

“双碳”目标下电量消费与碳排放核算的耦合机制探析

汪 君

国网六安供电公司 安徽 六安 237005

摘要: 实现“双碳”目标是中国对全球气候治理的承诺,也是经济社会绿色转型的内在要求。在此背景下,电力系统角色深刻变革,电量消耗与碳排放耦合关系紧密,精准动态核算用电隐含碳排放,是实现“双碳”目标精细化管理等核心基础。本文剖析“双碳”目标下二者核算的耦合机制,先阐释理论逻辑与现实动因,再系统梳理并批判分析当前主流核算方法及其反映电量-碳耦合关系的局限,接着构建融合多维信息的动态耦合核算框架,探讨关键技术路径,最后从政策、市场、标准、企业行动四个维度提出应用对策。研究表明,打破传统核算模式,建立实时精准可追溯的核算体系,是激活绿色电力价值、赋能深度减排、实现“双碳”目标的必由之路。

关键词: 双碳目标; 电量消耗; 碳排放核算; 耦合机制; 电力系统; 绿色电力

引言

2020年9月中国提出“双碳”目标,经济社会发展转向以降碳为重点。能源活动是碳排放主要来源,电力行业作为能源转换中心环节,兼具最大碳排放源与消纳可再生能源核心载体双重身份,其低碳化进程决定“双碳”目标成败。终端用能电气化提升,碳排放多以“用电”体现,用电行为本质是间接排碳,构成电量消耗与碳排放的深刻耦合。但传统核算体系依赖静态、区域平均电网排放因子,忽略电力系统动态性与异质性,导致数据失真、削弱市场机制激励效果。因此,深入探究二者核算耦合机制,构建真实、动态、精细的核算体系,是学术与政策界的关键问题。本文将围绕此议题展开研究,为完善核算体系、推动市场协同、引导绿色转型提供支撑与路径。

1 电量消耗与碳排放耦合的理论逻辑与现实动因

1.1 理论逻辑:从物理耦合到价值耦合

电量消耗与碳排放的耦合,首先源于物理世界的强关联。从能量守恒与物质流看,电力生产中化石燃料燃烧是碳排放直接来源,终端用电对应上游发电侧一次能源消耗及碳排放,“源-网-荷”的物理连接构成根本耦合基础。电力系统电源结构决定单位电量平均碳排放强度,但这种物理关联具有时空动态性。可再生能源的间歇性和波动性,使电网电源结构随时间变化,不同时段、区域用电的碳排放强度差异显著,远非静态平均值能概括。随着电力市场化改革和碳市场建立,耦合关系延伸至经济价值层面。准确碳排放核算结果影响企业碳配额履约成本、绿色产品认证、国际竞争力及 ESG 评级。使用“绿电”或在低碳时段用电的企业,能在市场上获得竞争优势和品牌溢价,激励用户主动寻求与低碳电力耦

合,形成良性价值传导闭环,使电量与碳耦合成为可定价、交易的市场信号。

1.2 现实动因:多重压力下的必然选择

推动电量-碳耦合核算机制创新,有诸多现实动因。“双碳”目标设定了明确时间表和路线图,要求精准计量、报告与核查全社会碳排放。传统粗放式核算无法满足精细化管理需求,只有建立与电量消耗实时联动的核算机制,才能准确评估减排成效,为政策制定和考核提供可靠依据。电力系统转型也有内在要求。构建以新能源为主体的新型电力系统,高比例可再生能源接入加剧了运行不确定性,使电网碳排放强度波动剧烈。为有效消纳可再生能源、维持系统安全稳定,需引导用户侧响应波动。动态碳排放信号作为经济杠杆,可激励用户将高耗能生产活动安排在绿电充裕时段,实现源荷互动,提升系统低碳运行效率^[1]。国际规则与贸易壁垒的压力也不容小觑。全球范围内,碳定价和碳足迹披露成为国际贸易新规则,欧盟 CBAM 等机制要求进口产品提供生产过程碳排放数据,外购电力碳排放是重要部分。若我国企业采用过时、笼统的电网排放因子核算,产品碳足迹将被高估,在国际市场处于不利地位。因此,建立与国际接轨、精细化的电量-碳耦合核算体系,是维护产业利益、参与全球绿色竞争的迫切需求。

2 现行碳排放核算方法及其局限性分析

目前,国内外在核算外购电力碳排放时,主要采用以下几种方法,但它们在揭示电量-碳动态耦合关系方面均存在明显不足。

2.1 区域电网平均排放因子法

这是目前应用最广泛的方法,尤其在国家温室气体清单编制和企业碳盘查中占据主导地位。其核心思想是,

将某一区域电网在特定时期（通常为一年）内所有发电机组的总碳排放量，除以该电网的总供电量，得到一个平均排放因子（单位： tCO_2/MWh ）。企业只需将其年度用电量乘以该因子，即可得出其范围二排放量。然而，这种方法的局限性十分突出。其年度平均的特性完全抹平了日内、季节性的碳强度波动，无论企业在何时用电，其碳排放都被视为相同，这严重扭曲了真实的用电碳足迹。同时，全国或大区统一的因子忽略了省内甚至地市间电网结构的巨大差异，导致位于水电丰富省份的企业与位于煤电大省的企业，即使用电量相同，其实际碳排放天差地别，却在核算上被一视同仁。更重要的是，由于无法反映用电行为（如错峰用电）对碳排放的影响，该方法无法为用户提供任何改变用电模式以降低碳足迹的经济或信息激励，从而在很大程度上抑制了需求侧响应的潜力。

2.2 边际排放因子法

该方法试图克服平均因子的静态缺陷，关注的是“额外一度电”所带来的边际碳排放增量。其逻辑是，当用户增加用电需求时，电网需要调用边际成本最低（通常也是碳强度最高）的机组来满足这部分增量需求^[2]。尽管这一思路更具动态性，但其在实践中面临诸多挑战。首先，“边际机组”的概念本身在复杂的电力市场中就十分模糊且难以精确量化，它受市场规则、机组组合、网络阻塞等多种因素影响，缺乏一个普适、稳定的定义。其次，边际因子主要适用于增量分析，用于评估新增负荷或能效项目的减排效益，而不适用于对既有用电总量的全面核算。它回答的是“多用一度电会多排多少碳”，而非“我用的这度电到底排了多少碳”，因此无法满足全面碳盘查的需求。此外，该方法过度强调增量效应，而忽视了现有电源结构对整体碳排放的基础性作用，可能导致对系统整体碳强度的误判。

2.3 溯源追踪法（Location-based & Market-based）

为回应上述方法的不足，一些国际标准引入了溯源追踪的概念，区分了基于地理位置的和基于市场合同的两种核算方法。后者允许企业通过购买绿证或签订PPA来声明其使用了特定来源的绿色电力，并据此使用更低的排放因子。这一方法的进步之处在于承认了市场选择的作用，但其局限性同样显著。最核心的问题在于物理与金融的脱节。Market-based方法本质上是一种金融合约，它解决了环境权益的“所有权”问题，但并未改变物理电网中的电子流动。用户在物理上使用的依然是混合电力，其用电行为对电网实时碳排放的实际影响并未被准确捕捉。此外，绿证、PPA等环境权益的交易与电力的实

际物理交割往往是分离的，形成了数据孤岛，如何确保环境权益的唯一性、防止重复计算，并将其与物理用电数据进行可信的关联，是该方法面临的巨大挑战。最后，即便采用了Market-based方法，大多数情况下使用的仍是年度绿证，依然无法反映日内不同时段用电的碳强度差异，未能从根本上解决时空动态性的问题。

综上所述，现有核算方法要么过于静态笼统，要么在物理真实性与金融灵活性之间存在矛盾，均未能有效刻画电量消耗与碳排放之间真实、动态、多维的耦合关系。这迫切要求我们构建一种全新的核算范式。

3 构建动态、精准的电量-碳耦合核算框架

为突破现有方法的桎梏，应构建一个融合时间、空间与电源结构信息的动态耦合核算框架。该框架的核心在于实现从“静态平均”到“动态溯源”的转变。

3.1 核心理念：时空耦合与物理溯源

新的核算框架应坚持时空耦合与物理溯源的核心理念。这意味着用户的用电时刻必须与电网在该时刻的电源出力结构精确匹配，核算的基本时间单元应从“年”细化到“小时”甚至“15分钟”，以捕捉可再生能源出力的瞬时变化^[3]。同时，核算应尽可能在用户接入电网的节点层面进行，以反映局部电网的真实碳强度，而非大区域的平均值，从而体现空间上的异质性。最为关键的是，核算结果应基于物理电网的实际潮流和电源出力数据，确保每一千瓦时用电所对应的碳排放都有据可循，避免金融合约与物理现实的脱节，真正实现“所见即所得”的碳足迹追踪。

3.2 框架构成：三层架构模型

为实现上述理念，可设计一个由数据感知层、耦合计算层和应用服务层构成的三层架构模型。数据感知层是整个框架的基石，它依托智能电表、物联网传感器、电网调度自动化系统等，实时采集发电侧、电网侧和用户侧的海量数据，为上层计算提供源源不断的“燃料”。耦合计算层则是框架的核心引擎，它利用电力系统潮流计算、最优潮流或简化的碳流追踪算法，将用户在特定时空节点的用电负荷，精确地“映射”或“分配”到上游的各个发电机组。每个发电机组根据其燃料类型和效率，拥有一个实时的碳排放系数，通过加权平均，即可计算出用户在该时刻、该地点所消费电力的实时碳排放强度^[4]。最终，应用服务层将这些精细化的碳排放数据转化为多样化的服务，例如为每个电力用户提供个性化的碳足迹账单，向市场发布实时碳信号以引导用户优化用电行为，结合区块链技术为低碳用电行为颁发不可篡改的数字凭证，以及为碳市场与电力市场的协同运作提供精准的数

据支持,从而打通从数据到价值的完整链条。

4 支撑耦合机制落地的关键技术路径

实现上述理想框架,离不开一系列前沿技术的深度融合与创新应用。电力大数据与人工智能技术是处理和分析来自发、输、变、配、用全环节PB级数据的关键,AI算法可用于预测可再生能源出力与负荷需求,优化碳流追踪模型的计算效率,并识别异常数据,确保核算结果的准确性。区块链技术凭借其去中心化、不可篡改和可追溯的特性,成为解决环境权益与物理用电数据可信关联的理想工具,通过将用电数据、发电数据、环境权益交易记录等上链,可以构建一个透明、可信的绿色电力溯源与认证体系,有效防止“洗绿”和重复计算。物联网与高级量测体系的广泛应用,则是实现用户侧用电数据分钟级甚至秒级采集的前提,为更精细的负荷分解和溯源提供可能。此外,数字孪生电网技术的发展,使得在虚拟空间中实时镜像物理电网的运行状态成为现实,为进行复杂的碳流模拟、场景推演和策略优化提供了强大的仿真平台,极大地提升了整个耦合核算体系的智能化水平。

5 深化耦合机制应用的对策建议

要将理论上的耦合机制转化为实践中的强大动能,需要多维度的政策与制度协同。首先,必须强化顶层设计与政策协同,国家应尽快修订和完善碳排放核算指南,明确鼓励并逐步推行基于时间、空间维度的精细化核算方法,并推动生态环境部与国家能源局、电网公司建立常态化数据共享与协调机制,打破部门壁垒。其次,应深化电力市场与碳市场的联动,探索建立“电-碳”联合市场,或将实时碳成本信号内嵌入电力现货市场价格形成机制中,使电价本身包含碳排放成本,从而最直接、最有效地引导发用电双方的低碳决策。再次,要加快标准体系与基础设施建设,制定统一的数据接口、通信协议和核算方法学标准,确保不同系统、不同主体间的数据互联

互通,并加大对智能电表、数据平台、区块链基础设施等的投入,夯实技术底座。最后,应积极引导企业主动拥抱绿色用电,通过税收优惠、绿色金融支持、政府采购倾斜等政策,激励企业投资建设分布式可再生能源、配置储能、参与需求响应,并主动采购带有精细化溯源信息的绿色电力,鼓励企业对外披露其基于新核算方法的碳足迹,以提升品牌形象和国际竞争力。

6 结语

“双碳”目标实现是广泛深刻的经济社会系统性变革,电力系统是主战场。电量消耗与碳排放存在动态耦合关系,这要求我们超越传统静态核算思维。本文剖析二者耦合深层逻辑,审视现行核算方法不足,前瞻性地提出融合时空信息、基于物理溯源的动态耦合核算框架。研究表明,借助电力大数据等新兴技术,构建能实时精准反映“一度电、一克碳”对应关系的核算体系,才能打通从宏观目标到微观行动的传导链条。该体系可为政府决策提供依据,为企业和个人减排提供指引与激励,释放绿色电力价值,激活全社会深度减排动力。未来,电量-碳耦合核算机制将成为驱动中国能源革命、实现和谐共生现代化的关键引擎。

参考文献

- [1]李桂鑫,王莹,开赛尔·艾斯卡尔,等.碳双控政策影响下碳排放预测及电力减排路径研究[J].高技术通讯,2025,35(09):1003-1015.
- [2]王伟胜,刘思扬,张悦,等.基于源侧碳排放模型的电力系统低碳运行模拟方法[J].中国工程科学,2025,27(05):78-92.
- [3]金琨,都兰娜,刘嘉丽,等.电力系统碳排放核算中的统计测度方法分析[J].集成电路应用,2025,42(10):102-104.
- [4]权培英,金艳鸣,徐沈智.区域碳双控下跨区电力间接碳排放核算方法[J].中国电力,2025,58(10):63-70.