

文章编号: 1000-8152(2001)05-0714-03

连铸结晶器液位预测控制*

郭戈

王伟 柴天佑

(甘肃工业大学电子与信息学院·兰州, 730050) (东北大学自动化研究中心·沈阳, 110006)

摘要: 提出一种能克服有色噪声扰动的广义预测控制方法, 并将其用于结晶器液位控制中, 结果表明液位偏差较小, 系统鲁棒性大大改善.

关键词: 结晶器液位; 有色噪声; 广义预测控制; 鲁棒性

文献标识码: A

Predictive Mould Level Control in a Continuous Casting Line

GUO Ge

(College of Electric and Information Engineering, Gansu University of Technology · Lanzhou, 730050, P. R. China)

WANG Wei and CHAI Tianyou

(Research Center of Automation, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

Abstract: A robust predictive control method which can distract the effect of colored noise is suggested in mould level control. It is demonstrated by real time control performance that the level error is admittable and this method has good robustness.

Key words: mould level; colored noise; generalized predictive control; robustness

1 引言(Introduction)

连铸生产过程中保持结晶器液位的稳定是至关重要的, 否则会严重影响铸坯质量. 目前液位控制中常用的是传统的 PID 方法, 它只有在特定工艺条件下才能实现较好的液位闭环控制. 其不足之处在于: 1) 系统开环增益较大, 即使很小的扰动也会引起较大的偏差; 2) 滑动水口等因存在死区或因磨损、腐蚀或堵塞等原因而使系统具有非线性特性; 3) 由于拉速的扰动作用, PID 控制系统的鲁棒性较差. 为了克服这些不足, 近年来国外已有许多研究人员将预测^[1,2]、自适应^[3]以及模糊控制^[4,5]等先进方法用于结晶器液位控制之中, 其控制效果比传统 PID 方法有较大改善. 但是, 它们都未能很好地克服拉速等形成的有色噪声对结晶器液位的影响, 为此, 本文提出一种有色噪声扰动下的鲁棒预测控制方法, 它能够很好地消除拉速等扰动, 实现结晶器液位的鲁棒控制.

2 结晶器液位系统的模型 (Mould level system model)

结晶器液位控制系统的结构如图 1 所示. 图中液压执行机构和液位检测器的特性可分别用下述传递函数来描述

$$G_h(s) = \frac{K_h}{s + \omega_h},$$
$$G_s(s) = \frac{K_s}{s + \omega_s}.$$

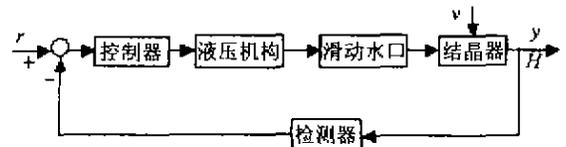


图 1 结晶器液位控制系统

Fig. 1 Mould level control system

由于它们都是惯性环节, 所起的作用相当于带有放大器的延迟环节, 可以认为在结晶器液位控制系统中, 这两部分不会对系统的性能产生根本性的影响, 只会使模型阶次增高两阶, 从而使控制策略在工程中实施的难度增大, 而系统的动态性能则主要由滑动水口和结晶器等决定. 实际上, 对工业过程控制系统的性能有较大影响的并不是检测仪器等的特性, 而是其精度. 因此, 考虑到实际控制的效果和便利, 在确定结晶器液位控制系统的模型结构时本文只考虑滑动水口和结晶等等的特性, 而对于液压执行机构和液位检测器对液位控制系统的影响则只是

* 基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(85-524-02-05), 辽宁省优秀青年科研人才基金(963007), 甘肃工业大学博士基金(139903)资助项目.
收稿日期: 1999-08-24; 收修改稿日期: 2000-06-13.

在模型辨识时进行考虑,事实上文献[3]也采取了同样的做法.此时,经辨识所得的模型参数不仅包含滑动水口和结晶器等的动态特性,也包含液位检测器和液压机构特性对液位系统的影响,也就是说辨识到的系统是将这两部分作为模型成分引入到系统模型中时所得的高阶系统的近似等效低阶系统.

由于滑动水口和结晶器可分别用如下二阶环节和积分环节来描述

$$G_v(s) = \frac{x_v(s)}{u(s)} = \frac{\omega_v^2}{s^2 + 2\xi\omega_v s + \omega_v^2}, \quad (1)$$

$$G_m(s) = \frac{1}{s}.$$

而由物流总量相等原理又可以写出结晶器液位与拉速及阀门开度间的如下关系

$$\begin{aligned} dH/dt &= (Q_1 - Q_2)/A_0 = \\ A_v c \sqrt{2gh}/A_0 - V &= \\ (ax_v + b)c \sqrt{2gh}/A_0 - V. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 A_0 为结晶器截面积, A_v 为阀门有效流通面积, a 和 b 分别为流量阀的有效流通面积系数, c 为钢液流出系数, h 为中间包中的钢液高度, V 为拉坯速度, x_v 为阀门开度. 所以, 如果令

$$\begin{aligned} x_1 &= H, \quad x_2 = x_v, \quad x_3 = \dot{x}_v, \\ w &= -V + b_1, \quad \gamma = H. \end{aligned}$$

则由(1)和(2)式可以写出如下状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{dH}{dt} = a_1 x_2 + w, \\ x_2 = x_3, \\ x_3 = a_2 x_2 + a_3 x_3 - a_2 u. \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} a_1 &= ac \sqrt{2gh}/A_0, \quad a_2 = -\omega_v^2, \quad a_3 = -2\xi\omega_v, \\ b_1 &= bc \sqrt{2gh}/A_0. \end{aligned}$$

将上述方程整理可以得到结晶器液位控制系统的状态空间方程模型

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ew, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (4)$$

式中 w 为由拉速等引起的有色扰动, 且

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_2 & a_3 \end{bmatrix},$$

$$B = [0 \quad 0 \quad -a_2]^T,$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0], \quad E = [1 \quad 0 \quad 0]^T.$$

3 鲁棒预测控制(Robust predictive control)

由于连铸结晶器液位控制系统开环增益较大且是随时变化的,其流量执行机构也具有非线性,所以常用的PID控制方法以及其它方法都不能很好地消除拉速等有色扰动的影响.为此,本文将包含有色噪声项的系统CARIMA模型进行等效化处理,然后在此等效模型的基础上用标准GPC方法求得最优控制律.

首先将结晶器液位系统的模型离散化为如下CARIMA模型

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta}w(k). \quad (5)$$

其中 $\Delta = 1 - z^{-1}$ 代表结晶器积分特性, $w(k)$ 为主要由拉速等引起的有色噪声扰动,结合连铸机的实际工艺条件经辨识得到如下模型参数

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 - 2.9128z^{-1} + 2.8559z^{-2} - 0.9130z^{-3}, \\ B(z^{-1}) &= 0.1012 + 0.3957z^{-1} + 0.0967z^{-2}, \\ C(z^{-1}) &= 1, \quad d = 1. \end{aligned}$$

由于标准的GPC方法要求噪声为均值为零的白噪声,而液位系统中存在的是有色噪声,所以必须对有色噪声进行白色化等效处理,然后才可以运用标准的GPC方法设计液位最优预测控制律.这里采用文献[6]提出的等效化综合方法来解决该有色噪声扰动下的GPC问题,将有色噪声 $w(k)$ 等效为由具有零均值的白噪声 $\xi(k)$ 经过一个线性环节 $H(z^{-1})$ 所产生,即有

$$w(k) = H(z^{-1})\xi(k), \quad (6)$$

线性环节 $H(z^{-1})$ 称作成形滤波器,其分子分母的根都应当在单位圆内,具体选择参见文献[6].这样就可将模型化为

$$A(z^{-1})y'(k) = B(z^{-1})u'(k-d) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta}\xi(k). \quad (7)$$

其中

$$y'(k) = H^{-1}(z^{-1})y(k), \quad (8)$$

$$u'(k) = H^{-1}(z^{-1})u(k). \quad (9)$$

由于变化后模型中的噪声为白噪声,所以就可利用标准的GPC控制策略设计控制器.在该模型的基础上得到 j 步超前输出预测为

$$y' = Gu' + p'. \quad (10)$$

其中 G 是系统的单位阶跃响应系数矩阵,可通过实验测得,这里由模型系数求得, p' 为输出预测序列中的自由响应构成的向量.

连铸是一个复杂的工业过程,系统的自由响应受到高频测量噪声的影响,为了克服这种扰动,本文在求解最优预测之前,首先对自由响应序列进行了低通滤波,这大大提高了系统的鲁棒性.这一过程相当于构造如下的准则函数:

$$J_f = E \left\{ \sum_{j=d}^{N_p} \gamma [\hat{y}_{\text{free}}(k+j) + \frac{F_n(z^{-1})}{F_d(z^{-1})} \hat{y}_{\text{free}}(k+j) - r_{k+j}]^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda [\Delta u_{k+j}]^2 \right\} \quad (11)$$

其中 $\hat{y}_{\text{free}}(k+j)$ 为 j 步超前最优预测输出中的自由响应(即与当前控制信号无关的部分), $\hat{y}_{\text{free}}(k+j)$ 为预测输出中的约束响应(即与当前控制信号相关的部分),低通滤波器 $F_n(z^{-1})/F_d(z^{-1})$ 根据结晶器液位系统中存在的噪声的频率和幅值来选取,本文根据连铸过程的工艺条件选 $N_p = 3, N_u = 2, \gamma = 0.65$ 以及 $\lambda = 0.35$.

最后得到最优控制律为:

$$u'(k) = [\gamma G^T G + \lambda I]^{-1} \gamma G^T \left[r - \frac{F_n}{F_d} p' \right] \quad (12)$$

然后根据前面的等效化方程 $u(k) = H(z^{-1})u'(k)$ 就可得到连铸机结晶器液位有色扰动系统的最优控制律:

$$u(k) = H(z^{-1})u'(k) = H(z^{-1})[\gamma G^T G + \lambda I]^{-1} \gamma G^T \left[r - \frac{F_n}{F_d} p' \right] \quad (13)$$

4 实施结果(Implementation results)

本文所研究的连铸机是结晶器为 $150\text{cm} \times 150\text{cm}$,正常拉速为 $1 \sim 3 \text{ m/min}$ 的弧形方坯连铸机.流量阀的有效流通面积系数为 $a = 0.5$ 以及 $b = 1.1$,阻尼系数为 $\xi = 0.68$,自然振荡角频率 $\omega_n = 6.14$,钢液流出系数 $c = 0.57$.工艺要求液位偏差应当小于 10mm ,而且波动不得太剧烈.由于有较强的扰动,在原有 PID 控制系统中,液位总是在较大范围内存在着波动(见图 2),只有 48% 的铸坯满足上述工艺要求.图 3 和图 4 为采用本文的控制方法对结晶器液位进行控制时液位响应的仿真曲线和实施记录曲线.由图 3 和图 4 可见,液位很快便达到了设定值,

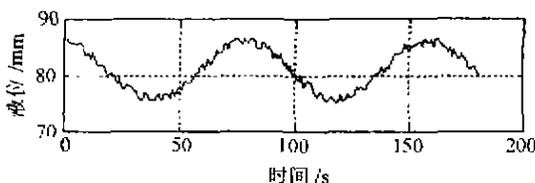


图 2 常规 PID 控制

Fig 2 Traditional PID control

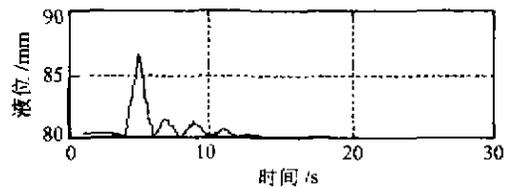


图 3 CGPC 控制(仿真)

Fig. 3 CGPC control (in simulation)

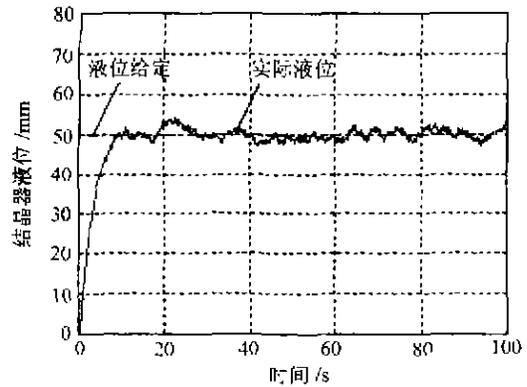


图 4 CGPC 控制(实施)

Fig. 4 CGPC control (in practice)

最大液位偏差约为 6mm ,而且没有出现剧烈的液位波动,所以满足工艺指标要求.

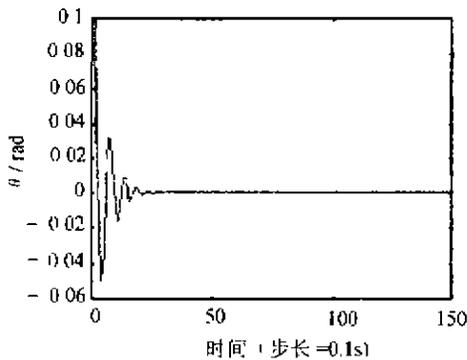
更换钢包和拉速变化时的液位控制始终是个难题,原有自动控制系统往往无法使液位准确地稳定到给定值,操作人员只好手动操作.实施中我们发现,用本文的方法时液位虽然也会偏离设定值,但几秒钟之内就可回到设定值,且没有出现较大的液位偏差.只是由于滑动水口和液位系统的惯性,使得液位回到稳定值后常常又会反超稳定值几毫米,而且超出之后再回到稳定值所需的时间往往比较长.

5 结论(Conclusion)

本文设计的结晶器液位控制策略可以克服有色噪声对液位的影响,使系统的鲁棒性大大改善.实施结果表明该方法简单可靠,经济实用,对加速我国连铸技术的改进具有重要意义,值得大力推广.

参考文献(References)

- [1] Thomas J and Joseph B. Generalized predictive control with dynamic filtering for process control applications [A]. Proceedings American Control Conference [C], Chicago, 1993, 1741 - 1745
- [2] Robin D K. Predictive mould level control in a continuous steel casting line [A]. Preprints IFAC 13th World Congress [C], San Francisco, 1996, 487 - 492
- [3] Hesketh T, Clements D J and Williams R. Adaptive mould level control for continuous steel slab casting [J]. Automatica, 1993, 29 (4): 851 - 864



(b) Mamdani方法

图3 仿真结果对比

Fig. 3 Comparative simulation results

3(b)所示的结果,不难看出,本文方法的效果明显更优。

6 结论(Conclusion)

本文指出,传统模糊控制中采用某一固定运算(如 MAX, MIN)作为与/或运算是片面的,我们构造了一种新的连续可控的 T/S 范数,使得运算形式由运算量的相关性决定,从而避免了运算选择的盲目性。我们将这种连续可控的 T/S 范数用在模糊控制中替代传统的 Mamdani 法,由仿真实验可以看出,本文方法比传统的 Mamdani 法更优。

本文利用遗传算法确定相关系数达到了引入相关系数对于模糊控制是一种改进的目的,下一步我们将继续研究更好的确定相关系数的方法。

参考文献(References)

- [1] Averkin A N. Decision making based on multivalued logic and fuzzy logic. architectures for semiotic modeling and situation analysis in

- large complex systems [A]. Proc. 95th IEEE International Symposium on Intelligent Control Workshop[C], Monterey, Mexico, 1995
- [2] He luacan, Lu Yonghuan and He Daqing. Generalized logic in experience thinking [J]. Science in China (E), 1996, 39(3): 225 - 234
- [3] Buckley J J and Siler W. A new t-norm [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 100(1-3): 283 - 290
- [4] Yager Ronald R. Analysis of flexible structured fuzzy logic controller [J]. IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics, 1994, 24(7): 1035 - 1043
- [5] Jin Yaochu and Jiang Jinpin. The analysis of GA-based fuzzy controller[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1997, 10(1): 75 - 80 (in Chinese)
- [6] Seng Teo Lian, Khalid Marzuki and Yusof Rubiyah. Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithms with an application to a coupled-tank liquid-level control system [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 11(4): 519 - 529
- [7] Chiang D A and Lin N P. Correlation of fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 102(2): 221 - 226
- [8] Yu Chunhai. Correlation of fuzzy numbers [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 55(1): 303 - 307
- [9] Hong D H and Hwang S Y. Correlation of intuitionistic fuzzy sets in probability space[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 75(1): 77 - 81
- [10] Han Shenglian, Hu Guosi and Wang Jianqiao. Features of fuzzy control and the problems to be solved [J]. Control and Decision, 1998, 13(5): 558 - 562 (in Chinese)

本文作者简介

陈丹 1975年生,分别于1998年,2000年获得西北工业大学学士和硕士学位,现于西北工业大学计算机科学与工程系攻读博士学位。主要研究方向是计算机软件与理论,人工智能,智能控制。

何华灿 1938年生,现为西北工业大学教授,博士生导师。主要研究方向为人工智能的基础理论与应用,泛逻辑理论。

王晖 1971年生,1998年获得西北工业大学硕士学位,现于西北工业大学计算机科学与工程系攻读博士学位。主要研究方向是人工智能,并行编译

(上接第716页)

- [4] Kayako O, Yoshilusa O and Masami K. Diagnostic expert system for mould level control equipment in continuous caster [A]. Proceedings 6th Int. Iron and Steel Congress [C], Nagoya, 1990, 331 - 338
- [5] Dussud M, Simonin P and Galichet S. Fuzzy logic control of continuous casting installations [A]. Preprints IFAC 13th World Congress [C]. San Francisco, 1996, 469 - 474
- [6] Fuxiang Ch. On random control problem with disturbance of colored noises [J]. Journal of Automation, 1986, 12(3): 224 - 228 (in Chinese)
- [7] Wei W. Generalized Predictive Control Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)

本文作者简介

郭戈 1972年生,1994年东北大学自动控制系本科毕业,1998年于东北大学自动化研究中心获博士学位,现为甘肃工业大学副教授。目前的主要研究方向是复杂工业过程的建模与控制,智能控制理论与应用等。

王伟 1955年生,1988年在东北大学获工学博士学位,1990年至1992年在挪威工学院从事博士后研究,现为东北大学教授,博士生导师、国家自然科学基金委员会委员。主要研究方向为自适应控制理论与应用,预测控制等。

柴天佑 见本刊2001年第3期第352页。