

非线性 和 自适应控制技术

控制工程杂志 编
珀杜工业应用控制实验室

科学出版社

73.1222
521

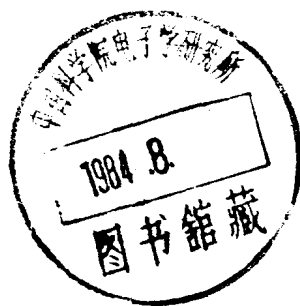
非线性 and 自适应控制技术

控制工程杂志 编

珀杜工业应用控制实验室

韦登谷 朱敬铨 吴金水 李良巧 译

叶正明 校



科学出版社

1984

1111603

5-08-36/3

内 容 简 介

本书是一本论文集。主要介绍自适应及非线性控制技术的应用。通过工程中的实际课题介绍有关自适应控制系统的基本概念、分类及实际应用中的性能判据、建立模型、辨识等问题。论文涉及的应用面很广，内容也比较新颖。对从事自动控制的工程技术人员和高等院校有关专业的师生有一定的实用价值。

Control engineering and Purdue laboratory for applied industrial control
NONLINEAR AND ADAPTIVE CONTROL TECHNIQUES

Dun-Donnelley Publishing Corporation, 1974

非线性 and 自适应控制技术

控制工程杂志 编
珀杜工业应用控制实验室

韦登谷 朱敬铨 吴金水 李良巧 译
叶正明 校

责任编辑 李淑兰 鞠丽娜

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 5 月 第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1984 年 5 月 第一次印刷	印张: 10
印数: 0001—6,700	字数: 226,000

统一书号: 15031·568

本社书号: 3536·15—8

定价: 1.55 元

021101

译 者 的 话

早在五十年代后期,自适应控制技术就引起了人们的广泛注意,其原因除了自适应控制系统本身诱人的潜力之外,更主要的还是生产实践和科学技术的不断发展,对控制技术提出了更高的要求。第二次世界大战后期,反馈控制系统的一般分析与设计方法相继出现,到五十年代前期已比较成熟,并广泛用来解决线性控制系统的设计问题。但它在遇到下列情况时,却无法给出设计系统的有效方法:

- (1) 系统的动态特性过于复杂;
- (2) 系统包含很多输入和输出,并且不能采用相互独立的控制;
- (3) 环境条件或系统参数变化剧烈,或干扰很大。

面对这些实际困难,人们在反馈控制原理的基础上,继续探索新的控制思想和方法。尽管这一时期计算技术有了可喜的进展,但最初收效甚微,原因在于原有的控制理论没有指明如何将上述复杂问题化为适合于计算机求解的问题。六十年代,现代控制理论和计算技术的飞速发展使得数字或模拟计算机作为控制系统的实时元件成为现实,从而导致了各种新的控制技术,其中包括自适应控制技术的迅速发展。

起初,自适应控制技术主要应用于航空与航天技术领域。六十年代中期,其应用逐步推广到工业部门,如电力系统的控制。七十年代,在核电站、化工工程、冶金工业和机械加工中都成功地应用了自适应控制技术。目前从美国阿波罗登月计划到社会生产管理控制,自适应控制技术都有广泛的应用。

但是,与其他类型的自动控制系统相比,自适应控制系统的实际应用为数尚少,其原因之一就是自适应系统的设计方法还不成熟。由于自适应控制系统是多回路系统,系统中存在着复杂的交联反馈通道,加上回路中的非线性特性,因而使得对自适应控制系统的稳定性和动态性能,即使进行很近似的分析,都是十分困难的。从六十年代中期开始,广泛开展了对自适应控制系统稳定性的研究,并取得了一定的成果。但是,总的来说,由于这项研究极为复杂,目前还远远没有达到完善的地步。因此,在常规控制方法无法达到规定的技术要求而必须采用自适应控制系统的场合,如何利用已取得的理论成果来设计出合乎要求的系统,是广大工程技术人员极为关心的问题。正是出于这个目的,我们翻译了《非线性和自适应控制技术》一书。

本书是一本论文集。全书共有综述性论文三篇,应用论文十篇。其中前一部分的综述性论文结合自适应控制系统在过程工业* 以及航空与航天领域的应用,简要地阐述了自适应控制系统的基本特性、分类以及相应的适用范围,重点在于应用自适应控制系统解决一般反馈控制系统难以解决的实际问题。有关自适应控制系统的各种性能判据、建立模型的方法等都通过工程中的实际课题阐述得比较清楚。

本书在翻译过程中曾得到汤鹏飞、许菊大等同志的很多帮助,在此谨致谢意。

由于译者水平所限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

译 者

1982年1月

* 过程工业系指涉及变量为温度、压力、流量、液面或 pH 值的工业生产。

——译者注

前 言

1974年4月29日至5月1日,由《控制工程》杂志和珀杜工业应用控制实验室联合发起,在珀杜大学召开了第一届高级控制年会。这个年会的宗旨是通过一些基础的指导性的学术报告,结合一些高级控制技术在特殊场合应用的短篇文献介绍,来推动和促使控制和仪表系统技术水平的提高。由于高级控制这一个学科的范围很广,每年高级控制会议所讨论的内容将限于指定的领域。如:第一届年会讨论的内容只限于自适应和非线性控制技术,第二届年会讨论的内容是多变量系统的高级控制和仪表技术。

《非线性和自适应控制技术》的出版是为了送给第一届高级控制年会的代表而预印的;本书把所有能来得及预印的论文全文都包括进去了。

《控制工程》主编:

Edward J. Kompass

珀杜工业应用控制实验室主任:

Theodore J. Williams

目 录

I. 指导性论文

自适应控制的基本情况及其应用 (M. S. Beck).....	1
自适应和非线性控制系统在宇航中的应用 (Stanley M. Shinnars)	85
过程工业中的自适应控制 (Edgar H. Bristol).....	152

II. 应用性论文

乘法器改善液压驱动装置的高速性能(Jack E. Gregg)...	196
座舱压力控制——非线性设计的一个实例(Dr. W. Richard kolk)	205
聚氯乙烯悬浮聚合过程控制的自适应技术 (M. A. Keyes 和 J. P. Kennedy)	216
AN/SPN-42 航空母舰上的自动降落系统 (W. D. T. Davies 和 Roger Noury).....	235
用于带钢热轧机输出辊道冷却喷嘴预测控制的非线性自适应模型的建立(Roger L. Barron 和 Jerry H. Schunk)...	265
用于互连电力系统控制的自适应技术(Charles W. Ross)...	269
真正的计算机数控——高级机床控制系统(Earl Bradley)...	289
仿形铣床的自适应控制 (Richard A. Mathias).....	298
多区域温度控制的简单自适应系统(Arthur E. Kempcke)...	299
化学过程的自适应控制 (William B. Field)	303

自适应控制的基本情况及其应用

M. S. Beck

摘 要

本文第一部分叙述了两种基本的自适应控制系统，模型参考式自适应系统和输入自适应系统；其基本特征以直流伺服机构的自适应控制为例予以说明。接着研究两种情况：一种是旋转式固体干燥机的自适应控制方案；另一种是在气动或液动运送系统中使固体传输特性最优的输入自适应控制方案。

为了成功地应用模型参考式自适应控制方案，需要有过程的精确模型。第二部分介绍了建立模型的一般原理和几种方法。对动态模型的实验辨识进行了详细的研究，同时认为采用简单的测试信号，例如脉冲和阶跃函数是值得提倡的；但是在噪声使这些简单的方法不可靠时，则表明了利用随机信号的互相关性可给出精确的模型。此外，还叙述了由互相关技术延伸所得的一种方法，在这种方法中工程师可相互关联地调整建立模型的计算机程序，以便根据比较少的，质量不好的数据给出精确的模型，还给出了此种方法的某些结果。

最后提供了参考文献目录并有一个单独的书目以供欲使其研究范围超出本书的读者所用。

第一部分 自适应控制系统

1.1 引言

许多过程按照预定的控制方案，其控制参数调整在非临界值，就能控制得令人满意。反馈控制用来精确地控制运行状况，而为了减少输入扰动的影响可另外加上前馈控制。但也有些过程，环境条件的变化要求控制策略作重大改变。例如，飞机的自动控制系统，这些飞机在高度相差很大的条件下飞行，以及用于化学催化反应装置的控制系统，在该反应装置中催化剂活动性随时间的变化规律是无法预测的。在这些情况下，无论环境条件如何变化，自适应控制系统可以给出接近于最优的控制。

自适应的过程控制系统能够认识过程环境条件的变化并包含有调整控制策略的机构，保证在环境条件变化时给出各种可能中最好或最优的性能。因此，自适应的过程控制系统包含下述措施：

(i) 直接测量环境条件或测量过程对部分环境条件的响应来测量环境条件，以及以下三者之一。

(ii) 输入自适应控制，参看图 1。

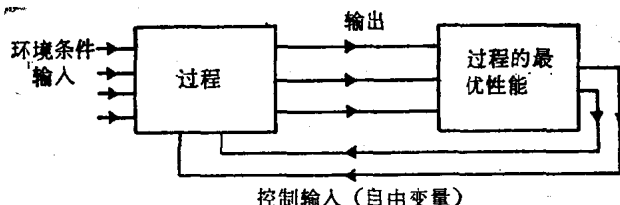


图 1 输入自适应控制

如果通过过程的响应测得环境条件，然后根据所测得的响应计算性能判据。再对过程的自由变量直接进行实验性改变使其性能按照性能判据的规定达到最优。

(iii) 模型参考式自适应控制(模型追随)参看图 2a。

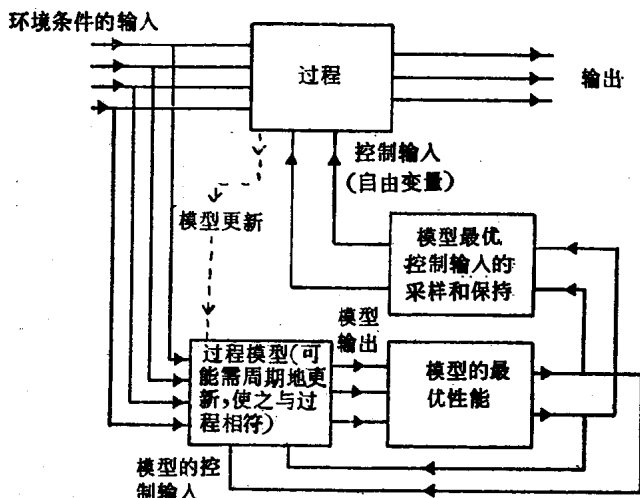


图 2a 模型参考式自适应控制(模型追随)

如果直接测得环境条件,测量结果输给过程的快速模型,并在模型上进行实验使其性能按预定的性能判据达到最优。然后调整过程的自由变量使之与模型的自由变量值相同。因此,只要模型是过程的精确描述,过程的性能也将是最优的。这种方案可帮助系统进行模型的自动更新。

(iv) 模型参考式自适应控制(理想化模型)。

如图 2b 所示,环境条件的输入加到过程的理想化模型上同时也影响于过程本身。理想化模型表示在预定的最优条件下运行的过程,误差信号 $e(t)$ 是模型和过程输出信号之差。通过最优搜索法使误差的时间平均指标,例如,误差平方的积

分值减至最小，最优搜索法调整过程的一个或几个自由变量以迫使过程响应紧紧追随理想模型的响应。

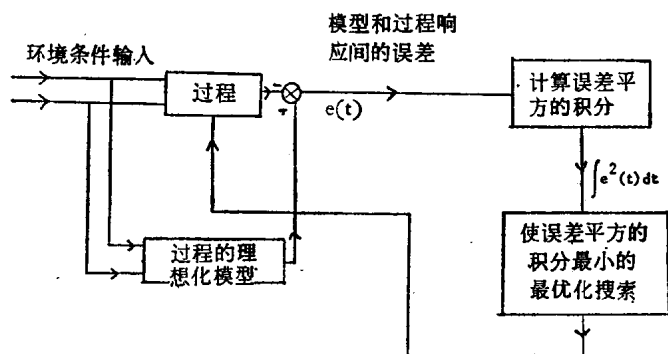


图 2b 模型参考式自适应控制(理想化模型)

由于输入自适应控制无需确定模型，所以它很有吸引力。但必须对过程进行实验，由于每次实验调整之后过程必须稳定至稳态运行值，所以这是一种缓慢的过程。只有在环境条件的明显变化间的间隔比其过程响应时间较长时，这样慢的自适应速度才是可以接受的。

模型参考式自适应控制方案中，通常将模型放在模拟或数字计算机中，所以有关模型的实验能够很快完成，系统就能适应环境条件的快速变化。成功的关键是有一个不断更新的模型。可惜，这种模型有时不能预先确定，所以必须根据从过程所获得的数据确定模型。

模型追随方案最适用于化学过程以及与此类似的物理系统。这种系统的特性随时间变化，所以需要周期地更新模型而不能开始就确定一个理想化的模型。在这些系统中有可能规定一个性能判据，并且可按图 2a 所示的安排使判据得到最优。如果辨识正在进行时，过程控制参数发生变化，将会出现一种混乱的情况。这种变化使一些不平稳的数据输入到辨识

程序中去。遗憾的是,目前现有的辨识方法均要求平稳的数据。这种情况通常被认为是“分离”问题。在控制参数发生变化以后,辨识的数据被收集以前,保证给以足够的时间使瞬态过程消失,就可以克服这一问题。

在航空空间领域内,事先可将飞机(举例来说)所需响应确定为理想模型的情况下,理想模型式自适应控制系统将得到典型的应用。利用这种型式的自适应控制来调整伺服机构的特性有可能使飞机的工作与理想模型一样。

因此,许多自适应控制系统中,如何获得过程的模型是最主要的问题。模型的辨识问题将在本文第二部分讨论。本文第一部分讨论三个系统,这三个系统是被选来阐明自适应控制技术主要原理的。第一个系统是位置控制伺服机构,虽然概念简单,但它可用来说明输入自适应控制所遇到的问题以及如何利用模型参考式自适应控制来克服这些问题。第二个系统是旋转干燥机的自适应控制,干燥机中残留时间比输入扰动之间的间隔长,所以必须采用模型参考式方案。第三个系统是使固体材料的管道传输特性最优的输入自适应控制方案。在这种情况下,绝大多数的环境条件变化比传输过程的响应时间缓慢,所以不需要参考模型;但是,某些情况下,某一输入变量可能变化很快,文中说明可以增加一个前馈回路克服这些扰动。

1.2 一种简单情况的研究——输入自适应和模型参考式自适应控制系统

1.2.1 输入自适应控制——使系统对于阶跃输入响应的误差平方积分减至最小

我们来考虑图 3 所示的简单位置控制伺服机构。输入和

输出位置轴各驱动一个电位器，如图所示将产生一个误差电压，误差电压被放大并按减小误差的方向驱动电动机/齿轮箱组合。

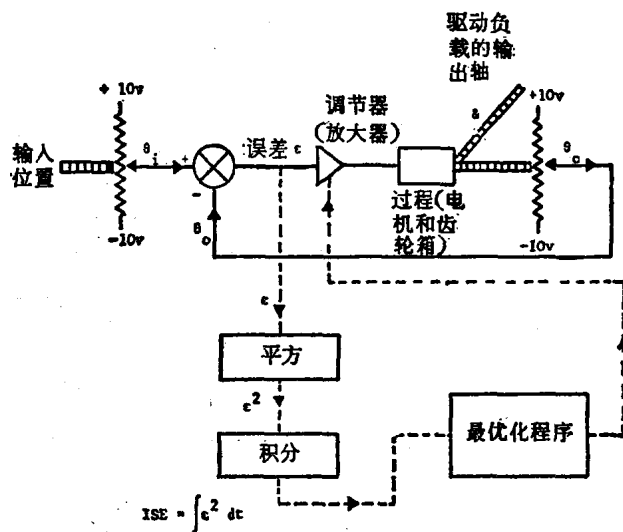


图3 位置控制伺服机构(输入自适应回路以虚线表示)

在这个简单系统中，我们设想通过调整放大器增益 K 使响应最优。例如，图4示出放大器增益 K 逐步增加时系统对阶跃输入的响应将从过阻尼、正确的阻尼变化为欠阻尼。

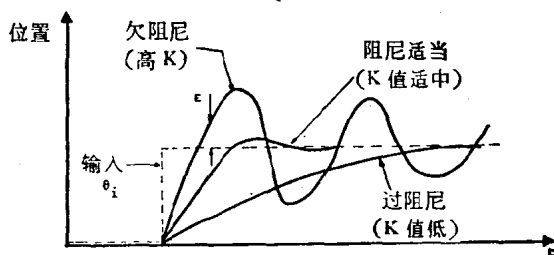


图4 伺服机构对阶跃输入的响应

使阶跃响应最优的方法可以看作是最基本的自适应控制方法;因为要使系统对于特定的输入——图4所示的输入——的响应最优,需要调整增益 K 。系统的良好性、最优性或响应的定量方法是计算按下式所定义的误差平方的积分:

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (1)$$

式中积分时间 T 大约是系统稳定时间的5到10倍。ISE判据使正误差和负误差造成同样的处罚(或价值)值并且此值与误差的平方成比例。这种判据对于很多实际情况是令人满意的,并且可以实际测量(Beck和Dadachanji, 1968)或解析计算(Beck和Dadachanji, 1971)。有时也采用其他判据(例如,参看1.3.1节)。

现在再看图3,我们打算采用一个简单的自适应回路(图中虚线所示),在此回路中,对于阶跃输入扰动时,算出它的响应的ISE,并且“最优化程序”连续调节增益 K 直至ISE最小。

ISE和增益 K 之间的关系取图5所示的典型形式, K 值低时具有相当大的误差,在最优 K 值附近为曲线的平坦段,高 K 值段由于系统接近于不稳定,误差急剧增加。

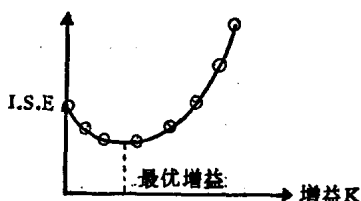


图5 误差平方的积分曲线

目前有许多令人满意的适用于在线计算机的最优化程序,所有这些程序都是用一种“爬山”的方式探求某目标函数的极大(或极小)值(Wilde, 1964)。

几乎任何一种最优化程序对上述简单的单参数搜索问题都会工作得很好。但是,实际上往往可能需要搜索好几个参数。例如,伺服机构中,为了改善性能要增加相位超前以及

(或)测速机反馈,因此需要搜索 2 或 3 个参数以使性能最优。上面所述也正是多参数搜索的基本原理,但是必须仔细选择最优化程序以便尽可能地以最少的步骤有效地给出总的最优性能。

无论是一个参数或几个参数需要最优化,自适应控制的基本原理都是一样的。所以这一节中余下的部分将讨论图 3 所示的简单的位置控制伺服机构所遇到的实际问题。

1.2.2 随机输入情况下的输入自适应控制系统

实际上系统的输入具有相当的随机性,例如,在雷达跟踪系统中可能要求位置控制伺服机构(图 3)。跟踪飞机的不规则的机动飞行,或在数字控制的机床中跟踪一个精心制作的模型。两者的输出轴都可能受随机负载的扰动,例如,引起大型天线振动的阵风以及切削机械中刀具的颤振,这些输出扰动都将作为定位误差影响系统的 ISE。图 6 示出上述情况,其中输出 θ_o 以某一误差 ϵ 追随输入指令 θ_i ,误差是由输入指令和负载扰动共同影响的结果。

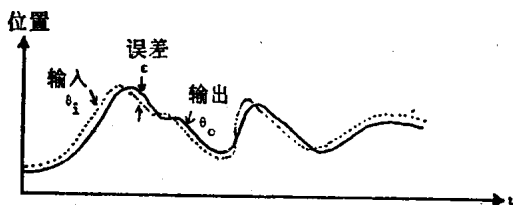


图 6 伺服机构对随机输入响应

对于图 6 所示的输入, ISE 是评定伺服机构性能的合适判据。因此图 3 所示的输入自适应系统可用来使伺服机构性能最优。ISE 测量系统在积分区间 T 内对误差采样 [式(1)], 然后最优化程序比较此 ISE 是大于还是小于上一个积分区间

所计算的 ISE, 并适当调整放大器增益 K 使 ISE 减小。如果输入指令和负载扰动在各个相继的积分区间 T 内合起来的影响是常数 (即统计上是平稳的), 从而 ISE 的逐次测量值将给出如图 5 所示的平滑的 ISE 曲线上的点, 最优化程序就可寻求明确规定的最小值, 这样, 系统就能工作得很好。

遗憾的是, 控制系统实际的指令和扰动通常对于各个积分区间统计上不是相同的 (即它们是统计上不平稳的), 由于输入和负载扰动的变化, ISE 的逐次测量值容易产生相当

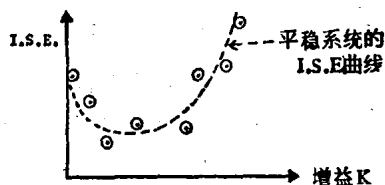


图 7 输入和负载不平稳所造成的误差平方积分的测量误差

大的变化, 这样就得出形如图 7 所示的 ISE 曲线。显然, 这样的 ISE 测量值对于力图寻求最小 ISE 的最优化程序是不合适的, 因为最优化程序无法知道, 比方说, ISE 的减小究竟是由于系统性能的实际改善, 还是由于输入或扰动信号的变化所造成。

综上所述, 由于绝大多数控制任务中输入和负载扰动不平稳, 最优化程序由于输入和扰动特性的变化而失效, 致使输入自适应控制系统效果不能令人满意。为此提出了另一种方案, 例如, 以标称化的性能判据代替式 1 所给的判据。标称化判据由下式给出:

$$\text{标称化的 ISE} = \frac{\text{ISE (式 1 所给出的)}}{\text{输入功率}} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{输入功率} &= \int_0^T (\theta_i - \bar{\theta}_i)^2 dt \\ \bar{\theta}_i &= \theta_i \text{ 的平均值} = \frac{1}{T} \int_0^T \theta_i dt \end{aligned}$$

标称化方法能解决输入信号活动性的强度有变化时所引起的问题,但无法解决输入信号频谱分布所引起的问题,并且丝毫不考虑负载扰动。

以上所述的困难可用模型参考式自适应控制系统加以克服,在这种系统中最优化程序在过程模型上进行。

1.2.3 模型参考式自适应控制系统

参看图 8, 输入信号不平稳问题以及在过程中输入和负载扰动的不能分离的影响可通过对输入信号波形进行采样加以解决(采样序列必须足够长以致能正确表示输入的统计特性)。采样值输入到一个模型参考系统,该系统被最优化而给出性能判据的最好值(比方说,最小的 ISE)。上面已经叙述了使 ISE 最小的步骤,但是在这种情况下,最优化程序工作在系统的快速计算机模型上,所以能很快决定控制参数 K' 的最优值。同一组输入信号数据用于 ISE 的每一次计算,所以模型的 ISE 测量值将成为图 5 所示的光滑形状。

成功的关键是采用一个精确的模型来表示其过程。在某些情况下模型可通过解析建立模型得到(表示过程的物理和化学过程),或通过实验辨识(实验在过程上进行)来预先确定。在很多情况下过程的特性随时间变化,因此模型必须通过另一个经实验辨识的模型周期地更新。模型的辨识问题是本文第二部分的主题。这一部分我们继续考虑用于旋转干燥机的模型参考式自适应系统。

1.3 用价值函数作为干燥机或其他时滞过程判据的模型参考式自适应控制系统

这一节研究利用模型参考式自适应控制方案改善旋转式