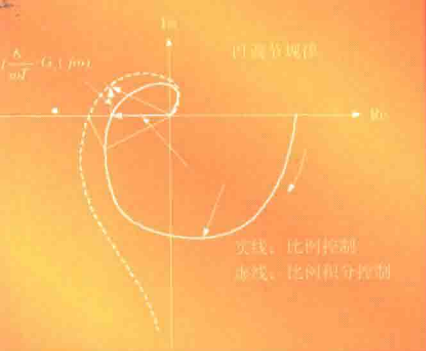




全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Process Control Systems 过程控制系统

郑辑光 韩九强 杨清宇 编著
Zheng Jiguang Han Jiuqiang Yang Qingyu

清华大学出版社





全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Process Control Systems

过程控制系统

郑辑光

Zheng Jiguang

西安交通大学

韩九强 编著

Han Jiuqiang

杨清宇

Yang Qingyu

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在讲述过程控制系统的基本组成、特点与发展概况的基础上,首先介绍组成过程控制系统的检测仪表、过程执行器与防爆栅。随后,介绍工业数字调节器、集散控制系统(DCS)中的PID控制算法及其实现技术、简单以及复杂调节系统的分析与设计等过程控制的基础理论。在此基础上,重点讨论可编程数字调节器、集散控制系统的软硬件结构、设计思想以及工程组态方法;现场总线控制系统中的网络通信技术、控制回路调度方法以及功能块编程等。最后,给出典型工业过程(锅炉、蒸馏塔)控制系统的设计实例。

本书重在理论联系实际,既可为大专院校自动化、电气工程等专业本科生、研究生作为教材或参考书使用,也可供从事检测、控制系统研究、设计与开发的相关科研院所及企业的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

过程控制系统/郑辑光等编著.--北京:清华大学出版社,2012.12

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-30020-5

I. ①过… II. ①郑… III. ①过程控制—自动控制系统—高等学校—教材

IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第211399号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm

印 张:30

字 数:637千字

版 次:2012年12月第1版

印 次:2012年12月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.00元

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)

陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层次、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20 世纪 50 年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实

践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005 年 10 月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的,既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元

形态、开放性的“广义教材”？等等，这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版，对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境，一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限，本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处，还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴澄 院士

2005 年 10 月于清华大学



本书主要讲述如何将计算机技术、网络通信技术及自动控制理论知识应用于实际工业过程控制系统,以及在实际应用中需要考虑哪些具体理论与工程实际问题,从而在理论与工程实践之间架起一座桥梁。

全书首先介绍过程控制系统的基本组成、特点以及在企业综合自动化系统中的定位。在此基础上,围绕过程控制系统的基本组成,首先介绍过程检测仪表、过程执行器以及控制器等。其中,控制器部分是本书的重点,主要包括:PID类控制算法及其工程实现技术、简单与复杂调节系统分析与设计、先进过程控制等过程控制的基础理论,其次,介绍将上述控制理论、方法和技术应用于工程实践所采用的软硬件平台,即自动化控制设备,具体包括:可编程数字调节器、集散控制系统以及现场总线控制系统等。重点讲解设备的软硬件结构、设计思想以及工程组态方法;现场总线控制系统中的网络通信技术、控制回路调度方法以及功能块编程等。最后,给出典型工业过程(锅炉、蒸馏塔)控制系统的设计实例。

本书内容按照工业过程控制系统的体系结构组织编排,在加强基本概念、基本理论和基本方法的基础上,注重理论联系实际,突出理论方法的实用性、可操作性与有效性。注重跟踪近年来工业过程控制实践中涌现出来的新技术、新理论和新方法,有利于培养学生理论联系实际的创新意识与创新思维能力。

本教材的参考教学学时数为60学时,其中过程控制理论部分(第4、5、6、7章)和自动化仪表部分(第2、3、8、9章)可以各占一半的学时。第10章可供学生参考阅读。各章后面还附有习题和思考题。

本教材是作者在多年教学科研的基础上编写而成的,全书由韩九强和郑辑光统稿审定,第8章8.2节由杨清宇编写,其他各章节由郑辑光编写。在编写过程中,一直得到西安交通大学自动控制研究所领导的大力支持与鼓励,在此表示衷心的感谢!

本书在编写过程中还参考了各种有关书刊及资料,在此,谨向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中肯定存在不少缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作者

2012年3月

第 1 章 过程控制系统概述	1
1.1 过程控制系统的组成、特点与地位	1
1.1.1 过程控制系统及其组成	1
1.1.2 过程控制的特点	3
1.1.3 过程控制系统的地位	5
1.2 过程控制的任務	6
1.3 过程控制系统的分类及性能指标	7
1.3.1 过程控制系统分类	7
1.3.2 过程控制系统的性能指标	8
1.4 过程控制系统的发展	11
1.4.1 过程控制仪表的发展	11
1.4.2 过程控制理论的发展	13
1.5 本书的结构与章节安排	14
习题与思考题	15
第 2 章 过程检测仪表	16
2.1 检测仪表的基本组成及工作方式	16
2.1.1 检测仪表的基本概念、组成及信号传输	16
2.1.2 检测仪表的零点迁移与量程迁移	19
2.2 过程检测仪表的基本性能指标	20
2.2.1 测量仪表的基本性能指标	20
2.2.2 测量信号的处理	23
2.3 温度变送器及其选型	24
2.3.1 温度检测方法概述	24
2.3.2 热电偶温度传感器	26
2.3.3 热电阻温度传感器	32
2.3.4 集成式温度传感器	35
2.3.5 接触式测温元件的选型与安装	36
2.4 压力变送器及其选型	37
2.4.1 压力检测方法概述	37

2.4.2	弹性式压力检测	38
2.4.3	应变片式压力检测	40
2.4.4	扩散硅压力传感器	41
2.4.5	电容式压力检测	42
2.4.6	压力仪表的选型与安装	46
2.5	流量变送器及其选型	46
2.5.1	容积式流量计	47
2.5.2	节流式流量计	48
2.5.3	电磁流量计	52
2.5.4	旋涡(涡街)流量计	53
2.5.5	超声波流量计	54
2.6	物位变送器及其选型	56
2.6.1	静压式液位测量	56
2.6.2	电容式液位测量	57
2.6.3	超声波式液位计	58
2.6.4	雷达式液位计	59
2.7	成分分析仪表	60
2.7.1	热导式气体分析仪	61
2.7.2	红外线气体分析仪	63
2.7.3	色谱分析仪	64
2.7.4	氧化锆氧量分析仪	67
	习题与思考题	68
第3章	过程执行器与防爆栅	69
3.1	过程执行器	69
3.1.1	电动执行器	70
3.1.2	气动执行器	71
3.1.3	调节阀的流通能力	75
3.1.4	调节阀的流量特性	76
3.1.5	执行器的选择	80
3.2	变频器	84
3.2.1	变频器的基本工作原理	84
3.2.2	变频器在过程控制中的应用	87
3.3	防爆栅	88
3.3.1	安全火花防爆系统的基本概念	88
3.3.2	危险场所的划分与安全火花防爆的等级	90
3.3.3	防爆栅的基本组成与工作原理	91

习题与思考题	95
第 4 章 PID 控制算法及其实现技术	96
4.1 基本 PID 控制算法	96
4.1.1 从 ON/OFF 控制到比例(P)控制	97
4.1.2 积分的引入——比例积分(PI)控制	101
4.1.3 微分的引入——比例积分微分(PID)控制	103
4.2 各种变形的 PID 控制算法	104
4.2.1 微分先行 PID 控制算法	105
4.2.2 比例先行 PID 控制算法	106
4.2.3 带设定值滤波的 PID 控制算法	107
4.3 PID 控制算法的时域、频域分析	108
4.3.1 PID 控制器的阶跃响应	108
4.3.2 PID 控制器的频率特性	110
4.4 PID 控制算法的数字实现技术	111
4.4.1 数字控制系统的基本结构	111
4.4.2 数字控制器的设计思想	112
4.4.3 连续 PID 控制器的离散化	116
4.4.4 数字 PID 控制的位置式与增量式算法	118
4.4.5 数字 PID 控制器采样周期、积分字长的选取	121
4.5 PID 控制算法的工程实现技术	123
4.5.1 PID 控制器的正/反作用方式	123
4.5.2 PID 控制器的抗积分饱和算法	125
4.5.3 PID 控制器的无扰切换技术	128
习题与思考题	131
第 5 章 单回路控制系统设计及调节器参数整定	133
5.1 单回路控制系统设计概述	134
5.1.1 过程控制系统设计的步骤	134
5.1.2 过程控制系统控制方案的制定	136
5.2 典型对象动态特性的数学描述及其实验测定	138
5.2.1 单容对象动特性及其数学描述、对象的自衡特性	139
5.2.2 多容对象动特性及其数学描述、容量滞后、纯滞后	143
5.2.3 具有反向特性的过程、非最小相位过程	146
5.2.4 对象特性的实验测定方法	148
5.3 对象动特性对调节质量的影响	152
5.3.1 干扰通道对象动特性对调节质量的影响	152

5.3.2	调节通道对象动特性对调节质量的影响	155
5.3.3	调节方案的确定	157
5.4	调节规律对系统闭环性能的影响及其选择	160
5.4.1	比例调节规律对系统动特性的影响	161
5.4.2	系统调节性能指标(又称可控性指标)	166
5.4.3	比例积分(PD)调节器对系统动特性的影响	169
5.4.4	比例微分(PD)调节器对系统动特性的影响	172
5.4.5	比例积分微分(PID)调节器	173
5.4.6	调节器调节规律的选择	175
5.5	PID 调节器的参数整定方法	175
5.5.1	稳定边界法	176
5.5.2	反应曲线法	178
5.5.3	改进的齐格勒-尼科尔斯(RZN)方法	179
5.5.4	PID 控制器的现场“试凑法”整定	181
5.6	工业过程常见回路的特点及其设计	182
	习题与思考题	184
第 6 章	复杂调节系统	186
6.1	串级调节系统	186
6.1.1	串级控制的基本思想	186
6.1.2	串级控制系统的一般结构	188
6.1.3	串级控制系统的特点和效果分析	189
6.1.4	串级控制系统的设计、投运与参数整定	192
6.2	前馈控制系统	196
6.2.1	前馈控制的基本结构与工作原理	197
6.2.2	前馈控制器设计及其性能分析	199
6.2.3	复合控制系统	201
6.2.4	前馈控制系统设计及其工程实现	203
6.3	分程控制系统	205
6.3.1	分程控制系统的基本结构与工作原理	205
6.3.2	分程控制系统的设计、实现及其工程应用	207
6.4	选择性控制系统	210
6.4.1	选择性控制系统的基本概念	210
6.4.2	选择性控制系统的结构与工作原理	211
6.4.3	选择性控制系统的设计	212
6.5	均匀调节系统	215
6.5.1	均匀调节系统的组成与工作原理	215

6.5.2 均匀调节系统控制规律的选择与参数整定	217
6.6 比值调节系统	218
6.6.1 比值调节系统的基本原理和结构	218
6.6.2 比值调节系统的设计与参数整定	222
习题与思考题	225
第7章 先进控制系统	227
7.1 解耦控制系统	227
7.1.1 系统关联分析和相对增益	228
7.1.2 避免耦合的设计原则、减少或解除耦合的途径	233
7.1.3 解耦控制系统的设计	236
7.1.4 解耦系统的简化及其工程实现	238
7.2 时滞补偿控制	238
7.2.1 典型时滞过程及其对闭环调节性能的影响	238
7.2.2 大时滞过程的常规控制方法	239
7.2.3 Smith 预估补偿算法及其性能	240
7.2.4 Smith 预估器的内模控制结构及其设计	242
7.2.5 改进的 Smith 预估补偿算法	244
7.3 自适应控制系统	245
7.3.1 自适应控制的基本原理	245
7.3.2 增益调度自适应控制	246
7.3.3 自整定 PID 控制器	247
7.3.4 模型参考自适应控制	250
7.3.5 自校正控制系统	253
7.4 模型预测控制	254
7.4.1 预测控制的基本思想	255
7.4.2 单输入单输出模型的预测	258
7.4.3 输出反馈和偏差校正	260
7.4.4 多输入多输出模型的预测	261
7.4.5 模型预测控制的动态优化	263
7.4.6 具有约束的 MPC 控制	265
7.4.7 模型预测控制器(MPC)的工程实现与参数整定	266
7.5 非线性过程控制	269
7.5.1 过程控制中的常见非线性环节	269
7.5.2 各种类型的开关式调节器	272
7.5.3 非线性 PID 调节器	275
习题与思考题	277

第 8 章 单回路调节器与集散控制系统	278
8.1 单回路可编程调节器 YS1700	278
8.1.1 YS1700 的基本组成与工作原理	279
8.1.2 YS1700 的基本操作与信息流程	281
8.1.3 YS1700 用户程序的基本结构与编制方法	284
8.1.4 YS1700 控制功能模块的结构及其编程	287
8.1.5 YS1700 中的控制算法	300
8.1.6 YS1700 中的运算模块	312
8.1.7 YS1700 用户程序的写入与调试	323
8.1.8 YS1700 的网络通信功能	330
8.2 集散控制系统	338
8.2.1 集散控制系统概述	338
8.2.2 DCS 的体系结构	338
8.2.3 DCS 的硬件组成	339
8.2.4 DCS 的软件组成	342
8.2.5 DCS 的通信网络	343
8.2.6 几种典型 DCS 介绍	346
8.2.7 DCS 的局限性及发展趋势	360
习题与思考题	361
第 9 章 现场总线控制系统	362
9.1 自动化仪表通信技术概述	363
9.1.1 自动化仪表间信号传输标准的发展	363
9.1.2 开放系统互连参考模型	365
9.1.3 信号传输的调制解调技术	366
9.2 HART 通信技术	367
9.2.1 HART 通信物理层	368
9.2.2 HART 通信数据链路层	369
9.2.3 HART 通信应用层	373
9.2.4 HART 协议智能检测仪表	375
9.3 基金会现场总线通信技术	379
9.3.1 FF H1 现场总线基本通信模型	379
9.3.2 FF H1 现场总线物理层	381
9.3.3 FF H1 现场总线数据链路层	383
9.3.4 FF H1 现场总线应用层	387
9.4 基金会现场总线的用户应用	389

9.4.1 用户应用模块	389
9.4.2 系统管理	401
9.4.3 设备信息文件	403
9.4.4 现场总线控制系统的设计	405
9.5 现场总线在集散控制系统中的集成	408
9.5.1 现场总线控制系统 System 302 的组成	408
9.5.2 系统 System 302 中现场设备与网络的组态	413
9.5.3 系统 System 302 中人机界面的组态	415
9.6 基金会现场总线 HSE 简介	416
9.6.1 HSE 基本通信模型	416
9.6.2 HSE 网络通信原理	417
9.7 工业无线网络技术的发展与应用	420
习题与思考题	424
第 10 章 典型工业过程的控制	425
10.1 能源工业锅炉设备的控制	425
10.1.1 火力发电机组的生产过程及其对控制的要求	425
10.1.2 汽轮机控制系统	427
10.1.3 蒸汽锅炉控制系统概述	429
10.1.4 汽包水位控制系统	430
10.1.5 锅炉燃烧控制系统	434
10.1.6 过热蒸汽温度控制系统	439
10.1.7 锅炉控制系统的应用实例	441
10.2 石油加工精馏过程的控制	443
10.2.1 石油加工过程控制系统概述	443
10.2.2 精馏塔的控制要求与控制特性	444
10.2.3 精馏塔质量指标的选取	449
10.2.4 精馏塔的基本控制方案	451
习题与思考题	459
参考文献	460