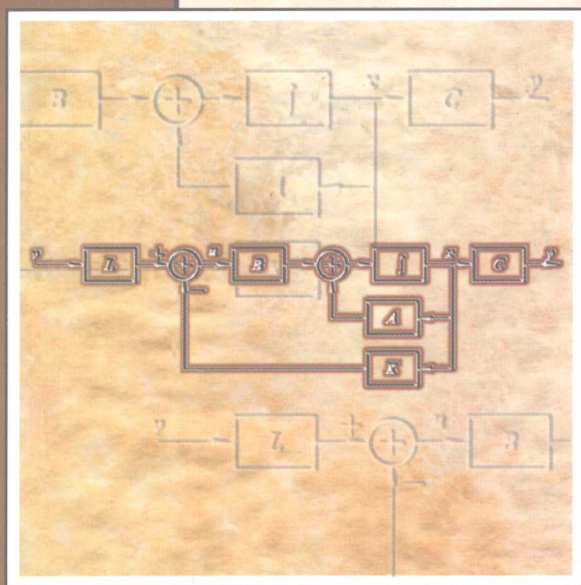
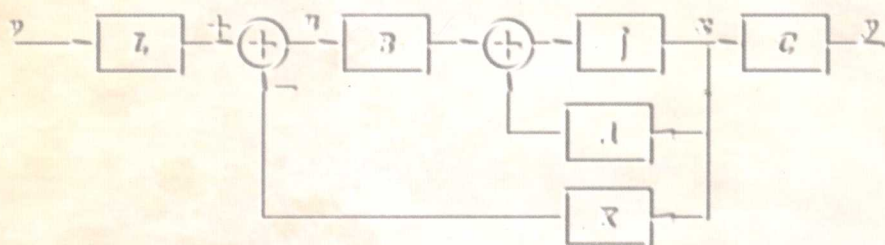




研究生系列教材

线性控制系统 理论与方法



李俊民 李 靖 杜彩霞 主编

西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

研究生系列教材

线性控制系统理论与方法

李俊民 李 靖 杜彩霞 编著

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书阐述了系统与控制科学领域中最基础的线性控制系统理论与方法,主要讲述线性控制系统的时域理论与方法,并从动态系统的建模、分析与综合三个方面系统地介绍了控制理论的基本概念和方法。全书共8章,内容包括:动态系统的输入/输出模型、状态空间模型;线性系统的定量分析法(包括经典控制理论)和线性系统的定性分析法(包括稳定性、能控性和能观测性);线性系统的综合和控制方法(包括稳定化法、极点配置法、解耦法、跟踪问题及观测器的理论和方法以及鲁棒控制)等。

本书既可作为应用数学专业、信息与计算专业及自动化专业本科和研究生教材,也可作为控制工程、系统工程专业研究生和科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

线性控制系统理论与方法/李俊民,李靖,杜彩霞编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2009.8

(研究生系列教材)

ISBN 978-7-5606-2221-7

I. 线… II. ①李… ②李… ③杜… III. 线性控制系统—研究生—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034092 号

策 划 马乐惠

责任编辑 任倍萱 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 13.25

字 数 309千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-2221-7/TP·1132

XDUP 2513001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

控制科学与技术是 20 世纪的人类科技进步中起到了举足轻重的作用。它对解决当今社会的许多挑战性问题产生了积极的影响,也提供了科学的思想方法论。它为许多产业领域实现自动化奠定了理论基础,提供了先进的生产技术和先进的控制仪器及装备。特别是数字计算机的广泛使用,为控制科学与技术开辟了更广泛的应用领域。

回顾近百年工程技术的发展,我们看到,20 世纪的控制科学与技术是在实践的重大需求驱动下快速发展的,它经历了若干重要的发展时期:20 世纪初的 Lyapunov 稳定理论和 PID 控制律概念,20 年代的反馈放大器,30 年代的 Nyquist 图与 Bode 图,40 年代维纳的控制论,50 年代的贝尔曼动态规划理论和庞特里亚金极大值原理,60 年代的卡尔曼滤波器、系统状态空间法、系统能控性和能观测性,70 年代的自校正控制和自适应控制,80 年代针对系统不确定状况的鲁棒控制,90 年代基于智能信息处理的智能控制理论。如今,控制论已经成为一门理论严谨、内容丰富、分支众多、发展迅速、应用广泛的学科领域。

线性控制系统理论是系统与控制科学领域的基础理论,它主要以线性系统为研究对象,经过近几十年的发展,线性系统理论的发展已经相当成熟与完善。线性系统理论的重要性在于它的基础性,其中的概念、方法、处理问题的思路和所获得的结论,对于系统和控制理论的许多学科分支,诸如最优控制、鲁棒控制、非线性控制、随机控制、分布参数系统和离散事件动态系统等,都具有重要的作用,因而成为学习和研究这些学科必不可少的基础知识。目前,线性系统理论已成为国内外大学系统与控制科学方向各个专业的一门重要基础课程。

控制论是一门应用性很强的科学理论,它面对的是各种各样错综复杂的实际系统。本书从动态系统的建模、分析与综合三个方面系统地介绍线性控制系统理论,这些内容已成为自然辩证法中的重要的方法论之一,同时,也补充了部分重要的经典控制理论。

全书共 8 章。第 1 章介绍了控制科学的历史和现状,同时介绍了控制科学国内外重要杂志和著名会议的信息和基本情况;第 2 章介绍了一些基本的数学基础知识;第 3 章给出了动态系统的建模方法及各种模型之间的转换关系;第 4 章论述了动态系统的定量分析与定性分析的方法,也介绍了重要的经典控制

理论；第5章叙述了动态系统的能控性、能观测性概念以及判别系统能控性和能观测性的若干准则；第6章介绍了动态系统的外部稳定和内部稳定的概念，给出了系统有界输入/有界输出(BIBO)稳定和 Lyapunov 稳定的判别准则；第7章介绍了动态系统综合控制问题，包括稳定化问题、极点配置问题、动静解耦问题、跟踪问题和观测器的设计问题；第8章论述了不确定线性系统的鲁棒控制问题，给出了不确定系统的二次稳定的概念、鲁棒控制的 LMI 条件和鲁棒非脆弱控制设计方法等。

本书各章末均配有习题，它们是本书不可或缺的组成部分，适当地选做这些习题可以帮助读者正确理解和灵活应用书中给出的概念、方法和结论。

本书可供高等院校理工科系统与控制科学方向各个专业高年级本科生和研究生作为相关课程的教材和参考书使用，亦可供控制理论与控制工程、自动化及相关信息科学领域科技工作者作为参考书使用。

本书第1章、第3~8章由李俊民同志编写，第2章和书中所有例题由李靖同志编写，每章后面的习题由杜彩霞同志编写。西安电子科技大学数学系的孙群同志和研究生王辉林同学对本书稿的文字输入做了大量工作，在此表示衷心感谢。

作者从陈启宗教授、郑大中教授、程兆林教授和段广仁教授的专著和教材中获得了对控制理论的深入理解，在此向他们深表感谢。同时，也感谢西安电子科技大学理学院领导的鼎力支持，以及西安电子科技大学出版社为本书的编辑和出版所做的努力。

限于编者水平，书中不妥之处在所难免，敬请读者指正。

编 者
2009 年 2 月

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~“十一五”国家级规划教材~~~~~

计算机系统结构(第四版)(李学干)	25.00
计算机系统安全(第二版)(马建峰)	30.00
计算机网络(第三版)(蔡皖东)	27.00
计算机应用基础教程(第四版)(陈建铎)	
(for Windows XP/Office XP)	30.00
计算机应用基础(冉崇善)(高职)	
(Windows XP & Office 2003 版)	23.00
《计算机应用基础》实践技能训练	
与案例分析(高职)(冉崇善)	18.00
微型计算机原理(第二版)(王忠民)	27.00
微型计算机原理及接口技术(第二版)(裘雪红)	36.00
微型计算机组成与接口技术(第二版)(高职)	28.00
微机原理与接口技术(第二版)(龚尚福)	37.00
单片机原理及应用(第二版)(李建忠)	32.00
单片机应用技术(第二版)(高职)(刘守义)	30.00
Java程序设计(第二版)(高职)(陈圣国)	26.00
编译原理基础(第二版)(刘坚)	29.00
人工智能技术导论(第三版)(廉师友)	24.00
多媒体软件设计技术(第三版)(陈启安)	23.00
信息系统分析与设计(第二版)(卫红春)	25.00
信息系统分析与设计(第三版)(陈圣国)(高职)	20.00
传感器原理及工程应用(第三版)	28.00
数字图像处理(第二版)(何东健)	30.00
电路基础(第三版)(王松林)	39.00
模拟电子电路及技术基础(第二版)(孙肖子)	35.00
模拟电子技术(第三版)(江晓安)	25.00
数字电子技术(第三版)(江晓安)	23.00
数字电路与系统设计(第二版)(邓元庆)	35.00
数字信号处理(第三版)(高西全)	29.00
电磁场与电磁波(第二版)(郭辉萍)	28.00
现代通信原理与技术(第二版)(张辉)	39.00
移动通信(第四版)(李建东)	30.00
移动通信(第二版)(章坚武)	24.00
物理光学与应用光学(第二版)(石顺祥)	42.00

数控机床故障分析与维修(高职)(第二版) 25.00

液压与气动技术(第二版)(朱梅)(高职) 23.00

~~~~~计算机提高普及类~~~~~

计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)(高职)	22.00
计算机文化基础(高职)(游鑫)	27.00
计算机文化基础上机实训及案例(高职)	15.00
计算机科学与技术导论(吕辉)	22.00
计算机应用基础(高职)(赵钢)	29.00
计算机应用基础——信息处理技术教程	31.00
《计算机应用基础——信息处理技术教程》	
习题集与上机指导(张郭军)	14.00

计算机组装与维修(中职)(董小莉) 23.00

微型机组装与维护实训教程(高职)(杨文诚) 22.00

~~~~~计算机网络类~~~~~

计算机网络技术基础教程(高职)(董武)	18.00
计算机网络管理(雷震甲)	20.00
网络设备配置与管理(李飞)	23.00
网络安全与管理实验教程(谢晓燕)	35.00
网络安全技术(高职)(廖兴)	19.00
网络信息安全技术(周明全)	17.00
动态网页设计实用教程(蒋理)	30.00
ASP动态网页制作基础教程(中职)(苏玉雄)	20.00
局域网组建实例教程(高职)(尹建璋)	20.00
Windows Server 2003组网技术(高职)(陈伟达)	30.00
组网技术(中职)(俞海英)	19.00
综合布线技术(高职)(王趾成)	18.00
计算机网络应用基础(武新华)	28.00
计算机网络基础及应用(高职)(向隅)	22.00

~~~~~计算机技术类~~~~~

计算机系统结构与组成(吕辉)	26.00
电子商务基础与实务(第二版)(高职)	16.00
数据结构——使用 C++ 语言(第二版)(朱战立)	23.00
数据结构(高职)(周岳山)	15.00
数据结构教程——Java 语言描述(朱振元)	29.00
离散数学(武波)	24.00

软件工程(第二版)(邓良松)	22.00	微机装配调试与维护教程(王忠民)	25.00
软件技术基础(高职)(鲍有文)	23.00	《微机装配调试与维护教程》实训指导	22.00
软件技术基础(周大为)	30.00	~~~~~数据库及计算机语言类~~~~~	
嵌入式软件开发(高职)(张京)	23.00	C程序设计与实例教程(曾令明)	21.00
~~~计算机辅助技术及图形处理类~~~		程序设计与C语言(第二版)(马鸣远)	32.00
电子工程制图(第二版)(高职)(童幸生)	40.00	C语言程序设计课程与考试辅导(王晓丹)	25.00
电子工程制图(含习题集)(高职)(郑芙蓉)	35.00	Visual Basic.NET程序设计(高职)(马宏锋)	24.00
机械制图与计算机绘图(含习题集)(高职)	40.00	Visual C#.NET程序设计基础(高职)(曾文权)	39.00
电子线路CAD实用教程(潘永雄)(第三版)	27.00	Visual FoxPro数据库程序设计教程(康贤)	24.00
AutoCAD实用教程(高职)(丁爱萍)	24.00	数据库基础与Visual FoxPro9.0程序设计	31.00
中文版AutoCAD 2008精编基础教程(高职)	22.00	Oracle数据库实用技术(高职)(费雅洁)	26.00
电子CAD(Protel 99 SE)实训指导书(高职)	12.00	Delphi程序设计实训教程(高职)(占跃华)	24.00
计算机辅助电路设计Protel 2004(高职)	24.00	SQL Server 2000应用基础与实训教程(高职)	22.00
EDA技术及应用(第二版)(谭会生)	27.00	Visual C++基础教程(郭文平)	29.00
数字电路EDA设计(高职)(顾斌)	19.00	面向对象程序设计与VC++实践(揣锦华)	22.00
多媒体软件开发(高职)(含盘)(牟奇春)	35.00	面向对象程序设计与C++语言(第二版)	18.00
多媒体技术基础与应用(曾广雄)(高职)	20.00	面向对象程序设计——JAVA(第二版)	32.00
三维动画案例教程(含光盘)(高职)	25.00	Java程序设计教程(曾令明)	23.00
图形图像处理案例教程(含光盘)(中职)	23.00	JavaWeb程序设计基础教程(高职)(李绪成)	25.00
平面设计(高职)(李卓玲)	32.00	Access数据库应用技术(高职)(王趾成)	21.00
~~~~~操作系统类~~~~~		ASP.NET程序设计与开发(高职)(眭碧霞)	23.00
计算机操作系统(第二版)(颜彬)(高职)	19.00	XML案例教程(高职)(眭碧霞)	24.00
计算机操作系统(修订版)(汤子瀛)	24.00	JSP程序设计实用案例教程(高职)(翁健红)	22.00
计算机操作系统(第三版)(汤小丹)	30.00	Web应用开发技术:JSP(含光盘)	33.00
计算机操作系统原理——Linux实例分析	25.00	~~~~~电子、电气工程及自动化类~~~~~	
Linux网络操作系统应用教程(高职)(王和平)	25.00	电路(高贇)	26.00
Linux操作系统实用教程(高职)(梁广民)	20.00	电路分析基础(第三版)(张永瑞)	28.00
~~~~~微机与控制类~~~~~		电路基础(高职)(孔凡东)	13.00
微机接口技术及其应用(李育贤)	19.00	电子技术基础(中职)(蔡宪承)	24.00
单片机原理与应用实例教程(高职)(李珍)	15.00	模拟电子技术(高职)(郑学峰)	23.00
单片机原理与应用技术(黄惟公)	22.00	模拟电子技术(高职)(张凌云)	17.00
单片机原理与程序设计实验教程(于殿泓)	18.00	数字电子技术(高职)(江力)	22.00
单片机实验与实训指导(高职)(王曙霞)	19.00	数字电子技术(高职)(肖志锋)	13.00
单片机原理及接口技术(第二版)(余锡存)	19.00	数字电子技术(高职)(蒋卓勤)	15.00
新编单片机原理与应用(第二版)(潘永雄)	24.00	数字电子技术及应用(高职)(张双琦)	21.00
MCS-51单片机原理及嵌入式系统应用	26.00	高频电子技术(高职)(钟苏)	21.00
微机外围设备的使用与维护(高职)(王伟)	19.00	现代电子装联工艺基础(余国兴)	20.00
		微电子制造工艺技术(高职)(肖国玲)	18.00

Multisim电子电路仿真教程(高职)	22.00	信息论与编码(邓家先)	18.00
电工基础(中职)(薛鉴章)	18.00	密码学基础(范九伦)	16.00
电工基础(高职)(郭宗智)	19.00	通信原理(高职)(丁龙刚)	14.00
电子技能实训及制作(中职)(徐伟刚)	15.00	通信原理(黄葆华)	25.00
电工技能训练(中职)(林家祥)	24.00	通信电路(第二版)(沈伟慈)	21.00
电工技能实训基础(高职)(张仁醒)	14.00	通信系统原理教程(王兴亮)	31.00
电子测量技术(秦云)	30.00	通信系统与测量(梁俊)	34.00
电子测量技术(李希文)	28.00	扩频通信技术的应用(韦惠民)	26.00
电子测量仪器(高职)(吴生有)	14.00	通信线路工程(高职)	30.00
模式识别原理与应用(李弼程)	25.00	通信工程制图与概预算(高职)(杨光)	23.00
信号与系统(第三版)(陈生潭)	44.00	程控数字交换技术(刘振霞)	24.00
信号与系统实验(MATLAB)(党宏社)	14.00	光纤通信技术与设备(高职)(杜庆波)	23.00
信号与系统分析(和卫星)	33.00	光纤通信技术(高职)(田国栋)	21.00
数字信号处理实验(MATLAB版)	26.00	现代通信网概论(高职)(强世锦)	23.00
DSP原理与应用实验(姜阳)	18.00	电信网络分析与设计(阳莉)	17.00
电气工程导论(贾文超)	18.00	~~~~~仪器仪表及自动化类~~~~~	
电力系统的MATLAB/SIMULINK仿真及应用	29.00	现代测控技术(吕辉)	20.00
传感器应用技术(高职)(王煜东)	27.00	现代测试技术(何广军)	22.00
传感器原理及应用(郭爱芳)	24.00	光学设计(刘钧)	22.00
测试技术与传感器(罗志增)	19.00	工程光学(韩军)	36.00
传感器与信号调理技术(李希文)	29.00	测试技术基础(李孟源)	15.00
传感器技术(杨帆)	27.00	测试系统技术(郭军)	14.00
传感器及实用检测技术(高职)(程军)	23.00	电气控制技术(史军刚)	18.00
电子系统集成设计导论(李玉山)	33.00	可编程序控制器应用技术(张发玉)	22.00
现代能源与发电技术(邢运民)	28.00	图像检测与处理技术(于殿泓)	18.00
神经网络(含光盘)(侯媛彬)	26.00	自动检测技术(何金田)	26.00
电磁场与电磁波(曹祥玉)	22.00	自动显示技术与仪表(何金田)	26.00
电磁波——传输·辐射·传播(王一平)	26.00	电气控制基础与可编程控制器应用教程	24.00
电磁兼容原理与技术(何宏)	22.00	DSP在现代测控技术中的应用(陈晓龙)	28.00
微波与卫星通信(李白萍)	15.00	智能仪器工程设计(尚振东)	25.00
微波技术及应用(张瑜)	20.00	面向对象的测控系统软件设计(孟建军)	33.00
嵌入式实时操作系统μC/OS-II教程(吴永忠)	28.00	计量技术基础(李孟源)	14.00
音响技术(高职)(梁长垠)	25.00	~~~~~自动控制、机械类~~~~~	
现代音响与调音技术(第二版)(王兴亮)	21.00	自动控制理论(吴晓燕)	34.00
~~~~~通信理论与技术类~~~~~		自动控制原理(李素玲)	30.00
专用集成电路设计基础教程(来新泉)	20.00	自动控制原理(第二版)(薛安克)	24.00
现代编码技术(曾凡鑫)	29.00	自动控制原理及其应用(高职)(温希东)	15.00
信息论、编码与密码学(田丽华)	36.00	控制工程基础(王建平)	23.00

现代控制理论基础(舒欣梅)	14.00	数控加工与编程(第二版)(高职)(詹华西)	23.00
过程控制系统及工程(杨为民)	25.00	数控加工工艺学(任同)	29.00
控制系统仿真(党宏社)	21.00	数控加工工艺(高职)(赵长旭)	24.00
模糊控制技术(席爱民)	24.00	数控加工工艺课程设计指导书(赵长旭)	12.00
工程电动力学(修订版)(王一平)(研究生)	32.00	数控加工编程与操作(高职)(刘虹)	15.00
工程力学(张光伟)	21.00	数控机床与编程(高职)(饶军)	24.00
工程力学(皮智谋)(高职)	12.00	数控机床电气控制(高职)(姚勇刚)	21.00
理论力学(张功学)	26.00	数控应用专业英语(高职)(黄海)	17.00
材料力学(张功学)	27.00	机床电器与 PLC(高职)(李伟)	14.00
材料成型工艺基础(刘建华)	25.00	电机及拖动基础(高职)(孟宪芳)	17.00
工程材料及应用(汪传生)	31.00	电机与电气控制(高职)(冉文)	23.00
工程材料与应用(戈晓岚)	19.00	电机原理与维修(高职)(解建军)	20.00
工程实践训练(周桂莲)	16.00	供配电技术(高职)(杨洋)	25.00
工程实践训练基础(周桂莲)	18.00	金属切削与机床(高职)(聂建武)	22.00
工程制图(含习题集)(高职)(白福民)	33.00	模具制造技术(高职)(刘航)	24.00
工程制图(含习题集)(周明贵)	36.00	模具设计(高职)(曾霞文)	18.00
工程图学简明教程(含习题集)(尉朝闻)	28.00	冷冲压模具设计(高职)(刘庚武)	21.00
现代设计方法(李思益)	21.00	塑料成型模具设计(高职)(单小根)	37.00
液压与气压传动(刘军营)	34.00	液压传动技术(高职)(简引霞)	23.00
先进制造技术(高职)(孙燕华)	16.00	发动机构造与维修(高职)(王正键)	29.00
机械原理多媒体教学系统(资料)(书配盘)	120.00	机动车辆保险与理赔实务(高职)	23.00
机械工程科技英语(程安宁)	15.00	汽车典型电控系统结构与维修(李美娟)	31.00
机械设计基础(郑甲红)	27.00	汽车机械基础(高职)(娄万军)	29.00
机械设计基础(岳大鑫)	33.00	汽车底盘结构与维修(高职)(张红伟)	28.00
机械设计(王宁侠)	36.00	汽车车身电气设备系统及附属电气设备(高职)	23.00
机械设计基础(张京辉)(高职)	24.00	汽车单片机与车载网络技术(于万海)	20.00
机械基础(安美玲)(高职)	20.00	汽车故障诊断技术(高职)(王秀贞)	19.00
机械 CAD/CAM(葛友华)	20.00	汽车营销技术(高职)(孙华宪)	15.00
机械 CAD/CAM(欧长劲)	21.00	汽车使用性能与检测技术(高职)(郭彬)	22.00
机械 CAD/CAM 上机指导及练习教程(欧)	20.00	汽车电工电子技术(高职)(黄建华)	22.00
画法几何与机械制图(叶琳)	35.00	汽车电气设备与维修(高职)(李春明)	25.00
《画法几何与机械制图》习题集(邱龙辉)	22.00	汽车使用与技术管理(高职)(边伟)	25.00
机械制图(含习题集)(高职)(孙建东)	29.00	汽车空调(高职)(李祥峰)	16.00
机械设备制造技术(高职)(柳青松)	33.00	汽车概论(高职)(邓书涛)	20.00
机械制造基础(高职)(郑广花)	21.00	现代汽车典型电控系统结构原理与故障诊断	25.00

欢迎来函索取本社书目和教材介绍! 通信地址: 西安市太白南路2号 西安电子科技大学出版社发行部
 邮政编码: 710071 邮购业务电话: (029)88201467 传真电话: (029)88213675。

目 录

第 1 章 绪论	1
Introduction	1
1.1 控制科学的历史与现状	2
History and Status of Control Science	2
1.2 控制问题的分类	3
Classification of Control Problems	3
1.3 线性控制系统理论的主要内容	5
Contents of Linear Control Systems Theory	5
1.4 与控制论相关的国际国内杂志和国内外会议名称	6
Name Lists of Journals and Conferences Related Control Theory	6
第 2 章 数学基础介绍	8
Introduction to Fundament of Mathematics	8
2.1 常数矩阵的几个基本概念和结论	8
Some Basic Concepts and Conclusions of Constant Matrix	8
2.2 多项式矩阵	12
Polynomial Matrix	12
2.3 矩阵分式	15
Matrix Fraction	15
2.4 线性矩阵方程	18
Linear Matrix Equations	18
2.5 拉普拉斯变换	20
Laplace Transform	20
习题	23
第 3 章 动态系统模型	25
Models of Dynamical Systems	25
3.1 系统模型的建立	25
Constuction of System Model	25
3.2 单变量系统输入/输出模型与状态空间模型的关系	34
Relationship between I/O Model and State-Space Model	34
3.3 多变量系统输入/输出模型与状态空间模型的关系	38
Relationship between MIMO I/O Model and State-Space Model	38
3.4 线性系统规范型状态方程	43
Canonical State Equation of Linear Systems	43
3.5 代数等价线性系统的不变特性	49
Properties of Linear Systems under Coordinate Transformation	49

3.6 组合系统的状态空间模型和传递函数矩阵	50
SS Model and Transfer Function Matrix of Composition Systems	50
习题	53
第4章 线性系统的定量分析法	56
Quantity Analysis of Linear Systems	56
4.1 单变量系统时域分析法	56
Time-domain Analysis of Single-variable Systems	56
4.2 频率响应分析法	63
Analysis Approach of Frequency Response	63
4.3 线性系统状态方程解的结构及性质	66
Structure and Properties of Solution for State Equation of Linear Systems	66
4.4 线性定常系统的状态转移矩阵和脉冲响应矩阵	70
State Transition Matrix and Impulse Response Matrix	70
4.5 线性时变系统的时域分析	73
Time-domain Analysis of Linear Time Varying Systems	73
4.6 线性连续系统的离散化及线性离散系统分析	77
Discretization of Continuous-time Systems and Analysis of Discrete Time Systems	77
习题	81
第5章 线性系统的能控性和能观测性	83
Controllability and Observability of Linear Systems	83
5.1 能控性定义及其判据	83
Definition and Criterion of Controllability	83
5.2 能观测性定义及其判据	94
Definition and Criterion of Observability	94
5.3 对偶性原理	99
Duality Principle	99
5.4 线性离散时间系统能控性和能观测性	100
Controllability and Observability of Linear Discrete-time Systems	100
5.5 能控规范型和能观测规范型	104
Controllable and Observable Canonical Forms	104
5.6 线性系统的结构分解	113
Structure Decomposition of Linear Systems	113
习题	118
第6章 动态系统的稳定性	121
Stability of Dynamical Systems	121
6.1 外部稳定性和内部稳定性	121
Internal and External Stability	121
6.2 Lyapunov 稳定性	124
Stability of Lyapunov	124
6.3 线性系统的稳定性判据	130
Stability Criterion of Linear Systems	130
6.4 离散时间系统的稳定性和判据	137

Stability and Criterion of Discrete-time Systems	137
习题	140
第 7 章 线性反馈系统的时间域综合	142
Time-domain Synthesis of Linear Feedback Systems	142
7.1 综合问题的提法及类型和性质	142
Description, Classes and Properties of Synthesis Problems	142
7.2 极点配置问题	145
Pole Placement Problem	145
7.3 输入/输出解耦控制问题	155
I/O Decoupling Control Problem	155
7.4 跟踪问题: 无静差性和鲁棒控制	165
Tracking Problem with No Static Error and Robust Control	165
7.5 状态重构问题及状态观测器	170
Reconstructing State Problem and State Observer	170
7.6 含有状态观测器的状态反馈控制系统	179
State Feedback Control System Based on State Observer	179
习题	182
第 8 章 不确定线性系统的鲁棒控制	185
Robust Control for Uncertain Linear Systems	185
8.1 引言	185
Introduction	185
8.2 系统描述和问题的定义	186
Systems Formulation and Definition of the Problem	186
8.3 不确定线性系统的二次稳定条件	188
Quadratic Stability Condition for Uncertain Linear Systems	188
8.4 不确定线性系统的鲁棒控制	190
Robust Control for Uncertain Linear Systems	190
8.5 不确定线性时滞系统的鲁棒非脆弱控制	192
Robust Non-fragile Control for Uncertain Linear Time-delay Systems	192
习题	202
参考文献	203
References	203

第1章 绪论

Introduction

控制概念的关键是反馈，它的工程概念是指用一个机器或过程偏离所期望的运行状态的偏差来推动一个装置，使机器或过程回到期望的状态。控制概念的一般定义为：对于某个确定对象或过程，根据给定的目标或任务所采取的行为或决策。

控制系统是由相互关联和相互作用的若干组成部分按一定规律组合而成的具有特定功能的整体。系统可具有完全不同的属性，如工程系统、生物系统、经济系统、社会系统等。但是，在系统理论中，常常抽去具体系统的物理或社会含义而把它抽象化为一个一般意义下的系统加以研究，这种处理方法有助于揭示系统的一般特性。系统的概念具有相对性。系统最基本的每个组成部分也可以是一个系统，而系统自身又可以是一个更大系统的组成部分。系统最基本的特征是它的整体性，它的行为和性能是由其整体所决定的，系统可以具有其组成部分所没有的功能，有着相同组成部分但它们的关联和作用关系不同的两个系统可呈现出很不相同的行为和功能。

自然界有许多控制系统，如人体温度的调节是由于代谢发热和蒸发冷却的作用，血糖量的自动控制是由于对抗的激素胰岛素和高血糖素的作用，人体运动的光学反馈等。这些都是人体生理方面的例子。还有许多工程控制系统，如自动化生产线、导航制导系统、人口控制系统、社会经济系统等。可以说控制系统无处不在，遍布社会的方方面面。

在系统与控制理论中，我们将主要研究动态系统，通常也称其为动力学系统。动态系统可用一组微分或差分方程来描述，并且可对系统的运动和各种性质给出严格的和定量的数学描述。当描述动态系统的数学方程具有线性属性时，称相应的系统为线性系统。线性系统是一类最简单且研究得最多的动态系统，众所周知，线性系统满足叠加原理，使得它在数学处理上非常简便，可以采用比较成熟的数学工具，如数学变换和线性代数来研究它的规律。

严格地说，一切实际的系统都是非线性的，真正的线性系统在现实世界中是不存在的，但是，很大的一部分实际系统，它们的某些主要关系特性在一定范围内可以充分精确地用线性系统来加以近似表示，并且实际系统与理想化的线性系统间的差别对于所研究的问题而言，已经小到无关紧要的程度，可忽略不计。因此从这个意义上来说，线性系统或者可线性化的系统是大量存在的，而这正是研究线性系统的实际背景。对于一个实际系统是否可将其按线性系统来处理，一般难以给出普遍的和绝对的判断准则，需要对具体系统进行具体的分析。不仅需要考虑系统本身的因素，而且也需要考虑研究问题方面的因素，只有从这两个方面才能确定能否把一个实际系统看成线性系统。

本章简要回顾控制科学发展的历史及现状,着重强调控制理论的发展轨迹,指出控制科学发展的规律,通过典型实例归纳出控制问题的基本分类。最后列举出控制科学期刊和重要会议的资料名称和信息源。

1.1 控制科学的历史与现状

History and Status of Control Science

早在 17 世纪,人类就利用对反馈和控制的认识,创造了许多装置,如古老的钟表机构,水轮及风力磨房的速度调节等。1765 年,James Wate 发明了蒸汽机,利用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机。这标志着人类以蒸汽为动力的机械化时代的开始,并对第一次工业革命产生了重大作用。

1868 年,Maxwell 发表的“关于调节器”一文指出,控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来确定。

1875 年,Routh 利用多项式系数建立了判断实系数多项式在右半平面内根的个数的算表,从而给出了判别其稳定性的 Routh 判据;1895 年,Hurwitz 采用多项式系数排成的矩阵的主子式的符号来判断该多项式在右半平面内根的个数和稳定性,先后找到了系统稳定的代数判据,即系统的特征根具有负实部是系统稳定的充要条件。

1892 年,俄国学者 Lyapunov 发表的博士论文“论运动稳定性的一般问题”中提出了用适当的能量函数——Lyapunov 函数的正定性及其导数的负定性来鉴别系统的稳定性准则,从而总结和发展的系统的经典时域分析法。

直到 1940 年,这些结果基本满足了控制工程师的需要,当时的自动控制都是调节系统,主要的设计准则是静态准确度和防止不稳定,而瞬态响应的平滑性及快慢是次要的。

二次世界大战期间,由于战争和军事的需要,出现了全程控制的控制目标,即对于迅速变化的信号,控制系统的准确跟踪及补偿能力变为最重要的,而设计这种系统所需要的理论已经在通信工程中得到发展,这种理论是在美国长距离电话网建设中发展起来的。

1927 年,Black 发明了负反馈放大器,它具有一个基本而又重要的性质,即一个设计合理的负反馈系统的整体特性对系统中个别元件的准确值是不敏感的。

在通信与信息处理技术中,工程师们发展了以实验为基础的频率响应分析法。1932 年,美国贝尔实验室工程师 Nyquist 发表了反馈放大器稳定性的著名论文,给出了系统稳定的 Nyquist 判据。后来,苏联学者米哈依洛夫又把 Nyquist 判据推广到条件稳定的开环不稳定系统的一般情况。由 Nyquist 判据提出的频率响应理论为控制工程师提供了设计一个具有高质量动态品质及静态准确度的控制系统所需要的分析工具。在第二次世界大战中,频率域法被推广到离散系统、随机系统及非线性系统中。

1948 年,Evans 提出了“根轨迹法”的重要结果,提供了从系统微分方程式模型研究问题的一个简单而有效的图解方法。

1948 年,美国著名的控制论创始人 Wiener 系统地总结了前人的成果,发表了《控制论或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,推广了反馈的概念,为控制理论这门学科的产生奠定了基础。直至此时,才算是完成了控制理论的第一阶段,即经典控制理论。

经典控制理论主要是解决单输入/单输出(SISO)问题,主要采用传递函数、频域特性、根轨迹为基础的频域分析法,研究的系统多为线性定常系统。

20世纪50年代到70年代是现代控制理论时期,这一时期,由于计算机的飞速发展推动了空间技术的发展,经典控制理论中的高阶微分方程可转化为一阶微分方程组,用以描述系统的动态过程,形成了动态系统的状态空间法。这种方法可以解决MIMO问题,系统可以是线性的、定常的,也可以是非线性的、时变的。

这一时期的主要理论和方法是1960年Kalman提出的状态空间法及能控性和能观测性概念。建立在状态空间法基础上的线性系统的分析和综合方法通常称为线性控制理论。自20世纪60年代中期以来,现代控制理论又有新的理论和方法,主要有线性系统的几何概念、代数理论和多变量频率域方法,还有Bellman的动态规划、Pontryagin的极大值原理和Kalman滤波器理论等。

20世纪70年代初瑞典的Astrom和德国的Landau分别提出了自校正理论和模型参考自适应控制理论,两者构成了自适应控制理论的基本内容。

20世纪70年代末期Mesarovic根据分解—协调原理提出了大系统理论,其中的递阶结构和分散结构理论为解决复杂系统问题提供了很好的方法论。大系统是指由许许多多子系统通过广泛互连接而形成的复杂系统,大系统理论中提出的关联预测法和关联平衡法成为处理关联关系的有效方法。

现代控制理论包括:线性控制系统理论、最优控制理论、系统辨识、随机控制理论、非线性控制理论和自适应控制理论以及大系统理论。

从20世纪80年代到现在,控制理论向着“智能控制”方向发展,以解决3C(复杂对象、复杂目标和复杂环境)等复杂的高度自动化问题,这是控制科学崭新的发展阶段。在此阶段,许多3C问题和3C系统被提出来,如计算机集成制造系统(CIMS)和拟人化机器人系统以及Internet系统等。如何对这些系统和问题进行理论分析,从而指导这些系统的设计和运行,已经成为极具挑战性的问题。相信智能控制会为这些问题的解决乃至自然科学的发展做出应有的贡献。

1.2 控制问题的分类

Classification of Control Problems

现代社会和现代生活离不开对一些物理量的控制,包括实现对这种控制的自动化。例如公共电网上的电压是220 V、频率为50 Hz的交流电,为此,在发电厂就要设法控制电压、频率这两个物理量为恒值,这要采用自动调压和自动调频装置。在工业生产中,如在化肥厂控制反应釜(塔)内温度和压力为恒值,使化学反应速度加快。在机械加工厂金属切削机床上,经常是控制工件或刀具的转速为恒值,以保证产品的质量和产量。而各种现代火炮的俯仰角和方位角,飞行器的姿态控制和轨迹跟踪问题都是自动控制问题。现代生活中,空调器保持室内温度为恒值,卫生洁具水箱的水位也保持为恒值。其它如冰箱、洗衣机无不将一些物理量控制为恒值,而洗衣机更把洗衣、漂洗和脱水等操作自动按程序进行。

下面我们先列举几个控制系统的实例,然后对控制基本问题给出一种分类方法。

【例 1.1】 水温调节系统。

在图 1.1 所示的水温调节系统中,水温调节器通过测温计来测试水的温度,并将此温度与所要求的值(给定值)相比较(通过调节记录仪),自动决定调节阀应该朝哪个方向旋转加温用的蒸汽阀门和旋转多大的角度,从而保证水箱内水温保持在恒定水平。上述功能由温度测量元件、控制记录仪和调节阀等来自动实现。水温调节系统通过实际水温与设定值的差异自动调节蒸汽阀门大小,实现水温恒温的要求。这类问题是根据被调系统的状态与设定值的差异来自动推动一个装置,使得这种差异被消除,这类问题被称为调节(Regulation)问题。

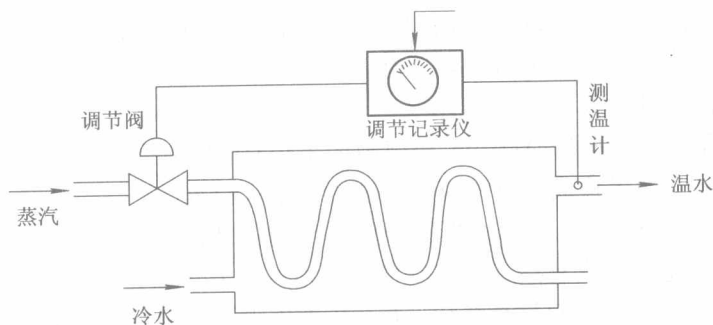


图 1.1 水温调节系统

【例 1.2】 导弹拦截系统。

用双雷达控制的防空导弹可以自动跟踪高空的飞行目标进行命中爆炸,这种导弹拦截系统如图 1.2 所示,由目标跟踪雷达、计算机、导弹引导雷达和导弹发射架组成。首先根据目标跟踪雷达检测和锁定目标,将目标的飞行轨迹做出估计并送到计算机,计算机根据导弹的运行状况与理想轨迹的差异,计算出制导导弹运行姿态的控制策略,以确保导弹能在未来某个时刻成功拦截目标。这类问题属于全程跟踪的控制问题,称为跟踪(Tracking)问题。

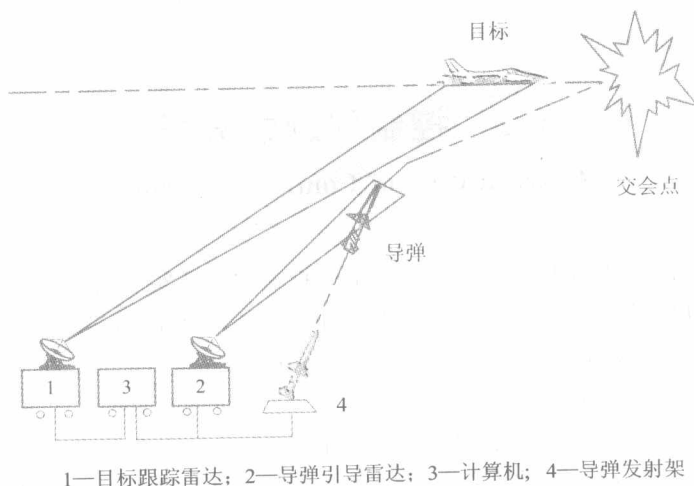


图 1.2 导弹拦截系统

由以上两个实例归纳出控制的基本问题,可分为两类:一类称为调节问题;另一类称为跟踪问题。所有的控制问题无外乎都是这两种问题之一。

1.3 线性控制系统理论的主要内容

Contents of Linear Control Systems Theory

线性控制系统理论主要研究线性系统的运动规律和改变这种运动规律的可能性及方法,建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的确定关系。通常,将研究系统运动规律称为分析问题,研究改变运动规律的可能性和方法的问题称为综合问题。前者属于认识系统,后者则为履行问题。

不管是对系统进行分析还是进行综合,前提是建立起系统的数学模型。在建立模型时,最重要的是确定什么是需要反映和研究的主要系统属性,并在此基础上定出它的变量关系。随着考察问题的性质不同,一个系统可以分为不同类型的模型,它们代表了系统不同侧面的属性。数学模型中的基本要素是变量、参量和常数以及它们之间的关系。系统模型中的变量包括状态变量、输入变量和输出变量,在有些情况下,还须考虑扰动变量。参量可以是系统的参数或表征系统性能的参数,前者受系统环境的影响可产生变动,后者可随设计要求而人为地改变其取值。常量是指系统中不随时间改变的参数。变量、参量和常量的关系需要针对具体问题根据相应的物理原理来决定。线性系统的数学模型主要有两种形式,即状态空间模型和输入/输出模型,对于系统的这两种模型发展和形成了线性系统理论的两类不同的分析方法,即时域法和频域法。

动态系统的数学模型一旦确定,就可着手对系统进行分析和综合。通常把分析区分为定性和定量分析两类情况。在定量分析中,主要关心的是分析系统相对于某个输入信号的响应和性能,这种分析涉及到繁多和复杂的计算,常常需要借助于计算机来完成。在定性分析中,着重于分析诸如稳定性、能控性和能观测性等系统的基本结构特性,这种分析对于系统的综合具有重要的指导性,因此在线性系统理论中占据重要的位置。当系统的性能不够令人满意而需要加以改善或实现最优化时,就需要同时按系统的状况和期望的性能指标要求来设计系统的控制器,这类问题就是综合问题,它是建立在分析基础上的。通常控制器的基本形式是反馈控制,在某些情况下还需同时引入附加的补偿器。应当指出,对于系统的综合是相对于系统的模型进行的,而所导出的控制器将施加和作用于实际系统中,因此必然会产生一系列实际问题,如反馈的构成、模型误差的影响、参数摄动的影响,扰动影响的抑制和消除等,不解决这些实际问题,综合中提出的期望性能指标仍然是没有保证的。因此,解决上述这些实际问题,使得所综合的系统在实际运行中能达到期望的性能,是系统理论中要研究的课题。

线性系统理论随着所采用的数学工具和所采取的系统描述方式不同,可分为五个平行的分支,它们反映了线性系统理论中的主要学派。这五大分支包括 Kalman 的状态空间法, Wonham 的线性系统几何理论,线性系统的代数理论,由 Rosenblock、MacFarlane 和 Wolovich 创立的多变量频率域理论和 Willems 提出的线性系统行为化理论。

本书将从通用性和实用性的角度考虑,限于以状态空间法为主来介绍线性控制系统分析和综合的理论和方法,这也是现代控制理论的基础和核心内容。