

高等学校精品教材

XIANDAI KONGZHI LILUN JI YINGYONG

现代控制理论 及应用

齐晓慧 黄健群 董海瑞 杨志军 编著



随书附光盘一张



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代控制理论及应用

齐晓慧 黄健群 董海瑞 杨志军 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍现代控制理论的五大基本分支,即线性系统理论(包括状态空间描述、状态空间分析和状态空间综合)、最优控制理论(包括变分法、极小值原理、动态规划和鲁棒最优控制)、最优估计理论(基本估计方法和卡尔曼滤波)、系统辨识(非参数辨识方法和参数辨识方法)及自适应控制(模型参考自适应和自校正控制)。

为了方便读者基于 MATLAB/SIMULINK 环境对控制系统进行建模、分析和综合,在相应分支后均给出了相应的应用方法和实例。对线性系统理论部分,给出在 MATLAB 环境上二次开发的 CAI 课件;对最优控制理论部分,给出了 LQR 问题的 MATLAB 实现,并对 Optimization Toolbox、Robust Control Toolbox 的使用方法进行了介绍;在系统辨识部分,通过实例介绍了使用 System Identification Toolbox 进行建模的方法;在自适应控制部分,也给出了基于 MATLAB/SIMULINK 进行自适应控制设计的方法和实例。

为了便于学习,每章开头给出了提要,结语给出了小结。除了列举丰富的例子外,还选配了适量的思考题与习题。本书可供非控制类的大学高年级本科生、研究生使用,也可供对控制理论感兴趣的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论及应用/齐晓慧等编著. —北京:国防工业出版社,2007.5

ISBN 978-7-118-05022-6

I. 现… II. 齐… III. 现代控制理论 IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021823 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 25 字数 492 千字

2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 42.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

研究多变量控制系统的现代控制理论诞生后,它就迅速成为一门重要的应用理论科学,在工业、农业、交通运输和国防等方面被广泛应用,特别是在宇宙航行、人造卫星、洲际导弹等的应用中取得了突出的效果。现代控制理论以严谨的数学结构和对设计指标明确的描述方式,为控制工程实践提供了解析的设计手段,也为基于计算机仿真软件 MATLAB 对控制系统进行建模、分析、设计奠定了基础。

本书试图从工程实践角度出发,系统地介绍现代控制理论的五大基本分支。阐述理论和方法时,在保证理论严密性的前提下,注重物理意义的解释,尽量减少繁杂的数学推导;介绍 MATLAB 软件及其相应工具箱时,力求结合实例,给出编程程序,使读者在比较全面地了解和掌握基本理论的基础上,正确运用 MATLAB 软件去解决工程中的实际问题。

全书共分五篇。第一篇为线性系统理论,包括线性控制系统的状态空间描述、状态空间分析、状态空间综合以及基于 MATLAB 的线性控制系统分析与综合;第二篇为最优控制理论,包括最优控制问题与变分法、极小值原理及其应用、线性二次型性能指标的最优控制、动态规划、鲁棒最优控制以及基于 MATLAB 的最优控制系统分析与综合;第三篇为最优估计理论,包括几种最优估计和卡尔曼滤波;第四篇为系统辨识,包括建模与系统辨识、非参数模型辨识方法、参数模型辨识方法以及基于 MATLAB 的系统辨识工具箱简介;第五篇为自适应控制,包括模型参考自适应控制、自校正控制和基于 MATLAB 的自适应控制系统设计简介。

本书绪论、第 1 章~第 3 章及第四篇和第五篇由齐晓慧编写,第 5 章~第 8 章由黄健群编写,第三篇由董海瑞编写,第 4 章、第 9 章和第 10 章由杨志军编写。齐晓慧对书稿进行了统一和审定。在编写过程中,作者参阅了近期国内出版的有关现代控制理论的教材和文献,得到国防工业出版社郑廷编审的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 11 月

目 录

绪论	1
0.1 控制理论的产生与发展	1
0.2 现代控制理论的基本内容	4
0.3 本书内容简介	6

第一篇 线性系统理论

概述	8
第1章 线性控制系统的状态空间描述	13
1.1 控制系统的状态空间表达式	13
1.2 线性系统状态空间表达式的建立	16
1.3 线性系统状态空间表达式的特征标准型	33
1.4 由状态空间表达式求传递函数阵	41
1.5 组合系统的状态空间表达式及传递函数阵	43
小结	46
思考题与习题	46
第2章 线性控制系统的状态空间分析	48
2.1 线性控制系统的运动分析	48
2.2 线性控制系统的能控性和能观性	62
2.3 控制系统的运动稳定性	81
小结	95
思考题与习题	95
第3章 线性控制系统的状态空间综合	99
3.1 反馈控制系统结构及其对系统特性的影响	100
3.2 闭环系统的极点配置	104
3.3 控制系统的镇定问题	109
3.4 控制系统的渐近跟踪问题	111
3.5 控制系统的解耦问题	115
3.6 状态观测器	125
小结	141
思考题与习题	141

第4章 基于 MATLAB 的线性控制系统分析与综合	145
4.1 状态空间分析的 MATLAB 实现	145
4.2 基于 MATLAB 的线性控制系统分析与综合软件介绍	148
小结	151
思考题与习题	152

第二篇 最优控制

概述	153
第5章 最优控制问题与变分法	155
5.1 最优控制问题的数学描述	155
5.2 泛函与变分	157
5.3 利用变分法解最优控制问题	166
小结	171
思考题与习题	172
第6章 极小值原理及其应用	174
6.1 极小值原理	174
6.2 时间最优控制问题	178
小结	184
思考题与习题	185
第7章 线性二次型性能指标的最优控制	186
7.1 二次型性能指标及其涵义	186
7.2 状态调节器	188
7.3 输出调节器	193
7.4 跟踪问题	197
小结	201
思考题与习题	201
第8章 动态规划	204
8.1 多级决策过程与最优性原理	204
8.2 离散控制系统的动态规划	206
8.3 连续控制系统的动态规划	209
小结	213
思考题与习题	213
第9章 鲁棒最优控制	216
9.1 鲁棒控制问题概述	216
9.2 H_∞ 最优控制理论简介	219
小结	228

思考题与习题	228
第 10 章 基于 MATLAB 的最优控制系统分析与综合	230
10.1 线性二次型最优控制的 MATLAB 实现	230
10.2 最优化工具箱简介	235
10.3 鲁棒控制工具箱简介	240
小结	249
思考题与习题	249

第三篇 最优估计理论

概述	251
第 11 章 几种最优估计	254
11.1 基本估计方法	254
11.2 几种最优估计方法的比较	263
小结	264
思考题与习题	264
第 12 章 卡尔曼滤波	265
12.1 离散型卡尔曼滤波	265
12.2 连续型卡尔曼滤波	271
12.3 卡尔曼滤波的实际应用问题	276
小结	282
思考题与习题	283

第四篇 系统辨识

概述	284
第 13 章 建模与系统辨识	286
13.1 模型、数学模型及建模	286
13.2 系统辨识	289
小结	297
思考题与习题	298
第 14 章 非参数模型辨识方法	299
14.1 时域测定法	299
14.2 相关分析法	303
小结	309
思考题与习题	310
第 15 章 参数模型辨识方法	312
15.1 最小二乘法辨识	312

15.2	极大似然估计法	327
15.3	系统辨识中的几个问题	333
	小结	336
	思考题与习题	336
第 16 章	基于 MATLAB 系统辨识工具箱建模简介	339
16.1	系统辨识工具箱简介	339
16.2	基于系统辨识工具箱的建模举例	345
	小结	348
	思考题与习题	348

第五篇 自适应控制

概述.....	350
第 17 章 模型参考自适应控制	352
17.1 模型参考自适应控制系统的一般概念	352
17.2 模型参考自适应控制系统的设计方法	353
小结	362
思考题与习题	363
第 18 章 自校正控制	364
18.1 自校正控制系统的一般概念	364
18.2 几种自校正控制	365
小结	376
思考题与习题	377
第 19 章 基于 MATLAB 的自适应控制系统设计简介	379
小结	388
思考题与习题	388
参考文献.....	389

绪 论

自动控制技术在工农业生产、交通运输、国防建设和空间技术等领域都有着重要的应用。随着科学技术的发展,一方面自动控制系统的趋向是大型化、复杂化和综合化,另一方面对控制系统的品质要求日益提高。这样,以研究单变量、线性、定常系统为对象,主要采用试凑方法进行系统分析和设计的经典控制理论就难以满足需要,从而现代控制理论应运而生。现代控制理论以严谨的数学结构及其对设计指标明确的描述方法,为控制工程实践提供了解析的分析、设计手段。近年来蓬勃发展的鲁棒控制、模糊控制、神经网络控制、递阶控制、专家系统等都是现代控制理论深度和广度的开拓。

本章是对现代控制理论的一个概貌性的论述。将介绍控制理论的产生与发展、现代控制理论的基本内容,并对全书进行简介,以期在宏观上对现代控制理论有一个总体的认识。

0.1 控制理论的产生与发展

人类发明具有“自动”功能装置的历史,可以追溯到公元前14世纪—公元前11世纪的中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。公元前4世纪,希腊的柏拉图(Platon,公元前427—公元前347)首先使用了“控制论”一词。但自觉运用反馈原理设计自动控制装置并得到成功应用的是英国的瓦特(J. Watt, 1736年—1819年),他于1765年发明了蒸汽机,1770年又用离心式飞锤调速器建立了蒸汽机转速自动控制系统,这标志着以蒸汽动力装置为开端的自动化初级阶段的到来。但在这些调速系统中,大多出现了振荡问题,于是唤起了许多学者开始对自动控制理论进行探索和研究。在1868年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831年—1879年)发表了“论调速器”一文,对它进行分析和研究,解释了该物理现象即为稳定性问题,指出控制系统的性能可以用线性微分方程来描述,并且系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来确定。此后,英国的劳斯(E. J. Routh, 1831年—1907年)和德国的赫尔维茨(A. Hurwitz, 1859年—1919年)分别于1877年和1895年提出了可用于高阶系统、根据代数方程系数判别稳定性的准则。1892年俄国学者李雅普诺夫(A. M. Ляпунов)发表了巨著《论运动稳定性的一般问题》,他用严格的数学分析方法全面论述了稳定性问题,为控制理论打下了坚实的基础。

20世纪30年代电子技术的迅速发展,促进了信息处理和自动控制及其理论的发展。1932年美籍瑞典科学家奈奎斯特(H. Nyquist)提出了稳定性的频率判据,即根据开环频率特性曲线来判断闭环系统稳定性的准则。1940年伯德(H. W. Bode)引入对数坐标系,1942年哈里斯(H. Harris)建立了传递函数的概念,1945年伯德写了《网络分析和反馈放

大器设计》一书。1948年,伊文思(W. R. Evens)提出了根轨迹法,同年,美国著名科学家维纳(N. Wiener, 1894年—1964年)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》,系统地阐述了控制理论的一般原理和方法,推广了反馈的概念,为控制理论学科的发展奠定了基础。该书的出版也标志着控制学科的诞生。1954年,我国著名科学家钱学森在美国出版了《工程控制论》一书,奠定了工程控制论的基础。

控制理论的发展得益于实践、得益于社会的需求,反过来又指导实践、促进社会的进步。它不仅已经成功地运用到工农业生产、科学技术、军事、生物医学、社会经济及人类生活等诸多领域,而且其应用已不限于工程控制,可以说已经渗透到了物质世界的所有领域,它对发展生产和社会进步都起着重要作用。控制理论的发展一般可划分为3个时期。

1) 经典控制理论时期(20世纪30年代—50年代)

所谓的经典控制理论,一般是指以单变量系统为主,用复频域研究控制系统动态特性的理论。在特定输入下研究系统输出的运动规律称为系统分析,而按一定动态指标要求(系统的稳定性、误差精度和各种动态指标——调节时间、超调量、误差系数和带宽频率……等)来改变这种运动规律称为系统综合。要指出的是,在经典控制理论发展过程中,开始和后来都曾用时域方法(微分方程、差分方程),但复频域方法还是主导的,故其主要特点可以概括如下:

(1) 计算量较小。与时域法的求解微分方程相比,其计算量很小,而且很多工作可用作图法来完成,如Nyquist曲线、Bode图、Nichles图等。

(2) 物理概念清晰。在分析和综合时便于联系工程实际做出决定,减少盲目性。

(3) 可用实验方法建立系统的数学模型,这样便于工程的应用。

(4) 在复频域内研究控制系统的时间变化特性,是一种间接的方法。虽然可判断系统运动的主要特征,但得不到系统运动的精确曲线。

(5) 以传递函数、频率特性为数学模型,是从外部来分析研究系统的,因此,当复杂系统的内部特性从外部反映不出来时,这种方法可能会得到错误的结论,此外,它也难以揭示系统更为深刻的本质特性。

(6) 只适用单变量线性定常系统,而不能有效地处理多变量线性定常系统以及时变系统或非线性系统的问题。

2) 现代控制理论时期(20世纪50年代—70年代)

现代控制理论是在经典控制理论基础上逐步发展起来的,它起源于20世纪50年代。由于空间技术的发展,对自动控制系统的要求越来越高,控制系统越来越复杂,原有的经典控制理论已不能适应这一发展的需要。另一方面,数字计算机的迅速发展,为控制理论的新方法提供了有力工具。现代控制理论研究方法在本质上是一种时域方法,即所谓的状态空间法。它的分析和综合目标是要揭示系统的内在规律,如能控性、能观性等,实现系统在一定意义下的最佳化。它以下述3个方面作为其形成的标志:

(1) 用来对系统进行全面描述、分析和设计过程的状态空间方法;

(2) 最优控制中的Pontriagin极大值原理和Bellman的动态规划;

(3) 随机控制系统理论中的Kalman滤波技术。

与经典控制理论进行比较,现代控制理论的基本特点可以概括为:

(1) 所研究的对象不再限于单变量的、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；

(2) 在时间域上建立系统模型的状态空间描述,不仅可以描述系统的外部特性,而且揭示了系统的内部状态和性能,可以进行系统的各种定量和定性分析以及希望的控制律设计；

(3) 以现代数学为主要分析手段,其中应用最多的分支是矩阵代数和微分方程理论,随着现代控制理论的发展,许多数学理论被应用到现代控制理论的新分支的研究之中,如李代数用于离散事件系统,微分几何用于非线性系统的分析和设计等；

(4) 以计算机为重要的辅助手段进行系统的分析和设计。在现代控制理论中,单靠手工计算一般无法完成较为复杂的控制系统的分析和设计,而必须借助于计算机,由此而产生了控制系统的计算机辅助分析和设计分支,并已经逐渐完善,在实际中得到重要的应用。用各种语言设计计算程序来对控制系统进行分析和设计显示了极大的优越性,它不仅在计算机上可以很容易修改系统参数,对各种控制方案及不同的参数组合进行充分比较,从中选出较好的控制方案,而且借助于计算机的图形显示功能,可对控制系统的动态特性获得更加深入的直观理解。特别是目前十分流行的数值计算软件 MATLAB,是自动控制计算与仿真的强有力工具。MATLAB 的工具箱,已覆盖了控制系统的各个领域,每一个工具箱都是当今世界上该控制领域里最顶尖、最优秀的计算与仿真软件。

尽管经典控制理论和现代控制理论各有其特点,但二者却是密切相关的。表现在:

(1) 任何事物都处于不断的发展变化之中,经典和现代控制理论从产生到发展至今,已经在许多方面相互渗透。越来越多的经典控制理论中用之有效的方法已渗透到现代控制理论内部,如零极点配置和频域方法(英国的罗森布洛克(H. H. Rosenbrock) 把一个多变量系统的设计问题转化为经典控制理论中的单变量系统的设计问题,创立了多变量频域理论)。

(2) 对单变量线性定常系统来说,尽管经典方法和现代方法从模型描述到分析、设计方法各不相同,但二者的设计结果可在 Laplace 变换及其逆变换下相互转化。从这种意义上讲,二者在单变量系统的分析和设计上是统一的。

3) 大系统控制理论和智能控制理论时期(20 世纪 60 年代 —)

从 20 世纪 60 年代末开始,控制理论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、软件计算等邻近学科交叉中又形成了许多新的研究分支。

例如,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的信息处理、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、管理等非工程系统,原有的理论方法遇到了挑战,大系统理论的发展逐渐转向“复杂系统”概念。

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、非传统的控制方法。它突破了传统的控制中控制对象有明确的数学描述和控制目标需进行数量化的限制,所采用的理论方法主要来源于自动控制理论、人工智能、模糊集和神经网络以及运筹学等学科分支,并已在专家系统、模糊控制、神经网络、递阶控制方面取得了较大进展。

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

0.2 现代控制理论的基本内容

从20世纪50年代以来,现代控制理论各方面都有了明显的进展,而且已形成几个分支学科:线性系统理论、最优控制理论、最优估计理论、动态系统辨识、自适应控制、鲁棒控制、预测控制等。有些分支学科还渗透到了相邻学科中,如滤波技术和适应滤波,自学习理论和人工智能,系统辨识和建模理论等。

概括地说,现代控制理论的基本内容主要包括如下5个分支。

1. 线性系统理论

线性系统理论是现代控制理论的基础,也是现代控制理论中理论最完善、技术最成熟、应用最广泛的部分。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、参数、动态行为和性能之间确定的及定量的关系。线性系统理论主要包括系统的数学模型建立、系统运动分析、能控性和能观性、稳定性分析、状态反馈与极点配置以及状态观测器理论等内容。

2. 最优控制理论

最优控制是在给定限制条件和性能指标(又称目标函数或性能泛函或评价函数)下,寻找使系统性能在一定意义下为最优的控制规律。所谓“限制条件”,即约束条件,指的是物理上对系统所施加的一些约束;而“性能指标”,则是为评价系统在全工作过程中的优劣所规定的标准;所寻求的控制规律就是综合出的最优控制器。

具体地描述如下:

假设图0-1中的系统,有一组输入函数(控制函数) $u(t)$ 作用在受控系统上,其相应状态变量是 $x(t)$,通过量测系统可得到这些状态的某种组合 $y(t)$ 。

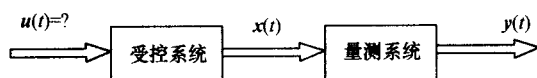


图0-1 最优控制问题示意图

从实际需要出发,可以为受控系统确定一些目标。例如,一个飞行器的飞行时间最短、燃料耗费最少、能量损失最小、与指定轨线的偏离或偏离均方最小等,可以提出一系列目标函数

$$J = L[x(t), u(t), t] \quad (0-1)$$

受控系统本身的输入与输出或(和)其状态变量间有一定动态关系,称之为受控系统的状态方程,如

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (0-2)$$

当式(0-1)和(0-2)已知,则找到一个控制函数 $u^*(t)$ 满足条件(0-2),并使 J 为极值(最大或最小)的问题,就是现代控制理论中最普遍的课题之一,称之为最优控制

问题。

控制理论的根本是反馈控制,所以最优控制问题中自然包含如何构成最优反馈控制律的问题。当然,可以模仿经典控制理论那样,构成以输出 $y(t)$ 反馈的最优控制律,这就是输出最优控制。由于输出中不可能包含系统状态的全部信息,因此,理论上就不能从输出反馈控制得到最优控制。理论上的最优控制应当来自状态反馈,所以就有最优状态反馈。当不能直接观测到状态 $x(t)$ 时,在得到最优控制律之前,就要设法从输出向量 $y(t)$ 找到系统的全部状态 $x(t)$,这就是所谓观测器问题。

系统最优控制律的实现涉及到状态变量是否能直接全部得到的问题,当系统状态不能全部直接量测到时,要为系统设计一个状态观测器,涉及受控系统是否能够控制和能观测的问题,这就是系统的能控性和能观性问题。在以研究系统运动状态规律为主的现代理论中,状态的能控性和能观性是设计系统最优控制的先决条件。

3. 最优估计理论

最优估计理论也称为最优滤波理论。当系统受到环境噪声或负载干扰时,其不确定性可以用概率和统计的方法进行描述和处理。也就是在系统数学模型已经建立的基础上,利用被噪声等污染的系统输入输出的量测数据,通过统计方法获得有用信号的最优估计。经典的维纳滤波理论阐述的是对平稳随机过程按均方意义的最佳滤波,而现代的卡尔曼滤波理论用状态空间法设计最佳滤波器,克服了前者的局限性,适用于非平稳过程并在很多领域中得到广泛应用,成为现代控制理论的基石。

具体描述如下:图 0-1 中系统输出 $y(t)$ 是通过量测系统由状态转换过来的,实际的量测系统要受到噪声 $v(t)$ 干扰,如图 0-2 所示。这时,从 $y(t)$ 尽可能消除干扰 $v(t)$ 的影响反求状态 $x(t)$ 的问题就叫做最优状态估计问题。

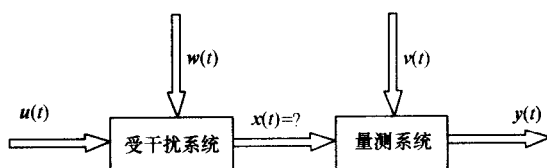


图 0-2 最优估计问题示意图

在图 0-2 中,我们把整个系统都看成是一个信息传递系统。输入噪声 $w(t)$ 表示这个信息传递系统的模型误差,或称为动态噪声,则从 $y(t)$,克服 $w(t)$ 和 $v(t)$ 的影响来估计 $x(t)$,称为最优状态估计。

4. 动态系统辨识

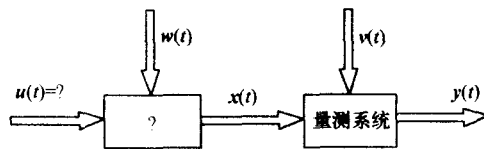
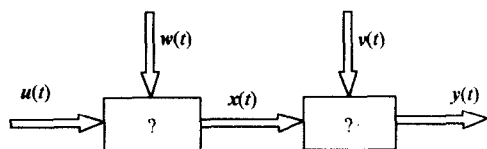
建立动态系统的数学模型,使其能正确反映系统输入、输出之间的基本关系,是对系统进行分析和综合的前提。当系统比较复杂,不能通过解析方法直接建立模型时,往往在系统输入输出试验数据或运行数据的基础上,从一类给定的模型中确定一个与被研究系统本质特征等价的模型。如果模型的结构已经确定,只需确定其参数,则称参数估计问题。若模型的结构和参数需同时确定,就是系统辨识问题。也可用图 0-3 表示。

根据输入 $u(t)$ 和输出 $y(t)$,消除动态干扰 $w(t)$ 、量测干扰 $v(t)$ 的影响来寻找一个最适合于 $u(t)$ 和 $y(t)$ 的数学模型,这一大类问题就是动态系统的辨识问题,它在理论和实际中都具有重要意义。

5. 自适应控制

所谓自适应控制,指的是随时辨识系统的数学模型并按照当前的模型去修改最优控制规律。当被控对象的内部结构和参数以及外部的环境特性及扰动存在不确定性时,系统自身能在线量测和处理信息,在线相应地修改控制器的结构和参数,以保持系统所要求的最佳性能。

可用图0-4来表示。就是由 $w(k), v(k), y(k), x(k), u(k)$ 来确定 $u^*(k+1)$ 。目前比较成熟的自适应控制有两大基本类型,一种是模型参考自适应控制;另一种为自校正控制。近期自适应控制理论发展的热点是广义预测控制、万用镇定器机理、鲁棒稳定的自适应系统以及引入了人工智能技术的自适应控制等。



0.3 本书内容简介

本书作为控制类本科生、非控制类硕士生或博士生的一门选修课教材,应当包含现代控制理论中最基本的内容。因此,本书分成线性系统理论、最优控制理论、最优估计理论、系统辨识、自适应控制五大部分。

以状态空间分析方法为核心的线性系统理论不仅是现代控制理论的重要内容,而且也是网络理论、通信理论、管理科学等的基础。在这部分中,本教材贯穿一条主线,即控制系统的状态空间描述(数学模型)→运动分析、能控性、能观性分析和稳定性分析(系统性能分析)→状态反馈与极点配置、镇定问题、状态观测器设计、解耦控制、渐近跟踪等(系统综合)。为了便于对控制系统进行分析和综合,介绍了状态空间分析的 MATLAB 实现方法,并对提供的基于 MATLAB 的线性控制系统分析与综合软件给出了使用说明。

确定性最优控制问题是现代控制理论的重要问题之一,也是随机性最优控制的基础。它包含两大基本内容,一是如何建立实际问题的最优控制的数学描述;二是如何对最优控制问题进行数学求解。本书在给出最优控制问题数学描述方法的基础上,重点介绍了3种求解最优控制问题的方法,即变分法、极小值原理和动态规划法。考虑到线性二次型性能指标的最优控制以及优化问题在实际工作中的重要性,本书对线性二次型性能指标的最优控制问题进行了较详细地阐述,对鲁棒最优控制问题进行了简介。在这部分中,介绍了基于 MATLAB 的两个重要工具箱的使用方法,这两个工具箱是最优化工具箱(Optimization Toolbox)和鲁棒控制工具箱(Robust Control Toolbox)。

实际系统承受着各种随机噪声的干扰,如何处理随机过程系统是现代控制理论中的又一个重要问题,即随机控制问题。它包括两大部分内容:最优状态估计和随机最优控制。前者常称为“滤波技术”,即如何从被干扰的测量值中得到真实信息。由于控制系统在工作中,所得到的被量测值都包括干扰信号,所以,通过滤波方法尽可能得到逼近的实际状

态,再以此进行最优控制。本书只涉及最优(状态)估计的内容,分两大部分进行介绍,即几种最优估计和卡尔曼滤波理论。

动态系统辨识是从系统的实际输入输出推算系统的数学模型,这是古典动态测试的发展。动态系统辨识的范围很广,内容很多。本书仅从3个方面对有关的基本内容做一些介绍,以期读者对建模与系统辨识有一定的了解,为后续的学习打下一定的基础。这3方面的内容分别是:建模与系统辨识、非参数辨识方法和参数辨识方法。在这部分中,还介绍了基于MATLAB的系统辨识工具箱(System Identification Toolbox)的使用方法。

控制系统在实际工作中,面对着客观上存在的各种不确定性,这里的“不确定性”主要指的是被控对象及其环境的数学模型不是完全确定的,其中包含一些未知因素和随机因素。如何通过不断地测量系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐地了解 and 掌握被控对象,然后根据所得到的过程信息,按一定的设计方法,做出控制决策去更新控制器的结构、参数或控制作用,以便在某种意义下,使控制效果达到最优或近似最优,这就是自适应控制要解决的主要问题。在这部分中,本书介绍目前比较成熟的两大类自适应控制系统:模型参考自适应控制系统(Model Reference Adaptive System)和自校正调节器(Self-Tuning Regulator)。并在最后,对基于MATLAB的自适应控制系统设计进行了简介。

第一篇 线性系统理论

概 述

线性系统理论是现代控制理论中最基本、最成熟的分支之一,学习线性系统理论具有十分重要的意义。一方面它在过程控制、航空、航天等领域的应用起到了应有的作用,另一方面,线性系统理论中的很多概念和方法,对于研究现代控制理论的其他分支,如最优控制理论、最优估计理论、系统辨识、自适应控制理论等是不可缺少的基础。在系统学习线性系统理论内容之前,为了使读者对它在整体上有个概貌性的认识,我们从研究对象、主要任务、发展过程以及主要学派 4 个方面对其做一个概括性的介绍。

1. 线性系统理论的研究对象

线性系统理论的研究对象为线性动态系统,简称线性系统。它是实际系统的一类理想化的模型。当描述动态系统的数学表达式具有线性属性时,称相应的系统为线性系统。线性系统的一个基本特征是满足叠加性和齐次性,所谓的叠加性是指当有多个输入同时作用于系统时,这个系统产生的输出等于每个输入单独作用于系统所产生的输出之和;所谓的齐次性是指当输入放大 K 倍,相应的输出也放大 K 倍。特别要指出的是,不能简单地把输入 $u(t)$ 和输出 $y(t)$ 有线性关系的系统都称为线性系统。例如,若 $y(t)$ 和 $u(t)$ 之间存在线性关系

$$y(t) = au(t) + b$$

但该系统却不是一个线性系统。因为当输入分别为 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 时,相应的输出为

$$y_1(t) = au_1(t) + b$$

$$y_2(t) = au_2(t) + b$$

然而,当输入为 $u_1(t) + u_2(t)$ 时,其输出为

$$a[u_1(t) + u_2(t)] + b \neq y_1(t) + y_2(t)$$

显然,不满足叠加性。

另外,还需说明的是,对线性系统所提出的叠加性和齐次性这两个要求是独立的。这是因为有些非线性系统,尽管满足叠加性,但不满足齐次性的要求。例如图 1-1 所示的非线性系统,其中滤波器 1 和滤波器 2 将输入信号分为两个不重叠的频谱带。若 $e_1(t)$ 的频谱完全落在滤波器 1 的通频带以内,而 $e_2(t)$ 的频谱完全落在滤波器 2 的通频带以内,显然,这个系统满足叠加性要求,但它不满足齐次性要求。

对于线性系统,通常还可进一步细分为线性时不变系统 (Linear Time-Invariant

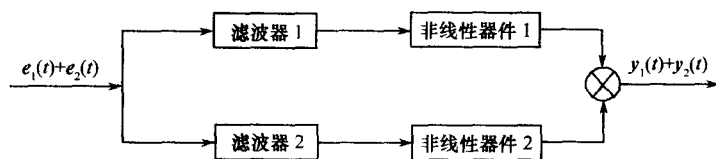


图 1-1 满足叠加性但不满足齐次性的非线性系统示意图

Systems) 和线性时变系统 (Linear Time-Varying Systems) 两大类。

线性时不变系统又称为线性定常系统。其特点是系统参数不随时间而变,常用常系数线性微分方程或差分方程来描述。实际上,线性时不变系统是对客观实际系统经过近似化和工程处理后所导出的一类理想化模型。由于一方面线性时不变系统在研究上的简便性和基础性;另一方面许多实际系统都可以在一定范围内以足够的精确度用线性时不变系统来表示,因此它成为了线性系统理论的主要研究对象。

线性时变系统又称为线性变系数系统。其特点是系统参数随时间而变,表征系统动态过程的线性微分方程或差分方程中,至少包含一个参数,是随时间变化的函数。在工程实际中,由于系统外部和内部的原因,参数的变化是不可避免的,因此严格地说几乎所有系统都属于时变系统的范畴。但是,从研究的角度来看,只要参数随时间变化远远慢于系统状态随时间的变化,那么就可以把系统当作定常的来考虑,由此而导致的误差完全可以达到忽略不计的程度。

由于对线性时不变系统和线性时变系统在数学描述上的差别,所以导致了对两者进行系统分析和综合方法上的不同。事实上,与线性时不变系统相比,对线性时变系统的研究要远为复杂,所建立的理论体系也远不成熟。有鉴于此,本篇将以线性时不变系统作为研究的重点。

2. 线性系统理论的主要任务

线性系统理论是一门以研究线性系统的分析与综合的理论和方法为基本任务的学科。具体地说,它主要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,建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间确定的和定量的关系。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或设计。前者属于认知系统,后者则为改造系统。

(1) 系统数学模型的建立。它是对系统进行分析 and 综合的前提。其目的是便于更深入地、定量地揭示系统行为的规律性或因果关系性,其实质是对系统的动态过程,即各个变量和参量间的关系按照研究需要的角度进行描述。线性系统的数学模型主要有时间域模型和复频域模型。时间域模型表现为微分方程组或差分方程组,可同时适用于定常系统和时变系统;复频域模型表现为传递函数和频率特性,只适用于定常系统。基于这两类数学模型,发展和形成了线性系统理论中的两类不同方法——状态空间方法和复频域方法。建立实际系统数学模型有解析法和实验法两种基本途径。前者通过分析系统的物理机理,来建立系统的各个变量和各个参量之间的数学方程,其物理概念清晰,但一般只适用于较为简单的系统;后者基于一定条件下对系统施加典型激励信号所获得的输入输出数据,利用相应的数学方法来建立反映系统变量关系的数学方程,即所谓的系统辨识,它已经成为现代控制理论独立的重要分支。