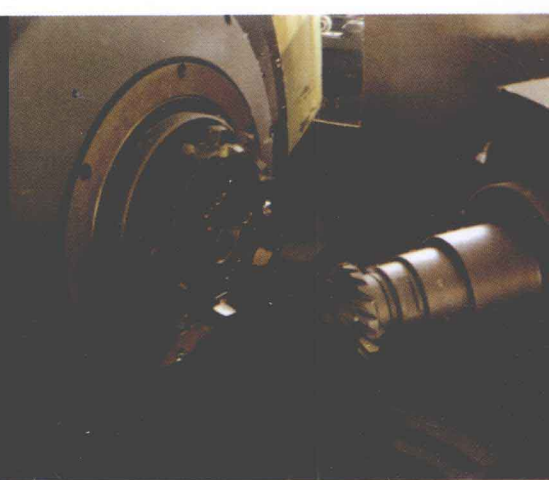




商跃进 王 红 主编

有限元原理与 ANSYS实践

清华大学出版社

有限元原理与 ANSYS实践

商跃进 王 红 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书基于 ANSYS 软件,深入浅出地介绍了结构分析、耦合场分析等有限单元法的基本原理及其工程应用方法,其内容包括:结构静力分析,动力学有限元分析,非线性结构分析,热、流体及耦合场分析、ANSYS 高级分析技术,ANSYS Workbench 快速入门及 ANSYS 基本操作。

本书内容丰富、浅显易懂,可作为高等院校机械、铁道、交通、土木、航空、航天等专业的高年级本科生、研究生学习有限单元原理与应用的教材和参考书,也可供相关领域从事科学研究、产品开发及仿真优化的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

有限元原理与 ANSYS 实践/商跃进,王红主编. --北京:清华大学出版社,2012.3

ISBN 978-7-302-28140-5

I. ①有… II. ①商… ②王… III. ①有限元分析—应用软件, ANSYS IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 026047 号

责任编辑:庄红权

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:19

字 数:459 千字

版 次:2012 年 3 月第 1 版

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

产品编号:045569-01

随着计算机技术的发展,CAE 技术已经成为产品设计的核心技术,作为
随 CAE 主要组成的有限元法更是设计师必备的设计工具。

“工欲善其事,必先利其器”,为了使读者快速掌握和提高有限元应用能力,本书综合目前有限元原理与应用方面相关教材的优点,联系理论与实践,以一些浅显易懂的工程设计问题为例,简明扼要地讲述相关问题的有限元原理,并以广泛使用的有限元软件 ANSYS 为载体,努力总结出大型通用有限元软件的通用分析过程,力求达到“因用而学”的目的。本书所有实例均具有鲜明的工程背景,不仅便于读者理解,而且便于读者对有限元分析结果的验证,使读者不仅能在较短的时间内对有限元法既知其然、又知其所以然,而且便于读者举一反三,真正将有限元分析方法在工程实际中灵活运用。

本书第 1 章绪论,介绍有限单元法发展过程、基本思路及其求解步骤;第 2 章结构静力分析,介绍结构静力分析的原理、步骤及技巧;第 3 章动力学有限元分析,介绍模态分析、谐响应分析、瞬态分析和谱分析等动力学分析原理及分析步骤;第 4 章非线性结构分析,介绍非线性分析原理及分析步骤(包括几何非线性、弹塑性及接触问题);第 5 章热、流体及耦合场分析,介绍热问题、流体问题和耦合场分析;第 6 章 ANSYS 高级分析技术,介绍尺寸优化、拓扑优化、疲劳分析、可靠性分析及单元生死等 ANSYS 高级分析功能的应用;第 7 章 ANSYS Workbench 快速入门,介绍 ANSYS Workbench 工程仿真技术集成平台的应用;附录 A ANSYS 基本操作,详细介绍 ANSYS 的常用功能及一些特殊约束与载荷的处理技巧。

本书由商跃进和王红主编,具体分工为:商跃进编写第 2 章、第 4 章,并负责全书的统稿和审阅工作;曹茹编写第 5 章和第 7 章;王红编写第 1 章和第 6 章;高全福编写第 3 章和附录 A。曹兴满和薛海对书中的例题进行了上机调试。在本书编写过程中还得到了兰州交通大学机电工程学院许多老师和一些网友的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 12 月于兰州

CONTENTS

目

录

第 1 章 绪论	1
1.1 有限元原理快速入门	1
1.1.1 有限元法的求解思路	1
1.1.2 有限元法应用三步曲	3
1.2 CAE 技术及其应用	5
1.3 ANSYS 概述	7
复习思考题	10
第 2 章 结构静力分析	11
2.1 结构静力有限元分析过程	11
2.1.1 结构分析概述	11
2.1.2 静力有限元分析原理	11
2.1.3 ANSYS 静力分析实践	17
2.2 有限元工程应用技巧	19
2.2.1 有限元工程应用过程	19
2.2.2 有限元建模原则及措施	21
2.2.3 有限元建模的方法	24
2.2.4 支承与载荷处理	25
2.2.5 结果验证与应用	27
2.3 带孔矩形板的综合分析	28
2.3.1 整体结构分析	28
2.3.2 对称结构分析	30
2.3.3 降维处理分析	32
2.3.4 网格密度影响	35
2.3.5 结果验证与应用	38
2.4 ANSYS 结构分析实例	39
2.4.1 自重作用下的悬臂梁分析	39
2.4.2 角速度作用下的轮子分析	41
2.4.3 板梁混合结构分析	45



2.4.4 扭矩作用下的空心轴分析	48
复习思考题	51
第3章 动力学有限元分析	52
3.1 动力学有限元分析过程	52
3.1.1 结构动力学分析的目的	52
3.1.2 结构动力学有限元分析原理	52
3.2 模态分析	54
3.2.1 模态分析过程	54
3.2.2 机翼模态分析	55
3.3 谐响应分析	59
3.3.1 谐响应分析的过程	59
3.3.2 车辆浮沉振动谐响应分析	61
3.3.3 电机-工作台系统谐响应分析	64
3.4 瞬态动力学分析	69
3.4.1 瞬态动力学分析原理	69
3.4.2 单向拉压圆柱的三种加载方法对比分析	72
3.5 谱分析	83
3.5.1 谱分析的过程	83
3.5.2 梁结构的地震响应谱分析	84
复习思考题	88
第4章 非线性结构分析	89
4.1 非线性分析概述	89
4.1.1 非线性分析原理	89
4.1.2 渔竿钓鱼过程分析	91
4.1.3 ANSYS 求解非线性问题的过程	94
4.2 几何非线性分析	95
4.2.1 几何非线性基础	95
4.2.2 螺旋弹簧变形过程分析	95
4.3 弹塑性分析	97
4.3.1 弹塑性分析基础	97
4.3.2 冲孔过程分析	98
4.3.3 碰撞过程分析	103
4.4 接触分析	106
4.4.1 接触分析基础	106
4.4.2 轮轨接触分析	108
4.4.3 轮对压装过盈配合分析	113
4.4.4 铝材挤压成形接触分析	120

复习思考题	125
第 5 章 热、流体及耦合场分析	126
5.1 热分析	126
5.1.1 热分析原理	126
5.1.2 供热管道稳态热分析	132
5.1.3 翅片管散热器稳态热分析	134
5.1.4 淬火过程瞬态热分析	136
5.1.5 铸造过程瞬态热分析	139
5.2 FLOTRAN CFD 分析	144
5.2.1 FLOTRAN CFD 分析原理	144
5.2.2 FLOTRAN CFD 管内流动分析	149
5.2.3 FLOTRAN CFD 圆柱绕流分析	155
5.2.4 FLOTRAN CFD 自然对流热分析	158
5.2.5 FLOTRAN CFD 两组分换热分析	161
5.3 耦合场分析	168
5.3.1 耦合场分析概述	168
5.3.2 散热器热应力分析——直接法	169
5.3.3 散热器热应力分析——间接法	172
5.3.4 两物体相对滑动过程中的摩擦生热分析	175
5.3.5 两物体相对转动过程中的摩擦生热分析	181
5.3.6 橡胶束的通道稳态流动-结构耦合分析	188
复习思考题	191
第 6 章 ANSYS 高级分析技术	192
6.1 尺寸优化	192
6.1.1 尺寸优化原理	192
6.1.2 带孔板尺寸优化设计	196
6.2 拓扑优化	200
6.2.1 拓扑优化原理	200
6.2.2 悬臂托架拓扑优化设计	201
6.3 疲劳分析	204
6.3.1 疲劳分析原理	204
6.3.2 四点弯曲轴疲劳分析	206
6.4 可靠性分析	210
6.4.1 可靠性分析原理	210
6.4.2 四点弯曲轴可靠性分析	212
6.5 子模型	215
6.5.1 子模型分析原理	215

6.5.2 带孔板子模型分析	216
6.6 子结构	222
6.6.1 子结构分析原理	222
6.6.2 带孔板子结构分析	225
6.7 单元生死及其应用	230
6.7.1 单元生死的概念	230
6.7.2 焊接残余应力分析	232
复习思考题	237
第 7 章 ANSYS Workbench 快速入门	238
7.1 ANSYS Workbench 简介	238
7.1.1 CAD-CAE 协同设计流程	238
7.1.2 ANSYS Workbench 步骤——带孔板分析	240
7.2 ANSYS Workbench 结构协同分析	242
7.2.1 螺旋弹簧静态分析	242
7.2.2 螺旋弹簧模态分析	245
7.2.3 螺旋弹簧谐响应分析	246
7.2.4 法兰结构预紧多载荷步分析	248
7.2.5 连杆疲劳分析	251
7.3 ANSYS Workbench 结构优化设计	257
7.3.1 悬臂托架形状优化	257
7.3.2 悬臂托架尺寸优化	259
7.4 ANSYS Workbench 热-结构耦合分析	263
7.4.1 热-结构间接耦合——圆柱淬火热应力分析	263
7.4.2 热-结构直接耦合——摩擦生热模拟	265
附录 A ANSYS 基本操作	270
A.1 使用概述	270
A.2 前处理	271
A.2.1 单元属性定义	271
A.2.2 实体模型建立	272
A.2.3 有限元模型建立	274
A.2.4 模型操作	275
A.3 求结果	277
A.3.1 分析设置与控制	277
A.3.2 施加普通载荷	279
A.3.3 施加特殊载荷	280
A.3.4 检查与求解	285
A.4 后处理	286

A. 4. 1	用 POST1 观察结果	286
A. 4. 2	用 POST26 观察结果	287
A. 5	APDL 命令流入门	288
A. 5. 1	APDL 概述	288
A. 5. 2	命令流文件操作	289
参考文献		294

1.1 有限元原理快速入门

1.1.1 有限元法的求解思路

许多工程分析问题,如固体力学中的位移场和应力场分析、传热学中的温度场分析、流体力学中的流场分析等都可归结为在给定边界条件下求解其控制方程(常微分方程或偏微分方程)的问题,但能用解析方法求出精确解的只是方程性质比较简单,且几何边界相当规则的少数问题。对于大多数的工程技术问题,由于物体的几何形状较复杂或者问题具有某些非线性特征,很少能得到解析解。目前,这类问题的解决途径是利用有限元法,借助计算机来获得满足工程要求的数值解,这就是数值模拟技术。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。

下面通过分析载荷作用下的变截面直杆来说明有限元法的分析步骤。

1. 引例描述

如图 1-1 所示,变截面直杆的长度 $L=100\text{ mm}$,顶端截面 $A_1=25\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,底端截面 $A_2=5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。弹性模量 $E=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,杆端静载荷 $P=1000\text{ N}$,试求杆端位移。

2. 理论分析

1) 结构离散

如图 1-2 所示,将直杆划分成有限的 n 段,各段之间通过一个铰接点连接。两段之间的连接点称为节点,每段为单元。当 n 足够多时,第 i 段可近似为等截面直杆进行求解。为简化分析,在此取 $n=2$ 。

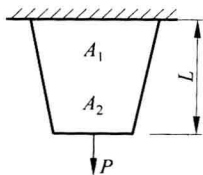


图 1-1 受载变截面直杆

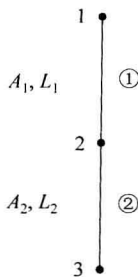


图 1-2 离散后的直杆

2) 单元分析

如图 1-3 所示, 由于第 i 单元近似为等截面直杆, 由材料力学知

$$\Delta l = \frac{FL_e}{EA_e} = u_i - u_j \Rightarrow F = \frac{EA_e}{L_e}(u_i - u_j) = k_e(u_i - u_j) \quad (1-1)$$

则有

$$\begin{cases} F_i = k_e(u_i - u_j) \\ F_j = k_e(-u_i + u_j) \end{cases} \Rightarrow \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e & -k_e \\ -k_e & k_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \Rightarrow \mathbf{F}^e = \mathbf{K}^e \mathbf{u}^e \quad (1-2)$$

$$\text{单元 1: } \begin{cases} F_1^{\textcircled{1}} = k_1(u_1^{\textcircled{1}} - u_2^{\textcircled{1}}) \\ F_2^{\textcircled{1}} = k_1(-u_1^{\textcircled{1}} + u_2^{\textcircled{1}}) \end{cases}; \quad \text{单元 2: } \begin{cases} F_2^{\textcircled{2}} = k_2(u_2^{\textcircled{2}} - u_3^{\textcircled{2}}) \\ F_3^{\textcircled{2}} = k_2(-u_2^{\textcircled{2}} + u_3^{\textcircled{2}}) \end{cases}$$

3) 整体分析

利用 3 个节点处的静力平衡条件 $\sum \tilde{\mathbf{F}}^e = \mathbf{P}$ 和变形谐调条件 $\tilde{\boldsymbol{\delta}}^e = \boldsymbol{\delta}$ 图 1-3 单元

可得

$$\begin{aligned} \begin{cases} F_1^{\textcircled{1}} = P_1 \\ F_2^{\textcircled{1}} + F_2^{\textcircled{2}} = P_2 \\ F_3^{\textcircled{2}} = P_3 \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} k_1(u_1^{\textcircled{1}} - u_2^{\textcircled{1}}) = P_1 \\ k_1(-u_1^{\textcircled{1}} + u_2^{\textcircled{1}}) + k_2(u_2^{\textcircled{2}} - u_3^{\textcircled{2}}) = P_2 \\ k_2(-u_2^{\textcircled{2}} + u_3^{\textcircled{2}}) = P_3 \end{cases} \\ &\Rightarrow \begin{cases} k_1(u_1 - u_2) = P_1 \\ k_1(-u_1 + u_2) + k_2(u_2 - u_3) = P_2 \\ k_2(-u_2 + u_3) = P_3 \end{cases} \\ &\Rightarrow \begin{cases} k_1 u_1 - k_1 u_2 = P_1 \\ -k_1 u_1 + (k_1 + k_2) u_2 - k_2 u_3 = P_2 \\ -k_2 u_2 + k_2 u_3 = P_3 \end{cases} \\ &\Rightarrow \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} \Rightarrow \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (1-3) \end{aligned}$$

4) 约束处理

由实际结构的分析可知: 节点 1 的位移为零, 节点 2 的载荷为零, 节点 3 的载荷为 P 。即 $u_1 = 0, P_2 = 0, P_3 = P$ 。将其代入式(1-3)可得

$$\begin{cases} k_1(0 - u_2) = P_1 \\ k_1(0 + u_2) + k_2(u_2 - u_3) = 0 \\ k_2(-u_2 + u_3) = P \end{cases} \quad (1-4)$$

5) 求解

由式(1-4)解得

$$u_3 = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) P = \left(\frac{1}{0.412 \times 10^5} + \frac{1}{0.206 \times 10^5} \right) \times 1000 \text{ mm} = 0.0728 \text{ mm}$$

由以上算例的分析过程可见: 有限元法是用较简单的问题代替复杂问题后再求解, 其基本思路可以归结为“化整为零、积零为整”。

有限元法(finite element method, FEM)也称为有限单元法或有限元素法, 它是求解数理方程的一种数值计算方法, 已经成为解决工程实际问题的一种数值计算工具。对于不同

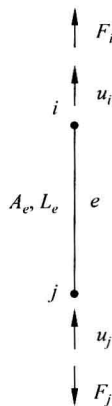


图 1-3 单元

物理性质的问题,有限元求解法的基本步骤是相同的,整个分析过程包括以下步骤。

(1) 结构离散:将连续的求解域划分为由有限个具有不同大小和形状的单元组成的离散域,且各单元彼此只在节点处相连,习惯上称为网络划分。显然网络越细则离散域的近似程度越好,计算结果也越精确,但计算量将增大。

(2) 单元分析:选定节点处的基本未知数(如位移),以特定的单元函数表示单元内各点处的其他物理特性(如应力、节点力等),从而形成单元刚度矩阵。

(3) 整体分析:利用节点处的连续条件(如变形协调条件)和平衡条件(如静力平衡条件),建立基本未知数与外载荷之间的整体刚度方程组。

(4) 约束处理:将已知的边界条件(约束)代入整体刚度方程组,用直接法、迭代法和随机法等方法进行求解,得到基本未知数的近似值。

(5) 后处理:由基本未知数派生出其他量(如应力、应变等)。

有限元分析涉及以下常用术语。

(1) 单元:结构的网格划分中的每一个小的块体称为一个单元。常见的单元类型有线段单元、三角形单元、四边形单元、四面体单元和六面体单元几种。

(2) 节点:确定单元形状的点。

(3) 载荷:工程结构所受到的外在施加的力。

(4) 边界条件:结构边界上所受到的外加约束。

1.1.2 有限元法应用三部曲

在“化整为零、积零为整”的有限元分析思路指导下,利用矩阵推导建模方法即可得到上述引例中变截面杆的杆端位移,但是对于大型问题则必须使用计算机求解。有人曾说:“有限元原理→矩阵推导建模→计算机软件实现”是有限元应用不可或缺的内容,三者是三位一体的。有限元技术发展至今,国内外已开发出一批成熟的有限元分析软件,常用的分析软件有 ADINA 和 ANSYS 等。这些软件应用范围广泛、前后处理方便、求解功能齐全,可处理连续体分析、流体分析、热传导分析、电磁场分析、线性与非线性分析、弹塑性分析等。为了快速掌握有限元软件的使用方法,下面仍以图 1-1 所示引例说明 ANSYS 的分析过程。

[步骤 1] 确定分析类型

分析可知该问题可以用通用软件中的杆系结构问题进行求解。

(1) 启动 ANSYS:开始→程序→ANSYS * . * →Mechanical APDL(ANSYS)。进入 ANSYS 主界面。

(2) 分析类型设置:选择菜单 Main Menu: Preferences→Structural。

[步骤 2] 定义单元属性

(1) 定义单元类型:选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete,在单元类型对话框中单击 Add 按钮,在弹出的单元库对话框中选择 Beam 和 2 node 188(即选 Beam188 单元),单击 OK 按钮,再单击 Close 按钮。

(2) 定义梁截面:选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections,在 Beam Tool 对话框中设 ID=1,Sub Type 为 ■,B=10,H=5,单击 Apply 按钮。在 Beam Tool 对话框中设 ID=2,Sub Type 为 ■,B=20,H=5,单击 OK 按钮。这个步骤分别设置单元类型 1 和 2 为 10×5 和 20×5 的实心矩形。

(3) 定义材料属性: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Material Props→Material Model, 在弹出的材料属性窗口中依次双击 Structural, Linear, Elastic 和 Isotropic, 在弹出的对话框中设置 EX(弹性模量)为 2.06×10^{11} (即 2.06×10^{11} , 以下类同); PRXY(泊松比)为 0.3, 单击 OK 按钮。

[步骤 3] 建立几何模型

(1) 绘制关键点: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS., 在创建关键点对话框的 X, Y, Z 项中输入关键点 1 的坐标(0, 0, 0), 单击 Apply 按钮。在创建关键点对话框的 X, Y, Z 项中输入关键点 2 的坐标(0, 100, 0), 单击 OK 按钮。

(2) 绘制线: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line, 在图形区中, 依次单击前面创建的 2 个关键点创建一条直线。

(3) 保存数据: Toolbar: Save-DB。

[步骤 4] 划分网格

(1) 定义单元尺寸: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Meshing→MeshTool, 单击 MeshTool 对话框 Lines 项中的 Set 按钮, 再在图形区中单击直线, 单击左侧的拾取对话框中的 OK 按钮。在单元尺寸对话框中, 设置 NDIV=2(单元等分), 单击 OK 按钮。

(2) 分格: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Meshing→MeshTool, 单击 MeshTool 对话框中的 Mesh 按钮, 在绘图区单击直线, 单击左侧的拾取对话框中的 OK 按钮。

(3) 显示单元形状: 选择菜单 Utility Menu: PlotCtrls→Style→Size and Shape, 将 Size and Shape 对话框中的 display of Element 项设为 On, 单击 OK 按钮。

(4) 修改单元 2 的截面号: 选择菜单 Main Menu: Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Element→Modify Attrib, 在图形区中单击上部单元, 单击左侧的拾取对话框中的 OK 按钮。在修改单元属性对话框中的 Attribute to change 列表框中选择 Section Num SEC, 将 New Attribute Num 设为 2, 单击 OK 按钮。

(5) 更新单元形状: 选择菜单 Utility Menu: PlotCtrls→Replot。

[步骤 5] 求解

(1) 定义分析类型: 选择菜单 Main Menu: Solution→Analysis Type→New Analysis, 在分析类型对话框中选择 Static(静力分析)复选框, 单击 OK 按钮。

(2) 添加约束: 选择菜单 Main Menu: Solution→Define Loads→Apply→Structure→Displacement→On Keypoints, 在图形区中单击直线上端点, 单击 OK 按钮。在施加约束对话框中选择 ALL DOF(所有自由度), 单击 OK 按钮。

(3) 添加载荷: 选择菜单 Main Menu: Solution→Define Loads→Apply→Structure→Force/Moment→On Keypoints, 在图形区中单击直线下端点, 单击 OK 按钮。在施加载荷对话框中选 FY, 设 VALUE=-1000, 单击 OK 按钮完成有限元模型(见图 1-4)。

(4) 求结果: 选择菜单 Main Menu: Solution→Solve→Current LS, 单击求解对话框中的 OK 按钮, 单击求解结束提示对话框中的 Close 按钮。

[步骤 6] 结果处理

(1) 绘制变形图: 选择菜单 Main Menu: General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 在绘制变形图对话框中选择 Def+undef edge 单选钮, 单击 OK 按钮即可绘制变截面

板的变形图。

(2) 节点变形列表: 选择菜单 Main Menu: General Postproc→List Results→Nodal Solution, 在结果列表对话框中选择 Y-Component of Displacement, 单击 OK 按钮, 显示所有节点 Y 方向的变形, 见图 1-5。



图 1-4 受载变截面直杆有限元模型

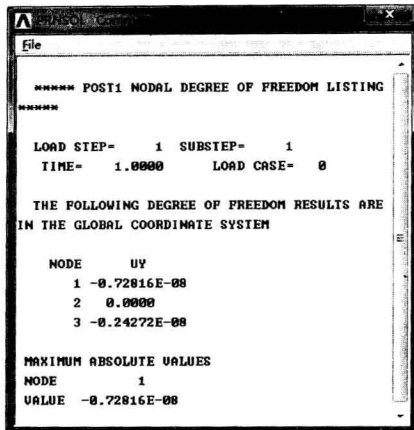


图 1-5 受载变截面直杆位移计算结果

(3) 演示变形动画: 选择菜单 Utility Menu: PlotCtrl→Animate→Model Shape, 在模型形状动画对话框中选择 DOF Solution 和 Def+undef edge, 单击 OK 按钮即可显示变形动画。

(4) 结果分析: 由图 1-5 可知, 最大位移发生在节点 3, 即直线下端点处, 大小为 0.72816×10^{-8} m, 该值与前面的理论分析结果一致。由此值可进一步判断该结构是否能够满足使用要求。

从以上 ANSYS 的使用过程可将大型通用有限元软件分析概括为三大步: 前处理、求解和后处理。前处理是建立有限元模型, 完成单元网格划分; 求解是计算基本未知量; 后处理则是采集处理分析结果, 使用户能简便提取信息, 了解计算结果。

各步骤的主要内容如下所述。

- (1) 前处理: 定类型, 设属性, 画模型, 分网格。
- (2) 求解: 添约束, 加载荷, 查错误, 求结果。
- (3) 后处理: 列结果, 绘图形, 显动画, 下结论。

1.2 CAE 技术及其应用

1. CAE 的概念

现代工业的进步, 完全得力于计算机科技的突飞猛进, 将计算机软件用于产品的开发、设计、分析与制造, 已成为近代工业提升竞争力的主要方法。企业要在激烈的市场竞争中立于不败之地, 就必须不断进行产品创新。

传统的工业产品皆依据个人的经验设计而成。一般先以经验做出初步的设计, 再由此初步的设计去做出原始模型, 最后做出成品, 成品完成以后, 进行实验以确保产品的可靠性。这种方法基本上是试误法 (try and error), 即初级成品经测试不能满足工程或品质上的需求

时,再回去修改原设计图,重新做出试件,然后再进行测试。此方法费时且成本相当的高。若使用 CAE,则在设计图完成后,连接 CAE 进行各式各样的分析,并且进行最优化(optimization),可在短时间内完成产品设计。

CAD/CAM 是实现创新的关键手段,CAE 则是实现创新设计的技术保障。

- 计算机辅助设计(computer-aided design,CAD)是用计算机软件直接从事图形的绘制与结构的设计。
- 计算机辅助工程(computer-aided engineering,CAE)是用工程上分析的过程及计算方法来辅助工程师作设计后的分析或进行同步工程。
- 计算机辅助制造(computer-aided manufacturing,CAM)是直接用来辅助操纵各式各样的精密工具机器以制造出不同的零部件。

CAE 技术的发展动力是 CAD/CAM 技术水平和应用水平的提高,其发展条件是计算机及图形显示设备的推出,其核心内容是计算机模拟与仿真,其理论基础是有限元法(finite element method,FEM)、边界元法(boundary element method,BEM)、有限差分法(finite difference method,FDM)等现代力学方法。

2. 有限元法概述

1) 有限元法的发展概况

有限元法分析的概念可以追溯到 20 世纪 40 年代,1943 年,Courant 第一次在他的论文中,取定义在三角形分片上的连续函数,利用最小势能原理研究了 St. Venant 的扭转问题。此方法发展很慢,几乎过了十年才再次有人用这些离散化的概念。“有限元法”这个名称,第一次出现在 1960 年,当时 Clough 在一篇平面弹性问题的论文中应用过它。工程师们开始认识了有限元法的功效,此后有限元法在工程界获得了广泛的应用。到 20 世纪 70 年代以后,随着计算机和软件技术的发展,有限元法也随之迅速地发展起来,发表的论文犹如雨后春笋,学术交流频繁,可以说进入了有限元法的鼎盛时期。到目前为止,有限元法已被应用于固体力学、流体力学、热传导、电磁学、声学、生物力学等各个领域;能进行由杆、梁、板、壳、块体等各类单元构成的弹性(线性和非线性)、弹塑性或塑性问题的求解,包括静力和动力问题;能求解流体场、温度场、电磁场等场分布问题的稳态和瞬态问题;还能求解水流管路、电路、润滑、噪声以及固体、流体、温度相互作用的问题。

2) 有限元软件简介

有限元分析离不开计算程序。有限元计算程序一般分为三类:大型通用程序、专用程序和自编特殊程序。

(1) 大型通用程序。其特点就是“通用性”。单元库内一般常用单元齐全,如杆单元、梁单元、膜单元、板壳元、轴对称单元、实体单元、边界元等;功能库内分析模块众多,有静力分析、固有特性分析、动态响应分析等;应用范围广泛,可涉及连续体分析、流体分析、热传导分析、电磁场分析,以及线性与非线性分析,弹塑性分析、复合材料分析等;并且一般都有较方便的前后处理功能。我国已引进的主要程序有 ANSYS 等,其主要功能见表 1-1。

(2) 专用程序。它是为解决某一类学科问题,如接触问题程序、优化程序、弹塑性程序等,或是解决某一类产品基础件的计算分析问题,如起重机的臂架结构分析系统等而发展起来的。其规模一般比较小,解决问题比较专一。

(3) 自编特殊程序。此类程序主要应用在科研和教学上。如在工程起重机臂架系统变

表 1-1 常用的有限元软件及其功能

程序名称 程序功能	ANSYS	ADINA	SAP	MARC	NONSAP	ASKA
非线性结构分析	✓	✓	✓	✓	✓	✓
塑性分析	✓	✓	✓	✓	✓	✓
断裂力学分析	✓	✓	✓	✓		✓
热应力和蠕变	✓	✓	✓	✓		✓
管道系统	✓			✓		
焊接接头				✓		
黏弹性材料分析	✓	✓	✓	✓		✓
结构优化分析	✓					
热分析	✓	✓	✓	✓	✓	✓
复合材料分析	✓	✓		✓		✓
流体动力学分析	✓	✓		✓		

幅运动动态分析中,根据结构运动特点,需要采用“运动弹性动力非线性分析”的方法,这种理论是近几年来发展起来的,在工程实际分析中的应用以前未见报道。自然在各通用程序、专用程序中不可能包含此方法,只能自编程序研究分析。当这类程序研制成功并经实际应用验证成功后,一般就发展成为专用程序。在有限元教学中,为了说明有限元原理,或者为了说明某一结构件的分析方法,常常自编一些小程序。这类程序不用特别技巧,只要说明问题即可,规模显然不大。

有限单元法发展至今,各种通用程序、专用程序求解功能齐全,前后处理方便,绝大部分机械、汽车结构的有限元静态分析、固有特性分析、动态分析等,都可应用这些通用程序、专用程序来分析计算。特别是初学者,主要是应用有限单元法求解工程实际问题,没有必要再费时费力去自编程序。

1.3 ANSYS 概述

ANSYS 软件是一个功能强大而灵活的大型通用有限元分析软件。它融结构、热、流体、电磁、声学于一体,广泛应用于核工业、铁道、石油、化工、航空、航天、机械工程、土木工程、汽车、交通、能源、电子、国防、地矿、水利、家电等工业及科学研究。

1. ANSYS 的发展过程

1970 年,John Swanson 博士洞察了计算机模拟工程商品化的发展,于是创建了 ANSYS 公司,总部设于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡,目前是世界 CAE 行业最大的公司。40 年来,该公司把握住了有限元软件发展的方向,使 ANSYS 公司在同行业中一直处于领先地位。

ANSYS 软件的最初版本与今天的版本相比已有很大的区别,当时,它仅仅提供了热分

析及线性结构分析功能,是一个批处理程序,且只能在大型计算机上使用。20 世纪 70 年代初,随着非线性、子结构以及更多的单元类型的加入,以及 70 年代末,图形技术和交互式操作方法的应用,使得 ANSYS 程序得到了很大的改善,前后处理技术进入了一个崭新的阶段。今天 ANSYS 软件更趋于完善,功能更加强大,使用更加便捷。新版本 ANSYS 中推出了显式动力分析(LS-DYNA)、概率设计系统(PDS)、计算流体动力学功能以及多物理场功能。

ANSYS 公司于 1992 年 2 月在北京开设了第一个驻华办事处,短短几年间又先后成立了上海、成都和广州办事处。该公司于 1996 年开发了符合我国 JB 732—1995 的压力容器版。另外,该软件已经在铁路提速和高速机车车辆的研制中开始发挥作用。目前最新的版本是 ANSYS 13.0。

2. ANSYS 的功能

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单,具体包括:结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力分析、优化设计、接触分析、自适应网格划分、大应变/有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言(APDL)的扩展宏命令功能。

(1) 结构静力分析用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且可以进行非线性分析,例如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触问题的分析。

(2) 结构动力分析是用来求解随时间变化的载荷对结构或者部件的影响。相对于静态分析,动力分析则要考虑随时间变化的力载荷以及阻尼和惯性的影响,如旋转机械产生的交变力,爆炸产生的冲击力,地震产生的随机力等。ANSYS 可以进行的结构动力分析类型有:瞬态分析、动力分析、模态分析、谱响应分析以及随即振动响应分析。

(3) 结构屈曲分析用来确定结构失稳的载荷大小与在特定的载荷下结构是否失稳的问题。

(4) 热力学分析主要包含三种类型:传导、对流和辐射。ANSYS 程序对热力学问题可以进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热力学分析还可以进行模拟材料的固化和熔解过程的分析,以及模拟热与结构应力之间关系的耦合问题的分析。

(5) 电磁场分析主要可以完成以下问题的分析:一维、二维静态电磁场的分析;一维、二维随时间变化的低频电磁场的分析;三维高频电磁场的分析。以解决电磁场的相关问题,如电容、电感、涡流、电磁场分布、运动效应等问题。电磁场分析主要应用于发电机、变压器、加速器、调制器等在电磁场作用下工作设备的设计和分析问题。

(6) 声场分析主要是用来研究在流体(气体、液体等)介质发出的声音的传播问题,以及在流体介质中固态结构的动态响应特性。

(7) 压电分析主要可以进行静态分析、模态分析、瞬态响应分析和谐波响应分析等,可用来研究压电材料结构随时间变化的电流或机械载荷响应特性。压电分析主要适用于谐振器、振荡器以及其他电子材料的结构动态分析。

(8) 流体动力分析。ANSYS 程序中的流体动力分析功能用来分析二维、三维流体动力场的问题,可以进行传热或绝热、层流或湍流、压缩或不可压缩等问题的研究,主要用于超音速喷管中的流场,使用混合流研究估计热冲击的可能性,弯管中流体的三维流动等问题的设计和研究工作。