第 16 卷增刊
1999 年 12 月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol.16, Suppl.
Dec., 1999

非建模自适应控制律及其重要参数的自适应辨识

韩志刚
(黑龙江大学 · 哈尔滨，150080)

摘要：本文讨论了非建模自适应控制律 (无模型控制律) 及其重要参数的辨识方法. 说明在辨识中只应用最小二乘类型的方法效果不能令人满意. 提出了常规辨识方法与智能修正相结合的方法. 用这种方法辨识控制器的重要参数，在应用中得到了满意的效果.

关键词：无模型控制器；辨识；智能修正

The Non-Modelling Adaptive Control and Identification of Important Parameters of This Control Law

Han Zhigang
(Heilongjiang University · Harbin, 150080, P. R. China)

Abstract: In this paper, the non-modelling adaptive control and identification method of important parameters of this control law have been discussed. Point out that, the least squares identification method sometimes is not satisfactory. The combines method of general identification and intelligent improvement has been presented. To estimates important parameters of non-modelling adaptive controller by this identification method, the result is good.

Key words: non-modelling adaptive controller; identification; intelligent improvement

1 引言

依据非建模自适应控制律或称无模型控制律设计并制造出来的无模型控制器，在炼油、化工、焦炭、造纸等行业中的应用取得了满意的效果. 这种控制器的应用范围正在逐步扩大. 之所以如此，是因为无模型控制器的确能够把某些其它控制器尚不能实现闭环控制的环节实现闭环稳定控制. 例如：

1) 克拉玛依炼油厂 30 万吨焦化炉的控制系统采用的是 Honeywell 公司的 DCS. 由于它的基本控制算法是 PID 调节器，所以该装置自投产以来，炉温的控制一直只能处于手动状态，操作人员的劳动量很大，产品质量和产量都受到影响. 采用无模型控制器后，情况立即产生了变化，两侧的炉膛和炉出口温度都实现了闭环稳定控制，控制效果良好，提高了产品质量. 两侧的炉温存在着强的耦合. 这个例子说明了无模型控制器不但有很强的稳定控制功能，而且还有自解耦功能.

2) 乌鲁木齐石化总厂炼油厂芳烃联合装置塔 102 的温差，原来在 Provax 的 DCS 控制之下，一直不能实现闭环，温差的目标值是 5°C，在手动控制之下，该温差在 3°C~ 13°C 之间波动，对装置的平稳运行和产品质量影响很大. 应用无模型控制器以后，实现了闭环稳定控制，温差控制在 4°C~ 6.5°C 之间，精馏后的产品纯度达到 99.99%.

在陕西化肥厂、西安焦化厂、燕山石化炼油厂、燕山石化化工一厂、黑龙江斯述造纸厂等都有这类事例.

无模型控制器为什么对某些难控环节的控制效果比一般的调节器来得好些？本文将对此进行讨论，同时介绍非建模自适应控制律 (无模型控制律) 的基本形式和这种控制律应用的辨识算法的基本特点，并给出实际应用效果的记录数据.

2 非建模自适应控制律 (无模型控制律) 的基本形式

无模型控制律表现形式包括两个重要部分，即基本形式部分和功能组合部分. 其中，基本形式部分是无模型控制律的主体，它的导出可以通过不同的途径，这里我们仅介绍其中的一种. 本文仅考虑离散时间系统. 不失一般性，设动态系统 S 的时滞为 1，即 S 可表示为下述形式：

$$y(k) = f[Y_{k-1}^{k-n}, u(k-1), U_{k-2}^{k-m}, \theta(k), k]. \quad (1)$$

其中 $y(k)$ 是一维的输出，$u(k)$ 是 p 维的输入，$\theta(k)$ 是未知参数，k 是离散时间，而

$$Y_{k-1}^{k-n}=\{y(k-1),y(k-2),\cdots,y(k-n)\},$$
$$U_{k-2}^{k-m}=\{u(k-2),u(k-3),\cdots,u(k-m)\}.$$

我们称 $\{u(k-1),y(k)\}$ 和 $\{u(k),y(k+1)\}$ 是动态系统 S 的相邻时刻的两组输入输出数据，为方便计，称之为该系统的两个相邻时刻状态.

定义 1 设 S_1、S_2 是两个动态系统，如果 S_1 的任何两个相邻时刻的状态皆为 S_2 的相同相邻时刻的状态，反过来，S_2 的任何两个相邻时刻的状态皆为 S_1 的相同相邻时刻的状态，就说这两个系统 S_1 和 S_2 是输入输出等价的.

定义 2 设 S 是一个动态系统，F 是动态系统的集合或称动态系统族. 如果对于 S 的任何两个相邻时刻的状态，皆有 F 中的一个系统 S_i，它也以这两个状态为其相同相邻时刻的状态. 反之，F 中的任何系统 S_i 的两个相邻时刻的状态，皆为系统 S 的相同相邻时刻的状态，则说系统 S 与系统族 F 是输入输出等价的.

定义 3 设 S 是一个动态系统，如果存在一个线性系统族 F，使得 S 与 F 是输入输出等价的，就说动态系统 S 可被输入输出等价线性化.

可以证明 ([6]).

定理 动态系统 S 在一定的条件下，可被输入输出等价线性化，而线性系统族 F 中的元素可表示成如下的统一形式：

$$y(k)-y(k-1)=\phi(k-1)^{\mathrm{T}}[u(k-1)-u(k-2)]. \tag{2}$$

其中 $\phi(k)$ 称为系统的特征参量.

由于 $\phi(k)$ 的不同，所对应的线性系统也不同，故 (2) 式可描述线性系统族 F. (2) 式有时也可称为动态系统 S 的"泛模型".

控制器设计问题的提法如下：

$\{y(k-1),u(k-2)\}$ 已知，$y(k)$ 给定，求 $u(k-1)$，使得在 $u(k-1)$ 作用下，动态系统 S 的输出是 $y(k)$.

设系统可被输入输出线性化，则这样的 $u(k-1)$ 当然必满足 F 中的某个线性方程 (2). 由于 $u(k-1)$ 可能是多维的，所以这是一个不定方程，它的一个特解是：

$$u(k-1)=u(k-2)+\frac{1}{\|\phi(k-1)\|^2}\cdot\phi(k-1)[y(k)-y(k-1)]. \tag{3}$$

此时假定了 $\phi(k-1)\neq 0$. 在 (3) 式中 $\phi(k-1)$ 事实上是未知的，所以只能用它的某估值 $\widehat{\phi}(k-1)$ 来代替. 为使 $\widehat{\phi}(k-1)$ 为 0 时，(3) 式仍有效，我们把 (3) 式的分母取成 $\delta+\|\widehat{\phi}(k-1)\|^2$. 至此，我们可以把所求的控制律写成如下的形式：

$$u(k-1)=u(k-2)+\frac{\lambda_k}{\delta+\|\widehat{\phi}(k-1)\|^2}\widehat{\phi}(k-1)\cdot[y(k)-y(k-1)]. \tag{4}$$

其中 λ_k 是对某些近似量的补偿，称为控制参数，另一个重要参数 $\phi(k)$ 称为该控制器的特征参量.

当 $y(k)=y_0$ 时，跟踪问题就变成了调节问题，这在工业过程控制中经常遇到. 所以它是一个很重要的情形.

一般我们所说的无模型控制律，就是指这种调节律，它的基本形式为：

$$u(k)=u(k-1)+\frac{\lambda_k}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}\widehat{\phi}(k)[y_0-y(k)]. \tag{5}$$

注意公式 (5) 与 (4) 在"时间 k"的取法上有点不同，但这无关紧要.

我们以这种控制律为基础，再加上某些功能组合算法，就形成了一般无模型控制律，它的一般形式为：

$$u(k)=u(k-1)+\frac{\lambda_k}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}\cdot\widehat{\phi}(k)[y_0-y(k)+G(Y_k^{k-n},U_{k-1}^{k-m})]. \tag{6}$$

其中 $G(\cdot,\cdot)$ 是某个适当的函数，而：

$$Y_k^{k-n}=\{y(k),\cdots,y(k-n),y_0\},$$
$$U_{k-1}^{k-m}=\{u(k-1),\cdots,u(k-m)\}.$$

n,m 是适当的正整数. $G(\cdot,\cdot)$ 中包含着一系列重要参数，它表示无模型控制算法中的功能组合部分.

3 无模型控制律中重要参数的自适应辨识

重要参数的自整定是无模型控制律有良好的控制效果的基本保证. 所谓该控制律的重要参数是指下述的一系列参数：

1) 基本形式 (5) 中的 $\widehat{\phi}(k)$ 和 λ_k.

2) 一般形式 (6) 中 $G((Y_k^{k-n},U_{k-1}^{k-m}))$ 中的某些参数.

这里我们对 $\widehat{\phi}(k)$ 的辨识进行详细讨论，其余参数的辨识，皆可类似地进行.

控制律 (5) 中的 $\widehat{\phi}(k)$ 是 $\phi(k)$ 的估值，如果 $\phi(k)$ 可准确求得，则控制律 (5) 就可以写成下述形式：

$$u(k)=u(k-1)+\frac{\lambda_k}{\delta+\|\phi(k)\|^2}\phi(k)[y_0-y(k)]. \tag{7}$$

而 $\phi(k)$ 满足泛模型

$$y(k)-y(k-1)=\phi(k-1)^{\mathrm{T}}[u(k-1)-u(k-2)]. \tag{8}$$

如果现在时刻是 k，则 (8) 中的 $y(k), y(k-1), u(k-1), u(k-2)$ 皆为已知，当然在 k 以前的诸时刻中，它们也是已知的．如果 $\phi(k)$ 需要估计，按惯例自然想到，可以依据泛模型 (8)，利用最小二乘法进行．如果考虑到 $\phi(k)$ 是时变的，在最小二乘法中还需加上遗忘因子．

然而实践表明，这是一个难以实现的技术路线．事实上，在实际生产中，许多被控对象或大或小，都存在着不同的时滞，并且时滞还是不确定的．在实际控制过程中，控制量 $u(k)$ 与过程测量值 $y(k)$，在表面上甚至出现矛盾现象．例如：

加热炉的出口温度控制系统，炉出口的温度是通过瓦斯气的给入量来进行调节的，温度和瓦斯气给入量之间存在着一定的滞后．理论上，温度比给定值高，瓦斯气给入量就需减小，温度比给定值低，瓦斯气给入量就需加大．确切地说，如果 y 是温度的测量值，y_0 是温度的给定值，u 是瓦斯气阀门的开度，从理论上讲：

当 $y-y_0>0$ 时，　u 需减小，

当 $y-y_0<0$ 时，　u 需增大．

但在实际的场合，如果用上规律进行控制，必然引起很大的控制误差，误差表现在超调量过大．因此甚至能导致控制失败．

实际应用的控制策略如下：

当 $y-y_0>0$ 并 y 继续增大，则 u 减小，如果 y 开始减小，则 u 不动或开始增大．

当 $y-y_0<0$ 并 y 继续减小，则 u 增大，如果 y 开始增大，则 u 不动或开始减小．

只有这样的控制策略，才有可能把炉出口的温度控制在一定的精度之内．

当然上述现象是因为系统存在着大的时滞所致．但实际系统的时滞一般随着装置处理量的变化而变化，几乎无法确定．

所以按常规办法对 $\phi(k)$ 进行估计，得到的估值 $\widehat{\phi}(k)$，很难得出合理的结果，特别是系统具有时滞的场合．为克服这一缺欠，我们在实际中采用了最小二乘法与控制律的性能要求相结合的辨识方法．基本原则是在最小二乘法估值的基础上，再根据控制律性能的要求，对它进行自适应修正．

具体地说，对无模型控制律的 $\widehat{\phi}(k)$，采取了如下的修正方案：设 β 是某个小正数

当 $\sqrt{\delta}<\widehat{\phi}_1(k)<\beta$ 则 $\widehat{\phi}(k)=\widehat{\phi}_1(k)$;

当 $\widehat{\phi}_1(k)\geq\beta$ 则 $\widehat{\phi}(k)=\beta$;

当 $0\leq\widehat{\phi}_1(k)\leq\sqrt{\delta}$ 则 $\widehat{\phi}(k)=\sqrt{\delta}$;

……

其中 $\widehat{\phi}_1(k)$ 为 $\phi(k)$ 的最小二乘法估值，$\widehat{\phi}(k)$ 为 $\phi(k)$ 的实际应用的估值．

这是无模型控制律中修正方法最简单的一个参数，其余的参数修正的基本原则与 $\phi(k)$ 相同，但具体的修正方法就不一样了，而且比较复杂，这里就不再赘述了．

4　自适应修正对控制律收敛性的保持

这里我们来说明上述的对重要参数的自适应修正，并不破坏无模型控制器的收敛性能．

关于无模型控制律基本形式的收敛性有下述的结果：

置 $\Delta_k=\dfrac{-\phi(k)^{\mathrm{T}}\widehat{\phi}_1(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}_1(k)\|^2}$，$\widehat{\phi}_1(k)$ 是 $\phi(k)$ 的最小二乘估值，则由文献 [6] 我们有：

定理　如果

1) $\lambda_{k+h}\Delta k+h\geq 0$, 对 $\forall h\geq 0, \lambda_{k+h}$ 取正数.

2) $\sum\limits_{h=0}^{\infty}\lambda_{k+h}\Delta_{k+h}=+\infty$, 则有：

$$\lim_{h\to\infty}y(k+h)=y_0.$$

其中 y_0 是控制律的设定值，$y(k)$ 是被控对象在无模型控制律作用下的输出 (即测量) 值．

为了分析自适应修正后算法的收敛性，我们仅考虑一维的情形．置

$$\Delta_k^0=\frac{\phi(k)^{\mathrm{T}}\widehat{\phi}(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}.$$

据 $\widehat{\phi}(k)$ 与 $\widehat{\phi}_1(k)$ 之间的关系，不难得出：

如果，$\sqrt{\delta}<\widehat{\phi}_1(k)<\beta$, 则 $\widehat{\phi}(k)=\widehat{\phi}_1(k)$, 于是 $\Delta_k^0=\Delta_k$. 其次，注意到函数

$$f(x)=\frac{x}{\delta+x^2},\quad x\geq 0$$

的最大值点是 $x=\sqrt{\delta}$，在 $x>\sqrt{\delta}$ 时，$f'(x)<0, f(x)$ 下降，

在 $x<\sqrt{\delta}$ 时，$f'(x)>0, f(x)$ 上升．

应用上述结论于表达式

$$\frac{\widehat{\phi}_1(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}_1(k)\|^2}\quad 和\quad \frac{\widehat{\phi}(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}.$$

不难得出，当 $\sqrt{\delta}\leq\widehat{\phi}_1(k)<\infty$ 时，由于此时有

$\widehat{\phi}(k) \le \widehat{\phi}_1(k)$ ，所以：

$$\frac{\widehat{\phi}_1(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}_1(k)\|^2} \le \frac{\widehat{\phi}(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}.$$

当 $0 \le \widehat{\phi}_1(k) \le \sqrt{\delta}$ 时，由于此时有 $\widehat{\phi}(k) = \sqrt{\delta} \ge \widehat{\phi}_1(k)$ ，所以：

$$\frac{\widehat{\phi}_1(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}_1(k)\|^2} \le \frac{\widehat{\phi}(k)}{\delta+\|\widehat{\phi}(k)\|^2}.$$

注意到 λ_{k+h} 是正数，且 $\lambda_{k+h}\Delta_{k+h} \ge 0$ ，所以恒有

$$\Delta_{k+h} \le \Delta_{k+h}^0$$

于是下述条件满足：

1) $0 \le \lambda_{k+h}\Delta_{k+h} \le \lambda_{k+h}\Delta_{k+h}^0$,

2) $\sum\limits_{h=0}^{\infty}\lambda_{k+h}\Delta_{k+h} \le \sum\limits_{h=0}^{\infty}\lambda_{k+h}\Delta_{k+h}^0 = \infty.$

这就是说，修正后收敛性条件仍满足，故原收敛性分析的结果必然保持.

对其余的情形，也会得出同样的结论. 从而有

结论 无模型控制器的重要参数最小二乘辨识结果的自适应修正，对系统输出的收敛性不产生影响.

5 无模型控制器与PID应用效果的比较

过程控制工程师根据现场实践的结果形成了一种看法，他们认为："PID调节器能控制的环节，自适应控制器才能控制，PID调节器不能控制的环节，自适应控制器同样不能很好的控制."过程控制工程师对参数自整定也有着一定的看法，他们说："参数自整定调节器，在应用过程中，往往产生把参数整定飞了的现象."

这些结论难免有些片面，但毕竟是他们在实践中的体会.

由于无模型控制算法及它的重要参数的自整定，都采取了一些新的有效的措施，所以打破了过程控制工程师的前述看法. 实践表明了某些PID调节器控制只能用手动控制的环节，无模型控制器能够实现自动控制，并且使控制精度还所有提高. 下面给出的就是两种控制器在同一个控制点上控制效果的记录. 从记录数据可以看出，无模型控制器控制的结果大大优于PID调节器.

表1 1997年4月23日某装置TRC104点在DCS（PID）控制下温度记录数据

502	503	504	502	503.5	505	503.9	503.8	503.2	503.5
501.7	502	501.5	499	500.5	502	502.9	503.4	504	503.1
501.6	499.5	502.8	501.9	502.7	503.3	503.7	501.2	504.1	503
503	505	506	508	505.5	504.5	503	503.5	502	501.9
501	501.5	501	500	499	498	497	497.7	498	499.2
500.4	501.2	502	502.5	503.4	503	503.9	503.2	503.5	504

设定值502°C，最高温度508°C，最低温度497°C。

表2 1997年4月29日同一装置同一点在无模型控制器控制下温度记录数据

501.5	501.7	501	501.6	502	501.9	502.1	502.5	501.8	502.5
501.1	502.8	502.7	502	501.7	501.5	502	502.3	502.9	502.2
501.5	502	502.4	502.9	502.3	501.9	501.2	501.5	502	502.5
502.8	502	501.6	501.3	501.7	502	502.2	502.8	502.6	502.8
502.5	502	501.5	501.2	500.9	501.5	502	502	503	502.5
502.7	502.9	502.1	502.8	502.4	502	501.9	501.5	501.9	502

设定值502°C，最高温度503°C，最低温度500.9°C。

参考文献

1 Han zhigang et al. Direct adaptive control for nonlinear systems. SAMS 1997, 28: 301–315

2 韩志刚等. 一类无模型系统的控制律及仿真研究. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集，北京：科学出版社，1993, 3: 2603–2608

3 韩志刚. 多输入多输出非线性系统的无模型控制律. 黑龙江大学自然科学学报，1995, 12(3): 1–7

4 韩志刚. 非线性自适应控制系统设计的一种方法. 控制与决策，1990, 5(6): 39–45

5 韩志刚. 同参数估计对耦的自适应控制算法. 控制理论与应用，1992, 9(4): 374–379

6 韩志刚等. 自适应辨识、预报和控制 — 多层递阶途径. 哈尔滨：黑龙江教育出版社，1995