



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
智能与控制系列教材

ZHINENG YU KONGZHI XILIE JIAOCAI

KONGZHI XITONG LILUN JI YINGYONG

控制系统理论及应用

(第2版)

王 枏 李睿凡 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

智能与控制系列教材

控制系统理论及应用

(第2版)

王 枞 李睿凡 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

控制系统理论内容丰富,本书以加强基础、突出重点、注重应用为原则,主要介绍线性系统的基本理论及其应用、控制系统的不确定性与鲁棒性分析、多变量协调控制、最优控制与随机最优估计等内容。在介绍有关基本概念时,力求在保持理论严密性的前提下,尽可能从工程实例来引入重要的概念和方法,使读者能较快地掌握控制系统理论的基本内容,为今后深入学习本学科的其他分支学科打好基础。

本书可作为控制理论与控制工程专业本科生或研究生的教材或教学参考书,亦可供相关领域科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统理论及应用/王枬,李睿凡编著. —2版. —北京:北京邮电大学出版社,2009

ISBN 978-7-5635-1872-2

I. 控… II. ①王…②李… III. 控制系统理论—高等学校—教材 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 118891 号

书 名: 控制系统理论及应用(第 2 版)

作 者: 王 枬 李睿凡

责任编辑: 陈岚岚

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt. edu. cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 20

字 数: 436 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2005 年 3 月第 1 版 2009 年 8 月第 2 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1872-2

定价: 34.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

序

控制系统理论的产生源于自动化工程实践的需要,而控制系统理论的发展又用于自动化系统的分析、设计和技术实现。

当前,控制系统理论及应用的发展动向如下:

1. 智能控制系统理论及应用

智能自动化工程实践的需要及人工智能、神经网络、模式识别等方法与技术的进展,促进了智能控制系统理论及应用的发展。

2. 大系统、巨系统控制理论及应用

管控一体化的综合自动化工程实践的需要及计算机网络和通信技术的进展,促进了大系统、巨系统控制理论及应用发展。

3. 基于广义模型的控制系统理论及应用

基于传统数学模型的控制系统理论的局限性及实际自动化工程系统的复杂性,需要发展基于广义模型(如:知识模型、网络模型等)的控制系统理论及应用。

4. 非工程领域控制系统理论及应用

由于社会经济、生物生态、气象环境等非工程领域的管理、控制、分析、预测的需要,促进了非工程控制系统理论及应用的发展。

北京邮电大学王枏教授根据教学任务的需要,在科研工作实践基础上,编著了《控制系统理论及应用》,这是一本注重控制原理的物理意义与工程应用,面向教学实践,理论联系实际的好书。相信其出版将为控制系统理论及应用的发展作出积极的贡献。

涂序彦

2004年5月6日

第2版前言

本书第一版于2005年出版,经过近5年相关专业本科生、研究生的教学实践,虽有一定成效,但仍嫌不足,触发了编者重写该书的愿望与动力。

控制原理是信息、控制、自动化等相关专业的核心课程之一,传统上分为经典与现代两个部分。经典部分是建立在频率响应法和根轨迹法基础上的一个分支;而现代部分则是以状态空间法为基础和以最优控制理论为特征。两者有着较大的差别,但又有着密切的联系。本书以现代控制原理为主要编写内容。但不可避免的也遇到经典控制中的概念与方法,每涉及此类问题,编者都点到为止,请读者再查阅相关书籍与资料。本书的内容安排如下。

第1章介绍控制系统的数学模型,包括连续模型与离散模型,单变量与多变量模型,线性模型与非线性模型,时变系统与定常系统等模型。特别是系统的状态空间方程,是后续章节的基础。

第2章、第3章是系统分析部分,分别从结构分析、稳定性、鲁棒性三个方面展开。在结构分析方面,主要包括可控、可观等各种标准型。在稳定性方面,包括李雅普诺夫稳定性的定义与第一、第二判别法。在鲁棒性方面,包括鲁棒系统的结构特性、不确定系统的模型、以及鲁棒稳定性。

第4章是系统综合部分,也即如何进行控制器的设计,寻求系统性能改善的各种控制律,以满足系统的性能指标要求。主要包括线性反馈控制系统、闭环系统极点配置、系统解耦问题、状态重构、带状态观测器的反馈控制系统等。

第5章介绍控制系统的最优控制与最优估计问题。包括最优控制的数学描述,变分法及其应用以及随机估计的基本方法。

第6章介绍 Matlab 求解控制问题的基本方法,其中多以前面章节中的例题作为求解对象。考虑到前5章的题目较多,可以作为第6章练习的问题,因而未附习题。

为满足不同的教学要求,编者给出下面两种可能的安排,供参考。

本科生教学中,1.3节、1.5.4节、2.1.5节、2.7节、2.8节、3.4.4节、3.5节、3.6节、4.4节、4.5节、4.7节、4.8节以及第5章可以作为选读内容。在学习其他章节的同时,穿插第6章的内容。

研究生教学中,前5章的内容都应讲授,可根据不同情况有所侧重,第6章内容以学

生自学为主。

此外,需要指出的是,控制是一个非常活跃的学科,智能控制、神经控制、大系统控制等理论与方法的研究不断深入。正因为如此,编者建议同学们,特别是研究生同学在学习该书的同时,也应关注与思考更为前沿的研究成果与课题,使得学习更为有趣、也更有效。

最后,感谢在教学过程中使用本书的本科生、研究生提出的意见与建议,也感谢他们与编者的交流和给予的启发。感谢北京科技大学涂序彦教授的厚爱,他不断鼓励与支持本书的出版工作。同时,感谢中国人工智能学会理事长钟义信教授对于智能与控制系列教材的支持。

由于编者水平有限,难免有错误、纰漏,恳请广大读者予以批评和指正。

编 者
2009年7月7日

前 言

控制系统理论的产生源于自动化工程实践的需要,并在机械、交通、武器、飞行器等各种系统中发挥不可替代的作用。20 世纪中叶以来,随着信息技术的迅速发展和广泛应用,随着物质经济向信息经济的迅速转型,随着信息化的进程不断深化,信息网络正在成为现代社会最为重要的基础结构,成为信息时代人类社会赖以生存和发展的命脉源泉。这就要求自动控制专业和信息类专业人才必须掌握控制系统理论与技术。

本教材是自动控制等专业本科生和研究生学习《现代控制理论》课程时的教科书,参考教学时数为 40~60 学时。本着加强基础、突出重点、注重应用的原则,本书以线性系统理论和最优控制与估计为主要内容。线性系统部分介绍了状态空间表达式的建立与求解、标准型、可控性与可观测性分析、稳定性与鲁棒性分析、结构分解、状态反馈与状态观测器设计、解耦控制、协调控制;最优控制与最优估计部分介绍了经典变分法求解最优控制问题、最小值原理及应用、随机系统及基本估计方法的基本方程等。

大规模信息网络是一类典型的“开放的复杂的大系统”。而且,随着技术的进步和社会的发展,信息网络的规模将进一步扩大,网络的技术将更加复杂,网络的服务也必将越来越多样。为了保证大规模信息网络高效可靠地运行,网络的管理与控制就成为头等重要的任务。大规模信息网络的管理与控制,需要大系统控制理论和智能控制理论的支持,控制系统理论是今后深入学习这些理论的基础。此外,信息系统的其他方面自动控制、智能控制与管理的需求也越来越迫切。因此,社会的发展对控制系统理论与技术人才提出了越来越迫切的需求,为自动控制的人才提供了广阔的驰骋天地。

鉴于控制系统理论数学推证多,概念抽象,有些内容学生不易理解,本教材在介绍有关基本概念时,力求在保证理论严密性的前提下,尽可能从概念上加以阐述,注意与经典控制理论的衔接与对照,并配有合适的例题与习题。使学生能较快地掌握控制系统理论中的最基本内容。另外,本书对某些较难的非基本内容以模块形式出现作为选学内容,有利于教师根据实际情况,在不打乱全书系统性的情况下,灵活处理。

在本教材中,参考和吸收了一些兄弟院校教材的部分内容,在此对这些教材的单位、作者谨致真诚的感谢。另外,要特别感谢涂序彦教授,承蒙涂序彦教授厚爱,在百忙之中抽出宝贵的时间对本教材提出了许多建设性的修改和指导意见。

在本教材的编写过程中,胡航先、罗鑫、陈翔、杨君、刘建毅、张鹏飞提出许多宝贵意

见,并参与校核。在此表示诚挚的感谢。

本书的写作获得国家 836 计划重大项目(2001AA114210-14 和 2002AA117010-07)的资助。

由于编者的水平有限,加上编写时间仓促,因此书中可能存在不妥甚至错误之处,恳请广大读者和专家予以批评和指正,以便进一步修订和完善。

编 者

2004 年 5 月于北京

目 录

绪论	1
第 1 章 控制系统的数学模型	7
1.1 控制系统的运动方程	7
1.1.1 动力学系统	7
1.1.2 描述运动的微分方程	8
1.1.3 非线性方程的线性化	8
1.1.4 离散时间运动方程	10
1.2 线性微分方程的解	11
1.2.1 线性微分方程的标准解	11
1.2.2 线性微分方程的拉氏变换解	16
1.2.3 运动的模态	17
1.3 控制系统的传递函数	20
1.3.1 传递函数	20
1.3.2 系统结构图	22
1.3.3 传递函数极点与零点的相消	24
1.4 控制系统的状态空间描述	29
1.4.1 状态空间的基本概念	30
1.4.2 状态空间表达式	32
1.4.3 由系统微分方程建立状态空间表达式	34
1.4.4 系统传递函数与状态空间表达式的互换	41
1.4.5 组合系统的状态空间表达式	46
1.4.6 离散系统的状态空间表达式	50
1.5 系统状态空间表达式的解	57
1.5.1 矩阵指数函数	57
1.5.2 状态转移矩阵	61
1.5.3 状态方程的解	68
1.5.4 系统特征值与模态的不变性	76
习题	79

第2章 线性控制系统的结构分析	83
2.1 特征值标准型	84
2.1.1 状态空间的等价变换	84
2.1.2 系统的特征值和特征向量	86
2.1.3 对角线标准型	87
2.1.4 约当标准型	90
2.1.5 模态标准型	99
2.2 状态可控性	102
2.2.1 状态可控性定义	102
2.2.2 状态可控性判据	104
2.3 状态可观性	111
2.3.1 状态可观性定义	111
2.3.2 状态可观性判据	112
2.4 状态可控性与可观性的对偶原理	116
2.5 状态可控标准型和可观标准型	117
2.6 线性系统的结构分解	123
2.6.1 按可控性分解	124
2.6.2 按可观性分解	127
2.6.3 按可控性和可观性分解	129
2.7 状态可控性可观性与传递函数矩阵	132
2.7.1 单输入单输出系统的零极相消	132
2.7.2 多输入多输出系统的零极相消	135
2.7.3 输出可控性	137
2.8 传递函数矩阵的实现	137
2.8.1 实现和最小实现	137
2.8.2 标量传递函数的实现	139
习题	141
第3章 控制系统的稳定性与鲁棒性分析	145
3.1 李雅普诺夫关于稳定性的定义	146
3.1.1 运动稳定性及平衡状态	146
3.1.2 稳定性的几个定义	147
3.2 李雅普诺夫第一法	149

3.2.1 线性系统的稳定性	150
3.2.2 非线性系统的稳定性	150
3.3 李雅普诺夫第二法	152
3.3.1 预备知识	153
3.3.2 几个稳定性判据	155
3.3.3 对李雅普诺夫函数的讨论	159
3.4 李雅普诺夫方法在线性系统中的应用	160
3.4.1 线性定常连续系统渐近稳定判据	160
3.4.2 线性定常离散时间系统渐近稳定判据	162
3.4.3 系统响应的快速性指标	163
3.4.4 参数的最优化设计	165
3.4.5 状态反馈的设计	167
3.5 李雅普诺夫方法在非线性系统中的应用	168
3.5.1 雅可比矩阵法	168
3.5.2 变量梯度法	170
3.6 系统不确定性与鲁棒性	176
3.6.1 不确定模型	178
3.6.2 鲁棒稳定性	183
3.6.3 鲁棒性能分析	186
习题	188
第4章 线性定常系统的综合	191
4.1 线性反馈控制系统	191
4.1.1 状态反馈	191
4.1.2 输出反馈	192
4.1.3 从输出到状态向量导数 $\dot{x}$ 反馈	193
4.1.4 动态补偿器	194
4.1.5 闭环系统的可控性与可观性	195
4.2 闭环系统的极点配置	196
4.2.1 采用状态反馈	197
4.2.2 采用输出反馈	201
4.2.3 系统镇定问题	202
4.3 系统解耦问题	203
4.3.1 前馈补偿器解耦	204

4.3.2 状态反馈解耦	205
4.4 多变量协调控制	211
4.5 状态重构	213
4.5.1 状态观测器定义	213
4.5.2 状态观测器的存在性	214
4.5.3 状态观测器的实现	214
4.5.4 降维观测器	215
4.6 带有状态观测器的反馈控制系统	221
4.6.1 系统的结构与状态空间表达式	221
4.6.2 闭环系统的基本特征	222
4.6.3 状态反馈系统与输出反馈系统	224
4.7 有外扰时控制系统的综合	225
4.7.1 调节器问题	226
4.7.2 闭环系统实现静态无差的判据	229
4.7.3 外扰状态可直接测量时的综合	232
4.8 鲁棒调节器	236
4.8.1 常值扰动下的鲁棒调节器	237
4.8.2 鲁棒调节器的构造	241
习题	246
第5章 最优控制与最优估计	249
5.1 最优控制的数学描述	249
5.1.1 最优控制问题的实例	250
5.1.2 最优控制问题的基本概念	252
5.2 变分法及其在最优控制中的应用	255
5.2.1 泛函与变分的基本概念	255
5.2.2 泛函极值条件	260
5.2.3 应用变分法求解最优控制问题	265
5.3 极小值原理及应用	271
5.3.1 基本原理	272
5.3.2 Bang-Bang 控制	274
5.3.3 双积分系统的时间最优控制	276
5.4 随机系统及基本估计方法	280
5.4.1 随机系统的基础知识	282

5.4.2 最小方差估计与线性最小方差估计	283
习题	285
第六章 MATLAB 应用实例	288
6.1 引言	288
6.2 状态空间模型的建立与变换	288
6.3 状态转移矩阵与状态方程的求解	290
6.4 状态响应求解与响应曲线绘制	292
6.5 可控性与可观性的判断与分解	295
6.6 系统标准型的求解	297
6.7 系统稳定性的分析	299
6.8 闭环系统的极点配置	301
6.9 状态观测器的设计	303
6.10 二次最优调节器的设计	304
参考文献	306

绪 论

控制系统用来控制某些物理量按照预定或期望的规律变化。随着科学技术的发展,控制系统理论与技术显得越来越重要。它不但在现代工程技术领域中获得广泛的应用,而且在经济学、生物学和医学领域中也受到了很大的重视。

控制系统理论作为一门新兴的科学普遍应用于国民经济的多个方面,包括各种自动控制系统、各类机器人、各种形式的自动机构,以及进行信息采集、信息处理、加工控制、管理、决策的各种自动化装置和系统。它不仅把人类从繁重的体力劳动与部分脑力劳动中解放出来,而且可以完成只靠人类的自身所无法完成的许多精密、复杂的工作。在许多危险以及特殊的环境中,更是少不了自动化装置。

控制系统理论主要研究系统中信息互相作用的规律以及如何利用这些规律对系统进行设计、控制、决策和管理,研究如何改进动态系统的性能以达到所需目标,这个广义定义涉及人类活动的许多方面。控制系统理论试图以定量方式描绘这些问题,并力图寻求一些精确的数学描述方法。

控制系统理论的研究目标是了解基本控制原理,建立数学模型用于分析控制系统的性能,设计自动控制系统。控制系统理论不仅用于处理简单的动态系统,还用于处理具有不确定性的复杂动态系统。

1. 控制系统理论的产生与发展

理论归根结底是从实践发展而来的,它来之于实践,但又反过来指导实践。控制系统理论的发展又一次说明了这一真理。控制系统理论的发展形成了经典控制理论和现代控制理论两大分支。

人类发明具有“自动”功能的装置的历史,可以追溯到公元前 14—前 11 世纪在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。公元前 4 世纪,希腊柏拉图首先使用了“控制论”一词,公元 235 年中国(三国时期)的马均及公元 477 年祖冲之等制造了具有开环控制特点的指南车,并发明了齿轮及差动齿轮机。具有反馈控制原理的控制装置最有代表性的例子当属古代的计时器“水钟”(在中国叫做“刻漏”,也叫“漏壶”)。北宋时期,苏颂等于 1086—1090 年在开封建成“水运仪象台”。仪象台上的浑仪附有窥管,能够相当准确地跟踪天体的运行,“使它自动地保持在窥管的视场中”。这种仪象台的动力装置中就利用了“从定水位漏壶中流出的水,并由擒纵器(天关、天锁)加以控制”。但比较自觉运用反馈原理设计并成功应用的是英国的瓦特于 1788 年发明的蒸汽机用的离心式飞锤调速器。后来,英国学者麦克斯韦于 1868 年发表了《论调速器》一文,对它的稳定性进行了分析,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研究。1875 年英国的劳斯和 1895 年德国的赫尔维茨先后提出了根据代数方程系数判别系

统稳定性的准则。1892年俄国学者李雅普诺夫出版了专著《论运动稳定性的一般问题》，提出了用李雅普诺夫函数(一种能量函数)的正定性及其导数的负定性判别系统稳定性的准则，从而建立了动力学系统的一般稳定性理论。

20世纪20年代电子技术的迅速发展，促进了信息处理和控制系统技术及其理论的发展。马克斯威尔对装有调速器的蒸汽机系统动态特性的分析、马诺斯基对船舶驾驶控制的研究都是控制系统理论的开拓性工作。1932年美籍瑞典科学家奈奎斯特对单回路反馈系统的研究结果表明，反馈控制即使在对系统情况知之不多的条件下也可以得到较好的性能，由此提出了根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则，即奈奎斯特判据。1938年，前苏联学者米哈依洛夫提出用图解分析方法判别系统稳定性的准则，把奈奎斯特判据推广到条件稳定和开环不稳定系统的一般情况。

20世纪40年代，美国著名科学家维纳对控制系统理论做出了创造性的贡献。1948年维纳出版了专著《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》，系统地论述了控制系统理论的一般原理和方法，推广了反馈的概念，为控制理论的发展奠定了基础。该书的出版标志控制学科的诞生，他的控制论概念提供了一个可以把控制问题和通信问题统一考虑的框架。他同时也发展了在有噪声的情况下信号的滤波、预报和平滑的方法。其后的研究又利用了当时刚提出的平稳随机过程，最后建立了信息的“伯德-申农”概念。

1945年，美国的伯德出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书，提出了频率响应分析方法，即简便而实用的“伯德图”法。1948年埃文斯提出了直观而简便的图解分析法——根轨迹法，在控制系统工程上得到了广泛应用。

这一时期，经典控制理论主要是解决单变量控制系统的分析与设计，研究的对象主要是线性定常系统。它以拉氏变换为数学工具，采用以传递函数、频率特性、根轨迹等为基础的经典频域方法研究系统。对于非线性系统，除了线性化及渐近展开计算以外，主要采用相平面分析和谐波平衡法(描述函数法)研究。

经典控制理论能够较好地解决单输入单输出反馈控制系统的问题，但它具有明显的局限性，突出的局限性是难以有效地应用于时变系统和多变量系统，也难以揭示系统更为深刻的特性。

20世纪50年代后期到60年代初期是控制系统理论发展的转折时期。这个时期由于计算机技术、航空航天技术的迅速发展，控制系统理论有了重大的突破和创新。它所研究的对象不再局限于单变量的、线性的、定常的、连续的系统，而扩展为多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。现代控制理论以线性代数和微分方程为主要数学工具，以状态空间法为基础，分析和设计控制系统。

哈尔德的序贯分析和贝尔曼的动态规划是转折时期的开端。1956年，美国的贝尔曼发表了《动态规划理论在控制过程中的应用》一文，提出了寻求最优控制的“动态规划”法。1958年，美籍匈牙利人卡尔曼提出递推估计的自动优化控制原理，奠定了自校正控制器的基础。1960年，他发表了《控制系统的一般理论》等论文，引入状态空间法分析系统，提

出可控性、可观性、最优调节器和卡尔曼滤波等概念。两年后,卡尔曼等人又提出最优控制反馈问题,并得到若干有关鲁棒性的结果。这些理论受到最优统计决策和资源分配中的序贯规划问题研究的激发。它们在概念上的贡献是考虑一大类以初始状态参数化的动态优化问题。这个理论的中心问题是建立最优性能的动态规划方法,从它的解就可以确定最优反馈控制规律。与此同时,优化领域中另一个长期被忽视的强调不等式约束的线性和非线性规划也开始得到发展,从而构建了现代控制理论的框架。

在现代控制理论发展的同一时期,与现代控制理论密切相关的科学也同时发展起来。

1954年,我国著名科学家钱学森在美国出版《工程控制论》一书,书中所阐明的基本理论和观点奠定了工程控制论的基础。

1960年,在第一届国际自动控制联合会 IFAC 世界大会上,我国学者涂序彦提出了多变量协调控制理论。

1961年,苏联的庞特里亚金的《最优过程的数学理论》一书正式出版,证明了极大值原理,使得最优控制理论得到很大发展。极大值原理的最大贡献是20世纪50~60年代对于大量轨迹优化数值计算方法的研究的推进,其研究成果是许多空间载运器的成功的设计,其中包括阿波罗计划和宇航飞行计划。

1967年,瑞典学者阿斯特勒姆提出最小二乘辨识,解决了线性定常系统的参数估计问题和定阶方法,他和法国的朗道教授等人在自适应控制理论和应用方面做出了贡献。

1970年,英国学者罗森布罗克等人提出多变量频域控制理论,丰富了现代控制理论领域。

从20世纪60年代末开始,控制系统理论更进一步地进入了一个多样化发展的时期。它不仅涉及系统辨识和建模、统计估计和滤波、最优控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制及控制系统 CAD 等理论和方法。同时,它在与社会经济、环境生态、组织管理等决策活动,与生物医学中诊断及控制,与信号处理、软计算等邻近学科相交叉中又形成了许多新的研究分支。

20世纪70年代以来形成的大系统理论主要解决大型工程和社会经济系统中信息处理、可靠性控制等综合优化的设计问题。由于应用范围涉及越来越复杂的工程系统和社会、经济、管理等非工程的人类活动系统,原有的理论方法遇到了本质困难,大系统理论的发展逐渐转向“复杂系统”概念。钱学森把系统的研究拓广到“开放的复杂巨系统”范畴,于1990年提出“从定性到定量的综合集成法”的处理开放的复杂巨系统的研究方法。1994年涂序彦出版了《大系统控制论》一书,在大系统理论与人工智能相结合的基础上,建立了“大系统论”的新分支。

智能控制的发展始于20世纪60年代,它是一种能更好地模仿人类智能的、非传统的控制法。它突破了传统的控制中对象有明确的数学描述和控制目标是可以数量化的限制。它所采用的理论方法主要来自控制系统理论、人工智能、模糊集和神经网络以及运筹学等科分支,主要代表人物是美国扎德,他于1965年创立了模糊集合论,为解决复杂系统

的控制提供了新的数学工具。1968年,美籍华人傅京孙和桑托斯等人提出用模糊神经元概念研究复杂大系统行为,正式提出了智能控制就是人工智能技术与控制理论的交叉,并创立了人机交互式分级递阶智能控制的系统结构。

控制系统理论和社会生产及科学技术的发展密切相关,在近代得到极其迅速的发展。它不仅已经成功地运用并渗透到工农业生产、科学技术、军事、生物医学、社会经济及人类生活等诸多领域,而且在此过程中控制系统理论也发展成为一门内涵极为丰富的新兴学科。

随着经济和科学技术的迅猛发展,控制系统理论与许多学科相互交叉、渗透融合的趋势在进一步加强,控制系统理论的应用范围在不断扩大,控制系统理论在认识事物运动的客观规律和改造世界中将得到进一步的发展和完善。

2. 控制系统理论的基本内容

控制系统理论包括传统控制理论(常被称为经典控制理论)与状态空间控制理论(常被称为现代控制理论),两者的数学描述工具,如微分方程、复变函数、矩阵和向量有内在联系,但解决工程技术问题时,在历史发展过程中形成了两套系统方法。本教材主要讨论状态空间控制理论,但也吸收了传统控制理论描述动力学系统的一些方法,使读者对控制系统理论有一个统一的了解。

状态空间控制理论是对系统的状态进行分析和综合及建模的理论,其主要内容如下。

(1) 线性系统理论

线性系统理论是状态空间控制理论中最基本的组成部分,也是现代控制理论中理论最完善、技术上较成熟、应用也最广泛的部分。它主要研究线性系统在输入作用下状态运动过程的规律和改变这些规律的可能性与措施;建立和揭示系统的结构性质、动态行为和性能之间的关系。系统的状态不但描述了系统的输入输出关系,而且描述了系统内部状态随时间变化的关系。线性系统理论主要包括系统的状态空间描述、可控性、可观测性和稳定性分析,状态反馈、状态观测器及补偿的理论和设计方法等内容,这些方法研究由状态变量构成的状态空间中对状态轨线的作用。

(2) 最优控制与鲁棒控制

最优控制与鲁棒控制是现代控制理论中的重要组成部分。最优控制问题是在给定限制条件和性能指标(即评价函数或目标函数)下,寻求一个最优控制向量使系统性能指标满足某种最佳准则或使某一指标泛函达到最优值的控制规律问题。解决最优控制问题的方法有变分法、庞特里亚金的极大值原理和贝尔曼的动态规划法,用各种“广义”梯度描述的优化算法,以及动态规划的哈密顿-雅可比-贝尔曼方程求解的新方法正在形成,并用于非线性系统的优化控制。

鲁棒控制理论研究控制系统中的参数发生摄动时使系统保持正常工作的特性和属性的控制规律。

在实际工程中要想得到精确的数学模型是一件困难的事情,因此我们在建立控制系