

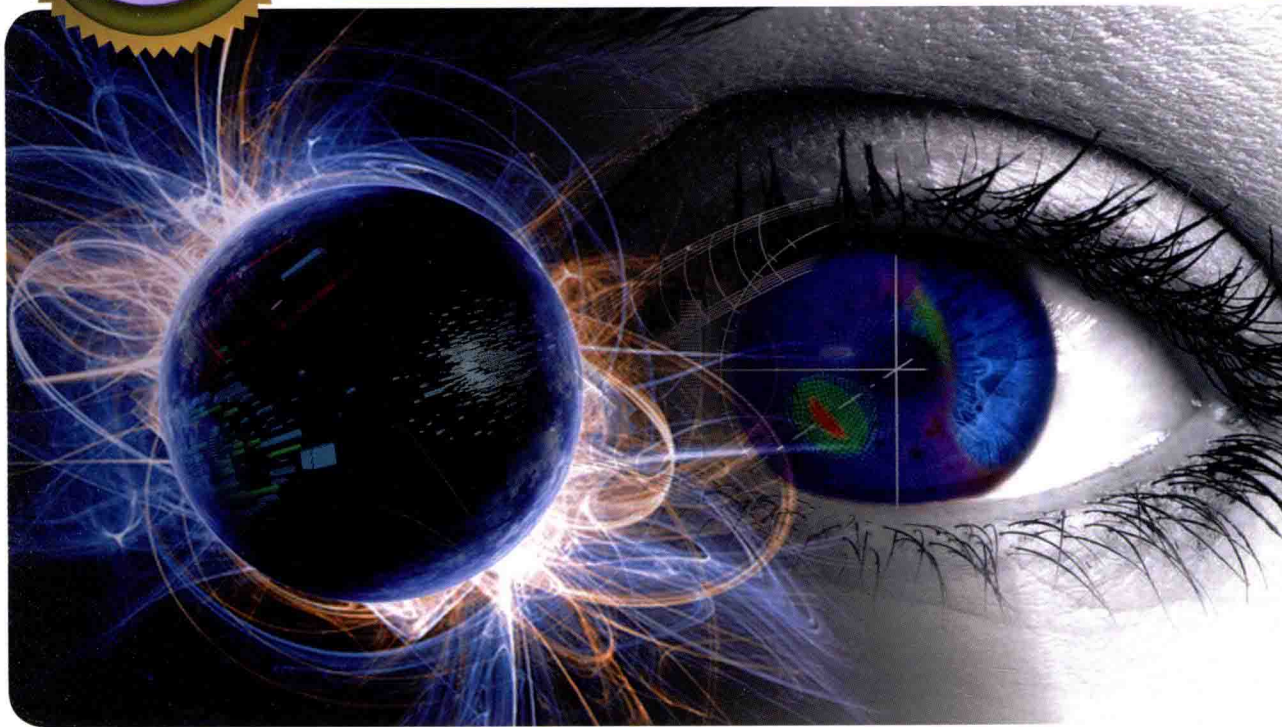
融合关键概念的深入讲解与实际案例的完整分析于一体，
操作更便捷，学习更快速！



总容量达**2.78GB**

34个实例视频教学，总时长达**282**分钟

全部实例的素材源文件、命令流文件及结果文件



ANSYS 15.0

有限元分析

- > 系统掌握有限元分析全流程，几何建模-划分网格-施加荷载-求解-后处理，环环相扣，一气呵成
- > 精选**34**个经典案例，采用CUI方式详析繁琐理论，深入浅出地帮助读者掌握工程要领，学习ANSYS，一本就够

自学手册

李津 槐创锋 等 编著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



ANSYS 15.0

有限元分析

自学手册

李津 槐创锋 等 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 15.0 有限元分析自学手册 / 李津等编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2015.10
(CAD/CAM/CAE 自学手册)
ISBN 978-7-115-27588-2

I. ①A… II. ①李… III. ①有限元分析—应用软件—手册 IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第123834号

内 容 提 要

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS15.0 为依据, 对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍, 并结合典型工程应用实例详细讲解了 ANSYS 具体工程应用方法。

书中尽量避开了繁琐的理论描述, 从实际应用出发, 结合作者使用该软件的经验进行讲解, 其中实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令, 在每个实例的后面都列出了分析过程的命令流文件。

本书分为两篇, 共计 15 章。第 1 篇为操作基础篇, 详细讲解了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法, 共分为 6 章: 第 1 章讲解 ANSYS 概述; 第 2 章讲解几何建模; 第 3 章讲解划分网格; 第 4 章讲解施加载荷; 第 5 章讲解求解; 第 6 章讲解后处理。第 2 篇为专题实例篇, 按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧, 共分为 9 章: 第 7 章讲解静力学分析; 第 8 章讲解模态分析; 第 9 章讲解谐响应分析; 第 10 章讲解瞬态动力学分析; 第 11 章讲解谱分析; 第 12 章讲解结构屈曲分析; 第 13 章讲解非线性分析; 第 14 章讲解接触问题分析; 第 15 章讲解高级分析。

◆ 编 著 李 津 槐创锋 等

责任编辑 俞 彬

责任印制 张佳莹 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京中新伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 33.5

2015 年 10 月第 1 版

字数: 693 千字

2015 年 10 月北京第 1 次印刷

定价: 69.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

前 言

计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术的飞速发展,使得数值模拟技术日趋成熟。数值模拟可以广泛应用到土木、机械、电子、能源、冶金、国防军工和航天航空等诸多领域,并对这些领域产生了深远影响。

有限单元法作为数值计算方法中在工程分析领域应用较为广泛的一种计算方法,自 20 世纪中叶以来,以其独有的计算优势得到了广泛地发展和应用,已出现了不同的有限元算法,并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展,各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS 软件以它的多物理场耦合分析功能而成为 CAE 软件的应用主流,在工程分析应用中得到了较为广泛的应用。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析(FEA)软件,它是世界范围内增长最快的 CAE 软件,能够进行包括结构、热、声、流体以及电磁场等学科的研究,在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医药、轻工、地矿、水利及日用家电等领域有着广泛的应用。ANSYS 的功能强大,操作简单方便,现在已成为国际最流行的有限元分析软件,在历年 FEA 评比中都名列第一。目前,中国 500 多所理工学院采用 ANSYS 软件进行有限元分析或作为标准教学软件。

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS15.0 为依据,对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍,并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。

书中尽量避开了繁琐的理论描述,从实际应用出发,结合作者使用该软件的经验,实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行了讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令,在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书分为两篇,共计 15 章。第 1 篇为操作基础篇,详细讲解了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法,共分为 6 章:第 1 章讲解 ANSYS 概述;第 2 章讲解几何建模;第 3 章讲解划分网格;第 4 章讲解施加载荷;第 5 章讲解求解;第 6 章讲解后处理。第 2 篇为专题实例篇,按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧,共分为 9 章:第 7 章讲解静力学分析;第 8 章讲解模态分析;第 9 章讲解谐响应分析;第 10 章讲解瞬态动力学分析;第 11 章讲解谱分析;第 12 章讲解结构屈曲分析;第 13 章讲解非线性分析;第 14 章讲解接触问题分析;第 15 章讲解高级分析。



本书附有一张多媒体光盘，光盘中除了有每一个实例 GUI（图形用户界面）实际操作步骤的视频以外，还以文本文件的格式给出了每个实例的命令流文件，用户可以直接调用。

本书由华东交通大学机电学院机械设计教研室的李津、槐创锋两位老师主编，涂嘉、黄志刚、钟礼东、沈晓玲 4 位老师也参与部分章节的编写，其中李津编写了 1~4 章，槐创峰编写了 5~7 章，涂嘉编写了 8、9 章，黄志刚编写了 10、11 章，钟礼东 12、13 章、沈晓玲编写了 14、15 章；此外卢园、左昉、杨雪静、李志尊、刘昌丽、王培合、王义发、王玉秋、王艳池、王敏、孟培、闫聪聪、张日晶、康士廷、李兵、胡仁喜等参加了资料整理和编排工作，在此编者向他们表示衷心的感谢。

本书适用于 ANSYS 软件的初中级用户，以及有初步使用经验的技术人员；本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材，也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。另外，由于时间仓促，加之作者的水平有限，缺点和错误在所难免，恳请专家和广大读者不吝赐教，登录网站 www.sjzswsw.com 或联系 win760520@126.com 批评指正。

作者

2015 年 5 月

目录

第 1 篇 操作基础篇

第 1 章 ANSYS 概述.....2

1.1 有限单元法简介.....3	
1.1.1 CAE 软件简介.....3	
1.1.2 有限单元法的基本概念.....5	
1.2 工业 ANSYS 简介.....6	
1.2.1 ANSYS 的发展.....7	
1.2.2 ANSYS 的功能.....7	
1.3 ANSYS15.0 的启动及界面.....8	
1.3.1 设置运行环境.....8	
1.3.2 启动与退出.....11	
1.3.3 ANSYS 15.0 的图形用户界面.....12	
1.4 程序结构.....13	
1.4.1 处理器.....14	
1.4.2 文件格式.....14	
1.4.3 输入方式.....14	
1.4.4 输出文件类型.....15	
1.5 ANSYS 分析的基本过程.....15	
1.5.1 前处理.....15	
1.5.2 加载并求解.....16	
1.5.3 后处理.....16	
1.5.4 实例导航——齿轮泵齿轮静力 分析实例.....17	
1.6 本章小结.....18	

第 2 章 几何建模.....19

2.1 坐标系简介.....20	
------------------	--

2.1.1 总体和局部坐标系.....20	
2.1.2 显示坐标系.....22	
2.1.3 节点坐标系.....23	
2.1.4 单元坐标系.....23	
2.1.5 结果坐标系.....24	
2.1.6 坐标系创建实例.....24	
2.2 工作平面的使用和操作.....27	
2.2.1 定义一个新的工作平面.....27	
2.2.2 控制工作平面的显示和样式.....28	
2.2.3 移动工作平面.....28	
2.2.4 旋转工作平面.....29	
2.2.5 还原一个已定义的工作平面.....29	
2.2.6 工作平面的高级用途.....29	
2.2.7 工作平面创建实例.....31	
2.3 布尔操作.....33	
2.3.1 布尔运算操作.....33	
2.3.2 布尔运算的设置.....34	
2.3.3 布尔运算之后的图元编号.....35	
2.3.4 交运算.....35	
2.3.5 两两相交.....36	
2.3.6 相加.....37	
2.3.7 相减.....37	
2.3.8 利用工作平面作减运算.....38	
2.3.9 搭接.....39	
2.3.10 分割.....39	
2.3.11 粘接(或合并).....40	
2.3.12 布尔操作实例.....40	
2.4 自底向上创建几何模型.....43	
2.4.1 关键点.....44	
2.4.2 硬点.....48	



2.4.3	线	49
2.4.4	面	51
2.4.5	体	52
2.4.6	自底向上建模实例	54
2.5	自顶向下创建几何模型(体素)	64
2.5.1	创建面体素	64
2.5.2	创建实体体素	64
2.5.3	自顶向下建模实例	67
2.6	移动、复制和缩放几何模型	77
2.6.1	移动和复制	77
2.6.2	拖拉和旋转	78
2.6.3	按照样本生成图元	78
2.6.4	由对称映像生成图元	79
2.6.5	将样本图元转换坐标系	79
2.6.6	实体模型图元的缩放	80
2.6.7	修改模型(清除和删除)	81
2.7	几何模型导入到 ANSYS	82
2.7.1	输入 IGES 单一实体	82
2.7.2	输入 SAT 单一实体	85
2.7.3	输入 SAT 实体集合	87
2.7.4	输入 Parasolid 单一实体	91
2.7.5	输入 Parasolid 实体集合	94
2.8	实例导航——齿轮泵齿轮的建模	95
2.9	本章小结	109

第 3 章 划分网格 111

3.1	有限元网格概论	112
3.2	设定单元属性	112
3.2.1	生成单元属性表	113
3.2.2	在划分网格之前分配单元属性	113
3.2.3	设定单元属性实例	115
3.3	网格划分的控制	119
3.3.1	ANSYS 网格划分工具 (MeshTool)	119
3.3.2	映射网格划分中单元默认尺寸	121

3.3.3	局部网格划分控制	122
3.3.4	内部网格划分控制	123
3.3.5	生成过渡棱锥单元	125
3.3.6	将退化的四面体单元转化为非 退化的形式	126
3.3.7	执行层网格划分	126
3.3.8	网格划分控制实例	127
3.4	自由网格划分和映射网格划分控制	129
3.4.1	自由网格划分	129
3.4.2	映射网格划分	130
3.5	给实体模型划分有限元网格	135
3.5.1	用 xMESH 命令生成网格	135
3.5.2	生成带方向节点的梁单元网格	136
3.5.3	在分界线或分界面处生成单位 厚度的界面单元	137
3.6	延伸和扫略生成有限元模型	138
3.6.1	延伸(Extrude)生成网格	138
3.6.2	扫略(VSWEEP)生成网格	140
3.7	修正有限元模型	142
3.7.1	局部细化网格	143
3.7.2	移动和复制节点和单元	145
3.7.3	控制面、线和单元的法向	146
3.7.4	修改单元属性	147
3.8	编号控制	147
3.8.1	合并重复项	148
3.8.2	编号压缩	149
3.8.3	设定起始编号	149
3.8.4	编号偏差	150
3.9	实例导航——齿轮泵齿轮模型 网格划分	150
3.10	本章小结	155

第 4 章 施加载荷 156

4.1	载荷概论	157
4.1.1	什么是载荷	157

4.1.2	载荷步、子步和平衡迭代	158
4.1.3	时间参数	159
4.1.4	阶跃载荷与坡道载荷	160
4.2	施加载荷	160
4.2.1	实体模型载荷与有限单元载荷	161
4.2.2	施加载荷	161
4.2.3	利用表格来施加载荷	167
4.2.4	轴对称载荷与反作用力	169
4.2.5	利用函数来施加载荷和边界条件	170
4.3	设定载荷步选项	172
4.3.1	通用选项	172
4.3.2	非线性选项	175
4.3.3	动力学分析选项	176
4.3.4	输出控制	176
4.3.5	Biot-Savart 选项	177
4.3.6	谱分析选项	178
4.3.7	创建多载荷步文件	178
4.4	实例导航——齿轮泵齿轮模型 载荷施加	179
4.5	本章小结	183
第 5 章 求解		184
5.1	求解概论	185
5.1.1	使用直接求解法	186
5.1.2	使用稀疏矩阵直接解法求解器	186
5.1.3	使用雅克比共轭梯度法求解器	186
5.1.4	使用不完全分解共轭梯度法求 解器	187
5.1.5	使用预条件共轭梯度法求解器	187
5.1.6	使用自动迭代解法选项	188
5.1.7	获得解答	189
5.2	利用特定的求解控制器来 指定求解类型	189
5.2.1	使用 Abridged Solution 菜单选项	190
5.2.2	使用求解控制对话框	190

5.3	多载荷步求解	192
5.3.1	多重求解法	192
5.3.2	使用载荷步文件法	192
5.3.3	使用数组参数法(矩阵参数法)	193
5.4	重新启动分析	194
5.4.1	重新启动一个分析	195
5.4.2	多载荷步文件的重启动分析	198
5.5	预测求解时间和估计文件大小	200
5.5.1	估计运算时间	201
5.5.2	估计文件的大小	201
5.5.3	估计内存需求	201
5.6	实例导航——齿轮泵齿轮 模型求解	202
5.7	本章小结	202
第 6 章 后处理		203
6.1	后处理概述	204
6.1.1	后处理	204
6.1.2	结果文件	205
6.1.3	后处理可用的数据类型	205
6.2	通用后处理器(POST1)	206
6.2.1	将数据结果读入数据库	206
6.2.2	列表显示结果	213
6.2.3	图像显示结果	219
6.2.4	映射结果到某一路径上	226
6.2.5	表面操作	231
6.2.6	将结果旋转到不同坐标 系中显示	234
6.3	时间历程后处理器(POST26)	236
6.3.1	定义和储存 POST26 变量	236
6.3.2	检查变量	239
6.3.3	后处理器 POST26 的其他功能	241
6.4	实例导航——齿轮泵齿轮 模型结果后处理	242
6.5	本章小结	248



第2篇 专题实例篇

第7章 静力学分析250

7.1 静力分析介绍251

7.1.1 结构静力分析简介251

7.1.2 静力分析的类型252

7.1.3 静力分析基本步骤252

7.2 实例导航——联轴体的

静力分析实例253

7.2.1 问题描述253

7.2.2 建立模型254

7.2.3 定义边界条件并求解258

7.2.4 查看结果261

7.2.5 命令流实现265

7.3 实例导航——内六角扳手的

静态分析265

7.3.1 问题的描述265

7.3.2 建立模型265

7.3.3 定义边界条件并求解273

7.3.4 查看结果276

7.3.5 命令流方式280

7.4 本章小结280

第8章 模态分析281

8.1 模态分析概论282

8.2 模态分析的基本步骤282

8.2.1 建立模型282

8.2.2 加载及求解283

8.2.3 扩展模态286

8.2.4 观察结果和后处理287

8.3 实例导航——结构模态

分析实例288

8.3.1 分析问题289

8.3.2 建立模型289

8.3.3 进行模态设置、定义边界条件并求解295

8.3.4 查看结果298

8.3.5 命令流实现301

8.4 实例导航——小发电机

转子模态分析301

8.4.1 分析问题301

8.4.2 建立模型302

8.4.3 进行模态设置、定义边界条件并求解306

8.4.4 查看结果308

8.4.5 命令流方式308

8.5 本章小结308

第9章 谐响应分析309

9.1 谐响应分析概论310

9.1.1 完全法 (Full Method)311

9.1.2 减缩法 (Reduced Method)311

9.1.3 模态叠加法 (Mode Superposition Method)312

9.1.4 3种方法的共同局限性312

9.2 谐响应分析的基本步骤312

9.2.1 建立模型 (前处理)313

9.2.2 加载和求解313

9.2.3 观察模型 (后处理)318

9.3 实例导航——悬臂梁谐

响应分析320

9.3.1 分析问题320

9.3.2 建立模型320

9.3.3 定义边界条件并求解325

9.3.4 查看结果331

9.3.5 命令流方式333

9.4 实例导航——吉他的谐

响应分析..... 334

9.4.1 分析问题..... 335

9.4.2 建立模型..... 335

9.4.3 定义边界条件并求解..... 340

9.4.4 查看结果..... 346

9.4.5 命令流方式..... 348

9.5 本章小结..... 348

第 10 章 瞬态动力学分析..... 349

10.1 瞬态动力学概论..... 350

10.1.1 完全法 (Full Method)..... 350

10.1.2 模态叠加法 (Mode Superposition Method)..... 351

10.1.3 减缩法 (Reduced Method)..... 351

10.2 瞬态动力学的基本步骤..... 351

10.2.1 前处理 (建模和分网)..... 352

10.2.2 建立初始条件..... 352

10.2.3 设定求解控制器..... 353

10.2.4 设定其他求解选项..... 355

10.2.5 施加载荷..... 355

10.2.6 设定多载荷步..... 357

10.2.7 瞬态求解..... 357

10.2.8 后处理..... 357

10.3 实例导航——瞬态动力学分析实例..... 359

10.3.1 分析问题..... 360

10.3.2 建立模型..... 361

10.3.3 进行瞬态动力分析设置、定义边界条件并求解..... 365

10.3.4 查看结果..... 369

10.3.5 命令流实现..... 371

10.4 实例导航——哥伦布阻尼的自由振动分析..... 372

10.4.1 问题描述..... 372

10.4.2 建立模型..... 373

10.4.3 进行瞬态动力分析设置、定义边界条件并求解..... 376

10.4.4 查看结果..... 380

10.4.5 命令流方式..... 384

10.5 本章小结..... 384

第 11 章 谱分析..... 385

11.1 谱分析概论..... 386

11.1.1 响应谱..... 386

11.1.2 动力设计分析方法 (DDAM)..... 386

11.1.3 功率谱密度 (PSD)..... 387

11.2 A 谱分析的基本步骤..... 387

11.2.1 前处理..... 387

11.2.2 模态分析..... 387

11.2.3 谱分析..... 388

11.2.4 扩展模态..... 390

11.2.5 合并模态..... 391

11.2.6 后处理..... 392

11.3 实例导航——支撑平板的动力效果分析..... 393

11.3.1 问题描述..... 394

11.3.2 建立模型..... 394

11.3.3 进行分析..... 400

11.3.4 后处理..... 408

11.3.5 命令流实现..... 411

11.4 本章小结..... 411

第 12 章 结构屈曲分析..... 412

12.1 结构屈曲概论..... 413

12.2 结构屈曲分析的基本步骤..... 413

12.2.1 前处理..... 413

12.2.2 获得静力解..... 414

12.2.3 获得特征值屈曲解..... 414

12.2.4 扩展解..... 415



12.2.5 后处理 (观察结果)417

12.3 实例导航——薄壁圆筒屈曲分析.....417

12.3.1 分析问题417

12.3.2 建立模型418

12.3.3 求解421

12.3.4 查看结果424

12.3.5 命令流424

12.4 实例导航——桁架结构屈曲分析.....424

12.4.1 问题描述424

12.4.2 建立模型425

12.4.3 求解429

12.4.4 查看结果432

12.4.5 命令流实现437

12.5 本章小结437

第 13 章 非线性分析.....438

13.1 非线性分析概论439

13.1.1 非线性行为的原因439

13.1.2 非线性分析的基本信息440

13.1.3 几何非线性442

13.1.4 材料非线性443

13.1.5 其他非线性问题447

13.2 非线性分析的基本步骤447

13.2.1 前处理 (建模和分网)448

13.2.2 设置求解控制器448

13.2.3 设定其他求解选项450

13.2.4 加载451

13.2.5 求解451

13.2.6 后处理452

13.3 实例导航——螺栓的蠕变分析.....453

13.3.1 问题描述453

13.3.2 建立模型454

13.3.3 设置分析并求解456

13.3.4 查看结果459

13.3.5 命令流实现461

13.4 实例导航——材料非线性分析实例.....461

13.4.1 分析问题462

13.4.2 建立模型462

13.4.3 定义边界条件并求解466

13.4.4 查看结果468

13.4.5 命令流实现472

13.5 本章小结472

第 14 章 接触问题分析.....473

14.1 接触问题概论474

14.1.1 一般分类474

14.1.2 接触单元474

14.2 接触分析的步骤475

14.2.1 建立模型, 并划分网格476

14.2.2 识别接触对476

14.2.3 定义刚性目标面477

14.2.4 定义柔性体的接触面478

14.2.5 设置实常数和单元关键点480

14.2.6 控制刚性目标的运动480

14.2.7 给变形体单元施加必要的
边界条件481

14.2.8 定义求解和载荷步选项481

14.2.9 求解482

14.2.10 检查结果482

14.3 实例导航——陶瓷套管的接触分析.....483

14.3.1 问题描述483

14.3.2 建立模型并划分网格484

14.3.3 定义边界条件并求解489

14.3.4 后处理494

14.3.5 命令流实现498

14.4 本章小结499

第 15 章 高级分析.....500

15.1 自适应网格划分501

15.1.1	自适应网格的条件	501	15.3.3	子模型过程	512
15.1.2	自适应网格过程	502	15.4	参数化设计语言	516
15.2	自适应网格划分实例-平板受热	504	15.4.1	参数化设计语言介绍	516
15.2.1	问题描述	504	15.4.2	参数化设计语言的功能	516
15.2.2	建立模型	505	15.5	参数化设计语言实例-悬臂梁	519
15.2.3	定义边界条件并求解	508	15.5.1	分析问题	519
15.2.4	查看结果	510	15.5.2	建立模型	519
15.2.5	命令流	511	15.5.3	定义边界条件并求解	522
15.3	子模型	511	15.5.4	命令流	523
15.3.1	子模型介绍	511	15.6	本章小结	523
15.3.2	子模型方法	512			



第1篇

操作基础篇

本篇详细讲解了 ANSYS 15.0 的有关理论基础和基本操作方法与流程，包括有限元分析基本理论、几何建模、划分网格、施加载荷、求解及后处理等。ANSYS 分析的整个流程的基本知识和技巧，内容详细具体，全程贯穿一个 ANSYS 分析实例对有关基本理论和基本操作方法进行串联和具体应用。

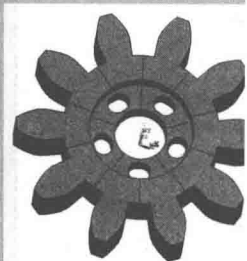
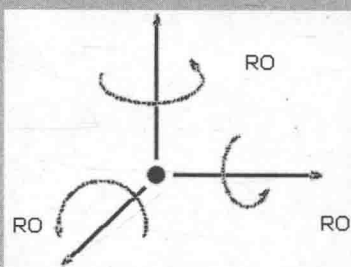
第1章

ANSYS 概述

本章导读

本章首先讲解 CAE (Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程) 技术及其有关基本知识, 并由此引出了 ANSYS 的最新版本 15.0。讲述了新版本功能特点以及 ANSYS 程序结构和分析基本流程。

本章提纲挈领地介绍了 ANSYS 的基本知识, 主要目的是给读者提供一个 ANSYS 的感性认识。



1.1

有限单元法简介



有限单元法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法是 20 世纪 50 年代首先在连续力学领域——飞机结构静、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法，随后很快就广泛地用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。

1.1.1 CAE 软件简介

传统的产品设计流程往往都是首先由客户提出产品相关的规格及要求，然后由设计人员进行概念设计，接着由工业设计人员对产品进行外观设计及功能规划，之后再由工程人员对产品进行详细设计。设计方案确定以后，便进行开模等投产前置工作。由图 1-1 所示可以发现，各项产品测试皆在设计流程后期方能进行。因此，一旦发现问题，除了必须付出设计成本，相关前置作业也需改动。发现问题越晚，重新设计所付出的成本将会越高，若影响交货期或产品形象，损失更是难以估计，为了避免此情形的发生，预期评估产品的特质便成为设计人员的重要课题。

计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术的飞速发展极大地推动了相关产业和学科研究地进步。有限元、有限体积及差分等方法与计算机技术相结合，诞生了新兴的跨专业和跨行业的学科。CAE 作为一种新兴的数值模拟分析技术，越来越受到工程技术人员的

重视。在产品开发过程中引入 CAE 技术后，在产品尚未批量生产之前，不仅能协助工程人员做产品设计，更可以在争取订单时，作为一种强有力的工具协助营销人员及管理人员与客户沟通；在批量生产阶段，可以协助工程技术人员在重新更改时，找出问题发生的起点。在批量生产以后，相关分析结果还可以成为下次设计的重要依据。图 1-2 所示为引入 CAE 后产品设计流程图。

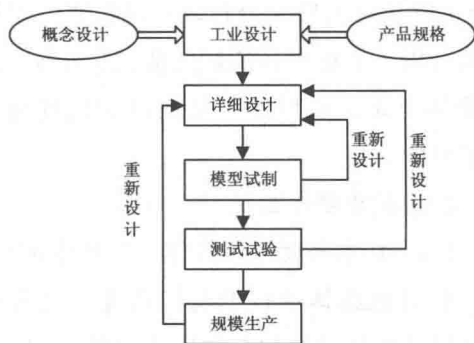


图 1-1 传统产品设计流程图

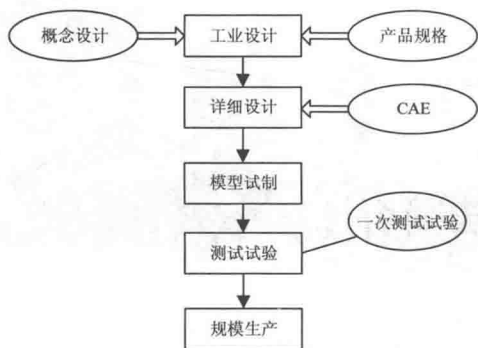


图 1-2 引入 CAE 后产品设计流程图

研究人员往往耗费大量的时间和成本，针对产品做相关的质量试验，最常见的如落下与冲击试验，这些不仅耗费了大量的研发时间和成本，而且试验本身也存在很多缺陷，表现如下。

试验发生的历程很短，很难观察试验过程的现象。

测试条件难以控制，试验的重复性很差。

试验时很难测量产品内部特性和观察内部现象。

一般只能得到试验结果，而无法观察试验原因。

引入 CAE 后可以在产品开模之前，透过相应软件对电子产品模拟自由落下试验 (Free Drop Test)、模拟冲击试验 (Shock Test) 以及应力应变分析、振动仿真、温度分布分析等求得设计的最佳解，进而为一次试验甚至无试验可使产品通过测试规范提供了可能。

CAE 的重要性如下。

1. CAE 本身就可以看作一种基本试验。计算机计算弹体的侵彻与炸药爆炸过程以及各种非线性波的相互作用等问题，实际上是求解含有很多线性与非线性的偏微分方

程、积分方程以及代数方程等的耦合方程组。利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的，一般只能考虑一些很简单的问题。利用试验方法费用昂贵，还只能表征初始状态和最终状态，中间过程无法得知，因而也无法帮助研究人员了解问题的实质。而数值模拟在某种意义上比理论与试验对问题的认识更为深刻、更为细致，不仅可以了解问题的结果，而且可随时连续动态地、重复地显示事物的发展，了解其整体与局部的细致过程。

2. CAE 可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象，容易为人理解和分析；还可以显示任何试验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。如弹体在不均匀介质侵彻过程中的受力和偏转；爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程。同时，数值模拟可以替代一些危险、昂贵的甚至是难于实施的试验，如反应堆的爆炸事故，核爆炸的过程与效应等。

3. CAE 促进了试验的发展，对试验方案的科学制定、试验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供更可靠的理论指导。侵彻、爆炸试验费用是昂贵的，并存在一定危险，因此数值模拟不但有很大的经济效益，而且可以加速理论、试验研究的进程。

4. 一次投资，长期受益。虽然数值模拟大型软件系统的研制需要花费相当多的经费和人力资源，但和试验相比，数值模拟软件是可以进行复制移植、重复利用，并可进行适当修改而满足不同情况的需求。据相关统计数据显示，应用 CAE 技术后，开发期的费用占开发成本的比例，从 80%~90% 下降到 8%~12%。

1.1.2 有限单元法的基本概念

1. 有限元分析

有限元分析是利用数学近似的方法对真实物理系统（几何和载荷工况）进行模拟。利用简单而又相互作用的元素，即单元，就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。

结构分析的有限元方法是由一批学术界和工业界的研究者在 20 世纪 50 年代到 20 世纪 60 年代创立的。

有限元分析理论已有 100 多年的历史，现已成为悬索桥和蒸汽锅炉进行手算评核的基础。

2. 有限元模型

有限元模型如图 1-3 所示：图中左边的是真实的结构，右边是对应的有限元模型，有限元模型可以看作是真实结构的一种分格，即把真实结构看作是由一个个小的分块部分构成的，或者在真实结构上划线，通过这些线真实结构被分离成一个个的部分。

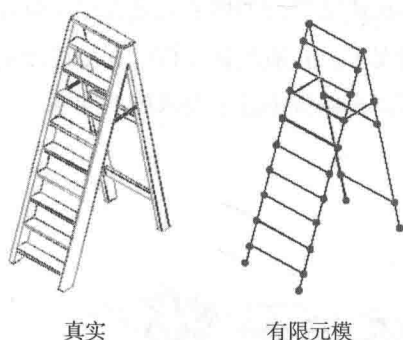


图 1-3 有限元模型

3. 自由度

自由度（Degree of Freedom, DOF）用于描述一个物理场的响应特性。如图 1-4 所示。不同的物理场需要描述的自由度不同，如表 1-1 所示。

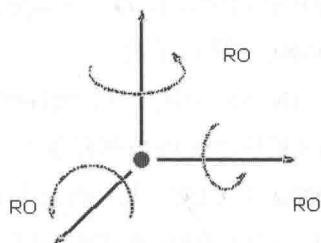


图 1-4 结构自由度（DOF）

表 1-1 学科方向与自由度

学科方向	自由度
结构	位移
热	温度
电	电位
流体	压力
磁	磁位

4. 节点和单元

节点和单元如图 1-5 所示。

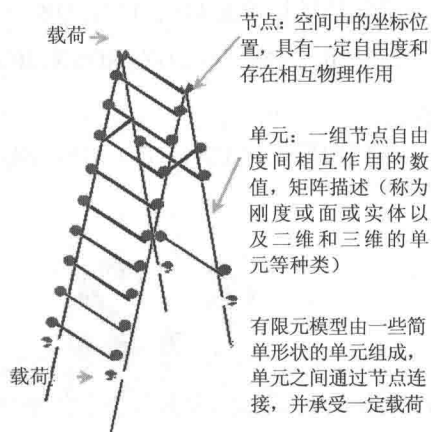


图 1-5 节点和单元

每个单元的特性是通过一些线性方程式来描述的。作为一个整体，单元形成了整体结构的数学模型。