

连铸过程的一种串级控制方法^①

郭 戈 乔俊飞 王 伟
(东北大学自动化研究中心, 沈阳 110006)

摘 要 以模型降阶和内模控制为基础设计了内回路滑动水口液压系统 PID 控制器, 采用模糊预测控制策略设计了外回路结晶器液位系统的串级控制器, 同时对中间包重量进行了前馈补偿。该方法消除了内回路的微分冲击现象和外回路的积分累积效应, 并克服了拉速等有色噪声扰动。实验证明该控制方法较为理想, 有很高的实用价值。

关键词 串级控制 模型降阶 内模控制 微分冲击 积分累积

中图法分类号 TG249 TP273

连铸生产中, 钢水通过钢包水口从钢包注入中间包, 进而经由中间包水口流入结晶器, 然后在冷却水作用下凝固形成铸坯, 并由拉坯机拉出结晶器。在此过程中, 结晶器钢水液位必须保持稳定, 否则将会影响铸坯质量。结晶器液位控制系统中采用液压伺服机构作为执行机构, 在结晶器液位发生变化时, 通过该执行机构来调节滑动水口的开度, 从而使液位输出稳定在设定值。

由于结晶器液位系统开环增益较大、具有非线性时变特性, 且滑动水口液压执行机构、中间包重量及拉坯速度等都会对结晶器液位产生扰动, 因而现有的结晶器液位 PID 控制系统的鲁棒性较差^[1, 2]。虽然诸如自适应控制^[3, 4]和模糊控制^[5]等智能控制方法已经用于连铸结晶器液位控制之中, 但实践表明它们无法克服拉速等形成的噪声扰动, 而且计算量大、不便于设计和实施。

本文设计的结晶器液位串级控制系统的原理如图 1 所示, 其中, C_4 是为了克服滑动水口非线性流量特性影响而设计的一个非线性补偿环节; C_3 是为消除中间包钢水液位(或中间包重量)对结晶器液位的影响而设计的前馈控制

器; C_2 为液压伺服机构和滑动水口位移控制器, 它采用模型降阶和参数整定方法设计; C_1 是采用模糊预测控制策略设计的结晶器液位控制器, 它主要用来克服由拉坯速度和未建模动态等引起的噪声扰动。实验表明, 采用这种串级控制器时, 即使在拉速发生变化或改变结晶器以及更换钢包时结晶器液位也可稳定在给定值。关于外回路控制器 C_1 和 C_4 的详细设计参见文献[5], 这里讲述内回路滑动水口位移控制器和中间包重量前馈控制器的设计。

1 控制器设计

滑动水口液压执行机构、中间包重量等都会对结晶器液位产生扰动, 因而在结晶器液位控制系统设计时必须首先解决滑动水口液压执行机构和中间包重量的有效控制。

1.1 中间包重量前馈控制

中间包钢水液位(或中间包重量)采用称重法测量很容易, 而且它与结晶器液位之间的关系也比较明确, 具有如下传递函数:

$$G_t(s) = \frac{k_t}{s(s + \tau_t)} \quad (1)$$

① 辽宁省优秀青年科研人才培养基金 963007 和国家“九五”科技攻关项目 85-524-02-05

收稿日期: 1997-11-17; 修回日期: 1998-08-10 郭戈, 男, 26岁, 博士

所以本文对中间包钢水重量设计了前馈控制器 C_3 , 使得

$$C_3 G_t(s) = 1 \tag{2}$$

由上述关系可得

$$C_3 = \frac{1}{G_t(s)} \tag{3}$$

1.2 滑动水口液压伺服机构控制

频率响应实验显示, 液压伺服机构是一个二阶快速平稳非线性系统, 输入信号幅值越大, 该机构的无阻尼自然振荡频率就越高。而且该系统开环不稳定, 具有明显的滞后特性。其传递函数如下

$$G_h(s) = \frac{k_h}{s^2 + 2\xi\omega_h s + \omega_h^2} e^{-sL_h} \tag{4}$$

式中 ω_h 和 ξ 分别为液压伺服系统的无阻尼自然振荡角频率和阻尼系数, k_h 和 L_h 分别为比例系数和时滞。滑动水口与液压机构控制信号之间的关系也通常用如下二阶环节来描述。

$$G_v(s) = \frac{k_v(s + \tau_{v1})}{(s + \tau_{v2})(s + \tau_{v3})} \tag{5}$$

由于滑动水口流量系统(包括液压机构)是一个高阶系统, 所以设计控制器时首先要对该系统进行降阶。设高阶系统的传递函数可写成如下形式:

$$G(s) = k \left[\prod_{k=0}^m (s + z_k) \right] / \left[\prod_{k=0}^n (s + p_k) \right]$$

$$= k' \frac{\sum_{k=0}^m b_k s^k}{\sum_{k=0}^n a_k s^k} \tag{6}$$

其中 $z_k \leq z_{k+1}$, $p_k \leq p_{k+1}$, $b_0 = 1$, $a_0 = 1$, $n \geq m$ 。通常采用下面两种形式之一作为该系统的降阶模型。

$$\begin{aligned} \tilde{G}_1(s) &= k \frac{z_1(s)}{p_1(s)} \\ &= k \frac{(s + z_1)}{(s + p_2)(s + p_1)} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \tilde{G}_2(s) &= k' \frac{z_2(s)}{p_2(s)} \\ &= k' \frac{(b_1 s + 1)}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \end{aligned} \tag{8}$$

但实际上这样做是不够准确的, 因为如果 $\tilde{G}(s)$ 是 $G(s)$ 降阶后的传递函数, 则要取得理想的控制性能^[6], 就必须满足 $|\tilde{G}(j\omega)| \approx |G(j\omega)|$ 。

这里先给出下面的重要结论:

对于具有上述传递函数模型的系统, 在低频段内有下面的不等式成立。

$|\tilde{G}_1(j\omega)| \geq |G(j\omega)|$, $|\tilde{G}_2(j\omega)| \leq |G(j\omega)|$, 即 $|\tilde{G}_1(j\omega)|$ 是 $|G(j\omega)|$ 的上界, $|\tilde{G}_2(j\omega)|$ 是 $|G(j\omega)|$ 的下界。

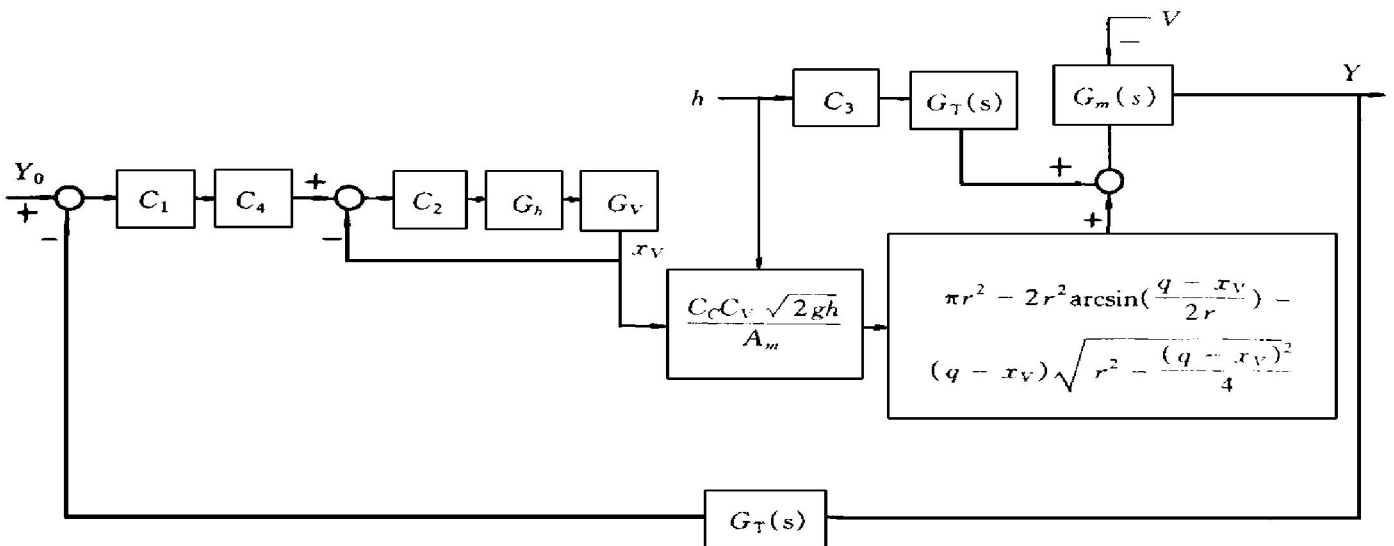


图1 结晶器液位控制系统原理图

Fig. 1 Mould level control system

上述结论的详细证明见文献[7]。现在设

$$\begin{aligned} \tilde{G}(s) &= \frac{z(s)}{p(s)} \\ &= \frac{kz_1(s) + k'z_2(s)}{p_1(s) + p_2(s)} \end{aligned} \quad (9)$$

则可以证明, 在上述不等式成立的频段内有

$$|\tilde{G}_2(jw)| \leq |\tilde{G}(jw)| \leq |\tilde{G}_1(jw)| \quad (10)$$

即 $|\tilde{G}(jw)|$ 与 $|G(jw)|$ 最为接近, 在一定频带内可认为 $|\tilde{G}(jw)| \approx |G(jw)|$ 。

对于滑动水口流量系统, 本文根据这一结论对 $G(s) = G_v(d)G_h(s)$ 进行了模型降阶, 在此基础上采用内模控制策略设计控制器为

$$G_c(s) = \frac{F(s)\tilde{G}_{inv}(s)}{1 - F(s)\tilde{G}_{inv}(s)\tilde{G}(s)} \quad (11)$$

$\tilde{G}_{inv}(s)$ 是 $\tilde{G}^{-1}(s)$ 的一个稳定近似函数, $F(s)$ 为低通滤波器。这样, 滑动水口位移闭环控制系统的特征多项式就变为

$$C_{cls}(s) = 1 + F(s)\tilde{G}_{inv}(s)\Delta G(s)$$

式中 $\Delta G(s) = G(s) - \tilde{G}(s)$ 。

对于任意 w , 只要满足了不等式 $|F(jw)\tilde{G}_{inv}(jw)\Delta G(jw)| < 1$, 由小增益定理可知闭环系统是稳定的。通常取 $F(s)$ 为 $F(s) = 1/(fs + 1)^2$, 参数 f 的取值除应满足这一不等式外, 还应使下面的性能指标最小^[8], 即

$$J = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |1 - F|^2 |F\tilde{G}_{inv}\Delta G|^2 \times |R(jw)|^2 dw \quad (12)$$

式中 $R(jw)$ 是滑动水口位移给定量的复频域形式。

2 仿真实验

经辨识得到所研究的连铸机各有关控制环节的参数如下:

$$G_h(s) = \frac{372.1}{s^2 + 26.2s + 372.1} e^{-0.5s}$$

$$G_v(s) = \frac{0.1007(s + 12.5)}{(s + 0.02)(s + 0.925)}$$

$$G_t(s) = \frac{0.017}{s(s + 0.458)}$$

在此基础上, 采用本文的串级控制策略对滑动水口液压伺服机构和结晶器液位进行控制, 并针对结晶大小、拉速变化以及更换钢包等不同工艺条件对结晶器液位控制系统进行了较为深入的实验研究。

液压伺服系统的典型性能如图 2(a) 所示, 由图中可见其执行动作中有一些毛刺, 这是因为结晶器液位在外部扰动作用下处于波动之中, 所以滑动水口液压伺服机构控制回路的设定值也不断地发生变化, 这就使得滑动水口的调节动作出现跳跃。这种现象称为微分冲击。对于滑动水口而言, 应尽量避免微分冲击。为此, 我们在前面设计的 PID 控制器的微分项中用滑动水口位移的输出量取代位移调节偏差, 使控制器变为

$$U(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) - k_p \frac{T_d s}{1 + \beta s} X(s) \quad (13)$$

式中 $X(s)$ 为滑动水口位移, β 为调节参数。由于这里微分项中不包括执行机构设定值, 所以它的阶跃变化不会使控制输出产生微分冲击, 从而使滑动水口的调节比较平稳。

整定前后液压伺服系统性能的比较如图 2 所示, 可见整定前液压伺服机构的动作具有明显的滞后, 且其性能曲线上有一些毛刺; 而整定后的控制系统则能快速跟随输入信号。这种方法的一个明显优点是当输入信号发生变化时, 液压系统的动作没有滞后而且很平稳, 这对于延长滑动水口的使用寿命和实现结晶器液位的稳定控制大有好处。

为了说明本文所提出的控制方法的有效性, 这里将没有对滑动水口流量特性和中间包重量采取补偿控制措施的主一副回路 PID 控制方法^[8]和本文所提的串级控制方法的性能加以对比。它们的控制性能见图 3, 图中曲线 1 表示本文的控制方法, 曲线 2 表示主一副回路

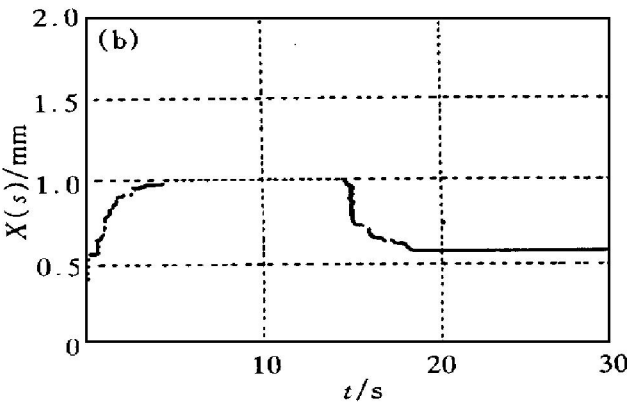
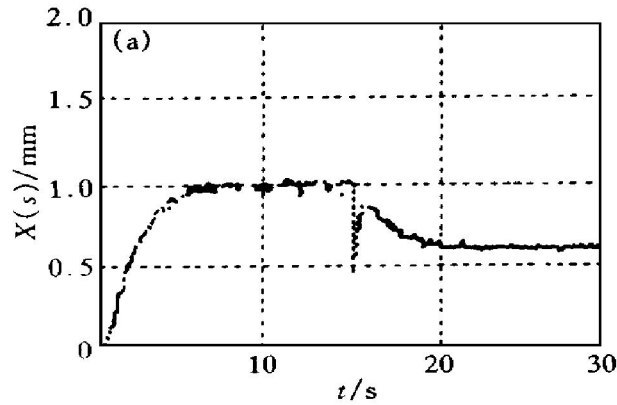


图2 液压伺服机构

Fig. 2 Hydraulic servo system

(a) —Not tuned; (b) —Tuned

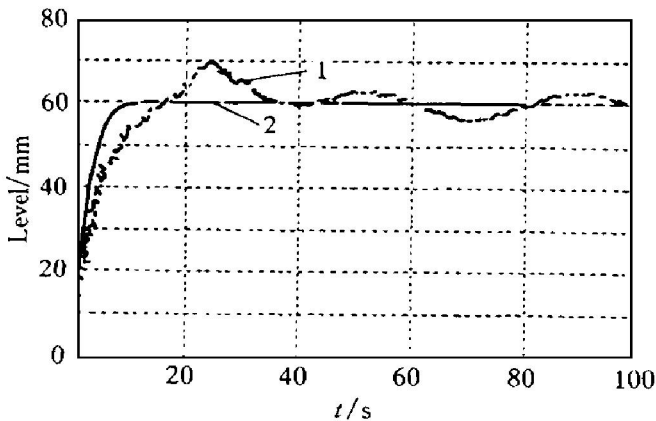


图3 补偿前后的液位

Fig. 3 Level before and after compensation

PID 控制方法。由图可以看出，采用主—副回路 PID 控制方法时，正常浇铸时结晶器液位不但超调量很大，且稳定性能较差。而当采用本文的串级控制方法时，结晶器液位很快就稳定到给定值，且稳态时液位基本没有出现波动。

当拉速发生变化时，现有的连铸机控制系统中结晶器液位常常产生剧烈的波动，图 4 是

实验中拉速在 50s 处由 1 m/min 变为 1.5 m/min 时本文提出的串级控制方法的液位控制性能。由图可见，液位由于拉速的突然增大而有所下降，但随后便很快回到稳定值。只是由于滑动水口和液位系统的惯性，使得液位回到给定值的过程需要一段时间，但没有出现较大的偏差。最大液位偏差也不超过 10 mm。实际生产中拉速不会发生剧烈的变化，最多也只是缓慢的微弱变化。因此在实验中只研究了拉速轻微变化的情况，作为对今后进行在线变拉速连铸生产可行性的一种探讨。

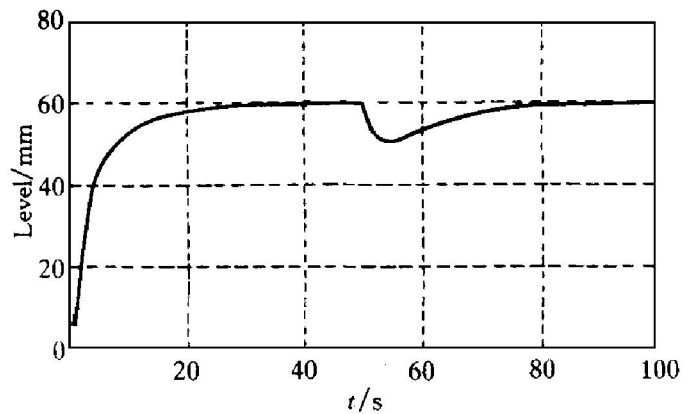


图4 拉速变化时的液位

Fig. 4 Level when speed changes

更换钢包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。图 5 是实验中更换钢包时本文的串级控制方法的液位控制性能。由图可见，结晶器液位由于更换钢包而有所下降，但很快就能够使液位稳定在给定值附近大约 5 mm 处。

实验中我们发现，更换钢包和拉速变化时结晶器液位的变化很相似，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，大约为 10~ 20s。这主要是由于更换钢包或拉速变化时，结晶器液位持续下降或升高，使得在较长一段时间内液位偏差的符号一直不变，从而在控制器的积分作用下，控制信号不断累积，而滑动水口的开度却有限，因而导致了液位超调

量较大且不能很快回到稳定值的现象。这种现象称为积分累积效应。为了克服积分累积效应, 一种解决办法是在每个控制周期用实际控制输出与其期望值之差来代替积分项, 或对积分项加以调整使控制器输出不超过其最大限度。另外还可采用非线性策略设计控制器, 但这样做计算量很大, 不利于工业控制的简单实用性。本文采用条件积分法^[9]根据液位偏差的大小对控制器的积分增益加以修正, 使得当绝对控制误差较大时停止积分作用, 从而避免了可能由此产生的较大超调量。

图6是该方法分别在结晶器为50 mm × 1000 mm和70 mm × 1000 mm, 拉速为3 m/min时的控制效果。由图可见, 对不同大小的结晶器, 液位能很快达到给定值并保持稳定。值得指出的是, 实验中我们发现结晶器越大, 液位

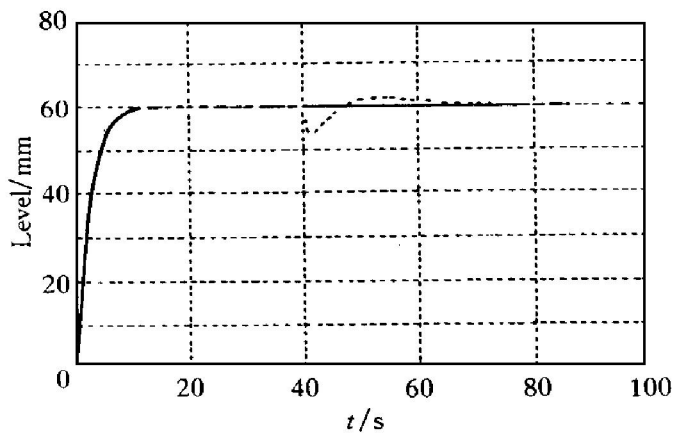


图5 换钢包时的液位

Fig. 5 Level during change over period

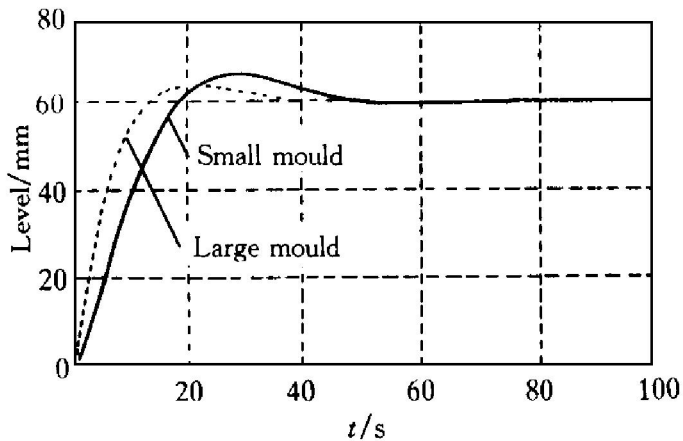


图6 结晶器不同的液位

Fig. 6 Level with different moulds

达到稳定越快且超调量越小。事实上, 结晶器越小, 系统的时间常数就越小, 系统性能也就越易受到扰动的影响。

现有连铸机的结晶器液位控制都存在着偏差。专家们认为这主要是由于为防止铸坯与结晶器壁粘结而让结晶器以大约2 Hz的频率振动引起的。从理论上讲, 在控制器中增加一个用来产生抖动控制信号的内部扰动模型就可克服由此产生的偏差。但实验中发现, 当在控制回路中加入抖动信号后, 控制效果会恶化(见图7)。实际上, 滑动水口不可能承受这样的抖动信号, 因而这种抖动控制方法很不实用。

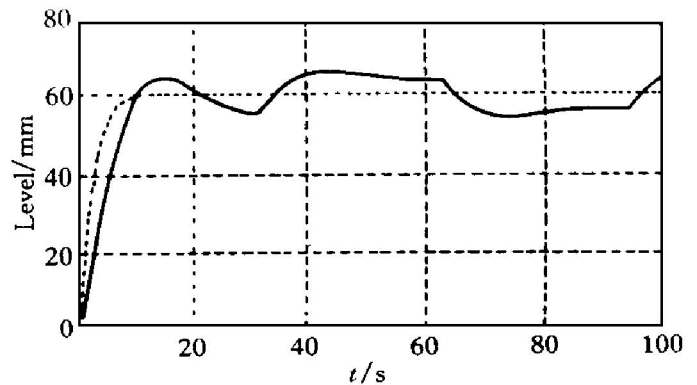


图7 液位抖动控制

Fig. 7 Level dither control

我们所研究的连铸机工艺要求液位偏差应当小于10 mm, 而且波动不得太剧烈。在原有控制系统中, 只有48%的铸坯满足上述工艺要求, 而用本文的串级控制方法, 液位偏差约为5 mm, 满足工艺指标要求。应该指出的是, 该控制方法的控制性能存在幅值约为5 mm和周期约为10~20 s的波动(见图8), 不过液位最大偏差仍然较小。其它许多结晶器液位控制方法也都有类似的波动现象^[4,5]。这主要是因为滑动水口因磨损或堵塞而具有非线性、钢水流入结晶器时产生涡流、液位检测噪音以及拉辊对铸坯的压力的变化等。另外, 即使当滑动水口开度固定不变时液位仍有波动, 这说明波动不仅仅是液位反馈的结果。这一结论与Kong等^[10]的研究成果相吻合。

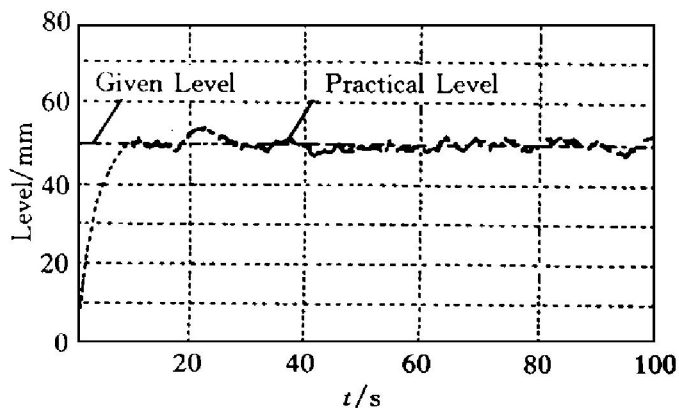


图8 实际液位控制

Fig. 8 Practical level control

3 结束语

本文提出对连铸机的滑动水口液压机构和结晶器液位进行串级控制,以内模控制思想和模型降阶策略为根据设计和整定内回路滑动水口位移控制器。采用抑制微分冲击的方法有效地克服了滑动水口液压系统的微分冲击现象,使液压执行机构能够快速跟随输入信号,且滑动水口动作很平稳。同时由于对中间包重量的前馈控制以及在滑动水口位移控制器中采用条件积分策略,防止了结晶器液位因拉速变化或更换钢包等引起的积分累积效应而发生较大的

偏差,使结晶器液位准确而稳定。该方法简单有效,具有较高的实用价值。

REFERENCES

- 1 Graebe S F, Goodwin G C, West M R *et al.* IEEE Control Systems, 1994, 15(4): 64.
- 2 Kong Fanjin, Keyser R D. In: Proceedings CCA, 1993: 53.
- 3 Wang Wei(王伟) and Guo Ge(郭戈). Control & Discision(控制与决策), 1997, (Suppl.): 1.
- 4 Hesketh T, Clememts D J and Williams R. Automatica, 1993, 29(4): 851.
- 5 Guo Ge(郭戈). PhD thesis. Shenyang: Northeastern University, 1998.
- 6 Person P and Åström K J. In: Proceedings 12th I-FAC World Congress, 1993: 241.
- 7 Isaksson A J and Stefan F G. In: Proceedings 12th I-FAC World Congress, 1993: 257.
- 8 Rivera D E and Morari M. Int J Control, 1987, 46(2): 505.
- 9 Nguyen H T, Sugeno M, Tong R *et al.* Theoretical Aspects of Fuzzy Control. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995.
- 10 Kong F and Robin D K. In: Proceedings IEEE CCA, 1993: 53.

A CASCADE CONTROL METHOD FOR CONCASTING PROCESS

Guo Ge, Qiao Junfei and Wang Wei

Research Center of Automation,

Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China

ABSTRACT A PID controller is designed with model reduction and internal model control method for the inner loop of mould level cascade control system. A fuzzy predictive controller is used in the outer loop and the tundish weight is compensated by feed forward control. Either the inner loop derivative kick and the outer loop integral windup or the influence of colored noise caused by casting speed is deleted. The effectiveness of this cascade control method is demonstrated in simulations and on line tests.

Key words cascade control model reduction internal model control derivative kick integral windup

(编辑 何学锋)