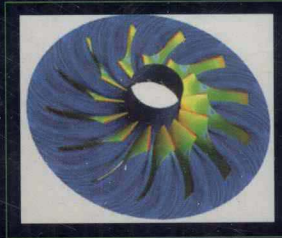
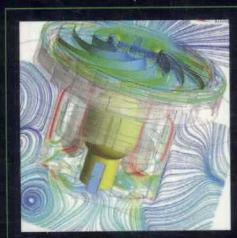


12.0

ANSYS

有限元分析完全手册



11小时多媒体教学视频

• 丁毓峰 等编著

- ◎ 快速理解有限单元法和ANSYS分析过程
- ◎ 熟练掌握ANSYS对不同类型问题的分析求解
- ◎ 稳步提升问题的分析和求解能力



12.0
ANSYS
有限元分析完全手册

• 丁毓峰 等编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京•BEIJING

内 容 简 介

ANSYS 作为大型通用有限元分析软件,已经广泛应用于机电、土木、航天等工业领域。本书是作者在使用 ANSYS 软件解决实际工程问题基础上,参考有关文献资料后编写完成的。

在内容编排上,本书基于 ANSYS 12.0 的最新版本,重点介绍了有限元分析的理论基础、ANSYS 12.0 有限元分析流程、实体建模、网格划分、施加载荷、求解、通用后处理、时间历程后处理、静力学分析、结构动力学分析、结构非线性分析、热力学分析、ANSYS Workbench 集成环境等内容。围绕 ANSYS 软件的功能讲解,书中给出了大量实例,实例涉及静力学分析、结构动力学分析、结构非线性分析、热力学分析等多种类型,可以帮助读者理解如何根据问题的性质,利用 ANSYS 进行有限元分析。附录给出了使用 ANSYS 经常遇到的一些问题,可以帮助读者少走弯路,提高学习效率和更好地掌握 ANSYS 的使用技巧。本书配套光盘提供了每章内容的 PPT 讲稿、实例操作录像文件和 ANSYS 实例文件。

本书不仅适合高等学校理工类高年级本科生或研究生学习 ANSYS 12.0 有限元分析软件的教材,还可供从事结构分析的工程技术人员参考使用,同时书中提供的大量实例也可供高级用户参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 12.0 有限元分析完全手册 / 丁毓峰等编著. -- 北京:电子工业出版社, 2011.1
ISBN 978-7-121-12304-7

I. ①A… II. ①丁… III. ①有限元分析—应用程序, ANSYS 12.0—手册 IV. ①O241.82-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 224548 号

责任编辑:胡辛征

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:32.5 字数:832 千字

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:65.00 元(含 DVD 光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

PREFACE

随着国内经济的快速发展，中国企业正逐步从中国制造向中国创造转变。中国创造的核心就是提高企业的自主创新能力。目前很多企业为了进一步提升自主创新能力，开始使用有限元分析软件对产品进行分析建模和仿真，力图在设计阶段就发现创新产品的问题，从而降低产品成本，提高企业的创新能力。作为国内外应用最为广泛的有限元分析软件，ANSYS 已经在国内拥有一定数量的用户。但是作为初学者，往往会对 ANSYS 的强大功能感到不知所措，不知如何开始学习或者开展自己的分析工作。本书遵循循序渐进的原则，帮助初学者在短期内学习并掌握 ANSYS 公司的新版本 ANSYS 12.0 的使用方法。

本书的特点

本书的主要特点如下。

- 内容全面新颖，实例丰富，讲述循序渐进，应用领域广泛。通过学习，读者可逐步提高自身的 ANSYS 操作水平及利用有限元分析理论进行结构分析的能力，最终具备在结构分析领域解决实际工程问题的思路、方法和能力。
- 本书对于 ANSYS 传统模式和新集成环境 Workbench 的基础知识和功能使用介绍得非常详细，几乎涵盖了 ANSYS 应用的所有分析类型，使读者阅读完本书就能够使用 ANSYS 进行产品分析。
- 本书编写时采用了目前最新的 ANSYS 12.0 版本，所涉及的知识也都是基于最新版本进行介绍的，在讲解分析过程中，结合了图形用户界面（GUI）操作和命令行操作两种模式，读者可以根据自己的需要进行选择。

本书的主要内容

不管对什么类型进行分析，使用 ANSYS 进行有限元分析的流程是类似的，本书的章节就是按照分析流程进行组织的，主要内容如下。

第 1 章：介绍了 ANSYS 软件的理论基础——有限单元法，ANSYS 12.0 新功能的特点，ANSYS 12.0 的安装过程。

第 2 章：介绍了 ANSYS 分析基本过程，以及分析过程中经常会使用到的一些命令。

第 3 章：介绍了 ANSYS 中建立实体模型的两种方法，包括通过中间文件格式导入实体模型和在 ANSYS 前处理器中直接建模的方法。

第 4 章：介绍了自由网格和映射网格的基本概念、网格划分的主要指导思想、网格划分的基本方法、单元属性的设定方法、网格划分过程和网格划分的控制方法等内容。

第 5 章：介绍了载荷的基本概念，载荷步、子步和迭代的概念，载荷的分类，加载方法，加载控制，如何针对不同的分析类型完成载荷的加载过程。

第 6 章：介绍了 ANSYS 求解类型、求解过程，并给出了求解实例。

第7章：介绍了 ANSYS 通用后处理器，包括通用后处理器概述、如何将结果文件导入到 ANSYS12、如何设置结果输出方式与图形显示方式、图形显示计算结果等内容。

第8章：介绍了时间-历程后处理器的使用方法。

第9章：介绍了平面应力、应变问题、轴对称问题，以及梁、桁架、壳等模型的分析问题，结合实例进行了具体的分析求解。

第10章：介绍了结构动力学分析的概念和基本过程、运用 ANSYS 软件对模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析和谱分析等各种动力学的实际问题进行分析的过程。

第11章：介绍了非线性分析基本过程、非线性分析常用的几种类型的分析过程，常用的类型包括结构非线性分析、几何非线性分析、材料非线性分析、状态非线性分析等。

第12章：介绍了热分析的基本概念、传热学经典理论、3种基本热传递方式等热分析基础知识；还介绍了热-结构耦合分析、热-应力耦合分析的内容和过程。

第13章：介绍了如何在 Workbench 集成环境中，将整个仿真流程的建立模型、划分网格、求解和查看结果更加紧密地组合在一起，实现复杂的多物理场分析流程。

本书读者对象

ANSYS 入门与进阶人员；
从事结构分析的工程技术人员；
ANSYS 有限元分析研究人员；
大、中专院校相关专业的学生和老师。

本书作者

本书主要由丁毓峰编著，其他参与编写工作的还有甘霖、潘迁、李建峰、李龙海、龚力、房伟、高会东、姜涛、李容、刘辉、刘开庆、吕辉、姚志娟等。

编写过程中参考了多种同类教材、专著，在此向参考文献与资料的编、著者表示衷心感谢！由于时间仓促，作者的水平有限，本书难免有一些错误和不足之处，欢迎广大读者给予批评和指正。读者在阅读本书过程中如遇到问题或者有相关建议，请发邮件到 dyfjd@126.com，我们将及时进行反馈。

编著者

第 1 章 有限单元法和 ANSYS 简介**15**

本章主要介绍有限单元法的基本思想、有限单元法的基本模型, 以及使用有限单元法进行产品分析的基本步骤。ANSYS 作为应用最广泛的有限元分析软件之一, 已经发展到 12.0 版本。本章介绍了 ANSYS 12.0 新功能和特点、ANSYS 12.0 的安装和配置、ANSYS 12.0 主菜单、ANSYS 12.0 帮助系统等内容。

1.1 有限单元法简介	15
1.1.1 有限单元法的基本思想	15
1.1.2 有限单元法的基本模型	17
1.1.3 有限单元法的分析步骤	18
1.2 ANSYS 功能和特点	19
1.2.1 ANSYS 的发展历程	19
1.2.2 ANSYS 的主要功能	20
1.2.3 ANSYS 12.0 版本的新特点	22
1.3 ANSYS 12.0 的安装和配置	25
1.3.1 ANSYS 12.0 的安装	26
1.3.2 ANSYS 12.0 的启动	32
1.3.3 ANSYS 12.0 的运行环境配置	33
1.4 ANSYS 程序结构	33
1.4.1 ANSYS 文件格式	33
1.4.2 处理器	34
1.4.3 图形输入	34
1.4.4 分析文件类型	34
1.5 ANSYS 12.0 用户界面基本组成	34
1.5.1 启动 ANSYS 12.0 用户界面	34
1.5.2 对话框及其控件	35
1.6 ANSYS 12.0 通用菜单	37
1.7 输入窗口	38
1.8 ANSYS 12.0 主菜单简介	38
1.9 工具条	39
1.10 输出窗口 (OUTPUT WINDOW)	40
1.11 图形窗口 (GRAPHICS WINDOW)	40
1.12 个性化界面	42
1.13 ANSYS 12.0 帮助系统	43
1.14 小结	44

第2章 ANSYS 分析基本过程

45

本章主要介绍包括分析问题、创建有限元模型、施加载荷进行求解和查看结果的典型 ANSYS 分析过程,以及在分析过程中经常会使用到的一些命令。最后通过一个工字钢悬臂梁的分析实例演示了 ANSYS 的分析流程。

2.1 分析问题	45
2.2 建立有限元模型	46
2.2.1 建立和修改工作文件名或标题	47
2.2.2 定义单元类型	47
2.2.3 定义材料特性数据	49
2.2.4 创建实体模型	49
2.2.5 对实体模型进行网格划分	49
2.3 施加载荷	50
2.3.1 定义分析类型和设置分析选项	50
2.3.2 施加载荷	51
2.4 进行求解	52
2.4.1 求解器的类别	52
2.4.2 求解检查	53
2.4.3 求解的实施	53
2.4.4 求解会碰到的问题	54
2.5 后处理	54
2.6 分析过程中常用到的命令	55
2.6.1 起始层命令	55
2.6.2 前处理命令	55
2.6.3 求解命令	56
2.6.4 一般后处理命令	57
2.7 工字钢悬臂梁分析实例	58
2.7.1 分析问题	58
2.7.2 建立有限元模型	59
2.7.3 施加载荷	62
2.7.4 进行求解	63
2.7.5 后处理	64
2.8 小结	66

第3章 建立实体模型

67

本章主要介绍如何通过 IGES、SAT、STEP 和 PARASOLID 等中间文件格式或者图形转换界面,将 CAD 模型直接导入至 ANSYS 中。

3.1 实体建模概述	67
3.2 导入 CAD 软件创建的实体模型	68
3.2.1 图形交换数据格式	68
3.2.2 IGES 格式实体的导入	68

3.2.3	SAT 格式实体的导入	70
3.2.4	Parasolid 格式实体的导入	71
3.2.5	STEP 格式的导入	71
3.2.6	导入 SolidWorks 中创建的叶片模型	72
3.2.7	导入 UG 绘制的轴承模型	73
3.2.8	导入 SolidEdge 中绘制的联轴器模型	74
3.3	对输入模型的修改	75
3.4	ANSYS 环境内直接建模方法	75
3.4.1	自上而下创建几何模型	75
3.4.2	自下而上建模几何模型	76
3.5	坐标系简介	76
3.5.1	总体和局部坐标系	76
3.5.2	显示坐标系	79
3.5.3	节点坐标系	82
3.5.4	单元坐标系	83
3.5.5	结果坐标系	84
3.6	工作平面的使用	84
3.6.1	定义一个新的工作平面	85
3.6.2	控制工作平面的显示和样式	85
3.6.3	移动工作平面	85
3.6.4	旋转工作平面	86
3.6.5	还原一个已定义的工作平面	86
3.6.6	工作平面的高级用途	87
3.7	自底向上创建几何模型	90
3.7.1	关键点	90
3.7.2	硬点	92
3.7.3	几何元素——线	95
3.7.4	几何元素——面	102
3.7.5	几何元素——体	107
3.8	自顶向下创建几何模型	114
3.8.1	创建面体素	114
3.8.2	创建实体体素	116
3.9	使用布尔操作来构建复杂几何模型	119
3.9.1	布尔运算的设置	119
3.9.2	布尔运算之后的图元编号	120
3.9.3	交运算	120
3.9.4	两个实体相交操作	122
3.9.5	两个实体相加操作	122
3.9.6	两个实体相减操作	124
3.10	小结	125

第4章 有限元网格划分与模型建立

126

本章将讲解自由网格和映射网格的基本概念、有限元网格划分的主要指导思想、有限元网格划分的基本方法、有限元单元属性的设定方法、有限元网格划分过程和有限元网格划分的控制方法等内容,最后给出了轴承座零件划分网格的实例。

4.1 网格类型和应用场合	126
4.2 有限元网格划分的主要指导思想	128
4.3 有限元网格划分的基本方法	129
4.4 有限元单元属性的设定	130
4.4.1 选择单元类型	130
4.4.2 单元设置	132
4.4.3 材料属性设定	132
4.4.4 单元坐标系设定	133
4.5 有限元网格划分的控制方法	133
4.5.1 有限元网格划分工具	134
4.5.2 选择自由或映射网格划分	134
4.5.3 单元属性分配设置	135
4.5.4 单元尺寸控制	136
4.5.5 局部网格划分控制	137
4.5.6 内部网格划分控制	138
4.5.7 细化网格控制	139
4.5.8 网格质量控制	140
4.5.9 细小结构的网格划分	140
4.6 实体模型的网格划分	140
4.6.1 映射网格划分方法	141
4.6.2 划分实体模型	141
4.6.3 有限元模型的修改	142
4.7 直接生成有限元模型	144
4.7.1 节点	144
4.7.2 单元	150
4.7.3 通过节点和单元生成有限元模型	152
4.8 生成有限元模型实例	157
4.9 小结	168

第5章 施加载荷

169

本章在实体建立和网格划分的基础上,主要介绍了载荷的基本概念、载荷步、子步和迭代的概念、载荷的分类、加载方法、加载控制、如何针对不同的分析类型完成载荷的加载过程。

5.1 概述	169
5.1.1 载荷的定义	169
5.1.2 载荷施加的对象	170
5.1.3 载荷步、子步和平衡迭代	171

5.1.4	时间参数	171
5.2	载荷的初始设置	172
5.2.1	均布温度和参考温度	172
5.2.2	面载荷梯度	173
5.2.3	重复加载方式	173
5.2.4	设定载荷步选项	174
5.3	载荷的分类	175
5.3.1	自由度约束	175
5.3.2	集中力载荷	177
5.3.3	面载荷	178
5.3.4	体载荷	180
5.3.5	阶跃载荷	181
5.3.6	坡道载荷	182
5.3.7	其他载荷	182
5.4	载荷的施加和操作	183
5.4.1	利用表格来施加载荷	183
5.4.2	利用函数来施加载荷	183
5.4.3	修改载荷	184
5.4.4	删除载荷	184
5.4.5	其他操作	185
5.5	实例	186
5.5.1	单载荷步的施加	186
5.5.2	多载荷步的施加	188
5.6	小结	192

第6章 求解

193

本章主要介绍 ANSYS 的求解类型、求解控制和求解过程，并给出了求解实例。

6.1	求解设置	193
6.1.1	新分析	194
6.1.2	求解控制	194
6.2	求解过程处理	196
6.2.1	求解概述	196
6.2.2	求解当前载荷步	196
6.2.3	根据载荷步文件求解	197
6.2.4	多载荷步求解	197
6.2.5	重新启动分析	199
6.2.6	预测求解时间	201
6.3	实例	203
6.3.1	恢复文件	203
6.3.2	求解	203
6.4	小结	204

第7章 通用后处理器

205

本章主要对后处理的基本概念、后处理可以处理的数据类型、图形显示分析计算结果及列表显示计算结果的方法进行了介绍,最后给出了一个综合实例。

7.1 概述	205
7.1.1 通用后处理器	206
7.1.2 时间-历程后处理器	206
7.1.3 结果文件读入通用后处理器	207
7.1.4 查看结果数据集	208
7.1.5 设置结果输出方式	208
7.1.6 设置图形显示方式	209
7.2 图形显示计算结果	209
7.2.1 结果查看器	210
7.2.2 查看和分析变形图	210
7.2.3 查看和分析等值线图	211
7.2.4 查看和分析矢量图	213
7.2.5 基于单元表的结果图形	214
7.2.6 载荷组合及其运算结果显示	216
7.3 列表显示计算结果	218
7.3.1 结果数据集汇总列表 (Detailed Summary)	219
7.3.2 迭代汇总信息 (Iteration Summary)	219
7.3.3 排序列表 (Sorted Listing)	220
7.4 综合实例	220
7.4.1 单载荷步求解结果查看	221
7.4.2 多载荷步求解结果查看	224
7.5 小结	227

第8章 时间-历程后处理器

228

本章主要介绍时间-历程后处理器的概况和使用方法,最后给出使用实例。

8.1 概述	228
8.1.1 时间-历程后处理器的作用	228
8.1.2 使用时间-历程后处理器的基本步骤	230
8.2 进入时间-历程后处理器	230
8.2.1 交互方式	230
8.2.2 批处理方式	232
8.3 时间-历程变量观察器	233
8.4 绘制时间-变量曲线	235
8.5 数据的输入和输出	236
8.5.1 数据的输入	237
8.5.2 数据的输出	237
8.6 综合实例	238

8.6.1 恢复文件	238
8.6.2 查看结果	239
8.7 小结	241

第9章 静力学分析

242

本章将系统地介绍结构静力学分析的内容,包括线性静力学问题中各种类型的工程实例,如平面应力、应变问题,轴对称问题,以及梁、桁架、壳等模型的分析问题,通过这些实例进行具体的分析求解,让读者能熟悉静力学中各种模型的分析思路和求解方法,并掌握 ANSYS 分析静力学问题的基本步骤。

9.1 静力学分析简介	242
9.1.1 静力学分析类型	242
9.1.2 静力学分析步骤	243
9.2 平面应力问题分析	244
9.2.1 问题描述	245
9.2.2 问题分析	245
9.2.3 求解过程和分析结果	246
9.3 平面应变问题分析	256
9.3.1 问题描述	257
9.3.2 问题分析	257
9.3.3 求解过程和分析结果	257
9.4 轴对称问题分析	266
9.4.1 问题描述	266
9.4.2 问题分析	266
9.4.3 求解过程和分析结果	267
9.5 梁分析	275
9.5.1 问题描述	275
9.5.2 问题分析	276
9.5.3 求解过程和分析结果	276
9.6 桁架分析	282
9.6.1 问题描述	283
9.6.2 问题分析	283
9.6.3 求解过程和分析结果	283
9.7 壳分析	292
9.7.1 问题描述	293
9.7.2 问题分析	293
9.7.3 求解过程和分析结果	294
9.8 接触分析	302
9.8.1 问题描述	302
9.8.2 问题分析	302
9.8.3 求解过程和分析结果	303
9.9 小结	325

第 10 章 结构动力学分析

326

本章主要介绍结构动力学分析基本过程、运用 ANSYS 软件对模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析和谱分析等各种动力学的实际问题进行分析的过程、步骤、技巧与方法。

10.1 结构动力学分析基本过程	326
10.1.1 模态分析	327
10.1.2 谐响应分析	330
10.1.3 瞬态动力学分析	333
10.1.4 谱分析	336
10.2 模态分析实例	340
10.2.1 问题描述	340
10.2.2 问题分析	340
10.2.3 求解过程和分析结果	340
10.3 谐响应分析	353
10.3.1 问题描述	353
10.3.2 问题分析	354
10.3.3 求解过程和分析结果	354
10.4 响应谱分析	364
10.4.1 问题描述	364
10.4.2 问题分析	365
10.4.3 求解过程和分析结果	365
10.5 瞬态动力学分析	374
10.5.1 问题描述	375
10.5.2 问题分析	375
10.5.3 求解过程和分析结果	375
10.6 小结	385

第 11 章 非线性分析

386

本章将介绍非线性分析基本过程,包括结构非线性分析、几何非线性分析、材料非线性分析、状态非线性分析等几种典型的非线性分析的基本概念,针对每种分析类型结合实例详细介绍了 ANSYS 中的非线性分析过程。

11.1 非线性分析基本过程	386
11.1.1 结构非线性分析	387
11.1.2 几何非线性分析	387
11.1.3 材料非线性分析	388
11.1.4 状态非线性分析	388
11.1.5 非线性分析步骤	388
11.2 几何非线性分析	396
11.2.1 问题描述	397
11.2.2 问题分析	397
11.2.3 建立模型	398

11.2.4	定义边界条件并求解	404
11.2.5	查看结果	406
11.3	材料非线性分析	410
11.3.1	问题描述	411
11.3.2	问题分析	411
11.3.3	建立模型	411
11.3.4	定义边界条件并求解	416
11.3.5	查看结果	419
11.4	状态非线性分析	422
11.4.1	问题描述	423
11.4.2	问题分析	423
11.4.3	建立模型	423
11.4.4	定义边界条件并求解	430
11.4.5	查看结果	432
11.5	小结	437

第 12 章 热分析

438

本章主要介绍热分析的基本概念、传热学经典理论、三种基本热传递方式等热分析基础知识、热分析的基本过程；热—结构耦合分析、热—应力耦合分析内容和实例。

12.1	热分析基础知识	438
12.1.1	热分析符号与单位	438
12.1.2	传热学经典理论	439
12.1.3	三种基本热传递方式	439
12.1.4	热分析材料基本属性	441
12.1.5	边界条件与初始条件	442
12.1.6	热载荷	443
12.1.7	稳态与瞬态热分析	444
12.1.8	线性与非线性热分析	445
12.2	热分析介绍	445
12.2.1	热分析简介	445
12.2.2	热分析的类型	445
12.2.3	热分析的基本过程	446
12.3	热—结构耦合分析	447
12.3.1	问题描述	447
12.3.2	问题分析	448
12.3.3	建立模型	448
12.3.4	定义边界条件并求解	456
12.3.5	查看结果	460
12.4	热—应力耦合分析实例	464
12.4.1	问题描述	464

12.4.2	问题分析	464
12.4.3	建立模型	465
12.4.4	定义边界条件并求解	471
12.4.5	查看结果	478
12.5	小结	480

第 13 章 ANSYS 新界面 WORKBENCH 环境 481

本章主要介绍 ANSYS 新界面 Workbench 集成环境的基本情况，如何基于 ANSYS 12.0 版本的“项目视图 (Project Schematic View)”功能，将整个仿真流程的建立模型，划分网格，求解和查看结果更加紧密的组合在一起，通过简单的拖拽操作即可完成复杂的多物理场分析流程。

13.1	ANSYS WORKBENCH 概述	481
13.1.1	ANSYS Workbench 产品设计流程	482
13.1.2	ANSYS Workbench 文件格式	484
13.2	ANSYS WORKBENCH 安装和启动配置	485
13.2.1	ANSYS 12.0 Workbench 启动	485
13.2.2	ANSYS 12.0 Workbench 配置	486
13.2.3	ANSYS 12.0 Workbench 帮助资源	488
13.3	静力学分析实例	489
13.3.1	问题描述	489
13.3.2	问题分析	489
13.3.3	建立模型	489
13.3.4	定义边界条件并求解	495
13.3.5	查看结果	498
13.4	结构动力学分析实例	500
13.4.1	问题描述	501
13.4.2	问题分析	501
13.4.3	建立模型	501
13.4.4	定义边界条件并求解	506
13.4.5	查看结果	508
13.5	热力学分析实例	508
13.5.1	问题描述	508
13.5.2	问题分析	509
13.5.3	建立模型	509
13.5.4	定义边界条件并求解	512
13.5.5	查看结果	513
13.6	小结	515

附录 A ANSYS 使用常见问题 516

第 1 章 有限单元法和 ANSYS 简介

有限单元法，又叫有限体积法（FVM），也称为控制体积法。本章主要介绍有限单元法的基本思想、有限单元法的基本模型，以及使用有限单元法进行产品分析的基本步骤。ANSYS 作为应用最广泛的有限元分析软件之一，已经发展到 12.0 版本。本章介绍了 ANSYS 12.0 新功能和特点、ANSYS 12.0 的安装和配置、ANSYS 12.0 主菜单、ANSYS 12.0 帮助系统等内容。

1.1 有限单元法简介

有限单元法是目前在工程领域内常用的数值模拟方法之一。本节主要介绍了有限单元法的发展历史、有限单元法的基本模型和 3 种主要的分类方式，以及有限单元法的分析步骤。

1.1.1 有限单元法的基本思想

目前在工程领域内常用的数值模拟方法包括有限单元法、边界元法、离散单元法和有限差分法等。就应用的广泛性而言，有限单元法应用最广。其基本思想是将连续的结构离散成有限多个单元，并在每一个单元中设定有限数量的节点，将连续体看做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个插值函数来表示单元中场函数的分布规律，进而利用弹性力学、固体力学、结构力学等力学中的变分原理去建立用以求解节点未知量的有限元方程，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。求解后就可以利用解得的节点值和设定的插值函数来确定单元上以至整个集合上的场函数。

有限单元法在 20 世纪 50 年代最初提出，是为处理固体力学问题而出现的，1956 年 Turner、Clough 把刚架位移法（直接刚度法）应用到了弹性力学平面应力问题中，将结构

划分成一个个三角形和矩形的“单元”。有限单元法的解利用每一个单元中近似的位移函数。“有限单元法”的名称由克拉夫 (Clough) 在 1960 年首先引用。

有限元分析 (FEA, Finite Element Analysis) 的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成, 对每一个单元假定一个合适的 (较简单的) 近似解, 然后推导求解这个域总的满足条件 (如结构的平衡条件), 从而得到问题的解。这个解不是准确解, 而是近似解, 因为实际问题被较简单的问题所代替。由于大多数实际问题难以得到准确解, 而有限元不仅计算精度高, 而且能适应各种复杂形状, 因而成为行之有效的工程分析手段。

有限元是那些集合在一起能够表示实际连续域的离散单元。有限元的概念早在几个世纪前就已产生并得到了应用, 例如, 用多边形 (有限个直线单元) 逼近圆来求得圆的周长, 但作为一种方法而被提出, 则是最近的事。有限元法最初被称为矩阵近似方法, 应用于航空器的结构强度计算, 并由于其方便性、实用性和有效性而引起从事力学研究的科学家的浓厚兴趣。经过短短数十年的努力, 随着计算机技术的快速发展和普及, 有限元方法迅速从结构工程强度分析计算扩展到几乎所有的科学技术领域, 成为一种丰富多彩、应用广泛并且实用高效的数值分析方法。

初期的有限单元法建立在虚功原理的基础上。1963—1964 年 Besseling、Melosh 和 Jones 等人确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法, 扩大了有限元法的应用范围。从 20 世纪 60 年代后期开始, 进一步利用伽辽金 (Galerkin) 法等加权余量法, 确定单元特性和建立有限元求解方程, 进一步扩大了有限元法的应用领域。1967 年出版的由 Zienkiewicz 与 Y.K.Cheung (张佑启) 合著的《结构与连续力学的有限元法》, 成为第一本有限元方面的专著。

从第一个成功尝试的飞机结构的有限元分析开始, 40 年来, 有限单元法蓬勃发展, 成为结构分析中必不可少的工具, 其广泛应用到空间问题、板壳问题, 稳定问题、动力问题和波动问题的分析和求解。分析内容包括流体力学、机械结构、热传导与热应力、磁场问题等。不仅涉及稳态场问题, 还涵盖材料非线性、几何非线性、时间维问题和断裂力学等问题。

已先后出现了先后有等参元、高次元、不协调元、拟协调元、杂交元、样条元、边界元、罚单元, 还有半解析的有限条等不同单元和半带宽与变带宽消去法、超矩阵法、波前法、子结构法、子空间迭代法等多种求解方法。同时出现了如 ANSYS、UG NX Nastran, FEMAP、ABAQUS、ALGOR、ASKA、ADINA、SAP、SolidWorks Simulation 等能够解决各种复杂问题的图形化软件系统。对网格自动划分和网格自适应过程的研究, 大大加强了有限元法的解题能力, 使有限单元法逐渐趋于成熟。有限元法作为一种离散化的数值解法, 也已成为应用数学的一个新的分支。