

无模型控制律串级形式及其应用¹⁾

韩志刚^{1,2} 汪国强^{2,1}

¹(黑龙江大学电子工程学院 哈尔滨 150080)

²(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

(E-mail: zgh3468@yahoo.com.cn)

摘要 无模型控制律在炼油、化工、电力、轻工等领域应用获得了良好的效果. 应用的方式许多是串级形式. 将对无模型控制律的串级形式进行分析, 指出这种形式是对具有干扰的大时滞系统控制的一种有效的方法, 给出了在加热炉、氢氮比控制中成功应用的实例.

关键词 串级控制, 无模型控制方法, 大时滞, 加热炉, 氢氮比

中图分类号 TP273

Cascade Scheme of Model Free Control Law and Its Application

HAN Zhi-Gang^{1,2} WANG Guo-Qiang^{2,1}

¹(College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080)

²(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

(E-mail: zgh3468@yahoo.com.cn)

Abstract The model free control method has excellent performance in oil refining, chemical industry, power, light industry and so on. Many schemes of application are in cascade form. In this paper, the cascade form of model free control is analyzed, and it is shown that this control scheme is an effective method to solve control problem of large scale time delay system with disturbance. The examples of successful application in the control of heat furnace and hydrogen-nitrogen ratio are introduced.

Key words Cascade control, model free control method, large scale time delay, heat furnace, hydrogen-nitrogen ratio

1 引言

无模型控制技术是一类兼有现代控制理论与经典 PID 的优点, 不依赖被控对象的数学模型, 保证系统闭环稳定性, 控制效果良好, 算法简单的新型控制算法和控制器, 是当前自动控制理论研究的一个新课题.

我们在上世纪 80 年代末开始了无模型控制技术的研究, 经过十多年的探索和应用实践, 现在无模型控制技术已达到了实用阶段. 根据这一理论设计制造出了无模型控制器及其软件包. 它们在炼油、化工、轻工、焦炭、化肥、造纸、电力、玻璃等行业的应用, 收到

1) 国家基础研究重大项目前期研究专项 (2001CCA04000) 资助

Supported by the Prophase Special Research Item of the National Important Foundational Research Project (2001CCA04000)

收稿日期 2004-7-4 收修修改稿日期 2006-1-9

Received July 4, 2004; in revised form January 9, 2006

了满意的效果. 无模型控制律又称为非建模自适应控制律 (NMAC), 它有可能成为使各种难控环节实现闭环控制的有利工具.

无模型控制技术的基本理论在 [1~6] 已进行了介绍. 无模型控制技术的应用及其效果, 在 [7,8] 中已有详细的报导.

本文只讨论离散时间的情形, 以下 $y(k)$ 表示控制器的测量值, 即被控系统的输出, $u(k)$ 表示控制器的输出即被控系统的控制量, k 表示时间.

文献 [1,2,4,6] 指出无模型控制律具有如下特点:

- 1) 无模型控制律是一种结构自适应控制律;
- 2) 无模型控制律是冲破 P、I、D 和线性框架的束缚的产物;
- 3) 无模型控制律是新的建模与控制思想, 即“建模与控制一体化”的产物.

在无模型控制律的应用研究中, 我们发现许多被控环节存在的难控问题, 往往要用无模型串级控制形式来解决. 在应用中取得成功的无模型串级控制形式与经典的串级控制形式有所不同, 所以有必要对与其有关问题进行讨论. 本文的目的就是要对无模型控制系统的串级控制形式有关的技术进行分析和对其应用效果作一介绍.

2 用于串级调节系统的无模型控制律

1) 串级调节的基本思想

在生产过程控制中, 一些复杂环节, 例如加热炉温度, 某些液位等等, 往往需要进行串级控制. 即把两个控制器串联起来, 第一个控制器的设定值是控制目标, 它的输出传给第二个控制器, 作为设定值, 第二个控制器的输出作串级控制系统的输出, 送到被控系统, 作为它的控制“动作”. 串级形式的框图如图 1 所示.

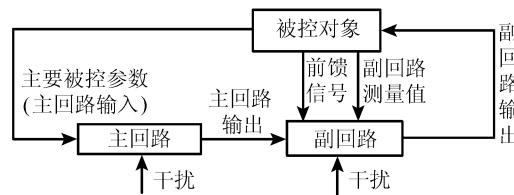


图 1 串级控制方案

Fig. 1 Scheme of cascaded control

控制系统的这种串级形式对于复杂对象的控制往往比单回路控制的效果为好.

本文所介绍的依据无模型控制方法所设计的串级控制律, 充分的考虑了主回路和副回路所包含的有用信息, 在主回路的设计中, 考虑到了副回路的状态, 副回路的设计中也考虑了主回路的状态, 所以使控制效果得到了很大的改善.

这种形式的串级控制, 一般以计算机控制系统为基础. 在这种情形串级控制律的算法能无困难的以整体形式被应用.

2) 经典无模型控制律的串级形式

回忆无模型控制器的具体表达式是

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \|\hat{\varphi}(k)\|^2} \hat{\varphi}(k) \{A(y_0 - y(k)) + D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k)\} \quad (1)$$

其中 $D(\dots)$ 是一个适当的函数, 它表示控制律的功能组合部分, 而

$$Y_{k-1}^{k-n} = \{y(k-1), \dots, y(k-n)\}, \quad U_{k-1}^{k-m} = \{u(k-1), \dots, u(k-m)\}$$

a 是一个小正常数, λ_k 是控制步长参数, A 和 θ 是无模型控制律的组态参数. θ 的作用在于通过它能够把各种元功能用适当的方式组合起来^[3]. 特征参量的估值的数学表达式是特征参量 $\varphi(k)$ 的估值^[1].

依据串级控制的思想把两个单回路控制算法串联起来, 第一路控制算法的输出作为第二路控制算法的设定值, 第二路控制算法的输出作为整个控制系统的输出作用到被控系统.

我们把两个单回路控制算法改写成下述形式

主回路控制算法:

$$u_z(k) = u_z(k-1) + \frac{\lambda_k^z}{a_z + \|\hat{\varphi}_z(k)\|^2} \hat{\varphi}_z(k) \{A_z(y_{z0} - y_z(k)) + D_z(\tilde{Y}_{k-1}^{k-n}, \tilde{U}_{k-1}^{k-m}, \theta_z, k)\} \quad (2)$$

其中 $u_z(k)$ 表示主回路控制算法的输出, $y_z(k)$ 表示主回路的测量值, $\hat{\varphi}_z(k)$ 是主回路特征参量的估值, y_{z0} 是主回路的设定值. 而

$$\tilde{Y}_{k-1}^{k-n} = \{y_z(k-1), \dots, y_z(k-n)\}, \quad \tilde{U}_{k-1}^{k-m} = \{u_z(k-1), \dots, u_z(k-m)\}$$

副回路控制算法:

$$u_f(k) = u_f(k-1) + \frac{\lambda_k^f}{a_f + \|\hat{\varphi}_f(k)\|^2} \hat{\varphi}_f(k) \{A_f(u_z(k) - y_f(k)) + D_f(\tilde{Y}_{k-1}^{k-n}, \tilde{U}_{k-1}^{k-m}, \theta_f, k)\} \quad (3)$$

其中 $u_f(k)$ 是副回路控制律的输出, $y_f(k)$ 表示副回路的测量值, $\hat{\varphi}_f(k)$ 是副回路的特征参量 $\varphi_f(k)$ 的估值, 而

$$\tilde{Y}_{k-1}^{k-n} = \{y_f(k-1), \dots, y_f(k-n)\}, \quad \tilde{U}_{k-1}^{k-m} = \{u_f(k-1), \dots, u_f(k-m)\}$$

算法 (2) 和 (3) 就组成了无模型控制律的串级形式.

3) 串级形式下的系统时滞分解原理

这种串级形式往往应用于带有干扰的大时滞系统的控制, 其基本依据是下述的命题.

a) 纯时滞分解原理. 对于时滞系统而言, 如果用串级回路控制, 主回路和付回路克服时滞的负担将相对的减轻, 即每路控制器的负担小于用同一个控制器对整个回路进行控制时的克服时滞的负担.

为说明上述命题的合理性, 首先必须说明什么是控制器克服时滞的负担. 为此, 如果用 τ 表示具有时滞系统的纯时滞时间, T 表示系统的时间常数, 那么

$$f = \frac{\tau}{T}$$

可称为时滞系统的可控性指标. 纯时滞时间和时间常数都是动态系统固有的特性, 所以 f 能够反映该系统与时滞有关的固有性质. 实践表明, 对于可控性指标为 f 的系统, 用控制器 A 不能实现稳定但用控制器 B 就可能实现稳定, 所以对时滞系统的控制, 控制方法的恰当选取是很重要的. 如所周知, 对于可控性指标 f 之值大于 0.6 的时滞系统, 用

PID 调节器实现稳定控制就比较困难了；如果这个值大于 1，用 PID 调节器实现稳定控制几乎就不可能了。因此，把 f 作为控制器克服时滞的负担的数值度量指标是可行的。

以下来说明系统时滞分解原理的合理性。由于被控系统的时间常数是其本身所固有的性质，并不因控制方式的不同而有所改变。在串级形式下，主、副回路各用一台控制器进行控制，因而整个控制过程从时间上被分割成两个部分：即主回路控制部分和副回路控制部分。如果把主回路控制部分和副回路控制部分，分别看成两个被控系统，它们的纯滞后时间分别记为 τ_1 和 τ_2 ，显然有 $\tau_1 \leq \tau$ 和 $\tau_2 \leq \tau$ ，所以有 $f_1 = \frac{\tau_1}{T} \leq f$ ， $f_2 = \frac{\tau_2}{T} \leq f$ 。

这就说明了系统时滞分解原理的合理性。进一步还可以看出下述命题也是合理的。

b) 控制回路的抗干扰能力在串级形式下相对于单回路而言可能得到加强。

基于上述思想，对具有干扰的大时滞系统的控制，经常采用两回路串级控制，有时也用三回路串级控制。

3 无模型串级控制律存在的问题和改进

上述分析可以看出串级控制形式对时滞系统的控制效果好于单回路的控制效果。但实践表明，这种经典的串级控制形式对于某些时滞系统的控制效果有时也并不理想，这就是说经典的串级控制形式仍然存在一定的问题。为此这里将分析控制律 (2) 和 (3) 形成的串级控制环节存在的主要问题和可能的改进途径。

1) 存在的主要问题

不失一般性，设所考虑的系统的动态具有下述特点。

u_f 增大，则 $y_f(k)$ 增大，从而引起 $y_z(k)$ 增大；反之， $u_f(k)$ 减小，则 $y_f(k)$ 减小，从而导致 $y_z(k)$ 减小。具有这种特点的系统很常见，例如加热炉系统大都属于此类。

对于具有上述特点的系统，往往简单地用控制律 (2) 和 (3) 形成串级控制取不到理想的控制效果。这是因为经典的控制方法性能的限制，使这种串级控制还存在着一定的问题：

第一类问题，可从系统的变化动态分析着手。

a) 当 $y_z(k) < y_0$ 时，主回路的输出 $u_z(k)$ 自然要增大，其目的在于引起 $u_f(k)$ 增大，最终使 $y(k)$ 增大。这只有在 $y_f(k) \leq u_z(k)$ 时才有可能。如果是这样，我们说系统处于正常工作状态；但在实践中，往往有令人失望的情况发生，即 $y_f(k) > u_z(k)$ ，从而导致 $u_f(k)$ 减小，这种状态是我们不希望的。把串级控制系统这种状态称之为处于第一类不正常工作状态。

b) 当 $y(k) > y_0$ 时，也有类似的情况发生。

这种第一类不正常工作状态必然使串级调节的效果不理想，必须设法避免。

第二类问题，在一般情况下串级控制系统的主回路的控制器要求尽量稳定，而副回路控制系统要求有一定的灵敏性，这两项要求往往是相互矛盾的：为了副回路的灵敏性加大，主回路的输出幅度就要适当的加大，但这时主回路的稳定性就很难保证。主回路输出幅度的加大，还将引起第一类问题的发生；反过来，如果副回路不具有一定的灵敏性，控制系统抗干扰能力就要降低。特别对付突发的大干扰，抗干扰能力，将会明显的不足。所以解决上述这一矛盾，是提高串级控制的性能所必须解决的第二类问题。

为了尽可能保持主回路输出的幅度不要过大，一个直接的做法是对主回路输出加限，然而这种方法在实践中是不可行的。因为与主回路设定值相对应的副回路的设定值并不

是不变的, 相反它的变化可能还很大, 即系统的状态的变化使得与相同的 y_0 对应的 $u_z(k)$ 可能有很大的不同. 如果对主回路的输出进行简单的限幅, 可能破坏控制系统对上述变化的适应性.

第三类问题, 串级控制系统往往使用在较难实现稳定闭环控制的大时滞环节上, 前两类问题的解决一般来说只仅仅保证系统正常运行情况下的闭环稳定控制. 当有大的干扰发生时, 可能还是使系统较大的偏离目标值. 经典的串级控制往往需要较长时间才能使被控系统恢复正常. 这是大时滞环节控制普遍存在的问题, 称为第三类问题. 为避免这类问题发生, 在串级系统的副回路中, 还必须有抑制大干扰的措施.

以上所述是经典的串级控制系统中普遍存在的主要问题.

2) 改进的途径

因为无模型控制算法是通过计算机 (或单片计算机) 来实现的, 所以串级控制算法的主副回路算法可以用一套软件 (程序) 来实现, 这就建立了主副回路间的更多的联系, 于是给上述一系列问题的解决带来了可能和方便.

串级控制的第一类问题, 实际上是副回路调节作用的滞后问题. 解决这一问题的关键在于充分的利用副回路的测量信息, 即测量值 $y_f(k)$ 的信息. 把 $y_f(k)$ 引入到主回路算法中, 是一种可行的方法.

为了解决第二类问题也必须了解副回路的有关信息, 在这个基础上, 再考虑采取适当的措施. 通常的方法, 是对 $u_z(k)$ 加限, 但这些限制值必须是随 $y_f(k)$ 的变化而变化的, 所以它们应该是 $y_f(k)$ 的函数.

第三类问题的解决方法. 系统的干扰可分为两类: 即可测量的干扰和不可测量的干扰. 对于可测量的干扰由于在事先就可以知道它是否存在, 并可以知道它的量值, 所以在副回路的输出上加适当的前馈算法, 就可对这类干扰造成的影响事先加以补偿. 对于不可测量的干扰的消除, 目前还只能应用加强控制算法的收敛性的途径来解决.

上面仅给出了解决上述三类问题的原则途径, 但具体方法将随被控对象的不同而不同, 并且方法是多种多样的. 在这里就不进行讨论了.

以下将给出应用上述设计思想设计出的串级控制系统成功应用的实例.

4 石化工业中加热炉温度的无模型串级控制

1) 控制方案

石化工业中的加热炉依据其燃料可分为三类, 即燃油加热炉、燃气加热炉和油气混烧加热炉. 由于油价较高, 所以在油气混烧加热炉在工作过程中, 只有在气量不足时, 才开始烧油. 所以对油气混烧加热炉的控制进程中油阀和气阀不会同时动作. 由此可见, 三类加热炉炉温的控制规律基本相同. 加热炉的温度系统都是大时滞系统, 根据观测数据可知, 系统的纯滞后时间一般在 5~8 分钟之间. 考虑到加热炉炉温所受到的干扰有的事先是可以被量测到, 只要在控制律中加上适当的前馈, 这类干扰就可能被抑制或消除. 对加热炉炉温采取带有多路前馈的串级控制是合理的. 具体地说对于油气混烧加热炉而言, 应采取带有前馈的炉出口温度与炉膛温度的串级控制. 炉出口回路是主回路, 炉膛回路是副回路, 副回路直接连接阀门, 燃料直接送到炉膛用以控制炉膛温度从而达到控制炉出口温度的目的.

一般的还要加四路前馈, 它们分别是

a) 瓦斯压力: 加热炉所用的瓦斯由于从外装置来, 经常发生变化, 瓦斯压力不稳必然造成炉温有所波动, 炉温波动反过来又造成瓦斯压力波动, 这样就形成了恶性循环. 所以必须把瓦斯压力变化的情况引入到控制律中;

b) 燃料油压力. 目前石油化工企业所用的大部分是油气混烧加热炉. 加热炉所用的燃料油是自产的, 炉温不稳必然引起与燃料油有关的装置的液位波动, 从而造成油压的波动. 这又使炉温产生较大的波动, 所以也必须把油压信号引入到控制律之中;

c) 处理量. 由于工艺的要求, 处理量的变化在所难免, 它也是对炉温有很大影响的因素, 必须把它的信号引入到控制律中;

d) 进料温度. 在装置其它条件都不变的情况下, 有时炉温也产生变化, 根据观察这种变化大都是因为进料温度的变化所引起的, 所以也必须把进料温度作为一个前馈量.

加热炉炉温的具体控制方案如图 2 所示.

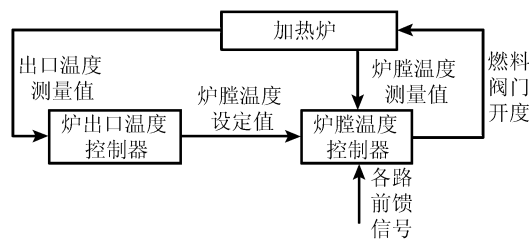


图 2 加热炉炉温控制方案

Fig. 2 Control scheme of heat furnace temperature

2) 应用成功的实例

现以独山子油厂 II 糠醛炉 -1 的温度控制为例, 对这种串级控制的效果予以说明.

独山子油厂 II 糠醛炉 -1 的温度控制系统是 FOXBRO 的 DCS(分布式控制系统), 我们把带有前馈的串级无模型控制系统连接到 DCS 之上. 没有把无模型控制律加入到 FOXBRO 的 DCS 时, 炉出口温度控制非常不平稳, 波动幅度大. DCS 控制不理想的原因在于它的主要算法是 PID, 而被控对象十分复杂.

在原 DCS 的控制下, 设定值为 210°C , 受到干扰时, 最低温度可达 180°C , 最高温度可达 260°C . 没有干扰时, 一般的情况下波动幅度为 $\pm 5^{\circ}\text{C} \sim \pm 10^{\circ}\text{C}$, 由于炉温度控制不稳, 有时造成装置临时停工处理结焦和更换炉管. 无模型控制系统投运之后, 最大偏差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$, 一般为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 没有干扰时为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$. 在极特殊的情况, 即瓦斯含氢时, 造成出口温度最高 225.7°C , 最低 192.4°C , 波动最大幅度为 33.3°C . 可见比原 DCS 的控制效果有了很大的改善.

5 氢氮比的无模型三串级控制

应用常规的 PID 调节器对氢氮比回路实现闭环稳定控制的结果尚不多见, 实际上确实存在很大困难. 下面介绍的是在大庆石化公司化肥厂无模型串级控制系统应用方式及效果.

1) 控制方案

合成氨生产氢氮比系统是一个大时滞系统. 对这一系统提出了三回路串级调节控制方案. 主回路为氢氮比控制回路, 输入量为氢氮比的实际值, 氢氮比的给定值由 DCS 通过

通讯方式给出, 输出作为副回路的给定值; 副回路为低变出口氢含量控制回路, 输入量为低变出口的氢含量, 输出做为次副回路的给定值; 次副回路为空气流量控制回路, 输入为空气流量, 输出值经通讯方式直接送给 DCS, 再由 DCS 送给现场的空气流量控制阀. 同时提出三个对回路影响较大的量作为前馈量. 根据现场的实际情况, 第一个回路的时滞大约为 8~10 分钟, 第二个回路的时滞大约为 10~15 分钟, 第三个回路的时滞很小. 所以前两个回路尽量在保证不超调的情况下相对慢的进行调节, 并且把前馈加到副回路上, 保证空气流量能够及时进行调节.

三个回路都采用无模型控制方法, 加到副回路上的三个前馈量分别是: 原料油田气流量、谱里森回流量和循环气温度变化量.

2) 实际应用的效果

原控制系统是 Honeywell 公司的 DCS, 经常在手动方式下运行, 一旦装置产生波动, 长时间才能恢复正常, 经济效益受到很大影响. 无模型控制系统投入以后, 情况产生了根本变化, 收到了比预想好得多的效果. 原来设想控制误差在 ± 0.1 之间就令人满意了, 而现在控制误差经常在 ± 0.05 之间, 即使存在较大干扰控制误差也在 ± 0.1 之间. 图 3 所显示的是现场实际的控制记录曲线, 它是存在较大干扰情形下的控制结果:

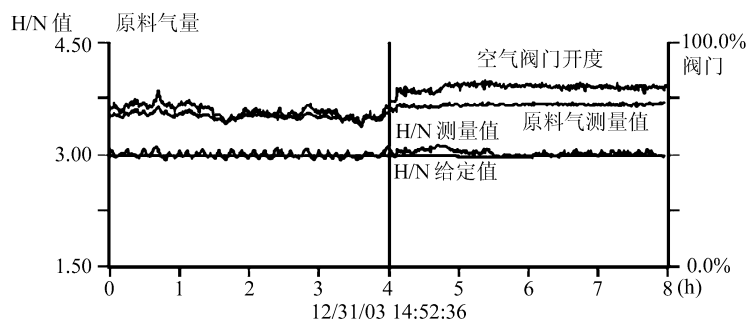


图 3 大干扰下的控制结果

Fig. 3 Control result under large disturbance

6 结论

无模型控制方法对某些大时滞、时变、强干扰和强耦合系统, 有着独特的控制功能. 它的一些优点是现在正在应用中的其他控制器所不能与之相比的. 依据无模型控制方法所设计的控制器可以作为单元仪表独立使用. 依据无模型控制方法所开发的软件包可以做为一个嵌入式软件, 添加到 DCS 中或以工控机为载体连接到 DCS 上, 以加强 DCS 的控制功能. 实践表明许多控制难点应用无模型控制系统几乎都能实现闭环稳定控制. 对非难控点, 无模型控制方法在应用中, 除设定值外其它参数一经给定就不需改变. 所以无模型控制方法应用范围必将愈来愈广.

References

- 1 Han Z G. An integrated approach to modeling and adaptive control. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(3): 380~389
- 2 Han Z G. Designing problem of model free controller. *Control Engineering of China*, 2002, **9**(3): 19~22

- 3 Han Z G, Jiang A P, Wang G Q. Adaptive identification prediction and control-multi-level recursive approach. Harbin: Heilongjiang Education Publishing House, 1995
- 4 Han Z G. An approach of functions combination of controller design of large scale complex systems. *Control Engineering of China*, 2004, **11**(2): 103~107
- 5 Han Z G, Yu X H. An adaptive model free control design and applications. In: Proceedings of 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics. Berlin, Germany: Fraunhofer IRB Verlag, 2004. 243~248
- 6 Han Z G. Study on non-modelling control method for a class of complex systems. *Control and Decision*, 2003, **18**(4): 398~402
- 7 Han Z G. The progress of theory and applications of model free controller. *Techniques of Automation and Application*, 2004, **23**(2): 13~16
- 8 Han Z G. The application of model free controller. *Control Engineering of China*, 2002, **9**(4): 22~25

韩志刚 黑龙江大学教授、东北大学客座教授, 博士生导师. 1958 年毕业于吉林大学. 提出了多层递阶方法和无模型控制技术. 现正从事复杂系统的控制、无模型控制理论和应用的研究.

(**HAN Zhi-Gang** Professor at Heilongjiang University. Visiting professor of Northeast University. And graduated from Jilin University at 1958. He has presented the multi-level recursive method and the control technique of mode free. His research interests include control of complex system and model free control law with application.)

汪国强 东北大学信息科学与工程学院博士生, 黑龙江大学副教授. 研究领域为无模型控制理论及其应用.

(**WANG Guo-Qiang** Ph.D. candidate in School of Information Science and Engineering at Northeastern University. He is now an associate professor at Heilongjiang University. His research interests include model free control theory and application.)