文章编号：1003-1421(2026)01-0099-11
引用格式：韩佩瑶，杜呈欣，张铭，等. 基于既有能源管理系统的城轨车站碳核算体系构建与协同优化研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：99-109.
HAN Peiyao，DU Chengxin，ZHANG Ming，et al. Study on Construction of Carbon Accounting System and Collaborative Optimization for Urban Rail Stations Based on Existing Energy Management Systems[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：99-109.

基于既有能源管理系统的城轨车站碳核算体系构建与协同优化研究

韩佩瑶[1]，杜呈欣[1]，张　铭[1]，田　源[1]，陶　韬[2]

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京　100081；2.中国铁道科学研究院集团有限公司 北京经纬信息技术有限公司，北京　100081)

摘　要：在“双碳”战略背景下，城市轨道交通作为大运量、高频率的环保公共交通方式，其车站级能耗与碳排放问题备受关注。针对既有能源管理系统存在的碳排放监测盲区，提出“数据层复用、算法层增强、应用层迭代”的渐进式升级路径，构建碳核算与能源管理协同优化系统。通过V型模型定义系统升级需求矩阵，搭建“物理层复用-信息层扩展”CPS融合框架，夯实系统架构基础；创新提出动态碳排放转换矩阵，集成电力间接排放、燃气直接排放和制冷剂隐形排放3类核算路径，实现碳排放的全面精准计量；设计“四层两轴”协同架构，引进基于改进多目标粒子群算法，形成高效协同优化策略。经仿真实验验证，该碳能协同优化机制具备显著成效。研究成果为城轨车站提供了一套可复制、可推广的碳能协同管理技术方案，对推动绿色城轨建设、助力“双碳”目标达成具有重要的实践意义。

关键词：城轨车站；能源管理系统；碳核算；协同优化；联动耦合
中图分类号：U239.5　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250613002

Study on Construction of Carbon Accounting System and Collaborative Optimization for Urban Rail Stations Based on Existing Energy Management Systems

HAN Peiyao[1]，DU Chengxin[1]，ZHANG Ming[1]，TIAN Yuan[1]，TAO Tao[2]

(1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. Beijing Jingwei Information Technology Co., Ltd., China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Against the backdrop of the “carbon peaking and carbon neutrality” strategy, station-level energy consumption and carbon emissions in urban rail transit, which is an environmentally friendly public transportation mode characterized by large capacity and high frequency, are gaining increasing attention. To address the blind spots of carbon emission monitoring in existing energy management systems, this study proposed a progressive upgrade path: “data layer reuse, algorithm layer enhancement, and application layer iteration” and constructed a collaborative optimization system for carbon accounting and energy management through a V-model to define the system upgrade

收稿日期：2025-06-13
基金项目：中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ115)

requirement matrix; a CPS integration framework of "physical layer reuse and information layer expansion" was established to lay a solid architectural foundation. A dynamic carbon emission transfer matrix was innovatively proposed, integrating three accounting paths: indirect power emissions, direct gas emissions, and invisible refrigerant emissions, to achieve comprehensive and accurate carbon emission measurement. A "four-layer two-axis" collaborative architecture was designed, and an improved multi-objective particle swarm optimization algorithm was introduced to form an efficient collaborative optimization strategy. Simulation experiments verified that the carbon-energy collaborative optimization mechanism achieved remarkable effects. The results offer a replicable and propagable technical solution for carbon-energy collaborative management in urban rail stations, contributing to the development of green urban rail and supporting the "carbon peaking and carbon neutrality" goals.
Keywords: Urban Rail Stations; Energy Management System; Carbon Accounting; Collaborative Optimization; Linkage and Coupling

0　引言

在碳达峰和碳中和的战略背景下，城市轨道交通凭借其大运量、高频率的运行特点，是绿色环保的公共交通方式，也是能源消耗和碳排放的重要领域[1-3]。据城市轨道交通碳排放统计分析报告统计，交通运输领域的碳排放量约占我国碳排放总量的10%，其中城轨车站的能耗占比高达35%~40%[4]。2024年全国城轨交通碳排放总量约1 450万t CO_2，车站级别的碳排放占比达到38.7%[5]。为了推动行业的低碳转型，中国城市轨道交通协会于2022年8月发布了《绿色行动发展方案》，提出通过"三步走"战略实现城轨"双碳"目标，建成绿色城轨体系，这凸显了行业对低碳转型的迫切需求[6]。

在智慧城轨建设过程中，能源管理系统通过集成数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition，SCADA)监测、建筑自动化系统(Building Automation System，BAS)等，实现了对用能情况、负荷预测与节能控制的集成化管理，在能耗可视化与设备参数优化方面取得了显著成效[7]。然而，目前既有能耗管理系统主要关注电、水、气等能源消耗的量化管理，缺乏对CO_2，CH_4等温室气体的实时核算能力。此外，城轨运营单位尚未建立完整的碳排放台账，碳排放管理建设覆盖率不足。

关于碳排放和能耗问题，学界已开展广泛研究，主要采用自上而下建模法、自下而上建模法和综合方法[8]。关于城轨碳排放的研究，主要针对全生命周期视角下的碳排放进行量化分析。李晓锋等[9]针对轨道交通全生命周期碳排放进行了深入分析，建立了涵盖轨道交通全线、全生命周期的碳排放计算模型，并定量计算新建地铁线路全线、全生命周期的碳排放量；陈坤阳等[2]基于全生命周期评估(Life Cycle Assessment，LCA)理论，提出了包含工程物化、施工建造与养护维修阶段的地铁轨道工程碳排放计算模型，并进一步构建了动态分析模型以预测未来养护维修阶段的碳排放变化。部分学者研究地铁建设期间碳排放计算方法和减排策略[10-12]以及运营期间通风空调系统的碳排放情况[13]。既有研究大多侧重线路级评估，对车站级碳排放特征的解析相对不足[14]。在运营阶段的碳排放管理方面，朱宁等[15]针对苏州地铁用能情况，提出了能源与碳排放协同管理的理念，但该研究仅停留在管理层面的协同，并未形成技术系统层面的深度融合；杨晓强等[16]采用碳排放因子法核算2018—2022年运营碳排放量，并运用指标法预测了2023—2027年西安城市轨道交通运营能耗及碳排放量，对节能总量目标进行了量化分析，进而确定碳排放总量的约束值与减碳量目标值。尽管学者围绕城轨碳排放开展诸多研究，但尚未有研究提出车站级"能源-碳排放"耦合系统，以解决独立能源管理系统导致的数据孤岛与重复建设问题。

鉴于此，在既有能源管理系统的基础上，通过"数据层复用、算法层增强、应用层迭代"的方式，构建了一个碳核算与能源管理协同优化系统。该系统将集成既有系统的实时感知设备与数据，提出一个涵盖碳排放核算与分析等功能的一体化架构，旨在为绿色城轨建设提供一个可借鉴的技术解决方案。

1　系统融合理论框架

系统融合理论框架以既有城轨车站能源管理系统为基础，通过多维度理论建模与工程技术映射，构建碳能协同管理的系统性方法论。

1.1　基于V型模型的系统升级路径

基于V型模型的“需求分析–设计–实现–验证”的系统工程逻辑，提出“需求定义–架构重构–验证闭环”三阶段实施框架，确保功能扩展的系统性与可靠性。V型模型框架如图1所示。

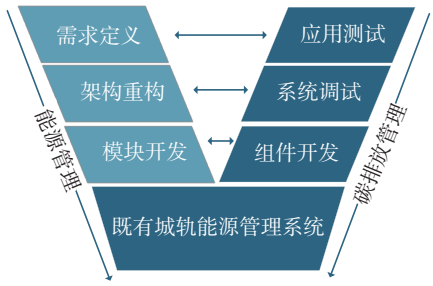

图1　V型模型框架

Fig.1　V-shaped model framework

1.1.1　需求定义

根据既有城轨能源管理系统的使用架构，结合碳排放的需求，梳理出构建双系统耦合需求矩阵，双系统耦合需求矩阵如表1所示，明确了功能扩展边界与兼容性约束。

（1）功能继承性设计。充分复用能源管理系统中SCADA、BAS子系统的实时数据库、能耗统计、可视化及预测分析以及设备用能优化等核心模块，在保留原有系统成熟功能的同时，避免重复开发，提高系统升级效率。

（2）功能扩展性规划。新增碳排放因子库、碳排放源监测、核算、可视化以及多目标协同优化策略等功能组件，满足城轨车站在碳管理方面的新需求，实现从单纯能源管理向“能源与碳管理相结合”的拓展。其中，多目标协同优化旨在平衡能源成本、碳排放强度与服务质量，需构建基于帕累托前沿理论的优化模型，并建立动态响应机制。

（3）兼容性约束限定。严格限定系统升级对既有控制时延的影响阈值，确保在新增功能和扩展系统的过程中，不会对原有系统的实时控制性能产生显著不良影响，保障系统整体的稳定性和可靠性。

1.1.2　架构重构

在既有能源管理系统架构基础上，分层加入碳排放管理的相关概念，提升系统的整体性能和可扩展性。

（1）物理感知层。复用能源管理系统中既有的传感器，通过软件定义网络技术灵活配置数据采集感知的网络，在更换大量设备的前提下为传感器添加碳计量功能，扩展碳计量标签，实现对碳排放相关数据的采集和传输。

（2）数据融合层。构建碳能关联数据立方体，在时序数据库中新增与碳排放相关数据的时间戳、设备ID、能源流、碳流、动态排放因子等维度，全面、准确地描述能源与碳排放之间的关联关系。为实现多源异构数据的标准化融合与时空对齐，采用多源异构数据标准化清洗、多尺度特征抽取技术；针对异常数据，采用基于动态阈值过滤算法与时间序列生成对抗网络的异常检测与数据重构模型；对不同采样频率数据，采用自适应时间规整方法构建差异化对齐策略，为后续的数据分析和应用提供丰富、可靠的数据支持。

（3）应用服务层。增加碳排放管理微服务模块，通过接口调用实现与能源管理系统控制模块交互。微服务架构能够使碳管理功能与原有能源管理系统功能松耦合，方便后续的维护和升级，便于能耗数据的交互和共享。

1.2　信息物理系统融合方法

为使能耗和碳排放数据能够实时转换、预测分析计算和应用，结合信息物理系统(Cyber–Physical Systems，CPS)理论，提出“物理层复用–信息层扩展”的方法，实现物理世界与信息世界的深度融合和信息流转。物理信息融合流转示意图如图2所示。

1.2.1　物理层建模

为满足现有能源管理系统和碳排放管理双系统

表1　双系统耦合需求矩阵

Tab.1　Dual-system coupling requirement matrix

既有能源管理系统功能	新增碳管理需求	兼容性改造方案
SCADA、BAS数据采集	碳排放实时监测	添加碳排放因子，增加数据标签，使数据采集能够同时涵盖能源流和碳排放信息流
能耗统计、可视化、分析预测	碳强度动态分析、预测及可视化	耦合长短期记忆人工神经网络(Long Short-Term Memory，LSTM)与碳约束条件，在原有能耗预测分析的基础上，融入碳强度的动态预测因素
设备用能优化	碳排放多目标优化	引入最优化算法求解，综合考虑能源效率和碳排放目标，实现设备运行的多目标优化

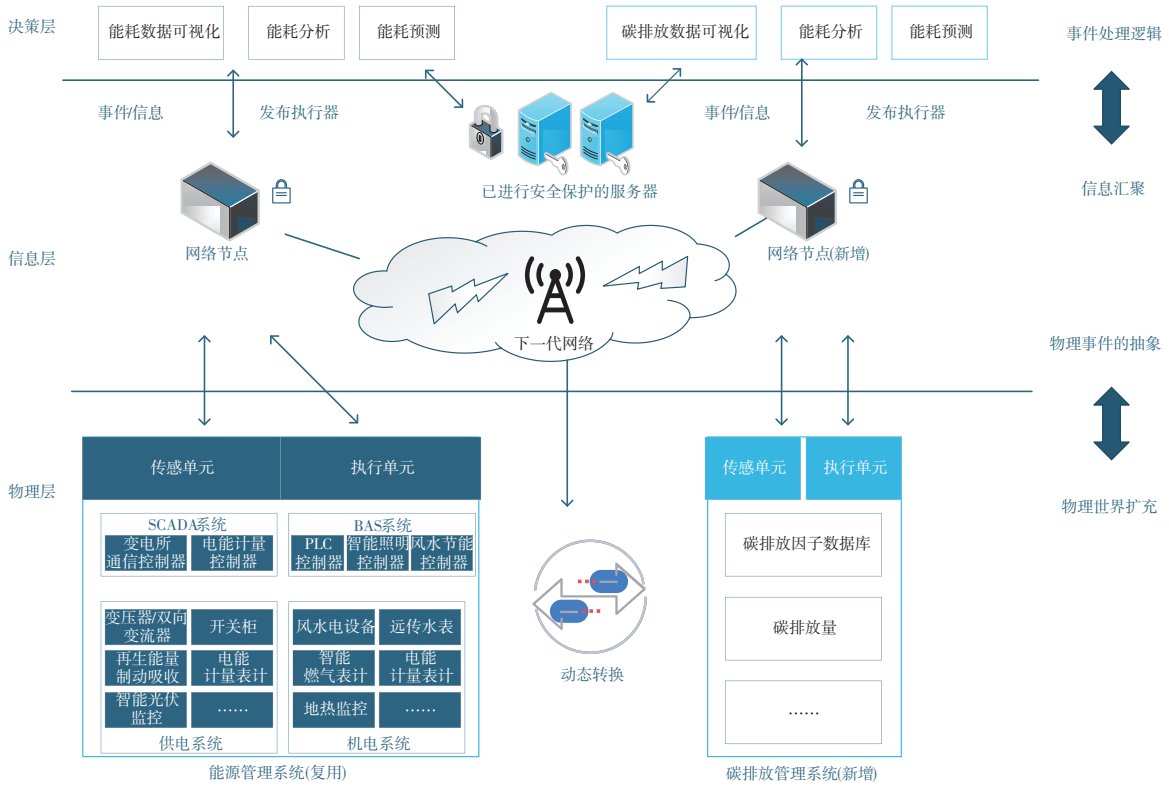

图2　物理信息融合流转示意图

Fig.2　Physical information fusion flow

的协同，物理层双系统数据采集模型为

$$DT_{\text{device}} =< M_{\text{Energy}},\ M_{\text{Carbon}},\ \phi > \tag{1}$$

式中：M_{Energy}为既有能源管理系统的能耗数据，包括原有设备的用能特征和分析模型，kW·h；M_{Carbon}为新增的碳排放数据，体现在运营过程中碳排放产生、传递和转换的过程，kgCO_2e；ϕ为能耗和碳排放的耦合方程，定义能耗和碳排放的动态转换规则。

通过该模型，实现双系统在物理层的数据采集，能耗数据的动态转换与管理协同。

1.2.2　信息层跨系统数据互通

在信息架构中，通过扩展已有节点，实现能耗和碳排放的跨系统数据互联互通和无缝共享。通过规范化定义节点，使得能耗和碳排放数据间的转换更完整和准确。通过设计能耗和碳排放总线关联的方式，同步能耗和碳排放时序，提升数据处理的实时性和可靠性，使系统能够基于实时同步的时间基准开展跨领域数据分析。

1.3　碳能耦合机理

碳能耦合机理是指在城轨车站运营场景中，能源消耗与碳排放间动态互联、转换影响的内在关系。其核心聚焦于明确能源与碳排放的转换机制，同时考虑时空变化、设备实时状态、运营策略调整等多维动态因素对转换过程的动态影响，从而揭示二者在复杂运营环境下的相互关联与演变规律。

1.3.1　能源-碳排放转换矩阵构建

当前车站内，运营阶段地铁车站的空调、照明、电梯及自动电扶梯等系统均以电力作为主要能源，占比超过90%[17-18]。影响碳排放的因素除电力消耗外，还涉及燃气和制冷剂泄漏。由于电力与燃气消耗数据可通过既有能源管理系统实时采集，选取这3类能源介质，建立动态碳排放转换矩阵(Dynamic Carbon Emission Matrix，DCEM)，实现碳排放的实时精准核算与动态追踪。该矩阵的设计充分考虑了碳排放因子的时间动态性[19]，并借鉴了城市减碳单元构建中对于多源排放精细化核算的理念[20]。

$$DCEM(t)=\begin{bmatrix}C_{\text{elec}}(t)\\C_{\text{gas}}(t)\\C_{\text{ref}}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}EF_{\text{elec}}(t)\cdot\sum E_i(t)\cdot\lambda(t)\\EF_{\text{CH}_4}\cdot GWP_{\text{CH}_4}\cdot V(t)\cdot(1-\eta_{\text{comb}})\\EF_{\text{R134a}}\cdot L(t)\cdot M_{\text{ref}}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：电力碳排放模块$C_{elec}(t)$为间接碳排放，来源于电力消耗；$EF_{elec}(t)$为电网实时碳排放因子，$kgCO_2/(kW\cdot h)$；$\sum E_i(t)$为车站总用电量，kW·h；$\lambda(t)$为再生制动能量回馈系数，$0\leqslant\lambda\leqslant1$，定义为列车制动回馈电网能量与牵引耗电量的比值，列车制动时会反馈一部分能量到电网，这部分能量可以被其他设备使用，从而减少净用电量，因此用于修正净碳排放量；燃气碳排放模块$C_{gas}(t)$为直接碳排放，来源于燃气燃烧过程中的非完全燃烧；EF_{CH_4}为甲烷排放因子，是燃气输送与燃烧过程的非完全燃烧损失，取值0.019 3，$kgCH_4/m^3$；GWP_{CH_4}为甲烷百年全球变暖潜能值，取值28；$V(t)$为燃气消耗量，通过智能流量计实时采集，m^3；η_{comb}为燃烧效率，默认≥90%；$C_{ref}(t)$为制冷剂碳排放模块隐形碳排放，来源于制冷剂R134a泄漏；EF_{R134a}为R134a制冷剂的全球变暖潜能值，取值1 430；$L(t)$为泄露率，基于设备运行参数与泄漏监测数据动态计算，%；M_{ref}为系统充注量，源自设备台账的初始参数，kg。

研究提出的能源–碳排放转换矩阵包含燃气燃烧产生的直接碳排放、电力消费产生的间接碳排放以及制冷剂泄漏导致的隐形碳排放，该转换矩阵能够为碳排放在线核算模块开发以及能源–碳管理协同优化算法提供有力支撑。

1.3.2　碳排放时空耦合特征建模

城轨车站的碳排放量会受时间和空间变换的影响，且传统模型仅关注碳排放核算总量。碳排放时空耦合模型旨在分析碳排放在时间和空间上的变化规律及二者之间的关联。构建了一个融合客流、设备和环境的耦合模型，以便更精准地分析碳排放的变化及不同因素之间的相互作用机制。

在时间维度中，碳能耦合主要表现为客流动态变化会对设备运行能耗、碳排放产生影响。客流高峰导致照明、空调、电梯等设备负荷增加，进而推高能耗与碳排放。然而这种影响存在时滞效应。因此研究采用一阶惯性环节模型。该模型量化了客流脉冲$\triangle Q(t-\tau)$对碳排放$C(t)$的动态耦合关系。

$$C(t)=C_{base}+\frac{K}{s+1}\cdot\triangle Q(t-\tau) \tag{3}$$

式中：C_{base}为基础碳排放量，表示在无客流影响下的基本排放水平，$kgCO_2/h$；K为客流敏感系数，衡量单位客流变化引起的碳排放变化率，$kgCO_2$/人时；T_s为时间常数，表示系统对客流变化的响应速度，h；$\triangle Q(t-\tau)$为滞后τ时刻的客流增量，人。

在空间维度模型中，碳能耦合机理体现为能源在站内传输、转换过程中的损耗和责任归属。基于设备拓扑图构建了一个碳排放责任分摊网络。该网络以设备为节点，能源传输关系为边，通过路径贡献度算法确定各设备在碳排放中的贡献路径，并结合距离衰减模型量化不同区域的碳排放占比。具体来说，路径贡献度算法通过分析能源传输路径中的关键节点及其权重，识别关键设备及其对碳排放的贡献；距离衰减模型则基于距离的倒数和指数衰减函数，计算远端设备的贡献衰减系统。这种空间模型动态地将碳排放总量耦合分配到具体的设备或区域，实现了碳排放的精细化溯源和责任认定，为精细化的碳排放管理提供支持。

2　集成系统架构设计

2.1　双系统协同架构

基于上文构建的系统融合理论框架，设计“能源–碳排放”协同优化系统集成架构，将理论转换为可实施技术方案。以“需求定义”明确整体架构功能边界与兼容性，使系统既继承SCADA、BAS数据处理、能耗统计优化等既有能源管理功能，又集成碳排放监测、核算、分析及多目标优化等新需求。依照“架构重构”分层理念，提出“四层两轴”协同架构，对应基础设施层、数据层、平台层和应用层。双系统协同架构如图3所示。

CPS融合方法在基础设施层实现物理感知复用与增强，在数据层和平台层完成数据融合、协议扩展与微服务交互，保障能耗与碳排放数据实时采集、转换、传输与共享。碳能耦合机理为数据层和平台层实时碳核算服务、碳能协同监测分析提供支撑，驱动了应用层的决策组织优化。

2.1.1　基础设施层

基础设施层通过优化既有传感器网络和增强边缘计算能力来实现物理感知层的升级。针对城轨车站已部署的电流互感器、电磁流量计等传感设备，在数据采集协议中嵌入碳排放元数据字段，构建覆盖能源消耗与碳排放相关参数的全维度数据采集体

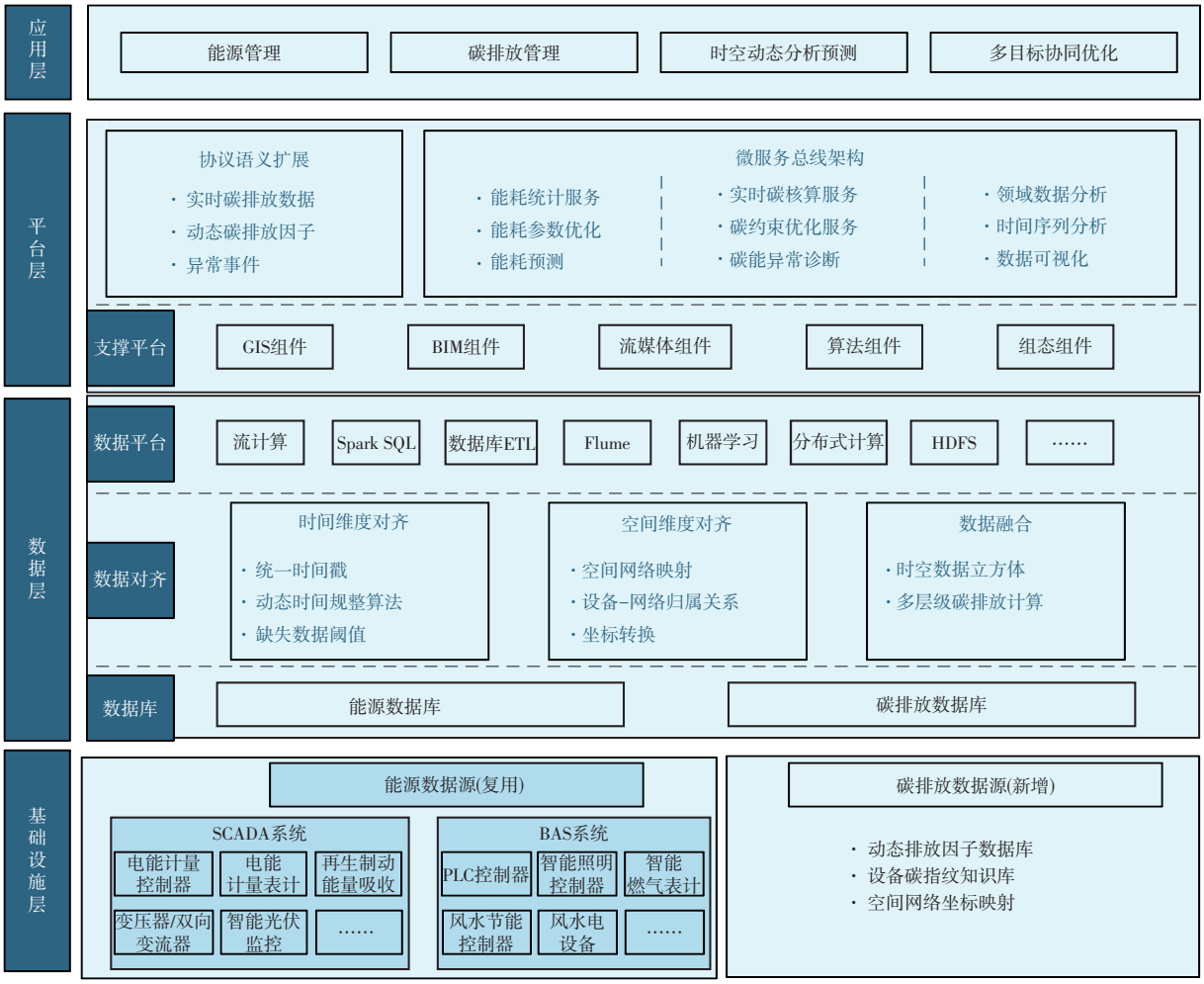

图3　双系统协同架构

Fig.3　Dual-system collaborative architecture

系。通过边缘计算架构的优化设计，在不更换硬件的前提下实现数据处理效率与实时性的双提升。

2.1.2　数据层

数据层构建“能源–碳排放双维度数据仓库”，通过新增碳排放维度表与能耗–碳排放时空数据对齐模型，实现多源异构数据的标准化存储与时空耦合计算。基于能源管理系统原有时序数据库扩展碳排放维度表，确保能耗与碳排放数据的时序一致性，同时沿用能源管理系统的设备编码规则能够与能耗排放统一设备级碳排放量、排放因子来源，为能耗与碳排放协同做支撑。通过在时间、空间维度上对能耗与碳排放数据进行精准对齐，实现“设备–区域–系统”多层级碳排放分布的时空耦合计算，精准分析碳排放的时空变化规律。双维度数据仓库的提出，为碳排放精准识别、动态分析及优化策略制定提供了标准化、结构化的数据底座，支持基于时空切片的多维数据查询与可视化分析，助力精细化碳排放管理与科学决策。

2.1.3　平台层

平台层构建基于工业协议扩展与微服务架构的双系统互联体系，实现高实时性、高可扩展性的系统协同能力。在工业协议语义扩展方面，采用模型驱动架构对OPC UA协议进行语义扩展，新增实时碳排放量、动态排放因子与异常事件三类核心节点，实现碳排放数据的结构化建模与跨系统传输，通信机制采用Pub/Sub模式保障毫秒级数据分发能力，满足工业实时性要求。在微服务化协同架构方面，将核心功能解耦为独立微服务模块，包括实时碳核算服务、碳约束优化服务、数据异常诊断服务及API网关服务，并采用服务治理机制实现服务发现、容错

及配置管理，确保单点故障隔离与系统高可用性。

实时碳核算服务作为核心引擎，负责执行DCEM模型，实现实时碳排放数据处理。其采用“直接排放+间接排放”双路径计算框架，集成动态更新的排放因子库，并构建基于LSTM的设备健康状态感知碳排放预测模型。该模型采用3层LSTM结构，后接1个全连接输出层。输入特征向量包含：时序能耗数据$E(t)$、设备实时运行状态参数、设备健康指数($HI = 1 - \frac{\eta_{\text{actual}}}{\eta_{\text{rated}}}$)、历史排放序列$C(t-1)$，$C(t-2)$，…，$C(t-n)$，以及影响碳排放的外部动态因子，如电网实时碳排放因子$EF_{\text{elec}}(t)$、室外温度$T_{\text{out}}(t)$。该模型输出为未来ΔT时间步的碳排放预测值$\hat{C}(t+\Delta T)$。模型性能通过平均绝对误差(Mean Absolute Deviation，MAE)、均方根误差(Root Mean Squared Error，RMSE)和决定系数(R^2)等关键指标进行评估。该模型旨在通过捕捉设备性能衰减等因素导致的碳排放波动趋势，为实时碳排放核算提供短期预测支撑。

碳约束优化服务主要是实现多目标的协同，核心采用改进型多目标粒子群算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance，MOPSO-CD)，构建帕累托优化模型。

$$\min F = \left[f_1,\ f_2,\ f_3\right]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$f_1 = \sum_t P_{\text{elec}}(t)\cdot\pi(t)\cdot\Delta t \tag{5}$$

$$f_2 = \frac{\sum_t C(t)}{A\cdot T} \tag{6}$$

$$f_3 = \frac{1}{N}\sum_{z=1}^{Z}\left|T_z(t) - T_{\text{set}}\right| \tag{7}$$

式中：f_1为量化分时电价驱动的能耗成本，元；$P_{\text{elec}}(t)$为时间区间t车站的平均功率，kW；$\pi(t)$为时间区间t的电价，元/(kW·h)；Δt为时间区间，h；f_2为单位面积、单位时间内碳排放强度，$kgCO_2/(m^2\cdot h)$；$C(t)$为优化周期内碳排放总量，$kgCO_2e$；A为车站的建筑面积，m^2；T为优化时间，h；f_3为温度偏离度量化服务质量，并嵌入设备功率上限、温度区间等硬约束，℃；Z为车站内划分的温控区域总数；$T_z(t)$表示在时间t区域z的实测温度，℃；T_{set}表示统一的设定温度，℃；N表示区域总数Z。

算法支持动态调整能耗与碳排放，权重以适应不同场景，并通过拥挤距离排序生成多样化优化解集。该服务与实时碳核算服务、设备控制接口紧密交互。

2.1.4　应用层

应用层基于微服务架构开发面向场景的应用组件，实现能源管理与碳核算的深度融合。通过碳能协同监测组件实现实时碳排放在线监测、碳排放与能源数据流的时空关联分析及设备碳足迹追溯；通过碳约束优化决策组件实现碳排放强度预测、基于平台层优化服务生成的多目标优化策略的解析与呈现、智能调控指令下发，该组件整合了“日前预测-日内滚动优化-秒级实时调节”的三级闭环机制，确保对动态工况的快速响应；通过碳管理业务组件实现碳排放台账自动生成、碳绩效评估与对标分析、减碳措施效果评估与优化建议，最终形成能源管理与碳排放管理的闭环协同。

3　案例分析

为验证碳排放核算与协同优化系统的可行性与有效性，基于北京典型城轨车站的运营参数与配置(建筑面积25 000 m^2，日均客流量18万人次)，构建了仿真环境进行案例验证。该仿真环境基于能源管理系统的历史数据、设备台账及区域电网碳排放因子等基础数据，依照“四层两轴”系统架构，对环控、照明、电扶梯等关键用能系统进行精细化建模，同时增加DCEM模型及MOPSO-CD优化，形成高保真仿真环境。

3.1　仿真环境构建与参数设置

在仿真参数设置中，电力部分采用北京市电力公司分时电价及动态碳排放因子，燃气排放基于城轨车站运营时间估算，制冷剂泄漏按冷水机组充注量与年泄漏率计算，再生制动回馈系数结合线路运行图确定。仿真环境参数设置如表2所示[21-23]。

3.1.1　仿真参数交叉验证

为保证仿真模型参数的合理性与可靠性，采用多维度交叉验证方法对关键参数进行校验。

（1）理论溯源与权威引用。核心参数严格遵循国际通用标准或国家权威发布。制冷剂年泄漏率(1.5%)依据IPCC Tier 1推荐方法设定[23]，该方法是温室气体清单核算的基础框架；北京市电网动态碳排放因子数据直接来源于生态环境部发布的官方文件[22]；分时电价结构(高峰、平时、低谷时段划分

表2　仿真环境参数设置

Tab.2　Simulation environment parameter settings

类别	参数	数值/方法	数据来源
能源数据	历史用电量	日均18 500 kW·h	能源管理数据库
	分时电价	高峰(10:00—15:00，18:00—21:00)：1.2元/(kW·h) 平时(7:00—10:00，15:00—18:00，21:00—23:00)：0.8元/(kW·h) 低谷(23:00—次日7:00)：0.4元/(kW·h)	北京市电力公司[21]
碳排放参数	电网碳排放因子	动态范围0.38~0.82 $kgCO_2$/(kW·h)	生态环境部[22]
	再生制动回馈系数$\lambda(t)$	早高峰：0.22±0.03 晚高峰：0.19±0.04	牵引供电数据拟合
	制冷剂泄露率$L(t)$	年泄露率1.5%	IPCC Tier 1方法[23]
设备建模	冷水机组容量	2×800 RT	设备台账
	照明分区功率	站厅：120 kW 站台：85 kW	设计图纸
优化参数	目标权重	能耗成本：0.4 碳排放强度：0.4 热舒适度：0.2	熵权法确定
	约束条件	站厅温度：26±2 ℃ 电梯响应：≤5 s	运营规范

及价格)严格采用北京市电力公司文件[21]。

(2) 敏感性分析。针对再生制动回馈系数$\lambda(t)$、制冷剂泄露率$L(t)$等关键动态参数，在±10%范围内进行扰动模拟。分析其对最终碳排放总量和优化目标函数(f_1, f_2, f_3)的影响程度。结果表明，碳排放总量和优化目标对单一参数的适度扰动表现出一定的鲁棒性，变化率均在可接受范围内。

(3) 历史数据交叉对比。在仿真系统稳定运行后，利用全国平均排放因子和仿真总碳排放量，推算出一个“估算碳排放量”，将其与仿真系统基于动态因子计算的总碳排放量进行趋势和总量级的一致性分析。交叉比对结果显示，基于静态平均因子估算的碳排放趋势与仿真动态结果基本吻合，总量差异在合理预期范围内，这从侧面验证了关键参数设置的合理性。

通过上述方法交叉验证，有效提升了仿真模型参数的可信度，为后续仿真结果的分析与结论的可靠性奠定了基础。

3.1.2　模型优化权重设置

为科学、客观地确定多目标优化模型中能耗成本f_1、碳排放强度f_2、热舒适偏离度f_3的权重系数ω_1，ω_2，ω_3，满足$\omega_1+\omega_2+\omega_3=1$，采用熵权法(Entropy Weight Method，EWM)反映不同目标在历史运营数据中的信息量差异与决策价值。具体步骤如下。

(1) 数据矩阵构建。基于历史运营数据，提取N的样本点(N=90 d)的实际运行数据，形成原始数据矩阵$\boldsymbol{F}$。

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1j} \\ f_{21} & & f_{2j} \\ f_{31} & \cdots & f_{3j} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：f_{1j}为第j天的总能耗成本，元；f_{2j}为第j天的单位面积碳排放强度，$kgCO_2/(m^2\cdot h)$；f_{3j}为第j天的平均舒适偏离度绝对值，℃。

(2) 数据标准化。由于3个优化目标量纲和方向性一致，采用极差法进行归一化处理，消除量纲影响。对于极小化目标i，样本j的标准化值p_{ji}计算如下。

$$p_{ij}=\frac{\max\left(f_i\right)-f_{ij}}{\max\left(f_i\right)-\min\left(f_i\right)} \quad i=1,\ 2,\ 3;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ N \tag{9}$$

式中：$\max\left(f_i\right)$表示f_i中的最大值，$\min\left(f_i\right)$表示f_i中的最小值；f_{ij}表示f_i中第j个值。

(3) 计算指标比重。计算第j个样本在第i个目标上的比重。

$$r_{ij}=p_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{N}p_{ij} \quad i=1,\ 2,\ 3;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ N \tag{10}$$

(4) 计算信息熵。计算第i个目标的信息熵值。

$$e_i=-k\sum_{j=1}^{N}r_{ij}\times\ln r_{ij} \quad i=1,\ 2,\ 3 \tag{11}$$

式中：k表示信息熵计算常数，确保熵值在[0，1]范围内。

$$k=\frac{1}{\ln N} \tag{12}$$

(5) 计算差异系数。计算第i个目标的差异系数。

$$g_i=1-e_i \tag{13}$$

(6) 确定权重。第i个目标的熵权ω_i由差异系数归一化得到。

$$\omega_i=g_i\Big/\sum_{i=1}^{3}g_i \tag{14}$$

应用熵权法对历史数据进行计算，所得权重结果为$\omega_1=0.402$，$\omega_2=0.398$，$\omega_3=0.2$。为简化表述并与后续优化目标函数形式一致，取整为$\omega_1=0.4$，$\omega_2=0.4$，$\omega_3=0.2$。该权重客观反映了历史运营数

据中，能耗成本与碳排放强度信息量大、波动显著、对系统状态区分度高的特点，而热舒适度相对稳定、信息熵较高，故权重略低。

3.2　仿真结果与分析

3.2.1　碳核算精度与动态性验证

仿真系统成功实现了基于公式(2)的DCEM模型实时计算。仿真车站典型日电力相关碳排放仿真结果如图4所示。图4展示了电力相关碳排放的仿真结果。如图4所示$C_{elec}(t)$与客流量、室外温度呈现显著的正相关性，并成功捕捉到再生制动能量回馈带来的碳排放瞬时降低现象。碳排放峰值与早晚高峰客流峰值高度吻合，验证了公式(3)中客流–碳排放耦合模型的准确性。在列车密集到发时间段，碳排放曲线出现瞬时下降，这反映了再生制动能量回馈系数对净碳排放耦合模型的修正作用。日间高碳排放时间与电网碳排放因子峰值时间段一致，表明系统能动态响应区域电网的碳排放强度变化。

3.2.2　协同优化效果分析

（1）总体性能对比。对比分析表明，总体能耗及碳排放与仅推行常规节能策略的基准场景相比，本系统在保证站内温度控制精度的前提下，实现了显著的节能减碳效果。关键指标对比如表3所示。

表3的数据显示，系统总能耗由18 750 kW·h降至17 210 kW·h，净减少1 540 kW·h，降幅达8.2%。这相当于该车站平均每小时节省64.2 kW·h的电量。总碳排放量由9 860 $kgCO_2e$降至8 705 $kgCO_2e$，净减少1 155 $kgCO_2e$，降幅达11.7%。这得益于能源消耗的减少和电网碳排放因子的时间差异性以及再生制动能量回馈的贡献，实现了节能与低碳用能的双重优化。在显著节能减碳与成本节约的同时，系统并未牺牲乘客的舒适体验。平均热舒适偏离度由0.85 ℃变为0.78 ℃，表明站内温度控制更加精准，更接近设定目标值(26±2℃)。这验证了MOPSO-CD算法在求解多目标帕累托前沿时，能够有效平衡节能减碳目标与服务质量约束。

（2）多目标优化空间解析。MOPSO-CD算法生成了涵盖成本、减碳、舒适等不同权重偏好的帕累托最优解集，帕累托前沿散点示意如图5所示。图中X轴表示能耗成本，Y轴表示碳排放强度，Z轴表示热舒适偏离度。但这些最优化解集密度低，实现难度大。运营人员可根据管理需求灵活选择，体现了系统的灵活性。

该案例验证了碳能协同优化系统通过“数据层复用、算法层增强、应用层迭代”的技术架构可行性，其集成的实时碳核算与多目标优化控制，为城轨车站提供了精细化低碳管理工具。然而，案例基于仿真环境，结果依赖模型与参数准确性，实际应用中设备性能衰减、客流预测偏差等因素可能影响效果。未来需在实际车站部署原型系统，通过长期

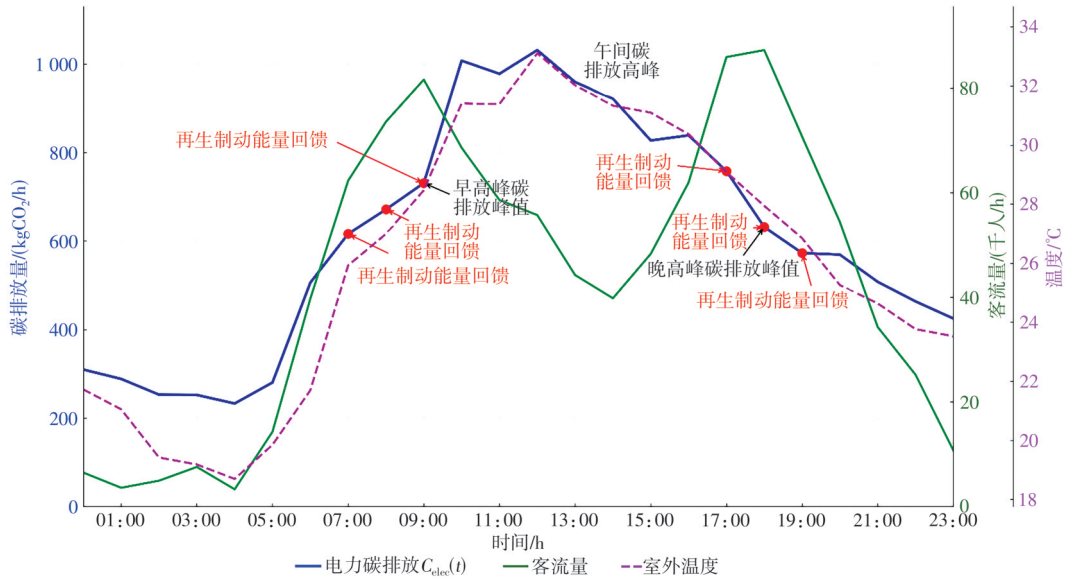

图4　仿真车站典型日电力相关碳排放仿真结果

Fig.4　Simulation results of typical daily electricity-related carbon emissions in simulated stations

表3　关键指标对比

Tab.3　Key indicator comparison

指标	基准场景	本系统
总能耗/(kW·h)	18 750	17 210
总碳排放/kgCO_2e	9 860	8 705
单位面积碳排放强度/(kgCO_2e/m^2)	0.394	0.348
平均热舒适偏离度/℃	0.85	0.78
能耗成本/元	15 300	13 950

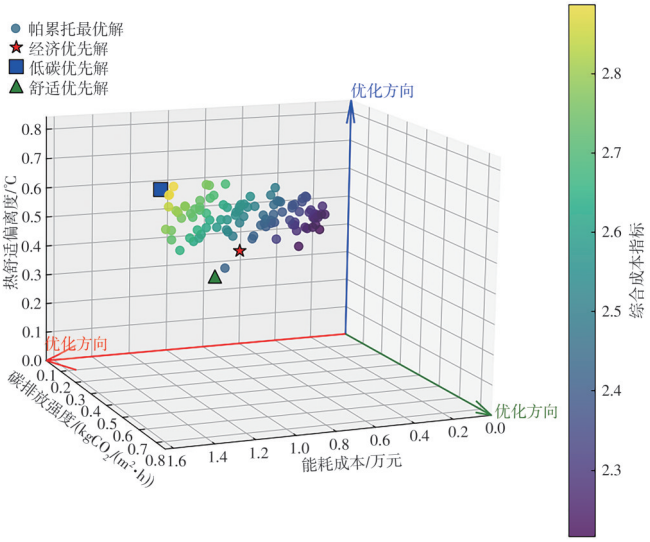

图5　帕累托前沿散点示意图

Fig.5　Pareto front scatter plot

运行数据对模型与算法进行持续验证与优化，以提升系统的实用性与可靠性。

4　结束语

在“双碳”战略推动下，针对既有能源管理系统存在的碳排放监测盲区，提出“数据层复用、算法层增强、应用层迭代”的渐进式升级路径，构建能源管理与碳排放核算协同优化系统，实现从单一能耗管理向碳能耦合管理的深度转型。通过物理层传感器复用、数据层时空对齐建模、应用层微服务扩展，形成“四层两轴”协同架构。该架构通过最大化复用既有能源管理系统的硬件设施与数据资源，避免重复建设与数据孤岛问题，模块化设计具备良好的可移植性，可适配不同规模的城轨车站。提出的动态碳排放转换矩阵模型融合电力间接排放、燃气直接排放和制冷剂隐形排放3类核算路径，实现了碳排放的全面计算。基于改进的MOPSO-CD算法的多目标协同优化策略，在保证服务质量的情况下，实现了节能与减碳的双重目标。尽管研究在数据实时处理、既有系统兼容及多目标协同优化等方面提出创新思路，但后续研究还需增强算法在复杂动态环境下的鲁棒性，并构建融合分布式能源的综合能源系统模型，助力绿色城轨实现低碳运营与乘客体验的协同提升。

参考文献：

[1] 杨　颖，梁洁林，李佳霖，等. 基于全生命周期的轨道交通产业集群供应链碳排放测算与影响因素分析[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：31-39.
YANG Ying，LIANG Jielin，LI Jialin，et al. Carbon Emission Estimation and Influencing Factors Analysis of Supply Chain of Rail Transit Industry Clusters Based on Life Cycle[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：31-39.

[2] 陈坤阳，周　鼎，粟月欢，等. 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究[J]. 铁道标准设计，2022，66(5)：1-7.
CHEN Kunyang，ZHOU Ding，SU Yuehuan，et al. Research on Carbon Emission Intensity and Reduction Potentials of Urban Rail Transit Life Cycle[J]. Railway Standard Design，2022，66(5)：1-7.

[3] 吴　磊，张凌云，吴宗臻，等. 城轨交通多源协同能量管理策略及经济性分析[J]. 铁道运输与经济，2024，46(12)：50-60.
WU Lei，ZHANG Lingyun，WU Zongzhen，et al. Strategy and Economic Analysis of Multi-Source Collaborative Energy Management for Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(12)：50-60.

[4] International Energy Agency. Global Tracking Report 2023：Transport [R]. Paris：IEA，2023.

[5] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2024年度统计和分析报告 [R]. 北京：中国城市轨道交通协会，2025.

[6] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案[J]. 城市轨道交通，2022(8)：20-35.

[7] 党晓勇. 基于云数融合的轨道交通智能能源管控系统应用研究[J]. 电气化铁道，2025，36(2)：74-77，87.
DANG Xiaoyong. Study on Application of Intelligent Energy Management and Control System for Rail Transit Based on Cloud Data Convergence[J]. Electric Railway，2025，36(2)：74-77，87.

[8] 孟宪振，李　欢，贾一林，等. 基于LEAP模型的煤炭综合运输能耗与碳排放研究[J]. 铁道运输与经济，2024，

46(9)：228-236.
MENG Xianzhen, LI Huan, JIA Yilin, et al. Energy Consumption and Carbon Emissions Analysis of Comprehensive Coal Transportation Based on LEAP Model[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(9): 228-236.

[9] 李晓锋，王　荔，栾承志，等. 基于实际地铁线路的全生命周期碳排放研究[J]. 都市快轨交通，2024，37(1)：82-87.
LI Xiaofeng, WANG Li, LUAN Chengzhi, et al. Whole Life-Cycle Carbon Emissions Based on Actual Metro Lines[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(1): 82-87.

[10] 郭　飞，孔　恒，孙凯悦，等. 地铁深大基坑施工碳排放计算方法[J]. 隧道建设(中英文)，2022，42(S2)：197-206.
GUO Fei, KONG Heng, SUN Kaiyue, et al. Calculation Method of Carbon Emission in Metro Deep and Large Foundation Pit Construction[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S2): 197-206.

[11] 张立国，穆心彤，程小乖，等. 地铁建设期碳排放核算研究进展[J]. 环境生态学，2024，6(1)：17-25.
ZHANG Liguo, MU Xintong, CHENG Xiaoguai, et al. Research Progress of Carbon Emission Accounting in Subway Construction Period[J]. Environmental Ecology, 2024, 6(1): 17-25.

[12] 赵　旭，孟亚娟，张国柱，等. 能源地铁车站物化阶段碳排放计算方法[J]. 北京工业大学学报，2025，51(3)：317-326.
ZHAO Xu, MENG Yajuan, ZHANG Guozhu, et al. Calculation Method of Carbon Emissions in Embodied Phase of Energy Subway Stations[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(3): 317-326.

[13] 鲁华伟，李森生，陈玉远，等. 地铁车站通风空调系统建设及运行阶段碳排放研究：以武汉地铁某车站为例[J]. 暖通空调，2024，54(S2)：387-391.

[14] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 城市轨道交通低碳效应研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：8-23，57.
YUAN Zhenzhou, YUAN Xiaojing, YANG Yang, et al. Review on Research of Low-Carbon Effects in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(8): 8-23, 57.

[15] 朱　宁，许常宜. 城市轨道交通能源与碳排放协同管理探索[J]. 现代城市轨道交通，2023(11)：110-113.
ZHU Ning, XU Changyi. Exploring Collaborative Management Methods between Energy and Carbon Emissions in Urban Rail Transit[J]. Modern Urban Transit, 2023(11): 110-113.

[16] 杨晓强，刘树峰，屈昊聿，等. 西安城市轨道交通运营碳排放预测与减碳目标研究[J]. 都市快轨交通，2024，37(2)：29-38.
YANG Xiaoqiang, LIU Shufeng, QU Haoyu, et al. Carbon Emission Predictions and Carbon Reduction Targets of Xi'an Urban Rail Transit Operations[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(2): 29-38.

[17] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通运营能耗使用情况分析：2023[R]. 北京：中国城市轨道交通协会，2023.

[18] 邓光蔚，钱　程，张　丹. 上海典型地铁车站环控系统能耗特点分析及运行诊断[J]. 暖通空调，2021，51(10)：83-86.
DENG Guangwei, QIAN Cheng, ZHANG Dan. Energy Consumption Characteristics and Operation Diagnosis of Environmental Control Systems in Shanghai Typical Underground Railway Stations[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(10): 83-86.

[19] 杨　洋，王雪纯，袁振洲，等. 基于碳回收期理论的城市轨道交通碳减排效应测算[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(5)：1-11，23.
YANG Yang, WANG Xuechun, YUAN Zhenzhou, et al. Calculation for Carbon Emission Reduction Effect of Urban Rail Transit Based on Carbon Recovery Period Theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 1-11, 23.

[20] 郑德高，吴　浩，林辰辉，等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. 城市规划学刊，2021(4)：43-50.
ZHENG Degao, WU Hao, LIN Chenhui, et al. The Formulation of Urban Carbon Reduction Unit and Integrated Planning Methodology Based on Carbon Accounting[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 43-50.

[21] 北京市发展和改革委员会. 关于调整本市分时电价机制等有关事项的通知：京发改规〔2023〕6号[Z]. 北京：北京市发展和改革委员会，2023.

[22] 生态环境部办公厅. 关于做好2023年度企业温室气体排放报告管理相关工作的通知：环办气候函〔2024〕7号[Z]. 北京：生态环境部办公厅，2024.

[23] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. (2006-10-24) [2025-10-27]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/.

(责任编辑　金　晶)