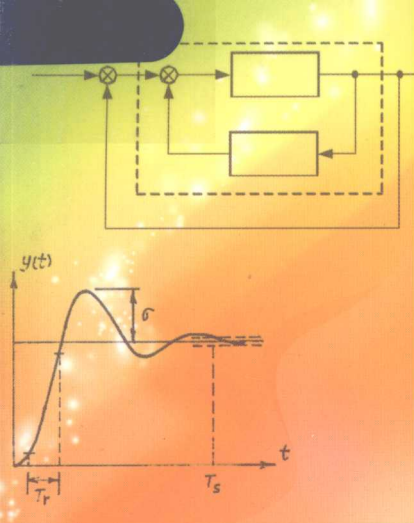




全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Control System Design

控制系统设计

王广雄 何朕 著

Wang Guangxiong He Zhen

陈新海 主审

Chen Xinhai



清华大学出版社

TP273/476

2008



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

Control System Design

控制系统设计

哈尔滨工业大学 王广雄 何朕 著

Wang Guangxiong He Zhen

西北工业大学 陈新海 主审

Chen Xinhai

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍控制系统的设计思想和方法,主要说明设计中的基本问题和处理准则。本书取材广泛,内容丰富、新颖,反映了控制系统设计近年来的新进展。全书共 12 章,第 1 章是书中各设计问题形成的历史背景,第 2 章至第 4 章是关于控制系统的性能要求,第 5 章和第 6 章是系统的设计限制,第 7 章至第 10 章分类研究各类系统的设计问题,第 11 章是现代工业技术发展中很重要的特殊对象的控制问题,第 12 章是关于系统的调试和调试中问题的发现与处理。本书主要是通过大量的实例分析来帮助设计者掌握系统设计的方法。

本书为自动控制专业大学高年级的教材,也可供有关专业的研究生使用,对从事控制系统设计工作的工程技术人员也是一本很好的参考书。从事控制理论研究的人员也可以从本书众多的应用实例中受益。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

控制系统设计/王广雄,何朕著. —北京:清华大学出版社,2008.3

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-16159-2

I. 控… II. ①王… ②何… III. 控制系统—系统设计—高等学校—教材 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 147024 号

责任编辑:王一玲

责任校对:梁毅

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:14.5 字 数:314 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 印 次:2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:017415-01

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。为满足多层面、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

《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)

序

FOREWORD

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。

吴怡迪 教授

2005年10月于教育部

序

FOREWORD

《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“加强实践教育,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。

吴炯 院士

2005 年 10 月于清华大学

前言

PREFACE

本书主要讲解自动控制系统的设计问题。虽然关于反馈控制系统的理论已经出版了各种层次的教材,但是当具体设计时尚有一系列的问题需要处理。例如,除稳定性外,对反馈控制系统究竟还有哪些设计要求?一个系统的性能指标是如何确定的?实际系统对设计有哪些限制?一般性理论如何用于具体的设计?等等。本书的目的就是要在理论和设计实践之间架设一座桥梁,帮助设计者掌握正确而有效的设计思想和方法。

本书的前身是 1992 年宇航出版社出版的《控制系统设计》。根据作者多年来的教学和科研实践,以及近年来控制理论应用方面大量的成功实例,现在已对原书作了许多重要的修改和补充。本书第 2 章的频谱分析是正确进行系统设计的基础,第 3 章和第 4 章研究的是系统的性能(performance)设计问题。但是对系统的性能要求是受到限制的,第 5 章和第 6 章研究的就是这个设计的约束问题。了解了对系统的要求和约束,第 7 章和第 8 章按作者的观点,分类来对系统设计进行讨论。第 9 章研究新兴的工业伺服系统的设计问题。第 10 章是多回路设计。第 11 章是在现代工业技术发展中很重要的特殊对象的控制。第 12 章的系统调试是系统设计的最后一个环节,通过调试才能实现设计要求。这一章的调试虽然是通过一些实例来介绍的,但是这里的一些思想都是可以借鉴的。而本书第 1 章的内容则有助于从历史的角度来了解书中有关设计问题的形成和本书的内容安排。控制系统设计这门课重在设计思想而不是设计计算方法,所以各章节后面所附的不是练习题而是思考题,这些思考题可以增加对正文中一些概念的了解。

本书内容适用于 50~60 学时的课程,如果学时数较少,可以只讲授到第 10 章,约 40 学时。

本书是自动控制专业本科高年级的教材,也可以作为非控制专业毕业的控制类研究生教材。本书也可供有关工程技术人员参考。本书对从事控制理论研究的人员也有参考价值,因为从本书的众多应用实例中可以了解到理论的各种可能的应用。阅读本书只需具备控制理论的基本知识。因为对系统的设计来说,重要的是设计思想,一些深层次的设计计算方法并不是本书的内容,所以只要具有经典理论和状态空间法中的基本概念,就可以阅读本书。

本书得到《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会的专项资金支持;西北工业大学陈新海教授对书稿进行了仔细的评阅并提出了许多宝

贵的意见。在此一并致谢。

本书在完稿过程中得到作者的研究生们的大力支持,其中尤其是研究生孟范伟承担了大量的文稿打印和图稿工作,孟范伟在工作中任劳任怨,精益求精的精神给作者留下了深刻的印象,在此致以衷心的感谢。

王广雄 何朕

2007年5月于哈尔滨工业大学

《全国高等学校自动化专业系列教材》丛书书目

教材 类型	编 号	教 材 名 称	主 编 / 主 审	主 编 单 位	备注
本科生教材					
控制 理论 与 工程	Auto-2-(1+2)-V01	自动控制原理(研究型)	吴麒、王诗宓	清华大学	
	Auto-2-1-V01	自动控制原理(研究型)	王建辉、顾树生/杨自厚	东北大学	
	Auto-2-1-V02	自动控制原理(应用型)	张爱民/黄永宣	西安交通大学	
	Auto-2-2-V01	现代控制理论(研究型)	张嗣瀛、高立群	东北大学	
	Auto-2-2-V02	现代控制理论(应用型)	谢克明、李国勇/郑大钟	太原理工大学	
	Auto-2-3-V01	控制理论 CAI 教程	吴晓蓓、徐志良/施颂椒	南京理工大学	
	Auto-2-4-V01	控制系统计算机辅助 设计	薛定宇/张晓华	东北大学	
	Auto-2-5-V01	工程控制基础	田作华、陈学中/施颂椒	上海交通大学	
	Auto-2-6-V01	控制系统设计	王广雄、何朕/陈新海	哈尔滨工业大学	
	Auto-2-8-V01	控制系统分析与设计	廖晓钟、刘向东/胡佑德	北京理工大学	
	Auto-2-9-V01	控制论导引	万百五、韩崇昭、蔡远利	西安交通大学	
	Auto-2-10-V01	控制数学问题的 MATLAB 求解	薛定宇、陈阳泉/张庆灵	东北大学	
控制 系统 与 技术	Auto-3-1-V01	计算机控制系统(面向 过程控制)	王锦标/徐用懋	清华大学	
	Auto-3-1-V02	计算机控制系统(面向 自动控制)	高金源、夏洁/张宇河	北京航空航天大学	
	Auto-3-2-V01	电力电子技术基础	洪乃刚/陈坚	安徽工业大学	
	Auto-3-3-V01	电机与运动控制系统	杨耕、罗应立/陈伯时	清华大学、华北电 力大学	
	Auto-3-4-V01	电机与拖动	刘锦波、张承慧/陈伯时	山东大学	
	Auto-3-5-V01	运动控制系统	阮毅、陈维钧/陈伯时	上海大学	
	Auto-3-6-V01	运动体控制系统	史震、姚绪梁/谈振藩	哈尔滨工程大学	
	Auto-3-7-V01	过程控制系统(研究型)	金以慧、王京春、黄德先	清华大学	
	Auto-3-7-V02	过程控制系统(应用型)	郑辑光、韩九强/韩崇昭	西安交通大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	吴重光、夏涛/吕崇德	北京化工大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	张晓华/薛定宇	哈尔滨工业大学	
	Auto-3-9-V01	传感器与检测技术	王俊杰/王家祯	清华大学	
	Auto-3-9-V02	传感器与检测技术	周杏鹏、孙永荣/韩九强	东南大学	
	Auto-3-10-V01	嵌入式控制系统	孙鹤旭、林涛/袁著祉	河北工业大学	
	Auto-3-13-V01	现代测控技术与系统	韩九强、张新曼/田作华	西安交通大学	
	Auto-3-14-V01	建筑智能化系统	章云、许锦标/胥布工	广东工业大学	
	Auto-3-15-V01	智能交通系统概论	张毅、姚丹亚/史其信	清华大学	
	Auto-3-16-V01	智能现代物流技术	柴跃廷、申金升/吴耀华	清华大学	

续表

教材类型	编 号	教 材 名 称	主 编 / 主 审	主 编 单 位	备 注
本科生教材					
信号处理与分析	Auto-5-1-V01	信号与系统	王文渊/阎平凡	清华大学	
	Auto-5-2-V01	信号分析与处理	徐科军/胡广书	合肥工业大学	
	Auto-5-3-V01	数字信号处理	郑南宁、程洪	西安交通大学	
计算机与网络	Auto-6-1-V01	单片机原理与接口技术	杨天怡、黄勤	重庆大学	
	Auto-6-2-V01	计算机网络	张曾科、阳宪惠/吴秋峰	清华大学	
	Auto-6-4-V01	嵌入式系统设计	慕春棣/汤志忠	清华大学	
	Auto-6-5-V01	数字多媒体基础与应用	戴琼海、丁贵广/林闯	清华大学	
软件基础与工程	Auto-7-1-V01	软件工程基础	金尊和/肖创柏	杭州电子科技大学	
	Auto-7-2-V01	应用软件系统分析与设计	周纯杰、何顶新/卢炎生	华中科技大学	
实验课程	Auto-8-1-V01	自动控制原理实验教程	程鹏、孙丹/王诗宓	北京航空航天大学	
	Auto-8-3-V01	运动控制实验教程	綦慧、杨玉珍/杨耕	北京工业大学	
	Auto-8-4-V01	过程控制实验教程	李国勇、何小刚/谢克明	太原理工大学	
	Auto-8-5-V01	检测技术实验教程	周杏鹏、仇国富/韩九强	东南大学	
研究生教材					
	Auto(*)-1-1-V01	系统与控制中的近代数学基础	程代展/冯德兴	中科院系统所	
	Auto(*)-2-1-V01	最优控制	钟宜生/秦化淑	清华大学	
	Auto(*)-2-2-V01	智能控制基础	韦巍、何衍/王耀南	浙江大学	
	Auto(*)-2-3-V01	线性系统理论	郑大钟	清华大学	
	Auto(*)-2-4-V01	非线性系统理论	方勇纯/袁著祉	南开大学	
	Auto(*)-2-6-V01	模式识别	张长水/边肇祺	清华大学	
	Auto(*)-2-7-V01	系统辨识理论及应用	萧德云/方崇智	清华大学	
	Auto(*)-2-8-V01	自适应控制理论及应用	柴天佑、岳恒/吴宏鑫	东北大学	
	Auto(*)-3-1-V01	多源信息融合理论与应用	潘泉、程咏梅/韩崇昭	西北工业大学	
	Auto(*)-4-1-V01	供应链协调及动态分析	李平、杨春节/桂卫华	浙江大学	

教师反馈表

感谢您购买本书！清华大学出版社计算机与信息分社专心致力于为广大院校电子信息类及相关专业师生提供优质的教学用书及辅助教学资源。

我们十分重视对广大教师的服务,如果您确认将本书作为指定教材,请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址,我们将免费向您提供有关本书的其他教学资源。

您需要教辅的教材:			
您的姓名:			
院系:			
院/校:			
您所教的课程名称:			
学生人数/所在年级:	_____人/ 1 2 3 4 硕士 博士		
学时/学期	_____学时/_____学期		
您目前采用的教材:	作者: _____ 书名: _____ 出版社: _____		
您准备何时用此书授课:			
通信地址:			
邮政编码:		联系电话	
E-mail:			
您对本书的意见/建议:		系主任签字 盖章	

我们的联系地址:

清华大学出版社 学研大厦 A602,A604 室

邮编: 100084

Tel: 010-62770175-4409,3208

Fax: 010-62770278

E-mail: liuli@tup.tsinghua.edu.cn; hanbh@tup.tsinghua.edu.cn

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 控制系统的发展	1
1.2 本书的内容考虑	5
参考文献	6
第 2 章 频谱分析	7
2.1 傅里叶级数	7
2.2 傅里叶积分和傅里叶变换	10
2.3 典型频谱特性	14
2.4 离散傅里叶变换	20
2.5 快速傅里叶变换	28
2.6 应用举例	31
思考题	35
参考文献	35
第 3 章 输入信号和跟踪误差	36
3.1 输入信号的分析	36
3.2 静态误差系数	41
3.3 动态误差系数	42
3.4 跟踪误差的计算	44
3.5 控制系统设计中的应用	49
思考题	50
参考文献	50
第 4 章 噪声和它所引起的误差	51
4.1 噪声与干扰	51
4.2 正态随机变量和正态随机向量	52
4.3 相关函数	55
4.4 谱密度	63
4.5 均方误差	71

4.6 系统的等效噪声带宽	75
4.7 小结	77
思考题	77
参考文献	77
第 5 章 控制系统的设计约束	78
5.1 灵敏度和 Bode 积分约束	78
5.2 对象的不确定性	83
5.3 鲁棒稳定性约束	87
思考题	89
参考文献	90
第 6 章 控制系统的设计	91
6.1 带宽及带宽设计	91
6.2 相对稳定性及其指标	98
思考题	100
参考文献	100
第 7 章 伺服系统的设计	101
7.1 伺服系统的数学模型	101
7.2 I 型系统	102
7.3 II 型系统	114
7.4 伺服系统的校正	120
思考题	123
参考文献	123
第 8 章 调节系统的设计	124
8.1 控制规律	124
8.2 调节系统的类型	126
8.3 PID 系统的设计	127
8.4 过程控制系统的设计	133
思考题	141
参考文献	141
第 9 章 工业伺服系统的设计	142
9.1 工业伺服系统	142
9.2 扰动的观测与补偿	149

9.3 交流伺服系统	154
思考题	159
参考文献	159
第 10 章 多回路系统的设计	161
10.1 多回路系统	161
10.2 串级调节系统	170
10.3 复合控制系统	172
思考题	175
参考文献	175
第 11 章 特殊对象的控制	176
11.1 不稳定对象的控制	176
11.2 非最小相位系统的控制	184
思考题	194
参考文献	194
第 12 章 控制系统的调试	195
12.1 频率特性的测试	195
12.2 系统的调试	198
12.3 振荡因素的分析	205
参考文献	213