

# 适应新型电力系统的调峰火电机组空气预热器安全评估策略

王志敏<sup>1</sup>, 黄骞<sup>1,✉</sup>, 柳冠青<sup>1</sup>, 周勇<sup>2</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 李诚<sup>1</sup>, 李水清<sup>1</sup>

(1. 清华大学 能源与动力工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 国家电投集团电站运营技术(北京)有限公司, 北京 102209)

**摘要:** [目的]“双碳”目标下新型电力系统建设要求存量火电转向调峰运行, 因此火电机组灵活运行下的安全性成为提升电力系统整体稳定性不可或缺的一环。其中, 空气预热器是影响火电机组宽负荷运行能力的关键辅机设备, 针对其由烟温波动与过量喷氨诱发的堵塞与腐蚀问题, 开发回转式空气预热器积灰堵塞实时评估及安全状态监测模型至关重要。[方法]依托我国中部地区某 600 MW 和 350 MW 机组宽负荷运行监测大数据, 建立了一种基于阻力系数的不同时间尺度逼近的空预器堵塞评估模型; 进一步, 以空预器出口烟气温度及冷端工作温度为监测指标, 统计其在机组多个负荷段的参数超限比例。[结果]结果表明, 机组处于 39% 调峰负荷下监测温度约有 20% 的超限概率; 独立计算两指标下的堵塞风险相较于联合分布计算会一定程度低估其折损率。此外, 通过两台机组数据的验证, 堵塞评估模型可实现量化机组在空预器吹灰周期内(短期)和中长期的堵塞状态演化趋势。[结论]所提评估策略可应用于 SCR 脱硝系统、磨煤机等其他火电机组设备及系统, 可量化机组调峰运行安全风险, 指导火电机组高效、稳定地配合新型电力系统调度。

**关键词:** 火电机组; 灵活调峰; 空气预热器; 堵塞; 状态评估

中图分类号: TM611; TK01+8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

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

## Flexibility-Oriented Safety Assessment Strategy for Air Preheater in Thermal Power Units Adapting to the Advanced Power System

WANG Zhimin<sup>1</sup>, HUANG Qian<sup>1,✉</sup>, LIU Guanqing<sup>1</sup>, ZHOU Yong<sup>2</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>1</sup>, LI Shuiqing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. SPIC Power Plant Operation Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** [Introduction] The realization of dual carbon goals in the construction of a new power system necessitates the transformation of existing thermal power plants to accommodate peak load operations. The safety of thermal power units during flexible operation is a critical element for enhancing the overall stability of the power system. Air preheater is the key auxiliary equipment that affects the wide-load operation capacity of thermal power units. This paper addresses the challenges associated with flue gas temperature fluctuations and blockage and corrosion induced by excessive ammonia injection. It is very important to develop a real-time assessment and safety status monitoring model for dust and blockage of rotary air preheaters. [Method] Based on the big data of wide-load operation monitoring of 600 MW and 350 MW units in central China, the paper developed a model for air preheater blockage assessment based on approximation of the resistance coefficients in the case of various time scales. Furthermore, the flue gas temperature at the outlet of the air preheater and the cold end working temperature were used as monitoring indicators to count the proportion of parameters exceeding the limit in multiple load sections of the unit. [Result] The results show that, at a peak regulation load of 39%, there is approximately a 20% probability of temperature exceedance. In addition, the independent calculation of the blockage risk based on the two indicators may

收稿日期: 2023-12-18 修回日期: 2024-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目“亚临界煤电机组深度灵活调峰关键技术及工程示范”(2023YFB4102900)

result in a certain degree of underestimation of its degradation rate compared to the calculation based on a joint distribution. Besides, with the verification of data from the two units, the method can quantify the short-term (within the soot-blowing cycle) and mid-and-long term evolution of the air preheater blockage. [Conclusion] This assessment strategy applies to other equipment and systems in thermal power plants, such as SCR denitrification systems and coal mills, providing a quantitative assessment of safety risks during peak load operation. It guides thermal power units to efficiently and stably cooperate with the new power system in dispatching.

**Key words:** thermal power; flexibility; air preheater; blockage; condition assessment

## 0 引言

“双碳”目标下,我国加快建设以可再生能源为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>,高比例新能源的供给消纳使得存量火电机组转向调峰运行,以增强电网的平衡调节能力。同时,考虑到风光能源的随机性、波动性和间歇性,碳中和下我国(及各区域)能源结构中仍应保有一定的火电装机容量,以保障电力供应的可靠性<sup>[2-3]</sup>。这都要求火电的输出能力更加灵活,以使电网时刻满足负荷需求的同时,最大限度地容纳可再生能源<sup>[4]</sup>。

火电机组灵活运行下的安全性是保持新型电力系统可靠健壮不可或缺的一环。但实际中,机组低负荷、变负荷运行常面临煤耗增高、燃烧稳定性降低等问题<sup>[5-6]</sup>。由于锅炉调峰运行工况复杂,对脱硝系统喷氨精度要求更高,易造成喷氨过量与烟温波动,加剧下游空气预热器(简称空预器)的积灰堵塞与腐蚀,严重时致机组停机:这也是火电机组为配合电力系统消纳新能源面临的一大关键安全制约因素<sup>[7-8]</sup>。

空预器是布设在锅炉尾部烟道的换热设备,利用烟气余热加热煤粉燃烧所需一、二次风,显著提升机组能效和低负荷运行下的煤粉着火与稳燃能力<sup>[9]</sup>。现代大型火电机组多采用三分仓回转式空预器结构,通过蓄热式波纹板将空气加热。但波纹板的流道狭窄,易被烟气中的飞灰颗粒物堵塞<sup>[10]</sup>。空预器内的积灰堵塞既降低其换热效率,影响机组整体运行效率,也会显著增大流道阻力,增加风机能耗,严重时引发风机喘振、失速甚至导致机组停机<sup>[11]</sup>。这已成为当前火电调峰运行中的普遍棘手问题:据国内某发电集团对所属 300 MW 及 600 MW 机组的不完全统计,超过半数机组的空预器运行压差显著高于设计值。

为清理空预器积灰,现代锅炉均配备空预器吹

灰器对其冷、热端进行定期吹扫,但运行中的核心难点是确定合理的吹灰周期,既防止吹灰不足,也要避免因过于频繁的吹灰造成的高机组能耗与换热面损伤<sup>[12]</sup>。为确定合理的吹灰周期,需要在机组运行中基于各类实时监测数据准确研判空预器堵塞状态。当前机组运行主要依靠空预器烟气进(热端)、出(冷端)口压力值(主要是压差)来监测其流动阻力,但压差不仅受空预器堵塞状态影响,更与烟气流量密切相关,无法直接反应堵塞状态。一些研究者通过数据处理方式,建立了各工况下空预器的“标准状态”压差,依此来衡量实测压差所对应的堵塞程度<sup>[13]</sup>。该方案计算简便,但受压力测点数量的制约,实测压差变化可能出现较强的随机性。利用空预器积灰前后换热能力的差异来表征其堵塞状况是另一技术路线<sup>[14-15]</sup>。具体来说,通过空预器进出口参数计算实时传热系数,并将实际与理论传热系数的比值定义为清洁度因子,以该系数的变化在线监测空预器灰渣污垢累积情况。但该方法模型较为复杂,且传热系数建模过程中假设条件较多,尚缺乏大规模应用基础。此外,也有对空预器冷端进行可视化图像监测的设想,但缺乏实际应用<sup>[16]</sup>。亟待开发可靠且具有实用性的运行数据分析模型,准确评估空预器堵塞状态。

除空预器积灰堵塞问题外,由机组调峰运行造成的烟温波动是限制机组可调最小负荷的另一关键问题,这可能导致空预器换热能力下降及冷端腐蚀等问题。针对空预器内的温度分布,已有一些数值模拟研究尝试分析空预器内空间温度分布特性<sup>[17-18]</sup>,但该类方法计算量大,适用工况窄(通常局限于少数清洁状态),难以在实际中大规模应用。目前多数电厂的设备状态监测策略仍然是根据经验对关键运行数据设定上限和下限值,并根据需求提供超限实时报警。但对于调峰运行烟温波动导致的腐蚀、堵塞等问题,仍缺乏系统性的设备状态综合评估研究,特

别是缺少对监测结果的统计分析。

综上,空气预热器作为影响火电机组宽负荷运行能力的关键辅机设备,文章拟为其构建运行状态评估模型,以提升机组灵活运行安全性。通过空预器进出口压差、负荷等实测运行数据计算其各历史时刻实际阻力系数,进一步关注该阻力系数在不同吹灰周期、停炉冲洗周期等运行范围内的堵塞增长情况,从而构建起历史吹灰评价体系。拟以空预器为例构建一种设备调峰能力量化分析模型,以评估火电机组配合新型电力系统调度的能力。该模型以空预器出口烟气温度、空预器冷端温度等关键运行参数在各负荷区间内的概率密度分布为基础,监控并评估其在不同调峰工况下的运行状态。

## 1 基于空预热器的火电机组调峰能力分析

本研究依托我国中部地区某 350 MW 和某 600 MW 机组实时运行数据开展。如图 1 所示,两机组均用 VN 回转式三分仓空气预热器,且前端加装 SCR 脱硝装置。对于加装 SCR 脱硝系统且未采取水旁路改造和烟气旁路改造的锅炉风烟系统,由烟气温度降低引起的空气预热器运行稳定性问题是制约火电机组承担调峰任务的关键因素之一<sup>[19]</sup>。

SCR 系统往烟气中喷入氨(NH<sub>3</sub>)还原氮氧化物 NO<sub>x</sub>。当机组处于低负荷或变负荷运行时,测得的烟气 NO<sub>x</sub> 浓度可能存在时滞、准确性差等问题<sup>[20-21]</sup>;此外,SCR 催化剂在异常烟气温度下可能活性降低,因此实际运行中倾向采用充分喷氨以避免尾气 NO<sub>x</sub> 超标的调节策略。当 NH<sub>3</sub> 注入量超过 NO<sub>x</sub> 脱除所需时,多余的 NH<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 会形成硫酸氢铵(ABS),其性质为中酸性,黏度较高。

ABS 在空预器中下游沉积与黏附是空预器堵塞的关键诱因<sup>[22]</sup>。其高黏特性会加速烟气中飞灰颗粒

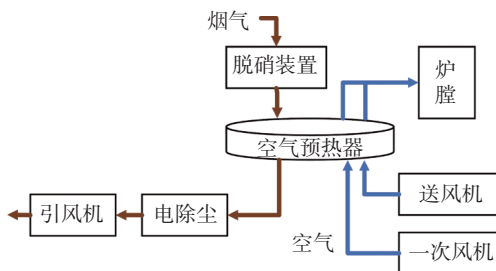


图 1 空气预热器工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air preheater operation

物的沉积,使得原定吹灰周期难以满足实际运行需求,还会影响后续除尘设备效率。因此,为降低由空预器堵塞造成的风机电耗增大、空气-烟气热量交换不充分等问题,定期评估空预器在短时吹灰周期及长期堵塞情况演化,对调整空预器运行具有重要意义。除堵塞外,冷端温度和烟气出口温度过低会增加 ABS 沉积概率,若低于烟气的酸露点温度,将进一步加剧金属表面的腐蚀。

可见,为优化和维护新型电力系统,必须着眼于其中各关键组件在运行中的灵活性,尽可能避免超负荷调峰带来的风险。

## 2 基于压差的空预器阻力系数评估

针对机组直接监测数据无法准确反映空预器内部堵塞情况的现状,本节首先基于流体力学基本原理,结合机组负荷及空预器进出口压差等实测数据,构建了空预器实时阻力系数计算方法;进一步针对该计算结果随机误差较大的问题,引入近期内历史数据进行拟合修正,以获得基于不同运行周期的堵塞演化模型。

### 2.1 阻力系数计算

空预器阻力系数是反映其内部堵塞状态的无量纲参数,其计算公式如式(1)所示<sup>[16]</sup>。

$$K = 2 \frac{\Delta P}{\bar{\rho}_f (Q_v / A_{ph})^2} \quad (1)$$

式中:

$\Delta p$  ——空预器进出口压力差(Pa);

$\bar{\rho}_f$  ——流经空预热器的烟气的平均密度(kg/m<sup>3</sup>);

$Q_v$  ——流经空预热器的烟气的体积流量(折算至烟气平均温度状态下, m<sup>3</sup>/s);

$A_{ph}$  ——空预器烟气侧的流通截面积(m<sup>2</sup>)。

在实际应用中,烟气压差主要依靠空预器进出口处布置的压力测点的实测数据计算得到;由于烟气的温度和压力波动范围通常较小,烟气平均密度通常视为定值;而烟气流量则是该计算方法的主要难点。电厂 SIS 系统(厂级信息监控系统)的烟气流量通常是标准状态下(0 °C, 101.325 kPa)、干基(即不含水蒸气)的测量数据,使得该参数参与计算时存在严重滞后;此外,由于难以保证烟道截面内的流速均匀,测量数据可能存在较大随机误差。一种改进方案是引入机组负荷  $W$  和过量空气系数  $\alpha$  代替式(1)

中的烟气流量,获得“修正”的阻力系数如式(2)所示。

$$K' = \Delta p / (W\alpha)^2 \quad (2)$$

如图2所示,空预器压差与负荷存在明显的线性相关性(Pearson 相关系数 0.92,  $R^2$  为 0.84),无法直接反映其内部堵塞状态。而如图3所示,由式(2)所得的阻力系数在机组满负荷运行段相对稳定,可一定程度反映空预器阻力变化。

## 2.2 阻力系数短/中长期演化模型

机组实际运行中,空预器的阻力系数应只与其内部结构及实时堵塞状态相关:即阻力系数  $K$  应在锅炉变负荷过程中保持相对稳定。但图3所示阻力系数即使在堵塞未发生明显变化的时段内,也可能

存在大幅波动。这可能由压力传感器的测量系统误差和随机误差导致,也可能是因为测点在截面上的布置位置单一,使得逐时刻计算结果不具有代表性。

为解决该问题,提出引入多项式  $K(t; k_1 \dots k_i)$  的方式对阻力系数  $K$  进行拟合与修正:

$$\Delta p = K(t; k_1, k_2 \dots k_i) [W(t)\alpha(t)]^2 + b \quad (3)$$

式中:

$W(t)$  —— 机组负荷(MW);

$\alpha(t)$  —— 过量空气系数;

$k_i, b$  —— 拟合参数。

其中  $K$  的具体拟合形式需依据不同规律变化期(例如:吹灰、停炉冲洗)进行选取,以获取适用于不同时间尺度的堵塞因子演化模型。

经测试,短期内(即通常小于单个吹灰周期),采取二次多项式对阻力系数变化趋势进行拟合可取得较好效果:

$$K = k_1 t^2 + k_2 t + k_3 \quad (4)$$

$$\Delta p(t) = (k_1 t^2 + k_2 t + k_3) W(t)^2 + b \quad (5)$$

式中:

$k_1, k_2, k_3$  —— 待定系数。

图4(a)展示了机组 A(600 MW)在一次持续约 48 h 的吹灰周期内的阻力系数拟合效果( $R^2 = 0.9168$ )。可见,在该时间区间内,阻力系数呈缓慢上升趋势,与工程实际相符。且如图4(a)所示,利用此拟合多项式计算得到的压差拟合曲线可在消除实际压差的波动的同时,较好地吻合其变化趋势,证明了该拟合结果的可靠性。取机组 B(350 MW)一次持续约 14 h 的吹灰周期数据进行类似拟合验证,得到了如图4(b)及图5(b)所示的拟合效果( $R^2 = 0.8158$ ),验证了该拟合模型在不同容量机组的适用性。

对于机组更长时间跨度内的堵塞状态演化趋势,简单的二次函数形式通常无法满足压差拟合需求。为处理周期性短期吹灰对空预器长期积灰状态的演化影响,在二次多项式拟合的基础上进一步引入包含吹灰周期  $T$  的拟合函数形式:

$$K = k_1 t^2 + k_2 t + k_3 \left| \sin\left(\frac{\pi}{T} t\right) \right| + k_4 t + k_5 \quad (6)$$

式中:

$k_1 \sim k_5$  —— 待定系数;

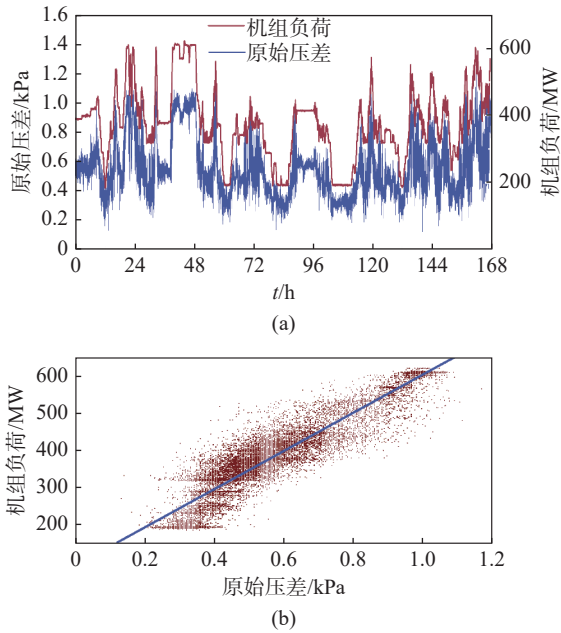


图2 负荷-压差关系图

Fig. 2 Relationship between the load and the pressure difference

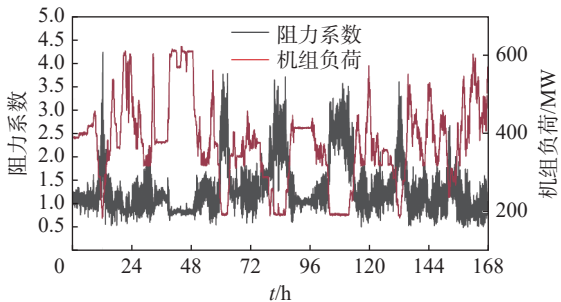
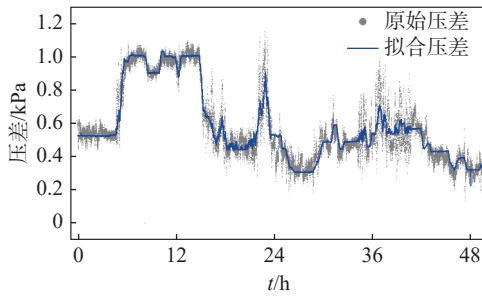
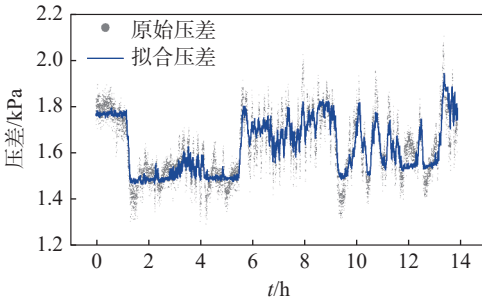


图3 负荷-修正阻力系数关系图

Fig. 3 Relationship between the load and the 'corrected' resistance coefficient



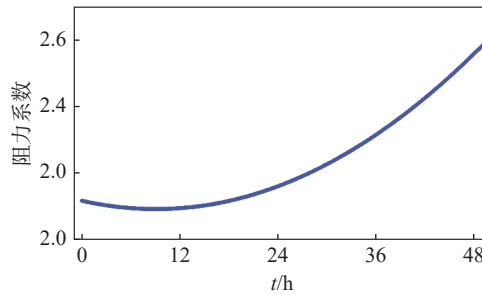
(a) 600 MW 机组



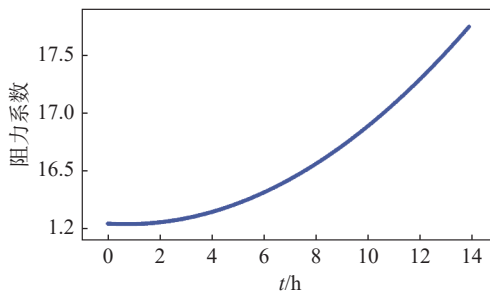
(b) 350 MW 机组

图 4 拟合压差

Fig. 4 Fitted pressure difference



(a) 600 MW 机组



(b) 350 MW 机组

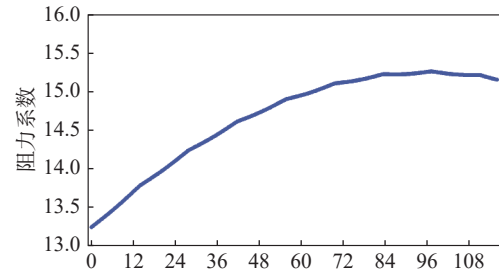
图 5 空预器短期阻力系数演化

Fig. 5 Short-term evolution of resistance coefficients of air preheaters

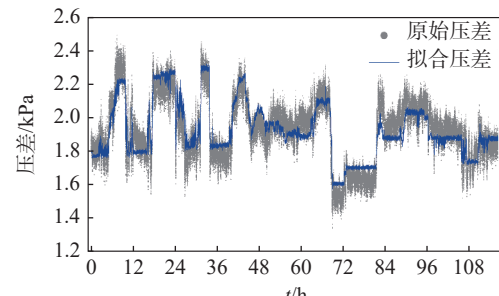
$T$ ——吹灰周期。

如图 6(a) 所示, 该拟合多项式下的机组 B(350 MW) 空预器中长期阻力系数变化规律与实际堵塞

状态变化规律相符, 且拟合压差可较好地反映实际压差的变化趋势(见图 6(b))。此外, 图 6(a) 所示拟合曲线呈现出一定的周期波动趋势, 反映了短期的、周期性的吹灰对空预器长期堵塞演化的影响。



(a)



(b)

图 6 (a) 350 MW 机组空预器长期阻力系数演化; (b) 拟合压差

Fig. 6 (a) Long-term evolution of resistance coefficient of the air preheater for the 350 MW unit; (b) fitted pressure difference

为获取空预器处于不同调峰状态下吹灰周期内的堵塞增长情况, 本节所提的短期空预期阻力系数演化模型通常设置吹灰周期  $T$  作为模型数据拟合周期。由此, 火电机组可依据周期  $T$  内的压差涨幅的变化, 为未来机组运行策略调整提供参考依据。此外, 本节所提的中长期堵塞规律演化模型是一种对包含多个吹灰周期的空预器长期堵塞状态评估, 可显示展示机组在经历长时间灵活变负荷运行后的空预器安全状态, 增强火电机组灵活运行能力。

### 3 辅机设备历史运行状态评估

在新型电力系统中, 火电机组各设备及系统为应对新能源出力及电力峰值需求不匹配的问题, 常处于非设计工况条件下运行。这大幅增加了火电机组, 乃至整个电力系统的不确定性及风险。仍以空气预热器为例, 其作为锅炉尾部烟道的低温受热面, 除由积灰堵塞引起的压力波动外, 其工作温度范围是

另一影响其安全状态的关键点。特别地,空预器过低的工作烟气出口温度和冷端温度不仅加剧空预器的冷端腐蚀程度,还间接影响积灰速率(见第 1 节讨论)。

为评估空预器历史工作状态,探究其在不同调峰工况下的运行情况。本节调取机组 B(350 MW)6 个月内的全部历史数据,按其历史调峰情况将机组历史数据分为 100%-负荷,91%-负荷,71%-负荷,51%-负荷,39%-负荷五组。进一步,在各负荷段内,统计空预器出口烟气温度和冷端工作温度各自的概率密度分布及联合概率密度分布。图 7 显示出了机组处于满负荷运行和最低稳负荷运行工况下,空预器出口烟气温度和冷端温度的概率分布。可见,机

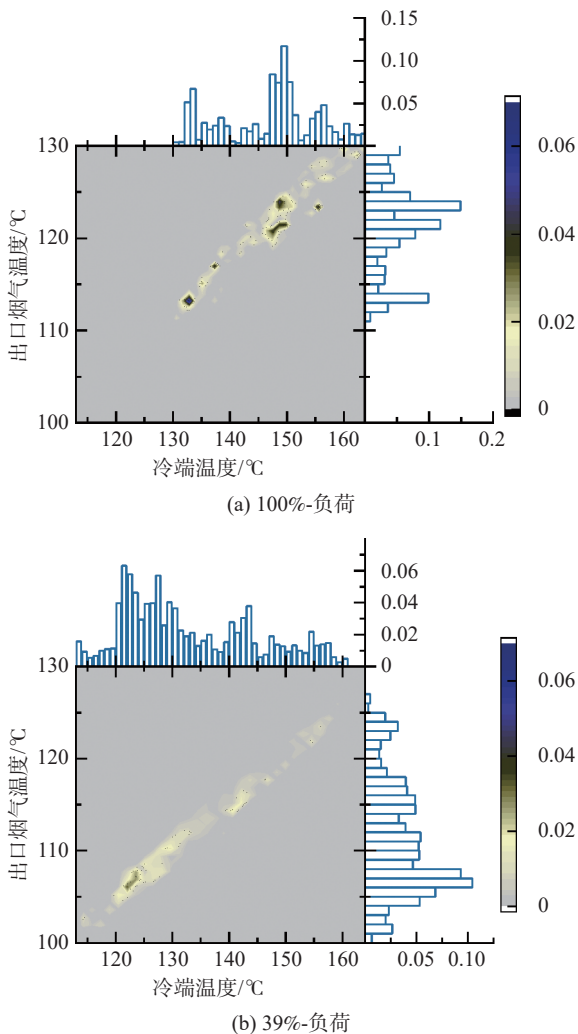


图 7 基于出口烟气温度和冷端温度的 350 MW 机组空预器状态评估

Fig. 7 Condition assessment of the air preheater for the 350 MW unit based on the flue gas temperature at the outlet and the cold end temperature

组低负荷运行下空预器典型温度分布较为分散,且整体温度偏低,更易出现温度失控而超出许用值的情况。

基于电厂空预器温限规范(出口烟气温度在 113 ~ 160 °C 之间;冷端温度不低于 148 °C),计算空预器在上述指标下的非正常工作时间占比,并将在不同典型负荷段下的超温限概率作为其折损率,以评价空预器的历史运行情况。如图 8 所示,在 51%-负荷以及 39%-负荷两个负荷段内,由于烟气温度难以控制,有 20% ~ 30% 的时间空预器都处于非正常工作区间内,这将极大程度加剧其冷端腐蚀及堵塞问题。此外,独立计算两指标下的堵塞风险相较于联合分布计算会一定程度低估其折损率,这是由于两变量间具有较强的线性相关关系导致的。

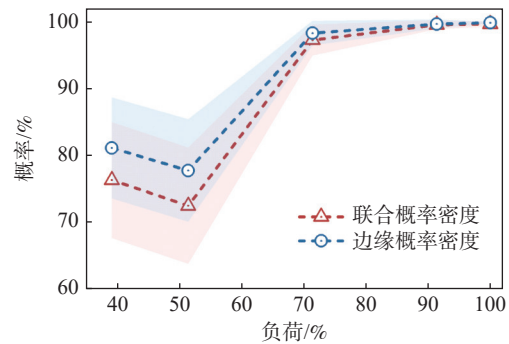


图 8 350 MW 机组不同运行负荷下空预器温度参数超限概率

Fig. 8 Probability for the air preheater temperature exceeding the limit for the 350 MW unit at various loads

本节以空气预热器为例,阐述了所提辅机设备调峰能力评价策略的构建方法。在具体应用中,该策略不仅可拓展至火电机组磨煤机、SCR 脱硝系统等设备,还可用于评价光伏逆变器新能源发电设备在不同工况条件下的运行安全性。需要注意的是,该策略实现拓展应用首先需分析各设备运行特点以确定建模指标;其次应检查所选取变量之间的相关性,以确定是否需要计算联合概率密度分布。

## 4 结论

为保障新型电力系统的安全与稳定,文章以空气预热器为研究范例,开展了基于 600 MW 及 350 MW 火电机组实际调峰运行大数据的火电机组灵活运行安全状态评估研究:

1) 探究了以阻力系数变化表征空气预热器堵塞状态变化的实际应用可行性。提出了基于二次多项式的短期阻力系数拟合模型, 可有效反映空预器吹灰周期内的堵塞增长趋势, 为机组灵活运行策略调整提供参考依据。

2) 提出了在拟合多项式中加入周期性函数项的方法对空预器中长期的堵塞状态进行评估。该拟合模型可在体现周期性吹灰影响的基础上, 反映机组在长时间灵活变负荷运行后的整体堵塞趋势演化。

3) 提出了一种适用于火电及新能源机组的设备调峰能力评价策略, 可用于量化新型电力系统建设中的安全风险。同时以空预器为例展示了模型具体效果: 机组满负荷运行下空预器基本处于安全温度区间内工作, 而在 39%-满负荷下监测温度约有 20% 的超限概率。

#### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2022 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2023-01-18) [2023-04-12]. [http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c\\_1310691509.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm).  
National Energy Administration. National power industry statistics data of 2022 [EB/OL]. (2023-01-18) [2023-04-12]. [http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c\\_1310691509.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm).
- [2] 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.
- [3] BP. Statistical review of world energy 2021 [EB/BL]. (2021-07-31) [2023-04-12]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [4] 潘尔生, 田雪沁, 徐彤, 等. 火电灵活性改造的现状、关键问题与发展前景 [J]. 电力建设, 2020, 41(9): 58-68. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2020.09.007.  
PAN E S, TIAN X Q, XU T, et al. Status, critical problems and prospects of flexibility retrofit of thermal power in China [J]. Electric power construction, 2020, 41(9): 58-68. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2020.09.007.
- [5] 王志敏, 黄骞, 王可轩, 等. 宽负荷下供热机组煤耗实时寻优分析 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1347-1358. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222277.  
WANG Z M, HUANG Q, WANG K X, et al. Real-time optimization analysis of coal consumption of co-generation units under varied loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1347-1358. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222277.
- [6] GU Y J, XU J, CHEN D C, et al. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 54: 723-731. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.052.
- [7] 张志强, 宋国升, 陈崇明, 等. 某电厂 600 MW 机组 SCR 脱硝过程氨逃逸原因分析 [J]. 电力建设, 2012, 33(6): 67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.06.017.  
ZHANG Z Q, SONG G S, CHEN C M, et al. Cause analysis of ammonia escape in SCR flue gas denitrification process for 600 MW units [J]. Electric power construction, 2012, 33(6): 67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.06.017.
- [8] ALOBAID F, MERTENS N, STARKLOFF R, et al. Progress in dynamic simulation of thermal power plants [J]. Progress in energy and combustion science, 2017, 59: 79-162. DOI: 10.1016/j.pecc.2016.11.001.
- [9] 王春昌, 马剑民, 张宇博, 等. 1 000 MW 机组锅炉空气预热器旁路余热利用系统节能效果分析 [J]. 热力发电, 2019, 48(11): 56-61. DOI: 10.19666/j.rlfid.201904144.  
WANG C C, MA J M, ZHANG Y B, et al. Study on energy-saving effect of bypass waste heat utilization system of air preheater in a 1 000 MW unit boiler [J]. Thermal power generation, 2019, 48(11): 56-61. DOI: 10.19666/j.rlfid.201904144.
- [10] 黄凤良, 孙志坚, 李鹏程, 等. 带扰流孔波纹板的传热和阻力特性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7): 1242-1248. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.07.006.  
HUANG F L, SUN Z J, LI P C, et al. Heat transfer and resistance characteristics of corrugated plate with spoiler holes [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2015, 49(7): 1242-1248. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.07.006.
- [11] 宋晓通. 600 MW 燃煤机组空预器堵塞治理对风机运行的影响 [J]. 能源科技, 2023, 21(1): 52-55.  
SONG X T. Effect of air preheater choking control on fan operation of 600 MW coal-fired unit [J]. Energy science and technology, 2023, 21(1): 52-55.
- [12] 高荣泽, 王利民, 孙浩家, 等. 回转式空气预热器积灰分层监测方法研究 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(6): 677-685. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.06.003.  
GAO R Z, WANG L M, SUN H J, et al. Study on layered fouling monitoring method of rotary air preheater [J]. Journal of Chinese society of power engineering, 2023, 43(6): 677-685. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.06.003.
- [13] 张晓安. 锅炉吹灰优化中清洁因子的计算研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.  
ZHANG X A. Calculation of clean factor for power station boiler blowing optimization [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [14] 王建国, 徐志明, 杨善让. 空气预热器积灰在线监测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 37-39. DOI: 10.3321/j.issn.0258-8013.2000.07.009.  
WANG J G, XU Z M, YANG S R. On-line monitoring model of

- ash deposits on air preheater [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(7): 37-39. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2000.07.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2000.07.009).
- [15] SHI Y H, WEN J, CUI F S, et al. An optimization study on soot-blowing of air preheaters in coal-fired power plant boilers [J]. *Energies*, 2019, 12(5): 958. DOI: [10.3390/en12050958](https://doi.org/10.3390/en12050958).
- [16] 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.
- [17] 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).
- [18] MENASHA J, DUNN-RANKIN D, MUZIO L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater [J]. *Fuel*, 2011, 90(7): 2445-2453. DOI: [10.1016/j.fuel.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.006).
- [19] 徐民. 超超临界锅炉宽负荷脱硝改造方案对比分析 [J]. *发电设备*, 2022, 36(6): 433-436. DOI: [10.19806/j.cnki.fdsb.2022.06.012](https://doi.org/10.19806/j.cnki.fdsb.2022.06.012).  
XU M. Comparison and analysis on wide-load denitration retrofit schemes for an ultra-supercritical boiler [J]. *Power equipment*, 2022, 36(6): 433-436. DOI: [10.19806/j.cnki.fdsb.2022.06.012](https://doi.org/10.19806/j.cnki.fdsb.2022.06.012).
- [20] VAN DER LANS R P, GLARBORG P, DAM-JOHANSEN K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners [J]. *Progress in energy and combustion science*, 1997, 23(4): 349-377. DOI: [10.1016/S0360-1285\(97\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00012-9).
- [21] SMREKAR J, POTOČNIK P, SENEGAČNIK A. Multi-step-ahead prediction of NO<sub>x</sub> emissions for a coal-based boiler [J]. *Applied energy*, 2013, 106: 89-99. DOI: [10.1016/j.apenergy.2012.10.056](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.056).
- [22] CHENG T, LUO L Y, YANG L J, et al. Formation and emission characteristics of ammonium sulfate aerosols in flue gas downstream of selective catalytic reduction [J]. *Energy & fuels*, 2019, 33(8): 7861-7868. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.9b01436](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01436).

---

作者简介:



王志敏

王志敏 (第一作者)

1998-, 女, 硕士在读, 主要从事低碳智能发电研究工作(e-mail)[1091987882@qq.com](mailto:1091987882@qq.com)。



黄骞

黄骞 (通信作者)

1991-, 男, 工学博士, 主要从事固体燃料燃烧过程中的颗粒物与灰渣防控、动力学方程建模分析等课题的研究工作(e-mail)[huangqian@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:huangqian@mail.tsinghua.edu.cn)。

(编辑 徐嘉铖)