

结晶器液位系统的卡尔曼滤波模糊自适应PID控制

Study on fuzzy adaptive PID control with kalman filter in mold liquid level control system

高凤翔¹, 王长松¹, 陈晓², 张玉宝¹

GAO Feng-xiang¹, WANG Chang-song¹, CHEN Xiao², ZHANG Yu-bao¹

(1. 北京科技大学 机械电子工程系, 北京 100083; 2. 安阳钢铁公司, 安阳 455004)

摘要: 连铸机结晶器钢水液位控制系统是一个时变的、非线性的、多干扰的复杂系统。通过对连铸机结晶器液位控制系统的分析, 建立了结晶器液位模型, 提出了卡尔曼滤波模糊自适应PID控制策略, 实现了PID参数的在线整定, 减小了随机干扰和测量噪声的影响。理论分析和仿真研究表明该控制方法对结晶器液位控制系统的适应性好, 抗干扰能力强, 具有较快的响应速度和较强的鲁棒性。

关键词: 结晶器液位控制系统; 模糊自适应PID控制; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP273

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2009)05-0018-04

0 引言

连铸机结晶器钢水液位控制是连铸生产过程自动化的关键环节之一, 其控制效果的好坏直接影响着铸坯质量和生产安全。结晶器钢水液位控制系统是一个时变的、非线性的、多干扰的复杂系统, 传统的常规PID方法虽然具有算法简单、方便、可靠性高的优点, 但经常达不到满意的控制效果。为解决这个问题, 很多研究提出如神经网络控制、模糊控制等, 但由于神经网络的学习速度慢, 其应用受到限制; 单纯的模糊控制有可能获得良好的动态特性, 但静态特性不能令人满意。

本文在常规PID控制的基础上结合模糊控制理论和卡尔曼滤波理论设计出卡尔曼滤波模糊自适应PID控制, 该方法通过把模糊自适应PID控制和基于卡尔曼滤波器的PID控制有机结合, 使系统具有很强的鲁棒性, 对扰动和测量噪声具有良好的抑制作用。

1 结晶器液位控制系统的数学描述

1) 结晶器液压伺服驱动位置系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_a K_{sv} K_f \omega_n^2}{A_p s (s + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

式中, K_a 为伺服放大器增益, K_{sv} 为伺服阀静态

流量增益, K_f 为传感器位移/电压转换系数, A_p 为液压缸活塞有效面积, ω_n 为液压系统固有频率, ζ 为液压阻尼比。

2) 结晶器液位模型为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_m} \quad (2)$$

式中, H 为液位高度, A_m 为结晶器截面积, Q_m 为钢液流入量, Q_{out} 为钢液流出量。

3) 结晶器流出量模型为

$$Q_{out} = V_{speed} A_m \quad (3)$$

式中, V_{speed} 为拉速。

4) 钢液流入量模型为

$$Q_{in} = A C_{cr} \sqrt{2gh} \quad (4)$$

式中, A 为水口面积, C_{cr} 为注入系数, h 为钢液从中间包水口到结晶器液面的高度差, g 为重力加速度。

2 卡尔曼滤波模糊自适应PID控制器设计

结晶器钢水液位系统采用液压伺服机构作为执行机构, 当结晶器钢水液位发生变化时, 通过该执行机构来调整塞棒水口开度, 从而使结晶器钢水液位稳定在设定值。

在浇铸过程中, 塞棒受到钢水冲刷和腐蚀, 塞

收稿日期: 2008-10-28

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (200607010705)

作者简介: 高凤翔 (1974 -), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 研究方向为连铸过程自动化与智能控制。

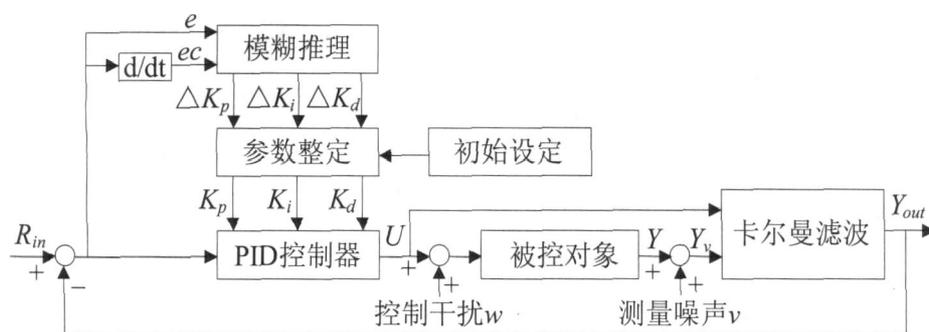


图1 卡尔曼滤波模糊自适应PID控制系统框图

棒头部变形，导致塞棒位置与钢水流量的特性关系发生变化。由于钢水液位控制系统是一个时变的、非线性的、多干扰的复杂系统，常规PID控制不能够实时地调整参数，很难将控制系统品质指标保持在最佳范围内。本文通过卡尔曼滤波模糊自适应PID控制方法对控制过程中不确定的条件、参数、延迟和干扰等因素进行检测分析，采用模糊推理方法和卡尔曼滤波实现PID参数的在线自整定和滤波，不仅保持了传统PID控制系统原理简单、使用方便等优点，而且具有了更大的抗干扰性、较强的鲁棒性和更好的控制精度。卡尔曼滤波模糊自适应PID控制系统框图如图1所示。由图可见，模糊控制器的输入量为结晶器液位的偏差e和偏差变化率ec经过模糊化处理后分别得到模糊量E和EC，以此为依据进行模糊推理，输出变量为PID控制参数 K_p, K_i, K_d 的增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ ，分别加上PID控制参数原来的控制值，即得到实际的PID控制参数。通过卡尔曼滤波，对控制信号进行线性递推最佳误差估计，抑制控制过程中的控制干扰w和测量噪声v，提高系统的稳定性能。

3 模糊自适应PID

3.1 模糊控制器输入、输出

模糊控制器选用二维输入和三维输出，其模糊语言变量集合均划分为“负大(NL)”、“负中(NM)”、“负小(NS)”、“零(ZO)”、“正小(PS)”、“正中(PM)”、“正大(PL)”等模糊子集。在本系统中，结晶器液位高度的可变化范围为 $[0, 180]$ mm，液位高度的偏差变化率为 $[-200, 200]$ mm/s，经转换后的结晶器液位模糊偏差E和模糊偏差变化率EC的离散论域均设定为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；控制输出 ΔK_p 的离散论域设定为 $\{-0.6, -0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5,$

$0.6\}$ ； ΔK_i 的离散论域设定为 $\{-0.06, -0.05, -0.04, -0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06\}$ ； ΔK_d 的离散论域设定为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

3.2 模糊控制器规则

通过咨询熟练操作人员，初步建立了结晶器钢水液位模糊控制器的控制规则，控制规则可以写成下列条件语句的形式：

If $E = A_m$ and $EC = B_n$,
Then $\Delta K_p = C_m, \Delta K_i = D_m, \Delta K_d = F_m$,
 $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$.

其中： A_m, B_n, C_m, D_m, F_m 分别是定义在偏差、偏差变化率和PID参数的增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 论域上的模糊集。

在模拟控制仿真的基础上，调整、确定了根据液位偏差e和偏差变化率ec值的不同PID的参数整定原则，并整理成模糊控制表如表1、表2和表3所示。模糊变量隶属函数采用三角形函数形式和S形函数形式相结合来描述。

表1 ΔK_p 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3.3 解模糊策略

解模糊就是求出每一个模糊量输出的精确值。为了获得准确的控制输出量,就要求模糊方法能够很好地表达输出隶属度函数的计算结果。本模糊控制器采用工业控制中广泛使用的加权平均法。该方法针对论域中的每个元素 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,以它作为待判决输出模糊集合的隶属度 $\mu(i)$ 的加权系数,即取乘积 $x_i\mu(i)$,再计算该乘积和对于隶属度和的平均值 x_0 ,求解公式为

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (5)$$

平均值 x_0 就是应用加权平均法求出的模糊量输出的精确值。

4 卡尔曼滤波

在现代随机最优控制和随机信号处理技术中,信号和噪声往往是多维非平稳随机过程,由于其时变性,功率谱不固定。卡尔曼滤波器采用时域上的递推算法在数字计算机上进行数据滤波,能够较好的解决噪声干扰。

通过计算机实现采样控制,控制系统的连续状态方程转换为离散状态方程。图1所示控制系统的离散状态方程为

$$X(k)=AX(k-1)+B(U(k)+w(k)) \quad (6)$$

$$Y_v(k)=CX(k)+v(k)$$

式中, $U(k)$ 为输入控制向量, $w(k)$ 为控制干扰噪声信号, $v(k)$ 为测量噪声信号。 $w(k)$ 、 $v(k)$ 为均值为零的白噪声信号。

离散卡尔曼滤波器递推算法为:

$$M_n(k) = \frac{P(k)C^T}{CP(k)C^T + R} \quad (7)$$

$$P(k) = AP(k-1)A^T + BQB^T \quad (8)$$

$$P(k) = (I_n - M_n(k)C)P(k) \quad (9)$$

$$X(k) = AX(k-1) + M_n(k)(Y_v(k) - CAX(k-1)) \quad (10)$$

$$Y_{out}(k) = CX(k) \quad (11)$$

误差的协方差为:

$$errcov(k) = CP(k)C^T \quad (12)$$

5 仿真结果与分析

结晶器液位控制模型是一个十分复杂的被控对象,实际应用时只考虑主要因素的影响,有些次要因素可以忽略,以某钢厂板坯连铸机结晶器为例,通过简化,结晶器液位控制模型的传递函数为

$$G(s) = \frac{30}{s \left(\frac{s^2}{95^2} + \frac{2 \times 0.2}{95} s + 1 \right)} \quad (13)$$

在不同情况下,分别对常规PID控制和卡尔曼滤波模糊自适应PID控制方法的单位阶跃信号的仿真曲线进行比较。图2和图3是在没有系统干扰与测量噪声的理想情况下,常规PID和模糊自适应PID控制方法的仿真结果。图4和图5是在有系统干扰与测量噪声情况下,模糊自适应PID控制和卡尔曼滤波模糊自适应PID控制方法的仿真结果。

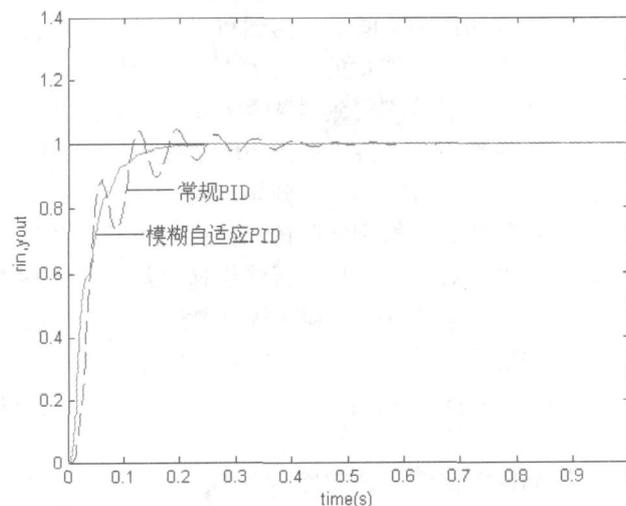


图2 理想情况下两种控制方法的响应曲线比较

由图2可以看出,在没有系统干扰与测量噪声的理想情况下,模糊自适应PID控制具有更快的响应速度和更好的跟踪性能,基本实现了系统的无差控制。而常规PID控制存在响应速度慢、滞后时间和调节时间长、超调量大等缺点。

由图3可以看出,在没有系统干扰与测量噪声的理想情况下,当被控对象由于塞棒磨损或结瘤发生时变时,模糊自适应PID控制具有很好的参数自

调整能力和自适应能力,使结晶器液位迅速达到稳定状态;而常规PID控制下的结晶器液位则不能很快适应被控对象的变化而使调节时间延长、超调量增加。

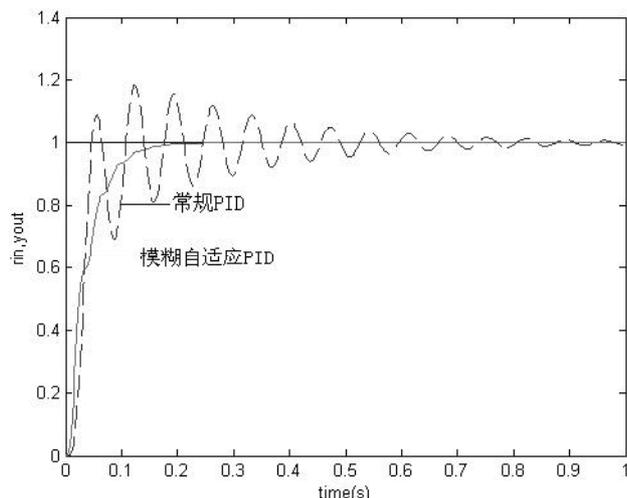


图3 理想情况下模型参数变化后2种控制方法的响应曲线比较

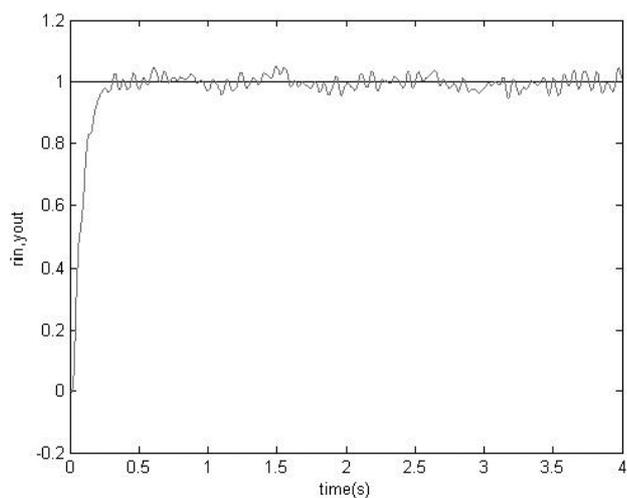


图4 噪声情况下模糊自适应PID控制方法的响应曲线

由图4和图5可以看出,在有系统干扰或测量噪声情况下,不带卡尔曼滤波器的模糊自适应PID控制不能去除系统干扰与测量噪声,而卡尔曼滤波模糊自适应PID控制能有效抑制系统干扰与测量噪声。

6 结束语

基于连铸机结晶器液位控制的特点,提出了一种卡尔曼滤波模糊自适应PID控制方法。此方法结合了常规PID、模糊和卡尔曼滤波3种控制方法,具

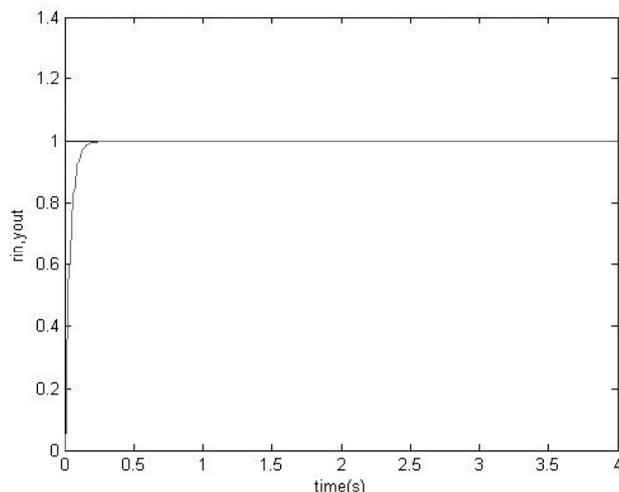


图5 噪声情况下卡尔曼滤波模糊自适应PID控制方法的响应曲线

有适应性强、鲁棒性好的优点。从仿真曲线可以看出,采用卡尔曼滤波模糊自适应PID控制几乎无超调,控制响应快,调节时间小,在抗干扰能力和对象参数变化时的适应性优于常规PID控制和模糊自适应PID控制,具有更好的动态特性和稳定性能,有效地减小了结晶器液位的波动,对于解决复杂的连铸结晶器液位控制问题具有实用价值。

参考文献:

- [1] 张乃尧,阎平凡.神经网络与模糊控制[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [2] R.M.C.De Keyser. Improved mould-level control in a continuous steel casting line[J]. Control Eng. Practice, 1996, 5(2): 231-237.
- [3] 裴福俊, 液压伺服驱动位置系统的智能控制[D].燕山大学, 2002.
- [4] 曹光明, 吴迪, 张殿华. 基于模糊控制决策的铸轧机结晶器液位控制系统设计[J]. 东北大学学报, 2006, 27(7): 775-778.
- [5] Qiao W Z, Mizumoto M. PID Type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78(1): 23-35.
- [6] Euntai Kim. A New Approach to Numerical Stability Analysis of Fuzzy Control Systems[J]. IEEE Trans on Systems, 2001, 31(1): 107-113.
- [7] 王国栋, 刘相华. 金属轧制过程人工智能优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [8] Qiao W Z, Tan S H, Yu Y. Adaptive Fuzzy Modeling of Nonlinear Dynamical Systems[J]. Automatica, 1996, 32(4): 637-643.
- [9] 薛定宇, 陈阳泉. 基于Matlab/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.