

典型赤铁矿磨矿过程智能运行反馈控制

周 平[†], 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 冶金磨矿是典型的高能耗、低效率过程, 其控制与优化不仅仅是使常规过程控制系统尽可能好地跟踪期望设定值, 而且要控制整个过程运行, 实现表征磨矿整体运行性能的磨矿粒度与生产效率等运行指标的优化. 针对我国广泛使用的赤铁矿两阶段全闭路磨矿, 由于其原矿石性质与成份复杂且不稳定、粒级波动大, 磨矿运行指标不能在线测量, 工况时变, 难以建立过程数学模型, 提出基于数据与知识的智能运行反馈控制方法, 包括基于案例推理的控制回路预设、磨矿粒度动态神经网络软测量以及多变量模糊动态调节器. 为了验证所提方法的有效性, 将所题方法应用于中国某大型赤铁矿选厂, 取得显著应用成效.

关键词: 运行反馈控制; 磨矿过程; 数据驱动; 案例推理; 模糊逻辑

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Intelligent operational feedback control for typical hematite grinding processes

ZHOU Ping[†], CHAI Tian-you

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: Metallurgical grinding is a typical process of high energy consumption and low efficiency; its control and optimization will make the outputs of the controlled processes best follow their setpoints, and optimize the entire plant so that the grinding particle size and efficiency during the production phase being maintained within their desired ranges. For the complex hematite grinding processes which are widely used in China, the processed hematite has complex composition and properties, and the operational indices cannot be measured online. Moreover, their dynamic characteristics are very intricate, making the accurate dynamic models of them are difficult to be built. An intelligent operational feedback control approach is proposed which is based on data and knowledge. This approach includes a case-based reasoning loop pre-setting controller, an artificial neural network (ANN)-based particle size soft sensor module, and a multivariable fuzzy dynamic adjuster. The proposed method has been successfully applied to the grinding process of a large hematite mineral processing plant in China.

Key words: operational feedback control; grinding process; data-driven; case-based reasoning; fuzzy logic

1 引言(Introduction)

中国铁矿资源虽然丰富, 但主要以赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿、镜铁矿等低品位贫矿为主, 平均铁矿品位仅为32%. 为此, 我国97%的铁矿石需要经过选矿过程的处理以得到有用成份含量高的精矿, 然后才能进行冶炼. 所谓选矿, 就是把大颗粒原矿石加以粉碎, 并将金属含量高的矿物或其它有价值矿物与大量无用脉石分离, 富集精矿, 抛弃脉石及尾矿. 图1为一个典型赤铁矿选矿流程, 主要包括破碎、竖炉焙烧、磨矿、选别等几个工序. 这其中, 磨矿是一道最为关键的工序, 其任务就是将矿物原料粉碎到适宜的粒度, 使有

用矿物与脉石单体解离, 或不同有用矿物相互解离, 为后续选别提供原料^[1-3]. 磨矿是典型的高能耗、低效率过程, 其电能消耗约占选厂的45%~70%, 生产成本约占40%~60%^[3]. 磨矿运行指标即磨矿产品粒度、生产效率等决定着整个选矿精矿品位的好坏和生产能力的强弱, 与选厂经济技术指标密切相关^[1-2, 4]. 长期以来, 磨矿过程控制与优化被认为是提高磨矿产品质量与生产效率以及整个选厂经济利润的关键, 一直受到国内外学者的关注和重视. 以多回路PI/PID和多变量控制为主的控制技术均一定程度达到了调控局部单元磨矿设备, 使其按照期望目标运行的目的^[4-8]. 然

收稿日期: 2013-12-03; 录用日期: 2014-05-14.

[†]通信作者. E-mail: zhouping@mail.neu.edu.cn; Tel.: +86 24-83681047-8005.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104084, 61333007, 61290323, 614730646); 中央高校基本科研业务费资助项目(130508002, 130108001); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目(2013ZCX02-09).

而,从过程工程的角度来看,磨矿自动控制不仅仅是使局部单元磨矿装置系统尽可能好地跟踪期望设定值,而且要控制整个过程运行,实现表征过程整体运行性能的磨矿粒度与生产效率等运行指标的优化^[1-2,4,8].

因此,将复杂磨矿生产与各个磨矿设备作为紧密联系的整体,构建磨矿整体运行的分层反馈控制结构,实现控制指标、运行指标以及经济性能指标的集成控制与优化,是各个选矿企业提高自身市场竞争力的重要手段.

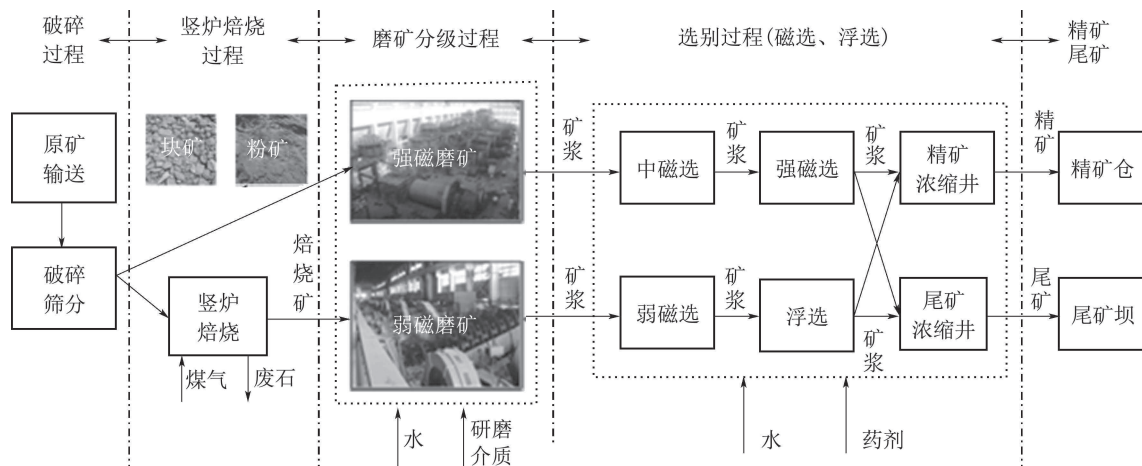


图 1 典型赤铁矿选矿过程流程

Fig. 1 Flowsheet of typical hematite mineral processing process

磨矿过程流程长、滞后大、影响因素众多且彼此相互制约和关联耦合. 磨矿运行指标不仅与回路控制的关键过程变量密切相关, 并且其动态特性还受原矿成份与性质、生产技术规范与操作规范、设备能力以及各种未知动态干扰的影响, 具有较强时变特性. 因此, 磨矿过程运行控制研究具有挑战性, 且已有理论方法较少, 目前研究主要集中在如下两方面: 1) 针对原矿石成份稳定且给矿粒度范围较窄的磨矿过程, 由于其生产比较平稳, 能够建立过程近似动态模型, 因而采用基于模型的运行优化与控制方法, 如实时优化控制、模型预测控制(model predictive control, MPC)、模型监督控制等^[9-14]; 2) 针对原矿石成份复杂且性质不稳定、给矿粒级波动大、尤其是磨矿粒度等运行指标难以在线检测的复杂赤铁矿磨矿过程, 由于其动态特性和影响因素复杂, 难以采用基于模型的方法对其进行有效调控. 在实际工程控制中, 通常针对特定的磨矿过程, 采用上层智能监督加底层基础回路控制的运行方式^[15-17].

上述已有方法大多采用上层开环设定加底层基础反馈控制的运行控制模式, 没有真正意义实现磨矿运行指标的上层闭环反馈控制. 当外部干扰和运行环境动态变化时, 难以对运行过程做出及时准确调整, 因而难以实现过程的优化运行^[1-2]. 这种情况下, 就必须利用实时或者间歇性的磨矿运行指标反馈信息, 研究实现运行指标上层闭环控制的运行反馈控制方法. 论文针对我国广泛使用的典型赤铁矿

闭路磨矿的原矿石性质与成份复杂且不稳定、嵌布粒度细, 磨矿运行指标难以在线测量且过程具有工况时变等综合复杂特性, 难以建立过程数学模型, 研究基于数据与知识的智能运行反馈控制方法及其工业应用研究.

2 磨矿过程介绍(Description of grinding process)

2.1 磨矿过程及运行指标(Grinding process and its operational indices)

闭路磨矿回路流程主要包括磨矿设备和分级设备. 具体工艺如下: 首先, 将原矿石以一定速度由给矿机经给矿皮带输送到磨机, 同时按比例添加一定水. 磨机内装入一定数量的研磨介质, 矿石和研磨介质随着磨机筒体的旋转被带到一定的高度后, 在磨机旋转离心力和摩擦力的作用下自由下落或滚下, 筒体内的矿石受到研磨介质的冲击力. 另一方面, 在研磨介质之间及其在筒体接触区又产生对矿石的挤压和磨剥力, 从而将矿石磨碎. 然后, 磨碎后的矿石输送到螺旋分级机或水力旋流器进行粒度分级, 细颗粒的矿浆从分级机排出进入下段磨矿或者直接进行浮选、磁选等选别工序进行矿石分选; 而粗颗粒的矿浆形成循环负荷又会返回到磨机进行再磨.

磨矿过程运行中, 磨矿产品粒度(production particle size, PPS)是最为重要的质量指标, 常以-200目(mesh)百分含量表示(即“%, < 200 mesh”). 另外, 磨矿生产率(grinding production rate, GPR)是体

现磨矿运行效率的重要指标,直接制约着整个选矿的生产效率水平.对于特定的选别作业流程,每一种矿石都有一个适宜选别的磨后产品粒度范围,粒度过粗和过细都不利于有用矿物的选别.粒度过粗,矿石未能单体解离,这显然不利于矿石的有效选离;而粒度过细,矿石大多已泥化,同样也难以在选别过程将有用矿物分选出来.并且由于矿石在细磨过程中消耗了过多的能量,不利于节能减排的需求和选厂经济收入最优化.在PPS合格的前提下,GPR通常需要最大化操作.另外,合格的产品质量和较高的生产率又意味着磨矿最有效的能耗利用.

2.2 典型磨矿回路(Typical grinding circuits)

根据所处理矿石成份与性质、过程影响因素及其复杂性,可以将磨矿分成两类:第1类磨矿处理的

矿石品位较高、可磨性好且成份和性质比较稳定、给矿粒级较窄.这类磨矿由于生产比较平稳,因此能够建立过程的近似动态模型;另一类磨矿所处理的矿石一般为赤铁矿,其矿石品位低、矿石硬度大,并且成份与性质波动明显、给矿粒级波动大.由于这类磨矿生产运行工况不稳定,具有明显的动态时变特性,因而难以建立过程的近似动态模型.

第1类磨矿在澳大利亚、南非等国外先进选矿厂应用广泛,通常采用一段棒磨开路、二段球磨机+水力旋流器构成的闭路磨矿回路,其控制与优化可以采用基于模型的方法也可以采用数据驱动的方法.第2类磨矿在中国最为常见,通常采用两段全闭路磨矿,并且广泛使用螺旋分级机等机械分级设备,其工艺过程如图2所示.

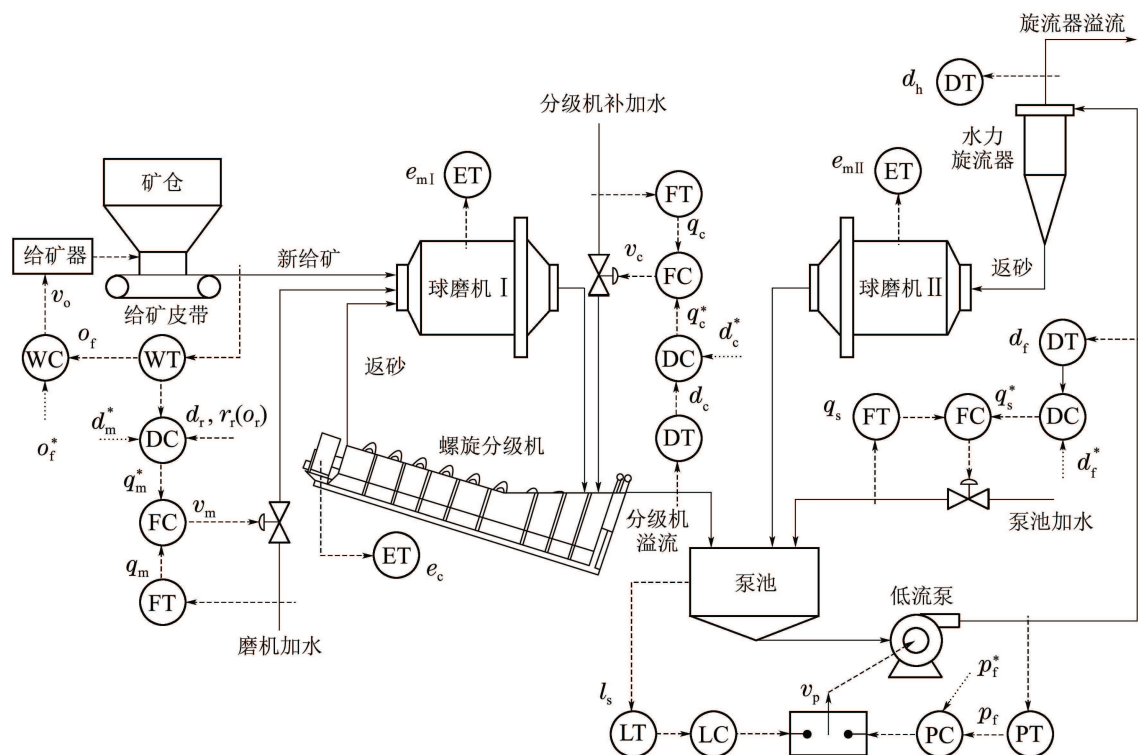


图2 两段全闭路赤铁矿磨矿系统

Fig. 2 Two-stage closed-circuit hematite grinding system

由于这类磨矿处理的赤铁矿成份和性质复杂且不稳定,并且采用两段全闭路以及使用螺旋分级机进行机械分级,因而其动态特性较第1类磨矿要复杂得多,单纯采用基于模型的方法难以对其进行有效控制,通常需要集成数据与知识,并采用基于智能的控制与优化方法.本文研究的就是第2类磨矿.

3 磨矿运行控制问题描述(Problem description of operational control for grinding process)

磨矿过程流程长、影响因素众多、运行机理及其

动态特性复杂,其运行过程及回路控制的磨矿装置系统的输入输出动态关系可以描述如下:

$$\begin{cases} \dot{R} = f_R(R, Y, D_O), \\ \dot{Y} = f_Y(Y, U, D_I), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{R} = f_R(\cdot)$ 表示磨矿过程运行的未知动态关系; $\dot{Y} = f_Y(\cdot)$ 表示基础反馈控制的被控设备(即给矿设备、给水设备等)的未知动态关系; $R = \{r_i\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 表示磨矿粒度、生产效率等运行指标; $Y = \{y_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ 表示基础回路控制的关键过程变量, $U = \{u_j\}$ 为操作变量; D_O, D_I 为外部干

扰, 包括原矿石成份、性质和矿粒大小的波动等。

磨矿基础反馈控制的任务就是设计具有控制律

$$U = f_U((Y^* - Y), D_I, \alpha_Y) \quad (2)$$

的回路控制器, 使得闭环基础反馈控制系统稳定, 并实现期望的控制指标。式(2)中: $f_U(\cdot)$ 表示控制律函数, α_Y 为控制器调节参数。

运行反馈控制的任务就是以被控运行过程与闭环基础反馈控制系统作为广义被控运行对象, 以此设计具有运行控制功能

$$Y^* = f_Y((R^* - R), D_O) \quad (3)$$

的运行反馈控制系统, 通过调整基础控制系统的设定值 Y^* , 使得磨矿运行控制系统在保证过程安全运行的条件下, 将磨矿运行指标的实际值控制在磨矿工艺要求的目标范围内, 即 $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$, 使得实际磨矿运行指标控制误差尽可能地小, 即 $\min\{\|R - R^*\|\}$, $R^* = \{r_i^*\}$ 为磨矿运行指标期望值。

4 基于数据与知识的赤铁矿磨矿智能运行反馈控制(Data and knowledge based intelligent operational feedback control of hematite grinding process)

中国广泛使用的赤铁矿磨矿过程, 由于受原矿石成份与性质反复波动、设备状况以及其它生产环境变化的影响, 其数学模型往往难以建立, 或者建立的数学模型因适应性差而不能应用。另外, 受矿石成份与性质的显著波动, 粒度计等昂贵仪表难以在此进行连续应用, 需要不断进行维护和标定, 难以满足运行指标实时反馈控制的需求。这种情况下,

现有基于模型的运行反馈控制方法难以在此进行应用^[1-2]。为此, 将过程运行数据与运行知识相结合, 并借助于智能建模与控制技术, 提出基于数据与知识的智能运行反馈方法。

4.1 人工监督的磨矿 DCS 系统(DCS-controlled grinding system with human supervision)

图2所示赤铁矿闭路磨矿的运行指标为磨矿产品粒度(PPS)和磨机生产率(GPR), 其中PPS又包括分级机溢流矿浆粒度(PPSc)和旋流器溢流矿浆粒度(PPSh)。实际工程中, 能够反映GPR高低的重要参数有一段磨机台时处理量和磨机作业率等。影响PPS和GPR的关键过程变量为磨机新给矿量 o_f 、分级机溢流矿浆浓度 d_c 、磨机I内的矿浆浓度 d_m 、旋流器给矿浓度 d_f 和给矿压力 p_f 。因此, 设置基础反馈控制用于对影响运行控制指标的关键过程变量 o_f , d_m , d_c , d_f , p_f 进行定跟踪控制, 具体基础回路设置如图2所示。

为了获得令人满意的过程整体运行性能, 通常需要工程师或领域专家根据其感知到的运行工况信息对基础控制系统进行人工设定和调节, 如图3所示。由于过程时常存在的原矿石成份与性质以及颗粒大小的频繁变化等未知强外部干扰、不确定过程动态以及多变量交错耦合效应, 磨矿过程运行条件随着时间推移而不断变化和波动。另外, 由于缺乏足够的操作经验, 操作员的人工操作也不可能每次操作都能100%有效。这些因素使得图3所示人工监督操作难以及时快速找到基础反馈控制系统的适宜设定值, 常常导致被控运行指标超过其期望范围, 甚至造成过负荷等故障工况^[1-2]。

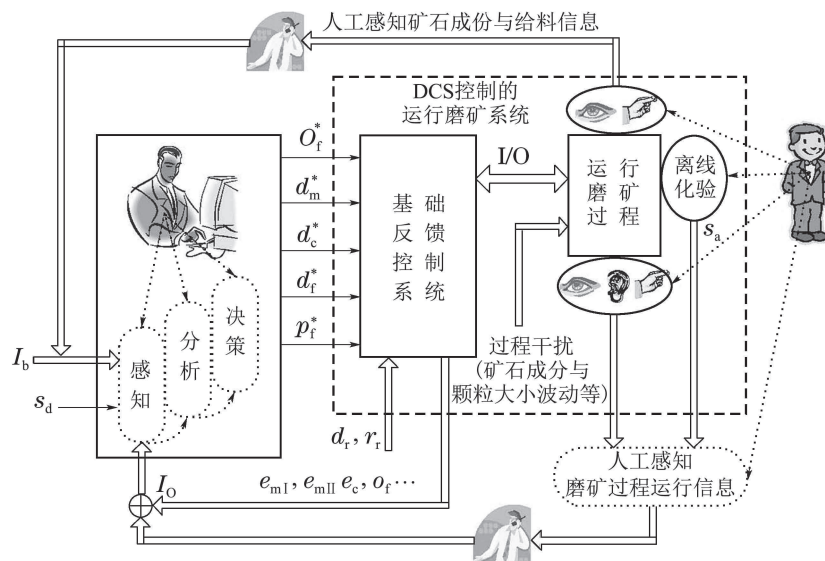


图 3 人工监视的磨矿控制系统

Fig. 3 Human-supervised grinding control system

4.2 智能运行反馈控制方法(Intelligent operational feedback control method)

针对上述实际工程难题,融合过程丰富的运行数据和操作知识,集成案例推理(case-based reasoning, CBR),人工神经网络以及模糊(fuzzy)逻辑等智能建模与控制技术,提出图4所示数据与知识驱动混合智能运行反馈控制方法,通过响应边界条件和运行工况的变化对基础反馈控制器设定值进行在线调整和修正,从而替代操作员的前述手工监督操作^[1-2].所提方法各组成部分如下:

- 回路预设模块(loop pre-setting controller, LPSC),采用数据驱动且具有较强自学习能力的CBR技术,根据期望磨矿运行指标计算出控制系统的预设值

$$\Theta_0^* = \{(o_{f,0}^*, d_{m,0}^*, d_{c,0}^*), (d_{f,0}^*, p_{f,0}^*)\}.$$

- 磨矿粒度神经网络动态软测量(PPS soft-sensor module, PSSM),采用动态神经网络软测量技术给出PPS的实时估计值 $s_p = \{s_{pI}, s_{pII}\}$,从而克服了PPS难以用常规方法进行连续在线测量的难题.

- 多变量模糊调节器(fuzzy adjustor, FA),采用fuzzy逻辑技术进行设计,用于实时计算出底层回路设定值

$$\Theta^* = \{(o_f^*, d_m^*, d_c^*), (d_f^*, p_f^*)\}$$

的调节增量 $\Delta\Theta = \{\Delta\Theta_M, \Delta\Theta_A\}$,从而以一种有效提高磨机处理量的方式来补偿运行环境的变化对磨矿运行指标的影响.

- 1) 模糊主动态调节器用于响应PPS估计值与期望设定值的实时偏差 $\Delta s_{pd} = s_p - s_d$,通过多变量模糊推理算法产生 Θ^* 的补偿增量 $\Delta\Theta_M^*$.

- 2) 模糊辅动态调节器根据间歇式的PPS化验值与期望设定值偏差 $\Delta s_{ad} = s_a - s_d$,产生 Θ^* 的补偿增量 $\Delta\Theta_A^*$.

磨矿系统运行之初或边界条件发生显著变化时,LPSC根据表征磨矿过程运行工况的特征描述变量,如PPS期望设定值 s_d 、工况信息 I_o 以及边界条件信息 I_b ,对案例库中的相似案例进行案例检索并找到与当前特征描述最为相似的案例.该最相似案例的解特征即为当前案例推理的解,也即回路控制器的预设值.然后,LPSC关闭,PSSM开始实时或以一定时间间隔进行软测量操作.若某个时刻 s_p 超出期望区间 $(s_d - s_\Delta, s_d + s_\Delta)$,则FA的主调节器将打开,根据 s_p 与 s_d 的偏差 Δs_{pd} 以一种有效提高GPR的算法计算出 Θ^* 的补偿增量 $\Delta\Theta_M^*$.另外,离线化验机构定期间歇式地给出PPS的实际化验值 s_a ,而FA的辅调节器根据 s_a 与 s_d 的偏差 Δs_{ad} 对 $\Delta\Theta_M$ 进行选

择性的辅助调节.

注1(控制方法总体评判) 所提混合运行反馈控制集成优化设定、动态软测量、动态反馈校正、统计过程控制等多种技术,尽管每一个功能模块都是已有的技术,但是他们在所提控制框架下的集成却可以产生更好和更可靠的控制性能:其中LPSC用于保证运行控制系统的标称性能;FA用于消除各种不确定动态和干扰的影响以增强控制系统的运行性能;PSSM作为在线运行软仪表解决PPS难以在线检测且化验过程滞后的问题;LPSC, PSSM, FA以及底层控制系统构成一个从底层基础反馈到上层运行反馈的多层次闭环反馈控制框架,显然这是采用常规控制方法难以实现的.

注2(系统实现) LPSC, FA可以利用实际过程的历史经验数据和领域专家知识进行集成建模, PSSM可以采用之前的历史数据进行设计(如果过程及其控制系统运行了一段时间)或者通过工业试验进行数据采集而建模(如果过程控制是刚刚投入运行或运行不久).

注3(关于区间优化控制) 图4所示运行反馈控制采用区间优化控制的方式.这是因为运行指标一般不需要控制在某一精确值,而是允许在某一范围内上下波动.另外,运行过程检测均存在一定的测量噪声,并且这些测量噪声在实际工程是可以容忍的.因此,区间控制可以避免对系统进行不必要的频繁调整,从而有利维护系统的稳定性.

注4(关于数据驱动的SPC) 考虑到正常工况下的实际物理系统各参数一般会围绕某一数值上下波动,同时也为了模仿人感知信息具有的移动平均特性,借助于统计过程控制(SPC)技术^[18],采用统计的方法来感知、分析和解释过程或者系统的数值信息.

注5(动态反馈调节器的必要性) 实际工业系统的原材料性质波动大、操作条件和运行环境恶劣,造成生产运行的工况条件显著时变,因而其对应的运行工作点会相应改变.

- 对于基于模型的一般连续生产过程的运行优化设定控制,解决运行工作点漂移的常规方法是在线模型参数校正或定期模型参数更新.然而,其实际工程控制的可操作性以及有效性难以保证.因为实际工业过程的干扰无时无刻不存在,其变化规律难以把握和定量刻画,在线模型参数校正的频率难以跟上过程工况的变化.

- 对于基于CBR的回路设定值预设,虽然可以采用输出偏差反馈法再次进行CBR求解,但是当不可测干扰的突变引起工作点明显漂移时,案例库的案例数据往往已经失效,不能对当前运行工况做准确刻画,而要积累足够多反映当前工况的新案例又需要比较长的时间.此种情况下, CBR设定系统难以找到当前工况下的合适回路设定值解.

因此,采用单一回路设定控制器难以适应过程复杂工况变化和干扰的突变.为此,需要建立专门的动态反馈调节机制,根据运行工况的变化对回路预设值进行在线动态校正,这也是保证运行反馈控制系统实用性、动态品质和运行控制性能的关键.

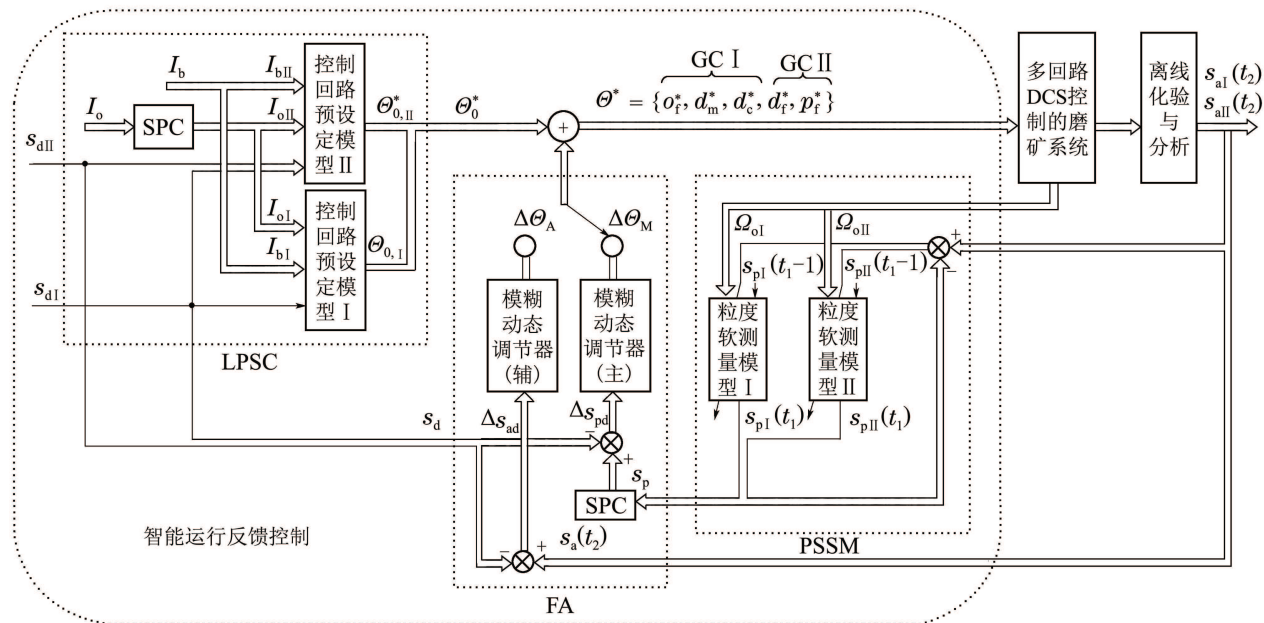


图 4 基于数据与知识的磨矿过程智能运行反馈控制策略

Fig. 4 Data and knowledge based intelligent operational feedback control strategy for grinding process

5 工业应用(Industrial application)

中国某大型选矿厂年处理 500 万吨品位为约 33% 的赤铁矿. 由于矿石成份复杂、嵌布粒度细且不均匀、磁性较弱且硬度较大, 因而采用 8 个并行系列的图 2 所示两段全闭路磨矿($\Phi 3.2\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 格子型球磨机, 2FLG- $\phi 2.4\text{ m}$ 双螺旋分级机, FX-350 水力旋流器). 在过去, 该选矿厂磨矿控制与管理都依靠人工操作来完成, 因而造成人员冗余、低效率和

高成本. 为此采用所提方法构建智能运行反馈控制系统, 总体结构如图 5 所示.

底层基础控制系统采用 Rockwell 的 Controllogix 5000 设计. 采用 RSView32 监控组态软件开发人机交互平台. 操作人员可通过这个平台对基础控制系统设定值进行修改和监督, 并采用 RSView32 内建的 VBA 语言对上层智能运行反馈控制系统进行开发实现.

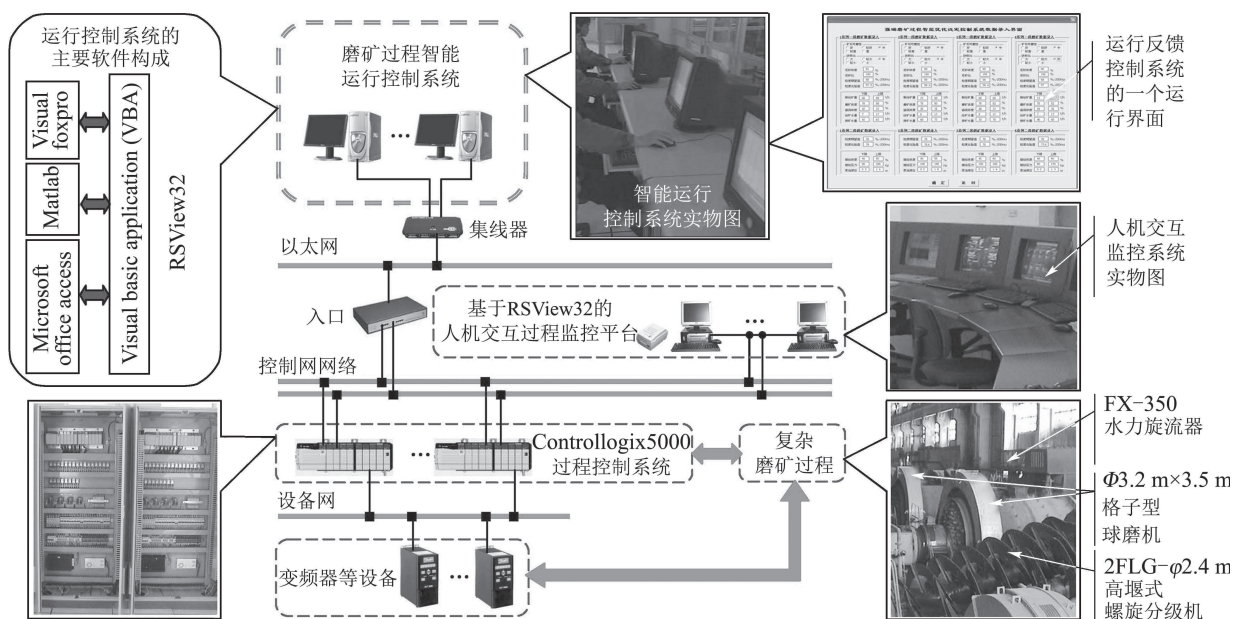


图 5 磨矿过程智能运行反馈控制系统的总体结构

Fig. 5 Architecture of the developed intelligent operational feedback control system

图6为采用智能运行反馈控制下的一段时间PPS运行控制效果. 由图6可以看出由于运行工况以及原矿石成份等边界条件的变化使得PPS超出其可控区间, 但是经过运行反馈控制对基础控制系统进行在线调节, PPS又逐渐进入可控的目标范围内. 通过各采样时刻下的PPS估计值与实际化验值的比较可以看出, PSSM能够较好地根据过程实时数据估计出PPS值, 且估计精度较高, 能够满足PPS闭环控制的精度要求.

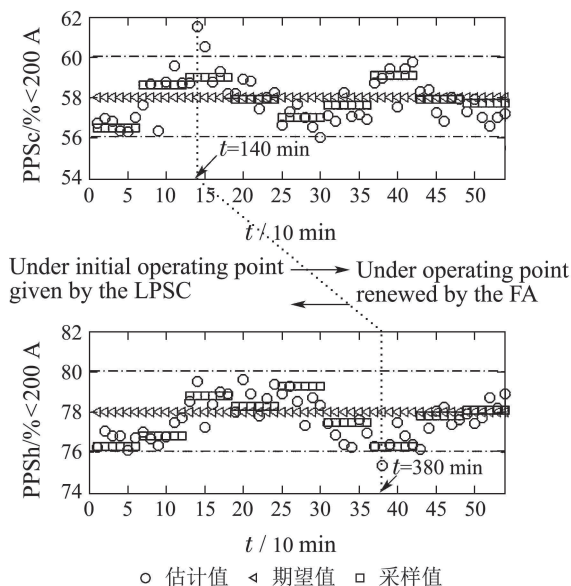


图6 智能运行反馈控制下的磨矿粒度控制效果
Fig. 6 Control effects of the PPS with intelligent operational feedback control

图7和图8分别为PPSc和PPSh在之前人工设定和智能运行控制下的效果比较.

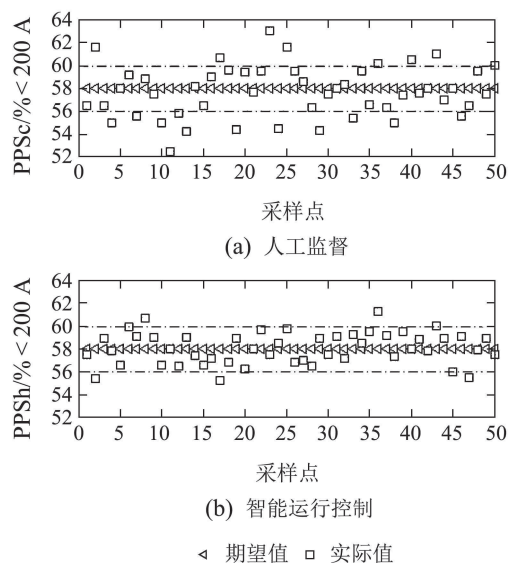


图7 人工监督与智能运行控制的PPSc比较
Fig. 7 Comparisons of PPSc between human supervision and intelligent operational control

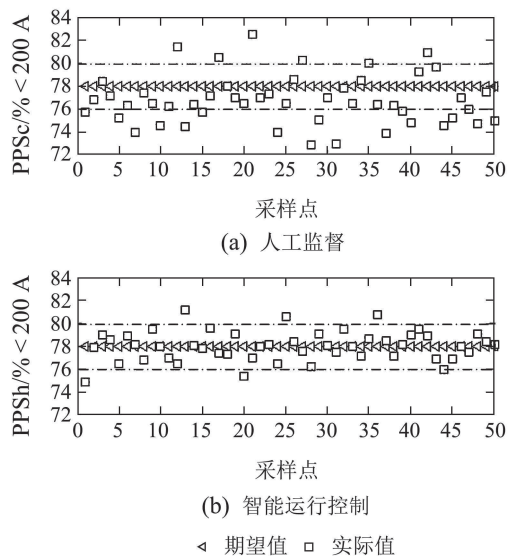


图8 人工监督与智能运行控制的PPSh比较

Fig. 8 Comparisons of PPSh between human supervision and intelligent operational control

由图7-8可以看出: 相对于人工设定, 智能运行控制下的磨矿粒度波动较小, 基本能够控制在期望目标区间内. 另外, 生产统计数据还表明, 在相同期望目标区间(56, 60)(% < 200 mesh)下, 智能运行反馈控制下的PPSc统计均值由之前人工设定下的约56.9(% < 200 mesh)提高到约58.1(% < 200 mesh), PPSh由之前人工设定时的约76.6(% < 200 mesh)提高到了现在的约77.9(% < 200 mesh). 这说明智能运行反馈控制实现了粒度指标的优化.

图9为智能运行反馈控制前后该选矿厂精矿品位合格率、金属回收率、磨机台时处理量及作业率的年统计比较. 图中数据为相应月份各日统计均值的平均, 而日统计均值为各采样时刻统计到日的均值. 可以看出, 智能运行反馈控制后精矿品位合格率较之前人工操作时提高了约15.77%, 并且金属回收率也比之前提高了约1.51%左右. 虽然精矿品位合格率和金属回收率的提高不能全部归功于磨矿过程的智能运行反馈控制, 但不能否认一个好的磨矿产品粒度质量将可以大大提高精矿品位合格率及金属回收率水平. 另外, 由图9可以看出, 磨机台时处理量以及磨机作业率均比之前有了较大的提高. 根据统计分析, 磨机作业率提高了约2.78%, 而磨机台时处理量提高了约4.42%. 这表明磨矿智能运行反馈控制在保证磨矿粒度指标的前提下实现提高磨机生产率的控制目标.

另外, 长期运行的生产统计数据还表明: 智能运行反馈控制系统运行后, 各项能耗总计减少约10%, 设备运转率总计提高约2.98%, 年增加经济利润约

930万元/年, 值得推广应用。

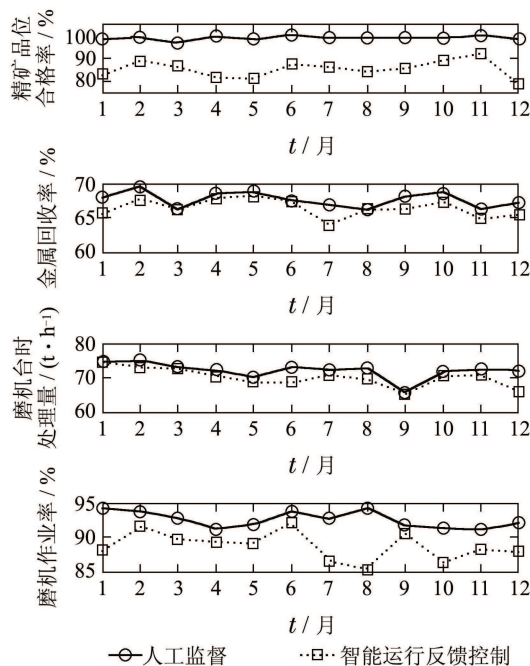


图 9 智能运行控制前后相关统计指标比较

Fig. 9 Comparisons of statistical indices between with human supervision and with intelligent operational control

6 结论(Conclusions)

冶金选矿中, 磨矿是任何一种金属选别的先决工序。长期以来, 磨矿控制与优化被认为是提高磨矿产品质量与生产效率以及整个选厂经济利润的关键, 一直受到国内外学者的关注和重视。论文针对磨矿运行反馈控制的难题和现有方法的不足, 以我国广泛使用的难建模赤铁矿闭路磨矿为研究对象, 提出基于数据与知识的智能运行反馈控制方法, 并对其进行工业应用。结果表明所提方法优化了磨矿粒度指标, 提高了磨机生产率, 节约了能耗, 保证了磨矿生产的稳定、连续和高效运行。

参考文献(References):

- [1] ZHOU P, CHAI T Y, SUN J. Intelligence-based supervisory control for optimal operation of a DCS-controlled grinding system [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(1): 162 – 175.
- [2] ZHOU P, CHAI T Y, WANG H. Intelligent optimal-setting control for grinding circuits of mineral processing process [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(4): 730 – 743.
- [3] HOUSEMAN L A, SCHUBERT J H, HART J R, et al. PlantStar 2000: a plant-wide control platform for minerals processing [J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14(6): 593 – 600.
- [4] ZHOU P, CHAI T Y. Grinding circuit control: A hierarchical approach using extended 2-DOF decoupling and model approximation [J]. *Powder Technology*, 2011, 213(1/3): 14 – 26.
- [5] POMERLEAU A, HODOUIN D, DESBIENS A, et al. A survey of grinding circuit control methods: From decentralized PID controllers to multivariable predictive controller [J]. *Powder Technology*, 2000, 108(2/3): 103 – 115.
- [6] HODOUIN D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(2): 211 – 225.
- [7] RAMASAMV M, NARAYANAN S S, RAO C D P. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme [J]. *Journal of Process Control* 2005, 15(3): 273 – 283.
- [8] 周平, 柴天佑. 基于多变量解耦控制的工业过程运行层次控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(2): 199 – 206. (ZHOU Ping, CHAI Tianyou. Hierarchical control approach for industrial process operation based on multivariable decoupling control [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(2): 199 – 206.)
- [9] DURATE M, SEPULVEDA F, REDARD J P, et al. Grinding operation optimization of the CODELCO-Andina concentrator plant [J]. *Minerals Engineering*, 1998, 11(12): 1119 – 1142.
- [10] RADHAKRISHNAN V R. Model based supervisory control of a ball mill grinding circuit [J]. *Journal of Process Control*, 1999, 9(3): 195 – 211.
- [11] SOSA-BLANCO C, HODOUIN D, BAZIN C, et al. Economic optimization of a flotation plant through grinding circuit tuning [J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(10/11): 999 – 1018.
- [12] LESTAGE R, POMERLEAU, HODOUIN D. Constrained real-time optimization of a grinding circuit using steady-state linear programming supervisory control [J]. *Powder Technology*, 2000, 124(3): 254 – 263.
- [13] MUNOZ C, CIPRIANO A. An integrated system for supervision and economic optimal control of mineral processing plants [J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(6): 627 – 643.
- [14] ZHOU P, CHAI T Y, ZHAO J H. DOB design for nonminimum-phase delay systems and its application in multivariable MPC Control [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, II*, 2012, 59(8): 525 – 529.
- [15] BOUCHE C, BRANDT C, BROUSSAUD A, et al. Advanced control of gold ore grinding plants in South Africa [J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(8): 866 – 876.
- [16] CHEN X S, LI Q, FEI S M. Supervisory expert control for ball mill grinding circuits [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(3): 1877 – 1885.
- [17] THWAITES P. Process control in metallurgical plants — From an Xstrata perspective [J]. *Annual Reviews in Control*, 2007, 31(2): 221 – 23.
- [18] SEBORG D E, EDGAR T F, MELLICHAMP D A. *Process Dynamics and Control* [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2004.

作者简介:

周平 (1980–), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为工业过程优化的反馈控制方法、软测量、多变量解耦控制及其应用等, E-mail: zhouping@mail.neu.edu.cn;

柴天佑 (1947–), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, IEEE Fellow, IFAC Fellow, 目前研究方向为流程工业一体化运行优化控制、自适应控制、多变量智能解耦控制等, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.