

结构分析有限元原理 —— 及ANSYS实现 ——

江克斌 屠义强 邵 飞 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

TB115
65

结构分析有限元原理 及 ANSYS 实现

江克斌 屠义强 邵飞 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在引入结构分析有限元基本原理的基础上,结合多年的教学经验编写而成,着重介绍了如何利用 ANSYS 软件实现结构有限元分析的基本思路、详细步骤和实际操作中可能遇到的各种问题。全书主要包括:工程结构分析的任务与方法,结构分析有限元软件的现状和基本特点,ANSYS 软件的基本使用方法,ANSYS 结构分析的定义以及利用 ANSYS 进行结构静力分析的主要步骤,ANSYS 结构分析的操作方法和注意事项。另外,书末附有习题和附录,习题以供读者检验学习效果,附录详细列举了部分单元的相关计算资料以供读者分析相关问题时参考。

本书适合于 ANSYS 软件的初学者和具有一定基础的读者使用,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

结构分析有限元原理及 ANSYS 实现 / 江克斌等编著.

北京:国防工业出版社,2005.6

ISBN 7-118-03948-9

I. 结... II. 江... III. ①有限元法-应用-工程
结构-结构分析②有限元分析-应用程序,ANSYS

IV. ①TU31②0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 056125 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 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 434 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:30.00 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

随着计算机技术和计算方法的发展,复杂的工程问题可采用离散化的数值计算方法并借助计算机得到满足工程要求的数值解,数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。

在工程领域中应用最广泛的数值模拟方法是有限单元法,它不但可以解决工程中的结构分析问题,也可以解决流体动力学、电磁学和声学等其他领域的问题,有限元计算结果已成为各类工业产品设计和性能分析的可靠依据。许多通用有限元分析程序将有限元分析、计算机图形学与优化技术相结合形成完整的计算机辅助分析系统,这些程序可以显著提高产品设计性能,缩短设计周期,增强产品的市场竞争能力。

ANSYS 软件是国际流行的集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,该软件广泛应用在我国的机械制造、航空航天、汽车交通、铁道、桥梁、石油化工、能源等领域,为各领域产品设计、科学研究做出了贡献。

国内很多高校开设的相关课程选择 ANSYS 作为支持软件,本书就是为此而编写的。本书从实用观点出发,以 ANSYS7.0 的使用方法为基础,结合各类实际工程结构中常用的基本构件和零件进行结构分析,目的是使读者能够快速入门,了解 ANSYS 的基本操作,学以致用。本书在编排方式上,充分考虑到初学者的需求,编排、插图和实例的选择都是经过精心设计的,从而使读者能够尽快掌握 ANSYS 的操作过程并熟练地应用。最后安排了有针对性的练习题,读者可以结合自己的实际情况去做,以检验学习效果,加深对本书内容的理解,提高运用 ANSYS 软件分析、解决实际工程问题的能力。

本书共九章,通过 ANSYS 实例的建模和计算过程,详细介绍了 ANSYS 的前处理、求解和后处理的基本命令和模块。第 1 章绪论,阐述了有限元方法和有限元软件的现状和基本特点。第 2 章介绍了结构分析有限元基本原理。第 3 至第 7 章详细介绍了 ANSYS 软件的基本使用方法。第 8 章和第 9 章介绍 ANSYS 结构分析的定义以及利用 ANSYS 进行结构静力分析的主要步骤,以本书涉及的几种典型结构类型为例,详细介绍了 ANSYS 结构分析的操作方法和注意事项。书末附有习题和附录,以供读者检验学习效果,附录详细列举了部分单元的相关计算资料以供读者分析相关问题时参考。

IV

由于本书是为初学者入门服务的,因此在内容的编排上,主要是介绍 ANSYS 的基本操作知识,对于 ANSYS 的高级操作,本书仅作简略的介绍。同时受篇幅所限,本书以结构分析为主,通过结构分析,使读者掌握在其他领域有限元分析的基本命令。

本书由江克斌、屠义强、邵飞编著,研究生周望进、龚晓波和潘大荣参与了本书的部分编写工作,完成了大量的制图、例题详解和练习试做工作。

本书编写过程中,参阅了大量文献资料,在此对参考文献的作者表示衷心感谢。

由于作者的水平和经验所限,加之时间仓促,本书难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2005 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构及其分类	1
1.2 结构分析的任务	3
1.3 结构分析的数值方法	3
1.4 现代有限元分析软件及其特点	5
1.5 本章小结	9
第 2 章 有限元分析的基本原理	10
2.1 概述	10
2.2 杆系结构有限元法	11
2.3 平面问题有限元法	21
2.4 实体结构有限元法	29
2.5 本章小结	34
第 3 章 ANSYS 有限元分析的基本步骤	35
3.1 ANSYS 基本构架	35
3.2 ANSYS 图形界面的交互操作	38
3.3 ANSYS 典型分析实例	50
3.4 本章小结	61
第 4 章 建立几何实体模型	62
4.1 概述	62
4.2 坐标系与工作平面	62
4.3 创建实体模型	67
4.4 本章小结	95
第 5 章 生成有限元模型	96
5.1 定义单元属性	96
5.2 划分网格	106
5.3 网格的检查与修改	117
5.4 控制壳单元面的方向	124
5.5 直接生成节点和单元	125
5.6 特殊的节点自由度关系	130
5.7 控制模型编号	132
5.8 模型文件操作	133

5.9 本章小结	135
第 6 章 施加载荷与求解	136
6.1 载荷种类与加载方式	136
6.2 在模型上加载	138
6.3 载荷显示与控制	150
6.4 求解过程控制	154
6.5 选择求解器并求解	161
6.6 本章小结	163
第 7 章 分析结果后处理	164
7.1 后处理器与结果文件	164
7.2 读入结果数据	164
7.3 分析结果显示	165
7.4 创建单元数据表	169
7.5 列表显示各种结果	178
7.6 产生及组合载荷工况	183
7.7 生成工作报告	188
7.8 本章小结	191
第 8 章 ANSYS 结构分析	192
8.1 结构分析概述	192
8.2 结构静力分析	192
8.3 结构非线性静力分析	193
8.4 结构静力分析步骤	198
8.5 本章小结	209
第 9 章 结构静力分析实例详解	210
9.1 桁架结构静力分析	210
9.2 梁结构静力分析	223
9.3 平板静力分析	237
9.4 轴承座静力分析	248
9.5 本章小结	255
习题	256
附录 常用单元参考资料摘要	264
主要参考文献	293

第 1 章 绪 论

1.1 结构及其分类

从字面上看,结构是组成整体的各部分的搭配和安排。本书研究的结构是指在建筑物中起骨架作用的承重部分的构造,例如桥梁的桁架、厂房的梁柱、车辆的底盘、飞机的机身等都是承受载荷的结构。

结构的种类很多,其几何特征、受力状态和计算方法也各不相同,可以以不同的角度来分类。

1.1.1 按几何特征分类

按照几何特征分类,结构可以分为杆件结构、板壳结构和实体结构。

1.1.1.1 杆件结构

杆件的几何特征是其长度远大于其截面的宽度和高度(或直径),由杆件组成的结构称为杆件结构或杆系结构。

杆件结构按其受力特性不同又可分为桁架结构、刚架结构和组合结构。

(1) 桁架 由直杆组成,所有杆件之间的连接结点均为铰接,如图 1-1 所示。为了简化计算,通常认为载荷只作用于桁架的结点处,称为结点载荷,而将非结点处作用的载荷转化为结点载荷,即等效结点载荷。因此,桁架的杆件只产生轴向力。



图 1-1 桁架结构示例

(2) 刚架结构 由直杆组成且各杆之间的连接采用刚结点,如图 1-2 所示。为了简化计算,认为刚架在变形过程中,各杆之间在连接处的夹角保持不变。因此,组成刚架的

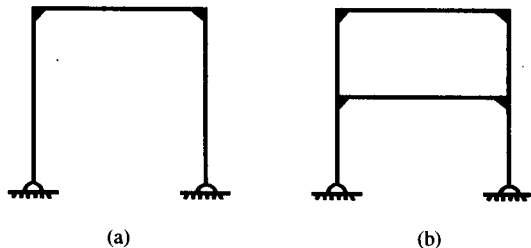


图 1-2 刚架结构

杆件除承受轴向力外同时还承受弯矩和剪力。

(3) 组合结构 指由桁架与梁或桁架与刚架组合在一起的结构,其中有些杆件只承受轴力,另一些杆件则同时还承受弯矩和剪力,如图 1-3 所示。

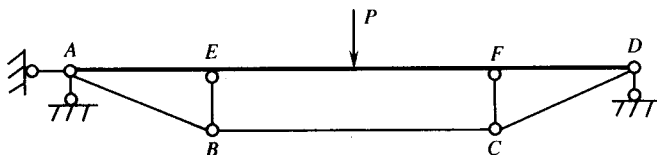


图 1-3 轻便钢桥组合结构示意图

1.1.1.2 板壳结构

板是指厚度远小于其长度和宽度的构件。按照中面的几何形状,板又可分为薄板和薄壳。薄板是中面为平面的板,薄壳是中面为曲面的板。因为板壳结构是由薄板和薄壳组成的,所以板壳结构又称薄壁结构,如图 1-4(a)、(b)、(c)所示。

1.1.1.3 实体结构

实体,也称块体,是指长、宽、高各方向尺寸都相当的构件。在工程结构中实体结构应用很普遍,例如地基、挡土墙、水坝和钢球等。

实体结构如图 1-4(d)所示。

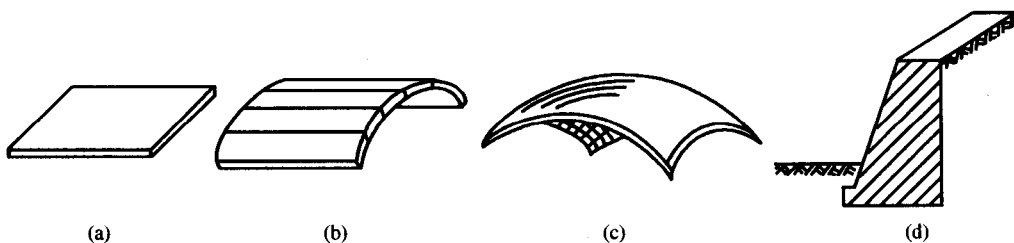


图 1-4 板壳结构和实体结构

1.1.2 按受力状态分类

按照杆轴线和外力的空间位置,结构可以分为平面结构和空间结构。如果结构的各杆轴线及外力(包括荷载和反力)都在同一平面内,则称为平面结构,否则便是空间结构。由多根杆件按照某种规律的几何图形通过结点连接起来的网架结构就是一种典型的空间结构。实际工程中的结构都是空间结构,只不过在很多情况下可以简化为平面结构或近似分解为几个平面结构来计算。当然,不是所有情况都能这样处理,有些必须作为空间结构来计算,如塔架等。

1.1.3 按计算方法分类

按照计算方法分类,结构可以分为静定结构和超静定结构。这一分类在理论上具有重要意义。如果在任意载荷作用下,结构的全部反力和内力都可以由静力平衡条件确定,

这样的结构便称为静定结构;若只靠平衡条件还不能确定全部反力和内力,必须考虑变形条件才能确定,这样的结构便称为超静定结构。

1.2 结构分析的任务

结构分析应该看成是结构设计的重要组成部分。结构设计的主要目的是要建造一个经过精心设计的结构,但设计结构首先要知晓结构在给定载荷作用下会有什么样的响应,这就是结构分析的目的。

具体地说,为了使结构既能安全、正常地工作,又能符合经济的要求,就需对其进行强度、刚度和稳定性的计算。这一任务是涉及材料力学、结构力学和弹性力学等课程的知识。在材料力学中主要研究单个杆件的计算;结构力学则在此基础上着重研究由杆件所组成的结构;弹性力学则对杆件作更精确的分析,并研究板、壳、块体等非杆状结构。

如上所述,结构分析的研究对象是杆件结构、板壳结构和实体结构,其具体任务是:

(1) 研究结构在载荷等因素作用下的内力计算方法,用于结构设计中的强度校核。

(2) 研究结构在载荷等因素作用下的变形计算方法,用以解决结构的刚度校核。

(3) 研究结构的稳定性问题,确定结构的临界载荷,给出结构不改变其承载方式的临界状态。

1.3 结构分析的数值方法

结构分析方法最初是基于结构力学的分析方法。在 20 世纪 30 年代以前,结构分析的研究对象主要是杆件结构的计算理论与方法。20 世纪 30 年代以后,板壳等薄壁结构以及实体结构的计算理论得到广泛研究,相应地形成了桥梁结构力学、船舶结构力学以及飞机结构力学等,使得结构分析的内容扩展到板壳结构和实体结构。

1.3.1 数值分析

随着现代科学技术的发展,人们不断地建造更为快速的交通工具、更大规模的建筑物、更大跨度的桥梁、更大功率的发电机组和更为精密的机械设备。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出产品和工程的技术性能,需要对结构的静、动力强度以及温度场、流场、电磁场和渗流等技术参数进行分析计算。例如分析计算高层建筑和大跨度桥梁在地震时所受到的影响,看看是否会发生破坏性事故;分析舟桥在水中运动时流体动力学参数,判定牵引(或推动)动力是否匹配等。这许许多多的工程分析问题,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那些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的某些特征是非线性的,则很少有解析解。这类问题的解决通常有两种途径: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的解。这种方法只在有限的情况下是可行的,因为过多的简化将可能导致不正确的甚至错误的解。二是采用数值分析方法,即在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上,借助于现代科学技术的产物——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。数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。

数值模拟技术并不仅限于结构分析,几乎涉及所有工程分析问题。目前使用较为普遍的领域及其相关学科主要有:

- (1) 位移场和应力场求解:固体力学;
- (2) 振动特性求解:动力学;
- (3) 温度场求解:传热学;
- (4) 流场求解:流体力学;
- (5) 电磁场求解:电磁学。

目前在工程技术领域内常用的数值模拟方法有有限元法、边界元法、离散单元法和有限差分法,但就实用性和应用的广泛性而言,主要还是有限元法。

1.3.2 有限元法的基本思想

有限元分析(FEA, Finite Element Analysis)方法,简称有限元法是在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的,为解决复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。有限元法的基本思想是将问题的求解域划分为一系列单元,单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求量可由单元节点量通过选定的函数关系插值求得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式,然后将各个单元方程“组集”在一起而形成总体代数方程组,计入边界条件后即可对方程组求解。单元划分越细,计算结果就越精确。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,再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。

有限元法是在 20 世纪 50 年代中期作为结构分析的矩阵法的推广应用到固体力学中的。结构分析的矩阵法是分析含有大量构件的结构系统的分析方法。这些结构系统的构件是简单的拉压杆件以及受弯曲或者扭转的梁,它们在有限个结点上的位移和内力的关系,列出方程组,可以以节点位移或节点内力作为未知数,有时也可以以节点位移和内力混合作为未知数。根据所用未知数的不同,矩阵分析法可分为位移法、力法或混合法。对离散的结构系统写出方程对于具备结构力学知识的人是熟悉的,采用矩阵符号推导和掌握这些方程也最方便,而对于大型代数方程的求解则可以交给计算机去完成。有限元法也是在电子计算机出现后才真正用于工程分析之中的。由于有了计算机这个强有力的工具,现在有限元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题,由静力平衡问题扩展到稳定性问题、动力问题和波动问题,分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料,从固体力学扩展到流体力学、传热学、电磁学等领域。

1.3.3 有限元法的基本要素

构成有限元系统的 3 个基本要素是节点、单元和自由度。

(1) 节点(Node):节点是构成有限元系统的基本对象,也就是整个工程系统中的最基本点。它包含了坐标位置以及具有物理意义的自由度信息。

(2) 单元(Element):单元是由节点与节点相连而成,是构成有限元系统的基础。一个

有限元系统必须有至少一个以上的单元。单元和单元之间由各节点相互连接。在具有不同特性的材料和不同的具体结构当中,可选用不同种类的单元,单元中包含了物理对象的各种特性。传统的结构矩阵分析中,结构构件的节点力和节点位移之间的关系是精确导出的,而在有限元法中,是根据单元内近似的位移函数导出。单元类型不同,位移函数也不一样。通用有限元分析软件中都要提供多种可供不同分析选择的单元,例如梁单元、平面单元、体积单元等。在工程分析时,选择适当的单元可以大大提高计算的效率和精度。

(3) 自由度(DOF, Degree Of Freedom):包括系统自由度和节点自由度。整个系统的自由度,在分析中需要进行适当的约束,系统中每个节点都有各自的节点坐标系和对应的节点自由度,对于不同的单元上的节点,具有不同的自由度。

1.3.4 有限元法解题基本步骤

利用有限元法进行结构分析,可采用以下解题步骤:

(1) 单元剖分和插值函数的确定。

根据构件的几何特性、载荷情况及所要求的变形点,建立由各种单元所组成的计算模型。也就是对整个结构进行离散化,将其分割成若干个单元,单元之间彼此通过节点相连。再按单元的性质和精度要求,写出表示单元内任意点的位移函数,利用节点位移表示单元体内任意点位移的插值函数。

(2) 单元特性分析。

根据位移插值函数,由应变与位移关系求得单元刚度矩阵。

(3) 单元组集。

把各单元按节点组集成与原结构相似的整体结构,得到整体结构的节点力与节点位移的关系,即整体结构平衡方程组。

(4) 求解有限元方程。

引入支承条件,根据不同的计算方法求解有限元方程,得出各节点的位移。

(5) 计算单元内的应力和应变。

根据结点位移计算相应的节点应力以及单元内部任意点的应力和应变。

1.4 现代有限元分析软件及其特点

有限元软件是和有限元法同时诞生的,并且随着有限元法和计算技术的发展而迅速发展。有限元法是与工程应用密切结合,直接为工程设计服务的,因此,各种有限元结构分析程序(即有限元软件)使有限元法转化为直接推动社会发展和科技进步的生产力,发挥了巨大的社会和经济效益。有限元软件本身已经成为 CAD/CAM 不可分割的一部分。同时,以有限元软件为依托的力学学科——计算力学,异军突起,将力学理论应用于工程实践,使古老的力学科学在新世纪的今天仍然闪耀着强大的生命之光。由于有限元通用程序使用方便、计算精度高,其计算结果已成为各类工业产品设计和性能分析的可靠依据。以 ANSYS 为代表的工程数值模拟软件,即有限元分析软件,不断吸取计算方法和计算机技术的最新进展,将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合,已成为解决现代

工程学问题必不可少的有力工具。

1.4.1 国内外著名的有限元软件

有限元软件就是有限元法的计算机程序或程序系统,有通用和专用两种。前者通常是商业软件,优点是通用性强,格式规范,输入方法简单,用户无需特殊记忆也不需要太多专业知识和计算机技能,解决问题领域宽,因而流行范围广;缺点是程序通常很长,开发成本高。专用软件的优点是程序相对短,开发价格低,版本升级相对容易,解决专门问题更有效。

自 20 世纪 70 年代后期,国际上较大型的面向工程的有限元通用程序达到几百种,引入我国的各种大、中型专用和通用有限元著名软件有数十种,主要包括:

(1) ADINA(A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)——美国麻省理工学院机械工程系开发的自动动力增量非线性分析有限元程序。

(2) ALGOR——美国 ALGOR 公司在 SAP5 和 ADINA 有限元分析程序基础上针对微机平台开发的通用有限元分析系统。

(3) ANSYS(Analysis System)——世界著名力学分析专家、匹兹堡大学教授 J. Swanson 创建的 SASI 公司(Swanson Analysis System Inc)开发的大型通用有限元分析软件,世界最具权威的有限元产品。

(4) IDEAS(Integrate Design Engineering Analysis System)——美国 SDRC 公司开发的机械通用软件集成化设计工程分析系统。它是集设计、分析、数控加工、塑料模具设计和测试数据分析为一体的工作站用软件。

(5) NASTRAN(NASA Structural Analysis)——美国国家航空和宇航局(NASA)开发的结构分析程序。

(6) SAP(Structural Analysis Program)——美国加州大学伯克利分校 M. J. Wilson 教授开发的线性静、动力结构分析程序。

另外还有德国的 ASKA,英国的 PAFEC,法国的 SYSTUS,美国的 ABQUS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE,韩国的 MIDAS 等产品。

这些程序的共同点是:

- ① 都至少包括杆、梁、板、壳和三维实体单元,热分析能力。
- ② 分析静力和动力问题。
- ③ 分析线弹性和非线性问题。
- ④ 适用多种载荷:集中力、分布力、力偶、温度和支座沉陷。
- ⑤ 自动划分网格功能的前处理程序。
- ⑥ 用图形解释计算结果,如变形前后的模型、应力和温度分布的云图、指定位置的位移和应力等。

这些程序有的经过我国工程技术人员消化得到推广和应用,有的经过改进提高形成功能更全更强的通用程序。

20 世纪 90 年代以来,随着我国 CAD 应用工程的兴起,科学和工程技术人员对于有限元软件的注意力由引进、消化、推广和应用转向自主开发,也出现了一大批优秀的专用和通用软件,在各行各业创造出巨大的社会效益和经济效益。

有限元理论经过三十多年的发展已经比较成熟,估计短期内不会再有大的突破,但是随着计算机的广泛应用和计算机科学令人难以置信的速度发展,国际、国内各种结构分析有限元软件将以商品的形式不断推出,并逐渐系统化为大规模有限元分析程序库。现代有限元软件已经是一个多学科、综合技术的集成化产品,并且和有限元技术结合,形成一个被称为有限元软件技术的特殊研究领域,以探讨如何满足科学和工程界对于有限元软件在智能化、可视化、集成化以及面向对象等方面越来越高的期望和无止境的要求。

无论什么类型的结构,使用什么软件,有限元法的实施过程都是由前处理、分析计算和后处理三个部分组成。前处理包括结构的离散化模型的建立,即节点和单元的生成、载荷和约束条件的施加、材料和截面几何形状的输入等内容,是经济可靠地进行结构分析的关键。结构计算是有限元的核心,包括单元分析、整体分析、结构计算等内容,从解线性方程组开始,完成节点位移、节点力等计算。后处理是计算结果的整理和分析,是实现有限元分析的最终目的的手段。

由于有限元法的成熟,任何有限元软件的结构计算部分都是计算机自动完成的,只要输入适当的指令,无需人工干预。而前处理、后处理的方式和功能却因软件而异,并受计算机条件的限制,计算结果的表达方式差别很大。

1.4.2 有限元软件的发展趋势

在大力推广 CAD 技术的今天,房屋建筑、桥梁工程、航天飞机等所有的设计制造都离不开有限元分析计算,有限元分析软件在工程设计和分析中将得到越来越广泛的重视。

1.4.2.1 国外软件发展趋势

国际上早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。当今国际上有限元法和软件发展呈现出以下一些趋势特征:

(1) 从单纯的结构力学计算发展到求解多物理场问题 有限元法最早是从结构化矩阵分析发展而来,逐步推广到板、壳和实体等连续体固体力学分析,实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明,只要用于离散求解对象的单元足够小,所得的解就可足够逼近于精确值。所以近年来有限元法已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算,最近又发展到求解几个交叉学科的问题。例如当舟桥结构在水流中运动时,水流对舟体产生作用,而舟体的运动反过来影响水流的运动等,这就需要用固体力学和流体动力学的有限元分析结果交叉迭代求解,即所谓“流固耦合”的问题。

(2) 由求解线性工程问题进展到分析非线性问题 随着科学技术的发展,线性理论已经远远不能满足设计的要求。例如建筑行业中的高层建筑、大跨度悬索桥以及大跨度快速拼装式桥梁的出现,就要求考虑结构的大位移和大应变等几何非线性问题;又如塑料、橡胶和复合材料等各种新材料的出现,仅靠线性计算理论就不足以解决遇到的问题,只有采用非线性有限元算法才能解决。众所周知,非线性的数值计算是很复杂的,它涉及很多专门的数学问题和运算技巧,很难为一般工程技术人员所掌握。为此近年来国外一些公司花费了大量的人力和投资开发诸如 ANSYS、MARC、ABQUS 和 ADINA 等专长于求解非线性问题的有限元分析软件,并广泛应用于工程实践。这些软件的共同特点是具有高

效的非线性求解器以及丰富和实用的非线性材料库。

(3) 增强可视化的前置建模和后置数据处理功能 早期有限元分析软件的研究重点在于推导新的高效求解方法和高精度的单元。随着数值分析方法的逐步完善,尤其是计算机运算速度的飞速发展,整个计算系统用于求解运算的时间越来越少,而数据准备和运算结果的表现问题却日益突出。在现在的工程工作站上,求解一个包含 10 万个方程的有限元模型只需要用几十分钟。但是如果用手工方式来建立这个模型,然后再处理大量的计算结果则需用几周甚至几十周的时间。可以说,工程师在分析计算一个工程问题时,有 80% 以上的精力都花在数据准备和结果分析上。因此目前几乎所有的商业化有限元程序系统都有功能很强的前置建模和后置数据处理模块。在强调“可视化”的今天,很多程序都建立了对用户非常友好的图形用户界面 GUI(Graphics User Interface),使用户能以可视图形方式直观快速地进行网格自动划分,生成有限元分析所需数据,并按要求将大量的计算结果整理成变形图、等值分布云图等,便于极值搜索和所需数据的列表输出。

(4) 与 CAD 软件的无缝集成 当今有限元分析系统的另一个特点是与通用 CAD 软件的集成使用,即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后,自动生成有限元网格并进行计算,如果分析的结果不符合设计要求则重新进行造型和计算,直到满意为止,从而极大地提高了设计水平和效率。今天,工程师可以在集成的 CAD 和有限元分析软件环境中快捷地解决一个在以前无法应付的复杂工程分析问题。所以当今所有的商业化有限元系统商都开发了与著名的 CAD 软件(例如 Pro/ENGINEER、Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks、IDEAS、Bentley 和 AutoCAD 等)的接口。

(5) 软件平台微机化 早期的有限元分析软件基本上都是在大中型计算机上开发和运行的,后来又发展到以工程工作站(EWS, Engineering Work Station)为平台,它们的共同特点是都采用 UNIX 操作系统。PC 机的出现使计算机的应用发生了根本性的变化,工程师渴望在办公桌上完成复杂工程分析的梦想成为现实。但是早期的 PC 机采用 16 位 CPU 和 DOS 操作系统,内存中的公共数据块受到限制,因此当时计算模型的规模不能超过 1 万阶方程。Microsoft Windows 操作系统和 32 位的 Intel Pentium 处理器的推出,为将 PC 机用于有限元分析提供了必需的软件和硬件支撑平台。因此,当前国际上著名的有限元程序研究和机构都纷纷将它们软件移植到 Windows 平台上。

1.4.2.2 国内软件发展情况和前景

1979 年美国的 SAP5 线性结构静、动力分析程序向国内引进移植成功,掀起了应用通用有限元程序来分析计算工程问题的高潮。这个高潮一直持续到 1981 年 ADINA 非线性结构分析程序引进,一时间许多一直无法解决的工程难题都迎刃而解了。大家也都开始认识到有限元分析程序的确是工程师应用计算机进行分析计算的重要工具。但是由于当时国内大中型计算机很少,所以用户使用起来非常不方便,而且费用昂贵。PC 机的出现及其性能奇迹般的提高,为移植和发展 PC 版本的有限元分析程序提供了必要的运行平台。可以说国内有限元分析软件的发展一直是围绕着 PC 平台做文章。但正如上面所述,国外很多著名的有限元分析公司已经从前些年对 PC 平台不屑一顾转变为热衷发展,对国内有限元分析程序开发者来说发展 PC 版本不再具有优势,而应该从下面几方面加以努力:

(1) 研究开发求解非固体力学和交叉学科的有限元分析程序 经过几十年的研究和发 展,用于求解固体力学的有限元法和软件已经比较成熟,现在研究的前沿问题是流体动力学、可压缩和不可压缩流体的流动等非固体力学和交叉学科的问题。由于国内没有类似功能的商品化软件,所以国外的软件就卖得非常贵。为了打破这种垄断局面,我们必须发展有自主版权、用于分析流体等非固体力学和交叉学科的软件。因为流体力学问题远比固体力学问题复杂,而且很少有现成的软件可以借鉴,所以需要投入大量的人力和经费。这就必须有国家和大型企业集团来支持。

(2) 开发具有中国特色的自动建模技术和 GUI 开发建模技术 和 GUI 的投入相比,前述课题要少得多,但却可以大大提高有限元分析软件的性能和用户接受程度,从而起到事半功倍的效果。国内不少人在这方面做了很多工作,但是由于当时 PC 机上的图形支撑环境有限,所以开发的效果都不甚理想。Windows 中提供了 OpenGL 图形标准,为在 PC 机上应用可视化图形技术开发 GUI 提供了强有力的工具。OpenGL 是当今国际上公认的高性能图形和交互式视景处理标准,应用它开发出来的三维图形软件深受专业技术人员的钟爱,目前世界上占主导地位的计算机公司都采用了这一标准。正如前面所述,近年来国外有的有限元分析程序已抛开仿真软件,直接在 Windows 平台上开发有限元分析程序。这些程序可直观地通过对“菜单”、“窗口”、“对话框”和“图标”等可视图形画面和符号的操作,自动建立有限元分析模型,并以交互式方法实现计算结果的可视化处理,因而大大提高有限元分析的效率和精确性,也便于用户学习和掌握。

(3) 与我国自主知识产权的 CAD 软件集成 当今有限元法的一个重要特点是和 CAD 软件的无缝集成。作为我国自行开发的有限元分析程序,首先要考虑和我国自主知识产权的 CAD 软件集成。因为有限元分析主要用于形状比较复杂的零部件,所以要和具有三维造型功能的 CAD 软件集成,使设计和分析紧密结合、融为一体。

1.5 本章小结

作为结构分析的前奏,本章首先简要介绍了结构的分类、结构分析的任务,介绍了有限元法的基本思想、基本要素和解题步骤,分析了国内外大型有限元分析软件的发展现状和趋势。读者通过本章的学习,应该明确结构分析的任务和方法,了解结构分析的有限元法和有限元软件的主要特点和发展趋势。

第2章 有限元分析的基本原理

2.1 概 述

有限元法是随着计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法。它是以计算机为手段,通过离散化将研究的对象变换成一个与原结构近似的数学模型,再经过一系列规范化的步骤以求解应力、应变、位移等参数的数值计算方法。利用有限元方法进行结构分析,通常需要进行结构离散化、单元特性分析、单元组集、求解未知节点位移、计算单元内部应力和应变等步骤。

2.1.1 结构离散化

所谓离散化是将一个连续体分割成若干个通过节点相连的单元,这样一个无限个自由度的结构就变换成一个具有有限个自由度的近似结构。该过程还包括对单元和节点进行编码以及局部坐标系和整体坐标系的确定。

单元节点的设置、性质、数目等应视问题的性质以及描述变形形态的需要和计算精度而定。一般地,单元划分越细,描述变形情况越精确,即越接近实际变形,但计算量越大。所以,有限元法中分析的结构已不是原有的结构物,而是具有同样材料,由许多单元以一定方式连接成的离散体,即有限元法获得的计算结果只是近似的。当然,如果划分单元数目足够且划分合理,则所获得的结果就与实际情况相符合。

2.1.2 单元特性分析

单元特性分析包括选择位移函数、分析单元力学性质并计算等效节点力。

1. 选择位移模式

在有限元法中,选择节点位移作为基本未知量时称为位移法,选择节点力作为基本未知量时称为力法,取一部分节点力和一部分节点位移作为基本未知量时称为混合法。位移法易于实现计算自动化,所以在有限元法中位移法应用范围最广。

当采用位移法时,结构离散化后,可以把单元的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移来表示。这时可以对单元中位移的分布采用一些逼近原分布函数的近似函数予以描述。在有限元法中,通常将位移表示为坐标变量的简单函数。这种近似函数称为位移模式,也称位移函数或插值函数。如 $y = \sum_{i=1}^n a_i \psi_i$, 其中, a_i 是待定系数, ψ_i 是与坐标有关的某种函数。

2. 分析单元的力学性质

根据单元的材料性质、形状、尺寸、节点数目、位置及其含义等,找出单元节点力和节点位移的关系式,这是单元分析中的关键一步。此时需要应用弹性力学中的几何方程和