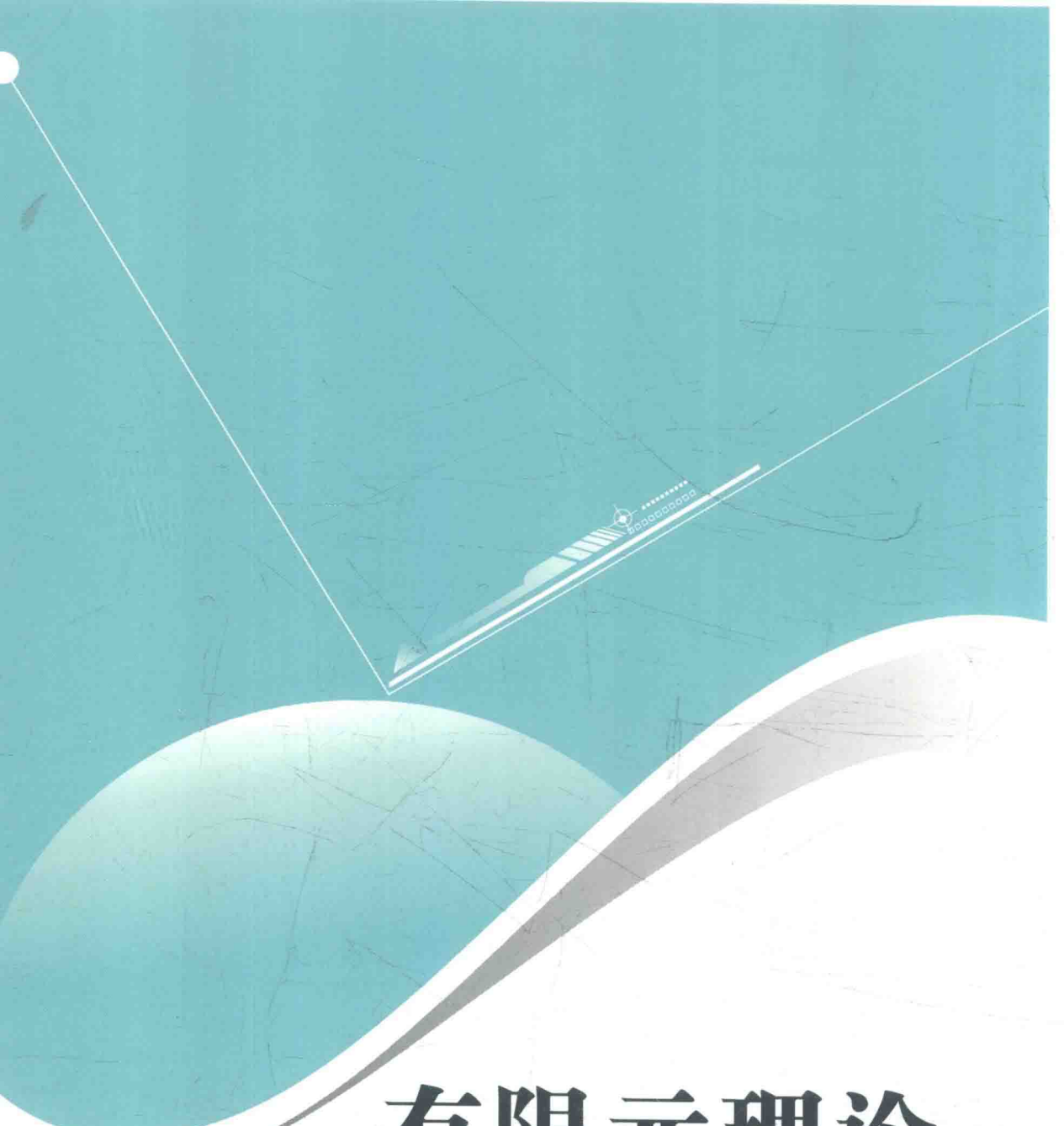




有限元理论 及ANSYS工程应用

YOUXIANYUAN LILUN JI ANSYS GONGCHENG YINGYONG

王胜永 编著

 郑州大学出版社

有限元

有限元理论 及ANSYS工程应用

YOUXIANYUAN LILUN JI ANSYS GONGCHENG YINGYONG

王胜永 编著

主审 石路杨 袁志华 何文斌 赵 红



郑州大学出版社

郑 州

内容简介

本书主要包括:以弹性力学为基础的有限元的概念和基本理论,平面弹性力学问题,空间弹性力学问题,有限元基本理论,ANSYS15.0 软件的有限元分析过程,ANSYS15.0 基本操作、基础应用实例、工程应用实例等,本书在内容安排上深入浅出、循序渐进,理论联系实际,注重工程应用。本书适合机械工程、土木工程、化工装备等工科专业教学及学习用书,也可作为相关专业从业人员参考学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

有限元理论及 ANSYS 工程应用/王胜永编著. —郑州:
郑州大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5645-5767-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 196933 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

北京虎彩文化传播有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:29.25

字数:693 千字

版次:2018 年 8 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

印次:2018 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-5767-6

定价:69.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

前言

自 1960 年 R. W. Clough 正式提出“有限元方法”以来,随着计算机科学技术的发展和进步,有限元方法得到了长足的发展和快速的普及。有限元方法已经在机械工程、航空航天、汽车、造船、土木工程、电子电气、冶金与成形等众多工程领域中得到了广泛应用。有限元法的通用计算软件作为有限元研究的一个重要组成部分,也随着电子计算机的飞速发展而迅速发展起来。大型通用有限元分析软件不断涌现和更新,在产品的开发、设计、分析以及制造过程得到了广泛应用,其功能强大、计算可靠、工作效率高,逐渐成为现代工业领域中计算机技术和现代工程方法的完美结合。同时,也对从事现代工程科学技术工作的人才提出了应具备完整知识结构的要求,即理论基础、工程实践和计算能力。

ANSYS 软件是一种大型通用的有限元分析(FEA)软件,是世界范围内增长最快的 CAE 软件。因其功能强大,应用领域宽广,现已成为国际最流行的有限元分析软件。目前,中国多所理工院校已采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件,并且相继开设了这方面的课程。我们根据近年来的有限元教学内容和工程实践经验编著了本书,并力求做到以下几点:

首先,本书作为入门教材,主要讲述了有限元的基本理论和通用有限元分析软件 ANSYS15.0 在有限元分析中的应用。本书可以作为一本介绍有限元分析与应用的教学或参考用书,在进行有限元理论讲解过程中,尽量避开了枯燥的理论,避免学生在理论面前望而却步;同时又保留了足够的理论知识确保可以灵活、有效地使用 ANSYS15.0。在 ANSYS15.0 应用过程中,首先介绍相关的基础理论,然后给出一些工程实例问题,并进行理论求解计算,以便于大学生和初学者更好地学习有限元方法的基本概念。进而再介绍如何利用 ANSYS 求解这些问题。使大学生和初学者掌握如何利用通用有限元分析软件进行问题的求解。

其次,本书还特别强调分析结果的验证,通过理论解析解和 ANSYS15.0 求解结果对比,以简单、可行的“合理性检查”方法,检验实例问题分析结果的正确性。

再次,本书给出习题,可以帮助大学生和初学者完成一定的上机实验练习。本书通过理论讲解并配合上机实验训练以加强大学生和初学者对有限元理论的理解以及对 ANSYS15.0 软件的有效使用,因此特别适合于希望学习有限元分析基本理论和方法并将其应用于 ANSYS15.0 有限元软件进行解决实际工程问题的高校学生、研究生和从事有限元研究与应用的工程技术人员。

本书是一本对工科各专业具有普遍适用性的基础应用学习书籍,在编著中做到由浅入深,注重知识体系的完整性,内容较为丰富。教师在具体讲授时,可根据需要适当取舍。

本书由郑州轻工业学院王胜永编著。同时,华北水利水电大学石路杨、河南农业大学袁志华、郑州轻工业学院何文斌以及郑州轻工业学院赵红担任主审。在此衷心感谢为本书付出努力的每一个人。

本书在编著的过程中,参考了相关专家和学者的著作和文献,在此谨表谢意!

由于编者水平有限,对书中的不足和疏漏之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2018 年 5 月



第1章 概论	1
1.1 有限元方法简介	1
1.2 有限元方法发展概况与趋势	2
1.3 有限元软件开发与 CAD/CAE 技术	5
1.4 有限元方法及相关软件计算分析的作用	8
1.5 本书内容安排与特点	8
第2章 有限单元法理论基础	10
2.1 有限单元法力学理论基础概述	10
2.2 离散结构的解析法与有限元法求解	11
2.3 弹性力学基本方程	19
2.4 有限单元法数学理论基础	23
2.5 三角形平面单元弹性力学分析	23
2.6 等参有限单元法	52
2.7 空间弹性力学问题	74
第3章 有限元分析过程	89
3.1 有限元分析的一般过程	89
3.2 单元的位移插值函数	93
3.3 单元刚度矩阵与等效节点载荷向量	96
3.4 整体分析	101
3.5 约束条件的处理	104
3.6 有限元一般分析过程算例	106
3.7 几种典型单元及位移模式	109
第4章 ANSYS 概述	110
4.1 ANSYS 简介	111
4.2 ANSYS 安装与启动	114
4.3 菜单介绍	118
4.4 ANSYS 基本操作	130
4.5 ANSYS 程序结构	133
4.6 ANSYS 的单位制	149
4.7 ANSYS 的坐标系及切换	149

4.8	工作平面(Working Plane)	152
4.9	ANSYS 通用操作	153
第5章	ANSYS 基本操作基础	155
5.1	几何建模	157
5.2	材料设置与网格划分	181
5.3	施加加载与求解	198
第6章	ANSYS 应用实例分析	221
6.1	ANSYS 分析规划方案	221
6.2	静力学结构分析概述	222
6.3	线性静力学结构分析的基本步骤	233
6.4	桁架结构	235
6.5	梁结构	257
6.6	二维与三维实体结构分析	279
6.7	圆轴扭转分析	295
6.8	压杆屈曲分析	307
6.9	简单振动模态分析	331
第7章	ANSYS 工程应用实例分析	352
7.1	土木工程实例分析	352
7.2	ANSYS 在机械工程的应用	413
7.3	化工装备实例分析——球罐在地震载荷下的动力响应	447
参考文献		459

第 1 章 概论

1.1 有限元方法简介

在大学里我们一般学习过四门力学课程(理论力学、材料力学、结构力学、弹性力学)。理论力学的研究对象是刚体受力平衡规律;材料力学的研究对象是变形体受力后内部效应(应力与应变);结构力学研究的对象包括结构(如框架、桁架)的组成规则,结构在各种效应(外力、温度效应、施工误差及支座变形等)作用下的响应,包括内力(轴力、剪力、弯矩、扭矩)的计算,位移(线位移、角位移)计算,以及结构在动力荷载作用下的动力响应(自振周期、振型)的计算等;弹性力学的主要研究对象是板、壳、实体结构(如平板、水坝),研究弹性物体在外力和其他外界因素作用下产生的变形和内力,也称为弹性理论。

在四门力学课程学习过程中,我们采用了假设理论,在正常荷载的作用下,大部分实际结构变形都很小,其分析过程都简化成用线性理论描述。因而在小变形和室温下,材料的本构方程可以看成是线性的而不致有较大的误差。通常采用解析方法求解出精确解。然而,解析方法只适用于是少数方程性质比较简单,且几何形状相当规则的问题。而对于实际工程结构中的大多数问题,我们一般不能得到系统的精确解。这是由于方程的某些特征的非线性性质,或由于求解区域的几何形状比较复杂,往往不能得到解析的答案。这类问题的解决通常有两种途径。一是引入简化假设,将方程和几何边界简化为能够处理的情况,从而得到问题在简化状态下的解。但是这种方法只是在有限的情况下是可行的,因为过多的简化可能导致误差很大甚至错误的解。因此工程界和科学界诸多工程师和学者一直致力于寻找和发展另一种求解途径和方法——数值解法。特别是近四十多年来,随着电子计算机和相关计算分析软件的飞速发展和广泛应用,数值分析方法已成为求解科学技术问题的主要工具。

解析解表明了工程问题在任何点的精确行为,而数值解只在称为节点的离散点上近似于解析解。已经发展的数值分析方法主要有两类:一类是有限差分法,其特点是针对每一个节点写微分方程,并且用差分方程代替导数,这一过程产生一组线性方程,有限差分法对于简单问题的求解是易于理解和应用的,但用于几何形状复杂的问题时,它的精度将降低,甚至发生困难;另一类数值分析方法是有限元方法,有限元方法的出现,是数值分析方法研究领域内重大突破性的进展。

有限元方法也叫“有限单元法”或“有限元素法”,它是一种将连续体离散化,以求解各种力学问题的数值方法。有限单元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限



个、且按一定方式相互连结在一起的单元的组合物。由于单元能按不同的连结方式进行组合,且单元本身又可以有不同形状和大小。因此,它可以很好地适应复杂的几何形状、复杂的材料特性和复杂的边界条件。再加上它有成熟的大型软件支持,使其已经成为一种非常广泛应用的数值计算方法。

例如,为分析直齿轮上一个齿内的应力分布,可分析如图 1.1 所示的一个平面截面内位移分布。作为近似解,可以先求出图中三角形各顶点位移。这里的三角形就是单元,其顶点就是节点。

从物理角度理解,可把一个连续的齿形截面分割成图 1.1 表示的很多小三角形单元,而单元之间在节点处以铰链相连接,由单元组合而成的结构近似代替原连续结构。如果能合理地求得各单元的弹性特性,也就可以求出这个组合结构的弹性特性。这样,结构在一定的约束条件下,在给定的载荷作用下,就可以求解各节点的位移,进而求解单元内的应力。这就是有限元方法直观的解释。

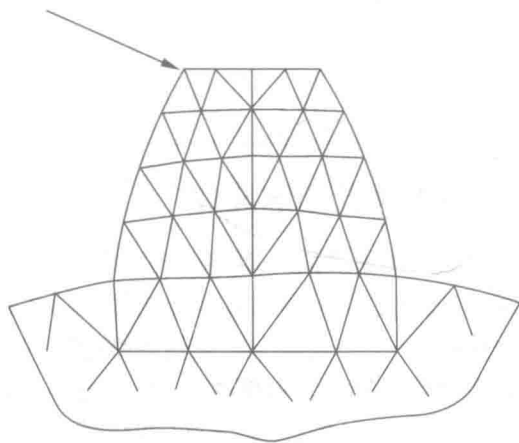


图 1.1 轮齿有限元网格

从数学角度理解,是把图 1.1 所示的求解区域剖分成许多三角形子域,子域内的位移可用三角形各顶点的位移合理插值来表示。按原问题的控制方程(如最小势能原理等)和约束条件,可以解出各节点的待定位移。推广到其他的连续域问题,节点未知量也可以是压力、温度、速度等物理量。这就是有限元方法的数学解释。

在一定条件下,由单元集合成的组合结构近似于真实结构。在此条件下,分区域插值求解也就能趋近于真实解。这种近似的求解方法及其所应满足的条件,就是有限元方法所要研究的内容。

可以看出,有限元方法可适应于任意复杂的几何区域,便于处理不同的边界条件,这一点比常用的差分法更为优越。满足一定条件下,单元越小,节点越多,有限元数值解的精度也就越高。电子计算机的大存贮量和高计算速度为此提供必要的手段。另外,由单元计算到集合为整体区域的有限元分析,都很适应于计算机的程序设计,可由计算机自动完成,这也是有限元法得以迅速发展原因之一。

1.2 有限元方法发展概况与趋势

有限元方法作为处理连续介质问题的一种普遍方法。离散化是有限元方法的基础。然而,这种思想自古有之。齐诺(公元前 5 世纪前后古希腊埃利亚学派哲学家)说:空间是有限的和无限可分的。故,事物要存在必有大小。亚里士多德(古希腊哲学家、科学家)说:连续体由可分的元素组成。祖冲之(南北朝时期):在计算圆的周长时采用了离散化的逼近方法,即采用内接多边形和外切多边形从两个不同的方向近似描述圆的周长,当

多边形的边数逐步增加时近似值将从这两个方向逼近真解(图 1.2)。这是“化圆为直”的做法,另外,“曹冲称象”的典故体现了“化整为零”的做法。这些实际上都体现了离散逼近的思想,即采用大量的简单小物体来“填充”出复杂的大物体。

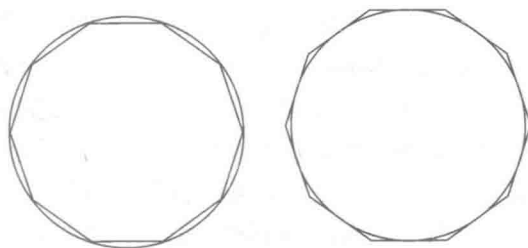


图 1.2 圆周长的多边形近似逼近

在近代,应用数学界第一篇有限元论文是 1943 年 Courant R (库朗)发表的

Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration 一文,文中描述了他使用三角形区域的多项式函数来求解扭转问题的近似解,由于当时计算机尚未出现,这篇论文并没有引起应有的注意。

1956 年, M. J. Turner (波音公司工程师 特纳), R. W. Clough (土木工程教授 克拉夫), H. C. Martin (航空工程教授 马丁)及 L. J. Topp (波音公司工程师 托普)等四位共同在航空科技期刊上发表一篇采用有限元技术计算飞机机翼强度及刚度的论文,名为 *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*, 文中把这种解法称为刚性法 (Stiffness), 一般认为这是工程学界上有限元法的开端。

1960 年, Ray W. Clough (克拉夫)教授在美国土木工程学会 (ASCE) 之计算机会议上,发表另一篇名为 *The Finite Element in Plane Stress Analysis* 的论文,将应用范围扩展到飞机以外之土木工程上,同时有限元法 (The Finite Element Method) 的名称也第一次被正式提出。

O. C. Zienkiewicz 在他的“*The Finite Element Method*”一书中写到: The limitation of the human mind are such that it can not grasp the behaviour of its complex surroundings and creations in one operation. Thus the process of subdividing all systems into their individual components or elements, whose behaviour is readily understood, and then rebuilding the original system from such components to study its behaviour is a natural way in which the engineer, the scientist, or even the economist proceeds.

这段文字的大意是:“人类大脑是有限的,以致不能一次就弄清周围许多(自然存在的和创造出的)复杂事物的特性。因此,我们先把整个系统分成特性容易了解的单个元件或‘单元’,然后由这些元件重建原来的系统以研究其特性,这是工程师、科学家甚至经济学家都采用的一种自然的方法”。许多经典的数学近似方法以及工程师们用的直接近似法都属于这一范畴。

我国的力学工作者为有限元方法的初期发展做出了许多贡献,其中比较著名的有:陈伯屏(结构矩阵方法),钱令希(余能原理),钱伟长(广义变分原理),胡海昌(广义变分原理),冯康(有限单元法理论)。而有限单元法从应用意义上讲,它的快速发展始于 20 世纪 60 年代。一般认为有限元法的发展经历了三个时期。

第一个时期:

1960 年起。最重要的工作来自结构工程师,第一次解决了诸如汽车、飞机、水坝等复杂结构的力学分析。尽管当时有限元法的数学基础尚未完全建立(尽管与今天相比,当



时的成就十分有限),但该方法获得了巨大成功。

第二个时期:

始于 1965 年前后,属于数值分析家。1963 年开始出现数值分析家的论文,他们终于认识了有限元法的基本原理,事实上是逼近论、偏微分方程及变分形式和泛函分析的巧妙结合。并得出结论:直接刚度法(即有限元法)的基础是变分原理,它是基于变分原理的一种新型里兹法(采用分区插值方案的新型里兹法)。这样就使数学界与工程界得到沟通,获得共识。从而使有限元法被公认为既有严密理论基础、又有普遍应用价值的一种数值方法。

在有限元的这一发展时期,还有必要说明两个问题:一个是有限单元法与变分原理之间的关系,另一个是我国学者对有限单元法的贡献。

第一个问题:从有限元法的创立过程看两者的关系。能量变分原理是有限元法的理论基础,这是学术界的共识。但这个共识的形成,有过这样的一段历史过程。

首先,应用数学界第一篇有限元论文是前面提到的 1943 年出版的 Courant 1941 年作的报告“Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration”。他用变分原理和分片插值方法来求扭转问题的近似解。他在论文题目上把后来称为有限元的这种解法归结为“变分解法”。

其次,工程技术界第一篇有限元论文是 1956 年 Turner, Clough, Martin 和 Toop 的论文“Stiffness and deflection analysis of complex structures”。他们把刚架的矩阵位移法推广用于弹性力学平面问题作近似分析,在题目上把这种解法归结为复杂结构的刚度法(或直接刚度法)。随后(1960 年)Clough 定名为有限元法。这些作者与当时的工程师一样,可能不太注意 Courant 那篇被冷落的论文,不太注意他们的直接刚度法与 Courant 的变分解法有何联系。

最后,1963 年开始出现论文,包括 Melosh 的论文“Basis for derivation for the Direct Stiffness Method”,并得出如下结论:直接刚度法(即有限元法)的基础是变分原理,它是基于变分原理的一种新型里兹法(采用分区插值方案的新型里兹法)。这样就使数学界与工程界得到沟通,获得共识。从而使有限元法被公认为既有严密理论基础、又有普遍应用价值的一种数值方法。

从 1943 年和 1956 年两种构思的独立提出,到 1963 年的交汇融合,这正是有限元创立的真实和曲折过程。通过这种曲折,正好看出两者关系的密切难分。

第二个问题:我国学者对有限单元法的贡献。我国数学家冯康等人从 1960 年前后开始,也创造了系统化的有限元算法(1965 年文“基于变分原理的差分格式”)编写了程序,解决了当时国防和经济建设中的一些重大课题,并奠定了数学理论基础。因此可以说,有限元法是在欧、美和中国被独立发展的。

有限元及变分原理的研究领域是我国学者的研究强项。胡海昌于 1954 年提出的弹性力学广义变分原理为有限元法的发展提供了理论基础。冯康提出的基于变分原理的差分格式实质上就是今天的有限元法。龙驭球提出的分区和分项能量原理(1980),分区混合有限元(1982),样条有限元(1984),广义协调元(1987)和四边形面积坐标理论(1997)等,使有限元方法的分析能力和应用领域得到很大提升。



在专著方面,钱伟长于1980年出版的专著(变分法与有限元,北京:科学出版社,1980)和胡海昌于1981年出版的专著(弹性力学的变分原理及其应用,北京:科学出版社,1981)是变分原理与有限元法的两本经典之作。朱伯芳于1979年初版和1998年再版的专著(有限单元法原理与应用,北京:中国水利水电出版社,第1版1979,第2版1998)是兼备科学性和实用性的巨著。

第三个时期:有限单元法的广泛应用。自1970年开始,有限元法的理论迅速地发展起来,并广泛地应用于各种力学问题和非线性问题,成为分析大型、复杂工程结构的强有力手段。并且随着计算机的迅速发展,有限元法中人工是难以完成的大量计算工作能够由计算机来实现并快速地完成。因此,可以说计算机的发展很大程度上促进了有限元法的建立和发展。有限元法被迅速应用到各领域。

1.3 有限元软件开发与 CAD/CAE 技术

40多年来,有限单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、黏弹性、黏塑性和复合材料等。从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。在工程分析中的作用已从分析和校核,扩展到优化设计并和计算机辅助设计技术相结合。随着现代力学、计算数学和计算机技术等学科的发展,有限单元法作为一个具有巩固理论基础和广泛应用能力的数值分析工具,已经迅速扩展到其他领域,诸如化工、电子、热传导、磁场、建筑声学、流体动力学、医学(骨骼力学、血液力学、脑流)、耦合场(结构—热、流体—结构、静电—结构、声学—结构)等等。可以说:有分析就有有限元。

有限元方法是与工程应用密切结合的,是直接为产品设计服务的。因而随着有限元理论的发展与完善,以及电子计算机的快速运算能力和广泛应用,结构有限元分析与产品设计结合起来,形成产品分析、设计、制造一体化(CAD/CAM)。而且,自20世纪80年代开始,世界各国,特别是发达国家,都花费巨大的人力和物力开发有限元程序,各种大小、专用的、通用的有限元结构分析程序也大量涌现出来。比如:

(1) ANSYS

1969年,John Swanson博士建立了自己的公司Swanson Analysis Systems Inc(SASI)。其实早在1963年John Swanson博士任职于美国宾州匹兹堡西屋公司的太空核子实验室时,就已经为核子反应火箭作应力分析编写了一些计算加载温度和压力的结构应力和变位的程序,此程序当时命名为STASYS(Structural Analysis System)。在Swanson博士公司成立的次年,结合者早期的STASYS程序发布了商用软件ANSYS。1994年Swanson Analysis Systems, Inc.被TA Associates并购,并宣布了新的公司名称改为ANSYS。

ANSYS公司自1969年成立以来,不断吸取世界最先进的计算方法和计算机技术,引导世界有限元分析软件的发展,以其先进性、可靠性、开放性等特点,被全球工业界广泛认可,拥有全球最大的用户群。1995年,在分析设计类软件中第一个通过ISO9001国际质量体系认证。

ANSYS采用三维实体描述法建立几何模型,几十种图素库可以模拟任意复杂的几何



形状,强大的布尔运算实现模型的精雕细刻;提供多种网格划分方法,可以实现网格密度及形态的精确控制。具体划分方法有拉伸网格划分,智能自由网格划分,映射网格划分,自适应网格划分等。

ANSYS 可对结构进行静、动力线性和非线性分析、流体分析、热分析、电磁场分析、声学分析等。结构非线性分析包括几何非线性、材料非线性、状态非线性,单元非线性分析等。具有先进的优化功能、灵活快速的求解器、丰富的网格划分工具、与 CAD 及 CAE 软件的接口等功能。

强大的后处理功能可使用户很方便地获得分析结果,其形式包括彩色方图、等值面、梯度、动画显示、多种数据格式输出、结果排序检索及数学运算等。因此,ANSYS 软件被广泛应用于土木工程、机械、电子、交通、造船、水利、地矿、铁道、石油化工、航空航天、核工业等领域。

近年来,ANSYS 公司通过一连串的并购与自身壮大后,把其产品扩展为 ANSYS Mechanical 系列,ANSYS CFD (FLUENT/CFX) 系列,ANSYS ANSOFT 系列以及 ANSYS Workbench 和 EKM 等。由此 ANSYS 塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台,在结构分析、电磁场分析、流体动力学分析、多物理场、协同技术等方面都提供完善的解决方案。

(2) SAP

1963 年在加州大学 Berkeley 分校,Edward L. Wilson 教授和 Ray W. Clough 教授为了计算结构静力与动力分析而开发了 SMIS (Symbolic Matrix Interpretive System),其目的是为了弥补在传统手工计算方法和结构分析矩阵法之间的隔阂。

1969 年,Wilson 教授在第一代程序的基础上开发的第二代线性有限元分析程序,就是著名的 SAP (Structural analysis program),而非线性程序则为 NONSAP。经过 20 多年的不断发展、完善,成为一个在国际上普遍受欢迎的通用结构分析软件。

(3) MARC

MARC Analysis Research Corporation (简称 MARC) 始创于 1967 年,总部设在美国加州的 Palo Alto,是全球第一家非线性有限元软件公司。创始人是美国著名布朗大学应用力学系教授 Pedro Marcal。MARC 公司在创立之初便独具慧眼,瞄准非线性分析这一未来分析发展的必然,致力于非线性有限元技术的研究、非线性有限元软件的开发、销售和售后服务。对于学术研究机构,MARC 公司的一贯宗旨是提供高水准的 CAE 分析软件及其超强灵活的二次开发环境,支持大学和研究机构完成前沿课题研究。对于广阔的工业领域,MARC 软件提供先进的虚拟产品加工过程和运行过程的仿真功能,帮助市场决策者和工程设计人员进行产品优化和设计,解决从简单到复杂的工程应用问题。经过 30 余年的不懈努力,MARC 软件得到学术界和工业界的大力推崇和广泛应用,建立了它在全球非线性有限元软件行业的领导者地位。

虽然在 MARC 在 1999 年被 MSC 公司收购,但其对有限元软件的发展起到了决定性的推动作用,至今在 MSC 的分析体系中依然有着 MARC 程序的身影。



(4) NASTRAN

美国国家太空总署 NASA (National Aeronautics and Space administration, 国家航空和宇宙航行局), 当年美国为了能够在与苏联之间的太空竞赛中取得优胜而成立了 NASA。为了满足宇航工业对结构分析的迫切需求, NASA 于 1966 年提出了发展世界上第一套泛用型的有限元分析软件 Nastran (NASA STRuctural ANalysis Program) 的计划, MSC. Software 则参与了整个 Nastran 程序的开发过程。1969 年 NASA 推出了其第一个 NASTRAN 版本, 称为 COSMIC Nastran。之后 MSC 继续的改良 Nastran 程序并在 1971 年推出 MSC. Nastran。因为和 NASA 的特殊关系, NASTRAN (又名 MSC NASTRAN) 在航空航天领域有着崇高的地位。MSC. NASTRAN 是世界上功能最全面、应用最广泛的大型通用结构有限元分析软件之一, 同时也是工业标准的 FEA 原代码程序及国际合作和国际招标中工程分析和校验的首选工具, 可以解决各类结构的强度、刚度、屈曲、模态、动力学、热力学、非线性、声学、流体-结构耦合、气动弹性、超单元、惯性释放及结构优化等问题。通过 MSC. NASTRAN 的分析可确保各个零部件及整个系统在合理的环境下正常工作。此外, 程序还提供了开放式用户开发环境和 DMAP 语言, 及多种 CAD 接口, 以满足用户的特殊需要。

MSC 公司作为最早成立的 CAE 公司, 先后通过开发、并购, 已经把数个 CAE 程序集成到其分析体系中。目前 MSC 公司旗下拥有十几个产品, 如 Nastran、patran、Marc、Adams、Dytran 和 Easy 5 等, 覆盖了线性分析、非线性分析、显式非线性分析以及流体动力学问题和流场耦合问题。另外, MSC 公司还推出了多学科方案 (MD) 来把以上的诸多产品集成为了一个单一的框架解决多学科仿真问题。

(5) ABAQUS

ABAQUS 公司成立于 1978 年, 总部位于美国罗得岛州博塔市, 是世界知名的高级有限元分析软件公司, 其主要业务为非线性有限元分析软件 ABAQUS 的开发、维护及售后服务。ABAQUS 软件已被全球工业界广泛接受, 在技术、品质以及可靠性等方面具有非常卓越的声誉, 并拥有世界最大的非线性力学用户群, 是国际上最先进的大型通用非线性有限元分析软件。

ABAQUS 是一套功能强大的模拟工程问题的有限元软件, 可以分析复杂的力学、热学和材料学问题, 分析的范围从相对简单的线性分析到非常复杂的非线性分析, 特别是能够分析非常庞大的模型和模拟非线性问题。它包括一个十分丰富的、可模拟任意实际形状的单元库, 并与之对应拥有各种类型的材料模型库, 其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩有弹性的泡沫材料以及类似于土和岩石等地质材料。作为通用的模拟计算工具, ABAQUS 可以模拟各种领域的问题, 例如热传导、质量扩散、电子部件的热控制 (热电耦合分析)、声学分析、岩土力学分析 (流体渗透和应力耦合分析) 及压电介质分析。

另外, 20 世纪 70 年代中期, 大连理工大学研制出了 JEFIX 有限元软件, 航空工业部研制了 HAJIF 系列程序。80 年代中期, 北京大学的袁明武教授通过对国外 SAP 软件的移植和重大改造, 研制出了 SAP-84; 北京农业大学的李明瑞教授研发了 FEM 软件; 建筑科学研究院在国家“六五”攻关项目支持下, 研制完成了“BDP-建筑工程设计软件包”; 中国科学院开发了 FEPS、SEFEM; 航空工业总公司飞机结构多约束优化设计系统 YIDOYU 等



一批自主程序。

20 世纪 90 年代以来,大批国外 CAE 软件涌入国内市场,遍及国内的各个领域,国外的专家则深入到大学、院所、企业与工厂,展示他们的 CAE 技术、系统功能及使用技巧。因此使得国内自主研发 CAE 软件受到强烈打压,以至于在 20 世纪的最后十几年国内 CAE 自主创新的步伐已经非常缓慢,也逐渐拉开了与国外 CAE 软件的距离。

1.4 有限元方法及相关软件计算分析的作用

基于功能完善的有限元分析软件和高性能的计算机硬件对设计的结构进行详细的力学分析,以获得尽可能真实的结构受力信息,就可以在设计阶段对可能出现的各种问题进行安全评判和设计参数修改。据有关资料,一个新产品的问題有 60% 以上可以在设计阶段消除,甚至有的结构的施工过程也需要进行精细的设计,要做到这一点,就需要类似有限元分析这样的分析手段。

例如,大家熟知的土木建筑工程领域中,北京奥运场馆的鸟巢由纵横交错的钢质杆件组成,它是鸟巢设计核心部分(图 1.3),也是鸟巢建设中最艰难的。看似轻灵的杆件总重达 42000 t。其中,顶盖以及周边悬空部位重量为 14000 t。在施工时,采用了 78 根支柱进行支撑。在钢结构焊接完成后,需要将其缓慢而又平稳地卸去,让鸟巢变成完全靠自身结构支撑。因而,支撑塔架的卸载,实际上就是对整个钢结构的加载,如何卸载需要进行非常详细的数值化分析,以确定出最佳的卸载方案。2006 年 9 月 17 日成功地完成了整体钢结构施工的最后卸载。

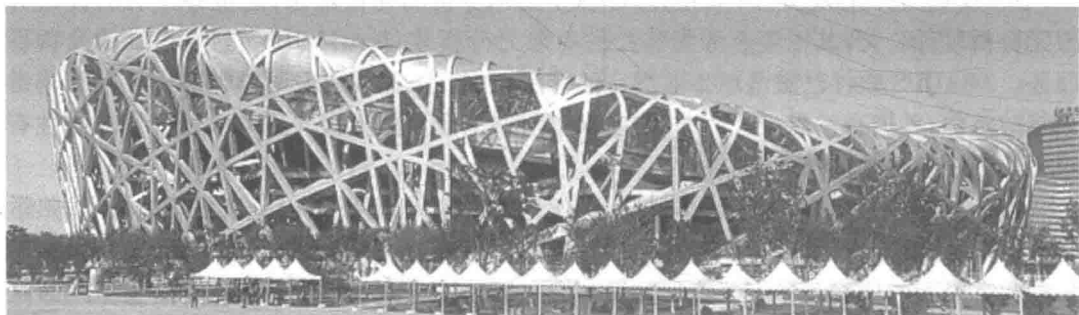


图 1.3 北京鸟巢钢结构

1.5 本书内容安排与特点

前已提及,有限单元法是一种数值解,可总结如下特点:

(1) 物理概念清晰。有限单元法一开始就从力学角度进行推导(平衡、几何、物理方程)研究,使初学者易于入门。

(2) 可以从不同的理论得出相同的有限元法结果。例如,可以从通俗易懂的结构力学方法出发,阐述其基本原理和公式的推导,也可利用变分原理为其建立起严格的数学解

释。如熟知的平面杆系单元刚度矩阵,可从转角位移方程出发获得单刚的每列元素。在左端单位水平位移和单位竖向位移单独作用下的杆端力便构成了单刚的第一、二列(图1.4)。

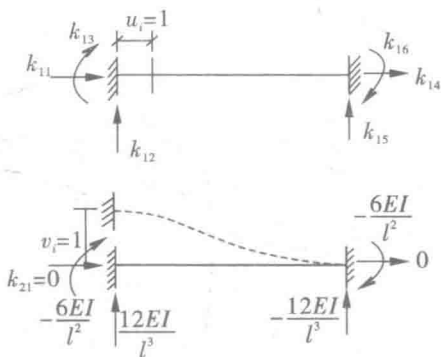


图 1.4 平面杆系单元

$$[K]^e = \begin{matrix} \begin{matrix} U_1 = 1 & V_1 = 1 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & \dots \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \dots \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \dots \\ -\frac{EA}{l} & 0 & \dots \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \dots \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \dots \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(3)有极强的灵活性与适用性,可以适应一切连续介质和场问题。

(4)采用矩阵表达式、适应计算机编程。

但是,对从事应用科学的人员来说,有限元法是与电子计算机联系在一起的,有一点是清楚的,离开计算机谈有限元,对我们从事工程专业的人来说恐怕意义不大。因此,本课程的内容安排是通过学习有限元的基本原理和方法,学会编写计算机程序来解决结构工程中的力学分析问题。本课程学习包括三个方面:力学原理、数学方法和计算机程序设计等几个方面,诸方面互相结合才能形成这一完整的分析方法。

由于计算机的普及,有限元的应用已越来越广泛。在结构工程领域,大部分需要借助计算机来完成的,而要用计算机解决的问题,绝大部分与有限元有关。

第 2 章 有限单元法理论基础

在工程和科技领域内,对于许多力学问题和物理问题,人们可以给出它们的数学模型,即应遵循的基本方程(常微分方程或偏微分方程)和相应的定解条件。但能用解析方法求出精确解的只是少数方程性质比较简单,且几何形状相当规则的情况。例如在材料力学和结构力学学习中,我们讨论了简单杆件及杆系结构的强度计算问题。那都是属于古典力学的范畴。在平面假设的条件下,所得到的解是精确的。而对于大多数问题,由于方程的非线性性质,或由于求解域的几何形状比较复杂,则只能采用数值方法求解。例如在弹性力学学习中,由于取消了平面假设,使问题变得复杂化了。对于我们所讨论的问题,能找到精确的解是非常有限的。而更多的问题是我们无法找到它的精确解(或严格叫解析解),只能采用数值方法求解。

工程结构大致可分为两类,一类是离散结构(例如桁架结构),一类是连续体结构(例如板壳结构)。材料力学(结构力学)主要解决的是简单的离散结构问题,弹性力学主要解决连续体结构问题。本章首先讨论了离散结构方面材料力学与有限元的矩阵位移法求解过程分析比较,其次讨论了连续体结构方面弹性力学平面问题与有限元方法的求解过程分析比较。从而,可以为基础力学理论知识与有限元理论之间起到较好的过渡、衔接作用,也能够更好地理解有限元方法理论及求解过程。

2.1 有限单元法力学理论基础概述

力学是研究力对物体的效应的一门学科。力对物体的效应有两种:一种是引起物体运动状态的变化,称为外效应;另一种是引起物体的变形,称为内效应。大学基础力学课程中,材料力学研究力的内效应,即物体的变形和破坏规律。材料力学主要研究物体受力后发生的变形、由于变形而产生的内力以及物体由此而产生的失效和控制失效的准则。然而,在大多数工程实际中的各种结构或机械都是由许多杆件或零部件组成。这些杆件或零部件统称为构件。工程上构件的几何形状也是各种各样的,可分为杆件、板(或壳)、实体。材料力学主要的研究对象是杆状构件。材料力学的任务,就是在分析构件内力和变形的基础上,给出合理的构件计算准则,满足既安全又经济的工程设计要求,并为后续课程如结构力学、弹性力学和复合材料力学等提供必要的理论基础。

弹性力学又称弹性理论,是固体力学的一个分支学科。它是研究可变形固体在外部因素(力、温度变化、约束变动等)作用下所产生的应力、应变和位移的经典学科。确定弹性体的各质点应力、应变、位移,其目的就是确定构件设计中的强度和刚度指标,以此来解决实际工程结构中的强度、刚度和稳定性问题。弹性力学具体的研究对象主要为梁、柱、