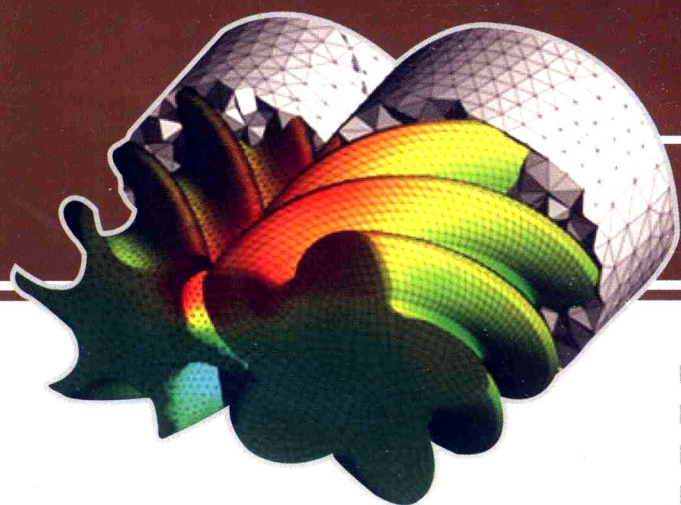


YOUXIAN YUANFA YUANLI
YU ANSYS YINGYONG

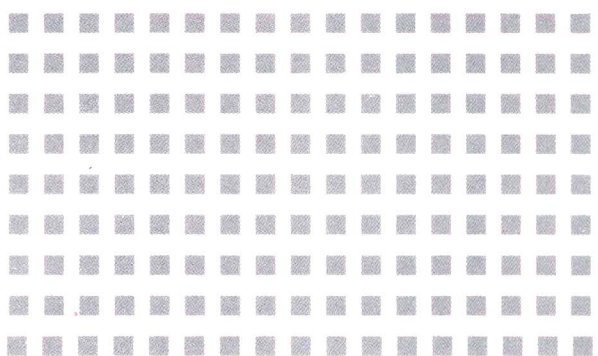
有限元法原理与

ANSYS

应用



夏建芳 叶南海 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

有限元法原理与 ANSYS 应用

夏建芳 叶南海 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分14章,内容包括有限元基本理论和有限元软件应用两个部分。第1章~第2章介绍了有限元解题思想和应用领域、学习有限单元法必备的力学基础知识。第3章介绍了有限单元法的一般原理、刚度矩阵的求解以及非节点载荷等效移置方法。第4章~第8章介绍了杆系结构(包括桁架、框架)、平面问题、轴对称问题、空间问题、板壳问题等六大专题的单元特性和工程实例。第9章介绍了 ANSYS11.0 的模块组成、界面风格。第10章~第11章介绍了 ANSYS 实体建模技术、网格生成技术。第12章介绍了载荷与约束的施加以及 ANSYS 的总体刚度方程求解模块。第13章介绍了 ANSYS 强大的后处理技术。第14章介绍了 ANSYS 在6大工程问题中的工程应用,展示了各类问题的 ANSYS 求解全过程。

本书以高等院校本科生、研究生正式教材为出发点,结合多年来的教学经验和应用技术,精心打造的面向21世纪的教材,并可作为从事有限元工程计算的技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

有限元法原理与 ANSYS 应用 / 夏建芳,叶南海编著.

—北京:国防工业出版社,2011.10

ISBN 978-7-118-07627-1

I. ①有... II. ①夏...②叶... III. ①有限元
分析-应用程序,ANSYS IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第195495号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 572 千字

2011年10月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

有限单元法是一种通用的数值方法,它是工程结构分析、传热分析、热力耦合分析以及流体分析、电磁分析等问题主要仿真分析技术。随着计算技术和计算机技术的发展,商业化的有限元分析软件功能不断完善,以及求解速度与计算稳定性不断提高,有限元法的工程分析能力和可靠性得到一致认同。目前,有限元法广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械工程、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工程领域,它是工程设计与研究人员必备的一门技术。因此,有限单元法已成为高等院校理、工科类一门重要的技术课程。工程设计院所也相继购买了商业化有限元软件进行自身产品的分析和产品研发。

在通用有限元原理表达方面,作者以力学概念最为清楚的桁架问题描述结构离散的概念与意义,应用位移法用杆单元推导单元刚度方程和单元刚度矩阵,进而推导有离散单元建立总体刚度矩阵的方法以及单元应力和约束反力求解方法,并用实例进行计算过程演示。在此基础上推导连续结构的有限元分析问题,且以实例进行计算过程演示,通过简单的自然离散问题、连续结构问题有限元分析特点,总结有限元通用解题过程,进而分专题介绍不同工程问题如杆系问题、框架问题、平面问题、轴对称问题、空间问题、板壳问题等。理论部分计算实例解题模式与有限元软件求解模式相一致,以形成统一的解题模式。有限元软件部分选用集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件 ANSYS,以 ANSYS 11.0 为背景介绍了软件的模块组成、文件结构、界面特征和通用应用技术,并针对理论部分杆系问题、框架问题、平面问题、轴对称问题、空间问题和板壳问题等 6 个专题进行经典实例应用操作。全书力求表达简练、易懂、准确的编写风格和内容实用、选题经典、难度适中的特色。

本书是有限元基本理论和有限元软件应用技术相结合的理想教程,虽然以结构分析为主,但通过结构分析能全面掌握有限元的理论和应用技术。有

限元高级应用如热力耦合问题、非线性问题、动力学问题、结构优化问题、强大功能模块 WORKBENCH 应用问题,将在后续系列教材中实现。

本书由中南大学夏建芳教授主编,湖南大学叶南海副教授参加了部分编写工作。本书得到中南大学重点教改项目支持,编写过程中参阅了大量文献资料,在此对参考文献的作者表示衷心的感谢。本书难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。CAI 多媒体教案请与本书作者联系。作者邮箱: xia - jian-fang@163. com

编 者
2011 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 有限单元法产生的背景	1
1.1.1 常规力学分析方法存在的问题	1
1.1.2 数值分析法	2
1.2 有限元单元法的基本解题思想	2
1.3 有限单元法的发展及应用领域	3
1.4 有限单元法的特点	4
1.5 有限元常用软件简介	4
1.6 工程应用的结构分析问题分类	5
1.6.1 结构静力学分析问题	5
1.6.2 结构动力学分析问题	6
1.6.3 热分析与热力耦合问题	6
1.7 结构静力分析问题的模型简化	6
1.7.1 杆系结构问题	7
1.7.2 平面问题	8
1.7.3 轴对称问题与周期对称结构问题	9
1.7.4 板壳体结构问题	9
第 2 章 有限单元法力学基础	11
2.1 弹性力学中的基本假设	11
2.2 弹性力学中的基本概念	12
2.2.1 弹性体外部载荷	12
2.2.2 弹性体内部应力	12
2.2.3 弹性体的形变与位移	16
2.3 弹性力学的基本方程	18
2.4 圣维南原理	22
2.5 弹性力学中的虚位移原理	22

2.6 基本失效理论	24
第3章 有限单元法的一般原理	27
3.1 有限单元法的基本要素	27
3.2 有限单元法的解题过程	27
3.2.1 结构离散	27
3.2.2 单元特性分析	31
3.2.3 单元组集	33
3.2.4 解结构有限元方程求得所有节点位移	33
3.3 自然离散结构有限元刚度方程的建立过程	33
3.4 连续体结构有限单元法的一般原理	39
3.4.1 集合的基本原则	39
3.4.2 3节点三角形单元刚度方程	40
3.4.3 3节点三角形单元离散的结构刚度方程	41
3.4.4 3节点三角形单元内任意一点的位移	42
3.4.5 3节点三角形单元内任意一点的应变	44
3.4.6 3节点三角形单元内任意一点的应力	44
3.4.7 3节点三角形单元刚度矩阵的求解	44
3.5 单元阶次简介	46
3.6 总体刚度矩阵的建立技术	47
3.7 结构刚度矩阵的性质	48
3.8 非节点载荷的等效移置及通用公式	49
3.8.1 非节点载荷移置通用公式	50
3.8.2 非节点载荷移置应用实例	50
3.9 结构有限元方程求解方法	53
3.10 有限单元法的通用方程	54
第4章 杆系结构的有限单元法	55
4.1 二力杆系结构的有限元分析	55
4.1.1 平面二力杆系结构的有限元分析	55
4.1.2 空间二力杆单元的有限元分析	59
4.2 桁架结构解题应用实例	59
4.3 梁单元的有限元分析	68
4.3.1 平面梁单元的有限元分析	68

4.3.2	空间梁单元的有限元分析	78
4.4	框架结构有限元解题应用实例	79
第5章	平面问题的有限单元法	84
5.1	平面问题概述	84
5.1.1	平面应力问题	84
5.1.2	平面应变问题	86
5.1.3	平面问题中的主应力	88
5.2	平面线性单元特性分析	89
5.2.1	3节点三角形单元	89
5.2.2	4节点矩形单元	91
5.3	面积坐标的应用	95
5.4	平面二次单元	98
5.4.1	6节点三角形单元	99
5.4.2	8节点矩形单元	106
5.5	平面等参数单元	108
5.5.1	普通不规整高阶单元存在的问题	108
5.5.2	普通不规整高阶单元边界不协调的处理方法——几何映射	109
5.5.3	平面问题母单元	110
5.5.4	平面坐标变换	112
5.5.5	6节点三角形等参单元	115
5.5.6	8节点四边形等参单元	118
5.5.7	等参单元使用注意事项	121
5.6	平面问题有限单元法应用实例	121
第6章	轴对称问题的有限单元法	128
6.1	轴对称问题单元	128
6.1.1	微元平衡微分方程	129
6.1.2	微元几何方程	130
6.1.3	微元物理方程	131
6.1.4	微元虚功方程	131
6.2	3节点三角形环单元	132
6.2.1	单元位移模式	132
6.2.2	单元的应变和应力	133

6.2.3	单元刚度矩阵	134
6.3	四边形环状等参单元	135
6.3.1	单元的位移模式和坐标变换式	135
6.3.2	单元应变和应力	136
6.3.3	单元刚度矩阵	137
6.4	轴对称问题应用实例	137
第7章	板壳问题的有限元法	140
7.1	薄板弯曲问题概述	140
7.1.1	薄板的小挠度弯曲理论	140
7.1.2	薄板弯曲几何方程	141
7.1.3	薄板弯曲物理方程	142
7.1.4	薄板弯曲虚功方程	143
7.1.5	薄板一般问题处理	144
7.2	矩形薄板单元	144
7.2.1	位移函数	145
7.2.2	单元的形变和力矩	146
7.2.3	单元刚度矩阵	147
7.2.4	单元等效节点力	148
7.3	三角形薄板单元	149
7.3.1	位移函数	149
7.3.2	单元形变和力矩	151
7.3.3	单元刚度矩阵	152
7.3.4	单元等效节点力	152
7.4	薄壳问题概述	153
7.5	平面矩形壳体单元	153
7.5.1	壳体平面矩形单元特性分析	153
7.5.2	壳体平面矩形单元的解题步骤	156
7.6	三角形壳体单元	156
7.7	应用实例	157
第8章	空间问题有限单元法	159
8.1	常用空间问题单元简介	159
8.2	4节点四面体单元	160

8.2.1	单元的位移模式与形函数	160
8.2.2	单元的应变和应力	162
8.2.3	单元刚度矩阵	164
8.2.4	单元的等效节点载荷	165
8.3	体积坐标简介	165
8.3.1	体积坐标与直角坐标的关系	165
8.3.2	体积坐标函数积分与求导	166
8.4	10 节点四面体单元简介	166
8.5	8 节点六面体单元	167
8.5.1	单元的位移模式	168
8.5.2	单元的应变和应力	169
8.5.3	单元的刚度矩阵	170
8.6	20 节点六面体单元简介	170
8.7	空间等参单元	172
8.7.1	六面体等参单元	172
8.7.2	四面体等参单元	178
第 9 章	ANSYS 软件概述	180
9.1	ANSYS 软件简介	180
9.2	ANSYS 软件的模块组成	180
9.2.1	通用前处理模块	180
9.2.2	分析计算模块	181
9.2.3	通用后处理模块	182
9.3	ANSYS 软件的特点	183
9.4	ANSYS 运行环境的预配置	183
9.5	ANSYS 图形界面的交互操作	184
9.5.1	ANSYS11.0 的启动与 IDE	184
9.5.2	ANSYS 的菜单操作	186
9.5.3	图元拾取操作	187
9.5.4	图形显示控制菜单的使用	189
9.6	ANSYS 的文件管理与数据库操作	191
9.6.1	ANSYS 的数据文件	191
9.6.2	ANSYS 数据库文件操作	192
9.6.3	ANSYS 中的 Log 文件	193

9.7 退出 ANSYS 环境	193
第 10 章 ANSYS 几何模型建模	195
10.1 有限元实体建模基础	195
10.1.1 坐标系	195
10.1.2 坐标系菜单操作	198
10.1.3 工作平面	199
10.1.4 工作平面显示、状态查询与选项设置	199
10.1.5 工作平面位置的调整	200
10.2 工作环境设置	202
10.3 几何模型建模技术	204
10.3.1 基本几何图素个体的创建	205
10.3.2 图形窗口中模型的视角调整、平移、缩放与旋转操作	212
10.3.3 复杂几何图素的创建	212
10.3.4 图元的显示、编号、复制、镜像及删除	215
10.4 图元选择集的建立	218
10.5 组建复杂几何模型——布尔运算	219
10.5.1 布尔运算设置	220
10.5.2 布尔操作	220
10.6 建模实例	223
第 11 章 ANSYS 几何模型网格划分	240
11.1 有限元网格生成方法	240
11.1.1 有限元网格生成方法分类	240
11.1.2 有限元网格生成方法选择	241
11.2 定义单元属性	242
11.2.1 单元概述	242
11.2.2 定义单元类型	243
11.2.3 定义单元实常数	245
11.2.4 定义材料特性	245
11.2.5 定义截面类型	247
11.3 分配单元属性	247
11.3.1 默认单元属性	248
11.3.2 手动分配单元属性	249

11.4	设定网格尺寸和网格形状	250
11.4.1	设定单元网格尺寸	251
11.4.2	设定单元网格形状	252
11.5	自由网格划分与映射网格划分	252
11.5.1	自由网格划分	253
11.5.2	映射网格划分	254
11.5.3	快速网格划分——网格划分工具 Mesh Tool	256
11.6	体的扫掠网格划分 VSWEEP	257
11.6.1	扫掠之前的准备工作	257
11.6.2	扫掠网格划分的补充说明	258
11.6.3	实例——六方孔螺钉头用扳手的体及网格生成	259
11.7	面网格拉伸生成体及网格	263
11.8	网格局部细化	264
第 12 章	施加载荷与求解	265
12.1	载荷种类	265
12.2	加载方式	266
12.3	载荷的施加	267
12.3.1	施加自由度(DOF)约束	268
12.3.2	施加力载荷	274
12.4	载荷显示与删除	280
12.5	求解过程控制	282
12.6	载荷步的设置和求解操作	284
第 13 章	ANSYS 分析结果的后处理	288
13.1	后处理器与结果文件	288
13.2	通用后处理器 POST1	288
13.2.1	结果文件中的数据读入内存数据库	289
13.2.2	通用后处理的一些选项控制	290
13.2.3	结果数据的图像化显示	290
13.2.4	单元表	297
13.3	结果数据的列表显示	302
13.3.1	支座反力列表显示	302
13.3.2	节点载荷列表显示	302

13.3.3	单元数据矢量列表显示	304
13.3.4	沿预先定义的几何路径列出指定数据	304
13.3.5	单元表数据列表显示	305
13.3.6	按求解结果排序列表显示数据	305
第 14 章	ANSYS 工程应用实例	308
14.1	结构静力学问题常用到的单元类型	308
14.2	桁架问题	309
14.3	框架问题	327
14.4	平面问题	339
14.5	轴对称问题	353
14.6	空间问题	357
14.7	板壳问题	376
参考文献		386

第1章 绪论

1.1 有限单元法产生的背景

机械设计中的一个重要环节是研究机械零部件的应力和变形问题,为强度和刚度等的设计计算提供依据。

1.1.1 常规力学分析方法存在的问题

材料力学主要通过应力、变形的力学概念来描述构件内部的状态,建立起构件强度、刚度、稳定性等方面的计算与分析方法,并用来解决在机械设计中杆、梁、圆筒、圆盘等特殊构件的强度、刚度、稳定性方面的分析问题,且构件材料是各向同性的。由于机械构件几何形状、材料特性、边界条件、载荷类型等诸多方面的复杂性,显然材料力学对于机械设计来说是远远不够的。

弹性力学的任务与材料力学、结构力学类似,也是研究构件(杆、梁、板、壳、块体)在外部因素(载荷、温度变化等)作用下,在弹性变形阶段的应力和位移,校核构件的强度和刚度。弹性力学研究构件应力和变形时,假想物体内部由无数个平行六面体单元组成,表面(表层)由无数个四面体单元组成,且对变形状态和应力的分布规律等不做假设。弹性力学解题过程:

1. 弹性力学方程的建立

(1) 考虑这些单元体的平衡,按静力平衡条件可以写出一组平衡微分方程,但由于未知应力数多于微分方程数,因此弹性理论问题是超静定的,必须考虑变形协调条件。

(2) 由于物体在变形之后仍保持连续,所以单元之间的变形必须是协调的,由此可以产生一组表示变形连续性的微分方程。

(3) 用广义胡克定律表示应力与形变之间的关系(物理方程)。

(4) 在弹性体表面上还需考虑体内应力与外载荷之间的平衡,称为边界条件。

联立上述四组微分方程则可以求解未知应力、形变和位移。因此,弹性力学的研究方法是从受力体中取出一无限小的微元体,从静力平衡条件、几何变形条件和本构关系(物理方程)等方面,建立弹性体内各点的位移和应力之间的基本的、普遍的关系式,再根据边界条件求得解答。

2. 弹性力学方程组的求解

上述这些微分方程还可以综合简化为以应力为基本未知函数的微分方程,或以位移为基本未知函数的微分方程,但这些都是偏微分方程,其解往往难于求得。所以弹性力学常用“逆解法”,即先假设一解答,如这个解能满足所有的偏微分,同时满足边界条件,则这个解答就是正确的,也是唯一的。或用“半逆解法”,即先假设一部分解答,另一部分在

解题过程中求出。若问题稍复杂,则这些偏微分方程组往往不能求得通解,因此,弹性力学在实际应用中有很大的局限性。

引申一步来讲,从数学角度看,许多工程分析问题,如固体力学中的位移/应力场及振动特性分析、传热学中的温度场分析、电磁学中的电磁场分析、流体力学中的流场分析等,都可以归结为在给定边界条件下求解微分方程(常微分或偏微分)组的问题。但是由于方程本身的复杂程度和求解域及边界条件的复杂性,常很难或根本得不到上述偏微分方程组的精确求解(解析解)。解决这类问题通常有两种方法:一是引入简化假设,将方程和边界条件简化为能够处理的问题,从而得到它在简化状态下的解,这种方法只有在有限的情况下是可行的,因为过多的假设将可能导致不正确的甚至是错误的解;二是在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上,借助于计算机来获得满足工程要求的数值解,即数值分析法。

1.1.2 数值分析法

在有限单元法产生以前,近似数值分析方法基本上可以分为两大类:一类是有限差分法;另一类是等效积分法(如加权残值法、最小二乘法、加辽金法、里兹法、力矩法等)。虽然这两类方法在不同领域上均有成功的应用实例,但由于它们均是在整个求解区域上假设近似函数,因此对结构几何形状复杂的问题仍然不能给出满足近代工程技术精度要求的近似解,另外对于复杂几何形状问题甚至求解发生困难。

随着电子计算机的迅速发展和普遍应用,开发了另一种近似数值分析法——有限单元法(Finite Element Method, FEM),有限单元法是数值分析方法研究领域内的重大突破性进展。

1.2 有限单元法的基本解题思想

有限元法避开在整个求解区域上寻找连续解析函数这一难点,转为寻求在满足整个物体边界条件和连续条件下的各个子域(单元)上适应控制方程。

有限单元法的基本思想:

(1) 结构离散。将一个连续的求解域离散化,即将连续体划分为有限个具有规则形状的微小块体,把每个微小块体称为单元,两相邻单元之间只通过若干点相互连接,每个连接点称为节点,单元与单元之间仅通过节点传递力(注:作用于各单元上的非节点外载荷向单元节点等效移置,即转化成单元的等效节点载荷)。

(2) 单元特性分析。以单元节点位移为未知参数并假设单元体内位移函数的近似模式,找出单元体中节点力和节点位移之间的关系,即单元刚度方程 $[F^e] = [K^e][\delta^e]$,其中单元刚度矩阵 $[K^e]$ 已知。

(3) 整体分析。通过节点平衡方程,由各个单元的单元刚度方程组合成以节点位移为未知参数的方程组,即整体刚度方程 $[R] = [K][\delta]$,其中节点载荷列阵 $[R]$ 、整体刚度矩阵 $[K]$ 均为已知。

(4) 方程求解。求解这个方程组,得出各节点的未知参数——位移。

(5) 后处理。利用单元节点位移,代入单元位移模式方程,求出位移模式待定系数,得到具体的单元位移函数。进而利用弹性力学几何方程、物理方程求出单元内任一点的应变、应力。

单元节点未知量除选取节点位移为未知量外,还可以选取节点力为未知量。根据节

点未知量选取的不同,有限单元法分为力型有限单元法、位移型有限单元法和混合型有限单元法,常用的是位移型有限单元法。如果单元位移函数选取合适,单元分得越多、越细,得到的计算结果就越精确。当单元数趋于无穷时,计算结果就收敛于精确解。但是单元数增加,节点数就大大增加,计算工作量和存储信息量就会迅速增加,这就要求计算机具备较好的性能。因此一般都是根据具体问题对精度的要求,只取一定数量的(有限个)的单元进行分析。

有限单元法的概念浅显,容易掌握,解题步骤是固定的模式,其主要研究工作就集中在构造计算简单、精度高、适用性强的单元模式上。一旦有了各种单元,如梁单元、杆单元、壳单元、平面单元、环单元、多面体单元等,就可以用来分析各种形状复杂的问题。

1.3 有限单元法的发展及应用领域

有限单元法是在 20 世纪 50 年代中期,最早以解决结构力学、弹性力学问题发展起来的。后来进一步研究表明,它不是计算某个特殊问题的专用解法,而是一种通用的数值方法,可以推广到其他领域。

有限单元法不受物体几何形状限制,可以计算复杂结构的场问题。这是因为单元能按各种不同的连接方式组合在一起,且单元本身又可以有不同的几何形状,因此可以模拟几何形状复杂的结构。目前,有限单元法已经远远超出了原有的应用范畴,已从弹性力学扩展到了弹塑性力学、岩石力学、地质力学、流体力学、热传学、气动力学、计算物理学等学科,且开始向纳米级的分子动力学渗透,有限单元法广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械工程、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业领域。

各个领域的广泛使用已使设计水平发生了质的飞跃,主要表现在以下几个方面:

- (1) 增加产品和工程的可靠性;
- (2) 在产品的设计阶段发现潜在的问题;
- (3) 经过分析计算,采用优化方案,降低原材料成本;
- (4) 缩短产品投向市场的时间;
- (5) 模拟试验方案,减少试验次数,从而减少试验经费。

有限单元法解题实例数之不尽,图 1-1 和图 1-2 示出的是机械工程中个别的应用实例。

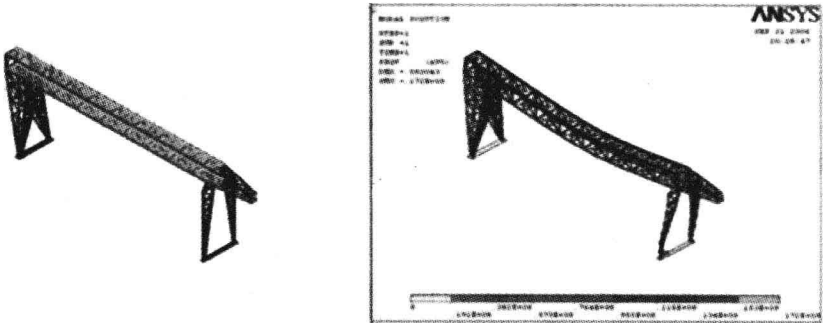


图 1-1 龙门吊应用实例

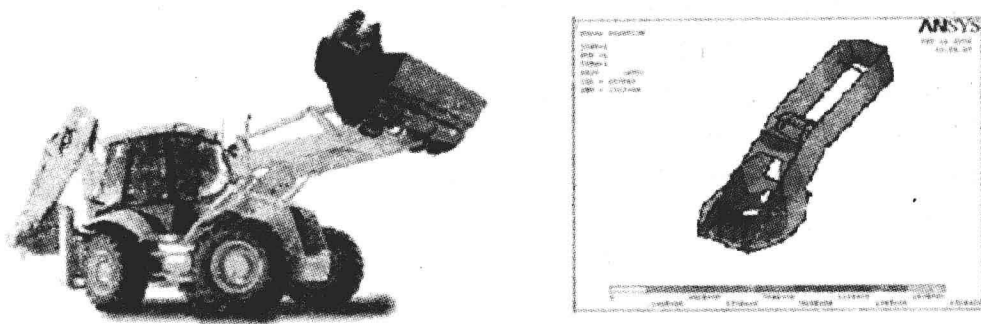


图 1-2 装载机应用实例

1.4 有限单元法的特点

(1) 概念清晰,深入浅出。理论上进行深入研究和探索,建立相应的数学模型和理论框架,进而扩大其应用领域,提高数值分析精度,同时也可以通过非常直观的物理解释去理解,并可方便而现实地求解各类工程问题。

(2) 具有统一、规范的表达形式。由于各单元的计算程式都相同,解题有固定的模式,所以有限元法的解题步骤已经系统化、标准化。为便于计算机编程,有限元方程采用矩阵形式。

(3) 求解过程计算稳定、收敛。总体刚度方程的系数矩阵是一个稀疏矩阵,即所有元素都分布在矩阵的主对角线附近,且是对称的正定矩阵,方程间的联系较弱,这种方程可以降低计算规模和存储规模,且稳定性好。研究发现,有限单元法的理论基础就是变分原理,于是关于这个方法的稳定性、收敛性就得到了证明。

(4) 有限单元法具有很强的适用性,应用范围极其广泛。

1.5 有限元常用软件简介

结构整体刚度方程是个庞大的代数方程组,计算工作量大,如果靠人工求解,其工作量之大是不可想象的,且容易出错。国际上早在 20 世纪 60 年代初就开始投入大量的人力、物力开发有限元程序,而有限元中一个重要的核心工作是结构离散,即需要对结构图形具有自动网格划分的功能,且自动提取相应节点信息和单元信息,直到计算机技术、计算数学的不断完善和发展以及计算机硬件技术的不断发展,界面友好、功能完善、快速求解的 CAE 软件才相继产生并逐渐商品化,这些 CAE 软件的推出为工程应用做出了不可磨灭的贡献。目前,流行的 CAE 分析软件主要有 ANSYS、NASTRAN、MARC、ABAQUS、ADINA、COSMOS 等。

ANSYS 软件是集结构、热、流体、电磁场、声场和耦合场分析于一体的大型有限元分析软件,具有强大的前后处理及分析能力,在我国拥有较多的用户且取得了很好的应用效果。典型的应用有三峡工程、二滩电站、黄河下游特大型公路斜拉桥、国家大剧院、浦东国际机场、上海科技城太空城、深圳南湖路花园大厦、高速铁路等,在结构设计时都采用了