i,i+10
  j = i
  *abcheck,j
  *if,_RETURN,eq,1,*EXIT
  /wait,1
*enddo
*abfinish
fini
*end
```

运行该宏，将开始生成节点，同时出现一个如图 8.34 所示的状态条，单击  按钮将停止生成节点。



图8.34 状态条

上例中主要用了两个命令 `*ABSET` 和 `*ABCHECK`。`*ABSET` 是用来定义状态条，其语法格式为：

`*ABSET,Title40,Item`

其中：

Title40：显示于进度条上面的文本串，最多 40 个字符。

Item 可以有以下三种选项：

- **BAR**：只显示进度条，没有【STOP】按钮；
- **KILL**：只显示【STOP】按钮，没有进度条；
- **BOTH**：同时显示进度条和【STOP】按钮。

`*ABCHECK` 命令用来更新状态条，其语法格式为：

`*ABCHECK,Percent,NewTitle`

其中：

Percent：0~100 之间的整数，表示进度条的位置；

NewTitle：表示进度信息的字符串，最多 40 个字符，其内容将替换 **Title40**

关闭状态条的命令是 `*ABFINISH`。如果定义了【STOP】按钮，可以用 `_RETURN` 参数来判断按钮是否按下。

注意：在一个循环中，不可重复使用 `*ABCHECK` 命令超过 20 次。

第九章 结构静力分析

9.1 结构分析概述

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；海洋结构，如船舶结构航空结构，如飞机机身等；同时还包括机械零部件，如活塞传动轴等等。

结构分析中计算得出的基本未知量（节点自由度）是位移，其他的一些未知量，如应变、应力和反力可通过节点位移导出。在 ANSYS 产品家族中有七种结构分析的类型：

- 静力分析：用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等静力分析包括线性和非线性分析而非线性分析涉及塑性应力刚化大变形大应变超弹性接触面和蠕变；
- 模态分析：用于计算结构的固有频率和模态；
- 谐波分析：用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应；
- 瞬态动力分析：用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可计算上述提到的静力分析中所有的非线性性质；
- 谱分析：是模态分析的应用拓广，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变；
- 曲屈分析：用于计算曲屈载荷和确定曲屈模态。ANSYS 可进行线性（特征值）和非线性曲屈分析；
- 显式动力分析：ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

此外，除了前面提到的七种分析类型外还有如下几种特殊的分析应用：

- 断裂力学
- 复合材料
- 疲劳分析
- p-Method

结构分析所用的单元：绝大多数的 ANSYS 单元类型可用于结构分析，单元类型从简单的杆单元和梁单元一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元。

9.2 结构线性静力分析

结构静力分析是计算结构在固定不变的荷载作用下的响应，它不考虑惯性和阻尼的影响，如：结构受随时间变化荷载的情况。但是，静力分析可以计算那些固定不变的惯性荷载对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力的随时间变化荷载（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风荷载和地震荷载）。

静力分析可以是线性的也可以是非线性的。本节主要讨论线性静力分析，非线性静力分析将在下一节中介绍。

9.2.1 线性静力分析基础

线性静力分析用于计算那些不包括惯性和阻尼效应的荷载结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。这里，固定不变的荷载和响应只是一种假设，即假荷载和结构的响应随时间的变化非常缓慢。

静力分析中所施加的荷载主要包括：

- 外部施加的作用力或压力
- 稳态的惯性力（如重力和离心力）
- 位移荷载
- 温度荷载

求角线性静力分析的主要步骤为：

- 建立有限元模型；
- 施加荷载和边界条件并求解；
- 结果分析和评价。

说明：对于线性静力分析，只要模型合理并施加边界条件正确，一般都可以得到计算结果；而非线性分析则不一定能够等到结果，使一个非线性分析迭代收敛有时需要花费大量的时间。

9.2.2 线性静力分析实例

在这个实例分析中，将对一个钢支架进行线性静力分析。

1. 问题提出

如图 9.1 所示，对一个书架上常用的钢支架进行结构静力分析。假定支架在厚度方向上无应力（即平面应力问题），选用 8 节点的平面应力单元；支架厚度为 3.125mm；材料普通钢材，弹性模量取 $E=200\text{ GPa}$ ；支架左边界固定；顶面上作用一个 2.625 KN/m 均布荷载。

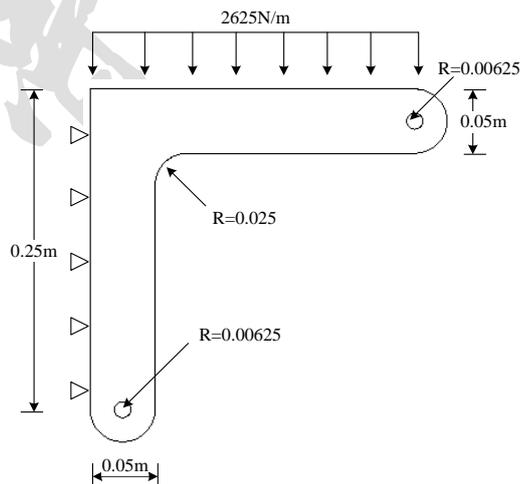


图9.1 钢支架示意图

2. 问题解决

具体求解步骤（GUI 方式）如下：

（1）先定义单元类型，单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，弹出如图 9.2 所示的【Element Types】对话框。



图9.2 单元类型管理对话框

（2）接着单击 Add... 按钮，按图 9.3 所示选中 8 节点平面应力单元，然后单击【OK】按钮关闭对话框。

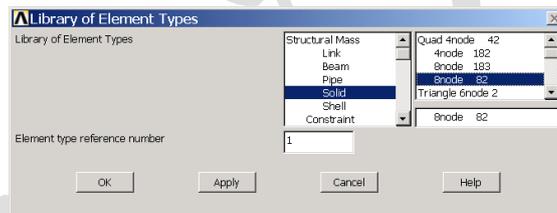


图9.3 定义单元类型

（3）回到【Element Types】对话框，选中定义的单元，然后单击 Options... 按钮，弹出如图 9.4 所示的对话框。在【K3】下拉列表框中选择【Plane strs w/thk】，然后单击【OK】按钮。

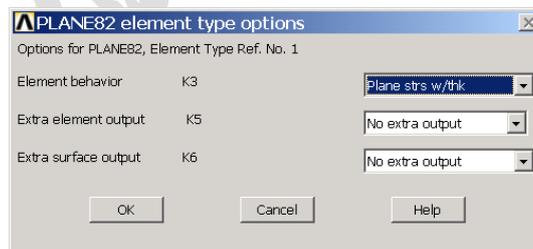


图9.4 单元选项

（4）接着定义实常数，单击 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete 按钮，弹出如图 9.5 所示的【Real Constants】对话框。



图9.5 实常数对话框

(5) 单击 **Add...** 按钮，选中【Plane82】单元，然后按图 9.6 所示输入实数值【3.125E-3】，单击【OK】按钮确认。

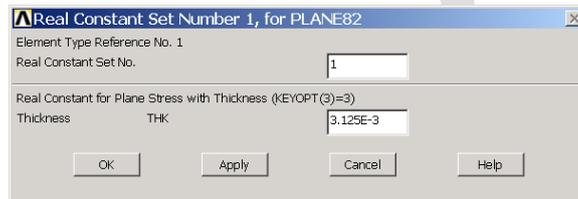


图9.6 定义实常数

(6) 输入材料参数，单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，弹出如图 9.7 所示的【Define Material Behavior】对话框。

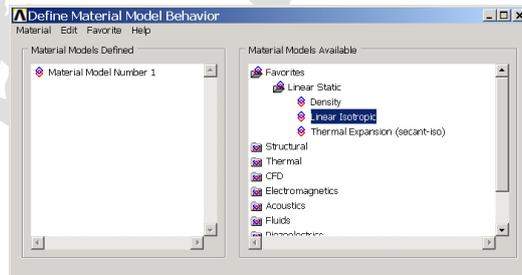


图9.7 选择参数性质

(7) 双击【Favorites】|【Linear Static】|【Linear Isotropic】菜单，将弹出如图 9.8 所示的对话框。在【EX】文本框中输入弹性模量【2E11】，在【PRXY】文本框中输入泊松比【0.3】，然后单击【OK】按钮。

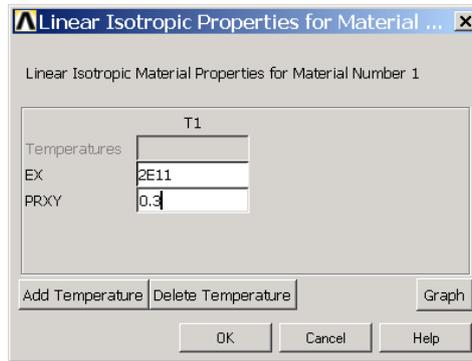


图9.8 定义材料参数

说明：这是在定义材料序号为 1 的参数，完成后将在【Define Material Behavior】对话框中左侧显示材料序号。

(8) 下面建立几何模型，单击【Utility Menu】|【Workplane】|【WP Settings】菜单，按图 9.9 所示进行工作平面设置，然后单击【OK】按钮。接着单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Display Working Plane】菜单，显示工作平面栅格。

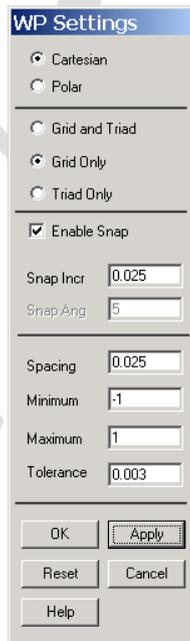


图9.9 设置工作平面

(9) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Working Plane 菜单，用鼠标在图形视窗中按图 9.10 的位置定义 6 个关键点，勾出支架的轮廓，并单击【OK】按钮。

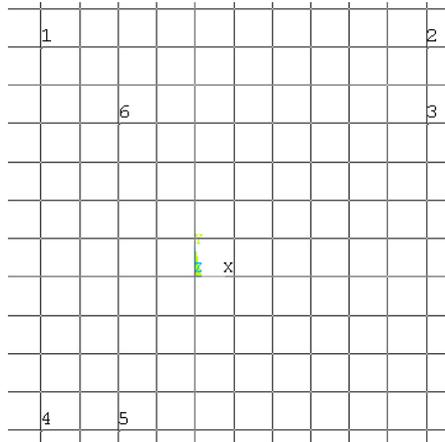


图9.10 生成关键点

说明：打开工作平面栅格的目的是为了能用鼠标在图形视窗中准备定义关键点。工作平面栅格具有自动吸附功能，读者可以自己体会。

(10) 单击【Utility Menu】|【Workplane】|【Display Working Plane】菜单关闭工作平面栅格。然后单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs 菜单，依次在图形视窗中选择关键点 1、2、3、6、5 和 4，单击【OK】按钮。即生成了直角形的面，打开线编号显示，如图 9.11 所示。

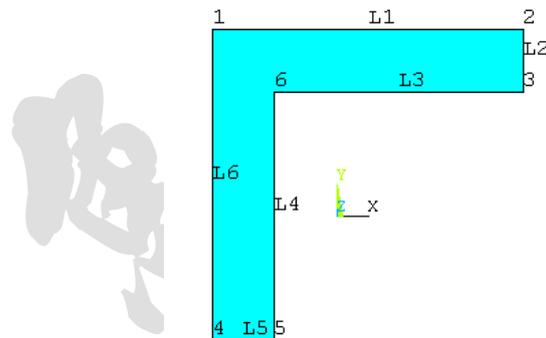


图9.11 由关键点生成面

(11) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet 菜单，然后在图形视窗中选择 L3 和 L4，单击【OK】按钮。接着弹出如图 9.12 所示的对话框。在【Fillet radius】文本框中输入倒角半径【0.025】，单击【OK】按钮。

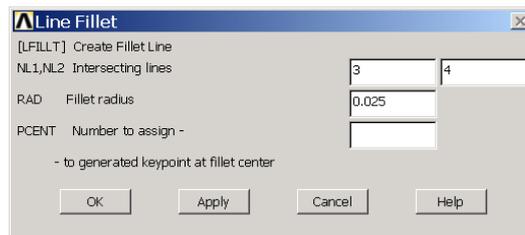


图9.12 对线进行倒角

(12) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines 菜单，选择倒角位置边线，单击【OK】按钮，把倒角填充成面，如图 9.13 所示。

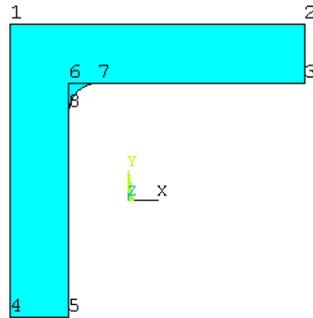


图9.13 倒角后的模型

(13) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus 菜单，在模型中画两个半圆，圆心位于支持边中点，直径等于支持边长，如图 9.14 所示。

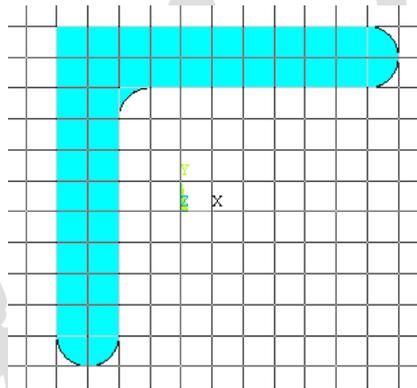


图9.14 生成半成半圆

说明：可以打开工作平面栅格辅助操作。

(14) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas 菜单，在弹出的对话框中，单击 **Pick All** 按钮，所有的面将通过布尔加运算变为一个面。

(15) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Annulus 菜单，在模型中生成两个半径为 0.00625 的小圆，圆心与 (13) 步中生成的半圆重合，如图 9.15 所示。

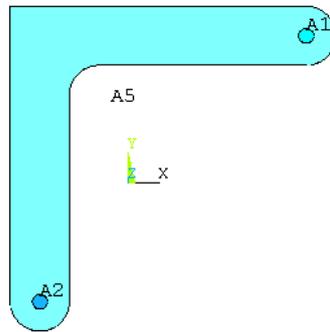


图9.15 生成内接圆

(16) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，选择 A5 单击【OK】按钮，接着选择 A1 和 A2，然后单击【OK】按钮，将得到图 9.16 所示的最终几何模型。

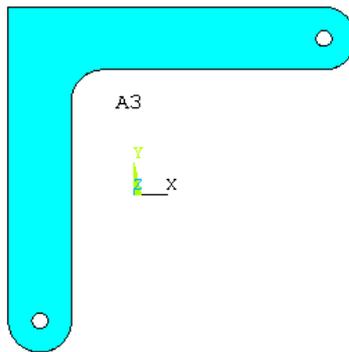


图9.16 几何模型

(17) 下面进行网格划分，单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Lines>Picked Lines 菜单，选择模型的外边线，单击【OK】按钮，弹出如图 9.17 所示。

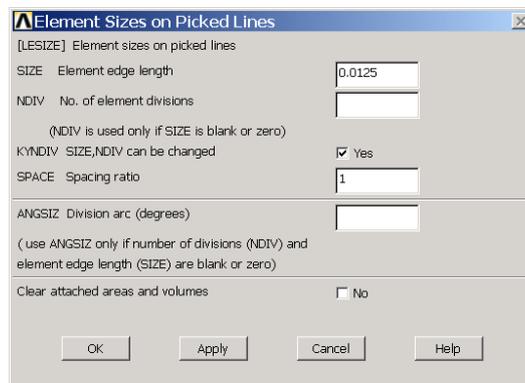


图9.17 设置线的网格尺寸

(18) 在【Element edge length】文本框中输入【0.0125】，单击【OK】按钮。再次单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls> ManualSize> Lines>Picked Lines 菜单，选择模型的小圆内边线，单击【OK】按钮，设置【Element edge length】文本框为【0.001】，然后单击【OK】按钮。

(19) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free 菜单，弹出图形拾取对话框，单击 **Pick All** 按钮，即可完成模型的网格划分，得到的网格如图 9.18 所示。

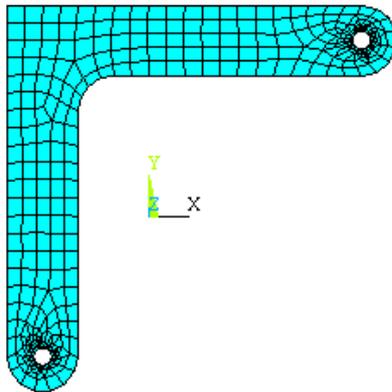


图9.18 网格划分结果

(20) 下面施加边界条件，单击 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines 菜单，选择模型的左边线，单击【OK】按钮，弹出如图 9.19 所示的对话框。在【DOFs to be constrained】列表框中选择【ALL DOF】，然后单击【OK】按钮。

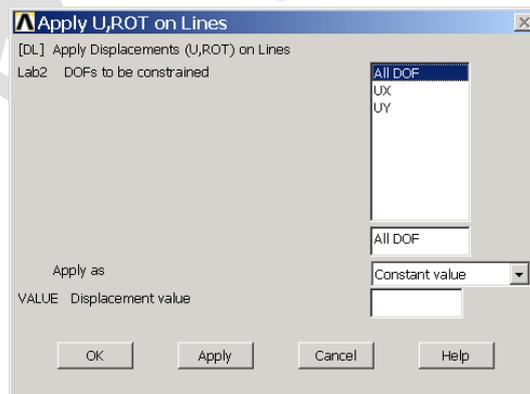


图9.19 定义边界条件

(21) 单击 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines 菜单，选择模型顶边线，单击【OK】按钮，弹出如图 9.20 所示的对话框。在【Load PRES value】文本框中输入压力值【2625】，单击【OK】按钮。

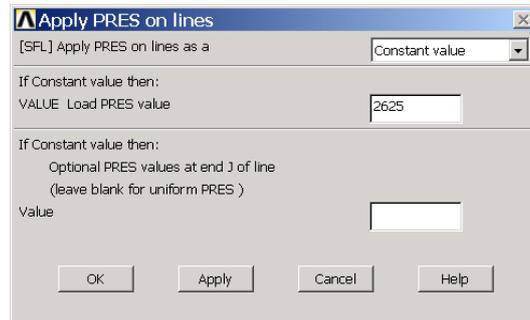


图9.20 施加荷载

(22) 下面进行求解，单击 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 菜单，弹出如图 9.21 所示的对话框。单击【OK】按钮，即开始求解。求解结果后，会弹出提示对话框。

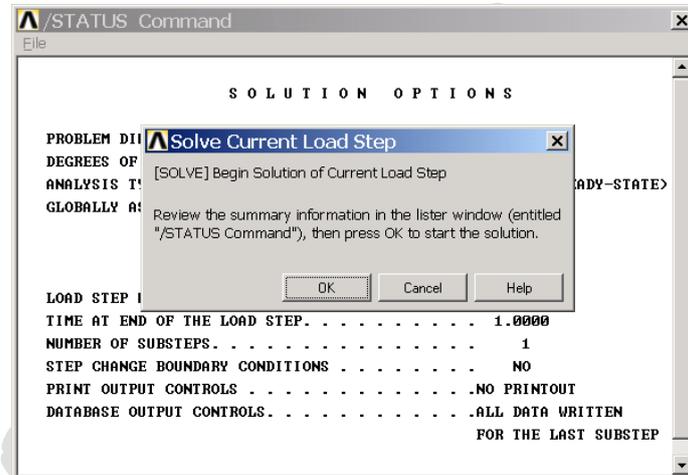


图9.21 求解确认对话框

接下来就是可以进行后处理了，结果如下：

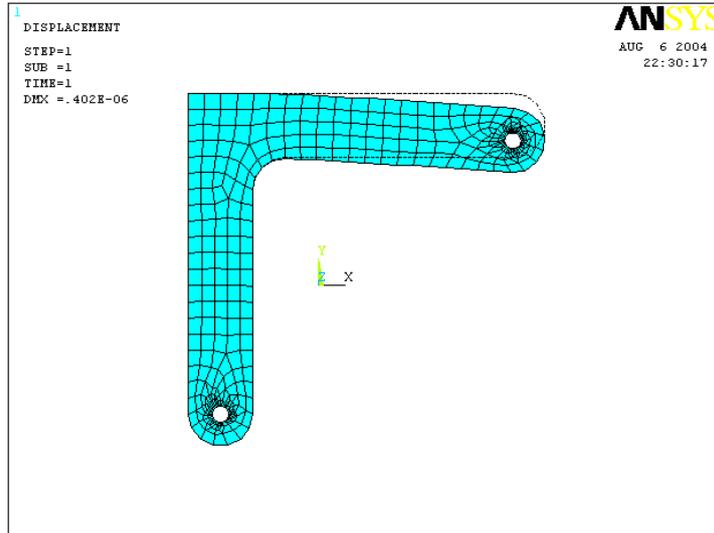


图9.22 结构变形图

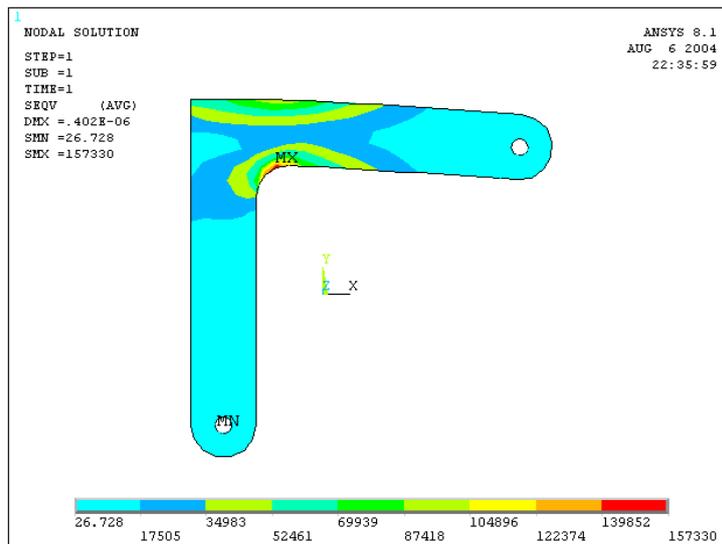


图9.23 结点等效应力等值线图

3. 命令方式

如果用户使用命令流方式，其指令如下：

```

/PREP7
ET,1,PLANE82,,,3           !定义单元类型
R,1,3.125E-3              !定义实常数
MP,EX,1,2E11              !定义材料参数
MP,PRXY,1,0.3
!建立几何模型
K,1,-0.1,0.15
K,2,0.15,0.15

```

```
K, 3, 0.15, 0.1
K, 4, -0.1, -0.1
K, 5, -0.05, -0.1
K, 6, -0.05, 0.1
A, 1, 2, 3, 6, 5, 4
LFILLT, 3, 4, 0.025
AL, 9, 8, 7
CYL4, 0.15, 0.125, 0.025, -90, , 90
CYL4, -0.075, -0.1, 0.025, -180, , 0
AADD, ALL
CYL4, 0.15, 0.125, 0.00625
CYL4, -0.075, -0.1, 0.00625
ASBA, 5, 1, , , DELETE
ASBA, 3, 2, , , DELETE
!网格划分
LSEL, S, LOC, X, 0.14, 0.16
LSEL, A, LOC, Y, -0.09, -0.11
LESIZE, ALL, 0.001
LSEL, S, LOC, X, 0.14, 0.16
LSEL, A, LOC, Y, -0.09, -0.11
LSEL, INVE
LESIZE, ALL, 0.0125
ALLSEL, ALL
AMESH, ALL
!施加边界条件
LSEL, S, LOC, X, -0.1
DL, ALL, , ALL
LSEL, S, LOC, Y, 0.15
SFL, ALL, PRES, 2625
ALLSEL, ALL
!求解
/SOLU
SOLVE
FINI
```

9.3 结构非线性分析

前面几节讨论的只是线性问题，但在实际生活中，结构的非线性问题也是人们经常遇到的。例如，用钉书针钉书时，金属钉书针最终将产生各种不同的形状，如图 9.24a 所示；在一个木制书架上放置重物，随着时间的迁移垂度将会不断增大，如图 9.24b 所示；汽车轮胎与路面之前的接触将随着重量的变化而变化，如图 9.24c 所示。将上面几个例子的变形曲线画出，会发现它们都显示了明显的非线性特征。

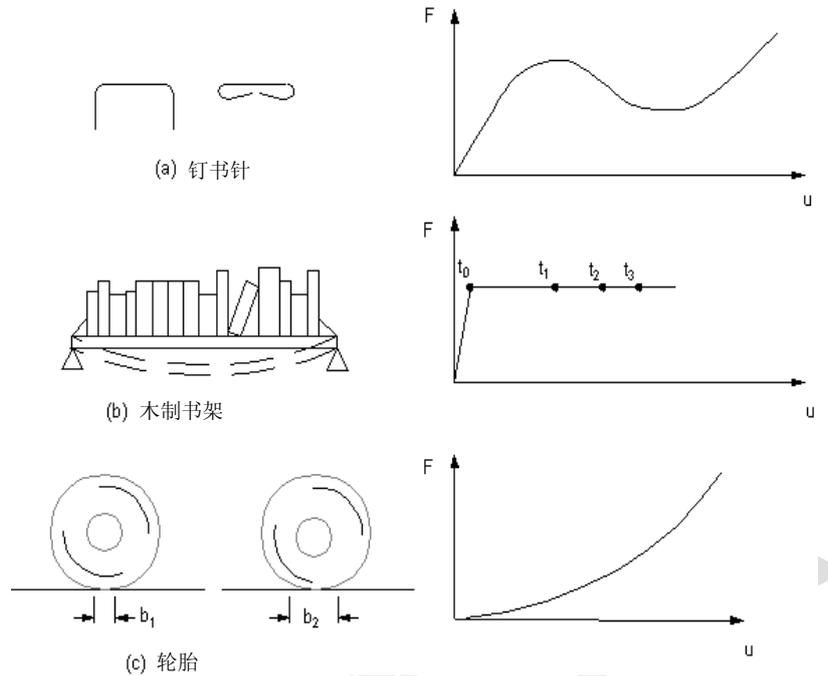


图9.24 非线性结构示例

由于篇幅原因，本章仅对常用的几何非线性分析和材料非线性分析加以详细介绍，状态非线性的问题读者可参考其它相关资料。

几何非线性问题是实际工程和生活中经常遇到一种问题，构件变化的几何形状一般会引入结构的非线性响应。一般来说，随着位移增长，一个有限单元已移动的坐标可以以多种方式改变结构的刚度。这类问题总是非线性的，需要进行迭代获得一个有效的解。

典型的几何非线性问题主要包括两类：大应变分析和屈曲分析。限于篇幅这里只对较简单、最常见的大应变分析加以介绍。

9.3.1 几何非线性分析

一个结构的总刚度依赖于它的组成部件（单元）的方向和单元刚度矩阵。当一个单元的结点经历位移后，那个单元对总体结构刚度的贡献可以以两种方式改变。首先，如果这个单元的形状改变，它的单元刚度将改变，如图 9.25 (a) 所示；其次，如果这个单元的取向改变，它的局部刚度转化到全局部件的变换也将改变，如图 9.25 (b) 所示。

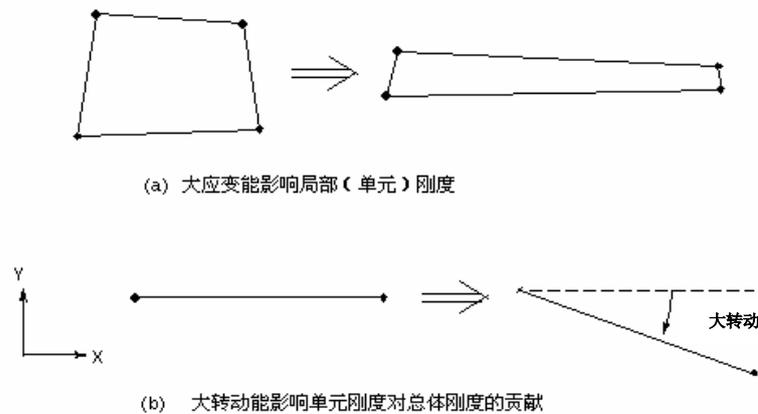


图9.25 大应变和大转动

小的变形和小的应变分析假定位移小到足够使所得到的刚度改变无足轻重。这种刚度不变假定意味着使用基于最初几何形状的结构刚度的一次迭代足以计算出小变形分析中的位移。什么时候使用“小”变形和应变依赖于特定分析中要求的精度等级。

相反，大应变分析说明由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响，且反之亦然，所以在大应变分析中需要迭代求解来得到正确的位移。

通过命令 `NLGEOM, ON` (GUI 路径 `Main Menu>Solution>Analysis Options`)，来激活大应变效应。此效应改变单元的形状和取向，并随单元转动表面载荷。(集中载荷和惯性载荷保持它们最初的方向。) 在大多数实体单元(包括所有的大应变和超弹性单元)，以及部分的壳单元中大应变特性是可用的。在 `ANSYS/Linear Plus` 程序中大应变效应是不可用的。

9.3.2 几何非线性分析实例

在这个实例分析中，对一个悬臂梁进行几何非线性分析。

1. 问题提出

如图 9.26 所示，一个矩形截面悬臂梁端部受一集中弯矩作用，梁的几何特性以及弯矩大小已经在图中标出。显然，这是一个几何非线性问题，要得到精确的解，必需使用 Ansys 的大变形选项，荷载要逐步施加。关于此非线性问题的详细参数如下所示。

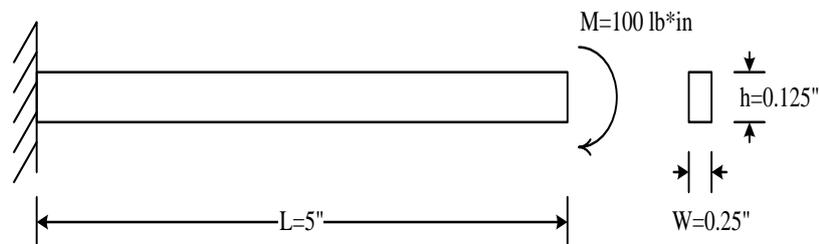


图9.26 悬臂梁受力作用简图

悬臂梁的材料性质参数：弹性模量 $EX=30E6$ ；泊松比 $NUXY=0.3$ 。

2. 问题解决

具体求解步骤（GUI 方式）如下：

（1）建立模型，给定边界条件：建立所要分析的模型，定义单元类型、材料性质，划分网络，给定边界条件，并将数据库文件保存。

（2）单击【Utility Menu】|【File】|【Resume from】选项，恢复数据文件。

（3）单击 Main Menu>Solution 选项，进入求解器。

（4）单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，选择【Static】然后单击【OK】按钮。

（5）单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls 菜单，将弹出【Solution Controls】对话框。如图 9.27 示。参数详细设置如表 9.1 所示。

表9.1 Solution Controls设置项

选项	值	说明
【Analysis Option】	【Large Displacement Static】	打开大变形选项。在结果中产生大变形效果
【Automatic Time Stepping】	【On】	打开自动时间步长
【Number of Substeps】	100	定义荷载子步数为 100
【Max no Substeps】	1000	定义最大荷载子步长为 1000
【Min no of Substeps】	1	定义最小荷载子步数为 1
【Write Items to Result File】	【All solution items】	所有结果项目输入到结构文件中

说明：假定要计算的最终荷载是 $100 \text{ lb}\cdot\text{in}$ ，如果自动荷载步选项关闭，那么 Ansys 将按照 100 个荷载子步进行加载，每个子步的步长都是总荷载的 $1/100$ 。在本例中已经把自动荷载步选项打开了，所以初始荷载子步将设为 $1 \text{ lb}\cdot\text{in}$ ，而以后的子步的步长将根据前一个荷载增量的响应自动调节。显然，这样能够得到更好的计算精度。

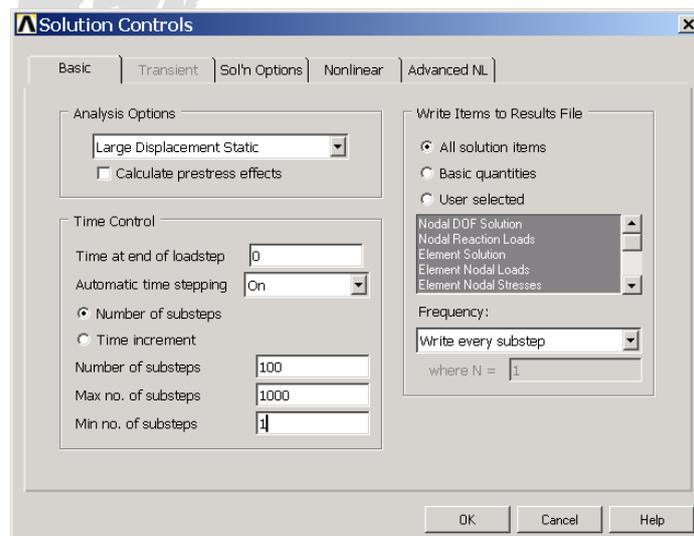


图 9.27 求解控制对话框

(6) 施加外荷载：单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints** 选项，进行施加外荷载。并捕捉关键点 2（即悬臂梁右端点），按图 9.28 所示输入荷载。

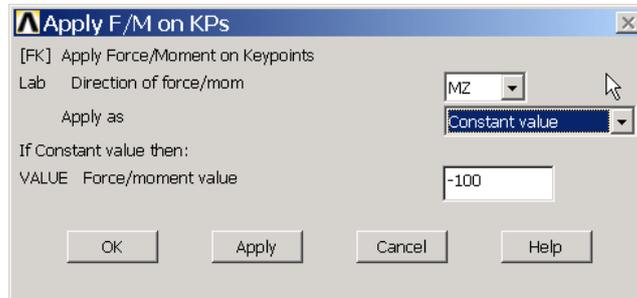


图9.28 弯矩荷载输入

(7) 选择菜单路径 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS**，检查状态窗口中的信息然后单击【Close】按钮，单击【Solve Current Load Step】对话框中的【OK】开始求解。最终得出的结果显示如图 9.29 和 9.30 所示。



图9.29 悬臂梁最终变形图示

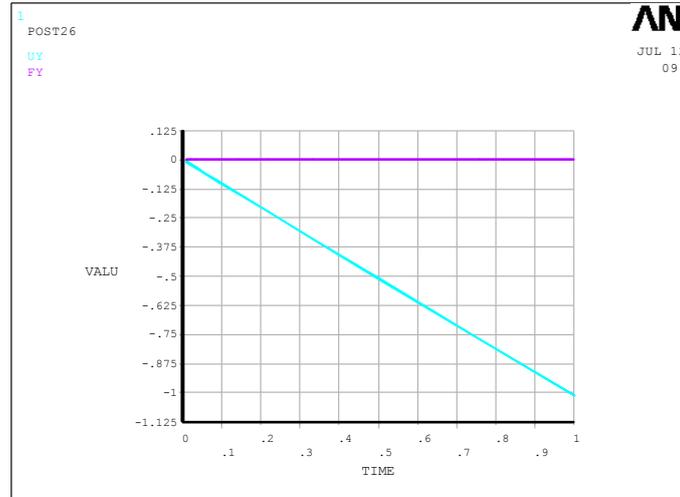


图9.30 相关参数曲线

3. 命令方式

如果用户使用命令流方式，其指令如下：

```

/prep7
/title,NonLinear Analysis of Cantilever Beam
!建模
k,1,0,0,0
k,2,5,0,0
l,1,2

et,1,beam3                ! 定义梁单元
r,1,0.03125,4.069e-5,0.125 ! 设置梁截面面积和惯性矩
mp,ex,1,30.0e6           ! 设置弹性模量
!网格划分
esize,0.1
lmesh,all
finish

/solu                    ! 进入求解模块

antype,static            ! 静力分析
nlgeom,on               ! 打开非线性大变形

autots,on                ! 打开自动时间步
nsubst,100,1000,1
outres,all,all          ! 保存每一子步的所有结果
!kbc,0                  ! 逐步加荷（默认）

dk,1,all                 ! 定义边界条件
fk,2,mz,-100            ! 施加外荷载

solve
!后处理
/post1                   !进入后处理模块
pldisp,1                ! 显示最后变形图

```

```
/post26  
nsol,2,2,u,y,  
rforce,3,1,f,y,  
plvar,2,3  
fini
```

9.3.3 材料非线性分析

非线性的应力-应变关系也是人们常见的结构非线性原因。ANSYS 中的材料非线性主要包括弹塑性分析、超弹性分析、蠕变分析等。限于篇幅的原因，本节主要讲述弹塑性分析。关于其它几种材料非线性问题，读者可以参考更详细的 ANSYS 在线手册。

塑性是一种在某种给定荷载下，材料产生永久变形的材料特性，对大多数的工程材料来说，当其应力低于比例极限时，应力-应变关系是线性的。另外，大多数材料在其应力低于屈服点时，表现为弹性行为，也就是说，当把荷载移走时，其应变也完全消失。

由于屈服点和比例极限相差很小，因此在 ANSYS 程序中，假定它们相同。在应力-应变曲线中，低于屈服点的叫作弹性部分，超过屈服点的叫作塑性部分，或者叫作应变强化部分。弹塑性分析就是既考虑弹性部分又考虑了塑性区域的材料特性。

ANSYS 程序提供了多种塑性材料选项，常用的有如下四种。用户可以通过激活一个数据表来选择这些选项。

- 经典双线性随动强化 (BKIN)；
- 双线性等向强化 (BISO)；
- 多线性随动强化 (MKIN)；
- 多线性等向强化 (MISO)；

下面重点介绍一下多线性等向强化 (MISO) 的定义方法，其它几种塑性选项的定义读者可参考 ANSYS 的在线手册。

多线性等向强化是使用多线性来表示使用 Von Mises 屈服准则的等向强化的应力-应变曲线，它适用于比例加载的情况和大应变分析。在定义多线性等向强化时，最多可输入 100 个应力-应变曲线，最多可以定义 20 条不同温度下的曲线。其定义的具体步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，弹出【Define Material Models Behavior】对话框，定义弹性模量和泊松比；

(2) 在【Define Material Models Behavior】对话框的右侧栏打开【Structural】|【Nonlinear】|【Inelastic】|【Rate Independent】|【Isotropic Hardening Plasticity】|【Mises plasticity】|【Multilinear】，并双击运行，如图 9.31 所示；

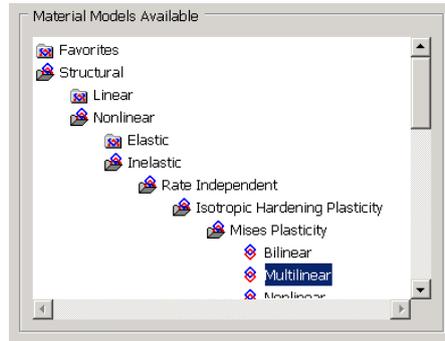


图9.31 多线性等向强化菜单

(3) 在弹出的【Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1】对话框中输入应力-应变数据，如图 9.32 所示。单击对话框中的【Add Point】和【Delete Point】按钮可以增加和删除数据点。待所有数据点添加完后，单击【Graph】按钮，Ansys 会在图形窗口中绘出材料的应力-应变曲线。

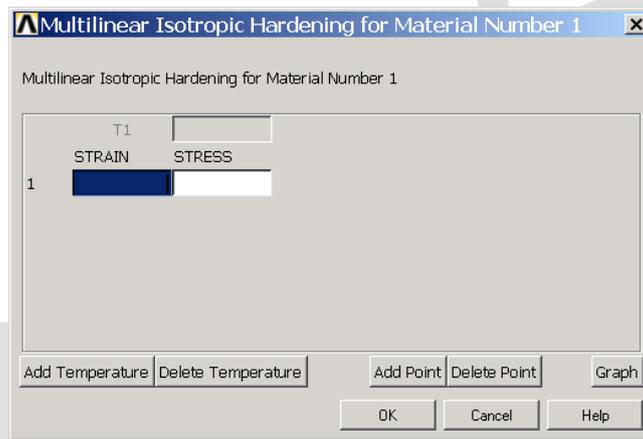


图9.32 多线性等向强化输入对话框

注意：MISO 的数据表对不同的温度可以有不同的应变值，因此，每条温度曲线有它自己的输入表。

9.3.4 材料非线性分析实例

在这个实例分析中，将进行一个钢棒单轴拉伸的塑性分析。

1. 问题提出

如图 9.33 所示，一直径为 10mm 长为 100mm 的钢棒，将其沿轴向拉伸 20mm。求其最后的变形情况和应力分布。

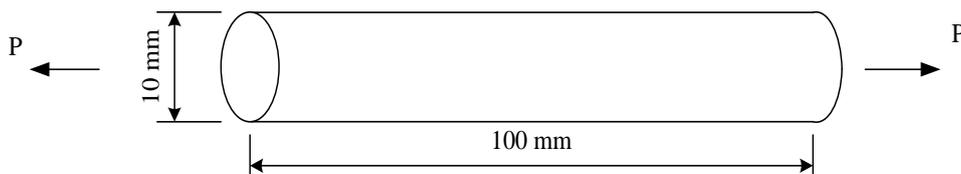


图9.33 钢棒单轴拉伸示意图

由于模型和荷载都是轴对称的，因此建模时可以只取钢棒轴向截面的四分之一，用平面轴对称单元来实现。而且为了产生颈缩现象，在建模时把钢棒端部和中部截面做了5%的误差，让其诱导出劲缩结果。

问题的详细参数如下：弹性模量 $E_X=200E3$ ；泊松比 $\nu_{XY}=0.3$ 。塑性时的应力-应变关系如表 10.2 所示。

表10.2 应力-应变关系表

数据点	1	2	3	4	5	6	7
应变	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.01
应力	400	416.3	429	438	445	456.8	465.3
数据点	8	9	10	11	12	13	14
应变	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3
应力	480.8	491.8	507.4	527.5	555.7	586	603

2. 问题解决

具体求解步骤（GUI 方式）如下：

说明：由于前面章节已经对一些常用步骤进行了详细说明，因此此节中将忽略一般步骤的阐述，只对一些关键步骤进行说明。

(1) 建立计算所需要的模型，给定边界条件：建立所要分析的模型，定义单元类型、材料性质，划分网络，给定边界条件，并将数据库文件保存。

(2) 单击【Utility Menu】|【File】|【Resume from】选项，恢复数据文件。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，弹出【Define Material Models Behavior】材料属性对话框。

(3) 在【Material Models Available】窗口中选择【Structural】|【Linear】|【Elastic】|【Isotropic】，打开另一对话框。在【EX】文本框中输入弹性模量 200E3，在【PRXY】文本框中输入泊松比 0.3。

(4) 在【Define Material Models Behavior】对话框的右侧栏双击【Structural】|【Nonlinear】|【Inelastic】|【Rate Independent】|【Isotropic Hardening Plasticity】|【Mises plasticity】|【Multilinear】。

(5) 在弹出的【Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1】对话框中输入应力-应变数据，完成后如图 9.34 所示。

	T1	0
	STRAIN	STRESS
1	0.002	400
2	0.003	416.32
3	0.004	429
4	0.005	438.23
5	0.006	445
6	0.008	456.76
7	0.01	465.33
8	0.015	480.8
9	0.02	491.79
10	0.03	507.42
11	0.05	527.5
12	0.1	555.68
13	0.2	585
14	0.3	603

图9.34 弹塑性应力-应变数据表

(6) 单击对话框中的【Graph】按钮，则一个完整的应力-应变关系曲线出现在 ANSYS 图形窗口中，如图 9.35 所示。

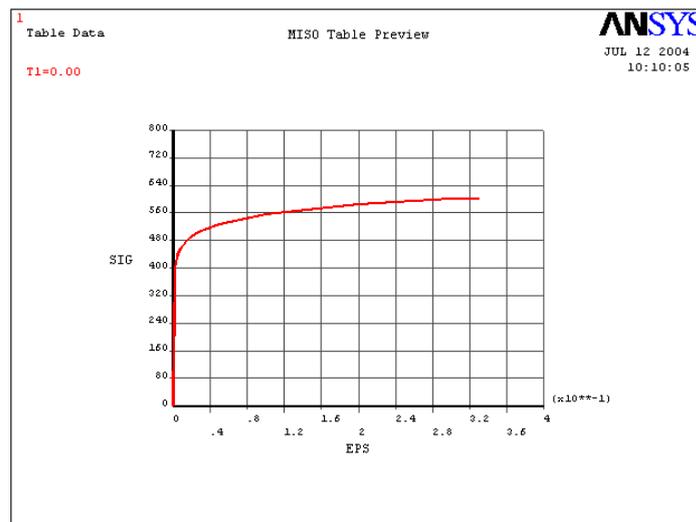


图9.35 应力-应变曲线图示

(7) 单击 Main Menu>Solution 选项，进入求解器。

(8) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，选择【Static】选项，然后单击【OK】按钮。

(9) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Solution Controls 菜单，将弹出【Solution Controls】对话框。选项设置如表 9.3 所示。

表9.3 Solution Controls设置项

选项	值	说明
【Number of Substeps】	100	定义荷载子步数为 100
【Max no of Substeps】	200	定义最大荷载子步长为 200
【Min no of Substeps】	10	定义最小荷载子步数为 10

【Write Items to Result File】	【All solution items】	所有结果项目输入到结构文件中
【Frequency】	【Write every Substep】	

(10) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，弹出【Static or Steady-State Analysis】对话框。

注意：如果找不到【Analysis Options】菜单，请单击 Main Menu>Solution>Abridged Menu 菜单，然后再按第(10)步操作。

(11) 在【Nonlineal options】中，选择【Large deform effects】选项为【On】，并在【Newton-Raphson option】下拉列表中选择【Full NR】，单击【OK】按钮。

(12) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines 菜单，选择编号为 3 的线，单击【OK】按钮。

(19) 在弹出的【Apply U Rot on Lines】对话框中，选择【UY】选项，【Value】输入框中输入 10，单击【OK】按钮。

(20) 选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，检查状态窗口中的信息然后，单击【Close】按钮。单击【Solve Current Load Step】对话框中的【OK】按钮，开始求解。

最终得出的结果显示如图 9.36 所示。

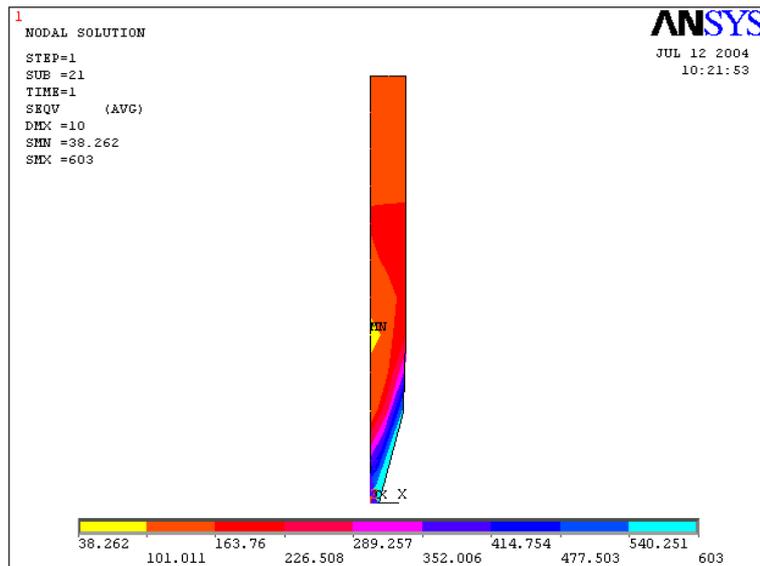


图9.36 钢棒单轴拉伸等效应力分布

3. 命令模式

如果用户使用命令流方式，其指令如下：

```
finish
/clear
/prep7
/units,si

r1=5.05
```

```
r0=5

!轴对称平面单元
ET,1,PLANE82,,,1,,2,4
mp,ex,1,200e3
mp,prxy,1,0.3
!材料本构关系
tb,miso,1,1,14
tbpt,,0.002,400
tbpt,,0.003,416.32
tbpt,,0.004,429
tbpt,,0.005,438.23
tbpt,,0.006,445.53
tbpt,,0.008,456.76
tbpt,,0.01,465.33
tbpt,,0.015,480.8
tbpt,,0.02,491.79
tbpt,,0.03,507.42
tbpt,,0.05,527.5
tbpt,,0.1,555.68
tbpt,,0.2,585.15
tbpt,,0.3,603.04

!建立模型
k,1
k,2,r0
k,3,r1,50
k,4,,50
a,1,2,3,4

!网络划分
lesize,1,,,2
lesize,2,,,10
lesize,3,,,2
lesize,4,,,10
allsel,all
amesh,all

!设定边界条件
nsel,s,loc,y,0
d,all,uy
nsel,s,loc,x,0
d,all,ux
nsel,s,loc,y,50
cp,1,uy,all

save,model
/solu
!resume,model
dl,3,,uy,10
nlgeom,on
nropt,full
outres,all,all
allsel,all
nsubst,100,200,10

solve
```

```
!后处理  
/post1  
pldisp,1  
  
plnsol,s,eqv  
fini
```

解法一

第十章 ANSYS 8.1 动力学分析

ANSYS 不但可以求解结构静力问题，还可以完成复杂的动力学分析。本章将重点介绍 ANSYS 的动力学分析功能。动力学分析需要有相关的动力学知识作为基础，对于不需要考试结构动力学响应的读者可以跳过本章的学习。

动力学分析是用来确定惯性（质量效应）和阻尼起着重要作用时结构或构件动力学特性的技术。动力学分析通常指分析下列几种物理现象：

- 振动：如由于旋转机械引起的振动；
- 冲击：如汽车碰撞，锤击等；
- 交变作用力：如各种曲轴以及其它回转机械等；
- 地震载荷：如地震，冲击波等；
- 随机振动：如火箭发射，道路运输。

上述每一种情况都由一个特定的动力学分析类型来处理。

按照运动方程的求解形式的不同，动力学分析又可以分为以下三种形式：

- 模态分析
 - 瞬态动力学分析
 - 谐响应分析
- 下分将分别讲述。

10.1 模态分析

模态分析可以确定一个结构或机构的固有频率和振型。同时经也可以作为其它更详细的动力学分析的起点，例如瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析等。

10.1.1 模态分析简介

模态分析是用来确定结构的振动特性的一种技术，这些振动特性包括：固有频率、振型、振型参与系数（即在特定方向上某个振型在多大程度上参与了振动）等。模态分析是所有动力学分析类型的最基础的内容。如果要进行谐响应分析或瞬态动力学分析，固有频率和振型也是必要的。

模态分析假定结构是线性的。任何非线性特性，如塑性单元即使定义了也将被忽略。模态提取是用来描述特征值和特征向量计算的术语，在 ANSYS 中提取模态的方法有 6 种：Subspace(子空间)法、Block Lanczos 法、PowerDynamics 法、Reduced(缩减)法、Unsymmetric（不对称）法和 Damped（阻尼）法。使用何种模态提取方法主要取决于模型大小（相对于计算机的计算能力而言）和具体的应用场合。

和其它分析一样，在 ANSYS 模态分析也有 GUI 和命令流两种操作方式。本节中将举例进行说明。

10.1.2 模态分析步骤

模态分析的过程由四个主要步骤组成：

- 建模
- 选择分析类型和分析选项
- 施加边界条件并求解
- 评价结果

1. 建模

这一步的操作主要在前处理器（PREP7）中进行，包括定义单元类型、单元实常数、材料参数及几何模型。建模过程中需要注意以下两点：

- 必须定义密度（DENS）；
- 只能使用线性单元和线性材料，非线性性质将被忽略。

建模过程的典型命令流如下：

```
/PREP7  
ET, ...  
MP, EX, ...  
MP, DENS, ...  
!建立几何模型  
...  
!划分网格  
...
```

2. 选择分析类型和分析选项

这一步要选择模态分析类型、选择模态提取选项和模态扩展选项等。

选择模态分析类型，可单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，在弹出的【New Analysis】对话框中选择【Modal】单选按钮即可。如图 10.1 所示。

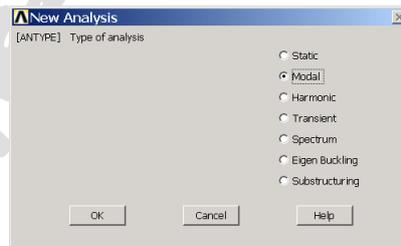


图10.1 选择模态分析类型

选择模态提取选项的步骤如下：

(1) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，弹出如图 10.2 所示的【Modal Analysis】对话框。

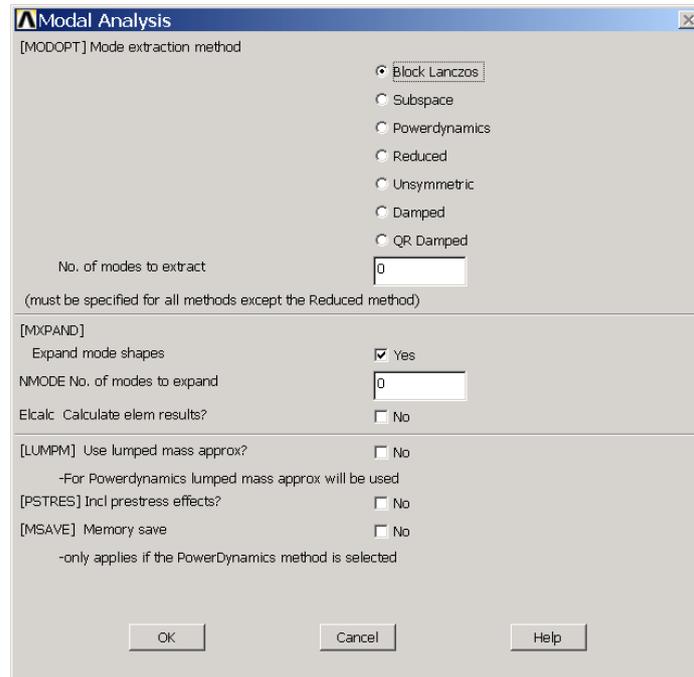


图10.2 选择模态提取选项

(2) 在【Mode extraction method】单选列表框中选择适当的模型提取方法，建议大多数情况下选择【Block Lanczos】法；在【No. of modes to extract】文本框中输入模态（振型）提取数目，选择【Reduced】法时不需要指定。设置好后单击【OK】按钮即可。

进行模态扩展的操作为：单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，在【Modal Analysis】对话框中，选中【Expand mode shapes】后面的【Yes】复选框，在【No. of modes to expand】文本框中输入扩展模态的数目（建议和模态提取数目相等）即可。

说明：模态扩展在下列几种情况下是必须的：（1）要在后处理中观察振型；（2）计算单元应力；（3）进行后继的频谱分析。

图 10.2 所示【Modal Analysis】对话框中的其它选项还有：

- 【Use lumped mass approx?】：是否使用集中质量矩阵；
- 【Incl prestress effects?】：预应力效应。

选择分析类型的典型命令流如下：

```

MODOPT, ...           !选择分析类型
MXPAND, ...           !模态扩展
LUMPM, OFF or ON
PSTRES, OFF or ON
ALPHAD, ...
BETAD, ...
DMPRAT, ...

```

3. 施加边界条件并求解

这一步主要是施加边界条件（包括位移约束和外部荷载）并求解计算。

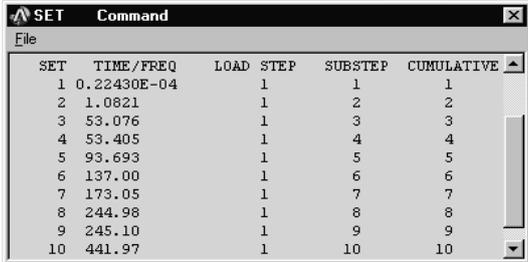
施加边界条件的操作基本上和静力分析相同，需要注意的是：因为振动被假定为自由振动，所以外部载荷将被忽略，ANSYS 程序形成的载荷向量可以在随后的模态叠加分析中使用。

求解时通常采用一个载荷步；有时为了研究不同位移约束的效果，可以采用多载荷步。例如，对称边界条件采用一个载荷步，反对称边界条件采用另一个载荷步。单击 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 菜单或输入命令“SOLVE”即可开始求解。

4. 评价结果

这一步的操作主要在通过后处理器（POST1）中进行。可以列表显示结构的固有频率、图形显示振型、显示模态应力等。

显示固有频率可单击 **Main Menu>General Postproc>Results Summary** 菜单，将列表显示各个模态，每个模态都保存在单独的子步中。如图 10.3 所示。



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.22430E-04	1	1	1
2	1.0821	1	2	2
3	53.076	1	3	3
4	53.405	1	4	4
5	93.693	1	5	5
6	137.00	1	6	6
7	173.05	1	7	7
8	244.98	1	8	8
9	245.10	1	9	9
10	441.97	1	10	10

图10.3 显示固有频率

观察振型可先单击 **Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set** 或者 **Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set** 菜单，读取模态数据，然后单击 **Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape** 菜单，将显示当前模态。

单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Mode Shape】菜单，可显示振型动画。

如果在选择分析选项时激活了单元应力计算选项，则可以得到模态应力。应力值并没有实际意义，但如果振型是相对于单位矩阵归一的，则可以在给定的振型中比较不同点的应力，从而发现可能存在的应力集中。

评价结果的典型命令如下：

```

/POST1
SET, 1, 1           !选择第一模态
ANMODE, 10, .05    !动画10帧，帧间间隔0.05秒
SET, 1, 2           !第二模态
ANMODE, 10, .05
SET, 1, 3           !第三模态
ANMODE, 10, .05
...
PLNSOL, S, EQV     !显示Mises应力
  
```

10.1.3 模态分析实例

本节中将通过一个实例具体介绍 ANSYS 进行模态分析的步骤。

1. 问题描述

对一个飞机机翼进行模态分析。机翼沿长度方向的轮廓是一致的，横截面由直线和样条曲线定义。机翼的一端固定在机体上，另一端悬空。要分析得到机翼的模态自由度。机翼几何模型如图 10.4 所示，弹性模量取 38×10^3 ，泊松比 0.3，密度为 $8.3E-5$ 。

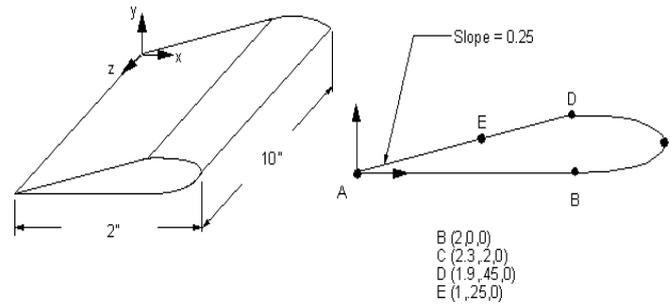


图10.4 机翼模型示意图

2. GUI操作步骤

(1) 定义单元类型。单击 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 菜单，定义两种单元类型 PLANE42 和 SOLID45，如图 10.5 所示。

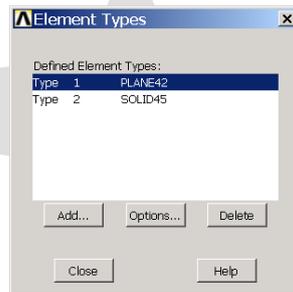


图10.5 定义单元类型

(2) 定义材料参数。单击 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 菜单，依次双击【Structural】|【Linear】|【Elastic】|【Isotropic】菜单，弹出如图 10.6 所示的对话框。在【EX】文本框中输入【38000】，在【PRXY】文本框中输入【0.3】，然后单击【OK】按钮。

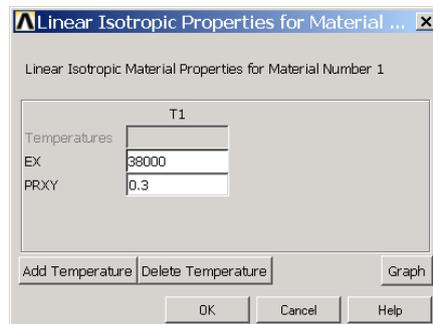


图10.6 定义弹性模量和泊松比。

(3) 再次单击 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 菜单，依次双击【Structural】|【Density】菜单，弹出如图 10.7 所示的对话框。在【DENS】文本框中输入材料密度值【8.3E-5】，然后单击【OK】按钮。

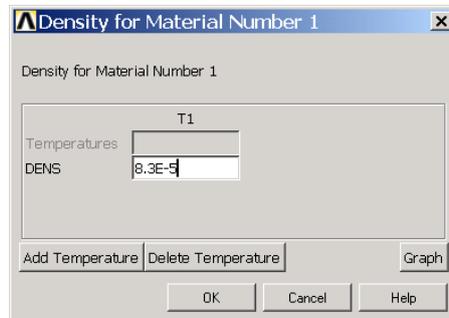


图10.7 定义材料密度

(4) 下面建立几何模型。单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 菜单，弹出如图 10.8 所示的对话框。

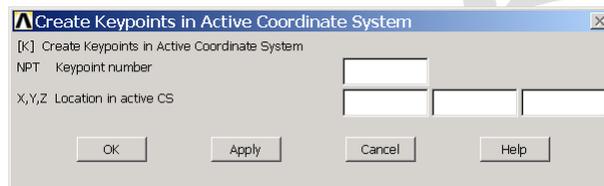


图10.8 定义关键点对话框。

(5) 重复(4)的操作，共定义5个关键点：(0, 0, 0)、(2, 0, 0)、(2.3, 0.2, 0)、(1.9, 0.45, 0)和(1, 0.25, 0)。得到如图 10.9 所示的模型。

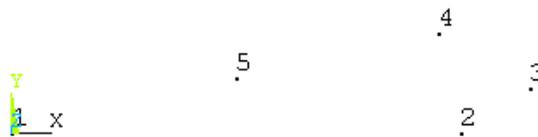


图10.9 生成的关键点

(6) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line 菜单，用鼠标在图形视窗中依次选择关键点 1 和 2，连接成直线。用同样的方法连接关键点 1 和 5 生成另一条直线。如图 10.10 所示。

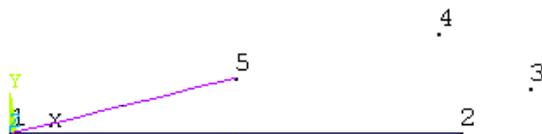


图10.10 生成直线

(7) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Splines>With Options>Spline thru KPs** 菜单, 依次选择关键点 2、3、4 和 5, 然后单击【OK】按钮, 弹出如图 10.11 所示的对话框。

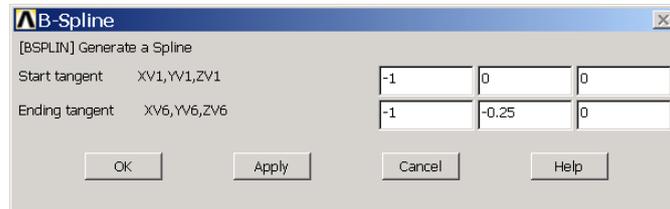


图10.11 设置样条曲线

(8) 在【Start tangent】文本框中输入起点的切线方向向量(-1, 0, 0); 在【Ending tangent】文本框中输入终点的切线方向向量(-1, -0.25, 0)。单击【OK】按钮, 得到如图 10.12 所示的曲线。

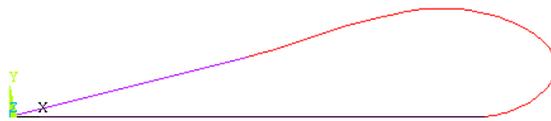


图10.12 生成的样条曲线

(9) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines** 菜单, 然后选中机翼的边线, 单击【OK】按钮, 即可生成机翼的截面。如图 10.13 所示。

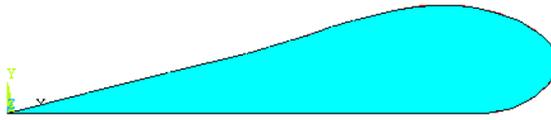


图10.13 生成截面

(10) 下面进行网格划分。单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool** 菜单, 接着单击【Mesh Tool】窗口中【Size Controls】栏里【global】旁边的 **Set** 按钮, 会弹出单元大小设置对话框, 如图 10.14 所示。在【Element edge length】文本框中输入【0.25】, 并单击【OK】按钮。

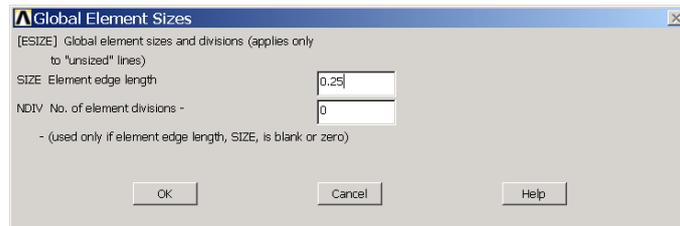


图10.14 总体单元尺寸设置

(11) 单击【Mesh Tool】窗口中的  按钮，选择图形视窗中生成的机翼截面，单击【OK】按钮，可对面进行网格划分。如图 10.15 所示。

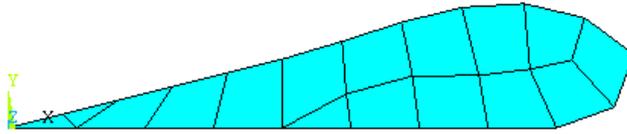


图10.15 截面网格划分结果

说明：网格划分过程中可能会出现警告对话框，提示当前划分网格超过网格检查设置的容许值，用户可不予理会，单击【CLOSE】按钮关闭即可。

(12) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Elem Ext Opts 菜单，弹出如图 10.16 所示的对话框。在【Element type number】下拉列表框中选择【2 SOLID45】，在【No. of element divisions】文本框中输入【10】，然后单击【OK】按钮确认。

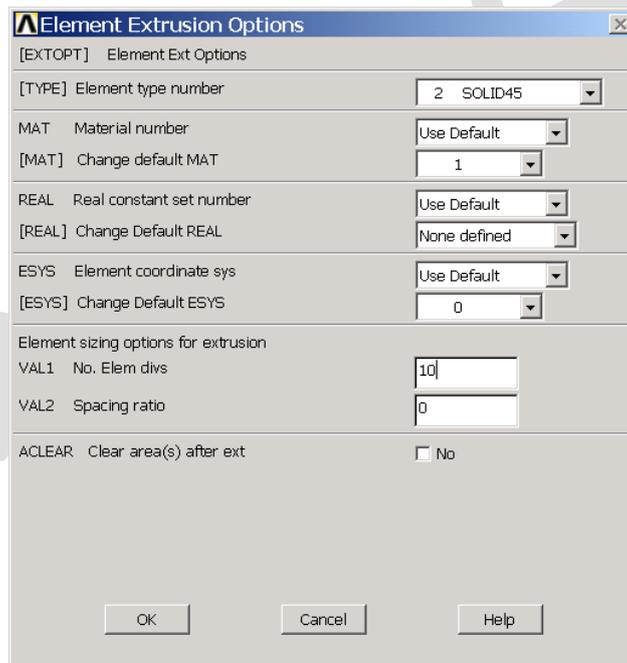


图10.16 单元延伸设置

(13) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset 菜单，弹出图形拾取对话框，用鼠标选中刚才划分好的机翼截面，单击【OK】按钮，接着弹出如图 10.17 所示的对话框。



图10.17 单元延伸对话框

(14) 在【Offsets for extrusion】文本框中输入【0】、【0】和【10】，表示沿 Z 轴方向延伸 10 个单位，单击【OK】按钮可完成网格划分操作。单击右侧工具栏中的  和  按钮，切换到三维视角，如图 10.18 所示。

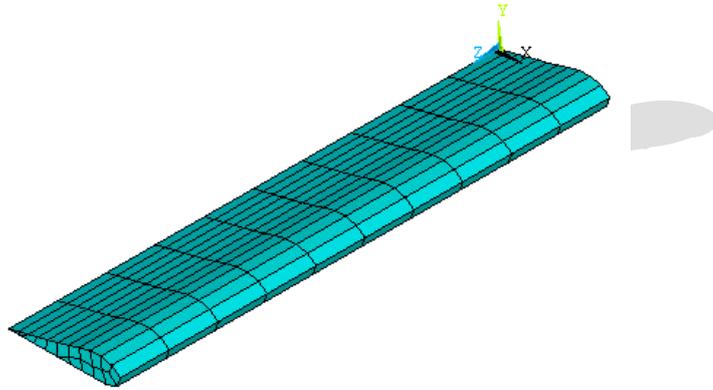


图10.18 机翼三维网格模型

(15) 下面进行求解器相关设置。单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，弹出【New Analysis】对话框，如图 10.19 所示。选择【Modal】单选按钮，然后单击【OK】按钮。

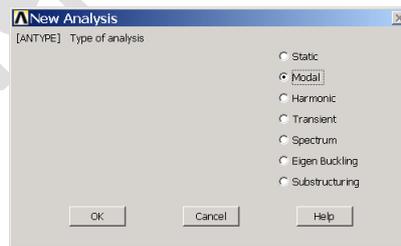


图10.19 选择分析类型

(16) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，然后用鼠标选择机翼任一个端面，单击【OK】按钮，接着弹出如图 10.20 所示的对话框。在【DOFs to be constrained】文本框中选择【ALL DOF】，然后单击【OK】按钮。

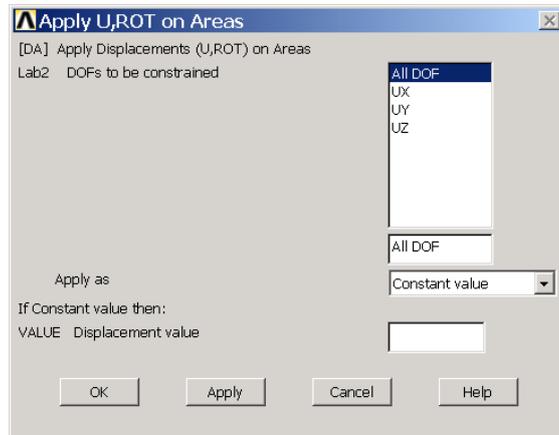


图10.20 施加面约束

(17) 单击 **Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options** 菜单，弹出【Modal Ansys】对话框，如图 10.21 所示。在【Mode extraction method】单选列表框中选择【Block Lanczos】单选按钮，在【No. of modes to extract】文本框中输入【5】，在【No. of modes to expand】文本框中输入【5】，单击【OK】按钮。

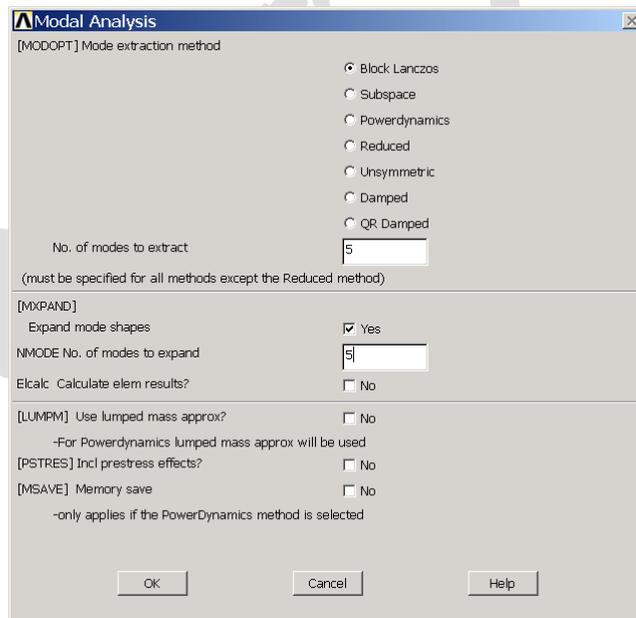


图10.21 模态分析选项设置

(18) 接着弹出如图 10.22 所示的对话框。该对话框的功能是设定起止频率，此例中保持默认，单击【OK】即可。

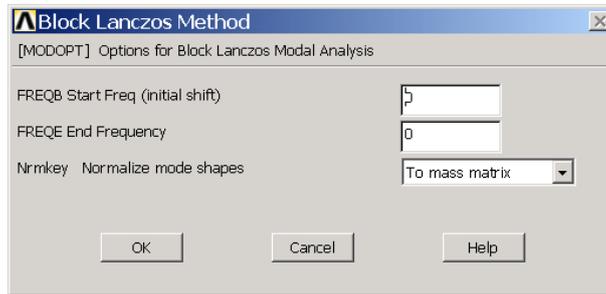


图10.22 设定频率范围

(19) 下面进行求解。单击 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 菜单，开始计算。计算结束后，会弹出一个确认对话框，如图 10.23，单击【Close】按钮即可。



图10.23 计算结束确认对话框

(20) 下面进入后处理。单击 **Main Menu>General Postproc>Results Summary** 菜单，将弹出列表显示模态结果对话框，如图 10.24 所示。

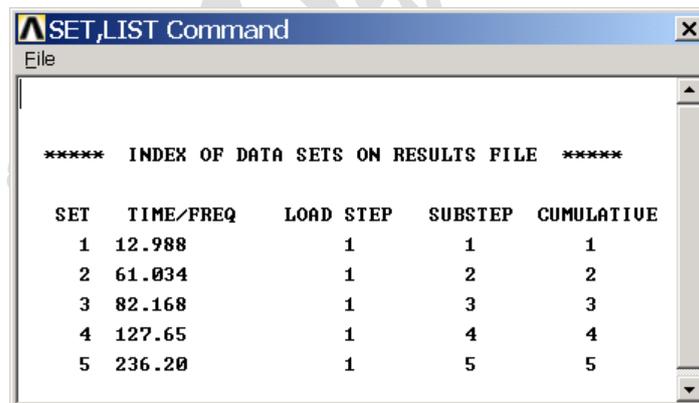


图10.24 模态计算结果

(21) 单击 **Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set** 菜单，读取第一模态的结果，然后单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Animate】|【Mode Shape】菜单，弹出如图 10.25 所示的对话框。保持默认设置，单击【OK】按钮可显示一阶模态的响应动画。

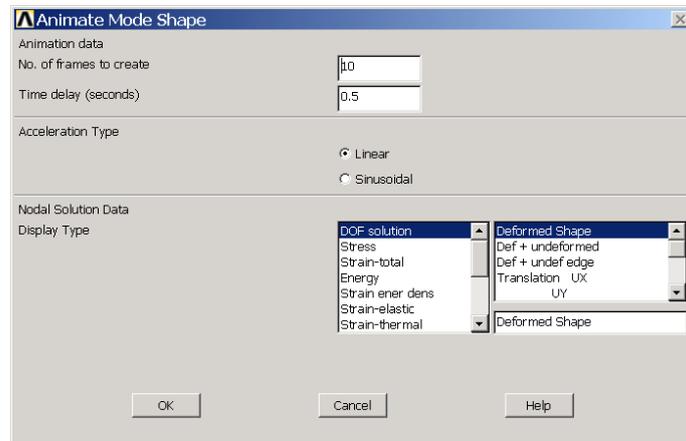


图10.25 动画显示模态结果对话框

(22) 单击【CLOSE】按钮关闭动画控制对话框。接着单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set 菜单，读取下一阶模态数据，重复上一步操作可显示模态动画。如此继续，可查看生成 5 个模态的响应动画。

3. 命令流方式

用户还可以使用以下命令流替代 GUI 的操作：

```

/FILNAM,MODAL
/TITLE,Modal Analysis of a Model Airplane Wing

/PREP7
ET,1,PLANE42          !定义 PLANE42 单元
ET,2,SOLID45         !定义 SOLID45 单元
MP,EX,1,38000
MP,DENS,1,8.3E-5
MP,NUXY,1,.3
K,1                  !定义关键点
K,2,2
K,3,2.3,.2
K,4,1.9,.45
K,5,1,.25
LSTR,1,2             !生成直线
LSTR,5,1
BSPLIN,2,3,4,5,,,,-1,,,,-1,-.25  !生成样条曲线
AL,1,3,2
ESIZE,.25
AMESH,1
ESIZE,,10
TYPE,2
VEXT,ALL,,,,,10
/VIEW,,1,1,1
/ANG,1
/REP
EPLOT
FINISH

/SOLU
ANTYPE,MODAL        !选择模态分析

```

```
MODOPT, SUBSP, 5          !选择模态提取方法和模态数
ESEL, U, TYPE, , 1       !选择单元类型 1
NSSEL, S, LOC, Z, 0
D, ALL, ALL
NSSEL, ALL
MXPAND, 5                !扩展模态
SOLVE
FINISH

/POST1
SET, LIST, 2
SET, FIRST
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
SET, NEXT
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
FINISH
/EXIT
```

10.2 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析是确定随时间变化载荷（例如爆炸）作用下结构响应的技术。它需要输入一个作为时间函数的荷载，可以输出随时间变化的位移和其它的导出量，如：应力和应变等。

10.2.1 瞬态动力分析简介

瞬态动力分析可以应用在以下设计中：

- 承受各种冲击载荷的结构，如：汽车中的门和缓冲器、建筑框架以及悬挂系统等；
- 承受各种随时间变化载荷的结构，如：桥梁、地面移动装置以及其它机器部件；
- 承受撞击和颠簸的家庭和办公设备，如：移动电话、笔记本电脑和真空吸尘器等。

ANSYS 允许在瞬态动力分析中包括各种类型的非线性，如大变形、接触、塑性等。求解瞬态运动方程主要有两种解法：模态叠加法和直接积分法。

和其它分析一样，在 ANSYS 瞬态动力分析也有 GUI 和命令流两种操作方式。本节中将举例进行说明

10.2.2 瞬态动力分析步骤

瞬态动力分析主要由以下几步组成：

- 建模

- 选择分析类型和选项
- 定义边界条件和初始条件
- 施加时间历程载荷并求解
- 查看结果

1. 建模

这一步的操作主要在前处理器（PREP7）中进行，包括定义单元类型、单元实常数、材料参数及几何模型。建模过程中需要注意以下两点：

- 瞬态动力分析允许各种非线性；
- 必须输入密度（DENS）。

建模过程的典型命令流如下：

```
/PREP7
ET, ...
MP, EX, ...
MP, DENS, ...
!建立几何模型
...
!划分网格
...
```

2. 选择分析类型和选项

这一步主要是选择分析类型及瞬态动力分析的一些选项设置。

选择模态分析类型，可单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，在弹出的【New Analysis】对话框中选择【Transient】单选按钮即可。如图 10.26 所示。

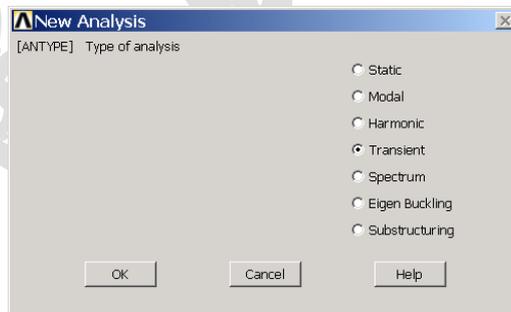


图10.26 选择瞬态动力分析

单击【OK】按钮，接着会弹出如图 10.27 所示的对话框。在【Solution】单选列表框中选择适当的解法，默认为【Full】（完整矩阵方法）。它允许大应变、应力硬化、Newton-Raphson 解法等非线性选项。选中【Use lumped mass approx?】右边的复选框，将打开集中质量矩阵选项。该选项主要用于主要用于细长梁和薄壁壳或波的传播。

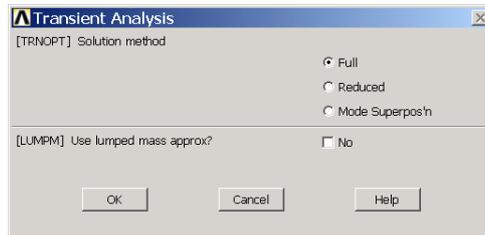


图10.27 设置瞬态分析求解方法

单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，将弹出如图 10.28 所示的【Solution Controls】对话框。选择【Transient】标签，将显示瞬态动力分析的一些选项，主要包括：【Full Transient options】（全瞬态选项）、【Damping Coefficients】（荷载步效应）和【Time Integration】（积分时间步长）选项。

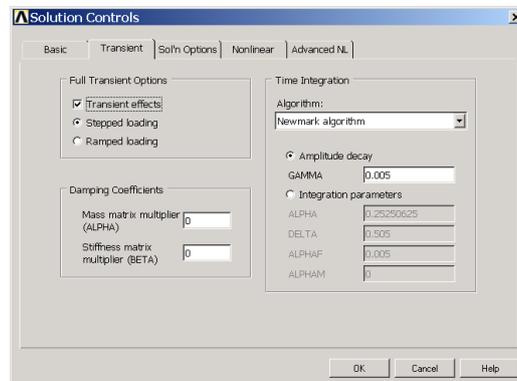


图10.28 求解控制对话框

选择分析类型和选项的典型命令流如下：

```
TRNOPT, FULL
NLGEOM, ...
SSTIF, ...
NROPT, ...
LUMPM, ...
EQSLV, ...
```

3. 定义边界条件和初始条件

边界条件为荷载或在整个瞬态过程中一直为常数的条件，如固定点约束、对称条件和重力等；初始条件是指时间 $t=0$ 时刻的条件，缺省的初始条件均为零值。

用户可单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define 菜单来施加初始条件。该操作适用于在整个物体上施加非零的初始位移或速度。本节后面的实例分析中将用到此命令，不再详述。

定义边界条件和初始条件的典型命令流如下：

```
DK, ... !或 D 或 DSYM
DL, ...
DA, ...
ACEL, ...
```

```
OMEGA, ...
NSEL, ...
IC, ...      !定义初始条件
```

4. 施加时间历程荷载并求解

时间历程荷载是随时间变化的荷载，主要有两种施加方法：列表输入法和多荷载步施加法。

列表输入法允许用户定义随时间变化的表（数组参数），采用此表作为荷载。此方法对于同时有几种不同的荷载，而每种荷载又同时有自己的时间历程时非常方便。

此方法的曲线命令流如下：

```
!首先定义荷载-时间数组
*DIM, FORCE, TABLE, 5, 1,, TIME      !表数组
FORCE(1, 0)=0, 0.5, 1, 1.01, 1.5    !时间值
FORCE(0, 1)=0, 22.5, 10, 0, 0       !荷载值
!将力数组定义到指定的节点上
NSEL, ...                             !选择指定的节点
F, ALL, FZ, %FORCE%                  !在所有选择节点上定义表荷载
NSEL, ALL
...
```

多荷载步施加法允许用户在单个的荷载步中施加荷载-时间曲线中的一段荷载，不必使用数组参数，只需施加每段荷载并且求解该荷载步或者将其写入一个荷载步文件。本节后面的实例分析中将用此方法，不再详述。

5. 查看结果

瞬态动力学分析生成的结果将被保存在文件 `Jobname.RST` 中，可以用时间历程后处理器（POST26）和通用后处理器（POST1）得到如下结果：

- 绘制结构中某些特殊点的结果-时间曲线；
- 确定临界时间点；
- 查看临界时间点时整个结构的结果。

10.2.3 瞬态动力分析实例

在此例中，将用 **Reduced**（缩减）法确定一个随时间有限增加荷载作用下的瞬态响应问题。

1. 问题描述

一个钢梁上支撑一个集中质量块，并受有动态荷载作用。钢梁的长度和几何参数如图 10.29 所示。梁上受动态荷载 $F(t)$ ，并随着时间 t 逐渐增加。梁的自重忽略不计，试确定最大位移响应 t_{\max} 和响应 y_{\max} 的时间，并确定梁上的最大弯曲应力 σ_{bend} 。

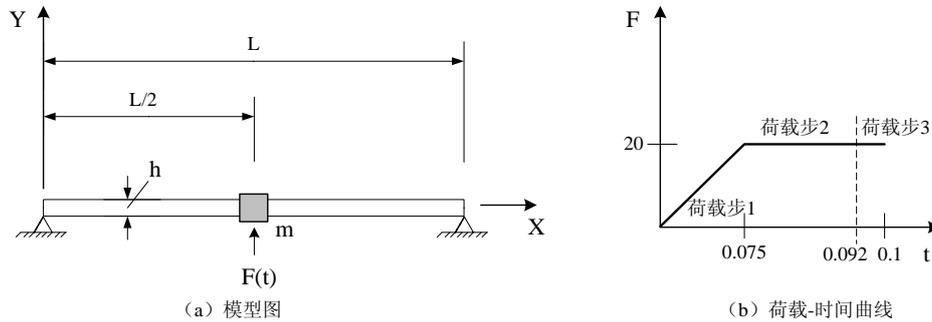


图10.29 钢梁模型示意图

材料参数如下:

$$E=30 \times 10^3 \text{ ksi}$$

$$m=0.0259067 \text{ kips-sec}^2/\text{in}$$

几何参数如下:

$$L=800.6 \text{ in}^4$$

$$h=18 \text{ in}$$

由于分析求解中梁并没有得到使用, 因此其面积可任意输入; 在第一荷载步中可以使用静态分析, 并且在分析中可以利用模型的对称性。

2. GUI操作步骤

由于动力分析的重点和难点不在建模部分, 本例将略去建模步骤的操作, 读者可直接打开本书所附光盘中的模型数据库进行操作, 或直接按命令流方式生成模型。具体操作如下:

(1) 复制光盘目录“\ch10\ex2\”中的文件到工作目录, 启动 ANSYS, 单击工具栏上的  按钮, 选择数据库文件【ex2.db】, 单击【OK】按钮, 恢复数据库。结果如图 10.30 所示。



图10.30 钢梁模型

(2) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单, 弹出如图 10.31 所示的对话框。选择【Transient】单选按钮, 单击【OK】按钮。

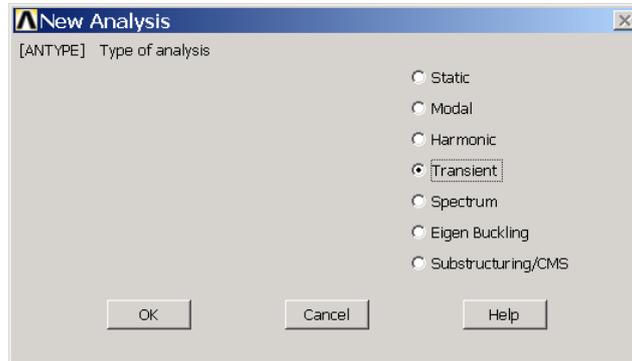


图10.31 选择分析类型

(3) 接着弹出如图 10.32 所示的【Transient Analysis】对话框。选中【Reduced】单选按钮，并单击【OK】按钮确认。

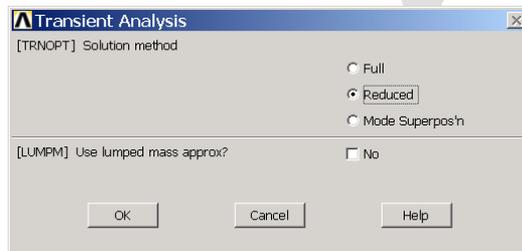


图10.32 选择分析方法

(4) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，弹出如图 10.33 所示的【Reduced Transient Analysis】对话框。在【Damping effects】下拉列表中选择【Ignore】，然后单击【OK】按钮。

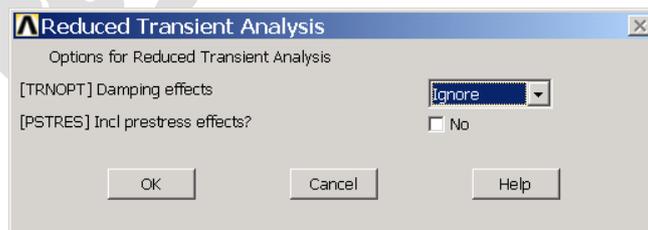


图10.33 缩减法选项设置

(5) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step 菜单，弹出如图 10.34 所示的【Time and Time Step Options】对话框。在【Time step size】文本框中输入【0.004】，然后单击【OK】按钮。

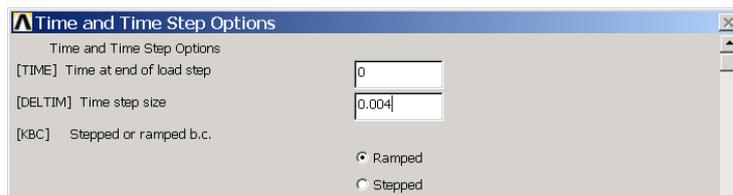


图10.34 设置时间步选项

(6) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 菜单, 弹出图形拾取对话框, 选择节点 1 并单击【Apply】按钮, 弹出【Apply U,ROT on Nodes】对话框, 选中【UY】, 然后单击【Apply】按钮。

(7) 接着选择节点 3, 然后单击【OK】按钮, 弹出【Apply U,ROT on Nodes】对话框, 选中【UX】和【UY】, 然后单击【OK】按钮。

(8) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes 菜单, 弹出图形拾取对话框, 在图形视窗中选择节点 2, 单击【OK】按钮, 接着弹出【Apply F/M on Nodes】对话框。在【Direction of force/mom】下拉菜单中选中【FY】, 单击【OK】按钮。

(9) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File 菜单, 弹出如图 10.35 所示的【Controls for Database and Results File Writing】对话框。选中【Every Nth substp】单选按钮, 然后在【Value of N】文本框中输入【1】, 单击【OK】按钮。

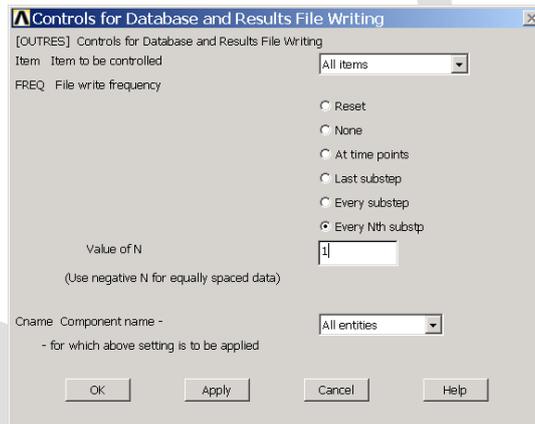


图10.35 控制输出

(10) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单, 求解最初荷载步。

(11) 再次单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step 菜单, 弹出【Time and Time Step Options】对话框, 在【Time at end of load step】文本框中输入【0.75】, 然后单击【OK】按钮。如图 10.36 所示。

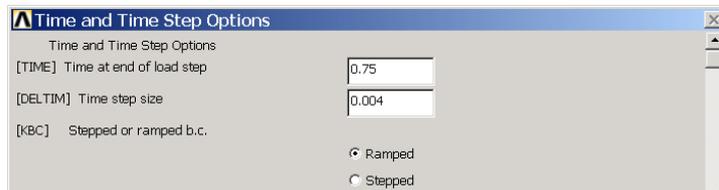


图10.36 时间步选项

(12) Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes 菜单, 弹出图形拾取对话框, 选择节点 2, 并单击【OK】按钮。接着弹出【Apply F/M on Nodes】对话框, 在【Force /moment value】文本框中输入 20, 单击【OK】按钮。

(13) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，求解第二荷载步。

(14) 再次单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step 菜单，弹出【Time and Time Step Options】对话框，在【Time at end of load step】文本框中输入【0.1】，并单击【OK】按钮。

(15) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，求解第三荷载步。求解完成后，单击 Main Menu>Finish 菜单。

(16) 下面运行 Expansion Pass 并求解。单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>ExpansionPass 菜单，弹出如图 10.37 所示的【Expansion Pass】对话框。选择【Expansion pass】右边的复选框为【On】，然后单击【OK】按钮。

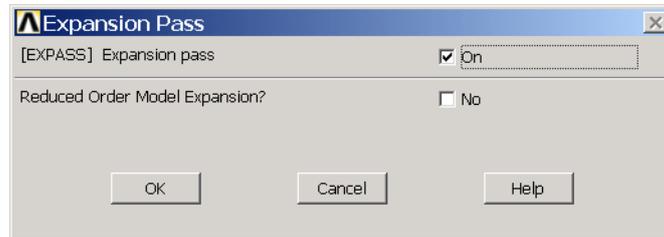


图10.37 打开Expansion Pass

(17) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand>By Time/Freq 菜单，弹出如图 10.38 所示的【Expand Single Solution by Time/Frequency】对话框。在【Time-point/Frequency】文本框中输入【0.092】，单击【OK】按钮。

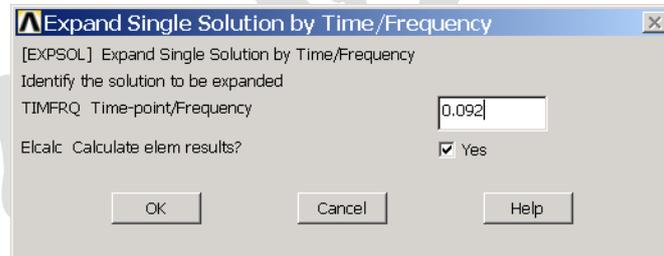


图10.38 设置最大响应时间

(18) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，进行求解。求解完毕后单击 Main Menu>Finish 菜单。

(19) 下面进行结果查看。单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>File 菜单，弹出如图 10.39 所示的【File Settings】对话框。在【Number of variables】文本框中输入【0】，在【File containing data】文本框中输入【ex2.rdsp】然后单击【OK】按钮。



图10.39 读取数据文件

(20) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables 菜单，弹出【Defined Time-History Variables】对话框。单击【Add...】按钮，接着弹出【Add Time-History Variable】对话框，使用【Nodal DOF Result】的默认设置并单击【OK】按钮。

(21) 接着弹出【Define Nodal Data】对话框，如图 10.40 所示。在【Node number】文本框中输入【2】，在【User-specified label】文本框中输入【NSOL】，在【Item,Comp Data item】列表框中选择【Translation UY】，然后单击【OK】按钮。

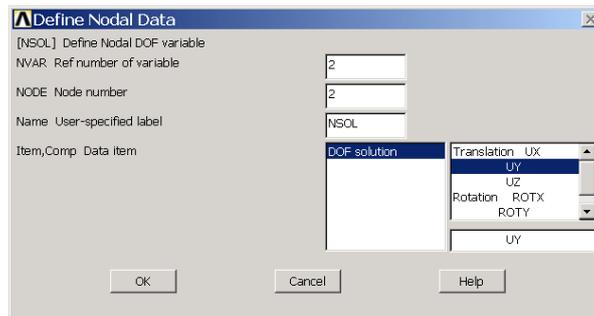


图10.40 定义变量

(22) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables 菜单，在【1st variable to graph】文本框中输入【2】，然后单击【OK】按钮，将图形显示位移-时间曲线。如图 10.41 所示。

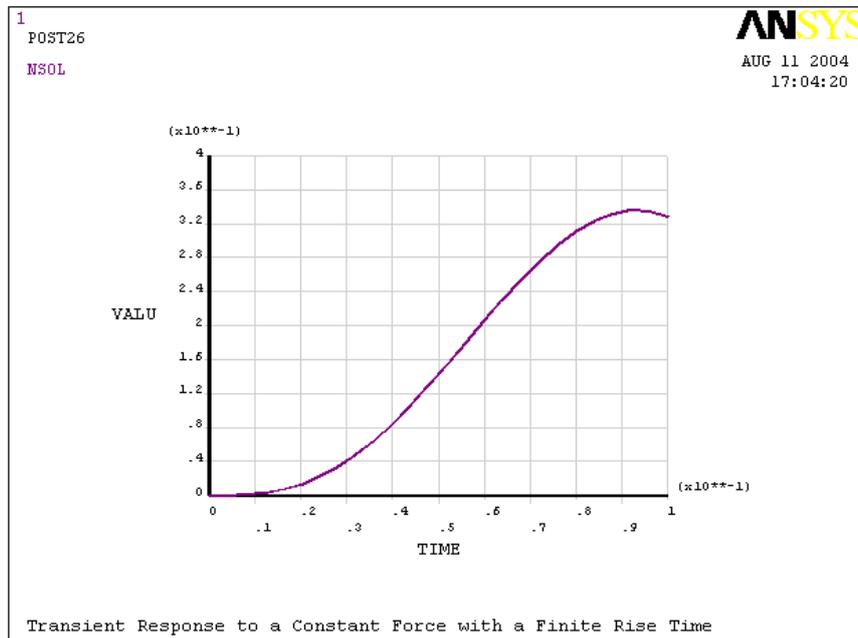


图10.41 图形显示变量

(23) 单击 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set 菜单，读取结果数据。

(24) 单击 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 菜单，弹出【Plot Deformed Shape】对话框，选择【Def+underformed】单选按钮，单击【OK】按钮，将显示

变形图如图 10.42 所示。

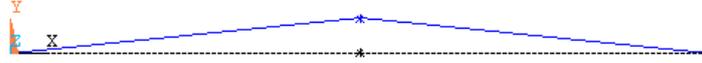


图10.42 结果变形图

3. 命令流方式

用户还可以使用以下命令流替代 GUI 的操作：

```

/PREP7
/TITLE, Transient Response to a Constant Force with a Finite Rise Time
ET,1,BEAM3           !2-D beam 单元
ET,2,MASS21,,,4     !2-D mass 单元
R,1,1,800.6,18      !梁单元常数
R,2,.0259067        !质量
MP,EX,1,30e3
N,1
N,3,240
FILL
E,1,2
EGEN,2,1,1
TYPE,2
REAL,2
E,2
M,2,UY              !定义主自由度
FINISH

/SOLU
ANTYPE,TRANS        !选择分析类型
TRNOPT,REDUC,,NODAMP !缩减法
DELTIM,.004        !积分时间步长
D,1,UY
D,3,UX,,,,,UY
OUTPR,BASIC,1
OUTRES,ALL,1
F,2,FY,0            !Time=0 时的荷载
SOLVE
TIME,.075          !第二荷载步
F,2,FY,20          !定义荷载值
SOLVE
TIME,.1            !第三荷载步
SOLVE
FINISH

/SOLU
!以下运行 expansion pass
EXPASS,ON          !打开 Expansion pass
EXPSOL,,,0.092    !最大响应时间
SOLVE
FINISH

/POST26

```

```
NUMVAR, 0
FILE, ex2, rdsp
NSOL, 2, 2, U, Y, NSOL      ! 定义变量
PLVAR, 2                    ! 图形显示变量
PRVAR, 2                    ! 列表显示变量
FINISH

/POST1
SET, FIRST                  ! 读取结果数据
PLDISP, 1                  ! 显示变形图
FINISH
```

10.3 谐响应分析

有时为了确保结构能够经受住各种不同频率的正弦荷载（如以不同速度运行的发动机等）；探测共振响应，并在必要时避免其发生。当用户遇到上述情况时就需要进行谐响应分析。

10.3.1 谐响应分析简介

谐响应分析主要是用于分析持续的周期荷载在结构系统中产生持续的周期响应，以及确定线性结构承受随时间变化并按正弦规律变化的荷载时模态响应的一种技术。谐响应分析是一种线性技术，但是也可以对有预应力的结构进行分析计算。

在 ANSYS 中进行谐响应分析主要可采用三种方法进行求解计算：**Full**（完全法）、**Reduced**（缩减法）和 **Mode Superposition**（模态叠加法）。

以上三种方法各有优缺点，但是在进行谐响应分析时，它们存在着共同的使用局限。即所有施加的荷载必须随着时间按正弦规律变化，且必须有相同的频率。另外，三种方法均不适用于计算瞬态效应，不允许有非线性特性存在。这些局限可以通过进行瞬态动力分析来克服，这时应将简谐荷载表示为有时间历程的荷载函数。

10.3.2 谐响应分析步骤

和其它动力分析类似，进行谐响应分析的步骤也可分为：建模、选择分析类型及选项、施加荷载并求解和查看结果三步。下面分别介绍：

1. 建模

这一步的操作主要在前处理器（PREP7）中进行，包括定义单元类型、单元实常数、材料参数及几何模型。和其它分析类似，不再详述。注意只能用线性单元，且要输入密度就可以了。

2. 选择分析类型及选项

这一步主要是选择分析类型及谐响应分析的一些选项设置。

选择谐响应分析类型，可单击 **Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis** 菜单，在弹出的【New Analysis】对话框中选择【Harmonic】单选按钮即可。

进行分析选项设置，可单击 **Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options** 菜单，

弹出如图 10.43 所示的对话框。

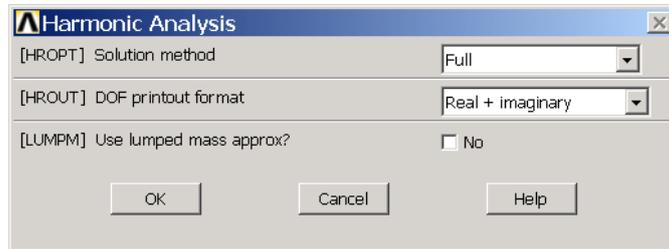


图10.43 分析选项对话框

其中：

- **【Solution method】** 用于从三种求解方法中选择一种适合的方法；
- **【DOF printout format】** 用于确定在输出文件 Jobname.OUT 中谐响应分析的位移解如何列出。
- **【Use lumped mass approx?】** 用于指定采用默认的质量矩阵形成方式还是使用集中质量矩阵近似。一般推荐在大多数应用中采用默认形成方式。

3. 施加荷载并求解

谐响应分析假定所施加的所有荷载随时间按简谐规律变化，因此指定一个完整的荷载需要输入三条信息：幅值（Amplitude）、相位角（Phase angle）和强制频率范围（forcing frequency range）。如图 10.44 所示，其含意为：

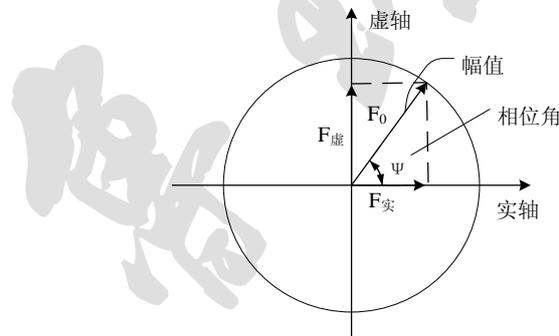


图10.44 荷载信息示意图

- 幅值（Amplitude）：指荷载的最大值；
- 相位角（Phase angle）：指荷载滞后或领先于参考时间的量度。在复平面上，相位角是以实轴为超始的角度。相位角不能直接输入，而是应该使用加载命令的 VALUE 和 VALUE2 来指定有相位角荷载的实部和虚部；
- 强制频率范围（forcing frequency range）：指简谐荷载的频率范围。

求解可单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单。

4. 查看结果

谐响应分析的结果将存储在 Jobname.RST 文件中，所有数据在解答所对应的强制频率

处按简谐规律变化。如果在结构中定义了阴尼，响应将与荷载异步，所有结果将是复数形式，并以实部和虚部存储。如果施加的是异步荷载，同样也会产生复数结果。

通常查看结果的顺序是首先使用 POST26 找到临界强制频率，然后用 POST1 在这些临界强制频率处处理整个模型。

10.3.3 谐响应分析实例

1. 问题描述

如图 10.45 所示的振动系统，在质量块 m_1 上作用一谐振力 $F_1 \sin \omega t$ ，试确定每一个质量块的振幅 X_i 和相位角 φ_i 。

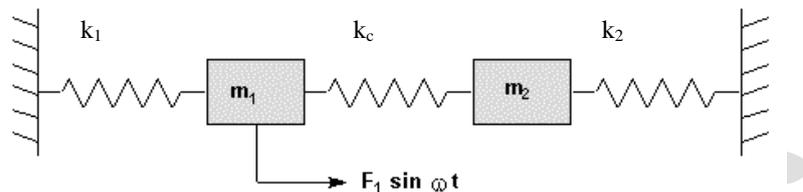


图10.45 振动系统示意

材料参数如下：

质量： $m_1 = m_2 = 0.5 \text{ lb-sec}^2/\text{in}$ ；

倔强系数： $k_1 = k_2 = k_c = 200 \text{ lb/in}$ ；

施加荷载： $F_1 = 200 \text{ lb}$ 。

弹簧长度可以任意选择，并且只是用来确定弹簧的方向。沿着弹簧的方向，在质量块上选择两个主自由度。频率的范围从 0 到 7.5Hz，其解间隔值为 $7.5/30 = 0.25\text{Hz}$ 。

2. GUI操作步骤

本例将略去建模步骤的操作，读者可直接打开本书所附光盘中的模型数据库进行操作，或直接按命令流方式生成模型。具体操作如下：

(1) 复制光盘目录“\ch10\ex3\”中的文件到工作目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的  按钮，选择数据库文件【ex3.db】，单击【OK】按钮，恢复数据库。结果如图 10.46 所示。



图10.46 振动系统模型

(2) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，弹出如图 10.47 所示的对话框。选择【Harmonic】单选按钮，单击【OK】按钮。

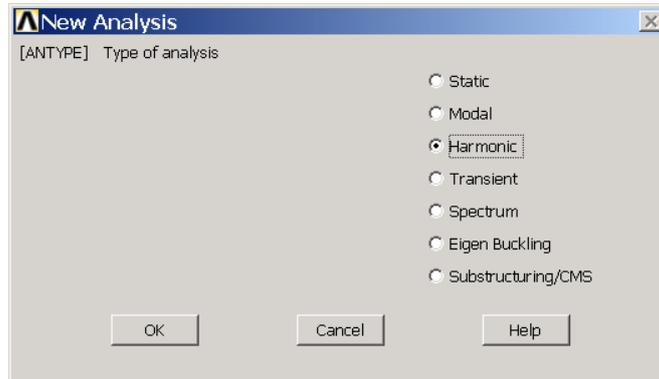


图10.47 选择谐响应分析

(3) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 菜单，弹出如图 10.48 所示的对话框。在【Solution method】下拉列表框中选择【Full】，在【DOF printout format】下拉列表框中选择【Amplitud + phase】，然后单击【OK】按钮。

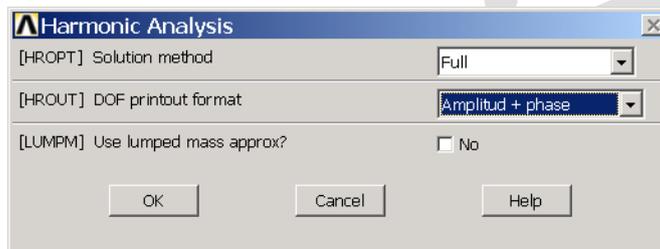


图10.48 谐响应分析选项设置

(4) 接着弹出如图 10.49 所示的【Full Harmonic Analysis】对话框。保持默认值，单击【OK】按钮即可。

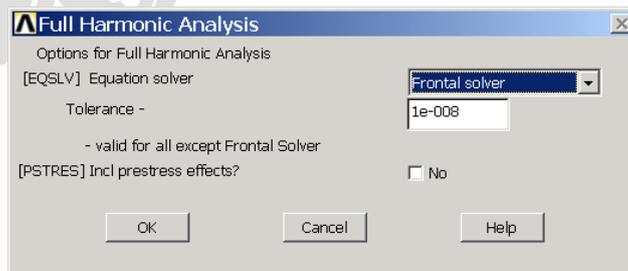


图10.49 完全法选项设置

(5) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>Solu Printout 菜单，弹出如图 10.50 所示的对话框。在【Print frequency】选项组中选择【Last substep】单选按钮，然后单击【OK】按钮确认。

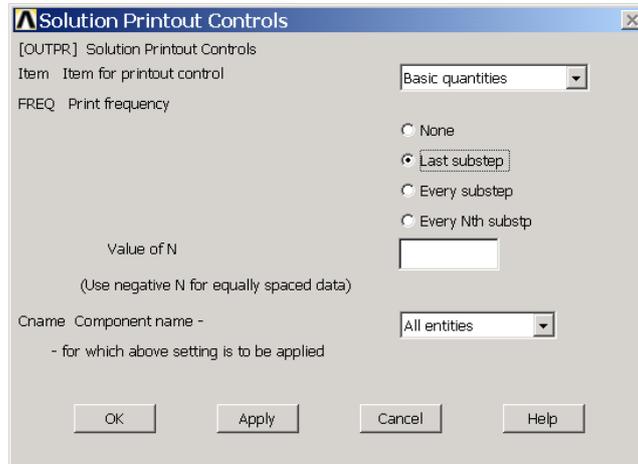


图10.50 输出控制对话框

(6) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Freq and Substps 菜单，弹出如图 10.51 所示的【Harmonic Frequency and Substep Options】对话框。在【Harmonic freq range】文本框中输入【0】和【7.5】，在【Number of substeps】文本框中输入【30】，在【Stepped or ramped b.c.】选项组中选择【Stepped】单选按钮。然后单击【OK】按钮。

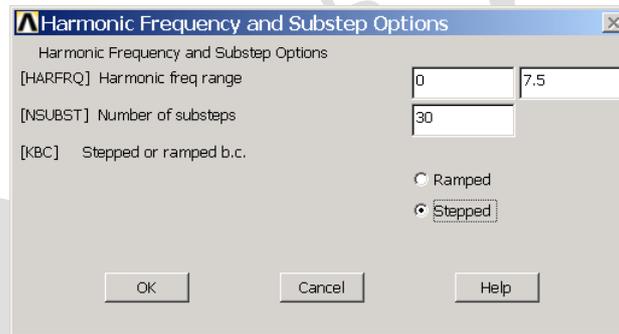


图10.51 设定频率和子步数

(7) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 菜单，弹出图形拾取对话框，单击【Pick All】按钮，弹出【Apply U,ROT on Nodes】对话框，选中【UY】，然后单击【OK】按钮。

(8) 再次单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗选择节点 1 和 4，单击【OK】按钮。接着弹出【Apply U,ROT on Nodes】对话框，选中【UX】，并取消选择【UY】项，然后单击【OK】按钮确认。

(9) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择节点 2，单击【OK】按钮。接着弹出【Apply F/M on Nodes】对话框，在【Direction of force/mom】下拉菜单中选中【FX】，在【real part of force/moment】文本框中输入【200】，单击【OK】按钮。

(10) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，进行求解计算。

(11) 下面进行结果查看。单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables 菜单，弹出【Defined Time-History Variables】对话框。单击【Add...】按钮，接着弹出【Add Time-History Variable】对话框，使用【Nodal DOF Result】的默认设置并单击【OK】按钮。

(12) 接着弹出图形拾取对话框，选择节点 2，单击【OK】按钮，弹出如图 10.52 所示的【Define Nodal Data】对话框。在【User-specified label】文本框中输入【2UX】，在【Item,Comp Data item】列表框中选中【Translation UX】。然后单击【OK】按钮。

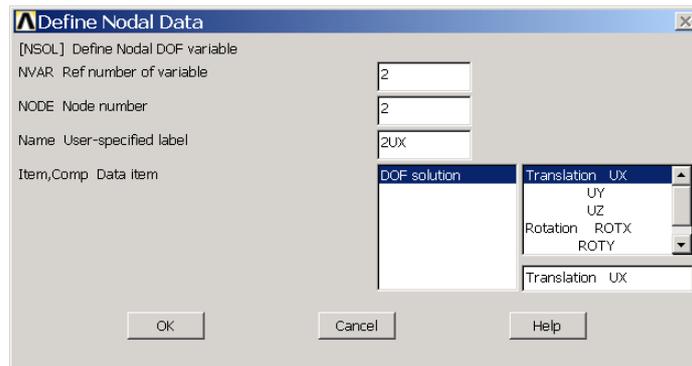


图10.52 定义变量对话框

(13) 按同样的方法定义变量 3UX 读取节点 3 的 UX 向位移结果。

(14) 单击【Utility Menu】|【PlotCtrls】|【Style】|【Graphs】|【Modify Grid】菜单，弹出如图 10.53 所示的对话框。选择【Display grid -】右边的复选框为【On】，然后单击【OK】按钮。

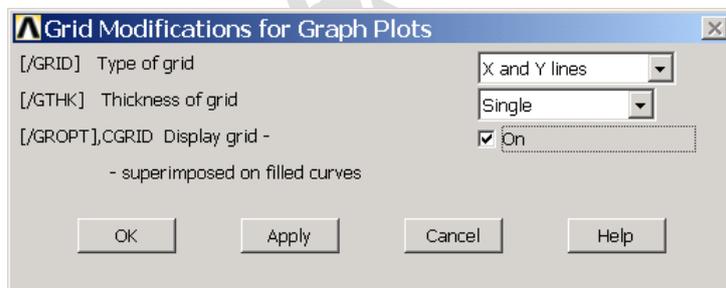


图10.53 显示网格

(15) 单击 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables 菜单，弹出【Graph Time-History Variables】对话框。在【1st variable to graph】文本框中输入【2】，在【2st variable to graph】文本框中输入【3】，单击【OK】按钮，可显示位移的时间历程曲线。如图 10.54 所示。

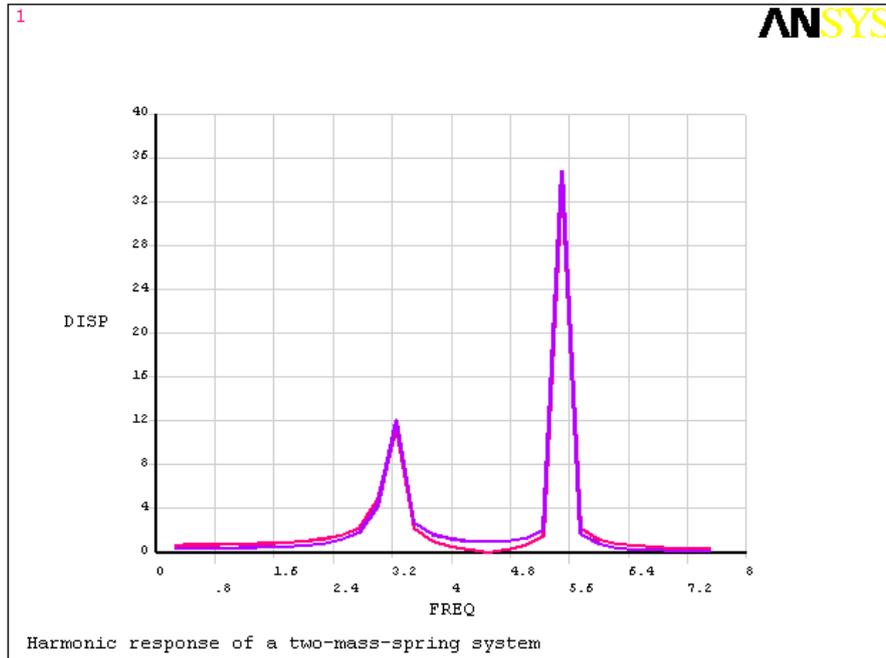


图10.54 时间历程曲线

3. 命令流方式

用户还可以使用以下命令流替代 GUI 的操作：

```

/PREP7
/TITLE, Harmonic response of a two-mass-spring system
ET,1,COMBIN14,,,2
ET,2,MASS21,,,4
R,1,200                !弹簧实常数
R,2,.5                 !质量=0.5
N,1
N,4,1
FILL
E,1,2
E,2,3                 !弹簧单元
E,3,4                 !弹簧单元
TYPE,2
REAL,2
E,2                   !质量单元
E,3                   !质量单元
FINISH

/SOLU
ANTYPE,HARMIC        !选择谐响应分析
HROPT,FULL          !选择完全法
HROUT,OFF           !以幅值和相位角的形式输出结果
OUTPR,BASIC,1
NSUBST,30          !在频率范围内迭代 30 次
HARFRQ,,7.5       !频率范围从 0 到 7.5 HZ

```

```
KBC,1                                !阶跃边界条件
D,1,UY,,,4
D,1,UX,,,4,3
F,2,FX,200
SOLVE
FINISH

/POST26
NSOL,2,2,U,X,2UX                      !存储 UX 位移
NSOL,3,3,U,X,3UX
/GRID,1                                !打开网格显示
/AXLAB,Y,DISP                          !定义 Y 轴标签为 disp
PLVAR,2,3                               !显示变量 2 和 3
FINISH
```

解

第十一章 ANSYS 8.1 热力学分析

热力学分析是用于计算一个系统或部件的温度分布及其它热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。热力学分析在许多工程应用中扮演重要角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。

ANSYS 热力学分析基于能量守恒原理的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其它热物理参数。在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 五种产品中包含热分析功能，其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。

热力学分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外，还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

ANSYS 热力学分析主要分为以下两类：

- 稳态传热：系统的温度场不随时间变化；
- 瞬态传热：系统的温度场随时间明显变化。

本章将分别介绍这两种分析。

11.1 热分析的基础知识

要进行热力学分析需要用户具有热力学分析的基础知识，本节简单回顾一下热力学分析的基础知识。已经掌握了这部分知识的读者跳过本节的学习。

11.1.1 符号与单位

热力学中常用的符号和单元如表 11.1 所示。

表11.1 热力学分析中的符号与单位

项目	国际单位	英制单位	ANSYS 代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	Kg	lbm	
温度	°C	°F	
力	N	lbf	
能量（热量）	J	BTU	
功率（热流率）	W	BTU/sec	
热流密度	W/m ²	BTU/sec-ft ²	
生热速率	W/m ³	BTU/sec-ft ³	
导热系数	W/m-°C	BTU/sec-ft-°F	KXX
对流系数	W/m ² -°C	BTU/sec-ft ² -°F	HF
密度	Kg/m ³	lbm/ft ³	DENS
比热	J/Kg-°C	BTU/lbm-°F	C
焓	J/m ³	BTU/ft ³	ENTH

11.1.2 传热学经典理论回顾

热力学分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律，其描述如下：

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）有

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

其中：

Q—— 热量；

W—— 做功；

ΔU ——系统内能；

——系统动能；

ΔPE ——系统势能；

对于大多数工程传热问题： $\Delta KE = \Delta PE = 0$ ；

通常考虑没有做功： $W = 0$ ，则： $Q = \Delta U$ ；

对于稳态热分析： $Q = \Delta U = 0$ ，即流入系统的热量等于流出的热量；

对于瞬态热分析： $q = \frac{dU}{dt}$ ，即流入或流出的热传递速率 q 等于系统内能的变化。

11.1.3 热传递的方式

1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循付里叶定律： $q'' = -k \frac{dT}{dx}$ ，式中 q'' 为热流密度 (W/m^2)， k 为导热系数 ($W/m \cdot ^\circ C$)，“-”表示热量流向温度降低的方向。

2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述： $q'' = h(T_s - T_b)$ ，式中 h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等）， T_s 为固体表面的温度， T_b 为周围流体的温度。

3. 热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其它物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算：，式中 q 为热流率， ϵ 为辐射率（黑度）， σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数，约为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ， A_1 为辐射面 1 的面积， F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数， T_1 为辐射面 1 的绝对温度， T_2 为辐射面 2 的绝对温度。由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

4. 稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量： $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$ ，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）

$$[K]\{T\} = \{Q\}$$

其中：

$[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

$\{T\}$ 为节点温度向量；

$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成；

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 以及 $\{Q\}$ 。

5. 瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为（以矩阵形式表示）：

其中：

$[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

$[C]$ 为比热矩阵，考虑系统内能的增加；

$\{T\}$ 为节点温度向量；

为温度对时间的导数；

$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

11.2 稳态热分析

11.2.1 稳态传热的定义

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析以前，进行稳态热分析用于确定初始温度分布。稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。

11.2.2 热分析的单元

在 ANSYS 中，热分析涉及到的单元有大约 40 种，其中纯粹用于热分析的有 14 种：线性 4 种如下：

- LINK32：二维二节点热传导单元
- LINK33：三维二节点热传导单元
- LINK34：二节点热对流单元

- LINK31: 二节点热辐射单元

二维实体 5 种如下:

- PLANE55: 四节点四边形单元
- PLANE77: 八节点四边形单元
- PLANE35: 三节点三角形单元
- PLANE75: 四节点轴对称单元
- PLANE78: 八节点轴对称单元

三维实体 3 种如下:

- SOLID87: 六节点四面体单元
- SOLID70: 八节点六面体单元
- SOLID90: 二十节点六面体单元

壳单元 1 种: SHELL57

点单元 1 种: MASS71

有关单元的详细解释, 请读者参考 ANSYS 的帮助文档。

11.2.3 ANSYS 稳态热分析的基本过程

ANSYS 进行稳态热分析可分为三个步骤:

- 建模
- 施加荷载并计算
- 查看结果

1. 建模

这一步主要是在前处理器 (PREP7) 中进行, 包括定义单元类型和单元选项、定义实常数、定义材料性能参数和创建几何模型并划分网格等。

其中, 定义材料热性能参数, 对于稳态传热, 一般只需定义导热系数, 它可以是恒定的, 也可以随温度变化。

2. 施加荷载并计算

这一步主要是在求解模块 (SOLU) 中进行, 包括定义分析类型、确定分析选项、施加荷载及荷载步等。

定义分析类型, 可单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单, 弹出如图 11.1 所示的对话框。在【Type of analysis】单选框中选【Steady-State】单选按钮, 单击【OK】按钮即可。

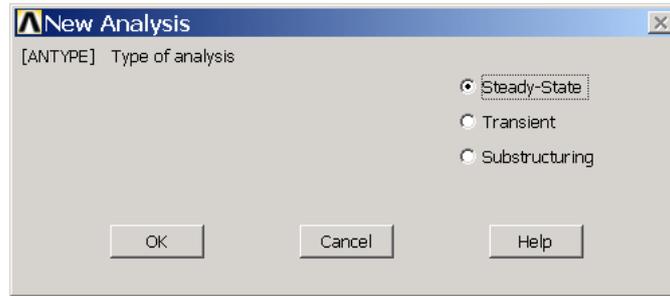


图11.1 定义分析类型

确认分析选项，可单击 **Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options** 菜单，弹出如图 11.2 所示的【Static or Steady-State Analysis】对话框，如图 11.2 所示。在【Newton – Raphson option】下拉列表框中选择牛顿-辛普森算法（当进行非线性分析时才需设置）；在【Equation solver】下拉列表框中选择求解器；在【Temperature difference】文本框中输入绝对零度值，在进行热辐射分析时，要将目前的温度值换算为绝对温度。如果使用的温度单位是摄氏度，此值应设定为【273】，如果使用的是华氏度，则为【460】。

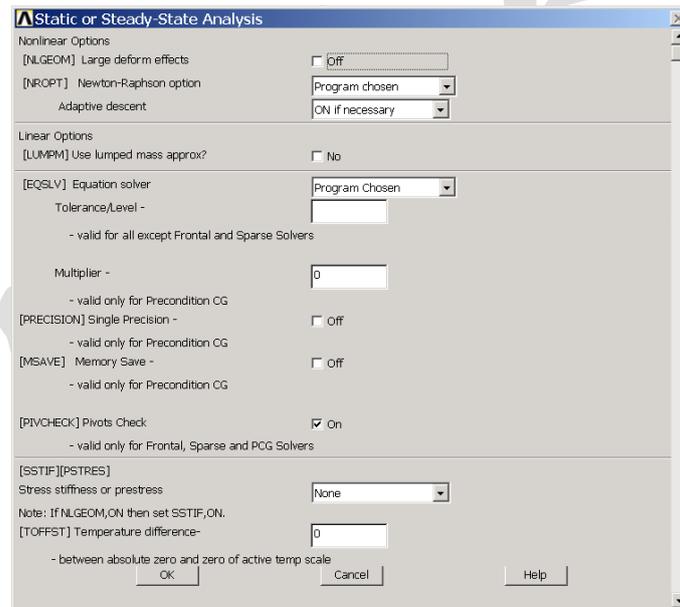


图11.2 稳态热分析选项

可以直接在实体模型或单元模型上施加五种载荷（边界条件）：

- 恒定温度

恒定温度通常作为自由度约束施加于温度已知的边界上。单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Temperature>On Nodes** 菜单，在节点上施加温度边界条件。

- 热流率

热流率作为节点集中载荷，主要用于线单元模型中（通常线单元模型不能施加对流或

热流密度载荷)，如果输入的正值，代表热流流入节点，即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上则 ANSYS 读取温度值进行计算。

单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Heat Flow>On Nodes** 菜单，可在节点上施加热流率。

注意：如果在实体单元的某一节点上施加热流率，则此节点周围的单元要密一些，在两种导热系数差别很大的两个单元的公共节点上施加热流率时，尤其要注意。此外，尽可能使用热生成或热流密度边界条件，这样结果会更精确些。

- 对流

对流边界条件作为面载施加于实体的外表面，计算与流体的热交换，它仅可施加于实体和壳模型上，对于线模型，可以通过对流单元 LINK34 考虑对流。

单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Convection>On Nodes** 菜单，可在节点上施加对流。

- 热流密度

热流密度也是一种面载。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOTRAN CFD 计算得到时，可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果输入的正值，代表热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。热流密度与对流可以施加在同一外表面，但 ANSYS 仅读取最后施加的面载进行计算。

单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Heat Flux>On Nodes** 菜单，可在节点上施加热流密度。

- 生热率

生热率作为体载施加于单元上，可以模拟化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。

单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Heat Generat>On Nodes** 菜单，可在节点上施加生热率。

3. 查看结果

ANSYS 将热分析的结果将写入 *.rth 文件中，它包含基本结果数据和导出结果数据。基本结果数据为节点温度；导出结果数据有：节点及单元的热流密度、节点及单元的热梯度、单元热流率和节点的反作用热流率等。

对于稳态热分析，可以使用 POST1 进行后处理。和基本的静力学分析一样，它也可以输出等值线图、矢量图和数据列表。

11.2.4 稳态热分析实例

本节将结合一个实例介绍用 ANSYS 进行稳态热分析的基本过程。

1. 问题描述

某一潜水艇可以简化为一圆筒，它由三层组成，最外面一层为不锈钢，中间为玻纤隔热层，最里面为铝层，筒内为空气，筒外为海水，求内外壁面温度及温度分布。沿垂直于

圆筒轴线作横截面，得到一圆环，取其中 1 度进行分析，如图 11.3 所示。

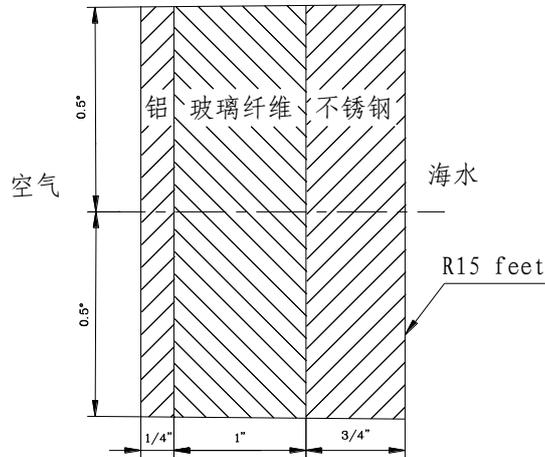


图11.3 圆筒截面示意图

基本参数如表 11.2 所示。

表11.2 圆筒基本参数

几何参数	导热系数	边界条件
筒外径: 30 feet 总壁厚: 2 inch 不锈钢层壁厚: 0.75 inch 玻纤层壁厚: 1 inch 铝层壁厚: 0.25 inch 筒长: 200 feet	不锈钢: 8.27 BTU/hr.ft. ^{°F} 玻纤: 0.028 BTU/hr.ft. ^{°F} 铝: 117.4 BTU/hr.ft. ^{°F}	空气温度: 70 °F 海水温度: 44.5 °F 空气对流系数: 2.5 BTU/hr.ft. ² .°F 海水对流系数: 80 BTU/hr.ft. ² .°F

2. GUI求解步骤

(1) 启动 ANSYS，单击【Utility Menu】|【File】|【Change Title】菜单，定义分析标题为“Steady-state thermal analysis of submarine”。

(2) 在命令流窗口中输入“/UNITS, BFT”，并按 Enter 键，定义单位制。

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，定义二维热单元 PLANE55，如图 11.4 所示。

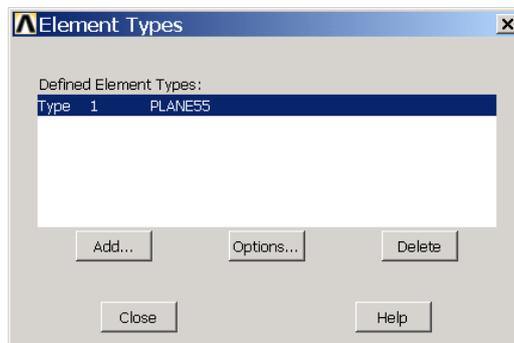


图11.4 定义单元类型

(4) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models** 菜单，弹出如图 11.5 所示的对话框。

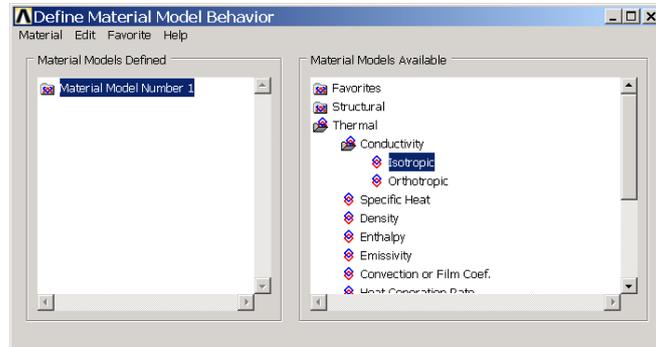


图11.5 定义材料参数

(5) 在右侧列表框中依次双击 **【Thermal】|【Conductivity】|【Isotropic】**，接着弹出如图 11.6 所示的对话框。在 **【KXX】** 文本框中输入不锈钢的导热系数 **【8.27】**，单击 **【OK】** 按钮。

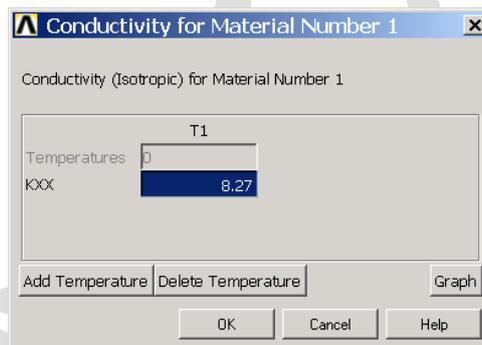


图11.6 设定导热系数

(6) 重复步骤 (4) 和 (5) 分别定义玻璃纤维和铝的导热系数为 **【0.082】** 和 **【117.4】**，如图 11.7 所示。

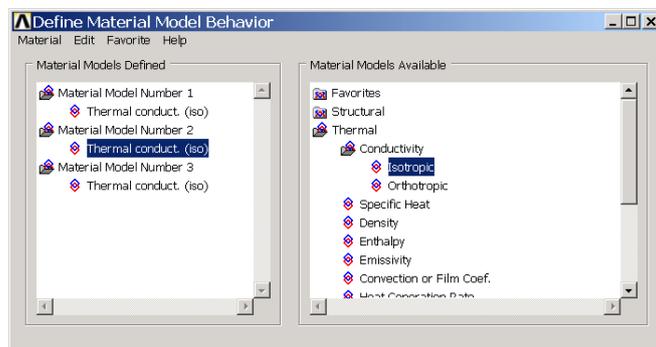


图11.7 定义好的导热系数

(7) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>By Dimensions** 菜

单，弹出如图 11.8 所示的对话框。在【RAD1】文本框中输入【15】，在【RAD2】文本框中输入【15-(.75/12)】，在【THETA1】文本框中输入【-0.5】，在【THETA2】文本框中输入【0.5】，单击【APPLY】按钮。

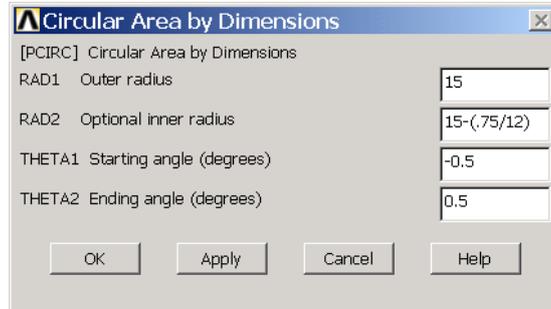


图11.8 生成圆面对话框

(8) 接着在【RAD1】文本框中输入【15-(.75/12)】，在【RAD2】文本框中输入【15-(1.75/12)】，单击【APPLY】按钮；接着在【RAD1】文本框中输入【15-(1.75/12)】，在【RAD2】文本框中输入【15-2/12】，单击【OK】按钮确认。得到如图 11.9 所示的模型。

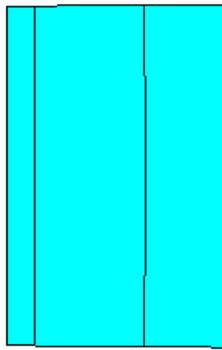


图11.9 生成的面

(9) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，单击【PICK ALL】按钮，将把所有的面粘在了一起。

(10) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines 菜单，弹出图形拾取对话框，在图形视窗中选择不锈钢层（右侧面）短边，单击【OK】按钮，在【No. of element divisions】文本框中输入【4】，单击【Apply】按钮。如图 11.10 所示。

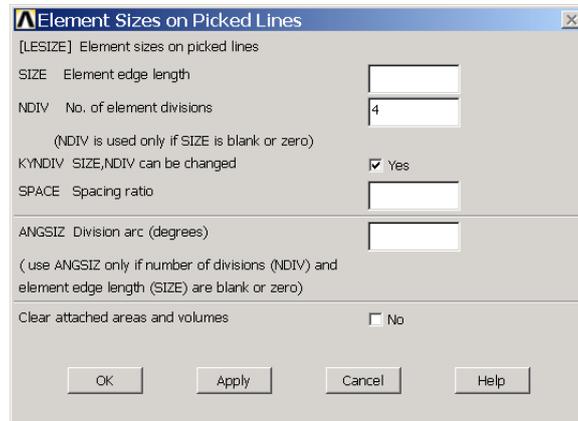


图11.10 定义单元尺寸

(11) 接着在图形视窗中选择玻璃纤维层（中间面）的短边，单击【OK】按钮，在【No. of element divisions】文本框中输入【5】，单击【Apply】按钮；再选择铝层（左侧面）的短边，单击【OK】按钮，在【No. of element divisions】文本框中输入【2】，单击【Apply】按钮；再选择四条长边，单击【OK】按钮，在【No. of element divisions】文本框中输入【16】，然后单击【OK】按钮。结果如图 11.11 所示。

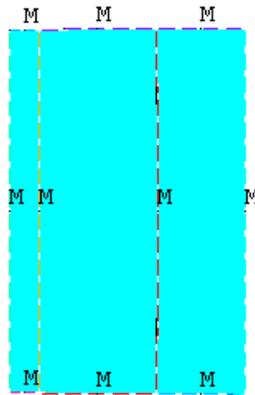


图11.11 用线控制单元尺寸

(12) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，选择不锈钢层，单击【OK】按钮，然后在【MAT】下拉列表框中选择【1】，单击【APPLY】按钮；接着选择玻璃纤维层，单击【OK】按钮，然后在【MAT】下拉列表框中选择【2】，单击【APPLY】按钮；再选择铝层，单击【OK】按钮，在【MAT】下拉列表框中选择【3】，最后单击【OK】按钮确认。

(13) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided 菜单，弹出图形拾取对话框，单击对话框中的【PICK ALL】按钮，将得到如图 11.12 所示的网格。

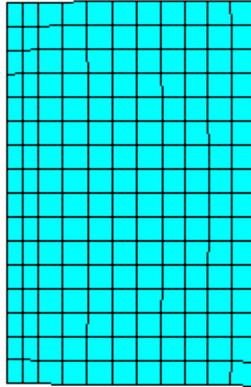


图11.12 网格划分结果

(14) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Convection>On Lines** 菜单，弹出图形拾取对话框，选择不锈钢层的外壁，单击【OK】按钮，弹出如图 11.13 所示的对话框。在【Film coefficient】文本框中输入【80】，在【Bulk temperature】文本框中输入【44.5】，单击【OK】按钮。

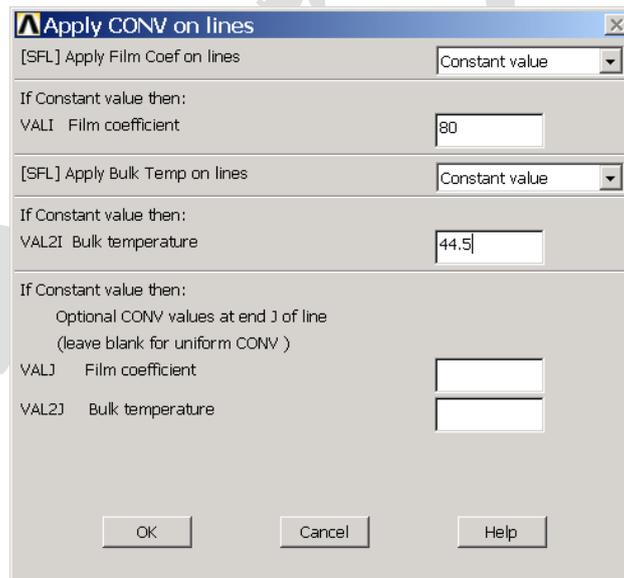


图11.13 施加荷载

(15) 重复上一步操作，选择铝层内壁，单击【OK】按钮，接着在【Film coefficient】文本框中输入【2.5】，在【Bulk temperature】文本框中输入【70】，单击【OK】按钮。结果如图 11.14 所示。

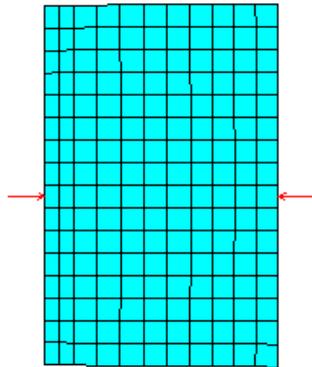


图11.14 施加了荷载后的模型

(16) 此例中保持默认的分析选项即可。单击 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 菜单，在接着弹出的对话框中单击【OK】按钮开始计算。结束后会弹出如图 11.15 所示的提示对话框，单击【CLOSE】按钮关闭即可。



图11.15 结束提示对话框

(17) 单击 **Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu** 菜单，选择温度等值线结果，单击【OK】按钮，将得到如图 11.16 所示的温度分布图。

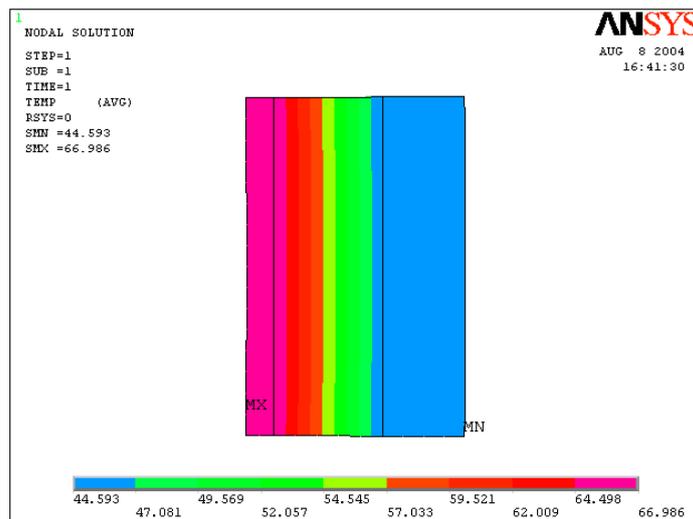


图11.16 温度等值线图

3. 命令流方式

用户还可以用以下命令流完成相同的操作:

```

/filename, Steady1
/title, Steady-state thermal analysis of submarine
/units, BFT

Ro=15                !外径 (ft)
Rss=15-(0.75/12)    !不锈钢层内径 ft)
Rins=15-(1.75/12)   !玻璃纤维层内径 (ft)
Ral=15-(2/12)       !铝层内径 (ft)
Tair=70              !潜水艇内空气温度
Tsea=44.5            !海水温度
Kss=8.27             !不锈钢的导热系数 (BTU/hr.ft.oF)
Kins=0.028           !玻璃纤维的导热系数 (BTU/hr.ft.oF)
Kal=117.4            !铝的导热系数(BTU/hr.ft.oF)
Hair=2.5             !空气的对流系数 (BTU/hr.ft2.oF)
Hsea=80              !海水的对流系数 (BTU/hr.ft2.oF)

/prep7
et,1,plane55         !定义二维热单元
mp,kxx,1,Kss         !设定不锈钢的导热系数
mp,kxx,2,Kins        !设定玻璃纤维的导热系数
mp,kxx,3,Kal         !设定铝的导热系数
pcirc,Ro,Rss,-0.5,0.5 !创建几何模型
pcirc,Rss,Rins,-0.5,0.5
pcirc,Rins,Ral,-0.5,0.5
aglu,e,all
numcmp,area
lesize,1,,,16        !设定划分网格密度
lesize,4,,,4
lesize,14,,,5
lesize,16,,,2
eshape,2             !设定为映射网格划分
mat,1
amesh,1
mat,2
amesh,2
mat,3
amesh,3

/SOLU
SFL,11,CONV,HAIR,,TAIR !施加空气对流边界
SFL,1,CONV,HSEA,,TSEA  !施加海水对流边界
SOLVE

/POST1
PLNSOL               !输出温度彩色云图
finish

```

11.3 瞬态热分析

11.3.1 瞬态传热分析的定义

瞬态热分析用于计算一个系统的随时间变化的温度场及其它热参数。在工程上一般用瞬态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。

瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似。主要的区别是瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。为了表达随时间变化的载荷，首先必须将载荷~时间曲线分为荷载步。荷载~时间曲线中的每一个拐点为一个荷载步。如图 11.17 所示。

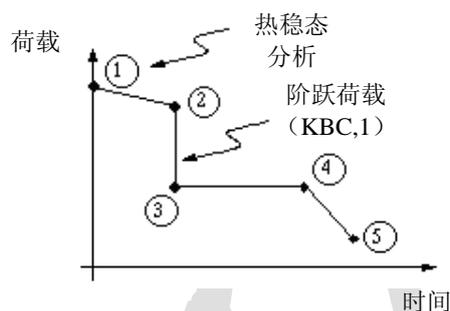


图11.17 荷载步示意图

对于每一个荷载步，必须定义荷载值及时间值，同时必须选择荷载步为渐变或阶跃。

11.3.2 瞬态热分析中的单元及命令

瞬态热分析中使用的单元与稳态热分析相同。要了解每个单元的详细说明，请读者参数 ANSYS 的帮助文档。

11.3.3 ANSYS 瞬态热分析的主要步骤

ANSYS 瞬态热分析的主要步骤有：

- 建模
- 加载求解
- 查看结果

1. 建模

这一步主要是在前处理器 (PREP7) 中进行，包括定义单元类型和单元选项、定义实常数、定义材料性能参数和创建几何模型并划分网格等。

2. 加载和求解

这一步主要是在求解模块 (SOLU) 中进行，包括定义分析类型、确定分析选项、确定瞬态初始条件、施加荷载及荷载步等。

定义分析类型，可单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，弹出如图 11.18 所示的对话框。在【Type of analysis】单选框中选中【Transient】单选按钮，单击

【OK】按钮即可。

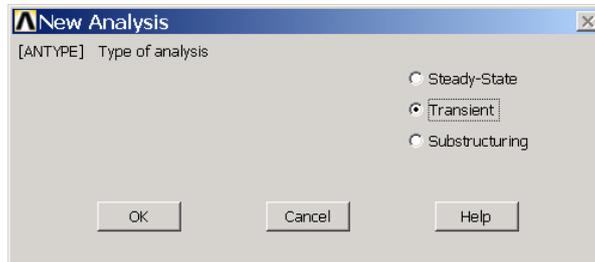


图11.18 定义分析类型

瞬态热分析的初始条件可以定义为均匀温度场或非均匀的初始温度。

定义初始均匀温度场可单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Settings>Uniform Temp** 菜单，在弹出的图 11.19 所示的对话框中输入温度值即可。



图11.19 定义初始温度场

说明：初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效；而设定节点温度将保持贯穿整个瞬态分析过程。

定义非均匀的初始温度，可单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define** 菜单来设定不同节点处的温度。如果初始温度场是不均匀的且又是未知的，就必须首先作稳态热分析确定初始条件。

荷载步选项和非线性分析类似，需要设置每个荷载步的子步数或荷载增量。每个荷载步需要多个荷载子步。时间步长的大小关系到计算的精度。步长越小，计算精度越高，同时计算的时间越长。根据线性传热传递，可以按如下公式估计初始时间步长：

$$ITS = \delta^2 / 4\alpha$$

其中 δ 为沿热流方向热梯度最大处的单元的长度， α 为导温系数，它等于导热系数除以密度与比热的乘积 ($\alpha = k/\rho c$)。

注意：如果荷载在这个荷载步是恒定的，需要设为阶跃选项；如果荷载值随时间线性变化，则要设定为渐变选项。

此外对于非线性分析，有时还需要设置迭代次数、自动时间步长和时间积分效果等。

3. 查看结果

对于瞬态热分析查看结果主要在通用后处理器(POST1)和时间历程后处理器(POST26)中进行。

在通用后处理器中可以读取某一时间点的结果，如果设定的时间点不在任何一个子步的时间点上，ANSYS 会进行线性插值。还可以读取某一荷载步的结果，然后用等值线图的

形式显示结果。

在时间历程处理器可以得到某一变量随时间变化的曲线等。

4. 相变问题

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，例如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态的问题。

相变问题需要考虑熔融潜热，即在相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热（如图 11.20 所示）。

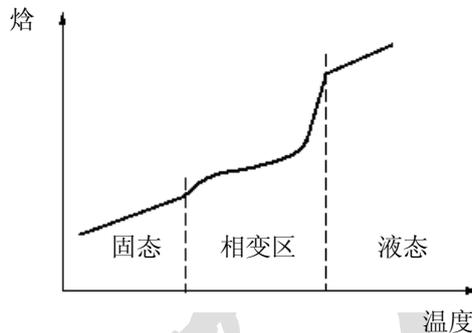


图11.20 相变示意图

焓的单位是 J/m^3 ，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int \rho c(T) dT$$

求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为【ON】。尽量选用低阶的热单元，例如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，请将单元选项 KEYOPT(1) 设置为【1】。

有时线性搜索将有助于加速相变问题的求解，打开线性搜索可单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Nonlinear 菜单。

11.3.4 瞬态热分析实例

本节将结合一个实例介绍用 ANSYS 进行瞬态热分析的基本过程。

1. 问题描述

一钢铸件及其砂模的横截面尺寸如图 11.21 所示。初始条件铸钢的温度为 2875°F ，砂模的温度为 80°F ；砂模外边界的对流边界条件：对流系数 $0.014\text{Btu/hr.in}^2.\text{F}$ ，空气温度 80°F 。求 3 个小时后铸钢及砂模的温度分布。

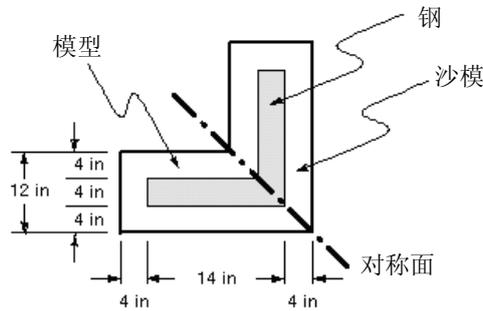


图11.21 钢铸件示意图

砂模的热物理性能如下表所示:

导热系数(KXX): 0.025 Btu/hr.in.^{°F}

密度(DENS): 0.254 lbm/in³

比热(C): 0.28 Btu/lbm.^{°F}

铸钢的热物理性能如表 11.3 所示。

表11.3 铸钢的热物理性能

	单位制	0°F	2643°F	2750°F	2875°F
导热系数	Btu/hr.in. ^{°F}	1.44	1.54	1.22	1.22
焓	Btu/in ³	0	128.1	163.8	174.2

2. GUI操作步骤

(1) 启动 ANSYS, 单击【Utility Menu】|【File】|【Change Title】菜单, 定义分析标题为“Casting Solidification”。

(2) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单, 定义二维热单元 PLANE55。如图 11.22 所示。

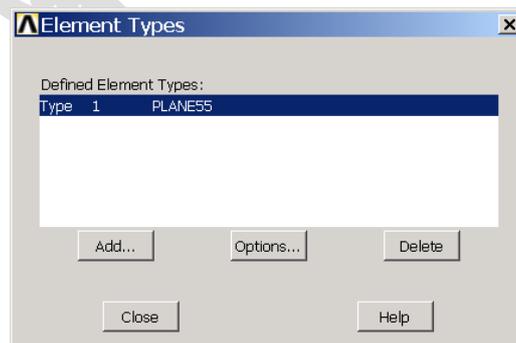


图11.22 定义单元类型

(3) 单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单, 在右侧列表框中依次双击【Thermal】|【Conductivity】|【Isotropic】, 定义砂模的导热系数 (KXX) 为【0.025】。

(4) 接着双击【Thermal】|【Specific heat】, 弹出如图 11.23 所示的对话框。在【C】

文本框中输入比热【0.28】，单击【OK】按钮。

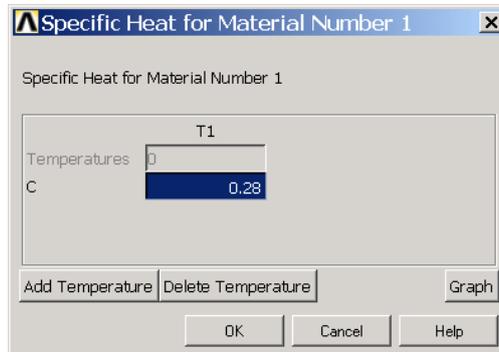


图11.23 定义砂模比热

(5) 接着双击【Thermal】|【Density】，弹出如图 11.24 所示的对话框。在【DENS】中输入砂模的密度【0.054】，单击【OK】按钮确认。

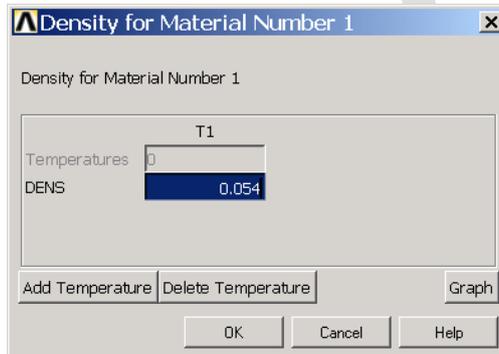


图11.24 定义砂模密度

(6) 再次单击 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 菜单，单击【File】|【New Model】菜单，定义 2 号材料。然后在右侧列表框中依次双击【Thermal】|【Enthalpy】，弹出【Enthalpy for Material Number 2】，单击 **Add Temperature** 按钮，可增加温度值。按图 11.25 设置钢模的温度表，单击【OK】按钮。

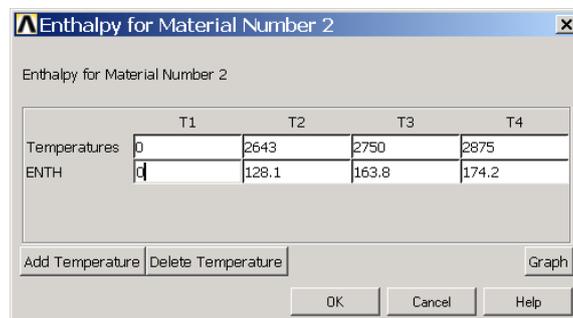


图11.25 定义钢模温度表

(7) 再在【Define Material Model Behavior】对话框中依次双击右侧列表框中的

【Thermal】|【Conductivity】|【Isotropic】菜单，弹出【Conductivity for Material Number 2】对话框。按图 11.26 进行设置后，单击【OK】按钮。

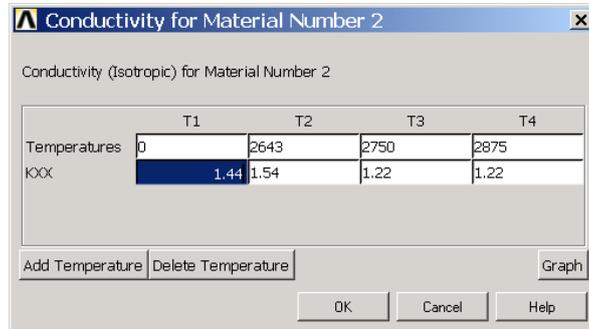


图11.26 定义钢模导热系数表

(8) 至此材料参数定义完毕，如图 11.27 所示。

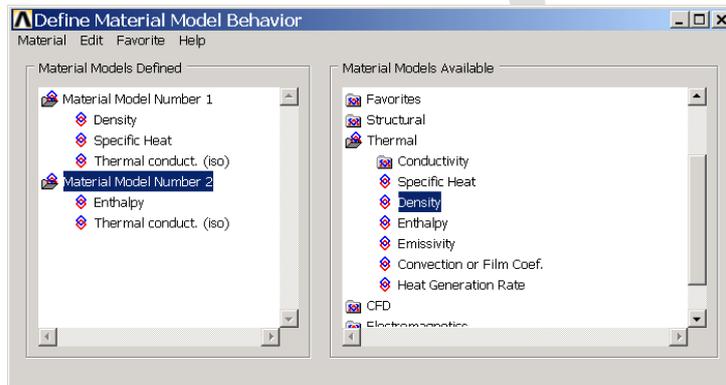


图11.27 定义的材料参数

(9) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 菜单，按以下坐标定义四个关键点：(0, 0, 0)、(22, 0, 0)、(10, 12, 0) 和 (0, 12, 0)。结果如图 11.28 所示。

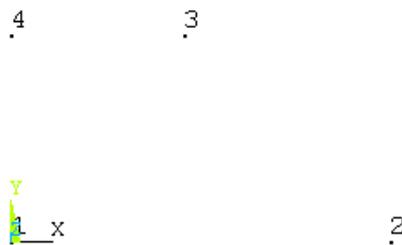


图11.28 定义关键点

(10) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs 菜单，弹出图形拾取对话框，依次选择关键点 1、2、3 和 4，单击【OK】按钮确认。得到如图 11.29 所示的面。

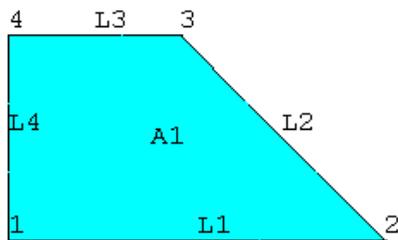


图11.29 由点生成面

(11) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By Dimensions 菜单，弹出如图 11.30 所示的对话框。在【X-coordinates】文本框中输入【4】和【22】，在【Y-coordinates】文本框中输入【4】和【8】，然后单击【OK】按钮。

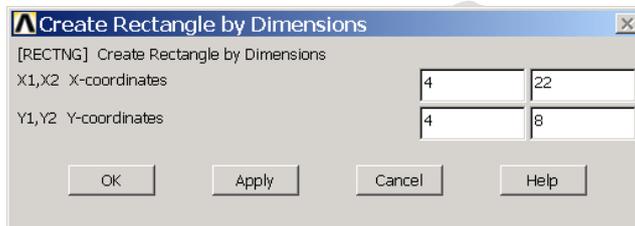


图11.30 定义矩形面

(12) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas 菜单，弹出图形拾取对话框，单击对话框中的【PICK ALL】按钮，得到如图 11.31 所示的三个面。

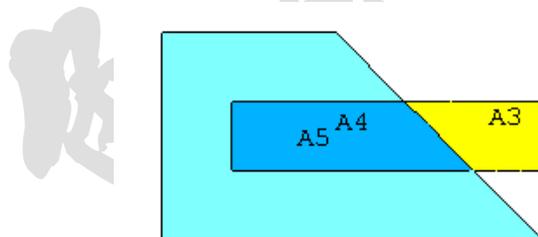


图11.31 布尔运算得到的面

(13) 单击 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Area and Below 菜单，弹出图形拾取对话框，选择面 3，单击【OK】按钮，即要删除多余的面。如图 11.32 所示。

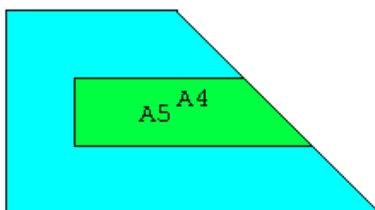


图11.32 删除多余的面

(14) 单击工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮，保存模型。

(15) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 菜单，弹出【Global Element Sizes】对话框，在【Element edge length】文本框中输入【1】，然后单击【OK】按钮。

(16) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free 菜单，弹出图形拾取对话框，然后选择砂模 (A5)，单击【OK】按钮，完成砂模的网格划分。如图 11.33 所示。

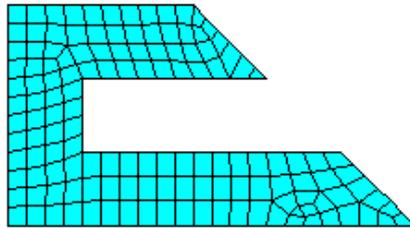


图11.33 对砂模进行网格划分

(17) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attribs 菜单，弹出【Meshing Attributes】对话框，在【Material number】下拉列表框中选择【2】，然后单击【OK】按钮。

(18) 单击 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free 菜单，弹出图形拾取对话框，选择铸钢 (A4)，单击【OK】按钮，完成铸钢的网格划分。结果如图 11.34 所示。

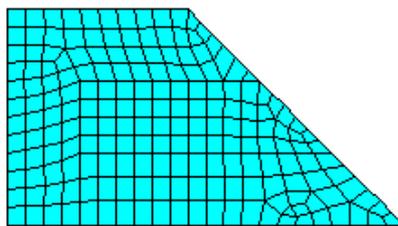


图11.34 网格划分结果

(19) 单击 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 菜单，弹出【New Analysis】对话框。选择【Transient】单选按钮，单击【OK】按钮确认。接着弹出如图 11.35 所示的对话框，保持默认即可。

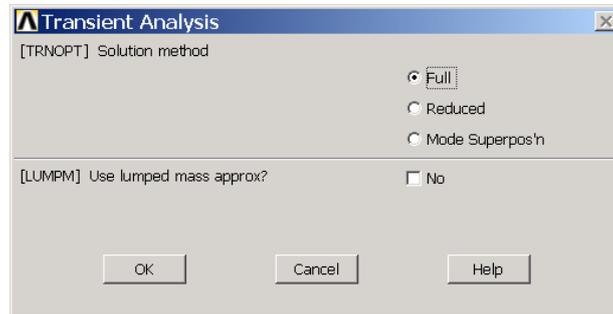


图11.35 瞬态分析选项

(20) 单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出实体选择对话框，选择【Element】、【By Attributes】、【Material num】，在文本框中输入【2】，如图 11.36 所示，然后单击 **Apply** 按钮；接着选择【Nodes】、【Attached to】、【Elements】，单击【OK】按钮。

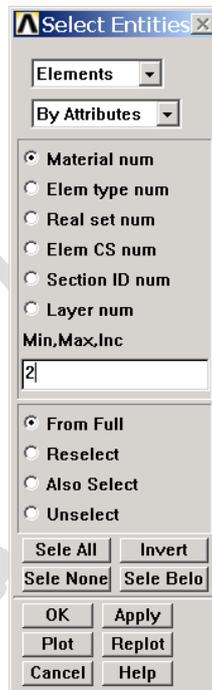


图11.36 实体选择对话框

(21) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define 菜单，弹出图形拾取对话框，单击【PICK ALL】按钮，弹出如图 11.37 所示的对话框，在【DOF to be specified】下拉列表框中选择【TEMP】，在【Intial value of DOF】文本框中输入【2875】，然后单击【OK】按钮。

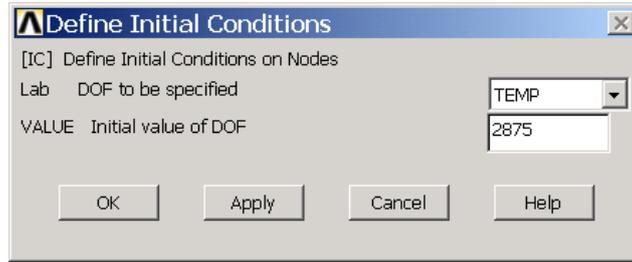


图11.37 定义初始温度

(22) 单击【Utility Menu】|【Select】|【Entities】菜单，弹出实体选择对话框，选择【Nodes】，单击 **Invert** 按钮。

(23) 再次单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define 菜单，弹出图形拾取对话框，单击【PICK ALL】按钮，在【Define Initial Conditions】对话框中设置初始温度为【80】，单击【OK】确认。

(24) 单击【Utility Menu】|【Select】|【Everything】菜单，选择所有实体。然后单击【Utility Menu】|【Plot】|【Lines】菜单，显示模型线，如图 11.38 所示。

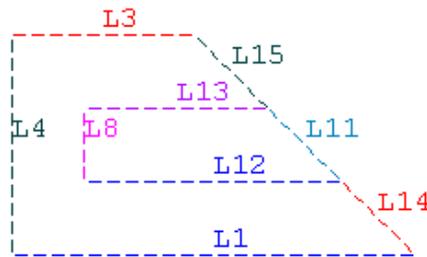


图11.38 模型线

(25) 单击 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Thermal>Convection>On Lines 菜单，弹出图形拾取对话框，选择砂模边界 L1、L3 和 L4，单击【OK】按钮。在【File coefficient】文本框中输入【80】，在【Bulk temperature】文本框中输入【80】，然后单击【OK】按钮。

(26) 单击 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step 菜单，弹出【Time and Time Step Options】对话框，如图 11.39 所示。在【Time at end of load step】文本框中输入【3】，在【Time step size】文本框中输入【0.01】，选择【Stepped】单元按钮，选择【Automatic time step size】为【ON】，在【Minimum time step size】文本框中输入【0.001】，在【Maximum time step size】文本框中输入【0.25】。然后单击【OK】按钮。

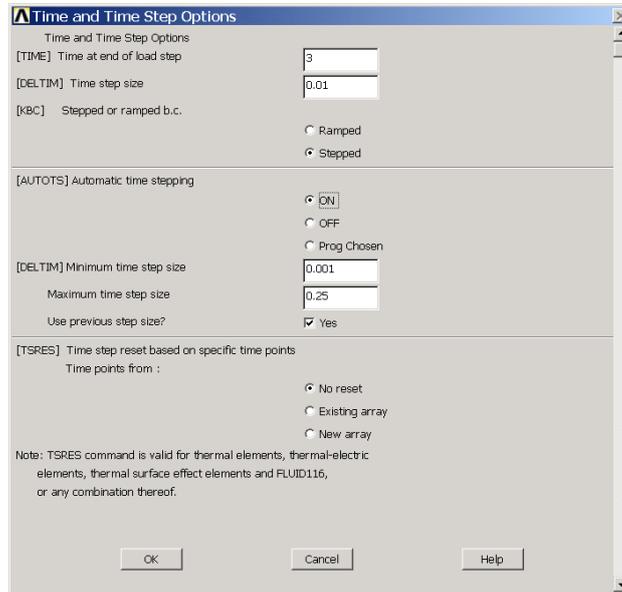


图11.39 设置荷载步选项

(27) 单击 Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File 菜单，弹出如图 11.40 所示的对话框。选择【Every substep】单元按钮，然后单击【OK】按钮。

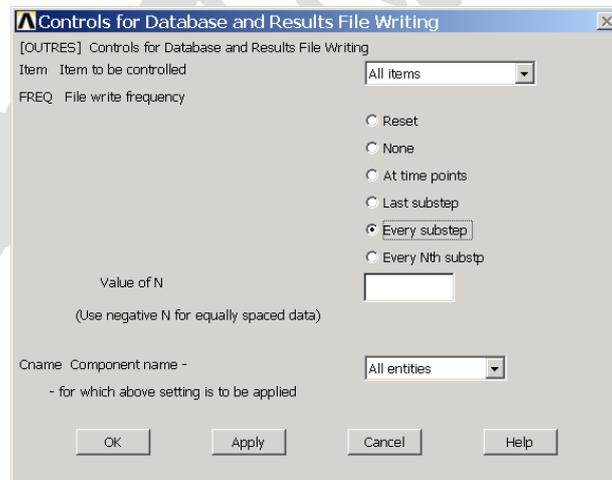


图11.40 结果输出选项

(28) 单击 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 菜单，进行求解。

(29) 求解完成后，单击 Main Menu>Timehist Postproc 菜单，弹出【Time History Variables】对话框，单击  按钮定义节点 204 的温度结果为变量。选中此变量，单击  按钮，显示变量随时间的变化曲线，如图 11.41 所示。

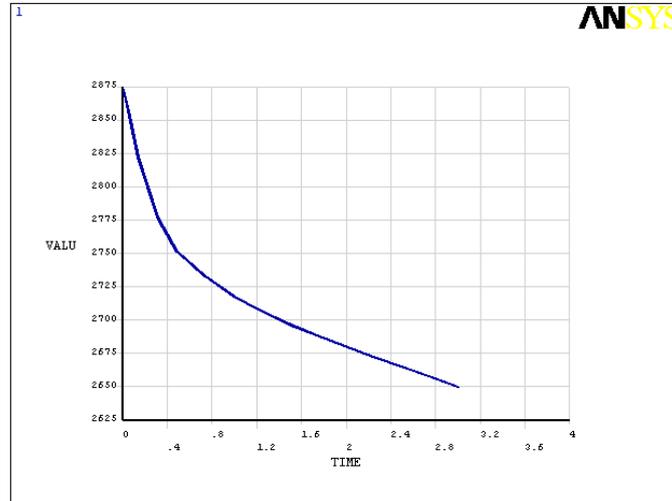


图11.41 温度随时间的变化曲线

3. 命令流方式

用户还可以用以下命令流完成相同的操作：

```
/Title, Casting Solidification
```

```
!进入前处理
/prep7
et,1,plane55                !定义单元类型
mp,dens,1,0.054             !定义砂模热性能
mp,kxx,1,0.025
mp,c,1,0.28
mptemp,1,0,2643,2750,2875  !定义铸钢的热性能
mpdata,kxx,2,1.44,1.54,1.22,1.22
mpdata,enth,2,0,128.1,163.8,174.2
mpplot,kxx,2
mpplot,enth,2
save
!创建几何模型
k,1,0,0,0
k,2,22,0,0
k,3,10,12,0
k,4,0,12,0
/pnum,kp,1
/pnum,line,1
/pnum,area,1
/Triad,ltop
kplot
a,1,2,3,4
save
rectng,4,22,4,8
aplot
aovlap,all
adele,3
aplot
save
!划分网格
```

```
esize,1
amesh,5
mat,2
aplot
amesh,4
epplot
/pnum,elem
/number,1
save

!进入加载求解
/SOLU
antype,trans           !设定为瞬态分析
esel,s,mat,,2         !设定铸钢的初始温度
nsle,s
/replot
ic,all,temp,2875
esel,inve             !设定砂模的初始温度
nsle,s
/replot
ic,all,temp,80
allsel
save
lplot
sfl,1,CONV,0.014,,80  !设定砂模外边界对流
sfl,3,CONV,0.014,,80
sfl,4,CONV,0.014,,80
/psf,conv,2
time,3                !设定瞬态分析时间
kbc,1                 !设定为阶越的载荷
autots,on             !打开自动时间步长
deltim,0.01,0.001,0.25 !设定时间步长
timint,on             !打开时间积分
tintp,,,,1           !将 THETA 设定为 1
outres,all,all        !输出每个子步的结果
solve

!进入后处理
/post26
/pnum,node,1
/number,0
epplot
nsol,2,204,temp,center !设定铸钢中心点温度随时间的变量
plvar,2               !绘制温度~时间曲线
save
finish
```

第十二章 优化设计

ANSYS 除了可以进行结构静动力分析和热分析外，还具有一个非常有用的高级功能——优化设计。它可以帮助用户快速找到设计的最优方案，单击 Main Menu>Design Opt 菜单，可进行 ANSYS 的优化设计模块，如图 12.1 所示。



图12.1 优化设计菜单

本章将结合实例，介绍 ANSYS 优化设计模块的使用方法。

12.1 优化设计基本概念

优化设计是一种寻找或确定最优设计方案的技术。所谓“最优设计”，指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且所需的支出（如重量，面积，体积，应力，费用等）最小。也就是说，最优设计方案就是一个最有效率的方案。

对于一个设计方案来说，许多方面都是可以优化的，比如：尺寸（如厚度），形状（如过渡圆角的大小），支撑位置，制造费用，自然频率，材料特性等。实际上，所有可以参数化的 ANSYS 选项都可以作优化设计。

ANSYS 程序提供了两种优化的方法：零阶方法和一阶方法。这两种方法可以处理绝大多数的优化问题。零阶方法是一个很完善的处理方法，可以很有效地处理大多数的工程问题。一阶方法基于目标函数对设计变量的敏感程度，因此更加适合于精确的优化分析。

对于这两种方法，ANSYS 程序提供了一系列的分析——评估——修正的循环过程。就是对于初始设计进行分析，对分析结果就设计要求进行评估，然后修正设计。这一循环过程重复进行直到所有的设计要求都满足为止。

除了这两种优化方法，ANSYS 程序还提供了一系列的优化工具以提高优化过程的效率。例如，随机优化分析的迭代次数是可以指定的。随机计算结果的初始值可以作为优化过程的起点数值。

在介绍优化设计过程之前，用户需要先了解一些基本概念：优化变量、设计序列、分析文件、循环、优化数据库以及合理和不合理的设计等。

图 12.2 是一个典型的优化设计问题，要求在以下的约束条件下找出矩形截面梁的最小重量：

- 总应力 σ 不超过 σ_{\max} ，即 $\sigma \leq \sigma_{\max}$ ；
- 梁的变形 δ 不超过 δ_{\max} ，即 $\delta \leq \delta_{\max}$ ；

- 梁的高度 h 不超过 h_{\max} ，即 $h \leq h_{\max}$ 。

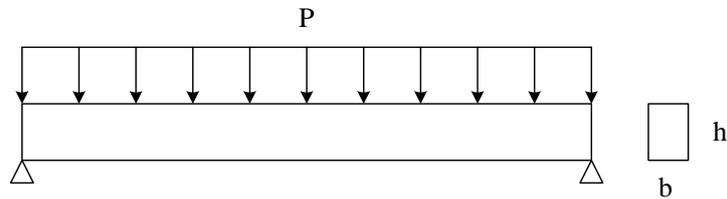


图12.2 梁的优化设计示意图

优化变量是优化设计过程中的基本变量，包括设计变量（DV_s）、状态变量（SV_s）和目标函数。优化变量由用户定义的参数来指定的。在 ANSYS 优化中，用户必须指出在参数集中哪些是设计变量，哪些是状态变量，哪些是目标函数。三种优化变量的定义如下：

- 设计变量（DV_s）是优化设计中的自变量，优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限，它定义了设计变量的变化范围。在以上的问题里，设计变量很显然为梁的宽度 b 和高度 h 。 b 和 h 都不可能为负值，因此其下限应为 b ， $h > 0$ ，而且， h 有上限 h_{\max} 。ANSYS 优化程序允许定义不超过 60 个设计变量。
- 状态变量（SV_s）是指约束设计的数值。它们一般是设计变量的函数，是“因变量”。状态变量可能会有上下限，也可能只有单方面的限制，即只有上限或只有下限。在上述梁问题中，有两个状态变量： σ （总应力）和 δ （梁的位移）。在 ANSYS 优化程序中用户可以定义不超过 100 个状态变量。
- 目标函数是指设计所要优化的数值。它必须是设计变量的函数，也就是说，改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在以上的问题中，梁的总重量应该是目标函数。在 ANSYS 优化程序中，只能设定一个目标函数。也就是说，ANSYS 只能解决单目标优化问题。

设计序列是指确定一个特定模型的参数的集合。一般来说，设计序列是由优化变量的数值来确定的，但所有的模型参数（包括不是优化变量的参数）组成了一个设计序列。

分析文件是一个 ANSYS 的命令流输入文件，包括一个完整的分析过程（前处理，求解，后处理）。它必须包含一个参数化的模型，用参数定义模型并指出设计变量，状态变量和目标函数。由这个文件可以自动生成优化循环文件（Jobname.LOOP），并在优化计算中循环处理。

一次循环指一个分析周期。（可以理解为执行一次分析文件。）最后一次循环的输出存储在文件 Jobname.OPO 中。优化迭代（或仅仅是迭代过程）是产生新的设计序列的一次或多次分析循环。一般来说，一次迭代等同于一次循环。但对于一阶方法，一次迭代代表多次循环。

优化数据库记录当前的优化环境，包括优化变量定义，参数，所有优化设定，和设计序列集合。该数据库可以存储（在文件 Jobname.OPT），也可以随时读入优化处理器中。

一个合理的设计是指满足所有给定的约束条件（设计变量的约束和状态变量的约束）的设计。如果其中任一约束条件不被满足，设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计。（如果所有的设计序列都是不合理的，

那么最优设计是最接近于合理的设计，而不考虑目标函数的数值。)

12.2 优化设计的步骤

在用 ANSYS 进行优化设计时，同样有两种实现方法：GUI 交互式和命令流方式。

交互方式具有很大的灵活性，而且可以实时看到循环过程的结果。在用 GUI 方式进行优化时，首要的是要建立模型的分析文件，然后优化处理器所提供的功能都可以交互式的使用，以确定设计空间，便于后续优化处理的进行。这些初期交互式的操作可以帮助用户缩小设计空间的大小，使优化过程得到更高的效率。

如果用户对于 ANSYS 程序的命令相当熟悉，就可以选择用命令输入整个优化文件并通过批处理方式来进行优化。对于复杂的需用大量机时的分析任务来说（如非线性），这种方法更有效率。

优化设计通常包括以下几个步骤，这些步骤根据用户所选用优化方法的不同（GUI 方式和命令流方式）而有细微的差别：

- 生成循环所用的分析文件。该文件必须包括整个分析的过程。
- 建立优化参数。
- 进入优化模块，指定分析文件（OPT）。
- 声明优化变量。
- 选择优化工具和优化方法。
- 指定优化循环控制方式。
- 进行优化分析。
- 查看设计序列结果（OPT）和后处理（POST1/POST26）。

下面将结合上节中提出的梁截面优化问题分别介绍每步的操作。GUI 方式和命令流方式的区别也将同时指出。

12.2.1 生成分析文件

分析文件生成是 ANSYS 优化设计过程中的关键部分。ANSYS 程序运用分析文件构造循环文件，进行循环分析。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的任意分析类型（结构，热，电磁等，线性或非线性）。（注：ANSYS/LS-DYNA 的显式分析不能进行优化。）

在分析文件中，模型的建立必须是参数化的（通常定义优化变量为参数），结果也必须用参数来提取（用于状态变量和目标函数）。优化设计中只能使用数值参数。（参数和 ANSYS 参数化设计语言 APDL 见本书第八章）

用户的任务是建立分析文件并保证其正确性。分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简练的，不是必须的语句（如完成图形显示功能和列表功能的语句等）应当从分析文件中省略掉。只有在交互过程中希望看到的显示（如 EPLOTT 等）可以包含在分析文件中。请注意分析文件是要多次执行的，与优化分析本身无关的命令都会不必要的耗费机时，降低循环效率。

建立分析文件通常有两种方法：（1）用系统编辑器逐行输入；（2）交互式地完成分析，将 ANSYS 的 LOG 文件作为基础建立分析文件。这两种方式各有优缺点。

用系统编辑器生成分析文件同生成其他分析时的批处理文件方法是一样的。这种方法使得用户可以通过命令输入来完全地控制参数化定义。同样，本方法可以省去了删除多余命令的麻烦。但是，如果对于 ANSYS 命令集不熟悉的话，这种方法是不方便的。

对于这类用户来说，第二种方法相对容易一些。但是，在最后生成分析文件的过程中，ANSYS 的 LOG 文件要做较大的修改才能适合循环分析。

不论采用哪种方法，分析文件中要求包含的内容都是一样的。对于上一节提出的梁截面优化问题，生成分析文件的步骤如下：

1. 参数化建立模型

这一步主要在前处理器 (PREP7) 中进行操作，对梁进行截面优化时，设计变量是梁的宽度 B 和梁的高度 H ，因此在此步骤中应该定义这两个参数，其命令流如下：

```

/PREP7
!初始化设计变量:
B=2.0
H=3.0
!定义单元类型和实常数
ET,1,BEAM3           !2-D 梁单元
AREA=B*H             !梁的横截面面积
IZZ=(B*(H**3))/12    !绕 Z 轴的转动惯量
R,1,AREA,IZZ,H       !以设计变量表示的单元实参
MP,EX,1,30E6         !定义弹性模量
!生成模型
N,1                  !生成结点
N,11,120
FILL
E,1,2                !生成单元
EGEN,10,1,-1
FINISH               !退出 PREP7

```

设计变量 (B 和 H) 可以在程序的任何模块中初始化，一般是在前处理中进行。这些变量必须定义初值，以便开始计算时使用，在优化过程中会被改变。

注意：如果用 GUI 模式完成输入，可能会遇到直接用鼠标拾取 (picking) 的操作。有些拾取操作是不允许参数化输入的。因此，应当避免在定义设计变量，状态变量和目标函数时使用这些操作，应该用可以参数化的操作来代替。

2. 求解

这一步主要在求解模块 (SOLU) 中进行，目的是完成初步的有限元计算，得到初始数据结果，以便下一步提取其它优化变量。其命令流如下：

```

/SOLU
ANTYPE,STATIC        !静力分析 (缺省)
D,1,UX,0,,11,10,UY  !UX=UY=0, 梁两端结点固定
SFBEAM,ALL,1,PRES,100 !施加压力
SOLVE
FINISH               !退出 SOLUTION

```

2. 参数化提取结果

这一步主要在通用后处理器 (POST1) 中进行，目的是提取数据结果并赋值给相应的

参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。

提取数据的命令为*GET，其对应的 GUI 菜单路径为【Utility Menu】|【Parameters】|【Get Scalar Data】。单击该菜单，将弹出如图 12.3 所示的对话框。选择相应的数据结果，单击【OK】按钮即可。

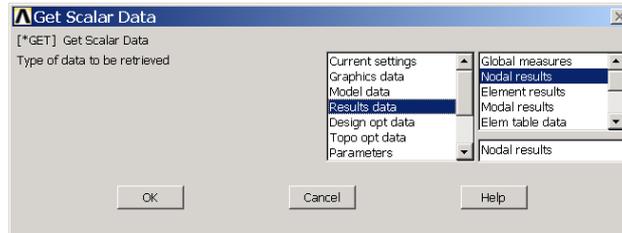


图12.3 提取结果参数

对于梁截面的优化问题，梁的总重量是目标函数。因为重量与体积成比例（假定密度是均匀的），那么减小总体积就相当于减小总重量。因此可以选择总体积为目标函数。状态变量选择为总应力和位移。定义这些参数的命令流如下：

```

/POST1
SET, 1
NSORT, U, Y, , 1           !以 UY 为基准对结点排序
*GET, DMAX, SORT, , MAX    !参数 DMAX=最大位移

!线单元的推导数值由 ETABLE 得出
ETABLE, VOLU, VOLU        !VOLU=每个单元的体积
ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1  !SMAX_I=每个单元 I 结点处应力的最大值
ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3  !SMAX_J=每个单元 J 结点处应力的最大值

SSUM                      !将单元表中每列的数据相加
*GET, VOLUME, SSUM, , ITEM, VOLU !参数 VOLUME=总体积
ESORT, ETAB, SMAX_I, , 1  !按照单元 SMAX_I 的绝对值大小排序
*GET, SMAXI, SORT, , MAX  !参数 SMAXI=SMAX_I 的最大值
ESORT, ETAB, SMAX_J, , 1  !按照单元 SMAX_J 的绝对值大小排序
*GET, SMAXJ, SORT, , MAX  !参数 SMAXJ=SMAX_J 的最大值
SMAX=SMAXI>SMAXJ         !参数 SMAX=最大应力值
FINISH

```

输入以上命令提取参数完成后，单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，可显示定义和提取的参数，如图 12.4 所示。

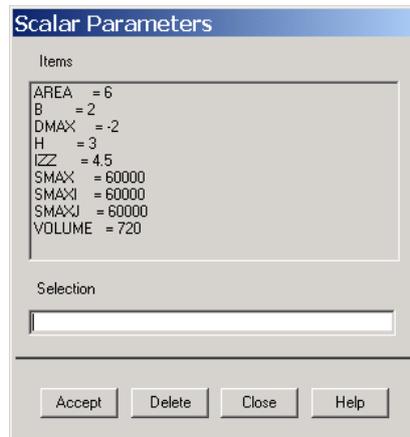


图12.4 提取到的参数值

3. 生成分析文件

到此为止，分析文件的基本内容已经得到了。如果是用系统编辑器来编辑的批处理文件，那么简单地存盘进入第二步即可。如果是用交互方式建模的话，用户必须在交互环境下生成分析文件。

通过 LGWRITE 命令或单击【Utility Menu】|【File】|【Write DB Log File】菜单，可从数据库从生成分析文件。单击该菜单后，弹出如图 12.5 所示的对话框。在【Write Database Log to】文本框中输入分析文件名【beam.lgw】，然后单击【OK】按钮可在工作目录下生成名为 beam.lgw 的分析文件。

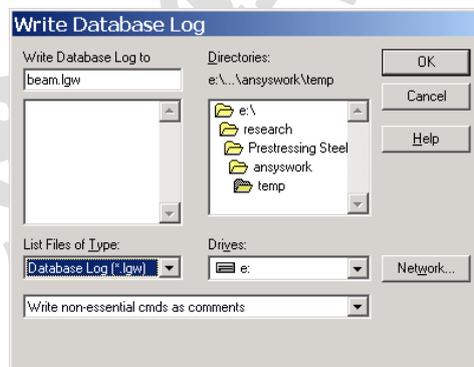


图12.5 生成分析文件

用户也可以通过修改 Jobname.LOG（程序命令流文件）来生成分析文件。Jobname.LOG 文件中记录了用户在 GUI 模式下的所有操作，用户必须删除文件中许多不必要的命令，修改工作比较复杂，而且，如果分析是在几个过程中完成的，就必须将几个 LOG 文件合在一起编辑生成一个完整的分析文件。因此，作者建议用户用 LGWRITE 命令生成分析文件。

12.2.2 建立优化参数

建立优化参数是相对于用系统编辑器直接生成分析文件的操作来说的。如果是直接生

成分析文件的话，需要重新进入 ANSYS，然后单击菜单【Utility Menu】|【File】|【Read Input from】菜单，重新读取生成的分析文件，这样将重新建立数据库。如果用户是在交互方式下生成的分析文件，可不退出 ANSYS 直接进入下一步的优化过程。

12.2.3 指定分析文件

以下的步骤都是在 ANSYS 的优化模块（OPT）中进行的。首次进入优化处理器时，ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列 1。在交互方式下，用户必须指定分析文件名。这个文件用于生成优化循环文件 Jobname.LOOP。分析文件名无缺省值，因此必须输入。

对于梁截面优化的例子，指定分析文件的操作为：单击 Main Menu>Design Opt>Analysis File>Assign 菜单，弹出如图 12.6 所示的对话框。在【Assign Analysis file】文本框中输入刚才生成的分析文件名【beam.lgw】，单击【OK】按钮即可。如果分析文件不在工作目录中，可单击 Browse... 按钮选择分析文件所在的路径。



图12.6 指定分析文件

12.2.4 声明优化变量

下一步是声明优化变量，即指定哪些参数是设计变量，哪些参数是状态变量，哪个参数是目标函数。以上提到，允许有不超过 60 个设计变量和不超过 100 个状态变量，但只能有一个目标函数。

对于设计变量和状态变量可以定义最大和最小值。目标函数不需要给定范围。每一个变量都有一个公差值，这个公差值可以由用户输入，也可以选择由程序计算得出。

对于梁截面优化的例子，声明优化变量的操作如下：

(1) 单击 Main Menu>Design Opt>Design Variables 菜单，弹出如图 12.7 所示的【Design Variables】对话框。可以看出当然没有定义设计变量。

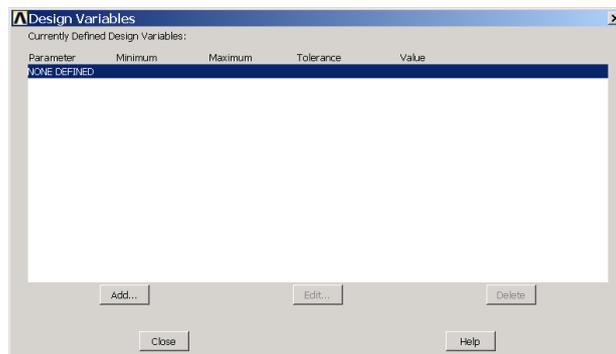


图12.7 设计变量对话框

(2) 单击【Design Variables】对话框中的 **Add...** 按钮，弹出如图 12.8 所示的【Define a Design Variable】对话框。在【Parameter name】列表框中选择截面宽度【B】，然后在【Minimum value】文本框中输入宽度下限【0.5】，在【Maximum value】文本框中输入宽度上限【16.5】，单击【APPLY】按钮。

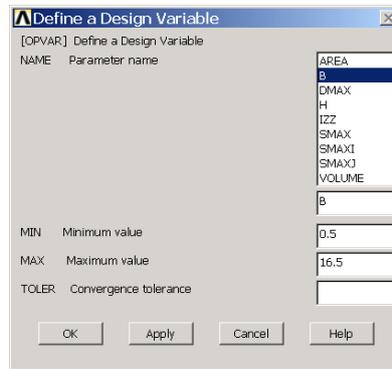


图12.8 定义设计变量B

(3) 接着按同样的方法，声明另一个设计变量【H】，定义截面高度【H】的下限为【0.5】，上限为【8】。完成后，可以看到定义设计变量的结果如图 12.9 所示。单击 **Edit...** 按钮可以修改设计变量，单击 **Delete** 按钮可以删除设计变量。

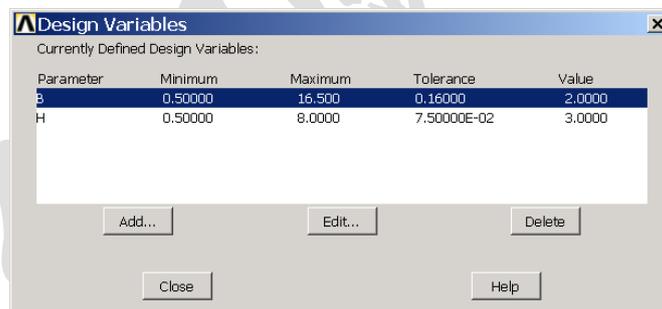


图12.9 定义完成的设计变量

说明：删除并不真正删除参数，而是不再将它视为一个优化变量而已。

(4) 单击 Main Menu>Design Opt>State Variables 菜单，弹出如图 12.10 所示的【State Variables】对话框。可以看出当前没有声明状态变量。

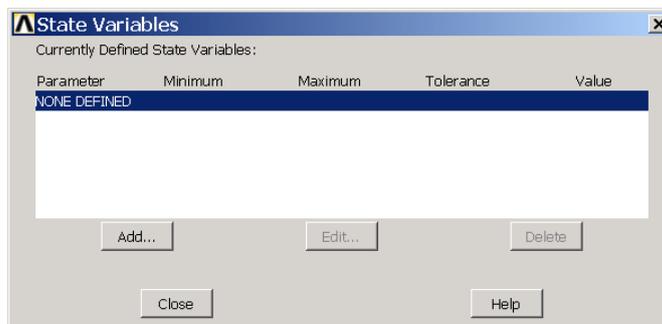


图12.10 状态变量对话框

(5) 单击【State Variables】对话框中的 **Add...** 按钮，弹出如图 12.11 所示的【Define a State Variable】对话框。在【Parameter name】列表框中选择截面宽度【DMAX】，然后在【Lower limit】文本框中输入下限【-0.1】，在【Upper limit】文本框中输入上限【0】，单击【APPLY】按钮。

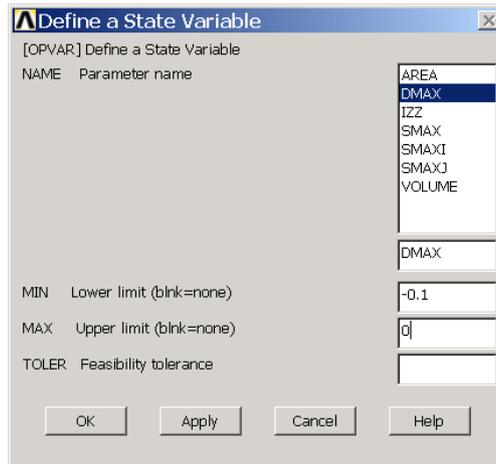


图12.11 定义状态变量DMAX

注意：【Lower limit】和【Upper limit】文本框留空表示没有下限或上限，而不是 0 值。

(6) 接着按同样的方法，声明另一个状态变量【SMAX】，定义【SMAX】的下限为【0】，上限为【20000】。完成后，可以看到定义状态变量的结果如图 12.12 所示。

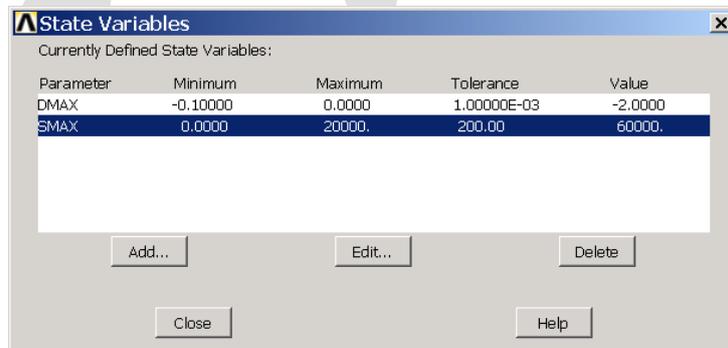


图12.12 定义完成的状态变量

(7) 单击 Main Menu>Design Opt>Objective 菜单，弹出如图 12.13 所示的【Define Objective Function】对话框。在【Parameter name】列表框中选择【VOLUME】，然后单击【OK】按钮，完成目标函数的定义。

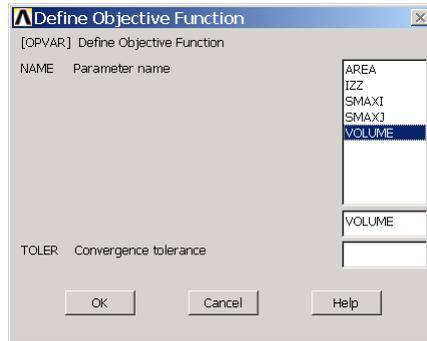


图12.13 定义目标函数

12.2.5 选择优化工具和方法

ANSYS 程序提供了一些优化工具和方法。

优化方法是使单个函数（目标函数）在控制条件下达到最小值的传统化的方法。有两种方法是可用的：零阶方法（Sub-Problem）和一阶方法（First-Order）。除此之外，用户可以提供外部的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法。使用其中任何一种方法之前，必须先定义目标函数。

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。因为求最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出。但是，必须要指定设计变量。可用的优化工具有：单步运行法（Single Run）、随机搜索法（Random Designs）、乘子评估法（Factorial）、等步长搜索法（Gradient）和最优梯度法（DV Sweeps）六种。

这些优化工具和方法将在下一节中详细介绍。

对于梁截面优化的例子，选择优化工具和方法的操作如下：

（1）单击 Main Menu>Design Opt>Method/Tool 菜单，弹出如图 12.14 所示的【Specify Optimization Method】对话框。选择【Sub-Problem】（零阶方法），然后单击【OK】按钮。

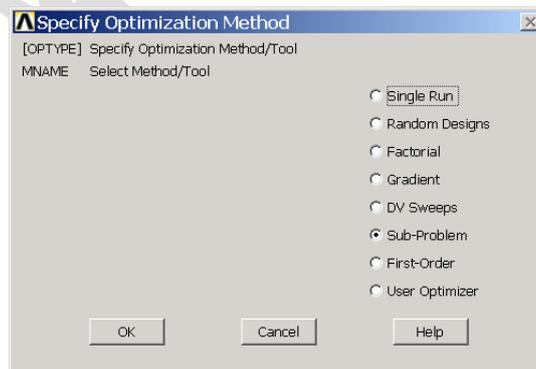


图12.14 选择优化工具和方法

（2）接着弹出如图 12.15 所示的【Controls for Sub-problem Optimization】对话框。在【Maximum iterations】文本框中可输入最大迭代次数。本例中全部保持默认即可。

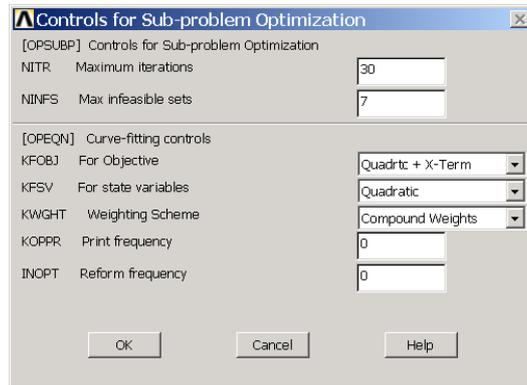


图12.15 零阶方法的控制参数

12.2.6 指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，选择不同的优化工具或方法将有不同的控制对话框。例如，对于梁截面优化的例子，当选择零阶优化方法（**Sub-Problem**）时，将弹出如图 12.15 所示的控制对话框，可控制最大迭代次数等参数。

用户还可以控制几个循环特性，包括分析文件在循环中如何读取。单击 **Main Menu>Design Opt>Controls** 菜单，将弹出如图 12.16 所示的【Specify run-time controls】对话框。

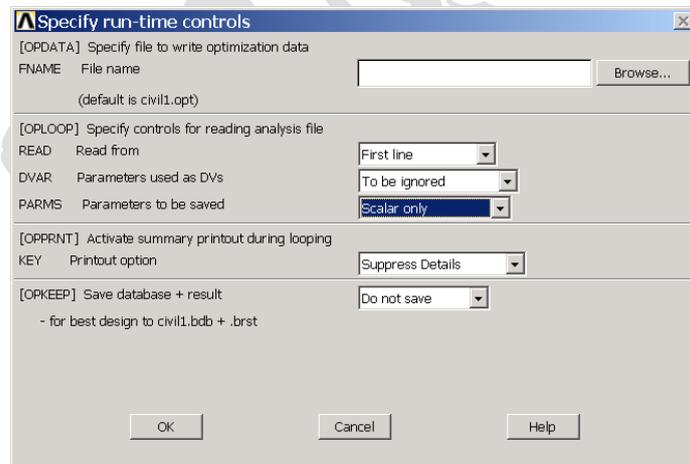


图12.16 循环特性控制

其中：

- 【File name】文本框可以用来设定优化数据文件的名称，默认为 Jobname.OPT。
- 【Read form】下拉列表框用来选择分析文件在循环中的读取方式，可以从第一行读取（First line），也可以从第一个/PREP7 出现的位置开始读取（First /PREP7）。
- 【Parameters used as DVs】下拉列表框可以设定优化变量的参数忽略（To be ignored），也可以设定优化变量在循环中处理（To be processed）。
- 【Parameters to be saved】下拉列表框用于选择只存储数值变量（Scale only）还是

存储数值变量和数组变量（Scale & Array）。

说明：在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不设置，除非是数组变量在分析文件外定义，而在循环中需要保存的情况。

12.2.7 进行优化分析

所有的控制选项设定好以后，就可以进行优化分析了。在进行优化分析时，会根据分析文件生成一个优化循环文件（Jobname.LOOP）。这个循环文件对用户是透明的，并在分析循环中使用。循环在满足下列情况时终止：收敛、中断或分析完成。中断的原因可能是不收敛，但最大循环次数或是最大不合理的数目达到了。

说明：如果循环是由于模型的问题（如网格划分有问题，非线性求解不收敛，与设计变量数值冲突等）中断时，优化处理器将进行下一次循环。如果是在交互方式下，程序将显示一个警告信息并询问是继续还是结束循环。如果是在批处理方式下，循环将自动继续。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件(Jobname.OPT)中。最多可以存储 130 组这样的序列。如果已经达到了 130 个序列，那么其中数据最“不好”的序列将被删除。

对于梁截面优化的例子，设置控制选项后，单击 Main Menu>Design Opt>Run 菜单，弹出如图 12.17 所示的对话框。单击【OK】按钮，即可开始优化分析。



图12.17 开始优化提示对话框

当优化结束循环完成后，将弹出如图 12.18 所示的对话框。显示了一些优化的结果信息。

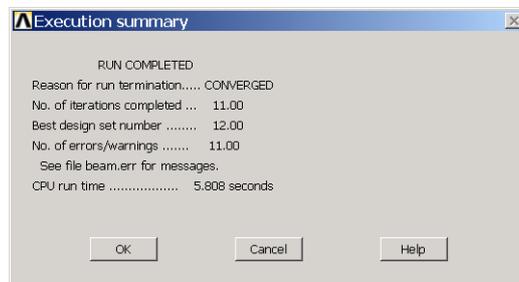


图12.18 优化结束对话框

以下是梁截面优化的例子，在优化模块的命令行操作方法：

```
/OPT !进入优化处理器
OPANL,beam,lgw !分析文件名（批处理方式不需要）
! 声明优化变量
OPVAR,B,DV,.5,16.5 !B 和 H 为设计变量
OPVAR,H,DV,.5,8
OPVAR,DMAX,SV,-0.1,0 !DMAX 和 SMAX 为状态变量
OPVAR,SMAX,SV,0,20000
OPVAR,VOLUME,OBJ !VOLUME 为目标函数
!指定优化类型和控制
OPTYPE,SUBP !零阶方法
OPSUBP,30 !最大迭代次数
OPEXE !开始优化循环
```

12.2.8 查看优化结果

优化循环结束以后，用户就可以查看设计序列了。用户可以列表显示指定序列或所有序列的优化参数值，还可以图形显示优化参数随序列号的变化情况等。

下面以上述的梁截面优化为例，介绍查看优化结果的常用操作：

(1) 单击 **Main Menu>Design Opt>Design Sets>List** 菜单，弹出如图 12.19 所示的对话框。在此对话框中，用户可以选择显示最佳序列 (**BEST Set**)、最后序列 (**LAST Set**)、所有序列 (**ALL Sets**) 等。

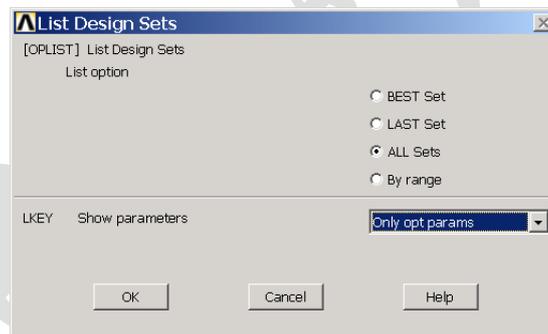


图12.19 列表显示设计序列对话框

(2) 选择 **【ALL Sets】** 单元按钮，并单击 **【OK】** 按钮，可列表显示所有的 12 个设计序列，如图 12.20 所示。

	SET 1	SET 2	SET 3	SET 4
	<INFEASIBLE>	<INFEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>
DMAX <SU>	>-2.0000	>-0.12670	-0.87271E-01	-0.87673E-01
SMAX <SU>	> 60000.	4978.1	4968.1	4501.5
B <DU>	2.0000	14.055	6.7079	9.1010
H <DU>	3.0000	3.9289	5.6928	5.1344
VOLUME <OBJ>	720.00	6626.4	4582.4	5607.4
	SET 5	SET 6	SET 7	SET 8
	<INFEASIBLE>	<INFEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>
DMAX <SU>	>-0.13923	>-0.14026	-0.99062E-01	-0.91261E-01
SMAX <SU>	9703.7	10155.	5735.9	5042.6
B <DU>	2.2912	2.0285	5.6160	4.5101
H <DU>	6.9697	7.2406	5.7902	6.4020
VOLUME <OBJ>	1916.3	1762.5	3902.2	3464.8

图12.20 显示所有设计序列

(3) 单击 Main Menu>Design Opt>Design Sets>Graphs/Tables 菜单，弹出如图 12.21 所示的对话框。在【X-variable parameter】列表框中可选择 X 轴显示的参数，在【Y-variable params】列表框中可选择 Y 轴显示的参数。

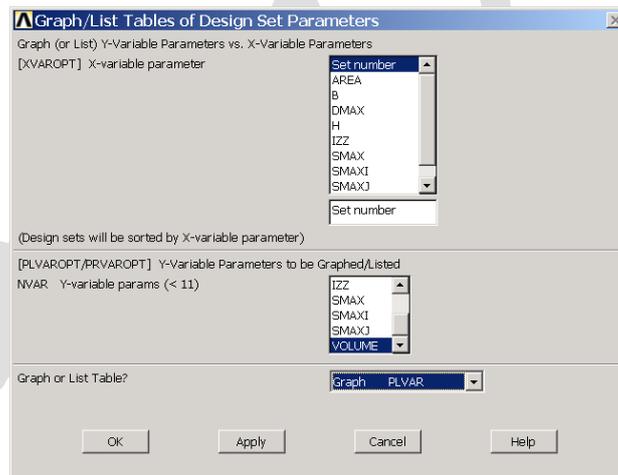


图12.21 图形显示参数对话框

(4) 在【X-variable parameter】列表框中选择【Set number】，表示设计序列号，在【Y-variable params】列表框选择目标函数【VOLUME】，然后单击【OK】按钮。得到如图 12.22 所示的曲线，显示了目标函数随设计序列号变化趋势。

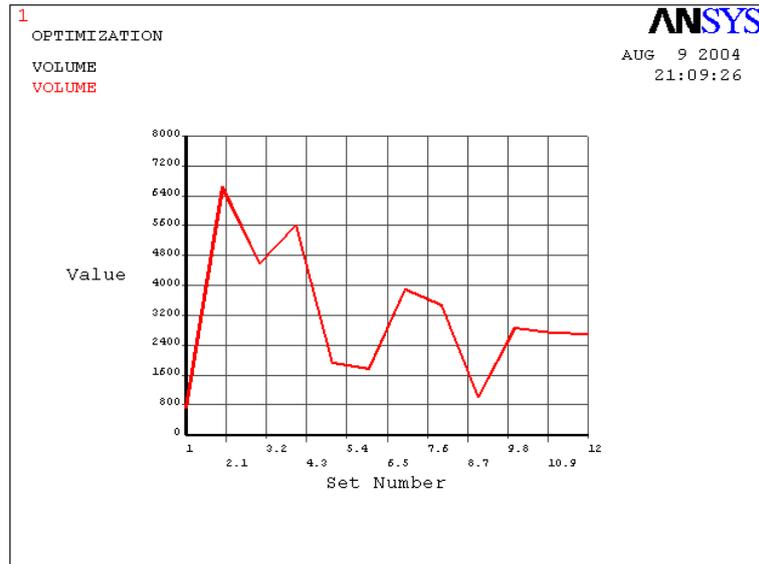


图12.22 目标函数曲线

说明：对于等步长，乘子和梯度工具有一些特别的查看结果的方法，如果用到读者可参考 ANSYS 的帮助文档，在此不再详细介绍。

除了查看优化数据，用户可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。缺省情况下，最后一个设计序列的结果存储在文件 Jobname.RST（或.RTH 等，视分析类型而定）中。如果在循环运行前将 OPKEEP 设为 ON，最佳设计序列的数据也将存储在数据库和结果文件中。“最佳结果”在文件 Jobname.BRST（.BRTH 等）中，“最佳数据库”在文件 Jobname.BDB 中。

12.3 基本优化方法和工具

理解计算机程序的算法总是很有用的，尤其是在优化设计中。本节中，将对 ANSYS 中的优化方法和工具做简单的介绍，主要包括：单步运行法（Single Run）、随机搜索法（Random Designs）、乘子评估法（Factorial）、等步长搜索法（Gradient）、最优梯度法（DV Sweeps）、零阶方法（Sub-Problem）和一阶方法（First-Order）。更多细节请读者参考 ANSYS 的帮助文档。

12.3.1 单步运行法

单步运行法是指实现一次循环并求出一个 FEA 解。它不进行循环迭代，可以通过一系列的单次循环，每次求解前设定不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。

12.3.2 随机搜索法

随机搜索法需要进行多次循环，每次循环设计变量随机变化。用户可以指定最大循环

次数和期望合理值的数目。本工具主要用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。

随机搜索法往往作为零阶方法的先期处理。它也可以用来完成一些小的设计任务。例如可以做一系列的随机搜索，然后通过查看结果来判断当前设计空间是否合理。

12.3.3 乘子评估法

乘子评估法是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组合的设计序列。这种技术与称之为经验设计的技术相关，后者是用二阶的整体和部分因子分析。主要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。

对于整体评估，程序进行 2^n 次循环， n 是设计变量的个数。1/2 部分的评估进行 $2^{n/2}$ 次循环，依此类推。

12.3.4 等步长搜索法

等步长搜索法以一个参考设计序列为起点，本工具生成几个设计序列。它按照单一步长在每次计算后将设计变量在变化范围内加以改变。对于目标函数和状态变量的整体变化评估可以用本工具实现。

本工具可生成 $n \cdot \text{NSPS}$ 个设计序列， n 是设计变量的个数，**NSPS** 是每个扫描中评估点的数目（由 **OPSWEEP** 命令指定）。对于每个设计变量，变量范围将划分为 **NSPS**-1 个相等的步长，进行 **NSPS** 次循环。问题的设计变量在每次循环中以步长递增，其他的设计变量保持其参考值不变。设计序列中设计变量的参考值用 **OPSWEEP** 命令的 **Dset** 指定（**GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool**）。

12.3.5 最优梯度法

对用户指定的参考设计序列，最优梯度法将计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度。使用本工具可以确定局部的设计敏感性。

用户可以用图显示设计变量和响应变量的数值。纵坐标表示目标函数或状态变量的实际数值。横坐标表示设计变量一个小的（1%）变化值。其菜单路径为 **Main Menu > Design Opt > Design Sets > Tool Results > Print**。

注意：1%的变化值是相对于设计变量的变化范围（由 **OPVAR** 命令中 **MAX-MIN** 数值确定），而不是相对于当前的设计变量数值的。

12.3.6 零阶方法

之所以称为零阶方法是因为这种方法只用到因变量而不用到它的偏导数。在零阶方法中有两个重要的概念：目标函数和状态变量的逼近方法，由约束的优化问题转换为非约束的优化问题。

1. 逼近方法

本方法中，程序用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间的关系。这是通过用几个

设计变量序列计算目标函数然后求得各数据点间最小平方实现的。该结果曲线（或平面）叫做逼近。每次优化循环生成一个新的数据点，目标函数就完成一次更新。实际上是逼近被求解最小值而并非目标函数。

状态变量也是同样处理的。每个状态变量都生成一个逼近并在每次循环后更新。

用户可以控制优化近似的逼近曲线。可以指定线性拟合，平方拟合或平方差拟合。缺省情况下，用平方差拟合目标函数，用平方拟合状态变量。在图 12.15 中所示的对话框中可以实现该控制。

2. 转化为非约束问题

状态变量和设计变量的数值范围约束了设计，优化问题就成为约束的优化问题。ANSYS 程序将其转化为非约束问题，因为后者的最小化方法比前者更有效率。转换是通过对目标函数逼近加罚函数的方法计入所加约束的。

搜索非约束目标函数的逼近是在每次迭代中用 **Sequential Unconstrained Minimization Technique(SUMT)** 实现的。

3. 收敛检查

在每次循环结束时都要进行收敛检查。当目前的、前面的或最佳设计是合理的而且满足下列条件之一时，问题就是收敛的：

- 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允差。
- 最后两个设计之间的差值应小于目标函数允差。
- 从当前设计到最佳合理设计所有设计变量的变化值应小于各自的允差。
- 最后两个设计所有设计变量的变化值应小于各自的允差。

注意：收敛并不代表实际的最小值已经得到了，只说明以上四个准则之一满足了。因此，用户必须确定当前设计优化的结果是否足够。如果不足的话，就要另外做附加的优化分析。

12.3.7 一阶方法

同零阶方法一样，一阶方法通过对目标函数添加罚函数将问题转换为非约束的。但是，与零阶方法不同的是，一阶方法将真实的有限元结果最小化，而不是对逼近数值进行操作。

一阶方法使用因变量对设计变量的偏导数。在每次迭代中，梯度计算（用最大斜度法或共轭方向法）确定搜索方向，并用线搜索法对非约束问题进行最小化。

因此，每次迭代都有一系列的子迭代（其中包括搜索方向和梯度计算）组成。这就使得一次优化迭代有多次分析循环。

用户可以通过 **OPFRST** 命令指定计算梯度的设计变量范围变化程度，也可以指定线搜索步长的范围。一般来说，这两个输入值的缺省数值就足够了。

一阶方法在收敛或中断时结束。当目前的设计序列相对于前面的和最佳序列满足下面任意一种情况时，问题就称为收敛：

- 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允差。
- 从当前设计到前面设计目标函数的变化值应小于允差。

同时要求最后的迭代使用最大斜度搜索，否则要进行附加的迭代。

12.4 优化设计实例

下在举一个实例，使用一阶方法对建筑结构中的桁架问题进行优化分析。

1. 问题描述

一个有三根杆组成的桁架承受纵向和横向载荷。桁架的重量在最大应力不超过 400psi 最小化。三根梁的横截面面积和基本尺寸 B 在指定范围内变化。如图 12.23 所示。

结构的重量初始设计为 109.10 磅。缺省允差（由程序计算）为初始重量的 1%（11 磅）。但是，为了便于收敛，一阶方法的优化分析中将目标函数的允差定为 2.0。

桁架的材料特性如下：

- 弹性模量： $E=2.1E6$ psi
- 比重： $RHO=2.85E-4$ lb/in³
- 最大许用应力：400psi

分析中使用如下几何特性：

- 横截面面积变化范围：1 到 1000in² （初始值为 1000）
- 基本尺寸 B 变化范围：400 到 1000in （初始值为 1000）

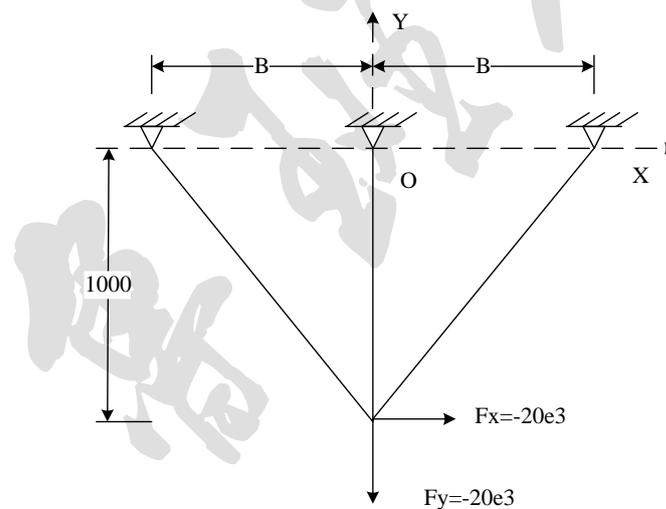


图12.23 桁架优化示意图

2. GUI操作步骤

- (1) 单击【Utility Menu】|【File】|【Change Jobname】菜单，修改工作文件名训【truss】。
- (2) 单击【Utility Menu】|【File】|【Change Title】菜单，输入分析题目【Optimization of a three-bar truss】。
- (3) 单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，打开【Scalar Parameters】对话框，按图 12.24 定义 B、A1、A2 和 A3 四个参数，然后单击【Accept】按钮。

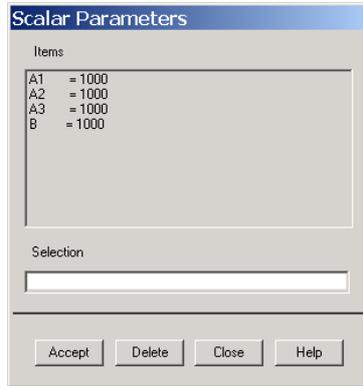


图12.24 定义数值参数

(4) 单击 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 菜单，打开【Element Types】对话框，然后单击【Add...】按钮，添加 LINK1 单元，如图 12.25 所示。

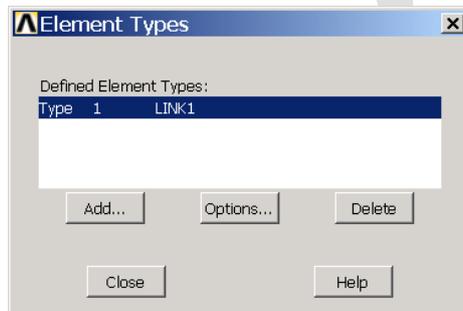


图12.25 定义单元类型

(5) 单击 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete 菜单，打开【Real Constants】对话框。单击【Add...】按钮，弹出单元类型选择对话框，接着单击【OK】按钮，在【Real Constants set No.】文本框中输入【1】，在【AREA】文本框中输入【A1】，单击【Apply】按钮。接着按同样的方法定义实常数 2 和 3，【AREA】区域分别输入【A2】和【A3】。完成后单击【OK】按钮，如图 12.26 所示。



图12.26 定义实常数

(6) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models** 菜单，打开 **Define Material Model Behavior** 对话框，按图 12.27 所示，双击 **Linear Isotropic** 菜单，在接着弹出的对话框中定义弹性模量为 **2.1E6**，然后单击 **OK** 确认。

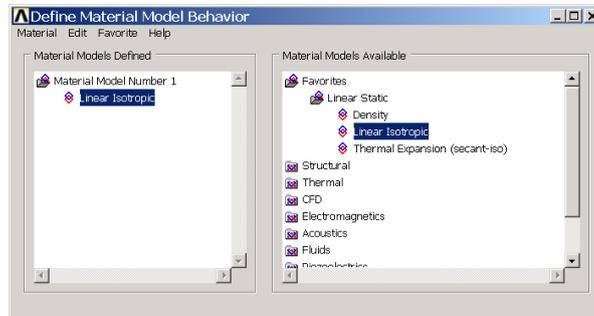


图12.27 定义材料参数

(7) 下面生成有限元模型。单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS** 菜单，按如下坐标值定义四个节点： $(-B, 0, 0)$ 、 $(0, 0, 0)$ 、 $(B, 0, 0)$ 和 $(0, -1000, 0)$ 。如图 12.28 所示。

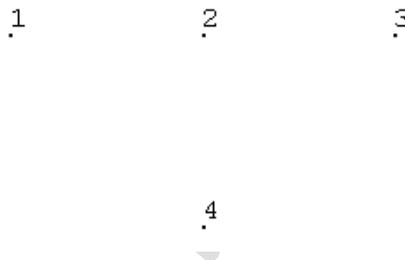


图12.28 生成节点

(8) 单击 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes** 菜单，弹出图形拾取对话框，依次在图形视窗中选择节点 1 和 4，然后单击 **OK** 按钮，将连接节点 1 和 4 生成一个线单元 1。

(9) 接着单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attrs** 菜单，弹出单元特性设置对话框，修改实常数下拉列表框为 **2**，单击 **OK** 按钮。重复步骤 (8)，在图形视窗中依次选择节点 2 和 4，然后单击 **OK** 按钮，连接节点 2 和 4 生成线单元 2。

(10) 再次单击 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attrs** 菜单，修改实常数下拉列表框为 **3**，单击 **OK** 按钮。重复步骤 (8)，在图形视窗中依次选择节点 3 和 4，然后单击 **OK** 按钮，连接节点 3 和 4 生成线单元 3。结果如图 12.29 所示。

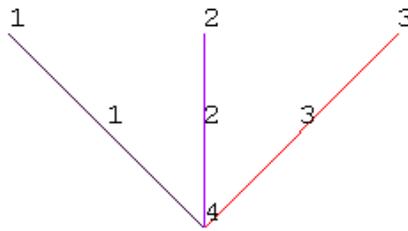


图12.29 生成单元

(11) 下面施加约束和荷载。单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes** 菜单, 弹出图形拾取对话框, 在图形视窗中依次选择节点 1、2 和 3, 单击【OK】按钮, 接着弹出【Apply U,ROT on Nodes】对话框, 选择【ALL DOF】, 单击【OK】按钮。

(12) 单击 **Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes** 菜单, 在图形视窗中选择节点 4, 单击【OK】按钮, 弹出【Apply F/M on Nodes】对话框, 在【Direction of force/mom】下拉列表框中选择【FX】, 在【Force/moment value】文本框中输入【200000】, 然后单击【Apply】按钮。

(13) 接着在【Direction of force/mom】下拉列表框中选择【FY】, 在【Force/moment value】文本框中输入【-200000】, 然后单击【OK】按钮。如图 12.30 所示。

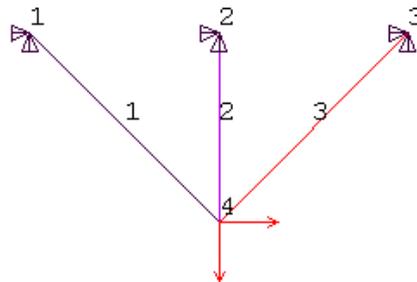


图12.30 施加约束条件

(14) 单击 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 菜单, 进行初次求解。求解完毕后, 将出现信息框告诉用户求解完毕。单击【Close】按钮关闭信息框。

(15) 下面提取参数结果。单击 **Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table** 菜单, 弹出【Element Table Data】对话框。单击【Add...】按钮弹出【Define Additional Element Table Items】对话框, 在【User label for item】文本框中输入【EVOL】, 在【Item,Comp Results data item】列表框的左侧选择【Geometry】, 右侧选择【Elem volume VOLU】, 然后单击【OK】按钮, 完成单击表 EVOL 的定义, 如图 12.31 所示。

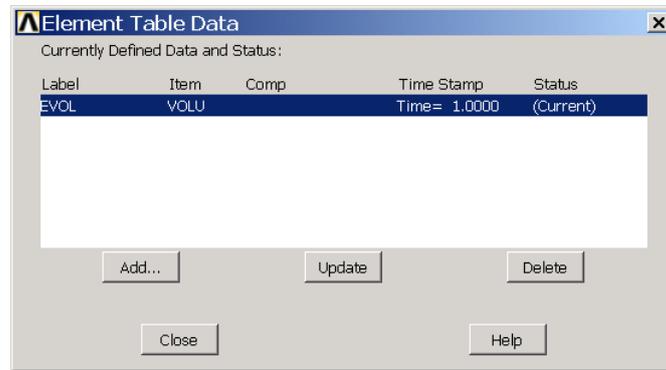


图12.31 定义单元表EVOL

(16) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Sum of Each Item 菜单，弹出【Tabular Sum of Each Element Table Item】对话框。单击【OK】按钮计算总和，将列表显示总和为【0.382843E+07】。

(17) 单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Get Scalar Data】菜单，弹出【Get Scalar Data】对话框，在【Type of Data to be Retrieved】列表框左列单击【Results Data】，在右列单击【Elem Table Sums】，单击【OK】按钮弹出【Get Element Table Sum Results】对话框，在【Name of Parameter to be Defined】文本框中输入【VTOT】，然后单击【OK】按钮。

(18) 单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，在【Selection】文本框中输入【RHO=2.85E-4】，单击【Accept】按钮，再在【Selection】文本框中输入【WT=RHO*VTOT】，单击【Accept】按钮。如图 12.32 所示。

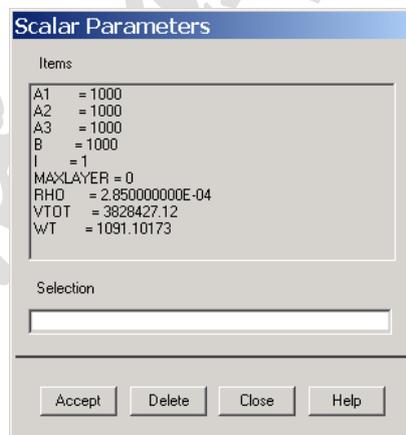


图12.32 读出单元总体积

(19) 单击 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 菜单，弹出【Element Table Data】对话框。单击【Add...】按钮弹出【Define Additional Element Table Items】对话框，在【User label for item】文本框中输入【SIG】，在【Item,Comp Results data item】列表框的左侧选择【By Sequence Num】，右侧选择【LS】，在【Section】文本框中输入【LS,1】，然后单击【OK】按钮，完成单元表 SIG 的定义。

(20) 单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Get Scalar Data】菜单，弹出【Get Scalar

Data】对话框，在【Type of Data to be Retrieved】列表框左列单击【Results Data】，在右列单击【Elem Table Data】，单击【OK】按钮弹出【Get Element Table Data】对话框，在【Name of Parameter to be Defined】文本框中输入【SIG1】，在【Element Number N】文本框中输入【1】，再在【Elem Table Data to be Retrieved】列表框的左侧选择【Results Data】，在右侧选择【Elem Table Data】，然后单击【OK】按钮，完成单元表 SIG1 的定义。

(21) 按上一步的方法定义单元表 SIG2 和 SIG3 分别读取单元 2 和 3 的轴向应力。

(22) 单击【Utility Menu】|【Parameters】|【Scalar Parameters】菜单，在【Selection】文本框中输入【SIG1=ABS(SIG1)】，单击【Accept】按钮，再在【Selection】文本框中输入【SIG2=ABS(SIG2)】，单击【Accept】按钮，再在【Selection】文本框中输入【SIG3=ABS(SIG3)】，单击【Accept】按钮。完成轴向应力的读取，如图 12.33 所示。

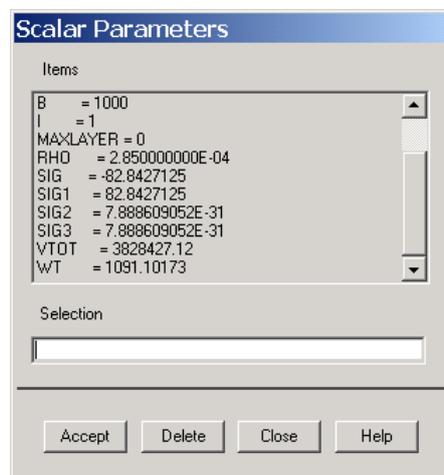


图12.33 读取单元轴向应力

(23) 下面生成优化分析文件。单击【Utility Menu】|【File】|【Write DB Log File】菜单，弹出【Write Database Log】对话框，在【Write Database Log To】文本框中输入【truss.lgw】，单击【OK】按钮。

(24) 下面指定分析文件。单击 Main Menu>Design Opt>Analysis File>Assign 菜单，弹出如图 12.34 所示的对话框。在【Assign Analysis file】文本框中输入刚才生成的分析文件名【truss.lgw】，单击【OK】按钮即可。



图12.34 指定分析文件

(25) 下面定义优化变量。单击 Main Menu>Design Opt>Design Variables 菜单，弹出【Design Variables】对话框。

(26) 单击【Add...】按钮弹出【Define a Design Variable】对话框，在【Parameter name】

列表框中选择【B】，在【Minimum Value】文本框中输入【400】，在【Maximum value】文本框中输入【2000】，如图 12.35 所示。然后单击【Apply】按钮。

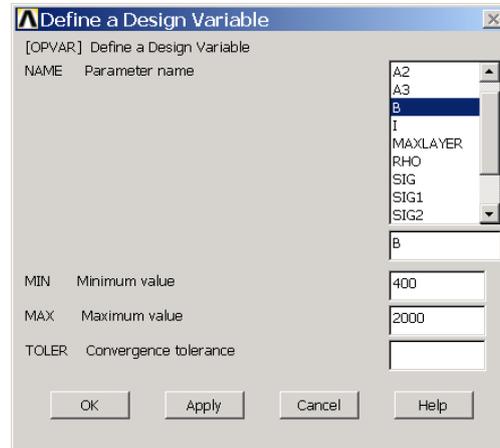


图12.35 定义设计变量B

(27) 重复上一步的操作，分别定义 A1、A2 和 A3 为设计变量，其取值范围均为 (1~1000)。完成后的设计变量如图 12.36 所示。



图12.36 定义的设计变量

(28) 单击 Main Menu>Design Opt>State Variables 菜单，弹出【State Variables】对话框。

(29) 单击【Add...】按钮，弹出【Define a State Variable】对话框。在【Parameter name】列表框中选择【SIG1】，在【Upper Limit】文本框中输入【400】，如图 12.37 所示。然后单击【Apply】按钮。

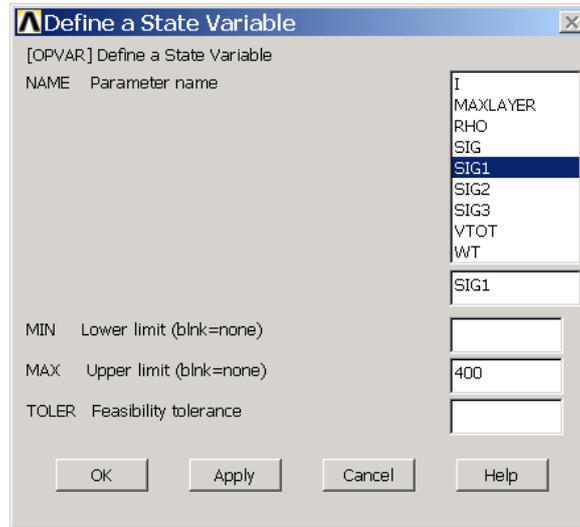


图12.37 定义状态变量SIG1

(30) 重复上一步的操作，分别定义 SIG2 和 SIG3 为状态变量，其取值范围和 SIG1 相同。完成后的状态变量如图 12.38 所示。



图12.38 定义的状态变量

(31) 单击 Main Menu>Design Opt>Opt Database>Save 菜单，弹出如图 12.39 所示的【Save Optimization Data】对话框。在【Filename】文本框中输入【trussvar.opt】，单击【OK】按钮。

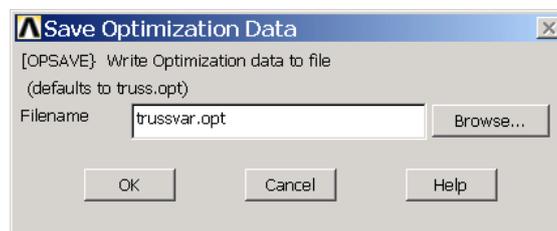


图12.39 存储优化数据库

(32) 单击 Main Menu>Design Opt>Objective 菜单，弹出如图 12.40 所示的【Define Objective Function】对话框。在【Parameter name】列表框中选择【WT】，在【Convergence tolerance】文本框中输入【2】，然后单击【OK】按钮，完成目标函数的定义。

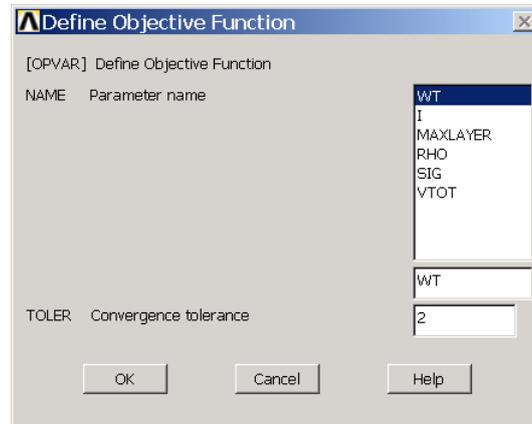


图12.40 定义目标函数

(33) 下面选择优化工具。单击 **Main Menu>Design Opt>Method/Tool** 菜单，弹出如图 12.41 所示的 **Specify Optimization Method** 对话框。选择 **First-Order**（一阶方法），然后单击 **OK** 按钮。

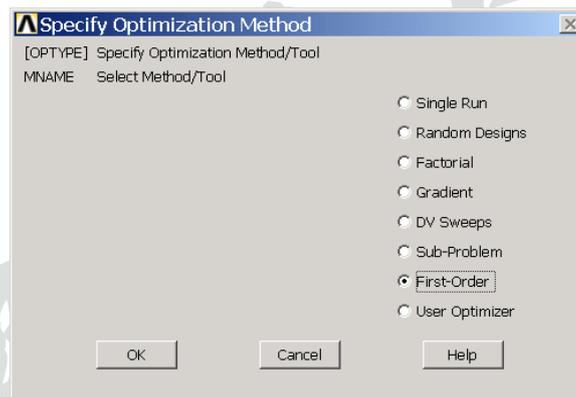


图12.41 选择优化方法

(34) 接着弹出如图 12.42 所示的对话框。在 **Maximum iterations** 文本框中输入 **45**，然后单击 **OK** 按钮。

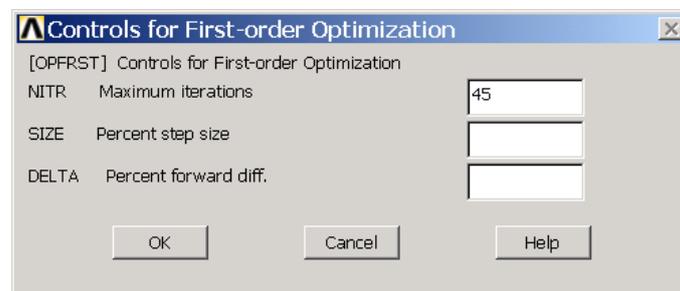
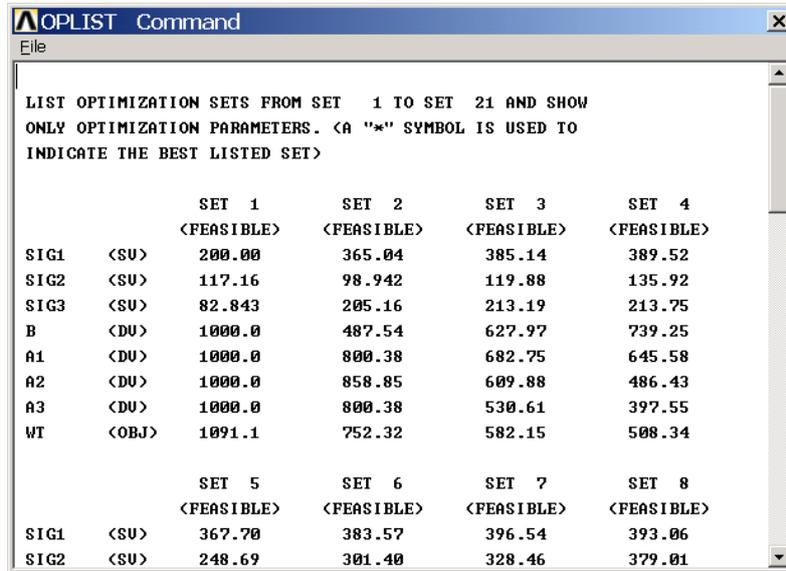


图12.42 定义最大迭代次数

(35) 下面运行优化。单击 **Main Menu>Design Opt>Run** 菜单，弹出 **Begin Execution of Run** 对话框，单击 **OK** 按钮，开始优化分析。分析可能会持续一段时间，结束后会弹

出确认对话框，显示最优设计序列的编号。

(36)下面查看结果。单击 Main Menu>Design Opt>Design Sets>List 菜单，弹出【List Design Set】对话框。选择【ALL Sets】单元按钮，并单击【OK】按钮，将列表显示所有设计序列，如图 12.43 所示。



The screenshot shows a window titled 'OPLIST Command' with a menu bar containing 'File'. The main text area contains the following text and table:

```
LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 21 AND SHOW  
ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO  
INDICATE THE BEST LISTED SET)
```

		SET 1	SET 2	SET 3	SET 4
		<FEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>
SIG1	<SU>	200.00	365.04	385.14	389.52
SIG2	<SU>	117.16	98.942	119.88	135.92
SIG3	<SU>	82.843	205.16	213.19	213.75
B	<DU>	1000.0	487.54	627.97	739.25
A1	<DU>	1000.0	800.38	682.75	645.58
A2	<DU>	1000.0	858.85	609.88	486.43
A3	<DU>	1000.0	800.38	530.61	397.55
WT	<OBJ>	1091.1	752.32	582.15	508.34

		SET 5	SET 6	SET 7	SET 8
		<FEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>	<FEASIBLE>
SIG1	<SU>	367.70	383.57	396.54	393.06
SIG2	<SU>	248.69	301.40	328.46	379.01

图12.43 列表显示设计序列

(37) 单击 Main Menu>Design Opt>Design Sets>Graphs/Tables 菜单，弹出【Graph/List Tables of Design Set Parameters】对话框。在【Y-variable params】列表框中选择【WT】。单击【OK】按钮，将显示重量的迭代图形，如图 12.44 所示。

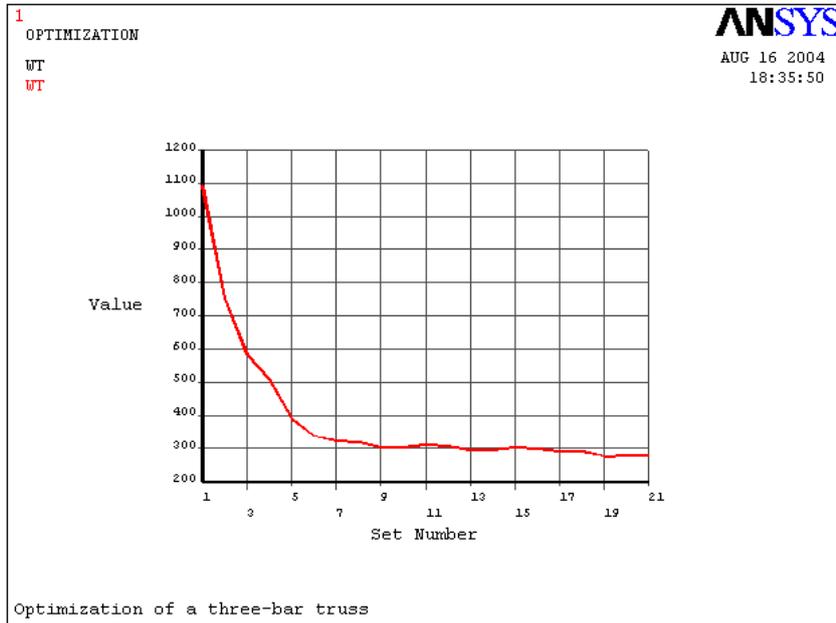


图12.44 重量迭代图形

(38) 单击 Main Menu>Design Opt>Design Sets>Graphs/Tables 菜单，弹出【Graph/List Tables of Design Set Parameters】对话框。在【Y-variable params】列表框中选择【A1】、【A2】和【A3】。单击【OK】按钮，将显示截面面积的迭代图形，如图 12.45 所示。

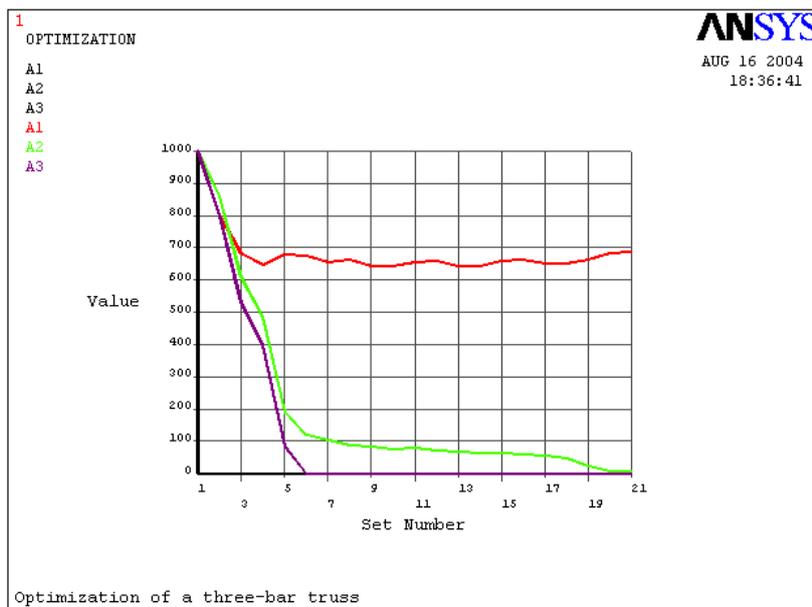


图12.45 面积迭代图形

3. 命令流方式

通过命令流方式进行优化分析的步骤如下：（以“!”开始的行为注释行，可不输入）

```

/FILNAM,truss
/TITLE,Optimization of a three-bar truss
!初始化设计变量参数
B=1000                !基本尺寸
A1=1000              !第一个面积
A2=1000              !第二个面积
A3=1000              !第三个面积
!
!进入 PREP7 并建模
/PREP7
ET,1,LINK1           !二维杆单元
R,1,A1                !以参数形式的实参
R,2,A2
R,3,A3
MP,EX,1,2.1E6        !杨氏模量
N,1,-B,0,0           !定义结点
N,2,0,0,0
N,3,B,0,0
N,4,0,-1000,0
E,1,4                 !定义单元
REAL,2
E,2,4
REAL,3
E,3,4
FINISH
!
!进入求解器，定义载荷和求解
/SOLU
D,1,ALL,0,,3         !结点 UX=UY=0
F,4,FX,200000        !结点 4 上的 X 方向载荷分量
F,4,FY,-200000       !结点 4 上的 Y 方向载荷分量
SOLVE
FINISH
!
!进入 POST1 并读出状态变量数值
/POST1
SET, LAST
ETABLE, EVOL, VOLU   !将每个单元的体积放入 ETABLE
SSUM                 !将单元表格内数据求和
*GET, VTOT, SSUM, , ITEM, EVOL !VTOT=总体积
RHO=2.85E-4
WT=RHO*VTOT         !计算总体积
ETABLE, SIG, LS, 1   !将轴向应力放入 ETABLE
!
*GET, SIG1, ELEM, 1, ETAB, SIG !SIG1=第一个单元的轴向应力
*GET, SIG2, ELEM, 2, ETAB, SIG !SIG2=第二个单元的轴向应力
*GET, SIG3, ELEM, 3, ETAB, SIG !SIG3=第三个单元的轴向应力
!
SIG1=ABS(SIG1)       !计算轴向应力的绝对值
SIG2=ABS(SIG2)
SIG3=ABS(SIG3)
!

```

```

/ESHAPE,2 !以实体单元模式显示壳单元
/VIEW,1,1,1,1 !轴测视图
EPLOT !画单元
!
/OPT !进入优化处理器
OPANL,truss,lgw !指定分析文件（批处理方式中不用这个命令）
!
OPVAR,B,DV,400,2000 !定义设计变量
OPVAR,A1,DV,1,1000
OPVAR,A2,DV,1,1000
OPVAR,A3,DV,1,1000
OPVAR,SIG1,SV,,400 !定义状态变量
OPVAR,SIG2,SV,,400
OPVAR,SIG3,SV,,400
!
OPSAVE,trussvar,opt !存储数据
!
OPVAR,WT,OBJ,,,2, !定义目标函数
!
OPTYPE,FIRST !定义一阶方法
OPFRST,45 !最大45次迭代
OPEXE !开始优化分析
!
OPLIST,ALL !列出所有设计序列
!
/VIEW,1,,,1 !前视图
!
/AXLAB,X,ITERATION NUMBER !画重量对迭代数图形
/AXLAB,Y STRUCTURE WEIGHT
PLVAROPT,WT
!
/AXLAB,Y,BASE DIMENSION !画B对迭代数图形
PLVAROPT,B
!
/AXLAB,Y,MAX STRESS !画最大应力对迭代数图形
PLVAROPT,SIG1,SIG2,SIG3
!
/AXLAB,Y,CROSS-SECTIONAL AREA !画面积对迭代数图形
PLVAROPT,A1,A2,A3
!
FINISH
/EXIT

```