

升级版

技能应用速成系列

ANSYS技能速成，本书足矣！

ANSYS 16.0

有限元分析 | 从入门到精通 (第2版)

CAX技术联盟

曹 渊 编著

内容全面、案例丰富

基础知识→专题技能→实例应用→举一反三。

讲解细致、综合应用

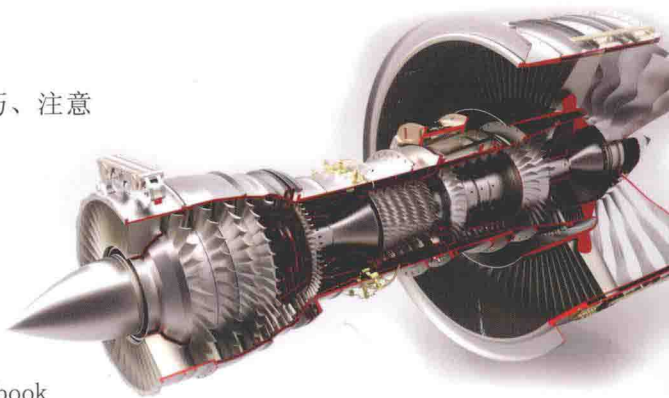
通过案例详细讲解分析流程、方法、技巧、注意事项，再到综合应用。

网络服务、博客答疑

超值素材资源、网络支持。

网络支持: <http://www.hxedu.com.cn>

博客答疑: <http://blog.sina.com.cn/caxbook>



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

技能应用速成系列

ANSYS 16.0 有限元分析从入门到精通 (第2版)

CAX 技术联盟
曹 渊 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书采用 GUI 界面操作与 APDL 命令相互对照的方式,从基础知识、专题技术两个层面详细地阐述有限元软件 ANSYS 16.0 的使用方法和技巧。本书自始至终采用实例描述方式安排内容,系统完整且每章又相对独立,是一本简明的 ANSYS 参考书。

全书分为两部分共 22 章。基础知识部分(第 1~7 章),讲解了使用 ANSYS 进行有限元分析的基本流程与方法、ANSYS 建模、网格划分、边界条件定义、求解、后处理等知识;专题技术部分(第 8~22 章),根据工程应用的实际经验,介绍大量高级应用知识,包括 ANSYS 结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析、稳态热分析、瞬态热分析、电磁场分析、多物理场耦合分析、几何非线性分析、接触分析、生死单元技术、复合材料分析、薄膜结构分析、参数化与优化设计等。

本书以实用为宗旨,深入浅出,实例引导,讲解详实,适合作为理工科高等院校本科生、研究生的教学用书,也可作为广大科研工程技术人员的参考书。

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 16.0 有限元分析从入门到精通 / CAX 技术联盟,曹渊编著. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2015.9

(技能应用速成系列)

ISBN 978-7-121-26973-8

I. ①A… II. ①C… ②曹… III. ①机械设计—应用软件 IV. ①TH122-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 195424 号



策划编辑:许存权

责任编辑:许存权 特约编辑:谢忠玉 鲁秀敏

印刷:涿州市京南印刷厂

装订:涿州市京南印刷厂

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:28.25 字数:723 千字

版次:2015 年 9 月第 1 版

印次:2015 年 9 月第 1 次印刷

定价:69.00 元

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 zltz@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

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，由世界著名的有限元分析软件公司——美国 ANSYS 公司开发，它能与多数 CAD 软件接口实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

ANSYS 软件不断吸收当今世界最新的计算方法与计算机技术，引领世界有限元技术发展的潮流，凭借其强大的功能、可靠的质量，赢得了全球工业界的广泛赞赏，尤其得到各行业 CAE 用户的认可，在航空航天、铁路运输、石油化工、机械制造、能源、汽车、电子、土木工程、船舶、生物医学、轻工、矿产、水利等领域得到广泛的应用，为各领域的科学研究与工程应用的发展提供了巨大的推动力。

1. 本书特点

由浅入深，循序渐进。本书以初、中级读者为对象，首先从 ANSYS 使用基础讲起，再辅以 ANSYS 在工程中的应用案例帮助读者尽快掌握 ANSYS 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、内容新颖。本书结合作者多年 ANSYS 使用经验与实际工程应用案例，将 ANSYS 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

实例典型，轻松易学。通过学习实际工程应用案例的具体操作是掌握 ANSYS 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ANSYS 在各方面的应用。

2. 本书内容

本书基于 ANSYS 16.0 版，讲解了 ANSYS 的基础知识和核心应用内容。本书主要分为两个部分：基础知识部分和专题技术部分。

第一部分：基础知识。第 1~7 章，主要介绍 ANSYS 的基础知识，包括 ANSYS 的基本操作、APDL 应用、实体建模、网格划分、加载、求解及后处理等内容。具体章节安排如下：

第 1 章 绪论

第 3 章 实体建模

第 5 章 加载

第 7 章 后处理

第 2 章 APDL 基础应用

第 4 章 划分网格

第 6 章 求解

第二部分：专题技术，即案例应用分析部分。第8~22章，主要从 ANSYS 所能求解的实际物理问题入手，给出其具体的计算算例。具体章节安排如下：

- | | |
|---------------|---------------|
| 第8章 结构静力分析 | 第9章 模态分析 |
| 第10章 谐响应分析 | 第11章 瞬态动力学分析 |
| 第12章 谱分析 | 第13章 热分析 |
| 第14章 电磁场分析 | 第15章 多物理场耦合分析 |
| 第16章 非线性静分析 | 第17章 接触问题 |
| 第18章 生死单元 | 第19章 复合材料分析 |
| 第20章 机械零件分析 | 第21章 薄膜结构分析 |
| 第22章 参数化与优化设计 | |

3. 读者对象

本书适合 ANSYS 初学者和期望提高矩阵运算及建模仿真工程应用能力的读者，具体包括如下：

- | | |
|----------------|-------------------|
| ★ 相关从业人员 | ★ 初学 ANSYS 的技术人员 |
| ★ 大中专院校的教师和在校生 | ★ 相关培训机构的教师和学员 |
| ★ 参加工作实习的“菜鸟” | ★ ANSYS 爱好者 |
| ★ 广大科研工作人员 | ★ 初、中级 ANSYS 从业人员 |

4. 本书作者

本书主要由曹渊编著，另外，参与本书编写的还有张明明、吴光中、魏鑫、石良臣、刘冰、林晓阳、唐家鹏、丁金滨、王菁、吴永福、张小勇、温正、李昕、刘成柱、乔建军、张迪妮、张岩、温光英、郭海霞、王芳。虽然作者在编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处，请读者朋友及各位同行批评指正，我们将不甚感激。

5. 读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者朋友在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxbook@126.com，或访问作者博客 <http://blog.sina.com.cn/caxbook>，编者会尽快给予解答，我们将竭诚为您服务。

注：本书配套的工程案例文件，可在作者博客中下载，或到华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>)，找到本书页面，即可下载。

编者

目 录

第一部分 基础知识

第 1 章 绪论	1	2.4 运算符、函数与函数编辑器	21
1.1 有限元法概述	1	2.5 本章小结	22
1.1.1 有限元法分析过程	1	第 3 章 实体建模	23
1.1.2 有限元的方法和理论手段	3	3.1 实体建模操作概述	23
1.2 ANSYS 16.0 简介	4	3.2 用自下向上的方法建模	24
1.2.1 ANSYS 启动与退出	4	3.3 自顶向下法	29
1.2.2 ANSYS 操作界面	4	3.4 外部程序导入模型	32
1.2.3 ANSYS 文件管理	7	3.5 常用建模命令汇总	35
1.2.4 ANSYS 分析流程	8	3.6 实体模型的建立	37
1.2.5 分析实例入门	9	3.7 本章小结	44
1.3 本章小结	14	第 4 章 划分网格	45
第 2 章 APDL 基础应用	15	4.1 定义单元属性	45
2.1 APDL 参数	15	4.2 设置网格划分控制	49
2.1.1 参数的概念与类型	15	4.2.1 智能网格划分	49
2.1.2 参数命名规则	16	4.2.2 全局单元尺寸控制	50
2.1.3 参数的定义与复制操作	16	4.2.3 默认单元尺寸控制	51
2.1.4 参数的删除操作	17	4.2.4 关键点尺寸控制	52
2.1.5 数组参数	17	4.2.5 线尺寸控制	52
2.2 APDL 的流程控制	18	4.2.6 面尺寸控制	54
2.2.1 *GO 分支语句	19	4.2.7 单元尺寸定义命令的 优先顺序	54
2.2.2 *IF 分支语句	19	4.2.8 完成划分	55
2.2.3 *DO 循环语句	19	4.3 网格的修改	56
2.2.4 *DOWHILE 循环语句	19	4.3.1 清除网格	56
2.3 宏文件	20	4.3.2 网格的局部细化	56
2.3.1 创建宏文件	20	4.3.3 层状网格划分	58
2.3.2 调用宏文件	21		

4.4 高级网格划分技术.....59	5.6 本章小结.....86
4.4.1 单元选择.....59	第6章 求解.....87
4.4.2 映射网格.....61	6.1 求解综述.....87
4.4.3 扫掠网格.....62	6.2 例题.....90
4.4.4 拉伸网格.....62	6.3 求解命令汇总.....91
4.5 划分网格命令汇总.....62	6.4 本章小结.....92
4.6 本章小结.....65	第7章 后处理.....93
第5章 加载.....66	7.1 通用后处理器.....93
5.1 载荷与载荷步.....66	7.1.1 结果文件.....93
5.1.1 载荷.....66	7.1.2 结果输出.....96
5.1.2 载荷步.....67	7.1.3 结果处理.....110
5.2 加载方式.....68	7.1.4 结果查看器.....112
5.2.1 实体加载的特点.....68	7.2 时间历程后处理器.....114
5.2.2 有限元模型的加载特点.....68	7.2.1 时间历程变量浏览器.....114
5.3 施加载荷.....69	7.2.2 定义变量.....116
5.4 齿轮泵模型的加载.....81	7.2.3 显示变量.....118
5.5 耦合与约束方程.....83	7.3 本章小结.....118
5.5.1 耦合.....83	
5.5.2 约束方程.....84	

第二部分 专题技术

第8章 结构静力分析.....120	8.2.10 查看矢量图.....139
8.1 结构分析概述.....120	8.2.11 查看约束反力.....140
8.1.1 结构分析的定义.....120	8.2.12 查询危险点坐标.....140
8.1.2 静力学分析的基本概念.....121	8.3 平面应力分析.....142
8.1.3 结构静力学分析的方法.....121	8.3.1 问题描述.....142
8.2 开孔平板静力分析.....124	8.3.2 设置分析环境.....142
8.2.1 问题描述.....124	8.3.3 定义几何参数.....143
8.2.2 设置分析环境.....124	8.3.4 选择单元.....144
8.2.3 定义单元与材料属性.....125	8.3.5 定义实常数.....145
8.2.4 建立模型.....127	8.3.6 定义材料属性.....146
8.2.5 划分网格.....129	8.3.7 创建实体模型.....147
8.2.6 施加边界条件.....130	8.3.8 设定网格尺寸并划分网格.....149
8.2.7 求解.....134	8.3.9 施加载荷并求解.....150
8.2.8 显示变形图.....135	8.3.10 求解.....153
8.2.9 显示结果云图.....135	8.3.11 查看分析结果.....153

8.3.12 命令流	157	11.2 斜拉悬臂梁结构瞬态响应分析	198
8.4 本章小结	158	11.2.1 问题描述	198
第 9 章 模态分析	159	11.2.2 设置环境变量	198
9.1 模态分析的基本假设	159	11.2.3 设置材料属性	199
9.2 模态分析方法	159	11.2.4 建立模型	200
9.3 立体桁架结构模态分析	164	11.2.5 划分网格	201
9.3.1 问题描述	164	11.2.6 施加载荷	202
9.3.2 分析	165	11.2.7 求解	204
9.3.3 设置环境变量	165	11.2.8 后处理	204
9.3.4 设置材料属性	166	11.3 本章小结	205
9.3.5 创建几何模型	167	第 12 章 谱分析	206
9.3.6 划分网格	170	12.1 ANSYS 谱分析概述	206
9.3.7 施加约束	171	12.2 三角平台结构地震响应分析	211
9.3.8 设置分析类型	171	12.2.1 问题描述	211
9.3.9 设置分析选项	172	12.2.2 分析	212
9.3.10 求解	173	12.2.3 设置环境变量	212
9.3.11 观察固有频率结果	173	12.2.4 设置材料属性	213
9.3.12 读入数据结果	173	12.2.5 建立模型	215
9.3.13 观察振型等值线结果。	174	12.2.6 划分网格	216
9.3.14 命令流	176	12.2.7 施加载荷	217
9.4 本章小结	178	12.2.8 求解	217
第 10 章 谐响应分析	179	12.2.9 观察结果	220
10.1 谐响应分析应用	179	12.3 本章小结	221
10.2 两自由度系统谐响应分析	184	第 13 章 热分析	222
10.2.1 问题描述	184	13.1 热分析介绍	222
10.2.2 设置环境变量	184	13.1.1 热分析的类型	222
10.2.3 设置材料属性	185	13.1.2 热分析的基本过程	222
10.2.4 建立模型	186	13.2 热—应力耦合分析实例	224
10.2.5 划分网格	187	13.2.1 问题描述	224
10.2.6 加载	188	13.2.2 设置环境变量	225
10.2.7 求解	189	13.2.3 设置材料属性	226
10.2.8 后处理	189	13.2.4 建模	228
10.2.9 命令流	190	13.2.5 网格划分	228
10.3 本章小结	191	13.2.6 加载	230
第 11 章 瞬态动力学分析	192	13.2.7 求解	231
11.1 概述	192	13.2.8 后处理	233
		13.3 本章小结	234

第 14 章 电磁场分析	235	16.2.4 设置属性	274
14.1 磁场分析	235	16.2.5 建模	275
14.2 电场分析	237	16.2.6 划分网格	276
14.3 屏蔽带状传输线静电场分析	238	16.2.7 加载	276
14.3.1 问题描述	238	16.2.8 求解	278
14.3.2 设置环境变量	238	16.2.9 后处理	279
14.3.3 设置材料属性	239	16.2.10 命令流	282
14.3.4 建模	240	16.3 实例分析二	283
14.3.5 划分网格	241	16.3.1 问题描述	283
14.3.6 加载	242	16.3.2 环境变量设置	283
14.3.7 求解	244	16.3.3 设置属性	284
14.3.8 后处理	244	16.3.4 建模	285
14.4 本章小结	247	16.3.5 网格划分	285
第 15 章 多物理场耦合分析	248	16.3.6 加载	286
15.1 概述	248	16.3.7 求解	288
15.1.1 顺序耦合	248	16.3.8 后处理	288
15.1.2 直接耦合分析	249	16.3.9 命令流	291
15.2 双层金属簧片耦合场分析	249	16.4 本章小结	293
15.2.1 问题描述	249	第 17 章 接触问题	294
15.2.2 设置环境变量	250	17.1 概述	294
15.2.3 设置材料属性	250	17.2 齿轮接触分析	295
15.2.4 建模	252	17.2.1 问题描述	295
15.2.5 划分网格	253	17.2.2 设置环境变量	296
15.2.6 加载	253	17.2.3 设置属性	297
15.2.7 求解	254	17.2.4 建立模型	298
15.2.8 后处理	255	17.2.5 对齿面划分网格	304
15.3 本章小结	257	17.2.6 定义接触对	304
第 16 章 非线性静力分析	258	17.2.7 施加位移边界	306
16.1 概述	258	17.2.8 求解	308
16.1.1 非线性问题的分类	258	17.2.9 后处理	309
16.1.2 牛顿-拉森方法	260	17.3 并列放置两个圆柱体的接触问题	311
16.1.3 非线性求解的组织级别	261	17.3.1 问题描述	311
16.1.4 非线性瞬态过程的分析	264	17.3.2 分析	311
16.2 实例分析一	273	17.3.3 设置分析环境	312
16.2.1 问题描述	273	17.3.4 设置属性	312
16.2.2 分析	273	17.3.5 建立模型	314
16.2.3 设置环境变量	274	17.3.6 网格划分	316
		17.3.7 定义约束	319

17.3.8 加载	320	第 20 章 机械零件分析	361
17.3.9 求解	322	20.1 扳手的静力分析	361
17.3.10 后处理	322	20.1.1 问题描述	361
17.4 本章小结	324	20.1.2 设置分析环境	362
第 18 章 生死单元	325	20.1.3 定义单元与材料属性	362
18.1 概述	325	20.1.4 建立模型	363
18.1.1 生死单元的基本概念	325	20.1.5 划分网格	365
18.1.2 单元生死技术的使用	326	20.1.6 施加边界条件	366
18.2 焊接过程模拟	328	20.1.7 求解	367
18.2.1 问题描述	328	20.1.8 查看求解结果	368
18.2.2 定义材料参数	328	20.1.9 退出系统	369
18.2.3 建立模型	330	20.1.10 命令流	369
18.2.4 生成钢板的单元	331	20.2 材料非线性分析	371
18.2.5 加载	332	20.2.1 问题描述	371
18.2.6 求解	334	20.2.2 设置环境变量	372
18.2.7 查看图形结果	339	20.2.3 定义单元类型	373
18.3 本章小结	341	20.2.4 建立实体模型	374
第 19 章 复合材料分析	342	20.2.5 划分网格	378
19.1 复合材料的相关概念	342	20.2.6 加载	379
19.2 建立复合材料模型	343	20.2.7 求解	380
19.2.1 选择合适的单元类型	343	20.2.8 后处理	381
19.2.2 定义材料的叠层结构	344	20.3 螺栓连接件仿真分析	383
19.2.3 定义失效准则	347	20.3.1 设置分析环境	384
19.2.4 应遵循的建模和 后处理规则	348	20.3.2 定义几何参数	384
19.3 复合材料分析实例	350	20.3.3 生成板梁	385
19.3.1 问题描述	350	20.3.4 生成柱腹板	389
19.3.2 定义单元类型、实常数及 材料特性	351	20.3.5 生成肋板	391
19.3.3 建立有限元模型	353	20.3.6 生成螺栓孔	393
19.3.4 划分网格	354	20.3.7 生成螺栓	395
19.3.5 添加约束和载荷	355	20.3.8 黏接	396
19.3.6 求解	356	20.3.9 设置属性	397
19.3.7 后处理	357	20.3.10 划分网格	398
19.3.8 命令流	359	20.3.11 定义接触	401
19.4 本章小结	360	20.3.12 加载	403
		20.3.13 求解	403
		20.3.14 后处理	405
		20.4 本章小结	406

第 21 章 薄膜结构分析	407
21.1 概述	407
21.2 实例详解：悬链面薄膜结构	
找形分析	408
21.2.1 问题描述	408
21.2.2 设置分析环境	409
21.2.3 建立模型	410
21.2.4 划分网格	413
21.2.5 施加边界条件	414
21.2.6 求解	416
21.2.7 后处理	416
21.3 命令流	417
21.4 本章小结	418
第 22 章 参数化与优化设计	419
22.1 参数化设计语言	419
22.1.1 参数化设计语言介绍	419
22.1.2 参数化设计语言功能	420
22.1.3 参数化设计语言实例	422
22.1.4 设置环境变量	423
22.1.5 定义单元类型	423
22.1.6 定义材料属性	424
22.1.7 创建模型并划分网格	425
22.1.8 加载	425
22.1.9 求解	426
22.1.10 查看结果	426
22.2 优化设计	428
22.2.1 优化设计介绍	428
22.2.2 优化中的基本概念	429
22.2.3 优化设计步骤	430
22.4 拓扑优化	433
22.4.1 拓扑优化方法	433
22.4.2 拓扑优化步骤	433
22.4.3 拓扑优化实例	434
22.5 本章小结	442

第一部分 基础知识

第 1 章

绪 论

有限单元法最初作为结构力学位移法的拓展，它的基本思路就是将复杂的结构看成由有限个单元仅在节点处连接的整体，首先对每一个单元分析其特性，建立相关物理量之间的联系。然后，依据单元之间的联系，再将各单元组装成整体，从而获得整体性方程，再应用方程相应的解法，即可完成整个问题的分析。这种先“化整为零”，然后再“集零为整”和“化未知为已知”的研究方法，是有普遍意义的。

学习目标：

- 了解有限元法的分析思想；
- 初步了解 ANSYS；
- 通过入门示例体会有限元分析的基本思路。

1.1 有限元法概述

有限单元法作为一种近似的（除杆件体系结构静力分析外）数值分析方法，它借助于矩阵等数学工具，尽管计算工作量很大，但是整体分析是一致的，有限强的规律性和统一模式，因此特别适合于编制计算机程序来处理。

1.1.1 有限元法分析过程

土木工程、岩土工程等学科中的弹塑性、粘弹性、粘塑性力学，水利、码头工程等的流体力学和流体-固体耦合作用，交通和桥梁隧道工程中的层状介质路面力学、大型桥

梁结构分析等都是力学学科的重要分支,其研究结果最终归结为求解数学物理方程边值或初值问题。

遗憾的是,这些学科传统的研究成果只对较为简单、规则的问题才能获得解析答案,大量实际科学、工程计算问题,由于数学上的困难,无法得到解决。

有限单元法从正式提出至今,已经历了半个多世纪的发展,从理论上讲,无论是简单的一维杆件体系结构,还是承受复杂荷载和不规则边界情况的二维平面问题、轴对称问题、三维空间块体问题等的静力、动力和稳定性分析,考虑材料具有非线性力学行为和有限变形的分析,如温度场、电磁场,流体、液-固、结构与相互作用等工程复杂问题的分析,利用有限单元法都可得到满意的解决,而且其基本思路和分析过程是基本相同的。

1. 结构离散化

应用有限单元法来分析工程问题的第一步是将结构进行离散化。其过程就是将要分析的结构对象(或更数学化一点也可称为求解域)用一些假想的线或面进行切割,使其成为具有选定切割开关的有限单元体(element)(注意单元体和材料力学中的微元体是根本不同的,它的惊讶是有限值而不是微量)。这些单元体被认为仅仅在单元的一些指定点相互连接,这些单元上的点则称为单元的节点(node)。这一步的实质就是用单元的集合体来代替原来要分析的结构。

为便于理论推导和用计算程序进行分析,一般来说结构离散化的具体步骤是:建立单元和整体坐标系,对单元和节点进行合理编号,为后续有限元分析准备所必需的数据化信息。目前市面上有各种类型的有限元分析软件,一般都具有友好的用户图形界面和直观输入、输出计算信息的强大功能,使用都应用这些软件越来越方便。即便如此,使用这些大型软件的第一步“建模”工作,实际上就是建立离散化模型和准备所需的数据。

2. 确定单元位移模式

结构离散化后,接下来的工作就是对结构离散化所得的任一典型单元进行所谓单元特性分析。为此,必须对该单元中任意一点的位移分布做出假设,即在单元内用只具有有限自由度的简单位移代替真实位移。

对位移元来说,就是将单元中任意一点的位移近似地表示成该单元节点位移的函数,该位移称为单元的位移模式(displacement mode)或位移函数(displacement function)。位移函数的假设合理与否,将直接影响有限元分析的计算精度、效率和可靠性。

有限单元法发展初期常用的方法是以多项式作为位移模式,这主要是因为用多项式的微积分去处理比较简单。而且从泰勒级数展开的意义来说,任何光滑函数都可以用无限项的泰勒级数多项式来展开,当单元极限趋于微量时,多项式的位移模式趋于真实位移。

位移模式的合理选择,是有限单元法最重要的内容之一,所谓创建一种新型的单元,确定位移模式是其核心内容。

3. 单元特性分析

确定了单元位移模式后,就可以对单元做如下三个方面的工作。

(1) 利用和位移之间的关系,即几何方程 (geometricalequation),将单元中任意一点的应变用特定的单元节点位移来表示。

(2) 利用应力和应变之间的关系,即物理方程 (physicalequation),推导出用单元节点位移表示的单元中任意一点应力的矩阵方程。

(3) 利用虚位移原理或最小势能原理 (对其他类型的一些有限元将应用其他对应的变分原理等)建立单元刚度方程。由虚位移原理或最小势能原理推导所得,是将单元节点位移和单元节点力、单元等效节点荷载联系起来的联系矩阵,称为单元刚度矩阵 (elementstiffnessmatrix)。

在上述位移型有限元三个方面的工作中,从编制计算程序而用计算机求解的角度来说,核心工作是建立单元刚度矩阵和单元等效节点荷载矩阵。正因如此,许多文献资料在单元刚度方程中没有这一项 (因为在由单元集成整体时,不同单元所交汇节点的全部节点力是彼此抵消的,即节点是平衡的)。

4. 按离散情况集成所有单元的特性,建立表示整个结构节点平衡的方程组

有了单元特性分析的结果,像结构力学中解超静定结构的位移法一样,对各单元仅在节点相互连接的单元集合体用虚位移原理或最小势能原理进行推导,可以建立起表示整个结构 (确切地说是单元集合体) 节点平衡的方程组,即整体刚度方程 (globalstiffnessequation)。

本步骤计算的细节取决于所求解的问题和所编制的计算程序的处理方法,对于一些问题将存在坐标 (局部与整体) 转换问题 (coordinatetransformationproblem),对于一些问题还存在位移边界条件 (displacementboundarycondition) 的引入等,作为绪论概述,这里不再赘述。

5. 解方程组和输出计算结果

对本书所讨论的纯属弹性计算问题,整体刚度方程式一般是一组高阶的线性代数方程组。由于整体刚度矩阵具有带状 (banded)、稀疏 (sparse) 和对称 (symmetrical) 等特性,在有限元发展过程中,人们通过研究,建立了许多不同的存储方式和计算方法,目的是考虑计算机的存储空间和提高计算效率。利用相应的计算方法,即可求出全部求和的节点位移。

求出结构全部节点位移后,利用分析过程中已建立的一些关系,即可以进一步计算单元中的应力或内力,并以数表或图形的方式输出计算结果。

1.1.2 有限元的方法和理论手段

有限元分析过程可以分为以下三个阶段。

(1) 建模阶段：建模阶段是根据实际结构形状和实际工况条件，建立有限元分析的计算模型——有限元模型，从而为有限元数值计算提供必要的输入数据。

有限元建模的中心任务是结构离散，即划分网格。但还是要处理许多与之相关的工作，如结构形式处理、集合模型建立、单元特性定义、单元质量检查、编号顺序以及模型边界条件的定义等。

(2) 计算阶段：计算阶段的任务是完成有限元方法有关的数值计算。由于这一步运算量非常大，所以这部分工作由有限元分析软件控制并在计算机上自动完成。

(3) 后处理阶段：后处理阶段的任务是对计算输出的结果经过必要的处理，并按一定方式显示或打印出来，以便对结构性能的好坏或设计的合理性进行评估，并作为相应的改进或优化，这是进行结构有限元分析的目的所在。

注意，在上述三个阶段中，建立有限元模型是整个有限分析过程的关键。

首先，有限元模型为计算提供所有原始数据，这些输入数据的误差将直接决定计算结果的精度。

其次，有限元模型的形式将对计算过程产生很大的影响，合理的模型既能保证计算结构的精度，又不致使计算量太大和对计算机存储容量的要求太高。

再次，由于结构形状和工况条件的复杂性，要建立一个符合实际的有限元模型并非易事，它要考虑的综合因素很多，对分析人员提出了较高的要求。

最后，建模所花费的时间，在整个分析过程中占有相当大的比重，约占整个分析时间的 70%，因此，把主要精力放在模型的建立上以及提高建模速度是缩短整个分析周期的关键。

1.2 ANSYS 16.0 简介

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元软件。它能与多数 CAD 接口实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

1.2.1 ANSYS 启动与退出

启动 Mechanical APDL Product Launcher 16.0，显示如图 1-1 所示的启动画面，随后弹出如图 1-2 所示的 Mechanical APDL Product Launcher 16.0 窗口。

该窗口方便用户管理自己的项目。在 Working Directory 中可以输入工作目录，Job Name 中可以输入用户定义的项目名称。

1.2.2 ANSYS 操作界面

单击 Mechanical APDL Product Launcher 16.0 窗口中的 Run 按钮，即可进入如图 1-3 所示 ANSYS 16.0 的 GUI 界面。与 GUI 操作界面同时打开的，还有如图 1-4 所示的 ANSYS 16.0 Output Window 窗口。

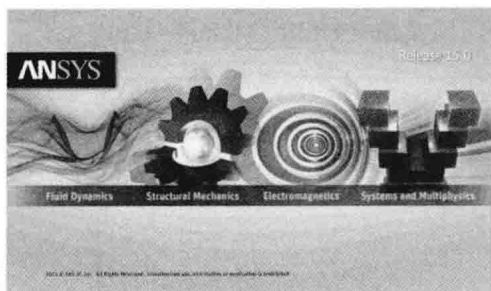


图 1-1 启动画面



图 1-2 Mechanical APDL Product Launcher 16.0 窗口

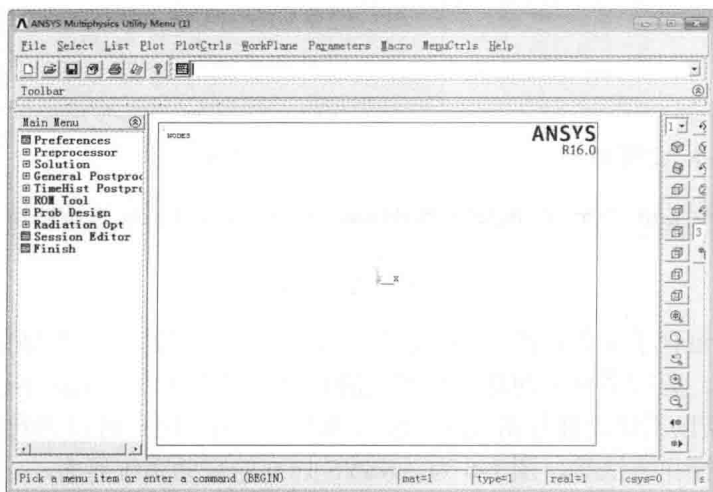


图 1-3 ANSYS 16.0 的 GUI 界面

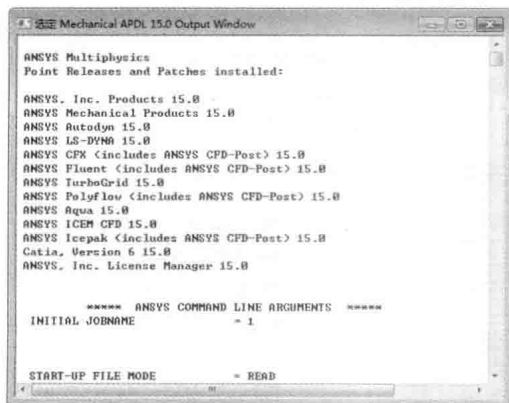


图 1-4 ANSYS 16.0 Output Window

ANSYS 16.0 Output Window 窗口显示了 ANSYS 项目的信息，例如定义单元、材料参数。分析过程的各种警告与错误提示，*GET 命令提取的数据等均可以在该窗口看到。ANSYS 16.0 GUI 界面主菜单（ANSYS Main Menu）如图 1-5 所示，定义单元、建

立模型、求解、后处理等命令都可以在此找到。

图 1-6 所示为 GUI 界面的工作区, 建立的模型、分析完成后的结果、求解过程的监视等都将在其中。

图 1-7 所示的 ANSYS 16.0 GUI 操作界面为通用菜单 (Utility Menu)。



图 1-5 主菜单

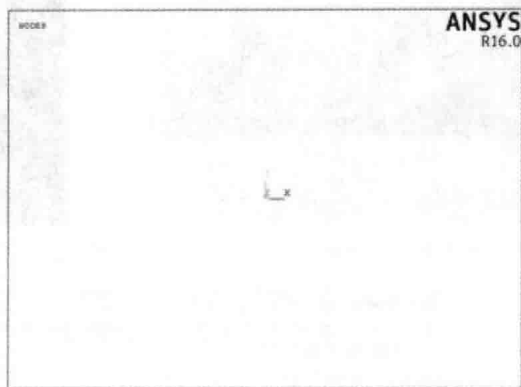


图 1-6 工作区

File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help

图 1-7 通用菜单

通用菜单中包含了文件管理、项目选择、工作区显示的控制、参数的定义、工作平面、帮助等功能。通过菜单中的功能在下文的介绍中经常遇到, 在此不过多叙述。

ANSYS 的帮助系统功能异常强大, 进入帮助系统后, 用户可以找到有关 ANSYS 的任何理论知识、操作方法等, 图 1-8 为 ANSYS 16.0 的帮助系统界面。

图 1-9 所示为 ANSYS 命令输入框, 在此输入框中可以输入 APDL 命令, 用户可以利用这些命令进行操作。

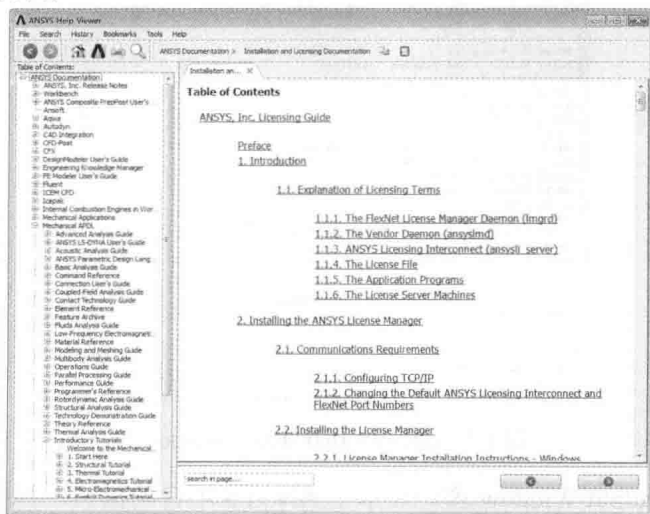


图 1-8 ANSYS 16.0 帮助系统