

DOI: 10.7652/xjtuxb201910013

火力发电锅炉主汽温控制系统 的动态矩阵控制策略

章家岩, 高锦, 冯旭刚

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 243032, 安徽马鞍山)

摘要: 针对火力发电锅炉主汽温控制系统的大惯性、纯滞后和非线性等特点, 提出一种基于动态矩阵控制的主汽温预测控制策略。根据过热蒸汽传输通道特性, 将减温水流量扰动作为前馈补偿; 综合考虑机组负荷、燃料波动等扰动因素设计动态矩阵控制器; 采用有限时段的滚动优化策略, 并引入基于误差的反馈校正算法, 从而能全面考虑模型失配、时变、干扰等引起的不确定性, 及时弥补这些因素造成的影响, 提高系统的鲁棒性。仿真结果表明: 与常规 PID 和 Smith 预估控制策略相比, 在施加扰动情况下所设计的控制策略调节时间最多可减少 314.28 s, 超调量最多可降低 12.6%; 在模型失配情况下调节时间最多可减少 516.66 s, 超调量最多可降低 15.46%。工程应用结果表明: 主汽温控制偏差低于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$, 动态和稳态性能得到了很大改善, 能有效满足发电锅炉主汽温控制系统的实际要求。

关键词: 火力发电锅炉; 主汽温; 动态矩阵控制; 滚动优化

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0096-07

Main Steam Temperature Control of Thermal Power Boiler Based on Dynamic Matrix Control

ZHANG Jiayan, GAO Jin, FENG Xugang

(College of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China)

Abstract: A predictive control strategy of main steam temperature based on dynamic matrix control is proposed and the characteristics of large inertia, pure lag and nonlinearity of main steam temperature control for thermal power boilers are taken into account. According to the characteristics of superheated steam transmission channel, the disturbance of cooling water flow is used as feed-forward compensation. A dynamic matrix controller is designed by comprehensive consideration of disturbance factors such as unit load, fuel fluctuation and so on. The algorithm adopts a rolling optimization strategy with finite time interval and introduces an error-based feedback correction algorithm so that uncertainties caused by model mismatch, time-varying and interference are comprehensively considered, and the influence caused by these factors is compensated in time, so as to improve the robustness of the system. Simulation experiments and comparisons with the conventional PID and Smith control strategies show that the adjust time and the overshoot of the proposed strategy reduce by up to 314.28 s and 12.6% respectively under disturbance, and by up to 516.66 s and 15.46% under the case of model mismatch. Results of

收稿日期: 2019-02-27。 作者简介: 章家岩(1963—),男,教授;冯旭刚(通信作者),男,副教授。 基金项目: 安徽省重点研究与开发计划资助项目(1804a09020094);安徽省高校自然科学研究重点资助项目(KJ2018A0054;KJ2018A0060)。

网络出版时间: 2019-07-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190723.1523.004.html>

engineering applications show that the deviation of main steam temperature control is less than $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and both the dynamic and steady-state performances are greatly improved. Actual requirements of the main steam temperature control system of power generation boilers are effectively met.

Keywords: thermal power boiler; main steam temperature; dynamic matrix control; rolling optimization

主汽温是火力发电锅炉燃烧系统控制过程中的一个重要被控参数,温度过高会导致受热的水冷壁和联箱、联通管道等金属部件变形,强度降低,寿命缩短,而温度过低会增大汽轮机的末级叶片湿度,使其过负荷运行,从而降低机组运行的经济性^[1-3]。主汽温具有时变、非线性和大滞后等特性,这使得对其控制难度加大,因此如何快速、准确地控制主汽温已经成为发电锅炉燃烧控制系统的一项重要研究任务。

目前,锅炉生产工业一般采用两级喷水减温器和常规 PID 串级控制策略来调节主汽温,但是在机组实际运行过程中,一些扰动因素^[4],例如减温水流量的波动、蒸汽流量、燃料流量和压力的变化,都会引起主汽温的变化。常规 PID 模型对参数变化不大的系统具有良好的控制效果,但是当被控对象受到外界干扰而导致模型不确定时,PID 控制器的比例、微分和积分增益若固定不变,将很难达到良好的控制效果^[5-7]。目前国内外学者针对主汽温控制问题也开展了一些研究工作,例如神经模糊-PID 控制^[8]、自适应 Smith 预估控制^[9]以及预测控制^[10]策略等。文献[8]设计了一种基于神经模糊模型的火电机组主汽温自适应 PID 控制策略,这种控制策略调节时间快,主汽温也比较平稳;文献[9]采用自适应 Smith 预估控制策略对主汽温控制系统进行了优化,提高了系统的响应性,增加了鲁棒性;文献[10]针对热电厂主汽温这一重要的参数,提出了带有约束性预测的控制策略,并进行了仿真。由于主汽温控制对象具有较大的不确定性,系统模型参数变化较大,因此使用上述策略会因模型失配而导致控制效果不佳。

本文提出了基于动态矩阵控制(DMC)的主汽温预测控制策略,将 DMC 控制器加入主汽温串级控制系统的主回路中,实时校正主汽温输出值,同时综合考虑负荷、燃料蒸汽流量等干扰,并与 PID 和 Smith 预估控制策略进行鲁棒性和抗干扰性比较。在此基础上,以某钢厂 150 t 发电锅炉为对象进行运行控制,达到了良好的控制效果。

1 主汽温控制系统特性

主汽温控制系统由汽包、一级过热器、屏式过热器、二级过热器和两级喷水减温器组成,如图 1^[11]所示。采用两级减温器结构对末级出口主汽温进行控制,一级减温器置于一级过热器出口和屏式过热器入口之间,二级减温器则置于屏式过热器出口和二级过热器入口之间。其中一级减温器喷水量较大,起粗调汽温作用,二级减温器起细调作用,使主汽温稳定在设定值附近,提高系统灵敏度,从而保护高温过热器的安全运行,而且两级控制段均采用独立单回路常规控制方式。

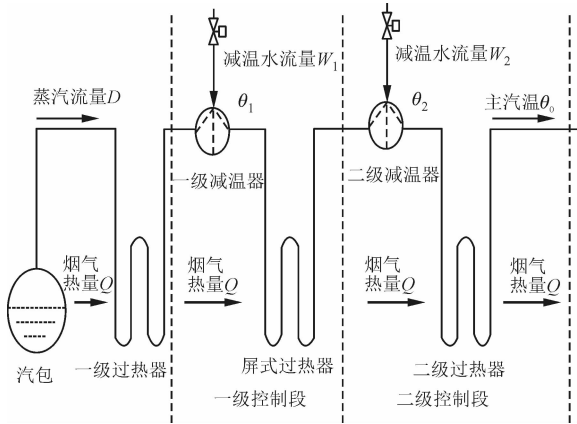


图 1 主汽温控制系统生产流程

根据过热蒸汽传输通道上的顺序,以喷水减温器为分界点,将过热器的控制通道分为过热汽温导前区和过热汽温滞后区,其结构如图 2 所示。

由文献[11]可知,导前区、惰性区的动态特性的

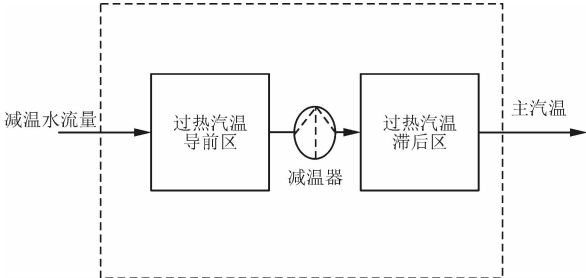


图 2 主汽温的控制通道方框

数学模型的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\theta_2(s)}{W_2(s)} = \frac{K_1}{(1+T_2s)^{n_1}} \\ G_2 &= \frac{\theta_0(s)}{\theta_2(s)} = \frac{K_2}{(1+T_1s)^{n_2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\theta_0(s)$ 为过热器出口蒸汽温度； $\theta_2(s)$ 为减温器出口蒸汽温度； $W_2(s)$ 为减温水流量。

2 主汽温 DMC 控制策略

DMC 控制一般由预测模型、滚动优化和反馈校正^[12-14]3部分组成。本文采用 DMC 控制策略,如图3所示,用主汽温实际输出值与预测模型得到的预测值两者之间的差值对系统进行反馈校正,反馈校正后的主汽温与设定值进行比较、优化,从而调节主汽温达到设定值附近。同时,将减温水干扰作为前馈补偿,当发生减温水流量扰动时,两个减温水流量阀会迅速做出反应,与前馈干扰补偿一起消除干扰,改善主汽温控制效果。

2.1 预测模型

DMC 控制策略采用阶跃响应数据建立预测模型,通过在锅炉现场进行阶跃响应实验,得到采样值 $a_i=a(iT), i=1,2,\cdots,N$,其中 T 为采样周期。根据线性系统叠加的原理,可以由给定的输入控制增量预测系统未来时刻的输出,从而得到系统的输出模型。在 k 时刻,假设控制作用保持不变时对未来 N 个时刻的主汽温输出有初始预测值 $\hat{y}_0(k+i|k)$, $i=1,2,\cdots,N,N$ 为建模时域,则当 k 时刻有一控制增量 $\Delta u(k)$ 时,在其作用下未来时刻的主汽温输出为

$$\hat{y}_1(k+i|k) = \hat{y}_0(k+i|k) + a_i \Delta u(k),$$

$$i=1,2,\cdots,N \quad (2)$$

同样,在 M 个连续的控制增量 $\Delta u(k), \cdots, \Delta u(k+M-1)$ 作用下未来各时刻的主汽温输出为

$$\begin{aligned} \hat{y}_M(k+i|k) = & \hat{y}_0(k+i|k) + \sum_{j=1}^{\min(M,i)} a_{i-j+1} \Delta u(k+j-1), \\ & i=1,2,\cdots,N \end{aligned} \quad (3)$$

式中： M 为控制时域。显然,在任一时刻 k ,只要知道对象的输出初始预测值 $\hat{y}_0(k+i|k)$,就可以根据未来的增量由预测模型(3)计算出未来时刻的主汽温输出。

2.2 滚动优化

DMC 控制策略是为了在主汽温控制系统作用下未来 P 个时刻的输出预测值 $\hat{y}_M(k+i|k)$ 尽可能地接近给定的锅炉主汽温期望值 $w(k+i), i=1,\cdots,P,P$ 为优化时域。

为了让 $\hat{y}_M(k+i|k)$ 与 $w(k+i)$ 尽可能地接近,令 $\hat{y}_M(k+i|k)$ 与 $w(k+i)$ 的偏差或偏差的平方为最小;在主汽温控制中不希望控制增量 $\Delta u(k+i)$ 变化过于激烈,以免引起控制系统的运动过于剧烈,因此在控制过程中, k 时刻的优化性能指标取为

$$\begin{aligned} \min J(k) = & \sum_{i=1}^P q_i [\omega(k+i) - \\ & \hat{y}_M(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u^2(k+j-1) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： q_i, r_j 是加权系数,它们分别表示对跟踪误差及控制作用变化的抑制。为了求解性能指标式(4)最小的问题,首先从预测模型(3)导出性能指标中 $\hat{y}$ 与 Δu 的关系,这一关系可用向量形式写成

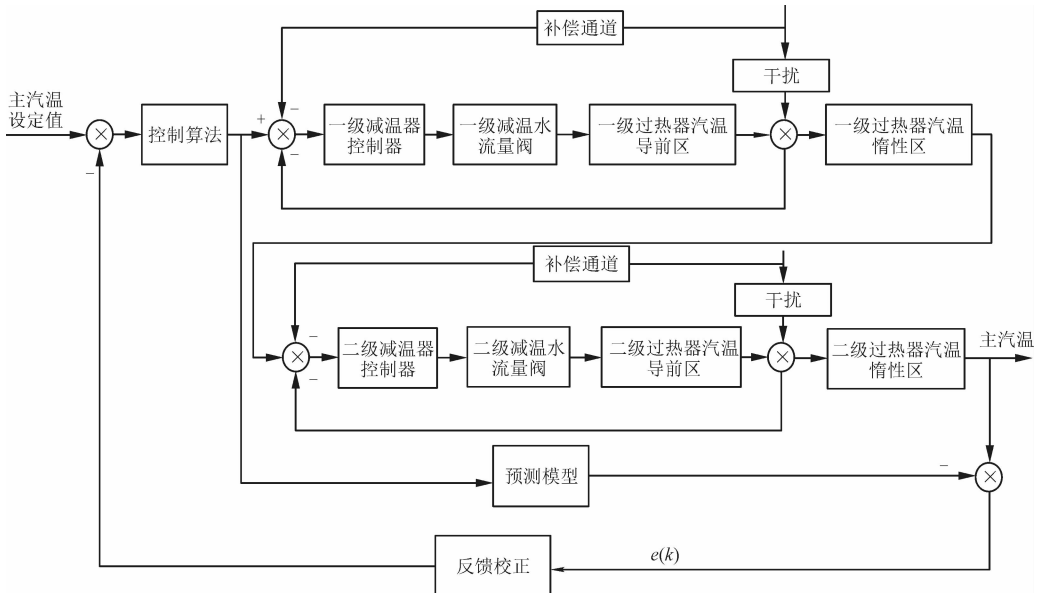


图 3 主汽温 DMC 控制策略

$$\hat{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \hat{\mathbf{y}}_{p0}(k) + \mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_M(k) \quad (5)$$

式中

$$\hat{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{y}}_{p0}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_M & \cdots & a_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_P & \cdots & a_{P-M+1} \end{bmatrix}$$

同样,性能指标式(4)也可以写成向量形式

$$\min \mathbf{J}(k) = \|\mathbf{w}_P(k) - \hat{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_{\mathbf{R}}^2 \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{w}_P(k) = [\mathbf{w}(k+1), \dots, \mathbf{w}(k+P)]^T$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(q_1, \dots, q_P)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, \dots, r_M)$$

$\mathbf{Q}$ 是误差加权矩阵, $\mathbf{R}$ 是控制作用加权矩阵。将式(5)代入式(6)中,可以得出

$$\min \mathbf{J}(k) = \|\mathbf{w}_P(k) - \hat{\mathbf{y}}_{p0}(k) - \mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta\mathbf{u}_M(k)\|_{\mathbf{R}}^2 \quad (7)$$

在 k 时刻, $\mathbf{w}_P(k)$ 、 $\hat{\mathbf{y}}_{p0}(k)$ 均是已知的,因此 $\Delta\mathbf{u}_M(k)$ 可通过极值的必要条件 $d\mathbf{J}(k)/d\Delta\mathbf{u}_M(k) = 0$ 求得

$$\Delta\mathbf{u}_M(k) = (\mathbf{A}^T\mathbf{Q}\mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{Q}[\mathbf{w}_P(k) - \hat{\mathbf{y}}_{p0}(k)] \quad (8)$$

它给出了 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 的最优值,但是 DMC 控制策略只是取其中的控制作用增量 $\Delta u(k)$ 构成实际控制, $\Delta u(k)$ 是 $\Delta\mathbf{u}_M(k)$ 的首元素,可以表示为

$$\Delta u(k) = \mathbf{c}^T\Delta\mathbf{u}_M(k) = \mathbf{d}^T[\mathbf{w}_P(k) - \hat{\mathbf{y}}_{p0}(k)]$$

式中

$$\mathbf{c}^T = [1, 0, \dots, 0]$$

$$\mathbf{d}^T = \mathbf{C}^T(\mathbf{A}^T\mathbf{Q}\mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{Q} \triangleq [d_1, \dots, d_n] \quad (9)$$

在求出控制增量 $\Delta u(k)$ 后,实际控制量为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (10)$$

将 $u(k)$ 作用于对象, $k+1$ 时刻求出 $\Delta u(k+1)$, 进一步求出 $u(k+1)$ 作用于对象,如此滚动进行。

当把 $u(k)$ 作用于主汽温的生成过程,根据式(3)可以在 k 时刻进行对 $k+i$ 时刻的主汽温的预测,其预测值为

$$\hat{y}_{N1}(k+i|k) = \hat{y}_{N0}(k+i|k) + a_i\Delta u(k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

2.3 反馈校正

在主汽温控制系统中,由于环境干扰等不确定因素的存在,预测得出的结果有可能偏离实际值,因此为进一步提高主汽温控制系统的稳定性,克服不可预测干扰的影响,需要对预测输出进行反馈校正。将主汽温的实际输出 $y(k+1)$ 与计算出来的主汽温预测值 $\hat{y}_1(k+1|k)$ 相减,得到输出误差

$$e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1|k) \quad (12)$$

可以利用对 $e(k+1)$ 加权的方式来预测未来的输出,设定

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) = \hat{\mathbf{y}}_{N1}(k) + \mathbf{h}e(k+1) \quad (13)$$

式中: $\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) = \begin{bmatrix} \hat{y}_{\text{cor}}(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \hat{y}_{\text{cor}}(k+N|k+1) \end{bmatrix}$ 是经过校正

的主汽温输出预测向量; $\mathbf{h} = [h_1, \dots, h_N]$ 是反馈校正向量。

在 $k+1$ 时刻,由于时间基点的变动,预测未来时间点也将移动到 $k+2, \dots, k+1+N$, 因此 $k+1$ 时刻的初始预测值可以通过校正后的预测向量 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1)$ 移位得到

$$\hat{\mathbf{y}}_{N0}(k+1) = \mathbf{S}\hat{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) \quad (14)$$

式中 $\mathbf{S}$ 为主汽温控制的移位矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & & 0 \\ & & & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

求解出 $\hat{\mathbf{y}}_{N0}(k+1)$ 后,就可以按照 DMC 控制策略反复进行计算。

3 主汽温控制系统仿真分析

根据主汽温控制系统的特性可知^[15],其被控对象的数学模型是不确定的,并且当负荷不同时,系统被控制对象的数学模型也会发生变化。为了检验 DMC 控制策略在火力发电锅炉主汽温系统中的控制效果,本文以某钢厂 150 t 燃气锅炉主汽温控制系统为研究对象,主汽温设定值为 485 °C,分别采集该厂 4 种不同负荷下的运行数据,利用最小二乘法分别辨识出导前区和惰性区的传递函数,结果见表 1。

为了达到良好的控制效果,根据文献[16]DMC 控制策略参数整定的方法,选取如下的 DMC 控制参数:采样周期 $T=1$ s,建模时域 $N=500$,优化时域 $P=400$,控制时域 $M=4$,误差加权矩阵 $\mathbf{Q}$ 为 $P \times P$ 的单位矩阵,控制加权矩阵 $\mathbf{R}$ 为 $M \times M$ 的单

位矩阵, $\mathbf{h}=[1,\cdots,1]_{1\times N}$, 经过试凑法得出 PID 参数见表 2。选取 44% 负荷和 100% 负荷为例, 采用 Matlab 软件从模型精确和模型失配两种情况进行仿真^[17-18], 来检测 DMC 控制策略在主汽温控制系统中的鲁棒性和抗干扰能力。

表 1 4 种典型负荷下的被控对象传递函数

负荷/%	被控对象传递函数	
	导前区	惰性区
44	$-\frac{8.07}{(24s+1)^2}$	$\frac{1.48}{(46.6s+1)^4}$
62	$-\frac{2.84}{(25.5s+1)^2}$	$\frac{1.12}{(45.2s+1)^4}$
88	$-\frac{1.65}{(20s+1)^2}$	$\frac{1.18}{(32.4s+1)^4}$
100	$-\frac{0.82}{(17.6s+1)^2}$	$-\frac{0.82}{(17.6s+1)^4}$

表 2 44% 和 100% 负荷下的 PID 参数

负荷/%	k_p	k_i	k_d
44	0.120 4	0.001 4	7.11
100	0.080 5	0.002 6	2.97

为了观察 DMC 控制策略的抗干扰效果, 本文在模型精确的情况下, 系统运行 1 000 s 时加入幅值为 20% 的阶跃干扰, 比较常规 PID、Smith 和 DMC 控制策略的抗干扰的效果, 在两种不同负荷下加入干扰的仿真曲线如图 4、5 所示。从图 4 可以看出: 当加入干扰后, 在 44% 负荷情况下 DMC 控制策略主汽温控制系统的调节时间为 424.24 s, 超调量为 7.67%; 常规 PID 策略调节的时间为 651.51 s, 超调量为 17.98%; Smith 预估策略调节的时间为 636.37 s, 超调量为 20.27%。从图 5 可以看出: 在 100% 负荷下 DMC 控制策略主汽温控制系统的调节时间为 257.14 s, 超调量为 11.58%; 常规 PID 策略调节的时间为 571.42 s, 超调量为 20.3%; Smith

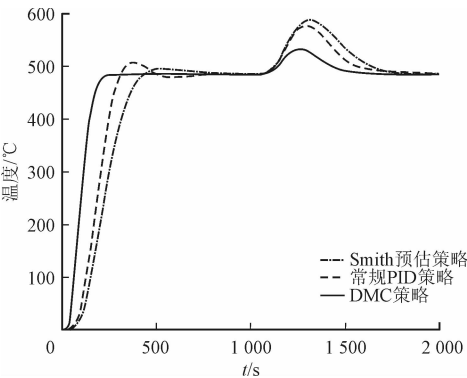


图 4 44% 负荷时加入扰动后 3 种控制策略仿真波形

预估控制策略调节时间为 357.14 s, 超调量为 22.56%。由此可见, DMC 控制策略的主汽温控制系统的抗干扰能力明显优于常规 PID 控制和 Smith 预估控制策略。

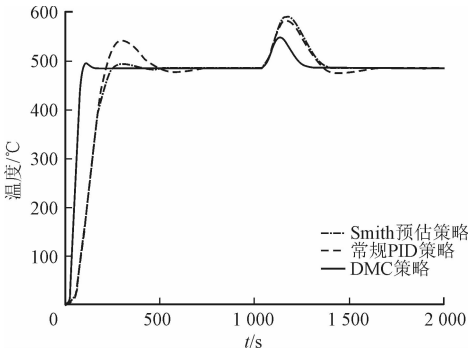


图 5 100% 负荷时加入扰动后 3 种控制策略仿真波形

主汽温控制系统的数学模型参数会随着机组的变化而变化, 而且现场许多原因也会改变主汽温控制系统的数学模型, 从而要求控制系统具有很强的鲁棒性。本文分别对增大惰性区的传递函数 20% 的增益和惯性这两种情况进行仿真, 对比不同负荷模型失配时在 3 种控制策略下的鲁棒性, 如图 6~9 所示。当 K 增大 20% 时, 从图 6 可以看出: 在 44% 负荷时 DMC 控制策略的调节时间为 156.25 s, 超调量为 4.2%; 常规 PID 策略调节的时间为 468.75 s, 超调量为 17.64%; Smith 预估策略调节时间为 359.37 s, 超调量为 12.25%。 K 增大 20% 时, 从图 7 可以看出: 在 100% 负荷时 DMC 控制策略的调节时间为 96.15 s, 超调量为 7.51%; 常规 PID 策略调节的时间为 480.76 s, 超调量为 22.23%; Smith 预估策略调节时间为 384.61 s, 超调量为 13.4%。当 T 增大 20% 时, 从图 8 可以看出: 在 44% 负荷时 DMC 控制策略的调节时间为 166.67 s, 超调量为 3.09%; 常规 PID 策略调节的时间为 683.33 s, 超调量为 18.55%; Smith 预估策略调节时间为 455.88 s, 超调量为 14.69%。从图 9 可以看出: 在 100% 负荷

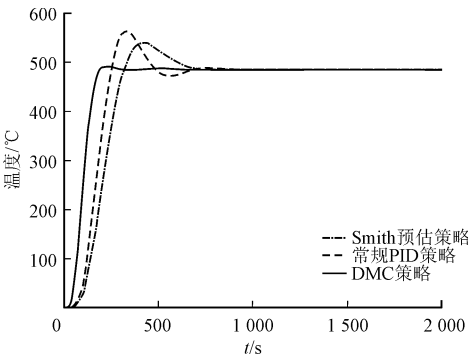


图 6 44% 负荷时 K 增大 20% 的 3 种控制策略仿真波形

时 DMC 控制策略主汽温控制系统的调节时间为 113.63 s,超调量为 8.47%;常规 PID 策略调节的时间为 568.18 s,超调量为 21.91%;Smith 预估策略调节时间为 477.27 s,超调量为 12.05%。根据以上分析可以得出,DMC 控制策略的鲁棒性明显优于常规 PID 和 Smith 预估控制策略。

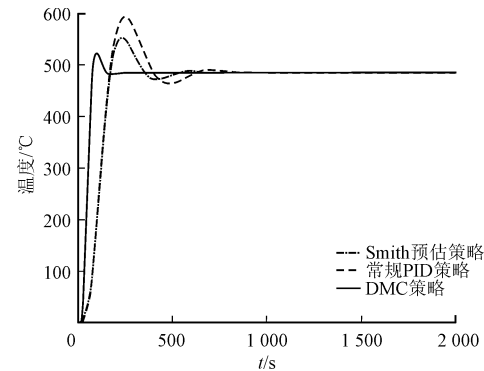


图 7 100%负荷时 K 增大 20%的 3 种控制策略仿真波形

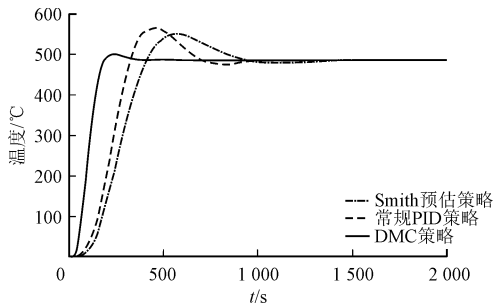


图 8 44%负荷时 T 增大 20%的 3 种控制策略仿真波形

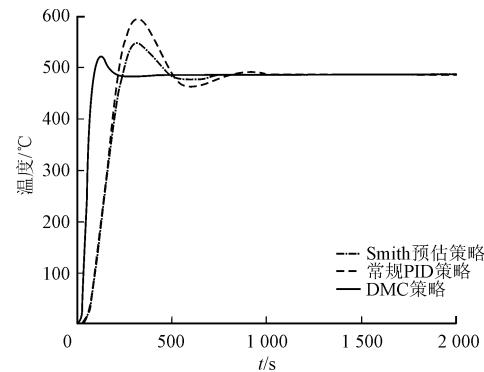


图 9 100%负荷时 T 增大 20%的 3 种控制策略仿真波形

4 工程应用

为了验证 DMC 策略的有效性,本文以某钢铁公司自备电厂 42 MW 发电机组 150 t 高温高压燃气锅炉为对象进行工程应用。采用本文控制策略,控制系统为浙大中控。在不改变原系统结构和硬件

配置的情况下,增加一套由优化控制器和监控计算机组成的锅炉主汽温优化控制系统。监控计算机与优化控制器之间通过工业以太网采用 OPC 协议进行数据通讯,而优化控制器与现有 DCS 系统操作员站则通过 OPC 协议进行联接和信息传输。现场的 DCS 系统由 I/O 设备及检测元件、变送器、驱动放大器、调节阀和传动设备组成,担负现场各种传感器信号的采集、处理和调节阀的实时控制。监控计算机担负数据库建立、数模计算、能效分析、集中监视、局部操作和系统设置、参数修改等工作。优化控制器主要完成数据传输、优化计算、控制指令下载和无扰切换等任务。系统之间具体架构如图 10 所示。

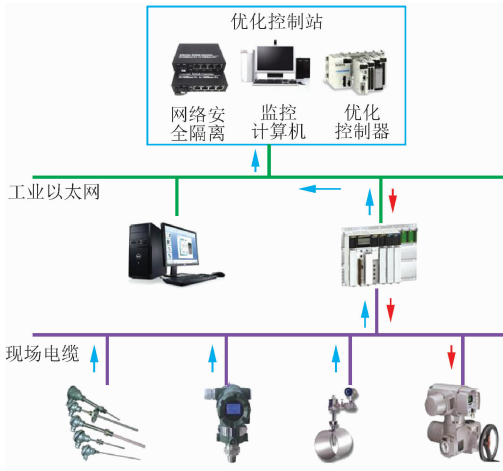


图 10 燃烧优化控制系统结构

本文将主汽温 DMC 控制策略投入现场运行控制,通过系统对接和反复调试,获得了良好的控制效果。图 11~13 给出了连续 3 天采用 PID、Smith、DMC 控制策略的主汽温实时曲线,作用时间均为 8 h,可以看出当主汽温控制系统采用本文的 DMC 控

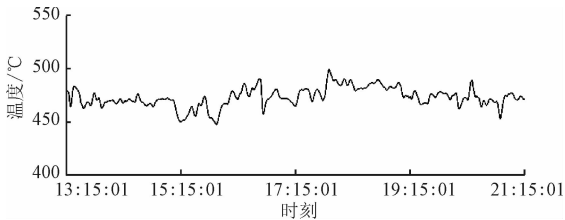


图 11 常规 PID 控制策略的主汽温实时曲线

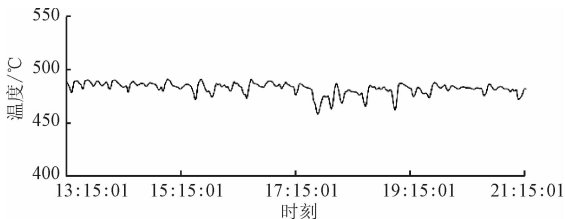


图 12 Smith 控制策略的主汽温实时曲线

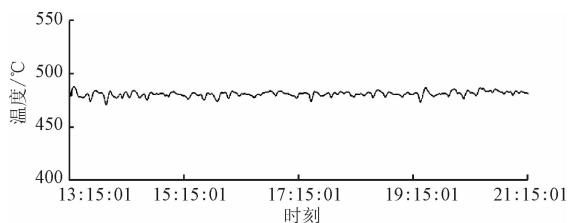


图 13 DMC 控制策略的主汽温实时曲线

制策略时,其温度波动的范围在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,而采用常规 PID 和 Smith 预估控制策略时,其温度波动较大,因此本文提出的 DMC 控制策略达到了良好的控制效果。

5 结 论

火力发电锅炉主汽温控制系统具有大惯性、纯滞后等特点,且在运行过程中容易受到外界的干扰,从而导致模型参数发生变化。鉴于常规控制策略无法较好地解决温度控制问题,本文提出了一种基于 DMC 控制的主汽温预测控制策略。在 Matlab 软件下对该策略进行仿真,仿真结果表明,该策略能够对温度超调量、调节时间等动态性能指标进行有效地控制,且控制效果优于常规的 PID 控制和 Smith 预估控制策略。最后,将本文控制策略应用于某钢厂 150 t 火力发电锅炉,温度控制偏差在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,有效地提高了主汽温控制系统的稳定性和机组的安全性。

参考文献:

- [1] LIANG Geng, LI Wen, LI Zhijun. Control of superheated steam temperature in large-capacity generation units based on active disturbance rejection method and distributed control system [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(3): 268-285.
- [2] 方彦军, 胡文凯. 基于改进遗传算法的直流锅炉主蒸汽温度自校正控制 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 125-129.
FANG Yanjun, HU Wenkai. Self-tuning control of main steam temperature of DC boiler based on improved genetic algorithms [J]. Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 125-129.
- [3] 张华, 沈胜强, 郭慧彬. 多模型分形切换预测控制在主汽温度调节中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 108-114.
ZHANG Hua, SHEN Shengqiang, GUO Huibin. Application of multi-model fractal switching predictive control in main steam temperature regulation [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(2): 108-114.

- [4] 冯晓露, 朱江涛, 杜劲松, 等. 神经网络技术在主蒸汽温度控制系统前馈中的应用 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(10): 1833-1836.
FENG Xiaolu, ZHU Jiangtao, DU Jinsong, et al. Application of neural network technology in feed forward control system of main steam temperature [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Edition), 2006, 40(10): 1833-1836.
- [5] 董恩增, 陈增强, 袁著祉, 等. 基于神经网络 PID 控制器的混沌系统控制与同步 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(3): 646-647.
DONG Enzeng, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi, et al. Control and synchronization of chaos systems based on neural network PID controller [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 646-647.
- [6] 马增辉, 刘长良, 开平安, 等. 基于扰动补偿的大滞后系统的控制 [J]. 信息与控制, 2013, 42(5): 570-576.
MA Zenghui, LIU Changliang, KAI Pingan, et al. Control of large delay systems based on disturbance compensation [J]. Information and Control, 2013, 42(5): 570-576.
- [7] 冯建苗, 李少远. 电厂过热汽温串级系统的约束预测控制 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(10): 1504-1508.
FENG Jianmiao, LI Shaoyuan. Constrained predictive control of superheated steam temperature cascade system in power plant [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(10): 1504-1508.
- [8] 贾立, 柴宗君. 火电机主蒸汽温度神经模糊-PID 串级控制 [J]. 控制工程, 2013, 20(5): 877-881.
JIA Li, CHAI Zongjun. Neuro-fuzzy-PID cascade control for main steam temperature of thermal power units [J]. Control Engineering, 2013, 20(5): 877-881.
- [9] 张宁. 基于自适应 Smith 预估算法的再热蒸汽温度控制策略 [J]. 热力发电, 2013, 42(4): 98-101.
ZHANG Ning. Reheated steam temperature control strategy based on adaptive Smith prediction method [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(4): 98-101.
- [10] 王喜庆, 冯晓露. 电厂过热蒸汽温度的有约束预测控制 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(3): 192-195.
WANG Xiqing, FENG Xiaolu. Constrained predictive control of superheated steam temperature in power plant [J]. Journal of Power Engineering, 2010, 30(3): 192-195.

(下转第 174 页)