

文章编号: 1001-0920(2001) 02-0211-04

# 预测控制在连铸结晶器液位控制中的应用研究

王朝利<sup>1</sup>, 阳思聪<sup>1</sup>, 朱发俊<sup>2</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 宝钢技术中心, 上海 201900)

**摘 要:** 介绍利用预测控制算法之一——增量型模型算法(IMAC)设计宝钢一连铸结晶器液位控制系统的过程。IMAC 的引入使结晶器液位控制独具特色。仿真和对比研究表明, 引入 IMAC 后系统的控制效果优于原先的 PID 控制, 结晶器液位预测控制前景看好。

**关键词:** 预测控制; 控制器; 结晶器; 仿真; 连铸

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

## Predictive Control to Molten Steel Level in the Continuous Casting Mould

WANG Chao-li<sup>1</sup>, YANG Si-cong<sup>1</sup>, ZHU Fa-jun<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Technology Center of Baosteel, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** The increment model arithmetic control(IMAC), which is the one of predictive control arithmetic, is applied to design the mould molten steel level control system of the first continuous casting plant of Baosteel. It is a feature to apply the IMAC to the mould molten steel level control. The simulation and comparison results show that the IMAC control system is prior to the old PID control system and the former is promising to be applied into the mould molten steel level control.

**Key words:** predictive control; controller; mould; simulate; continuous casting

## 1 引 言

随着科学技术的发展, 市场对产品质量的要求越来越高。钢厂中连铸环节的产品质量直接影响整个公司的产品质量, 而连铸的产品质量主要受制于结晶器液位的控制精度以及整个连铸过程的自动化程度。因此, 提高结晶器液位的控制精度和整个连铸过程的自动化程度, 已经势在必行。

预测控制是在计算机技术迅速发展、控制理论日臻成熟的情况下发展起来的一类新型计算机控制

算法。它以预测控制模型、滚动优化、反馈校正为基础, 经历了约 20 年的发展历程, 在工业过程控制中得到了成功的应用。本文基于宝钢一连铸的现场工艺和数据, 对预测控制在结晶器液位控制中的应用进行研究。

## 2 系统组成

结晶器液位控制系统主要包括两个控制子系统: 中间包重量控制子系统和结晶器内钢水液位控制子系统。这两个子系统物理上相互独立。本文仅

收稿日期: 2000-04-29; 修回日期: 2000-09-04

作者简介: 王朝利(1959—), 男, 山东德州人, 副教授, 从事电力拖动及其自动化研究; 阳思聪(1975—), 湖南长沙人, 从事分散控制系统研究。

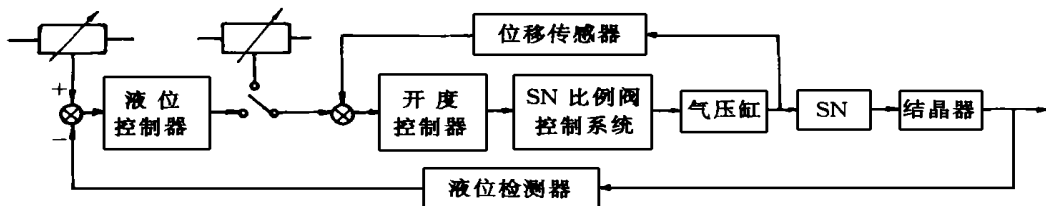


图1 连铸结晶器液位控制原理

研究预测控制在结晶器内钢水液位控制的作用。结晶器内钢水液位控制系统原理如图1所示。

结晶器液位控制主要有调节拉坯速度和调节钢水流入量两种方式，也有以调节流入量为主、调节拉速为辅的复合控制方式。宝钢一连铸采用调节钢水流入量液位控制方式，这种方式是根据钢水液位变化调节中间包滑动水口开度，以改变钢水流入量，稳定结晶器内钢水的高度。

### 3 结晶器液位预测控制系统

#### 3.1 控制策略设计

模型算法控制(MAC)是一种出现较早的预测控制方法。它包括:1)内部模型;2)反馈校正;3)滚动优化;4)参考输入轨迹等几部分。MAC采用基于脉冲响应的非参数模型作为内部模型,用过去和未来的输入输出误差进行反馈校正,再与参考输入轨迹进行比较,应用二次性能指标进行滚动优化,然后计算当前时刻应施加于系统的控制动作,完成整个控制循环。由于这种算法先在线预测系统未来的输出状态,再确定当前时刻的控制动作,所以具有预见性。其系统原理简图如图2所示。

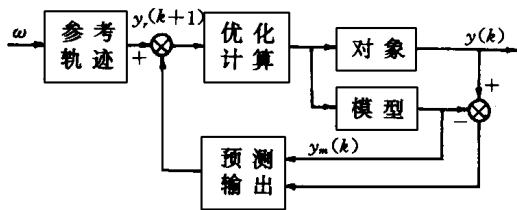


图2 模型算法控制系统原理简图

模型算法控制分为单步模型算法控制、多步模型算法控制、增量型模型算法控制等多种。由于单步模型算法控制包含的控制信息量少,因而控制效果和鲁棒性都较多步模型算法控制和增量型模型算法控制差,而且单步模型算法和多步模型算法控制都无法消除扰动造成的稳态偏差,不能无偏差跟踪参考输入轨迹;而增量型模型算法控制(IMAC)恰好能解决这些问题。

虽然IMAC算法使用的是非参数模型,但选定数据步长和控制步长后,离线设计时可以先通过模型辨识得到参数模型,然后将参数模型转化为非参数模型。本文就是将辨识所得到的参数模型转化为脉冲响应模型,然后利用脉冲响应模型设计IMAC控制器。

#### 3.2 结晶器液位预测控制系统设计

利用上述控制策略设计结晶器液位预测控制系统,其结构框图如图3所示。

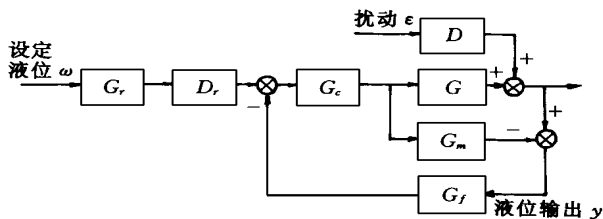


图3 结晶器液位预测控制系统

图中,  $G_r = \frac{1-\alpha}{1-\alpha z^{-1}}$  为输入柔化函数,  $G$  为对象传递函数,  $G_c$  为预测控制器,  $G_f = \frac{1-\alpha_f}{1-\alpha_f z^{-1}}$  为反馈传递函数,  $G_m$  为对象模型传递函数,  $D$  为噪声传递函数。

根据辨识结果,对象模型为

$$G = \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} \quad (1)$$

噪声传递函数  $D = 1 + d_1 z^{-1}$ 。

#### 3.3 IMAC控制器

采用IMAC算法,通过优化计算可得最优控制律<sup>[1]</sup>

$$\Delta U(k) = (G^T Q G + \lambda)^{-1} G^T Q [Y_r(k+1) - F_0 U(k-1) - h e(k)] \quad (2)$$

设  $g_i$  为脉冲函数序列,并由下式求得

$$\begin{cases} \hat{g}_1 = \hat{b}_1 \\ \hat{g}_2 = \hat{b}_2 - \hat{a}_1 \hat{g}_1 \\ \vdots \\ \hat{g}_k = \hat{b}_k - \hat{a}_1 \hat{g}_{k-1} - \hat{a}_2 \hat{g}_{k-2} - \dots - \hat{a}_{k-1} \hat{g}_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \hat{b}_k = 0, & k > n_b \\ \hat{a}_i = 0, & i < n_a \end{cases} \quad (4)$$

对最优控制律进行数学处理, 然后将控制器转化为最小化模型<sup>[1]</sup>, 得

$$\begin{cases} u(k) = \frac{D_r(z^{-1})y_r(k+P) - h_f e(k)}{F(z^{-1})} \\ G_c(z^{-1}) = \frac{d_s \hat{A}(z^{-1})}{P(z^{-1})} \end{cases} \quad (5)$$

以上述公式为依据, 利用现场采集的数据, 经计算可得控制器的最小化模型为

$$G_c = \frac{b_{c0} + b_{c1}z^{-1} + b_{c2}z^{-2} + b_{c3}z^{-3}}{1 + a_{c1}z^{-1} + a_{c2}z^{-2} + a_{c3}z^{-3} + a_{c4}z^{-4}} \quad (6)$$

### 3.4 控制系统的稳定性分析

令

$$1 + a_{c1}z^{-1} + a_{c2}z^{-2} + a_{c3}z^{-3} + a_{c4}z^{-4} = 0 \quad (7)$$

解方程(7) 可得出控制器的开环极点

$$|z_i| < 1, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

由此可知控制器是稳定的。因此, 可以调节反馈滤波器参数以保证控制系统稳定。

### 3.5 控制系统的鲁棒性分析

当被控对象模型  $\hat{G}(z^{-1})$  受参数估计不准、参数时变或存在非线性等因素影响时, 将与实际对象失配。经数学推理知, 闭环系统的稳定性取决于下列方程组的解<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} 1 + G_c(z^{-1})G_f(z^{-1})h_f[G(z^{-1}) - \hat{G}(z^{-1})] = 0 \\ G_c(z^{-1}) = \frac{d_s}{f(z^{-1})} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} G_f(z^{-1}) = \frac{1 - \alpha_f}{1 - \alpha_f z^{-1}} \\ G(z^{-1}) = z^{-1}g(z^{-1}) \\ \hat{G}(z^{-1}) = z^{-1}\hat{g}(z^{-1}) \\ h_f = 1 \end{cases} \quad (10)$$

由方程组(9), (10) 可得闭环特征方程为

$$P(z^{-1}) = (1 - \alpha_f z^{-1})f(z^{-1}) + z^{-1}d_s(1 - \alpha_f)[g(z^{-1}) - \hat{g}(z^{-1})] \quad (11)$$

当模型失控, 即  $G(z^{-1}) \neq \hat{G}(z^{-1})$  时, 系统的稳定性主要由滤波器  $G_f(z^{-1})$  的参数  $\alpha_f$  决定。因此, 可调整  $\alpha_f$  的大小来调整系统的鲁棒性。

### 3.6 控制系统的稳态误差

用 IMAC 设计的系统误差特性为

$$E(k) = \frac{(F(z^{-1}) - z^P D_r(z^{-1})) + \frac{G_f(z^{-1})h_f(G(z^{-1}) - \hat{G}(z^{-1}))}{G_f(z^{-1})h_f(G(z^{-1}) - G(z^{-1}))}y_r(k) - \frac{F(z^{-1}) - G_f(z^{-1})h_f G_f(z^{-1})}{F(z^{-1}) + G_f(z^{-1})h_f(G(z^{-1}) - G(z^{-1}))}\alpha(k)}{(12)}$$

稳定时,  $k \rightarrow \infty, z \rightarrow 1$ , 可得  $E(\infty) = 0$ 。所以, 无论是否存在模型偏差, 系统都能实现无偏差跟踪。

## 4 仿真研究

结晶器液位控制的基本要求是: 液位波动  $\pm 10\text{mm}$ ; 自动启动时, 液位波动  $\pm 5\text{mm}$ ; 波动平稳。

### 4.1 结晶器液位控制系统仿真

利用现场采集的数据作为基本数据, 对设计的结晶器液位控制系统进行仿真研究。设计中取  $\alpha = 0.1, \alpha_f = 0.5$ , 仿真结果如图 4 所示。其中, ① 为结晶器设定液位值, ② 为系统控制量, ③ 为结晶器液位仿真输出。

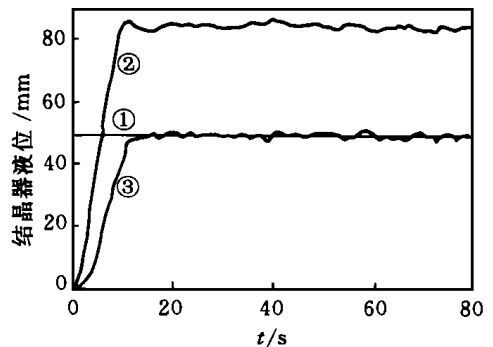


图 4 结晶器液位系统仿真

由图 4 可以看出:

- 1) 控制系统能较好地调节系统的输出, 使其达到预定值;
- 2) 系统的仿真输出在  $t = 15\text{ s}$  附近达到最大值 51, 其超调量  $\delta = (51 - 49) / 49 = 4.08\%$ , 符合结晶器液位波动在  $5\text{ mm}$  之内的工艺要求, 不会造成系统的过大震荡, 从而避免了对执行机构造成机械损害;
- 3) 系统调整时间  $t_s = 16\text{ s}$ , 即 16 个采样周期, 满足控制要求。

### 4.2 协调预测控制系统与变结构 PID 控制系统的比较

仿真结果比较如图 5 所示。其中, ④ 为结晶器

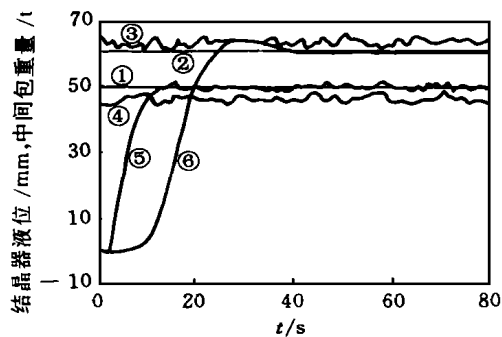


图5 仿真结果比较

液位设定值, ②为中间包重量设定值, ③为中间包重量现场输出, ④为结晶器液位现场输出, ⑤为结晶器液位仿真输出, ⑥为中间包重量仿真输出。

系统稳定工况下结晶器液位的均值和方差分析见表1。

表1 均值和样本方差

性质	均值	样本方差
结晶器液位设定值	49.914 8	0.649 2
结晶器液位现场数据	46.453 9	1.221 1
结晶器液位仿真输出	49.888 3	1.137 1

## 5 结 语

通过预测控制在连铸结晶器液位控制中的应用研究, 可得出如下结论:

1) 与现场使用的PID控制系统相比, 结晶器液位控制精度明显提高, 液位波动较小且没有稳态误差, 能实现无稳态偏差调节和跟踪;

2) 由对系统稳定后进行均值和方差分析可知, 采用预测控制, 无论是系统的稳态性能还是系统的暂态性能都较为理想。

3) 从上述分析可知, 采用预测控制能获得比现场控制系统更好的效果, 预测控制在钢厂连铸中将有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 舒迪前. 预测控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 熊毅刚. 板坯连铸[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [3] 金继文, 姚建青, 王建跃. 宝钢连铸结晶器液位控制系统[J]. 冶金自动化, 1992, 16(6): 22-26.
- [4] 王伟, 郭戈, 柴天佑. 连铸过程的建模与控制[J]. 控制与决策, 1997, 12(增刊): 385-390.

## 第20届中国控制会议征文通知

由中国自动化学会控制理论专业委员会主办的中国控制会议每年举办一次, 第20届中国控制会议将于2001年8月在大连举行。

会议组织者: 中国自动化学会控制理论专业委员会; 大连理工大学信息与控制研究中心。

征文范围: 非线性系统, 最优控制, 鲁棒控制,  $H$  控制, 预测控制, 随机控制, 自适应控制, 模型降阶, 优化方法, 系统建模与辨识, 稳定性分析, 变结构控制, 分布参数系统, DEDS 与 HDS, 大规模、复杂系统, 过程控制, 模糊系统与控制, 神经网络, 专家智能控制, CIMS, 机器人控制, 故障检测与诊断, 电力系统, 交通系统, 社会经济系统, 生态环境系统, 以及上述各方面的实际应用。

论文要求: 1. 采用10磅字体, 单倍行距, A4纸双栏打印; 2. 全文不超过5页, 中英文均可, 一式三份; 3. 请另纸写明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址、摘要和关键词3至5个; 4. 特邀组的作者需提供1000字的摘要, 论文主题应鲜明、集中。

关肇直奖: 每年评定一次, 每次获奖名额不多于两名。授奖对象为在中国控制会议上宣读论文的年龄不超过40周岁的青年作者(包括合作者)。凡申请“关肇直奖”的论文, 需在投稿时注明, 提交论文一式九份, 并附工作证(学生证)和身份证复印件, 以及至少一份同行教授级专家的推荐意见。

论文出版: 拟正式出版会议论文集, 其中部分论文拟在《自动化学报》或《控制理论与应用》增刊上发表。

截稿日期: 2001年4月1日

录用通知: 2001年5月15日

激光稿寄到时间: 2001年6月15日

联系地址: 100080 北京中关村中科院系统科学所会议秘书处

联系人: 刘智敏

电话: 86-10-62532161

传真: 86-10-62587343

E-mail: lzm@iss03.iss.ac.cn

WWW: <http://iss03.iss.ac.cn/ccc2001>

中国控制会议秘书处