

清华大学机械工程基础系列教材

现代控制理论与方法概论

Introduction to Modern
Control Theory and Method

● 董景新 吴秋平 编著

● Dong Jingxin Wu Qiuping

清华大学出版社

100

2019 中国环境科学大会论文集
Environmental Science

清华大学机械工程基础系列教材

现代控制理论与方法概论

Introduction to Modern Control Theory and Method

董景新 吴秋平 编著

Dong Jingxin Wu Qiuping

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍现代控制理论和方法的基本内容。全书分4大部分共23章。第1部分(第1~7章)介绍现代控制理论的基础知识,主要内容包括概述、控制系统的状态空间法、线性控制系统状态方程的解、线性系统的能控性和能观测性、系统的稳定性、线性控制系统的综合以及控制理论中需要用到的最优估计理论基础知识。第2部分(第8~14章)介绍最优控制方面的内容,包括最优控制概述、变分法求最优控制、极大值原理、动态规划法、时间最优控制、线性二次型最优控制、线性系统的随机最优控制。第3部分(第15~17章)介绍自适应控制方面的内容,包括自适应控制概述、模型参考自适应控制、自校正控制。第4部分(第18~23章)介绍智能控制方面的内容,包括智能控制概述、模糊控制、神经网络控制、混沌控制、遗传算法以及第23章的倒立摆控制实例。

本书主要面向机械类、仪器类专业背景的高年级本科生和研究生,可作为《控制工程基础(第二版)》(董景新等编著,清华大学出版社2003年出版)的后续教材,也可供相关领域的科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论与方法概论 / 董景新,吴秋平编著. —北京:清华大学出版社,2007.8
(清华大学机械工程基础系列教材)
ISBN 978-7-302-15418-1

I. 现… II. ①董… ②吴… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 ②控制方法—高等学校—教材 IV. O231

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第085801号

责任编辑:张秋玲

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:30 字 数:615千字

版 次:2007年8月第1版 印 次:2007年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:45.00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:020956-01

前言

随着机电一体化技术的迅猛发展,面对高技术机电产品在市场上的激烈竞争,原先对控制技术涉足较少的机械类、仪器类学科对控制技术的需求空前增长。日新月异的高技术创新型机电产品翻新越来越快,经典控制技术已经难以完全胜任,最优控制、自适应控制、智能控制等现代控制技术在机械类、仪器类学科的引入是历史的必然。本书试图面对机械类、仪器类在本科阶段已经学过经典控制理论的研究生、本科高年级学生和工程技术人员介绍现代控制理论和方法的基本内容。本教材着重于概念的建立和理解,不追求严格的定理理论证明,同时书中力图引入一些例题帮助读者理解概念和方法,侧重于应用。

本书分4大部分共23章。第1部分共7章,介绍现代控制理论的基础知识,主要内容包括概述、控制系统的状态空间法、线性控制系统状态方程的解、线性系统的能控性和能观测性、系统的稳定性、线性控制系统的综合、控制理论中需要用到的最优估计理论基础知识。第2部分共7章,介绍最优控制方面的内容,包括最优控制概述、变分法求最优控制、极大值原理、动态规划法、时间最优控制、线性二次型最优控制、线性系统的随机最优控制。第3部分共3章,介绍自适应控制方面的内容,包括概述、模型参考自适应控制、自校正控制。第4部分共6章,介绍智能控制方面的内容,前5章包括概述、模糊控制、神经网络控制、混沌控制、遗传算法。最后一章介绍倒立摆控制实例。为了更好地理解和掌握本书的内容,除各章正文中的例题外,在各章后均选编了有关习题,书后还有部分习题的参考答案,以便读者自学。

本教材第7章最优估计理论基础和第19章模糊控制由吴秋平副教授编写,其他章节由董景新教授编写,全书由董景新教授统稿,第23章的实例主要由研究生李恺提供。

现代控制理论和技术领域广阔,内容浩瀚,并处于不断发展中。在编写本书的过程

II 现代控制理论与方法概论

中,笔者深感欲写好这类教材,不仅需要教学经验,同时必须具备控制理论的功底,而且还需要在机械和控制技术方面丰富的实践经验。笔者自感缺憾很多,错误疏漏在所难免,恳请读者不吝赐教。

作 者

2007年3月于清华大学

目录



第1部分 基础知识

1	概述	3
2	控制系统的状态空间法	6
	2.1 状态变量及状态空间表达	6
	2.2 状态空间表达式的建立	11
	2.3 状态矢量的线性变换	30
	习题	41
3	线性控制系统状态方程的解	43
	3.1 线性连续定常系统状态方程的解	43
	3.2 线性连续时变系统状态方程的解	47
	3.3 线性离散系统状态方程的解	49
	3.4 瞬态响应的计算机仿真方法	53
	习题	55
4	线性系统的能控性和能观测性	59
	4.1 线性系统的能控性	60
	4.2 线性系统的能观测性	69
	4.3 系统结构的分解	74
	习题	97

5	系统的稳定性	104
5.1	稳定性的定义	104
5.2	李雅普诺夫稳定性方法	105
5.3	线性定常连续系统渐近稳定的判别	107
5.4	线性时变连续系统渐近稳定的判别	109
5.5	线性定常离散系统渐近稳定的判别	110
5.6	线性时变离散系统渐近稳定的判别	110
5.7	非线性系统的稳定性分析	111
5.8	波波夫超稳定性方法简介	114
	习题	117
6	线性控制系统的综合	120
6.1	系统构成及特性	120
6.2	极点配置	125
6.3	状态重构问题	126
6.4	系统镇定问题	131
6.5	系统解耦问题	132
	习题	135
7	最优估计理论基础	140
7.1	估计问题的提法和估计准则	140
7.2	估计理论的发展	141
7.3	最小二乘估计	143
7.4	最小方差估计	147
7.5	线性最小方差估计	149
7.6	卡尔曼滤波	152
7.7	广义卡尔曼滤波	157
7.8	几种最优估计的优缺点比较	165
	习题	166

第 2 部分 最优控制

8	最优控制概述	171
9	变分法求最优控制	174
9.1	基本概念	174

9.2	用变分法求解最优问题	176
9.3	有约束条件的泛函极值	179
9.4	变分法求最优控制	180
	习题	189
10	极大值原理	191
10.1	连续系统的极大值原理	192
10.2	离散系统的极大值原理	195
	习题	197
11	动态规划法	199
11.1	离散系统的动态规划法	199
11.2	连续系统的动态规划法	203
	习题	207
12	时间最优控制	209
	习题	216
13	线性二次型最优控制	218
13.1	状态调节器	218
13.2	输出调节器	226
13.3	离散系统情况	229
13.4	跟踪问题(随动问题)	229
	习题	233
14	线性系统的随机最优控制	234
14.1	系统状态对随机作用的响应	234
14.2	随机状态反馈调节器	236
14.3	随机输出反馈调节器	239
14.4	随机跟踪问题	244
14.5	离散系统随机最优控制	250
	习题	255

第3部分 自适应控制

15	自适应控制概述	259
	习题	261
16	模型参考自适应控制	262
16.1	模型参考自适应控制系统的主要结构形式	262
16.2	局部参数最优化设计方法	264
16.3	基于稳定性理论的设计方法	266
16.4	不同模型参考自适应系统设计方法的比较	274
	习题	276
17	自校正控制	278
17.1	最小方差自校正控制	278
17.2	广义最小方差自校正控制	283
17.3	极点配置自校正控制	291
17.4	自校正PID控制	297
17.5	自适应控制系统的鲁棒性	298
	习题	299

第4部分 智能控制

18	智能控制概述	303
	习题	306
19	模糊控制	307
19.1	模糊控制的产生与发展	307
19.2	模糊数学基础知识	310
19.3	模糊控制系统与模糊控制器概论	325
19.4	基本模糊控制器设计	340
19.5	MATLAB模糊逻辑工具箱	350
	习题	353
20	神经网络控制	354
20.1	神经网络的产生和发展	354

20.2	人工神经元模型	357
20.3	网络结构及工作方式	362
20.4	神经网络的学习方法	364
20.5	BP 算法	366
20.6	基于神经网络的模糊自适应控制	373
	习题	375
21	混沌控制	376
21.1	混沌概念的形成	376
21.2	混沌的特性	377
21.3	混沌分析方法	380
21.4	混沌控制	382
21.5	混沌系统的神经网络建模辨识结构	385
	习题	386
22	遗传算法	387
22.1	遗传算法的产生和发展	387
22.2	遗传算法中的基本概念和术语	389
22.3	遗传算法的基本设计步骤	391
22.4	遗传算法的基本操作	394
22.5	遗传算法的有关理论	399
22.6	遗传算法的解题过程	403
22.7	MATLAB 遗传算法工具箱	405
22.8	模糊技术、神经网络和遗传算法的结合	407
	习题	408
23	倒立摆控制实例	409
23.1	系统构成和控制方案	409
23.2	倒立摆系统建模、仿真与分析	412
23.3	系统软件设计与调试	443
23.4	系统调试与实验结果	446
23.5	倒立摆的模糊神经网络自适应控制	448
	部分习题参考答案	452
	主要参考文献	466



第 1 部分

基础知识





概 述

自 20 世纪 40 年代末维纳(N. Wiener)创立控制理论以来,短短的几十年控制理论已经渗透到各个领域,并伴随着其他科学技术的发展,极大地改变了整个世界。控制理论自身也在创造人类文明中不断向前发展。

机电工业是我国最重要的支柱产业之一,而传统的机电产品正在向机电一体化方向发展。我国科技界普遍认为,机电一体化是用系统工程学的观点和方法,研究在机电系统产品中如何将机械、微机、信息处理和自动控制技术集成综合应用,以求达到最佳的融合。

机电一体化产品或系统的显著特点是系统控制自动化。机电控制型产品技术含量高,附加值大,在市场上具有很强的竞争优势,形成机电一体化产品的主流。当前国际上机电结合型产品,诸如典型的工业机器人、数控机床、自动导引车等都广泛地应用了控制理论;在高性能的产品中,包括航空航天产品甚至人们日常使用的照相机都已经越来越多地用到了最优控制、自适应控制和智能控制等现代控制理论。

表 1-1 概括了控制理论的历史发展进程。半个世纪以来,控制理论从主要依靠手工计算的经典控制理论发展到依赖电脑的现代控制理论,发展了最优控制、自适应控制、智能控制。智能控制中,学习控制技术从简单的参数学习向更为复杂的结构学习、环境学习和复杂对象学习的方向发展,并发展了神经网络、模糊逻辑、进化算法、专家系统、混沌控制、鲁棒控制与 H_∞控制等技术。同时,还发展了计算机辅助控制系统设计(computer aided control system design, CACSD)工具,使控制理论在工程上的应用更加方便。

各种控制理论都有其发展的历史背景及相互联系,同时也都有其局限和不足。例如,经典控制理论对线性定常系统有完善的控制理论和良好的控制效果,但对多输入-多输出、时变系统、非线性系统难以胜任;最优控制理论建立在受控对象严格而准确的数学模型基础上,否则控制效果会大打折扣,而准确的数学模型在工程上是很难实际得到的;模糊控制需要提高稳态精度,寻找一般性稳态分析和系统化设计方法;神经网络控制需要加速算法的收敛速度,提高神经网络的适应能力。各种控制理论分支还需要互相借鉴、不断发展。

表 1-1 控制理论的发展

年代	控制理论	数学基础	特点
1946—1955	反馈理论 伺服控制理论	Laplace 变换 传递函数 过渡过程理论 稳定性理论	经典控制理论(手工计算的局限); 着眼于系统的外部联系; 重点为单输入-单输出的线性定常系统 (连续系统和离散系统);
1955—1960	采样控制理论 非线性控制理论	z 变换 相平面理论 噪声和滤波理论	以传递函数为基础; 除时域分析外,以频率法、根轨迹法为 主要分析方法; 设计时常用试探法
1960—1965	状态空间理论 能控性和能观性理论 最优控制理论	矢量微分方程理论 矩阵理论 集合论 变分理论 极值搜索方法	现代控制理论(伴随计算机的发展); 多输入-多输出的时变系统(连续系统 和离散系统);
1965 年以后	自适应控制理论 自学习控制理论 随机控制理论 智能控制理论 神经网络控制理论 模糊控制理论 混沌学 遗传算法 H_{∞} 空间理论 机器人控制理论 仿生学理论	随机过程理论 数理规划理论 运筹学 系统工程理论 图像识别理论 复值函数理论	以状态空间理论为基础; 以时域分析为主; 着眼于系统的状态及其内部联系(哲学 上的突破); 交叉学科的特点; 带有生物的特征; 设计时采用严格的数学规律

控制理论的发展需要增加控制理论体系的开放性,汲取其他学科的先进成果。为了满足人们更高的控制要求,控制理论需要对当代多种前沿学科、多种先进技术和科学方法高度综合集成。例如,已有初步研究的混沌控制、可拓控制以及免疫优化算法等。

控制理论的发展需要开拓新视角、广义模型化、多目标优化(例如仿人智能控制器),以取得理想的控制效果。另外,利用数学模型和知识模型集成的广义模型进行定量与定性相结合的系统分析,已引起不少学者的注意。对一个动态系统设计控制器时,通常有多个相互矛盾的目标需要考虑,如何分析和协调这些目标,探索多目标优化的数字化解决方

式以达到最优化设计,成为近年来的重要课题之一。

混合式控制理论也成为控制理论发展的一个热点。以一种控制理论为主,结合其他控制理论优点构成复合式控制往往可以取得最佳的控制效果。比如,模糊控制与 PID 控制相结合的模糊 PID 控制,与自适应控制相结合的模糊自适应控制,与神经网络相结合的模糊神经网络控制,以及鲁棒模糊控制、鲁棒神经网络控制、专家自适应 PID 控制等。这些复合式控制都显示出旺盛的生命力,代表了一种发展趋势。除了上述复合控制外,多模态控制、多模型自适应控制也是一种集多种控制优点于一身的混合控制。多模态控制指多个控制器存在于同一控制系统中,在适当时候切换工作状态的控制器;多模型自适应控制利用多模型来逼近系统的动态性能,以期能对复杂系统达到更好的控制精度、跟踪速度和稳定性。

控制理论在发展过程中一方面走向高度分化,不断产生新的理论分支;另一方面走向高度综合,产生了多模态控制、多模型自适应控制等理论。从单项技术、复合式技术到技术群,从基本的反馈到自适应、自学习、自组织结构,控制理论取得了很大的发展。

控制问题可归纳为以下 4 类:

(1) 确定性控制问题。在确定性控制问题中,系统和扰动的模型、参数及初始条件均是确定的、已知的。其最优控制是综合一个控制过程或序列,使某一指定的性能指标函数达到最小。

(2) 随机控制问题。在随机控制问题中,系统模型参数及初始条件是确定的、已知的,而扰动变量及其初始状态是统计特性已知的随机序列。其最优控制是综合一个控制过程或序列,使某一指定的性能指标函数达到最小。

(3) 自适应控制问题。在自适应控制问题中,系统模型参数及初始条件是不完全确定的,扰动变量及其初始状态统计特性也是未知的。其最优控制是综合一个控制过程或序列,使某一指定的性能指标函数达到最小。

(4) 智能控制问题。前 3 类控制问题对象的结构是已知的,而在智能控制问题中,系统结构和参数均未知,很难建立有效的数学模型,现阶段借鉴人工智能特点,采用专家系统、模糊控制、人工神经网络控制等方法解决。

本教材在学习了经典控制理论的基础上,采用现代控制理论方法,介绍了各类控制问题的主要内容。

2

控制系统的状态空间法

本章首先通过一些简单的机电系统数学模型的列写,选定并得到系统状态变量及状态空间表达的基本形式。然后,分别介绍如何通过描述系统的微分方程、传递函数、方块图,以及直接从系统机理出发建立系统状态空间的表达式。同时介绍控制系统中经常用到的状态矢量的线性变换。

2.1 状态变量及状态空间表达

首先看描述以下机电系统数学模型的例子。

例 2-1 在图 2-1 所示系统中, R 为电阻, L 为电感, C 为电容, $i_L(t)$ 为流过电感的电流, $u_C(t)$ 为电容两端的电压, $u_i(t)$ 和 $u_o(t)$ 分别为输入和输出电压。

解 根据基尔霍夫定律,该系统可表示为如下微分方程组:

$$\begin{cases} u_i(t) = Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + u_C(t) \\ i_L(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \\ u_o(t) = u_C(t) \end{cases}$$

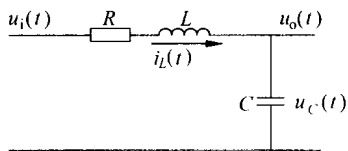


图 2-1 电路网络(一)

即

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_L(t) - \frac{1}{L}u_C(t) + \frac{1}{L}u_i(t) \\ \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{1}{C}i_L(t) \\ u_o(t) = u_C(t) \end{cases}$$

也可表示为