

“双碳”目标下火电厂 CO₂ 计量 CEMS 技术

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。

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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 计量技术成为了实现 CO_2 减排措施的基础^[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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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

$$\text{燃料电 } E = E_{\text{燃料}} + E_{\text{电}}$$

(1)

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

燃料 $E_{\text{燃料}}$ 表达式如下:

$$\text{燃料 } E_{\text{燃料}} = \sum_{i=1}^n \text{AD}_{\text{燃料 } i} \times \text{EF}_i$$

(2)

$$\text{燃料 } \text{AD}_{\text{燃料 } i} = \text{FC}_{\text{燃料 } i} \times \text{NCV}_{\text{燃料 } i}$$

(3)

式中:燃料 $\text{AD}_{\text{燃料 } i}$ 为第 i 种燃料的 CO₂ 活动数据, GJ; EF_i 为第 i 种燃料的 CO₂ 排放因子, t/GJ; 燃料 $\text{FC}_{\text{燃料 } i}$ 为

第 i 种燃料的消耗量， t ；燃料 NCV 燃料 i 为第 i 种燃料的平均低位发热值， GJ/t 。

电 E 电表达式如下：

$$\text{电外购电电 } E \text{ 电} = AD \text{ 外购电} \times EF \text{ 电} \quad (4)$$

式中：外购电 AD 外购电为火电厂购入电量， $MW \cdot h$ ；电 EF 电为火电厂区域电网年平均供电排放因子， $t/(MW \cdot h)$ 。

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 CO_2 排放情况，合理选取碳排放因子，计算 CO_2 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 CO_2 核算的前提是获取准确全面的 CO_2 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 CO_2 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

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

火电厂燃料剩余物质带出的碳总量表示为

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

火电厂排放的碳排放总量表示为

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

火电厂碳平衡表示为

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

式中：原料 $M_{m \text{ 原料}}$ 为原料 m 的年消耗量，t；碳 α_m 碳为原料 m 中碳的质量分数，%；产品 $M_{j \text{ 产品}}$ 为燃料剩余物质 j 的年消耗量，t；碳 β_j 碳为产品 j 中碳的质量分数，%；排放 $M_{k \text{ 排放}}$ 为废弃物 k 的年排放量，t；碳 η_k 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 、 SO_2 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 CO_2 排放源主要包括：

- 1) 煤炭、天然气等化石燃料燃烧所产生的 CO_2 ；
- 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 CO_2 ；
- 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 CO_2 。

在采用监测法对火电厂 CO_2 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凭的所有车辆产生的 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。

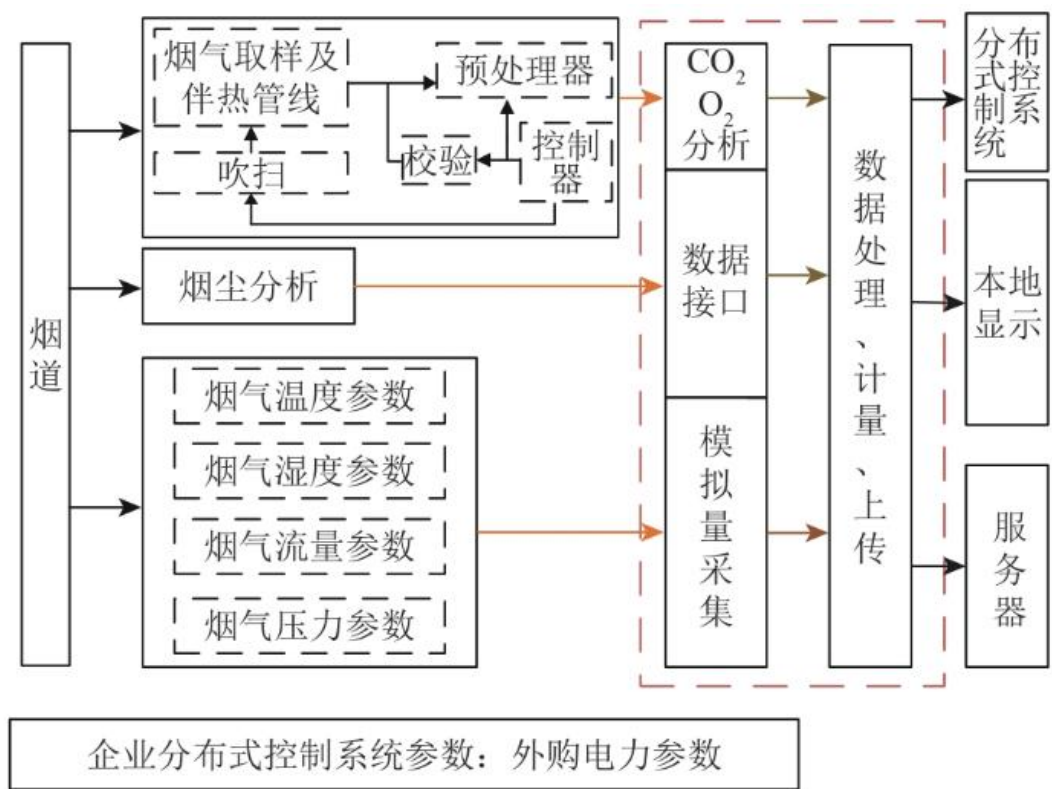


图 1 CO₂-CEMS 系统示意图

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。

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。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/045100141040011133>