

国家杰出青年科学基金 (11325211) 资助

压力容器分析设计方法 与工程应用

沈鋆 刘应华 编著

清华大学出版社

压力容器分析设计方法 与工程应用

沈鋆 刘应华 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

近年来美欧相继颁布了新一代的压力容器分析设计规范,提出了很多新的设计理念,吸收了诸多压力容器前沿技术。与此同时,国内分析设计规范也修订在即。本书结合当前国内外分析设计的技术进步和工程实践,对压力容器分析设计相关的力学基础、应力分析、强度设计、规范条款、工具软件、工程实例和技术进展等进行了详细的阐述;对美欧规范中的分析设计方法均有涉及,既讲区别也讲联系;以失效模式为主线并结合工程实例对极限分析、安定分析、屈曲分析、疲劳分析及蠕变疲劳等评定方法进行了探讨。

本书适合自学分析设计的技术人员,也可供资深工程师参考。同时,可作为分析设计考证人员的辅导资料或技术培训和继续教育用教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

压力容器分析设计方法与工程应用/沈鋈,刘应华编著. —北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-45613-1

I. ①压… II. ①沈… ②刘… III. ①压力容器—设计 IV. ①TH490.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 283923 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:何凤霞

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:20.75 字 数:351 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版 印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:065963-01

序

经过几十年的快速发展,我国制造业的规模已经跃居世界第一位,成为支撑我国经济发展的重要基石和促进世界经济发展的重要力量。但与先进国家相比,目前我国制造业大而不强,自主创新能力较弱,关键核心技术与高端装备对外依存度较高。2015年5月8日,国务院正式印发《中国制造2025》,这是我国全面推进和实施制造强国战略的第一个十年行动纲领。《中国制造2025》提倡创新驱动、智能转型、绿色发展,鼓励全社会力量奋力拼搏,并最终实现中国制造向中国创造的转变、中国速度向中国质量的转变、中国产品向中国品牌的转变,完成中国制造由大变强的战略任务。

压力容器是工程、工业中的关键设备,广泛应用于核能、石油、化工、电力、制药等领域。压力容器的结构复杂,建造过程涉及结构、材料、成形、焊接、热处理、无损检测等多种技术,其制造能力是国家装备制造能力的总体反映。压力容器有强度、疲劳、低温脆断、高温蠕变、腐蚀等多种失效模式,其设计方法、制造要求和风险防控是压力容器行业所面临的技术难题。我国压力容器制造业大而不强的原因之一是我们的设计水平与国际先进水平尚有差距,一些关键技术(例如蠕变疲劳设计)尚缺乏经验。压力容器行业要绿色发展、轻量化设计,提高设计水平是必由之路。

压力容器技术发展日新月异。欧盟压力容器标准 EN 13445:2002 版给出了压力容器分析设计的直接法,提出了很多新的设计理念和设计方法。2007年修订的美国 ASME VIII-2 规范全面引入弹-塑性分析方法和数值计算技术。这些技术动向引起了全球的关注。精读其内容会发现,新版不仅是老版内容的修补完善,更是设计理念和设计方法的重大变革。目前我国也正在修订《钢制压力容器——分析设计标准》(JB 4732)。在这承前启后的时期,总结过去的工程实践经验,学习和借鉴国际最新技术进展,对深入理解压力容器分析设计方法是有益的。

本书总体上分为基础知识、规范条款和工程实例及软件应用三个部分,结构清晰,符合读者的学习和认知规律。理论篇给出了压力容器分析设计

所必须了解的力学基础知识。规范篇以失效模式为主线介绍了各种分析设计方法,包括极限载荷分析、弹塑性应力分析、局部失效分析、屈曲分析、疲劳分析、棘轮分析和蠕变疲劳分析等。内容与当前的主流设计理念保持一致,方便读者并行地学习相关规范。弹-塑性分析和数值计算是未来规范发展和应用的两个主要方向。本书对老版规范中的弹性应力分析方法(即应力分类法)做了简明介绍,重点关注其近期进展。对新版规范中发布的弹-塑性分析方法阐述得较为详细。对基于弹-塑性分析的棘轮评定等国内设计人员相对比较陌生的方法给出了较深入的分析 and 应用实例。近年来蠕变疲劳的设计需求日益凸显,本书对 ASME Code Case 2605 展开讨论,并给出了实例。

本书内容丰富、系统完整、条理清晰,围绕规范条款既讲述力学理论基础,又介绍规范应用实例,对初学压力容器分析设计的工程师来说是一本很好的入门教材,对富有经验的资深工程师来说也有不少参考价值。阅读本书将有助于读者提升压力容器分析设计的水平。

陆明丁

清华大学航天航空学院

2016 年 11 月 16 日

前 言

压力容器规范的发展史,是一部技术进步史。压力容器分析设计最早源自美国机械工程师协会的 ASME III《核设施元件建造规则》,该协会于 1968 年发布 ASME VIII-2《压力容器另一建造规则》。此后 30 年,各国纷纷参照 ASME VIII-2 制定本国的分析设计规范。2002 年之后压力容器分析设计与 20 世纪 60 年代相比变化较大。

我国石化行业最早于 1971 年开始应用分析设计规则,对容器的封头、开孔和开孔补强以及换热器管板等受压部件,进行了大量的分析计算工作。在 JB 4732 制定之前也曾多次应用应力分析法校核引进工程中的某些重要容器(如加氢反应器等),为制定以应力分析为基础的压力容器标准奠定了基础。

1995 年,我国颁布了分析设计规范 JB 4732-95,真正开始较大规模地实施分析设计是在 2000 年之后。然而之后的短短几年,欧美分别在 2002 年和 2007 年相继颁布了自己的新一代分析设计规范。这两部规范提出了很多新的设计理念,吸收了诸多压力容器前沿技术,特别值得关注的是全面引入了弹-塑性分析和数值计算方法。目前,国内分析设计规范修订工作也已提上议事日程。修订后的分析设计规范将由 JB(简称“机标”,即原国家机械工业部标准)改为 GB(简称“国标”,即国家标准),设计理念和设计方法,包括其规范名称和结构都将发生重大的改变。

分析设计(Design by Analysis)是 ASME VIII-2《压力容器另一建造规则》中的一章(第 5 章),其与第 4 章规则设计(Design by Rules)是并列的,指基于数值计算(主要是有限元法)和详细应力分析的一种设计方法,本书所说的分析设计也指此意,即不包括制造、检验等内容。

当前我们处在一个特殊时期:既要熟练地按国内规范进行国内工程的设计,同时随着国内工程公司近年来国际化的步伐不断推进,设计人员还要了解并运用国际规范来满足海外业主的工程要求。了解并学习欧美规范,这既能满足外资项目或对外投资项目的需求,也能为今后国内规范的修订做好准备工作并提供有益参考。

同时,分析设计的工程应用和市场需求越来越广泛,学习分析设计的工程师也越来越多。在这样一个承前启后的过渡阶段,正好可以在总结国内

过去 10 多年的使用经验的基础上,立足近年来国际上的技术进步,对分析设计做一个阶段性的回顾,期望达成如下几个目标:

(1) 理解规范条款的原理。分析设计规范的条款都是对设计方法和规则最直截了当、言简意赅的表述,这对设计人员而言,太宽泛、太笼统以致不能深刻理解。看起来都简单明了的规范条款,实际实施起来却困难重重,对初学者来说,更是感觉无从下手。本书期望为规范条款的理解和实施提供具体的指导、解析规范的来龙去脉、帮助技术人员较深刻地理解并运用好规范。

(2) 了解国际上的技术进步。分析设计涉及的内容相对较广,很多知识分布在各种外文资料和文献中。近几年国际上压力容器分析设计技术发生了巨大的变化,而这些成果大多发表在外文期刊上,参阅起来并不是很方便。这给国内技术人员的自学和技能提升带来了困难。本书试图把国外压力容器分析设计的相关知识和技能进行系统的整理,给技术人员的日常设计工作提供便利的参考。

(3) 掌握弹-塑性分析的基本原理和实施步骤。近年来,软、硬件的发展从未停息,云计算等新技术的逐渐普及,也推动了弹-塑性分析的广泛应用。美欧新一代规范的亮点之一就是弹-塑性分析,这也是国内规范修订的必由之路。这对设计人员而言,当前既是机遇,也是挑战。弹-塑性分析相比弹性分析更为复杂,例如弹-塑性分析得出的结果难以用解析解去验证或判断其趋势。本书试图对弹-塑性分析相关的原理和步骤加以介绍,这有助于国内技术人员对其原理加深理解,以便今后在设计工作中更好地运用该方法。

(4) 了解蠕变疲劳分析的基本原理和实施步骤。随着生产工艺的不断进步,高温设备及高温加疲劳的设备不断涌现。目前高温蠕变的设备通常由境外公司设计并制造。国内的几个知名工程公司及高校已经开展了相关的研究和试设计。今后国内分析设计规范修订时或许会引入相关的内容。高温蠕变是今后的设计中必须要面对和解决的问题,本书试图对其做一个初步性的介绍,希望起到一个抛砖引玉的作用。

(5) 了解有限元软件的原理和设置。有限元技术和弹-塑性分析越来越普遍,这是一个趋势。但是众多弹-塑性有限元分析技术的使用者却并不了解有限元软件中所包含的经典塑性理论的各种原理、假设和近似。比如:什么情况下软件会考虑鲍辛格效应和迟滞现象?初始屈服和后继屈服的数学模型在软件中做了各种近似,这些近似在哪些情况下是成立的,在哪些情况下是不成立的?不同的材料模型对压缩时的屈服做了何种假设等?再比如,很少有人留意屈服应力本身也是基于一定假设的:它来自单向拉伸试验,却用作多向屈服准则的参照值。上述这些隐藏在规范和软件背后的原

理和假设是分析设计人员需要了解的。本书也会对这部分内容进行探讨和介绍,以便在实际的软件操作过程中针对不同的工程问题选择正确的计算模型和参数设置。

(6) 熟悉典型的工程案例。学习分析设计的最终目的是进行工程应用。本书收集工程实践中的数个典型实例,除了给出日常设计经常碰到的接管分析、疲劳分析等,还给出了一些如高温蠕变等比较前沿的分析实例。本书大部分例子是基于 ANSYS Workbench 软件完成的,书中讨论了最新版有限元软件的工程应用,给出了一些实际工程问题的解决方案,适合一线工程技术人员学习和参考。

本书内容丰富,共分为五篇 24 章:

第一篇为概述篇。介绍了当前国际上(主要是美欧)压力容器分析设计的技术进步,同时也介绍了数值计算(主要是有限元)软件的发展情况。在此基础上,讨论了国内分析设计的现状及今后的发展方向。

第二篇为理论篇。压力容器分析设计是以材料力学、弹性力学、塑性力学及断裂力学等多门力学为理论基础的。这些力学问题求解所用的数值方法主要是有限元法。本篇介绍弹性力学、塑性力学和有限元等与工程设计息息相关的理论基础知识。这些知识是分析设计的基础和前提,但工程技术人员大多并非力学专业出身,我们的目标是掌握最基本和最核心的内容,以便在有限元模型的建立和分析过程中作出正确的判断。同时,这些理论知识也是正确使用有限元软件的必要前提,有限元软件界面操作很容易,要正确使用的话必须了解其背后的理论和技术背景。

第三篇为规范篇。本篇以失效模式为主线,介绍了塑性垮塌、局部失效、屈曲、疲劳和棘轮这几种失效模式对应的评定方法,包括弹性应力分析法和弹-塑性应力分析法。这些内容也是近年来美欧规范修订的重点内容,也是今后 JB 4732 的重点升级或修订内容。值得一提的是,这些名称均是直接翻译而来,在 JB 4732 修订时,如有必要,应对其制定更合适的命名。

第四篇为实例篇。工程设计中需要设计的元件和设备的结构多年来没有大的变化,变化的是运用新的规范和软件技术来提高设计水平。本书在介绍典型实例的同时,力求介绍更多的新内容和新技能。比如,运用子模型技术对斜接管进行分析,虽然子模型技术对斜接管分析不是必需的,但通过这个实例掌握的基于 Workbench 的子模型技术可以运用于其他场合。基于 ASME CODE CASE 2605 的蠕变疲劳分析,这些都是比较新颖的内容,希望能给读者一个有益的参考。

第五篇为软件篇。本篇主要介绍了 ANSYS Workbench 软件。ANSYS

Workbench 在日常工程设计中已经应用很多,在介绍时以介绍使用技巧和注意事项为主。

本书可作为规范的一个补充或参考,应该结合规范一起阅读。读者应该具备一定的压力容器设计相关的经验和知识(但是否从事过分析设计不是必需的),分析设计的初学者和资深工程师都可以参阅本书。对于初学者可先学习本书中力学基础和软件应用的相关章节,必要时可以参阅其他专门阐述该类主题的专著。对于资深工程师可更多地关注规范的原理和假设、部件受力分析及工程案例复验等,进而提出改进方案和方法。

本书得以完成得益于作者多年的工程实践与科研经历,还有多家单位和多位专家同仁的大力支持。特别感谢国家杰出青年科学基金、惠生工程(中国)有限公司和清华大学的支持。感谢清华大学航天航空学院陆明万教授的支持和指导。本书审稿专家吴云龙高工知识渊博、工程经验丰富,从工程实践的角度提出了很多宝贵意见,使得本书在内容和逻辑上更加严谨。高温结构完整性领域专家、美国 ASME 压力容器技术杂志副主编、英国 Strathclyde 大学陈浩峰教授为作者提供了很多有价值的资料和指导。唐艳芳、清华彭恒硕士、章骁程(高温部分)三位同仁参与了部分章节的编写工作,丰富了本书的内容。浙大李涛博士、黄志新博士、程香高工、清华代岩伟博士、蔡国华高工、万里平对本书提出了很多有益的建议。惠生工程公司的刘海军总裁、陈惠梅高级副总裁、章晨晖教授级高工、李延生教授级高工、刘敬源高工和林亚森高工对我们开展的分析设计工作给予了大力支持。正是在大家的支持和鼓励下,本书才得以顺利出版,在此表示衷心感谢。同时还感谢清华大学出版社陈朝晖老师对本书出版给予的热情指导。感谢朱明思完成了大量的文字整理和校对工作。本书还借鉴了国内外专家学者及工程技术人员的研究成果和工程经验,在此向相关的作者和出版单位表示感谢。

技术是在不断进步的,但书籍出版后一般都无法像维基百科或百度百科那样随时进行线上更新和补充,读者之间的奇思妙想和建议、创意也无法实时交流。互联网时代,这些都不是问题,早在《ASME 压力容器分析设计》一书出版时,就已经为读者及对分析设计感兴趣的同仁建立了一个技术交流社区(www.shebeiQ.com),供大家在线讨论,也欢迎关注微信公众号 shebeiQ 以获得与本书相关的勘误和技术交流信息。由于编者水平有限,错误在所难免,恳请读者批评指正。联系邮箱 KennyShen@vip.163.com。

沈 鋈 刘应华

于北京清华园

2015 年 12 月

目 录

第一篇 概述篇

第 1 章 绪论	2
1.1 国际压力容器规范的进步	2
1.1.1 欧盟 EN13445	2
1.1.2 美国 ASME VIII-2	3
1.2 国内规范修订方向	3
1.3 计算机辅助工程的发展	5
1.4 分析设计发展趋势	8
第 2 章 分析设计方法概要	10
2.1 分析设计的基本概念	10
2.1.1 应力强度	10
2.1.2 总体结构不连续	11
2.1.3 局部结构不连续	11
2.1.4 法向应力	12
2.1.5 切应力	12
2.1.6 薄膜应力	12
2.1.7 弯曲应力	12
2.1.8 热应力	12
2.1.9 运行循环	14
2.1.10 应变循环	14
2.1.11 疲劳强度减弱系数	14
2.1.12 自由端位移	14
2.1.13 蠕变	14
2.1.14 塑性	14

2.1.15	塑性分析	14
2.1.16	棘轮效应	15
2.1.17	安定性	15
2.1.18	应力-应变曲线	15
2.2	压力容器的失效模式	16
2.3	分析设计考虑的失效模式	17
2.4	弹性分析与应力分类法概要	19
2.4.1	一次应力	19
2.4.2	一次总体薄膜应力	19
2.4.3	一次局部薄膜应力	20
2.4.4	一次弯曲应力	21
2.4.5	二次应力	21
2.4.6	峰值应力	22
2.4.7	总应力	22
2.4.8	应力分类	23
2.4.9	应力评定	26
2.4.10	应力分类及应力强度极限值	28
2.4.11	应力强度极限值的依据	30
2.4.12	应力分类遇到的问题	31
2.5	弹-塑性分析设计法概述	31
2.6	小结	32

第二篇 理论篇

第3章	梁的弯曲	34
3.1	纯弯曲	34
3.1.1	横截面上的应力	34
3.1.2	纯弯曲和横力弯曲的概念	35
3.2	弯曲正应力	36
3.2.1	几何方面	36
3.2.2	物理方面	37
3.2.3	静力学关系	38
3.2.4	轴惯性矩	38
3.3	强度条件	38

3.4	纯弯矩作用下单位宽度矩形截面梁	39
3.5	拉伸和弯矩同时作用下矩形截面梁	41
3.6	截面形状系数	43
3.7	小结	43
第4章	弹性力学基础	45
4.1	弹性力学基本假设	45
4.1.1	连续性假设	45
4.1.2	完全弹性假设	45
4.1.3	均匀性假设	46
4.1.4	各向同性假设	46
4.1.5	小位移和小变形的假设	46
4.1.6	引入基本假设后的变化	46
4.2	弹性力学基本概念	47
4.2.1	外力	47
4.2.2	内力与应力	48
4.2.3	一点的应力状态	49
4.2.4	形变	50
4.2.5	位移	50
4.2.6	小结	50
4.3	弹性力学基本方程	51
4.3.1	平衡微分方程	51
4.3.2	几何方程	52
4.3.3	物理方程	52
4.4	边界条件	53
4.4.1	给定位移的边界	53
4.4.2	给定力的边界	54
4.4.3	混合边界条件	54
4.5	结构的对称性	54
4.6	弹性力学的一般定理	56
4.6.1	解的唯一性定理	56
4.6.2	解的叠加定理	56
4.6.3	虚位移原理	56

4.6.4	最小势能原理	56
4.6.5	外力功的互等定理	56
4.6.6	圣维南原理	56
4.7	热应力	57
4.7.1	计算热应力的必要参数	57
4.7.2	热应力的特点	60
4.7.3	热应力实例	60
4.8	讨论	64
4.9	小结	65
第5章	塑性力学基础	66
5.1	概述	66
5.2	塑性力学基本假设	67
5.3	变形路径对塑性变形和极限载荷的影响	67
5.4	屈服条件	67
5.4.1	屈服条件的概念	67
5.4.2	特雷斯卡屈服条件	68
5.4.3	米泽斯屈服条件	69
5.4.4	两种屈服条件的优缺点	69
5.5	强化模型与加载条件	69
5.6	小结	70
第6章	有限元法基础	71
6.1	基本方程的矩阵表示	72
6.2	基本原理	73
6.3	单元的位移模式和解的收敛性	75
6.4	单元的应变矩阵和应力矩阵	76
6.5	单元介绍	77
6.5.1	三维实体单元	78
6.5.2	轴对称单元	81
6.5.3	薄壳单元	84
6.5.4	划分单元注意事项	86
6.6	小结	87

第三篇 规范篇

第 7 章 塑性垮塌的评定	90
7.1 弹性应力分析方法	90
7.1.1 弹性应力分析步骤	90
7.1.2 应力线性化	91
7.1.3 应力分类的指导原则	93
7.1.4 载荷组合系数	96
7.1.5 接管应力评定	98
7.2 非弹性分析方法	98
7.2.1 极限载荷设计的概念	99
7.2.2 ASME 极限载荷分析法	99
7.2.3 ASME 弹-塑性应力分析法	101
7.2.4 JB 4732 中的非弹性分析	103
7.3 小结	104
第 8 章 局部失效的评定	105
8.1 弹性分析法	105
8.2 弹-塑性分析法	105
8.2.1 评定步骤	105
8.2.2 累积损伤	107
8.3 小结	108
第 9 章 屈曲的评定	109
9.1 屈曲的定义	109
9.2 屈曲评定的三种方法	109
9.3 设计系数	110
9.4 小结	111
第 10 章 疲劳	113
10.1 疲劳分析免除	113
10.1.1 疲劳分析免除准则	113
10.1.2 疲劳分析免除的原理	114

10.2	疲劳曲线	116
10.3	三种疲劳评定方法简介	116
10.3.1	弹性疲劳分析法	116
10.3.2	弹-塑性疲劳分析法	118
10.3.3	等效结构应力法	118
10.4	小结	122
第 11 章	棘轮的评定	124
11.1	安定与棘轮的概念	124
11.2	弹性分析法	125
11.2.1	弹性安定的原理	125
11.2.2	弹性分析法的评定	127
11.2.3	简化的弹-塑性分析法	128
11.2.4	热应力棘轮评定	128
11.3	热应力棘轮评定方法修订的解读	129
11.3.1	ASME VIII-2(2013 版)中的修订	130
11.3.2	原评定方法的制定依据	130
11.3.3	布里法的不足	132
11.3.4	考虑热薄膜和弯曲应力的棘轮边界	132
11.3.5	ASME VIII-2(2013 版)修订时的考虑	136
11.3.6	修订要点小结	138
11.4	弹-塑性分析法	139
11.4.1	弹-塑性分析法的评定	139
11.4.2	弹性核	140
11.5	评定方法的回顾	143
11.5.1	弹性方法	144
11.5.2	弹塑性方法	144
11.6	小结	146
第 12 章	蠕变疲劳的评定	147
12.1	蠕变疲劳的概念	147
12.1.1	蠕变	148
12.1.2	疲劳	148

12.1.3	蠕变疲劳	148
12.1.4	韧性	149
12.1.5	安定性	149
12.2	蠕变疲劳设计的理论基础	150
12.2.1	蠕变疲劳的试验方法	150
12.2.2	常用的蠕变疲劳设计方法	151
12.3	核电行业中的蠕变疲劳工程设计方法	156
12.3.1	ASME III-NH	156
12.3.2	R5 规程	156
12.3.3	RCC-MR	157
12.4	化工行业中的蠕变疲劳工程设计方法	157
12.4.1	API 579	157
12.4.2	ASME 规范案例 2605	158
12.5	小结	160

第四篇 实例篇

第 13 章	基于子模型技术的斜接管应力分析实例	162
13.1	设计条件	162
13.2	几何模型	164
13.3	网格划分	164
13.4	加载求解	165
13.5	子模型技术	165
13.5.1	创建子模型	165
13.5.2	修改几何模型	166
13.5.3	重新划分网格	166
13.5.4	重新设置边界条件	167
13.5.5	求解并查看结果	168
13.6	小结	169
第 14 章	球罐分析实例	170
14.1	GB 12337—2014 要点简介	170
14.2	载荷分析	171

14.3	载荷工况组合.....	171
14.4	边界条件.....	171
14.4.1	压力载荷.....	171
14.4.2	自重载荷.....	172
14.4.3	风载荷.....	172
14.4.4	地震载荷.....	173
14.4.5	位移边界.....	173
14.5	应力评定.....	173
14.6	丙烯球罐的整体分析.....	174
14.6.1	设计条件.....	174
14.6.2	几何模型.....	176
14.6.3	网格划分.....	177
14.6.4	载荷条件.....	178
14.6.5	求解计算.....	179
14.6.6	应力评定.....	180
14.7	小结.....	180
第 15 章 疲劳设备分析实例		182
15.1	概述.....	182
15.2	设计条件.....	183
15.3	结构分析.....	184
15.4	应力计算结果.....	187
15.5	应力强度评定.....	188
15.6	最大应力点疲劳评定.....	189
15.7	结论.....	190
15.8	小结.....	191
第 16 章 高压容器局部结构分析实例		192
16.1	简介.....	192
16.2	设计条件.....	192
16.3	结构分析.....	194
16.4	应力分析计算.....	194