电网企业电工装备碳足迹测算框架与低碳采购综合评价体系研究

汪 琨[1]，吴越人[2]

（1. 国家电网有限公司，北京 100031；2. 国网浙江省电力有限公司物资分公司，浙江 杭州 310012）

摘 要：在“双碳”目标背景下我国正式提出建设碳足迹管理体系，电工装备作为能源基础设施建设的重要组成部分，目前仍然缺乏行业统一的碳足迹测算标准与数据库，导致企业的低碳供应链管理难以落地，也阻碍整个电力产业链的低碳转型。通过系统梳理碳足迹相关政策以及电工装备碳足迹测算研究，提出面向电网企业电工装备采购的碳足迹管理解决方案。首先，界定碳足迹测算概念并综述生命周期评价方法及其应用，进一步调研供应链碳排放管理的研究现状，最后对电工装备领域已开展的碳足迹研究进行分析，发现先前的研究多聚焦单一产品（如变压器）的碳足迹核算，缺乏普适性测算标准，且尚未与企业采购体系结合并导致低碳采购无据可依。基于以上问题，基于电网企业需求和国家政策规划提出电网企业电工装备低碳采购规划，分 3 个阶段将碳足迹管理逐步纳入企业的装备采购中，实现碳足迹数据从无到有、从有到优再到同采购体系深度融合的过程，考虑设备特点、电网企业需求和供应商能力培养等因素，结合多项标准文件分别设计了电工装备碳足迹测算框架和数据评价标准，并进一步提出了低碳产品与低碳供应商评价体系，最后从企业内部协同角度和供应链能力共建角度提供建议，为电力行业低碳转型提供管理理论参考。

关键词：电工装备；产品碳足迹；输配电设备；低碳采购；供应链管理

中图分类号：F206 **文献标识码**：A **文章编号**：1673－2464（2026）03－0056－21

Carbon Footprint Estimation and Low Carbon Purchase Evaluation System of Electrical Equipment of Power Grid Enterprises

WANG Kun[1], WU Yueren[2]

(1. *State Grid Corporation of China*, *Beijing* 100031, *China*;
2. *State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Material Branch*, *Hangzhou* 310012, *China*)

Abstract: China officially presents a carbon footprint management system under “dual-carbon” objective. Electrical equipment as the fundamental part of energic infrastructural construction still lacks unified carbon footprint estimation standard and database, which leads to low carbon supply chain management is hard to be conducted in power grid enterprises, and blocks the low carbon transformation in the entire power industrial chain. This paper, based on carbon footprint policies and electrical equipment carbon footprint estimation, presents a solution for power grid enterprises to

收稿日期：2025－09－22；**修订日期**：2025－10－27；**责任编辑**：段丽萍。

网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5426.TD.20260113.1706.002 **DOI**：10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20260113.001

第一作者简介：汪琨，高级经济师，主要从事供应链管理、绿色低碳、供应链发展规划、供应链指标体系研究。E-mail：522276572@qq.com

引用格式：汪琨，吴越人，2026. 电网企业电工装备碳足迹测算框架与低碳采购综合评价体系研究[J]. 资源与产业，28(3)：56－76.

WANG Kun, *WU Yueren*, 2026. *Carbon footprint estimation and low carbon purchase evaluation system of electrical equipment of power grid enterprises*[J]. *Resources & Industries*, 28(3): 56－76.

estimate the carbon footprint of purchasing electrical equipment. This paper gives definition of carbon footprint concept and reviews its evaluation and application of life circle, and studies its research advances on supply chain carbon emission management, and analyzes the carbon footprint in electrical equipment domain, finding that most previous studies have been focused on single product like transformer, lacking universal estimation standard without being related to enterprises' sales system. This paper presents low carbon purchasing plan for power grid enterprises' electrical equipment on the basis of their needs and national policies, in three stages incorporating carbon footprint into their purchasing plan with realizing carbon footprint data from starting to developing process. This paper constructs electrical equipment carbon footprint estimation framework and data evaluation standard on consideration of equipment features, power grid enterprises' needs and supplier's capacities combined with multiple standards, and presents low carbon products and suppliers evaluation system, and provides suggestions from perspectives of enterprises' internal integration and supply chain capabilities.

Key words: electrical equipment; product carbon footprint; power transmission and distribution equipment; low carbon purchase; supply chain management

0　引言

近年来，全球气候变化压力不断加剧，中国于 2020 年正式提出“双碳”目标，即 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和，并于 2024 年进一步发布《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》，提出建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制，建立起了以“双碳”目标为核心的 N + 1 政策框架（1 是总体层面的纲领性文件，N 是重点领域和行业的实施方案与保障措施）（范秋芳等，2024；朱智洺等，2024；袁惊柱，2025；周丽等，2025）。2023 年 11 月，中华人民共和国国家发展和改革委员会等部门联合发布《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》，并于 2024 年发布《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》和《关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025 年）》，明确要求“优先聚焦电力、电子电器等重点产品，制定碳足迹核算规则标准”，从国家层面出台重点产品碳足迹核算规则和标准，并建立重点行业碳足迹背景数据库，《温室气体产品碳足迹量化要求和指南（GB/T 24067—2024）》也同步推出，标志着我国正式推出了首个产品碳足迹核算通用国家标准。

相比之下，碳计量与碳足迹测算在国际范围内实施的更早，如 IPCC 温室气体排放清单、PAS2050、GHG Protocol 以及 ISO14060 系列等多项标准与方法，便是国际通用且普遍认可的碳排放测算方法（丁宁等，2025a；朱继忠等，2025）。欧美等发达国家在碳足迹相关领域进行了大量的实践推广，并于近年开始推出最新的强制性政策，如欧盟于 2020 年提出《循环经济法案》，并于 2024 年进一步推出《可持续产品生态设计法规》，将碳排放的测算要求拓展至产品的全生命周期过程，从设计环节即开始考虑如何降低产品碳足迹、提高回收效率并减少环境影响与资源浪费（朱艺等，2024）。2023 年推出的《新电池法案》更是全球首个强制性的碳足迹管理政策，要求未来流通于欧洲市场的电池产品必须标明碳足迹，碳足迹正在像 3C、CE 认证等质量认证一样成为产品进入市场的准入门槛（刘学文等，2014；胡剑波等，2015）。《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见（发改环资〔2023〕1529 号）》中明确提出，将碳足迹管理要求融入企业的采购标准，推动碳标识在消费品领域推广应用，但相关工作在近年才刚刚起步，距离构建全面的碳足迹管理体系还尚存距离。一方面，碳足迹测算的标准制定与实践尚未充分开展，许多企业与组织并没有碳足迹的测算能力与意识，另一方面，碳足迹尚未与产品的评估、销售以及采购充分结合，碳足迹尚未成为消费者采购时考虑的因素。

电工装备是电力系统的核心基础设施，其全生命周期碳排放将是新型电力系统建设的重要考虑因素之一，但行业目前缺乏统一的碳足迹测算标准与数据库，导致整个电力产业链中的企业在低碳供应链管理中面临数据割裂、评价无据的困境（陈晓红等，2023；李可昀等，2025），并且鲜有研究关注如何将碳足迹评价纳入电工装备采购管理。2023 年 6 月国网总部发布的《国家电网有限公司绿色采购

指南》提出贯彻绿色低碳理念并开展碳足迹研究的要求，将产品碳足迹纳入采购体系中。中国电力企业联合会也正在制定出台电力行业产品碳足迹标准，并构建电力碳足迹因子数据库。如图 1 所示，2024 年 12 月发布的《产品碳足迹标识认证试点名单》中，变压器作为输配电设备中主要的产品类别也被选中参与产品碳足迹标识认证试点，电工装备中的其他产品如光伏组件和锂电池也被纳入试点名单中。

综合以上政策背景，当前电工装备领域亟须建立统一、可操作的碳足迹测算标准与数据库，并结合企业的实际情况与需求在采购体系中嵌入低碳评价机制，以弥补现有低碳推行过程中的空白。因此，本文将从当前碳足迹相关概念与研究现状入手，分析碳计量与碳足迹测算相关成果与现存问题，结合电网公司的实际采购需求将变压器、GIS 断路器、电缆导线等输配电装备作为研究对象，提出电工装备的碳足迹测算框架并将碳足迹纳入电网企业的低碳采购机制中，为电力企业的碳足迹管理以及电工装备供应链的绿色低碳转型提供建议。

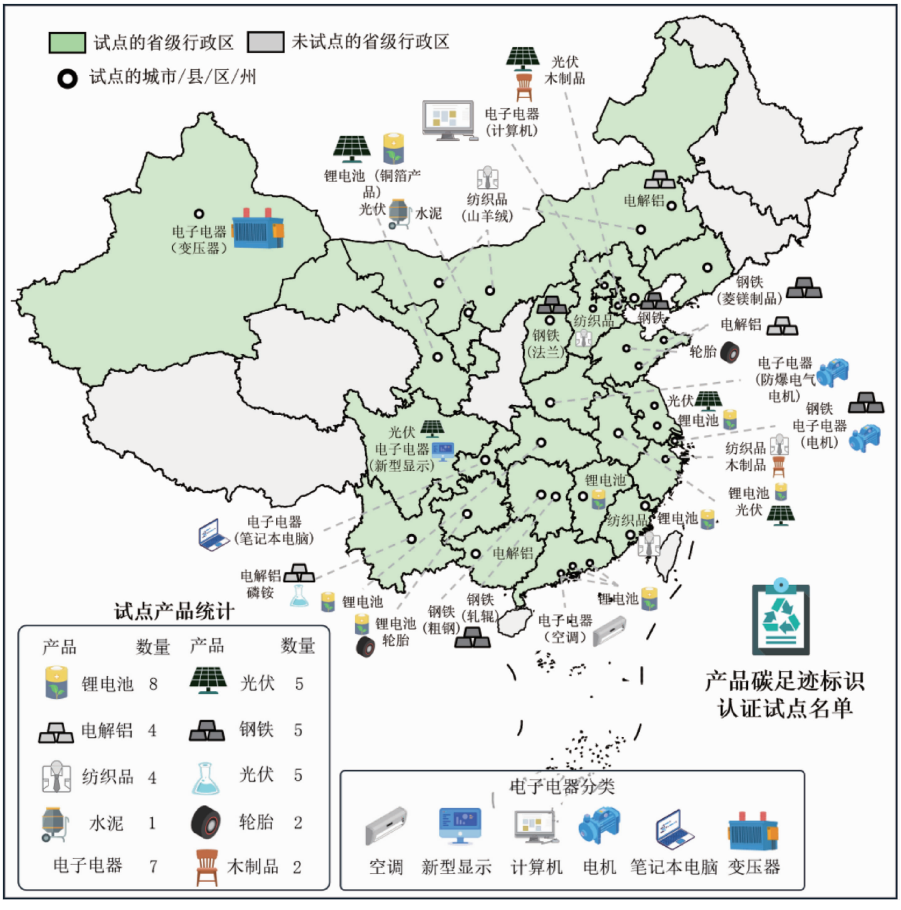


图 1 《产品碳足迹标识认证试点名单》中试点产品及试点地区分布

Fig. 1 Distribution of pilot products and pilot regions in the "list of pilot programs for product carbon footprint labeling and certification"

1 研究现状

1.1 碳计量相关方法

碳计量是对于碳排放量的计算与测量过程，目前实际执行中的方法如表 1 所示，主要有连续监法、排放源抽样法、质量平衡法、排放因子法等（姚小剑等，2025），根据计量场景的不同可以选择合适的计量方法，除此之外，还有投入产出法等内容。以全生命周期法为核心的碳足迹测算，其本质也是碳计量的一种，但其测算范围包含测算对象的全生命周期过程，因此，相比于表 1 中的各方法，碳足迹更侧重于系统边界的扩大，仍需要对生命周期各环节分别进行测算，并灵活使用以下各类方法。

表 1　碳排放测算方法

Table 1　Carbon emission calculation method

方法	适用场景	举例	标准	优点	缺点	方法学
连续监测法	所有需要测量碳排放的企业，但排放速率不稳定	发电企业在排烟口安装连续监测设备	EMEP[①] GHGRP[②] IPCC[③] ISO[④] GHGP[⑤]	测量数据精确，受认证后的数据可信度高	监测成本较高，需要定期矫正和维护设备	EMEP
排放源采样法	所有需要测量碳排放的企业，但排放速率相对稳定	所有碳交易覆盖的行业，交通运输业	EMEP GHGRP IPCC ISO GHGP	测量数据精确，受认证后的数据可信度高	监测成本较高，需要定期校准维护设备，无法应对排放速率的波动	EMEP
质量平衡法	产品生产过程不涉及大量稳定的直接排放过程	如农业、林业生产、汽车制造	GHGRP IPCC	可计算隐含在原料或生产过程中的碳排量，操作简单	只关注生产过程中物料的质量变化，容易遗漏其他形式的排放	GHGRP
标准排放因子法	大多数需要测量碳排放的场景，产生碳排放的活动条件与标准规定相同	国家碳排放计量、钢铁、发电行业等企业	EMEP GHGRP IPCC	全面详细地反映了温室气体排放源的排放量，适用于以能源为类别的碳计量		
实测排放因子法	产生碳排放的活动条件与标准规定不同且差异较大	如存在燃烧不完全燃烧、标准文件中未出现的合成过程	EU-ETS GHGRP IPCC	与标准法的优点相同，并且能够测量标准中未出现的活动碳排放	受限于因子数据集的数据质量，且数据不够精确	IPCC

注：① EMEP（European monitoring and evaluation program）欧洲污染物监测和评估项目；② GHGRP（greenhouse gas report program）美国环境署制定的温室气体报告体系；③ IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）联合国政府间气候变化专门委员会；④ ISO（International Organization for Standardization）国际标准化组织；⑤ GHG Protocol（greenhouse gas protocol）温室气体核算体系

连续监测法和排放源采样法是几乎所有碳排放相关国际标准和政策法规所认可的方法，两者都需要在排放设施的排气口处安装监测设备测量碳排放量，但成本较高且仅适用于排放量较大的生产设施使用。

质量平衡法是计算产品生产过程中难以测算或产品原料隐含碳排放量的计量手段，通过测算生产前后物料质量的变化得出生产过程的碳排量。其缺点是计算过程不够精确，只能起到间接计量的作用。

标准和实测排放因子法都属于排放因子法，根据产生碳排放的活动类别确定排放因子，结合活动量即可计算出碳排放量，适用于大多数场景的计算并受到所有政策法规的认可。两者的区别在于使用的是政策或标准目录提供的排放因子数据还是自行测量获得的排放因子数据（Chancel，2022；张琦峰等，2018）。

投入产出方法是以投入产出表为基础的自上而下的碳排放计算方法，适用于以经济活动为依据的宏观系统碳排放计算（Roh et al.，2016；Zhao et al.，2022），其原理是结合各部门平均温室气体排放强度的数据，计算各部门向终端用户提供的产品或服务，在整个生产链上产生的温室气体排放量。

1.2　碳标签与碳认证相关实践

碳标签与碳认证是第三方认证机构基于 PAS2050、ISO14060 系列、GHGP 等标准文件，对产品或组织的碳排放量开展核查后提供权威证明的服务，通过可信的证书或声明等方式展现组织或产品生产方在碳减排方面的努力与贡献。如表 2 所示，欧洲、日本、韩国等地区都涌现出了大量商业性质的自愿碳减排认证。这些碳认证与碳标签正在通过强制性政策不断提高产品进入当地市场的合规门槛，并逐步形成以碳为核心的新国际贸易壁垒（聂正标等，2024）。无论是从实现“双碳”目标的角度出发还是从助力产品出口的角度考虑，中国在近年对碳足迹管理也越来越重视，先后发布了《关于开展产品碳足迹标识认证试点工作的通知（国市监认证发〔2024〕85 号）》《产品碳足迹标识认证通用实施规则（试行）》等多项政策，大力推动碳标签与碳认证的试点工作。

表 2 碳标签与碳认证相关实践

Table 2 Practices related to carbon labels and carbon certifications

认证与标签体系	国家	体系内容
BSI 碳减排认证	英国	由 PAS2050 标准衡量，是建立在 ISO140000 系列上的全生命周期碳减排认证
carbonfree 碳中和标签	美国	是计及全生命周期的碳中和认证，以 ISO14000 系列、PAS2050 和 GHG Protocol 为基础编制
JVETS&J-VER	日本	计算直接排放和间接排放的自愿减排交易体系与认证体系，受到国际第三方机构认可并适用总量交易模式
Climatop 碳标签	瑞士	计算产品全生命周期中的碳排放情况，控制在较低水平的企业可以获得认证
cool label 低碳标签	韩国	计算产品生产过程与原料生产过程中的碳排放量，并根据减排量划分产品等级
carbon counted 碳标签	加拿大	计算产品生产过程中的碳排量，并分为组织层和产品层两个层面的碳足迹
carbon trust 碳中和认证	英国	Carbon Trust 碳信托公司基于碳中和标准 PAS 2060 提供的组织或产品碳中和认证
产品碳足迹标识认证试点	中国	由市场监管总局、生态环境部、国家发改委和工信部联合推动，为全国不同地区制定的首批产品碳足迹标识认证试点
粤港澳大湾区碳足迹标识	中国	以电池、无人机、医疗器械等战略新兴产业为重点，是全国首个实现申请、核算、认证全流程数字化的碳足迹管理体系

1.3 碳足迹基本概念

产品碳足迹（product carbon footprint，PCF）的概念源自“生态足迹”，是衡量温室气体排放对环境影响的重要指标之一（范锦凤，2025）。碳足迹以生命周期评价（life cycle assessment，LCA）的方法为基础（丁宁等，2025b），对个人、组织、产品或活动在其整个生命周期中产生的温室气体进行量化，单位是二氧化碳排放当量（CO_2eq）。根据研究内容和范围的不同，碳足迹分类可以细分为国家碳足迹、企业碳足迹、产品碳足迹和个人碳足迹。国家碳足迹指在一定时间内，全国范围内所有活动产生的温室气体排放总量，包括工业生产、交通运输、农业活动等；企业碳足迹指企业在生产运营过程中产生的温室气体排放（杨文婕等，2025）；个人碳足迹是指个人或家庭的生活方式和消费行为产生的温室气体排放。碳足迹是应对气候变化和推动可持续发展的关键途径，对制定减排路径、促进绿色消费以及推动绿色低碳转型具有重要意义。而生态环境部将产品碳足迹的概念做出了进一步的明确——产品从原材料获取、产品生产、运输分销、使用消费到最终废弃处理的各个环节所产生的碳排放量总和，是衡量生产企业和产品绿色低碳水平的重要指标。

1.4 供应链碳排放管理

随着全球气候变化问题日益严峻，供应链碳排放管理已成为学术界和企业界共同关注的热点问题。供应链作为连接原材料采购、生产制造、物流运输到最终消费的全过程，其碳排放占全球总排放量的相当大比例。制造业的绿色转型，特别是降低供应链中的碳排放，已成为推动可持续发展的关键驱动力。目前对于供应链碳排放管理的研究主要聚焦在供应链碳排放核算与供应链减排策略两大方面。

在供应链碳排放核算方面，现有研究主要采用生命周期评价（LCA）方法计算供应链中各环节碳排放。生命周期评价作为一种系统化的分析方法，能够对产品从原材料获取、生产、使用到最终处置或回收的全过程中所产生的环境影响进行评估。吕衍超（2025）采用生命周期评价（LCA）方法，分析了制造业企业供应链从原材料采购、产品制造、物流运输到终端回收全流程碳排放。此外，还有部分学者通过构建碳排放核算模型来核算供应链碳排放。王志国等（2024）根据标准数字化技术所具备的数据自动化处理和分析的特性，构建基于标准数字化的链长企业碳排放核算模型，帮助链长企业高效、精确测算和管理自身及供应链碳排放。周春雷等（2024）聚焦能源行业低碳供应链碳排放测算，搭建“双碳”目标下能源行业低碳供应链碳排放测算模型，实现对货物生产、运输、仓储多环节碳排放测算。

在供应链减排策略研究方面，唐艳群等

（2025）研究了不同汇率结算方式和相关参数对跨国供应链减排决策的影响，表明汇率波动所产生的影响会在供应链间发生传递，汇率波动和风险规避行为均会降低产品减排量。许海娟等（2025）通过构建上下游供应商和制造商的碳减排演化博弈模型分析各方主体行为演化策略，仿真结果表明低碳生产收益增长率、提高政府规制力度有利于促进供应链碳减排。Yang et al.（2023）构建了包含供应商和单一制造商的两级低碳产品供应链，并通过不确定微分方程求解得出供应链中的动态均衡策略、减排量及收益轨迹，表明供应商与制造商合作情形下供应链双方的减排努力程度更高，碳减排量更大。

1.5　电工装备碳足迹测算

电工装备是电力工业中利用电磁能完成一定功能的电工装置，主要涵盖发电、输电、变电、配电、用电设备、电测仪表以及储能等多个领域，能够保障能源安全稳定供给并助力实现碳达峰碳中和目标。其中，发电企业主要使用发电、输电和变电设备，而电网公司的采购范围主要包含输电、变电和配电设备。近年来，许多学者也开展了电力系统和电工装备领域的碳足迹测算研究，其中各类发电设备成了测算的关注对象，电力系统以及电工装备的碳足迹也主要基于发电碳足迹展开。

在发电碳足迹测算方面，刘含笑等（2024）将系统边界划分为上游、核心和下游 3 个环节，综述了产品类型、用能结构、工艺流程、减排技术等因素对光伏产品碳足迹评价的影响，并分析了当前光伏产品碳足迹评价在方法论、成本、技术、政策等方面面临的挑战。韩然等（2025）测算了典型单晶硅光伏组件，比较分析了单玻单晶与双玻单晶两种典型硅光伏组件的生命周期碳足迹以及区域异质性。黄成等（2025）对比分析了光伏发电和燃煤发电的全生命周期碳足迹，发现光伏虽然在发电阶段几乎不产生碳排放，但在电站建设和原材料制造阶段存在显著的碳排放，而燃煤发电则是原材料生产和设施建设阶段占比相对较少，发电过程的排放显著高于其他阶段。付紫君等（2025）对基于绿电和碳捕集技术的 CO_2 捕集－甲烷化一体化的生产流程进行了模拟并测算出该技术的碳足迹，发现提高绿电占比以及氢气利用率能够实现负碳排放。陈雅禾等（2025）测算了中国典型风力发电及储能系统的碳足迹，发现组件制造阶段的碳足迹贡献最大达到了 74.05%，而在原有的发电系统上增加储能系统可以降低系统的总电力碳足迹。Liu et al.（2025）核算了中国 HPR1000 核电机组的碳足迹，并探讨了核燃料回收对碳足迹的影响以及未来核电对于中国电力系统减排的潜在贡献。

在电力系统碳足迹测算方面，刘昱良等（2024）研究了电力系统碳排放计量与分析方法，系统梳理了排放因子法和质量平衡法两种电力系统碳排放核算的主流方法，并认为需结合排放源识别、影响因素评估（如能源结构、设备效率）及减排措施优化，强调未来需通过新能源技术应用和核算方法改进提升减排效率。耿光飞等（2025）对比了电力系统碳流分析中的平均碳势法、电量法及典型日估算法 3 种碳足迹估算方法的差异，并结合三者的优势提出了新的电力系统碳足迹估算方法。

相比之下，输配电设备碳足迹的测算研究则相对较少。祁利等（2022）探讨了电工装备企业产品碳足迹量化模型及应用场景，以变压器为例，研究基于 GHGP 标准，采用排放因子法测算全生命周期碳排放，发现电工装备碳足迹核算面临系统边界模糊、数据采集困难等挑战，提出通过可视化信息系统建设优化企业内部管理，推动绿色采购转型。赵扉等（2022）总结了电工装备常用的碳排放测算方法，并以 110 kV 变压器为例进行了碳足迹测算。李冬雪等（2024）提出了一种电力变压器磁特性数字孪生模型的构建方法，通过仿真测算验证了建模的有效性，通过模型优化能够确保经济性的同时降低变压器的碳足迹。毕竟等（2024）在广泛文献和数据调研的基础上建立了变电站的全生命周期碳排放核算模型，发现运行阶段的碳排放量占比最高达到了 75%，因此，在设计阶段即开始注重生产、使用和报废阶段的碳排放有助于降低产品碳足迹。陈晓红等（2023）从碳足迹视角而非传统的费用清单出发，基于生命周期评价方法首次构建了特高压工程建设碳源排放清单体系，并以陇东—山东 800kV 高压直流输电工程为工程实例测算了碳足迹与减排潜力。李可昀等（2025）梳理了输变电工程关键设备与材料在原材料获取与生产制造环节的碳排放活动，构建了输变电工程关键设备与材料的碳排放核算模型，核算了 7 种关键电力设备与材料“从摇篮到大门”过程的碳足迹，发现导线、杆塔材料和变

压器是输变电工程关键设备与材料的主要碳排放来源。

1.6 研究现状总结

根据以上文献可以看出，碳排放与碳足迹的测算已经开展了大量研究，在实际应用中常见的测算方法包括物质平衡法、排放因子法和实测法等，但电工装备领域中相较于近年不断迭代更新的发电碳足迹测算，输配电设备碳足迹的相关研究较少。同时，基于碳足迹的采购标准研究也较为匮乏，供应链下游的企业无法将碳足迹评价纳入自身的产品采购计划中。因此，研究电工装备的碳足迹测算标准并将其纳入采购体系中具有重要的理论意义，对电力装备供应链以及电力系统的低碳化发展都具有一定的参考价值。

2 “双碳”目标下电网企业电工装备低碳采购机制建设

建立科学、统一、可操作的电工装备碳足迹测算标准，是将绿色低碳理念融入采购决策以及建立电网企业碳足迹管理体系的前提和基础。为了解决当前核算边界不清、核算方法不一、数据来源混杂以及缺乏评价标准等问题，本研究将从 3 个方面设计电网企业电工装备碳足迹测算标准与低碳采购机制，并提出总公司和省公司 2 个层面的协同体系。

2.1 电网企业电工装备低碳采购规划

考虑到中国 2024—2025 年才开始大范围推广产品的碳足迹测算，大部分生产企业的碳足迹管理工作刚刚起步，因此，参考 2024 年《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》制定的发展目标，如图 2 所示，电网企业的输配电设备碳足迹采购管理规划将分为 3 个主要阶段，每个阶段分为不同的发展任务并分批次开展主要产品类别的碳足迹测算试点工作，逐步建立健全电网企业的碳足迹管理体系，并以电力供应链“链长”的身份引导带动上游的装备制造商提高碳足迹管理能力。本规划中的电工装备聚焦电网企业主要采购的输配电设备，包括变压器、GIS、导线电缆、绝缘子、耦合电容器等。

1）起步阶段——2025—2027 年。总体目标是实现碳足迹的信息“从无到有”，进行输配电设备供应链的碳数据摸底。电网企业初步建立碳足迹管理体系，输配电设备低碳采购标准是其中的重要组成部分；在部分关键输配电设备采购招标中试点推广碳足迹测算标准，碳足迹相关要求主要作为评标



图 2 电网企业输配电设备低碳采购规划

Fig. 2 Low-carbon procurement planning for power transmission and distribution equipment of power grid enterprises

办法中的加分项出现，以引导供应商探索并建立碳足迹管理体系为主要目的，初步建立电网企业输配电设备碳足迹数据库。

2）成熟阶段——2028—2030 年。总体目标是实现数据质量的“从有到优”，初步建立起差异化竞争机制。碳足迹管理体系以及管理实践逐步融入企业管理的各个环节，碳足迹测算要求从重点产品推广到所有输配电设备采购中；产品完整且规范的碳足迹测算报告成为供应商参与采购招标时所需要提供的必备材料，并开始在其他产品采购类别中试点产品碳足迹测算要求（如办公用品、检测设备、车辆等）；碳足迹管理体系建设成为供应商评价的加分项。完成电网企业输配电设备碳足迹数据库的搭建，完成已购设备、新采购设备以及设备供应商的碳足迹相关数据的收录工作，并基于大数据技术通过 API 接口将数据库接入企业数据平台。

3）强化阶段——2030 年实现碳达峰目标后。总体目标是实现碳足迹管理与采购体系的全面深度融合。电网企业碳足迹管理体系完全建立，碳足迹管理正式成为企业管理中的一环；产品碳足迹成为输配电设备采购评标中的主要指标之一，碳足迹管理体系纳入供应商准入标准，供应商在产品设计时即需要考虑设备使用、维护以及后续报废回收阶段的碳排放管理，降低输配电设备碳足迹并提升碳足迹管理能力成为主要目标之一，碳足迹数据库成为企业采购活动的重要参考依据。

2.2　电网企业电工装备碳足迹测算框架

参考 ISO 14067、PAS 2050 等国际标准以及国家标准 GB/T 24067—2024《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》，进一步基于电工装备种类以及电网公司需求设计电工装备的碳足迹测算框架（李可昀等，2025；毕竟等，2024），充分考虑国内当前的数据基础与行业现状，旨在建立一个科学、清晰、可逐步提升的核算体系。

2.2.1　产品分类

根据电网运营管理过程中设备的重要性及数据基础，输配电设备在碳足迹管理中可依次分为 3 类——A 类核心设备、B 类关键设备、C 类辅助设备，通过分级管理实现碳足迹管理能力的逐步提升。

A 类设备为输配电过程中的主要一次设备，包括变压器、GIS（气体绝缘开关设备）、换流器、导线和电缆。这些设备具有采购量大、采购频次高以及核算案例相对较多的特点，是起步阶段中首批开展碳足迹测算试点的设备类别。

B 类设备指输配电过程中的其他一次设备，其中有绝缘子、耦合电容器和互感器等，二次设备包括金具以及各类电表和监测装置。这些设备在输配电过程中同样占据关键地位，但开展的碳足迹测算经验相对较少且采购频次较低，是第二批开展碳足迹测算试点的设备类别。

C 类设备为二次设备以及其他辅助设备，包括各类金具、电表等监测装置以及杆塔材料等。这些设备在输配电过程中主要起辅助作用，优先级相较于 A 类和 B 类更低，是第三批开展碳足迹测算试点的设备类别。

需要注意的是，变压器、换流器和 GIS 等设备供应商的生产方式一般为产品组装，其生产过程的碳排放强度相对较低，但仍存在庞大的上游供应链即各类电子元器件的生产过程，这些设备由数百甚至数千个小型元器件（如半导体器件、传感器、绝缘材料、紧固件等）组装而成。要精确测算其全生命周期碳足迹，不仅需要核心材料（如硅钢片、铜线、绝缘油）的数据，还需追踪大量小型元器件的碳排放数据，这面临着数据可见性低、收集边界广和供应链协同难等问题（李可昀等，2025；李冬雪等，2024）。因此，虽然这些设备被归属为 A 类设备，但对该类供应商以及产品的碳足迹管理，其重点不在于考核其自身减排，而在于评估其供应链碳数据的管理能力、透明度及与主要供应商协同降碳的意愿与行动。

部分设备如变压器（干式或油浸式）因电压等级或类别不同，其制作工艺有所差异，导致碳足迹量也存在明显不同，因此，需要根据电压等级大致将碳足迹分为 4 类进行管理——10 kV 以下、10 ~ 220 kV、330 ~ 750 kV 以及 750 kV 以上，导线和电缆的分类则主要根据其金属材料、绝缘层材料以及规格进行。

2.2.2　电工装备碳足迹测算框架

如图 3 所示，产品的全生命周期包括原材料获取、原材料运输、生产制造、产品运输、产品使用和产品最终废弃处置 6 个阶段，其中从原材料获取到产品最终废弃处置的完整过程被称为“从摇篮到坟墓”，从原材料获取到产品运输的过程被称为

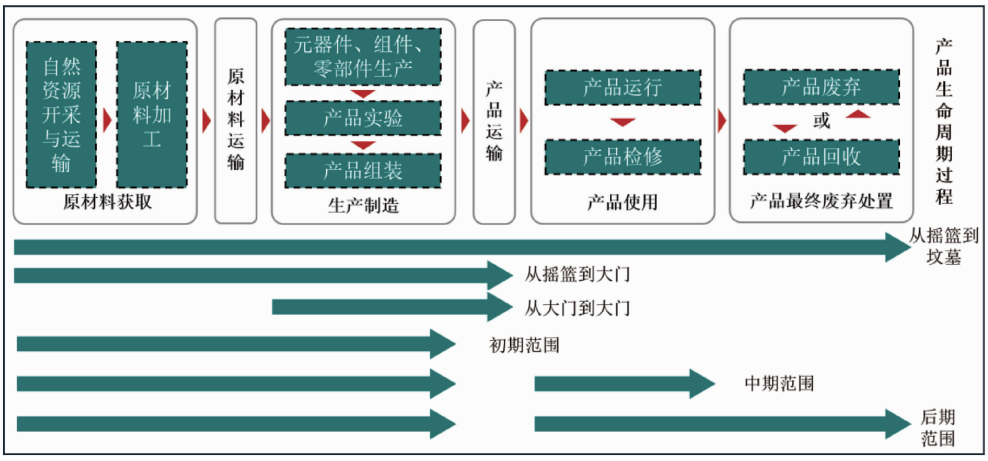


图 3 产品全生命周期过程和产品碳足迹核算范围

Fig. 3 The entire product life cycle process and the scope of product carbon footprint accounting

“从摇篮到大门”，从生产制造到产品运输的过程被称为“从大门到大门”（丁宁等，2025a）。

考虑到不同时期生产企业的碳足迹管理能力存在差异，根据设备分级和时间阶段设置不同的核算范围以实现循序渐进的碳足迹管理能力建设，该计划过程如表 3 所示。A 类设备在起步阶段即开始采用中期范围，即原材料获取到生产制造以及产品使用，自成熟阶段开始就采用后期范围，在中期范围的基础上增加了产品最终废弃处置。B 类设备则从起步阶段开始自初期范围的原材料获取到原材料运输并逐步拓展至后期范围。C 类设备从成熟阶段开始核算初期范围并逐步拓展至后期范围。

表 3 不同级别的产品在各个计划阶段内的碳足迹核算范围

Table 3 The scope of carbon footprint calculation for products of different levels within each planning stage

阶段	A 类设备	B 类设备	C 类设备
起步阶段	中期范围	初期范围	不核算
成熟阶段	后期范围	初期范围	初期范围
强化阶段（前期）	后期范围	中期范围	中期范围
强化阶段（后期）	后期范围	后期范围	后期范围

参考 ISO—14067，输配电设备的碳足迹核算主要采用生命周期建模，并可分为根据产品结构建模和根据产品生产工艺流程建模 2 种方式，前者主要依据产品组装工艺流程划分单元过程，更适用于由元器件、零部件组装成形的大型设备、集成产品和成套电工装备，如变压器（A 类）、GIS（A 类）、换流器（A 类）、互感器（B 类）和电表（C 类）等；后者按产品线加工程序细分单元过程，更适用于产品原材料直接由自然资源获得，通过一次加工或二次加工获得，且涉及的原材料种类少，如导线（A 类）、电缆（A 类）和绝缘子（B 类）等，两种方式在实际建模过程中也可交叉使用。

核算方法应优先考虑现场实测方法，包括现场抽样或安装连续监测设备等方式，在无法实验实测方法时可选择排放因子法和质量平衡法。若采用排放因子法，应当按照公式（1）—（6）计算电工装备的碳足迹。

$$E = E_{\mathrm{N}} + E_{\mathrm{M}} + E_{\mathrm{SF_6}} = M \times E_{\mathrm{CF}}, \quad (1)$$

式中：E 为输配电设备的碳足迹，$\mathrm{tCO_2e}$；E_{N} 为输配电设备在生命周期内能源消耗产生的碳排放总量，$\mathrm{tCO_2e}$；E_{M} 为获得用于输配电设备生产各类物质时产生的碳排放总量；$E_{\mathrm{SF_6}}$ 为六氟化硫逸散产生的二氧化碳当量，$\mathrm{tCO_2e}$。M 为输配电设备功能单位对应的产品总量（如长度、质量和体积等）；E_{CF} 为输配电设备的碳足迹系数。

$$E_{\mathrm{N}} = \sum_{i=1}^{N} E_{i\text{燃料}} + E_{\mathrm{e}} = \sum_{j=1}^{M} AD_j \times EF_j \times \mathrm{GWP}_{100}, \quad (2)$$

式中：$E_{i\text{燃料}}$ 为第 i 种燃料燃烧产生的二氧化碳排放量，$\mathrm{tCO_2e}$；E_{e} 为外购电力用于输配电设备生产过程产生的二氧化碳排放量，$\mathrm{tCO_2e}$；AD_j 为第 j 种能源活动水平数据；EF_j 为第 j 种能源的碳排放因子；N 和 M 分别为燃料和能源的种类数；GWP_{100} 为全球变暖潜能值，温室气体种类不同，潜能值则不同。

$$E_{\mathrm{M}} = \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{P} AD_{m,n} \times PF_{m,n} \times \xi_m \times \mathrm{GWP}_{100}, \quad (3)$$

式中：$AD_{m,n}$ 为某类物质在某单元过程中的活动水平数据；$PF_{m,n}$ 为某类物质在某单元过程中的排放系数，可以是碳足迹系数，也可以是碳排放系数；

ξ_m为第 m 个单元过程的基准流折算系数，以输配电设备功能单位对应基准流的物质数量除以实际量测单元对应的物质数量表示（如 1 台变压器需要 30 个电容，但在实际生产中通过测量获得的是一个电阻的碳排放量，则折算系数为 30）；K 和 P 分别为单元过程和物质种类的总数。

六氟化硫 SF_6 逸散是输配电设备温室气体排放所关注的重点内容，变压器和 GIS 等设备的部分型号在使用过程中都会产生 SF_6 逸散，因此，需要将六氟化硫 SF_6 逸散量通过 GWP_{100}全球变暖潜势参数折算为碳足迹，其计算过程如公式（4）所示。

$$E_{SF_6} = \sum_{i=1}^{N} AD_i \times GWP_{100}, \tag{4}$$

式中 AD_i 为第 i 个过程中的六氟化硫逸散量。

外购电力的碳排放计算也是碳足迹测算的重要一环，其计算过程如公式（5）所示。

$$E_e = AD \times CF \times \delta \times GWP_{100} = AD \times P \times T \times \eta \times \delta \times GWP_{100}, \tag{5}$$

式中：AD 为中间产品的活动水平数据；CF 为中间产品的活动水平数据——过程碳排放系数；P 和 T 分别为设备运行的功率和时间；η 为获得单位数量的中间产品，对应设备输出功率的特征值；δ 为单元过程基准流折算系数。

在需要测算运输过程的碳排放时，可参考公式（6）的计算过程。

$$E_t = W \times D \times TF, \tag{6}$$

式中：E_t 为原材料运输或输配电设备运输碳排放总量；W 为原材料或产品总重量，t；D 为运输总里程，km；TF 为运输过程的碳排放系数，$tCO_2e/t\ km$。

2.2.3　碳足迹测算报告的编制要求

在实际的物资招标采购过程中，供应商在制作投标文件时需要提供产品的碳足迹测算报告，以具体说明其产品的碳足迹属性，其完整内容主要包含 4 大部分——概述、报告范围、生命周期清单以及影响评价。

概述部分主要包括供应商的基本信息（为避免数据冗余，在采购招标中可参考商务标书）、产品信息、该报告的主要测算方法以及该报告的撰写目的（在采购招标中对应招标信息以及技术规范书），报告范围部分需要阐明电工装备的功能单位、系统边界、取舍准则以及时间范围。生命周期清单部分需要包含数据来源信息、分配原则与方法、生命周期清单以及各阶段的计算过程。影响评价部分应当包含输配电设备碳足迹的计算结果、敏感性分析（推荐）、不确定性分析（推荐）以及局限性，如果先前已有碳足迹测算数据，可以提供碳足迹数据测算报告历史版本。

为了引导供应商逐步建立碳足迹管理体系，在起步阶段开始推荐 A 类设备的供应商在报告中填写敏感性分析和不确定性分析内容，分析测算过程中关键数据集的选择对于结果的影响，鼓励 B 类和 C 类设备的供应商开始建立碳足迹年度监测制度，每年进行设备的碳足迹测算并形成报告。成熟阶段 A 类设备的供应商需要在报告中体现敏感性分析和不确定性分析内容，B 类和 C 类设备的供应商也需要在后续阶段中加入两部分的分析内容。同时，鼓励供应商根据国家认证认可监督管理委员会发布的《产品碳足迹标识认证试点参与机构遴选结果》以及后续公布的机构名单，选择第三方认证机构对碳足迹测算报告进行核查与验证（或由第三方机构执行测算并出具报告）。

2.2.4　碳抵销产品的使用

碳抵消产品是非碳排放权交易市场控排主体根据温室气体自愿减排项目方法学开发的自愿减排项目，根据特定的备案、审核与认定流程产生并出售的温室气体减排量（史洋等，2025）。自愿减排机制的初衷是为具有良好减排性能但应用中存在困难的减排技术提供经济支持，也为具有减排需求的主体提供减排量。但碳抵消产品对应的减排量本质上不是由购买者或其供应链上的其他主体产生的，不能直接将碳抵销产品的减排量直接分摊到输配电设备的碳足迹中，因此，碳抵消产品不能直接降低设备的碳足迹。但购买碳抵消产品仍然可被视为企业做出了碳减排的贡献，在供应商评价中可以获得加分。

2.3　碳足迹数据质量评价标准

2.3.1　数据分级规则

碳足迹测算报告中数据的质量关系到测算结果和结论的严谨性、准确性和可靠性，参考 ISO—14067 和欧盟产品环境足迹（product environmental footprint，PEF）中的数据质量评价标准，分别提出两种输配电设备碳足迹数据质量评价标准（丁宁等，2025a，2025b），以供采购部门根据实际情况

进行选择。数据收集时应当遵循守可获取、可溯源和可测量原则，供应商在报告撰写中需要收集多种数据，包括能源（排放因子、消耗量和排放方式）、物质（物资采购信息、物质排放清单、副产品等）、温室气体（仅包含二氧化碳和六氟化硫 SF_6）、单元过程信息、运输（油耗量、总里程、运输方式等）和废弃处置（处置方式、排放方式等），这些数据集需要体现在报告正文的对应位置或附录中。

数据的评价标准主要从 4 个方面出发。1）数据集的完整性：需要始终确保数据收集的完整性，数据集不完整时，应重新收集数据集。2）数据集的时间代表性：使用对输配电设备具有时间代表性的数据，越接近测算时间的数据质量越高。3）数据集的地理代表性：使用对输配电设备生产所属地理位置的数据（生产、使用和废弃处置等阶段都应尽量接近其所属的地理位置），地理位置越接近的数据质量越高。4）数据集的技术代表性：使用对输配电设备具有相关技术代表性的数据，生产工艺特性越接近的数据质量越高；收集数据时最优先的是现场数据，可制定抽样计划并通过抽样方案获取。

1）质量分级规则 1。根据 ISO—14067 的评价标准，当无法获取现场数据时，应当依次按初级数据、次级数据（或称为背景数据）的优先级获取数据集。初级数据是指通过直接测量或基于直接量测的计算获得各单元过程的碳排放量、活动水平数据和碳排放因子。初级数据可能来自供应商的设备生产具有可比性的其他产品系统，但应在报告中说明其数据源的可替代性。因此，现场数据必定是初级数据，但初级数据不一定是现场数据（如果采用现场数据应当标注为现场数据，而非统一标记为初级数据），应在测算报告中说明其数据源的可替代性。次级数据是指所有非初级数据，即非直接测量和测算的各种碳排放量、活动水平数据，以及由数据库获取的碳足迹系数。因此，来自公共数据库、文献、记录或行业公开的数据都属于次级数据。

2）质量分级规则 2。参考欧盟 PEF 的标准，指标得分越低，代表数据的质量评级越好，来自生产企业内部或生产现场的数据为第一类数据，需要根据如表 4 所示的质量评价规则对数据集进行评价。

对于未使用现场或企业内部数据的情况即次级数据（或称为背景数据），无须对准确性进行评分，但需要重新对技术代表性、时间代表性和地理代表性评分，如表 5 所示。

表 4 第一类数据的质量评价规则

Table 4 Quality evaluation rules for the first type of data

得分	有效性	时间代表性	技术代表性	地理代表性
1	测量/计算并且外部验证	最近年度的数据	准确反映数据集的技术	准确反映生产地区的水平
2	测量/计算并且内部验证可信度由审查员检查	两年内的数据	可代表反映数据集的技术	大致反映生产地区的水平
3	测量/计算/文献且可信度未经审查员检查，或基于计算的有保留的估算且可信度由审查员检查	三年内的数据	无	无

表 5 第二类数据的质量评价规则

Table 5 Quality evaluation rules for the second type of data

得分	时间代表性	技术代表性	地理代表性
1	有效期内的数据	数据集中使用的技术与实际生产的完全相同	来自同一工业园区/产业集群的数据
2	超过有效期 2 年内的数据	数据集中使用的技术包含在实际生产中	来自同一省级行政区的数据
3	超过有效期 4 年内的数据	数据集中使用的技术仅部分包含在实际生产中	来自同一地区的数据
4	超过有效期 6 年内的数据	数据集中使用的技术与实际生产的类似	来自中国的数据
5	超过有效期 6 年以上或有效期不明确的数据	数据集中使用的技术与实际生产的不同	世界/国际地区平均水平数据

2.3.2 数据质量评价方法

对数据质量的评价是开展碳足迹测算的基础，供应商在收集数据时即需要对数据的有效性进行评价，当有效性低于标准时就应当重新搜集数据。考虑到当前大部分输配电设备供应商暂未建立碳足迹管理体系，数据质量标准分 3 个阶段逐步提升。

1）质量评价方法 1。根据 ISO—14067 的评价标准，所有数据集可以分为 a、b、c 三个等级：a 级数据质量最优，只包含现场数据；b 级数据质量次之，包括设备生产系统内的初级数据；c 级数据

质量最低，包括设备生产系统外的初级数据和次级数据。数据集的有效性可以通过公式（7）的方法进行确定。

$$\mathrm{Eff}_1 = \frac{N_a + N_b}{N_a + N_b + N_c}, \tag{7}$$

式中：Eff_1 为数据集的有效性指标；N_a、N_b、N_c 分别为每个单元过程中 a 级、b 级和 c 级的数据量。

在起步阶段，变压器、GIS 和换流器因生产工艺复杂，其测算报告的 Eff_1 值应当达到 40%，即现场数据及初级数据的比例应超过 40%，而电缆和导线的生产工艺相对简单，Eff_1 值应当达到 60%；在成熟阶段，变压器、GIS 和换流器的 Eff_1 值应当逐步上升至 60%，电缆和导线上升至 80%，B 类设备 Eff_1 值达到 40%；在强化阶段，所有 A 类设备的 Eff_1 值都应达到 80%，B 类设备和 C 类设备的 Eff_1 值逐步上升至 70%。

2）质量评价方法 2。根据欧盟 PEF 的评价标准，每一条数据都需要测算其数据质量，对于其中占碳足迹贡献度前 80% 的单元过程，所使用的数据需要达到数据质量标准。数据的有效性可以通过公式（8）的方法进行确定。

$$\mathrm{Eff}_2 = \frac{\mathrm{TER} + \mathrm{GER} + \mathrm{TIR} + P}{4}, \tag{8}$$

式中：Eff_2 为数据的有效性指标；TER、GER、TIR 和 P 分别为技术代表性、时间代表性、地理代表性和准确性。

在起步阶段，变压器、GIS 和换流器因生产工艺复杂，Eff_2 值应小于等于 4，电缆和导线的生产工艺相对简单，Eff_2 值应小于等于 3；在成熟阶段，变压器、GIS 和换流器的 Eff_1 值应当下降至 3，电缆和导线下降至 2，B 类设备数据的 Eff_2 值小于等于 4；在强化阶段，所有 A 类设备的 Eff_2 值都小于等于 1.5，B 类设备和 C 类设备的 Eff_2 值逐步下降至 2。

2.4　低碳采购协同体系与能力共建

2.4.1　企业内部协同体系

在将碳足迹管理纳入采购体系中时，电网企业自身需要增强内部协同以及能力建设。为此，企业应构建基于 PDCA 循环理论和 SMART 原则的双向互动机制，如图 4 所示。其涵盖信息交互、业务协同和决策反馈等机制，实现总部与分公司之间的动态交互。这一过程不仅有助于实现企业的低碳发展

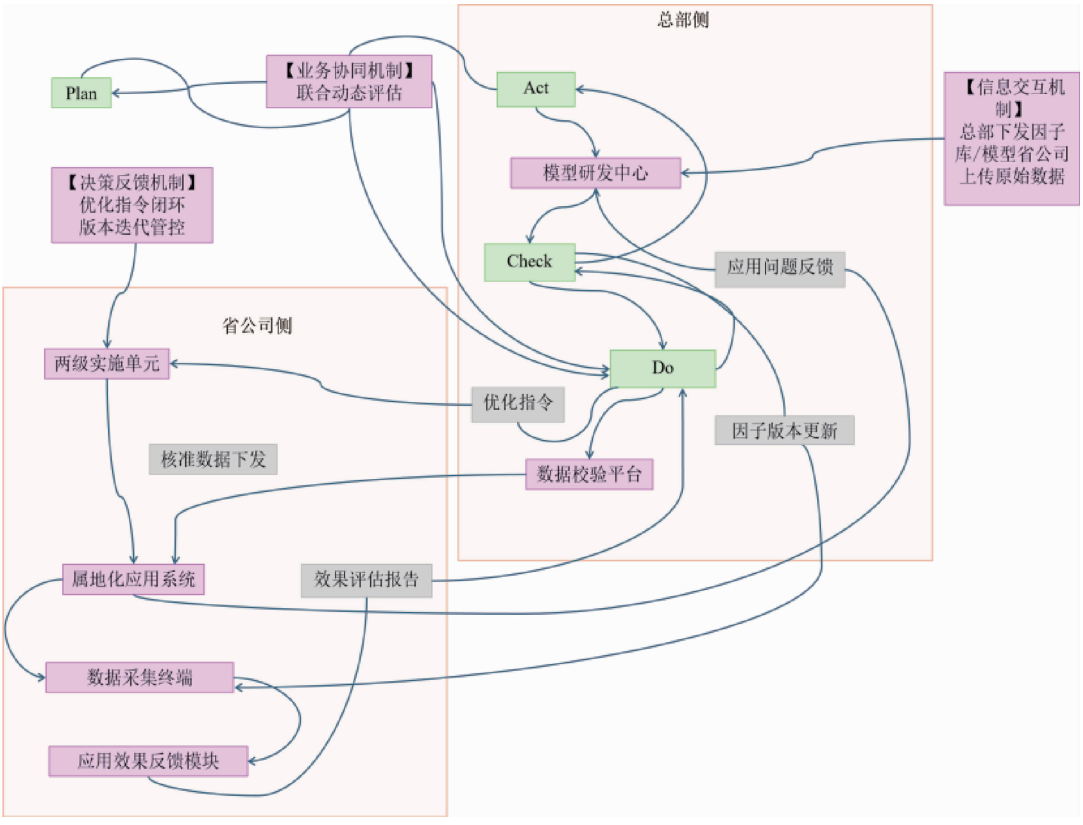


图 4　双向动态交互体系设计框架

Fig. 4　Design framework of the bidirectional dynamic interaction system

目标，还能推动整个供应链的绿色转型。

1）信息交互机制的构建。通过建立统一的信息平台，实现总部与分公司、各部门之间的实时数据共享和信息交流，确保信息的对称性和及时性。例如，总部可以及时发布碳足迹管理的最新政策、标准和要求，分公司则可以反馈实际执行过程中的问题和建议。这种双向信息流动确保了信息的对称性和及时性，为碳足迹管理提供了坚实的数据支持。

2）业务协同机制的优化。明确各部门在碳足迹管理中的职责分工，打破部门壁垒，加强协作。例如，采购部门负责与供应商沟通碳足迹数据的收集和审核，技术部门负责研发低碳采购的技术支持工具，数据管理部门负责碳足迹数据的存储、管理和分析，各部门协同工作，形成合力。通过这种协同机制，企业可以提升碳足迹管理的整体效率。

3）决策反馈机制的完善。建立科学的决策流程，确保碳足迹管理决策的科学性和合理性。设立反馈渠道，让执行部门能够及时将决策执行过程中的问题和效果反馈给决策层，以便及时调整和优化决策。这种反馈机制有助于企业持续改进碳足迹管理流程，确保其符合实际需求和目标。

4）碳足迹数据和信息的共享。通过内部协同体系的建设，实现碳足迹数据和信息的共享。在起步阶段，区域公司和总部通过碳数据摸底，形成基础碳足迹数据库。总部要加强对区域公司的指导和支持，帮助区域公司建立碳数据收集和管理的体系。同时，区域公司要积极配合总部的工作，及时反馈数据收集过程中遇到的问题。进入成熟期后，开展数据收集与规范工作，提升数据库质量。总部要加强对碳足迹数据的质量控制，建立数据质量评估体系，定期对碳足迹数据进行评估和审核。区域公司要按照总部的要求，规范碳足迹数据的收集和管理，提高数据质量。最终为碳达峰后深度脱碳期的强化阶段提供数据基础与管理经验。

2.4.2 供应链能力共建机制

电网企业应发挥“链长”作用，主导构建碳足迹管理能力共建体系。通过与供应商的紧密合作，电网企业可以推动整个供应链的低碳转型，提升供应链的可持续发展能力。这种主导作用不仅有助于实现企业的低碳目标，还能增强企业在行业中的竞争力。

1）建立定期培训机制。定期为供应商举办碳足迹核算、标准解读、案例分享等培训，提高其核算意识，宣传管理的重要性。通过制定详细的培训计划，涵盖碳足迹核算的基本原理、方法和工具，输配电设备碳足迹管理的标准和要求，以及典型案例的分享，确保供应商能够全面了解碳足迹管理的相关知识。这种培训机制有助于提高供应商的碳足迹核算意识，充分宣传管理重要性。

2）应用多样化培训方式。采用多种培训方式，如线上培训、线下培训、实地考察等，增强培训效果。例如，通过线上培训平台，为供应商提供碳足迹核算的视频教程和在线答疑服务；通过线下培训课程，组织供应商进行面对面的交流和讨论；通过实地考察，带领供应商参观低碳采购的示范企业，学习先进的经验。这种多样化的培训方式可以满足不同供应商的需求，提升培训的覆盖面和效果。

3）开发与支持碳计算工具。通过开发简化的碳计算小程序或模板，为供应商开放部分数据库权限，降低起步难度。组织专业技术人员，开发简化的碳计算小程序或模板，使供应商能够方便快捷地进行碳足迹核算。碳计算工具要简单易用，操作方便，同时要保证计算结果的准确性。根据供应商的需求，为供应商开放部分数据库权限，使供应商能够获取相关的数据和信息。例如，开放碳足迹核算所需的原材料数据、生产工艺数据等，帮助供应商更好地进行碳足迹核算。

4）建立联合实验室并共享知识产权。与核心供应商成立联合实验室，共同研发低碳新材料、新工艺，共享知识产权。根据供应商的实力、信誉和合作意愿等因素，选择核心供应商并共同成立联合实验室。核心供应商要具备较强的研发能力和技术创新能力，明确联合实验室的组织架构、人员分工、研发方向等。联合实验室要配备先进的研发设备和专业的技术人员，为低碳新材料、新工艺的研发提供保障。建立知识产权共享机制，明确知识产权的归属和使用方式。

3 电网企业电工装备低碳采购综合评价体系

3.1 综合评价指标体系

3.1.1 指标体系的建立原则

科学合理的评价指标体系是确保评价结果客观、有效的重要前提和基础。构建评价指标体系需

严格遵循相应的准则，指标数量需适宜，并非简单追求繁多或精简，而应注重各指标在整体评价中的实际贡献与代表性。因此，在构建过程中，应明确指标层次、区分核心与辅助指标，并依据科学原则进行筛选，以建立结构清晰、功能明确的评价体系。评价指标体系的构建应遵循科学性、代表性和可获取性原则（王楠等，2024；魏新航等，2025）。

3.1.2　指标体系的构成思路

在构建低碳采购方案的评价指标体系过程中，本研究确立了 2 个一级指标，分别为“低碳产品”与“低碳供应商”，以此作为评价体系的核心架构。基于系统分析方法，进一步对每个一级指标下的关键影响因素进行识别与筛选，将其作为二级评价指标纳入体系之中。采用德尔菲法，结合层次分析法，进行指标筛选与体系构建，具体流程为：在广泛查阅碳足迹管理、绿色采购及电力行业相关文献与政策文件的基础上，初步拟定涵盖多个方面的候选指标集；通过多轮专家咨询，征集对指标重要性、代表性和可操作性的意见；运用层次分析法（AHP）对专家反馈进行量化处理与统计分析，计算各指标权重，筛选出权重较高、代表性强的指标；经数轮咨询与优化后，最终确定二级评价指标，形成结构清晰、层次分明、科学合理的综合评价指标体系（张泽亚等，2023）。

3.1.3　评价指标的选取

在构建低碳采购方案综合评价指标体系时，需系统识别并分层归纳其关键影响因素。一级指标低碳产品的各类影响因素可以归纳为 7 个主要类别作为二级评价指标，包括数据质量、内容完整性、碳足迹量、历史监测、行业先进性、数据核查以及产品设计。数据质量涵盖数据有效性、数据可溯源性和时间代表性，分别衡量数据的准确程度、来源可追溯能力以及时间维度的适用性。内容完整性包含报告规范性、信息完备性和附录完整性，重点关注报告符合国际标准的格式要求、核心内容的完整程度以及支撑材料的提供情况。碳足迹量涉及单位产品碳足迹，用于量化产品碳排放强度及特定电力设备的温室气体排放（如 SF_6）。历史监测包括监测年限、减排趋势和数据连续性，评估企业持续开展碳管理的时间跨度、碳排放变化情况以及监测数据的连贯程度（王玉燕等，2025）。行业先进性包含行业对比水平、历史平均值对比和技术领先度，衡量产品在行业中的碳排放地位、与历史水平的差异以及所采用低碳技术的创新程度。数据核查涵盖第三方资质、核查范围和报告公信力，考察核查机构的专业认证情况、核查覆盖的生命周期阶段以及核查结论的权威性。产品设计包括废弃处置方案、循环利用设计和生态设计理念，关注报废阶段的环境影响控制、材料的可回收性以及全生命周期环境影响的系统考虑（韩然等，2025；刘含笑等，2024）。

对于一级指标低碳供应商，则需全面考量其碳管理能力和实践水平。本研究将低碳供应商的各类影响因素归纳为 6 项核心指标作为二级评价指标，包括管理体系、低碳采购、低碳技术应用、绿电绿证、核查报告和试点认证。管理体系涵盖制度完整性、执行规范性和组织架构，评估碳管理制度的健全程度、碳管理活动的流程符合性以及专门团队与职责设置的合理性（赵双池等，2025）。低碳采购包含上游数据完整性、供应链协同度和供应商管理，考察主要原材料碳足迹数据的获取情况、与供应商在碳数据披露与减排方面的协作水平以及对供应商低碳绩效的要求与管理。低碳技术应用涉及技术类型、减排效果和创新性，衡量节能减碳技术种类、实际碳排放削减量以及技术的行业领先程度。绿电绿证包括绿电比例、绿证数量和绿色能源规划，关注绿色电力在总用电量中的占比、购买的绿色电力证书数量以及未来使用绿色能源的计划。核查报告涵盖报告完整性、第三方资质和核查频次，评估企业碳排放报告内容的全面性、出具核查报告的机构资质以及接受第三方核查的频率。试点认证包含试点级别、参与成效和认证成果，考察参与国家或省市级试点项目的层次、在试点项目中取得的实际成果以及获得第三方低碳认证的情况（毛田等，2024）。由此，初步构建一套低碳采购方案评价指标体系，如图 5 所示。

3.2　综合评价模型

3.2.1　低碳采购方案评价模型的建立

本文参考现有成熟方法（夏云舒等，2025），结合电网企业电工装备采购的实际需求，构建低碳采购方案评价模型，采用层次分析法和综合指数法进行定量评价。低碳采购方案评价的数学模型如公式（9）所示。

$$P = \sum_{i=1}^{n} K_i \times C_i, \tag{9}$$

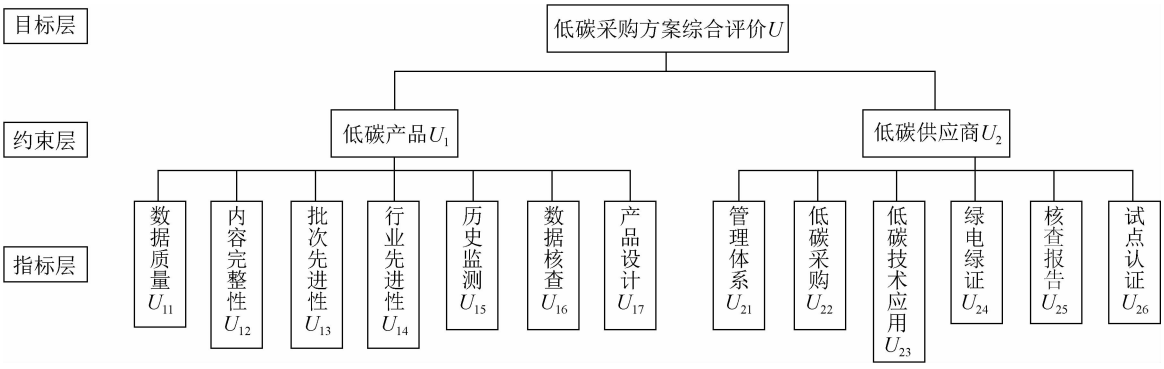


图 5 低碳采购方案综合评价指标体系框架

Fig. 5 Framework of the comprehensive evaluation index system for low-carbon procurement schemes

式中：P 为低碳采购方案综合评价得分；K_i 为第 i 个一级指标权重，通过层次分析法确定；C_i 为第 i 个一级指标的标准化得分，依据二级指标量化后综合评定。

3.2.2 确定评价模型的权重

邀请来自电网企业的采购部门、高校等研究机构的 6 位专家对各评价指标的重要程度进行比较，对各位专家不同意见进行统计、处理、分析和归纳。根据 1—9 标度法，建立判断矩阵。计算得出一级指标 U_1—U_2 的各项权值 M，二级指标 U_{11}—U_{26}的权值 N 及组合权值 K，并进行排序。整理其中一位专家对一级指标的意见，以此计算权重，如表 6 所示。

表 6 一级指标对目标层的判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of the target layer by the first-level indicators

$\boldsymbol{U}$	U_1	U_2
U_1	1	2
U_2	1/2	1

对判断矩阵进行运算，求出矩阵 $\boldsymbol{U}$ 的最大特征值，为 $\lambda_{max}=2.5$。进行一致性检验，得 $CI=0.5$，如公式（10）和（11）所示。

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}=\frac{2.5-2}{2-1}=0.5, \tag{10}$$

$$CR=\frac{CI}{RI}=0, \tag{11}$$

查找平均随机一致性指数，当 $n=2$ 时，$RI=0$，则 CR 通过一致性检验。得到该专家认为的一级指标的重要性排序，如表 7 所示。

表 7 一级指标 U_1—U_2 权值（专家一）

Table 7 Weights of first-level indicators U_1-U_2 (Expert One)

序号	一级指标	权重 M
1	低碳产品	0.667
2	低碳供应商	0.333

根据不同专业的专家打分情况，按照相同的计算方法和步骤，分别处理其他 5 位专家对一级指标的打分，计算 6 位专家权重的平均值，最终等到一级指标 U_1—U_2 的权重，并进行排序，如表 8 所示。

表 8 一级指标 U_1—U_2 的权重及排序

Table 8 Weights and rankings of the first-level indicators U_1-U_2

序号	专家身份	低碳产品 U_1	低碳供应商 U_2
专家一	电网企业采购管理人员（高级工程师）	0.667	0.333
专家二	电网企业采购管理人员（高级工程师）	0.400	0.600
专家三	电网企业管理人员（高级工程师）	0.500	0.500
专家四	企业管理、低碳政策领域教授	0.667	0.333
专家五	环境管理、低碳政策领域教授	0.545	0.455
专家六	企业管理、环境管理领域研究员	0.357	0.643
平均值		0.523	0.477
排序		1	2

按照相同的计算方法和步骤，分析处理 6 位专家对二级指标的判断矩阵，得到二级指标 U_{11}—U_{26} 对各一级指标的权值 N。依次沿递阶层次结构由上而下逐层计算，可得出各指标综合权重 K，并进行排序。最终得出各指标相对于目标层的相对重要性，如表 9 所示。

表 9　二级指标组合权值

Table 9　Combined weights of secondary indicators

一级指标	权重 M	二级指标	权值 N	组合权值 K	K 排序
低碳产品 U_1	0.523	数据质量 U_{11}	0.123	0.064	13
		内容完整性 U_{12}	0.143	0.075	7
		批次先进性 U_{13}	0.132	0.069	11
		行业先进性 U_{14}	0.188	0.098	1
		历史监测 U_{15}	0.136	0.071	10
		数据核查 U_{16}	0.140	0.073	8
		产品设计 U_{17}	0.147	0.077	5
低碳供应商 U_2	0.477	管理体系 U_{21}	0.154	0.073	8
		低碳采购 U_{22}	0.163	0.078	4
		低碳技术应用 U_{23}	0.202	0.096	2
		绿电绿证 U_{24}	0.178	0.085	3
		核查报告 U_{25}	0.160	0.076	6
		试点认证 U_{26}	0.143	0.068	12

3.2.3　确定评价标准与评价等级

为保证低碳产品评价的科学性与可操作性，本研究采用五级制评价等级，分别为：优秀——100 分；良好——80 分；一般——60 分；较差——40 分；不合格——20 分。如表 10 所示，在系统分析电网企业采购数据、行业技术标准及国内外碳足迹评价实践的基础上，结合定量与定性指标特征，针对各项指标制定明确的评价标准。

表 10　低碳采购方案综合评价等级参考标准

Table 10　Reference standards for comprehensive evaluation grades of low-carbon procurement schemes

序号	二级指标	指标评判标准			
		优秀	良好	一般	较差
1	数据质量 U_{11}	数据质量指标超过标准值 20% 及以上	数据质量指标达到或未超过标准值 20%	不适用	未达到标准
2	内容完整性 U_{12}	包含推荐性内容两项	包含推荐性内容一项	未包含推荐性内容	内容不完整
3	批次先进性 U_{13}	本批次招标中碳足迹因子排名第一	本批次招标中碳足迹因子排名第二	本批次招标中碳足迹因子排名第三	本批次招标中碳足迹因子排名第四
4	行业先进性 U_{14}	低于数据库中的历史平均值 20% 以上	低于数据库中的历史平均值 10% ~20%	低于数据库中的历史平均值 10% 及以下	等于或高于数据库中的历史平均值
5	历史监测 U_{15}	具有 3 年及以上的监测报告，且碳足迹降低	具有 2 年及以上的监测报告，且碳足迹降低	具有 1 年及以上的监测报告，且碳足迹降低	无历史监测报告，或碳足迹未降低
6	数据核查 U_{16}	经受国家认可的第三方机构核查合格	经未受国家认可的第三方机构核查合格	打算经过第三方机构核查	未打算经过第三方机构核查
7	产品设计 U_{17}	产品设计考虑了废弃处置阶段，并设计了循环利用方案	产品设计考虑了废弃处置阶段，未设计循环利用方案	不适用	产品设计未考虑废弃处置阶段

续表 10

序号	二级指标	指标评判标准			
		优秀	良好	一般	较差
8	管理体系 U_{21}	已完善碳足迹管理体系	初步建立了碳足迹管理体系	未建立碳足迹管理体系	不适用
9	低碳采购 U_{22}	能够出具上游供应商提供的碳足迹测算报告，内容完整	能够出具上游供应商提供的碳足迹测算报告，内容部分缺失	不能够出具上游供应商提供的碳足迹测算报告	不适用
10	低碳技术应用 U_{23}	采用减碳/负碳生产技术	购买碳抵消产品达到年排放量的 20%	未应用减排生产技术	不适用
11	绿电绿证 U_{24}	绿电/绿证消费比例达到总用电量的 30% 以上	绿电/绿证消费比例达到总用电量的 20% ~30%	绿电/绿证消费比例未超过总用电量的 20%	未消费绿电/绿证
12	核查报告 U_{25}	具有第三方机构核查的企业碳排放清单报告	具有自行核查的企业碳排放清单报告	无企业碳排放清单报告	不适用
13	试点认证 U_{26}	参与国家的产品碳足迹试点认证工作	参与区域/省/市的产品碳足迹试点认证工作	未参与产品碳足迹试点认证工作	不适用

3.3 典型案例评价

3.3.1 评价指标信息提取

如表 11 所示，本研究选取了初步调研中收集的 2 家变压器产品供应商提交的产品碳足迹测算报告以及供应商调查问卷作为综合评价的数据基础，对供应商甲和供应商乙分别进行评价。根据 3.2 中提出的评价模型以及等级参考标准，为 2 家供应商的各项二级指标进行打分。

3.3.2 评价结果与供应商改进建议

根据评价模型，各指标综合权重乘以各指标的分值，合计得出总分，即典型低碳产品的优度指数，结果如表 12 所示。

供应商甲的综合得分为 96.1 分，属于“优秀”等级，企业和变压器产品的低碳属性竞争力强，“行业先进性”指标中产品碳足迹低于本次调研中的平均值 23%（因尚未建立完整的数据库，选用本次调研的平均值作为参考），数据质量、内容完

表 11 低碳采购评价基础信息

Table 11 Basic information for low-carbon procurement evaluation

一级指标	二级指标	供应商调研信息			
		供应商甲	得分	供应商乙	得分
低碳产品 U_1	数据质量 U_{11}	数据质量指标超过了标准值 20%	100	数据质量指标基本满足标准值	80
	内容完整性 U_{12}	进行了敏感性分析和不确定性分析	100	进行了不确定性分析	80
	批次先进性 U_{13}	在调研中的碳足迹因子排名第一（数值最低）	100	在调研中的碳足迹因子排名第二	80
	行业先进性 U_{14}	低于本次调研的平均值 23%	100	低于本次调研的平均值 9.2%	60
	历史监测 U_{15}	具有 2 年及以上的产品碳足迹监测报告，且碳足迹降低	80	无历史监测报告，本次调研为首次计算产品碳足迹	40
	数据核查 U_{16}	经受国家认可的第三方机构核查合格	100	数据为自行核查	80
	产品设计 U_{17}	产品设计考虑废弃处置阶段，设计了循环利用方案	100	产品设计考虑了废弃处置阶段，未设计循环利用方案	80
低碳供应商 U_2	管理体系 U_{21}	初步建立并正在试行企业的碳足迹管理体系	80	未建立碳足迹管理体系	60
	低碳采购 U_{22}	能够出具上游供应商提供的碳足迹测算报告，内容完整	100	能够出具部分上游供应商提供的碳足迹测算报告	80
	低碳技术应用 U_{23}	采用了减碳的生产工艺	100	未应用减排生产技术	60
	绿电绿证 U_{24}	购买了绿证，消费比例达到总用电量的 38%	100	购买了绿证，绿证消费比例达到总用电量的 22%	80
	核查报告 U_{25}	具有第三方机构核查的企业碳排放清单报告	100	本次调研前首次自行制作了企业碳排放清单报告	80
	试点认证 U_{26}	正在参与本市的产品碳足迹试点	80	正在参与本市的产品碳足迹试点	80

表 12　低碳采购综合评价结果

Table 12　Comprehensive evaluation results of low-carbon procurement

一级指标	二级指标	组合权重	供应商甲			供应商乙		
			二级指标得分	一级指标得分	总得分	二级指标得分	一级指标得分	总得分
低碳产品 U_1	数据质量 U_{11}	0.064	6.40	51.30	96.10	5.12	37.30	72.00
	内容完整性 U_{12}	0.075	7.50			6.00		
	批次先进性 U_{13}	0.069	6.90			5.52		
	行业先进性 U_{14}	0.098	9.80			5.88		
	历史监测 U_{15}	0.071	5.68			2.84		
	数据核查 U_{16}	0.073	7.30			5.84		
	产品设计 U_{17}	0.077	7.70			6.16		
低碳供应商 U_2	管理体系 U_{21}	0.073	5.84	44.80		4.38	34.70	
	低碳采购 U_{22}	0.078	7.80			6.24		
	低碳技术应用 U_{23}	0.096	9.60			5.76		
	绿电绿证 U_{24}	0.085	8.50			6.80		
	核查报告 U_{25}	0.076	7.60			6.08		
	试点认证 U_{26}	0.068	5.44			5.44		

整性、数据核查均达 100 分，“产品设计”也考虑了废弃处置与循环利用，供应商碳管理能力突出，13 项二级指标中 10 项达“优秀”，仅“管理体系”“历史监测”“试点认证”为“良好”，不过“历史监测”仅具备 2 年监测报告，未达“优秀”标准的 3 年要求，“管理体系”也处于“初步建立”阶段，需进一步完善以匹配强化阶段碳足迹与采购体系深度融合的要求，考虑到中国的相关实践起步较晚，供应商甲的碳足迹管理能力以及实践案例在中国的电工装备制造领域仍具有示范作用。

供应商乙的综合得分为 72.0 分，未达“良好”标准，需要提高企业的碳足迹管理能力。其低碳产品基础相对薄弱，碳足迹测算报告的编制不够规范，未应用减排技术，且尚未建立碳足迹管理体系，缺少对上游供应链碳足迹测算数据的掌握，碳足迹数据以及企业的排放清单编制工作均为自行完成，缺乏第三方认证机构的核查，但其正在参与当地的碳足迹试点工作，虽然先前的基础相对薄弱，但仍在努力建设碳足迹管理体系，这将为供应商乙后续的碳足迹管理能力提升奠定了基础。

对供应商来说，供应商甲需进一步完善长期监测与管理体系，推动管理体系升级并强化自身产品的低碳竞争力，深化全生命周期低碳设计并引入生态设计理念；供应商乙要建立碳足迹管理体系并补足自身的数据短板，引入减碳技术或购买碳抵消产品，借力正在参与的试点工作寻求专家意见指导，补全测算报告并建立长期的碳足迹监测机制，对标国家要求、引入第三方机构协助建立管理体系并制定手册，确保制度落地。

对电网企业而言，仅从低碳采购的角度应优先选择供应商甲所提供的产品，并将其作为示范企业纳入供应商标杆案例库；对供应商乙实施“改进 - 复核”机制，要求其逐步建立碳足迹管理机制，并针对不同指标提出改进建议。同时，结合分阶段采购规划，动态调整评价权重与标准，起步阶段降低部分指标权重，成熟阶段提高核心指标权重并设硬性要求。电网企业与供应商应共建电工装备产品碳足迹数据库，电网企业有限度地开放行业数据（需脱敏处理），供应商按季度上传数据，实现数据共享、对标与预警，电网企业还需为供应商提供核算培训与简化模板，双方共同选择国家认可的第三方机构对碳足迹数据进行核查，指导碳足迹管理工作的开展。

3.4　碳足迹评价指标与现有采购体系的融合路径

结合“电网企业输配电设备低碳采购规划”的三阶段目标，充分考虑电网企业采购以“价格、质量、交货期”为核心的现实逻辑，碳足迹评价指标按“渐进嵌入、权重递增”原则融入现有采购体系，避免对采购核心功能产生冲击。

起步阶段以“辅助加分”为定位，仅针对 A 类核心设备（变压器、GIS 等）在技术指标中设置

碳足迹权重，该权重低于质量、价格等核心指标，供应商碳足迹达标即获得加分、不达标不扣分，且需先满足国标/行标质量要求，方可参与碳足迹加分竞争，不改变原有采购决策框架。

成熟阶段将碳足迹评价升级为“必备门槛 + 加分项”，A 类设备的碳足迹权重均有所提升，与“供应商资质等级”“履约历史”等非核心指标权重持平。B 类、C 类设备也分别设置对应的碳足迹权重。

强化阶段实现碳足迹与采购体系的“核心维度融合”，A 类设备的碳足迹权重进一步提升，形成“价格、质量、碳足迹”协同加权的评标公式。B 类、C 类设备碳足迹权重同步提升至对应水平。对碳足迹表现优异的供应商，应给予合理价格上浮空间，平衡低碳投入与成本控制，确保碳足迹深度融入采购全流程。

4 结论与展望

本研究从产品碳足迹测算以及电工装备产品碳足迹测算研究现状出发，发现当前存在电网企业缺乏电工装备碳足迹测算、评价及采购标准的问题。针对这一问题，本研究基于电网企业实际需求和国家政策，提出了电网企业输配电设备低碳采购规划，实现碳足迹数据从无到有、从有到优再到同采购体系的深度融合。此外，本研究考虑了设备特点、电网企业需求以及供应商能力培养等因素，结合 ISO—14067、欧盟产品碳足迹 PCF 和 GB/T 24067—2024 等标准文件，设计了碳足迹测算标准框架和数据评价标准，从企业内部协同角度和供应链能力共建角度提供了管理建议。同时，进一步基于层次分析法以及专家意见构建了低碳产品与低碳供应商评价体系，最后根据调研中的案例分别计算了两家供应商的综合评分并给出改进建议。

未来工作可围绕以下 4 个方面展开。1）主导标准制定：推动建立国家或行业级的输配电设备产品碳足迹测算规则以及细分产品的测算标准，建立国家标准并推动全球互认。2）积极同已开展碳足迹试点认证工作的企业和地方政府进行沟通，学习借鉴碳足迹管理的先进经验（本次国家级试点地区为新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州）。3）打造绿色低碳供应链激励体系：将经过验证的优异碳足迹表现与产品碳足迹测算报告作为信用凭证，为供应商提供认可报告和激励。4）探索全球合规：研究并应对欧盟 CBAM、新电池法案等新型绿色贸易壁垒，将本体系打造为中国电工装备企业走向全球的“绿色护照”。

参考文献

毕竟，丁超民，崔益国，等，2024. 双碳背景下变电站全生命周期碳排放管理研究[J]. 价格理论与实践(1)：199-202.〔BI J，DING C M，CUI Y G，et al.，2024. Research on the lifecycle carbon emission management of substations under the “dual carbon” background[J]. Price:Theory & Practice(1)：199-202.〕

陈晓红，付益鹏，黄骋东，等，2023. 特高压工程建设碳排放测算方法与应用[J]. 资源科学，45(12)：2291-2310.〔CHEN X H，FU Y P，HUANG C D，et al.，2023. Method and application of carbon emission calculation for ultra-high voltage (UHV) project construction[J]. Resources Science,45(12)：2291-2310.〕

陈雅禾，丁宁，白孝轩，等，2025. 风力发电及储能系统碳足迹分析[J]. 中国环境科学，45(5)：2926-2931.〔CHEN Y H，DING N，BAI X X，et al.，2025. Carbon footprint analysis of wind power system with generation and storage[J]. China Environmental Science,45(5)：2926-2931.〕

丁宁，潘京津，崔晗，等，2025a. 基于生命周期思想构建中国产品碳足迹数据库的挑战与展望[J]. 环境科学学报，45(10)：1-8.〔DING N，PAN J J，CUI H，et al.，2025. The challenge and prospect of developing Chinese databases of product carbon footprint in life cycle perspective[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,45(10)：1-8.〕

丁宁，潘京津，崔晗，等，2025b. LCA 数据质量评价研究现状及趋势[J]. 中国环境科学，45(12)：7097-7104.〔DING N，PAN J J，CUI H，et al.，2025. Research status and trends of LCA data quality evaluation[J]. China Environmental Science,45(12)：7097-7104.〕

范锦凤，2025. 国内外产品碳足迹管理政策及其实施现状梳理[J]. 建筑科技，9(3)：20-22.

范秋芳，高梦琦，刘浩旻，2024.“双碳”目标下油气行业固定资产投资对碳排放的影响研究[J]. 资源与产业，26(3)：36-47.〔FAN Q F，GAO M Q，LIU H W,2024. Impacts of fixed asset investment on carbon emission in oil-gas sector under “dual carbon” objective[J]. Resources & Industries,26(3)：36-47.〕

付紫君，宋学行，沈群，等，2025. 基于 LCA 的 CO_2 捕集-甲烷化一体化技术碳足迹分析[J]. 化工进展，44(5)：2879-2887.〔FU Z J，SONG X H，SHEN Q，et al.，2025. Carbon footprint analysis of integrated CO_2 capture and methanation technology based on life cycle assessment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,44(5)：2879-2887.〕

耿光飞，党宣，刘洋，2025. 电力系统碳足迹估算方法[J]. 电力系统及其自动化学报，37(5)：32-39.〔GENG G F，DANG X，LIU Y，2025. Carbon footprint estimation methods for power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,37(5)：32-39.〕

韩然，刘宇，王振国，等，2025. 典型单晶硅光伏组件的生命周期评价[J/OL]. 环境工程学报(2025-07-18)[2025-09-15]. https://link. cnki. net/urlid/11. 5591. X. 20250718. 1009. 004.〔HAN R, LIU Y, WANG Z G, et al., 2025. Life cycle assessment of typical monocrystalline silicon photovoltaic modules[J/OL]. Chinese Journal of Environmental Engineering(2025-07-18)[2025-09-15]. https://link. cnki. net/urlid/11. 5591. X. 20250718. 1009. 004.〕

胡剑波，任亚运，丁子格，2015. 气候变化下国际贸易中的碳壁垒及应对策略[J]. 经济问题探索(10)：137-141.

黄成，薛贵元，朱寰，等，2025. 全生命周期下光伏发电和煤电的碳排放及环境效益核算[J/OL]. 环境化学(2025-05-22)[2025-09-15]. https://link. cnki. net/urlid/11. 1844. X. 20250521. 1616. 002.〔HUANG C, XUE G Y, ZHU H, et al., 2025. Carbon emissions and environmental benefits accounting of photovoltaic and coal-fired power based on whole life cycle[J/OL]. Environmental Chemistry(2025-05-22)[2025-09-15]. https://link. cnki. net/urlid/11. 1844. X. 20250521. 1616. 002.〕

李冬雪，刘岩，沈博垚，等，2024. 基于数字孪生技术的电力变压器碳足迹分析及低碳优化方法仿真研究[J]. 系统仿真学报，36(9)：2075-2085.〔LI D X, LIU Y, SHEN B Y, et al., 2024. Carbon footprint analysis and low-carbon optimization method simulation study of power transformer based on digital twin technology[J]. Journal of System Simulation,36(9)：2075-2085.〕

李可昀，张宁，赵乐，等，2025. 输变电工程关键电力设备与材料碳排放核算方法[J]. 中国电力，58(4)：193-204.〔LI K Y, ZHANG N, ZHAO L, et al., 2025. Carbon emission accounting methods for key electric equipment and materials in power transmission and transformation projects[J]. Electric Power,58(4)：193-204.〕

刘含笑，朱前林，林青阳，等，2024. 基于 LCA 方法的光伏产品碳足迹量化评价与低碳设计[J]. 环境工程学报，18(10)：2972-2981.〔LIU H X, ZHU Q L, LIN Q Y, et al., 2024. Carbon footprint evaluation and low carbon design of China's photovoltaic products based on LCA methodology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,18(10)：2972-2981.〕

刘学文，朱京安，2014. 低碳产品认证制度对中国出口贸易的影响及其法律对策[J]. 法治研究(12)：51-59.

刘昱良，李姚旺，周春雷，等，2024. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报，44(6)：2220-2236.〔LIU Y L, LI Y W, ZHOU C L, et al., 2024. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 44(6)：2220-2236.〕

吕衍超，2025. 基于碳足迹核算的制造业绿色供应链优化路径研究[J]. 中国经贸导刊(12)：76-78.

毛田，李江南，周保荣，等，2024. 电碳一体化市场虚拟电厂竞价策略研究:基于不确定性因素的分析[J]. 价格理论与实践(12)：210-216，232.〔MAO T, LI J N, ZHOU B R, et al., 2024. Research on bidding strategies of virtual power plants in the integrated electricity and carbon market: Analysis based on uncertainty factors[J]. Price: Theory & Practice(12)：210-216,232.〕

聂正标，贾彦鹏，2024. 加快建立统一规范的产品碳足迹管理体系[J]. 宏观经济管理(8)：57-64.

祁利，杜治，周志强，等，2022. 电工装备企业产品碳足迹量化及应用场景研究[J]. 现代管理，12(10)：6.〔QI L, DU Z, ZHOU Z Q, et al., 2022. Research on carbon footprint quantification and application scenarios of electrical equipment enterprise[J]. Modern Management,12(10)：6.〕

史洋，孔震，张保瑞，等，2025. 零碳目标下园区自愿减排产品的选择[J]. 资源与产业，27(5)：109-122.〔SHI Y, KONG Z, ZHANG B R, et al., 2025. Selection of voluntary emission products in industrial zones under zero carbon emission goal[J]. Resources & Industries,27(5)：109-122.〕

唐艳群，柳键，柳璐，等，2025. 考虑汇率风险、风险态度与消费者偏好的跨国供应链减排策略研究[J]. 运筹与管理，34(3)：155-162.〔TANG Y Q, LIU J, LIU L, et al., 2025. Research on emission reduction strategy of multinational supply chains considering exchange rate risk, risk attitude and consumer preference[J]. Operations Research and Management Science,34(3)：155-162.〕

王楠，赵艳军，刘成林，等，2024. 卤水型锂资源勘查开发综合评价指标体系构建与应用[J]. 资源与产业，26(4)：118-132.〔WANG N, ZHAO Y J, LIU C L, et al., 2024. Construction and application of comprehensive evaluation index system of brine lithium resources exploration and development[J]. Resources & Industries, 26(4)：118-132.〕

王玉燕，丁露萍，2025. 碳政策选择对网络外部性下低碳电商供应链的决策影响研究[J]. 管理工程学报，39(2)：105-117.〔WANG Y Y, DING L P, 2025. Research on the impact of carbon policy choice on the decision-making of low-carbon e-commerce supply chain under network externalities[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 39(2)：105-117.〕

王志国，席业成，顾瑞钦，2024. 供应链协同减碳的数字化碳排放核算方法研究[J]. 中国标准化(22)：55-58.〔WANG Z G, XI Y C, GU R Q, 2024. Research on digital carbon emission accounting method of supply chain collaborative carbon reduction[J]. China Standardization(22)：55-58.〕

魏新航，张玉琢，白云龙，等，2025. 新型电力负荷管理系统综合效益评价体系[J]. 科学技术与工程，25(17)：7208-7218.〔WEI X H, ZHANG Y Z, BAI Y L, et al., 2025. Comprehensive benefit evaluation system of new electricity load management system[J]. Science Technology and Engineering,25(17)：7208-7218.〕

夏云舒，蒋越，柳思歧，等，2025. 基于电网物资碳足迹的产品低碳评价方法研究[J]. 现代管理，15(2)：212-217.

许海娟，叶春明，李芳，2025. 政府规制下供应链企业碳减排演化博弈分析[J]. 软科学，39(2)：107-114.〔XU H J, YE C M, LI F, 2025. Evolutionary game analysis of carbon emission reduction in supply chain enterprises under government regulation[J]. Soft Science,39(2)：107-114.〕

杨文婕，吕粤，阿阳，等，2025. 碳足迹实施路径的合理规划和企业价值链排放的思考[J]. 印染，51(7)：74-78.〔YANG W J, LYU

Y, A Y, et al., 2025. Reasonable plan for the implementation path of carbon footprint and thoughts on emissions in corporate value chain [J]. China Dyeing & Finishing,51(7): 74-78.〕

姚小剑, 吴毓源, 2025. 粤港澳大湾区碳排放影响因素分析与情景预测[J]. 资源与产业, 27(3): 44-53.〔YAO X J, WU Y Y, 2025. Carbon emission factors and scenario forecasts of Guangdong-Hongkong-Macao Bay Area [J]. Resources & Industries, 27(3): 44-53.〕

袁惊柱, 2025. 能耗双控向碳排放双控全面转型的进展、问题和路径[J]. 当代经济管理, 47(12): 68-76.〔YUAN J Z, 2025. The progress, problems and paths of China's comprehensive transformation from dual control of energy consumption to dual control of carbon emissions [J]. Contemporary Economic Management, 47(12): 68-76.〕

张琦峰, 方恺, 徐明, 等, 2018. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 33(4): 696-708.〔ZHANG Q F, FANG K, XU M, et al., 2018. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 60(8): 92-96,104.〕

张泽亚, 安佳坤, 周兴华, 等, 2023. 基于 AHP 和 TOPSIS 法的电采暖综合效益评价方法研究[J]. 电测与仪表, 60(8): 92-96, 104.〔ZHANG Z Y, AN J K, ZHOU X H, et al., 2023. Research on comprehensive benefit evaluation of electric heating based on AHP and TOPSIS method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 60(8): 92-96,104.〕

赵扉, 王曦冉, 沈梁, 等, 2022. 绿色低碳发展下电工装备产品碳足迹评价方法研究[J]. 管理科学与工程, 11(3): 8.〔ZHAO F, WANG X R, SHEN L, et al., 2022. Research on carbon footprint evaluation method of power equipment products under green and low-carbon development[J]. Management Science and Engineering, 11(3): 8.〕

赵双池, 蔺红, 王海云, 2025. 电碳联合市场下考虑风光不确定性的虚拟电厂竞标策略[J]. 电力工程技术, 44(3): 76-85.〔ZHAO S C, LIN H, WANG H Y, 2025. Bidding strategies for virtual power plants under the electricity-carbon joint market taking into account wind and solar uncertainties [J]. Electric Power Engineering Technology,44(3): 76-85.〕

周春雷, 王洁, 刘文思, 等, 2024. "双碳"目标下能源行业低碳供应链碳排放测算模型研究[J]. 环境科学与管理, 49(9): 26-31.〔ZHOU C L, WANG J, LIU W S, et al., 2024. Research on the calculation model of carbon emissions in the low carbon supply chain of the energy industry under the "dual carbon" goal [J]. Environmental Science and Management,49(9): 26-31.〕

周丽, 章姝, 王美涵, 等, 2025. "双碳"目标下中国碳排放控制目标分解思路研究[J]. 气候变化研究进展, 21(4): 529-540.〔ZHOU L, ZHANG S, WANG M H, et al., 2025. Research on China's carbon emission control decomposition methods under the "dual-carbon" goal[J]. Climate Change Research,21(4): 529-540.〕

朱继忠, 周迦琳, 张迪, 2025. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 45(4): 1323-1343.〔ZHU J Z, ZHOU J L, ZHANG D, 2025. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems [J]. Proceedings of the CSEE,45(4): 1323-1343.〕

朱艺, 陈晓露, 丁爽, 2024. 欧盟可持续产品生态设计法规对我国绿色产品标准化的启示[J]. 中国标准化(17): 107-110.〔ZHU Y, CHEN X L, DING S, 2024. Implications of EU ecodesign for sustainable products regulation on standardization of green products in China[J]. China Standardization(17): 107-110.〕

朱智洺, 徐婕, 李红艳, 等, 2024. "双碳"背景下能源消费碳排放效率与生态韧性耦合协调研究[J]. 资源与产业, 26(3): 21-35.〔ZHU Z M, XU J, LI H Y, et al., 2024. Coupling coordination between energy consumption carbon emission efficiency and ecological resilience under "dual carbon"[J]. Resources & Industries,26(3): 21-35.〕

CHANCEL L, 2022. Global carbon inequality over 1990 - 2019[J]. Nature Sustainability,5(11): 931-938.

LIU B J, LIU G Y, LI H, et al., 2025. Would widespread adoption of third-generation nuclear power HPR1000 enhance the mitigation of net greenhouse gas emissions? [J]. iScience, 28(3): 111923.

ROH S, TAE S, SUK S J, et al., 2016. Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Koreas green building index certification system [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 53: 954-965. DOI: 10. 1016/j. rser. 2015.09.048.

YANG X F, ZHANG P, 2023. Emission reduction of low-carbon supply chain based on uncertain differential game [J]. Journal of Optimization Theory and Applications,199(2): 732-765.

ZHAO B, SHUAI C Y, QU S, et al., 2022. Using deep learning to fill data gaps in environmental footprint accounting[J]. Environmental Science & Technology,56(16): 11897-11906.