

# Green Maintenance Strategy for Metro Vehicles under Carbon Neutrality Goals

Yali Wang

Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

Against the backdrop of the deepening “dual carbon” strategy, subway vehicle maintenance, as a significant source of carbon emissions in rail transit operations, has become a crucial pathway for industry sustainable development. As a key link in ensuring the safe operation of the system, traditional maintenance practices face challenges such as high energy consumption, material waste, and improper waste disposal, which hinder the industry’s low-carbon transition. Therefore, this paper proposes relevant strategies for green subway vehicle maintenance under the carbon neutrality goal, based on the concept of green maintenance: technological innovation, process optimization, and management upgrades, to achieve synergistic improvements in energy efficiency, resource recycling, and carbon emission reduction during maintenance. It provides technical pathways and practical references for achieving carbon neutrality in the rail transit sector.

## Keywords

carbon neutrality goal; subway vehicles; green maintenance

## 碳中和目标下地铁车辆绿色维修策略

王雅莉

北京市地铁运营有限公司，中国·北京 100000

## 摘要

在“双碳”战略深入推进的背景下，地铁车辆维修作为轨道交通运营碳排放的重要来源，其绿色转型成为行业可持续发展的重要路径。地铁车辆维修作为保障系统安全运行的关键环节，传统模式中存在的能源高消耗、材料高损耗、废弃物处置不规范等问题，阻碍了行业低碳转型。因此，本文就绿色维修理念为基础，提出碳中和目标下地铁车辆绿色维修的相关策略：技术创新、流程优化与管理升级，实现维修过程中能源效率提升、资源循环利用与碳排放削减的协同统一。为轨道交通领域碳中和目标实现提供技术路径与实践参考。

## 关键词

碳中和目标；地铁车辆；绿色维修

## 1 引言

《交通领域碳达峰实施方案》明确提出要推动轨道交通运维绿色化，而地铁车辆维修作为运维核心环节，其碳排放强度直接影响行业双碳目标达成。因此，构建科学完善的绿色维修策略，对降低地铁系统碳足迹、提升资源利用效率具有重要现实意义。

## 2 地铁车辆绿色维修的核心内涵与发展价值

### 2.1 核心内涵界定

地铁车辆绿色维修是融合低碳理念、数字技术与循环经济思想的新型维修模式，其核心要义在于打破传统“故障修复”的被动思维，构建“预防为主、高效节能、循环

利用”的主动运维体系。从技术维度看，它涵盖低碳维修技术应用、绿色材料研发、能源结构优化等关键环节；从管理维度看，其强调以碳足迹量化为基础的精准决策，通过全流程碳排放管控实现环境效益与经济效益的平衡；从产业维度看，它推动维修环节与上下游产业链的协同减碳，形成从材料生产到废弃物回收的闭环管理。与传统维修模式相比，绿色维修呈现三大特征：其一，精准化，精准化是绿色维修区别于传统“经验型、计划型”维修的核心特征，其核心逻辑是通过数字化技术打破信息壁垒，实现“状态感知-数据分析-精准施策”的闭环管理，从根源上减少“过度维修”与“维修不足”导致的资源浪费；其二，低碳化，通过清洁能源替代与能效提升，降低维修过程能源消耗；其三，循环化，建立废旧部件再生利用体系，提高资源利用效率。

【作者简介】王雅莉（1983-），女，中国山西晋城人，硕士，高级工程师，从事地铁车辆维修技术研究。

## 2.2 多维发展价值

**环境价值：**直接削减维修环节碳排放，据南宁地铁实践数据，通过优化检修流程可减少 44% 以上的物料消耗与大量水资源浪费，而再生材料应用能进一步降低原材料生产阶段的隐含碳。同时，绿色维修减少化学试剂排放与固体废物污染，改善城市生态环境<sup>[1]</sup>。

**经济价值：**一方面通过延长检修周期、降低能源消耗直接削减运维成本，如南宁地铁推行“精益修”后年均节省物料成本超 20%；另一方面通过废旧部件再生利用创造二次价值，北京大兴机场线电子工场通过自主维修使设备使用寿命延长 30% 以上。

**产业价值：**倒逼维修技术升级与绿色产业链构建，推动传感器、数字孪生、再生材料等新兴技术在轨道交通领域的应用，同时带动上下游企业参与碳减排，提升行业整体绿色竞争力。

## 3 地铁车辆绿色维修的关键技术路径与应用实践

### 3.1 数字化监测与预测性维修技术

传统计划修模式存在“过度维修”与“维修不足”并存的问题，导致资源浪费与碳排放增加。数字化监测与预测性维修通过“状态感知-数据分析-精准决策”的闭环体系，实现维修时机与范围的最优匹配。

北京大兴机场线的实践颇具代表性，其创新性引入铁路系统成熟的供电安全检测监测 6C 系统，利用红外传感器、紫外探测与视频监控设备，实时采集接触网悬挂状态与电气参数。通过数据分析建立设备劣化模型，提前识别潜在故障并制定针对性维修计划，不仅降低了人工巡检的劳动强度，更减少了无效检修带来的能源消耗与碳排放。在车辆核心部件监测方面，南宁地铁通过大数据分析对 280 余项工程车检修项目进行风险等级评定，对低风险部件延长检修周期，实现检修资源的精准配置。

数字孪生技术的应用进一步提升了维修精准度，通过构建车辆三维数字模型，映射物理实体的运行状态与损耗规律，结合 AI 算法预测部件剩余寿命，使维修决策从“经验驱动”转向“数据驱动”，可减少 15%-25% 的维修工作量与相应碳排放。

### 3.2 绿色维修材料创新与应用

在再生材料应用领域，北京大兴机场线电子工场建立了完善的元器件维修与再生体系，对通信、信号、车辆等专业的废旧设备进行拆解、检测与修复，通过原理图绘制与软件编程实现停产设备的替代研制，使设备重复利用率提升至 70% 以上。在结构材料方面，行业内正推广废弃道砟再生混凝土技术，将旧道砟掺量提升至 40% 仍能满足强度要求，可节约 55% 的水泥用量，显著降低材料生产阶段的碳排放<sup>[2]</sup>。

高性能低碳材料研发则聚焦于延长使用寿命与降低施工能耗。纳米复合修复涂料通过二氧化硅、石墨烯等纳米颗

粒增强韧性，使道砟板使用寿命延长至传统材料的 1.5 倍；低温固化树脂技术将施工能耗降低 40%，同时提升耐候性 80% 以上。这些材料的应用从源头减少了维修频率与资源消耗，实现全生命周期碳减排。

### 3.3 精益化维修流程与能源优化

流程再造与能源结构优化是降低维修过程直接碳排放的关键手段。南宁地铁推行的“精益修”模式为行业提供了范本，其以部件故障严重程度、影响范围、发生概率为评估指标，建立风险等级评定体系，在保障安全的前提下优化检修范围与周期。通过取消洗车机周检、优化设备功能测试流程，每年节省水耗 831.6 立方米，同时减少了设备运行的电力消耗。

能源结构优化则聚焦于清洁能源替代与能效提升。在维修基地建设中，太阳能光伏板的普及为检修设备提供绿色电力；在现场作业中，电动检修工具逐步替代传统燃油设备，减少尾气排放。智能能源管理系统的应用实现了能耗的实时监控与优化，通过调整设备运行参数降低待机能耗，可使维修基地总能耗下降 10%-15%。

### 3.4 废旧部件回收与循环利用体系

建立闭环式循环利用体系是实现维修环节资源高效利用的核心，需涵盖回收、拆解、检测、再生四个关键环节。北京大兴机场线电子工场形成了专业化的电子设备再生链条，技术人员通过精准检测识别可修复部件，采用芯片级维修技术恢复设备功能，使部分停产设备重新投入使用，这种模式不仅降低了对新设备的需求，更减少了电子废弃物带来的环境压力。

对于无法修复的废旧部件，资源化处理技术实现了材料再生。废旧轨道钢通过磁选、破碎与热压成型，再生骨料性能可达新料的 80% 以上；废橡胶轮胎制成的轨道填缝料，其抗变形能力是传统沥青材料的 2 倍，同时降低 40% 的养护成本。这些技术的应用使维修废弃物资源化率从传统的不足 30% 提升至 60% 以上，显著减少了天然资源开采与废弃物填埋带来的碳排放。

## 4 地铁车辆绿色维修推广面临的挑战

### 4.1 技术与成本的双重约束

部分绿色维修技术仍处于研发或试点阶段，尚未形成规模化应用能力。数字孪生、AI 预测等技术需要高额的前期投入，而中小企业难以承担软硬件采购与人才培养成本。再生材料的性能稳定性仍需提升，如再生混凝土的抗渗性与耐久性较新料存在差距，限制了其在关键结构维修中的应用。从成本角度看，低碳材料价格普遍高于传统材料，如石墨烯改性沥青的单价是普通沥青的 1.5 倍，尽管全生命周期效益显著，但短期内仍难以被市场广泛接受。

### 4.2 标准体系与评价机制缺失

目前我国尚未建立统一的地铁车辆绿色维修标准体系，维修流程、绿色材料选用、碳足迹核算等缺乏明确规范。

碳足迹量化方法不统一导致不同企业的减排效果难以对比,如部分企业仅统计维修过程的直接碳排放,而忽略了材料生产、运输等间接排放。评价指标的缺失也使绿色维修的效益难以量化呈现,影响企业的投入意愿。

### 4.3 产业链协同不足

绿色维修的实施需要设计、制造、维修、回收等多环节协同,但当前上下游企业存在“各自为战”的问题。车辆设计阶段未充分考虑维修便利性与可回收性,导致部分部件拆解困难;回收企业与维修企业缺乏信息对接,废旧部件回收效率低下。此外,再生材料的市场流通机制不完善,缺乏统一的质量认证与溯源体系,限制了循环利用规模的扩大。

## 5 碳中和目标下地铁车辆绿色维修策略

### 5.1 技术革新:以低碳技术降低排放强度

首先是构建设备全生命周期管理(ELM)模块,整合采购合同、安装记录等信息建立数字档案,通过振动传感器、温度传感器等采集轴承温度、牵引电流等运行数据,实时更新设备状态。采用 Weibull 分布与机器学习算法构建寿命预测模型,精准预测设备剩余使用寿命(RUL),实现“状态修”替代“周期修”。天津地铁通过该技术实现定修周期由15万公里延长至20万公里,减少非必要检修成本10%以上。

其次是优先采用环保型与再生材料,建立“低碳耗材名录”。机械部件维修选用玄武岩纤维增强混凝土,其抗拉强度达普通钢筋混凝土的1.3倍,抗碱骨料反应能力提升50%;电气系统维护采用可降解生物基养护剂,实现维修后无残留污染;制动系统升级为玄武岩基耐磨涂层,磨损率降低至传统钢轨的0.3,延长换轨周期至15年。

最后淘汰高能耗老旧维修设备,推广电动化、轻量化装备。架车机、转向架检修平台等采用变频节能技术,降低待机能耗30%;引入低温固化树脂技术,减少施工能耗至普通热固性树脂的40%;维修车间加装光伏发电系统,天津地铁已实现场段光伏年均发电量5710万千瓦时,替代传统电力消耗。

### 5.2 流程再造:以智能管理提升资源效率

首先需要维修流程数字化重构;搭建运维管理系统(OMS),通过流程自动化(BPA)实现“需求发起-工单分配-执行反馈-验收闭环”全流程数字化。采用遗传算法优化工单分配,基于“设备位置、故障类型、人员技能”三要素匹配最优资源,如信号系统故障自动调度“熟悉该型号+距离最近”的运维人员,缩短响应时间30%以上。应用RPA机器人处理数据录入、报表生成等重复性劳动,减少人工操作能耗。

其次是废旧材料循环利用体系建设;建立“回收-检测-再生-复用”闭环机制,在维修车间设置专用回收区域,

对废旧钢轨、制动闸瓦等进行分类处理。采用磁选与热压成型技术构建再生系统,使废旧轨道材料再生骨料性能达标准的80%以上;开发废橡胶轮胎改性填缝料,其抗变形能力较沥青填缝料高2倍,减少养护成本40%。青岛地铁通过该体系使零部件再生利用率提升至35%,年减少碳排放1200吨。

最后检修周期动态优化;开展“延修延寿”专项研究,结合车辆实际运行状态与材料性能数据,科学调整检修周期。参考天津地铁经验,在保障安全前提下逐步实现列检周期向八日检过渡,架修周期延长至80万公里,通过全寿命周期“修程再造”降低碳排放。对接近设计寿命的车辆进行性能评估,符合标准的实施延寿改造,减少报废车辆产生的资源浪费。

### 5.3 管理升级:以制度保障强化实施效果

首先构建碳排放核算与评估体系;基于LCA方法构建维修碳足迹评估模型,明确直接与间接排放计算标准,建立“设备-作业-线路”三级核算体系。定期开展碳排放审计,识别高排放环节,设定分阶段减排目标。引入敏感性分析方法,重点监测维修模式、材料类型等关键因素对排放的影响程度。

其次完善绿色维修标准与激励机制;制定《地铁车辆绿色维修技术规范》,明确预测性维护实施要求、低碳材料技术指标与废旧材料回收比例标准。建立“减排积分”制度,对采用绿色技术的维修团队给予奖励;将维修碳排放指标纳入企业绩效考核,与运维经费分配挂钩<sup>[1]</sup>。

最后跨主体协同创新平台搭建;推动政府、企业、科研机构三方合作,建立绿色维修技术创新联盟。政府提供资金支持低碳技术研发,企业开展试点应用,科研机构攻关再生材料、智能监测等关键技术。中车四方股份已联合高校研发智能列车感知监控系统,实现“实-数”列车数据实时映射,为全寿命周期维修提供技术支撑。

## 6 结语

综上所述;地铁车辆绿色维修是轨道交通领域实现碳中和目标的重要路径,其核心在于通过技术革新、流程再造与管理升级,构建“状态可感知、决策可量化、排放可控制”的维修体系。传统维修模式向绿色化转型,不仅能降低碳排放与运维成本,更能提升设备可靠性与资源利用效率,为城市轨道交通可持续发展提供支撑。

### 参考文献

- [1] 韩亮.新型自动化技术在地铁设备维修中的协同集成研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(06):114-116.
- [2] 陆睿睿.南京地铁运营设备维修管理改进研究[D].贵州大学,2025.
- [3] 薛如俊.地铁设备管理与维修技术分析[J].建筑机械,2025,(03):45-49.