



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

国家精品课程教材

Fundamentals of Control Engineering

工程控制基础

田作华 陈学中 翁正新 编著

Tian Zuohua, Chen Xuezhong, Weng Zhengxin

施颂椒 韩正之 主审

Shi Songjiao, Han Zhengzhi



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

国家精品课程教材

Fundamentals of Control Engineering

工程控制基础

田作华 陈学中 翁正新 编著

Tian Zuohua, Chen Xuezhong, Weng Zhengxin

上海交通大学

施颂椒 韩正之 主审

Shi Songjiao, Han Zhengzhi

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书的主要任务是讲清自动控制系统的基本原理,指导学生学会对实际控制系统的抽象,完成机构图的绘制、数学模型的建立和对控制系统的分析与设计。主要包括系统在三域(时域、复域、频域)中的数学模型,系统分析的三要素(稳定性、静态特性和动态特性),以及基于根轨迹法和频率法设计系统各种校正装置的方法,等等。

MATLAB是当前一种常用的计算机辅助设计软件,它为控制系统的分析与设计提供了专用的工具包。本书在各章都将介绍 MATLAB 的相关应用。本书基本概念清晰,工程实例丰富,配有大量习题(包括一般题、深入题、实际题和 MATLAB 题)。

本书可作为高等学校工科各专业,如电子信息类、机械工程类、电气工程类、仪器仪表类、工程物理类专业本科生学习控制理论的教材,也可供相关领域专业技术人员参考。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

工程控制基础/田作华,陈学中,翁正新编著. —北京:清华大学出版社,2007.9
(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-15796-0

I. 工… II. ①田… ②陈… ③翁… III. 工程控制论—高等学校—教材
IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113394 号

责任编辑:王一玲

责任校对:梁毅

责任印制:孟凡玉

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

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:20.5 字 数:430 千字

版 次:2007年9月第1版 印 次:2007年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 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:017435-01

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)

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

《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



工业现代化的基础是工业自动化。自动控制技术的广泛应用不仅可以大幅度地提高投入产出比,而且在减轻劳动强度、提高产品质量方面有着不可替代的巨大作用。当今世界科学技术突飞猛进,新技术不断涌现,这一方面给自动化学科的发展带来了绝好的机遇,同时也带来了严峻的挑战。

(1) 信息技术进步所带来的巨大冲击。

我国目前的自动化专业主要由以前的自动控制、工业自动化、工业电气自动化、生产过程自动化等专业组成,主要研究“过程控制”、“运动控制”的基本原理与实际应用,分析手段基本上是沿用传统的工程求解技术,调节方式则以 PID 为主。经过几十年的深入研究与应用实践,人们已积累了一套完整有效的控制理论与实用技术,并在长期的生产实践中取得了辉煌的业绩。但也应看到,随着科技的进步,生产中对控制的要求越来越高,先后提出多入多出控制、非线性控制、不确定模型控制及优化控制等。它们向传统控制理论的建模方式、分析手段、设计思想提出了挑战。20 世纪 60 年代初,随着现代控制理论的出现,特别是后来 IT 技术的发展突飞猛进,计算机在自动控制领域的应用与普及,突破了长期困扰人们的时空制约,为控制的新思想、新理论、新技术发现、发展与实现提供了广阔的天地。

(2) 国民经济产业结构调整和优化升级所带来的巨大冲击。

随着科技的进步和改革的深入发展,推进产业结构调整和优化升级,转变经济增长方式,是目前提高经济增长质量的重要途径和迫切任务。从目前的形势来看,我国的产业结构调整存在着一个明显的趋势:机械向电子靠,强电向弱电靠,弱电向计算机、信息靠。这既是经济发展的必然,也是自身生存的需要。

当前,各学科如何在保持自身特色的基础上,以信息为龙头,发挥各自优势,赶超世界先进水平,已成为当前一个热门的话题。作为以研究“系统”为主攻方向的“自动化”专业,无论在其内容还是在形式上,都存在一个如何保持专业特点,摒弃陈腐落后,纳收先进技术的问题,都存在一个如何跟上形势发展,适应社会人才需求,重新审视构建自动化专业

人才培养新平台的问题。特别是 IT 技术的发展,《自动控制原理》正从传统的专业课向目前的专业基础课演变,成为“电子信息教学平台”的重要组成部分,开设的面越来越广,受教育的对象越来越多。从以前主要面向弱电类专业,现已扩展到强电类、机械类、材料类、交通运输类乃至管理类、医学类,实际上它已成为现代专业技术人才必须掌握的一门专业基础。

根据我们目前已掌握的教材、教学计划来看,国外对自动控制的教學相当重视,绝大部分的工科专业都设有“控制工程”或与此相类似的课程,并普遍采用计算机辅助设计、虚拟仪器,来完成对控制系统的分析设计。

紧跟科技的进步、适应形势的发展,编制出适应具有中国特色的《控制工程基础》教材,势在必行。

根据我国目前自动控制教学现状和实际工程的特点,我们在编写过程中,遵循“加强基础,削枝强干,注重应用,逐步更新”的原则,在保持传统教材主要内容特点的基础上,力求做到:

(1) 在指导思想:强调与 IT 技术的结合。

我们认为:自动化专业的基础是“信息”、核心是“控制”、着眼点应立足于“系统”。有人认为 IT 就是指通信、计算机,这是一种狭隘片面的理解。其实自动化也属于 IT 的范畴,而且有着更广、更丰富的内涵,它包括了信息的获取(检测、仪表)、信息的处理(计算机)、信息的传输(通信),它从“系统”的角度,对客观事物进行抽象、建模、分析和设计,是更高层次上的信息集成。目前的“自动控制原理”在内容上自喻是“经典控制理论”,采用的分析手段是“经典”的工程求解法。应当承认这种工程求解法,对系统的分析设计发挥了很大的作用,但随着科技的进步,利用现代手段完成运动方程的直接求解和工程计算已不再困难。为此,本教材引入了计算机在控制系统分析、设计和仿真等内容的介绍。

(2) 在体系结构上:理清“三纵三横”。

这里讲的“三纵”:指系统在三域(时域、复域、频域)中的数学模型;“三横”:指系统特性(稳定性、稳态特性、动态特性)的三分析。

“三纵”:结合系统的数学模型,讲清工程求解与理论计算之间的内在联系与区别。具体地说,就是要搞清楚第 1 章图 1-12 所示的几种数学模型之间的相互关系。

这里需指出:对于一个具体的系统,人们可以根据对象的特点、工程的要求、求解的方便及本人的习惯,人为地建立各个不同域中的数学模型,如时域中的数学模型——微分方程,复域中的数学模型——传递函数或频域中的数学模型——频率特性,这些数学模型之间存在着严格的数学变换关系。学习中,所有问题的分析与求解都是建立在数学模型基础上的。所以,学会建立系统的模

型描述,掌握各种模型之间的特点与内在联系,对一个工程控制人员来说是至关重要的。加深对这条线的理解,能使学习者统观全局,树立一个“纵向”的思路。

“三横”:掌握系统分析的三要素:稳定性、静态特性和动态特性,具体地说,就是要弄清楚第1章表1-1中所涉及的内容。此表中有关的性能指标是衡量一个系统品质好坏的重要标志,也是对系统进行校正的主要依据,抓住这条线,就是抓住了系统分析设计的关键,有利于学习者建立一个“横向”的思路。

(3)在内容安排上:坚持“加强基础、削枝强干”。

本书的主要任务是:讲清自动控制系统的基本原理,指导学生学会对实际控制系统的抽象,完成结构图的绘制、数学模型的建立和对控制系统的分析与设计。为此:

①强化计算机的辅助设计,淡化工程求解的过程分析。传统的《自动控制原理》教材中,系统分析几乎占据了全书的一半以上,其中相当一部分是讲述工程求解的方法与技巧,如复域中“根轨迹绘制的规则”,频域中“三图”(Bode图、Nyquist图及Nichols图)的制作方法及其技巧等。本书根据实际需求,对相关内容进行了淡化,引入计算机的分析求解技术,紧扣重点,讲深讲透。

②增加工程实例,讲清物理概念。《自动控制原理》是一门实用背景很强的基础课程,学习本书的根本目的是:学以致用,联系实际,解决工程实践中的问题。为了加强这一方面的训练,本书在实例分析中,引入机械系统、电气系统、热力系统和液位系统等,以扩大知识面;在习题安排上分为:基本题、深入题、实际题和MATLAB题等四种类型,由浅入深,逐步展开。

③引入计算机控制技术。随着微机可靠性的日益提高和成本的不断下降,计算机已在工控领域得到了广泛的应用。从单片机、PLC、工业PC到嵌入式系统,从单机控制、集散控制、分布式控制到网络监控等都离不开数字调节技术。从控制的角度来看,人们完全可以利用计算机特有的存储、运算、比较、判断、交互及外围设备的优势,实现“根据不同对象选择不同的控制策略,根据不同的要求采用不同的整定参数”来改善系统的控制质量。如果再配上多媒体、网络技术,可使系统的控制更加形象活泼,更加人性化,而这些对已有相当计算机科学基础的一代来说并不困难。

本书被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材和教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会推荐使用教材。全书共分三部分8章。第1~6章为线性经典控制理论,由田作华、陈学中编写。第7、8章分别为非线性控制系统和计算机控制系统,由翁正新编写;全书由田作华统稿。

本书的各部分内容具有相对的独立性。在使用本书作为教材时,可根据不同类型、不同层次的需求进行组合。

本书由上海交通大学施颂椒教授、韩正之教授主审。他们对本书的体系结构,内容取舍提出了许多宝贵意见。该校自动化系的研究生参与了仿真实验、图形绘制和部分题解的工作,对此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,经验不足,书中一定存在不少缺点和错误,恳请广大读者和使用教材的兄弟院校师生批评指正。

作 者

2007.6 于上海交通大学

第 1 章 导论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统的基本原理和组成	2
1.2.1 自动控制系统基本原理	2
1.2.2 自动控制系统的组成	4
1.3 自动控制系统的分类	6
1.3.1 按信号的传递路径来分	6
1.3.2 按系统输出信号的变化规律来分	7
1.3.3 按系统传输信号的性质来分	7
1.3.4 按系统的输入输出特性不同来分	8
1.4 控制系统实例	9
1.4.1 内燃机的转速控制系统	9
1.4.2 角度随动系统	10
1.5 本书概貌	10
习题	12
第 2 章 控制系统的数学模型	15
2.1 控制系统的时域数学模型——微分方程	15
2.1.1 系统的微分方程举例	16
2.1.2 非线性系统的线性化	17
2.2 控制系统的复域数学模型——传递函数	18
2.2.1 传递函数定义	18
2.2.2 传递函数性质	19
2.3 控制系统的频域数学模型——频率特性	19
2.4 典型环节及其传递函数	20
2.4.1 比例环节	20
2.4.2 微分环节	21
2.4.3 积分环节	23
2.4.4 惯性环节(非周期环节)	24
2.4.5 振荡环节	25

2.4.6	时间延迟环节(时滞环节)	26
2.5	控制系统的方块图	26
2.5.1	系统方块图	26
2.5.2	方块图的基本运算法则	28
2.5.3	系统常用的传递函数	29
2.5.4	方块图的简化法则	30
2.6	信号流图	32
2.6.1	几个定义	33
2.6.2	信号流图的性质及运算法则	33
2.6.3	信号流图与方块图之间等效关系	34
2.6.4	梅逊(Mason)公式	35
2.7	物理元件和系统的数学模型	37
2.7.1	机械系统	38
2.7.2	电气系统	39
2.7.3	热力系统	41
2.7.4	液位系统	43
2.7.5	典型位置随动系统的数学模型	45
2.8	MATLAB在系统数学模型转换中的应用	47
2.8.1	MATLAB中传递函数的分式多项式的表示	47
2.8.2	传递函数的零极点表示	48
2.8.3	用MATLAB计算系统的传递函数	49
2.8.4	MATLAB中多项式与因式分解形式的互相转换	51
小结		52
习题		52
第3章	自动控制系统的时域分析	58
3.1	常用的典型测试信号	58
3.1.1	阶跃信号	59
3.1.2	速度信号(斜坡信号)	59
3.1.3	加速度信号(抛物线信号)	60
3.1.4	脉冲信号	60
3.1.5	正弦信号	61
3.2	控制系统的稳定性分析	62
3.2.1	稳定性的基本概念	62
3.2.2	线性定常系统稳定的充分必要条件	62
3.2.3	劳斯(Routh)稳定性判据	64

3.2.4	用 MATLAB 分析系统的稳定性	68
3.3	控制系统的稳态特性——稳态误差分析	69
3.3.1	稳态误差和控制系统类型	69
3.3.2	稳态误差系数和稳态误差计算	71
3.3.3	几点结论	74
3.4	控制系统的动态特性——动态响应分析	75
3.4.1	控制系统动态响应指标	75
3.4.2	一阶系统的动态响应	76
3.4.3	二阶系统动态响应的描述参数	77
3.4.4	二阶系统的单位阶跃响应	78
3.4.5	二阶系统的动态响应指标	79
3.5	高阶系统的动态响应	82
3.5.1	高阶系统动态响应的特点	82
3.5.2	主导极点、偶极子和附加零极点	83
3.6	利用 MATLAB 分析系统性能	85
3.6.1	step 命令	85
3.6.2	impulse 命令	86
3.6.3	lsim 命令	87
小结	88
习题	89
第 4 章	根轨迹法	95
4.1	闭环系统的根轨迹	95
4.1.1	根轨迹的定义	95
4.1.2	根轨迹的幅值条件和相角条件	97
4.2	绘制根轨迹的基本规则	98
4.2.1	绘制根轨迹的基本规则和步骤	98
4.2.2	开环零、极点的变化对根轨迹的影响	105
4.3	根轨迹的应用	107
4.3.1	用根轨迹分析系统	107
4.3.2	用根轨迹选择系统的参数	109
4.4	用 MATLAB 绘制根轨迹	109
小结	111
习题	112
第 5 章	线性系统的频域分析——频率响应法	118
5.1	频率特性	118

5.1.1	线性定常系统对正弦输入信号的响应	118
5.1.2	系统的频率特性	119
5.1.3	频率特性的性质	120
5.2	频率特性图	121
5.2.1	频率特性的极坐标图(奈氏图)	121
5.2.2	典型环节的奈氏图	122
5.2.3	对数频率特性图(伯德图)	126
5.2.4	基本因子的伯德图	128
5.2.5	控制系统的伯德图	132
5.2.6	最小相位系统和非最小相位系统	134
5.2.7	对数幅相特性图	136
5.2.8	用 MATLAB 作频率特性图	137
5.3	频域中的稳定性判据	138
5.3.1	引言	138
5.3.2	幅角原理	139
5.3.3	奈氏稳定性判据	140
5.3.4	伯德图的奈氏判据	144
5.4	系统动态性能的频域分析与频域指标	146
5.4.1	系统的相对稳定性	146
5.4.2	基于开环频率特性的系统动态性能分析	148
5.4.3	基于闭环频率特性的系统动态性能分析	150
5.4.4	从尼科尔斯图求闭环系统的频域指标	151
5.4.5	用 MATLAB 分析系统的动态性能	153
5.5	基于伯德图的系统稳态性能分析	155
	小结	157
	习题	158
第 6 章 线性控制系统的设计		166
6.1	引言	166
6.2	不同域中系统动态性能指标的相互关系	167
6.3	串联校正	168
6.3.1	相位超前校正	169
6.3.2	相位滞后校正	177
6.3.3	相位超前-滞后校正	183
6.3.4	有源校正网络	192
6.3.5	不希望极点的抵消	192