

■ CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ■



ANSYS 高级工程 应用实例分析与二次开发

■ 阚前华 谭长建 张 娟 董 城 编著
■ 康国政 主审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS高级工程应用实例 分析与二次开发

阚前华 谭长建 张 娟 董 城 编著
康国政 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以有限元分析法为基础,以作者使用和开发经验为根基,结合丰富的工程实例,以专业化的语言和完善的理论体系,将 ANSYS 在各个专业领域的应用介绍给广大读者。

全书首先简单介绍了有限元分析法、ANSYS、APDL 基础知识;然后分土木工程、机械工程、材料工程、水利工程、电子工程 5 大专业,分别阐述了各专业的工程背景和 ANSYS 在上述领域的强大分析能力;最后,详细介绍了 ANSYS 的二次开发,并对大多数常见问题给予详细解答。全书共包含 25 个工程应用实例,所有实例均在 ANSYS 9.0 下经过了调试。本书配套光盘收录了近 200 个文件,如各章节实例所需的命令流文件、用户子程序源代码、数据文件和宏文件等。

本书理论翔实,实例专业性和针对性强,可作为各理工科院校的高年级本科生、研究生、博士生教学用书,也可作为相关专业领域广大工程技术人员学习和使用 ANSYS 的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发 / 阚前华, 谭长建, 张娟等编著. —北京: 电子工业出版社, 2006.8

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 7-121-02903-0

I. A… II. ①阚… ②谭… ③张… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080469 号

责任编辑: 刘志红 特约编辑: 陈 虹

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 30.5 字数: 774 千字

印 次: 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元(含光盘 1 张)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

半个世纪以来,随着计算机科学与应用技术的飞速发展,有限元理论日益完善,涌现出一大批通用和专业的有限元计算软件。其中,以 ANSYS、ABAQUS、MARC、ALGOR、ADINA、ASKA、COSMOS 和 SYSTUS 最为有名。

ANSYS 是最为通用和有效的商用有限元软件之一,它融结构、传热学、流体、电磁、声学 and 爆破分析于一体,具有极其强大的前后处理器及计算分析能力,能够同时模拟结构、热、流体、电磁及多种物理场间的耦合效应。自 1996 年落户中国以来,ANSYS 以其强大的功能、可靠的质量、全面的培训及良好的市场开拓,赢得了中国 CAE 界的认可和青睐,被广泛应用于我国的土木工程、机械制造、材料加工、水利工程、航空航天、铁路运输业、石油化工、能源、汽车、电子、造船、生物医学、轻工、地矿等各个方面,为各领域的产品设计、研究开发和前沿课题的攻关做出了突出的贡献。

ANSYS 软件的推出为科学研究和工程实践提供了巨大的便利。许多工程技术人员、研究人员在面对如此庞大的系统时往往无所适从,但他们有时又迫切需要使用有限元软件的某些功能解决特定领域的工程问题。ANSYS 已经发展成为一个包罗万象、博大精深的系统,通过自学掌握 ANSYS 是不大现实的;另外,大多数 ANSYS 用户初次面对层叠众多的菜单时感到束手无策;或者他们只了解菜单的详细功能和宏观构架,但是没有实际操作的技巧和分析问题能力。即使从事此项工作的工程技术人员也要经常查阅一些工具书。然而,目前有关 ANSYS 的系统指导书仍不多见。基于以上现状,本书给出了大量包括土木、机械、材料、水利和电子等相关专业的 25 个十分完整的实例,涉及 ANSYS 的各个方面。众所周知,有限元分析的结果评价是十分关键的,本书也将在这方面给予重点阐述。

本书结构和内容梗概

本书由前言、目录、正文、参考文献和配套光盘组成,主要以 ANSYS 9.0 为软件平台,共 16 章。

第 1 章到第 2 章重点介绍了 ANSYS 基础知识,如有限元的基本方法,ANSYS 的功能、结构、界面和分析步骤,APDL 的变量、参数、语法、宏文件和函数运算等。

第 3 章到第 5 章介绍 ANSYS 在土木工程中的应用,主要介绍 ANSYS 在桥梁、隧道和道路工程方面的应用。

第 6 章到第 8 章介绍 ANSYS 在材料工程中的应用,主要介绍 ANSYS 在金属材料、复合材料和焊接结构中的应用。

第 9 章到第 10 章介绍 ANSYS 在机械工程中的应用,主要介绍机械中的轴承、压力容器等有限元分析过程。

第 11 章介绍 ANSYS 在水利工程中的应用,主要介绍 ANSYS 在水利工程中在闸门中

的应用。

第 12 章到第 13 章介绍 ANSYS 在电子工程中的应用, 主要介绍 ANSYS 在电子封装和压电陶瓷中的应用。

第 14 章到第 15 章介绍 ANSYS 二次开发, 针对 ANSYS 的用户子程序、UDIL 语言的二次开发。

第 16 章为疑难解答, 针对读者使用 ANSYS 中可能遇到的问题, 给予系统的解答。

需要说明的是, 本书所附命令流可以针对 ANSYS 的不同版本, 但本书的实例均在 ANSYS 9.0 版本下进行操作和验证。

使用建议

本书可作为广大理工科院校的高年级本科生、硕士生、博士生、教师及广大工程技术人员在学习 ANSYS 时的学习用书和使用 ANSYS 过程中的参考用书。

ANSYS 是一种高级有限元分析软件, 这决定了本书的主要读者群是具有一定理论基础的中高级专门人才, 所以本书在每一章节给予实例分析的同时, 也对相关的理论知识和工程背景进行了较详尽的阐述, 这些知识必将给读者分析问题进而解决问题带来很大的方便, 建议读者在揣摩实例前先进行认真的阅读。

本书的实例材料以 GUI 和命令流两种常用方式编排, 且均在 ANSYS 9.0 版本下运行和调试。GUI 操作随版本的变更而不同, 对非 ANSYS 9.0 版本要慎重使用; 而 APDL 的良好兼容性使得读者可以在任意版本上运行命令流编写的实例。

本书配套光盘

本书配套光盘中包括各类文件近 200 个。其中, 文件可以分为各章节所需的命令流文件、用户子程序源代码、数据文件和宏文件等。读者可以结合本书, 进行有针对性的练习。

编写分工

本书由西南交通大学应用工程与力学系教授和博士编写。其中, 康国政教授多年从事有限元教学、科研工作; 阚前华、张娟、谭长建、董城多年从事桥梁、水利、隧道、压力容器、金属材料等工程领域的有限元分析和研究。

本书的编写工作主要有以下同志: 谭长建编写了第 3 章的命令流源文件, 张娟编写了第 11 章的命令流源文件以及第 7 章的 7.2、7.3 节, 董城编写了第 4 章和第 9 章的命令流源文件, 其余章节均由阚前华编写, 全书内容由阚前华统一编排、整理, 最终由康国政教授对全书进行审定。感谢郭素娟提供了第 7.4 节的内容; 感谢王萍对作者的启发, 感谢吴之俊提供了第 12 章的命令流, 感谢于建提供了第 13 章的命令流源文件, 感谢许荔对第 10.2 节命令流的校对, 感谢朱曦对第 12.2 节命令流的校对。感谢广大网友资料的提供, 给作者以灵感。

参与本书编写工作的还有：邹素琼、冼进、赵秋云、赵继军、彭艺、曲辉辉、周章、蒋波、徐留旺、曹振宇、张婷、温凌霜、鲁得翠、蒋泽平、魏乐、韩翔、程小英、谭小丽、卢丽娟、李小琼、周宏、罗吉、许翔燕、陈春、张忠、方小马、黄姹英、周明、宋晶、邓勇等，在此一并表示感谢！

ANSYS 本身是一个庞大的知识系统和资源库，因此，本书虽卷帙浩繁，仍难全窥其貌。在编写过程中，几易书稿，反复修订，并对所给实例进行了反复的验证，但由于作者水平有限，难免存在疏漏和错误之处，敬请广大读者批评指正，交流提高。我们的联系方式 E-mail: china_54@tom.com。

作者

2006 年 6 月

读者调查表

尊敬的读者：

自电子工业出版社机电图书事业部开展读者调查活动以来，收到来自全国各地众多读者的积极反馈，他们除了褒奖我们所出版图书的优点外，也很客观地指出需要改进的地方。读者对我们工作的支持与关爱，将促进我们为您提供更优秀的图书。您可以填写下表寄给我们（北京万寿路 173 信箱机电图书事业部 邮编：100036），也可以发送电子邮件与我们取得联系（lzhmails@phei.com.cn），反馈您宝贵的建议和意见。我们将从中评出热心读者若干名，赠送我们出版的图书。感谢您对我们工作的支持！

您的意见
是我们创造
精品的动力
源泉！

姓名：_____ 性别：☐ 男 ☐ 女 年龄：_____ 职业：_____
电话（手机）：_____ E-mail: _____
传真：_____ 通信地址：_____
邮编：_____

1. 影响您购买同类图书因素（可多选）：

☐ 封面封底 ☐ 价格 ☐ 内容提要、前言和目录 ☐ 书评广告 ☐ 出版社名声
☐ 作者名声 ☐ 正文内容 ☐ 其他_____

2. 您对本事业部图书的满意度：

从技术角度 ☐ 很满意 ☐ 比较满意 ☐ 一般 ☐ 较不满意 ☐ 不满意
从文字角度 ☐ 很满意 ☐ 比较满意 ☐ 一般 ☐ 较不满意 ☐ 不满意
从排版、封面设计角度 ☐ 很满意 ☐ 比较满意 ☐ 一般 ☐ 较不满意 ☐ 不满意

3. 您选购了我们哪些图书？主要用途？

4. 您最喜欢我们出版的哪几本图书？请说明理由。

5. 您所教课程主要参考书？请说明书名、作者、出版年、定价、出版社。

6. 目前教学您使用的是哪本教材？（请说明书名、作者、出版年、定价、出版社）有何优缺点？

7. 您的相关专业领域中所涉及的新专业、新技术包括：

8. 您感兴趣或希望增加的图书选题有：

9. 您是否需要我们定期给您邮寄相关出版信息：☐ 是 ☐ 否

邮寄地址：北京海淀区万寿路 173 信箱机电图书事业部

邮编：100036

电话：010-88254473

E-mail: lzhmails@phei.com.cn

联系人：刘志红

目 录

第 1 章	ANSYS 概述	(1)
1.1	有限元法概述	(1)
1.1.1	各类几何性质中的张量形式	(2)
1.1.2	非线性方程组的迭代方法	(3)
1.1.3	有限元常用术语	(8)
1.2	有限元法的分析过程	(9)
1.3	ANSYS 的发展过程	(10)
1.4	ANSYS 功能简介	(11)
1.5	ANSYS 9.0 启动与界面	(15)
1.5.1	启动 ANSYS 9.0	(15)
1.5.2	ANSYS 操作界面	(16)
1.6	ANSYS 文件系统	(19)
1.6.1	文件格式	(19)
1.6.2	文件管理	(20)
1.7	ANSYS 分析实例	(22)
1.7.1	问题描述	(22)
1.7.2	模型选取	(22)
1.7.3	模型建立	(22)
1.7.4	加载及求解	(25)
1.7.5	结果分析	(28)
1.7.6	命令流求解	(33)
第 2 章	APDL 简介	(38)
2.1	APDL 概述	(38)
2.2	参数	(39)
2.3	流程控制	(41)
2.3.1	*go 无条件分支	(41)
2.3.2	*if...*ifelse...*else...*endif 条件分支	(41)
2.3.3	*do...*enddo 循环	(42)
2.3.4	*dowhile 循环	(43)
2.3.5	*repeat 重复命令	(43)
2.4	宏文件	(45)
2.5	函数、表达式和函数编辑器	(46)

2.5.1	函数	(46)
2.5.2	表达式	(47)
2.5.3	函数编辑器	(47)
2.6	APDL 实例	(49)
2.6.1	弹簧—质量系统的响应	(49)
2.6.2	简支梁的最不利载荷位置	(51)
第 3 章	斜拉桥有限元分析	(57)
3.1	工程背景	(57)
3.1.1	概述	(57)
3.1.2	斜拉桥在中国的发展	(58)
3.1.3	理论分析	(60)
3.2	有限元模型	(62)
3.2.1	斜拉桥参数说明	(62)
3.2.2	自定义截面	(63)
3.2.3	建模过程	(68)
3.3	成桥状态分析	(81)
3.4	模态分析	(87)
3.5	地震分析	(90)
3.5.1	地震作用理论	(90)
3.5.2	地震谱分析	(91)
3.5.3	地震波分析	(93)
3.6	车辆强迫振动分析	(96)
3.7	斜拉桥施工监控分段模拟	(99)
3.8	结论	(110)
第 4 章	隧道工程有限元分析	(111)
4.1	工程背景	(111)
4.1.1	生死单元	(111)
4.1.2	初始地应力的模拟	(116)
4.1.3	Drucker-Prager (DP) 材料模型	(116)
4.1.4	隧道设计模型	(118)
4.1.5	隧道载荷	(120)
4.2	建立隧道有限元模型	(120)
4.3	加载与求解	(128)
4.4	后处理	(130)
4.5	加固范围讨论	(134)
4.6	隧道埋深讨论	(139)

第 5 章 道路工程有限元分析	(146)
5.1 工程背景	(146)
5.2 建立模型	(148)
5.3 边界条件及载荷	(155)
5.4 初始温度场求解	(158)
5.5 温度场求解	(158)
5.6 后处理	(159)
5.7 保温材料保温效果分析	(160)
5.8 结果讨论	(161)
第 6 章 材料循环变形行为的有限元分析	(162)
6.1 材料非线性	(162)
6.1.1 弹塑性分析	(162)
6.1.2 各向异性塑性	(165)
6.1.3 Drucker-Prager (DP) 材料	(166)
6.1.4 超弹性分析	(167)
6.1.5 蠕变分析	(169)
6.1.6 黏塑性分析	(170)
6.1.7 形状记忆合金	(171)
6.1.8 组合材料本构模型	(173)
6.2 非对称应力控制下的棘轮行为有限元模拟	(174)
6.2.1 工程背景	(174)
6.2.2 建立有限元模型	(176)
6.2.3 边界及载荷条件	(178)
6.2.4 求解及结果分析	(180)
6.2.5 不同应力幅值求解	(183)
6.2.6 结论	(187)
6.3 循环应变行为的有限元模拟	(187)
6.3.1 工程背景	(187)
6.3.2 有限元模型	(188)
6.3.3 边界及载荷条件	(189)
6.3.4 求解及结果分析	(190)
6.3.5 结论	(195)
第 7 章 复合材料有限元分析	(196)
7.1 复合材料概述	(196)
7.1.1 复合材料的定义及分类	(196)
7.1.2 复合材料的性能	(197)
7.1.3 复合材料的用途	(198)

7.1.4	复合材料的组分	(198)
7.1.5	金属基复合材料	(199)
7.2	短纤维增强复合材料在制备过程中产生的热残余应力分析	(200)
7.2.1	工程背景	(200)
7.2.2	建立有限元模型	(202)
7.2.3	求解及结果分析	(204)
7.3	金属基复合材料热残余应力分析	(206)
7.3.1	工程背景	(206)
7.3.2	建立有限元模型	(207)
7.3.3	边界及载荷条件	(210)
7.3.4	求解及结果分析	(211)
7.4	复合材料层合板的有限元分析	(214)
7.4.1	工程背景	(214)
7.4.2	建立有限元模型	(215)
7.4.3	边界及载荷条件	(218)
7.4.4	求解及结果分析	(219)
7.5	6061Al/SiC 层合复合材料循环变形行为的有限元分析	(221)
7.5.1	工程背景	(221)
7.5.2	对称面温度 0℃、外表面 40℃ 时温度分布	(222)
7.5.3	交变温度场分析	(225)
7.5.4	20℃ 时复合材料在 $\varepsilon=\pm 2\%$ 的单轴应变循环作用下的循环变形行为	(229)
7.5.5	20℃ 复合材料在 $\sigma=(50\pm 200)\text{MPa}$ 的单轴应力循环 (2N) 作用下的 循环变形行为	(232)
7.5.6	SiC 层的厚度的影响	(235)
7.5.7	结论	(235)
第 8 章	焊接结构有限元分析	(236)
8.1	热分析相关知识	(236)
8.1.1	热分析简介	(236)
8.1.2	稳态传热分析	(237)
8.2	钢板边缘堆焊温度场分析	(239)
8.2.1	工程背景	(239)
8.2.2	建立有限元模型	(240)
8.2.3	分析及求解	(242)
8.2.4	后处理	(244)
8.2.5	结果讨论	(246)
8.3	铸件浇铸温度场分析	(246)
8.3.1	工程背景	(246)

8.3.2	建立有限元模型	(247)
8.3.3	施加载荷	(248)
8.3.4	求解	(249)
8.3.5	结果分析	(249)
8.4	焊缝残余应力及温度场分析	(251)
8.4.1	工程背景	(251)
8.4.2	赋予材料参数	(252)
8.4.3	建立有限元模型	(254)
8.4.4	施加约束与载荷	(255)
8.4.5	单元生死	(255)
8.4.6	求解	(257)
8.4.7	通用后处理	(258)
8.4.8	时间历程处理器	(262)
第 9 章	机械工程有限元分析	(264)
9.1	理论基础	(264)
9.1.1	子模型简介	(264)
9.1.2	子模型分析步骤	(265)
9.2	问题描述	(269)
9.3	模型建立	(269)
9.3.1	环境及参数设定	(269)
9.3.2	实体建模	(271)
9.3.3	划分单元	(275)
9.4	加载及求解	(275)
9.5	结果分析	(276)
9.6	子模型分析	(278)
9.6.1	实体建模	(279)
9.6.2	划分单元	(281)
9.6.3	切割边界条件	(282)
9.7	其他载荷及求解	(283)
9.8	结果分析	(284)
9.9	展望	(284)
第 10 章	压力容器有限元分析	(285)
10.1	压力容器封头应力场的有限元分析	(285)
10.1.1	工程背景	(285)
10.1.2	建立有限元模型	(286)
10.1.3	边界及载荷条件	(288)
10.1.4	求解及结果分析	(289)

10.1.5	结论	(292)
10.2	压力容器的应力分析	(292)
10.2.1	工程背景	(292)
10.2.2	建立有限元模型	(293)
10.2.3	边界条件及载荷	(295)
10.2.4	求解及结果分析	(296)
10.2.5	结论	(299)
第 11 章	水库闸门有限元分析	(300)
11.1	工程背景	(300)
11.2	有限元模型	(301)
11.3	载荷及边界条件	(301)
11.4	求解与结果分析	(303)
11.4.1	整体结果	(303)
11.4.2	面板结果	(303)
11.4.3	梁结果	(304)
11.4.4	支臂结果	(305)
11.5	结构强度与刚度评定	(305)
11.5.1	容许应力	(305)
11.5.2	强度条件	(306)
11.5.3	强度评判结果	(306)
11.6	结论	(307)
11.7	命令流求解	(307)
第 12 章	电子封装有限元分析	(325)
12.1	工程背景	(325)
12.1.1	电子封装国内外研究现状	(325)
12.1.2	电子封装的焊料研究	(326)
12.1.3	电子封装面临的工程问题	(328)
12.2	QFP 结构在温度循环下的有限元分析	(329)
12.2.1	QFP 介绍	(329)
12.2.2	Anand 黏塑性本构模型	(330)
12.2.3	材料参数	(330)
12.2.4	单元类型	(331)
12.2.5	有限元模型	(332)
12.2.6	载荷及边界条件	(332)
12.2.7	分析过程的 APDL	(333)
12.2.8	求解及结果分析	(340)
12.2.9	结论	(344)

12.3	QFP 位移循环下的有限元分析	(344)
12.3.1	分析方案	(344)
12.3.2	求解过程	(345)
12.3.3	结果与分析	(347)
12.3.4	结论	(350)
第 13 章	压电断裂行为有限元分析	(351)
13.1	工程背景	(351)
13.1.1	压电效应及压电材料概述	(351)
13.1.2	线性压电基本理论	(352)
13.1.3	有限元分析在压电材料中的应用	(353)
13.1.4	压电材料断裂理论研究进展	(353)
13.1.5	线性断裂模型	(353)
13.1.6	压电材料断裂准则	(354)
13.1.7	压电材料的裂纹偏折	(355)
13.2	PZT-4 材料平面中心裂纹有限元模拟	(355)
13.3	压电陶瓷断裂准则	(362)
13.3.1	应力强度因子准则	(362)
13.3.2	总能量释放率断裂准则	(364)
13.3.3	机械应变能释放率断裂准则	(367)
13.4	压电陶瓷 PZT-4 材料断裂有限元模拟	(370)
13.4.1	I 型断裂有限元模拟及结果分析	(370)
13.4.2	混合模式断裂有限元模拟及结果分析	(375)
13.5	结果结论	(395)
第 14 章	用户子程序	(396)
14.1	用户子程序适用性	(396)
14.2	用户蠕变子程序 usercr.f	(399)
14.3	用户蠕变子程序 usercreep.f	(405)
14.4	用户自定义本构关系	(408)
14.5	子程序实例	(413)
14.5.1	输入数据	(413)
14.5.2	后处理输出数据	(415)
14.5.3	用户子程序 usermat.f 源文件	(416)
第 15 章	ANSYS 用户界面设计	(424)
15.1	UIDL 概述	(424)
15.1.1	单行参数输入	(424)
15.1.2	多行参数输入	(425)

15.2 棘轮行为分析专用程序开发实例.....	(426)
15.2.1 程序简介.....	(426)
15.2.2 程序框架.....	(426)
15.2.3 工作流程.....	(432)
第 16 章 疑难解答	(436)
16.1 ANSYS 工作环境.....	(436)
16.2 前处理.....	(439)
16.3 载荷及边界.....	(448)
16.4 求解.....	(454)
16.5 后处理.....	(455)
16.6 专业知识.....	(459)
参考文献	(466)

第1章

ANSYS 概述

知识点:

- 有限元法
- ANSYS 功能
- ANSYS 结构
- ANSYS 软件窗口
- ANSYS 分析流程

本章导读:

本章先介绍有限元分析方法的有关理论知识,随后详细阐述 ANSYS 的特点、功能、结构和实现过程。

1.1 有限元法概述

有限元法是求解数值方程的一种数值计算方法,是解决工程实际问题的一种有力的数值计算工具,它是将弹性理论、计算数学和计算机软件有机结合的一种数值分析技术。在所有的数值分析方法中,有限差分法是被普遍接受的一种数值方法。借助有限差分法,可以较容易地解答一些复杂问题。但在遇到复杂的几何形状和边界条件时,有限元差分法解的精度受到影响,收敛性亦难以保证。

随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,一种新的功能强大、使用范围广泛的数值方法——有限元法出现了。“有限元法”(Finite Element Method, 简称 FEA) 这个名称最先是由 Clough 在一篇平面问题的论文中提到的,但有限元法的基本思想要追溯到 Courant 的工作,他曾于 1943 年尝试将分片连续函数和最小位能原理结合求解 St. Venant 扭转问题。有限元法的应用则是随着计算机的出现而开始的。Turner、Clough 等人于 1956 年将钢架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题,并用于飞机结构的分析。半个世纪以来,由于有限元法的通用性和高效性,它在工程分析中获得了最广泛应用。许多学者开展了针对有限元法的研究,如 Oden (1972 年)、Belytschko 和 Hughes (1983 年)、Zienkiewicz 和 Taylor (1991 年), Bathe (1996 年)、Simo 和 Hughes (1998 年)、Bonet 和 Wood (1997 年)、Belytschko、Liu 和 Moran (2000 年) 等人的著作。国内比较有影响的有限元专著包括清华大学王勖成编著的《有限单元法的基本原理和数值方法》(1987 年, 1995 年, 1997 年);王勖成编著的《有限单元法》(2003 年);