

机械工程中的有限元方法

· 王世军 赵金娟 著 ·



科学出版社

机械工程中的有限元方法

王世军 赵金娟 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍有限元方法的基础理论、常见机械结构的建模方法以及 ANSYS 软件在机械结构分析中的应用。基于弹性力学的虚功原理介绍有限元方法的基本原理,包括刚度矩阵的推导、材料模型的建立和常见机械零件的建模方法,并结合机械结构的热分析介绍多物理场的耦合分析方法。机械零件的接触性质和包含零件接触特性的整机建模方法是本书的落脚点。在介绍常用的接触单元及其使用方法之后,阐述机械零件微观粗糙表面的接触性质、建模方法以及在有限元分析软件中的使用方法。在介绍有限元方法和机械结构建模方法之后,结合机械结构分析的需要,介绍 ANSYS 软件的经典界面和 Workbench 界面的使用方法,并在此基础上,介绍基于 ANSYS 软件的用户开发工具 APDL 语言的使用方法。

本书可供机械工程专业高年级本科生、研究生和从事机械结构设计的工程师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程中的有限元方法 / 王世军, 赵金娟著. —北京: 科学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-03-062186-3

I. ①机… II. ①王… ②赵… III. ①机械工程-有限元分析-应用软件 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 186443 号

责任编辑: 杨 丹 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 22

字数: 443 000

定价: 145.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

有限元法是复杂机械结构设计中强度校核、性能分析和模拟、仿真的主要技术手段。此外,该方法也被推广应用到流体、声、光、电、热、磁等几乎所有物理场和机械、土木、水利、电子等几乎所有的工程学科。

从 20 世纪 50 年代在机械工程中开始应用以来,有限元法经历了 60 余年不断的发展,基础理论、相关技术和软件结构异常庞杂。有限元法从诞生开始就是一项完全依赖于计算机软件的技术,有限元软件也一直向着简便、易用方向发展。有限元软件的求解过程已经实现了完全的自动化,不再需要人工干预,但是从实际的工程问题到有限元模型的建立,仍然需要相关的专业知识、经验和有限元理论的指导,有限元软件计算结果的正确性、合理性、准确性的判断和评估,也仍然需要相关的经验和理论作指导。总之,机械结构的有限元分析需要了解相关的基础理论并具备一定的专业基础,这也是本书的写作目的之一。

本书尝试采用尽可能通俗的工程语言描述与机械结构设计相关的有限元法的基本原理和基本方法,尽可能不涉及复杂的数学和力学的基础理论以及单元刚度的推导过程,让初学者能够尽快了解、掌握有限元法基本原理和实施过程,能够结合专业知识尽快建立合理的有限元模型,并且对有限元软件计算结果的正确性、合理性作出分析和判断。

现有的机械结构有限元分析,主要是面向零件的分析,很少针对整机。本书结合作者长期的工程分析经验和机械结合部领域的科研成果,给出了常见机械零件的有限元建模方法以及包含机械结合面的机械结构整机性能分析方法。本书紧密围绕机械工程的应用安排章节内容,摒弃机械结构分析中不使用或者很少使用的内容,全书条理清晰、内容简洁、针对性强,能够使读者尽快了解有限元法的基本理论,掌握一种有限元分析软件,具备初步的机械结构性能的有限元分析能力。

本书基于 2013 年起为西安理工大学机械工程专业研究生开设的有限元分析课程的同名讲义整理、完善而成,相关内容经过多年选择和锤炼,有较好的针对性。机械零件和整机分析的相关内容大多源于作者及研究团队的科研成果,随着研究工作的深入和有限元软件的发展,相关的内容、观点和方法也在不断改变。有限元软件在多年发展过程中,不断引入新的算法,很多软件也包含非有限元算法,如分析流体的有限体积法、分析散体的离散单元法、涉及无限边界问题的边

界单元法等，这些内容在书中也作了简单介绍。

第1章、第6~11章由王世军撰写，第2~5章由赵金娟在已有讲义基础上整理、撰写，全书由王世军统稿。研究生韩子锐和卫娟娟也参与了文字、图表整理等工作。

本书的出版得到西安理工大学重点教材建设项目和一流专业建设项目共同资助。

限于作者水平，书中难免有不足之处，请广大读者批评指正。

王世军

2019年6月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 有限元法的起源和发展	1
1.2 有限元分析的过程	16
1.3 计算机辅助工程	24
练习题	31
参考文献	32
第2章 有限元法的基本原理	33
2.1 弹性力学的基本方程	33
2.2 平面问题	41
2.3 基于虚功原理的有限元方法	45
练习题	56
参考文献	58
第3章 结构分析中的常用单元	59
3.1 等参元	59
3.2 梁单元	67
3.3 壳单元	76
3.4 接触单元	80
3.5 弹簧-阻尼单元	86
3.6 质点单元	87
练习题	87
参考文献	88
第4章 材料的力学性质和建模	89
4.1 材料的一维力学性质	89
4.2 材料的弹性、塑性和黏性性质	93
4.3 复杂应力状态下的材料性质和强度理论	97
4.4 材料的本构关系	103
4.5 常用的材料模型	105
4.6 非线性材料的计算过程	111

练习题	116
参考文献	117
第 5 章 机械动态性能的分析方法	118
5.1 计算模态分析	118
5.2 试验模态分析	125
5.3 瞬态响应分析	133
练习题	139
参考文献	140
第 6 章 机械结构的建模方法	141
6.1 不同类型单元的混合使用	143
6.2 网格生成算法及质量评价	147
6.3 尖角问题	157
6.4 集中力问题	166
6.5 圣维南原理与应用	179
6.6 常见机械结构的建模方法	182
练习题	209
参考文献	211
第 7 章 机械零件的接触性质和整机建模方法	212
7.1 机械零件表面的几何特征	215
7.2 表面的接触性质	224
7.3 表面接触特性参数的获取	230
7.4 表面接触数据在整机分析中的应用	237
7.5 包含接触特性的整机模态分析	242
练习题	243
参考文献	244
第 8 章 结构的热分析	246
8.1 传热学的基本原理	246
8.2 热分析的有限元方法	250
8.3 热应力分析	252
练习题	255
参考文献	256
第 9 章 ANSYS 经典界面的使用	257
9.1 ANSYS 软件概述	257
9.2 ANSYS 的启动	259
9.3 前处理	273

9.4 求解	278
9.5 后处理	281
9.6 分析报告	284
练习题	287
参考文献	287
第 10 章 ANSYS Workbench 的使用	288
10.1 ANSYS Workbench 概述	288
10.2 前处理	292
10.3 DesignModeler 的使用	294
10.4 ANSYS Mechanical 的使用	299
练习题	305
参考文献	305
第 11 章 APDL 语言	306
11.1 APDL 语言概述	306
11.2 变量定义	307
11.3 赋值语句	307
11.4 数组	308
11.5 条件语句	309
11.6 循环语句	311
11.7 数据提取	312
11.8 输入输出语句	314
11.9 文件创建	316
11.10 宏	317
11.11 有限元相关的常用命令	320
11.12 用户界面开发	341
练习题	343
参考文献	343

第1章 绪 论

本章介绍有限元法 (finite element method, FEM) 基本概念和实施过程、有限元法在工程中的应用、有限元法的起源和发展过程、常用的有限元分析软件等。结合有限元软件的发展过程和趋势, 介绍计算机辅助工程 (computer aided engineering, CAE) 的概念和相关的软件。

有限元法是利用计算机软件模拟、仿真物理现象的一种虚拟现实技术。在机械工程中主要用来模拟、观察机械零件在受力后的变形和应力分布情况以及振动过程中的共振频率和振型, 是现代机械设计中校核、验证结构性能的主要手段。

早期的机械设计中, 零件的强度校核方法主要有经验类比和试验检验。经验类比的准确性取决于设计师的经验, 存在一定风险, 并且随着设计产品的种类增多, 有强度富裕量逐渐增加的趋势。试验检验需要有零件样品和试验条件, 试验结果确切、可靠, 但是设计过程持续时间长、设计成本高。

随着经验的积累和理论研究的深入, 一些理论公式、经验公式以及大量的试验数据可供设计校核使用, 形成目前各类机械设计手册中提供的常见的、通用的机械零件的设计、校核方法, 如螺栓、齿轮、轴的校核方法, 包括校核公式和相关的数据。由于存在误差, 这类校核方法中通常包含各种安全系数、工况系数, 用来修正计算结果, 确保设计的安全性。

传统的基于设计手册的机械强度校核方法主要适用对象是通用件、标准件, 对于这类零件, 已经积累了大量的经验数据可供设计参考; 对于非标准件, 如果没有经验数据, 强度校核很难进行。例如, 减速机壳体的强度、汽车在碰撞过程中的变形等, 无法通过传统的设计方法, 像齿轮和轴一样采用手册提供的强度校核公式进行强度校核和性能预测。这类传统的设计方法很难解决的问题, 采用有限元法能得到很好的解决。

有限元法在机械结构的性能分析和预测、结构强度的校核、性能的优化过程中有着广泛的应用。

1.1 有限元法的起源和发展

有限元法最初是作为求解弹性力学问题的一种方法而提出的, 从数学角度看,

属于求解描述弹性力学问题的微分方程的一种数值方法。弹性力学中用来描述弹性体变形和应力的微分方程组，只有在少数结构简单的情况下能够获得解析解，多数情况下并不能求得表达式形式的解析解，因而无从得知结构的变形和应力。虽然弹性力学的微分方程不能直接求解，但是可以改写成近似的差分形式，在给定初值后，可以求得结构在某个具体的载荷和约束条件下近似的变形和应力值。虽然这种解是在给定条件下用一组数值表示的数值解，不能像解析解那样反映结构变形和应力的变化规律，但是可以在很大程度上满足结构设计需要，在结构分析中有很重要的价值，有限元法也因此结构设计中获得了广泛的应用，成为机械结构性能仿真分析的主要技术手段。

有限元法在数学上是一种获得微分方程数值解的求解方法。非固体的物理场，如温度场、流场、电磁场，描述其物理性质的方程都可以归结为类似于描述固体结构的微分方程。基于此，有限元法被推广到非固体物理场的数值求解中。有限元法起源于固体结构的弹性分析，在声、光、电、热、磁等多物理场的性能分析中也有着广泛的应用，成为机械、岩土、建筑、流体、传热、电磁、声学 and 光学等几乎所有工程学科中主要的仿真分析技术手段。

1.1.1 理论的起源

有限元法的理论起源，最早可以追溯到 1943 年 Courant^[1] 发表的一篇论文，其尝试将三角形区域上分片连续的多项式函数和最小势能原理相结合，用来求解圣维南扭转问题的近似解。在这篇论文里，Courant 提出了有限元法的基本思想。但是由于当时电子计算机还未出现，其提出的方法在工程中难以应用，并没有引起重视。到了 20 世纪 50 年代，随着电子计算机的广泛应用，这篇论文的重要性才逐渐被认识到。

1.1.2 工程应用的起源

1954 年，Turner 等在波音公司尝试进行飞机机翼弹性变形的计算工作。1956 年相关工作以图 1-1 所示论文的形式发表^[2]。在这篇论文里，采用直接刚度法推导了三角形单元的刚度矩阵，并将其用于机翼变形的计算机程序中。这篇论文使人们认识到，复杂结构在载荷作用下的弹性变形可以在设计阶段通过有限元计算事先获得，有限元法对结构设计有着重要的价值。随后，有限元法在理论研究和工程应用两个方面都进入一个快速发展的时期。因此，1956 年 Turner 等发表的这篇论文被认为是有限元法正式出现的起点。1960 年，Clough^[3] 将这一方法正式命名为有限元法。

JOURNAL OF THE
AERONAUTICAL SCIENCES

VOLUME 23

SEPTEMBER, 1956

NUMBER 9

Stiffness and Deflection Analysis of Complex
Structures

M. J. TURNER,* R. W. CLOUGH,† H. C. MARTIN,‡ AND L. J. TOPP**

ABSTRACT

A method is developed for calculating stiffness influence coefficients of complex shell-type structures. The object is to provide a method that will yield structural data of sufficient accuracy to be adequate for judgments of static and aeroelastic analysis. Stiffness of the complete structure is obtained by summing stiffness of individual units. Stiffness of typical structural components are defined in the paper. Basic conditions of continuity and equilibrium are established at selected points (nodes).

line on static air loads, and theoretical analysis of aeroelastic effects on stability and control. This is a problem of exceptional difficulty when thin wings and tail surfaces of low aspect ratio, either swept or unswept, are involved.

It is recognized that member bending (or rib bending) is a significant feature of the vibration modes of the newer configurations, even of the low-order modes.

Received June 29, 1955. This paper is based on a paper presented at the Aeroelasticity Session, Twenty-Second Annual Meeting, IAS, New York, January 25-29, 1954.

* Structural Dynamics Unit Chief, Boeing Airplane Company, Seattle Division.

† Associate Professor of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

‡ Professor of Aeronautical Engineering, University of Washington, Seattle.

** Structures Engineer, Structural Dynamics Unit, Boeing Airplane Company, Wichita Division.

图 1-1 标志着有限元法起源的文章

1.1.3 软件的起源

有限元法的计算过程复杂，工作量巨大，导致其强烈地依赖于计算机程序。

计算机技术的发展和进步一直是有限元法发展和应用的基础。最初的有限元程序是具体工程项目子程序的集合，缺乏通用性，如 Turner 等为分析波音公司飞机机翼变形所写的代码。

1963 年，加州大学伯克利分校的 Wilson 和 Clough 为了结构静力与动力分析的教学需要开发了最早的通用有限元分析程序 SMIS (symbolic matrix interpretive system)，在这个程序的基础上，又开发了有限元分析软件 SAP (structure analysis program)，SMIS 实际上是 SAP 的第一个版本。SAP 程序早期的代码是公开的，并且代码具有规范性和通用性，很多有限元软件是以此发展起来的。1963 年，MacNeal 和 Schwendler 创办 MSC 公司，开发了第一个商业化的通用有限元软件 SADSAM (structural analysis by digital simulation of analog methods)。1964 年，美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 委托 Computer Sciences、Martin 和 MSC 三家公司组成研发团队为其开发通用有限元分析程序 NASTRAN (NASA structural analysis program)，SADSAM 成为 NASTRAN 的基础版本。1969 年，NASA 通过其软件管理部门 COSMIC (Computer Software Management and Information Center) 发布了 NASTRAN 程序的第一个版本，一般称为 COSMIC/NASTRAN。由于程序的稳定性、准确性和权威性，迄今为止一直是其他有限元软件开发的标准和参照程序。

COSMIC/NASTRAN 是一个 NASA 内部使用的有限元程序，并不是一个对外销售的商业程序。因此，在得到授权和许可后，软件公司在 COSMIC/NASTRAN 程序的基础上，研发出很多商业版本的 NASTRAN 程序，如 UAI/NASTRAN、CSAR/NASTRAN、MSC/NASTRAN、NX/NASTRAN、MARC/NASTRAN、COSMOS/NASTRAN，这些不同版本的 NASTRAN 程序实际上并没有大的差异，

很多只是改了个名字。

20 世纪 60 年代末到 70 年代初,很多有限元工作者将其拥有的有限元程序代码通用化、商业化,产生了大量的有限元分析软件。现在主流的有限元软件大部分出现在这个时期。

1.1.4 理论的完善

有限元法的理论基础主要是在 20 世纪 50~60 年代建立起来的。

最初的有限元法通过结构力学分析直接推导出单元的刚度矩阵,称为直接刚度法。该方法有直观的力学概念,容易理解和实施,缺点是对于复杂、高阶的单元,单元刚度矩阵的推导十分困难。后来采用虚功原理推导单元的刚度矩阵,在很大程度上克服了直接刚度法的缺点,现在机械结构分析中常用的单元刚度矩阵大都可以通过虚功原理获得。

1963~1964 年, Besseling、Melosh 和 Jones 等证明了有限元法是基于变分原理的瑞利-里兹法 (Rayleigh-Ritz method) 的另一种形式,变分法成为推导单元刚度矩阵的更一般化的新方法。对于找不到问题的泛函,或者问题的泛函不存在,无法通过变分方法求得单元刚度矩阵的情况,20 世纪 60 年代后期开始采用加权余量法来推导单元的刚度矩阵。

1965 年, Zienkiewicz 和 Cheung (张佑启) 证明了有限元法不仅适用于固体结构的力学分析,而且可以用于温度场、流场、电磁场的分析,从而扩展有限元法用于所有场问题的求解。

1966 年, Irons^[4] 提出了当前有限元软件中广泛使用的等参元。

1973 年,两个美国数学家证明了有限元网格密度与收敛极限的关系,即通过加密网格,可以提高有限元的分析精度。此后,除了采用提高插值函数的阶数提高分析精度以外,也采用加密网格的方法提高分析精度。在有限元分析中,前一种方法称为 p 方法,后一种方法称为 h 方法。当前, h 方法是提高分析精度的主流方法,插值函数的次数一般不超过 3 次。

1.1.5 早期的出版物

1967 年,由 Zienkiewicz 与 Cheung^[5] 合作出版了第一本有限元专著——*The Finite Element Method in Continuum and Structural Mechanics*, 1989 年再版更名为 *The Finite Element Method*^[6]。该书是有关有限元法的经典书籍和权威的教科书,其英文版和中文版在国内都有发行。

由于有限元法只能求得问题的数值解而不是解析解,传统的力学杂志不愿意接收有限元相关的论文。为此, Zienkiewicz 于 1968 年创办了 *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 杂志,专门发表有限元相关的论文。

1.1.6 有限元在中国

有限元法的相关研究在我国开始得很早。1954 年, 胡海昌^[7]发表了三变量的广义变分原理, 卞学镛的学生鹭津久一郎次年在美国也发表了相关的论文, 这一变分原理后来被称为胡海昌-鹭津原理 (Hu-Washizu principle), 成为基于变分法的有限元理论的基础。1965 年, 冯康在《应用数学与计算数学》上发表的论文“基于变分原理的差分格式”, 是我国开始有限元理论研究的标志。崔俊芝、朱伯芳等在 20 世纪 60 年代末 70 年代初开始编写有限元程序进行结构计算, 但是都未能商业化。徐芝纶于 1974 年出版了我国第一部关于有限元法的专著《弹性力学问题的有限元法》。1975 年、1979 年, SAP4 和 SAP5 程序的源码被张之勇和卞学镛引入国内, 解决了当时机械工业中多年积累下来的很多疑难问题, 如大跨度起重机的共振和模态分析、重型机床的减重设计等, 极大地促进了有限元法在我国的应用。同时, 经过学习和研究程序代码, 规范化的有限元程序开始被我国的有限元工作者掌握, 在此基础上开发了很多有限元软件。这些在 SAP 基础上开发的国产软件很多后来都变成商业软件, 如郑州机械研究所的紫瑞、大连理工大学的 JIFEX、北京大学力学系的 SAP84 等。由于各种因素, 这些国产有限元软件并没有像国外有限元软件那样很好地发展起来, 基于 NASTRAN 开发的国内航空系统使用的 HAJIF 也有类似的情况, 目前国内销售和使用的机械结构分析的有限元软件基本上都是国外的。

1.1.7 常用的有限元软件

早期的计算机系统很不统一, 不同型号的计算机往往采用不同的系统。为了方便在不同类型的计算机上运行, 通用的有限元程序大多以 FORTRAN 源码的形式在内部发行, 由使用者在各自的计算机上修改后编译、运行, 这种发行模式给众多用户开发自己的有限元程序带来便利。有限元程序的计算模块结构复杂、代码很长, 为了减少开发工作量, 很多有限元程序的计算核心代码是从早期的几个通用程序继承并发展起来的。

1. SAP、ADINA 和 ALGOR

SAP 和 NASTRAN 是最早的两个公开过源代码的有限元程序, 它们的计算模块成为后来很多有限元程序计算模块的核心和基础。1969 年, Wilson 在 SMIS 的基础上开发了第二代线性有限元分析程序 SAP, 1970 年发布了第一个正式版本 SAP1, 1974 年发布了最后一个公开源码的 SAP5。1978 年, Ashraf 在 Wilson 的支持下创建了 CSI, 在 SAP5 的基础上继续开发商业版本的 SAP 程序, 即现在土木和建筑工程中广泛使用的 SAP2000。1984 年, ALGOR 公司将 SAP5 程序与基

于微机的 CAD 图形系统 ViziCAD 结合,推出了具有完整 CAD 图形界面的微机有限元分析系统 ALGOR FEAS (ALGOR finite element analysis system)。由于其易用性,这个软件应用广泛,在国内被称为 SuperSAP。2009 年,ALGOR 被 Autodesk 公司收购,成为其 Simulation 模块中的一部分。此外,基于 SAP 程序还派生出很多各具特色的有限元分析软件,如 COSMOS、FEPG 和 PKPM 等。

1975 年,Bathe 在 NONSAP 的基础上开发了非线性程序 ADINA (automatic dynamic incremental nonlinear analysis)。跟 SAP 一样,最初的 ADINA 程序是开源码的,这使它成为后来很多非线性有限元软件的基础代码。ADINA 源码在 1981 年被引入我国,是 ANSYS 进入我国之前国内主要的非线性分析软件。1986 年,Bathe 成立 ADINA R & D 公司,将 ADINA 变成源代码不公开的商业程序。

2. NASTRAN

1971 年,MSC 从 NASA 获得了 COSMIC/NASTRAN 的源码,发布了 MSC 自己的 MSC/NASTRAN。MSC/NASTRAN 是最著名的 NASTRAN 版本之一。1972 年和 1985 年,UAI 公司和 CSAR 公司也分别从 NASA 获得了 COSMIC/NASTRAN 的源码,随后推出了各自的 NASTRAN 程序 UAI/NASTRAN 和 CSAR/NASTRAN。1999 年,MSC 收购了 UAI 和 CSAR,成为市场上唯一的 NASTRAN 程序供应商。2002 年,美国联邦贸易委员会(Federal Trade Commission, FTC)裁决 MSC 构成市场垄断,为了重建 NASTRAN 市场的竞争,要求 MSC 必须共享其商业版本的 NASTRAN 程序。此后,很多公司从 MSC 获得了 NASTRAN 程序的源码并发布了各自的 NASTRAN 程序,如 NX/NASTRAN、COSMOS/NASTRAN、MARC/NASTRAN 等。

3. ANSYS

1963 年,Westinghouse 公司的 John Swanson 为核反应堆的应力分析编写了一些温度和应力计算的有限元程序,当时命名为 STASYS(structural analysis system)。1969 年,Swanson 从 Westinghouse 辞职,建立了 Swanson 分析系统公司(SASI)。结合早期的 STASYS 程序,Swanson 于第二年发布了商用软件 ANSYS。1994 年,ANSYS 的前后处理程序从 DOS 向 Windows 过渡过程中,由于开发时间过长,新版本迟迟不能问世,公司经营遇到很大困难而被 TA Associates 收购,公司也随之改名为 ANSYS 公司。ANSYS 是最早从 DOS 图形界面升级到 Windows 图形界面的有限元软件之一,也是最早全面拥有结构、热、流体、电、磁、声分析能力的有限元软件。1995 年进入我国市场后,以其良好的易用性和全面的分析能力很快取代了 ALGOR 和 ADINA 的市场地位,成为国内主流的有限元分析软件。2000 年以后,ANSYS 收购了很多相关的分析软件公司以便进一步加强自身的分析能

力, 如 CFX、Fluent、Ansoft、EVEN 和 Autodyn 等。然而, 不断收购新的分析模块, 使得 2002 年开始推出的新架构的前后处理程序 Workbench 在超过 10 年的时间里一直没能完工, 而旧的前后处理程序又不支持新并购的模块, 软件的完整性和易用性受到很大影响。

4. MARC 和 Abaqus

1967 年, 布朗大学的 Pedro Marcal 创建了 MARC 分析研究公司, 于 1972 年推出了第一个商业版本的非线性有限元程序 MARC。MARC 在 1999 年被 MSC 收购, 成为 MSC 的非线性分析模块。MARC 原有的前后处理是基于 DOS 系统的 MENTAT, 被 MSC 收购以后, MSC 的通用前后处理程序 PATRAN 也开始支持 MARC。

David Hibbitt 是 Pedro Marcal 的学生, 是 MARC 程序的开发者之一, 1977 年离开 MARC 后编写了一个新的非线性有限元程序 Abaqus, 次年与曾为 MARC 公司同事的 Bengt Karlsson 和 Paul Sorenson 建立了 Hibbitt, Karlsson & Sorensen (HKS) 公司, 随后正式推出 Abaqus 软件。Abaqus 软件拥有丰富的材料模型, 也允许用户编写 FORTRAN 语言的子程序开发自己的材料模型和单元类型, 这使得 Abaqus 成为材料力学性能研究的重要工具。Abaqus 最初的动力学分析只有隐式分析模块, 1991 年推出了显式分析模块 Abaqus/Explicit, 专门用于爆炸、冲击过程的分析。Abaqus 直到 1999 年才推出图形界面的前后处理程序 Abaqus/CAE, 在几个重要的有限元程序中推出前后处理程序的时间较晚。2002 年, 公司的创始人退休, 随后公司名称改为 Abaqus 公司。2005 年 Abaqus 被达索系统收购, 在保持软件独立性的同时, 也作为核心分析模块与 CATIA 集成。

5. LS-DYNA

在有限元动力学分析中, 有隐式和显式两种方法求解动力学微分方程。最初开发的有限元动力学分析程序大部分是隐式程序, 如 NASTRAN、SAP、ADINA 等。用隐式方法求解动力学微分方程时, 将微分方程改写成差分表达式后, 需要求解的同一时刻的变量不能写到方程的一边, 只能写成隐式形式, 通过迭代求解。显式方法刚好相反, 将微分方程改写成差分表达式后, 同一时刻的待求变量可以写到方程的一边, 方程可以直接求解。两种方法在使用上的主要差别是隐式方法计算稳定性好, 可以使用较大的时间步长求解较长时间的动态响应, 显式方法只能使用很小的时间步长, 主要用于持续时间很短的爆破、冲击、碰撞过程的响应分析。

1976 年, Hallquist 在劳伦斯利弗摩尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 主持开发为武器设计使用的显式有限元分析程序 DYNA2D

和 DYNA3D, 统称为 DYNA 程序。DYNA 程序的源码是公开的, 因此成为现在大部分显式动力学分析程序的基础代码, 如 PAM-CRASH、LS-DYNA、MSC/DYNA、MSC/DYTRAN、DEFORM、ANSYS/Autodyn 等。

1984 年, DYNA 程序首先被法国 ESI 公司商业化, 命名为 PAM-CRASH。1988 年, Hallquist 离开 LNLL, 创建 LSTC 公司, 开发 DYNA 程序的商业化版本 LS-DYNA。同年, MSC 基于 DYNA 源码开发了 MSC/DYNA 并于 1990 年发布了第一个版本, 随后于 1993 年将其改名为 MSC/DYTRAN。

LS-DYNA 程序是目前功能最强的显示动力学分析程序, 除了具有庞大的材料模型库, 丰富的接触算法以外, 还引入了隐式分析模块和一些非有限元的分析方法, 如光滑粒子流 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 法、离散单元法 (discrete element method, DEM)、无网格的伽辽金 (element free Galerkin, EFG) 法、边界元法 (boundary element method, BEM) 等。由于显示动力学分析的有限元模型通常比较简单、规模不大, LSTC 多年来一直致力于程序计算功能的开发而拒绝发展前后处理, LS-DYNA 程序在很长一段时间没有自己完整、全面支持计算功能的前后处理程序, 只提供一个功能很弱的前后处理程序 LS-PrePost。甚至到目前为止, LS-DYNA 的前后处理工作仍然主要依赖第三方的有限元程序或者通用的前后处理程序, 如 LSTC 与 ANSYS 合作开发的前后处理程序 ANSYS/LS-DYNA, 通用的有限元前后处理程序 Femap、ETA/FEMB、HyperMesh、MSC/PATRAN 等。

由于 LSTC 坚持独立发展, 拒绝被收购, 一直没有显式动力学分析功能的 ANSYS 于 1995 年收购了 Century Dynamics 公司, 把该公司基于 DYNA 程序开发的显式动力分析软件 Autodyn 纳入到 ANSYS 的分析体系中。1996 年, ANSYS 又与 LSTC 合作, 为 LS-DYNA 开发了基于 ANSYS 平台的前后处理程序 ANSYS/LS-DYNA。

6. COSMOS

COSMOS 是一个类似于 ALGOR FEAS 的基于微机平台的多物理场的有限元分析软件, 由 SRAC 开发。COSMOS 软件的特点是计算速度快、解题时占用磁盘空间少、使用方便、分析功能全面、与其他 CAD/CAE 软件集成性好。SRAC 成立于 1982 年, 最初的有限元代码来自于 SAP, 于 1985 年开发了基于微机平台的有限元软件, 1993 年发表了快速有限元 (fast finite element, FFE) 算法。传统有限元分析的数值计算方法有直接法 (direct method) 与迭代法 (iterative method) 两种。由于迭代法一直无法保证数值计算的收敛性, 故直接法在多数有限元分析软件中仍然是一种主流的计算方法。从 1982 年开始, 三位苏联的数学博士, 致力于开发一种可以确保求解过程能够收敛的迭代法。他们找到了迭代法在有限元分

析中造成发散的原因并提出了相应的解决方案。他们加入 SRAC 以后,于 1993 年将保证收敛的迭代法——又称作快速有限元法应用到 COSMOS 的产品之中。由于开发快速有限元法的过程中需要完全重写计算程序,因此 SRAC 将传统的有限元计算程序重新以 C++ 语言开发。新的有限元分析软件对磁盘空间的要求大幅降低,占用的计算机系统内存也大大减少,因此分析速度大幅提高。

1.1.8 有限元的发展趋势

有限元法的基础理论在 20 世纪 60 年代末已经相当成熟,进入 70 年代,尤其是在 80 年代,有限元法的发展主要体现在有限元软件的发展上,特别是交互式的图形界面和单元的自动划分技术上,而有限元软件的发展在很大程度上依赖于计算机硬件和软件的发展。

1. 易用性和灵活性

有限元软件一方面朝着提高易用性方向发展,另一方面也在改善灵活性,如图 1-2 所示。有限元软件的易用性和灵活性是两个互相矛盾的发展方向。易用性要求软件的封装严密,对用户的要求少,操作过程简单;灵活性则是允许用户干预计算过程,允许用户开发自己的材料模型、用户单元等,能够满足用户的特殊需求。FEPG 软件就是一个具有极端灵活性的例子,它把有限元分析的各个子程序模块化,可以按照用户需要生成完整的有限元分析所需的 FORTRAN 代码,用户经过编译,就可以生成自己的求解器。COMSOL 也有类似功能,只是生成的不是 FORTRAN 代码,而是可执行的程序。有限元软件的灵活性要求用户对有限元的理论、编程算法有一定的了解,灵活性高的软件,易用性往往较差。大部分的有限元软件或多或少会给用户一定程度的二次开发功能,允许用户使用自己的单元刚度矩阵甚至材料模型,将用户程序引入计算过程,开发用户自己的图形

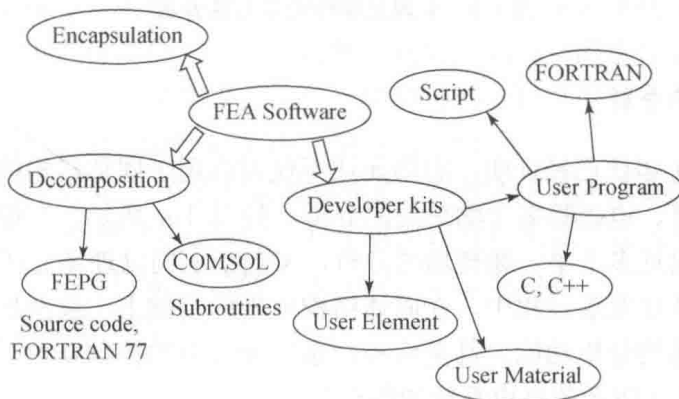


图 1-2 有限元软件的易用性和灵活性