

自适应控制的系统识别

〔美〕 W. D. T. 戴维斯 著

潘裕煊 译

科学出版社

内 容 简 介

本书结合工程技术实际,介绍系统识别时所用的相关技术,重点介绍如何应用准随机信号。本书首先花了较多的篇幅介绍二位式最大长度序列 (b. m. l. s.) 的性质、特点及生成方法,以及它们应用于系统识别的基本原理,包括单输入-单输出系统及多输入-多输出系统的识别。最后介绍了自适应控制系统设计中的两个重要概念——品质指标和优良度,并概述了整个自适应控制系统的构成。书中有较多的实例和表格,便于参照查阅。本书可供从事自动控制的科研人员及工程技术人员参考。

W. D. T. Davies
SYSTEM IDENTIFICATION
FOR SELF-ADAPTIVE CONTROL
John Wiley, 1970

自适应控制的系统识别

(美) W. D. T. 戴维斯 著

潘裕焕 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977年11月第一版	开本: 787×1092 1/32
1977年11月第一次印刷	印张: 12 7/8
印数: 0001—6,720	字数: 290,000

统一书号: 15031·158

本社书号: 920·15-8

定 价: 1.30 元

目 录

第一章 自适应控制系统的概念	1
1.1 自适应控制系统的定义	1
1.2 为什么要用自适应控制系统	3
1.3 自适应控制系统的分类	4
1.4 自适应控制的实际问题	7
1.5 自适应控制系统的基本成分	9
1.6 自适应控制的基本性质	11
1.7 几个非自适应系统	12
1.8 多维自适应控制技术	16
1.9 稳定性问题	20
1.10 自适应系统中的学习	21
1.11 一个实际的自适应控制系统	23
1.12 结论	25
第二章 随机信号试验法的原理	27
2.1 引言	27
2.2 褶积	28
2.3 随机信号的统计描述	29
2.4 自相关函数	31
2.5 互相关函数	33
2.6 功率密度谱	34
2.7 信号的均方值的几个性质	35
2.8 从互相关函数识别脉冲响应函数	37
2.9 采用白色噪音为输入信号进行识别	39
2.10 采用准随机噪音作为输入进行识别	41
2.11 多维系统的识别	42

2.12	准随机噪音信号的几个例子	45
第三章	二位式最大长度序列的产生及其性质	47
3.1	引言	47
3.2	采用移位寄存器产生二位式最大长度序列	48
3.3	二位式最大长度序列移位寄存器式信号发生器反馈通道的正确选择	53
3.4	二位式最大长度序列移位寄存器式信号发生器的几个重要性质	60
3.5	二位式最大长度序列的性质	64
3.6	滞后的二位式最大长度序列的产生	79
3.7	产生互不相关二位式最大长度序列的方法	87
3.8	结论	91
第四章	其它周期性噪音源	99
4.1	引言	99
4.2	准随机二位式噪音信号的几个例子	100
4.3	多水平准随机信号	119
4.4	三水平或三位式最大长度序列	120
4.5	三水平最大长度序列的几个性质	124
4.6	互不相关的三位式序列	128
4.7	特殊的三水平序列	130
4.8	互不相关的半三位式最大长度序列	132
4.9	特殊的二位式序列	133
4.10	由二位式序列生成三水平序列	134
4.11	另一种构成方法	137
4.12	五水平最大长度序列	139
4.13	结论	142
第五章	利用最大长度序列估计系统的动特性	145
5.1	引言	145
5.2	建议的实验过程	146
5.3	可能存在的误差源分析	149

5.4	减小误差的方法	171
5.5	电子数字计算机的使用	175
5.6	上述方法在多变量系统中的推广	179
5.7	结论	182
	附录	
5.1	非周期信号	185
5.2	白色噪音的分析	185
5.3	b. m. l. s. 的导数	187
5.4	b. m. l. s. 的某些性质	188
5.5	非理想传感器的分析	189
5.6	多项式漂移的分析	193
5.7	导数项的消除	194
5.8	漂移参数的估计	196
第六章	由脉冲响应曲线求传递函数	197
6.1	引言	197
6.2	概述	198
6.3	由脉冲响应曲线求频率响应曲线的方法	199
6.4	由频率响应曲线求传递函数	213
6.5	直接由脉冲响应求传递函数	222
6.6	结论	233
第七章	系统自动识别的基本原理	235
7.1	引言	235
7.2	正交函数	237
7.3	自适应网络	245
7.4	结论	253
第八章	系统在线识别的方法	254
8.1	引言	254
8.2	概述	255
8.3	方法 1	260
8.4	方法 2	266
8.5	方法 3	278

8.6 总的结论	287
附录	288
第九章 自动识别的一般方法	291
9.1 引言	291
9.2 连续单输入方法	291
9.3 理论	292
9.4 方法 1	296
9.5 方法 2	297
9.6 方法 3a	300
9.7 方法 3b	304
9.8 方法 3c	306
9.9 结论	311
第十章 优良度和品质指标	314
10.1 引言	314
10.2 优良度的概念	315
10.3 对品质指标所希望具有的性质	318
10.4 品质指标和优良度的分类	321
10.5 几种现有的品质指标	322
10.6 品质指标的分析	336
10.7 对品质指标的限制	338
10.8 品质指标的测量	341
10.9 结论	343
附录	347
第十一章 自适应回路的闭合	351
11.1 引言	351
11.2 保持极点-零点结构	352
11.3 满足优良度	355
11.4 范德格林顿(Van der Grinten)方法	356
11.5 学习模型法	359
11.6 以模型为参考的自适应方法	377

11.7 “自动求模型”的自适应系统	383
11.8 结论	388
附录	390

第一章 自适应控制系统的概念

1.1 自适应控制系统的定义

虽然过去曾提出过若干关于自适应控制系统的定义,但似乎没有一个被普遍接受。大概特鲁克萨尔 (Truxal)^[1] 所提出的算是到目前为止最普遍的定义,即:“任何一个按自适应观点设计的物理系统均为自适应系统。”从该定义出发,有人可能认为,如果设计成这样一个系统,在任何时候系统对对象特性的变化都极不敏感,从而使整个系统保持不变,那末这个系统在某种意义上讲就是一个自适应系统。这也意味着一个自适应控制系统实质上就是一个反馈控制系统,当控制系统参数有很大变化和(或)有大量外界扰动存在时,可以自动地得到所希望的动态响应。

根据这个观点,可以得出更为确切一些的定义,即:“自适应控制系统是这样一个系统:它能够按某一给定准则或优良度来连续地测量系统品质,并且靠闭环作用自动地改变系统的可调参数,以满足该优良度。”^[2] 本书将采用这个定义。

该定义表示一个自适应控制系统必须使自己反映或适应于它所处的“环境”的变化。为此,所谓“环境”又要有所定义,它可定义为系统设计者通常应该考虑的一组条件。这组条件显然应该包括如下各项:系统输入信号的性质,系统将鉴别的噪音,以及影响系统参数的各有关因素等等。

因而这样一个系统必须能自动地测量控制系统输出及被控过程的特性,并在此测量的基础上,按着某些预先规定的最

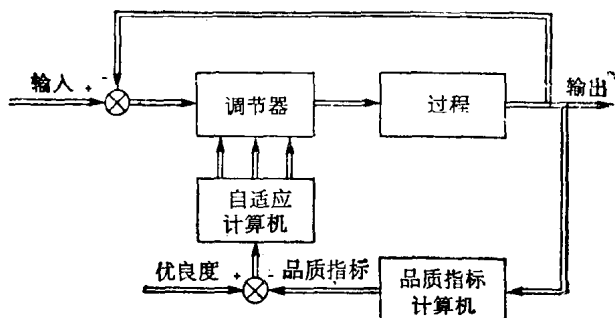


图 1.1 典型的自适应系统

优化条件或特性调整整个系统。这种系统的方框图如图 1.1 所示。这里要注意两点：(a) 自适应回路必须以实际品质与希望的标准相比较后闭合起来——这就排除了将简单的程序控制系统误为自适应控制系统的可能性；(b) 由自适应调节器算出的信号必须用来进行参数调整——因此也就不包括象简单的积分控制等一类系统。

由此可见，这样一个定义要求完成三个主要的职能：识别—决策—变更。在各种具体应用中，总是很难从整个系统中分出这三部分来，尤其是前两部分，然而，所有这三部分，对于自适应来讲都是必不可少的。

本书的主要部分将用来详细讨论其中的第一部分，即自适应系统的识别。这是一个表征系统特性的过程，也是使近代自适应技术的发展受到限制的一个因素。工程师或者系统设计师可以仔细考虑系统的全部有效信息，甚至可根据其脉冲响应或传递函数确定这个系统；然而，一般地讲，除此以外，识别还意味着构成一个品质指标的公式，以此可以建立起一个系统品质的质的度量。往往一个自适应控制系统还包含某些专门手段，可用来监视系统的输入和(或)输出，并对系统或

参数进行随机的或其它方法的扰动以便可以推算出系统的品质。

基于上述自适应控制系统的定义，最优控制系统可以被看成是自适应控制系统的一个分支，这一类系统的品质指标可以被直接地测量出来。自适应与最优控制之间的这个内在关系可以以一个复杂化学过程的控制系统为例，得到最好的说明。因为这样一种系统的原始要求可能是使产量最大，这时必须根据预知的数据来选择某些希望的控制设定点。这样，为了使产量最大，就必须加上一个最优控制系统。而静态运行点通常是所用各种化学成分的函数，因为它们的性质将会随着时间而变化，例如触媒的老化将使整个过程的动特性慢慢地变化，因此，为了保持满意的动态控制也必须采用自适应控制系统。

因而一个最优控制系统将根据某些预知的信息或假定，以经验为基础，来确定与此假定有关的最优运行条件。

1.2 为什么要用自适应控制系统

当一个常规调节器无法工作时就要求采用自适应控制系统。例如要求一个调节器补偿下述各项变化时，就需要采用自适应控制系统：

(a) 由于环境变化而引起的过程传递函数的阶数或参数值的变化，例如，随着空气速度、飞行高度以及空气压力等等的变化所引起的飞机传递函数的变化。

(b) 系统本身的变化，如磨损，机械损坏等。

(c) 系统的输入和扰动的性质的变化。

这类变化的其它例子还可列举不少，例如：一个连续化学过程的参数是要发生变化的，它是环境温度或流入、流出速度

等的函数。在造纸厂中,卷筒的惯性由于纸的卷绕而变化,为了保持卷筒张力恒定所需要的马达力矩又随着卷筒的直径而变化。导弹的质量和重心随着燃料的消耗而发生变化。当超音速飞机从海平面上升到比方说是五万呎的高空时,其空气动力学参数发生范围极大的变化。

显然,在这些情况下,常用的反馈控制系统将无法对付这些变化,系统的品质将降低到容许的限度之下。最初,为了解决这些问题,考虑设计非线性控制系统,其最简单的情况就是仅仅对某些系统参量(通常是回路增益)安排好一个慎重的经过深思熟虑的调整程序,以便补偿由于环境变化而引起的系统参数的变化。这曾经是非常成功的,但这样一个“固定的”补偿器只能在一个有限的运行条件范围内适用。超出这个范围就必须改变补偿方法,也就是说,必须使系统适应于新的条件。

因此,在这种情况下,就要求系统能自动地改变它自己的补偿方法,这就导致产生自适应控制系统。

1.3 自适应控制系统的分类

上面所给出的自适应和自适应控制系统的定义中有一个很清楚的含意,即系统中至少有一个环节的特性是随着环境的变化而发生变化的,有时还很显著。于是为了对付这种变化,就设计这样一种系统,使它对于对象参数的变化具有一个固有的低灵敏度,通常称这种系统为从动的自适应系统。

主动的自适应控制系统则可定义为这样一种系统,它要求测出系统的品质(按照某项准则),在此测量的基础上变更系统,以便使得整个系统的品质对于环境的变化不敏感,或者能改进它的品质,或者两者兼备。

常用的反馈控制系统，它使输出量以极小的静态误差跟踪给定的输入量，这种系统也可以认为是自适应控制系统的一个分支，称为**静态的自适应系统**。按照这样的定义，那末一个反馈控制系统，若其动态响应在系统参数变化的影响下基本上不变，则可认为是**动态的自适应控制系统**。根据这样的分类法，我们规定，当且仅当反馈控制系统具有动态的自适应性时才是自适应的系统。

由此可见，一个主动的动态自适应控制系统，除了要求有一些在一定的环境下运行的环节之外，还必须包含下述特征：

(a) 最优运行条件或**优良度**的定义，即一个品质的标准，实际系统的品质可与之相比较。

(b) 用品质指标的形式测量系统实际的品质的方法，测得之品质指标用来与希望的响应(或品质)相比较。

(c) 在此比较的基础上，确定如何改变系统以减小品质指标和优良度之间的差的方法。

(d) 实现这种变更的方法。一般地讲，这要求引进一个或多个新的环节和(或)去掉一个或多个原有的环节，以便改变系统中一个或多个参数值和(或)改变系统的结构。

如果采用这种动态自适应性的概念，那末由上面定义确定的自适应控制系统还可以按照所采用的自适应原理再进一步分类。列举几类如下：

1. **从动的自适应系统**——这些系统原来就设计得能在环境变化很大和控制系统参数变化剧烈的情况下，不改变调节器的参数或结构仍能具有满意的品质。显而易见，这类系统并不符合前面所给出的关于自适应控制系统的定义，但是为了完整起见，仍把它包括在内。

2. **对于输入信号的自适应**——对于输入信号的自适应系统，测量输入信号的一个或几个特征，诸如信号噪音比、频

谱、均方根值等等,并按照这些特征的变化来改变基本的控制系统。在这类系统中不需要辨认系统的响应或输出信号,这时,所得的自适应系统实质上是一个开环系统。当然,若还需监视所得的均方误差并按此来确定最终的调节作用,这种情况就不能算开环了。

3. 对于对象的自适应控制系统——这类系统以调整其本身参数来补偿被控制对象传递函数的变化。基本控制系统可以通过测量系统的因变量来改变,这时就称之为对象变量自适应系统;也可以通过测量其传递函数来改变,这时可称为对象特征自适应系统。可以并入这一类的一种特殊系统,就是以模型为参考的自适应系统,后面将较详细地讨论。

4. 参数自适应系统——这类系统通过直接调整系统的增益、时间常数或其它回路参数来获得自适应的性能。显然,根据上述定义,可以认为所有的自适应控制系统都属于这一类,然而,定义这样一类系统的根本目的在于要把直接的参数自适应系统和下面一类系统区分开来。

5. 调整输入信号型式的自适应——当把驱动器的传递特性也考虑进去后,就可形成一个输入控制信号,使之比直接输入信号所产生的系统响应更能符合要求。这个方法对自适应控制问题来说是一个很有潜力的方法,因为在这个方法中显然要采用电子数字计算机作为调节器,如图 1.2 所示,所以

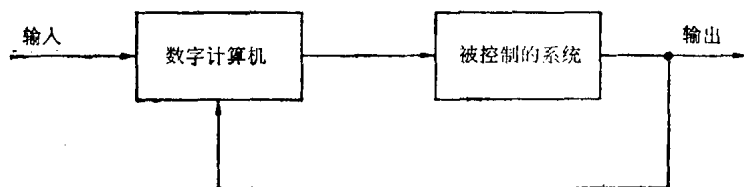


图 1.2 数字计算机控制的自适应系统框图

有时又称为计算机控制自适应。这时数字计算机的作用是算出为获得所希望的系统响应必须的强制函数，及系统动态响应的最终信息。在计算系统动态响应的基础上产生并使用强制函数，这就使自适应回路闭合起来。

6. 极值或最优自适应——在这一类系统中调整其基本控制系统，使某些因变量取极大值或极小值。该类系统后面不再进一步讨论。

显然，自适应控制系统的这种分类方法并不很严格，因为有些自适应系统可以同时属于上面所述的二类或更多类。然而，因为对于过去几年来得到极大注意的自适应系统，人们一直企图区分它的各种类型，也因为这些分类构成从理论上讨论自适应性能很方便的基础，所以进行这样的分类是值得的。

1.4 自适应控制的实际问题

应用自适应控制所出现的第一个主要问题就是：如果从输入与输出之间的关系来看，原来可能是线性系统，会由于引用了变参数的回路而使整个系统变为非线性。这个问题显然增加了系统的复杂性。

第二个重要的困难则在于系统的识别部分。往往有许多实际的限制，诸如对容许或可采用的测量设备的限制或对于测量时间的限制等等，这都表明只能对系统作出部分的识别。这时，不能收集到系统传递特性的全部信息，而只能收集其特别重要的那一部分，因此，产生了这样一个问题，就是要决定可测参量中究竟哪些是最重要的。另外还应指出一点，即识别时间应比对象参数的变化速度来得快，否则所得之信息就是过时的，毫无用处的。虽然花费在识别上的时间取决于对

对象预先了解的多少,但根据经验,总是要求识别时间与系统的时间常数是可以相比拟的。

而且,识别必须在正常运行条件及存在噪音干扰的情况下进行,同时对系统所作的各种试验必须对所控制的正常运行条件不造成过分严重的干扰。因此试验时既不允许直接采用大扰动也不允许使对象脱离正常运行状态。

随着识别问题而来的是,系统的最优运行条件需要用优良度这样单独的一个数来表征,系统的品质总不能比这个标准更好。显然,试图用单独一个数来表征整个一个系统是颇为冒险的事,然而必须这样做。在设计自适应控制系统时必须作出的最重要的决策之一就是选择一个最好的优良度,而且必须保证所选择的优良度将不会使得设计的系统变得不稳定、不能实现,或甚至更坏,不然一个可实现的系统将产生错误的结果。优良度应尽可能选得简单,如果可能,应同时包含长期的经济目标和短期的品质目标。

作为前面两个问题的结果,第三个主要问题就是系统的稳定性。这个问题通常是由所选的改变系统可调整参数的方法引起的,在最好的方法与可用的方法之间是有矛盾的,这时必须寻找一个折衷的解决办法。设计系统时必须注意,应保证系统在某一类输入信号下的工作性能与在其它类型输入信号下差别不大。这可以对输入信号的类型加以必要的限制,以保证系统有合适的运行状态,这时可能需要采用非线性元件,或者对输入信号的性质进行频繁的或连续的估计,以便相应地修改控制系统设计准则。

因此,即使基本控制系统是单回路的,一个实际的自适应控制系统必须是多回路的。由于有如此复杂的内部交联反馈通道,对系统稳定性及品质即使进行很近似的分析也很困难,必须大量应用反馈及非线性理论。

因为大多数实际过程是极为复杂的,包含许多回路、许多输入和输出,因此,自适应回路的工作必须完全与过程相隔离,不是插入基本控制系统,而是与之并行地进行工作。

设计系统时,要取得对各种允许结构的估计,以及对自适应调节器将能满意运行的某一类功能的估计,这时,利用李亚普诺夫^[5]稳定性理论是很方便的。

为了使稳定性问题简单起见,参数调整应该进行得尽可能快。对于只有一个变量的系统来讲,这是一个很容易解决的问题,但是,当考虑一个多变量控制系统时,想自动地调整二个或二个以上的参数以便很快地达到最优状态却并非很容易——最优状态是可能漂移的。因此必须研究一种搜索的策略,这种策略要求搜索过程很有效率,这并非是随使用什么方法都能做到的。最有效的策略与所考察的具体系统有关,这必须在进行基本设计时就考虑进去。进一步的困难就是滞后时间,这在绝大多数工业对象中都是存在的,在这些对象中,从改变一个可变参数到取得有关其效应的任何信息,有时需要两个小时以上。若对主优良度构成一个短期的副目标,则可以多少克服一下这个困难。

在设计自适应控制系统时,关于基本系统的全部有用的预知的信息都应该利用起来。如果对于系统的正确的数学描述还有某些地方不能完全确定,那末应对此作出最好的有效的估计或假设,而只给自适应回路留下尽可能少的工作。

1.5 自适应控制系统的基本成分

从前面可以看出,在自适应控制系统中至少有两个以某种形式出现的基本成分,即:1.识别——测量被控制过程的动态特性,2.驱动——产生一个合适的驱动信号,再用它来修改

可调整的特征。

识别问题也可定义为：将系统的动态特性化成一个可为调节器所采用的形式，如前所述，它也许是自适应控制中最重要的一个方面。因为自适应就意味着频繁地、自动地和快速地解决识别问题，所以它将成为该系统的核心部分。因而，一般的自适应控制系统要求根据对其特性的充分估计作出完全的过程识别。

驱动功能可以进一步再分成二部分，即决策功能和控制信号的修改功能。

决策功能根据系统当前的品质和希望的（或最优的）品质的有关信息而动作，决定要产生什么样的校正作用（如果有需要的话），确定所需之调节器的特征或必须的驱动信号。这一功能在系统估计准则是确定的范围内起作用，该功能实现起来可能是一个很复杂的设备，它包含了一组数学关系的连续求解，也可能很简单，仅仅隐含在识别和修改部分中。

控制信号的修改功能根据所作的决策起作用，进行所要求的修改以使系统趋向最优。这个功能体现一个实际的装置，该装置用来实现决策机构所作出的决策，因为它完全取决于具体的结构，所以没有通用的表示法。希望这样设计系统，其中自适应部分只是附加在常规反馈控制系统上，当自适应部分去掉或者损坏时整个系统仍能运行。

虽然在任何一个具体系统中都可能很难将这三部分功能分开（其中某一部分功能往往与上述另一部分功能结合在一起），但是，任何一个自适应系统都必须具有这三个功能。

在设计自适应控制系统时，识别部分和驱动部分的性能与控制工程师所掌握的基本工具有关系，这里面包括对反馈控制系统进行线性、非线性、采样和统计分析时所用的工具，它和最优控制理论的概念结合在一起，可用来研制所要求的