

DOI: 10.19666/j.rlfed.202402023

# 基于前后端在线监测的燃气发电机组 碳排放特性与影响因素分析

陈公达<sup>1</sup>, 傅诗万<sup>2</sup>, 蔡秀霞<sup>2</sup>, 邹祥波<sup>1,3</sup>

(1.广东能源集团科学技术研究院有限公司, 广东 广州 510630;

2.广东粤华发电有限责任公司, 广东 广州 510730;

3.广东省能源集团有限公司, 广东 广州 510630)

**[摘要]** 为探索碳排放监测技术在支持火电企业碳排放“双控”以外如何助力火电机组运行优化, 以某 F 级燃气-蒸汽联合循环机组为研究对象, 在其尾部烟囱加装 CO<sub>2</sub> 监测系统, 进而基于前端调压站燃料在线监测数据与后端烟囱环保测点烟气在线监测数据开展研究。研究发现: 该机组中高负荷段的烟气监测碳排放速率稳定高于燃料监测碳排放速率但曲线变化基本一致, 说明前后端数据具有可比性但存在稳定的偏移; 对于该型机组中负荷运行时, 大气环境是一个优先考量因素, 气温较高时可能改善机组热散失, 气压较低时可减小压气机压缩能耗, 进而降低该型机组瞬时碳排放强度; 透平膨胀比、压气机压比、蒸燃功比可能是在机组负荷不变的情况下降低机组瞬时碳排放强度的优先考虑因素。

**[关键词]** 燃气-蒸汽联合循环机组; CO<sub>2</sub> 排放监测; 碳核算; 天然气; 运行优化

[引用本文格式] 陈公达, 傅诗万, 蔡秀霞, 等. 基于前后端在线监测的燃气发电机组碳排放特性与影响因素分析[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 96-105. CHEN Gongda, FU Shiwan, CAI Xiuxia, et al. The carbon emission characteristics and influencing factors of gas generator unit based on online monitoring of front-end and back-end[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 96-105.

## The carbon emission characteristics and influencing factors of gas generator unit based on online monitoring of front-end and back-end

CHEN Gongda<sup>1</sup>, FU Shiwan<sup>2</sup>, CAI Xiuxia<sup>2</sup>, ZOU Xiangbo<sup>1,3</sup>

(1.Guangdong Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

2.Guangdong Yuehua Power Co., Ltd., Guangzhou 510730, China; 3.Guangdong Energy Group Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** To investigate the potential of carbon emission monitoring technology in optimizing thermal power unit operations beyond the “double control” of emissions in thermal power enterprises, an F-class gas-steam combined cycle unit where a CO<sub>2</sub> monitoring system is installed at the tail chimney is selected to be discussed. Research is conducted using online fuel monitoring data from the front pressure regulating station and flue gas monitoring data from the rear chimney environmental protection measurement point. The results reveal that, in the high-load section, the flue gas monitoring carbon emission rate is consistently higher than the fuel monitoring rate, although both curves exhibit similar trends, indicating comparable yet offsetting data. For units operating at medium loads, atmospheric conditions are crucial. Elevated temperatures may increase heat loss, while reduced air pressure can minimize compressor energy consumption, thereby decreasing the unit’s instantaneous carbon emission intensity. Among various parameters, adjusting the turbine expansion ratio, compressor pressure ratio, and steam fuel power ratio could be effective strategies to minimize carbon emissions without altering the unit load.

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0601001); 广东省能源集团有限公司科技项目 (GEG/AJS-22-002)

Supported by: National Key Research and Development Program (2021YFF0601001); Science and Technology Project of Guangdong Energy Group Co., Ltd. (GEG/AJS-22-002)

第一作者简介: 陈公达 (1990), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为烟气 CCUS 技术、碳排放监测技术、烟气污染物控制技术、工业数据挖掘, chengongda@geg.com.cn.

**Key words:** gas-steam combined cycle unit; CO<sub>2</sub> emission monitoring; carbon accounting; natural gas; operation optimization

在未来相当长的一段时间内,火电仍是维持我国电力供应稳定的支柱,电力行业尤其是火电行业已经成为我国碳达峰碳中和的首要目标,对燃煤燃气机组 CO<sub>2</sub> 排放的准确计量与监测则是编制机组精准碳减排方案的必要支撑<sup>[1-3]</sup>。当前我国火电行业碳排放计量所执行的官方文件为 2022 年 12 月 21 日生态环境部印发的《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》(以下简称指南)<sup>[4]</sup>。该方法源于联合国政府间气候变化专门委员会推荐的排放因子法,依靠相关燃料因子或月度检测报告及燃料统计信息进行计量,企业报告一年一报,使我国管理部门掌握了各行业与重点企业的碳排放基本情况。但由于检测数据滞后,核算数据仅可用来完成火电企业年度碳核查与履约任务,难以用于快速分析机组短时碳排放情况<sup>[5-8]</sup>。

另一种碳排放量统计方法是烟气端的在线监测法,主要依托气体浓度与流量数据进行计量,最小碳排放数据频率可达秒级,具有较好时效性<sup>[9-10]</sup>。我国对于 CO<sub>2</sub> 在线监测法的相关法规政策相对美国和欧盟较为滞后,在 2021 年 9 月,生态环境部聚焦重点行业、城市和区域启动监测评估试点;同年,国家能源局批准发布《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》(DL/T 2376—2021),可提供一定安装与运维技术指导<sup>[11-12]</sup>。关于在线监测数据的有效性,生态环境部 2022 年 5 月关于试点工作的成效报告指出火电行业 CO<sub>2</sub> 排放监测数据与核算数据基本一致可比,有望在辅助企业排放量核算、支撑减排监管等方面进一步发挥作用,有望启动碳监测评估第二阶段试点工作<sup>[13-15]</sup>。

随着近几年碳核查与碳监测试点工作的展开,相关研究人员陆续进行核算数据与监测数据的比对分析,验证了在线监测法的可行性。李峥辉等对比了直接监测碳排放与核算碳排放的结果,直接监测碳排放与锅炉产出能量变化基本一致,二者存在正相关关系,能反映锅炉的运行状态变化<sup>[16]</sup>。陈咏城等采用带 CO<sub>2</sub> 测量的烟气连续监测系统对火力发电厂进行碳排放监测,实现了单台机组碳排放速率、碳排放总量的精确计算,系统具有准确性、实时性的优点<sup>[17]</sup>。胡永飞等分别对电厂固定排放源 CO<sub>2</sub> 排放量进行了对比分析,发现监测数据略低于核算数据,元素测量取样方法、取样频次,实验设

备测量精度均会影响核算结果<sup>[18]</sup>。

但关于机组排放特征与运行优化的分析研究较少,尤其是关于燃气机组的研究更少。刘科等基于碳核算方法,根据相关运行数据以及煤质、灰渣含碳量等数据对不同容量等级机组的碳排放强度进行正向连续监测分析,发现不同机组关于负荷的碳排放特性具有明显的差异性<sup>[19]</sup>。马学礼等基于碳核算方法,研究了碳排放强度与机组类型、运行负荷、燃煤品质、空冷方式等因素的关系,发现高参数、大容量碳排放强度相对较低,机组负荷越低则碳排放强度增大等规律<sup>[20]</sup>。这些研究分析都受限于碳核算数据统计跨度过大,难以关联机组子系统运行参数进行分析。

因此,为了进一步挖掘碳排放监测数据对企业生产的价值,探索碳排放监测技术助力火电机组运行优化的途径,本文以某 F 级燃气机组为研究对象,在其尾部烟囱加装 CO<sub>2</sub> 监测系统,进而基于前端调压站燃料在线监测数据与后端烟囱环保测点烟气在线监测数据开展研究,既进行核算数据与监测数据的比对分析,也针对稳负荷条件进行关于机组瞬时碳排放强度的子系统关联因素分析,最后对如何利用前后端在线监测技术优化火电机组生产运行提出了建议与展望。

## 1 研究方法

### 1.1 前端监测—燃料端在线监测

参考指南方法,燃料端在线监测的碳排放速率计算方法为:

$$R_{\text{fuel}} = F_{\text{C}} \times C_{\text{ar}} \times O_{\text{F}} \times 44 / 12 \quad (1)$$

式中: $R_{\text{fuel}}$ 为燃料端在线监测机组的 CO<sub>2</sub> 排放速率, t/h;  $F_{\text{C}}$ 为单位时间天然气消耗量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h (标况下), 本研究中使用调压站的天然气管道监测流量数据;  $C_{\text{ar}}$ 为天然气收到基元素含碳量, t/(×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>) (标况下), 本研究中使用调压站在线色谱仪的监测数据(通过甲烷、乙烷等主要碳氢成分数据折算得到);  $O_{\text{F}}$ 为天然气的碳氧化率,取 99%。

基于燃料端在线监测的机组碳排放量为:

$$E_{\text{fuel}} = \sum_{i=1}^n (R_{\text{fuel}} \times T) \quad (2)$$

式中: $n$ 可根据数据颗粒度进行调整; $T$ 为数据采集时间间隔,本研究使用的数据间隔为 10 min。

当  $C_{ar}$  使用调压站的在线色谱仪监测数据时,得到的碳排放计量数据即为燃料端在线监测数据,图例为“燃料监测”,当  $C_{ar}$  使用指南中天然气收到基低位发热量与单位热值含碳量的缺省数据时,则得到燃料端缺省核算数据,图例为“燃料缺省”。

### 1.2 后端监测—烟气端在线监测

烟气端在线监测的碳排放计量类似于 CEMS 污染物排放计量,实施方案参考《固定污染源烟气(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物)排放连续监测技术规范》(HJ75—2017)与 DL/T 2376—2021,图例为“烟气监测”,具体见式(3):

$$R_{fluegas} = C_{CO_2} \times V_N \times 44 / (22.4 \times 10^5) \quad (3)$$

式中:  $R_{fluegas}$  为烟气端在线监测的机组碳排放速率, t/h;  $E_{fluegas}$  为烟气端在线监测的机组碳排放量, t, 类同式(2)进行统计;  $C_{CO_2}$  为烟气端在线监测的干基烟气 CO<sub>2</sub> 体积分数, %, 本研究中使用 3 台串联的 CO<sub>2</sub> 在线监测仪表均值, 气体由烟囱直抽再冷凝后进行检测;  $V_N$  为烟气标干流量, m<sup>3</sup>/h (标况下), 可由式(4)、式(5)计算, 本研究中通过 CEMS 环保测点的温压流湿仪表监测获取, 该机组使用符合环保产品认证的测量仪表并按规范进行校准与校验。

$$V_N = Q_s \times \frac{273}{273+t} \times \frac{B_a + P_s}{101325} \times (1 - X_{sw}) \quad (4)$$

$$Q_s = 3600 \times F \times K_v \times V_p \quad (5)$$

式中:  $Q_s$  为湿烟气流量, m<sup>3</sup>/h;  $t$  为烟气温度, °C,  $B_a$  为烟气静压力, Pa;  $P_s$  为大气压力, Pa;  $X_{sw}$  为烟气含湿量, %;  $F$  为测点布置断面的面积, m<sup>2</sup>;  $V_p$  为湿烟气流速, m/s;  $K_v$  为速度场系数。

### 1.3 机组系统构成与测点布置

本研究中燃气—蒸汽联合循环机组发电原理如图 1 所示。天然气与空气混合燃烧驱动燃气轮机转动, 同时燃气轮机尾气加热余热锅炉制造蒸汽, 蒸汽进而驱动蒸汽轮机转动, 2 机共轴对称布置, 共同带动发电机发电, 这是目前高效能燃气机组常见系统之一<sup>[21-22]</sup>。

由于从燃气轮机到烟囱, 烟道前后在运行时除脱硝系统(selective catalytic reduction, SCR)喷氨格栅外完全封闭, 因此可以认为系统碳流主要前端入口为天然气调压站的燃气管道, 次要入口为喷氨格栅, 碳流后端出口为烟囱。本机组采用尿素热解脱硝工艺, 虽然脱硝反应过程不释放碳, 但尿素(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)溶液热解后随稀释空气或余热烟气进

入烟道时会带入尿素分解产生的 CO<sub>2</sub>, 因此, 脱硝系统也是有碳释放的。由于烟囱 CO<sub>2</sub> 在线监测仪表使用空气标定零点, 所以燃气轮机压气机入口空气中的 CO<sub>2</sub> 作为本底值被扣除。本研究中燃料端在线监测所涉及的管道流量仪表与在线色谱仪表的测点位于天然气调压站中, 处于烟气碳流的前端, 烟气端在线监测涉及流量计算的烟气温压流湿仪表为现环保测点仪表, 定期接受上级主管部门检查校验, CO<sub>2</sub> 在线监测仪表为新增仪表, 与现 CEMS 烟气采样点同源, 处于烟气碳流的后端。

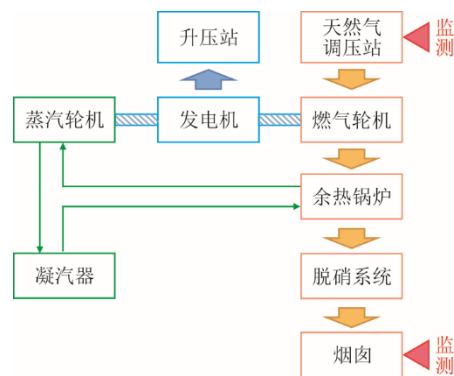


图 1 燃气—蒸汽联合循环机组发电原理示意  
Fig.1 Schematic diagram of the power generation principle of a gas-steam combined cycle unit

假设前端到后端烟道密封性完好, 由于燃气发电机组烟道方向构成简单, 物料从前端到后端的用时较短, 按照物料守恒原则, 以 10 min 时间跨度进行统计时可覆盖碳物质从机组天然气调压站到烟囱检测议标的时间, 也正因这个物质传递速度的原因, 前后端数据仅能做一段时间的统计数据对照比较, 无法直接按时间戳进行实时前后比较, 但其可用的时间颗粒度也远远小于指南方法的月度数据。前后端碳排放速率数据应满足式(6), 按长时间进行排放量统计则前后端碳排放量数据应满足式(7)。式中  $\Delta_R$ 、 $\Delta_E$  分别为前、后端数据偏差, 可能为监测仪表误差叠加或其他系统误差导致。其中, 尿素脱硝系统的碳流入影响可通过对比稳负荷时喷氨启停前后的尾部碳排放数据评估, 以考虑是否需要忽略。

$$R_{fuel} + R_{SCR} = R_{fluegas} + \Delta_R \quad (6)$$

$$E_{fuel} + E_{SCR} = E_{fluegas} + \Delta_E \quad (7)$$

### 1.4 影响因素分析

考虑到未来对企业碳排放量与碳排放强度的

“双控”需求，除了一般意义上的碳排放量前后端对比，本研究重点考察了多个可能影响机组瞬时碳排放强度的相关因素，主要针对稳负荷运行时与主要子系统相关的运行因素、燃料因素、环境因素。其中运行因素与燃料因素由于涉及企业生产数据，所以2类指标因素进行了线性归一化处理，同时也使指标间具有可比性，处理方法见式(8)。然后，采用最小二乘法对线性归一化后的数据与稳负荷时的机组瞬时碳排放强度数据进行线性拟合，可得到依托烟气端在线监测数据与燃端在线监测数据的2条拟合趋势线<sup>[23]</sup>。

$$X_i = 100 \times \frac{(x_i - \min(x_i))}{(\max(x_i) - \min(x_i))} \quad (8)$$

式中： $X_i$ 为线性归一化后的指标数值； $x_i$ 为原始控制系统监测的真实数值。

由于单纯从前端或者后端进行分析无法保证数据覆盖整个机组，数据无闭环，因此，本研究借鉴夹逼原理，将单向数据趋势预测问题转换为双向数据线性求解问题，通过夹逼前后端数据分布再进行关联分析，这样可以有效保证数据和分析结论关于机组完整烟气流程闭环是可互相对照的，虽然无法精确获取关系数学模型，但是可以获得一个较为合理的关于闭环数据的趋势斜率<sup>[24-25]</sup>。

本研究在夹逼分析时主要以2条拟合趋势线的斜率作为分析对象，以夹逼原理对前后端在线监测数据拟合趋势线覆盖范围进行斜率归中，进而分析该因素与机组瞬时碳排放强度是否存在一定程度的直接关联关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 前后端数据可比性

由于燃气机组启停频繁，时常多天处于停机状态，因此仅选取部分数据进行可比性展示，但比对分析时使用全部数据（15天数据）。部分时段下不同计量方法的碳排放速率变化如图2所示，不同负荷率段的前后端在线监测碳排放量与相对偏差如图3所示。

由图2可以看出：燃料监测的碳排放速率与燃料缺省的碳排放速率的变化曲线基本一致，这说明该机组这段时间所用天然气的品质指标与指南缺省参考数据基本一致，即本文碳监测数据具有一定通用参考价值；而中高负荷段的烟气监测

碳排放速率（蓝）稳定偏高于前二者但曲线变化基本一致，则说明前后端数据具有可比性但存在稳定的偏移。

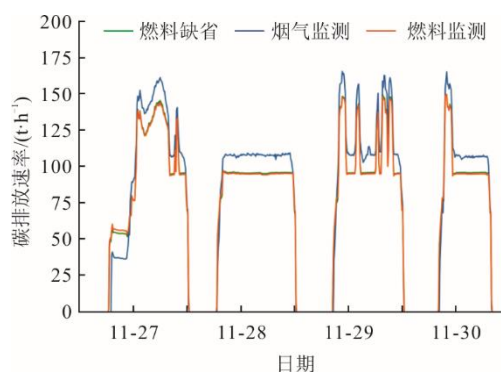


图2 不同计量方法的碳排放速率变化  
Fig.2 The rate of carbon emissions by different measurement methods

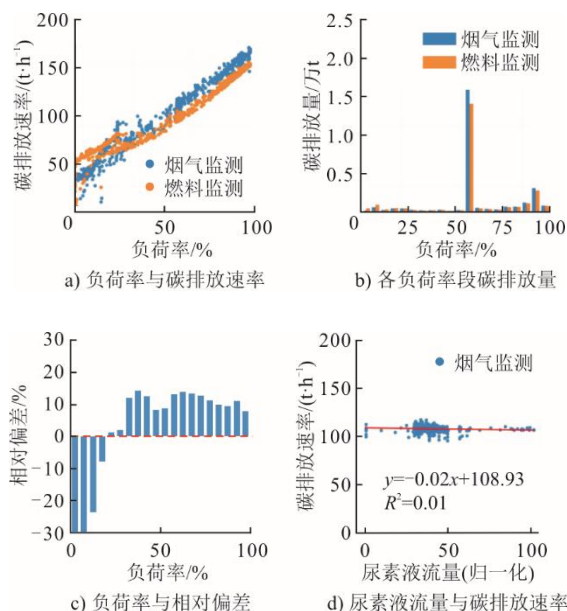


图3 不同负荷率段的前后端在线监测碳排放量与相对偏差  
Fig.3 Carbon emissions from monitor resource at front-end and back-end at different loads and the relative deviations

由图3a)可以看出：该机组前后端分别监测得到的机组碳排放速率都随负荷率升高而升高，二者在50%负荷率以下时数据点分布离散度较高，推测是由于启停机阶段低负荷燃烧不稳定所致；在50%负荷率以上稳燃时，数据分布相对集中，前后端监测的碳排放速率均对负荷率变化呈现较为明显的正相关趋势。

从图3b)可看出，作为调峰机组，其主要的碳排放出现在55%~60%的中负荷率段（即机组的主要稳燃工况在240 MW左右），其次是60%~100%

的中高负荷率段,在 0~55%的低负荷率段产生的碳排放很少,说明进行数据分析时应优先针对 240 MW 稳负荷数据,可以更好地代表该机组的主要情况。以燃料监测统计数据为基准计算相对偏差分布,从图 3c)可看出,在 30%负荷率以上时,烟气监测的碳排放量比燃料监测的碳排放量偏大 10%左右,偏大规律较为稳定,30%负荷率以下时则是反向偏小。因此,可以进一步推论出,前后端数据在中高负荷时具有可比性。

此外,在进一步关联分析前,还需要评估脱硝系统对前后碳排放偏差的影响<sup>[26]</sup>。图 3d)展示了 240±1 MW 时脱硝系统投加尿素液流量与后端烟囱监测的碳排放速率关系。从图中拟合曲线可以看出,随着规程范围内尿素液流量的增加,烟气监测的碳排放速率并未增加,可以推测在稳燃时,脱硝系统投运对该机组碳排放的影响极小,因此对于该机组在稳燃时,式(6)、式(7)的  $R_{SCR}$ 、 $E_{SCR}$  项可忽略,得到:

$$R_{fuel} \approx R_{fluegas} + \Delta_R \quad (9)$$

$$E_{fuel} \approx E_{fluegas} + \Delta_E \quad (10)$$

根据前述结果与讨论,中高负荷时,前后端碳排放速率和碳排放量总是存在较为稳定的数值偏差,可认为  $\Delta_R$ 、 $\Delta_E$  近似于某个常数,并不会影响前后端监测数据的分布趋势,更进一步可假设,在进行稳燃时机组瞬时碳排放强度与关联因素的趋势夹逼分析时,该常数项对 2 种数据线性拟合斜率的影响可以忽略,前后端监测的碳数据依旧具有趋势上的可比性。

同时,鉴于该机组天然气流量、在线色谱、干基  $CO_2$  体积分数检测准确度均在 1%左右,因此,该  $\Delta_R$ 、 $\Delta_E$  可能主要源于标干流量相关测点的系统性误差,如湿烟气流速测点允许误差高达 10%<sup>[11,21]</sup>。

## 2.2 机组碳排放特征

宏观的机组碳排放特征主要与负荷有关,本节主要考察烟囱  $CO_2$  体积分数、机组瞬时碳排放强度(瞬时碳排放速率/机组发电负荷)的负荷关联变化规律,不同负荷率段的机组碳排放特征如图 4 所示。由图 4a)可以看出:随着机组负荷率提高,烟囱  $CO_2$  体积分数逐渐升高,在 50%负荷率后趋稳至 4%左右,相对燃煤机组中高负荷稳燃时烟气中高达 10%以上的  $CO_2$  体积分数水平要低很多;而烟囱  $O_2$  体积分数则正好相反,随着机组负荷率提高,烟囱  $O_2$  体

积分数逐渐降低,在 50%负荷率后趋稳逼近 14%左右,这比燃煤机组常见的烟气含氧量参考值要高很多(6%),侧面说明燃气机组相对燃煤机组耗氧速率要低很多。

图 4b)中前后端机组瞬时碳排放强度数据均与负荷率呈负相关关系,在 50%负荷率以下时随负荷增加快速下降,在 50%负荷率以上时,随负荷增加逐渐趋于稳定,可推测与燃烧情况直接相关,越接近机组满负荷设计条件,机组效率越高,则机组瞬时碳排放强度越低。以燃料监测进行评价,机组瞬时碳排放强度在 400 g/(kW·h)以下<sup>[27]</sup>。其中,烟气监测数据点相对燃料监测数据呈现整体性偏移但趋势基本一致,与图 3a)、图 3c)展示的偏差情况相似,由于机组瞬时碳排放强度计算时的分母都是机组发电负荷,所以该偏差源于瞬时碳排放速率的差异,再次验证前后端数据在中高负荷时存在系统性偏差但趋势具有可比性。

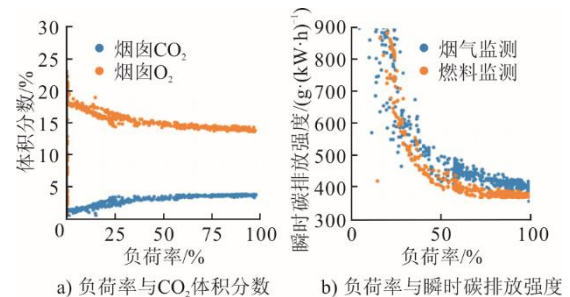


图 4 不同负荷率段的机组碳排放特征  
Fig.4 The carbon emission characteristics of units at different load rates

## 2.3 机组性能关联分析

为了判断机组瞬时碳排放强度与机组主要效率指标的关联关系,本文基于机组自动控制系统计算出的效率指标数据,分析了中高负荷段前后端监测的机组瞬时碳排放强度与机组发电热效率、发电标准煤耗间的关联关系,其中效率数据已作归一化处理,具体如图 5 所示。

由图 5a)、图 5b)可知,前后端监测的机组瞬时碳排放强度都与机组发电热效率呈现负相关关系分布,同时又与机组发电标准煤耗呈正相关关系分布,前后端拟合后的趋势斜率有较大差异但正负相同,说明不管是前端燃料监测还是后端烟气监测,机组瞬时碳排放强度与机组效率指标存在较为明显的趋势关联,可在一定程度上作为机组运行情况的一种宏观效能指标参考。

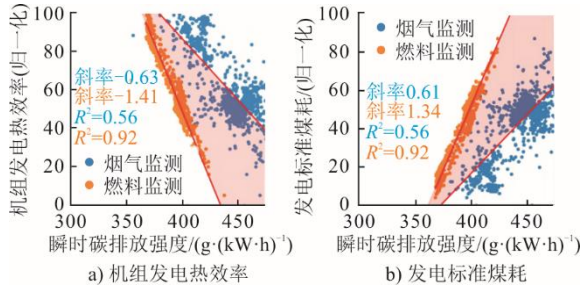


图 5 前后端在线监测瞬时碳排强度与机组发电热效率  
**Fig.5 The data distribution relationship between carbon emission intensity from different resources and the thermal efficiency**

尽管火电行业内主要以主机系统自动计算的机组发电热效率与发电标准煤耗来进行机组间横向比较及指导生产优化，但无法作为碳排放“双控”的直接衡量指标。考虑到国内未来碳计量方法与标准接轨欧美后，烟气碳监测技术有可能成为统一的火电机组碳排放计量手段，烟气碳监测的碳排放量与碳排放强度数据既可以成为国家对火电企业进行碳排放“双控”的直接数据媒介，也可直接与碳交易挂钩，这是机组发电热效率与标准煤耗数据难做到的。在这种情况下，使用不同颗粒度的机组发电碳排放强度来衡量机组效能与指导生产可能会成为更加方便的方法之一。

**2.4 稳负荷瞬时碳排放强度关联因素分析**

该调峰机组的碳排放主要出现在 240 MW 左右，由于该机组稳定负荷时，系统可以维持±1 MW 运行，超过这个范围时往往都是机组处于变负荷调整的情况，覆盖范围太窄时又会出现剔除数据过多的情况，因此考察稳燃时各因素的关系时，需要尽可能减少变负荷数据的出现但保留足够多的稳燃稳负荷样本，所以本研究将负荷(240±1) MW 作为边界条件进行影响因素分析。以燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机、凝汽器、SO<sub>2</sub>、厂用电率相关的 7 个监控参数作为运行因素，以燃料低位发热量和元素含碳量作为燃料因素，以大气温度、相对湿度和气压作为环境因素，寻找与机组瞬时碳排放强度关联度较强的因素，以上因素关于前后端监测机组瞬时碳排放强度的数据趋势与线性拟合结果见图 6—图 8。

**2.4.1 运行因素**

从图 6a)看出，前后端监测的机组瞬时碳排放

强度数据点呈现上下平行分布，具有整体可比性。尽管从其他运行因素作为横坐标的角度出发，数据分布较为离散，依旧可从图 6 的总体趋势看出，各运行参数从控制范围最低升至最高时，该机组在 240 MW 稳负荷时的机组瞬时碳排放强度存在十几到几十 g/(kW·h)的变化，依旧存在一定的关联趋势，可结合数据分布趋势与线性拟合斜率进行有限评估。

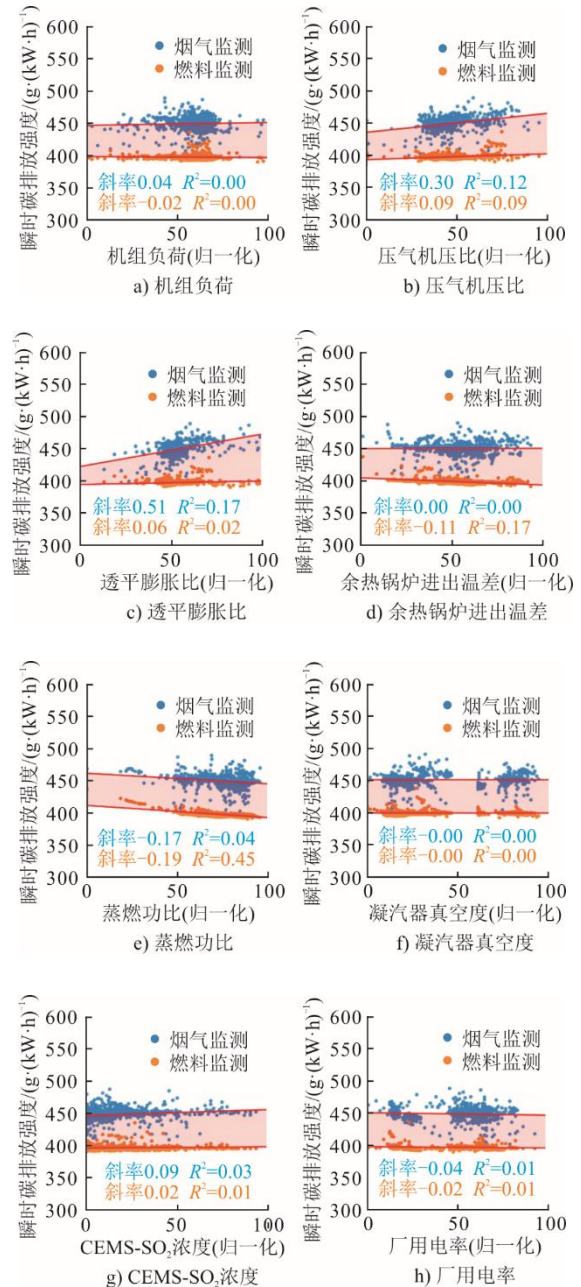


图 6 运行因素与机组瞬时碳排强度间的数据关联  
**Fig.6 The data distribution relationship between operating factors and unit carbon emission intensity**

从烟气监测数据分布趋势看，压气机压比、透

平膨胀比、蒸燃功比对烟气监测的机组瞬时碳排放强度影响相对明显,余热锅炉进出温差、凝汽器真空度、CEMS-SO<sub>2</sub>浓度、厂用电率对烟气监测的机组瞬时碳排放强度影响相对不明显。从燃料监测数据分布趋势看,压气机压比、透平膨胀比、余热锅炉进出温差、蒸燃功比对燃料监测的机组瞬时碳排放强度影响相对明显,凝汽器真空度、CEMS-SO<sub>2</sub>浓度、厂用电率对燃料监测的机组瞬时碳排放强度影响相对不明显。前后端监测数据推导出的结论大致相同。

综合前后端数据关联趋势,可以推论出,压气机压比、透平膨胀比、蒸燃功比对机组稳负荷运行时的机组瞬时碳排放强度影响关联度相对较大,余热锅炉进出温差、凝汽器真空度、CEMS-SO<sub>2</sub>浓度、厂用电率对机组瞬时碳排放强度影响相对较小。

从燃气机组发电原理上考虑,压气机与透平是燃气机组最核心的部分,气体压缩膨胀做功过程中最关键的则是压缩终点的气体压力,压缩终点压力越高则燃烧后气体膨胀幅度越大,进而透平出力越大、膨胀比越大,但同时前段压缩过程耗能也越大,因此推测该机组的压缩终点压力设置可能偏高,所以在前后端监测数据分布上表现为一定的正相关。

此外值得注意的是,透平膨胀比对前后端监测机组瞬时碳排放强度影响有较为明显的趋势差异,推测可能正是膨胀比直接与烟气流量相关,膨胀比的细微变化可直接导致燃机排气量大幅度变化,进而导致后端烟气监测的数据变大<sup>[28]</sup>。

蒸燃功比反映的是燃气-蒸汽联合循环机组2个能量转换部分的出力配比<sup>[29]</sup>。本研究中前后端监测数据均显示蒸汽轮机出力/燃气轮机出力越高,机组瞬时碳排放强度越低,前后端数据分布趋势一致,这可能与前述压缩终点压力偏大有关,换句话说该机组的燃气轮机可能并未运行在最优参数,所以降低燃气轮机在联合循环中的出力占比反而可以降低机组瞬时碳排放强度,说明机组参数依然有提升空间。

#### 2.4.2 燃料因素

燃料因素作为整个机组的前置外在因素,其与机组稳负荷运行时机组瞬时碳排放强度的关联趋势如图7所示。从图7可看出,天然气低位发

热量与元素含碳量在监测数据范围内变化时,机组瞬时碳排放强度随天然气低位发热量的升高而小幅度降低、随元素含碳量的升高而小幅度升高。这是由于燃料热值越高,单位发电耗电量越少,而燃料含碳量越高则每单位气体消耗后释放的碳越多。

但前后端监测的机组瞬时碳排放强度变化都相对运行因素所导致的趋势变化要小很多,说明该机组天然气供气品质相对稳定且符合机组设计要求,不是稳负荷时影响机组的主要因素。

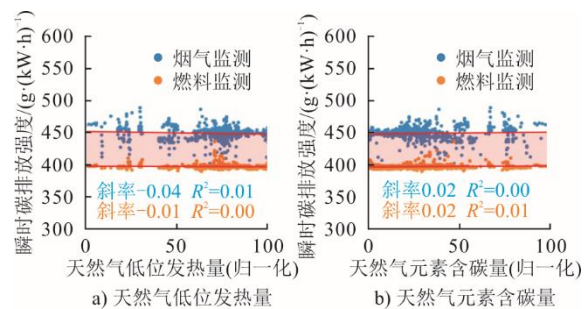


图7 燃料因素与机组瞬时碳排放强度间的数据关联分布  
Fig.7 The data correlation distribution between fuel factors and unit carbon emission intensity

#### 2.4.3 环境因素

环境因素主要考察大气温度、大气相对湿度、大气压力,这些因素直接与进入机组的空气相关,其关联趋势如图8所示。由图8可以见,环境因素对前后端监测的机组瞬时碳排放强度存在一定影响,其中大气压力影响极其显著,大气温度次之,大气相对湿度对机组瞬时碳排放强度几乎没有影响。

根据学者关于气压对燃气机组联合循环效率的研究发现,当大气压力增加时,空气的比容降低,燃气轮机的最大出力(即最大负荷)增加<sup>[30]</sup>。考虑到机组瞬时碳排放强度与最大出力的定义差异,一个是反映维持定负荷时的碳排放速率,一个是反映维持输入能量时的最大负荷,因此已有研究中关于最大出力与大气压力的结论并不能直接套用在本文机组瞬时碳排放强度的讨论中。本研究在定负荷条件下观察到了随着大气压力增加,机组瞬时碳排放强度增加的现象。推测可能是当外部环境气压高时,为了维持透平出力,压气机压缩终点压力也会随着大气压力升高而升高,在等容情况下,压缩过程需要克服的阻力越大,即耗能越大,所以导致中负荷时随着大气压力上升而机组瞬时碳排放强度出现显著升高。

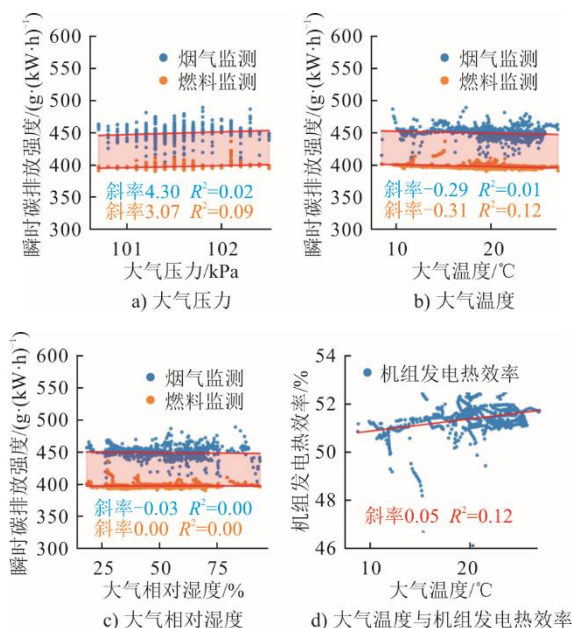


图 8 机组瞬时碳排放强度

Fig.8 The data correlation distribution between environmental factors and unit carbon emission intensity

满负荷运行时, 大气温度的影响主要源于燃气轮机是定容发动机, 其功率输出与进入燃气轮机的空气质量流量成正比, 而空气比容随大气温度升高而减小, 从而导致机组的出力下降, 即机组最大出力随着温度升高而减小<sup>[31]</sup>。但本研究主要分析 240 MW 中负荷工况而非满负荷工况碳排放数据, 在恒定的中等出力条件下, 图 8d) 反而观测到随着大气温度上升, 机组瞬时碳排放强度降低与机组发电热效率上升这 2 种现象, 推测可能是该机组中负荷时, 环境大气温度越高, 机组内外促进热量传递的温差梯度越小, 散热越少, 进而导致机组发电热效率升高与机组瞬时碳排放强度降低, 也有可能是机组出力与机

组瞬时碳排放强度之间可能并不构成线性关联。

### 2.5 前后端数据夹逼分析

为了探寻哪个因素对机组瞬时碳排放强度影响最大, 本研究基于前后端监测点物质近似守恒且监测仪表存在系统性误差叠加的前提, 以前后端数值归一化后的数据趋势斜率进行夹逼分析, 得到了各因素在 240 MW 稳负荷控制范围的关于机组瞬时碳排放强度的夹逼归中斜率, 该夹逼归中斜率与前后端测点范围内的整个机组系统有关, 因此可以认为其一定程度可作为该机组运行优化的参考指标, 结果见表 1。从斜率是否同向可以看出, 所有因素的前后端监测数据分布拟合的斜率正负方向基本一致, 显示了前后端监测数据分布的趋势可比性。

在对前后端监测数据的拟合斜率夹逼归中并进行绝对值排序后, 得到了一组关于该工况下主要因素对机组瞬时碳排放强度的线性影响权重序列。可以看出在排序前 5 的因素中环境因素占了 2 个, 运行因素占了 3 个。可以推论出对于该型机组在建设时, 当地大气环境是一个优先考量因素, 当地气温偏高或气压偏低时有利于降低该型机组瞬时碳排放强度。但对于已建好的机组, 由于负荷设定是从动于电网调度任务, 难以自行决定何种天气启停, 因此难以将环境因素纳入运行优化建议的范畴。

在运行因素中, 关于机组运行中的减碳方案编制时应优先考虑透平膨胀比、压气机压比和蒸燃功比, 这 3 个因素变化带来的机组瞬时碳排放强度变化幅度较大, 适当降低透平膨胀比和压气机压比或适当提高蒸燃功比可能是在该机组 240 MW 负荷工况下降低机组瞬时碳排放强度的优选途径之一。

表 1 负荷 240 MW 时各因素关于机组瞬时碳排放强度的线性拟合斜率与夹逼分析

Tab.1 Linear fitting slope and entrainment analysis of each factor on carbon emission intensity at 240 MW

类别	指标因素	烟气端监测数据	燃料端监测数据	斜率是否同向	前后端夹逼斜率	绝对值排序
运行因素	压气机压比	0.30	0.09	√	0.195	4
	透平膨胀比	0.51	0.06	√	0.285	3
	余热锅炉进出口烟气温差	0	-0.11	√	-0.055	7
	蒸燃功比	-0.17	-0.19	√	-0.180	5
	凝汽器真空度	0	0	√	0	12
	烟囱出口 SO <sub>2</sub> 浓度	0.09	0.02	√	0.055	6
	厂用电率	-0.04	-0.02	√	-0.030	8
燃料因素	天然气低位发热量	-0.04	-0.01	√	-0.025	9
	天然气元素含碳量	0.02	0.02	√	0.020	10
环境因素	大气温度	-0.29	-0.31	√	-0.300	2
	大气相对湿度	-0.03	0	√	-0.015	11
	大气压力	4.30	3.07	√	3.685	1

### 3 结 语

本文以某 F 级燃气机组为研究对象, 发现中高负荷段的烟气监测的碳排放速率稳定高于燃料监测的数据但监测曲线变化基本一致。机组瞬时碳排放强度与燃烧情况直接相关, 越接近机组满负荷设计条件, 机组效率越高, 则碳排放强度越低。

以前后端数值归一化后的数据趋势斜率进行夹逼分析, 得到了各因素在 240 MW 稳负荷控制范围机组瞬时碳排放强度的夹逼归中斜率, 所有因素的前后端监测数据分布拟合的斜率正负方向基本一致, 显示了前后端监测数据分布的趋势可比性。大气环境是一个优先考量因素, 气温较高时可能改善机组热散失, 气压较低时可减小压气机压缩能耗, 进而降低该型机组瞬时碳排放强度; 透平膨胀比、压气机压比、蒸燃功比可能是在机组负荷不变的情况下降低机组瞬时碳排放强度的优先考虑因素。

在未来国内碳计量方法与标准接轨欧美后, 烟气碳监测技术有可能成为统一的火电机组碳排放计量手段, 烟气碳监测的碳排放量与碳排放强度数据既可以成为国家对火电企业进行碳排放“双控”的直接数据媒介, 也可直接与碳交易挂钩, 使用不同颗粒度的机组发电碳排放强度来衡量机组效能与指导生产可能会成为更加方便的方法之一。

#### [参 考 文 献]

- [1] 谢克昌. 新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 47-56.  
XIE Kechang. Develop new energy system and promote clean and efficient conversion of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 47-56.
- [2] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.  
ZHANG Quanbin, ZHOU Qiongfang. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of "carbon peak and carbon neutralization"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [3] 张安安, 周奇, 李茜, 等. “双碳”目标下火电厂 CO<sub>2</sub> 计量技术研究现状与展望[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 51-61.  
ZHANG An'an, ZHOU Qi, LI Xi, et al. Research status and prospect of CO<sub>2</sub> accounting technology in thermal power plants under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 51-61.
- [4] 中电联规划发展部. 电力行业碳达峰碳中和发展路径研究[EB/OL]. (2021-12-27)[2024-01-10]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305168>.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施[Z/OL]. (2022-12-22) [2024-01-10]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202212/W020221221671986519778.shtml>.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for accounting and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises power generation facilities[Z/OL]. (2022-12-22) [2024-01-10]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202212/W020221221671986519778.shtml>.
- [6] 包雪珂. 基于 SD 的中国火电碳排放预测与控制研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021: 1.  
BAO Xueke. SD-based Research on Carbon Emission Prediction and Control of Thermal Power in China[D]. Hengyang: University of South China, 2021: 1.
- [7] 弓林娟. 面向灵活性运行的火电机组建模及其预测控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 1.  
GONG Linjuan. Research on modeling of thermal power units and their predictive control for flexible operation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 1.
- [8] 王雅娴. 中国火电行业碳排放和总碳强度减排问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
WANG Yaxian. Research on carbon emission and total carbon intensity reduction in China's thermal power industry[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [9] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 1-13.  
WU Hao, REN Xin, ZHU Junjie. Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 1-13.
- [10] 王萍萍, 赵永椿, 张军营, 等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 170-183.  
WANG Pingping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 170-183.
- [11] 陈公达, 邹祥波, 卢锐, 等. 中外火电企业碳排放统计方法与质量控制现状分析[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 54-60.  
CHEN Gongda, ZOU Xiangbo, LU Rui, et al. Analysis of carbon emission statistics methods and quality control status of thermal power companies in China and abroad[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 54-60.
- [12] 王霖晗, 朱林, 张晶杰, 等. 欧盟火电厂二氧化碳排放在线监测系统质量保证体系对中国的启示[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 154-158.  
WANG Muhan, ZHU Lin, ZHANG Jingjie, et al. Practice of quality assurance system of carbon dioxide emission on-line monitoring system in the European Union[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 154-158.
- [13] 姚顺春, 支嘉琦, 付金杯, 等. 火电企业碳排放在线监测技术研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 97-108.  
YAO Shunchun, ZHI Jiaqi, FU Jinbei, et al. Research progress of online carbon emission monitoring technology for thermal power enterprises[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 97-108.

- [14] 中华人民共和国生态环境部. 力争今年年底前, 推动更多火电企业开展碳排放在线监测[Z]. (2023-05-26) [2024-01-10]. 生态环境部5月例行新闻发布会. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526\\_983531.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526_983531.shtml). Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. We will strive to promote more thermal power enterprises to carry out online monitoring of carbon emissions before the end of this year[Z]. (2023-05-26) [2024-01-10]. Monthly routine press conference of the Ministry of Ecology and Environment. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526\\_983531.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526_983531.shtml).
- [15] 人民网. 生态环境部: 即将启动碳监测评估第二阶段试点工作[EB/OL]. (2023-05-29) [2024-01-10]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0531/c1004-40003028.html>. People's Daily. Ministry of Ecological Environment: To launch the second phase of carbon monitoring and evaluation pilot work[EB/OL]. (2023-05-29) [2024-01-10]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0531/c1004-40003028.html>.
- [16] 李峥辉, 卢伟业, 庞晓坤, 等. 火电企业CO<sub>2</sub>排放在线监测系统的研发应用[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 182-189. LI Zhenghui, LU Weiye, PANG Xiaokun, et al. Research and application of on-line monitoring system for CO<sub>2</sub> emissions from thermal power enterprises[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 182-189.
- [17] 陈咏城, 唐雯, 马旭涛. 火力发电厂碳排放测量及分析[J]. 电站辅机, 2021, 42(3): 14-17. CHEN Yongcheng, TANG Wen, MA Xutao. Measurement and analysis of carbon emission in Thermal power plant[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2021, 42(3): 14-17.
- [18] 胡永飞, 姚艳霞, 苏玲彦, 等. 燃煤电厂固定排放源二氧化碳排放量方法对比[J]. 中外能源, 2020, 25(12): 71-77. HU Yongfei, YAO Yanxia, SU Lingyan, et al. Comparison of quantitative methods for CO<sub>2</sub> emissions from stationary emission sources of coal-fired power plants[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(12): 71-77.
- [19] 刘科, 杨兴森, 王太, 等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 47-53. LIU Ke, YANG Xingsen, WANG Tai, et al. Research on carbon emission characteristics of coal-fired units based on real-time monitoring[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 47-53.
- [20] 马学礼, 王笑飞, 孙希进, 等. 燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 190-195. MA Xueli, WANG Xiaofei, SUN Xijin, et al. Influence factors of carbon emission intensity of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 190-195.
- [21] 固定污染源烟气(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物)排放连续监测技术规范: H75—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017: 1. Specifications for continuous emissions monitoring of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and particulate matter in the flue gas emitted from stationary sources: HJ75—2017[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017: 1.
- [22] 肖俊峰, 王峰, 高松, 等. 重型燃气轮机燃烧调整技术研究现状及进展[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 1-8. XIAO Junfeng, WANG Feng, GAO Song, et al. Research status and progress of heavy gas turbine combustion adjustment technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 1-8.
- [23] 廖彭伟. 基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 111-116. LIAO Pengwei. Combustion control optimization of power plant boiler based on dynamic benchmark values[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 111-116.
- [24] 申朋宇, 乔明帅, 刘建超, 等. 基于夹逼准则高精度靶向研判电站锅炉效率的算法研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(10): 201-207. SHEN Pengyu, QIAO Mingshuai, LIU Jianchao, et al. Research on algorithm of high-precision targeted judgment of power plant boiler efficiency based on clamping criterion[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(10): 201-207.
- [25] 何光宇, 郭家春, 鲍毅, 等. 一种中长期日负荷曲线预测的新方法——双向夹逼法[J]. 电网技术, 2004(7): 27-29. HE Guangyu, GUO Jiachun, BAO Yi, et al. A novel method of middle and long term forecasting for daily load curve-approaching algorithm in two directions[J]. Power System Technology, 2004(7): 27-29.
- [26] 吴鹏, 周锦晖, 庄柯, 等. 燃气轮机脱硝技术现状及发展趋势[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 103-105. WU Peng, ZHOU Jinhui, ZHUANG Ke, et al. Present status and development tendency of denitrification technology for gas turbines[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(1): 103-105.
- [27] 刘高军. 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 189-195. LIU Gaojun. Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 189-195.
- [28] 贾晨曦, 王波, 赵丽凤, 等. 考虑透平冷却的再热燃气轮机联合循环热力性能参数影响[J]. 燃气轮机技术, 2023, 36(4): 39-45. JIA Chenxi, WANG Bo, ZHAO Lifeng, et al. Influence of parameters on thermodynamic performance of reheat gas turbine combined cycle considering turbine cooling[J]. Gas Turbine Technology, 2023, 36(4): 39-45.
- [29] 张晓声, 丁涛, 曲明, 等. 考虑燃气-蒸汽联合循环机组的机组组合建模综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 969-987. ZHANG Xiaosheng, DING Tao, QU Ming, et al. Review on unit commitment modeling considering combined-cycle gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 969-987.
- [30] 郭明慧, 荆永昌, 侯宝. SGT5-4000F(4)燃气轮机夏季最大负荷研究及应用[J]. 燃气轮机技术, 2014, 27(4): 37-41. GUO Minghui, JING Yongchang, HOU Bao. Research and application of SGT5-4000F(4) gas turbine maximum load in summer[J]. Gas Turbine Technology, 2014, 27(4): 37-41.
- [31] 张涛, 付忠广, 刘志坦, 等. 进气温度对燃气-蒸汽联合循环机组性能的影响[J]. 化工进展, 2020, 39(11): 4367-4374. ZHANG Tao, FU Zhongguang, LIU Zhitan, et al. Effect of the intake temperature of gas turbine on the performance of gas-steam combined cycle power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4367-4374.

(责任编辑 邓玲惠)