

文章编号: 1000-8152(2010)11-1471-08

## 氧化铝回转窑制粉系统磨机负荷的智能控制

张立岩, 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 氧化铝回转窑制粉系统采用回转窑余热产生的热风干燥煤粉时, 由于热风温度低且变化频繁, 常常导致制粉工况处于过负荷异常工况, 出现“饱磨”故障, 导致停磨, 使负荷控制系统无法投入自动运行. 本文提出了有规则推理的切换机制, 在磨机负荷PI控制器和过负荷控制器之间进行智能切换. 所提出的控制方法成功应用于氧化铝回转窑制粉系统, 在热风温度低且变化频繁时, 将磨机控制在出力最大的负荷范围内, 避免出现故障工况.

**关键词:** 磨机负荷; 切换控制; 过负荷控制; 制粉系统; 氧化铝烧制过程

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Intelligent mill-load control for pulverizing system in alumina sintering process

ZHANG Li-yan, CHAI Tian-you

(Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004)

**Abstract:** The pulverizing system in alumina sintering process uses the air with residual heat produced by cooling clinker as the hot air to dry the coal powder. When the temperature of hot air is low and varies frequently, it may cause an overload condition for the pulverizing system, leading to operational faults of “coal blockage” and even the termination of the mill operation and the operation of mill-load controller. To deal with this problem, we propose a rule-based reasoning switching mechanism which switches between the PI controller for normal load and the controller for overload. This method has been applied successfully to a pulverizing system for alumina sintering process, in which the pulverizing system is controlled to generate the maximal output power when the temperature of hot air is low and varies frequently, thus, avoiding the fault of “coal blockage”.

**Key words:** mill load; switching control; overload control; pulverizing system; alumina sintering process

### 1 引言(Introduction)

中国虽然有丰富的铝土矿, 但铝土矿的铝硅比普遍比较低. 在氧化铝烧制过程中广泛使用采用回转窑烧制熟料过程中产生的余热来加热煤粉, 提高磨机出口温度的制粉系统. 提高磨机的出力对于提高制粉效率、降低制粉电耗具有十分重要的意义, 磨机的出力取决于磨机负荷的控制, 因此如何控制磨机负荷, 使其处于生产工艺规定的负荷范围内, 具有尽可能高的出力, 是氧化铝烧制过程制粉系统控制的关键.

文献[1]针对火力发电厂的制粉系统, 提出了智能解耦控制方法实现对磨机差压(磨机负荷的一种表示方法)、磨机出口温度和磨机入口负压的解耦控制. 文献[2]通过分析磨机差压和磨机电流等信号将磨机负荷划分为3个区间, 将模糊PID控制和模糊自优化补偿控制相结合, 将磨机负荷控制在设定的范

围内. 文献[3]采用磨机差压信号控制磨机负荷, 并结合磨前轴振动信号辅助判别磨机负荷状况, 提出了磨机负荷的模糊控制方法.

文献[4]采用磨机差压及振动信号的加权平均值作为磨机负荷, 并采用递阶模糊控制的方法建立磨机入口负压、磨机出口温度、磨机负荷模糊控制查询表和协调级模糊控制查询表. 文献[5]在磨机负荷上限和下限之间采用PI调节给煤使得磨音跟踪设定值, 并采用动态步进搜索的负荷寻优方法修正磨音控制目标, 提高系统运行的稳定性和经济性.

上述制粉系统的热风由专门锅炉产生, 热风温度稳定, 通过调节热风门开度可将磨机出口温度控制在规定的范围内, 采用上述方法实现对负荷的控制. 由于氧化铝回转窑处于不同工况, 如点火、烘窑等不同阶段并加上不同成分生料浆时熟料温度不同以及进入篦冷机的熟料量不同, 造成由篦冷机冷却熟料

收稿日期: 2009-05-11; 收修改稿日期: 2010-01-05.

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2009CB320601); “111”引智工程资助项目(B08015); 国家“863”计划资助项目(2007AA041405).

产生用于制粉系统的热风温度频繁在 $150^{\circ}\sim 400^{\circ}$ 之间波动且常常处于 $300^{\circ}$ 以下的低温状态. 此时只能将冷风门全关, 热风门全开, 最大限度利用热风, 提高出口温度, 磨机出口温度随着热风温度波动而变化.

当烧熟料温度升高使得磨机出口温度升高时, 虽然磨机存煤量没有变化, 磨机负荷的检测量磨音升高, 为使磨音在磨音设定值上, 控制系统加煤, 使磨机存煤量增加, 有可能出现超过存煤量临界值(磨机最大出力对应的磨机存煤量), 出力下降, 甚至出现“饱磨”(煤粉过多堵塞磨机)故障.

因此已有的制粉系统的控制方法难以应用到上述氧化铝烧结过程制粉系统, 目前氧化铝烧结过程制粉系统处于人工控制状态. 由于操作员难以及时准确的判断热风温度与负荷状况以及确定给煤量, 常常使制粉系统负荷过高, 出力减少, 甚至堵磨. 当热风温度降低时, 磨机出力降低, 使磨机负荷增加, 有可能出现过负荷工况, 造成故障. 当热风温度升高时, 磨机出力增加使得磨机负荷减小, 造成磨机出力

不足.

切换控制是处理动态特性变化频繁的复杂工业过程的有效控制方法<sup>[6~9]</sup>. 如文献[10]设计了由环境识别及切换子系统和一组针对每一个环境下基于神经网络的自适应控制器, 并将上述切换控制应用到轮式移动机器人在不平坦地形行走的控制, 取得了很好的应用效果.

将PI控制与基于规则推理控制相结合, 负荷工况识别与不同负荷工况下控制器切换相结合提出了由基于规则推理的切换机制, 磨机负荷PI控制器, “给煤保持”控制器, “强制减煤”控制器和“抽粉”控制器组成的磨机负荷智能控制方法, 并成功应用于氧化铝烧结过程制粉系统.

## 2 制粉过程描述(Process description of pulverizing system)

氧化铝回转窑制粉过程如图1所示, 它由原煤仓、给煤机、钢球磨机、粗粉分离器、布袋收集器、煤粉仓、排风机、回转窑及篦冷机组成.

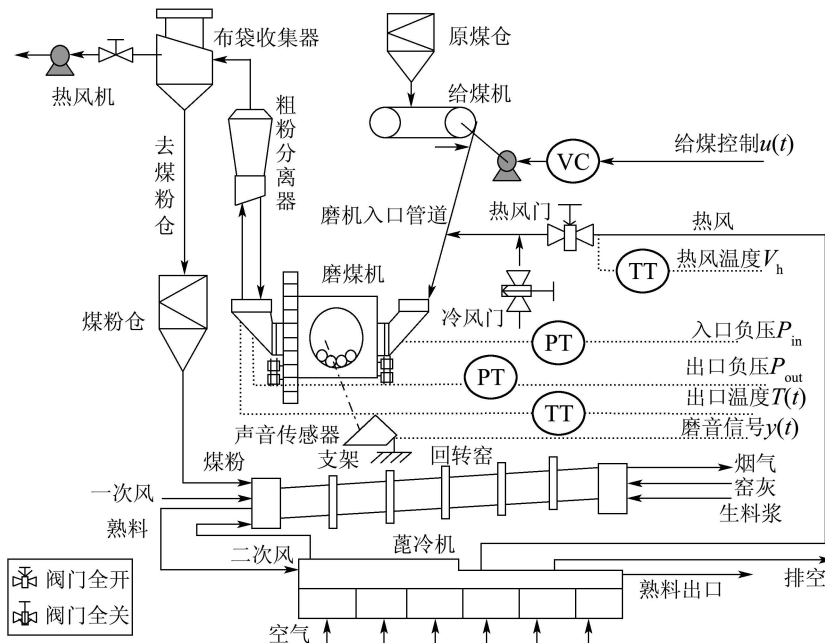


图1 制粉系统工艺流程图

Fig. 1 The flow chart of the coal pulverizing process

原煤仓内的原煤通过给煤机送入到磨机入口管道, 并与干燥剂混合, 回转窑产生的熟料经过篦冷机冷却产生的余热空气由热风门进入磨机入口管道加热, 加热的混合物在磨机内经过钢球的挤压、研磨作用而被磨制成细度与温度合格的煤粉, 然后在排风机的抽吸作用下随气流进入粗粉分离器进行分选. 分离的粗粉返回磨机继续研磨, 细粉

进入布袋收集器实现风粉分离, 煤粉送入煤粉仓用于回转窑燃烧.

制粉过程控制系统的控制输入是给煤机转速 $u(t)$ , 热风门开度 $u_1(t)$ , 冷风门开度 $u_2(t)$ , 输出是表示磨机负荷的磨音 $y(t)$ , 磨机出口温度 $T(t)$ , 磨机负荷主要反映了磨煤机内存煤量 $w_m(t)$ , 磨音是通过安装在磨机的声音传感器来检测磨机工作

时钢球撞击钢球和钢球撞击衬板发出的声音的音频和音强大小, (通常)磨机负荷大, 由于煤粉的缓冲作用, 磨音小且频率低, 磨音检测值小<sup>[11]</sup>. 控制目的是通过调节 $u(t)$ ,  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ 使制粉系统的磨机出口温度和磨音在生产工艺规定的范围内, 使磨音尽可能处于磨机出力最大所对应的负荷范围内.

由文献[11~15]知 $u(t)$ ,  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ 和 $y(t)$ ,  $T(t)$ 之间的动态模型:

$$y(t) = \frac{k_0 \cdot f_1(T(t), B)}{w_m(t)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}(t) = & \frac{1}{(C_m w_m(t) + C_{gq} w_{gq})} \{C_h G_r(u_1(t)) V_h(t) + \\ & C_1 G_1(u_2(t)) T_1 + \frac{C_y T_y}{3.6} B_{r \max} u(t) - \\ & (C_r (G_r(u_1(t)) + G_1(u_2(t)) + \\ & \frac{C_m B_m(t)}{3.6}) T(t) + Q\}. \end{aligned} \quad (2)$$

由于余热温度低, 为充分利用余热温度, 热风阀门全开, 即 $u_1(t) = 100\%$ , 冷风阀门全关, 即 $u_2(t) = 0$ , 此时热风流量 $G_r(u_1(t))$ 为最大值 $G_{h \max}$ , 冷风流量最小 $G_1(u_2(t)) = 0$ , 式(2)为

$$\begin{aligned} \dot{T}(t) = & \frac{1}{(C_m w_m(t) + C_{gq} w_{gq})} \{C_h G_{h \max} V_h(t) + \\ & \frac{C_y T_y}{3.6} B_{r \max} u(t - L_2) - (C_r G_{h \max} + \\ & \frac{C_m B_m(t)}{3.6}) T(t) + Q\}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中各参数与变量的含义由表1给出.

表 1 参数及说明

Table 1 The parameters and variables

参数	说明	参数	说明
$C_y$	原煤比热系数	$C_h$	热风比热系数
$C_{gq}$	钢球比热系数	$C_1$	冷风比热系数
$C_r$	混合气体比热系数	$W_{gq}$	钢球装载量
$w_m$	存煤量	$V_h$	热风温度
$T_1$	冷风温度	$B_{r \max}$	单位转速给煤量
$L_1, L$	纯滞后时间常数	$Q$	磨煤机热能、环境散热等热量总和
$C_m$	煤粉比热系数		

存煤量 $w_m(t)$ , 磨机出力 $B_m(t)$ 由下式表示:

$$w_m(t) = w_m(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{B_{r \max} u(t - L) - B_m(t)}{3.6} dt,$$

$$B_m(t) =$$

$$B_{\max} \cdot \left(2 \frac{w_m(t)}{w_{m \max}} - \left(\frac{w_m(t)}{w_{m \max}}\right)^2\right) \cdot f_2(T(t), B). \quad (4)$$

其中:  $w_m(t_0)$ 为初始时刻 $t_0$ 时磨机内的存煤量,  $B_{\max}$ 为磨机最大出力; 临界存煤量 $w_{m \max}$ 为磨机最大出力 $B_{\max}$ 对应的存煤量值,  $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 为未知的非线性函数.

$f_1(\cdot)$ 的特性如图2所示, 曲线1, 2, 3表示磨机出口温度 $T(t)$ 在 $T_1, T_2, T_3$ 时的磨音 $y(t)$ 与存煤量 $w_m(t)$ 的曲线. 由式(4)和图2可见:

$u(t)$ 增加,  $w_m(t)$ 增加, 负荷增加, 磨音 $y(t)$ 减小;

当存煤量 $w_m(t)$ 不变时, 磨音 $y(t)$ 随磨机出口温度 $T(t)$ 的变化而变化;

当 $T_1 < T_2 < T_3$ ,  $y(T_1) < y(T_2) < y(T_3)$ .

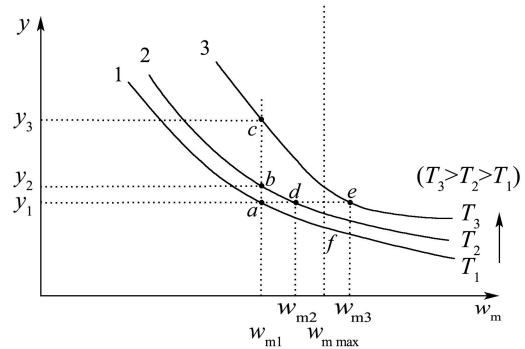


图 2 不同温度下磨音与磨机存煤量的关系曲线

Fig. 2 Function  $f_1(\cdot)$  for different temperatures

图3表示 $f_2(T, B)$ 的特性, 曲线4, 5, 6表示当磨机出口温度 $T(t)$ 为 $T_1, T_2, T_3$ 时磨机出力 $B_m(t)$ 与磨机存煤量 $w_m(t)$ 的关系曲线. 由图3可知:

存煤量 $w_m(t)$ 增加, 磨机出力 $B_m(t)$ 增大.

当 $w_m(t) = w_{m \max}$ , 磨机出力为 $B_{\max}$ ;

当存煤量 $w_m(t)$ 大于 $w_{m \max}$ , 磨机出力 $B_m(t)$ 小于 $B_{\max}$ 并减少;

当存煤量 $w_m(t)$ 不变, 出力 $B_m(t)$ 随温度 $T(t)$ 降低而减小.

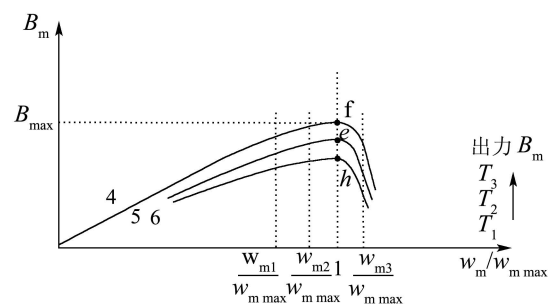


图 3 不同温度下磨机出力与磨机存煤量的关系曲线

Fig. 3 Function  $f_2(\cdot)$  for different temperatures

由方程(1)~(4)以及上述分析可知,磨音 $y(t)$ 与 $u(t)$ 之间具有强非线性,且受余热温度 $V_h(t)$ 的影响.余热温度 $V_h(t)$ 变化频繁,当余热温度 $V_h(t)$ 加大时,使出口温度 $T(t)$ 增加,虽然存煤量 $w_m(t)$ 没有变化,磨音 $y(t)$ 增加.为跟踪磨音设定值 $y_{sp}$ ,可能增大给煤机转速 $u(t)$ ,导致磨机存煤量 $w_m(t)$ 增加,可能造成 $w_m(t)$ 大于临界存煤量 $w_{m\max}$ ,造成过负荷工况 $S_2$ ,使得出力 $B_m(t)$ 减小.

由以上分析可知,采用已有的控制方法在热风温度频繁变化下,通过给煤量 $u(t)$ 控制磨音 $y(t)$ 时,易于造成过负荷,导致“饱磨”故障,难以实现将磨机负荷控制在工艺规定的范围内,且使系统具有最大出力的控制目标,只能采用如图4所示人工控制方式.

### 3 制粉过程人工控制现状(Human-based operation process of pulverizing system)

图4为制粉过程负荷控制现状.

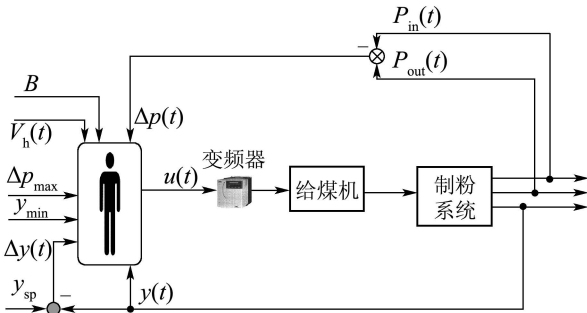


图4 制粉过程控制现状示意图

Fig. 4 The existing control human operator based control of the pulverizing process.

操作员首先根据磨音 $y(t)$ 和磨机入口负压 $p_{in}(t)$ 与磨机出口负压 $p_{out}(t)$ 的差 $\Delta p(t) = p_{in}(t) - p_{out}(t)$ 来判断负荷工况.并根据磨机运行经验,将负荷工况分为极高 $L_4$ ,很高 $L_3$ ,较高 $L_2$ 不同工况.如果磨音 $y(t)$ 大于 $y_{\min}$ ,或者磨音 $y(t)$ 小于 $y_{\min}$ ,且磨机差压 $\Delta p(t)$ 小于 $\Delta p(L_2)$ 时,判断为正常负荷工况 $L_1$ ,采用PI负荷控制器,否则为过负荷工况.过负荷时,如果 $\Delta p(t)$ 小于 $\Delta p(L_3)$ ,判断为磨机负荷较高工况 $L_2$ ,保持给煤量不变;如果大于 $\Delta p(L_3)$ ,但小于 $\Delta p(L_4)$ 时,判断为负荷很高工况 $L_3$ ,减小给煤量;如果大于 $\Delta p(L_4)$ ,判断为磨机负荷极高工况 $L_4$ ,停止给煤.过负荷时运行人员通过改变给煤机的变频器频率减小给煤量.正常负荷时,根据磨音跟踪误差 $\Delta y(t) = y(t) - y_{sp}$ ,根据经

验改变变频器频率来调整给煤量 $u(t)$ 将 $y(t)$ 控制在设定 $y_{sp}$ 上.

当余热温度变化频繁时,操作员难以及时准确判负荷工况,不能及时准确调整给煤量,进行过负荷控制,容易造成“包球”故障.并且人工控制时磨机负荷常常偏离最佳负荷设定值,增加制粉能耗.

因此如何设计负荷控制器,在热风温度变化频繁的条件下,尽可能的将磨机负荷控制在磨机出力最大的负荷范围内,并避免出现“饱磨”故障,是本文将要解决的问题.

### 4 磨机负荷智能切换控制方法(The mill load intelligent switching control method)

制粉过程磨机负荷控制的目的是通过 $u(t)$ 调整给煤量,在余热温度变化时,将磨音控制在工艺设定的范围内,且尽可能跟踪磨机最大出力对应的设定值 $y_{sp}$ ,即

$$y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max} \text{ and } \min |y(t) - y_{sp}|. \quad (5)$$

其中: $y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 分别为磨音设定范围的最小值和最大值, $y_{sp}$ 为磨音设定值.

本文将PI控制、规则推理与切换控制相结合提出磨机负荷智能控制方法,如图5所示.

#### 4.1 控制策略(Control strategy)

图5为本文提出的切换控制系统,由基于规则推理的切换机制,PI负荷控制器和过负荷控制器组成,其功能如下:

切换机制根据磨音 $y(t)$ 与磨音下限 $y_{\min}$ ,磨机差压

$$\Delta p(t) = p_{in}(t) - p_{out}(t)$$

与磨机差压上限 $\Delta p_{\max}$ ,识别负荷工况 $L$ .当磨机处于正常负荷工况 $L_1$ 时,选择PI负荷控制器 $C_1$ .处于负荷较高工况 $L_2$ 时,选择“给煤保持”控制器 $C_2$ .处于负荷很高工况 $L_3$ 时,选择“强制减煤”控制器 $C_3$ .处于负荷极高工况 $L_4$ 时,选择“抽粉”控制器 $C_4$ .

PI负荷控制器根据磨音跟踪误差 $e_y(t)$ 调整给煤量 $u(t)$ ,使磨音 $y(t)$ 跟踪设定值 $y_{sp}$ .

过负荷控制器包括“给煤保持”控制器,“强制减煤”控制器和“抽粉”控制器,在不同负荷工况下,调整给煤量 $u(t)$ ,使磨机远离故障工况.

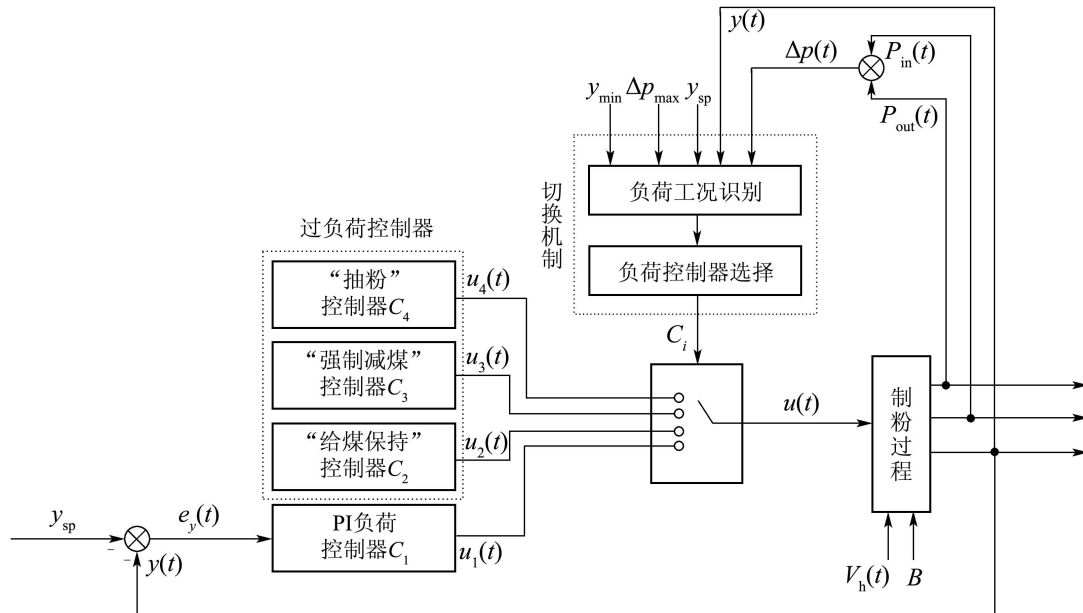


图 5 磨机负荷智能切换控制器系统结构

Fig. 5 The proposed switching controller for mill load

4.2 控制算法(Control algorithms)

由上述分析可知, 当磨机处于过负荷工况时, 呈现强非线性特性. 此时磨机出力 $B_m(t)$ 随着磨机存煤量 $w_m(t)$ 的增加而迅速减小; 同时磨音 $y(t)$ 随存煤量 $w_m(t)$ 增加缓慢减小, 采用PI负荷控制器无法使磨机离开过负荷工况. 因此采用基于规则推理的切换机制.

根据磨机运行专家的经验, 将负荷工况分为正常 $L_1$ , 较高 $L_2$ , 很高 $L_3$ 和极高 $L_4$ 不同工况. 由于余热温度变化, 造成磨机出口温度 $T(t)$ 变化时, 虽然存煤量 $w_m(t)$ 没有变化, 磨音 $y(t)$ 却变化, 因此仅使用磨音信号不能准确测量磨机负荷. 当

$$y(t) < y_{\min} \text{ 且 } \Delta p(t) > \Delta p_{\max}.$$

时, 差压 $\Delta p(t)$ 随着磨机存煤量 $w_m(t)$ 的增加迅速增加, 因此采用磨音 $y(t)$ 和差压 $\Delta p(t)$ 识别负荷工况 $L_1, L_2, L_3, L_4$ .

采用“原型分析”方法<sup>[16]</sup>, 结合制粉过程运行专家识别工况的经验, 提取识别工况的“原型”, 并整理成专家规则存储在专家系统的知识库中, 表示方法如下. 知识库中的知识采用产生式运行专家规则<sup>[19]</sup>, 且随系统运行更新.

IF < 前提 > THEN < 结论 > .

其中规则中的前提条件中的变量及变化范围的限定值由表2给出.

表 2 磨音及差压变化区间

Table 2 The limits of variables of  $y, \Delta p$

变量	区间限定值	
	下限	上限
$y$	—	$y_{\min}$
	$y_{\min}$	—
$\Delta p$	—	$\Delta p_{\max}$
	$\Delta p(L_2)$	$\Delta p(H_2)$
	$\Delta p(L_3)$	$\Delta p(H_3)$
	$\Delta p(L_4)$	—

其中: “—”表示相应单元格内容为空,  $y_{\min}$ 是磨音在正常负荷工况 $L_1$ 时的下限;  $\Delta p_{\max}$ 是差压在正常负荷工况 $L_1$ 时的上限;  $\Delta p(L_2), \Delta p(H_2)$ 为负荷较高工况 $L_2$ 时磨机差压的下限和上限;  $\Delta p(L_3), \Delta p(H_3)$ 为负荷很高工况 $L_3$ 时磨机差压的下限和上限;  $\Delta p(L_4)$ 是负荷极高工况 $L_4$ 磨机差压的下限.

规则的前提是根据表2中变量 $y(t), \Delta p(t)$ 与限定值的关系, 得出负荷工况及负荷控制器选择的结论. 根据过程运行专家经验和观察过程数据, 可以得到如表3切换机制的专家规则.

表3表明磨机负荷工况 $L$ 由磨音和磨机差压确定. 专家系统采用正向推理机制, 将当前磨音 $y(t)$ 、差压 $\Delta p(t)$ 检测值与知识库中规则的前提条件进行匹配, 识别当前负荷工况并选择控制器作为推理结果.

表3 磨机过负荷监督控制规则  
Table 3 Supervisory control rules of overload of mill

规则	前提条件	结论
R21	$y(t) \geq y_{\min}$	$L_i = L_1, u(t) = u(C_1)$
R22	$y(t) < y_{\min}$ and $\Delta p(t) < \Delta p_{\max}$	$L_i = L_1, u(t) = u(C_1)$
R23	$y(t) < y_{\min}$ and $\Delta p(L_2) \leq \Delta p(t) \leq \Delta p(H_2)$	$L_i = L_2, u(t) = u(C_2)$
R24	$y(t) < y_{\min}$ and $\Delta p(L_3) \leq \Delta p(t) \leq \Delta p(H_3)$	$L_i = L_3, u(t) = u(C_3)$
R25	$y(t) < y_{\min}$ and $\Delta p(t) \geq \Delta p(L_4)$	$L_i = L_4, u(t) = u(C_4)$

4.2.1 PI负荷控制器(PI based mill load controller)

当磨机处于正常负荷工况时,在磨机运行点附近,给煤机转速 $u(t)$ 和磨音 $y(t)$ 的动态特性呈现线性特征,可近似用如下传递函数来表示:

$$G(s) = \frac{k}{T_s s + 1} e^{-Ls}. \quad (6)$$

采用PI控制,负荷控制器方程为

$$u(t) = u(t-1) + k_p(e_y(t) - e_y(t-1)) + k_i e_y(t). \quad (7)$$

其中:PI参数 $k_p$ 和 $k_i$ ,整定采用内模控制(internal model control, IMC)方法<sup>[17,18]</sup>确定.

$$k_p = \frac{T}{k(L + \lambda)}, \quad k_i = \frac{T_s}{T}. \quad (8)$$

其中: $T_s$ 为采样周期,模型参数 $T, k$ 和 $L$ 由阶跃实验数据,采用公式法可以确定,滤波常数 $\lambda$ 为<sup>[18]</sup>

$$\lambda = (2 \frac{A_m}{\pi} - 1)L. \quad (9)$$

其中幅值 $A_m$ 相位裕量 $\phi_m$ 由下式给出<sup>[18]</sup>:

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} (1 - \frac{1}{A_m}), \quad (10)$$

其中 $\phi_m$ 为相位裕量.选择 $\phi_m = \pi/3$ ,于是 $A_m = 3$ ,可得滤波常数 $\lambda = 0.91L$ .由式(9)计算的PI参数分别为:

$$k_p = 0.47, \quad k_i = 0.07. \quad (11)$$

4.2.2 过负荷控制器(Overload controller)

在过负荷工况时,如果磨机负荷工况 $L_i$ 为负荷较高工况 $L_2$ ,采用“给煤保持”控制器 $C_2$ ,控制器的方程为

$$u(t) = u(t-1). \quad (12)$$

如果磨机负荷工况 $L_i$ 为负荷很高工况 $L_3$ ,采用“强制减煤”控制器 $C_3$ ,控制器的方程为

$$u(t) = u(t-1) - \alpha. \quad (13)$$

其中: $\alpha = \beta \cdot B_{\max} \cdot 10\%$ , $B_{\max}$ 为磨机出力额定最大出力,由磨机的设计参数确定, $\beta$ 为给煤量与给

煤机转速的转换系数.

如果磨机负荷工况 $L_i$ 为负荷极高工况 $L_4$ ,采用“抽粉”控制器 $C_4$ ,控制器的方程为

$$u(t) = 0. \quad (14)$$

5 实际应用(Industry application)

5.1 负荷切换控制系统(The switching control system of mill load)

如图6所示,磨机规格为 $\Phi 3.2 \times 9.5$  m,主电机型号YR80-8/1180,额定功率800 kW,磨机的最大出力 $B_{\max} = 28$  t/h.



图6 磨煤机工业现场图片

Fig. 6 The ball mill of pulverizing system for alumina sintering process

控制系统参数选择如下:

切换规则中的变量变化范围的限定值 $y_{\min} = 62$ , $\Delta p_{\max} = 1.96$ .

经现场调试负荷PI控制器参数为: $k_p = 0.45$ , $k_i = 0.07$ .

过负荷控制器参数如表4所示.

表4 过负荷工况控制器参数  
Table 4 The limit value selection of rule antecedents for overload controller

$\Delta p(L_1)$	$\Delta p(L_2)$	$\Delta p(L_3)$	$\alpha$
1.96	2.05	2.11	2

### 5.2 控制效果(Application result)

将负荷切换控制系统应用于上述的氧化铝回转窑制粉过程, 图7和图8分别表示当余热温度  $V_h(t)$  变化时, 系统处于正常工况和过负荷工况运行时, 磨音  $y(t)$ 、磨机出口温度  $T(t)$ 、给煤量控制  $u(t)$  的变化趋势。

图7为正常工况下, 当余热温度  $V_h(t)$  变化时, 采用PI负荷控制器的运行曲线. 图7中在点  $a, b, c, d$  处运行工况如表5所示. 从表5和图7可以看到虽然热风温度  $V_h(t)$  变化频繁, 且波动范围较大, 采用所设计PI控制器能够使磨音  $y(t)$  跟踪设定值  $y_{sp}$ .

表 5 采用负荷PI控制的运行工况  
Table 5 The operation condition using the PI control under the normal condition

时间	$y(t)/\text{Db}$	$T(t)/^\circ\text{C}$	$V_h(t)/^\circ\text{C}$	$u(t)/\text{Hz}$
$a:(12:00)$	63.4	51.8	262.7	31.2
$b:(12:24)$	64.4	53.8	358.9	30.8
$c:(12:32)$	60.9	54.6	308.9	30.1
$d:(12:41)$	63.1	52.5	247.9	28.8

图8为余热温度升高时, 控制磨音使得磨机处于过负荷工况, 采用基于规则推理的过负荷控制器的运行曲线. 图8中在点  $a, b, c, d, e$  处运行

工况如表6所示. 热风温度从点  $a$  时的  $202.8^\circ\text{C}$  升高到点  $b$  时的  $278.6^\circ\text{C}$ , 采用负荷PI控制器控制磨音  $y(t)$ , 使得给煤量  $u(t)$  增加, 使得磨机存煤量增加, 磨机差压  $\Delta p(t)$  从  $1.82\text{ kPa}$  增加到  $1.962\text{ kPa}$ . 此时切换机制自动识别过负荷工况, 采用基于规则推理的过负荷控制器  $C_3$ . 由  $\Delta p(t)$  可知, 磨机处于负荷较高工况  $L_2$ , 根据补偿控制规则, 减煤量  $\Delta u(t) = 0$ . 随着磨机负荷进一步增加, 在点  $c$  时磨机差压  $\Delta p(t) = 2.051\text{ kPa}$ , 此时磨机处于负荷很高工况, 根据补偿控制规则, 减煤量  $\Delta u(t) = -2$ . 由于迅速减小给煤, 磨机负荷降低, 在点  $d$  处磨机差压为  $2.047\text{ kPa}$ , 磨机处于负荷较高工况. 在点  $e$  时磨机差压  $\Delta p(t) = 1.956\text{ kPa}$ , 此时切换机制识别为负荷正常工况, 自动切换到负荷PI控制器.

表 6 过负荷工况时的运行工况  
Table 6 The operation condition under condition overload

时间	$y(t)/\text{Db}$	$\Delta p(t)/\text{kPa}$	$V_h(t)/^\circ\text{C}$	$u(t)/\text{Hz}$
$a:(14:30)$	65.6	1.82	202.8	29.6
$b:(15:00)$	60.1	1.962	278.6	34.3
$c:(15:20)$	61.2	2.051	275.9	34.3
$d:(15:27)$	59.3	2.047	281.1	26.3
$e:(15:33)$	61.8	1.956	279.9	26.3

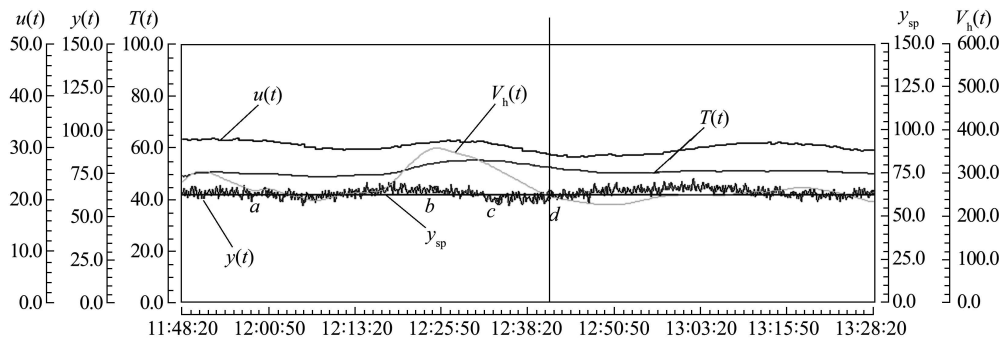


图 7 磨机负荷PI控制器的运行曲线

Fig. 7 The running curve using PI controller

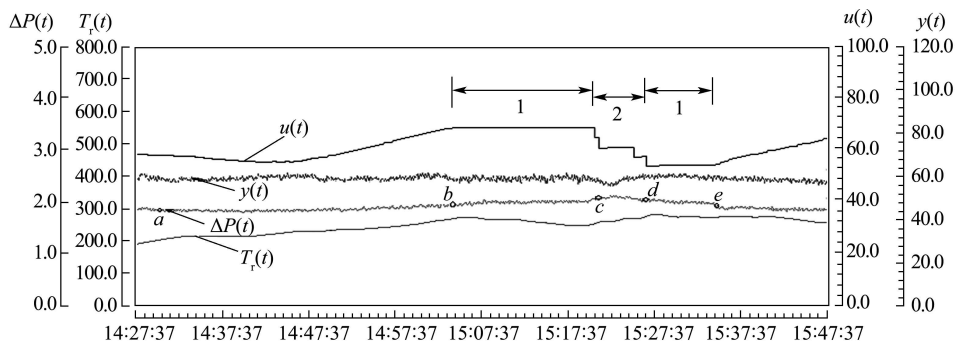


图 8 基于规则推理的过负荷控制器的运行曲线

Fig. 8 The running curve of overload controller based on rule reasoning

图7和图8的运行曲线表明,采用磨机负荷智能切换控制方法可以准确识别负荷工况.在正常工况时,即使热风温度变化频繁,采用负荷PI控制,通过给煤 $u(t)$ 的调节,使磨音 $y(t)$ 能够很好的跟踪设定值 $y_{sp}(t)$ .在过负荷工况时,由基于规则推理的切换机制,采用过负荷控制器使磨机远离“饱磨”故障.采用本文切换控制方法避免了采用人工控制难以及时准确判断运行工况和调节给煤量,从而导致“饱磨”故障工况.

该系统的长期运行结果表明,当余热温度频繁变化时,该系统能够将磨机负荷控制在生产工艺规定的范围内,从而避免了“饱磨”故障工况.该系统保证了磨机负荷控制长期安全运行,提高了磨机出力,制粉单耗(每吨煤粉消耗的电能)降低了4%.

## 6 结论(Conclusion)

本文提出的磨机负荷智能切换控制方法在余热温度变化频繁时自动识别工况.当磨机处于正常工况时切换到PI负荷控制器,过负荷工况切换到基于规则推理的过负荷控制器.将磨机负荷控制在工艺规定的范围内,且尽可能使磨音处于最佳负荷所对应的磨音设定值附近,使磨机远离故障工况.该方法成功应用于某氧化铝回转窑制粉系统,避免了“饱磨”故障发生,降低了制粉单耗4%,取得了显著应用效果.

## 参考文献(References):

- [1] CHAI T Y, YUE H. Multivariable intelligent de-coupling control system and its application[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(1): 123 – 131.
- [2] LI X F, ZENG Y X, SUN J, et al. Fuzzy optimization control system and its application in ball mill pulverizing system[C] // *2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Piscataway: IEEE, 2006, 6: 615 – 620.
- [3] 李遵基, 蔡军. 中间仓储式制粉系统球磨机模糊控制理论与实践[J]. *中国电力*, 1996, 29(10): 33 – 37.  
(LI Zunji, CHAI Jun. Fuzzy control theory and practice of coal tube mill system with intermediate storage bunker[J]. *Electric Power*, 1996, 29(10): 33 – 37.)
- [4] WANG Z N, FAN Q N. Application of fuzzy rule-based hierarchical intelligent control in mill system of thermal power plant[C] // *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.]: [s.n.], 2000: 444 – 448.
- [5] 刘齐寿, 黄锦涛. 球磨机中储式制粉系统自寻最优控制[J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(7): 30 – 34.  
(LIU Qishou, HUANG Jintao. Self optimized control strategy for ball mill pulverizing system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(7): 30 – 34.)
- [6] HESPANHA J P, LIBERZON D, MORSE A S. Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching[J]. *Systems & Control Letters*, 2003, 49(1): 49 – 65.
- [7] CHEN L G, NARENDRAN K S. Nonlinear adaptive control using neural networks and multiple models[J]. *Automatica*, 2001, 37(8): 1245 – 1255.
- [8] SATO M, KANDA A, ISHII K. A switching controller system for a wheeled mobile robot[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2007, 7(4): 281 – 289.
- [9] 沙哑红, 常太华, 常建平. 磨机负荷的检测方法[J]. *现代电力*, 2006, 23(14): 66 – 69.  
(SHA Yahong, CHANG Taihua, CHANG Jianping. Measure methods of ball mill's load[J]. *Modern Electric Power*, 2006, 23(14): 66 – 69.)
- [10] 邓依群, 杨志勇. 球磨机计算机控制系统[J]. *中国电力*, 1999, 31(3): 47 – 51.  
(DENG Yiqun, YANG Zhiyong. Computer based control system of tube coal mill[J]. *Electric Power*, 1999, 31(3): 47 – 51.)
- [11] 王东风. 制粉系统球磨机的神经网络预测控制[J]. *华北电力大学学报*, 2001, 28(3): 34 – 37.  
(WANG Dongfeng. Neural network based predictive control for ball mill system[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2001, 28(3): 34 – 37.)
- [12] 王东风, 李遵基, 李炎. 中间储仓式制粉全程控制系统设计与应用[J]. *华东电力*, 1999, 27(5): 41 – 43.  
(WANG Dongfeng, LI Zunji, LI Yan. Design of coal pulverizing bunker control system and its application[J]. *East China Electric Power*, 1999, 27(5): 41 – 43.)
- [13] ZHAI L F, CHAI T Y. Nonlinear decoupling PID control using neural networks and multiple models[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 62 – 69.
- [14] 陈旭, 楼波. 基于音频信号控制策略的磨煤机存煤量控制的应用[J]. *电站辅机*, 2007, 28(3): 46 – 48.  
(CHEN Xu, LOU Bo. Application of audio signal to control of storage coal of the pulverize process[J]. *Power Station Auxiliary Equipment*, 2007, 28(3): 46 – 48.)
- [15] 王兴国, 李冠慧. 球磨机料位监控技术及制粉系统优化运行[J]. *中国电力*, 1996, 29(1): 21 – 25.  
(WANG Xingguo, LI Guanhui. Monitoring technique for material level of tube coal mill and optimized operation of coal-pulverizing system[J]. *Electric Power*, 1996, 29(1): 21 – 25.)
- [16] WAGNER W P, OTTO J, CHUNG Q B. Knowledge acquisition for expert systems in accounting and financial problem domains[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2002, 15(8): 439 – 447.
- [17] CHIEN I L, FRUEHAUF P S. Consider IMC tuning to improve controller performance[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1990, 86(10): 33 – 41.
- [18] KAYA I. Tuning PI controllers for stable processes with specifications on gain and phase margins[J]. *ISA Transactions*, 2004, 43(2): 297 – 304.

## 作者简介:

张立岩 (1976—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂工业过程的控制与优化, E-mail: zly1976@sohu.com;

柴天佑 (1947—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自适应控制、多变量智能解耦控制、流程工业过程综合自动化等.