

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404127

# 燃气电厂碳排放量在线监测法不确定度评定

陈公达<sup>1</sup>, 傅诗万<sup>2</sup>, 蔡秀霞<sup>2</sup>, 黄泳如<sup>3</sup>, 邹祥波<sup>1,4</sup>, 叶 骥<sup>1</sup>,

秦士伟<sup>1</sup>, 卢伟业<sup>5</sup>, 陈小玄<sup>5</sup>, 卢志民<sup>3</sup>, 姚顺春<sup>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.华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

4.广东省能源集团有限公司, 广东 广州 510730;

5.广东省特种设备检测研究院顺德检测院, 广东 佛山 528300)

**[摘 要]** 碳市场的稳定运行依赖于碳排放数据的准确性, 在线监测法作为碳排放数据核算的主要方法, 其数据质量仍有待提高。不确定度评定是碳排放测量体系建设以及数据质量控制的重要环节, 为了评估和提高碳排放在线监测系统数据质量, 对某 F 级燃气机组的碳排放量在线监测数据进行不确定度评估。结果表明, 碳排放量扩展不确定度为 4.838%~5.012% (包含因子  $k=2$ ), 碳排放测量不确定度主要来源于烟气流速测量, 其中速度场系数检测是烟气流速测量不确定度高的主要原因, 且运行负荷对碳排放测量结果无明显影响。因此, 提高烟气流速和 CO<sub>2</sub> 测量仪器的精度或定期进行校准试验能有效降低碳排放测量不确定度, 从而提高数据质量。

**[关 键 词]** 燃气电厂; 在线监测; 碳排放量; 不确定度

**[引用本文格式]** 陈公达, 傅诗万, 蔡秀霞, 等. 燃气电厂碳排放量在线监测法不确定度评定[J]. 热力发电, 2025, 54(1): 145-152. CHEN Gongda, FU Shiwan, CAI Xiuxia, et al. Carbon emission uncertainty assessment by CEMS in gas-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(1): 145-152.

## Carbon emission uncertainty assessment by CEMS in gas-fired power plants

CHEN Gongda<sup>1</sup>, FU Shiwan<sup>2</sup>, CAI Xiuxia<sup>2</sup>, HUANG Yongru<sup>3</sup>, ZOU Xiangbo<sup>1,4</sup>, YE Ji<sup>1</sup>,

QIN Shiwei<sup>1</sup>, LU Weiye<sup>5</sup>, CHEN Xiaoxuan<sup>5</sup>, LU Zhimin<sup>3</sup>, YAO Shunchun<sup>3</sup>

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

2.Guangdong Yuehua Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 510730, China;

3.School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

4.Guangdong Energy Group Co., Ltd., Guangzhou 510730, China;

5.Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research Shunde Branch, Foshan 528300, China)

**Abstract:** The stable operation of carbon market depends on the accuracy of carbon emission data, and the data quality of continuous emission monitoring system (CEMS), as an adjunct to the accounting method, still needs to be improved. Uncertainty assessment is an important part of the construction of CEMS and data quality control. To assess and improve the data quality of CEMS, the uncertainty assessment of the carbon emission online monitoring data of an F-class gas unit was carried out. The results show that, the extended uncertainty of carbon emissions is 4.838%~5.012% ( $k=2$ ), and the main source of uncertainty is the flow rate measurement, in which the velocity field coefficient detection is the main reason for the high uncertainty in the flow rate measurement, and the operating load does not have a more obvious effect on the results. Therefore, improving the accuracy of flow rate and concentration measurement instruments or conducting regular calibration tests can effectively reduce the

收稿日期: 2024-04-28 网络首发日期: 2024-11-22

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, 高级工程师, 主要研究方向为火电 CCUS 技术、碳计量技术、烟气污染物控制技术、工业数据挖掘, chengongda@geg.com.cn.

通信作者简介: 姚顺春(1983), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源清洁转化过程的智能感知和调控, epscyao@scut.edu.cn.

uncertainty and improve data quality.

**Key words:** gas-fired power plant; online monitoring; carbon emission; uncertainty

碳市场是落实“碳达峰、碳中和”目标的重要工具，也是推动绿色低碳发展的重要举措，全国碳市场自 2021 年正式启动以来，截至 2023 年 6 月碳排放配额累计成交量达到 2.38 亿 t<sup>[1]</sup>，已是全球规模最大的碳市场。碳交易市场和机制高效运行发展的重要基础是客观、准确且具有公信力的碳排放数据。碳排放量量化方法主要分为核算法与在线监测法，其中核算法是我国现行的碳计量方法。核算法具有时效性差、易造假等缺陷，不利于碳交易市场的稳步运行；而在线监测法具有时效性高、数据同步上传等优势，成为提高碳排放数据时效性与准确性的方法之一。生态环境部提出遵循“核算为主、监测为辅”的原则，并首先在火力发电行业进行在线监测法应用的探索。在线监测法近年来在国内发展迅速，但是其与核算法的可比性较差，2 种方法的计量结果之间仍存在偏差<sup>[2-4]</sup>。在线监测法的测量点一般位于烟囱，而大多数烟囱管道直径较大，内部烟气流动复杂，这样会造成烟气流量测量的不准确<sup>[5]</sup>，从而降低在线监测数据的质量。

发电行业是最主要的碳排放行业，也是首批纳入碳交易市场的重点行业之一，但其在线监测法与核算法的碳排放量结果之间存在一定差异。国外对这方面研究时间较长并累积了大量分析案例，基于大样本的碳排放量偏差不大，基本在 6% 以内<sup>[6-8]</sup>；对于个别电厂或机组，2 种方法碳排放量计量结果存在较大的差异，最大偏差能达到 30% 以上<sup>[7,9-10]</sup>。在线监测法在国内也在稳步发展，不少学者对在线监测设备、数据可比性等方面进行研究，发现 2 种碳计量方法之间仍有一定的差异<sup>[11-15]</sup>。因此需要首先实现对 CO<sub>2</sub> 排放量进行准确可靠的计量，并设定适当的不确定性水平，为其他行业提供参考。

欧美国家在线监测技术发展较为成熟，特别是在数据质量评定上。欧盟虽然以核算法作为主要碳排放量计算方法，但仍对烟气在线连续监测系统（CEMS）的数据质量要求做出规定，对不同排放量排放源不确定度要求在 2.5%~10.0%<sup>[16-18]</sup>。对于 CO<sub>2</sub> 的数据质量，文献几乎一致认为其数据不确定度较低，一般在 0~2% 之间<sup>[7,9-10]</sup>；而对于烟气流速的数据质量，由于实际环境复杂，烟囱直径较大，流速测量数据采集时可能会存在较大的不稳定性，不确定度在 0~10% 之间<sup>[9-10,19]</sup>。Bryant 等人<sup>[19]</sup>在模

拟固定污染源排放的管道中利用皮托管进行流速测量，并对测量结果进行不确定度分析，结果表明，在低流速时压差测量的不确定度较大导致对流速不确定度影响较大。Kang 等人<sup>[20]</sup>使用误差传递法和蒙特卡洛法评定 S 型皮托管测量烟气流量的不确定度，考虑皮托管系数、动力压差、烟气温度、烟囱直径等参数分析不确定度来源，发现其不确定度的主要来源是流速测量。Lee 等人<sup>[10]</sup>评估在线监测法对某企业温室气体排放量计量时的不确定度，结果显示，不确定度主要源于体流量的测量，而这其中动力压差所引入的不确定度最大。在碳排放量在线监测过程中，流量的不确定度较大使得在线监测法的数据质量仍有待提升。

2023 年 2 月 6 日，国务院印发《质量强国建设纲要》提出，建立健全“碳达峰、碳中和”目标标准计量体系，推动建立国际互认的碳计量基准、碳监测及效果评估机制。不确定度评定是碳排放量体系建设以及数据质量控制的重要一环。相比之下，国内的研究起步晚，少量评定 CEMS 不确定度的研究，大都集中于气体浓度测量方面<sup>[21-24]</sup>，包括污染物浓度与 CO<sub>2</sub> 浓度。仅有极少数学者对燃煤机组的碳排放量不确定度及其来源进行分析研究。杨美昭<sup>[25]</sup>基于误差传递法建立不确定度分析模型，对比分析若干燃煤发电企业不同方法下得到的碳排放量及其不确定度，发现在线监测法结果的不确定度最小，其扩展相对不确定度在 4.96%~5.22%，且流量测量的精度是不确定度的主要来源。对于不同电厂的不同机组，碳排放在线测量的不确定度来源可能有所差异。郭振等<sup>[26]</sup>通过搭建碳排放连续在线监测平台模拟在线监测过程并评定其结果的不确定度，结果表明不确定度主要来源是环境温度引起的系统误差。这与前述论文结果有差异，说明不同的在线监测系统在运行过程中碳排放量测量的不确定度主要来源有所不同。

目前国内对于火电机组碳排放量的研究主要针对燃煤机组，对燃气机组的研究相对较少，且主要是使用蒙特卡洛模型对核算碳排放数据进行不确定度评定<sup>[27]</sup>。不仅少有在线监测法碳排放量不确定度的分析，也缺少机组运行负荷对碳排放量不确定度量化影响的研究。因此，有必要对企业或者机组在线监测法的不确定度进行量化并分析具体的

不确定度来源,以提高碳排放数据的质量,保障碳交易市场的稳定运行,同时可以为企业提供更完善的在线监测数据质量的思路。本文以某 423 MW F 级燃气机组为例,评定其碳排放在线监测数据的不确定度,分析其中主要不确定度来源,并探究负荷对不确定度评定的影响。

## 1 碳排放量不确定度评定方法

### 1.1 不确定度评定方法

本文使用误差传递法 (guide to the uncertainty in measurement, GUM) 评定在线监测法碳排放量的不确定度,根据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)<sup>[28]</sup>,不确定度分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

A 类不确定度是对测量数据进行统计分析的方法,以实验标准偏差作为表征。估计值的标准不确定度  $u(\bar{x})$  计算公式为:

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为第  $i$  次测量结果;  $\bar{x}$  为测量结果的平均值;  $n$  为测量次数。

B 类不确定度评定是用不同于 A 类不确定度评定的方法对测量不确定度分量进行评定,可以基于测量仪器的校准证书、检定报告或出厂说明书等。通常情况下需要假设被测量的概率分布,根据概率分布和概率来确定包含因子  $k$ ,其标准不确定度计算公式为:

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad (2)$$

式中:  $u(x_i)$  为测量值的标准不确定度;  $a$  为被测量可能值区间的半宽度,对于一般测量仪器是量程与精度乘积;  $k$  为对应包含概率的包含因子。

在碳排放量的计算中,一般认为各个不确定度是不相关的,可以由式(3)得到合成不确定度:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum u^2(x_i)} \quad (3)$$

式中:  $u_c(y)$  为测量值的合成不确定度。

求得合成不确定度后,为了使测量结果大部分落于某区间内,通常按式(4)求扩展不确定度:

$$U = u_c(y) \times k \quad (4)$$

式中:  $U$  为被测量的扩展不确定度,%;  $k$  为包含因子,对于不确定度分量较多且大小接近时,可估计为正态分布,在 95% 的包含概率下,  $k=2$ 。

### 1.2 碳排放量测量模型

CO<sub>2</sub> 排放速率计算公式为:

$$E = Q \times c(\text{CO}_2) \times 10^{-9} \quad (5)$$

式中:  $E$  为 CO<sub>2</sub> 排放速率, t/h;  $Q$  为平均标干流量, m<sup>3</sup>/h;  $c(\text{CO}_2)$  为一段时间内的平均 CO<sub>2</sub> 质量浓度, mg/m<sup>3</sup>。

干烟气流量计算公式为:

$$Q = S \times v \times \frac{p}{101325} \times \frac{273.15}{T} \times (1 - \varphi_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (6)$$

式中:  $S$  为测量截面面积, m<sup>2</sup>;  $v$  为平均流速, m/s;  $p$  为烟气压力, Pa;  $T$  为烟气温度, K;  $\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$  为烟气湿度, %。

该电厂流速测量原理为皮托管差压法,皮托管测量流速计算公式为:

$$v = k_p \sqrt{\frac{2\Delta p_d}{\rho_s}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta p_d$  为压差, Pa;  $\rho_s$  为烟气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $k_p$  为皮托管系数,在本文取 0.84。

### 1.3 不确定度来源分析

根据上述在线监测碳排放量的数学模型以及《测量不确定度评定与表示》可知,不确定度分为由参数重复测量过程引入的 A 类不确定度与由仪器设备引起的 B 类不确定度。考虑 CO<sub>2</sub> 质量浓度、烟气流速、烟气温度等参数<sup>[20-25]</sup>,碳排放量不确定度来源如图 1 所示。

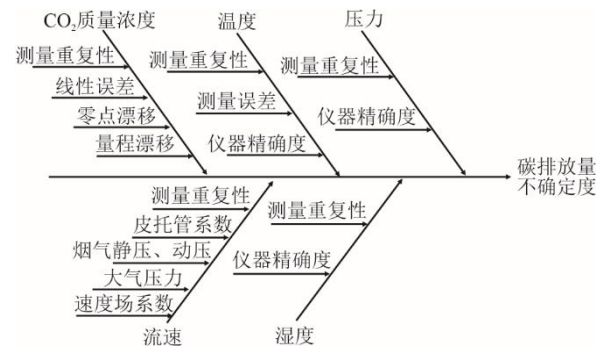


图 1 碳排放量不确定度来源

Fig.1 Sources of uncertainty for carbon emissions

## 2 研究数据选取

某燃气电厂 1 号机组为 423 MW 的 F 级燃气-蒸汽联合循环发电机组,已安装的 CEMS 日常数据采集周期为 1 min。以 1 h 为单位选取 4—7 月 240~390 MW 的稳定运行数据,数据包括烟气流速、湿度、温度、压力以及 CO<sub>2</sub> 体积分数。

利用滑动窗口法对选择负荷段进行计算,以 3

为窗口大小计算负荷平均值以及标准差，以标准差小于 1 MW 为判据确定稳定运行负荷段。在此基础上，剔除离群点后进行不确定度评定。

### 3 不确定度评定结果

以 2023 年 4 月 3 日平均负荷为 240 MW 正常运行数据为例，在稳定运行时段中随机选取某 1 h 内的运行数据作为分析对象，评定在线监测法碳排放量的不确定度，分别计算 CO<sub>2</sub> 体积分数、烟气流速、烟气温度、烟气压力以及烟气温度的 A 类不确定度以及 B 类不确定度，最终得到合成不确定度与扩展不确定度。

选取 4 月 3 日 13:00—13:59 期间 60 个数据点 (图 2)，其中标红数据点为明显离群点，剔除异常数值后剩余 55 个数据点，对其进行 A 类不确定度评定。

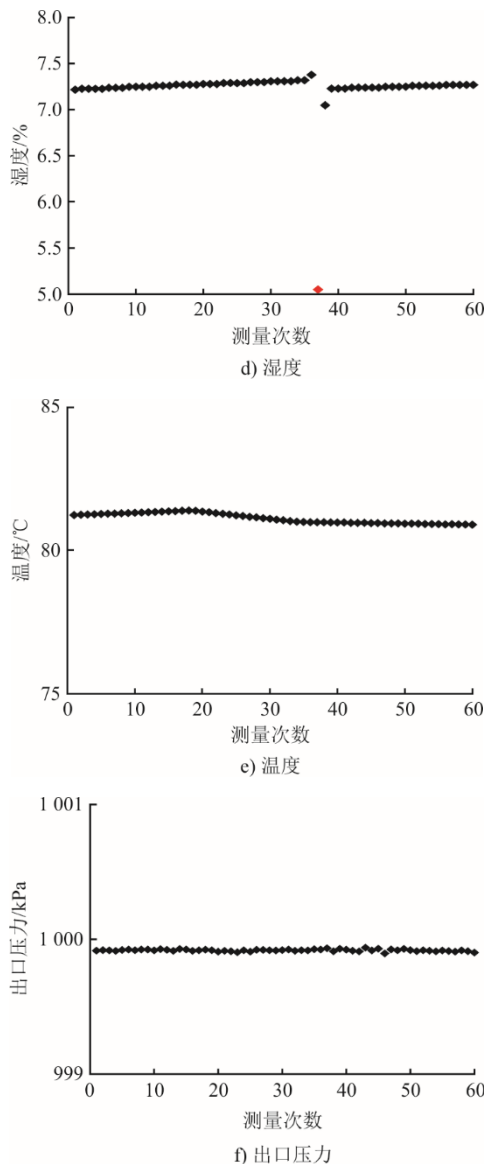
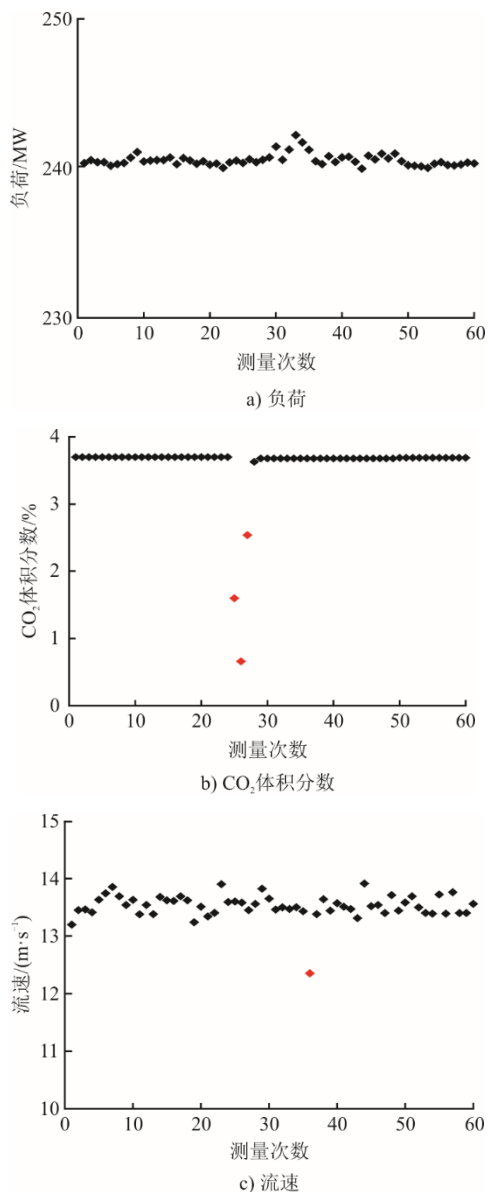


图 2 各参数测量结果  
Fig.2 Repeatability measurement of each parameter

#### 3.1 A 类不确定度

##### 3.1.1 测量重复性的不确定度

各参数的测量重复性由 A 类不确定度进行评定，以选定时间段内的各参数平均值作为实测值，根据式(1)计算其不确定度与相对不确定度，得到表 1。

表 1 各参数测量重复性不确定度结果  
Tab.1 Measurement repeatability uncertainty results for each parameter

项目	平均值	相对标准不确定度/%
CO <sub>2</sub> 体积分数/%	3.690	0.044
烟气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	13.541	0.154
温度/K	354.278	0.007
压力/kPa	999.918	9.979 × 10 <sup>-5</sup>
湿度/%	7.261	0.071

从表 1 可以看到, 烟气流速测量重复性所引入的不确定度最大, 其次是湿度测量的重复性, 二者均影响干烟气流量的换算。这表明, 烟气流量在测量上的波动相较其他参数而言更大, 会对碳排放量带来更大的影响。

### 3.1.2 测量误差的不确定度

该电厂对温度进行定期的参比试验, 试验采用 3012H 自动烟尘(气)测试仪测量烟气温度, 通过参比试验引入的测量误差计算公式为:

$$N_m = |\bar{d}| + c_c \quad (8)$$

$$c_c = t_{f,0.95} \frac{S_d}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

式中:  $N_m$  为测量误差;  $\bar{d}$  为绝对误差的平均值;  $c_c$  为置信系数;  $t_{f,0.95}$  为 95% 置信水平的  $t$  值, 查表获得;  $S_d$  为绝对误差的标准偏差;  $n$  为数据对个数。

根据参比方法计算得到置信系数为 0.689 K, 测量误差为 1.589 K, 假设为正态分布, 包含因子取 2, 则由测量误差所引入不确定度为 0.795 K。

## 3.2 B 类不确定度

### 3.2.1 CO<sub>2</sub> 体积分数测量的 B 类不确定度

该电厂 CO<sub>2</sub> 体积分数测量使用某红外线气体分析仪。查阅仪器说明书: 该仪器线性误差 ≤ 1%FS, 零点漂移 ≤ 1%FS, 量程漂移 ≤ 1%FS, 仪器量程为 0~5% 与 0~25%, 假设满足均匀分布, 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则相对不确定度分量结果见表 2。

表 2 CO<sub>2</sub> 体积分数测量 B 类不确定度结果  
Tab.2 Type B evaluation of uncertainty of carbon dioxide volume fraction measurement

项目	线性误差	零点漂移	量程漂移	合成不确定度
不确定度分量 (量程 0~5%) / %	0.78	0.78	0.78	1.36
不确定度分量 (量程 0~25%) / %	3.91	3.91	3.91	6.78

当仪器量程选择 0~5% 时, 由于线性误差、零点漂移以及量程漂移引入的合成不确定度为 1.36%; 当量程选择 0~25%, 合成不确定度为 6.78%。选择大量程测量 CO<sub>2</sub> 体积分数时, 会引入较大的不确定度, 使得在线监测数据质量下降, 同时会使不确定度主要来源改变。对于燃气电厂, 建议使用 0~5% 的量程测量 CO<sub>2</sub> 体积分数, 降低不确定度分量从而提高数据质量。下文以 0~5% 量程下的不确定度作为 CO<sub>2</sub> 体积分数测量的 B 类不确定度进行讨论。

### 3.2.2 流速测量的 B 类不确定度

该电厂流速测量使用的是 PS7400 型烟气排放连续监测分析系统, 流速测量原理为皮托管差压法, 皮托管系数取 0.84, 最大误差不超过 ±0.01, 假设为均匀分布, 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则相对不确定度分量为 0.69%。静压传感器、动压传感器以及大气压力传感器测量准确度均为 0.5%, 按均匀分布, 包含因子取  $k=\sqrt{3}$ , 相对不确定度分量均为 0.29%。

电厂定期开展速度场系数检测, 参比使用的是青岛崂山 3012H 流量计, 测量原理是皮托管差压法。根据最近一次的检测结果, 速度场系数的相对偏差为 1.76%, 符合速度场精密度小于 8% 的要求。流速测量的 B 类不确定度结果见表 3。

对于流速来说, B 类不确定度的主要来源是速度场系数的检测, 其次是皮托管系数。当默认手工测点温度与 CEMS 测点温度相同时, 速度场系数实际上就是 2 个测点动压的平方根之比<sup>[29]</sup>, 这就恰恰说明影响流速测量不确定度的因素仍然是动压的测量, 这也得到了与前述文献相似的不确定度主要来源结论<sup>[20]</sup>。

表 3 流速测量 B 类不确定度结果  
Tab.3 Type B evaluation of uncertainty of flow rate measurement

	皮托管系数	静压	动压	大气压力	速度场系数	合成不确定度
不确定度分量 / %	0.69	0.29	0.29	0.29	1.76	1.96

### 3.2.3 温度测量的 B 类不确定度

该电厂烟气温度测量使用的是 PS7400 型烟气排放连续监测系统, 测温元件为铂电阻。根据电厂提供的仪器检定报告, 不确定度为 1.6 °C,  $k=2$ , 则标准不确定度为 0.8 °C。

### 3.2.4 压力测量的 B 类不确定度

该电厂烟气压力测量使用的是罗斯蒙特 3501C 压力变送器, 根据仪器说明书, 该压力变送器的总体性能准确度为 ±0.14%FS, 量程为 -248.64~248.64 kPa, 假设为均匀分布, 包含因子取  $k=\sqrt{3}$ , 不确定度分量为 0.04%。

### 3.2.5 湿度测量的 B 类不确定度

该电厂烟气湿度测量使用的是 PS7400 型烟气排放连续监测分析系统, 根据湿度分析仪说明书, 精确度为 ±1%, 假设为均匀分布, 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则不确定度为 0.58%。

### 3.3 CO<sub>2</sub> 排放量的不确定度

由于 CO<sub>2</sub> 体积分数、烟气流速及其他各参数之间无相关性，则 CO<sub>2</sub> 排放量合成相对不确定度计算如式(10)，计算得到相对合成不确定度为 2.476%，并以  $k=2$  计算扩展相对不确定度，扩展相对不确定度为 4.952% ( $k=2$ )，计算结果见表 4。

$$u(E) = \sqrt{u^2(c(\text{CO}_2)) + u^2(v) + u^2(p) + u^2(T) + u^2(\varphi_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (10)$$

式中： $u(E)$ 为碳排放量的标准不确定度； $u(c(\text{CO}_2))$ 为 CO<sub>2</sub> 体积分数的标准不确定度； $u(v)$ 为烟气流速的标准不确定度； $u(p)$ 为烟气压力的标准不确定度； $u(T)$ 为烟气温度的标准不确定度； $u(\varphi_{\text{H}_2\text{O}})$ 为烟气湿度的标准不确定度。

流速测量扩展不确定度为 3.9%左右，这与前述学者研究结论相一致<sup>[9-10,19]</sup>；而 CO<sub>2</sub> 体积分数扩展不确定度为 2.72%左右，略高于文献<sup>[7,9-10,25]</sup>研究结果，这是由于本文使用的仪器精度为说明书给出的最大范围，而前述研究中均对浓度分析仪进行校准测试得到对应的零点漂移、线性漂移等数值。

表 4 在线监测法碳排放量不确定度结果  
Tab.4 Uncertainty of carbon emission for CEMS

项目	平均值	相对标准不确定度/%		相对合成不确定度/%
		A 类	B 类	
$c(\text{CO}_2)/\%$	3.690	0.044	1.360	1.356
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	13.523	0.154	1.956	1.962
$T/\text{K}$	354.282	0.231	0.226	0.324
$p/\text{kPa}$	999.918	$8.569 \times 10^{-5}$	0.040	0.040
$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	7.261	0.071	0.577	0.582
$E/\text{t}$	112.976			2.476
$U$				4.952 ( $k=2$ )

从表 4 可以看出，碳排放量的不确定度主要来源是烟气流速，在这其中，B 类不确定度为主要不确定度来源，这也验证了前述研究结论<sup>[20,25]</sup>，可见提高测量仪器精度或者定期进行校准试验可以有效降低碳排放量测量的不确定度。

## 4 不同负荷段下的不确定度评定

为了更好地比较各个负荷段下，碳排放量的不确定度来源是否有差异，随机选取了机组运行时的常见负荷段 240、300、360、380、390 MW 下数据计算对应不确定度，数据选择情况如表 5 所示。为了区分同一负荷段下不同时段选取的数据集，以 (a)、(b) 作为区分标志。

表 5 数据集选取情况  
Tab.5 Selection of data sets

负荷段	平均负荷/ MW	时段	有效数据点
240 MW (b)	240.44	6 月 2 日 02:00—02:59	55
300 MW	300.35	6 月 28 日 20:00—20:59	58
360 MW	360.41	6 月 7 日 19:00—19:59	58
380 MW (a)	380.48	6 月 1 日 09:00—09:59	59
380 MW (b)	383.59	7 月 28 日 01:00—01:59	60
390 MW	387.21	5 月 31 日 21:00—21:59	58

在此基础上讨论其不确定度来源情况，不确定度评定结果如表 6 和图 3 所示。

表 6 不同负荷段下不确定度的评定结果  
Tab.6 Uncertainty evaluation under different loading bands

项目	平均值	相对标准不确定度/%		相对合成不确定度/%	
		A 类	B 类		
240 MW (b)	$c(\text{CO}_2)/\%$	3.679	0.105	1.359	1.359
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	13.678	0.412	1.956	1.999
	$T/\text{K}$	360.309	0.222	0.222	0.314
	$p/\text{kPa}$	999.887	0.000 27	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	8.343	0.058	0.577	0.580
	$E/\text{t}$	110.608			2.506
	$U$				5.012 ( $k=2$ )
300 MW	$c(\text{CO}_2)/\%$	3.844	0.017	1.301	1.301
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15.509	0.484	1.956	2.015
	$T/\text{K}$	361.163	0.221	0.222	0.313
	$p/\text{kPa}$	999.842	0.000 33	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	8.582	0.093	0.577	0.585
	$E/\text{t}$	130.709			2.489
	$U$				4.978 ( $k=2$ )
360 MW	$c(\text{CO}_2)/\%$	4.070	0.000	1.229	1.229
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	17.731	0.413	1.956	2.015
	$T/\text{K}$	346.167	0.219	0.220	0.310
	$p/\text{kPa}$	999.806	0.000 41	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	9.115	0.117	0.577	0.589
	$E/\text{t}$	155.503			2.439
	$U$				4.878 ( $k=2$ )
380 MW (a)	$c(\text{CO}_2)/\%$	3.996	0.327	1.251	1.255
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	18.295	0.457	1.956	2.009
	$T/\text{K}$	364.370	0.219	0.220	0.310
	$p/\text{kPa}$	999.799	0.000 38	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	8.841	0.097	0.577	0.585
	$E/\text{t}$	158.082			2.460
	$U$				4.920 ( $k=2$ )
380 MW (b)	$c(\text{CO}_2)/\%$	3.971	0.008	1.259	1.259
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	18.597	0.394	1.956	1.995
	$T/\text{K}$	364.271	0.220	0.220	0.311
	$p/\text{kPa}$	999.754	0.000 44	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	8.632	0.010	0.577	0.577
	$E/\text{t}$	160.690			2.449
	$U$				4.898 ( $k=2$ )
390 MW	$c(\text{CO}_2)/\%$	4.070	0.006	1.228	1.228
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	18.611	0.037	1.956	1.966
	$T/\text{K}$	364.391	0.223	0.220	0.313
	$p/\text{kPa}$	999.760	0.000 16	0.040	0.040
	$\varphi_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	9.326	0.209	0.577	0.614
	$E/\text{t}$	163.257			2.419
	$U$				4.838 ( $k=2$ )

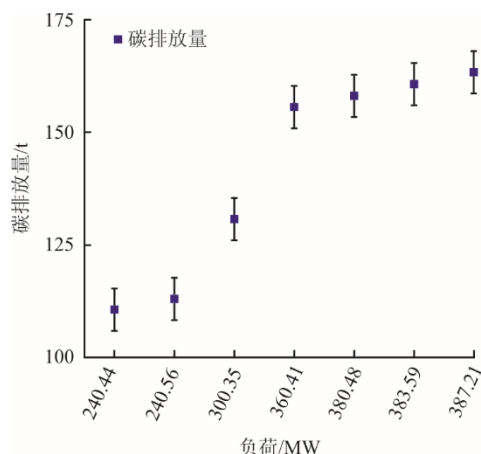


图 3 不同负荷下的碳排放量与不确定度

Fig.3 Carbon emissions and uncertainties at different loads

对于 A 类不确定度,主要不确定度来源是烟气流速测量,其次是温度的测量;而对于 B 类不确定度,主要不确定度来源是烟气流速,其次是  $\text{CO}_2$  体积分数。在不同负荷下,碳排放量主要不确定度来源都是烟气流速的测量,其次是  $\text{CO}_2$  体积分数测量。

此外计算各负荷段不确定度的扩展不确定度为 4.838%~5.012% ( $k=2$ ),这与其他论文中得到的不确定度评定结果差异不大<sup>[10,25]</sup>。

图 4 为扩展不确定度随时间变化情况。对比图 3 和图 4 可见,对于该机组,相对不确定度大小并没有因为负荷与时间变化而发生较大的改变,这是由于 B 类不确定度是主要不确定度来源,负荷不会对 B 类不确定度产生较大的影响。

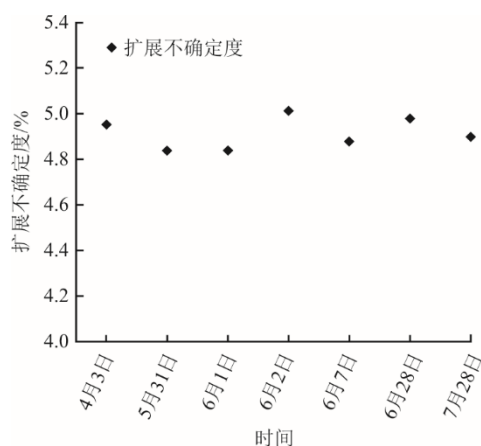


图 4 扩展不确定度随时间变化情况

Fig.4 Variation of extended uncertainty over time

## 5 结 论

通过对某燃气发电机组在线监测数据估算  $\text{CO}_2$  排放量结果进行不确定度评定发现,对于  $\text{CO}_2$  体积分数测量,测量仪器量程的选择对不确定度的计算

会产生较大的影响。量程为 0~25%时会引入超过 6%的不确定度,而选择 0~5%作为量程时则使得不确定度降低至 1.5%以下。对于燃气电厂, $\text{CO}_2$  体积分数一般小于 5%,因此选择 0~5%作为量程能有效降低  $\text{CO}_2$  体积分数测量的不确定度,从而提高在线监测数据质量。

对于该电厂, $\text{CO}_2$  排放量不确定度主要来自流速测量的不确定度,扩展不确定度为 3.932%~4.030%;其次是  $\text{CO}_2$  体积分数不确定度,扩展不确定度在 2.456%~2.720%。流速不确定度与前述<sup>[7,9-10,20,25]</sup>文献结论相似。计算得到该电厂在线监测结果的扩展相对不确定度为 4.838%~5.012% ( $k=2$ )。在这之中,速度场系数是主要不确定度来源,速度场系数的变化体现了烟囱流场不稳定。因此,对不确定度影响最大的是流场的不稳定性。

另外,负荷与时间变化不会改变碳排放量不确定度的主要来源,该机组在不同稳定负荷段,烟气流速始终是在线监测碳排放量不确定度的主要来源。因此,提高烟气流速测量仪器的精度或定期进行校准试验有助于减小碳排放量不确定度,从而提高在线监测数据质量。

## [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国应对气候变化的政策与行动 2023 年度报告[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2023: 1.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China's policies and actions for address climate change (2023)[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023: 1.
- [2] 李鹏, 吴文昊, 郭伟. 连续监测方法在全国碳市场应用的挑战与对策[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1): 77-92.  
LI Peng, WU Wenhao, GUO Wei. The challenges and recommendations of application of the measurement-based monitoring methodology in national carbon market[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(1): 77-92.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 谢子立, 卢志民, 姚顺春, 等. 大口径管道烟气流速测

- 量方法综述[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 112-124.
- XIE Zili, LU Zhimin, YAO Shunchun, et al. Overview of flue gas flow measurement methods in large-scale ducts[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 112-124.
- [6] ACKERMAN K V, SUNDQUIST E T. Comparison of two U.S. power-plant carbon dioxide emissions data sets[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(15): 5688-5693.
- [7] QUICK J C. Carbon dioxide emission tallies for 210 U.S. coal-fired power plants: a comparison of two accounting methods[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, 64(1): 73-79.
- [8] JEON E, SA J, LEE S, et al. Development of emission factors for greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) from bituminous coal fired power plants[J]. Korean Society for Atmospheric Environment, 2006, 22(1): 107-116.
- [9] EVANS S, DEERY S, BIONDA A J. How reliable are GHG combustion calculations and emission factors[C]/Proceedings of the CEM 2009 Conference. Itlay, 2009.
- [10] LEE S, CHOI Y, WOO J, et al. Estimating and comparing greenhouse gas emissions with their uncertainties using different methods: a case study for an energy supply utility[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, 64(10): 1164-1173.
- [11] 张海滨, 胡永飞, 张景奇, 等. 二氧化碳排放量方法探讨[J]. 中外能源, 2013, 18(3): 96-101.
- ZHANG Haibin, HU Yongfei, ZHANG Jingqi, et al. A study on methods for quantifying CO<sub>2</sub> emission[J]. Sino-Global Energy, 2013, 18(3): 96-101.
- [12] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 1.
- TAN Chao. Study on monitoring methods of carbon emission in coal fired power plants[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 1.
- [13] 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.
- [14] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO<sub>2</sub> 排放监测模型及准确性验证[J]. 煤化工, 2022, 50(2): 18-21.
- WANG Ming, ZHOU Zhixing, FENG Mingmin, et al. Online CO<sub>2</sub> emission monitoring system for coal-fired power plant based on direct measurement and its accuracy verification[J]. Coal Chemical Industry, 2022, 50(2): 18-21.
- [15] 段志洁, 张丽欣, 李文波, 等. 燃煤电力企业温室气体排放量方法对比分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 120-125.
- DUAN Zhijie, ZHANG Lixin, LI Wenbo, et al. Comparison of GHG emission quantification methods for coal-fired electric power enterprises[J]. Electric Power, 2014, 47(2): 120-125.
- [16] 邓程意, 闻倩娱, 朱娜, 等. 欧盟碳排放量核算方法及不确定度的研究与借鉴[C]. 第十八届中国标准化论坛论文集, 2021.
- DENG Chengyi, WEN Qianyu, ZHU Na, et al. Research and reference on carbon emission accounting methods and uncertainties in the European Union[C]. Proceedings of the 18th China Standardization Forum, 2021.
- [17] YRJÖ M, TIMO K, TURKKA U. EU emission trading related CO<sub>2</sub> monitoring in power plants[C]. Proceedings of the International Federation of Automatic Control, 2014, 47(3): 1361-1366.
- [18] 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.
- [19] BRYANT R, SANNI O, MOORE E, et al. An uncertainty analysis of mean flow velocity measurements used to quantify emissions from stationary sources[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, 64(6): 679-689.
- [20] KANG W, TRANG N D, LEE S, et al. Uncertainty analysis of stack gas flow measurements with an S-type Pitot tube for estimating greenhouse gas emissions using a continuous emission monitoring system[J]. Metrologia, 2020, 57(6): 065031.
- [21] 宁雪婷. 烟气排放连续监测系统不确定度分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016: 1.
- NING Xueting. Uncertainty research of continuous emission monitoring system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016: 1.
- [22] 张铭, 葛志伟, 郑张, 等. 碳排放在线检测中 CO<sub>2</sub> 示值误差测得值的不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(8): 110-111.
- ZHANG Ming, GE Zhiwei, ZHENG Zhang, et al. Uncertainty analysis of the measurement result of CO<sub>2</sub> indication error in on-line detection of carbon emissions[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(8): 110-111.
- [23] 梁天琪. 热电厂超低排放 CEMS 应用及测量不确定度研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2020: 1.
- LIANG Tianqi. Application and measurement uncertainty study of ultra-low emission CEMS in thermal power plants[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2020: 1.
- [24] LIANG T Q, ZHENG T L, ZHANG G X. Uncertainty research of particles concentration measurement in continuous emission monitoring system of thermal power plants[C]. 2019 International Conference on Boilers and Heat Exchangers. 2020.
- [25] 杨美昭. 企业温室气体排放量监测计量方法研究[D]. 保定: 河北大学, 2021: 1.
- YANG Meizhao. Research on monitoring and measurement methods of enterprise greenhouse gas emission[D]. Baoding: Hebei University, 2021: 1.
- [26] 郭振, 王小龙, 任健, 等. 二氧化碳排放连续在线监测过程的模拟与不确定度评定[J]. 计量学报, 2022, 43(1): 120-126.
- GUO Zhen, WANG Xiaolong, REN Jian, et al. Simulation and uncertainty evaluation of continuous on-line monitoring process of carbon dioxide emission[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(1): 120-126.

(下转第 161 页)

