

多效蒸发的无模型自适应控制研究

李春玲, 何小阳

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 将基于紧格式线性化的非线性系统无模型自适应控制方法应用在多效蒸发控制中。控制器的设计是直接基于称为伪偏导数的向量, 伪偏导数是根据多效蒸发系统的人工神经网络模型的输入输出信息在线导出的。并利用 MATLAB 仿真实验证明了该方法的有效性和稳定性, 其性能优于传统 PID 控制。

关键词: 无模型自适应控制方法; 多效蒸发; 非线性系统; 计算机仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0074-03

Study on Model-Free Adaptive Control in Multiple-Effect Evaporator Method

Li Chunling, He Xiaoyang

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The model-free adaptive control (MFAC) approach of nonlinear systems based on linearization of tight format is applied to multiple-effect evaporator control. The controller design is based directly on pseudo-partial-derivatives (PPD) derived on-line from the input and output information of the multiple-effect system. The simulation examples prove its validity and stability for nonlinear systems of multiple-effect evaporator by using MATLAB software. The performance outperforms traditional PID controller.

Key words: model-free adaptive control method; multiple-effect evaporators; nonlinear systems; computer simulation

0 引言

蒸发是重要的化工单元操作。由于溶剂气化需要大量的潜热, 因此蒸发是一个能耗很高的单元操作, 同时产生大量的二次蒸汽。这些二次蒸汽具有较高的温度, 可作为热源供其它工段使用。为了降低能耗, 提高蒸汽的利用率, 工业生产一般采用多效蒸发。对多效蒸发系统的有效控制, 首先保证了末效出口浓度的稳定, 保证下一个工段的稳定生产, 同时减小能量的损耗, 具有显著的经济效益。

实际的多效蒸发操作过程具有非线性、大时滞、多约束条件等特点, 这就使得过程的控制问题变得复杂了。随着现代控制理论的发展, 对多效蒸发的控制

已经给出了一些有效的控制方法, 如 PID 控制^[1], 预测控制^[2-4]。但传统 PID 对这种参数不确定性系统的应用的控制效果不甚理想, 且参数整定非常困难; 而预测控制是基于被控对象数学模型的控制方法。

无模型自适应控制 (model-free adaptive control, 简称 MFAC) 于 1993~1994 年提出^[5-7]。无模型控制理论与方法是指: “控制器的设计不包括受控过程数学模型的任何信息, 仅利用受控系统的 I/O 数据来设计控制器的理论与方法”。无模型控制算法和控制器是一种兼具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, 控制效果好, 算法简单的新型控制算法和控制器。

收稿日期: 2008-08-08

作者简介: 李春玲 (1983-), 女, 广西宁明人, 广西大学硕士研究生, 主要研究方向为综合自动化;

何小阳 (1957-), 男, 广东兴宁人, 广西大学副教授, 主要研究方向为综合自动化。

1 无模型自适应控制的设计

1.1 SISO 非线性系统的紧格式线性化

文献[8]提出了非参数模型学习自适应控制, 该控制方案设计的基本思想是将非线性系统在工作轨线附近进行折线化。一般离散时间非线性 SISO 系统为:

$$y(k-1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) \quad (1)$$

式(1)在满足一定假设条件下^[5], 可写成如下紧格式形式: $\Delta y(k+1) = \phi(k)\Delta u(k)$, (2)

式(1)、(2)中: $y(k)$ 、 $u(k)$ 分别表示系统 k 时刻的输入与输出; n_y 、 n_u 分别表示系统未知的阶数, $f(\dots)$ 是未知的非线性函数。

$$\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k), \Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$\phi(k)$ 为基于紧格式线性化的伪偏导数。

1.2 基于紧格式线性化的无模型学习自适应控制控制率算法

为了保证表示一般非线性系统的式(1)由动态线性化式(2)合理代替, 必须限制控制输入 $u(k)$ 的变化量。考虑如下控制输入准则函数:

$$J(u(k)) = [y^*(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2 \quad (3)$$

此准则函数中引入的 $\lambda |u(k) - u(k-1)|^2$, 使控制输入量的变化受到限制, λ 的作用是限制 $\Delta u(k)$ 。将式(2)代入式(3)中, 对 $u(k)$ 求导, 并令其等于零, 得:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + \phi(k)^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (4)$$

式(4)中: $\phi(k)$ 为基于紧格式线性化的伪偏导数; $\rho_k \in (0, 2)$ 是步长序列; λ 是权重系数; $y^*(k+1)$ 是系统期望输出。

从式(4)可知, 此类控制率与受控系统参数数学模型结构系统阶数无关, 仅用系统 I/O 数据设计, 这正是无模型自适应控制的优势所在。

1.3 基于紧格式线性化的无模型学习自适应控制伪偏导数估计算法

以投影算法为估计算法方案^[5], 考虑如下估计准则函数:

$$J(\phi(k)) = [y^u(k) - y(k-1) - \phi(k)\Delta u(k-1)]^2 + \mu (\phi(k) - \hat{\phi}(k-1))^2 \quad (5)$$

式(5)中, $y^u(k)$ 表示系统的输出, 由于项 $\mu (\phi(k) - \hat{\phi}(k-1))^2$ 的引入, 惩罚了参数 ϕ 的变化, 通过极小化推导过程, 得到如下伪偏导数估计算法:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) - \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} [\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)] \quad (6)$$

式(6)中, $\eta_k \in (0, 2)$, μ 是关于参数估计变化量的惩

罚因子, 通过它的适当选取, 可以限制非线性系统进行线性替代的范围。

由于上述控制方案比传统的自适应控制方案在线调整参数少, 计算量小, 系统伪偏导数是唯一在线调整的参数, 因此能适应系统快速性要求, 且易于实现。

2 仿真研究及稳定性分析

蒸发过程是动态的, 具有非线性、多参数、大滞后、强耦合、多约束条件等特点。精确的数学模型很难确定, 但建立对象模型是过程仿真的基础。对于非线性和不确定性的复杂系统可采用人工智能技术建立和优化模型。文献[9]根据多效蒸发系统强干扰、非线性、多约束等特点, 利用 BP 神经网络建立了糖厂多效蒸发系统二效压力和末效出口糖浆浓度之间的人工神经网络模型。

2.1 多效蒸发的控制系统模型

文献[9]所给出的神经网络模型样本来自广西伶俐糖厂 2007 年 3 月份的生产数据, 共 600 组。受工厂条件限制, 现场采集到的生产数据只有各效压力、温度及末效罐的糖浆出口浓度, 一些重要数据(如进口的糖汁流量、蒸汽流量等)没有记录。而实际用于煮糖的加热蒸汽主要是抽取一效和二效(以二效为主)的二次蒸汽。因此通过神经网络辨识建模方法, 建立五效蒸发系统中二效汁汽压力 $P_2(t-2)$ 、 $P_2(t-1)$ 和出口糖浆的锤度 $C_5(t-1)$ 、 $C_5(t-2)$ 与 $C_5(t)$ 。仿真实验显示, 建立的模型具有较好的逼近能力, 能够较好地反映系统末效出口糖浆锤度的输出特性。目前广西区内糖厂要求的糖浆锤度为 66°Bx 左右。

2.2 仿真研究及稳定性分析

此处用文献[9]给出的神经网络模型, 通过式(4)的控制律控制, 伪偏导数通过式(6)投影算法得出。系统仿真初始值设为: $\eta_k=1.1$, $\rho_k=0.7$, $\mu=1$, $\lambda=30\ 000$, $\hat{\phi}(1)=2$, 采样周期为 10 s, 系统期望输出为 66°Bx 。系统不加扰动时, MATLAB 下的仿真结果如图 1 所示。

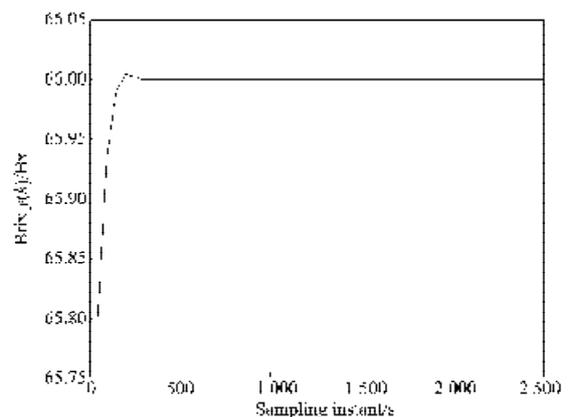


图 1 不加扰动, MFAC 的仿真结果

Fig. 1 Simulation result of MFAC without disturbance

为了演示本文方法的优越性,应用经典PID控制方法进行仿真以与本文所述方案进行比较。PID参数的整定通过经验法试凑,结合蒸发过程的实际情况进行整定。经过多次反复整定,最后得到PID的参数为: $K_p=-0.007$, $T_i=-0.00667$, $T_d=0.00005$,已调到最佳。不加扰动时其MATLAB仿真结果如图2所示。

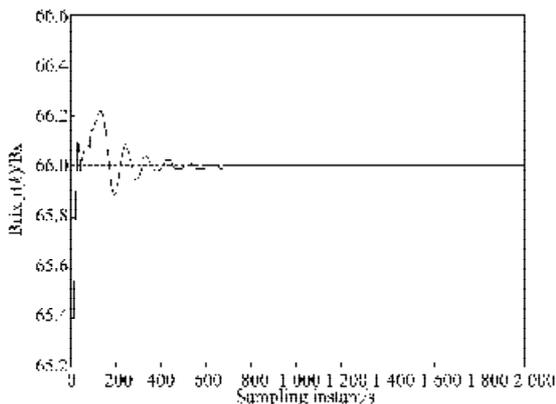


图2 不加扰动, PID控制的仿真结果

Fig. 2 Simulation result of PID control without disturbance

由图1、图2可以看出,与传统的PID控制相比,采用无模型自适应控制时,系统响应速度快、超调量小,有很好的控制效果和非常小的跟踪误差。

加入方差为0.2的随机干扰,采用无模型自适应控制和PID控制的MATLAB仿真结果如图3所示。

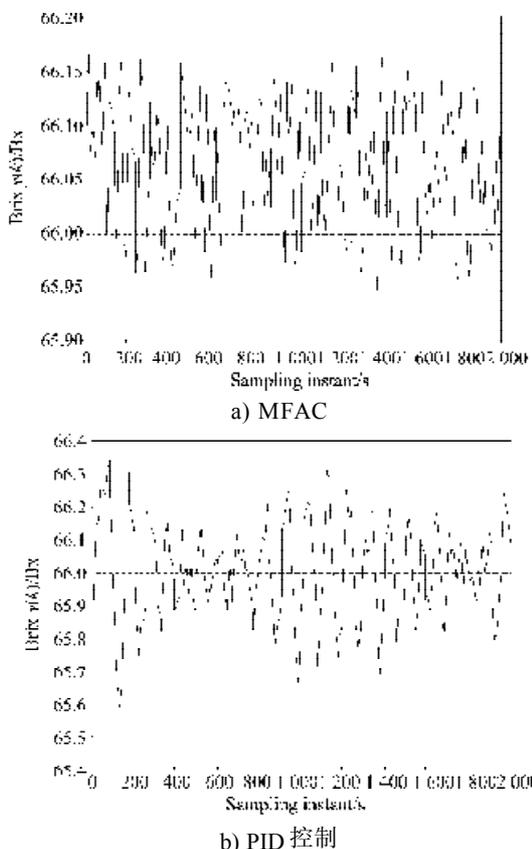


图3 加入方差0.2随机扰动时仿真结果

Fig. 3 Simulation results of adding random disturbance

由图3可看出,采用无模型自适应控制可将末效出口糖浆浓度控制在 ± 0.15 °Bx设定值范围内;而常规PID控制将末效出口糖浆浓度控制在 ± 0.35 °Bx设定值范围内,无模型自适应控制算法抗干扰能力较强。

3 结语

在本文中,将基于紧格式线性化的无模型学习自适应控制方法应用在多效蒸发控制中。该算法能对大时滞、强非线性的多效蒸发系统进行有效控制,且响应速度快、抗干扰能力强、算法简单、易于实现,得到了很好的控制效果。所设计的控制器是无模型的,只需从I/O数据在线导出伪偏导数(PPD)。由于无模型学习自适应控制方案中系统伪偏导数是唯一在线调整的参数,比传统的自适应控制方案在线调整参数少、计算量小、易于实现,能适应系统的快速性需求。

参考文献:

- [1] 吴刚,陈宗海,薛美盛,等.建模与先进控制在多效蒸发器节能中的应用[J].中国科学技术大学学报,1999,29(1):30-37.
- [2] Cadet C, Toure Y, Gilles G, et al. Knowledge modeling and nonlinear predictive control of vaporators in cane sugarproduction plants[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40: 59-70.
- [3] Durmus Kaya, H Ibrahim Sarac. Mathematical modeling of multiple-effect evaporators and energy economy[J]. Energy, 2006, 10: 1-7.
- [4] 陈金水,王慧,孙优贤.黑液蒸发出液浓度的控制实践—基于前馈+反馈的预测控制算法[J]. China Pulp & Paper, 1998, 5: 36-39.
- [5] 侯忠生.非参数模型及其自适应控制理论[M].北京:科学出版社,1999.
- [6] 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):1-6.
- [7] 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.
- [8] 侯忠生.非线性系统的参数辨识、自适应控制和无模型学习自适应控制[D].沈阳:东北大学,1994.
- [9] 梁海葵,何小阳,刘宏.基于ANN的糖厂蒸发工段的建模[J].湖南工业大学学报,2007,21(6):80-82.

(责任编辑:廖友媛)