

结构塑性极限与安定 分析理论及工程方法

Numerical Theories and Engineering
Methods for Structural Limit and
Shakedown Analyses

◎ 陈 钢 刘应华 著



科学出版社
www.sciencep.com

**结构塑性极限与安定分析理论
及工程方法**

**Numerical Theories and Engineering
Methods for Structural Limit and
Shakedown Analyses**

陈 钢 刘应华 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于塑性力学的极限与安定分析理论及工程方法的著作。作者力求通过本书告诉读者应用极限与安定分析理论解决系列工程问题的一般方法和过程。书中介绍了作者近20年来在这一领域的系统性研究成果——弹塑性结构极限与安定分析数值理论及其在压力容器与压力管道强度设计和安全评定等方面的工程应用。全书共分三篇十五章,其中第一篇简要阐述极限与安定分析的基本任务与工程背景、基本理论与解析方法;第二篇重点介绍各种先进的数值计算方法和实用的实验测试方法;第三篇突出展示典型、成功的工程应用案例,并总结凝炼出工程应用的一般方法。这些成果既有理论创新和发展,又解决了工程中的关键技术难题,形成较为完整和一般通用的应用理论体系,具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书可供力学、机械、材料、能源、化工、冶金、航空、核技术等相关领域的科研人员、工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构塑性极限与安定分析理论及工程方法/陈钢,刘应华著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 978-7-03-015246-6

I. 结… II. ①陈… ②刘… III. ①结构极限-研究
②塑性极限-研究 IV. O343 0344.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 024551 号

责任编辑:童安齐/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年12月第一版 开本:850×1168 1/32
2006年12月第一次印刷 印张:18 1/2 插页 1
印数:1—2 500 字数:460 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部门电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)



作者简介

陈钢 1958年12月生，江苏江阴人。清华大学固体力学博士。

1989~1990年作为德国国家奖学金获得者在德国汉诺威技术

监督协会 (TÜV) 学习、工作。现担任中国特种设备检测研究中心总工程师、研究员、锅炉压力容器压力管道高级检验师。兼任国家特种设备产品质量监督检验中心主任、国家安全生产专家组专家、国际压力容器理事会 (ICPVT) 理事、国家质检总局特种设备安全技术委员会副主任、中国特种设备检验协会副理事长、中国机械工程学会压力容器分会副主任委员、中国机械工程学会失效分析分会副主任委员、中国标准化协会和中国职业安全健康协会常务理事、北京航空航天大学和华东理工大学博士生导师、中国特种设备检测研究中心博士后科研工作站学术委员会主任委员。

长期从事特种设备安全科学研究和工程实践。作为国家“七五”、“九五”、“十五”重点科技攻关课题组长和“八五”攻关课题副组长，先后组织全国10个部委140多个单位的数百名专家联合攻关，在承压设备的危险源辨识、缺陷检测、等级评价、安全评定和在线监测等方面开展了失效分析、检测监测、断裂与疲劳评定、高温与腐蚀环境敏感性评定、风险评估等技术研究，共完成28项专题，取得近80多项重要研究成果，为我国特种承压设备重大事故率的迅速下降发挥了重要作用。同时，还具体负责其中5项课题、参加7项专题的研究工作，建立了结构塑性极限与安定性分析的高效数值算法和通用工程方法，开拓了含体积型缺陷承压设备塑性评定技术的研究领域，发展了完整性技术。负责或主持解决了一批重大、关键承压设备的检测评定技术难题，多项研究成果被国家标准和政府法规采用，取得重大社会和经济效益。2004~2005年，作为专家组长负责组织全国百余位专家完成了“我国特种设备安全中长期科技发展规划战略研究”课题。

发表论文、专著50多篇（部），培养或联合培养博士后、博士、硕士10名。获国家科技进步二等奖3项，省部级一等奖7项、二等奖3项，国家“八五”与“九五”攻关重大优秀科技成果奖2项，2004年获全国出国留学回国人员成就奖章，同年被评为2004年全国十大创新英才，2005年被评为全国先进工作者。



作者简介

刘应华 1968年9月生。现为清华大学工程力学系教授、博士生导师，教育部破坏力学重点实验室副主任。1996年获清华大学固体力学专业博士学位。1996~1997年赴意大利米兰工业大学结构工程系做博士后研究，1997年5月回清华大学任教。研究方向为塑性力学和计算固体力学及其工程应用。先后主持国家自然科学基金项目，全国优秀博士论文专项基金项目，国家基础研究“973”项目子课题，教育部新世纪优秀人才支持计划项目，国家“863”项目子课题以及来自工业部门的应用研究项目10多项。担任三份国内核心期刊和两份国际期刊的编委。

近10多年来，与合作者一起在塑性极限与安定分析及其工程应用领域做出了系统性和独创性的研究成果：建立了极限与安定分析的特征模式和层叠模型理论；提出了塑性上、下限分析高效可靠的系列数值计算方法；解决了国际上多年未能解决的极限与安定理论的工程应用问题。同时发展了压力容器设计和评定的新方法，提出了压力容器多目标塑性优化设计、运行过程优化理论和方法，建立了相应的灵敏度分析方法。此外，在复合材料和层合板壳静动力特性与稳定性分析、材料参数反分析、先进的计算力学理论和方法等领域也取得了一系列创新成果。

上述成果受到了国际著名学者和专家的重视和好评。已在国内外重要期刊、会议上发表学术论文90多篇，其中SCI收录43篇，EI收录35篇，被他人引用100多次。获国家科技进步二等奖2项，教育部新世纪优秀人才支持计划，全国优秀博士论文奖，清华大学学术新人奖等多项奖励。

序

随着科学技术的不断进步和可持续发展观的深入人心,现代工业不仅对工程结构的安全性和可靠性提出了更高的要求,而且也期望尽可能发掘材料的承载潜力,充分利用其塑性特性,减少材料消耗。由于塑性极限与安定分析理论对于加强结构安全和降低其成本,具有重要的理论意义和实用的工程价值,因此它有着广泛的应用前景,在现代结构设计和安全评定技术发展的过程中起着愈来愈重要的作用。

极限与安定分析理论自 20 世纪 30 年代被提出以来,不断有新的发展,并为工程界所瞩目。尤其是 20 世纪 50 年代到 80 年代,不少中外学者应用结构塑性极限与安定分析的基本原理,针对梁、钢架、轴对称板壳等结构,给出了一系列确定极限与安定荷载完全解的解析方法,对完善该理论做出了重要贡献。由中国建筑工业出版社于 1985 年出版的《结构塑性极限分析》一书,集中反映了这个时期所取得的创新性成果,是国内一部系统介绍塑性极限理论的专著。

然而,随着计算机技术和数值方法的快速发展,作为一种工程分析与设计的工具,极限与安定分析理论远没有与其价值相称地普及应用。其主要原因是:该理论的应用研究还不够充分,许多研究成果只具有理论意义,计算规模和工作量很大,一进入实际应用,就显出巨大的困难;另一方面,由于数值方法计算结果的离散性、数据准备和处理量巨大以及各变量之间影响关系不明确等特点,应用其解决系列工程问题更为困难。到目前为止,国内外学者仅解决了一些比较典型的简单结构在不同荷载作用下的极限与安定分析问题,而对于复杂工程实际结构还是难以求解。因此,研究和建立一般工程结构极限与安定分析的高效数值算法和通用工程方法,已成为该理论能否实际工程应用,并发挥其巨大作用的关键和难点,也是此前亟待攻克的前沿课题。

本书作者长期从事塑性极限与安定性分析理论的数值算法和工

程方法研究,在该理论的工程应用方面,取得了一系列突破性进展。尤其是该书第一作者,自 1985 年就开始从事薄壁筒壳双轴热棘轮效应机理和设计方法的研究,形成了应用安定理论数值方法解决系列工程难题的初步模式。在“七五”、“八五”、“九五”和“十五”期间,他作为国家重点科技攻关专题组长,在国内外率先应用极限与安定分析理论研究含体积型缺陷承压设备的承载能力,开拓了体积型缺陷塑性安全评定的研究领域,提出了高效数值算法,首次建立了失效模式、应力图谱、极限与安定荷载数据库和拟合计算公式,提出了单参数判据和三级评定方法,从而进一步完善了该理论的工程方法。20 多年来,他和他带领的团队,在攻关课题的研究中,突破了国内外三维复杂系统塑性极限与安定理论计算量巨大、在工程上无法应用的难题,提出了一系列各具特点的高效数值计算方法,并结合压力容器和压力管道体积型缺陷评定方法、压力容器大开孔和弯管等结构设计公式的研究,建立了系统、完整的通用工程方法。虽然这些方法出自承压设备体积型缺陷的研究,但适用于一般复杂结构的塑性极限与安定分析,从而解决了该理论的工程应用难题,并使其转化为生产力。上述成果既有理论创新和发展,又解决了工程中的关键技术难题,形成了较为完整和一般通用的应用理论体系,构成了我国在这一领域的重要系统性创新成果,受到国际著名专家和学者的重视和好评,并被多项国家标准和政府法规所采用,在解决一系列重大工程技术难题中发挥了重要作用,取得重大的经济效益和社会效益。

该书是对作者及其团队 20 多年来在此领域研究成果的系统总结,是国内外首部系统论述塑性极限与安定分析数值理论及工程方法的专著。该书第一篇简要地概述了极限与安定分析的基本任务和工程背景、基本理论与解析方法,并给出大量国内外参考文献。第二篇和第三篇主要反映了作者及其团队的原创性研究成果。其中,第二篇重点介绍了多种典型的高效数值计算方法和实验测试方法,突出体现了先进的数学、力学理论和方法的成功应用;第三篇重点阐述了应用极限与安定性分析理论解决工程问题的一般方法、思路和过程,突出展示

了典型、成功的工程应用案例。在通用工程方法应用中,该书十分重视加强先进的数学和力学方法手段、模型建立和参数化简、失效模式和极限与安定荷载数据库及其拟合公式,尤其是工程物理特性和常规设计准则之间的综合分析 with 相互关联,实现二次创新;该书的突出特点是,高效数值算法与通用工程方法组合应用、工程实际问题的解决和设计、评定标准法规制定的有机结合,不但给出有效的理论方法,解决重大工程难题,而且在技术法规层面,为极限与安定理论的高层次、大范围推广应用奠定了基础,体现了高水平的理论研究与广泛的工程应用之间的有机结合。这是作者将理论应用解决工程实际问题的成功范例,也是作者在本学科领域中做出的具有很高水平的贡献。

该书内容全面、丰富、系统。它的出版对塑性极限与安定理论的发展和工程应用将产生重要的推动作用。我为该书的正式出版表示衷心的祝贺,故乐为之序。

清华大学教授

技术科学博士

徐秉业

2006. 2. 20 于清华园

前 言

随着现代工业技术的迅速发展,在石油、化工、化肥、冶金、电力、核技术、海洋开发等领域,工程结构的工作条件日益苛刻,从而对其工作安全性提出了更高的要求。另一方面,利用材料的塑性特性,可以充分发挥材料的承载能力,节约可观的材料,产生显著的经济效益。因此,对外载作用下的结构进行塑性分析,具有重要的理论意义和工程实用价值。

结构的极限分析与安定分析是塑性力学中最有实用意义的分支之一,其宗旨是确定各类工程结构的极限荷载和安定荷载,为工程设计和安全评定提供准确可靠的理论依据。与常规分析(弹性设计)相比,极限与安定性分析更能反映结构性态的本质和实际安全程度,进一步发挥材料承载的潜力。这种分析与加载历史无关,可以避免弹塑性增量分析的复杂计算而直接求解(常常由于无法事先知道加载路径,而使这种弹塑性计算无法实现)。极限与安定分析的理论基础是上、下限定理。极限与安定分析早期(20 世纪六七十年代以前)的研究重点是寻求典型简单结构的解析解,在梁、刚架、板壳及平面问题等方面都取得了显著成果,但对大多数实际工程结构,受限于数学上的困难,无法找到解析解。随着电子计算机技术的迅猛发展,从 20 世纪 80 年代起研究重点越来越转向研究应用的策略,建立和发展高效可靠、切实可行的数值计算方法,使极限与安定性理论得以在工程中应用,解决更多的个案实际问题。经过几十年的发展和应用,结构的极限和安定分析研究领域已取得了丰富的成果。然而,由于数值方法计算结果的离散性、数据准备和处理量巨大以及各变量之间影响关系不明显等特点,应用其解决同类系统工程问题,仍然十分困难。尽管如此,极限与安定理论已经在美国 ASME 规范、日本 JSME 规范、英国

CEGB 标准、法国 RCC-MR 标准等国际重要的一些设计规范和标准中得到了体现。我国国家标准《在用含缺陷压力容器安全评定》(GB/T19624—2004)和行业标准《钢制压力容器分析设计》(JB4732—98)中也采用了极限与安定分析理论的思想。极限荷载和安定荷载已逐渐成为近代工程强度设计和安全评定规范中塑性失效准则的重要判据。

我国在役压力容器和管道安全评定与事故预防对力学提出了重大而紧迫的国家需求。压力容器和管道的塑性极限与安定分析及相应安全评定方法的研究,是当时压力容器和管道安全性分析中的前沿课题,具有十分重要而广泛的应用背景。近十多年来,结合国家重大需求与学科分支前沿,在国家“八五”、“九五”和“十五”重点科技攻关专题的连续支持下,作者及其所在的研究小组在国内外首次应用塑性极限与安定理论研究压力容器和压力管道体型缺陷安全评定技术,并在国际上率先建立了三维结构的极限与安定数值计算方法。在此基础上,不断发展和应用先进的塑性极限与安定分析数值理论和工程方法,系统、深入地开展了压力容器和管道安全评定技术的研究,成功地解决了大幅度降低复杂系统极限与安定性数值计算规模、缺陷多影响因素化简、含缺陷容器和管道三维有限元数据全自动生成和自适应技术、数据拟合处理、免评条件建立等关键技术,在极限与安定分析数值计算方法、缺陷表征和规则化、失效模式建立、数据库建立、极限与安定分析及安全评定方法研究等方面取得了突破性进展,其成果具有开拓性、先进性、安全性、经济性和实用性等突出特点。目前该成果已在全国石油、化工、冶金、化肥、轻工、电力等行业得到了广泛应用,取得了显著的经济效益和社会效益,被国家标准《在用含缺陷压力容器安全评定》(包括管道部分)和政府技术法规《在用压力容器定期检验规则》、《工业压力管道定期检验规程》作为创新成果而采纳,并获国家科技进步二等奖 2 项,国家重大、优秀科技攻关成果奖 2 项,部级一等奖 2 项。本书正是这方面研究成果的一个系统总结。

虽然本书中的工程应用案例主要集中于压力容器和压力管道等

承压设备,但由此总结提炼出的一般工程方法适用于其他各类弹塑性结构,并为应用数值方法解决系列复杂工程实际问题提供了基本思路、方法和技巧。该工程方法与数值计算系列方法共同构成较为完整和一般通用的塑性极限与安定理论的应用方法体系。

本书共分三篇十五章,其中第一篇简要阐述极限与安定分析的基本任务与工程背景、基本理论与解析方法;第二篇重点介绍各种先进的数值计算方法和实用的实验测试方法;第三篇突出展示典型、成功的工程应用案例,并总结凝炼出工程应用的一般方法。本书强调高水平的理论研究与广泛工程应用之间的有机结合,努力沟通科学与工程两个方面。希望读者一方面通过本书的阅读能较为系统地了解极限与安定分析的基本科学理论和方法,另一方面从本书所介绍的工程应用的一般方法和应用实例中得到启发,能在自己的研究工作中灵活应用极限与安定分析理论,创造性地解决科学研究和工程实践中的问题。

本书的写作遵循从工程实践到抽象理论再到工程实践的认识规律。讲述力求循序渐进,深入浅出,以点带面,点面结合;既简要介绍基本理论,更突出展示数值理论及其工程应用的最新成果。全书内容全面、丰富、系统,思路清晰,结构严谨,层次分明。作者力求通过本书告诉读者应用极限与安定分析理论解决工程问题的一般方法和过程,也力求通过本书的成果介绍体现高水平的理论研究与广泛工程应用之间的有机结合的特点。

本书的出版得益于作者多年从事塑性极限与安定分析工程方法、承压设备安全科学与工程技术的研究和工程实践,许多集体和个人对本书均有贡献。作者特别感谢国家“八五”、“九五”和“十五”重点科技攻关课题在压力容器和压力管道研究领域给予的长期而稳定的资助。作者所指导过的博士生和同事们近年来在该领域开展了卓有成效的研究工作,他们对课题中若干成果的取得做出了重要贡献。本书还参考了国内外众多学者的研究成果。在本书的撰写过程中,还得到了有关方面的热情支持和帮助。清华大学工程力学系徐秉业教授长期以来对作者的研究工作给予大力支持,并在百忙中仔细审阅全书,提出了

宝贵意见。北京航空航天大学的钟群鹏院士、华东理工大学的李培宁教授、清华大学的岑章志教授、全国锅炉压力容器标准化委员会的寿比南研究员和梅林涛研究员、合肥通用机械研究所的陈学东教授级高工、南京工业大学的沈士明教授等对作者的工作给予了许多支持和帮助。第一作者所在单位中国特种设备检测研究中心的同事们也给予了积极的支持和帮助,尤其是孙亮、贾国栋、左尚志博士完成了大量的数值计算和具体的分析工作,李学仁研究员、林树青主任给予了大力支持。作者还有幸得到了国际著名学者、意大利和波兰科学院院士 Maier G 教授的指教和帮助,并与著名学者 Mroz Z、Polizzotto C 等教授通过书信就课题的研究工作进行过有益的讨论。

本书第一章由陈钢和刘应华共同撰写,第四、五、七、九~十五章由陈钢撰写,第二、三、六、八章及附录由刘应华撰写。本书集中反映了作者近 20 年来在塑性极限与安定分析及其工程应用研究领域耕耘的成果。本书的出版,希望能为该领域的进一步发展有所推动和启示。

由于作者水平有限,加之时间紧张,书中的缺点与不妥之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

陈钢 刘应华
2006 年 1 月于北京

目 录

序 前言

第一篇 基础理论与解析方法

第一章 绪论	3
§ 1.1 引言	3
§ 1.2 基础理论	5
§ 1.2.1 极限分析理论	5
§ 1.2.2 安定分析理论	6
§ 1.3 分析方法及应用	7
§ 1.3.1 极限分析的基本方法	8
§ 1.3.2 安定分析的基本方法	12
§ 1.3.3 极限与安定分析方法的应用	18
§ 1.4 发展趋势	20
§ 1.4.1 极限分析	20
§ 1.4.2 安定分析	21
§ 1.5 工程应用的迫切需求	23
§ 1.6 本书主要内容	24
参考文献	30
第二章 极限与安定分析的基本理论	52
§ 2.1 极限分析的基本理论	52
§ 2.1.1 塑性极限分析的任务和假设	52
§ 2.1.2 塑性材料的应力-应变曲线及其简化模型	54
§ 2.1.3 极限状态下应力和应变率的特点	56
§ 2.1.4 塑性极限分析的基本原理和方法	58

§ 2.1.5	上、下限定理的推论	62
§ 2.1.6	多组独立外载的情况	63
§ 2.1.7	存在间断场情况下载荷因子的计算	65
§ 2.2	安定分析的基本理论	68
§ 2.2.1	安定问题的提法与任务	68
§ 2.2.2	假设及简化处理	69
§ 2.2.3	残余应力-应变状态的基本性质	70
§ 2.2.4	安定定理	74
参考文献		77
第三章	典型结构极限与安定分析的解析方法	79
§ 3.1	梁和刚架	79
§ 3.1.1	梁和刚架极限分析中的上、下限定理	79
§ 3.1.2	上限法和下限法	80
§ 3.1.3	应用实例	81
§ 3.2	板	85
§ 3.2.1	圆板的基本方程	85
§ 3.2.2	实例分析	88
§ 3.3	薄壳	91
§ 3.3.1	基本假设	91
§ 3.3.2	旋转轴对称夹层壳的极限条件	92
§ 3.3.3	夹层球壳的极限分析	98
§ 3.4	压力管道管件极限载荷的解析解	102
§ 3.4.1	复杂载荷下无缺陷弯管的塑性极限载荷	103
§ 3.4.2	焊制三通塑性极限荷载的工程分析	110
§ 3.5	其他典型结构极限与安定分析解析解	124
参考文献		124

第二篇 数值理论与实验方法

第四章	确定极限载荷的弹塑性增量分析原理	129
§ 4.1	确定极限载荷的方法	129
§ 4.2	增量弹塑性有限元	130

§ 4.2.1 增量理论弹塑性有限元	130
§ 4.2.2 求解极限载荷的要点	131
§ 4.3 有限元分析中确定极限载荷的方法	133
§ 4.3.1 确定极限载荷的工程方法	133
§ 4.3.2 有限元分析中确定极限载荷的方法	133
§ 4.4 通用有限元分析软件简介	136
§ 4.5 主要结论	136
参考文献	137
第五章 极限与安定下限分析的数值计算方法	139
§ 5.1 引言	139
§ 5.2 极限与安定载荷下限的降维迭代法	140
§ 5.2.1 下限分析的数学规划格式	140
§ 5.2.2 自平衡应力场空间	145
§ 5.2.3 降维迭代法	147
§ 5.2.4 搜索子空间 $B^{r,k}$ 的形成	151
§ 5.2.5 优化方法探讨	154
§ 5.2.6 算法的程序实现	164
§ 5.3 极限下限分析的 P 范数方法	166
§ 5.3.1 极限分析问题的提出	166
§ 5.3.2 极限下限问题的格式	167
§ 5.3.3 下限有限元方法	171
§ 5.4 算例	177
§ 5.4.1 降维迭代法	177
§ 5.4.2 P 范数法	181
§ 5.5 主要结论	184
参考文献	185
第六章 极限与安定上限分析的数值计算方法	188
§ 6.1 引言	188
§ 6.2 极限上限分析的无搜索迭代算法	189
§ 6.2.1 加载路径的径向辐射求解方案	189

§ 6.2.2	结构极限上限分析的数学规划格式	190
§ 6.2.3	直接迭代优化算法	191
§ 6.2.4	算法的收敛性证明	194
§ 6.3	理想弹塑性结构安定上限分析的数值方法	197
§ 6.3.1	数学规划格式	197
§ 6.3.2	优化迭代算法	200
§ 6.4	考虑应变强化结构安定上限分析的数值方法	204
§ 6.4.1	数学规划格式	204
§ 6.4.2	优化迭代算法	207
§ 6.5	极限与安定载荷计算的有限元简化算法	211
§ 6.5.1	基于形变理论的弹塑性有限元分析方法	211
§ 6.5.2	结构极限载荷的确定	215
§ 6.6	算例	218
§ 6.6.1	无搜索迭代算法	218
§ 6.6.2	有限元简化算法	225
§ 6.7	主要结论	227
参考文献		228
第七章	多种数值计算方法的主要特点与应用范围	231
§ 7.1	主要特点	231
§ 7.2	应用范围	232
§ 7.3	典型算例计算结果的比较	233
§ 7.4	主要结论	239
参考文献		240
第八章	极限载荷的实验测试方法	241
§ 8.1	实验测试方法简介	241
§ 8.1.1	实验极限载荷定义方法	241
§ 8.1.2	极限载荷实验测试主要步骤	244
§ 8.1.3	材料机械性能测试	244
§ 8.1.4	实验装置与测试方案	244
§ 8.1.5	实验结果分析	245

§ 8.2 含凹坑压力容器应用案例	245
§ 8.2.1 试件的设计与制备	245
§ 8.2.2 材料机械性能测试	248
§ 8.2.3 实验装置和测试方案	250
§ 8.2.4 实验结果和分析	255
§ 8.3 含局部减薄压力管道应用案例	261
§ 8.3.1 试件的设计与制备	261
§ 8.3.2 材料机械性能测试	263
§ 8.3.3 实验装置与测试方案	263
§ 8.3.4 实验结果与分析	264
§ 8.4 主要结论	267
参考文献	268

第三篇 一般工程方法与典型应用案例

第九章 工程应用的一般方法	271
§ 9.1 工程背景分析	271
§ 9.2 模型建立与数据准备	271
§ 9.2.1 力学计算模型建立	271
§ 9.2.2 单元选取与网格划分	272
§ 9.2.3 有限元数据前后处理	273
§ 9.3 计算结果验证	274
§ 9.4 影响因素化简	275
§ 9.5 塑性变形过程与失效模式分析	277
§ 9.6 塑性极限与安定载荷数据库建立与分析	278
§ 9.7 计算公式拟合与分析	279
§ 9.8 工程设计与安全评定方法制定	281
§ 9.9 主要结论	283
参考文献	284
第十章 含凹坑缺陷压力容器塑性极限与安定分析	285
§ 10.1 工程背景	285