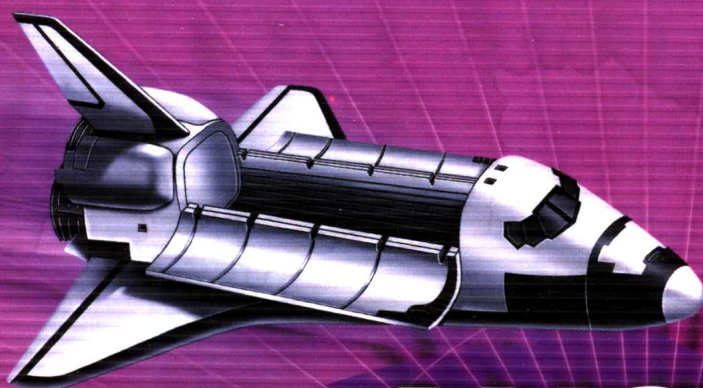


计算机工程应用系列丛书



ANSYS7.0 教学范例

★ 说明了有限元素的基本原理、
电脑辅助工程分析的基本结构
与ANSYS的操作界面。

★ 介绍了桁架、板和角架的
位移，以及应力的分析。

★ 通过范例介绍热应力、流体的
稳流与紊流分析，以及最佳化
设计等。

★ 论述了模型的自然振动频率
与模态的分析，以及梁与板
结构的挫屈分析。

★ ANSYS是世界上有限元素分析
占有率第一名的泛用型工具

洪庆章 • 刘清吉 • 郭嘉源 • 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

ANSYS 7.0 教学范例

洪庆章 刘清吉 郭嘉源 编著



中国铁道出版社

2003年·北京

(京)新登字 063 号

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2002-1576 号

版 权 声 明

本书中文繁体字版由台湾知城数位科技股份有限公司出版。本书中文简体字版经台湾知城数位科技股份有限公司授权由中国铁道出版社出版。任何单位或个人未经出版者书面允许不得以任何手段复制或抄袭本书内容。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 7.0 教学范例/洪庆章, 刘清吉, 郭嘉源编著. —北京: 中国铁道出版社, 2003. 7
(计算机工程应用系列丛书)

ISBN 7-113-05413-7

I. A… II. ①洪…②刘…③郭… III. 有限元分析-应用程序, ANSYS7.0 IV. 0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 060633 号

书 名: ANSYS 7.0 教学范例

作 者: 洪庆章 刘清吉 郭嘉源

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 郭毅鹏

责任编辑: 苏 茜 赵树刚

封面设计: 孙天昭

印 刷: 北京市彩桥印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25 字数: 593 千

版 本: 2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~5000 册

书 号: ISBN 7-113-05413-7/TP·999

定 价: 40.00 元

版权所有 盗版必究

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。

出版说明

随着科学技术的进一步发展，企业只有提高设计研发的能力，才能跟上发展的脚步。而在产品开发的过程中，分析过程是一项重要的工作，其分析必须经过不断地修改，以得到最佳化的效果。所以，我们希望通过计算机辅助工程分析软件（ANSYS），帮助您解决相关的复杂问题，做出最佳化的设计，并且还可以了解到整个分析的流程。

书中内容循序渐进，希望能引导读者提高对计算机辅助工程分析的认识能力。

本文第6章提及的 `actuatr.iges` 文件，可在 <http://www.tqbooks.net/download.asp> 中下载。

本书由台湾知城数位科技股份有限公司提供版权，经中国铁道出版社计算机图书项目中心审选，刘竹清、杨华、李自运、陈贤淑、陈晓娟、廖康良等同志完成了本书的整稿及编排工作。

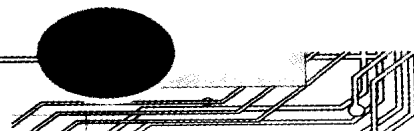
由于时间仓促，不足之处在所难免，希望读者批评指正，我们也会在适当时间进行修订和补充，并发布在天勤网站：<http://www.tqbooks.net> “图书修订”栏目中。

2003 年 7 月

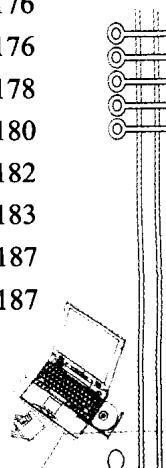
目 录

第 1 章 概 况	1
1-1 计算机辅助分析的基本结构	2
第一项 单元、截面及材料定义 (Elements、Sections and Materials)	2
第二项 绘制几何图形 (Geometry)	3
第三项 网格划分 (Meshing)	3
第四项 负载及约束 (Loads and Constraints)	3
第五项 分析 (Analysis)	4
第六项 结果 (Results)	4
1-2 ANSYS 的菜单结构	4
第一项 各菜单和窗口的外形及其功能说明	5
第二项 介绍用户界面的设置	6
1-3 有限单元法简介	7
第一项 变分学 (Calculus of Variation)	7
第二项 Rayleigh-Ritz 方法	8
第三项 加权余量法 (Weighted Residual Method)	13
第四项 函数降阶与试探函数	22
第二章 静力分析	25
2-1 桁架的静力分析	26
一、偏好设定	26
二、定义单元及材料	27
三、建立桁架几何图形	29
四、施加负载	32
五、分析	35
六、结果	36
2-2 板的静力分析	37
一、设置辅助网格	38
二、确定单元及截面	39

三、定义材料属性.....	41
四、绘制几何图形.....	43
五、划分网格.....	44
六、负载及约束.....	46
七、分析.....	48
八、结果.....	49
2-3 角架的静力分析.....	52
一、偏好设定.....	52
二、定义单元及材料.....	53
三、定义实例常量.....	55
四、建立几何图形.....	56
五、网格划分.....	71
六、约束及压力.....	72
七、分析.....	75
八、结果.....	75
2-4 复合板的静力分析.....	78
一、定义单元及材料.....	79
二、绘制几何图形.....	82
三、网格划分.....	83
四、负载及约束.....	85
五、分析.....	86
六、结果.....	87
第3章 自然振动分析.....	89
3-1 梁的自然振动分析.....	90
一、偏好设定.....	90
二、单元、截面及材料定义.....	91
三、绘制几何图形.....	94
四、网格划分.....	96
五、约束梁左端节点.....	97
六、振动特征值及特征向量分析.....	98
七、结果.....	102
3-2 板的自然振动分析.....	107
一、偏好设定.....	108
二、定义单元及截面.....	108
三、定义材料属性.....	110
四、绘制几何图形.....	112
五、网格划分.....	112
六、板底端约束.....	114



七、振动特征值及特征向量分析.....	115
八、结果	119
3-3 机翼的自然振动分析	122
一、偏好设定.....	122
二、定义单元及材料.....	123
三、建立机翼几何图形.....	125
四、网格划分.....	130
五、施加负载.....	131
六、分析	134
七、结果	135
八、生成动态的机翼振动模型.....	136
第 4 章 曲屈分析.....	139
4-1 梁的曲屈分析	140
一、偏好设定.....	140
二、单元、截面及材料定义.....	141
三、绘制几何图形.....	144
四、网格划分.....	146
五、约束及负载.....	148
六、静力、曲屈的特征值及特征向量分析.....	149
七、结果	153
4-2 板的曲屈分析	158
一、偏好设定.....	159
二、定义单元及截面.....	159
三、定义材料属性.....	161
四、绘制几何图形.....	163
五、网格划分.....	163
六、约束及负载.....	166
七、静力、曲屈的特征值及特征向量分析.....	168
八、结果	172
第 5 章 3D 结构分析	175
5-1 3D 的基本范例	176
一、系统环境设置.....	176
二、单元及材料定义.....	178
三、绘制几何图形.....	180
四、网格划分.....	182
五、负载及约束.....	183
六、分析	187
七、结果	187



5-2 轴对称分析	191
一、系统环境设置.....	192
二、单元及材料定义.....	193
三、绘制几何图形.....	196
四、网格划分.....	198
五、负载及约束.....	200
六、分析	202
七、结果	203
5-3 参数设计	209
一、设置辅助网格及定义参数.....	209
二、定义单元及实常数.....	211
三、绘制几何图形.....	213
四、网格划分.....	214
五、保存 log 程序文件及修改参数	216
六、读取 new.txt 文件.....	217
第 6 章 进阶范例.....	219
6-1 瞬态动力学分析	220
一、定义单元及材料.....	220
二、绘制几何图形与网格划分.....	227
三、生成碰撞组件.....	234
四、设置分析模块.....	237
五、施加负载.....	239
六、分析	240
七、更改负载.....	241
八、分析	243
九、结果	244
6-2 热应力分析	249
一、偏好设定.....	250
二、定义单元.....	250
三、定义材料特性.....	251
四、建立几何图形.....	257
五、网格划分.....	263
六、施加热对流.....	266
七、定义分析模块.....	268
八、定义瞬时分析的初始条件.....	268
九、设置时间、时间步骤及相关参数.....	272
十、设置输出控制.....	273
十一、解	273

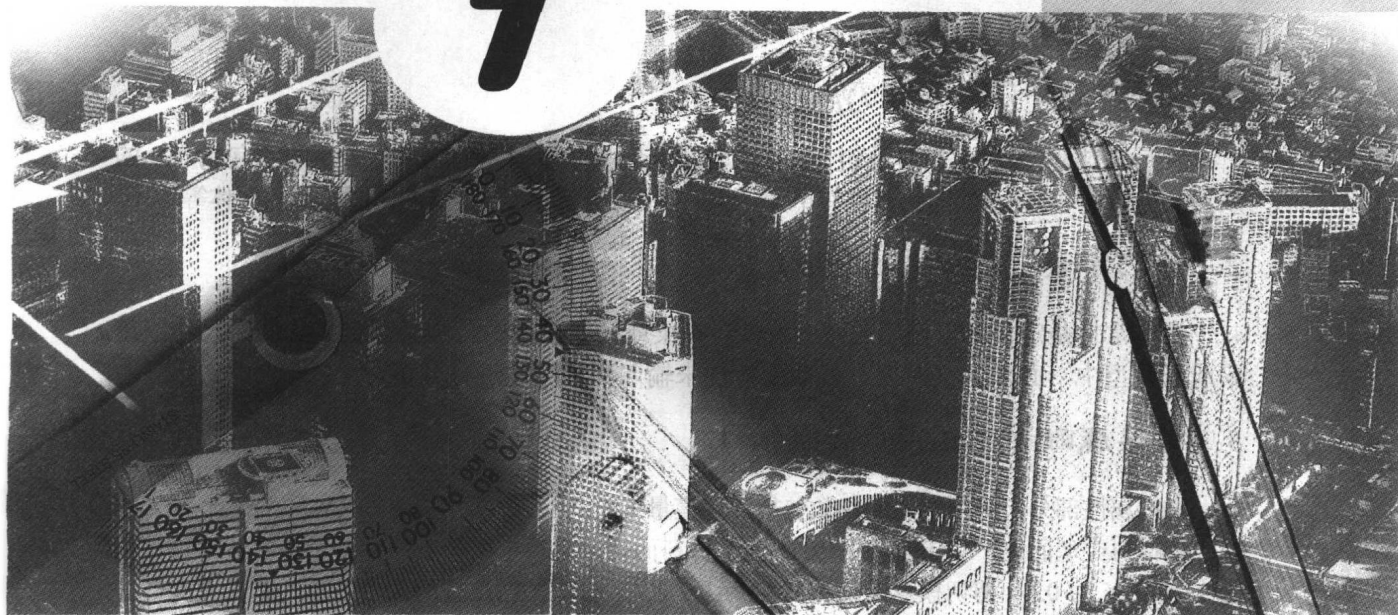
十二、过程处理模块和定义变量.....	274
十三、动态结果.....	278
6-3 流体的层流与紊流分析.....	282
一、偏好设定.....	282
二、定义单元.....	283
三、构造几何图形.....	284
四、网格划分.....	287
五、限制边界条件.....	291
六、环境设置.....	295
七、执行流力分析（层流分析）.....	297
八、一般后处理模块.....	298
九、增加进入速度.....	304
十、增加出口区的长度.....	307
十一、限制边界条件.....	312
十二、紊流分析.....	318
6-4 电磁分析	320
一、偏好设定.....	320
二、定义单元及材料.....	321
三、构造几何图形.....	324
四、设置面属性.....	328
五、网格划分.....	330
六、施加负载.....	332
七、分析	337
八、结果	337
6-5 微机电问题分析	339
一、转入几何图形.....	340
二、定义单元及材料.....	341
三、网格划分.....	345
四、施加边界条件.....	346
五、分析	351
六、结果	352
6-6 形状最佳化	357
一、设置辅助网格.....	358
二、定义单元及截面.....	359
三、定义材料属性.....	360
四、绘制几何图形.....	361
五、网格划分.....	363
六、负载及约束.....	365
七、执行静力分析及形状最优化分析.....	367

6-7 非线性分析	369
一、偏好设定.....	370
二、定义单元及材料.....	370
三、绘制几何图形.....	374
四、网格划分.....	375
五、设置分析模块.....	377
六、定义起始条件与限制条件.....	379
七、分析	382
八、结果	382

CHAPTER

1

概 况



1. 计算机辅助分析的基本结构

2. ANSYS 的菜单结构

3. 有限单元法简介

1-1 计算机辅助分析的基本结构

计算机辅助工程分析的软件程序，是经过以下六个主要步骤来定义一个问题，并进行分析。

第一项 单元、截面及材料定义 (Elements、Sections and Materials)

在这个步骤中主要定义以下三部分数据：

1. 单元类型 (Element Type)

单元类型的定义是告诉计算机，问题将要以什么样的单元模型来分析。单元类型包括 0-D 的质点及空隙等单元、1-D 的梁及柱等单元、2-D 的板及壳等单元、3-D 的四面体及六面体等单元。

2. 实例常量 (Real Constants)

实例常量是定义分析模型的截面特性，在梁或桁架模型中，则必须定义其截面尺寸；在膜或板模型中，必须定义厚度。若截面特性未输入，则无法进行分析。

3. 材料属性 (Material Properties)

材料属性部分，必须定义参数包括弹性模量 EX 及 EY、剪切模量 GXY 和泊松比 NUXY 等，依材料类型而定。对于等向 (Isotropic) 材料而言，必须定义杨氏弹性模量 E，程序内建泊松比 NUXY 为 0.3，剪切模量的值为 $GXY = E / 2 (1 + NUXY)$ 。提醒读者注意的是，在弹性分析中，泊松比不可设置为 0.5，因为这样将使体弹性模量 (Bulk Modulus) 变成无限大，程序将无法运行。塑性分析中则无此限制，因为塑性力学将材料视为不可压缩，只能因剪力而变形。对于正交 (Orthotropic) 材料而言，必须定义 EX 及 EY。对于非等向 (Anisotropic) 材料而言，每个方向的材料参数都不同，因此必须定义所有方向的数值。在塑性分析中，尚且需要输入材料属性曲线。在渐变分析中，则需要输入材料的时间曲线。若进行振动分析则需要输入材料密度。

较常使用的单位系统有三种 (如表 1.1 所示)：

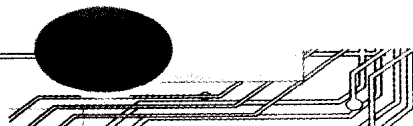
表 1.1

单位系统	长度	时间	质量	力
SI	米	秒	千克	牛顿
MKS	米	秒	千克	公斤力*
FPS	英尺	秒	磅**	磅

*以相当于一千克重的力为单位

**以相当于一磅重的质量为单位

笔者建议初学者一律使用 SI 单位，尤其牵涉加速度的问题。因为在 $F=ma$ 公式中，由 MKS 或 FPS 单位系统定义的问题，必须修正加速度的值。在 SI 单位中则无此顾虑。“常有学员问及 ANSYS 或计算机程序的单位。其实程序是没有单位的，只是我们给定材料参数时，其数值本身就隐含某特定单位值，因此所有其他数据也必须用同一单位系统”。尤其是当您直接从程序内建的数据库选择材料时，单位的一致性是非常重要的。应力常用的公制单位为 Pa (N/m^2)，英制则以 psi (lb/in^2) 为单位。



第二项 绘制几何图形 (Geometry)

几何图形可由软件提供的功能绘出,也可以经过 CAD 系统,用 IGES 文件、SAT 文件、Pro/E 文件、UG 文件与 PARA 参数实例文件导入。在本章第 2 节中,示范运用 PARA 参数实例文件格式导入 ANSYS 中做分析,一个实体的外形,首先必须定义清楚且正确,才能够进行分析。绝大多数的软件都提供 1-D、2-D 及 3-D 的绘图功能。几何图形包括点 (Keypoint)、线 (Line)、面 (Area) 及体 (Volume)。

第三项 网格划分 (Meshing)

实体外形定义完毕后,再将它分成小网格 (Mesh) 以供后续分析计算。网格分得越细,所计算的结果误差越小,但所需要的时间越长。在线性分析时,时间并不是一个很严重的问题,但是在非线性分析,如塑性力学分析中,时间将是一个很重要的问题。因此,网格不宜无限细分。关于网格无限细分的收敛性问题,在 ANSYS 计算机辅助工程分析 (夸克工作室著) 一书中第 4 章将会详细举例说明,收敛的数值解与理论解的比较。

网络的生成有下列两种:

1. 直接网格划分: 逐一定义节点及单元, 不经过几何图形。
2. 自动网格划分: 先定义几何图形, 如线、面或体, 再进行网格划分。

要提高分析的精确度, 有下列三种调试网格法 (Adaptive Mesh):

1. 网格细分法 (h-Method): 程序自动细分网格。
2. 高次单元法 (p-Method): 选择高次单元进行分析。
3. 混合并行法 (hp-Method): 上述两者并用。

对于复杂的结构, 网格划分后会生成重叠的节点, 必须用 Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items→Nodes 命令消除重复节点, 以免生成不连续的单元及奇异点 (Singularities), 并使用压缩节点编号命令 Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers→Nodes, 来减少矩阵的主自由度 (Master Degrees of Freedom), 以节省计算时间。

第四项 负载及约束 (Loads and Constraints)

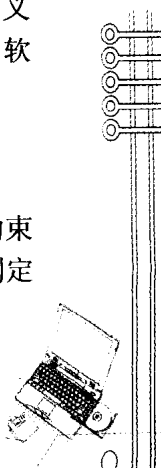
这个步骤主要定义以下两部分数据:

1. 约束 (或称边界条件)

约束 (Constraints) 是定义一个结构固定的部分。在分析一个结构前, 必须适当地定义边界条件 (Boundary Conditions, BC)。在对称受力而无约束的问题中, 有些软件必须定义“软弹簧” (Soft-Spring), 否则无法进行分析。

2. 负载 (Loads)

负载包括集中力、分布力 (Distributed Load)、加速度及预应变 (Prestrain) 等。在约束点上不宜再施力于同一自由度。线性问题中多重负载状况 (Multiple Load Cases) 可以分别定义, 并在后处理程序中以各种比例组合输出结果。



第五项 分析 (Analysis)

在进入分析这一步骤之前，整个分析模型必须定义完成。进行分析以前的步骤，称为前处理 (Pre-Processing)，包括前面四个部分。再分析以后的各步骤，称为后处理 (Post-Processing)，提供应力、应变、位移等数据的图标及列表显示 (Plotting and Listing)。“分析”这一步骤包含计算机大量的计算，本书中的原理即是这一模块 (分析模块) 的结构。分析软件在程序运行时，这一步骤的定义，只是选择适当的命令，并加以运行即可。

第六项 结果 (Results)

这一步骤包括全部后处理的功能。如列表显示 (List)、图标 (Plot) 分析结果，还有以动态显示振动模型或其他分析结果的图形。ANSYS 还有一个 Query (询问数据) 的功能，将图形窗口中光标位置的数据显示出来，更为方便。

1-2 ANSYS 的菜单结构

ANSYS 的用户界面主要由六大部分所构成：

1. 下拉式菜单 (又称应用命令菜单) Utility Menu。
2. 主菜单 Main Menu。
3. 工具条 Tool Bar。
4. 输入窗口 Input Window。
5. 图形窗口 Graphics Window。
6. 输出窗口 Output Window。

各窗口及菜单可由下拉式菜单中的 MenuCtrls 菜单控制选项打开与关闭。当您进入 ANSYS 时，屏幕显示如图 1.1 所示。

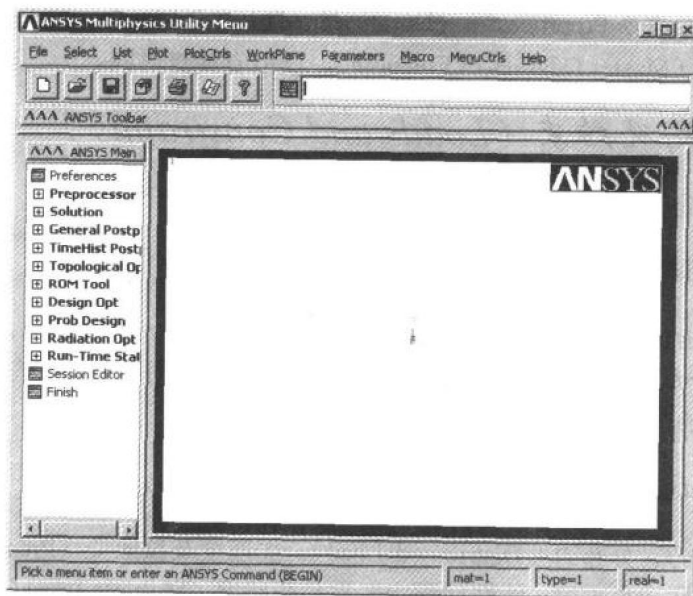


图 1.1

第一项 各菜单和窗口的外形及其功能说明

1. 下拉式菜单 (应用命令菜单) *Utility Menu*

下拉式菜单中包含各种应用命令, 包括 File (文件)、Select (选择)、List (列表显示)、Plot (图标)、PlotCtrls (图形控制)、WorkPlane (工作平面)、Parameters (参数)、Macro (宏)、MenuCtrls (菜单控制) 及 Help (帮助) 等 (如图 1.2 所示)。

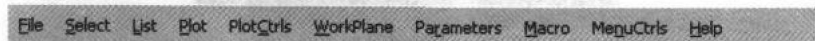


图 1.2

2. 主菜单 *Main Menu*

主菜单中有各种功能命令, 包括前处理模块的单元、截面、材料、几何图形、网格划分等相关命令, 以及后处理模块的图标与列表显示等命令, 还有分析模块的约束、负载、分析等命令。在菜单中若有“田”的符号, 表单显示尚有子菜单; 若有“■”符号, 表单显示尚有对话框; 若有“...”符号, 表单显示尚有选择栏, 必须选择适当的图像像素才能完成命令的设置。对话框中的“Apply”按钮代表命令输入并继续原来操作, 而“OK”按钮代表命令输入并关闭对话框 (如图 1.3 所示)。

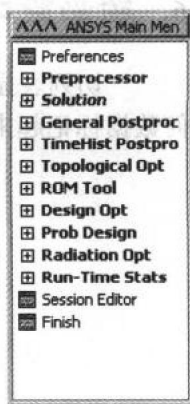


图 1.3

3. 工具条 *Toolbar*

您可以自行定义屏幕功能按钮, 以提高工作效率 (如图 1.4 所示)。



图 1.4

4. 输入窗口 *Input Window*

一般而言, 使用鼠标及菜单工作的效率比较高, 而且不必记忆命令。但对于一向习惯键入命令的用户而言, 输入窗口是键入命令的地方 (如图 1.5 所示)。



图 1.5

5. 图形窗口 *Graphic Window*

图形窗口是显示所有前后处理图形的窗口。如同大多数 CAE 软件一样, ANSYS 可以同时打开多个图形窗口, 并可作各种缩放及位置安排的操作 (如图 1.6 所示)。

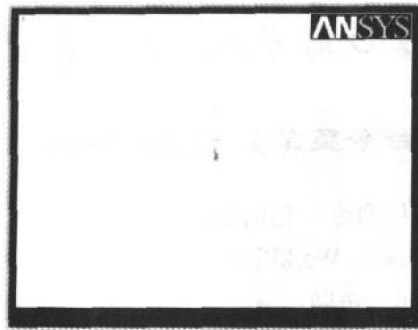


图 1.6

6. 输出窗口 Output Window

一切列表显示的结果都会显示在输出窗口。在 Windows 环境下，您可以将输出窗口内任何数据标记起来，并复制到其他文件处理等软件，做进一步的操作（如图 1.7 所示）。

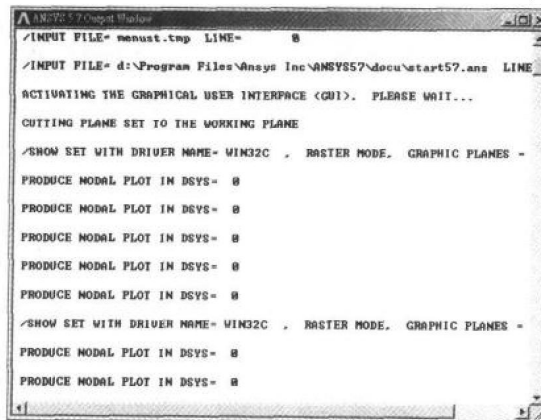


图 1.7

第二项 介绍用户界面的设置

1. 显示视角平移、缩放及旋转工具箱

运行下拉式菜单中 PlotCtrls→Pan, Zoom, Rotate 视角平移、缩放及旋转命令，本命令控制图形窗口内所显示对象的位置大小及方向，使用频繁。将这个图形显示控制的工具条保持打开状态，将有助于工作效率。窗口及工具条的安排视个人喜好及方便而定，没有一定的规则（如图 1.8 所示）。

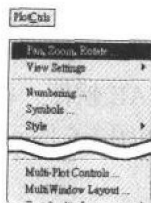


图 1.8

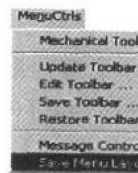
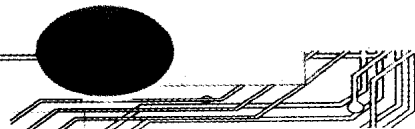


图 1.9



2. 保存菜单位置

您可以将各窗口及工具条移到您所喜欢的位置, 然后将各菜单在屏幕的位置存盘。运行下拉式菜单 MenuCtrls→Save Menu Layout (保存菜单位置) 命令。下次再进入主界面时, 菜单就会直接打开在存盘时的位置 (如图 1.9 所示)。

1-3 有限单元法简介

第一项 变分学 (Calculus of Variation)

假设函数 F 是一个位移、速度以及加速度的函数, 可写成 $F = F(x, \dot{x}, \ddot{x})$ 形式, 若要对总能量函数 $\pi = \int_v F(x, \dot{x}, \ddot{x}) dv$ 找出最小值, 依照变分法可以得到下式:

$$\frac{\partial}{\partial t^2} \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

1. 弹簧-质量系统

如图 1.10 所示。

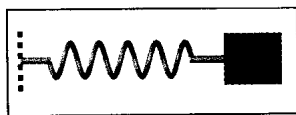


图 1.10

对于一个弹簧-质量的振动系统, 根据汉米尔顿定理(Hamilton Principle), 总能量 (或称为拉格朗日(Lagrange)运算符) L , 为动能 V 与势能 U 的和, 写成:

$$L = V + U \quad (2)$$

其中动能 V 与势能 U 分别为:

$$V = \int_v \frac{1}{2} m (\dot{x})^2 dv \quad (3a)$$

$$U = \int_v -\frac{1}{2} kx^2 dv \quad (3b)$$

将拉格朗日(Lagrange)运算符 L 代入(1)式的 F 位置, 可得:

$$\frac{\partial}{\partial t^2} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{x}} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

将(2)式与(3)式分别代入(4)式, 可得微分方程式, 如(5)式所示。此方程式即是牛顿运动定律 $F=ma$ 的形式。

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (5)$$

