



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



控制工程基础

杜继宏 王诗宓 编著



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材

控制工程基础

杜继宏 王诗宓 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

“控制工程基础”是电气信息类的基础课程。本书力求贴近实际,满足多学科交叉背景学生的教学需要,体现宽口径的教学思想。本书可以作为国内重点大学电子信息学院大平台基础课的教材。

本书比较全面地介绍了自动控制原理的基本理论及其工程分析和设计方法,使读者能够清晰地建立线性反馈控制系统的基本原理和基本概念,学会利用时域法、频率特性法和根轨迹法等来分析、设计自动控制系统。本书侧重反映基本概念,重视基础知识讲解,强调物理概念,简化理论推导,尽量做到深入浅出、叙述严密。书中包含丰富的例题和习题。为强调理论和实际的联系,收录了一定数量的结合工程实际的例题,在离散控制系统一章中增加了计算机控制系统的实用知识。本书还引入了利用计算机软件研究控制系统的方法,精简了部分手工作图方法的技术细节,但仍然保留有价值的简图绘制以及利用它们分析概念性问题的方法。

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

控制工程基础/杜继宏,王诗宓编著. —北京:清华大学出版社,2008.9

(电子信息学科基础课程系列教材)

ISBN 978-7-302-17310-6

I. 控… II. ①杜… ②王… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 047690 号

责任编辑:王敏稚

责任校对:李建庄

责任印制:何 芊

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

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 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:28.25 字 数:644 千字

版 次:2008 年 9 月第 1 版 印 次:2008 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00 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:024094-01

《电子信息学科基础课程系列教材》
编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)

王小海(浙江大学)

王 萍(天津大学)

刘宗行(重庆大学)

刘新元(北京大学)

张晓林(北京航空航天大学)

陈后金(北京交通大学)

郭宝龙(西安电子科技大学)

高上凯(清华大学)

徐淑华(青岛大学)

崔翔(华北电力大学)

董在望(清华大学)

蒋宗礼(北京工业大学)

邓建国(西安交通大学)

王诗宓(清华大学)

王福昌(华中科技大学)

刘润华(中国石油大学)

张 石(东北大学)

沈连丰(东南大学)

郑宝玉(南京邮电大学)

柯亨玉(武汉大学)

高小榕(清华大学)

袁建生(清华大学)

傅丰林(西安电子科技大学)

曾孝平(重庆大学)

《电子信息学科基础课程系列教材》 丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程教研组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和 research,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

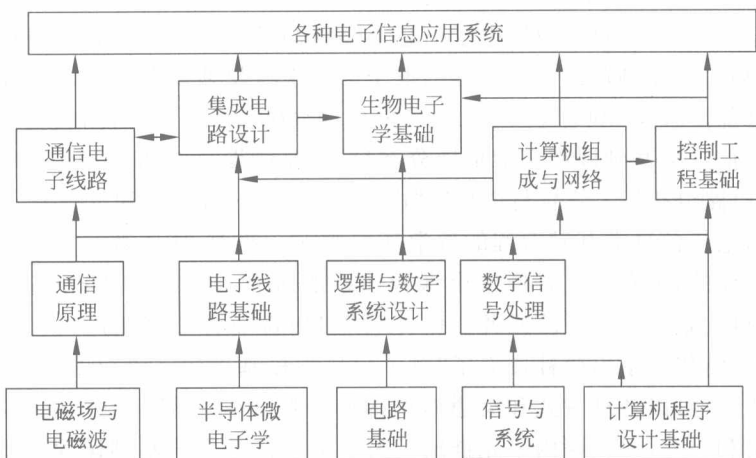
在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

- (1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。
- (2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。
- (3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 信息工程
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

前言

“控制工程基础”是电气信息类的基础课程。在编写本书时,编者力求更加贴近实际,满足多学科交叉背景学生的教学需要,体现宽口径的教学思想。本书可以作为国内重点大学电子信息学院大平台基础课的教材。

自动化是工业现代化的基础和前提,是现代工业生产及技术中重要而不可缺少的组成部分。本教材比较全面地向学生介绍自动控制的基本理论及其工程分析和设计方法,使学生清晰地建立线性反馈控制系统的基本原理和基本概念,初步学会利用经典控制理论的方法,即利用时域法、频率特性法和根轨迹法等来分析、设计自动控制系统。

本书侧重于反映最基本的概念,重视基础知识的讲解。在叙述原理时强调物理概念,简化理论推导。并尽量做到深入浅出,叙述严密。本书包含丰富的例题和习题,熟悉这些例题并完成习题,对读者理解概念和掌握方法会有很大的帮助。为了强调理论和实际的联系,本书收录了一定数量的结合工程实际的例题,在离散控制系统一章中增加了计算机控制系统的实用知识。本书还引入了利用计算机软件研究控制系统的方法,精简了一批过时的手工作图方法的应用细节。不过,本书仍然保留了某些有价值的简图绘制及利用它们分析概念性问题的方法。

“控制工程基础”的建议学时数为48学时。选用本教材的学校可以根据本校专业的特点进行取舍,确定教学的重点。本书第2章的2.7节、2.8节,第3章的3.8节,第4章的4.7节,第5章的5.6节、5.7节,第7章的7.4节、7.5节、7.6节和第9章的9.4节可以作为选修内容处理。

本书共分9章,第1~5章由王诗宓执笔,第6~9章由杜继宏执笔,王诗宓对全书的术语、译名、符号和插图等进行了统一的校准。本书的习题解答将作为配套教辅材料另行出版。

在编写本书的过程中,参考了许多相关的优秀教材和著作,编者向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。对于本书的错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2008年5月于清华园

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：	控制工程基础(杜继宏 王诗宓)		
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

第 1 章 绪论	1
1.1 控制系统的示例	2
1.2 自动控制系统的基本形式	5
1.3 对控制系统性能的基本要求	8
1.4 自动控制理论的发展简史	10
习题	11
第 2 章 控制系统的数学描述	13
2.1 引言	14
2.2 微分方程描述方法	15
2.2.1 描述运动的微分方程	15
2.2.2 非线性方程的线性化	17
2.2.3 从原始方程组推导微分方程	18
2.2.4 离散时间系统的运动方程	20
2.3 求解微分方程的拉普拉斯变换方法	20
2.3.1 拉普拉斯变换及性质	20
2.3.2 逆拉普拉斯变换	24
2.3.3 用拉普拉斯变换解微分方程	25
2.3.4 运动模态	27
2.4 传递函数描述方法	28
2.4.1 传递函数	28
2.4.2 传递函数的极点与零点	31
2.4.3 极点与零点的对消	33
2.5 闭环系统的传递函数	35
2.5.1 框图	35
2.5.2 闭环系统的传递函数	40
2.5.3 信号流图	43
2.6 基本单元	45
2.7 卫星通信天线定位系统	49
2.8 锅炉水位控制系统	56
2.9 本章小结	59
习题	59

目录

第3章 线性控制系统的运动	64
3.1 引言	65
3.2 线性系统的典型时间响应	65
3.2.1 控制系统的典型输入	65
3.2.2 典型输出响应	67
3.3 稳定性和劳斯判据	68
3.3.1 运动的稳定性	68
3.3.2 线性系统的稳定性	69
3.3.3 劳斯判据	71
3.4 稳定系统响应的性能指标	75
3.4.1 稳态误差	75
3.4.2 扰动作用下的稳态误差	79
3.4.3 瞬态响应指标	80
3.4.4 误差积分指标	81
3.5 一阶系统响应的分析	83
3.6 二阶系统响应的分析	86
3.6.1 标准二阶系统的阶跃响应	86
3.6.2 标准二阶系统的瞬态响应指标	89
3.6.3 标准二阶系统的冲激响应	92
3.6.4 具有微分作用的二阶系统	93
3.7 高阶系统的运动	95
3.7.1 高阶系统的二阶近似	95
3.7.2 高阶系统运动特性的一般特征	97
3.8 卫星天线控制系统的运动分析	98
3.9 本章小结	101
习题	101
第4章 频率响应法	106
4.1 引言	107
4.2 频率特性函数	107
4.3 频率特性函数的图像	109
4.3.1 伯德图	109

4.3.2 极坐标图	122
4.3.3 尼柯尔斯图	127
4.4 奈奎斯特稳定性判据及其应用	128
4.4.1 奈奎斯特稳定性判据	128
4.4.2 奈奎斯特稳定性判据应用举例	130
4.4.3 控制系统的稳定裕度	138
4.5 闭环频率特性	142
4.5.1 闭环频率特性的特点	142
4.5.2 绘制闭环频率特性的常用工具图	143
4.6 开环频率特性与闭环系统响应的关系	147
4.7 卫星天线控制系统的频率特性	151
4.8 本章小结	152
习题	153
第 5 章 控制系统的频域校正	158
5.1 引言	159
5.2 校正的基本概念	159
5.3 超前校正	161
5.3.1 超前校正的性质和作用	161
5.3.2 设计示例	164
5.4 滞后校正	168
5.4.1 滞后校正的性质和作用	168
5.4.2 设计示例	170
5.5 超前滞后校正	172
5.5.1 超前滞后校正的性质和作用	172
5.5.2 设计示例	173
5.6 比例积分微分校正	178
5.6.1 比例积分微分校正作用	178
5.6.2 比例积分微分校正的参数整定	180
5.6.3 设计示例	183
5.7 采用预期开环频率特性的设计	185
5.7.1 典型四阶开环模型	186

目录

5.7.2 设计示例	187
5.8 本章小结	189
习题	190
第6章 根轨迹方法及控制系统的校正	193
6.1 引言	194
6.2 根轨迹的基本概念及绘制	196
6.2.1 根轨迹	196
6.2.2 闭环零点、极点与开环零点、极点的关系	197
6.2.3 根轨迹的幅值条件和幅角条件	198
6.2.4 计算机辅助绘制根轨迹	199
6.3 根轨迹的基本性质	200
6.4 根轨迹方法应用示例	212
6.4.1 条件稳定系统	212
6.4.2 增加极点或零点对根轨迹的影响	213
6.4.3 参数根轨迹和根轨迹族	215
6.4.4 延时系统	218
6.5 常用串联校正装置的性质	222
6.5.1 超前校正装置	222
6.5.2 滞后校正装置	224
6.5.3 超前滞后校正装置	226
6.6 超前校正	226
6.6.1 超前校正的基本设计方法	227
6.6.2 设计示例	229
6.7 滞后校正	233
6.7.1 滞后校正的基本设计方法	233
6.7.2 设计示例	235
6.8 超前滞后校正	237
6.8.1 超前滞后校正的一般设计方法	237
6.8.2 设计示例	237
6.9 本章小结	240
习题	241

第 7 章 多回路控制策略	245
7.1 引言	246
7.2 单回路控制系统中存在的问题	246
7.2.1 扰动特性	247
7.2.2 扰动进入点的影响	250
7.2.3 调节器增益变化的影响	251
7.2.4 小结	254
7.3 串级控制	254
7.3.1 串级控制的优点	254
7.3.2 串级控制的设计原则与实施中的问题	262
7.3.3 小结	267
7.4 补偿控制	268
7.4.1 扰动不变性原理和双通道原理	268
7.4.2 前馈补偿控制	269
7.4.3 前馈补偿调节器	271
7.4.4 锅炉水位控制系统	273
7.4.5 大滞后对象的补偿控制	276
7.4.6 小结	277
7.5 他励直流电机调速系统	277
7.5.1 转速负反馈单回路直流调速系统	278
7.5.2 转速-电流双回路直流调速系统	281
7.5.3 设计示例	287
7.5.4 小结	290
7.6 双变量系统的解耦控制	290
7.6.1 减少双变量系统稳态相互作用的策略	291
7.6.2 采用前馈补偿实现解耦控制	294
7.6.3 实现解耦控制的对角矩阵法	296
7.6.4 小结	300
7.7 本章小结	301
习题	302

目录

第 8 章 线性离散控制系统	305
8.1 引言	306
8.2 采样与保持	307
8.2.1 采样过程	307
8.2.2 理想采样过程	310
8.2.3 保持器	312
8.2.4 A/D 转换器和 D/A 转换器	316
8.2.5 小结	317
8.3 z 变换	317
8.3.1 时间函数的 z 变换	318
8.3.2 z 变换的性质	322
8.3.3 z 反变换	327
8.3.4 小结	331
8.4 离散控制系统的数学模型	331
8.4.1 差分方程及其求解	331
8.4.2 脉冲传递函数	335
8.4.3 闭环系统的脉冲传递函数	340
8.4.4 小结	343
8.5 离散系统的稳定性分析	343
8.5.1 s 平面与 z 平面之间的映射	343
8.5.2 z 平面上的稳定性分析	345
8.5.3 双线性变换	350
8.5.4 w 平面上的稳定性分析	351
8.5.5 小结	353
8.6 离散控制系统的时域响应	354
8.6.1 闭环极点与冲激响应的关系	354
8.6.2 离散系统的瞬态响应指标	357
8.6.3 离散系统的稳态响应	359
8.6.4 修正的 z 变换	361
8.6.5 小结	367
8.7 本章小结	367
习题	368

第 9 章 离散控制系统的校正综合	372
9.1 引言	373
9.2 连续部件离散化的几种近似方法	374
9.2.1 冲激响应不变法	374
9.2.2 零阶保持器近似法	376
9.2.3 极零匹配映射法	377
9.2.4 后向差分法	379
9.2.5 梯形积分法	381
9.2.6 小结	385
9.3 等效模拟校正设计方法	386
9.3.1 离散系统的两类校正设计方法	386
9.3.2 数字控制器的等效模拟校正设计	387
9.3.3 数字 PID 控制器	390
9.3.4 数字控制器的编程实现	398
9.3.5 小结	400
9.4 直接数字校正设计方法	400
9.4.1 数字控制器的直接设计	401
9.4.2 数字控制器的解析设计	405
9.4.3 最小时间响应	408
9.4.4 达林算法	418
9.4.5 小结	421
9.5 本章小结	421
习题	422
名词索引	425
参考文献	431

第1章 绪论