文章编号：1003-1421(2026)03-0001-17
引用格式：杨洋，初祺涵，黄海博，等.轨道交通列车碳排放核算与低碳减排技术综述[J].铁道运输与经济，2026，48(3)：1-17.
YANG Yang，CHU Qihan，HUANG Haibo，et al. Review of Carbon Emission Accounting and Low-Carbon Emission Reduction Technologies for Rail Transit Trains[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：1-17.

轨道交通列车碳排放核算与低碳减排技术综述

杨　洋[1]，初祺涵[1]，黄海博[1]，薛龙昌[2]，袁振洲[1]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.中车工业研究院有限公司，北京　100071)

摘要：轨道交通列车全生命周期碳排放研究是科学评估其环境负荷、制定低碳化发展路径的重要基础。基于VOSviewer软件对轨道交通列车全生命周期评价与碳减排相关研究进行文献计量学分析，详细阐述该领域的研究热点；系统梳理轨道交通列车全生命周期评价方法在碳排放核算中的应用，构建覆盖原料、物化、运营、维护与报废5个阶段的系统框架，并总结各阶段的主要碳排放特征与关键影响因素；围绕材料低碳化、轻量化制造、牵引系统节能、再生制动能量回收及智能维护等方面，总结轨道交通列车全生命周期减排技术的最新进展；最后，分析氢能、光伏发电、锂电池、能量回收等新兴技术对列车低碳化转型的潜在推动作用。研究可为轨道交通列车低碳化发展提供学术参考。

关键词：轨道交通列车；碳排放；生命周期评价；低碳技术；新能源技术；影响因素
中图分类号：U2-9　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251202005

Review of Carbon Emission Accounting and Low-Carbon Emission Reduction Technologies for Rail Transit Trains

YANG Yang[1]，CHU Qihan[1]，HUANG Haibo[1]，XUE Longchang[2]，YUAN Zhenzhou[1]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. CRRC Industrial Research Institute Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: Research on the life-cycle carbon emissions of rail transit trains is an essential basis for scientifically assessing their environmental loads and formulating low-carbon development pathways. By using VOSviewer software, a bibliometric analysis of research related to the life-cycle assessment and carbon emission reduction of rail transit trains was conducted to elaborate on the research hotspots in this field. The application of life-cycle assessment methods in carbon emission accounting was systematically reviewed. A system framework covering five stages, raw material, materialization, operation, maintenance, and end-of-life, was constructed, and the main carbon emission characteristics and key influencing factors of each stage were summarized. Focusing on low-carbon materials, lightweight manufacturing, traction energy efficiency, regenerative braking energy recovery, and intelligent maintenance, this paper summarized recent advances in life-cycle carbon emission reduction technologies. Furthermore, the potential promoting roles of emerging technologies such as hydrogen energy, photovoltaic power generation, lithium batteries, and energy recovery in the low-carbon transformation of trains were analyzed. This paper provides an academic reference for the low-carbon transformation of rail transit trains.

收稿日期：2025-12-02　　**修订日期**：2026-02-15
基金项目：中央高校基本科研业务费项目(2024JBRC009)

Keywords: Rail Transit Train; Carbon Emission; Life Cycle Assessment; Low-Carbon Technology; New Energy Technology; Influencing Factor

0　引言

随着城市建成区扩张与人口规模持续增长，交通系统面临的减排压力不断加大。研究表明，城市地区贡献了全球70%以上的温室气体排放[1-2]，其中交通领域碳排放占比约为10%~30%，已成为全球气候治理的重要挑战[2-3]。在此背景下，轨道交通列车作为环境友好型交通方式，在构建低碳交通体系中具有不可替代的战略地位。中共中央、国务院明确提出应“大力倡导低碳出行，加快推进城市轨道交通等大容量公共交通基础设施建设”[4]。2021年以来，《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》等多项政策文件均强调完善综合交通网络体系，重点发展新一代轨道交通装备[5-8]，并将“全生命周期低碳化”确立为轨道交通发展的核心目标，明确提出到2025年单位运输工作量综合能耗较2020年下降5%的阶段性要求[9]，以推动轨道交通系统向高效、绿色和可持续方向发展。

根据国内外研究，交通领域碳排放核算方法主要可分为3类[10]：一是因素分解法，通过构建计量模型分析不同因素对碳排放量的影响，为低碳政策制定提供依据；二是排放系数法，依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)等机构发布的指南建立，是当前应用最广、支撑碳交易体系的主要核算方法；三是全生命周期评价法(Life Cycle Assessment，LCA)，通过标准化流程系统量化交通基础设施、车辆制造及运营维护等全过程碳排放，能够全面反映系统环境影响，也是本综述所要介绍的重点方法。随着LCA方法在轨道交通领域的深入应用，其在揭示列车全生命周期碳排放特征方面的优势日益突显。

列车运行能耗是轨道交通系统全生命周期能耗的重要来源，开展列车节能研究对挖掘系统减碳潜力具有重要意义。现有研究主要集中于基础设施节能设计[11-13]、再生制动能量利用[14-20]和列车节能运行优化[21-23]等方面。其中，基础设施改造虽可实现节能效果，但普遍存在成本高、投入产出比偏低的问题，而再生制动能量回收与运行优化方案因灵活性和经济性更强而受到广泛关注，尤其是储能型再生制动系统在提升能量回收效率方面表现尤为突出[16，18-20]。随着LCA方法在轨道交通领域的深入应用，研究逐渐从单一运行能耗分析拓展至全生命周期视角，多数关注施工材料、技术和结构因素对全生命周期碳排放的影响[24-27]，并评估不同减排措施的效果[28-29]，同时从原料、制造、维护及报废等阶段提出了低碳材料替代、车体轻量化和智能化维修等技术路径[30-31]。总体而言，轨道交通列车碳排放具有系统性和长期性特征，只有系统识别各阶段排放源并量化其贡献度，才能制定精准有效的减排策略。

在此背景下，本综述旨在系统梳理轨道交通列车全生命周期低碳化研究的学术脉络，填补现有研究中局部性分析的不足，通过整合多维度数据，揭示轨道交通列车全生命周期碳排放的整体特征，为制定精准减排策略提供理论支撑。首先系统梳理LCA的碳排放核算方法体系，随后分析原料、物化、运营、维护及报废各阶段的碳排放特征及主要影响因素，并综述相应的低碳技术路径，最后总结研究结论并展望未来发展方向。

基于Web of Science核心数据库，聚焦轨道交通列车、生命周期评价和碳排放核算，涵盖环境科学、交通运输、能源与绿色可持续科技等领域，时间跨度为2015—2025年，文献类型为研究型论文和综述论文，语种为英语。经过筛选与去重，共获得649篇相关文献，涉及93个国家和地区。轨道交通列车全生命周期低碳化研究领域文献发表分布如图1所示，该领域从2015—2025年呈现“起步积累”到“加速发展”再到“阶段性峰值”的演进特征。基于VOSviewer软件对文献关键词共现分析，得到关键词共现网络如图2所示，识别出52个核心关键词，主要集中在生命周期评价、碳足迹、碳排放、可持续性评估等，反映出对环境影响评估与交通系统可持续性的持续关注。近3年研究热点以生命周期评价为核心，与碳排放、碳足迹和气候变化等议题高度关联，突出学术界对碳排放管理与碳中和目标的重视。

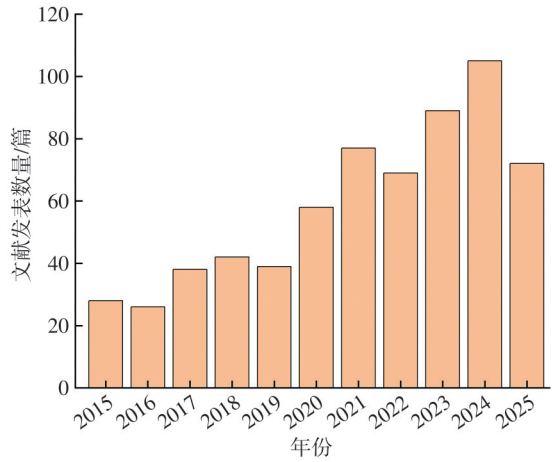

图1　轨道交通列车全生命周期低碳化研究领域文献发表分布

Fig.1　Distribution of literature publication in field of life-cycle low-carbon research on rail transit trains

1　基于生命周期评价方法的轨道交通列车碳排放分析框架

1.1　LCA定义

LCA是对产品从原料开采、生产制造、使用运营到废弃回收全过程环境影响的系统分析方法。尽管国际上对LCA的定义存在差异，但国际环境毒理学与化学学会(The Society of Environmental Toxicology and Chemistry，SETAC)和国际标准化组织(International Organization for Standardization，ISO)提出的定义最具权威性。SETAC将LCA定义为一种通过量化产品、工艺或活动在物质与能量利用及环境排放方面的特征，从而评估其环境负荷并识别改进机会的方法，涵盖从原材料获取、加工制造、运输配送到使用、维护和最终处置的全过程[32]；ISO则强调对产品系统整个生命周期内的输入、输出及潜在环境影响进行汇总与评估，以量化其对环境的整体影响[33]。

LCA评价流程遵循《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(ISO 14040：2006)和《环境管理 生命周期评价 要求和指南》(ISO 14044：2006)标准，主要包括目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释4个阶段[34]。轨道交通列车生命周期评价就是以列车系统为研究对象，对其在建设、制造、运营、维护及报废等阶段的环境影响进行全面评估。

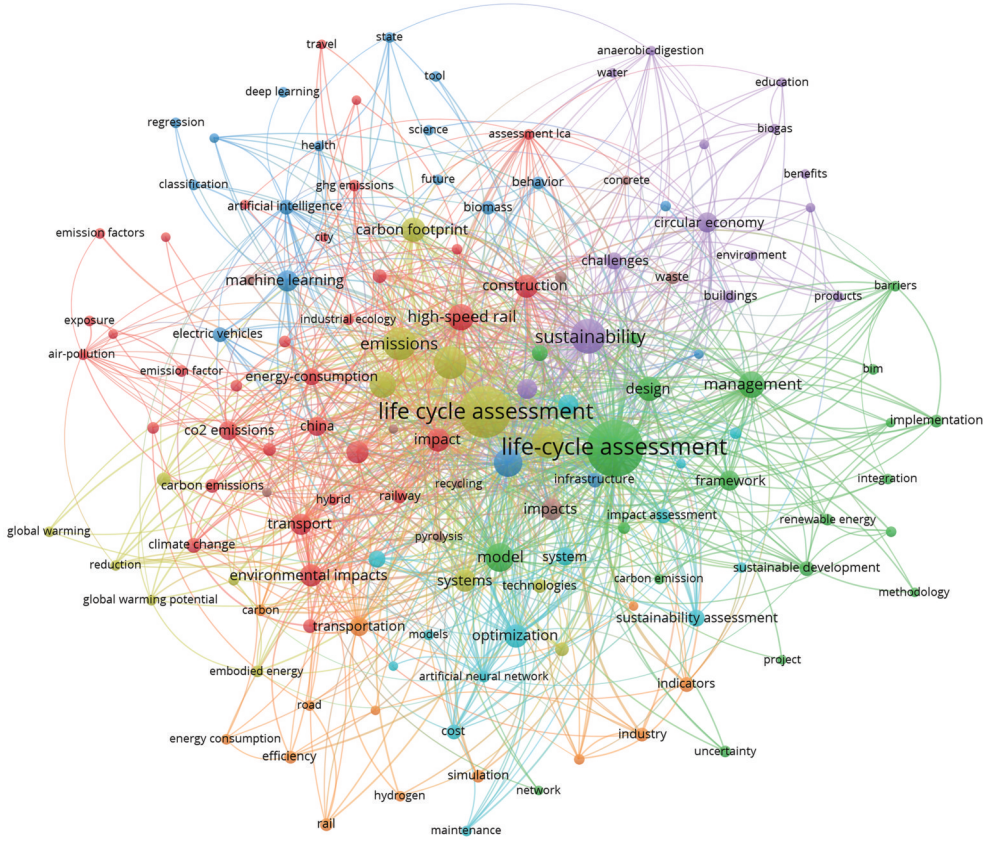

图2　关键词共现网络

Fig.2　Keywords co-occurrence network

1.2　轨道交通列车LCA分析框架

轨道交通列车生命周期评价包含4个步骤：目标与范围的定义、清单分析、影响评价和结果解释。其中，目标与范围的界定最为关键，决定哪些过程被包括在内，哪些过程被排除在外[35]。目前，轨道交通列车全生命周期的阶段划分尚未形成统一标准，其系统边界的界定仍存在不确定性。

基于LCA方法的轨道交通碳排放研究已形成较为成熟的理论体系。相关研究普遍表明，列车运营阶段是轨道交通系统全生命周期碳排放的主要来源之一。以地铁和单轨交通系统为例，研究发现运营阶段碳排放占总排放量的比例最高，部分系统甚至超过90%[36-38]。在跨交通方式比较中，基于LCA的分析结果显示，铁路系统在运营阶段相较高速公路具有更为显著的减排优势，且铁路利用率的提升有助于改善整体生态环境质量[39-40]。与此同时，建设阶段的碳排放同样不容忽视，尤其是高速铁路隧道施工过程中，建筑材料生产成为碳排放的主要来源，其排放占比可超过建设阶段总量的一半[41-42]。

当前，轨道交通列车全生命周期研究多集中于建设或运营等单一阶段，虽能揭示局部碳排放特征，但难以全面反映系统整体碳足迹。近年来，部分学者开始构建系统化的全生命周期评估框架，将建设、运营与维护等环节统一纳入分析。相关研究表明，无论是在轻轨、地铁还是货运交通系统中，运营阶段通常是碳排放占比最高的环节[43-46]。在城市轨道交通领域，已有研究基于具体项目与全国运营数据，量化了全周期碳排放强度，并提出针对性的优化措施[47-49]。此外，基于LCA方法的实证结果显示，采用绿色建造技术可显著降低建设阶段的资源与能源消耗，进而提升轨道交通系统整体减排水平[50]。

总体而言，轨道交通列车在其生命周期内会产生来源多样且相互关联的碳排放。现有研究多覆盖原料生产、物化建设及运营维护阶段，而受回收技术和数据条件限制，报废阶段的系统性碳排放分析仍相对不足。基于上述研究现状，本综述将轨道交通列车全生命周期划分为原料阶段、物化阶段、运营阶段、维护阶段和报废阶段5个核心环节，并据此明确轨道交通列车LCA碳排放系统边界。轨道交通列车系统碳排放系统边界如图3所示，该系统边界涵盖材料生产与运输、列车制造与施工、运行能耗、维修活动及报废拆解等关键过程。后续内容将在此基础上，对轨道交通列车全生命周期碳排放特征及其减排潜力进行系统分析。

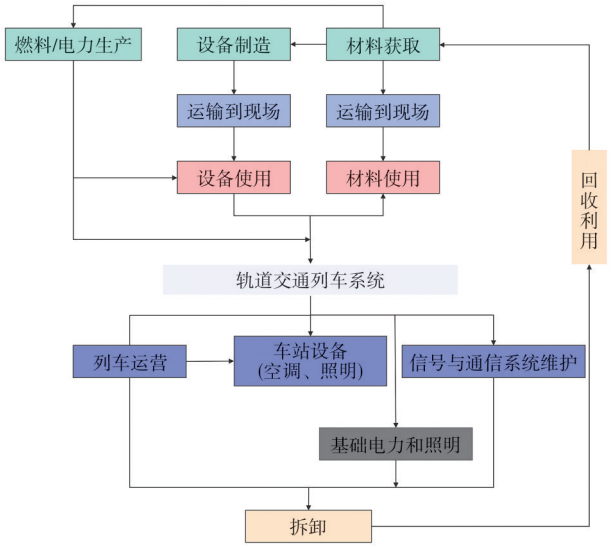

图3　轨道交通列车系统碳排放系统边界

Fig.3　System boundary of carbon emission for rail transit train system

2　基于LCA的轨道交通列车碳排放核算

轨道交通列车全生命周期碳排放贯穿原料、物化、运营、维护和报废等阶段，并受多种因素共同影响。研究表明，交通运输业碳排放与能源利用强度、产业结构、人口规模及经济发展水平密切相关，其影响机制存在明显差异[51]。因此，系统评估各阶段碳排放特征及影响因素，对制定有针对性的列车减排策略具有重要意义。

2.1　原料阶段

原料阶段是轨道交通列车全生命周期的起点，主要涵盖列车制造与基础设施建设所需材料的开采、加工、运输及生产活动。由于列车制造涉及大量金属与复合材料，该阶段碳排放在生命周期中占据重要比例。通过降低材料冗余、优化结构设计和推广轻量化技术，可有效实现低碳制造。为量化原料阶段碳排放，本综述从材料生产排放和运输排放2方面进行核算，其计算方法分别如公式(1)和公式(2)所示。

$$C_{\text{prod}} = \sum_{i=1}^{n} M_i \left(1 + \alpha_i\right) EF_{\text{prod}} \tag{1}$$

$$C_{\text{trans}} = \sum_{i=1}^{n} M_i D_i EF_{\text{trans}} \tag{2}$$

式中：C_{prod}和C_{trans}分别为材料生产过程和运输过程所产生的碳排放，kg；M_i为材料i的用量，kg；α_i为材料损耗率；D_i为运输距离，km；EF_{prod}为材料生产阶段的碳排放因子，kgCO_2e/kg；EF_{trans}为运输碳排放因子，kgCO_2e/(t·km)。

在此背景下，列车轻量化设计已成为轨道交通领域的重要研究方向，其中材料创新是实现轻量化的核心途径。铝合金车体技术已取得显著应用成效，而复合材料凭借轻质高强、耐腐蚀和设计灵活等优势，能够有效降低列车自重并延长服役寿命[53]。随着复合材料技术的发展，部分学者通过多目标优化与结构仿真提出多种轻量化方案，并在工程实践中验证了复合材料在满足结构强度要求的同时实现显著减重的可行性[54-56]。

2.2　物化阶段

物化阶段是轨道交通列车全生命周期的重要组成部分，主要涵盖线路、桥隧、车站及车辆制造等工程建设活动。随着全生命周期碳管理理念的推广，物化阶段碳排放特征及其结构优化逐渐成为研究重点。为系统识别该阶段的碳排放构成，可将主要排放来源及影响因素汇总，得到典型轨道交通建设环节的碳排放特征如表1所示。

表1　典型轨道交通建设环节的碳排放特征

Tab.1　Carbon emission characteristics of typical rail transit construction links

物化环节	主要排放来源	关键影响因素
土建施工(路基/桥梁/隧道)	挖掘设备燃油消耗、混凝土与钢材使用、运输排放	施工机械能效、工程规模、材料碳排放系数
车站建设	明挖土方、模板制作、混凝土浇筑	施工方式、建筑材料用量、施工组织
车辆制造	焊接能耗、喷涂/涂装、电机装配、设备驱动能耗	工艺路线、设备能效、电网碳强度
材料加工	铝型材挤压、钢材切割、复合材料固化	加工温度、加工能耗、材料类型

针对轨道交通物化阶段碳排放量化的研究，学者们逐步拓展至全生命周期视角，探讨轨道交通系统的碳排放特征及影响因素。郭鑫楠[57]将LCA方法与铁路施工过程相结合，对郑州铁路建设期碳排放进行了测算。杨洋等[58]以碳回收期为评价基准，将施工建设阶段纳入统一量化框架，拓展了全生命周期的研究视角。秦骜等[59]针对地铁站建筑开展LCA分析，结果表明车站建造物化阶段的碳排放贡献显著高于其他类型建筑。在此基础上，部分研究进一步从基础设施与列车层面开展全生命周期评估，如Hankan等[60]以Bothnia铁路和California高速铁路为案例，对基础设施建设、机车制造及运行阶段的环境影响进行了系统分析，冯旭杰[61]则基于全生命周期视角，建立了列车建造阶段能源消耗与碳排放分析模型。在细分领域中，地铁建设阶段研究最为深入，相关成果围绕明挖车站、盾构隧道及地下工程等典型工况，构建了针对性的碳排放核算模型[62-65]。此外，基于具体线路的全生命周期测算进一步揭示了建设阶段的减碳潜力，为物化阶段减碳措施的制定提供了定量依据[48，66]。

2.3　运营阶段

根据轨道交通列车全生命周期理论，运营阶段涵盖牵引、制动及各类辅助供电系统及车内辅助系统，是列车节能降耗的核心环节。轨道交通列车生命周期能耗示意图如图4所示，可以看出运营阶段碳排放在全生命周期中占比最高，应作为减排优化的重点方向[67]，通过碳排放成本内部化，可引导列车运输资源向低碳方式配置，从而有效降低运营阶段碳排放水平[68]。

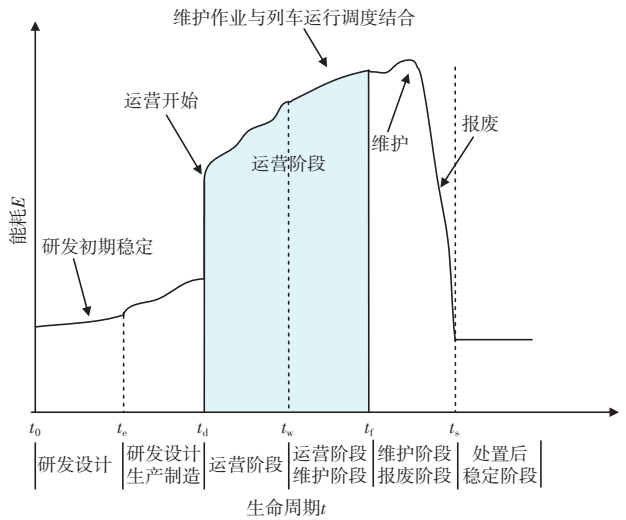

图4　轨道交通列车生命周期能耗示意图

Fig.4　Schematic diagram of life-cycle energy consumption of rail transit trains

为量化运营阶段的碳排放，本综述综合考虑牵引电力、辅助系统能耗与再生制动能量回收率等因素，进行碳排放核算，运营阶段能耗与碳排放来源如表2所示。

在进行详细计算时，牵引能耗、制动能耗和辅

表2　运营阶段能耗与碳排放来源

Tab.2　Energy consumption and carbon emission sources in operation stage

能耗来源	主要碳排放来源	关键影响因素
牵引能耗	列车电力消耗、车速与加速度	牵引电机效率、列车运行速度
制动能耗	列车制动过程中能量损失	制动系统效率、制动模式
辅助系统能耗	空调、电池充电、照明等	空调使用、车内电力消耗
再生制动能量回收	制动能量回收系统	再生制动率、电能回收效率

助系统能耗是最主要的排放来源。因此，本综述依据这些能耗来源进一步将碳排放进行量化计算。

$$C_{\text{traction}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{traction}}(v,\ a) T_i \frac{CF}{1\,000} \tag{3}$$

$$C_{\text{brake}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{brake}}(v) T_i \frac{CF}{1\,000} \tag{4}$$

$$C_{\text{aux}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{aux}}(t) T_i \frac{CF}{1\,000} \tag{5}$$

式中：C_{traction}，C_{brake}，C_{aux}分别表示牵引能耗、制动能耗和辅助系统能耗所产生的碳排放，kg；$P_{\text{traction}}(v,\ a)$为列车牵引率，kW，依赖于运行速度$v$和加速度$a$；$P_{\text{brake}}(v)$为制动功率，kW；$P_{\text{aux}}(t)$为车内辅助系统的功率消耗，kW，依时间而定；$T_i$为运行时间，h；$CF$为电力碳强度，kg$CO_2$e/(kW·h)。

研究普遍认为，尽管轨道交通在建设与运营阶段仍会产生一定碳排放，但其通过替代高碳出行方式所带来的减排效应，可在系统层面抵消部分排放并实现环境协同收益。Saxe等[69]研究指出，地铁出行相较于其他交通方式具有显著的减排潜力，其替代效应能够有效弥补建设与运营阶段的环境负荷。在碳排放测算层面，已有研究以深圳、福州等城市地铁为对象，对运营能耗引起的碳排放进行定量测算，并提出相应的节能优化与排放预测方法，为运营阶段碳管理提供了技术支撑[70-71]。部分学者从车站与车辆子系统入手，构建照明、通风、电梯及车辆牵引等能耗与碳排放模型，揭示了地铁运营阶段碳排放的动态变化特征，并明确车站运行与列车牵引是主要排放来源[72-73]。除地铁系统外，相关研究逐步延伸至高速铁路领域。Yue等[74]基于我国本土化生命周期数据库对京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)开展分析，发现列车运营阶段在多数环境影响类别中占据主导地位，从而凸显了高速铁路运营减排与低碳管理的重要性。在跨交通方式的环境效益比较方面，既有研究普遍证实轨道交通具有显著的低碳优势，其运营不仅能够通过降低单位出行能耗直接减少碳排放，还可通过提升网络通达性、缓解道路拥堵实现间接减排[75]。Chaturvedi等[76]基于全生命周期视角的比较结果进一步表明，轨道交通的推广有助于降低交通部门整体能耗与碳排放水平，但其建设与运营阶段的排放贡献仍不容忽视。结合通勤行为与出行方式转变的研究发现，轨道交通出行相较于私人交通方式具有更低的碳排放强度，能够有效降低居民出行碳足迹，并对城市整体碳减排产生积极影响[77-79]。

2.4　维护阶段

维护阶段是轨道交通列车全生命周期的重要环节，涵盖车站服务保障、列车运行维护及相关设备的检修与更新。该阶段在保障安全与效率的同时，也因部件更换、设备清洗、润滑及维修作业等环节而产生一定碳排放。为精确核算其排放水平，本综述结合碳排放因子、部件更换频次及能耗等因素进行计算。

$$C_{\text{part}} = \sum_{i=1}^{n} M_i (EF_{\text{prod}} + EF_{\text{trans}}) \tag{6}$$

$$C_{\text{clean}} = \sum_{i=1}^{n} (C_i EF_{\text{clean}} + L_i EF_{\text{lub}}) \tag{7}$$

$$C_{\text{repair}} = \sum_{i=1}^{n} W_i EF_{\text{repair}} \tag{8}$$

式中：C_{part}，C_{clean}，C_{repair}分别表示部件更换、清洁润滑、设备维修过程中所产生的碳排放，kg；C_i为清洁剂消耗量，kg；L_i为润滑油消耗量，kg；W_i为设备维修能耗，kW·h；EF_{clean}为清洁剂碳排放因子，kgCO_2e/kg；EF_{lub}为润滑油碳排放因子，kgCO_2e/kg；EF_{repair}为设备维修能耗碳排放因子，kgCO_2e/kg。

已有研究表明，轨道交通系统的生产效率是影响城轨碳排放的重要因素，因此优化车辆维护阶段的检修策略可间接降低系统能耗[80]。近年来，轨道交通逐渐建立了列车运行与维护计划的协同优化机制，通过合理规划停站时间与间隔，为维护作业提供时间窗口，避免因维护与运营相互干扰而造成能源浪费。例如，在终点站停站期间安排快速检查与维护，不仅保障准点发车，还能及时发现潜在故障隐患。然而，针对维护阶段碳排放的系统研究仍相

对不足。Baron等[81]对德国ICE-2、法国TGV Duplex和日本新干线系列电力动车组进行全生命周期分析，发现制造、维护及拆解阶段碳排放差异较小，年均碳排放为0.3 t CO_2e，表明尽管该阶段非主要排放源，管理优化仍具减排潜力。随着列车运营里程增长，维修费用通常占总维修成本的40%以上[82]，因此开展全生命周期维修经济性评估至关重要[83]。韦伟等[84]改进了轨道交通资产的全生命周期成本(LCC)模型，强化了维护阶段的经济性评估；牟明明[85]则基于LCC理论与RAMS指标，构建了地铁车辆全生命周期维修成本模型。这些研究为轨道交通列车维护阶段的低碳化与经济性优化提供了理论支持，也为后续的系统碳排放管理奠定了基础。

2.5　报废阶段

报废阶段是指列车终止服役并进入拆解、处置与材料回收过程，其碳排放主要来源于拆解作业、废料运输及不可回收物处理，报废阶段碳排放来源如表3所示。现有轨道交通减排研究多聚焦于建设、运营与维护阶段的成本与效益，以及相关外部环境收益，而往往未将列车拆解、报废与材料回收纳入分析[86-87]，使报废阶段被排除在生命周期研究之外。然而，该阶段对完整刻画列车碳足迹具有重要意义。已有研究因未考虑报废环节，难以全面反映轨道交通系统的全周期碳排放水平[61]。

表3　报废阶段碳排放来源

Tab.3　Carbon emission sources in end-of-life stage

主要作业	主要碳排放来源	关键影响因素
拆解作业	设备能耗、废料分类、废料运输	拆解机械能效、废料类型与数量
废料运输	废料运输能耗	运输距离、废料数量、运输方式
不可回收物处理	废料处置过程能耗	处置方式、处置设备效率

在此背景下，LCA方法的跨领域应用为弥补轨道交通列车报废阶段研究不足提供了新思路。相关研究通过对动力电池和建筑拆除全过程的碳排放核算，表明回收与拆解环节可能产生不可忽视的排放[88-89]。这为轨道交通列车在报废阶段纳入拆除能耗、材料回收与废弃物处置提供了方法借鉴。未来有必要结合LCA方法与具体技术路径，对报废阶段碳排放进行系统量化，以完善轨道交通列车全生命周期碳管理体系。

3　基于LCA的轨道交通列车低碳减排技术

轨道交通作为高度复杂的综合运输系统，其低碳化技术体系呈现多层次、系统化特征。总体来看，轨道交通低碳目标贯穿列车全生命周期，可系统划分为原料、物化、运营、维护和报废5个阶段，轨道交通列车全生命周期低碳减排技术逻辑如图5所示。

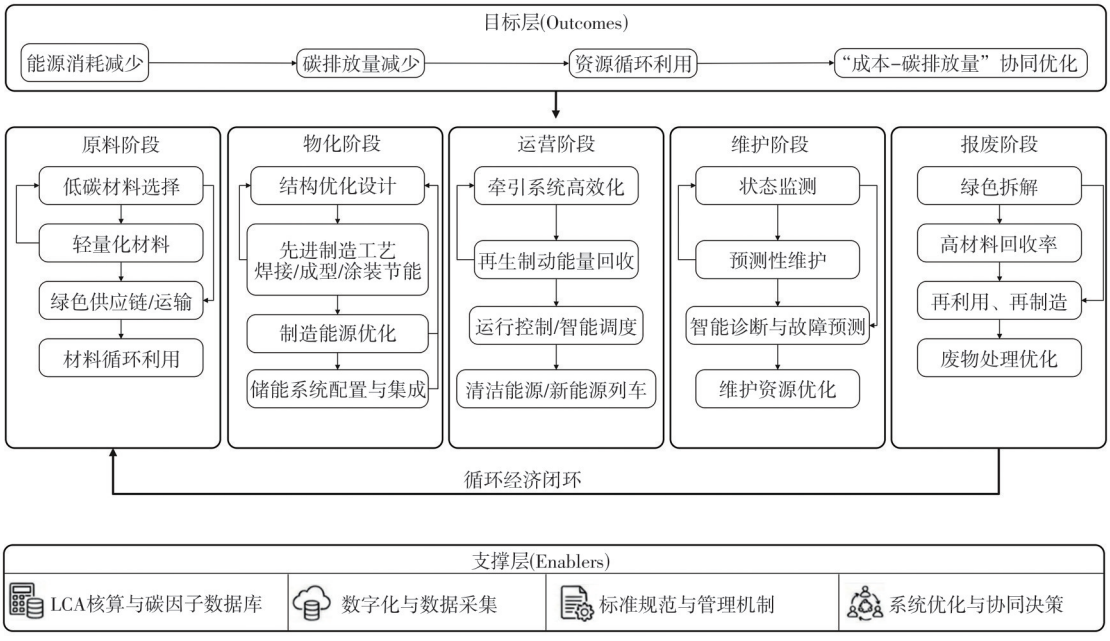

图5　轨道交通列车全生命周期低碳减排技术逻辑

Fig.5　Logic of life-cycle low-carbon emission reduction technologies for rail transit trains

3.1　原料阶段

轨道交通列车及其部件制造是全生命周期碳排放的重要来源，涉及原材料选取、零部件加工、能源利用及废弃处理等环节。为避免能源浪费与环境负担，有必要构建以“资源循环、能效提升和材料固碳”为核心的制造端低碳技术体系。针对该阶段的减排需求，系统总结相关低碳技术路径，得到原料阶段碳减排技术及其特点如表4所示。

由表4可知，原料阶段主要涵盖了4种主要技术：轻量化材料、低碳材料、碳封存技术和近净成型工艺。每种技术的优势与挑战各异，适用于不同的轨道交通制造阶段，且共同推动着轨道交通行业向低碳、绿色方向发展。轻量化材料技术通过减少列车自重，提升能效并延长使用寿命，能够显著降低能耗，尤其在提升列车运营效率方面具有重要作用。其优势在于提高了运输系统的整体能效，减少了能源消耗，尤其适用于需要减轻重量并提高能效的轨道交通车辆。然而，这项技术的缺点在于生产过程中可能需要更高的能耗，并且材料成本较高，因此需要在成本和节能效果之间进行权衡。低碳材料技术则侧重于通过采用低碳原料和改进制造工艺，减少生产过程中的碳排放，提升轨道交通车辆的环境友好性。这类材料能够有效降低生产环节的碳足迹，对满足日益严格的环保标准具有重要意义。虽然低碳材料在性能上可能略逊于传统金属材料，但随着技术进步，这类材料在轨道交通中的应用越来越广泛，尤其适用于对环保要求较高的项目。碳封存技术则通过在材料生产过程中封存CO_2，减少碳排放，尤其在长期服役的轨道交通部件中具有巨大的潜力。该技术可以提高材料的循环利用率，显著降低全生命周期的碳足迹，尤其适用于高强度和长期使用的部件。尽管该技术面临成熟度和大规模应用的挑战，但其减排效果不可忽视，是未来轨道交通低碳化的关键技术之一。最后，近净成型工艺通过减少机械加工和材料浪费，提高了生产效率，并有效降低了生产过程中的碳排放。这项技术适用于大规模生产和初期设计阶段，可以从源头减少材料浪费，提高资源利用率，降低生产成本。然而，该技术的应用需要较高的技术门槛和设备投入，初期成本较高，但从长远来看，能够在提升生产效率的同时实现减排目标。

3.2　物化阶段

当前，轨道交通低碳化的核心技术路径主要集中于车体轻量化与结构优化、驱动系统节能升级以及控制与储能系统的智能化管理，构成了物化阶段节能减碳的基本框架。研究表明，上述技术的协同应用可显著降低列车全生命周期能耗与碳排放，为实现近零碳目标奠定基础[90-92]。物化阶段碳减排技术及其特点如表5所示。

总体来看，物化阶段低碳技术呈现明显的阶段性演进特征。研究由早期单一工序或局部能耗优化，逐步转向制造工艺、结构设计与储能系统的协同优化，实现由局部改进向系统集成减排的转变。以车体结构设计、制造工艺创新和储能系统优化为核心的技术体系，已成为物化阶段节能减排的重要支撑，其中先进焊接与成型工艺提升了制造能效，混合储能技术强化了能量管理能力，共同推动轨道交通向高效、绿色的低碳发展模式演进。

表4　原料阶段碳减排技术及其特点

Tab.4　Carbon emission reduction technologies and their characteristics in raw material stage

技术/措施	优点	缺点	适应性	经济效益
轻量化材料	降低列车自重，提高能源效率，延长使用寿命，减少材料消耗	高成本，生产技术要求高，材料研发周期长	适用于高速列车和长途列车	长期节能降耗，减少维护费用，初期成本较高
低碳材料	材料生产过程碳排放低，减少环境污染	原料选择有限，部分材料性能较传统材料差	适用于所有类型轨道交通	减少碳排放，促进绿色建材市场的发展，初期投入较大
碳封存材料	在生产过程中锁定碳，减少大气排放	材料性能可能不稳定，回收利用存在挑战	适用于车体非承载部分	长期效益显著，减少长期排放成本
近净成型工艺	减少材料浪费，提升生产效率，减少碳排放	设备要求高，技术门槛大，初期投入较高	适用于大规模制造	降低材料和能源消耗，减少生产过程中的碳排放
复合材料应用	高比强度和低密度，提升列车性能，减重	成本高，生产工艺复杂，材料难以回收	适用于高速列车，特别是车体和部件	提高运行效率，节省能源，减少长期运营和维护成本

表5　物化阶段碳减排技术及其特点

Tab.5　Carbon emission reduction technologies and their characteristics in materialization stage

技术/措施	优点	缺点	适应性	经济效益
轻量化设计	降低车体质量，提高能效，减少碳排放	生产成本较高，技术复杂，要求高	适用于车体、桥梁等关键设施	长期节能效益显著，短期成本较高
先进焊接技术	提高焊接质量与精度，减少能源消耗，降低碳排放	需要高技术工人操作和昂贵的设备	适用于车辆和设备制造	提高生产效率，节省能源消耗，减少维修需求
结构优化	提高材料使用效率，降低能源消耗，减少废料和浪费	设计过程复杂，需要高性能计算工具	适用于车体设计和基础设施建设	减少材料浪费，降低生产和维护成本
储能系统优化	增强能量回收效率，减少运营中的能源消耗，减轻系统负担	成本较高，技术发展仍处于实验阶段	适用于地铁、高速铁路等轨道交通系统	提高能源利用效率，降低长远运营成本
绿色建材应用	减少建材生产中的碳排放，优化施工过程	材料来源有限，成本较高	适用于轨道、隧道、车站等基础设施建设	降低施工阶段碳排放，长远节省能源消耗与维护成本

3.3　运营阶段

从研究演进看，轨道交通列车运营阶段低碳技术已由早期能耗统计与效率评估，发展为融合运行控制优化、能源结构调整与智能调度的综合研究方向。研究表明，车辆动力系统与能源结构是运营期碳排放的关键影响因素，推广新能源列车在减排方面较基础设施改造更具成效[93]。在“双碳”目标背景下，加快光伏、氢能源等清洁能源在轨道交通中的应用，有助于优化列车全生命周期碳排放结构并提升系统能源安全性，运营阶段碳减排技术及其特点如表6所示。

动力系统是决定列车能耗与碳排放水平的关键，其低碳化依赖于牵引电机、变流器、传动系统及控制策略的协同优化。研究表明，通过惰行控制与工况切换优化牵引策略，可显著降低列车能耗，体现出动力系统运行优化对减排的直接作用[94]。在牵引电机选择方面，永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM)凭借高能效、快速响应和低维护需求，已成为轨道交通的主流方案[95]。相关研究指出，PMSM牵引系统可实现能量回馈和智能控制，适用于城市轨道交通频繁启停工况[96]。未来PMSM与智能变流控制及模块化电驱系统的融合，将成为列车动力系统高效、低碳发展的重要方向[97]。

3.4　维护阶段

有研究指出，列车检修费用约占轨道交通系统总维保支出的40%[98]，在保障运行安全与运输效率的前提下，实现维护成本与能耗的协同优化已成为轨道交通可持续发展的关键议题。近年来，轨道交通系统逐步形成列车运行与维护计划的协同制定机制，通过合理安排停站时间与发车间隔，为维护作业预留稳定的时间窗口，避免维护活动与列车运行相互干扰而引发的能源浪费，同时提升列车运行效率与设备利用率。在此基础上，状态监测技术的进步推动维护模式由“事后维修”向“预测性维护”转变，借助传感器网络、振动分析与油液检测等手段，实现关键部件运行状态的实时感知与性能退化

表6　运营阶段碳减排技术及其特点

Tab.6　Carbon emission reduction technologies and their characteristics in operation stage

技术/措施	优点	缺点	适应性	经济效益
氢能源列车	具备零排放特性，能源效率高，减少对传统电力的依赖	技术尚未完全成熟，成本较高，基础设施建设需要大量投资	适用于长途、高速铁路	长期运行成本低，推动清洁能源转型
光伏发电	利用可再生能源，减少对传统电网的依赖，提高能源利用效率	受天气影响大，能量输出不稳定，系统建设成本高	适用于地面和车顶的太阳能应用	长期节能效益显著，减少电力成本并促进绿色发展
再生制动能量回收	高效回收列车制动过程中释放的能量，提高能源利用率	在低频制动场景下效率较低，设备投资较大	适用于大多数轨道交通系统	提高系统能效，减少外部电网负荷，降低能源消耗
牵引系统优化	提高牵引电机效率，减少能源消耗，提升列车性能	需要对现有系统进行技术改造，成本较高	适用于所有轨道交通系统	降低能源消耗，提升运行效率，减少长期运营成本
智能调度与优化	通过优化列车运行调度，降低能耗，提高运行效率	需要高度集成的控制系统和数据支持，初期投资较大	适用于所有轨道交通系统	提高整体运营效率，减少碳排放，提升运输能力

识别，从而在故障发生前实施预防性维护，降低延误风险与附加能耗，并通过靶向维修减少不必要的零部件更换，实现资源与碳排放的协同控制。

随着智能化与信息技术的快速发展，轨道交通列车运维体系正加速向主动预测与智能决策方向演进，智能诊断与故障预测已成为重要研究方向[99]。以欧洲铁路产业联盟为代表的国际研究机构，通过InteGRail技术体系构建了集成化的智能诊断、信息传输与评估标准，为高速列车智能运维提供了系统化支撑[100-102]。在国内，相关研究围绕状态监测、健康评估与智能维护展开，形成了融合多源数据的故障预警与决策模型，并在信号系统与车辆设备维护中得到应用[103-106]。总体而言，轨道交通列车运维正由“经验驱动”向“数据驱动”转型，人工智能、大数据与物联网技术的融合将持续推动运维系统向高效、精准与低碳方向发展，为轨道交通列车全生命周期碳减排与可持续管理奠定技术支撑。

3.5　报废阶段

轨道交通列车在全生命周期末端阶段，其零部件与材料的再利用与处置是实现资源循环与碳减排的重要环节。依据生命周期特征，处理过程可分为再使用、再利用、能量回收及残余物最终处置，报废处理过程如图6所示，其中无法进一步回收的残余物需通过填埋等方式进行无害化处理。在众多回收路径中，制动能量再利用被认为是当前节能减碳的重点方向。由于城市轨道交通启停频繁、负荷波动大，列车制动过程中释放大量可回收能量，而传统电阻制动将其以热损形式消耗，造成显著能效浪费[107]。因此，近年来逐步发展能量存储型、能量回馈型及混合型再生制动技术，以提升能量回收效率[108]。工程实践表明，德国ICE列车及我国城市轨道交通系统通过配置再生制动装置，有效降低了电网负荷并提升整体能效[109]。同时，随着轨道交通规模扩大，报废拆解阶段可回收材料持续增加，废旧材料再生利用可替代原生材料生产，显著降低能耗与碳排放。由此可见，构建涵盖制动能量回收与材料再利用的高效循环体系，是实现轨道交通全生命周期减碳与可持续发展的重要路径。

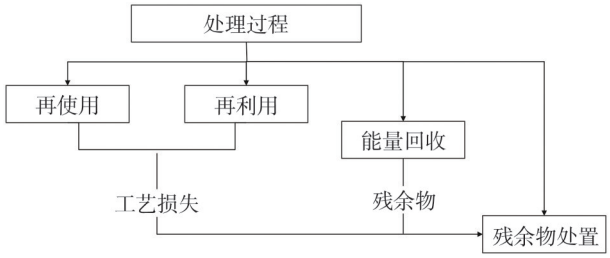

图6　报废处理过程

Fig.6　End-of-life treatment process

4　结论及展望

4.1　结论

基于LCA系统梳理了轨道交通列车碳排放的分析框架与评价工具，深入解析了不同阶段碳排放的影响因素及具体核算方法，并归纳总结出涵盖制造、物化、运营、维护与报废回收全周期的低碳减排技术路径。主要结论如下。

（1）轨道交通列车的碳排放结构可归纳为原料、物化、运营、维护和报废5个阶段，涵盖材料开采与加工、列车制造与基础设施建设、运营能耗、维护活动及拆解回收等关键环节，能够有效识别不同阶段的主要碳源与排放特征，为后续开展碳足迹量化分析及制定分阶段减排策略提供了明确依据。

（2）轨道交通列车全生命周期各阶段的碳排放特征差异显著。原料阶段排放主要源于钢铁、水泥等高能耗材料生产，受材料类型和工艺水平影响；物化阶段排放集中于基础设施建设和列车制造过程，与施工工艺和车体轻量化程度相关。运营阶段是碳排放的核心环节，主要由牵引能耗决定，并受运行速度、系统效率及再生制动利用率影响。维护阶段排放来源于设备更换与维护作业，其水平取决于维护策略和技术条件。相比之下，报废阶段研究相对不足，其减排潜力主要与拆解工艺和材料回收效率有关。

（3）轨道交通列车全生命周期低碳减排应从各阶段协同推进。原料阶段优先推广低碳轻量化材料并优化制造工艺与供应链距离。物化阶段通过结构优化、先进制造和绿色建造降低能耗与排放。运营阶段重点提升牵引系统效率、强化再生制动能量回收并推动清洁能源应用。维护阶段发

展预测性维护与智能诊断技术，优化维护与运行协同。报废阶段则需提高材料回收与再利用水平，构建规范化循环体系，实现资源高效利用。

4.2　未来重点发展方向

在碳中和目标推动下，轨道交通正加速向高效、清洁和低碳方向发展。氢能、光伏发电、锂电池及能量回收等新兴技术的应用，促进了绿色能源供给、多元化动力系统与智能能源管理的发展。这些技术在提升列车能效、优化系统结构和实现低碳运行方面具有重要潜力，将为轨道交通低碳化转型提供关键支撑。

（1）氢燃料电池已在轨道交通列车中实现初步应用，但其规模化推广仍面临功率提升、牵引系统专用化设计、安全防护和标准体系不完善等瓶颈。未来需明确典型应用场景，强化燃料电池及制、储、运氢等关键技术研发，提升系统性能、寿命与可靠性，并推动低成本、高集成度部件应用，以降低整车成本。

（2）轨道交通列车的光伏发电技术具有良好发展前景，通过优化车顶组件布局、采用多端口变流器并构建“光伏+储能”协同系统，可提升其应用潜力。但由于成本较高、寿命有限、功率波动大及对储能依赖强等问题，当前应用仍受限制。未来需在能量管理与储能系统轻量化方面取得突破，推动光伏技术规模化应用。

（3）轨道交通列车传统采用铅酸或镍镉电池储能，但其能量密度低、寿命短且存在环境污染问题。锂电池虽具高能量密度和较长寿命优势，但容量与体积增加会带来效率下降和运行风险。相比之下，超级电容器具有响应快、寿命长和环境适应性强等特点，与锂电池构建混合储能系统，可兼顾高能量与高功率输出，提升列车能效与运行稳定性。

（4）在列车运行中，优化能源结构、提升新能源消纳能力和再生制动能量回收效率是降碳关键。随着储能与电力电子技术发展，利用储能装置回收再生能量成为研究重点，但仍面临成本高、寿命受限和系统集成复杂等问题，低频制动场景下回收效率亦有限。未来需发展高功率密度、长寿命的混合储能系统，并构建“网–源–储–车”一体化能量管理体系，实现再生能量的高效利用。

参考文献：

[1] AGENCY I E. World Energy Outlook 2023[M]. Abu Dhabi：OECD，2023.

[2] NOCERA S，RUIZ-ALARCÓN-QUINTERO C，CAVALLARO F. Assessing Carbon Emissions from Road Transport through Traffic Flow Estimators[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2018，95：125-148.

[3] 吕　莹，李希杰，孙会君，等. 碳中和导向下考虑不确定排放的收费-补贴策略[J]. 系统工程理论与实践，2022，42(5)：1303-1313.
LYU Ying，LI Xijie，SUN Huijun，et al. Carbon Neutrality Based Toll-Subsidy Design for Road Traffic Network under Emission Uncertainty[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2022，42(5)：1303-1313.

[4] 中国共产党中央委员会，中华人民共和国国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-09-22) [2026-01-24]. https：//www. gov. cn/xinwen/2021-10/24/content_5644613. htm.

[5] 中国共产党中央委员会，中华人民共和国国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL]. (2021-02-24) [2026-01-24]. https：//www. gov. cn/gongbao/content/2021/content_5593440. htm.

[6] 中国共产党中央委员会，中华人民共和国国务院. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划[EB/OL]. (2022-01-18) [2026-01-24]. https：//www. gov. cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049. htm.

[7] 中国共产党中央委员会，中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2026-01-24]. https：//www. gov. cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681. htm.

[8] 中国共产党中央委员会，中华人民共和国国务院. 关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL]. (2024-12-05) [2026-01-24]. https：//www. gov. cn/zhengce/202412/content_6991171. htm.

[9] 中国城市轨道交通协会. 实施绿色低碳战略 践行城轨责任担当：《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》正式发布[J]. 都市快轨交通，2022，35(5)：2.

[10] 丘建栋，徐　祥，屈新明，等. 城市道路交通移动源碳排放核算方法[J]. 城市交通，2023，21(4)：77-86.
QIU Jiandong，XU Xiang，QU Xinming，et al. Method for Accounting Urban On-Road Mobile Source Carbon Emissions[J]. Urban Transport of China，2023，21(4)：77-86.

[11] 陈进杰，吕希奎. 高速铁路区间节能坡设计方法研究[J]. 铁道学报，2013，35(12)：83-89.
CHEN Jinjie，LYU Xikui. Research on Method of Energy Saving Gradient Design for High Speed Railway Sections[J]. Journal of the China Railway Society，2013，35(12)：83-89.

[12] 张　磊，许帅康，陈　洁，等. 列车车体轻量化设计研究进展[J]. 机械工程学报，2023，59(24)：177-196.
ZHANG Lei，XU Shuaikang，CHEN Jie，et al. Research Progress in Lightweight Design of Train Body[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(24)：177-196.

[13] 聂泉存. 基于改进粒子群算法的牵引变电所的数量及位置优化研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2022.

[14] 陈　冲，贾利民，赵天宇，等. 光伏和储能植入铁路牵引供电系统的拓扑架构与控制策略研究综述[J]. 电工技术学报，2024，39(24)：7874-7901.
CHEN Chong，JIA Limin，ZHAO Tianyu，et al. Research Review on Topology and Control Strategy of PV and Energy Storage Connected to Railway Traction Power Supply Systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(24)：7874-7901.

[15] 高锋阳，宋志翔，高建宁，等. 计及光伏和储能接入的牵引供电系统能量管理策略[J]. 电工技术学报，2024，39(3)：745-757.
GAO Fengyang，SONG Zhixiang，GAO Jianning，et al. Energy Management Strategies for Traction Power Systems with PV and Energy Storage Access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(3)：745-757.

[16] 胡海涛，陈俊宇，葛银波，等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(1)：246-256，391.
HU Haitao，CHEN Junyu，GE Yinbo，et al. Research on Regenerative Braking Energy Storage and Utilization Technology for High Speed Railways[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(1)：246-256，391.

[17] 李俊豪，涂春鸣，王　鑫，等. 基于“规则+优化”的电气化铁路站点实时能量管控策略[J]. 电工技术学报，2024，39(11)：3339-3352.
LI Junhao，TU Chunming，WANG Xin，et al. Real-Time Energy Management Strategy for Electrified Railroad Stations Based on “Rules+Optimization” [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(11)：3339-3352.

[18] 李　欣，卢景涛，黄文勋. 绿电牵引场景下高速铁路长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报，2025，45(10)：3865-3876.
LI Xin，LU Jingtao，HUANG Wenxun. Capacity Optimization Configuration of Hybrid Energy Storage System for Long Steep Slope of High Speed Railway under Green Electric Traction Scenarios[J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(10)：3865-3876.

[19] 李　欣，卢景涛，肖林润，等. 高速铁路列车长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 电工技术学报，2023，38(20)：5645-5660.
LI Xin，LU Jingtao，XIAO Linrun，et al. Capacity Optimization Configuration of Hybrid Energy Storage System for Long Steep Slope of High Speed Railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(20)：5645-5660.

[20] 袁佳歆，曲　锴，郑先锋，等. 高速铁路混合储能系统容量优化研究[J]. 电工技术学报，2021，36(19)：4161-4169，4182.
YUAN Jiaxin，QU Kai，ZHENG Xianfeng，et al. Optimizing Research on Hybrid Energy Storage System of High Speed Railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2021，36(19)：4161-4169，4182.

[21] 革　新，张玉召，黄志鹏. 基于再生制动能利用的高铁列车运行图优化[J]. 深圳大学学报(理工版)，2023，40(5)：539-545.
GE Xin，ZHANG Yuzhao，HUANG Zhipeng. Optimization of High Speed Train Timetable Based on Regenerative Braking Energy Utilization[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)，2023，40(5)：539-545.

[22] 章　鹏. 超长大坡道条件下西成高铁节能优化研究[D]. 成都：西南交通大学，2020.

[23] ZHU C K，LU J T，LI X. Review of Studies on Energy-Efficient Train Operation in High Speed Railways[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering，2023，18(3)：451-462.

[24] 鲁　娇，方向晨，黎元生，等. 道路沥青碳足迹研究[J]. 现代化工，2016，36(1)：12-16.
LU Jiao，FANG Xiangchen，LI Yuansheng，et al. Carbon Footprint of Paving Asphalt[J]. Modern Chemical Industry，2016，36(1)：12-16.

[25] VEGA A D L，SANTOS J，MARTINEZ-ARGUELLES G.

Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregates for Road Pavements Construction[J]. International Journal of Pavement Engineering，2022，23(4)：923-936.

[26] CHONG D，WANG Y H. Impacts of Flexible Pavement Design and Management Decisions on Life Cycle Energy Consumption and Carbon Footprint[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment，2017，22(6)：952-971.

[27] JIA X L，QIN X F，ZHU J Y，et al. Carbon Emission Pattern of Driving Car on Vertical Curves of Highway[J]. Sustainability，2023，15(8)：6460.

[28] ALAM M R，HOSSAIN K，BUTT A A，et al. Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Maintenance and Rehabilitation Techniques：A Study for the City of St. John's[J]. Canadian Journal of Civil Engineering，2020，47(12)：1320-1326.

[29] MA F，DONG W H，FU Z，et al. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Maintenance：A Case Study in China[J]. Journal of Cleaner Production，2021，288：125595.

[30] XIE J，WANG Z H，WANG F S，et al. The Life Cycle Energy Consumption and Emissions of Asphalt Pavement Incorporating Basic Oxygen Furnace Slag by Comparative Study[J]. Sustainability，2021，13(8)：4540

[31] HUANG Y Q，WOLFRAM P，MILLER R，et al. Mitigating Life Cycle GHG Emissions of Roads to Be Built through 2030：Case Study of a Chinese Province[J]. Journal of Environmental Management，2022，319：115512.

[32] EKVALL T. SETAC Summaries[J]. Journal of Cleaner Production，2005，13：1351-1358.

[33] PRYSHLAKIVSKY J，SEARCY C. Fifteen Years of ISO 14040：A Review[J]. Journal of Cleaner Production，2013，57：115-123.

[34] 毕雅珺. 基于生命周期评价的中国清洁燃煤发电系统的环境影响研究[D]. 武汉：华中科技大学，2020.

[35] 奉凯文. 基于碳达峰目标的地铁LCA视角下碳排放强度与减碳潜力研究[D]. 成都：西华大学，2023.

[36] 郜新军. 城市轨道交通系统碳排放评估及集成优化控制方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.

[37] DE ANDRADE C E S，DE ALMEIDA D'AGOSTO M. Energy Use and Carbon Dioxide Emissions Assessment in the Lifecycle of Passenger Rail Systems：The Case of the Rio de Janeiro Metro[J]. Journal of Cleaner Production，2016，126：526-536.

[38] LI T，ZHU E Y. Quantifying Carbon Emissions Generated by Monorail Transits：A Life Cycle Assessment Approach[J]. Computational Intelligence and Neuroscience，2022，2022(1)：3872069.

[39] 刘淑芬. 基于LCA的京沪高速与京沪高铁基础设施建设环境影响比较研究[D]. 南京：东南大学，2015.

[40] BILGILI L，KUZU S L，ÇETINKAYA A Y，et al. Evaluation of Railway versus Highway Emissions Using LCA Approach between the Two Cities of Middle Anatolia[J]. Sustainable Cities and Society，2019，49：101635.

[41] CHANG B. Initial Greenhouse Gas Emissions from the Construction of the California High Speed Rail Infrastructure：A Preliminary Estimate[D]. Davis：University of California，Davis，2009.

[42] CHANG B，KENDALL A. Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Infrastructure Construction for California's High Speed Rail System[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2011，16(6)：429-434.

[43] BÁRZAGA-CASTELLANOS L，NEUFERT R，MARKERT B. Life Cycle Assessment for the Implementation of Emission Control Measures for the Freight Traffic with Heavy Duty Vehicles in Germany[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment，2001，6(6)：356-362.

[44] HKKINEN T，MKEL K. Environmental Adaption of Concrete：Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[J/OL]. VTT Technical Research Centre of Finland (1996-06-05) [2026-01-24]. https：//cris. vtt. fi/en/publications/environmental-adaption-of-concrete-environmental-impact-of-concre/.

[45] LI Y，HE Q，LUO X，et al. Calculation of Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Urban Rail Transit Systems：A Case Study of Shanghai Metro[J]. Resources，Conservation and Recycling，2018，128：451-457.

[46] SHINDE A M，DIKSHIT A K，SONI A. Environmental Life Cycle Assessment of Underground Metro Rail：A Case Study in Mumbai Metropolitan Region，India[J]. Environmental Impact Assessment Review，2024，106：107501.

[47] 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.

[48] 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.

[49] GUO H，ZHAO L Y，ZANG S，et al. Calculation of Greenhouse Gas Emissions of Urban Rail Transit Systems in China[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability，2024，177(4)：209-216.

[50] 粟月欢，张　宇，段华波，等. 地铁建设环境影响评估及减排效益研究：以深圳市为例[J]. 环境工程，2022，40(5)：184-192，236.
SU Yuehuan，ZHANG Yu，DUAN Huabo，et al. Research on Environmental Impact Assessment and Emission Reduction Potential of Metro Construction：A Case Study in Shenzhen，China[J]. Environmental Engineering，2022，40(5)：184-192，236.

[51] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 交通运输业碳足迹测算及其交互效应评估：以京津冀地区为例[J]. 北京交通大学学报，2023，47(6)：74-81.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Carbon Footprint Measurement in Transportation Sector and Assessment of Its Interaction Effects：A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2023，47(6)：74-81.

[52] 陈进杰，王兴举，王祥琴，等. 高速铁路全生命周期碳排放计算[J]. 铁道学报，2016，38(12)：47-55.
CHEN Jinjie，WANG Xingju，WANG Xiangqin，et al. Calculation of Carbon Dioxide Emissions in the Life Cycle of High Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society，2016，38(12)：47-55.

[53] 周　丰，孙洪涛. 新时代背景下中长期规划高速铁路网适应性探讨[J]. 铁道标准设计，2019，63(11)：30-34.
ZHOU Feng，SUN Hongtao. Discussion on the Adaptability of the Medium and Long-Term High Speed Railway Network Planning for a New Era[J]. Railway Standard Design，2019，63(11)：30-34.

[54] 叶　辉，刘　畅，闫康康. 纤维增强复合材料在汽车覆盖件中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版)，2020，50(2)：417-425.
YE Hui，LIU Chang，YAN Kangkang. Application of Fiber Reinforced Composite in Auto-Body Panel[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2020，50(2)：417-425.

[55] KIANI M，GANDIKOTA I，RAIS-ROHANI M，et al. Design of Lightweight Magnesium Car Body Structure under Crash and Vibration Constraints[J]. Journal of Magnesium and Alloys，2014，2(2)：99-108.

[56] WENNHAGE P. Weight Optimization of Large Scale Sandwich Structures with Acoustic and Mechanical Constraints[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials，2003，5(3)：253-266.

[57] 郭鑫楠. 基于生命周期评价的铁路建设项目二氧化碳排放评价研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.

[58] 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.

[59] 秦　骜，袁艳平，蒋福建. 地铁站建筑全生命周期碳排放研究：以成都三号线某站为例[J]. 建筑经济，2020，41(S1)：329-334.
QIN Ao，YUAN Yanping，JIANG Fujian. Research on Life Cycle Carbon Emissions of Metro Stations：Taking a Station on Chengdu Line 3 as an Example[J]. Construction Economy，2020，41(S1)：329-334.

[60] Stripple H. Life Cycle Assessment of Railways and Rail Transports-Application in Environmental Product Declarations (EPDs) for the Bothnia Line[J/OL](2010-06-12) [2026-01-24]. https：//wrlc-gulaw. primo. exlibrisgroup. com/permalink/01WRLC_GUNIVLAW/13ohgjo/cdi_swepub_primary_oai_DiVA_org_ivl_2715.

[61] 冯旭杰. 基于生命周期的高速铁路能源消耗和碳排放建模方法[D]. 北京：北京交通大学，2014.

[62] 陈坤阳，陈湘生，王　雷，等. 明挖地铁车站建设期温室

气体排放研究：以深圳市城市轨道交通12号线某车站为例[J]. 隧道建设(中英文)，2023，43(S1)：189-197.
CHEN Kunyang，CHEN Xiangsheng，WANG Lei，et al. Greenhouse Gas Emissions of Open-Cut Metro Station in Construction Phase：A Case Study of a Metro Station on Shenzhen Urban Rail Transit Line 12[J]. Tunnel Construction，2023，43(S1)：189-197.

[63] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[64] 黄旭辉. 地铁土建工程物化阶段碳排放计量与减排分析[D]. 广州：华南理工大学，2019.

[65] 王幼松，黄旭辉，闫　辉. 地铁盾构区间物化阶段碳排放计量分析[J]. 土木工程与管理学报，2019，36(3)：12-18，47.
WANG Yousong，HUANG Xuhui，YAN Hui. Quantitative Analysis of Embodied Carbon Emission in Metro Shield Tunnel[J]. Journal of Civil Engineering and Management，2019，36(3)：12-18，47.

[66] 安　东，李子倞，孙念念. 地铁站点施工期碳排放预测模型研究[J]. 居舍，2019(14)：139-140.

[67] JIANG R，WU P. Estimation of Environmental Impacts of Roads through Life Cycle Assessment：A Critical Review and Future Directions[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2019，77：148-163.

[68] 王　辉，石　瑜，杨　洋，等. 基于碳排放成本内部化的公铁联运定价策略研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：84-94.
WANG Hui，SHI Yu，YANG Yang，et al. Research on Pricing Strategy for Intermodal Road-Rail Transport Based on Internalization of Carbon Emission Costs[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(10)：84-94.

[69] SAXE S，MILLER E，GUTHRIE P. The Net Greenhouse Gas Impact of the Sheppard Subway Line[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2017，51：261-275.

[70] CHEN K Y，ZHANG G B，WU H Y，et al. Uncovering the Carbon Emission Intensity and Reduction Potentials of the Metro Operation Phase：A Case Study in Shenzhen Megacity[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2022，20(1)：206.

[71] LIU M H，JIA S Y，LI P，et al. Predicting GHG Emissions from Subway Lines in the Planning Stage on a City Level[J]. Journal of Cleaner Production，2020，259：120823.

[72] 龙江英，李　焱，马　龙. 城市轨道交通运营期碳排放算量研究[J]. 贵阳学院学报(自然科学版)，2011，6(2)：1-11.
LONG Jiangying，LI Yan，MA Long. Research on Carbon Emission Calculation in the Process of Urban Rail Transit[J]. Journal of Guiyang College (Natural Sciences)，2011，6(2)：1-11.

[73] 王环宇. 城市轨道交通车站动力系统能耗体系分析与节能措施研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.

[74] YUE Y. Life Cycle Assessment of High Speed Rail in China [J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2015，41：367-376.

[75] 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.

[76] CHATURVEDI V，KIM S H. Long Term Energy and Emission Implications of a Global Shift to Electricity-Based Public Rail Transportation System[J]. Energy Policy，2015，81：176-185.

[77] 曾雪兰，徐伟嘉，郭绍德，等. 基于生命周期的轨道交通能耗与碳排放分析[J]. 安全与环境学报，2015，15(6)：290-294.
ZENG Xuelan，XU Weijia，GUO Shaode，et al. Analysis of the Energy Consumption and Carbon Emission of the Rail Transit Based on the Life Cycle Assessment[J]. Journal of Safety and Environment，2015，15(6)：290-294.

[78] 黄　莹，郭洪旭，谢鹏程，等. 碳普惠制下市民乘坐地铁出行减碳量核算方法研究：以广州为例[J]. 气候变化研究进展，2017，13(3)：284-291.
HUANG Ying，GUO Hongxu，XIE Pengcheng，et al. Study on Carbon Emission Reduction Calculation of Subway Travel：Take Guangzhou as an Example[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis，2017，13(3)：284-291.

[79] DONG D，DUAN H B，MAO R C，et al. Towards a Low Carbon Transition of Urban Public Transport in Megacities：A Case Study of Shenzhen，China[J]. Resources，Conservation and Recycling，2018，134：149-155.

[80] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 城市轨道交通二氧化碳排

放量化及其影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(10)：97-102.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Quantification of Carbon Dioxide Emissions in Urban Rail Transit and Its Influencing Factor Analysis[J]. Urban Mass Transit，2023，26(10)：97-102.

[81] BARON T T M，MARTINETTI G，PÉPION D. High Speed Rail and Sustainability-Background Report：Methodology and Results of Carbon Footprint Analysis[R]. Paris：International Union of Railways (UIC)，2011.

[82] 王　渊. 兰州地铁车辆架修模式研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2020.

[83] 陈国锋，蔡　勋，蔡岳辰，等. 我国标准地铁车辆的全寿命周期成本构成及控制[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(4)：5-8.
CHEN Guofeng，CAI Xun，CAI Yuechen，et al. Whole Lifecycle Cost Composition and Control of Standard Metro Vehicle in China[J]. Urban Mass Transit，2023，26(4)：5-8.

[84] 韦　伟，王亚媛. 轨道交通资产全寿命周期预防性维修成本分析[J]. 物流科技，2020，43(10)：36-38.
WEI Wei，WANG Yayuan. Asset Life Cycle Preventive Maintenance Cost Analysis of Rail Transit[J]. Logistics Sci-tech，2020，43(10)：36-38.

[85] 牟明明. 地铁车辆寿命周期维修成本分析方法研究[J]. 中国高新技术企业，2017(2)：100-102.

[86] SICILIANO G，BARONTINI F，ISLAM D M Z，et al. Adapted Cost-Benefit Analysis Methodology for Innovative Railway Services[J]. European Transport Research Review，2016，8(4)：23.

[87] MANGANELLI B. The Cost-Benefit Analysis for the Evaluation of Public Infrastructure Projects：The case of the Subway of Potenza[C]//International Conference on Energy，Environment and Sustainable Development. Hoboken：Advanced Materials Research，2015：1362-1367.

[88] 杨　馨. 基于建筑全生命周期碳排放的某工程生态改良实证研究[D]. 广州：华南理工大学，2017.

[89] FENG T，GUO W，LI Q，et al. Life Cycle Assessment of Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide Batteries and Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles in China[J]. Journal of Energy Storage，2022，52：104767.

[90] TANG J，ZHOU Z P，CHEN H，et al. Research on the Lightweight Design of GFRP Fabric Pultrusion Panels for Railway Vehicle[J]. Composite Structures，2022，286：115221.

[91] DE FILIPPIS G，LENZO B，SORNIOTTI A，et al. Energy-Efficient Torque-Vectoring Control of Electric Vehicles with Multiple Drivetrains[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2018，67(6)：4702-4715.

[92] 郭团生. 基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法[J]. 城市轨道交通研究，2024，27(6)：79-83.
GUO Tuansheng. Intelligent Control of Tram Braking Signal Switching Based on Dual-Core Controller[J]. Urban Mass Transit，2024，27(6)：79-83.

[93] MORIMOTO Ryoko，SHIBAHARA Naoki，KATO Hirokazu. Life Cycle Assessmentof Road Improvement Projects Considering Innovations in VehicleTechnology and Changes in TrafTic Demand[J/OL]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (2014-01-27) [2026-01-24]. https://trid.trb.org/view/1284045.

[94] 杨　洋，杨晓彤，黄守刚，等. 道口群约束下铁路内燃机车牵引节能运行综合建模[J]. 铁道运输与经济，2025，47(5)：16-26.
YANG Yang，YANG Xiaotong，HUANG Shougang，et al. Comprehensive Modeling for Energy-Saving Operation of Railway Diesel Locomotive Traction under Constraint of Crossing Group[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(5)：16-26.

[95] 钱曙杰. 轨道交通新型永磁同步牵引电机的设计与比较[J]. 城市轨道交通研究，2021，24(7)：110-114.
QIAN Shujie. Design and Comparison of Novel Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for Rail Transit[J]. Urban Mass Transit，2021，24(7)：110-114.

[96] 刘　畅. 轨道交通用永磁同步电机牵引系统控制策略研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.

[97] 孙振耀，徐　帅，任冠州，等. 永磁同步牵引电机全速域双模式模型预测控制策略[J]. 中国电机工程学报，2025，45(2)：748-757.
SUN Zhenyao，XU Shuai，REN Guanzhou，et al. Dual-Mode Model Predictive Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Traction Motor in the Full Speed Range[J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(2)：748-757.

[98] LIU H L. Reliability and Maintenance Modeling for Competing Risk Processes with Weibull Inter-Arrival Shocks[J]. Applied

Mathematical Modelling，2019，71：194-207.

[99] 贾利民，秦　勇，李　平. 新一代轨道智能运输系统总体框架与关键技术[J]. 中国铁路，2015(4)：14-19.

[100] PATRICK F，Siemens Energy，et al. Publishable Final Activity Report. [EB/OL]. (2010-07-30) [2026-01-24]. http：//www，integrail. info/download. htm.

[101] BRIGNONE C，DE AMBROSI C，DE LUCA M，et al. Engineering Knowledge-Based Condition Analyzers for On-Board Intelligent Fault Classification：A Case Study[C]// The Institution of Engineering and Technology. 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2008). Derby：IET，2008：19.

[102] SHINGLER R，FADIN G，UMILIACCHI P. From RCM to Predictive Maintenance：The InteGRail Approach[C]//The Institution of Engineering and Technology. 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2008). Derby：IET，2008：17.

[103] 曾　嵘. 机车状态监测、智能诊断与维护支持系统的研究与设计[D]. 长沙：中南大学，2008.

[104] 李　帅. 轨道交通车站关键设备智能监控和健康维护系统的研究[D]. 上海：东华大学，2011.

[105] 刘志亮，潘　登，左明健，等. 轨道车辆故障诊断研究进展[J]. 机械工程学报，2016，52(14)：134-146.
LIU Zhiliang，PAN Deng，ZUO Mingjian，et al. A Review on Fault Diagnosis for Rail Vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(14)：134-146.

[106] 杨连报. 高速铁路信号系统大数据规范化研究与运维决策支持[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[107] 王振国，唐文清，杨超华. 城市轨道交通中压回馈型再生制动吸收装置的研究[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(2)：69-71.
WANG Zhenguo，TANG Wenqing，YANG Chaohua. Medium-Voltage Feedback Type Regenerative Braking Absorption Device in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit，2023，26(2)：69-71.

[108] 安秋颖. 城市轨道交通供电系统再生制动能量回收装置节能影响因素分析[J]. 铁道车辆，2021，59(1)：31-34，116.
AN Qiuying. Analysis of Affecting Factors of Energy Saving of Regenerative Braking Energy Recovery Device in Power Supply System for Urban Rail Transit[J]. Rolling Stock，2021，59(1)：31-34，116.

[109] 张晓虎，张　熊，张克良，等. 储能技术在轨道交通再生制动能量回收的应用[J]. 电气工程学报，2023，18(2)：210-220.
ZHANG Xiaohu，ZHANG Xiong，ZHANG Keliang，et al. Application of Energy Storage Technology in Regenerative Braking Energy Recovery of Rail Transit[J]. Journal of Electrical Engineering，2023，18(2)：210-220.

(责任编辑　刘宁馨)