



高等院校精品课程系列教材

JINGPIN
KECHENG

自动控制原理

主 编 李 斌
副主编 黄建明 王 斌
主 审 孙 跃



附赠电子教案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等院校精品课程系列教材

自动控制原理（下）

主 编 李 斌
副主编 黄建明 王 斌
主 审 孙 跃



机械工业出版社

本书根据高等学校本科自动控制原理课程的教学要求编写,比较全面地阐述了经典控制理论的线性离散控制系统、非线性控制系统和现代控制理论基础部分的基本内容。全书共分三篇(线性离散控制系统篇、非线性控制系统基础篇、现代控制理论基础篇),共7章,包括线性离散控制系统建模、分析及数字控制器设计方法,经典非线性控制系统分析的相平面法和描述函数法,现代控制理论中系统建模、分析及综合设计的状态空间法。

本书为《自动控制原理(下)》,上册(《自动控制原理(上)》谢昭莉主编)包括控制基础篇、系统分析篇、系统设计篇、应用篇四部分内容。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及自动化、机械工程及自动化、热力工程、通信工程、电子信息工程等相关专业的“自动控制原理”课程的教材,也可作为自动化相关专业研究生和工程技术人员的参考书。

本书配有课件、教材相关 MATLAB 程序、部分习题答案或题解等教学资源,欢迎使用该教材的教师通过电子邮件(Lzbymcqc@sohu.com)索取。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理. 下/李斌主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 2

高等院校精品课程系列教材

ISBN 978-7-111-45741-1

I. ①自… II. ①李… III. ①自动控制理论-高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023900 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:时 静 责任编辑:时 静 王 荣

版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·17.75 印张·437 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45741-1

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

自动控制原理是自动化学科重要的基础理论，专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法。《自动控制原理（下）》共分7章，包含经典控制理论的线性离散控制系统理论、非线性控制系统基础和现代控制理论基础。本书与由谢昭莉主编的《自动控制原理（上）》一起，构成了现代自动控制技术所需的基础理论内容。

本书的编者都是从事“自动控制原理”课程教学多年的一线教师，了解学生需求及课程发展历程。本书是在广泛参考国内外优秀教材内容及体系结构的基础上，结合编者的教学经验及研究体会编写而成的。在编写过程中，力求内容系统全面、概念清晰完整；重点概念阐明原始问题来源，用实例指明其实质，并归纳出相关研究结论，意在培养学生思维和研究能力。为使读者便于了解相关理论的应用领域，便于对理论及方法的理解和掌握，书中配有丰富的应用例题和习题。

当前，MATLAB已成为自动控制领域最普及的应用软件。《自动控制原理（上）》各章均对MATLAB在系统建模、分析、设计中的应用作了专门论述。故本书强调MATLAB在相关内容上的应用，而无专门的章节论述。

本书由重庆大学李斌任主编，黄建明、王斌、马铁东参与主持编写。第8、9章由黄建明编写，第10、11章由王斌编写，第12章由李斌编写，第13、14章由马铁东编写，全书由李斌统稿。

本书由重庆大学孙跃教授主审，他对本教材提出了许多宝贵的意见和建议，编者在此表示诚挚的感谢。

由于编者学识所限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者原谅，并提出宝贵意见。

编 者
于重庆大学



本科电气精品教材推荐

21 世纪高等院校自动化专业系列教材

控制系统仿真与计算机辅助设计

书号: 15636

定价: 33.00 元

作者: 薛定宇 配套资源: 电子教案、源代码

获奖情况: 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

推荐简言:

作者为国内仿真教育领域专家, 为 MATLAB 国内教育的先行者, 具有很高的知名度。本书以国际上最流行的 MATLAB/Simulink 语言为主要工具, 在全新的框架下对控制系统建模、仿真、分析与设计进行了较全面的介绍。

模拟电子技术基础

书号: 18185

定价: 41.00 元

作者: 陈大钦

配套资源: 电子教案

获奖情况: 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

推荐简言:

本书是作者在多年教学实践和长期编写教材经验的基础上, 吸收了国内外电子技术优秀教材的特点编写而成的。本书采用新体系, 突出了集成运放及模拟集成电路的应用和综合应用能力、计算机应用能力的培养。教材中重点、难点内容都有相应例题, 力求做到通俗易懂, 便于教学。

电力拖动自动控制系统

书号: 24867

定价: 43.00 元

作者: 李华德

配套资源: 电子教案

获奖情况: 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

推荐简言:

作者系北京科技大学资深教授, 本书由权威人士马小亮教授主审。本书全面、系统、深入地介绍了现代电力拖动(运动)自动控制系统的基本组成、基本原理、基本控制方法, 介绍了数字电力拖动(运动)自动控制系统的实现方法。

电力电子技术基础

书号: 25182

定价: 25.00 元

作者: 邢岩

配套资源: 电子教案

推荐简言:

本书涉及电力电子变换系统的基本原理和分析设计方法, 主要内容包括电力半导体器件; 功率变换电路的拓扑(DC-DC, AC-DC 和 DC-AC)、分析方法和参数设计; 开关器件的驱动和缓冲技术; 开关变换系统的调制、建模和闭环控制技术等。

计算机控制系统 第2版

书号: 26236

定价: 38.00 元

作者: 李正军

配套资源: 电子教案

获奖情况: 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

推荐简言:

本书理论联系实际, 突出工程应用, 全面系统地介绍了计算机控制系统的各个重要组成部分, 是作者在多年教学与科研实践经验的基础上, 吸收了国内外计算机控制系统设计的最新技术编写而成的。书中还介绍了作者在计算机控制领域的最新研究成果。

智能控制 第2版

书号: 27339

定价: 26.00 元

作者: 李少远

配套资源: 电子教案

获奖情况: 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

推荐简言:

作者系上海交大资深教授。本书从控制系统建模、控制与优化的本质要求出发, 系统地介绍了模糊推理、神经网络、现代优化理论和方法对控制系统的建模、控制与优化的作用。着重讨论了智能控制理论和方法对解决复杂系统控制问题的意义, 以及其在控制领域中的各种应用实例。



本科电气精品教材推荐

高等院校精品课程系列教材

电路原理（第2版）

书号：34512

定价：49.00 元

作者：陈晓平

配套资源：电子教案

获奖情况：国家精品课程、省级精品教材

推荐简言：本书是根据教育部电子电气基础课程教学指导分委员会制订的高等工业学校电路课程教学的基本要求，并充分考虑各院校新的教学计划及现代科技发展趋势，为电子电气信息类各专业学生编写的教材。配有《电路原理学习指导与习题全解》、《电路原理题库与题解》。

模拟电子电路原理与设计基础

书号：34392

定价：42.00 元

作者：刘祖刚

配套资源：电子教案

获奖情况：省级精品课程配套教材。

推荐简言：本书着重讲清讲透模拟电子电路的工作原理、分析方法；各章对一些基本电路的设计作了必要的讨论。通过本书的学习，读者不仅能较好地理解和掌握模拟电子电路的工作原理和分析方法，而且还能根据实际要求初步设计一些实用的模拟电子电路。

自动控制原理

书号：31071

定价：36.00 元

作者：潘丰

配套资源：电子教案

获奖情况：江苏省高等教育质量工程建设精品教材

推荐简言：本书以经典控制理论为主，较系统地介绍了自动控制理论的基本内容，着重于基本概念、基本理论、基本的分析和设计方法。为适应不同专业和不同层次教学的需要，各章所述的基本分析方法尽可能做到相对独立，以便灵活选择。

单片机原理及控制技术

书号：29900

定价：36.00 元

作者：王君

配套资源：电子教案

推荐简言：本书着重介绍计算机控制系统的组成，单片微型计算机的结构、软硬件系统，基本控制算法及在工业控制中的应用技术。以单片机控制系统为例，介绍微机控制系统的结构、组成、算法；讲述基于 MCS-51 系列单片机的结构及工作原理、指令系统及程序设计（包括 C51 程序设计）、中断系统及定时/计数器、串行通信、系统扩展技术等内容。

单片机原理与应用——基于 Proteus 虚拟仿真技术

书号：31033

定价：43.00 元

作者：徐爱钧

配套资源：电子教案、光盘

推荐简言：省级精品课程配套教材。本书以 Proteus 虚拟仿真技术为基础阐述 8051 单片机原理与应用，对 8051 单片机基本结构、中断系统、定时器、串行口等功能部件的工作原理作了完整介绍。给出了大量在 Proteus 集成环境 ISIS 中绘制的原理电路图、汇编语言和 C 语言应用程序范例，所有范例均在 Proteus 软件平台上调试通过，可以直接运行。

信号与系统——信号分析与处理（上册）

书号：26030

定价：22.00 元

作者：程耕国

配套资源：电子教案

推荐简言：省级精品课程配套教材。本书是根据当前信息和电子技术的发展，结合高校教学改革形势和要求，综合近十年来的教学实践，整合原“信号与系统”和“数字信号处理”两门课程的教学内容精心编写而成的。上册讲述信号分析与处理。

目 录

前言		
绪论	1	
第五篇 线性离散控制系统篇	5	
第 8 章 线性离散控制系统	6	
8.1 概述	6	
8.1.1 离散控制系统简介	6	
8.1.2 离散控制系统的特点和研究方法	8	
8.2 信号采样与恢复	8	
8.2.1 信号采样	9	
8.2.2 采样定理	10	
8.2.3 信号恢复	12	
8.3 z 变换	13	
8.3.1 z 变换的定义	13	
8.3.2 z 变换的方法	14	
8.3.3 z 变换的基本定理	17	
8.3.4 z 反变换	19	
8.4 离散控制系统的数学模型	22	
8.4.1 差分方程	22	
8.4.2 脉冲传递函数	24	
8.4.3 离散控制系统的动态结构图	27	
8.5 离散控制系统的性能分析	33	
8.5.1 稳定性	33	
8.5.2 动态性能	39	
8.5.3 稳态误差	42	
8.6 离散控制系统的数字校正	45	
8.6.1 模拟控制器的离散化	46	
8.6.2 根轨迹法校正	47	
8.6.3 频率特性法校正	50	
8.6.4 数字控制器直接设计法	52	
小结	63	
习题	64	
第六篇 非线性控制系统基础篇	69	
第 9 章 非线性控制系统	70	
9.1 概述	70	
9.1.1 非线性系统	70	
9.1.2 常见的非线性特性	71	
9.1.3 非线性控制系统的特点	73	
9.2 相平面法	74	
9.2.1 相平面法的基本概念	74	
9.2.2 相平面图的绘制	77	
9.2.3 非线性控制系统的相平面分析	83	
9.3 描述函数法	91	
9.3.1 描述函数法的基本概念	91	
9.3.2 非线性特性的描述函数	92	
9.3.3 非线性控制系统的描述函数法分析	97	
9.4 改善非线性控制系统性能的措施	104	
9.4.1 改变线性部分的参数和结构	104	
9.4.2 改变非线性特性	105	
9.4.3 非线性特性的利用	106	
小结	107	
习题	108	
第七篇 现代控制理论基础篇	113	
第 10 章 控制系统的状态空间描述	114	
10.1 控制系统及其描述	114	
10.1.1 控制系统	114	
10.1.2 控制系统的特性与分类	114	
10.1.3 控制系统的输入-输出描述	115	
10.2 控制系统的状态空间模型	117	
10.2.1 基本概念	117	

10.2.2 线性系统的状态空间描述	121	空间	153
10.2.3 状态空间描述的模拟结构图	123	11.1.3 系统的状态转移矩阵	153
10.3 系统状态空间表达式的建立	124	11.1.4 系统状态转移矩阵的性质	154
10.3.1 由系统的模拟结构图建立状态空间表达式	124	11.1.5 系统的自由运动	155
10.3.2 由系统的物理机理直接建立状态空间表达式	125	11.1.6 线性时变系统的一般运动	155
10.3.3 由系统的微分方程或传递函数建立状态空间描述	128	11.1.7 线性时变系统状态转移矩阵 $\Phi(t, t_0)$ 的计算	157
10.4 状态空间描述的线性变换	131	11.2 线性时不变系统状态方程的求解	158
10.4.1 线性变换	131	11.2.1 状态转移矩阵	158
10.4.2 系统的特征值和特征向量	133	11.2.2 状态转移矩阵的性质	160
10.4.3 化状态空间表达式为对角线标准型	134	11.2.3 状态转移矩阵 $\Phi(t)$ 的计算	160
10.4.4 化状态空间表达式为约当标准型	136	11.2.4 线性时不变系统的运动	166
10.5 由状态空间描述求传递函数阵	139	11.3 线性连续系统状态空间表达式的离散化	168
10.5.1 系统的传递函数矩阵	139	11.3.1 线性时变系统的离散化	168
10.5.2 系统的输入-输出描述与状态空间描述方法比较	142	11.3.2 线性时不变系统的离散化	169
10.6 组合系统的状态空间描述和传递函数阵	142	11.3.3 近似离散化	171
10.6.1 并联组合系统	143	11.4 离散系统状态方程的解	172
10.6.2 串联组合系统	143	11.4.1 递推法	172
10.6.3 输出反馈系统	144	11.4.2 z 变换法	175
10.7 离散系统的状态空间描述	144	小结	177
10.8 系统模型的计算机表示及转换	145	习题	177
10.8.1 模型的建立与转换	146	第 12 章 线性时不变系统的能控性和能观性	180
10.8.2 建立组合系统的状态空间描述	148	12.1 系统的能控性及其判别	180
小结	150	12.1.1 能控性定义	181
习题	150	12.1.2 能控性判据	182
第 11 章 线性控制系统的动态分析	153	12.2 系统的能观性及其判别	185
11.1 线性时变系统状态方程的求解	153	12.2.1 能观性定义	185
11.1.1 线性时变系统状态方程解的存在性与唯一性	153	12.2.2 能观性判据	186
11.1.2 线性齐次微分方程组的解		12.3 能控性与能观性的对偶关系	187
		12.3.1 对偶系统	187
		12.3.2 对偶原理	187
		12.4 约当型方程的能控性、能观性	187
		12.4.1 线性变换不改变系统的能控性、能观性判据	188
		12.4.2 约当型方程的能控性、能	

VI 自动控制原理 (下)

观性判据	188	13.5.1 线性时不变连续系统渐近稳定的判别	229
12.5 线性离散系统的能控性与能观性	190	13.5.2 线性时不变离散系统渐近稳定的判别	234
12.5.1 能控性	191	13.5.3 线性时变连续系统渐近稳定的判别	235
12.5.2 能观性	192	13.6 李雅普诺夫方法在非	
12.6 线性时不变系统结构分解	193	线性系统中的应用	236
12.6.1 系统状态空间结构及子空间的性质	194	13.6.1 克拉索夫斯基法	236
12.6.2 系统的结构分解	196	13.6.2 变量梯度法	238
12.7 线性时不变系统的标准型与最小实现	201	小结	241
12.7.1 化系统状态空间描述为能控规范型	201	习题	242
12.7.2 线性时不变系统的最小实现	207	第14章 线性时不变系统的综合	244
小结	208	14.1 反馈控制系统的基本结构	244
习题	209	14.1.1 状态反馈	246
第13章 系统的运动稳定性	213	14.1.2 输出反馈	246
13.1 BIBO 稳定性	213	14.1.3 反馈控制系统的能控能观性	247
13.1.1 BIBO 稳定的概念	213	14.2 状态反馈系统的极点配置	249
13.1.2 判据	214	14.2.1 极点配置定理	249
13.2 李雅普诺夫稳定性定义	215	14.2.2 系统极点配置	252
13.2.1 系统的平衡状态	215	14.2.3 状态反馈的应用——状态反馈下闭环系统的镇定问题	263
13.2.2 李雅普诺夫稳定性的几个定义	216	14.3 状态重构与状态观测器的设计	264
13.3 李雅普诺夫第一法	217	14.3.1 状态估计	264
13.3.1 线性系统的稳定判据	218	14.3.2 全维观测器设计	264
13.3.2 非线性系统的稳定性	218	14.3.3 降维观测器	267
13.3.3 系统内部稳定和外部稳定的关系	219	14.4 带观测器的状态反馈系统的综合	270
13.4 李雅普诺夫第二法	221	14.4.1 系统的描述	270
13.4.1 预备知识	222	14.4.2 闭环系统的基本特性	271
13.4.2 李雅普诺夫第二法的判稳定理	223	小结	273
13.5 线性系统稳定性分析	229	习题	273
		参考文献	276

绪 论

自动控制理论是关于自动控制系统构成、分析和设计的理论。它的任务是研究自动控制系统的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径，为设计优越性能的自动控制系统提供必要的理论基础。

1. 现代控制理论

现代控制理论是研究多输入-多输出非线性系统的控制问题而逐步发展起来的。它对控制系统的分析和设计主要是通过对系统状态变量的描述来进行，基本方法是状态空间法，两个核心是最优控制和最优估计理论，数学基础几乎包括数学的各个分支，生成的算法更适合在计算机上运行，从而为涉及和构造具有指定性能指标的最优控制系统提供了可能性。

20 世纪 50 年代中期空间技术兴起，美国和前苏联在航天领域的竞争，驱动人们研究航天器、运载器等涉及的具有多变量、时变、非线性特征，控制精度要求高的控制系统问题。对于这类系统的描述和求解问题，数学、物理、力学等学科的发展成果已经为此奠定了坚实的基础；20 世纪 50 年代后期，迅速发展的计算机技术，使人们摆脱了计算量大、计算复杂的束缚，有可能对复杂控制系统作深入的研究。20 世纪 70 年代微型计算机的发展，实现了计算机直接参与控制，从根本上改变了控制系统的面貌，极大地促进了控制技术和理论的发展。

1958 年，前苏联数学家 C. 庞特里亚金提出了称为“极大值原理”的控制系统综合新方法；1954 年，美国数学家 R. 贝尔曼创立了动态规划。这些方法改变了经典控制理论中以稳定性和动态品质为中心的设计模式，而以系统在整个工作期间的性能作为整体考虑，寻求最优控制律，从而可以大大改善系统性能。这些研究成果解决了空间技术中出现的复杂控制问题，开拓出控制理论中的最优控制这一新领域。1960、1961 年，美国数学家、电气工程师 R. E. 卡尔曼和数学家 R. S. 布西考虑到控制问题中所存在的随机噪声影响，建立了卡尔曼-布西滤波器理论，进一步丰富了控制理论的研究内容，扩大了所能处理的控制问题范围。同时，卡尔曼等人把状态空间法系统地引入控制理论中，为揭示和认识控制系统的特性起了关键作用。其中关于系统结构的能控性、能观性，已成为控制理论中两个基本的概念。1960 年，美国自动控制联合会第一届年会上，以状态空间法为基础，极大值原理、动态规划、卡尔曼滤波器为核心的分析、设计控制系统的新原理和方法被定名为现代控制理论，标志着控制理论进入了一个新的发展阶段。

然而，将这套时域法推广用于工业控制时，却遇到建模、被控对象行为的性能指标描述及控制器实现困难等难题。于是，20 世纪 70 年代中期，英国自动控制专家 H. H. 罗森布罗克等人将单变量系统分析设计中行之有效的频域法向多变量系统推广，创立了多变量系统频域法。随着问题范围的扩大和研究的深入，多种学派、多种方法相互交融，推动着现代控制理论不断向前发展。

2. 离散时间控制系统理论

随着计算机技术的飞速发展和数字信号抗干扰和可靠性的特点，数字元器件和系统大量

2 自动控制原理(下)

涌现,其特点是系统中信号由单一的连续时间信号变为连续、离散时间的混合信号类型。控制系统的结构增加了采样器和保持器,用以实现连续、离散信号间的转换。香农采样定理指明了实现这种信号转换,采样周期的选取原则。运用 z 变换,建立线性离散系统的脉冲传递函数描述,推广古典控制理论中的时域法、根轨迹法和频域法、现代控制理论中的状态空间法,形成了分析和设计离散时间控制系统的理论。目前,这一理论研究的问题、方法仍在不断发展中。

3. 非线性控制系统理论

与线性控制系统研究平行发展的是关于非线性系统的研究。非线性系统最原始经典的分析和设计理论主要是针对特殊、基本的系统,如间隙、饱和、死区等,主要的理论有相平面法和描述函数法。

(1) 相平面法

相平面法是由 Poincare 于 1885 年提出的一种图解方法。其实质是将系统的动态过程在相平面内用运动轨迹的形式绘制成相平面图,然后根据相平面图的几何特征来判断系统所具有的动、静态特性。该方法主要用奇点、极限环概念描述相平面的几何特征,并将奇点和极限环分成几种类型。但该方法仅适用于一阶、二阶及简单三阶系统。现代控制理论中的状态空间分析就是相平面法的推广。相平面法也是变结构控制理论的来源。

(2) 描述函数法

它是英国学者 P. J. Daniel 于 1940 年首次提出的。它研究的对象可以是任何阶次的系统。其思想是用谐波分析的方法,忽略由于对象非线性因素所造成的高次谐波成分,而仅使用一次谐波(基波)分量来近似描述其非线性特性。当系统中的非线性元件用线性化的描述函数代替后,非线性系统就等效成一个线性系统,然后就可借用线性系统理论的频域法对系统进行频域分析。描述函数法可用来近似研究非线性控制系统的稳定性和自激振荡问题,也可对系统进行综合。

除此之外,非线性控制系统理论还包括绝对稳定性理论、李雅普诺夫稳定性理论、输入-输出稳定性理论等。由于非线性系统本身所包含的现象十分复杂,现有的方法都有局限性,不能成为非线性系统分析和设计的通用方法。非线性控制系统理论的研究还处于发展阶段,许多问题有待进一步研究解决。

随着生产的发展和科学技术的进步,出现了诸如电力系统、交通网络、通信系统、柔性制造系统、计算机集成制造系统、生态系统、社会经济系统、水资源系统等规模庞大、结构复杂、地域分散的系统,为解决这类信息量大、分散系统的控制问题,人们提出了大系统理论。另一方面,对于一些复杂系统,因缺乏对其内部机制的本质认识,难以建立数学模型,难以用常规控制理论定量计算、分析,必须采用定量、定性相结合的控制方式。于是,融合了自动控制、人工智能、计算机技术和系统科学等多学科技术成果,并适用于这类复杂系统的控制理论和技术——智能控制理论应运而生,从而将自动控制技术推向了崭新的发展阶段。

综合上述,自动控制理论的建立和发展是社会生产发展的需要,是多学科交叉、融合的产物;它不仅促进了自动控制技术向广度和深度发展,也对其他科学技术的发展产生着深刻影响。

4. 现代控制理论的主要研究内容

现代控制理论的研究内容十分广泛，主要包括以下几方面：

(1) 系统辨识

根据实验得到的系统输入-输出数据来获取描述系统行为的数学模型，是现代控制理论的一个分支，称为系统辨识。它包括系统结构辨识和系统参数辨识，是解决控制问题的首要工作，直接决定着控制的成败，因此，一直是非常活跃的研究领域，受到高度重视。

(2) 线性系统理论

这是现代控制理论中最基本和比较成熟的一个分支，主要研究线性系统中状态的控制和观测问题，其基本分析方法是状态空间法。线性系统是人们在一定假设条件下，从真实系统中抽象出的一种理想模型，它反映了一大类真实系统内部机制的主要方面。由于其响应具有叠加性、均匀性，使研究问题大为简化，其研究方法和成果，对复杂系统的研究具有借鉴和指导作用。在线性系统理论的发展过程中，形成了以加拿大学者 W. M. 旺纳姆为代表的基于几何概念和方法的几何学派；以美国学者 R. E. 卡尔曼为代表的基于抽象代数方法的代数理论学派和以英国学者 H. H. 罗森布罗克为代表的基于复变量方法的频域理论学派。

(3) 最优控制理论

它是设计最优控制系统的理论基础，也是现代控制理论的核心内容之一，主要研究被控系统在给定性能指标下，实现最优的控制规律和综合方法。用于综合最优控制系统的主要方法是极大值原理和动态规划。目前，集中参数系统的最优控制理论和方法已趋成熟；而分布参数系统的最优控制、随机最优控制、大系统的最优控制仍在研究和发展中。

(4) 最优估计理论

构造最优控制系统的一个关键是要获得真实系统的状态信息。研究对受到随机噪声污染的状态测量信号的处理，作出真实系统状态的最好估计的理论，称为最优估计理论。它的数学基础是概率论、数理统计和随机过程，最有影响的研究成果是卡尔曼-布西滤波器理论。最优估计理论是现代控制理论的另一个核心内容，改进和完善现有理论和算法，研究非线性滤波器的设计方法是最优估计理论的研究热点。

(5) 自适应控制

随着受控对象动态特性的变化(不确定性)而改变控制器自身特性的控制系统，称为自适应控制系统；而关于自适应控制系统分析与设计的理论，则称为自适应控制理论。它主要研究的基本问题是：

- 1) 认识受控对象的动态特性(辨识)。
- 2) 构造自适应控制的控制器。
- 3) 用算法实现这种控制器。

自适应控制是控制理论应用于实际的关键问题，它正朝着自学习、自组织和智能控制等方面发展。

5. 本书主要内容

本书主要介绍线性离散时间控制系统、非线性控制系统、线性多变量控制系统分析与综合所需的基本知识、基本理论和基本方法。内容包括：在 z 变换基础上的脉冲传函法、相平面法、描述函数法、状态空间法基础；关于系统信号转换与恢复的香农定理、典型非线性环节的特征、系统结构的能控性、能观性、稳定性、最小性等问题；关于反馈原理、分离原理

4 自动控制原理(下)

等基本控制原理；结合各章内容，本书将对 MATLAB 在相关理论研究中的应用作简介。

本书共 7 章，并沿续上册的序号，分别如下：

第 8 章介绍线性离散控制系统的组成、结构特征、信号分析、采样定理；以 z 变换为工具，引入脉冲传递函数的概念，阐述建立系统脉冲传递函数描述的方法和离散时间控制系统的分析、设计方法。

第 9 章介绍典型非线性环节及非线性系统的构成；引入相轨迹概念，介绍非线性系统的相平面分析法及其在非线性系统分析中的应用；引入描述函数概念，介绍非线性系统稳定性分析的描述函数法。

第 10 章主要介绍系统状态、状态空间和状态空间描述等基本概念，建立线性系统状态空间描述的方法，状态空间描述的非奇异变换，还介绍了系统状态空间描述与输入输出描述的转换。

第 11 章介绍线性系统状态空间描述的求解及相关概念。重点是系统状态转移矩阵的概念、性质与计算方法，线性系统运动的一般表达式及意义，以及 MATLAB 求取系统响应的相关函数的应用。这些内容是对线性系统进行定量分析的方法和主要概念。

第 12 章主要介绍系统能控性与能观性的基本概念和判别方法；在此基础上，介绍系统结构分解定理和意义，以及分解方法，求取最小实现的途径。

第 13 章介绍系统稳定性分析的李雅普诺夫方法的相关概念，重点是李雅普诺夫稳定性的定义和判别定理。

第 12、13 两章构成了状态空间法对系统的定性分析部分。

第 14 章介绍线性时不变系统的综合技术，重点是状态反馈、状态观测器的概念和极点配置的条件、方法，分离原理。

通过对本书的学习，学生应具备对线性离散控制系统、非线性控制系统、线性多变量连续时间系统的基本分析、设计能力；熟悉 MATLAB 相关函数的应用，掌握进一步学习控制理论的基本知识。

第五篇

线性离散控制系统篇

系统中一处或多处信号具有脉冲序列或数字序列形式的系统称为离散系统。随着数字系统的涌现，特别是数字计算机直接参与系统的管理与控制，这类系统已成为实际工程中常见且重要的控制系统。离散控制系统理论也称为采样控制理论。

本篇以 z 变换为工具，探讨单输入-单输出线性离散控制系统的组成原理、结构特征、模型建立和性能要求等问题；探讨以脉冲传递函数为核心概念的线性离散系统分析和控制器设计方法。

第 8 章 线性离散控制系统

随着脉冲和数字信号技术、数字式元部件、数字计算机，特别是微处理器的迅速发展和广泛应用，数字控制器在许多场合已经逐步取代了模拟控制器。数字控制器只在离散时间点上采集、接收、处理和输出数据，这就有必要研究离散信号的分析方法，以及讨论离散控制系统的分析和校正方法。

离散控制系统与连续控制系统相比，虽然在本质上有不同，但是其分析和设计方法存在很大程度的相似性。由于离散控制系统中出现了在离散时间点取值的脉冲序列信号，因而有关连续控制系统的理论不能直接用来分析离散控制系统。通常，利用 z 变换将脉冲序列信号变换到 z 域中加以分析处理。在 z 变换理论基础上，连续控制系统中的许多概念和方法，都可以推广应用于离散控制系统。

本章主要讨论线性离散控制系统的分析和校正方法。首先建立系统中信号采样和恢复的数学描述，然后介绍 z 变换理论和脉冲传递函数，最后讨论线性离散控制系统的稳定性、动态性能和稳态精度的分析与校正方法。

8.1 概述

如果控制系统中的所有信号都是时间变量的连续函数，则这样的系统称为连续时间控制系统，简称连续控制系统；如果控制系统中有一处或多处信号呈现脉冲序列的形式或呈现数码的形式，换句话说，这些信号仅仅定义在离散时间点上，则称这类控制系统为离散时间控制系统，简称离散控制系统。通常，将离散信号是脉冲序列形式的离散控制系统，称为采样控制系统或脉冲控制系统；而将离散信号为数码或数字序列形式的离散控制系统，称为数字控制系统或计算机控制系统。在理想采样及忽略量化误差的情况下，数字控制系统近似于采样控制系统，因此将它们统称为离散控制系统。

8.1.1 离散控制系统简介

早期的离散控制系统为采样控制系统，控制装置大多还属于模拟控制装置，控制功能和控制精度均受到限制。在数字控制系统中，数字控制器基本取代了模拟控制器，控制器的功能和控制精度大大提高。数字控制系统是一种用数字计算机作为控制器去控制具有连续工作状态的被控对象的控制系统，包括工作于离散状态下的数字控制器和工作于连续状态下的被控对象两大部分。数字控制系统的典型原理如图 8-1 所示。



图 8-1 数字控制系统典型原理图

在图 8-1 中, 系统的给定输入信号 $r(t)$ 、输出信号 $c(t)$ 、反馈信号 $b(t)$ 以及误差信号 $e(t)$ 都是连续信号, 被控对象所能接收的控制信号 $u(t)$ 也是连续信号。数字计算机作为数字控制系统的控制器, 其输入信号和输出信号都只能是二进制编码的数字信号, 即在时间上和幅值上都离散的数码信号。因此, 连续的误差信号 $e(t)$ 需经 A-D 转换器变成数字信号 $\bar{e}^*(t)$, 然后送入数字计算机按照控制规律或控制算法进行运算, 运算结果以数字信号 $\bar{u}^*(t)$ 输出, 经 D-A 转换器变成连续信号 $u(t)$, 用以控制被控对象。

A-D 转换器是将连续的模拟信号转换为离散的数字信号的装置。A-D 转换包括两个过程: 一是采样过程, 即每隔时间 T 对连续信号 $e(t)$ (见图 8-2a) 进行一次采样, 得到离散时间信号 $e^*(t)$ (简称离散信号或采样信号), 如图 8-2b 所示; 二是量化过程, 将采样信号 $e^*(t)$ 转换成最小二进制单位 (这个最小二进制单位称为量化单位, 用 q 表示) 的整数倍表示的数字信号 $\bar{e}^*(t)$, 如图 8-2c 所示。采样信号 $e^*(t)$ 经量化变成数字信号 $\bar{e}^*(t)$ 的过程, 也称为编码过程。

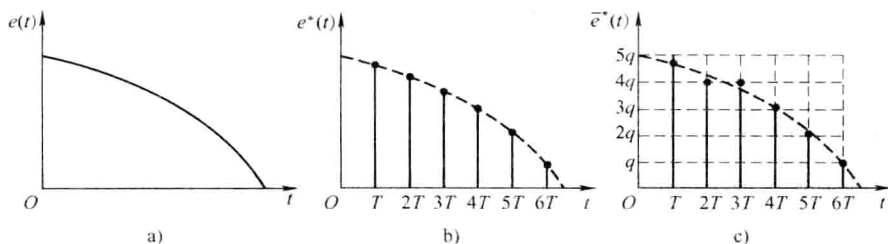


图 8-2 A-D 转换过程

通常, A-D 转换器有足够的字长来表示数字信号, 且量化单位 q 足够小, 可以忽略由于量化所引起的信号幅值上的断续性。此外, 可以认为采样编码过程是瞬时完成的。因此, 用理想脉冲信号来等效代替数字信号, A-D 转换器就可以用一个每隔 T 瞬时闭合一次的理想采样开关 S 来表示。对连续信号进行采样的时间间隔 T , 称为采样周期。

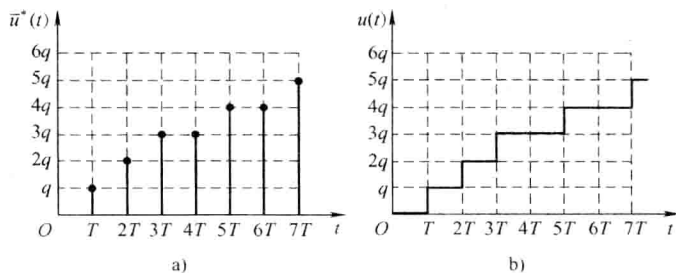


图 8-3 D-A 转换过程

D-A 转换器是将离散的数字信号 $\bar{u}^*(t)$ 转换为连续的模拟信号 $u(t)$ 的装置。D-A 转换也经历了两个过程: 一是解码过程, 把离散的数字信号 $\bar{u}^*(t)$ 转换为离散的模拟信号 $u^*(t)$, 如图 8-3a 所示; 二是复现过程, 需要将离散的模拟信号 $u^*(t)$ 复现为连续的模拟信号 $u(t)$ 才能用来控制连续的被控对象, 如图 8-3b 所示。通常的办法是通过 D-A 转换器中的寄存器存储数字信号, 使其在每个采样周期内保持为常值, 并经 D-A 转换器中的解码网络将这一

数字信号变成模拟信号。经 D-A 转换后得到的模拟信号 $u(t)$ 是一个阶梯信号，当采样频率足够高时，将趋近于平滑的连续信号。可见，D-A 转换器可以等效为将数字信号复现成模拟信号的信号保持器。

综上所述，A-D 转换器用采样周期为 T 的理想采样开关 S 代替；D-A 转换器用信号保持器取代，其传递函数为 $G_h(s)$ ；数字控制器实质上是一个数字校正装置，在结构图中可以等效为一个传递函数为 $G_c(s)$ 的脉冲控制器与一个周期为 T 的理想采样开关相串联。工作于连续状态的被控对象和测量元件分别用传递函数 $G_p(s)$ 和 $H(s)$ 表示。这样，图 8-1 所示的数字控制系统可以等效地用图 8-4 所示的离散控制系统典型结构来表示。

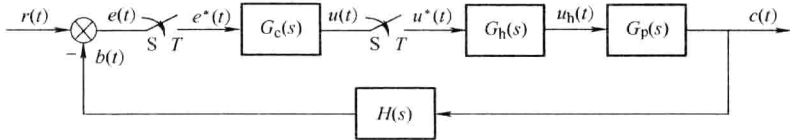


图 8-4 离散控制系统典型结构图

8.1.2 离散控制系统的特点和研究方法

离散控制系统特别是数字控制系统在自动控制领域中得到了广泛的应用，其主要原因是离散控制系统较之相应的连续控制系统具有一系列的特点：

- 1) 数字信号的传递可以有效地抑制噪声，从而提高系统的抗干扰能力。
- 2) 采用高精度的数字测量元件和数字控制元件，可以提高系统的测量和控制精度。
- 3) 可用一台计算机分时控制若干个子系统，提高了设备的利用率，经济性好。
- 4) 在数字控制器中，由软件实现的控制规律易于改变、控制灵活。
- 5) 计算机控制系统可以实现高级控制规律，实现复杂的控制目标，实现管理和控制一体化。

在离散控制系统中，系统的一处或多处存在脉冲序列或数字序列，不能沿用连续控制系统的研究方法。在时域中，需要采用差分方程对离散控制系统进行数学描述；在频域中，利用 z 变换这一数学工具得到离散控制系统的脉冲传递函数。离散控制系统在 z 域中的分析方法与连续控制系统在 s 域中的分析方法有很多相似之处。在建立了离散控制系统的脉冲传递函数数学模型后，连续系统的许多时域和频域中的分析与校正方法，经过适当改变后可以直接应用于离散控制系统的分析和设计之中。

8.2 信号采样与恢复

在离散控制系统中，既存在着连续信号，又在一处或数处存在脉冲序列或数字序列这样的离散信号。被控对象是连续的，其输入信号和输出信号是连续信号；数字控制器或数字校正装置的输入信号和输出信号是离散信号。因此，一方面，需要使用采样器把连续信号变换为脉冲序列或数字序列；另一方面，又需要使用保持器将脉冲序列或数字序列变换为连续信号。因此，为了定量地研究离散控制系统，有必要对信号的采样过程和恢复过程用数学的方法加以描述。