

文章编号: 1000-8152(2005)05-0762-05

合成氨生产中的氢氮比控制系统

韩志刚, 蒋爱平, 汪国强

(黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 本文介绍了合成氨生产中氢氮比的一种控制方案. 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. 因为氢氮比系统是一个超小时滞系统, 大时滞系统的控制问题是过程控制中的难题, 超小时滞系统的控制更为困难. 本文采取无模型控制方法加前馈来解决这一难题, 实践证明这一途径是正确的.

关键词: 氢氮比; 大时滞系统; 干扰; 无模型控制方法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control system of H-N ratio in the production of synthetic ammonia

HAN Zhi-gang, JIANG Ai-ping, WANG guo-qiang

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

Abstract: A control scheme of H-N ratio in the production of synthetic ammonia was introduced in this paper. Problems in control the H-N ratio exist in almost all devices of synthetic ammonia production, because the system of H-N ratio is a very-large-scale-time-delay system, which is difficult to be controlled. A model-free control method (MFCM) with feed forward is applied to resolve this tough problem. The practice shows that this method works well.

Key words: H-N ratio; large-time-delay system; disturbance; model-free control method(MFCM)

1 引言 (Introduction)

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再进入合成塔, 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.

这一环节难控的原因如下: 1) 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 τ 为 30 min 左右, 而氢和氮合成过程是一个化学变化过程, 这就决定了该系统的时间常数 T 不会太大, 从而使得

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

远大于 1, 对于 $f > 0.6$ 的系统, PID 调节器就已经不

能很好的控制了, 对于 $f > 1$ 的系统就更无能为力了, 所以即使自动控制设备是很好的 DCS, 这个环节的自动闭环稳定控制仍不能实现.

2) 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, 必须有一股与原积累方向相反的氢气或氮气去补充.

3) 扰动因素多. 归纳起来主要有: 原料油田气系统来的变换气流量、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变量. 利用常规 PID 组成的控制系统因适应能力差, 满足不了这一变量的控制要求. 多年来, 这个生产装置的氢氮比控制都是通过人工调节的, 氢氮比控制在 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.某些厂的合格率仅为43%左右,严重影响合成氨的产量.

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很差.

第一个原因是客观存在,工艺和装置不能做任何改变.所以要解决氢氮比的控制问题,只能从第二个原因入手,即要用较好的控制方法对这个环节进行控制.为此人们在理论和实践上都进行了大量的研究工作.试用了许多方法,但效果都不理想.无论从理论上还是从实践上讲,寻求高性能的控制策略来构成氢氮比计算机实时控制系统,以改善氢氮比环节的控制,显然是十分必要的.

2 无模型控制方法 (Model-free control method)

无模型控制方法(MFCM)由两部分组成^[1~4],即基本的无模型控制方法和功能组合控制方法.无模型控制方法的主要特点是^[5]:

1) 无模型控制器是一种结构自适应控制器.

无模型控制器设计所依赖的是“泛模型”

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

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

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

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) 无模型控制器是新的建模与控制思想即“建模与控制一体化”的产物^[1].

在无模型控制器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式(1).

无模型控制律的基本算法就是由基于泛模型式(1)对特征参量 $\varphi(k)$ 的辨识算法和基本控制算法式(2)在线交互进行而组成的.当经过辨识得到 $\varphi(k)$ 值以后,即可以应用控制律式(2)把系统进行反馈控制,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 $\varphi(k+1)$ 进行辨识,如此继续下去,就可实现辨识与控制的一体化.

3) 无模型控制器是用功能组合途径设计的非线性控制器

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,我们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,即所谓功能组合控制途径^[6].

控制方法的功能组合途径由一系列单元控制方法用线性和非线性方式组合成控制律的途径.单元控制方法包括: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、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相应的控制方法模块表示,每个单元控制方法模块都有相对应的参数.单元控制方法模块的不同组合方式可得出不同的控制规律.应用功能模块组合的思想,在控制器的设计中,我们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,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,表现出了它的优良的控制品质.

当然控制方法的功能组合是以基本的无模型控制律为基础的.在文献[1]中我们已经对无模型控制基本方法的收敛性进行了分析,指出在一定条件下,无模型控制方法具有很好的收敛性.

实际应用成功的一系列实例证明了^[7,8]无模型控制方法作为解决复杂大时滞系统控制问题的一种方法是完全可行的和有效的.

3 无模型控制方法与 PID 克服时滞能力的仿真分析 (Simulation analysis for ability of MFCM and PID control time-delay systems)

以下我们用仿真实例来说明无模型控制方法比 PID 有更强的克服大时滞的能力. 考虑系统

$$y(k) = 1.4y(k-1) - 0.48y(k-2) + 0.5u(k-m). \quad (3)$$

设定值 $y_0 = 70$.

1) 当 $m = 5$ 时, 无模型控制方法和 PID 的控制结果如图 1 所示, 上面的波形是无模型控制方法的控制结果, 下面的波形是 PID 的控制结果; 横坐标表示时间(单位为秒), 纵坐标表示系统的输出, 可以是

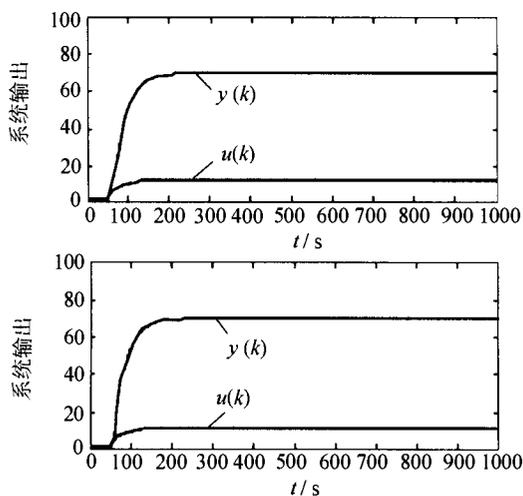


图 1 $m = 5$ 时无模型控制方法和 PID 的控制结果
Fig. 1 Control results of MFCM and PID when $m = 5$

3) 当 $m = 30$ 时结果如图 3 所示, 上面的波形是无模型控制方法的控制结果; 下面的波形是 PID 的控制结果. 可以看出无模型控制方法比 PID 的控制结果好得多.

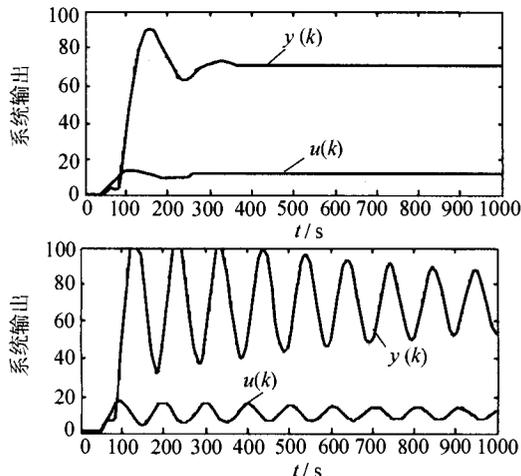


图 3 $m = 30$ 时无模型控制方法和 PID 的控制结果
Fig. 3 Control results of MFCM and PID when $m = 30$

压力, 温度等物理量; 以下图 2 和图 3 与此相同. 可以看出无模型控制方法和 PID 的控制结果基本相同.

由图 1 可以看出, 当 $m = 5$ 时, 无模型控制方法和 PID 的控制结果基本相同. 固定这一组无模型控制方法和 PID 调节器参数, 并在以下的仿真计算中保持不变.

2) 在系统(3)中令纯滞后 m 逐渐增大, 则 PID 的效果逐渐变坏, 当 $m = 20$ 时结果如图 2 所示, 上面的波形是无模型控制方法的控制结果, 下面的波形是 PID 的控制结果. 可以看出无模型控制方法比 PID 的控制结果明显的好.

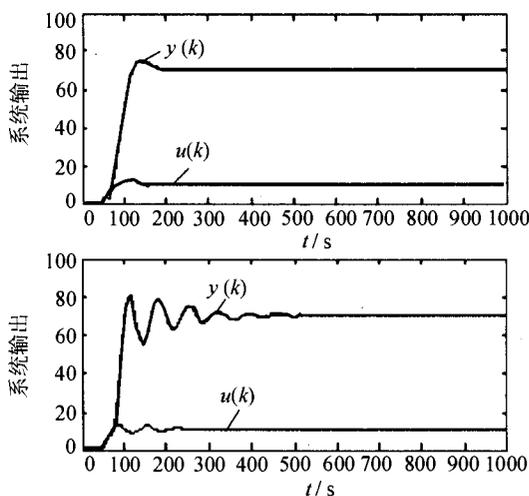


图 2 $m = 20$ 时无模型控制方法和 PID 的控制结果
Fig. 2 Control results of MFCM and PID when $m = 20$

以上仿真结果表明无模型控制方法克服大时滞的能力比 PID 调节器强得多.

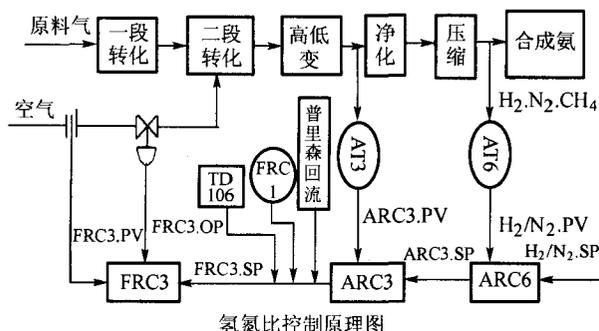
4 控制方案设计 (Designing the control scheme)

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. 而无模型控制方法具有较好的收敛性和克服大时滞的能力, 所以我们在氢氮比控制回路上采用了无模型控制方法.

4.1 控制方案 (Control scheme)

依据现场工艺及工厂所提出要求, 提出了 3 回路串级调节控制方案. 主回路 (ARC6) 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 (ARC3) 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 (FRC3) 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 3 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 1 个回路的时滞大约为 10 ~ 15 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稳定的进行调节,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.控制方案如图 4 所示.



氢氮比控制原理图

图 4 控制方案

Fig. 4 Control scheme

3 个回路都采用无模型控制方法,加到副回路上的 3 个前馈量分别是:原料油田气流量(FRC1)、谱里森回流量和循环气温度变化量(TD106).

4.2 通讯和控制流程 (Communication and control program)

目前大庆石化公司化肥厂合成装置所用的控制

系统是 Honeywell 公司的 DCS (distribution control system).为了无模型控制方法能够顺利的应用,必须解决无模型控制系统与 DCS 连接的问题.

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. Honeywell 公司的底层通讯协议不对外公开.我们也没有收集到 Honeywell 公司的底层通讯协议的有关资料,无法使用该协议.该 DCS 通讯工具 GUS 提供的 DDE 通讯使用的是冷连接.每隔 0.5 s 执行一次循环连接,由于受 WINDOWS 系统影响,每次连接后所分配的缓冲区没有被系统释放,形成了内存泄漏,无法在工程中的应用. Honeywell 公司对外提供的优化程序接口为 ATP,价格约 40 万元.因价格问题无法应用.因而我们采用了下述的通讯方式:

无模型控制软件以工控机为载体(统称无模型控制工作站),通过 812PG 数据采集板与 DCS 之间进行通讯.输入数据由 DCS 进行转换后从 IO 点以 4-20mA 的模拟信号送出,采集板把模拟信号转化为数字信号送给控制软件,经过计算送出阀位信号,数据采集板把数字信号转化为模拟信号送给 DCS,DCS 在判断后把阀位信号送给现场的控制阀.

无模型控制工作站中程序模块的连接如图 5 所示.

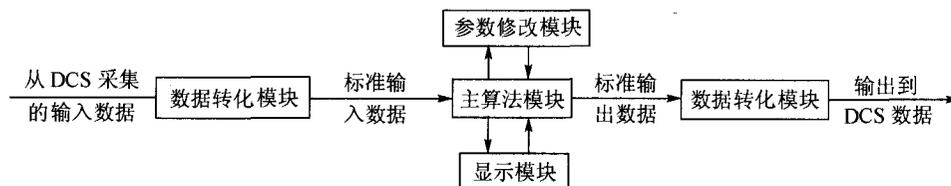


图 5 程序模块连接图

Fig.5 Figure of connection for program modules

其中 DCS 给 NMAC 的数据,即输入数据有:氢氮比、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 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.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.

主算法模块是本系统的核心模块,由 4 种算法组成,分别适用于对大时滞、非线性、非稳定环节的控制.对于不同的控制回路可以在线的选择不同的算法.

数据转化模块能实现与 DCS 的通信功能,实时采集 DCS 上某个回路的相关信号(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.

在 DCS 的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 与无模型控制工作站(NMAC)之间的互相切换.

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.

5 实际应用效果 (Result in the practice)

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:氢氮比的设定值为 3,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6的波形所显示的是现场实际的控制记录曲线(8h).从该记录曲线图中可以看出,当系统有较大干扰时,干扰来自原料气量有较大改变,空气阀门响应很快,控制效果没受多大影响(误差不超过 ± 0.1).

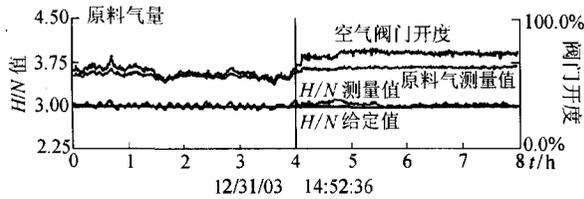


图6 存在较大干扰情形下的控制结果

Fig. 6 Control Result under large disturbance

6 结论(Conclusion)

本文以合成氨生产中氢氮比的控制为背景,讨论了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超大时滞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,蒋爱平,王虹桥.自适应辨识、预报和控制-多层递归途径[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.

- [3] HAN Zhigang, QIN Bin. Direct adaptive control for non-linear systems [J]. *System Analysis Modeling Simulation*, 1997, 28: 301-315.
- [4] 韩志刚.一类复杂系统非建模控制方法的研究[J].控制与决策,2003,18(4):398-402.
(HAN Zhigang. An study of non-modelling control method for a class of complex systems [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 398-402.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 韩志刚.无模型控制器理论与应用的进展[J].自动化技术与应用,2004,23(2):13-16.
(HAN Zhigang. The progress of theory and applications for model free controller [J]. *Techniques of Automation and Application*, 2004, 23(2): 13-16.
- [8] 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.

作者简介:

韩志刚 (1934—),男,教授、博士生导师.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;

蒋爱平 (1962—)女,黑龙江人.副教授、在读博士,现正从事无模型控制理论和应用,及医学图像处理等研究, E-mail: jap62@sohu.com.