

引用格式: 宋民航, 杨宏燕. 基于智能控制的燃煤锅炉灵活调峰技术[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 1-17. SONG Minhang, YANG Hongyan. Flexible peak shaving technology for coal-fired boilers based on intelligent control [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 1-17. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.01.

# 基于智能控制的燃煤锅炉灵活调峰技术

宋民航<sup>1</sup>, 杨宏燕<sup>2,✉</sup>

(1. 华北科技学院 安全工程学院, 河北 廊坊 065201;

2. 北京工业大学 信息科学技术学院, 北京 100124)

**摘要:** [目的] 随着对火电机组灵活调峰的需求骤增及信息技术的飞速发展, 火电企业正由传统运行及管理模式, 向更加清洁、高效、可靠的数字化及智能化方向发展, 如何提高燃煤机组灵活调峰过程中的智能化、精准化及可靠性, 已成为行业内人员所关注的重点问题。[方法] 文章针对深度调峰的背景需求, 对燃煤锅炉灵活调峰中的典型问题进行总结, 分析了应用于锅炉的控制理论整体发展状况。基于此, 分别从锅炉燃烧性能优化控制、宽负荷脱硝精准控制、锅炉运行能效控制、主辅机设备监测及诊断等4个方面对基于智能控制的燃煤锅炉灵活调峰算法模型及应用进行了综合分析。[结果] 在此基础上, 详细探讨了智能控制理论及模型在燃煤锅炉灵活调峰中的研究进展及应用效果。[结论] 目前, 基于燃煤锅炉灵活调峰过程中的常见问题, 需要在燃烧组织方式稳燃能力深度提升的基础上, 提高基础数据获取准确性, 促进数据及知识的互补融合, 加强多目标优化控制及DCS控制系统优化等, 同时兼顾调峰经济性与机组寿命之间的辩证优化关系, 从而提高燃煤锅炉灵活调峰能力提供智能化及精准化解决方案。

**关键词:** 燃煤电站锅炉; 灵活调峰; 控制算法; 神经网络; 清洁高效

中图分类号: TM621; TK01+8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0001-17

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.01

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Flexible Peak Shaving Technology for Coal-Fired Boilers Based on Intelligent Control

SONG Minhang<sup>1</sup>, YANG Hongyan<sup>2,✉</sup>

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang, Hebei 065201, China;

2. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** [Introduction] With the increasing demand for flexible peak shaving of thermal power units and the rapid development of information technology, thermal power enterprises are shifting from the traditional operation and management mode toward a cleaner, more efficient, reliable digital and intelligent mode. How to improve the intelligence, precision and reliability of coal-fired units in the flexible peak-shaving process has become a key issue of concern to those in the industry. [Method] Aiming at the deep peak shaving demand of the power system, this paper summarized the typical problems in the process of flexible peak shaving and analyzed the overall development of control theory applied to boilers in coal-fired units. Based on this, this paper conducted a comprehensive analysis of coal-fired boiler flexible peak shaving algorithm models and their applications based on intelligent control from four aspects: optimization control of boiler combustion performance, precise control of wide-load denitration, boiler operational energy efficiency control, and monitoring and diagnosis of main and auxiliary machinery equipment. [Result] On this basis, the research progress and application

收稿日期: 2023-12-19 修回日期: 2024-01-14 网络首发日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“信息网络环境下 Markovian 跳变系统安全运行控制方法研究”(62103011); 北京市科技新星“Markovian 跳变系统安全运行控制方法研究”(Z211100002121073); 北京市教委科技一般项目“马尔科夫跳变信息物理系统安全运行控制方法研究”(KM202210005025)。

effects of intelligent control theory and models in the flexible peak shaving of coal-fired boilers are discussed in detail. [Conclusion] At present, based on the common problems in the flexible peak-shaving process of coal-fired boilers, it is necessary to improve the accuracy of basic data acquisition, promote the complementary integration of data and knowledge, and strengthen multi-objective optimization control and DCS control system optimization on the basis of the stable combustion ability improvement of the combustion organization method. At the same time, it is important to consider the dialectical optimization relationship between peak shaving economy and unit life, thereby providing intelligent and precise solutions to improve the flexible peak shaving capabilities of coal-fired boilers.

**Key words:** coal-fired power plant boiler; flexible peak shaving; control algorithm; neural network; clean and efficient

2095-8676 © 2024 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

可再生能源是中国多轮驱动能源供应体系的重要组成部分<sup>[1]</sup>。经预测, 2025 年的可再生能源发电量可达约 4000 TWh<sup>[2]</sup>。由于可再生能源自身的调峰能力有限<sup>[3]</sup>, 容易出现“弃光弃风”的能源浪费问题<sup>[4]</sup>。电站锅炉作为电网中的基础调节能源<sup>[5]</sup>, 充分挖掘燃煤发电机组深度调峰潜力具有重要实际意义。

对于大型燃煤锅炉的深度调峰, 由于低负荷运行时机组整体运行特性大幅偏离满负荷设计运行参数, 使机组在调峰过程中出现燃烧稳定性差、NO<sub>x</sub> 生成量高等问题<sup>[6]</sup>, 同时也面临着机组运行能耗的大幅增加。锅炉系统受限于其内部的复杂流动、反应及传热过程, 对于过程数据的获取手段较为有限。目前, 发电企业主要通过设备改造、试验及运行调试摸索规律<sup>[7]</sup>, 该方法的过程缓慢且成本巨大, 具有主观性和局限性的特点, 难以适应燃煤锅炉调峰的频繁变工况需求<sup>[8]</sup>。以上措施对提升燃煤锅炉深度调峰能力有一定的提升作用, 但仍难以满足燃煤锅炉对调峰灵活性、精确性、快速性及经济性的运行需求。

随着信息技术的飞速发展, 以及“十三五”规划和《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》等文件<sup>[9-10]</sup>的陆续发布, 标志着火电机组的数字化及智能化的发展趋势。深度挖掘和分析燃煤机组的运行数据, 有助于提高灵活调峰机组的运行可靠性、环保性和经济性, 助力电站锅炉调峰能力的深度提升。因此, 在已有电站锅炉深度调峰的常规措施及经验基础上, 进一步结合基于数据驱动和燃烧理论的智能控制算法, 是未来电站锅炉灵活调峰技术的主流发展方向。

由于锅炉系统的复杂性, 诸多优化目标经常是相互冲突、非线性的, 因此调峰过程中的运行工况频

繁变化决定着最优运行参数的多变性, 为深度调峰下锅炉智能控制及优化调控提出了新的挑战。文章首先对锅炉控制理论的应用进行概述, 并基于电站锅炉深度调峰过程中的典型问题分析, 对基于智能控制算法的燃煤锅炉灵活调峰技术研究及进展进行分析和总结, 在此基础上, 总结了现阶段基于智能控制的灵活调峰研究存在的问题并进行研究展望。

## 1 燃煤锅炉灵活调峰的常见问题

图 1 为燃煤锅炉深度调峰过程中所面临的典型问题。燃煤锅炉主要由锅炉本体、辅机、烟气污染物处理 3 部分共同组成。锅炉本体包括炉膛、煤粉燃烧器、水冷壁、灰斗等; 辅机设备包括磨煤机、风机、水泵、空预器等; 烟气处理设备包括脱硝设备、除尘器及脱硫设备。在锅炉灵活调峰过程中, 运行参数大幅偏离满负荷运行, 造成各类问题的出现, 多种问题间存在互为因果、内在耦合的关系。下面将上述问题总结归纳为以下 5 类(图 1 中对下述 5 类问题所对应的位置进行了标注):

### 1) 炉内燃烧的影响

**火焰稳定性:** 火焰稳定性是燃煤机组调峰过程中关注的首要问题, 直接决定着机组的运行可靠性。深度调峰下燃料供给量大幅降低, 使燃烧特性大幅偏离设计参数, 对燃烧火焰稳定性产生极大影响, 甚至造成锅炉熄火事故。

**炉内配风:** 由于调峰过程中的运行工况切换频繁, 且多处于低负荷及变负荷运行, 造成炉内风粉分配不合理, 通常通过控制各燃烧区域的风量分配, 深化空气分级燃烧, 以及调整配风参数控制炉内热负荷分布等进行优化。上述措施主要为基于经验的人工调控, 难以做到及时、精准、有效调控。

**NO<sub>x</sub> 及 SO<sub>x</sub> 生成:** 调峰过程中, 常在较大风量下

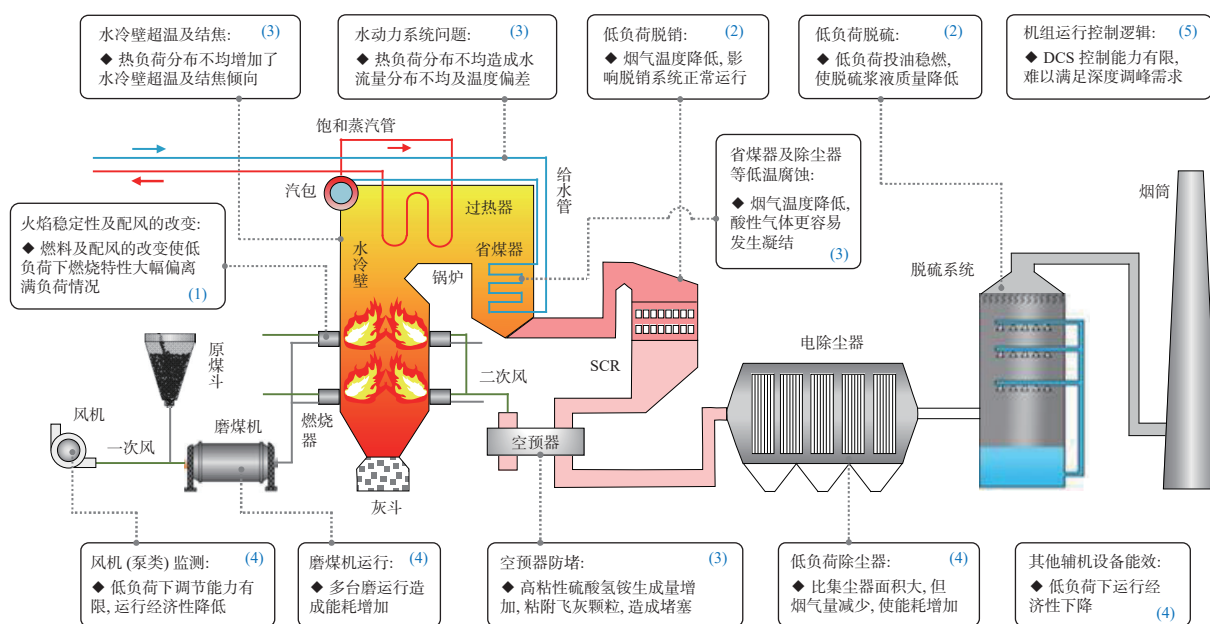


图1 燃煤锅炉深度调峰过程中存在的典型问题

Fig. 1 Typical problems of coal-fired boilers in the process of depth peak shaving

进行,此时的 $\text{NO}_x$ 生成量不减反增。加之,低负荷下常采用投油燃烧方式提高煤粉燃烧稳定性,进一步造成额外的 $\text{NO}_x$ 及 $\text{SO}_x$ 生成,同时增加了污染物处理成本。

## 2) 污染物脱除的影响

**脱硝系统:** 催化剂活性对于 $\text{NO}_x$ 降低影响巨大,其最佳温度一般在 $300 \sim 420^\circ\text{C}$ ,而深度调峰下,入口烟温常低于 $300^\circ\text{C}$ ,造成催化剂活性及脱硝效率降低。与此同时, $\text{NO}_x$ 浓度远超正常值,进一步增加了系统脱硝难度。

**脱硫系统:** 投油稳燃情况下,未完全燃烧的燃油与燃烧产物将与脱硫浆液形成系列反应,使吸收塔内杂质含量显著升高,且油污容易在脱硫剂石灰石、亚硫酸钙表面形成油膜,对钙离子与 $\text{SO}_3$ 的反应产生抑制作用,导致脱硫效率下降。

## 3) 设备稳定运行的影响

**省煤器及除尘器等的低温腐蚀:** 深度调峰运行下,烟气温度会随之降低,此时烟气中酸性气体更容易发生凝结。对后续省煤器、除尘器而言,腐蚀物容易粘附在设备上,腐蚀设备关键部件,影响设备的正常运行。

**空预器积灰堵塞:** 低负荷下脱硝系统喷氨量难以精确控制,使氨逃逸量增多,与烟气中 $\text{SO}_3$ 反应生成 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ,其粘度较大,容易粘附于空预器蓄热元

件表面,使飞灰颗粒大量沉积,造成空预器堵塞,影响风烟系统稳定运行<sup>[11-12]</sup>。

**水动力系统:** 当锅炉负荷降低时( $<30\%$ 负荷),将降低水冷壁中个别管路的水流量,使水量分配不均,受热面部分区域温度分布过高,是造成受热面过热,引起换热管路超温爆管的主要问题之一。

**水冷壁超温及结焦:** 炉内高温区分布不均,部分水冷壁长期温度过高,加之低负荷下的水动力问题,进一步造成水冷壁等换热管路的过热现象。同时,由于火焰偏斜及分布不均问题,也容易造成煤粉气流附着在水冷壁上,形成结焦问题,使传热问题进一步恶化,并增加了掉焦频率,影响受热面安全。

## 4) 对辅机设备运行能耗的影响

**磨煤机:** 低负荷运行下的煤粉含量较低,为了促进煤粉着火及提高燃烧稳定性,通常采取增加磨煤机运行数量和/或提高磨煤机运行参数以降低煤粉细度等措施<sup>[13-14]</sup>,大幅增加了磨煤机的运行能耗。

**泵及风机类:** 水泵及风机作为典型工业流体输运设备,占据着重要耗能比重。由于低负荷下的运行功率难以灵活调控,显著增加了泵类等流体机械的运行能耗<sup>[15]</sup>。

**除尘器:** 锅炉深度调峰下的烟气量大幅减少,相对而言,除尘器的比集尘面积大,增加了低负荷下的运行能耗。



此外,还存在其他类型辅机设备的能耗增加问题,在此不做详细赘述。

#### 5) 对机组控制逻辑的影响

DCS 控制系统: DCS 系统通常在中高负荷情况下运行良好,但未能充分考虑深度调峰下,给水、燃料、配风等条件的复杂控制需求,难以实施有效连续控制<sup>[16]</sup>。

智能控制程度低: 锅炉运行调控过程中的智能化调控份额占比低,难以实现对燃料、氧量、配风、制粉等过程的快速和精准控制,以及各个环节间的高效协同效果。

## 2 应用于锅炉的控制理论概述

基于传统控制理论,智能控制系统常用于非线性度大、任务复杂、研究模型不确定的系统<sup>[17]</sup>,如电站锅炉。通过在控制系统中加入人工智能,能够增强系统的自调控能力<sup>[18]</sup>。目前,常用智能控制方法包括神经网络、模糊控制、遗传算法等。工业应用中的主要控制方案如下<sup>[19]</sup>:

1) 传统 PID(Proportional Integral Differential) 控制。传统 PID 控制已应用于诸多工业过程,但需要根据实践经验手动调参。针对锅炉系统 PID 控制,赵静等<sup>[20]</sup>提出了基于 PLC 锅炉专家 PID 的智能控制。

2) 模糊 PID 控制。在 PID 控制基础上,出现了一些更为智能的 PID 控制模型,如模糊 PID 控制<sup>[21-22]</sup>、无模型自适应控制<sup>[23-24]</sup>、神经网络控制<sup>[25-26]</sup>。适用于具有强干扰性及非线性特点的控制系统,能够大幅提高系统的抗干扰能力及自动化控制能力,但对于控制过程易变化的系统,缺乏必要的自动调节能力。

3) 神经网络智能控制。神经网络算法能够以任意精度趋近非线性函数,具有突出的非线性映射能力及很强的自调节能力,适用于复杂的、非线性的多变量控制系统。近些年,人工神经网络算法在锅炉控制系统中的应用比例逐渐增大。

结合上述经典控制理论及方法,研究人员针对燃煤机组智能控制开展了诸多研究工作,针对锅炉燃烧性能优化控制中的燃烧器出口火焰稳燃控制及炉内配风优化控制,宽负荷脱硝精准控制,锅炉运行能效控制中的锅炉煤耗控制、泵及风机能效控制、脱硫及除尘能效控制,以及主辅机设备运行监测及诊断中的受热面壁温监测及空预器积灰堵塞监测等

方面取得了创新性研究及实际应用成果,下文将围绕上述方面进一步分析展开。

## 3 基于智能控制的燃煤锅炉深度调峰

### 3.1 锅炉燃烧性能优化控制

#### 3.1.1 燃烧器出口火焰稳燃控制

燃烧稳定性是制约燃煤机组深度调峰性能的核心因素。聚焦于燃烧稳定性控制方面,国内外开展了一定的研究工作。颜廷学等<sup>[27]</sup>提出了一种锅炉燃烧稳定性控制方法,首先对炉内燃烧火焰强度进行在线检测,在此基础上,通过建立燃烧强度信号与燃油助燃装置注油量的关联,使在燃烧器出口火焰不稳定时,通过调整助燃油的量,来对火焰稳定情况进行动态调控。通过对燃油助燃设备的自动控制,实现及时喷油,避免喷油滞后处理不及时,以及由此导致的燃烧不稳定问题。

基于神经网络的火焰稳定性检测方法可以有效提高炉内火焰燃烧稳定性的检测精度。由于火焰的脉动特性,为了缓解传统灰度方差方法对于燃烧稳定性存在较大检测偏差的问题,刘树明<sup>[28]</sup>基于神经网络模型,提出了一种新型火焰稳定性检测方法,具体检测算法流程如图 2 所示。该方法在考虑灰度方差特征向量的基础上,同时选取了影响燃烧稳定性的 8 个特征向量,通过对样本训练降低微小脉动的影响。测试表明其检测准确度为 98.7%,图像数目的误检率远少于传统检测方法。

为了克服基于火焰图像的不稳定性燃烧样本匮乏的训练难题,蔡国源等<sup>[29]</sup>提出了采用卷积变分的自编码模型,用于对火焰稳定性的实时、定量表征。该编码器可以获得稳定燃烧图像下的潜在高维概率分布。图 3 为该自编码模型示意图,可通过适当增加池化层、卷积层及全连接层的数量,来提升该模型的准确性。通过对隐变量分布特征的记录,能够计算获得该分布与标准正态分布间的 KL 散度值,最终利用 KL 散度定量表征燃烧稳定性。

图 4 为该种燃烧稳定性表征方法的流程图<sup>[29]</sup>。通过仿真验证,说明变分推断理论的引入,能够提高对燃烧图像的重构质量,图片重构前后的均方根误差位于 0.0055 以内。通过对磨煤机给煤量的调控测试,用于模拟具有不同稳定性的燃烧工况,验证了该方法的有效性 & 准确度,评价准确率达 92.1%。通

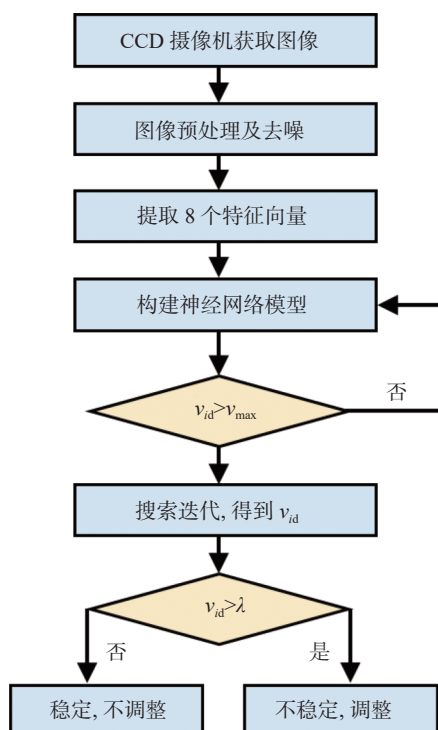


图 2 检测燃烧稳定性的算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart for detecting combustion stability

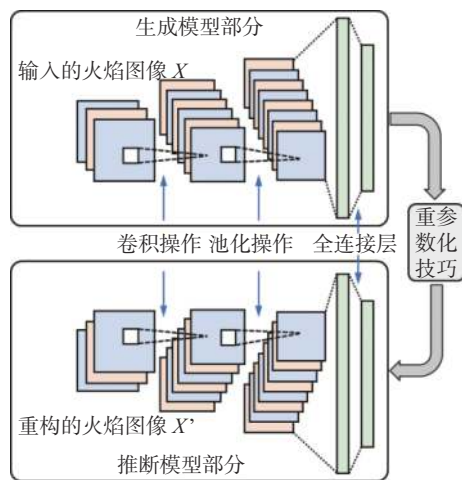


图 3 卷积变分自编码器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of convolutional variational autoencoder

过与煤火检评价的比较, 进一步验证了该方法对燃烧火焰的定量判断能力, 且感知性能更加敏锐, 实现提前 167 s 对能够造成燃烧器灭火的不稳定燃烧状态进行预警。

从影响燃烧稳定性中最核心的颗粒燃烧角度, 多位学者开展了煤粉颗粒燃烧特性智能算法研究<sup>[30-31]</sup>。Han 等<sup>[30]</sup>采用机器学习方法研究了煤粉的着火延迟

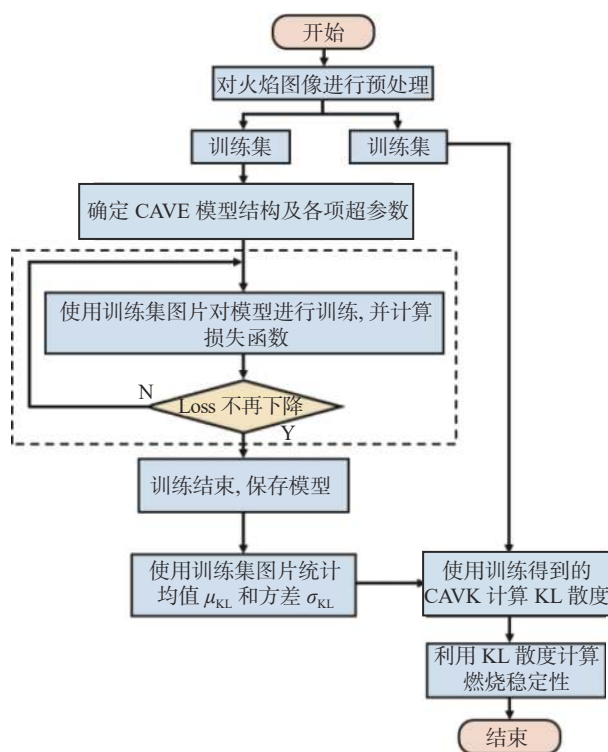


图 4 燃烧稳定性计算流程图

Fig. 4 Flow chart of combustion stability calculation

时间, 证明该方法在保证预测精度的同时可大幅缩短计算时间。Xing 等<sup>[31]</sup>为了解决计算流体动力学方法所需的计算资源消耗量大、计算时间长的问题, 采用了人工神经网络来预测煤粉热解过程, 大幅提高了计算效率。

总结而言, 以上提高锅炉内部火焰燃烧稳定性的方法可以有效提升对火焰燃烧稳定性的检测精度, 为火电机组深度调峰下的炉内燃烧稳定性及安全性, 提供先进的在线监控及预测方法。

### 3.1.2 炉内配风优化控制

在炉内燃烧配风智能优化方面, 针对某 330 MW 机组锅炉, 张振宇等<sup>[32]</sup>结合最小流量再循环阀控制逻辑及负荷指令前馈函数优化, 在不投油情况下, 实现了 30% 负荷下的机组调峰。王子杰等<sup>[33]</sup>针对锅炉燃烧优化, 采用遗传算法实现了燃烧过程的全局寻优。为了降低全局寻优的复杂性, 顾燕萍等<sup>[34]</sup>利用最优 MVs 决策模型, 对锅炉燃烧性能进行优化, 简化了算法复杂程度并提高了稳定性, 其应用结果与全局寻优接近。薛阳等<sup>[35]</sup>针对锅炉汽温控制, 对比分析了单神经元 PID 控制器和 BP 神经网络 PID 控制器的效果, 相比之下, BP 神经网络 PID 控制具

有更为突出的鲁棒性。吴智群等<sup>[36]</sup>以某 600 MW 锅炉为对象,进一步结合遗传算法和径向基神经网络建模进行燃烧优化,获得了较好的应用效果。

为了发展一种原理清晰、成本适宜的燃煤锅炉配风优化方法,实现机组在复杂多变工况下的高效运行。沙晓<sup>[37]</sup>针对锅炉配风调整的困难,提出了一种基于 CO-水蒸气双组分监测的配风调节优化方法,利用水煤气平衡反应,通过对比多测点局部当量比与基准值,对炉内燃烧状态的空间分布进行实时表征,识别燃烧中心偏斜、后移、前移等异常工况并分级报警,实时计算所需燃尽风量。该方法可以有效识别炉内当前燃烧状态,计算给出燃尽风的合理供给量,指导锅炉燃烧优化调整。

决定机组深度调峰能力的决定性因素之一为燃煤特性。基于此,陈鑫等<sup>[38]</sup>提出了一种优化逻辑方法,具体构建框架如图 5 所示。基于入厂前煤质特性建立燃料数据库,采用机器学习算法与数据挖掘手段,综合考虑设备运行状态及机组负荷预测等重要信息,在线优化煤种掺混参数,并实时将不同煤种下的机组运行数据反馈至燃料数据库,可为燃料入炉及配风优化提供参考。

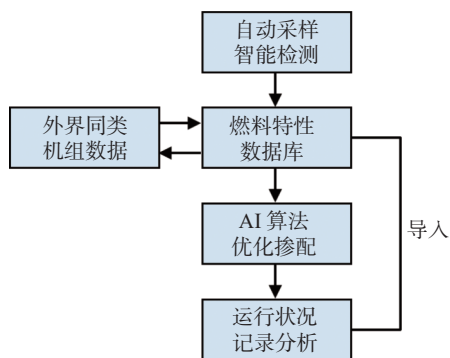


图 5 燃料智能掺配系统构架

Fig. 5 Framework of intelligent fuel blending system

王政等<sup>[39]</sup>采用遗传算法的寻优策略,聚焦于污染物排放及锅炉效率优化,提出了如图 6 所示的配风优化原理。考虑到降低  $\text{NO}_x$  排放与提高锅炉效率间存在一定的矛盾性,为了降低系统复杂度,通过分配权重,将多目标优化简化为单目标优化问题。同时,考虑到运行工况处于持续性变化中,燃烧优化系统允许根据实际运行情况调整神经网络的输入、输出及网络结构,以适应多变的工况。

为了兼顾神经网络模型动态精度高,以及统计

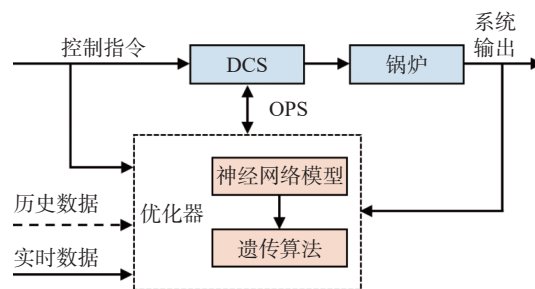


图 6 燃烧优化原理图

Fig. 6 Schematic diagram of combustion optimization

模型的精度高、静态性好的优势,王政等<sup>[39]</sup>将两种模型取长补短进行结合,提出了一种燃烧优化混合模型。预测模型流程如图 7 所示<sup>[39]</sup>,其中的动态模型使用回归神经网络或模糊神经网络进行建模,稳态模型使用回归和惯性环节辨识进行建模,采用锅炉在线测量数据和优化过程中间数据作为预测模型输入参数。通过上述模型预测及优化实现锅炉经济性运行。

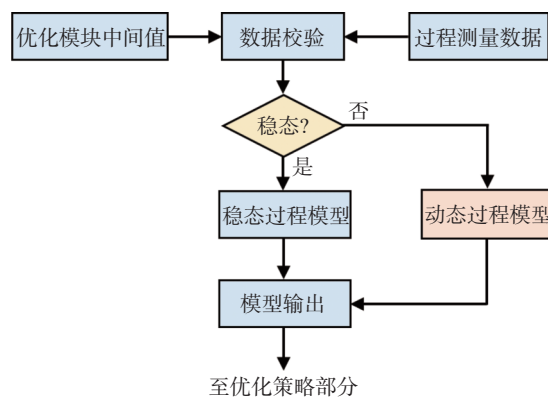


图 7 混合模型流程图

Fig. 7 Flow chart of mixed model

### 3.2 宽负荷脱硝精准控制

在锅炉尾部脱硝控制方面,王立等<sup>[40]</sup>对机组控制逻辑进行优化,在控制器中增加了入口烟温小于 300 °C 时的闭锁减负荷逻辑,同时结合对脱硝入口  $\text{NO}_x$  浓度的灵活调控,获得了最优运行负荷。李彦军等<sup>[41]</sup>对 SCR 分区喷氨进行改造,采用“四分区/八点测量”设计,具体结合  $\text{NO}_x$  浓度分布式巡测和混合采样测量、喷氨总量多维度决策控制、分区在线调平氨氮摩尔比等技术,结合针对执行层的包括总量控制、支管调节及分区调平的三级阀门串联调控,实现降低  $\text{NO}_x$  排放浓度及喷氨量的效果。实现根据深度调峰时设备运行方式、配风方式等不同的  $\text{NO}_x$



浓度场及内部流场,最大程度地减少氨逃逸率。

实时预测  $\text{NO}_x$  浓度,对机组调峰过程中的污染物控制及经济性运行具有重要意义。近些年来,人工智能在燃煤污染物调控中起到了日益突出的作用。周昊等<sup>[42-43]</sup>利用神经网络对燃煤锅炉  $\text{NO}_x$  特性进行研究,模型采用 BP 算法,获得了与实测值吻合良好的预测结果。方海泉等<sup>[44]</sup>利用贝叶斯神经网络遗传算法优化了炉内燃烧特性,用以同时兼顾低  $\text{NO}_x$  排放及较高锅炉热效率。考虑到温度是影响  $\text{NO}_x$  生成的重要因素之一,王浙芬等<sup>[45]</sup>将炉膛温度分布作为 BP 神经网络模型的输入参数,增强了  $\text{NO}_x$  的预测精度。张振星<sup>[46]</sup>通过对脱硝系统的实时氨氮比与脱硝效率的比较分析,发现存在喷氨量响应滞后且喷氨调整过度现象,并发展了基于数据驱动的脱硝入口  $\text{NO}_x$  预测模型,流程图如图 8 所示,该模型基于核函数与寻优参数结果,能够预测锅炉深度调峰下的  $\text{NO}_x$  排放浓度。

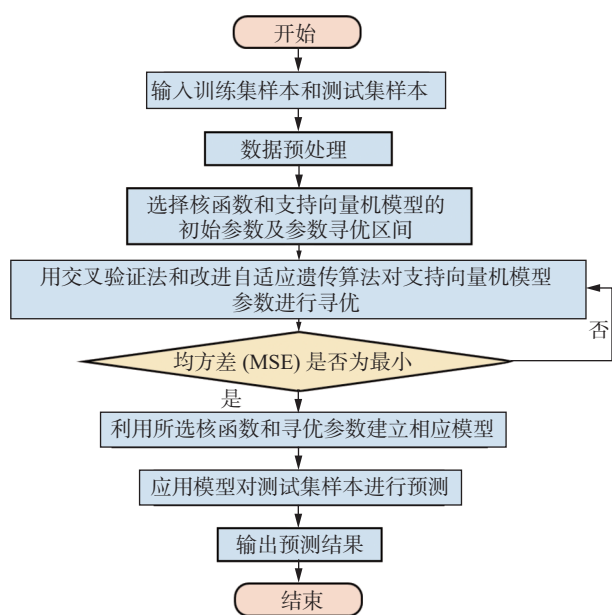


图 8 预测模型流程图

Fig. 8 Flow chart of forecast model

针对某 330 MW 机组锅炉,景雪晖等<sup>[47]</sup>使用 MATLAB 内置的神经网络工具箱,对该锅炉低负荷下的  $\text{NO}_x$  排放浓度进行预测,具体基于 5 min 1 组的  $\text{NO}_x$  实测数据,通过模型训练获得了与目标值接近的模型输出值,拟合  $R$  值约为 0.98。李诚<sup>[48]</sup>结合燃料型及热力型  $\text{NO}_x$  生成机理,开发了基于长短期记忆网络(LSTM)的  $\text{NO}_x$  预测模型,在脱硝入口测试

集上提前 1 min 的平均预测误差为 7%。通过局部加权回归(STL)滤波后目标变量较为平滑,可在一定程度上提高模型精度。调参优化数值实验表明,LSTM 模型的预测时长与依赖时长呈正相关关系,预测时长上限约为 60 s,预测精度可达 93%;若预测时长大于 60 s,其预测精度不再随网络依赖时长的增加而明显改善。此外,Tan 等<sup>[49]</sup>及 Yang 等<sup>[50]</sup>也先后采用了 LSTM 模型,实现对  $\text{NO}_x$  排放的预测,取得了良好的预测效果。

针对炉内燃烧过程的强非线性及大时延特征,唐振浩等<sup>[51]</sup>开发了一种兼顾时间延迟的动态修正模型。为了减轻数据延迟性的影响,采用最大信息系数分析相关参数与  $\text{NO}_x$  排放浓度的延迟时间,对数据集进行重构。基于 Lasso 和 ReliefF 的自适应特征选择算法,获得对  $\text{NO}_x$  浓度影响大的参数,建立极限学习机(ELM)模型。同时,为了实现预测模型的长期、高精度预测,提出了一种具备动态误差修正能力的预测模型(EC-ELM)。具体对 ELM 模型训练集的预测值与测量值作差,将获得的误差结果作为误差模型的输出数据,并将前一时段的历史误差及原始模型输入数据作为误差模型的输入变量,经训练后获得误差模型。最后,将误差模型与预测模型的测试集输出相加,获得的预测结果即为 EC-ELM 模型,模型详细结构如图 9 所示。

图 10 为多种模型的  $\text{NO}_x$  预测结果对比。可见相比于 SVR、ELM、RBF、ESN 模型,EC-ELM 模型能够更好地反应实际  $\text{NO}_x$  浓度变化规律。尤其是从内插放大图可见,EC-ELM 模型的预测值拟合曲线要明显优于其他模型,更接近于真实值,所提出算法在不同工况下的预测误差均小于 2%<sup>[51]</sup>。

目前,针对锅炉尾部污染物脱除的相关研究,主要聚焦于大家广泛关注的  $\text{NO}_x$  脱除,而在  $\text{SO}_x$ 、颗粒物控制<sup>[52]</sup>等方面,均缺少系统的研究报道。

### 3.3 锅炉运行能效控制

#### 3.3.1 锅炉煤耗控制

机组深度调峰将增加发电煤耗及综合厂用电率,降低了机组运行的经济性。在降低锅炉煤耗方面,针对某 440 t/h 的循环流化床锅炉,鲍铁军等<sup>[53]</sup>建立了基于先进控制技术的数学模型,实现机组深度调峰下的 CCS 控制,降低锅炉煤耗约 1%。

通过分析同种型号锅炉的运行参数对煤耗的影

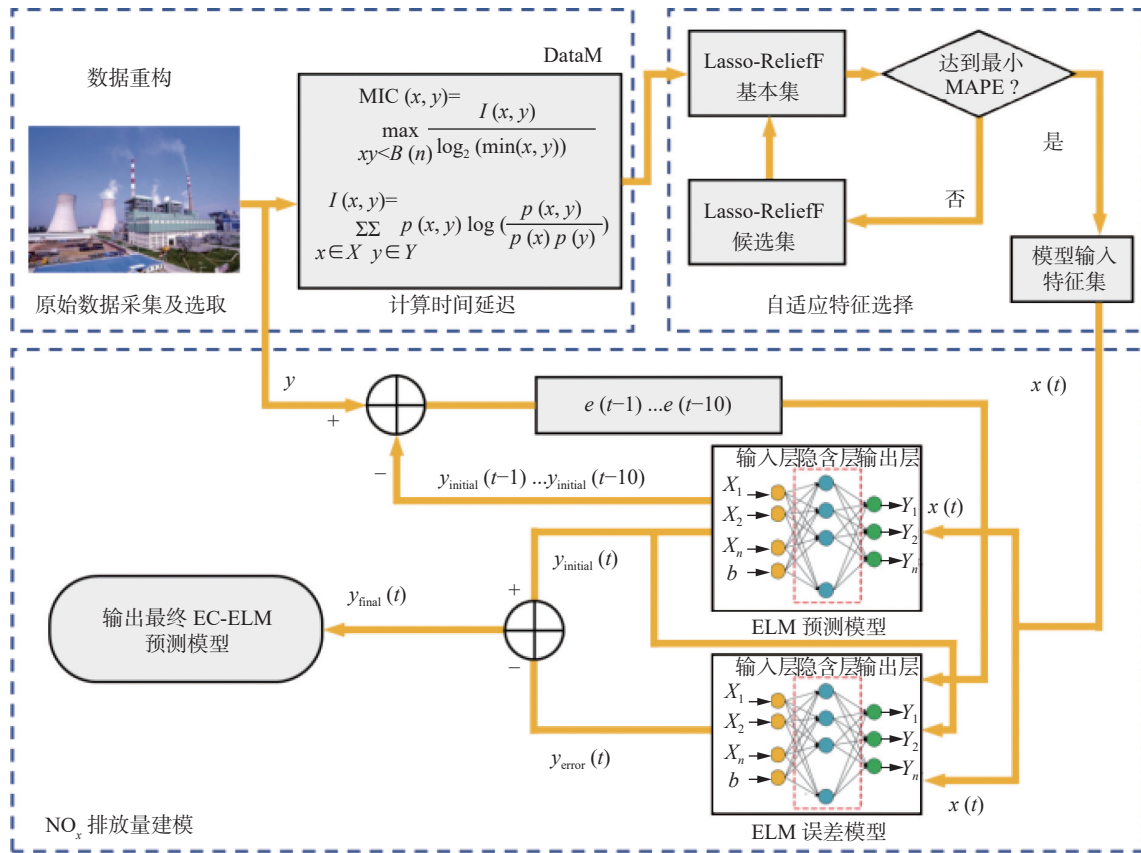
图 9 EC-ELM 模型结构图<sup>[51]</sup>

Fig. 9 Diagram of EC-ELM mode

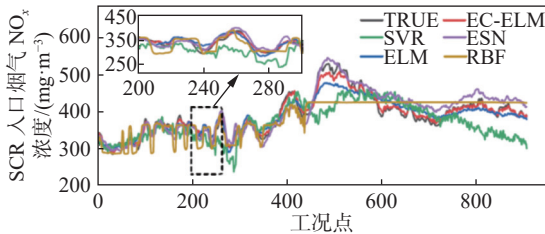
图 10 模型预测结果对比<sup>[51]</sup>

Fig. 10 Comparison of model prediction results

响特性,找出一定外部环境下的最优机组运行策略。这种通过分析煤耗与设计值间的差异指导设备运行的方法称为耗差分析法,广泛应用于电厂生产运行<sup>[54-55]</sup>。但灵活调峰过程中,机组工况繁多,运行区间较大,直接固定其他变量,计算单个变量数值变化引起的煤耗偏差计算方法准确性有待验证<sup>[56]</sup>。

随着电厂数据系统的不断完善,以历史运行数据库数据库中相似工况为参照,对比分析当前运行状态是切实可行的方案<sup>[57]</sup>。李诚<sup>[48]</sup>针对某 660 MW 超超临界纯凝机组,发展了基于机组负荷与环境温度的煤

耗实时寻优算法,可实时提示当前工况下的历史最优煤耗及相应运行状态。煤耗寻优分析可为机组运行优化提供理论指导,提高机组低碳运行水平,同时降低度电  $\text{NO}_x$  生成量。李鑫鑫<sup>[58]</sup>基于历史寻优对火电机组进行运行优化研究,分别采用改进 BP 神经网络和 RBF 神经网络分析了机组最优初压及其影响因素,得出二者间的相对误差分别为 1.416% 和 0.901%,改进的 RBF 神经网络具有更为简单、高效及准确的优势,其总体预测流程如图 11 所示。

目前已有研究通过分析长时间运行规律总结各变量对煤耗的影响,提出了各设备的优化策略。但现有研究多为离线分析,未给出实时优化方案。且各变量对煤耗的敏感度均由统计数据拟合,无法反映不同负荷下变量敏感度的差异,故对于实时工况,只能以变量偏离度粗略评估各变量重要度,精确性较差。

### 3.3.2 泵及风机能效控制

在锅炉水泵方面,传统泵类多采用恒定速度进行控制,容易出现零部件易损耗、耗能大及控制滞后



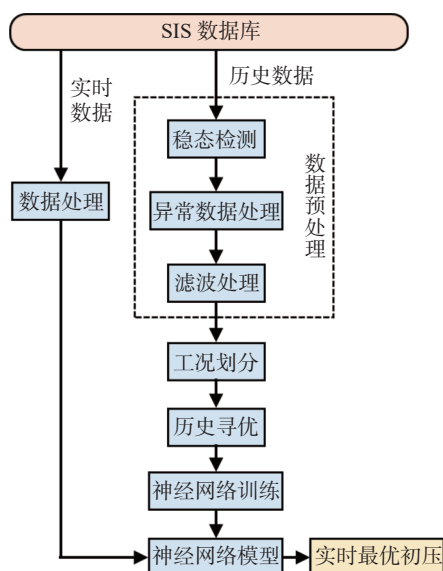


图 11 总体流程图

Fig. 11 Overall flow chart

等问题。基于 PLC 和模糊 PID 控制算法, 李霍生<sup>[59]</sup>提出了如图 12 所示的锅炉泵类智能控制方法。在该方法中, 根据室内外实时温度获得最佳供回水温度差, 并结合回水管的实时温度控制回水流量, 确保供回水温度差满足室外温度下的要求。应用表明, 采用该循环水泵智能控制方法后, 供暖期内每台水泵可节省电费约 4 万元, 节能效果显著<sup>[59]</sup>。

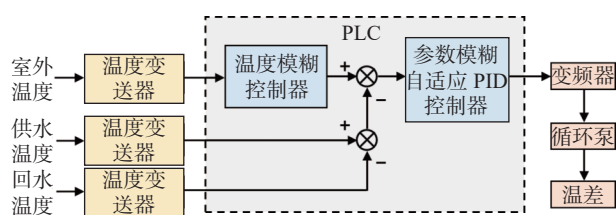
图 12 泵模糊 PID 控制系统结构图<sup>[59]</sup>

Fig. 12 Structure block diagram of pump fuzzy PID control system

在锅炉风机方面, 风机发生故障则会影响锅炉的状态稳定性。胡刚等<sup>[60]</sup>基于 300 MW 等级 CFB 锅炉, 提出了通过优化流化一次风量及一次风系统阻力(床压)来降低风机能耗的方法, 具体通过锅炉测试获得料层厚度与一次风量间的关系, 同时构建了一次风机压头与一次风量的关系特性。应用结果表明该方法有效降低了一次风机能耗, 同时缓解了多台风机并联运行过程中容易出现的抢风现象, 是一种简便安全又成本低廉的方法。总结而言, 为了进一步提升锅炉水泵的效率、降低供热成本, 需要在

锅炉水泵变频调速控制的基础上构建智能化控制系统<sup>[61]</sup>。

### 3.3.3 脱硫及除尘能效控制

针对机组调峰过程中的脱硫系统能耗控制, 华雪莹等<sup>[62]</sup>提出了多种节能方案, 如在控制  $\text{SO}_x$  排放达标的情况下, 对浆液循环泵组合的运行模式进行优化, 以减少浆液循环泵的电能消耗; 对石灰石浆液泵进行变频改造以解决浆液补给过量的问题, 从而实现精细化供浆; 为了降低氧化风机的运行电耗, 优化氧化风机的控制过程, 采用氧化还原电位或氧化风需求软策略对氧化风机运行能耗进行控制。

为满足除尘器的节能降耗需求, 可低(变)负荷运行时降低除尘器的运行参数, 并结合对除尘器的智能控制改造, 实现基于机组负荷及烟气量的电场运行参数自动优化调节, 达到节能降耗的目的<sup>[62]</sup>。目前, 针对深度调峰下其他类型辅机的节能研究, 尚较为匮乏, 有待进一步深入。

## 4 主辅机设备运行监测及诊断

### 4.1 受热面壁温监测

在受热面壁温监测方面, 诸多研究将回归拟合和神经网络等技术应用于壁温计算中。付忠广等<sup>[63]</sup>基于反向建模原理, 利用大量实际运行数据, 选用偏最小二乘法算法(PLS), 建立局部系统数学模型。吴啸川<sup>[64]</sup>基于反向建模原理, 采用最小二乘法搭建了非线性系统模型, 利用混合遗传算法进行模型的参数寻优, 实现对管壁温度的预测, 以指导壁温调控。

使用神经网络能够对壁温与管壁换热系数、蒸汽流量和温度等各项参数之间的复杂非线性函数关系进行逼近。早在 2005 年, 吴斐等<sup>[65]</sup>开发了基于 BP 神经网络的过热器、再热器管壁壁温计算方法, 计算值与实际值取得了较好的一致性。周云龙等<sup>[66]</sup>借助 RBF 神经网络和 BP 神经网络计算了过热器壁温分布, 发现 RBF 网络计算误差更小, 且更为稳定。卢彬等<sup>[67]</sup>采用 NARX 动态神经网络预测屏式过热器的壁温分布, 也取得了较好效果。

壁温是具有时序性的数列, 使用循环神经网络会有更好的效果。其中长短期记忆神经网络(LSTM)是一种善于处理序列问题的深度学习模型, 在智能电厂领域已有诸多应用<sup>[68-71]</sup>。沙骁等<sup>[72]</sup>研究了火电

机组宽负荷调峰下的锅炉受热面壁温特性及超温防控技术,具体采集了某 660 MW 燃煤锅炉的四百余个实时运行数据,分析了炉内典型受热面壁温序列的频域特性,提出了一种基于频域分析的壁温异常波动辨识算法,可筛选未超温的异常壁温测点。对屏式过热器某管壁温实现了提前 2 min 预测,误差为 8 ℃。

垂直管圈水冷壁因其系统阻力小、给水泵的需求功耗低等优势被广泛应用于燃煤发电机组中,但也存在对受热面热偏差的适应能力不足问题,使调峰变负荷过程中的水冷壁超温、爆管事故频繁。针对该问题,祝建飞等<sup>[73]</sup>开发了用于垂直管圈水冷壁的优化控制技术,从锅炉燃烧效率及水煤比控制出发,结合动态水煤比控制、变负荷智能超调、燃料热值修正等技术,大幅降低了因热负荷分布不均造成的水冷壁温差过大及超温问题,同时减弱了水冷壁管内膜态沸腾等恶劣现象。具体采用的水冷壁传热调控策略详见图 13。经优化控制后,水冷壁壁温随负荷变化的变动量大幅度下降,降幅为 49.4%。

总结而言,超温现象的出现在物理层面上影响因素众多,对超温进行预测要比  $\text{NO}_x$  浓度预测、负荷预测等问题更为复杂。并且,受制于电厂测量系统,只能通过一些总包性的参数作为壁温模型的输入,这对模型精度的影响是显而易见的。未来的研究应当结合物理模型与数据模型进行综合考虑。

## 4.2 空预器积灰堵塞监测

为获得空预器内部运行状态,现有研究多基于数值模拟与流动阻力监测等方法开展<sup>[74-76]</sup>。其中,通过数值模拟可获取空预器内温度分布,预测易堵塞部位。但现有研究多针对清洁状态开展模拟,且工况易偏离实际状态,难以给出实时的优化策略。

针对空预器堵塞的监测需求, Li 等<sup>[77]</sup>提出了一种基于差压信号进行堵塞程度判别及预警的新方法。首先利用机组负荷、过量空气系数等前端物理量修正机组烟气流量,并结合空预器内堵塞发展的机理及吹灰频次,建立不同时间尺度的堵塞因子预测模型,能够有效反映空预器整体堵塞程度的变化趋势,并实现提前预警。在积灰情况可视化监测方面,提出了一种基于冷端图像分析的可视化监测方法,针对可视化监测方法,研究了不同图像分割算法对图像内流通区和实体区分类的准确性和鲁棒性。结果表明,  $K$  均值聚类算法能够考虑像素点周围信息,灵活调整聚类类数,较好地体现堵塞区域的连通性,较适用于此类图像集场景,但受高斯噪声影响较大,实际应用中应结合平滑滤波等手段进行预处理<sup>[77]</sup>。

总结而言,基于差压数据特征及图像分析等技术能够获得空预器堵塞的长、中、短期变化趋势,但内部堵塞增长过程有待进一步研究,如部分区域发生堵塞后对周围区域的影响及堵塞增长变化的过程尚需进一步明晰。

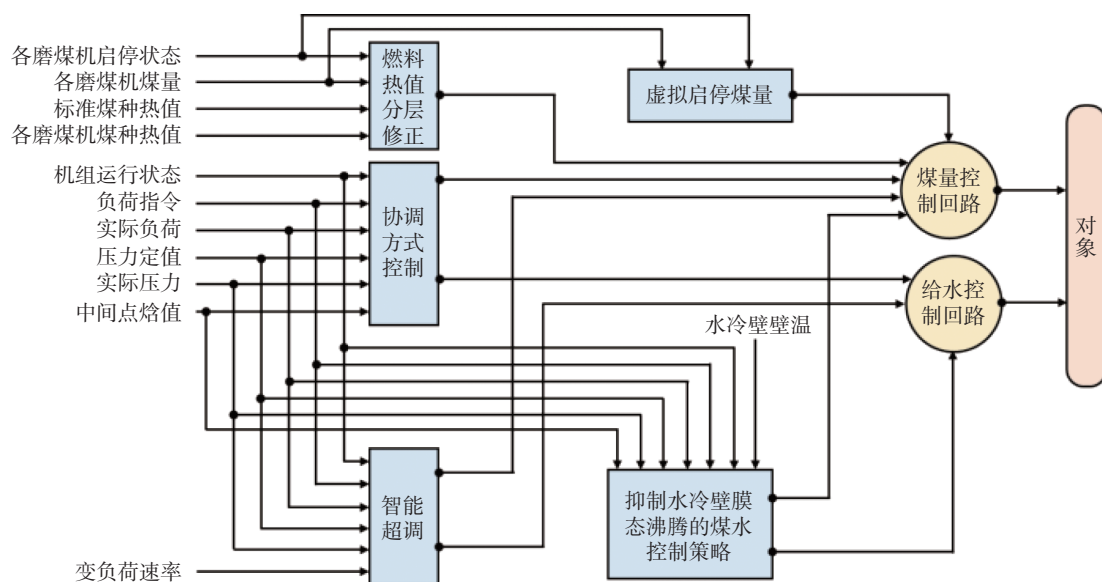


图 13 水冷壁传热调控策略

Fig. 13 Heat transfer control strategy for water-cooled walls

## 5 智能控制灵活调峰存在的问题及展望

总结目前亟待解决的主要问题及研究展望如图14所示, 具体分析如下:

### 1) 燃烧稳定性的提升

在燃煤机组深度调峰过程中, 最本质的问题为调峰过程中的稳定性, 研究开发更为高效和稳定的燃烧组织方式, 实现快速精准的燃烧优化, 对深度调峰具有先发优势, 是实现深度调峰的基础。在此基础上, 通过更为完备的机组数据及优化控制算法, 实现协同优势, 同时兼顾调峰经济性和机组寿命之间的辩证优化关系, 最终达到更为高效、稳定及经济性调峰目的。因此, 需要包括热能工程、控制工程、数据算法等多领域人员间的配合, 不能仅依赖智能控制来完全满足灵活调峰需求。

### 2) 基础数据获取准确性

锅炉燃烧优化技术通常聚焦于控制端, 基于先进数据解析技术的控制手段, 忽略了数据本身的来源和可靠性, 以及数据较大的迟滞性。实际上, 由于燃煤锅炉内高温、高尘的复杂环境, 导致测量设备对

部分物理量的测量值偏差较大, 且部分炉内区域的监测手段匮乏, 缺少实时关键数据值, 只能采用软测量手段进行推断, 导致实际运行数据基础检测能力不足、数据劣化度高的问题。而数据质量的好坏直接影响到算法模型的准确性及应用效果。因此, 应不断提高机组运行数据检测手段, 加强基础数据获取能力及数据准确性, 如耦合适用于不同场景的基于微波、激光、静电、声学 and 红外等原理的数据在线监测<sup>[78]</sup>。

### 3) 数据及知识的互补融合

现有智能算法模型多集中于基于数据和基于知识的两个方面, 缺乏数据与知识的互补融合。数据驱动模型, 由于缺少燃烧及污染物生成等的机理知识支撑, 存在精度不足问题。然而, 燃煤锅炉作为大型工业设备, 其运行状态复杂多变, 影响因素繁多, 无法单纯以基于知识的机理模型进行精确计算, 且对内部算法原理的指导较为困难, 导致机理与数据模型相对独立。因此, 需要分别结合数据模型及机理模型的特点, 充分融合数据和知识, 实现优势互补, 从而提高智能优化模型的准确度。

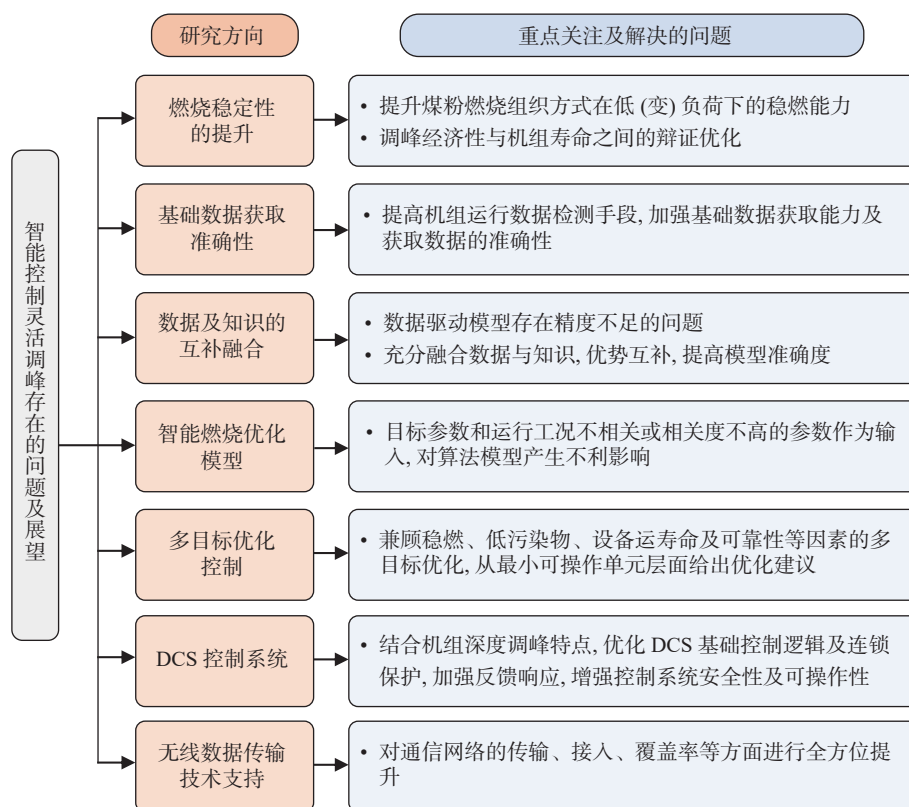


图14 存在的问题及研究展望

Fig. 14 Existing problems and research prospects



#### 4) 智能燃烧优化模型

人工智能算法为深度调峰提出了新的解决思路<sup>[79]</sup>,但由于锅炉自身的复杂特性及众多因素影响,容易将目标参数和运行工况相关度低或不相关数据作为输入参数,对算法模型产生不利影响,降低了模型的准确度。此外,神经网络模型中的隐藏层数及隐藏节点数的确定主要基于经验公式,直接影响到模型准确性。并且,在电站锅炉 DCS 系统上,很难直接搭建智能算法的建模及优化过程,需要外接计算机与 DCS 进行通讯,实现智能控制。因此,需要分别从锅炉自身运行特性及算法改进角度出发,促进基于人工智能的燃烧优化模型不断迭代升级。

#### 5) 多目标优化控制

机组深度调峰运行状态需要从多维信息角度进行综合评价,研究过程中应同时兼顾稳燃、低污染物、设备运行寿命及可靠性等因素。目前,虽然燃煤锅炉运行状态评价与结果溯源已取得了一定的研究成果,但是仍面临着巨大的挑战,主要包括如何充分挖掘炉内温度、流场、气体组分、图像等多源异构信息所蕴含的运行状态相关特征,分析燃煤锅炉在时空维度下的多源信息内在耦合关系,以及如何根据锅炉运行状态的评价结果,准确追溯引起运行异常的核心原因,从最小可操作单元层面给出优化建议。

#### 6) DCS 控制系统

在燃煤锅炉深度调峰过程中,各设备的运行状态逐渐接近其临界值,由于系统中系列保护措施的设置,运行参数超过安全阈值时会触发连锁保护,导致机组跳闸,影响调峰安全。加之,锅炉在低(变)负荷运行时,存在诸多非线性变化,机组在安全运行边界稍有不慎,将可能造成一定的安全风险,依靠人工管理来实现可靠监控难以满足调峰需求。因此,应结合机组深度调峰特点,优化 DCS 基础控制逻辑,优化连锁保护,加强反馈响应,增强控制系统安全性及可操作性,提升自动化监控水平。

#### 7) 无线数据传输技术支持

电厂中的传统接线方式和基于 4G、Wi-Fi 通信的无线数据传输已难以满足对海量生产数据传输、信息安全等方面的需求。因此,需对数据通信过程中的接入、传输、覆盖范围等进行综合提升。基于 5G 通信技术的工业互联网,为火电机组智能控制模型的推广应用提供了广阔平台<sup>[79]</sup>。基于 5G 通信技

术,建立多元立体的感知层级,为智能运行、智能管理、智能安全、数字孪生<sup>[80-82]</sup>等功能的应用集成提供基础支撑。

## 6 结论

文章以目前火电企业的数字化及智能化发展为背景,聚焦于燃煤锅炉灵活调峰需求,详细探讨了智能控制理论及模型在燃煤锅炉灵活调峰中的研究进展及应用效果,得出结论如下:

1) 燃煤锅炉灵活调峰过程面临诸多典型问题,首要是对炉内燃烧及污染物生成特性的影响问题,同时还包括对污染物脱除设备、设备运行稳定、主辅机运行能耗及机组控制逻辑等的影响,涉及从燃烧机理、设备运行到机组控制的整个流程。

2) 自动控制模型为提高燃煤锅炉灵活调峰能力提供了智能化解决方案,目前围绕锅炉燃烧性能优化控制、宽负荷脱硝精准控制、锅炉运行能效控制、主辅机设备监测及诊断 4 个方面开展了较为丰富的算法模型及应用研究,取得了良好的应用效果。

3) 为了提供燃煤锅炉灵活调峰的智能化及精准化解决方案,需要在燃烧组织方式稳燃能力深度提升的基础上,提高基础数据获取准确性,促进数据及知识的互补融合,加强多目标优化控制及 DCS 控制系统优化等,同时兼顾调峰经济性与机组寿命之间的辩证优化关系。

#### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局综合司关于做好可再生能源发展“十四五”规划编制工作有关事项的通知 [EB/OL]. (2020-04-09) [2023-12-01]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c\\_138978661.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c_138978661.htm).  
National Energy Administration. Notice of the Comprehensive Department of the National Energy Administration on doing a good job in the preparation of the "14th five-year plan" for the development of renewable energy [EB/OL]. (2020-04-09) [2023-12-01]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c\\_138978661.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c_138978661.htm).
- [2] 王风云, 张爽. 我国可再生能源发电趋势与市场空间研究——兼析“十四五”期间可再生能源发展潜力 [J]. 价格理论与实践, 2020(4): 36-40. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2020.04.108.  
WANG F Y, ZHANG S. Research on the trend and market capacity of renewable energy power generation in China—and predictive analysis of the renewable energy development during the 14th five-year Plan period [J]. Price: theory & practice, 2020(4): 36-40. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2020.04.108.

- [3] 王佳蕊,孙勇,胡泉,等.基于MICP的多能耦合综合能源系统可再生能源消纳能力研究[J].*电力建设*,2023,44(8):157-170. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.08.015.  
WANG J R, SUN Y, HU X, et al. Research on renewable energy absorption capacity of multi-energy coupling integrated energy systems based on MICP [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(8): 157-170. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.08.015.
- [4] 岑彬.“双碳”背景下可再生能源发展中“弃风弃光”的问题及消纳措施[J].*中阿科技论坛(中英文)*,2022(10):60-63.  
CEN B. Study on the "forced abandonment of wind and light" in the development of renewable energy under the background of "dual carbon" and its mitigation measures [J]. *China-Arab states science and technology forum*, 2022(10): 60-63.
- [5] 袁家海,张浩楠,黄辉.煤电与新能源耦合发展模式探析[J].*中国电力企业管理*,2023(1):20-22.  
YUAN J H, ZHANG H N, HUANG H. Analysis on the coupling development model of coal power and new energy [J]. *China power enterprise management*, 2023(1): 20-22.
- [6] 王金星,卓建坤,李菁,等.适应燃煤电厂灵活调峰的安全改造技术探讨[C]//2017热电联产智能高效与灵活性改造技术研讨会论文集,丹东,2017-08-16. 丹东:国家火力发电工程技术研究中心,2017:80-86.  
WANG J X, ZHUO J K, LI J, et al. Discussion on safety transformation technology suitable for flexible peak shaving of coal-fired power plant [C]//Proceedings of the 2017 Symposium on Smart, Efficient and Flexible Transformation Technology of Cogeneration, Dandong, August 16, 2017. Dandong: National Thermal Power Engineering Technology Research Center, 2017: 80-86.
- [7] 张少强,陈露,刘子易,等.大型燃煤锅炉深度调峰关键问题探讨[J].*南方能源建设*,2022,9(3):16-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.003.  
ZHANG S Q, CHEN L, LIU Z Y, et al. Discussion on key problems of depth peak adjustment for large coal-fired boilers [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 16-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.003.
- [8] 周俊波,刘茜,张华,等.典型燃煤锅炉低负荷及变负荷运行控制特性分析[J].*热力发电*,2018,47(9):34-40. DOI: 10.19666/j.rld.201803071.  
ZHOU J B, LIU X, ZHANG H, et al. Control characteristic analysis of typical coal-fired boilers during low load or variable load running [J]. *Thermal power generation*, 2018, 47(9): 34-40. DOI: 10.19666/j.rld.201803071.
- [9] 国家发展改革委,国家能源局.电力发展“十三五”规划(2016—2020)[R].2016:1-46.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 13th five year plan for electric power development (2016—2020) [R]. 2016: 1-46.
- [10] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部.关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[R].2016:4-9.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information
- Technology of the People's Republic of China. Guidance on promoting the development of "Internet +" smart energy [R]. 2016: 4-9.
- [11] 黄建平,胡志勇,吴小明,等.回转式空预器联合热管空预器防堵应用及效果[J].*电力科技与环保*,2021,37(6):31-39. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2021.06.005.  
HUANG J P, HU Z Y, WU X M, et al. Application and effect analysis of rotary air preheater combined with heat pipe air preheater preventing blocking technology [J]. *Electric power technology and environmental protection*, 2021, 37(6): 31-39. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2021.06.005.
- [12] 翟博.三分仓回转式空预器防堵灰技术改造研究[J].*科技与创新*,2022(18):38-40. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.18.011.  
ZHAI B. Research on the technical transformation of the three section rotary air preheater to prevent ash blocking [J]. *Science and technology & innovation*, 2022(18): 38-40. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.18.011.
- [13] 昂永波.350 MW超临界机组深度调峰运行优化调整技术分析[J].*内蒙古电力技术*,2018,36(1):32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2018.01.012.  
ANG Y B. Adjustment technology analysis of deep cyclic operation optimization of 350 MW supercritical unit [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2018, 36(1): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2018.01.012.
- [14] 陈辉,王爱英,戴维葆,等.高灰分烟煤煤粉细度对燃烧特性及低负荷稳燃影响研究[J].*电站系统工程*,2020,36(5):13-15.  
CHEN H, WANG A Y, DAI W B, et al. Study on effect of pulverized coal fineness on combustion characteristics and low load stable combustion of high ash bituminous coal [J]. *Power system engineering*, 2020, 36(5): 13-15.
- [15] 刘增春,刘江涛.高海拔地区660 MW超超临界煤电机组深度调峰试验解析[J].*中国新技术新产品*,2020(11):15-17. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2020.11.008.  
LIU Z C, LIU J T. Analysis on deep peak shaving test of 660 MW ultra supercritical coal fired power unit in high altitude area [J]. *New technology & new products of China*, 2020(11): 15-17. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2020.11.008.
- [16] 华敏,董益华,项群扬,等.超临界660 MW燃煤机组深度调峰试验研究[J].*电站系统工程*,2019,35(5):35-36,40.  
HUA M, DONG Y H, XIANG Q Y, et al. Research on deep load regulation of 660 MW supercritical coal-fired units [J]. *Power system engineering*, 2019, 35(5): 35-36, 40.
- [17] 王振波,李国成.工业锅炉技术[M].北京:中国石化出版社,2010:145-148.  
WANG Z B, LI G C. Industrial boiler technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010: 145-148.
- [18] 刘志刚.电厂锅炉自动化控制系统分析[J].*中国石油和化工标准与质量*,2012,32(8):257. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2012.08.231.  
LIU Z G. Analysis of power plant boiler automatic control system [J]. *China petroleum and chemical standard and quality*, 2012, 32(8): 257. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2012.08.231.

- [19] 白鑫. 锅炉控制的智能优化算法研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.  
BAI X. Research on intelligent optimization algorithm for boiler control [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019.
- [20] 赵静, 王敏. 基于 PLC 锅炉专家 PID 智能控制的研究 [J]. 工业炉, 2018, 40(5): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2018.05.016.  
ZHAO J, WANG M. Research on intelligent control of boiler expert PID based on PLC [J]. Industrial furnace, 2018, 40(5): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2018.05.016.
- [21] 刘华, 刘敏层. 基于模糊 PID 在锅炉温度控制系统的仿真研究 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(4): 20-25. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.04.005.  
LIU H, LIU M C. Simulation research of boiler temperature control system based on fuzzy PID [J]. Automation & instrumentation, 2018, 33(4): 20-25. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.04.005.
- [22] 张建宏. 基于自适应 PID 控制算法的壁挂式锅炉控制软件开发 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.  
ZHANG J H. The development of the control software of the wall-mounted gas boiler based on the adaptive PID control [D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [23] 许天鹏. 锅炉汽包水位的无模型自适应 PID 控制研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.  
XU T P. Research on model-free adaptive PID control of boiler drum water level [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [24] 黎丹. 基于无模型自适应控制算法的锅炉汽包水位控制研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.  
LI D. Research of boiler drum level based on model-free adaptive control [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [25] 刘晓丹. 基于 RBF 模糊神经网络的船用锅炉汽包水位控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.  
LIU X D. Study on control of water level in marine boiler based on RBF fuzzy neural network [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [26] 刘佳. 基于神经网络 PID 控制算法的热水锅炉燃烧控制的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.  
LIU J. Study on combustion control of hot water boiler based on neural network PID [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005.
- [27] 颜廷学, 何岩, 武旭, 等. 一种燃烧锅炉稳燃控制方法: CN113847620A [P]. 2021-12-28.  
YAN T X, HE Y, WU X, et al. A stable combustion control method for combustion boiler: CN113847620A [P]. 2021-12-28.
- [28] 刘树明. 基于神经网络的锅炉内火焰燃烧稳定性研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 187-189, 195. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2012.08.045.  
LIU S M. Research on combustion within boiler stability based on neural network [J]. Computer simulation, 2012, 29(8): 187-189, 195. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2012.08.045.
- [29] 蔡国源, 牛玉广, 刘雪菲, 等. 基于图像卷积变分自编码的电站锅炉燃烧稳定性评价方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 210-220. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108460.  
CAI G Y, NIU Y G, LIU X F, et al. Combustion stability judgment of power plant boiler based on image convolutional variational auto-encoder [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2022, 43(3): 210-220. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108460.
- [30] HAN W, SUN Z, SCHOLTISSEK A, et al. Machine Learning of ignition delay times under dual-fuel engine conditions [J]. Fuel, 2021, 288: 119650. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119650.
- [31] XING J K, LUO K, HEINZ P, et al. Predicting kinetic parameters for coal devolatilization by means of Artificial Neural Networks [J]. Proceedings of the combustion institute, 2019, 37(3): 2943-2950. DOI: 10.1016/j.proci.2018.05.148.
- [32] 张振宇, 王刚, 刘宗奎, 等. 330 MW 机组深度调峰控制系统问题分析及优化 [J]. 能源研究与管理, 2021(2): 119-123. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2021.02.023.  
ZHANG Z Y, WANG G, LIU Z K, et al. Analysis and optimization of deep peak load regulation control system for 330 MW power unit [J]. Energy research and management, 2021(2): 119-123. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2021.02.023.
- [33] 王子杰, 李健, 孙万云. 基于神经网络和遗传算法的锅炉燃烧优化方法 [J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2008.01.004.  
WANG Z J, LI J, SUN W Y. Boiler combustion optimization based on neural network and genetic algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(1): 14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2008.01.004.
- [34] 顾燕萍, 赵文杰, 吴占松. 采用最优 MVs 决策模型的电站锅炉燃烧优化 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 39-44. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.02.009.  
GU Y P, ZHAO W J, WU Z S. An optimal MVs decision-model for boiler combustion optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 39-44. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.02.009.
- [35] 薛阳, 叶建华, 钱虹, 等. 火电机组过热汽温神经网络控制的研究 [J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(1): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2009.01.010.  
XUE Y, YE J H, QIAN H, et al. Research of neural network control of the superheated steam temperature of fossil-fired power station [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2009, 25(1): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2009.01.010.
- [36] 吴智群, 黄廷辉, 胡洪华, 等. 电站锅炉智能燃烧优化技术的应用研究 [J]. 热力发电, 2008, 37(9): 23-27, 31. DOI: 10.19666/j.rld.2008.09.007.  
WU Z Q, HUANG T H, HU H H, et al. Study on application of intelligent combustion-optimizing technology on utility boilers [J]. Thermal power generation, 2008, 37(9): 23-27, 31. DOI: 10.19666/j.rld.2008.09.007.
- [37] 沙骁. 宽负荷火电机组锅炉受热面超温分析及智能预测研



- 究 [D]. 北京: 清华大学, 2021.
- SHA X. Research on over-temperature analysis and intelligent prediction of boiler heating surface of wide-load thermal power unit [D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [38] 陈鑫, 王乃斌, 刘利, 等. 大数据技术应用于火电机组深度调峰的研究 [J]. 电力设备管理, 2018(10): 53-55.
- CHEN X, WANG N B, LIU L, et al. Study on the application of big data technology in deep peak regulation of thermal power units [J]. Electric power equipment management, 2018(10): 53-55.
- [39] 王政, 刘继伟. 电站锅炉燃烧优化技术的应用与发展 [J]. 华北电力技术, 2015(11): 63-70. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2015.11.011.
- WANG Z, LIU J W. Application and development of boiler combustion optimization technology [J]. North China electric power, 2015(11): 63-70. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2015.11.011.
- [40] 王立, 王燕晋, 李战国, 等. 火力发电机组深度调峰试验及优化 [J]. 发电设备, 2019, 33(2): 133-137. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2019.02.014.
- WANG L, WANG Y J, LI Z G, et al. Deep peak shaving tests and optimization for thermal power units [J]. Power equipment, 2019, 33(2): 133-137. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2019.02.014.
- [41] 李彦军, 郭洪远, 任海彬, 等. 基于灵活性改造的机组深度调峰模式运行研究 [J]. 中国高新技术, 2020(19): 96-97. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4137.2020.19.041.
- LI Y J, GUO H Y, REN H B, et al. Research on unit deep peak shaving mode operation based on flexibility transformation [J]. China high and new technology, 2020(19): 96-97. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4137.2020.19.041.
- [42] 周昊, 茅建波, 池作和, 等. 燃煤锅炉低氮氧化物燃烧特性的神经网络预报 [J]. 环境科学, 2002, 23(2): 18-22. DOI: 10.13227/j.hjks.2002.02.004.
- ZHOU H, MAO J B, CHI Z H, et al. Predicting low NO<sub>x</sub> combustion property of a coal-fired boiler [J]. Environmental science, 2002, 23(2): 18-22. DOI: 10.13227/j.hjks.2002.02.004.
- [43] 周昊, 朱洪波, 茅建波, 等. 大型四角切圆燃烧锅炉 NO<sub>x</sub> 排放特性的神经网络模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 33-37. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2002.01.007.
- ZHOU H, ZHU H B, MAO J B, et al. An artificial neural network model on NO<sub>x</sub> emission property of a high capacity tangentially firing boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 33-37. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2002.01.007.
- [44] 方海泉, 薛惠锋, 李宁, 等. 基于贝叶斯神经网络遗传算法的锅炉燃烧优化 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8): 1790-1795. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2015.08.020.
- FANG H Q, XUE H F, LI N, et al. Boiler combustion optimization based on Bayesian neural network and genetic algorithm [J]. Journal of system simulation, 2015, 27(8): 1790-1795. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2015.08.020.
- [45] 王渐芬, 罗自学, 周怀春. 基于炉内温度分布的 NO<sub>x</sub> 排放特性的神经网络模型 [J]. 能源技术, 2009, 30(3): 133-136, 148.
- WANG X F, LUO Z X, ZHOU H C. Neural network model on NO<sub>x</sub> emission with furnace temperature distribution in a boiler [J]. Energy technology, 2009, 30(3): 133-136, 148.
- [46] 张振星. 基于智能优化算法的电站锅炉燃烧优化 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- ZHANG Z X. Utility boiler combustion optimization based on intelligent optimization algorithm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [47] 景雪晖, 张涛, 周曙明, 等. 灵活性深度调峰下锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的神经网络方法预报 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(3): 215-220. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2019.03.004.
- JING X H, ZHANG T, ZHOU S M, et al. Neural network prediction of NO<sub>x</sub> emission characteristics of boiler under flexibility and deep peak shaving [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(3): 215-220. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2019.03.004.
- [48] 李诚. 深度调峰下燃煤机组低碳运行与氮氧化物协同优化脱除 [D]. 北京: 清华大学, 2021.
- LI C. Low-carbon operation and synergistic optimization of nitrogen oxide removal of coal-fired power plants under deep peak regulation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [49] TAN P, HE B, ZHANG C, et al. Dynamic modeling of NO<sub>x</sub> emission in a 660 MW coal-fired boiler with long short-term memory [J]. Energy, 2019, 176: 429-436. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.020.
- [50] YANG G T, WANG Y N, LI X L. Prediction of the NO<sub>x</sub> emissions from thermal power plant using long-short term memory neural network [J]. Energy, 2020, 192: 116597. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116597.
- [51] 唐振浩, 朱得宇, 李扬. 基于数据驱动的燃煤锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度动态修正预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5182-5193. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211426.
- TANG Z H, ZHU D Y, LI Y. Data driven based dynamic correction prediction model for NO<sub>x</sub> emission of coal fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5182-5193. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211426.
- [52] 翁卫国, 周灿, 王丁振. 1000 MW 燃煤机组变负荷条件下颗粒物排放特性研究 [J]. 能源工程, 2018, 38(2): 1-6. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2018.02.001.
- WENG W G, ZHOU C, WANG D Z. Study on particle emission in a 1000 MW coal-fired unit under varying loads [J]. Energy engineering, 2018, 38(2): 1-6. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2018.02.001.
- [53] 鲍铁军, 刘建平, 侯志, 等. 440 t/h 循环流化床机组深度调峰工况下燃烧优化与机炉协调控制的实现 [J]. 锅炉制造, 2021(4): 25-27, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1005.2021.04.009.
- BAO T J, LIU J P, HOU Z, et al. Realization of combustion optimization and boiler-turbine coordinated control for 440 t/h CFB unit under deep peak shaving condition [J]. Boiler manufacturing, 2021(4): 25-27, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1005.2021.04.009.

- [54] 许振宇, 陈鸿伟, 高建强. 火电厂锅炉主要运行参数的耗差分析 [J]. *热力发电*, 2007, 36(2): 16-18,30. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2007.02.005.
- XU Z Y, CHEN H W, GAO J Q. Analysis of consumption deviation for main operation parameters of boilers in thermal power plant [J]. *Thermal power generation*, 2007, 36(2): 16-18,30. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2007.02.005.
- [55] 杨志良. 浅析火力发电厂锅炉经济运行 [J]. *科技视界*, 2013(24): 258. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2013.24.200.
- YANG Z L. Analysis on economic operation of boiler in thermal power plant [J]. *Science & technology vision*, 2013(24): 258. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2013.24.200.
- [56] 顾先青, 潘卫国, 王文欢, 等. 大型火电机组供电煤耗率比较分析 [J]. *上海电力学院学报*, 2009, 25(2): 109-112. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2009.02.003.
- GU X Q, PAN W G, WANG W H, et al. Compative analysis of the net coal consumption rate of coal-fired power generating units [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2009, 25(2): 109-112. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2009.02.003.
- [57] 高燕武, 李朋, 张伟, 等. 基于大数据的燃煤机组供电煤耗分析 [J]. *电力与能源*, 2020, 41(1): 109-111.
- GAO Y W, LI P, ZHANG W, et al. Analysis of power supply coal consumption of coal-fired unit based on big data [J]. *Power & energy*, 2020, 41(1): 109-111.
- [58] 李鑫鑫. 基于历史寻优的火电机组运行优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- LI X X. Research on optimal operation of thermal power unit based on the optimal searching method of the historical data [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [59] 李霍生. 基于 PID 实现对锅炉循环泵的智能控制 [J]. *机械管理开发*, 2022, 37(5): 227-228. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.097.
- LI H S. Intelligent control of boiler circulation pump based on PID [J]. *Mechanical management and development*, 2022, 37(5): 227-228. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.097.
- [60] 胡刚, 刘伟. 300 MW CFB 锅炉一次风机耗电量优化研究 [J]. *电力学报*, 2021, 36(4): 301-305. DOI: 10.13357/j.dlxb.2021.037.
- HU G, LIU W. Study on optimization of the power consumption rate of 300 MW CFB boiler primary fan [J]. *Journal of electric power*, 2021, 36(4): 301-305. DOI: 10.13357/j.dlxb.2021.037.
- [61] 吴桂林, 田斌斌, 杨国. 高压变频器在锅炉风机节能控制中的应用 [C]//第五届全国石油和化工电气技术大会论文集, 淄博, 2020-09-09. 淄博: 中国机电一体化技术应用协会, 2020: 141-146.
- WU G L, TIAN B B, YANG G. Application of high voltage inverter in boiler fan energy saving control [C]//Proceedings of the 5th National Petroleum and Chemical Electrical Technology Conference, Zibo, September 9, 2020. Zibo: China Association for the Application of Mechatronics Technology, 2020: 141-146.
- [62] 华雪莹, 王润芳, 姚为方, 等. 燃煤机组深度调峰环保设备安全运行策略研究 [J]. *能源与节能*, 2021(12): 184-186. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.069.
- HUA X Y, WANG R F, YAO W F, et al. Research on safety operation strategy of environmental protection equipment for deep peak load adjustment of coal-fired units [J]. *Energy and energy conservation*, 2021(12): 184-186. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.069.
- [63] 付忠广, 靳涛, 周丽君, 等. 复杂系统反向建模方法及偏最小二乘法建模应用研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(2): 25-29. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2009.02.005.
- FU Z G, JIN T, ZHOU L J, et al. Research and application of the reversed modeling method and partial least-square regression modeling for the complex thermal system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(2): 25-29. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2009.02.005.
- [64] 吴啸川. 电站锅炉高温受热面管壁温度的反向建模研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2011.
- WU X C. Research on reverse modeling of tube wall temperature of high-temperature heating surface in power plant boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2011.
- [65] 吴斐, 唐必光, 余艳芝, 等. 神经网络在过热器、再热器管壁温度计算中的应用 [J]. *发电设备*, 2005, 19(2): 108-111. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2005.02.012.
- WU F, TANG B G, YU Y Z, et al. Application of neural networks in the calculation of seperheater and reheater tube wall temperature [J]. *Power equipment*, 2005, 19(2): 108-111. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2005.02.012.
- [66] 周云龙, 苏耀雷. 基于神经网络的锅炉过热器和再热器管壁温度预测研究 [J]. *热力发电*, 2012, 41(5): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2012.05.022.
- ZHOU Y L, SU Y L. Study on prediction of tube-wall temperature in superheater and reheater of boiler based on neural network [J]. *Thermal power generation*, 2012, 41(5): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2012.05.022.
- [67] 卢彬, 刘茜, 高林, 等. 基于 NARX 神经网络的锅炉壁温预测模型 [J]. *热力发电*, 2019, 48(3): 35-40. DOI: 10.19666/j.rlfid.201812214.
- LU B, LIU X, GAO L, et al. Prediction model of boiler platen superheater tube wall temperature based on NARX neural network [J]. *Thermal power generation*, 2019, 48(3): 35-40. DOI: 10.19666/j.rlfid.201812214.
- [68] CHEN Y T, ZHANG D X. Theory-guided deep-learning for electrical load forecasting (TgDLF) via ensemble long short-term memory [J]. *Advances in applied energy*, 2021, 1: 100004. DOI: 10.1016/j.adapen.2020.100004.
- [69] 李友志, 蒋蓬勃, 白帆, 等. 基于 LSTM 的锅炉四管高温再热器超温预测分析 [J]. *无线互联科技*, 2019, 16(18): 103-104. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6944.2019.18.049.
- LI Y Z, JIANG P B, BAI F, et al. Analysis on prediction of overtemperature of boiler four-tube high temperature reheater based on LSTM [J]. *Wireless internet technology*, 2019, 16(18): 103-104. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6944.2019.18.049.

- [70] 金志远, 李胜男, 谭鹏, 等. 基于长短时记忆神经网络的锅炉多参数协同预测模型 [J]. *热力发电*, 2021, 50(5): 120-126. DOI: [10.19666/j.rlfid.202007234](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202007234).  
JIN Z Y, LI S N, TAN P, et al. Multi-parameter collaborative prediction model of boilers based on long-short-term memory neural network [J]. *Thermal power generation*, 2021, 50(5): 120-126. DOI: [10.19666/j.rlfid.202007234](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202007234).
- [71] 韩驰. 超超临界火电机组炉膛受热面金属壁温预测及监测系统 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.  
HAN C. Prediction and monitoring system of metal wall temperature on furnace heating surface of ultra-supercritical thermal power unit [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020.
- [72] 沙骁, 黄寒, 柳冠青, 等. 燃煤锅炉受热面壁温监测数据的时序特征分析 [J]. *燃烧科学与技术*, 2021, 27(5): 475-481. DOI: [10.11715/rskxjs.R202108022](https://doi.org/10.11715/rskxjs.R202108022).  
SHA X, HUANG Q, LIU G Q, et al. Time series analysis of monitored heating surface wall temperature of coal-fired boiler [J]. *Journal of combustion science and technology*, 2021, 27(5): 475-481. DOI: [10.11715/rskxjs.R202108022](https://doi.org/10.11715/rskxjs.R202108022).
- [73] 祝建飞, 马建华, 杨康, 等. 超临界垂直管圈直流炉壁温偏差及优化控制 [J]. *锅炉技术*, 2021, 52(5): 22-26. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2021.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2021.05.005).  
ZHU J F, MA J H, YANG K, et al. Wall temperature deviation and optimal control of supercritical vertical tube once through boiler [J]. *Boiler technology*, 2021, 52(5): 22-26. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2021.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2021.05.005).
- [74] ZHANG Q N, SUN F Z, CHEN C X. Research on the three-dimensional wall temperature distribution and low-temperature corrosion of quad-sectional air preheater in larger power plant boilers [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2019, 128: 739-747. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.006).
- [75] ÖZDEMİR K, SERINCAN M F. A computational fluid dynamics model of a rotary regenerative heat exchanger in a flue gas desulfurization system [J]. *Applied thermal engineering*, 2018, 143: 988-1002. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.08.011](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.011).
- [76] BU Y F, WANG L M, CHEN X, et al. Numerical analysis of ABS deposition and corrosion on a rotary air preheater [J]. *Applied thermal engineering*, 2018, 131: 669-677. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2017.11.082](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.082).
- [77] LI C, HUANG Q, LIU G Q, et al. In situ visual monitoring of rotary air preheater blockage: setup and image analysis [M]// LYU J F, LI S Q. *Clean Coal and Sustainable Energy*. Singapore: Springer, 2022. DOI: [10.1007/978-981-16-1657-0\\_65](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1657-0_65).
- [78] 韩院臣. 660 MW 超临界机组深度调峰自动控制技术研究 [J]. *电气传动自动化*, 2021, 43(6): 30-32, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1005-7277.2021.06.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7277.2021.06.008).  
HAN Y C. Research on automatic control technology of deep peak shaving of 660 MW supercritical unit [J]. *Electric drive automation*, 2021, 43(6): 30-32, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1005-7277.2021.06.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7277.2021.06.008).
- [79] 高满达, 李庚达, 陈彦桥, 等. 先进检测与 5G 通信技术在燃煤锅炉运行监测中的应用研究 [J]. *热力发电*, 2023, 52(1): 18-25. DOI: [10.19666/j.rlfid.202204061](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202204061).  
GAO M D, LI G D, CHEN Y Q, et al. Application of advanced detection and 5G communication technology in coal-fired boiler operation monitoring [J]. *Thermal power generation*, 2023, 52(1): 18-25. DOI: [10.19666/j.rlfid.202204061](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202204061).
- [80] 董泽, 姜伟, 王晓燕, 等. 数字孪生在火电机组数字化转型中的应用 [J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(6): 1144-1156. DOI: [10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0229](https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0229).  
DONG Z, JIANG W, WANG X Y, et al. Application of digital twin in digital transformation of thermal power units [J]. *Journal of system simulation*, 2023, 35(6): 1144-1156. DOI: [10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0229](https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0229).
- [81] 卢锦玲, 颜禄涵, 腊志源, 等. 基于数字孪生与动态能效模型的综合能源系统实时优化调度策略 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 226-238. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0044](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0044).  
LU J L, YAN L H, LA Z Y, et al. Real-time optimal scheduling strategy for integrated energy system based on digital twins and dynamic energy efficiency model [J]. *Power system technology*, 2023, 47(1): 226-238. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0044](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0044).
- [82] 牛百芳, 董功利, 陈文鑫. 基于 RFID 的锅炉炉膛出口烟气温度智能监测系统 [J]. *电子元器件与信息技术*, 2023, 7(6): 76-79. DOI: [10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.6.020](https://doi.org/10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.6.020).  
NIU B F, DONG G L, CHEN W X. Intelligent monitoring system for boiler furnace outlet flue gas temperature based on RFID [J]. *Electronic components and information technology*, 2023, 7(6): 76-79. DOI: [10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.6.020](https://doi.org/10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.6.020).

## 作者简介:



宋民航

宋民航(第一作者)

1986-, 男, 副研究员, 热能工程博士, 主要研究方向为多元燃料低碳清洁高效燃烧及其防火防爆理论与技术(e-mail)[songminhang@126.com](mailto:songminhang@126.com)。



杨宏燕

杨宏燕(通信作者)

1986-, 女, 副教授, 控制科学与工程博士, 主要研究方向为马尔科夫跳变系统故障估计与容错控制、信息物理系统安全估计与弹性控制(e-mail)[Yanghai@bjut.edu.cn](mailto:Yanghai@bjut.edu.cn)。

(编辑 徐嘉诚)