

基于多模型切换的锅炉主蒸汽温度预测控制

周超^{1,2}, 谢七月¹, 左毅¹, 李鹏辉¹

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 湖南中烟工业有限责任公司长沙卷烟厂, 湖南长沙 410007)

摘要:火电厂锅炉主蒸汽温度具有大迟延、大惯性、参数时变等特点, 当工况发生大的变化时, 采用基于单一模型的传统 PID 控制难以维持满意的控制效果。为此, 提出一种基于多模型切换的预测控制方法。首先建立多个典型工况的对象模型; 再设计不同模型下的最佳动态矩阵控制器; 然后设计切换策略选出最合适的控制器来削弱变工况 (特别是负荷变化) 对主蒸汽温度系统的影响; 最后通过 Matlab 仿真验证所提方法的有效性。仿真结果比较分析表明, 多模型动态矩阵控制方法优于传统 PID 控制, 多模型切换提高了固定参数模型预测控制的鲁棒性。

关键词:主蒸汽温度; 多模型切换; 动态矩阵控制; Matlab 仿真

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.021 中图分类号: TM621; TK23 文章编号: 1673-9140(2020)04-0154-07

Multi-model switching based predictive control for main steam temperature in boiler

ZHOU Chao^{1,2}, XIE Qiyue¹, ZUO Yi¹, LI Penghui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd., Changsha Cigarette Factory, Changsha 410007, China)

Abstract: The main steam temperature in the thermal power plant boiler has the characteristics such as large delay, strong inertial, time varying parameters and so on. When the condition changes greatly, it is difficult to maintain satisfactory control results using traditional PID control based on a single model. To solve this problem, this paper presents a predictive control method based on multi-model switching. Firstly, the object models are established under a number of typical conditions. Secondly, the best dynamic matrix controller under different models are designed. Thirdly, the switching strategy is designed to select the most appropriate controller to mitigate the effects of varied operating conditions (especially load changes) on the main steam temperature system. Finally, the validity of the proposed method is verified through Matlab simulation. The simulation results show that the proposed method is superior to the traditional PID control, and the multi-model switching improves the robustness of the fixed parameter model predictive control.

Key words: main steam temperature; multi-model switching; dynamic matrix control; Matlab simulation

随着国家对高效、节能、低污染等生产政策的大力提倡, 超临界机组与超超临界机组成为火电站的

发展趋势。但机组容量、压力和温度的不断增加, 使得大容量机组比一般机组更复杂, 也更难控制。主

蒸汽温度是锅炉的主要参数之一,维持其在额定值附近是锅炉和机组高效、经济与安全运行的保障,温度过高或过低都会给电力正常生产带来巨大的影响。由于锅炉主蒸汽温度具有大迟延、大惯性、参数时变等特点,采用单一模型的传统串级 PID 控制难以取得满意的控制效果^[1]。

为此,许多学者对更好地控制主蒸汽温度问题进行了研究,并取得了一定的控制效果。例如:文献[2-3]分别将内模控制和神经网络与串级 PID 相结合,通过计算输出改变控制器参数,实质上仍然是变参数的 PID 控制,改善了 PID 控制性能,但未能克服 PID 控制器对大惯性对象调节时间长、超调量大的固有缺点;文献[4]将 BP 神经网络用于辨识对象模型,提出一种改进型 Smith 预估控制,在一定程度上克服了主蒸汽温度大惯性、大滞后的特性影响,但由于在线计算量大且神经网络建模的随机性大,对模型变化的适应能力较差;文献[5]将 Smith 预估器参数多目标自调整优化方法用于串级 PID 控制中,提高了模型变化的适应能力,但该方法仍未有效克服主蒸汽温度大惯性、大迟延的特性。预测控制^[6-11]可以很好地克服系统大惯性、大迟延、非线性等缺点,但因采用固定预测模型,当系统负荷发生大的改变时,单一参数预测控制器就不能适应对象模型的变化,致使控制品质变差,影响系统的稳定性。

该文将多模型切换和动态矩阵控制(DMC)相结合,有效地解决了上述问题。通过预先确定几种典型工况下的对象模型,设计好合适的预测控制器,当负荷发生大的变化时,切换策略通过决策后,切换到最佳的控制器,从而改善主蒸汽温度的控制品质。

1 主蒸汽对象模型与温度控制系统

主蒸汽温度模型是一个参数时变的模型,引起其参数变化的扰动主要有主蒸汽的流量、压力和温度。三者中流量的变化对系统的扰动最大、压力次之、温度最小。因此,可忽略温度对模型参数的作用,而主蒸汽流量与压力之间存在因果联系,流量变化必然导致压力的变化,故可以把 3 种干扰因素归因于主蒸汽流量的变化,即锅炉运行负荷的改变导

致被控对象模型参数的改变。而锅炉的运行负荷随着实际电力生产需求的改变而变化,变工况时常发生,这使得对象模型参数也随之变化。锅炉主蒸汽温度模型也是一个大惯性、大滞后的模型,超临界直流锅炉主蒸汽温度系统的惰性区惯性环节阶次较高,使得常规控制器调节时间过长。此外,锅炉主蒸汽温度模型还容易受到外部干扰,呈现一定的非线性。

控制系统的选择直接关系到主蒸汽温度控制效果,间接影响锅炉及机组的运行效率。由于对象系统的复杂性和时变性,为了能获得满意的控制效果而又便于工程实现,控制器的选择尤为重要。

典型模型很好地涵盖了锅炉负荷的一般运行范围,预测控制以其对模型精准度要求不高、反应快速、鲁棒性强等优良性能,适用于温度系统的特性。当锅炉运行在典型工况附近,即使被控对象参数发生改变,也在该工况下控制器的有效控制范围。

2 基于模型切换的动态矩阵控制方法

2.1 多模型切换预测控制系统结构

预测控制可以有效地解决对象模型大惯性、大迟延及非线性问题,多模型可有效地解决变工况问题。为了使温度系统能快速抵抗干扰,提升动态性能,采用串级控制结构。

多模型预测控制系统结构框图如图 1 所示,虚线框内视为一个整体,称为广义被控对象, W_2 为导前区传递函数,由减温器阀门开度进行输入量调节,输出为导前汽温; W_1 为惰性区传递函数,其输入为导前汽温,输出为主蒸汽温度。内环采用比例控制

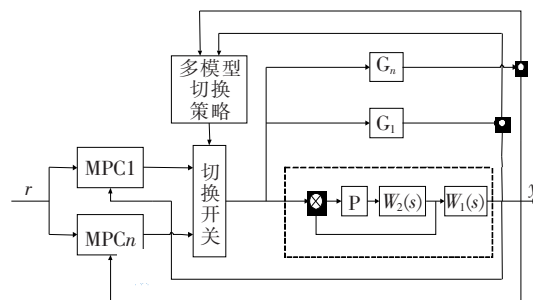


图 1 多模型切换预测控制系统结构框图

Figure 1 Block diagram of multi-model switching predictive control system

进行粗调 G_1, G_2, \dots, G_n 为 n 种预先设计好的典型对象模型, $MPC_1, MPC_2, \dots, MPC_n$ 为 n 种不同工况下与之对应的预测控制器。

该设计结构的工作原理: 实际被控对象输出值与预先设计好的各种典型模型输出值进行偏差加权, 通过多模型切换策略计算, 得出合理的切换方案, 控制切换开关的通断, 达到控制效果最佳的预测控制器选择目的。

2.2 多模型切换策略

单一模型控制器很难适应复杂变工况的主蒸汽温度的控制; 其他先进在线辨识对象模型方法在线计算量过大、算法复杂, 工程上不易实现; 多模型控制能有效克服主蒸汽温度模型参数时变对控制效果的影响, 且算法简单、不需要在线识别对象模型, 适合工程上应用。

多模型控制的设计思想: 由于外界或多或少的干扰, 使得大多数被控对象在实际的工业控制过程中都存在一定的非线性, 因而固定参数的数学模型有很大的局限性。将锅炉负荷变化区间切割为合理子区间, 在每个子区间建立与之匹配性较好的数学模型, 并预先设计好适用于各子区间的控制器。当锅炉负荷运行在某一工况子区间内, 该控制器能取得好的控制品质; 当系统工况从某个子区间变换到另一个子区间时, 之前的控制器就难以维持原有的控制品质, 应通过性能指标决策快速切换到与之匹配最好的控制器, 以得到更好的控制品质。

多模型切换性能指标的选择: 切换指标是用来判断对象模型与控制方式的匹配程度, 多模型中通过计算实际模型与各预先设定模型之间匹配度, 满足一定设定条件后, 再选择最佳控制。选择多模型切换性能指标的好坏也关系到系统的稳定与否, 所以性能指标的选择一定要快速、精准地反应主蒸汽温度系统模型与控制器的匹配程度。

该文采用时间与绝对误差乘积 (ITAE) 性能指标作为多模型切换的性能指标^[12], 即

$$J_i(t) = \int_0^t t e_i^2(t) dt \quad (1)$$

其中, $e_i(t) = y_i(t) - y(t)$ 。 $e_i(t)$ 为第 i 个预先设定子模型输出值与实际模型输出值的差值(用于反映模型间的匹配程度), 时间 t 确保系统快速平稳地

切换到最佳控制器。任何时刻, 当 $J_q(t) = \min\{J_i(t)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 时, 可得多模型控制器为

$$u(t) = u_q(t) \quad (2)$$

为避免上述切换方法出现切换过于频繁与误切换现象, 该文采用滞后切换进行改进, 引入滞后因子 $\epsilon (\epsilon > 0)$, J_k 为上一时刻最优切换性能指标, 当 $J_q(t) = \min\{J_i(t)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 时, 若 $J_k \leq J_q + \epsilon$, 则控制器保持不变, 若 $J_k > J_q + \epsilon$, 则切换到 q 控制器。

2.3 DMC 算法

DMC 是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法, 也是在工业过程应用最为广泛的预测控制算法之一^[13], 多步预估、滚动优化和反馈误差校正是其典型特征, 适用于模型比较复杂的锅炉主蒸汽温度系统的控制。

在 DMC 中, 对象单位阶跃响应值 $\alpha_i = \alpha(iT)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 其中 T 为采样周期。对于渐进稳定系统, 阶跃响应在某一时刻 $t_N = NT$ 后将趋于平稳, 使得 $\alpha_i (i > N)$ 与 α_N 的误差已经降低到与测量误差和量化误差相同的水平, 可认为 α_N 已近似等于 $t \rightarrow \infty$ 时的稳态值 α_∞ 。 $\alpha = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_N]^T$ 称为模型向量, N 为建模时域。

通过预测模型, 可知预测对象在未来时刻的输出值为

$$Y_M(k) = A \Delta U_M(k) + A_0 U(k-1) \quad (3)$$

其中, A 为动态矩阵。

$$\begin{aligned} Y_M(k) = & [y_m(k+1), y_m(k+2), \dots, y_m(k+P)]^T \\ \Delta U_M(k) = & [u(k), u(k+1), \dots, u(k+M-1)]^T \\ U(k-1) = & [u(k-N+1), u(k-N+2), \dots, u(k-1)]^T \\ & \begin{bmatrix} \alpha_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_M & \dots & \alpha_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_P & \dots & \alpha_{P-M+1} \end{bmatrix}_{P \times M} \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \alpha_N - \alpha_{N-1} & \alpha_{N-1} - \alpha_{N-2} & \alpha_{N-2} - \alpha_{N-3} & \cdots & \alpha_3 - \alpha_2 & \alpha_2 \\ 0 & \alpha_N - \alpha_{N-1} & \alpha_{N-1} - \alpha_{N-2} & \cdots & \alpha_4 - \alpha_3 & \alpha_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \alpha_N - \alpha_{N-1} & \cdots & \alpha_{P+2} - \alpha_{P+1} & \alpha_{P+1} \end{bmatrix}_{P \times (N-1)}$$

式(3)表明模型预测输出由初始矢量和动态矩阵与控制增量乘积两部分组成。由于模型存在扰动,对象预测输出须通过实际和模型输出的偏差进行校正,即

$$\mathbf{Y}_P(k) = \mathbf{Y}_M(k) + \mathbf{h}(y(k) - y_m(k)) \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),有

$$\mathbf{Y}_P(k) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{U}_M(k) + \mathbf{A}_0 \mathbf{U}(k-1) + \mathbf{h} \mathbf{e}(k) \quad (5)$$

其中, \mathbf{h} 为误差补偿加权系数矩阵。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}_P(k) &= [\mathbf{y}_P(k+1), \mathbf{y}_P(k+2), \dots, \mathbf{y}_P(k+P)]^T \\
 \mathbf{e}(k) &= y(k) - y_m(k) \\
 \mathbf{h} &= [h_1, h_2, \dots, h_P]^T
 \end{aligned}$$

k 时刻的优化性能指标为

$$\mathbf{J}(k) = \|\mathbf{Y}_r(k) - \mathbf{Y}_P(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{U}_M(k)\|_R^2 \quad (6)$$

其中, \mathbf{Q}, \mathbf{R} 分别为误差权和控制权系数矩阵, P, M 分别为预测和控制时域。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}_r(k+1) &= [\mathbf{y}_r(k+1), \mathbf{y}_r(k+2), \dots, \mathbf{y}_r(k+P)]^T \\
 \mathbf{Q} &= \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_P) \\
 \mathbf{R} &= \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_P)
 \end{aligned}$$

在 k 时刻, $\mathbf{Y}_r(k), \mathbf{A}_0 \mathbf{U}(k-1)$ 均为已知,要使 $\mathbf{J}(k)$ 取极小值, $\Delta \mathbf{U}_M(k)$ 需通过极值必要条件 $d\mathbf{J}(k) / d\Delta \mathbf{U}_M(k) = 0$ 求得:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} [\mathbf{Y}_r(k) - \mathbf{A}_0 \mathbf{U}(k-1)] \quad (7)$$

取当前的控制增量 $\Delta u(k)$ 为 $\Delta \mathbf{U}_M(k)$ 的首元素,可表示为

$$\Delta u(k) = \mathbf{c}^T \Delta \mathbf{U}_M(k) = \mathbf{d}^T [\mathbf{Y}_r(k) - \mathbf{A}_0 \mathbf{U}(k-1)] \quad (8)$$

其中, M 维行向量 $\mathbf{c}^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ 表示进行矩阵首行的运算, P 维行向量为控制向量,有

$$\mathbf{d}^T = \mathbf{c}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} \quad (9)$$

3 Matlab 仿真与分析

3.1 对象模型选择

该文以某 600 MW 超临界直流锅炉主蒸汽温度作为研究对象,4 种典型工况下的主蒸汽温度模型^[14-15]如表 1 所示。

表 1 控制对象模型

Table 1 Models of control target

负荷/%(D/(kg/s))	导前区	惰性区
37(D=179.2)	$-\frac{5.072}{(28s+1)^2}$	$\frac{1.048}{(56.6s+1)^8}$
50(D=242.2)	$-\frac{3.067}{(25s+1)^2}$	$\frac{1.119}{(42.1s+1)^7}$
75(D=347.9)	$-\frac{1.657}{(20s+1)^2}$	$\frac{1.202}{(27.1s+1)^7}$
100(D=527.8)	$-\frac{0.815}{(18s+1)^2}$	$\frac{1.276}{(18.4s+1)^6}$

3.2 控制器仿真参数设定

为了更好地呈现控制器对比的效果,二者内回路都采用相同的比例控制进行粗调,控制器参数 $K_p = 2.5$ 。不同工况下 DMC 控制器的 T, P 和 M 选择如表 2 所示,其中,取 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}, \mathbf{R} = \mathbf{0}$ 。PID 控制器参数的选择参考文献[13],其输入与输出之间的传递函数一般式为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (10)$$

其中, K_p, T_i 和 T_d 分别为控制器的比例增益、积分时间、微分时间。4 种典型工况下 PID 和 DMC 控制器的参数设定值见表 2。

表 2 典型负荷下控制器参数值选择

Table 2 Parameter selection of controller under typical loads

负荷/ %	PID 控制器参数选择			DMC 控制器参数选择		
	K_p	T_i	T_d	T	P	M
37	1.136	353.95	88.5	5	130	10
50	1.176	240.50	60.1	5	98	8
75	1.099	154.80	38.7	5	80	2
100	1.205	94.80	23.7	5	45	1

3.3 仿真结果

首先论证 PID 和 DMC 控制在锅炉 4 种典型工况下控制效果的优劣。不同负荷下对系统做单位阶跃响应,二者控制效果仿真结果对比如图 2~5 所示。

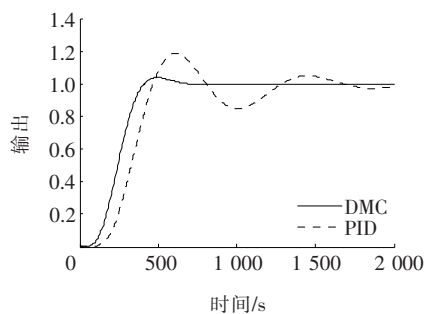


图 2 37% 负荷控制效果对比

Figure 2 Comparison of 37% load control effect

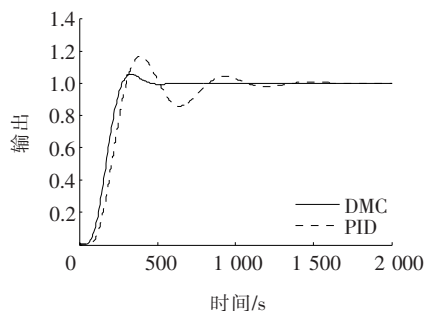


图 3 50% 负荷控制效果对比

Figure 3 Comparison of 50% load control effect

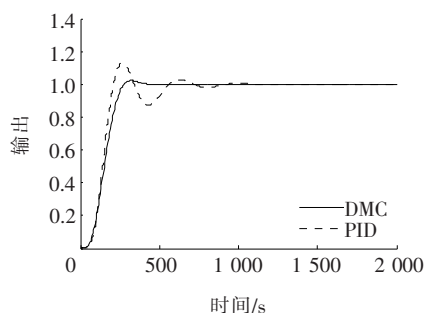


图 4 75% 负荷控制效果对比

Figure 4 Comparison of 75% load control effect

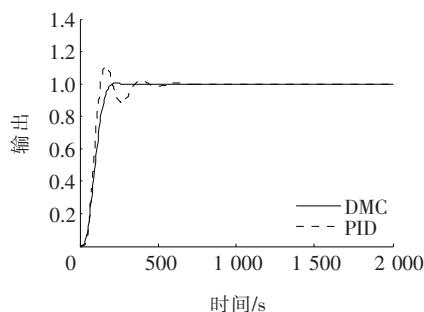


图 5 100% 负荷控制效果对比

Figure 5 Comparison of 100% load control effect

由 4 种典型负荷的仿真曲线对比可知,由于 DMC 控制应用多步模型预测技术,控制器通过提前预知输出的变化趋势,调整控制方式能有效解决时延和超调问题,所以 DMC 控制在每种典型工况下的控制品质都优于 PID 控制,有更小的超调量、更短的调节时间,且锅炉的负荷越高,控制效果越明显。因为随着负荷的不断降低,惯性环节阶次较高,惯性常数也越来越大,所以锅炉在低负荷运行时,DMC 和 PID 控制在系统的平稳性与快速性快方面较高负荷运行时要稍差。综上所述,该文主蒸汽温度系统串级控制的外环主控制器采用 DMC 控制。

尽管 DMC 算法对被控对象模型精确度要求较低,但锅炉在某一确定负荷下运行时,控制器的参数是确定的,当负荷发生较大改变时,控制器的参数也要随之改变,否则控制品质将变差。该文以 75% 负荷的控制器参数分别控制其他 4 种 (37%、50%、80% 和 100%) 不同运行负荷,分析锅炉主蒸汽温度系统的鲁棒性,仿真结果如图 6 所示。

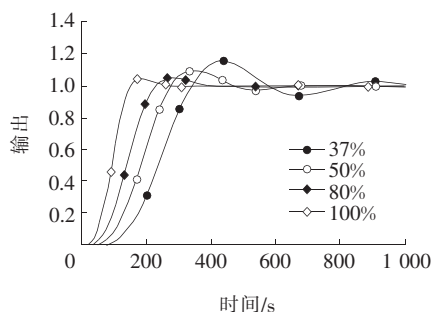


图 6 固定模型 DMC 控制鲁棒性分析

Figure 6 Robustness analysis of fixed model DMC control

由图 6 仿真结果可知,使用单一模型的动态矩阵控制,锅炉实际负荷运行在该模型附近时(80% 仿真曲线)有很好的控制效果。当负荷降低时(50%、37% 仿真曲线),系统出现震荡,且负荷降得越低震荡的幅度越大,导致系统调整时间过长,甚至会引起系统失衡;当负荷升高时(100% 仿真曲线),系统的平稳性和快速性变差。由此可见,使用固定预测参数的动态矩阵控制无法满足锅炉负荷变化的鲁棒性要求。

固定参数模型 DMC 控制以其先进的控制算法能适应锅炉负荷小范围波动给系统带来的影响,但

不适用于负荷大范围变动,为此,该文引入多模型切换方法来改善这一不足。

当负荷发生改变时,例如,某时刻负荷从 40% 增加到 100%,负荷的变化率为(2%~5%)/min 做单位阶跃响应,系统响应与切换曲线如图 7 所示。同时,做锅炉负荷从 100% 降至 40% 的阶跃响应,输出仿真曲线如图 8 所示。由图 7、8 可知,不管在升负荷还是在降负荷中,基于多模型切换的 DMC 控制的控制效果明显优于基于多模型切换的 PID 控制,多模型切换 DMC 控制很好地解决了单一模型 DMC 控制在变工况下出现控制效果不佳的问题。

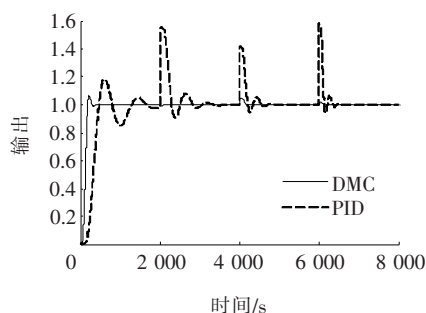


图 7 升负荷二者切换输出响应曲线

Figure 7 Switching output response curve of both load lifting

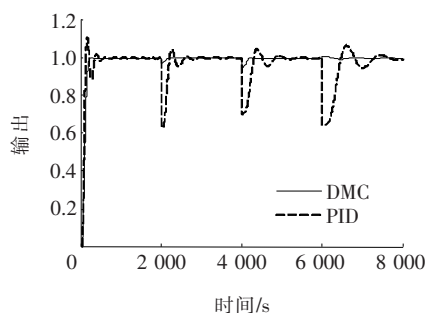


图 8 降负荷二者切换输出响应曲线

Figure 8 Output response curve of switching between load reduction

4 结语

1)在 4 种典型负荷运行下,锅炉的 DMC 控制较 PID 控制明显具有更好的控制效果。因为预测控制适用于大延迟、大惯性、非线性的主蒸汽温度对象,但单一的 DMC 控制器不能满足大变工况控制要求,导致系统鲁棒性变差。

2)在 DMC 算法基础上引入多模型切换策略,性能指标的选择兼顾快速切换与平稳切换原则。通过先建立多个典型工况的对象模型,再设计不同模型下的最佳动态矩阵控制器;然后设计切换策略,选出最合适的控制器来削弱变工况(特别是负荷变化)对主蒸汽温度系统的影响。弥补了固定参数 DMC 控制的缺陷,提高了系统在大变工况下的鲁棒性和动态品质,且设计简单,易于工程实现。

参考文献:

- [1] 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[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18 (2): 108-114.
- [2] WANG F, LI X, ZHANG Q. Main steam temperature control of ultra supercritical unit based on online identification and IMC-PID[C]// IEEE 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Shenyang, China, 2014.
- [3] ZHANG J, ZHANG F, REN M, et al. Cascade control of superheated steam temperature with neuro-PID controller[J]. ISA Transactions, 2012, 51(6): 778-785.
- [4] 孙宇贞,高将,彭道刚. 主汽温的改进型神经网络辨识 Smith 预估器[J]. 自动化仪表, 2016, 37(7):85-87.
SUN Yuzhen, GAO Jiang, PENG Daogang. Smith predictor improved by BP neural network recognition for main steam temperature control[J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37 (7): 85-87.
- [5] 刘长良,马增辉. 过热汽温系统的 Smith 预估器参数多目标优化控制[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(3): 282-288.
LIU Changliang, MA Zenghui. Multi-objective optimization control of Smith-predictor parameters in superheated steam temperature system[J]. PR & AI, 2015, 28 (3):282-288.
- [6] 王勇,刘吉臻,刘向杰,等. 基于折息递推最小二乘自适应动态矩阵的过热汽温控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8):70-75.

- WANG Yong, LIU Jizhen, LIU Xiangjie, et al. Design of superheat steam temperature controller based on discount recursive least square adaptive DMC[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27 (8):70-75.
- [7] Draganescu M, Guo S, Wojcik J, et al. Generalized predictive control for superheated steam temperature regulation in a supercritical coal-fired power plant[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 69-77.
- [8] 王松鹤,丁维明,王伟. 过热汽温的非线性广义预测控制与优化[J]. 动力工程学报, 2015, 35(9):733-739.
WANG Songhe, DING Weiming, WANG Wei. Nonlinear general predictive control and optimization of superheat steam temperatures[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35 (9): 733-739.
- [9] 康军胜,刘桂英,刘思贤,等. 基于动态预测和形态学滤波的电压暂降检测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(1):96-101.
KANG Junsheng, LIU Guiying, LIU Sixian, et al. Research on voltage sags detection based on dynamic prediction and morphological filtering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34 (1): 96-101.
- [10] 刘庆时,赵贺,刘迪,等. 基于支持向量机的家庭负荷控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 96-101.
LIU Qingshi, ZHAO He, LIU Di, et al. Research on family load control strategy based on support vector machine[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(4):96-101.
- [11] 蔡利军,朱豫才,吕霞,等. 模型预测控制在超超临界机组 AGC 协调控制和主汽温控制中的应用[J]. 中国电力, 2018,51(7):68-77.
CAI Lijun, ZHU Yucai, LV Xia, et al. MPC applications in AGC CCS and steam temperature control on two ultrasupercritical coal-fired power generation units [J]. Electric Power, 2018,51(7):68-77.
- [12] 王振雷,陈登乾,王昕. 基于多模型切换策略的精馏塔最优控制[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2016, 56(4): 430-436.
WANG Zhenlei, CHEN Dengqian, WANG Xin. Optimal control of distillation columns based on a multiple model switching strategy[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2016, 56(4): 430-436.
- [13] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.
- [14] HOU G, ZHANG J, LIU J, et al. Multiple-model predictive control based on fuzzy adaptive weights and its application to main-steam temperature in power plant[C]//The 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Taichung, China, 2010.
- [15] 范永胜,徐治皋. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23-28.
FAN Yongsheng, XU Zhigao. Study on adaptive fuzzy control system of boiler superheated steam temperature based on dynamic characteristic mechanism analysis[J]. Proceeding of the CSEE, 1997, 17 (1): 23-28.