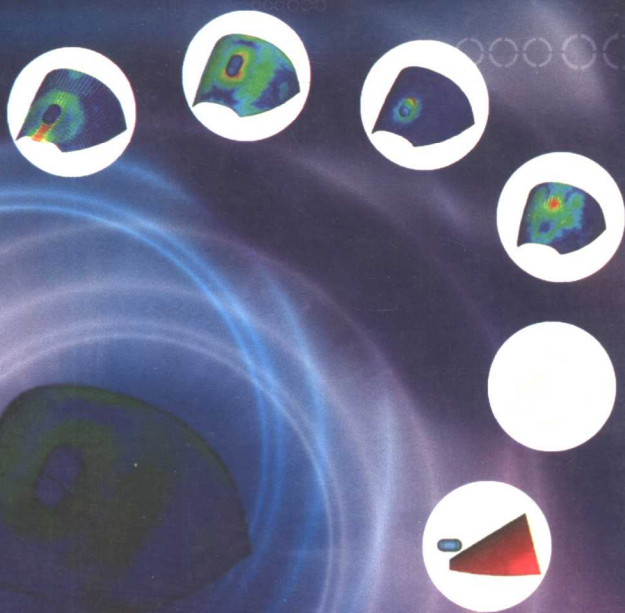


数码工程师系列丛书



# ANSYS

## 基础与应用教程

刘相新 孟宪颐 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

0241.82

35

数码工程师系列丛书

# ANSYS 基础与应用教程

刘相新 孟宪颐 主 编

隋连武 张云峰 副主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书重点介绍 ANSYS 中应用最为广泛的结构分析和热分析,在详细介绍 ANSYS 操作使用方法的基础上,专题讲述了 ANSYS 结构静力分析、非线性结构分析、接触分析、模态分析、谐响应、谱分析、瞬态动力学分析、热分析的方法和过程,同时通过大量的工程应用实例,可以使读者能够快速掌握 ANSYS 软件,并在实际应用中得到进一步的提高。

本书理论与实用相结合,力求全面、深入、系统和实用。本书可作为理工院校相关专业高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材,也可作为机械制造、石油化工、轻工、造船、航空航天、汽车交通、电子、土木工程、水利、铁道等专业的科研人员和工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 基础与应用教程/刘相新,孟宪颐主编. —北京:科学出版社,2006  
(数码工程师系列丛书)

ISBN 7-03-016742-2

I. A… II. ①刘…②孟… III. 有限元分析-应用程序, ANSYS-教材  
IV. 0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 161067 号

责任编辑:万国清 孙露露/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年3月第一次印刷 印张:33 1/2

印数:1—3 000 字数:766 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8004 (B102)

# 前 言

在科学技术领域内,对于许多力学问题和物理问题,人们已经得到了它们遵循的基本方程(常微分方程或偏微分方程)和相应的定解条件,但能用解析法求出精确解的只是少数方程性质比较简单,且几何形状相当规则的问题,而对于大多数问题,由于方程的某些特征的非线性性质或由于求解区域几何形状的复杂,不能得到解析结果。部分问题可以通过简化得到简化状态下的解答,但过多的简化会导致解答误差很大甚至完全错误。因此,人们经过多年来的寻找,建立和发展了另一种求解途径和方法——数值解法。有限单元法就是其中得以广泛应用的一种。其基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个、且按一定方式相互连接在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的连接方式进行组合,且单元本身又可以有不同的形状,因此可以模型化复杂的几何形状求解区域。随着计算机技术的飞速发展和广泛应用,有限单元法发展到今天,已成为工程数值分析的有力工具,一批以有限元数值计算方法为基础,具有良好操作性和通用性的商业软件的开发和应用极大地提高了工程设计的技术水平。

ANSYS 是世界上著名的大型通用有限元分析软件,也是中国用户最多、应用最广泛的有限元分析软件,它融结构、热、流体、电磁、声学多专业的分析于一体,可广泛应用于机械制造、石油化工、轻工、造船、航空航天、汽车交通、电子、土木工程、水利、铁道等各种工业设计和科学研究。作为世界上首个通过 ISO9000 认证的有限元分析软件,目前推出的 ANSYS 产品具有应用范围广、操作简单、图形和后处理功能强大等优点,因而为全球工业界所接受,尤其在中国的 CAE (Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程)软件市场上一向高居榜首。CAE 技术是实现创新设计最主要的技术保障,应用 CAE 软件可对创新设计方案的快速实施性能与可靠性分析进行虚拟模拟,从而及早发现设计缺陷,在实现创新设计的同时提高设计质量,降低研究开发成本,缩短研究开发周期。因此,掌握 CAE 技术和 CAE 软件的应用已成为出色的工程设计人员的必备技能。

目前 ANSYS 产品不断更新,功能也不断增强。在 ANSYS 7.0 以后的产品中,ANSYS 公司同步推出了 ANSYS Workbench 仿真分析平台(集成化的设计分析系统),与 ANSYS 传统界面产品一起为用户提供了更为方便、丰富的分析手段,并不断将 ANSYS 核心技术移植到这一仿真平台下。考虑到目前 ANSYS 传统界面产品功能相对更为强大,工程应用更为广泛,而且在掌握 ANSYS 传统界面产品后也可以更加容易地理解、使用 ANSYS Workbench,因此,本书中以 ANSYS 最新推出的 ANSYS 10.0 传统界面产品介绍各种操作和应用实例。

本书将重点介绍 ANSYS 中应用最为广泛的结构分析和热分析,既介绍软件的操作方法和使用技巧,又辅之以必要的理论分析,同时还有大量的工程应用实例供读者参考。全书共分 17 章,前两章是对 ANSYS 有限元分析的入门介绍,第 3~8 章全面、详细地讲述了 ANSYS 的前处理、求解、后处理全过程的操作方法,包括应用菜单、几何建模、有限元网格划分、载荷施加、求解选项设置、通用后处理和时间历程后处

理等内容, 这些是熟练应用 ANSYS 解决问题的基础。第 9~16 章则以专题形式介绍了 ANSYS 结构静力分析、非线性结构分析、接触分析、模态分析、谐响应、谱分析、瞬态动力学分析和热分析的方法和过程, 每一专题都给出了应用实例分析, 采用 GUI 和命令行两种方式讲解, 对于 ANSYS 分析人员提高水平大有裨益。第 17 章专门介绍了 ANSYS 的参数化程序设计语言, 特别适用于复杂模型、新产品的研制以及模型需多次修改、重复分析的问题, 是 ANSYS 中、高级分析人员必须掌握的内容。

本书从实际应用出发, 结合作者使用 ANSYS 的工程经验, 力求全面、深入、系统和实用, 以满足 ANSYS 的初级用户和有一定基础的分析人员学习的需要。初学者应对本书的前 8 章认真阅读, 并结合实际操作多加练习, 尽快掌握 ANSYS 的操作使用方法。有一定基础的分析人员则可以根据具体的需要学习相关的章节。本书前半部分相当于一本使用手册, 便于读者快速查阅, 后半部分即专题部分则相对独立, 便于读者根据所从事的工程项目性质查阅参考。

根据作者的经验, 对于应用 ANSYS 进行工程分析, 有以下建议供参考。

- 分析人员要对所分析的问题有透彻的了解, 具备一定的相关理论基础, 而不仅仅能够使用软件。
- 应养成分析之前进行规划的习惯, 包括问题性质分析、计算模型区域范围、计算时间段、通过分析考核的关键指标、可能的误差及对分析目标实现的影响等。对复杂的问题还要形成分析方案并进行评审。要充分理解分析工作本身也是一个系统工程。
- 对于工程问题, 建模时进行简化是非常必要的, 因此需要分析人员具有一定的工程经验。分析是对实际的模拟, 模拟的准确性不仅取决于采用的工具、掌握的知识, 更取决于对工程实际本身的了解程度。
- 同样, 软件仅仅是一种工具, 其分析结果受多方面因素的影响, 因此在完成分析后应根据经验和理论估计, 仔细核对结果, 而不能完全依赖于软件。
- 在使用 ANSYS 的过程中, 应尽量熟练掌握和使用命令操作, 这将有助于提高工作效率。

为便于读者操作练习, 作者提供了书中大部分示例的模型文件, 请到科学出版社网站下载: [www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)。

由于作者水平有限, 书中错误之处在所难免, 敬请读者谅解。真心希望通过本书的学习能够共同进步, 使 ANSYS 迅速成为您工作中的有力工具。

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论.....                      | 1  |
| 1.1 有限元法基本思路.....                  | 2  |
| 1.2 ANSYS 简介.....                  | 3  |
| 1.2.1 前处理模块 PREP7.....             | 4  |
| 1.2.2 求解模块 SOLUTION.....           | 4  |
| 1.2.3 后处理模块 POST1 和 POST26.....    | 5  |
| 1.3 ANSYS 新版本功能简介.....             | 6  |
| 第 2 章 初识 ANSYS.....                | 8  |
| 2.1 ANSYS 10.0 的启动运行及设定.....       | 9  |
| 2.2 ANSYS 的文件系统.....               | 9  |
| 2.3 ANSYS 分析的基本步骤.....             | 10 |
| 2.3.1 启动 ANSYS.....                | 10 |
| 2.3.2 建立模型.....                    | 11 |
| 2.3.3 加载和求解.....                   | 11 |
| 2.3.4 检查分析结果.....                  | 12 |
| 2.4 基本分析过程示例.....                  | 12 |
| 2.4.1 问题描述.....                    | 12 |
| 2.4.2 建立 ANSYS 实体模型.....           | 12 |
| 2.4.3 网格划分——创建有限元模型.....           | 13 |
| 2.4.4 施加载荷和约束条件.....               | 15 |
| 2.4.5 求解分析.....                    | 16 |
| 2.4.6 查看结果.....                    | 17 |
| 2.4.7 退出 ANSYS.....                | 17 |
| 2.4.8 命令行方式分析过程.....               | 18 |
| 第 3 章 应用菜单.....                    | 19 |
| 3.1 File 菜单.....                   | 20 |
| 3.1.1 数据库和文件操作.....                | 20 |
| 3.1.2 模型导入导出操作.....                | 22 |
| 3.1.3 报告自动生成器.....                 | 22 |
| 3.2 Select 菜单.....                 | 22 |
| 3.2.1 实体选择.....                    | 22 |
| 3.2.2 部件和组件操作 (Comp/Assembly)..... | 25 |
| 3.2.3 选择所有实体.....                  | 27 |
| 3.3 List 菜单.....                   | 27 |
| 3.3.1 列表显示文件信息.....                | 27 |

|        |                           |    |
|--------|---------------------------|----|
| 3.3.2  | 列表显示当前状态 .....            | 27 |
| 3.3.3  | 列表显示各实体数据 .....           | 28 |
| 3.3.4  | 列出当前施加的载荷情况 (Loads) ..... | 29 |
| 3.3.5  | 列出实体属性 (Properties) ..... | 29 |
| 3.4    | Plot 菜单 .....             | 29 |
| 3.4.1  | 刷新当前显示 .....              | 29 |
| 3.4.2  | 实体显示 .....                | 29 |
| 3.4.3  | 显示层单元 .....               | 29 |
| 3.4.4  | 显示指定的材料属性 .....           | 30 |
| 3.4.5  | 显示所有选择的实体 .....           | 30 |
| 3.4.6  | 显示组件和部件 .....             | 31 |
| 3.5    | PlotCtrls 菜单 .....        | 31 |
| 3.5.1  | 模型视图的移动、缩放和旋转 .....       | 31 |
| 3.5.2  | 视图显示内容设置 .....            | 33 |
| 3.5.3  | 图形显示风格设置 .....            | 35 |
| 3.5.4  | 字体控制 .....                | 39 |
| 3.5.5  | 绘图窗口控制 .....              | 39 |
| 3.5.6  | 绘图区的清理 .....              | 40 |
| 3.5.7  | 动画制作 .....                | 40 |
| 3.5.8  | 图形设备操作 .....              | 41 |
| 3.5.9  | 图形文件输出 .....              | 41 |
| 3.5.10 | 保存和恢复绘图控制设置 .....         | 41 |
| 3.6    | WorkPlane 菜单 .....        | 41 |
| 3.6.1  | 显示工作平面 .....              | 42 |
| 3.6.2  | 设置工作平面选项 .....            | 42 |
| 3.6.3  | 工作平面的平移和旋转 .....          | 42 |
| 3.6.4  | 局部坐标系设置 .....             | 43 |
| 第 4 章  | ANSYS 的几何建模 .....         | 45 |
| 4.1    | ANSYS 几何建模的概念 .....       | 46 |
| 4.2    | 建模前的问题规划 .....            | 47 |
| 4.2.1  | 类型 (二维、三维等) .....         | 48 |
| 4.2.2  | 线性单元和二次单元的选择 .....        | 48 |
| 4.2.3  | 不同单元连接的限制 .....           | 50 |
| 4.2.4  | 对称性 .....                 | 51 |
| 4.2.5  | 决定模型包含多少细节 .....          | 52 |
| 4.3    | 坐标系和工作平面在建模中的应用 .....     | 52 |
| 4.3.1  | ANSYS 的坐标系 .....          | 52 |
| 4.3.2  | 使用工作平面 .....              | 55 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 4.4 自底向上建模方法 .....            | 56        |
| 4.4.1 关键点 (Key Point) .....   | 56        |
| 4.4.2 硬点 (Hard Point) .....   | 58        |
| 4.4.3 线 (Line) .....          | 60        |
| 4.4.4 面 (Area) .....          | 63        |
| 4.4.5 体 (Volume) .....        | 65        |
| 4.5 自顶向下的建模方法 .....           | 68        |
| 4.5.1 创建面体素 .....             | 68        |
| 4.5.2 生成实体体素 .....            | 69        |
| 4.6 实体模型的布尔运算 .....           | 72        |
| 4.6.1 布尔运算的设置 .....           | 72        |
| 4.6.2 交运算 .....               | 73        |
| 4.6.3 加运算 .....               | 74        |
| 4.6.4 减运算 .....               | 75        |
| 4.6.5 分割运算 .....              | 76        |
| 4.6.6 搭接运算 .....              | 78        |
| 4.6.7 分块连接 .....              | 78        |
| 4.6.8 粘接 .....                | 79        |
| 4.7 实体图元的缩放 .....             | 80        |
| 4.8 从其他 CAD 系统导入模型 .....      | 81        |
| 4.8.1 导入 IGES 格式文件 .....      | 81        |
| 4.8.2 Pro/E 接口 .....          | 83        |
| 4.8.3 UG 接口 .....             | 83        |
| 4.8.4 导入 SAT 格式文件 .....       | 84        |
| 4.8.5 导入 ParaSolid 格式文件 ..... | 84        |
| 4.9 实体模型几何特性的计算 .....         | 85        |
| 4.9.1 计算两点间距离 .....           | 85        |
| 4.9.2 计算实体几何特性 .....          | 85        |
| 4.10 实体建模时的注意事项 .....         | 85        |
| 4.10.1 实体模型的内部表示 .....        | 85        |
| 4.10.2 布尔运算中的常见问题 .....       | 86        |
| 4.10.3 常用措施 .....             | 88        |
| <b>第 5 章 创建有限元模型 .....</b>    | <b>90</b> |
| 5.1 选定单元类型 .....              | 91        |
| 5.1.1 ANSYS 的单元类型 .....       | 91        |
| 5.1.2 定义单元类型的一般过程 .....       | 91        |
| 5.2 设置实常数 .....               | 93        |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.3   | 定义材料属性 .....            | 94  |
| 5.3.1 | 材料属性的说明 .....           | 94  |
| 5.3.2 | ANSYS 中的材料模型 .....      | 94  |
| 5.3.3 | 定义材料属性的一般过程 .....       | 95  |
| 5.4   | 实体模型的网格划分 .....         | 96  |
| 5.4.1 | 自由网格和映射网格 .....         | 96  |
| 5.4.2 | 网格划分的一般步骤 .....         | 97  |
| 5.4.3 | 网格划分工具 .....            | 97  |
| 5.5   | 网格划分控制 .....            | 98  |
| 5.5.1 | 设定单元尺寸 Size Cntrl ..... | 98  |
| 5.5.2 | 网格划分选项 .....            | 99  |
| 5.5.3 | 使用“SmartSize”控制尺寸 ..... | 100 |
| 5.5.4 | 单元形状控制 .....            | 101 |
| 5.5.5 | 自由网格划分 .....            | 102 |
| 5.5.6 | 映射网格划分 .....            | 102 |
| 5.5.7 | 由面生成体网格 .....           | 102 |
| 5.6   | 网格质量检查和修改 .....         | 103 |
| 5.6.1 | 单元形状检查 .....            | 103 |
| 5.6.2 | 网格局部细化 .....            | 105 |
| 5.6.3 | 清除网格 .....              | 105 |
| 5.6.4 | 处理退化的四面体单元 .....        | 105 |
| 5.6.5 | 改进四面体单元网格 .....         | 106 |
| 5.7   | 直接生成单元网格的方法 .....       | 106 |
| 5.7.1 | 创建节点 .....              | 107 |
| 5.7.2 | 创建单元 .....              | 107 |
| 第 6 章 | 载荷施加 .....              | 109 |
| 6.1   | 载荷概述 .....              | 110 |
| 6.1.1 | 载荷概念和类型 .....           | 110 |
| 6.1.2 | 载荷步、载荷子步的概念 .....       | 110 |
| 6.1.3 | 阶跃载荷和递变载荷 .....         | 111 |
| 6.2   | 自由度约束条件的施加 .....        | 111 |
| 6.2.1 | 施加 DOF 约束 .....         | 111 |
| 6.2.2 | 施加对称/反对称边界条件 .....      | 113 |
| 6.2.3 | 删除 DOF 约束 .....         | 113 |
| 6.3   | 施加载荷 .....              | 114 |
| 6.3.1 | 集中力载荷 .....             | 114 |
| 6.3.2 | 表面载荷 .....              | 116 |
| 6.3.3 | 体积载荷 .....              | 119 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 6.3.4 施加耦合场载荷 .....           | 122        |
| 6.3.5 载荷步文件的使用 .....          | 122        |
| <b>第 7 章 求解</b> .....         | <b>123</b> |
| 7.1 求解器 .....                 | 124        |
| 7.2 求解多步载荷 .....              | 126        |
| 7.2.1 多重求解法 .....             | 126        |
| 7.2.2 载荷步文件法 .....            | 126        |
| 7.2.3 矩阵参数法 .....             | 127        |
| 7.3 分析的中断和重启动 .....           | 129        |
| 7.3.1 中断分析作业 .....            | 129        |
| 7.3.2 重新启动分析的要求 .....         | 130        |
| 7.3.3 重启动分析的步骤 .....          | 131        |
| 7.3.4 从不兼容的数据库重新启动非线性分析 ..... | 132        |
| 7.3.5 分步求解 .....              | 133        |
| 7.4 求解参数估计 .....              | 133        |
| 7.4.1 估计求解时间 .....            | 133        |
| 7.4.2 估计文件大小 .....            | 134        |
| 7.4.3 估计内存需求 .....            | 135        |
| 7.5 求解时需要注意的事项 .....          | 135        |
| 7.5.1 求解控制设置 .....            | 135        |
| 7.5.2 问题的奇异解 .....            | 136        |
| <b>第 8 章 ANSYS 后处理</b> .....  | <b>137</b> |
| 8.1 后处理概述 .....               | 138        |
| 8.1.1 什么是后处理 .....            | 138        |
| 8.1.2 ANSYS 分析结果文件和数据类型 ..... | 138        |
| 8.2 通用后处理器 .....              | 139        |
| 8.2.1 读入结果文件 .....            | 139        |
| 8.2.2 结果的图形显示 .....           | 143        |
| 8.2.3 结果的列表显示 .....           | 148        |
| 8.2.4 结果的查询 .....             | 154        |
| 8.2.5 节点结果计算 .....            | 155        |
| 8.2.6 单元表的创建和使用 .....         | 156        |
| 8.2.7 路径的创建和使用 .....          | 160        |
| 8.2.8 分析计算误差 .....            | 167        |
| 8.2.9 将计算结果旋转到不同坐标系中 .....    | 168        |
| 8.2.10 产生及组合载荷工况 .....        | 169        |
| 8.3 时间历程后处理 (POST26) .....    | 174        |
| 8.3.1 定义和储存 POST26 变量 .....   | 174        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 8.3.2 查看变量 .....             | 177        |
| 8.3.3 POST26 后处理器的其他功能 ..... | 179        |
| <b>第 9 章 结构静力分析</b> .....    | <b>181</b> |
| 9.1 结构分析的概念 .....            | 182        |
| 9.2 结构静力分析的基本步骤 .....        | 183        |
| 9.2.1 建模 .....               | 183        |
| 9.2.2 施加载荷和边界条件 .....        | 183        |
| 9.2.3 查看结果 .....             | 184        |
| 9.3 平面问题的结构静力分析 .....        | 185        |
| 9.3.1 平面问题定义 .....           | 185        |
| 9.3.2 ANSYS 二维平面单元 .....     | 186        |
| 9.3.3 平面问题分析示例 .....         | 187        |
| 9.4 桁架结构静力分析 .....           | 195        |
| 9.4.1 桁架结构定义 .....           | 195        |
| 9.4.2 ANSYS 中常用杆单元 .....     | 195        |
| 9.4.3 空间桁架结构静力分析示例 .....     | 196        |
| 9.5 梁结构静力分析 .....            | 202        |
| 9.5.1 常用梁单元 .....            | 202        |
| 9.5.2 梁截面的创建和使用 .....        | 203        |
| 9.5.3 梁结构静力分析示例 .....        | 205        |
| 9.6 壳结构静力分析 .....            | 213        |
| 9.6.1 壳结构定义 .....            | 213        |
| 9.6.2 壳结构分析示例 .....          | 213        |
| 9.7 三维实体结构静力分析 .....         | 217        |
| 9.7.1 三维实体结构概念 .....         | 217        |
| 9.7.2 三维实体结构静力分析示例 .....     | 218        |
| 9.8 结构静力分析中需要注意的问题 .....     | 226        |
| 9.8.1 模型简化和应力奇异 .....        | 226        |
| 9.8.2 载荷施加原则 .....           | 227        |
| 9.8.3 大型结构件的应力分析——子模型法 ..... | 228        |
| 9.8.4 后处理的基本注意事项 .....       | 230        |
| 9.8.5 分析结果验证 .....           | 231        |
| <b>第 10 章 非线性结构分析</b> .....  | <b>233</b> |
| 10.1 结构非线性的基本概念 .....        | 234        |
| 10.1.1 非线性结构的定义 .....        | 234        |
| 10.1.2 导致结构非线性的原因 .....      | 234        |
| 10.2 非线性分析的特殊性 .....         | 235        |
| 10.2.1 过程依赖性 .....           | 236        |

|        |                       |     |
|--------|-----------------------|-----|
| 10.2.2 | 子步 .....              | 237 |
| 10.2.3 | 恒定力和跟随力 .....         | 237 |
| 10.2.4 | 非线性瞬态分析 .....         | 238 |
| 10.3   | 非线性静态分析的基本过程 .....    | 238 |
| 10.3.1 | 建模 .....              | 238 |
| 10.3.2 | 设置一般求解控制选项 .....      | 238 |
| 10.3.3 | 设置其他求解选项 .....        | 243 |
| 10.3.4 | 施加载荷、求解 .....         | 246 |
| 10.3.5 | 查看结果 .....            | 246 |
| 10.3.6 | 终止正在运行的工作，重启动分析 ..... | 247 |
| 10.4   | 非线性结构分析注意事项 .....     | 247 |
| 10.4.1 | 分析之前的注意事项 .....       | 247 |
| 10.4.2 | 建模过程中的注意事项 .....      | 247 |
| 10.4.3 | 确保计算收敛的注意事项 .....     | 247 |
| 10.5   | 大应变分析 .....           | 250 |
| 10.5.1 | 大应变分析概念 .....         | 251 |
| 10.5.2 | 大应变分析注意事项 .....       | 251 |
| 10.6   | 屈曲分析 .....            | 253 |
| 10.6.1 | 非线性屈曲分析过程 .....       | 253 |
| 10.6.2 | 特征值屈曲分析过程 .....       | 254 |
| 10.7   | 材料非线性分析（弹塑性分析） .....  | 257 |
| 10.7.1 | 材料塑性基本理论 .....        | 257 |
| 10.7.2 | ANSYS 中的塑性材料模型 .....  | 259 |
| 10.7.3 | 塑性分析的注意事项 .....       | 262 |
| 10.8   | 非线性分析示例 .....         | 264 |
| 10.8.1 | 大应变分析示例 .....         | 264 |
| 10.8.2 | 非线性屈曲分析示例 .....       | 270 |
| 10.8.3 | 特征值屈曲分析示例 .....       | 277 |
| 10.8.4 | 弹塑性分析示例 .....         | 282 |
| 10.8.5 | 非线性瞬态结构分析示例 .....     | 290 |
| 第 11 章 | 接触分析 .....            | 295 |
| 11.1   | 接触分析的概念和分类 .....      | 296 |
| 11.2   | ANSYS 接触分析能力 .....    | 296 |
| 11.2.1 | 面—面接触单元 .....         | 296 |
| 11.2.2 | 点—面接触单元 .....         | 297 |
| 11.2.3 | 点—点接触单元 .....         | 297 |
| 11.3   | 面—面接触分析 .....         | 298 |
| 11.3.1 | 面—面接触分析的基本步骤 .....    | 298 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 11.3.2 识别接触对.....           | 299        |
| 11.3.3 定义目标面.....           | 300        |
| 11.3.4 定义接触面.....           | 303        |
| 11.3.5 设置接触单元关键字.....       | 304        |
| 11.3.6 定义解除对实常数.....        | 313        |
| 11.3.7 施加约束条件.....          | 313        |
| 11.3.8 设置分析选项.....          | 314        |
| 11.3.9 求解及后处理.....          | 314        |
| 11.4 点一面接触分析.....           | 315        |
| 11.4.1 点一面接触单元.....         | 315        |
| 11.4.2 点一面接触分析基本过程.....     | 316        |
| 11.4.3 生成接触单元.....          | 316        |
| 11.4.4 设置单元关键字和实常数.....     | 318        |
| 11.4.5 施加必要的边界条件.....       | 320        |
| 11.4.6 定义求解选项.....          | 321        |
| 11.4.7 求解及后处理.....          | 321        |
| 11.5 点一点接触分析.....           | 321        |
| 11.6 接触问题示例.....            | 324        |
| 11.6.1 三维接触分析示例.....        | 324        |
| 11.6.2 二维接触分析示例.....        | 331        |
| <b>第 12 章 模态分析.....</b>     | <b>336</b> |
| 12.1 模态分析基本概念.....          | 337        |
| 12.2 模态分析方法.....            | 337        |
| 12.3 模态分析过程.....            | 341        |
| 12.3.1 建模.....              | 341        |
| 12.3.2 加载并求解.....           | 341        |
| 12.3.3 扩展模态.....            | 345        |
| 12.3.4 观察结果.....            | 347        |
| 12.4 预应力模态分析.....           | 348        |
| 12.5 循环对称结构的模态分析.....       | 349        |
| 12.5.1 基本概念.....            | 349        |
| 12.5.2 一般循环对称结构的模态分析过程..... | 350        |
| 12.5.3 有预应力循环对称结构模态分析.....  | 352        |
| 12.6 模态分析示例.....            | 352        |
| <b>第 13 章 谐响应分析.....</b>    | <b>359</b> |
| 13.1 谐响应分析基本概念.....         | 360        |
| 13.2 谐响应分析求解方法.....         | 360        |
| 13.3 完全法谐响应分析过程.....        | 361        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 13.4 缩减法谐响应分析过程 .....       | 364        |
| 13.5 模态叠加法谐响应分析过程 .....     | 366        |
| 13.5.1 获取模态分析解 .....        | 366        |
| 13.5.2 获取模态叠加法谐响应分析解 .....  | 367        |
| 13.6 有预应力的谐响应分析 .....       | 368        |
| 13.7 谐响应分析实例 .....          | 368        |
| 13.7.1 弹簧—质量块系统谐响应分析 .....  | 368        |
| 13.7.2 琴弦的预应力谐响应分析 .....    | 372        |
| <b>第 14 章 瞬态动力学分析 .....</b> | <b>378</b> |
| 14.1 瞬态动力学分析概念 .....        | 379        |
| 14.2 瞬态分析的三种求解方法 .....      | 380        |
| 14.3 完全法瞬态动力学分析过程 .....     | 381        |
| 14.3.1 建模 .....             | 381        |
| 14.3.2 设定分析类型和选项 .....      | 381        |
| 14.3.3 建立初始条件 .....         | 382        |
| 14.3.4 施加其他瞬态载荷步 .....      | 384        |
| 14.3.5 求解 .....             | 385        |
| 14.3.6 观察结果 .....           | 385        |
| 14.4 缩减法瞬态动力学分析过程 .....     | 385        |
| 14.4.1 缩减法求解 .....          | 385        |
| 14.4.2 观察缩减法求解的结果 .....     | 388        |
| 14.4.3 扩展求解 .....           | 388        |
| 14.4.4 观察扩展求解结果 .....       | 389        |
| 14.5 模态叠加法瞬态动力学分析过程 .....   | 389        |
| 14.5.1 定义分析类型和分析选项 .....    | 390        |
| 14.5.2 在模型上加载 .....         | 390        |
| 14.5.3 瞬态分析求解 .....         | 391        |
| 14.6 有预应力瞬态动力学分析 .....      | 392        |
| 14.7 进行瞬态分析要注意的技术细节 .....   | 392        |
| 14.7.1 积分时间步长的选取 .....      | 392        |
| 14.7.2 自动时间步长 .....         | 394        |
| 14.7.3 阻尼 .....             | 394        |
| 14.8 瞬态动力学分析示例 .....        | 396        |
| <b>第 15 章 谱分析 .....</b>     | <b>400</b> |
| 15.1 谱分析基本概念 .....          | 401        |
| 15.2 谱分析中的常用术语 .....        | 402        |
| 15.2.1 参与系数 (PF) .....      | 402        |
| 15.2.2 模态系数 .....           | 402        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 15.2.3 模态合并 .....              | 403 |
| 15.3 单点响应谱 (SPRS) 分析步骤 .....   | 403 |
| 15.4 随机振动 (PSD) 分析步骤 .....     | 406 |
| 15.4.1 模态扩展 .....              | 407 |
| 15.4.2 进行谱分析 .....             | 407 |
| 15.4.3 合并模态 .....              | 409 |
| 15.4.4 后处理观察结果 .....           | 409 |
| 15.4.5 典型的 PSD 命令行方式分析过程 ..... | 411 |
| 15.4.6 随机振动分析结果的应用 .....       | 412 |
| 15.5 动力设计方法 (DDAM 谱分析) .....   | 414 |
| 15.6 多点响应谱 (MPRS) 分析 .....     | 414 |
| 15.7 单点响应谱分析示例 .....           | 415 |
| 15.7.1 问题描述和分析 .....           | 415 |
| 15.7.2 GUI 方式分析过程 .....        | 416 |
| 15.7.3 命令行方式分析过程 .....         | 420 |
| 15.8 随机振动分析示例 .....            | 421 |
| 15.8.1 问题描述和分析 .....           | 421 |
| 15.8.2 GUI 分析过程 .....          | 422 |
| 15.8.3 命令行方式分析过程 .....         | 429 |
| 第 16 章 热分析 .....               | 432 |
| 16.1 ANSYS 热分析功能 .....         | 433 |
| 16.2 热分析的理论基础 .....            | 433 |
| 16.2.1 基本传热方式 .....            | 433 |
| 16.2.2 热分析计算公式 .....           | 435 |
| 16.2.3 热分析的分类 .....            | 435 |
| 16.2.4 热分析的基本材料属性 .....        | 436 |
| 16.2.5 热分析的边界条件 .....          | 437 |
| 16.2.6 热分析的载荷 .....            | 438 |
| 16.2.7 热分析的常用参数的符号和单元 .....    | 439 |
| 16.3 稳态传热分析 .....              | 440 |
| 16.3.1 概述 .....                | 440 |
| 16.3.2 稳态热分析的基本步骤 .....        | 440 |
| 16.3.3 稳态热分析实例 .....           | 445 |
| 16.4 瞬态传热分析 .....              | 449 |
| 16.4.1 瞬态传热分析概述 .....          | 449 |
| 16.4.2 瞬态热分析的基本步骤 .....        | 450 |
| 16.4.3 瞬态热分析实例 .....           | 452 |
| 16.5 辐射热分析 .....               | 457 |
| 16.5.1 热辐射基本概念 .....           | 457 |

|         |                                   |     |
|---------|-----------------------------------|-----|
| 16.5.2  | ANSYS 热辐射分析类型 .....               | 458 |
| 16.5.3  | 使用 AUX12 辐射矩阵方法进行热辐射分析 .....      | 459 |
| 16.5.4  | Radiosity 求解方法进行热辐射分析 .....       | 462 |
| 16.5.5  | 热辐射分析示例 .....                     | 465 |
| 16.6    | 含相变现象的热分析 .....                   | 470 |
| 16.7    | 热应力分析 .....                       | 470 |
| 16.7.1  | 耦合场求解方法 .....                     | 471 |
| 16.7.2  | 热应力分析方法 .....                     | 471 |
| 16.8    | 综合热分析示例 .....                     | 472 |
| 第 17 章  | APDL 开发 .....                     | 477 |
| 17.1    | 参数 .....                          | 478 |
| 17.1.1  | 参数定义 .....                        | 478 |
| 17.1.2  | 删除参数 .....                        | 479 |
| 17.1.3  | 参数值的使用 .....                      | 480 |
| 17.1.4  | 参数值的更新 .....                      | 482 |
| 17.1.5  | 参数列表 .....                        | 482 |
| 17.1.6  | 参数的存储和恢复 .....                    | 482 |
| 17.2    | 数组型参数 .....                       | 483 |
| 17.2.1  | 数组型参数的概念和分类 .....                 | 483 |
| 17.2.2  | 数组型参数的定义和显示 .....                 | 485 |
| 17.2.3  | 数组型参数的赋值 .....                    | 486 |
| 17.2.4  | 数组型参数间的运算 .....                   | 493 |
| 17.2.5  | 数组型参数的矢量图形显示 .....                | 496 |
| 17.3    | 数据文件的输入输出 .....                   | 498 |
| 17.3.1  | 文件的打开和写入 .....                    | 498 |
| 17.3.2  | 数据文件的读取 .....                     | 500 |
| 17.4    | APDL 宏程序设计 .....                  | 500 |
| 17.4.1  | 宏程序文件的命名规则 .....                  | 501 |
| 17.4.2  | 在 ANSYS 下创建宏程序 .....              | 501 |
| 17.4.3  | 使用文本编辑器创建宏程序 .....                | 502 |
| 17.4.4  | 创建宏程序库 .....                      | 503 |
| 17.4.5  | 执行宏程序 .....                       | 503 |
| 17.4.6  | 宏程序的局部参数 .....                    | 504 |
| 17.4.7  | 宏程序的流程控制 .....                    | 505 |
| 17.4.8  | 宏程序中应用 _STATUS 和 _RETURN 参数 ..... | 507 |
| 17.4.9  | 宏程序中应用部件和组件 .....                 | 507 |
| 17.4.10 | 宏程序示例 .....                       | 508 |

---

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 17.5 与 GUI 的交互设计 ..... | 509 |
| 17.5.1 定制工具栏 .....     | 509 |
| 17.5.2 提示用户输入 .....    | 511 |
| 17.5.3 对话框提示 .....     | 511 |
| 17.5.4 定制自己的输出消息 ..... | 513 |
| 17.5.5 创建进程状态窗 .....   | 514 |
| 17.5.6 实现图形拾取 .....    | 515 |
| 17.6 宏程序的加密 .....      | 515 |
| 17.6.1 加密前的准备工作 .....  | 515 |
| 17.6.2 创建加密的宏程序 .....  | 516 |
| 17.6.3 加密宏程序的执行 .....  | 516 |
| 参考文献 .....             | 517 |