



铁路机车全寿命周期节能减排 技术要素研究综述

朱 丹¹, 付学光¹, 高洪光¹, 刘景来¹, 程 尧², 张立臣¹, 刘 霞¹

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116000;

2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 随着绿色低碳发展的不断推进, 铁路机车节能减排研究逐渐由单一能耗控制转向覆盖设计、制造、运用及退役全过程的协同优化。围绕机车全寿命周期, 文章系统总结了各阶段节能减排相关技术进展。在设计层面, 重点分析了牵引系统效率提升、再生制动能量回收以及结构轻量化与气动优化等关键技术; 在制造层面, 归纳了绿色材料应用与低碳制造工艺的发展趋势; 在运用阶段, 探讨了基于优化控制与能量管理的节能策略; 在维修及报废阶段, 总结了健康管理及资源循环利用技术。在此基础上, 结合典型国家在政策标准及工程实践方面的经验, 对绿色制造与能耗评估体系进行了归纳分析, 并对比了不同技术路径在工程应用中的适用性与局限性; 同时, 考虑电力机车与内燃机车在动力结构与应用场景上的差异, 探讨了多能源协同条件下的节能减排实现路径。研究表明, 现有技术虽在能效提升方面取得一定进展, 但在多系统协同优化及复杂运行环境适应方面仍存在不足。未来有必要进一步加强智能运维、新能源动力及全生命周期碳管理等方向的研究, 以推动铁路机车向高效、低碳和智能化方向发展。

关键词: 铁路机车; 节能减排; 全寿命周期; 牵引传动; 再生制动; 能量管理; 绿色制造; 低碳技术

中图分类号: U260; U268.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0055-09

0 引言

针对铁路机车全寿命周期中的节能减排问题, 相关研究已逐步由单一环节优化向多阶段协同优化发展, 涵盖设计、制造、运用及维修报废等全过程。现有研究主要集中在牵引传动效率提升、再生制动能量利用、车载辅助系统能耗优化以及运用阶段能量管理等方面^[1]。在设计阶段, 除传统结构优化外^[2], 研究重点逐渐转向牵引系统拓扑结构优化与控制策略提升, 以提高系统整体效率与可维护性; 在制造阶段则通过绿色制造工艺与智能化生产技术降低能源消耗与资源浪费^[3]; 在运用阶段通过运行组织优化与能量管理策略优化, 减少无效牵引与频繁制动带来的能耗损失^[4-5]。

在复杂服役环境(高寒、高温及大温差等)条件下, 机车关键部件性能退化对能耗及运行效率的影响机制尚不明确。现有研究虽已开展多部件建模与仿真分析, 但在多系统耦合以及健康状态与能耗之间的关联机理方面仍有待深入研究^[6-7]。具体而言, 机车全寿命周期节能减排技术要素的研究需要深入推进, 包括设计阶段的结构优化、制造阶段的工艺改进、运用阶段的智能调度及运维管理^[8]等。

随着铁路机车技术的不断发展, 试验台的设计与研发也在不断进步。多个研究机构如中国铁道科学研究院、西南交通大学、北京交通大学等, 已成功研制出能够模拟不同服役环境下机车系统磨损特性和受流稳定性的试验台。这些试验设备可在实际服役环境条件下进行全面的动态性能和磨损性能测试, 尤其对复

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目(2025ZNSFSC0400)

通信作者: 程 尧, 男, 工学博士, 副研究员, 主要从事轨道车辆智能运维方面的研究; E-mail: chengyao2015@my.swjtu.edu.cn

引用格式: 朱丹, 付学光, 高洪光, 等. 铁路机车全寿命周期节能减排技术要素研究综述[J]. 机车电传动, 2025(6): 55-63. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.006.

Citation: ZHU Dan, FU Xueguang, GAO Hongguang, et al. Review of technology elements for life-cycle energy conservation and emission reduction of railway locomotives[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 55-63. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.006.

杂服役环境下铁路机车节能减排技术的优化具有重要意义^[9]。

1 铁路机车技术发展现状

在当前铁路机车技术体系中，机车车辆按动力来源可分为电力机车、内燃机车和蒸汽机车。其中，电力机车凭借高效率、低排放等优势，在高速与重载运输中占据主导地位。然而，从全球范围来看，内燃机车仍在非电气化线路及复杂工况运输中发挥着不可替代的作用，在我国机车保有量中仍占约 1/3，具有重要的工程应用价值。

电力机车因其高效、环保的特性，在全球范围内得到广泛应用^[10]。以德国为例，西门子 ES64U4 型电力机车，作为“欧洲短跑手”系列的重要代表，是在 ES64F4 和 ES64U2 型基础上研发而成的，该车型在试验时曾创下 357 km/h 的纪录；西门子后续推出的 Vectron 系列机车，则通过可重构、模块化的设计来满足不同铁路系统的需求^[11]。庞巴迪推出的 TRAXX 系列机车，凭借其模块化设计和跨制式兼容性，在欧洲市场上广受青睐。此外，阿尔斯通 Prima 系列机车、日本的 EH500 与 EF210 型机车，以及中国韶山、和谐、复兴系列机车，都体现了各国在机车技术上的独特研发方向和市场战略^[1]。上述部分车型如图 1 所示。

相比之下，内燃机车以柴油机为核心动力，其节能减排技术主要集中在燃烧效率提升与排放控制两个



(d) 中国复兴 3 型电力机车

图 1 典型铁路机车

Fig. 1 Typical locomotive

方面。近年来，高压共轨喷射技术、废气再循环（EGR）、选择性催化还原（SCR）以及柴油颗粒捕集器（DPF）等技术的应用，使内燃机车在氮氧化物和颗粒物排放控制方面取得显著进展^[1]；同时，混合动力内燃机车（柴油机+储能系统）逐渐成为研究热点^[5]，通过制动能量回收与峰值功率削减，可实现燃油消耗降低约 10%~20%。

这些铁路机车的发展不仅体现在技术与性能的不断提升，而且反映了全球铁路运输对安全性、节能环保、运营经济性与智能维护等方面的综合要求^[12]。比如，部分研究已关注到车站能效设计和整体车辆运行的节能优化，从而为铁路系统在满足运输需求的同时实现绿色可持续发展提供了有益参考^[13]。各类列车技术参数、结构设计和运营指标的详细比较，则为深入理解不同国家在铁路机车制造领域的技术演进和创新路径提供了丰富的案例支持^[14-15]。

当前铁路机车技术正由单一动力系统优化向多能源融合与系统级协同优化发展。尽管电力机车在能效与环保方面具有显著优势，但其对基础设施依赖较强；而内燃机车虽排放对环境有影响，但在非电气化线路中仍具有不可替代性。现有研究多集中于单一类型机车的性能优化，对多能源协同条件下的系统优化与运行策略研究仍相对不足。因此，面向复杂线路条件与多样化运输需求，开展电力与内燃机车协同发展的关键技术研究具有重要意义。

2 机车全寿命周期节能减排技术

机车全寿命周期不同阶段节能减排技术要素的研究框架如图 2 所示，图 2 中明确了全寿命周期各阶段面临的**关键技术挑战**。

2.1 设计阶段节能减排技术要素

设计阶段是机车全寿命周期节能减排技术体系的核心，以牵引传动高效化与能量回收利用为主线，并结合结构优化、受流与气动性能改进以及车载辅助系统能耗控制等开展多维度技术协同，实现能耗与环境影响的系统性降低^[2,16-17]。本阶段关键技术要素包括：牵引传动与制动系统的高效化及能量回收、车体与转



(a) 西门子 ES64U4 型机车



(b) 西门子 Vectron 型机车



(c) 中国 HXD3D 型电力机车

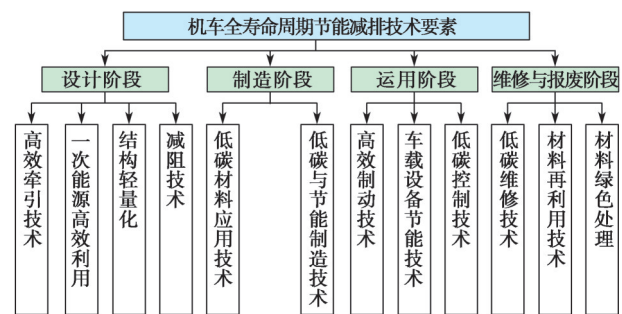


图 2 节能减排技术要素结构树

Fig. 2 Structure tree of technology elements for energy conservation and emission reduction

向架结构轻量化与减阻降噪优化, 以及机车辅助系统 (风机、空压机、冷却系统等) 的节能控制。图 3 展示了设计阶段节能减排技术要素的结构框架, 并指明了每个技术要素在实际应用中的关键技术挑战。

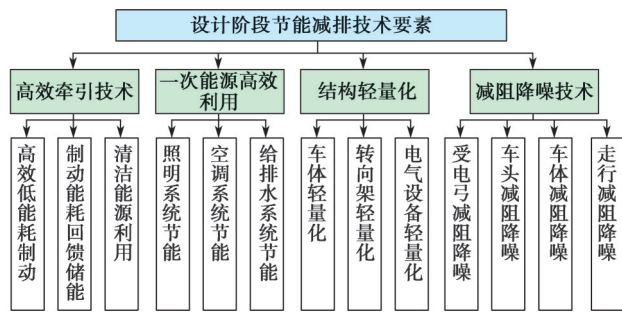


图 3 设计阶段节能减排技术要素结构树

Fig. 3 Structure tree of technology elements in the design stage for energy conservation and emission reduction

牵引传动系统作为机车能量转换的核心环节, 其效率水平直接决定整车能耗。当前主流方案采用永磁同步电机与多电平变流器的组合, 在额定工况下可显著提高功率密度并降低能量损耗^[18-20]。然而, 相较于传统异步牵引系统, 永磁同步电机在高温环境下存在退磁风险, 对冷却系统与控制策略有更高要求。此外, 多电平变流器虽可降低开关损耗和谐波含量, 但其拓扑结构复杂、控制难度较高, 在工程应用中仍需在效率提升与系统可靠性之间进行权衡。

在再生制动方面, 现有研究多集中于提升能量回收率, 但其实际利用效果受限于供电系统吸收能力。在受限的回馈条件下, 仅依赖车载再生制动难以充分发挥节能潜力。因此, 结合储能系统或车网协同能量管理策略成为提高再生能量利用效率的重要发展方向。

机车辅助系统 (风机、空压机、冷却系统等) 引入了智能能量管理系统, 以需求侧控制为核心, 通过传感器实时监测与算法优化, 可使能耗下降 10%~15%, 待机损耗几乎消除^[21]。其制造环节通过推广可回收材料和热能回收生产线, 将生产阶段碳排放降低 20% 以上^[22]。

车体轻量化主要依靠高强度铝合金和碳/玻璃纤维复合材料, 并配合激光焊接、摩擦搅拌焊接等先进制造

工艺, 实现了既有效降低自重, 又保证结构强度与抗疲劳性能的目标^[23]。模块化车体设计将车体整体划分为多个标准化单元, 不仅能提升生产效率和定制化水平, 还简化维护流程^[2]。转向架方面, 中空梁结构与高强度轻质材料的结合, 辅以精密焊接技术, 使部件质量减小 15% 以上, 可显著提升转向架的可靠性和耐久性^[24]。

气动优化依托 CFD 仿真和风洞试验, 对车头、车身包角及受电弓造型开展倒角、曲率和导流板设计, 可实现 10%~15% 的空气阻力降低和 3~6 dB 的噪声衰减^[25-28]。一体化碳纤维帆板和可控导流板的应用, 兼顾强度与轻量化, 提升了结构稳定性; 主动减振控制通过气动弹簧压力调节和传感器反馈, 将网压波动维持在±10% 以内, 实现动态跟随性能提升 20% 以上^[29-30]。

总体来看, 设计阶段节能技术已由传统结构优化向“系统级+多目标优化”方向发展。然而, 现有研究多基于理想工况或单一目标函数, 缺乏对复杂运行环境及多性能指标耦合关系的系统分析。此外, 高效牵引系统与再生制动技术虽在理论上具有较高节能潜力, 但其工程应用效果受制于热管理、供电条件及系统匹配等因素。因此, 未来研究需进一步强化多系统协同设计方法, 并提升模型与实际运行环境的一致性。

2.2 制造阶段节能减排技术要素

制造阶段是机车全生命周期中至关重要的一部分, 直接关系着能源消耗、资源利用和环境影响, 其优化设计和技术创新的目标主要是最大程度减少能源消耗和降低环境污染。该阶段的节能技术要素主要包括: 绿色材料和循环利用材料的应用、低碳与节能制造技术的实施, 以及智能化生产与自动化装配的有效结合, 从而降低制造过程中资源消耗和废弃物排放^[3]。图 4 展示了制造阶段节能减排技术要素的结构框架, 明确了各个技术要素在实践中的挑战。随着节能减排要求的不断提高, 机车设计和制造逐步向使用绿色材料和循环利用材料转变, 特别是机车辅助系统等关键部件, 已实现相关材料的广泛应用^[31]。

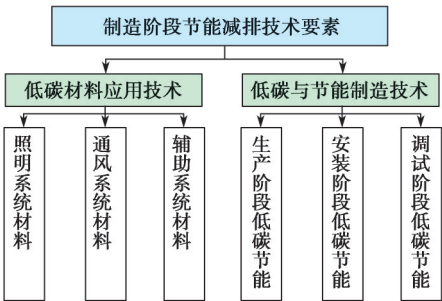


图 4 制造阶段节能减排技术要素结构树

Fig. 4 Structure tree of technology elements in the manufacturing stage for energy conservation and emission reduction

在机车照明系统中, 绿色材料应用尤为突出。例如, LED 照明技术以其高效、长寿命和低热量特性

成为首选^[32]。与传统卤钨灯和荧光灯相比，LED灯不仅能显著减少能耗，还能降低因发热导致的空调负荷，可提高整体能源利用效率。LED灯具由于不含汞等有害物质，在环保方面具备明显优势；同时通过对比LED灯具与荧光灯具的相对光谱测试结果，可知LED在发光效率方面具有优越性。除此之外，照明系统中还可大量采用可回收塑料和金属材料，这些材料在制造过程中具有较低的单位运量碳足迹，并在使用寿命结束后容易实现再利用。无毒涂料和无毒粘合剂的使用不仅减少了环境污染，还有效保护了人体健康^[22]。

在机车空调与通风系统中，环保材料同样备受重视。当前，空调系统正逐步采用氢氟烯烃（HFOs）及天然制冷剂（如氨、二氧化碳和丙烷），这类绿色制冷剂具有较低的全球变暖潜能值（GWP）和较高的热力学效率，可有效降低制冷系统对气候变化的影响^[33]。ASHRAE 34标准确立了制冷剂的安全分类体系，可用于评估制冷剂在应用中的安全性与适用效能。通风系统同时采用了生物基塑料和复合材料，这不仅降低了部件重量、提高了可回收性，而且减少了对化石燃料的依赖，从而实现了碳足迹的削减。此外，高效能的绝热材料（如气凝胶）的应用进一步提升了风机系统能效。

对于机车辅助系统而言，采用可再生材料和循环利用材料同样起着关键作用。高密度聚乙烯（HDPE）材料因其耐化学性、耐腐蚀性和耐磨性被广泛应用于冷却与给排水系统管路的制造，这不仅减轻了车辆总重，也使得管道能有效抵御各类化学介质的侵蚀^[34]。再生塑料材料的使用减少了对新原材料的需求，也减少了废弃物的产生。此外，不锈钢和聚四氟乙烯（PTFE）材料凭借优异的耐腐蚀性和强度，确保了管道系统的长期稳定运行；环氧树脂等材料被用于管道内部涂层来防止腐蚀和提升密封性能，延长系统使用寿命^[35]。总体而言，上述材料选择原则对机车辅助管路同样适用，绿色材料和循环利用材料的应用大幅提升了机车系统的能源效率和资源利用率，同时降低了环境污染风险。

随着铁路交通运输行业的快速发展，生产阶段的低碳与节能制造技术已成为实现可持续发展的关键手段。这些技术通过优化能源使用和减少排放，在提升生产效率和环境友好性方面发挥了显著作用。首先，智能化生产技术在制造阶段同样发挥了关键作用。自动化生产线的引入大大提高了生产效率，减少了人工操作。智能传感与控制装备的应用使得关键设备的能源消耗得到优化，高效能设备（如大型数控机床和重载机器人）的使用有效减少了材料损耗与资源浪费^[36]。其次，数字化制造与过程优化为实现低碳与节能提供了有力保障。设备联网和集成控制系统使得生产线能够实时监控运行状态，并自动调整运行参数以达到最

佳能源利用效率。自动程序管理、设备自动启停、工作台自动交换等自动化系统提升了生产效率，有效降低了能源浪费和停机时间。

当前绿色制造技术正由单一工艺优化向全流程数字化与低碳化融合发展。尽管轻量化材料与先进制造工艺已在部分机车产品中得到应用，但其成本控制与规模化推广仍面临挑战。此外，现有研究多关注制造阶段能耗降低，对材料全生命周期环境影响的系统评估仍不充分。因此，结合生命周期评价（LCA）方法开展绿色制造技术优化^[3]，将成为未来重要研究方向。

2.3 运用阶段节能减排技术要素

运用阶段在机车全生命周期节能减排体系中具有决定性作用，是直接影响机车实际能耗的决定性环节，其核心在于牵引控制与运行组织的协同优化。图5展示了运用阶段节能减排技术要素的结构框架，涵盖牵引优化控制、再生制动能量利用、车载设备节能和绿色低碳运行控制等方面。

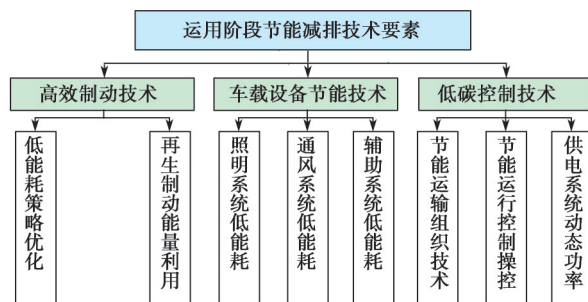


图5 运用阶段节能减排技术要素结构树

Fig. 5 Structural tree of technology elements in the operation stage for energy conservation and emission reduction

对铁路机车而言，运用阶段能耗降低的关键在于牵引-制动协同与再生制动能量的利用情况。在典型牵引任务中，通过对牵引级位、惰行区间及制动配比的协同优化，可有效减少因重复牵引和过度制动造成的能量损耗；同时，再生制动能量的实际回收情况受供电系统吸收能力约束，在受限回馈场景下需要结合运行组织与能量调度策略提升其利用水平^[37-39]。

绿色低碳运行控制通过优化运输组织模式与牵引运行策略，在降低系统能耗的同时，兼顾列车运行质量（如准点性、舒适度），实现节能与运营效能的协同优化。通过合理编排时刻表与区间运行密度，可减少停车与空驶带来的能量浪费。在速度曲线优化方面，改进的区域强化人工蜂群算法（RR-ABC）加快了收敛速度，并提升了算法跳出局部最优解的能力，使节能效果提升了3%~5%^[37,40]；粒子群与遗传算法结合的混合优化模型能够在能量最小化与运行时间最小化之间取得更优平衡^[41-42]。区间运行与制动控制协同优化，则在保证安全与准点的前提下，进一步降低了能耗^[38-39]。

供电系统的动态功率运行依赖于实时监测与双向

变流器的潮流优化, 通过内外双层迭代算法, 实现全网损耗的最小化^[43]; 在电气化铁路领域, 车网协同管理显著提高了牵引供电的可靠性与稳定性^[44]。以上技术要素协同作用, 使运用阶段总体能耗降低10%~20%, 再生能量利用率提升至20%, 并显著减少了温室气体及污染物排放。

总体而言, 运用阶段的节能技术已从基于经验的操纵优化向基于模型与数据驱动的智能控制方法发展。然而, 现有研究多集中于单列车或理想运行环境, 缺乏对多列车耦合、随机扰动及复杂调度条件的系统研究。此外, 各类优化算法虽在理论上具有良好效果, 但在实时性与工程可实现性方面仍存在一定局限。因此, 未来研究应从“单车优化”向“车网系统级协同优化”转变, 重点发展基于大数据与人工智能的实时优化控制方法, 以提升复杂运行环境下的节能效果与鲁棒性。

2.4 维修与报废阶段节能减排技术要素

在机车全寿命周期中, 维修与报废阶段的节能减排技术尤为关键, 因为其直接影响设备的运行能效、维护经济性及资源再生利用率。随着全球交通行业对环境保护与能源效率的关注日益提升, 铁路领域在这一阶段也积极引入新技术与新措施, 以降低能源消耗和碳排放^[8]。图6展示了维修与报废阶段节能减排技术要素的结构框架, 涉及健康管理与状态修技术、维修工艺以及废弃物的绿色处理等多个方面。

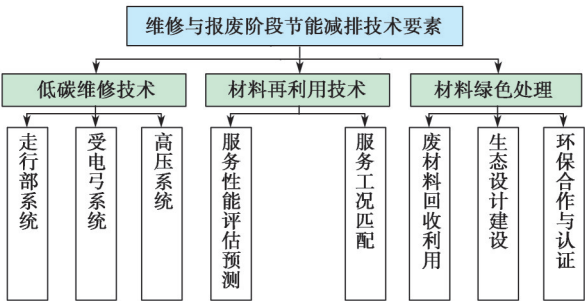


图6 维修与报废阶段节能减排技术要素结构树

Fig. 6 Structure tree of technology elements in the maintenance and scrapping stages for energy conservation and emission reduction

走行部的健康管理和状态修技术通过精确监测和实时数据分析, 降低了故障发生的频率, 延长了走行部的使用寿命^[45]。健康管理系统集成了自检测与辅助检测功能, 通过多系统协同, 实现对轮对状态的全面监控, 从而保障其最佳运行状态, 避免过度维修与不必要的能源消耗。在状态检测方面, 不同检测系统(温度传感器、振动监测系统和轨边声学检测系统等)都有特定的检测内容和周期, 如温度传感器实时监测轴承的温度变化, 对隐患及时发出预警。表1详细列出了自检测和辅助检测系统的检测项目、周期和内容,

确保能够及时发现潜在故障并进行处理^[46]。

表1 自检测系统和辅助检测系统

Table 1 Self-detection system and auxiliary detection system

系统分类	设备	层次	周期	检测内容
自检系统	IMS 晃动检测装置	动态	实时	失稳检测
	传感器	动态	实时	轴温检测
	TADS 轨旁声学检测系统	动态	每天	轴承故障
辅助检测系统	LY 轮对动态检测系统	动态	每次入库	几何尺寸 踏面状态
	轮辋轮辐探伤系统	定期	18 万 km	轮辋轮辐缺陷
	镟修机床	动态	(20~30) 万 km	踏面修型 尺寸检测
	LB 便携式轮对检测设备	临时	每次复核	尺寸检测

通过这些精确的检测技术, 铁路机车可以实现更高效的健康管理, 减少故障导致的意外停运和资源浪费^[4]。此外, 随着智能化和数据分析技术的发展, 运维决策日益依托于大数据分析 with 机器学习技术, 以支撑运营商制定更加精准有效的维护策略^[5]。在维修工艺方面, 轮对镟修是健康管理中的关键环节^[47]。不同铁路机车厂商如西门子、庞巴迪、阿尔斯通等, 通过高精度的镟修设备和优化算法, 可以精确计算出最优的镟修方案, 既保证质量安全, 又有效降低成本和能耗^[48]。镟修过程中的精密测量与数据分析, 可以保证轮对处于最佳的工作状态, 并减少对轨道的磨损和不必要的能源消耗^[49]。在报废阶段, 铁路机车的废弃物处理技术逐渐引起重视。各大机车制造商在设计阶段已开始考虑机车部件的可回收性, 通过模块化设计与可回收材料的应用, 有效实现废旧零部件的回收与再利用。通过先进的回收技术, 不仅减小了环境污染, 还提高了材料的再利用率^[50]。在高压系统、受电弓等关键部件的回收过程中, 精细化的拆解和处理技术确保了资源的最大化利用, 同时减少了废弃物的产生。

通过健康管理 with 状态修技术、精准维修工艺及废弃物绿色处理的协同应用, 显著提升了机车的使用效率, 减少了资源浪费, 降低了对生态环境的压力。健康管理 with 状态修技术通过实时监控和数据分析, 可准确预测部件的健康状况, 减少过度维修和不必要的停机, 提高了机车的经济性和安全性。

综上所述, 在铁路机车维修与报废阶段, 当前研究主要集中于故障诊断与部件再制造技术。虽然基于健康状态的预测性维护研究已取得一定进展, 但在多源数据融合与退化机理建模方面仍存在不足; 同时, 报废阶段资源回收利用技术尚缺乏统一标准与系统化评估方法。因此, 构建面向全生命周期的健康管理 with

资源循环利用体系,是实现机车绿色发展的关键方向之一。

3 结束语

铁路机车节能减排技术已从单一环节优化逐步发展为全寿命周期多阶段协同优化。设计、制造、运用及维修报废各阶段的技术要素相互耦合,共同决定机车全生命周期的能源利用效率与环境影响。尽管针对牵引系统高效化、能量回收及智能运维等方面的研究应用均取得了显著进展,但在多系统耦合优化、复杂工况适应性及工程应用推广方面仍存在一定不足。

未来研究应重点关注以下方向:一是推动新能源动力技术(如氢能与混合动力)的工程化应用,二是发展基于人工智能与数字孪生的智能运维与能量管理技术,三是构建面向全生命周期的碳排放评估与优化体系。另外,应统筹电力机车与内燃机车的差异化发展路径,在多能源协同框架下实现铁路运输系统的高效化、低碳化与智能化发展。

参考文献:

- [1] 樊运新,龙源,江大发,等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(1): 1-11.
FAN Yunxin, LONG Yuan, JIANG Dafa, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46(1): 1-11.
- [2] 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.
- [3] 伍赛特. 机车车辆制造技术发展研究及未来趋势展望[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(8): 114-118.
WU Saite. Research on the development of locomotive and rolling stock manufacturing technology and prospects for the future[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2021, 57(8): 114-118.
- [4] WANG P L, GOVERDE R M P. Multi-train trajectory optimization for energy efficiency and delay recovery on single-track railway lines[J]. Transportation research part B-methodological, 2017, 105: 340-361.
- [5] 冯晓云,黄德青,王青元,等. 轨道交通列车综合节能研究综述[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 22-34.
FENG Xiaoyun, HUANG Deqing, WANG Qingyuan, et al. Overview on comprehensive energy saving schemes for rail transit train operation system[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(2): 22-34.
- [6] 罗光兵,罗彦,严皓,等. 动车组轮对运行状态检测及健康管理系统设计[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(2): 22-25.
LUO Guangbing, LUO Yan, YAN Hao, et al. Operation state detection and health management system design for EMU wheelset[J]. Railway computer application, 2019, 28(2): 22-25.
- [7] 朱贺,齐胜,张悦斌. 城市轨道交通接触网状态检测及健康管理研究[J]. 中国设备工程, 2021(11): 180-181.
ZHU He, QI Sheng, ZHANG Yuebin. Research on the state detection and health management system of urban rail transit contact network[J]. China plant engineering, 2021(11): 180-181.
- [8] 陈闯,陈广泰,姜正,等. 快捷货运列车一体化智能运维监测平台研究[J]. 铁道机车与动车, 2021(1): 23-25.
CHEN Chuang, CHEN Guangtai, JIANG Zheng, et al. Research on an integrated intelligent operation and maintenance monitoring platform for fast freight trains[J]. Railway locomotive and motor car, 2021(1): 23-25.
- [9] 王浩. 日计划下机车动态运用与调整优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
WANG Hao. Research on dynamic locomotive operation and adjustment optimization under daily plan[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [10] 郭峰,张海军. 轨道交通电力机车核心部件智能制造新模式应用[J]. 中国高新技术, 2020(22): 108-110.
GUO Feng, ZHANG Haijun. Application of new mode of intelligent manufacturing for core components of rail transit electric locomotives[J]. China high and new technology, 2020(22): 108-110.
- [11] THOMA C, HAMMER W. Vectron:用于欧洲铁路的新一代机车[J]. 国外内燃机车, 2013(3): 9-22.
THOMA C, HAMMER W. Vectron: the new generation of trains for European railways[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2013(3): 9-22.
- [12] HUGHES M, 赵忠红. 法国下一代高速列车 TGV M[J]. 国外铁道机车与动车, 2021(4): 15-18.
HUGHES M, ZHAO Zhonghong, et al. France's next-generation high-speed train TGV M[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2021(4): 15-18.
- [13] 许红. 铁路电力工程节能减排有关技术措施的研究[J]. 铁路工程造价管理, 2012, 27(4): 18-23.
XU Hong. Research on related technical measures of energy saving and emission reduction in railway power engineering [J]. Railway engineering technology and economy, 2012, 27 (4): 18-23.
- [14] LUSTIG D, 宋俊峰. 氢燃料电池作为铁路机车替代能源的应用[J]. 国外铁道机车与动车, 2023(4): 14-16.
LUSTIG D, SONG Junfeng, et al. Application of hydrogen fuel cells as alternative energy for railway locomotives[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2023(4): 14-16.
- [15] CIRY B, 乔英忍. 阿尔斯通公司的PRIMA系列机车[J]. 国外内燃机车, 2008(2): 1-9.

- CIRY B, QIAO Yingren. PRIMA series locomotives of Alstom company[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2008(2): 1-9.
- [16] 李群湛, 王辉, 黄文勋, 等. 电气化铁路牵引变电所群贯通供电系统及其关键技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1064-1074.
- LI Qunzhan, WANG Hui, HUANG Wenxun, et al. Interconnected power supply system of traction substation group and its key technologies for the electrified railway[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(5): 1064-1074.
- [17] 邢慧珍. 交流牵引供电系统仿真模型及动态潮流计算[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- XING Huizhen. Simulation model and dynamic power flow calculation of AC traction power supply system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [18] 高雅, 刘卫国, 骆光照. 牵引机车用永磁同步电机断电-重投控制系统研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 100-107.
- GAO Ya, LIU Weiguang, LUO Guangzhao. Research of power down-rejoining on control system for permanent magnet synchronous motor used in traction engines[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(6): 100-107.
- [19] 徐博. 动车组牵引电机的故障预测与健康管技术的研究[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2022, 21(4): 65-69.
- XU Bo. Research on health management technology and fault prediction of EMU traction motor[J]. Journal of Shijiazhuang institute of railway technology, 2022, 21(4): 65-69.
- [20] 康兴东, 龚晓波, 赵建. 城市轨道交通车辆轻量化车体结构材料的研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(6): 177-180.
- KANG Xingdong, GONG Xiaobo, ZHAO Jian. Research and application of lightweight carbody structural material for urban rail transit vehicle[J]. Urban mass transit, 2020, 23(6): 177-180.
- [21] CHEN L, CHEN M W, CHEN Y T, et al. Modelling and control of a novel AT-fed co-phase traction power supply system for electrified railway[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 125: 106405.
- [22] 薛松柏, 王博, 张亮, 等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2813-2830.
- XUE Songbai, WANG Bo, ZHANG Liang, et al. Development of green welding technology in China during the past decade[J]. Materials reports, 2019, 33(17): 2813-2830.
- [23] 梁连杰, 童玉鹏, 金文涛, 等. 悬挂式空铁列车车体制造工艺研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(2): 24-27.
- LIANG Lianjie, TONG Yupeng, JIN Wentao, et al. Research on the manufacturing process of suspended sky rail train car body[J]. Rail transportation equipment and technology, 2020(2): 24-27.
- [24] 黄强吴. 转8A型转向架提速改进方案的研究[J]. 中国铁道科学, 1999(3): 3-12.
- HUANG Qiangwu. Research on improved speed scheme for Z8A bogie[J]. China railway science, 1999(3): 3-12.
- [25] 成思瑾, 刘堂红, 李文辉, 等. 风洞试验中不同厚度挡风墙合理长度的数值研究[J]. 中南大学学报(英文版), 2023, 30(4): 1388-1404.
- CHENG Sijin, LIU Tanghong, LI Wenhui, et al. Numerical study on reasonable lengths of wind barriers with different thicknesses in wind tunnel tests[J]. Journal of central south university, 2023, 30(4): 1388-1404.
- [26] 王岳宸, 余以正, 盖杰, 等. 高速列车流线型受电弓气动特性仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(1): 37-42.
- WANG Yuechen, YU Yizheng, GAI Jie, et al. Simulation analysis of aerodynamic characteristics of streamlined pantograph for high speed train[J]. Journal of Dalian jiaotong university, 2022, 43(1): 37-42.
- [27] 卓钺, 刘希从, 文思维, 等. 受电弓滑板用轻质高碳-石墨/铝复合材料[J]. 机车电传动, 2003(增刊1): 37-38.
- ZHUO Yue, LIU Xicong, WEN Siwei, et al. Lightweight high carbon-graphite/aluminum composites applied for pantograph contact strips[J]. Electric drive for locomotives, 2003(Suppl 1): 37-38.
- [28] 田春飞, 王靖, 张庆华, 等. 动车组受电弓预防性维修研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 60-63.
- TIAN Chunfei, WANG Jing, ZHANG Qinghua, et al. Research on preventive maintenance of EMU pantograph[J]. Railway locomotive & car, 2016, 36(1): 60-63.
- [29] 李丹. 动车组受电弓故障与处理技术分析[J]. 湖南铁路科技职业技术学院学报, 2019(1): 70-71.
- LI Dan. Analysis of pantograph fault and treatment technology of EMU[J]. Journal of Hunan railway science and technology vocational college, 2019(1): 70-71.
- [30] 史佳伟, 葛帅, 圣小珍. 受电弓舱对受电弓区域气动噪声的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 216-222.
- SHI Jiawei, GE Shuai, SHENG Xiaozhen. Effects of pantograph recess on aerodynamic noise in pantograph area[J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(23): 216-222.
- [31] 齐然. 新型环保制冷剂在轨道车辆空调中的应用探讨[J]. 轨道交通装备与技术, 2021(6): 26-29.
- QI Ran. Discussion on the application of new environmental-friendly refrigerants in the air conditioning of rail vehicles[J]. Rail transportation equipment and technology, 2021(6): 26-29.
- [32] 王保华, 靳尚宇, 汤钰鹏, 等. 新型列车智能LED照明控制系统的设计[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(3): 51-53.
- WANG Baohua, JIN Shangyu, TANG Yupeng, et al. Design of intelligent LED illumination control system for new subway train[J]. Urban mass transit, 2015, 18(3): 51-53.
- [33] 杨国志, 吕崇伟, 吴剑伟, 等. 机车空调系统的节能改造和智能化控制设计[J]. 科技资讯, 2021, 19(34): 43-46.
- YANG Guozhi, LYU Chongwei, WU Jianwei, et al. Energy

- saving transformation and intelligent control design of locomotive air conditioning system[J]. Science & technology information, 2021, 19(34): 43-46.
- [34] 牛宇锟. 城市轨道交通给排水系统节水节能措施[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 49-51.
- NIU Yukun. Water-saving and energy-saving measures for water supply and drainage system in urban rail transit[J]. Modern urban transit, 2022(8): 49-51.
- [35] 沈浦源. 高速列车项目给排水及卫生系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 208-209.
- SHEN Puyuan. Design of supply & drainage water and waste collection system for high speed EMU[J]. Mechanical engineering & automation, 2015(3): 208-209.
- [36] 袁立祥, 龙斌, 杨志伟, 等. 基于智能网络信息系统的车轮加工自动化生产线设计与应用[J]. 机械设计, 2019, 36(增刊1): 295-297.
- YUAN Lixiang, LONG Bin, YANG Zhiwei, et al. Design and application of wheel automatically processing production line based on intelligent network information system [J]. Journal of machine design, 2019, 36(Suppl 1): 295-297.
- [37] WANG X W, XIAO Z, CHEN M, et al. Energy-efficient speed profile optimization and sliding mode speed tracking for metros[J]. Energies, 2020, 13(22): 6093.
- [38] 葛学超, 王青元, 孙鹏飞, 等. 货运列车节能平稳运行优化操纵研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(4): 47-52.
- GE Xuechao, WANG Qingyuan, SUN Pengfei, et al. Study on optimized handling for energy-saving and smooth operation of freight train[J]. Railway locomotive & car, 2017, 37(4): 47-52.
- [39] ALBRECHT A, COLEMAN D, HOWLETT P, et al. Using simulation to assess the benefits of energy-efficient driving strategies[C]//The 9th International Heavy Haul Conference, Shanghai: 2009.
- [40] 韩冰. 基于改进遗传算法的货运列车节能操纵策略优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- HAN Bing. Research on optimization of energy-saving operation strategy of freight train based on improved genetic algorithm[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [41] 赵东升, 赵鹏, 姚向明, 等. 基于工况序列寻优的列车节能操纵策略优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(2): 157-165.
- ZHAO Dongsheng, ZHAO Peng, YAO Xiangming, et al. An energy-efficient train driving strategy based on regime sequences optimization[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2024, 24(2): 157-165.
- [42] 张勇. 列车节能优化操纵理论及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG Yong. Research on train energy-saving optimization operation and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [43] 张超, 李红波, 赵丽颖, 等. 城轨主动式牵引供电系统能量调度算法[J]. 机车电传动, 2022(3): 69-75.
- ZHANG Chao, LI Hongbo, ZHAO Liying, et al. Energy scheduling algorithm for urban rail active traction power supply system[J]. Electric drive for locomotives, 2022(3): 69-75.
- [44] 李红波, 丁荣军, 张超, 等. 城市轨道交通智慧牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2021(3): 1-8.
- LI Hongbo, DING Rongjun, ZHANG Chao, et al. Smart traction power grid of urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2021(3): 1-8.
- [45] 江灼坤, 宋冬利. 轨道交通健康管理系统关键技术研究综述[J]. 中国铁路, 2022(3): 16-22.
- JIANG Xinkun, SONG Dongli. Research review of key technologies of rail transit health management system[J]. Chinese railways, 2022(3): 16-22.
- [46] 陈艳鑫, 杨硕. 轨道交通车辆走行部故障诊断系统研究[J]. 内燃机与配件, 2020(7): 155-157.
- CHEN Yanxin, YANG Shuo. Research on the fault diagnosis system for the running gear of rail transit vehicles[J]. Internal combustion engine & parts, 2020(7): 155-157.
- [47] 王珍. 动车组整车轮对镟修优化决策模型的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- WANG Zhen. Study on the model of there-profiling strategy optimization about the whole wheelset wearing electric multiple unit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [48] 张卫华, 李权福, 宋冬利. 关于铁路机车车辆健康管理与健康状态修的思考[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 379-389.
- ZHANG Weihua, LI Quanfu, SONG Dongli. Thoughts on health management and condition-based maintenance of rolling stocks[J]. China mechanical engineering, 2021, 32(4): 379-389.
- [49] 许磊, 周志国, 刘永鹏, 等. 关于铁路车辆维修绿色低碳发展路径的思考[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2023, 13(4): 28-31.
- XU Lei, ZHOU Zhiguo, LIU Yongpeng, et al. Thoughts on the green and low-carbon development path of railway vehicle maintenance[J]. Railway energy saving & environmental protection & occupational safety and health, 2023, 13(4): 28-31.
- [50] 张建敏, 郭会生, 胡震. 轨道车辆回收利用技术与应用研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(6): 173-178.
- ZHANG Jianmin, GUO Huisheng, HU Zhen. Study on the rail vehicle recycling technologies and applications[J]. Rolling stock, 2023, 61(6): 173-178.

Review of technology elements for life-cycle energy conservation and emission reduction of railway locomotives

ZHU Dan¹, FU Xueguang¹, GAO Hongguang¹, LIU Jinglai¹, CHENG Yao², ZHANG Lichen¹, LIU Xia¹

(1. CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116000, China;

2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: With the ongoing advances of green and low-carbon development, research on energy conservation and emission reduction for railway locomotives has shifted from isolated energy consumption control toward collaborative life-cycle optimization across design, manufacturing, operation, maintenance and decommissioning. This paper systematically review technological progress in energy saving and emission reduction across all the stages. Key design technologies are analyzed, such as traction system efficiency improvements, regenerative braking energy recovery, structural lightweighting, and aerodynamic optimization. Development trends in green materials and low-carbon production processes for the manufacturing stage are summarized. Energy-saving strategies for operation based on optimal control and energy management are discussed. Health management and resource recycling techniques for maintenance and scrapping are summarized. Based on this review, this paper presents a comprehensive analysis of green manufacturing and energy consumption evaluation systems by examining policies, standards, and engineering practices in representative countries, and compares technological pathways in terms of their applicability and limitations. Meanwhile, multi-energy coordinated pathways for energy saving and emission reduction are further explored, considering differences between electric and diesel locomotives in power structures and application scenarios. Results indicate that, although technological improvements have been achieved in energy efficiency, challenges remain in multi-system collaborative optimization and adaptability to complex operating environments. Future research should emphasize intelligent operation and maintenance, new-energy power systems, and life-cycle carbon management to promote the development of locomotives toward higher efficiency, lower emissions, and greater intelligence.

Keywords: railway locomotive; energy conservation and emission reduction; life-cycle; traction drive; regenerative braking; energy management; green manufacturing; low-carbon technology