

制粉系统抗扰动预测控制算法研究

曾德良, 简一帆[†], 高耀焱

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102204)

摘要: 为了提高火电厂制粉控制系统抗扰动的能力,在综合考虑制粉系统中各被控量历史输出和预测输出的基础上,提出一种改进的制粉系统多模型预测控制算法.该算法将对被控量偏差的比例、积分、微分作用引入到目标函数中,以改善系统动态调节过程,减小一次风流量和磨出口温度的波动,对于一次风的精确配风有重要意义.仿真结果表明,所提出算法能够提高制粉系统抗煤水分扰动的能力和工况大范围变动时的稳定性,实现制粉系统安全、稳定、经济运行.

关键词: 制粉系统; 多模型预测控制; 煤水分; 抗扰动能力; 精确配风

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

Research on predictive control algorithm for suppressing disturbance in pulverizing system

ZENG De-liang, JIAN Yi-fan[†], GAO Yao-kui

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102204, China)

Abstract: In order to improve the ability of suppressing disturbance in the pulverizing system, an improved multi-model predictive control algorithm is designed on the basis of considering the historical output and predicted output of each controlled variable in pulverizing system. The algorithm introduces the proportion, integral and differential effect on the deviation of the controlled variables in the objective function, thus improving the dynamic regulation process of the system and reducing the fluctuation of the primary air flow and the outlet temperature, which is important to the precise distribution of the primary air. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the ability of the system to resist the disturbance of coal moisture and the stability of a wide range of operating conditions and can realize the safe, stable and economic operation of the pulverizing system.

Keywords: pulverizing system; multi-model predictive control; coal moisture; ability of suppressing disturbance; precise air distribution

0 引 言

目前,国内绝大多数火电厂普遍采用正压直吹式制粉系统.该类系统是典型的三入三出、非线性时变系统,各控制量与被控量之间存在严重的耦合,导致其控制性能较差.

传统的制粉系统控制由3个独立的单回路构成,可以基本实现制粉系统的自动控制功能,但是未考虑各回路间的耦合情况,控制效果并不理想^[1].文献[2-3]提出了改进的解耦控制策略,但整个控制是基于线性化的模型,无法满足实际磨煤机系统非线性特征.随着计算机技术的发展,国内外研究人员开始探索采用神经网络、模糊控制、粒子群算法等智

能算法设计控制器^[4-6],改善了制粉系统的控制效果,但是这些智能算法无法使用数学表达式进行机理分析,限制了此类先进算法的进一步发展.近年来,一些基于模型的先进控制算法也开始应用于制粉系统的设计中.文献[7]针对MPS中速磨煤机直吹式制粉系统非线性、大延迟、大惯性的特点,提出了基于RBF网络的预测控制算法,有效解决了磨煤机的优化控制问题,但基于RBF网络的预测模型可靠性差,不利于工程应用;文献[8-9]针对中速磨煤机制粉系统提出了一种多模型广义预测解耦控制,实现了多工况下制粉系统的稳定控制,仿真结果验证了该算法的有效性.

上述学者的研究主要集中在克服制粉系统的强

收稿日期: 2017-03-23; 修回日期: 2017-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776065).

责任编委: 李少远.

作者简介: 曾德良(1969—),男,教授,博士,从事大型火电机组建模与控制等研究;简一帆(1993—),男,硕士生,从事制粉系统建模与优化控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: ncepujyf@163.com

耦合问题上,很少有学者研究过程扰动的影响,例如:混煤掺烧导致煤水分变化,磨煤机运行工况发生改变引起实际模型偏离所建立的模型.近年来,新发展的预测控制算法虽然极大地提高了控制算法的稳定性和鲁棒性,但预测控制的本质是基于模型的控制,其控制效果很大程度上受所建立的模型精确性影响^[10].因此,当制粉系统的模型受到扰动,导致实际的模型偏离所建立的模型时,需要对预测控制算法的控制效果如何变化作深入的探讨.

本文以文献[11]所述的MPS中速磨煤机制粉系统模型为基础,提出一种基于状态空间的预测控制(MPC)与PID控制结构相结合的多模型预测控制方案,并通过制粉系统引入煤水分扰动和工况大范围变化扰动,对比分析当制粉系统受到扰动,导致实际模型偏离所建立的模型时,采用MPC-PID算法和只采用MPC算法的控制效果,验证本文所提出改进预测控制算法的合理性和有效性.

1 制粉系统介绍

典型的正压直吹式制粉系统主要由给煤机、磨煤机、一次风机、密封风机、粗粉分离器以及燃烧器等构成.原煤经给煤机进入磨煤机进行碾磨和加热,形成一定细度的煤粉并得到充分的干燥.一次风经过一次风机升压后分成两路,其中一路直接进入磨煤机前的冷一次风管,即冷一次风;另一路经过空气预热器加热后进入磨煤机前的热一次风管,即热一次风.两路一次风在磨煤机前混合后进入磨煤机.在冷热一次风管的出口均设有调节挡板,即冷热一次风门,其中热一次风门控制一次风流量,冷一次风门控制磨煤机出口温度,两者配合完成煤粉的干燥和输送任务.每台磨配有一台密封风机,一次风机出口的冷一次风经密封风机升压后完成对磨煤机的密封作用,防止煤粉外漏.

我国正压直吹式制粉系统广泛采用MPS型中速磨煤机,其工作原理为:原煤由落煤管进入两个碾磨部件磨辊和磨盘之间,在压紧力的作用下受到挤压和碾磨而被粉碎成煤粉.一次风由热风 and 冷风经过各自的调节挡板混合至一定温度,通过风环进入中速磨煤机对煤粉进行干燥,同时将一定细度的煤粉带入碾磨区上部的粗粉分离器中进行分离,合格的细粉被一次风带出分离器出口的煤粉管道送到锅炉中燃烧,不合格的煤粉落入落煤管中继续碾磨.

2 制粉系统模型介绍

本文的研究工作是在文献[11]所建立的中速磨直吹式制粉系统基础上进行的,该文基于一次风以及

磨内煤水分的质量平衡和能量平衡,建立了三入三出的制粉系统模型,如下式所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{W}_{\text{air}} &= \frac{1}{T_1}(-W_{\text{air}} + W_L^{\text{max}}u_L + W_H^{\text{max}}u_H), \\ \dot{T}_{\text{in}} &= \frac{1}{T_2} \left[\frac{C_L W_L^{\text{max}}u_L T_L + C_H W_H^{\text{max}}u_H T_H}{C_{\text{in}}(W_L^{\text{max}}u_L + W_H^{\text{max}}u_H)} - T_{\text{in}} \right], \\ \dot{M}_c &= W_c - a_{10}M_c, \\ \dot{M}_{\text{pf}} &= a_{10}M_c - W_{\text{pf}}, \\ W_{\text{pf}} &= a_{11}\Delta P_{\text{pa}}M_{\text{pf}}, \\ \Delta P_{\text{pa}} &= \frac{22.4}{28.8} \cdot \frac{273 + T_{\text{in}}}{273} \cdot \left(\frac{W_{\text{air}}}{10} \right)^2, \\ I &= a_6 M_{\text{pf}} + a_7 M_c + a_8, \\ \dot{T}_{\text{out}} &= [a_1 T_{\text{in}} + a_2]W_{\text{air}} + a_3 W_c - \\ &\quad [a_4 T_{\text{out}} + a_5][W_{\text{air}} + W_c] + a_9 I + \\ &\quad a_{12}T_{\text{out}} - a_{14}W_{\text{free}}^{\text{water}}, \\ \dot{M}_{\text{pc}} &= \frac{1}{M_c + M_{\text{pf}}}(M_{\text{ar}}W_c - W_{\text{free}}^{\text{water}} - M_{\text{pc}}W_{\text{pf}}), \\ W_{\text{free}}^{\text{water}} &= a_{13}(W_c M_{\text{ar}})T_{\text{out}}(1 - e^{-\frac{W_{\text{air}}}{a_{15}}}). \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中: T_1 表示风门开度至一次风流量的迟延时间(单位为s); T_2 表示风门开度至一次风温度的迟延时间(单位为s); a_i 表示模型参数, $i = 1, 2, \dots, 15$;其余符号说明见表1.

表1 符号说明

| 符号 | 意义 |
|----------------------------------|-----------------------|
| W_L^{max} | 冷风最大流量/(kg/s) |
| u_H | 热风门开度/% |
| T_{in} | 磨入口一次风温度/°C |
| W_c | 给煤量/(kg/s) |
| M_c | 磨煤机内原煤量/kg |
| ΔP_{pa} | 一次风差压/mbar |
| M_{ar} | 原煤水分/% |
| W_H^{max} | 热风最大流量/(kg/s) |
| W_{air} | 一次风流量/(kg/s) |
| T_L | 冷风温度/°C |
| T_H | 热风温度/°C |
| M_{pf} | 磨煤机内煤粉量/kg |
| I | 磨煤机电流/A |
| T_{out} | 磨煤机出口温度/°C |
| u_L | 冷风门开度/% |
| C_L | 冷一次风的比热容/(kJ/(kg·°C)) |
| C_H | 热一次风的比热容/(kJ/(kg·°C)) |
| C_{in} | 混合一次风比热容/(kJ/(kg·°C)) |
| W_{pf} | 磨煤机出口煤粉流量/(kg/s) |
| M_{pc} | 煤粉水分/% |
| $W_{\text{free}}^{\text{water}}$ | 原煤水分的蒸发量/(kg/s) |

模型的控制量输入为 U_L 、 U_H 和 W_c ;模型的输出为 W_{air} 、 T_{out} 和 W_{pf} ;模型待辨识参数为 a_i 和 T_j , $i = 1, 2, \dots, 15$, $j = 1, 2$,其数值如表2所示.

表2 模型参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------|-----------|----------|------------|
| a_1 | 0.0006901 | a_{10} | 0.4137806 |
| a_2 | 0.1954937 | a_{11} | 0.0700494 |
| a_3 | 0.0099998 | a_{12} | -0.0598681 |
| a_4 | 0.0010881 | a_{13} | 0.0115228 |
| a_5 | 0.0933825 | a_{14} | 0.2625266 |
| a_6 | 0.1799866 | a_{15} | 14.986719 |
| a_7 | 0.8883559 | T_1 | 10.300401 |
| a_8 | 34.206525 | T_2 | 3.676511 |
| a_9 | 0.0165557 | | |

3 制粉系统抗模型参数扰动方案设计

3.1 制粉系统抗扰动算法推导

PID算法是过程工业领域中运用最为普遍的控制策略,具有较强的抗扰动能力. 本文在基于状态空间的预测控制算法基础上,尝试与PID的控制思想相结合^[12],考虑制粉系统各被控量的历史输出和预测输出,在优化目标函数中引入如下对被控量偏差的比例、积分、微分操作,设计了MPC-PID算法:

$$\min J(k) = K_p \Delta E(k)^T Q \Delta E(k) + K_i E(k)^T Q E(k) + K_d \Delta^2 E(k)^T Q \Delta^2 E(k) + U(k)^T R U(k). \quad (2)$$

其中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分系数矩阵, $E(k)$ 为 k 时刻的预测误差, $\Delta E(k)$ 为 k 时刻的预测误差增量, $\Delta^2 E(k)$ 为 k 时刻预测误差增量的增量.

首先,定义基于状态空间预测控制的优化目标函数为

$$\min J(k) = \|W(k) - Y(k)\|_Q^2 + \|U(k)\|_R^2. \quad (3)$$

其中: $W(k)$ 为 k 时刻的输出期望值, $Y(k)$ 为 k 时刻的模型实际输出值, $U(k)$ 为 k 时刻的控制量, Q 为输出加权矩阵, R 为控制加权矩阵.

接着,借鉴PID算法的思想,对目标函数的输出误差项进行改进,使用增量式结构对预测控制的优化目标进行改写,使得推导的改进算法具有广义上的比例、积分、微分特征,具体推导步骤如下:

令

$$\begin{aligned} E(k) &= W(k) - Y(k), \\ \Delta E(k) &= E(k) - E(k-1), \\ \Delta^2 E(k) &= \Delta E(k) - \Delta E(k-1), \end{aligned}$$

则改进后的优化目标可以写为式(2)形式.

求解式(2)还需要获得模型的输出表达式. 考虑以状态空间方程描述的具有 n 个输入 n 个输出的线性系统

$$\begin{cases} X_m(k+1) = A_m X_m(k) + B_m u(k), \\ Y_m(k) = C_m X_m(k). \end{cases} \quad (4)$$

其中: A_m 、 B_m 、 C_m 为状态空间预测模型的系数矩阵, 系统状态矩阵 X_m 、系统输入矩阵 u 和系统输出矩阵

Y_m 的具体形式为

$$\begin{aligned} X_m(k) &= [x_{m1}^T(k), x_{m2}^T(k), \dots, x_{mn}^T(k)]^T, \\ u(k) &= [u_1(k), u_2(k), \dots, u_n(k)]^T, \\ Y_m(k) &= [y_{m1}(k), y_{m2}(k), \dots, y_{mn}(k)]^T. \end{aligned}$$

由式(4)可以递推得到模型第 $k+P$ 时刻的输出

$$\begin{aligned} X_m(k+1) &= A_m X_m(k) + B_m u(k), \\ X_m(k+2) &= \\ & A_m^2 X_m(k) + A_m B_m u(k) + B_m u(k+1), \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_m(k+P) &= \\ & A_m^P X_m(k) + \sum_{i=1}^P A_m^{P-i} B_m u(k+i-1), \\ Y_m(k+P) &= C_m X_m(k+P) = \\ & C_m A_m^P X_m(k) + C_m \sum_{i=1}^P A_m^{P-i} B_m u(k+i-1). \end{aligned}$$

将模型未来 P 个时刻的预测输出合并到一起,可以得到

$$Y(k) = Q_1 X(k) + Q_2 U(k). \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} Y(k) &= [Y_m(k+1), \dots, Y_m(k+P)]^T, \\ X(k) &= [X_m(k+1), \dots, X_m(k+P)]^T, \\ U(k) &= [U_1(k), \dots, U_n(k)]^T, \\ U_1(k) &= [u_1(k), \dots, u_1(k+P-1)]^T, \\ U_n(k) &= [u_n(k), \dots, u_n(k+P-1)]^T, \\ Q_1 &= [C_m A, \dots, C_m A^P]^T, \end{aligned}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} C_m B_m & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m A_m^{P-1} B_m & C_m A_m^{P-2} B_m & \dots & C_m B_m \end{bmatrix}.$$

同时,若想使改进后的算法在工程中具有应用价值,还应该考虑物理执行机构的实际情况,加入控制量的约束. 本文对控制量的输出和变化速率进行限制,控制量的约束可以写为

$$\begin{cases} U^{\min}(k) \leq U(k) \leq U^{\max}(k), \\ \Delta U^{\min}(k) \leq \Delta U(k) \leq \Delta U^{\max}(k). \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} U^{\min}(k) &= [U_1^{\min}(k), \dots, U_n^{\min}(k)]^T, \\ U^{\max}(k) &= [U_1^{\max}(k), \dots, U_n^{\max}(k)]^T, \\ \Delta U^{\min}(k) &= [\Delta U_1^{\min}(k), \dots, \Delta U_n^{\min}(k)]^T, \\ \Delta U^{\max}(k) &= [\Delta U_1^{\max}(k), \dots, \Delta U_n^{\max}(k)]^T. \end{aligned}$$

为了获得MPC-PID的控制律,需要将式(3)化简为如下标准二次型的形式:

$$\begin{aligned}
 J(k) = & K_p(W' - Q_1X - Q_2U)^T Q(W' - Q_1X - Q_2U) + \\
 & K_i(W - Q_1X - Q_2U)^T Q(W - Q_1X - Q_2U) + \\
 & K_d(W'' - Q_1X - Q_2U)^T Q(W'' - \\
 & Q_1X - Q_2U) + U^T RU. \tag{7}
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 W &= W(k) - Y(k), \\
 W' &= W(k) - W(k-1) - Y(k-1), \\
 W'' &= W(k) - 2[Y(k) - W(k-1)] + \\
 & W(k-2) - Y(k-2).
 \end{aligned}$$

继续推导,同时为了简化书写,省略公式中各符号中的 k ,可以将式(7)化简为

$$\begin{aligned}
 J(k) = & U^T RU + K_p(W' - Q_1X)^T Q(W' - Q_1X) - \\
 & 2K_p(W' - Q_1X)^T Q Q_2 U + K_p U^T Q Q_2 U + \\
 & K_i(W - Q_1X)^T Q(W - Q_1X) + K_i U^T Q Q_2 U - \\
 & 2K_i(W - Q_1X)^T Q Q_2 U + \\
 & K_d(W'' - Q_1X)^T Q(W'' - Q_1X) - \\
 & 2K_d(W'' - Q_1X)^T Q Q_2 U + K_d U^T Q Q_2 U. \tag{8}
 \end{aligned}$$

式(8)中,第2,5,8项在 k 时刻是已知项,与优化无关,可以从性能指标中除去.综合式(6)和(8),求解控制律的问题可以转换为如下标准的二次规划问题:

$$\begin{aligned}
 \min J &= \frac{1}{2} x^T H x + c^T x, \\
 \text{s.t. } Fx &\leq d. \tag{9}
 \end{aligned}$$

其中: x 为待求解的量, $x = \Delta U$;

$$\begin{aligned}
 F &= [1, -1, 1, -1]^T; \\
 H &= 2[(K_p + K_i + K_d)Q_2^T Q Q_2 + R]; \\
 c^T &= -2[K_p(W' - Q_1X)^T + K_i(W - Q_1X)^T + \\
 & K_d(W'' - Q_1X)^T] Q Q_2; \\
 d &= [U^{\max}(k) - U(k-1), -U^{\min}(k) + U(k-1), \\
 & \Delta U^{\max}(k), -\Delta U^{\min}(k)].
 \end{aligned}$$

最后,利用有效集法^[10]求解式(9)描述的标准二次规划问题,可以最终获得MPC-PID算法的控制律.

3.2 多模型预测控制

磨煤机是强非线性系统,不同工况下模型结构参数变化大.为了提高在多工况下的控制精度,本文基于上一小节推导的MPC-PID算法,设计了制粉系统多模型预测控制方案.方案的具体实施步骤是:首先利用模糊减法聚类法^[13]对制粉系统的历史运行数据进行统计分析,选定系统的典型运行工况;然后在每个典型工况点下对非线性模型进行线性化,得到较为精确的局部线性化模型,并设计相应的MPC-PID控

制器;最后实时计算模型当前运行工况与典型工况间的距离,并加权输出控制量,如图1所示.

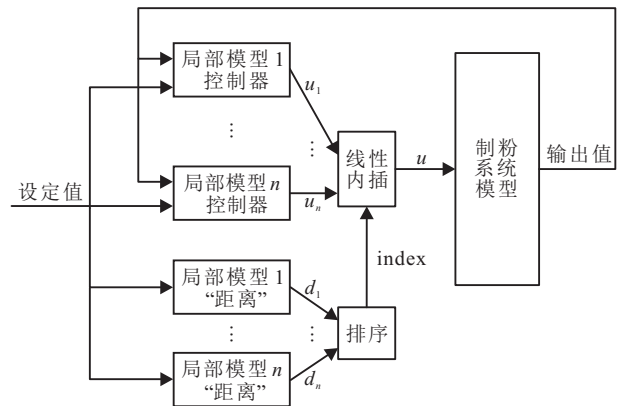


图1 多模型预测控制框图

计算模型当前运行工况与典型工况间的距离 d 如下所示:

$$\begin{aligned}
 d_i = & \sqrt{\left\| \frac{W_{\text{air}} - W_{\text{air}}^i}{W_{\text{air}}} \right\|^2 + \left\| \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{out}}^i}{T_{\text{out}}} \right\|^2 + \left\| \frac{W_{\text{pf}} - W_{\text{pf}}^i}{W_{\text{pf}}} \right\|^2}, \\
 & i = 1, 2, \dots, n. \tag{10}
 \end{aligned}$$

其中: W_{air} 、 T_{out} 和 W_{pf} 分别为实际工作点下一次风流量、磨出口温度、磨出口煤粉流量的设定值; W_{air}^i 、 T_{out}^i 和 W_{pf}^i 分别为典型工况下一次风流量、磨出口温度、磨出口煤粉流量的设计值.

控制量 u 的最终输出由下式计算得出:

$$u = \frac{d_2}{d_1 + d_2} u_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} u_2. \tag{11}$$

其中: d_1 和 d_2 分别为实际工作点与各控制器设计工作点间的最近和次近距离; u_1 和 u_2 为对应控制器的输出.

综上所述,本文设计了制粉系统抗模型参数扰动的多模型预测控制方案,控制原理如图2所示.

1) 制粉系统抗扰动的MPC-PID算法. 本文将基于状态空间的预测控制同PID的反馈结构相结合,用增量式结构对预测控制的目标函数进行改进,使得推导的算法具备广义上的比例、积分、微分特征.

2) 制粉系统多模型预测控制. 在典型工况点下对制粉系统模型进行线性化,并在每个工况下都单独设计了相应的MPC-PID控制器,控制器的输入包括一次风流量设定值、磨出口温度设定值、磨出口煤粉流量设定值以及上述3个被控量的过程反馈值.

3) 模型和控制器的自适应更新. 磨煤机结构改造、物理损耗等因素可能引起实际制粉系统特性发生变化,偏离设计控制器时采用的模型. 因此需要根据实际对象与模型的匹配程度计算模型的可信度,并作为模型和控制器更新的主要依据.

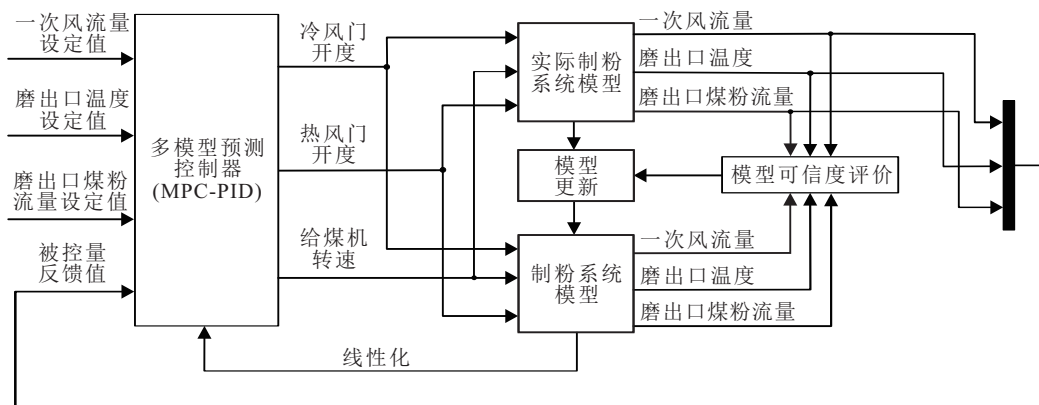


图2 制粉系统抗扰动的多模型预测控制框图

4 仿真分析

以国电乐东电厂MPS180-HP-II型中速磨煤机为研究对象,其设计最大出力为44.496 t/h,煤粉细度R₉₀ = 22.对该厂磨煤机A的历史运行数据采用模糊减法聚类法进行分类,可以获得5个典型工况(如表3所示),并分别在各个工况下设计相应的MPC-PID控制器和MPC控制器.

表3 典型工况分类

| | 一次风 流量/(kg·s ⁻¹) | 磨出口 温度/°C | 煤粉 流量/(kg·s ⁻¹) |
|-----|---------------------------------|--------------|--------------------------------|
| 工况1 | 18.875 | 73.081 | 7.416 |
| 工况2 | 22.021 | 72.686 | 8.652 |
| 工况3 | 24.603 | 71.977 | 9.667 |
| 工况4 | 26.739 | 70.735 | 10.506 |
| 工况5 | 28.312 | 69.806 | 11.124 |

根据经验设定算法的相关参数:各预测控制器的预测步长 $P = 10$,控制步长 $M = 5$;冷热风门的输出限幅应满足阀门实际开度情况,设为0%~100%;给煤机转速的输出限幅应满足磨煤机最大出力,设为0~44.496 t/h;控制量速率变化 ΔU 为-0.5~0.5;PID的参数设置为 $k_p = 10, k_i = 0.3, k_d = 0.1$;采样时间 $T_s = 1$ s.为了验证制粉系统抗扰动预测控制算法的有效性,本文进行3组仿真实验,具体流程如下.

首先,验证多模型预测控制方案的有效性.磨煤机系统稳定运行一段时间后,改变模型的结构参数,使实际模型偏离原有的设计工况,观察各被控量的输出曲线,如图3所示.

从图3可以看出,当模型偏离设计工况时,采用单一控制器控制下的模型输出曲线出现了波动,甚至偏离设定值,而基于多模型预测控制下的模型输出曲线几乎没有受到影响,表明多模型预测控制方案能够提高多工况下的控制精度.

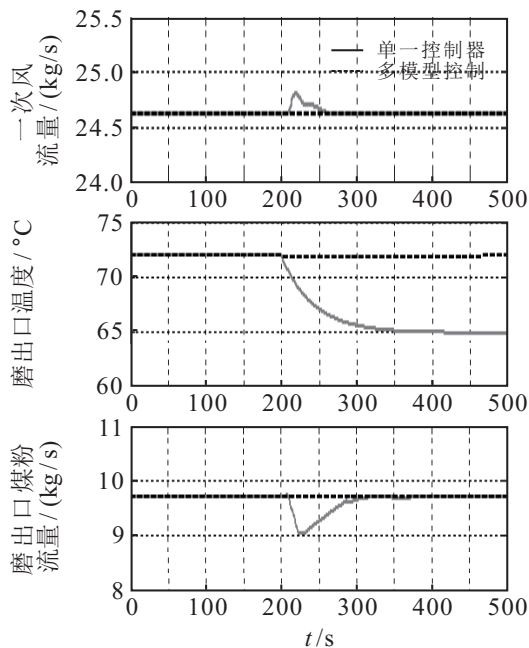


图3 单一控制器与多模型控制器的控制对比

然后,进行煤水分扰动实验.在系统运行第200s时,原煤水分 M_{ar} 由19.2%阶跃变化至25%,模型控制量的变化曲线如图4(a)所示,各被控量的输出曲线如图4(b)~图4(d)所示.

分析图4的仿真结果可知,原煤水分突然增加,导致磨出口温度下降,此时冷风门开度逐渐减小甚至为零,热风门开度逐渐开大,调节磨出口温度逐渐恢复到原设定值.当磨出口温度快要接近原设定值时,因为MPC-PID算法中存在比例的作用,能够及时减小热风门开大的速度,使磨出口温度的控制更加平稳,没有出现超调.而单独采用MPC控制时,控制器对偏差量减小的敏感程度不足,此时并没有及时减小开门速度,随后又出现反向关小热风门的情况,导致了磨出口温度的大幅超调.同时,基于MPC-PID算法控制的调节过程中,热风门开度没有出现反调,因而一次风流量的控制也更为平稳,并未出现单独采用MPC控制下的振荡调节过程.对于磨出口煤粉流量

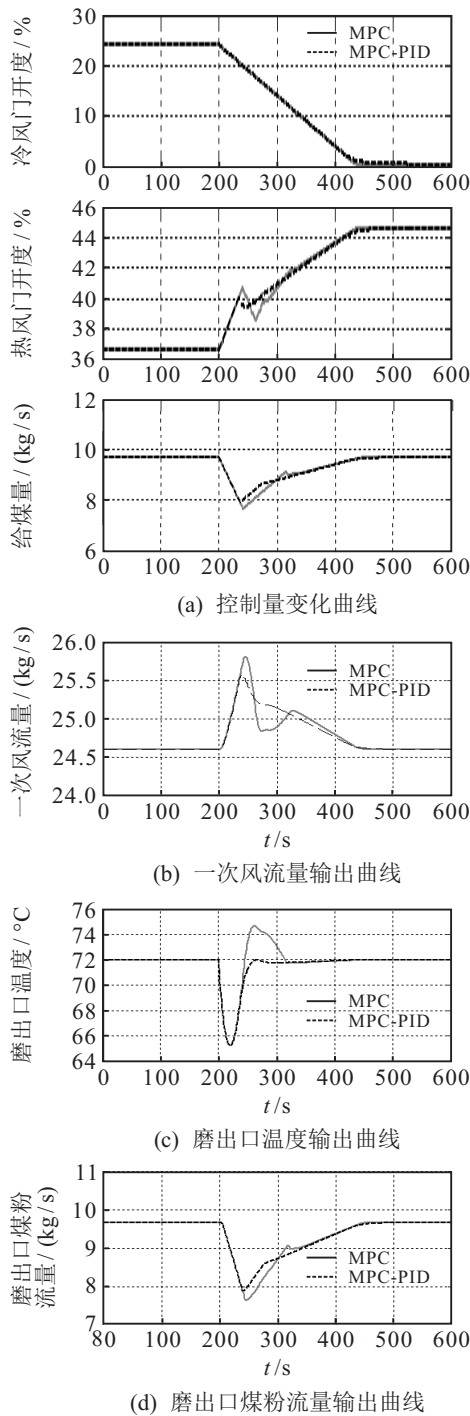


图4 煤水分扰动下的仿真结果

的控制, MPC-PID算法控制器能够使给煤机提早动作,在一定程度上克服一次风流量变化对磨出口煤粉流量的影响. 综上分析,当原煤水分发生扰动时,基于MPC-PID算法设计的控制器能够克服模型失配的影响,从被控量曲线的动态调节过程来看,减小了一次风流量和磨出口温度的波动,对于一次风的精确配风有重要意义.

从表4还可以看出,采用本文设计的算法进行控制,各被控量的平均控制误差更小,说明控制的准确性也优于MPC控制.

表4 原煤水分扰动时各被控量的平均控制误差

| 方法 | 一次风流量 | 磨出口温度 | 煤粉流量 |
|---------|-------|-------|-------|
| GPC | 0.243 | 0.836 | 0.765 |
| GPC-PID | 0.232 | 0.601 | 0.611 |

最后,进行模型变工况扰动实验. 制粉系统具有强非线性特征,运行工况不同,系统的模型参数差别很大. 当模型稳定运行在工况1时,将模型被控量的设定值大幅度变化至工况5下对应的数值,模型控制量的变化曲线和各被控量的输出曲线如图5所示(控制算法的参数设置同上一个仿真实验).

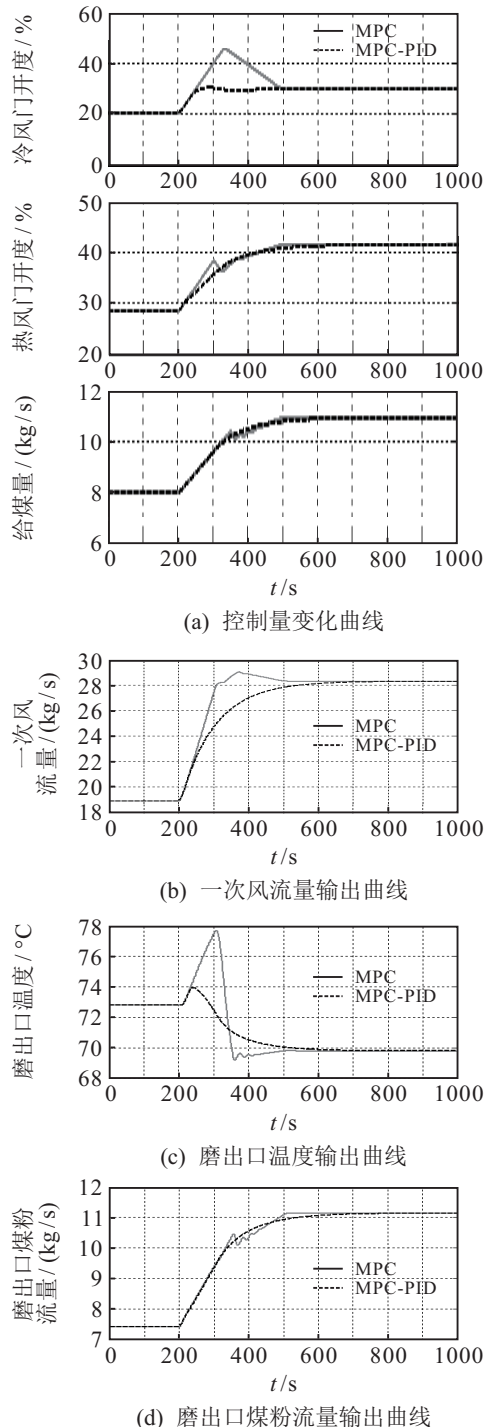


图5 大范围变工况下的仿真结果

当制粉系统运行工况发生大范围变动时,模型的结构参数势必发生较大变化.为提高模型的控制精度,本文设计了多模型预测控制方案,在各个工况点下单独设计控制器.从图5的仿真结果可以看出,基于MPC控制下的模型输出曲线虽然能够稳定,但动态调节过程存在超调大、来回波动等问题;而基于MPC-PID控制的各被控量动态调节过程更加平稳,有效避免了控制器在调节过程中出现来回波动的情况,对于磨煤机煤粉出力的稳定控制和一次风的精确配风有重要意义.

5 结论

本文针对制粉系统的强耦合、非线性、大延迟特性,在综合考虑制粉系统中各被控量历史输出和预测输出的基础上,提出了一种基于MPC-PID的抗扰动控制算法,并根据此算法设计了多模型预测控制方案.仿真结果表明,所提方案具有优良的鲁棒性和抗扰性,能够快速平稳地克服外部扰动和内部扰动带来的影响,实现制粉系统经济稳定的运行.同时,该方案还能够实现实时在线优化,对于制粉系统的工业过程生产具有一定的实际借鉴意义.

本文所设计的制粉系统抗扰动预测控制算法也存在不足,尤其是算法参数的确定缺乏理论依据,有待进一步完善.

参考文献(References)

- [1] 程启明,王勇浩.火电厂中间储仓式球磨机制粉系统控制技术综述[J].上海电力学院学报,2006,22(1):48-54.
(Cheng Q M, Wang Y H. The overview on the development of control techniques on intermediate storage bunker ball mill pulverizing system of power plant[J]. J of Shanghai University of Electric Power, 2006, 22(1): 48-54.)
- [2] 王介生,王伟.球磨机制粉系统参数自整定PID解耦控制器[J].控制工程,2007,14(2):135-139.
(Wang J S, Wang W. Self-tuning PID decoupling controller of ball mill pulverizing system[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(2): 135-139.)
- [3] 程启明,郑勇.球磨机多模型PID型神经网络控制系统[J].中国电机工程学报,2008,28(2):103-109.
(Cheng Q M, Zheng Y. Control system of multi-model PID neuron network for ball mill[J]. Proc of the CSEE, 2008, 28(2): 103-109.)
- [4] 程启明,程尹曼,郑勇,等.基于模糊径向基神经网络的PID算法球磨机控制系统研究[J].中国电机工程学报,2009,29(35):22-28.
(Cheng Q M, Zheng Y M, Zheng Y, et al. PID control system for ball mill based on fuzzy radial basis function neural network[J]. Proc of the CSEE, 2009, 29(35): 22-28.)
- [5] 温玄,王培东,张海英.中储式球磨机制粉系统控制器设计[J].哈尔滨理工大学学报,2010,14(2):47-50.
(Wen X, Wang P D, Zhang H Y. Design of complex controller for ball coal-milling[J]. J of Harbin University of Science and Technology, 2010, 14(2): 47-50.)
- [6] 孙杰,韩艳,段勇,等.基于改进的PSO算法的球磨机PID神经网络控制系统[J].工矿自动化,2011,37(5):59-62.
(Sun J, Han Y, Duan Y, et al. PID neural network control system of ball mill based on modified PSO algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(5): 59-62.)
- [7] 周洪煜,张振华,陈晓锋.中速直吹磨组径向基函数神经网络信息融合-模糊启动控制[J].中国电机工程学报,2011,31(11):119-125.
(Zhou H Y, Zhang Z H, Chen X F. Radial basis function neural network-data fusion and fuzzy control during direct-firing medium-speed mill's start-up[J]. Proc of the CSEE, 2011, 31(11): 119-125.)
- [8] 樊第.多模型广义预测解耦控制[D].合肥:中国科学技术大学,信息科学技术学院,2010.
(Fan D. Decoupling generalized predictive control using multiple models[D]. Hefei: School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, 2010.)
- [9] 薛美盛,樊弟,魏衡华.多变量系统的广义预测控制解耦设计[J].控制工程,2011,18(1):39-42.
(Xue M S, Fan D, Wei H H. Decoupling design of generalized predictive control for multivariable systems[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(1): 39-42.)
- [10] 席裕庚.预测控制[M].第2版.北京:国防工业出版社,2013.
(Xi Y G. Predictive control[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.)
- [11] 曾德良,高珊,胡勇.MPS型中速磨煤机建模与仿真[J].动力工程学报,2015,35(1):55-61.
(Zeng D L, Gao S, Hu Y. Modeling and simulation of MPS medium speed coal mills[J]. J of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(1): 55-61.)
- [12] 门洪,李项楠,史冬琳.P-隐式广义预测控制在球磨机制粉系统中的应用[J].化工自动化及仪表,2013,40(6):734-737.
(Men H, Li X N, Shi D L. Proportional implicit GPC control in ball pulverizing system[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(6): 734-737.)
- [13] 陈绍炳,张铁军,徐治,等.基于机理分析的球磨机系统动态模糊建模方法[J].中国动力工程学报,2005,25(2):244-248.
(Chen S B, Zhang T J, Xu Z, et al. A dynamic fuzzy modelling method for ball pulverizing systems based on mechanism analysis[J]. Chinese J of Power Engineering, 2005, 25(2): 244-248.)