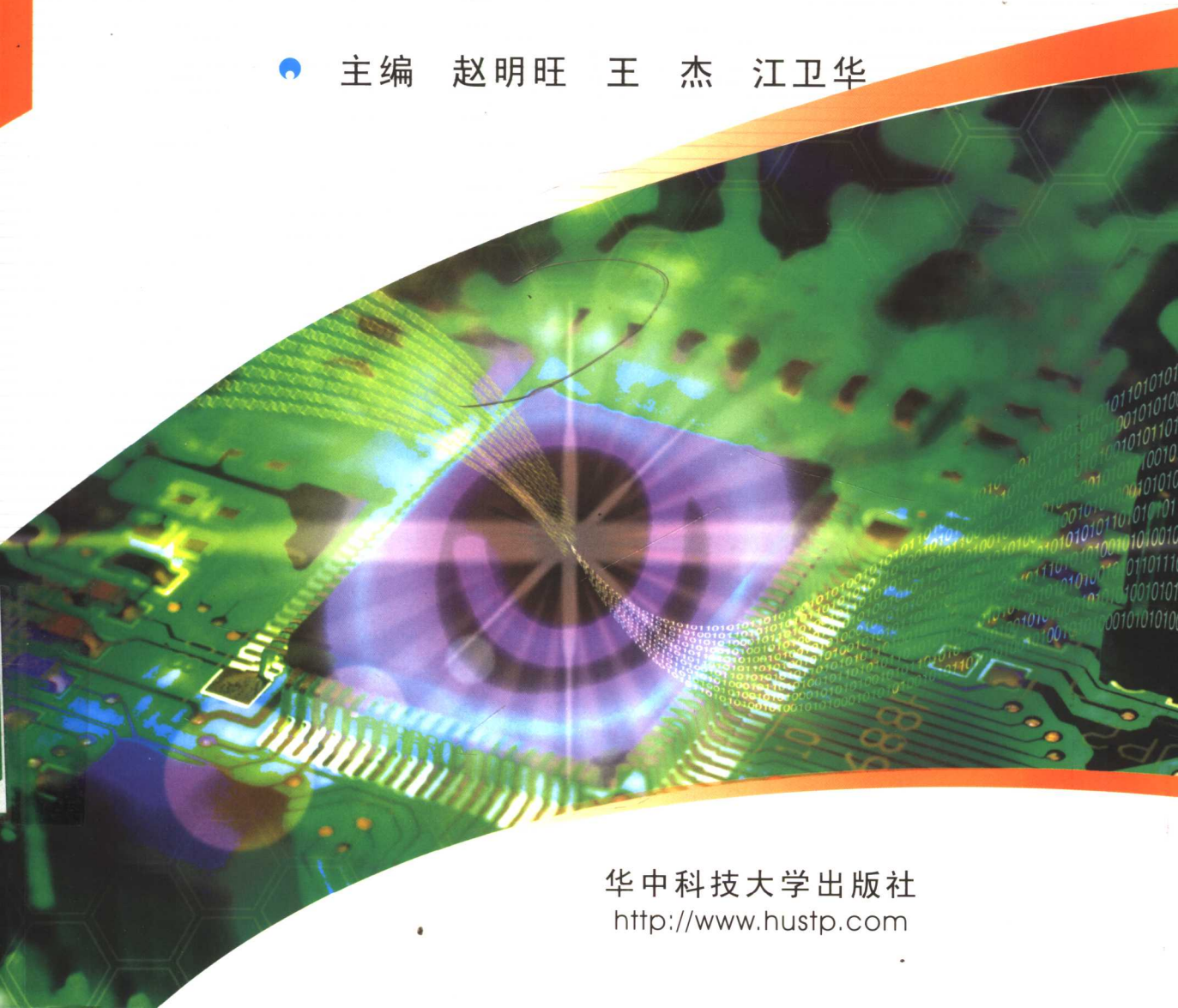




21世纪电气信息学科立体化系列教材

现代控制理论

● 主编 赵明旺 王 杰 江卫华



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/赵明旺 王杰 江卫华 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007
年3月

ISBN 978-7-5609-3950-6

I. 现… II. ①赵… ②王… ③江… III. 现代控制理论-高等学校-教材
IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020522 号

现代控制理论

赵明旺 王杰 江卫华 主编

策划编辑:王红梅 孙基寿

责任编辑:王红梅

封面设计:秦 茹

责任校对:陈 骏

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:24.75 插页:2

字数:484 000

版次:2007年3月第1版

印次:2007年3月第1次印刷

定价:36.80元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-3950-6/O·410

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

0231

62D

2007

内容简介

本书介绍现代控制理论的基础知识。全书共分 7 章。第 1 章介绍了控制理论的发展及现代控制理论的主要内容。第 2 章介绍了控制系统的状态、状态空间和状态空间模型等基本概念,以及如何建立状态空间模型。第 3~5 章分别讨论了控制系统状态空间模型的时域分析、能控能观结构性分析、稳定性分析。第 6 章介绍了基于状态空间分析的系统综合,包括状态反馈与极点配置、系统镇定、系统解耦、状态观测器等。第 7 章介绍了最优控制理论初步知识。

为使读者更好地理解现代控制理论的概念和方法,本书还专门讨论了基于 Matlab 计算软件的现代控制理论相关问题和方法的计算机仿真计算与设计的程序编制和应用。本书还附有编著者自行开发的 Matlab 程序和大量算例。

本书可作为自动化专业、电气工程及其自动化专业、测控技术与仪器专业及其相关专业的本科生及研究生教材,也可供从事控制理论与控制工程研究、设计和应用的科技工作者参考使用。

前 言

本书是自动化专业、电气工程及其自动化专业、测控技术和仪器专业的教学计划中所列“现代控制理论”课程的对应教材。学习本课程的目的是使学生获得现代控制理论基础知识,掌握控制系统的状态空间分析方法,熟悉控制系统综合与最优控制方法,并为今后的学习深造和实际运用打下扎实的基础。全书覆盖线性系统理论和最优控制两个现代控制理论最基本的分支,内容包括线性系统的状态空间表示与运动分析、线性系统的能控性与能观性分析、控制系统的李雅普诺夫稳定性分析、系统综合以及最优控制。

现代控制理论涉及的数学概念与方法之多、之深、之新,与工程应用结合之紧密,在其他工科专业的知识体系中是不多见的。在教学中既要讲清现代数学与控制理论的基本概念和方法、建立控制理论的独特的思维方式,又要为控制理论与控制工程设计及应用架桥铺路,这给现代控制理论课程的教学带来极大困难与挑战。本书编著者多年从事控制理论系列课程的教学工作,潜心研究控制理论课程的教材内容和教学方法,积累了丰富的经验。在撰写过程中充分考虑了学习过程的教与学两个环节的特点,以增强教学过程的可操作性。

随着计算机技术与现代教育技术的发展,本书在如下两个方面作了新的探索。

1) 专长于科学计算与工程设计的 Matlab 语言的诞生与发展,为现代控制理论课程的教学提供了新的支撑平台,为教学注入了新的活力。本书充分利用 Matlab 的图形化工具直观性强和符号计算工具揭示系统规律深刻的特点,在 Matlab 平台上介绍控制系统仿真分析、设计问题的计算方法与软件开发。为不破坏控制理论知识的系统性和严整性,编著者将 Matlab 相关内容放在各章的最后一节,既与本章内容相呼应,又自成体系。

2) 以多媒体教学、网络教学为代表的现代教育技术的发展,为现代控制理论的教学带来了教学方法的革新。顺应这一革新,编著者精心开发了用于多媒体教学、网络教学的课件,并制作了随书配套发行的光盘。该课件是开放的,教学者可以直接使用,也可以在此基础上适当裁剪、加工,开发自己的课件。光盘中还包含所有为本书开发的 Matlab 程序、库函数以及图形化仿真软件平台,全书的习题参考答案,以及与控制理论相关的文献、资料。

在华中科技大学出版社的组织与协调下,来自 6 所高校长期担任“现代控制理论”课程教学的老师组成了本书的编委会。大家集思广益,深入细致地讨论了本书的编写大

纲,然后分工负责各章的编写工作。本书编写分工为:郑州大学王杰编写第1、2章(其中2.6节与江汉大学刘玫共同编写);刘玫编写第3章;长江大学朱清祥编写第4章;武汉工程大学江卫华编写第5章,武汉科技大学赵明旺与程磊共同编写第6章,赵明旺还负责全书各章的 Matlab 部分撰写、Matlab 程序编制以及附录。编委会特邀长期从事最优控制与鲁棒控制研究的武汉科技大学王耀青编写第7章。全书由赵明旺负责修改与统稿。湖北工业大学廖家平参与制定编写大纲,并提出了富有建设性的建议,在此致以衷心谢意!

本书参考了国内外大量专著、教材和文献(见参考文献),在此编著者谨向有关著作者致以衷心的感谢!

本书仅是学习现代控制理论过程中的一个环节。学习过程的实施,还有赖于教学者和学习者这两个教学的主体,有赖于他们教学的实践。书中难免存在不足或疏漏之处,恳请同行专家及使用者批评指正,谢谢!

21 世纪电气信息学科立体化系列教材

《现代控制理论》编委会

2006 年 10 月 20 日

目 录

1 现代控制理论概况	(1)
1.1 控制理论发展概述	(1)
1.1.1 经典控制理论	(1)
1.1.2 现代控制理论	(3)
1.2 现代控制理论的主要内容	(4)
1.2.1 线性系统理论	(4)
1.2.2 最优控制理论	(4)
1.2.3 随机系统理论和最优估计	(5)
1.2.4 系统辨识	(5)
1.2.5 自适应控制	(5)
1.2.6 非线性系统理论	(6)
1.2.7 鲁棒性分析与鲁棒控制	(6)
1.2.8 分布参数控制	(7)
1.2.9 离散事件控制	(7)
1.2.10 智能控制	(8)
1.3 Matlab 软件概述	(9)
1.3.1 Matlab 的发展历史	(9)
1.3.2 Matlab 的主要功能与特点	(9)
1.3.3 控制系统 Matlab 计算及仿真	(13)
1.4 本书的主要内容	(14)
本章小结	(15)
2 控制系统的状态空间模型	(17)
2.1 状态和状态空间模型	(18)
2.1.1 状态空间的基本概念	(18)
2.1.2 系统的状态空间模型	(20)
2.1.3 线性系统状态空间模型的模拟结构图	(23)
2.2 根据系统机理建立状态空间模型	(24)

2.3 根据系统的输入输出关系建立状态空间模型	(28)
2.3.1 由高阶常微分方程建立状态空间模型	(28)
2.3.2 由传递函数建立状态空间模型	(32)
2.3.3 MIMO 线性系统	(37)
2.3.4 非线性系统	(38)
2.4 线性变换和约旦规范形	(40)
2.4.1 状态空间的线性变换	(40)
2.4.2 系统特征值的不变性与系统的不变量	(42)
2.4.3 对角线规范形的转换	(46)
2.4.4 约旦规范形的转换	(49)
2.5 传递函数阵	(54)
2.5.1 传递函数阵的定义	(54)
2.5.2 由状态空间模型求传递函数阵	(54)
2.5.3 组合系统的状态空间模型和传递函数阵	(56)
2.6 线性离散系统的状态空间描述	(60)
2.6.1 工程控制系统的计算机实现	(60)
2.6.2 线性离散系统的状态空间描述	(62)
2.6.3 离散系统的机理建模	(63)
2.6.4 由离散系统的输入/输出关系建立状态空间模型	(64)
2.6.5 由离散系统的状态空间模型求传递函数阵	(65)
2.7 Matlab 问题	(66)
2.7.1 控制系统模型种类与转换	(66)
2.7.2 状态及状态空间模型变换	(74)
2.7.3 组合系统的模型计算	(76)
本章小结	(78)
习题	(79)
3 线性系统的时域分析	(83)
3.1 线性定常连续系统状态方程的解	(83)
3.1.1 齐次状态方程的解	(84)
3.1.2 线性定常连续系统的状态转移矩阵	(86)
3.1.3 非齐次状态方程的解	(89)
3.1.4 系统的脉冲响应	(91)
3.2 状态转移矩阵计算	(91)
3.2.1 级数求和法	(92)
3.2.2 约旦规范形法	(92)

3.2.3 塞尔维斯特内插法	(94)
3.3 线性时变连续系统状态方程的解	(99)
3.3.1 线性时变连续系统齐次状态方程的解	(99)
3.3.2 线性时变连续系统的状态转移矩阵	(100)
3.3.3 非齐次状态方程的解	(103)
3.4 线性连续系统状态空间模型的离散化	(105)
3.4.1 线性定常连续系统的离散化	(106)
3.4.2 线性时变连续系统的离散化	(108)
3.5 线性定常离散系统状态方程的解	(109)
3.5.1 线性定常离散系统状态方程的求解	(109)
3.5.2 线性时变离散系统状态方程的求解	(113)
3.6 Matlab 问题	(114)
3.6.1 矩阵指数函数的计算	(115)
3.6.2 线性定常连续系统的状态空间模型求解	(117)
3.6.3 连续系统的离散化	(124)
3.6.4 线性定常离散系统的状态空间模型求解	(125)
3.6.5 线性定常系统的运动分析的符号计算和仿真平台	(126)
本章小结	(128)
习题	(129)
4 线性系统的能控性和能观性	(131)
4.1 线性连续系统的能控性	(132)
4.1.1 能控性的直观讨论	(132)
4.1.2 状态能控性的定义	(133)
4.1.3 线性定常连续系统的状态能控性判别	(134)
4.1.4 线性定常连续系统的输出能控性	(140)
4.1.5 线性时变连续系统的状态能控性	(141)
4.2 线性连续系统的能观性	(144)
4.2.1 能观性的直观讨论	(144)
4.2.2 状态能观性的定义	(145)
4.2.3 线性定常连续系统的状态能观性判别	(146)
4.2.4 线性时变连续系统的状态能观性	(151)
4.3 线性定常离散系统的能控性和能观性	(153)
4.3.1 线性定常离散系统的状态能控性与能达性	(153)
4.3.2 线性定常离散系统的状态能观性	(156)
4.3.3 离散化线性定常系统的状态能控性和能观性	(158)



4.4	对偶性原理	(160)
4.5	线性系统的结构分解和零极点相消	(162)
4.5.1	能控性分解	(162)
4.5.2	能观性分解	(166)
4.5.3	能控能观分解	(168)
4.5.4	系统传递函数中的零极点相消定理	(171)
4.6	能控规范形和能观规范形	(173)
4.6.1	能控规范形	(173)
4.6.2	能观规范形	(176)
4.6.3	MIMO 系统的能控能观规范形	(178)
4.7	实现问题	(182)
4.7.1	基本概念	(183)
4.7.2	能控规范形实现和能观规范形实现	(183)
4.7.3	最小实现	(187)
4.8	Matlab 问题	(189)
4.8.1	状态能控性与能观性判定	(189)
4.8.2	线性系统的能控能观分解	(193)
4.8.3	能控规范形和能观规范形	(196)
4.8.4	系统实现	(198)
本章小结		(202)
习题		(202)
5	李雅普诺夫稳定性分析	(205)
5.1	李雅普诺夫稳定性的定义	(206)
5.1.1	平衡态	(206)
5.1.2	李雅普诺夫意义下的稳定性	(207)
5.1.3	渐近稳定性	(208)
5.1.4	大范围渐近稳定性	(209)
5.1.5	不稳定性	(209)
5.1.6	平衡态稳定性与输入/输出稳定性的关系	(209)
5.2	李雅普诺夫稳定性的基本定理	(210)
5.2.1	李雅普诺夫第一法	(210)
5.2.2	李雅普诺夫第二法	(211)
5.3	线性系统的稳定性分析	(219)
5.3.1	线性定常连续系统的稳定性分析	(219)
5.3.2	线性时变连续系统的稳定性分析	(222)

5.3.3 线性离散系统的稳定性分析	(223)
5.4 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	(226)
5.4.1 克拉索夫斯基法	(226)
5.4.2 变量梯度法	(227)
5.4.3 阿依捷尔曼法	(230)
5.5 Matlab 问题	(232)
5.5.1 对称矩阵的定号性(正定性)的判定	(232)
5.5.2 线性定常连续系统的李雅普诺夫稳定性	(235)
5.5.3 线性定常离散系统的李雅普诺夫稳定性	(236)
5.5.4 线性定常系统的状态空间模型的结构分析仿真平台	(237)
本章小结	(239)
习题	(240)
6 线性系统综合	(243)
6.1 状态反馈与输出反馈	(245)
6.1.1 状态反馈的描述式	(245)
6.1.2 输出反馈的描述式	(246)
6.1.3 闭环系统的状态能控性和能观性	(246)
6.2 反馈控制与极点配置	(248)
6.2.1 状态反馈极点配置定理	(249)
6.2.2 SISO 系统状态反馈极点配置方法	(251)
6.2.3 MIMO 系统状态反馈极点配置方法	(252)
6.2.4 输出反馈极点配置	(258)
6.3 系统镇定	(260)
6.3.1 状态反馈镇定	(260)
6.3.2 输出反馈镇定	(263)
6.4 系统解耦	(264)
6.4.1 补偿器解耦	(265)
6.4.2 状态反馈解耦	(266)
6.5 状态观测器	(269)
6.5.1 全维状态观测器及其设计方法	(270)
6.5.2 降维状态观测器	(274)
6.6 带状态观测器的闭环控制系统	(278)
6.7 Matlab 问题	(280)
6.7.1 反馈控制系统的模型计算	(280)
6.7.2 状态反馈极点配置	(282)

6.7.3	系统镇定	(285)
6.7.4	系统解耦	(286)
6.7.5	状态观测器	(286)
6.7.6	线性定常系统的系统综合仿真平台	(289)
本章小结		(292)
习题		(293)
7	最优控制原理	(295)
7.1	最优控制概述	(295)
7.1.1	最优控制问题的提出	(295)
7.1.2	最优控制问题的描述	(297)
7.1.3	最优控制发展简史	(299)
7.2	变分法	(300)
7.2.1	多元函数的极值问题	(300)
7.2.2	泛函	(303)
7.2.3	欧拉方程	(306)
7.2.4	横截条件	(309)
7.2.5	欧拉方程和横截条件的向量形式	(311)
7.3	变分法在最优控制中的应用	(312)
7.3.1	具有等式约束条件下的变分问题	(312)
7.3.2	末态时刻 t_f 固定、末态 $\mathbf{x}(t_f)$ 无约束的最优控制问题	(314)
7.3.3	末态时刻 t_f 和末态 $\mathbf{x}(t_f)$ 固定的问题	(317)
7.3.4	末态时刻 t_f 固定、末态 $\mathbf{x}(t_f)$ 受约束的问题	(318)
7.3.5	末态时刻 t_f 未定的问题	(320)
7.4	极大值原理	(322)
7.4.1	自由末端的极大值原理	(323)
7.4.2	极大值原理的证明	(324)
7.4.3	极大值原理的几种具体形式	(331)
7.4.4	约束条件的处理	(334)
7.5	线性二次型最优控制	(337)
7.5.1	时变状态调节器	(340)
7.5.2	定常状态调节器	(346)
7.6	动态规划与离散系统最优控制	(348)
7.6.1	最优性原理与离散系统的动态规划法	(349)
7.6.2	线性离散系统的二次型最优控制	(357)
7.7	Matlab 问题	(362)

7.7.1 线性定常连续系统的二次型最优控制	(362)
7.7.2 线性定常离散系统的二次型最优控制	(364)
本章小结	(365)
习题	(365)
附录	(369)
附录 A 矩阵分析知识补充	(369)
附录 B 名词与人名中外文索引表	(377)
附录 C 符号表	(381)
参考文献	(383)

1

现代控制理论概况

本章介绍控制理论的发展、经典控制理论与现代控制理论的特点、Matlab 软件概述、现代控制理论的主要内容及学习方法,以及本书各章节的安排。作为全书的开篇,力求通过对现代控制理论的发展前景和应用成果的展示,激发读者对现代控制理论及相关领域知识探求的渴望和学习热情。

1.1 控制理论发展概述

现代工业、科学技术的迅猛发展,对控制系统提出了越来越高的要求。例如,要求系统有更高的控制精度、更快的控制速度、更大的控制范围以及更强的适应能力等。计算机技术和其他相关材料、设备的发展也为控制系统的新理论、新设计和新技术的产生创造了条件。如今,控制理论和技术已不再局限于工业和科学技术领域,而是广泛渗透到农业、社会、经济等领域。

控制理论的发展基本上可分为经典控制理论和现代控制理论两个阶段。

1.1.1 经典控制理论

在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁着控制理论智慧火花的杰作。例如,我国北宋时期(1086—1089 年)天文学家苏颂、韩公廉建造的水运仪象台,就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统;1681 年,法国物理学家、发明家巴本(D. Papin)发明了用作安全调节装置的锅炉压力调节器;1765 年,俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等。

到了 1788 年,英国人瓦特(J. Watt)在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题。这项发明引起了人们对控制技术的重视,此后人们曾经试图改

善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统不稳定的原因,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家胡尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性的判据,奠定了频域法的基础。随后,伯德(H. W. Bode)和尼科尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步发展了频域法,形成了经典控制理论的频域分析法,为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,反馈控制方法被广泛应用于设计、研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促成了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

1948年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)创立了根轨迹分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。

以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析、设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。

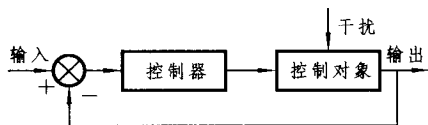


图 1-1 反馈控制系统的简化原理框图

经典控制理论主要用于解决反馈控制系统中控制器的分析与设计的问题。图 1-1 所示为反馈控制系统的简化原理框图。

经典控制理论主要研究线性定常系统。

所谓线性系统,是指系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的系统。如果描述该线性系统的微分方程的系数是常数,则称为线性定常系统。描述自动控制系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型,它是分析和设计控制系统的基础。经典控制理论中广泛使用的频域法和根轨迹法,是建立在传递函数基础上的。线性定常系统的传递函数是在零初始条件下系统输出量的拉普拉斯(以下简称拉氏)变换与输入量的拉氏变换之比,是描述系统的频域模型。传递函数只描述了系统的输入与输出间的关系,没有内部变量的表示。经典控制理论的特点是以传递函数为数学工具,本质上是频域方法,主要研究“单输入单输出”(Single-Input Single-Output, 简称 SISO)线性定常系统的分析与设计,对线性定常系统的研究已经形成相当成熟的理论。典型的经典控制理论包括 PID

控制、Smith 控制、解耦控制和串级控制等。

经典控制理论虽然具有很大的实用价值,但也有着明显的局限性,主要表现如下。

1) 经典控制理论只适用于 SISO 线性定常系统的研究,难以推广到多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, 简称 MIMO) 线性定常系统,对时变系统和非线性系统更无能为力。

2) 用经典控制理论分析、设计控制系统,一般根据幅值裕度、相位裕度、超调量、调节时间等频域里讨论的指标来进行,这些指标并不直观且难以接受,与通常所讨论的性能指标,如最快速度、最小能量等,难以建立直接对应关系。

3) 经典控制理论在系统设计、分析时无法考虑系统的初始条件,因此,难以达到高精度的位置、速度等控制系统设计要求。

4) 经典控制理论在进行控制系统设计和综合时,需要借助丰富的经验进行试凑以及大量的手工计算。

1.1.2 现代控制理论

20 世纪 50 年代中期,科学技术及生产力的发展,特别是空间技术的发展,迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题,如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制等。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。俄国数学家李雅普诺夫 (A. M. Ляпунов) 在 1892 年创立的稳定性理论被应用到现代控制理论研究中。1956 年,前苏联科学家庞特里亚金 (L. S. Понтрягин) 提出极大值原理;同年,美国数学家贝尔曼 (R. Bellman) 创立了动态规划理论。极大值原理和动态规划理论为解决最优控制问题提供了理论依据。美国数学家卡尔曼 (R. Kalman) 在 1959 年提出了著名的卡尔曼滤波器,1960 年又提出系统的能控性和能观性问题。到 20 世纪 60 年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波器为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。虽然它在本质上是一种“时域法”,但并不是对经典频域法的从频域到时域的简单回归,而是立足于新的分析方法,有着新的目标的新理论。现代控制理论研究内容非常广泛,主要包括 3 个基本内容:多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。现代控制理论从理论上解决了系统的能控性、能观性、稳定性以及复杂系统的控制问题。

与经典控制理论相比较,现代控制理论有如下优点。

1) 现代控制理论不仅适用于 SISO 线性定常系统,而且易于推广到 MIMO 系统、时变系统和非线性系统等,显示了更强的描述系统的动态行为特性的能力,能够处理的系统的范围更大;

2) 现代控制理论利用时域分析法容易给人以时间上清晰的性能指标,如最快速度、最小能量等,易于理解、接受和优化设计;

3) 现代控制理论易于考虑系统的初始条件,使得所设计的控制系统有更高的精度和更佳的性能指标;

4) 现代控制理论易于用计算机进行系统分析、计算和实现计算机控制,所设计的控制系统的实现具有极大的可行性、优越性、先进性。

现代控制理论和经典控制理论并不是截然对立的,而是相辅相成、互为补充的,有各自的长处和不足。一般来说,现代控制理论对描述系统动态特性的数学模型的要求较高,需要用到更多的数学知识,在控制系统的设计和实现时对控制设备和系统所处的环境要求也高一些。在进行实际系统分析与设计时,要根据具体的要求、目标和条件,选择适宜的控制理论方法,也可以将经典控制理论和现代控制理论结合起来综合考虑。

1.2 现代控制理论的主要内容

在工业生产过程应用中,常常遇到被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造以及所得到最优的、稳定的控制器往往过于复杂等问题。为了解决这些问题,科学家们从 20 世纪 50 年代末现代控制理论的诞生至今,不断提出新的控制方法和理论,其内容相当丰富、广泛,极大地扩展了控制理论的研究范围。概括起来,主要包括如下内容。

1.2.1 线性系统理论

线性系统是一种最为常见的系统,也是控制理论讨论得最深入的系统。线性系统理论着重于研究线性系统状态的运动规律和改变这种运动规律的可能性和方法,以建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的定量关系。通常,研究系统运动规律的问题称为分析问题,研究改变运动规律的可能性和方法的问题则称为综合问题。线性系统理论的主要内容有系统的结构性问题,如系统的能控性、能观性、系统实现和结构性分解,以及线性状态反馈及极点配置、镇定、解耦和状态观测等问题。近 30 年来,线性系统理论一直是控制领域研究的重点,其主要研究方法有:以状态空间分析为基础的代数方法,以多项式理论为基础的多项式描述法和以空间分解为基础的几何方法。

1.2.2 最优控制理论

最优控制理论是研究和解决从所有可能的控制方案中寻找最优解的一门学科。具体地说,就是研究被控系统在给定的约束条件和性能指标下,寻求使性能指标达到最佳值的控制规律问题。例如,要求航天器达到预定轨道的时间最短、所携带的燃料最少等。最优控制理论的基本内容和常用方法是动态规划、最大值原理和变分法。

1.2.3 随机系统理论和最优估计

随机系统理论就是研究随机动态系统的系统分析、优化与控制等内容。实际应用中的工程系统、农业系统以及社会经济系统的本身含有一些未知的或者不能建模的因素,外部环境上亦存在各种扰动因素以及误差和噪音,这是信号或信息的检测与传输时不可避免的。随机系统理论将各种未知的、不能建模的内外部扰动和误差,用不能直接测量的随机变量及过程以概率统计的方式来描述,并利用随机代数方程、随机微分方程以及随机差分方程作为系统动态模型来刻画系统的特性与本质。

最优估计讨论的是如何根据系统的输入、输出信息,估计或构造出随机动态系统中不能直接测量的状态变量的值。由于现代控制理论主要是以状态空间模型为基础,构成反馈闭环多采用系统的状态变量,因此,估计某些不可直接测量的状态变量的最优方法是实现闭环控制系统的重要环节。实现最优估计的难度在于系统本身受多种内外因素扰动,并且各种输入输出信号的测量值都含有未知的、不可测的误差。

最优估计的早期工作是维纳(N. Wiener)在20世纪40年代提出的维纳滤波器,较系统、完整的工作是卡尔曼在20世纪60年代初提出的滤波器理论。随机系统理论和最优估计的基础理论为概率统计理论、线性系统理论和最优控制理论。

1.2.4 系统辨识

系统辨识是利用系统在试验或实际运行中测得的输入输出数据,运用数学方法归纳构造描述系统动态特性的数学模型,并估计其参数的理论和方法。系统辨识理论是由数理统计学发展而来的,是该学科在动态系统建模中的应用。系统辨识包括两个方面:结构辨识和参数估计。在实际的辨识过程中,随着使用方法的不同,结构辨识和参数估计这两个方面并不是截然分开的,而是可以交织在一起进行的。

无论是经典控制理论还是现代控制理论,在进行系统分析、综合和设计时,都需要事先知道系统的数学模型。系统辨识是最重要的实验建模方法,因此亦是控制理论实现和应用的基础。

1.2.5 自适应控制

自适应控制研究当被控系统的数学模型未知或者被控系统的结构和参数随时间和环境的变化而变化时,通过实时在线修正控制系统的结构或参数使其能主动适应变化的理论和方法。自适应控制系统通过不断地测量系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐了解和掌握对象,然后根据所得的信息按一定的设计方法作出决策,去更新控制器的结构和参数,以适应环境的变化,达到所要求的控制性能指标。该系统理论诞生于20世纪50年代末,是控制理论中发展最迅速、最活跃的分支。

自适应控制系统应具备如下基本功能。

- 1) 辨识对象的结构和参数,以便精确地建立被控对象的数学模型;