

# 考虑涉网性能的超超临界供热机组气温自动化控制技术

谢进安, 蒋炜, 夏莹, 洪英立, 杨海滨

(浙江浙能镇海发电有限责任公司, 浙江 宁波 315204)

**摘要:** 火电厂涉网过程中超超临界供热机组存在气温大延迟与非线性等特点, 导致其气温自动化控制效果较差。为此, 研究考虑涉网性能的超超临界供热机组气温自动化控制技术, 提升气温自动化控制效果。利用超超临界供热机组的线性状态空间模型, 预测供热机组输出的气温值; 通过改进蝗虫优化算法, 优化模糊PID控制算法的比例、积分、微分系数; 在系数优化后的模糊PID算法内, 输入预测气温值与设定气温值间的差值, 以及差值变化率, 输出供热机组自动化控制结果。实验证明, 该技术可有效预测超超临界供热机组的气温, 完成气温自动化控制; 经过该技术控制后, 供热机组的气温始终稳定在设定温度附近, 且波动幅度较小; 该技术可有效降低供热机组的瞬时给煤量, 提升其涉网性能。

**关键词:** 涉网性能; 超超临界; 供热机组; 气温控制; 自动化; 模糊PID

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0154-05

## Automatic Temperature Control Technology of Ultra-supercritical Heating Unit Considering Netted Performance

XIE Jin-an, JIANG Wei, XIA Ying, HONG Ying-li, YANG Hai-bin

(Zhejiang Zheneng Zhenhai Power Generation Co., Ltd., Ningbo 315204 China)

**Abstract:** In the grid-related process of thermal power plant, the ultra-supercritical heating unit has the characteristics of large temperature delay and nonlinearity, which leads to the poor effect of automatic temperature control. Therefore, the temperature automation control technology of ultra-supercritical heating units is studied considering the performance of the network, so as to improve the effect of temperature automation control. The linear state space model of the ultra-supercritical heating unit is used to predict the output temperature of the unit. By improving the locust optimization algorithm, the proportion, integral and differential coefficients of fuzzy PID control algorithm are optimized. In the fuzzy PID algorithm after coefficient optimization, it inputs the difference between the predicted temperature and the set temperature, as well as the change rate of the difference, outputs the automatic control result of the heating unit. Experimental results show that the technology can effectively predict the temperature of the ultra-supercritical heating unit and complete the automatic temperature control. After the technology control, the temperature of the heating unit is always stable near the set temperature, and the fluctuation range is small. The technology can effectively reduce the instantaneous coal feed and improve the grid performance of the heating unit.

**Keywords:** network-related performance; ultra-supercritical; heating unit; temperature control; automation; fuzzy PID

### 0 引言

新能源具备较强的随机性与不确定性, 在电网中接入大量新能源, 会影响电网的稳定运行<sup>[1]</sup>。以提升火电机组变负荷运行能力的方式, 可提升新能源的消纳能力<sup>[2]</sup>。提升火电机组变负荷运行能力最有效的办法是以机组储热方式, 加强超超临界供热机组的调峰运行能力<sup>[3]</sup>。而超超临界供热机组的调峰运行能力, 与其气温控制效果息息相关<sup>[4]</sup>。为此设计超超临界供热机组气温自动化控制技术, 可确保供热机组气温稳定在允许范围内, 避免因负荷变化大, 导致其气温偏差超限, 影响电网稳定运行<sup>[5]</sup>。

例如, 邵峰等人依据实时背压与供热量, 求解基准工况的功率变换量, 同时和温度控制指令展开加法运算, 得到最优初压函数的新温度控制指令, 完成供热机组气温自动化控制。该技术可有效自动化控制超超临界供热机组的气温<sup>[6]</sup>。丁建良等人针对气温控制的延迟性与非线性等问题, 设计仿人智能气温控制技术, 利用粒子群算法优化仿人智能气温控制技术的参数, 提升气温自动化控制效果。该技术可有效提升超超临界供热机组的鲁棒性, 具备较优的气温自动化控制效果, 对于提升供热机组的经济性具有重要意义<sup>[7]</sup>。涉网性能属于影响电网稳定运行的关键因素, 但这两种技术均未考虑超超临界供热机组的涉网性能, 随着超超临界供热机组在电网中的大量接入, 导致其涉网性能有所降低, 影响电网运行的稳定性。

\*基金项目: 浙江省科学技术研究项目 (ZFD12.002.271-2022)

收稿日期: 2023-11-22

为此,研究考虑涉网性能的超超临界供热机组气温自动化控制技术,提升气温自动化控制的稳定性以及供热机组的涉网性能,确保电网稳定运行。

## 1 考虑涉网性能的供热机组气温自动化控制

超超临界供热机组的输入由磨煤机前给煤质量流量 $q_m$ 、供热调节阀开度 $\psi_H$ 、汽轮机调节阀开度 $\psi_\theta$ ;输出是主汽温度 $T$ 、汽轮机前压力 $P_\theta$ 、供热抽汽质量流量 $q_H$ 。根据超超临界供热机组的输入与输出变量,建立供热机组的线性状态空间模型,公式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Dv(t) \\ y(t) = W\dot{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $t$ 时刻,超超临界供热机组的状态变量向量是 $x(t)$ ;超超临界供热机组矩阵是 $A$ ;输入向量是 $v(t)$ , $v(t)$ 内包含 $q_m$ 、 $\psi_H$ 、 $\psi_\theta$ ;输出向量即超超临界供热机组气温是 $y(t)$ , $y(t)$ 内包含 $T$ 、 $P_\theta$ 、 $q_H$ ;输入、输出矩阵是 $D$ 、 $W$ 。

依据超超临界供热机组的线性状态空间模型,设计供热机组气温自动化控制技术,具体步骤如下:

(1) 利用超超临界供热机组的线性状态空间模型,依据 $t$ 时刻,供热机组状态量的变化量以及输出值,预测 $t+1$ 时刻的输出值 $T$ 、 $P_\theta$ 、 $q_H$ 。

(2) 利用改进蝗虫优化算法,优化模糊PID控制算法的参数,在参数优化后的模糊PID控制算法内,输入预测值和指定值间的误差以及误差变化率,输出超超临界供热机组气温自动化控制结果。

### 1.1 基于线性状态空间模型的供热机组输出预测

在式(1)的线性状态空间模型基础上,考虑超超临界供热机组的涉网性能,并取其增量后,获取:

$$\begin{cases} \Delta x(t+1) = \alpha\beta A\Delta x(t) + D\Delta v(t) \\ y(t+1) = W\Delta x(t+1) + y(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中,超超临界供热机组输出预测精度是 $\alpha$ ;气温自动化控制性能是 $\beta$ ; $\alpha$ 与 $\beta$ 实现了超超临界供热机组涉网性能和气温自动化控制指令的关联,可促进其提高涉网性能<sup>[8-10]</sup>;时刻 $t$ 和 $t-1$ 间,供热机组状态变量的变化量是 $\Delta x(t) = x(t) - x(t-1)$ ;输入变化量是 $\Delta v(t) = v(t) - v(t-1)$ 。

推导获取:

$$\begin{aligned} \Delta x(t+k|t) &= \alpha\beta A^k \Delta x(t) + \alpha\beta A^{k-1} D\Delta v(t) \\ &+ \alpha\beta A^{k-2} D\Delta v(t+1) + \dots + \alpha\beta A^{k-m} D\Delta v(t+m-1) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $W$ 的跨度步数是 $k$ ;  $D$ 的跨度步数是 $m$ ;超超临界供热机组状态变量的变化量预测值是 $\Delta x(t+k|k)$ ;  $t$ 时刻对 $t+k$ 时刻的预测时刻是 $t+k|k$ 。

$t+k$ 时刻的预测结果为:

$$\begin{aligned} y(t+k|t) &= \sum_{i=1}^k W\alpha\beta A^i \Delta x(t) + \sum_{i=1}^k W\alpha\beta A^{i-1} D\Delta v(t) \\ &+ \sum_{i=1}^{k-1} W\alpha\beta A^{i-1} D\Delta v(t+1) + \dots \\ &+ \sum_{i=1}^{k-m+1} W\alpha\beta A^{i-1} D\Delta v(t+m-1) + y(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,超超临界供热机组输出的预测结果是 $y(t+k|k)$ ;第 $i$ 、 $i-1$ 步时的供热机组矩阵是 $A^i$ 、 $A^{i-1}$ 。

令跨度是 $k$ 的输出矩阵为:

$$Y_k(t+1) = [y(t+1|t) \ y(t+2|t) \ \dots \ y(t+k|t)]_{k \times 1} \quad (5)$$

令跨度是 $m$ 的输入矩阵为:

$$\Delta V(t) = [\Delta v(t) \ \Delta v(t+1) \ \dots \ \Delta v(t+m-1)]_{m \times 1} \quad (6)$$

跨度是 $k$ 的预测输出矩阵为:

$$Y_k(t+1|t) = C_x \Delta x(t) + Iy(t) + C_v \Delta V(t) \quad (7)$$

其中, $W$ 和 $A$ 间的关联矩阵是 $C_x = \begin{bmatrix} W\alpha\beta A & \sum_{i=1}^2 W\alpha\beta A^i & \dots \\ \sum_{i=1}^k W\alpha\beta A^i \end{bmatrix}_{k \times 1}$ ;  $W$ 和预测输出间的关联矩阵是 $I$ ;  $D$ 与 $W$ 间的关联矩阵是

$$C_v = \begin{bmatrix} WD & 0 & \dots & 0 \\ \sum_{i=1}^2 W\alpha\beta A^{i-1} D & WD & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m W\alpha\beta A^{i-1} D & \sum_{i=1}^{m-1} W\alpha\beta A^{i-1} D & \dots & WD \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=1}^k W\alpha\beta A^{i-1} D & \sum_{i=1}^{k-1} W\alpha\beta A^{i-1} D & \dots & \sum_{i=1}^{k-m+1} W\alpha\beta A^{i-1} D \end{bmatrix}_{k \times m}$$

### 1.2 基于模糊PID控制算法的供热机组气温自动化控制

以上述预测气温 $y_k(t+1|t)$ 与设定气温 $\hat{y}(t)$ 间的差值 $e(t) = |y_k(t+1|t) - \hat{y}(t)|$ ,以及气温差值变化率 $\Delta e(t)$ ,为模糊PID控制算法的输入,输出超超临界供热机组气温自动化控制结果<sup>[11-12]</sup>。模糊PID控制算法的气温自动化控制输出方程为:

$$g(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

式中,超超临界供热机组的气温自动化控制结果是 $g(t)$ ;比例、积分、微分系数是 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 。

预测气温与设定气温之间的差值 $e(t)$ ,以及差值变化率 $\Delta e(t)$ ,均属于不间断的数值<sup>[13-14]</sup>,利用模糊化处理,可将 $e(t)$ 、 $\Delta e(t)$ 离散至某一区间中,有限个整数值,便于后续供热机组的气温自动化控制<sup>[15]</sup>。若将区间 $[z, q]$ 的精准数值 $e$ ,模离散成对称 $[-\eta, \eta]$ 区间的离散数值 $r$ ,则 $r$ 的计算公式为:

$$r = \frac{2\eta e - \eta(q+z)}{q-z} \quad (9)$$

如果  $r$  不是整数, 可将  $r$  近似成整数。

将区间  $[z, q]$  的精准数值  $e$ , 离散成不对称  $[-\eta, \tau]$  区间的离散数值  $r$ , 则  $r$  的计算公式为:

$$r = \frac{e(\eta+\tau) - \frac{(q+z)(\eta+\tau)}{2}}{q-z} \quad (10)$$

同理, 模糊化处理  $\Delta e(t)$ , 得到模糊化后的偏差变化率  $\Delta r(t)$ 。

依据模糊化后的  $r(t)$  与  $\Delta r(t)$  制定模糊PID控制算法的模糊控制规则  $\{NB, NS, 0, PS, PB\}$ , 分别表示负大、负小、零、正小、正大。

利用式(8)结合制定的模糊控制规则, 计算超超临界供热机组气温自动化模糊控制结果  $\hat{g}(t)$ , 为获取气温自动化控制的精准数值, 利用重心法, 对气温自动化模糊控制结果, 进行解模糊化, 计算公式如下:

$$g(t) = \frac{\int \hat{g}(t) \mu(\hat{g}(t)) d\hat{g}(t)}{\int \mu(\hat{g}(t)) d\hat{g}(t)} \quad (11)$$

式中,  $\hat{g}(t)$  的隶属度函数是  $\mu(\hat{g}(t))$ 。

### 1.3 供热机组气温自动化控制参数优化

为提升超超临界供热机组气温自动化控制精度, 利用改进蝗虫算法, 优化模糊PID控制算法的  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 。具体步骤如下:

步骤1: 参数初始化, 设置最大迭代次数  $o_{max}$ , 生成初始种群;

步骤2: 以蝗虫位置为模糊PID算法中  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的解。以气温自动化控制的平均绝对百分比误差, 为蝗虫个体适应度值  $f$ ;

步骤3: 调整线性缩减因子  $\theta$ , 公式如下:

$$\theta = (\theta_{max} - \theta_{min}) - (\theta_{max} - \theta_{min}) \times \sin\left[\left(\frac{o}{o_{max}}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{2}\right] \quad (12)$$

式中,  $\theta$  的最大、最小值是  $\theta_{max}$ 、 $\theta_{min}$ ; 迭代次数是  $o$ 。

步骤4: 在蝗虫算法内, 添加柯西-高斯混合变异, 更新蝗虫位置  $\chi$ , 利于算法跳出局部极值, 添加柯西算子  $L$  后,  $\chi$  的更新公式如下:

$$\chi_{new,j}(o+1) = \theta \left[ \chi_j(o) + L \oplus [\chi_{best}(o) - \chi'(o)] \right] \quad (13)$$

式中, 迭代次数是  $o$ 、 $o+1$  时, 第  $j$  只蝗虫的位置是  $\chi_j(o)$ 、 $\chi_{new,j}(o+1)$ ; 随机位置是  $\chi'(o)$ ; 最佳位置是  $\chi_{best}(o)$ 。

添加高斯算子  $G$  后,  $\chi$  的更新公式如下:

$$\chi_{new,j}(o+1) = \theta \left[ \chi_j(o) + G \oplus [\chi_{best}(o) - \chi'(o)] \right] \quad (14)$$

利用  $f$  的变化率  $\rho$  确定在算法内, 添加  $L$  或是  $G$ , 更新蝗虫位置,  $\rho$  的计算公式如下:

$$\rho = \left| \frac{f(\chi_{best}(o)) - f(\chi_{best}(o-\sigma))}{f(\chi_{best}(o))} \right| \quad (15)$$

式中,  $\chi_{best}(o)$  的适应度是  $f(\chi_{best}(o))$ ; 经过不间断的  $\sigma$  代后,  $\chi_{best}(o-\sigma)$  的适应度是  $f(\chi_{best}(o-\sigma))$ 。

设置阈值  $\varepsilon$ , 在  $\rho \leq \varepsilon$  情况下, 那么在算法内添加  $G$ , 利用式(14)更新蝗虫位置; 在  $\rho > \varepsilon$  情况下, 那么在算法内添加  $L$ , 利用式(13)更新蝗虫位置。

为加快算法的收敛速度, 在算法内添加最优邻域扰动策略, 改进蝗虫位置更新公式, 改进后的蝗虫位置更新公式如下:

$$\hat{\chi}_{new,j}(o+1) = \begin{cases} \chi_{new,j}(o) + \frac{\gamma \cdot \chi_{new,j}(o)}{2}, & f(\hat{\chi}_{new,j}(o)) < f(\chi_{new,j}(o)) \\ \chi_{new,j}(o), & f(\hat{\chi}_{new,j}(o)) \geq f(\chi_{new,j}(o)) \end{cases} \quad (16)$$

式中, 随机数是  $\gamma$ ; 扰动后蝗虫位置  $\hat{\chi}_{new,j}(o)$  的适应度是  $f(\hat{\chi}_{new,j}(o))$ 。

利用式(16)更新蝗虫位置, 并记录最佳位置。

步骤5: 分析蝗虫个体是否达到  $o_{max}$ , 如果达到  $o_{max}$ , 那么输出  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的最佳解, 如果未达到  $o_{max}$ , 那么跳转至步骤2;

步骤6: 将优化后的  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ , 代入模糊PID控制算法内, 得到最佳的超超临界供热机组气温自动化控制结果。

## 2 实验结果与分析

以浙江浙能镇海发电有限责任公司#2机组的超超临界供热机组为实验对象, 利用本文技术对超超临界供热机组进行气温自动化控制, 提升发电公司供电的稳定性。该超超临界供热机组的稳态指标以及变负荷动态指标如表1所示。

表1 供热机组稳态指标与变负荷动态指标

指标类型	稳态情况	变负荷动态情况
变负荷率	-	>1.5 Pe%/min
负荷响应延迟	-	<10s
控制性能	>95%	>90%
主汽压力偏差	≤±2%	≤±3%
主汽温度偏差	≤±5℃	≤±10℃
主汽温度平均提升	>2℃	>3℃
再热气温偏差	≤±4℃	≤±8℃
再热气温平均提升	>2℃	>3℃
NOx浓度偏差	≤±15 mg/m <sup>3</sup>	≤±25 mg/m <sup>3</sup>
高低加水位	±30 mm	±50 mm
炉膛负压	±100 Pa	±200 Pa
一次调频动作正确率	>80%	>80%
一次调频动作效果	>0.6	>0.6
预测精度	>90%	>90%

利用本文技术对该超超临界供热机组不同时刻的气

温进行预测,预测结果如图1所示。根据图1可知,本文技术可有效预测超超临界供热机组的气温,当供热机组运行至1000s左右时,气温升至最高,接近595℃,当供热机组运行至3800s左右时,气温降至最低,接近508℃。未经自动化控制前,该超超临界供热机组的气温波动幅度较大。实验证明:本文技术具备超超临界供热机组气温预测的可行性。

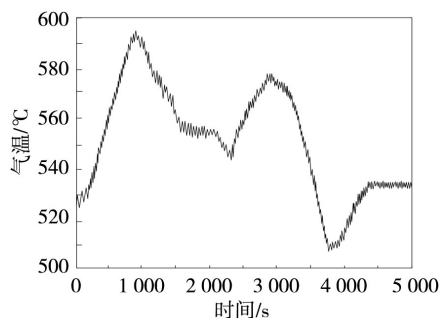


图1 超超临界供热机组的气温预测结果

在稳态情况下,利用本文技术对该超超临界供热机组进行气温自动化控制,设定气温为580℃,本文技术的气温自动化控制结果如图2所示。根据图2可知,经过本文技术自动化控制后,该超超临界供热机组运行至200s左右时,便可将供热机组的气温控制在580℃左右,自动化控制的时间较短,本文技术自动化控制后,供热机组的气温始终在580℃左右波动,最高气温在584℃左右,最低气温在579℃左右,气温偏差分别是+4℃、-1℃,稳态情况下供热机组气温偏差是 $< \pm 5^{\circ}\text{C}$ ,本文技术自动化控制后的温度并未超过气温偏差指标值,说明本文技术自动化控制后供热机组的气温,符合其稳态运行指标。实验证明:本文技术可有效自动化控制供热机组气温,令气温稳定在设定气温值附近,且自动化控制速度较快。

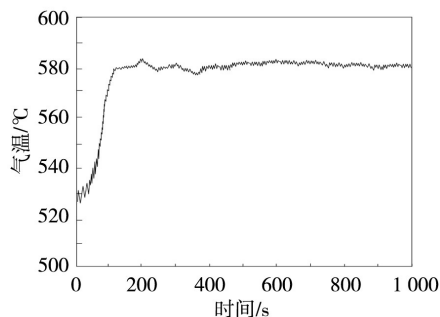


图2 超超临界供热机组气温自动化控制结果

当超超临界供热机组运行至600s时,在该供热机组上输入电负荷斜坡上升指令,电负荷斜坡上升值是5 MW/min,分析变负荷动态情况下,本文技术的气温自动化控制效果,分析结果如图3所示,气温设定值为590℃。根据图3可知,在超超临界供热机组运行至1100s左右时,气温稳定在590℃附近,最高气温在598℃左右,最低气温在

585℃左右,气温偏差分别是+8℃、-5℃,变负荷动态情况下供热机组气温偏差是 $< \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,本文技术自动化控制后的温度并未超过气温偏差指标值,说明本文技术自动化控制后供热机组的气温,符合其变负荷动态运行指标。实验证明:在变负荷动态情况下,本文技术依旧可有效自动化控制供热机组气温,令气温稳定在设定气温值附近,且气温自动化控制的超调量较小。

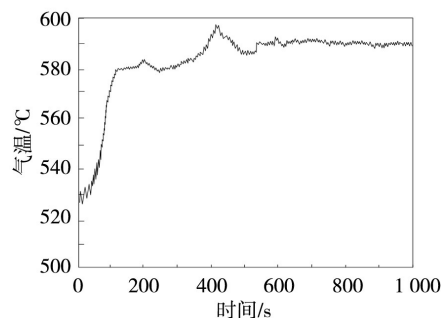
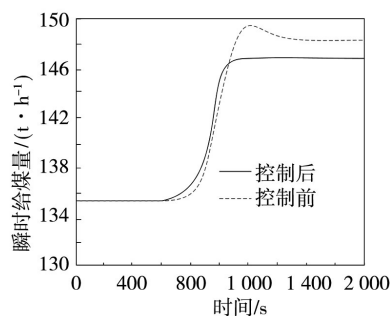
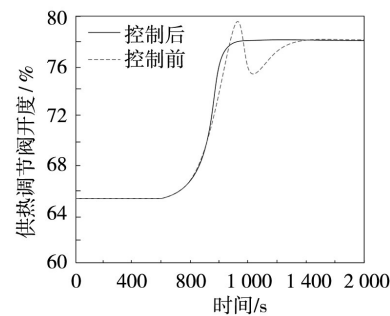


图3 变负荷动态时气温自动化控制结果



(a) 瞬时给煤量的变化情况



(b) 供热阀门调节开度的变化情况

图4 瞬时给煤量与供热阀门调节开度的变化情况

分析变负荷动态情况下,应用本文技术前后,该超超临界供热机组瞬时给煤量与供热阀门调节开度的变化情况,分析结果如图4所示。根据图4(a)可知,当超超临界供热机组运行至600s时,供热机组接收到电负荷斜坡上升指令后,需将供热机组气温提升至590℃;应用本文技术后,在供热机组运行至1100s左右时,便完成瞬时给煤量的重新设置,且无超调情况;应用本文技术前,供热机组运行至1500s左右时,才完成瞬时给煤量的重新设置,且超调量较大,最终的瞬时给煤量也明显高于应用本文

技术后,说明应用本文技术后还可以降低超超临界供热机组的瞬时给煤量。根据图4(b)可知,应用本文技术后,供热机组的供热调节阀门开度,在1 100 s左右时,便完成操作,且无超调情况;应用本文技术前,供热调节阀门开度在1 600 s左右时才完成操作,且存在严重的超调情况。实验证明:应用本文技术后可有效降低超超临界供热机组的瞬时给煤量,且经过控制后的供热调节阀门开度并无任何波动情况,说明本文技术自动化控制的稳定性较强,并有效提升发电公司的经济效益。

表2 超超临界供热机组的涉网性能

时间	稳态情况/%		变负荷动态情况/%	
	预测精度	控制性能	预测精度	控制性能
1天	95.6	97.8	95.3	96.7
2天	96.8	98.2	96.5	97.1
3天	97.2	98.5	96.6	97.4
4天	97.6	98.9	97.3	97.8
5天	97.9	99.2	97.5	98.5
6天	98.2	99.2	97.9	98.5
7天	98.5	99.2	98.2	98.5

分析在该发电公司应用本文技术一周后,该超超临界供热发电机组的涉网性能,利用预测精度与气温自动化控制性能为衡量指标,分析结果如表2所示。根据表2可知,随着应用本文技术时间的延长,在稳态与变负荷动态情况下,该超超临界供热机组,预测精度指标与控制性能指标值均呈上升趋势,对比表1可知,两种情况下,最低预测精度与控制性能,均高于其运行的要求值,说明应用本文技术后,可提升超超临界供热机组的涉网性能。

### 3 结束语

电网中不断接入新能源,导致电网结构的繁琐程度越来越高,影响电网供电稳定性。加快火电机组的循环热效率,可提升火电机组的新能源消纳能力,提升电网供电稳定性。为此,研究考虑涉网性能的超超临界供热机组气温自动化控制技术,避免供热机组气温自动化控制过程,影响其供电质量与运行稳定性等涉网性能,提升气温自动化控制效果,提升发电公司的经济效益。

(上接第133页)

[9] 张鹏,张峻霞.基于CNN-ENN的改进串行混合网络及多传感器信息融合的运动意图识别研究[J].传感技术学报,2021,34(7):932-938.

[10] 朱菊香,谷卫,罗丹悦,等.基于PSO优化BP神经网络的多传感器数据融合[J].中国测试,2022,48(8):94-100.

[11] 曹轲,谭冲,刘洪,等.基于改进灰狼算法优化BP神经网络的无线传感器网络数据融合算法[J].中国科学院大学学报,2022,39(2):232-239.

[12] 蔺万科,宋华,南新元,等.一种基于最优聚类中心与权重

### 参考文献:

[1] 邢智炜,骆意,王立,等.超超临界机组柔性快减负荷控制策略的研究与应用[J].中国电机工程学报,2020,40(S1):204-210.

[2] 于国强,胡尊民,张天海.全工况下的1000 MW超超临界机组协调控制系统多模型广义预测控制方法及其工程应用[J].热能动力工程,2020,35(5):9-16.

[3] 齐结红,潘宇,钱虹,等.自动发电控制优先的厂级多机组供热经济优化调度研究[J].热力发电,2022,51(9):63-71.

[4] 高奎,谭祥帅,郭三虎,等.超超临界机组辅机故障减负荷过程重要运行参数控制优化[J].热力发电,2021,50(7):91-99.

[5] 屈小凡,吕剑虹.深度调峰超超临界机组过热汽温迭代学习预测控制[J].动力工程学报,2020,40(8):614-620,634.

[6] 邵峰,谭锐.供热机组最优初压运行的自动控制方法[J].汽轮机技术,2021,63(1):43-45.

[7] 丁建良,于国强,罗建裕.深度调峰下超超临界机组再热汽温控制优化[J].中国电力,2020,53(5):143-149.

[8] 马良玉,陈婷婷,刘文杰,等.基于神经网络的超临界机组过热汽温设定值优化补偿[J].动力工程学报,2021,41(1):36-42.

[9] 马良玉,郑佳奕.基于动态模糊神经网络的超临界机组协调控制[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):96-103.

[10] 孙宇贞,唐毅伟,李帅.基于改进粒子群算法的超超临界燃煤机组负荷系统建模[J].系统仿真学报,2021,33(4):875-882.

[11] 吕当振,宾谊沅,李文军,等.600 MW超临界机组锅炉轴流风机并列与过程控制技术[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5574-5583.

[12] 牟文彪,杨敏,陆陆,等.深度调峰超临界直流炉机组快速降负荷工况过热汽温控制[J].中国测试,2021,47(9):107-112.

[13] 白光亚,张诚,李天佼,等.特高压换流站智能滤油控制方案设计[J].自动化技术与应用,2024,43(9):1-3,29.

[14] 戎瑞,张志强,柳行.集中供热机组全自动控制方法研究[J].控制工程,2021,28(4):815-820.

[15] 高远,田亮.供热机组热负荷解耦控制[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(1):87-95.

作者简介:谢进安(1984-),男,本科,工程师,研究方向:电厂热控设备维护管理。

欧氏距离的多源异质传感器数据融合方法[J].传感技术学报,2022,35(1):49-56.

作者简介:王海明(1982-),男,本科,高级工程师,研究方向:变电设备维护。