

引用格式: 丁乐, 虞仕杰. 基于 NSGA-II 的脱硫浆液循环泵变频优化控制策略 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 165-174. DING Le, YU Shijie. Variable frequency optimization control strategy for desulfurization slurry circulation pumps based on NSGA-II [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 165-174. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-076.

基于 NSGA-II 的脱硫浆液循环泵变频优化控制策略

丁乐, 虞仕杰[✉]

(浙江浙能北仑发电有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘要: [目的]为应对燃煤机组脱硫系统在低负荷、高硫煤掺烧及环保约束趋严等复杂工况下面临的循环泵能耗高、脱硫剂消耗大及出口 SO_2 浓度波动剧烈等挑战, 文章提出一种脱硫浆液循环泵变频控制的多目标协同优化策略, 旨在实现脱硫效率、运行成本与环保指标间的优化平衡。[方法]提出了一种基于 NSGA-II 的钙硫比与液气比协同控制方案。建立了以运行成本(泵组电耗、脱硫剂消耗)最小化、出口 SO_2 浓度波动最小化及排污达标为核心目标的多目标优化模型, 通过 NSGA-II 的非支配排序与拥挤度机制, 动态优化循环泵变频参数与石灰石浆液流量, 生成帕累托最优解集, 并基于工程数据验证算法参数。[结果]工程应用表明: 所提方法在升/降负荷及平稳工况下, 可实现浆液循环泵出力与浆液消耗的均衡分配。投运后, 5 台浆液循环泵平均小时功率降低 21.7%, 年节约电费 133.5 万元; 单位粉耗下降 26.7%。[结论]研究成果有效解决了脱硫系统多变量强耦合与动态工况适应性差的难题, 显著降低了运行成本并提升了环保性能, 可为燃煤电厂实现经济运行与超低排放的协同增效提供可借鉴的技术路径, 对推动湿法烟气脱硫工艺的智能化升级具有重要的工程实践价值。

关键词: 变频控制; 浆液循环泵; 湿法烟气脱硫; NSGA-II; 钙硫比; 液气比

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-076

文章编号: 2095-8676(2025)05-0165-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-076

中图分类号: TM611; TM621



论文二维码

Variable Frequency Optimization Control Strategy for Desulfurization Slurry Circulation Pumps Based on NSGA-II

DING Le, YU Shijie[✉]

(Zhejiang Zheneng Beilun Power Generation Co., Ltd., Ningbo 315800, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To address the challenges in the desulfurization systems of coal-fired power units: such as high energy consumption of circulation pumps, excessive desulfurizing agent usage, and severe fluctuations in outlet SO_2 concentration under complex operating conditions like low loads, high-sulfur coal co-firing, and tightening environmental constraints: this paper proposes a multi-objective cooperative optimization strategy for the variable frequency control of slurry circulation pumps. The strategy aims to achieve an optimal balance among desulfurization efficiency, operational costs, and environmental indicators. [Method] A calcium-to-sulfur (Ca/S) ratio and liquid-to-gas (L/G) ratio intelligent cooperative control scheme based on the NSGA-II was proposed. A multi-objective optimization model was established to minimize operational costs (pump energy consumption and desulfurizing agent usage), reduce outlet SO_2 concentration fluctuations, and ensure emission compliance. Leveraging NSGA-II's non-dominated sorting and crowding distance mechanisms, the frequency conversion parameters of recirculation pumps and limestone slurry flow rates were dynamically optimized to generate a Pareto-optimal solution set. Algorithm parameters were validated using engineering data. [Result] Engineering applications demonstrate that the proposed method achieves balanced allocation of slurry circulation pump output and slurry consumption under load-increasing/decreasing and steady-state conditions. After implementation, the average hourly power consumption of five slurry circulation pumps was reduced by 21.7%, yielding annual electricity cost savings of 1.335 million CNY. The

unit powder consumption decreased by 26.7%. **[Conclusion]** The research effectively addresses the challenges of strong multivariable coupling and poor adaptability to dynamic conditions in desulfurization systems, significantly reducing operational costs while enhancing environmental performance. It provides a valuable technical pathway for coal-fired power units to achieve synergistic optimization of economic operation and ultra-low emissions, holding significant engineering value for promoting the intelligent upgrading of the wet flue gas desulfurization process.

Key words: variable frequency control; slurry circulation pump; wet flue gas desulfurization; NSGA-II; calcium-to-sulfur ratio; liquid-to-gas ratio

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着全球环保法规的日益严格,燃煤电厂烟气脱硫系统的优化运行已成为实现低碳减排的关键环节。湿法烟气脱硫工艺中,浆液循环泵作为高耗能设备,其能耗占脱硫系统总电耗的 60%~75%^[1-2],其运行状态直接影响到整个脱硫系统的效率和经济性。因此,如何优化脱硫浆液循环泵的运行,成为提高脱硫系统性能的关键问题之一。

早期的脱硫浆液循环泵大多采用定频运行方式,这种方式存在明显的局限性。高伟等^[3]、陈雷等^[4]、吕游等^[5]指出,定频运行的浆液循环泵在负荷波动时无法灵活调整,导致脱硫效率不稳定,运行成本较高。此外,定频运行的浆液循环泵在启停过程中对电网的冲击较大,容易引起设备的机械应力和热应力,缩短设备的使用寿命。为了解决这些问题,变频调速技术逐渐被引入到脱硫浆液循环泵的控制中^[6-10]。李伟等^[6]研究了超低排放优化措施,以降低污染物排放。通过改变锅炉下游多种污染物控制设备的运行参数,分析其对污染物浓度及理化特性、脱除效率的影响,提出系统最环保运行模式和最经济运行模式。徐晓钢^[7]针对燃煤发电机组调峰调频任务剧增的情况,建立了超超临界 660 MW 燃煤发电机组的动态模型及基于双膜理论的湿法烟气脱硫系统动态模型,提出了浆液循环泵定频运行优化控制策略,可实现变负荷过程中浆液与烟气流量的最佳匹配。冯斌等^[8]分析了变频改造的节能效果和经济效益。魏书州^[9]研究了降低厂用电率的方法。通过分析影响厂用电率的因素,挑选出最有效、最可行的降低辅机电耗的方式,并通过借鉴和试验的方式进行效果验证,逐步实施。徐遵义等^[10]基于数据驱动的方法,建立了浆液循环泵运行优化模型,通

过对影响浆液循环泵运行效率和能耗的因素进行分析和优化,提高了浆液循环泵的运行效率和经济性。

然而,变频调速技术虽然在一定程度上提高了脱硫系统的性能,但仍然存在一些不足之处。例如,变频调速技术在处理多目标优化问题时,往往难以兼顾脱硫效率和运行成本之间的平衡。此外,变频调速技术在处理复杂工况和多变量耦合问题时,也存在一定的局限性。

近年来,随着控制理论和信息技术的不断发展,智能算法被引入处理非线性问题^[11-14],覃文力等^[11]采用 PKO 算法优化含电氢耦合综合能源系统的调度。王超等^[12]基于麻雀优化算法估计锂电池健康状态,提高了估计精度和可靠性。李杰等^[13]采用白鲨优化算法(WSO)对模型进行参数辨识。金秀章等^[14]利用 GA-BP 算法结合 MI 时序处理对脱硫制浆系统能耗建模,提高了模型的预测精度和实用性。随着目标函数增多,多目标优化算法逐渐被引入到脱硫系统的控制中^[15-20],其中,非支配排序遗传算法-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)作为一种多目标优化算法,因其在解决复杂优化问题中的优越性能,逐渐受到研究者的关注。NSGA-II 能够同时处理多个目标函数,并在多个目标之间找到最优的折中解,这为脱硫系统的优化提供了新的思路和方法。

综上所述,本文提出了基于 NSGA-II 的脱硫浆液循环泵变频智能控制策略,首先介绍了湿式烟气脱硫工艺及分析了影响因素;其次建立了以运行成本最小、排污最小、出口 SO₂ 浓度的波动程度最小为目标函数,考虑脱硫钙硫比和液气比等约束;在此基础上,提出了基于 NSGA-II 的脱硫浆液循环泵变频多目标求解方法;最后,通过算例进行验证。

1 湿式烟气脱硫工艺及影响因素分析

1.1 湿式烟气脱硫工艺

湿式烟气脱硫 (Wet Flue Gas Desulfurization, WFGD) 工艺流程如图 1 所示, 首先, 原烟气从锅炉出来后, 经过进口挡板进入吸收塔; 于吸收塔中, 含污染物气体同石灰石浆液以逆流形式相互接触, 发生化学反应, 去除其中的 SO_2 ; 吸收塔顶部设有出口挡板, 净烟气通过出口挡板进入烟囱排放; 吸收塔内设有浆液循环泵, 用于循环喷淋石灰石浆液, 增强脱硫效果; 氧化风机向吸收塔内提供氧化空气, 促进亚硫酸钙氧化成硫酸钙, 生成石膏; 石膏浆液经专用泵输送至旋流器完成初步脱水, 随后进入真空皮带脱水机实施二次脱水工艺, 最终形成符合外运标准的成品石膏。工艺水系统为整套装置提供核心用水支持, 涵盖石灰石浆液制备、除雾装置清洁等关键环节, 确保系统持续稳定运行。

在湿法烟气脱硫过程中, 液气比和钙硫比是两个关键的操作参数, 对脱硫效率和系统性能有着重要影响。

1.2 WFGD 过程主要影响因素分析

在湿法烟气脱硫的生产流程里, 脱硫环节的效益主要通过环境 and 经济两个方面的绩效来评估, 而 WFGD 系统受到多种因素的影响, 这些因素主要可以归为烟气相关和运行相关两大类。

1.2.1 烟气因素

1) 入口烟气中 SO_2 浓度的提升, 会在相同条件下导致浆液内反应剂消耗的增加, 进而提升液膜的吸收阻力, 使得脱硫效率降低。

2) 在湿法烟气脱硫工艺中, 吸收塔内进行的氧化反应所需的氧气主要来源于氧化风机鼓入的空气。在其他条件保持不变的情况下, 氧气浓度的增加有助于促进氧化反应的进行, 从而提升脱硫效率。然而, 当氧气含量过高时, 不仅会增加氧化风机的能耗, 导致运行成本上升, 还可能对脱硫过程产生不利影响。

3) 吸收塔烟气温度: 鉴于脱硫反应为放热反应, 温度过高会抑制反应的顺利进行, 阻碍石膏的结晶过程, 从而显著降低脱硫效率, 减少吸收剂的利用率。若通过增加喷水量来调节温度, 过多的喷

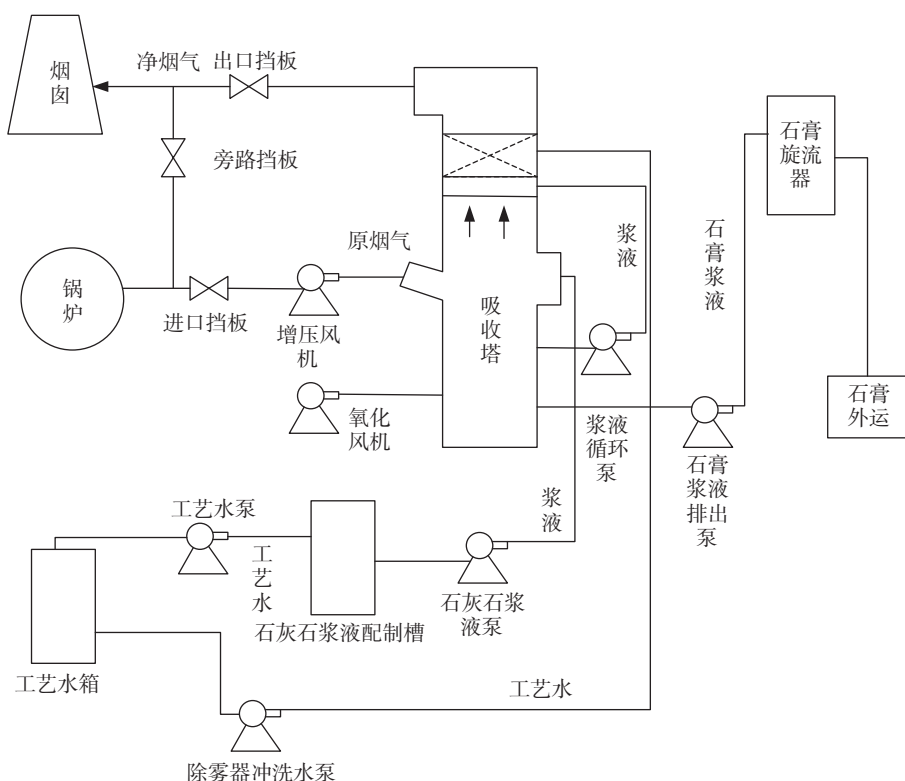


图 1 WFGD 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of the WFGD system

水量则可能生成酸性溶液, 对设备造成腐蚀, 进而导致经济损失。

1.2.2 运行因素

1) 浆液 pH 值: 浆液 pH 值的提高会加快 SO_2 的吸收速度, 有利于吸收剂与 SO_2 之间的化学反应。然而, 如果 pH 值过高, 吸收剂的利用率会下降, 从而增加运行成本。

2) 石灰石浆液流量: 在烟气中 SO_2 含量波动不大的情况下, 增加石灰石浆液的投入可以提高吸收塔内的钙硫比, 从而提高脱硫效率。但石灰石浆液投入过量时, 脱硫效率不会明显改善, 反而会导致吸收塔内结垢, 增加其他设备的运行负荷。

3) 循环浆液流量: 在吸收塔内, 增加循环浆液的流量可以使浆液与烟气更加充分地接触, 有利于脱硫反应的进行。

4) 浆液密度: 浆液密度过小表明浆液中有未完全反应的 CaCO_3 , 如果不及时进行石膏脱水, 会造成石灰石的浪费; 而浆液密度过高则会导致循环浆液量减少, 从而降低脱硫效率。

2 脱硫系统优化模型

2.1 优化目标

1) 运行成本最低: 最小化运行泵组电耗、脱硫剂消耗。

当所用煤种的含硫量增加或锅炉的负荷提升时, 脱硫系统入口处的 SO_2 浓度会相应提高, 这会导致脱硫效率降低。为了确保达到国家标准, 要对新石灰石浆液量的大小进行调整。系统每秒消耗的脱硫剂成本计算如下:

$$C_{\text{CaCO}_3} = \eta_{\text{CaCO}_3} Q_1 C_0 \quad (1)$$

式中:

C_{CaCO_3} ——脱硫剂费用 (元);

C_0 ——石灰石粉价格 (元/kg);

Q_1 ——新石灰石浆液流量 (m^3/h);

η_{CaCO_3} ——新石灰石浆液的浓度 (kg/m^3)。

脱硫系统电能消耗的成本核算覆盖多个关键组成部分, 具体涉及新制石灰石浆液输送设备、循环喷淋装置及氧化风机单元的电力使用量。具体计算公式如下:

$$C_{\text{ele}} = \sum_i C_{\text{P}-i} \quad (2)$$

式中:

C_{ele} ——泵组运行费用 (元)。

脱硫系统泵组运行能耗与脱硫剂用量如式 (3) ~ 式 (5) 所示。

$$C_{\text{P}-1} = P_e \sum_j^{n_1} \sqrt{3} U_{1,j} I_{1,j} (\cos \varphi)_{1,j} \quad (3)$$

$$C_{\text{P}-2} = P_e \sum_j^{n_2} \sqrt{3} U_{2,j} I_{2,j} (\cos \varphi)_{2,j} \quad (4)$$

$$C_{\text{P}-3} = P_e \sum_j^{n_3} \sqrt{3} U_{3,j} I_{3,j} (\cos \varphi)_{3,j} \quad (5)$$

$$f_{1,\min} = C_{\text{P}-1} + C_{\text{P}-2} + C_{\text{P}-3} \quad (6)$$

式中:

$C_{\text{P}-1}$ ——新石灰浆泵能耗费用 (元);

$C_{\text{P}-2}$ ——循环喷淋泵能耗费用 (元);

$C_{\text{P}-3}$ ——氧化风机能耗费用 (元);

P_e ——当地电价 (元/kWh);

$U_{1,j}$ 、 $U_{2,j}$ 、 $U_{3,j}$ ——第 j 台新浆泵、循环泵及氧化风机电压 (V);

$I_{1,j}$ 、 $I_{2,j}$ 、 $I_{3,j}$ ——第 j 台新浆泵、循环泵及氧化风机电流 (A);

$(\cos \varphi)_{1,j}$ 、 $(\cos \varphi)_{2,j}$ 、 $(\cos \varphi)_{3,j}$ ——功率因数。

2) 排污最小

$$f_{2,\max} = \frac{1}{(1 + |C_{\text{out}} - C_{\text{set}}|)} \quad (7)$$

式中:

C_{out} ——出口 SO_2 浓度, 表示脱硫装置末端烟气中 SO_2 的含量水平 (mg/Nm^3);

C_{set} ——设定的 SO_2 排放标准, 表示环保要求的 SO_2 排放浓度标准 (mg/Nm^3)。

3) 出口 SO_2 浓度的波动程度最小

$$f_{3,\min} = \sigma(C_{\text{out}}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (C_{\text{out},k} - \bar{C}_{\text{out}})^2} \quad (8)$$

式中:

n ——测量点的数量 (个);

$C_{\text{out},k}$ ——第 k 个出口 SO_2 浓度 (mg/Nm^3);

$\bar{C}_{\text{out}}$ ——出口 SO_2 浓度的均值 (mg/Nm^3)。

2.2 约束条件

模型约束条件的设定需与脱硫工艺动态特性深度耦合, 且参数阈值严格限定于系统允许范围内。

1) 循环泵电流约束

$$I_{cpc-min} \leq I_{cpc} \leq I_{cpc-max} \quad (9)$$

式中:

I_{cpc} ——循环泵电流 (A);

$I_{cpc-min}$ ——循环泵电流最小值 (A);

$I_{cpc-max}$ ——循环泵电流最大值 (A)。

循环泵电流的最小值设置是为了确保循环泵能够提供足够的流量, 维持脱硫系统的正常运行, 同时避免因电流过低导致设备频繁启停或运行不稳定, 最大值设置是为了确保循环泵在运行过程中不会因过载而损坏, 同时避免因电流过高导致系统能耗过大, 本文最小值和最大值分别取 88 A 和 185 A。

2) 循环浆液动态调节约束

$$\Delta Q_{2-min} \leq \Delta Q_2 \leq \Delta Q_{2-max} \quad (10)$$

式中:

ΔQ_2 ——表征循环浆液流量瞬时变化速率 (m^3/h);

ΔQ_{2-min} 、 ΔQ_{2-max} ——环浆液流量瞬时变化速率最小值和最大值, 考虑到过快的流量变化可能导致系统压力波动, 影响脱硫效率和设备寿命, 本文取值 0~10000 m^3/h 。

3) 新石灰浆液供给静态约束

$$Q_{1-min} \leq Q_1 \leq Q_{1-max} \quad (11)$$

式中:

Q_1 ——新石灰浆液流量 (m^3/h);

Q_{1-min} 、 Q_{1-max} ——新石灰浆液流量最小值和最大值 (m^3/h), 下限保证连续投加, 上限防止过量导致吸收塔结垢, 取值分别为 0 m^3/h 和 50 m^3/h 。

4) 新石灰浆液动态调节约束

$$\Delta Q_{1-min} \leq \Delta Q_1 \leq \Delta Q_{1-max} \quad (12)$$

式中:

ΔQ_1 ——新石灰浆液流量变化率 ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot min^{-1}$);

ΔQ_{1-min} 、 ΔQ_{1-max} ——新石灰浆液流量变化率最小值和最大值, 基于浆液输送泵调节能力, 确保 pH 值平稳, 分别取 5 $m^3 \cdot h^{-1} \cdot min^{-1}$ 和 20 $m^3 \cdot h^{-1} \cdot min^{-1}$ 。

5) 末端排放限值约束

$$m_{SO_2,out} \leq m_{SO_2,out-max} \quad (13)$$

式中:

$m_{SO_2,out}$ ——出口烟气中 SO_2 的浓度, 需满足 $m_{SO_2,out} \leq 35 \text{ mg/Nm}^3$ (环保法规强制限值)。

6) 浆液主体 pH 值约束

$$pH_{min} \leq pH \leq pH_{max} \quad (14)$$

式中:

pH ——浆液主体 pH 值;

pH_{min} 、 pH_{max} ——浆液主体 pH 值最小值和最大值。 $pH_{min}=5.0$, $pH_{max}=6.0$, $pH<5.0$ 时反应速率降低, $pH>6.0$ 时石灰石利用率下降。

7) 钙硫比约束

$$(Ca/S)_{min} \leq Ca/S \leq (Ca/S)_{max} \quad (15)$$

式中:

Ca/S ——钙硫比;

$(Ca/S)_{min}$ 、 $(Ca/S)_{max}$ ——钙硫比的最小值及最大值, 在文中取 0.8 和 1.5, 下限 0.8 确保 SO_2 充分反应, 上限 1.5 避免浆液过饱和和抑制石膏结晶。

8) 液气比约束

$$(L/G)_{min} \leq L/G \leq (L/G)_{max} \quad (16)$$

式中:

L/G ——液气比, 表示浆液流量与烟气流量之比;

$(L/G)_{min}$ 、 $(L/G)_{max}$ ——液气比的最小值和最大值, 当液气比小于 8 将导致脱硫效率不足, 大于 15 则电耗显著增加, 取值分别为 8 和 15。

9) 钙硫比的变化率约束

$$\Delta(Ca/S) \leq \Delta(Ca/S)_{max} \quad (17)$$

式中:

$\Delta(Ca/S)$ ——钙硫比的变化率;

$\Delta(Ca/S)_{max}$ ——钙硫比的变化率上限, 防止过快调整导致 pH 剧烈波动, 影响石膏品质, 取 0.2/min。

10) 液气比的变化率约束

$$\Delta(L/G) \leq \Delta(L/G)_{max} \quad (18)$$

式中:

$\Delta(L/G)$ ——液气比的变化率;

$\Delta(L/G)_{max}$ ——液气比的变化率上限, 匹配循环泵变频调节速率, 确保烟气与浆液流量动态平衡, 取值 1/min。

3 基于 NSGA-II 的多目标求解方法

均衡地实现循环泵组合 (液气比) 和石灰石浆液流量 (钙硫比) 的同步控制, 对脱硫过程的稳定性和效率至关重要。非支配排序遗传算法-II

(NSGA-II) 是基于精英保留策略的多目标优化框架, 其核心是通过非支配分层与拥挤度距离机制实现帕累托前沿的高效搜索。它通过非支配排序和拥挤度比较来平衡探索和利用, 适用于需要同时考虑多个性能指标的复杂问题。NSGA-II 能够在保证脱硫出口 SO_2 浓度不超标的情况下, 有效均衡循环泵出力分配和石灰石浆液消耗, 从而提高脱硫系统的整体性能 and 经济效益。

3.1 问题定义

多准则优化模型的核心任务是通过帕累托前沿搜索机制, 对多维目标向量实现全局协同最小化:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) &= [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})] \\ \text{s.t } \mathbf{x} &\in \Omega \end{aligned} \quad (19)$$

式中:

$f(\mathbf{x})$ —— 目标向量;

$\mathbf{x}$ —— 决策变量向量;

Ω —— 可行解空间。

3.2 算法流程

基于 NSGA-II 的多目标求解方法流程如图 2 所示。

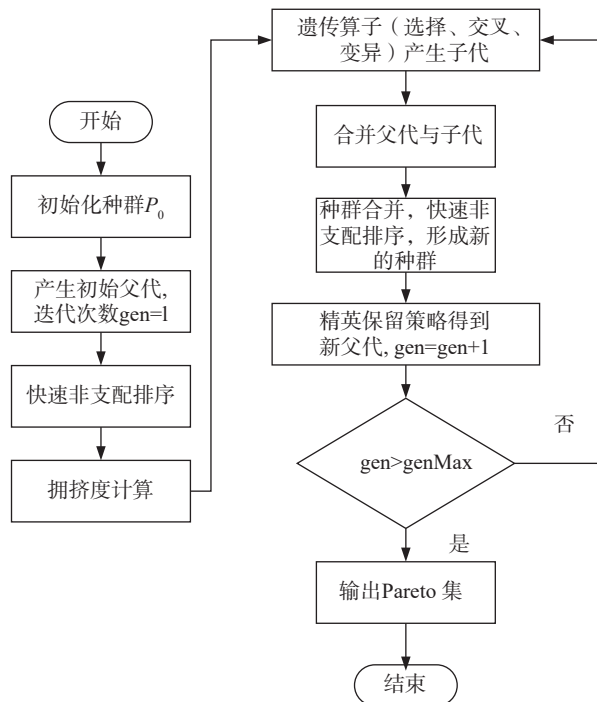


图 2 NSGA-II 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the NSGA-II algorithm

1) 初始种群生成

生成一个随机的初始种群 P_0 , 其大小为 N , 每

个个体表示一组决策变量 (钙硫比、液气比)。

2) 非支配排序

通过非支配分层机制对种群个体进行帕累托层级划分 (前沿)。

3) 拥挤度计算

逐层级执行邻域密度度量, 优化解集分布均匀性。

4) 选择

采用拥挤比较算子进行锦标赛选择, 对于两个个体 p 和 q , 选择规则为: 若 $r(p) < r(q)$ 或 $r(p) = r(q)$ 且 $d(p) > d(q)$ 选择 p , 其中 $r(p)$ 和 $r(q)$ 是非支配排序的层次, $d(p)$ 和 $d(q)$ 是拥挤距离。

5) 交叉与变异 (Crossover and Mutation)

(1) 生成子代种群 Q_t

模拟二进制交叉 (SBX), 对于父代个体 x_1 和 x_2 , 生成子代个体 c_1 和 c_2 :

$$\beta_q = \begin{cases} (2u)^{1/(n_c+1)}, & \text{if } u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{1/(n_c+1)}, & \text{if } u > 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

$$c_1 = 0.5[(1+\beta_q)x_1 + (1-\beta_q)x_2] \quad (21)$$

$$c_2 = 0.5[(1-\beta_q)x_1 + (1+\beta_q)x_2] \quad (22)$$

其中 u 是一个均匀分布的随机数, n_c 是交叉分布指数。

(2) 多项式变异 (Polynomial Mutation)

对于每个子代个体 c , 执行变异, 其中 u 是一个均匀分布的随机数, n_m 是变异分布指数。

6) 种群合并与更新

将亲本群体 P_t 与衍生群体 Q_t 进行代际融合, 构建复合解集 R_t 。对 R_t 进行非支配排序; 选择前 N 个非支配排序较优的个体形成新的种群 ($P(t+1)$)。

7) 重复与收敛条件

重复步骤 4—步骤 6, 直到达到收敛条件 (如达到最大代数 G 或种群收敛)。

4 工程应用分析

本文以浙江浙能北仑发电有限公司 #3 号机组为例进行分析, 该脱硫吸收塔为三层喷淋系统, 有 5 台 3 kV 等级浆液循环泵, 其中 B、D 为第一喷淋层, A、C 为第二喷淋层, E 为第三喷淋层; A、C、E 为同一母线, B、D 为同一母线, D 泵由于改为

变频调节默认一直运行不切换, 具体参数如表 1 所示。

表 1 脱硫吸收塔参数
Tab. 1 Parameters of the desulfurization absorption tower

循环泵	电流/A	备注
A	160	—
B	185	—
C	150	—
D	175	可变频调节
E	160	—

4.1 参数设置

1) 算法参数配置

表 2 给出了 NSGA-II 算法中相关参数的设置, 具体如下。

种群个数 ($N=100$) 和迭代次数 ($G=200$) 是

表 2 NSGA-II 相关参数设置
Tab. 2 Parameter settings for the NSGA-II algorithm

种群个数 N	迭代次数 G	基因重组率 p_c	突变概率 p_m
100	200	0.9	0.5

基于计算效率和收敛性能的平衡确定的。

基因重组率 ($p_c=0.9$) 和突变概率 ($p_m=0.5$) 是根据 NSGA-II 算法的推荐值设置的, 以确保种群的多样性和收敛性。

2) 工艺参数的设计

针对液气比, 现阶段浆液循环泵的工况调控主要依赖多模式协同切换策略, 因为脱硫吸收塔浆液循环泵的组合方式多样, 加上变频改造的那一台泵的可调节范围。确定目标向量后, 对历史数据库, 开始液气比种群的拥挤度计算, 可以得到相应不同循环泵的组合分配, 如表 3 所示。

表 3 循环泵的组合分配表
Tab. 3 Combination allocation table of circulating pumps

负荷/MW	SO ₂				
	1g/m ³	1.2 g/m ³	1.4 g/m ³	1.6 g/m ³	1.8 g/m ³
200	AD/DE	AD/DE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE
300	AD/DE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE
400	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABCD/ABDE
500	ABD/ADE	ABD/ADE	ABD/ADE	ABCD/ABDE	ABCD/ABDE
600	ABD/ADE	ABD/ADE	ABCD/ABDE	ABCD/ABDE	ABCD/ABDE
660	ABD/ADE	ABCD/ABDE	ABCD/ABDE	ABCD/ABDE	ABCDE

针对脱硫系统运行特征, 对关键参数获取方式与约束条件进行优化改进。烟气流量数据虽可通过 DCS 系统实时采集, 但原始监测值存在显著波动, 可能影响拥挤度计算精度。对此采用机组总风量数据融合技术实现动态修正, 同时将煤质波动引起的吸收塔入口硫浓度变化区间纳入拥挤度算子设计, 增强工况适应性。

运行实践表明, 钙硫比参数呈现非线性控制特性。在初始阶段 (钙硫比 <1.01), 石灰石浆液投加量提升可有效提高浆液 pH 值, 强化 SO₂ 吸收过程; 但当钙硫比超过临界阈值时, CaCO₃ 溶解速率的物理限制会导致浆液过饱和现象, 反而形成逆向抑制效应。通过多目标优化算法求解得出系统最佳控制点为钙硫比 1.01、液气比 11.03 (图 3), 此时达到帕累托最优状态。

4.2 不同工况下的优化策略

由于火电企业具有深度调峰的特点, 针对 3 种典型工况类型展开了深入研究。

1) 工况 1: 升负荷过程

在图 4 (a) 中, 功率曲线呈上升趋势, 表明机

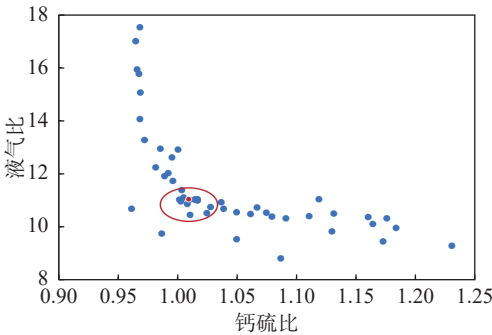


图 3 最优解分布示意图
Fig. 3 Distribution of the Pareto-optimal solutions

组负荷增加。此时,图4(b)里循环泵变频功率迅速做出反应,频率升高,增加了浆液的喷淋量,加

强与烟气的反应。紧接着,调节钙硫比,从图4(d)可以看到石灰石浆液流量增大,这使得pH值上升。在这一系列操作下,图4(c)中的出口SO₂浓度稳定在设定值范围内,确保了环保达标。结合图4(f)脱硫效率变化,在稳定运行和环保达标的基础上,逐步优化经济性能,提高整体运行效率。

2) 工况2: 降负荷过程

图4(a)中功率曲线下降,显示负荷降低,率先调节钙硫比,减少石灰石浆液流量,导致图4(c)中pH值降低。随后,图4(b)调整循环泵变频功率,降低频率。这一系列调整使出口SO₂浓度保持达标。在这个过程中,先保障系统稳定性和环保要求,从图4(f)脱硫效率的变化可以看出,之后逐步优化经济性,降低运行成本。

3) 工况3: 平稳工况

工况平稳时,通过微调钙硫比和液气比,维持这种稳定状态,此时系统稳定性和环保目标已达成,重点在于优化经济性。通过精准控制,减少石灰石粉耗和循环泵的用电成本,在图4(f)脱硫效率稳定的情况下,实现经济运行的最优化。

如图5(a)所示,优化前,#3机组发电机功率曲线波动明显,运行过程中功率调整频繁且幅度较大。优化后,功率曲线波动幅度明显减小,运行更加平稳。这表明基于NSGA-II的控制策略有效提升了机组运行的稳定性,减少了不必要的功率波动。如图5(b)所示,优化前,净烟气出口SO₂浓度波动较大,难以稳定在较低水平,这可能导致排放超标风险增加,对环境造成较大压力。优化后,净烟气出口SO₂浓度显著降低且波动幅度明显减小,能够稳定保持在较低浓度范围内,严格满足环保法规的要求。通过项目应用前后的一周数据对比分析,在相同负荷率和硫分的情况下,通过合理的循环泵切换结合变频控制策略的应用,取得了显著的节能效果。

(1) 总体循环泵节能情况

表4展示了使用优化策略前后5台循环泵运作1周前后的平均小时功率,可以看出循环泵一周平均小时功率减少了21.72%,按照年运行6000h,厂用电单价0.35元/kWh计算,每年可以节省133.5万元。

(2) 总体单位粉耗下降情况

表5展示了投运前后一周单位脱硫粉耗对比,可以看出按单位硫粉耗率计算单位粉耗下降26.7%。

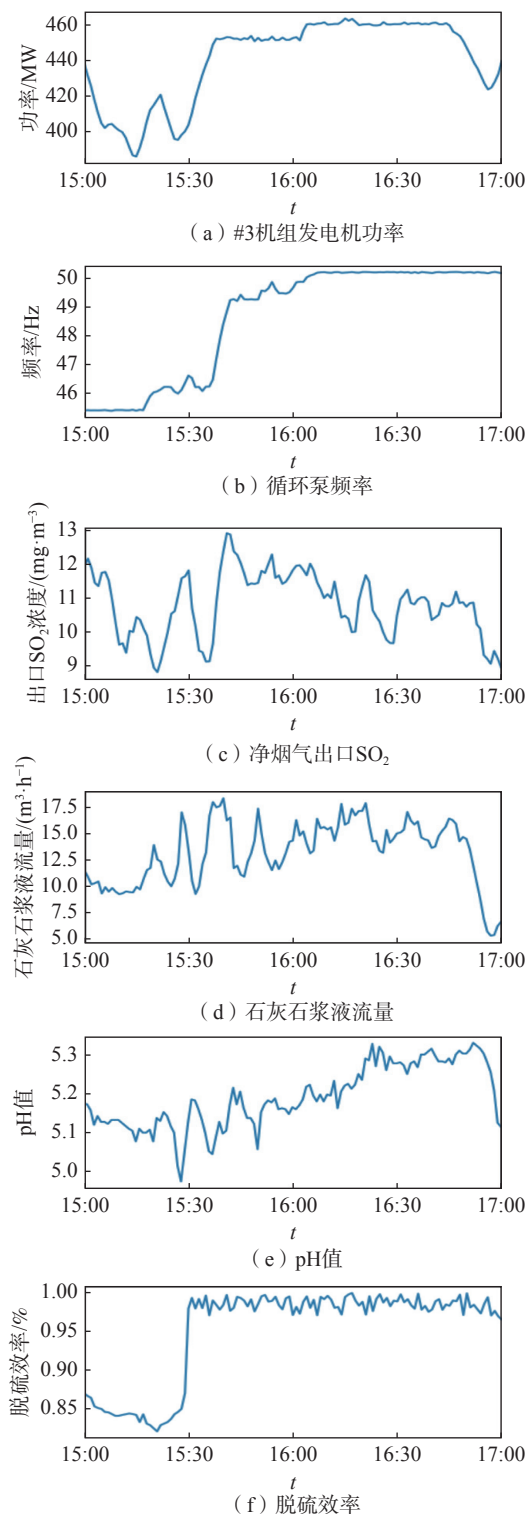


图4 典型工况控制曲线

Fig. 4 Control performance curves under typical operating conditions

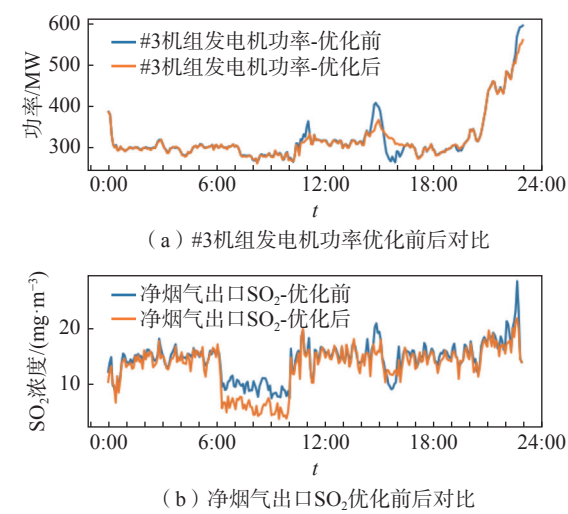


图 5 投运前后对比曲线

Fig. 5 Performance comparison before and after optimization

表 4 总体循环泵节能情况前后对比

Tab. 4 Energy-saving performance comparison for the circulation pumps before and after optimization

投运前一周5台 循环泵平均小时 功率/kW	投运后一周5台 循环泵平均小时 功率/kW	按照年运行6 000 h, 厂用电 单价0.35元/kWh计算, 每年可以节省/万元
2 926.55	2 290.80	133.5

表 5 总体单位粉耗下降前后对比

Tab. 5 Comparison of the specific powder consumption of desulfurizing agent before and after optimization

投运前一周 单位脱硫粉耗/kg	投运后一周 单位脱硫粉耗/kg	按单位硫粉耗率 计算单位粉耗下降/%
2.43	1.78	26.7

5 结论

针对燃煤机组脱硫系统运行中多目标优化难题, 本文提出基于 NSGA-II 的钙硫比与液气比智能协同控制策略。通过构建多目标优化模型, 以最小化运行成本(泵组电耗、脱硫剂消耗)、稳定出口 SO₂ 浓度及满足环保约束为核心目标, 结合 NSGA-II 的非支配排序与拥挤度机制, 动态优化循环泵变频参数与石灰石浆液流量。工程应用表明: 该方案在升/降负荷及平稳工况下, 可均衡循环泵出力分配与浆液消耗, 保障 SO₂ 排放浓度达标, 同时实现显著节能降耗——循环泵电耗降低 21.7% (年节约 133.5 万元), 单位粉耗下降 26.7%。研究验证了

NSGA-II 在多变量强耦合脱硫系统优化中的有效性, 为燃煤电厂经济环保运行提供了可靠技术支撑。

参考文献:

[1] 邱国华, 魏宏鸽, 梁秀进, 等. 火电机组脱硫超低排放运行能耗分析与节能运行展望 [J]. 发电技术, 2020, 41(5): 510-516. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.20040.

QIU G H, WEI H G, LIANG X J, et al. Energy consumption analysis of desulphurization ultra-low emission operation and outlook on its energy-saving operation in thermal power plants [J]. Power generation technology, 2020, 41(5): 510-516. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.20040.

[2] 沈健, 董强强, 申军锋. 脱硫浆液循环泵运行成本分析及节能控制措施 [J]. 化学工程与装备, 2019(1): 226-227, 225. DOI: 10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2019.01.095.

SHEN J, DONG Q Q, SHEN J F. Analysis of operating costs and energy-saving control measures for desulfurization slurry circulating pump [J]. Chemical engineering & equipment, 2019(1): 226-227, 225. DOI: 10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2019.01.095.

[3] 高伟, 刘明, 赵永亮, 等. 燃煤机组脱硫浆液循环泵变频运行控制策略优化及节能分析 [J]. 热力发电, 2024, 53(10): 134-143. DOI: 10.19666/j.rld.202403056.

GAO W, LIU M, ZHAO Y L, et al. Control strategy optimization and energy saving analysis for slurry circulation pumps in fixed-frequency mode of desulfurization system in coal-fired power units [J]. Thermal power generation, 2024, 53(10): 134-143. DOI: 10.19666/j.rld.202403056.

[4] 陈雷, 罗洪, 付强. 1000 MW 燃煤发电机组双钙基湿法脱硫 pH 调控技术的节能效益分析 [J]. 节能与环保, 2023(1): 84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2023.01.030.

CHEN L, LUO H, FU Q. Energy saving benefit analysis of pH regulation technology for double calcium based wet desulfurization of 1000 MW coal-fired power generation units [J]. Energy conservation and environmental protection, 2023(1): 84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2023.01.030.

[5] 吕游, 吴斌, 秦瑞钧, 等. 燃煤机组灵活运行性能评价及成本分析 [J]. 热力发电, 2023, 52(12): 20-28. DOI: 10.19666/j.rld.202303026.

LYU Y, WU B, QIN R J, et al. Flexible operation performance evaluation and cost analysis of coal-fired units [J]. Thermal power generation, 2023, 52(12): 20-28. DOI: 10.19666/j.rld.202303026.

[6] 李伟, 林晓斌. 燃煤电厂脱硫浆液循环泵节能改造及效果分析 [J]. 节能与环保, 2022(12): 77-79. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2022.12.029.

LI W, LIN X B. Energy saving transformation and effect analysis of desulfurization slurry circulating pump in coal-fired power plant [J]. Energy conservation and environmental protection, 2022(12): 77-79. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2022.12.029.

[7] 徐晓钢. 330 MW 燃煤供热机组降低厂用电率的方法研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.

XU X G. The research on methods of reducing auxiliary power rate in 330 MW coal-fired cogeneration units [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.

[8] 冯斌, 王锋涛, 闫乃明, 等. 600 MW 燃煤机组脱硫浆液循环泵

- 变频改造及节能优化研究 [J]. *电力科技与环保*, 2021, 37(2): 51-57. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2021.02.009.
- FENG B, WANG F T, YAN N M, et al. Study on frequency conversion transformation and energy saving optimization of desulfurization slurry circulating pump in 600 MW coal-fired unit [J]. *Electric power technology and environmental protection*, 2021, 37(2): 51-57. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2021.02.009.
- [9] 魏书州. 350 MW 燃煤机组超低排放优化研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- WEI S Z. Study of ultra low emission optimization of 350 MW coal-fired power plant [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [10] 徐遵义, 刘文慧, 张旭冉, 等. 基于数据驱动的浆液循环泵运行优化研究 [J]. *中国电力*, 2021, 54(3): 197-204. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202002141.
- XU Z Y, LIU W H, ZHANG X R, et al. Research on data-driven optimal operation of slurry circulation pump [J]. *Electric power*, 2021, 54(3): 197-204. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202002141.
- [11] 覃文力, 荣娜, 刘兴艳. 基于 PKO 算法的含电氢耦合综合能源系统优化调度 [J]. *南方能源建设*, 2025, 12(3): 90-101. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-219.
- QIN W L, RONG N, LIU X Y. Optimization and scheduling of integrated energy systems with hydrogen-electricity coupling based on PKO algorithm [J]. *Southern energy construction*, 2025, 12(3): 90-101. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-219.
- [12] 王超, 陈奇, 谷新梅, 等. 基于麻雀优化算法的锂电池健康状态估计方法 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 89-97. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.010.
- WANG C, CHEN Q, GU X M, et al. Assessment method for health state of Li-ion batteries based on sparrow search algorithm [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 89-97. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.010.
- [13] 李杰, 王杰, 梁文腾, 等. 含逆变型分布式电源的负荷模型构建及参数辨识方法 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 164-173. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.17.
- LI J, WANG J, LIANG W T, et al. Load model construction and parameter identification method of inverter-interfaced distributed generator [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(6): 164-173. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.17.
- [14] 金秀章, 李奕颖. 基于 MI 时序处理的 GA-BP 脱硫制浆系统能耗建模 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 64-68. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.010.
- JIN X Z, LI Y Y. Energy Consumption modeling of GA-BP for desulfurization pulping system based on MI time series processing [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 64-68. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.010.
- [15] 胡增旗, 李兆北, 王印松. 一种基于改进多目标粒子群算法的脱硫系统优化运行策略方法 [J]. *电力科技与环保*, 2022, 38(5): 351-357. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2022.05.002.
- HU Z Q, LI Z B, WANG Y S. An optimal operation strategy method of the desulfurization system based on MOPSO algorithm [J]. *Electric power technology and environmental protection*, 2022, 38(5): 351-357. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2022.05.002.
- [16] 尹晓云, 李静, 林冬, 等. 基于正交试验的天然脱硫工艺多目标优化 [J]. *石油与天然气化工*, 2024, 53(5): 138-146. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.05.016.
- YIN X Y, LI J, LIN D, et al. Multi-objective optimization of natural gas desulfurization process based on orthogonal test [J]. *Chemical engineering of oil & gas*, 2024, 53(5): 138-146. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.05.016.
- [17] 马永涛. 数据驱动的燃煤电厂脱硫脱硝系统多目标优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- MA Y T. Data-driven multi-objective optimization research on desulfurization and denitrification system in a coal-fired power plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [18] 冉初萌. 基于改进粒子群算法和多目标优化算法的燃煤电站脱硫废水零排放综合评价 [J]. *微型电脑应用*, 2024, 40(9): 205-209. DOI: 10.3969/j.issn.1007-757X.2024.09.050.
- RAN C M. Comprehensive evaluation of zero discharge of desulfurization wastewater from coal-fired power plants based on improved particle swarm algorithm and multi-objective optimization algorithm [J]. *Microcomputer applications*, 2024, 40(9): 205-209. DOI: 10.3969/j.issn.1007-757X.2024.09.050.
- [19] 许彦斌, 赵明, 吕金花, 等. 基于工况划分的机组优化运行寻优方法 [J]. *节能技术*, 2018, 36(2): 139-144. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2018.02.009.
- XU Y B, ZHAO M, LYU J H, et al. Optimization of unit operation based on operating condition [J]. *Energy conservation technology*, 2018, 36(2): 139-144. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2018.02.009.
- [20] 郑茗友. 基于数据驱动的电站湿法脱硫系统运行优化研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- ZHENG M Y. Study on operation optimization of power plant wet desulphurization system based on data drive [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.

作者简介:



丁乐

丁乐 (第一作者)

1969-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事能源工程管理工作 (email) 13646669061@163.com。



虞仕杰

虞仕杰 (通信作者)

1981-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事热控技术管理工作 (email) 2111903179@zjut.edu.cn。

(编辑 徐嘉铨)