

文章编号: 1001-0920(2003)04-0398-05

一类复杂系统非建模控制方法的研究

韩志刚

(黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以石油化工中加热炉、反应器、蒸馏塔等为背景, 讨论复杂系统的控制问题, 目的是寻求对复杂系统的有效控制方法。对复杂系统进行稳定控制, 必须考虑诸如非线性、大时滞、时变和强耦合的控制问题。给出了这类问题的一种解决途径, 并给出了成功应用的实例。

关键词: 复杂系统; 非线性; 时变; 大时滞; 无模型控制方法

中图分类号: TP23

文献标识码: A

Study on non-modelling control method for a class of complex systems

HAN Zhi-gang

(Faculty of Electron Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The control problem of complex systems is discussed on background of heat furnace, reactor and distillatory etc. The aim is to seek efficient control method for complex systems. In order to stable control for complex systems, it is necessary to consider the control problems with nonlinear, large scale time delay, time varying and coupling. The scheme of solving this problem is given and some of successful application examples are presented.

Key words: Complex system; Nonlinear; Time varying; Large scale time delay; Model-free control method

1 引言

研究和设计良好的控制算法, 对被控对象实现闭环稳定控制, 一直是控制界关注的重要课题。随着被控对象规模越来越大, 性质越来越复杂, 控制算法的设计途径也必须与之相适应, 而不能象经典设计方法那样, 孤立地考虑问题。所设计的控制算法往往应用在大型复杂系统的某些单元环节上。对于良好的控制算法的研究和设计, 应从复杂系统的整体要求考虑。也就是说对于属于复杂系统的单元控制环节, 不能分割开来孤立地进行处理, 必须把每个环节置于系统之中, 从各环节互相关联并且服从系统全局性要求来考虑。

本文介绍能对复杂系统进行有效控制的一种方法, 称为非建模方法, 也称无模型控制方法。在实际应用中, 这种方法已收到了良好的效果。

2 面临的复杂问题实例

(1) 加热炉炉温

锦西石化分公司南蒸馏装置 3 个加热炉的炉温一直不稳。由工艺分析可知, 保持整个装置稳定运行的关键是 3 个加热炉的出口温度稳定, 保证产品质量的关键是 3 个加热炉的出口温度达到工艺要求。对 3 个加热炉的出口温度实现设定值闭环稳定控制, 是保证产品质量提高产品产量的基本要求。

从工艺流程可以看出, 加热炉出口温度的影响

收稿日期: 2002-12-30; 修回日期: 2003-02-18。

基金项目: 国家基础研究重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCA04000)。

作者简介: 韩志刚(1934—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事多层递阶方法、无模型控制等研究。

因素很多。由于加热炉是油、气混烧,油是装置自产的,气是从外装置来的,所以炉温不稳必然使得油压和气压都不稳,这样更加剧了炉温不稳,形成一种恶性循环。此外,进料温度的变化和处量量的变化对炉温的影响也很大,进料量的变化还使炉温的时滞发生变化。所以每个加热炉都是一个时变、大时滞、多干扰的复杂系统。

(2) 常压塔侧线温度

独山子炼油厂蒸馏装置是年处理 250 万吨燃料-润滑油的生产装置,该装置采用了 DCS 控制。原油经过处理进入闪蒸塔,一部分轻组份拨出后,其余全部经回路进料送到常压炉加热至 365 ,然后送入常压塔,通过蒸馏后塔顶出汽油,一线出煤油,二、三线出柴油或润滑油。

作为常压塔,为了保持产品质量指标,每个侧线温度的波动都应尽量小。但受蒸馏塔的物理性质所制约,常压塔侧线温度的控制系统是一个具有严重耦合的大时滞系统。因此对各侧线温度进行闭环稳定控制是很困难的。

(3) 硝酸氨生产中中和过程的 pH 值

大庆石化炼油厂硝酸氨生产中中和过程的 pH 值是用 pH 值分析仪测定的。从组份浓度或流量发生变化,到在反应釜内组份混合反应均匀,一小部分流入分析仪经电离法测定出 pH 值的变化,这一过程大约需要 10 min 左右,而且这个数值随组份浓度或流量的变化而变化。即使组份流量不变,其浓度变化也会引起 pH 值的变化。在生产过程中,对组份浓度的变化没有在线检测设备,所以浓度变化是一个未知的干扰量。

通过对生产过程的直接观测和分析,证实了这一过程存在着大纯滞后 τ 和小时间常数 T , 并且 τ/T 很大。所以这是一个非线性、大时滞、具有未知干扰的系统。

上述 3 个典型实例说明,大型复杂系统的单元控制环节有的本身就构成一个复杂系统,可见我们所面临问题是十分复杂的。

本文所考虑的是大型复杂系统单元环节的控制问题。这类单元环节往往具有大时滞、非线性、未知干扰并且单元环节之间存在强耦合。所以对复杂系统控制方法的设计,必须综合考虑上述问题。

3 复杂系统控制对控制方法的基本要求

从控制实践看出,对于复杂大时滞环节的控制,所用的控制方法必须具有以下特性:

(1) 克服强干扰的能力

克服强干扰的能力是任何控制律都应具备的能力(功能),但不同的控制律具有这种功能的程度是不同的。系统存在的干扰可分为两类:第 1 类是可测量的干扰,例如在加热炉的炉温控制系统中,燃料气压力变化对温度的干扰就属于这一类;第 2 类是不可测量的干扰,例如在加热炉的炉温控制系统中,燃料气成分变化对温度的干扰就属于这一类。一般情况下,燃料气成分没有在线测量设备,所以燃料气成分的变化无法测量到。这类干扰对系统的稳定性危害最大。

(2) 克服大时滞的能力

克服大时滞的能力(功能)是控制工程人员十分关心的,也是大型复杂系统控制所必须解决的问题。一般大时滞系统控制存在的主要问题表现为控制速度与系统稳定性之间的矛盾,控制速度快系统则产生振荡;控制速度慢,无干扰时控制结果还可以,一旦有大的干扰发生,系统的测量值就会远离设定值,并且长时间不能返回到原来的状态。

为了达到克服大时滞的目的,必须考虑下述问题:

- 1) 系统的时滞与控制速度之间的关系;
- 2) 如何快速克服大干扰所导致的大偏差;
- 3) 如何解决快速性与稳定性之间的矛盾。

大时滞现象在不同装置上的表现形式差异很大:有的装置表现为纯滞后很大但时间常数很小;有的装置在具有大时滞的同时还有强干扰,而且强干扰不止一种;有的装置在具有大时滞的同时,各控制环节间还存在着不同程度的耦合。

(3) 对强耦合环节的控制能力

对强耦合环节进行稳定控制,习惯做法是从解耦入手,但这是很困难的。如何解决这一问题,是寻求大型复杂系统控制方案时必须考虑的。

关于强耦合环节的控制,可以考虑对强耦合各环节的控制所经历的过程进行分析。例如有 3 个环节 A1, A2, A3 互相存在着强耦合,即它们的输出和输入都互相关联。可以进行如下处理:以环节(系统) A1 为例,来自于环节(系统) A2 和 A3 的输出耦合和输入耦合,可以看成外界对它的干扰,一般说它们是可测量的干扰。如果控制律有足够的克服这种干扰的能力,那么耦合就会得到消除。如果每个控制律都具有对这种互相干扰的抑制能力,则解耦问题就变成了克服相互干扰的问题。

因此在考虑复杂系统的控制时,必须使控制算法的抗干扰能力得到加强。只要控制算法有足够强

的抗干扰能力,就可以对复杂系统进行非解耦控制。

(4) 对时变特性的适应控制能力

关于时变系统的控制,自然要考虑应用自适应控制方法。现有的结果往往只考虑参数自适应,而没有考虑结构的自适应性。对于复杂时变系统的控制,只考虑参数自适应是不够的,必须考虑结构的自适应性。

另一方面,系统的剧烈时变可看成是一种干扰。因此,克服时变的适应控制能力与抗干扰能力具有密切的联系。

(5) 对非线性现象的控制能力

在客观世界中,非线性现象大量存在,而且性质十分复杂,因此对非线性系统控制的研究是一项困难而又意义重大的课题。

为避免系统的非线性所带来的难题,人们试图选择非线性系统线性化的途径。例如近似线性化方法^[1,2],反馈线性化方法^[3,4],大范围线性化方法^[5]等。这些方法对非线性系统理论而言,无疑是一个重大的贡献,然而这些方法的应用都需要满足一定的条件,而有些条件的满足并不容易,因而在应用上受到很大的限制。

在控制方法的设计中,如何使控制器具有上述全部特性,至少具有上述部分特性,是当前控制理论研究的一项迫切的任务。

PID 调节器是一种性能良好的控制器,目前在控制现场发挥重要作用的,大部分是这种类型的控制器。但 PID 调节器是 20 世纪 40 年代产生的,其设计思想是在线性思维框架中形成的,尽管它在许多简单环节上能保证系统的稳定性,但对于复杂环节的控制效果却不尽人意。

60 年代以后,以被控对象数学模型为基础的现代控制理论得到很大发展,但由于大量实际对象无法给出合适的数学模型,因此现代控制理论在许多应用场合遇到了困难。

70 年代以后出现的自校正控制、模糊控制、预测控制、神经网络、智能控制、专家系统等方法,试图解决对模型的依赖和复杂系统的控制问题,但实际上仍没有摆脱模型框架的束缚,有时还要用到建模、系统辨识等手段。这些方法的一个很大缺欠是控制方法比较复杂,不能适应未知非线性的变化,因此其应用范围仍受到一定的限制。

综上所述,对于复杂环节控制方法(或控制律)的设计,不能沿用惯用的方法,必须寻求新的合适的途径。

4 复杂系统的一种非建模控制方案

前已指出,我们所面临的是一类复杂系统的控制问题,即大时滞、强干扰、非线性、时变并可能具有耦合的系统的控制问题。理论和实践都表明,如果能得到系统精确的数学模型,那么依据它便可设计出具有希望功能的控制方法,但目前对复杂系统尚无令人满意的建模方法,因此复杂系统的建模便成为控制理论研究的一个重大课题。

鉴于控制理论研究的现状,我们不能采取先建模后设计控制律的途径。因为这种途径还存在很大的困难,实践表明这种途径也不是必须的,而应开辟另外的途径。

经过大量的理论和实践分析,找到了一种解决复杂系统控制问题的非建模方法,也称无模型控制方法。无模型控制方法由基本控制方法和组合控制方法组成。

4.1 基本控制方法

4.1.1 基本控制方法可实现建模与控制一体化^[6]

无模型控制器基本算法中包含两个基本算式:

1) 泛模型

$$y(k) - y(k-1) = \mathcal{Q}(k-1)^\top [u(k-1) - u(k-2)] \quad (1)$$

用基于泛模型对特征参量 $\mathcal{Q}(k)$ 进行估计。

2) 无模型控制律的基本形式^[7,8]

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \mathcal{Q}(k)^2} \times \mathcal{Q}(k) \{y_0 - y(k)\} \quad (2)$$

无模型控制律的基本算法,是由基于泛模型(1)对特征参量 $\mathcal{Q}(k)$ 的辨识算法和基本控制算法(2)在线交互进行而组成。当辨识到 $\mathcal{Q}(k)$ 值后,可应用控制律(2)对系统进行反馈控制,结果将得到一组新的观测数据,在已有数据中添加这组新的数据,再对 $\mathcal{Q}(k+1)$ 进行辨识。如此进行下去,便可实现辨识与控制的一体化。

4.1.2 无模型控制律是一种结构自适应控制律

无模型控制律设计所依赖的是泛模型

$$y(k+1) - y(k) = \mathcal{Q}(k)^\top [u(k) - u(k-1)] \quad (3)$$

在该模型中,能够变化而实现自适应部分仅是特征参量 $\mathcal{Q}(k)$ 。理论分析指出,当系统在设定值处于稳定状态时, $\mathcal{Q}(k)$ 事实上是 $y(k)$ 关于 $u(k-1)$ 的梯度。所以特征参量 $\mathcal{Q}(k)$ 在无模型控制律(2)中既代表被控对象模型的参数,又是它的结构特征。

$\mathcal{Q}(k)$ 的估计值 $\hat{\mathcal{Q}}(k)$ 是在线实时估计的。当被控

对象发生变化时,无论是参数性的还是结构性的,都用 $Q(k)$ 的变化来描述。所以无模型控制律既是参数自适应的,又是结构自适应的。

4.2 功能组合控制方法

无模型控制律设计的功能模块组合的思想,是以被控对象对控制器的功能要求为导向,而不是从被控对象的数学模型出发,设计出的控制器应用范围更广,可将控制器设计直接转向非线性设计的途径。

应用功能模块组合的思想,控制器设计中所注意的是控制器的各种功能模块,其中包括线性控制功能模块和非线性控制功能模块。在应用无模型控制器时,根据对象的不同,选取不同的功能模块,并把它们组装起来即可。这种控制器对被控对象的适应性更强。功能组合控制方法由各单元控制方法用线性和非线性方式组合而成。单元控制方法包括:静差克服控制法、反向预调控制法、控制作用转向加速控制法、强制稳定控制法、前馈控制法、大时滞控制法、串级调节控制法、正反作用控制法等。每项单元控制方法(或功能)均由计算机程序模块表示,每个单元控制模块(功能模块)都有相对应的参数。

模块参数可分为两类:第 1 类是相对应的控制方法有无的判断符号,参数取特定值,控制方法起作用;参数不取特定值,控制方法不起作用。第 2 类是模块参数,既表示所对应的控制方法存在与否,又表示存在的程度。参数取值为 0,表示控制方法不起作用;参数取值大于 0,表示控制方法起作用,并且其作用的程度随参数值的增大而增强。

无模型控制方法的功能组合具有如下特点:

1) 无模型控制是突破 PID 线性框架束缚的非线性控制:单元控制模块的不同组合可得出不同的控制规律,这种组装方式完全打破了 PID 线性组合的框架,所形成的无模型控制器是一个非线性控制器。用它来控制某些非线性复杂对象,能表现出优良的控制品质。

2) 无模型控制具有预测控制功能:无模型控制的预测功能是由静差克服控制、反向预调控制和智能区间等功能模块适当组合而成,智能区间被表示成 $(y_0 - h, y_0 + h)$ 。其中: y_0 是设定值, h 是智能区间半径。

3) 无模型控制具有克服强干扰、时变和对耦合系统实现稳定控制的功能(无模型控制方法功能组合的特点将另文讨论)。

© 无模型控制方法一般形式的数学表达式为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{\delta + Q(k)} Q(k) \times [y_0 - y(k) + G(Y_k^{k-n}, U_{k-1}^{k-m})] + f(Q(k)) \quad (4)$$

其中: $f(\cdot)$ 表示前馈项,可以存在多路前馈, $Q(k)$ 是特征参数的估值, y_0 是设定值, $y(k)$ 和 $u(k)$ 是测量值和输出值, $G(Y_k^{k-n}, U_{k-1}^{k-m})$ 和 λ_k 代表组合控制方法,它们都是 Y_k^{k-n} 和 U_{k-1}^{k-m} 的函数, $Y_k^{k-n} = \{y(k), \dots, y(k-n), y_0\}$, $U_{k-1}^{k-m} = \{u(k-1), \dots, u(k-m)\}$, n 和 m 是适当的常数。

无模型控制方法在应用实践中,已充分证明它对复杂系统是一种很有效的控制方法。

5 成功应用的实例

(1) 加热炉炉温控制

锦西石化分公司炼油厂南蒸馏装置中,3 个加热炉的控制方案相同,即都采取带有 4 路前馈的炉出口温度与炉膛温度串级控制。炉出口温度控制系统是主回路,炉膛温度控制系统是副回路。通过控制阀门直接控制炉膛温度,从而达到控制炉出口温度的目的。4 路前馈分别是:1) 燃料气压力 $q_1(k)$: 把燃料气压力变化情况引入控制律;2) 燃料油压力 $q_2(k)$: 把油压信号引入控制律;3) 处理量 $q_3(k)$: 把处理量信号引入控制律;4) 进料温度 $q_4(k)$: 把进料温度作为一个前馈量。

该装置在 DCS 控制下运行一直不稳,其根源在于 3 个加热炉的炉温不稳。采用无模型控制系统后,使南蒸馏装置 3 个加热炉长期处于稳定运行状态,正常情况下炉出口温度变化不超出 2,一般情况下控制误差不超过 1。

(2) 糠醛炉温度控制

独山子炼油厂糠醛装置是生产润滑油的装置,该装置采用 DCS 控制,炉出口温度控制非常不稳定。设定值为 210,发生干扰后,最低温度可达 180,最高温度可达 260,最大波动幅度为 80。由于炉温控制不稳,有时不得不临时停工处理结焦和更换炉管。DCS 控制效果不好的原因在于它的主要算法是 PID,而被控对象十分复杂,具体表现为:

1) 加热炉出口热负荷小,抗干扰能力差,在炉膛温度平稳时,炉出口温度也会发生变化;

2) 燃料气系统处于工艺过程的末端,其他系统引起的燃料气压力波动经常引起出口温度波动;

3) 燃料气成分中含氢量的变化造成温度波动很大;

- 4) 进料量频繁提降也会使出口温度产生波动;
- 5) 油品不断切换使炉口的温度产生较大的波动。

为此, 采用无模型控制方法的串级加前馈方式, 炉膛温度与炉出口温度进行串级调节, 可测量的干扰作为前馈。无模型控制器投运后, 最大偏差为 ± 10 , 一般为 ± 3 左右, 没有干扰时为 ± 1 左右。可见无模型控制器的控制效果是良好的。

(3) 硝酸氨生产中和过程 pH 值控制

大庆石化炼油厂硝酸氨生产合成车间中和环节是一个非线性大时滞系统。pH 值是该系统的一个重要工艺参数, 工艺要求 pH 值控制在 3.5 左右。以往用手动操作改变处理量, 对处理量提量或降量, 但酸的流量也随之增加或减少, 而 pH 值长时间才产生明显的变化, 这一过程大约需要 10 min。变化一旦出现, pH 值就会很快变化。当发现 pH 值变化过大时, 再来改变酸的流量已经来不及了。所以这是一个非线性、大时滞、具有未知干扰的过程。

中和过程的 τ/T 远远大于 1, 用 PID 调节器根本无济于事。即使采用自校正 PID、模糊 PID、Smith 控制, 对于这样的过程进行控制也是无能为力。该厂采用无模型控制方法, 对中和过程 pH 值进行控制, 使控制过程实现闭环稳定, 收到了预期的效果, pH 值经常在 3.5 ± 0.3 之间变化。

(4) 炼油厂焦化装置的控制

克拉玛依炼油厂 30 万吨焦化装置采用 DCS 控制。该装置的焦化炉出口温度一直处于人工手动状态, 对操作人员要求很高, 劳动强度很大, 产品的产量和质量受到很大的影响。加热炉左右各有 8 个喷嘴, 但左方和右方喷嘴燃烧时所生成的热量严重耦合。左方炉出口温度设定值为 498, 右方炉出口温度的设定值为 502, 用 PID 控制算法对这种系统实现闭环稳定控制几乎是不可能的。

我们采取无模型控制方法对该加热炉的出口温度进行控制。左右两组喷火口与相应的炉膛以及炉出口温度各形成一个串级闭环系统, 从而实现了加热炉炉温的闭环稳定控制。左右两个炉出口温度误差经常在 ± 1 之内。

(5) 常压塔侧线温度控制

独山子炼油厂蒸馏装置在 FOXBORO 公司的 DCS 控制下, 控制效果一直不理想。以常一线为例,

其温度波动为 ± 5 , 有时超过 ± 6 。原因是原控制方案抗干扰能力不强, 并且不能很好地克服强耦合的影响。采用无模型控制方法后, 温度实现了闭环稳定控制, 温度波动最大为 $+ 2.9$ 和 $- 2.5$, 正常状态下控制偏差在 ± 1.5 之内。可见控制效果是令人满意的。

6 结 论

实践表明, 无模型控制方法对于大时滞、时变、强干扰和强耦合的复杂系统, 有着独特的控制功能。无模型控制方法的一些优点是目前使用的其他控制方法所不能比拟的。对于许多控制难点, 应用无模型控制方法几乎都能实现闭环稳定控制; 对于非难控点, 无模型控制方法除设定值外几乎不需设定任何其他参数。所以无模型控制方法对复杂系统进行稳定控制是一种有效的方法。

参考文献(References):

- [1] 高为炳, 吴东南. 关于非线性控制系统的线性化问题[J]. 中国科学(A 辑), 1987, 17(7): 740-748.
(Gao Weibing, Wu Dongnan. On linearization problem of nonlinear systems[J]. *Science in China(Series A)*, 1987, 17(7): 740-748.)
- [2] 郭朝晖, 郑加成, 吴铁军. 近似线性化方法综述[J]. 控制与决策, 1999, 14(5): 385-391.
(Guo Zhaohui, Zheng Jiacheng, Wu Tiejun. On the approximate linearization of nonlinear control systems survey[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(5): 385-391.)
- [3] Pei H L, Zhou Q J. Approximate linearization of nonlinear systems a neural network approach[J]. *Control Theory and Applications*, 1998, 15(1): 34-38.
- [4] Baumann W T, Rugh W J. Feedback control of nonlinear systems by extended linearization[J]. *IEEE Trans Automatic Control*, 1986, 31(1): 40-46.
- [5] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [6] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 19-22.
(Han Zhigang. Designing problem of model free controller[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 19-22.)
- [7] 韩志刚, 蒋爱平, 王洪桥. 自适应辨识、预报和控制——多层递阶途径[M]. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 1995.
- [8] Han Zhigang, Qin Bin. Direct adaptive control for nonlinear systems[J]. *System Analysis Modeling Simulation*, 1997, 28: 301-315.