

新能源机车推广对铁路节能减排的作用分析

李红光

安阳钢铁股份有限公司 运输作业部机修作业区 河南 安阳 455004

摘要:在“双碳”战略背景下,传统内燃机车高油耗、高排放问题制约铁路绿色转型。本文以纯电池、油电混动、氢燃料电池三类新能源机车为研究对象,从化石能源替代、能量回收利用、大气污染物削减、线路低碳改造四个维度剖析节能减排作用机制。结合多场景运营数据,量化测算新能源机车节油、减碳、降污效益,梳理基建配套不足、全周期成本偏高、低温工况稳定性差等现实阻碍,提出设施配套完善、技术迭代升级、政策财税激励等对策,为铁路系统替换老旧内燃机车、构建低碳运输体系提供量化依据与实操路径。

关键词:新能源机车;铁路运输;节能减排;碳排放;能量回收

引言:铁路是大宗货物低碳运输骨干,但全国近万台内燃机车(据国家铁路局统计)长期消耗柴油,排放大量二氧化碳与氮氧化物,非电气化支线、工矿专用线污染管控压力突出。传统电气化改造受地形与投资约束难以全面覆盖,新能源机车凭借无接触网、能量高效回收、多场景适配优势,成为牵引动力低碳转型的关键装备。本文基于行业运营数据,系统拆解新能源机车节能减碳机理,测算环保效益,识别推广制约因素并提出优化方案,为铁路碳减排提供参考。

1 新能源机车的主要类型与技术节能原理

1.1 新能源机车的分类及适用场景

现阶段国内新能源机车主要分为三类。第一类为油电混合动力机车,搭载柴油发电机组与磷酸铁锂储能电池,调车启停及低速工况优先电池驱动,重载爬坡时油电协同,适用于机务段调车、短途支线货运,是存量内燃机车改造的主流方案。第二类为纯电动电池机车,完全依靠大容量电池供电,制动动能全部回收,零尾气排放,多用于港口、钢厂、矿区等封闭专用线,单台年减排二氧化碳超800吨。第三类为氢燃料电池机车,通过氢氧电化学反应输出电能,产物仅为水,续航可达500公里,适配长距离无网支线和高原低温线路,目前处于小规模试点,累计运行超80万公里。三类机车均搭载智能能量管理系统,分机型表述,纯电65%~75%,氢能50%~60%,远超内燃机车怠速工况下不足30%的燃烧效率,从动力源头奠定了显著节能基础。

1.2 新能源机车的核心节能技术机理

新能源机车节能优势源于四项核心技术协同。第一是制动动能回收储能技术,制动时牵引电机反转发电,将惯性动能存储至电池,启停频繁场景中可回收25%~45%运行能耗,替代传统机械刹车的热能损耗。第二是负荷智

能分配调控技术,油电混动机车根据牵引重量、坡道、车速自动切换动力模式,消除怠速空烧问题,实测节油率36%~45%。第三是轻量化低损耗设计,采用高强度轻量化合金和低滚动阻力轮对,氢能与纯电机车取消了复杂燃油供给系统和尾气后处理组件,机械损耗进一步降低^[1]。第四是清洁能源替代,纯电机车和氢能机车运行阶段不消耗柴油,以绿电绿氢替代化石燃料,从源头切断碳排放与污染物产生路径,为近零排放提供根本保障。

2 新能源机车对节能减排的作用机制与效应

2.1 化石能源替代效应

新能源机车对柴油消费的深度替代是最直接的节能效应。内燃机车单位万吨公里柴油消耗约120~160千克,调车机车油耗更高,单台年消耗柴油最高达260吨。混动机车同等工况节油率约45%;纯电池机车和氢能机车完全替代柴油,实现化石燃料零消耗。若全国1万台内燃机车替换为新能源车型,年均可减少柴油消耗超200万吨,大幅降低铁路石油依赖度。从运营成本看,纯电机车能耗成本仅为内燃机车的20%,混动机车燃料成本下降50%以上,同时减少柴油储运和加注环节能耗,形成全链条节约效应,进一步优化铁路系统能源消费结构。

2.2 碳排放削减效应

新能源机车碳排放削减分为直接排放与间接排放两个层面。直接排放方面,混动机车氮氧化物减排45%、一氧化碳减排83%、碳氢化物减排73%;纯电和氢能机车运行阶段无任何温室气体排放。全生命周期碳足迹核算显示,以30年服役周期测算,纯电池机车碳足迹较内燃机车降低约94%,混动机车降低约62%,单台纯电机车年均减排二氧化碳约700~800吨,按30年服役周期计算,全周期累计减碳超2万吨。间接排放方面,沿线光伏充电站和分布式储能逐步普及,机车用电正由火电转向绿电,上

游碳排放持续走低。氢能机车可利用风光制绿氢，构建“风光发电—电解制氢—铁路运输”的零碳闭环，弥补传统电气化铁路依赖火电的短板^[2]。

2.3 大气污染物削减效应

内燃机车尾气含氮氧化物、颗粒物、挥发性有机物等，调车作业区和城镇沿线污染扰民问题突出。老旧DF系列机车每万公里氮氧化物排放高达280公斤，颗粒物排放超标14公斤，噪声峰值超90分贝。混动机车通过电池承担低负荷运行，污染物总量削减45%~83%；纯电和氢能机车实现零尾气排放，从源头消除气态污染物和颗粒物。同时，新能源机车运行噪声降至58~70分贝，降噪约80%，大幅降低沿线噪声污染，减少声屏障等降噪工程投入。在港口、钢厂、城市近郊专用线推广后，可有效缓解工业区域大气复合污染，降低铁路沿线大气治理成本，减少尾气引发的植被损伤和居民健康损害等隐性成本，实现运输效益与生态保护协同发展。

2.4 线路低碳化改造的间接节能效应

传统电气化改造需架设接触网和牵引变电所，山地和短途支线单公里投资超千万元，低运量支线缺乏改造经济价值，长期依赖高排放内燃机车。新能源机车无需接触网，仅配套充电或加氢站点即可运营，大幅降低非电气化线路低碳改造门槛，快速补齐无网线路减排短板。依托新能源机车，矿区、工业园区、港口专用线无需大规模土建改造即可完成低碳升级，有效扩大绿色运输覆盖范围。同时，机车配套充电站可与沿线光伏、储能协同建设，形成路域分布式清洁能源系统，实现清洁能源就地生产消纳。这种“以车带网”的低碳模式，为电气化改造经济性不足的线路提供了切实可行的绿色转型路径。

3 新能源机车推广面临的制约因素

3.1 配套能源基础设施建设滞后

基础设施不足是制约新能源机车规模化推广的首要障碍，纯电机车沿线快充站和换电站布局严重不足，多数支线和工矿专用线尚无专用充电场地，单次充电耗时15~30分钟，干扰运输班次调度。氢能机车加氢站点极为稀缺，全国仅少数干线试点项目配套加氢设施，氢气储运和加注标准尚不完善，远距离续航补给无法保障。现有机务段按内燃机车标准建设，缺少电池检修和氢安全防护专用工位，场站改造需大额投资，地方铁路和中小企业资金压力大^[3]。沿线光伏储能配套建设滞后，大量充电站依赖火电，上游能源清洁化转型速度与机车推广节奏不匹配，削弱了全生命周期环保效益。

3.2 购置成本与全生命周期经济性压力

新能源机车采购价格显著高于同功率内燃机车，纯电机车购置成本高出1倍以上，氢能机车核心部件进口依赖度高，设备溢价明显。尽管运行能耗和维护费用更低，但企业短期现金流压力大，中小铁路和工矿企业替换意愿不足。动力电池和燃料电池使用寿命有限，约8~10年需整体更换，更换成本占新车采购价40%。氢能机车绿氢制备和储运成本居高不下，长周期经济性优势被削弱。当前碳交易和补贴政策覆盖有限，缺少长效财税激励机制，难以对冲前期高额投入，成为制约企业主动替换老旧内燃机车的关键经济因素。

3.3 复杂工况下的技术适配性不足

新能源机车在极端环境下的适应性存在短板。低温环境动力电池容量衰减明显，续航缩短30%以上；氢能机车在零下20℃以下储氢系统和电堆效率下降，高原缺氧条件下（空气含氧量下降导致电堆反应速率受限）动力输出不稳定，制约高寒高海拔线路推广。重载长坡道工况电池大功率放电发热明显，连续运行时长受限。国内新能源机车谱系化程度不足，缺少适配重载干线、高寒高原、短途调车等场景的细分车型，统一技术标准缺失，不同厂商设备无法通用互换，运维成本提升。智能能量管理算法针对长大坡道和连续启停场景优化不充分，实际动能回收效率未达理论设计值。

3.4 运营管理体系与专业人才缺口

现有机务、调度、检修人员长期适应内燃机车运维，缺少动力电池、氢燃料电池和智能储能系统的专业操作与故障处置能力。机务段尚未建立新能源机车专项运维规程，电池安全检测、氢气泄漏防护、废旧电池回收流程不完善，存在安全管理漏洞。调度体系未结合充电和加氢时间优化运输组织，导致运力闲置和班次延误。废旧电池回收产业链不完善，拆解、梯次利用和资源化回收机制尚未健全，退役电池处置易产生二次环保风险，部分抵消运行阶段减排收益，成为全生命周期绿色属性验证中不可忽视的环节。

4 加快推进新能源机车推广的对策建议

4.1 统筹布局配套能源基础设施

干线枢纽机务段应配套大功率快充和换电站，保障高频运用需求；矿区、港口等封闭专用线可建设分布式光伏储能一体化充电站，实现绿电就地供应；高原长距离支线应试点布局标准化加氢站，同步统一加氢设备和储氢安全的国家标准。推动铁路沿线闲置场地开发光伏电站，实现充电站绿电直供。同步改造现有机务段检修车间，增设电池检测和氢安全防护专用工位。建立区域能源共享调度平台，推动充电和加氢设施跨企业共用，降低单家企业基建

投入,形成高效集约的基础设施网络^[4]。

4.2 完善财税激励与市场机制

政策工具的综合运用是降低企业替换成本的关键路径。应落实交通装备更新专项补贴政策,按照机车功率等级和减排效益分级发放购置补贴,重点向地方支线和工矿企业的老旧内燃机车替换项目倾斜。将新能源机车运行产生的碳减排量纳入全国碳市场交易体系,使铁路运营企业能够将减碳收益对冲设备运维和电池更换成本。推行电池租赁和车电分离等商业模式,有效降低初期购车门槛;出台绿氢生产和储运的税收减免政策,稳步降低氢能机车的运营成本。同步建立老旧内燃机车强制淘汰机制,对高排放老旧车型设置限行区域和时间表,倒逼企业加快新能源替换进度,形成政策驱动与市场牵引的合力。

4.3 加速细分车型技术迭代

技术突破是提升新能源机车推广可行性的根本保障。应推动装备制造企业研发谱系化新能源机车产品,针对高寒、重载、短途调车等不同场景打造专用车型,优化低温电池预热和氢电堆保温系统,提升极端环境下的续航能力与动力稳定性。升级智能能量管理算法,结合线路坡度、车流密度和启停频率动态优化动能回收策略,力争使实际动能回收效率较当前提升10~15个百分点。加快统一行业电池标准、充电接口规格和数据通信协议,实现不同厂商设备的通用互换,降低备件储备与运维成本。加强电池轻量化和长寿命材料的研发投入,延长储能系统服役周期,减少更换频次;同步完善废旧电池梯次利用和无害化回收产业链,消除二次污染隐患,保障全生命周期的环境友好性。

4.4 重构运维体系与人才培养机制

组织能力建设是新能源机车长期稳定运行的软性支撑。应制定新能源机车专项检修和安全管理的行为规

范,明确电池巡检、氢气安全防护和退役电池回收的全流程操作标准。开展分层次的人才培训,面向调度人员、机车司机和检修人员开设动力电池和氢燃料电池实操课程,建立持证上岗制度,填补专业能力缺口。优化运输调度组织,在运行图编制中预留充电和加氢缓冲时段,结合储能峰谷电价安排机车补能,兼顾运力效率与节能收益。组建路企联合技术服务团队,为中小铁路企业提供设备运维和故障处置的技术支持,解决基层专业技术力量薄弱的问题,保障新能源机车长期稳定运行,持续释放节能减排的综合效益。

结束语

新能源机车依靠化石能源替代、制动动能回收、清洁能源补给三重技术优势,可同步实现柴油消耗降低、温室气体减排、大气污染物削减,还能以较低投资完成无网支线铁路的低碳升级,是铁路交通实现“双碳”目标的核心装备。通过统筹建设路域清洁能源配套设施、完善财税碳市场激励机制、推进细分车型技术迭代、重构专业化运维管理体系,能够系统破解规模化推广的障碍。持续扩大新能源机车应用规模,将全面优化铁路能源消费结构,持续降低铁路运输碳强度,为全国交通领域绿色低碳转型提供可复制、可推广的铁路解决方案。

参考文献

- [1]杨弘毅.铁路行业碳达峰路径的预测研究[J].铁路工程技术与经济,2023,38(4):45-51.
- [2]仝雷.新能源调车机车方案设计与成本分析[J].铁道机车与动车,2022(9):5-8,32.
- [3]刘永刚,程建峰,孙传军,等.新能源与电气化/非电气化铁路融合技术路径研究[J].交通节能与环保,2025,21(6):276-280.
- [4]程建峰,刘永刚,孙传军,等.新能源驱动的轨道交通装备发展路径分析[J].科技和产业,2025,25(17):44-51.