

文章编号:1674-7607(2025)12-2034-10

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250375

基于模糊智能预测控制的燃煤机组低温省煤器多变量解耦控制策略

张明琦¹, 李 军¹, 高 林¹, 王 林¹, 周俊波¹,
高耀焄¹, 雷杨祥¹, 王大伟², 王立成²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710043; 2. 陕西延长石油富县发电有限公司, 陕西延安 727599)

摘 要: 针对燃煤机组低温省煤器系统的大迟延、大惯性、强耦合等复杂的运行特性, 提出了一种基于模糊智能预测控制的多变量解耦控制策略。首先, 建立以省煤器出口烟温和暖风器出口风温为被控量、水泵变频器和暖风器出口调节阀为控制量的多变量耦合数学模型, 并利用金豺算法优化的偏最小二乘法辨识获得模型参数。在此基础上, 基于模糊智能预测控制算法设计多变量前馈解耦策略, 对低温省煤器系统进行解耦控制。仿真结果表明: 相比于传统控制方法, 基于模糊智能预测算法的多变量解耦控制具有更好的控制精度和鲁棒性。实际应用结果表明: 省煤器出口烟温和暖风器出口风温采用模糊智能预测算法的多变量解耦控制策略控制效果良好, 其中实际出口烟温与设定值偏差小于 5 °C, 实际出口风温与设定值偏差小于 3 °C, 提高了系统的稳定性, 并且波动幅度明显减小, 符合工业生产要求。

关键词: 燃煤机组; 模糊智能预测控制; 解耦控制; 偏最小二乘法; 金豺算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

学科分类号: 470.30

A Multivariable Decoupling Control Strategy for a Low-temperature Economizer in a Coal-fired Power Unit Based on Fuzzy Intelligent Predictive Control

ZHANG Mingqi¹, LI Jun¹, GAO Lin¹, WANG Lin¹, ZHOU Junbo¹, GAO Yaokui¹,
LEI Yangxiang¹, WANG Dawei², WANG Licheng²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., LTD, Xi'an 710043, Shaanxi Province, China;

2. Shaanxi Yanchang Petroleum Fuxian Power Generation Co., Ltd., Yan'an 727599,

Shaanxi Province, China)

Abstract: To address the complex operational characteristics of the low-temperature economizer system of coal-fired units, such as large time delay, significant inertia and strong coupling, a multivariate decoupling control strategy based on fuzzy intelligent predictive control was proposed. First, a multivariate coupled mathematical model was established, taking the flue gas temperature at the outlet of the economizer and the air temperature at the outlet of the heater as the controlled variables, and the water pump frequency converter and the air heater outlet control valve as the control variables. The model parameters were then

收稿日期: 2025-06-19

修订日期: 2025-08-29

基金项目: 华能集团科技资助项目(HNKJ24-H136)

作者简介: 张明琦(2001—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为智能发电控制技术, E-mail: 1196137309@qq.com。

identified using the partial least squares method optimized by the golden jackal optimization algorithm. Building on this model, a multivariate feed forward decoupling strategy was designed based on the fuzzy intelligent predictive control algorithm to decouple the control for the low-temperature economizer system. The simulation results show that compared with the traditional control method, the multivariate decoupling control based on the fuzzy intelligent predictive algorithm exhibits superior control accuracy and robustness. The practical application results indicate that the multivariate decoupling control strategy using fuzzy intelligent predictive algorithm achieves excellent control performance for both the economizer outlet flue gas temperature and the air heater outlet air temperature. The deviation between the actual outlet flue gas temperature and its setpoint is kept within 5°C , and the deviation between the actual outlet air temperature and its setpoint is kept within 3°C . This has enhanced the stability of the system and significantly reduced fluctuation amplitude, meeting the requirements of industrial production.

Key words: coal-fired unit; fuzzy intelligent predictive control; decoupling control; partial least squares method; golden jackal algorithm

近年来,国家对能源化工企业的节能环保要求日趋严格,各企业不断通过技术更新、设备改造等手段,提高生产效率、降低能源消耗,保证各项节能环保参数达到要求。对于火力发电厂,锅炉的热量损失以排烟热量损失为主(一般占锅炉热量损失的 $60\%\sim 70\%$ ^[1-2]),开展锅炉排烟热量损失综合利用工作,具有非常重要的意义。在锅炉排烟系统中加装低温省煤器,能够降低电除尘器耗电率,提高凝结水温度,减少热量损失,节约发电成本^[3-5]。然而,低温省煤器系统作为一个具有大迟延、大惯性和强耦合性等特点的复杂系统,影响因素众多且具有较强的不确定性,常规的控制策略较难满足需求,因此亟需基于先进智能控制算法,研究低温省煤器多变量解耦控制策略。

目前,国内外关于低温省煤器的研究主要集中在优化改造和事故诊断上。倪贺喜等^[6]对真空热管低温省煤器进行了研究与设计,提出了设计和选型的原则,并针对磨损、腐蚀和积灰问题提出解决方法,为同类型设备的研究和设计提供了参考;史俭^[7]对省煤器加强制造质量管理和结构形式改造提出改进措施,消除了省煤器易腐蚀泄漏的问题;陈静^[8]对 1 000 MW 机组低温省煤器系统的增效型创新进行了介绍,对低温省煤器冷凝水系统进行设备选取、逻辑搭建,使其能满足不同负荷工况下对低温省煤器进口凝结水温度及流量调节的要求;熊锐等^[9]通过对低温烟道积灰现象进行分析,利用数值模拟对烟道内部流场进行模拟,提出解决烟道积灰问题的针对性方法,为提升低温省煤器换热效果提供了参考;雷承勇等^[10]从传热学的角度,根据并联管道的性质和流固耦合传热理论,对增设旁路的低温省煤器系

统进行了数值模拟,得到不同进口烟气流速和旁路规格下系统烟气进、出口压差和换热情况,并拟合出旁路压头损失与系统烟气进、出口压差的关系。上述研究都针对提升低温省煤器的余热利用效率提出了有效的设备改进方法,但未涉及针对低温省煤器系统数学模型的构建,更没有深入研究适合低温省煤器系统的先进智能控制策略。

本文提出了一种基于模糊智能预测控制的低温省煤器多变量解耦控制策略。首先,建立低温省煤器多变量系统动态数学模型,并采用金豺优化算法辅助优化的偏最小二乘法辨识获得模型参数;在此基础上,基于模糊智能预测控制算法,设计低温省煤器系统的多变量解耦控制策略,对模型中各变量参数进行解耦,将低温省煤器多变量系统转化为独立的单变量控制系统,提升控制的精度和稳定性。

1 低温省煤器特性分析及模型辨识

1.1 低温省煤器特性分析

图 1 为锅炉中低温省煤器运行工艺流程,图 2 为低温省煤器系统结构图。省煤器回收火电厂排烟余热,加热凝结水,减少汽轮机抽汽,增加发电功率,构成火电厂余热回收系统^[11]。当系统中通过省煤器的出口烟气温度较低时,燃煤烟气中的酸性气体易与水蒸气凝结形成硫酸溶液,腐蚀低温省煤器管束、烟道及后续设备^[12-14];通过暖风器出口的风温较高时,会使煤粉气流进入炉膛后迅速升温,可能导致燃烧器喷口附近提前着火,烧毁喷口或引发结焦,威胁机组安全^[15-17]。

低温省煤器系统中,省煤器采用管式换热器,安装于空气预热器出口至电除尘进口水平汇集烟道

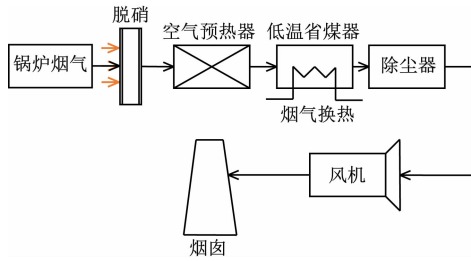


图 1 锅炉中低温省煤器运行工艺流程

Fig. 1 Operational process flow of the low-temperature economizer in the boiler

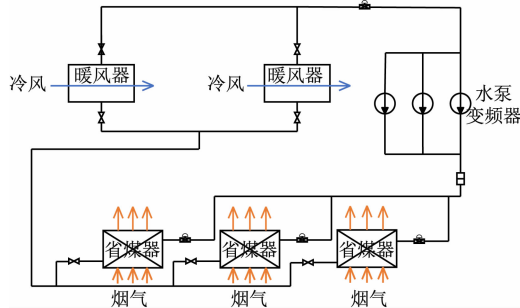


图 2 低温省煤器系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of low-temperature economizer system

上^[18-19],低温省煤器进出口截面尺寸与引风机出口水平烟道管径匹配。低温省煤器系统中的水取自凝结水,在实际运行中,通过调节水泵变频器的频率控制进入低温省煤器的水量,当变频器的频率增大时,进入低温省煤器的水量增大,省煤器内部换热量加大,使得经过省煤器出口的烟温降低,流出省煤器的凝结水温度升高,加大暖风器中的热量交换,使得经过暖风器的出口风温升高;暖风器也采用管式换热器,安装于每台一次风机出口的冷一次风道上,凝结水进入省煤器吸收热量后,用于加热暖风器。在一次暖风器凝结水出口设置电动调节阀,当暖风器出口风温高于设定值时,减小暖风器凝结水出口调节阀的开度以减少进入暖风器的水量、降低暖风器的出口风温,由于流经省煤器的凝结水量减少,省煤器内部换热量降低,致使省煤器出口烟温增加。

低温省煤器系统中各变量之间的耦合关系复杂(如表 1 所示),因此在构建低温省煤器控制系统时,需综合考量 4 个控制变量的耦合关系才能实现多变量优化控制。

表 1 各参数间相关性

Tab. 1 Correlation between parameters

变量	省煤器出口烟温	暖风器出口风温
水泵变频器频率	强	一般
暖风器出口电动调节阀开度	一般	强

1.2 系统模型辨识

1.2.1 偏最小二乘法

偏最小二乘法是一种多变量统计分析方法^[20-21]。从自变量(X)和因变量(Y)中分别提取若干个主成分,每个主成分是原始变量的线性组合,并且尽可能保留原始变量的信息。要求自变量的主成分与因变量的主成分之间相关性最强,从而在降维的同时保留变量间的关键关联。通过迭代算法逐步提取,直到满足精度要求或提取完所有有效成分,最终建立基于主成分的回归模型。

假设自变量为 $X_{n \times q}$, 因变量为 $Y_{n \times w}$, 其中 n 为样本数, q 和 w 为变量数, 假设完成主成分为 t_a 的提取后, 得到回归系数进行拟合, 拟合后得到回归方程为

$$u_a = b_a t_a + e_a \quad (1)$$

式中: u_a 为线性回归结果; b_a 为未知参数; e_a 为误差向量; a 为主成分个数。

利用偏最小二乘原理可输出最优估计 $\hat{b}_a$ 。最终建立如下的两输入两输出低温省煤器多变量系统模型传递函数 $G(s)$ 。

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $G_{11}(s)$ 、 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 为 $G(s)$ 中的 4 个元素。

1.2.2 金豺优化算法

金豺优化算法(GJO)是一种新兴的全局优化方法^[22-23],其核心思想源于金豺群体合作狩猎的生存策略。该算法通过 4 个关键步骤模拟金豺的狩猎行为,经过迭代优化,算法输出最优解,为复杂优化问题提供高效解决方案。金豺优化算法 4 个步骤依次为种群位置初始化、确定雌雄金豺对位置、搜索猎物阶段和包围攻击猎物阶段。

(1) 种群位置初始化

在搜索空间中随机生成初始猎物种群位置。

$$X_{i,j} = X_{\min,j} + r_0 \cdot (X_{\max,j} - X_{\min,j}) \quad (3)$$

式中: $X_{i,j}$ 为第 i 个个体的第 j 维的位置 ($i \in [1, N_1]$, $j \in [1, D]$, N_1 为种群大小, D 为问题维度); $X_{\max,j}$ 和 $X_{\min,j}$ 为第 j 维的搜索空间上限/下限; r_0 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数。

通过均匀随机分布生成初始种群,确保搜索空间的覆盖性。

(2) 确定雌雄金豺对位置

通过适应度导向确定领导个体,引导种群进化方向。根据适应度值筛选最优(雄性)和次优(雌性)个体作为领导角色,计算适应度矩阵。 $f_i = F(X_i)$

($i=1,2,\dots,N$), f_i 为第 i 个个体的适应度值。按 f_i 升序(最小化问题)或降序(最大化问题)排序,取前 2 位。雄金豺位置: $Y_1 = X_{\text{best}}$, 适应度 $f_1 = f_{\text{best}}$; 雌金豺位置: $Y_2 = X_{\text{sec-best}}$, 适应度 $f_2 = f_{\text{sec-best}}$ 。 X_{best} 为雄性最优个体; f_{best} 为雄性最优个体的适应度; $X_{\text{sec-best}}$ 为雌性最优个体; $f_{\text{sec-best}}$ 为雌性最优个体的适应度。

(3) 搜索猎物阶段

模拟金豺在广阔区域搜索猎物的行为,全局探索新解。逃跑能量更新公式为

$$E_1 = E_0 \cdot e^{-c_1 \cdot \frac{t}{T}} \quad (4)$$

式中: E_0 为初始逃跑能量; c_1 为递减系数; t 为当前迭代次数; T 为总迭代次数; E_1 为最新逃跑能量,随迭代次数增加逐渐衰减,控制搜索范围从全局向局部过渡。

雄性金豺引导的位置更新为

$$X_i^{\text{new}} = Y_1 - A_1 \cdot (C_1 \cdot Y_1 - X_i) \quad (5)$$

$$A_1 = 2 \cdot E_1 \cdot r_1 - E_1 \quad (6)$$

$$C_1 = 2 \cdot r_2 \quad (7)$$

式中: X_i^{new} 为更新后位置; r_1 和 r_2 为 0~1 间的随机数; A_1 为控制搜索方向的系数,绝对值大于 1 时扩大搜索范围,小于 1 时缩小范围进行包围攻击。

雌性金豺引导的位置更新为

$$X_i^{\text{new}} = Y_2 - A_2 \cdot (C_2 \cdot Y_2 - X_i) \quad (8)$$

$$A_2 = 2 \cdot E_1 \cdot r_3 - E_1 \quad (9)$$

$$C_2 = 2 \cdot r_4 \quad (10)$$

式中: A_2 为控制搜索方向的系数; r_3 和 r_4 为 0~1 间的随机数。

与雄性公式类似,通过 Y_2 引入次优解的引导,增强种群多样性。利用雌雄领导的双引导机制,结合指数衰减的逃跑能量,平衡全局勘探与局部开发。

(4) 包围攻击猎物阶段

模拟金豺包围并攻击猎物的行为,局部开发当前最优解。

其中,位置更新模型为

$$X_i^{\text{new}} = \begin{cases} Y_1 - B_1 \cdot |Y_1 - r_5 \cdot X_i|, & f_i < f_2 \\ Y_2 - B_2 \cdot |Y_2 - r_5 \cdot X_i|, & f_i \geq f_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: r_5 为 0~1 间的随机数,代表随机权重,控制攻击方向; B_1 和 B_2 为收缩系数。

攻击能量与位置调整为

$$E_2 = E_0 - t \cdot \frac{E_0}{T} \quad (12)$$

式中: E_2 为攻击能量。

攻击能量 E_2 线性递减,随着迭代深入,逐渐缩

小搜索步长,聚焦最优区域。根据个体适应度的比较选择引导源,适应度更优的个体向雄性金豺靠拢,反之向雌性金豺靠拢,加速局部收敛。

借鉴金豺优化算法的合作狩猎与全局探索优势,将其融入偏最小二乘法的参数整定过程(见图 3,其中 $|E|$ 反映攻击能量的大小)。金豺优化算法通过模拟雌雄金豺双领导机制和动态能量调节策略,在确认目标函数存在极小值的前提下,能够自适应平衡全局勘探与局部开发。算法利用搜索猎物阶段的指数衰减逃跑能量,高效搜索参数空间,避免陷入局部最优;借助包围攻击猎物阶段的线性衰减攻击能量,精准收敛至全局最优解,显著提升了偏最小二乘法参数整定的收敛速度与优化精度。

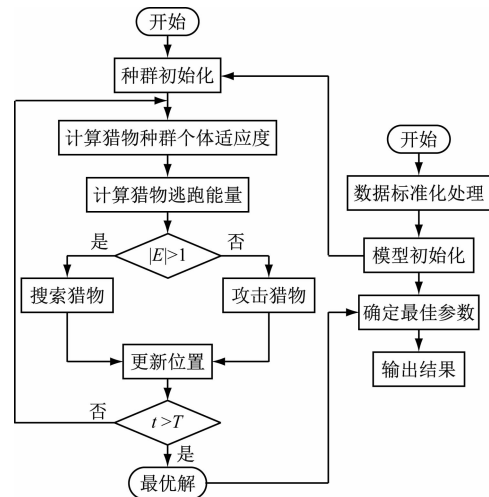


图 3 基于金豺算法优化的偏最小二乘法程序流程图

Fig. 3 Flowchart of the partial least squares method program optimized by the golden jackal algorithm

2 基于模糊智能预测控制的低温省煤器多变量解耦控制

2.1 模糊智能预测控制算法

模糊智能预测控制算法由序列预测、性能评估和结果决策 3 部分构成^[24], 将其模糊集理论、专家系统和预测控制算法有机结合, 适用于多扰动、非线性过程的优化控制过程。在上文利用模型辨识方法建立的低温省煤器系统模型基础上, 采用模糊预测控制对解耦产生的出口烟温和出口风温 2 个独立变量进行进一步精确控制。

2.1.1 序列预测

序列预测指对控制过程的未来时刻输出结果进行预测。预测结果的确定主要依赖于 3 个关键要素: (1) 过程于当前时刻所具备的已知信息和实时数据; (2) 过程的动态模型, 该模型基于系统的物理特性、数学原理构建而成, 精准地描述了过程随时间演

变的规律;(3)预先假定的未来控制序列依据控制目标、系统约束条件等因素制定,代表着对未来控制行为的系统性规划。

假设被控过程的动态特性由如下形式的时间离散方程描述为

$$y(k) = g[y(k-1), \dots, y(k-h_1), u(k-l), \dots, u(k-m)] \quad (13)$$

式中: y 和 g 分别为过程的输出和控制作用; k 为自然数; h_1 为过程的阶次; l 为过程的滞后; m 为常数,并且按照递推算法对系统未来时刻的输出进行预测。

递推算法为

$$\hat{y}(k+i) = g \begin{bmatrix} \hat{y}(k+i-1) \\ \vdots \\ \hat{u}(k+i-l) \\ \vdots \\ \hat{u}(k+i-m) \end{bmatrix} + \hat{d}(k+i) \quad (14)$$

$$\hat{y}(k-j) = y(k-j) \quad (15)$$

$$u(k+h) = u_0 \quad (16)$$

$$\hat{d}(k+i) = d(k) \quad (17)$$

式中: $i \in [1, N]$, $j \in [0, s_1-1]$, $h \in [0, N-l]$, N 为预测的步数, s_1 为参数; $\hat{y}(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻过程输出的预测值; $\hat{u}(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻过程输入的预测值; $\hat{y}(k-j)$ 为 $k-j$ 时刻过程输出的预测值; $y(k-j)$ 为 $k-j$ 时刻过程输出的实际值; $u(k+h)$ 为假设的未来时刻过程的控制输入; u_0 为表示控制量大小的常数; $\hat{d}(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻扰动的预测值; $d(k)$ 为 k 时刻的具体扰动量。

在对过程输出预测过程中,进行两点假设,即过程未来的控制输入量恒为定值 u_0 ,过程未来的扰动量恒为 $d(k)$ 。

2.1.2 性能评估

在控制系统运行中,性能评估往往可以根据控制偏差和控制偏差变化率的大小来决定。在控制输入量 u_0 的作用下,定义 N 步预测的偏差 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 以及预测偏差变化率 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 分别为

$$\hat{K}_{PE}(k+N) = p_0 - y(k+N) \quad (18)$$

$$\hat{K}_{CPE}(k+N) = \hat{K}_{PE}(k+N) - \hat{K}_{PE}(k+N-1) \quad (19)$$

式中: p_0 为控制系统过程输出的设定值,控制输入量 u_0 的控制效果通过 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 和 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 共同进行评判。

假设 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 结果为正大, $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 结果

为负大,则证明控制输入量 u_0 的控制效果较好。因此,建立关于2个变量的控制性能测量指标。将 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 和 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 的论域按照图1,划分为5个模糊集,再通过性能测量查询表(见表2)确定性能指标值。性能测量查询表本质是对变量“正负方向、偏离程度”的模糊分类,其中NB为负大,NS为负小,ZE为正中,PS为正小,PB为正大。

表2 性能测量查询表

Tab. 2 Performance measurement look-up table

项目	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	-1.0	-0.8	-0.6	-0.3	0
NS	-0.8	-0.6	-0.3	0	0.3
ZE	-0.6	-0.3	0	0.3	0.6
PS	-0.3	0	0.3	0.6	0.8
PB	0	0.3	0.6	0.8	1.0

2.1.3 结果决策

为了提升控制系统的灵活性和精确性,基于机组实际运行数据,设计了专家系统自适应优化调节因子来限定预测控制过程中的控制偏差 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$,适时地改变模糊规则中的隶属度,计算更符合实时工况的匹配度和性能输出,用于最优的控制量选择。

专家规则结合预测控制器算法系统框图见图4。其中: r 为控制量设定值, $\Delta e(k)$ 为控制量偏差变化率, u 为输出控制信号, y 为输出值。

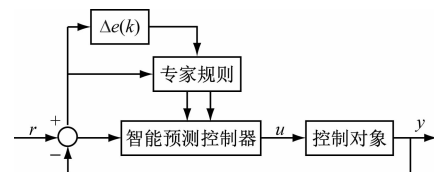


图4 专家规则结合智能预测控制器算法系统框图

Fig. 4 System block diagram of the expert rules combined with the intelligent predictive controller algorithm

根据汽温控制中不同的实际工况,设计了以下控制规则。首先,对各参数变量和阈值进行界定,设定 e_h 为偏差量的上限, e_l 为偏差量的下限, β_1 为控制偏差增大因子($\beta_1 > 1$), β_2 为控制偏差减小因子($0 < \beta_2 < 1$), γ_1 为偏差变化率小幅增大因子($\gamma_1 > 1$), γ_2 为偏差变化率小幅减小因子($0 < \gamma_2 < 1$), ϕ_1 为偏差变化率大幅增大因子($\phi_1 > \gamma_1 > 1$), ϕ_2 为偏差变化率大幅减小因子($1 > \gamma_2 > \phi_2 > 0$)。 $e(k)$ 为实时的偏差量,具体规则如下。

规则1:当 $|e(k)| > e_h$ 时,将控制器设置为最大(或最小)输出模式,大幅增大控制偏差 $\hat{K}_{PE}(k+N)$

和偏差变化率 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 以迅速消除误差。

规则 2: 当 $e_h > |e(k)| > e_l$ 时, 引入偏差增量 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, 为保证控制过程的稳定性和平滑性, 通过微调偏差变化率的大小进行优化控制。

规则 2.1: 当 $\Delta e(k)e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 时, 表明偏差量的绝对值正在增加或为某个固定值。若 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) > 0$, 说明偏差量变化率仍有增大的趋势, 需要将控制器调整为较强的控制模式, 使得偏差量变化率趋势扭转, 达到将偏差量快速减小的效果, 令 $\hat{K}_{CPE}(k+N) = \hat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \phi_1$ 。

规则 2.2: 当 $\Delta e(k)e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 时, 若 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) \leq 0$, 说明虽然偏差量的绝对值正在增加或为某个固定值, 但偏差量变化率有减小的趋势, 此时应进行适度控制来扭转变化趋势, 使得偏差量绝对值处于持续减小的趋势, 令 $\hat{K}_{CPE}(k+N) = \hat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \gamma_1$ 。

规则 2.3: 当 $\Delta e(k)e(k) < 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 且 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) > 0$ 时, 系统正逐步趋于稳定, 此时应保持控制器各参数不变。

规则 2.4: 当 $\Delta e(k)e(k) < 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 且 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) < 0$ 时, 系统出现了平衡状态附近的振荡现象, 此时应以较低的控制模式消除系统的振荡, 令 $\hat{K}_{CPE}(k+N) = \hat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \gamma_2$ 。

规则 3: 当 $|e(k)| < e_l$ 时, 说明偏差量较小, 控制目标聚焦在解决系统静差, 因此应降低控制偏差 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$ 以消除静态误差, 令 $\hat{K}_{PE}(k+N) = \hat{K}_{PE}(k+N-1) \times \beta_2$, $\hat{K}_{CPE}(k+N) = \hat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \phi_2$ 。

在假定未来控制输入量 u_0 后, 通过上述专家系统自适应优化的比例调节因子, 计算得到更合理的未来第 N 个采样时刻的控制偏差 $\hat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\hat{K}_{CPE}(k+N)$, 再依据表 2 计算对应控制指令下的性能指标 J_0 。

设 U_L 和 U_H 分别为控制指令输入的下限和上限, δ_m 为每个采样周期内指令的最大允许改变量, 用来抑制过快的控制作用, 未来控制指令 $u(k)$ 的寻优范围为 $[U_{k,LL}, U_{k,HL}]$, 其中:

$$U_{k,LL} = \max[u(k-1) - \delta_m, U_L] \quad (20)$$

$$U_{k,HL} = \min[u(k-1) + \delta_m, U_H] \quad (21)$$

将控制指令寻优范围 $[U_{k,LL}, U_{k,HL}]$ 进行 M 等分, 得到控制参考分量 u_i 为

$$u_i = \frac{U_{k,LL} + i \cdot (U_{k,HL} - U_{k,LL})}{M}, i = 0, 1, \dots, M \quad (22)$$

根据 u_i 的预测控制性能指标 J_i , 找出对应最小 $|J_i| = J_L$ 的控制指令 u_L , 最优控制指令 u_{bst} 一定处于控制指令 u_L 的附近, 根据模糊查询规则表可知, 最优控制指令对应的指标 J_{bst} 的大小应为 0。因此, 可根据 J_{L-1}, J_L, J_{L+1} 的数值正负情况, 计算出 u_{bst} 。

若 J_{L-1} 与 J_L 异号, J_L 与 J_{L+1} 同号, 则 u_{bst} 处于 u_{L-1} 和 u_L 之间。此时通过线性插值的方法, 可以得出:

$$u_{bst} = u_{L-1} + \frac{|J_L|}{|J_L| + |J_{L-1}|} (u_L - u_{L-1}) \quad (23)$$

若 J_{L-1} 与 J_L 同号, J_L 与 J_{L+1} 异号, 则 u_{bst} 处于 u_L 和 u_{L+1} 之间。此时通过线性插值的方法, 可以得出:

$$u_{bst} = u_L + \frac{|J_L|}{|J_L| + |J_{L+1}|} (u_{L+1} - u_L) \quad (24)$$

若 J_{L-1} 与 J_L, J_{L+1} 均同号, 则

$$u_{bst} = u_L \quad (25)$$

2.2 多变量前馈解耦策略

采用前馈解耦的控制思想, 在控制器与被控对象之间加入校正装置, 即多变量前馈补偿数学模型^[25]。由图 5 所示, 控制与解耦由 2 个不同的控制器以对角传输的方式进行, 从而从静态和动态上解决 2 个控制回路的耦合性。

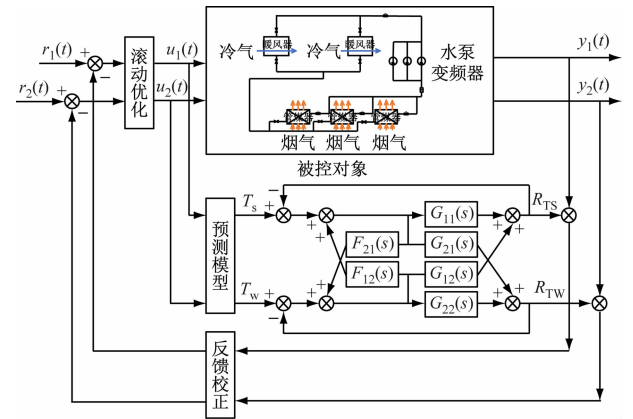


图 5 出口烟温与出口风温前馈解耦模型原理

Fig. 5 Principle of the feed forward decoupling model for outlet flue gas temperature and air temperature

图 5 中: $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别为烟、风温设定值; $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别为水泵变频器频率和暖风器出口电动调节阀开度的输入值; $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 为烟、风温实际值; T_s 和 T_w 分别为预测模型的输出值; R_{TS} 和 R_{TW} 为智能模糊预测控制烟、风温的输出值; $G(s)$ 为传递矩阵, 表示水泵变频器和电动调节阀分别对应出口烟温和出口风温的传递函数; $F(s)$ 为解耦后的补偿矩阵。

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{F}(s) = (F_{11}(s) \ F_{12}(s)) \quad (27)$$

由多变量前馈解耦的相关规则,解耦后的模型为

$$\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & W_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{pmatrix} \quad (28)$$

式中: $Y_1(s)$ 为解耦模型输出值 1; $Y_2(s)$ 为解耦模型输出值 2; $W_{11}(s)$ 为对角矩阵 1; $W_{22}(s)$ 为对角矩阵 2; $U_1(s)$ 为解耦模型输入值 1; $U_2(s)$ 为解耦模型输入值 2。

将补偿器模型代入,得到广义模型为

$$W_{11}(s) = G_{11}(s) + F_{21}(s)G_{12}(s) = G_{11}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (29)$$

$$W_{22}(s) = G_{22}(s) + F_{12}(s)G_{21}(s) = G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)} \quad (30)$$

3 实验仿真与分析

为探究模糊智能预测解耦控制算法的有效性,选取某超超临界机组低温省煤器为被控对象,在严格保证辨识控制精度的前提下,采集 2 000 组机组运行相关数据。首先,采用多项式逼近与滑动平均数值滤波方法对采集数据实施预处理,旨在对样本数据中的奇异项与趋势项进行分拣和剔除,以此消除可能对研究结果产生影响的潜在干扰因素。进一步,利用金豺算法辅助优化偏最小二乘法,对完成处理的现场运行数据进行辨识,再采用前馈解耦算法实现对辨识模型的解耦,最终得到系统模型形式为

$$\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & W_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{pmatrix} \quad (31)$$

其中:

$$W_{11}(s) = \frac{-19\ 044.35(s^2 + 0.002\ 2)}{(480s + 1)(456s + 1)(310s + 1)}$$

$$W_{22}(s) = \frac{129\ 389(s^2 + 0.002\ 4)}{(385s + 1)(480s + 1)(456s + 1)} \quad (32)$$

3.1 多变量前馈解耦效果对比

为模拟前馈解耦算法在日常运行中对系统耦合性能的实际影响,在 $t=0$ s 时对出口烟温施加幅值为 $5\ ^\circ\text{C}$ 的温度干扰阶跃信号,随后在 $t=600$ s 时对暖风器出口风温施加幅值为 $5\ ^\circ\text{C}$ 的温度干扰阶跃信号。由图 6 可知:解耦前,出口烟温和出口风温中任意变量发生变化均会对另一个变量产生影响;解耦后,耦合性对变量的影响大幅减小,动态性能明显改善。

3.2 解耦后控制算法跟踪性

假设系统无扰动,以阶跃信号作为系统输入,分

别模拟出口烟温和出口风温设定值的变化,对传统串级比例-积分-微分(PID)控制、传统模糊预测控制器和改进后的模糊智能预测控制器 3 种控制方法下系统的阶跃响应进行对比,其中 PID 参数采用现场实际参数,仿真结果如图 7 所示。

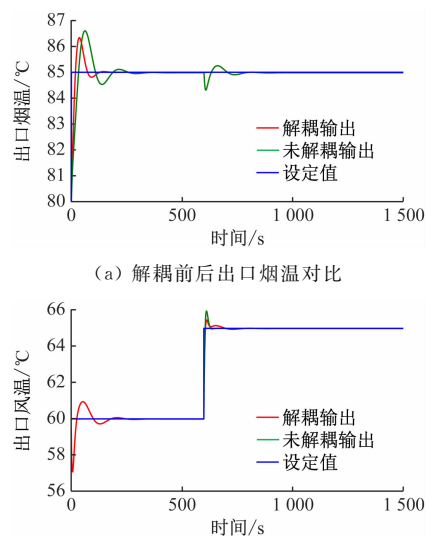


图 6 解耦效果对比

Fig. 6 Comparison of decoupling effects

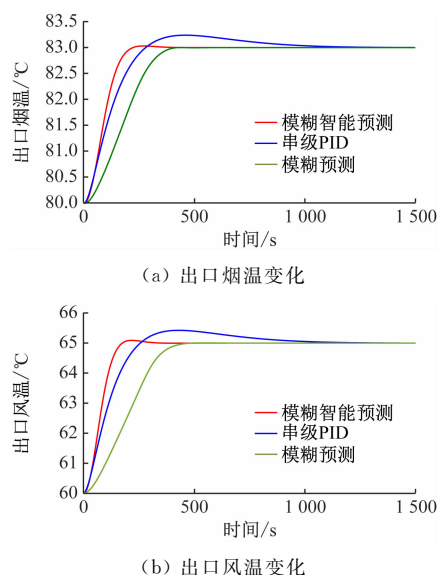


图 7 解耦后控制算法跟踪效果对比

Fig. 7 Comparison of tracking performance of the control algorithms after decoupling

对于所模拟的出口烟温设定值变化:传统模糊预测控制产生的超调量为 0,调节时间为 334.74 s;传统串级 PID 控制超调量为 8%,调节时间为 668.4 s;改进后的模糊智能预测控制超调量为 1%,调节时间为 183.1 s。对于所模拟的出口风温设定值变化:传统模糊预测控制产生的超调量为 0,调节时间为 367.2 s;传统串级 PID 控制超调量为 8.6%,调

节时间为 671.1 s;改进后的模糊智能预测控制超调量为 1.8%,调节时间为 148.7 s。

传统串级 PID 控制响应时间快速性适中,但产生的超调量和调节时间均较大;传统模糊预测控制产生的超调量小,调节时间适中,但响应速度较慢;改进后的模糊智能预测控制既保留了传统模糊预测控制超调量较小的优点,又提升了快速性,对指令响应迅速,符合实际工业需求。

3.3 解耦后控制算法抗扰性

为测试改进模糊智能预测控制相较其他常用控制策略在抗干扰性能上的优势,仿真测试条件为在系统输入阶跃信号 1 500 s 后,分别减少幅值 67% 和 40% 的阶跃干扰。采用传统串级 PID 控制、传统模糊预测控制和改进模糊智能预测控制对各被控量进行控制效果仿真。由图 8 可以得到:与传统串级 PID 控制、传统模糊预测控制相比,综合考虑超调量与调节时间,模糊智能预测控制的抗干扰性能更优。

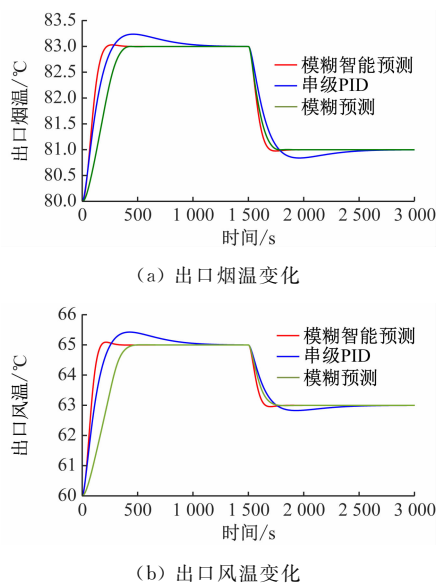


图 8 解耦后控制算法抗扰效果对比

Fig. 8 Comparison of anti-disturbance effect of the control algorithms after decoupling

3.4 解耦后控制算法鲁棒性

为分析改进后的模糊智能预测控制下系统的鲁棒性,将被控对象的传递函数的增益和延迟时间依次换作参数值增加 10%、50%、100% 的控制对象传递函数,模拟实际应用中的参数变化,得到在阶跃输入的情形下,控制系统响应曲线(见图 9)。

由图 9 可知,对于改进后的模糊智能预测控制算法,即使遭遇机组设备老化等情况导致的预测模型参数摄动,仍能维持良好的控制效果,满足工程实际的控制需要。

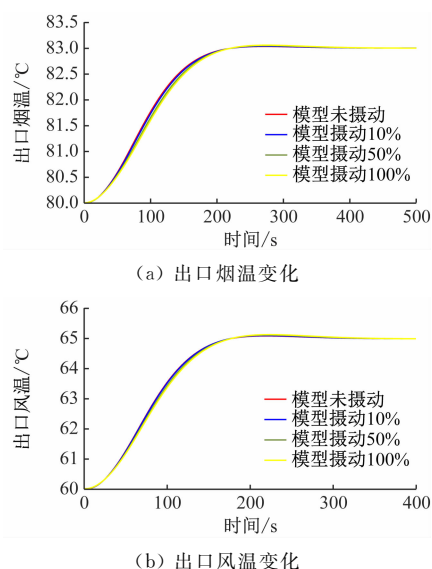


图 9 解耦后控制算法鲁棒性结果

Fig. 9 Robustness results of the control algorithm after decoupling

4 工程应用

本文所设计的基于模糊智能预测的多变量解耦控制策略已成功应用于某 1 000 MW 超超临界机组低温省煤器系统的控制。

图 10 为低温省煤器系统运行情况。由图 10 可知,随着发电机功率增加,热媒水循环泵变频器频率提高,变频器电流增大,省煤器出口实际烟温随设定值下降,实际出口烟温与设定值偏差小于 5 °C。

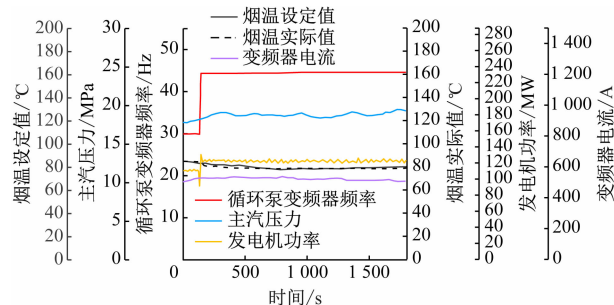


图 10 低温省煤器系统运行情况

Fig. 10 Operating conditions of the low-temperature economizer system

图 11 为暖风器系统运行情况。由图 11 可知,随着发电机功率增大,暖风器出口母管电动阀开度上升,暖风器出口实际风温随设定值上升,实际出口风温与设定值偏差小于 3 °C。应用基于模糊智能预测的多变量解耦控制策略后,低温省煤器系统的控制效果提高,满足工业应用需要。

5 结论

(1) 采用金豺算法辅助优化的偏最小二乘法辨识低温省煤器系统模型,计算速度较快,系统运行效

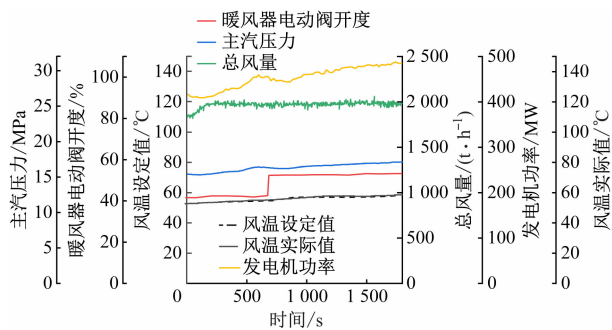


图11 暖风器系统运行情况

Fig. 11 Operating conditions of the air heater system

率明显提高。

(2) 利用改进的模糊智能预测控制算法,有效克服了低温省煤器系统存在的参数摄动及大延迟、大惯性等问题。

(3) 利用多变量动态前馈解耦简化原有的复杂数学模型,提升了系统动态性能指标。

(4) 本文所设计的基于模糊智能预测的多变量解耦控制策略成功在某1 000 MW超超临界机组中应用,工程应用的实际情况表明,该策略加强了机组低温省煤器系统的控制性能,更好地保证了机组运行的安全性、稳定性、经济性和灵活性。

参考文献:

- [1] 王宏武,刘欢,于龙文,等.存在系统边界外热量损失的锅炉效率计算方法[J].*热力发电*,2023,52(12):140-146.
WANG Hongwu, LIU Huan, YU Longwen, et al. Boiler efficiency calculation method for heat loss outside the system boundary[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(12): 140-146.
- [2] 董伟,许继东,刘双白,等.燃煤电站两种烟气余热利用方式的对比分析[J].*动力工程学报*,2022,42(4):350-358.
DONG Wei, XU Jidong, LIU Shuangbai, et al. Comparative study on two utilization methods of flue gas waste heat in coal-fired power plants[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(4): 350-358.
- [3] 杨伟明,燕鹏,独敬东,等.低温省煤器旁路改造的流动传热模拟分析[J].*动力工程学报*,2021,41(2):144-151.
YANG Weiming, YAN Peng, DU Jingdong, et al. Numerical analysis on flow and heat transfer of a low-temperature economizer after bypass retrofit [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2021, 41(2): 144-151.
- [4] 汤华振,李科育.低温省煤器支持下的锅炉余热回收节能改造方法研究[J].*化工设计通讯*,2024,50(8):60-62.
TANG Huazhen, LI Keyu. Research on energy-saving renovation methods for boiler waste heat recovery supported by low-temperature economizers [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2024, 50(8): 60-62.
- [5] 高过斌,高伟,张军亮,等.不同宽负荷脱硝系统变工况及瞬态性能的对比研究[J].*动力工程学报*,2023,43(11):1523-1530.
GAO Guobin, GAO Wei, ZHANG Junliang, et al. Comparative study on load cycling and transient performance of different wide-load denitration systems [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(11): 1523-1530.
- [6] 倪贺喜,李智鑫,邢丙南,等.真空热管低温省煤器研究与设计[J].*锅炉制造*,2025(3):13-14,20.
NI Hexi, LI Zhixin, XING Bingnan, et al. Research and design of vacuum heat pipe low temperature economizer [J]. *Boiler Manufacturing*, 2025 (3): 13-14, 20.
- [7] 史俭.催化裂化余热锅炉省煤器泄漏分析与改进[J].*化工安全与环境*,2025,38(4):70-75.
SHI Jian. Analysis and improvement of economizer leakage in catalytic cracking waste heat boiler [J]. *Chemical Safety & Environment*, 2025, 38 (4): 70-75.
- [8] 陈静.1 000 MW机组低温省煤器系统优化[J].*机电信息*,2025(6):64-67.
CHEN Jing. Optimization of low-temperature economizer system of 1 000 MW unit [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2025(6): 64-67.
- [9] 熊锐,王焱敏,刘元德,等.燃煤电厂低温省煤器烟道积灰改进办法初探[J].*中国环保产业*,2024(8):31-33.
XIONG Rui, WANG Yanmin, LIU Yuande, et al. Preliminary exploration of improvement methods for ash accumulation in the flue of low temperature economizers in coal-fired power plants [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2024(8): 31-33.
- [10] 雷承勇,李亚洲,李祺.630 MW燃煤锅炉低温省煤器前烟道烟气流程数值模拟及优化[J].*节能*,2025,44(6):77-80.
Lei Chengyong, Li Yazhou, Li Qi. Numerical simulation and optimization of flue gas flow field in the front duct of low-temperature economizer of 630 MW coal-fired boiler [J]. *Energy Conservation*, 2025, 44 (6): 77-80.
- [11] 陈允驰,赵丹,何勇,等.1 000 MW机组低温省煤器入口烟道流场数值模拟优化研究[J].*电站系统工程*,2025,41(3):1-4.
CHEN Yunchi, ZHAO Dan, HE Yong, et al. Nu-

- merical simulation of flow field optimization of low temperature economizer inlet flue for 1 000 MW power unit[J]. **Power System Engineering**, 2025, 41(3): 1-4.
- [12] 杨超群. 电站锅炉低低温省煤器冲蚀特性数值模拟研究[D]. 福州: 福建理工大学, 2024.
- [13] 王志康, 雍恒, 杨刚中, 等. 化学团聚耦合低温省煤器强化除尘协同脱硫废水零排放试验研究[J]. **中国电机工程学报**, 2024, 44(6): 2292-2300.
- WANG Zhikang, YONG Heng, YANG Gangzhong, et al. Experimental study on chemical agglomeration coupled with low temperature economizer to enhance dedusting and zero discharge desulfurization waste water[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2024, 44(6): 2292-2300.
- [14] 张安文, 霍岩, 李建雄, 等. 低温省煤器 ND 钢大面积腐蚀原因[J]. **理化检验-物理分册**, 2023, 59(8): 47-50.
- ZHANG Anwen, HUO Yan, LI Jianxiong, et al. Causes of large area corrosion of ND steel for low temperature economizer [J]. **Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)**, 2023, 59(8): 47-50.
- [15] 李建伟. 660 MW 四角切圆燃烧超超临界锅炉结焦原因分析及对策[J]. **电站系统工程**, 2025, 41(3): 15-18.
- LI Jianwei. Cause analysis of slagging in 660 MW ultra supercritical boilers with four-corner tangential firing and countermeasures[J]. **Power System Engineering**, 2025, 41(3): 15-18.
- [16] 王华东. 630 MW 火电机组燃烧器一体式外窥火焰检测系统研究与应用[J]. **锅炉制造**, 2025(2): 14-16, 19.
- WANG Huadong. Research of integrated external flame detection system for burner of 630 MW thermal power unit[J]. **Boiler Manufacturing**, 2025(2): 14-16, 19.
- [17] 李宣达, 段璐, 纪任山, 等. 煤粉锅炉燃烧系统灵活性改造调峰技术研究进展[J]. **煤质技术**, 2024, 39(6): 1-13.
- LI Xuanda, DUAN Lu, JI Renshan, et al. Research progress of peaking technology for flexibility modification of pulverized coal boiler combustion system [J]. **Coal Quality Technology**, 2024, 39(6): 1-13.
- [18] 惠岩波. 电站锅炉加装低温省煤器的研究[J]. **现代制造技术与装备**, 2023, 59(7): 162-164.
- HUI Yanbo. Research on the installation of low-temperature economizer in power station boilers [J]. **Modern Manufacturing Technology and Equipment**, 2023, 59(7): 162-164.
- [19] 刘坤, 赵桂锋, 杨文波. 某改造工程低温省煤器设计简述[J]. **锅炉制造**, 2023(2): 4-5, 8.
- LIU Kun, ZHAO Guifeng, YANG Wenbo. Design of low-temperature economizer in a reconstruction project[J]. **Boiler Manufacturing**, 2023(2): 4-5, 8.
- [20] 周心睿, 安硕, 王兵, 等. 基于 IMPC 的燃煤发电机组多变量解耦控制策略[J]. **动力工程学报**, 2025, 45(2): 263-274.
- ZHOU Xinrui, AN Shuo, WANG Bing, et al. IM-PC-based multivariable decoupling control strategy for coal-fired power generation units[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2025, 45(2): 263-274.
- [21] 王航. 基于改进最小二乘法的 SCR 脱硝系统模型辨识[J]. **现代计算机**, 2023, 29(21): 51-55.
- WANG Hang. Model identification of SCR denitration system based on improved least square method [J]. **Modern Computer**, 2023, 29(21): 51-55.
- [22] 金秀章, 赵术善, 畅晗, 等. 基于金豺优化变分模态分解与时间卷积网络的过热汽温特性建模[J]. **中国电机工程学报**, 2025, 45(12): 4759-4767.
- JIN Xiuzhang, ZHAO Shushan, CHANG Han, et al. Superheated steam temperature characteristics modeling based on golden jackal optimization variational mode decomposition and temporal convolutional network[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2025, 45(12): 4759-4767.
- [23] 王延峰, 曹育晗, 孙军伟. 基于多策略改进金豺算法优化 LSTM 的短期电力负荷预测[J]. **电力系统保护与控制**, 2024, 52(14): 95-102.
- WANG Yanfeng, CAO Yuhan, SUN Junwei. Short-term power load forecasting based on multi-strategy improved golden jackal algorithm-optimized LSTM [J]. **Power System Protection and Control**, 2024, 52(14): 95-102.
- [24] 曾德良, 高耀岩, 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.
- 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.
- [25] 朱远帆, 杨海仕, 俞永伟, 等. 模糊 PID 算法在婴儿培养箱解耦控制中的应用[J]. **传感器与微系统**, 2021, 40(7): 156-160.
- ZHU Yuanfan, YANG Haishi, YU Yongwei, et al. Application of fuzzy PID algorithm in decoupling control of infant incubator[J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2021, 40(7): 156-160.