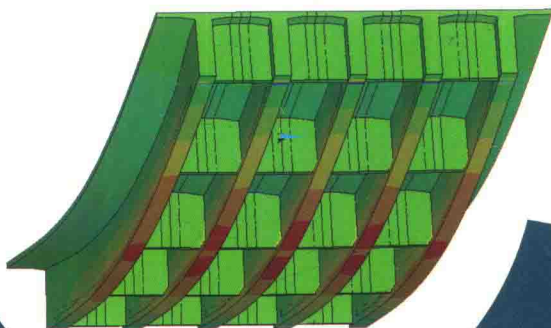


普通高等学校规划教材

Basic Principle of
Structural Finite Element Method and
its Realization in ANSYS

结构有限元基本原理 及ANSYS实现



郭增伟 王小松 邵亚会 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

普通高等学校规划教材

结构有限元基本原理 及 ANSYS 实现

郭增伟 王小松 邵亚会 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书主要介绍了有限元方法的力学原理、土木工程结构建模和分析方法。鉴于 ANSYS 软件在国内的教学、科研和生产中应用较为广泛,本书较为系统地介绍了 ANSYS 软件的基本操作及有限元基本原理在 ANSYS 中的实现方式,给出的典型实例都附有 ANSYS 实现过程,以典型算例为载体,通过计算精度影响因素的讨论,更为直观地展示了有限元分析中应特别关注的细节。

本书适合于高等理工院校土木工程专业本科、研究生及教师使用,也可供从事相关领域科学研究的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构有限元基本原理及 ANSYS 实现 / 郭增伟, 王小松,
邵亚会编著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司,
2019. 7

ISBN 978-7-114-15582-6

I. ①结… II. ①郭… ②王… ③邵… III. ①土木工
程—有限元分析—应用软件 IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 111508 号

书 名: 结构有限元基本原理及 ANSYS 实现

著 者: 郭增伟 王小松 邵亚会

责任编辑: 周 凯 郭红蕊

责任校对: 赵媛媛

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 13

字 数: 319 千

版 次: 2019 年 7 月 第 1 版

印 次: 2019 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15582-6

定 价: 39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

有限元分析已成为土木工程教学、科研、生产中重要而又普及的数值分析方法,目前有限元分析技术和软件已相对成熟,工程应用中无需用户自己编写基础代码,仅需掌握软件的基本操作及建模流程。然而我们在多年的有限元法及其应用的教学实践和软件使用过程中发现:部分软件使用者缺乏对有限元基本原理的了解,出现单元选择、网格划分、边界条件设置等方面的诸多问题。为提高工程技术人员有限元分析的能力,本教材较为系统地介绍了有限元基本原理、建模方法和软件应用,以“原理”引导学生学习掌握软件基本操作,加强学生对软件参数的理解。

有限元建模分析过程离不开对土木工程结构受力行为的深刻认识及合理简化,本教材详细介绍了土木工程结构的力学描述方法、工程结构的基本构件及其受力特征,借此引导学生深刻理解土木工程结构的简化方法。为实现新工科建设中提倡的“在使用中学习,在学习中使用”的重实践教学的目标,在介绍每一种单元的同时,提供典型实例的 ANSYS 实现过程,使学生在分析原理的同时,配合学习有限元分析软件的操作方法,经历实例建模、求解、分析和结果评判的全过程,在实践中深刻理解和掌握有限元分析方法。

本教材共分为 8 章,第 1 章介绍了有限元分析的基本过程、力学原理和发展历程,引导学生思考技术进步的外在需求和内驱动力;第 2 章和第 3 章介绍了离散杆系结构和平面问题的有限元力学原理和分析方法,通过杆系结构矩阵位移法和有限元法的对比分析引导学生思考并掌握有限元的力学原理和本质;第 4 章上承有限元基本理论,下接 ANSYS 软件应用,先后介绍了土木工程结构的力学描述方法、工程结构的基本构件及其受力特征、有限元分析的一般过程和计算误差讨论,引导学生深刻理解并掌握土木工程结构的简化方法和有限元分析的一般过程;第 5 章系统介绍了 ANSYS 软件的操作界面、文件系统、通用操作方法,引导学生系统了解 ANSYS 软件的常用操作;第 6~8 章以经典算例为引,系统介绍了 ANSYS 建模、求解、分析和结果评判的全过程,针对算例建模过程中的关键环节,详细介绍了坐标系、工作平面、布尔运算、网格划分技巧的相关操作,并讨论了单元形函数、单元阶次、网格类型、网格形状对计算结果的影响,引导学生思考在 ANSYS 建模和分析中如何结合有限元基本原理提高分析精度。

本教材由重庆交通大学和合肥工业大学多位从事结构分析和承担有限元法

及其应用教学的教师共同编写,其中第1、2、4、5、6章由重庆交通大学郭增伟负责编写,第3、7章由重庆交通大学王小松负责编写,第8章由合肥工业大学邵亚会负责编写,全书由重庆交通大学郭增伟统稿并完成最终的文字整理工作。另外,重庆交通大学硕士研究生韩玉青、冉洪键、徐华等参与整理了书中部分算例和插图,在此深表感谢。

在教材编写过程中,作者查阅了不少参考文献,如在参考文献中未给予标注引用,在此深表歉意。

由于作者的水平有限,所写的教材难免存在一定不足或疏漏,敬请读者批评指正。

编著者

2019年1月

目 录

第1章 概述	1
1.1 有限单元法概念及基本思路	1
1.2 有限元发展历程	3
1.3 有限元分析基本过程	9
1.4 有限元软件介绍	10
本章参考文献	14
第2章 杆系结构有限单元法	15
2.1 杆件受力变形	15
2.2 单元分析	19
2.3 整体分析	24
2.4 结构位移和内力计算	28
2.5 矩阵位移法和杆系结构有限元法的异同	30
本章参考文献	32
第3章 平面问题有限元法	33
3.1 平面问题概述	33
3.2 平面问题的离散化	35
3.3 单元分析:以3节点三角形单元为例	36
3.4 整体分析	48
3.5 计算结果的整理	48
本章参考文献	50
第4章 土木工程结构的有限元模拟方法	51
4.1 土木工程结构力学描述方法	51
4.2 工程结构的基本构件及其受力特征	52
4.3 有限元分析的一般过程	55
4.4 几何模型的建模原则	57
4.5 单元类型的选取及特性的定义	59
4.6 有限元分析误差和计算精度	67
本章参考文献	71
第5章 ANSYS 基本操作	72
5.1 ANSYS 简介	72
5.2 ANSYS 图形用户界面	74

5.3	ANSYS 中的文件系统	84
5.4	ANSYS 中的量纲	86
5.5	ANSYS 中的选择操作	86
5.6	ANSYS 中的结果展示	88
5.7	建模流程	93
5.8	ANSYS 中两种建模方式	94
	本章参考文献	95
第 6 章	杆系结构的 ANSYS 建模分析	97
6.1	ANSYS 中杆系单元简介	97
6.2	算例:平面框架	103
6.3	算例:三铰拱	125
	本章参考文献	132
第 7 章	平面问题的 ANSYS 建模分析	133
7.1	ANSYS 中平面单元简介	133
7.2	网格划分技巧	136
7.3	网格划分质量	144
7.4	算例:简支梁	147
7.5	简支梁计算精度的讨论	154
7.6	算例:环形荷载箱	159
	本章参考文献	167
第 8 章	实体结构的 ANSYS 建模分析	168
8.1	ANSYS 中实体单元简介	168
8.2	坐标系	168
8.3	工作平面	172
8.4	布尔运算	174
8.5	自上而下建模的基本流程	183
8.6	算例:简支箱梁桥	185
8.7	算例:轴承底座	193
	本章参考文献	200

1.1 有限单元法概念及基本思路

1960年,加州大学伯克利分校的 Ray William Clough 教授在美国土木工程学会(ASCE)的会议上,发表了一篇名为《The Finite Element in Plane Stress Analysis》的论文,文中首次正式提出了有限元法(Finite Element Method)的学术命名,这被认为是有限单元法的起源。所谓有限单元法,是将一个连续系统(物体)分隔成有限个单元,对每一个单元给出一个近似解,再将所有单元按照一定的方式进行组合,来模拟或者逼近原来的系统或物体,从而将一个连续的无限自由度问题简化成一个离散的有限自由度问题分析求解的一种数值分析方法。

有限单元法的基本思想是,在力学模型上将一个原来连续的物体离散成为有限个具有一定大小的单元,这些单元仅在有限个节点上相连接(这也就是“有限元”一词的由来),并在节点上引进等效力以代替实际作用于单元上的外力。对于每个单元,根据分块近似的思想,选择一种简单的函数来表示单元内位移的分布规律,并按弹性理论中的能量原理(或用变分原理)建立单元节点力和节点位移之间的关系。最后,把所有单元的这种关系式集合起来,就得到一组以节点位移为未知量的代数方程组,求解这些方程组就可以求出物体上有限个离散节点上的位移。

下面用自重作用下的等截面直杆来说明有限元的基本思路。

受自重作用的等截面直杆如图 1-1 所示,杆的长度为 L ,横截面面积为 A ,弹性模量为 E ,均布荷载集度为 q ,试求杆的位移、应力和应变分布。

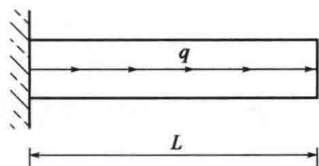


图 1-1 受均布轴向荷载作用的等截面直杆

1) 弹性力学法解答

杆件轴力:

$$N(x) = q(L - x) \quad (1-1)$$

杆件位移场:

$$du(x) = \frac{N(x)dx}{EA} = \frac{q(L - x)dx}{EA} \quad (1-2)$$

杆件应变场:

$$\varepsilon(x) = \frac{du}{dx} = \frac{q}{EA}(L-x) \quad (1-3)$$

杆件应力场:

$$\sigma(x) = E\varepsilon(x) = \frac{q}{A}(L-x) \quad (1-4)$$

2) 有限元法解答

(1) 结构离散化

如图 1-2 所示, 将直杆等分为 2 个有限段, 有限段之间通过一个连接点连接, 称为节点, 每个有限段称为单元, 2 个单元长度为 $L/2$ 。

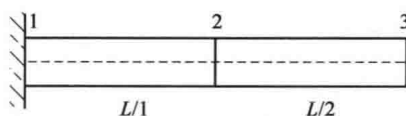


图 1-2 离散后的直杆

(2) 单元分析

以 1 号单元为例, 用单元节点位移表示单元内部位移, 假设单元内部轴向位移 $u(x)$ 为线性函数:

$$u(x) = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{L/2}(x - x_1) \quad (1-5)$$

式中: u_1, u_2 ——1 号和 2 号节点的位移;

x_1 ——1 号节点的坐标, 则:

1 号单元应变:

$$\varepsilon_1 = \frac{u_2 - u_1}{L/2} \quad (1-6)$$

1 号单元应力:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 = \frac{E(u_2 - u_1)}{L/2} \quad (1-7)$$

1 号单元轴力:

$$N_1 = \sigma_1 A = \frac{EA(u_2 - u_1)}{L/2} \quad (1-8)$$

(3) 整体分析

把 1 号单元和 2 号单元所受均布荷载集中于三个节点上, 则 1 号节点上节点荷载为 1 号单元所受荷载的一半 ($qL/4$), 2 号节点上节点荷载为 1 号单元和 2 号单元所受荷载之和的一半 ($qL/2$), 3 号节点上节点荷载为 2 号单元所受荷载的一半 ($qL/4$)。

对于 1、2、3 号节点, 力的平衡方程可表示为:

$$N_1 = qL/4 - N_x \quad (1-9)$$

$$N_2 - N_1 = qL/2 \quad (1-10)$$

$$N_3 = qL/4 \quad (1-11)$$

将单元轴力使用节点位移表达并带入式(1-9)~式(1-11)即可得到以下方程组:

$$\begin{cases} u_2 - u_1 = \frac{qL^2}{8EA} \\ -u_1 + 2u_2 - u_3 = \frac{qL^2}{4EA} \\ u_3 - u_2 = -\frac{qL^2}{8EA} \end{cases} \quad (1-12)$$

引入边界条件 $u_1 = 0$ 后,即可求解平衡方程组获得节点位移及单元轴力。

1.2 有限元发展历程

大约在三百年前,牛顿和莱布尼茨发明了积分法,证明了该运算具有整体对局部的可加性。积分运算是对定义域的无限划分,而有限元则是对定义域的有限划分,虽然两者划分方式不同,但积分运算为有限元的实现奠定了第一个理论基础。

在牛顿之后约一百年,著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的高斯消元法。加权余量法和之后拉格朗日提出的泛函数分析可用来将微分方程改写为积分形式,避免了微分方程组的求解。而高斯消元法则为有限元整体平衡方程的求解提供了数学工具。

在19世纪末及20世纪初,数学家瑞雷和里兹首先提出了在全定义域内运用展开函数来表达该域内的未知函数。1915年,数学家伽辽金提出了可以人为定义展开函数的伽辽金法,该方法被广泛地用于有限元。1943年,数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数,这实际就是有限元的做法。

至此,有限元技术的第二个理论基础也已确立。

1.2.1 有限元法的诞生

每一项新技术的推出都是由于时代的迫切需要,而新技术出现后也需要经历时间的重重考验。在20世纪40年代,由于航空事业的快速发展,人们对飞机内部结构设计提出了越来越高的要求,即重量轻、强度高、刚度好,因此人们不得不进行精确的设计和计算。正是在这一背景下,有限元分析方法逐渐发展起来。

早期一些成功的实验求解方法与专题论文,全部或部分内容对有限元技术的产生作出了贡献,首先应用数学界第一篇有限元论文是1943年美国纽约大学 Richard Courant 教授(图1-3)发表的《Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration》,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。

20世纪50年代,飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组,将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析,希望通过离散单元的求解逼近整个连续体系的真实解,经过一番波折后才获得成功。

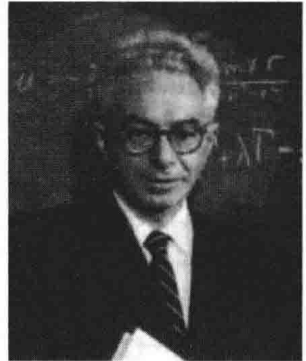


图1-3 Richard Courant

1956年, M. Jone Turner (波音公司工程师)、Ray William Clough (土木工程教授)(图1-4)、H. C. Martin (航空工程教授)及 L. J. Topp (波音公司工程师)等四位共同在航空科技期刊上发表了一篇采用有限元技术计算飞机机翼强度的论文,名为《Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures》,文中把这种解法称为“直接刚度法”,一般认为这是工程学上有限元法的开端。

1960年, Clough 教授在美国土木工程学会 (ASCE) 的计算机会议上,发表了一篇名为《The Finite Element in Plane Stress Analysis》的论文,将应用范围扩展到飞机以外的土木工程



图 1-4 Ray William Clough

上,同时有限元法(Finite Element Method)的名称也第一次被正式提出。

下面通过 Clough 教授在欧洲第一届计算力学会议(European Conference on Computational Mechanics, ECCM'99)上的演讲,回顾那段属于有限单元法的青葱岁月^[1]:

“我很高兴参加 ECCM'99。正如 Wunderlich 博士邀请我参加时我告诉他的,我的确已经不能为计算力学领域做任何技术贡献。然而,我已经在这个被称为有限元方法(FEM)的领域积极工作了超过 45 年,包括研究生教学和我退休后 12 年的咨询工作。咨询重点绝大多数集中在混凝土大坝——特别是混凝土拱坝的地震行为。

“我与 FEM 结缘是在 1952 年夏天,我被西雅图波音飞机公司聘请为他们 Summer Faculty 项目的成员,那时我已经在 1949 年加入 Berkeley 土木系。由于波音 Summer Faculty 项目提供了结构动力学小组的位置,我抓住了这个最好机会,作为我在地震工程领域发展的准备。我很幸运地选择了波音公司的那次夏季工作机会,因为他们结构动力学小组的领导人是 M. Jone Turner 先生——一个在处理结构振动与颤振问题方面非常有能力的人。

“当我在 1952 年夏天参加项目的时候,Turner 让我从事一种 Delta 机翼结构的振动分析工作。由于它是三角平面形状,这个问题不能用基于标准梁理论的方法解决;于是我花了一个夏天的时间来建立由一维梁与桁架组拼成的一个 Delta 机翼模型。然而基于这种类型的数学模型得到的变形分析结果与 Delta 机翼比例模型试验数据吻合很差。我最后的结论是,我一个夏天的工作是一个彻底的失败。然而,至少我知道了什么是不可行的。受这次失败挫折的刺激,我决定重新回到波音公司参加 1953 年的夏季 Faculty 项目。在冬季期间,我和 Turner 一直保持联系,这样我能够重新参加 6 月的结构动力学小组。冬季期间最重要的进展是,Turner 建议我尝试通过组装三角或矩形形状的平面应力小块来建立机翼的刚度特性列式,但我认为三角形形状会更实用,因为这样一种小块可以组拼近似任意结构形状。况且,单个三角块的刚度特性可以在假定 X 与 Y 方向主应力的均匀分布结合剪应力均匀分布状态的基础上很容易计算,于是整个结构的刚度由单个子块的贡献相应叠加得到。波音小组称这种方法为直接刚度法。1953 年夏天的全部时间都花在了如何使用三角形单元组装成整体结构并组集、求解方程组,经过一段时间的努力完成了相关求解,发现变形计算结果和实际结构的实验室测量结果非常吻合,且计算结果的精度可以通过连续细分有限元网格渐进提高。那个夏天工作得到的结论由 Turner 发表在 1954 年 1 月的 Institute of Aeronautical Sciences 年度会议上。然而至今我仍不明白为什么 Turner 直到许多月以后才把这篇论文拿去发表。因此,这篇被认为是有限元第一篇论文的文章直到 1956 年 9 月才发表^[1]——在它被口头提出两年多后。

“值得强调的是,Turner 的结构动力学小组做这个工作的基本目的是为了振动和颤振分析。他们并不关心应力分析,因为那是应力分析小组的任务。然而,很显然的是通过直接刚度法建立的模型除了用于振动分析,同样可以用于应力分析。因此我计划一旦可能,马上调查它在应力分析中的应用。然而当时我有其他研究任务,无法抽出有用的时间在应力分析问题上,直到 1956 年 9 月我申请到挪威 Trondheim 休假。当我到达挪威时,我能做的只是拟订了一个研究方案,并且用一台台式计算器计算一些很小的系统,因为挪威理工学院那时还

没有一台自动电子计算机。

“在 Institute of Aeronautical Sciences 上发表的那篇文章^[1]第一次向技术人员引入了有限元的原理,很短时间后这种方法的一些基本概念在 1954 年 8 月到 1955 年 5 月期间被 John H. Argyris 博士(图 1-5)在 Aircraft Engineering 发表的一系列论文引用^[2]。然而,这些论文中所提及的矩形单元对有限元理论的贡献并不大。我在挪威的休假期间,Argyris 博士的研究工作吸引了我的注意,我认为 Argyris 博士在有限单元法方面的研究工作和一系列论文是结构力学领域最重要成果。也正是这些研究工作把我对结构理论的理解扩展到它最终达到的层次。

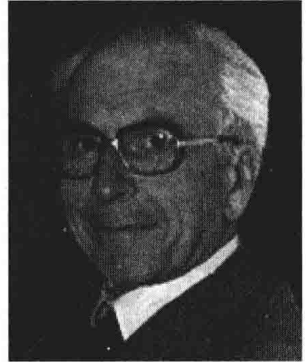


图 1-5 John H. Argyris

“根据我个人的观点,有限元历史上另一个重要事件是创造了有限元(FEM)这个名字。我选择这个名字的目的是为了将组成有限元整体的尺寸相对较大的结构小块,与在结构位移计算典型虚功分析中的无穷小量明确区分,这个名字最早出现在一篇向土木工程界演示有限元方法的文章中。这个方法的一个更重要的应用发表在 1962 年在波兰 Lisbon 的一个有关计算机在土木工程中的应用的会议上^[3],它用有限元对一个已经在中截面开裂的重力大坝进行应力集中分析。

“近年来,我所接触的有限元研究工作主要是我的博士生开展的论文研究,而我在有限元领域所做的贡献仅是如文献[5-6]的回顾性论文以及你所看到的这篇文章。”

1.2.2 有限元法的探索起源期

有限元法概念的提出,引出了美国加州大学伯克利分校有限元技术研究小组最为辉煌的十年历程。

1963 年,在加州大学伯克利分校,Edward L. Wilson 教授和 Ray William Clough 教授为了讲解结构静力与动力分析而开发了 SMIS(Symbolic Matrix Interpretive System),其目的是为了消除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。

Wilson 教授的学生 Ashraf Habibullah 于 1978 年创建了 Computer and Structures Inc.(CSI),CSI 的大部分技术开发人员都是 Wilson 教授的学生,并且 Wilson 教授也是 CSI 的高级技术发展顾问。而 SAP2000 则是由 CSI 在 SAP5、SAP80、SAP90 的基础上开发研制的通用结构分析与设计软件。

同样是 1963 年,Richard MacNeal 博士和 Robert Schwendler 先生联手创办了 MSC 公司,并开发了第一个软件程序,名为 SADSAM(Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods),即数字仿真模拟法结构分析。

提到 MSC 公司,就不得不提及与之有着不解渊源的美国国家太空总署(NASA),当年美国为了能够在与苏联的太空竞赛中取胜而成立了 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 推出了第一个 NASTRAN 版本,即 COSMIC Nastran。之后,MSC 继续改良 Nastran 程序并在 1971 年推出了 MSC. Nastran。

另一个与 NASA 结缘的是 SDRC 公司,1967 年在 NASA 的支持下 SDRC 公司成立,并于 1968 年发布了世界上第一个动力学测试及模态分析软件包,1971 年推出商业用有限元分析软件 Supertab(后并入 I-DEAS 软件中,这也就是为什么 I-DEAS 作为一款设计软件其有限元分析如此强大的原因)。

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 博士任职于美国宾夕法尼亚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做应力分析并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,此程序当时被命名为 STASYS(Structural Analysis System)。在 Swanson 博士公司成立的次年,结合早期的 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。

1.2.3 有限元法的蓬勃发展期

进入 20 世纪 70 年代后,随着有限元理论趋于成熟,CAE 技术也逐渐进入了蓬勃发展的时期,一方面 MSC、ANSYS、SDRC 三大 CAE 公司先后组建,并且致力于大型商用 CAE 软件的研究与开发;另一方面,更多的新的 CAE 软件迅速出现,为 CAE 市场的繁荣注入了新鲜血液。

20 世纪 70 年代初,当时任教于 Brown 大学的 Pedro Marcal 创建了 MARC 公司,并推出了第一个商业非线性有限元程序 MARC。虽然 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 MSC 的分析体系中依然有着 MARC 程序的身影,更值得一提的是 Pedro Marcal 早年也是毕业于伯克利分校。

在早期的商用软件舞台上,还有两位重要人物,他们是 David Hibbitt 和 Klaus J. Bathe。David Hibbitt 是 Pedro Marcal 在 Brown 的博士生,David Hibbitt 与 Pedro Marcal 合作到 1972 年,随后 Hibbitt 与 Bengt Karlsson 和 Paul Sorenson 于 1978 年共同建立 HKS 公司,推出了 ABAQUS 软件,使 ABAQUS 商业软件进入市场。因为该程序是能够引导研究人员增加用户单元和材料模型的早期有限元程序之一,所以它对软件行业带来了实质性的冲击。2002 年, HKS 公司改名为 ABAQUS,并于 2005 年被达索公司收购。

另外一位对有限元方法作出重大贡献的是 Klaus J. Bathe 博士。Klaus J. Bathe 20 世纪 60 年代末在伯克利分校 Clough 和 Wilson 博士的指导下攻读博士学位,从事结构动力学求解算法和计算系统的研究。由于 Bathe 博士对结构计算以及 SAP 软件所做的贡献,Bathe 博士毕业后被 MIT 聘请到机械与力学学院任教。

1975 年,于 MIT 任教的 Bathe 博士在 NONSAP 的基础上发表了著名的非线性求解器 ADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis),而在 1986 年 ADINA R&D Inc. 成立以前,ADINA 软件的源代码是公开的,即著名的 ADINA81 版和 ADINA84 版本的 Fortran 源程序,后期很多有限元软件都是根据这个源程序所编写的。

1977 年,Mechanical Dynamics Inc. (MDI)公司成立,致力于发展机械系统仿真软件,其软件 ADAMS 用于机械系统运动学、动力学仿真分析。后被 MSC 公司收购,成为 MSC 分析体系中一个重要的组成部分。

在 CAE 的历史中,另一个神奇的程序是显式有限元程序 DYNA,DYNA 程序由当时在美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 John Hallquist 编写。之所以说 DYNA 神奇,是因为在现在我们熟知的众多软件中,都可以发现 DYNA 的踪迹,因此 LS-DYNA 系列也被公认为是显

式有限元程序的鼻祖。下面我们来细数一下由 DYNA 所演变出来的有限元程序：

在 20 世纪 80 年代, DYNA 程序首先被法国 ESI 公司商业化, 命名为 PAM-CRASH, 现已成为 ESI 的明星产品。除此之外, ESI 公司还有多个被人熟知的软件, 如铸造软件 ProCAST、钣金软件 PAM-STAMP、焊接软件 SYSWELD、振动噪声软件 VA One、空气动力学软件 CFDFASTRAN、多物理场软件 CFD-ACE + 等等。

1988 年, John Hallquist 创建了 LSTC (Livermore Software Technology Corporation) 公司, 发行和扩展 DYNA 程序商业化版本 LS-DYNA。

同样是 1988 年, MSC 在 DYNA3D 的框架下开发了 MSC. Dyna 并于 1990 年发布了第一个版本, 随后于 1993 年发布了著名的 MSC. Dytran。

另外, ANSYS 收购了 Century Dynamics 公司, 把该公司以 DYNA 程序开发的高速瞬态动力分析软件 AUTODYN 纳入 ANSYS 的分析体系中。并且在 1996 年, ANSYS 与 LSCT 公司合作推出了 ANSYS/LS-DYNA。

1984 年, ALGOR 公司成立, 总部位于宾夕法尼亚州的匹兹堡, ALGOR 公司在购买 SAP5 源程序和 Vizicad 图像处理软件后, 同年推出 ALGOR FEAS (Finite Element Analysis System)。

随着有限元技术的日趋成熟, 市场上不断有新的公司成立并推出 CAE 软件, 1983 年 AAC 公司成立, 推出 COMET 程序, 主要用于噪声及结构噪声优化分析等领域。随后, Computer Aided Design Software Inc. 推出提供线性静态、动态及热分析的 PolyFEM 软件包。1988 年, Flomerics 公司成立, 提供用于空气流及热传递的分析程序。同时期还有多家专业性软件公司投入专业 CAE 程序的开发。由此, CAE 的分析已经逐渐扩展到了声学、热传导以及流体等更多的领域。

在早期有限元技术刚刚提出时, 其应用范围仅限于航空航天领域, 且研究的对象也只局限在线性问题与静力分析。而经过近十年的发展研究, 有限元技术的应用范围已经囊括了力学、热、流体、电磁这四大自然界基本物理场, 并且已经发展到多场耦合技术。可以说, 有限元技术经过十年的研究发展, 其应用范围与研究对象发生了翻天覆地的变化。

1.2.4 有限元法的成熟壮大期

20 世纪 90 年代至今是 CAE 技术的成熟壮大时期, 这一时期的 CAE 领域呈现出了“大鱼吃小鱼”的市场局面, 大的软件公司为了提升自己的分析技术、拓宽自己的应用范围而寻找机会收购、并购小的、专业的软件商, 因此, CAE 软件本身的功能得到了极大提升。

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。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), 以将上述诸多产品集成为一个单一的框架解决多学科仿真问题。

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了完善的解决方案。

SDRC 将其有限元程序 Supertab 并入到 I-DEAS 中, 并加入耐用性、NVH、优化与灵敏度、电子系统冷却、热分析等技术, 且将有限元技术与实验技术有机地结合起来, 开发了实验信

号处理、实验与分析相关等分析能力。在 2001 年 SDRC 公司被 EDS 所收购,并将其与 UGS 合并重组后,SDRC 的有限元分析程序也演变成了 NX 中的 I-deas NX Simulation,与 NX Nastran 一起成为 NX 产品生命周期中仿真分析的重要组成部分。

说到 NX Nastran,大家都会想到另一个以 Nastran 为名的有限元软件 MSC. Nastran。MSC. Nastran 与 NX Nastran 可谓是同根同源,皆是由 NASA 推出的 Nastran 程序的源代码发展出来的。下面我们简单介绍下 MSC. Nastran 与 NX Nastran 的由来:

在当时开发 Nastran 程序的不止 MSC 一家公司,还有另外两家公司也推出了 Nastran 程序的商业版,1972 年 UAI 公司发布基于 COSMIC NASTRAN 的 UAI Nastran 软件,1985 年 CSAR 公司发布了基于 COSMIC NASTRAN 的 CSAR Nastran 软件。

而在 1999 年,MSC 收购了 UAI 和 CSAR,成为市场上唯一一家提供 Nastran 商业代码的供应商。而在此后的几年,独自享有源代码的 MSC Nastran 软件价格不断上涨,但是其功能和服务却没有得到相应的提升,从而引发大量客户的抱怨,为此 NASA 则向美国联邦贸易委员会(FTC)提出了申诉。

美国 FTC 判 MSC Nastran 垄断,MSC Nastran 源代码须公开,而这一决定也引来了 UGS 公司加入到 Nastran 的市场中来。而后,UGS 根据 MSC 所提供的源代码、测试案例、开发工具和其他技术资源开发出了 NX Nastran。至此,源于 NASA 的 Nastran 一分为二,齐头并进,为用户带来了更多的新技术与服务。

进入 21 世纪后,早期的三大软件商 MSC、ANSYS、SDRC 的命运各不相同;SDRC 被 EDS 收购后与 UGS 进行了重组,其产品 I-DEAS 已经逐渐淡出了人们的视线;MSC 自从 Nastran 被反垄断拆分后一蹶不振,2009 年 7 月被风投公司 STG 收购,前途至今还不明朗;而 ANSYS 则是三大软件商中最为强劲的一支,收购了 Fluent、CFX、Ansoft 等众多知名厂商后,逐渐塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台。

而在 CAE 市场的其他厂商也发生了不少的并购和重组,一些新近的厂商也在逐渐崭露头角。如并入达索 SIMULIA 的 ABAQUS,自然也是希望如 SolidWorks 一样借助达索的强劲在 CAE 市场中打出一片天地;以前后处理而进入 CAE 领域的 Altair 公司,其 Hypermesh 软件自诞生之日起就备受业界的关注,而围绕前后处理建立起来的 Hyper Works 软件,也成为现在市场上很有竞争力的软件,近几年来收入也持续上涨;LMS 也是一个比较有特点的 CAE 软件公司,其软件的分析集 1D、3D、“试验”于一身,不仅可以加速虚拟仿真,还能使仿真结果更为准确可靠;COMSOL 则是以多物理场耦合仿真开辟出了一片新天地,为其发展、更为 CAE 技术的发展拨开迷雾。

另外,在市场中占有一定份额的还有如前后处理软件 ANSA、Truegrid,流体仿真软件 Fluent(被 ANSYS 收购)、CFX(被 ANSYS 收购)、Phoenics、NUMECA、Star-CD,铸造仿真软件 ProCAST、FLOW-3D、MAGMA SOFT 等一批专业 CAE 分析软件。

1.2.5 国内有限元法的发展之路

我国的力学工作者为有限元方法的初期发展作出了许多贡献,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)。遗憾的是由于当时环境所致,我国有限元方法的研究工作受到阻碍,有限元理论的发展也逐渐与国外拉开了距离。

20 世纪 60 年代初期,我国的老一辈计算科学家较早地将计算机应用于土木、建筑和机

械工程领域。当时黄玉珊教授就提出了“小展弦比机翼薄壁结构的直接设计法”和“力法—应力设计法”；而在20世纪70年代初期，钱令希教授提出了“结构力学中的最优化设计理论与方法的近代发展”。这些理论和方法都为国内的有限元技术指明了方向。

1964年初，崔俊芝院士研制出国内第一个平面问题通用有限元程序，解决了刘家峡大坝的复杂应力分析问题。20世纪60~70年代，国内的有限元方法及有限元软件诞生之后，曾计算过数十个大型工程，应用于水利、电力、机械、航空、建筑等多个领域。

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。20世纪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；航空工业总公司开发了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、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。同时，有关管理部门在对直接为先进装备制造业服务的CAE软件核心技术认识上产生了偏差：CAE既不属于基础科学，又不属于科技攻关，故而失去了必要的支持，使其发展举步维艰，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。

进入21世纪后，虽然国外CAE软件占据市场主流的现状短时间内已经无法撼动，但国内自主知识产权CAE软件逐渐市场化，且获得了一定的发展：北京火箭软件有限公司推出的FEPG、郑州机械研究所推出的紫瑞CAE、大连大工安道公司的CAE软件Adopt. Smart；湖南大学与吉林大学开发了针对汽车结构的KMAS分析系统；华中科技大学针对铸造成型开发的华铸CAE软件；清华大学、上海交通大学在注塑成型CAE领域也推出了相应的分析软件。

1.3 有限元分析基本过程

有限元法的计算步骤为：结构离散、单元分析、整体分析。

1.3.1 结构离散

有限元法的基础是用有限个单元体的集合来代替原有的连续体，因此首先要对弹性体进行必要的简化，再将弹性体划分为有限个单元组成的离散体，离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来，将求解区域变成用点、线或面划分的有限数目的单元组合成的集合体。结构的离散包括几何形体的离散、协调方程的离散、物理方程的离散、平衡方程的离散、边界条件的离散。

在一个具体的结构中，确定单元的类型和数目以及哪些部位的单元可以取得大一些、哪些部位单元应该取得小一些，需要根据经验来作出判断。单元划分越细，则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物体或结构物，而是同样材料的众多单元以一定方式连接成的离散物体，而用有限元分析计算所获

得的结果只是近似的。如果划分单元数目非常多而又合理,则所获得的计算结果就逼近实际情况。

1.3.2 单元分析

有限元法中,将单元的节点位移作为基本变量。单元分析,就是建立各个单元的节点位移和节点力之间的关系式,进行单元分析首先要为单元内部的位移确定一个近似表达式,然后计算单元的应变、应力,再建立单元中节点力与节点位移的关系式,单元分析具体步骤如图 1-6 所示。

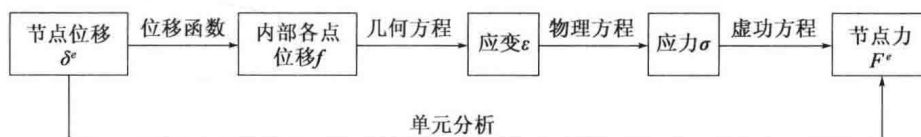


图 1-6 单元分析的步骤

当物体或结构物离散化之后,就可把单元中的一些物理量如位移、应变和应力等用节点位移来表示。位移模式是表示单元内任意点的位移随位置变化的函数,常采用一些能逼近单元真实位移场的近似函数予以描述,一般不能精确地反映单元中真实的位移分布,这就带来了有限元法的另一种基本近似性。

物体离散化后,假定力是通过节点从一个单元传递到另一个单元。但是,对于实际的连续体,力是从单元的公共边界传递到另一个单元中去的。因而,这种作用在单元边界的表面力、体积力或集中力都需要等效地移到节点上去,也就是用等效的节点力来代替所有作用在单元上的力。

选定单元的类型和位移模式,并获得等效节点力以后,就可按虚功原理或最小势能原理建立单元平衡方程。

1.3.3 整体分析

有限元法的分析过程是先分后合,即先进行单元分析,在建立了单元刚度方程以后,再进行整体分析,把这些方程集成起来,形成求解区域的刚度方程,称为有限元位移法基本方程。集成所遵循的原则是各相邻单元在共同节点处具有相同的位移。求解整体平衡方程即可得出节点位移,之后可由弹性力学的几何方程和弹性方程来计算单元应变和应力。

通过上述分析可以看出,有限元法的基本思想是“一分一合”,化整为零,集零为整,把复杂的结构看成由有限个单元组成的整体。

1.4 有限元软件介绍

经过几十年持续不断的研发,已有一大批著名的计算功能强大的大型通用商业软件,如 ANSYS、ABAQUS、ADINA、MSC/NASTRAN、MSC/MARC、SAP2000。这些软件的分析功能和结构模型化功能较强,解题规模大,计算效率高,能够适应广泛的工程领域,而且经过长期的使用和维护,比较可靠。