

## 无模型自适应控制

程树行博士与他的 CyboCon CE，被称为世界上第一台通用型自适应控制仪表

这种新的自适应控制技术用来应付各种控制的挑战

PID 回路控制着大部分工业装置中的自动化过程。比例-积分-微分算法简单、可靠，50年来被广泛用于成千上万个控制回路。

然而，并不是所有工业过程都可以用PID回路来控制。例如，多变量、非线性和时变等过程都需要用更先进的控制技术。曾几何时，这些技术只出现在学术界的实验室和航天领域，价廉物美的计算机平台的出现使得那些晦涩难解的算法接近了工业用户。

### 自适应控制

自适应控制就是这样的例子。早在1970年代，学术界和工业界的研究人员一直在研究能够自己学习和适应被控过程特性渐变的反馈控制器。

诚然，就迫使过程的输出调整到操作人员所需要的值来讲，所有的过程控制器都是‘自适应的’。然而大多数控制器是根据控制器开始工作之前由操作人员设计（至少是调整）好的算法运行的。操作员会定期地调整常规控制器的参数，在一般情况下，只有在控制器性能由于

某种原因恶化后才由人工进行这种调整。真正的自适应控制器,即使过程的特性发生了变化,也能够在运行中自己调整参数以保持其最佳性能。这相当于自动改变控制器的整个策略以适应过程新的特性。例如,一个原先调好用于控制迟缓过程的自适应控制器,当它发现过程对控制作用的响应变得敏感时,就会采用比较保守的整定参数。而固定参数的常规控制器则会继续过度地控制该过程,造成过程的输出严重振荡。

### 专家系统

自适应控制器的形式大小各异,也许最常见的是能够自己产生整定参数的自整定PID。1980年代推出的那些按指令或可连续整定PID参数的方法在单回路控制器中到处可见。许多自整定控制器采用专家系统来解决自身P、I、D参数的刷新问题。它们试图仿效控制专家的思维过程,按照一组旨在改善回路闭环性能的、复杂的经验规则来整定参数。当被控过程比较简单并且可以预测时,这种方法很奏效。许多专家自整定控制器都假设过程的动态特性可以完全用增益、滞后时间和时间常数加以量化。控制器无需知道这三个参数的值,但它假定控制器提供的过程输入与由此而生的过程输出之间的关系不受任何其它过程动态特性的影响。

当过程的动态特性变得复杂时问题就会出现。专家系统的规则可能会产生虚假的结果,因为它们并没有收录对付更复杂过程的经验。

在投运新回路时,专家自整定控制器会经历一段痛苦的历程。它们的规则一般被设计成用于处理过程动态特性的逐渐变化或用于校正已有的整定参数。在启用控制器时,一般需人工设定一组控制器的初始参数。

### 基于模型的自适应控制

基于模型的自适应控制提供了比专家系统启发式逼近更为精确的控制算法。其控制决策建立在对过程的经验模型上,把输入输出的关系量化为一个微分方程。在连续控制过程的同时,它也能根据最新的输入输出数据提炼模型。

假定最新的模型可以保持到不久的将来,控制器就可以预测未来的过程变化并决定采取何种控制作用拨正其运行方向。考虑到意外因素或时变系统会影响控制作用的未来结果,控制器必须不断地更新自己的过程模型。

据本人的经验,这种方法比起基于规则的控制器,可以适应更广范的过程动态特性。基于模型的自适应控制器可以利用各种已开发出来的整定公式将模型参数转化成控制器参数,如

P、I、D值。事实上，我推测这就是在线建模如此受宠（至少在学术界）的原因。如果能够从输入输出数据中得到过程的精确模型，控制器的正确参数就容易计算了。

### **难题**

不幸的是，这个“如果”的假设也许太大。一个能维持过程变量稳定的控制器同时也给自己留下很少关于过程动态特性的有用信息。反之，能获得足够信息从而能得到精确模型的控制器一定或至少允许过程变量上下起伏。

劣质的模型会导致劣质的控制效果，这就象用一个控制器去控制一个不按预期方式运行的过程一样。具有讽刺意义的是，这种现象会使过程变量产生震荡，而控制器却以此去改进模型。另一方面，随着模型和后继控制效果的改善，从过程得到的有用信息变得越来越少，导致模型无法进一步提炼。

总的来说，一个基于模型的自适应控制器所期望达到的最好结果是具有相当精确的模型和比较满意的控制效果。然而在最坏的情形下，过程模型与实际过程的严重不匹配会导致闭环控制系统的失控。

### **无模型自适应控制**

那么为什么非要建立模型呢？从理论上讲，不管是否从中推出过数学方程，一个反馈控制器在控制过程时所需要的全部信息都已包含在输入/输出数据之中。毕竟，一个有经验的控制工程师可以通过察看趋势图来手工整定PID的参数，而不需要计算增益、滞后时间或过程模型的时间常数。

不言而喻，能得到一个描述过程特性的数学模型会使问题迎刃而解。尽管存在着某些局限，基于模型的自适应控制技术已经被成功地用来解决很多控制问题，尤其是当模型的某些部分可以通过对过程知识的推导而得到时（如滞后时间可以通过一个已知的传输滞后计算得到）。

然而，在我看来应该有一种方法可直接从输入/输出数据中计算控制作用，而完全没有必要首先建立模型。因为所有体现过程动态特征的信息都已在此，剩下的仅仅是如何正确利用这些数据。

### **CyboCon产品**

位于美国加州Rancho Cordova市的通控集团博软公司（CyboSoft, General Cybernation Group Inc.）总裁，程树行（George Cheng）博士赞同上述观点。事实上，程博士声称已

经设计出了一种“梦想成真的控制器”。这种称为MFA（Model-Free Adaptive 无模型自适应）的控制器无需数学建模以及复杂的人工参数整定即可控制时变、多变量等复杂过程。

博软公司最初在CyboCon上实现了MFA控制器。CyboCon是一个软件产品，它运行在与PLC或DCS相连接的PC机上。MFA的最新产品是CyboCon CE，它在Windows CE上运行，被安装在特制的控制盒中。博软公司宣称它是世界上首套通用型先进控制仪表。



CyboCon CE

这两种产品都应用MFA控制器来减小过程变量的偏差值（过程变量和设定值之间的方差之和）。博软公司指出，在大多数实际应用中，MFA控制器能够有效地控制各种恶劣的过程回路并保证闭环稳定。

为了适应一些特殊的控制问题，在基本的MFA控制算法上引出了一些变种。标准算法可以用于大多数的过程，具有滞后预测的“抗滞后”算法最适合于具有大滞后的过程，非线性MFA用来控制非线性过程如pH回路，而鲁棒MFA则可用来控制具有大扰动的过程。

MFA是如何在既无过程模型又无操作员专心干预的情况下对许多难控回路实施有效的反馈控制的呢？在此之前这仍是一个严加保护的秘密。然而，程博士已经成功地获得了此项技术的专利权，由此也透露了一些MFA的关键细节。

### **MFA控制器是如何工作的**

与其它负反馈控制器（自适应或非自适应）一样，MFA根据设定值和过程变量之间的偏差决定如何最好地控制过程。但与传统的过程控制器不同的是，MFA通过前N个采样值来分析偏差的整个趋势。这就使控制器可以观察到过程的动态特性。

然而，MFA并不试图通过这种观察来创建过程的固定模型，而是利用如图1所示的神经网络，

根据偏差的历史数据直接计算出下一步控制作用。

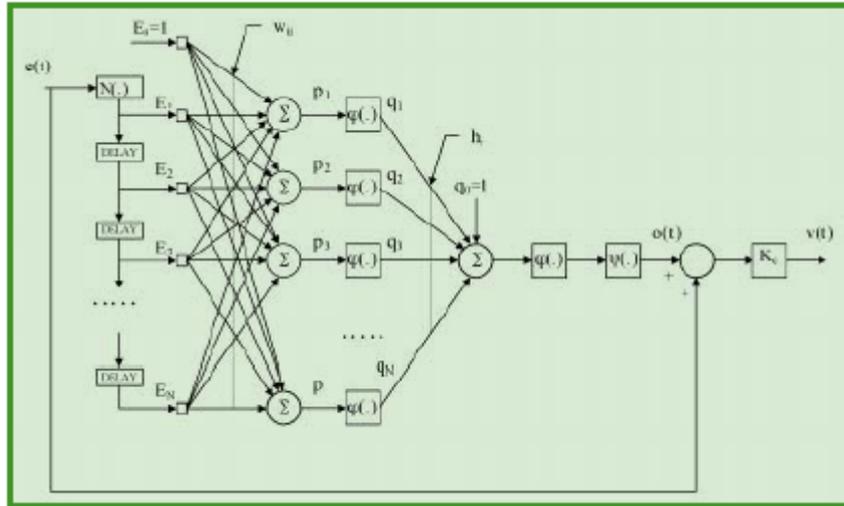


图1

人工智能专家会认为图1是一个传统的、具有一系列滤波器(  $s$  和  $s$  )和加权因子(  $w$ 's 和  $h$ 's )的多层感知网络,它能够认知或学习蕴含在测量信号中的模式。MFA神经元网络的特点是它的动态特性。通过不断更新加权因子的值,在每一个采样周期后,帮助控制器产生一个自适应控制信号,以达到消除设定值与过程变量之间的偏差的控制目标。

对于不熟悉人工智能理论的人,程博士揭示了这个神经网络在过程控制应用中的关键部分。首先是存储测量到的偏差之历史数据的机理。这可以通过网络输入端(图的左边)的延时模块实现。最新的测量偏差进入模块顶端,先前的每一个测量偏差被依次向下推入历史文件。

接着,网络将每一个历史测量偏差乘以加权因子,经过迭加和滤波产生输出 $o(t)$ 。最后,将 $o(t)$ 与当前的测量偏差 $e(t)$ 相加,再乘以用户设定的增益 $K_c$ 得到实际的控制作用 $v(t)$ 。

### 实质如何?

这些数学处理是如何产生程博士所说的控制作用的,还是不甚明了(至少对我来说)。

然而,程博士的研究以及在许多场合的应用已经证明MFA控制器具有标准PID控制器所不具备的能力。类似图2所示的仿真显示了这个结论。我从图1看到,MFA工作时有点像一个积分作用可变而增益 $K_c$ 不变的PI控制器。比例控制作用通过前馈方法将当前测量偏差叠加到网络的输出。神经网络通过综合以前所有的偏差提供积分作用。该操作与简单积分的唯一区别在于网络集合的每个元素都被不同程度的加权和滤波而且加权因子始终在变。

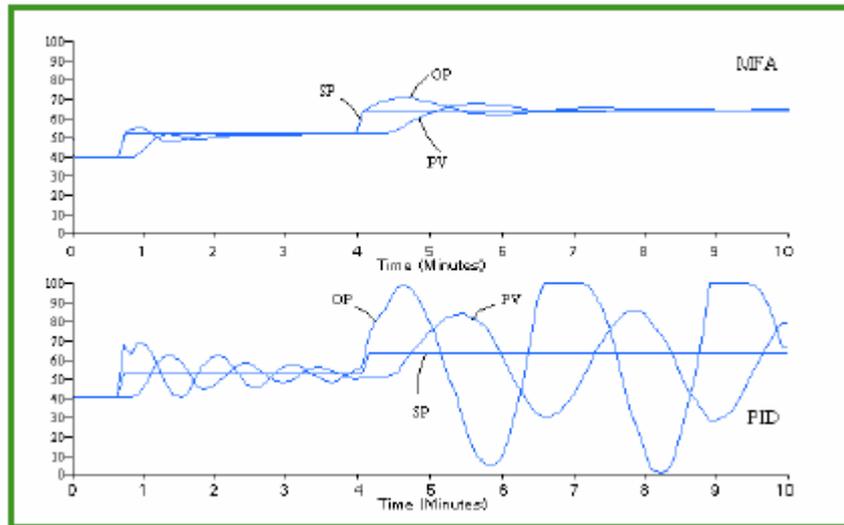


图2

总之，假设MFA控制算法通过计算这些至关重要的加权因子而得到那些特殊能力，为什麼面对实际控制问题的控制工程师会对它另眼相看呢？换句话说，是什麼东西让MFA超越了其它形式的自适应控制、尤其是基于模型的控制方法呢？

### 优点

程博士指出他的自适应控制方法有三个主要优点：鲁棒性、高速性和稳定性。

不管相信与否，他可以证明只要过程是无源、可控的，并且符号不变，不管过程是线性的、非线性的、时变的、非时变的、单变量或多变量的，MFA系统的闭环稳定性是可以保证的。

也许过程的符号或者说其作用方向是最起码的要求了。我还没有看到过有什么控制器能在过程突然从正作用方向改变为反作用方向后继续保持回路稳定的。可控性也算是一个比较普通的要求。一般来说，它要求由控制器操作的执行器可使被控变量在其工作范围内变化。用一个10瓦的灯泡去加热隔壁楼里的100,000升的糖浆罐的温度，这一过程显然是不可控的（无论对于MFA还是任何其它控制器）。无源是指过程内也许储存了能量但不会自身产生能量。糖浆罐是无源的，而化学反应器则不是。程博士已在其无模型自适应控制理论中证明MFA本身是一个无源网络。

非线性稳定性理论告诉我们，用无源控制器控制无源过程会得到一个稳定的闭环系统。所幸的是，大部分流程工业中的过程是无源的。

### 收敛性

程博士还宣称MFA比大多数基于模型的自适应控制器速度更快。因为MFA不像基于模型的控制

方法那样含有辨识机制，它可以比基于模型的控制器更早施加控制作用。

然而，主要区别还在于其收敛性。基于模型的控制器试图建造一个过程的数学模型并至少在未来一段时间里保持不变。模型参数的估计值必须收敛到一些最能反映过程动态特性的常数值上。这需要花费时间，特别是当系统处于静止状态时，有用的输入/输出数据寥寥无几，建模过程可能拉得很长。

相反，MFA计算的加权因子根本无需收敛。当由于扰动或过程动态特性的变化引起过程变化时，修改加权因子就行了，实际上根本不存在需要收敛的固定值。

而且，一个静止的过程也不会像基于模型的控制器那样减慢MFA的学习速度。更确切地说，过程若不发生变化，MFA就不需要学习任何东西。因为一个静止的系统不需要任何新的控制作用，这正是MFA在这种规则下会得出的结论。而当过程响应扰动或设定值的变化时，MFA就会产生出一个合适的控制输出去抑制偏差。

### **鲁棒性**

鲁棒控制器能够控制那些行为不确定或动态特性总是在变的过程。

真正的“黑匣子”控制器不需要任何有关过程的提示。但是，鲁棒控制器一般都需要估计过程的增益、滞后时间、时间常数等。控制器越是鲁棒，对过程参数的估计精度就可以越低。

虽然MFA看上去像一个“黑匣子”控制器，实际上把它看成一个鲁棒控制器更合适些，因为它还是需要从过程提取一些量化信息。用户至少需要粗略估计一下过程的时间常数。对抗滞后MFA还需要估计过程的滞后时间。借助于控制器增益 $K_c$ 的调整使回路增益等于1，用户缺省定义过程的增益为 $K_c^{-1}$ 。

幸运的是，实际上用户无需提供精确的过程参数。程博士说，即使用户估计的时间常数大于或小于实际过程的300%，滞后时间的估计误差达到200%，MFA仍能取得相当好的控制效果。

### **抗滞后控制**

MFA能够克服大而不确定的过程滞后时间的能力使其变得特别鲁棒。当过程的滞后时间变得大于该控制器在当初设计时所能处理的滞后时间时，传统的控制器就会急不可耐。由于控制作用只有在滞后时间过去之后才会表现出来，控制器会感到它的控制不起作用而加大力度，以强迫被控变量快些变化。这些额外增加的控制作用会过度调节操作变量最后导致被控

变量出现大范围的振荡。

抗滞后MFA采用特殊的滞后预估器从而避免了这个问题。

预估器在滞后时间消逝之前产生一个人为模拟的偏差。这一偏差可使控制器马上“感到”自己的控制作用，从而避免了继续盲目地增加控制作用。与传统的史密斯预估器不同，抗滞后MFA的预估器不需要过程的精确模型，只要用户粗略估计过程的滞后时间和时间常数。若估计不符合实际的过程参数，将由MFA自适应算法来弥补这些差异。

### 不足之处

如果MFA真有什么弱点，那一定是它的复杂性。熟悉线性控制理论、持传统观点的人总想事先知道控制器将对其输入到底要采取什么行动。

由于神经网络所作的计算错综复杂，这种要求对MFA有些过份。即使是程博士本人也不知道在进行每一步计算时网络中到底发生了什么。只有控制器的最终结果是可以预料的。

从另一角度看，那些完全不熟悉控制理论的用户可能会感到失望，他们希望MFA掌管一切，操作人员可以高枕无忧。MFA不是真正的黑匣子控制器，它还是需要用户提供一些信息。比如哪个传感器用作过程的测量值，哪个执行器用来施加控制作用。当然，任何控制器都要用户指定这些内容。作为一个完美的自适应控制器应该能够自己找到诸如过程时间常数之类的参数。

尽管如此，MFA已成功地用来解决了各种各样的控制问题。它，也许非同寻常，也许令人费解，但是当传统的方法不能奏效时还是值得一试。

### 插语

**一个过程动态特性的全部信息都已包含在输入/输出数据里了。应该有一种方法可以直接从输入/输出中计算出控制作用而无需任何模型。**

*图1-MFA控制器直接从过程偏差的历史数据计算控制作用。它采用了一个3层神经网络以及时间滞后函数，活化函数，加权因子等部件。控制器分析前N次采样的测量偏差（如左列所示E1, E2, ...），使之能够观察和学习到过程的动态特性并根据偏差的历史直接计算出下一步控制作用。控制器自动设置神经元和滞后模块；这些究竟是如何实现的目前仍是一个商业机密。*

*照片说明：CyboSoft已将原先面向PLC或DCS的PC软件CyboCon集成到这一精心制作的机*

盒里，在Windows CE平台上运行。

图2-仿真结果显示了对同一种难控的过程，MFA控制（上图）与人工整定的PID控制的性能差别。在0.6到4.0分钟期间，由设定值（SP）变化作用下的各控制器的输出（OP）和受其控制的过程变量（PV）的响应曲线如图所示。在3.7分钟时，仿真过程的动态特性发生了变化，此后MFA控制器能适应过程新的变化而PID控制器变得不稳定了。

**作者：凡斯.凡多仑博士（Dr.Vance Van Doren），《Control Engineering》杂志专栏作家**

**译者：张中炜，虞孟起**

本文原发表于2001年2月/3月刊的《控制工程-欧洲版》杂志。本杂志或出版商Cahners Europe的授权翻译

并出版其中文版。

For more information on the CyboCon controller, please enter number **200** on the Reader Service card or contact CyboSoft, 2868 Prospect Park Drive, Suite 300, Rancho Cordova, Calif. 95670 USA; e-mail [GCGroup@cybosoft.com](mailto:GCGroup@cybosoft.com); tel +1 916 631 6313; fax +1 916 631 6312; [www.cybosoft.com](http://www.cybosoft.com)

### **MFA解决了PID难以解决的回路**

总部设在德州休斯顿市的美国Air Liquide 公司，是一家专门生产气体的厂家，需要对其分布在全球的空气分离设备作生产优化。原先安装了一套基于模型的预测控制系统，曾明显改善过程的稳定性并提高了产量。

但是厂里的工程师在生产氩气时遇到了麻烦，主精馏塔回路控制不好。

Air Liquide的高级控制工程师Dave Seiver和Brian Keene（Air Liquide在McMinnville, Oregon分厂的厂长）说，空气分离塔低质量的控制效果造成整个过程老在振荡。我们曾试图重新整定PID回路但屡遭失败。

装上CyboCon后，Seiver先生他们花了不到一天的时间就将PID难以解决的回路变成了MFA控制回路。过程的振荡陡然减小，氩气的产量创了纪录，生产更加稳定。现场的操作人员很快接纳了这项技术。