

The Finite Element Method 5th ed

有限元方法 (第5版)



第 2 卷

Volume 2

固体力学

Solid Mechanics

(英) O.C.Zienkiewicz (美) R.L.Taylor 著

庄茁 岑松 译

清华大学出版社

The Finite Element Method 5th ed

有限元方法 (第5版)

第 **2** 卷
Volume 2

固体力学

Solid Mechanics

(英) O.C.Zienkiewicz (美) R.L.Taylor 著

庄茁 岑松 译

清华大学出版社
北京

O. C. Zienkiewicz & R. L. Taylor

The Finite Element Method (Fifth Edition) Volume 2: Solid Mechanics

EISBN:075065055

Copyright © 2000 by Butterworth-Heinemann

Original language published by Butterworth-Heinemann. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education(Asia)Co., within the territory of the People's Republic of China only(excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由 Butterworth-Heinemann 授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2003-7181

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

有限元方法.第2卷,固体力学/(英)监凯维奇(Zienkiewicz, O. C.), (美)泰勒(Taylor, R. L.)著;庄茁,岑松译.—5版.—北京:清华大学出版社,2006.6

书名原文:The Finite Element Method (Fifth Edition) Volume 2: Solid Mechanics

ISBN 7-302-12987-8

I. 有… II. ①监… ②泰… ③庄… ④岑… III. ①有限元法 ②固体力学 IV. ①O241.82 ②O34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 052709 号

出 版 者:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

客户服务:010-62776969

组稿编辑:杨 倩

文稿编辑:赵从棉

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:170×230 印张:28.5 插页:2 字数:574千字

版 次:2006年6月第1版 2006年6月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12987-8/O·539

印 数:1~3000

定 价:48.00元

译者简介

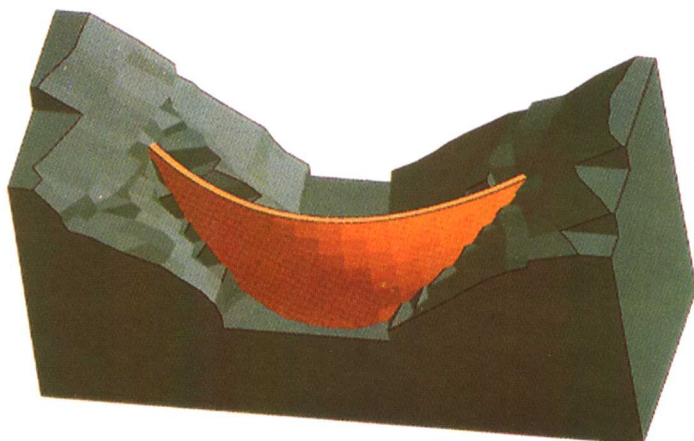
庄苗 男,汉族,1952年6月出生,辽宁省沈阳市人,清华大学航天航空学院教授,博士生导师。1995年爱尔兰国立大学都柏林大学获博士学位。从事固体力学、结构力学、断裂力学和非线性有限元的理论、数值分析方法和工程应用的研究。4次获得国家自然科学基金资助,3次获得863和973项目子课题资助。先后负责中美和中日等7项国际合作项目;完成和正在进行几十项工业和国防课题。发表学术论文110多篇,其中被SCI和EI收录60多篇,编著和译著出版书籍12部(500多万字)。先后培养博士研究生12名,硕士研究生25名,指导博士后3名(含法国1名)。于1998、2000和2004年获得清华大学教学工作优秀成果一、二等奖;2001年获得中国高校科学技术奖自然科学二等奖和柳州市人民政府科学技术进步三等奖。兼任的主要社会工作和学术职务有:清华大学航天航空学院党委书记;中国力学学会计算力学专业委员会委员;中国力学学会《工程力学》学报编委;国际杂志 *Journal of Mechanical Science and Technology* (SCI)的学术顾问;中国机械工业教育协会工科学教学工作委员会副主任委员;北京市机械工程学会压力容器分会副理事长;沈阳工业大学兼职教授;北京市总工会第十一届委员会委员;中国爱尔兰留学生联谊会副主席等。先后到美国ABAQUS公司、香港理工大学、中科院金属所、日本IHI公司、韩国技术科学院(KAIST)、法国巴黎技术大学矿业学院、东京大学和神户大学等做学术交流和访问。

岑松 男,汉族,1972年8月生于北京,福建省福州市人,清华大学航天航空学院副教授,硕士生导师。2000年在清华大学土木工程系获得工学博士学位。从事计算固体力学方向研究。先后主持和参与了国家自然科学基金、高等学校全国优秀博士学位作者专项基金、中国博士后科学基金等14项课题的研究。出版有限元领域专著译著5部,发表论文70余篇,被SCI、EI、ISTP收录46篇次,被他人引用200余次。曾获霍英东教育基金会第十届高等院校青年教师奖(研究类)(2006),2002年全国优秀博士学位论文奖,2002年教育部提名国家自然科学奖一等奖,第一届麻省理工学院计算流体和固体力学国际会议青年学者奖(2001),清华大学优秀博士后奖(2003),清华大学优秀博士毕业生奖(2000),并入选2004年北京市科技新星计划(A类)。兼任的主要社会工作和学术职务有:清华大学航天航空学院党委副书记;中国力学学会计算力学专业委员会委员;中国力学学会《工程力学》学报编委;国际计算力学(IACM)会员。1999年和2001年曾两次应邀赴香港大学进行合作科研。2004年7—8月获新加坡Tan Chin Tuan Exchange Fellowship Award奖励资助赴南洋理工大学土木与环境工程学院任访问学者。

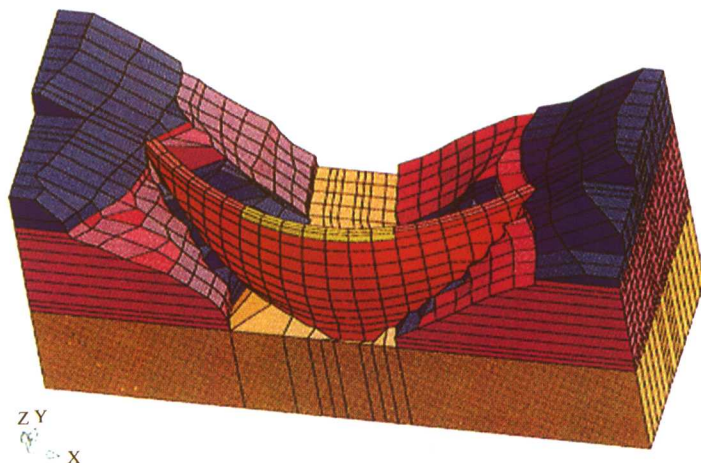
作者简介

O. C. Zienkiewicz 教授 英国 Swansea 大学的荣誉退休教授,是该校工程数值方法研究所的原主任,现在仍然是西班牙巴塞罗那 Calalunya 技术大学工程数值方法的 UNESCO 主席。从 1961 至 1989 年,担任 Swansea 大学土木工程系的主任,使该系成为有限元研究的重要中心之一。在 1968 年,创办了 International Journal for Numerical Methods in Engineering 杂志并任主编,该杂志至今仍然是该领域的主要刊物。他被授予 24 个荣誉学位和多种奖励。Zienkiewicz 教授还是 5 所科学院的院士,这是对他有限元方法领域的奠基性发展和贡献的赞誉。1978 年,成为皇家科学院和皇家工程院的院士;并先后被选为美国工程院的外籍院士(1981),波兰科学院院士(1985),中国科学院院士(1998)和意大利国家科学院院士(1999)。1967 年,他出版了本书的第 1 版,直到 1971 年,本书的第 1 版仍然是该领域的惟一书籍。

R. L. Taylor 教授 在结构和固体力学建模和仿真方面,具有 35 年的经历,其中在工业界工作 2 年。1991 年,被选为美国国家工程院的院士,以表彰他对计算力学领域的教育和研究的贡献。1992 年,被任命为 T. Y. 和 Margaret Lin 工程教授;1994 年,获得 Berkeley Citation 奖,这是加利福尼亚大学伯克利分校的最高荣誉奖。1997 年,Taylor 教授成为美国计算力学学会的资深会员,并在最近被选为国际计算力学学会的资深会员,并获得了 USACM John von Neumann 奖章。Taylor 教授编写了几套应用于结构和非结构系统的有限元分析的计算机程序,FEAP 是其中之一,在世界各国的教学和研究领域得到了广泛的应用。现在 FEAP 更全面地结合于本书中以展示非线性和有限变形的问题。



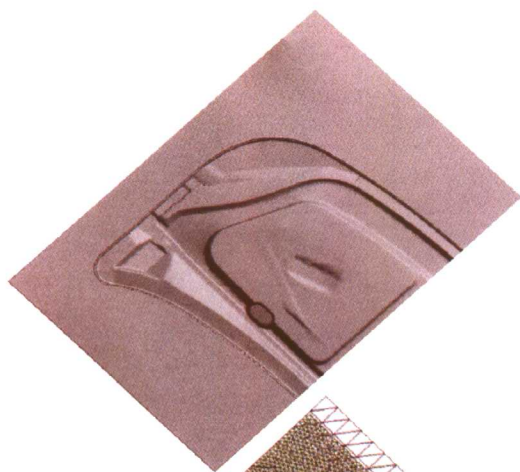
(a) 拱坝的几何模型



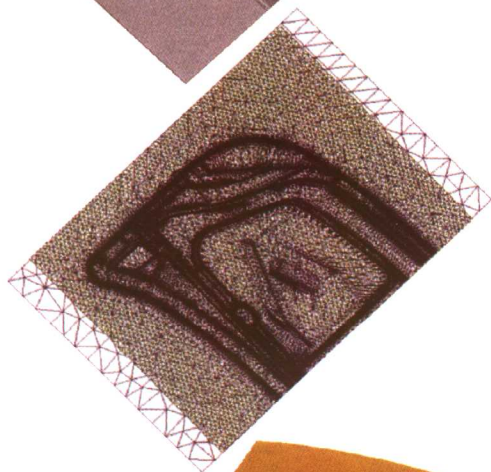
(b) 拱坝连同其基础的有限元离散

彩图 1 坝体的三维非线性分析

经巴塞罗那 CIMNE 的 Miguel Cervera 教授许可, 来源于: B. Suarez, M. Cervera and J. Miguel Canet, "Safety assessment of the Suarna arch dam using non-linear damage model", Proc. Int. Sym. New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona, Spain, 1998. L. Berga (ed.) Balakema, Rotterdam.



(a) 汽车结构件的冲压模具



(b) 离散为 23522 个无转动自由度 BST 三角形壳元的模具(黑色)和薄板(绿色)



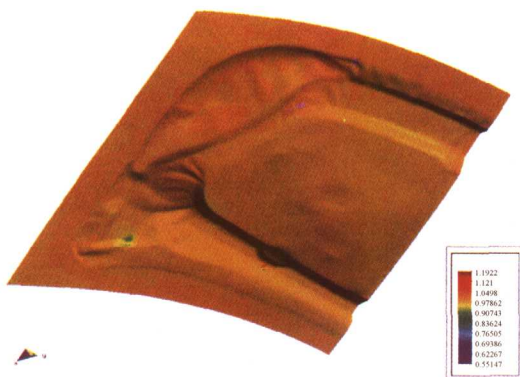
(c) 当冲压 17mm 时的薄板厚度率变化图

彩图 2 汽车门的金属成形非线性分析

E. Oñate, F. Zarate, J. Rojek, G. Duffet, L. Neamtui, "Adventures in rotation free elements for sheet stamping analysis", 4th Int. Conf. Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes (NUMSHEET 99, Besancon, France, Sept. 13-17, 1999).



(d) 当冲压 35mm 时的薄板厚度率变化图



(e) 当冲压 54mm 时的薄板厚度率变化图



(f) 当冲压 72mm 时的薄板厚度率变化图

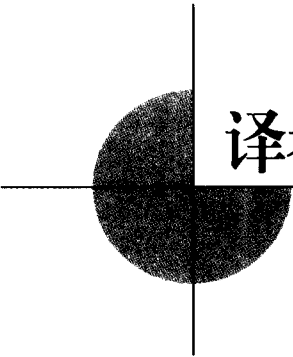
彩图 2(续)



彩图 3 汽车碰撞分析

应用 LS-DYNA 模拟 Neon 汽车前部碰撞。经 Livermore 软件技术公司许可。

由乔治华盛顿大学 FHWA/NHTSA 国家碰撞分析中心建模。



译者前言

计算机仿真科学的发展,使我们能够在虚拟环境中瞬抚四海和纵览古今,而有限元方法及其计算机程序正是我们到达彼岸的桥梁,它是虚拟科学与工程研究的重要工具。

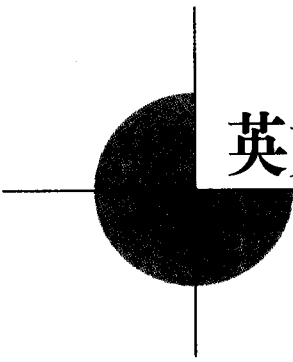
在1999年慕尼黑的欧洲计算力学会议上,R. L. Taylor教授(本书第2作者)在主题报告中,形象生动地用三角形单元的3个顶点形容有限元方法的3位奠基人:R. W. Clough, J. H. Argyris, O. C. Zienkiewicz(本书第1作者),足以证明本书的两位作者对发展有限元方法的贡献。

本书的第1版诞生于1967年,是有限元方法最早的出版物,历经近40年和前后5版的不断更新,从结构、固体扩展到流体,从一卷本扩展到三卷本(基础篇、固体力学篇、流体力学篇),凝聚了本书作者30多年的研究成果,荟萃了近千篇文献的精华,培养了世界上几代计算固体力学的师生和工程师,成为有限元方法的经典名著。

本卷为第2卷——固体力学篇,涵盖了计算固体力学的前沿课题,描述了非线性系统的特殊问题,如材料、几何和接触非线性问题的有限元格式、求解和例题;同时也包含了结构力学分析中板和壳体的有限元格式、解答和应用。二者相得益彰,读者将从连续体与结构的有限元分析中获益。

我们历经艰辛、严谨的工作,终于将此书第2卷翻译成中文并出版,使广大读者能够与我们共同分享计算固体力学的成果,提高相关领域的研究水平,深感欣慰。借此书出版机会,衷心感谢我们的研究生郭宇、柳占立、赵志明、聂君锋、王璞等给予的帮助及其所作出的贡献,感谢清华大学出版社的支持。在本书中对原著的理解上难免有不当之处,敬请读者谅解。

庄茁 岑松
2005年国庆
于清华园



英文版前言(第2卷)

本书是第5版。第1卷覆盖了在线性问题内容中有限元近似的基本方面,涉及了在稳态和瞬态情况下的二维和三维弹性、热传导和电磁问题的典型例子,介绍了有限元计算程序的结构。然而,许多方面的公式属于第2卷和第3卷的内容。在第1卷中,我们希望读者发现对更前沿问题的解答,其中许多问题处于不断探索和研究之中。

在本卷中,我们考虑在固体力学中更前沿的问题,而在第3卷中将考虑在流体动力学中的应用。我们的目的是使得第2卷可以被熟悉有限元方法一般内容的研究者应用,并且将把这些一般性内容引入到固体力学的专题中去。因而本卷内容在许多方面都可以是独立的。在第1卷中提供了许多通用的有限元计算过程,读者可能并不熟悉如何在其他问题中引入有限元的方法。因此,我们建议将本卷与我们所频繁引用的第1卷结合使用。

本卷包括了在固体力学中的两个主要研究领域。

1. 非线性问题(第1~3章和第10~12章): 描述了求解非线性方程系统的特殊问题。在第1部分中,我们密切关注的是材料的非线性行为,而为了研究线弹性问题则保持了在第1卷中采用的关于小应变的假设。这样为在后面进行更前沿课题的研究建立了桥梁,如来自大位移和大变形所展示的几何影响。事实上,在当今工程和物理的大多数领域,非线性应用具有更重要的理论意义和应用价值。我们的研究首先源于应用小应变近似,相信读者能够更容易地体会需要理解和掌握的各方面课题。在粘弹性、塑性和粘塑性方面,涵盖了某些问题的详细内容,以此作为应用其他材料模型的基础。在有限变形问题的研究中,展示了一系列算法,应用它们可以求解的问题包括含约束的问题(例如几乎不可压缩问题和刚体运动问题),以及屈曲和大转动问题。

2. 板和壳(第4~9章): 这些内容显然对于那些从事“结构力学”和涉及特殊类型问题的读者是最感兴趣的,在这里,结构的一维与其他二维尺度相比很小,这

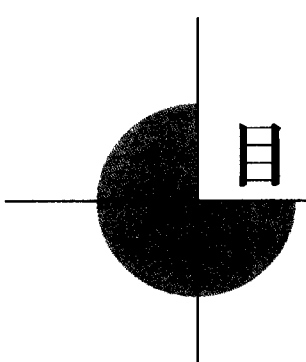
IV 有限元方法

是有限元最初的直接应用和目前还在继续研究的课题之一。那些对固体力学的其他领域感兴趣的读者,第一次阅读时可以忽略这部分内容,通过类比所展示的方法,在结构力学以外拓展更广泛的应用。

第2卷包括一章有关计算程序的内容,为了解非线性问题,在这里我们描述了在第1卷中提供的基本程序的应用。很明显,在书中所展示的各种问题不允许对所讨论的全部课题给予详细的处理,但是,展示了求解的框架形式并在出版者的网页上提供了更多的信息,这样将允许读者做出他们本身的扩展。

我们再次衷心地感谢我们的合作者和朋友,感谢他们的许多有益的评述和讨论。在本卷中,我们要特别感谢 Eric Kasper 教授,他提供了关于材料本构的大量评述,以及对第10章中混合增强方法部分的贡献。我们也希望借此机会感谢我们在 CIMNE 的朋友们,他们提供了模拟环境使得本卷的大部分计算得以完成。

OCZ 和 RLT



目 录

译者前言	I
英文版前言(第2卷)	III
1 固体力学和非线性中的一般问题	1
1.1 引言	1
1.2 小变形非线性的固体力学问题	3
1.3 非线性准调和场问题	12
1.4 瞬态非线性计算的一些典型例子	13
1.5 小结	19
参考文献	19
2 非线性代数方程组的解法	21
2.1 引言	21
2.2 迭代技术	22
参考文献	34
3 非弹性和非线性材料	36
3.1 引言	36
3.2 粘弹性——变形的历史依赖性	37
3.3 经典的时间无关塑性理论	46
3.4 应力增量的计算	53
3.5 各向同性塑性模型	58
3.6 广义塑性——非关联情况	65
3.7 塑性计算的一些例子	69

3.8 蠕变问题的基本公式	73
3.9 粘塑性——一种推广	75
3.10 脆性材料的一些特殊问题	82
3.11 在弹-塑性变形中的非惟一性和局部化	86
3.12 自适应细划网格和局部化(滑移线)捕获	90
3.13 非线性准调和场问题	96
参考文献	99
4 板弯曲问题的近似——薄板(Kirchhoff 理论)与 C_1 连续性要求	107
4.1 引言	107
4.2 板问题——厚板和薄板公式	109
非协调形函数	119
4.3 带有角节点的矩形单元(12 个自由度)	119
4.4 四边形和平行四边形单元	123
4.5 带有角节点的三角形单元(9 个自由度)	123
4.6 最简单形式的三角形单元(6 个自由度)	128
4.7 分片试验——分析的要求	129
4.8 数值算例	130
具有节点奇异性的协调形函数	139
4.9 概述	139
4.10 简单三角形单元的奇异形函数	139
4.11 具有协调形函数的 18 自由度三角形单元	142
4.12 协调的四边形单元	142
4.13 拟协调单元	144
具有附加自由度的协调形函数	145
4.14 Hermite 矩形形函数	145
4.15 21 和 18 自由度的三角形单元	146
协调性困难的避免——混合与具有约束的单元	148
4.16 混合公式——概述	148
4.17 杂交板单元	150
4.18 离散 Kirchhoff 约束	152
4.19 无转角的单元	155
4.20 非弹性材料行为	157
4.21 小结——哪个单元	159

参考文献	160
5 “厚的”、Reissner-Mindlin 板——不可约和混合的公式	166
5.1 引言	166
5.2 不可约的公式——缩减积分	169
5.3 厚板的混合公式	173
5.4 板弯曲单元的分片试验	176
5.5 带有离散配点约束的单元	181
5.6 具有转角泡状和增强模式的单元	190
5.7 连锁插值方案——改善精度	193
5.8 离散“精确的”薄板极限	196
5.9 各种“厚”板单元的性能——薄板理论的局限性	197
5.10 无转角参数的形式	202
5.11 非弹性材料行为	204
5.12 小结——自适应细划	204
参考文献	206
6 由平板单元组成的壳	210
6.1 引言	210
6.2 局部坐标下平板单元的刚度矩阵	212
6.3 向整体坐标转换及单元的组装	214
6.4 局部方向余弦	215
6.5 旋转刚度——6 个自由度的组装	218
6.6 仅具有边中点斜率连续的单元	223
6.7 单元的选择	224
6.8 应用实例	224
参考文献	231
7 轴对称壳	235
7.1 引言	235
7.2 直线单元	236
7.3 曲线单元	242
7.4 独立的斜率——带有罚函数的位移插值(厚或薄壳公式)	250
参考文献	252

8 壳作为三维分析的一种特殊情况——Reissner-Mindlin 假设	255
8.1 引言	255
8.2 具有位移和转动参数的壳单元	256
8.3 轴对称、厚曲壳的特殊情况	263
8.4 厚板的特殊情况	266
8.5 收敛性	266
8.6 非弹性行为	267
8.7 某些壳的例子	268
8.8 小结	273
参考文献	274
9 半解析有限元方法——利用正交函数与“有限条”法	277
9.1 引言	277
9.2 棱柱条	280
9.3 薄膜箱结构	283
9.4 受弯曲作用的板和箱形结构	283
9.5 承受非对称载荷的轴对称实体	285
9.6 承受非对称载荷的轴对称壳	290
9.7 有限条方法——不完全解耦	292
9.8 小结	295
参考文献	296
10 几何非线性问题——有限变形	299
10.1 引言	299
10.2 控制方程	300
10.3 有限变形的变分描述	305
10.4 三场混合有限变形公式	313
10.5 混合增强的有限变形公式	317
10.6 依赖于变形的力——压力载荷	321
10.7 有限变形的材料本构	323
10.8 接触问题	331
10.9 数值算例	338
10.10 小结	342

参考文献	342
11 非线性结构问题——大位移和不稳定性	347
11.1 引言	347
11.2 梁的大位移理论	347
11.3 弹性稳定性——能量解释	354
11.4 厚板的大位移理论	356
11.5 薄板的大位移理论	361
11.6 大挠度问题的解答	363
11.7 壳	366
11.8 小结	370
参考文献	371
12 伪-刚性和刚-柔性物体	375
12.1 引言	375
12.2 伪-刚性体的运动	375
12.3 刚体运动	376
12.4 将刚体连接到柔性体上	380
12.5 通过连接耦合的多体问题	383
12.6 数值例题	385
参考文献	387
13 有限元分析的计算机程序	390
13.1 引言	390
13.2 增加的程序功能描述	391
13.3 非线性问题的求解	392
13.4 重启选项	405
13.5 算例	406
13.6 小结	407
参考文献	408
附录 A 二阶张量的不变量	409
A.1 主不变量	409
A.2 矩不变量	410