



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102319612 A

(43) 申请公布日 2012. 01. 18

(21) 申请号 201110186847. X

(22) 申请日 2011. 07. 05

(71) 申请人 中国科学院沈阳自动化研究所
地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街
114 号

(72) 发明人 苑明哲 王卓 宁艳艳 朱光

(74) 专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限
公司 21002

代理人 许宗富

(51) Int. Cl.

B02C 25/00 (2006. 01)

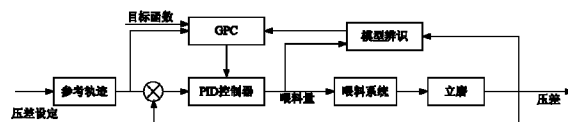
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种水泥生料立磨压差的智能控制方法

(57) 摘要

一种水泥生料立磨压差的智能控制方法, 选取磨内压差为主要被控变量, 外循环电流为辅助被控变量, 喂料量为主要控制变量, 喷水量为辅助控制变量。根据磨内压差和外循环电流信息采用产生式规则方法判断当前的生产工况。在正常工况下, 采用 GPC-PID (Generalized Predictive Control PID, GPC-PID) 控制磨内压差。本发明无需分析生料立磨粉磨物料的复杂过程, 只需利用过程输入输出数据就可以建立描述压差随喂料量大小变化的数学模型, 辨识过程简单, 且可以在线辨识; 对生产工况的变化有一定的适应性; 充分利用广义预测控制算法多步预测、滚动优化和反馈校正的优点, 和 PID 算法简单、鲁棒性强的优点, 且大大减轻了现场操作员的劳动强度。



1. 一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,选取磨内压差为主要被控变量,外循环电流为辅助被控变量,喂料量为主要控制变量,喷水量为辅助控制变量;根据磨内压差和外循环电流信息采用产生式规则方法判断当前的生产工况;在正常工况下,采用 GPC-PID 控制磨内压差;

所述 GPC-PID 控制方法为:

A 模型辨识:压差与喂料量之间的模型可表示成如下形式:

$$A(z^{-1}) = z^{-d}B(z^{-1})u(k-1)+C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (2)$$

其中

$$A(z^{-1}) = 1+a_1z^{-1}+\dots+a_{na}z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0+b_1z^{-1}+\dots+b_{nb}z^{-nb}$$

$$C(z^{-1}) = c_0+c_1z^{-1}+\dots+c_{nc}z^{-nc}$$

式中, $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 分别是 na 、 nb 和 na 阶的 z^{-1} 的多项式, $\Delta = 1-z^{-1}$; $y(k)$ 为磨内压差, $u(k)$ 为喂料量, $\xi(k)$ 为随机干扰, d 为滞后时间;

针对喂料量与磨内压差之间的控制通道,基于递推最小二乘辨识方法,利用试验数据得到喂料量与磨内压差的脉冲传递函数模型;

B 优化计算:采用滚动优化策略。在当前时刻 k ,利用过去的输入输出信息和预测的未来输入信息,通过辨识得到的传递函数模型,预测未来的输出磨内压差 $y(k+j)$,并将预测输出与设定输出值的参考轨迹 $y_r(k)$ 进行比较。应用二次性能指标进行滚动优化,性能指标函数取为:

$$J = E[Y_r(k)-Y(k)][Y_r(k)-Y(k)]^T + \Delta UQ\Delta U^T \quad (27)$$

其中, $Q = \Lambda + \text{diag}(Q_j)z^{-1}$, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$, $Q_j = q_1^j z^{-1} + \dots + q_{nb}^j$, $q_i^j = \text{diag}(q_i^1, 0, \dots, 0)$, N 为预测时域, $j = 1, 2, \dots, N$; $i = 1, 2, \dots, nb$;

通过将 GPC-PID 控制律与传统 PID 控制律比较,借助 GPC 算法中参数的递推关系得到 PID 三个参数的自整定公式,从而得到当前时刻的控制增量 $\Delta u(k)$,然后再与原来的控制量相加得到作用于系统的当前控制量 $u(k)$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,在异常工况下,根据外循环电流的检测值与期望值之间的偏差,依据专家规则调节喷水量的大小,控制磨内压差与外循环电流平衡,实现对压差的控制。

3. 根据权利要求 1 或 2 任 1 项所述的一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,所述专家规则为由经验值确定的调节规则表。

4. 根据权利要求 1 所述的一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,所述根据磨内压差和外循环电流信息采用产生式规则方法判断当前的生产工况的方法为:如果压差高于下限 P_{lower} 且低于上限 P_{upper} ,则当前工况为正常工况;如果压差低于下限 P_{lower} 且外循环电流大于上限 I_{upper} ,则当前工况为异常工况。

5. 根据权利要求 4 所述的一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,所述压差的上限 P_{upper} 、下限 P_{lower} ,外循环电流的上限 I_{upper} 等边界视生产条件根据专家经验给定。

6. 根据权利要求 1 所述的一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,所述 GPC-PID 控制过程为

步骤 1, 初始化: 设置工况识别模块所需的参数上下限值;
 设置正常工况下, GPC-PID 算法用到参数的初始值;
 设置异常工况下, 专家规则中的参数值;
 步骤 2, 读取压差 $y(k)$, 喂料量 $u(k)$, 外循环电流 I 和喷水量的采样值;
 步骤 3, 利用步骤 2 读取的数据, 根据

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(k+1) &= \hat{\theta}(k) + K(k+1)[\Delta y(k+1) - \varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k)] \\ K(k+1) &= P(k)\varphi(k+1)[\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1) + \lambda]^{-1} \\ P(k+1) &= \frac{1}{\lambda}[P(k) - K(k)\varphi^T(k+1)P(k)]\end{aligned}\quad (5)$$

在线估计

$$\Delta y(k) = -a_1 \Delta y(k-1) + b \Delta u(k-1-d) + \xi(k) \quad (6)$$

中的参数 a_1 和 b ;

步骤 4, 利用步骤 3 估计的参数, 按丢番方程

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (7)$$

$$E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1})$$

其中,

$$E_j(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1}$$

$$F_j(z^{-1}) = f_0^j z^{-1} + \dots + f_{na}^j z^{-na}$$

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{j-1} z^{-j+1}$$

$$H_j(z^{-1}) = h_0^j z^{-1} + \dots + h_{nb-1}^j z^{-nb+1}$$

和

$$E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j} \quad (21)$$

$$S_{j+1}(z^{-1}) = z[S_j(z^{-1}) - A(z^{-1})\Delta] \quad (22)$$

$$g_j = h_{j,0} + b_0 e_j \quad (24)$$

$$h_{j+1,i} = h_{j,i+1} + b_{i+1} e_j - g_j \quad (25)$$

递推求解 $E_j(z^{-1})$ 、 $G_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ 和 $H_j(z^{-1})$;

步骤 5, 利用

$$\begin{aligned}K_p &= -\sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j) \\ K_i &= \sum_{j=1}^N p_j \\ K_d &= \sum_{j=1}^N p_j f_2^j\end{aligned}\quad (18)$$

求解 GPC-PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数;

步骤 6, 利用

$$\Delta u(k) = \sum_{j=1}^N p_j (y_r(k) - y(k)) - \left[\sum_{j=1}^N p_j f_2^j (1 - z^{-1}) - \sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j) \right] y(k) \quad (19)$$

计算喂料量 $u(k)$;

步骤 7, 令 $k = k+1$, 返回步骤 2。

一种水泥生料立磨压差的智能控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及水泥生产过程控制领域,尤其涉及一种水泥生料立磨压差的智能控制方法。

背景技术

[0002] 立磨辊磨机(简称立磨)是新型干法水泥生产过程中的关键生料粉磨设备,承担着粉磨和烘干物料的作用。因此,有效地控制立磨磨内压差和出磨气体温度,对整条生料生产线的稳定运行至关重要。

[0003] 水泥生料粉磨工艺流程如图 1 所示。石灰石、铁粉、砂岩和粘土经配料站配料后,由皮带输送机送至磨内。物料通过磨盘与磨辊之间的相对运动被碾碎粉磨。由窑尾(或热风炉)送来的热气流从磨机喷口环吹入,作用于物料,粉碎后的物料被热气流吹起,同时物料被烘干;大颗粒落回磨盘上继续粉磨,不能被风环热风吹起的特大颗粒经排渣口排出磨外(外循环),其余物料被带入磨上部的分离器进行粗细分离,满足产品要求的颗粒随气流排出磨外,不合格的颗粒返回磨盘继续粉磨(内循环),直至合格。

[0004] 磨内压差的大小直接反应磨内物料量的多少,当压差上升,磨内料层变厚,导致磨机振动;当压差下降,磨内料层变薄,磨盘与磨辊产生线性接触,也会导致磨机振动。为保证原料烘干良好,出磨温度一般控制在 80~90℃。若出磨气体温度太高,物料被迅速烘干,使得料层不稳,会导致磨机振动,当出磨气体温度达到 120℃时磨机跳停;若出磨气体温度太低,说明烘干不足,成品的含水率大,系统的粉磨效率降低,严重影响产量。出磨气体温度主要通过调节入磨的热风量和冷风量进行控制,通过热平衡方程建立出磨气体温度与冷、热风量的数学模型,然后利用动态矩阵控制算法(DMC)进行控制,控制效果完全能满足工艺要求;而磨内压差的控制是立磨系统的控制难点。物料在磨内粉磨的过程是一个非线性、大滞后、多扰动的过程。经现场试验测定,过程的滞后时间与时间常数之比大于 3,此外,压差还受到物料特性、系统风量等诸多因素的干扰,这给磨内压差的控制带来了很大的困难。

[0005] 目前,国内大多数水泥生产厂采用手动调节喂料量来控制磨内压差,个别厂家采用了 PID 控制。研究表明,当过程的滞后时间与时间常数之比大于 3 时, PID 控制就难以获得好的控制效果。手动调节不仅增加了操作员的劳动强度,而且压差的控制效果也不够平稳,经常出现波动,难以达到工艺要求。因此,有必要从立磨对象自身特点出发寻找一种新的控制方法,既要减轻操作员的工作负担,又能提高生料粉磨系统的稳定性。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于针对现有技术对水泥生料立磨压差控制存在的不足,提供一种有效克服粉磨过程的非线性、大滞后、大惯性和多扰动的影响,实现磨内压差的平稳控制的基于广义预测 PID 的自适应控制方法。

[0007] 本发明为实现上述目的所采用的技术方案是:一种水泥生料立磨压差的智能控制方法,其特征在于,选取磨内压差为主要被控变量,外循环电流为辅助被控变量,喂料量为

主要控制变量, 喷水量为辅助控制变量; 根据磨内压差和外循环电流信息采用产生式规则方法判断当前的生产工况; 在正常工况下, 采用 GPC-PID 控制磨内压差;

[0008] 所述 GPC-PID 控制方法为:

[0009] A 模型辨识: 压差与喂料量之间的模型可表示成如下形式:

$$[0010] \quad A(z^{-1}) = z^{-d}B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (2)$$

[0011] 其中

$$[0012] \quad A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na}$$

$$[0013] \quad B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}$$

$$[0014] \quad C(z^{-1}) = c_0 + c_1z^{-1} + \dots + c_{nc}z^{-nc}$$

[0015] 式中, $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 分别是 na 、 nb 和 na 阶的 z^{-1} 的多项式, $\Delta = 1 - z^{-1}$; $y(k)$ 为磨内压差, $u(k)$ 为喂料量, $\xi(k)$ 为随机干扰, d 为滞后时间;

[0016] 针对喂料量与磨内压差之间的控制通道, 基于递推最小二乘辨识方法, 利用试验数据得到喂料量与磨内压差的脉冲传递函数模型;

[0017] B 优化计算: 采用滚动优化策略。在当前时刻 k , 利用过去的输入输出信息和预测的未来输入信息, 通过辨识得到的传递函数模型, 预测未来的输出磨内压差 $y(k+j)$, 并将预测输出与设定输出值的参考轨迹 $y_r(k)$ 进行比较。应用二次性能指标进行滚动优化, 性能指标函数取为:

$$[0018] \quad J = E[Y_r(k) - Y(k)][Y_r(k) - Y(k)]^T + \Delta U Q \Delta U^T \quad (27)$$

[0019] 其中, $Q = \Lambda + \text{diag}(Q_j)z^{-1}$, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$, $Q_j = q_1^j z^{-1} + \dots + q_{nb}^j$, $q_i^j = \text{diag}(q_i^j, 0, \dots, 0)$, N 为预测时域, $j = 1, 2, \dots, N$; $i = 1, 2, \dots, nb$;

[0020] 通过将 GPC-PID 控制律与传统 PID 控制律比较, 借助 GPC 算法中参数的递推关系得到 PID 三个参数的自整定公式, 从而得到当前时刻的控制增量 $\Delta u(k)$, 然后再与原来的控制量相加得到作用于系统的当前控制量 $u(k)$ 。

[0021] 在异常工况下, 根据外循环电流的检测值与期望值之间的偏差, 依据专家规则调节喷水量的大小, 控制磨内压差与外循环电流平衡, 实现对压差的控制。

[0022] 所述专家规则为由经验值确定的调节规则表。

[0023] 所述根据磨内压差和外循环电流信息采用产生式规则方法判断当前的生产工况的方法为: 如果压差高于下限 P_{lower} 且低于上限 P_{upper} , 则当前工况为正常工况; 如果压差低于下限 P_{lower} 且外循环电流大于上限 I_{upper} , 则当前工况为异常工况。

[0024] 所述压差的上限 P_{upper} 、下限 P_{lower} , 外循环电流的上限 I_{upper} 等边界视生产条件根据专家经验给定。

[0025] 所述 GPC-PID 控制过程为

[0026] 步骤 1, 初始化: 设置工况识别模块所需的参数上下限值;

[0027] 设置正常工况下, GPC-PID 算法用到参数的初始值;

[0028] 设置异常工况下, 专家规则中的参数值;

[0029] 步骤 2, 读取压差 $y(k)$, 喂料量 $u(k)$, 外循环电流 I 和喷水量的采样值;

[0030] 步骤 3, 利用步骤 2 读取的数据, 根据

[0031]

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1)[\Delta y(k+1) - \varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k)]$$

[0032]

$$K(k+1) = P(k)\varphi(k+1)[\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1) + \lambda]^{-1} \quad (5)$$

[0033]

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda}[P(k) - K(k)\varphi^T(k+1)P(k)]$$

[0034] 在线估计

$$\Delta y(k) = -a_1 \Delta y(k-1) + b \Delta u(k-1-d) + \xi(k) \quad (6)$$

[0036] 中的参数 a_1 和 b ;

[0037] 步骤 4, 利用步骤 3 估计的参数, 按丢番方程

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (7)$$

$$E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1})$$

[0040] 其中,

$$E_j(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1}$$

$$F_j(z^{-1}) = f_0^j z^{-1} + \dots + f_{na}^j z^{-na}$$

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{j-1} z^{-j+1}$$

$$H_j(z^{-1}) = h_0^j z^{-1} + \dots + h_{nb-1}^j z^{-nb+1}$$

[0045] 和

$$E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j} \quad (21)$$

$$S_{j+1}(z^{-1}) = z[S_j(z^{-1}) - A(z^{-1})\Delta] \quad (22)$$

$$g_j = h_{j,0} + b_0 e_j \quad (24)$$

$$h_{j+1,i} = h_{j,i+1} + b_{i+1} e_j - g_j \quad (25)$$

[0050] 递推求解 $E_j(z^{-1})$ 、 $G_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ 和 $H_j(z^{-1})$;

[0051] 步骤 5, 利用

$$K_p = -\sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^N p_j \quad (18)$$

$$K_d = \sum_{j=1}^N p_j f_2^j$$

[0055] 求解 GPC-PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数 ;

[0056] 步骤 6, 利用

$$\Delta u(k) = \sum_{j=1}^N p_j (y_r(k) - y(k)) - \left[\sum_{j=1}^N p_j f_2^j (1 - z^{-1}) - \sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j) \right] y(k) \quad (19)$$

[0058] 计算喂料量 $u(k)$;[0059] 步骤 7, 令 $k = k+1$, 返回步骤 2。

[0060] 本发明的有益效果体现在 :

[0061] 1. 无需分析生料立磨粉磨物料的复杂过程, 只需利用过程输入输出数据就可以建立描述压差随喂料量大小变化的数学模型, 辨识过程简单, 且可以在线辨识 ;

[0062] 2. 根据不同的生产工况采用不同的控制模式, 对生产工况的变化有一定的适应

性；

[0063] 3. 充分利用广义预测控制算法多步预测、滚动优化和反馈校正的优点,和PID算法简单、鲁棒性强的优点,将广义预测控制与PID控制相结合,使生料立磨磨内压差很好的克服了纯滞后、多扰动和慢时变的影响,平稳快速地达到设定值,跟踪性能好,鲁棒性强,且大大减轻了现场操作员的劳动强度。

附图说明

[0064] 图1是本发明的水泥生料粉磨工艺流程图；

[0065] 图2是本发明的GPC-PID控制结构图；

[0066] 图3是本发明的磨内压差的智能控制原理图；

[0067] 图4是本发明正常工况下,立磨压差控制过程流程图；

[0068] 图5是本发明立磨压差控制过程流程图。

具体实施方式

[0069] 下面结合附图及具体实施例对本发明做详细说明。

[0070] 变量选取:如图1所示,在t时刻,磨内物料填充量为G(t),喂料量为 $G_{in}(t)$,外循环物料量为 $G_c(t)$,出磨物料量为 $G_o(t)$,开磨时磨内的物料量 $G(t_0)$ 。则磨内物料的填充量为:

$$[0071] \quad G(t) = \int_0^t (G_{in}(t) - G_c(t) - G_o(t)) dt + G(t_0) \quad (1)$$

[0072] 磨内压差的变化直接反应磨腔内物料量的多少,外循环电流反应外循环物料量的多少。当喂料量、磨内压差都比较稳定时外循环电流也比较稳定。因此在正常工况下,选取磨内压差为主要被控变量。当喂料量一定,外循环电流波动较大时,压差也会随之波动。因此在异常工况下,选取外循环电流为辅助被控变量。喂料量对压差和外循环电流的影响是最大的,其次就是磨内喷水量。因此,选取喂料量为主要控制变量,磨内喷水量为辅助控制变量。

[0073] 工况识别:选取磨内压差和外循环电流为工况判断的条件,将生产工况划分为正常工况和异常工况。采用产生式规则来划分工况,工况判断规则如下:如果压差高于下限 P_{lower} 且低于上限 P_{upper} ,则当前工况为正常工况;如果压差低于下限 P_{lower} 且外循环电流大于上限 I_{upper} ,则当前工况为异常工况。在工况判断规则中,压差的上限 P_{upper} 、下限 P_{lower} ,外循环电流的上限 I_{upper} 等边界视生产条件根据专家经验给定。

[0074] 工况识别举例:假设,压差允许的范围为 $[6000Pa, 8000Pa]$,外循环电流允许的上限为110A。在t时刻,压差的检测值为5500Pa,外循环电流为118A。此时,压差低于压差的下限6000Pa且外循环电流高于外循环电流允许的上限110A,那么当前工况为异常工况。

[0075] 正常工况:

[0076] A模型辨识:主要建立磨内压差与喂料量之间的数学模型。

[0077] 根据过程特点,压差与喂料量之间的模型可表示成如下形式:

$$[0078] \quad A(z^{-1}) = z^{-d}B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (2)$$

[0079] 其中

[0080] $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{na} z^{-na}$

[0081] $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$

[0082] $C(z^{-1}) = c_0 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{nc} z^{-nc}$

[0083] 式中, $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 分别是 na 、 nb 和 na 阶的 z^{-1} 的多项式, $\Delta = 1 - z^{-1}$; $y(k)$ 为磨内压差, $u(k)$ 为喂料量, $\xi(k)$ 为随机干扰, d 为滞后时间。

[0084] 当 $C(z^{-1}) = 1$ 时, 公式 (1) 可写成:

[0085] $\Delta y(k) = -a_1 \Delta y(k-1) - \dots - a_{na} \Delta y(k-na) + b_0 \Delta u(k-d-1) +$

[0086] $\dots + b_{nb} \Delta u(k-d-1-nb) + \xi(k)$ (3)

[0087] $\dots + b_{nb} \Delta u(k-d-1-nb) + \xi(k)$

[0088] 上式可表示为:

[0089]

$$\Delta y(k) = \varphi^T(k) \theta + \xi(k) \quad (4)$$

[0090] 其中,

[0091]

$$\varphi(k) = [-\Delta y(k-1), \dots, -\Delta y(k-n), \Delta u(k-d-1), \dots, \Delta u(k-1-d-nb)]^T$$

[0092] $\theta = [a_1, \dots, a_{na}, b_0, \dots, b_{nb}]^T$

[0093] 考虑到被控对象是时变的, 这里采用带有遗忘因子的递推最小二乘辨识算法估计模型参数 θ :

[0094]

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1)[\Delta y(k+1) - \varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k)]$$

[0095]

$$K(k+1) = P(k)\varphi(k+1)[\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1) + \lambda]^{-1} \quad (5)$$

[0096]

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} [P(k) - K(k)\varphi^T(k+1)P(k)]$$

[0097] 上式中, λ 为遗忘因子, 通常取 $0.9 < \lambda < 1$; $P(k)$ 的初值取为 $\sigma^{-2}I$, σ 是一个足够大的正数。

[0098] 通过分析生产现场采集到的数据, 磨内压差与喂料量之间的数学模型可以用一阶惯性加纯滞后环节 $G(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s}$ 表示, 将其离散化, 得到差分形式为:

[0099] $\Delta y(k) = -a_1 \Delta y(k-1) + b \Delta u(k-1-d) + \xi(k)$ (6)

[0100] 滞后时间 d 根据阶跃响应曲线得到; 对于一阶惯性加纯滞后环节, 模型参数为 $\theta = [a_1, b]^T$ 。

[0101] 在某水泥厂, 在稳态工作点 (410kg/h, 6200Pa) 处, 以采样时间 $T_s = 5s$ 采集生产过程中磨内压差和喂料量的 200 组数据, 利用上述 (4) 式和 (5) 式辨识得到模型参数 a_1 和 b , 然后将 a_1 和 b 代入 (6) 式, 并将 (6) 式连续化, 从而得到压差与喂料量之间的数学模型为 $G(s) = \frac{18.7}{491s+1} e^{-110s}$ 。

[0102] B 优化计算: 根据预测理论, 利用直到 k 时刻为至的输入输出数据, 对 $k+j$ 时刻系统的输出进行预测, 引入丢番图 (Diophantine) 方程:

$$[0103] \quad 1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (7)$$

$$[0105] \quad E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1})$$

[0106] 其中,

$$[0107] \quad E_j(z^{-1}) = 1 + e_1z^{-1} + \dots + e_{j-1}z^{-j+1}$$

$$[0108] \quad F_j(z^{-1}) = f_0^jz^{-1} + \dots + f_{na}^jz^{-na}$$

$$[0109] \quad G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_{j-1}z^{-j+1}$$

$$[0110] \quad H_j(z^{-1}) = h_0^jz^{-1} + \dots + h_{nb-1}^jz^{-nb+1}$$

[0111] 由 (2)、(7) 两式可得 $k+j$ 时刻 $y(k+j)$ 的最优预测值为:

$$[0112] \quad \tilde{y}(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(z^{-1})y(k) + H_j(z^{-1})\Delta u(k-1) \quad (8)$$

[0113] 当 j 从 1 增加到 N 时, 将 (8) 式表示为矢量形式:

$$[0114] \quad \tilde{Y}(k+1) = G\Delta U + Fy(k) + H\Delta u(k-1) \quad (9)$$

[0115] 其中

$$[0116] \quad \tilde{Y}(k+1) = [\tilde{y}(k+1), \tilde{y}(k+2), \dots, \tilde{y}(k+N)]^T$$

$$[0117] \quad \Delta U = [\Delta u(k), \Delta u(k-1), \dots, \Delta u(k+N-1)]^T$$

$$[0118] \quad F = [F_1, F_2, \dots, F_N]^T$$

$$[0119] \quad H = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T$$

[0120]

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & & & & \\ g_1 & g_0 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \\ g_{N-1} & g_{N-2} & & & g_0 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

[0121] 设给定输入

$$[0122] \quad Y_r^T(k+1) = [y_r(k+1), \dots, y_r(k+N)] \quad (10)$$

[0123] 性能指标函数采用对输出误差和控制量加权的二次型性能指标:

$$[0124] \quad J = E[Y_r(k+1) - \tilde{Y}(k+1)][Y_r(k+1) - \tilde{Y}(k+1)]^T + \Delta U Q \Delta U^T \quad (11)$$

[0125] 其中

$$[0126] \quad Q = \Lambda + \text{diag}(Q_j(z^{-1}))$$

$$[0127] \quad \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N)$$

$$[0128] \quad Q_j(z^{-1}) = q_1^jz^{-1} + \dots + q_{nb}^jz^{-nb} \quad j = 1 \dots N$$

$$[0129] \quad q_i^j = \text{diag}\{q_i^1, 0, \dots, 0\}; \quad i = 1, 2, \dots, nb$$

[0130] 将 (9) 和 (10) 式代入 (11) 式, 并将目标函数 (11) 式对控制增量 ΔU 求导, 令其为零, 得到最优控制律:

$$[0131] \quad \Delta U = (G^T G + \Lambda)^{-1} G^T [Y_r - Fy(k) - H\Delta u(k-1) + G^{-T} \sum_{i=1}^{nb} q_i^1 \Delta u(k-i)] \quad (12)$$

[0132] 对上式取首行, 得到即时控制增量

[0133]

$$\Delta u(k) = \sum_{j=1}^N p_j y_r(k) - \sum_{j=1}^N p_j F_j(z^{-1})y(k) - \sum_{j=1}^N p_j H_j(z^{-1})\Delta u(k-1) + G^{-T} p_1 \sum_{i=1}^{nb} q_i^1 \Delta u(k-i) \quad (13)$$

[0134] 其中,

$$[0135] \quad [p_1, \dots, p_N] = [1, 0, \dots, 0] \cdot (G^T G + \Lambda)^{-1} G^T$$

$$[0136] \quad \text{令式 (13) 中 } G^{-T} p_1 \sum_{i=1}^{nb} q_i^1 \Delta u(k-i) = \sum_{j=1}^N p_j H_j(z^{-1}) \Delta u(k-1),$$

[0137] 得到

$$[0138] \quad q_i^1 = \frac{G^T}{p_1} \sum_{j=1}^N p_j h_i^j \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (14)$$

[0139] 则 (13) 式变为:

$$[0140] \quad \Delta u(k) = \sum_j p_j y_r(k) - \sum_j p_j F_j(z^{-1})y(k) \quad (15)$$

[0141] 传统 PID 的控制律可写成:

$$[0142] \quad \Delta u(k) = K_i y_r(k) - [(K_p + K_i + K_d) - (K_p + 2K_d)z^{-1} + K_d z^{-2}]y(k) \quad (16)$$

[0143] 比较传统 PID 控制律 (16) 式和改进的 GPC 控制律 (15) 式, 令 (15) 中

$$[0144] \quad \sum_{j=1}^N p_j = K_i \quad (17)$$

$$[0145] \quad \sum_j p_j F_j(z^{-1}) = (K_p + K_i + K_d) - (K_p + 2K_d)z^{-1} + K_d z^{-2}$$

[0146] 解上式得 PID 控制器参数:

$$[0147] \quad K_p = -\sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j)$$

$$[0148] \quad K_i = \sum_{j=1}^N p_j \quad (18)$$

$$[0149] \quad K_d = \sum_{j=1}^N p_j f_2^j$$

[0150] 将基于 GPC 的 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 带入到 (16) 式, 即得基于 GPC 的自适应 PID 的控制律:

$$[0151] \quad \Delta u(k) = \sum_{j=1}^N p_j (y_r(k) - y(k)) - [\sum_{j=1}^N p_j f_2^j (1 - z^{-1}) - \sum_{j=1}^N p_j (f_1^j + 2f_2^j)]y(k) \quad (19)$$

[0152] 则 k 时刻的控制量为

$$[0153] \quad u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (20)$$

[0154] 丢番 (Diophantine) 方程的递推求解:

[0155] 当预测输出长度 j 改变时, (8) 式中的 $E_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ 、 $G_j(z^{-1})$ 、 $H_j(z^{-1})$ 的值也会改变, 从而 (19) 式 $\Delta u(k)$ 也会变化, 因此需要按丢番 (Diophantine) 方程 (7) 式重新计算。

对于 $E_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ 的递推公式, 由 (7) 式可推得:

$$[0156] \quad E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j} \quad (21)$$

$$[0157] \quad S_{j+1}(z^{-1}) = z[S_j(z^{-1}) - \Lambda(z^{-1}) \Delta] \quad (22)$$

[0158] 初值

$$[0159] \quad e_0 = 1$$

[0160] (23)

[0161] $S_1(z^{-1}) = z[1-A(z^{-1})\Delta]$

[0162] 对于 $G_j(z^{-1})$ 、 $H_j(z^{-1})$ 的递推公式,由 (7) 式可推得:

[0163] $g_j = h_{j,0} + b_0 e_j$ (24)

[0164] $h_{j+1,i} = h_{j,i+1} + b_{i+1} e_j - g_j$ (25)

[0165] 初值

[0166] $G_1(z^{-1}) = b_0$

[0167] (26)

[0168] $H_1(z^{-1}) = z[B(z^{-1}) - b_0]$

[0169] 反馈校正:在 GPC-PID 的推导过程中虽然没有明显给出反馈或闭环的表示,但它在进行滚动优化时,强调了优化的基点与实际系统一致。

[0170] 正常工况下,立磨压差的控制结构和控制原理如图 2 和图 3 所示,具体算法的执行步骤如图 4 和图 5 所示:

[0171] 步骤 1,初始化:设定被控对象阶次 $n_a = 1$, $n_b = 1$ 和模型结构

[0172] $\Delta y(k) = -a_1 \Delta y(k-1) + b \Delta u(k-1-d) + \xi(k)$;

[0173] 预测时域 $N = 17$ 和控制时域 $M = 1$;递推最小二乘方法中 $\theta(0) = 0$, $P(0) = 10^5$;

[0174] 按 (23) 式和 (26) 式设置丢番图 (Diophantine) 方程中初始值;

[0175] 步骤 2,读取压差和喂料量的采样值 $y(k)$ 、 $u(k)$;

[0176] 步骤 3,利用步骤 2 的数据,根据 (5) 式在线估计 (6) 式的参数 a_1 和 b ;

[0177] 步骤 4:利用步骤 3 估计的参数,按丢番图 (Diophantine) 方程 (7) 式、(21) 式、(22) 式、(24) 式和 (25) 式递推求解 $E_j(z^{-1})$ 、 $G_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ 和 $H_j(z^{-1})$;

[0178] 步骤 5:用 (18) 式计算 GPC-PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数;

[0179] 步骤 6:用 (19) 式计算喂料量 $u(k)$;

[0180] 步骤 7:令 $k = k+1$,返回步骤 2。

[0181] 异常工况下,采用专家规则控制模式调节磨内压差与外循环电流平衡。根据外循环电流的检测值与期望值之间的偏差 ΔI ,依据专家经验调节喷水量的大小。

[0182] 下面以一个例子具体说明专家规则的工作过程:设压差允许的范围为 [6000Pa, 8000Pa],外循环电流允许的上限为 110A。在 t 时刻,压差的检测值为 5500Pa,外循环电流为 118A,此时根据工况判断的规则:压差低于下限 6000Pa 且外循环电流高于上限 110A,那么当前工况为异常工况,采用专家规则的方法调节磨内喷水量。根据外循环电流的检测值与期望值之间的偏差,依据专家规则调节喷水量的大小。

[0183] 调节规则如表 1 所示。

[0184] 表 1 专家调节规则

变量	区间限定值		喷水量设定值
	下限	上限	修正量 $\Delta y^{*(t)}$
[0185] 外 循 环 电 流 I	T5		a6
	T4	T5	a5
	T3	T4	a4
	T2	T3	a3
	T1	T2	a2
	T0	T1	a1
		T0	a0

[0186] 其中, ΔI 为外循环电流的检测值与期望值之间的偏差; $T_j (j = 0, 1 \cdots 5)$ 为偏差限, T_j 属于 $[110A, 125A]$; $a_i (i = 0, 1 \cdots 6)$ 为喷水量设定值的修正值, a_i 属于 $[0m^3/h, 1m^3/h]$; 各参数的具体值由专家经验给出。

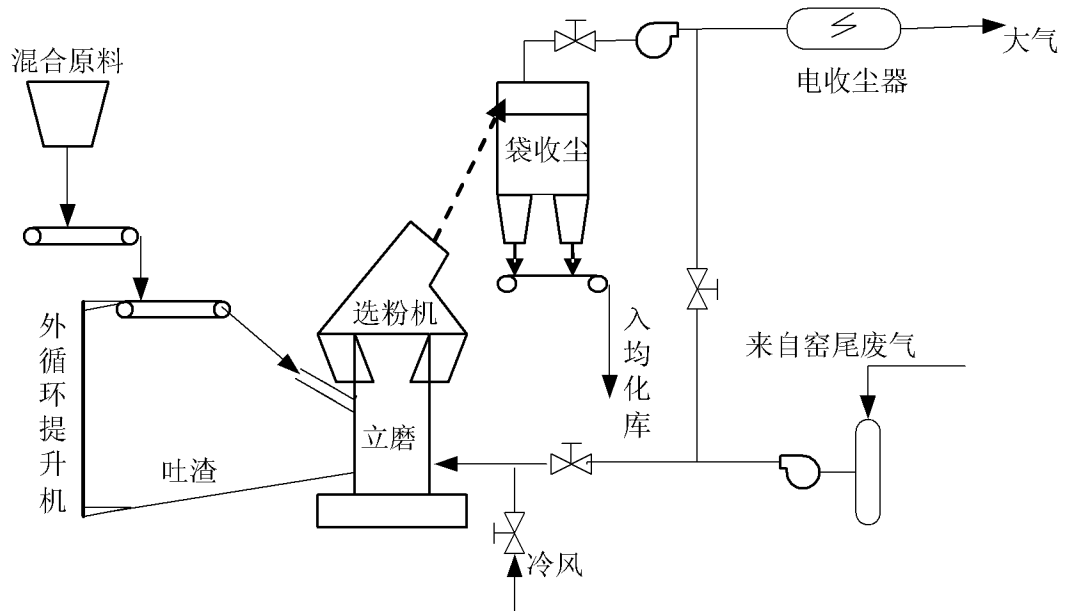


图 1

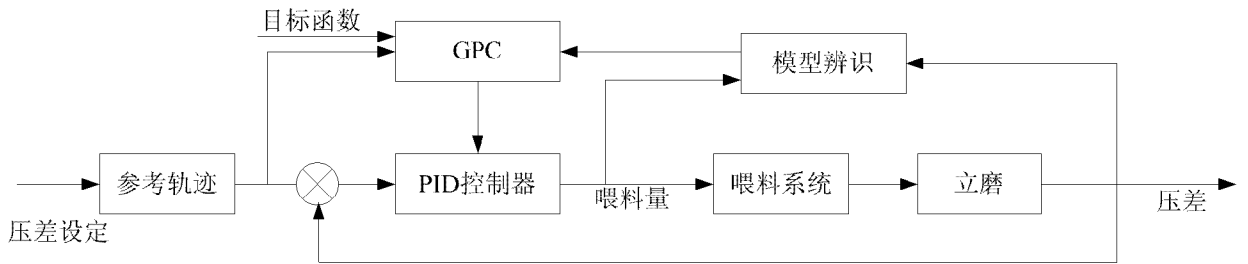


图 2

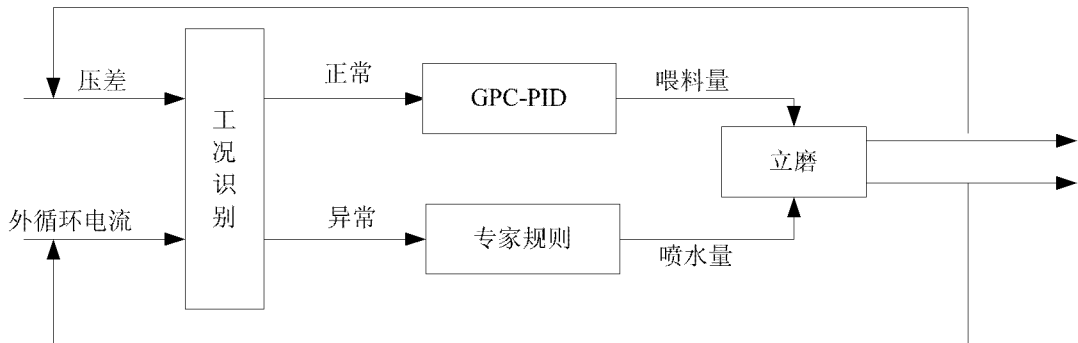


图 3

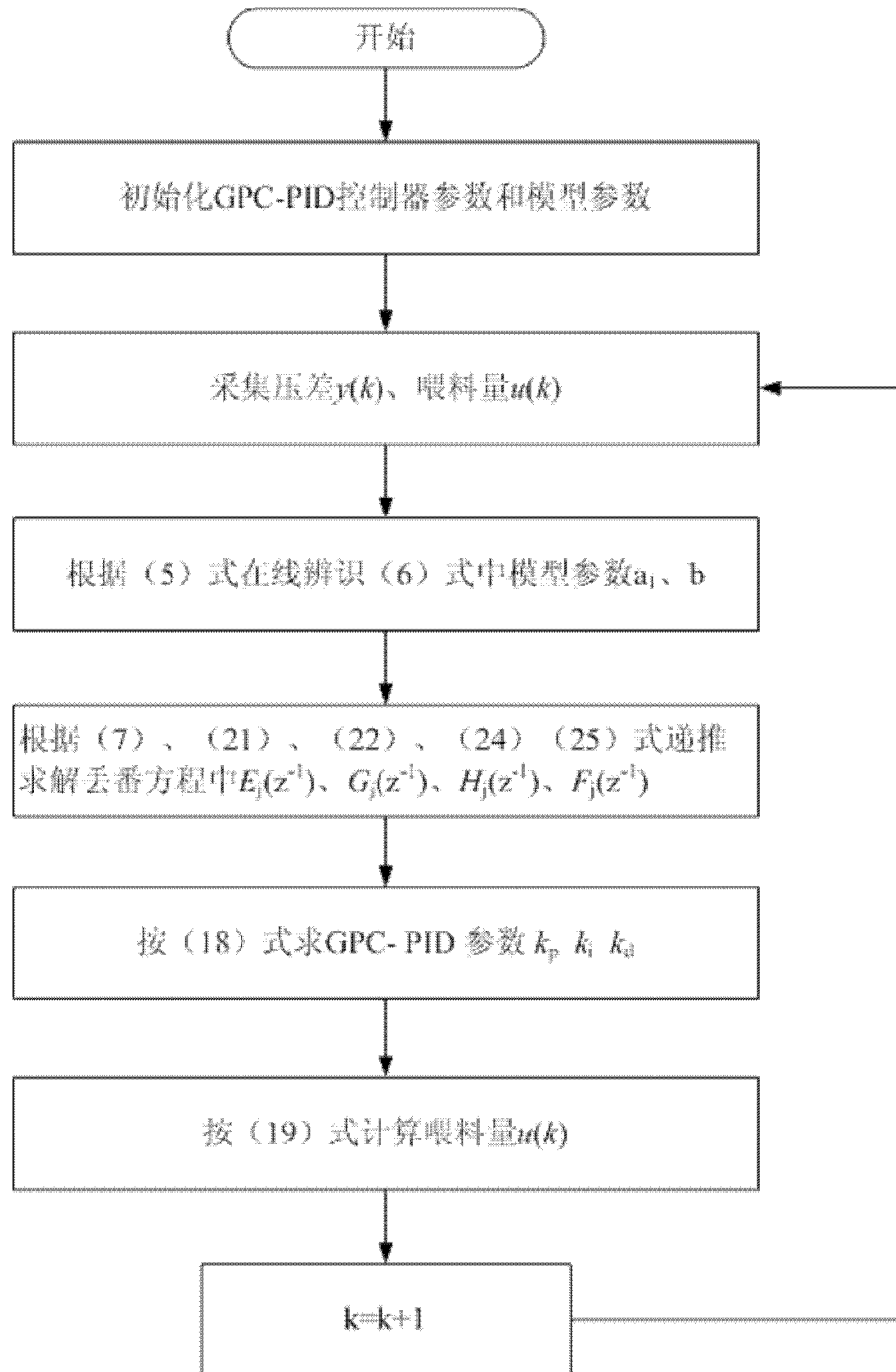


图 4

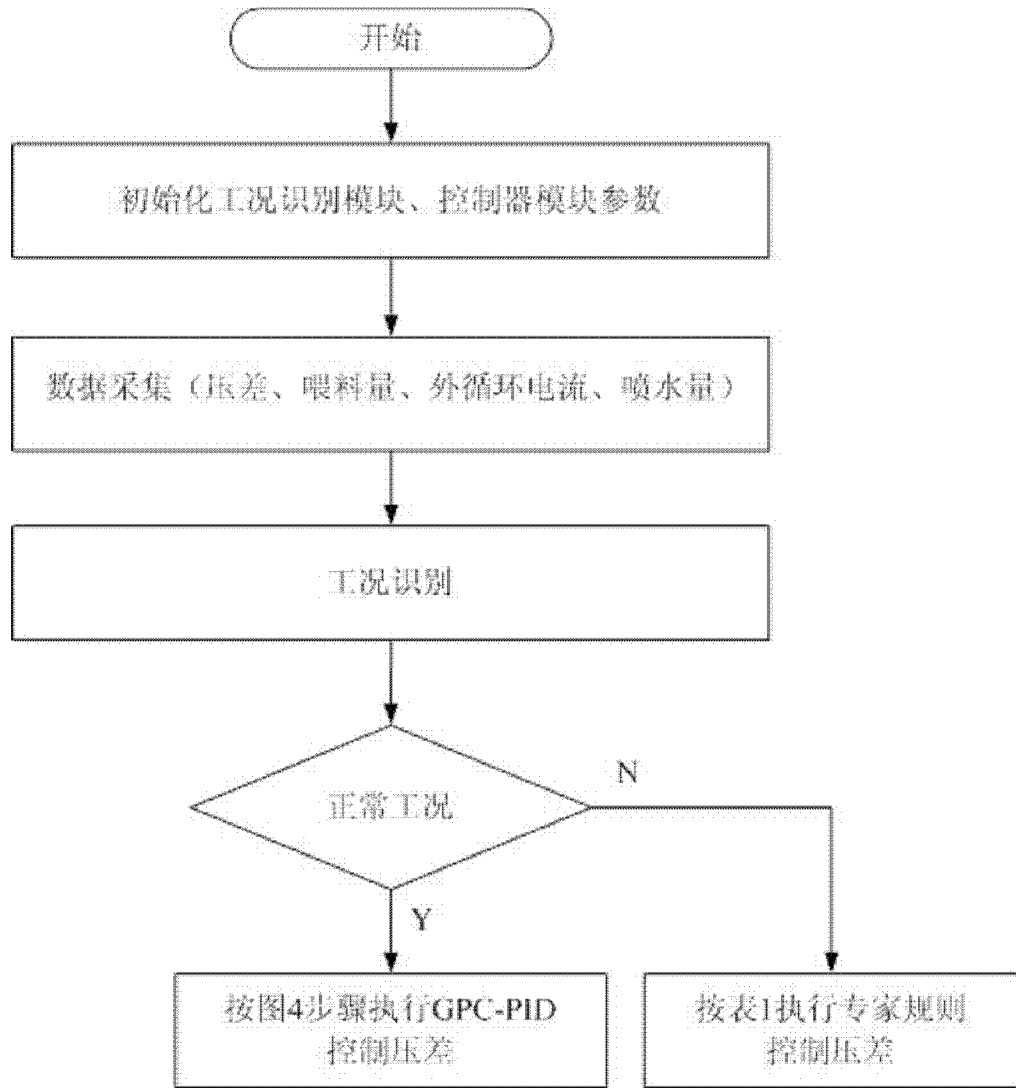


图 5