

文章编号: 1001-0920(2002)02-0167-04

连铸过程结晶器液面控制的模糊控制方法

肖文栋¹, 王克明¹, 张 森²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳电力高等学校, 辽宁 沈阳 110041)

摘 要: 对连铸过程结晶器液面控制提出一种新的模糊控制方法。该方法采用一种简化的模糊 PD 结构, 结合了传统模糊 PI 与模糊 PD 控制方法的优点。仿真结果表明, 该方法对周期性扰动具有良好的抑制效果, 对过程参数的变化具有很强的鲁棒性。

关键词: 结晶器液面控制; 模糊控制; PD 控制; 鲁棒性

中图分类号: TP 18 **文献标识码:** A

Fuzzy logic approach for mold level control in continuous steel casting process

XIAO Wen-dong¹, WANG Ke-ming¹, ZHANG Sen²

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang High School of Electricity, Shenyang 110041, China)

Abstract: A new kind of fuzzy control is proposed for mold level control in continuous casting process. In nature, it is a PD type fuzzy control hybridizing the conventional fuzzy PI and fuzzy PD controllers with a simplified design scheme. It is shown by simulations that this control strategy can achieve good disturbance rejection performance to periodic disturbances, and is more robust against process parameter variations.

Key words: mold level control; fuzzy control; PD control; robustness

1 引 言

结晶器液面控制是连铸过程中一个非常重要的控制问题, 其效果好坏直接影响着铸坯的表面质量和生产的安全性。但因该系统所具有的时变、非线性特性以及各种扰动的影响, 要得到高性能的液面控制效果是很难的。为此, 人们提出了各种控制方法, 如预测控制^[1]、线性或非线性串级控制^[1,2]、周期性扰动的重复学习方法^[3]等。

近年来, 模糊控制已成为一种有效的液面控制

方法, 主要应用方法有以下几种: 作为传统控制器的上层监控器, 以调整底层控制器的参数^[4]; 并行于传统的控制器, 用来排除大的扰动^[5,6]; 用于直接控制, 以完全代替传统的控制器^[6]。

研究表明, 采用传统的模糊控制方法(即直接控制方法)不能同时得到良好的稳态性能和扰动排除功能^[6]。为此, 本文对结晶器液面控制提出一种新的模糊控制方法, 该方法采用一种简化的模糊 PD 控制结构, 并结合了传统模糊 PI 与模糊 PD 控制方法的优点。试验表明, 该方法能克服传统模糊控制器的

收稿日期: 2000-12-21; 修回日期: 2001-05-21

作者简介: 肖文栋(1968—), 男, 河北昌黎人, 副教授, 博士, 从事离散事件动态系统、智能控制等研究; 王克明(1960—), 男, 辽宁黑山人, 工程师, 从事计算机和 PLC 应用研究。

上述缺点,具有良好的控制效果

2 连铸过程与结晶器液面控制简介

典型的连铸过程如图 1 所示^[1,2]。钢水首先经钢水包注入到中间包,然后经滑门及浸入的喷嘴流入到结晶器,冷却后表面固化的带钢由拉辊以确定的速度拉下,同时进行二次冷却,最后由切割机切成铸坯。结晶器的液面由 X-射线或涡流传感器进行检测,对它的补偿由调节驱动滑门的液压系统实现。

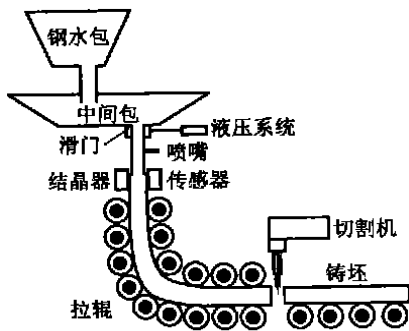


图 1 连铸过程描述

为了进行控制器设计,我们为液面控制建立了如图 2 所示的数学模型。液压系统由时间常数为 T_1 的一阶传递函数表示,其输入、输出分别为控制输入 u 及滑门的位置 x_v 。通常,钢水的有效流动面积 A_v 与滑门的位置 x_v 具有如下非线性关系

$$A_v = F(x_v) = 2\alpha r^2 - r(3r - x_v) \sin \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \arccos(1.5 - x_v / (2r)) \quad (2)$$

其中 $2r - x_v - 4r$ 表示 x_v 的有效活动范围。结晶器中钢水的流入量

$$Q_i = A_v c \sqrt{2gh} \quad (3)$$

其中, g 为重力加速度; h 为钢水从中间包到结晶器的高度差; c 为注入系数,其值取决于钢水成分的粘性及滑门的收缩系数; Q_i 表示从结晶器流出的钢水量,其表达式为

$$Q_o = A_m v_{cs} \quad (4)$$

其中, A_m 为结晶器的横截面积, v_{cs} 为拉速。结晶器为一积分器,可描述为

$$y = (Q_i - Q_o) / A_m \quad (5)$$

此处 y 表示结晶器的液面高度。进行液面高度检测

的传感器可表示为一时间常数为 T_2 的一阶传递函数,同时将一检测噪声 n (白噪声) 加入到检测过程中。本文所用的各种参数值如表 1 所示。

表 1 过程参数

Hydraulic actuator	$T_1 = 0.23 \text{ s}$
Sensor	$T_2 = 0.58 \text{ s}$
Sliding gate valve	$r = 40 \text{ mm}$
Acceleration of gravity	$g = 9.810 \text{ mm/s}^2$
Mold cross section area	$A_m = 1950 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$
Casting speed	$V_{cs} = 16.66 \text{ mm/s}$

在正常工作条件下,典型控制系统的稳态响应通常表现为在设定值周围的周期性振荡现象,其频率通常在 $0.05 \sim 0.1 \text{ Hz}$ 之间,幅值为 $5 \sim 15 \text{ mm}$ 。人们至今还不清楚其确切的原因是什么,可能是包括液面表面的波浪、带钢的膨胀或液压驱动装备的非光滑非线性等。但是这种振荡必须尽量减小。这里通过在液面的高度 y 上加入一周期扰动项 D_p 来对这一现象进行仿真。

3 模糊控制器设计

3.1 PI/PD 和 PD 型模糊控制器^[7]

模糊控制器通常采用比例-积分型(模糊 PI)或比例-微分型(模糊 PD),它们均用误差及误差的变化量作为输入,输出分别为控制信号增量和直接的控制量(本文采用离散形式)。同传统的 PD 控制类似,模糊 PI 控制器具有良好的稳态性能(没有稳态误差),但暂态性能较差,如其上升时间和调节时间通常较长。另一方面,模糊 PD 控制器具有良好的暂态性能,但通常存在稳态误差,或在稳态出现振荡现象。

模糊 PD 控制器是另外一种模糊控制器结构,通常从误差、误差的变化量、误差的加速度产生控制信号增量。从理论上讲,模糊 PD 控制器可以大大提高系统的控制性能,但较多数量的输入将使模糊规则库发生膨胀,并带来设计方面的困难。

3.2 混杂模糊 PI/PD 控制

为了结合模糊 PI/PD 控制器的优点,并克服它

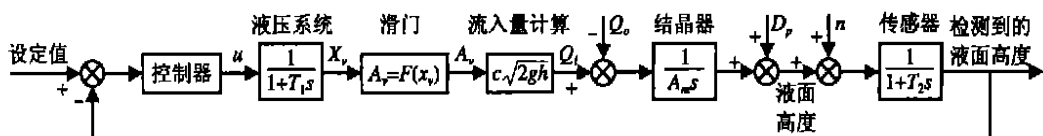


图 2 液面控制的数学模型

们的缺点, 这里提出如图 3 所示的控制器结构。该结构混杂了模糊 PI 控制器与模糊 PD 控制器, 并对模糊控制器的输入 / 输出应用了增益系数使其规范化。它是一种特殊结构的模糊 PD 控制器, 可为设计带来一定的柔性, 例如设计者可对模糊 PI 和模糊 PD 控制器采用不同的模糊隶属度函数、规则库及模糊推理算法。

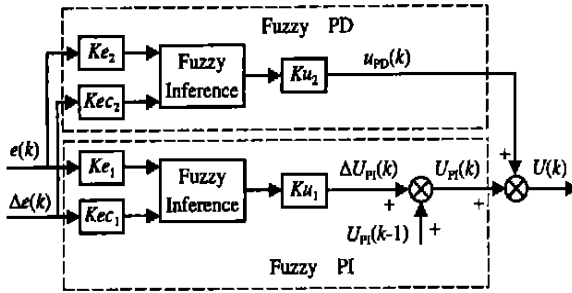


图 3 混杂模糊 PI/PD 控制器结构

3.3 结晶器液面控制的设计

本文的结晶器液面控制采用图 4 简化的混杂模糊控制器结构, 它是将图 3 中的模糊 PI/PD 控制器采用相同的模糊隶属度函数、规则库及模糊推理算法而得到的。容易看出, 它结构简单, 容易实现, 并且传统的模糊 PI 控制器和模糊 PD 控制器是这一控制结构的特殊情况, 分别对应 $Ku_2 = 0$ 和 $Ku_1 = 0$ 。

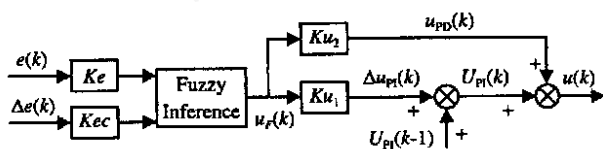


图 4 简化的模糊 PD 控制器结构

对每一个输入和输出变量, 均将其规范化到 $[-1, 1]$ 区间, 并采用 7 个模糊集 NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL (此处 N 代表负, P 代表正)。每个输入的模糊集采用三角型函数, 每个输出的模糊集采用单数值型。本文采用的模糊规则如表 2 所示。模糊推理过程采用标准的模糊处理方法, 由模糊化、模糊决策

表 2 模糊规则

	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE

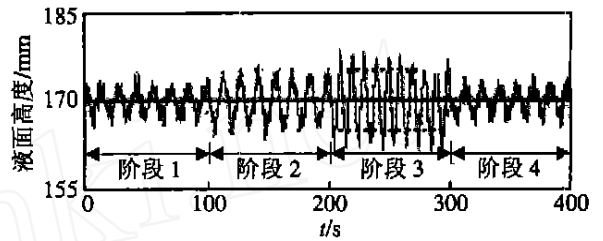
及反模糊化等过程组成。模糊推理及反模糊化分别采用 Min-Max 法和加权平均法。

4 仿真结果

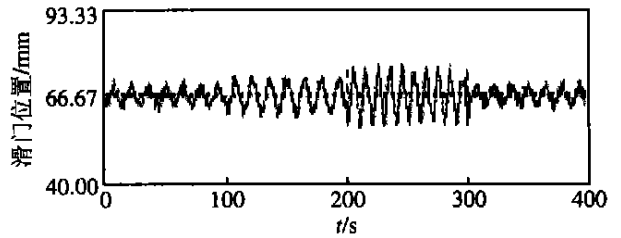
此处将对提出的模糊控制器与传统的 PD 控制器进行比较, 以检测其稳态性能、扰动抑制性能以及对过程参数的鲁棒性。

4.1 对周期扰动的抑制性能

采用变化的周期扰动, 将仿真过程分为 4 个阶段, 每个阶段持续 100 s。在第 1 阶段, 周期扰动的幅值与频率分别为 4.3 mm 及 0.07 Hz; 在第 2 阶段, 周期扰动的幅值变为 9 mm, 而频率保持不变; 在第

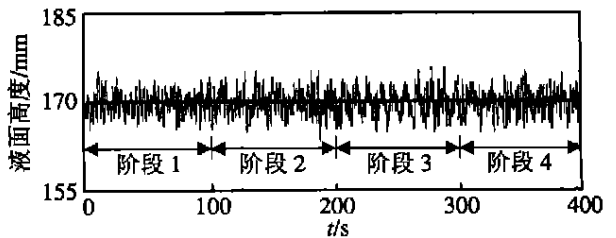


(a) 液面高度的响应

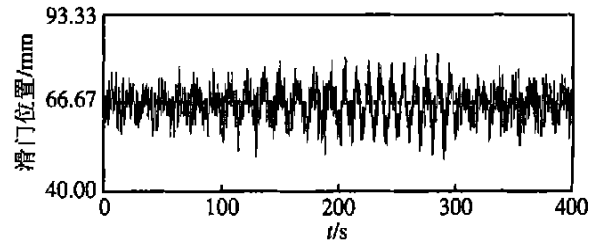


(b) 滑门位置的响应

图 5 在不同周期扰动下 PI 控制的稳态响应



(a) 液面高度的响应



(b) 滑门位置的响应

图 6 在不同周期扰动下模糊控制的稳态响应

3阶段,周期扰动的幅值仍保持在9 mm,但频率变为0.10 Hz;在第4阶段,周期扰动的幅值与频率恢复为最初的4.3 mm及0.07 Hz。在每一阶段,都将一噪声项加入到系统中,系统在PI控制器和模糊控制器下的稳态响应分别如图5和图6所示。在模糊控制下,结晶器液面的震荡均很小,同时在不同的周期扰动下没有明显的不同;而在PI控制器下,结晶器的液面出现了明显的震荡。该结果表明,模糊控制比PI控制对周期扰动具有更好的稳定性和扰动抑制效果。

4.2 对阻塞及阻塞物突然脱落的鲁棒性

喷嘴的阻塞、阻塞物的突然脱落及腐蚀等会引起系统的时变现象,即在不改变滑门位置的情况下,减小或突然增大钢水流入结晶器的速度。本文对该现象的仿真通过改变注入系数 c 来实现。 c 的标称值为1.0,并可由阻塞变小,或由阻塞物的脱落而突然变大。仿真基于如图7所示的阻塞/阻塞物的突然脱落循环实现。每一循环由一个较慢的阻塞过程及

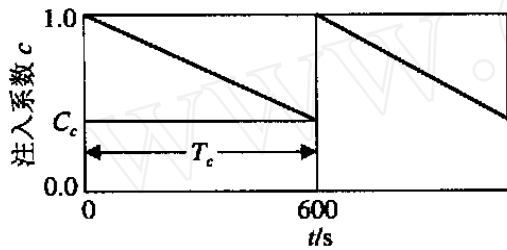
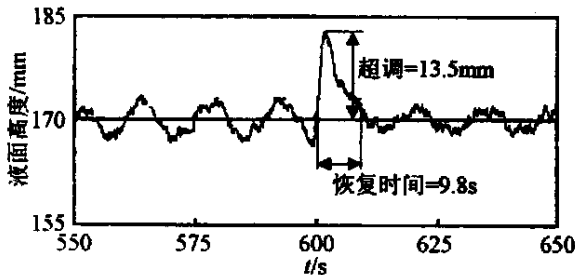
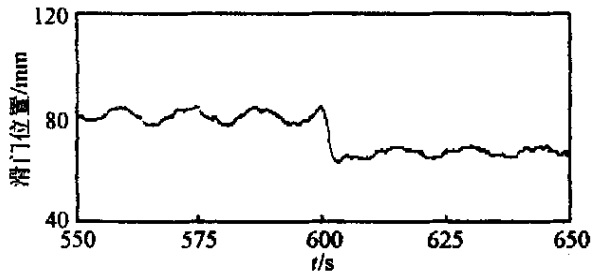


图7 在阻塞/阻塞物突然脱落循环中注入系数的变化



(a) 液面高度的响应

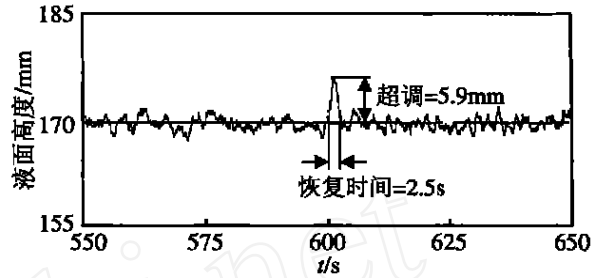


(b) 滑门位置的响应

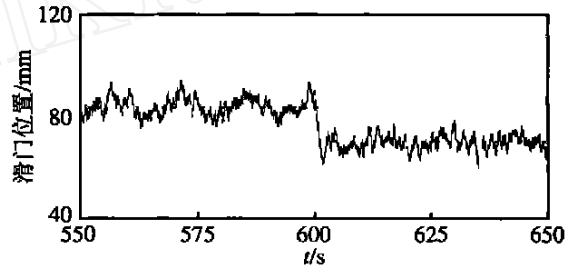
图8 在阻塞/阻塞物突然脱落下PI控制的响应

一个阻塞物的突然脱落过程构成。图中 C_c 和 T_c 分别为最小的注入系数及阻塞时间,并假定 $C_c = 0.45$, $T_c = 600$ s。

仿真结果如图8和图9所示。容易看出,与PI控制相比,模糊控制下结晶器液面的震荡很小,同时具有较快的恢复时间。液面高度的超调从13.5 mm下降为5.9 mm,恢复时间由9.8 s下降到2.5 s。该结果表明,模糊控制比PI控制对过程参数的变化具有更好的鲁棒性。



(a) 液面高度的响应



(b) 滑门位置的响应

图9 在阻塞/阻塞物突然脱落下模糊控制的响应

5 结 论

本文对连铸过程结晶器液面控制提出一种新的模糊控制方法,该方法结构简单,结合了传统的模糊PI与模糊PD的优点,并克服了它们的不足。仿真结果表明,该方法具有很好的扰动抑制及鲁棒性。下一步的工作是对模糊控制器进行优化设计,以使控制系统的性能得到进一步提高。

参考文献(References):

[1] De Keyser R. Improved mould-level control in a continuous steel casting line[J]. Contr Eng Prac, 1997, 5(2): 231-237.
 [2] S F Graebe, G C Goodwin, G Elsley. Control design and implementation in continuous steel casting [J]. IEEE Contr Syst Mag, 1995, 15(4): 64-71.

(下转第174页)

状态如图3所示。由图3可见,由于系统的初始点为(1.0, 1.3),不满足控制条件,因此开始时没有对系统进行控制,系统的状态值根据原系统(11)进行迭代。迭代1次后,系统的状态值变为(0.9, 0.3),已在控制区域内,这时开始对系统进行控制。迭代17次后,系统的状态变量 y_n 的值稳定在不动点0.8上;迭代7次后,系统的状态变量 x_n 的值稳定在不动点0.4上。由此可见,利用上述控制方法可将Hénon映射的状态变量快速稳定在期望点上。

4 结 论

研究表明:在控制区域内,将控制器施加到离散混沌系统(1)上,可按需要配置系统的李雅普诺夫指数。当李雅普诺夫指数均小于零时,系统可收敛到任意的期望点上。对Hénon映射的控制研究表明,该控制方法可以实现系统的快速稳定。

参考文献(References):

- [1] 陈关荣. 控制非线性动力系统的混沌现象[J]. 控制理论与应用(Control Theory & Applications), 1997, 14(1): 1-6
- [2] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(11): 1196-1199
- [3] Garfinkel A, Spano M L, Ditto W L, et al. Controlling cardiac chaos[J]. Science, 1992, 257(28): 1230-1235
- [4] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback[J]. Phys Lett A, 1992, 170(6): 421-428
- [5] Basso M, Genesio R, Tesi A. Stabilizing periodic orbits of forced systems via generalized pyragas controllers[J]. IEEE Trans on Circ Syst I, 1997, 44(10): 1023-1027
- [6] Brandt M E, Chen G. Feedback control of a quadratic map model of cardiac chaos[J]. Int J Bifurc and Chaos, 1996, 6(4): 715-723
- [7] Chen G, Dong X. On feedback control chaotic dynamical systems[J]. Int J Bifurc and Chaos, 1992, 2(2): 407-411
- [8] Chen G, Dong X. From chaos to order: Perspectives and methodologies in controlling chaotic nonlinear dynamical systems[J]. Int J Bifurc and Chaos, 1993, 3(4): 1363-1409
- [9] Yang L, Liu Z. An improvement and proof of OGY method[J]. App Math and Mech, 1998, 19(1): 1-8
- [10] Chen G, Lai D. Feedback control of Lyapunov exponents for discrete-time dynamical systems[J]. Int J Bifurc and Chaos, 1996, 6(7): 1341-1349
- [11] Chen G, Lai D. Making a dynamical system chaotic: Feedback control of Lyapunov exponents for discrete-time dynamical systems[J]. IEEE Trans on Circ Syst I, 1997, 44(3): 250-253
- [12] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985, 16(2): 285-317
- [13] 褚健. 现代控制理论基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 90-92
- [3] T J Manayathara, T C Tsao, J Bentsman, et al. Rejection of unknown periodic load disturbances in continuous steel casting process using learning repetitive control approach[J]. IEEE Trans Contr Syst Tech, 1996, 4(3): 259-265
- [4] J Paiuk, A Janini, M Remorino, et al. The automatic mould level control for a continuous casting process: Practical implementation of different control algorithms [A]. Proc IFAC Automat in Mining, Mineral and Metal Proc[C]. Buenos Aires, 1989. 205-208
- [5] M S Dussud, Galichet, L P Foulloy. Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control[J]. IEEE Trans Contr Syst Tech, 1998, 6(2): 246-256
- [6] N Kiupel, P M Frank, J Wochnik. Improvement of mold-level control using fuzzy logic[J]. Eng Appl of Artif Intell, 1994, 7(5): 493-499
- [7] H X Li, H B Gatland. Conventional fuzzy control and its enhancement[J]. IEEE Trans Syst, Man & Cybern—Part B: Cybern, 1996, 26(5): 791-797

(上接第170页)