

基于ANSYS 平台有限元分析手册

结构的建模与分析

Finite Element Analysis Guide:
Modeling and Analysis of Structure

曾攀 雷丽萍 方刚 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



基于 ANSYS 平台有限元分析手册 结构的建模与分析

**Finite Element Analysis Guide: Modeling and
Analysis of Structure**

曾攀 雷丽萍 方刚 编著



机械工业出版社

本书以手册的规范化方式提供了覆盖有限元结构分析主要领域的各项专题,包括60个原理、91个典型算例、98个建模操作,以及168条ANSYS主要命令的使用方法。全书介绍了有限元分析的原理及建模方法,共分9章,包括ANSYS平台的基本操作、前处理建模与计算、后处理操作与计算结果分析、基于APDL的参数化有限元分析与二次开发、线性结构的静力分析、结构分析的高级建模与分析技术、结构的模态及屈曲分析、线性结构简谐振动及谱分析、线性结构瞬态分析等,还涉及一般静力分析、热应力分析、应力刚化与旋转软化、单元的“激活”与“杀死”技术、p方法、自适应网格划分、子模型、耦合及约束方程、结构的参数及拓扑优化、结构的概率疲劳与断裂分析、复合材料分析、结构及高速旋转下的模态分析、屈曲分析、结构简谐振动及谱分析、结构瞬态分析等内容。

本书注重算例物理本质的描述、建模要点、操作步骤,许多算例的结果还与解析解进行了比较和考证,读者在算例的基础上还可以进行二次扩展。本书具有原理阐述简明、重点突出、深入浅出、算例丰富、覆盖面广等特点。要求读者具有一定的材料力学及有限元方法的基础,读者可以在“学中用、用中学”的交互方式中更深入地掌握有限元分析原理及建模方法。

本书可作为机械、力学、土木、水利、航空航天等专业的高年级本科生、研究生、工程技术人员、科研工作者进行有限元分析及建模的指导书,也可以适用于不同程度的读者进行自学,对于希望在ANSYS软件平台上进行建模分析的读者,本书非常值得参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于ANSYS平台有限元分析手册——结构的建模与分析/曾攀,雷丽萍,方刚编著. —北京:机械工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-111-31442-4

I. ①基… II. ①曾…②雷…③方… III. ①有限元分析-应用程序, ANSYS-手册 IV. ①O241.82-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第146399号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 版式设计:张世琚

责任校对:陈延翔 封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京四季青印刷厂印刷(三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·31印张·769千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-31442-4

ISBN 978-7-89451-759-3(光盘)

定价:69.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务 编辑热线:(010) 88379772

社服务中心:(010) 88361066 网络服务

销售一部:(010) 68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

作者简介

曾攀，男，1963年生，海南省海口市人；1988年在清华大学获博士学位，1988—1992年先后在大连理工大学和西南交通大学从事两站博士后研究（领域为计算力学），为国家杰出青年科学基金获得者（1998）、长江学者（2000）、德国“洪堡”学者（1994~1995）、“新世纪百千万人才工程”国家级人选。现为清华大学机械工程系主任、教授、博士生导师，为中国机械工程学会塑性工程分会副理事长、《机械工程学报》、《工程力学》、《塑性工程学报》等五个学术期刊的编委；为两个国家重点实验室的学术委员会委员。先后主持和参与包括国家级重点基金项目、863项目、霍英东基金项目等科研项目30多个；获教委科技进步二等奖、机械工业部科技进步一等奖各一项，获国家发明专利授权3项，获得国家级教学成果二等奖、北京市高等教育教学成果一等奖各一项；长期主讲有限元方面的课程。已出版及翻译学术著作有：《材料的概率疲劳损伤力学及现代结构分析原理》（曾攀，1993）、《有限元分析及应用》（曾攀，2004）、《有限元基础教程》（曾攀，2009）、《工程中的有限元方法》（T. R. Chandrupatla，曾攀译）（2006）、《有限元方法第1卷：基本原理》（O. C. Zienkiewicz（第5版），曾攀译）（2008），发表论文100多篇。主要从事计算力学、结构设计与分析、材料加工中的数值模拟等方面的研究。

雷丽萍，女，1968年生，分别于1991年、1996年在清华大学获得学士、硕士学位，2000年在韩国国立釜山大学获得博士学位，2001年至2003年在清华大学机械工程系从事博士后研究工作，现为清华大学机械工程系副教授。主要从事材料加工中的数值模拟、塑性微成形、大型装备结构设计与分析等方面的研究。先后主持和参与包括国家级基金项目、863项目在内的科研项目10余个，发表论文40多篇。

方刚，男，1971年生，1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位，1999年至2001年、2005年至2006年分别在清华大学机械工程系、荷兰Delft University of Technology从事博士后研究工作。2001年至今在清华大学机械工程系工作，现为副教授。主要从事材料加工中的塑性成形工艺与数值模拟、大型装备结构设计与分析等方面的研究。先后主持和参与包括国家级基金项目、863项目在内的科研项目10余个，发表论文50多篇。

前 言

在科学研究和工程设计中，基于建模与仿真的数字化已成为当今科技发展的必然趋势，有限元分析已成为该领域数字化的最重要方法之一。ANSYS 软件经过近 40 年的发展及完善，已成为国际上最知名、应用领域最广泛、使用人员最多的软件之一，是实施有限元分析的最重要平台之一。

在有限元分析日益普及的当今，如何进行可靠的有限元分析，特别是针对复杂问题进行大规模、全过程、多尺度、高精度的数值化计算和分析，向我们提出了新的挑战。因此，要求进行有限元分析的人员具备“理解原理，精于建模，熟知应用”的综合能力，本书就是“基于原理的数力能力培养，基于建模的操作能力训练，基于算例的应用能力拓展”这样的理念来组织编写的。本书集有限元分析原理、建模方法及实际应用为一体，采用大量算例的方式进行描述，具有规范性、系统性、完整性、实用性等特点。具体给出了 60 个原理、91 个典型算例、98 个建模操作，以及 168 条 ANSYS 主要命令的使用方法。所阐述的原理具有较好的指导性，所提供的建模方法具有较强的可操作性，所提供的实际算例具有很好的二次开发性。

为充分体现以上的理念，全书分 9 章，主要内容如下。

第 1 章为基本操作。主要介绍在 ANSYS 平台上的一些基本操作，包括：系统启动，菜单操作与命令流，菜单窗口的基本设置，模型对象选择的控制，模型信息显示的控制，图形及硬拷贝文件，模型信息的查询及其列显，通过命令获取建模及计算结果的信息，通过编号和组件来操作模型获取单元矩阵对角元素信息的操作。

第 2 章为前处理建模与计算。主要介绍前处理及计算中的一些基本建模方法及命令，包括：①建模的总体考虑，涉及三种建模方法、对称模型、一次单元与二次单元、不同种类单元的应用、网格密度的考虑等；②实体模型的建立，涉及坐标系及工作平面、布尔操作、模型的复制与修改、CAD 文件及多个建模文件的转换等；③基于几何模型的单元划分，涉及单元划分的基本步骤、单元划分前的准备、网格划分的控制、网格的改进等；④直接生成模型方法，涉及直接生成节点、单元的直接生成等；⑤边界条件的施加；⑥计算求解与过程控制；⑦模型的屏蔽处理及应用；还给出了综合算例。

第 3 章为后处理操作与计算结果分析。主要介绍后处理中的一些基本处理

方法及命令,包括后处理的基本操作,计算结果显示的控制及分析,多工况计算结果的组合后处理。

第4章为基于APDL的参数化有限元分析与二次开发。包括参数及操作,参数和数组的定义及读写操作,表参数的定义和应用,APDL的内部函数,流程的控制,宏文件的建立、调用和加密,定制用户化界面,二次开发综合应用算例。

第5章线性结构的静力分析。主要介绍:①基本分析原理及主要算法,涉及基本原理、结构的惯性释放、结构分析线性方程求解的基本算法、ANSYS的一般实现过程;②常用的实体单元及特征,涉及单元的几何形状测试指标、常用单元的基本特征、常用单元形状及网格密度的典型算例;③各向异性以及温度相关材料的弹性问题分析,涉及各向异性材料弹性分析的基本原理、ANSYS实现过程、典型算例;④热应力分析,涉及热应力分析的基本原理、ANSYS实现过程、典型算例;还给出了综合算例。

第6章为结构分析的高级建模与分析技术。主要介绍:①应力刚化、旋转软化问题的弹性分析,涉及应力刚化的基本原理、ANSYS实现过程、典型实例;②单元的“激活”与“杀死”技术,涉及单元“激活”与“杀死”技术的分析原理、ANSYS实现过程、典型算例;③高阶及高效建模技术,涉及p方法的分析原理及过程、自适应网格划分的分析过程、子模型的分析过程、典型算例;④基于耦合及约束方程的建模技术;⑤结构优化问题的分析,涉及结构参数优化的分析过程、拓扑优化的分析过程、典型算例;⑥结构的概率、疲劳与断裂分析,涉及结构概率分析过程、结构疲劳分析过程、结构断裂分析过程、典型算例;⑦复合材料的分析。

第7章为结构的模态及屈曲分析。主要介绍:①结构模态分析;②结构屈曲分析的原理与操作;③高速旋转结构的模态分析;④循环对称结构的模态分析,还给出了综合算例。

第8章为线性结构简谐振动及谱分析。主要介绍:①简谐振动分析的过程及典型算例;②结构随机谱响应分析的过程及典型算例。

第9章为线性结构瞬态分析,包括瞬态分析的过程及典型算例。

本书重点是强调有限元分析的融会贯通,将原理、建模、应用这三个方面相融合,力求精而透;强调读者运用有限元方法处理复杂问题的综合能力,并提供全面、物理含义深刻的典型算例。读者在使用过程中,领会并掌握有限元分析的实质,具备使用先进有限元软件平台的能力;同时,还给读者提供了进一步扩展的空间。

在本书的编写中,曾攀编写了第1章、第4章部分内容、第5章~第9章,雷丽萍编写了第2章,方刚编写了第3章以及第4章的部分内容,雷丽萍、方刚

编写并调试了部分算例的程序；清华大学机械工程系的博士生赵加清、杜泓飞、高懿、卢永进，硕士生黄少锋、吴玥明、姚波、郇宜伟、高蔚然、梅乐、刘倩、王文娟、李婉宜、李源、邹建荣、宁静、陈海平、王娜、廖培根整理并核对了书中的算例；另外瞿体明、赵瑞海、彭伟平、马源、杨力铭参与了部分算例的整理。作者还感谢张惠玲女士、机械工业出版社的孔劲编辑对本书的重要贡献。

由于作者的水平有限，书中难免会有错误和纰漏，敬请读者提出批评。

作者
于清华园

目 录

作者简介

前言

| | |
|--|----|
| 第0章 引论 | 1 |
| 【算例】0.1 盘形弹簧 (Belleville) 的小变形静力分析 | 1 |
| 【算例】0.2 盘形弹簧 (Belleville) 几何非线性的增量计算 | 7 |
| 第1章 基本操作 | 11 |
| 1.1 系统启动 | 11 |
| 【操作】1.1(1) ANSYS 的启动和目录管理 | 11 |
| 【操作】1.1(2) ANSYS 的文件管理 | 11 |
| 【操作】1.1(3) ANSYS 进入时的故障处理 | 13 |
| 1.2 菜单操作与命令流 | 13 |
| 【操作】1.2(1) 基于 GUI 和命令流的操作 | 13 |
| 【操作】1.2(2) 命令流的生成和导入 | 13 |
| 【操作】1.2(3) 建模过程的操作次序 | 15 |
| 1.3 菜单窗口的基本设置 | 15 |
| 【操作】1.3 窗口和尺标显示的控制 | 15 |
| 1.4 模型对象选择的控制 | 17 |
| 【操作】1.4(1) 模型对象的选择 | 17 |
| 【操作】1.4(2) 选择命令的应用 | 19 |
| 1.5 模型信息显示的控制 | 20 |
| 【操作】1.5(1) 模型信息的一般性显示 | 20 |
| 【操作】1.5(2) 模型的个性化显示 | 21 |
| 1.6 图形及硬拷贝文件 | 22 |
| 【操作】1.6 模型的图形拷贝 | 22 |
| 1.7 模型信息的查询及其列显 | 23 |
| 【操作】1.7 模型信息的查询 | 23 |
| 1.8 通过命令直接获取所有建模及计算结果的信息 | 24 |
| 【操作】1.8(1) 基于 < * GET > 的信息直接提取 | 24 |
| 【操作】1.8(2) 建模对象及计算结果信息的取值函数直接提取 | 24 |
| 1.9 通过编号来操作模型 | 27 |
| 【操作】1.9 基于模型编号的操作 | 27 |
| 1.10 通过组件来操作模型 | 27 |
| 【操作】1.10 模型组件的定义与选择 | 27 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 1.11 获取单元矩阵对角元素信息的操作 | 28 |
| 【操作】1.11 提取单元矩阵元素的信息,并输出到文件中 | 28 |
| 第2章 前处理建模与计算 | 29 |
| 2.1 建模的总体考虑 | 29 |
| 2.1.1 三种建模方法 | 29 |
| 2.1.2 1D、2D、3D 及对称模型 | 29 |
| 2.1.3 针对几何形状的一次单元与二次单元 | 30 |
| 2.1.4 不同种类单元的应用 | 32 |
| 2.1.5 考虑分析的细节 | 33 |
| 2.1.6 网格密度的考虑 | 34 |
| 2.2 实体模型的建立 | 34 |
| 2.2.1 坐标系、转换、工作平面 | 34 |
| 【操作】2.2.1(1) 局部坐标系的定义 | 34 |
| 【操作】2.2.1(2) 节点坐标系的操作 | 35 |
| 【操作】2.2.1(3) 单元坐标系的设置 | 37 |
| 【操作】2.2.1(4) 局部坐标系与工作平面的关系 | 37 |
| 2.2.2 点、线、面、体的建模 | 39 |
| 【操作】2.2.2(1) 关键点的建模 | 39 |
| 【操作】2.2.2(2) 线的建模 | 40 |
| 【操作】2.2.2(3) 面的建模 | 43 |
| 【操作】2.2.2(4) 体的建模 | 45 |
| 【操作】2.2.2(5) 体、面的直接建模 | 46 |
| 2.2.3 模型的布尔操作 | 49 |
| 【操作】2.2.3(1) 布尔操作的设置 | 49 |
| 【操作】2.2.3(2) 布尔操作:相交 | 50 |
| 【操作】2.2.3(3) 布尔操作:相减 | 51 |
| 【操作】2.2.3(4) 布尔操作:分割 | 52 |
| 【操作】2.2.3(5) 布尔操作:相加 | 52 |
| 【操作】2.2.3(6) 布尔操作:搭接 | 53 |
| 【操作】2.2.3(7) 布尔操作:粘合 | 53 |
| 2.2.4 模型的复制与修改 | 54 |
| 【操作】2.2.4(1) 模型的复制 | 54 |
| 【操作】2.2.4(2) 实体模型的坐标转换 | 55 |
| 【操作】2.2.4(3) 几何尺度的缩放 | 55 |
| 【操作】2.2.4(4) 模型的修改与删除 | 56 |
| 2.2.5 CAD 文件及多个建模文件的转换与操作 | 57 |
| 【算例】2.2.5(1) 厚壁柱体的 IGES 文件读写 | 57 |
| 【算例】2.2.5(2) 厚壁柱体的多个建模文件的读写 | 58 |
| 2.3 基于几何模型的单元划分 | 60 |

| | | |
|---------------|------------------------|----|
| 2.3.1 | 单元划分的基本步骤 | 60 |
| 2.3.2 | 单元划分前的准备 | 60 |
| 【操作】 2.3.2(1) | 单元属性的定义 | 60 |
| 【操作】 2.3.2(2) | 单元划分前的属性设置 | 60 |
| 2.3.3 | 基于几何模型的网格划分的控制 | 61 |
| 【操作】 2.3.3(1) | 单元形状的控制 | 61 |
| 【操作】 2.3.3(2) | 中间节点位置的控制 | 62 |
| 【操作】 2.3.3(3) | 单元尺寸的控制 | 62 |
| 【操作】 2.3.3(4) | 划分网格 | 64 |
| 2.3.4 | 网格的控制与改进 | 65 |
| 【操作】 2.3.4(1) | 局部网格的细化 | 65 |
| 【操作】 2.3.4(2) | 清除网格 | 65 |
| 【算例】 2.3.4(3) | 加肋蓄冷器网格划分的控制 | 66 |
| 【算例】 2.3.4(4) | 花形卡盘网格划分的控制 | 67 |
| 【算例】 2.3.4(5) | 复杂空间体的六面体网格划分的控制 | 68 |
| 【算例】 2.3.4(6) | 给定点处网格划分的控制 | 69 |
| 2.4 | 直接生成模型方法 | 70 |
| 2.4.1 | 直接生成节点 | 70 |
| 【操作】 2.4.1 | 直接生成节点 | 70 |
| 2.4.2 | 基于节点的单元直接生成 | 72 |
| 【操作】 2.4.2(1) | 基于节点的单元直接生成 | 72 |
| 【操作】 2.4.2(2) | 模型编号的合并与压缩操作 | 73 |
| 【操作】 2.4.2(3) | 几何参数的计算 | 73 |
| 【操作】 2.4.2(4) | 模型的单元形状检查 | 74 |
| 2.5 | 边界条件的施加 | 75 |
| 【操作】 2.5(1) | 自由度约束的施加 | 75 |
| 【操作】 2.5(2) | 点载荷的施加 | 76 |
| 【操作】 2.5(3) | 表面分布载荷的施加 | 77 |
| 【操作】 2.5(4) | 体载荷的施加 | 81 |
| 【操作】 2.5(5) | 惯性载荷的施加 | 81 |
| 【算例】 2.5(6) | 分段分布函数面压载荷的施加 | 82 |
| 2.6 | 计算求解与过程控制 | 85 |
| 【操作】 2.6(1) | 计算求解过程 | 85 |
| 【操作】 2.6(2) | 多工况计算 | 87 |
| 2.7 | 模型的屏蔽处理及应用 | 87 |
| 【算例】 2.7 | 路灯支撑装置的两种状态分析 | 88 |
| 2.8 | 综合算例 | 91 |
| 【算例】 2.8(1) | 桁架结构的多工况载荷的分析 | 91 |
| 【算例】 2.8(2) | 圆盘封盖的建模与受力分析 | 94 |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|
| 【算例】 2.8(3) | L形弯管的建模与受力分析 | 97 |
| 【算例】 2.8(4) | 受载7杆桁架结构的初始状态反求分析 | 99 |
| 第3章 | 后处理操作与计算结果分析 | 105 |
| 3.1 | 基本操作 | 105 |
| 【操作】 3.1(1) | 结果文件的调入 | 105 |
| 【操作】 3.1(2) | 变形及应力的显示 | 106 |
| 【操作】 3.1(3) | 计算结果的等值线显示 | 108 |
| 【操作】 3.1(4) | 线型单元的列表及显示 | 110 |
| 【操作】 3.1(5) | 连续单元的列表及显示 | 112 |
| 【操作】 3.1(6) | 计算结果的时间过程显示 | 113 |
| 【操作】 3.1(7) | 一般性后处理观察器 | 114 |
| 【操作】 3.1(8) | 时间变量后处理观察器 | 114 |
| 3.2 | 计算结果显示的控制及分析 | 115 |
| 【操作】 3.2(1) | 节点及单元应力结果的显示与计算误差 | 115 |
| 【算例】 3.2(2) | 平面L形结构的受力分析与误差 | 116 |
| 【操作】 3.2(3) | 计算结果显示的控制及图形设置 | 120 |
| 【操作】 3.2(4) | 后处理中的路径设置及显示 | 122 |
| 【操作】 3.2(5) | 计算结果的列表显示 | 124 |
| 【操作】 3.2(6) | 计算结果的动画及切片显示 | 125 |
| 【操作】 3.2(7) | 计算结果的安全系数显示 | 127 |
| 【操作】 3.2(8) | 在后处理中修改计算结果并进行显示 | 128 |
| 3.3 | 多工况计算结果的组合后处理 | 130 |
| 【操作】 3.3(1) | 基于后处理的多工况分析 | 130 |
| 【算例】 3.3(2) | 桁架7杆结构的多工况载荷的后处理分析 | 131 |
| 第4章 | 基于APDL的参数化有限元分析与二次开发 | 134 |
| 4.1 | 参数及操作 | 134 |
| 4.1.1 | 参数和数组的定义 | 134 |
| 【操作】 4.1.1(1) | 参数的定义及赋值 | 134 |
| 【操作】 4.1.1(2) | 数组参数的图形显示 | 136 |
| 4.1.2 | 数组的读写操作 | 137 |
| 【操作】 4.1.2(1) | 数组的读入 | 137 |
| 【操作】 4.1.2(2) | 建立一个输出文件 | 137 |
| 【操作】 4.1.2(3) | 数据的写出 | 138 |
| 4.1.3 | 表参数的定义和应用 | 139 |
| 【操作】 4.1.3(1) | 表参数的定义及赋值 | 139 |
| 【操作】 4.1.3(2) | 表参数数组的读入 | 140 |
| 【算例】 4.1.3(3) | 支撑平台的瞬态响应分析 | 141 |
| 4.2 | APDL的内部函数 | 143 |

| | | |
|--------------|---------------------------|-----|
| 【操作】4.2 | APDL 的内部函数 | 143 |
| 4.3 | 流程的控制 | 144 |
| 【操作】4.3(1) | 计算流程的无条件转移 | 144 |
| 【操作】4.3(2) | 计算流程的条件转移 | 145 |
| 【操作】4.3(3) | 计算流程的 DO 循环 | 145 |
| 【操作】4.3(4) | 流程的 DOWHILE 循环 | 147 |
| 【操作】4.3(5) | 计算流程的 REPEAT 循环 | 147 |
| 4.4 | 宏文件的建立、调用和加密 | 148 |
| 【操作】4.4(1) | 宏文件的建立 | 148 |
| 【操作】4.4(2) | 宏文件的调用 | 149 |
| 【操作】4.4(3) | 宏文件的加密 | 150 |
| 4.5 | 定制用户化界面 | 152 |
| 【操作】4.5(1) | 参数输入对话框 | 152 |
| 【操作】4.5(2) | 命令流中的 GUI 拾取 | 153 |
| 【操作】4.5(3) | 工具条的订制 | 154 |
| 4.6 | 二次开发综合应用算例 | 155 |
| 【算例】4.6(1) | 基于对话框的受移动载荷作用的桁架桥分析 | 156 |
| 【算例】4.6(2) | 基于宏文件的受移动载荷桁架桥的分析 | 158 |
| 【算例】4.6(3) | 采用定制工具条的受移动载荷桁架桥的分析 | 160 |
| 第5章 | 线性结构的静力分析 | 162 |
| 5.1 | 基本分析原理及主要算法 | 162 |
| 5.1.1 | 基本原理 | 162 |
| 【原理】5.1.1(1) | 结构分析基本原理 | 162 |
| 【原理】5.1.1(2) | 材料破坏的强度准则 | 163 |
| 5.1.2 | 结构的惯性释放 | 165 |
| 【原理】5.1.2(1) | 惯性释放分析基本原理 | 165 |
| 【算例】5.1.2(2) | 自由块体的旋转运动 | 166 |
| 5.1.3 | 结构分析线性方程求解的基本算法 | 168 |
| 【原理】5.1.3(1) | 稀疏矩阵直接法求解的原理 | 168 |
| 【原理】5.1.3(2) | 波前法的计算原理 | 169 |
| 【原理】5.1.3(3) | 迭代法的计算原理 | 171 |
| 5.1.4 | ANSYS 的一般实现过程 | 172 |
| 【原理】5.1.4(1) | ANSYS 分析的一般过程 | 172 |
| 【算例】5.1.4(2) | 轴对称圆板弯曲的静力分析 | 173 |
| 5.2 | 常用的实体单元及特征 | 175 |
| 5.2.1 | 单元的几何形状特征指标 | 175 |
| 【原理】5.2.1(1) | 实体单元的分类 | 175 |
| 【原理】5.2.1(2) | 单元几何形状的特征 | 176 |
| 5.2.2 | 常用单元的基本特征 | 179 |

| | | |
|--------------|------------------------------|-----|
| 【原理】5.2.2 | 实体及板壳单元的基本特征 | 179 |
| 5.2.3 | 常用单元形状及网格密度的典型算例 | 182 |
| 【算例】5.2.3(1) | 拱形平面的三种类型平面单元的分析 | 182 |
| 【算例】5.2.3(2) | 空间板的三种类型空间单元的分析 | 183 |
| 【算例】5.2.3(3) | 空间悬臂结构的多种形状单元的分析 | 185 |
| 5.3 | 各向异性以及温度相关材料的弹性问题分析 | 187 |
| 5.3.1 | 各向异性材料弹性分析的基本原理 | 187 |
| 【原理】5.3.1(1) | 各向异性材料的本构关系 | 187 |
| 【原理】5.3.1(2) | 直角坐标系下正交各向异性材料 | 188 |
| 【原理】5.3.1(3) | 柱坐标系下正交各向异性材料 | 188 |
| 5.3.2 | 各向异性材料弹性分析的 ANSYS 实现过程 | 189 |
| 【操作】5.3.2(1) | 各向异性材料弹性分析的 ANSYS 实现方式 | 189 |
| 【操作】5.3.2(2) | 各向异性材料弹性分析的 ANSYS 实现流程 | 190 |
| 5.3.3 | 各向异性材料弹性分析的典型算例 | 193 |
| 【算例】5.3.3(1) | 正交各向异性方块的拉伸问题 | 193 |
| 【算例】5.3.3(2) | 带钢筋混凝土梁的弯曲问题 | 195 |
| 5.4 | 热应力分析 | 198 |
| 5.4.1 | 热应力分析的基本原理 | 198 |
| 【原理】5.4.1(1) | 热应力分析的本构方程 | 198 |
| 【原理】5.4.1(2) | 随温度变化的热膨胀系数 | 198 |
| 5.4.2 | 热应力分析的 ANSYS 实现过程 | 199 |
| 【操作】5.4.2(1) | 热应力分析的 ANSYS 实现方式 | 199 |
| 【操作】5.4.2(2) | 热应力分析的 ANSYS 实现流程 | 200 |
| 5.4.3 | 热应力分析的典型算例 | 200 |
| 【算例】5.4.3 | 双金属层悬臂结构板材的热载荷分析 | 200 |
| 5.5 | 结构分析的典型算例 | 203 |
| 【算例】5.5(1) | 塔式起重机旋臂的加速度分析 | 203 |
| 【算例】5.5(2) | 弹性地基上的平面梁的弯曲 | 204 |
| 【算例】5.5(3) | 偏心压缩梁的静力分析 | 206 |
| 【算例】5.5(4) | 工字形钢梁框架的静力分析 | 208 |
| 【算例】5.5(5) | 多层复合材料悬臂梁的分析 | 210 |
| 【算例】5.5(6) | 带预紧力的矩形截面杆的分析 | 213 |
| 【算例】5.5(7) | 塔式起重机桁架结构的受力分析 | 215 |
| 第6章 | 结构分析的高级建模与分析技术 | 223 |
| 6.1 | 应力刚化、旋转软化问题的弹性分析 | 223 |
| 6.1.1 | 应力刚化问题及基本原理 | 223 |
| 【原理】6.1.1 | 应力刚化问题分析的基本原理 | 223 |
| 6.1.2 | 应力刚化分析的 ANSYS 实现过程 | 226 |
| 【操作】6.1.2(1) | 应力刚化分析的 ANSYS 实现方式 | 226 |

| | | |
|---------------|-------------------------|-----|
| 【操作】 6.1.2(2) | 应力刚化分析的 ANSYS 实现流程 | 227 |
| 6.1.3 | 应力刚化分析的典型实例 | 227 |
| 【算例】 6.1.3 | 带张力简支梁受横向载荷作用的静力分析 | 227 |
| 6.2 | 单元的“激活”与“杀死”技术 | 230 |
| 6.2.1 | 单元“激活”与“杀死”技术的分析原理 | 230 |
| 【原理】 6.2.1 | 单元“激活”与“杀死”技术的基本原理 | 230 |
| 6.2.2 | ANSYS 实现过程 | 231 |
| 【操作】 6.2.2(1) | 单元“激活”与“杀死”的 ANSYS 实现方式 | 231 |
| 【操作】 6.2.2(2) | 单元“激活”与“杀死”的 ANSYS 实现流程 | 232 |
| 6.2.3 | 典型算例 | 232 |
| 【算例】 6.2.3(1) | 预紧结构张拉全过程的死活单元模拟 | 232 |
| 【算例】 6.2.3(2) | 斜拉桥分段施工过程的工艺模拟 | 236 |
| 【算例】 6.2.3(3) | 煤炭采掘作业过程的受力分析 | 240 |
| 【算例】 6.2.3(4) | 带椭圆孔平板拉伸的断裂过程模拟 | 245 |
| 6.3 | 高阶及高效建模技术 | 248 |
| 6.3.1 | p 方法的分析原理及过程 | 248 |
| 【原理】 6.3.1(1) | p 方法的分析原理 | 248 |
| 【原理】 6.3.1(2) | p 方法的 ANSYS 实现方式 | 249 |
| 【原理】 6.3.1(3) | p 方法的 ANSYS 实现流程 | 250 |
| 6.3.2 | 自适应网格划分的分析过程 | 251 |
| 【原理】 6.3.2(1) | 自适应网格划分的分析原理 | 251 |
| 【原理】 6.3.2(2) | 自适应网格划分的 ANSYS 实现方式 | 252 |
| 【原理】 6.3.2(3) | 自适应网格划分的 ANSYS 实现流程 | 253 |
| 6.3.3 | 子模型的分析过程 | 255 |
| 【原理】 6.3.3 | 子模型的 ANSYS 实现方式 | 255 |
| 6.3.4 | 高阶及高效建模技术典型算例 | 257 |
| 【算例】 6.3.4(1) | 平面问题的 p 型单元建模与分析 | 257 |
| 【算例】 6.3.4(2) | 椭圆形带孔平面的自适应分析 | 259 |
| 【算例】 6.3.4(3) | 带孔方板应力集中的子模型分析 | 260 |
| 6.4 | 基于耦合及约束方程的建模技术 | 263 |
| 【原理】 6.4(1) | 耦合及约束方程的分析原理 | 263 |
| 【原理】 6.4(2) | 约束方程的 ANSYS 实现方式及流程 | 264 |
| 【算例】 6.4(3) | 带扭转弹簧的刚性梁的小挠度旋转 | 265 |
| 6.5 | 结构优化问题的分析 | 267 |
| 6.5.1 | 结构参数优化的分析过程 | 267 |
| 【原理】 6.5.1(1) | 结构参数优化的分析原理 | 267 |
| 【原理】 6.5.1(2) | 结构参数优化的 ANSYS 实现方式 | 270 |
| 【原理】 6.5.1(3) | 结构参数优化的 ANSYS 实现流程 | 271 |
| 6.5.2 | 拓扑优化的分析过程 | 272 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|-----|
| 【原理】6.5.2(1) | 拓扑优化的分析原理 | 272 |
| 【原理】6.5.2(2) | 拓扑优化的 ANSYS 实现方式 | 274 |
| 【原理】6.5.2(3) | 拓扑优化的 ANSYS 实现流程 | 276 |
| 6.5.3 | 结构优化问题的典型算例 | 277 |
| 【算例】6.5.3(1) | 平面框架结构的参数优化 | 277 |
| 【算例】6.5.3(2) | 多工况载荷下的静力拓扑优化 | 280 |
| 【算例】6.5.3(3) | 平面简支梁固有频率最大化的拓扑优化 | 283 |
| 6.6 | 结构的概率、疲劳与断裂分析 | 285 |
| 6.6.1 | 结构概率分析过程 | 285 |
| 【原理】6.6.1(1) | 结构概率分析的原理 | 285 |
| 【原理】6.6.1(2) | 结构概率分析的 ANSYS 实现方式 | 288 |
| 【原理】6.6.1(3) | 结构概率分析的 ANSYS 实现流程 | 291 |
| 6.6.2 | 结构疲劳分析过程 | 292 |
| 【原理】6.6.2(1) | 结构疲劳分析的原理 | 292 |
| 【原理】6.6.2(2) | 结构疲劳分析的 ANSYS 实现方式 | 294 |
| 【原理】6.6.2(3) | 结构疲劳分析的 ANSYS 实现流程 | 296 |
| 6.6.3 | 结构断裂分析过程 | 296 |
| 【原理】6.6.3(1) | 结构断裂分析的原理 | 296 |
| 【原理】6.6.3(2) | 结构断裂分析的 ANSYS 实现方式 | 300 |
| 【原理】6.6.3(3) | 结构断裂分析的 ANSYS 实现流程 | 302 |
| 6.6.4 | 典型算例 | 303 |
| 【算例】6.6.4(1) | 大型液压机架的概率设计分析 | 303 |
| 【算例】6.6.4(2) | 带孔平板的疲劳分析 | 307 |
| 【算例】6.6.4(3) | 带裂纹的椭圆孔平板的断裂力学分析 | 309 |
| 【算例】6.6.4(4) | 平板剪切型裂纹应力强度因子计算 | 312 |
| 6.7 | 复合材料的分析 | 313 |
| 6.7.1 | 复合材料的分析过程 | 313 |
| 【原理】6.7.1(1) | 多层复合材料分析的原理 | 313 |
| 【原理】6.7.1(2) | 多层复合材料分析的 ANSYS 实现方式 | 316 |
| 【原理】6.7.1(3) | 多层复合材料分析的 ANSYS 实现流程 | 318 |
| 6.7.2 | 复合材料分析的典型算例 | 318 |
| 【算例】6.7.2(1) | 多层复合梁的弯曲问题 | 318 |
| 【算例】6.7.2(2) | 带孔简支叠层复合板的静力分析 | 321 |
| 第7章 | 结构的模态及屈曲分析 | 324 |
| 7.1 | 结构模态分析 | 324 |
| 7.1.1 | 结构模态分析的过程 | 324 |
| 【原理】7.1.1(1) | 结构模态分析的原理 | 324 |
| 【原理】7.1.1(2) | 结构模态分析的 ANSYS 实现方式及流程 | 326 |
| 7.1.2 | 结构模态分析的经典算例 | 328 |

| | | |
|---------------|----------------------------------|-----|
| 【原理】 7.1.2(1) | 模态分析中的尺度单位换算 | 328 |
| 【算例】 7.1.2(2) | 单元类型及网格密度对振动频率的影响 | 329 |
| 【算例】 7.1.2(3) | 两悬挂圆盘的扭转振动频率 | 331 |
| 【算例】 7.1.2(4) | 旋转悬臂叶片的振动 | 333 |
| 【算例】 7.1.2(5) | 钻杆钻环的扭转振动 | 335 |
| 【算例】 7.1.2(6) | 带孔两层复合壳的模态分析 | 336 |
| 【算例】 7.1.2(7) | 流体耦合系统的振动 | 338 |
| 【算例】 7.1.2(8) | 长方体压电陶瓷材料的固有频率的分析 | 341 |
| 7.2 | 结构屈曲分析的原理与操作 | 343 |
| 7.2.1 | 结构屈曲分析的过程 | 343 |
| 【原理】 7.2.1(1) | 结构屈曲分析的原理 | 343 |
| 【原理】 7.2.1(2) | 结构屈曲分析的 ANSYS 实现方式及流程 | 345 |
| 7.2.2 | 弹性结构失稳分析的典型算例 | 347 |
| 【算例】 7.2.2(1) | 矩形梁受压弯曲后的扭转失稳 | 347 |
| 【算例】 7.2.2(2) | 两端铰支梁的失稳分析 | 351 |
| 【算例】 7.2.2(3) | 静态压杆失稳的平面单元分析 | 352 |
| 【算例】 7.2.2(4) | 直角框架的失稳分析 | 354 |
| 7.3 | 高速旋转结构的模态分析 | 356 |
| 7.3.1 | 高速旋转结构模态分析的过程 | 356 |
| 【原理】 7.3.1(1) | 高速旋转结构模态分析的原理 | 356 |
| 【原理】 7.3.1(2) | 高速旋转结构模态分析的 ANSYS 实现方式及流程 | 357 |
| 7.3.2 | 高速旋转结构模态分析的典型算例 | 359 |
| 【算例】 7.3.2(1) | 空心管道高速旋转的模态分析 | 359 |
| 【算例】 7.3.2(2) | 考虑 Coriolis 效应的空心圆筒的旋转模态分析 | 361 |
| 7.4 | 循环对称结构的模态分析 | 363 |
| 7.4.1 | 循环对称结构模态分析的过程 | 363 |
| 【原理】 7.4.1(1) | 循环对称结构模态分析的原理 | 363 |
| 【原理】 7.4.1(2) | 循环对称结构模态分析的 ANSYS 实现方式及流程 | 365 |
| 7.4.2 | 循环对称振动及屈曲分析的典型算例 | 366 |
| 【算例】 7.4.2(1) | 拉伸薄膜的 3D 循环对称振动分析 | 366 |
| 【算例】 7.4.2(2) | 水轮机循环对称结构的模态分析 | 370 |
| 第 8 章 | 线性结构简谐振动及谱分析 | 373 |
| 8.1 | 简谐振动分析的过程 | 373 |
| 【原理】 8.1(1) | 简谐振动分析的原理 | 373 |
| 【原理】 8.1(2) | 简谐振动分析的 ANSYS 实现方式及流程 | 377 |
| 8.2 | 结构简谐振动分析经典算例 | 380 |
| 【算例】 8.2(1) | 两质量弹簧系统的强迫振动 | 380 |
| 【算例】 8.2(2) | 一个动力系统的强迫振动 | 383 |
| 【算例】 8.2(3) | 偏心重力激振器的响应 | 385 |

| | | |
|-------------|-----------------------------|-----|
| 【算例】8.2(4) | 吉他弦的简谐振动 | 386 |
| 【算例】8.2(5) | 压电传感器结构的强迫响应 | 389 |
| 【算例】8.2(6) | 可压缩液体中环形结构的简谐分析 | 392 |
| 8.3 | 结构随机响应谱分析的过程 | 396 |
| 【原理】8.3(1) | 谱分析的原理 | 396 |
| 【原理】8.3(2) | 结构随机响应谱分析的 ANSYS 实现方式 | 398 |
| 【原理】8.3(3) | 结构随机响应谱分析的 ANSYS 实现流程 | 399 |
| 8.4 | 结构谱分析典型算例 | 400 |
| 【算例】8.4(1) | 简支梁的随机振动分析 | 400 |
| 【算例】8.4(2) | 两质量弹簧系统的随机响应 | 403 |
| 【算例】8.4(3) | 简支梁的地震响应分析 | 405 |
| 【算例】8.4(4) | 简支厚板的功率谱密度随机及简谐响应分析 | 407 |
| 【算例】8.4(5) | 考虑地震作用的建筑物加速度响应谱分析 | 410 |
| 第9章 | 线性结构瞬态分析 | 416 |
| 9.1 | 瞬态分析的过程 | 416 |
| 【原理】9.1(1) | 一阶系统瞬态分析的原理 | 416 |
| 【原理】9.1(2) | 二阶系统瞬态分析的原理 | 416 |
| 【原理】9.1(3) | 瞬态分析中的三种求解方法 | 419 |
| 【原理】9.1(4) | 瞬态分析的 ANSYS 实现流程 | 422 |
| 9.2 | 结构系统瞬态分析典型算例 | 425 |
| 【算例】9.2(1) | 简支梁的瞬态响应 | 425 |
| 【算例】9.2(2) | 非等刚度弹簧的大侧向挠度 | 428 |
| 【算例】9.2(3) | 铰接梁的转动 | 430 |
| 【算例】9.2(4) | 刚性球撞击弹性地面的分析 | 433 |
| 【算例】9.2(5) | 弹簧质量系统的干摩擦滑动 | 435 |
| 【算例】9.2(6) | 带间隔的双弹簧系统的瞬态响应 | 437 |
| 【算例】9.2(7) | 坠落容器中弹簧质量系统的瞬态响应 | 440 |
| 【算例】9.2(8) | 自由杆的冲击分析 | 443 |
| 【算例】9.2(9) | 单摆的大位移旋转 | 446 |
| 【算例】9.2(10) | 水中浮标的运动 | 449 |
| 【算例】9.2(11) | 铰支梁的双向旋转运动 | 451 |
| 【算例】9.2(12) | 考虑地震作用的建筑物加速度瞬态分析 | 455 |
| 【算例】9.2(13) | 桥梁在车辆经过时的瞬态分析 | 457 |
| 参考文献 | | 460 |
| 主题词索引 | | 463 |
| 命令流索引 | | 470 |
| 单元索引 | | 478 |