

改进型火电机组烟气直测法碳计量不确定度评定方法

黄辉^{1,2}, 刘俊¹, 崔洪滨³, 李阳海¹, 刘栗³, 贺俊⁴, 徐万兵^{1,2}, 王楠^{1,2},
周淼¹, 许涛^{1,2}, 徐龔^{1,2}

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 湖北方源东力电力科学研究所有限公司, 湖北 武汉 430077;
3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 电力行业碳排放占全国总碳排放的40%以上, 加快健全火电厂碳排放的精确计量和不确定度评定方法对电力行业碳排放精细化监管有重要作用。考虑到安装在电厂现场的浓度、流量等计量仪表长期运行后, 其测量性能和精度发生变化, 采用仪表出厂时的精度计算不确定度无法真实反映测量结果的可信度。提出了一种适用于生产实际, 基于计量仪表定期检定结果的不确定度评定方法, 并对湖北省某电厂660 MW机组的碳排放在线监测结果进行不确定度评定, 分析不确定度贡献, 并提出优化建议。结果表明: 该机组直测法碳计量结果的扩展相对不确定度为8.282% (包含因子 $k=2$, 置信水平95%)。除压强外, 其余项均为B类不确定度占主导。是否考虑灵敏系数及B类不确定度评定方法的选择都会对结果产生显著影响。影响碳排放不确定度的主要来源为 CO_2 浓度和烟气流量测量, 采用更高精度的气体成分和流量测量仪器对测量仪表进行定期维护、校准以及优化烟道内测点布置等均有助于减小不确定度。

关键词: 碳排放; 碳计量; 碳监测; 直测法; 不确定度; 燃煤电厂

中图分类号: TK114 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2024)08-0042-08

Improved method for uncertainty evaluation of carbon measurement using flue gas direct measurement in thermal power unit

HUANG Hui^{1,2}, LIU Jun¹, CUI Hongbin³, LI Yanghai¹, LIU Li³, HE Jun⁴, XU Wanbing^{1,2},
WANG Nan^{1,2}, ZHOU Miao¹, XU Tao^{1,2}, XU Yan^{1,2}

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. Hubei Fangyuan Dongli Electric Power Science & Research Limited Company, Wuhan 430077, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
4. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: The carbon emission of the power industry accounts for more than 40% of the total carbon emission in China. Accelerating the improvement of the accurate measurement and uncertainty assessment method of carbon emission of thermal power plants plays an important role in the fine supervision of carbon emission of the power industry. Considering that the measuring performance and accuracy of the concentration, flow and other measuring instruments installed on the power plant site may change after long-term operation, using the factory accuracy of the meters to calculate the uncertainty cannot truly reflect the confidence level of the measurement. In this paper, an improved practical method for uncertainty assessment based on the periodic calibration results of the instruments was proposed. The method was used to evaluate the uncertainty of the online monitoring results of carbon emissions for a 660 MW power plant in Hubei Province, the contribution of uncertainty was analyzed, and optimization suggestions were proposed. The results show that the extended relative uncertainty of the carbon measurement results obtained by the direct measurement method is 8.282% (including factor $k=2$, confidence level 95%). With the exception of pressure, all other terms are dominated by class B uncertainty. Whether to consider the sensitivity coefficient and the choice of the evaluation method of Class B uncertainty will have a significant impact on the results. The main sources of carbon

收稿日期: 2024-07-30; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.LC24073001

基金项目: 国网湖北省电力有限公司成本专项资助项目(B11532232993)

作者简介: 黄辉(1986—), 男, 江西吉安人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 360688470@qq.com

通讯作者: 刘栗(1983—), 女, 黑龙江双鸭山人, 副教授, 博士。E-mail: liulihit@hit.edu.cn

引用格式: 黄辉, 刘俊, 崔洪滨, 等. 改进型火电机组烟气直测法碳计量不确定度评定方法[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(8): 42-49.

HUANG Hui, LIU Jun, CUI Hongbin, et al. Improved method for uncertainty evaluation of carbon measurement using flue gas direct measurement in thermal power unit[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 42-49.



移动阅读

emission uncertainty are carbon dioxide concentration and flue gas flow measurement. The use of higher precision gas composition and flow measurement instruments, regular maintenance and calibration of measuring instruments, and optimization of measuring point layout in the flue can help reduce the uncertainty.

Key words: carbon dioxide emission; carbon accounting; carbon monitoring; direct measurement; uncertainty; coal-fired power plant

0 引言

为实现双碳目标,减碳行动刻不容缓。2022年,中国碳排放量约为114.8亿t,而电力行业排放量约51亿t,占中国碳排放总量的46.37%^[1-4],受核查数据准确度影响,发电企业参与碳交易的信心和意愿不足^[5],碳交易市场减碳降碳作用不显著,因此,获取准确的碳计量数据是促使碳交易市场健康运作的基础^[6]。常用碳计量方法有直测法、排放因子法和核算法(碳平衡法)。排放因子的选取依托于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的相关指南^[7-9],误差一般较大,核算法计算时氧化率通常使用缺省值,即使使用飞灰和炉渣含碳量进行修正,但由于飞灰和炉渣含碳量并非实时测量,通常是每天、每2~3d检测一次取平均值,因此该方法的核算碳排量误差仍较大,而直测法(监测法)在发电企业碳计量方法中具有不区分煤种、可靠性高等^[10-14]特点。美国70%火电企业使用CEMS进行碳监测^[15],欧盟制定相关法规提高监测法质量^[16]。而我国主要采用核算法,烟气直测法尚处于试点阶段,碳排放监测体系及不确定度评定体系较欠缺^[17-18]。因此,开展直测法不确定度评定具有重要意义。

在碳计量评定中,不确定度被用来表征碳排放量数据的分散性,代表测量结果的可信度。目前研究集中在单个物理量测量方法的不确定度分析或利用仪器出厂参数建立不确定度的评定方法等。王萍萍等^[6]详细综述了目前碳排放计量方法现状,说明目前直测法的精准度高于核算法。张铭等^[19]分析了碳排放监测中二氧化碳分析仪CO₂示值误差的不确定度,并给出评定结果和提高气体分析仪精确度的有效方法。郭振等^[3]在实验室搭建了碳排放监测试验平台,结合相关标准建立了碳排放监测系统不确定度数学模型,为整体不确定度的评定与计算提供参考,但文中并未考虑不同物理量之间的数学关系,将灵敏系数简化为1。此外,火电机组实际长期运行时,测量仪器性能会随测量环境和测量时间而改变,此时使用仪器出厂参数进行不确定度评定显然不合适。因此有必要针对火电机组CO₂在线监测仪表长期运行的实际情况,建立碳排放直测法不

确定度的评定方法。

笔者依据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》与DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》建立了火电机组烟气直测法碳计量不确定度评定方法,结合湖北某电厂660 MW机组在线监测数据进行碳计量不确定度评定,分析不确定度来源并提出优化建议。

1 碳排放连续监测环境

在湖北省某台660 MW火电机组烟气排放出口位置,安装CO₂在线分析柜(包括分析仪、预处理装置、配套软件等)、温度计、湿度计、超声波流量计、压力表计等测量元件,对烟气中CO₂浓度、烟气流量、烟气温度、烟气压强和烟气含湿量等参数进行在线测量,实现机组出口CO₂排放量在线实时监测。依据HJ 75—2017《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范》进行上述测量元件安装,依据DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》计算实时CO₂流量和累计CO₂排放量。碳排放监测系统如图1所示。

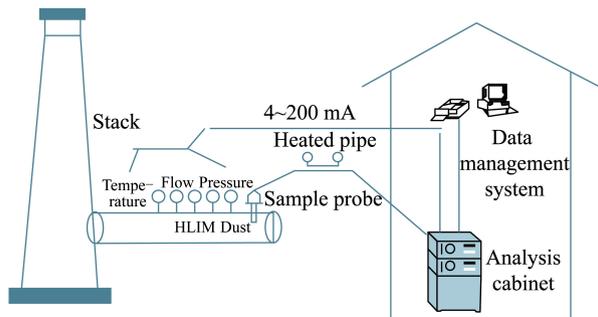


图1 碳排放监测系统

Fig.1 Carbon emission monitoring system

整体烟气测量参数包括气体浓度、烟气流量、含湿量、温度及压强。气体分析仪采用SIEMENS公司的CO₂/O₂气体分析仪ULTRAMAT 23,采样方法为直接抽取法,分析方法为NDIR红外法,主要对CO₂浓度进行测量。烟气流量测量采用超声波流量计。MODEL 2062为烟气含湿量测量系统,测量原理为氧化锆极限电流法。部分设备实物图如图2所示。



(a) 超声波流量计



(b) 气体分析仪

图2 流量和气体成分分析仪器实物图

Fig.2 Pictures of flow and gas composition analysis instrument

2 碳排放数学模型及不确定度评定模型

2.1 碳排放数学模型

燃煤电厂碳排放根据主要碳排放源分为直接排放和间接排放。其中煤燃烧产生的碳排放为直接排放,外购电力产生的碳排放为间接排放,火电厂碳直接排放可采用在线监测方法。在线监测过程依据DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》,通过监测烟气中碳浓度、流量、含湿量、温度及压强,计算燃烧产生的碳排放量,最后加上外购电力产生的排放即为电厂总碳排放。总碳排放的数学模型为

$$G_h = C_s \frac{44}{22.4} Q_s \frac{273}{273+t} \frac{P^0 + P}{101\ 325} \times (1 - X_{sw}) + A_D E_F, \quad (1)$$

式中, G_h 为 CO_2 排放量, t/h ; C_s 为烟气中 CO_2 体积分数, %; Q_s 为实际工况下的湿烟气流量, km^3/h ; P^0 为当地标准大气压; P 为烟气表压, Pa ; X_{sw} 为烟气中含湿量, %; t 为烟气温度, $^\circ\text{C}$; A_D 为外购电量, MWh ; E_F 为电网碳排放因子, t/MWh (以 CO_2 计)。

2.2 不确定度来源分析及计算公式

2.2.1 不确定度来源分析

根据 CO_2 在线监测的数学模型(式(1)),并考虑机组正常运行时,机组外购电量一般为0,可以不考虑外购电力项的不确定度,因此碳排放不确定度来源如图3所示,分别来自 CO_2 体积分数、烟气流量、含湿量、温度及压强。每项物理量不确定度由2部分组成:一部分是由各测量参数对应的仪器重复测量引起的不确定度(A类不确定度),另一部分是

由设备本身固有特性引起的不确定度(B类不确定度)。

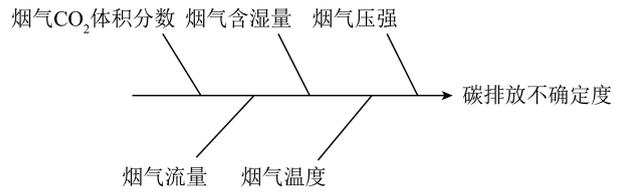


图3 碳排放不确定度来源

Fig.3 Source map of carbon emission uncertainty

2.2.2 不确定度计算公式

输出量 y 为多个输入量 x_i 的函数时,其测量不确定度传播律公式为

$$u(y) = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j) \right]^{0.5}, \quad (2)$$

式中, y 为输出量的估计值,即被测量的最佳估计值或测量结果的值; $u(y)$ 为输出量的不确定度; x_i 为输入量的估计值; N 为输入量的数量; $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为灵敏系数; $u(x_i)$ 为输入量 x_i 的标准不确定度; $r(x_i, x_j)$ 为 x_i 与 x_j 的相关系数估计值(i, j 分别为不同输入量)。

不考虑外购电量且各输入量相关系数估计值为0时,由式(1)、(2)得出碳排放总合成标准不确定度 $u(G_h)$ 为

$$u(G_h) = \left[C_{C_s}^2 u^2(C_s) + C_{Q_s}^2 u^2(Q_s) + C_t^2 u^2(t) + C_P^2 u^2(P) + C_{X_{sw}}^2 u^2(X_{sw}) \right]^{0.5}, \quad (3)$$

各灵敏系数分别为

$$C_{C_s} = \frac{\partial G_h}{\partial C_s} = \frac{44}{22.4} Q_s \frac{273}{273+t} \frac{P^0+P}{101\ 325} (1-X_{sw}), \quad (4)$$

$$C_{Q_s} = \frac{\partial G_h}{\partial Q_s} = \frac{44}{22.4} C_s \frac{273}{273+t} \frac{P^0+P}{101\ 325} (1-X_{sw}), \quad (5)$$

$$C_t = \frac{\partial G_h}{\partial t} = -C_s \frac{44}{22.4} Q_s \frac{273}{(273+t)^2} \frac{P^0+P}{101\ 325} (1-X_{sw}), \quad (6)$$

$$C_P = \frac{\partial G_h}{\partial P} = C_s \frac{44}{22.4} Q_s \frac{273}{273+t} \frac{1-X_{sw}}{101\ 325}, \quad (7)$$

$$C_{X_{sw}} = \frac{\partial G_h}{\partial X_{sw}} = -C_s \frac{44}{22.4} Q_s \frac{273}{273+t} \frac{P^0+P}{101\ 325}. \quad (8)$$

相对不确定度 $u_r(G_h)$ 为

$$u_r(G_h) = \frac{u(G_h)}{\bar{G}_h}, \quad (9)$$

式中, $u_r(G_h)$ 为相对不确定度; \bar{G}_h 为不考虑外购电量

时,由各物理量平均值计算得到的碳排放最佳估计值。

2.3 现有评定模型及存在问题

目前对于碳排放计量不确定度评定模型未有完善规定,主要采取理想化评定方式,使用仪器本身出厂精度参数进行评定^[3,14,19],测量物理量数学模型可归结为

$$C = C_0 + \Delta C_a + \Delta C_1 + \Delta C_z + \dots, \quad (10)$$

式中, C 为某测量量实际测量值; C_0 为仪器测量值,包含多次重复性测量的误差; ΔC_a 为仪器本身精度对结果造成的修正值; ΔC_1 为仪器线性度带来的误差; ΔC_z 为零点漂移带来的误差。

对于投入生产的仪器设备而言,其漂移量和线性度等反映精度的参数会随服役时间而改变,再将其视为B类不确定度,会降低不确定度评定准确度。对于企业内部,仪器会定期校准以获得其误差范围,将标定结果作为B类不确定度可避免因仪器出厂性能参数变化造成的误差,同时校准数据方便获取的特性也利于对不确定度进行核算处理。

其次,大多数不确定度评定模型未考虑不同测量量之间的数学关系或忽略这部分影响,简单认为式(3)中各灵敏系数为1,造成不确定度评定准确性进一步降低。

2.4 改进型评定模型

针对第2.3节提出的问题,将测量物理量的数学模型修改为

$$C = C_0 + \Delta C. \quad (11)$$

其中, ΔC 为安装在现场测量元件当前参比较准有效期内测量系统综合误差带来的修正项,不仅考虑了测量元件安装位置引起的误差,还考虑了测量元件服役时间因素各项本体误差(如线性度、漂移等)。 ΔC 从第三方参比较准机构定期现场试验报告中获取,一般每季度开展一次参比较准。

1)各物理量重复性测量的不确定度。重复性测量引入A类不确定度 u_A ,利用贝塞尔公式进行

计算,其中 n 为重复测量次数, x'_i 为单次测量值, \bar{x}_i 为重复测量的平均值。

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - \bar{x}_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (12)$$

2)各物理量测量仪表本身特性的不确定度。仪器仪表本身因长时间服务于生产,准确性会随时间下降,需定期校准并采用标准仪器检定。检定结果常为准确度信息 U ,其误差分布按照均匀分布处理,因此B类不确定度 u_B 为

$$u_B = \frac{U}{\sqrt{3}} \bar{x}_i. \quad (13)$$

其中, U 为检定精准度相关信息;若仪表检定结果中, U 为相对值,单位为%,则按式(13)处理,若单位与被测量单位一致,则无需再乘平均值。

3)各物理量合成标准不确定度。重复性测量误差与仪器检定误差相互独立且不相关,故相关系数为0,由式(11)得2项所对应的灵敏系数均为1,则合成标准不确定度 u 为

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (14)$$

以各物理量的重复性测量平均值作为测量结果,其A类与B类的相对不确定度 $u_{A,r}$ 、 $u_{B,r}$ 为

$$u_{A,r} = \frac{u_A}{x_i}, \quad (15)$$

$$u_{B,r} = \frac{u_B}{x_i}. \quad (16)$$

3 结果与讨论

3.1 改进型评定模型的不确定度分析与优化建议

3.1.1 各物理量重复性测量的不确定度

读取同一段时间各仪器连续监测数据,取连续30个监控值作为重复性测量数据以代表其重复性测量误差。各物理量重复性测量数据如图4所示。

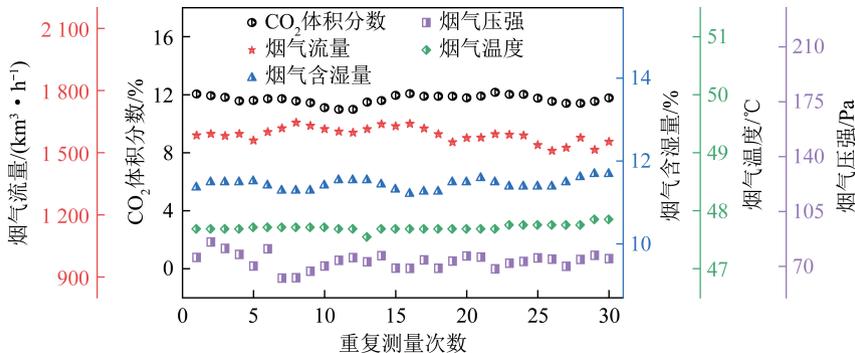


图4 烟气中各测量物理量的重复性测量结果

Fig.4 Repeatabile measurement results of each parameter in flue gas

各物理量平均值与通过式(12)计算的A类不确定度及相对不确定度见表1。

表1 重复性测量数据计算结果

Table 1 Repeatability measurement data calculation results

项目	重复性测量平均值	A类不确定度	A类相对不确定度/%
烟气 CO ₂ 体积分数/%	11.69	0.056 2	0.481
烟气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	1 587.68	6.60	0.416
烟气含湿量/%	11.44	0.022 7	0.198
烟气温度/℃	47.71	0.009 96	0.021
烟气压强/Pa	73.32	0.928	1.266

3.1.2 各物理量测量仪表本身特性的不确定度

根据该检定结果、式(13)计算的B类不确定度结果以及各测量仪器最新的检定结果见表2。

表2 测量仪器检定结果及B类不确定度

Table 2 Verification results of measuring instruments and Class B uncertainty

设备	检定结果	B类不确定度	B类相对不确定度/%
烟气分析仪 CEMS	0.648%	0.374 1%	3.201
流量计	4.4%	40.33 km ³ /h	2.540
湿度计	1%	0.07%	0.577
温度计	1.047 ℃	0.604 ℃	1.267
压力表	0.038 Pa	0.022 Pa	0.030

3.1.3 各物理量合成标准不确定度

由式(14)计算得各物理量合成标准不确定度结果见表3。

表3 各物理量合成标准不确定度

Table 3 Synthetic standard uncertainty of each parameter

项目	合成标准不确定度
烟气 CO ₂ 体积分数/%	0.378 3
烟气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	40.869 4
烟气含湿量/%	0.069 9
烟气温度/℃	0.604 6
烟气压强/Pa	0.928 1

3.1.4 碳排放总合成标准不确定度

根据式(4)~(8),可得各物理量的灵敏系数分别为: $C_{C_s} = 2\ 352.60$ 、 $C_{Q_s} = 0.17$ 、 $C_t = -0.86$ 、 $C_p = 0.002\ 7$ 、 $C_{X_{sw}} = -310.20$ 。结合表3各物理量合成标准不确定度和式(3)可得碳排放总合成标准不确定度 $u(G_h) = 11.385\ \text{t/h}$ 。总合成相对不确定度由式(9)计算得 $u_r(G_h) = 4.114\%$ 。碳排放相对扩展不确定度为 $u_{rel}(G_h) = 8.282\%$, $k=2$, 置信水平 95%。

3.2 改进型评定模型的不确定度分析与优化建议

前文计算的各物理量A类与B类相对不确定度对比如图5所示。可知除压强外,其余量均为B类不确定度占主导,需优先考虑从仪器本身特性入手降低不确定度。对于压强,优先考虑通过优化测量环境因素和测量方法减小测量不确定度。

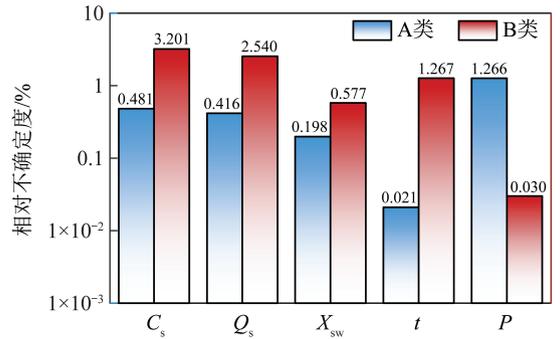


图5 烟气各测量物理量相对不确定度对比

Fig.5 Comparison of Class A and Class B relative uncertainty of each parameter of flue gas

从第3.1.4节中各物理量灵敏系数看,CO₂体积分数和含湿量对应的灵敏系数较大,说明总不确定度的变化对浓度和含湿量不确定度的变化较敏感。

从合成不确定度贡献分析^[20],将表3中各物理量的合成标准不确定度与第3.1.4节中灵敏系数的绝对值相乘即为碳排放总合成标准不确定度中各物理量的不确定度分量,计算得 $|C_{C_s}|u(C_s) = 8.901\ \text{t/h}$ 、 $|C_{Q_s}|u(Q_s) = 7.078\ \text{t/h}$ 、 $|C_t|u(t) = 0.518\ \text{t/h}$ 、 $|C_p|u(P) = 0.002\ 52\ \text{t/h}$ 、 $|C_{X_{sw}}|u(X_{sw}) = 0.217\ \text{t/h}$,具体如图6所示。

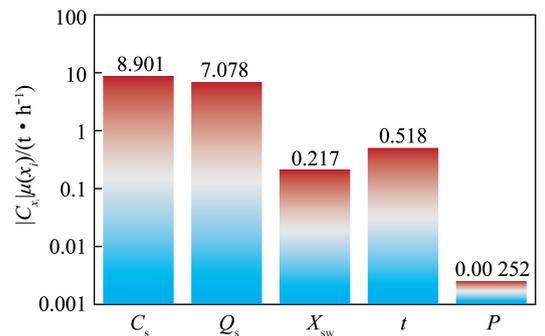


图6 总合成标准不确定度中各物理量的不确定度分量
Fig.6 Uncertainty component of the output corresponding to each parameter

由图6可知,总合成标准不确定度中CO₂体积分数的不确定度分量最大,其次为烟气流量,二者相比其他3个物理量大1~3个数量级。因此,降低火电机组烟气直测法碳计量的关键是准确测量CO₂体积分数和烟气流量。一是在设备

选型期间,应选取高精度 CO₂体积分数和烟气流量测量元件,减少测量元件固有测量误差;二是在现场安装位置选取过程中,尽量选取浓度场和流场相对均匀位置,建议先借助仿真模拟软件进行浓度场、流场模拟计算或借助标准仪器测量绘制浓度场、流场,进而确定最佳安装位置;三是设备投运期间,应加强 CO₂体积分数和烟气流量测量元件的定期维护和校准。

表 4 仪器出厂参数及计算各部分不确定度

Table 4 Instrument factory parameters and uncertainty of each part of calculation

仪器与设备	不确定度来源类型	仪器出厂参数	各分项标准不确定度	现有评定模型的 B 类不确定度	改进型评定模型的 B 类不确定度
烟气分析仪	B	线性误差:2%	0.134 5%	0.233%	0.374%
		零点漂移:2%	0.134 5%		
		量程漂移:2%	0.134 5%		
流量计	B	测量精度:2%	18.50 km ³ /h	18.50 km ³ /h	40.33 km ³ /h
含湿量测量模块	B	测量精度:2%	0.131 7%	0.131 7%	0.07%
温度测量模块	B	测量精度:1%	0.275 ℃	0.275 ℃	0.604 ℃
压力测量模块	B	测量精度:1%	0.424 Pa	0.424 Pa	0.022 Pa

通过不同计算方法得到的碳排放总合成标准不确定度对比如图 7 所示,所有方法计算碳排放总合成标准不确定度时,各物理量 A 类不确定度的数值均采用表 1 数值,主要分析采用出厂参数计算 B 类不确定和灵敏系数简化为 1 对碳排放总合成标准不确定度的影响。其中方法 1 为考虑灵敏系数且使用出厂参数;方法 2 为考虑灵敏系数且使用检定结果进行评定(本文改进型评定模型);方法 3 为不考虑灵敏系数(即灵敏系数简化为 1)且使用出厂参数(现有评定模型);方法 4 为不考虑灵敏系数且使用检定结果。

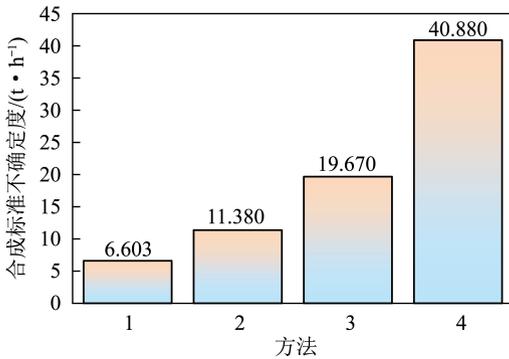


图 7 不同方法下计算的碳排放总合成标准不确定度

Fig.7 Uncertainty of total carbon emission synthesis standard calculated by different methods

由图 7 可知,分别对比方法 1、2 及方法 3、4 可知,使用出厂参数评定 B 类不确定度相较使用检定结果使最后合成标准不确定度计算结果减小约

3.3 评定模型对比分析

该电厂测量仪器设备出厂参数和依据现有评定模型计算得到的 B 类不确定度对比见表 4,可知相比本文提出的改进型模型,现有评定模型对于 B 类不确定度的评定在烟气浓度和流量上均偏低,尤其是流量偏差较大,仅为改进型模型结果的 45.6%。这与流量测量元件长期在恶劣环境下服役后,其测量元件本体测量误差必然增大相符。

50%。表明现有评定模型对 B 类不确定度的来源考虑不全面,未考虑出厂参数的改变带来的不确定度增加。

分别对比方法 1、3 及方法 2、4 可知,是否准确考虑灵敏系数对结果影响比较大,灵敏系数简化为 1 时结果偏大 3~4 倍,远超使用出厂参数评定 B 类不确定度对碳排放总合成标准不确定度的影响,直接影响碳排放计量结果的可信度,因此应该严格按照不确定度传播律计算碳排放总合成标准不确定度。

4 结 论

1)通过对湖北某电厂 660 MW 机组抽检监测数据进行不确定度分析以及评定,得出了该电厂机组碳排放测量扩展相对不确定度为 8.282% ($k=2$)。

2)碳排放的总不确定度整体较小,这说明该电厂的碳排放监测系统稳定性比较好,碳排放数据可信度比较高。对大多数物理量来说,其 B 类不确定度贡献占比较高,对于压强, A 类不确定度占比较高。

3)相比使用仪器出厂参数进行不确定度评定,使用检定结果计算的不确定度更大,更能体现仪器随时间性能下降导致的不准确性;是否考虑敏感系数对结果具有显著影响,应严格按照不确定度传播律进行合成计算。本文提出的改进型评定模型更全面考虑了各物理量 B 类不确定度的来源且采用更

合理的不确定度合成计算方法。

4) 从不确定度的分量看, CO_2 体积分数与烟气流量对不确定度的贡献比较大。对于浓度与流量的监测, 首先选择比较精确的仪器型号, 其次加强仪器维护频率。确保仪器在比较精确的状态下工作。考虑烟道内流动较复杂, 可以通过流场模拟等手段优化浓度与流量监测点布局, 监测过程中应该尽量保持流速均匀稳定以减小其对碳排放监测产生的误差。

5) 本文提出了一种改进型烟气直测法碳计量不确定度评定方法, 对实际生产具有一定指导意义。在不确定度评定上依赖仪器校准结果的准确性, 应进一步建立统一的碳计量仪器校准规范, 督促企业按规范要求落实仪器校准从而保证该评定方法的可行性和准确性。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 鲁非, 张露, 卢仰泽, 等. 基于电网全过程链的变压器碳排放测算与评价研究框架及应用展望[J]. 湖北电力, 2022, 46(4): 113-119.
LU Fei, ZHANG Lu, LU Yangze, et al. Transformer carbon emission measurement, evaluation research framework and application prospect based on whole process chain of power grid [J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(4): 113-119.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 卢伟业, 陈小玄, 陆继东, 等. 双碳背景下火电企业碳计量分析与建议[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(1): 194-203.
LU Weiye, CHEN Xiaoxuan, LU Jidong, et al. Analysis and suggestion on carbon accounting of thermal power enterprises under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(1): 194-203.

[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. Re-

search 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] 刘广一, 王继业, 汤亚宸, 等. 电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 12-28.
LIU Guangyi, WANG Jiye, TANG Yachen, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12-28.
- [8] 姚顺春, 刘泽明, 卢志民, 等. 软测量技术赋能燃煤电厂碳排放计量的研究进展[J/OL]. 洁净煤技术, 1-18 [2024-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240511.1521.002.html>.
YAO Shunchun, LIU Zeming, LU Zhimin, et al. Research progress of soft measurement technology optimizing carbon emission measurement of coal-fired power plants [J/OL]. Clean Coal Technology, 1-18 [2024-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240511.1521.002.html>.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 程兰芬, 周保荣, 张东辉, 等. 中国低碳电力的发展方向与实施路径[J]. 湖北电力, 2018, 42(6): 48-54.
CHENG Lanfen, ZHOU Baorong, ZHANG Donghui, et al. The development direction and implementation path of low carbon power system in China [J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(6): 48-54.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王静, 郑张, 张铭. 碳排放连续检测气体分析仪测量结果的不确定度研究[J]. 山东化工, 2019, 48(21): 98-99.
WANG Jing, ZHENG Zhang, ZHANG Ming. Study on uncertainty of measurement results of carbon emission continuous detection gas analyzer [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(21): 98-99.
- [15] 王霖哈. 火电厂碳排放监测体系与核算方法的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [16] MAJANNE Y, KORPELA T, UOTILA T. EU emission trading related CO_2 monitoring in power plants [J]. IFAC Proceedings

- Volumes, 2014, 47(3): 1361–1366.
- [17] 饶雨舟, 李越胜, 姚顺春, 等. 碳排放在线检测技术的研究进展[J]. 广东电力, 2015, 28(8): 1–8.
RAO Yuzhou, LI Yuesheng, YAO Shunchun, et al. Research development of online detection technology for carbon emission [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(8): 1–8.
- [18] SUN Shuanzhu, ZHOU Chunlei, WANG Ming, et al. The extension of continuous carbon emission monitoring system in China's thermal power plants under the carbon market[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 467:012165.
- [19] 张铭, 葛志伟, 郑张, 等. 碳排放在线检测中 CO₂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, 118.
ZHANG Ming, GE Zhiwei, ZHENG Zhang, et al. Uncertainty analysis of the measurement result of CO₂ indication error in on-line detection of carbon emissions[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(8): 110–111, 118.
- [20] 徐凯, 钟平, 宋金时, 等. 垃圾焚烧电站入炉垃圾低位热值及不确定度研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 169–174.
XU Kai, ZHONG Ping, SONG Jinshi, et al. Low level calorific value and uncertainty of waste in MSW incineration power plant [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 169–174.