DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.03.018

“双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究

贾利民[1,2]，程鹏[2]，张蜇[1]，吉莉[3]，徐春梅[4]

（1. 轨道交通控制与安全国家重点实验室（北京交通大学），北京 100044；2. 华北电力大学国家能源交通融合发展研究院，北京 102206；3. 中国石油大学（北京）信息科学与工程学院，北京 102249；4. 北京交通大学电气工程学院，北京 100044）

摘要：轨道交通是能源消耗和碳排放的重要行业，推进轨道交通能源结构变革和以能源自洽为特征的新型轨道交通能源系统发展是助力实现碳达峰、碳中和目标的重要手段。本文在分析轨道交通与能源融合发展需求的基础上，总结了轨道交通与能源融合的发展现状和发展趋势，从太阳能、风能等方面分析了轨道交通与能源融合发展的自然禀赋情况；根据电气化和非电气化轨道交通特点，提出了通过交通资产能源化充分利用可再生能源自然禀赋，实现新时代轨道交通能源融合发展的关键技术路径；最后，基于轨道交通新能源自洽供给潜力评估，提出了轨道交通与能源融合的系列场景和方式，最终形成了以轨道交通自洽能源系统构建为目标的轨道交通与能源融合的发展路线图和对策建议。研究建议：鼓励绿色智能轨道交通技术创新，构建轨道交通能源融合技术体系；实施核心科技攻关计划，统筹新能源与轨道交通产业布局；政策引领轨道交通能源融合发展，建立绿色金融政策保障体系。

关键词：轨道交通；资产能源化；自然禀赋；自洽供给；融合发展

中图分类号：U2　　**文献标识码：**A

Integrated Development of Rail Transit and Energies in China: Development Paths and Strategies

Jia Limin[1,2], Cheng Peng[2], Zhang Zhe[1], Ji Li[3], Xu Chunmei[4]

(1. State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China; 2. China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 4. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Rail transit features high levels of energy consumption and carbon emission; therefore, transforming its energy structure and developing a novel rail transit energy system with self-consistent energy supply become significant approaches for realizing carbon peak and neutrality in China. In this article, we first review the demand for the integrated development of rail transit and energies, summarize the current status and development trends of the integration, and analyze natural endowments for the integration

收稿日期：2022-02-16；**修回日期：**2022-03-31

通讯作者：贾利民，轨道交通控制与安全国家重点实验室（北京交通大学）教授，研究方向为交通运输工程、交通能源融合；E-mail: lmjia@bjtu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“中国交通与能源融合发展战略研究”(2021-XZ-22)

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

in terms of solar and wind resources. Subsequently, based on the characteristics of electrified and non-electrified rail transits, critical technology paths are proposed considering the natural endowments of renewable energies. Moreover, based on the assessment of self-consistent supply potentials of new energies, a series of scenarios and methods are introduced. A roadmap and suggestions are proposed for rail-energy integration development, aiming to a self-consistent energy system construct for rail transit. The suggestions include: (1) encouraging technology innovation regarding green and intelligent rail transit to form a technology system for rail-energy integration; (2) implementing major scientific and technological projects to coordinate the industrial layout of new energy and rail transit; and (3) formulating support policies to create a policy guarantee system for green finance.
Keywords: rail transit; energization of infrastructure assets; natural endowments; self-consistent supply; integrated development

一、前言

我国风、光等可再生能源丰富，轨道交通基础设施和沿线空间具有充足的空间资源可用于可再生能源开发利用。充分利用可再生能源，构建清洁、绿色和高弹性的轨道交通能源系统，实现轨道交通与可再生能源融合发展，促进能源与轨道交通系统供需革命势在必行，发展空间巨大。推动轨道交通与能源融合发展，有助于优化交通运输系统能源结构，促进绿色低碳、环境友好型交通运输系统的发展，为我国履行应对气候变化责任、确保国家能源安全和推动交通强国建设提供支撑保障。

在铁路新能源利用方面，国内外均进行了有益的探索尝试和应用实践。东日本铁路公司（JR-East）在东京站9号和10号轨道的整个站台上方安装了453 kWp太阳能电池板，为东海道3号线列车服务 [1]；瑞士铁路运营商拥有并运营了6座水电站，为公司提供75%的牵引电力 [2]；智利圣地亚哥的地铁运营商于2017年建造了两座太阳能光伏发电站，为地铁供应60%的电能，可再生能源利用率达到76% [3]；荷兰铁路已实现铁路一次能源100%由风能提供 [4]。在国内，北京南站已于2008年投入运行了220 kWp的屋顶太阳能发电机组；武汉火车站建成了2.2 MWp的屋面光伏系统；杭州东站在天篷和屋顶上安装了10 MWp的太阳能发电装置 [5]；雄安高铁站铺设了4.2×10^4 m^{2}的光伏建材，总装机容量为6 MW，为车站服务设施带来了清洁电力 [6]；济青高铁利用沿线车站的屋顶、站台雨棚等闲置空间安装光伏发电项目，取得了显著的节能减排效果 [7]。

在理论研究方面，目前学者们提出了光伏接入轨道交通牵引供电系统拓扑结构 [8]。由于光伏接入会影响轨道交通牵引供电系统的可靠性和安全性，有必要构建含光伏和储能的牵引供电系统优化调度和控制策略 [9,10]，建立高铁新能源微电网规划定容及调度优化模型 [11]。为实现非电气化铁路化石能源替代，实验研究表明，氢能驱动的列车具有较高的技术可行性 [12~14]。为抑制清洁能源波动性对铁路运行的影响，储能系统已成为铁路能源供给系统规划设计的主要内容 [15]。目前，轨道交通储能技术主要用来回收列车制动能量 [16]。以上研究分别针对电气化和非电气化轨道交通与清洁能源的融合提出了不同解决方案。然而，我国地域广阔且复杂多变，需要基于我国轨道交通自然禀赋潜力，进一步提出轨道交通与能源融合发展的策略。

国内外在铁路新能源利用方面进行了大量理论方法研究和技术应用，但这些铁路与能源融合应用的范围较小且体系化程度低，无法针对我国国情形成轨道交通能源融合发展路径的系统性规划和设计。因此，本文通过梳理轨道交通能源融合发展历史与现状，全面分析轨道交通能源融合发展的需求与趋势，系统性提出轨道交通能源融合发展的策略路径和对策建议，以期为轨道交通与能源融合发展提供方向指引。

二、轨道交通与能源融合发展的需求分析

安全高效、绿色低碳是交通运输未来发展的全球共识。铁路运输作为绿色交通方式的代表，不仅对社会经济发展的支撑和保障作用更加凸显，同时也面临碳达峰、碳中和背景下减排增效的巨大压力和挑战。长期以来，铁路对外部电网的高度依赖，不仅使碳排放量居高不下，更因系统弹性缺失形成社会经济运行安全的严重隐患。铁路路网与电网空间布局失配或适配困难，造成铁路系统运行、维护、服务的智能化与绿色化发展进程的结构性约束和瓶颈性障碍，这对于弱电网和无电网地区尤其如此。为全面推进交通运输系统的绿色低碳转型，《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》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 [17]。因此，铁路行业亟需从自身资源挖掘可再生能源潜力，促进其能源结构变革。

确保能源安全亟需轨道交通系统能源结构变革。我国风、光等自然资源丰富，充分利用可再生能源，构建清洁、绿色和高弹性的轨道交通能源系统，实现交通能源绿色自洽，促进能源与交通系统融合。轨道交通系统的能源自洽不仅可以促进轨道交通运输行业用能结构的优化和转型，也是建设交通强国和保障国家能源总体安全的战略性举措。

轨道交通绿色化发展需求促使一次能源清洁化。当前我国乃至全球都面临着气候变化、生态环境污染等严峻挑战，而交通运输行业是第三用能耗能大户。通过利用轨道交通基础设施承载的可再生能源，实现轨道交通一次能源清洁化、绿色化，可助力我国碳达峰、碳中和目标的实现。

不同的自然禀赋利用模式导致轨道交通能源系统形态变化。轨道交通系统自然禀赋的利用需要综合考虑自然禀赋形态、丰度以及电网建设情况，从而建设场景适用的轨道交通自洽能源系统。因此，为满足全国不同地理区域轨道交通自洽能源系统建设需求，迫切需要制定轨道交通能源融合发展策略，实现轨道交通系统用能从非自洽、部分自洽向自洽的转变。

能源可及性需求为融合模式的变革提供动力。轨道交通系统智能化发展的前提是轨道交通系统的电气化。目前，由于电网建设强度不同，我国中西部还存在一部分非电气化铁路。因此，通过利用可再生能源，提出轨道交通能源融合的新模式，是建设智能化轨道交通系统的必要措施。

三、轨道交通与能源融合发展的现状与趋势

（一）发展现状

能源是交通的基础使能领域，交通是能源的最大负荷领域，能源与交通的融合发展一直是保障人类社会合理、有效和可持续演进的重要条件。能源与交通的每一次协同创新，都极大地提高了社会生产率，促进了科技进步，进而塑造了不同时期的人类文明特征。蒸汽机与一次化石能源——煤炭的融合产生了蒸汽机车，拉开了工业文明的序幕；电力机车及铁路与二次能源——电力的融合促成了第二次工业革命，推动了工业文明的发展。与此同时，藉由历次工业革命，在能源与交通相辅相成、互相促进和融合发展的作用下，世界各国的经济地位和战略格局在不断发生着变化与革新 [18]。

现有轨道交通载运装备动力系统和基础设施能源供给主要有碳基燃料内燃机和电力。内燃机驱动列车使用石油或天然气作为主要的动力能量，通过传动装置转化为机械能；电力驱动列车通过牵引供电网获取电力或者采用电力储能为轨道交通运输提供动力来源。在基础设施方面，轨道交通经历了机械化和电气化两个阶段，由于轨道交通基础设施电气化建设要求和难度相比于列车牵引动力电气化较低，其电气化实现早于载运装备。截至 2021 年年底，我国铁路电气化率达 73.3%，但内燃机车使用量仍有 0.78 万辆 [19]。在城市轨道交通方面，电力机车的普及程度较高，基本实现了基础设施和载运装备的完全电气化，但车辆段或停车场仍存在大量用于应急救援和区间作业的内燃机车。

（二）发展趋势

未来的轨道交通能源系统将围绕高效能、高弹性和绿色化三大历史使命进行演进。轨道交通用能形态将朝三大创新方向发展：一是轨道交通资产向绿色能源化方向发展，主要是新能源供能技术运用于轨道交通系统；二是能源供给向自洽多元化方向发展：主要通过新能源出力的接入，采用混合储能装置作为中间单元，为轨道交通系统提供多元化的能源供给；三是用能管理向协同弹性化方向发展，即通过轨道交通资产的绿色能源化和能源供给的弹性多元化的发展，运营管理逐渐向高度协同的弹性化方向发展。

通过轨道交通资产向绿色化转变，铁路能源系统可以减少外界能源供给，降低并减轻电网的压力和负担，提高轨道交通资产的效能；通过自洽式供能的推进，将逐渐减少轨道交通能源系统与高压电网的接触电压，可以有效减少电弧、电晕等铁路接触网高压放电危险的发生，对保障轨道交通的安全稳定运行极为关键；通过能源管理的弹性化发展，可以充分利用和调度我国丰富的交通可再生资源。总之，轨道交通系统的充分绿色化将是建设绿色中国、完成碳减排目标和任务的有力支撑。

四、轨道交通与能源融合发展的自然禀赋分析

（一）太阳能

我国太阳能资源丰富 [20]，各地每平方米的年太阳辐射总量为928~2333 kW·h，中值为每平方米1626 kW·h。据估算，我国每年平均获得的太阳能约为1×10^{16} kW·h，相当于1.2×10^{12} tce所具有的能量。根据各地区经纬度及气候差异，我国太阳能资源可分为四类地区 [21]，其中，I类区域每平方米的年辐射量超过1860 kW·h，II类区域每平方米的年辐射量为1500~1860 kW·h，III类区域每平方米的年辐射量为1200~1500 kW·h，IV类区域每平方米的年辐射量少于1200 kW·h。我国太阳能资源的区域分布情况如表1所示。

我国88.5%的轨道交通里程分布在II、III类光资源区，光伏发电潜力显著，因此，可充分利用轨道交通侧的地理优势进行可再生能源的最大量开发。通过利用轨道交通自有空间资源实施分布式新能源发电，不仅可以提高轨道交通土地资源的综合利用率，还可以提供部分轨道交通用能。

轨道交通的基础设施中线路沿侧、车站站点院内、房顶等集中空间资源具有较大的可再生能源开发潜力，便于建设光伏发电系统。因此，通过在轨道交通可开发空间建设分布式光伏发电系统，实现轨道交通系统从消费者向生产者的转变，减少非可再生能源电力的用量，是一种新型、具有广阔前景的轨道交通电源潜力开发的方式。轨道交通的空间资源为分布式光伏发电提供了布局空间，同时轨道列车、站点负荷又为可再生能源提供了就近的消纳空间，从而形成自发自用的分布式发电开发新模式，降低轨道交通系统的外购电力与碳排放量。含可再生能源与电网共同供电的交通侧电源，在发电量较少时可以从电网取电，在发电量充足时又可以独立电网单独供电，形成交通侧微电网。

（二）风能

我国幅员辽阔，海岸线长，季风气候显著，风能资源丰富。根据中国气象局对中国陆地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/m^2，其中，陆地上可开发和利用的风能储量为2.53×10^8 kW。如果陆上年风电上网电量按等效满负荷2000 h计算，每年可提供电量约为0.5×10^{12} kW·h [22]。由此可见，我国可开发的风能资源储备极为丰富，可成为未来轨道交通供能系统中一个重要的组成部分。

风能不仅随时间的变化而变化，还随高度的变化而变化，总的来看，我国“三北地区”具有发展风能的显著优势。其中，黑龙江、吉林、辽宁、北京、天津、河北、河南、山西、内蒙古、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等地区是我国风能利用和发展的重点地区。其中，内蒙古地势平坦、海拔高，在离地70 m高度的平均风速可达8.0~9.3 m/s，功率密度为700~1200 W/m^2，大量优质、易开发的风能资源催生出一大批风力发电场。此外，我国沿海地区及岛屿地区受春冬季冷空气以及夏秋季台风的影响，在山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等沿海省市形成了向内陆延展10 km宽的风能资源丰富区，年可用小时数为7000~8000 h。我国风资源分布的整体情况如表2所示。

表1　我国太阳能资源分布的区域划分

资源区	地区
I类	宁夏、青海（海西）、甘肃（嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌）、新疆（哈密、塔城、阿勒泰、克拉玛依）、内蒙古（除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔以外地区）
II类	北京、天津、黑龙江、吉林、辽宁、四川、云南、内蒙古（赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔）、河北（承德、张家口、唐山、秦皇岛）、山西（大同、朔州、忻州、阳泉）、陕西（榆林、延安）、青海（除I类外其他地区）、甘肃（除I类外其他地区）、新疆（除I类外其他地区）
III类	河北（除II类外其他地区）、山西（除II类外其他地区）、陕西（除II类外其他地区）、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、贵州、西藏
IV类	除I类、II类、III类资源区以外的其他地区

注：太阳能资源区域划分根据标杆上网电价进行划分。

表2 我国风力资源分布的区域划分

资源区	地区
I类	内蒙古（除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔以外其他地区）、新疆（乌鲁木齐、伊犁哈萨克族自治州、克拉玛依、石河子）
II类	河北（张家口、承德）、内蒙古（赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔）、甘肃（嘉峪关、酒泉）、云南
III类	吉林（白城、松原）、黑龙江（鸡西、双鸭山、七台河、绥化、伊春、大兴安岭地区）、甘肃（除嘉峪关、酒泉以外其他地区）、新疆（除乌鲁木齐、伊犁哈萨克族自治州、克拉玛依、石河子以外其他地区）、宁夏
IV类	除I类、II类、III类资源区以外的其他地区

注：风力资源区域划分根据标杆上网电价进行划分。

五、轨道交通与能源融合发展的技术策略

轨道交通能源融合的目标是通过轨道交通能源自洽，实现轨道交通系统能源结构的改变，提高轨道交通系统弹性，支撑国家能源安全和“双碳”战略。接下来，笔者在分析轨道交通一次能源结构转型目标的基础上，分别提出适用电气化和非电气化轨道交通能源融合发展的策略。

（一）电气化轨道交通与能源融合发展策略

电气化轨道交通与能源融合发展是通过电气化轨道交通与可再生能源集成融合，构建新型的电气化轨道交通能源供给系统。电气化轨道交通与能源融合发展的总体目标是低碳化、再电气化和数字化。电气化轨道交通与能源融合的总体策略为以清洁能源作为电气化轨道交通的部分动力源，借助先进的电力电子技术与信息电子技术，充分利用电气化轨道交通的自然资源禀赋，实现电气化轨道交通与能源融合的快速发展。

在总体策略的指引下，为实现电气化轨道交通与能源融合发展的目标，今后的主要发展方向为轨道交通能源清洁化转型、资产能源化开发、信息化构建。首先，通过轨道交通能源清洁化，降低轨道交通的直接/间接碳排放量，促进电气化轨道交通的低碳化发展；然后，以资产能源化的方式，充分利用轨道交通既有空间资源，提高轨道交通空间资源综合利用率，进一步促进轨道交通电气化的发展；最后，借助先进信息电子技术，构建“源–网–储–车”协同的智能化铁路牵引供电系统，促进能源的高效节约利用。

1. 能源清洁化转型

能源清洁化转型是实现电气化轨道交通与能源融合发展低碳化目标的重要路径。能源清洁化包括供给侧产能的清洁化和需求侧用能的清洁化，前者指开发太阳能和风能等可再生清洁能源作为电能生产方式；后者指构建多途径清洁能源消纳方式，实现清洁能源的高效利用。通过促进电气化轨道交通清洁能源消纳，发展电气化轨道交通，减少内燃机车使用，使电气化轨道交通系统用能实现清洁、绿色化。电气化轨道交通的能源清洁化转型是实现绿色低碳发展的核心目标，是对电气化轨道交通的低碳化改造，是实现电气化轨道交通领域“双碳”战略目标的重要路径。

2. 资产能源化开发

电气化轨道交通资产的能源化开发是实现轨道交通再电气化的主要路径，可以根据电气化轨道交通的空间布局与结构特征，在电气化轨道交通铺设区段建设分布式可再生能源转换设施。通过部署分布式能源设施，将我国轨道交通范围内的自然资源禀赋转化为能源加以利用，促进我国电气化轨道交通的建设和发展，构建以清洁能源为主体的新型电气化轨道交通牵引供电系统。具体方式有轨道交通沿线国土资产开发、轨道交通附属建筑资产开发等。资产能源化开发是电气化轨道交通与能源融合发展的基石，是对轨道交通资产的再电气化改造，是改变电气化轨道交通能源供给方式的重要举措。

3. 电气化轨道交通系统的信息化构建

信息化是电气化轨道交通能源高效利用的技术保障，将极大提升电气化轨道交通的能源可靠性与利用效率。电气化轨道交通系统的信息化构建，可以助力实现电气化轨道交通与能源融合发展的数字化目标。通过先进信息电子技术，构建智能电气化轨道交通供电系统，搭建高效的智慧系统运行管控平台。电气化轨道交通系统信息化构建主要是从本地终端层和系统集控层两个方面开展。在本地终端层，通过对“产–储–配”设施的实时检测监测，

实现能源基础设施全周期状态感知；在系统集控层，通过对轨道交通“网–源–储–车”多个供/用能主体的协同管理，实现整个系统的用能效率最大化。

4. 电气化铁路与能源融合发展的场景应用

电气化轨道交通与能源融合发展的场景应用是指对新能源发电设备进行适应性调整，使其适合电气化轨道交通牵引系统结构集成，提供清洁牵引电力，实现新能源发电的适配集成与全额消纳。针对分相交流牵引供电系统，可利用V/v变压器构造额外交流母线或功率调节器的公共直流母线，分别构造交流微电网与直流微电网，实现光伏和风力发电的近站区接入，如图1和图2所示。

针对同相交流牵引供电系统，由于功率调节器和电力电子变压器均存在公共直流侧，可利用公共直流端构建直流微电网，实现光伏发电和风力发电的近站区接入，如图3所示。

利用轨道交通侧的空间资源，充分发挥多可控资源的互补性优势，实现轨道交通侧的可再生能源最大化开发，并利用可再生能源的发电潜力为轨道交通能源系统提供充足的可再生电力供给。轨道交通运载体作为轨道交通侧最大的消耗能源者，也为可再生能源发电提供了足够的消纳空间，在满足自身能源消耗外，剩余能量可回馈于电网。由于可再生能源发电与轨道交通运载体用电的双重波动性，可通过加装储能装置对能量/功率进行时间上的平移，实现负荷与发电量相匹配。综上所述，将一定地理范围内的可再生能源、储能装置以及可控负荷、稳定的主电源进行统一整合，共同形成一个既可以与大电网并联运行，又可以独立于大电网、孤岛运行的轨道交通侧微网，从而实现电气化铁路轨道交通系统与能源融合的高弹性和高效能运行。

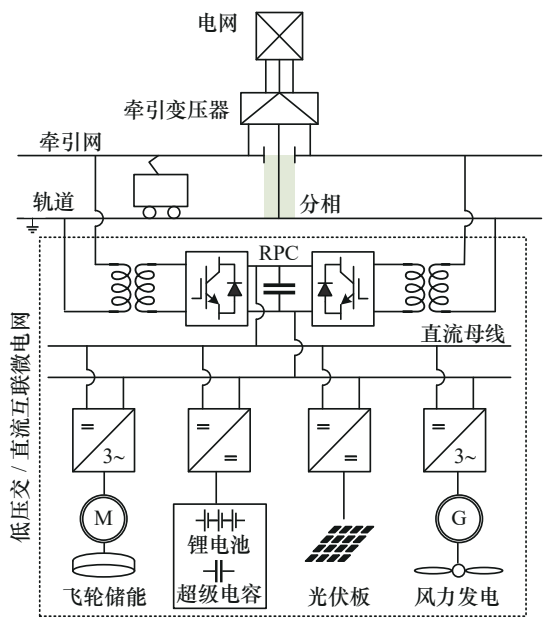

图1　交/直流混合微电网并入两相交流轨道牵引网

注：G表示发电机；M表示电机；RPC表示铁路功率调节器。

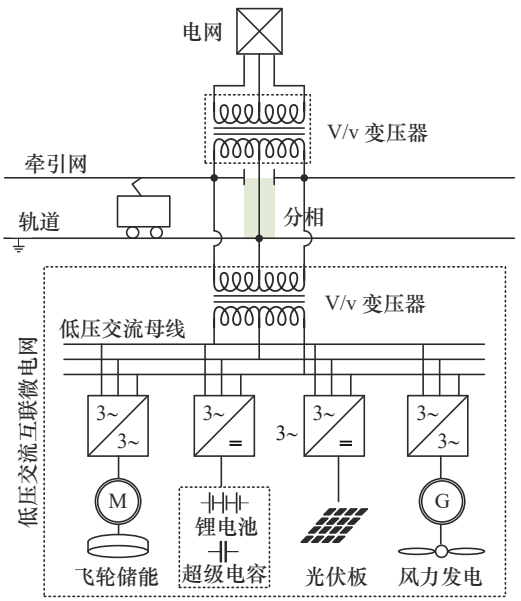

图2　交流微电网并入分相交流轨道牵引网

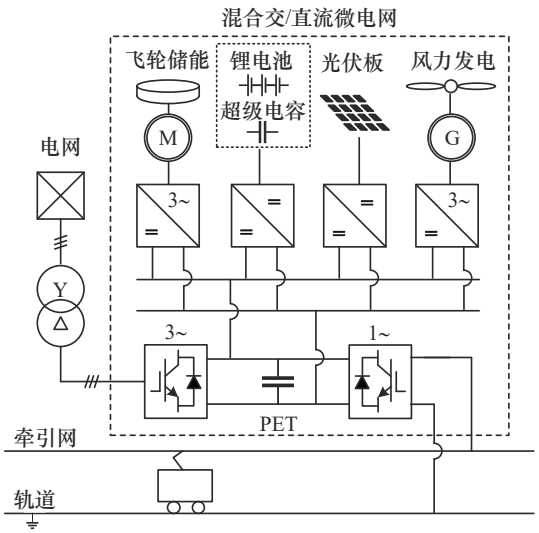

图3　交/直流混合微电网并入同相交流轨道牵引网

注：Y为电气工程通用标识，指变压器的星形接法；PET表示电力电子变压器。

（二）非电气化轨道交通与能源融合发展策略

非电气化轨道交通与能源融合发展是促进轨道交通全面清洁化和电气化的重要措施。为实现非电气

化轨道交通与能源融合发展，达到非电气化铁路的新型电气化、清洁化和一体化的预期目标，主要途径有新动力转型和新能源供配。其中，新动力转型是实现非电气化轨道交通与能源融合发展的新型电气化之路的核心；新能源供配是实现非电气化轨道交通区段自然资源禀赋的清洁化综合开发与高效利用。

1. 新动力转型

针对非电气化轨道交通，载运工具的新动力转型是建设新型电气化轨道交通的关键。通过促进非电气化轨道交通牵引动力由化石燃料驱动向清洁电力驱动转型，使非电气化轨道交通系统牵引用能实现新型电气化。清洁电力驱动方式主要采用超级电容、动力电池、氢燃料电池等方式供电的电动化驱动。其中，氢能化驱动是以氢能作为列车动力源，再由燃料电池转化为电能驱动列车运行 [23]。特别地，电气化轨道交通区段的内燃调车机车可作为新型动力转型的对象。非电气化轨道交通的新动力转型是实现非电气化轨道交通绿色低碳发展的首要条件，是对非电气化轨道交通的新型电气化改造，是实现非电气化轨道交通领域“双碳”战略的内在动力。

2. 非电气化轨道交通的新能源供配

针对站点的陆基设施，非电气化轨道交通新能源供配是实现非电气化轨道交通与能源融合发展清洁化、一体化目标的主要路径。新能源供配包括两个方面，一是大力促进轨道交通区域内的自然资源禀赋开发与利用，实现轨道交通清洁能源的自洽供给，使非电气化轨道交通系统从化石能源消费者向清洁能源产消者转型；二是构建新型非电气化轨道交通能源供配系统，实现非电气化轨道交通系统的能源生产、转换与补给功能一体化系统集成。非电气化轨道交通的新能源供配是实现非电气化轨道交通清洁高效发展的必要条件，是实现非电气化轨道交通领域“双碳”战略目标的外在动力。

3. 非电气化轨道交通与能源融合的应用场景

非电气化轨道交通与能源融合发展的场景主要包括载运工具的电动化和氢能化。为实现非电气化轨道交通系统的用能清洁化，需要提高铁路能源系统弹性，提出专用的可再生清洁能源系统。该系统可借助轨道交通车站近站区范围内的可再生能源发电系统（风、光为主），通过“源–储–荷”互动模式以支撑非电气化轨道交通站点用能与新型载运工具用能，维持负荷的长期稳定运行。

风、光可再生能源的波动性和轨道交通新型载运工具无接触网的独立运行模式，导致电源随气候变化的随机性供给与负荷随运行模式的间断性用能之间存在匹配差异。因此，建议采用非电气化轨道交通站点的二次能源系统作为一次发电系统与机车负荷之间的过渡桥接系统。如图 4 所示，该系统主要由电储能、电化学储能和充电、电制氢、氢储和加氢装置组成。通过二次能源系统对可再生清洁能源发电系统生产的能源进行物理上的暂存，并通过能源输出配置实现制式上的规范和统一，亦保证了能源的清洁性。

六、轨道交通与能源融合发展的潜力测算与实施步骤：以铁路和光伏融合发展为例

本文以铁路和光伏的融合发展为例，通过测算太阳能自然禀赋潜力和能源负荷，提出铁路与能源融合发展的路线图。

（一）我国铁路和光伏融合发展潜力测算

为便于分析，按照每个区域的年平均辐射量对应该区域的相同辐射量的一点来代替该区域，由此计算得出的区域为：I类区域选择（30.7°N，89.85°E），II类区域选择（39.4°N，90.3°E），III类区域选择（35.3°N，114.9°E），IV类区域（30.2°N，108.2°E）。

铁路和光伏融合的方式主要分为运载体与光伏融合、基础设施与光伏融合以及服务设施与光伏融合 [24~26]。运载体与光伏融合是指在列车车厢顶部布置光伏组件，目前适合此类融合方式的主要为非电气化铁路的机车车辆；基础设施与光伏融合是指利用铁路线路周围空间布设光伏组件；服务设施与光伏融合是指在车站站顶布设光伏组件。不同融

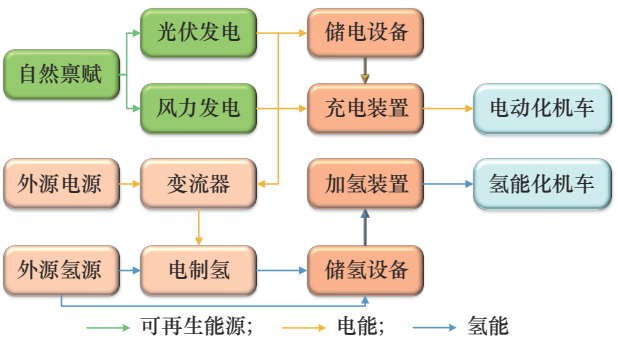

图4 非电气化铁路可再生清洁能源转换系统

合模式的光伏出力潜力计算公式如下 [18]：

（1）铁路运载体的光伏出力：

$$P_t = n_t \cdot S_t \cdot R_a \cdot \rho \quad (1)$$

式（1）中，P_t为运载体的光伏出力，n_t为客车数量，S_t为列车车顶可铺设光伏面积，R_a为全国平均年辐射量，ρ为光伏组件转化效率。

（2）铁路基础设施的光伏出力：

$$P_r = \left(l_1 \cdot c \cdot R_1 + l_2 \cdot c \cdot R_2 + l_3 \cdot c \cdot R_3 + l_4 \cdot c \cdot R_4\right) \cdot \rho \quad (2)$$

式（2）中，P_r为轨道交通线路的光伏出力，l_1、l_2、l_3、l_4分别为I类、II类、III类、IV类辐射地区可铺设光伏线路的长度，c为平均光伏组件宽度，R_1、R_2、R_3、R_4分别为I类、II类、III类、IV类地区的平均年辐射量。

（3）铁路服务设施的光伏出力：

$$P_s = \left(n_{s1} \cdot R_1 + n_{s2} \cdot R_2 + n_{s3} \cdot R_3 + n_{s4} \cdot R_4\right) \cdot S_a \cdot \rho \quad (3)$$

式（3）中，P_s为铁路服务设施的光伏出力，n_{s1}、n_{s2}、n_{s3}、n_{s4}分别为I类、II类、III类、IV类辐射地区的车站数量，S_a为车站平均面积。根据我国太阳能辐射资源，图5给出了2017年我国不同地区铁路光伏出力的评估结果。

（二）未来我国铁路和光伏融合潜力测算

1. 未来光伏出力潜力测算

假定2021—2025年列车数量的增长率与铁路网规模保持一致，列车可铺设光伏的空间利用率达到10%，其他条件保持不变，因此，2025年我国轨道交通载运工具的光伏年出力为0.11×10^8 kW·h，2030年将达到0.27×10^8 kW·h，2035年将达到0.44×10^8 kW·h。

假定铁路网规模在四类光辐射区域的增长情况一致，线路可铺设的光伏空间利用率达到10%，则2025年我国轨道交通基础设施光伏年出力可达到4.18×10^{10} kW·h，2030年将达到1×10^{11} kW·h，2035年将达到1.66×10^{11} kW·h。

假定铁路特等站数量在四类光辐射区域的增长情况与铁路规模的增长情况一致，车站可铺设的光伏空间利用率为10%，其他条件保持不变，则2025年我国铁路特等站光伏年出力可达到2.77×10^8 kW·h，2030年将达到6.62×10^8 kW·h，2035年将达到1.09×10^9 kW·h。

2. 能源负荷预测

根据国际能源署的数据统计 [27]，2017年我国铁路能源需求为1.57×10^7 tce，预计到2030年为2.5×10^7 tce，到2050年为3.29×10^7 tce。我国大多数地区增加的铁路用电需求可以通过如架空电气化线路等各种技术来满足，同时也是可以提供降低温室气体、当地污染物排放的成本效益手段。据预测，2025年，我国铁路用电负荷将达1.66×10^7 tce，约为1.35×10^{11} kW·h；2030年，我国铁路运输的电力需求

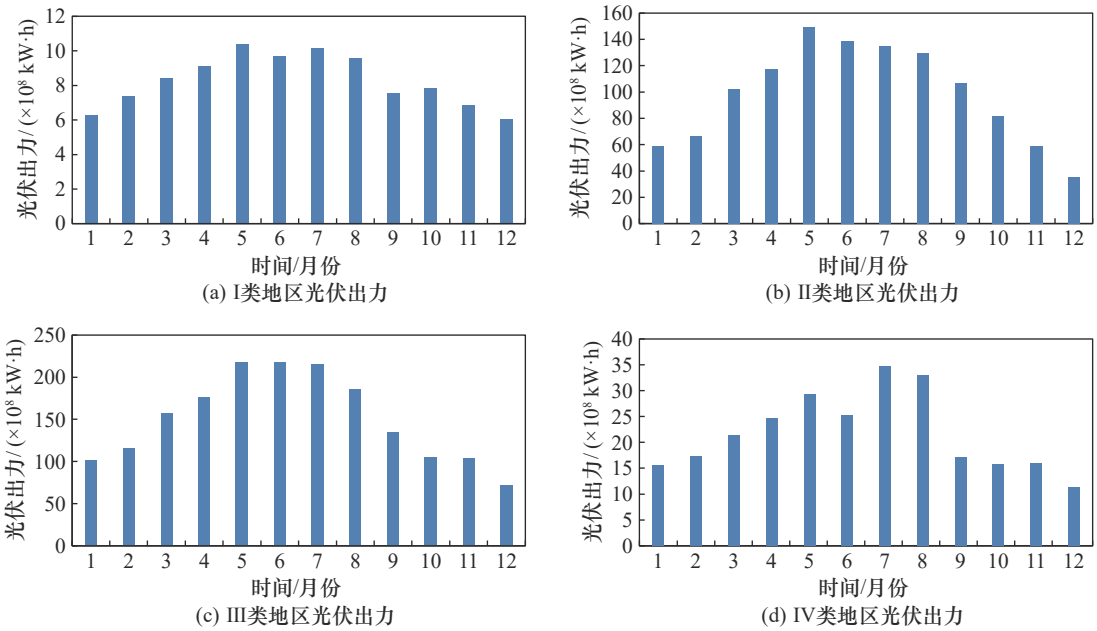

图5　2017年我国不同地区轨道交通（铁路）光伏出力评估 [18]

将达到2.25×10^7 tce，约为1.83×10^{11} kW·h；2035年，我国铁路用电负荷将达到2.76×10^7 tce，约为2.24×10^{11} kW·h [18]。

（三）铁路能源融合发展路线图

本文以新能源渗透率为量化指标，提出铁路能源融合总体目标，从用电自洽率、用能自洽率和碳减排等方面提出铁路能源融合的五年阶段性发展目标和策略 [18]。首先，根据未来15年我国新能源与铁路融合的潜力测算得出我国铁路系统到2025年、2030年、2035年的新能源渗透率可分别达到10%、20%、30%。根据铁路光伏出力及其用电负荷需求，计算出不同时间阶段内达到的自洽率，进而得到面向2035年的铁路新能源融合演进路线图（见图6）。

2022—2025年：优先开发列车开行密度高且光照资源丰富区域，以“可再生能源+储能+微电网+余电上网”和“可再生能源+储能+微电网/电网+自给自足”模式为主，实现用电自洽率为19.5%、用能自洽率为15.6%。可再生能源配合混合储能可提供部分有功出力，铁路主要用能仍以电网供电为主。铁路节能减排效果显著，能效逐步提高。

2026—2030年：持续开发列车开行密度高且光照资源丰富区域，逐步推进少负荷且多光区域，以“内燃机+可再生能源+微电网+自给自足”和“可再生能源+储能+微电网为主+余电上网”模式为主，实现用电自洽率为34.5%、用能自洽率为31.0%。可再生能源配合混合储能可提供的有功出力进一步增多，剩余出力由电网补充。铁路节能减排取得大幅度进展，能效进一步提高，助力实现铁路碳达峰目标。

2031—2035年：持续开发列车密度小且光照资源丰富多光区域，逐步推进其他区域的开发，逐步推进“内燃机+可再生能源+微电网+自给自足”和“可再生能源+储能+微电网/电网+自给自足”等模式，实现用电自洽率达到46.5%，用能自洽率达到44.2%。可再生能源配合混合储能可提供几乎一半的有功出力，剩余出力仍由电网补充。铁路交通智能化、绿色化、高效化和环境友好水平大大提升，并向铁路碳中和目标前进。

七、对策建议

（一）鼓励绿色智能轨道交通技术创新，构建轨道交通能源融合技术体系

建议加强新能源轨道交通载运工具技术研发，突破高性能电动、氢能驱动和低碳能源驱动载运装备技术，突破轨道交通载运装备混合动力技术和非碳基能源动力技术；研发轨道交通能源自洽、轨道交通自洽能源系统多能变换与调控、轨道交通自洽能源系统高效能与高弹性等技术，研究轨道交通系

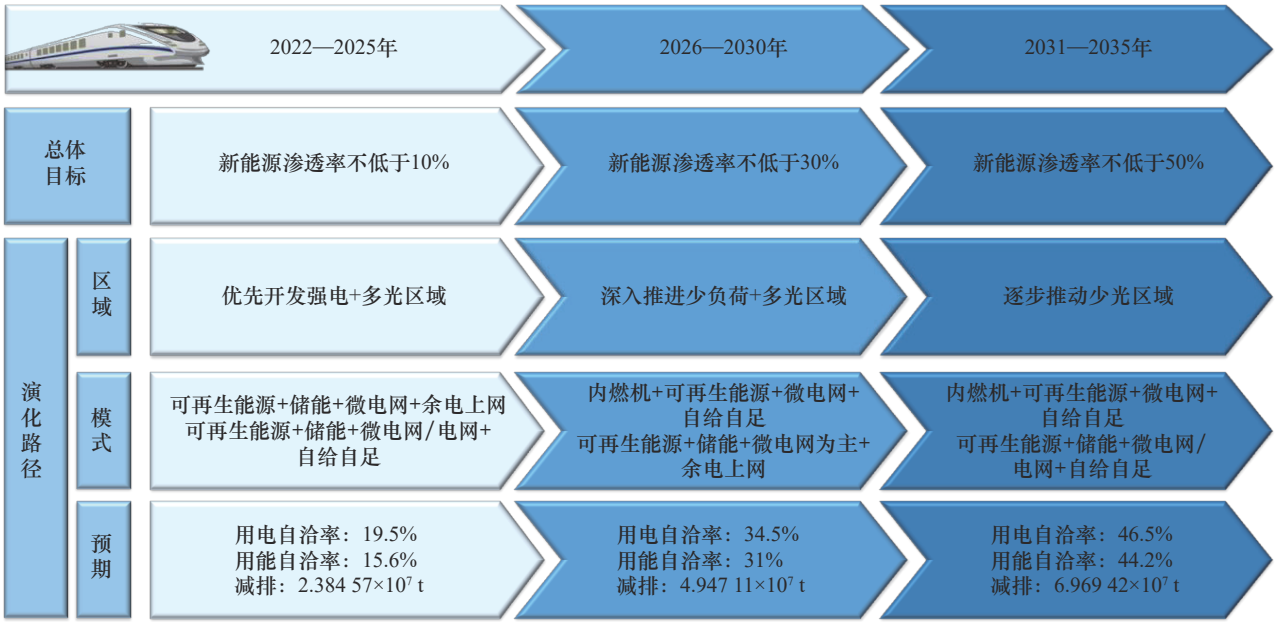

图6 铁路与能源融合发展路线图

统数字化、智能化与综合化等技术，建设绿色智慧轨道交通体系。

（二）实施核心科技攻关计划，统筹新能源与轨道交通产业布局

加强国家科技行动战略引领，论证并制定轨道交通能源融合科技发展规划，编制轨道交通能源融合发展脉络图，部署领域重点科技攻关计划。建议围绕轨道交通自洽能源系统，统筹国家实验室、国家重点实验室和国家技术创新中心布局，培育发展创新型领军企业，建设轨道交通能源融合创新联合体，以期在轨道交通自洽能源系统规划设计、标准规范和实施应用等方面取得突破。加快轨道交通能源融合技术研发、示范和规模化应用，构建与新型电力系统建设深度融合的“政产学研用”技术产业创新体系；持续加强轨道交通自洽能源技术研发和示范工程支持力度，促进轨道交通和能源行业高质量可持续发展。

（三）政策引领轨道交通能源融合发展，建立绿色金融政策保障体系

发挥市场在资源配置方面的决定性作用，以市场化手段解决轨道交通新能源系统建设成本高的问题。借助电力市场化改革契机和碳排放交易机制 [28]，挖掘“源 – 网 – 车 – 储”协同的轨道交通能源系统资源配置潜力，推进轨道交通能源结构优化，提高轨道交通能源融合产业的投资收益。加强政府引领，制定能源电力部门与轨道交通行业的合作政策，优化面向轨道交通能源融合产业的投融资和税收政策，健全轨道交通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，促进交通运输行业碳达峰、碳中和目标的实现。

参考文献

[1] JR East Group. CSR Report 2017: Aiming for a sustainable society [EB/OL]. (2017-10-30) [2022-03-31]. https://www.jreast.co.jp/e/environment/2017.html.

[2] International Union of Railways. Technologies and potential developments for energy efficiency and CO_2 reductions in rail systems [EB/OL]. (2016-12-30) [2022-03-31]. https://uic.org/IMG/pdf/_27_technologies_and_potential_developments_for_energy_efficiency_and_co2_reductions_in_rail_systems._uic_in_colaboration.pdf.

[3] Metro de Santiago. Sustainability report 2017 [EB/OL]. (2018-06-30) [2022-03-31]. https://www.metro.cl/documentos/reporte_sostenibilidad_metro_2017.pdf.

[4] Zhong J, Bollen M, Rönnberg S. Towards a 100% renewable energy electricity generation system in Sweden [J]. Renewable Energy, 2021, 171: 812–824.

[5] Zhou X. A study on potential for using new energy and renewable energy sources in railways [J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2019, 8(4): 45–51.

[6] 张广平, 薛海龙, 王杨. 雄安站建设新理念系统研究与创新实践 [J]. 中国铁路, 2021 (S1): 50–56.
Zhang G P, Xue H L, Wang Y. Systematic study and innovation practice of new concept for the construction of Xiongan station [J]. China Railway, 2021 (S1): 50–56.

[7] 贾彦. 济青高铁实施国内首个“高铁+光伏”项目 [J]. 山东国资, 2018 (Z1): 83.
Jia Y. Jinan-Qingdao high speed railway implements the first high “speed railway + photovoltaic” project in China [J]. State-Owned Assets of Shandong, 2018 (Z1): 83.

[8] 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.
Deng W L, Dai C H, Chen W R. Preliminary research of multiple constriction for PV access traction power supply system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(8): 192–203.

[9] 刘元立, 李群湛. 含光伏和混合储能的同相牵引供电系统日前优化调度 [EB/OL]. (2020-12-28) [2022-02-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20201225.1619.014.html.
Liu Y L, Li Q Z. Day-ahead optimal scheduling of co-phase traction power supply system with photovoltaic and hybrid energy storage [EB/OL]. (2020-12-28) [2022-02-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20201225.1619.014.html.

[10] 王轶欧. 电气化铁路牵引供电用光伏发电系统的接入拓扑及其电流控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 91–97.
Wang Y O. Connection topology and current control of PV generation for traction power supply in electric railway [J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(11): 91–97.

[11] 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.

[12] Sun Y, Anwar M, Hassan N M S, et al. A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations [J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(3): 212–232.

[13] Zenith F, Isaac R, Hoffrichter A, et al. Techno-economic analysis of freight railway electrification by overhead line, hydrogen and batteries: Case studies in Norway and USA [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(7): 791–802.

[14] Din T, Hillmansen S. Energy consumption and carbon dioxide emissions analysis for a concept design of a hydrogen hybrid railway vehicle [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2018, 8(2): 112–121.

[15] Zhong Z, Zhang Y, Shen H, et al. Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121394.

[16] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246–256, 391.
Hu H T, Chen J Y, Ge Y B, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 246–256, 391.

[17] 中华人民共和国国务院. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划 [EB/OL]. (2021-12-09) [2022-02-28]. http://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-01/18/content_5669049.htm.
The State Council of the People’s Republic of China. Development plan of modern comprehensive transportation system in the 14th Five-Year Plan [EB/OL]. (2021-12-09) [2022-02-28]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/18/content_5669049.htm.

[18] 贾利民, 马静, 吉莉, 等. 中国陆路交通能源融合的形态、模式与解决方案 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Jia L M, Ma J, Ji L, et al. Scenarios, patterns and solutions of ground transportation and energy convergence in China [M]. Beijing: Science Press, 2020.

[19] 人民铁道网. 中国国家铁路集团有限公司 2021 年统计公报 [EB/OL]. (2022-03-01) [2022-03-31]. https://www.peoplerail.com/rail/show-2020-483432-1.html.
Peoplerail.com. China State Railway Group Co., Ltd. 2021 statistical bulletin [EB/OL]. (2022-03-01) [2022-03-31]. https://www.peoplerail.com/rail/show-2020-483432-1.html.

[20] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049–1054.
Li K, He F N. Analysis on mainland China’s solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source [J]. Progress In Geography, 2010, 29(9): 1049–1054.

[21] 贾利民, 师瑞峰, 马静, 等. 中国陆路交通基础设施资产能源化潜力研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Jia L M, Shi R F, Ma J, et al. Energization potential of ground transportation infrastructure assets in China [M]. Beijing: Science Press, 2020.

[22] 朱蓉, 王阳, 向洋, 等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409–418.
Zhu R, Wang Y, Xiang Y, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 409–418.

[23] Cipek M, Pavković D, Kljaić Z, et al. Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route [J]. Energy, 2019, 173(3–4): 1154–1171.

[24] 宋剑伟. 地铁高架车站分布式光伏发电系统设计探讨 [J]. 现代城市轨道交通, 2020 (12): 33–37.
Song J W. Discussion on design of distributed photovoltaic power generation system for elevated metro station [J]. Modern Urban Transit, 2020 (12): 33–37.

[25] Jia L M, Peng C, Liu Y K, et al. A perspective on solar energy-powered road and rail transportation in China [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(4): 760–771.

[26] Ji L, Ning F, Ma J, et al. SWOT analysis for orchestrated development of a solar railway system in China [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(1): 3628–3635.

[27] International Energy Agency. The future of rail-opportunities for energy and the environment [EB/OL]. (2019-01-30)[2022-03-31]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/fb7dc9e4-d5ff-4a22-ac07-ef3ca73ac680/The_Future_of_Rail.pdf.

[28] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.
Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China’s power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1–14.