

我国陆路交通能源系统发展战略研究

杨勇平, 武平, 程鹏*, 师瑞峰, 田新首

(华北电力大学国家能源交通融合发展研究院, 北京 102206)

摘要: 以能源高质量发展、交通强国建设为契机, 推动能源与交通融合, 将提升能源、交通两大基础行业的低碳化、高效化、集约化发展水平, 支持实现我国碳达峰、碳中和战略目标。本文梳理了陆路交通能源系统的发展现状与趋势, 阐述了能源与交通融合的必然性, 提出了由动力层、物理层、应用层组成的新型交通能源系统架构; 从能源主导、交通主导、能源交通并重等视角, 分别剖析了互联电力网、电动化交通、能源交通融合网 3 种新型交通能源系统形态。在评估高速公路、高速铁路等典型线路上交通能源系统可利用的自然资源禀赋潜力的基础上, 提出了 3 层结构、3 类形态、3 种驱动力相结合的陆路交通能源系统发展策略, 以引导形成清洁低碳、融合高效的新型综合交通基础设施体系。研究认为, 陆路交通能源系统的创新方向主要包括成套核心装备研制、融合系统构建与运维、技术规范与标准体系建设。为此建议, 推进以清洁能源为主导、以电能为媒介的现代交通能源系统, 创建清洁能源发电-零碳原料燃料-电动化驱动的新型交通动力系统, 实施集能源、交通属性于一身的交通能源一体化新型基础设施规划建设。

关键词: 陆路交通; 交通能源系统; 互联电力网; 电动化交通; 能源交通融合网

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

Development Strategy for Energy System of Land Transport in China

Yang Yongping, Wu Ping, Cheng Peng*, Shi Ruifeng, Tian Xinshou

(China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Considering the high-quality development of the energy sector in China, the integration of energy and transport sectors can facilitate the low-carbon, high-efficiency, and intensive development of both sectors and contribute to carbon peaking and carbon neutralization. This study reviewed the development status and trend of the energy system for land transport and proposed a novel system architecture, which consists of power, physical, and application levels. Three integrated scenarios—interconnected power grid, electrified transportation, and energy-transport integrated network—are analyzed from the energy-dominated, transport-dominated, and energy-transport integrated perspectives. Moreover, a novel development strategy for land transport energy system is proposed based on the potential evaluation of natural resources available for transport energy systems of both highways and high-speed railways. A development strategy consists of three structures, three scenarios, and three driving forces is proposed to guide the construction of a low-carbon and efficient transport infrastructure system. The innovation directions for the transport energy system include key equipment research and development, construction and maintenance of the integrated system, and formation of technical

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-05-16

通讯作者: *程鹏, 华北电力大学国家能源交通融合发展研究院副研究员, 研究方向为新能源交通系统、新能源电力系统;

E-mail: p.cheng@ncepu.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

specifications and standards. Therefore, it is essential to promote a modern transport energy system that is dominated by renewable energies and supported by electric power. Furthermore, a new transport power system that integrates renewable energy generation, zero-carbon fuel, and electric drive should be established, and a transport-energy integrated infrastructure should be planned and constructed.

Keywords: land transport; transport energy system; interconnected power grid; electrified transportation; energy-transport integrated network

一、前言

交通发展先后经历了畜力、煤炭、石油等时代，每次交通方式的升级都离不开能源转型：生物质能源与畜力交通的融合成就了农业文明；蒸汽机与化石能源的融合拉开了工业文明的序幕，形成了第一次工业革命；电动机与电力的融合，推动了第二次工业革命的发展。目前，交通运输消耗石油约占世界石油产量的2/3，相应的碳排放量约占世界总量的1/4，加剧了全球温室效应 [1,2]。随着交通运输规模的不断增长，交通能源系统完成由化石能源向可再生能源的转型并形成零碳系统势在必行 [3~5]。

随着我国经济社会发展，陆路交通作为重要的物流运输方式，能源消耗规模持续扩大；在碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标提出后，构建以清洁能源为主体的新型陆路交通能源系统显得尤为迫切。梳理国内外交通能源系统发展 [6~8]可以发现，交通系统自身蕴含了充足的自然禀赋，特别是在我国西部陆路交通可及的地区，充分利用这些自然资源禀赋，形成服务于交通运转与运维装备的能源供给体系和方案；在提升交通能源自主保障水平、优化交通能源结构的同时，还可在交通可及、能源不可及的地区形成自主能源供给，保障交通正常运转需求。例如，我国高速公路、高速铁路沿线所蕴含的太阳能自然资源禀赋分别为 1.023×10^{12} kW·h、 2.396×10^{11} kW·h，充分利用这些自然资源禀赋将满足陆路交通能源所需、提升交通能源自洽水平 [8,9]；从电气化铁路能源供给角度提出了新能源接入电气化铁路牵引供电系统的结构与实施方案，配置新能源发电、电化学储能等能源单元后可提升电气化铁路牵引供电的灵活性与可靠性 [10~12]；在公路能源方面，电动化趋势明显，确认了规模化电动汽车参与车-网互动的可行性以及对能源电力系统支撑能力的提升作用 [13~15]。因此，陆路交通系统作为能源消耗大户，继续从自身内部挖掘新的能源供给能力，将是优化交通能源结构，促进绿色低碳、

环境友好型交通能源系统的重要方面。

在“双碳”战略目标下，交通运输行业面临严峻的减排降碳压力。推动我国陆路交通领域碳减排，构建以清洁能源为主、能源高效利用的新型交通能源系统至关重要。针对于此，本文在分析国内外交通能源系统发展态势的基础上，提出陆路交通能源系统框架构建方案；以高速公路、高速铁路为例，开展新型陆路交通能源系统可利用的自然资源禀赋潜力分析评估，确立系统建设的必要前提；论证提出陆路交通能源系统的发展策略及创新方向，以期新型交通能源系统的理论与应用研究提供基础参考。

二、陆路交通能源系统发展态势

（一）陆路交通能源系统现状

当前，已有较多的新能源与铁路、公路交通结合的案例，展现了能源与交通融合发展的巨大潜力：既可提高交通国土空间资源利用率，也可促进新能源消纳、降低碳排放，实现能源、交通行业的协调发展。

在铁路交通方面，德国铁路用电量的10%以上由太阳能、风能、水力等可再生能源供给，正在建立兆瓦级光伏发电系统直接接入16.7 Hz交流电气化铁路牵引供电系统的示范工程；预计2050年可实现铁路零碳运行 [16,17]。荷兰鹿特丹中央火车站建成欧洲最大的屋顶光伏项目，年发电量可达 3.2×10^5 kW·h [18]。东日本铁路公司在日本东京火车站建设了453 kW·h分布式光伏发电项目，供给轨道交通牵引用电 [19]。英国建设的光伏发电系统接入直流牵引供电系统的示范工程，每兆瓦太阳能发电设备每年可减少碳排放量约245 t，促进了铁路牵引用能的清洁化与自主化 [20]。此外，在轨道车辆方面，氢动力列车发展迅速 [21]，如广东省佛山市高明区现代有轨电车示范线率先采用了氢能源有轨电车作为运营车辆；2018年起，德国下萨克森州

采用了法国阿尔斯通公司生产的氢动力列车执行区域性客运任务。

在公路交通方面,借力新能源汽车的快速发展,“光储充”一体化充电站得到广泛应用 [22~24]。2015年,美国通过在公路边坡架设太阳能电池板来发电,功率达到99 kW [25]。2016年,世界首条光伏公路在法国西北部投入运营,长度约为1 km。意大利建造了太阳风能桥,在桥面铺设密集的太阳电池板以连续生产电力,在支柱之间安装风力机,从而将通行、景观、绿色能源结合起来,年发电量约为 4×10^5 kW·h [26]。2020年,山西省高速公路服务区分布式光伏发电项目投入运营,装机总容量为395 kW,年发电量约为 6.5×10^5 kW·h,以“车棚光伏+屋顶光伏+地面光伏”模式实现了节能减排的环境收益 [27]。

(二) 陆路交通能源系统展望

能源、交通行业快速发展,互联程度不断增强,呈现的趋同化特征日益显现,这为陆路交通能源系统的变革提供了前提条件。

现阶段,我国新能源电力得到广泛应用,尤其是风力、光伏发电进展较快。2021年,我国累计风电、光伏发电并网规模分别为 3.3×10^8 kW、 3.1×10^8 kW;2030年,风、光并网规模预计超过 1.2×10^9 kW,为以新能源为主体的新型电力系统建设、经济社会可持续发展提供清洁脱碳的能源保障 [28]。与此同时,“安全、便捷、高效、绿色、经济”的现代化综合交通体系建设成为趋势,交通用能清洁化、动力电气化发展特征显著,如2020年我国纯电新能源汽车保有量为 4×10^6 辆 [29],电气化铁路营业里程达到 1.063×10^5 km [30]。在“双碳”战略目标下,能源与交通势必出现重大变革,催生新模式、新技术并获得加速应用,以此实现能源清洁化、交通绿色化转型升级与可持续发展;在能源安全、交通强国战略驱动下,推动陆路交通能源系统的转型发展,是交通与能源协同共进的创新实践,也是绿色发展支撑“双碳”战略的必然路径。

从发展路径角度看,我国面临资源紧缺、气候变化、环境污染带来的严峻挑战,因此粗放式、非协同的增长方式难以为继;面向绿色发展的战略规划和产业转型升级,是应对上述挑战的主要举措和根本途径。应运而生的能源转型与供给侧改革、交

通绿色化与智能化发展,亟需协同能源、交通开展统筹规划 [31~33]。在世界倡导节能减排、我国推行高质量发展的背景下,梳理能源交通融合的基础结构,重新审视新发展格局下陆路交通能源系统的结构与形态,在推动能源网络建设、促进交通动力电气化及用能清洁化方面具有积极作用。

从经济社会的角度来看,在以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的发展格局下,叠加“双碳”战略目标,高质量发展已成为新时期经济社会发展的主旋律;能源与交通作为主要的基础保障,直接决定相关发展的模式、形态与质量 [34,35]。因此,陆路交通能源系统的变革将形成新技术、新业态、新产业、新模式,促进产业重构、聚集、引领、带动等作用的发挥。

未来,能源、交通将由条块分割、行业隔离式发展转变为相互衔接、集成融合的协同发展模式,以清洁低碳、融合高效的新型综合交通基础设施体系,驱动能量流、交通流的高效协同。陆路交通能源系统的变革,是加速能源革命与交通转型、促进经济社会可持续发展的必然趋势,也将提升能源、交通行业的低碳化发展水平并以更强的脱碳竞争力支撑国家“双碳”战略目标的实现。

三、陆路交通能源系统框架构建

(一) 系统架构

在“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念引导下,能源、交通行业的运行水平大幅提升,用能结构更加清洁,趋同化特征显现。① 能源行业的发展趋势表现在三方面:能源生产清洁化,呈现由高碳向低碳转型趋势;能源消费电气化,电能的终端能源消费占比持续提升;能源配置广域化,新能源开发从大规模并网逐步转向集中式并网与分布式接入并举的模式。② 交通行业的演变特征表现在三方面:用能清洁化是交通系统可持续发展的关键所在,大规模利用电能、氢能等替代能源,降低交通行业对石油等化石能源的依赖,减少交通系统的碳排放;动力电气化是交通系统提高能源利用效率的必经途径,在清洁化用能格局的推动下,电动机将替代内燃机成为主流动力装备,全面电气化是大势所趋;系统集成化是交通系统实现高效集约运行的重要举措,通过交通通道资源、自然禀赋

的统筹协同与有效衔接，提高交通国土空间利用率、降低建设成本、增强交通枢纽功能水平。

整体来看，能源、交通行业的清洁化、高效化、集成化发展方向趋同，内生联系加深，在智慧能源、自主交通等领域的融合应用更是率先展开。论证提出了我国陆路交通能源系统架构（见图1）：① 动力层是实现能源、交通系统运转的能源系统，驱动能源与交通系统的运行，主要有石油、天然气、电力、氢能等能源形式，为物理层设备和设施的运维提供动力保障；② 物理层是能源、交通系统各类设备与终端的集合，作为动力层的物理载体，主要有变电站、客货枢纽、载运工具等，为应用层业务和服务的实施提供运行支持；③ 应用层是能源、交通系统各类业务服务的集合，作为价值创造的平台，主要有规划建设、运转运维、用能充电、动力补给等业务和服务。

（二）系统形态

1. 互联电力网

互联电力网着眼于交通基础设施，重点关注动力层，侧重于交通基础设施自有资源禀赋的开发利用；先期利用新能源发电为交通系统提供清洁能源，后续结合交通载运装备需要，以电解水制氢、合成氨等方式提供载运装备所需燃料。电能作为清洁、高效、便捷的二次能源，将主导陆路交通能源系统的动力层融合发展。在该视角下，交通资产进行能源化开发并与电力技术、信息技术相结合，通

过能源融合模式形成能源产销清洁化、高效化、一体化的互联电力网；以智能电网为主体，实现能源、交通动力层的充分融合，为能源、交通系统提供清洁、高效、自主的动力保障。

互联电力网这种融合形态的突出特征是以电力为中心，以实现陆路交通能源系统的产用一体化为目标；依托交通基础设施的空间资源，通过交通基础设施资产能源化开发来实现能源生产与利用设施的有效融合；交通基础设施用能负荷同时为可再生能源提供了广阔的消纳空间，避免了弃风、弃光现象。针对此类交通能源融合模式，重点加强电力网络与交通用能系统之间的衔接及融合，加快清洁电力替代进程，提升能源系统效率与清洁化水平。

2. 电动化交通

电动化交通着眼于交通载运装备，重点关注物理层，侧重于交通载运装备动力系统的类型革新；将原有以石油为主的动力系统升级为以电化学、氢、氨等清洁能源为主的动力系统，降低载运装备的碳排放量。电动化交通以电能替代传统化石能源作为载运装备动力源，是交通节能减排的重要趋势，将引导陆路交通能源系统的物理层融合发展。在该视角下，以交通动力源的电动化转型升级为导向并与现代制造技术、动力电气技术相结合，以载运装备为主体形成高效率、低排放的电动化交通格局。电动化交通也是能源、交通系统融合发展的重要节点；作为用能终端，相应的清洁化、低碳化进程取决于能源系统动力供给品质；作为新型载运工具，直接决定交通载运装备的能源利用效率。

电动化交通这种融合形态的突出特征是以电能为动力源，以实现交通载运装备用能的高效化为目标；利用电能替代传统化石能源，实现车载动力的清洁化、高效化转型；随着氢能技术的快速发展，发挥氢的比能优势，氢动力交通作为有效补充，将克服锂电续航里程、补给时间等不足，进一步推动交通系统的深度脱碳。针对此类交通能源融合模式，重点加强电能、氢能与交通载运装备动力的融合，在清洁能源消纳、动力效能提升、碳减排等方面发挥重要作用。

3. 能源交通融合网

能源交通融合网着眼于交通能源一体化发展，重点关注业务层，侧重于利用交通系统的自然资源禀赋制取零碳交通燃料；在供给交通载运装备所需

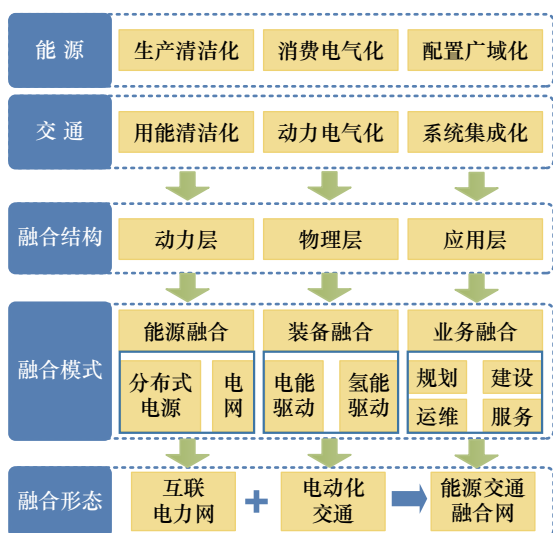


图1 我国陆路交通能源系统架构

的同时，形成能源捕获—燃料制取—交通加注一体化的新型交通能源一体化系统。能源交通融合网强调以能源网、交通网并存形式来实现陆路交通能源系统的应用层融合，即各种品类能源和电动化交通并重，无需以单一网络主导融合过程；电、热等各式能源供给可通过相应的转换器实现直连或交互，无需经过以电为中心的转换环节。在该视角下，统筹规划能源、交通系统，以微能网单元建设、交通自主运转为主要特征；根据各式能源的生产和利用需求，构建电、氢、冷、热等多能耦合的交通自洽能源系统，促进能源产用、交通出行等应用的整合与衔接。

能源交通融合网这种融合形态的突出特征是能源电力网、电动化交通网对等共存，以实现多能综合供配、交通能源自洽为目标；打破能源、交通系统的行业壁垒，推动通道共用、枢纽共建、终端集成，实现各自业务的深度融合。作为新型网络化基础设施，能源交通融合网兼具能源网、交通网属性，是资源配置、自主保障能力更强的陆路交通能源系统形态，成为提高能源利用与交通运转效率的重要途径。

四、陆路交通能源系统潜力评估——以光伏资产化潜力为例

光伏发电具有组件灵活、安装便捷的特点，因而十分适合与陆路交通基础设施相结合，形成清洁高效的交通自洽能源系统。本文针对高速公路、高速铁路等陆路交通线路上自有的国土空间资源，分别提出利用交通资产能源化开展光伏发电的融合策略；以京沪高速公路、京哈高速公路、京沪高速铁路、京哈高速铁路等典型交通线路为例，具体开展潜力评估。

（一）交通基础设施能源化潜力评估模型

在高速公路方面，光伏可利用的国土空间主要分为道路沿线空间、服务区空间；前者包括路侧边坡、边沟，道路上方专属空间；后者包括建筑屋顶、停车场、出入匝道等。为客观评估高速公路光伏资产化潜力，文中以上述可用空间的70%作为基准进行测算。在高速铁路方面，光伏可利用国土空间主要分为铁路沿线空间、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、停车场、雨棚等区域。为客观评估高速铁路光伏资产化潜力，文中以沿线两侧10 m空间资源、火车站屋顶、广场、停车场、雨棚总面积的70%为基准进行测算。光伏可开发潜力评估模型如图2所示。

（二）交通基础设施用能自洽率评估

为了评估交通基础设施资产能源化后的供能自洽率，文中引入总自洽率、经时自洽率、电能时移率3个指标（见图3）[8]，针对典型场景交通系统的基础设施资产能源化潜力、基础设施用电负荷开展案例分析：以华北—华东地区的京沪高速公路、东北地区的京哈高速公路为例，展示高速公路能源化的发展潜力；以华北—华东地区的京沪高速铁路、东北地区的京哈高速铁路为例，评估高速铁路能源化发展潜力（见表1）。

合理简化交通线路的空间分布差异性，分别选用42.5° N、35.0° N纬度的辐照数据进行京沪高速公路/铁路、京哈高速公路/铁路的装机容量测算。结果表明，高速公路、高速铁路系统通过交通基础

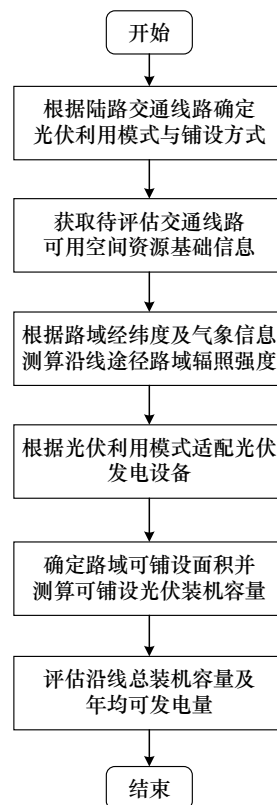


图2 我国陆路交通基础设施光伏资产化潜力评估模型

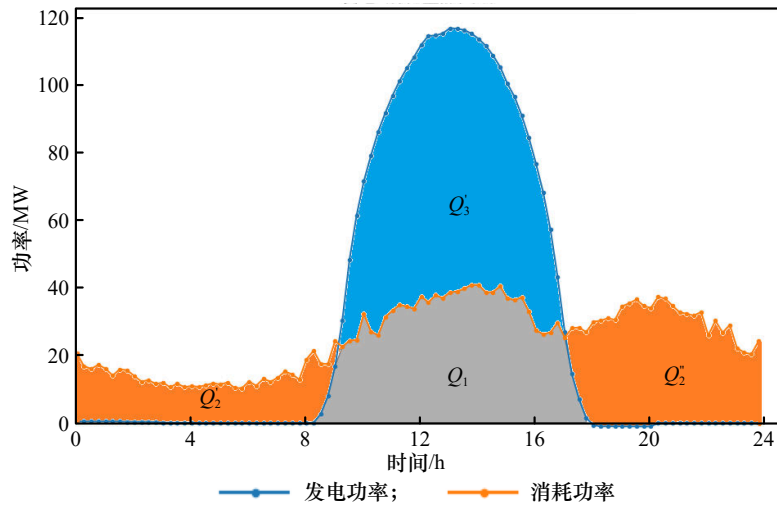


图3 交通系统能源化潜力与用电需求量关系示意图（发电—消耗叠加曲线）

注： Q_1 表示线路实施自发自用电量； Q_2 表示线路典型日的总耗电量（ $Q_2=Q_1+Q_2'+Q_2''$ ）； Q_3 表示典型日光伏最大发电量（ $Q_3=Q_1+Q_3'$ ）。

表1 典型陆路交通线路基础设施可发电潜力测算

| 指标 | | 类别 | | | |
|------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 高速公路 | | 高速铁路 | |
| | | 京沪 | 京哈 | 京沪 | 京哈 |
| 可用空间 | 总里程/km | 1233.4 | 1209.0 | 1302.0 | 1250.0 |
| | 沿线空间/ $\times 10^4$ m ² | 511.2 | 478.3 | 1065.0 | 1022.5 |
| | 站点空间/ $\times 10^4$ m ² | 141.1 | 130.2 | 144.0 | 120.9 |
| 发电潜力 | 装机容量/10 MW | 27.2 | 15.1 | 57.0 | 54.7 |
| | 年均发电量/(GW·h) | 471.9 | 246.4 | 3177.3 | 3360.2 |
| | 年均用电量/(GW·h) | 101.5 | 85.0 | 1388.8 | 1864.1 |
| 评价指标 | 总自洽率/% | 470.4 | 295.4 | 247.8 | 186.9 |
| | 经时自洽率/% | 57.1 | 56.1 | 59.1 | 41.1 |
| | 电能时移率/% | 86.9 | 77.4 | 74.0 | 76.9 |

设施光伏能源化利用的总自洽率均远高于100%，即交通系统完全可以通过自身资产能源化潜力开发来实现基础设施的自洽供能；经时自洽率介于41%~59%，即交通系统通过资产能源化所开发的电能需要采用储能系统或者与外部电网互济，才可满足自身的全部用能需求。

五、我国陆路交通能源系统发展策略

（一）总体策略

本文立足国情实际、参照国际趋势，论证提出了我国陆路交通能源系统发展策略（见图4），以期协同建设低碳化、集约化的新型基础设施体系，促进能源和交通行业的高质量、可持续发展。整体来

看，我国陆路交通能源系统可分为3个层级：①动力层，保障基础设施运转的能量供给，通过动力层的能源融合来推动能源结构优化、提升交通行业的脱碳竞争力；②物理层，作为能源与交通装备设施的集合、能源利用效率提升的关键环节，通过物理层的装备融合来推动交通能源动力系统清洁化、低碳化、高效化；③应用层，承载数据信息和服务功能，通过管廊共用、枢纽共建、功能集成等方式来推动能源与交通社会功能的有效衔接。

我国陆路交通能源系统存在3种形态：①互联电力网，以能源行业为主，以智能电网为载体，为交通系统提供清洁能源保障，驱动陆路交通能源系统动力层的充分融合；②电动化交通，以交通行业为主，以交通运载工具为对象，通过交通动力源的

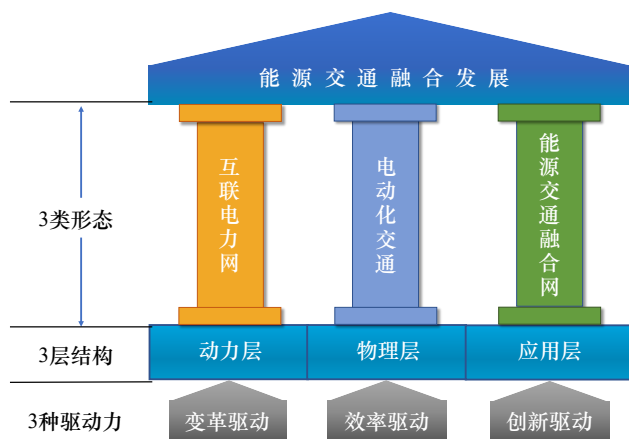


图4 陆路交通能源系统发展策略

电动化转型升级，引领陆路交通能源系统物理层装备的有效融合；③ 能源交通融合网，强调能源网、交通网并重，通过陆路交通能源系统的统筹规划、协同运维，提高陆路交通能源系统效率，实现“两网”应用的深度融合。

我国陆路交通能源系统受到3种驱动力的作用：变革驱动、效率驱动、创新驱动。交通基础设施能源供给将由“远方来”转为“远方来”“周边取”共存，以电能代替石油的交通动力系统再电气化持续发展，这些主动变革将会带来陆路交通能源系统整体效率的显著提升，也将催生陆路交通能源系统的新技术、新模式。加快交通能源系统的清洁化、低碳化，推动铁路电气化进程，推广新能源动力的公路运载装备，共同促进交通能源系统与交通动力系统的减碳降耗、提质增效发展。

（二）轨道交通能源方面

通过轨道交通供用能系统的转型升级，分别构建面向电气化铁路的新型牵引供电系统、面向非电气化铁路的新型动力系统，共同实现轨道交通能源系统清洁化、再电气化的发展目标。

在清洁化发展方面，充分利用轨道交通空间资源，将分布式发电设施接入电气化轨道交通系统，推动非电气化轨道交通区域内的自然资源禀赋开发与利用；将能源电力生产设备纳入轨道交通系统基础设施，形成兼具能源、交通属性的新型基础设施，实现非电气化轨道交通系统的能源生产、转换、补给功能一体化（可视为互联电力网的具体形式）。

在再电气化方面，非电气化轨道交通牵引动力由化石燃料驱动转向清洁电力驱动，促进非电气化轨道交通系统运用能实现再电气化，分为以电能作为动力源、以氢能作为机车动力源再由燃料电池转化为电能两种方式；完成轨道交通载运装备的电能替代，以电动机作为驱动机构来获得优于内燃机的能量转换效率，实现交通载运装备的节能与增效（可视为电动化交通的直接表现）。

在此基础上，促成以能源生产为主的互联电力网、以能源消费为主的电动化相结合，充分利用轨道交通沿线自然禀赋资源，以新能源发电为轨道交通提供清洁电力，形成电力“远方来”“周边取”共存的能源电力供给新模式；基于清洁电力制备交通零碳燃料，加速清洁原料燃料替代交通终端化石能源的进程，形成清洁能源发电—零碳原料燃料—电动化驱动的新型交通能源系统（可视为能源交通融合的关键所在）。

（三）公路交通能源方面

通过公路交通资产能源化潜力开发，分别构面向公路交通基础设施自洽能源系统与载运装备电动化、氢能化的新型动力系统，实现公路交通能源系统绿色化、智能化的发展目标。

在基础设施自洽能源系统构建方面，根据我国气象、经济、人口特征，地势三大阶梯特征以及地理空间骨干电网分布、交通负荷需求分布等，划分能源交通融合场景；在综合考虑道路风光可再生能源自洽率、渗透率、经济性、碳减排等综合因素的前提下，优先开发自然禀赋好、负荷小的区域，随后开发其他区域；实现交通基础设施资产能源化潜力的梯次开发利用，最终形成我国公路交通系统的自洽清洁能源系统。

在载运装备电动化、氢能化转型方面，逐步构建分布式的“源—网—荷—储—充”道路交通自洽供电系统；发展小型化的绿氢制备设备，完善氢气“制—储—运”一体化的服务网络；开展氢、氨联合储运，研发公路交通载运装备氢能化、氨能化并存的新型动力系统，率先实现载重汽车动力的清洁化。通过新型动力装备的研制，充电、加氢服务设施的规模化及网络化建设，最终实现交通载运装备的绿色化、智能化。

六、陆路交通能源系统的创新方向

（一）成套核心装备研制

高可靠、高适应性的能源捕获与变换成套核心装备，是陆路交通与能源融合的关键。陆路基础设施能源捕获/存储与变换的运行场景变化多样，面临高寒、沙漠高风沙、高海拔空气稀薄、高盐雾腐蚀等恶劣运行环境。因此，集成交通基础设施、能源捕获/存储系统面临着复杂苛刻的应用环境，对装备性能的稳定可靠提出挑战。

能源侧的光伏发电、风力发电、变流器、储能等可再生能源发电装备，其运行特性、寿命周期等可能因运行环境不同而出现明显变化；对材料、生产工艺、运行特性、主动支撑控制功能提出了新增的适应性要求，因而能源捕获与变换成套核心装备均需进行适配性设计与调整。

交通侧推广应用新能源，清洁能源，智能化、数字化、轻量化、环保型交通成套技术装备，积极运用智能高速铁路、智能道路、智能航运、自动化码头、数字管网、智能仓储与分拣系统等新型装备设施，交通装备相关的智能检测监测和运维技术。

（二）融合系统构建与运维

场景适配是陆路交通能源融合系统构建及运维的重要前提，表现为交通结构优化与能源一体化发展，用能管理朝着协同弹性化方向发展。陆路交通能源系统基于不同场景组网而表现出多样化的模式，是以能源转化单元、交通基础设施用能单元、多类型储能等装备为主体的综合能源系统、自洽系统，其运行需要实时、准确、高效、统一的能量管理系统。

能源系统与交通系统作为供需双方参与的协同规划运行体系，电网接入条件多变，强电/弱电/无电情形并存。需结合实际应用需求研发适配技术，如强电网接入下的交通能源融合系统清洁能源利用与自洽提升技术、电网末端薄弱环节接入时的系统内电力电子设备强主动支撑能力与稳定性增强相关技术、偏远地区无配网时的交通系统特有孤网与微电网系统内发电装备的同步控制及构网运行技术。

（三）技术规范与标准体系建设

能源、交通两大基础性行业的趋同化发展特征

凸显，能源与交通融合发展加速，势必出现行业体制、技术体系的重大变革，批量产生新模式、新技术。对照陆路交通能源系统的重大需求、技术构成、产业态势，现有技术规范与标准体系仅反映各自分散领域的装备特性及技术要求，不能满足场景适配场景下的可再生能源发电技术要求，时效性也显滞后，在全面支撑新的综合性领域发展方面存在明显差距。

在研究制定陆路交通能源系统的适配标准过程中，应坚持目标能力导向，形成有关技术规范与标准体系总体建设方案，据此细化可再生能源标准，支持包括太阳能、风能、氢能、生物质能在内的可再生能源体系化发展，促进能源转型。结合能源动力、交通运输的学科交叉背景，界定标准在陆路交通能源系统适配场景中的应用范围，协同构建场景全覆盖的技术规范与标准体系。明确术语与定义，进一步在适用范围内把握装备动态特性，针对工作环境、功率预测、有功/无功控制、运行适应性、电能质量、启停、安全、继电保护、离/并网控制模式、通信与信息、检测等，提出相应技术要求。发挥陆路交通能源系统发展过程中标准对技术创新、产业跃升的引导和规范作用。

七、陆路交通能源系统发展建议

陆路交通能源系统的建设运行将是跨行业、跨领域的创新工程。能源与交通融合是提高资源利用效率的重要载体，也是新发展格局下能源与交通行业“创新、绿色、高效、协同”发展的现实需求，还是实现“双碳”战略目标的构成要素。持续推动我国陆路交通能源系统建设，驱动能源和交通行业由条块分割、缺少统筹的独自发展模式转向功能融合、系统集成的协同发展模式，在形态功能上实现更深层次的融合，在运转模式上实现更高效率的协同，进而形成清洁、高效、共享的综合基础设施体系。

一是稳步推进以清洁能源为主导、以电能为媒介的现代交通能源系统。在全球能源革命的趋势下，电能在交通行业领域持续渗透，依托现代能源、先进材料、信息通信等技术，以电能深度替代和以石油为主体的交通终端化石能源消费，以交通行业电气化水平的显著提升推动清洁能源的大规模开发利用。

二是引领创建清洁能源发电—零碳原料燃料—电动化驱动的新型交通动力系统。在清洁原料燃料替代交通终端化石能源的进程中,充分利用我国自然资源禀赋,以新能源发电方式形成低碳电力供给,而后利用低碳电力制备原料燃料,从而为交通再电气化发展提供零碳原料燃料并支持电动化载运装备革新。

三是规划建设交通能源一体化新型基础设施。通过能源、交通系统的统筹规划和协同建设,融合能源、交通属性,打破各自行业壁垒,建立陆路交通与新能源用地的统筹规划、一体化设计、基础设施协调等机制,推动通道共用和枢纽共建,提高两大领域的资源配置与自主保障能力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 25, 2022; **Revised date:** May 16, 2022

Corresponding author: Cheng Peng is an associate research fellow from the China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University. His major research fields include new-energy transportation system and new-energy power system. E-mail: p.cheng@ncepu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Integrated Development of Transportation and Energy in China” (2021-XZ-22)

参考文献

- [1] International Energy Agency. The future of rail: Opportunities for energy and the environment [EB/OL]. (2019-01-30)[2022-03-25]. <https://www.iea.org/events/the-future-of-rail-opportunities-for-energy-and-the-environment>.
- [2] International Energy Agency. World energy outlook 2020 [EB/OL]. (2020-10-01)[2022-03-25]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- [3] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15–21.
Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 15–21.
- [4] 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.
- [5] Jiang L, Fu X Z. An ammonia-hydrogen energy roadmap for carbon neutrality: Opportunity and challenges in China [J]. Engineering, 2021, 7(12): 1688–1691.
- [6] Pei J Z, Zhou B C, Lyu L. e-Road: The largest energy supply of the future? [J]. Applied Energy, 2019, 241(1): 174–183.
- [7] 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, 2021.
Jia L M, Ma J, Ji L, et al. Energization potential of ground transportation infrastructure assets in China [M]. Beijing: China Science Press, 2021.
- [8] 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. Scenarios, patterns and solutions of ground transportation and energy convergence in China [M]. Beijing: China Science Press, 2020.
- [9] Jia L M, Ma J, Cheng P, 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.
- [10] Cheng P, Liu W Q, Ma J, et al. Solar-powered rail transportation in China: Potential, scenario, and case [J]. Energy, 2022, 245: 1–15.
- [11] Ji L, Ning F W, Ma J, et al. SWOT analysis for orchestrated development of a solar railway system in China [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(18): 3628–3635.
- [12] Brenna M, Foadelli F, Kaleybar H J. The evolution of railway power supply systems toward smart microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources [J]. IEEE Electrification Magazine, 2020, 8(1): 12–23.
- [13] Zhang Y M, Chen J Y, Cai L, et al. Expanding EV charging networks considering transportation pattern and power supply limit [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6332–6342.
- [14] Yang Y, Jia Q S, Deconinck G, et al. Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6253–6264.
- [15] Dong X H, Mu Y F, Jia H J, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1452–1461.
- [16] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692–5702.
Deng W L, Dai C H, Chen W R, et al. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692–5702.
- [17] D’Arco S, Piegari L, Tricoli P. Comparative analysis of topologies to integrate photovoltaic sources in the feeder stations of AC railways [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(4): 951–960.
- [18] 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.
- [19] JR-East Group. CSR report 2017: Aiming for a sustainable society [EB/OL]. (2017-04-01)[2022-01-19]. <https://www.jreast.co.jp/e/environment/2017.html>.
- [20] Cheng P, Kong H W, Ma J, et al. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid [J].

- CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5): 1122–1132.
- [21] Abdin Z, Zafaranloo A, Rafiee A, et al. Hydrogen as an energy vector [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120: 1–15.
- [22] 杨健维, 李爱, 廖凯. 城际高速路网中光储充电站的定容规划 [J]. 电网技术, 2020, 44(3): 934–943.
Yang J W, Li A, Liao K. Capacity planning of light storage charging station for intercity highways based on charging guidance [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 934–943.
- [23] Tran V T, Islam M R, Muttaqi K M, et al. An efficient energy management approach for a solar-powered EV battery charging facility to support distribution grids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6517–6526.
- [24] Shariff S M, Alam M S, Ahmad F, et al. System design and realization of a solar-powered electric vehicle charging station [J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(2): 2748–2758.
- [25] Subramanian R. The current status of roadways solar power technology: A review [C]. Fairbanks: International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation, 2015.
- [26] 汪瑒. 他山之石: 国外公路建设的能源利用 [J]. 交通建设与管理, 2018 (2): 42–45.
Wang Y. Learning from others: Energy utilization of foreign highway construction [J]. Transport Construction & Management, 2018 (2): 42–45.
- [27] 唐明涛, 陈志强, 王志刚, 等. 分布式光伏发电在高速公路交通设施中的应用 [J]. 太阳能, 2016 (9): 28–31.
Tang M T, Chen Z Q, Wang Z G, et al. Application of distributed photovoltaic power generation in highway traffic facilities [J]. Solar Energy, 2016 (9): 28–31.
- [28] 国家能源局. 2021年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-03-02]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
National Energy Administration. Statistics of China power industry 2021 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-03-02]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [29] 人民日报. 截至2021年底全国新能源汽车保有量达784万辆 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-03-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667734.htm.
People's Daily. Amount of new-energy vehicles in China over 7.84 million by 2021 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-03-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667734.htm.
- [30] 中华人民共和国交通运输部. 2020年铁道统计公报 [EB/OL]. (2021-04-19)[2022-03-02]. https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/202104/t20210419_3573713.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistics bulletin of railway 2020 [EB/OL]. (2021-04-19)[2022-03-02]. https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/202104/t20210419_3573713.html.
- [31] 周宏春, 李长征, 周春. 碳中和背景下能源发展战略的若干思考 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 1–6.
Zhou H C, Li C Z, Zhou C. Some thoughts on energy development strategy under the background of carbon neutrality [J]. China Coal, 2021, 47(5): 1–6.
- [32] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015—2050): 可再生能源发展与可行路径 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 8–18.
Ma L M, Shi D, Pei Q B. Low-carbon transformation of China's energy in 2015—2050: Renewable energy development and feasible path [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 8–18.
- [33] 唐珂. 高速公路营运期能耗水平分析与测算方法研究 [D]. 西安: 长安大学(硕士学位论文), 2013.
Tang K. Energy consumption analysis and calculation method study of expressway operation period [D]. Xi'an: Chang'an University(Master's thesis), 2013.
- [34] 乞孟迪, 柯晓明, 王殿铭. 交通领域清洁化、低碳化发展趋势研究 [J]. 石油石化绿色低碳, 2019, 4(2): 1–11.
Qi M D, Ke X M, Wang D M. Research on the trend of transportation decarbonization [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2019, 4(2): 1–11.
- [35] 李俊峰, 李广. 中国能源、环境与气候变化问题回顾与展望 [J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(5): 8–17.
Li J F, Li G. Review and prospect of energy, environment and climate change in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(5): 8–17.