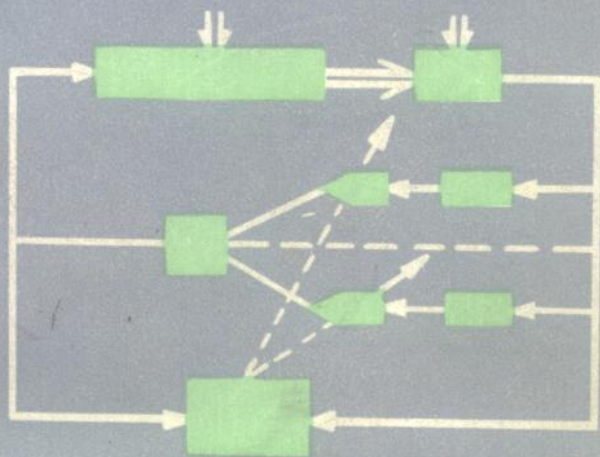


随机系统的自组织控制

[美] G. N. 萨里迪斯 著



科学出版社

73-0.17
738

随机系统的自组织控制

〔美〕 G. N. 萨里迪斯 著

郑应平 译

王振均 校

科学出版社

1984

DL65/12
内 容 简 介

通过模仿人类更高级的智能活动,对更加大型、复杂和更具有不确定性的系统进行控制,这是当前自动化技术发展的一个重要趋势。由于技术手段的进步,特别是电子计算机的普遍应用,自组织控制系统(通常说的自适应控制系统正是它的一个主要内容)在许多方面都得到日益广泛的应用。美国珀杜(Purdue)大学电机工程系的萨里迪斯(G. N. Saridis)教授,1977年出版的这本书较好地总结了这方面的发展情况,并力图为之建立一个较为系统化的理论基础。其内容包括对自组织控制的基本思想和基本概念 的阐述;现代控制理论的有关预备知识;决定性和随机系统自适应控制的各种基本方法和应用;以及自学习控制、分层多级智能控制等新技术的原理、应用和前景。

书中收集材料较为全面,注意介绍各种方法的可能应用并列出了大量参考文献。

本书可作为高等学校、研究所以及工业部门从事控制系统的研制人员的参考书。

George N. Saridis

Self-Organizing Control of Stochastic Systems

Marcel Dekker Inc, 1977

随机系统的自组织控制

[美] G. N. 萨里迪斯 著

郑应平 译

玉振均 校

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

*

1984年3月第一版 开本: 850×1168 1/32

1984年3月第一次印刷 印张: 14

印数: 0001—5,600 字数: 366,000

统一书号: 15031·552

本社书号: 3414·15—8

定 价: 2.60 元

译者前言

自动控制或自动化的主要目的就是以机器实现人的一部分脑力劳动,从而在无须操作人员参与的情况下完成规定的控制功能。当然,需要自动控制的原因总是由于所控制的对象、环境以至于控制任务本身带有某种不确定性。这时人们无法用一种死板的、程序式的装置来完成多变的任务。利用反馈原理可以在一定范围内处理不确定性,而通常的反馈控制系统也确实很好地完成了许多常规的控制任务。但如果这种不确定因素的变化范围过大,我们就要求控制系统能不断地调整自己的结构和参数以适应这种变化。这就是“自适应”或“自组织”控制系统的基本原理。各种生物体正是在亿万年的进化过程中,不断改进自身的功能以适应环境而形成了今天我们看到的如此灵活、完美和可靠的种种控制和调节机制。而自适应控制系统的研制正是人们对生物体控制系统的这种诱人的品质进行模仿和应用的一种尝试。二十多年来在这种思想指导下已经建造了许多巧妙的控制系统并付诸实用。许多讨论这些系统的论文和专著相继出现,自适应控制已经成了现代控制技术的一个重要分支而日益引起人们的重视。

但是自适应控制系统的复杂和昂贵大大限制了它们的应用范围,其理论模型也因种类繁多而难以处理。甚至连“自适应”这一概念也很难给予统一而明确的定义。这给自适应控制的理论研究带来了很大的困难。

技术的进步总是在不断地推动着理论的发展。数字计算机尤其是微处理机技术的飞速进步和广泛应用使得自适应控制系统的普遍应用成为可能。这就促使人们重新审视和总结已有的理论工作,以指导工程设计并为更高级的控制系统的设计指明方向。萨里迪斯的这本书正是这方面的一个较为成功的尝试。它以随机自

适应(自组织)控制为主要论题,但同时也系统地给出了控制理论方面的预备知识并对确定性的自适应(自组织)控制做了全面的介绍。按照作者的观点,自适应(自组织)控制是普通的反馈控制和随机最优控制的自然发展,它是理想的二重控制的一种可行的处理方法。同时作者又把自适应(自组织)控制自然地纳入走向大系统分层多级控制、自学习控制以及更高级的智能控制的轨道之中,从而指出了可进一步研究的方向和课题。书中给出的大量实例指出了这些理论方法在实际应用上的广阔前景。

虽然本书的结构和条理并不十分理想,但它较全面地收集了有关材料并确实反映了这一领域的发展动向。其丰富的内容使它不失为有关自适应控制的一本较好的参考书。应当强调的是,书中所给出的许多具体控制方案、算法和结论有时固然可以直接使用,但更重要的还是由它们所表现出来的基本思想和处理方法。由此人们可以独立地建立符合自己需要的新的方案和算法,以解决自己的具体问题。

书中内容涉猎的面很广,译者才疏学浅,误解之处势在难免。原书论述和刊印错误颇多,译者虽尽力做了修改(其中较明显者一般未注明),但遗漏或改误肯定也都是有的,衷心希望大家批评指正。

序

控制系统理论是近三十年来发展成为分析和综合科学的一门工程学科。它的成长一直是和近代技术问题的需求以及新工艺的发展密切联系的。近几年来，这些技术的需求已经转移到对其动态特性完全未知或部分未知的过程进行处理，这种处理需要具有较高决策能力的控制系统。

二十年来，在有关控制的文献中，出现了大量讨论具有不确定动态特性系统的各种论著。但是这些研究工作都是在各种不同名目下，以各种互有分歧和互不联系的形式出现的，从而导致了在许多知名的专家间产生种种争议这样一种特殊情况。这本书的目的就在于，通过对具有共同性质和目标的这些已有的研究方法，进行适当的明确和充实，而使具有不确定动态特性的控制系统这样一个研究领域统一起来。这一具有雄心的意图势必引起控制系统现有体系的扩充，并与其余的控制方法建立起解析关系。这一使命成败与否只有靠读者来裁决了。

本书并不打算成为一本讨论控制系统及其有关数学问题的自足式专著。的确，开始我们曾想把它写成一个研究专题报告。但是，由于这一领域中所积累的经验，已使我们把它写成了一本高等教科书和研究生教程，以及研究所和工业实验室的科技人员的参考书。范围宽广的文献书目也为这一领域提供了一个参考的来源。读者需要具备以下数学知识：线性系统、状态变量、变换理论、概率论和初等随机过程、确定性的和随机的最优控制，以及在连续和离散时间情形下的有限状态系统。所举的例子大多在数字计算机或混合计算机上试算过，从而对于希望熟悉这些研究方法的读者来说，这些机器的程序编制将是十分有用的。由于本书所涉及的性质和范围，书中并未给出练习题。有兴趣的读者可以多

动脑筋对已有的例子重新进行模拟研究以取得充分的体验。

本书分为三个部分：第一部分包含该领域的定义以及若干确定性的自组织控制系统的一个综述，这些系统由于篇幅所限未能在这本书中进行讨论。第二部分就估计理论、随机和二重最优控制以及辨识方法为读者提供了一个基础性的讨论。熟悉这些材料的读者可以直接跳到第三部分，在那里对各种参数自适应和品质自适应的自组织方法进行了叙述、比较并应用于各种问题。我们还讨论了自组织控制和学习及智能系统之间的关系。书中采用的术语和符号都是近代最优控制系统文献中最通常使用的。本书的材料是作者十年来在珀杜大学讲授“自组织控制系统”中发展起来的。

按照惯例作者还要对那些在编写这本书的过程中给予了精神上 and 物质上帮助的人们表示感谢。毫无疑问，我首先要感谢傅京荪 (K. S. Fu) 教授，他在私人通信中给了我许多鼓励和启发，并提供了他在这方面的大量贡献，从而使本书的产生成为可能。我还要感谢 J. M. Mendel 和 J. Meditch 教授，他们在我长年累月准备材料的过程中给予了巨大的精神支持。我要感谢我的同事：Z. J. Nikolic 博士、G. Stein 博士、H. Gilbert 博士、P. Badavas 博士、Fensel 博士、北原博士、R. Lobbia 博士、R. Hofstadter 博士、D. Ricker 博士和 H. Stephanou 博士以及 T. K. Dao 先生，他们在本书论述的各部分材料的形成中做出了贡献。我感谢珀杜大学 EE687 和 EE689 课程的学生们，他们做了大部分模拟试验并进行了比较研究。我还要特别感谢 H. Stephanou, T. K. Dao, A. Desrochers 和 G. Lee 等几位先生，他们对手稿进行了评论和改正；感谢 Terry Brown, Wanitta 和 Wanda Booth, Molly Harrington 和 Becky Fagan 等几位女士打印了全部手稿。最后，我要感谢珀杜大学和国家科学基金会，他们为我完成本书提供了经费和条件。

G. N. 萨里迪斯
印第安纳州西拉法叶特

目 录

译者前言	i
序	iii

第一部分 自组织控制系统的基础

第一章 基本思想和定义	1
1.1 引言	1
1.2 系统理论、控制及其发展	2
1.3 在可简约的不定性下的决策问题	8
1.4 新的定义	14
1.5 关于自组织控制、学习和智能系统的一些想法	17
1.6 关于应用的讨论	19
参考文献	21
第二章 某些确定性自组织控制的算法	24
2.1 引言	24
2.2 梯度辨识自组织控制	26
2.3 系统辨识和建模的多项式表示方法	36
2.4 自组织控制的泛函方法	45
2.5 模型参考自适应控制系统	49
2.6 讨论	64
参考文献	66

第二部分 最优随机估计、辨识和控制

第三章 最优估计和有关的搜索算法	71
3.1 引言	71
3.2 对平稳系统的最优点估计	72
3.3 序贯估计	81
3.4 状态估计: 线性系统	97
3.5 非线性估计	111

3.6 讨论	115
参考文献	117
第四章 随机最优控制	120
4.1 引言	120
4.2 随机最优性,概述	120
4.3 开环控制策略	122
4.4 被动反馈控制	123
4.5 线性、二次、高斯型的最优控制	125
4.6 讨论	139
参考文献	141
第五章 二重控制问题	143
5.1 引言	143
5.2 二重控制问题的一般提法	144
5.3 最优解的构成	148
5.4 最优二重控制和中立性系统	153
5.5 二重控制两个特例的研究	154
5.6 讨论	164
参考文献	165
第六章 在线参数辨识概述	166
6.1 引言	166
6.2 参数辨识和结构辨识	167
6.3 互相关方法	170
6.4 随机逼近算法	176
6.5 在线的最大似然算法	182
6.6 作为滤波的一种推广的辨识问题	185
6.7 随机搜索辨识算法	190
6.8 例子和比较	194
6.9 讨论	201
参考文献	203

第三部分 自组织控制

第七章 参数自适应的自组织控制	208
------------------------------	------------

7.1	引言	208
7.2	历史的回顾	209
7.3	线性化的随机最优算法	211
7.4	开环的反馈最优算法 (OLFO)	218
7.5	上界和下界极小化的算法	233
7.6	萨里迪斯和洛比亚的并行辨识与控制	250
7.7	谢和巴沙罗姆的主动自适应算法	263
7.8	讨论	270
	参考文献	271
第八章	品质自适应自组织控制	274
8.1	引言	274
8.2	历史的回顾	275
8.3	纳伦德拉的互相关方法	278
8.4	线性再励和随机自动机算法	282
8.5	随机逼近算法	298
8.6	萨里迪斯的扩展子区间算法	318
8.7	对一类分布参数系统控制的随机逼近	329
8.8	讨论	335
	参考文献	339
第九章	自组织控制算法的评价及稳定性考虑	348
9.1	引言	348
9.2	自组织控制的定性评价	349
9.3	一些参数自适应自组织控制算法的定量评价	356
9.4	一些品质自适应自组织控制算法的定量评价	360
9.5	参数自适应和品质自适应的自组织控制算法的交叉比较	372
9.6	自组织控制的稳定性考虑	374
9.7	讨论	391
	参考文献	392
第十章	自组织控制的未来: 学习控制系统和多级递阶智能 控制系统	395
10.1	引言	395
10.2	学习系统	397

10.3 仿生系统和智能系统	328
10.4 多级递阶的智能控制	405
10.5 自组织控制的其它应用	410
10.6 讨论及进一步研究的建议	411
参考文献	413
人名索引	427
名词索引	429

第一部分 自组织控制系统的基础

第一章 基本思想和定义

1.1 引 言

控制系统,作为使一过程产生预期响应的手段,它的研究及各种应用可以回溯到古代文明的记载。但是,第二次世界大战是这一领域的一个里程碑,由于伯德(Bode)、尼柯尔斯(Nichols)、波波夫(Popov)、乃奎斯特(Nyquist)等人的开创性的工作,使这一分散的研究领域开始凝结成了一门学科。这个新学科的主题是反馈的概念,以及它在理论上的一些结论。当时的重点是伺服机构和其它为驱动简单电力机械系统而设计的控制部件。其后,随着技术水平的提高,控制系统的研究范围扩展到包括完善的理论研究,以及复杂的硬设备的应用问题。它的最突出的成就之一,就是在使人登上月球的业绩中,作出了重要的贡献。控制系统领域的成长和取得的成就,主要应归功于数字计算机及其惊人的能力,尤其近年来更是如此。

最近一段时期,现代系统工程师的兴趣,已由纯粹的硬设备工程问题,大量地转移到更广泛的一系列问题上去了,它们包括都市、社会和经济系统、交通和运输系统、生物医学系统等等。正如人们所希望的那样,对于现代世界上由于技术的飞跃发展而产生的种种问题,系统理论的成果可以提供一些普遍的解答。但为了解决这些新领域中的问题,对现存的理论结果必须作一些改进。这种改进所以必要是由于我们对于这些系统的具体模型缺少了解,而当我们用物理规律对系统进行描述时这种知识是不可少的。为了解决这一类问题,我们需要建立一个专门的学科,来处理具有不定性模型的系统。

自组织控制是系统理论的一个分支,它专门研究工作于确定性环境或随机环境中的、具有完全或部分未知动力学性质的系统。这一领域还有一个重要特点,那就是对所考察的未知系统,或明显地或隐舍地进行辨识,并常常需要联机(在线)地建立它们的模型。而后这些信息被用于调整控制器以近似地实现该系统的最优控制。许多科学家,包括本书作者所从事研究的这一学科,仅仅在最近才成熟到足以将它表述为统一的形式。在美国的文献中,把从自组织观点出发来处理未知系统的各种现有办法统一起来,可以说本书是一个尝试。

自组织控制可以看成是走向未来的控制,即智能控制的第一步。在环境不允许或不宜于存在操作人员时,这种控制系统可以代替人进行决策、安排控制策略,通过训练以学习新的功能并完成其它的智能作用。

本章的目的在于,通过讨论自组织控制可能的应用,来说明这种控制原理的必要性;通过给出正确的定义,并给出它的应用范围(在此范围中自组织控制不仅是绝对需要的,而且作为一个控制系统来说它是不可取代的),来建立它的恰当的基础。这一讨论可以作为本学科的一个导引,还可以按其给出的定义,对收集到的属于该学科的各种方法,加以系统化,并进行讲述。这样就可以对文献中出现的许许多多的方法,给它们一个新的、合理的位置,这些方法通常具有自适应、最优化、自寻最佳等等不同名称,而且由于其观点中的矛盾,它们有时是彼此对立的。由于需要产生控制系统的一个统一化的新观点去概括有关的方法,有许多方法被排除掉了。因此,许多人可能在读到本书之前就不同意它提出的某些思想。我希望他们耐心一点,并在读完最后一章之后再作结论。

1.2 系统理论、控制及其发展

为了使这一主题具有适当的科学背景,必须弄清它与系统工程和控制系统这些领域之间的关系。因此我们将先作一综述,并

希望由此建立思想发展的连贯性,建立自组织控制这一新学科与其它的系统工程研究方法之间的因果关系。

1.2.1 系统工程

系统理论的方法一贯是实际工程师所应用的研究方法的一个不可分割的部分。之所以如此,主要是由于与其它科学不同,它的工作本质上不在于揭示物理对象间的函数关系,即不是这种应用分析思考的过程,相反地,在于设计一个由许多部件组合起来、作为整体而进行工作的一个系统^[1,38]。

系统理论的观点,在性质上总是从宏观的角度来看待自然,并且只利用它们的那些特征,这些特征对于系统的设计,以及得到物理上正确合理的系统性能是必需的。机械工程师在设计发动机时应用平均热力学而不用分子运动论;电气工程师在设计电路时应用欧姆定律而不用电子动力学,这些都是系统理论思维最好说明。

五十年代末和六十年代初在技术上的突破,以及数字计算机的发明,使工程师置身于大量的创造性的工作之中,这就促进了系统理论方法的发展和形成。包括了工程的所有方面的所谓大规模系统,它的出现要求发展系统具体的抽象理论,它适用于每一工程学科,在解决各种问题时,不涉及各问题应用的物理规律是如何地不同。这里数学科学提供了工具,新的学科被命名为系统工程。

为了理解系统理论的潜在力量并寻求它的应用,应该从系统工程师的观点来定义那些最关键的的概念。这样的处理,其必要性在于(和其它情形不同),这些定义是功能性的,而且最终是要解决现有的问题。许多科学家都研究了这些概念,参看文献[1.22, 1.48, 1.51, 1.52]。

介绍系统理论的最好办法是首先给出它的基本概念,例如系统的概念、系统状态的概念等等。在辞典上,系统一词被定义为“由某种形式的相互依存性而联合起来的对象的总体”。另一方面,系统在任意给定时间的状态则是“为确定该时刻以后系统行为所必需的信息”。但这些定义都不是功能性的,因为它们数学上

不够具体从而无法建立数学模型。例如按此定义可以把每一事物都称为系统,而状态又过于含糊而无法处理。

扎德 (Zadeh)^[1,51] 给这些术语下了一个比较精确的数学定义。

定义 1.1

系统是由一组分别表示输入和输出的时间函数的有序对来描述的,它确定了一个抽象的对象。这些有序对必须满足以下条件:若其中某个有序对属于该系统,则它的每一片段都属于该系统。这一定义通过输入-输出关系而不是通过该过程特定的物理实质来刻画每一抽象的对象或系统。这样,对于各种各样的系统,人们可以只考察其因果关系而将它们作为一个整体来处理,从而就可以用统一的方法来处理许多不同的问题。为了从数学上构造一个系统,我们需要以下的定义。

定义 1.2

系统的现有状态可以看成是,当所有现在和未来时刻的系统输入为已知时,为完全描述系统将来的行为(例如输出)所需要的关于“过去”的最少量的信息。

定义 1.3

状态变量是一个依赖于时间的数学变量,它可以完整地描述系统的状态。

由这些定义,人们可以用一组积分微分方程来描述一个系统,当给定系统的现有状态及过去、现在和将来的输入时,这组方程可以描述系统在未来某一时刻的状态或输出。这样的系统称为确定性的系统。但在许多情形下,当一个不确定的环境对系统可能引入一些随机输入时,系统的状态就可能以一定的概率而取一组不同的数值。这时系统的未来行为只能以一定的概率来描述,这种系统称为随机系统。如果一个系统工作于随机环境而且其描述是具有不定性的,并且在过程的进行中它能减少这种描述的不定性,那末我们称之为学习系统。如果系统具有诸如决策、规划等较高级的智能作用,就称之为智能系统。后面我们将进一步讨论

这类系统。

1.2.2 系统理论的研究方法

当前感兴趣的大部分问题是涉及包含有大量变量的系统。这些问题出现于传统上由工程学来处理的动力和通讯系统中，也出现于许多与工程无关的学科领域的系统中，例如社会经济系统、都市系统、生态系统、社会系统、运输系统、保健系统、行政和经营管理系统等等。由于系统理论方法在航天计划中得到了成功的应用，看来系统工程学是可以为上述问题提供解决办法的。

系统理论方法对每一系统建立一个适当的数学模型，这种模型是基于定义 1.1 来建立的，而与系统的物理实质无关。而后对此数学模型进行分析并预测它的行为。基于这种预测就可对该模型设计适当的控制并进行试验。最后，对实际的问题就按这种基于数学模型的设计来实现这些控制。这一程序可以形式地归纳为以下五个步骤：

1. 建立过程的模型；
2. 数学的分析；
3. 数学的综合；
4. 控制的试验；
5. 真实系统的设计。

这里只有第一步和第五步是与所考察的特定物理过程有关。其余三步则可用数学的方法并借助计算机来完成。这就使我们的方法具有高度的灵活性。下面我们对以上步骤做更详细的说明。

建立模型就是对所考察的物理系统求得一数学模型的过程。这要求该领域的专家和系统工程师之间相互紧密地联系和合作。对于具有一定程度不确定性的系统更要特别注意。它通常需要分两步进行：

1. 结构辨识，它包括对其所依赖的物理规律的解释方法。
2. 参数辨识，它包括对系统各种功能参数数值的取得方法。

数学分析就是研究一特定结构系统的过去、现在和将来的品

质这样一个过程，它不涉及问题的物理本质。响应分析方法适用于确定性系统，而状态估计方法通常可用于随机系统。对于具有较大程度不确定性的系统则宜于使用学习的方法。由于现代关心的过程都不同程度地具有大量的状态变量，为研究这类系统已经发展了各种不同的分析方法。试列举如下：

1. 多级递阶 (Hierarchical) 方法；
2. 分解 (Decomposition) 方法；
3. 流图和网络方法；
4. 学习理论的方法；等等。

数学综合就是设计控制作用以使系统按预期的方式工作的问题，在大多数情形这正是工程研究的主要目标。通过开环或闭环地加入一外接的控制器，前面已分析的数学模型将被强制按预期的方式而工作。对感兴趣的现代系统设计数学控制的各种方法列举如下：

1. 数学规划的最优化方法；
2. 数学规划的运筹学方法；
3. 稳定性研究；
4. 随机控制和两重控制；
5. 自组织、自学习和智能控制。

试验是系统理论研究方法的一个十分重要的组成部分。它通常为确立前面讨论的分析和综合过程的合理性提供了一种手段。大的计算机系统使试验工作大为简化。下面列举一些试验技术：

1. 小尺度模型试验；
2. 模拟计算机仿真；
3. 数字计算机仿真；
4. 混合计算机仿真。

真实系统设计过程涉及如何把由模型得到的关于设计的信息转化到原来所考察的真实问题上去的问题。它是系统理论方法的最后一步并应由该领域的专家和系统工程师相互合作来完成。