

泡沫图像特征驱动的锑粗选加药控制策略

吴 佳, 谢永芳[†], 阳春华, 桂卫华

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 锑粗选工序的加药控制直接影响精选与扫选的性能. 通常由人工观察泡沫手动调节药剂. 这种方式, 存在控制滞后、主观随意性大、易导致浮选性能不稳定甚至恶化的问题. 对此, 我们提出一种泡沫图像特征驱动的锑粗选加药控制策略. 利用概率支持向量回归方法建立基于锑粗选关键泡沫图像特征与加药量的入矿品位估计模型; 在此基础上, 采用操作模式匹配方法实现加药量的预设, 快速满足入矿品位类型变化后新的控制要求; 并采用基于区间II型模糊系统的加药反馈控制器减小泡沫状态与期望的偏差. 工业验证结果表明, 该方法能有效代替人工加药并改善了锑浮选性能.

关键词: 泡沫图像特征; 操作模式; 区间II型模糊控制; 支持向量回归

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Froth-image-features-driven control strategy for addition rates of reagents in stibium rougher flotation

WU Jia, XIE Yong-fang[†], YANG Chun-hua, GUI Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Dosing control for stibium rougher flotation has a direct impact on the performance of cleaner and scavenger flotation. Conventionally, operators regulate the addition rates of reagents through observing the froth status, which is with large delay and is highly subjective causing the flotation performance unstable and even deteriorated. To deal with this problem, we propose a froth-image-features-driven control strategy. Using probabilistic support vector regression method, a feed-ore grade estimation model is built based on the key froth image features and the addition rates of reagents; then in order to satisfy the new control requirements as soon as possible when the feed-ore grade is changed, we adopt the operational pattern method to preset the addition rates of reagents; and a feedback dosage controller is developed based on interval type II fuzzy control system to minimize the deviation between the froth status and their expectation. The industrial experimental results show that the proposed control strategy can substitute operators in regulating the addition rates of reagents, and improve the flotation performance.

Key words: froth image features; operational pattern; interval type II fuzzy control; support vector regress

1 引言(Introduction)

锑浮选包含锑粗选、锑精选I、II与锑扫选I、II等5个工序, 其中锑粗选的加药直接决定锑浮选的精矿与尾矿品位性能指标, 是一道关键工序. 由于缺乏精、尾矿品位在线检测设备, 目前采用“人工观察泡沫, 手动调节药剂”的控制方式, 存在加药控制滞后、主观随意性大的问题, 易造成精、尾矿品位波动大甚至不达标. 因此, 研究利用泡沫图像特征实现锑粗选自动加药的控制方法具有重要意义.

针对浮选过程加药控制问题, 近年来基于泡沫图像特征的加药量控制技术受到国内外学者的关注^[1-2].

Kaartinen等^[3]基于锌浮选的泡沫颜色、速度、尺寸、稳定度、负载率等图像特征与加药量之间的经验知识, 开发了一种基于专家规则的加药控制系统. Liu等^[4]基于锌浮选的透明窗、黑洞等泡沫图像特征采用偏最小二乘法建立了泡沫图像特征与加药量的关系模型, 并利用该模型实施了锌浮选的硫酸铜药剂量控制. Zhu等^[5]提出了一种基于铜泡沫尺寸概率密度函数的加药量控制方法. Gianni等^[6]利用泡沫尺寸大小实现了锌浮选的硫酸铜添加量控制. 以上研究为泡沫图像数据驱动的浮选加药控制奠定了一定的基础, 但对于锑粗选, 泡沫图像特征驱动的加药控制亟待解决的问

收稿日期: 2015-03-20; 录用日期: 2015-09-17.

[†]通信作者. E-mail: yfxie@csu.edu.cn; Tel.: +86 731-88836876.

国家自然科学基金项目(61134006, 61304126, 61473318), 高等学校博士学科点专项科研基金(20120162110076)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61134006, 61304126, 61473318) and a Grant from the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20120162110076).

题有: 1) 如何根据入矿品位及时调整加药量. 锑浮选过程入矿品位波动频繁, 为保证精、尾矿品位满足生产要求, 泡沫图像特征期望应根据入矿品位类型设定, 加药量也需随之调整. 当发现入矿品位类型变化后, 为使泡沫状态快速达到新的期望区间内, 需要根据入矿品位类型及时调整加药量. 而锑粗选药剂种类繁多且作用互相耦合, 工人凭经验难以一次将药剂调整到位; 2) 当工况波动或发生迁移时, 如何更有效的实施药剂调整. 锑粗选槽中剧烈的搅拌和充气作用使得矿物粒子和泡沫动态波动, 再加上给矿量与药剂浓度的波动干扰, 药剂调整后泡沫状态往往在一个区间内波动变化而具有不确定性, 比如多次增加相同量硝酸铅时, 泡沫尺寸每次都会变小但又不尽相同. 工人只能凭主观经验知识反复多次调整药剂, 容易造成工况不稳定甚至恶化浮选性能.

为此, 针对锑粗选过程提出一种泡沫图像特征驱动的锑粗选加药量控制策略, 主要包括以下3个部分:

1) 基于泡沫图像特征与加药量的入矿品位估计. 泡沫状态是入矿品位与加药量共同作用的结果, 已知泡沫状态与加药量就能反推出入矿品位. 鉴于此, 作者提出一种基于泡沫图像特征与加药量的入矿品位估计模型^[7]. 该模型采用多T-S模糊模型结构, 并针对泡沫的动态波动会降低估计模型精准性的问题采用概率支持向量机(probabilistic support vector regress, PSVR)方法建立各估计子模型, 实际应用表明该方法能有效估计入矿品位. 在此基础上, 将入矿品位进行分类, 然后根据入矿品位估计模型的输出得到当前入矿类型, 并根据入矿类型调整泡沫图像特征的设定值, 用以指导浮选加药.

2) 基于操作模式匹配的加药量预设方法. 锑粗选中, 药剂种类繁多, 作用互相耦合, 为及时将加药量调整到合理值附近以尽快适用入矿品位类型变化后新的生产要求, 从历史经验中总结出基本加药量制度是可行的方法. 基于操作模式的优化控制是一种基于历史经验知识的适用于多参数调整的工业过程控制技术^[8-9]. 它由操作模式评估、优化操作模式库、操作匹配等模块组成, 通过操作模式评估模块对历史操作模式进行评价, 将优良操作模式存入优化操作模式库, 并根据输入条件从优化操作模式库中匹配出最佳操作模式, 最后从最佳操作模式中提取操作参数用于控制输出. 基于操作模式匹配的加药量预设根据入矿品位从历史优化操作库中匹配得到一种优化的基准加药制度, 用以实现加药量的快速粗调.

3) 基于区间II型模糊系统的加药量反馈控制器. 在锑粗选中, 外部干扰因素的存在使得药剂调整后泡沫图像特征的变化值在一个区间内不确定, 当泡沫状态与期望存在偏差时难以客观有效的调整药剂. II型模糊集是Zadeh在1975年为增强I型模糊控制系统处

理不确定性的能力而提出的^[10]. II型模糊控制系统采用了基于模糊隶属度函数表示的II型模糊集, 因此可以同时语言和不确定性进行建模^[11], 近年来II型模糊系统发展成处理不确定场合控制问题的重要手段, 广泛应用于各个领域^[12-13]. 基于区间II型模糊系统的加药量反馈控制器根据泡沫图像特征的反馈偏差对加药量进行不断修正, 使得泡沫更好的稳定在设定值附近.

将提出的控制策略进行工业试验, 试验结果表明该方法能有效替代人工加药, 对稳定浮选工况和改善浮选性能起到重要作用.

2 锑粗选加药控制策略(Dosage control strategy for stibium rougher)

锑浮选工艺如图1所示, 矿浆进入锑粗选后, 大部分含锑矿物粒子与泡沫碰撞、粘附并随气泡上升然后被刮出进入锑精选, 而脉石随底流进入锑扫选, 在锑精选I, II中含锑矿物与脉石进一步分离使得精矿中的含锑量得到提高, 锑扫选I, II则尽可能回收尾矿中的含锑矿物. 因此, 锑粗选直接影响精选与扫选性能, 对浮选工艺性能起决定性作用. 在锑粗选中添加黑药、硫酸铜、硝酸铅、黄药、2#油等5种药剂改善含锑矿物的可浮性. 人工调整药剂的方式可将一个控制周期分为3个阶段: 过渡阶段、稳定阶段和恶化阶段, 如图2所示. 假设在 t_k 时刻人工估计入矿品位 \hat{I}_k 后将药剂调整量为 P_k , 浮选进入过渡阶段, 药剂与矿物粒子开始发生物理化学反应, 泡沫状态也随之开始变化, 直至物理化学反应完全, 泡沫状态相对稳定, 浮选进入稳定阶段, 之后若入矿品位发生变化引起泡沫状态重新变化, 浮选进入恶化阶段, 直至 t_{k+1} 时刻入矿品位相对稳定进入下一个药剂调整周期. 人工加药方式具有随意性且工人经常忘记调整药剂或药剂调整滞后, 易造成精、尾矿品位波动大, 难以满足生产要求.

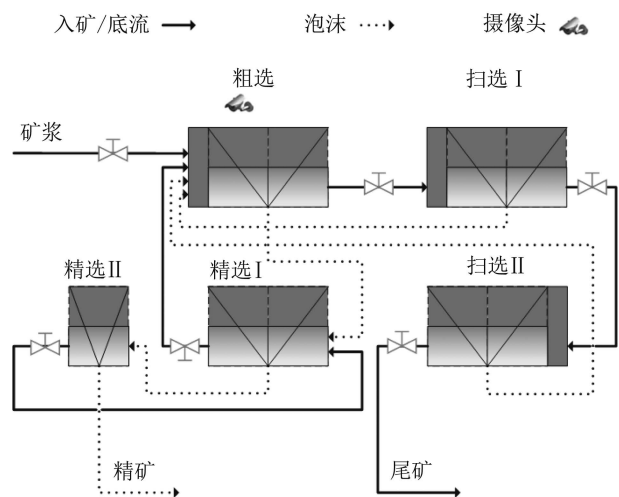


图1 锑浮选工艺流程

Fig. 1 Stibium flotation process

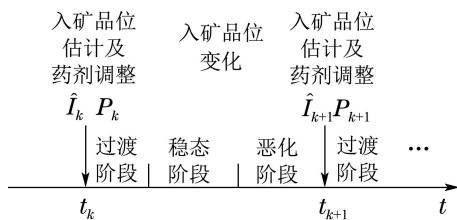


图 2 人工加药模式

Fig. 2 Operators' dosage control strategy

为改善浮选性能, 在锑粗选安装泡沫图像分析系统. 分别采用改进的谷底边缘检测、亮点修复与多颜色空间泡沫颜色特征提取以及尺度不变特征点配准等方法^[10-16]提取了泡沫尺寸、颜色、速度等13种图像特征. 针对泡沫图像特征对浮选工况表述能力不尽相同且存在相关性的问题, 采用敏感性指数与属性重要度^[17]的方法对泡沫图像特征集进行约简, 得到蓝色分量均值、泡沫平均尺寸、承载率、与色度等4种能充分反映浮选工况信息的关键泡沫图像特征. 并根据人工加药模式, 提出如图3所示的控制策略, 其主要由入矿品位估计模型、基于操作模式的加药预设与基于区间II型模糊系统的加药反馈控制器3个单元组成, 其中 \hat{I} , P , S 分别代表入矿品位估计、加药量、泡沫图像特征, P^a , P^b 分别为加药量的预设值和反馈控制输出, S^* 为泡沫图像特征的期望值.

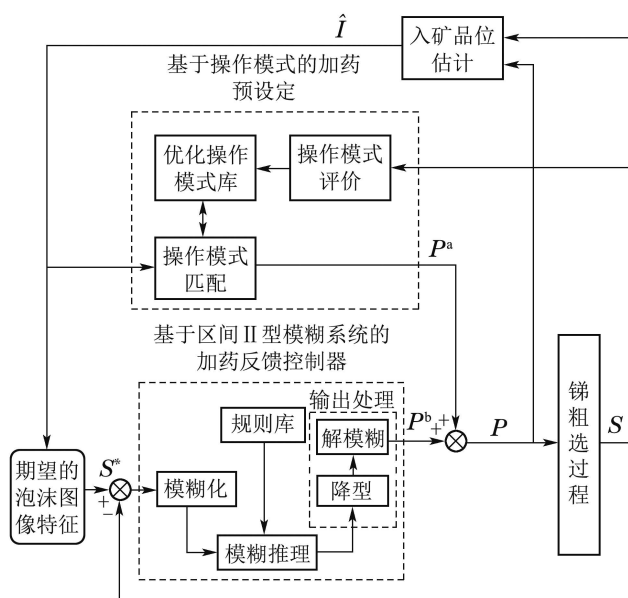


图 3 加药控制策略

Fig. 3 Reagents dosage control strategy

2.1 入矿品位估计(Estimation for feed grade)

在每一个药剂调整周期开始时, 都要对入矿品位进行估计. 入矿品位的估计模型采用多T-S模型结构, 其输入为当前图像特征与加药量, 输出为入矿品位的估计结果. 先通过模糊C均值聚类法将样本数据的输

入部分进行聚类, 然后针对每类样本采用PSVR方法进行建模^[7]. PSVR建模方法是入矿品位估计模型的核心. 设样本集为 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$, $x_i = [S_i, P_i] = [s_{i,1}, \dots, s_{i,4}, p_{i,1}, \dots, p_{i,5}]$, $y_i = I_i$, 经过核主元分析后将 x_i 转换为 x'_i , 标准的支持向量机在特征空间中通过求解式(1)以获取最优超平面,

$$\begin{cases} \min J(\omega, b, \varepsilon_i) = \frac{1}{2}\omega^T\omega + \frac{\varsigma}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2, \\ \text{s.t. } y_i = \omega^T\Phi(x'_i) + b + \varepsilon_i, \end{cases} \quad (1)$$

其中: ς 为惩罚系数, ε_i 为松弛变量, $\Phi(\cdot)$ 为非线性映射函数. 因为泡沫图像特征是动态波动的, 数据存在不确定性, 导致最优超平面具有不确定性, 式(1)中 $\|\omega\|$ 取值会在一定范围内随机分布. 因此, 将式(1)转换为求解最优超平面的期望

$$\begin{cases} \min J(\omega, b, \varepsilon_i) = \\ \frac{1}{2} \int_{\|\omega\|} \|\omega\|^2 \rho(\|\omega\|) d(\|\omega\|) + \frac{\varsigma}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2, \\ \text{s.t. } y_i = \omega^T\Phi(x'_i) + b + \varepsilon_i, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\rho(\|\omega\|)$ 为 $\|\omega\|$ 的概率密度分布函数. 最后回归模型的最优决策函数为

$$f(x') = \sum_{i=1}^N \alpha_i k(x'_i, x') + b, \quad (3)$$

其中: $k(x'_i, x') = \Phi(x'_i) \cdot \Phi(x')$ 为核函数, α_i 为 Lagrange 乘子. 求解式(2)的方法是: 首先对样本进行随机抽样获取多个训练子集, 然后求取每个子集对应的 $\|\omega\|$, 最后对 $\rho(\|\omega\|)$ 进行估计, 采用智能搜索算法求解式(2). 根据生产实践经验, 矿石性质一般会随着入矿品位的变化而变化, 将矿源按照入矿品位进行分类, 然后根据入矿品位类型进行加药. 本文将入矿品位类型分为低、偏低、中、偏高、高品位等5种类型, 对应的入矿品位变化区间为(0, 1.0%), [1.0%, 1.25%), [1.25%, 1.55%), [1.55%, 1.8%), [1.8%, ∞). 当入矿品位类型发生变化, 泡沫图像特征的期望值需要调整. 因此, 在获取入矿品位的直接估计结果后, 还需根据入矿品位类型的划分区间输出入矿品位类型.

2.2 基于操作模式的加药预设(Preset dosing rates based on operational pattern)

当入矿品位类型估计结果与上一个控制周期的估计结果不同时, 通常需要大幅度调整药剂量. 本文采用基于操作模式的方法对药剂进行预设. 将锑粗选中第 j 个操作模式定义如表1所示.

表 1 锑粗选操作模式定义

Table 1 Definition of operational pattern for stibium rougher flotation

输入条件	状态参数	操作参数
$i_{j,1}$	$s_{j,1} \sim s_{j,4}$	$p_{j,1} \sim p_{j,5}$

表1中: $i_{j,1}$ 为第 j 个操作模式的入矿品位, $s_{j,1} \sim s_{j,4}$ 与 $p_{j,1} \sim p_{j,5}$ 分别为第 j 个操作模式的4个关键泡沫图像特征与5个药剂添加量. 操作模式 F_h 与 F_j 的相似度定义为

$$K(F_h, F_j) = \exp(-(i_{h,1} - i_{j,1})^2). \quad (4)$$

2.2.1 操作模式评价(Evaluation for operational pattern)

对历史数据中的每个操作模式进行评价, 选择较优的操作模式存储到优化操作模式库. 根据泡沫图像特征建立第 j 个操作模式的评价模型:

$$E_j = \sum_{h=1}^4 \lambda_h \|1 - s_{j,h}/s_h^*\|, \quad (5)$$

其中: $s_{j,h}$ 为第 j 个操作模式中的第 h 个泡沫图像特征值, s_h^* 为第 h 个泡沫图像特征的期望值, λ_h 为权系数, 其大小可根据经验给出. 当 E_j 越小, 操作模式越优. 当 $E_j \leq \alpha$ 将操作模式根据入矿品位类型存入相应的优化操作模式库, α 为给定阈值.

2.2.2 操作模式匹配(Operational pattern retrieval)

首先根据入矿品位类型的估计结果确定优化操作模式库, 然后根据入矿品位的估计结果与式(4)从优化操作模式库中找到相似度满足要求的操作模式. 原则上匹配出的操作模式集中的单个操作模式可以输出其操作参数作为加药量的预设定值. 然而, 药剂的耦合作用, 使得不同的操作模式可能导致相近的泡沫状态, 因此, 需从匹配出的操作模式集中找到概率密度最大的操作模式. 设操作模式 F_1, F_2, \dots, F_n 为检索出的操作模式集, 根据式(6)计算操作模式 $F_h, h = 1, 2, \dots, n$ 的密度估计^[18],

$$\rho(F_h) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\|F_h - F_j\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

其中: $\|F_h - F_j\|^2 = \sum_{b=1}^5 (p_{h,b} - p_{j,b})^2$, $\sigma = \{\|F_h\|\}_{h=1}^n$ 的标准差. 设 $k-1$ 与 k 时刻的入矿品位类型估计结果分别为 $\hat{I}_c(k-1)$ 和 $\hat{I}_c(k)$, F_h 为根据式(6)匹配出的操作模式, 则加药预设定为

$$P^a(k) = \begin{cases} [p_{h,1}, \dots, p_{h,5}], & \hat{I}_c(k) \neq \hat{I}_c(k-1), \\ 0, & \hat{I}_c(k) = \hat{I}_c(k-1). \end{cases} \quad (7)$$

2.3 基于区间II型模糊系统的反馈控制器(Feedback controller based on interval type II fuzzy system)

当入矿品位类型与前一控制周期相同而泡沫图像特征与期望值存在偏差时, 采用基于区间II型模糊系统的方法对加药量进行反馈调整. 在经典的I型模糊系统中, 系统的模糊隶属度一旦确定下来, 其数据的隶属度值也就唯一确定. 从系统测量的输入输出数据出发, 数据的隶属度是点输入对应点输出. 而实际的

系统中, 噪声和干扰不可避免, 测量数据的模糊隶属度值与系统实际数据的模糊隶属度值可能存在不确定的偏差, 而输入与输出为点映射的经典的I型模糊系统无法有效处理系统数据存在的这种不确定性. 若将系统数据的隶属度进一步模糊化, 则输入与输出为数据隶属度的模糊集合与模糊集合(或区间与区间)之间的映射, 因此将增强系统处理数据不确定性的能力. 设 \tilde{A} 为定义域在 X 上的II型模糊集, $x \in X$, 则

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \left(\int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u)/u \right) / x, \quad (8)$$

其中: $u \in J_x$ 为主隶属度, $\mu_{\tilde{A}}(x, u) \in [0, 1]$ 为次隶属度. 由于对模糊集合 \tilde{A} 的主隶属度值再次进行模糊化, 增强了集合的模糊性, 从而提高其处理不确定性的能力. 当次隶属度均为1时, \tilde{A} 为区间II型模糊集. 与I型模糊系统类似, II型模糊系统由模糊化、规则库、模糊推理、降型与解模糊等模块组成. 基于区间II型模糊系统的加药反馈控制器先将泡沫图像特征的偏差进行模糊化, 然后基于控制规则库模糊推理机根据模糊输入量推理出加药量的模糊语言解, 最后通过降型与解模糊得到药剂的调整量.

2.3.1 药剂调整量与泡沫图像特征偏差的模糊化(Fuzzification for regulations of dosing rates and errors of froth image features)

药剂调整量的模糊化. 根据工人操作习惯将药剂调整方式分为正大调(PB)、正中调(PM)、正小调(PS)、零调整(Z)、负小调(NS)、负中调(NM)、负大调(NB)等几种模式. 药剂调整量为离散值, 采用三角型的隶属度函数描述模糊语言较为合理. 因此, 采用式(9)计算各加药量的主隶属度:

$$\begin{cases} \bar{u}_{\tilde{F}}(\Delta p) = \begin{cases} (\Delta p - L_L)/(c - L_L), & L_L \leq \Delta p \leq c, \\ (R_R - \Delta p)/(R_R - c), & c \leq \Delta p \leq R_R, \end{cases} \\ \underline{u}_{\tilde{F}}(\Delta p) = \begin{cases} (\Delta p - L_R)/(c - L_R), & L_R \leq \Delta p \leq c, \\ (R_L - \Delta p)/(R_L - c), & c \leq \Delta p \leq R_L, \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中: Δp 为药剂调整量, $[L_L, L_R]$, c , $[R_L, R_R]$ 分别表示三角型函数的左端点区间、中心与右端点区间, $\bar{u}_{\tilde{F}}(\Delta p)$ 与 $\underline{u}_{\tilde{F}}(\Delta p)$ 分别表示主隶属度的上界和下界.

泡沫图像特征偏差的模糊化. 将每个泡沫图像特征的偏差模糊化为7种变化模式. 由于图像特征是连续变化的, 采用高斯型隶属度函数较为合适, 并认为隶属度函数中心不确定. 对每个图像特征进行聚类, 设聚类后的中心为 $C'_i, i = 1, \dots, 7$, 因为变化模式具有对称性, 所以可根据式(10)得到隶属度函数的中心区间

$$C_i = \begin{cases} [-\max(|C'_i|, |C'_{8-i}|), -\min(|C'_i|, |C'_{8-i}|)], \\ \quad i \leq 3; \\ [-|C'_i|, |C'_i|], \quad i = 4; \\ [\min(|C'_i|, |C'_{8-i}|), \max(|C'_i|, |C'_{8-i}|)], \\ \quad 5 \leq i \leq 7. \end{cases} \quad (10)$$

计算各类的样本标准差 σ_i , 并分别以 C_i 为中心, $\max(\sigma_i, \sigma_{8-i})$ 为标准差采用高斯函数对图像特征模糊化.

2.3.2 模糊规则库的建立(Rule base setup)

模糊规则库是模糊系统的关键. 针对区间II型模糊系统, 文献[19]分别介绍了用于提取规则的5种品质度分别为置信度、支持度、可靠度、异常度与简易度. 本文采用其中的支持度与置信度提取控制规则. 设第 l 条规则形式如式(11):

$$R^l : \text{IF } \Delta s_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l, \dots, \text{ and } \Delta s_m \text{ is } \tilde{F}_m^l, \\ \text{THEN } \Delta p_1 \text{ is } \tilde{G}_1^l, \dots, \text{ and } \Delta p_n \text{ is } \tilde{G}_n^l, \quad (11)$$

其中: Δp_i 和 Δs_j 分别表示第 i 种药剂的调整量与第 j 个图像特征的偏差, \tilde{F}_i^l 与 \tilde{G}_j^l 分别表示 Δp_i 和 Δs_j 的II型模糊语言集, $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n, l=1, \dots, M$. 并设 $\Delta P_j = [\Delta p_{j,1}, \dots, \Delta p_{j,5}]$ 与 $\Delta S_j = [\Delta s_{j,1}, \dots, \Delta s_{j,4}]$ 分别表示第 j 个样本的药剂调整量与图像特征偏差, $\{\Delta P_j, \Delta S_j\}_{j=1}^N$ 为样本集, N 为样本数, 将第 l 条规则的置信度与支持度的定义如下:

$$\begin{cases} T^l = \sum_{k=1}^N u_{\tilde{G}_i^l}(\Delta P_k) \times u_{\tilde{F}_i^l}(\Delta S_k) / \\ \quad \sum_{k=1}^N u_{\tilde{F}_i^l}(\Delta S_k), \\ C^l = \sum_{k=1}^N u_{\tilde{G}_i^l}(\Delta P_k) \times u_{\tilde{F}_i^l}(\Delta S_k) / N, \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$u_{\tilde{F}_i^l}(\Delta S_k) = [\prod_{i=1}^4 \bar{u}_{\tilde{F}_i^l}(\Delta s_{k,i}) + \prod_{i=1}^4 \underline{u}_{\tilde{F}_i^l}(\Delta s_{k,i})] / 2, \\ u_{\tilde{G}_i^l}(\Delta P_k) = [\prod_{j=1}^5 \bar{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_{k,j}) + \prod_{j=1}^5 \underline{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_{k,j})] / 2,$$

$\bar{u}_{\tilde{F}_i^l}(\Delta s_{k,i})$ 与 $\underline{u}_{\tilde{F}_i^l}(\Delta s_{k,i})$ 分别表示第 k 个样本隶属于第 i 个图像特征偏差的第 l 个模糊语言集的上界与下界, $\bar{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_{k,j})$ 与 $\underline{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_{k,j})$ 分别表示第 k 个样本隶属于第 j 个药剂调整量的第 l 个模糊语言集的上界与下界. 提取加药控制规则: 1) 当同一种药剂调整模式导致多种泡沫图像特征偏差模式时, 保留支持度最大的规则, 其他剔除; 2) 当同一种泡沫图像特征偏差模式可选择多种药剂调整模式时, 保留置信度最大的规则, 其他剔除.

2.3.3 区间II型模糊推理 (Interval type II fuzzy inference)

设输入向量 $\Delta S = (\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3, \Delta s_4)$, 将其模糊化为区间II型模糊集 $\tilde{A}_{\Delta s}$, 其隶属度记为

$$u_{\tilde{A}_{\Delta s}}(\Delta S) = \prod_{i=1}^4 u_{\Delta \tilde{S}_i}(\Delta s_i), \quad (13)$$

其中: $\Delta \tilde{S}_i, i=1, \dots, 4$ 表示描述输入模糊集合的语言变量, \sqcup, \sqcap 分别代表 join 和 meet 操作^[12]. 对某一输出 Δp_i , 基于规则 R^l 的推理输出为区间II模糊集 $\tilde{B}_i^l = \tilde{A}_{\Delta S} \circ R^l$, 其隶属度为

$$u_{\tilde{B}_i^l}(\Delta p_i) = u_{\tilde{A}_{\Delta S} \circ R^l} = \bigcup_{\Delta s \in \Delta S} [u_{\tilde{A}_{\Delta S}}(\Delta S) \sqcap u_{R^l}(\Delta S, \Delta p_i)], \quad (14)$$

其中: $u_{R^l}(\Delta S, \Delta p_i) = \prod_{k=1}^4 u_{\tilde{F}_k^l}(\Delta s_k) \sqcap u_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_i)$; 假设当前的泡沫图像特征偏差为 $\Delta S = \Delta S'$, 采用单值模糊化, 则式(14)简化为

$$u_{\tilde{B}_i^l}(\Delta p_i) = u_{\tilde{G}_i^l}(\Delta p_i) \sqcap [\prod_{k=1}^4 u_{\tilde{F}_k^l}(\Delta s'_k)]. \quad (15)$$

式(15)等式右边括号中的项为激活集

$$\begin{cases} f^l(\Delta s') = \prod_{k=1}^4 u_{\tilde{F}_k^l}(\Delta s'_k) = [\underline{f}^l, \bar{f}^l], \\ \underline{f}^l = \prod_{i=1}^4 \bar{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta s'_i), \\ \bar{f}^l = \prod_{i=1}^4 \underline{u}_{\tilde{G}_i^l}(\Delta s'_i). \end{cases} \quad (16)$$

2.3.4 降型及解模糊 (Type reducer and defuzzification)

采用集合中心(center of sets, COS)型降型法对加药量进行推理^[12], 其结果为

$$\begin{cases} \Delta p_{i_{\text{cos}}}(\Delta S) = [\Delta p_i^l(\Delta S), \Delta p_i^r(\Delta S)], \\ \Delta p_i^l(\Delta S) = \min_{\forall f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} [\sum_{l=1}^M \Delta p_{il}^l f^l / \sum_{l=1}^M f^l], \\ \Delta p_i^r(\Delta S) = \max_{\forall f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} [\sum_{l=1}^M \Delta p_{ir}^l f^l / \sum_{l=1}^M f^l], \end{cases} \quad (17)$$

其中: $[\Delta p_{il}^l, \Delta p_{ir}^l]$ 为离线采用KM法^[12]得到的集合 \tilde{G}_i^l 的质心区间, $[\Delta p_i^l(\Delta S), \Delta p_i^r(\Delta S)]$ 可在线采用KM算法或Wu-Mendel uncertainty bounds近似计算方法^[20]得到. 降型得到I型区间集 $\Delta p_{i_{\text{cos}}}(\Delta S)$, 通过输出区间中心解模糊, 最终药剂调整量为

$$\Delta p_i = (\Delta p_i^l(\Delta S) + \Delta p_i^r(\Delta S)) / 2. \quad (18)$$

设 $k-1$ 时刻的加药量为 $P(k-1)$, k 时刻的药剂调整量为 $\Delta P(k) = [\Delta p_i(k)]$, 则 k 时刻的药剂反馈控制输出为

$$P^b(k) = \begin{cases} 0, & \hat{I}_c(k) \neq \hat{I}_c(k-1), \\ P(k-1) + \Delta P(k), & \hat{I}_c(k) = \hat{I}_c(k-1). \end{cases} \quad (19)$$

3 工业试验(Industrial experiment)

为验证本文所提方法的有效性,在一条日处理800吨的锑浮选生产线上进行了多次工业试验.每次试验进行一周,为使浮选过程加药量调整后有足够的恢复时间,将加药量的控制周期设为30 min,其中每个控制周期的前12 min设定为过渡阶段,第12~15 min为稳定阶段,最后3 min根据入矿品位的变化判断是否重新设定泡沫图像特征.5种入矿品位类型下的泡沫图像特征期望值分别为

$$\begin{aligned}
 S_1^* &= [97.4, 452.5, 50.0, 112.1], \\
 S_2^* &= [88.4, 478.9, 41.8, 103.6], \\
 S_3^* &= [96.0, 516.2, 42.0, 139.6], \\
 S_4^* &= [102.7, 1133.7, 51.6, 176.4], \\
 S_5^* &= [95.6, 1043.5, 41.4, 154.4].
 \end{aligned}$$

在每次试验中,泡沫分析系统将估计入矿品位及类型并给出泡沫图像特征期望值作为指导.在试验1中工人根据经验进行加药以使得泡沫状态控制到目标区,在试验2中采用基于操作模式的预设定控制器对加药量进行控制,在试验3中采用基于操作模式的预设定控制器与基于经典模糊系统的反馈控制器对加药量进行控制,在试验4中采用基于操作模式的预设定控制器与基于区间II模糊系统的反馈控制器对加药量进行控制.在试验2-4中,为获取优化操作模式库,设 $\alpha = 0.1$,可从历史数据中获取329个优化操作模式.在试验3中,在构建基于经典模糊系统的反馈控制器过程中,药剂调整量采用三角型隶属度函数进行模糊化,三角型隶属度函数的左端点、中心与右端点取式(9)中的 L_R, c 与 R_L ,泡沫图像特征偏差采用高斯函数进行模糊化,并取式(10)中的 $(|C'_i| + |C'_{8-i}|)/2$ 与 $\max(\sigma_i, \sigma_{8-i})$ 作为高斯函数的中心与标准差,取274条锑粗选历史数据,计算规则的支持度、置信度并进行约简后,可获得66条锑粗选加药控制规则.在试验4中,在构建基于区间II型模糊系统的反馈控制系统过程中,采用式(9)-(10)对泡沫图像特征偏差与药剂调整量的模糊化后,得到的部分结果如图4,取274条锑粗选历史数据,计算规则的支持度、置信度并进行约简后,可获得65条锑粗选加药控制规则,表2为锑粗选部分控制规则.

表2 锑粗选部分加药量控制规则

Table 2 Partial control rules for stibium rough flotation

	图像特征偏差				药剂调整量				
	Δs_1	Δs_2	Δs_3	Δs_4	Δp_1	Δp_2	Δp_3	Δp_4	Δp_5
1	NS	PB	PM	Z	NS	PM	NS	PM	PB
2	NS	NM	NS	Z	NM	NM	NS	NM	NB
⋮									
65	PS	NM	Z	NB	NB	PS	NS	NM	NM

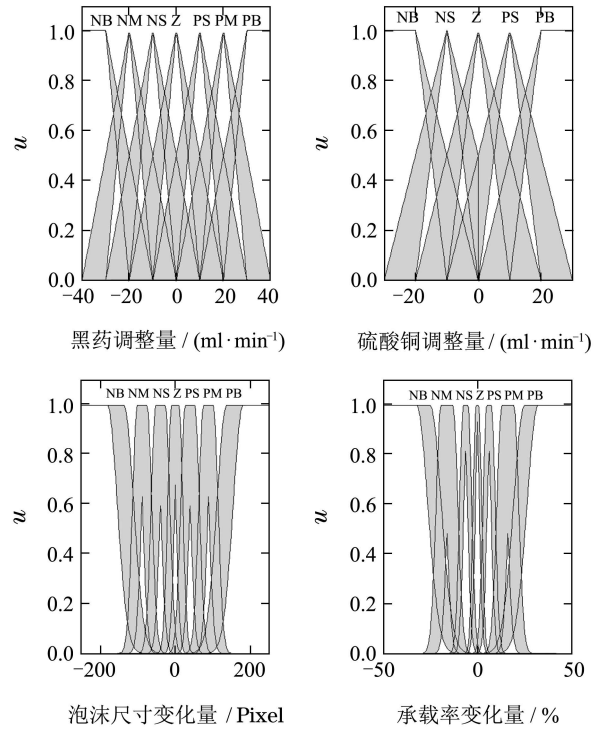
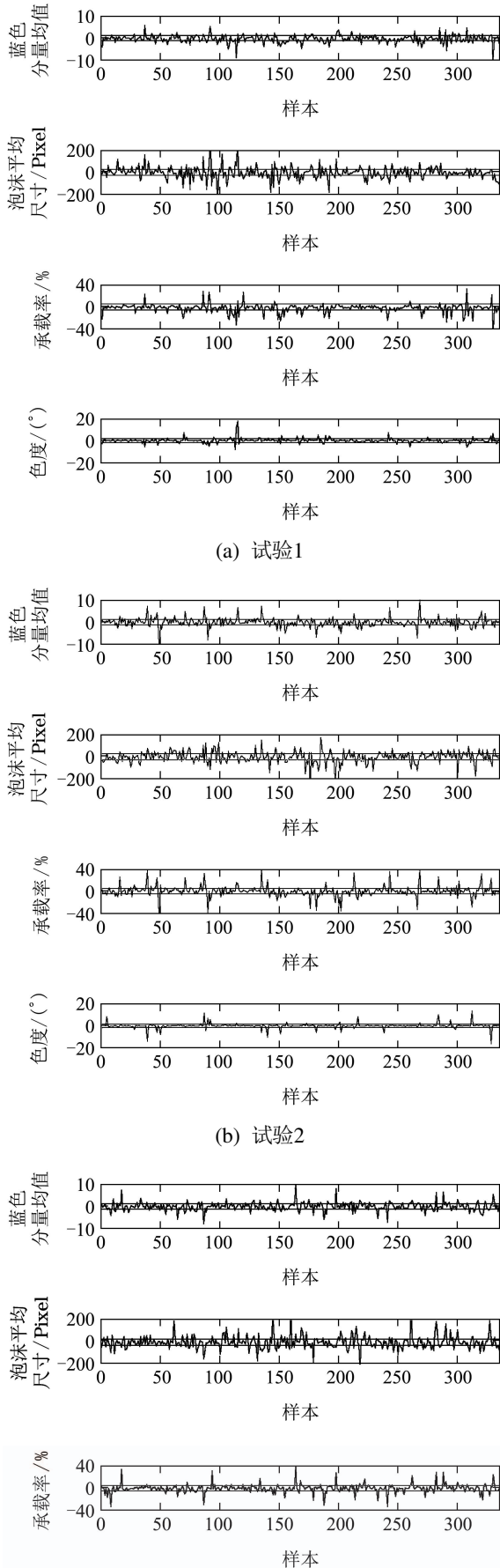


图4 部分泡沫图像特征偏差与药剂调整量的模糊化
Fig. 4 Fuzzification of partial froth image features' errors and regulation of reagents' addition rates

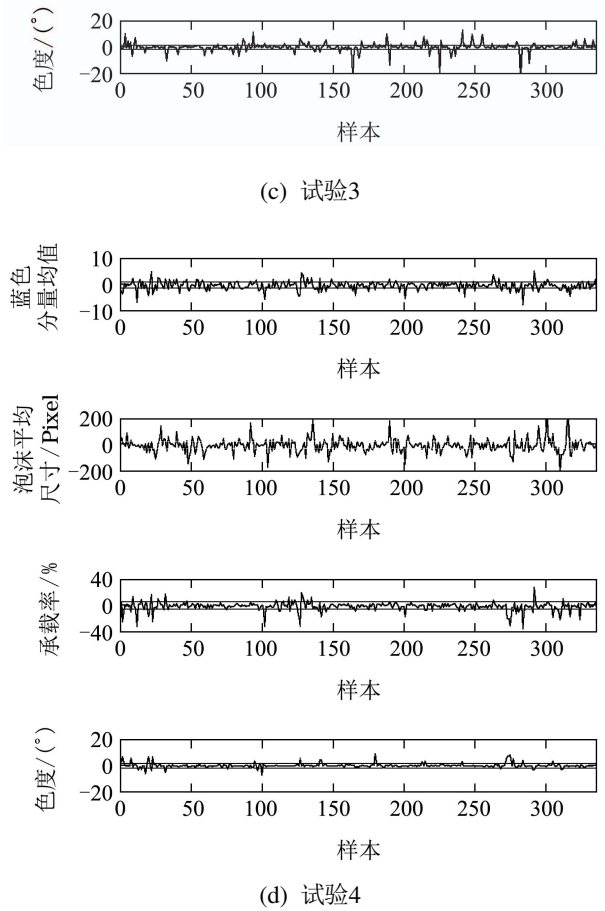
为衡量控制效果,利用模糊语言PS, NS设定每种泡沫图像特征的容许控制偏差区间,则将容许控制偏差区间设为 $[C_{3,R}, C_{5,L}]$,计算每个控制周期稳定阶段内的泡沫图像特征均值落入容许控制偏差区间的概率,并根据式(5)定义评价指数 $EI = \sum_{j=1}^N E_j/N$,其中式(5)中的 $\lambda_h, h = 1, \dots, 4$ 分别取0.35, 0.3, 0.25, 0.1.4个试验中泡沫图像的控制偏差如图5所示((a)-(d)分别对应试验1-4),锑粗选的4个泡沫图像特征落入允许控制偏差区的概率如表3所示,评价指数分别为0.050, 0.058, 0.053, 0.048.由此可以看出:1)若不考虑系统的外部干扰和工况本身可能的迁移,只采用预设定方式对加药量进行调节,控制效果基本可行但得到的控制结果最差;2)考虑系统存在外部干扰因素和工况存在迁移的可能性时,增加反馈控制器能取得更好的控制效果,且采用基于区间II型模糊系统的反馈控制效果比基于经典模糊系统的反馈控制效果更好;3)本文所提的自动加药方法(试验4)与人工加药方式(试验1)的控制效果最为接近,例如:图6为两种加药方式下的泡沫图像样本对比,图6(a)为偏低入矿品位时人工加药(图5中第187时段)与自动加药(图5中第115时段)下的泡沫图像样本,对应时段的泡沫图像特征均值分别为 $[87.0 \ 477.8 \ 47.8 \ 100.5]$, $[89.8 \ 450.3 \ 48.3 \ 103.7]$,图6(b)为偏高入矿品位试验1(图5中第174时段)与试验4(图5中第257时段)的泡沫图像样本,对应时段的泡沫图像特征均值分别为 $[102.1 \ 1139.9 \ 50.0 \ 175.3]$, $[102.2 \ 1148.6 \ 49.0 \ 176.0]$;

4) 本文所提的控制方法的控制效果最好. 因此, 本文所提的控制方案能有效代替人工对铋粗选加药量进行自动控制.



(a) 试验1

(b) 试验2



(c) 试验3

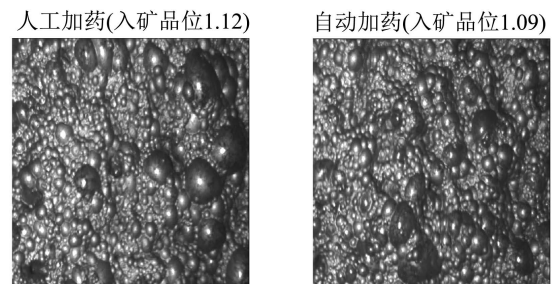
(d) 试验4

图 5 泡沫图像特征的控制偏差

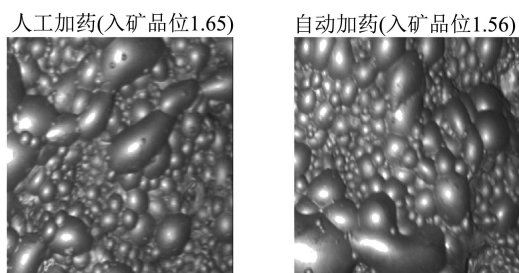
Fig. 5 Control errors of froth image features

表 3 泡沫图像特征落入允许控制偏差区间的概率
Table 3 The probability of froth image features fall in the permissible intervals of control errors

试验	概率/%			
	蓝色分量均值	泡沫平均尺寸	承载率	色度
1	60.40	51.50	77.70	83.90
2	59.50	50.30	75.60	77.70
3	61.30	49.70	67.00	90.20
4	62.20	52.10	78.90	88.40



(a) 偏低入矿品位试验1与试验4的泡沫图像样本



(b) 偏高入矿品位试验1与试验4的泡沫图像样本

图6 不同控制方式下的泡沫图像个例

Fig. 6 Froth samples under different control ways

4 结语(Conclusions)

通过分析钨粗选过程特点, 提出泡沫图像特征驱动的加药量控制策略。针对入矿品位频繁波动的问题, 利用泡沫图像特征与加药量对入矿品位进行在线估计。在此基础上, 对入矿品位进行分类, 并根据入矿品位类型采用操作模式匹配的方法对加药量进行预设。当入矿类型没有变化而浮选受外部干扰发生工况迁移时, 采用区间II模糊系统的方法对加药量进行反馈调整。工业试验证明该方法能有效实施加药量自动控制, 改善了钨浮选性能, 并为进一步优化浮选过程控制奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 桂卫华, 阳春华, 徐德刚, 等. 基于机器视觉的矿物浮选过程监控技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1879 – 1888. (GUI Weihua, YANG Chunhua, XU Degang, et al. Machine-vision-based online measuring and controlling technologies for mineral flotation a review [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1879 – 1888.)
- [2] SHEAN B J, CILLIERS J J. A review of froth flotation control [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 100(3/4): 57 – 71.
- [3] KAARTINEN J, HATONEN J, HYOTYNIEMI H, et al. Machine-vision-based control of zinc flotation—a case study [J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(12): 1455 – 1466.
- [4] LIU J J, MACGREGOR J F. Froth-based modeling and control of flotation processes [J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21(9): 642 – 651.
- [5] ZHU J Y, GUI W H, YANG C H, et al. Probability density function of bubble size based reagent dosage control for flotation process [J]. *Asian Journal of Control*, 2014, 16(4): 1 – 13.
- [6] BARTOLACCI G, PELLETIER P, TESSIER J, et al. Application of numerical image analysis to process diagnosis and physical parameter measurement in mineral processes—Part I: Flotation control based on froth textural characteristics [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6): 734 – 747.
- [7] 吴佳, 谢永芳, 阳春华, 等. 基于泡沫图像特征的金钨浮选入矿品位估计 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2): 262 – 266. (WU Jia, XIE Yongfang, YANG Chunhua, et al. Mineral concentration estimation of feed ore in gold and stibium flotation based on froth image features [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(2): 262 – 266.)
- [8] 桂卫华, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于数据驱动的铜闪速熔炼过程操作模式优化及应用 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 717 – 724. (GUI Weihua, YANG Chunhua, LI Yonggang, et al. Data-driven operational-pattern optimization for copper flash smelting process. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 717 – 724.)
- [9] 伍铁斌, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于糊操作模式的砷盐除钴过程操作参数协同优化 [J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1690 – 1698. (WU Tiebin, YANG Chunhua, LI Yonggang, et al. Fuzzy operational-pattern based operating parameters collaborative optimization of cobalt removal process with arsenic salt [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1690 – 1698.)
- [10] ZADEH L A. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning [J]. *Information Sciences*, 1975, 8(3): 199 – 249.
- [11] KARNIK N N, MENDEL J M, LIANG Q. Type-2 fuzzy logic systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(6): 643 – 658.
- [12] CASTILLO O, MELIN P. A review on the design and optimization of interval type-2 fuzzy controllers [J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(4): 1267 – 1278.
- [13] ZARANDI M H F, TORSHIZI A D, TURKSEN I B, et al. A new indirect approach to the type-2 fuzzy systems modeling and design [J]. *Information Sciences*, 2013, 232(5): 346 – 365.
- [14] YANG C H, XU C H, MU X M, et al. Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(3): 694 – 699.
- [15] YANG C H, XU C H, GUI W H, et al. Application of highlight removal and multivariate image analysis to color measurement of flotation bubble images [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2009, 19(4): 316 – 322.
- [16] LIU J P, GUI W H, TANG Z H. Flow velocity measurement and analysis based on froth image SIFT features and Kalman filter for froth flotation [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2013, 21(2): 2378 – 2396.
- [17] 吴佳, 谢永芳, 阳春华, 等. 一种无监督约简的浮选泡沫图像特征选择方法及应用 [J]. 信息与控制, 2014, 43(3): 314 – 317. (WU Jia, XIE Yongfang, YANG Chunhua, et al. An unsupervised reduction method for selection of flotation froth image characters and its application [J]. *Information and control*, 2014, 43(3): 314 – 317.)
- [18] GIROLAMI M, CHAO H. Probability density estimation from optimally condensed data samples [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(10): 1253 – 1264.
- [19] WU D R, MENDEL J M. Linguistic summarization using IF-THEN rules and interval type-2 fuzzy sets [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, 19(1): 136 – 151.
- [20] WU H, MENDEL J M. Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(5): 622 – 639.

作者简介:

吴佳 (1982–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂有色冶金过程建模、数据挖掘, E-mail: star0723@163.com;

谢永芳 (1972–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为分散鲁棒控制、故障诊断等, E-mail: yfxie@mail.csu.edu.cn;

阳春华 (1965–), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂工业过程建模及优化控制, E-mail: ychh@csu.edu.cn;

桂卫华 (1950–), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 目前研究方向为复杂工业过程建模及优化控制, E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn.