

文章编号: 1001-0920(2012)02-0286-05

## 磨矿分级过程动态优化控制

马天雨, 桂卫华, 王雅琳, 阳春华

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 建立了基于改进粒级质量平衡模型(PBM)的质量指标预测模型和保证过程最优运行的优化计算模型, 提出了基于反馈校正的动态优化控制方案. 首先由优化模型计算最优控制律, 为消除过程扰动及其他不确定因素影响, 引入质量指标反馈调节机制; 然后智能控制单元根据人工测试和期望质量指标间的偏差对最优控制律进行反馈修正. 现场实验结果表明, 该方案能够稳定过程产品质量, 实现过程节能降耗.

**关键词:** 磨矿分级过程; 动态优化控制; 节能降耗

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Dynamic optimization control for grinding and classification process

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

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

**Abstract:** Quality index predictive model based on improved population balance model(PBM), optimization model guaranteeing process optimum operation and a dynamic optimization control scheme based on feedback correction are developed. Firstly, the optimal control laws are derived from the optimization model, and the production quality index feedback correction is employed for eliminating the effects of disturbances and other uncertainties of the grinding and classification process. The optimal control laws are compensated and adjusted by the intelligent control unit according to the differences between the values of the feedback obtained by workers and the desired quality indices. Field experiments show that the production quality of the process is improved, and power saving and energy conservation are realized.

**Key words:** grinding and classification process; dynamic optimization control; power saving and energy conservation

### 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过程, 为浮选作业提供浓细度合适的矿浆. 目前国内大部分磨矿分级过程仍依靠专家经验手动调节, 因个人差异, 不仅容易造成质量工艺指标波动较大, 而且难以保证过程的优化运行.

为提高磨矿分级过程的质量和产量, 节能降耗, 国内外学者相继开展了一些研究. 其中Chen等人<sup>[1]</sup>建立了状态矩阵模型, 采用模型预测控制实现磨矿分级过程优化控制, 该方案能够保证一定细度矿浆的稳定供给, 但没有考虑过程优化运行. 李勇等人<sup>[2]</sup>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, 没有将实际磨矿过程最重要的工艺指标(二级

溢流液浓、细度)考虑进控制目标. 铁鸣等人<sup>[3]</sup>基于物料平衡原理建立了球磨机与泵池的动态模型, 研制了可进行磨矿分级动态仿真的智能混合模型, 但该模型没有考虑变化工况, 因此模型精度容易受干扰影响.

本文建立以二级溢流细度为预测目标, 考虑工况的磨矿分级过程模型, 并建立以提高企业经济效益、节能降耗为目标的优化模型; 为消除干扰对优化计算结果的影响, 采用模糊专家控制对最优控制律进行修正补偿.

### 2 磨矿分级过程

选矿拜耳法可大致分为破矿、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, 且磨矿分级过程存在较大能

收稿日期: 2010-09-07; 修回日期: 2010-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60634020); 国家自然科学基金项目(60874069, 60804037).

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.

耗和钢耗,所以磨矿回路优化控制对提高企业经济效益,节能降耗至关重要。

磨矿分级过程如图 1 所示。

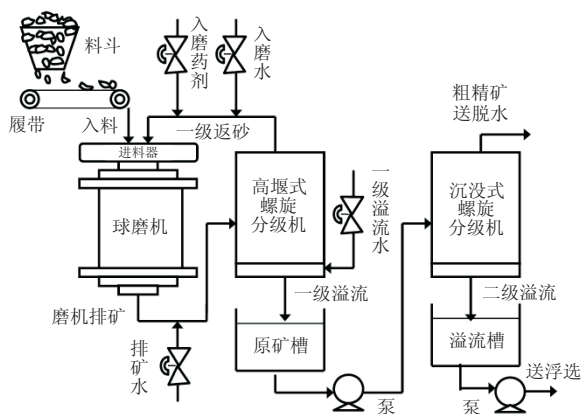


图 1 磨矿分级过程

破碎车间首先将大块矿石破碎成细矿料(小于 19 mm),细矿料均化后经料斗震动筛均匀撒在传送带上,经传送带送球磨机入口处的进料器。由于采用湿磨方式,需要给球磨机加入一定量的水,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药剂。原矿料、入磨水和助磨剂在进料器混合后进入球磨机。球磨机是一个被电机带动绕轴旋转的圆筒钢体,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中的粗矿粒研磨并破碎成细矿粒,细矿料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分级机(一级分级机)。堰分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一级返砂,由入磨水冲入进料器,和新加物料一起进入磨机重磨;较细矿料以矿浆形式溢出沉降槽,形成一级溢流,混合一级溢流水后进入原矿槽,原矿槽矿浆被水泵送入沉没式螺旋分级机(二级分级机)。类似于堰分,高分中的较粗矿料被螺旋板推进返砂槽形成二级返砂,二级返砂送总精矿槽,直接进入脱水车间。较细矿料以矿浆形式溢出,形成二级溢流,经泵送浮选槽,进入浮选工序。

溢流液过粗、过细都不利于浮选,只有基本单体解离的矿粒可以被由下而上移动的气泡带走,形成粗精矿送脱水车间。矿粒太大会造成气泡破裂,沉底进入尾矿;而矿粒太小会降低其在气泡上的表面沾力,同样进入尾矿,且过细研磨会造成大量能耗和钢耗。所以将二级溢流液细度控制在基本单体解离大小是磨矿回路优化控制的关键。

### 3 磨矿分级过程的动态优化控制

本文提出了一套动态优化控制方案,见图 2。该优化控制系统主要由质量指标预测模型,优化计算模

型和模糊专家控制模块组成。其中质量指标预测模型由改进的球磨机 PB 模型<sup>[4]</sup>、分级机机理模型<sup>[5]</sup>和磨矿回路各变量间关系模型组成。优化计算模型以入磨水量、排矿水量、一级溢流水量、下料量和代表钢球充填率的磨机电流作为操作变量,各变量约束条件根据水阀最大流量和充填率范围等生产实际确定。优化计算过程中,根据生产指标要求对指标预测模型输出结果和一、二级溢流浓、细度实行范围约束。为消除钢球磨损、原矿粒径变化、矿石硬度变化和模型失配等干扰对系统的影响,引入了质量指标反馈调整机制。反馈量是人工测量得到的一、二级溢流液浓和细度,模糊专家系统根据人工测量和期望指标间的偏差,依据专家规则对优化计算模型得到的控制律进行补偿修正。

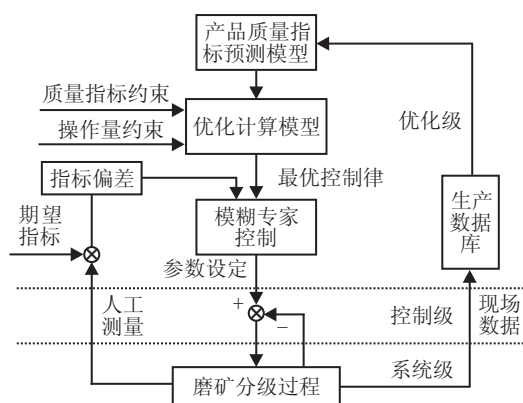


图 2 磨矿分级过程动态优化

优化计算模型每天运行一次,智能控制单元每 4h 修正一次。两次修正间隔内若出现水压不稳,则会造成过程操作量设定点偏移,因此需要在控制级采用简单的监控调节机制,将操作量稳定在设定值上。当水压出现较大波动时,调节水阀开度以保证过程最优运行。

## 4 质量指标预测模型

### 4.1 球磨机模型

实验表明,下述粒级质量平衡模型(PBM)<sup>[4]</sup>最适合作为某矿石球磨机连续磨矿模型:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = \sum_{j=1, i>1}^{i-1} b_{ij} S_j M_j(t) - S_i M_i(t). \quad (1)$$

其中:  $M_i(t)$  为第  $i$  个粒级在  $t$  时刻的质量分数;  $b_{ij}$  为破碎分布函数,代表矿石性质(由大量分批实验得到),表示第  $j$  粒级的物料经过一次破碎后进入第  $i$  粒级的质量分数;  $S_i$  为第  $i$  粒级矿石破碎率,代表磨矿速率,它影响磨机排矿细度  $F_{mill}$ 。

PBM 实用模型是由 Austin 等人根据里德解<sup>[4, 6]</sup>推出的转换函数解<sup>[4, 7]</sup>,即

$$p_i = \sum_{j=1}^i d_{ij} f_j. \quad (2)$$

其中:  $d_{ij}$  为球磨机单元矩阵模型, 可由破碎率、停留时间分布和破碎分布函数递推得到(详见文献[4]);  $p_i$  为磨机排矿中第  $i$  粒级物料所占的质量分数;  $f_j$  为磨机入料中第  $j$  粒级物料所占的质量分数.

PBM 有两条假设<sup>[7]</sup>: 1) 各粒径破碎率都符合一阶磨矿动力学(破碎率不受研磨时间影响); 2) 模型不受工况影响.

对某矿石进行分批磨矿实验, 不同粒径矿石经不同研磨时间后, 破碎率如表 1 所示. 可以看出, 除 20~35 目, 35~65 目和 65~100 目外, 其他各粒级破碎率随时间变化, 不符合一阶动力学特性, 因此将原破碎率模型<sup>[1]</sup>改进成如下形式:

$$S_i = \frac{a(x_i/x_0)^\alpha e^{-\beta t}}{1 + (x_i/\mu)^\Lambda}. \quad (3)$$

其中:  $x_i$  为矿石粒径,  $x_0$  用来统一单位. 当  $x_i$  以  $\mu\text{m}$  为单位时,  $x_0 = 1000$ ; 当  $x_i$  以  $\text{mm}$  为单位时,  $x_0 = 1$ .

表 1 各粒级破碎率分批实验结果

粒级大小/目	0	0.5	1	2	4
6~10	0.6850	0.2518	0.1832	0.1402	0.1092
10~20	0.9167	0.5781	0.4197	0.4197	0.4197
20~35	1.2049	1.2049	1.2049	1.2049	1.2049
35~65	0.7507	0.7507	0.7507	0.7507	0.7507
65~100	0.6424	0.6424	0.6424	0.6424	0.6424
100~200	0.4327	0.3379	0.2195	0.2195	0.2195
200~325	0.3554	0.2100	0.1048	0.1048	0.1048

式(3)是在原模型基础上加入代表时间特性的  $e^{-\beta t}$  项而来,  $\beta$  值可按表 1 数据, 根据不同粒径矿粒在不同研磨时间破碎率变化情况计算得到. 仿真表明, 该改进模型可以描述破碎率随时间变化的非一阶特性.

磨矿过程工况多变, 为消除工况变化对球磨机模型预测精度的影响, 建立分别用  $S_m, Fr_s, R_m, R_{win}$  表示的下料粒径分布、磨机电流、下料量和入磨水流量等工况变量与破碎率模型参数  $a, \alpha, \mu, \Lambda$  间的 LSSVM 关系模型. 从实际采样 50 组数据中选取 45 组直接调用 `trainlssvm()` 函数训练 LSSVM, 其余 5 组用于预测, 调整核函数参数直到预测结果满意, 最后得到 LSSVM 关系模型. 优化计算模型运行前, 必须测量当前工况, 将测得工况代入 LSSVM 模型并计算破碎率模型参数  $a, \alpha, \mu, \Lambda$ , 再代入 PBM 后, 便可得到球磨机模型.

## 4.2 建立指标预测模型

根据图 1 可给出各操作参数与质量指标的关系, 如图 3 所示. 可以看出质量指标, 即二级溢流细度受一级溢流细度和二级溢流浓度影响; 一级溢流细

度受 pH 值、一级溢流浓度和磨机排矿细度影响; 二级溢流浓度受一级溢流浓度和一级溢流水量影响; 下料量、入磨水和加药剂量影响 pH 值;  $S_m, Fr_s, R_m, R_{win}$  影响磨机排矿细度  $F_{mill}$ .

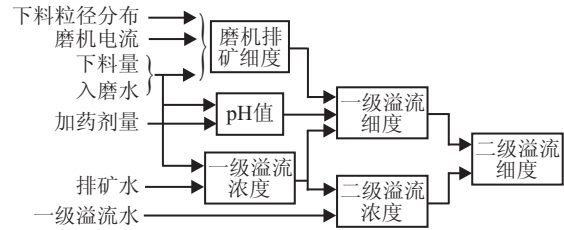


图 3 控制参数和质量指标的关系

4.1 节已经建立了  $S_m, Fr_s, R_m, R_{win}$  与磨机排矿细度间的 LSSVM 模型. 下料量、入磨水和 pH 值之间的关系如下:

$$PH_m = a_{ph} \times \frac{R_{\text{CosNa}_3}}{R_m + R_{win} + R_{wout}}. \quad (4)$$

其中:  $PH_m$  为一级溢流液 pH 值,  $a_{ph}$  为 pH 值待定系数,  $R_{\text{CosNa}_3}$  为碳酸钠流量,  $R_{wout}$  为排矿水流量.

一级溢流浓度可表示为

$$C_{fc} = a_{fcc} \times \frac{R_m}{R_{wout} + R_{win}}, \quad (5)$$

其中  $a_{fcc}$  为一级溢流浓度待定系数. 相同条件下, pH 值越大, 粗粒级沉降速度越快; 浓度越大, 粗粒级沉降速率越慢. 故一级溢流细度与 pH 值成正比, 与浓度成反比. 因此一级溢流细度可表示为

$$F_{fc} = M_{\text{classifier1}}(F_{mill}) \times \frac{PH_m}{C_{fc}} \times a_{fcf}. \quad (6)$$

其中  $M_{\text{classifier1}}()$  为一级分级机(高分)模型<sup>[5]</sup>,  $F_{fc}$  和  $a_{fcf}$  分别为一级溢流细度和一级溢流细度待定系数.

二级溢流浓度可表示为

$$C_{sc} = C_{fc} \times \frac{a_{scc}}{R_{wfc}}. \quad (7)$$

其中:  $a_{scc}$  为二级溢流浓度待定系数,  $R_{wfc}$  为一级溢流水流量. 二级溢流细度可由下式表示:

$$F_{sc} = M_{\text{classifier2}}(F_{fc}) \times \frac{a_{scf}}{C_{sc}}. \quad (8)$$

其中:  $M_{\text{classifier2}}()$  为二级分级机(沉分)模型<sup>[5]</sup>,  $a_{scf}$  为溢流细度待定系数.

根据上述关系模型, 球磨机模型和高分、沉分模型<sup>[5]</sup>, 可计算二级溢流细度. 模型待定系数可根据现场关系数据库由优化算法优化得到.

## 5 优化计算模型

### 5.1 优化目标

根据三水的卡边调节稳定质量指标, 减少钢球添加量, 尽可能多地生产合适粒径的矿浆, 提高产量(下料量), 实现磨矿分级过程优化控制. 优化控制目标可公式化为

$$\max : S_{\text{fit}} - \alpha \int W_{\text{steel}} - \beta \sum_{i=1}^3 R_{\text{water}}. \quad (9)$$

其中:  $S_{\text{fit}}$  为合适粒径矿物含量,  $\int W_{\text{steel}}$  为磨矿过程中的钢球损耗量,  $\sum_{i=1}^3$  为入磨水、排矿水和一级溢流水供应量. 权系数  $\beta, \alpha$  影响最优控制律中钢球添加量 and 三水调节量, 其中  $0 < \beta < \alpha < 1$ .

## 5.2 终端约束条件

磨矿分级过程质量指标是二级溢流液细度, 必须严格控制, 过细或过粗都会影响浮选率; 同时二级溢流浓度和一级溢流浓度、细度都要在工业指标范围内. 因此建立如下终端不等式约束条件:

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

## 5.3 边界约束条件

优化计算模型的边界条件即操作变量的变化范围. 球磨机钢球充填率受磨机容量及下料量的影响, 其范围是 0.32~0.4. 一级返砂由入磨水冲进球磨机, 入磨水流量太小不仅会引起磨机内矿浆浓度过高, 造成涨肚现象, 还会引起返砂槽堵塞. 所以入磨水流量有下限限制范围可设为  $75\text{m}^3/\text{h} \sim R_{\text{max open}} \text{m}^3/\text{h}$  (阀门最大流量). 排矿水和一级溢流水只受阀门最大开度限制, 因此其范围是  $0 \sim R_{\text{max open}} \text{m}^3/\text{h}$ . 另外为保证一定的产量, 车间对最小下料量有指标规定, 即 80 t/h.

## 6 控制模块

为消除各种干扰影响, 根据反馈机制, 本文提出一种基于模糊专家系统的智能补偿修正方法.

### 6.1 模糊分割

目前磨矿分级过程的调节是一个模糊过程, 调节量一般以大、中、小等模糊语言表示. 现场调节的依据是工人操作经验和专家知识, 因此要实现智能补偿首先必须将过程变量模糊化. 其中  $R_{\text{win}}, R_{\text{wfc}}, R_{\text{wout}}$  的变化范围为  $(-10, 10)$ , 采用平均区间法可将其分成 7 个等级组成的论域  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ .  $F_{\text{sc}}, F_{\text{fc}}, C_{\text{sc}}, C_{\text{fc}}$  的变化范围见 5.2 节. 加钢球量  $R_{\text{sc}}$  的变化范围为  $(-0.8, 0.8)$ , 可分成 5 个等级组成的论域  $\{-4, -2, 0, 2, 4\}$ . 通过正态函数构造的隶属函数, 两个论域对应的模糊子集分别为  $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$  和  $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PB}\}$ .

### 6.2 专家控制

根据厂家多年生产经验, 建立了描述操作变量和生产质量指标及过程变量间的不断动态更新的关系数据库. 根据该数据库及专家经验知识建立如下控制

规则集:

Rule 1: If  $F_{\text{sc}} = \text{NB}$ , and  $C_{\text{sc}} = \text{PB}$ , and  $C_{\text{fc}} = \text{ZE}$ , then  $R'_{\text{wfc}} = R_{\text{wfc}} + \text{PB}$ ;

Rule 2: If  $F_{\text{sc}} = \text{NB}$ , and  $C_{\text{sc}} = \text{PB}$ , and  $C_{\text{fc}} = \text{PS}$ , then  $R'_{\text{wfc}} = R_{\text{wfc}} + \text{PS}$  and  $R'_{\text{wout}} = R_{\text{wout}} + \text{PS}$ ;

⋮

Rule  $n$ : If  $F_{\text{sc}} = \text{NB}$ , and  $C_{\text{sc}} = \text{NB}$ , and  $C_{\text{fc}} = \text{NB}$ , then  $R'_{\text{win}} = R_{\text{win}} + \text{NB}$ .

Rule 1 表明: 若二级溢流很粗, 且二级溢流浓度很大, 一级溢流浓度适中, 则为保证二级溢流细度需要大量增加一级溢流水. 受篇幅所限, 这里只对 Rule 1 进行说明: 规则中带撇的变量表示修正后的操作量. 虽然控制规则较多, 但可以全部列出来, 因此只需要采用前向推理方法即可实现专家规则的推理.

## 7 实验结果分析

本文对 1# 磨机进行连续 30 天的跟踪实验, 以建立磨机电流、入磨水量、排矿水量和一级溢流量等操作变量与一、二级溢流液浓、细度的关系数据库, 并用该数据库对 4.2 节指标预测模型进行参数优化. 表 2 和表 3 分别是 1# 磨机实施优化控制前后, 某周二的采样数据.

表 2 控制前 1# 磨机的采样数据

采样时间	$R_{\text{win}}$	$R_{\text{wout}}$	$R_m$	$C_{\text{fc}}$	$F_{\text{fc}}$	$C_{\text{sc}}$	$F_{\text{sc}}$
1:00	90	20	83.8	32.09	78.19	26.44	93.87
5:00	89	21	83.7	34.06	76.43	28.56	90.37
9:00	92	19	84.2	34.54	76.15	28.83	92.62
13:00	90	20	84.5	33.71	71.94	27.49	92.98
17:00	87	22	83.9	31.54	73.63	26.44	86.90
21:00	88	22	84.3	33.09	71.18	27.77	87.38

表 3 控制后 1# 磨机的采样数据

采样时间	$R_{\text{win}}$	$R_{\text{wout}}$	$R_m$	$C_{\text{fc}}$	$F_{\text{fc}}$	$C_{\text{sc}}$	$F_{\text{sc}}$
1:00	85	25	82.8	34.78	77.82	31.43	92.48
5:00	85	25	82.5	34.69	78.43	30.32	93.07
9:00	83	27	81.2	32.64	80.12	28.36	91.60
13:00	80	26	81	35.55	80.32	28.41	90.67
17:00	80	26	81.1	36.28	75.18	31.57	92.13
21:00	84	25	81	35.43	74.12	29.87	92.52

控制前每周二给磨机添加 1.8 t 钢球, 控制后根据优化结果添加钢球. 可以看出, 控制后二级溢流细度在 0.90~0.95 之间, 比控制前稳定. 另外, 由于添加钢球量少, 磨机电流减小 1~2 A. 同时为了满足排矿细度, 入磨水由 90 t 降到 83 t (入磨水必须大于 75 t, 否则形成涨肚或返砂槽堵塞). 因下料量不变 (95 t/h), 减少入磨水必然会造成一、二溢流浓度偏高, 所以加大了排矿水量, 同时调大了一级溢流水 (没有安装流量计, 表中没有采样值). 可以看出, 控制后二级溢流浓度基本达到了指标上限. 这样便可通过三水的卡边调节来完成稳定质量指标和实现过程节能降耗目标.

取指标波动较大的 120 组数据, 控制前后二级溢流细度对比如图 4 所示. 可以看出, 采用动态优化控制后可以将二级细度稳定控制在 0.90~0.95 之间, 满足了厂方指标要求.

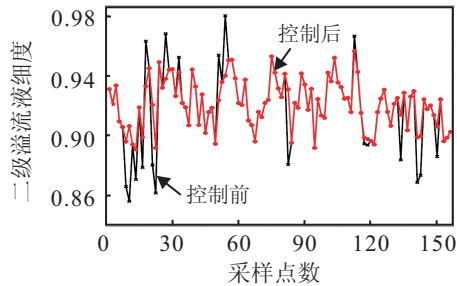


图 4 产品质量指标变化曲线

施加控制后, 钢球添加量由每周 3 斗 (1.8 t), 月 9 t 左右, 降到月 8.5 t 左右. 随着钢球添加量的减少, 磨机电耗也随之降低. 选择工况变化较大的 10 天, 共 60 组数据, 控制前后磨机电流对比如图 5 所示, 基本可实现节约电能 2% 左右.

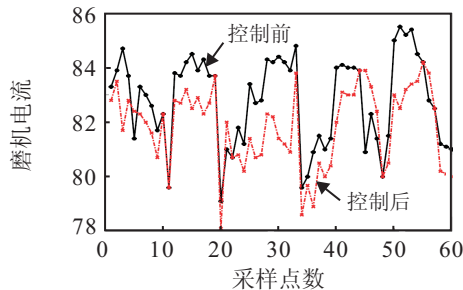


图 5 磨机电流变化曲线

## 8 结 论

本文建立了基于分批实验、考虑工况的质量指标预测模型, 以及旨在节能降耗、保证过程优化运行的优化计算模型. 为消除过程干扰, 提出了基于反馈校正的动态优化控制方案, 模糊专家控制单元根据人工测试和期望质量指标的偏差对最优控制律进行反馈修正. 为保证过程最优运行, 每天运行一次优化计算模型. 为消除过程干扰, 每 4 个小时调用智能控制单元对最优控制律进行补偿修正. 现场实验表明该方案可降低过程钢耗 5.6%, 电耗 2%, 可将过程质量指标 (二级溢流液细度) 稳定在 0.90~0.95 之间, 能够实现稳定过程质量指标和节能降耗的优化控制目标.

## 参考文献(References)

[1] Chen Xi-song. Constrained model predictive control in

ballmill grinding process[J]. Powder Technology, 2008, 18(6): 31-39.

- [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: 大连理工大学信息科学与工程学院, 2006.  
(Li Y. Research on the parameters' soft sensing and synthetic optimization of grinding process[D]. Dalian: College of Information Science and Engineering, Dalian University of Technology, 2006.)
- [3] 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.)
- [4] 尹蒂, 李松仁. 选矿数学模型[M]. 长沙: 中南工业大学, 1993: 118-158.  
(Ying D, Li S R. Mathematical models of mineral processing[M]. Changsha: Central South University of Technology, 1993: 118-158.)
- [5] 谢恒星, 李松仁. 工业型螺旋分级机数学模型的研究[J]. 有色金属, 1992, 44(1): 28-34.  
(Xie H X, Li S R. A mathematical model for industrial spiral classifier[J]. Non-ferrous Metals, 1992, 44(1): 28-34.)
- [6] Kelsall D F, Reid K J, Restarick C J. A review: Continuous grinding in a small wet ball mill, Part II[J]. Powder Technology, 1969, 2(5): 162-168.
- [7] Austin L G. An introduction to the mathematical description of grinding as a rate process[J]. Powder Technology, 1971, 5(2): 1-17.
- [8] 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.)
- [9] 綦守荣. 中储式钢球磨制粉系统的建模与优化控制研究[D]. 北京: 华北电力大学信息科学与工程学院, 2008.  
(Qi S R. Studies on modeling and optimum control in the coal-pulverized storage system[D]. Beijing: College of Information Science and Engineering, North China Electric Power University, 2008.)