

“双碳”目标下火电厂碳核算主要方法综述

刘雪原^{1,2},陈玉敏^{1,2},魏阳^{1,2},孟拓⁴,刘悦³,周奇⁴,向银太³,李茜⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 西昌 615000; 4. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要:中国提出的“碳达峰、碳中和”目标旨在应对全球气候变化,减少温室气体排放,最终实现碳排放量与碳吸收量之间的平衡,从而为全球环境保护和可持续发展做出贡献。作为中国最大的碳排放源,火电行业承担的减排任务极为艰巨,其减排活动具有重要意义。火电厂碳核算是针对火电厂所排放的温室气体进行测量、计算和报告的活动。火电厂主要的温室气体是二氧化碳,其排放量与燃料类型、工艺流程、燃烧效率等因素有关。针对火电厂碳核算综述了主要标准、政策、方法和技术,分析了各种方法的优缺点和适用范围,展望了火电厂碳核算的发展趋势和挑战。

关键词:火电厂; 碳核算; 核算边界; 碳核算方法

中图分类号:F 426.61 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2024)05-0034-10

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240506

Overview of Carbon Accounting Methods for Thermal Power Plants under Dual Carbon Target

LIU Xueyuan^{1,2}, CHEN Yumin^{1,2}, WEI Yang^{1,2}, MENG Tuo⁴, LIU Yue³, ZHOU Qi⁴, XIANG Yintai³, LI Qian⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Xichang 615000, Sichuan, China; 4. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: "carbon peaking and carbon neutrality" goals proposed by China aim to address global climate change, reduce greenhouse gas emissions and ultimately achieve a balance between carbon emissions and carbon absorption, so as to make a contribution to global environmental protection and sustainable development. As the largest source of carbon emissions in China, the thermal power industry bears a significant burden in emission reduction which makes its reduction efforts vitally important. Carbon accounting in thermal power plants involves measuring, calculating and reporting the emitted greenhouse gases. The main greenhouse gas from thermal power plants is carbon dioxide, and its emissions are related to the factors such as fuel type, process flow and combustion efficiency. Aiming at carbon accounting of thermal power plants, an overview of main standards, policies, methods and technologies is provided, the advantages and disadvantages of various methods and their applicability are analyzed, and the development trends and challenges of carbon accounting in thermal power plants are prospected.

Key words: thermal power plant; carbon accounting; accounting boundary; carbon accounting method

0 引言

实现“双碳”目标具有重要意义^[1-4],而“双碳”

目标的实现离不开火电厂碳核算。火电厂碳核算的目的在于控制和减少碳排放,以实现低碳可持续发展。根据《巴黎协定》,各国承诺在本世纪中叶实现温室气体排放达到净零,控制全球平均气温升幅在2℃以内,努力将其限制在1.5℃以内。2020年9月

22日,习近平主席在联合国大会上宣布:中国二氧化碳排放2030年前达峰,2060年前实现碳中和。这是党中央、国务院做出的重大战略决策,是推动实现高质量发展的内在要求^[5]。火电厂碳核算是做好碳达峰、碳中和工作的重要基础,是制定政策、推动工作、开展考核的重要依据^[6]。火电厂是中国能源结构中比例最大的发电方式,也是中国最大的二氧化碳排放源之一。根据中国能源网数据,2019年中国火电行业二氧化碳排放量约为4.15 Gt,占全国能源消费二氧化碳排放量的51.7%。由此看来火电厂碳核算是实现双碳目标的关键一步^[7]。

实现火电厂碳核算的主要方法有物料衡算法、直接监测法与排放因子法^[8-10]。下面将介绍这3种方法的原理、优缺点和适用范围,以期为火电厂的碳核算提供参考。同时,结合中国火电厂碳核算的实际情况,评价不同方法的适用性和有效性,为早日实现“双碳”目标提供理论借鉴。

1 火电厂碳核算起源与主要政策

火电厂碳核算的起源受到了国内外法律法规与政策的影响。国际法规是火电厂碳核算起源的重要驱动力,它为火电厂碳核算提供了国际性的要求和标准,促使各国积极参与温室气体排放的监测与减排。除此之外,国内法律法规为火电厂碳核算做出了重要的政策支撑,为火电厂碳核算提供了国家层面的指导与规范,进一步促进了国内火电厂碳核算体系实施和完善^[10]。以下从时间维度出发结合政策意义来论述火电厂碳核算的产生。

1.1 国际碳核算起源

国际碳核算的发展可以分为4个阶段^[11]。第一阶段是从1995年到2000年,以政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)为主导,建立了国家层面的温室气体清单编制方法和标准,为全球温室气体排放量的统计和核算提供了基础。第二阶段是从2001年到2006年,以《温室气体协议》^[12]为代表,出现了多种适用于企业和项目层面的温室气体核算方法和标准,为碳市场的发展和碳交易的实施提供了支持。第三阶段是从2007年到2012年,以ISO 14064温室气体管理标准体系和《商品和服务生命周期温室气体排放评价规范》为代表,出现了多种适用于产品

和服务层面的温室气体核算方法和标准,为碳足迹的评估提供了指导。第四阶段是从2013年至今,以IPCC 2019年国家温室气体清单指南为代表,出现了多种适用于不同领域和行业的温室气体核算方法和标准,为碳达峰、碳中和提供了参考。这些国际标准与指南的制定为全球各国制定温室气体清单和进行碳交易提供了指导和规范。

国际碳核算发展的4个阶段为火电厂碳核算提供了不同层面的方法和标准。第一阶段是在国家层面,使火电厂能够按照IPCC的指南编制温室气体清单,反映碳排放情况。第二阶段是在企业和项目层面,使火电厂能够参与碳市场的交易,实现碳排放的减少和抵消。第三阶段是在产品和服务层面,使火电厂能够评估产品和服务的碳足迹,提高碳效率和竞争力。第四阶段是在不同领域和行业的层面,使火电厂能够制定“碳达峰、碳中和”的目标和措施,为全球气候变化应对做出贡献。这些方法、标准的制定和应用,促进了火电厂碳核算的起源和发展,也推动了火电厂的低碳转型和绿色发展。

1.2 国内碳核算起源

从2007年到2010年,中国根据《中国应对气候变化国家方案》^[13]建立了全国层面的温室气体清单编制和核算体系,为全球气候谈判和减排承诺提供了数据支撑。随后,从2011年到2015年,以省级试点为基础,推出了24个行业企业温室气体核算方法与报告指南,为全国碳排放权交易市场建设与碳交易参与者提供了技术规范。自2016年以来,中国以国家标准为引领,发布了13个行业企业碳排放核算国家标准,为全国碳排放权交易线上市场运行与“碳达峰、碳中和”目标实现提供了统一标准。这些阶段的举措和标准的推出,为中国的碳排放核算和碳交易提供了重要的支持和指导。

1.3 现行国内碳排放核算法律法规

2020年6月,生态环境部发布了《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》^[14],其中提出了重点温室气体排放源监测的管理体系和技术体系建设。该规划强调以核算为主、辅以监测的原则,并计划首先在火电行业进行推行。2022年,生态环境部修订了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[15]和《企业温室气体排放核查技术指导 发电设施》^[15],规范了碳排放数据质量的控制与管理过程,减少了数据造假的空间。现行国内碳排放核算法律

法规为火电厂碳核算提供了法律依据和技术指导,与此同时法律法规的完善与发展也为火电厂碳核算提供了激励措施和约束机制。按照《碳排放权交易管理办法(试行)》^[16]等相关法规和政策,规定火电厂必须参与全国碳排放权交易市场分配和交易碳排放权,要实现数据的公开性和透明性。火电厂碳核算主要政策法规见表 1。

2 火电厂碳排放源与碳核算边界

2.1 火电厂的排放源

火电厂的碳排放源是指使用化石燃料(如煤、油、气等)或掺烧化石燃料的发电设施产生的温室气体排放,主要包括化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放、购入电力所产生的二氧化碳排放以及其他温室气体排放,如甲烷、氧化亚氮、硫化氢等^[17]。

2.1.1 化石燃料碳排放

化石燃料是火电厂二氧化碳排放的主要来源,它使用煤、油、气等化石燃料作为能源,在发电过程中燃烧产生二氧化碳。这部分排放量的计算方法是:根据燃料的种类、使用量、低位发热量、碳含量等参数计算得来的活动因子,乘以相应的排放因子,得到燃料燃烧产生的二氧化碳排放量^[18]。

2.1.2 购入电力排放

这是火电厂碳排放的次要来源,是指火电厂从外部电网购入的电力所产生的二氧化碳排放。这部分排放量的计算方法是:根据购入的电量,乘以相应的电网排放因子,得到购入电力的二氧化碳排放量。

2.1.3 其他排放源

这是火电厂碳排放的较小来源,是指火电厂在生产过程中产生的其他温室气体排放,如甲烷、氧化亚氮、硫化氢等。这部分排放量的计算方法是:根据排放源的类型、活动数据、排放因子等参数,得到其

他温室气体的排放量,然后乘以相应的全球变暖潜能,转换为二氧化碳当量的排放量。

2.2 火电厂碳核算边界

火电厂的碳核算通常要囊括直接排放的二氧化碳以及其他温室气体、间接排放、能源使用、资源消耗等。这意味着火电厂的碳核算边界需要考虑燃烧煤炭、天然气等产生的直接排放,以及供应链中其他组织的间接排放和电力、热能的消耗。全面考虑这些因素有助于更好地了解火电厂碳排放情况,并采取相应的措施来减少碳排放。

根据《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》,火电厂的碳核算边界是指发电设施的主要组成部分,包括燃烧系统、汽水系统、电气系统、控制系统以及除尘、脱硫和脱硝等装置。碳核算边界不包括厂区内的其他辅助生产系统和附属生产系统。发电设施的碳核算边界如图 1 所示,用虚线框标出。

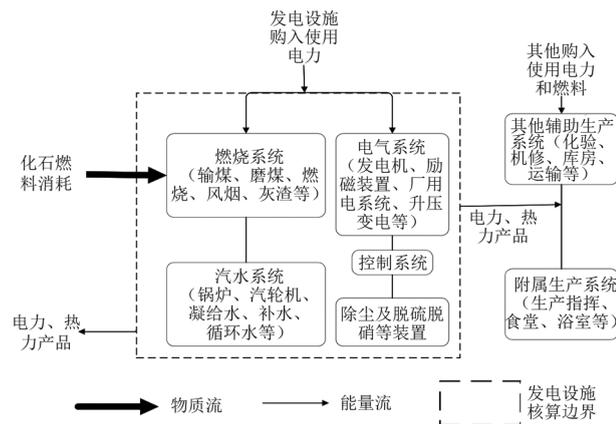


图 1 碳核算边界

3 火电厂碳核算方法

火电厂的碳核算是对火电厂的温室气体排放进行测量、计算和报告的过程。根据《IPCC 国家温室

表 1 火电厂碳核算主要政策法规

政策法规名称	发布日期	实施日期	政策内容
火电厂碳排放核算暂行办法	2013 年 11 月 4 日	2013 年 11 月 4 日	规定了火电厂在进行碳排放核算时应遵循的原则、方法和要求
火电厂节能减排审计规范	2021 年 10 月 15 日	2021 年 10 月 15 日	规定了火电厂节能减排审计的目的、范围、内容、方法、程序和要求
国家能源局关于印发《火电厂碳排放权核算管理办法(试行)》的通知	2021 年 12 月 28 日	2022 年 1 月 1 日	规定了火电厂在参与全国碳排放权交易市场时应遵循的碳排放权核算、分配、交易、监督等内容
火电厂碳排放核算技术导则(试行)	2021 年 12 月 28 日	2022 年 1 月 1 日	规定了火电厂在进行碳排放核算时应遵循的原则、方法和要求
国家能源局关于火电厂碳排放核算数据管理的通知	2021 年 12 月 28 日	2022 年 1 月 1 日	规定了火电厂在进行碳排放核算数据管理时应遵循的原则、方法和要求

气体清单指南》^[17] 纳入温室气体排放量计算的气体,包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)。火力发电厂基本生产过程是:燃料在燃烧时加热水生成蒸汽,将燃料的化学能转变成热能;蒸汽压力推动汽轮机旋转,热能转换成机械能;汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。其按燃料类型可分为燃煤电厂、燃气电厂、燃油电厂、余热发电厂。这些电厂在碳核算方法上有所不同,目前国际认可的火电厂排放二氧化碳量化方法主要有排放因子法、物料衡算法和直接监测法^[19]。

3.1 物料衡算法

物料衡算法的基本原理是物质守恒定律,即在确定核算边界后,输入物料量等于输出物料量与物料流失量的和。通过物料衡算法计算火电厂二氧化碳排放量,是利用输入物料和输出物料中含碳量差值,推算出燃烧过程中释放的二氧化碳量。燃烧过程中释放的主要含碳物料是煤炭、飞灰和炉渣等^[7]。物料衡算法的数据需求复杂,但可以提供更准确的排放数据,适用于需要精确核算特定化学物质排放的电厂,如燃气电厂。

国内研究多集中在如何优化物料衡算法以提高计算精度。例如,结合多维数据分析的方法来更精确地估算输入和输出物料的碳含量,从而提高排放量计算的准确性^[9]。许多国内燃气电厂和部分燃煤电厂已经采用物料衡算法进行碳核算,并通过详细分析飞灰和炉渣来提高二氧化碳排放量的核算精度^[8]。国际上,美国和欧盟等国家和地区已经制定了详细的技术标准和规范,如美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)和欧盟排放交易体系(European Union Emissions Trading System, EU ETS)均有明确的物料衡算法应用指导。同时,一些跨国研究项目对不同国家和地区的物料衡算法应用进行了对比,发现尽管基础原理相同,但由于能源结构和技术水平的差异,各国在具体应用中存在显著差异。物料衡算法的计算公式^[9]为

$$E_{C,out} = \left[\sum (C_{in} \cdot C) - \sum (C_{out} \cdot C) \right] \cdot \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中: $E_{C,out}$ 为火电厂碳排放,t/年; C_{in} 为输入物料量,t; C_{out} 为输出物料量,t; C 为物料含碳量,%; $\frac{44}{12}$ 为碳转

换成二氧化碳的转换系数,即二氧化碳与碳的相对原子质量之比。

目前,国内外已有一些研究与应用使用物料衡算法进行火电厂碳核算的案例。例如:文献[18]从火电厂角度分析了其内部的碳流环节,然后提出了一个基于锅炉燃烧反应的质量平衡方程来计算机组的二氧化碳排放率,并基于物料平衡法对比了不同机组的碳排放数据;文献[20]依据物料平衡法计算了煤燃烧后产生的污染因子数据;文献[21]对美国不同类型的火电厂进行了物料衡算法和直接监测法的对比分析,发现两种方法的结果基本一致,但物料衡算法更能反映火电厂内部各个过程的碳排放特征。综上数据可知,物料衡算法可以测量不同设备不同工序的具体碳排放,但是通过物料衡算法进行火电厂碳核算测量需要大量的数据和完善的基础生产记录,就中国目前的统计基础尚不满足要求^[22]。

物料衡算法面对复杂多变的生产过程较为乏力,因为复杂过程可能存在具体数据缺失等问题。图2清晰地展示了火电厂内部的碳流过程,这一过程与物料衡算法的应用紧密相关^[23]。该图揭示了从燃料处理到最终排放的各个步骤,涵盖了一氧化碳和二氧化碳的排放量、硫化物和其他污染物质的处理,以及飞灰和炉渣的处理设备和产物。通过图2,可以更好地理解火电厂内部的碳排放和循环过程,并且可以看到输入物料和输出物料中含碳物质的对比,这展示了物料衡算法在实际生产环境中的应用。

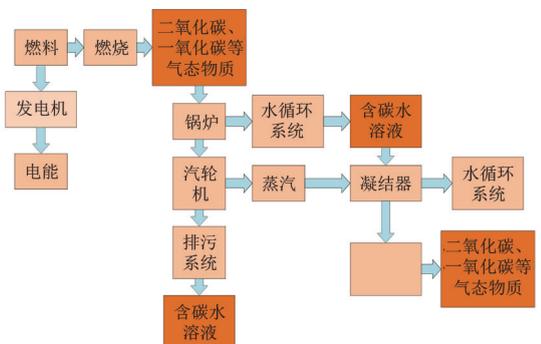


图2 火电厂内部碳流通^[19]

3.2 直接监测法

火电厂碳核算直接监测法是一种利用现场的烟气在线监测系统(continuous emission monitoring system, CEMS)^[24]直接测量火电厂烟气中二氧化碳浓度与烟气流速等参数,进而计算火电厂二氧化碳排放量的方法。直接监测法与传统的核算法相比,

具有自动化水平高、监测数据频次高、运行管理成本更经济等优势^[22],在国际上已有较成熟的应用。直接监测法和核算法是一些国家和地区双重统计碳排放量的方式。

直接监测法适用于有条件进行实时监测的电厂,如部分燃气和燃油电厂。它通过监测烟气中的二氧化碳浓度和流速来直接测量排放量。这种方法准确性高,但设备和运维成本较高。国内 CEMS 技术的开发和推广主要集中在企业和科研机构,尤其是中国环境监测总站领头开发的在线监测系统在大型燃煤电厂得到广泛应用,表现出较高的稳定性和准确性。政府在法律法规中也对推广 CEMS 提出要求,推动了直接监测法的应用。国外方面,美国和欧盟等国家在直接监测法技术方面领先,建立了完善的技术标准和管理体系,如 USEPA 和 EU ETS 制定了详细的 CEMS 安装、校准和运行标准。此外,国外的研究重点在于如何高效管理和应用 CEMS 数据,利用大数据分析和机器学习技术优化监测系统,以提高数据的准确性和实时性。

3.2.1 原理与计算公式

直接监测法是根据生产过程中的实际数据,直接计算碳排放量的方法。它不需要依赖排放因子、燃料质量、碳氧化率等参数,而是通过 CEMS 或其他仪器,直接测量烟气流量和二氧化碳浓度,从而得到碳排放量,计算公式^[21]为

$$E_{\text{CH}_2} = (Q_{\text{烟}} \cdot C_{\text{烟}} \cdot T \cdot K) \cdot \frac{1}{1000} \quad (2)$$

式中: E_{CH_2} 为温室气体排放量,t/年; $Q_{\text{烟}}$ 为烟气流量, m^3/h ; $C_{\text{烟}}$ 为二氧化碳浓度,%; T 为企业在一年中实际生产的时间,h/年; K 为二氧化碳的标准密度,约为 $1.977 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.2.2 直接检测法的关键因素

火电厂多使用燃烧后捕集二氧化碳的方法直接检测,其中烟气多通过烟囱排出。中国火电厂碳排放多为固定污染源,而通过固定污染源使用直接监测法监测碳排放有两个关键因素,分别是固定污染源温室气体排放流量的测量和温室气体浓度的测量^[25]。

1) 固定污染源温室气体排放流量的测量

面对固定污染源的排放流量常采用速度面积法来测量其流量。它是根据流体在封闭管道中的连续性方程,利用流体在不同位置的速度和截面积的关系,

计算出流体的体积流量或质量流量。计算原理如图 3 所示。

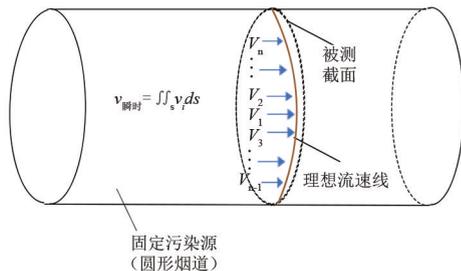


图 3 固定污染源速度流量法原理图^[25]

在封闭管道中,流体的体积流量等于流体在任意截面上的平均速度与截面积的乘积,即:

$$Q_{\text{流}} = V_{\text{流}} \cdot A \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{流}}$ 为流体的体积流量, m^3/s ; $V_{\text{流}}$ 为流体在任意截面上的平均速度, m/s ; A 为任意截面上的截面积, m^2 。

速度截面法的步骤为:首先,选择合适的测量截面^[26],在测量截面上按照一定规则划分若干个小区域,并在每个小区域内选取一个代表性的测点;然后,使用合适的流速仪器在每个测点上测量出局部速度,并根据每个小区域所占的面积比例,计算出每个测点对平均速度的贡献,求和得到平均速度;最后,根据测量截面的形状和大小计算出截面积,并与平均速度相乘得到体积流量^[26-27]。

固定污染源温室气体排放流量的测量常用的流速仪表有皮托管、超声流量计、光学流速计等。皮托管是一种利用流体动压差来测量流速的仪表,由 1 个静压管和 1 个动压管组成,静压管对准流体流动方向,动压管垂直于流体流动方向^[28]。超声流量计是根据超声波的多普勒效应或相位差异计算出流体的平均速度。郑州燃煤电厂矩形烟道内温室气体排放采用多声道超声流量计进行监测,这是国内首次采用多声道超声流量计直接监测固定污染源温室气体排放,其研究团队总结了声路配置和几何参数测量等技术问题^[25]。光学流速计由 1 个光源和 1 个光电探测器组成,光源向流体中发射一束光线,光电探测器接收经过流体散射或干涉的光线。光学流速计的优点是测量无接触、无阻力、精度高,能测量微小流速;缺点是易受光源稳定性和环境光干扰影响,且成本高,需要校准。文献^[29]就基于激光多普勒流速计测量了液力变矩器内部流场;文献^[30]阐述了激光流速计的基本原理。

2) 温室气体浓度的测量

气体浓度测量的方法主要有传感器测量法、光学测量法、质谱法、热导法和气体采样分析法。下面主要介绍光学测量法中的红外线吸收法^[31]。

红外线吸收法是基于二氧化碳分子对特定波长的红外线光的吸收特性。二氧化碳分子在特定波长的红外线光的作用下会吸收部分光能,使得透过或散射的光强度减弱。通过测量透过或散射的光的强度变化,可以推断出二氧化碳浓度。红外线吸收法的传感器通常采用非色散红外(non-dispersive infrared, NDIR)^[32]技术或可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术^[33]。这两种技术都可以实现高灵敏度和准确度的二氧化碳浓度测量。NDIR 传感器使用 1 个滤波器来选择特定波长的红外线光,例如文献[34]基于 NDIR 技术设计了一款单光路双波长的反射式气室结构二氧化碳传感器。TDLAS 传感器则使用激光来发射特定波长的红外线光。例如文献[35]就采用了 TDLAS 技术对吸气式组合发动机燃烧室内二氧化碳浓度测量。

综上,这些方法在不同的应用领域和场景中有不同的优势和限制。在选择二氧化碳浓度的测量方法时,需要考虑测量的精度要求、测量范围、实时性以及实际操作的可行性。

3.2.3 直接监测法现状

2021 年 12 月 22 日,国家能源局发布实施了 DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》^[36],这是国内首个二氧化碳排放连续监测行业技术标准。DL/T 2376—2021 主要规定了火电厂烟气二氧化碳排放连续监测系统的组成、安装、运行、校验、数据处理和质量保证等内容,为火电厂烟气二氧化碳排放连续监测提供了技术要求和指导。目前,许多火电厂已经展开碳数据监测与分析工作,为发电行业的节能减排起到了良好的示范作用。总之,CEMS 法是一种先进有效的碳排放量监测方法,适合火电企业的实际情况。DL/T 2376—2021 的发布实施有利于全面推进 CEMS 法的推广应用,完善发电行业碳排放监测核算技术体系,高质量完成国家碳监测评估试点工作。

3.3 排放因子法

排放因子法由于计算简单、权威性高且应用广泛,而被中国相关的温室气体清单编制指南、温室气

体排放核算方法与报告指南采用。排放因子法适用于大多数火电厂,特别是燃煤电厂。它根据化石燃料的消耗量和排放因子来计算温室气体排放量。这种方法操作简单,但可能因地区能源品质差异和机组燃烧效率不同而导致误差。国内方面,中国环境保护部与国家发展和改革委员会合作建立了全国统一的排放因子数据库,为排放因子法在全国范围内的应用提供了关键的数据支持。同时,国内多个研究机构 and 高校积极开展排放因子法的推广和培训活动,提升了各地环保部门和企业对该法的认识和应用能力。在国外方面,特别是美国和欧洲等地每年根据最新研究成果和实际数据对排放因子进行更新。例如,IPCC 定期发布的《国家温室气体清单指南》为各国提供了最新的排放因子数据。排放因子法在国际碳市场和各国温室气体清单编制中得到广泛应用,并已成为国际通行的碳核算方法之一。各国通过制定详细的应用指南和技术规范,确保排放因子法应用的准确性和一致性。

3.3.1 排放因子法的定义与原理

排放因子法是一种基于活动数据和排放因子相乘来计算温室气体排放量的方法^[37]。活动数据是指导致温室气体排放或吸收的活动或过程所涉及的数量或强度参数^[38],例如燃煤发电过程中的活动数据就是燃煤量。排放因子是指单位活动数据所对应的温室气体排放量^[37],例如燃煤发电过程中的排放因子就是单位燃煤量所产生的二氧化碳排放量。

根据 IPCC 发布的《国家温室气体清单指南》^[17],火电厂燃煤发电过程中二氧化碳排放量的计算公式为:

$$E_{\text{总}} = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{电}} + E_{\text{过程}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{总}}$ 为总的二氧化碳排放量,t; $E_{\text{燃烧}}$ 为化石燃料的二氧化碳排放量,t; $E_{\text{电}}$ 为购买电力排放的二氧化碳排放量,t; $E_{\text{过程}}$ 为其他来源的二氧化碳排放量,t。

$$E_{\text{燃烧}} = A_{\text{D}} \cdot F_{\text{E}} \cdot O_{\text{X}} \quad (5)$$

$$F_{\text{E}} = C_{\text{C}} \cdot O_{\text{F}} \cdot \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中: A_{D} 为燃煤量,t; F_{E} 为单位燃煤量二氧化碳排放因子; O_{X} 为碳氧化率,%; C_{C} 为化石燃料的单位热值含碳量,tC/GJ; O_{F} 为化石燃料的碳氧化率,%。

$$E_{\text{电}} = A_{\text{D电}} \cdot F_{\text{E电}} \quad (7)$$

式中: $A_{\text{D电}}$ 为火电厂消耗了的电力,kWh; $F_{\text{E电}}$ 为电力

碳排放因子, kgCO_2/kWh 。

$$E_{\text{过程}} = A_{\text{D过程}} \cdot M_{\text{过程}} \cdot C_{\text{含}} \quad (8)$$

式中: $A_{\text{D过程}}$ 为火电厂生产过程中产生的其他温室气体(如甲烷、氧化亚氮、硫化氢等)的排放量; $M_{\text{过程}}$ 为相应的分子量, g/mol ; $C_{\text{含}}$ 为气体分子中碳原子的比例。

根据中国火电厂碳核算排放因子法研究现状可知,排放因子法主要聚焦在两个方面:化石燃料燃烧排放和购买电力排放^[39]。化石燃料燃烧排放是指火电厂使用燃煤、燃油、燃气等化石燃料及掺烧化石燃料的纯凝发电机组和热电联产机组等发电设施在氧化燃烧过程中产生的二氧化碳排放。该类排放是火电厂二氧化碳排放的主要来源,比例超过 90%。购买电力排放是指火电厂购买并使用电网输送的电力所对应的电力生产环节产生的二氧化碳排放。该类排放是火电厂二氧化碳排放的次要来源,比例较小^[40]。在实际计算中,需要根据不同情况选择合适的数据来源。活动数据一般可以从企业自身或相关部门获取,也可以从统计年鉴等公开资料中查询。

排放因子可以根据不同的层次和精度选择缺省值或实测值。根据《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》,缺省值是指由权威机构或专家根据大量数据统计分析得到的具有一定代表性的平均值,一般分为国家级、省级和行业级 3 个层次。实测值是指根据实际生产过程中所用燃料的化学成分或烟气成分进行实验室分析或现场监测得到的值,一般具有更高的准确性和可靠性。碳氧化率是指燃料中的碳被氧化成二氧化碳的比例,一般可以采用缺省值或根据锅炉效率进行估算。根据 DL/T 2376—2021,可以得到常见化石燃料的相关参数缺省值。

3.3.2 排放因子法的现状

中国已经出台了 GB/T 32151.1—2015《温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分:发电企业》^[41],规定了发电企业二氧化碳排放的核算方法、数据来源、不确定性分析、报告格式等内容;还建立了全国碳排放权交易市场,涵盖了发电、钢铁、有色、化工、建材、造纸等 7 个重点行业,其中发电行业所占比例最大,约占总交易量的 80%。目前,中国已经开展了火电厂二氧化碳排放连续监测技术的试点工作,通过安装在线监测设备,成功实现了对火电厂固定排放源烟气二氧化碳排放量的实时、准确监测。火电厂碳核算排放因子法的应用有利于提高火电厂二氧化碳排放数据的准确性和一致性,促进火电厂实施低碳发展战略,参与全国碳排放权交易。

为规范碳核算方法,需建立国家温室气体排放因子数据库,实施规范更新,制定适用于不同领域的碳核算统计方法与标准。为确保数据库全面覆盖各温室气体来源,需建立统一规范的碳核算体系。为维持时效性和准确性,需设立定期更新机制。这一系列措施将有助于建立更透明、可持续的碳核算体系,为实现低碳经济和碳中和目标提供支持。

3.4 3 种碳核算方法对比

针对火电厂碳核算的 3 种碳核算方法,下面从适用场景、精度、成本、实时性、优缺点、适用性 6 个维度进行了简要总结,具体分析如表 2 所示。

4 展望与总结

未来主流碳核算方法将更加市场化和国际化,与全球碳市场的发展和衔接相适应,碳核算方法将更加精细化和动态化^[42]。未来火电厂碳核算的发

表 2 火电厂 3 种核算方法不同维度比较

维度	排放因子法	物料衡算法	直接监测法
使用场景	常用于数据不完整或无法直接测量排放的场合	适用于有详细物料流量和质量数据的场合	适用于大型企业,有在线监测设备(CEMS)的场合
优点	简单易行,数据获取方便,适用范围广	精度较高,能够反映实际生产过程中的碳排放	精度最高,可实时监测,反映最真实的排放情况
缺点	精度较低,依赖于排放因子的准确性	数据获取复杂,要求详细的物料和能量流量数据	设备成本高,维护要求高,适用范围有限
精度	低至中等	中等至高	高
成本	低	中等	高
实时性	无法实时监测	无法实时监测	可实时监测
适用性	适用于初步评估或数据不全的情况	适用于有详细物料与能量流量数据的企业	适用于有条件安装在线监测系统的大型企业

展方向将会是针对不同行业和产品的特点与公司规模结合现代信息技术,研究制定适用不同排放情况的核算方法^[43]。火电厂可以基于排放因子法、物料衡算法、直接监测法等碳核算,结合在线监测数据实现碳排放量的实时动态评估,通过不确定度量化评估在线监测数据的质量确保数据可靠性^[44]。未来,激光测量技术将不断提高流量计精度,智能传感器结合物联网技术可实现实时数据采集和远程监控,数据融合与人工智能可帮助全面评估碳排放情况^[45]。烟道流量计作为火电厂碳核算的关键技术,其发展和应用将推动火电行业向低碳、环保方向发展,而新兴技术的不断进步也将在未来火电厂碳核算中发挥重要作用。

综上所述,在“碳达峰、碳中和”的目标下,火电厂碳核算方法的研究进展主要集中在以下几个方面:

1) 优化碳排放因子的确定方法:准确的排放因子对于计算碳排放量至关重要。通过不断改进和精细化排放因子的确定方法,可以提高数据的可比性和准确性。

2) 基于在线监测数据的碳核算模型:利用实时在线监测数据可以更准确地评估火电厂的碳排放量,这有助于制定更具针对性的碳减排计划。

3) 分析不同地区、不同类型、不同技术水平的火电厂的碳强度和碳减排潜力:了解不同火电厂的特点和潜力,有助于制定差异化的碳达峰目标和路径。这可以促进更有针对性的政策和措施。

4) 火电厂的低碳转型策略:提高燃煤机组效率、发展可再生能源替代、实施碳捕集利用和封存等策略,将有助于降低火电厂的碳排放量。

5 结 论

中国“双碳”目标的提出意味着中国要在未来30年内实现二氧化碳排放的快速下降,而火电行业作为中国最大的二氧化碳排放源,其碳减排任务十分艰巨^[46]。因此,火电厂的碳核算工作具有重要的意义。首先,它为火电厂确立碳减排目标提供科学依据,帮助制定合理的碳减排计划和措施。其次,碳核算数据可作为碳排放权交易的基础,帮助企业更好地参与碳市场,实现碳排放的经济化管理。此外,对政府来说,通过对火电厂的碳排放情况进行核算

和监管,可以更有效地征收碳税,推动企业减排。最后,碳核算工作还为企业的碳审计提供数据支撑,帮助监管部门更好地了解企业的碳排放情况,实现碳减排目标的有效监管。因此,碳核算工作对企业和社会都具有重要意义,为实现碳减排目标提供了数据支撑和技术保障。

参考文献

- [1] 刘学之,孙鑫,朱乾坤,等.中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J].生态经济,2017,33(11):21-27.
- [2] 陈文会,鲁玺.碳中和目标下中国燃煤电厂CCUS集群部署优化研究[J].气候变化研究进展,2022,18(3):261-271.
- [3] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
- [4] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
- [5] 叶晨,李红军,唐志东,等.热电联产机组的控制优化策略研究[J].四川电力技术,2020,43(2):7-11.
- [6] 唐虎,崔浩,陈爱伦,等.燃煤锅炉用户电能替代方案对比研究[J].四川电力技术,2020,43(1):88-94.
- [7] 刘健.燃煤电厂碳排放核算与在线监测对比研究[J].计算机应用文摘,2023,39(5):117-119.
- [8] 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.
- [9] 张安安,周奇,李茜,等.“双碳”目标下火电厂二氧化碳计量技术研究现状与展望[J].发电技术,2024,45(1):51-61.
- [10] 刘源,温作民.中国绿色低碳技术创新效率测度及空间溢出效应——基于“双碳”目标视角[J].生态经济,2023,39(12):49-55.
- [11] 陈红敏.国际碳核算体系发展及其评价[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):6.
- [12] 联合国.关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书[EB/OL].(1987-09-16)[2023-07-12].<https://ozone.unep.org/system/files/documents/MOP-35-12C.pdf>.
- [13] 中国气象局贯彻落实《中国应对气候变化国家方案》行动计划[N].中国气象报,2007-08-16(003).
- [14] 生态环境部.生态环境监测规划纲要(2020—2035年)[EB/OL].[2023-07-12].http://www.ep-serve.com/forepart/zxnr_index.do?oid=51478575&tid=26378242.

- [15] 生态环境部办公厅.关于印发《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》《企业温室气体排放核查技术指南 发电设施》的通知:环办气候函[2022]485号[A/OL].(2022-12-21)[2023-07-14].https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html
- [16] 中华人民共和国生态环境部.碳排放权交易管理办法(试行):部令第19号[A/OL].(2021-01-05)[2023-07-12].https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5591410.htm
- [17] 胡艳麟,朱齐艳.《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》(2019年修订版)废弃物卷修订浅析[J].低碳世界,2021,11(9):49-50.
- [18] 蔡宇,李保卫,胡泽春,等.燃煤机组碳排放指标计算及影响因素分析[J].电网技术,2013,37(5):1185-1189.
- [19] 宋铜铜.燃煤电厂碳排放强度核算及影响因素研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [20] 段升飞.固体燃料燃烧产生多环芳烃及含氧多环芳烃排放因子与排放特征的研究[D].济南:山东大学,2021
- [21] 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.
- [22] 于琳娜.完善发电行业碳排放数据核算体系[N].中国电力报,2022-04-15(002).
- [23] 赵国涛,钱国明,王盛,等.“双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J].华电技术,2021,43(10):11-21.
- [24] 邱梦春,温作乐,屈颖,等.一种烟气流量监测装置及方法:CN202310014166.8[P].2023-04-04.
- [25] 李海洋,葛志松,宋进.固定污染源温室气体排放量直接监测方法综述[J].中国测试,2022,48(10):181-188.
- [26] 李海洋,张亮,刘幸,等.固定排放源烟气流量在线监测技术的研究[J].上海计量测试,2018,45(5):6-11.
- [27] 国家环境保护局.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:中国环境科学出版社,1996.
- [28] 李海洋,王灿,姚新红,等.一种液体用标准L型皮托管的系数标定装置及方法:116718802A[P].2023-09-08.
- [29] 过学迅.应用激光多普勒流速计测定液力变矩器内部流场的探讨[J].工程机械,1988(2):41-45.
- [30] 苗华义.激光流速计[J].工业仪表与自动化装置,1985(3):32-35.
- [31] 韦建环,杨峥,张勇,等.一种红外线吸收法测量试样中碳元素的助熔剂用量确定方法:113008825B[P].2023-07-21.
- [32] 孙世岭.基于非色散红外技术的二氧化碳传感器研究[J].仪表技术与传感器,2021(4):1-3.
- [33] 杨舒涵,乔顺达,林殿阳,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J].中国光学(中英文),2023,16(1):151-157.
- [34] 张雅楠,刘灿,张磊,等.基于NDIR技术的红外二氧化碳气体传感器研究[J].仪表技术与传感器,2023(9):23-28.
- [35] 焦晓锋.基于TDLAS的吸气式组合发动机燃烧流场的CO₂浓度测量技术研究[D].太原:中北大学,2023.
- [36] 电力行业环境保护标准化技术委员会.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:中国电力出版社,2022.
- [37] 马学礼,王笑飞,孙希进,等.燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究[J].热力发电,2022,51(1):190-195.
- [38] 李峥辉,卢伟业,庞晓坤,等.火电企业CO₂排放在线监测系统的研发应用[J].洁净煤技术,2020,26(4):182-189.
- [39] 郑玉蓉,孙文彬,杜守航,等.煤炭企业碳排放核算方法研究综述[J/OL].煤炭学报:1-13[2023-10-31].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1077>.
- [40] 徐沁颖.基于排放因子法的蒸汽锅炉碳排放核算[J].工业锅炉,2023(4):12-15.
- [41] 全国碳排放管理标准化技术委员会.温室气体排放核算与报告要求 第1部分:发电企业:GB/T 32151.1—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [42] 芦海燕,张雪雁.国标碳核查体系建设经验及对我国的启示[J].生态经济,2023,39(2):41-46.
- [43] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [44] 邓程慧,闻倩媵,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.杭州:中国计量大学标准化学院,华电电力科学研究院有限公司,2021:10.
- [45] 李玉超,蔡迪韦,黄秀,等.基于5G和工业互联网的智能碳排放计量装置:202311705823.x[P].2024-01-12.
- [46] 李健华,陈雪,付浩,等.碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术[J].四川电力技术,2023,46(3):46-52.

作者简介:

刘雪原(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

陈玉敏(1997),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

魏阳(1987),女,博士研究生,高级经济师,主要研究方向为碳中和技术创新;

孟拓(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳反演与碳计量;

(上接第20页)

算法的全局优化能力得到了改善,具有快速收敛和强大搜索能力等特点;同时,该方法能考虑日前需求,合理安排各机组出力,具有一定的有效性和可靠性,为微电网的安全可靠、经济环保运行提供了参考。

参考文献

- [1] ALOTAIBI I, ABIDO M A, KHALID M, et al. A comprehensive review of recent advances in smart grids: A sustainable future with renewable energy resources [J]. Energies, 2020, 13(23):6269.
- [2] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1):1-18.
- [3] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10):3077-3093.
- [4] HIRSCH A, PARAG Y, GUERRERO J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90:402-411.
- [5] 全年,李燕青,申宏威,等. 基于改进黑洞算法的微电网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5):113-119.
- [6] 何力,吕红芳,李俊甫,等. 基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(SA_AFSA)的微电网能量优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9):36-43.
- [7] 李国庆,翟晓娟,李扬,等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8):2310-2317.
- [8] 李兴莘,张靖,何宇,等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3):1-7.
- [9] 续一臣,王海云. 基于改进灰狼算法的微电网优化调度[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3):96-102.

刘悦(1974),男,高级政工师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

周奇(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳监测与碳计量;

向银太(1981),男,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

李茜(1988),女,博士,副教授,主要研究方向为碳监测与碳计量、综合能源系统运行与控制、能源系统智能感知等。 (收稿日期:2024-03-26)

- [10] 薛开阳,楚瀛,凌梓,等. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 37(8):1206-1213.
- [11] 宋扬,石勇,刘宝泉,等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3):33-40.
- [12] SEYYEDABBASI A, KIANI F. Sand cat swarm optimization: a nature-inspired algorithm to solve global optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2022, 39(4):2627-2651.
- [13] 贾鹤鸣,王琢,文昌盛,等. 改进沙猫群优化算法的无人机三维路径规划[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2023, 35(2):171-179.
- [14] LI Y M, WANG G C. Sand cat swarm optimization based on stochastic variation with elite collaboration [J]. IEEE Access, 2022, 10:89989-90003.
- [15] 毛清华,张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6):1155-1164.
- [16] 何庆,林杰,徐航. 混合柯西变异和均匀分布的蝗虫优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(7):1558-1568.
- [17] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1):256-262.
- [18] HALPERN-WIGHT N, KONSTANTINOU M, CHARALAMBIDES A G, et al. Training and testing of a single-layer LSTM network for near-future solar forecasting [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5873.

作者简介:

朱赵晴(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及电能质量分析研究;

方芬璐(1984),女,硕士,高级工程师,主要从事电力规划技术工作;

夏焰坤(1984),男,博士,教授,研究方向为电力系统及电能质量分析研究。

(收稿日期:2023-12-06)