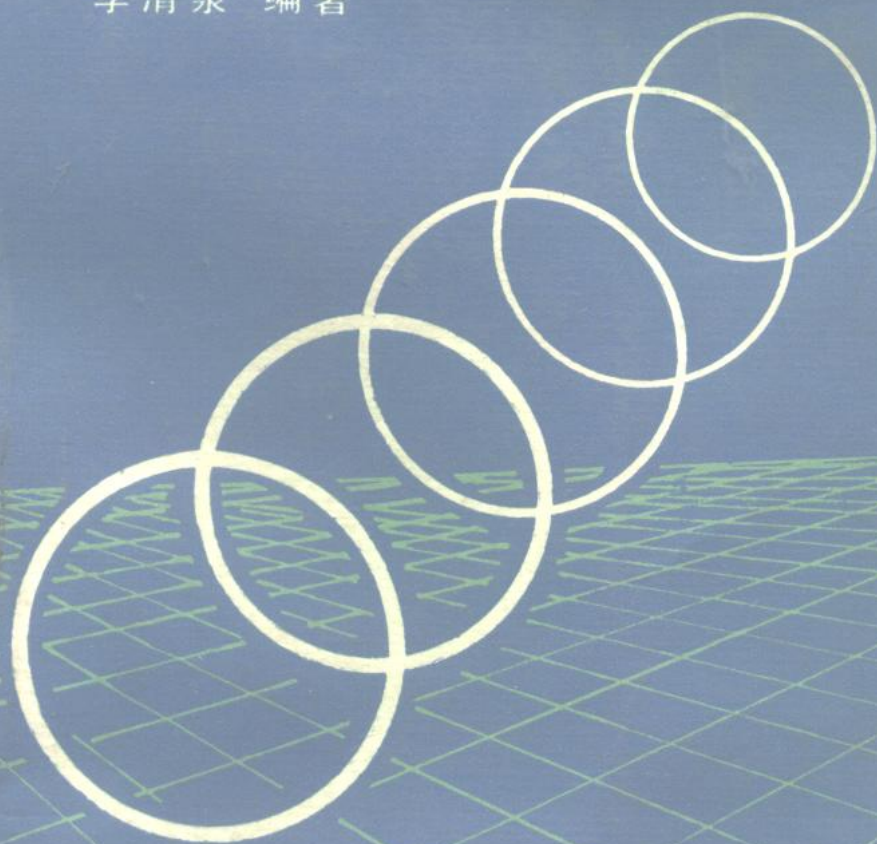


自适应控制系统理论、 设计与应用

李清泉 编著



科学出版社

TP273.02

2

自适应控制系统理论、 设计与应用

李清泉 编著

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书是作者在清华大学自动化系讲授“自适应控制”课程的教材,主要介绍自适应控制系统的工程控制理论、设计方法和应用实例。

全书共九章和一个结语。前四章为基础理论,内容包括概述、离散时间系统、系统辨识和设计自适应控制系统的理论基础,后五章讲述各种自适应控制系统的工作原理、算法和应用,内容包括模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、自寻最优控制系统、变结构控制系统、模糊自适应控制系统和智能自适应控制系统,特别是对前两种系统进行了全面深入的分析和讨论。结语是对自适应控制的未来研究课题和发展的设想。书中各章均有大量的例题、习题和实验,供读者参考和选做。

本书可作为自动控制、计算机科学与应用以及相近专业的大学生和研究生教材,也可供从事自动控制和计算机应用的教师 and 科技人员参考。

自适应控制系统理论、 设计与应用

李清泉 编著
责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京东黄城根北街15号
邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1990年3月第一次印刷 印张:33
字数:765 000

ISBN 7-03-001562-2/TP·108

定 价:24.50元

前 言

70年代以来,由于空间技术和过程控制的需要,特别是在微电子技术、计算机技术的迅猛发展和广泛应用的推动下,自适应控制的理论和设计方法有了显著的进展,它已成为现代控制理论中的一个十分活跃和富有魅力的重要科学领域。与传统的调节原理和最优控制理论不同,自适应控制能在受控过程的模型知识和环境知识知之不全甚至知之甚少,的情况下,给出高质量的控制品质。大量工程实践表明,对于复杂的受控对象和过程,采用自适应控制往往能提高现有的生产率,降低成本,改进产品质量和开发新的产品。这也许就是自适应控制至今不衰的原因。

本书的目的是从工程控制理论和应用的观点出发,对现有自适应控制系统的核心内容进行全面深入的分析和综合,以利于读者在现有成果的基础上,进行更加有益的开拓工作。

本书共九章和一个结语。前四章为基础理论。第一章概述了自适应控制系统的作用、类型、理论和应用概况。由于自适应控制必须经由数字计算机技术才能实现,所以在第二章中用了较多的篇幅来讲述离散时间系统,其中不少内容是一般教材中没有的。作为自校正控制支柱的系统辨识技术,安排在第三章中讲解。第四章的稳定性和随机控制理论是设计常用自适应控制系统的理论基础。第五至八章是全书的重点,它们占了近三分之二的篇幅,内容包括模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、自寻最优控制系统、变结构控制系统、模糊自适应控制系统和智能自适应控制系统,特别是对前两种系统进行了全面深入的分析 and 讨论。第九章介绍自适应控制系统在各个领域中的工程应用。结语是对自适应控制未来的研究课题和发展的设想。为了帮助读者掌握和巩固所学的内容,全书各章均有大量的例题、习题和实验,供读者参考和选做。读者若想了解某个课题的原始论述和细节,可从书末的参考文献中找到。

为了努力反映自适应控制领域的先进水平和最新研究成果,以及按教学要求安排和组织这些内容,本书对浩瀚的自适应控制文献作了科学的取舍,并纳入了多年的教学经验。如果它能对自适应控制的普及、推广应用作出微薄的贡献,笔者就十分欣慰了。

从大学有关专业的教学要求来看,本书可作为自动控制、计算机科学与应用以及有关专业的大学生和研究生的教材。全书内容比较丰富,有关教师可根据学时和专业特点加以选用。

由于自适应控制的成果甚多,涉及的知识面又广,再加上笔者学识有限,所以书中肯定存在不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 自适应控制的任务	1
1.2 自适应控制系统	2
1.3 自适应控制系统的类型	3
1.3-1 自校正控制系统	4
1.3-2 模型参考自适应控制系统	5
1.3-3 自寻最优控制系统	7
1.3-4 变结构控制系统	8
1.3-5 学习控制系统	8
1.4 自适应控制的理论问题	9
1.4-1 稳定性	9
1.4-2 收敛性	10
1.4-3 鲁棒性	10
1.4-4 其他理论课题	10
1.5 自适应控制技术的应用概况	10
习题	11
第二章 离散时间系统	13
2.1 离散化方法	13
2.2 连续时间系统的等价离散时间状态空间描述	14
2.2-1 系统的零阶保持采样	14
2.2-2 具有时滞的系统	17
2.2-3 具有随机噪声的系统	18
2.3 连续时间系统的等价脉冲传递函数	19
2.3-1 系统的零阶保持采样	19
2.3-2 具有时滞的系统	23
2.4 离散模型参数的规范关系	26
2.4-1 零阶保持法	26
2.4-2 其他离散化方法	27
2.4-3 离散模型参数规范关系的实现	29
2.5 离散时间系统的极点和零点	32
2.6 平移算子	37
2.6-1 正向和反向平移算子	37
2.6-2 脉冲传递算子和脉冲传递函数	40
2.7 脉冲传递算子的实现和它的关联矩阵	41
2.7-1 单变量脉冲传递算子与状态空间规范型的关系	41

2.7-2 多变量 $H(q)$ 的状态空间实现	46
2.7-3 多变量系统的关联矩阵	51
2.8 CARMA 模型	56
2.8-1 平稳随机过程	56
2.8-2 随机扰动模型	58
2.8-3 输入-输出模型的规范化	63
2.8-4 CARMA 模型的控制特征	66
2.8-5 CARMA 模型与状态空间规范型的关系	67
2.8-6 多变量 CARMA 模型	68
2.9 CARIMA 模型	70
习题	71
第三章 系统辨识	76
3.1 系统辨识的基本内容	76
3.1-1 系统辨识的三要素	76
3.1-2 系统辨识的内容和一般步骤	78
3.2 最小二乘参数估计	79
3.2-1 最小二乘估计	79
3.2-2 最小二乘估计的性质	82
3.2-3 加权最小二乘估计	88
3.2-4 辅助变量法	89
3.2-5 广义最小二乘估计	90
3.3 递推最小二乘参数估计	92
3.3-1 基本算法	92
3.3-2 慢时变参数的实时算法	95
3.3-3 递推辅助变量法	96
3.3-4 递推广义最小二乘法	96
3.3-5 增广矩阵法	97
3.3-6 多输入-多输出系统的参数估计	98
3.4 最大似然法	99
3.5 数值稳定的递推算法	102
3.5-1 递推算法中的数值问题	102
3.5-2 平方根算法	103
3.5-3 U-D 分解算法	108
3.6 闭环参数估计	112
3.6-1 闭环辨识的基本概念	112
3.6-2 能辨性条件	114
3.6-3 基于离散模型参数规范关系的闭环参数估计方法	116
习题	118
第四章 自适应控制系统的设计基础	123
4.1 Ляпунов 稳定性理论	123
4.1-1 Ляпунов 意义下的稳定性	123
4.1-2 Ляпунов 稳定性定理	126

4.2 正实性和正实引理	130
4.2-1 正实函数	131
4.2-2 正实函数矩阵	133
4.2-3 连续系统的正实引理	134
4.2-4 离散系统的正实引理	137
4.3 超稳定性理论	137
4.3-1 超稳定性问题	137
4.3-2 超稳定性的基本概念	138
4.3-3 超稳定性定理	139
4.4 随机自适应控制的理论基础	141
4.4-1 随机控制问题	141
4.4-2 双重效应和双重控制	143
4.4-3 随机最优控制解	144
4.4-4 具有随机参数的积分器的最优控制	145
4.4-5 随机控制系统的结构特性	149
4.4-6 随机控制策略	150
习题	150
第五章 模型参考自适应控制系统	153
5.1 基本概念	153
5.1-1 基本结构	153
5.1-2 连续模型参考自适应控制系统的数学描述	154
5.1-3 离散模型参考自适应控制系统的数学描述	156
5.2 局部参数最优化设计方法	158
5.2-1 设计原理	158
5.2-2 具有可调增益的 MIT 律的设计	158
5.2-3 具有多个可调参数的 MIT 律的设计	161
5.2-4 MIT 方案的稳定性	163
5.2-5 稳定-优化设计方法	166
5.3 采用 Ляпунов 稳定性理论的设计方法	168
5.3-1 设计问题	168
5.3-2 具有可调增益的自适应律的设计	171
5.3-3 增广误差信号设计法	174
5.3-4 误差模型和稳定自适应控制器	178
5.4 采用超稳定性理论的设计方法	195
5.4-1 基本设计步骤	195
5.4-2 基于状态方程描述的模型参考自适应控制系统的设计	195
5.4-3 基于输入-输出方程描述的模型参考自适应控制系统的设计	201
5.5 离散模型参考自适应控制系统	208
5.5-1 离散误差模型和稳定自适应控制器	209
5.5-2 具有最小预测误差的模型参考自适应控制系统	214
5.6 模型参考自适应控制系统的鲁棒性	222
5.6-1 鲁棒性问题	222

5.6-2 稳定鲁棒性机理的分析	224
5.6-3 带有死区的自适应算法	229
5.6-4 σ -修正算法	233
5.6-5 具有归一化变量的组合算法	240
习题	246
第六章 基于优化控制策略的自校正器	249
6.1 最小方差自校正器	249
6.1-1 最优预测和最小方差控制	249
6.1-2 最小方差自校正调节器	254
6.1-3 最小方差自校正控制器	260
6.1-4 跟踪慢时变参数的数据遗忘技术	261
6.1-5 采样周期的选择和多速率采样控制	264
6.1-6 输出为平移平均过程的自校正调节器	266
6.1-7 多变量自校正调节器	268
6.2 广义最小方差自校正器	272
6.2-1 最优预测和广义最小方差控制	273
6.2-2 广义最小方差自校正控制器	279
6.2-3 加权多项式的选择和它的自动整定	283
6.2-4 广义最小方差自校正前馈控制器	286
6.2-5 延迟未知或时变的过程的自校正控制	290
6.2-6 多变量广义最小方差自校正控制器	293
6.3 加权最小方差自校正器	302
6.3-1 最优预测和加权最小方差控制	303
6.3-2 加权最小方差自校正控制器	307
6.4 LQG 自校正器	310
6.4-1 LQ 控制器的设计方法	310
6.4-2 基本 LQG 自校正调节器	314
6.4-3 广义 LQG 自校正器——Riccati 方程迭代法	318
6.4-4 LQG 自校正器——谱因子分解法	322
6.5 长期预测自校正器	326
6.5-1 长度后退控制原理	327
6.5-2 基于非参数模型的长期预测自适应控制	328
6.5-3 最优长期预测和 Diophantine 方程的递推解	331
6.5-4 广义预测自校正控制	334
习题	341
第七章 基于常规控制策略的自校正器	347
7.1 极点配置自校正器	347
7.1-1 极点配置设计原理	347
7.1-2 极点配置自校正调节器	351
7.1-3 极点配置自校正控制器	357
7.1-4 组合自校正器	360
7.1-5 极-零配置自校正器	366

7.1-6 状态空间极点配置自校正器	370
7.1-7 广义预测极点配置自校正控制器	373
7.1-8 多变量极点配置自校正器	382
7.2 自校正 PID 控制器	389
7.2-1 PID 算式	389
7.2-2 简单的自校正 PID 控制器	390
7.2-3 基于离散设计法的自校正 PID 控制器	391
7.2-4 基于连续设计法的自校正 PID 控制器	394
7.3 自适应 Dahlin 数字控制器	400
7.3-1 Dahlin 数字控制器	400
7.3-2 自适应控制策略	402
7.4 自适应无波纹有限拍数字控制器	404
7.4-1 无波纹有限拍数字控制器	404
7.4-2 自适应无波纹有限拍控制器	405
习题	407
第八章 其他形式的自适应控制系统	411
8.1 自寻最优控制系统	411
8.1-1 切换法	411
8.1-2 扰动法	414
8.1-3 峰值保持法	415
8.1-4 模型定向法	416
8.2 变结构控制系统	419
8.2-1 变结构控制系统的滑态和基本特性	419
8.2-2 单变量变结构控制器的设计	423
8.2-3 多变量变结构控制器的设计	426
8.2-4 变结构自适应模型跟踪控制系统	437
8.2-5 变结构模型参考自适应控制系统	439
8.2-6 自适应变结构控制器	441
8.3 模糊自适应控制系统	445
8.3-1 模糊集合, 语言变量和模糊逻辑	445
8.3-2 模糊控制器的设计	448
8.3-3 模糊自适应控制器	450
8.4 智能自适应控制系统	454
8.4-1 专家自适应控制系统	454
8.4-2 分层递阶智能控制	456
习题	457
第九章 自适应控制系统的应用	460
9.1 卫星跟踪望远镜的模型参考自适应控制系统	460
9.1-1 望远镜的控制要求和伺服控制系统	460
9.1-2 自适应控制方案	461
9.1-3 现场试验结果	463
9.2 船舶驾驶的自适应控制	464

9.2-1 船舶动态特性的数学模型	464
9.2-2 海洋事业考察船的模型参考自适应控制	465
9.2-3 超级油轮的自校正控制	469
9.3 自适应控制在化工生产中的应用	472
9.3-1 醋酸蒸发器的自校正调节器	472
9.3-2 精馏塔的多变量自校正控制	474
9.3-3 污水处理的自校正 PI 调节器	476
9.4 自适应控制在造纸工业中的应用	478
9.4-1 纸机模型	479
9.4-2 绝干定量的组合自校正控制	480
9.4-3 纸张水份的自校正调节器	480
9.5 水泥生产过程的自校正控制	482
9.5-1 水泥生料配料的多变量自校正控制	482
9.5-2 水泥生产的自校正调节器	486
9.6 电加热炉的多变量自校正控制	487
9.6-1 电加热炉的数学模型	487
9.6-2 电加热炉的多变量最小方差自校正调节器	487
9.6-3 电加热炉的多变量广义最小方差自校正控制器	488
9.7 核反应堆的自校正控制	491
9.7-1 核反应堆的控制原理	491
9.7-2 URR 反应堆一次载热剂出口温度的自校正前馈控制器	491
9.8 自适应控制在机器人中的应用	493
9.8-1 机器人系统的基本结构	493
9.8-2 机器人的模型参考自适应控制	494
9.8-3 机器人的广义预测极点配置自校正控制	497
9.9 人工心脏的自适应控制	500
9.9-1 心脏模型	500
9.9-2 自校正 PID 控制策略	502
9.9-3 试验结果	503
结语	505
参考文献	507

第一章 概 论

1.1 自适应控制的任务

在控制工程中,有各种各样的受控对象,它们的机理、复杂程度和环境条件可能各不相同,但对它们施加控制的目的却是基本相同的,都是为了使它们的状态或运动轨线符合某个预定要求,也即使受控对象的运行性能满足预定的性能指标。受控对象的运行状态或运动轨线称为受控过程,或简称为过程。十分明显,过程不仅与受控对象本身有关,还与对象所处的环境有关。因此,在综合控制作用时,必须把对象和它所处的环境统一地加以考察。本书把受控对象和它所处的环境叫做受控系统,由受控系统及其控制器所组成的整体称为控制系统。今后,书中将交替地使用受控系统和过程这两个术语,这仅是为了强调某个方面,并不意味着它们之间有何本质差别。

倘若过程的脉冲响应函数或传递函数已知,则可用经典控制理论设计一种控制器,使控制系统的过渡过程指标,如超调量、振荡次数、过渡时间和通频带等符合要求。如果掌握了过程的运动方程,就可以用最优控制理论设计一种最优控制器,使控制系统的某项性能指标达到最佳。例如,产品产量最高、质量最好、能耗最少、成本最低、运行时间最短、跟踪指令信号的速度最快以及输出方差最小,等等。但是,如果我们对受控系统本身的动力学特性未知或不完全掌握,或者在运行过程中发生了事先未知的变化,那么,上述控制设计方法就无法实现,或者即便能实现但实际控制效果却变差,甚至出现不稳定现象。这是因为上述两种理论都是以过程的动态特性事先已知,且在运行中不发生未知变化为前提条件的。

然而,由于种种原因,要事先完全掌握受控系统的动力学特性几乎是不可能的。受控系统动态特性的这种未知性质称为不定性。概括地讲,形成受控系统不定性的原因有:

(1) 现代工业装置的特征是既精细又复杂,所以除了比较简单的情形外,一个受控系统总或多或少具有某些非线性、时变性、分布性和随机性。因此,单纯依靠机理分析无法确知它的动态特性,必须辅以一定的试验才能获得描述它的某种近似的数学模型。这种近似性是由于试验装置、测量仪表、试验方法、试验时间和试验费用的限制所造成的。从这个意义上讲,所有过程的数学模型都是近似的,受控系统的结构和参数存在不定性是一种普遍的现象。

(2) 一般地讲,环境特性对过程的影响是不可避免的。例如,空间飞行器的空气动力学参数随飞行高度、飞行速度和大气条件的变化而在大范围内发生变化;化学反应过程的参数随环境温度和湿度的变化而变化;船舶的动态特性随水域状态而变化,等等。环境干扰可分为随机干扰和突发性干扰,前者如各种各样的噪声,后者如大雨、阵风或负荷突变等。这些干扰有的不能量测,有的虽然能量测但无法预计它们的变化。因此,环境干扰也必然在受控系统中引入某种不定性。

(3) 过程本身的特性在运行过程中也会发生变化。例如,空间飞行器的质量和重心

随燃料的消耗而变化,化学反应速度随催化剂活性的衰减而变慢,机械手的动态特性随臂的伸屈而变化,等等。这类变化都具有相当的不定性。

总之,任何受控系统都存在不定性,仅强弱程度不同而已。因此可以断言,一个实际系统的数学模型不可能描述它的全部动态特性。未被描述的那部分动态特性称为未建模动力学特性,已被描述的那部分动态特性称为已建模动力学特性。这两种动力学特性显然都具有不定性,而且前者强于后者。

面对如此众多的具有较强不定性的受控系统,如何设计一个满意的控制器,就是自适应控制的任务。这意味着,当对受控系统特性尚未完全掌握,系统本身又存在不可忽视的不定性时,采用自适应控制方案是控制工程人员的一种合乎逻辑的抉择。与具有不定性的确定性定常系统相比,对一个具有不定性的随机非线性时变系统施加自适应控制显然要困难得多。

1.2 自适应控制系统

由于自适应控制的对象是那些存在不定性的系统,所以这种控制应首先能在控制系统的运行过程中,通过不断地量测系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐了解和掌握对象。然后根据所得的过程信息,按一定的设计方法,作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次最优,或达到某个预期目标。按此设计思想建立的控制系统便是自适应控制系统。

由此可见,一个自适应控制系统必然具有下列三个基本特征:

(1) 过程信息的在线积累

在线积累过程信息的目的,是为了降低受控系统原有的不定性。为此可用系统辨识的方法在线辨识受控系统的结构和参数,直接积累过程信息;也可通过量测能反映过程状态的某些辅助变量,间接积累过程信息。在系统辨识中,结构辨识比参数估计困难得多。

(2) 可调控制器

可调控制器是指它的结构、参数或信号可以根据性能指标要求进行自动调整。这种可调性要求是由受控系统的不定性决定的,否则就无法对过程实现有效的控制。

(3) 性能指标的控制

性能指标的控制可分为开环控制方式和闭环控制方式两种。若与过程动态相关联的辅助变量可测,而且此辅助变量与可调控制器参数之间的关系又可根据物理学的知识和经验导出,这时就可通过此辅助变量直接调整可调控制器,以期达到预定的性能指标。这就是性能指标的开环控制,它的特点是没有根据系统实际达到的性能指标再作进一步的调整。与开环控制方式不同,在性能指标的闭环控制中,还要获取实际性能与预定性能之间的偏差信息,将其反馈后修改可调控制器,直到实际性能达到或接近预定性能为止。

例 1-1 (增益调度控制) 考察图 1-1 所示的控制系统。若把对象视为自由飞机,则可将飞行高度和速度作为辅助变量。因为这两个变量是飞行 Mach 数和动压的函数,而且可测,所以在设计控制系统时,可先将辅助变量的可能变化范围分割为若干区段,根据物理学知识为每个区段综合出最好的控制器参数,然后列成增益调度表。在实际运行中,我们可由实测的辅助变量直接查表,得到最好的控制器参数。当然,也可经由在线寻优方

法找到所需的控制器参数。

在这种控制中,它无法通过反馈消除错误的或不良的增益补偿,所以对性能指标实现的是开环控制.这是它的一个缺点.

另一个缺点是制定增益调度表很费时间,往往需要在各种运行条件下进行大量的仿真试验.不过,若设计得当,这种方案能使控制器参数快速地适应过程的变化,削弱过程参数和环境条件变化的影响。 ■

开环自适应控制是否属于自适应控制范畴,目前尚有争议.考虑到这种控制的适用范围有限,且只

是自适应控制初期发展阶段的雏形,所以本书不讨论这种自适应系统。

现代过程控制所遇到的实际难题是:

- (1) 过程参数的未知性、时变性和随机性。
- (2) 过程时滞或时延的未知性和时变性。
- (3) 过程的非线性性和分布性。
- (4) 过程干扰的随机性。
- (5) 过程的非最小相位特性。

为了控制好具有上述特征的过程,一个理想的自适应控制系统应具有下列能力:

- (1) 有适应环境变化和系统要求的能力。
- (2) 有学习的能力。
- (3) 在变化的环境中能逐渐形成所需的控制策略和控制参数序列。
- (4) 在内部参数失效时有自行恢复的能力。
- (5) 应具有良好的鲁棒性,从而使控制系统性能对环境变化、过程参数变化和建模误差等不敏感。

设计、生产和实现这种控制器是当代控制工程技术人员所面临的重要任务。

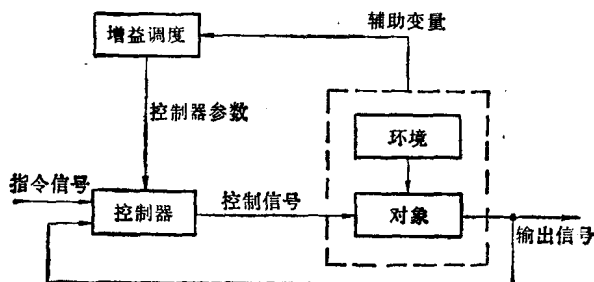


图 1-1 增益调度控制系统框图

1.3 自适应控制系统的类型

在 50 年代初自适应控制系统就已出现,但取得较大进展并引起广泛重视还只是近十来年的事情,其理论、设计方法和应用还远未达到成熟的地步,新的概念和方法仍在不断涌现.这就使得这一领域的学术观点繁多,在许多问题上都还没有形成统一的认识.最突出的例子是至今尚无一个公认的用以确定一个系统是否具有自适应性质的“自适应”定义.“自适应”这个术语是从生理学借用过来的.在生理学家看来,一个细胞,一个器官,一个有机体或者一个物种,如果在变化着的环境中,能调节自身的性能以维持生理平衡,那它就是自适应的.关于自适应的问题,生理学中已有一种含义确切的自适应度理论,歧义很小^[138].然而,当把这个形象直观的概念移植到其他学科时,“自适应”这个术语便在各种具体的应用场合下有了不同的含义并引起了争议.在 1973 年,美国电气与电子工程

师学会(IEEE)所属控制系统学会的一个专门小组委员会(自适应学习和模式识别标准与定义小组)建议,把“自适应控制”正名为“适应式自组织控制”。“自组织”一词是从技术观点提出的,它含有系统的结构和参数可在线调整的意思。不过,这个建议至今并未得到多数人的响应。至于自适应控制系统的分类和其他问题,更是众说纷纭,不一而足^[20,22]。鉴于此,本书只限于介绍已被普遍认可的、应用较为广泛的自适应控制系统类型,并把重点放在自校正控制和模型参考自适应控制上。当然,限于理论、设计方法和技术的发展水平,这些系统离理想自适应系统尚有一段相当的距离。

1.3-1 自校正控制系统

当过程的随机、时滞、时变和非线性等特性比较明显时,采用常规的比例-积分-微分(PID)调节器很难收到良好的控制效果,甚至无法达到基本要求。此外,在初次运转或者工况发生变化时,都需要重新整定 PID 参数,这相当耗费时间。如果采用自校正控制技术,上述问题都能得到圆满解决。理论分析和应用结果表明,自校正控制技术特别适用于结构部分已知和参数未知而恒定或缓慢变化的随机受控系统。由于大多数工业对象都具有这些特征,再加上自校正控制技术理解直观,实现简单经济,所以它在工业过程控制中已得到广泛应用,现已成为十分重要的一类自适应控制系统。

关于自校正控制系统, Gibson 在 1962 年提出了如下定义^[128]:

定义 1-1 (自校正控制系统) 一个自适应控制系统必须连续地提供受控系统的当前状态信息;也就是必须对过程进行辨识;然后将系统的当前性能与期望的或最优的性能进行比较,作出使系统趋向期望的或最优的性能的决策;最后,必须对控制器进行适当的修正,以驱使系统接近最优状态。这就是一个自适应控制系统所必须具有的三个内在功能。

自校正控制系统由两个环路组成,它的典型结构如图 1-2 所示。内环与常规反馈系

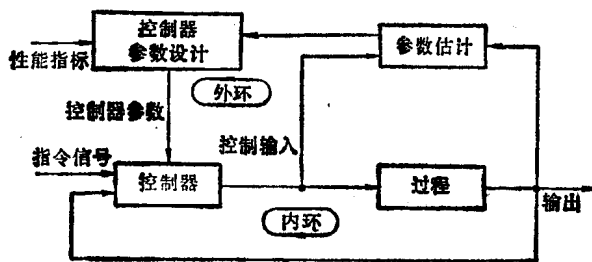


图 1-2 自校正控制系统的典型结构

统类似,由过程 and 控制器组成。外环由参数估计器和控制器设计计算机构成,其任务是辨识过程参数,再按选定的设计方法综合出控制器参数,用以修改内环的控制器。在目前的自校正控制系统中,用来综合自校正控制律的性能指标有两类:优化性能指标和常规性能指标。前者如最小方差、LQG 和广义预测控

制,后者如极点配置和 PID 控制;用来进行参数估计的方法有最小二乘法、增广矩阵法、辅助变量法和最大似然法。

在参数估计时,对观测数据的使用方式有两种。一种估计受控系统模型本身的未知参数,这样的自校正算法称为显式算法。另一种估计控制器的未知参数,这时需要将过程重新参数化,建立一个与控制器参数直接关联的估计模型,相应的自校正算法称为隐式算法。隐式算法无需进行控制器参数的设计计算,所以它的计算量比显式算法小,不过要为其建立一个合适的估计模型。

由此可见,自校正控制器是在线参数估计和控制器参数在线设计两者的有机结合.由于存在多种参数估计和控制器设计的方法,所以自校正控制器的设计十分灵活,这也是它得到广泛应用的原因之一。

自校正控制思想可追溯到 1958 年 Kalman 发表的一篇文章——自最优控制系统的设计^[154]。在 1970 年,捷克自动化和信息理论研究所的 Peterka 把这一原理推广到参数未知但恒定的线性离散时间单输入-单输出系统^[244]。由于当时在理论上和技术上的限制,上述原理没有得到成功的应用,直到 1973 年才获得了实质性的突破。这一富有创见的工作是由瑞典隆德工学院的 Åström 和 Wittenmark 完成的^[66]。他们提出的最小方差自校正调节器是最小方差调节器的自然发展^[3]。这种自校正调节器的突出优点是实现简易,仅用一台微处理机甚至单板机便可实现,而且经济效益明显。它的缺点是不能用于逆不稳定系统,没有工程约束,且功能单一。针对这些缺点,1975 年英国牛津大学的 Clarke 和 Gawthrop 提出了一种巧妙而简易的控制器——广义最小方差自校正控制器,它把自校正调节器的主要缺点都一一克服了,所以受到了普遍重视^[88,90,122,123]。不过,这种算法在处理逆不稳定系统时,尚需选择目标函数中的控制权。由于存在不定性,这个控制权的选择常常要依靠试凑法。因此,人们开始研究既能保持实现简易,又能具有直观性和鲁棒性的新方法,哪怕这种方法不是最优的也能为工程界所接受,这就是极点配置自校正控制技术。这种方案首先由英国剑桥大学的 Edmunds 在 1976 年提出^[106], Åström, Westerberg 和 Wittenmark 在这方面也做了一些研究^[59,65,67],但比较富有成效的工作是由英国曼彻斯特大学理工学院的 Wellstead, Prager, Zanker 和 Sanoff, 以及 Edmunds 等共同完成的^[241~244]。除了最优性这一指标外,这种方案在其他方面都超过了上述自校正器。随后又有人提出了 LQG、广义预测和 PID 等自校正器。近年来,自校正控制技术宛如雨后春笋般地迅速发展。关于离散时间随机自适应控制的稳定性和收敛性,澳大利亚纽卡斯尔大学的 Goodwin 作出了有益的贡献^[132]。

1.3-2 模型参考自适应控制系统

这也是一类重要的自适应控制系统。它的主要特点是实现容易,自适应速度快,并在许多领域得到了应用。对于这类自适应控制系统,1974 年法国国立格勒诺布理工学院的 Landau 给出了下述定义^[170]:

定义 1-2 (模型参考自适应控制系统) 一个自适应控制系统,就是利用它的可调系统的输入、状态和输出变量来度量某个性能指标,然后根据实测性能指标值与给定性能指标集相比较的结果,由自适应机构修正可调系统的参数,或者产生一个辅助输入信号,以保持系统的性能指标接近给定的性能指标集。

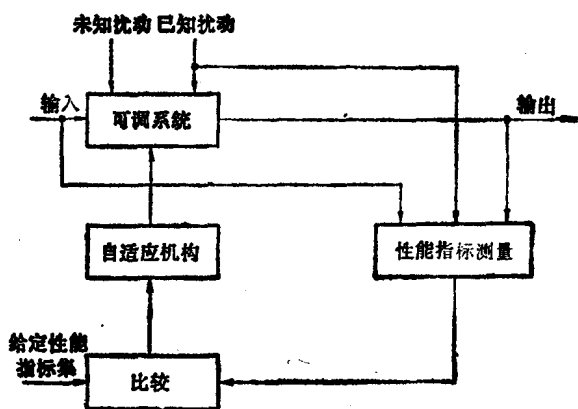


图 1-3 定义 1-2 的编图

图 1-3 是定义 1-2 的说明.定义中的可调系统是指能通过修正它的参数或内部结构,或者修改它的输入信号以调节其性能的那类系统.

模型参考自适应控制系统的典型结构如图 1-4 所示.在这个系统中,采用了一个称为

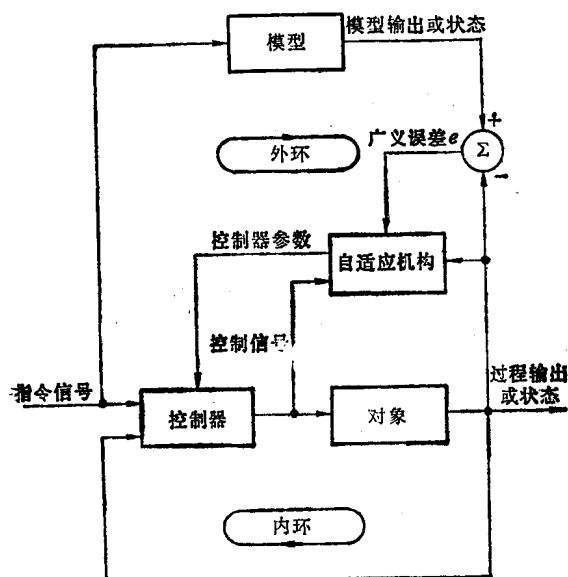


图 1-4 模型参考自适应控制系统的基本结构

与参考模型特性的这种一致性要求(模型匹配),常常要在可调系统内部实现极-零抵消,因此,这种控制只能用于逆稳定的对象。

象自校正控制系统一样,在结构上也可把模型参考自适应控制系统划分为内外两个环路。内环是由对象和控制器组成的常规反馈回路。外环是调整控制器参数的自适应回路。自校正控制与模型参考自适应控制在形式上的相似性,反映了它们在某种意义上互相等价的内在联系。

模型参考自适应控制系统的关键在于如何设计自适应控制律,以得到一个能使广义误差为零的稳定系统。

自适应律的综合方法可粗略分为两大类.一类称为局部参数最优化设计方法,它利用最优化技术搜索能满足要求的一组控制器参数.这种方法首先由美国麻省理工学院(MIT)仪表实验室的 Whitaker 及其同事于 1958 年提出,并在飞行控制器中得到了应用^[246]。因此这种自适应律又称为 MIT 律。这种方法的主要缺点是不能确保所设计的自适应控制系统的全局渐近稳定性,甚至对简单的受控对象,在某些输入信号作用下,控制系统也可能丧失稳定性。为此,在 60 年代中期,英国皇家军事科学院的 Parks 提出了另一类基于稳定性理论的设计方法,他当时采用的是 Ляпунов 稳定性理论^[292]。这种方法保证了控制系统的稳定性,但它需要利用系统的全部状态或输出量的微分信号,这是 Parks 方法的严重缺点。为了解决这个问题,美国马萨诸塞大学的 Monopoli 在 1974 年提出了一种增广误差信号法,当按 Ляпунов 稳定性理论设计自适应律时,利用这种方法就可避免出现输出量的微分信号,仅由系统的输入输出便可调整控制器参数^[186]。与此同时,Landau 采用 Popov 的超稳定性理论进行设计,也得到了类似的结果^[169]。这是一种系统的设计

方法,它可导出一大类稳定的自适应算法,这为选择自适应律提供了更多的灵活性。已经发现,超稳定理论设计法和 Ляпунов 稳定性理论设计法在本质上是一致的。近年来许多学者在稳定性、收敛性和设计方法上又做了大量的有益工作,其中有美国耶鲁大学的 Narendra^[191-196], Morse^[189]和 Goodwin^[131]。

1.3-3 自寻最优控制系统

自寻最优控制系统是一种自动搜索和保持系统输出位于极值状态的控制系统。先前这种系统称为极值控制系统。在这种系统中,受控系统的输入-输出特性至少有一个代表最优运行状态的极值点或其他形式的非线性特性。因此,受控对象是非线性的。如果极值特性在运行过程中不发生变化,则可通过分析和试验找到一个能使系统工作在极值位置的固定控制量,这时由常规控制便可保持最优运行状态。不过,许多工业对象的极值特性在运行中都或多或少会发生漂移,因而无法采用常规控制策略。例如,在内燃机、蒸汽发生器和煤气发生炉等工业设备中,燃烧过程的燃烧特性——燃料的耗气量与温度之间的关系——具有极值特性,通过控制气-燃比就可保证最优燃烧过程。然而,在实际运行中,燃料成分和质量总会发生变化,且无法测量,因而引起了极值特性漂移。再如,远程飞机的最优燃耗(每公斤汽油能飞行的最大公里数)也是一个极值点。这个极值点与发动机功率和转速,以及飞行环境有关。当飞机在结冰的气候条件下飞行时,机翼和机身表面冰层的堆积和融化会使飞机外形发生变化,进而引起极值点漂移。冰层的堆积和融化情况无法测量,因而无法预估它的影响。对于这类受控系统,采用自寻最优控制策略便可自动保持极值运行状态,使运行状态的梯度为零。此外,自寻最优控制系统还具有易于理解和实现方便等优点,所以它在工业中也有广泛的应用^[23]。

十分明显,为了保持最优极值点,自寻最优控制系统必须具备两个功能:探测和调整。探测是为了获取当前运行状态的信息,调整是为了保证最优运行条件。实现这两个功能的主要方法有:

(1) 切换法

在切换法中,输入信号首先以恒定速度沿一个方向变化,直到性能没有进一步改善时,再以同一速度沿相反方向变化。这样周而复始地形成一种周期性输入信号。采用这种环绕最优点进行搜索的方式,就能保持极值运行状态。输入信号的换向条件由所选的控制策略决定。输入信号可连续变化也可步进变化。输入连续变化方案的设计参数为输入变化速度和输出搜索范围。这是因为这两个参数决定了系统的其他特征参数,从而决定了整个系统的特征。搜索范围是指输出由最大值下降到最小值的范围。输出有一个均值,称为搜索损失,它代表最优输出的偏离。可见搜索损失反映了为把控制系统保持在最优极值点附近所付出的代价。扩大搜索范围可以避免干扰和对象动态特性引起的错误换向,但同时会加大搜索损失,使系统性能下降。因此,在实际系统中必须采用滤波等附加措施才能保证系统运行良好。输入步进变化方案的设计参数是步进周期和步长。设计时可用等步长也可用变步长,前者算法简单,但搜索损失大,后者恰好相反。输入步进变化方案可由数字技术实现,灵活性大,故比输入连续变化方案应用更广。

(2) 摄动法

在摄动法中,将一个周期性探测信号(正弦和方波)附加到控制输入上,再用梯度信号