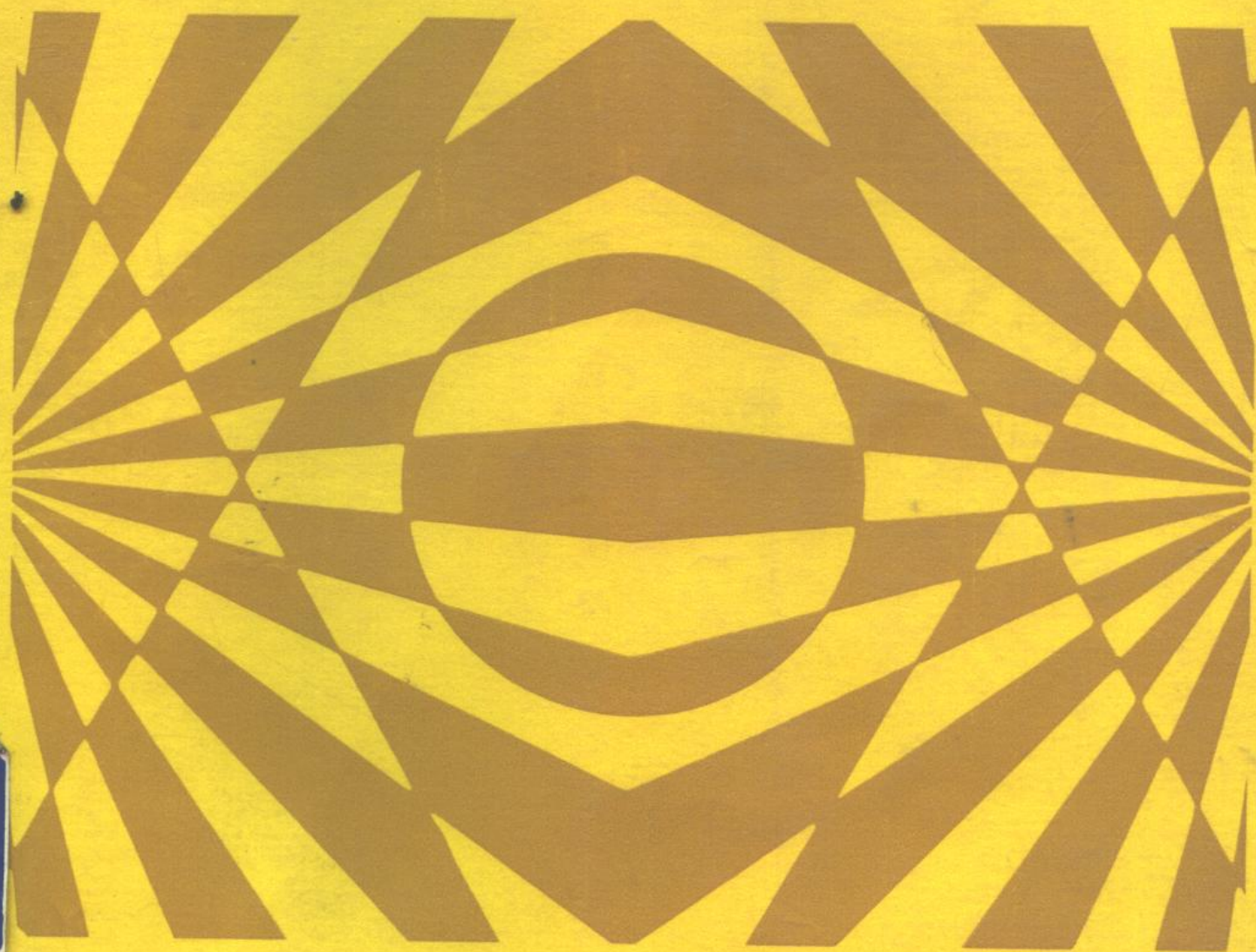
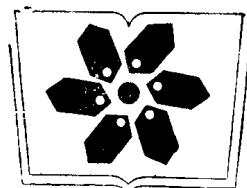


[瑞典] K. J. 奥斯特隆姆 B. 威顿马克 著

自适应控制



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助项目

TP273
89

自适应控制

[瑞典] K. J. 奥斯特隆姆 著
B. 威顿 马克

李清泉 等 译

科学出版社

1992

(京)新登字092号

内 容 简 介

JS452/42 01

本书是瑞典 Lund 理工学院的“自适应控制”课程教材,由国际控制界的著名学者 Åström 和他的同事 Wittenmark 共同撰写。本书主要讲述自适应控制的理论、设计、实现和应用。书中许多内容都是作者多年研究的成果。

全书共十三章和两个附录。前两章是概论。第三章讲述实时参数估计。第四至第六章介绍模型参考自适应系统和自校正调节器的概念、基本性质、主要算法和理论。第七章论述随机自适应控制。第八章介绍 PID 调节器的自动整定技术。第九章和第十章讨论增益调度控制、鲁棒高增益控制、自振荡自适应系统和变结构系统。第十一章和第十二章讲述自适应控制的实现和应用以及某些工业自适应控制器。最后一章是对自适应控制的展望。附录主要介绍调节器设计和正实传递函数的基本概念。全书附有大量的例题、仿真实验结果和习题。

本书可供高等院校自动控制、计算机科学与应用以及相近专业的学生、研究生和教师参考,也可供从事自动控制和计算机技术的有关科研人员和工程技术人员阅读。

K. J. Åström B. Wittenmark

ADAPTIVE CONTROL

Addison-Wesley Publishing Company, 1989

自 适 应 控 制

K. J. 奥斯特隆姆 著
〔瑞典〕 B. 威顿马克

李清泉 等 译

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京东黄城根北街16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

*

1992年5月第一版 开本:787×1092 1/16
1992年5月第一次印刷 印张:22 1/2
印数:1—2 400 字数:514 000

ISBN 7-03-002622-5/TP·198

定价:16.50 元

译 者 的 话

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、计算机技术的推动下,自适应控制的理论和设计方法有了长足的发展,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一直不衰的原因。目前,第一代工业自适应控制器已经问世,第二代产品正在研制之中。随着微处理机的普及,自适应控制器成为廉价、高效的工业控制器已为期不远了。

Åström 和 Wittenmark 合著的《自适应控制》一书,是瑞典 Lund 理工学院的大学生和研究生教材。它比较全面系统地讲述了自适应控制的基本理论、设计方法,以及在实现和应用中遇到的许多实际问题,其中大部分内容是作者多年的研究成果。作者在编写本书时还纳入了多年的教学经验,在讲解基本理论和设计方法时,尽量少用高深的数学理论,比较重视工程概念、实际问题和工程应用,而且安排了一定数量的例题、仿真实验结果和习题。所有这些都将有助于读者理解本书的内容。同作者的前两本著作——《随机控制理论导论》和《计算机控制系统理论和设计》一样,作者对每章末的参考文献都作了简要评价。这无疑将有助于引导读者找到进一步阅读的参考材料。

Åström 教授是国际控制界享有盛名的学者,是自适应控制的主要创始人之一。他在随机控制、系统辨识、计算机控制、自适应控制和控制理论的代数方法等方面都作出了重要的贡献。他长期致力于把控制理论与实际相结合的研究工作,并与他的同事和学生一起解决了理论实现中的许多实际问题,成功地把现代控制理论用于船舶驾驶、惯性导航以及造纸、化工和矿山等众多工业对象上。应当承认,在理论联系实际方面,他是当今世界知名的控制理论学者中的佼佼者。由于他在自动控制方面的杰出贡献,ASME 和 IFAC 分别在 1985 和 1987 年授予他 Rufus Oldenburger 和 Giorgio Quazza 奖章。

鉴于上述原因,特将该书译成中文,供大学有关专业的师生以及有关的科技人员和对此有兴趣的读者参考。

本书的翻译曾得到学部委员杨嘉墀教授和陈振宇教授的支持和关心,也得到了吴宏鑫研究员的热情帮助,在此一并致谢。

本书由李清泉、李翔、张兆义等翻译,最后由李清泉整理校订。

限于译者水平,译文中定有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

前 言

自适应控制是一个非常有吸引力的研究领域。由于自适应技术在工业控制系统中的应用越来越广泛,所以自适应控制的实际重要性仍在不断增大。但是,这个领域还不太成熟,尚存在许多未解决的理论和实际问题。尽管如此,我们仍确信本书是有益的,这是因为自适应技术的知识在有关参考文献中相当分散,这对于刚入门的读者来说,要很好掌握这个领域的知识会遇到很大的困难。本书是根据我们对自适应控制的多年研究和教学经验而写成的。

我们的目的是打算把本书写成一本导论性的教科书。在本书的讲述中,我们认为读者已掌握自动控制和采样数据系统的基本知识。在我们的大学里,本课程安排在反馈控制导论和数字控制课程之后进行讲授。本书对工业界的读者也是有益的。

本书的编排如下:前两章概略地介绍自适应控制和它的应用背景。实时估计是自适应控制的极为重要的部分,安排在第三章讲述,该章还包含了离散时间和连续时间的参数估计。第四、五两章介绍两类基本的自适应控制,它们是模型参考自适应系统(MRAS)和自校正调节器(STR)。至今,我们未发现这两种控制之间有何差别,实质上它们是等价的。不过,本书仍按历史发展的进程来处理这两类自适应控制方法,即按连续时间体系论述MRAS,按离散时间体系论述STR。这样讲述就能涉及自适应调节器的各个方面的问题。这两章主要讨论这两类控制器的概念和基本性质,而且也提供自适应控制的原始算法。

有关自适应控制理论的比较深入的内容安排在第六章讲述,该章讨论了诸如稳定性、收敛性和鲁棒性这样的理论问题。第七章讨论随机自适应控制。在导论性的课程中,可以根据学生的基础知识情况,略去第六、七两章的部分内容。第八章介绍调节器的自动整定技术,这一技术已被工业界迅速认可。

尽管自适应控制器是十分有用的工具,但这种控制绝不是处理变参数系统的唯一方法。我们认为,一个工程师在解决某个问题时,他能拥有多种方法是十分有益的。因此,本书还用了两章的篇幅来介绍可取代自适应控制的另外一些控制方案。增益调度控制安排第九章讨论,第十章介绍鲁棒高增益控制和自振荡控制器。

第十一章讨论自适应控制器的实现问题,内容是以在真实过程中使用自适应控制器的实践经验为基础。第十二章介绍应用概况和某些工业自适应控制器。这些应用表明,自适应控制可用于各种不同类型的过程;不过,为了得到一个有效的控制系统,所有的应用都必须考虑某些特殊的性能。在本书的最后一章中,简单地评述了与自适应控制密切相关的一些领域,这些领域的内容在本书的前述内容中均未涉及。这些领域是自适应信号处理,专家系统和神经网络。为了说明本书所述内容的物理概念和有关理论,全书列举了许多例题和仿真实验结果。

本书可有多种不同的使用方法。如果作为自适应控制导论课程,可包括第一至第五章,第八章,第十一至第十三章。更高阶段的课程可包括本书全部章节的内容。对于面向

工业界的课程,则包括第一和第二章,第三至第五章的部分内容,以及第八、第九、第十一和第十二章。为了收到满意的教学效果,利用习题课和实验室的实验补充讲课内容是很重要的,另外,一个有效的仿真软件包也是必不可少的。本书的全部仿真实验结果都是用交互式仿真软件包 Simnon 完成的,这个软件包是由瑞典 Lund 理工学院研制的。它可用于 IBM-PC 兼容机,也可用于几种主计算机。进一步的信息可由下列地址获取:

Karl Johan Åström
Björn Wittenmark
Department of Automatic Control
Lund Institute of Technology
Box 118,S-221 00 Lund,Sweden

作为从事自动控制的教师和研究人員,我们十分懂得反馈的重要性。因此,希望读者把读后的意见,例如本书存在的错误和曲解,对本书的改进建议,以及本书哪些内容可能是有价值的,等等,写信告诉我们。

K. J. 奥斯特隆姆
B. 威顿马克

目 录

译者的话

前言

第一章 什么是自适应控制?	1
1.1 引言	1
1.2 自适应控制方案	3
1.3 自适应控制理论	9
1.4 应用	14
1.5 结论	17
习题	17
参考文献	17
第二章 为什么需要自适应控制?	19
2.1 引言	19
2.2 何时不宜采用增益恒定的反馈控制	19
2.3 鲁棒控制	27
2.4 自适应控制问题	31
2.5 结论	33
习题	34
参考文献	36
第三章 实时参数估计	38
3.1 引言	38
3.2 最小二乘法和回归模型	38
3.3 动力学系统的参数估计	46
3.4 试验条件	51
3.5 递推估计器的性质	55
3.6 实现问题	58
3.7 结论	64
习题	65
参考文献	68
第四章 模型参考自适应系统	69
4.1 引言	69
4.2 MRAS 问题	70
4.3 梯度法	72
4.4 基于稳定性理论的 MRAS	81

4.5 一般线性系统的直接 MRAS	92
4.6 系统部分已知的 MRAS	100
4.7 结论	102
习题	103
参考文献	105
第五章 自校正调节器	107
5.1 基本概念	107
5.2 间接自校正调节器	108
5.3 直接自校正调节器	113
5.4 直接自校正调节器的统一性	122
5.5 线性二次 STR	127
5.6 自适应预测控制	130
5.7 STR 中的先验知识	137
5.8 结论	138
习题	139
参考文献	140
第六章 稳定性、收敛性和鲁棒性	143
6.1 引言	143
6.2 全局稳定性	143
6.3 收敛性	150
6.4 平均分析方法	154
6.5 平均分析方法举例	156
6.6 鲁棒性	162
6.7 随机平均方法	176
6.8 参数化	182
6.9 不稳定的机理	188
6.10 通用稳定器	192
6.11 结论	194
习题	195
参考文献	196
第七章 随机自适应控制	199
7.1 引言	199
7.2 问题表示法	200
7.3 双重控制	201
7.4 次最优控制策略	206
7.5 例题	209
7.6 结论	212
习题	213
参考文献	214

第八章 自动整定	216
8.1 引言	216
8.2 PID 控制	216
8.3 暂态响应法	217
8.4 基于继电反馈的整定方法	218
8.5 继电振荡	221
8.6 结论	223
习题	223
参考文献	224
第九章 增益调度控制	225
9.1 引言	225
9.2 原理	225
9.3 增益调度调节器的设计	226
9.4 非线性变换	230
9.5 增益调度控制的应用	232
9.6 结论	242
习题	242
参考文献	242
第十章 自适应控制的一些替代方案	244
10.1 为什么不用自适应控制?	244
10.2 鲁棒高增益反馈控制	244
10.3 自振荡自适应系统	248
10.4 变结构系统	255
10.5 结论	259
习题	259
参考文献	260
第十一章 实际问题 and 实现方法	263
11.1 引言	263
11.2 估计器的实现	264
11.3 控制器的实现	271
11.4 估计和控制的相互作用	277
11.5 原型算法	281
11.6 结论	285
习题	285
参考文献	286
第十二章 应用	288
12.1 引言	288
12.2 应用概况	288
12.3 工业自适应控制器	290

12.4	Novatune 的一些应用	300
12.5	船舶驾驶的自动驾驶仪	304
12.6	超滤作用	306
12.7	结论	311
	参考文献	312
第十三章	自适应控制的展望	314
13.1	引言	314
13.2	自适应信号处理	314
13.3	极值控制	318
13.4	专家控制	320
13.5	学习系统	322
13.6	未来的发展	324
13.7	结论	325
	参考文献	326
附录 A	调节器的设计	328
A.1	极点配置设计	328
A.2	Diophantine 方程	334
	参考文献	337
附录 B	正实传递函数	338
	参考文献	339
	名词索引	340
	厂家、产品名称和人名索引	344

第一章 什么是自适应控制?

1.1 引言

在日常语言中,“自适应”是指生物变更自己的习性以适应新的环境的一种特征。直观地讲,自适应调节器是这样一种调节器,它能修正自己的特性以响应过程和扰动的动力学特性的变化。鉴于常规反馈控制也是为了同一目的而引入的,所以自然要问:反馈控制与自适应控制究竟有何不同?多年来,已花了很多力量来定义自适应控制。早在1961年的一次讨论会上,与会者经过长时间的讨论提出了如下定义:“自适应系统是按某种自适应观点设计的任何一种物理系统。”美国电气与电子工程师学会(IEEE)的一个委员会*在1973年进行了一次新的尝试,它基于自组织控制(SOC)系统,参数自适应SOC,性能自适应SOC以及学习控制系统这样一些概念提出了一个新的词汇,但是,这些努力并未被人们广泛采纳。一个有价值的自适应控制的定义应能着眼于一个调节器的硬件和软件,并且能够判定这个调节器是否是自适应的,可惜这样的定义至今仍然缺乏。然而,一个增益恒定的反馈系统已被公认为不是自适应的系统。

我们在本书中对自适应控制的定义将采取实用的态度。一个自适应控制是一类特定的非线性反馈控制,这种系统中的过程状态可划分为两种类型,一类状态变化速度快,另一类状态变化速度慢,慢变化状态可视为参数。这就提出了两个时间尺度的概念:适用于常规反馈控制的快时间尺度以及适用于更新调节器参数的慢时间尺度。这也就意味着一个参数恒定的线性调节器不是自适应调节器。在一个自适应控制器中,我们还认为存在某种类型的闭环系统性能反馈。这个意思就暗示着不应把增益调度控制视为自适应控制器,因为增益调度控制的参数是由调度表确定的,在这种控制中不存在任何闭环性能反馈。

一个控制工程师为什么一定要了解自适应系统?这是因为自适应系统具有许多有用的性能以及有价值的特性,可把它们有益地纳入新型控制系统的设计之中。

自适应控制的历史简介

50年代初期,在设计高性能飞机的自动驾驶仪时,人们就已对自适应控制进行了广泛的研究。这种高性能飞机的飞行速度和飞行高度的范围十分宽广。已经发现,在一种飞行条件下,增益恒定的常规线性反馈控制的性能相当良好,而在飞行条件改变后,这种控制就遇到了麻烦。所以需要一种更加复杂的调节器,它在各种飞行条件下都能良好的工作,但由于人们对一次飞行试验事故缺乏正确的了解,从而冲淡了对这种复杂调节器的研究兴趣。

60年代,控制理论的很多成果,例如,状态空间理论和稳定性理论的结果,还有随

* 这是指 IEEE 控制系统学会所属的自适应学习和模式识别标准与定义的专门小组委员会。——译者注

机控制理论的重要结果对发展自适应控制起了重要的作用。Bellman 提出的动态规划加深了对自适应过程的理解。Tsypkin^{*)} 也做出了重要的贡献, 他证明了许多学习方案和自适应控制方案都能按一种共同的体系描述为一种特定类型的递推方程。系统辨识和参数估计在此期间也有重大进展。在 70 年代, 当把不同的估计方案和各种设计方法结合起来时, 自适应控制又重新恢复了它的活力。这期间报道了许多自适应控制的应用成果, 不过理论成果却相当有限。

在 70 年代末和 80 年代初, 一些研究人员提出了自适应系统稳定性的严格证明, 尽管在这些证明中还用了限制性很强的假设, 然而探讨这些假设的必要性已激励起人们投入到一种新的有意义的研究工作, 即对自适应控制器的鲁棒性的研究, 以及具有泛稳定性的控制器的研究。

微电子学的迅猛而富有变革性的进展, 使得我们有可能十分简单和廉价地实现自适应调节器。在大学和工业部门, 自适应控制领域的各种研制结果正在涌现。基于不同概念的几种工业用自适应调节器已经上市, 自适应控制在工业中的应用正在缓慢而稳步地增长。关于自适应控制历史的补充注释给在 1.2 节中。

自适应控制与自动控制其他领域的关系

自适应控制决不是一个成熟的领域, 它所用的许多算法和方法还带有一种特定的性质, 采用的工具也取自各种领域, 优质的系统性的方法依然缺乏。但是, 人们已经发现, 自适应算法和自适应系统的使用都很好, 有些自适应系统的性能还明显优于常规的反馈系统。

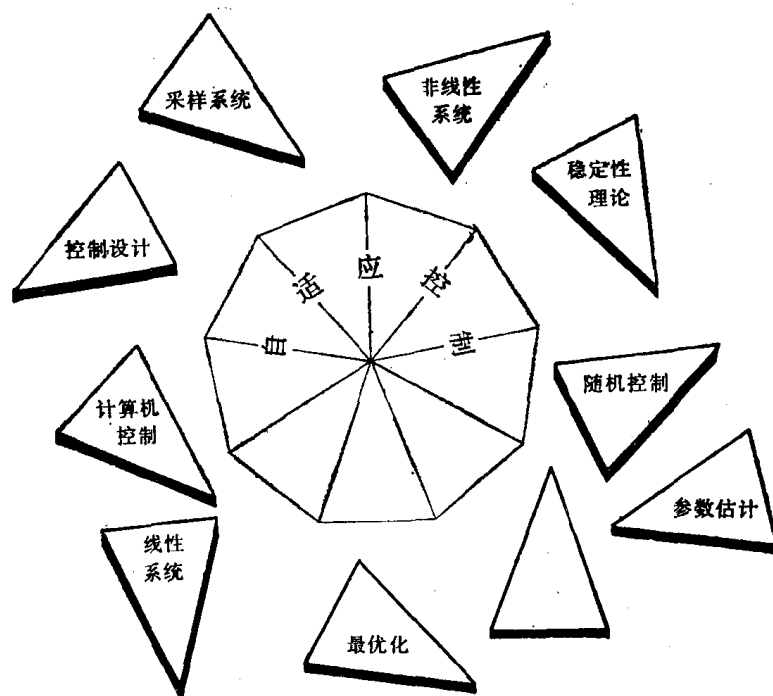


图 1.1 自适应控制与自动控制其他分支领域的关系

^{*)} Tsypkin 是苏联学者 Я. З. Цыпкин 的英译名。——译者注

从事自适应控制的科技人员都必须具备常规反馈控制以及采样数据系统的基础知识。采样数据系统知识的必要性在于,所有自适应系统实际上都是用数字计算机实现的。自适应控制与很多领域都有联系,其中的一些联系示于图 1.1 中。自适应系统本质上是非线性的,所以它强烈地依赖于非线性系统理论。稳定性理论是自适应控制的一个关键部分。自适应控制还与奇异摄动理论和平均理论有关,这是因为自适应系统中的时标是分离的。在考察自适应系统时,一种方法是把它看成参数估计和控制的结合,所以自适应系统还与随机控制和参数估计有联系。

本章的安排

1.2 节介绍一些自适应系统,以便使读者对自适应系统有一个感性认识。1.3 节论述自适应控制的主要理论问题,自适应控制的某些应用在 1.4 节中介绍。本章讲述的内容是相当概述性的,这些问题将在后续各章中详细讨论。

1.2 自适应控制方案

本节的讨论将从增益恒定的鲁棒调节器入手,这种系统包含一个代表希望性能的模式。然后我们论述各种富有启发性的自适应系统,它们是自振荡自适应系统、增益调度系统、模型参考自适应系统和自校正调节器。最后,我们讨论由随机控制理论导出的系统,这样的系统是不易实现的,但它们很有价值。这种系统的自适应速度很快,需要新的谨慎和探测功能,这些功能在上述基于启发式概念的方法中是不存在的。

鲁棒高增益控制

我们现在开始讨论鲁棒高增益调节器,这是一种为克服参数变化而设计的增益恒定的调节器。这种调节器的框图如图 1.2 所示。它有一个环绕对象的高增益反馈回路,其目的是使输出 y 在一个宽广的带宽 ω_B 上跟踪参考信号 y_m ; 带宽 ω_B 将随过程动力学特性而变化。这种调节器还有一个在前馈通路中给出希望性能的模式。只要这个模式的带宽小于 ω_B ,那么即使过程动力学特性发生变化,输出 y 也能按模型所规定的要求响应指令信号 u_c 。问题的关键在于设计反馈回路和前馈模型,以便在过程发生变化时能保持系统的稳定性和性能。图 1.2 的结构称为两自由度系统。当不定性是非结构性的且事先已知时,这种设计就是有效的。鲁棒高增益控制将在第二章和第十章讨论。

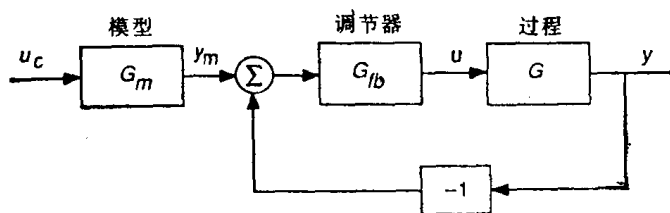


图 1.2 鲁棒高增益系统框图

自振荡自适应系统 (SOAS)

自振荡自适应系统在结构上与高增益系统相同,但它的反馈回路的带宽能自动地调整到尽可能宽的值上。这种系统的框图示于图 1.3 中。环路的高增益由反馈回路中的继

电特性维持。继电特性会在回路中引起一个极限环振荡。可以证明，对于频率比极限环振荡频率低得多的信号，系统的幅度裕量大约等于 2。因此，具有继电反馈的系统能把幅度裕量自行调整到一个适当值。

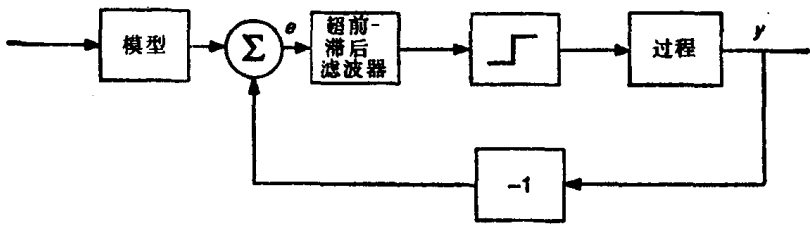


图 1.3 自振荡自适应系统框图

注意，由于极限环振荡的存在，系统总处于激励的状态。极限环的振荡频率可用图 1.3 中的超前-滞后滤波器改变，振荡幅度可用变更继电特性的幅度来调整。极限环振荡在有些情况下是可以接受的，不过对飞机驾驶来说，还需要详细论证。试验已经表明，驾驶员对振荡总是很关注的。

基本自振荡自适应控制系统还有许多变型。有的力图用反馈来调整极限环幅度，而当继电特性的幅度过小时，系统对指令信号的响应就会太慢。还有用高频振动信号来抑制继电振荡的方案。SOAS 将在第十章中讨论。

增益调度控制

在有些系统中，存在着一些与过程动力学特性密切关联的辅助变量。如果这些辅助变量可以量测，则可用它们来改变调节器参数。这种方法称为增益调度控制，这是因为这种方案最初是用来适应过程增益的变化的。增益调度控制系统的框图示于图 1.4 中。

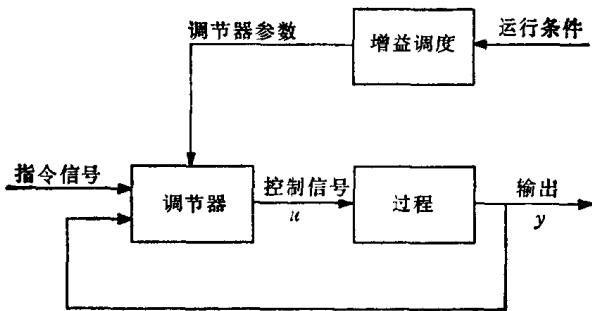


图 1.4 增益调度控制系统框图

增益调度是一种开环补偿，可把它视为反馈增益用前馈补偿进行调整的一种反馈控制系统。这种系统没有闭环系统性能反馈，因而无法补偿错误的调度。增益调度概念是在研制飞行控制系统时提出的，在这种应用中，Mach（马赫）数和动压可用大气数据传感器测量，并作为系统的调度变量。在过程控制中，由于

时间常数和时滞通常反比于生产率，所以常把生产率选为调度变量。就专门术语而言，增益调度控制是否属于自适应系统尚有争议，这是因为它的参数是在开环条件下变更的。尽管如此，增益调度控制在削弱参数变化影响方面还是一种十分有用的技术。增益调度控制的细节和应用情况将在第九章中讲述。

自动整定

简单的 PID 控制器在许多应用中都能满足要求。这类控制器的传统整定方法是采

用简单的试验再加上直观的经验法则进行的。很多自适应技术都能用来整定 PID 控制器,而且已提出自动整定 PID 调节器的一些专用方法。这些问题将在第八章讨论。

PID 的整定常常以一个试验为基础,试验时要加入阶跃或脉冲这样的试验信号;也可采用固有的扰动信号作为试验信号。调节器参数可依据整定 PID 控制器的标准法则通过试验加以确定。

在试验中利用继电反馈可得到一类特定的自动整定器,这时由所得的极限环振荡特性可获取有关过程动力学的信息。因此,这类自动整定器与 SOAS 有关。

自动整定器的一个优点是整定试验可由操作人员激励和管理。自动整定所需的“安全网”要比连续修改参数方案所需的“安全网”简单。

模型参考自适应系统 (MRAS)

模型参考自适应系统用来解决性能规范由参考模型规定的控制问题,这个参考模型指明了过程输出应怎样理想地响应指令信号。这种系统的框图示于图 1.5 中,图中的参考模型与系统并联,而不是象 SOAS 那样与系统串联。这种调节器可设想为包含两个环路:内环和外环。内环是由过程和调节器所组成的普通反馈回路,而调节器的参数则由外环调整。外环调整参数的原则是使过程输出 y 和模型输出 y_m 之间的误差 e 变小。因此,外环也是一个调节器回路。MRAS 的关键问题是确定调整机构^{*)},以便得到一个使误差趋向零的稳定系统。这个问题的解是非平凡的。在早期的 MRAS 中使用的参数调整机构是

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (1.1)$$

这个调整律称为 MIT 律。在式 (1.1) 中, e 代表模型误差,向量 $\partial e / \partial \theta$ 的分量是误差相对于各可调参数 θ 的灵敏度导数。灵敏度导数的近似值可由一个线性系统的输出来生成,这个线性系统是由过程输入和输出驱动的。参数 γ 决定了系统的自适应速度。

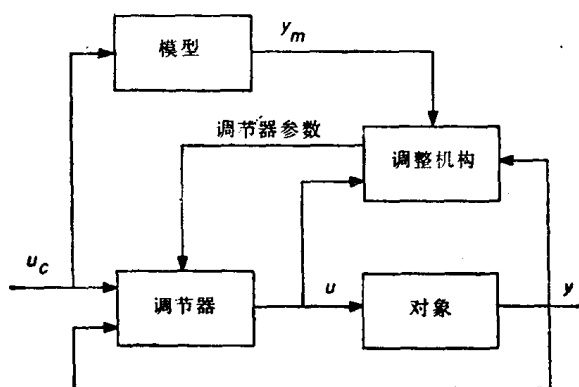


图 1.5 模型参考自适应系统 (MRAS) 的框图

MIT 律的规则可阐述如下: 假设参数 θ 的变化速度比系统其他变量的变化速度慢得多。为了使误差的平方变小,看来合理的办法是沿 e^2 的负梯度方向变更参数。

^{*)} 在有些文献上,调整机构也称为自适应机构。——译者注

式(1.1)描述的参数调整机构可视为由三部分组成：一个线性滤波器，一个乘法器和一个积分器。线性滤波器是根据过程输入和输出来计算灵敏度导数。把由此得到的参数再经第二个乘法器用于控制律。这是很多自适应方案的共同部分，图1.6是为强调这种共同结构而重新绘制的框图，称为误差模型。注意，MRAS力图调整参数，以便使误差 e 和灵敏度导数之间的相关度变为零。下面我们用一个简单的例题来说明模型参考自适应控制的工作情况。

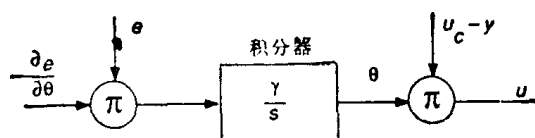


图 1.6 误差模型

例 1.1——前馈增益的自适应控制

考虑前馈增益的调整问题。设模型传递函数为

$$G_m(s) = \theta^0 G(s)$$

式中， θ^0 是已知常数。过程的传递函数假设为 $G(s)$ ，而且已知，误差为

$$e = y - y_m = G(p)\theta u_c - G_m(p)u_c = G(p)(\theta - \theta^0)u_c$$

式中， u_c 为指令信号， y_m 为模型输出， y 为过程输出， θ 为可调参数， $p = d/dt$ ，为微分算子。灵敏度导数是

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = G(p)u_c = y_m/\theta^0$$

MIT 律 [式(1.1)] 为

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e y_m$$

式中， θ^0 已包含在 γ 中。因此，应使参数的变化率正比于误差与模型输出之乘积。本例的模型参考自适应系统的框图示于图 1.7 中。

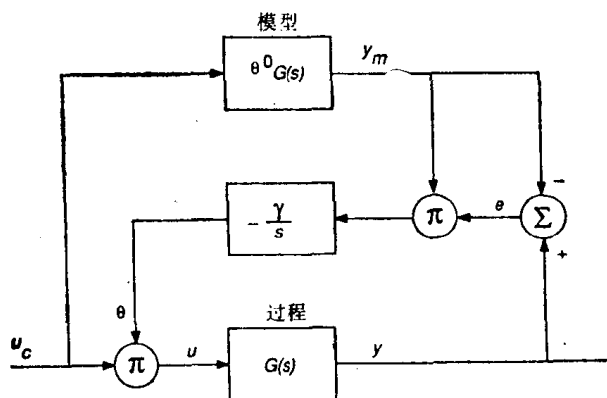


图 1.7 采用 MIT 律调整前馈增益的 MRAS 框图

注意，例 1.1 不需要近似。当把 MIT 律用于更复杂的控制问题时，就必须采用近似方法才能得到灵敏度导数。MRAS 的详细描述和分析在第四章给出。

实时估计

实时估计器是大多数自适应控制器的核心部分。式(1.1)所示的是极简单的估计器，它的一个参数是沿着 e^2 的负梯度连续调整的。

有很多方法可以用来完成实时估计，既有连续时间的方法也有离散时间的方法。各种估计方法和它们的性质将在第三章讨论。在自适应控制器的结构中，最小二乘估计法和它的各种变型起着基本的作用。最小二乘法可用一个十分简单的例题来说明。

例 1.2——最小二乘估计

假定过程由下列差分方程描述:

$$y(t+1) = \theta^0 y(t) + u(t) \quad (1.2)$$

式中, θ^0 是未知参数。考虑模型

$$\hat{y}(t+1) = \hat{\theta} y(t) + u(t) \quad (1.3)$$

式中, $\hat{\theta}$ 是 θ^0 的估计, $\hat{y}(t+1)$ 是基于估计 $\hat{\theta}$ 的 $t+1$ 时刻的输出预测值或设想值。最小二乘的损失函数定义为

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^t e(k)^2 \quad (1.4)$$

式中

$$\begin{aligned} e(t) &= y(t) - \hat{y}(t) \\ &= \theta^0 y(t-1) - \hat{\theta} y(t-1) \\ &= y(t) - u(t-1) - \hat{\theta} y(t-1) \end{aligned}$$

上述推导中已用式 (1.2) 消去 θ^0 。式 (1.4) 相对于 $\hat{\theta}$ 微分, 得下列最小二乘估计:

$$\hat{\theta}(t) = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} y(k)(y(k+1) - u(k))}{\sum_{k=0}^{t-1} y^2(k)} \quad (1.5)$$

上式中的时间标记表示这个估计是对基于到时刻 t 并包括时刻 t 在内的数据作出的参数估计。因此, 如果过程果真由式 (1.2) 描述, 则式 (1.5) 的估计将极小化式 (1.4)。

自校正调节器 (STR)

迄今为止, 我们讨论过的调整规律都是直接指明应如何更新调节器的参数, 所以这类方案称为直接法。如果更新的参数是过程参数, 而调节器的参数还要求解一个设计问题才能得出, 则我们就有了一种不同的自适应控制方案。这种系统的框图示于图 1.8 中。这个自适应调节器可设想为由内环和外环两个环路组成。内环包括过程和一个普通的线性反馈调节器, 这个调节器的参数由外环调节。外环则由一个递推参数估计器和一个设计计算机构组成。为了得到一个良好的估计, 可能还需要加入扰动信号。为了使框图简洁, 这个外加信号的功能未在图 1.8 中示出。注意, 这种系统的过程建模和控制设计都可视为是自动化的, 这种系统的过程模型和控制设计在每个采样周期中都要更新一次。具有这种结构的控制器称为自校正调节器 (STR), 这个名称强调了这种控制器能自动校正自己的参数, 以得到希望的闭环系统性能。自校正调节器将在第五章讨论。

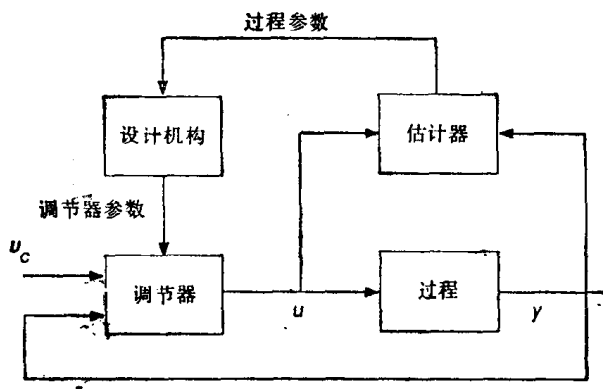


图 1.8 自校正调节器 (STR) 的框图