



计算机工程应用系列丛书



ANSYS

工程应用教程

机械篇

★ 由浅入深地讲解了ANSYS基础知识、ANSYS建模、有限元法基础等。

★ 分别说明ANSYS在静力学分析、动力学分析和热力学分析中的功能。

★ 以开发五轴联动铣头的项目为实例，介绍大型通用工程数据模拟软件ANSYS在机械方面的应用。

刘国庆 ● 杨庆东 ● 编 著

★ ANSYS是世界上有限元分析占有率第一的泛用型软件，是现代机械产品设计中的重要工具。

★ 强大的程序功能和友好的图形用户界面（GUI）使其易学易用。

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

号 880 字 登 版 (京)

(Window) 图 容 内

ANSYS 工程应用教程

——机械篇

刘国庆 杨庆东 编著



ANSYS 工程应用教程——机械篇

中国铁道出版社
地址：北京市宣武门大街100号
邮编：100045
电话：(010) 63702444
网址：http://www.tdp.com.cn
ISBN 7-113-04409-8
定价：25.00元

中国铁道出版社

2003·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书介绍了大型通用工程数值模拟软件 ANSYS 在机械方面的应用。书中围绕开发五轴联动铣头的项目,采用多个实例介绍 ANSYS 在静力学分析、动力学分析、热力学分析中的使用以及 ANSYS 的高级分析技术。

本书可作为理工科院校机械专业本科生、研究生及教师学习使用 ANSYS 软件的教材或参考书,也可以作为机械行业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 工程应用教程——机械篇/刘国庆,杨庆东 编著. —北京:中国铁道出版社,2002.11

(计算机工程应用系列)

ISBN 7-113-04995-8

I. A… II. ①刘… ②杨… III. 分析力学-应用软件, ANSYS-教材 IV. TP319:0316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 088800 号

书 名: ANSYS 工程应用教程——机械篇

作 者: 刘国庆 杨庆东

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑: 严晓舟 魏 春

责任编辑: 苏 茜 张丽群

封面设计: 孙天昭

印 刷: 河北省遵化市胶印厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21 25 字数: 507 千

版 本: 2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~5000 册

书 号: ISBN 7-113-04995-8/TP·809

定 价: 32.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

前 言

ANSYS 是大型通用有限元分析软件。有限元法是一种采用电子计算机求解结构静、动态力学特性等问题的数值解法。由于有限元法具有精度高、适应性强以及计算格式规范统一等优点,故在短短 50 多年间已广泛应用于机械、宇航航空、汽车、船舶、土木、核工程及海洋工程许多领域,成为现代机械产品设计中的一种重要工具。特别是随着电子计算机技术的发展和软、硬件环境的不断完善以及高档微机和计算机工作站的逐步普及,从而为 ANSYS 的推广应用创造了良好的条件,并将展示出更为广阔的工程应用前景。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单,包括:结构分析、电磁分析、流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、参数设计语言等功能。尽管 ANSYS 程序功能强大,但其拥有友好的图形用户界面(GUI)。通过 GUI 可以方便地交互访问程序的各种功能、命令、用户手册和参考资料,一步一步地完成整个分析,因而使 ANSYS 易于使用。

本书是编者在使用 ANSYS 解决机械领域中实际问题的基础上,参考了大量有关有限元方法和 ANSYS 的文献资料后写成的。书中采用的实例来源于开发五轴联动铣头的项目,这样可以使读者对本书的多个实例介绍有一个总体的认识,并可以由浅入深、循序渐进地介绍 ANSYS 的操作。本书中的实例分为静力学分析、动力学分析和热力学分析三个方面。

静力学分析计算在固定不变的载荷作用下结构的效应,它不考虑惯性和阻尼的影响,如结构随时间变化载荷的情况。

动力学分析分为模态分析和谐响应分析。模态分析用于确定设计中的结构或机器部件的振动特性(固有频率和振型),也是瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析的起点。模态分析过程由四个主要步骤组成:建模、加载及求解、扩展模态和检查结果。谐响应分析用于分析持续的周期载荷在结构系统中产生的持续的周期响应(谐响应),以及确定线性结构承受随时间按正弦(简谐)规律变化的载荷时稳定响应的一种技术。

在本书中涉及的热力学分析为稳态热分析,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。

在编写和审稿中,得到北京机械工业学院石小滨、曹东兴、黄小龙、张淑兰、郝刚、刘绍婕、姜学斌、王荣、张春燕、王梓、曹爱东、冉林仓、吴国新、刘彦君、宋玉金等多位老师的大力支持和帮助,在此致以衷心的感谢。

此外,由于时间仓促,书中恐有不当之处,烦请读者多加指正,编者 E-mail: liu0311@263.net。

对于计划和正在使用 ANSYS 解决机械领域问题的研究生、教师和工程师来说,这是一本十分有价值的参考书。

编 者

2002 年 11 月于北京

目 录

第 1 章	初识 ANSYS.....	1
1.1	ANSYS 简介.....	1
1.2	初识 ANSYS.....	2
1.3	实例操作.....	3
1.3.1	建立 ANSYS 实体模型.....	3
1.3.2	网格划分.....	4
1.3.3	模型操作.....	6
1.3.4	ANSYS 帮助系统.....	8
1.3.5	退出 ANSYS	8
第 2 章	有限单元法基础.....	11
2.1	有限单元法的基本概念.....	11
2.2	结构动力学分析的有限元法.....	11
2.2.1	引言	11
2.2.2	固有振动特性.....	15
2.2.3	动力响应特性.....	18
2.3	温度场的有限元法.....	23
2.3.1	温度场问题的基本方程.....	23
2.3.2	稳态温度场的有限元法.....	25
2.3.3	瞬态温度场的有限元法.....	29
第 3 章	ANSYS 建模.....	31
3.1	模型生成概述.....	31
3.1.1	什么是模型生成.....	31
3.1.2	ANSYS 中建模的典型步骤.....	31
3.1.3	实体建模和直接生成的比较.....	32
3.1.4	从 CAD 系统中输入的实体模型	33
3.2	规划分析方案.....	33
3.2.1	规划的重要性.....	33
3.2.2	确定分析目标.....	33
3.2.3	选择模型类型（二维、三维等）.....	33
3.2.4	线性单元和高次单元的选择.....	34
3.2.5	不同单元连接的限制.....	37
3.2.6	找到利用对称性的办法.....	37

3.2.7	决定包含多少细节.....	39
3.2.8	确定合适的网格密度.....	39
3.3	坐标系.....	39
3.3.1	坐标系的类型.....	39
3.3.2	总体和局部坐标系.....	40
3.3.3	显示坐标系.....	43
3.3.4	节点坐标系.....	44
3.3.5	单元坐标系.....	45
3.3.6	结果坐标系.....	45
3.4	利用工作平面.....	46
3.4.1	什么是工作平面.....	46
3.4.2	生成一个工作平面.....	46
3.4.3	增强的工作平面.....	48
3.5	实体造型.....	51
3.5.1	实体造型操作概述.....	51
3.5.2	用自底向上的方法建模.....	54
3.5.3	用自顶向下的方法建模: 体素.....	54
3.5.4	用布尔运算雕塑实体模型.....	59
3.5.5	布尔运算之后的更新.....	70
3.5.6	移动和拷贝实体模型.....	71
3.5.7	实体模型图元的缩放.....	72
3.5.8	实体模型加载.....	73
3.5.9	质量和惯量的计算.....	75
3.6	输入实体模型.....	76
3.6.1	从 IGES 文件中输入实体模型.....	76
3.6.2	用 IGES 文件进行工作.....	76
第 4 章	ANSYS 网格划分及修改模型.....	93
4.1	如何对实体模型进行网格划分.....	93
4.2	定义单元属性.....	94
4.2.1	生成单元属性表.....	94
4.2.2	在划分网格之前分配单元属性.....	95
4.3	网格划分控制.....	96
4.3.1	ANSYS 网格划分工具.....	96
4.3.2	单元形状.....	97
4.3.3	选择自由或映射网格划分.....	98
4.3.4	控制边中节点的位置.....	99
4.3.5	自由网格划分中单元的 SmartSizing.....	99
4.3.6	对映射网格划分的缺省单元尺寸.....	101

4.3.7	局部网格划分控制.....	102
4.3.8	网格划分控制.....	104
4.3.9	生成过渡的棱锥单元.....	108
4.3.10	将退化的四面体单元转化为非退化形式.....	109
4.3.11	对层进行网格划分.....	111
4.3.12	通过 GUI 设置层网格划分控制.....	111
4.4	自由网格和映射网格划分控制.....	112
4.4.1	自由网格划分.....	113
4.4.2	映射网格划分.....	114
4.5	实体模型的网格划分.....	121
4.5.1	用 xMESH 命令生成网格.....	121
4.5.2	生成带有方向节点的梁单元网格.....	122
4.5.3	由面生成体网格.....	126
4.5.4	用 xMESH 命令的注意事项.....	126
4.5.5	通过扫掠生成体网格.....	126
4.5.6	中断网格划分操作.....	132
4.5.7	单元形状检查.....	132
4.6	改变网格.....	138
4.6.1	对模型重新划分网格.....	138
4.6.2	利用网格 Accept/Reject 提示.....	139
4.6.3	清除网格.....	139
4.6.4	细化局部网格.....	139
4.6.5	改进网格（只针对四面体单元网格）.....	139
4.7	一些提示和注意事项.....	141
4.7.1	注意事项.....	141
4.7.2	进一步的提示.....	142
4.8	修改模型.....	142
4.8.1	简介.....	142
4.8.2	细化局部网格.....	143
4.8.3	节点和单元的移动与拷贝.....	149
4.8.4	记录单元面和方向.....	151
4.8.5	已划分网格模型的修改：清除和删除.....	154
4.8.6	理解实体模型的相互对照检查.....	157
4.9	网格直接生成.....	158
4.9.1	什么是直接生成.....	158
4.9.2	节点.....	159
4.9.3	从已有节点生成另外的节点.....	159
4.9.4	移动节点.....	160
4.9.5	单元.....	162

4.10	管路模型.....	167
4.10.1	管路命令简介.....	167
4.10.2	管路命令能做的工作.....	167
4.10.3	用管路命令建立管路系统模型.....	167
4.10.4	输入示例.....	170
4.11	编号控制和单元重排序.....	171
4.11.1	编号控制.....	171
4.11.2	单元重排序.....	175
4.12	耦合和约束方程.....	176
4.12.1	概述.....	176
4.12.2	什么是耦合.....	176
4.12.3	如何生成耦合自由度集.....	176
4.12.4	耦合的其他条件.....	177
4.12.5	什么是约束方程.....	177
4.12.6	如何生成约束方程.....	178
4.12.7	约束方程的其他注意事项.....	180
4.13	模型的合并和归档.....	181
4.13.1	合并模型.....	181
4.13.2	模型归档.....	181
4.14	ANSYS 与其他程序的接口.....	183
4.14.1	什么是接口软件.....	183
4.14.2	与计算机辅助设计 (CAD) 程序的接口.....	183
4.14.3	与其他有限元分析 (FEA) 程序的接口.....	183
4.14.4	其他接口.....	183
第 5 章	结构静力分析.....	185
5.1	结构分析概述.....	185
5.2	结构线性静力分析.....	186
5.3	结构非线性静力分析.....	186
5.4	静力分析实例(一).....	200
5.4.1	问题描述.....	200
5.4.2	计算铣削力.....	201
5.4.3	GUI 方式分析过程.....	202
5.5	静力分析实例 (二).....	208
5.5.1	问题描述.....	208
5.5.2	GUI 方式分析过程.....	209
5.5.3	结果分析.....	211
第 6 章	ANSYS 动力学分析.....	213
6.1	模态分析.....	213

6.1.1	模态分析简介.....	213
6.1.2	建模	213
6.1.3	加载及求解.....	213
6.1.4	扩展模态.....	216
6.1.5	观察结果.....	217
6.2	模态分析实例（一）	218
6.2.1	引言	218
6.2.2	三维有限元的基本理论.....	219
6.2.3	结构材料性能参数.....	222
6.2.4	结构的建模和分网.....	222
6.2.5	加载及求解.....	227
6.2.6	临界转速分析.....	232
6.3	模态分析实例（二）	233
6.3.1	引言	233
6.3.2	模态分析.....	234
6.4	谐响应分析.....	239
6.4.1	谐响应分析的三种求解方法.....	239
6.4.2	谐响应分析的步骤.....	240
6.5	谐响应分析实例.....	245
6.5.1	引言	245
6.5.2	激振力的确定.....	246
6.5.3	响应特性分析.....	247
6.5.4	加工精度分析.....	252
6.6	基础件的动力学分析.....	253
6.6.1	引言	253
6.6.2	动力学分析.....	253
6.6.3	结果分析.....	260
第 7 章	ANSYS 热力学分析.....	263
7.1	热分析的基础知识.....	263
7.1.1	符号与单位.....	263
7.1.2	传热学经典理论回顾.....	263
7.1.3	热传递的方式.....	264
7.2	稳态热分析.....	266
7.2.1	稳态传热的定义.....	266
7.2.2	热分析的单元.....	266
7.2.3	ANSYS 稳态热分析的基本过程.....	266
7.3	瞬态热分析.....	270
7.3.1	瞬态传热分析的定义.....	270

7.3.2	瞬态热分析中的单元及命令.....	271
7.3.3	ANSYS 瞬态热分析的主要步骤.....	271
7.3.4	建模	271
7.3.5	加载求解.....	271
7.3.6	后处理.....	274
7.3.7	相变问题.....	274
7.4	热力学分析实例.....	275
7.4.1	引言	275
7.4.2	建立有限元模型.....	276
7.4.3	求取热力学系数.....	277
7.4.4	加载并求解.....	277
7.4.5	计算结果分析与改进措施.....	279
7.5	热辐射.....	280
7.5.1	什么是热辐射.....	280
7.5.2	分析热辐射问题.....	280
7.5.3	使用 LINK31——辐射线单元	280
7.5.4	使用表面效应单元.....	280
7.5.5	使用 AUX12——辐射矩阵生成器.....	280
第 8 章	ANSYS 高级分析技术.....	283
8.1	优化设计.....	283
8.1.1	基本概念.....	283
8.1.2	优化设计的步骤.....	284
8.1.3	优化设计的关键点.....	293
8.1.4	优化分析的示例 (GUI 方法)	303
8.2	拓扑优化.....	315
8.2.1	什么是拓扑优化.....	315
8.2.2	如何做拓扑优化.....	315
8.2.3	拓扑优化示例.....	319
8.3	单元的生和死.....	321
8.3.1	何为单元的生和死.....	321
8.3.2	单元生死是如何工作的.....	322
8.3.3	如何使用单元生死特性.....	322
8.3.4	单元生死应用实例 (命令行格式)	326

第 1 章

初识 ANSYS

1.1 ANSYS 简介

ANSYS 软件是大型通用有限元分析软件。有限元法是一种采用电子计算机求解结构静、动态力学特性等问题的数值解法。由于有限元法具有精度高、适应性强以及计算格式规范统一等优点,故在短短 50 多年间已广泛应用于机械、宇航航空、汽车、船舶、土木、核工程及海洋工程许多领域,已成为现代机械产品设计中的一种重要工具。特别是随着电子计算机技术的发展和软、硬件环境的不断完善以及高档计算机和计算机工作站的逐步普及,为 ANSYS 的推广应用创造了更为良好的条件,并展示出更为广阔的工程应用前景。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单,包括:结构分析、电磁分析、流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、参数设计语言等功能。

尽管 ANSYS 程序功能强大,但它友好的图形用户界面(GUI)使其易学易用。通过 GUI 可以方便地交互访问程序的各种功能、命令、用户手册和参考材料,可以一步一步地完成整个分析,因而使 ANSYS 易于使用。

ANSYS 按功能作用可分为:一个前处理器、一个求解器、两个后处理器、几个辅助处理器等。前处理器用于生成有限元模型;求解器用于施加载荷及边界条件,完成求解计算;后处理器用于获取求解结果,以便对模型做出评价。

而且 ANSYS 提供了数据接口程序,使得在其他 3D 软件中建立的模型很方便地导入 ANSYS 中。

在本书中将主要介绍 ANSYS 软件在机械方面的应用,即介绍静力学分析、动力学分析和热力学分析。利用 ANSYS 程序,机械工程师可以构造出机械产品、零部件或系统的计算机模型,对它们施加载荷或其他设计条件,可以得出相应的动静特性,对产品进行优化设计,以降低生产成本。

ANSYS 程序可以运行于 Windows 98、Windows NT、Windows 2000 和 UNIX 操作系统下的 PC 机、工作站。下面介绍的 ANSYS 程序都是运行于操作系统为 Windows 2000 的 PC 机上。

1.2 初识 ANSYS

从开始菜单下启动 ANSYS，如图 1-1，依次选择“开始→程序→ANSYS5.6→Interactive”菜单选项，出现如图 1-2 所示的对话框。

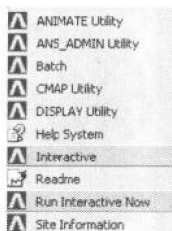


图 1-1 ANSYS 启动菜单

图 1-2 所示的对话框中“Product selection”项让您选择 ANSYS 产品；“Working directory”项让您选择 ANSYS 的工作目录；“Graphic device name”项让您选择显卡，如果您配置了 3D 显卡，则选择“3D”；“Initial jobname”项让您设定初始工作文件名，缺省为上次运行的工作文件名；“Memory requested (megabytes)”项让您设定 ANSYS 工作空间及数据库大小。

单击“Run”按钮即可运行 ANSYS。当然您也可以从图 1-1 所示的菜单中单击“Run Interactive Now”，将读取上一次的设置，直接运行 ANSYS。

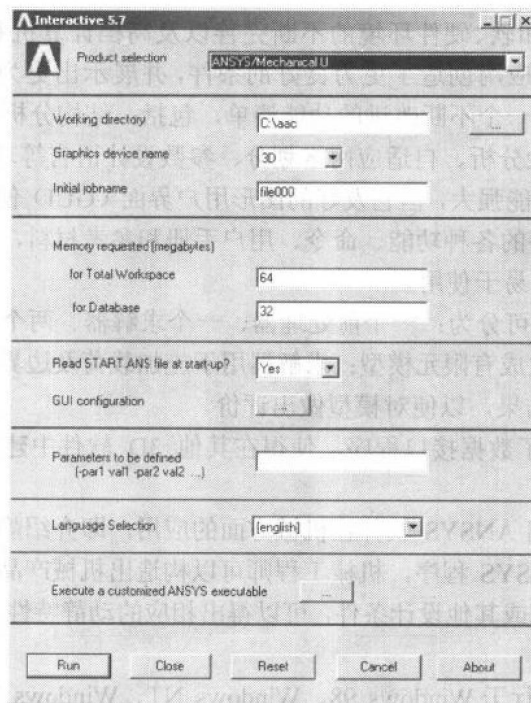


图 1-2 ANSYS 定制对话框

运行 ANSYS 后将出现应用菜单、输入、工具条、主菜单、图形和输出六个窗口，如图 1-3 所示。各个窗口的功能为：

- (1) 应用菜单窗口的主要功能是文件管理、显示控制和参数设置等;
- (2) 输入窗口的主要功能是输入各种命令;
- (3) 工具条窗口的主要功能是将常用的命令制成工具条, 方便调用;
- (4) 主菜单窗口的主要功能是 ANSYS 前处理、求解和后处理等;
- (5) 图形窗口的主要功能是显示由 ANSYS 创建的图形;
- (6) 输出窗口的主要功能是显示软件文本的输出。

下面您就可以建立有限元模型了。应用菜单

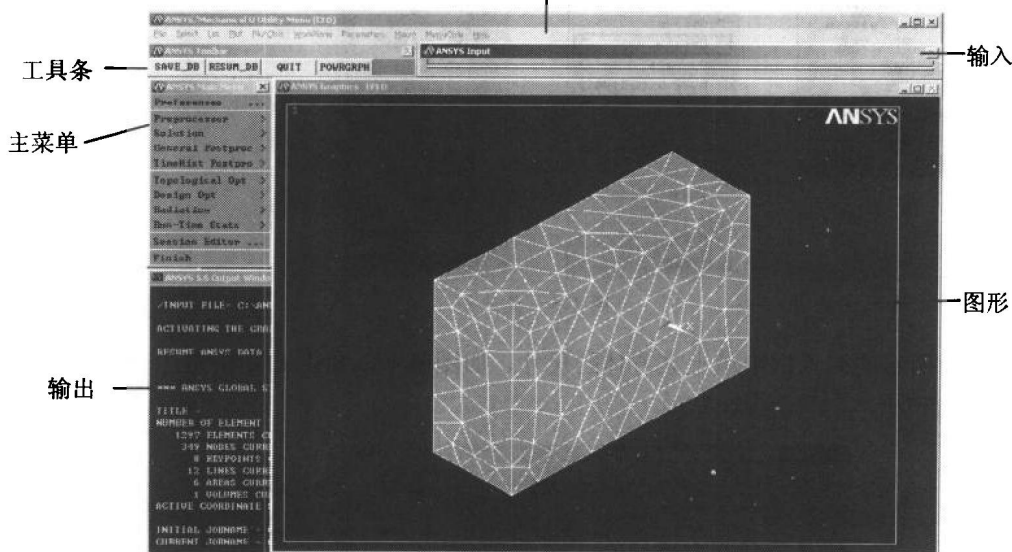


图 1-3 ANSYS 界面

1.3 实例操作

下面将建立一个 ANSYS 实体模型: $0.1\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的立方体, 并对它进行网格划分。通过这个实例, 让您对 ANSYS 的建模、网格划分和模型操作有一个初步的认识。

1.3.1 建立 ANSYS 实体模型

选择主菜单中的“Preferences”菜单选项, 将弹出如图 1-4 所示的对话框。在图中的“Structural”项前面打上勾, 它将只显示 Structural 的相关菜单, 否则将显示所有菜单项。

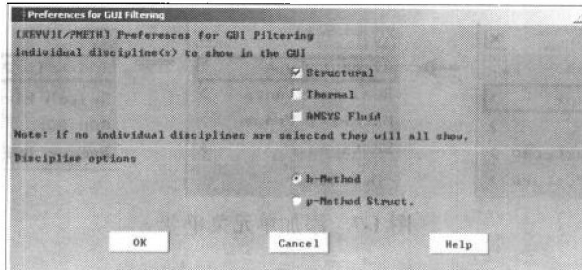


图 1-4 菜单过滤对话框

如图 1-5 所示,依次选择 “Preprocessor→Create→Block→By Dimensions” 菜单选项。(图 1-5 中的“→”表示在下一级菜单中选择某个菜单项,在以后各章都采用这种表示法),弹出如图 1-6 所示的对话框。ANSYS 主菜单的主要特点是:它的子菜单是相对独立的,迭加在主菜单上。您也可以单击“压住”的菜单,将它调到前面来。

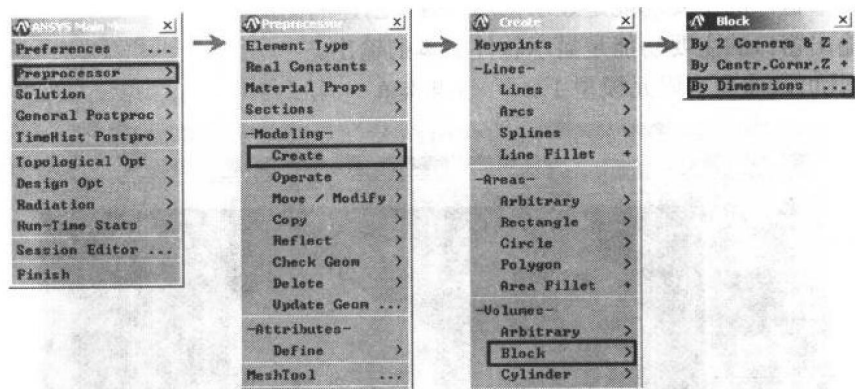


图 1-5 菜单

在图 1-6 所示的对话框中填上立方体的尺寸,如图所示,单击 OK 按钮,一个立方体就出现在图形窗口中。

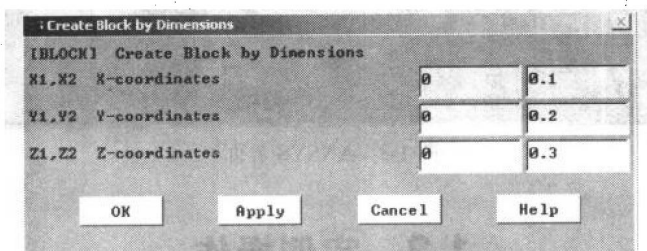


图 1-6 尺寸对话框

1.3.2 网格划分

立方体的实体模型已经建立,下面对其进行网格划分。具体的步骤如下:

1. 选择单元:如图 1-7 所示,选择菜单“Preprocessor→Element Type →Add/Edit/Delete”,出现如图 1-8 所示的对话框,接受默认选项,单击 Add 按钮,出现如图 1-9 所示的对话框,选择 Solid 中的 Brick 8node 45。

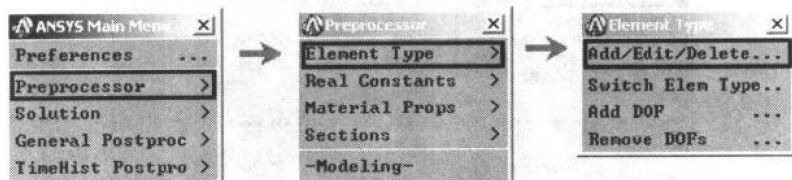


图 1-7 添加单元菜单

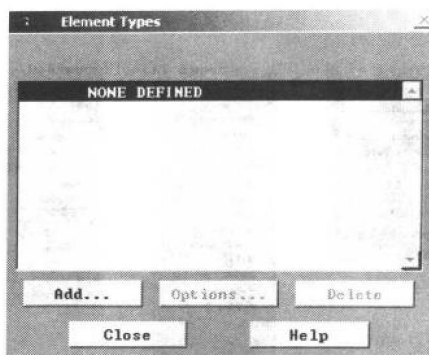


图 1-8 单元对话框

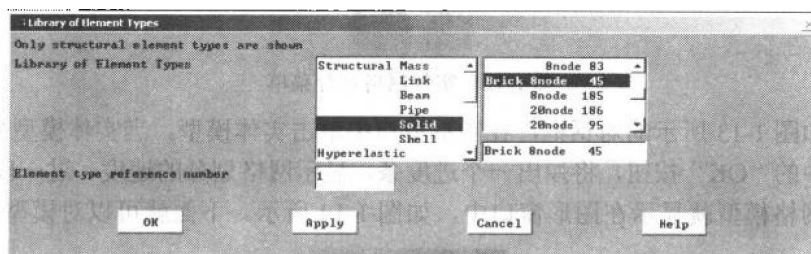


图 1-9 选择单元

2. 设置网格划分精度：如图 1-10 所示，依次选择 “Preprocessor→Meshing Size Cntrl→SmartSize Basic” 菜单选项，弹出如图 1-11 所示的对话框。

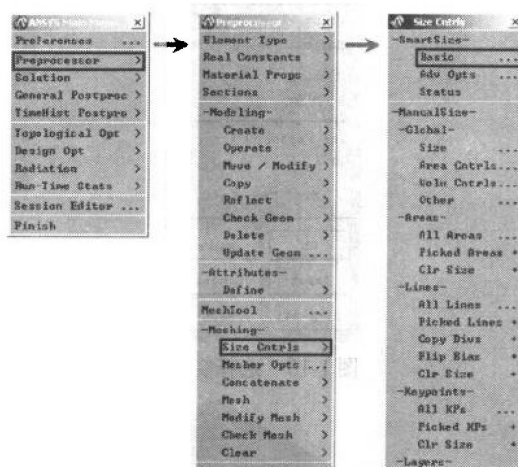


图 1-10 选择网格划分精度菜单

在 “Size Level” 文本框中选择网格划分的精度等级为 9。

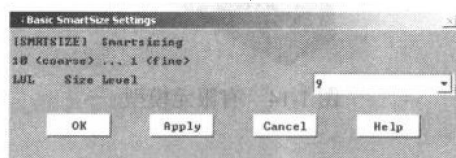


图 1-11 选择网格划分精度对话框

3. 网格划分：依次选择 “Preprocessor → Meshing Mesh → Volumes Free” 菜单选项，

如图 1-12 所示。

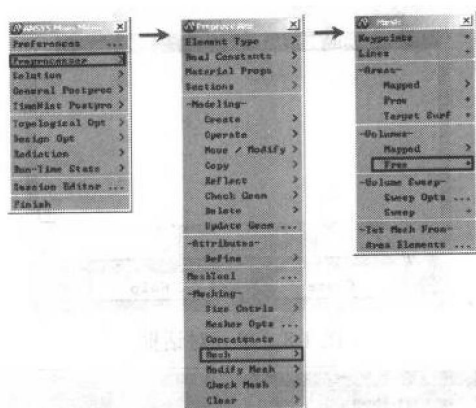


图 1-12 实体网格划分菜单

将弹出如图 1-13 所示的对话框，在图形窗口中单击实体模型。当实体模型变为红色后，单击对话框中的“OK”按钮，将弹出一个进度条，显示网格划分的速度。过一段时间，进度条消失后，网格模型就显示在图形窗口中，如图 1-14 所示。下面就可以对模型进行操作。

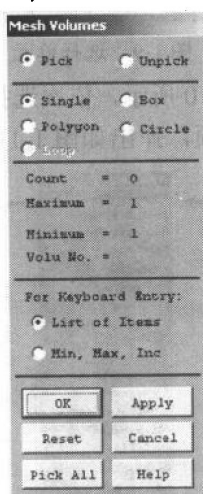


图 1-13 选择实体

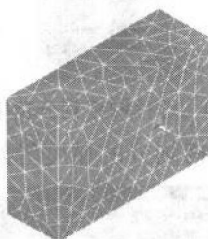


图 1-14 有限元模型

1.3.3 模型操作

您创建的立方体模型是由多个单元构成的，而每个单元又由节点构成。立方体的创建过

程是：关键点→面→立方体。

如图 1-15 所示，选择应用菜单中的 Plot 选项，分别选择 Keypoints、Lines 和 Areas，图形窗口中显示的对应图形见图 1-16。

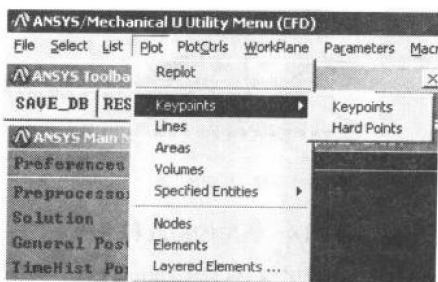


图 1-15 绘图菜单

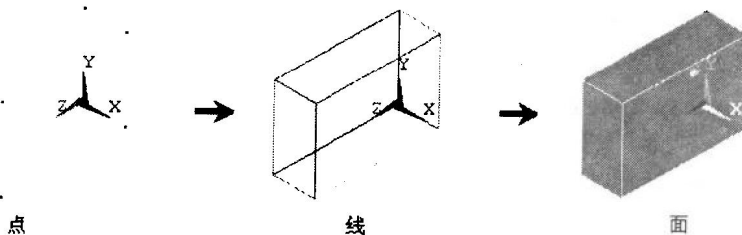


图 1-16 立方体的点线面

下面介绍模型的平移、缩放和旋转。

选择应用菜单中“PlotCtrls→Pan-Zoom-Rotate...”选项，弹出 Pan-Zoom-Rotate 对话框。下面将该对话框分为三个部分，分别介绍各个部分的功能：

1. 模型视图的转换：如图 1-17，标出了各个按钮的功能。当您单击“Iso”按钮后，在图形窗口中将显示立方体的正等轴侧图。

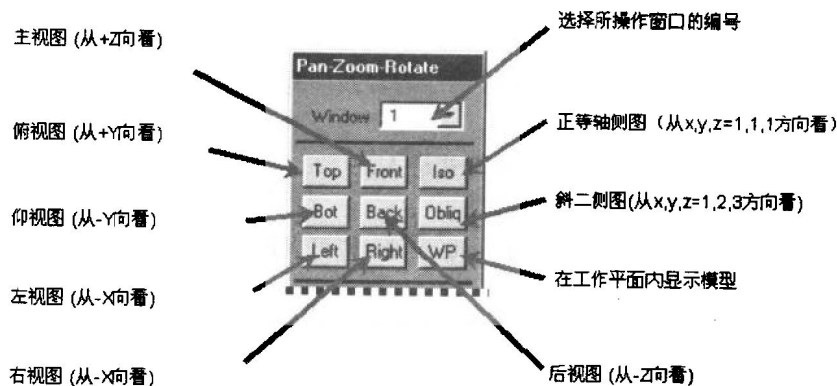


图 1-17 模型视图的转换

2. 模型的缩放和平移：如图 1-18，标出了各个按钮的功能。当您单击“Back Up”按钮后，将恢复到缩放前的画面。