

无模型控制方法在化肥生产中的应用

韩志刚

(黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 硝酸氨生产中和过程 pH 值控制对于产品质量有很大的影响. 对这个过程的精确控制一直是硝酸氨生产中的一个难题. 原因在于中和过程是一个强非线性大时滞过程. 在合成氨生产中几乎所有的合成氨装置对氢氮比的控制都存在一定的问题, 氢氮比系统是一个超大时滞系统, PID 调节器对这种过程实现稳定闭环控制几乎不可能. 用无模型控制方法借助于它的强有力的控制功能, 对上述两个过程实现了闭环稳定控制, 并对无模型控制方法在上述两个过程中的成功应用进行了分析与介绍.

关键词: pH 值; 氢氮比; 非线性; 大时滞; 无模型控制方法

中图分类号: TP273, TQ441

文献标识码: A

Model free control law in the production of chemical fertilizer

HAN Zhi-gang

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

Abstract: The pH value control of neutrality process of ammonium nitrate product has a great influence on the quality of the production. But it is always difficult to control the pH value in producing ammonium nitrate, because it is a strong non-linear and large-scale time-delay process. In the process of synthetic ammonia production, nearly all the synthetic ammonia equipments have got the problem with the control of the ratio between hydrogen and nitrogen. The system of ratio for hydrogen and nitrogen is a super large-scale time-delay system, it is impossible for PID controller to make this closed-loop control process stable. But by the model free control law's powerful controlled function, the above two processes can be stably closed-loop controlled. The paper analyzes and introduces its successful applications to the two processes.

Key words: pH-value; ratio between hydrogen and nitrogen; nonlinear; large-scale time-delay; model free control method

1 前言(Introduction)

《控制理论与应用》已满 20 周岁了. 20 年前, 她在改革开放的浪潮中诞生. 20 年来她随着中国控制理论的发展而发展. 目前《控制理论与应用》已成为中国自动控制界在国内外有重大影响的刊物. 我为《控制理论与应用》20 年的长足发展而高兴. 本刊从创刊起就强调了理论与实际并重的方针, 20 年来一直重视有理论并有实际应价值的文章. 为庆祝这光辉的 20 年, 特写此文作为纪念.

2 无模型控制方法(Model free control method)

近半个世纪以来, 以被控对象的数学模型为基础的现代控制理论得到很大发展, 但是由于大量实际被控对象给不出合适的数学模型, 现代控制理论在许多应用场合遇到了困难. 目前过程控制中应用的控制器, 绝大多数是 20 世纪 40 年代形成的经典的 PID 调节器及其变种, 这种控制器的设计思想是在线性思维框架中形成的. 尽管在很多场合 PID 调

节器能够被应用, 但是常常难以保证控制精度, 适应性差, 难以对付未知强非线性和强扰动的作用.

由此可见, 研究出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、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与应用研究的一个重要课题.

为适应这种情况, 作者进行了无模型控制理论与技术的研究. 经过 10 年的研究, 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的无模型控制方法系列产品在炼油、化工、轻工、焦炭、化肥、造纸、电力、玻璃等行业的应用, 收到了满意的效果. 无模型控制方法又称为非建模自适应控制方法(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. 在生产过程控制中无模型控制方法可以通过下述 3 种形式来实现: 无模型控制器(盘装控制表)、无模型控制方法工作站(NMACS)、无模型控制方法嵌入式软件. 这里对无

模型控制方法简单地介绍:

无模型控制方法由两部分组成,即基本的无模型控制方法和功能组合控制方法.无模型控制方法的设计途径和主要特点是:

1) 它是一种结构自适应控制.

基本的无模型控制方法设计所依赖的是“泛模型”:

$$y(k+1) - y(k) = \varphi(k)^T [u(k) - u(k-1)]. \quad (1)$$

在这个模型中能够变化而实现自适应的部分仅仅是特征参量 $\varphi(k)$. 理论分析指出,当系统在设定值处于稳定状态时, $\varphi(k)$ 事实上是 $y(k)$ 关于 $u(k-1)$ 的梯度,所以特征参量 $\varphi(k)$ 在基本的无模型控制律

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \|\hat{\varphi}(k)\|^2} \hat{\varphi}(k) \{y_0 - y(k)\} \quad (2)$$

中,既代表了被控对象模型的参数,又是它的结构特征.

$\varphi(k)$ 的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 是在线实时估计得到的.被控对象如果发生变化,无论是参数性的,还是结构性的,都用 $\varphi(k)$ 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.

2) 它是新的建模与控制思想即“建模与控制一体化”的产物^[1,2].

在无模型控制方法基本算法的运行过程中,必须对特征参量进行在线实时估计.实时估计需要依据泛模型(1).

无模型控制律的基本算法就是由基于泛模型(1)对特征参量 $\varphi(k)$ 的辨识算法和基本控制算法(2)在线交互进行而组成的.当经过辨识到 $\hat{\varphi}(k)$ 值以后,即可以应用控制律(2)对系统进行反馈控制,控制的结果将得到一组新的观测数据,在已有数据中添加这一组新的数据,再对 $\hat{\varphi}(k+1)$ 进行辨识,如此继续下去,就可实现辨识与控制的一体化.

3) 无模型控制律是用功能组合途径设计的非线性控制律^[4].

改变设计思路,向非线性和不建模方向发展是一个可行的途径.为摆脱旧的设计思想的束缚,本文提出了以被控对象对控制方法的功能要求为导向,而不是先考虑建立被控系统的数学模型的设计途径即所谓功能组合设计途径控制方法设计的功能组合途径由下述各单元控制方法用线性和非线性方式组合而成.它们是静差克服控制方法、反向预调控制方法、控制作用转向加速控制方法、强制稳定控制方法、前馈控制方法、克服大时滞控制方法、串级调节

控制方法、正反作用控制方法等等.每项单元控制方法均由算法模块表示,每个单元控制方法模块都有相对应的参数.模块参数有两类,第一类是相对应的控制方法有无的判断符号,该参数取特定值,则该控制方法起作用,该参数不取这个特定值,该控制方法不起作用.第二类模块参数,既表示所对应的控制方法存在与否又表示存在的程度.该类参数取值0,表示该控制方法不起作用,取值大于0,表示该控制方法起作用,而且其作用的程度随参数值的增大而增强.上述单元控制方法模块的不同组合方式可得出不同的控制律.应用功能模块组合的思想,在控制器的设计中,作者注意的是控制器的各种功能模块,其中包括线性控制功能,也包括非线性控制功能.在应用无模型控制方法时,根据对象的不同,选取不同的功能模块把它“组装”起来就行了.这种控制器对被控对象的适应性更强.

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方法是一个非线性控制方法.所以用它来控制某些非线性复杂对象时,表现出了优良的控制品质.实际应用成功的一系列实例证明,无模型控制方法作为解决复杂控制环节的控制问题的一种方法是完全可行和有效的^[5~8].

目前化肥生产过程控制中存在的典型难控环节是硝酸氨生产中和过程的pH值控制和合成氨生产中氢氮比值控制.工艺分析和现场实践证明无模型控制方法完全可以解决化肥生产中自动控制的这些困难问题.

本文的目的是要对无模型控制方法在化肥生产中成功应用的一些情况进行分析和介绍.

3 硝酸氨生产中和过程 pH 值的控制 (Control of pH in neutrality process of ammonium nitrate product)

硝酸氨生产中和过程是氨和硝酸发生反应生成硝酸氨的主要过程,工艺要求反应生成的产物,pH值在3~4之间,pH值大于4和小于3,生产出的硝酸氨产品质量都不合要求.长期以来,这个过程在PID调节器控制之下,经常采取比值控制,即把酸量和氨量的比值控制到一个给定值.但如所周知氨和酸的浓度经常发生变化,由于氨、酸浓度的变化,即使在流量不变的情况下,产品的pH值也在发生变化,这种变化有时还很大,这就使产品质量受到了很大影响.

所以生产工艺希望对pH值能够直接进行控制,这是一个合理的要求.但遗憾的是这一点对控制工程人员而言,长期以来是一个难题.因为目前使用

的PID调节器及其变种对强非线性和大时滞系统的控制很难收到良好的效果。

3.1 工艺原理简述 (Brief description of technology principle)

溶液的pH值与该溶液中氢离子 H^+ 的浓度有关. 如果在该溶液中氢离子 H^+ 的浓度为

$$[H^+] = A(M),$$

M 为 $[H^+]$ 的量纲, 单位为 mol. 则该溶液的 pH 值为

$$pH = -\log A, \text{ 即 } A = 10^{-pH}.$$

由此可见, pH 值与氢离子浓度之间 $[H^+]$ 存在着严重的非线性关系。

硝酸氨生产中和过程的 pH 值是用 pH 值分析仪测定的, 该分析仪安装在反应釜的外面. 从组份的浓度或流量发生变化开始, 到在反应釜中组份混合反应均匀, 一小部分流入到分析仪中经电离法测定出 pH 值的变化, 这一过程需要大约十分钟左右. 而且这个数值随组份浓度或流量的变化而变化. 即使组份流量不变时, 其浓度变化, 也引起 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, 所以浓度变化是系统的一个未知的干扰量。

对生产过程的直接观测和分析, 完全证实了这一过程存在着大的纯滞后 τ 和小的时间常数 T , 所以 $\frac{\tau}{T}$ 很大. 按操作人员的描述, 用手动操作改变处理量, 即提量或降量以后酸的流量也随之增加或减少, 但 pH 值长时间不产生明显的变化, 经 10 分钟左右开始有了变化, 这一变化一旦出现, pH 值就变化得很快. 当发现 pH 值发生这样的变化时, 再来改变酸的流量, 使 pH 值稳定已经来不及了. 所以这是一个非线性、大时滞、具有未知干扰的很难控制的过程。

对于 PID 调节器而言有以下的可控率作为对象能否被稳定控制的判据:

$$\alpha = \frac{\tau}{T}.$$

τ 是被控对象的纯滞后, T 是时间常数, 当 $\alpha < 0.2$ 时, 对象比较容易控制, $0.2 \leq \alpha < 0.6$ 对象比较难控制, $\alpha > 0.6$ 对象很难控制, $\alpha > 1$ 用一般的 PID 几乎不能进行控制. 中和过程的 $\frac{\tau}{T}$ 远远大于 1, 所以用 PID 调节器根本无能为力, 即使采用自校正 PID、模糊 PID、Sunith 控制等对于这样的过程进行控制也是力不从心。

无模型控制方法从其设计思想来看, 就具备对这种形式的非线性、大时滞系统进行稳定控制的能力, 所以我们采用无模型控制方法, 对中和过程 pH 值进行了控制。

3.2 控制方案设计 (Designing the control scheme)

硝酸氨是氨和硝酸在反应釜中经反应而生成. 前已指出, 生成物其 pH 值在 3~4 之间是合格品. 生产流程是以氨量为基础加入适当量的硝酸, 在反应釜中混合发生反应生成硝酸氨. 控制的目标, 就是使生成品具有给定的 pH 值, 所以控制系统的设定值是反应后生成物的 pH 值, 一般给定 $pH = 3.5$.

整个控制系统由串级形式的无模型控制律所组成:

主回路的设定值是 $pH = 3.5$, 测量值是由 pH 值分析仪从现场测定的 pH 值信号. 主回路的输出是酸量和氨量的比. 如果用 $y(k)$ 表示 k 时刻生成物的 pH 值, y_0 表示产品 pH 值的设定值, 则主回路的控制律可以写成

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{\alpha + \|\hat{\varphi}(k)\|^2} \hat{\varphi}(k) \{b(y_0 - y(k)) + G(Y_k^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta)\}.$$

其中 $u(k)$ 是主回路控制器在 k 时刻的输出, $\hat{\varphi}(k)$ 是系统的特征参量 $\varphi(k)$ 的估计值, α 是一个小正数, λ_k 和 $G(Y_k^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta)$ 是控制律的功能组合部分, 而

$$Y_k^{k-n} = \{y(k), y(k-1), \dots, y(k-n), y_0\},$$

$$U_{k-1}^{k-m} = \{u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m)\}.$$

一般来说 $G(\cdot, \cdot, \cdot)$ 是一个非线性函数, θ 是功能组合参数, n, m 是非负整数。

副回路的设定值是主回路的输出 $u(k)$. 事实上它是酸的流量 $h(k)$ 和氨的流量 $q(k)$ 的比值 $c(k) = h(k)/q(k)$ 的希望值. 副回路的被控量就是这个比值 $c(k)$, 它是由酸的流量信号 $h(k)$ 和氨的流量信号 $q(k)$ 经下式算得的:

$$c(k) = \frac{h(k)}{q(k)},$$

于是副回路的控制律可以写为

$$u^*(k) = u^*(k-1) + \frac{\lambda_k^f}{\alpha_f + \|\hat{\varphi}_f(k)\|^2} \hat{\varphi}_f(k) \{b_f(u(k) - c(k)) + G_f(C_k^{k-n_f}, V_{k-1}^{k-m_f}, \theta_f)\}.$$

其中 $u^*(k)$ 是副回路的输出, 即硝酸的流入量, 事实上是酸阀门的开度. $\hat{\varphi}_f(k)$ 是副回路系统的特征参量 $\varphi_f(k)$ 的估计值, α_f 是一个小正数, λ_k^f 和 $G_f(\cdot, \cdot, \cdot)$ 是副回路控制器的功能组合部分, 而

$$C_k^{k-n_f} = \{c(k), c(k-1), \dots, c(k-n_f), u(k)\},$$

$$V_{k-1}^{k-m_f} = \{u^*(k-1), u^*(k-2), \dots, u^*(k-m_f)\}.$$

θ_f 是功能组合参数, n_f, m_f 是适当的非负整数.

主、副回路控制律的功能组合部分由一系列单元功能, 诸如预先反向调节功能、测量值转向加速功能、强制稳定功能、大干扰抑制功能、大时滞克服功能经线性和非线性方式组合而成.

为了克服由于氨的提降量对 pH 值所产生的大干扰, 在副回路算法中加上了前馈 $f(q(k), q(k-1))$, 于是实际应用的副回路的控制律的表达式是

$$u^*(k) = u^*(k-1) + \frac{\lambda_k^f}{\alpha_f + \|\hat{\varphi}_f(k)\|^2} \hat{\varphi}_f(k) \{b_f(u(k) - c(k)) + G_f(C_k^{k-n_f}, V_k^{k-m_f}, \theta_f)\} + f(q(k), q(k-1)).$$

3.3 实际应用效果(Result in the practice)

这种无模型串级控制律在应用于硝酸氨生产中和过程 pH 值的控制中, 使系统长期在闭环稳定状态下运行, pH 值经常控制在 3.5 ± 0.3 之间. 减轻了操作人员的劳动负担, 提高了产品的质量和产量, 取得了良好的效果.

4 合成氨生产氢氮比的控制(Control of ratio between hydrogen and nitrogen in the process of synthetic ammonia production)

合成氨生产中氢氮比值是一个重要的参数, 几乎所有的合成氨装置对这个参数的控制都存在的问题. 大庆石化公司化肥厂合成氨装置有其特殊性但更重要的是其共性. 该装置的生产原料是空气和油田原料气. 氮来自于空气, 氢来自于油田原料气. 空气和油田原料气在造气工段经过一系列加工净化处理后在进入合成塔, 合成反应后生成氨气.

上述过程十分复杂, 氢氮合成环节是一个复杂的难控环节. 对这一环节实现闭环稳定控制, 其经济效益十分明显, 是当前合成氨生产急需解决的问题.

4.1 氢氮比环节的特性(Properties of ratio between hydrogen and nitrogen)

氢氮比控制环节的特性如下:

a) 纯滞后时间大. 从造气工段到合成工段间隔时间需 20 ~ 25 min, 因为通道长, 更加大了这个系统的时滞, 初步估计这一系统纯滞后时间 30 min 左右, 而氢和氮合成过程是一个化学变化过程, 这就决定了该系统时间常数 T 不会太大, 从而使得 $\alpha = \frac{\tau}{T}$ 远大于 1. 即使自动控制设备是很好的 DCS, 但由于所用的控制算法仍是 PID, 所以这个环节的自动闭环稳定控制仍不能实现. 这不但对扰动因素产生的

波动长时间得不到克服, 而且会造成超调.

b) 无自衡性和蓄存性. 合成塔以 3:1 的关系消耗氢气和氮气, 如果补充气不是以 3:1 补充, 将有氢或氮的积累. 这就是对象的无自衡性. 已经积累的氢或氮将存于循环气中不会自行消失, 这就是蓄存性. 要消除已积累的氢或氮气, 必须有一定量的与原积累方向相反的气体氢或氮去补充.

c) 扰动因素多. 归纳起来主要有: 原料油田气的变换气流量、氢含量、氮气纯度、以及为降低系统压力和惰性气体含量的弛放气流量等. 还有许多不可测的干扰因素.

生产实际表明, 氢氮比是该装置中最难控制的一个工艺参数. 利用常规 PID 组成的控制系统因适应能力差, 满足不了对这一参数的控制要求. 多年来, 这个生产装置的氢氮比控制都是通过人工调节的, 某些厂的合格率不到 50% (2.8 ~ 3.2 为合格).

用手动控制, 在装置稳定时可以收到满意的效果, 但装置情况有变化, 例如有大的干扰发生或处理量发生变化等, 手动控制不能及时跟踪, 这就使得装置在一段时期内不能稳定, 必然影响产品的产量和质量.

综合上述分析可见, 氢氮比环节之所以成为一个难控环节的原因有二: 一是装置特性的原因, 即它是复杂的大时滞环节; 二是 DCS 的所用的控制算法的原因, 即在 DCS 中使用的算法基本是 PID, 而 PID 对于大时滞强干扰环节的控制能力较差.

第一个原因是客观存在, 工艺上不能做任何改变, 所以要解决氢氮比的控制问题, 只能从克服第二个原因, 即要换一个较好的控制方法入手.

4.2 控制系统设计的有关问题(Related problems of control scheme design)

前已指出应用通常的 PID 调节器对氢氮比回路实现闭环稳定控制几乎是不可能的. 因而我们采用新的控制方法, 即无模型控制方法. 其控制方案如下:

a) 关于通讯问题.

由于无模型控制方法工作站(NMACS)是作为原控制系统的“外脑”单独存在, 所以必须解决与 DCS 之间的数据传输即通讯问题. 从保证生产安全出发, 无模型控制系统应该用的最佳方式是与 DCS 连接起来.

DCS 为一套完整、成熟的计算机控制系统, 不同 DCS 有不同的底层通讯协议. 无模型控制方法工作站(NMACS)与 DCS 的通讯可以用 TCP/IP、串口和数据采集板三种方式.

无论采取那种方式,都必须保证下述功能的实现:

1) 实时采集 DCS 上有关回路的相关信号(如主回路输入、副回路输入、前馈信号)同时将主算法模块计算出输出信号(阀门开度)发送回 DCS.

2) 在操作员站上可修改被控回路的给定值和通过软开关进行 DCS 与 NMAC 站之间的互相切换.

3) 在 DCS 的工程师站上,可以对无模型控制系统的参数组态值作修改.

4) 一旦系统情况反常,控制系统立即自动切换到 DCS 由操作员进行手动处理.

DCS 给 NMAC 站的数据有氢氮比(H/N)、变换气氢含量、原料油田气量、空气量和某些可测量的干扰量.

NMAC 站给 DCS 的数据有空气量的阀位信号和系统情况反常判断信号.

b) 控制系统分析与设计.

依据上述分析可见,氢氮比控制的主要困难是怎样克服系统的超大时滞和抑制强干扰.根据装置的情况和工艺要求,设计了无模型三回路串级控制方案.

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.基本依据是下述的猜想:

串级回路克服时滞的能力不超过每个单独回路克服时滞能力的总和但必大于每个单独回路克服时滞的能力.

实践和理论分析都证实了上述猜想的正确性.

但是,常用的串级控制方案,存在着一定的欠缺,主要表现在:副回路控制器中仅包含 $u(k)$,即仅包含主回路的输出信息.而主回路控制器中不含副回路的任何信息.正如在实践中所看到的那样,这

种欠缺有时使串级调节不能收到预期的效果.所以有必要对常用的串级控制律进行改进.

为此在无模型控制方法的串级调节律中,充分考虑到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.

这种形式的串级调节,一般以计算机控制系统为基础.在这种情形串级调节律的算法能无困难的以整体形式被应用.当然,如果单回路调节器具有很好的通讯功能的话,那么由于主副回路的有关信息,可以通过这一功能相互传递,这种形式的串级调节也可能被实现.

对于大庆石化公司化肥厂合成氨装置氢氮比控制回路具体的控制方案是:

1) 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;

2) 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,输出作为次副回路的给定值;

3) 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.

4) 同时提出 3 个对回路影响较大的量作为前馈量,加到副回路上的 3 个前馈量分别是:原料油田气流量、普里森回流量和循环气温度变化量.

根据现场的实际情况,第 1 个回路的时滞大约为 10 min,第 2 个回路的时滞大约为 20 min,第 3 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很慢地进行调节,并且把前馈加到副回路上,保证空气流量能够及时地进行调节.

控制方案如图 1 所示.

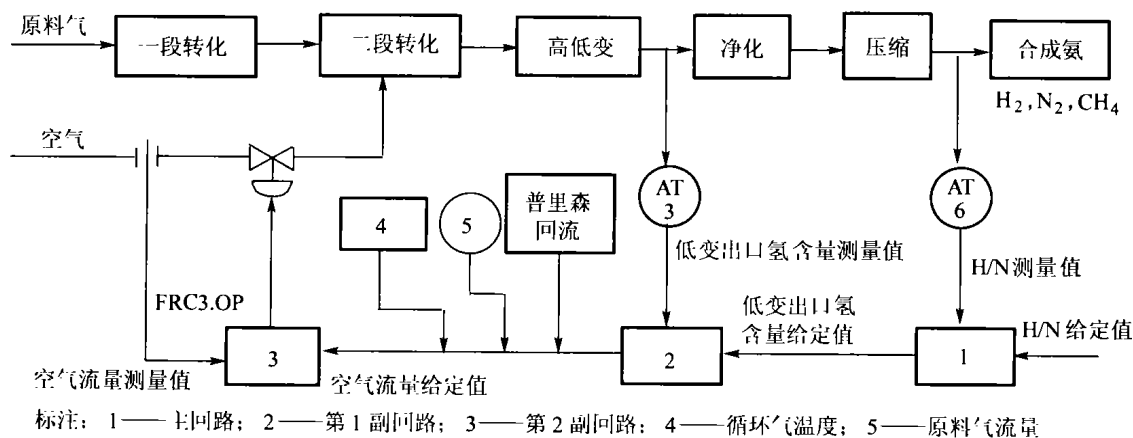


图 1 控制方案

Fig. 1 Control scheme

4.3 实际应用的效果(Effect of application)

原系统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,经济效益将受到很大影响.无模型控制系统投入以后,情况产生了根本的变化,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2和图3所显示的是现场实际的控制记录曲线.图2中,氢氮比的设定值为 3 ,氢氮比的测量值经常在 $2.95 \sim 3.05$ 之间变化.

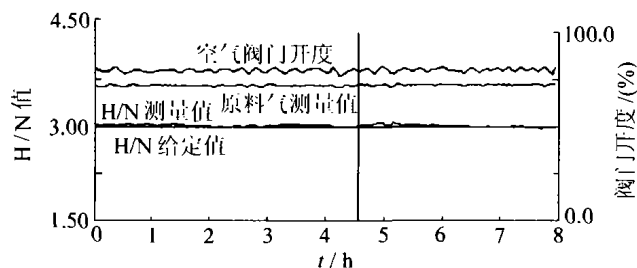


图2 一般情形下的控制结果

Fig. 2 Control result in the ordinary case

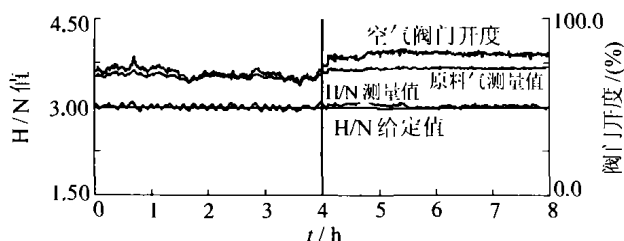


图3 存在较大干扰情形下的控制结果

Fig. 3 Control result in the case under big disturbance

5 结论(Conclusion)

以硝酸氨生产中和过程中的pH值控制和合成氨生产中的氢氮比控制为对象,讨论了非线性、强干扰和超大时滞系统的闭环稳定控制问题.实际应用证明了无模型控制方法完全可以对这类系统实现闭环稳定控制.

参考文献(References):

- [1] 韩志刚.关于建模与自适应控制的一体化途径[J].自动化学报,2004,30(3):380-389.
(HAN Zhigang. An integrated approach of modeling and adaptive control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3):380-389.)
- [2] 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 of China*, 2002, 9(3):19-22.)
- [3] 韩志刚,蒋爱平,王虹桥.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.
(HAN Zhigang, JIANG Aiping, WANG Hongqiao. *Adaptive Identification Prediction and Control-Multi-level Recursive Approach* [M]. Harbin: Heilongjiang Education Publishing House, 1995.)
- [4] 韩志刚.大型复杂系统控制器设计的功能组合途径[J].控制工程,2004,11(2):103-107.
(HAN Zhigang. One Designing approach of functions combination of controller of unit control Loop of large scale complex systems [J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(2):103-107.)
- [5] 蒋爱平,韩志刚,韩丹.无模型控制系统在加热炉温度控制上的应用[J].控制工程,2004,11(5):388-391.
(JIANG Aiping, HAN Zhigang, HAN Dian. Model free control system applied to temperature control of heat furnace [J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(5):388-391.)
- [6] 韩志刚,徐明欣.无模型控制律的一般形式及其在石化工业中的应用[J].黑龙江大学自然科学学报,2001,18(3):24-29.
(HAN Zhigang, XU Mingxing. The general form of model free controller with application in refining and chemical industry [J]. *J of Natural Science of Heilongjiang University*, 2001, 18(3):24-29.)
- [7] 韩志刚.无模型控制的应用[J].控制工程,2002,9(4):22-25.
(HAN Zhigang. The Application of model free controller [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(4):22-25.)
- [8] 薛荆岩,巫红,韩志刚.无模型控制方法在复杂大时滞系统控制中的应用[J].自动化技术与应用,2004,23(4):1-6.
(XUE Jingyan, WU Hong, HAN Zhigang. An application study of model free control method in control of complex large scale system [J]. *Techniques of Automation and Application*, 2004, 23(4):1-6.)