

低碳背景下的绿色电气化公路技术分析

张金辉, 马高波

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 在全球碳中和战略背景下, 探寻公路货运领域传统柴油货车污染严重、纯电动重卡续航不足的解决途径, 在降低碳排放的同时提升能源的使用效率。提出可再生能源发电、智能接触网供电与双源动力货车驱动的绿色电气化公路技术体系。该体系通过4大核心子系统进行协同工作: 发电系统采用公路沿线的风光储一体化电站; 供电系统通过钢结构桁架在公路外侧车道边搭设接触网支架; 货车通过受电弓系统实现动态取电; 车辆系统集成能量管理模块和电机驱动模块。构建“发—输—用”闭环清洁能源供给链, 支撑公路运输中长途货运的电力化转型。该技术实现了中长途货运的全程电力驱动, 建立了“可再生能源发电—智能接触网供电—车辆用能”的高效闭环系统, 为公路货运提供了低碳化解决方案。

关键词: 绿色电气化公路; 碳中和; 双源动力货车; 接触网供电; 可再生能源

中图分类号: U417; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0040-04

Technology Analysis of Green Electrified Highway under Low-Carbon Background

ZHANG Jinhui, MA Gaobo

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Under the global carbon neutrality strategy, the solutions to the serious pollution caused by traditional diesel trucks and the insufficient range of pure electric heavy-duty trucks in the field of road freight transportation are explored to reduce carbon emissions while improving energy utilization efficiency. A green electrified highway technology system integrating the renewable energy generation, intelligent power supply networks and dual-source electric trucks is proposed. This system works in coordination through four core subsystems, which are that the power generation system adopts the integrated wind-solar-storage power stations along the highway, the power supply system sets up contact network supports along the outer lane of the highway through steel structure trusses, the truck achieves dynamic power supply through the pantograph system, and the vehicle system integrates an energy management module and a motor drive module. A closed-loop clean energy supply chain of "power generation - power transmission - power consumption" is built to support the electrification transformation of medium and long-distance freight transportation on highways. This technology can achieve full process electric energy drive for the medium and long-distance freight transportation. An efficient closed-loop system for "renewable energy power generation - smart catenary power supply - vehicle energy use" is established, which provides a low-carbon solution for highway freight transportation.

Keywords: green electrified highway; carbon neutrality; dual-source electric trucks; catenary power supply; renewable energy

0 引言

当前我国的碳中和战略正有条不紊地推进。公路交通运输既是传统运输模式的重要组成部分,也是大气污染排放的重要来源。本文提出的绿色电气化公路技术,将可再生能源发电、智能接触网供电与双源动力货车驱动理念有机结合,形成“发—输—

用”闭环系统。绿色电气化公路技术,可以降低公路长距离货运模式的物流成本,减少碳排放,为公路交通领域的碳中和目标实现提供助力。

公路货运以传统柴油货车为主要的运输工具。近年来,为解决柴油货车带来的大气污染等问题,纯电动重卡的使用逐渐增多,公路沿线也出现不少纯电动重卡的换电站和充电站。受到电池能量密度及耐久性的限制,纯电动重卡仍存在续航里程不足、全生命周期成本高的现实问题。

目前我国已出现电气化公路的试验路段。试验

收稿日期: 2025-08-24

作者简介: 张金辉(1987—),男,硕士,高级工程师,从事道路
交通专业规划设计及研究工作。

路段采用的技术路径相对单一,主要目的是验证以接触网供电驱动货车的可行性,对供电能否融合可再生能源、低温工况下接触网覆冰运行的适应性及供电连续性的保障措施等,尚未进行系统性的探索^[1-2]。

本文通过对电气化公路技术的多方面优化,构建兼具“能源清洁化、供电连续化、车辆智能化”特点的技术体系,有效解决了公路货运低碳转型过程中存在的问题。

1 传统公路交通运输工具分析

本文对传统柴油货车和纯电动重卡的运输方式特点进行分析。

1.1 传统柴油货车运输

在传统公路运输系统中,燃油汽车造成的空气污染严重,碳排放量大。第二次全国污染源普查工作调查数据显示,截至2017年底,由机动车污染源产生的氮氧化物和挥发性有机物排放量,分别占全国大气污染物排放总量的33.34%和19.29%^[3]。

根据《中国移动源环境管理年报(2024)》,移动源已经成为大气污染排放的重要来源。其中,汽油车一氧化碳和碳氢化合物的排放量分别占汽车排放量的84.9%和83.5%,柴油车氮氧化物和细颗粒物的排放量分别占汽车排放量的87.8%和99%以上^[4-5]。

燃油汽车的经济性劣势及技术瓶颈相对突出。柴油货车的燃料成本占物流总成本的30%~40%,且油价波动加剧了运营风险。燃油发动机的热效率上限约为50%,能效提升空间有限。

1.2 纯电动重卡运输

现行纯电动重卡按补能模式可分为传导充电式与换电式2类,受当前动力电池能量密度(磷酸铁锂电池≤160 Wh/kg)的限制,电池的续航里程受限。例

如,载重49 t级纯电动重卡须搭载≥350 kWh的电池组,这导致其整备质量增加18%~22%(相较于同级柴油车)。据行业统计数据显示,2023年主流6×4电动牵引车的续航里程集中于280~350 km,难以满足日均600 km以上的干线物流需求,与重卡中长途运输的属性存在结构性矛盾。

根据宁德时代(CATL)2023年第四季度的财报数据,由于动力电池成本占整车制造成本的42.7%^[6],纯电动重卡的购置成本比柴油车高出55%~82%(以解放J6P 6×4牵引车为基准)。尽管纯电动重卡在运营阶段的能耗成本降低了37.6%(按0.6元/kWh电价测算),但电池组在8年周期内需更换1.2次(循环寿命为2 000次)。这导致纯电动重卡全生命周期总拥有成本(TCO)仍比柴油车高出14.3%。

锂离子电池在-20℃低温工况下存在显著的容量衰减,放电容量降至常温状态的68.5%,充电效率降低至81.3%,驱动系统能耗增加22.7%,电池加热系统额外消耗15%~20%电量,进一步压缩了电池的有效续航里程^[7-8]。

2 绿色电气化公路的技术实现

鉴于常规的公路运输、纯电动重卡运输、电气化铁路运输等陆上运输方式的局限性,本文提出绿色电气化公路的技术实现路径。

绿色电气化公路系统如图1所示,由发电系统、供电系统、受电弓系统和车辆系统四维技术架构组成。发电系统为绿色电气化公路提供电能来源;供电系统将发电系统产生的电能变压为牵引电,并输送至绿色电气化公路的接触网;绿色电气化公路的电气化货车通过受电弓系统,将接触网的电能输送给车辆电控系统;车辆系统控制电气化货车行驶。

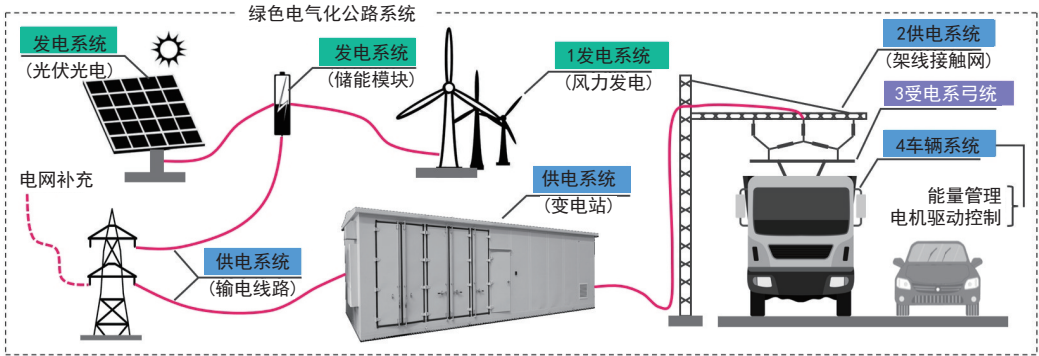


图1 绿色电气化公路技术系统示意图

2.1 发电系统

发电系统如图2所示,由新能源发电站及配

备的储能模块构成。在电气化公路(拟改造为绿色电气化公路的现状公路)沿线建设新能源

发电站,并利用风、光等可再生能源发电,如风力

发电、光伏发电。

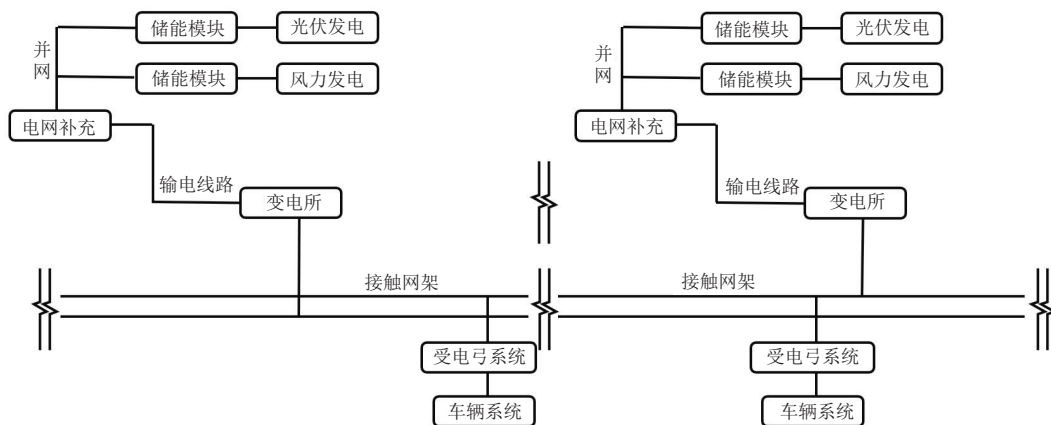


图2 绿色电气化公路技术构架关系示意图

新能源发电站同步配备储能模块,储能模块可以储存富余的绿电,用以解决弃风现象、日照不足的问题,消除绿电的随机波动,提高电能输出质量,并能参与调峰调频。

2.2 供电系统

供电系统由输电线路、变电箱和接触网架构成。输电线路连接发电系统与变电箱,将发电系统产生的绿电输送至公路沿线的变电箱。变电箱将发电系统产生的绿电进行变压调节,使高压绿电转变为适合电气化货车使用的牵引电^[9]。

接触网支架设置在公路的外侧车道边,即公路土路肩外侧,可通过钢结构桁架进行搭设,接触网安装在接触网支架上,并悬挑于公路外侧车道的正上方,经过变电箱转变的牵引电与接触网相通。供电系统为绿色电气化公路提供全程电动力来源,同时起到保护、测量、控制电气设备、提高供电质量等作用^[10]。当电气化货车的新能源电能供给不足时,可以采用电网补充电力。

2.3 受电弓系统

受电弓系统安装于电气化货车驾驶舱的顶部。当电气化货车行驶于公路的外侧车道时,受电弓可通过与接触网的接触,将牵引电能传输至电气化货车。电气化货车在车辆系统的指挥下,以牵引电驱动车辆行驶。此外,牵引电还可供车辆自备的电池充电。

受电弓的升起与落下可控,车辆在无接触网的路段行驶时可将受电弓降下,实现更好的通过性和更低的风阻;车辆需要电能补给时,可将受电弓升起并与接触网进行接触,通过接触获得牵引电。

2.4 车辆系统

车辆系统装备在电气化货车内部,由能量管理、电机驱动控制等模块构成,具有实现车辆动力分配、功率限制、充电控制和高压绝缘等功能。

能量管理模块包括直流供电线路、逆变装置和车载蓄电池等,用于监测、控制和优化车辆的能量流动和能源消耗,监测能源设备的运行状态、能源消耗情况和环境条件,从而实现对电气化货车能源的高效管理和优化。当受电弓脱离接触网时,能量管理模块将启用车辆备用电源进行电能输出。

电机驱动控制模块由电动机驱动系统与其机械传动机构2个部分构成,包括牵引电动机、联轴节、齿轮箱、车轴等,用于实现电能向机械能的转换,推动电气化货车的行驶。

3 绿色电气化公路的优势

3.1 低碳减排效能

以25 t级货车为例,柴油车的二氧化碳排放量为0.986 kg/km,在绿电直供模式下,其二氧化碳排放量降至0.09 kg/km,降幅达91%。实现货车的电力驱动,使之取代公路燃油货车,有助于降低碳排放量,缓解空气污染。采用电力为道路运输提供动能,显著降低了道路运输对化石燃料的依赖,有助于减少污染物排放量,甚至实现零排放^[11]。

3.2 全链清洁化

绿色电气化公路的接触网供电可以来自光伏发电、风力发电等绿电。相较于传统的化石能源,绿电具有可持续性、高普及性、环境友好等特点。因此,可再生能源发电的减污降碳效果显著,有助于实现低碳或零碳排放。

对公路进行电气化改造并配建新能源发电站,将风、光绿电等多种清洁能源接入电气化公路,可以实现绿电的高效消纳。例如新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区等地区,由于地域辽阔,风、光资源丰富,依托绿色电气化公路,不仅可以消纳大量的绿电,还

可以大大降低电气化公路的运输成本,从而降低整体物流成本。依托风光储一体化发电系统,可以实现“发—输—用”全环节零碳化。

3.3 系统灵活性

相较于纯电池货车,绿色电气化公路的电气化货车由于可以实时充电,显著降低了对车载备用电池的依赖,从而缩小车载电池的安装空间。如果以接触网供电为主($\geq 80\%$ 里程),车载备用电池也能够满足货车变道、货场装卸等场景需求。因此,实现货车在公路运输过程中的持续充电,不仅有助于降低车载电池容量需求(减少70%),还可以减小自备电池体积,以及降低电池购置与更换成本。

考虑到变换车道、往返货场等需求,电气化货车存在脱离接触网行驶的可能,因此须配备独立的备用电池,为脱离接触网后的行驶提供电能。独立的备用电池提升了电气化货车的灵活机动性。电气化公路系统采用轨道交通架空接触网方式,基于接触网连续受流技术,可实现较高的供电稳定性,消除纯电动重卡因低温导致的容量衰减问题。运输装备采用“接触网—电池”双源耦合驱动架构,其中,接触网直供功率占比 $\geq 85\%$,车载电池仅作为应急电源。当货车在非接触网路段行驶时,货车依托车载电池电源脱离电网运行,提升了自身的机动性能。

绿色电气化公路是在传统公路的基础上进行改造升级,公路既有线路不变、占地面积不会有大的变化,通过绿色电气化改造即可实现公路的电气化升级改造,资源浪费少。电气化公路支持传统车辆混行,避免“全有或全无”改造风险。外侧车道专设电气化车道,内侧车道保留传统车辆通行。也可以通过电子标签实现分车道计费,兼容现有ETC系统。绿色电气化公路除了向电气化货车连续供电外,还可以依托公路电气化改造进行智慧化升级,促进货车的无人驾驶技术应用,实现货车长距离行驶和连续运行能力,提高公路运输效率^[12]。

4 绿色电气化公路的效益分析

4.1 环境效益

绿色电气化公路可以消纳绿电资源,减少化石燃料的使用及二氧化碳的排放。本文以25~31 t货车为例,对比传统公路与绿色电气化公路的二氧化碳排放量。

根据我国国家标准《重型商用车辆燃料消耗量限值》(GB 30510—2018)的规定,25~31 t货车的

柴油燃料消耗限值为0.375 L/km,预计排放二氧化碳0.986 kg/km^[13]。若采用绿色电气化公路,该类型货车的耗电量约为0.2 kWh/km,电能来自光伏绿电,预计排放二氧化碳0.09 kg/km。由此可见,绿色电气化公路的电气化货车碳排放量仅为传统公路燃油货车碳排放量的10%,甚至更低^[14]。实现绿色电气化公路运输,对于公路行业实现“双碳”目标具有重要意义。

4.2 经济效益

相较于传统公路的燃油货车,绿色电气化公路的电气化货车因使用绿电,在物流运输成本上更具优势。本文以25~31 t货车为例,对比传统公路与绿色电气化公路的物流运输成本。25~31 t货车的柴油燃料消耗限值为0.375 L/km,每升柴油按照7.9元计算,预计柴油费用约为2.96元/km。若光伏绿电按照0.8元/kWh计算,预计消耗电费约为1.6元/km。由此可见,绿色电气化公路的电气化货车运输成本低于传统公路燃油货车的运输成本^[15],将对公路运输行业的发展产生深远影响。

4.3 社会效益

绿色电气化公路提供绿电,适用于电气化货车行驶,因此需要沿线设置光伏电站或风力发电站等发电端;此外,还需要货车实现电动化,并配备应急电池。绿色电气化公路需要对公路进行电气化改造,建设受电系统和供电系统。与传统公路相比,绿色电气化公路的电气化货车大量使用绿电,可有效带动公路沿线的新能源产业发展,推动新能源道路运输装备应用,助力区域经济发展和产业升级。

5 结 论

绿色电气化公路技术可实现公路运输的能源清洁化、供电连续化及车辆智能化,构建了公路货运低碳转型的可行路径。未来需重点突破大功率动态受电及风、光、储协同调度等技术瓶颈,完善标准体系与商业模式建设,推动交通领域高质量实现“双碳”目标。

参考文献:

- [1] 张明琦,郑泽东,李永东.公路货运能耗及低碳化发展路径研究[J].机电传动,2022(3):10-16.
- [2] 孙宇,徐娜.新建电气化公路口岸规模计算方法和布局方案研究[J].交通工程,2025(2):28-33.
- [3] 中华人民共和国生态环境部.第二次全国污染源普查公报[EB/OL].(2020-06-10)[2025-09-26].<https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/>.
- [4] 中华人民共和国生态环境部.生态环境部发布《中国移动源环境

(下转第67页)