

“双碳”目标下火电厂CO₂计量技术研究现状与展望

张安安, 周奇, 李茜, 丁宁, 杨超, 马岩

(西南石油大学电气信息学院, 四川省 成都市 610000)

Research Status and Prospect of CO₂ Accounting Technology in Thermal Power Plants Under the Goal of Dual Carbon

ZHANG Anan, ZHOU Qi, LI Qian, DING Ning, YANG Chao, MA Yan

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, Sichuan Province, China)

摘要: 中国电力行业CO₂排放量是CO₂排放的主要来源, 其中火电厂CO₂排放量在电力行业中占比最大。在“双碳”目标下, CO₂计量技术可以实现对火电厂中CO₂排放量的直观判断, 为火电厂CO₂减排提供重要支撑, 促进火电厂参与碳交易, 带动区域经济发展。结合国内外政策, 讨论了目前通用CO₂计量方法的实施进展, 总结归纳了以碳核算为主、碳监测为辅的火电厂CO₂计量方法存在的问题, 并对火电厂CO₂计量技术应用的重难点进行了分析。最后, 对火电厂CO₂计量技术的发展及应用进行了展望。

关键词: 火电厂; 双碳; CO₂计量; 碳核算; 碳监测

ABSTRACT: The CO₂ emissions of China power industry is the main source of CO₂ emissions. The CO₂ emissions of thermal power plants account for the largest proportion in the power industry. Under the goal of “double carbon”, CO₂ accounting technology can realize the intuitive judgment of CO₂ emissions in thermal power plants, provide important support for CO₂ emission reduction in thermal power plants, promote thermal power plants to participate in carbon trading, and drive regional economic development. Combined with domestic and foreign policies, the implementation progress of the current general CO₂ accounting methods was discussed. The problems existing in the CO₂ accounting methods of thermal power plants based on carbon accounting and supplemented by carbon monitoring were summarized. The key and difficult points of the application of CO₂ accounting technology in thermal power plants were analyzed. Finally, the development and application of CO₂ accounting technology in thermal power plants were prospected.

KEY WORDS: thermal power plant; dual carbon; CO₂ accounting; carbon estimating; carbon monitoring

0 引言

全球温室效应突出, 气候变暖带来的问题日益显著, 全球气候变暖的主要原因之一是以CO₂为主的温室气体大量排放^[1-2]。根据政府部门发布的《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》数据, 近5年中国电力行业CO₂排放量占总体CO₂排放量的40%, 工业生产CO₂排放量占比约为25%, 交通运输CO₂排放量占比为10%~15%, 其他领域(如农业、废弃物处理等)的CO₂排放量不超过5%。电力行业长期以来作为中国最大的能源消耗及产出部门, 化石燃料燃烧产生的大量CO₂直接或间接排放到空气中是电力行业碳排放量居高不下的主要原因^[3]。2020年, 中国承诺“力争2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”(简称“双碳”目标)^[4]。为实现“双碳”目标, 国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》, 明确提出了“碳达峰十大行动”, 并对电力行业及相关工业领域的CO₂减排措施进行部署。2022年生态环境部发布了《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》, 强调电力行业重点任务, 强化电力数据质量监督管理, 《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施(2022年修订版)》成为发电行业温室气体排放核算的主要依据。为响应国家“碳达峰”“碳中和”决策, 精确的CO₂计量技术成为了实现CO₂减排措施的基础。

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2023YFQ0073); 智能电网四川省重点实验室开放基金项目(2021-IEPGKLSP-KFYB02)。

Project Supported by Sichuan Science and Technology Program (2023YFQ0073); Smart Grid Sichuan Key Laboratory Open Fund Program (2021-IEPGKLSP-KFYB02).

础^[5-6]。2021年底,生态环境部印发了《“十四五”生态环境监测规划》的通知,提出建立重点排放单位温室气体排放源监测的管理体系和技术体系,并在火电行业开展碳排放监测试点。针对各行业,特别是电力能源部门,实施可靠、准确的CO₂计量是助力中国实现“双碳”目标至关重要的举措,不仅可以对火电厂的CO₂排放情况进行精准监测和计量,还可以优化火电厂生产流程和能源消耗等方面,有效控制成本,提高生产效率和能源效率。

实现火电厂CO₂计量的主要途径有核算和监测。核算方法主要是通过尽可能全面地获取火电厂的CO₂排放数据,推算出一段时间内的CO₂排放量。监测方法是利用气体检测设备对火电厂排放源进行实时测量,结合相应的量化方法得到CO₂排放量的实时监测数据^[7]。

本文对核算和监测2种火电厂CO₂计量技术的研究现状进行综述,总结归纳存在的问题,并对火电厂CO₂计量技术应用的重难点进行分析。最后,对火电厂CO₂计量技术在中国电力行业的发展进行展望。

1 火电厂CO₂排放核算方法

火电厂CO₂排放核算指对火电厂的CO₂排放量进行定量估算和测算。目前,火电厂常用CO₂排放核算方法包括排放因子法和物料平衡法。

1.1 排放因子法

排放因子法是CO₂核算最常用的方法,计算简单且应用广泛。排放因子法实现计量的核算依据,主要基于联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告中发布的各行业年度缺省排放因子数值,以及具体行业实际CO₂活动数据进行计算,其中企业CO₂活动数据由相关监管部门进行统计查证后获得^[8]。以某火电厂的发电设施为例,利用碳排放因子进行核算,可分为化石燃料燃烧排放核算及购入电力排放核算2部分。化石燃料燃烧碳排放包括化石燃料的燃烧过程以及其他工艺流程(如除尘、脱硫和脱硝等)^[9]。首先,对该发电厂化石燃料燃烧及电力购置的年度CO₂活动数据

进行统计;其次,确定火电厂化石燃料的排放因子,其中IPCC的缺省排放因子一般在缺乏准确数据或无法进行详细测量的情况下使用,对火电厂核算而言,可以根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)等数据库或者火电厂设备制造商、燃料供应商提供的数据确定其燃料排放因子;最后,通过相应的数学计算,获得该发电厂发电设施的年度CO₂排放总量。其中,火电厂化石燃料燃烧部分的CO₂活动数据为燃料消耗量与平均低位发热值的乘积。

火电厂CO₂排放总量表示为

$$E = E_{\text{燃料}} + E_{\text{电}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{燃料}}$ 为火电厂燃料燃烧产生的CO₂排放量, t; $E_{\text{电}}$ 为火电厂外购电力产生的CO₂排放量, t。

$E_{\text{燃料}}$ 表达式如下:

$$E_{\text{燃料}} = \sum_{i=1}^n A_{\text{D, 燃料}i} \times E_{\text{Fi}} \quad (2)$$

$$A_{\text{D, 燃料}i} = F_{\text{C, 燃料}i} \times N_{\text{CV, 燃料}i} \quad (3)$$

式中: $A_{\text{D, 燃料}i}$ 为第*i*种燃料的CO₂活动数据, GJ; E_{Fi} 为第*i*种燃料的CO₂排放因子, t/GJ; $F_{\text{C, 燃料}i}$ 为第*i*种燃料的消耗量, t; $N_{\text{CV, 燃料}i}$ 为第*i*种燃料的平均低位发热值, GJ/t。

$E_{\text{电}}$ 表达式如下:

$$E_{\text{电}} = A_{\text{D, 外购电}} \times E_{\text{F, 电}} \quad (4)$$

式中: $A_{\text{D, 外购电}}$ 为火电厂购入电量, MW·h; $E_{\text{F, 电}}$ 为火电厂区域电网年平均供电排放因子, t/(MW·h)。

排放因子法是一种较为宏观的量化方法,其优点是计算简单、易于理解、应用广泛、较为成熟,但受火电厂排放因子的准确性和适应性等限制。以火电为主的电力系统为例,利用碳排放因子法进行核算,需要全面考虑不同种类化石燃料燃烧的CO₂排放情况,合理选取碳排放因子,计算CO₂排放量。换言之,针对能源构成相对复杂的主体,采用排放因子法进行CO₂核算的前提是获取准确全面的CO₂活动数据。然而,近年来电力系统可再生能源发电量占比不断上升,碳排放因子的时空差异性日渐明显,且存在数据收集效率低、时效性较差、人为干扰因素较多等问题,碳排放因子法的应用随着能源结构的转变与调整受到阶段性的限制与制约。

1.2 物料平衡法

物料平衡法也叫元素平衡法,是基于燃料消耗量及质量守恒定律,通过跟踪和量化各个环节的CO₂排放量,来计算企业某一时段的CO₂排放总量。针对电厂工艺流程,火电厂的CO₂来源包括化石燃料等原料及外购电力。而CO₂排放主要形式包括产品碳及直接、间接碳排放^[10]。

火电厂装置原料带入的碳总量表示为

$$C_{\text{带入}} = \sum M_{m\text{原料}} \times \alpha_{m\text{碳}} \quad (5)$$

火电厂燃料剩余物质带出的碳总量表示为

$$C_{\text{燃料剩余物质}} = \sum M_{j\text{产品}} \times \beta_{j\text{碳}} \quad (6)$$

火电厂排放的碳排放总量表示为

$$C_{\text{排放}} = \sum M_{k\text{排放}} \times \eta_{k\text{碳}} \quad (7)$$

火电厂碳平衡表示为

$$C_{\text{带入}} = C_{\text{燃料剩余物质}} + C_{\text{排放}} \quad (8)$$

式中: $M_{m\text{原料}}$ 为原料 m 的年消耗量, t; $\alpha_{m\text{碳}}$ 为原料 m 中碳的质量分数, %; $M_{j\text{产品}}$ 为燃料剩余物质 j 的年消耗量, t; $\beta_{j\text{碳}}$ 为产品 j 中碳的质量分数, %; $M_{k\text{排放}}$ 为废弃物 k 的年排放量, t; $\eta_{k\text{碳}}$ 为废弃物 k 中碳的质量分数, %。

物料平衡法作为一种理论估算方法较为简便,要求火电厂燃料燃烧过程中只生产CO₂这一种温室气体,但在实际作业中,碳元素燃烧也会产生大量CO等。同时也需要企业具有完善的基础生产记录,目前我国大部分中小型企业不具备记录完整生产过程的统计能力,大量基础生产记录缺失,物料平衡法实施难度较大^[11]。

2 火电厂CO₂监测方法

2.1 火电厂工作流程

火电厂通常将化石燃料通过运输系统供应到燃烧锅炉中并点燃,与空气进行燃烧反应,释放热能。同时燃烧产生的高温烟气通过锅炉加热水,将水转化为高温、高压的蒸汽,蒸汽进入汽轮机,驱动轮毂旋转。汽轮机的旋转运动产生机械能,通过发电机将机械能转化为电能。在燃烧过程中,火电厂会产生CO₂、SO₂和NO_x等烟气,这些气体通过除尘、脱硫、脱硝等装置之后进入到烟囱,并排放到空气中^[12]。通过上述火电厂工作流程可

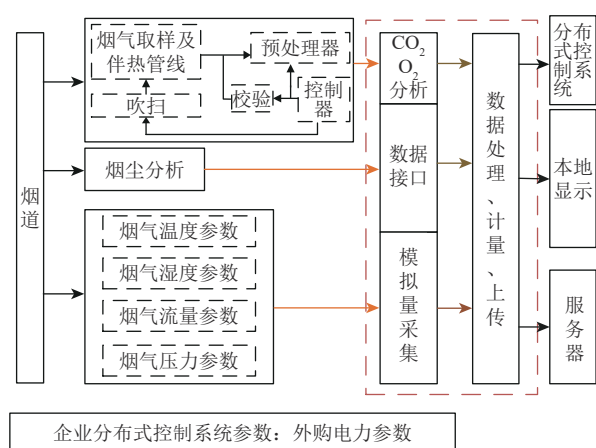
知,火电厂的CO₂排放源主要包括:1)煤炭、天然气等化石燃料燃烧所产生的CO₂;2)化石燃料处理和储存过程中(如煤炭的加工、储存、运输等环节)排放的CO₂;3)脱硫、脱硝装置及除尘装置等技术设备消耗能源所产生的CO₂。在采用监测法对火电厂CO₂排放进行核算时,火电厂净购入电力产生的CO₂排放无法通过监测进行计量,可采用式(4)进行核算。

目前,IPCC清单将温室气体排放方式分为固定源排放、移动源排放和逸散排放3种。固定源排放指大气污染物从烟道、烟囱及排气筒等固定排放口有规律地排放到大气中,排放源是固定集中的,以固定源排放的CO₂多是火电厂生产过程中产生的烟囱烟气。移动源排放指火电厂拥有或租赁的所有车辆产生的CO₂排放,属于火电厂本身的直接排放。逸散排放指火电厂化石燃料工艺工程中CO₂有意或无意释放的排放,为火电厂直接碳排放。无组织排放处于移动源排放与逸散排放之间,在火电厂碳排放量中,无组织排放占比为30%~50%,不可忽略。本文将无组织排放定义为火电厂工艺过程中无组织、间歇式且不经过程排气筒的无规则排放,包括因火电厂生产过程无密闭设备和工艺原料密封不当所导致的CO₂排放。

2.2 火电厂固定源CO₂排放监测技术

火电厂固定源CO₂排放有很强的时空分布特性,排放源固定集中且源强较容易确定。火电厂固定源废气排放监测采用烟气排放连续监测系统(continuous emission monitoring system, CEMS)实时监测废气排放。CEMS系统通过直接测量烟气的流量、温度、湿度等参数,从而计算排放烟气(如SO₂、NO_x等)的排放总量及浓度。在CEMS系统的基础上安装CO₂浓度监测模块,即可完成固定源CO₂排放监测,即CO₂排放连续监测系统(CO₂-CEMS),该系统由CO₂浓度监测模块、烟气参数监测模块、数据传输及处理模块等组成^[13],流程如图1所示。

CO₂-CEMS系统实时监测电力行业固定排放源烟气中CO₂浓度及流量,并进行数据计算、传输及处理,将结果反馈至主管部门,对异常数据进行实时监测报警。

图1 CO₂-CEMS系统示意图Fig. 1 Schematic diagram of CO₂-CEMS system

CO₂-CEMS系统取样方式分为原位式采样法、完全抽取式采样法及稀释抽样法。原位式采样法直接将检测装置安装在发电机组烟道处进行采样与分析，采样数据精度较高，但要求检测装置耐用，成本较高。完全抽取式采样法需要采样探头把烟气从烟道抽取出来，将气体数据传递至气体分析仪中，解决了烟气扰动的问题，其成本相对原位式采样法较低，但烟气采样量较大，采样管易堵塞，氧气在传递过程中易被稀释，导致准确性不高^[14]。稀释抽样法按一定比例对烟气进行稀释测量，需要干净干燥的空气进行稀释取样，系统结构较简单，稀释比稳定，精度高，但响应时间稍长，要求稀释空气纯度高，成本较高^[15]。火电厂固定源CO₂排放监测技术重点是保证CO₂-CEMS系统监测的准确性，由于CO₂-CEMS系统长期工作在高温、高尘的恶劣环境下，系统需具有高适应性，以保证监测性能较稳定。3种取样方式各有优劣，需根据不同领域和不同污染物进行不同分析，选择最适用的采样方法，以保证监测数据的精度。但国内烟尘排放超标浓度约为欧美等国家的4倍，若采用完全抽取式采样法与原位式采样法，则运行时间过长，如果未及时维护，将发生采样管堵塞等状况，导致监测结果不准确。因此，目前国内多采用稀释抽样法进行采样。

21世纪以来，欧美等发达国家首先对CO₂排放监测技术展开研究，针对监测设备气体辨识度低、测试精度低，CO₂排放量数据结构复杂、处

理困难、准确性不高等问题逐一进行攻克。制度方面，欧美从2005年开始制定火电行业CO₂监测范围与方法，在发展过程中制定并实施了《温室气体排放核算与报告指南》《监测及报告条例》等法规标准体系^[14]，保证了火电行业CO₂监测质量。美国从2010年起已强制要求电力行业排放源安装CEMS系统，欧美CEMS系统在CO₂监测领域已具有较成熟的政策和技术应用体系^[16]。美国颁布了《酸雨计划》等法律法规作为判定火电行业CO₂排放监测体系是否具有实效性的法律依据，并制定CO₂监测的主要措施及指标。通过现场审核与年度CO₂排放报告审核，保证达到监测质量要求，且美国已经将CO₂-CEMS系统监测数据应用于碳市场交易^[17]。为验证CO₂-CEMS系统监测固定源CO₂排放的准确性，欧美研究者对多个安装CO₂-CEMS系统的火电厂进行分析，对比了CEMS监测法和核算法监测结果，从整体上来看，2种方法得到的CO₂排放数据差异在3%以内，但个体排放量差异较大，有50%的电厂排放数据差异超过5%，甚至有20%的电厂排放数据差异超过10%^[18-20]。尽管气体检测技术不断发展，但由于CEMS系统长期工作在高温、高湿的恶劣环境中，必须保证CEMS适应性的问题。为提高CEMS系统监测的准确性，文献[21]研究了CEMS系统在不同条件下的采样损耗，提出通过数值求解采样线的粒子运输方程，获得烟气颗粒在不同条件下的沉积速度，为提高采样的准确性提供了数据基础。文献[22]提出了一种将CEMS系统的连续测量分析仪与预测确定值耦合的方法，优化CEMS系统桥接停机时间及改善监测数据的准确性。

从国内来看，近几年国家颁布了一系列有关固定污染源CEMS系统的技术要求及检测方法，并出台了相应的法律法规^[23-24]，如表1所示。虽然CEMS系统已经成熟应用在国内火电厂，但大部分CEMS系统并没有安装碳监测模块。我国固定源CO₂排放监测技术相对欧美等发达国家起步较晚，目前我国火电厂仍遵循以碳核算为主、监测为辅的原则，利用监测数据为核算数据提供可靠的支撑。火电厂CO₂排放计量包括电厂各机组燃料燃烧产生的CO₂排放，以及通过数据管理和专

表 1 涉及国内固定污染源排放监测技术规范

Tab. 1 Technical specifications for emission monitoring of domestic fixed pollution sources		
编号	名称	作用
GB/T 16157—1996	固定源污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法	规范固定源排放监测,特别样品采集方法
HJ/T 397—2007	固定源废气监测技术规范	规定固定源排放监测测定技术方法,以及便携式仪器监测方法
HJ 75—2017	固定源污染源烟气(SO ₂ 、NO _x 、颗粒物)排放连续监测技术规范	规定固定源排放连续监测系统的组成、技术性能、 日常运行质量等有关要求
HJ 76—2017	固定源污染源烟气(SO ₂ 、NO _x 、颗粒物)排放连续监测系统 技术要求及检测方法	固定源污染源烟气(SO ₂ 、NO _x 、颗粒物)排放连续监测系统 技术要求及检测方法
HJ 870—2017	固定污染源废气 二氧化碳的测定 非分散红外吸收法	规定测定固定污染源废气中二氧化碳的非分散红外吸收法

家分析得出的外购电力产生的CO₂排放。最终,这些数据将被提交给第三方碳排放检测机构进行碳核查。随着上述技术规范和政策的发布,相应运行管理制度与质量保证体系的建立,会逐渐保证我国火电厂固定源CO₂监测可靠性。华南理工大学研究团队^[25]针对发电侧固定源CO₂排放问题,研发了一套具有自主产权的火电厂CO₂监测系统,并已应用在320 MW热电联产企业,通过对比监测法与核算法发现,监测法相较于核算法计算结果低5%~30%;该团队从流量、湿度等方面对监测法数据误差进行分析,虽然二者在测量误差的不确定范围之内,但现有监测法还是不够准确。

西门子公司研发的CEMS系统已得到广泛认可,该系统针对固定源烟气中气体物质、温度、流速等进行测量,实现烟气排放物的量化控制。该系统包括西门子ULTTRAMAT 23多组分气体分析仪、LDS 6激光气体分析仪,以及红外/紫外气体分析系统取样与预处理单元。取样采用直插式原位测量与抽取式分析相结合的方式,且采用防腐设计,保证系统长期可靠运行。德国SICK公司研发PowerCEMS100等一系列烟气连续排放监测系统,基于抽取式采样法对样气进行检测,产品将电气装置和分析部件明确分离,易于维护。国内麦越环境研发的M-3000C系列污染源烟气碳排放在线监测系统主要监测CO₂及CH₄的排放量,CO₂量程为0~25%,且通信接口及通信协议都满足政府要求。

2.3 火电厂无组织CO₂排放监测技术

无组织排放是大气污染物不经过排气筒(烟囱)的无规则排放,包括露天开放式环境中排放的污染源^[26]。针对火电厂各复杂多元生产职能区域,

由于火电厂工艺流程中锅炉等原料燃烧装置无法做到完全密封,空气污染物可以通过非烟囱途径泄漏到周围环境中,同时燃料在加工、储存、运送的过程中有意或者无意与空气发生反应,释放CO₂,因此无组织排放是不可避免的。火电厂不同的产业结构和工艺流程也会形成不同的无组织排放源,主要包括煤炭、天然气等化石燃料储存、运输、制备系统及脱硝过程等。

火电厂除各机组燃料燃烧排放之外,在燃料储存、运输、制备系统及脱硝过程等也会释放CO₂。这种排放是间歇式、无组织,不经过排气筒,并不能通过CO₂-CEMS系统进行监测,故多采用CO₂核算量化CO₂排放量,但存在时效性较为滞后、数据收集效率低等问题。而CO₂-CEMS系统不能保证火电厂CO₂监测技术区域全覆盖性、监测准确性,同时无法满足火电厂实时碳交易。文献[27]提出用一种改进的碳平衡法量化砖窑窑道和无组织排放源的碳排放因子,从而核算砖窑固定源CO₂排放量及无组织CO₂排放量,结果表明,无组织排放的碳排放因子远高于固定源。国内外针对火电厂无组织CO₂排放监测研究较少,由于无组织排放具有排放点广、难以量化和管理困难等特点,且无组织排放源种类繁多^[28],火电厂产业结构复杂,同时受气候环境因素的影响,CO₂的扩散和稀释取决于大气的运动状况,在不同气象条件下,同一排放源对同一地点的CO₂浓度可能相差数十倍,其排放量不易确定,监测难度大^[29]。另外,无组织CO₂排放具有很强的时空分布特性^[30]。火电厂开放式区域无组织CO₂排放监测的重难点在于实现被监测对象的区域全覆盖性、数据实时性以及监测的准确性。

目前,无组织排放监测方式分为点、线、面3种,均可应用在火电厂CO₂监测中。点监测是直接对火电厂无组织排放范围中某个浓度点进行采样分析。点监测技术操作简单,应用广泛,但覆盖空间有限,时效性较差,不能满足火电厂CO₂浓度长时空变化,只能用于气象环境稳态的常规监测^[31]。线监测是利用红外光谱分析仪等设备对直线上最远1 km距离进行监测。与点监测技术相比,线监测技术时效性较好,时空覆盖率较高,但分辨能力较低,识别的物质较少^[32]。面监测结合风向、风速与遥感技术融合驱动,对直径1 km 以内的空间进行监测。面监测技术覆盖范围大,无法进行组分定性分析,不适合长期在线监测^[33]。在实际应用中,一般采用多种监测技术相结合的方式实现无组织排放监测的全覆盖性及准确性。

欧美对石化行业等挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)无组织排放监测制定

了一系列监测标准方法,规范了企业工艺生产区域排放标准^[34-35],但对CO₂无组织排放监测并没有制定相关标准。文献[36]基于Voronoi算法,利用环境地理位置、设备数据传输量等信息作为约束条件,以最高碳负荷为中心,在高浓度区域展开独立点监测的三角划分规则,或者采用点、面监测相结合的圆形划分规则;通过应用气体扩散模型预测点源的最大浓度点,并据此进行布点;最后,利用Voronoi算法验证所选择布点的合理性,如图2所示。图中:连续监测及流量监测是指固定碳排放源实时监测(CEMS系统);厂界监测是指火电厂监测区域定义及监测边界界定,确定测量范围;厂区监测是指火电厂无组织排放监测;主导方向是指无组织排放监测与固定源排放监测网络交互;高低浓度排放区是指通过火电厂生产工艺、功能分布不同及高斯分散模型,划分高低浓度排放区。

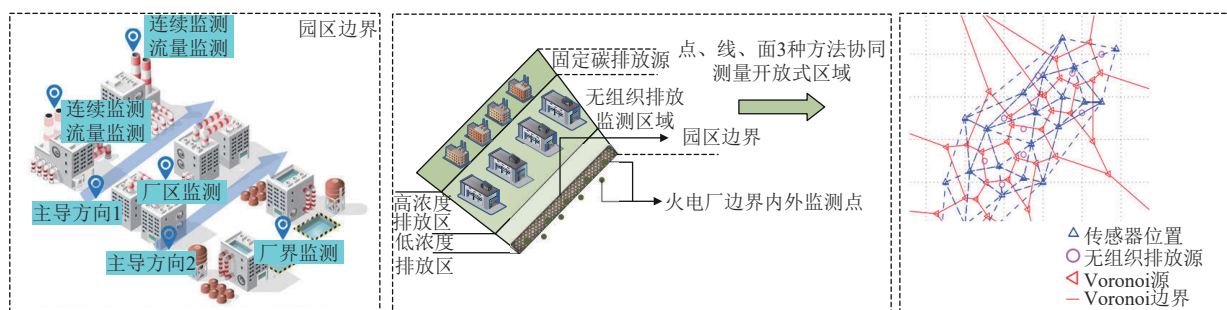


图2 火电厂CO₂无组织排放监测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of carbon fugitive emission monitoring in thermal power plant

文献[37]针对无组织排放点、线、面3种监测方式,综述了各监测方式的主要问题与技术难点。文献[38]利用点、线监测的大气层析成像技术和开放路径的傅立叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) CO₂传感器,对澳大利亚某实验站的CO₂排放进行量化,并根据高斯烟羽模型的水平方向浓度分布进行拟合,从而提高监测的精确度。文献[39-41]研究指出,利用传感器网络对排放源的位置和强度进行估计存在不可靠性,为此,提出了一种结合贝叶斯反演和大气层析成像技术的方法,用于量化CO₂无组织排放强度并确定点源位置,研究结果表明,在适宜的风向下,所获取的数据是可靠的,

但仍需对数据进行进一步校准以提高其精度。

目前,国内对无组织排放监测研究较少,相关技术规范匮乏。不同于固定源排放监测,近20年来无组织排放监测研究进展比较缓慢。部分企业及研究单位只是小范围进行监测,并没有形成监测体系、规范技术与运行管理制度。其原因主要是:各行业生产工艺及功能分布不同,无组织排放源种类繁多,存在监测边界不确定等因素。在火电厂实际监测工作中,监测环境对火电厂无组织排放监测布点的影响较大,需要对具体问题进行具体分析。在《大气污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T 55—2000)中规定了监测的适宜条件及初始监测点位设置准则,如表2所示。

表 2 各气象因子适宜程度分类
Tab. 2 Classification of suitability of meteorological factors

各类气象因子	适宜条件			
风向变化大小/(°)	<15	15~29	30~45	>45
平均风速/(m/s)	1.0~2.0	2.1~3.0	3.1~4.5	>4.5
大气稳定度等级	F、E	D	C	B、A
适宜程度类别	a	b	c	d

注：A、B、C、D、E、F 分别表示强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定、稳定；a、b、c、d 表示监测适宜程度递减。

国内外无组织排放监测对象基本为 VOCs，并取得了一定进展。文献[42]对炼油企业 VOCs 无组织排放监测现状与发展情况进行了综述，总结了各类 VOCs 无组织排放量监测技术原理及适用范围。我国颁布了《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822—2019)等一系列标准，规定了厂区 VOCs 监测技术规范，为火电厂无组织 CO₂ 排放监测提供了良好的技术参考。火电厂无组织排放监测技术应用重难点概括如下：

- 1) 由于火电厂厂房厂区数量较多，需考虑在局部流场、涡流情况下监控点的布设方法，同时布点位置易受到外部环境的影响，需在适宜的条件下进行监测。
- 2) 地理环境作为不可抗力，会严重影响信息交互，火电厂大多建在农村或偏远山区，易受到网络覆盖限制。由于监控设备需要在不考虑位置的情况下通过网络发送传感器数据，因此系统需采用全覆盖通信技术。
- 3) 火电厂监测规模较大，CO₂ 检测数据吞吐量较大，传统数据服务技术不能满足数据信息传输高效、高质要求，需研究一种数据分布服务的 CO₂ 浓度检测装置，保证数据有效、信息可靠。
- 4) 监控点设备长期在野外运行，频繁更换或调试支持设备运行的动力源，会导致人为干扰因素较大，影响监测精度，需要完备的电力支持网络来保证监测信息可靠。
- 5) 相关无组织排放监测技术标准及方法尚未成熟，难以保证 CO₂ 排放数据的准确性，连续监测设备对企业硬件一次性投入有要求，同时对企业整体管理及人员水平要求较高，数据主要通过采集获得，缺少台账。

3 火电厂 CO₂ 计量技术发展方向

目前，火电厂 CO₂ 计量方法以核算为主、监测为辅。火电厂 CO₂ 排放监测技术既是现有 CO₂ 计量技术的升级与拓展，又是未来计量火电厂 CO₂ 排放量的重要组成部分。该技术已逐渐被应用在复杂工业园区，与 CO₂ 核算技术交织融合。虽然火电厂固定源排放已形成成熟的监测技术，但随着 CO₂ 监测全覆盖性要求提高，对火电厂无组织排放监测需求逐渐增加，这些监测数据最终将接入碳交易市场。

3.1 火电厂 CO₂ 核算技术发展方向

针对核算方法，一些火电厂，特别是年代久远的火电厂，可能存在收集燃料排放因子、产品含碳总量等数据不准确、不全面的问题，导致核算结果准确度不高，同时火电厂核算时效性较差，无法满足即时碳交易需要。随着能源转型的推进，火电厂需要改变传统的以整个厂区为独立个体核算方式，如何对火电厂不同设备、系统和工艺等进行独立核算，以便得到更精确的 CO₂ 排放量，是未来 CO₂ 核算技术的主要研究方向之一。

3.2 火电厂 CO₂ 监测技术发展方向

固定源排放监测 CO₂-CEMS 系统虽然已相对成熟，但还存在数据准确性低、监测系统与 CEMS 耦合二次开发成本高等问题，需开发更简易、更精确的传感装置，使 CEMS 系统更易于安装及操作，以获得更准确的排放数据，这可以作为 CO₂-CEMS 系统开发的重要研究方向之一。CO₂-CEMS 系统长期工作在高温、高烟的恶劣环境下，为了确保系统能够在恶劣环境下稳定运行，需要部署能适应高温环境的封装和保护措施，同时研制耐高温、低成本的 CO₂ 浓度监测装置，以提升系统的稳定性，这也是未来 CO₂-CEMS 系统开发的重要研究方向之一。

火电厂无组织排放监测需考虑排放源扩散情况，在外部环境影响下，火电厂 CO₂ 负荷场的建立主要依靠火电厂 CO₂ 浓度和流量 2 个数据，如何获取可靠的数据来源是建立火电厂 CO₂ 负荷场的前提，也是未来研究火电厂无组织排放监测布点的前提。无组织排放监测布点规则虽然在《大气

污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T 55—2000)有明确的规定,但需要针对具体场景进行具体分析,且只考虑了平面(即横纵坐标方向)的布点方案,并未考虑在空间上的可操作性。考虑到火电厂无组织排放布点算法创新性较高,实现较为复杂,未来可以火电厂CO₂负荷场式布点方案为主。实时监测前需要火电厂外部环境信息,如地理位置、气压、风向、风速等信息,气象条件的测量与判定作为火电厂无组织排放布点算法的关键判定依据,最好能够获取实时监测的有效信息。针对特定监测项目,统计及分析适宜监测的外部环境条件也是未来重要研究方向。

火电厂CO₂监测规模较大,CO₂排放数据量较多,要保证CO₂监测信息交互及时。无论是火电厂固定源排放监测,还是火电厂无组织排放监测,监控点都较多,CO₂浓度、流量等数据要确保具有时效性,以时间为基准的数据交互传递要求网络具备强大的数据存储功能,保证监测所得数据有效。同时,在检测装置长期运行过程中,不易频繁更换或调试支持设备运行的动力源。当设备出现电力故障或电力不足时,电力支持网络能够及时获得信息,准确定位并解决故障问题。研制基于数据分布服务与电力支持网络的CO₂浓度检测装置是一个重要研究方向。

鉴于碳监测对于测量范围、精度等指标具体要求还处于模糊期,目前CO₂测量装置研发可以从量程、精度、价格3个指标考虑。通过对吸收光谱技术的初步梳理,火电厂CO₂监测装置多采用非分散红外检测技术(non-dispersive infrared, NDIR)进行研发,NDIR具有量程宽、测量种类多、价格低等优势,针对精度不足的问题,可以通过采取增加光程、温湿度补偿以及数字锁相放大器等技术提高测量精度。火电厂固定源CO₂监测装置是CO₂-CEMS系统的重要组成部分,需考虑传感器的设备运维成本、精度等因素,未来研制更高精度、更简化的监测装置是主流研究方向。无组织排放通常分布在开放式区域中,在火电厂较为分散。因此,无组织排放监测装置更需要考虑监测精度,还需要考虑每台监测装置覆盖范围的问题,这是未来无组织排放监测装置研究方向

之一。同时,火电厂无组织排放监测设备在大范围内进行,多台设备成本较高,对于火电厂并没有经济效益,如何降低无组织排放监测成本也是未来装置研制的方向之一。火电厂无组织排放监测设备除考虑上述因素外,还需考虑设备间实时互联、数据实时共享等因素。

火电厂CO₂计量技术是可监测、可报告、可核查(monitoring, reporting and verification, MRV)体系的一种。MRV是温室气体控制和减排量化的基本条件,是火电厂碳交易体系实施的基础。通过建设火电厂MRV体系,能够进行火电厂CO₂排放信息数据审定、核查、核证等业务,保证碳交易市场公开和透明化,确保CO₂计量数据有效,可用于后期核查。我国处于MRV体系建设及运行起步阶段,目前方法体系不够完善,如何基于CO₂计量技术提高MRV体系数据的采信度、认可度,增加碳市场可信度,也是未来重要研究方向。

4 结论

从核算与监测2种途径对火电厂CO₂计量技术研究进展进行了综述,对该技术应用的重难点进行了分析,并对未来发展方向和改进空间进行探讨。在今后的发展过程中,火电厂CO₂计量技术在各设备独立进行CO₂核算、研制能适应恶劣环境的CO₂监测装置、火电厂无组织排放CO₂监测的布点及算法、高低浓度边界界定、外部环境信息交互等方面仍有很大的研究空间。另外,如何将火电厂CO₂计量技术与碳交易市场接轨也是重要研究方向。

参考文献

- [1] 刘含笑. 碳背景下电除尘器的节能减碳分析[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 738-744.
LIU H X. Energy saving and carbon reduction analysis of electrostatic precipitator under double carbon background[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 738-744.
- [2] 郑国光. 支撑“双碳”目标实现的问题辨识与关键举措研究[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 1-8.
ZHENG G G. Problem identification and key measures to support the achievement of carbon peak and carbon

- neutrality[J]. *Electric Power*, 2023, 56(11): 1-8.
- [3] 董瑞, 高林, 何松, 等. CCUS技术对我国电力行业低碳转型的意义与挑战[J]. *发电技术*, 2022, 43(4): 523-532.
- DONG R, GAO L, HE S, et al. Significance and challenges of CCUS technology for low-carbon transformation of China's power industry[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(4): 523-532.
- [4] 饶庆平, 郝建刚, 白云山. 碳排放目标背景下我国天然气发电发展路径分析[J]. *发电技术*, 2022, 43(3): 468-475.
- RAO Q P, HAO J G, BAI Y S. Analysis on the development path of natural gas power generation in china under the background of carbon emission target[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(3): 468-475.
- [5] 袁加梅, 尤佳, 周永刚, 等. 电热耦合系统全流程碳排放计量技术[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(11): 18-25.
- YUAN J M, YOU J, ZHOU Y G, et al. The whole-process carbon emission metering technology for electro-thermal coupled system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(11): 18-25.
- [6] 刘子华, 曹瑞峰, 赵志扬, 等. 基于碳排放流的综合能源系统碳排放监测方法[J]. *浙江电力*, 2023, 42(10): 65-72.
- LIU Z H, CAO R F, ZHAO Z Y, et al. A carbon emission monitoring method for integrated energy systems based on carbon emission flow[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(10): 65-72.
- [7] 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 W Y, CHEN X X, LU J D, 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.
- [8] 招景明, 李经儒, 潘峰, 等. 电力碳排放计量技术现状及展望[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 1-8.
- ZHAO J M, LI J R, PAN F, et al. Current status and future prospects of electricity carbon emission measurement technology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 1-8.
- [9] 北京市市场监督管理局. 二氧化碳排放核算和报告要求 电力生产业: DB11/T 1781—2020[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2020.
- Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Requirements for carbon dioxide emission accounting and reporting power generation enterprises: DB11/T 1781—2020[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration, 2020.
- [10] 周向忠, 罗子明, 梁成虎, 等. 炼化企业碳平衡法计算 CO₂ 排放量[J]. *石化技术*, 2023, 30(6): 268-270.
- ZHOU X Z, LUO Z M, LIANG C H, et al. Carbon balance method for calculating CO₂ emissions in refining and chemical enterprises[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(6): 268-270.
- [11] 李胜杰. 水泥企业碳排放计量方法研究与系统开发[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2013.
- LI S J. Research and system development of carbon emission measurement methods for cement enterprises [D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2013.
- [12] 龙建平. “碳中和”目标下火电机组远方碳排放监测系统设计与应用[J]. *广西电力*, 2021, 44(2): 10-13.
- LONG J P. Design and application of a remote carbon emission monitoring system for thermal power unit to help achieve the carbon neutrality goal[J]. *Guangxi Electric Power*, 2021, 44(2): 10-13.
- [13] 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: 国家能源局, 2021.
- National Energy Administration. Technical specifications for continuous monitoring of carbon dioxide emissions from flue gas of thermal power plants: DL/T 2376—2021[S]. Beijing: National Energy Administration, 2021.
- [14] 王霖晗. 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.
- WANG M H. Research on carbon emission monitoring system and accounting method of thermal power plant [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.
- [15] SLONG S E, NORRIS J E, CARNEY J, et al. Provision of primary NIST traceability to support vapor phase mercury emissions monitoring of combustion sources using isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(5): 909-919.
- [16] 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 M H, ZHU L, ZHANG J J, 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.
- [17] 周春蕾, 王明, 李梦, 等. 美国火电机组碳排放连续监测机制研究[J]. *价格理论与实践*, 2018(11): 54-57.
- ZHOU C L, WANG M, LI M, et al. The research on the mechanism of continuous carbon emission monitoring of thermal power units in the U.S.[J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(11): 54-57.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] GURNEY K R, HUANG J, COLTIN K. Bias present in US federal agency power plant CO₂ emissions data and implications for the US clean power plan[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(6): 064005.
- [21] ZHU R, ZHANG Y, YUAN Y, et al. Deposition loss of particles in the sampling lines of continuous emission monitor[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(6): 1483-1492.
- [22] THULL B, WAEBER M. Software-supported uprating of availability for continuous emission monitoring systems (CEMS) using predictive systems (PEMS)[J]. *Gefährstoffe Reinhaltung Der Luft*, 2017, 77(6): 257-260.
- [23] 国家环境保护总局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157—1996[S]. 北京: 国家环境保护总局, 1996.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. The determination of particulates and sampling methods of gaseous pollutants emitted from exhaust gas of stationary source: GB/T 16157—1996[S]. Beijing: State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, 1996.
- [24] 国家环境保护总局. 固定源废气监测技术规范: HJ/T 397—2007[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2007.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Technical specification for emission monitoring of stationary source: HJ/T 397—2007[S]. Beijing: State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, 2007.
- [25] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- TAN C. Study on monitoring methods of carbon emission in coal fired power plants[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [26] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南: ISBN 92-9169-520-3[S]. 东京: 全球环境战略研究所, 2006.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC national greenhouse gas inventory guidelines: ISBN 92-9169-520-3[S]. Tokyo: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [27] CHEN Y C, DU W, ZHUO S J, et al. Stack and fugitive emissions of major air pollutants from typical brick kilns in China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 421-429.
- [28] 霍玉侠. 石化工业无组织排放环境影响评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- HUO Y X. Study on environmental impact assessment of fugitive emission in petrochemical industry[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [29] FARHANE M, ALEHYANE O, SOUHAR O. Three-dimensional analytical solution of the advection-diffusion equation for air pollution dispersion[J]. *ANZIAM Journal*, 2022, 64: 40-53.
- [30] 陈诗龙. UCT工艺污水处理厂二氧化碳排放特性[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- CHEN S L. CO₂ emission characteristics of UCT process wastewater treatment plant[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [31] NA K, KIM Y P. Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(15): 2603-2614.
- [32] HONG D W, CHO S Y. Improved methods for performing multivariate analysis and deriving background spectra in atmospheric open-path FT-IR monitoring[J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(3): 299-308.
- [33] 李凌波, 李龙, 程梦婷, 等. 石化企业挥发性有机物无组织排放监测技术进展[J]. *化工进展*, 2020, 39(3): 1196-1208.
- LI L B, LI L, CHENG M T, et al. Current status and future developments in monitoring of fugitive VOC emissions from petroleum refining and petrochemical industry[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(3): 1196-1208.

- [34] U. S. Environmental Protection Agency. Clean air act standards and guidelines for petroleum refineries and distribution industry[EB/OL]. (2016-10-06)[2023-10-06]. <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/clean-air-act-standards-and-guidelines-petroleum-refineries-and>.
- [35] SMITH T, INNOCENTI F, ROBINSON R A. 1st interim report on CEN/TC264/WG38 stationary source emissions-standard method to determine fugitive and diffuse emissions of volatile organic compounds into the atmosphere[EB/OL]. (2019-06-06)[2023-10-06]. https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/krdl_dateien/WG_38_Interim_Report.pdf.
- [36] FEITZ A, SCHRODER I, PHILLIPS F, et al. The Ginninderra CH₄ and CO₂ release experiment: an evaluation of gas detection and quantification techniques [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 70: 202-224.
- [37] MACKIE K R, COOPER C D. Landfill gas emission prediction using Voronoi diagrams and importance sampling[J]. Environmental Modelling and Software, 2009, 24(10): 1223-1232.
- [38] HUMPHRIES R, JENKINS C, LEUNING R, et al. Atmospheric tomography: a Bayesian inversion technique for determining the rate and location of fugitive emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(3): 1739-1746.
- [39] TKUSKE T, JENKINS C, ZEGELIN S, et al. Atmospheric tomography as a tool for quantification of CO₂ emissions from potential surface leaks: signal processing workflow for a low accuracy sensor array[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 4065-4076.
- [40] FEITZ A, JENKINS C, SCHACHT U, et al. An assessment of near surface CO₂ leakage detection techniques under Australian conditions[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 3891-3906.
- [41] JENKINS C, KUSKE T, ZEGELIN S. Simple and

effective atmospheric monitoring for CO₂ leakage[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 46: 158-174.

- [42] 李凌波, 程梦婷, 李龙, 等. 炼油企业挥发性有机物无组织排放通量监测现状与发展[J]. 中国环境监测, 2020, 36(3): 19-28.

LI L B, CHENG M T, LI L, et al. Current and future developments in fugitive volatile organic compounds emission flux monitoring in petroleum refining industry[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(3): 19-28.

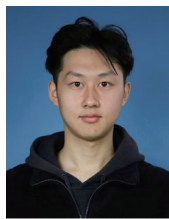
收稿日期: 2023-10-19.

作者简介:



张安安

张安安(1977), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统碳监测与碳核算研究, 2564764@qq.com;



周奇

周奇(1999), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统碳计量研究, 18980123798@163.com;



李茜

李茜(1988), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统碳计量研究, swpuliqian@163.com。

(责任编辑 尚彩娟)