



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104950945 A

(43) 申请公布日 2015. 09. 30

(21) 申请号 201510394016. X

(22) 申请日 2015. 07. 07

(71) 申请人 天津水泥工业设计研究院有限公司  
地址 300400 天津市北辰区引河里北道 1 号

(72) 发明人 王靖 魏灿 艾军

(74) 专利代理机构 天津市鼎和专利商标代理有限公司 12101

代理人 李凤

(51) Int. Cl.

G05D 23/19(2006. 01)

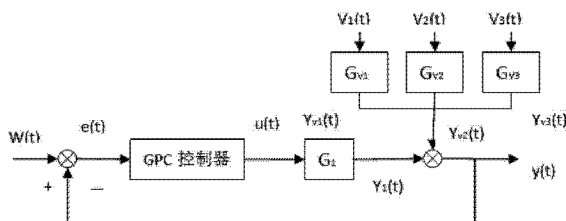
权利要求书4页 说明书9页 附图1页

(54) 发明名称

一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法,包括如下步骤:基于输入输出参数化模型的预测控制算法,建立 GPC 控制器;其中输入变量包括窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度,输出变量包括分解炉出口温度;设定控制模型参数,对 GPC 控制器初始化设置;实时采集输入/输出变量信号,并反馈至 GPC 控制器中;GPC 控制器根据输出变量的实际值和预测值,自校正控制模型参数,计算出输入变量控制量,并输出控制指令至执行装置;执行装置控制窑尾喂煤量,并根据分解炉出口温度自适应调节窑喂料量的供给量;循环反馈控制,直至工艺过程结束。本发明建立了更加符合实际生产工况的数学模型来进行控制,控制效果更加精确。



1. 一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤 a:基于输入输出参数化模型的预测控制算法,在上位机建立 GPC 控制器;其中输入变量包括窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度,输出变量包括:分解炉出口温度;

步骤 b:设定控制模型参数,对所述 GPC 控制器初始化设置后运行;

步骤 c:实时采集所述输入变量和所述输出变量信号,并进行数据预处理后反馈至所述 GPC 控制器中;

步骤 d:所述 GPC 控制器,根据分解炉出口温度的实际值和预测值,自校正控制模型参数,并采用最优化算法,计算出输入变量的控制量,并输出相应的控制指令至执行装置;

步骤 e:所述执行装置执行所述 GPC 控制器指令,控制窑尾喂煤量,同时根据分解炉出口温度状况自适应调节窑喂料量的供给量;

步骤 f:返回步骤 c,直至工艺过程结束。

2. 根据权利要求 1 所述的水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法,其特征在于,所述步骤 a 中,建立 GPC 控制器的具体步骤如下:

步骤 a-1:在稳态工况下,分别建立分解炉出口温度对窑尾喂煤量、分解炉出口温度对窑喂料量、分解炉出口温度对三次风温、分解炉出口温度对烟室温度的阶跃响应数学模型,并进一步离散化;

设  $T_s$  为系统的采样时间,得到每个阶跃响应模型所对应的离散方程:

$$y(k) - e^{-\frac{T_s}{T}} y(k-1) = K \left(1 - e^{-\frac{T_s}{T}}\right) r \left(k - \frac{\tau}{T_s} - 1\right), \quad (1)$$

式 (1) 中,  $K$  是系统的比例系数,  $T$  是时间常数,  $\tau$  是时滞,  $T_s$  为系统的采样时间;  $y(k)$  为对象输出变量;  $r(k)$  为控制输入变量;

步骤 a-2:采用 CARIMA 模型建立分解炉出口温度控制系统的控制模型,其表达式为:

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})R(k-1) + \zeta(k) / \Delta \quad (2)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$$

其中,  $Y(k)$  为控制对象输出向量,  $R(k)$  为控制对象输入向量,  $\zeta(k)$  是互不相关的零均值噪声序列;  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$  分别表示算子  $z^{-1}$  的多项式;  $\Delta = 1 - z^{-1}$  为差分算子;则  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $R(k-1)$  对应输入变量:窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度的相应矩阵为:

$$A(z^{-1}) = [A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1})] \quad (3)$$

$$B(z^{-1}) = \begin{bmatrix} B_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * B_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * B_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * B_{V_3}(z^{-1}) \end{bmatrix}^T$$

$$R(k-1) = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ v_1(k-1) \\ v_2(k-1) \\ v_3(k-1) \end{bmatrix}$$

其中,

$$A_i(z^{-1}) = 1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}z^{-1}} \quad i=1, v_1, v_2, v_3$$

$$B_i(z^{-1}) = K_i(1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}})z^{-\frac{\tau_i}{T_s}} \quad i=1, v_1, v_2, v_3$$

由上可知  $A(z^{-1})$  的阶次为  $n_a=4$ ,  $B(z^{-1})$  的阶次为  $n_b = \max(\frac{\tau_1}{T_s}, \frac{\tau_{v_1}}{T_s}, \frac{\tau_{v_2}}{T_s}, \frac{\tau_{v_3}}{T_s})$ ;

式(3)中,  $i$  为对应不同输入变量的编号:  $i=1$  对应窑尾喂煤量输入变量;  $i=v_1$  对应窑喂料量输入变量;  $i=v_2$  对应三次风温输入变量;  $i=v_3$  对应烟室温度输入变量;  $u(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑尾喂煤量输入变量值;  $v_1(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑喂料量输入变量值;  $v_2(k-1)$  为  $k-1$  时刻三次风温输入变量值;  $v_3(k-1)$  为  $k-1$  时刻烟室温度输入变量值;  $A_i, B_i$  是对应不同输入变量的算子  $z^{-1}$  多项式;  $\tau_i$  是对应不同输入变量的时滞;  $K_i$  是对应不同输入变量的比例系数;  $T_i$  是对应不同输入变量的时间常数;  $T_s$  为系统的采样时间;

步骤 a-3: 定义  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  为式(4)所述形式, 由所述步骤 a-2 得到  $A(z^{-1})$ , 计算出  $\tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta$ , 进而求出中间变量  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 其中  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  的表达式如下:

$$E(z^{-1}) = [E_1(z^{-1}), \dots, E_p(z^{-1})]^T \quad (4)$$

$$F(z^{-1}) = [F_1(z^{-1}), \dots, F_p(z^{-1})]^T$$

$$E_f(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1}$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1} z^{-1} + f_{j,2} z^{-2} + f_{j,3} z^{-3} + f_{j,4} z^{-4}$$

$$f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - \tilde{a}_{i+1} e_j \quad i=1, 2, 3$$

$$f_{j+1,4} = -\tilde{a}_5 e_j = -\tilde{a}_5 f_{j,0} \quad i=4$$

$$E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j};$$

当初始值  $j=1$  时,  $E_1(z^{-1})=1$ ,  $e_0=1$ ,  $F_1(z^{-1}) = z[1 - \tilde{A}(z^{-1})] = z[1 - A(z^{-1})\Delta]$ ; 其

中,  $e_i, f_{i,0}, f_{i,1}, f_{i,2}, f_{i,3}, f_{i,4}$  是  $1 \times 1$  维的向量,  $P$  是预测时域,  $\tilde{A}(z^{-1})$  有如下形式:

$$\tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta = 1 + \tilde{a}_1 z^{-1} + \dots + \tilde{a}_{n_a+1} z^{-n_a+1};$$

步骤 a-4: 由所述步骤 a-2 和所述步骤 a-3, 求出  $B(z^{-1})$ 、 $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 得到系统阶跃响应矩阵  $G(z^{-1})$  和历史响应矩阵  $H(z^{-1})$ ,  $G(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$  表达式如下:

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{n_b+j-1} z^{-n_b-j+1} \quad j=1, 2, \dots, P$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_0 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{P-2} & g_{P-3} & \cdots & g_{P-M-1} \\ g_{P-1} & g_{P-2} & \cdots & g_{P-M} \end{bmatrix}_{P \times M}$$

$$H(z^{-1}) = [H_1(z^{-1}), \dots, H_P(z^{-1})]^T = \begin{bmatrix} [G_1(z^{-1}) - g_0]z \\ [G_2(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1}]z^2 \\ \vdots \\ [G_N(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1} - \dots - g_{P-1}z^{-P+1}]z^P \end{bmatrix}$$

$$g_j = e_j b_0 + h_{j,0}$$

$$h_{j+1,i-1} = e_j b_0 + h_{j,i} \quad 1 \leq i \leq n_b$$

$$h_{j+1,n_b-1} = e_j b_{n_b}$$

当初始值  $j=1$  时 :

$$G_1(z^{-1}) = g_0 = e_0 b_0,$$

$$H_1(z^{-1}) = z[e_0 B(z^{-1}) - e_0 b_0] = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{1-n_b}$$

其中  $g_i, h_{j,i}$  是  $1 \times 4$  维的向量 ;  $P$  是预测时域,  $M$  是控制时域 ;

步骤 a-5 : 根据所述步骤 a-3 和所述步骤 a-4, 求出中间变量  $F(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$ , 得出系统过去的响应  $f(k)$  为如下形式 :

$$f(k) = [f_1(k) \ f_2(k) \ \cdots \ f_p(k)]^T$$

$$f_j(k) = F_j y(k) + H_j(z^{-1}) \Delta R(k-1)$$

$$= f_{j,0} y(k) + f_{j,1} y(k-1) + \dots + f_{j,n_a} y(k-n_a)$$

$$+ h_{j,0} \Delta R(k-1) + h_{j,1} \Delta R(k-2) + \dots + h_{j,n_b-1} \Delta R(k-n_b)$$

其中  $f_j$  是  $1 \times 1$  维的向量,  $P$  是预测时域,  $M$  是控制时域。

3. 根据权利要求 2 所述的水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法, 其特征在于, 在所述步骤 d 中, 由所述步骤 a-4 和所述步骤 a-5, 计算出最优控制增量  $\Delta r(k) = d[Y_s - f(k) - c * e(k)]$ , 其中  $d$  是  $(\lambda + \tilde{G}^T \tilde{G})^{-1} \tilde{G}^T$  的第一行, 矩阵  $\tilde{G}$  是由所述步骤 a-4 中的矩阵  $G$  中取每个元素的第一行第一列的元素所构成的矩阵,  $Y_s = [y_s(k+1)^T, \dots, y_s(k+N)^T]^T$  是如下控制目标曲线 :

$$y_s(k) = y(k)$$

$$y_s(k+j) = a y_s(k+j-1) + (1-a) W, \quad j=1, \dots, P$$

其中,  $W$  是控制目标值,  $\lambda$  是控制加权系数,  $a$  是柔化系数,  $c$  是误差校正参数,  $e(k)$  是预测误差 ;

预测误差  $e(k)$  的表达式为 :  $e(k) = y(k) - y_p(k)$ , 其中  $y(k)$  是当前分解炉出口温度的实际值,  $y_p(k)$  是上一时刻分解炉出口温度的预测值 ;

从而计算出最优控制量  $r(k+1) = r(k) + \Delta r(k)$ 。

4. 根据权利要求 2 所述的水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法, 其特征在于, 在所述步骤 d 中, 自校正控制模型参数的具体方法如下 :

(1)把由所述步骤 d 得到的最优控制增量  $r(k)$  代入到公式(1)能够得到分解炉出口温度的预测值  $y_p(k+1)$ ,对比分解炉出口温度  $y(k+1)$ ,由下式可以求出模型比例系数  $K'$  :

$$\frac{K}{y_p(k+1)} = \frac{K'}{y(k+1)}$$

在  $k+1$  时刻的计算处理中,将控制模型的比例系数自适应调整为  $K'$  ;

(2)分解炉出口温度在设定的周期内如果一直低于设定目标时,则自动定量减少窑喂料量;分解炉出口温度在设定的周期内如果一直高于设定目标时,则自动定量增加窑喂料量。

5. 根据权利要求 1 所述的水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法,其特征在于,在所述步骤 c 中,数据预处理的方法包括:通过设置上下限的方式剔除掉失效的数据;对于随机噪声,用高通滤波、低通滤波、数据平滑和卡尔曼滤波滤波去除;对于显著误差,采用残差分析法、校正量分析法、广义似然比法、贝叶斯法、增量法和主元分析法消除。

## 一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及分解炉出口温度控制方法,特别是一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法。

### 背景技术

[0002] 在水泥预分解窑系统的生产过程中,分解炉出口温度是一个非常重要的工艺参数,该参数可以表征水泥窑内燃烧以及物料的分解情况。因此,分解炉出口温度的稳定对整条水泥生产线的稳定,产品质量的提高都具有非常重要的影响。但是分解炉出口温度是一个纯滞后、大惯性、非线性、多种变量相互耦合的复杂控制对象,影响的因素很多,各因素之间耦合性很强,难以用简单的常规控制方法来进行控制。

[0003] 影响分解炉出口温度最主要的因素是窑尾喂煤量。一般来说,增加喂煤量可以提高分解炉出口温度,反之降低分解炉出口温度。此外,窑喂料量、三次风温和烟室温度都能影响分解炉出口温度。当窑喂料量增加时,物料分解所需的热量相应增加,导致分解炉出口温度下降;反之,窑喂料量减少时,物料分解所需的热量相应减少,导致分解炉出口温度上升。三次风是指从篦冷机引入分解炉的热风,三次风温的增加会使得分解炉出口温度升高,反之使得分解炉出口温度降低。而烟室气体由于烟室闸板阀密闭不严,也会进入到分解炉进而影响分解炉的温度。因此,为了更加精确地控制分解炉出口温度,必须考虑窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度的影响。对于水泥分解炉出口温度控制,目前采用的比较多的方法就是模糊控制、简单 PID 控制、或者单变量预测控制,并且上述方法都没有把窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度这几个重要的影响因素考虑进来。

[0004] 此外,由于大多数水泥厂煤炭预均化效果差或者取煤方式不固定等原因,煤炭热值经常会发生变化,严重影响控制模型的参数,因此考虑控制模型自适应更加符合水泥生产的复杂工况。

### 发明内容

[0005] 本发明为解决公知技术中存在的技术问题而提供一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法。

[0006] 本发明为解决公知技术中存在的技术问题所采取的技术方案是:一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

[0007] 步骤 a:基于输入输出参数化模型的预测控制算法,在上位机建立 GPC 控制器;其中输入变量包括窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度,输出变量包括:分解炉出口温度;

[0008] 步骤 b:设定控制模型参数,对所述 GPC 控制器初始化设置后运行;

[0009] 步骤 c:实时采集所述输入变量和所述输出变量信号,并进行数据预处理后反馈至所述 GPC 控制器中;

[0010] 步骤 d:所述 GPC 控制器,根据分解炉出口温度的实际值和预测值,自校正控制模

型参数,并采用最优化算法,计算出输入变量的控制量,并输出相应的控制指令至执行装置;

[0011] 步骤 e:所述执行装置执行所述 GPC 控制器指令,控制窑尾喂煤量,同时根据分解炉出口温度状况自适应调节窑喂料量的供给量;

[0012] 步骤 f:返回步骤 c,直至工艺过程结束。

[0013] 进一步地,所述步骤 a 中,建立 GPC 控制器的具体步骤如下:

[0014] 步骤 a-1:在稳态工况下,分别建立分解炉出口温度对窑尾喂煤量、分解炉出口温度对窑喂料量、分解炉出口温度对三次风温、分解炉出口温度对烟室温度的阶跃响应数学模型,并进一步离散化;

[0015] 设  $T_s$  为系统的采样时间,得到每个阶跃响应模型所对应的离散方程:

$$[0016] \quad y(k) - e^{-\frac{T_s}{T}} y(k-1) = K \left(1 - e^{-\frac{T_s}{T}}\right) r \left(k - \frac{\tau}{T_s} - 1\right), \quad (1)$$

[0017] 式 (1) 中,  $K$  是系统的比例系数,  $T$  是时间常数,  $\tau$  是时滞,  $T_s$  为系统的采样时间;  $y(k)$  为对象输出变量;  $r(k)$  为控制输入变量;

[0018] 步骤 a-2:采用 CARIMA 模型建立分解炉出口温度控制系统的控制模型,其表达式为:

$$[0019] \quad A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})R(k-1) + \zeta(k) / \Delta \quad (2)$$

$$[0020] \quad A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$$

$$[0021] \quad B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$$

[0022] 其中,  $Y(k)$  为控制对象输出向量,  $R(k)$  为控制对象输入向量,  $\zeta(k)$  是互不相关的零均值噪声序列;  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$  分别表示算子  $z^{-1}$  的多项式;  $\Delta = 1 - z^{-1}$  为差分算子;则  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $R(k-1)$  对应输入变量:窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度的相应矩阵为:

[0023]

$$A(z^{-1}) = [A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1})] \quad (3)$$

$$[0024] \quad B(z^{-1}) = \begin{bmatrix} B_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * B_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * B_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * B_{V_3}(z^{-1}) \end{bmatrix}^T$$

$$[0025] \quad R(k-1) = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ v_1(k-1) \\ v_2(k-1) \\ v_3(k-1) \end{bmatrix}$$

[0026] 其中,

$$[0027] \quad A_i(z^{-1}) = 1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}} z^{-1} \quad i = 1, v_1, v_2, v_3$$

$$B_i(z^{-1}) = K_i \left(1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}}\right) z^{-\frac{\tau_i}{T_s}} \quad i = 1, v_1, v_2, v_3$$

[0028] 由上可知  $A(z^{-1})$  的阶次为  $n_a = 4$ ,  $B(z^{-1})$  的阶次为  $n_b = \max(\frac{\tau_1}{T_s}, \frac{\tau_{v_1}}{T_s}, \frac{\tau_{v_2}}{T_s}, \frac{\tau_{v_3}}{T_s})$ ;

[0029] 式 (3) 中,  $i$  为对应不同输入变量的编号:  $i = 1$  对应窑尾喂煤量输入变量;  $i = v_1$  对应窑喂料量输入变量;  $i = v_2$  对应三次风温输入变量;  $i = v_3$  对应烟室温度输入变量;  $u(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑尾喂煤量输入变量值;  $v_1(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑喂料量输入变量值;  $v_2(k-1)$  为  $k-1$  时刻三次风温输入变量值;  $v_3(k-1)$  为  $k-1$  时刻烟室温度输入变量值;  $A_i$ 、 $B_i$  是对应不同输入变量的算子  $z^{-1}$  多项式;  $\tau_i$  是对应不同输入变量的时滞;  $K_i$  是对应不同输入变量的比例系数;  $T_i$  是对应不同输入变量的时间常数;  $T_s$  为系统的采样时间;

[0030] 步骤 a-3: 定义  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  为式 (4) 所述形式, 由所述步骤 a-2 得到  $A(z^{-1})$ , 计算出  $\tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta$ , 进而求出中间变量  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 其中  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  的表达式如下:

$$[0031] \quad E(z^{-1}) = [E_1(z^{-1}), \dots, E_p(z^{-1})]^T \quad (4)$$

$$[0032] \quad F(z^{-1}) = [F_1(z^{-1}), \dots, F_p(z^{-1})]^T$$

$$[0033] \quad E_j(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1}$$

$$[0034] \quad F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1} z^{-1} + f_{j,2} z^{-2} + f_{j,3} z^{-3} + f_{j,4} z^{-4}$$

$$[0035] \quad f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - \tilde{a}_{i+1} e_j \quad i=1, 2, 3$$

$$[0035] \quad f_{j+1,4} = -\tilde{a}_5 e_j = -\tilde{a}_5 f_{j,0} \quad i=4$$

$$[0036] \quad E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j};$$

$$[0037] \quad \text{当初始值 } j = 1 \text{ 时, } E_1(z^{-1}) = 1, e_0 = 1, F_1(z^{-1}) = z[1 - \tilde{A}(z^{-1})] = z[1 - A(z^{-1})\Delta];$$

其中,  $e_i, f_{i,0}, f_{i,1}, f_{i,2}, f_{i,3}, f_{i,4}$  是  $1 \times 1$  维的向量,  $P$  是预测时域,  $\tilde{A}(z^{-1})$  有如下形式:

$$[0038] \quad \tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta = 1 + \tilde{a}_1 z^{-1} + \dots + \tilde{a}_{n_a+1} z^{-n_a+1};$$

[0039] 步骤 a-4: 由所述步骤 a-2 和所述步骤 a-3, 求出  $B(z^{-1})$ 、 $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 得到系统阶跃响应矩阵  $G(z^{-1})$  和历史响应矩阵  $H(z^{-1})$ ,  $G(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$  表达式如下:

$$[0040] \quad G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{n_b+j-1} z^{-n_b-j+1} \quad j=1, 2, \dots, P$$

$$[0041] \quad G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_0 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{P-2} & g_{P-3} & \dots & g_{P-M-1} \\ g_{P-1} & g_{P-2} & \dots & g_{P-M} \end{bmatrix}_{P \times M}$$

$$[0042] \quad H(z^{-1}) = [H_1(z^{-1}), \dots, H_p(z^{-1})]^T = \begin{bmatrix} [G_1(z^{-1}) - g_0]z \\ [G_2(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1}]z^2 \\ \vdots \\ [G_N(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1} - \dots - g_{P-1} z^{-P+1}]z^P \end{bmatrix}$$

$$[0043] \quad g_j = e_j b_0 + h_{j,0}$$

$$[0044] \quad h_{j+1,i-1} = e_j b_0 + h_{j,i} \quad 1 \leq i \leq n_b$$



[0045]  $h_{j+1,n_b-1} = e_j b_{n_b}$

[0046] 当初始值  $j = 1$  时 :

[0047]  $G_1(z^{-1}) = g_0 = e_0 b_0,$

[0048]  $H_1(z^{-1}) = z[e_0 B(z^{-1}) - e_0 b_0] = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{1-n_b}$

[0049] 其中  $g_i, h_{j,i}$  是  $1 \times 4$  维的向量 ;P 是预测时域, M 是控制时域 ;

[0050] 步骤 a-5 :根据所述步骤 a-3 和所述步骤 a-4, 求出中间变量  $F(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$ , 得出系统过去的响应  $f(k)$  为如下形式 :

[0051]  $f(k) = [f_1(k) \ f_2(k) \ \dots \ f_p(k)]^T$

$$f_j(k) = F_j y(k) + H_j(z^{-1}) \Delta R(k-1)$$

[0052]  $= f_{j,0} y(k) + f_{j,1} y(k-1) + \dots + f_{j,n_a} y(k-n_a)$

$$+ h_{j,0} \Delta R(k-1) + h_{j,1} \Delta R(k-2) + \dots + h_{j,n_b-1} \Delta R(k-n_b)$$

[0053] 其中  $f_j$  是  $1 \times 1$  维的向量, P 是预测时域, M 是控制时域。

[0054] 进一步地, 在所述步骤 d 中, 由所述步骤 a-4 和所述步骤 a-5, 计算出最优控制增量  $\Delta r(k) = d[Y_s - f(k) - c * e(k)]$  其中  $d$  是  $(\lambda + \tilde{G}^T \tilde{G})^{-1} \tilde{G}^T$  的第一行, 矩阵  $\tilde{G}$  是由所述步骤 a-4 中的矩阵  $G$  中取每个元素的第一行第一列的元素所构成的矩阵,  $Y_s = [y_s(k+1)^T, \dots, y_s(k+N)^T]^T$  是如下控制目标曲线 :

[0055]  $y_s(k) = y(k)$

[0056]  $y_s(k+j) = a y_s(k+j-1) + (1-a)W, j = 1, \dots, P$

[0057] 其中,  $W$  是控制目标值,  $\lambda$  是控制加权系数,  $a$  是柔化系数,  $c$  是误差校正参数,  $e(k)$  是预测误差 ;

[0058] 预测误差  $e(k)$  的表达式为 :  $e(k) = y(k) - y_p(k)$ , 其中  $y(k)$  是当前分解炉出口温度的实际值,  $y_p(k)$  是上一时刻分解炉出口温度的预测值 ;

[0059] 从而计算出最优控制量  $r(k+1) = r(k) + \Delta r(k)$ 。

[0060] 进一步地, 在所述步骤 d 中, 自校正控制模型参数的具体方法如下 :

[0061] (1) 把由所述步骤 d 得到的最优控制增量  $r(k)$  代入到公式 (1) 能够得到分解炉出口温度的预测值  $y_p(k+1)$ , 对比分解炉出口温度  $y(k+1)$ , 由下式可以求出模型比例系数  $K'$  :

[0062] 
$$\frac{K}{y_p(k+1)} = \frac{K'}{y(k+1)}$$

[0063] 在  $k+1$  时刻的计算处理中, 将控制模型的比例系数自适应调整为  $K'$  ;

[0064] (2) 分解炉出口温度在设定的周期内如果一直低于设定目标时, 则自动定量减少窑喂料量 ; 分解炉出口温度在设定的周期内如果一直高于设定目标时, 则自动定量增加窑喂料量。

[0065] 进一步地, 在所述步骤 c 中, 数据预处理的方法包括 : 通过设置上下限的方式剔除掉失效的数据 ; 对于随机噪声, 用高通滤波、低通滤波、数据平滑和卡尔曼滤波滤波去除 ; 对于显著误差, 采用残差分析法、校正量分析法、广义似然比法、贝叶斯法、增量法和主元分析法消除。

[0066] 本发明具有的优点和积极效果是：本发明考虑了窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度等多个变量对分解炉出口温度的影响，建立了更加符合实际生产工况的数学模型来进行控制，控制效果更加精确。该方法能够根据每个扰动变量的变化做出相应的调整，能够针对水泥烧成系统全工况进行自适应控制；分解炉温度在正常工况下的波动下降至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内，甚至长期能够保持在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的范围之内，全工况在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 之内波动。相比人工手动控制，波动范围缩小了75%。采用该算法能够长期稳定安全运行，最大程度减少生产过程的波动。系统投运率能够达到99%以上，极大地降低了操作员的劳动强度。

#### 附图说明

[0067] 图1：分解炉出口温度闭环控制系统方框图。

[0068] 图中： $W(t)$ 为控制目标曲线中的控制目标值； $e(t)$ 为实际值与目标值的误差值； $Y_1(t)$ 为由窑尾喂煤量影响的分解炉出口温度分量； $Y_{v_1}(t)$ 为由窑喂料量影响的分解炉出口温度分量； $Y_{v_2}(t)$ 为由三次风温影响的分解炉出口温度分量； $Y_{v_3}(t)$ 为由烟室温度影响的分解炉出口温度分量； $u(t)$ 为窑尾喂煤量； $v_1(t)$ 为窑喂料量； $v_2(t)$ 为三次风温； $v_3(t)$ 为烟室温度。

#### 具体实施方式

[0069] 为能进一步了解本发明的发明内容、特点及功效，兹例举以下实施例，并配合附图详细说明如下：

[0070] 请参阅图1，一种水泥烧成分解炉全工况自适应温度优化控制方法，其特征在于，包括如下步骤：

[0071] 步骤a：基于输入输出参数化模型的预测控制算法，在上位机建立GPC控制器；其中输入变量包括窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度，输出变量包括：分解炉出口温度；

[0072] 步骤b：设定控制模型参数，对所述GPC控制器初始化设置后运行；

[0073] 步骤c：实时采集所述输入变量和所述输出变量信号，并进行数据预处理后反馈至所述GPC控制器中；

[0074] 步骤d：所述GPC控制器，根据分解炉出口温度的实际值和预测值，自校正控制模型参数，并采用最优化算法，计算出输入变量的控制量，并输出相应的控制指令至执行装置；

[0075] 步骤e：所述执行装置执行所述GPC控制器指令，控制窑尾喂煤量，同时根据分解炉出口温度状况自适应调节窑喂料量的供给量；

[0076] 步骤f：返回步骤c，直至工艺过程结束。

[0077] 可将窑尾喂煤量作为主要调节的变量进行重点控制，将窑喂料量作为次要调节变量，将三次风温和烟室温度作为扰动变量不进行调节。

[0078] 进一步地，所述步骤a中，建立GPC控制器的具体步骤可如下：

[0079] 步骤a-1：在稳态工况下，分别建立分解炉出口温度对窑尾喂煤量、分解炉出口温度对窑喂料量、分解炉出口温度对三次风温、分解炉出口温度对烟室温度的阶跃响应数学

模型,并进一步离散化;

[0080] 首先通过阶跃响应测试分别得到窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度对分解炉出口温度的控制模型。假设分解炉出口温度为输出变量  $y(k)$ , 窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度分别为操作变量  $u(k)$ 、 $v_1(k)$ 、 $v_2(k)$ 、 $v_3(k)$ , 采用一阶惯性时滞模型来描述分解炉出口温度与各个操作变量之间的对应关系。采用如下形式的传递函数

$$[0081] \quad \Phi(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$$

[0082] 其中  $K$  是系统的比例系数,  $T$  是时间常数,  $\tau$  是时滞。

[0083] 设  $T_s$  为系统的采样时间, 得到每个阶跃响应模型所对应的离散方程:

$$[0084] \quad y(k) - e^{-\frac{T_s}{T}} y(k-1) = K \left(1 - e^{-\frac{T_s}{T}}\right) r \left(k - \frac{\tau}{T_s} - 1\right), \quad (1)$$

[0085] 式 (1) 中,  $K$  是系统的比例系数,  $T$  是时间常数,  $\tau$  是时滞,  $T_s$  为系统的采样时间;  $y(k)$  为对象输出变量;  $r(k)$  为控制输入变量;

[0086] 步骤 a-2: 可采用 CARIMA 模型建立分解炉出口温度控制系统的控制模型, 其表达式为:  $A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})R(k-1) + \zeta(k) / \Delta$  (2)

$$[0087] \quad A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$$

$$[0088] \quad B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$$

[0089] 其中,  $Y(k)$  为控制对象输出向量,  $R(k)$  为控制对象输入向量,  $\zeta(k)$  是互不相关的零均值噪声序列, 由于该噪声序列经过实际系统作用之后体现在预测误差中, 因此在预测误差之前的计算中可不予考虑;  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$  分别表示算子  $z^{-1}$  的多项式;  $\Delta = 1 - z^{-1}$  为差分算子; 则  $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $R(k-1)$  对应输入变量: 窑尾喂煤量、窑喂料量、三次风温和烟室温度的相应矩阵为:

[0090]

$$A(z^{-1}) = [A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1})] \quad (3)$$

$$[0091] \quad B(z^{-1}) = \begin{bmatrix} B_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * B_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * B_{V_2}(z^{-1}) * A_{V_3}(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) * A_{V_1}(z^{-1}) * A_{V_2}(z^{-1}) * B_{V_3}(z^{-1}) \end{bmatrix}^T$$

$$[0092] \quad R(k-1) = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ v_1(k-1) \\ v_2(k-1) \\ v_3(k-1) \end{bmatrix}$$

[0093] 其中,

$$[0094] \quad A_i(z^{-1}) = 1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}} z^{-1} \quad i=1, v_1, v_2, v_3$$

$$B_i(z^{-1}) = K_i \left(1 - e^{-\frac{T_s}{T_i}}\right) z^{-\frac{\tau_i}{T_s}} \quad i=1, v_1, v_2, v_3$$

[0095] 由上可知  $A(z^{-1})$  的阶次为  $n_a = 4$ ,  $B(z^{-1})$  的阶次为  $n_b = \max(\frac{\tau_1}{T_s}, \frac{\tau_{v_1}}{T_s}, \frac{\tau_{v_2}}{T_s}, \frac{\tau_{v_3}}{T_s})$ ;

[0096] 式 (3) 中,  $i$  为对应不同输入变量的编号:  $i = 1$  对应窑尾喂煤量输入变量;  $i = v_1$  对应窑喂料量输入变量;  $i = v_2$  对应三次风温输入变量;  $i = v_3$  对应烟室温度输入变量;  $u(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑尾喂煤量输入变量值;  $v_1(k-1)$  为  $k-1$  时刻窑喂料量输入变量值;  $v_2(k-1)$  为  $k-1$  时刻三次风温输入变量值;  $v_3(k-1)$  为  $k-1$  时刻烟室温度输入变量值;  $A_i$ 、 $B_i$  是对应不同输入变量的算子  $z^{-1}$  多项式;  $\tau_i$  是对应不同输入变量的时滞;  $K_i$  是对应不同输入变量的比例系数;  $T_i$  是对应不同输入变量的时间常数;  $T_s$  为系统的采样时间; 比如:  $A_1$ 、 $B_1$  为对应窑尾喂煤量输入的算子  $z^{-1}$  多项式;  $A_{v_1}$ 、 $B_{v_1}$  为对应窑喂料量输入的算子  $z^{-1}$  多项式;  $A_{v_2}$ 、 $B_{v_2}$  为对应三次风温输入的算子  $z^{-1}$  多项式;  $A_{v_3}$ 、 $B_{v_3}$  为对应烟室温度的算子  $z^{-1}$  多项式;  $\tau_1$  为对应窑尾喂煤量输入的时滞;  $\tau_{v_1}$  为对应窑喂料量输入的时滞;  $\tau_{v_2}$  为对应三次风温输入的时滞;  $\tau_{v_3}$  为对应烟室温度输入的时滞;  $K_1$  是对应窑尾喂煤量输入的比例系数;  $K_{v_1}$  是对应窑喂料量输入的比例系数;  $K_{v_2}$  是对应三次风温输入的比例系数;  $K_{v_3}$  是对应烟室温度输入的比例系数;  $T_1$  是对应窑尾喂煤量输入的时间常数;  $T_{v_1}$  是对应窑喂料量输入的时间常数;  $T_{v_2}$  是对应三次风温输入的时间常数;  $T_{v_3}$  是对应烟室温度输入的时间常数;

[0097] 步骤 a-3: 可定义  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  为式 (4) 所述形式, 由所述步骤 a-2 得到  $A(z^{-1})$ , 计算出  $\tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta$ , 进而求出中间变量  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 其中  $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$  的表达式如下:

$$[0098] \quad E(z^{-1}) = [E_1(z^{-1}), \dots, E_p(z^{-1})]^T \quad (4)$$

$$[0099] \quad F(z^{-1}) = \{F_1(z^{-1}), \dots, F_p(z^{-1})\}^T$$

$$[0100] \quad E_j(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1}$$

$$[0101] \quad F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1} z^{-1} + f_{j,2} z^{-2} + f_{j,3} z^{-3} + f_{j,4} z^{-4}$$

$$[0102] \quad f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - \tilde{a}_{i+1} e_j \quad i=1, 2, 3$$

$$f_{j+1,4} = -\tilde{a}_5 e_j = -\tilde{a}_5 f_{j,0} \quad i=4$$

$$[0103] \quad E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_j z^{-j};$$

$$[0104] \quad \text{当初始值 } j = 1 \text{ 时, } E_1(z^{-1}) = 1, e_0 = 1, F_1(z^{-1}) = z[1 - \tilde{A}(z^{-1})] = z[1 - A(z^{-1})\Delta];$$

其中,  $e_i$ ,  $f_{i,0}$ ,  $f_{i,1}$ ,  $f_{i,2}$ ,  $f_{i,3}$ ,  $f_{i,4}$  是  $1 \times 1$  维的向量,  $P$  是预测时域,  $\tilde{A}(z^{-1})$  有如下形式:

$$[0105] \quad \tilde{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})\Delta = 1 + \tilde{a}_1 z^{-1} + \dots + \tilde{a}_{n_a+1} z^{-n_a+1};$$

[0106] 步骤 a-4: 可由所述步骤 a-2 和所述步骤 a-3, 求出的  $B(z^{-1})$ 、 $E(z^{-1})$  和  $F(z^{-1})$ , 得到系统阶跃响应矩阵  $G(z^{-1})$  和历史响应矩阵  $H(z^{-1})$ ,  $G(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$  表达式如下:

$$[0107] \quad G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{n_b+j-1} z^{-n_b-j+1} \quad j=1, 2, \dots, P$$

$$[0108] \quad G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_0 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{P-2} & g_{P-3} & \dots & g_{P-M-1} \\ g_{P-1} & g_{P-2} & \dots & g_{P-M} \end{bmatrix}_{P \times M}$$

$$[0109] \quad H(z^{-1}) = [H_1(z^{-1}), \dots, H_P(z^{-1})]^T = \begin{bmatrix} [G_1(z^{-1}) - g_0]z \\ [G_2(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1}]z^2 \\ \vdots \\ [G_N(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1} - \dots - g_{P-1} z^{-P+1}]z^P \end{bmatrix}$$

$$[0110] \quad g_j = e_j b_0 + h_{j,0}$$

$$[0111] \quad h_{j+1,i-1} = e_j b_0 + h_{j,i} \quad 1 \leq i \leq n_b$$

$$h_{j+1,n_b-1} = e_j b_{n_b}$$

[0112] 当初始值  $j = 1$  时 :

$$[0113] \quad G_1(z^{-1}) = g_0 = e_0 b_0,$$

$$[0114] \quad H_1(z^{-1}) = z[e_0 B(z^{-1}) - e_0 b_0] = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{1-n_b}$$

[0115] 其中  $g_i, h_{j,i}$  是  $1 \times 4$  维的向量 ;  $P$  是预测时域,  $M$  是控制时域 ;

[0116] 步骤 a-5 : 可根据所述步骤 a-3 和所述步骤 a-4, 求出中间变量  $F(z^{-1})$  和  $H(z^{-1})$ , 得出系统过去的响应  $f(k)$  为如下形式 :

$$[0117] \quad f(k) = [f_1(k) \ f_2(k) \ \dots \ f_p(k)]^T$$

$$[0118] \quad f_j(k) = F_j y(k) + H_j(z^{-1}) \Delta R(k-1) \\ = f_{j,0} y(k) + f_{j,1} y(k-1) + \dots + f_{j,n_a} y(k-n_a)$$

$$[0119] \quad + h_{j,0} \Delta R(k-1) + h_{j,1} \Delta R(k-2) + \dots + h_{j,n_b-1} \Delta R(k-n_b)$$

[0120] 其中  $f_j$  是  $1 \times 1$  维的向量,  $P$  是预测时域,  $M$  是控制时域。

[0121] 进一步地, 在所述步骤 d 中, 可由所述步骤 a-4 和所述步骤 a-5, 计算出最优控制增量  $\Delta r(k) = d[Y_s - f(k) - c * e(k)]$ , 其中  $d$  是  $(\lambda + \tilde{G}^T \tilde{G})^{-1} \tilde{G}^T$  的第一行, 矩阵  $\tilde{G}$  是由所述步骤 a-4 中的矩阵  $G$  中取每个元素的第一行第一列的元素所构成的矩阵,  $Y_s = [y_s(k+1)^T, \dots, y_s(k+N)^T]^T$  是如下控制目标曲线 :

$$[0122] \quad y_s(k) = y(k)$$

$$[0123] \quad y_s(k+j) = a y_s(k+j-1) + (1-a)W, \quad j = 1, \dots, P$$

[0124] 其中,  $W$  是控制目标值,  $\lambda$  是控制加权系数,  $a$  是柔化系数,  $c$  是误差校正参数, 以上四个参数都由人工给定 ;  $e(k)$  是预测误差, 是由式 (2) 中等式右边第二项  $\zeta(k) / \Delta$  作用于实际系统而产生, 它表示实际值与预测值之间的误差 ;

[0125] 预测误差  $e(k)$  的表达式为 :  $e(k) = y(k) - y_p(k)$ , 其中  $y(k)$  是当前分解炉出口温度的实际值,  $y_p(k)$  是上一时刻分解炉出口温度的预测值 ;

[0126] 从而计算出最优控制量  $r(k+1) = r(k) + \Delta r(k)$ 。

[0127] 进一步地, 在所述步骤 d 中, 自校正控制模型参数的具体方法可如下 :

[0128] (1) 把由所述步骤 d 得到的最优控制增量  $r(k)$  代入到公式 (1) 能够得到分解炉出

口温度的预测值  $y_p(k+1)$ , 对比分解炉出口温度  $y(k+1)$ , 由下式可以求出模型比例系数  $K'$  :

$$[0129] \quad \frac{K}{y_p(k+1)} = \frac{K'}{y(k+1)}$$

[0130] 在  $k+1$  时刻的计算处理中, 将控制模型的比例系数自适应调整为  $K'$  ;

[0131] (2) 分解炉出口温度在设定的周期内如果一直低于设定目标时, 则可自动定量减少窑喂料量; 分解炉出口温度在设定的周期内如果一直高于设定目标时, 则可自动定量增加窑喂料量。

[0132] 进一步地, 在所述步骤 c 中, 数据预处理的方法可包括: 通过设置上下限的方式剔除掉失效的数据; 对于随机噪声, 用高通滤波、低通滤波、数据平滑和卡尔曼滤波滤波去除; 对于显著误差, 采用残差分析法、校正量分析法、广义似然比法、贝叶斯法、增量法和主元分析法消除。

[0133] 采用该控制算法能够使得分解炉温度在正常工况下的波动下降至  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内, 甚至长期能够保持在  $\pm 2^\circ\text{C}$  的范围之内, 全工况在  $\pm 10^\circ\text{C}$  之内波动。相比人工手动控制, 波动范围缩小了 75%。

[0134] 采用该算法能够长期稳定安全运行。该系统安全可靠, 在正常工况下能够长期安全稳定运行, 最大程度减少生产过程的波动。系统投运率能够达到 99% 以上, 极大地降低了操作员的劳动强度。

[0135] 尽管上面结合附图对本发明的优选实施例进行了描述, 但是本发明并不局限于上述的具体实施方式, 上述的具体实施方式仅仅是示意性的, 并不是限制性的, 本领域的普通技术人员在本发明的启示下, 在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下, 还可以做出很多形式, 这些均属于本发明的保护范围之内。

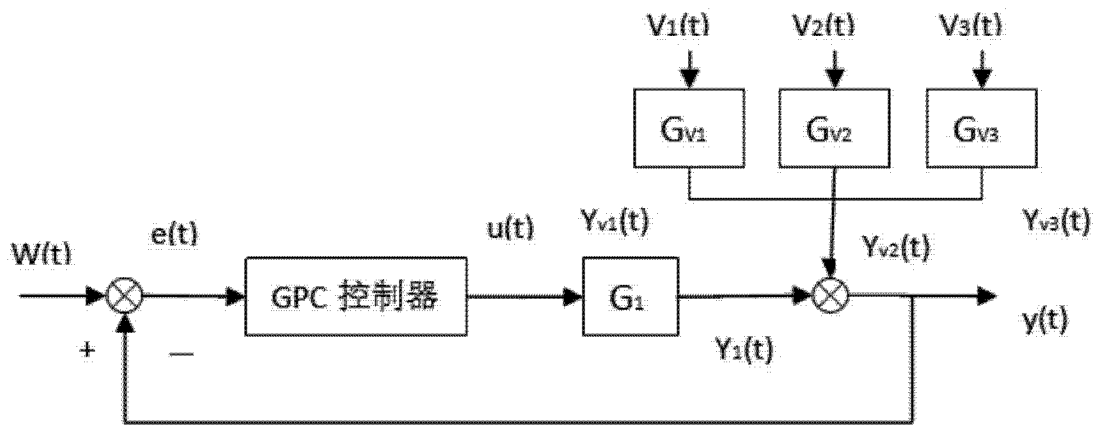


图 1