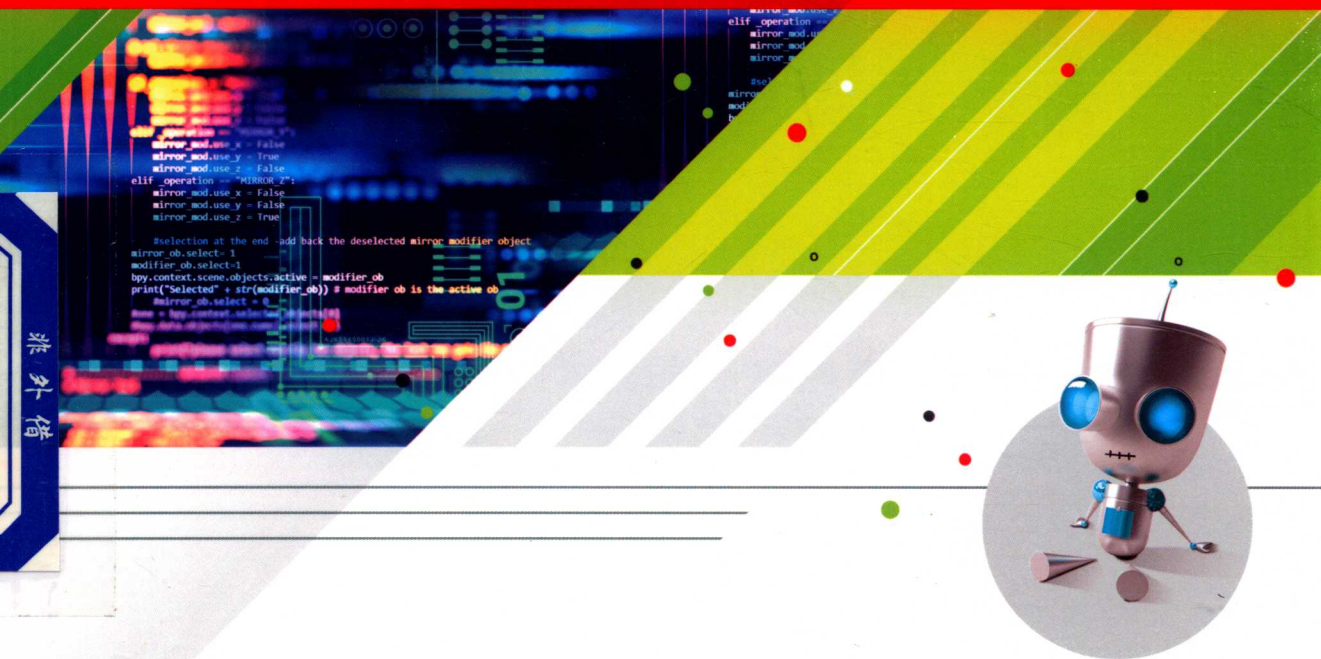




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材
电气工程、自动化专业规划教材

现代控制理论 (第3版)

◆ 王宏华 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



电气工程、自动化专业规划教材

“十三五”江苏省高等学校重点教材(教材编号:2016-1-095)

现代控制理论

(第3版)

王宏华 主 编

王时胜 副主编

高强 李智 张燕 安连祥 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从工程应用角度出发,以线性系统理论和最优控制为主线,介绍现代控制理论的基本方法。其中,线性系统理论部分主要阐述状态空间分析法和综合法的基本内容,包括动态系统的状态空间描述、动态系统的定量分析(状态方程的解)和定性分析(能控性、能观测性、李亚普诺夫稳定性)、动态系统的综合(状态反馈与状态观测器设计);最优控制部分在介绍解决最优问题3种基本方法(变分法、极小值原理、动态规划法)的基础上,阐述两类典型最优反馈系统的设计(线性二次型最优控制、最小时间控制)。本书在保证理论知识体系结构完整的前提下,融入MATLAB在线性系统理论和最优控制中的应用。

本书注重现代控制理论的工程应用背景和对应用状态空间方法解决实际工程问题能力的培养,力求结合物理概念阐述重要概念和方法,通过工程应用举例促进理论联系实际。本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化等专业本科生的教材,也可供相关专业的研究生及相关领域的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论 / 王宏华主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2018.9

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-35034-4

I. ①现… II. ①王… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 207968 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

装 订:北京盛通印刷股份有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:525 千字

版 次:2006 年 8 月第 1 版

2018 年 9 月第 3 版

印 次:2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价:46.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254528,lingyi@phei.com.cn。

第3版前言

为了适应现代控制理论教学改革需要和 21 世纪对人才培养的要求,避免状态空间方法的工程背景被烦琐证明和大量矩阵运算所掩盖,本书第 1 版和第 2 版已做了一定的努力和尝试,基本形成了结构清晰,注重物理概念和工程应用背景,融入 MATLAB 应用,例题、习题丰富,利于自学等特色,并受到了读者的肯定。本次再版仍以线性系统理论和最优控制为主线,在保持第 2 版框架体系、主要内容及基本特色的基础上,主要进行了如下修改和补充:

(1) 充实李亚普诺夫直接法应用举例,增加了基于李亚普诺夫直接法的线性系统参数最优设计、估计线性定常系统稳定自由运动的快速性;

(2) 增加了单倒立摆全维状态观测器设计举例、直流调速系统负载降维观测器设计举例;

(3) 以新增例题的方式,适当充实状态反馈解耦控制的内容;

(4) 以单倒立摆的二次型最优控制设计实例替换原版中的最优控制理论工程应用举例之二;

(5) 统一全书的变量符号和图形格式,增加了常用符号表;

(6) 增加了部分习题和上机实验题;

(7) 删除了部分数学证明,修改了部分内容的阐述方式,力求结合工程背景和物理概念,由浅入深地阐述状态空间控制理论。

本书前两版由王宏华任主编,王时胜任副主编,高强、李智、张燕、安连祥参编。此次再版工作主要由王宏华结合教学实践的经验和体会完成。

王执铨教授担任本书第 1 版的主审,提出了许多宝贵的意见。本书在编写过程中,参阅了国内外专家、学者的教材、著作,本次再版也是在电子工业出版社凌毅编辑的促进与支持下才顺利与读者见面的,谨在此一并致谢。

本书提供配套的电子课件及相关仿真程序,可登录电子工业出版社的华信教育资源网:www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

对于本版中存在的错误和不妥之处,恳请读者批评指正。作者的电子邮箱为:wanghonghua@263.net。

王宏华
2018 年 8 月

常用符号表

符号	含 义
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \cdots$	加粗斜体字符表示矩阵或向量
$B, u, x, y, \cdots$	斜体字符表示标量
$\mathbf{0}$	表示零向量或零矩阵
$\mathbf{I}(\mathbf{I}_n)$	单位矩阵($n \times n$ 单位矩阵)
$\ \mathbf{x}\ $	向量 $\mathbf{x}$ 的范数, 未说明者一般为欧几里德范数
$\dot{\mathbf{x}}, \dot{x}$	向量 $\mathbf{x}$ 的导数, 标量 x 的导数
$\mathbf{A}^T, \mathbf{x}^T$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置, 向量 $\mathbf{x}$ 的转置
$\mathbf{A}^{-1}$	方阵 $\mathbf{A}$ 的逆矩阵
$ \mathbf{A} , \det \mathbf{A}$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的行列式
$\text{rank} \mathbf{A}$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩
$\text{adj} \mathbf{A}$	方阵 $\mathbf{A}$ 的伴随矩阵
Re	实部
Im	虚部
$\in$	属于
$\forall$	全称量词, 意思为“任取”、“任意”、“所有”
R^n	n 维实元素列向量的全体
$\mathbb{C}$	复数域
$W(s), \mathbf{W}(s)$	(标量)传递函数, 传递函数矩阵或传递函数向量
$W(z)$	脉冲传递函数
$\mathbf{T}$	非奇异变换矩阵
$\mathbf{T}_v$	模态矩阵
$\mathbf{T}_{cc}, \mathbf{T}_{cd}$	能控标准型变换阵, 能控性分解变换阵
$\mathbf{T}_{oc}, \mathbf{T}_{od}$	能观测标准型变换阵, 能观测性分解变换阵
$\mathbf{Q}_c, \mathbf{Q}_{ck}$	线性定常连续系统能控性判别阵, 线性定常离散系统能控性判别阵
$\mathbf{Q}_o, \mathbf{Q}_{ok}$	线性定常连续系统能观测性判别阵, 线性定常离散系统能观测性判别阵
$\mathbf{P} > \mathbf{0}, \mathbf{P} \geqslant \mathbf{0}, \mathbf{P} < \mathbf{0}, \mathbf{P} \leqslant \mathbf{0}$	实对称矩阵 $\mathbf{P}$ 正定, 半正定, 负定, 半负定
$\hat{\mathbf{x}}$	向量 $\mathbf{x}$ 的估计值
SISO, MIMO	单输入单输出, 多输入多输出
t, T	时间, 采样周期

目 录

绪论	1
0.1 自动控制理论的发展与现状	1
0.2 现代控制理论的研究范围	3
0.3 经典控制理论与现代控制理论的联系与比较	4
0.4 MATLAB 控制系统工具箱简介	5
0.5 本书综述	6
第 1 章 动态系统的状态空间描述	7
1.1 引言	7
1.2 动态系统的状态空间模型	7
1.2.1 状态空间的基本概念	7
1.2.2 动态系统状态空间表达式的一般形式	14
1.2.3 状态空间模型的图示	17
1.2.4 由系统机理建立状态空间模型示例	18
1.3 动态系统数学模型变换	23
1.3.1 状态向量的线性变换与状态空间表达式标准型	23
1.3.2 系统的高阶微分方程描述化为状态空间描述	30
1.3.3 系统的传递函数描述化为状态空间描述	34
1.3.4 系统的传递函数阵	43
1.4 离散系统的状态空间描述	48
1.4.1 离散系统的状态空间表达式	49
1.4.2 差分方程化为状态空间表达式	49
1.4.3 由脉冲传递函数化为状态空间表达式	51
1.4.4 由离散系统状态空间表达式求脉冲传递函数矩阵	54
1.5 MATLAB 在系统数学模型变换中的应用	55
1.5.1 系统的模型	55
1.5.2 系统模型的转换	57
1.5.3 系统的线性非奇异变换与标准型状态空间表达式	59
小结	61
思考题与习题 1	62
上机实验题 1	65
第 2 章 线性系统动态分析	67
2.1 引言	67
2.2 线性定常齐次状态方程的解	67
2.3 状态转移矩阵的性质及其计算方法	69
2.3.1 线性定常系统状态转移矩阵的运算性质	69
2.3.2 线性定常系统状态转移矩阵的计算方法	70

2.4	线性定常非齐次状态方程的解	79
2.5	线性时变系统状态方程的解	81
2.5.1	线性时变系统状态转移矩阵的求解	82
2.5.2	线性时变系统状态转移矩阵的性质	84
2.5.3	线性时变非齐次状态方程的解	84
2.6	离散状态方程的解	87
2.6.1	递推法求解线性离散状态方程	87
2.6.2	Z变换法求解线性定常离散状态方程	89
2.7	连续状态方程的离散化	92
2.7.1	线性定常连续状态方程的离散化	93
2.7.2	线性时变连续状态方程的离散化	94
2.8	MATLAB在线性系统动态分析中的应用	98
2.8.1	应用 MATLAB 计算线性定常系统的矩阵指数(状态转移矩阵)	98
2.8.2	应用 MATLAB 求定常系统时间响应	99
2.8.3	应用 MATLAB 变连续状态空间模型为离散状态空间模型	105
	小结	106
	思考题与习题 2	106
	上机实验题 2	108
第 3 章	线性系统的能控性和能观测性分析	110
3.1	引言	110
3.2	能控性与能观测性的概念与示例	110
3.3	能控性和能观测性定义	112
3.3.1	能控性定义	112
3.3.2	能观测性定义	113
3.4	线性连续系统能控性判据	114
3.4.1	线性定常连续系统能控性判据	114
3.4.2	线性定常连续系统输出能控性	122
3.4.3	线性时变连续系统能控性判据	123
3.5	线性连续系统能观测性判据	125
3.5.1	线性定常连续系统能观测性判据	125
3.5.2	线性时变连续系统能观测性判据	131
3.6	线性离散系统的能控性与能观测性	133
3.6.1	线性离散系统能控性定义	133
3.6.2	线性定常离散系统能控性的秩判据	133
3.6.3	线性离散系统能观测性定义	135
3.6.4	线性定常离散系统能观测性的秩判据	135
3.6.5	离散化系统能控性、能观测性与采样周期的关系	137
3.7	系统能控性和能观测性的对偶原理	138
3.7.1	线性系统的对偶关系	138
3.7.2	对偶原理	139
3.8	线性系统的结构分解	140

3.8.1	化为约当标准型的分解	140
3.8.2	按能控性和能观测性分解	141
3.9	能控性和能观测性与传递函数(阵)的关系	150
3.10	能控标准型与能观测标准型	154
3.10.1	单输入系统的能控标准型	154
3.10.2	单输出系统的能观测标准型	158
3.11	传递函数矩阵的状态空间实现	161
3.11.1	实现和最小实现概述	162
3.11.2	传递函数矩阵的能控标准型实现和能观测标准型实现	163
3.11.3	传递函数矩阵的最小实现	163
3.12	MATLAB 在能控性和能观测性分析中的应用	168
3.12.1	系统能控、能观测性分析的 MATLAB 函数	168
3.12.2	用 MATLAB 进行系统能控性和能观测性分析举例	168
	小结	169
	思考题与习题 3	170
	上机实验题 3	173
第 4 章	李亚普诺夫稳定性分析	175
4.1	引言	175
4.2	外部稳定性和内部稳定性	176
4.2.1	外部稳定性	176
4.2.2	内部稳定性	176
4.2.3	外部稳定性与内部稳定性的关系	177
4.3	李亚普诺夫稳定性的基本概念	178
4.3.1	平衡状态	178
4.3.2	范数	179
4.3.3	李亚普诺夫稳定性定义	180
4.4	李亚普诺夫稳定性定理	181
4.4.1	二次型函数及其定号性	181
4.4.2	李亚普诺夫第二法	183
4.5	线性定常系统李亚普诺夫稳定性分析	187
4.5.1	李亚普诺夫第一法(间接法)	187
4.5.2	李亚普诺夫第二法	187
4.6	线性时变系统李亚普诺夫函数的求法	191
4.6.1	线性时变连续系统	191
4.6.2	线性时变离散系统	192
4.7	非线性系统李亚普诺夫稳定性分析	192
4.7.1	李亚普诺夫第一法分析非线性系统的稳定性	192
4.7.2	李亚普诺夫第二法在非线性系统稳定性分析中的应用	193
4.8	李亚普诺夫直接法应用举例	197
4.8.1	线性系统校正	197
4.8.2	线性系统参数最优化设计	199

4.8.3	估计线性定常系统稳定自由运动的快速性	200
4.9	MATLAB 在系统稳定性分析中的应用	200
4.9.1	李亚普诺夫第一法	200
4.9.2	李亚普诺夫第二法	201
	小结	201
	思考题与习题 4	202
	上机实验题 4	204
第 5 章	状态反馈与状态观测器	205
5.1	引言	205
5.2	状态反馈与输出反馈	205
5.2.1	状态反馈	205
5.2.2	输出反馈	206
5.3	反馈控制对能控性与能观测性的影响	207
5.4	闭环系统极点配置	209
5.4.1	采用状态反馈配置闭环系统极点	210
5.4.2	采用线性非动态输出反馈至参考输入配置闭环系统极点	213
5.4.3	镇定问题	214
5.5	状态观测器	215
5.5.1	全维观测器的构造思想	215
5.5.2	闭环观测器极点配置	217
5.5.3	降维观测器	220
5.6	采用状态观测器的状态反馈系统	225
5.7	解耦控制	229
5.7.1	前馈补偿器解耦	230
5.7.2	输入变换与状态反馈相结合实现解耦控制	230
5.8	MATLAB 在闭环极点配置及状态观测器设计中的应用	234
5.8.1	用 MATLAB 求解闭环极点配置问题	234
5.8.2	用 MATLAB 设计状态观测器	235
5.8.3	基于 Simulink 的状态反馈系统仿真研究	235
5.9	线性控制系统理论的工程应用举例	236
5.9.1	稳态精度与跟踪问题	236
5.9.2	基于状态空间综合法的单倒立摆控制系统设计实例	238
5.9.3	基于状态空间综合法的直流电动机调速控制系统设计实例	243
	小结	247
	思考题与习题 5	248
	上机实验题 5	250
第 6 章	最优控制的基本理论及应用	253
6.1	引言	253
6.2	最优控制问题的提出及数学描述	253
6.2.1	最优控制问题实例	253
6.2.2	最优控制问题的数学描述	254

6.3 变分法 256

6.3.1 变分法的基本概念 256

6.3.2 用变分法求解无约束条件的泛函极值问题 258

6.3.3 有约束条件的泛函极值问题 261

6.4 极小值原理 265

6.5 动态规划法 268

6.5.1 最优性原理 268

6.5.2 离散系统的动态规划 270

6.5.3 连续系统的动态规划 271

6.6 线性二次型最优调节器 273

6.6.1 线性二次型最优控制问题的提法 273

6.6.2 有限时间的线性最优调节器 274

6.6.3 定常线性最优调节器 276

6.6.4 输出调节器 279

6.6.5 非零给定点调节器 281

6.6.6 最优跟踪问题 282

6.7 最小时间控制 284

6.8 应用 MATLAB 解线性二次型最优控制问题 288

6.9 最优控制理论的工程应用举例 290

小结 293

思考题与习题 6 293

上机实验题 6 296

参考文献 298

绪 论

0.1 自动控制理论的发展与现状

自动控制系统是无须人直接参与而借助控制装置使被控对象的被控量等于给定量或按设定规律自动运行的系统。自动控制理论是基于数学、物理学等基础科学,研究自动控制系统建模、分析、综合共同规律的技术科学。其研究的主要问题是控制过程的精度,即如何分析、协调系统被控量在控制过程中跟踪给定量的“稳”、“快”、“准”这3项相互牵制的性能。

尽管最早的自动控制可追溯到公元前,如我国古代的漏壶指南车、希腊人公元前300年使用的浮子控制器等,但自动控制的大量应用却始于第一次工业革命时期。1788年,瓦特(J. Watt)使用的自动调节进气阀门开度以控制蒸汽机转速的离心式(飞球式)调速器是闭环自动控制装置在工程实践中应用的第一项重大成果。以此为背景,物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)于1868年在“论调节器”这篇论文中首次对反馈控制系统的稳定性进行系统分析,指出系统稳定性取决于系统微分方程对应的特征方程的根具有负实部,该论文开辟了用数学方法研究控制系统的途径,是控制理论早期发展的奠基之作。随后,自动控制理论开始形成并随着控制工程实践的需要不断发展。纵观自动控制理论的发展历程,根据研究方法和思路的不同,一般可分为如下3个阶段。

1. 控制理论发展初期及经典控制理论阶段

1868年麦克斯韦从理论上揭示了反馈系统的稳定性与系统微分方程对应的特征方程的特征根在复平面上分布位置的关系;1877年劳斯(E. J. Routh)、1895年赫尔维茨(A. Hurwitz)分别研究了系统的稳定性与特征方程系数的关系,并分别独立给出了高阶线性系统稳定性的代数判据,这就是至今仍得到应用的劳斯判据和赫尔维茨判据。针对非线性和时变系统稳定性问题,1892年,李亚普诺夫(A. M. Lyapunov)提出用可模拟系统能量的假想标量函数——“李亚普诺夫函数”的正定性及其导数的负定性直接判别系统稳定性的判据,建立了动力学系统稳定性的一般理论。

1927年,为了减小电子管放大器的非线性引起的信号失真,布莱克(H. S. Black)提出了反馈放大器,“反馈”这一自动控制的基本原理和基本方法开始建立;但提高反馈系统的开环增益以减小误差(失真)与系统稳定性要求降低开环增益是矛盾的,这就涉及反馈系统的稳定性问题。当动态特征很复杂时,难以用基于时域的劳斯-赫尔维茨判据解决。1932年,奈奎斯特(H. Nyquist)提出负反馈系统稳定性频(率)域判据,标志着经典控制理论的形成,其揭示了系统开环幅相频率特性和闭环系统稳定性的本质联系。1943年,哈尔(A. C. Hall)基于传递函数这一描述系统动态特性的复数域数学模型,将通信工程的频率响应法和机械工程的时域方法统一为经典控制理论的复数域方法。传递函数可通过在零初始条件下对线性常微分方程进行拉普拉斯(Laplace)变换得到,其不仅回避了求解高阶微分方程的困难,而且可直接应用传递函数研究系统结构和参数对性能指标的影响。1945年,伯德(H. W. Bode)出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书,提出了使频率响应法更适合工程应用的Bode图法。Bode图绘制简便且有良好的工程分析精度,不仅可分析判断闭环系统动、静态性能,而且可确切获取闭环系统稳定性和稳定

裕度的信息。1948年,伊凡思(W. R. Evans)则提出了复数域分析和设计负反馈系统的方法——根轨迹法,即直接由开环零、极点在复平面的分布求闭环特征根随某一参数变化的轨迹。至此,以传递函数为动态数学模型、频率响应法和根轨迹法两种频域方法为核心,主要研究单输入单输出(Single-Input Single-Output,简称SISO)线性定常反馈系统的经典控制理论基本成熟。

1944年,美国陆军发明的自动化防空火炮系统是经典控制理论应用于工程实践的成功范例之一。数学家维纳(N. Wiener)从中提炼出“信息”、“系统”、“控制”3个要素,于1948出版了自动化科学的奠基著作《控制论》。该书与1945年贝塔朗菲(L. Von. Bertalanffy)的《关于一般系统论》、1948年香农(C. Shannon)的《通信的数学理论》简称为“三论”(控制论、系统论、信息论),共同构筑了自动化与信息科学技术的理论基础。

1922年,米诺斯基(N. Minorsky)提出比例积分微分(PID)控制律,其将负反馈系统偏差的现状(比例P)、历史(积分I)和变化趋势(微分D)线性组合成复合控制量,对被控对象进行控制,兼顾了系统稳、快、准3个方面的要求,应用广泛。1942年,尼柯尔斯(N. B. Nichols)提出PID参数最佳整定法,发展了PID算法。

2. 现代控制理论阶段

20世纪60年代,随着电子计算机技术的进步,航空航天技术和综合自动化发展的需要,推动了以状态空间描述为基础、最优控制为核心,主要在时域研究多输入多输出(Multi-Input Multi-Output,简称MIMO)系统的现代控制理论的诞生。

1957年,苏联成功发射人类历史上第一颗人造地球卫星;1968年,美国“阿波罗”宇宙飞船登上月球,揭开了人类开始征服太空的序幕。航天器控制系统是MIMO系统,而且要求设计某种性能指标下的最优控制系统,用经典控制理论基于传递函数的频域方法难以解决。卡尔曼(R. E. Kalman)、贝尔曼(R. Bellman)和庞特里亚金(L. S. Pontryagin)等倡导从变换后的频域回到时域,用状态空间表达式(一阶微分或差分方程组)建立MIMO线性/非线性、定常/时变系统的动态数学模型,并提出与经典控制理论频域法不同的状态反馈和最优控制方法,即现代控制理论。其包括20世纪50年代贝尔曼提出的寻求最优控制的动态规划法和庞特里亚金提出的极小值原理,20世纪60年代卡尔曼分析系统引入的状态空间分析法及提出的多变量最优控制和最优滤波理论、能控性和能观性概念。1958年,由于控制科学中研究非线性系统大范围稳定性问题的推动,基于状态变量法的李亚普诺夫稳定性理论在控制理论的文献中开始被引用,并掀起了相当持久的李亚普诺夫热。应该指出,数字计算机技术的飞速发展,为多变量复杂系统的时域分析提供了物质基础。事实上,现代控制理论的状态空间方法以计算机作为系统建模、分析、设计、控制的工具。

最优控制依赖确定的数学模型,但环境和被控对象参数不可避免的变化将导致实际系统的模型发生变化。因此,在线辨识系统数学模型,并按当前模型修改最优控制律的自适应控制及系统辨识理论也是现代控制理论的研究范畴。20世纪70年代以来,自适应控制理论进展显著,奥斯特隆姆(K. J. Åström)和朗道(I. D. Landau)等为此做出了贡献。1970年,罗森布罗克(H. H. Rosenbroek)等提出多变量频域控制理论,将传统频域方法发展为现代频域方法。为了使控制算法对系统模型的变化具有更强的适应性,产生了预测控制和鲁棒控制等方法。这些新方法都是现代控制理论在控制工程实践需要的推动下向深度和广度发展的成果。

3. 大系统理论和智能控制理论阶段

20世纪70年代以来,一方面现代工业综合自动化要求对多个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制;另一方面,控制理论应用领域已从传统的军事、工业扩展到社会经济、能源环境、生物医学等大型系统,因此被控对象难以精确描述,控制任务复杂,使基于数学模型、控制任务要求较单一的现代控制理论面临困难,由此产生了大系统理论和智能控制理论。

“大系统”是规模庞大、结构复杂、变量众多、功能综合、目标多样的过程控制与信息处理相结合的综合自动化系统。正在发展之中的大系统理论是动态的系统工程理论。其综合了现代控制理论、图论、数学规划和决策等方面的成果,采用控制和信息的观点,研究大系统的建模和模型简化、结构方案、稳定性和镇定、总体设计中的分解方法和协调等。

智能控制是针对控制系统(被控对象、环境、目标、任务)的不确定性和复杂性产生的不依赖于或不完全依赖于控制对象的数学模型,以知识、经验为基础,模仿人类智能的非传统控制方法。和空间技术、原子能技术并列为 20 世纪 3 大科技成就的人工智能技术的发展,促进了自动控制理论向智能控制方向发展。1971 年,傅京孙(K. S. Fu)将智能控制(Intelligent Control)概括为自动控制(Automatic Control)和人工智能(Artificial Intelligent)的交集,体现了智能控制系统多元跨学科的基本结构特征。随着智能控制技术研究深入及其走向工程化、实用化,在二元交集论基础上产生了三元、四元、多元等智能控制结构,智能控制的理论体系正在不断的发展和完善之中。1991 年,奥斯特隆姆(K. J. Åström)提出“模糊逻辑控制、神经网络控制、专家控制是 3 种典型的智能控制方法”,较全面地阐明了智能控制的几个重要分支。除此之外,学习控制(包括迭代学习控制和遗传学习控制)、仿人控制、混沌控制等则是智能控制的新兴研究方向。

应该指出,智能控制并非代替而只是扩展了传统控制,应正确处理智能控制对传统控制继承与发展的关系。事实上,智能控制策略与传统控制策略相结合的复合控制模式及几种智能控制策略相结合的集成智能控制是控制策略的发展方向。

0.2 现代控制理论的研究范围

现代控制理论是应用状态空间法对 MIMO、线性或非线性、定常或时变系统的状态进行分析与综合的理论。其采用状态空间表达式作为系统的动态模型,以能控性、能观测性揭示系统外部特性(输入、输出)与内部特性(状态)之间的关系,采用状态反馈、极点配置的方法对系统进行综合,以实现系统性能指标最优控制。现代控制理论的研究范畴主要有如下几个方面。

1. 系统辨识

基于动态系统在状态空间的数学模型进行分析和控制是现代控制理论的特点之一。因此,系统辨识和建模是现代控制理论重要研究范畴之一。当系统较复杂时,解析法建模不再适用,而需采用实验研究的方法即系统辨识方法。在基于试验前知识所提出的被辨识系统模型的类型中,根据对所选择的输入试验信号作用下的被辨识系统输出响应的观测,估计被辨识系统等价数学模型的结构参数和模型参数,并进行模型校验。其中,参数估计是系统辨识中最重要和发展最快的研究领域,已出现很多参数估计的计算方法,如基于脉冲响应的脉冲响应法、相关函数法、局部辨识法;基于最小二乘法的加权最小二乘法、递推最小二乘法、广义最小二乘法等;基于似然函数的极大似然法等。

2. 线性系统理论

线性系统理论是现代控制理论中应用最广泛的独立分支,也是现代控制理论的基础。其采用状态空间法对线性动态系统进行定量分析(即确定在不同输入控制作用下系统状态的动态响应)和定性分析(即稳定性、能控性、能观测性分析),并采用状态反馈配置闭环极点的方法控制并改善系统状态的动态响应。因此,线性系统理论主要包括动态系统的状态空间描述、状态方程的求解、能控性、能观测性和稳定性分析、状态反馈及状态观测器设计等内容。

低阶线性定常系统的稳定性分析,既可采用李亚普诺夫稳定性判据的第一法(间接法),即求系统微分方程的解,根据解的性质判断系统稳定性;也可采用李亚普诺夫稳定性判据的第二法

(直接法),即不求解系统微分方程,而是构造“李亚普诺夫函数”,并根据该标量函数的正定性和其导数的负定性直接判别系统稳定性。李亚普诺夫直接法提供了判别任何复杂系统稳定性的方法,在高阶线性定常系统、非线性系统、时变系统稳定性分析中有显著优势,应用广泛。因此,尽管基于状态变量法的李亚普诺夫稳定性理论是 1892 年提出的,但控制系统的李亚普诺夫稳定性分析仍是现代控制理论的组成部分。

在状态空间法的基础上,派生了基于几何方法的线性系统几何理论、基于抽象代数的线性系统代数理论及基于经典频率法的线性系统多变量频域理论等新分支。

3. 最优控制

最优控制是现代控制理论的核心。最优控制问题就是在多种约束条件下寻找使系统某个性能指标泛函取极值的控制规律,故其数学本质是求某泛函的条件极值问题,即变分学问题。针对经典变分法只适用于求解无约束或容许控制属于开集的最优控制问题的局限,20 世纪 50 年代,庞特里亚金提出“极小值原理”,发展了经典变分原理,以处理容许控制属于闭集的最优控制问题。与此同时,贝尔曼为解决多级决策问题,提出“动态规划”。“极小值原理”和“动态规划”是研究最优控制问题最重要的两种方法。随着控制理论的发展,最优控制也有很大发展,如分布参数的最优控制、随机最优控制、大系统的最优控制等。

4. 最优滤波(最佳估计)

最优控制规律是被控系统内部状态向量的函数,但由于被控系统和测量装置存在随机干扰和测量装置的限制,一般难以精确地测量出系统全部状态的信息。故基于已建立的系统数学模型,从夹杂着随机噪声的系统输入/输出的量测数据中,采用统计方法,针对一定统计规则(如最小方差估计、极大似然估计、最小二乘估计等)求出系统状态的最优估计,即最优滤波是闭环系统最优控制工程实现的前提。基于最小方差准则的维纳滤波和卡尔曼滤波是得到广泛应用的两种最优线性滤波方法。20 世纪 40 年代提出的维纳滤波方法开创了应用统计方法研究随机控制问题的新领域,但其仅是对平稳随机过程最优滤波的方法;20 世纪 60 年代提出的卡尔曼滤波理论克服了维纳滤波理论的局限性,适用于非平稳随机过程,已在通信、控制、导航及其他具有随机信号处理的很多领域得到广泛应用。对非线性系统,由于在理论上难于找到严格的递推滤波公式,目前一般采用非线性滤波线性化的近似方法(如连续型和离散型线性化卡尔曼滤波、推广的卡尔曼滤波)处理非线性滤波问题。

5. 自适应控制

系统的不确定性(如被控对象参数未知或工作状况改变和环境变化引起系统参数改变)是对基于数学模型的传统控制的挑战,自适应控制正是为解决环境和被控对象参数有较大变化时系统仍能自动保持在接近某种意义下最优运行状态这一问题提出的。“自适应控制”基于在线辨识系统数学模型,将系统当前性能与最优性能比较,实时调整控制器的结构、参数,即修改最优控制规律,以保证系统适应环境和被控对象参数变化,保持最优性能。模型参考自适应控制系统和自校正控制系统是自适应控制系统的两种基本形式。目前,自适应控制理论仍在迅速发展之中,这反映了现代控制系统向智能化、精确化方向发展的总趋势。

0.3 经典控制理论与现代控制理论的联系与比较

经典控制理论与现代控制理论是在自动化学科发展的历史中形成的两种不同的对控制系统分析、综合的方法。经典控制理论适用于 SISO(单变量)线性定常系统;现代控制理论适用于 MIMO(多变量)、线性或非线性、定常或时变系统。

经典控制理论本质上是(复)频域方法,以表达系统外部输入/输出关系的传递函数为动态数学模型、根轨迹和 Bode 图为主要工具,系统输出对特定输入响应的“稳”、“快”、“准”性能为研究重点,常借助图表分析设计系统。综合方法主要为输出反馈和期望频率特性校正(包括在主反馈回路内部的串联校正、反馈校正,和在主反馈回路以外的前置校正、干扰补偿校正),而校正装置由能实现典型控制规律的调节器(如 PI、PD、PID)构成,所设计的系统能保证输出稳定,且具有满意的“稳”、“快”、“准”性能,但并非某种意义上的最优控制系统。

现代控制理论的状态空间法本质上是时域方法,以揭示系统内部状态与外部输入/输出关系的状态空间表达式为动态数学模型、状态空间法为主要工具、在多种约束条件下寻找使系统某个性能指标泛函取极值的最优控制律为研究重点,借助计算机分析设计系统。综合方法主要为状态反馈、极点配置、各种综合目标的最优化。所设计的系统能运行在接近某种意义下的最优状态。

现代控制理论与经典控制理论虽然在方法和思路上显著不同,但这两种理论均基于描述动态系统的数学模型,是有内在联系的。经典控制理论以拉普拉斯变换为主要数学工具,采用传递函数这一描述动力学系统运动的外部模型;现代控制理论的状态空间法以矩阵论为主要数学工具,采用状态空间表达式这一描述动力学系统运动的内部模型,而描述动力学系统运动的微分方程则是联系传递函数和状态空间表达式的桥梁。

0.4 MATLAB 控制系统工具箱简介

MATLAB 的全称为 Matrix Laboratory(矩阵实验室),是美国 MathWorks 公司的产品,是一种将复数数组(阵列)作为计算基本处理单位的高级科学分析与计算软件。自 1984 年 MathWorks 公司推出内核采用 C 语言编写的 MATLAB 软件以来,经过多年的发展,MATLAB 已成为融“语言化”的数值和符号双重计算能力、强大的数据图形显示功能、图形化控制仿真程序设计功能(Simulink)、全方位帮助系统于一体的交互式软件系统,而且其良好的可扩展性吸引了各个领域的专家学者推出不断扩大的附属不同学科的 MATLAB 工具箱,使之成为国际上最为流行的计算软件。目前,国际上许多新版高校教科书都重视 MATLAB 的应用,将其作为分析、计算、设计、仿真研究的基本工具。

MATLAB 控制系统工具箱(Control System Toolbox)集成了在 MATLAB 环境下对线性定常(LTI)连续或离散系统建模、仿真、分析、设计的工具箱函数。这些函数多数为以 m 作扩展名的 M 文件,其包含经典控制理论与现代控制理论中线性系统分析的大部分内容。例如,创建 LTI 系统动态模型(包括状态空间模型(ss)、传递函数模型(tf)、零极点-增益模型(zpk))函数,模型转换函数,模型降阶函数,系统模型连接函数,时域响应(脉冲响应、阶跃响应等)分析函数,频域分析(Bode 图、Nyquist 图、稳定裕度、Nichols 图线)函数,根轨迹分析函数,稳定性分析(时域稳定性分析、李亚普诺夫稳定性分析等)函数,能观性、能控性分析函数,设计函数(包括极点配置、状态估计、线性二次型最优控制器设计等)等。另外,MATLAB 控制系统工具箱还提供 LTI 系统分析和设计的图形界面环境(GUI),支持 10 种不同类型的系统响应分析的 LTI 观测器(LTI Viewer)和用于 SISO 反馈控制系统补偿器设计的图形设计环境(SISO Design Tool),简化了典型控制系统的分析和设计过程。而且,MATLAB 控制系统工具箱具有可扩展性,用户可自行编写 M 文件创建满足某种特定需要的控制函数。

MATLAB 控制系统工具箱随着 MATLAB 的发展而不断升级。控制工具箱函数清单可在 MATLAB 命令窗口(Command Windows)输入联机帮助指令“help control”获得,若要进一步查

询其中某一具体的 M 函数的功能及调用格式,仍可使用 help 指令获得在线帮助。另外,也可通过控制系统工具箱附带的演示软件(Control System Toolbox Demos)学习一些控制工具箱函数的使用。事实上,MATLAB 的全方位帮助系统,为用户学习、掌握 MATLAB 语言及其工具箱知识提供了很好的向导。

作为最早的 MATLAB 工具箱之一的控制系统工具箱,主要是运用经典控制理论与现代控制理论研究 LTI 系统的函数集合。随着 MATLAB 版本的不断升级,附属不同学科的 MATLAB 工具箱不断加入 MATLAB 系统中,与控制有关的工具箱也在不断扩充、丰富与完善,MATLAB 已成为控制理论研究及工程应用十分重要的有力工具。

0.5 本书综述

现代控制理论研究范畴较广,线性系统理论、最优控制、系统辨识、最优估计理论、自适应控制均是现代控制理论的重要内容,但受教学学时和教材篇幅的限制,难以做到面面俱到。考虑到线性系统理论是现代控制理论的基础,最优控制是现代控制理论的核心,本书从工程应用角度出发,以线性系统理论的时域分析和最优控制为主线,介绍现代控制理论的基本方法。其中,线性系统理论部分主要阐述状态空间分析法和综合法的基本内容,包括动态系统的状态空间描述、动态系统的定量分析(状态方程的解)和定性分析(能控性、能观测性、李亚普诺夫稳定性)、动态系统的综合(状态反馈与状态观测器设计);最优控制部分在介绍解决最优问题 3 种基本方法(变分法、极小值原理、动态规划法)的基础上,阐述两类典型最优反馈系统的设计(线性二次型最优控制、最小时间控制)。鉴于 MATLAB 已成为国际控制领域应用广泛的工具软件,本书在保证理论知识体系结构完整的前提下,融入了 MATLAB 应用。

为了避免使现代控制理论的概念、方法仅仅停留在数学表达式上,本书编者作了一些努力,试图形成如下特色:

- (1) 结构清晰,便于学生从整体上掌握现代控制理论的基本思路和方法。本书贯穿了动态系统在状态空间数学模型基础上的定量分析,定性分析,极点配置,最优反馈控制这一结构主线。
- (2) 注重物理概念,避免烦琐数学推导,突出现代控制理论的工程应用背景,便于指导学生运用理论解决实际问题。例如,第 4 章编写了李亚普诺夫直接法应用举例,第 5 章编写了线性控制系统理论的工程应用举例,第 6 章编写了最优控制理论的工程应用举例。
- (3) 在阐述现代控制理论的基本方法时,注意与经典控制理论基本方法的联系与比较。
- (4) 在保证理论知识体系结构完整的前提下,融入 MATLAB 在线性系统理论和最优控制中的应用。
- (5) 每章均有较丰富的例题、习题与思考题、上机实验题,便于学生对所讨论的问题有更为深入的理解,并有利于学生自学能力、计算机应用能力和研究能力的提高。

第 1 章 动态系统的状态空间描述

1.1 引言

经典控制理论以系统的输入、输出特性为研究依据,对线性定常连续系统,其基本数学模型为线性定常高阶微分方程、传递函数;对线性定常离散系统,其基本数学模型则为线性定常高阶差分方程、脉冲传递函数。这些模型仅仅描述系统输入、输出之间的外部特性,不能揭示系统内部各物理量的运动规律;若要完全揭示整个系统的全部运动状况,仅凭输入、输出描述是不够的,即系统的输入、输出描述是一种不完全的描述。

20 世纪 60 年代,人们将状态空间的概念引入控制理论,产生了以状态空间描述为基础、最优控制为核心的现代控制理论。系统动态特性的状态空间描述由两个数学方程组成,一个是反映系统内部状态变量和输入变量间因果关系的状态方程;另一个是表征系统内部状态变量及输入变量与输出变量转换关系的输出方程。系统的状态空间描述不仅描述了系统输入、输出外部特性,而且揭示了系统内部的结构特性,能完全表征系统的所有动力学行为,因而是对系统的一种完全的描述。

经典控制理论主要处理 SISO 线性定常系统的问题,而状态空间法是一种既可用于单输入、单输出线性定常系统,又可用于非线性系统、时变系统、多输入、多输出系统的有效分析和综合方法。状态空间法可方便地使用向量、矩阵等数学工具,简化系统的数学描述。从设计计算的角度看,由于状态空间法是时域的方法,便于应用数字计算机计算求解,这也是状态空间法的优点之一。

建立动态系统的状态空间模型是状态空间分析和综合的基本问题和前提。

1.2 动态系统的状态空间模型

1.2.1 状态空间的基本概念

系统的状态空间模型是建立在状态、状态空间概念的基础之上的。为此,首先对系统、状态、状态空间等基本概念进行定义和讨论。

1. 系统的基本概念

(1) 系统

所谓系统,是由相互制约的各个部分有机结合,且具有一定功能的整体。从输入、输出关系看,自然界存在两类系统:静态系统和动态系统。

(2) 静态系统

对于任意时刻 t , 系统的输出唯一地取决于同一时刻的输入,这类系统称为静态系统。该类系统的特征是:任意时刻系统的输出与同一时刻的输入保持确定的关系,而对该时刻以前的输入无任何依赖性,即无记忆,故静态系统亦称为无记忆系统。静态系统的输入、输出关系为代数方程。

图 1-1 所示的电阻电路就属于静态系统。若输入电压为 $u(t)$, 对于任意时刻 t , 其输出电流