

铁路与新能源融合发展现状及展望

胡田飞^{1,2}, 刘济华³, 李天峰³, 岳祖润^{1,2}, 张翊敏³

(1. 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043; 2. 河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要: 铁路资产能源化、用能绿色化是助力实现交通领域“碳达峰、碳中和”目标的重要途径。本文在分析铁路与新能源融合发展需求的基础上, 梳理了铁路沿线太阳能、风能、地热能、声能、制动能、振动能等各类新能源的自然禀赋条件, 总结了当前铁路与新能源融合形式、技术特征、设备水平的发展现状; 分类汇总了铁路服务设施、运载体、基础设施与新能源融合的具体场景, 讨论了车站站顶光伏、新能源机车、基础设施自供电监测设备等主力场景的发展规模及面临的问题。按照铁路新能源供给潜力分级, 从微型、小中型、大型、超大型等不同规模新能源系统的角度, 构建了铁路与新能源融合的系列场景及方式, 重点讨论了铁路沿线基础设施病害防控电气化设备与小型、中型分布式离网光伏系统融合这一新型主力场景。进一步从能量捕获与转化、负载、储能、能源管理等技术方面, 提出了铁路与新能源融合的未来趋势、关键技术、重点方向, 以期对相关领域的规划建设、转型发展研究提供参考。

关键词: 铁路; 新能源; 服务设施; 运载体; 基础设施; 电气化; 融合场景

中图分类号: TU442 **文献标识码:** A

Current Status and Prospect of the Integration of Railway and New Energy

Hu Tianfei^{1,2}, Liu Jihua³, Li Tianfeng³, Yue Zurun^{1,2}, Zhang Yimin³

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Mechanical Behavior Evolution and Control of Traffic Engineering Structures in Hebei, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The integration of railway facilities and use of new energies is an important way to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals of transportation domain. After analyzing the demand for the integrated development of railway and new energies, this study summarizes the natural conditions of various new energy sources along railways, including solar, wind, geothermal, acoustic, braking, and vibrational energies. The current integration forms, technical characteristics, and equipment levels are then reviewed. The specific integration scenarios between the railway service facilities, carriers, infrastructures, and new energy sources are summarized by category, and the developmental scales and problems of major scenarios, such as photovoltaic systems at the top of railway stations, new-energy locomotives, and self-power supply monitoring equipment, are discussed. Based on the classification of potentials to supply new energies for railways, a series of new integration scenarios and methods are introduced considering the new energy systems of different scales (e.g., micro, small- and medium-sized, as well as large and super-large). A new major scenario that

收稿日期: 2022-11-21; **修回日期:** 2023-02-21

通讯作者: 岳祖润, 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室教授, 研究方向为地基变形控制与特殊土路基;
E-mail: yzr1898@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(42001059); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z5402G)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

integrates electric equipment for railway infrastructure defects control and small- and medium-sized distributed off-grid photovoltaic systems is proposed. Furthermore, the future trends, core technologies, and key developmental directions for the integration of railway and new energies are proposed from the aspects such as energy capture and conversion, load, energy storage, and energy management. The results can provide references for planning, construction, and transformation development research in related fields.

Keywords: railway; new energy; service facilities; carrier; infrastructure; electrification; integration scenarios

一、前言

铁路运输电能消耗量巨大,是交通领域能源消耗、碳排放的重要行业,在“碳达峰、碳中和”目标背景下面临着减排增效的巨大压力。我国地域辽阔,铁路路网纵横全国,沿线的风、光、地热等可再生能源自然禀赋丰富,提供了用地与资产、用电场景与需求等条件,能源化潜力突出^[1]。铁路设施组成和运行环境复杂,构建清洁、绿色、弹性的新能源系统有助于提高铁路安全稳定运行能力,也是实现铁路低碳化、绿色自洽发展的必由之路。

我国铁路行业制定了系列推广清洁能源利用的政策。铁路交通管理部门先后发布了《铁路节能技术政策》(1999年)、《铁路“十一五”节能和资源综合利用规划》(2007年)、《节能减排“十二五”规划》(2012年)、《铁路主要技术政策》(2013年)等文件,要求按照因地制宜、多能互补的原则,推广太阳能、风能、地热能等可再生能源,积极采用高效、低成本的中小型太阳能集热器、光伏电源、地源热泵等产品,用于铁路沿线站段建筑物的生活热水、采暖、制冷等^[2,3]。《交通强国建设纲要》(2019年)提出推广新能源、清洁能源、智能化、数字化、轻量化、环保型交通装备及成套技术装备等要求。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》(2022年)指出,鼓励在铁路沿线布局光伏发电及储能设施,推动交通运输设施绿色化升级发展。在此宏观形势下,铁路领域需要继续推进新能源开发利用,探索并实践更多的新能源技术及应用场景。

铁路新能源利用形式主要是发电、热利用。电气化是减少碳排放、实现设施高效智能管控的关键解决方案^[4]。当前铁路高度依赖外部电网,在一些弱电网、无电网地区,铁路路网与电网布局失配或适配困难,造成铁路系统运维智能化、绿色化发展面临结构性约束和瓶颈性障碍^[5]。因此,应用布局灵活的新能源有利于自主能源供给、提升自洽水平,是实现高品质运维、绿色铁路的首要选择;铁

路行业从自身路域资源出发,挖掘新能源发电潜力成为亟需。

立足上述背景,本文针对铁路沿线新能源禀赋条件,总结铁路能源融合的主要形式、技术特征、设备水平,分类汇总主要途径的具体场景、发展规模及存在问题,以辨明未来趋势和重点方向;提出铁路能源融合发展的新场景和技术开发要点,以期作为铁路低碳转型,深化交通领域“双碳”研究提供参考。

二、铁路沿线新能源禀赋及利用形式

铁路沿线自然禀赋丰富,包括太阳能、地热能、风能等。新能源利用需要考虑以下因素:资源禀赋优势,技术成熟度、可靠性、经济性、可替代性、技术寿命等影响投资收益的因素,适用范围和发展规模潜力范围。

(一) 铁路沿线新能源禀赋分析

铁路沿线可利用空间资源分为沿线空间、车站空间:前者包括沿线两侧边坡、轨道专属空间;后者包括车站屋顶、广场、站台雨棚等区域。

太阳能是一类取之不尽、用之不竭的零排放新能源。我国太阳能资源总体呈“高原大于平原、西部干燥区大于东部湿润区”的分布特点。中国气象局《2020年中国风能太阳能资源年景公报》显示,全国各地年太阳辐射总量为928~2333 kW·h/m²,中值为1626 kW·h/m²,其中青藏高原最为丰富^[6]。我国88.5%的轨道交通里程分布在II、III类光资源区,高速铁路沿线所蕴含的太阳能为 2.396×10^{11} kW·h^[7],开发潜力巨大。

我国陆域风能最丰富的地区主要分布在“三北”地区,即东北、华北北部、西北地区,其次是沿海地区。根据中国陆地10 m高度层风能资源的理论值统计,全国平均风能密度为100 W/m²^[8]。行驶列车周围风场和隧道活塞风也是可观的风力资源。

地热能包括浅层地热、水热型地热和干热岩地

热。地表以下2倍于冻结深度范围内的变温带已具有地热开发潜力，称为“超浅层”地热能^[9]。恒温带和增温带地热储量相对稳定，我国北方地区恒温带多位于地下20~30 m深度，温度一般比当地年平均气温高0.8~2 ℃，是开发浅层地热的适宜位置。浅层地热主要通过热泵技术开采。统计表明，在全国336个地级以上城市中，80%的土地面积适宜利用浅层地热能^[10]。在东北、内蒙古、西北等寒冷地区，也分布着储量可观的地热资源。

铁路还会产生特有的声能、制动能和振动能^[11]。列车运行过程中，发动机、齿轮、高速运行的空气动力效应以及轮轨相互作用产生的噪声都属于声能。列车在进站和道口等位置减速时，制动系统会产生大量的制动能量（表现为热能形式）。由于铁路轨道接头、轮轨磨损和风力等因素的作用，在列车行驶过程中车体、轨道和其他基础设施会持续振动，轨道和列车悬架振动能是近年来受关注程度较高的轨道交通产能类型。

综上所述，我国铁路设施能源化潜力巨大，铁路系统能源自洽和碳减排前景广阔。

（二）铁路新能源利用形式及技术特征

传统的陆域新能源利用形式主要有太阳能（光热转化器、空气源热泵、光伏发电）、风能（风力发电）、地热能（地源热泵）3类。

铁路行业较早开始推广太阳能与地热能供热技术。太阳能光热和地源热泵各有优缺点，太阳能光热的集热器技术成熟，造价经济，但占地面积大、集热效率差、热源品位低，只能在日照条件下使用。地源热泵的能耗低，热源品位高，可以实现全天候运行，但需要电辅助，安装时需要打井作业，并打穿冻土层，使用过程需要维持年均冷热平衡。近年发展的空气源热泵适用性更强，尤其是超低温型跨临界CO₂空气源热泵不受地域和气候条件限制，安装方便，在极寒天气下也能正常工作^[12]。这一方面应用主要面向站段建筑物集中负载，一般直接嫁接市政建筑领域的既有商业化产品。

光伏发电具有清洁、安装灵活、可存储等特点，是目前最经济的电力能源，也是各国优先发展的主力能源，分为离网型、并网型及混合型3类。按照装机容量，又分为微型（<1 kW）、小型（1~10 kW，户用为主）、中型（10~50 kW，区段用为主）、大型

（50 kW~6 MW，区域微网为主）和超大型（>6 MW，并网为主）。近年来，分布式光储直柔技术发展迅猛，是光伏发电、储能技术、直流配电、柔性用电于一体的新型系统性能源技术，是能源革新的一种新技术^[13]。我国已经建立了先进的光伏制造产业链，技术成熟，成本大幅下降，具备了在铁路上大规模应用的条件。

风力发电有电磁式发电机和压电片发电机2类，均由气流驱动。目前产业化的风电机组一般需要四、五级以上风速才能有效发电，风速低于3 m/s时视为不可利用风能^[14]。大型风电机组最为成熟，是目前风电装机的主流，铁路沿线一般没有充足空间安装大型风电机组。中小型机组技术相对成熟，也已实现了商业化，但技术可靠性和发电效率还需要进一步提升，且外露的机械运动部件对铁路运营而言是风险源。为提高风电捕捉效率，业界发展了一种摩擦纳米发电机，可在微风状态下实现启动和发电，但目前尚未实现商业化^[15]。此外，还开发了在列车车顶和隧道安装的车顶式涡轮风力发电机等微型设备，还处于试验阶段^[16,17]。

铁路运行噪声对周围环境有负面影响，近年来出现了可降噪或消噪的声能采集技术。例如，使用压电发电机收集铁路环境噪声的技术，试验表明在100 dB的入射声压级下可输出0.7 V电压^[18]。此外，还包括一种使用亥姆霍兹谐振器和聚偏二氟乙烯（PVDF）薄膜的可再生低频声能收集屏障，试验表明在110 dB下可输出74.6 mV的瞬时最大电压^[19]。制动能主要针对钢轨摩擦热，通过温差发电方式收集^[20]。振动能采集手段包括电磁式、压电式、摩擦发电式和液压发电式^[21]。声能、制动能和振动能的能流密度低、时空连续性差、输出功率小，目前只验证了具有为铁路低功耗传感器供电的潜力，但整体处于技术试验与产品试制阶段，尚未中试。

三、铁路与新能源融合规模现状

铁路和新能源融合的途径包括服务设施、运载体、基础设施。其中，铁路服务设施主要指站场，包括各种车站和作业场。铁路运载体包括机车、列车及检修车等，机车分为内燃机车和电力机车。铁路基础设施指线路上的轨道、接触网、路基、涵洞、桥梁及隧道等。根据铁路设施的电气化

发展趋势,发电成为新能源利用的主流方向,包括为车站和沿途设备供电,以及接入牵引供电系统为机车供电。

(一) 服务设施与新能源融合

服务设施与新能源融合是指在站房与雨棚顶部、广场等空间布设新能源收集与转化组件。铁路站房是能耗集中地,包括办公、居住和候车建筑物能耗,及通信、信号、道岔等设备的能耗。

铁路设施分布分散、点多线长,站房也大多位于市域边缘,站房供热、供燃气、空调等运行能耗较大,一般难以接入城市公共管网。为解决边远铁路沿线职工生活、生产用热水问题,已大规模推广应用太阳能热水器和太阳能供暖系统,其中太阳能热水器的推广最为广泛,没有技术瓶颈,但太阳能冬季供暖存在季节匹配性差的不足^[22]。铁路行业正在发展新型光电互补供暖技术,来实现站房人居环境和一些特殊工作车间供暖的节能化和智慧化,例如站房太阳能+储能+电辅助采暖系统^[23]。铁路行业目前正在推广新型空气源热泵技术,来代替北方站区燃煤燃油锅炉^[24]。总体上铁路站房可再生热能利用的规模大、普及率高,受限于负载需求,大规模发展的潜力一般。

目前,服务设施大型新能源发电系统的推广是热点,主要是太阳能、风能用于车站用电及机车牵引,其中光伏建筑一体化是主流趋势。东日本旅客铁道株式会社在2012年为平泉站、东京站的站台上安装光伏阵列,建设太阳能发电零排放站,在光照充足的情况下,站内电力都由光伏提供^[25]。荷兰在2017年已实现铁路一次能源100%由风能提供。肯尼亚米轨铁路采用离网型风光互补供电装置为车站提供电力供应,但设计容量仅为30 kW^[26]。近年来,我国也在车站积极安装大型光伏发电系统,北京南站、上海虹桥站、青岛站、武汉站、杭州东站、雄安高铁站先后在天蓬、屋顶、站台雨棚等闲置空间投资光伏发电项目。其中,上海虹桥站利用雨棚屋面铺设了2万多块太阳能电池板,年发电量达 6.3×10^6 kW·h。京雄城际雄安站2021年在站房屋顶建设了分布式光伏项目,装机容量为6 MW,每年可发电 5.8×10^6 kW·h,经济效益显著。风力发电因车站所处地理位置导致风能资源不均衡,且大型风电机组所需空间大,国内暂未见应用。

综上可见,目前铁路服务设施在太阳能热水器、空气源热泵等方面规模较大。光伏主要围绕路侧、屋顶等开发模式,采用“自发自用、余电上网”的传统消纳模式,装机容量不高,缺乏配套的能源管控系统,也未充分考虑潜在的多元化用能需求。服务设施大型光伏系统仍有巨大的规模化发展潜力,应继续推广大型与超大型光伏发电项目。

(二) 运载体与新能源融合

在铁路用电构成中,牵引用电占比最大。近年来运输装备能耗的新能源替代一直被视为铁路碳减排的重要手段^[27]。运载体与光伏融合是指在铁路沿线或机车车辆顶部布置光伏系统,并接入牵引供电系统。光伏系统并入牵引供电网的难题在于,首先铁路牵引负荷功率大、波动性强,对光伏系统的高低电压穿越能力、设备过载能力要求严格,且光伏系统调压、调频能力差,会加大牵引网的控制和调度难度^[28]。其次,光伏系统与牵引供电负荷均具时变性和非线性,光伏电站接入牵引供电系统会影响供电可靠性和安全性^[29]。光伏接入牵引供电系统的必要途径是发展拓扑结构^[30]。为抑制波动性,储能已成为新能源发电系统的主要组成。铁路行业正在研究含光伏和储能的牵引供电系统,已经建立了一些高铁新能源微电网规划定容及调度优化模型^[31]。

非电气化轨道交通与能源融合的主要途径为通过清洁电力驱动方式代替传统的内燃机车,包括超级电容、动力电池、氢燃料电池等方式^[32]。氢燃料电池机车是由将氢气和氧气的化学能直接转换成电能的装置提供电力。氢能的近期前景是替代内燃机。加拿大太平洋铁路公司在2020年研制成功由氢燃料电池供电的铁路货运机车,实现了重载铁路机车的脱碳^[33]。中国中车股份有限公司在2021年也研发出国内首台大功率氢能源动力调车机车和国内首台以“氢燃料电池+锂电动力电池”为动力的“零排放”接触网作业车,并完成了上万公里运行考核,国家能源集团于2022年4月在新朔铁路建设了首个重载铁路加氢科研示范站。

近年来,新能源小型乘用车技术逐步成熟,一部分已经实现商业化^[34]。但对于重型货车、船舶、铁路机车等大能耗运输装备,新能源在续驶里程、有效载重方面仍存在瓶颈。面向铁路运输供电时,轨道车辆所载定员、列车质量和运行速度所需功耗

大，目前最先进的光伏阵列和锂电池很难满足机车供电要求。总体上目前光伏、氢燃料等新能源及混合动力机车仍处于起步阶段，缺乏新能源牵引用电的实际应用。仅当太阳能电池单位输出功率和蓄电池储电容量大幅提升，车体质量大幅减轻，运行阻力大幅减少时，才可能实现随车光伏驱动。

除了新能源牵引用电之外，运载体与新能源融合途径还包括为冷藏列车等特种用途车辆提供随车电力。我国在2020年首次试运行了铁路锂电池冷藏集装箱^[35]。

综上所述，在装备研发方面，光伏供电机车技术尚不成熟。氢能列车已具备实用水平，但在配套能源基础设施建设、安全风险防控、标准规范等方面仍存在缺口。关键的问题是，电网虽然初始投资大，但供电可靠，投资收益稳定。而新能源机车的随车转化部件、储能部件仍面临输出效率与使用寿命低的局限，且投资收益差，与国家电网规划建设也存在冲突。国内外新一代列车研制方向的统计显示，高速列车较少涉及新能源，新能源列车主要在非电气化铁路有较大的发展潜力^[36]。

（三）基础设施与新能源融合

基础设施与新能源融合是指利用铁路沿线空间布设新能源组件，适合铁路长线型、分散化的用能需求特点。传统的铁路沿线供电包括蓄电池和电网两种方式。蓄电池存在人工更换作业繁琐和造成电化学污染的缺陷^[37]。当采用铁路沿线的电力贯通线供电时，如负载过于分散，还需要敷设分支电源线，投资大。尤其在偏远地区，供电难题一直是限制铁路监测与病害防控电气化进程的主要瓶颈。

目前，铁路行业正在推广轨道及线下结构的“地对地”全寿命周期智能监测与健康诊断设备，采用无线网络传感器技术和第四代移动通信技术，来弥补现有“人对地”“车对地”“空对地”等监测方式灵活性差、布线复杂、监测范围受限、成本高的缺陷^[38]。电子传感器的功耗一般在微瓦至毫瓦之间，加上采集传输系统的总功耗也在数瓦以内，而大多数清洁能源采集器的输出功率在毫瓦至瓦之间，可以满足供需平衡要求。与电力贯通线相比，新能源供电方案投资低、施工便捷，是铁路沿线长期监控系统实现自供电的关键技术。青藏铁路通过太阳能监测系统，对无缝线路的温度力过高、长钢

轨爬行和轨道臃曲等病害进行精密监控^[39]。我国大量高速铁路都已将电子位移计与太阳能供电及物联网技术结合，实现了运营期基础沉降的长期自动连续监测^[40]。针对铁路电力架空线路电缆复杂、人力检修效率低、故障点难以及时发现的问题，朔黄铁路推广应用了一种太阳能供电的电力线路故障在线监测报警系统^[41]。此外，还可以回收利用列车再生自动能量，铁路行业研发了一种基于压电效应的路基压电俘能装置，在兰新高铁的应用表明，开路电压峰值可达到252.4 V，满足路基变形长期监测供电的要求^[42]。

铁路沿线自然环境是安全运行的主要危险源，通过传感器自供电技术实时在线监测预警是目前的发展趋势。监测对象包括雨量及洪水、风向风速、滑坡坍塌、泥石流、风沙等。例如，沙漠铁路无人区段积沙掩埋钢轨将严重威胁行车安全，目前巡线工作主要靠人工完成，效率低下、安全压力巨大。哈罗铁路已推广了一种太阳能供电的风沙实时监控系统，太阳能板安装于测风塔中部或水泥杆下部，蓄电池安装于地下保温箱，使用效果良好^[43]。

除了为低功耗的监测设备供电之外，清洁能源也具有为更高功率铁路附属电气设施供电的潜能。照明、信号、通信基站等设施点位分散，在偏远线路的供电、运维难度大。哈尔滨铁路局针对传统铁路车号自动识别系统有线通信以及供电设备需要过轨安装的难题，设计了一种太阳能供电的车号一体机^[44]。高海拔地区具有突出的日照资源优势，还可利用太阳能发电来保障运营隧道风机和照明正常运行^[45]。针对铁路专用第五代移动通信系统基站布置密集、单体功耗高的特点，青藏铁路在沿线陆续设计安装了35座千瓦级无人值守的光伏通信电站，解决了沿线通信困难及部分区域无集群基站信号的问题^[46]。上述设施的耗电功率一般在数十瓦至百瓦之间，限于天气环境及光伏组件自身耐久性影响，光伏设计容量偏低时，容易出现供电连续性与可靠性不足的问题。为保证供需平衡，一般需要建设小型与中型规模的光伏系统，并结合设备日用电规律、光伏日发电规律及占地面积等因素，进行专项优化设计。目前，小、中型光伏系统在铁路的应用普及率仍较低。

铁路光伏需要安装在沿线自有空间，包括线路两侧边坡、机车车辆限界与建筑限界之间的安全空

间及轨道结构。英国和德国尝试将光伏安装在轨枕、双线中央,形成“光伏铁路”。中国尝试采用柔性支架技术将光伏安装在铁路试验线的双线交汇夹心地块,此外,提出了一种光伏声屏障,但可用面积小、成本高^[47]。光伏一旦安装在限界以内,首要问题是安全隐患,需要提前论证^[48];其次还涉及组件抗震、清洗、朝向和倾角、并网繁琐等问题,目前也没有成熟的审批程序。因此,“光伏铁路”的规模性推广还有很多障碍,光伏系统安装区域仍然要以控制线以外的闲置空地为主。

综上所述,目前铁路基础设施新能源发电技术主要是提供非牵引部分电能,以微型发电系统为主,供电对象多为集成度高、功率低的轨边监测设备。可再生能源在铁路的应用占我国铁路整体用能的比例有待提高。新能源发电系统在铁路沿线的集成与规模化应用仍然面临一些技术瓶颈,包括微网建设规划方法、储能部件寿命等。

四、铁路与新能源融合展望

(一) 铁路新能源应用场景设计及展望

铁路现有资产结合光伏等新能源进行复用首先要考虑的是投入与收益的关系,核心是投入多少路产才能达到双赢目标。第二是时间与空间的统筹,核心是解决用电、发电时空错位问题,背后问题是如何建设储能和电网。因此,需要针对具体的应用场景,综合考虑自然禀赋形态、丰度以及电网建设情况,从供给角度提出新能源供电系统的实施方案。未来我国铁路与新能源融合的场景如下。

一是微型新能源系统。研发更多具有智能感应、自动启动与动态运行的自供电电气化监测设备,继续扩大铁路全生命周期远程自动化监测预警技术的应用规模,助力铁路智能运维。

二是小、中型新能源系统。在既有为照明、信号、通信等铁路附属设备供电的基础上,继续扩大分布式系统的应用场景。目前在基础设施电气化监测的基础上,针对病害防控的电气化设备也快速发展。例如,针对寒区道岔积雪或结冰隐患,沈阳铁路局、哈尔滨铁路局等单位已大规模推广电热板主动加温融雪措施^[49]。针对多年冻土退化引起的路基融沉病害,铁路行业研发了专用的压缩式制冷装置,对多年冻土进行人工制冷补强或快速恢复,弥

补了既有热管、通风管、片(块)石结构冷却效率低与季节匹配性差的不足^[50,51]。针对季节性冻土区路基冻胀问题,铁路行业也已研发了专用的地源热泵和电热装置,对路基进行主动供热解冻^[52,53]。同时,还参照公路路面加热融雪技术,采用电伴热方法来解决寒区隧道洞口的排水沟结冰堵塞问题^[54,55]。此外,针对接触网覆冰风险,业界研发了直流融冰技术,并在京广高速铁路、哈大高速铁路等进行推广^[56]。目前,还正在发展面向高寒或湿热地区的小半径曲线路段钢轨及无砟轨道结构的主动温控装置。上述应用均表现出了良好的使用效果,但普遍能耗大、电源接入困难,限制了大规模推广。

实质上,电气化是实现铁路设施智能化、自动化运维的必要途径,因此应结合前述基础设施病害防控电气化设备的用能特性,着重推动小、中型光伏系统的应用,以“分布式和就地消纳”为主要模式,通过集成光伏阵列、储能装置与负载单元,构建适配的综合能源微网或微网群。在此基础上,才能真正构建极端气候条件和病害频发情况下的铁路沿线基础设施快速恢复与应急保障技术体系。

三是大型新能源系统。继续推动大型光伏系统在路侧边坡、铁路站段、物流基地等场景的装机规模。以“自发自用、余电上网”为主要消纳模式,侧重为服务设施供电,提高自身发电和用电的灵活性,降低铁路用电成本。车站区域大型光伏系统是铁路与能源融合的主力场景。

四是超大型新能源系统。充分利用铁路地域广阔的特点,选择太阳能、风能资源丰富的位置,建设集中式超大型清洁能源发电项目,这是未来快速扩大铁路与能源融合规模、推动路衍经济发展的主要途径之一。一方面,以“全额上网”为消纳模式,主要任务是打通铁路与能源两个行业之间的体系化融合机制,实现铁路能源融合路径的系统性规划和设计。另一方面,以“牵引供电”为消纳模式,促进就地消纳,降低交通系统外购电量,减少铁路运输碳排放量,也可作为应急电源,提高供电可靠性。

在“双碳”背景下,光伏通过铁路功率调节器接入牵引供电系统具有良好的发展前景。铁路牵引供电系统是一个高度成熟的自动化系统,光伏系统的并入还需要解决两者信息开放性及时时性、系统间协同控制、多变换器环流等技术难题^[57]。目前,

在铁路沿线规模化地投入光伏牵引尚需时日，但可以做一些前瞻性工作，比如选几条铁路进行试点，逐步实现机车牵引用能从非自洽、部分自洽向自洽的转变，待试点成功后再逐步推广。

（二）铁路新能源系统技术开发展望

在设计铁路与新能源融合场景的基础上，还应继续升级研发新能源“发电、输电、储能、充电、放电、配电”各环节紧密结合的高效技术，开展源、网、荷、储灵活互动的深度融合模式，以适应新能源发电特性与各类负荷用能需求特性。未来我国铁路与新能源融合所需突破的关键技术包括以下几方面。

一是从能量捕获和转化角度，发展高可靠性、高适应性的成套核心装备。一方面，铁路具有“线长面广”的特点，沿线自然环境及运行场景多样，面临高海拔、严寒、酷热、沙漠风沙、高盐雾腐蚀等复杂恶劣环境。特别是，多数电子产品的可靠性和电容器容量在低温下会大幅劣化甚至失效^[58]。因此，环境稳定性与耐久性是铁路与能源融合的瓶颈之一，需大力提升能源捕获、存储、变换技术的可靠性。另一方面，铁路沿线资源禀赋丰度不一，需研发针对低密度能量的高效采集技术，除成熟的光伏和热泵技术之外，还应继续推进微风发电机、制动能及振动能采集设备的性能提升和商业化。

二是从负载角度，发展面向铁路监测与病害防控的直流设备。目前电气设备一般采用220 V或380 V交流电源，而光伏、风电等新能源的转化形式为直流，需要进行逆变后使用，增加设备投资，逆变过程也存在电能损耗。近年来随着直流技术、直流断路器、电力电气器件的不断完善，直流电气设备的功率和可靠性在不断提升。基础设施病害防控电气化设备的推广是未来铁路运维的重点方向，需要配套建设大量分散的分布式小、中型光伏系统。因此，将前述面向路基、隧道、桥梁、轨道等设施病害防控的电气化装置改进设计为直流驱动，将极大地减少光伏组件投资和增大电能利用率。

三是从储能角度，发展适配离网型能源系统的高容量、高环境耐久性的储能装置。目前储能主要采用蓄电池，其中铅酸蓄电池的商业化程度最高，但功率密度低，充放电次数有限，尤其低温时容量会急剧减小，对高寒气候的适应性差。这导致铁路沿线离网光伏系统设计时需要对接蓄电池进行大幅扩

容，储能投资比例有时甚至超过光伏阵列。一方面，需研究高寒地区铁路沿线蓄电池组的保温及安全保障方案，减少电能低温损耗。另一方面，积极探索低温型阀控式铅酸蓄电池、锂电池、超级电容等新型蓄电池面向铁路场景的技术方案。

四是从能源管理角度，发展与铁路场景相配套的新能源系统设计理论、输配电机制与智慧管理平台。首先，目前还缺乏铁路新能源系统的设计理论，例如目前光伏系统的设计理论主要面向光伏电站的年均发电应用，而铁路设施在日照场景、负载水平、高峰用电时节等方面有其特殊性，因此需要构建铁路沿线离网式光伏系统的组件匹配原则及设计流程，实现日、月、季节、年等不同时间尺度下光伏阵列最优倾角及其他参数的优化设计。其次，应根据不同铁路设施的用能需求，统筹制定用能方案，规避用能发电时空错位，解决负载需求不稳定的困难。最后，铁路沿线新能源系统一般无人值守，储能器容易出现过放而无法再次启动的现象。为防止新能源系统中途停机故障，应配套开发电池巡检仪、逆变控制器无线通信装置等附属组件，对系统工作状态进行监测、异常预警和远程操控。

五是铁路新能源系统自洽角度，应在规划与设计阶段引入弹性概念，实现自给自足和稳定及时。弹性表征能源系统应具备在极端事件发生时预防、适应和供电中断后快速恢复的能力，以保持重要设施持续供能，最大限度满足用能需求^[59]。弹性铁路能源系统的研究内容包括规划与设计、风险评估与预警、运行与控制、应急处置与恢复等内容。

五、研究结论与发展建议

（一）研究结论

铁路沿线太阳能、风能、地热能、声能、制动能、振动能等各类自然禀赋和空间资源丰富，铁路设施资产具备良好的绿色化转型、能源化潜力。推进以清洁能源为主导、以电能为媒介的源网荷储一体化铁路自洽新能源系统是推进碳达峰、碳中和的重要依托。

铁路智能化、电气化等已经推动了铁路与新能源的快速融合发展。铁路服务设施在太阳能热水器、空气源热泵等方面应用规模较大，光伏目前主要围绕路侧、屋顶等开发模式。新能源列车主要在

非电气化铁路方面有较大的发展潜力。铁路沿线新能源系统的供电对象多为集成度高、功率低的轨边监测设备,以微型系统为主。新能源在我国铁路的用能比例有待提高,光伏潜力最大。

铁路与新能源融合的近期目标是着重推动面向沿线灾害监测及预警、异物侵限检测、基础设施病害电气化防控的小、中型光伏系统的应用规模,这是目前最务实的发展方向。远期目标是推广以机车牵引或全额上网为消纳方式的超大型系统。铁路新能源融合的技术开发方向包括能量捕获和转化成套核心装备、设备直流供电、高容量与高环境耐久性储能装置、铁路新能源系统智慧管理平台、弹性自洽功能等内容。

(二) 发展建议

铁路与新能源的融合发展需要政府、铁路部门、能源电力部门的协同促进。政府应加强引领,制定能源电力部门与铁路行业的合作政策,建立推进铁路绿色低碳发展的制度框架,健全铁路与新能源用地统筹规划、系统一体化设计和基础设施协调建设机制^[60]。加大对清洁低碳能源项目的投融资支持力度,形成比较完善的政策、标准、市场和监管体系,促进铁路碳达峰、碳中和目标的实现。

铁路部门和能源电力部门积极建立跨部门、跨区域的能源安全与发展协调机制,联合论证并制定铁路能源融合科技发展规划,部署重点科技攻关计划,加快轨道交通能源融合技术研发、示范和规模化应用。探索建立在铁路沿线统一规划、统一实施、利益共享的新能源项目投资经营模式。铁路部门集中发展列车多源动力系统,深化储能设备、燃料电池等创新型牵引供电技术研究。加快推进铁路沿线大型风电、光伏发电基地建设。

电力部门应完善适应新能源局域深度利用和广域输送的电网体系,提升对新能源电力的输送和消纳能力。加强面向铁路行业的新型电力系统体系建设,在电网架构、电源结构、源网荷储协调、数字化智能化运行控制等方面提升技术水平,开展相关技术试点和区域示范。探索建立送受两端协同为新能源电力输送提供调节的机制,提升新能源电力接纳能力,推进高比例容纳分布式新能源电力的智能配电网建设,鼓励建设源网荷储一体化、多能互补的智慧能源系统和微电网。

参考文献

- [1] 贾利民,程鹏,张蛰,等.“双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J].中国工程科学,2022,24(3):173-183.
Jia L M, Cheng P, Zhang Z, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: Development paths and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 173-183.
- [2] 杨全亮.新能源和可再生能源在铁路应用现状及展望[J].铁路节能环保与安全卫生,2015,5(3):106-108.
Yang Q L. The current situation and outlook of new energy and renewable energy applied in railway [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2015, 5(3): 106-108.
- [3] 曲云腾,王永泽.绿色铁路技术创新现状与发展策略研究[J].铁路节能环保与安全卫生,2021,11(3):30-34.
Qu Y T, Wang Y Z. Research on the current situation and development strategy of green railway technology innovation [J]. Railway Energy Saving Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2021, 11(3): 30-34.
- [4] 舒印彪,谢典,赵良,等.碳中和目标下我国再电气化研究[J].中国工程科学,2022,24(3):195-204.
Shu Y B, Xie D, Zhao L, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 195-204.
- [5] 康学东.我国铁路智能建设与运营管理初探[J].铁道工程学报,2019(4):84-89.
Kang X D. Preliminary exploration on the intelligent construction and operation of China's high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019 (4): 84-89.
- [6] 周新军.铁路利用新能源和可再生能源潜力分析[J].中外能源,2016,21(5):29-34.
Zhou X J. A Study on potential for using new energy and renewable energy sources in railways [J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(5): 29-34.
- [7] 贾利民,师瑞峰,吉莉,等.我国道路交通与能源融合发展策略研究[J].中国工程科学,2022,24(3):163-172.
Jia L M, Shi R F, Ji L, et al. Road transportation and energy integration strategy in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 163-172.
- [8] 杨勇平,武平,程鹏,等.我国陆路交通能源系统发展战略研究[J].中国工程科学,2022,34(3):152-161.
Yang Y P, Wu P, Cheng P, et al. Study on the development strategy of China's land transport energy system [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 34(3): 152-161.
- [9] 姜城.超浅层地能应用技术研究[D].秦皇岛:燕山大学(硕士学位论文),2016.
Jiang C. Research on supers hallow geothermal energy and its application technology [D]. Qinhuangdao: Yanshan University (Master's thesis), 2016.
- [10] 王贵玲,张薇,藺文静,等.全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J].中国地质调查,2018,5(2):1-7.
Wang G L, Zhang W, Lin W J, et al. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource [J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 1-7.
- [11] 吴小平,张祖涛,潘亚嘉,等.轨道交通领域新能源再生技术研究

- 究现状与展望 [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20221130.1907.005.html>.
- Wu X P, Zhang Z T, Pan Y J, et al. Development of energy harvesting technology in the field of rail transportation [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20221130.1907.005.html>.
- [12] 金磊, 冯晓娟, 王守国, 等. 铁路沿线供暖用低温空气源热泵热力性能对比研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(1): 12-17.
- Jin L, Feng X J, Wang S G, et al. Thermodynamic performance investigation of low ambient temperature air source heat pump using in railway system for space heating [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2019, 9(1): 12-17.
- [13] 吴宗臻, 王小锁, 张凌云, 等. 轨道交通光储直柔技术应用及展望 [J]. 现代轨道交通, 2022 (8): 19-22.
- Wu Z Z, Wang X S, Zhang L Y, et al. Progress of PDEF technology and its application prospect in rail transit [J]. Modern Urban Transit, 2022 (8): 19-22.
- [14] 刘平, 张媛, 莫堃, 等. 风力发电设备技术现状与发展趋势 [J]. 中国重型装备, 2022, 4(10): 1-6.
- Liu P, Zhang Y, Mo K, et al. Current situation and development trend of wind power generation equipment technology [J]. China Heavy Equipment, 2022, 4(10): 1-6.
- [15] 张莹. 面向低速风能收集的接触分离模式摩擦纳米发电机结构设计及性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学(硕士学位论文), 2018.
- Zhang Y. Structure design and performance research of contact separation mode friction nano generator for low-speed wind energy collection [D]. Chongqing: Chongqing University (Master's thesis), 2018.
- [16] Nurmanova V, Bagheri M, Phung T, et al. Feasibility study on wind energy harvesting system implementation in moving trains [J]. Electrical Engineering, 2018, 100: 1837-1845.
- [17] Zheng P, Qi L, Sun M, et al. A novel wind energy harvesting system with hybrid mechanism for self-powered applications in subway tunnels [J]. Energy, 2021, 227: 120446.
- [18] Noh H M. Acoustic energy harvesting using piezoelectric generator for railway environmental noise [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10: 1-9.
- [19] Wang Y, Zhu X, Zhang T, et al. A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film [J]. Applied Energy, 2018, 230: 52-61.
- [20] 于鑫. 城市轨道交通绿色低碳技术研究及展望 [J]. 现代城市轨道交通, 2022 (8): 1-6.
- Yu X. Research and prospect of green and low-carbon technology for urban rail transit [J]. Modern Urban Transit, 2022 (8): 1-6.
- [21] 张坤, 赵毫杰, 冯伟, 等. 低频振动能量收集技术研究进展 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (8): 100-107.
- Zhang K, Zhao H J, Feng W, et al. Research advance in low frequency vibration energy harvesting technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (8): 100-107.
- [22] 周新军. 太阳能在铁路行业中应用现状及展望 [J]. 中国能源, 2016 (3): 44-48.
- Zhou X J. Application status and prospect of solar energy in railway industry [J]. Energy of China, 2016 (3): 44-48.
- [23] 温建平. 铁路沿线光电互补供暖系统的设计与实现 [J]. 中国高新科技, 2021 (20): 34-37.
- Wen J P. Design and realization of photoelectric complementary heating system along the railway [J]. China High Technology, 2021 (20): 34-37.
- [24] 张宇峰. 空气源热泵在铁路企业的应用 [J]. 设备管理与维修, 2019 (1): 99-100.
- Zhang Y F. Application of air source heat pump in railway enterprises [J]. Equipment Management and Maintenance, 2019 (1): 99-100.
- [25] 张文丽. 日本“举国”利用再生电力节能降耗推广铁路节能技术 [J]. 能源研究与利用, 2015 (2): 24-25.
- Zhang W L. Japan “whole country” promotes railway energy saving technology by using regenerated power to save energy and reduce consumption [J]. Energy Research and Utilization, 2015 (2): 24-25.
- [26] 杨播, 王征, 高红均. 离网型风光互补装置在肯尼亚米轨铁路的应用研究 [J]. 中国铁路, 2021 (8): 121-127.
- Yang B, Wang Z, Gao H J. A study of the application of off-grid wind-PV hybrid device in Kenya Meter-gauge [J]. China Railway, 2021 (8): 121-127.
- [27] 陈维荣, 王璇, 李奇, 等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述 [J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663-3670.
- Chen W R, Wang X, Li Q, et al. Review on the development status of PV power station accessing to traction power supply system for rail transit [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3663-3670.
- [28] 陈维荣, 李奇, 戴朝华. 新能源机车技术与应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2020.
- Chen W R, Li Q, Dai C H. New energy locomotive technology and application [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2020.
- [29] 朱晓娟. 含光伏能源的柔性直流牵引供电系统稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学(博士学位论文), 2022.
- Zhu X J. Stability Analysis of flexible DC railway electrification system with new energy [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University (Doctoral dissertation), 2022.
- [30] 邓文丽, 戴朝华, 张涵博, 等. 复杂电气化铁路牵引用光伏发电系统综合优化控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5849-5864.
- Deng W L, Dai C H, Zhang H B, et al. Research on comprehensive optimization control method for traction photovoltaic generation system of complex electrified railway [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5849-5864.
- [31] 田立霞. 高铁新能源微电网规划定容及调度优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学(博士学位论文), 2021.
- Tian L X. Planning and capacity and dispatching optimization of HSR's new energy microgrid [D]. Beijing: North China Electric Power University(Doctoral dissertation), 2021.
- [32] 伍赛特. 太阳能轨道车辆应用前景展望 [J]. 节能, 2020 (2): 60-62.
- Wu S T. Prospects for the application of solar rail vehicles [J]. Energy Conservation, 2020 (2): 60-62.

- [33] David T, 杨嘉琪. 加拿大氢动力干线货运机车的研发 [J]. 国外铁道机车与动车, 2022 (5): 1-3.
David T, Yang J Q. Development of Canadian hydrogen powered trunk freight locomotive [J]. Foreign Railway Locomotives and Motor Cars, 2022 (5): 1-3
- [34] 王缪莹, 温宏宇. 铁路新技术发展趋势研究及对我国的建议 [J]. 中国铁路, 2020 (1): 59-63.
Wang L Y, Wen H Y. Research on the development trend of new railway technology and suggestions to China [J]. China Railway, 2020 (1): 59-63.
- [35] 苗晓雨, 姜成, 张俊, 等. 铁路新能源冷藏集装箱技术条件研究 [J]. 中国铁路, 2021 (12): 71-75.
Miao X Y, Jiang C, Zhang J, et al. Research on technical conditions for railway new energy refrigerated containers [J]. China Railway, 2021 (12): 71-75.
- [36] 史俊玲, 沈通, 荆晓霞, 等. 国外典型新一代高速列车研制综述 [J]. 中国铁路, 2022 (5): 35-41.
Shi J L, Shen T, Jing X X, et al. Review of development of foreign typical new-generation high speed trains [J]. China Railway, 2022 (5): 35-41.
- [37] 高翔. 光伏电站用储能电池的发展现状及应用前景综述 [J]. 太阳能, 2022 (9): 15-21.
Gao X. Overview of development status and application prospect of energy storage batteries for PV power station [J]. Solar Energy, 2022 (9): 15-21.
- [38] 韩自力, 蔡德钧, 姚京川. 铁路工务基础设施原位检测监测技术现状与展望 [J]. 中国铁路, 2021 (10): 52-62.
Han Z L, Cai D G, Yao J C. Current status and prospect of testing and monitoring technologies for railway track maintenance infrastructure [J]. China Railway, 2021 (10): 52-62.
- [39] 张向民, 高亮, 崔日新. 青藏铁路多年冻土区无缝线路监测技术研究 [J]. 铁道建筑, 2016 (4): 114-117.
Zhang X M, Gao L, Cui R X. Research on monitoring technology for CWR(continuous welded rail) of Qinghai-Tibet Railway in permafrost region [J]. Railway Engineering, 2016 (4): 114-117.
- [40] 王翔, 王波汪, 王正兴. 高速铁路运营期基础沉降长期监测技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 11-15.
Wang X, Wang B W, Wang Z X. Research on the long-term monitoring technology of subgrade settlement for high-speed railway in operation period [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(5): 11-15.
- [41] 刘鹏. 电力线路故障在线监测智能报警通知系统的研发及应用 [J]. 电力自动化, 2020 (2): 105-106.
Liu P. Development and application of intelligent alarm notification system for online monitoring of power line faults [J]. Power Automation, 2020 (2): 105-106.
- [42] 闫宏业, 都建英, 蔡德钧, 等. 铁路路基长期监测系统俘能供电装置研发与应用 [J]. 铁道建筑, 2022, 62(6): 16-20.
Yan H Y, Dou J Y, Cai D G, et al. Research and development on energy harvesting and power supply device for long-term monitoring system of railway subgrade and its application [J]. Railway Engineering, 2022, 62(6): 16-20.
- [43] 康随武. 铁路沿线无人区段风沙监控的研究与应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021 (3): 207-210.
Kang S W. Research and application of wind sand monitoring in unmanned sections along the railway [J]. Automation & Instrumentation, 2021 (3): 207-210.
- [44] 曲辉. 铁路车号识别设备太阳能供电技术的探讨 [J]. 哈尔滨铁道科学, 2020 (1): 27-28.
Qu H. Discussion on solar power supply technology of railway car number recognition equipment [J]. Harbin Railway Science, 2020 (1): 27-28.
- [45] 王明年, 李琦, 于丽, 等. 高海拔隧道通风、供氧、防灾与节能技术的发展 [J]. 隧道建设, 2017, 37(10): 1209-1216.
Wang M N, Li Q, Yu L, et al. Development of new technologies for ventilation, oxygen supply, disaster prevention and energy saving for high-altitude tunnels [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(10): 1209-1216.
- [46] 赵耀. 铁路 5G-R 基站太阳能供电架构及应用 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(8): 775-780.
Zhao Y. PV power supply structure and application of 5G-R base station [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(8): 775-780.
- [47] 刘昊, 李克飞. 太阳能光伏发电系统在城市轨道交通中的应用研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022 (8): 38-41.
Liu H, Li K F. Study on the application of solar photovoltaic generation system in urban rail transit [J]. Modern Urban Transit, 2022 (8): 38-41.
- [48] 苏益, 李志国, 李佳辉, 等. 铁路沿线太阳能电池板及支架立柱的抗风性能 [J]. 铁道建筑, 2020, 60(2): 152-156.
Su Y, Li Z G, Li J H, et al. Wind-resistant performance of solar panels and support columns along railway [J]. Railway Engineering, 2020, 60(2): 152-156.
- [49] 苏蕊, 李忠明. 高速铁路道岔融雪系统智能化方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(10): 24-29.
Su R, Li Z M. Scheme of intelligent high-speed railway point heating system [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 24-29.
- [50] 胡田飞, 刘建坤, 常键, 等. 基于新能源制冷技术的多年冻土路基维护方法研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 253-261.
Hu T F, Liu J K, Chang J, et al. Research on maintenance methods for permafrost embankment based on new-energy refrigeration technologies [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2): 253-261.
- [51] 刘建坤, 胡田飞. 基于压缩式制冷技术的多年冻土保护方法研究 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 313-322.
Liu J K, Hu T F. Permafrost protection method based on compression refrigeration technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 313-322.
- [52] 胡田飞. 基于可再生能源供热技术的冻土区路基防冻胀方法研究 [J]. 太阳能, 2021(6): 37-49.
Hu T F. Study on frost heaving prevention method for subgrade in frozen soil regions based on renewable energy heating technology [J]. Solar Energy, 2021(6): 37-49.
- [53] Zhang J Y, He Z L, Feng J. Frost damage improvement for railway subgrade based on ground temperature control in cold regions [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021 (25): 2911-2921.
- [54] 李尧. 既有铁路隧道排水沟冻害原因及处置措施 [J]. 铁道建

- 筑, 2021, 61(4): 48–51.
- Li Y. Freezing Damage cause of drainage ditch in existing railway tunnels and its treatment measures [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(4): 48–51.
- [55] 高红义. 日本铁路装备技术的发展与启示 [J]. *中国铁路*, 2015 (6): 107–110.
- Gao H Y. Development and enlightenment of Japan railway equipment technology [J]. *Chinese Railways*, 2015 (6): 107–110.
- [56] 史国强. 高速铁路接触网直流融冰技术 [J]. *中国铁路*, 2020 (11): 122–127.
- Shi G Q. DC-based deicing technology for OCL of high speed railway [J]. *China Railway*, 2020 (11): 122–127.
- [57] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 光伏接入牵引供电系统的多元制约因素初探 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 192–203.
- Deny W L, Dai C H, Chen W R. Preliminary research of multiple constriction for PV access traction power supply system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2020, 41(8): 192–203.
- [58] 杨世武, 扈瑞峰, 刘磊, 等. 高原铁路信号电气电子设备气候环境适应性试验分析 [J]. *铁道技术监督*, 2022, 50(7): 1–6.
- Yang S W, Hu R F, Liu L, et al. Climatic and environmental adaptability test analysis on plateau railway signal electrical and electronic equipment [J]. *Railway Quality Control*, 2022, 50(7): 1–6.
- [59] 马静, 徐宏璐, 马瑞辰, 等. 能源交通融合下的弹性公路能源系统发展技术要点及展望 [J]. *电网技术*, 2022, 38(1): 1–14.
- Ma J, Xu H L, Ma R C, et al. A review on the development of resilient highway energy system under the integration of energy and transportation [J]. *Power System Technology*, 2022, 38(1): 1–14.
- [60] 陈霞, 韩春白雪, 张晔, 等. 城市轨道交通光伏发电系统的应用现状及发展趋势 [J]. *城市轨道交通研究*, 2021 (6): 166–170.
- Chen X, Han C B X, Zhang Y, et al. Application status and development trend of photovoltaic power generation system in urban rail transit [J]. *Urban Mass Transit*, 2021 (6): 166–170.