

改进粒子群优化的燃气发电锅炉 主汽压模糊预测控制策略

冯旭刚, 鲍立昌, 章家岩

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 243032, 安徽马鞍山)

摘要: 针对燃气发电锅炉存在的纯滞后、大惯性和参数模型易变等问题,设计了一种改进粒子群优化(PSO)的主汽压模糊广义预测控制策略。利用遗忘因子递推最小二乘法(FFRLS)辨识出主汽压模型,并引入广义预测控制(GPC),通过多步预测、滚动优化和实时反馈技术克服系统惯性、时滞和参数时变问题。为改善主汽压控制系统的稳定性和动态响应品质,对GPC算法中的控制加权系数进行模糊自校正设计。引入改进粒子群算法对广义预测控制的控制量增量进行寻优,求取最优控制律。仿真结果表明:与改进 PSO-GPC 策略和动态矩阵控制(DMC)策略相比,在施加扰动情况下,所提改进 PSO-模糊 GPC 策略在模型适配与失配时稳定时间分别最多减少 94.5 s 和 132 s,超调量分别最多降低 5.1%和 8%。工程运用表明:所提控制策略主汽压控制偏差低于 ± 0.15 MPa,系统受模型失配影响更小,稳定性和抗扰动能力明显提升。

关键词: 主汽压;广义预测控制;模糊控制;改进粒子群算法

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202103010 **文章编号:** 0253-987X(2021)03-0081-09



OSID 码

Improved Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Predictive Control Strategy for Main Steam Pressure in Gas-Fired Power Boiler

FENG Xugang, BAO Lichang, ZHANG Jiayan

(College of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China)

Abstract: Aiming at the problems of pure lag, large inertia and variable parameter models in gas-fired power boilers, an improved particle swarm optimization (PSO) fuzzy generalized predictive control strategy for main steam pressure is designed. The main steam pressure model is identified by the forgetting factor recursive least squares method (FFRLS), and a generalized predictive control (GPC) is introduced to overcome system inertia, time delay and parameter time-varying via multi-step prediction, rolling optimization and real-time feedback technology. To improve the stability and dynamic response quality of the main steam pressure control system, the fuzzy self-tuning design of the control weighting coefficient in the GPC algorithm is carried out. Then an improved particle swarm algorithm is introduced to optimize the control variable increment of the generalized predictive control and obtain the optimal control law. Compared with the improved PSO-GPC strategy and the dynamic matrix control (DMC) strategy, the improved PSO-fuzzy GPC strategy reduces the stability time of model adaptation and mismatch by up to 94.5 s and 132

收稿日期: 2020-07-22。 作者简介: 冯旭刚(1977—),男,教授;章家岩(通信作者),男,教授。 基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1908085ME134);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)。

网络出版时间: 2020-11-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201110.0949.004.html>

s respectively under disturbed condition. The overshoot is decreased by up to 5.1% and 8% respectively. Engineering application shows that the main steam pressure control deviation of the control scheme is lower than ± 0.15 MPa, the system is less affected by model mismatch, and the stability and anti-disturbance ability are significantly promoted.

Keywords: main steam pressure; generalized predictive control; fuzzy control; improved particle swarm optimization

燃气发电锅炉使用钢铁企业在生产过程中产生的大量高炉、转炉和焦炉煤气作为燃料进行发电,但煤气压力波动剧烈,主汽压难以维持稳定^[1-2]。目前,燃气锅炉主汽压控制主要采用 PID 控制方法,但由于锅炉存在大惯性、大滞后和模型参数易变等特点,当工业现场环境或煤气压力变化时,控制精度和实时性往往达不到要求^[3-4]。

近年来,研究人员将智能控制引入主汽压控制,进行了大量的理论与实践研究。郑跃等针对火电机组大惯性导致负荷响应慢、主汽压波动大的问题,提出了一种主汽压预测的火电机组负荷控制方法,采用遗传算法整定预测模型动态参数,根据预测跟踪误差来修正锅炉侧的能量需求,提前改变入炉能量来减少主汽压波动,使得机炉之间协调动作^[5]。曾德良等针对主汽压动态调节过程波动大,导致汽包炉机组协调系统的控制性能不达标问题,提出了一种以阶梯式预测控制为核心,融合前馈控制和解耦控制理念的汽包炉机组协调系统优化控制方案,并设计了预测控制和 PID 控制无扰切换方式,该方案对减少主汽压波动、提高机组协调控制性能具有一定效果^[6]。高锦等针对发电锅炉主汽压存在的大滞后和煤气扰动大的特点,提出了一种基于失配补偿 Smith-RBF 神经网络控制方法,利用 RBF 神经网络整定常规 PID 参数,并通过失配补偿 Smith 预估控制器对系统中存在的纯滞后进行补偿,一定程度上解决了火力发电锅炉主汽压对象动态特性模型失配及纯滞后的问题^[7]。这些方法虽然都取得了一定的控制效果,但实际工业现场具有很强不确定性,工况易发生变化,控制系统常因对象参数变化而得不到满意的控制效果。

鉴于此,本文提出一种改进粒子群优化的模糊广义预测控制(改进 PSO-模糊 GPC)策略,通过遗忘因子递推最小二乘法(FFRLS)辨识得到受控自回归积分滑动平均过程(CARIMA)模型,利用含控制加权系数模糊自校正环节的 GPC 算法提高系统在工况或模型变化时的动态特性,引入改进 PSO 算法寻求 GPC 算法中的控制量增量最优解,将其输

出给控制对象。工程应用表明,该策略能够实现主汽压超调量小、稳定性好和动态响应速度快的综合调节效果。

1 主汽压控制系统参数辨识

1.1 主汽压控制模型

主汽压是表征锅炉运行状态的重要参数,关系到锅炉设备的安全运行,是衡量燃烧产生的热量与机组负荷是否相平衡的重要标志^[8-9]。锅炉燃烧控制的主要任务是维持主汽压稳定。当主汽压升高时,蒸汽流量、机组负荷随之增加,锅炉各承压部件应力变大,设备易损伤,同时末级排汽湿度增大,影响汽轮机末级叶片寿命;当主汽压降低时,蒸汽流量、机组负荷降低,经济性下降,为维持负荷需增大蒸汽流量,使得汽轮机组的轴向位移变大,动静碰摩可能性增加^[10-11]。

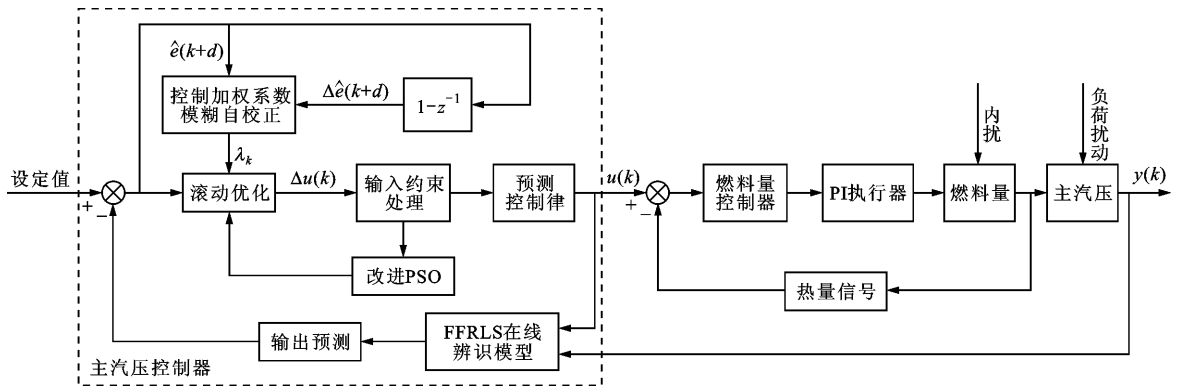
为提高燃气锅炉主汽压的稳定性,可采用串级控制方案,如图 1 所示。串级控制器的副回路控制器采用燃料量控制器,通过热电偶测量得到的炉膛温度信号,改变煤气阀门开度来调节煤气量,克服由燃料量或燃料热值变化造成的内部扰动。主回路控制器采用主汽压控制器,利用主汽压系统的输入输出数据对预测模型进行实时辨识,运用改进 PSO 算法和控制加权系数模糊自校正对控制增量 $\Delta u(k)$ 进行同步寻优,最后通过预测控制律求得预测输入 $u(k)$ 。当发电机组轮机负荷变化时,主汽压偏离设定值,主汽压控制器根据主汽压信号给燃料控制器信号,调节合适的煤气输入量维持主汽压稳定,克服由发电机组负荷变化造成的外部扰动。

串级控制系统中,副回路根据炉膛温度对煤气量进行控制。煤气压力或热值变化时,造成炉膛温度产生变化,其传递函数可表示为

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (1)$$

式中: K_1 为煤气燃烧产热的系数; T_1 为燃烧过程时间常数。

主回路根据主汽压变化对煤气量进行控制。炉



$\hat{e}(k+d)$ —预测跟踪偏差; $\Delta\hat{e}(k+d)$ —偏差变化率; λ_k —广义预测控制加权系数;

$\Delta u(k)$ —控制增量; $u(k)$ —系统输入燃料量; $y(k)$ —输出主汽压。

图1 主汽压控制系统

膛内热量变化时,造成主汽压发生变化,其传递函数可表示为

$$G_2(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} e^{-\tau_2 s} \quad (2)$$

式中: K_2 为热量转化为蒸汽的放大系数; T_2 为蒸汽形成过程时间常数; τ_2 为纯滞后时间。

结合本小节分析,主汽压串级控制系统的输入量为煤气量,输出量为主汽压,其传递函数为

$$G(s) = \frac{K_1 K_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau_2 s} \quad (3)$$

1.2 遗忘因子递推最小二乘法系统辨识

FFRLS在递推最小二乘法的基础上引入遗忘因子,能有效克服系统参数时变问题^[12]。本文根据广义预测控制对模型的要求,利用FFRLS算法辨识现场采集的数据建立系统CARIMA模型。

对于单输入单输出的离散系统,CARIMA模型的表达式和其传递函数表达式分别为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + \xi(k)/\Delta \quad (4)$$

$$G(z) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (5)$$

式中: $\xi(k)$ 为白噪声; $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为差分算子; $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 为含有系统变量参数的多项式,表达式为

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

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

其中 n_a 、 n_b 、 d 均为已知的结构参数。

根据系统辨识理论,由采集到的输入和输出数据,确定参数 $a_1, a_2, \cdots, a_{n_a}, b_0, b_1, b_2, \cdots, b_{n_b}$ 。

由式(4)和式(5)可知,离散CARIMA模型可写成最小二乘形式

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \cdots - a_{n_a} y(k-n_a) +$$

$$b_0 y(k-d) + \cdots + b_{n_b} u(k-d-n_b) + \xi(k)/\Delta = \boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta} + \xi(k)/\Delta \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}(k) = [-y(k-1), \cdots, y(k-n_a), u(k-d), \cdots, u(k-d-n_b)]^T$; $\boldsymbol{\theta} = [a_1, \cdots, a_{n_a}, b_0, \cdots, b_{n_b}]$ 。

设性能指标函数为

$$J = \sum_{k=1}^L \eta^{L-k} [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}]^2 \quad (7)$$

式中: L 为数据长度; η 为遗忘因子, $0 \leq \eta \leq 1$ 。

求取使式(7)取得极小值的参数 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 。经推导可得FFRLS公式为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k)[y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ \mathbf{K}(k) &= [\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)] / [\eta + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)] \\ \mathbf{P}(k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)]\mathbf{P}(k-1) / \eta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{P}(0) = \alpha_0^2 \mathbf{I}$, α_0 为充分大的正实数,范围为 $10^2 \sim 10^5$; $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = \boldsymbol{\varepsilon}$ 为充分小的正实向量或零向量。

参数辨识步骤如下。

步骤1 根据先验知识和燃气发电锅炉内部机理分析,确定结构参数 n_a 、 n_b 和 d ,设置初值 $\mathbf{P}(0)$ 、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)$ 及遗忘因子 η ,输入初始数据。

步骤2 采样当前输出 $y(k)$ 和输入 $u(k)$ 。

步骤3 利用式(8),计算 $\mathbf{K}(k)$ 、 $\mathbf{P}(k)$ 和 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$,进行模型参数辨识。

步骤4 当已辨识数据量小于式(7)中的数据长度 L 时,则 $k \rightarrow k+1$,返回步骤2,继续循环;当已辨识数据量等于 L 时,则结束辨识过程,进入下一步。

步骤5 得到主汽压控制系统各参数辨识数据。

2 燃气锅炉主汽压优化控制

2.1 广义预测控制算法

广义预测控制是Clarke等在最小方差控制和

自适应控制发展的基础上,吸收了动态矩阵控制(DMC)和模型算法控制(MAC)中滚动优化的思想,提出的一种包括多步预测、动态优化和反馈校正的自适应控制算法^[13-14]。针对燃气发电锅炉具有的大时滞和模型不确定等特点,采用 GPC 算法设计主汽压控制系统,能够有效降低因工况或煤气压力变化所产生的主汽压超调量,提高主汽压的控制效果和准确性。

2.1.1 预测模型 主汽压广义预测控制的预测模型采用 CARIMA 模型,表达式为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + \xi(k)/\Delta \quad (9)$$

2.1.2 滚动优化 主汽压 GPC 控制的目标是使主汽压预测输出与参考轨迹的偏差最小,提高系统的鲁棒性。在目标函数中加入当前时刻的输入燃料量 $u(k)$ 对系统输出主汽压 $y(k)$ 未来时刻的影响,取目标函数

$$J = \sum_{j=1}^n [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_k(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (10)$$

式中 m 和 n 分别为控制长度和预测长度, $m \leq n$ 。

对系统进行柔化控制,使输出更好地跟踪参考轨迹曲线,参考轨迹表达式为

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1-\alpha^j) y_r, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中: $w(k)$ 为参考轨迹; y_r 为系统设定值; α 为柔化系数, $0 < \alpha < 1$ 。

通过求解丢番图方程可得 $k+j$ 时刻的预测输出值

$$\hat{y}(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (12)$$

式(12)中的输出预测值包括 k 时刻的已知量和未知量两部分。将已知量用 $r(k+j)$ 表示,写成矩阵形式

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}\mathbf{y}(k) \quad (13)$$

式中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} G_1 - g_1 \\ z(G_1 - z^{-1}g_1 - g_0) \\ \vdots \\ z^{-n-1}(G_n - z^{-n+1}g_{n-1} - \dots - z^{-1}g_1 - g_0) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$$

根据式(12)可得最优输出预测值矩阵形式

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{U} + \mathbf{r} \quad (14)$$

式中

$$\hat{\mathbf{Y}} = [\hat{y}(k+1), \hat{y}(k+2), \dots, \hat{y}(k+n)]^T$$

$$\Delta\mathbf{U} = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+n)]^T$$

$$\mathbf{r} = [r(k), r(k+1), \dots, r(k+n)]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{n-1} & g_{n-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}$$

由式(10)可得,目标函数的矩阵表达式为

$$\mathbf{J} = (\mathbf{Y} - \mathbf{W})^T(\mathbf{Y} - \mathbf{W}) + \lambda_k \Delta\mathbf{U}^T \Delta\mathbf{U} \quad (15)$$

式中 $\mathbf{W} = [w(k+1), w(k+2), \dots, w(k+n)]^T$ 。

利用最优输出预测值 $\hat{\mathbf{Y}}$ 代替 $\mathbf{Y}$, 并对 $\Delta\mathbf{U}$ 求导, 可求得最优控制律

$$\Delta\mathbf{U} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda_k \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{W} - \mathbf{r}) \quad (16)$$

令 $(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda_k \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T$ 的第一行为 $\mathbf{g}^T$, 则 k 时刻实际控制量输入为

$$u(k) = u(k-1) + \mathbf{g}^T (\mathbf{W} - \mathbf{r}) \quad (17)$$

2.2 控制加权系数模糊自校正

由式(17)可知,控制加权系数 λ_k 对当前时刻的输入变化量 $u(k)$ 有直接影响。一般而言, λ_k 是根据反复仿真调整选取的固定值。但是,实际运行中 λ_k 应根据主汽压运行状况不断进行动态校正,使主汽压获得更快的响应速度,同时防止主汽压因工况变化发生大幅波动,从而提高控制系统的快速性和稳定性。

本文引入模糊算法对控制加权系数 λ_k 进行动态校正,选取主汽压第 $k+d$ 步的预测跟踪偏差 $e(k+d)$ 和偏差变化率 $\Delta e(k+d)$ 作为输入,控制加权系数 λ_k 作为输出,构成模糊预测自校正控制系统。 $e(k+d)$ 和 $\Delta e(k+d)$ 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} e(k+d) &= \hat{y}(k+d) - w(k+d) \\ \Delta e(k+d) &= e(k+d) - e(k+d-1) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

模糊预测自校正控制系统由模糊推理、跟踪偏差和偏差变化率模糊化、模糊规则库组成。实际运行中,锅炉主汽压控制目标为稳定在设定值附近 ± 300 Pa,因此跟踪偏差 e 的论域选取为 $-300 \sim +300$ Pa,并在论域空间内均匀设置 5 个三角模糊集,即 $A_e = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。主汽压变化率较小,因此偏差变化率 Δe 的论域选择为 $-15 \sim +15$ Pa,同样在该空间内均匀设置 5 个三角模糊集,即 $A_{\Delta e} = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。输出 λ_k 的论域空间选取为 $0.1 \sim 0.9$,划分为 9 个单值模糊集,即 $A_{\lambda_k} = \{\text{NL}, \text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}, \text{PL}\}$ 。 e 、 Δe 、 λ_k 的隶属度函数如图 2 所示。

模糊规则库是控制加权系数自校正的关键,规

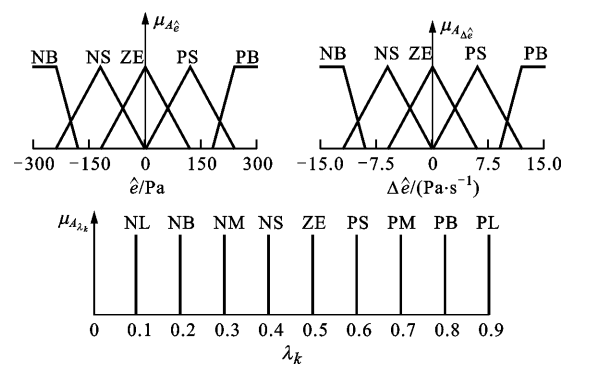


图 2 $\hat{e}$ 、 $\Delta\hat{e}$ 、 λ_k 的隶属度函数

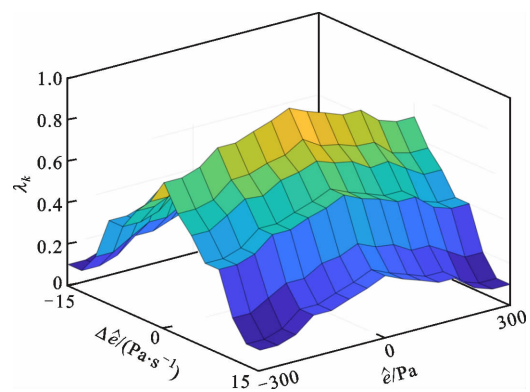


图 3 控制加权系数 λ_k 的模糊自校正曲面

则库设计逻辑如下:①当主汽压预测跟踪偏差绝对值较小时,应选择较大的 λ_k ,使输入量增幅减小,防止主汽压发生超调;②当主汽压预测跟踪偏差绝对值变大时,应选择较小的 λ_k ,使输入量增幅变大,从而加快主汽压调节过程。建立的模糊规则库如表 1 所示。

表 1 控制加权系数 λ_k 模糊调节规则

$\Delta\hat{e}$	λ_k				
	$\hat{e}=\text{NB}$	$\hat{e}=\text{NS}$	$\hat{e}=\text{ZE}$	$\hat{e}=\text{PS}$	$\hat{e}=\text{PB}$
NB	NL	NB	NM	NB	NL
NS	NS	ZE	PS	ZE	NS
ZE	PM	PB	PL	PB	PM
PS	NS	ZE	PS	ZE	NS
PB	NL	NB	NM	NB	NL

采用乘积运算、单值模糊化和加权反模糊推理机制,得控制加权系数 λ_k 的动态校正值为

$$\lambda_k(\hat{e}, \Delta\hat{e}) = \frac{\sum_{l=1}^{25} \bar{\lambda}^l \mu_{A_e^l}(\hat{e}) \mu_{A_{\Delta e}^l}(\Delta\hat{e})}{\sum_{l=1}^{25} \mu_{A_e^l}(\hat{e}) \mu_{A_{\Delta e}^l}(\Delta\hat{e})} \quad (19)$$

式中: $\bar{\lambda}^l$ 为第 l 条模糊规则对应的输出模糊集中心值; $\mu_{A_e^l}(\hat{e})$ 、 $\mu_{A_{\Delta e}^l}(\Delta\hat{e})$ 分别为第 l 条模糊规则对应的输入模糊集 A_e^l 和 $A_{\Delta e}^l$ 的隶属度。图 3 为控制加权系数 λ_k 的模糊自校正曲面。

2.3 控制增量限幅

由于工业现场的控制装置自身存在调节范围、调节速率等约束,造成广义预测控制算法中存在各种约束条件。本文针对广义预测控制要求,考虑控制增量 ΔU 的约束条件

$$\phi \Delta u_{\min} \leq \Delta U \leq \phi \Delta u_{\max} \quad (20)$$

式中: $\Delta u_{\min}$ 和 $\Delta u_{\max}$ 为控制增量 ΔU 的下限与上限; $\phi=[1, \cdots, 1]^T$ 。

控制系统根据最优控制律计算控制量增量,当

增量不满足约束条件时,引入改进粒子群算法对滚动优化环节进行寻优。

3 改进粒子群算法

3.1 粒子群优化算法

粒子群算法是一种模拟鸟类觅食行为的群智能算法,其中每个个体被称为一个粒子,该算法利用粒子的不断搜索、迭代来搜寻最优解。将粒子群算法引入广义预测控制,可加快主汽压获得最优输出预测值的速度^[15]。假设一个群体由 q 个 D 维粒子组成,第 i 个粒子的位置为 $X_i=(x_i^1, x_i^2, \cdots, x_i^D)$,其速度为 $v_i=(v_i^1, v_i^2, \cdots, v_i^D)$,其最优位置为 $P_{ip}=(P_{ip}^1, P_{ip}^2, \cdots, P_{ip}^D)$,群体最优位置为 $P_{ig}=(P_{ig}^1, P_{ig}^2, \cdots, P_{ig}^D)$, $i=1, 2, \cdots, q$ 。为防止粒子离开寻优空间,给粒子位置限定范围,即 $X_i \in [-x_{\max}, x_{\max}]$ 。胡旺等对粒子群算法进行微分处理,得到不含速度项的简化粒子群(PSPO)位置公式^[16]为

$$x_{id}^{\beta+1} = \omega x_{id}^{\beta} + c_1 r_1 (p_{id}^{\beta} - x_{id}^{\beta}) + c_2 r_2 (p_{gd}^{\beta} - x_{id}^{\beta}) \quad (21)$$

式中: ω 为惯性系数; β 为迭代次数; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 的随机数; x_{id}^{β} 为第 β 次迭代时,第 i 个粒子在第 D 维的位置, $d=1, 2, \cdots, D$ 。

3.2 基于改进粒子群算法优化的广义预测控制

根据 PSO 算法寻优原理可知,惯性系数 ω 的大小与粒子全局寻优能力成正比,与搜索精度和局部寻优能力成反比。针对 PSO 优化过程中惯性系数 ω 对全局搜索能力的影响,本文采取使 ω 非线性递减的方法,公式为

$$\omega(l') = \omega_{\text{start}} - (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})(l'/L_m)^2 \quad (22)$$

式中: l' 为当前迭代次数,当 l' 较小时 ω 较大,当 l' 较大时 ω 较小; L_m 为最大迭代次数。

SPSO 算法寻优过程中会使粒子位置逐渐收敛,导致进化后期寻优缓慢,算法陷入局部极值。因

此,引入极值扰动算子,设置进化停滞步数 t 为触发条件,通过极值扰动算子产生的随机扰动来调整个体极值 p_i 和群体极值 p_g ,从而产生新的搜索路径。极值扰动算子为

$$p_i = r_{sp}^{t_p > T_p} p_i; \quad p_g = r_{pg}^{t_g > T_g} p_g \quad (23)$$

式中: t_p 、 t_g 分别为 p_i 和 p_g 陷入停滞的进化步数; T_p 、 T_g 分别为 p_i 和 p_g 产生扰动的步数阈值; $r_{sp}^{t_p > T_p}$ 和 $r_{pg}^{t_g > T_g}$ 分别为带条件的均匀随机函数,公式为

$$r_{sp}^{t_p > T_p} = \begin{cases} 1, & t_p \leq T_p \\ U(0,1), & t_p > T_p \end{cases}$$

$$r_{pg}^{t_g > T_g} = \begin{cases} 1, & t_g \leq T_p \\ U(0,1), & t_g > T_p \end{cases}$$

其中 $U(0,1)$ 为 $0 \sim 1$ 间的一个随机数。

SPSO 增加极值扰动算子后的方程为

$$x_{id}^{\beta+1} = \omega x_{id}^{\beta} + c_1 r_1 (r_{sp}^{t_p > T_p} p_i - x_{id}) + c_2 r_2 (r_{pg}^{t_g > T_g} p_g - x_{id}) \quad (24)$$

在广义预测控制算法滚动优化这一步中引入改进 PSO 算法,利用改进 PSO 算法不需要目标函数在约束条件下可微,可以很好地解决广义预测控制算法在约束条件下 ΔU 的最优求解问题。将 Δu 引入改进 PSO 算法的适应度函数中,可得适应度函数

$$J = \sum_{j=1}^n [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_k(j) [\Delta u(k+j-1)] \quad (25)$$

基于改进 PSO 优化的广义预测控制算法实现流程如下。

步骤 1 利用式(16)计算出 ΔU 。若 ΔU 满足约束条件,则根据式(17)输出 $u(k)$;若 ΔU 不满足约束条件,则将其引入改进 PSO 算法进行寻优。

步骤 2 利用式(25)计算第一个粒子的适应度 E_1^1 ,将其作为该粒子的个体极值 p_i^1 和全局极值 p_{ig}^1 ,将其对应的粒子位置 x_i^1 当作该粒子当前时刻最优位置 P_{ip} 和全部粒子最优位置 P_{lg} 。

步骤 3 根据式(24)得到更新后粒子的位置 x_i^2 ,且 x_i^2 还需满足 $x_i^2 = \begin{cases} x_{\max}, & x_i^2 > x_{\max} \\ -x_{\max}, & x_i^2 < -x_{\max} \end{cases}$ 。

步骤 4 将 x_i^2 代入式(25)求得适应度 E_i^2 。如果 $E_i^2 < p_i^1$,则 $p_i^1 = E_i^2$,并将 E_i^2 对应的位置 X_i^2 作为 P_{ip} ,否则 p_i^1 和 P_{ip} 不变;如果 $E_i^2 < p_{ig}^1$,则 $p_{ig}^1 = E_i^2$,同时 $P_{lg} = X_i^2$,否则 p_{ig}^1 和 P_{lg} 不变。

步骤 5 重复步骤 2 到 4 直到满足以下任一停止条件,终止寻优并输出最终寻优值。停止条件为:①达到最大迭代次数 L_m ;②满足稳定精度 δ 和连续稳定

迭代次数 T 。

4 主汽压模型辨识与控制仿真

4.1 主汽压系统建模

采集某钢厂自备电厂燃气发电锅炉正常工况下 1 000 组高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气和主汽压数据。对采集数据进行剔除异值、平滑处理等预处理后,再将高炉、转炉、焦炉煤气根据热值比例按 1:2:4 换算为高炉煤气,作为系统输入煤气量。利用 FFRLS 算法进行参数辨识,建立主汽压传递函数

$$G(s) = \frac{0.602}{13.65s^2 + 8.6s + 1} e^{-60s} \quad (26)$$

4.2 主汽压控制系统仿真

根据主汽压特性可知,数学模型是变化的。为验证本文控制算法在煤气发电锅炉主汽压控制系统中的控制效果,运用 MATLAB 软件分别在主汽压模型适配和失配两种情况下进行仿真。参考文献[17]的参数整定方法,并经过多次仿真实验验证,本文预测控制模型参数取值如下:预测长度 $n=8$,控制长度 $m=2$,控制加权系数 $\lambda_k=0.65$,柔化系数 $\alpha=0.6$,改进 PSO 的学习因子 $c_1=c_2=2$, $\delta=0.1$, $T=10$, $L_m=100$, $\xi(k)$ 是均值为 0、方差为 0.01 的白噪声。

为检测本文控制算法在主汽压控制系统中的抗干扰能力和鲁棒性,在系统运行 500 s 时加入幅值为 20% 的阶跃干扰,比较改进 PSO-模糊 GPC、改进 PSO-GPC 和 DMC 控制策略的控制效果,结果如图 4 和图 5 所示。模型失配时系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.813}{11.65s^2 + 5.9s + 1} e^{-49s} \quad (27)$$

由图 4 可知,加入干扰后,系统模型适配时:改进 PSO-模糊 GPC 策略的调节时间为 65.5 s,超调量为 8.2%;改进 PSO-GPC 策略的调节时间为 72.4 s,超调量为 10.8%;DMC 策略的调节时间为 160 s,超调量为 13.3%。由图 5 可知,系统模型失

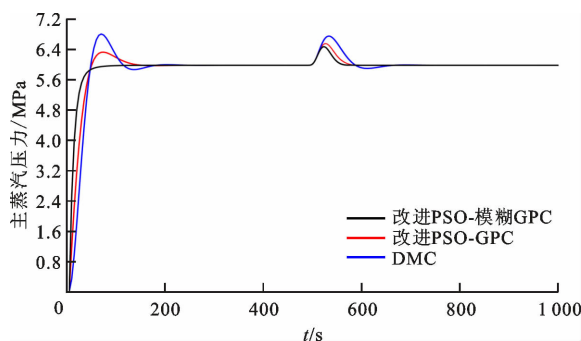


图 4 模型适配仿真

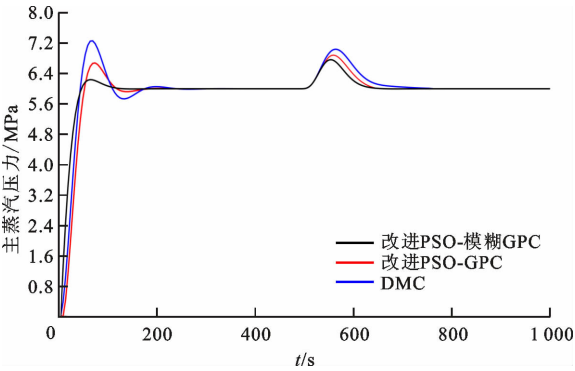


图 5 模型失配仿真

配时:改进 PSO-模糊 GPC 策略的调节时间为 138 s,超调量为 12.1%;改进 PSO-GPC 策略的调节时间为 155 s,超调量为 15.8%;DMC 策略的调节时间为 270 s,超调量为 20.1%。由此可知,改进 PSO-模糊 GPC 策略相比改进 PSO-GPC 和 DMC 策略的抗干扰能力更好,鲁棒性更强,受模型失配影响更小。

为进一步检验本文控制方法在现场工况变化时的控制效果,分别针对 3 种控制算法在模型适配和模型失配情况下进行仿真对比,结果如图 6 和图 7 所示。

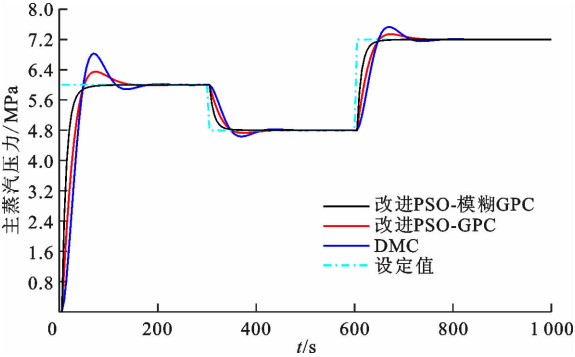


图 6 工况改变时模型适配仿真

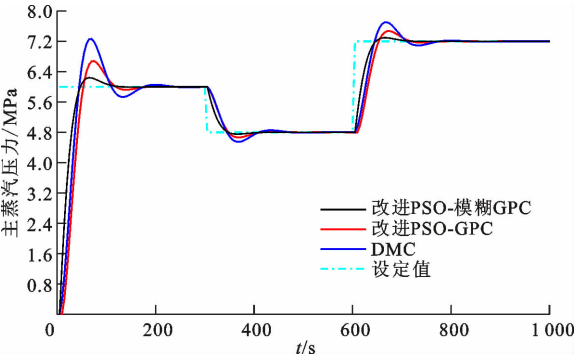


图 7 工况改变时模型失配仿真

分别在 300 s 和 600 s 时改变工况。由图 6 可知,系统模型适配时,改进 PSO-模糊 GPC 策略、改进 PSO-GPC 和 DMC 策略在第一次工况改变后的

调节时间分别为 50、100、155 s,超调量分别为 0%、2%、3.6%,第二次工况改变后的调节时间分别为 75、135、170 s,超调量分别为 0%、2.6%、4.8%。由图 7 可知,系统模型失配时,改进 PSO-模糊 GPC 策略、改进 PSO-GPC 和 DMC 策略在第一次工况改变后的调节时间分别为 100、135、190 s,超调量分别为 1%、3.5%和 5.6%,第二次工况改变后的调节时间分别为 110、160、230 s,超调量分别为 1.2%、3.9%、7.1%。由此可知,改进 PSO-模糊 GPC 策略相比改进 PSO-GPC 和 DMC 策略拥有更优越的动态响应能力,受现场工况变化影响更小,鲁棒性更强。

5 工程应用

为了验证本文提出的燃气发电锅炉主汽压广义预测控制策略的有效性,以某钢铁厂冶金自备电厂 150 t 煤气发电锅炉为对象进行工程应用。保持原系统结构和硬件配置不变,在现场增加一台工控机作为优化控制系统,并在 DCS 系统中添加控制权切换程序,利用本文提出的改进 PSO-模糊 GPC 策略对主汽压进行优化控制。控制系统通过 OPC 协议从原 DCS 系统读取锅炉主汽压控制系统各项参数,并采集控制系统实时曲线。主汽压控制系统结构如图 8 所示。

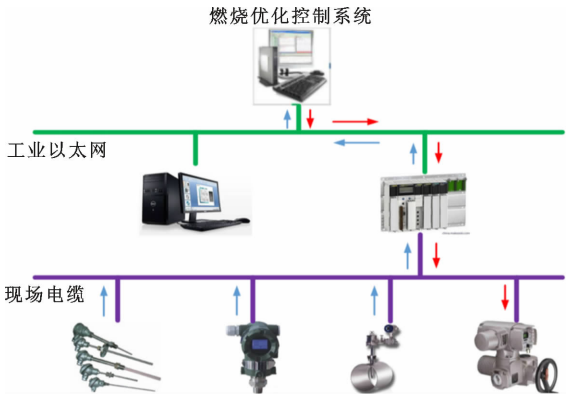


图 8 主汽压控制系统结构

图 9 为采用 DMC 控制、改进 PSO-GPC 控制和改进 PSO-模糊 GPC 控制方案的主汽压实时曲线,采集时间均为 4 h。

由图 9 可知:DMC 控制的主汽压曲线基本稳定在 5.8 MPa,最低为 5.43 MPa,最高为 6.21 MPa,上下波动为 7%;改进 PSO-GPC 控制的主汽压曲线基本稳定在 6.07 MPa,最低为 5.69 MPa,最高为 6.29 MPa,上下波动为 6.2%;本文设计的改进 PSO-模糊 GPC 控制的主汽压曲线基本稳定在 6 MPa 左右,最低为 5.85 MPa,最高为 6.15 MPa,上

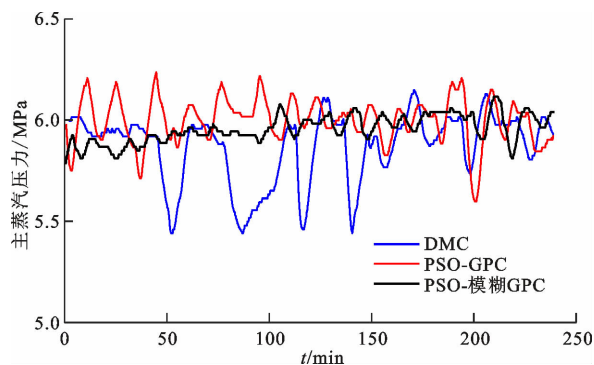


图9 主蒸汽压力控制实时曲线

下波动为2.7%。对比可知,改进 PSO-模糊 GPC 控制方案的主汽压波动更小,更加稳定,可取得更好的控制效果。

6 总 结

燃气发电锅炉主汽压控制系统具有大惯性、纯滞后的特点,且机组运行时易受外界干扰,导致被控对象模型参数变化。鉴于常规控制策略无法达到理想的控制效果,本文提出一种基于改进 PSO 优化的主汽压模糊 GPC 控制策略,利用 FFRLS 算法建立系统模型,运用改进 PSO 算法和控制加权系数模糊自校正对 GPC 控制策略中的输入增量 $\Delta u(k)$ 进行同步寻优,克服了主汽压控制系统惯性和时滞的动态特性,从而实现了主汽压控制系统的有效控制。仿真结果表明,本文所提控制策略在抗干扰能力、调节时间和超调量方面均优于改进 PSO-GPC 控制策略和 DMC 控制策略。工程应用表明,采用本文所提控制策略的主汽压实时曲线的上下波动仅为2.7%,进一步证明了该控制策略稳定性良好,受模型失配影响更小,鲁棒性更强。本文提出的控制策略对其他燃煤或燃油发电锅炉主汽压控制应具有一定的借鉴意义。

未来可探索采用参数更少的预测模型实现主汽压的有效预测。

参考文献:

[1] 夏新华, 高宗和, 徐帆, 等. 基于煤气调度的高耗能企业自备电厂发电优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 160-167.

XIA Xinhua, GAO Zonghe, XU Fan, et al. Gas scheduling based generation dispatching of self-provided power plants for energy-intensive enterprises [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 160-167.

[2] WANG Zhongjie, HAN Ning, WANG Jia. The study on the fuzzy control algorithm for main steam pressure control of circulated fluidized bed boiler [J]. Advanced Materials Research, 2011, 383/384/385/386/387/388/389/390: 2092-2096.

[3] SIVAKUMAR L, JIMS S H, DHARMALINGAM S. An investigation on the efficacy of classical tuning algorithm to satisfy advanced requirements: control of main steam pressure during fuel switching and load disturbances in coal fired boilers [J]. IFAC-PapersOn-Line, 2016, 49(1): 443-449.

[4] 曾帅, 史智俊, 王鹏, 等. 舰用蒸汽动力系统主汽压力控制方法仿真 [J]. 化工学报, 2016, 67(S1): 334-340.

ZENG Shuai, SHI Zhijun, WANG Peng, et al. Dynamic simulation of control for main steam pressure of marine steam power system [J]. CIESC Journal, 2016, 67(S1): 334-340.

[5] 郑跃, 刘禾, 宫奎元. 一种基于主汽压预测的火电机组负荷控制方法 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(4): 37-42.

ZHENG Yue, LIU He, GONG Kuiyuan. A load control method of thermal power unit based on predictive main steam pressure [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(4): 37-42.

[6] 曾德良, 高耀崑, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4819-4826, 4983.

ZENG Deliang, GAO Yaokui, HU Yong, et al. Optimized control of the drum boiler power plant's coordination system based on stair-like generalized predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4819-4826, 4983.

[7] 高锦, 章家岩, 冯旭刚, 等. 基于失配补偿 Smith-RBF 神经网络的主蒸汽压力控制技术 [J]. 重庆大学学报, 2019, 42(7): 105-113.

GAO Jin, ZHANG Jiayan, FENG Xugang, et al. Main steam pressure control technique based on mismatch compensation Smith predictor and RBF neural network [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(7): 105-113.

[8] 薛美盛, 孙德敏, 吴刚. 火电厂锅炉主蒸汽压力的阶梯式广义预测控制 [J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 685-689.

XUE Meisheng, SUN Demin, WU Gang. Stair-like generalized predictive control for main-steam pressure of boilers in a fire power plant [J]. Journal of Univer-

- sity of Science and Technology of China, 2002, 32(6): 685-689.
- [9] 张师帅, 周怀春, 贾涛, 等. 基于炉膛辐射能信号的主汽压特性及仿真研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 54-56.
ZHANG Shishuai, ZHOU Huaichun, JIA Tao, et al. Characteristics of main steam pressure and its simulation based on furnace radiant energy signal [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2002, 30(2): 54-56.
- [10] GUZMAN J L, BERENGUEL M, DORMIDO S. Interactive teaching of constrained generalized predictive control [J]. IEEE Control Systems, 2005, 25(2): 52-66.
- [11] 赵乃龙, 王伟哲, 刘应征. 主蒸汽温度和压力波动对汽轮机转子蠕变疲劳损伤的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(2): 127-133.
ZHAO Nailong, WANG Weizhe, LIU Yingzheng. Influence of main steam temperature and pressure fluctuations on the creep-fatigue damage of a steam turbine rotor [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(2): 127-133.
- [12] 尹良震, 李奇, 洪志湖, 等. PEMFC 发电系统 FFRLS 在线辨识和实时最优温度广义预测控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3223-3235, 3378.
YIN Liangzhen, LI Qi, HONG Zhihu, et al. FFRLS online identification and real-time optimal temperature generalized predictive control method of PEMFC power generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3223-3235, 3378.
- [13] 张金营. 基于 γ 增量型 SGPC 的火电机组脱硝控制 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5824-5828, 5910.
ZHANG Jinying. Denitration control of thermal power unit based on gamma incremental SGPC [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5824-5828, 5910.
- [14] 薛生辉, 曲俊海, 王永宏, 等. 比例积分控制加广义预测控制算法及其应用 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1320-1330.
XUE Shenghui, QU Junhai, WANG Yonghong, et al. Proportional-integral control plus generalized predictive control algorithm and its application [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(9): 1320-1330.
- [15] 王珊, 刘明, 严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 159-166.
WANG Shan, LIU Ming, YAN Junjie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 159-166.
- [16] 胡旺, 李志蜀. 一种更简化而高效的粒子群优化算法 [J]. 软件学报, 2007, 18(4): 861-868.
HU Wang, LI Zhishu. A simpler and more effective particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 861-868.
- [17] 陈增强, 吴瑕, 孙明玮, 等. 时滞系统的自抗扰广义预测控制的性能分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 1960-1970.
CHEN Zengqiang, WU Xia, SUN Mingwei, et al. Performance analysis of active disturbance rejection generalized predictive control on time-delay systems [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8): 1960-1970.

(编辑 陶晴)