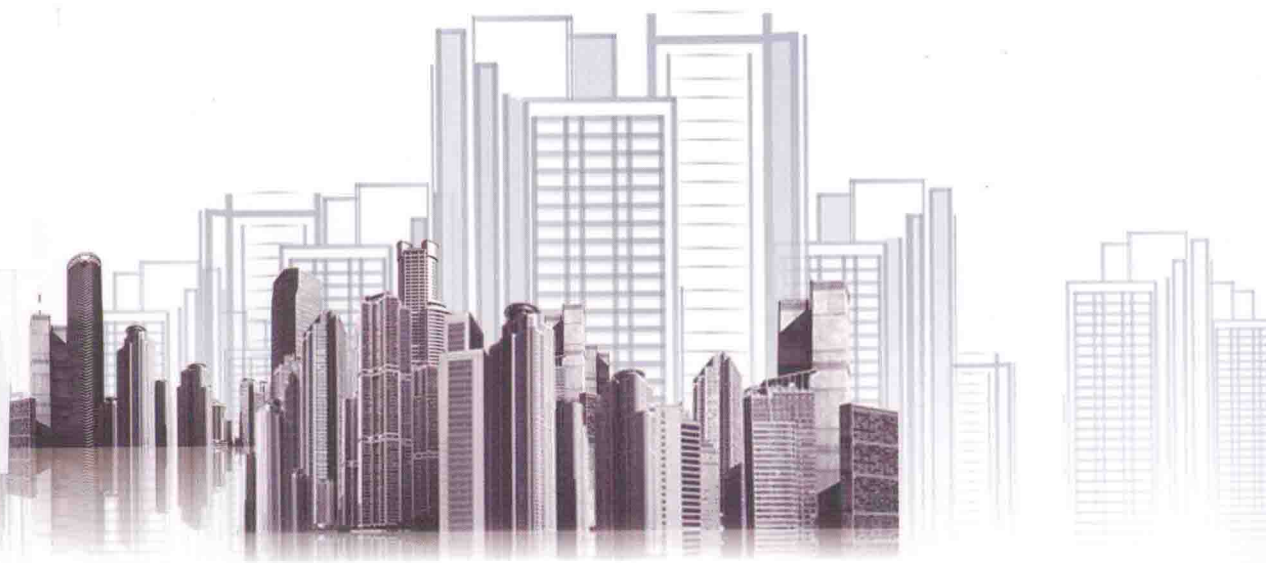


建筑
结构

仿真分析与 工程实例

李云贵 段 进 陈晓明 编著

Simulation Analysis and Engineering
Examples for Building Structures



中国建筑工业出版社

建筑结构仿真分析与工程实例

李云贵 段 进 陈晓明 编著

封面设计：张 颖
责任编辑：李 颖
封面设计：张 颖

清华大学出版社

地址：北京清华大学学研大厦A座

邮编：100084 电话：(010) 62770175

发行：新华书店

印刷：北京印刷厂

开本：185mm×260mm

字数：240千字

印数：1000册

定价：38.00元

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构仿真分析与工程实例/李云贵等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-112-17773-8

I. ①建… II. ①李… III. ①建筑结构-计算机仿真 IV. ①TU311.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031457 号

本书围绕全面阐述建筑结构的数值模拟与仿真分析。全书共分 4 篇, 分别是基础理论篇、软件篇、工程应用篇及附录。其中, 基础理论篇包含 7 章, 分别从有限元概述、有限元网格划分、有限元单元、有限元刚度集成和方程求解、几何非线性、弹塑性、隐式与显式动力学等方面来阐述有限元理论以及程序实现; 软件篇包含 3 章, 分别从土木工程分析与设计专业软件、大型通用有限元软件以及高性能结构仿真集成系统 (ISSS) 等方面来阐述结构仿真软件的特点、功能以及使用和操作情况; 工程应用篇包含 3 章, 分别从大跨钢结构的稳定性分析、超高层结构的动力弹塑性分析以及复杂结构的施工模拟等方面来阐述结构仿真集成系统 (结合各专业软件和通用软件) 在实际工程中的应用; 附录篇包含 3 个附录, 详细介绍了结构仿真集成系统 (ISSS) 的几个重要组成模块, 包括底层网格算法、计算模型生成以及计算结果整理等。

本书适用于各建筑设计院和施工单位的技术人员与研发人员学习, 也可作为土木工程相关专业在校大学生和研究生的辅助读物。

责任编辑: 范业庶

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 姜小莲

建筑结构仿真分析与工程实例

李云贵 段 进 陈晓明 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 23 $\frac{3}{4}$ 字数: 590 千字

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月第一次印刷

定价: 59.00 元

ISBN 978-7-112-17773-8

(27043)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

工程仿真兴起于 20 世纪中后期,它是计算机技术和数值计算方法(以有限元为代表)发展到一定阶段的必然产物。早期以单机单线程计算为主,20 世纪八九十年代开始逐步发展为多机并行计算(又称网格计算)以及单机多线程并行计算。进入 21 世纪以后,随着互联网技术的发展,基于网络的“云计算”模式逐渐进入数值仿真的视线,但它还处于尝试与摸索阶段。就目前来说,数值仿真依然以局域网并行和单机多线程并行为主,不过考虑到以后的结构仿真会越来越接近真实的物理模型,其几何模型会越来越大且越来越复杂,同时各物理场的耦合作用也会越来越强,这必然导致计算量和数据处理量的海量增加,甚至有可能远远超出传统仿真的概念。在这种情况下,目前的仿真技术将不再满足要求,换言之,工程仿真将来有可能进入“云计算”和“大数据”时代。

在 20 世纪八九十年代以前,土木工程仿真主要以国外通用软件为主,典型的如 ANSYS、ABAQUS、NASTRAN、MARC、ADINA、LS-DYNA 等有限元软件以及大量的 CFD 软件(比如 FLUENT、CFX、STAR-CD 和 PHOENICS 等),它要求用户具备较高的理论水平,其计算功能非常强大,但其前处理模块不适用于建筑结构建模,且计算结果无法直接用于工程设计,因此不方便直接用来解决土木工程问题。基于此,20 世纪后期国内外逐渐发展起了结构设计专业软件,比较有代表性的包括美国 CSI 系列、韩国 MIDAS 系列和中国 PKPM 系列等。这类软件专门针对结构设计进行开发,概念明确且操作方便,但其计算模块却相对简化,不利于复杂结构的分析与设计,因此其适用范围受到一定程度的限制。进入 21 世纪以后,随着计算机技术的发展和 BIM 概念的逐步推广,结构仿真的发展越来越向“系统集成”方向倾斜,也就是说将仿真软件(含建筑结构模块和通用有限元模块)集成到 BIM 系统,将结构仿真做成 BIM 系统的一个子集,以满足 BIM 应用与实施的需求。这其中比较著名的有美国 AUTODESK 公司的 REVIT 软件,另外法国达索系统公司的 3DS 也在尝试类似的事情。但由于仿真系统集成涉及多方面的知识(比如计算机、建筑结构、计算固体力学、流体动力学及流固耦合等),它需要复合型的人才团队协同开发而非各模块的简单捆绑,其考虑因素较杂且难度较高,因此到目前为止还没有任何一家软件产品能完全满足国内外的市场需求,但可以肯定的是:“系统集成”将会成为土木工程仿真的必然发展方向。

源于上述考虑,中国建筑技术中心基于自主研发的数据处理内核(含模型处理和结果处理),采用接口模式集成了国内外常用结构设计软件(比如 PKPM、YJK、MIDAS、ETABS 等)和大型有限元商业软件(比如 ANSYS、ABAQUS 等)并对其进行二次开发,最终形成了建筑工程仿真集成系统(Integrated Simulation System for Structures,简称 ISSS)。该系统能够为超高层和大跨度等复杂结构设计提供仿真咨询,适用于各种复杂混凝土结构、钢结构以及钢—混凝土混合结构的弹性和弹塑性动力时程分析,为复杂结构设计的安全性和舒适性提供计算保证,必要时还将提供结构优化方案。基于该集成系统,用

户可采用 PKPM、YJK、ETABS 等软件进行结构常规设计（含建模、计算、配筋等），所得到的设计模型（包括结构模型和配筋信息）将自动转换为通用有限元计算模型并直接导入大型商业软件（ANSYS、ABAQUS 等）以进行各种复杂有限元分析，然后自动提取其有限元计算结果、会同原有结构模型信息并根据相关规范以进行各项指标整理和评估（包括安全性和舒适性等），并最终生成适用于工程设计的计算报告书。整个过程用户只需在交互界面简单地指定部分参数和选项，其余工作全部由集成系统（ISSS）自动完成。

本书将围绕上述结构仿真集成系统（ISSS）来阐述大型复杂工程的数值模拟与仿真分析，主要包括四个组成部分，分别是：有限元基础理论、结构仿真软件、实际工程应用以及附录。第 1 篇为基础理论篇，包含第 1~7 章共 7 章，将从网格划分、有限元单元、刚度集成和方程求解、几何非线性、弹塑性、隐式和显式动力学等多个方面来阐述有限元理论以及程序实现，考虑到本书并不是有限元教程，因此只对少部分理论作了详细介绍，而大部分理论均采用文献引用的模式给出简要说明，但读者如果有需要的话，可以循着文献引用直接查找到各理论的详细说明；第 2 篇分为软件篇，包含第 8~10 章共 3 章，主要是介绍各土木工程分析与设计专业软件、有限元通用软件以及高性能结构仿真集成系统（ISSS）的主要功能、特点以及使用操作情况，本书的软件介绍是概述性介绍，关于各软件的详细说明可参阅其用户手册，而关于结构仿真集成系统（ISSS）则将在附录 A、B、C 中给出更详细的说明；第 3 篇为工程应用篇，包含第 11~13 章共 3 章，将介绍结构仿真集成系统（ISSS）结合各专业软件和通用软件在实际工程中的应用实例，主要包括三种应用类型，分别是：大跨钢结构的稳定性分析、超高层结构的弹塑性动力学分析以及复杂结构的施工模拟等；第 4 篇为附录篇，包含附录 A、B、C 共 3 个部分，将详细介绍结构仿真集成系统（ISSS）的 3 个重要组成模块，分别是：底层网格算法、计算模型生成、计算结果整理等。

本书由李云贵博士完成内容策划、统稿、审稿以及修订工作，由段进博士完成第 1~2 章、第 4~7 章、第 11 章以及附录 A、附录 B 的撰写工作，由陈晓明博士完成第 3 章、第 8 章、第 12、13 章以及附录 C 的撰写工作，由段进博士和陈晓明博士共同完成第 9、10 章的撰写工作。此外，齐虎博士给本书第 6.4 节、第 12.1 节、第 12.2 节、第 13.1 节提供了部分素材以及参考文献，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，本书肯定存在不足、不妥或者错误之处，敬请读者和同行专家提出批评和指正。

目 录

第 1 篇 基础理论篇

第 1 章 有限元概述	3
1.1 有限元理论	3
1.2 有限元软件	5
1.3 参考文献	6
第 2 章 有限元网格划分	8
2.1 网格划分概述	8
2.2 三角形网格划分	10
2.2.1 背景网格法	10
2.2.2 四叉树法	10
2.2.3 Delaunay 法	11
2.2.4 移动边界法	11
2.3 四边形网格划分	12
2.3.1 映射网格划分	12
2.3.2 几何拆分法	13
2.3.3 铺砌法	14
2.3.4 间接法四边形网格	14
2.4 空间曲面网格划分	16
2.4.1 参数空间法	16
2.4.2 直接三维法	18
2.5 网格划分后处理	18
2.5.1 网格结点抹平	18
2.5.2 网格拓扑优化	19
2.5.3 网格局部加密	19
2.6 域内约束网格划分	19
2.7 建筑结构网格自动划分	21
2.8 参考文献	22
第 3 章 有限元单元	25
3.1 有限元单元概述	25
3.1.1 梁单元概述	25
3.1.2 平面单元概述	26
3.1.3 平板弯曲单元概述	28

3.1.4 三维实体单元	28
3.2 有限元单元中的几个问题	29
3.2.1 协调性与收敛性	29
3.2.2 单元畸变问题	31
3.2.3 闭锁现象	33
3.2.4 沙漏的控制	35
3.3 广义协调系列单元	36
3.3.1 广义协调简介	36
3.3.2 自然坐标简介	38
3.3.3 平面单元	42
3.3.4 厚薄板通用单元	44
3.4 参考文献	46
第4章 有限元刚度集成和方程求解	48
4.1 大型有限元总刚集成	48
4.1.1 非零元压缩存储的基本格式	48
4.1.2 用于压缩存储的数据结构	49
4.1.3 对应压缩存储的刚度集成	50
4.2 大型线性代数方程求解	51
4.2.1 直接法的基本理论简介	51
4.2.2 基于直接法的求解器简介及应用	54
4.3 大型特征值求解	57
4.3.1 特征值求解的理论简介	58
4.3.2 子空间迭代法的程序实现	59
4.4 非线性方程求解	61
4.4.1 非线性算法简介	62
4.4.2 静力非线性求解的有限元实现	63
4.4.3 动力非线性求解的有限元实现	63
4.5 参考文献	65
第5章 几何非线性	68
5.1 几何非线性的一般性描述	68
5.2 梁杆结构的几何非线性	69
5.2.1 梁结构几何非线性简介	69
5.2.2 一种基于同步转动理论的梁单元	71
5.3 几何非线性的关键之大转动	73
5.3.1 定点转动 (Euler 转角)	73
5.3.2 定轴转动 (Rodrigues 转角)	74
5.3.3 梁单元的大转动矩阵	75
5.4 几何非线性的关键之刚体试验	78
5.5 参考文献	79

第 6 章 弹塑性	81
6.1 弹塑性全量本构理论	81
6.2 弹塑性增量本构理论	82
6.2.1 屈服条件	82
6.2.2 流动法则	84
6.2.3 硬化法则	85
6.2.4 增量弹塑性本构的建立	87
6.3 增量弹塑性分析的关键—应力积分	88
6.3.1 增量弹塑性分析的一般性步骤	88
6.3.2 应力积分简介	89
6.3.3 Nayak 显式应力积分	90
6.3.4 GPM 隐式应力积分	91
6.4 混凝土本构模型	92
6.4.1 混凝土破坏准则	93
6.4.2 约束效应对混凝土的影响	94
6.4.3 混凝土单轴约束本构	95
6.5 参考文献	96
第 7 章 隐式与显式动力学	99
7.1 隐式和显式概述	99
7.2 隐式算法	100
7.2.1 Newmark 差分格式	101
7.2.2 隐式积分流程	103
7.2.3 隐式积分的时间步长	104
7.3 显式算法	105
7.3.1 中心差分格式	105
7.3.2 显式积分流程	106
7.3.3 显式积分的关键——时间步长	108
7.3.4 稳定性的检测（能量平衡）	110
7.3.5 计算效率的提升（质量缩放和子域循环）	111
7.3.6 准静态的应用（动力松弛）	111
7.4 隐式和显式的选用原则	112
7.5 参考文献	112
第 2 篇 软 件 篇	
第 8 章 土木工程分析与设计专业软件	117
8.1 PKPM/SATWE 软件	117
8.1.1 PKPM/SATWE 软件简介	117
8.1.2 PKPM/SATWE 软件的主要功能	118
8.1.3 PKPM/SATWE 软件的特点	125

8.2	CSI/ETABS 软件	125
8.2.1	CSI/ETABS 软件简介	125
8.2.2	CSI/ETABS 软件的主要功能	127
8.2.3	CSI/ETABS 软件的特点	136
8.3	MIDAS/Building 软件	136
8.3.1	MIDAS/Building 软件简介	136
8.3.2	MIDAS/Building 软件的主要功能	137
8.3.3	MIDAS/Building 软件的特点	143
8.4	YJK 软件	143
8.4.1	YJK 软件简介	143
8.4.2	YJK 软件的主要功能	144
8.4.3	YJK 软件的特点	147
8.5	CSI/SAP2000 软件	147
8.5.1	CSI/SAP2000 软件简介	147
8.5.2	CSI/SAP2000 软件的主要功能	148
8.5.3	CSI/SAP2000 软件的特点	151
8.6	参考文献	151
第 9 章	大型通用有限元软件	152
9.1	ANSYS 软件	152
9.1.1	ANSYS 软件简介	152
9.1.2	ANSYS APDL 二次开发	154
9.1.3	ANSYS UPFs 二次开发	155
9.1.4	ANSYS 用户界面定制 (UIDL)	157
9.1.5	ANSYS 数据接口	157
9.2	ABAQUS 软件	159
9.2.1	ABAQUS 软件简介	159
9.2.2	ABAQUS 的纤维杆件模型	163
9.2.3	ABAQUS 的剪力墙模型	165
9.2.4	ABAQUS 结果数据读取 (Python 语言)	166
9.3	参考文献	167
第 10 章	高性能结构仿真集成系统	168
10.1	结构仿真集成系统概述	169
10.1.1	主要功能	169
10.1.2	系统界面	169
10.1.3	操作流程	171
10.2	软件接口介绍	172
10.2.1	结构设计软件接口	172
10.2.2	通用有限元软件接口	172
10.3	模型处理中心介绍	173

10.3.1	有限元网格划分	174
10.3.2	构件截面配置	175
10.3.3	有限元荷载导算	175
10.3.4	约束与连接处理	176
10.3.5	剪力墙边缘构件处理	177
10.4	规范后处理介绍	178
10.4.1	有限元结果的读取	178
10.4.2	基于规范的结果整理	178
10.4.3	构件破坏的评估	179
10.4.4	计算报告书的生成	180
10.5	基于 ABAQUS 的本构和单元应用	180
10.5.1	钢筋混凝土本构模型	180
10.5.2	钢筋混凝土单元模型	181
10.6	参考文献	181
第 3 篇 工程应用篇		
第 11 章	大跨钢结构分析实例	185
11.1	某会展中心屋顶网壳的非线性稳定分析	185
11.1.1	模型与荷载	185
11.1.2	线性稳定验算	186
11.1.3	非线性稳定验算	187
11.1.4	结论	190
11.2	某单层柱面网壳的非线性稳定分析	190
11.2.1	结构模型与荷载	190
11.2.2	弹性假定下的几何非线性分析	191
11.2.3	考虑弹塑性的稳定性分析	192
11.2.4	结论	193
11.3	参考文献	193
第 12 章	高层混凝土结构分析实例	195
12.1	某大悬挑工程的弹塑性动力时程分析	195
12.1.1	材料本构模型	196
12.1.2	单元模型	196
12.1.3	整体结构模型与计算条件	197
12.1.4	选取地震波	198
12.1.5	主要分析结果	200
12.1.6	详细构建计算结果及抗震性能分析	209
12.1.7	钢桁架验算	213
12.1.8	型钢混凝土构件验算	213
12.1.9	多道防线分析	220

12.1.10	说明与结论	221
12.2	上海香格里拉酒店弹塑性动力时程分析	221
12.2.1	模型简介	221
12.2.2	静力结果	223
12.2.3	非线性动力时程分析	223
12.3	某超高层结构的弹塑性动力时程分析	229
12.3.1	模型简介	229
12.3.2	分析模型及分析过程	229
12.3.3	静力分析	233
12.3.4	非线性动力时程分析	236
12.3.5	结论	255
12.4	参考文献	255
第 13 章	施工模拟分析实例	256
13.1	苏州国际金融中心施工模拟分析	256
13.1.1	施工步骤的划分	257
13.1.2	分析理论	257
13.1.3	分析结果	260
13.1.4	结论	264
13.2	华润“春笋”施工模拟分析	266
13.2.1	施工步骤的划分	266
13.2.2	分析理论	267
13.2.3	分析结果	268
13.2.4	结论	279
13.3	参考文献	281
第 4 篇 附 录		
附录 A	结构仿真集成系统的底层网格算法	285
A.1	铺砌法自由网格划分	285
A.1.1	铺砌法概述	285
A.1.2	铺砌法的基本流程	286
A.1.3	铺砌法关键步骤介绍	287
A.1.4	网格拓扑优化	298
A.1.5	网格结点抹平	299
A.1.6	铺砌法流程图解	303
A.2	域内约束网格划分	304
A.2.1	域内定点网格划分	305
A.2.2	域内定线网格划分	305
A.3	可展空间曲面网格划分	308
A.3.1	柱面网格划分	308

A. 3.2 圆台曲面网格划分	309
附录 B 结构仿真集成系统的计算模型生成	311
B. 1 建筑结构有限元模型离散	311
B. 1.1 全协调边界结点的自动布置	311
B. 1.2 单片剪力墙的网格划分	313
B. 1.3 单块楼板的网格划分	314
B. 1.4 建筑结构有限元网格划分	315
B. 2 构件截面重新配置	317
B. 2.1 配置型钢混凝土截面	317
B. 2.2 配置层合板(墙)截面	317
B. 2.3 配置偏心构件截面	318
B. 3 结构荷载有限元离散及导算	318
B. 3.1 墙板框架构件荷载导算	319
B. 3.2 刚性楼板和刚性杆荷载导算	320
B. 4 结构约束与连接处理	320
B. 4.1 结构约束连接的处理方式	320
B. 4.2 约束方程的算法实现	324
B. 4.3 铰接自由度凝聚的算法实现	327
B. 5 关于模型转换的对比测试	327
B. 5.1 关于边界协调性的问题	327
B. 5.2 关于网格密度的问题	330
B. 5.3 关于构件偏心的问题	332
B. 5.4 关于梁墙连接的问题	338
附录 C 结构仿真集成系统的计算结果整理	344
C. 1 数据后处理功能介绍	344
C. 2 通用有限元数据提取	345
C. 3 通用有限元数据后处理	347
C. 3.1 索引等结构信息	348
C. 3.2 位移转换	348
C. 3.3 构件结果	349
C. 3.4 楼层、塔结果	354
C. 4 计算书自动生成系统	362
C. 4.1 小震设计结果	362
C. 4.2 计算模型描述	362
C. 4.3 计算结果汇总	363
作者简介	366

第 1 篇 基础理论篇

第 1 章 有限元概述

有限元法是当今工程计算领域应用最广泛的数值计算方法，由于其通用性和有效性而受到工程界以及学术界的一致重视，其基本思路可概况如下：

- **有限元离散**：将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个子域（单元），并通过边界上的结点相互联结为一个组合体，如图 1.0.1 所示，该过程又称为有限元网格划分；
- **单元构造**：用每个单元内所假设的近似函数分片表示全求解域内的未知场变量，而每个单元内的近似函数由未知场函数（或其导数）在单元各结点上的数值以及其对应的插值函数来表达。由于场函数在联结相邻单元的结点上具有相同数值，因此将它们作为数值求解的基本未知量，从而将“求解原待求场函数的无穷多自由度问题”转换为“求解场函数结点值的有限自由度问题”；
- **方程建立及求解**：通过和原问题数学模型（例如基本方程、边界条件等）等效的变分原理或加权余量法，建立求解基本未知量（场函数结点值）的代数方程组或常微分方程组，并表述成规范化的矩阵形式，然后用相应的数值计算方法求解该方程组，从而得到原问题的解答。

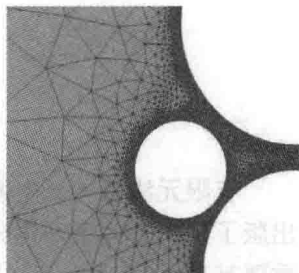


图 1.0.1 有限元离散示意图

1.1 有限元理论

早在 1870 年，英国科学家 Rayleigh 就采用假想的“试函数”来求解复杂的微分方程，1909 年 Ritz 将其发展成为完善的数值近似方法，为现代有限元方法打下坚实基础。1943 年，Courant 发表了第一篇使用三角形区域的多项式函数来求解扭转问题的论文。20 世纪 40 年代，由于航空事业的飞速发展，设计师需要对飞机结构进行精确的设计和计算，便逐渐在工程中产生了的矩阵力学分析方法。20 世纪 50 年代初期，美国波音公司开始尝试采用有限元的概念对机翼进行强度和振动校验，1956 年，Turner、Clough、Martin & Topp 发表了第一篇用有限元分析复杂结构的文章^[14]，该文章系统研究了离散杆、梁、三角形的单元刚度表达式，1960 年，Clough 在研究平面弹性问题时正式提出“有限单元法（FEM）”这个名词^[5]。到此为止，有限元方法正式面世（其大致发展历程如图 1.1.1 所示），之后，该方法迅速引起众多学者和工程师的广泛关注，并很快推广到非线性分析（包括几何、材料、接触等）以解决各种科学与工程问题。与此同时，我国的一些学者也在该领域做出了重要贡献，比如胡海昌（1954）提出了广义变分原理^[10]，钱伟长（1980）最先研究了拉格朗日乘子法与广义变分原理之间的关系^[12]，钱令希在 20 世纪 50 年代就研究了力学分析的余能原理，冯康在 20 世纪 60 年代独立于西方为有限元的收敛性奠定了理论基础。

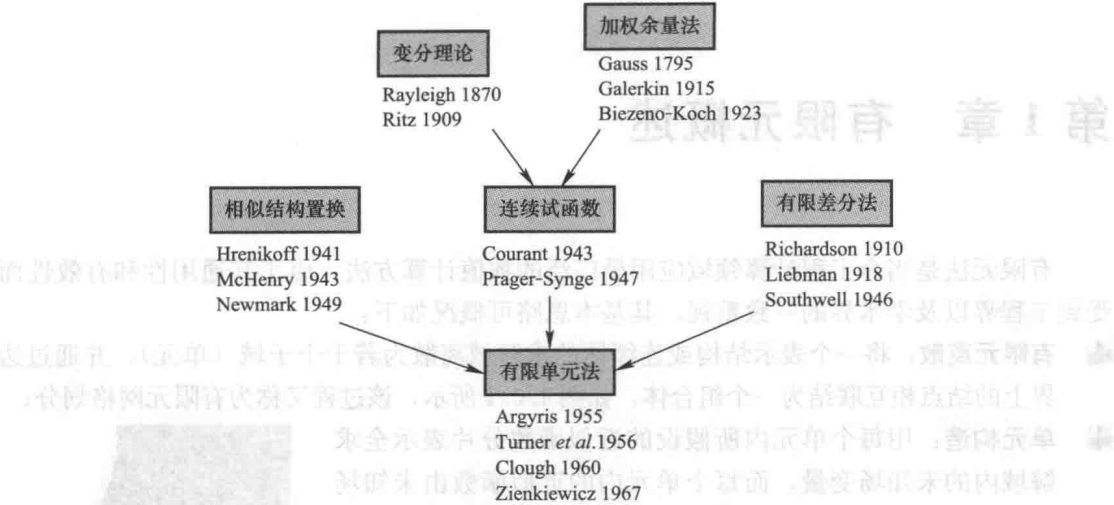


图 1.1.1 有限元法的发展历程（曾攀，2008）

有限元法从一诞生便备受关注，关于该问题的书籍和期刊数不胜数。1955 年 Argyris 出版了第一本关于结构分析中的能量原理和矩阵方法的书籍，为后续的有限元研究奠定了重要基础，1967 年 Zienkiewicz & Cheung 出版了第一本有关有限元分析的专著。到目前为止，国际上已出版了许多关于有限元法的教程和专著。其中，有些书籍是专门针对非线性问题，比如 Oden (1972)、Yang & Kuo (1994)、Crisfield (1991, 1997)、Simo & Hughes (1998)、Belytschko, Liu, Moran & Elkhodary (2014) 等的著作；还有一些书籍则同时针对线性和非线性分析，比如 Belytschko & Hughes (1983)、Cook, Malkus & Plesha (1989)、Bathe (1995)、Zienkiewicz & Taylor (2000)、王勖成 (2003) 等的著作。另外，目前国际上关于有限元方法的期刊种类繁多，仅 SCI 检索就有四五十种，表 1.1.1 列出了部分期刊名称及出版商。

刊登有限元分析论文的学术期刊（曾攀，2008）表 1.1.1

出版商	服务商	网 址	期刊名称
Academic Press	IDEAL	www.idealibrary.com	J. of Sound and Vibration
Elsevier	Science Direct	www.elsevier.nl	Acta Materialia Advances in Eng. Software Applied Math. Modelling Composite Structures Composites A,B Composites Science and Technology Computational Materials Science Computer Meth. in Appl. Mech and Eng. Computers & Structures Eng. Analysis with Boundary Elements Eng. Failure Analysis Eng. Fracture Mechanics Eng. Structures European J. of Mechanics A,B Finite Elements in Analysis and Design Int. J. of Mechanical Sciences Int. J. of Solids and Structures

续表

出版商	服务商	网 址	期刊名称
<i>Elsevier</i>	Science Direct	www.elsevier.nl	Int. J. of Impact Eng. Int. J. of Fatigue Int. J. of Plasticity Int. J. of Non-Linear Mechanics J. of Constructional Steel Research J. of Material Processing Technology J. of the Mech. and Physics of Solids Materials Science and Eng. A Mechanics of Materials Mechanics Research Communications Nuclear Eng. And Design Probabilistic Eng. Mechanics Structural Safety Theoretical and Appl. Fracture Mech. Thin-Walled Structures
<i>IoP Publishing</i>	Electronic J.	www.iop.org/EJ	Smart Materials and Structures
<i>Kluwer Academic Publishing</i>	Kluwer Online	www.wkap.nl/journals	Applied Composite Materials Int. J. of Fracture Meccanica Mechanics of Composite Materials
<i>MCB University Press</i>	Emerald Library	www.mcb.co.uk/portfolio.htm	Engineering Computations Int. J. of Num. Meth. For Heat&Fluid Flow
<i>Springer Verlag</i>	LINK	Link. springer.de/ol/eol/index.htm	Archive of Applied Mechanics Computational Mechanics Engineering With Computers
<i>J.Wiley & Sons</i>	Interscience	www.interscience.wiley.com	Communicat. in Numer. Meth. in Eng. Int. J. for Numerical Methods in Eng. Mech. of Cohesive-Frictional Mater. Progress in Structural Eng. and Mater.

1.2 有限元软件

在有限元的发展史上，商业软件（通用有限元程序，见表 1.2.1）的出现和推广是一个重要的转折点。在此之前，有限元分析主要局限于大学、研究所及少部分公司的实验室；而在此之后，有限元方法迅速应用于工程实践，其范围几乎涵盖了各行各业。20 世纪 60 年代，Wilson 以私人名义发布了一个有限元程序，美国加州大学 Berkeley 分校的部分学者和工程师对其进行改良和扩展，取名为“SAP”，专门做线性结构分析，这是有限元历史上第一个正式的通用软件（Belytschko 等，2014）。之后不久，他们在软件中添加了非线性功能，并改名为“NONSAP”。1969 年，Brown 大学的 Marcal 推出了第一个商用非线性有限元软件“MARC”，几乎同时，美国西屋公司的 Swanson 开发了另外一个非线性软件“ANSYS”，不过该软件主要是针对材料非线性问题，而不是几何非线性。1972 年，Brown 大学的 Habbitt 及其合作者开发了 ABAQUS 软件，这是第一个给用户预留接口的商业软件，用户可以根据实际需求添加单元和材料本构模型。同年，MIT（麻省理工