



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程设备设计

郑津洋 董其伍 桑芝富 主编

第三版



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程设备设计

第三版

郑津洋 董其伍 桑芝富 主编



化学工业出版社

·北京·

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订过程中仍保留了前两版的编排结构，以及由浅入深、内容丰富、突出基本概念和设计思想的风格，补充和修改了部分内容，增加了部分新内容，以反映过程设备的最新成果。

全书分绪论、压力容器篇和过程设备篇。在绪论中综合介绍过程设备特点、基本要求和设计内涵；压力容器篇包括压力容器结构、应力分析、材料及时间和环境对其性能的影响、设计准则、常规设计、分析设计和疲劳设计等；过程设备篇包括储运设备、换热设备、塔设备和反应设备。

本书适合作为“过程装备与控制工程”专业的教材或教学参考资料，也可供其他专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程设备设计/郑津洋, 董其伍, 桑芝富主编. —3 版.
北京: 化学工业出版社, 2010. 6
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-08076-9

I. 过… II. ①郑…②董…③桑… III. 化工过程-
化工设备-设计-高等学校-教材 IV. TQ051.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 052761 号

责任编辑: 程树珍
责任校对: 宋 夏

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 25¼ 彩插 1 字数 366 千字 2010 年 7 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 50.00 元

版权所有 违者必究

第三版前言

本书第一版和第二版分别荣获“第六届全国石油和化学工业优秀教材一等奖”和“第八届全国石油和化学工业优秀教材一等奖”，第二版为普通高等教育“十五”国家级规划教材，本版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，并得到教育部“新世纪优秀人才支持计划”和浙江省新世纪高等教育教学改革项目“基于提高学生实践能力的过控专业教材和虚拟实验室建设”的支持。

考虑到本书前两版使用范围较广，在修订过程中遵循了保持编排结构相对稳定、反映过程设备设计最新成果、展现学科发展前沿的原则；同时也介绍了由于近几年来，具有极端尺度或者在极端条件下工作的过程设备日趋增加，材料、设计、制造、检测、运输和安装等方面的新难题不断出现，过程设备制造、使用过程中节能降耗的绿色环保要求越来越高，出现的许多与过程设备设计有关的新概念、新观点、新方法和新标准。

本书由郑津洋、董其伍和桑芝富主编；大连理工大学丁信伟教授主审；华东理工大学蔡仁良教授审定。浙江大学郑津洋教授主持修订和统稿工作。参加修订工作的有浙江大学郑津洋教授（绪论、第1章、第4章4.2节和4.6节，以及附录A、附录C、附录D和附录E）、陈志平教授〔4.1节、4.3节（除4.3.4）、第5章〕、叶德潜副教授（附录B）；浙江大学杨健副教授和杭州杭氧股份有限公司张淑文高工（第8章）；郑州大学董其伍教授和刘敏珊教授（第2章、第6章）；南京工业大学桑芝富教授（第7章）；北京化工大学钱才富教授和浙江大学郑津洋教授（4.4节、4.5节）；辽宁省石油化工规划设计院王非教授级高工〔第3章（除3.3中的流动腐蚀）〕；全国化工设备设计技术中心站秦叔经教授级高工（4.3.4节）；浙江理工大学偶国富教授（3.3中的流动腐蚀）。

借此机会，向对本书提出过建设性修改意见的苏义脑院士、王玉明院士、高金吉院士、陈钢、宋继红、高继轩、王晓雷、李军、张建荣、黄强华、陈学东、涂善东、寿比南、朱国辉、李培宁、王志文、潘家楨等，以及参加过本书前两版编写工作的林兴华、魏新利、卓震、徐思浩等，深表谢意。全国锅炉压力容器标准化技术委员会陈志伟、中国五环化学工程公司王荣贵及浙江大学刘鹏飞、叶建军、唐萍、师俊、石丽娜等在本书制图、校对方面付出了辛勤劳动，特此致谢。

限于编者水平，虽经努力，修改后的教材恐仍有不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

编者
2010.3

过程装备与控制工程学科的研究方向、趋势和前沿 代 序

人类的主要特点是能制造工具，富兰克林曾把人定义为制造工具的动物。通过制造和使用工具，人把自然物变成他的活动器官，从而延伸了他的肢体和感官。人们制造和使用工具，有目的、有计划地改造自然、变革自然，才有了名副其实的生产劳动。

现代人越来越依赖高度机械化、自动化和智能化的产业来创造财富，因此必然要创造出现代化的工业装备和控制系统来满足生产的需要。流程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济支柱产业之一，必然要求越来越高度机械化、自动化和智能化的过程装备与控制工程。如果说制造工具是原始人与动物区别的最主要标志，那么就可以说，现代过程装备与控制系统是现代人类文明的最主要标志。

工程是人类将现有状态改造成所需状态的实践活动，而工程科学是关于工程实践的科学基础。现代工程科学是自然科学和工程技术的桥梁。工程科学具有宽广的研究领域和学科分支，如机械工程科学、化学工程科学、材料工程科学、信息工程科学、控制工程科学、能源工程科学、冶金工程科学、建筑与土木工程科学、水利工程科学、采矿工程科学和电子/电气工程科学等。

现代过程装备与控制工程是工程科学的一个分支，严格地讲它并不能完全归属于上述任何一个研究领域或学科。它是机械、化学、电、能源、信息、材料工程乃至医学、系统学等学科的交叉学科，是在多个大学科发展的基础上交叉、融合而出现的新兴学科分支，也是生产需求牵引、工程科技发展的必然产物。显而易见，过程装备与控制工程学科具有强大的生命力和广阔的发展前景。

学科交叉、融合和用信息化改造传统的“化工设备与机械”学科产生了过程装备与控制工程学科。化工设备与机械专业是在建国初期向前苏联学习，在我国几所高校首先设立后发展起来的，半个世纪以来，毕业生几乎一直供不应求，为我国社会主义建设输送了大批优秀工程科技人才。1998年3月教育部应上届教学指导委员会建议正式批准建立了“过程装备与控制工程”学科。这一学科在美欧等国家本科和研究生专业目录上是没有的，在我国已有60多所高校开设这一专业，是适合我国国情，具有中国特色的一门新兴交叉学科。其主要特点如下。

(1) 过程装备 与生产工艺即加工流程性材料紧密结合，有其独特的过程单元设备和工程技术，如混合工程、反应工程、分离工程及其设备等，与一般机械设备完全不同，有其独特之处。

(2) 控制工程 对过程装备及其系统的状态和工况进行监测、控制，以确保生产工艺有序稳定运行，提高过程装备的可靠度和功能可利用度。

(3) 过程装备与控制工程 是指机、电、仪一体化连续的复杂系统，它需要长周期稳定运行；并且系统中的各组成部分（机泵、过程单元设备、管道、阀、监测仪表、计算机系统）均互相关联、互相作用和互相制约，任何一点发生故障都会影响整个系统；又由于加工的过程材料有些易燃易爆、有毒或是加工要在高温、高压下进行，系统的安全可靠性十分重要。

过程装备与控制工程的上述特点就决定了其学科研究的领域十分宽广，一是要以机电工程为主干与工艺过程密切结合，创新单元工艺装备；二是与信息技术和知识工程密切结合，

实现智能监控和机电一体化；三是不仅研究单一的设备和机器，而且更主要的是要研究与过程生产融为一体的机、电、仪连续复杂系统，在工程上就是要设计建造过程工业大型成套装备。因此，要密切关注其他学科的新的动向，博采众长、集成创新，把诸多学科最新研究成果之他山之石为我所用；同时要以现代系统论（Systemics）和耗散结构理论为指导，研究本学科过程装备与控制工程复杂系统独特的工程理论，不断创新和发展过程装备与控制工程学科是我们的研究方向。

我国科技部和国家自然科学基金委员会在 21 世纪初发表了《中国基础学科发展报告》，其中分析了世界工程科学研究的发展趋势和前沿，这也为过程装备与控制工程学科的发展指明了方向，值得借鉴和参考。

(1) 全生命周期的设计/制造正成为研究的重要发展趋势。由过去单纯考虑正常使用的设计，前后延伸到考虑建造、生产、使用、维修、废弃、回收和再利用在内的全生命周期的综合决策。

过程装备的监测与诊断工程、绿色再制造工程和装备的全寿命周期费用分析、安全和风险评估等正在流程工业开始得到应用。工程科技界已开始移植和借鉴现代医学与疾病作斗争的理论和方法，去研究过程装备故障自愈调控（Fault Self-recovering Regulation），探讨装备医工程（Plant Medical Engineering）理论。

(2) 工程科学的研究尺度向两极延伸。过程装备的大型化是多年发展方向，近年来又有向小型化集成化的趋势。

(3) 广泛的学科交叉、融合，推动了工程科学不断深入、不断精细化，同时也提出了更高的前沿科学问题，尤其是计算机科学和信息技术的发展冲击着每个工程科学领域，影响着学科的基础格局。过程装备与控制工程学科的发展也必须依靠学科交叉和信息化，改变传统的生产观念和模式，过程装备复杂系统的监控一体化和数字化是发展的必然趋势。

(4) 产品的个性化、多样化和标准化已经成为工程领域竞争力的标志，要求产品更精细、灵巧并满足特殊的功能要求。产品创新和功能扩展/强化是工程科学研究的首要目标，柔性制造和快速重组技术在大流程工业中也得到了重视。

(5) 先进工艺技术得到前所未有的广泛重视，如精密、高效、短流程、敏捷制造、虚拟制造等先进制造技术对机械、冶金、化工、石油等制造工业产生了重要影响。

(6) 可持续发展的战略思想渗透到工程科学的多个方面，表现了人类社会与自然相协调的发展趋势。制造工业和大型工程建设都面临着有限资源和破坏环境等迫切需要解决的难题，从源头控制污染的绿色设计和制造系统为今后发展的主要趋势之一。

众所周知，过程工业是国民经济的支柱产业；是发展经济提高我国国际竞争力的不可缺少的基础；过程工业是提高人民生活水平的基础；过程工业是保障国家安全、打赢现代战争的重要支撑，没有过程工业就没有强大的国防；过程工业是实现经济、社会发展与自然相协调从而实现可持续发展的重要基础和手段。因而，过程装备与控制工程在发展国民经济的重要地位是显而易见的。

新中国成立以来，特别是改革开放以来，中国的制造业得到蓬勃发展。中国的制造业和装备制造业的工业增加值已居世界第四位，仅次于美国、日本和德国。但中国制造业的劳动生产率远低于发达国家，约为美国的 5.76%、日本的 5.35%、德国的 7.32%。其中最主要原因是技术创新能力十分薄弱，基本上停留在仿制，实现国产化的低层次阶段。从 20 世纪 70 年代末，中国大规模、全方位地引进国外技术和进口国外设备，但没做好引进技术装备的消化、吸收和创新，没有同时加快装备制造业的发展，因此，步入引进——落后——再引进的怪圈。以石油化工设备为例，20 年来，化肥生产企业先后共引进 31 套合成氨装置、26 套尿素装置、47 套磷复肥装置，总计耗资 48 亿美元；乙烯生产企业先后引进 18 套乙烯装置，总计耗资 200 亿美元。因此，要振兴我国的装备制造业，必须变“国际引进型”为“自

主集成创新型”，这是历史赋予我们过程装备与控制工程教育和科技工作者的历史重任。过程装备与控制工程学科的发展不仅仅要发表 EI、SCI 文章，而且要十分重视发明专利和标准，也要重视工程实践，实现产、学、研相结合。这样才能为结束我国过程装备“出不去，挡不住”的局面做出应有的贡献。

过程装备与控制工程是应用科学和工程技术，这一学科的发展会立竿见影，直接促进国民经济的发展。过程装备的现代化也会促进机械工程、材料工程、热能动力工程、化学工程、电子/电气工程、信息工程等工程技术的发展。我们不能只看到过程装备与控制工程是一个新兴的学科，是博采诸多自然科学学科的成果而综合集成的一项工程科学技术，而忽略了反过来的一面，一个反馈作用，也就是过程装备与控制工程学科也应对自然科学的发展做出应有的贡献。

实际上，早在 18 世纪末期，自然科学的研究就超出了自然界，从而包括了整个世界，即自然界和人工自然物。过程装备与控制工程属人工自然物，它也理所当然是自然科学研究的对象之一。工程科学能把过程装备与控制工程在工程实践中的宝贵经验和初步理论精练成具有普遍意义的规律，这些工程科学的规律就可能含有自然科学里现在没有的东西。所以对工程科学研究的成果即工程理论加以分析，再加以提高就可能成为自然科学的一部分。钱学森先生曾提出：“工程控制论的内容就是完全从实际自动控制技术总结出来的，没有设计和运用控制系统的经验，决不会有工程控制论。也可以说工程控制论在自然科学中是没有它的祖先的。”因此对现代过程装备与工程的研究也有可能创造出新的工程理论，为自然科学的发展做出贡献。

过程装备与控制工程学科的发展历史地落在我们这一代人的肩上，任重道远。我们深信，经过一代又一代人的努力奋斗，过程装备与控制工程这一新兴学科一定会兴旺发达，不但会为国民经济的发展建功立业，而且会为自然科学的发展做出应有的贡献。

高质量的精品教材是培养高素质人才的重要基础，因此编写面向 21 世纪的迫切需要的过程装备与控制工程“十五”规划教材，是学科建设的重要内容。遵照教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》，以邓小平理论为指导，全面贯彻国家的教育方针和科教兴国战略，面向现代化、面向世界、面向未来，充分发挥高等学校在教材建设中的主体作用，在有关教师和教学指导委员会委员的共同努力下，过程装备与控制工程的“十五”规划教材陆续与广大师生和工程科技界读者见面了。这套教材力求反映近年来教学改革成果，适应多样化的教学需要；在选择教材内容和编写体系时注意体现素质教育和创新能力和实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。在此向所有为这些教材问世付出辛勤劳动的人们表示诚挚的敬意。

教材的建设往往滞后于教学改革的实践，教材的内容很难包含最新的科研成果，这套教材还要在教学和教改实践中不断丰富和完善；由于对教学改革研究深度和认识水平都有限，在这套书中不妥之处在所难免。为此，恳请广大读者予以批评指正。

教育部高等学校机械学科教学指导委员会副主任委员
过程装备与控制工程专业教学指导分委员会主任委员
北京化工大学教授
中国工程院院士

高吉吉

2003 年 5 月于北京

第二版前言

自 2001 年 8 月出版以来，本书受到了广大教师和学生的欢迎，荣获“第六届全国石油和化学工业优秀教材一等奖”，被列入普通高等教育“十五”国家级规划教材，并得到教育部“新世纪优秀人才支持计划”的支持。

近几年来，国内外过程设备的研究、开发和标准化工作有了较大的发展，有必要对本书第一版进行修订。考虑到本书第一版使用范围较广，修订过程中遵循了保持编排结构相对稳定、反映过程设备设计最新发展趋势、展现学科发展前沿的原则。

本书仍由郑津洋教授、董其伍教授和桑芝富教授主编；大连理工大学丁信伟教授主审；华东理工大学蔡仁良教授审定。浙江大学郑津洋教授主持修订和统稿工作。参加修订的有浙江大学郑津洋教授 [绪论、第 1 章、第 3 章、第 4 章 (除 4.2.5 节)、第 5 章、第 8 章，以及附录 A、附录 C、附录 D 和附录 E]、叶德潜副教授 (附录 B)；郑州大学董其伍教授和刘敏珊教授 (第 2 章、第 6 章)；南京工业大学桑芝富教授 (第 7 章)；华东理工大学蔡仁良教授 (4.2.5 节)。

使用过本书第一版的广大教师陆续提出过许多建设性的修改意见；全国锅炉压力容器标准化委员会寿比南，国家质量监督检验检疫总局特种设备局宋继红、高继轩和张建荣，浙江省特种设备检验中心马夏康等专家也对本书的修订提出了许多有益的建议。为此，我们非常珍视，谨此致谢。借此机会，还向参加过本书第一版编写工作的钱才富、林兴华、魏新利、卓震、陈志平、徐思浩等老师，深表谢意。

限于编者水平，虽经努力，修改后的教材恐仍有不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

编者

2005. 3

第一版序

按照国际标准化组织的认定 (ISO/DIS 9000: 2000), 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware)、软件产品 (software)、流程性材料产品 (processed material) 和服务型产品 (service)。在新世纪初, 世界上各主要发达国家和我国都已把“先进制造技术”列为优先发展的战略性高技术之一。先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与储罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者的统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ①过程原理与技术的创新; ②成套装置流程技术的创新; ③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④过程控制技术的创新。于是把过程工业需要实现的最佳技术经济指标: 高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 确保该产业在国际上的竞争力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调研研讨的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在的问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于1998年3月获得教育部的正式批准, 设立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向21世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生的素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分

量，淡化专业技术教学，从而较大幅度地减少总的授课时数，以加强学生自学、自由探讨和发展的空间，以有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向 21 世纪的 6 种迫切需要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，还编写了 6 种选修课程教材。教学指导委员会明确要求教材作者以“教改”精神为指导，力求新教材从认知规律出发，阐明本课程的基本理论与应用及其现代进展，做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。新教材的编写实施主编负责制，主编都经过了投标竞聘，专家择优选定的过程，核心课程教材在完成主审程序后，还增设了审定制度。为确保教材编写质量，在开始编写时，主编、教学指导委员会和化学工业出版社三方面签订了正式出版合同，明确了各自的责、权、利。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套教材中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养，但是由于我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限，必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会
副主任委员兼化工装备教学指导组组长
大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001 年 3 月于大连

第一版前言

为适应专业调整和学科发展的要求,1998年5月浙江大学、郑州大学、南京化工大学、北京化工大学和江苏石油化工学院决定编写教材《过程设备设计》,并于1998年12月提出编写大纲初稿。经竞标,于1999年被“全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会化工装备教学指导组”列入“过程装备与控制工程”专业核心课教材。在研究教学指导组关于教材建设意见、吸收国内外相关教材和著作优点、广泛征求国内外同行专家教授意见和建议、收集最新资料的基础上,以减少学时、加强基础、拓宽知识面、增强适应性、展示学科发展趋势为目标,经过三年时间的努力,完成了本书的编写工作。本书是著作者们长期从事过程设备教学、课程改革和科学研究的结晶,也是教育部21世纪初高等教育教学改革项目“过程装备与控制工程人才培养方案研究与实践”的一项重要研究成果。

本书的主要特点体现在以下几个方面。

1. 通过精选、贯通、融合和相互渗透,对编排结构进行了创新处理。全书分绪论、压力容器部分和过程设备部分。在绪论中综合介绍过程设备特点、基本要求和设计内涵;压力容器部分以防止失效、确保安全经济可靠运行为主线,以结构分析、应力分析、材料在载荷和环境作用下的性能为重点,从失效方式、失效判据和设计准则中派生出常规设计、分析设计、疲劳设计等不同设计理念与方法;过程设备部分突出结构对功能的影响,重点介绍各种结构的演变。

2. 在内容取舍和表达上有所创新,反映了学科的最新发展趋势,具有一定的前瞻性。本书精简了在有限篇幅中难以讲透或学生难以理解或实际工作中不易遇到的部分经典内容,如法兰、管板、膨胀节的应力分析,有力矩理论的推导,高压和超高压容器设计等。与此同时,本书还结合学科的发展以及 New Jersey Institute of Technology、University of Waterloo 等国外部分高校相关课程的教学内容,充实了一些必要的或新的内容,如焊接接头基本知识、环境和时间对材料性能的影响、过程设备设计文件、失效判据和设计准则、安全附件、球罐和余热锅炉结构、生物反应器结构特点、中英文名词术语对照等,并精心设计了插图。

3. 注重培养学生解决工程实际问题的能力。本书在介绍压力容器应力分析时,注意理论表达深度,以力学模型建立、应力求解思路、应力分布特点和工程意义为重点,把一些复杂的推导通过指出参考文献留给学生自学;在附录中除给出钢制压力容器常用标准和材料外,还结合工程设计实例介绍过程设备图的表达特点;采用最新的中国、美国、欧盟和日本相关规范、标准,不简单罗列规范、标准中的公式,注重介绍规范制定的理论依据和适用范围;介绍制造工艺(塑性变形、焊接、热处理)和环境(温度、介质、载荷特性)对材料性能的影响,以便在设计阶段对材料或设备使用提出更为深层次的要求。

4. 重视学生在学习活动中的主体地位,不将学生单纯视为传授知识的对象,注重他们的自主学习精神,给他们留下思维的空间。为此本书在编写过程中做了如下处理:提供了相当数量的思考题和习题;列出了经过精选的参考文献;在有些内容的表达上,不求面面俱

到，而是突出重点，点到为止，列出参考文献，如螺栓法兰连接设计新方法、大开孔补强、破损安全设计、先漏后破设计、流体诱导振动等，使学生有问题可思考，有问题可研究。

本书由郑津洋教授、董其伍教授、桑芝富教授主编；大连理工大学丁信伟教授主审；华东理工大学蔡仁良教授审定。郑津洋教授负责全书统稿和修改工作。参加编写的有浙江大学郑津洋教授（序、绪论、附录 A、附录 C、附录 D）、林兴华教授（第 8 章）、陈志平副教授（第 1 章和第 4 章第 1、2、3 节）、叶德潜副教授（附录 B）；郑州大学董其伍教授（第 2 章第 1 至第 4 节），刘敏珊教授（第 6 章）、魏新利教授（第 4 章第 6 节）；南京化工大学桑芝富教授（第 7 章）、徐思浩副教授（第 2 章第 5 节、第 3 章）；北京化工大学钱才富教授（第 4 章第 4、5 节）；江苏石油化工学院卓震教授（第 5 章）。

国内兄弟院校的戴树和教授、贺匡国教授、朱国辉教授、柳曾典教授、王志文教授、张康达教授、聂清德教授、黄载生教授、蒋家羚教授、王宽福教授、陈柏暖教授、方善如教授、冯兴奎教授、涂善东教授、黄振仁教授、黄卫星教授、张石铭教授、胡家顺教授、王祖荫教授，Oak Ridge National Laboratory 的 Rusi P. Taleyarkhan 博士、Seokho Kim 博士，以及 ASME Boiler & Pressure Vessel Committee 的 Sam Y. Zamrik 教授和 Mark Sheehan 博士等专家教授对本书大纲进行了认真评审，在充分肯定的同时，提出了许多建设性意见；在统稿过程中，主审丁信伟教授和审定蔡仁良教授，对书稿提出了详尽而中肯的意见，对书稿质量的提高起到了很大的作用；孙国有副教授、蒋家羚教授、叶德潜副教授、沈祖凤副教授、徐平副教授、俞群高级工程师和张炯祥高级工程师等对书稿提出了许多中肯的意见；黄冰、刘育明、苏文献、李晓红、刘爱萍等同学在本书制图、校对等方面付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心的感谢。

限于水平，虽经努力，书中不妥甚至错误之处在所难免，敬请读者指正。

编者

2001. 4

目 录

绪论	1
1 压力容器引言	8
1.1 压力容器总体结构	8
1.1.1 压力容器基本组成	8
1.1.2 压力容器零部件间的焊接	10
1.2 压力容器分类	10
1.2.1 介质危害性	11
1.2.2 压力容器分类	12
1.3 压力容器规范标准	14
1.3.1 国外主要规范标准简介	14
1.3.2 国内主要规范标准介绍	16
思考题	20
2 压力容器应力分析	21
2.1 载荷分析	21
2.1.1 载荷	21
2.1.2 载荷工况	22
2.2 回转薄壳应力分析	23
2.2.1 薄壁圆筒的应力	23
2.2.2 回转薄壳的无力矩理论	24
2.2.3 无力矩理论的基本方程	26
2.2.4 无力矩理论的应用	29
2.2.5 回转薄壳的不连续分析	33
2.3 厚壁圆筒应力分析	39
2.3.1 弹性应力	39
2.3.2 弹塑性应力	46
2.3.3 屈服压力和爆破压力	49
2.3.4 提高屈服承载能力的措施	51
2.4 平板应力分析	52
2.4.1 概述	52
2.4.2 圆平板对称弯曲微分方程	53
2.4.3 圆平板中的应力	56
2.4.4 承受轴对称载荷时环板中的应力	59
2.5 壳体失稳应力分析	60
2.5.1 概述	60

2.5.2	外压薄壁圆柱壳弹性失稳分析	61
2.5.3	其他回转薄壳的临界压力	68
2.6	典型局部应力	70
2.6.1	概述	70
2.6.2	受内压壳体与接管连接处的局部应力	70
2.6.3	降低局部应力的措施	73
	思考题	74
	习题	75
3	压力容器材料及环境和时间对其性能的影响	77
3.1	压力容器材料	77
3.1.1	压力容器常用钢材	77
3.1.2	有色金属和非金属	79
3.2	压力容器制造工艺对钢材性能的影响	80
3.2.1	塑性变形	80
3.2.2	焊接	81
3.2.3	热处理	84
3.3	环境对压力容器用钢性能的影响	86
3.3.1	温度	86
3.3.2	介质	89
3.3.3	加载速率	93
3.4	压力容器材料选择	93
3.4.1	压力容器用钢的基本要求	93
3.4.2	压力容器钢材的选择	95
	思考题	97
4	压力容器设计	98
4.1	概述	98
4.1.1	设计要求	98
4.1.2	设计文件	98
4.1.3	设计条件	99
4.2	设计准则	100
4.2.1	压力容器失效	100
4.2.2	强度失效设计准则	103
4.2.3	刚度失效设计准则	105
4.2.4	失稳失效设计准则	106
4.2.5	泄漏失效设计准则	106
4.3	常规设计	106
4.3.1	概述	106
4.3.2	圆筒设计	108
4.3.3	封头设计	126
4.3.4	密封装置设计	135

4.3.5	开孔和开孔补强设计	160
4.3.6	支座和检查孔	166
4.3.7	安全泄放装置	168
4.3.8	焊接结构设计	171
4.3.9	耐压试验	177
4.3.10	泄漏试验	178
4.4	分析设计	179
4.4.1	概述	179
4.4.2	压力容器的应力分类	181
4.4.3	应力强度计算	184
4.4.4	应力强度限制	186
4.4.5	分析设计的应用	189
4.5	疲劳分析	190
4.5.1	概述	190
4.5.2	低循环疲劳曲线	190
4.5.3	压力容器的疲劳设计	194
4.5.4	影响疲劳寿命的其他因素	197
4.6	压力容器设计技术进展	197
4.6.1	可靠性设计	197
4.6.2	优化设计	198
4.6.3	计算机辅助设计	198
	思考题	199
	习题	200
5	储运设备	202
5.1	概述	202
5.1.1	储存介质的性质	202
5.1.2	装量系数	202
5.1.3	环境对储存设备的影响	203
5.2	储罐的结构	203
5.2.1	卧式圆柱形储罐	203
5.2.2	立式平底筒形储罐	204
5.2.3	球形储罐	207
5.2.4	低温储槽	211
5.3	卧式储罐设计	212
5.3.1	支座结构及布置	212
5.3.2	设计计算	214
5.4	移动式压力容器	225
5.4.1	基本结构	225
5.4.2	罐体设计要点	227
	思考题	228

习题	228
6 换热设备	229
6.1 概述	229
6.1.1 换热设备的应用	229
6.1.2 换热设备分类及其特点	229
6.1.3 换热器选型	238
6.1.4 换热器相关技术发展动向	239
6.2 管壳式换热器	240
6.2.1 基本类型	240
6.2.2 管壳式换热器结构	242
6.2.3 管板设计	251
6.2.4 膨胀节设计	254
6.2.5 管束振动和防止	254
6.2.6 设计方法	257
6.3 传热强化技术	258
6.3.1 传热强化概述	258
6.3.2 扩展表面及内插件强化传热	260
6.3.3 壳程强化传热	264
思考题	266
7 塔设备	267
7.1 概述	267
7.1.1 塔设备的应用	267
7.1.2 塔设备的选型	267
7.2 填料塔	270
7.2.1 填料	270
7.2.2 填料塔内件的结构设计	274
7.3 板式塔	281
7.3.1 板式塔的分类	281
7.3.2 板式塔的结构	282
7.3.3 板式塔塔盘的结构	287
7.4 塔设备的附件	295
7.4.1 除沫器	295
7.4.2 裙座	296
7.4.3 吊柱	298
7.5 塔的强度设计	299
7.5.1 塔的固有周期	299
7.5.2 塔的载荷分析	302
7.5.3 筒体的强度及稳定性校核	309
7.5.4 裙座的强度及稳定性校核	310
7.6 塔设备的振动	312

7.6.1	风的诱导振动	312
7.6.2	塔设备的防振	314
	思考题	315
8	反应设备	316
8.1	概述	316
8.1.1	反应设备的应用	316
8.1.2	反应设备的分类与特征	316
8.1.3	常见反应设备的特点	317
8.2	机械搅拌反应设备	321
8.2.1	基本结构	321
8.2.2	搅拌容器	322
8.2.3	搅拌器	325
8.2.4	搅拌轴设计	334
8.2.5	密封装置	338
8.2.6	传动装置	343
8.2.7	机械搅拌设备技术进展	345
8.3	微反应器	347
8.3.1	概述	347
8.3.2	微/纳反应器	348
8.3.3	微反应器的加工制造	349
8.3.4	微反应器的发展前景	353
	思考题	353
	习题	353
附录 A	钢制压力容器设计常用标准	355
附录 B	过程设备设计图样的表达特点和设计实例	357
附录 C	中英文术语对照	368
附录 D	压力容器材料	372
附录 E	过程设备设计常用网址	380
	参考文献	381