

前 言

本书是以中国科学技术大学数学科学学院、少年班与 2000 班的应用数学专业开设的选修课“控制论”的讲义为基础,再加上近年来控制系统优化方面的最新研究成果编写而成的。该课程从 2000 年开始一直讲授至今,每学期大约 60 学时。

N. Wiener 于 1948 年出版的专著《控制论 (或关于在动物和机器中控制与通信的科学)》,标志着控制论作为科学的一门重要分支正式诞生。借助控制论的研究热潮,一个重要的分支研究领域——控制理论迅猛发展起来了,本书的目的就是介绍这一理论。这是因为,一方面在当今世界各国的高等学校已设有专门研究控制理论的专业,另一方面在中国学术界把控制论的理论与控制理论等同起来。控制理论的特点是以数学模型化方法为主,并应用于自动控制领域。它基本上略去了 Wiener《控制论》中神经生理学和神经病理学的范畴,因而专注于数学与控制问题的处理技术和设计方法。全书共分 9 章。第 1 章是概论,介绍了控制理论的产生、发展、意义、作用与基本模型;第 2 章讨论了控制系统的数学模型;第 3 章讨论了线性控制系统的能控性、能观性与结构分解;第 4 章讨论了系统的稳定性与控制;第 5 章讨论了线性定常系统的实现;第 6 章讨论了最优控制问题;第 7 章讨论了自适应控制问题的提出与自校正设计;第 8 章介绍了与非线性系统稳定、镇定、逆最优控制有关的一些基本概念、基本定理与数学基础;第 9 章讨论了逆最优控制问题。书中配有习题。读者通过对本书的学习,了解控制问题的来源与形成过程,对数学在其中的作用有着基本的认识,掌握控制理论最基本的知识,为今后实际运用控制论的方法与结果打下一定的基础。

本书第 1~2 章由杨孝先编著,第 3~5 章由康宇编著,第 6~9 章由合肥学院自动化教研室王俊编著。全书由杨孝先统稿。在本书的编写过程中,我们得到了中国科学技术大学自动化系丛爽教授的指导,也得到了研究生钱坤宏、付欣欣、杨

红广三位同学的帮助, 在此对他们表示衷心的感谢!

因经验与水平的关系, 本书难免有错漏或不妥之处, 热切期望专家与读者批评指正.

编著者

2013 年 12 月

目 次

前言	i
第 1 章 概论	1
1.1 控制理论的产生与发展	1
1.2 控制的意义与作用	4
1.2.1 控制系统	4
1.2.2 恒值系统与随动系统	6
1.2.3 线性系统与非线性系统	6
1.2.4 连续系统与离散系统	7
1.2.5 单变量系统与多变量系统	7
1.3 控制系统的基本模型	7
第 2 章 控制系统的数学模型	10
2.1 状态空间模型	11
2.1.1 动态方程	11
2.1.2 非线性动态系统的线性化	19
2.2 状态转移矩阵的一般提法	22
2.2.1 线性时变系统的状态转移矩阵	26
2.2.2 线性定常系统的解	32
2.3 离散时间控制系统	38
2.3.1 线性控制系统的离散化	38
2.3.2 离散线性定常控制系统的解法	40
2.4 传递函数模型	42
2.5 传递函数矩阵	45
2.6 传递函数矩阵相互连接的模型	46
2.6.1 串联环节的传递函数矩阵	46
2.6.2 并联环节的传递函数矩阵	48
2.6.3 反馈环节的传递函数矩阵	49

2.6.4 一般的传递函数矩阵	51
第 3 章 线性控制系统的能控性与能观性	56
3.1 线性控制系统的能控性	56
3.2 线性控制系统的能观性	65
3.3 能控性与能观性的对偶关系	73
3.4 线性定常控制系统的分解	74
3.5 离散时间线性系统的能控性与能观性	77
第 4 章 稳定性	83
4.1 稳定性的概念	83
4.2 线性定常系统稳定性的代数判据	84
4.3 离散时间线性系统的稳定性	87
4.4 线性时变系统的稳定性	88
4.5 非线性系统的稳定性	89
4.5.1 非线性定常系统的稳定性	89
4.5.2 非线性时变系统的稳定性	91
4.6 Lyapunov 稳定性理论	92
4.6.1 正定函数与负定函数	93
4.6.2 Lyapunov 的稳定性判据	94
4.6.3 线性系统情形	97
4.6.4 构造 Lyapunov 函数的方法	100
4.7 稳定性的频率判据	106
4.7.1 n 次多项式的稳定性频率判据	106
4.7.2 开环传递函数为 $G(s) = Q(s)/P(s)$ 的控制系数的稳定频率判据	108
4.7.3 线性定常系统的 Nyquist 稳定性判据	109
4.8 稳定性与控制	117
4.8.1 输入 - 输出稳定性	118
4.8.2 线性反馈控制与稳定性	119
4.9 状态渐近估计器与调节器的设计	124
4.9.1 状态渐近估计器的构造	125
4.9.2 状态渐近估计器与状态调节器的分离原理	126
4.9.3 降维状态渐近估计器	128
第 5 章 线性定常系统的实现	136
5.1 控制系统的外部表示	136
5.2 线性定常控制系统的实现	142
5.3 最小实现	149

5.4	传递函数矩阵的能控实现与能观实现	152
5.5	离散时间控制系统的参数辨识	169
第 6 章	最优控制	174
6.1	性能指标	174
6.1.1	性能的度量	174
6.1.2	最优控制的存在性与唯一性介绍	176
6.2	Bellman 方程与 Pontryagin 最大值原理	177
6.2.1	Bellman 方程与值函数	177
6.2.2	Pontryagin 最大值原理	181
6.2.3	最大值原理的充分条件	184
6.3	一般的最大值原理	185
6.3.1	控制变量受约束的情形	185
6.3.2	只有状态变量受约束的情形	187
6.3.3	一种通用的公式	187
6.4	线性调节器问题与 Riccati 矩阵微分方程	190
6.5	线性调节器问题与稳定性	193
6.6	跟踪给定值问题	201
6.6.1	问题的套用提法	202
6.6.2	问题的正确提法	203
6.6.3	二阶系统跟踪给定值的最优设计	204
6.6.4	多输入 - 多输出系统的跟踪给定值 z 的问题	206
第 7 章	自适应控制	212
7.1	自适应控制的提出与设计方法	212
7.1.1	自适应控制的提出	213
7.1.2	自适应控制的设计方法	214
7.2	基于优化控制策略的自校正器	218
7.2.1	最小方差调节器	219
7.2.2	最小方差控制律	224
7.2.3	最小方差自校正器	229
7.3	LQG 自校正器	232
7.3.1	Kalman 滤波器	233
7.3.2	滤波器与状态观测器的关系分析	237
7.3.3	LQG 系统的分离特性	238
7.3.4	随机系统的最优控制律	238
7.3.5	二元性原理 (双重效应)	239
7.3.6	LQG 自校正调节器	241

7.3.7	LQG 自校正控制器	244
7.4	基于常规控制策略的自校正器	247
7.4.1	极点配置自校正调节器	248
7.4.2	极点配置自校正控制器	253
7.4.3	自校正 PID 控制器	256
7.4.4	有限拍无纹波控制器	260
第 8 章	稳定、镇定与逆最优控制	264
8.1	Lyapunov 定理和 LaSalle-Yoshizawa 定理	264
8.2	控制 Lyapunov 函数与 Sontag 公式	267
8.3	扰动抑制	269
8.4	随机形式的 Lyapunov 定理与 LaSalle 定理	273
8.5	逆最优控制问题	277
第 9 章	逆最优控制	280
9.1	受扰非线性系统的逆最优控制	280
9.1.1	问题描述	280
9.1.2	逆最优控制器的设计	283
9.1.3	性能估计	287
9.1.4	实例仿真	287
9.2	受扰非线性系统的逆最优跟踪	289
9.2.1	问题描述	289
9.2.2	逆最优控制器设计	293
9.2.3	数值仿真	299
9.3	随机非线性系统自适应逆最优控制	300
9.3.1	问题描述	301
9.3.2	全局依概率渐近稳定	305
9.3.3	逆最优控制器设计	309
9.3.4	设计举例	312
9.3.5	输出反馈逆最优控制	313
9.4	统计特性不确定随机系统稳健自适应逆最优控制	320
9.4.1	问题描述	320
9.4.2	全局依概率渐近稳定	326
9.4.3	自适应逆最优控制器设计	331
9.4.4	设计举例	333
参考文献		336