混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法

李海波 [1] 柴天佑 [1,2] 赵大勇 [1]

摘 要 赤铁矿磁选–浓密–浮选过程中浓密机的底流矿浆浓度受到大而频繁的浮选过程产生的中矿矿浆随机干扰的影响, 造成底流矿浆流量频繁波动在工艺规定的范围之外, 使得矿浆在浮选机中选别时间缩短, 液位波动造成有用金属流失, 从而减少精矿品位和金属回收率. 本文分析了难以采用现有的底流矿浆浓度闭环控制策略的原因, 提出了由流量设定和跟踪流量设定值控制组成的矿浆浓度与流量区间双闭环控制; 提出了基于静态模型的流量预设定、模糊推理的流量设定补偿、流量设定保持器和规则推理的切换机制组成的流量设定智能切换控制方法. 与矿浆浓度闭环控制方法的仿真对比实验和在国内某大型赤铁矿混合选别浓密机的成功应用, 表明所提出的方法在浮选中矿干扰下, 不仅将底流矿浆浓度和流量控制在目标值范围内, 而且明显减少底流矿浆流量波动, 从而在保证金属回收率不变的条件下, 显著提高了精矿品位.

关键词 混合选别浓密机, 智能控制, 模糊控制, 切换控制

引用格式 李海波, 柴天佑, 赵大勇. 混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法. 自动化学报, 2014, **40**(9): 1967−1975

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01967

Intelligent Switching Control of Underflow Slurry Concentration and Flowrate Intervals in Mixed Separation Thickener

LI Hai-Bo[1] CHAI Tian-You[1,2] ZHAO Da-Yong[1]

Abstract In the mixed separation thickener (MST) of hematite beneficiation, since the underflow slurry concentration (USC) is influenced by some large random disturbances, the underflow slurry flowrate (USF) frequently fluctuates outside the technologically specified range so as to decrease the flotation time and cause flotation machine level fluctuations. Hence, the concentration grade and metal recovery percent are influenced remarkably. This paper firstly analyzes the reason why the existing USC close-loop control strategy is difficult to adopt. Then a two-layer hierarchical control structure based on the USF setpoint control and tracking USF setpont control is proposed, and the intelligent switching control method is proposed which includes a USF presetting based on the static model, a USF setpoint compensator based on fuzzy reasoning, a retainer of USF setpoint and a switching mechanism based on rule reasoning. A simulation to compare the proposed method with the USC setpoint control strategy and a successful application of the proposed in a domestic hematite concentration plant have shown the effectiveness of the proposed method. Moveover, the application results demonstrate that the fluctuations of USC and USF have been significantly reduced, and the underflow slurry quality has been guaranteed. As a result, the concentration grade and the recovery percent have been improved.

Key words Mixed separation thickener, intelligent control, fuzzy control, switching control

Citation Li Hai-Bo, Chai Tian-You, Zhao Da-Yong. Intelligent switching control of underflow slurry concentration and flowrate intervals in mixed separation thickener. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 1967−1975

对于高品位、嵌布粒度均匀、易选别的矿石, 采用单一磁选或者浮选的选别流程就能获得高品位的精矿矿浆[1], 浓密机用来对选别后的精矿矿浆进行浓密处理, 使其底流矿浆浓度达到工艺规定的范围内. 流入浓密机的单一选别流程产生的精矿矿浆稳定, 对于这类工艺流程的浓密过程, 将矿浆浓度控制在工艺规定的范围内, 不会造成底流矿浆流量发生较大波动. 由于底流矿浆泵转速与矿浆浓度具有强非线性, 因此如何实现矿浆浓度控制成为研究热点, 文献 [2] 针对美国某金矿选矿厂浓密过程的浓密机, 以矿浆泵转速为输入, 以底流矿浆浓度为输出, 采用

收稿日期 2013-06-21 录用日期 2014-01-09
Manuscript received June 21, 2013; accepted January 9, 2014
国家科技支撑计划 (2012BAF19G01) 资助
Supported by National Science and Technology Support Program of China (2012BAF19G01)
本文责任编委 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
1. 流程工业综合自动化国家重点实验室 (东北大学) 沈阳 110819
2. 东北大学自动化研究中心 沈阳 110819
1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries (Northeastern University), Shenyang 110819
2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110819

基于专家规则的控制器, 实现底流矿浆浓度进行定值闭环控制. 文献 [3] 针对铜矿选矿厂浓密过程的浓密机, 以矿浆泵转速为输入, 以底流矿浆浓度为输出, 采用模糊控制方法控制底流矿浆浓度并进行了仿真研究. 文献 [4] 针对铝土矿浓密过程的浓密机, 以矿浆泵转速为输入, 以底流矿浆浓度为输出, 采用专家规则的控制方法对底流矿浆浓度进行控制.

赤铁矿具有品位低、杂质含量高、难以选别的特点, 采用单一的选别工艺难以去除杂质而实现金属的有效回收, 为了获得较高的精矿品位和金属回收率, 必须采用磁选 浓密-浮选混合选别工艺. 而浮选工艺对浓密过程会产生新的影响[5−6], 一是浮选过程返回的中矿矿浆和污水等随机干扰量会造成浓密机底流矿浆浓度和流量产生较大波动; 二是浮选过程要求浮选机液位稳定, 因此要求浓密过程的底流矿浆流量的波动在工艺规定的范围内. 如果采用上述的底流矿浆浓度的定值闭环控制方法[2−4], 虽然能将底流矿浆浓度控制在设定值附近, 但由于混合选别过程中产生的浮选中矿矿浆特性变化较大, 造成底流矿浆泵转速在较大范围内频繁波动, 导致浓密机底流流量及其波动在工艺规定的范围之外, 影响浮选过程选别时间和液位波动, 导致精矿品位和金属回收率降低, 因此上述浓度定值控制方法难以应用于混合选别浓密机. 目前, 浮选选别浓密机仍采用人工控制, 当浮选中矿矿浆和污水等干扰频繁变化时, 难以及时准确地调整底流矿浆泵转速, 常会造成底流矿浆浓度越过其上下限, 无法保证底流矿浆流量及其波动在工艺规定的范围内, 影响浮选过程的产品质量.

本文针对混合选别浓密机存在的上述问题, 提出了混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法, 并在国内某大型赤铁矿选矿厂的混合选别浓密机进行了工业应用验证, 将浓密机底流矿浆浓度、底流矿浆流量及其波动值同时控制在工艺规定范围内, 取得了满意的控制效果.

1 控制问题描述

1.1 浓密过程描述

混合选别浓密机工艺流程图如图 1 所示, 磁选产生的低浓度精矿矿浆直接进入浓密机, 通过浓密机耙子的搅拌作用, 在浓密机底部形成较高浓度的矿浆, 通过调节底流矿浆泵转速, 将底流矿浆浓度控制在工艺规定的目标范围内, 输送到浮选过程. 而浮选过程产生的低品位、低浓度的中矿矿浆及污水一起返回到浓密机, 造成了浓密机底流矿浆流量产生频繁较大波动, 从而使得矿浆在浮选机内的停留时间缩短, 小于工艺规定的浮选时间, 导致精矿品位下降, 同时流量波动造成浮选机液位变化, 严重时会出现浮选机冒槽现象, 导致有用金属流失, 降低了浮选过程的金属回收率. 因此, 需要将浓密过程的底流矿浆浓度和流量及其波动控制在工艺规定的范围内, 为后续浮选过程准备合格的矿浆. 而目前已有的矿浆浓度定值控制方法没有考虑矿浆流量频繁变化对后续浮选过程造成的影响, 因此难以应用于本文所描述的赤铁矿混合选别浓密过程.

如图 1 所示, 赤铁矿混合选别浓密过程的输入变量为底流矿浆泵转速 u, 输出变量为底流矿浆浓度 y_2 和矿浆流量 y_1, 干扰为浮选中矿矿浆流量 q_1 和污水流量 q_2, q_3 表示磁选精矿矿浆流量.

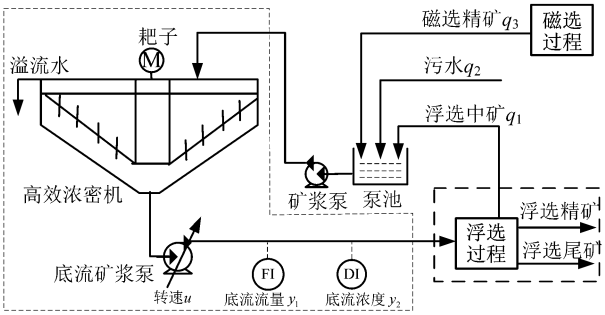


图 1 混合选别浓密机工艺流程图

Fig. 1 The technical flowsheet of mixed separation thickener (MST)

1.2 控制目标

1.2.1 动态特性分析

根据文献 [7−8], 建立以底流矿浆泵转速 u 为输入, 以底流矿浆流量 y_1 和底流矿浆浓度 y_2 为输出的动态模型:

$$\dot{y}_1(t) = -\frac{y_1(t)}{\tau} + \frac{k_0}{\tau}u(t) \tag{1}$$

$$\dot{y}_2(t) = \frac{1}{k_2 h(y_1, y_2)}\left(\frac{-{y_2}^2(t)y_1(t)}{y_2(t) + k_3 v(t) + k_3 Q} + k_1 v_p(y_1, y_2, v)(v(t) + Q) + \frac{k_1(k_i - k_3)v_p(y_1, y_2)(v(t) + Q)}{y_2(t) + k_3(v(t) + Q)}\right) \tag{2}$$

其中 $k_1 = Ak_i$, $k_2 = Ap$, $k_3 = k_i - \mu(\rho_s - \rho_l)/Ap$. $v_p(y_1, y_2)$ 为矿浆颗粒沉降速度; $h(y_1, y_2)$ 为泥层界面高度; μ、p、ρ_s、ρ_l 是与矿浆性质有关的常数; k_i 和 A 是与浓密机结构有关的常数; $Q = q_3\varphi_3$ 为磁选精矿矿浆; $v(t)$ 为随机干扰变量, 由式 (3) 表示

$$v(t) = q_1(t)\varphi_1(t) + q_2(t)\varphi_2(t) \tag{3}$$

其中 q_1 浮选中矿矿浆流量, φ_1 为浮选中矿矿浆浓度, q_2 为污水流量, φ_2 为污水浓度.

式 (2) 可简记为 $\dot{y}_2(t) = F(y_1, y_2, v, v_p, h)$, 由式 (2) 可知, 底流矿浆浓度 $y_2(t)$ 和矿浆流量 $y_1(t)$ 之间具有非线性特性, 且模型系数 $v_p(y_1, y_2)$ 和 $h(y_1, y_2)$ 为与 y_1 和 y_2 相关的未知非线性函数.

如果采用矿浆浓度闭环控制方式, 当矿浆浓度控制系统处于稳态时, 矿浆浓度跟踪其设定值 y_{2ref} 此时 $\dot{y}_2(t) \approx 0$, 那么由式 (2) 可知,

$$y_1(t) = \frac{k_i A v_p(\cdot) v(t) + k_i A Q v_p(\cdot)}{y_{2ref} - k_i v(t) - k_i Q} \tag{4}$$

其中 y_{2ref} 为矿浆浓度的设定值.

由式 (4) 可知, 此时矿浆流量 $y_1(t)$ 随着干扰变量 $v(t)$ 的变化而变化, 由于返回到浓密机的浮选中矿矿浆频繁波动, 最大时能达到浓密机来料矿浆量的 60 % 以上, 经常造成底流矿浆流量超过其工艺规定范围的情况, 最大可能超过其目标值范围 25 % 以上. 当矿浆流量超过工艺规定上限时, 矿浆在浮选机内的选别时间缩短, 难以充分选别去除脉石等杂质, 导致精矿品位下降.

此外, 底流矿浆流量的波动还会直接影响浮选机液位的高低, 当矿浆流量波动较大时, 会导致浮选机液位剧烈变化, 严重时会出现浮选机矿浆 “冒槽” 的现象, 导致有用金属流失, 金属回收率下降.

因此矿浆浓度定值控制策略难以应用于赤铁矿混合选别浓密过程.

1.2.2　控制目标

通过第 1.2.1 节的分析可知, 混合选别工艺浓密机生产过程的控制目标是, 将矿浆浓度控制工艺规定的范围内, 即:

$$y_{2\min} < y_2(k) < y_{2\max} \tag{5}$$

其中, $y_{2\min}$ 和 $y_{2\max}$ 分别为底流矿浆浓度工艺规定的上下限, k 为采样时刻. 同时将矿浆流量控制在工艺规定的范围内, 即:

$$y_{1\min} < y_1(k) < y_{1\max} \tag{6}$$

其中 $y_{1\min}$ 和 $y_{1\max}$ 分别为矿浆流量工艺规定上下限. 且要求矿浆流量波动尽可能小, 即:

$$|y_1(k) - y_1(k-1)| \le \delta \tag{7}$$

其中, $|y_1(k) - y_1(k-1)|$ 为矿浆流量当前采样时刻和上一时刻差的绝对值, 即矿浆流量的波动, δ 为矿浆流量波动的上限值, 由工艺确定.

混合选别浓密过程的控制问题是设计一个以底流矿浆泵转速 u 为输入, 以底流矿浆流量 y_1 和矿浆浓度 y_2 为输出的控制系统, 在底流矿浆泵转速 u 满足 $u_{\min} \le u(k) \le u_{\max}$ 的限制条件下, 通过调节底流矿浆泵转速 u, 同时将矿浆浓度 y_1 和流量 y_2 及其波动控制在工艺规定的范围内, 实现上述控制目标.

目前, 混合选别浓密过程普遍采用底流矿浆浓度人工手动控制与底流矿浆流量定值 PI 控制相结合的控制方式, 如图 2 所示.

操作员根据底流矿浆浓度的实际值 $y_2(t)$ 与参考值 $y_{2\text{ref}}$ 的偏差 $e_2(t)$、工艺规定矿浆浓度的上下限 ($y_{2\min}$, $y_{2\max}$) 以及矿浆流量的实际值 $y_1(t)$, 确定矿浆流量设定值 $y_{1\text{sp}}$, 通过 PI 控制器调整矿浆泵转速 u_{auto} 跟踪其设定值, 保证矿浆浓度和矿浆流量控制在目标值范围内. 当浮选中矿干扰造成底流矿浆浓度过高或过低时 ($y_2 > y_{2\max}$ 或 $y_2 < y_{2\min}$), 操作员切换到手动控制给出底流矿浆泵转速的最大值 $u_{\text{man}} = u_{\max}$ 或最小值 $u_{\text{man}} = u_{\min}$, 使得矿浆浓度回到工艺规定的范围内. 当干扰大而频繁波动时, 人工操作不能及时准确进行手动控制与矿浆流量 PI 控制的切换, 仅通过矿浆泵转速的最大值 $u_{\max}$ 和最小值 $u_{\min}$ 的切换, 难以将矿浆浓度和流量及波动控制在目标值范围内, 会造成底流矿浆浓度和流量及波动超过目标值范围, 影响浮选过程的精矿品位和金属回收率.

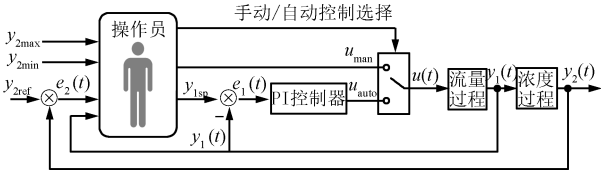


图 2　混合选别浓密机控制现状

Fig. 2　The existing manul-based control status of MST

2　控制方法

2.1　控制策略

本文提出了如图 3 所示的由底流矿浆流量设定和跟踪流量设定值控制组成的矿浆浓度与流量区间智能切换双闭环控制结构, 其中, 矿浆流量设定控制由流量预设定模块、流量设定值补偿器、流量设定保持器和切换机制组成; 跟踪流量设定值控制采用 PI 控制器.

矿浆流量预设定模块: 选择浓度设定值 $y_{2\text{ref}} = (y_{2\max} + y_{2\min})/2$, 由式 (4) 可得流量稳态模型, 产生矿浆流量初始设定值 $y^*_{1\text{sp}}$.

流量设定值补偿器: 采用矿浆浓度参考值为 $y_{2\text{ref}}$, 矿浆流量的参考值 $y_{1\text{ref}}$ 为 $(y_{1\max} + y_{1\min})/2$, 实际矿浆流量 $y_1(k)$ 与参考值 $y_{1\text{ref}}$ 的偏差 $e_1(k) = y_{1\text{ref}} - y_1(k)$, 及实际矿浆浓度 $y_2(k)$ 与参考值 $y_{2\text{ref}}$ 的偏差 $e_2(k) = y_{2\text{ref}} - y_2(k)$, 以 $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$ 为输入, 由模糊推理产生矿浆流量设定补偿值 $\Delta y_{1\text{sp}}(k)$, 使得到的矿浆流量设定值 $y_{1\text{sp}}(k) = y^*_{1\text{sp}} + \sum_{i=1}^{k} \Delta y_{1\text{sp}}(i)$, 保证矿浆浓度和流量控制在目标值范围内.

流量设定值保持器: 使得 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)=0$, 保持原设定值不变, 即 $y_{1\mathrm{sp}}(k)=y_{1\mathrm{sp}}(k-1)$.

切换机制: 根据矿浆浓度偏差 $e_2(k)$ 和偏差变化率 $\Delta e_2(k)$, 实现矿浆流量设定补偿器和保持器的切换. 当矿浆浓度偏差 $|e_2(k)|>\varepsilon$ 且 $e_2(k)\cdot\Delta e_2(k)>0$, 切换到矿浆流量设定补偿器, 由补偿器给出矿浆流量设定的补偿值 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)$; 当矿浆浓度偏差 $|e_2(k)|\le\varepsilon$, 或者 $|e_2(k)|>\varepsilon$ 且 $e_2(k)\cdot\Delta e_2(k)\le 0$ 时, 切换到矿浆流量设定保持器.

流量 PI 控制器使得矿浆流量跟踪其设定值 $y_{1\mathrm{sp}}(k)$, 从而将矿浆浓度和流量及波动控制在目标值范围内.

2.2 矿浆浓度和流量区间智能切换控制算法

区间智能切换控制算法由流量设定控制算法和跟踪流量设定控制算法组成.

2.2.1 底流矿浆流量设定控制算法

矿浆流量设定控制算法结构如图 4 所示.

1) 矿浆流量预设定算法: 底流矿浆浓度设定值为 $y_{2\mathrm{ref}}$, 当矿浆浓度处于稳态时, 由式 (4) 可知,

$$y^*_{1\mathrm{sp}}=\frac{k_iA\bar v_p(\bar v+Q)}{y_{2\mathrm{ref}}-k_i(\bar v+Q)} \tag{8}$$

式中 k_i 和 A 可根据具体浓密机设备确定, $\bar v_p$、$\bar v$ 和 Q 分别为浓度处于稳态时的颗粒沉降速度、浮选中矿干矿量和磁选精矿干矿量, 可通过实验确定.

2) 基于模糊推理的流量设定补偿算法: 为了使底流矿浆浓度和矿浆流量在目标值范围内调节的区间尽可能大, 选择浓度的参考值为 $y_{2\mathrm{ref}}$, 流量的参考值为 $y_{1\mathrm{ref}}$.

由于矿浆浓度和流量受浮选中矿随机干扰的影响, 选择由式 (8) 流量预设定模型产生的预设定值, 不能保证将浓度和流量控制在目标值范围内, 因此对设定值进行补偿. 流量设定补偿值 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)$ 为与流量偏差 $e_1(k)$ 和浓度偏差 $e_2(k)$ 相关的非线性函数, 即 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)=f(e_1(k),e_2(k))$, f 为未知非线性函数, 且浓度和流量的控制目标值为区间, 因此采用模糊推理方法设计补偿器. 模糊推理补偿器由偏差 $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$ 模糊化、模糊推理和解模糊化组成.

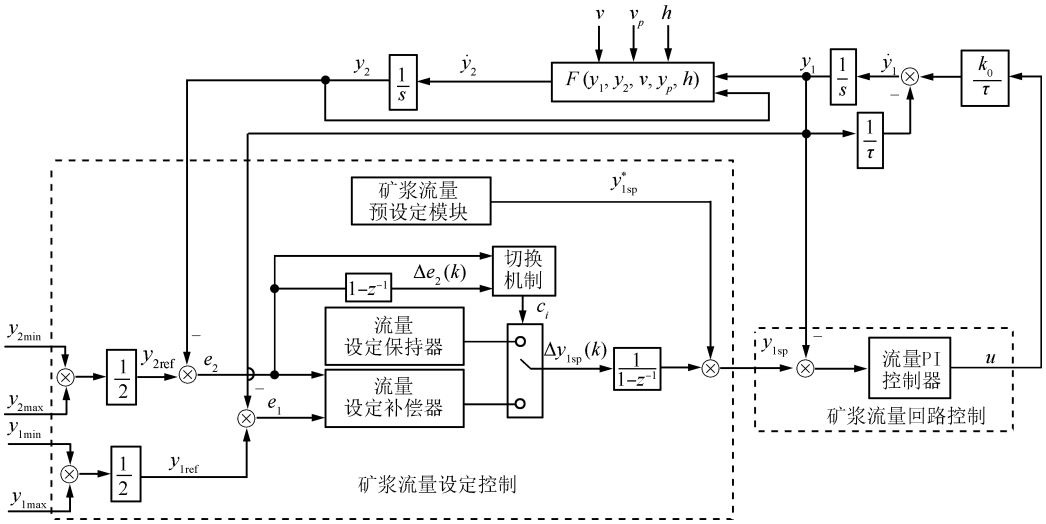


图 3 混合选别浓密过程底流矿浆浓度和流量区间智能切换双闭环控制结构

Fig. 3 The intelligent switching control structure for underflow concentration and flowrate intervals of MST

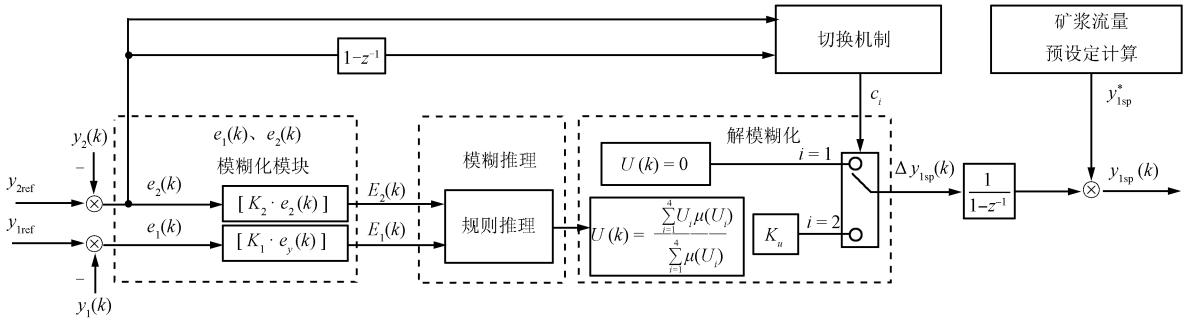


图 4 矿浆流量设定值控制器结构

Fig. 4 The structure of switching controller for slurry flowrate setpoint

a) e_1、e_2 和 δ 的模糊化

采用文献 [9] 的方法确定矿浆流量偏差的上限 α 为 $(y_{1\max}-y_{1\min})/2$ 和矿浆浓度偏差的上限 β 为 $(y_{2\max}-y_{2\min})/2$, e_1 和 e_2 的量化因子分别为 K_1 和 K_2, δ 的量化因子为 K_u, 模糊子集的数量 u, 则模糊控制器的输入 $E_1(k)$ 和 $E_2(k)$ 分别为:

$$E_1(k)=[K_1.e_1(k)],\ E_2(k)=[K_2.e_2(k)]$$

式中, $[\cdot]$ 表示取整运算.

本文选择模糊子集个数 $m=7$, 在 $E_1(k)$ 和 $E_2(k)$ 各自论域上建立 7 个模糊子集, 分别为负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZE)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB).

b) 模糊推理

根据浓度偏差 E_2 和流量偏差 E_1, 由模糊推理规则得到控制量, 其模糊推理规则如下:

如果流量偏差是正中且浓度偏差为负小, 则控制量为正小:

IF E_1 is PM and E_2 is PS THEN U is PS.

以此类推, 采用文献 [10] 的方法, 设计 Mamdani 模型的流量设定模糊规则表, 如表 1 所示.

表 1　底流矿浆流量设定补偿值 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)$ 模糊规则

Table 1　The fuzzy rule based inference for $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)$ of flowrate

U		E_2						
		PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
E_1	PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	PS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PM	PM
	ZE	NM	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM
	NS	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS	PS
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE

采用文献 [11] 隶属度函数选择方法, 确定底流矿浆流量偏差 E_1、底流矿浆浓度偏差 E_2 的隶属函数为对称三角形隶属函数, 控制量 U 采用单值型隶属函数, 如图 5 所示.

c) 解模糊化

采用重心法解模糊化得到模糊控制的清晰解. 由图 5 可知, 任何 $(E_1(k),E_2(k))$ 所对应的模糊子集的最大个数为 4, 因此只要计算这 4 个模糊子集所对应的输出控制量模糊集的隶属度 $\mu(U_i)$ $(i=1,2,3,4)$, 即可得到清晰解:

$$U(k)=\frac{\sum_{i=1}^{4}U_i\mu(U_i)}{\sum_{i=1}^{4}\mu(U_i)} \tag{9}$$

式中, $\mu(U_i)$ 为第 i 条规则输出控制量模糊集的隶属度, U_i 为第 i 条规则结论部分隶属函数的特征值.

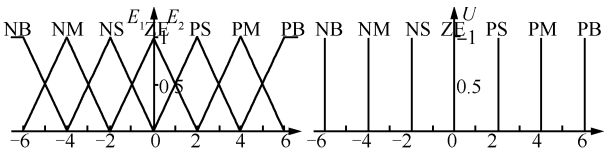


图 5　底流矿浆流量偏差 E_1、底流矿浆浓度偏差 E_2 与控制量 U 的隶属度函数

Fig. 5　The membership functions of E_1, E_2 and U

将式 (9) 计算得到的精确量 $U(k)$ 乘以比例因子 K_u, 得到当前时刻流量设定补偿器输出 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)$:

$$\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)=U(k)\times K_u \tag{10}$$

其中 $K_u=\delta/U_{\max}$, $U_{\max}$ 为隶属度函数特征值的上限. 由于 $U_{\min}\le U_i\le U_{\max}$, $\mu(U_i)\le 1$, 那么根据式 (9) 可以得出 $U_{\min}\le U(k)\le U_{\max}$, 保证补偿值 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)=U(k)\times K_u\le U_{\max}\times K_u=\delta$, 在目标值 δ 的范围内.

在底流矿浆流量预设定值 $y^*_{1\mathrm{sp}}$ 的基础上, 按式 (11) 计算当前时刻矿浆流量设定值 $y_{1\mathrm{sp}}(k)$,

$$y_{1\mathrm{sp}}(k)=y^*_{1\mathrm{sp}}+\sum_{i=1}^{k}\Delta y_{1\mathrm{sp}}(i) \tag{11}$$

3) 流量设定保持器

定义底流矿浆浓度的偏差及偏差变化率 $\Delta e_2(k)=[e_2(k)-e_2(k-1)]/T$ (T 为采样周期), 如果判断矿浆浓度在参考值附近 ($|e_2(k)|\le\varepsilon$, ε 根据生产工艺确定) 或有回到参考值的变化趋势时 ($e_2(k)\cdot\Delta e_2(k)<0$), 则 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k)=0$, $y_{1\mathrm{sp}}(k)=y_{1\mathrm{sp}}(k-1)$, 保持流量的设定值不变.

4) 基于专家规则的切换机制算法

本文根据混合选别浓密过程的工艺特点, 采用基于 "IF < 前提 > THEN < 结论 >" 的规则推理结构建立了混合选别浓密过程的工况识别方法[12−13]. 前提条件中的变量及其限定值由表 2 给出.

根据规则的前提变量底流矿浆浓度偏差和偏差变化率, 由切换机制选择流量设定保持器和设定补偿器, 切换机制专家规则库如表 3 所示.

表 2　切换机制变量及限定值

Table 2　The variables and limits in switching mechanism

变量	区间限定值	
	下限	上限
$e_2(k)$	$-(y_{2\max}-y_{2\min})/2$	$-\varepsilon$
	$-\varepsilon$	ε
	ε	$(y_{2\max}-y_{2\min})/2$

表 3 切换机制的专家规则库
Table 3 The expert rules base for the switching mechanism

规则	前提	结论
规则 1	$\|e_2(k)\| \le \varepsilon$	$\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k) = 0$
规则 2	$e_2(k) \cdot \Delta e_2(k) \le 0$	$\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k) = 0$
规则 3	$\varepsilon < \|e_2(k)\| < (y_{2\max} - y_{2\min})/2$ and $e_2(k) \cdot \Delta e_2(k) > 0$	$\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k) = f(e_1(k), e_2(k))$

2.2.2 底流矿浆流量 PI 控制算法

采用 Z-N 法[14] 设计流量 PI 控制器, 使得底流矿浆流量跟踪其设定值.

3 仿真实验

为了验证本文提出的混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法的有效性, 进行了所设计控制器的控制性能对比仿真实验. 对于如式 (1)、(2) 所描述的混合选别浓密机生产过程, 设 $A = 490$, $h = 6$, $v_p = 14.75$, $p = 0.5$, $y_1(0) = 370$, $y_{1\max} = 420$, $y_{1\min} = 340$, $y_2(0) = 32.5$, $\dot{y}_2(0) = 0$, $y_{2\max} = 35\,\%$, $y_{2\min} = 31\,\%$, $\varphi_i = 19.96\,\%$; 浓密机的来料矿浆中, 磁选精矿矿浆流量稳定为 $320\,\mathrm{m^3/h}$; 浮选中矿量初始值为 $300\,\mathrm{m^3/h}$, 如图 6 所示, 分别在 3 分 20 秒、10 分、16 分 40 秒、23 分 20 秒对浮选中矿加入 $-80\,\mathrm{m^3/h}$、$80\,\mathrm{m^3/h}$、$-10\,\mathrm{m^3/h}$、$10\,\mathrm{m^3/h}$ 的阶跃扰动且持续时间为 3 分钟; 控制目标为: $340 \le y_1(k) \le 420$, $|y_1(k) - y_1(k-1)| < 20$, $31 \le y_2(k) \le 35$, 并且满足 $550 \le u(k) \le 980$. 图 7 为采用文献 [3] 矿浆浓度定值闭环控制方法仿真效果, 图 8 为采用本文提出的底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制仿真效果.

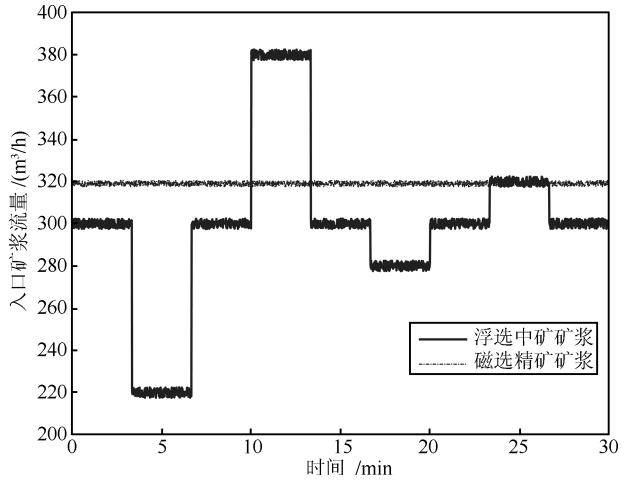


图 6 浓密机入口矿浆流量曲线
Fig. 6 Curve of flowrate inlet the thickener

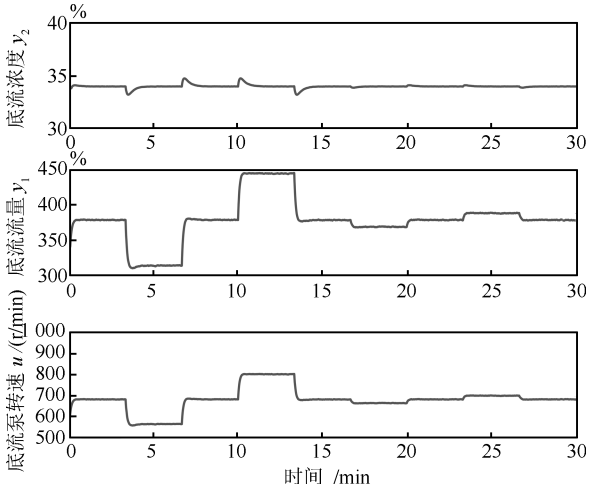


图 7 常规定值闭环控制仿真曲线
Fig. 7 Conventional setpoint close-loop control simulation results

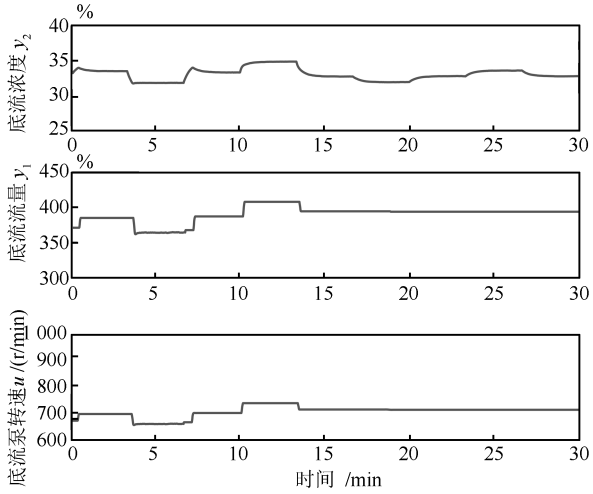


图 8 智能切换控制仿真曲线
Fig. 8 Intelligent switching control simulation results

从图 7 中可以看出, 采用文献 [3] 矿浆浓度闭环控制方法实现底流矿浆浓度的定值控制, 由于浮选过程返回的中矿矿浆的波动造成矿浆泵转速频繁波动, 从而造成底流流量在 [327, 435] 之间大范围波动, 严重超出矿浆流量目标值范围的上下限, 且矿浆流量 y_1 的最大波动值为 $49\,\mathrm{m^3/h}$, 超过了控制目标允许的最大值 $20\,\mathrm{m^3/h}$; 图 8 为采用本文提出的智能切换控制方法时仿真效果, 从图中可以看出, 矿浆浓度和流量的变化区间分别为 [32.0, 34.5] 和 [357, 406], 均控制在目标值范围内, 同时底流矿浆流量最大变化率为 $16\,\mathrm{m^3/h}$, 小于控制目标允许的最大值 $20\,\mathrm{m^3/h}$. 仿真结果表明, 该控制方法能够将底流矿浆浓度 y_2 和底流矿浆流量 y_1 控制在其目标值允许范围内的同时, 使得底流矿浆流量 y_1 的设定值的波动控制在目标值范围内. 因此, 对于受到大的频繁干

扰影响的混合选别浓密机, 本文提出的方法优于文献 [3] 矿浆浓度定值闭环控制方法, 满足混合选别浓密机生产过程的控制目标式 (5) ∼ (7).

4　工业应用

4.1　混合选别浓密机应用对象描述

将本文提出的混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法应用于国内某选矿厂混合选别浓密机, 如图 9 所示, 该过程主要由浓密机 (型号 HRC25/2, 直径 25 m, 深度 9.5 m)、泵池 (尺寸为 $2\,\mathrm{m}(L)\times 2\,\mathrm{m}(W)\times 1.5\,\mathrm{m}(H)$) 和底流矿浆泵 (型号 300ZJ-I-A56, 电机功率 75 kW) 等设备组成.

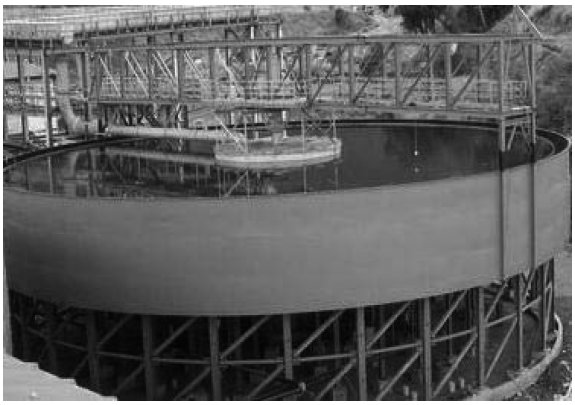


图 9　混合选别浓密机生产现场场景

Fig. 9　The hematite mineral flotation thickening process

根据工艺给定的底流矿浆流量和底流矿浆浓度上下限, 即 $y_{1\max}=420\,\mathrm{m^3/h}$, $y_{1\min}=340\,\mathrm{m^3/h}$, $y_{1\max}=35\,\%$ 和 $y_{1\min}=31\,\%$, 以及底流矿浆流量波动的上限值 $\delta=20\,\mathrm{m^3/h}$, 则该混合选别浓密机生产过程的控制目标可以表示为:

$$31\le y_2(k)\le 35 \tag{12}$$

$$340\le y_1(k)\le 420 \tag{13}$$

$$|y_1(k)-y_1(k-1)|<20 \tag{14}$$

并且满足矿浆泵转速 $u(t)$ 的限制条件: $550\le u(t)\le 980$.

该控制系统硬件平台如图 10 所示, 由 3 套 CLX 集散控制系统、2 台 RsView32 操作员站、1 台多媒体监控站以及相应的仪器仪表 (西门子 The Probe 液位计、核浓度计、电磁流量计)、电气设备、执行机构 (AB-Power Flex 700 变频器) 组成.

控制系统软件平台包括 1 套 RSLogix5K 下位机编程软件、1 套 RSView32 上位机组态软件、1 套 RSlinx 通讯软件、1 套 RsNetworx 网络规划软件以及相应的计算机操作系统组成.

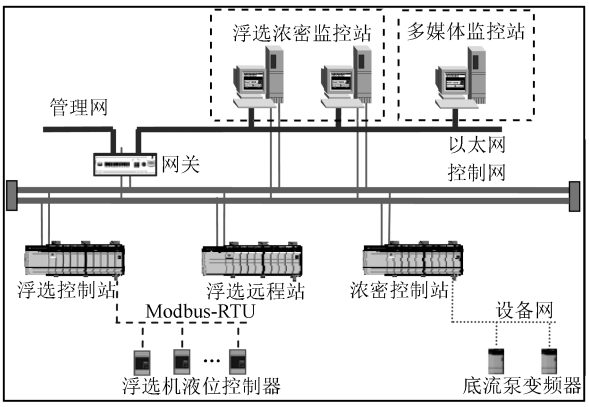


图 10　混合选别浓密过程控制系统硬件平台

Fig. 10　Control system hardware platform for MST

根据混合选别浓密过程工艺流程和设备运行情况, 设计了混合选别浓密过程 HMI 人机交互界面, 如图 11 所示. 人机交互界面主要实现设备监控、工艺参数实时显示和记录重要参数历史趋势等功能, 操作员通过人机交互界面能够监视浓密机驱动电机、底流矿浆泵的运行状态, 以及浓密机底流矿浆浓度和流量等参数, 通过点击设备图标或切换按钮等方式切换到需要调整的相关设备或控制回路的监控操作画面, 完成自动/手动切换、给定参数设置等功能.

图 11　混合选别浓密过程监控画面

Fig. 11　Human machine interface of MST

4.2　控制器参数选择

采用 Z-N 法设计底流矿浆流量 PI 控制器参数, $K_p=1.5$, $T_i=0.4$, 采用周期为 $T_1=1\,\mathrm{s}$. 根据混合选别浓密过程工艺规定的底流矿浆浓度和流量上下限, 确定底流矿浆浓度的参考值为 $y_{2\mathrm{ref}}=(35+31)/2=33\,\%$, 底流矿浆流量的参考值为 $y_{1\mathrm{ref}}=(420+340)/2=380\,\mathrm{m^3/h}$, 则底流矿浆浓度偏差所允许的最大偏差为 $\alpha=(35-31)/2=2$, 底流矿浆浓度偏差 $e_1(k)$ 的基本论域为 $[-2,2]$, 量化

因子为 $K_2 = 6/2 = 3$; 底流矿浆流量所允许的最大偏差 $\beta = (420 - 340)/2 = 40$, 底流流量偏差 $e_1(k)$ 的基本论域为 $[-40, 40]$, 量化因子为 $K_1 = 6/40$. 实验确定浓密机底流浓度稳定时入口矿浆总流量的统计值为 $610\,\mathrm{m^3/h}$. 工艺规定的浓密机底流矿浆流量最大波动值为 $20\,\mathrm{m^3/h}$, 则 Δy_{1sp} 的基本论域为 $[-20, 20]$, 比例因子为 $K_u = 20/6$.

4.3 应用效果分析

在对赤铁矿混合选别浓密过程进行自动化改造前, 该生产过程一直处于人工手动控制方式, 其底流矿浆流量 $y_1(t)$、底流矿浆流量设定值 $y_{1\mathrm{sp}}$ 和底流矿浆浓度 $y_2(t)$ 的历史曲线如图 12 所示.

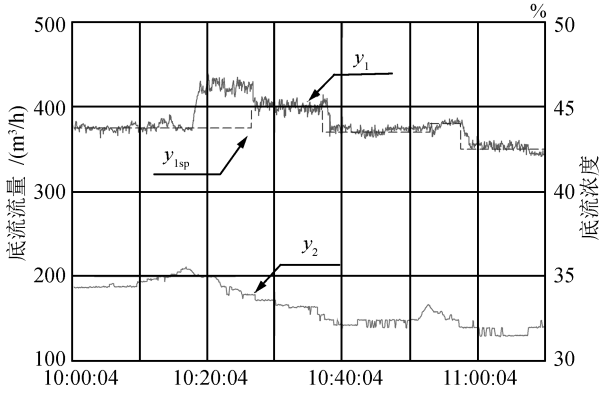


图 12 人工控制时底流流量 y_1 和底流浓度 y_2 曲线

Fig. 12 The curves of y_1 and y_2 using manual control

从图 12 中可以看出, 在 10:18 时, 由于浮选中矿矿浆出现较大的干扰, 导致矿浆浓度超过了工艺规定的上限 $y_2(t) > 35\,\%$, 实际检测值为 35.04 %, 操作员直接手动给出底流矿浆泵转速的最大值 $u_{\max} = 980\,\mathrm{rpm}$, 底流矿浆浓度实际值逐渐降低, 在 10:26 时, 底流矿浆浓度降低到 33.26 %, 底流矿浆浓度回到了工艺规定的范围之内, 操作员凭经验给出底流矿浆流量设定值 $y_{1\mathrm{sp}} = 400$, 在 10:37 时, 底流矿浆浓度降低到 32.14 %, 偏离参考值附近, 操作员根据经验调整底流矿浆流量的设定值从 400 减少到 370. 由于人工控制不能及时准确地切换手动控制和流量 PI 控制方式, 导致底流矿浆浓度和底流矿浆流量发生较大波动, 从 10:18 到 10:42, 底流矿浆浓度在 [31.8 % 35.34 %] 之间变化; 在 10:16 到 10:24 时间段内, 底流矿浆流量在 $[382\ 439]\,\mathrm{m^3/h}$ 范围内变化, 底流矿浆流量最大值为 $439\,\mathrm{m^3/h}$, 超过了底流流量工艺规定的最大值 $420\,\mathrm{m^3/h}$, 流量变化率最大值为 $57\,\mathrm{m^3/h}$, 超过了流量变化率上限值 $20\,\mathrm{m^3/h}$, 严重影响了浮选过程的精矿品位和金属回收率. 人工控制时混合选别浓密机运行工况如表 4 所示.

表 4 人工控制时混合选别浓密机运行时工况

Table 4 Operating states by manual regulation

	y_1 ($\mathrm{m^3/h}$)	$\lvert\Delta y_{1\mathrm{sp}}\rvert$ ($\mathrm{m^3/h}$)	y_2 (%)
Min	345.2	5	31.5
Max	439.4	49	35.34

采用本文所提出的底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法, 对混合选别浓密机实现了自动控制, 其控制效果曲线如图 13 所示.

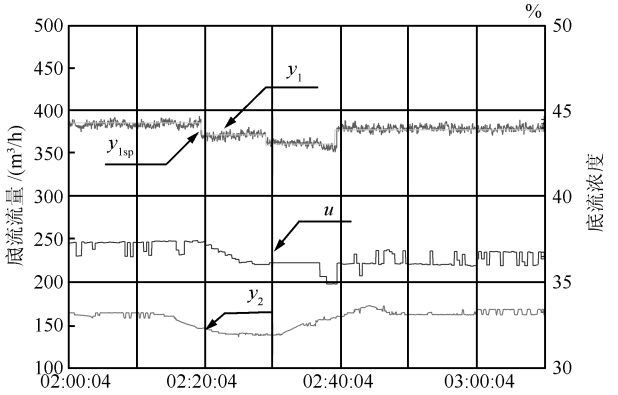


图 13 采用本文方法时底流流量 y_1 和底流浓度 y_2 曲线

Fig. 13 The curves of y_1 and y_2 using the proposed method

从图 13 中可以看出, 在 02:18 之前, 底流矿浆浓度检测值在 [32.7 % 32.9 %] 之间, 此时 $|e_2(k)| \le 0.5$, 根据切换机制选择底流矿浆流量保持器, 不调整底流矿浆流量设定值, 底流流量设定值为 $y_{1\mathrm{sp}} = 386.21\,\mathrm{m^3/h}$, 底流流量 PI 控制器差跟踪设定值, 在 02:18 时, 由于浮选中矿干扰的影响, 导致底流矿浆浓度降低, 控制系统检测到底流矿浆浓度为 32.12 %, 底流流量为 $372.61\,\mathrm{m^3/h}$, 底流浓度偏差为 $e_2(k) = 0.88$, 底流流量偏差为 $e_1(k) = 7.39$, 分别对应模糊论域 $E_2(k) = 3$, $E_1(k) = 1$, 此时 $|e_2(k)| > 0.5$, 且 $e_2(k) \cdot \Delta e_2(k) > 0$, 根据切换机制选择基于模糊推理的底流流量设定控制器, 通过模糊补偿控制器得到底流流量设定值增量 $\Delta y_{1\mathrm{sp}}(k) = -6$, 最终得到底流流量设定值 $y_{1\mathrm{sp}}(k) = 386 - 6 = 380\,\mathrm{m^3/h}$. 在 02:30 左右, 底流浓度回到 $32.5\,\% \le y_2(t) \le 33.5\,\%$ 范围内, 流量设定值不做调整, 通过 PI 控制器调整底流泵转速, 跟踪底流流量设定值, 使得底流浓度和底流流量及其波动在工艺规定范围内. 从图 12 和图 13 的运行对比曲线可以看出, 混合选别浓密机底流浓度和底流流量的自动控制效果明显优于人工手动控制. 自动控制时混合选别浓密机运行工况如表 5 所示.

由表 5 可以看出, 混合选别浓密机采用本文所提方法进行自动控制时, 底流矿浆浓度的实际变化范围在 $31.9\,\% < y_2(t) < 33.7\,\%$, 底流矿浆流量变化

范围在 $358.4 < y_1(t) < 396.7\,\mathrm{m^3/h}$, 流量波动最大为 $\Delta y_{1\mathrm{sp}} = 12\,\mathrm{m^3/h}$, 满足控制目标式 (12) ∼ (14). 该控制系统在 2010 年在国内西北某选矿厂投入运行至今, 长期安全稳定运行结果表明, 能够将矿浆浓度和流量及其波动控制在目标值范围内, 保证矿浆在浮选机内的浮选时间及浮选机的矿浆液位稳定, 在金属回收率基本保持不变的情况下, 使得浮选精矿品位从 60.69 % 提高到 60.82 %, 提高了 0.13 个百分点.

表 5　自动控制时混合选别浓密机运行工况

Table 5　Operating states with the proposed method

	y_1 ($\mathrm{m^3/h}$)	$\lvert\Delta y_{1\mathrm{sp}}\rvert$ ($\mathrm{m^3/h}$)	y_2 (%)
Min	358.4	5	31.9
Max	396.7	12	33.7

5　结论

本文提出的混合选别浓密机底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制方法, 由流量设定控制和流量回路控制两层结构组成, 其中流量设定控制由矿浆流量预设定模块、基于模糊推理的流量设定补偿器流量设定保持器和基于规则推理的切换机制组成. 底流矿浆浓度和流量区间智能切换控制能够充分利用底流矿浆浓度和流量的变化区间, 通过切换机制选择流量设定保持器或补偿器, 尽可能较少改变矿浆流量设定值, 并使矿浆流量设定值的波动在所允许的范围内, 采用 PI 控制器使矿浆流量跟踪其设定值, 从而将底流矿浆浓度和流量及波动控制在目标值范围内. 长期工业应用的结果可以看出浓度的变化范围为 $31.9\,\% < y_2(t) < 33.7\,\%$, 流量的变化范围为 $358.4 < y_1(t) < 396.7\,\mathrm{m^3/h}$, 底流矿浆流量波动的最大值为 $12\,\mathrm{m^3/h}$, 均远小于工艺规定范围, 满足混合选别浓密机对底流矿浆浓度和流量控制目标的要求.

References

1 Ghose M K, Sen P K. Characteristics of iron ore tailing slime in India and its test for required pond size. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, **68**(1): 51−61

2 Diehl S. A regulator for continuous sedimentation in ideal clarifier-thickener units. *Journal of Engineering Mathematics*, 2008, **60**(3−4): 265−291

3 Segovia J P, Concha F, Sbarbaro D. On the control of sludge level and underflow concentration in industrial thickeners. *World Congress*, 2011, **18**(1): 8571−8576

4 Sidrak Y L. Control of the thickener operation in alumina production. *Control Engineering Practice*, 1997, **5**(10): 1417−1426

5 Shean B J, Cilliers J J. A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, **100**(3−4): 57−71

6 Maldonado M, Araya R, Finch J. Optimizing flotation bank performance by recovery profiling. *Minerals Engineeringl*, 2011, **24**(8): 939−943

7 Kim B H, Klima M S. Development and application of a dynamic model for hindered-settling column separations. *Minerals Engineering*, 2004, **17**(3): 403−410

8 Zheng Y Y. Mathematical Mode of Anaerobic Processes Applied to the Anaerobic Sequencing Batch Reactor [Ph. D. dissertation], University of Toronto, Canada, 2003

9 Fileti A M F, Antunes A J B, Silva F V, Silveira J, Pereira J A F R. Experimental investigations on fuzzy logic for process control. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(9): 1149−1160

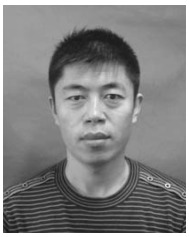
10 Zheng J M, Zhao S D, Wei S G. Application of self-tuning fuzzy PID controller for a SRM direct drive volume control hydraulic press. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(12): 1398−1404

11 Precup R E, Hellendoorn H. A survey on industrial applications of fuzzy control. *Computers in Industry*, 2011, **62**(3): 213−226

12 Li S T, Shue L Y, Shiue W. The development of a decision model for liquidity analysis. *Expert Systems with Applications*, 2000, **19**(4): 271−278

13 Lin S C, Tseng S S, Teng C W. Dynamic EMCUD for knowledge acquisition. *Expert Systems with Applications*, 2008, **34**(2): 833−844

14 Lequin O, Gevers M, Mossberg M, Bosmans M, Bosmans E, Triest L. Iterative feedback tuning of PID parameters: comparison with classical tuning rules. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(9): 1023−1033.



李海波　东北大学博士研究生. 主要研究方向为复杂工业过程的智能建模、优化与智能控制. 本文通信作者.
E-mail: lihb_neu@163.com
(**LI Hai-Bo**　Ph. D. candidate at Northeastern University. His research interest covers intelligent modeling, optimal and intelligent control of complex industrial process. Corresponding author of this paper.)

柴天佑　中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士. 1985 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制和流程工业综合自动化理论、方法与技术.
E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn
(**CHAI Tian-You**　Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent control and integrated automation of industrial process.)

赵大勇　东北大学博士研究生. 主要研究方向为复杂工业过程的智能建模与智能控制. E-mail: zdy_ln@163.com
(**ZHAO Da-Yong**　Ph. D. candidate at Northeastern University. His research interest covers intelligent modeling and intelligent control of complex industrial process.)