

火力发电厂碳排放技术标准及在线监测方法研究

申舒兰 杨晓雷 张力 张权锐

山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013

摘要：随着中国“双碳”目标的深入推进，火力发电作为碳排放的重点行业，其精准、可靠的碳排放监测与核算技术已成为行业绿色低碳转型的核心基础。本文系统研究了国内外碳排放计量的主流技术路线与方法，解读了适用于国内火电厂的碳排放核算法规体系。深入剖析了燃煤电厂目前主流的排放因子法与发展中的实测法的技术特点、优缺点及适用范围。在此基础上，提出了与智能电厂平台融合的碳排放监测应用模块功能设计构想，并为后续工程实施提供了针对性建议，以期为火电厂碳排放的精准管控与数字化、智能化发展提供技术参考。

关键词：火力发电；碳排放；在线监测；排放因子法；实测法；智能电厂

1 前言

电力行业是我国最大的单一碳排放行业，是碳排放和碳减排的重要领域。因此，精准的电力碳排放计量是电力行业参与碳交易的基础。目前燃煤电厂 CO₂ 连续监测尚处于试点阶段。研究燃煤电厂 CO₂ 计量方法，提高计量的准确性和一致性，在“双碳”目标早日实现的背景下具有重大的现实意义和应用价值，准确地评估电厂的碳排放状况，促进燃煤电厂向更为环保、更加高效率的发展方向转变，有助于“双碳”目标的最终实现。

2. 国外碳排放计量的主要技术路线和方法

美国火电厂采用实测法核算碳排放量，将相关技术标准和规范纳入法规体系，明确要求 25MW 以上燃煤机组必须采用实测法，并提交温室气体强制性报告。在线监测法（CEMS）也是重要手段，据统计，约 70% 的火电厂已安装 CEMS。由于美国烟囱普遍较低，CEMS 监测位点常设于烟囱 80 米高处，以确保气态污染物混合均匀，提高数据代表性。此外，燃煤及采用其他固体燃料的发电机组必须使用 CEMS 监测 CO₂，而燃气和燃油机组则可选择排放因子法。CEMS 需至少每 15 分钟检测一次，并计算每小时平均值。美国的强制报告制度有效规范了企业 CO₂ 排放监测方法，尤其强化了在线监测法的应用^[1]。

欧盟采取核算法与实测法并行的碳计量方式，根据电厂碳排放量划分层级，并设定不确定度要求。鉴于欧盟燃煤电厂煤种单一，核算法应用更为广泛。同时，欧盟高度重视 CEMS 的发展，制定了一系列法规以确保其质量控制。欧盟

碳排放交易体系法规制度旨在提升核算方法的灵活性、数据质量及在线监测法的认可度，对 20MW 以上的火电机组核算数据实施规范化管理，允许根据实际需求选择核算法或在线监测法。

3. 国内适用于火力发电厂的碳排放计算及核查的主要规程规范

从 2013 年发布《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》，及 2022 年 12 月发布了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》以来，目前已有相关标准 5 项，对于标准研究和工程实践具有很强的指导作用。生态环境部公布的《生态环境监测规划纲要（2020—2035 年）》提出遵循“核算为主、监测为辅”的原则，探索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，在火电行业率先开展 CO₂ 排放在线监测试点^[2]。

· 核心政策文件：《碳排放权交易管理办法（试行）》明确了全国碳市场的总体框架，规定重点排放单位需履行排放报告和清缴履约义务。

· 技术规范体系：

· 《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》：它明确规定现阶段采用排放因子法作为核算标准方法。详细规定了活动数据（燃煤元素碳含量、低位发热量、购入电量等）的获取方式、测量频次、数据来源（需遵循 GB/T 213、GB/T 476 等煤质分析国标），并给出了排放因子的计算公式和缺省值。

· 《火力发电企业温室气体排放核查技术指南》：指

导第三方核查机构如何对企业的排放报告进行审核，确保数据的真实性、准确性和完整性。其核查重点包括：测量设备的校准与检定记录、原始凭证的规范性、数据流的内控管理、计算过程的正确性等。

当前国家强制规范仍以核算方法为主，但对数据的精准性要求极高。虽然实测法(CEMS)尚未成为法定核算依据，

但《指南》也鼓励企业使用连续监测数据进行内部校验和管理，为未来向实测法过渡留下了空间。

4. 燃煤电厂碳计量主要方法

目前燃煤电厂碳计量主要方法有排放因子法(核算法)和实测法(CEMS测量法)。

序号	方法	发展现状	优点	缺点	适用范围
1	排放因子法(核算法)	现行主流强制方法，技术成熟，在全国碳市场普遍应用。	1. 方法简单，易于理解和实施。 2. 初始投资成本低。 3. 有完善的国家标准和技术规范支持。	1. 误差较大，是多种测量误差的累积(煤量、煤质分析误差)。 2. 时效性差，通常基于月度或年度报表数据，无法实时反映排放情况。 3. 对煤质取样、制样、化验等环节的质量控制要求极高。	适用于所有火电厂，是目前碳配额履约、官方排放报告的唯一法定依据。
2	实测法(CEMS测量法)	处于试点示范和内部管理应用阶段，尚未作为全国碳市场法定核算依据，但技术快速发展。	1. 精度高，可反映机组实时运行状态下的真实排放。 2. 时效性强，可实现小时级甚至分钟级的实时监测。 3. 有助于精准定位高碳排放工况，为运行优化提供数据支撑。	1. 初始投资高，系统复杂，涉及精密仪表和安装工程。 2. 运维要求高，需定期校准和维护，对人员技术水平要求高。 3. 目前缺乏作为核算依据的国家标准认证体系。	适用于对碳排放管理有精细化需求的大型集团电厂，用于内部管理、对标、优化、校验核算方法，并为未来政策变化做技术储备。

1) 排放因子法的计算方法

- 计算方法： $E_{CO2} = AD \times EF \times GWP$ 其中：
- E_{CO2} : CO_2 排放量 (t)
- AD: 燃料消耗量 (t 或 Nm^3)
- EF: 排放因子 (tCO_2/t 或 tCO_2/Nm^3)， $EF = NCV \times CC \times OF \times 44/12$
- NCV: 燃料平均低位发热量 (GJ/t)
- CC: 燃料单位热值含碳量 (tC/GJ)
- OF: 碳氧化率 (%)
- 44/12: CO_2 与 C 的分子量之比
- GWP: 全球变暖潜势 (CO_2 为 1)

· 误差情况：总误差是各环节误差的合成。主要误差来源包括：

- a. 燃煤消耗量(AD)测量误差(1~2%): 来自皮带秤、给煤机等设备的精度。
- b. 煤质分析误差(是主要误差源)：
 - 低位发热量(NCV)测量误差(1%)。
 - 元素碳含量(CC)测量误差(可达3~5%甚至更高)，取样代表性不足是最大问题。
 - c. 氧化因子(OF)取值误差(通常取缺省值0.99，存在一定不确定性)。综合误差通常在5%以上。
- 实施要求：
 - a. 计量设备校准：所有燃料计量器具必须按期由有资质的机构进行检定/校准。

b. 规范煤样采集与检测：必须严格按照 GB/T 19494 等标准进行机械化采样、制样，并送往有 CMA/CNAS 资质的实验室检测元素碳含量，确保数据的代表性和准确性。

c. 数据记录与存证：建立从燃料入厂、采样、化验、消耗到计算的完整数据链台账，所有原始记录必须可追溯、可核查^[3]。

2) 实测法

- 系统构成及功能：
 - a. 气态污染物(CO_2)监测单元：采用非分散红外(NDIR)或傅里叶变换红外(FTIR)分析仪，连续测量烟气中 CO_2 的干基体积浓度。
 - b. 烟气参数测量单元：
 - 流速：采用差压法(皮托管)或超声波法，测量烟气流速，用于计算体积流量。
 - 温度、压力、湿度：Pt100 温度传感器、压力传感器、湿度仪，用于将测量值换算为标准状态下的干基值。
 - c. 数据采集与处理系统(DAS)：实时采集各仪表信号，计算瞬时排放速率和累计排放量，生成报表和数据记录。
 - c. 技术性能：
 - a. 相对准确度：参照《HJ 75-2017 固定污染源烟气(SO_2 、 NOX 、颗粒物)排放连续监测技术规范》要求，通常要求相对准确度 $\leq 15\%$ (与参比方法对比)。
 - b. 零点/量程漂移： $\leq \pm 2.0\% F.S./24h$ 。
 - c. 响应时间： $\leq 200s$ 。

· 仪表系统设计与安装要求：

a. 点位选择：应安装在烟气分布均匀、流速稳定的直管段，避开弯头、变径管等扰流部件（前4后2原则）。

b. 平台与安全：需建设符合安全标准的采样平台（护栏、梯子、照明），满足防爆、防雷、防静电要求。

c. 伴热与预处理：采样探头至分析仪的整个采样管线需全程伴热（通常>120°C），防止冷凝损失SO₂；预处理系统需高效除尘、除湿，保证气体清洁干燥。

· 工程造价：一套完整的烟气碳排放CEMS（不含安装工程）的投资成本通常在80万至150万元人民币之间。若包含安装施工、平台改造、调试等，总工程费用可能达到150万至250万元。具体价格因品牌、配置（如是否与现有环保CEMS系统整合）、电厂具体条件而异。

5. 与智能电厂平台的融合

碳排放CEMS不应是信息孤岛，而应深度融入智能电厂大数据平台，构建“碳排放智能监测中心”。

· 数据集成：通过接口从DCS、SIS、燃料管理系统等获取机组负荷、煤量、煤质分析等数据。

· 核心功能模块设置：

1. 实时看板：全景展示全厂、各机组的实时碳排放强度(g/kWh)、累计排放量、碳轨迹等关键指标。

2. 多维度对标分析：支持按时间（小时/日/月）、机组、负荷区间等多维度进行碳排放绩效对标，自动生成分析报告。

3. 碳排放在线诊断与优化：建立机组碳排放特性模型，实时计算理论最优排放值，与实测值进行比对，诊断偏离原因（如煤质变化、燃烧效率下降等），并推送优化建议（如配煤掺烧方案、风煤比调整）。

4. 碳资产管理与预测：集成碳配额数据，实时计算碳配额盈亏情况，并基于发电计划预测未来碳排放和配额需求，为碳交易决策提供支持。

5. 数据直报与核查支持：一键生成符合要求的排放报告，并具备完整的数据溯源功能，快速响应第三方核查。

6. 后续工程实施建议

1) 策略先行，分步实施：集团层面应统一规划，明确碳排放监测体系建设的目标和路径。新建机组可考虑直接配套建设CEMS；现有机组可先完善核算法的数据质量，再择机开展CEMS试点，逐步过渡。

2) 技术选型与认证：在选择CEMS技术时，应优先选择技术成熟、有大量成功案例的供应商。密切关注国家关于碳排放连续监测的技术规范和政策动向，确保系统未来可通过认证。

3) 重视数据质量与人才培养：无论是核算还是实测，核心都是数据质量。必须建立严格的计量管理体系和质量控制程序。同时，加强专业技术人才的培养，使其掌握CEMS运维、数据分析和碳管理知识。

4) 探索与碳市场的衔接：积极与主管部门沟通，参与碳排放连续监测方法的试点和应用研究，推动实测数据在未来碳市场核算、交易与履约中发挥更大作用。

7. 结论

建立精准、高效的碳排放监测体系是火电行业应对“双碳”挑战的必然选择。当前，以精准测量为基础的排放因子法仍是法定核算的基石，而实测法(CEMS)以其实时、精准的特性，将成为电厂精细化管理和未来技术发展的方向。二者在很长一段时间内将是并存、互补的关系。将碳排放监测与智能电厂平台深度融合，构建集监测、分析、管理、优化于一体的数字化碳管控系统，不仅能满足合规要求，更能挖掘碳数据价值，驱动发电企业实现节能降耗、降本增效，最终迈向绿色、低碳、智能的高质量发展新阶段。

参考文献：

[1] 冯晶晶. 欧盟和美国火电厂碳排放连续监测体系研究 [J]. 绿色建筑, 2025, 17(03):82-85.

[2] 张志迪. 探析火力发电厂碳排放测算方法和减排方法 [J]. 中国设备工程, 2024, (12):220-222.

[3] 李凤宁, 张景伟, 赵阳, 等. 火电厂二氧化碳排放量计算方法研究 [J]. 东北电力技术, 2024, 45(1):46-49.

作者简介：

姓名：申舒兰

出生年月：1981.05.11

性别：女

民族：汉

籍贯：山东济南

学历：硕士

职称：高级工程师

工作领域：仪表与控制