

文章编号: 1001-0920(2012)11-1715-05

多模型预测控制在磨矿分级过程中的应用

马天雨, 桂卫华, 阳春华, 王雅琳

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 磨矿分级过程的控制目标是将一、二级溢流浓度和细度稳定控制在质量指标区间内. 磨矿分级过程是胖系统, 完成动态优化目标后控制器仍有剩余自由度, 因此需考虑局部稳态经济优化. 针对这一目标, 提出一种考虑局部稳态经济目标的多模型预测控制方案. 首先, 建立了基于现场数据库的球磨机和分级机传函矩阵模型; 然后考虑局部经济性能, 将稳态经济目标以罚函数形式嵌入动态优化目标函数; 为消除球磨机换球引起的模型失配的影响, 建立了一种基于换球规律的多模型切换策略. 仿真结果表明了所提出控制方案的有效性.

关键词: 磨矿分级过程; 罚函数; 多模型预测控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Multiple model predictive control applied in grinding and classification process

MA Tian-yu, GUI Wei-hua, YANG Chun-hua, WANG Ya-lin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: MA Tian-yu, E-mail: pymty@yahoo.com.cn)

Abstract: Stably controlling concentration and fineness of first and second overflow in their quality index range are the control objectives of grinding and classification process. Grinding and classification process is a fat system, and the controller still has free degree after its dynamic optimization objectives realized, so local steady-state economic optimization is considered. For this objective, a multiple model predictive control considering local steady-state economic objectives is proposed. Firstly, based on the field database, transfer function matrix models of ball-mill and classifications are built up. By considering local economic performance, steady-state economic objectives are embedded into dynamic objectives as a penalty function. To eliminate the effect of model mismatch, based on the law of ball changing, a multiple model switching strategy is built. The simulation result shows the effectiveness of the proposed control method.

Key words: grinding and classification process; penalty function; multiple model predictive control

1 引言

磨矿分级过程是将粗矿粒磨细并将粗、细矿粒分离的选矿工艺, 为浮选提供浓、细度合适的矿浆. 矿浆过细或过粗都会影响后续浮选效率, 从而影响有用矿物回收率和尾矿金属含量, 因此, 磨矿分级过程必须能够为后续浮选工艺提供稳定浓、细度的矿浆. 为了提高经济效益, 保证一、二级溢流液浓度和细度的同时, 希望增加下料量以提高产量. 另外, 为实现过程节能降耗, 还需要减少钢球添加量, 减少过程的钢耗和电耗. 磨矿过程优化控制可表述为: 在保证一、二级溢流液浓度和细度的同时提高下料量, 减少钢球的添

加量.

很多专家学者对磨矿分级过程的优化控制进行了深入研究. Chen^[1]建立了传递函数矩阵模型和矿石硬度软测量模型, 并根据矿石硬度建立了多模型, 由专家系统根据软测量结果实现模型切换, 采用模型预测控制消除过程干扰. 该方案能消除矿石硬度变化对过程的影响, 但没有考虑钢球磨损和添加引起的模型失配. 李勇^[2]建立了基于灰色理论的浓度软测量模型, 结合能耗机理模型, 以提高磨矿生产率、降低生产能耗为目标, 提出了磨矿过程质量综合优化控制策略. 该策略侧重于降低能耗, 没有将实际磨矿

收稿日期: 2011-03-24; 修回日期: 2011-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61134006); 国家自然科学基金项目(60871069, 61273187); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0576).

作者简介: 马天雨(1978—), 男, 博士生, 从事复杂工业过程建模、优化控制的研究; 桂卫华(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 从事大系统理论、复杂工业过程建模与优化等研究.

过程最重要的工艺指标(溢流液浓、细度)考虑进控制目标. Radhakrishnan^[3]深入分析了磨矿回路各操作变量和各控制变量间的关系,建立了基于阶跃响应的 MIMO 传递函数矩阵模型和过程经济优化模型. 该模型以球磨机和旋流器组成的一级磨矿回路为研究对象,因此,不适用于以球磨机和一、二级螺旋分级机组成的磨矿分级过程.

经过长期考察,本文建立了磨矿分级过程操作变量和控制变量间的关系数据库. 在此基础上,建立了球磨机和两级分级机的传递函数矩阵模型. 由于磨矿分级过程属于胖系统,采用预测控制将被控变量稳定在指标区间后控制器仍有自由度,在实现动态控制后需要考虑稳态经济优化,实现过程优化运行. 为消除由钢球磨损或添加引起的模型失配对控制效果的影响,根据换球规律建立了多模型切换策略,以提高控制器性能. 仿真结果表明了该方案的有效性.

2 磨矿分级过程

选矿拜耳法可大致分成破碎、磨浮、脱水和溶出(配料、分解和蒸发)4个车间. 磨浮车间包括磨矿分级和浮选. 磨矿分级的目的是得到粒度适宜、基本单体解离的矿粒,磨矿分级产品质量影响浮选效率,并最终影响有用金属回收率. 磨矿分级过程存在较大的能耗和钢耗,所以磨矿回路优化控制对提高企业的经济效益和节能降耗至关重要.

磨矿分级过程如图1所示. 破碎车间首先将大块矿石破碎成细矿料(小于19 mm)并均化后经料斗震动筛均匀撒在传送带上,称为原矿下料,经传送带送入球磨机入口处的进料器. 湿磨工艺需要加入磨水,同时为了提高研磨效率,磨机中添加了一定量的碳酸钠溶液,作为碱性助磨剂. 原矿料、入磨水和助磨剂在进料器混合后形成磨机入料,进入球磨机. 球磨机是一个由电动机带动绕轴旋转的圆形钢筒,内装有大量钢球作为研磨介质,转动的球磨机带动钢球将混合矿浆研磨、破碎成细矿料后以矿浆形式溢出球磨机排矿口,混合排矿水后进入高堰式螺旋

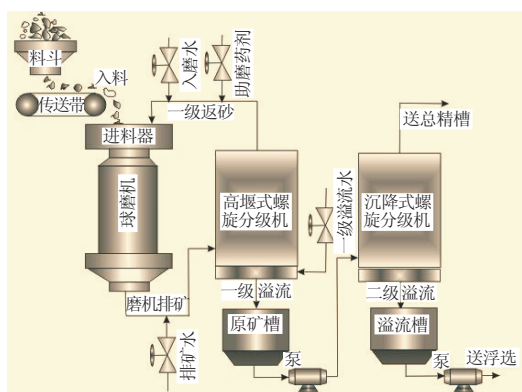


图1 磨矿分级过程

分级机(一级分级机). 分级机由沉降槽和一个旋转的螺旋板组成,螺旋板在旋转过程中将沉降槽底部粗料推进返砂槽形成返砂,较细矿料以矿浆形式溢出沉降槽,形成溢流. 一级返砂进返砂槽后由入磨水冲入进料器,和新加物料一起进入磨机重磨. 一级溢流混合一级溢流水后进入原矿槽,由水泵送入浸没式螺旋分级机(二级分级机). 二级返砂直接送总精矿槽后进入脱水工序. 二级溢流进入溢流槽后经水泵送浮选槽,进入浮选车间.

溢流液过粗或过细都不利于浮选. 矿粒太大会造成气泡破裂,沉底进入尾矿;矿粒太小会降低其在气泡上的表面沾力,不能随气泡一起上浮,进入尾矿,且过细研磨会造成大量能耗和钢耗. 所以将二级溢流液的细度控制在基本单体解离大小的同时减少钢球添加量,降低球磨机钢耗、电耗,是磨矿回路优化控制的关键. 表1和表2给出了球磨机和分级机的设备参数.

表1 溢流球磨机

直径/m	长度/m	入料细度/mm	矿浆浓度/%	充填率/%
3.6	5	< 19	0.75~0.80	0.35~0.40

表2 螺旋分级机

	螺旋数	螺旋直径/m	螺旋长度/m	-200目含量
堰分	7	3	12.25	0.25
沉分	7	3	14	0.75

3 磨矿分级过程建模

为了实现磨矿分级过程优化控制目标,根据图2建立过程模型.

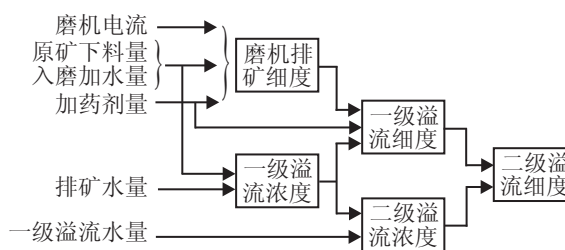


图2 磨矿分级过程模型关系图

选择操作变量为: 磨机电流 C (代表钢球添加量), 加药剂量 R_{CosNa_3} , 原矿下料量 R_m , 入磨加水量 R_{win} , 排矿水量 R_{wout} 以及一级溢流加水量 R_{wfc} . 选择控制变量为: 一、二级溢流液浓度和细度 $C_{\text{fc}}, C_{\text{sc}}, F_{\text{fc}}, F_{\text{sc}}$. 因为影响溢流细度的主要因素是磨机排矿细度 F_{bm} , 所以首先建立磨机排矿细度和球磨机各操作变量间的关系模型

$$F_{\text{bm}} = f_1(C, R_{\text{CosNa}_3}, R_m, R_{\text{win}}); \quad (1)$$

然后分别建立一、二级溢流液浓度和细度以及对操作变量的传递函数矩阵模型

$$C_{\text{fc}} = f_2(R_m, R_{\text{win}}, R_{\text{wout}}), \quad (2)$$

$$F_{\text{fc}} = f_3(C_{\text{fc}}, R_{\text{CosNa}_3}, F_{\text{bm}}), \quad (3)$$

$$C_{sc} = f_4(C_{fc}, R_{wfc}), \quad (4)$$

$$F_{sc} = f_5(F_{fc}, C_{sc}); \quad (5)$$

最终得到用于磨矿分级过程的 MIMO 模型。

3.1 球磨机模型

经现场考察,建立了磨矿分级过程操作变量和控制变量间的关系数据库。为建立球磨机模型(式(1)),需要得到某一操作变量对磨机排矿细度的阶跃响应曲线。对数据库进行分类,找出只有某一操作变量变化,而其他操作变量不变的所有数据,描点可得到排矿细度对这一操作变量的阶跃响应曲线。图3是球磨机各操作变量对排矿细度的阶跃响应包络线。由图3可知,下料量的增加会导致排矿细度下降。入磨水增加,排矿变细,但一段时间后逐渐变粗,最后稳定在比加水前稍粗的细度点。这是因为加入磨水后磨机浓度降低,矿浆沉降速度增加,所以排矿细度增加。但矿浆浓度降低会减少物料在磨机中的停留时间,所以一段时间后排矿细度较加水前变小。碳酸钠溶液有明显的

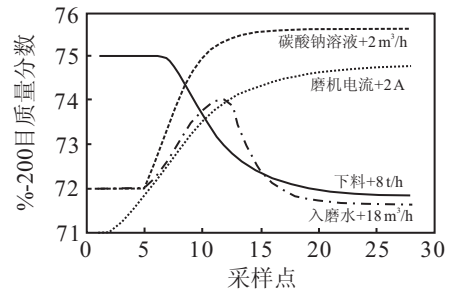


图 3 磨机排矿细度对各操作量的阶跃响应曲线

助磨作用和分散剂作用,增加碳酸钠溶液会提高排矿细度。但后续浮选工艺对 pH 值有要求,因此碳酸钠溶液可调范围较小。磨机电流增加(添加钢球)会明显增加磨机破碎率,从而提高排矿细度。

图3中的阶跃响应曲线可用带延迟的惯性环节描述^[1-4],只要选择合适的延迟时间及惯性环节结构和参数,即可较为精确地逼近图4中的阶跃响应包络线。综上,可建立球磨机传递函数矩阵模型(见表3)。

表 3 球磨机传递函数矩阵模型

	C	$R_{C_{OS}Na_3}$	R_m	R_{win}
F_{bm}	$\frac{-0.35e^{-87s}}{(160s+1)(36s+1)}$	$\frac{-0.1e^{-52s} - 0.102e^{-160s}}{(82s+1)(30s+1)}$	$\frac{-0.6e^{-63s}}{(90s+1)}$	$\frac{-0.58e^{-5s}}{(172s+1)}$

3.2 两级分级机模型

由现场调试经验,磨机细度和一级溢流细度成直接线性关系。碳酸钠溶液具有明显的离散作用,加大药剂量会加速粗矿粒下沉速度,导致一级溢流液变细。浓度和细度成反比例关系,浓度增大会引起细度降低。为建立磨机排矿细度 F_{bm} ,加药剂量 $R_{C_{OS}Na_3}$ 和一级溢流浓度 C_{fc} 与一级溢流细度 F_{fc} 的关系模型(式(2)),类似于第3.1节,先描绘出各操作变量对一级细度的阶跃响应曲线,然后采用带延迟的惯性环节描述对应曲线,得到表4所示的一级溢流细度与各操作变量间的传递函数矩阵模型。同理,可建立一级溢流浓度,二级溢流浓度和细度与各操作变量间的传递函数矩阵模型。

表 4 一级溢流细度传递函数矩阵模型

	F_{bm}	$R_{C_{OS}Na_3}$	C_{fc}
F_{fc}	$\frac{0.98e^{-10s}}{(200s+1)}$	$\frac{1.2e^{-20s}}{(95s+1)}$	$\frac{-1.06e^{-10s}}{(156s+1)(32s+1)}$

4 磨矿分级过程优化控制

目前, MPC 已成为化工过程应用最广的多变量控制算法^[1, 3-5, 8],将 MPC 应用于具有如下特性的系统时其优势明显: 1) 多输入、多输出; 2) 操作变量和被控变量有约束; 3) 系统存在延时和弱非线性。因磨矿分级过程具有上述特点,故本文采用 MPC 实现磨矿过程优化控制。过程控制质量指标要求如下:

$$0.90 < F_{sc} < 0.95, \quad 0.70 < F_{fc} < 0.78, \\ 0.26 < C_{sc} < 0.32, \quad 0.38 < C_{fc} < 0.42.$$

4.1 考虑局部稳态经济目标

磨矿过程综合优化的控制目标是: 两级溢流浓、细度跟踪指标设定值的同时提高下料量,减少钢球添加量。基本 MPC 以一、二级溢流浓度和细度偏离设定值方差和最小为优化目标,该目标没有考虑经济性能和过程损耗。因此建立如下综合控制目标:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(t) \dots \Delta u(t+H_u-1)} J = & \\ & \sum_{l=n}^{H_p} [e(t+l)^T Q e(t+l)] + \\ & \rho \sum_{l=0}^{H_u-1} [\Delta u(t+l)^T R \Delta u(t+l)] + \\ & \lambda(R_m - 95) + \gamma(C - 75). \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $e(t+l) = y(t+l) - y_r(t+l)$; n 为最小预测时域; H_p 为最大预测时域; H_u 为控制时域, 一般有 $H_u \leq i \leq H_p - 1$; $e(t+l)$ 和 $y_r(t+l)$ 分别为预测误差和输出设定值; $\Delta u(t+l)$ 为输入调节变化量; ρ 可调节输出误差和输入调节量在目标函数中的权重; Q 和 R 分别为目标函数误差对角权矩阵和输入对角权矩阵。 $\lambda(R_m - 95) + \gamma(C - 75)$ 是经济优化目标, 加入该项后, 在控制器有余量时可保证较大的下料量和

较小的磨机电流,实现过程节能降耗.

另外,应根据现场工况确定操作变量约束.一级返砂由入磨水冲进球磨机,入磨水流量太小不但会引起磨机内矿浆浓度过高,容易造成涨肚现象,而且还会引起返砂槽堵塞,所以入磨水流量有下限制(75 m³/h).排矿水和一级溢流水受阀门最大开度的限制.为保证一定的产量,车间对最小下料量有指标规定(80 t/h),最大下料量不能超出过程容量(95 t/h).助磨药剂量、磨机电流分别受溶液 pH 值和钢球充填率的限制.综上,建立如下所示的过程操作量约束:

$$\begin{cases} u^L \leq u(t+j) \leq u^H, \\ y^L \leq y(t+j) \leq y^H, \\ \Delta u(t+j) = 0, j > H_c. \end{cases} \quad (7)$$

其中: u^L, u^H 表示操作变量的约束上、下限; y^L, y^H 表示一、二级溢流浓度和细度质量指标区间边界.

这样,在式(7)约束下,以式(6)作为优化目标,采用预测控制优化磨矿过程.

4.2 建立多模型

球磨机每两月换一次钢球,每次换球约 85 t.因此,在换球前后及运行中期球磨机破碎率有较大差别,这一点也可以从现场采样数据得到验证.表 5 是换球周期内,采样的磨机排矿 -200 目质量分数.

表 5 磨机排矿 -200 目质量分数

分类	-200 目质量百分含量						
新换球	29.8	25.3	25.1	26.0	25.6	26.8	25.2
中间运行	22.2	21.5	18.5	20.0	20.2	18.4	18.1
换球前	16.9	17.5	16.4	15.8	16.3	16.6	17.7

从表 5 可以看出排矿细度有明显差别:新换球后,磨机内钢球较多,球完整,破碎率大,导致 -200 目粒级质量分数较大,一般都在 0.25 以上;而换球前,因钢球磨损严重,球磨机破碎率下降,导致 -200 目粒级质量分数较小,一般都在 0.18 以下.因此现场采样不同运行阶段数据,根据换球规律建立参数不同的 3 个球磨机模型;同时建立基于换球规律的多模型切换策略,控制器在不同阶段调用对应模型,以消除模型失配对控制器性能的影响.

5 仿真结果与分析

为实现磨矿过程 MPC,先在 Matlab-2009RA 环境下搭建基于 multiple-MPC 控制器的 simulink 仿真平台,建立以磨机换球时间为依据的切换信号,实现 3 个不同球磨机模型的切换.矿石硬度和下料粒径变化引起的输入干扰在模型中用 +8 t 的下料量代替,在 simulink 中用白噪声驱动积分环节代替系统测量干扰.选择 $Q = [1.2 \ 1.5 \ 1 \ 1]$, $\rho = 0.4$, $\gamma = \lambda = 0.1$.由权矩阵 Q 可以看出,控制的主要目标是二级溢流细度,同时兼顾一级细度和一、二级溢流浓度以及过程

产量和能耗.根据质量指标要求,控制目标设定为:一级浓度 0.40,二级浓度 0.28;一级细度 0.75,二级细度 0.92. MPC 控制器中,各操作量现场约束如下:

$$\begin{aligned} 80 &\leq R_m \leq 95 \text{ (t/h)}, \\ 75 &\leq R_{win} \leq 90 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 75 &\leq C \leq 86 \text{ (A)}, \\ 10 &\leq R_{\cos Na_3 V} \leq 30 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 20 &\leq R_{out} \leq 90 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 0 &\leq R_{wfc} \leq 60 \text{ (m}^3\text{/h)}. \end{aligned} \quad (8)$$

对于磨矿分级过程这种胖系统,在式(8)约束下很容易实现一、二级溢流浓度和细度质量指标控制.为考虑稳态经济性能,修改式(8)约束.将下料量下限和磨机电流上限分别改为 90 t/h 和 78 A;另外,磨机入水太少会引起磨机涨肚或者返砂槽堵塞,为留有余量,将磨机入水量下限约束提高到 82 m³/h;一级溢流水太大会造成未磨矿进入粗精矿,降低成品纯度,因此减少一级溢流水流量上限.基于以上分析,将式(8)约束修改为

$$\begin{aligned} 90 &\leq R_m \leq 95 \text{ (t/h)}, \\ 82 &\leq R_{win} \leq 90 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 75 &\leq C \leq 78 \text{ (A)}, \\ 10 &\leq R_{\cos Na_3 V} \leq 30 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 20 &\leq R_{out} \leq 80 \text{ (m}^3\text{/h)}, \\ 0 &\leq R_{wfc} \leq 45 \text{ (m}^3\text{/h)}. \end{aligned} \quad (9)$$

以式(6)为控制目标,在式(9)约束下, MPC 控制器不但能够稳定控制产品质量,而且还可以保证磨矿分级过程优化运行,节能降耗.但约束太紧会降低控制器抗干扰能力,造成图 4 所示结果.其中:点线表示约束合适时控制结果,实线表示约束太紧导致控制器余量不足时控制结果.可以看出,受到干扰后二级溢流细度偏离了设定值,因此,需要根据现场情况不断调试才能确定合适的约束条件,保证过程优化运行.

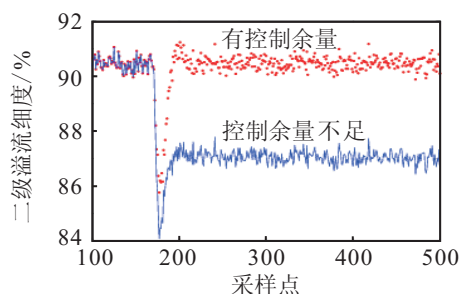


图 4 产品质量指标变化曲线

Simulink 仿真时,若模型切换和控制器切换顺序正确,即模型失配影响较小,则二级溢流细度控制结果如图 5 中实线所示,其超调量小,跟踪速度快.若切

换顺序错误,即多模型控制器中的预测模型和对象模型失配,则控制结果如图 5 中点线所示,此时超调量较大,稳定时间长。可见,本文建立的多模型切换机制能够有效消除因钢球磨损或添加而引起的模型失配影响。

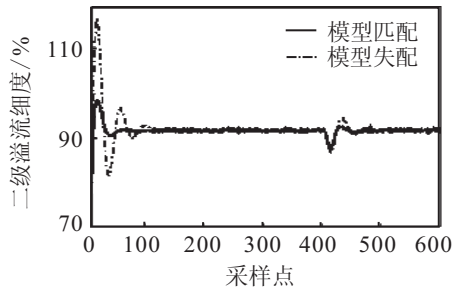


图 5 二级溢流调节曲线

上述仿真结果表明,本文方法明显优于传统多回路 PID 控制: 1) 克服了 PID 控制操作量、控制量难以配对的问题; 2) 实现了过程优化运行。与文献 [1, 3-5] 方法相比,本文方法的优势在于: 1) 考虑了更换钢球引起的模型失配影响; 2) 在控制器有剩余自由度时考虑了经济性能和过程损耗。

6 结 论

本文建立了磨机排矿细度,一、二级溢流浓度和细度以及对应操作变量间的传函矩阵模型。根据磨矿分级过程特性,采用 MPC 实现过程优化控制。为消除由球磨机换球引起的模型失配对控制效果的影响,将球磨机分成新换球、中间运行和待换球 3 个运行阶段,根据不同阶段采样数据建立了 3 个球磨机传函矩阵模型,并根据换球规律实现多模型切换,提高了控制器性能。对于磨矿过程,实现动态优化后控制器具有剩余自由度,考虑了局部经济优化。改进 MPC 优化目标,将下料量和钢球添加量作为惩罚项加入动态优化目标。控制器将一、二级溢流浓度和细度稳定在质量指标区间后,通过增加下料、减少钢球添加量耗尽剩余自由度。仿真结果表明了该方案的有效性。

关于如何处理硬度和下料粒径变化对过程的影

响,进一步释放控制器自由度,是下一步研究的重点。另外,当过程受到强干扰而导致控制器性能严重不足时,如何保证过程稳定运行也是一个有待研究的问题。

参考文献(References)

- [1] Chen Xi-song. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(11): 1099-1108.
- [2] 李勇. 磨矿过程参数软测量与综合优化控制的研究[D]. 大连: 大连理工大学控制科学与工程学院, 2006. (Li Y. Research on the parameters' soft sensing and synthetic optimization of grinding process[D]. Dalian: School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, 2006.)
- [3] Radhakrishnan V R. Model based supervisory control of a ball mill grinding circuit[J]. J of Process Control, 1999, 19(3): 195-211.
- [4] Ramasamy M. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme[J]. J of Process Control, 2005, 15(3): 273-283.
- [5] Pomerleau A, Hodouin D, Desbiens A, et al. A survey of grinding circuit control methods: From decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers[J]. Powder Technology, 2000, 108(2/3): 103-115.
- [6] 铁鸣, 岳恒. 磨矿分级过程的混合智能建模与仿真[J]. 东北大学学报, 2007, 28(5): 609-612. (Tie M, Yue H. Hybrid intelligent modeling and simulation for ore grinding and classification process[J]. J of Northeastern University, 2007, 28(5): 609-612.)
- [7] 宋海鹰, 桂卫华. PS 转炉造渣过程的动态优化控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1093-1099. (Song H Y, Gui W H. Dynamic optimization control for the slag forming process in a pierce Smith converter[J]. Control Theory and Application, 2009, 26(10): 1093-1099.)
- [8] Chen X S, Li S H. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(1): 716-723.

(上接第 1714 页)

- [11] Maji P, Pal S K. Rough set based generalized fuzzy c-means algorithm and quantitative indices[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2007, 37(6): 1529-1540.
- [12] Peters G. Some refinements of rough k-means clustering[J]. Pattern Recognition, 2006, 39(8): 1481-1491.
- [13] Blake C L, Merz C J. UCI repository of machine learning databases[EB/OL]. (2012-02-14). [Http://www.ics.uci.edu/mllearn/](http://www.ics.uci.edu/mllearn/). MLRepository.html.