

名师策划 名师主理 教改结晶 教材精品



新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

丛书主编 邹逢兴

自动控制——

建模 · 分析 · 设计

宫二玲 沈 辉 编 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

自动控制——建模·分析·设计

宫二玲 沈 辉 编 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书针对工科院校普遍开设的“自动控制原理”课程,系统地阐述了经典控制理论和现代控制理论所涉及的基本内容。作为主要特色之一,本书将这些内容划分为模型篇、分析篇和设计篇三大部分。其中模型篇涵盖了连续时间系统的微分方程与传递函数模型、方框图与信号流程图模型、频率特性模型、离散时间系统的差分方程与脉冲传递函数模型,以及作为现代控制理论基石的状态空间模型;分析篇包括连续时间系统的稳定性、瞬态性能、稳态性能分析,以及离散时间系统的性能分析,其中每一种性能分析都用到了多种方法,例如稳定性分析用到了 Routh-Hurwitz 判据、根轨迹方法、Nyquist 判定方法等;设计篇包括连续时间超前/滞后校正网络设计、离散时间数字控制器设计、状态反馈控制器设计、PID 与鲁棒控制器设计,以及最优控制器设计。

本书的另一大特色是全书贯穿了军事装备案例——高炮随动控制系统,包括对该系统各组成部分的介绍、各部件的数学模型以及全系统的数学模型,并在传递函数模型的基础上对系统进行性能分析和设计,从而将各篇中的基本理论和方法很好地加以运用。

本书还注重与当前先进的工具软件相结合,几乎在每章的理论阐述后,都介绍与之相关的 Matlab 命令或 Simulink 仿真模块,旨在帮助学生具备以现代手段分析设计控制系统的能力。

本书可以作为高等工科院校电气、机械、航空航天、自动化、化工等专业本科生的“自动控制原理”课程教材,也可供从事与自动控制系统相关的教师、研究生、科研或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制:建模·分析·设计/宫二玲,沈辉编著

—北京:中国水利水电出版社,2016.11

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

ISBN 978-7-5170-4889-3

I. ①自… II. ①宫… ②沈… III. ①自动控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第277981号

责任编辑:杨庆川 李 炎 加工编辑:高双春 封面设计:李 佳

书 名	新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材 自动控制——建模·分析·设计 ZIDONG KONGZHI—JIANMO·FENXI·SHEJI
作 者	宫二玲 沈 辉 编 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 29.25印张 757千字
版 次	2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

编审委员会

顾问：

冯博琴（西安交通大学教授，第一届国家级教学名师）

蔡自兴（中南大学教授，第一届国家级教学名师）

蔡惟铮（哈尔滨工业大学教授，第一届国家级教学名师）

主任委员：

邹逢兴（国防科学技术大学教授，第一届国家级教学名师）

副主任委员：

刘甘娜（大连海事大学教授，教育部非计算机专业计算机基础课程
教学指导分委员会委员）

胡德文（国防科学技术大学教授，国家杰出青年科学基金获得者）

龚沛曾（同济大学教授，国家级精品课程负责人）

王移芝（北京交通大学教授，国家级教学名师，国家级精品课程负
责人）

委员：

孙即祥	陈怀义	叶湘滨	马宏绪	张湘平	高 政
李 革	刁节涛	卢启中	潘孟春	陆 勤	黄爱民
宋学瑞	李云钢	陈立刚	彭学锋	徐晓红	杨益强
陈贵荣	王成友	史美萍	李 迅	徐 欣	王 浩

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

总 序

电子信息与自动化系列课程是专业适用面很广的课程系列。随着电子信息时代的到来,特别是进入 21 世纪之后,我国各级各类本科院校相当多的理工科专业都或多或少地开设了该系列课程中的课程。因此,提高该系列课程的教学水平、教学质量,对于提高我国高等教育水平和质量,增强当代大学生应用先进的信息技术解决专业领域问题的能力和业务素质,具有特殊重要的意义。而教材是课程内容和课程体系的知识载体,对课程改革和建设既有龙头作用,又有推动作用,所以要提高课程教学水平和质量,关键是要有高水平、高质量的教材。

正是基于上述认识,中国水利水电出版社推动成立了“新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材”编审委员会,在经过近两年的深入调查研究的基础上,策划提出了本系列教材的编写、出版计划。

本系列教材总的定位是面向各级各类高等院校的本科教学,重点是一般本科院校的教学。整个教材系列大体分为电子信息与通信、计算机基础教育和测控技术与自动化三类,共约 50 本主体教材,它们既自成体系,具有信息类学科的系统性、完整性,又有相对独立性。参加本系列教材编写的作者全部是一些长期在重点大学从事相关课程教学的教授、副教授,大多是所在单位的学科学术带头人或学术骨干,不少还是全国知名专家教授、国家级教学名师和教育部有关“教指委”专家、国家级精品课程负责人等,他们不仅具有丰富的教学经验,而且具有丰富的相关领域的科研经验,对有关课程的内涵、特点、内容相关性及应用等都有较深刻的认识和切身体验。这对编写、出版好本系列教材是十分有利的条件。

本系列教材在编写时均遵循了以下指导思想:

(1) 正确处理先进性和基础性的关系,努力实现两者的统一。

作为进入新世纪的新编信息类教材,既注重在原有同类教材的基础上推陈出新,努力反映学科技术的最新成就,使之具有鲜明的时代特征和先进水平,又注重符合教学规律、教学特点,突出基本原理、基本知识、基本方法和基本技术技能的阐述,着力培养学生应用基础知识分析、解决问题的创新思维能力和将来独立获取、掌握新知识,跟踪相关学科技术发展的能力。

(2) 正确处理理论与实践的关系,切实贯彻理论与实践紧密结合的原则。

本系列教材绝大多数都是理论与实际结合紧密、实用性很强的课程教材,因此特别强调从应用的角度组织内容,在重视理论系统性的同时,尤其突出实践性、应用性,使学生学了以后懂得有什么用、怎么用。在教材内容阐释时,积极引入“案例”,将基本知识单元、知识点的讲解融入典型案例的解决和研究过程中,以培养学生解决工程实际问题的能力作为突破口。

(3) 遵循“宽编窄用”的内容选取原则和模块化的内容组织原则。

凡教育部课程“教指委”制定了教学基本内容及要求的课程,所编教材均覆盖基本内容,

满足基本要求；其他教材的内容选取也都尽量符合多数学校和国内外同行专家的共识。在此基础上再改革创新，努力从继承与发展的结合上来准确把握（取舍）内容。模块化的内容组织主要有利于适应不同专业、不同层次、不同学时数的教学组织和安排。

（4）努力贯彻素质教育与创新教育的思想，尽量采用“问题牵引”“任务驱动”的编写方式，融入启发式教学方法。

各知识单元尽量以实际问题、工程实例引出相关知识点，在启发学生分析、解决问题及实例的过程中，讲清原理和概念，提炼解决问题的思路和方法，着力培养学生的创新思维意识、习惯和能力，提高学生思考、分析、解决工程实际问题的素质和能力。

（5）注重内容编排的科学严谨性和文字叙述的准确生动性，务求好教好学。

在内容组织上，除条理清晰、逻辑严谨外，还尽量做到重点突出、难点分散、循序渐进，使学生易于理解。在文字叙述上，不仅概念准确、语言流畅，而且力求富有启发性、互动性、感染性、思想性，重视运用形象思维方法和通俗易懂语言，深入浅出地叙述复杂概念，说明难点问题。

（6）立足于形成立体配套的教材体系，以适应现代化教育教学方法手段的需要。

每本教材编写出版后都配套制作有 PowerPoint 电子教案，可从中国水利水电出版社网站上免费下载。大部分主教材出版后还将相继出版配套的辅助教材（包括教学辅导、习题解答、实验教程等），有的还将推出相应的多媒体教学资源库、CAI 课件和课程网站，为教师备课、教学和学生自主性、个性化学习提供更多更好的支持。

总之，本系列教材是近年来各位作者及其所在学校、学科课程教学改革和科学研究成果的结晶，在内容上、体系上、模式上有一定创新。我相信，它的出版将对推动我国高校电子信息与自动化系列课程的改革发挥积极的作用。

但是，由于电子信息与自动化类学科的内涵十分丰富，课程覆盖面很广，在组织策划本系列教材时难免有挂一漏万和不妥之处，所编教材质量也未必都能如愿，恳请广大读者多提宝贵意见，以使本系列教材渐趋合理、完善。

邹逢兴

2005 年 6 月

前 言

控制工程是一个充满新奇和挑战的领域，从本质上讲，它是一个跨学科的综合领域，自动控制原理则是该领域的学习中非常重要的一门核心基础课程。一般而言，控制工程基本理论的学习可以采取两条不同的途径：一方面，由于控制工程建立在坚实的数学基础之上，因此可以将基本原理作为重点，从严格的理论角度进行学习，再将其应用到具体的工程实践中；另一方面，由于控制工程的终极目标是实现对实际系统的控制，因此也可以在设计反馈控制系统的实践中，凭直观和实践经验进行学习，不过没有理论的指导可能要走很多弯路。我们深信要能深入地、卓有成效地理解和掌握自动控制的基本思想和理论方法，就必须系统地学习前人的研究成果，并对其进行重新发现和创新。这样，一本适用的教材就是必不可缺的，而本书即可作为工科类本科生学习自动控制基本原理时的教材。相较于目前为数众多的此类教材，本书具有如下显著特点：

1. 重新整合经典控制和现代控制的基本内容，将其分为模型篇、分析篇、设计篇三大部分，这是本书的最大特色。这种篇章结构带来的好处是，更便于将研究同一问题的各种方法加以横向比较，进而做到融会贯通。

例如，在“模型篇”中，针对连续时间 LTI 系统分别介绍了微分方程模型、传递函数模型、方框图与信号流图模型、频率特性模型。其中微分方程模型是对连续时间系统的时域描述，也是根据系统运行的物理机理建立起来的最原始模型；当在零初始条件下，对微分方程两边同时进行 Laplace 变换后，就可以整理得到传递函数模型，它也是系统单位脉冲响应的 Laplace 变换；在传递函数模型的基础上，如果对系统内部结构了解得比较清楚，则可以用图示化的方式加以展示，即方框图模型或信号流图模型，当然由 Mason 公式也可以方便地再得到传递函数模型；在零初始条件下，对系统输入不同频率的正弦信号，其稳态输出仍是正弦信号，只是输出的幅值和相位是输入信号频率的函数，这就是系统的频率特性模型。事实上，频率特性模型也可以看作是系统单位脉冲响应的傅里叶变换。这样，我们就把用于描述连续时间 LTI 控制系统的四种模型有机地结合起来，同时可以认为它们是对同一个系统从不同角度的描述，具有“横看成岭侧成峰”的效果。对于离散时间 LTI 系统本书则介绍了差分方程、脉冲传递函数、状态空间三种模型。在“分析篇”中，对连续时间系统按照稳定性分析、瞬态性能分析、稳态性能分析将内容组织成三章。每一章中都运用多种方法对同一性能从不同角度进行分析。例如，稳定性分析中就采用了 Routh-Hurwitz 判据、根轨迹、Nyquist 判据三种方法，对同一个系统，三种方法的切入角度不同，但分析的结论应该是一致的。瞬态性能和稳态性能的分析中也采用了不同的方法加以比较。“设计篇”中对于校正装置的经典设计介绍了基于根轨迹和基于 Bode 图两种思路，现代控制系统设计中介绍了基于状态空间模型的状态反馈控制器设计方法。对于离散控制系统还介绍了基于模拟控制器的转换法和数字控制器的直接设计法。作为自动控制基本理论的延伸和拓展，“设计篇”中还介绍了 PID 控制、鲁棒控制和最优控制的基本思想。

2. 不同于其他教材中常常采用的工业生产过程案例，本书自始至终贯穿了一个典型装备

案例——高炮随动控制系统。除却在导论中对该系统的结构和工作原理加以介绍外，从全系统的数学模型建立，到系统的稳定性、瞬态性能、稳态性能分析，最后到系统性能的改进和设计，均作为每一篇的最后一章加以讨论。这样，一方面可以作为各篇所讲述基本理论知识的综合运用，另一方面又可以展现自动控制理论在装备系统中的具体应用。

3. 随着计算机和软件技术的迅猛发展，不论是从事实际工作的工程师还是在校学习的学生，都离不开 Matlab 这一强大工具的帮助。本书几乎在每章的最后一节都设置了 Matlab 应用专题，其中既包含对单条指令的介绍，又包含为解决一个实际问题而编制的 Matlab 脚本程序，以及程序运行后的结果。期望学习者可以通过仿照例程，切实掌握 Matlab 工具在控制系统建模、分析和设计中的运用。

4. 为方便数学基础较弱的学生学习本教材，我们还增加了 Laplace 变换、Z 变换和矩阵运算的基本内容作为附录 A、B、C，这三部分内容在自动控制原理的学习过程中是不可或缺的，必须要熟练掌握。

在本教材的编写即将完成之际，特别要提到国防科技大学的张湘平教授。作为本教材的负责人，早在 2010 年初，张教授即对教材的篇章结构进行了整体规划，提出了划分为模型篇、分析篇和设计篇的基本思想，并准备添加典型装备案例。在编写过程中，张教授亲力亲为，完成了第 1、2、3、16、17 章的编写任务，并负责全书的统稿。不幸的是，2012 年张教授罹患癌症。在和病魔抗争的过程中，他依然没有放弃本书的编写工作，精益求精，力求完美。如今，张教授已溘然仙逝。其余的编者只能化悲痛为力量，尽全力完成张教授的呕心沥血之作。其中宫二玲完成了第 5、7、8、10、11、12、15、18 章及附录的编写工作，沈辉完成了第 4、6、9、13、14 章的编写工作。还要特别感谢国防科技大学自动控制原理课程组的谢红卫教授、张明教授、韦庆教授、张辉教授、李兴玮副教授、孙志强讲师、白圣建讲师等同事的指导和帮助，以及“新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材”丛书主编邹逢兴教授的鼓励与大力支持。

鉴于笔者水平有限，书中难免存在不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月于国防科技大学

目 录

总序

前言

第1章 导论	1	1.3.2 定常系统与时变系统	11
1.1 概述	2	1.3.3 连续系统与离散系统	11
1.1.1 自动控制简史	2	1.3.4 单输入单输出(SISO)系统与 多输入多输出(MIMO)系统	12
1.1.2 自动控制的未来机遇与挑战	4	1.4 自动控制系统性能的基本要求	12
1.2 自动控制的基本思想	5	1.5 循序渐进实例——高炮随动控制 系统简介	13
1.2.1 自动控制的基本概念	5	1.5.1 火炮相关知识	13
1.2.2 开环控制系统	7	1.5.2 高炮随动控制系统简介	15
1.2.3 闭环控制系统	8	习题一	16
1.3 自动控制系统的类型	10		
1.3.1 线性系统与非线性系统	10		

模型篇

第2章 微分方程与传递函数模型	20	2.8 用 Matlab 处理传递函数	46
2.1 线性定常微分方程	21	2.8.1 传递函数的表示及形式转换	46
2.1.1 线性定常微分方程的一般形式	21	2.8.2 传递函数的特征根及零极点分布图	47
2.1.2 线性叠加原理	21	习题二	48
2.1.3 建立线性定常微分方程的步骤	21	第3章 方框图与信号流程图模型	52
2.2 传递函数	21	3.1 方框图模型	53
2.2.1 传递函数的定义	22	3.1.1 方框图的基本组成单元与绘制步骤	53
2.2.2 关于传递函数的说明	22	3.1.2 方框图的等效变换	56
2.2.3 基本环节及其传递函数	23	3.2 信号流图	60
2.3 电气系统	24	3.2.1 信号流图的概念与性质	60
2.3.1 电路基本定律和常用电气元件	24	3.2.2 信号流图代数	63
2.3.2 电气系统的数学建模举例	26	3.2.3 Mason 增益公式及其应用	64
2.4 机械系统	30	3.3 利用 Matlab 函数或 Simulink 环境 进行系统建模	67
2.4.1 牛顿定律和常用机械元件	30	3.3.1 利用 Matlab 函数进行框图化简	67
2.4.2 机械系统的数学建模举例	34	3.3.2 利用 Simulink 环境进行系统建模	70
2.5 相似系统	40	习题三	71
2.5.1 相似系统举例	40	第4章 控制系统的频域模型	76
2.5.2 相似系统的优势	43	4.1 频率特性的基本概念	77
2.6 非线性系统的线性化	43	4.1.1 引言	77
2.6.1 非线性系统的线性化方法	44	4.1.2 频率特性的定义	78
2.6.2 磁悬浮钢球系统的线性化处理	44	4.2 频率特性的表示方法	80
2.7 模型误差	45		

4.2.1 幅相频率特性曲线	81	5.6.2 连续控制系统与离散控制系统 之间的转换	123
4.2.2 对数频率特性曲线	82	习题五	124
4.2.3 对数幅相频率特性曲线	84	第 6 章 状态空间模型	127
4.3 典型环节的频率特性	84	6.1 动态系统的状态空间描述法	128
4.3.1 比例环节	84	6.1.1 引言	128
4.3.2 惯性环节	85	6.1.2 系统的状态空间模型	130
4.3.3 积分环节	87	6.1.3 状态空间模型的建立	134
4.3.4 微分环节	88	6.1.4 等价变换与特征值标准型	138
4.3.5 振荡环节	90	6.2 模型变换与实现问题	142
4.4 系统开环频率特性的绘制	92	6.2.1 由微分方程模型转换为状态 空间模型	142
4.4.1 开环幅相频率特性曲线的绘制	92	6.2.2 由状态空间模型转换为传递 函数模型	146
4.4.2 开环对数频率特性曲线的绘制	96	6.2.3 由传递函数模型转换为状态 空间模型	148
4.4.3 频率特性的测量	99	6.3 线性连续定常系统状态方程的解	153
4.5 利用 Matlab 绘制频率特性	100	6.3.1 状态转移矩阵	153
习题四	103	6.3.2 状态方程的解析解	156
第 5 章 差分方程与脉冲传递函数模型	105	6.4 离散系统的状态空间模型	158
5.1 离散时间系统的基本结构	106	6.4.1 离散系统状态方程模型	158
5.1.1 信号类型	106	6.4.2 离散状态方程的求解	162
5.1.2 离散时间系统的基本结构	106	习题六	164
5.2 信号的采样、保持及转换	107	第 7 章 火炮随动控制系统模型	167
5.2.1 采样过程	107	7.1 主要元部件的工作原理及数学模型	168
5.2.2 Nyquist-Shannon 采样定理	108	7.1.1 失调角检测	168
5.2.3 信号的保持	111	7.1.2 信号转换与处理	170
5.3 离散时间系统的差分方程模型	113	7.1.3 功率放大	170
5.3.1 线性常系数差分方程	113	7.1.4 执行元件	171
5.3.2 微分方程描述的差分化	113	7.1.5 转速测量	174
5.4 线性常系数差分方程的求解	115	7.1.6 转动角加速度测量	175
5.4.1 迭代法	115	7.2 系统的方框图与传递函数模型	175
5.4.2 Z 变换法求解差分方程	115	7.2.1 系统的方框图模型	175
5.5 离散时间系统的脉冲传递函数模型	116	7.2.2 系统的传递函数模型	176
5.5.1 脉冲传递函数的定义	116	习题七	177
5.5.2 串联环节的脉冲传递函数	117		
5.5.3 闭环系统的脉冲传递函数	119		
5.6 利用 Matlab 处理脉冲传递函数	122		
5.6.1 脉冲传递函数在 Matlab 中的表示	122		

分析篇

第 8 章 控制系统的稳定性分析	180	8.1.2 稳定性的重要性	181
8.1 稳定性研究概述	181	8.2 稳定性概念	182
8.1.1 稳定性研究的历史足迹	181	8.2.1 零状态响应和零输入响应	182

8.2.2 BIBO (外部) 稳定	185	习题九	255
8.2.3 渐近 (内部) 稳定	189	第 10 章 控制系统的稳态性能分析	257
8.2.4 BIBO 稳定与渐近稳定之间的关系	191	10.1 稳态性能指标	258
8.3 Routh-Hurwitz 判据及其应用	192	10.1.1 稳态性能指标	258
8.3.1 Routh-Hurwitz 判据的用法	192	10.1.2 误差和稳态误差的定义	258
8.3.2 Routh-Hurwitz 判据的应用	194	10.2 稳态误差系数	259
8.4 基于根轨迹的稳定性分析	196	10.3 干扰稳态误差	263
8.4.1 根轨迹的概念	196	10.4 根轨迹方法分析稳态误差	266
8.4.2 根轨迹的幅角条件和幅值条件	197	10.5 频率响应方法分析稳态误差	268
8.4.3 根轨迹的 Matlab 绘制、举例 及解释	198	10.6 减小稳态误差的方法	270
8.4.4 几种特殊情况的稳定性分析举例	201	10.7 Matlab 分析稳态误差	272
8.5 Nyquist 稳定性判据	205	习题十	275
8.5.1 围线映射与 Cauchy 定理 (幅角原理)	205	第 11 章 离散控制系统的性能分析	279
8.5.2 Nyquist 稳定性判据及其理解	207	11.1 离散控制系统的稳定性分析	280
8.5.3 Nyquist 稳定性判据的应用	209	11.1.1 稳定性的定义	280
8.6 相对稳定性	216	11.1.2 s 平面与 z 平面的映射关系	280
8.6.1 相对稳定性的时域衡量方式	216	11.1.3 离散控制系统稳定的代数判据	281
8.6.2 相对稳定性的频域衡量方式	217	11.2 离散控制系统的瞬态性能分析	284
8.6.3 相角/增益裕度的 Matlab 求解	220	11.2.1 离散控制系统的时间响应及 性能指标	284
8.6.4 关于相角裕度和增益裕度的 几点说明	222	11.2.2 闭环极点与系统动态响应的关系	285
习题八	223	11.3 离散控制系统的稳态性能分析	288
第 9 章 控制系统的瞬态性能分析	229	11.3.1 由终值定理计算稳态误差	288
9.1 控制系统的时域瞬态性能分析	230	11.3.2 以静态误差系数求稳态误差	289
9.1.1 引言	230	11.3.3 以动态误差系数求稳态误差	291
9.1.2 时域瞬态性能指标的定义	230	11.4 应用 Matlab 分析离散控制系统 的性能	291
9.1.3 一阶系统的时间响应分析	232	习题十一	296
9.1.4 二阶系统的时间响应分析	234	第 12 章 高炮随动控制系统的性能分析	299
9.1.5 高阶系统的时间响应分析	241	12.1 高炮随动控制系统的稳定性分析	300
9.2 控制系统的频域瞬态性能分析	246	12.1.1 Routh-Hurwitz 判据分析系统 稳定性	300
9.2.1 频域瞬态性能指标的定义	246	12.1.2 根轨迹分析系统稳定性	300
9.2.2 应用频率特性计算二阶欠阻尼系统 的瞬态性能指标	249	12.1.3 频率响应分析系统稳定性	301
9.2.3 应用频率特性分析高阶系统的 瞬态性能指标	250	12.2 高炮随动控制系统的瞬态性能	302
9.3 利用 Matlab 分析瞬态性能指标	251	12.2.1 时域响应分析系统瞬态性能	303
9.3.1 时间响应分析	251	12.2.2 根轨迹分析系统瞬态性能	304
9.3.2 频域性能分析	253	12.2.3 频率响应分析系统瞬态性能	305
		12.3 高炮随动控制系统的稳态性能	306
		12.3.1 时域响应分析系统稳态误差	306

12.3.2 根轨迹分析系统稳态误差·····	307
12.3.3 频率响应分析系统稳态误差·····	307

习题十二·····	308
-----------	-----

设计篇

第13章 控制系统的校正设计·····	310
---------------------	-----

13.1 校正的基本方式·····	311
13.2 常用的串联校正网络及其性质·····	312
13.2.1 超前校正网络的频率特性及其特点·····	312
13.2.2 滞后校正网络的频率特性及其特点·····	313
13.3 串联校正的频率响应综合法·····	314
13.3.1 串联超前校正的Bode设计方法·····	315
13.3.2 串联滞后校正的Bode设计方法·····	320
13.4 串联校正的根轨迹设计法·····	322
13.4.1 串联超前校正的根轨迹设计方法·····	322
13.4.2 串联滞后校正的根轨迹设计方法·····	325
13.5 利用Matlab进行系统串联校正设计·····	326
习题十三·····	333

第14章 状态反馈控制器设计·····	336
---------------------	-----

14.1 引言·····	337
14.2 控制系统的能控性与能观性·····	338
14.2.1 能控性与能观性的基本概念·····	338
14.2.2 线性定常连续系统能控性的判据·····	340
14.2.3 线性定常连续系统能观性的判据·····	343
14.3 状态反馈控制器·····	345
14.4 引入状态观测器的状态反馈系统·····	348
14.4.1 全维状态观测器·····	348
14.4.2 分离原理·····	350
14.5 利用Matlab进行状态反馈控制器设计·····	352
习题十四·····	356

第15章 离散控制系统的设计·····	358
---------------------	-----

15.1 概述·····	359
15.2 数字控制器的模拟化设计·····	360
15.2.1 双线性变换法·····	361
15.2.2 零极点匹配法·····	362
15.2.3 Z变换法·····	363
15.3 数字控制器的离散化设计·····	363
15.3.1 最少拍设计的原理·····	364
15.3.2 典型输入信号的最少拍设计·····	365

15.3.3 无纹波最少拍系统的设计·····	366
-------------------------	-----

15.4 应用Matlab进行离散控制系统的设计·····	368
-------------------------------	-----

习题十五·····	369
-----------	-----

第16章 PID控制与鲁棒控制·····	371
----------------------	-----

16.1 PID控制·····	372
-----------------	-----

16.1.1 PID控制的工作原理·····	372
------------------------	-----

16.1.2 Ziegler-Nichols整定公式·····	378
---------------------------------	-----

16.1.3 应用Matlab进行PID控制器设计·····	381
--------------------------------	-----

16.1.4 PID控制算法的改进·····	381
------------------------	-----

16.2 极点配置PID控制·····	383
---------------------	-----

16.2.1 带有两个实极点系统的极点配置PID控制·····	383
---------------------------------	-----

16.2.2 一般二阶系统的极点配置PID控制·····	384
------------------------------	-----

16.2.3 高阶系统的极点配置PID控制·····	384
----------------------------	-----

16.3 鲁棒PID控制·····	386
-------------------	-----

16.3.1 鲁棒PID控制器的设计要点·····	386
---------------------------	-----

16.3.2 应用Matlab进行鲁棒PID控制设计·····	387
---------------------------------	-----

16.3.3 非线性系统的鲁棒PID控制·····	388
---------------------------	-----

习题十六·····	390
-----------	-----

第17章 最优控制·····	392
----------------	-----

17.1 概述·····	393
--------------	-----

17.1.1 问题提出·····	393
------------------	-----

17.1.2 最优控制的成功范例——阿波罗登月飞船·····	395
--------------------------------	-----

17.1.3 实现最优控制的难点·····	396
-----------------------	-----

17.2 最优控制问题·····	396
------------------	-----

17.2.1 系统数学模型·····	396
--------------------	-----

17.2.2 边界条件与目标集·····	396
----------------------	-----

17.2.3 容许控制集合·····	397
--------------------	-----

17.2.4 性能指标函数·····	397
--------------------	-----

17.2.5 最优控制问题的求解方法·····	398
-------------------------	-----

17.3 控制变量无约束的最优控制·····	398
------------------------	-----

17.3.1 控制变量无约束的最优控制问题	398
17.3.2 t_f 固定时的最优解	399
17.3.3 t_f 自由时的最优解	402
17.4 二次型性能指标的最优控制	404
17.4.1 问题描述	404
17.4.2 有限时间状态调节器	405
17.4.3 定常状态调节器	408
17.4.4 输出调节器	409
17.5 运用 Matlab 设计最优控制系统	410
习题十七	414
第 18 章 高炮随动控制系统的改进	415
18.1 新型高炮随动控制系统的改进	416
18.1.1 前馈校正	416
18.1.2 PI 校正	416
18.2 改进后高炮随动控制系统的性能分析	417
18.2.1 附加前馈和 PI 校正后的系统框图	417
18.2.2 附加前馈校正时系统的性能分析	417
18.2.3 附加 PI 校正时系统的性能分析	418
18.2.4 同时附加前馈和 PI 校正后的系统性能分析	419
18.3 数字高炮随动控制系统工作原理	420
18.3.1 数字式 PID 控制算法	420
18.3.2 数字式平方根控制算法	421
习题十八	422
附录 A Laplace 变换	423
A.1 Laplace 变换的定义及性质	424
A.1.1 Laplace 变换的定义	424
A.1.2 Laplace 变换的性质	424
A.2 重要的 Laplace 变换对	425
A.3 Laplace 反变换方法	426
A.3.1 查表法	426
A.3.2 部分分式展开法	427
A.4 利用 Matlab 进行 Laplace 正反变换	429
A.4.1 利用 Matlab 进行 Laplace 正变换	429
A.4.2 利用 Matlab 进行 Laplace 反变换	429
A.4.3 利用 Matlab 进行部分分式展开	430
A.5 线性定常微分方程的 Laplace 变换解法	430
A.5.1 应用 Laplace 变换法求解线性定常微分方程	430
A.5.2 利用 Matlab 求解线性定常微分方程	431
附录 B Z 变换	432
B.1 Z 变换的定义及性质	433
B.1.1 Z 变换的定义	433
B.1.2 Z 变换的性质	434
B.2 Z 变换的求法	434
B.2.1 级数求和法	434
B.2.2 部分分式法	435
B.2.3 常用函数的 Z 变换表	436
B.3 Z 反变换的求法	436
B.3.1 幂级数法	437
B.3.2 部分分式法	437
B.4 利用 Matlab 进行 Z 正反变换	438
B.4.1 利用 Matlab 进行 Z 正变换	438
B.4.2 利用 Matlab 进行 Z 反变换	439
B.5 Z 变换法求解线性定常差分方程	440
附录 C 矩阵运算	442
C.1 矩阵的概念及基本运算	443
C.1.1 矩阵定义	443
C.1.2 矩阵基本运算	444
C.1.3 相似矩阵与矩阵对角化	445
C.2 矩阵指数函数	447
C.2.1 定义与性质	447
C.2.2 几种计算方法	448
C.3 矩阵微分法	450
C.3.1 向量或者矩阵对于数量变量的微分	450
C.3.2 数量函数对于向量的微分	451
C.3.3 向量函数对于向量的微分	451
参考文献	453



第 1 章

导 论

作为整本书的开篇,本章将首先回顾自动控制发展的简史,展望自动控制的未来机遇与挑战;然后阐述自动控制的基本思想,包括自动控制系统的基本构成,开环控制和闭环控制的基本原理;介绍自动控制系统的类型,包括线性系统与非线性系统,定常系统与时变系统,连续系统与离散系统,单输入单输出(SISO)系统与多输入多输出(MIMO)系统;阐明对自动控制系统性能的基本要求,包括稳定性、瞬态响应的快速性和平稳性、稳态过程的准确性三个方面;作为整本书循序渐进实例的基础,最后将介绍高炮随动控制系统工作的基本原理。

1.1 概述

1.1.1 自动控制简史

人们普遍认为自动控制在工程中的最早应用可追溯到工业革命期间的瓦特蒸汽机, 1788 年英国机械师 James Watt 发明了飞球式调节器(也称离心式调节器), 并将它创造性地应用到蒸汽机的速度控制^[1]。这项发明实现了蒸汽机的安全和可靠操作, 从而使蒸气—动力工业得到了快速发展, 瓦特蒸汽机也因此而闻名遐尔。

James Watt 是一个擅长实践的工程师, 他没有太多的时间进行理论分析。但是, 他仍然观察到在一定条件下, 蒸汽机的速度调节过程中所出现的振荡现象。削弱这种振荡现象——也就是以后被众所周知的不稳定现象, 是所有控制系统设计的一个重要特点。1868 年, 英国物理学家 J.C.Maxwell 发表了《论调节器》一文^[2], 在理论上通过平衡点附近的线性化处理, 用线性微分方程为蒸汽机的调节器建立了数学模型, 并证实系统的稳定性取决于特征方程的所有根是否具有负实部, 从而揭开了创立古典控制理论的序幕。此后, 英国数学家 E.J.Routh 和德国数学家 A.Hurwitz 分别在 1877 年和 1895 年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则^[3,4]。1893 年, 俄国数学家 A.M.Lyapunov 用严格的数学分析方法全面论述了系统稳定性问题, 他的稳定性理论至今还是研究系统稳定性的重要方法。

在 20 世纪 20~40 年代之间, 曾经涌现出许多研究古典控制理论的重要学者, 如 Minorsky、Black、Nyquist, Hazen 和 Bode 等。1922 年, Minorsky 研制出船舶操纵自动控制器, 并且证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性; 1927 年, Black^[5]在解决电子管放大器失真问题时首先引入了负反馈的概念, 并研究了反馈放大器; 1932 年, Nyquist 提出了一种基于开环频率响应的闭环系统稳定性分析方法^[6]; 1934 年, Hazen 提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念, 并且研究了可以精确跟踪输入信号变化的继电式伺服机构; 1940 年, Bode^[7]采用频域方法, 分析了反馈放大器的设计。他们的工作既为古典控制理论奠定了基础, 同时也促进了二次世界大战中的许多武器和通信自动化系统的研制工作, 例如, 针对防空火力控制系统中的军事技术问题, 科学家们设计出各种精密的自动调节装置。二次大战后到 20 世纪 50 年代中期, 由于生产和军事的需要, 古典控制理论又得到了新发展, 添加了 Evans 的根轨迹法^[8,9]、非线性系统的谐波近似法(描述函数法)、采样控制系统等新内容。到 20 世纪 50 年代末期, 古典控制理论已经形成了比较完善的理论体系, 并在工程实践中得到了许多成功应用。1954 年, 中国科学家钱学森全面地总结和提高古典控制理论, 出版了一本具有重要国际影响的著作《工程控制论》^[10]。值得指出的是, 在古典控制理论的发展过程中, 开始和后来都曾用过时域方法, 如微分方程和差分方程描述等, 但频域法却是主导的。同样, 古典控制理论的发展后期, 也曾研究过多变量系统和非线性系统, 但从整体上看, 还是以研究单变量线性定常系统为主的。

随着人造卫星和空间时代的到来, 人们迫切需要解决多变量控制问题, 这样自动控制才有了新的推动力。1956 年, 俄国数学家 L.S.Pontryagin 提出极大值原理, 同年美国数学家 R.Bellman 创立动态规划, 极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959 年, 美国数学家 R.E.Kalman 提出著名的卡尔曼滤波器。1960 年, Kalman 又提出两个揭示系统内在属性的能控性和能观性概念^[11,12]。此外, Kalman 还引入状态空间法, 提出具有二次型性能指标的线性状态反馈

律,对线性控制系统给出了最优调节器的概念。至此,古典控制理论的发展与现代控制理论接轨。数字计算机的出现对现代控制理论的发展起到了强大的推动作用,在20世纪60~80年代之间,不论是系统辨识与建模,还是系统的自适应与学习控制,都得到了充分的研究。从1980年至今,现代控制理论的研究主要集中于鲁棒控制和 H_∞ 控制等。目前现代控制理论已形成了多个重要分支,包括系统辨识、最优控制、自适应控制、综合自动化、大系统理论、非线性系统理论、模式识别与人工智能、智能控制等。

自动控制理论(包括:古典控制理论和现代控制理论)的建立和发展,不仅推动了自动控制技术的发展,而且也推动了其他邻近学科和技术的发展。早在1948年,美国数学家N.Winner就把反馈的概念推广到生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统,他出版的名著《控制论》具有划时代的意义^[13]半个多世纪以来,自动控制已经从一个以反馈理论为基础的自动调节原理,发展成为一门包括工程控制论、生物控制论和经济控制论在内的独立的学科——控制论。表1.1给出了自动控制发展的主要历程。

表 1.1 自动控制简史表

年代	重要事件	说明
1788	James Watt 发明了飞球式调节器(也称离心式调节器),并将它创造性地应用到蒸汽机的速度控制。蒸汽机常常被认为是英国工业革命开始的标志。工业革命时期机械化水平有了巨大的提高,这是自动控制发展的前奏	严格地说,飞球式调节器并不是 James Watt 发明的,早在 1776 年 Fuller 就使用飞球式调节器来测量风力磨粉机的转速,James Watt 只是将这些原理运用于蒸汽机,才使得飞球式调节器闻名于世。可见,创造性地运用前人知识是非常重要的
1868	J.C.Maxwell 用系统的观点,把调节器和调节对象合在一起考虑,用微分方程来进行研究,为蒸汽机的调节器建立数学模型	J.C.Maxwell 解释了速度调节过程中所出现的振荡现象,并指出系统的稳定性取决于微分方程的特征根是否都具有负实部
1877	E.J.Routh 建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则	E.J.Routh 所提出的方法被称为 Routh 稳定性判据,他也因此贡献而获得了当时设立的 Adams 奖
1893	A.M.Lyapunov 用严格的数学分析方法全面论述了系统稳定性问题,他的稳定性理论基本上就是现在所说的状态变量法控制理论	A.M.Lyapunov 的理论是基于非线性运动微分方程而建立的,也包括符合 Routh 稳定性判据的线性微分方程的结论,但直到 1958 年才被录入控制文献
1895	A.Hurwitz 建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则	A.Hurwitz 所提出的方法与 Routh 稳定性判据在形式上不同,但本质上是一样的
1927	Black 在解决电子管放大器失真问题时首先引入了负反馈的概念,并研究了反馈放大器	Black 是贝尔实验室的一名年轻的工程师,他的负反馈灵感来源于他长期从事电子振荡器的研究
1932	Nyquist 提出了一种基于开环频率响应的闭环系统稳定性分析方法	Nyquist 的方法可在系统数学模型未知的情况下,利用频率响应数据来简便地分析系统的稳定性
1940	Bode 采用频域方法,分析了反馈放大器的设计	频率响应分析法是古典控制理论的核心内容之一
1942	Nichols 和 Ziegler 提出 PID 控制器参数整定表	50 多年过去了,他们的研究成果现在仍在在使用
1946	Evens 提出了线性反馈系统的根轨迹法	根轨迹法是古典控制理论的又一核心内容
1948	N.Winner 出版了名著《控制论》	N.Winner 把反馈的概念推广到生物、神经、经济及社会等非常复杂的系统
1954	钱学森出版了重要著作《工程控制论》	钱学森全面地总结和提高了古典控制理论

续表

年代	重要事件	说明
1956	L.S. Pontryagin 和 R.Bellman 分别提出了极大值原理和动态规划	极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具
1960	R.E.Kalman 提出了滤波器理论, 以及基于状态空间法的系统能控性、能观性	状态空间法为解决多变量系统的控制问题提供了理论工具
1970~1980	现代频域法、数字控制、自适应控制、非线性控制、预测控制、智能控制、模糊控制等理论的产生与发展	系统辨识与建模、自适应与学习控制等都得到了充分的研究
1980至今	现代控制理论主要研究鲁棒控制、 H_∞ 控制以及大系统理论等	目前鲁棒控制系统设计得到了广泛研究与应用

1.1.2 自动控制的未来机遇与挑战

当前, 无处不在的分布式计算、通信以及传感系统已经给我们营造了一个获取丰富信息资源的环境, 各种计算机软件系统已经开始以多种集成方式与物理系统进行互联从而构成不同层次结构的大系统; 与此同时, 计算机技术的飞速发展, 也极大地提高了我们处理和交互大量数据的能力, 这些在 20 年前是无法想象的。那么, 在这种情况下, 自动控制在未来将面临什么样的机遇与挑战呢?

首先, 人们对这种大系统提出了比单个控制单元要高得多的控制性能要求, 并且这里所谈的控制系统与“单物理过程和单控制器”的传统控制系统观念有很大差别, 它被视为是一个由各种不同物理和信息子系统构成的、且各子系统之间存在相互关联与相互作用的系统。对于这样的系统, 自动控制的一个重要发展趋势就是从低层次的控制转向更高层次的优化调度与控制, 比如, 将若干个局部反馈控制回路和企业的生产计划与调度信息系统进行集成。这种非传统意义下的自动控制必将会在高效、高产、安全、可靠的实际需求牵引下获得巨大的发展空间和机遇。另外, 在信息技术的支撑下, 自动控制作为军事领域的关键技术也越来越表现出它的重要作用。比如, 可实现自主或半自主操作的无人系统, 避免战斗人员的伤亡; 可实现重构的指挥与控制系统, 适应瞬息万变的战场环境。因此, 自动控制在当前新军事技术变革中的应用前景是不言而喻的。

显然, 为了充分挖掘自动控制的应用潜力, 我们迫切需要发展自动控制的新理论、新方法及新技术。在这种新的挑战中, 我们将主要面临这样一些待研究的课题:

(1) 符号逻辑与连续动力学控制系统

下一代系统将包含连续变量(比如: 电压、位置、浓度)和逻辑运算(比如: 符号推理和决策)。现有的理论还不能很好地解决这类系统的控制问题, 特别是对于大系统更是如此。

(2) 分布式、时间不同步及网络环境下的控制系统

考虑到分布式计算和数据通信时间不同步等方面因素的影响, 这类控制系统要求发展新的理论来确保系统的稳定性、快速性以及鲁棒性。

(3) 高级调度与自治系统

反馈控制与决策系统日益紧密的结合, 相继产生了许多具有高级调度与自治功能的系统, 比如: 企业的生产供应链管理系统, 空中交通管理与控制系统, 军事指挥与控制系统等。为了适应现场环境的复杂多变性, 就必须将鲁棒控制系统的分析与设计方法推广应用到这类系统的高级决策层。