

磨矿过程磨机负荷的智能监测与控制

周 平¹, 柴天佑^{1,2}

(1. 东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 磨机过负荷是磨矿过程的常见故障工况, 如果不及时、准确处理, 就会造成磨矿产品质量变坏甚至磨矿生产的停顿. 采用规则推理(RBR)和统计过程控制(SPC)技术, 提出了由SPC机制、过负荷监测模块和监督控制器构成的磨机负荷智能监测与控制方法. 该方法通过对磨机过负荷的智能监测与诊断, 由监督控制器自动修改控制回路的设定值, 通过控制回路的输出跟踪修改后的设定值, 使磨机负荷逐渐远离过负荷状态. 工业应用表明, 该方法能够实现磨矿生产的安全、稳定和连续运行.

关键词: 磨机负荷(ML); 智能监测; 监督控制; 规则推理(RBR); 统计过程控制(SPC)

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Intelligent monitoring and control of mill load for grinding processes

ZHOU Ping¹, CHAI Tian-you^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Automation for Process Industry, Ministry of Education, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: Overload in mill is a work-situation fault that commonly occurred in grinding processes. This work-situation fault may cause the deterioration of the product quality and even a total collapse of the grinding production, if it is not detected and controlled in time. We propose an innovative approach for intelligent monitoring and control of the mill load(ML) using rule-based reasoning(RBR) and statistical process control(SPC) techniques. In this approach, we employ a SPC unit, a RBR-based ML monitoring module and an RBR-based supervisory controller to detect the imminent overload situation and automatically adjust the set-points of the control loops. The outputs of the controlled system track the modified set-points, making the ML deviate from the overload-situation gradually. The industrial application shows that this approach guarantees the grinding production of reliable and stable operations with less operational breakdowns.

Key words: mill load(ML); intelligent monitoring; supervisory control; rules-based reasoning(RBR); statistical process control(SPC)

1 引言(Introduction)

选矿行业的磨矿过程^[1]中, 磨机负荷(ML)是指磨机内瞬时的全部装载量, 包括新给矿量、循环负荷、水量及介质装载量等. ML是影响磨矿效率及磨矿产品质量好坏的重要因素, 特别是当负荷过大而又操作不当时, 就会造成磨机“胀肚”危险事故的发生. 因此必须对ML进行过负荷监测及过负荷控制, 这对于保证磨矿产品质量及生产的安全、连续、稳定运行是极其必要的^[2~5].

ML不但与磨机中的物料量有关, 还与物料粒径大小及分布有关, 而磨机中被磨物料粒径分布是随时变化的, 其性质和形态等因素也都会影响磨机的负荷状态, 因此很难用解析的方法对ML进行定量

描述. 另外, 由于磨机体积庞大且高速旋转, 因而也难以用常规仪表对ML进行直接检测及在此基础上过负荷控制. 实际生产中一般是由操作员通过声响、振动或功率等间接方法^[3~5], 凭借经验对过负荷进行人工判断与处理, 由于人工操作的主观性和随意性, 往往使得磨机过负荷得不到及时准确的发现和及时处理, 从而造成产品质量的变坏和生产的不稳定, 甚至因为磨机“胀肚”而停产.

本文在文[1]工业对象和智能优化控制系统之上, 结合领域专家知识, 采用基于规则的推理(RBR)^[6]和统计过程控制(SPC)^[7,8]技术, 提出了一种新的磨机负荷智能监测和控制方法, 该方法通过对ML状态的监测及对过负荷故障工况的诊断, 自动修正回路控

收稿日期: 2006-11-17; 收修改稿日期: 2008-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534010); 国家973计划项目(2002CB312201); 国家863计划项目(2006AA04Z179, 2007AA041405); 国家创新研究群体科学基金资助项目(60521003); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0294).

制器的设定值,各控制回路跟踪修改后的设定值,使得ML逐渐远离过负荷危险状态。

2 工业背景介绍(Industrial background)

某选厂一段磨矿为由球磨机、螺旋分级机构成的典型湿式磨矿回路^[1],如图1所示。该过程具有典型的非线性、强耦合等综合复杂特性,且关键工艺指标磨矿粒度(PS)难以用常规控制方法进行有效控制。文[1]集成混合智能技术,构建了该过程的具有回路控制和回路设定两层结构的智能优化控制系统。回路控制层实现影响PS的关键工艺参数的连续稳定控制,相关控制回路、检测仪表及执行机构设置如图1所示。回路设定层即回路设定系统,由回路预设、辅助补偿及软测量预报等智能模块构成,根据期望的PS指标,依据边界条件和运行工况信息自动给出控制回路的优化设定值。工业应用表明该系统能够对磨矿生产指标进行优化,但是由于磨机负荷监测和控制完全凭人工经验操作,具有很大的主观性和随意性,当磨机过负荷时往往得到及时准确发现和控制,因而系统安全性和稳定性不足。

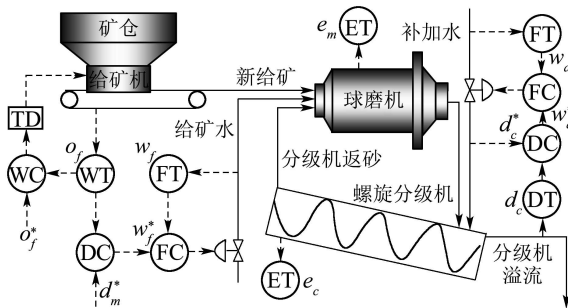


图1 磨矿系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grinding system

图1中的相关符号或变量解释如下: w_f, w_a 为给矿水量和补加水量; e_m, e_c 为磨机电流和分级机电流; o_f 为新给矿量; d_c, d_m 为分溢浓度和磨矿浓度; -C, -T 分别表示相关控制器和传感器, F-, D-, W- 和 E- 分别表示流量、浓度、称重和电流; TD 为变频器; 上标*为回路控制器设定值。

3 磨机负荷智能监测与控制(Intelligent monitoring and control of mill load)

3.1 负荷智能监测与控制策略(Strategy for intelligent monitoring and control of mill load)

研制出一种能够根据运行工况自动对磨机负荷进行智能监测与控制的方法,不但能克服文[1]智能优化控制系统的不足,而且具有普遍适用意义。因为现今尤其是我国磨矿生产,都存在因磨机过负荷得不到及时发现与处理而使磨矿产品质量变坏、生产不稳定甚至停顿的问题。为此,在文[1]控制系统基础上提出了由SPC机制、磨机负荷监测模块(MLM)以及监督控制器(SC)构成的磨机负荷智能监测与控制

方法,如图2所示。

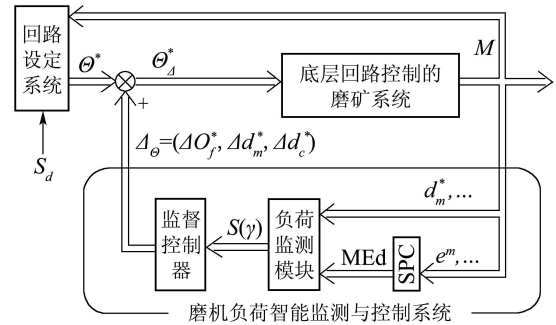


图2 智能监测与控制策略图

Fig. 2 Strategy diagram of intelligent monitoring and control

首先由SPC机制对相关原始测量数据进行统计分析(实际上SPC模仿了人感知信息具有移动平均的特性)。然后,MLM根据统计分析后的信息对ML进行智能监测。SC根据由MLM监测到的过负荷故障工况S,给出回路控制器设定值的相应调节量 $\Delta\theta$,各控制回路跟踪修改后的回路设定值 θ_{Δ}^* ,从而使ML逐渐远离过负荷状态。

正常工况下,由文[1]的回路设定系统根据PS期望值 s_d ,依据边界条件和运行工况信息M给出回路控制器的优化设定值 θ^* ,从而将PS控制在期望目标范围内。不难理解,这种以产品质量指标主、产量为辅的控制思想,为了保证期望的PS指标,允许磨机在一定条件下欠负荷运行。也正因此,本文只对磨机过负荷进行监测与控制。

3.2 负荷智能监测与控制的实现(Realization of intelligent monitoring and control of mill load)

1) SPC机制。实际经验表明:当磨机欠负荷尤其是过负荷时,磨机电流就会显著下降^[5,9]。所以可以根据这个现象对ML进行监测。实际生产中,由于磨机运行的不均匀性,即使工况稳定,磨机电流也是上下围绕均值反复波动的(e_c, o_f, w_f 等过程变量也具有类似特征)。因此不能直接用原始测量数据对ML进行监测与控制,否则会造成误判与误控,本文采用SPC技术对这些磨机电流等原始测量数据进行统计分析,具体如下:

设 $e_m(t)$ 为采样周期为 T_1 的磨机电流原始测量值,一般来说 T_1 是秒级别的时间常数,定义

$$\bar{e}_m(t) = \frac{T_1}{T_2} \sum_{\tau=t-T_2}^t e_m(\tau). \quad (1)$$

式中 T_2 为 $\bar{e}_m(t)$ 的计算周期,取 $T_2 = 30T_1$,定义

$$u_{e_m}(t) = \frac{T_2}{T_3} \sum_{\tau=t-T_3}^t \bar{e}_m(\tau), \quad (2)$$

$$\delta_{e_m}(t) = \sqrt{\frac{T_2}{T_3 - T_2} \sum_{\tau=t-T_3}^t (\bar{e}_m(\tau) - u_{e_m}(t))^2}. \quad (3)$$

式中 T_3 为 u, δ 计算周期, 取 $T_3 = 20T_2$

类似于SPC的西电规则^[7,8], 建立如下规则用于判断磨机电流是否下降: 若某一 $u_{em}(t_0)$ 计算时间内的某时刻, 至少有以下条件之一成立:

- ① $\bar{e}_m(\tau) \langle \bar{e}_m(\tau-1) \langle (u_{em}(t_0) - 3\delta_{em}(t_0));$
- ② $\bar{e}_m(\tau) \langle \cdots \langle \bar{e}_m(\tau-2) \langle (u_{em}(t_0) - 2\delta_{em}(t_0));$
- ③ $\bar{e}_m(\tau) \langle \cdots \langle \bar{e}_m(\tau-3) \langle (u_{em}(t_0) - \delta_{em}(t_0));$

则说明磨机电流在下降, 为了叙述方便, 不妨将该事件简记为MEd.

2) 磨机负荷智能监测. 前文分析可知, 磨机电流下降并不意味着ML过负荷, 也可能欠负荷, 所以单纯通过磨机电流来对ML进行监测是不可靠的. 引起ML增大以致过负荷的原因主要有给矿量大、磨矿浓度高以及矿石性质差(如矿石变硬、粒度变粗等). 磨矿过程的前述综合复杂特性, 使得难以建立ML与上述影响因素的解析表达式. 但领域专家知识以及优秀操作员良好的操作经验为MLM提供了一个良好的品质模型, 因此知识驱动且简单适用的RBR技术在此可以发挥作用.

采用RBR技术并结合领域专家知识设计了如表1所示的过负荷智能监测规则. 规则形式为广泛使用的产生式规则, 其中主前提条件为事件MEd, 辅前提条件为其他相关过程变量, 结论为ML过负荷故障工况 S 中的给矿量大引起的过负荷 S_1 、磨矿浓度高

引起的过负荷 S_2 以及矿石性质差引起的过负荷 S_3 . 表1结论括号中的百分数为事件可信度 Υ , Υ 也表示事件的严重程度. $\Delta\bar{o}_f = \bar{o}_f(t_1) - \bar{o}_f(t_1 - 1)$, 其他类似标志意义与 $\Delta\bar{o}_f$ 相同, $\rightarrow$ 表示无变化, λ 为可调阈值系数, 这里 $(\lambda_{of}, \lambda_{dm}, \lambda_{ec}, \lambda_{wf}) = (5, 1, 1.2, 2)$.

3) 监督控制器. 基于文[1]控制系统的故障工况监督控制器(SC)的作用是在磨机过负荷故障工况发生时, 减少直至消除磨机的过负荷故障工况. 具体来说SC根据MLM诊断出的磨机过负荷工况 S , 给出回路控制器的设定值修正量 $\Delta\theta$ (包括新给矿量设定值调整量 Δo_f^* 、磨矿浓度设定值调整量 Δd_m^* 及分溢浓度设定值调整量 Δd_c^*).

由于难以建立故障工况 S 与回路设定值修正量 $\Delta\theta$ 的解释表达式, 因而SC仍采用知识驱动的RBR技术实现. 具体推理规则如表2所示, 其中 γ 为可调系数, 这里确定为

$$\begin{aligned} \gamma_{of}^{(11)} &= \gamma_{of}^{(31)} = -1, \gamma_{of}^{(12)} = \gamma_{of}^{(22)} = \gamma_{of}^{(32)} = -1.5, \\ \gamma_{dm}^{(21)} &= -0.2, \gamma_{dm}^{(22)} = -0.3, \gamma_{dm}^{(31)} = 0.1, \\ \gamma_{dm}^{(32)} &= 0.2, \gamma_{dc}^{(12)} = \gamma_{dc}^{(22)} = \gamma_{dc}^{(32)} = 1. \end{aligned}$$

由回路设定系统给出的原回路设定值, 加上SC给出的修正量 $\Delta\theta$, 即得修正后的回路设定值 θ_Δ^* . 各控制回路跟踪该设定值, 就可使得ML逐渐远离过负荷故障工况.

表1 磨机过负荷监测规则
Table 1 Monitoring rules of overload of mill

规则	主前提条件	辅助前提条件	结论
R-11	MEd	$\Delta\bar{o}_f \rangle \lambda_{of}$	$S_1(80\%)$
R-12	MEd	$\Delta\bar{o}_f \rangle \lambda_{of}$ AND $\Delta\bar{e}_c \rangle \lambda_{ec}$	$S_1(100\%)$
R-21	MEd	$\Delta\bar{d}_m^* \rangle \lambda_{dm}$	$S_2(80\%)$
R-22	MEd	$\Delta\bar{d}_m^* \rangle \lambda_{dm}$ AND $\Delta\bar{e}_c \rangle \lambda_{ec}$	$S_2(100\%)$
R-23	MEd	$\Delta\bar{w}_f \langle -\lambda_{wf}$ AND $o_f^* \rightarrow$	$S_2(80\%)$
R-24	MEd	$\Delta\bar{w}_f \langle -\lambda_{wf}$ AND $o_f^* \rightarrow$ AND $\Delta\bar{e}_c \rangle \lambda_{ec}$	$S_2(100\%)$
R-31	MEd	$o_f^* \rightarrow$ AND $d_m^* \rightarrow$	$S_3(80\%)$
R-32	MEd	$o_f^* \rightarrow$ AND $d_m^* \rightarrow$ AND $\Delta\bar{e}_c \rangle \lambda_{ec}$	$S_3(100\%)$

表2 磨机过负荷监督控制规则
Table 2 Supervisory control rules of overload of mill

规则	前提条件	结论
R'-11	$S_1(80\%)$	$\Delta o_f^* = \gamma_{of}^{(11)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$
R'-12	$S_1(100\%)$	$\Delta o_f^* = \gamma_{of}^{(12)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_c^* = \gamma_{dc}^{(12)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$
R'-21	$S_2(80\%)$	$\Delta d_m^* = \gamma_{dm}^{(21)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$
R'-22	$S_2(100\%)$	$\Delta o_f^* = \gamma_{of}^{(22)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_c^* = \gamma_{dc}^{(22)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_m^* = \gamma_{dm}^{(22)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$
R'-31	$S_3(80\%)$	$\Delta o_f^* = \gamma_{of}^{(31)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_m^* = \gamma_{dm}^{(31)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$
R'-32	$S_3(100\%)$	$\Delta o_f^* = \gamma_{of}^{(32)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_c^* = \gamma_{dc}^{(32)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)], \Delta d_m^* = \gamma_{dm}^{(32)} [u_{em}(t_0) - \bar{e}_m(\tau)]$

4 工业应用效果(Industrial application)

将提出的磨机负荷智能监测与控制方法嵌入在文[1]所述磨矿过程的智能优化控制系统. 在工业实验成功的基础上, 将其用于磨矿生产实际.

图3为磨机电流及关键工艺参数24小时的连续运行曲线, 图4为该时间内磨机电流的概率分布曲线, 其中虚线LCL为 3δ 下控制限^[7]. 可以看出磨机电流服从 $\mu = 60.166, \delta = 0.573$ 的正态分布, 且大于 3δ 下控制限的点数为99.9%, 即满足 3δ 控制标准. 另外, 可以看出磨机电流稳定维持在一个较高水平, 即磨机运行在理想负荷工作点处. 当某时刻由于边界条件的变化磨机电流超出 3δ LCL时, 提出的负荷智能监测与控制方法能够及时对其进行监测并且通过调整回路设定值, 使得磨机电流又快速进入受控区域.

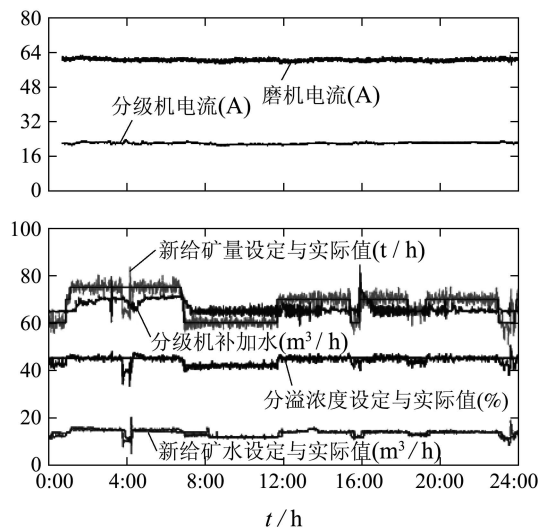


图3 磨机电流及关键工艺参数运行曲线
Fig. 3 Running curves of mill electricity and key technical parameters

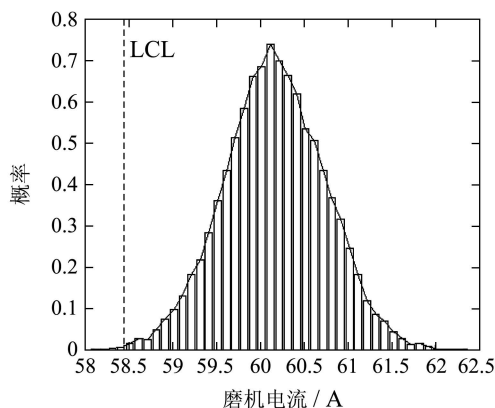


图4 磨机电流的概率分布曲线
Fig. 4 Probability distribution of mill electricity

监测与有效控制, 使得磨矿系统较以前稳定, 无磨机“胀肚”事故发生, 且磨矿产品质量和台时产量较以前也均有提高. 这说明本文方法能够进一步保证磨矿产品质量, 并实现磨矿生产的安全、稳定和连续运行.

5 结论(Conclusion)

针对磨机负荷监测与控制的重要性及现有方法的不足, 在文[1]控制系统基础上, 提出了基于RBR和SPC的负荷智能监测与控制方法. 该方法通过对过负荷故障工况的监测与诊断, 产生监督控制策略以自动修改回路控制器的设定值. 通过控制回路的输出跟踪修改后的设定值, 使ML远离过负荷状态, 从而避免磨机“胀肚”事故的发生. 工业应用效果表明了方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] ZHOU P, CHAI T Y, YUE H, et al. Intelligent optimal control of grinding circuits for optimization of particle size index[C]//*Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA)*. Piscataway, USA: IEEE Press, 2006: 6586 – 6591.
- [2] NIEROP M A V, MOYS M H. Measurement of load behaviour in an industrial grinding mill[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(2): 257 – 262.
- [3] KOLACZ J. Measurement system of the mill charge in grinding ball mill circuits[J]. *Minerals Engineering*, 1997, 10(12): 1329 – 1338.
- [4] KIANGI K K, MOYS M H. Measurement of the load behaviour in a dry pilot mill using an inductive proximity probe[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(13): 1348 – 1356.
- [5] 王泽红, 陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势[J]. *中国粉体技术*, 2001, 1(1): 19 – 23.
(WANG Zehong, CHEN Bingchen. Present state and development trend for ball mill load measurement[J]. *China Powder Science and Technology*, 2001, 1(1): 19 – 23.)
- [6] WANG H C, WANG H S. A hybrid expert system for equipment failure analysis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 28(4): 615 – 622.
- [7] SEBORG D E, EDGAR T F, MELLICHAMP D A. *Process Dynamics and Control*[M]. New York: John Wiley and Sons Press, 2004.
- [8] FOURNIER B, RUPIN N, BIGERELLE M, et al. Application of the generalized lambda distributions in a statistical process control methodology[J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(10): 1087 – 1098.

作者简介:

周平 (1980—), 男, 东北大学博士研究生, 主要研究方向为复杂工业过程智能优化控制、软测量及其应用等, E-mail: zhoup1980@126.com;

柴天佑 (1947—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为自适应控制、多变量智能解耦控制与流程工业综合自动化等, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.

该系统运行以来, 由于磨机过负荷得到了及时