

# 烟气碳排放监测数据补缺方法适用性

陈公达<sup>1</sup>,程国辉<sup>2</sup>,蔡汝金<sup>2</sup>,邹祥波<sup>1,3</sup>,朱旺<sup>1</sup>,叶骥<sup>1</sup>,秦士伟<sup>1</sup>,唐顺<sup>4</sup>,卢伟业<sup>4</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.珠海经济特区广珠发电有限责任公司,广东 珠海 519000;3.广东省能源集团有限公司,广东 广州 510630;4.广东省特种设备检测研究院顺德检测院,广东 佛山 528300)

**摘要:**烟气端碳计量技术近年来逐渐受瞩目,然而由于国内相关技术标准和体系尚待完善,该技术尚未在发电行业的正式推广应用,尤其在CO<sub>2</sub>监测数据补缺方面鲜有研究。探讨了CO<sub>2</sub>监测数据缺失时的有效补缺方法,在CO<sub>2</sub>浓度方面上对比了保持缺失段前最后有效值、基于缺省值与中位修正值的氧气换算三种补缺方法,在长周期碳排放量方面进一步增加对比了取180 h内最大碳排放速率的补缺方法。研究结果显示,两机组烟气实际燃料燃烧的最大CO<sub>2</sub>体积分数在不同负荷率条件时不是固定值,且分布规律也各不同。燃煤机组的反演算最大CO<sub>2</sub>体积分数散布上下限差异约4%,在负荷率方向上总体变化小,整体反演算数据的中位值18.67%,与缺省值相差小,仅0.03%。燃气机组的反演算最大CO<sub>2</sub>体积分数在负荷率方向上变化存在两段显著差异,20%负荷率以下时,随负荷率上升而逐渐上升,20%负荷率以上时,随负荷率上升基本稳定,整体反演算数据的中位值11.38%,与缺省值差0.12%。在长周期考察中,用修正方法补缺后数据最接近于正常数据,1个月内造成的碳排放量偏差均控制在1.5 t以内,从数据准确性角度看,该补缺方法有高适用性。此外,采用取180 h最大值补缺的方法,虽可作为碳数据管理部门对企业的一种有效惩罚性管理手段,但长远来看,随着烟气监测法在火电行业的广泛推广,该方法可能会导致我国在国际层面的碳相关事务谈判或交易中我国火电行业的碳排放总量被高估。

**关键词:**碳计量;碳监测;火力发电;烟气;数据补缺

中图分类号:TK39 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2024)08-0032-10

## Applicability of Data Gaps Imputation Methods for Monitoring Flue Gas Carbon Emissions

CHEN Gongda<sup>1</sup>, CHENG Guohui<sup>2</sup>, CAI Rujin<sup>2</sup>, ZOU Xiangbo<sup>1,3</sup>, ZHU Wang<sup>1</sup>, YE Ji<sup>1</sup>, QIN Shiwei<sup>1</sup>,  
TANG Shun<sup>4</sup>, LU Weiye<sup>4</sup>

(1. Guangdong Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 2. Guangzhou Power Generation Co., Ltd. of Zhuhai Special Economic Zone, Zhuhai 519000, China; 3. Guangdong Energy Group Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 4. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research Shunde Testing Institute, Foshan 528300, China)

**Abstract:** In recent years, carbon measurement technology for flue gases has garnered increased attention. Nevertheless, due to the lack of comprehensive technical standards and systems in China, its formal implementation in the power generation industry remains limited, particularly concerning CO<sub>2</sub> monitoring data gaps. Effective methods for addressing CO<sub>2</sub> data gaps were investigated and three approaches were compared including retaining the last valid value before the gap, data conversion using oxygen based on default and median correction values, and utilizing the maximum carbon emission rate within the past 180 hours during long-term evaluations. The findings indicate that the maximum CO<sub>2</sub> volumetric fraction in actual fuel combustion varies under different load conditions, with distinct distribution patterns. For coal-fired units, the variability in the maximum CO<sub>2</sub> volumetric fraction is approximately 4%, with a median value of 18.67% that closely aligns with the default value. In contrast, for gas-fired units, the maximum CO<sub>2</sub> volumetric fraction exhibits two notable stages

收稿日期:2024-04-10;责任编辑:戴春雷 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.LC24041001

基金项目:国家重点研发计划资助项目课题(2021YFF0601001);广东省能源局广东省新型电力系统技术创新资助项目(1688950422168)。

作者简介:陈公达(1990—),男,湖南湘潭人,高级工程师,博士。E-mail: chengongda@gcg.com.cn

引用格式:陈公达,程国辉,蔡汝金,等.烟气碳排放监测数据补缺方法适用性[J].洁净煤技术,2024,30(8):32-41.

CHEN Gongda, CHENG Guohui, CAI Rujin, et al. Applicability of missing data imputation methods for monitoring flue gas carbon emissions[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 32-41.



移动阅读

of variation, with a median value of 11.38%, differing by 0.12% from the default. Long-term evaluations show that the corrected method yields data most comparable to normal conditions, with monthly carbon emission deviations controlled within 1.5 tons, demonstrating high accuracy and applicability. However, while the 180-hour maximum value method can serve as an effective punitive management tool for carbon data, its widespread adoption may lead to overestimation of carbon emissions in international negotiations or transactions as flue gas monitoring becomes more prevalent in the coal-fired power sector.

**Key words:** carbon measurement, CO<sub>2</sub> monitoring, thermal power, flue gas, data gaps imputation.

## 0 引言

火电在未来相当长的一段时间内仍是我国电力的安全保障与支柱,准确计量燃煤燃气机组 CO<sub>2</sub> 排放是未实现碳达峰、碳中和的必要支撑<sup>[1-3]</sup>。当前我国火电行业碳排放计量执行排放因子法,主要依托燃料数据与排放因子计量<sup>[4]</sup>。该方法适用范围广、有统一核算标准,但在样品采集、缩分、送检等环节存在样品均匀性与潜在人为干扰等难完全规避的问题<sup>[5]</sup>。为避免人为修改数据、便于数据管理,烟气端碳计量技术也越来越受关注。该技术类似于烟气连续监测系统计量烟气污染物排放量,可参考 HJ75—2017《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》与 DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》,主要依托烟气 CO<sub>2</sub> 气体浓度与烟气流量数据进行计量,除仪表校准外全程无人为干扰因素<sup>[6-9]</sup>。

目前烟气端碳计量技术在欧美已形成较完整的体系,其计量数据已准入欧美碳交易市场。我国对于烟气端碳计量技术的应用仍在试点探索阶段<sup>[10-12]</sup>。2022年5月,生态环境部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<sup>[13-14]</sup>。同时期,国内关于烟气端碳计量技术研究也逐渐增多。陈咏城等<sup>[15]</sup>基于 CO<sub>2</sub> 排放监测数据实现单台机组碳排放速率、碳排放总量精确计算。胡永飞等<sup>[16]</sup>比对了某电厂 CO<sub>2</sub> 排放监测数据与核算数据,发现监测数据略低于核算数据。李小龙等<sup>[17]</sup>从烟道测量位置要求、测量点的布置及测量方法等,综述了当前国内外烟气流速与流量手工监测方法现状,指出我国标准缺少对测量位置气流方向及流场均匀性检查验证的具体规定。

综上,目前国内烟气碳排放监测技术研究主要从2种方法总体数据比对与政策标准方面展开,对于监测技术实施的各细节问题,讨论主要从流速测点布置与不确定度方面展开,均只考虑数据正常的情况,但鲜有关于数据异常时如何合理补缺研究。由于碳排放数据不同于污染物数据,后者更关注短

时是否超过限值,前者更关注长时排放总量,故数据异常时的合理补缺也是未来需关注的问题,补缺过高对企业碳履约、国家碳排放量边境谈判都不利,过低则对行业配额分配及政府管理造成误导。因此笔者针对 CO<sub>2</sub> 监测数据缺失时的补缺方法开展研究,比较目前国内可参考文件中不同补缺方法效果差异,分析其适用性。

## 1 试验

CO<sub>2</sub> 缺失数据主要指 CO<sub>2</sub> 浓度与排放量数据缺失的情况,也是相关标准或试点文件中提及的情况,不涉及已有明确补缺规范的流量数据。研究数据来源于在非检修状态的1台F级蒸燃联合循环机组与1台亚临界燃煤机组,2台机组均位于大湾区,有相似的气候地理条件。

### 1.1 CO<sub>2</sub> 体积分数

CO<sub>2</sub> 体积分数来源于仪表采样检测,采样与预处理方案参考 DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》,在烟囱尾部直管段直抽采样,烟气经冷凝后进入非分散红外气体检测仪表分析,获得 CO<sub>2</sub> 干基体积分数,所用仪表为自研定制,检测准确度<1% F.S.,可用数据补缺方法主要为保持前值、O<sub>2</sub> 体积分数数据换算。

保持前值的方法常用于校准操作过程或有明确标识的异常数据段,处理方法可参考 DL/T 2376—2021、HJ75—2017,类似于烟气污染物浓度监测仪表的校准要求,当识别到仪表进入校准或异常状态后,仪表维持校准或异常前最后一次检测的数据直至校准或异常状态结束。该方法取得 CO<sub>2</sub> 数据在后续讨论中标识为“保持”。

O<sub>2</sub> 体积分数数据换算主要用于无标识的数据缺失段,可参考 HJ75—2017,该方法也被写入生态环境部的烟气 CO<sub>2</sub> 在线监测评估试点实施方案中,具体计算方法如下:

$$\varphi(\text{CO}_2)_{\text{trans}} = C(\text{CO}_2)_{\text{max}}(1 - C(\text{O}_2)/20.9\%)。 \quad (1)$$

其中, $\varphi(\text{CO}_2)_{\text{trans}}$ 为经 O<sub>2</sub> 体积分数换算的 CO<sub>2</sub> 体积分数,%; $\varphi(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ 为燃料燃烧的最大 CO<sub>2</sub> 体积分数,取值参考表1; $\varphi(\text{O}_2)$ 为烟气中干基 O<sub>2</sub> 体积

表1  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  近似值Table 1  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  approximate values

燃料类型	烟煤		湿性	干性
	贫煤		天然气	天然气
$\varphi(\text{CO}_2)_{\max}/\%$	18.4~18.7	18.9~19.3	10.6	11.5

分数,%,来源于仪表连续采样检测,实施方案参考HJ75—2017,与 $\text{CO}_2$ 数据同采样源;20.9%为基准 $\text{O}_2$ 体积分数。

对于燃气机组,干性天然气是含甲烷90%以上的天然气,而湿性天然气除主要含甲烷外,还有较多乙烷、丙烷、丁烷等气体<sup>[18]</sup>。本研究燃气机组该数据时间段的天然气甲烷色谱检测数据基本在90%,因此 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 可取11.5。对于燃煤机组,在参考标准中并无取值依据,但通过0.1梯度的预计算比较发现 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 取18.7时,换算数据与实测 $\text{CO}_2$ 数据偏离小,因此 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 可取18.7。以上直接从表里中取值再计算所得的 $\text{CO}_2$ 数据在后续讨论中标识为“缺省”。

## 1.2 $\text{CO}_2$ 排放量

$\text{CO}_2$ 排放量计算类似于烟气污染物排放量计算,参考HJ75—2017与DL/T 2376—2021:

$$E = \sum_{i=1}^n Rt, \quad (2)$$

式中, $E$ 为烟气 $\text{CO}_2$ 排放量,t; $n$ 可根据数据颗粒度进行调整; $t$ 为数据采集时间间隔,h; $R$ 为烟气 $\text{CO}_2$ 排放速率,t/h。

$$R = 44\varphi(\text{CO}_2)V_N/(22.4 \times 10^5), \quad (3)$$

式中, $\varphi(\text{CO}_2)$ 为干基 $\text{CO}_2$ 体积分数,%,为实际或缺数据; $V_N$ 为烟气标干流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ,参照HJ75—2017通过环保测点的温压流湿仪表监测数据计算获取。

关于 $\text{CO}_2$ 排放量数据异常时的补缺方法可参考DL/T 2376—2021,详见表2,主要以异常时段前某

表2 维护期间和其他异常导致 $\text{CO}_2$ 排放量数据无效时段处理方法

Table 2 Completion methods for invalid  $\text{CO}_2$  emission data caused by maintenance periods, and other abnormalities

季度有效数据 捕集率/%	连续无效 时间/h	选取值
$\geq 90$	0~<24	上次校准前180个有效小时排放量最大值
	$\geq 24$	上次校准前720个有效小时排放量最大值
90~75	—	上次校准前2160个有效小时排放量最大值

个时间内的有效小时排放量最大值来填充补缺,该标准中定义系统超期未校准的时段视为数据失控时段,本研究仪表未出现超期未校准情况,因此仅参考系统有计划(质量保证/质量控制)的维护保养、校准及其他异常导致的数据无效时段的处理方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同机组 $\text{CO}_2$ 体积分数与运行特征

通过采集正常状态实测数据作为基准值,图1为不同机组 $\text{CO}_2$ 与 $\text{O}_2$ 体积分数实测数据,不同机组的运行特征与烟气 $\text{CO}_2$ 体积分数水平有显著差异。可知燃气机组启停机操作较燃煤机组更频繁,可能由于该地区调峰需求极高,故调度分配了更多调峰任务给可快速启停的燃气机组而不是燃煤机组<sup>[19]</sup>。

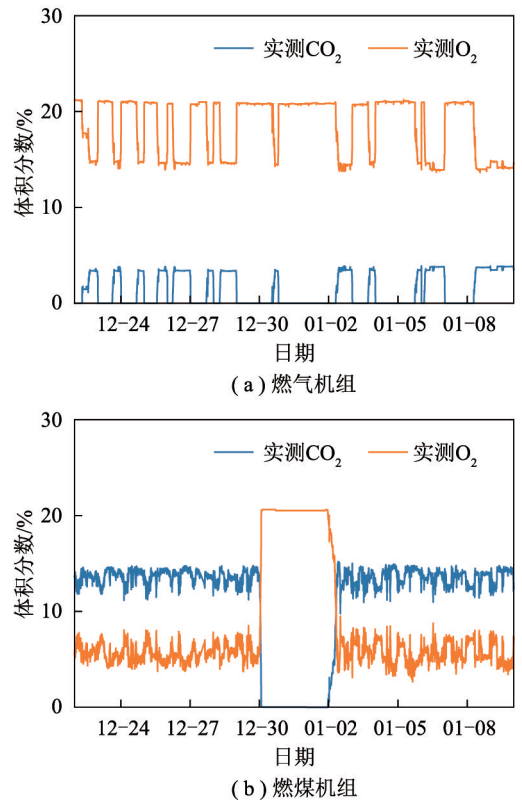


图1 不同机组 $\text{CO}_2$ 与 $\text{O}_2$ 体积分数实测数据

Fig.1 Actual  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  volume fraction of different units

燃气机组 $\text{CO}_2$ 体积分数较燃煤机组的低且数值曲线更稳定,稳定运行时燃煤机组烟气中 $\text{CO}_2$ 体积分数在11%~16%抖动,而燃气机组中在3%~4%稳定维持,这是由2种机组的燃料性质决定的,典型动力煤单位热值含碳量(33.6 t/TJ)比天然气的单位热值含碳量(15.3 t/TJ)大得多,故燃煤燃烧后烟气中 $\text{CO}_2$ 体积分数更高<sup>[5]</sup>。此外,两机组 $\text{CO}_2$ 与 $\text{O}_2$ 体积分数在变化时均呈显著负相关关系,当 $\text{CO}_2$ 体积分数升高时, $\text{O}_2$ 体积分数同步下降,这反映燃料燃烧

中C与O<sub>2</sub>反应转化为CO<sub>2</sub>的过程。

图2将两机组CO<sub>2</sub>体积分数数据通过负荷率该指标合并展示,可更显著地看出,燃气机组CO<sub>2</sub>体积分数较燃煤机组的在全负荷段范围都低。随负荷率升高,两机组CO<sub>2</sub>体积浓度均呈低负荷快速升高、中高负荷缓慢升高规律,与机组的燃料投加量和烟气流量增速直接相关,低负荷时为助燃,空气供给往往较过量,中高负荷为了稳燃和节能则适当过量<sup>[20]</sup>。

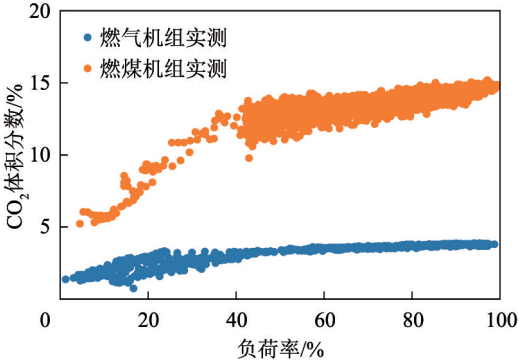


图2 不同负荷率时CO<sub>2</sub>实测数据

Fig.2 Actual CO<sub>2</sub> volume fraction of different load rates

为进一步量化不同机组的运行与CO<sub>2</sub>排放特性,对图2的数据点进行分负荷率段累积分析,得到数据量分布情况,如图3所示。分停机、低负荷、中高负荷三段精确量化统计两机组的状态时长比例与

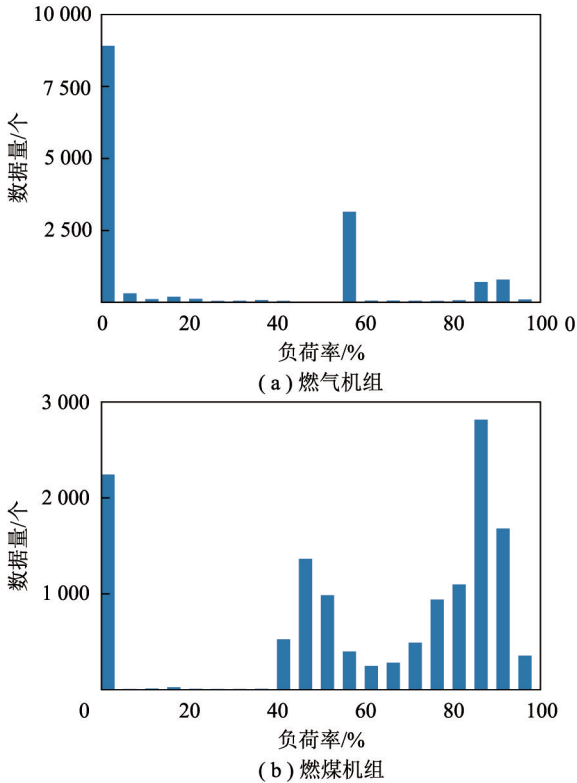


图3 不同机组的监测数据点累积分布

Fig.3 Cumulative distribution of monitoring data points for different units

CO<sub>2</sub>体积分数范围,结果见表3。

表3 不同状态的时长比例及其CO<sub>2</sub>体积分数

Table 3 Duration proportion and range of CO<sub>2</sub> volume fraction of different states

负荷率 /%	时长比例/%		CO <sub>2</sub> 体积分数/%	
	燃气	燃煤	燃气	燃煤
≤2.5	59.50	16.60	0~1.8	0~5.5
>2.5~40.0	6.20	0.60	1.8~3.4	5.0~13.0
>40.0~70.0	22.41	28.18	2.8~3.6	11.0~13.0
>70.0~100.0	11.88	54.64	3.6~4.0	13.0~16.0

由图3可知燃气机组尽管启停频繁,但主要集中在55%负荷率与90%负荷率左右稳定运行,燃煤机组启停不频繁,但运行时负荷率不稳定,在40%~100%大范围调整,与电网调度和燃煤品质变化有关,40%也作为表3统计时中高负荷的下限阈值。

从表3工况分段可知在本研究的数据时段内,燃气机组停机备用更多,时长比例59.5%,而燃煤机组仅16.6%,另一方面,燃气机组正常稳燃发电时长占比相对低,仅34.3%,燃煤机组该数据达82.8%。3个分段中CO<sub>2</sub>体积分数范围相互衔接与部分重叠,每段中燃煤机组CO<sub>2</sub>体积分数为燃气机组CO<sub>2</sub>体积分数数值的3~4倍。因此综合机组的运行与CO<sub>2</sub>体积分数排放特征,在考察异常数据补缺问题时,同一补缺方法在燃气机组与燃煤机组上可能存在不同的适用性与情况。

为便于精细观察各补缺方法效果,基于图1中CO<sub>2</sub>体积分数与图3负荷率变化,将样本数据划分为高负荷稳燃阶段、中负荷稳燃阶段、启动阶段和停机阶段共4个工况,见表4。

表4 样本数据工况划分方式

Table 4 Working condition classification methods for sample data

工况	CO <sub>2</sub> 体积分数/%		负荷率/%	
	燃气	燃煤	燃气	燃煤
高负荷稳燃	3.6~4.0	13.0~16.0	70~100	70~100
中负荷稳燃	2.8~3.6	11.0~13.0	40~70	40~70
启动	0→3.6	0→14.0	0→80	0→80
停机	3.6→0	14.0→0	80→0	80→0

## 2.2 系数φ(CO<sub>2</sub>)<sub>max</sub>适用性

系数φ(CO<sub>2</sub>)<sub>max</sub>在燃气机组与燃煤机组烟气换算时尽管取缺省值不同,但均为定值,考虑到机组工况和燃烧情况并非稳态,φ(CO<sub>2</sub>)<sub>max</sub>也可能有所变化。为考察缺省值是否偏离真实的燃料燃烧最大CO<sub>2</sub>体积分数,利用实测CO<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>体积分数数据与

式(1)反演算,得到实际  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ ,结果如图4所示。

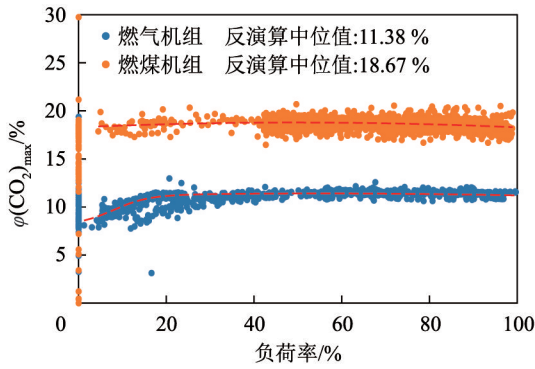


图4 反演计算的  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  系数分布

Fig.4 Distribution of  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  with inverse calculation

两机组烟气数据反演算出的实际  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  不同负荷率时均不是固定值,分布规律不同。燃煤机组的反演算  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  数据散布上下限差异约4%,在负荷率方向上总体变化小,整体反演算数据的中位值18.67%,与缺省值相差小,仅0.03%。燃气机组的反演算  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  数据在负荷率方向上变化存在两段显著差异,20%负荷率以下时,反演算  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  随负荷率上升而逐渐上升,散布上下限差异约5%,20%负荷率以上时,反演算  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  随负荷率上升基本稳定,散布上下限差异约2%,整体反演算数据的中位值11.38%,与缺省值差0.12%。侧面说明,燃气机组与燃煤机组在低负荷启停阶段的燃烧情况可能存在较大差异,考虑到该机组在低负荷启停时烟气中能检测出CO,推测低负荷时可能供氧不足,天然气中C未完全燃烧转化为CO<sub>2</sub>,导致图4中低负荷燃气机组的最大CO<sub>2</sub>体积分数  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  比高负荷时低得多。

为进一步分析  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  影响,以实测CO<sub>2</sub>体积分数基准按5%负荷率梯度,统计  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  取缺省与图4中反演算中位值时  $\varphi(\text{CO}_2)_{\text{trans}}$  相对真实值的偏离情况,结果如图5所示,其中反演算  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  中位值换算的数据对应结果标记为“修正”。

由图5可知不同机组中按缺省值与修正值得到  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  相对实际CO<sub>2</sub>体积分数的相对偏差变化趋势非常接近,总体中位值也相差小。燃气机组中相对偏差在负荷率20%以下时较明显,燃煤机组中相对偏差在90%以上负荷率时较明显,但也都在±2%以内。因此结合图32种机组主要运行在40%~90%负荷率特点,可认为利用  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  转换补缺的方法在燃气与燃煤机组长周期运行中是可行的。

图5(b)燃煤机组在90%以上负荷率时相对偏差反而大幅上升。考虑到该机组在此种工况时烟气

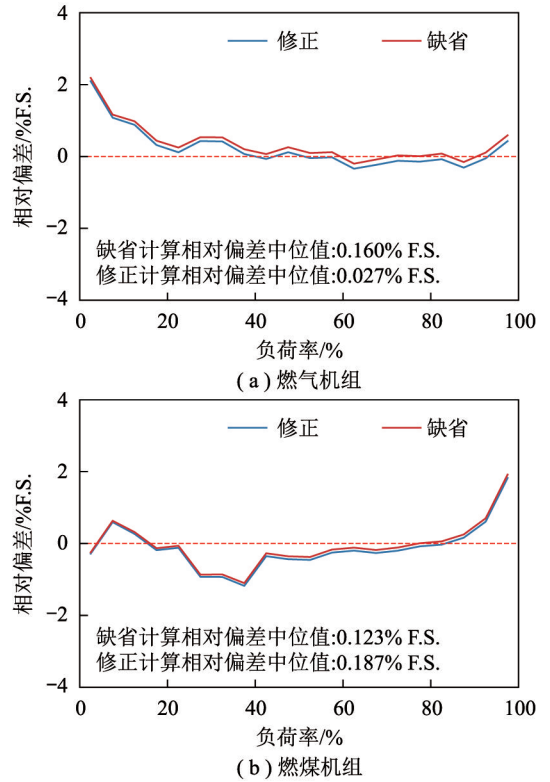


图5 基于  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  中位值计算CO<sub>2</sub>体积分数相对偏差

Fig.5 Relative deviation of CO<sub>2</sub> volume fraction based on median calculation of  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$

中未检测出CO,可排除碳氧化率不足的原因,因此这种相对偏差扩大的原因有可能为负荷与燃煤给粉速率到达最大极限后,炉膛内温度与碳氢化合物燃料浓度均达最大,触及热力型NO<sub>x</sub>与快速型NO<sub>x</sub>生成条件,增加O<sub>2</sub>消耗,使燃煤机组在90%以上负荷率时式(1)换算得到  $\varphi(\text{CO}_2)_{\text{trans}}$  结果偏大<sup>[21]</sup>。

### 2.3 中高负荷稳燃段瞬时数据补缺

为探究不同补缺方法在中高负荷稳燃段的效果差异,以燃气机组与燃煤机组负荷较稳定的时段数据作为正常基准,选取其中1h区间数据进行瞬时数据模拟补缺,高负荷稳燃阶段CO<sub>2</sub>体积分数补全曲线及该补缺段不同方法计量CO<sub>2</sub>排放量情况如图6所示,中负荷稳燃阶段的结果如图7所示。

由图6中可知同一补缺方法在2种机组高负荷时的模拟补缺效果有一定差异。对于燃气机组,图6(a)中3种补缺方法模拟补缺曲线有较明显差异,缺省方法曲线明显偏低,保持与修正方法补缺曲线在正常曲线变化内,结合图6(c),可知该小时时段内修正方法补缺后CO<sub>2</sub>排放量最接近正常基准,仅差0.38 kg,缺省方法补缺后CO<sub>2</sub>排放量低于正常值2 kg。而在图6(b)燃煤机组中,这3种模拟补缺曲线都较接近正常曲线,未明显偏离正常曲线抖

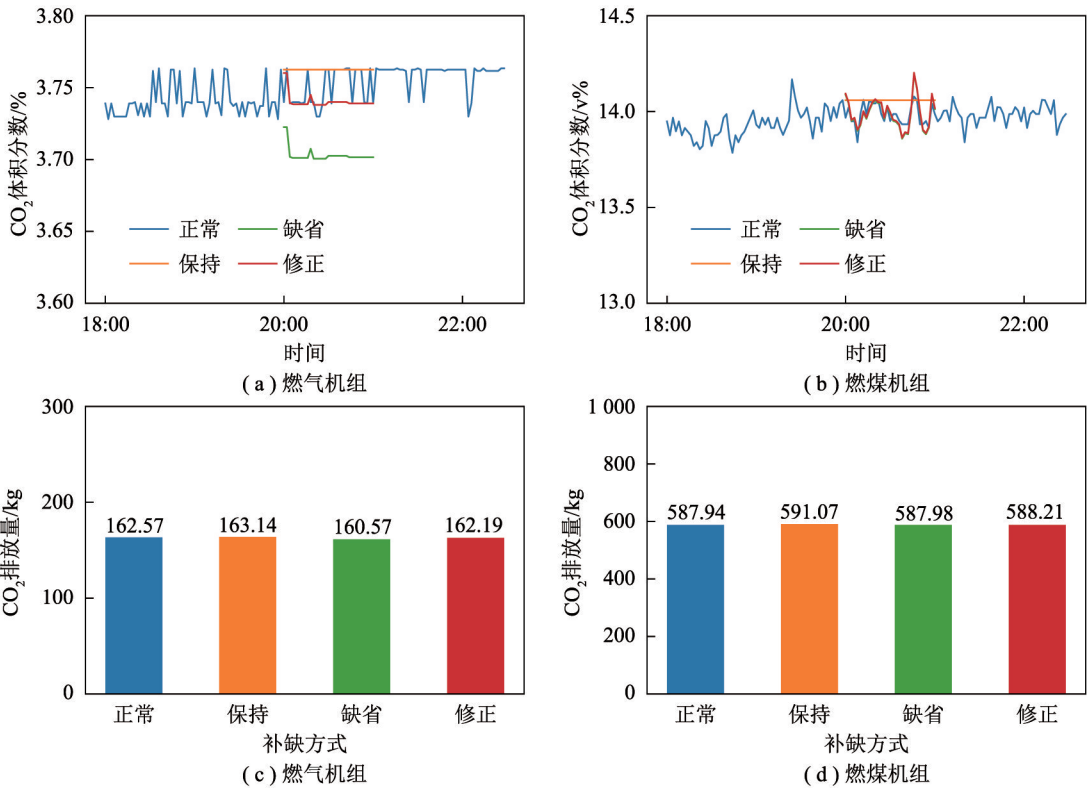


图6 高负荷稳燃阶段不同方法数据补缺效果

Fig.6 Data imputation effect of different methods in high-load stable combustion stage

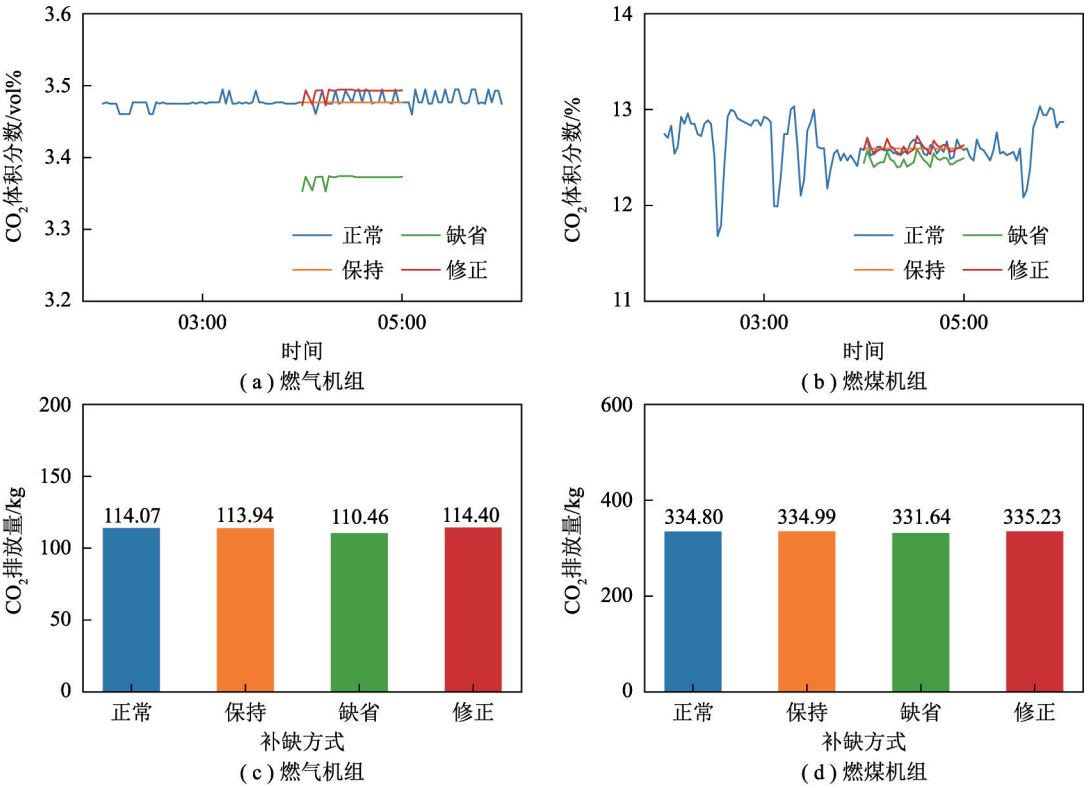


图7 中负荷稳燃阶段不同方法数据补缺效果

Fig.7 Data filling effect of different methods in the stage of medium load stable combustion

动范围,结合图6(d),可知该小时时段内缺省方法补缺后CO<sub>2</sub>排放量最接近正常基准,仅差0.04 kg,

保持方法补缺后CO<sub>2</sub>排放量高于正常值3.13 kg。在图7中负荷条件时,同一补缺方法在2种机组的

模拟补缺效果与高负荷时不完全一致。对于燃气机组,缺省方法曲线明显偏低,小时时段内保持方法补缺后  $\text{CO}_2$  排放量最接近正常基准,仅差 0.13 kg,缺省方法补缺后  $\text{CO}_2$  排放量低于正常值 3.61 kg。对于燃煤机组,缺省方法曲线明显偏低,小时时段内保持方法补缺后  $\text{CO}_2$  排放量最接近正常基准,仅差 0.19 kg,缺省方法补缺后  $\text{CO}_2$  排放量高于正常值 3.

16kg。2种高负荷情况,不同补缺方法 1 h 补缺效果接近,未出现显著区别,仅能看出缺省补缺在燃气机组的数据补缺效果相对差。

## 2.4 启停段瞬时数据补缺

以相似方法获取启动段  $\text{CO}_2$  体积分数补全曲线及该补缺段不同方法计量  $\text{CO}_2$  排放量情况如图 8 所示,停机段的结果如图 9 所示。

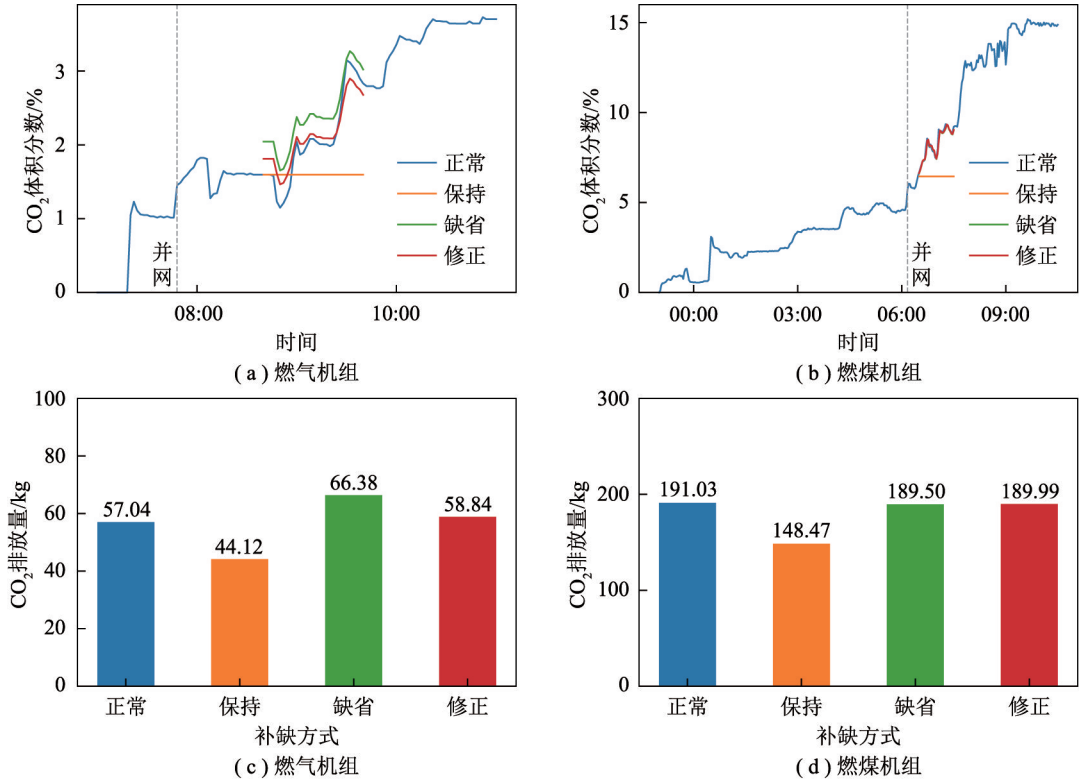


图 8 启动阶段不同方法数据补缺效果

Fig.8 Data filling effect of different methods in the start-up stage

由图 8、9 可知,不同补缺方法补缺效果出现显著差异。在图 8 中,在启机并网后,修正方法对燃气机组数据的补缺效果最好, $\text{CO}_2$  排放量仅差 1.8 kg,缺省方法导致  $\text{CO}_2$  排放量偏大 9.34 kg,而保持方法导致  $\text{CO}_2$  排放量偏小 12.92 kg。对燃煤机组而言,缺省与修正方法均有较好补缺效果,而保持方法补缺效果最差,补缺后  $\text{CO}_2$  排放量比正常值偏小 42.56 kg。

在图 9 中,对燃气机组而言,在停机解列前,缺省与修正方法对数据的补缺效果最好,偏差小于 2 kg,而保持方法会导致  $\text{CO}_2$  排放量偏大 15.95 kg。对燃煤机组而言,缺省与修正方法均表现出较好的补缺效果,偏差小于 4 kg,保持方法补缺后  $\text{CO}_2$  排放量比正常值偏大 60 kg。综合图 8 与图 9,可知无论燃气还是燃煤机组,保持方法在启停阶段的补缺效果均差,使用  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  缺省值补缺在燃煤机组效果好,使用  $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$  修正值补缺在燃气机组效果好。

为提高数据与结论的代表性,基于图 8 模拟方法,进一步对不同启动阶段与停机阶段(负荷不同,单位小时正常  $\text{CO}_2$  排放量有显著差异)的补缺方法效果进行模拟与平均偏差计算,结果见表 5、表 6,发现结论与图 8、图 9 数据讨论结论无异。

## 2.5 长周期碳排放量影响分析

除瞬时数据补缺外,还有一个重要指标是碳排放量,本节以 3 种瞬时数据补缺方法结合表 2 的历史最高小时排放量补缺方法进行模拟。本节假设连续无效小时数 < 24 h,可用表 2 中前 180 个有效小时排放量最大值进行补缺,采集区间内的最大小时碳排放量如图 10 所示,补缺后对应计算数据标记为“180 h 最大”。

将表 5、表 6 中小时碳排放量偏差数据进行汇总,可知典型工况下不同补缺方法对燃气机组与燃煤机组的小时碳排放量影响水平数据,见表 7、表 8。

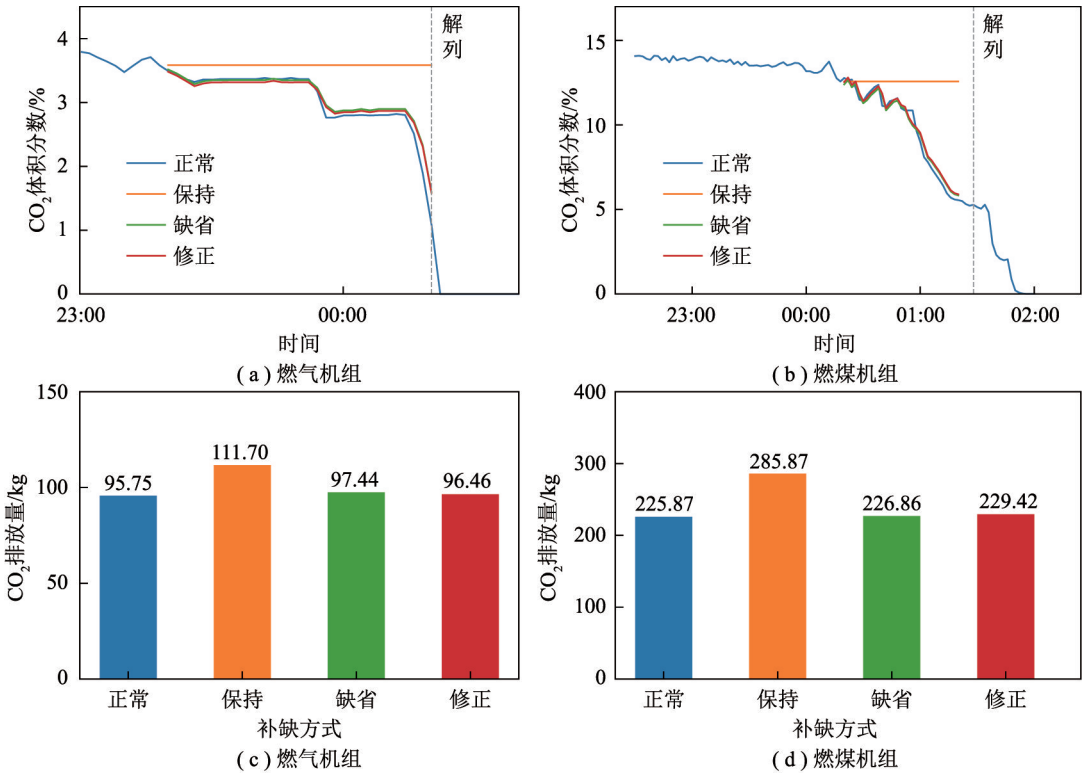


图9 停机阶段不同方法数据补缺效果

Fig.9 Data imputation effects of different methods in shutdown stage

表5 不同启动阶段不同补缺方法对燃气机组小时碳排放量数据影响水平

Table 5 Impact of different compensation methods on hourly carbon emission data of gas turbine units during different start-up stage

机组	小时碳排放量/(kg·h <sup>-1</sup> )			
	正常	保持	缺省	修正
燃气	108.00	90.55	112.52	99.73
	57.04	44.12	66.38	58.84
	39.53	29.05	51.35	45.51
	平均偏差	-13.62	8.56	-0.16
燃煤	463.46	444.76	460.20	461.40
	191.03	148.47	189.50	189.99
	108.77	101.08	111.19	111.48
	平均偏差	-22.98	-0.79	-0.13

表6 不同停机阶段不同补缺方法对燃气机组小时碳排放量数据影响水平

Table 6 Impact of different compensation methods on hourly carbon emission data of gas turbine units during different shutdown stage

机组	小时碳排放量/(kg·h <sup>-1</sup> )			
	正常	保持	缺省	修正
燃气	95.75	111.7	97.44	97.36
	76.92	86.87	79.52	78.72
	58.58	70.28	61.07	60.45
	平均偏差	12.53	2.26	1.76
燃煤	405.26	420.12	401.53	406.07
	225.87	285.87	226.86	229.42
	92.92	201.01	102.70	103.86
	平均偏差	60.98	2.350	5.100

由表5可知对于燃气机组4个不同工况阶段,取180h最大值补缺的小时碳排放量偏差最大,其次是保持前值与缺省 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ ,而修正 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 换算补缺的方法效果最优,其最大偏离小于2kg/h。对于表6中燃煤机组4个不同工况阶段,取180h最大值补缺的小时碳排放量偏差最大,次之为保持前值,2种基于 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 换算补缺的方法效果最优,其最大偏离小于4kg/h。

基于表7、表8的小时碳排放量偏差数据,参考常见机组验收稳定运行时长最少168h的要求,假设CO<sub>2</sub>体积分数数据异常间隔为168h,即每月最多4次数据异常,4h中,各工况出现概率参考表3,其中启、停阶段概率按1:1参考2.5%~40.0%负荷率时长占比,高、中负荷稳燃阶段按参考40%~100%负荷率时长占比,假设常维人员1h内响应并解决问题,即每次异常持续1h,可模拟4种不同数据补缺方法对月碳排放量影响期望,结果见表9,其中停



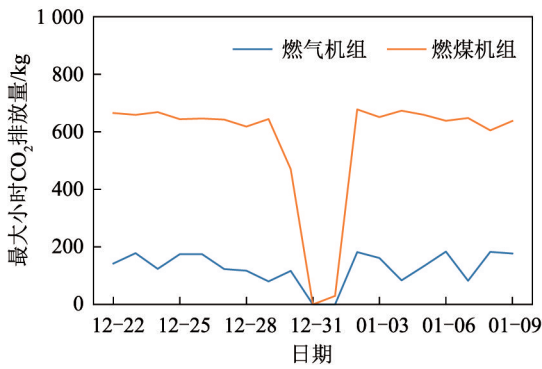


图10 每日最大小时碳排放量烟气实测数据

Fig.10 Measured data of flue gas with daily maximum hourly carbon emission

机状态按无烟气排放计算。

表7 典型工况不同补缺方法对燃气机组小时碳排放量数据影响水平

Table 7 Impact of different compensation methods on hourly carbon emission data of gas turbine units under typical working conditions

工况	小时碳排放量/(kg·h <sup>-1</sup> )			
	保持	缺省	修正	180 h 最大
高	0.57	-2.00	-0.38	21.09
中	-0.13	-3.61	0.33	69.59
启	-13.62	8.56	-0.16	126.62
停	12.53	2.26	1.76	79.05

表8 典型工况不同补缺方法对燃煤机组小时碳排放量数据影响水平

Table 8 Impact of different compensation methods on hourly carbon emission data of coal-fired units under typical operating conditions

工况	小时碳排放量/(kg·h <sup>-1</sup> )			
	保持	缺省	修正	180 h 最大
高	3.13	0.03	0.27	89.94
中	0.19	-3.16	0.43	343.08
启	-22.98	-0.79	-0.13	482.34
停	60.98	2.35	5.10	452.01

表9 不同补缺方法对机组月碳排放量影响期望

Table 9 Expected deviations in monthly carbon emissions for different compensation methods

机组	月碳排放量/t			
	保持	缺省	修正	180 h 最大
燃气	0.02	-2.84	0.31	97.91
燃煤	7.51	-3.48	1.13	594.50

由表9可知2种机组条件,取机组反演算中位值的修正方法补缺后数据最接近正常数据,1个月内造成的碳排放量偏差均小于1.5 t,可认为 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 换算的方法是有效且适用的,当前 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 缺省

值的取值依据和参考数据仍有进一步优化的空间,这种补缺方法从数据准确性角度来说上是合适的。

从行业管控与促进企业加强运维管理角度出发,取180 h最大值补缺的方法尽管使数据大幅偏离真实数据,却是碳数据管理部门对企业较有效惩罚性管理手段。但当烟气监测法在火电行业大范围推广后,随着其计量总量增加,不同补缺方法带来的行业或地区总量偏差会变得不可忽视,尤其是按历史180 h最大值补缺会大幅度提高统计总量,会导致我国在国际层面碳相关事项谈判或交易时在高估火电行业总量情况,此时用 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 换算的方法更合理。因此未来相关烟气碳排放监测技术规范或法规的制定者或学者势必需从准确度、企业管理、边境谈判等多个维度进行综合考虑。

### 3 结论

1) 燃气机组 $\text{CO}_2$ 体积分数较燃煤机组的低且数值曲线更稳定,稳定运行时燃煤机组烟气中 $\text{CO}_2$ 体积分数在11%~16%波动,而燃气机组中在3%~4%稳定维持。

2) 两机组反演算出的实际 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 不同负荷率时均不是固定值,分布规律不同。燃煤机组的反演算 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 数据散布在负荷率方向上总体变化小,整体反演算数据的中位值18.67%,与缺省值相差小。燃气机组的反演算 $\varphi(\text{CO}_2)_{\max}$ 数据在负荷率方向上变化存在两段显著差异,40%负荷率以下时随负荷率上升而逐渐上升,40%负荷率以上时随负荷率上升基本稳定。

3) 中、高负荷2种情况,不同补缺方法1 h补缺效果接近,无显著区别,缺省补缺在燃气机组的数据补缺效果相对差。无论燃气还是燃煤机组,保持方法在启停阶段的补缺效果均差,缺省值补缺在燃煤机组效果好,修正值补缺在燃气机组效果好。在长周期考察时,取机组反演算中位值的修正方法补缺后数据最接近正常数据,1个月内造成的碳排放量期望偏差均小于1.5 t,这种补缺方法从数据准确性角度合适。

4) 取180 h最大值补缺的方法是碳数据管理部门对企业较有效惩罚性管理手段,但当烟气监测法在火电行业大范围推广后,可能会导致我国在国际层面碳相关事项谈判或交易时在高估火电行业总量情况。因此未来相关烟气碳排放监测技术规范或法规的制定者或学者势必需从准确度、企业管理、边境谈判等多个维度进行综合考虑。

## 参考文献(References):

- [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 neutralization [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 51-61.
- [4] 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[EB/OL]. (2022-12-22) [2024-04-03]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/W020221221671986519778.shtml>.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 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.
- [8] 国家能源局. 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范: DL/T 2376—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [9] 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. Domestic and international statistical methods and quality control status for carbon emission from fossil-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 54-60.
- [10] 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, 176.  
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, 176.
- [11] 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.
- [12] 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[EB/OL]. (2023-05-26) [2024-04-03]. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526\\_983531.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202205/t20220526_983531.shtml).
- [13] 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) [2024-04-03]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0531/c1004-40003028.html>.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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比对[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.
- [17] 李小龙, 李军壮, 郑成强, 等. 烟气流速与流量手工监测方法现状与探讨[J]. 化工进展, 2024, 43(7): 4032-4042.  
LI Xiaolong, LI Junzhuang, ZHENG Chengqiang, et al. Current situation and discussion of manual monitoring methods of flue gas velocity and flow rate [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(7): 4032-4042.
- [18] 金晶岚. 燃煤机组参与深度调峰消纳可再生能源的可行性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [19] 林俐, 田欣雨, 蔡雪瑄. 考虑附加成本的燃气机组深度调峰及电力系统能源效率[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 16-23.  
LIN Li, TIAN Xinyu, CAI Xuexuan. Gas unit deep peak regulation and power system energy efficiency in consideration of conditional cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 16-23.
- [20] 项群扬, 郎宁, 蔡毅, 等. 大型燃煤电站锅炉碳氧化率试验研究[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 24-28.  
XIANG Qunyang, LANG Ning, CAI Yi, et al. Experimental study on carbon oxidation rate of large-scale coal-fired stations [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 24-28.
- [21] 王晶, 廖昌建, 王海波, 等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 99-114.  
WANG Jing, LIAO Changjian, WANG Haibo, et al. Research progress of low-NO<sub>x</sub> combustion technology for boilers [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 99-114.