

我国道路交通与能源融合发展战略研究

贾利民^{1,2}, 师瑞峰^{2,3*}, 吉莉⁴, 武平²

(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. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 4. 中国石油大学(北京)信息科学与工程学院, 北京 102249)

摘要: 能源与交通的交替进步承载了人类社会的繁衍发展与文明延续。面对资源紧缺、气候变化、环境污染带来的严峻挑战, 利用交通资产能源化、交通用能绿色化途径可以有效实现交通领域“碳达峰、碳中和”目标已逐渐成为一种共识。本文系统回顾了道路交通能源融合的发展历史, 调研并分析了源于国家能源安全、交通能源结构绿色化转型、交通资产能源化潜力开发, 以及交通系统智能化等推动道路交通与清洁能源融合发展的需求与变化趋势。笔者在对我国道路通风、光自然资源禀赋与用能需求自洽供给评估分析的基础上, 给出了我国道路交通与能源融合发展的参考路径, 并结合“碳达峰、碳中和”目标, 提出了道路交通与能源融合发展的路线图。最后, 提出了技术与政策两方面建议: 在技术方面, 建议强化科技研发、推进产业链发展, 助力技术创新与融合; 在政策方面, 建议完善顶层设计与战略规划、支持探索市场新模式, 进一步深化国际合作。

关键词: 道路交通; 交通能源融合; 交通资产能源化; 可再生清洁能源; 碳达峰、碳中和; 交通用能负荷

中图分类号: F512; F426; U417 **文献标识码:** A

Road Transportation and Energy Integration Strategy in China

Jia Limin^{1,2}, Shi Ruifeng^{2,3*}, Ji Li⁴, Wu Ping²

(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. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Transportation and energy are crucial for social development and civilization evolution. The energization of transportation infrastructure assets and clean transformation of transportation energies are effective decarbonization strategies for solving severe challenges such as resource shortage, climate change, and environmental pollution. This study first reviews the integration history of road transportation and energy, and investigates the demand for and trends of the integration from the perspectives of national energy security, clean transformation of energy supply, energization potential of transportation infrastructure assets, and intelligentization of the transportation system. The pathway for promoting the integrated development of road transportation and the energy sector is proposed based on assessing the wind and solar resources and the self-consistent supply capacity of energies within the road transportation system. Moreover, a roadmap for integrating road transportation and renewable energies is proposed considering the carbon peak and carbon neutralization targets. Finally, suggestions are proposed from two aspects. In terms of technology

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-04-13

通讯作者: *师瑞峰, 华北电力大学控制与计算机工程学院教授, 研究方向为能源交通融合发展理论与方法; E-mail: shi.ruifeng@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

development, we suggest that China should enhance technology research and development, improve the industry chain, and promote technology innovation and integration. Additionally, it should provide policies for improving top-level design and strategic planning, exploiting new market modes, and strengthening international cooperation.

Keywords: road transportation; transportation and energy integration; energization of transportation infrastructure assets; renewable clean energy; carbon peak and carbon neutralization; transportation energy consumption

一、前言

交通运输事关国民经济命脉与国家安全，我国地域辽阔，风、光可再生能源自然禀赋丰富 [1]，陆路交通基础设施资产能源化潜力巨大 [2]，开发利用形态、模式与系统解决方案可行 [3]，为缓解我国交通系统的能源问题提供了战略选择的可能性 [4]。

目前，充分利用风、光等可再生能源作为交通低碳化、绿色化发展的必由之路，正在成为世界各国应对气候变化的战略共识，各发达国家相继结合本国国情与自然禀赋状况探索各具特色的交通能源变革发展道路。依据风能资源分布情况可将我国划分为资源丰富区、较丰富区、可利用区和贫乏区 [5]，风能在高速公路上可方便地为监控、照明、收费系统以及配套设施提供电能供给，风能与道路交通融合前景可观 [6]；依据太阳能资源分布的丰度可将我国划分为最丰富区、很丰富区、较丰富区与一般区四类 [7]，利用道路基础设施融合新能源技术引起了研究者的广泛关注，风、光可再生能源与道路交通融合发展广受关注 [8-10]。道路交通系统载运装备的用能清洁化技术近年来得到了迅速发展 [11]，除蓬勃发展的载运装备动力电动化外，氢能作为交通载运装备新型动力源，也呈现出巨大的潜力，交通基础设施承载的风、光可再生能源利用与氢能制、储、用一体化融合发展开辟了交通能源融合的新篇章 [12]。

综上所述，利用风、光自然资源禀赋开展道路交通用能的技术研发、示范验证、一体化发展模式等早已开展探索 [13,14]，但系统地构建体系化的道路交通与可再生清洁能源自洽供能融合发展模式、技术和产业体系尚属空白。本文通过回顾道路交通与能源融合发展历史、分析现状，结合交通与能源融合的发展需求与趋势，提出我国道路交通与能源融合发展的路径与相关政策建议，为政府决策、企业技术研发、产业示范应用提供对策建议，为能源与道路交通的融合发展提供基于国情的参考路径。

二、道路交通能源融合发展历史与现状

道路交通的发展历史从动力驱动形态视角出发，经历了畜力化驱动、蒸汽化驱动、内燃化驱动、电气化驱动几个阶段，目前已迈入混合驱动的新阶段。

（一）畜力化驱动的道路交通发展阶段（农业文明时代）

人类早在旧石器时代就掌握了取火技术，这被认为是最早的能源转化技术。但人类早期农耕文明时代，交通出行主要依靠由牛、马等牲畜提供驱动的牛车、马车等交通运输工具。在此阶段，交通承运能力、人类活动空间位移范围主要受制于牲畜自身体能、体力等客观条件，活动范围、受益人群、普及性均受到很大制约。

（二）蒸汽化驱动的道路交通发展阶段（第一次工业革命时代）

随着19世纪初第一次工业革命蒸汽机的出现，人类认知水平与科技水平出现了长足进步，以蒸汽机车为驱动的交通载运装备应运而生，煤炭取代人力、畜力成为交通载运装备的主要动力能源。在此阶段，蒸汽化车辆具备的新型交通载运装备形态、运行方式和运行效率极大改变了人类出行模式，出行范围、通行能力都得到了质的飞跃。

（三）内燃化驱动的道路交通发展阶段（第二次工业革命时代）

19世纪中叶内燃机的诞生，为后续轿车、卡车、大型巴士等内燃化交通载运装备发展开辟了新途径，石油逐步取代煤炭成为道路交通工具的主要动力能源。在此阶段，由于内燃机与石油配合的工作模式效率远高于蒸汽机工作模式，因此道路交通载运装备动力系统较之前蒸汽化机车又实现了质的飞跃，加上燃油补给站点分布的普及性与加注过程的便捷性，使得内燃化驱动的交通方式在其诞生后

长达一个多世纪中绝对主导了道路交通出行方式，极大地促进了产业革命乃至人类文明的发展。

（四）电气化驱动的道路交通发展阶段（19 世纪末至今）

电动汽车最早诞生于 19 世纪末期，但由于其经济性、续航里程、充电便捷性等因素制约，很快便沉寂于内燃机汽车发展的洪流之中。直至 20 世纪 70 年代爆发了国际石油危机后，世界各国意识到石油资源作为不可再生化石能源，在未来的某个阶段注定要被其他能源所替代，因此世界主要工业大国又先后重启了电动汽车研发计划与产业发展规划。时至今日，在全球气候变暖、化石能源危机、环境可持续发展等诸多因素共同推动下，进一步强化了道路交通载运装备电气化的发展趋势。

（五）混合驱动的未来道路交通发展阶段（未来）

在 21 世纪刚刚过去的 20 年间，世界各国都先后出台了各自的汽车产业发展规划，美国、欧盟、日本等发达国家和地区先后推出了氢能源汽车、纯电动汽车、混合动力汽车、高效内燃机汽车等一系列产业技术发展规划，技术路线呈现多元化、混合驱动共存的发展态势。我国也根据自身国情，先后藉由国家重点研发计划项目持续支持了纯电动汽车、燃料电池汽车、内燃轻量化汽车等不同技术路线的科技研发与装备研制，为国家道路交通发展储备了相对完整的、可供未来选择的技术体系。在这种新形势下，国家自然资源禀赋、国家能源安全、环境问题、可持续发展等诸多要素共同作用，决定了未来一段时间内还将继续保持这种多技术路线混合驱动的并存发展形态。

三、我国道路交通能源融合的发展需求与趋势

截至 2020 年年底，我国已有的公路里程已达 5.2×10^6 km [15]，汽车保有量达 3 亿辆 [16]，道路交通系统整体能耗数量巨大，尤其是交通载运装备燃油消耗导致的石油进口逐年增加已日益影响到了我国能源安全乃至国家安全。因此解决好如此规模庞大的系统用能就成为保障国家安全、实现“碳达峰、碳中和”目标的关键。

（一）国家能源安全带来的道路交通系统能源分布式自洽供给趋势

众所周知，我国一次化石能源结构具有多煤、少气、贫油的特点，因此我国交通系统、特别是道路交通载运装备消耗的石油主要依赖于进口，截至 2020 年，我国每年原油进口占比高达 70%，而包括轿车与重型卡车在内的道路交通载运装备占整个交通载运装备能耗的 77%，进口石油绝大多数被用于满足道路交通载运装备的能源需求 [17]，如此高比例的能源进口依存度，不仅消耗了庞大的国家财富，而且使我国在国际地缘政治、国际贸易、国家统一等诸多问题上受到了巨大钳制。因此，如何改善我国道路交通系统的用能结构，实现基础设施蕴含的风、光可再生清洁能源的充分利用，为道路交通系统提供清洁、自洽的电能和氢能，真正实现道路交通系统能源需求的分布式自洽供给，已成为一种保障国家能源安全的战略选择。

（二）能源结构绿色化需求带来的交通载运装备动力能源的形态变化趋势

环境问题与气候问题已成为当今世界可持续发展的两大主题，我国自 20 世纪 80 年代以来就一直积极探索和大力发展以风、光为主的非水可再生能源系统，可再生能源装机容量位居世界首位，绿色能源占比逐年攀升 [18]。为实现“碳达峰、碳中和”目标，未来能源供给中风、光可再生能源占比会持续加速提升，因此我国一次能源结构占比会随风、光等清洁能源份额逐步扩大实现能源结构绿色化的形态变迁。在这种能源供给绿色化发展大势下，交通载运装备的动力能源也会随之进行适应性调整，从而呈现出特色鲜明的电动化、氢能化形态变化趋势，最终实现交通载运装备动力能源系统的低碳化或净零排放，达成道路交通系统的碳中和目标。

（三）风光自然禀赋利用模式的变革带来交通能源系统形态的变化趋势

由于我国道路交通系统所拥有的土地面积蕴含着潜力巨大的风、光自然资源禀赋 [2]，并且风、光等自然禀赋作为一次能源可以经济高效地因地制宜转变为电能或氢能等二次能源加以开发、储存、输送和利用。已有许多示范性项目开展了车站、服务区、道路枢纽等交通基础设施资产能源

化的实践尝试，取得了非常宝贵的经验。随着国家政策对“光伏+交通”等产业的扶持 [19]，以及交通行业自身实现低碳发展的压力，倒逼交通能源系统及其用能形态必须根据这种供能结构变化做出适应性调整，以实现交通系统自身全生命周期的“碳达峰、碳中和”目标。因此，道路交通系统、特别是载运装备的未来能源利用模式也会由燃油供给向电动化、氢能化等绿色二次能源利用方式转变。

(四) 交通系统智能化发展对能源可及性的迫切需求带来的交通能源形态、模式变化趋势

智能交通的持续创新和快速发展，正在为人们构筑起一个更加安全、高效、绿色、便捷的交通运输和出行服务体系 [20]。但随着交通行业的智能化发展，车联网、5G设备、智能运维等硬件体系发展也伴随着新的能源需求跃升，这种由于交通系统智能化要求与路网基础设施空间布局相关的设备大量部署所带来的新的能源需求，经与道路路网耦合后呈现出线状或网状的分布式能源需求，这对传统电网集约供电模式提出了新的挑战，尤其是“胡焕庸线”西北一侧无电网或弱电网的广大区域更是无电可用。因此，如何利用道路交通系统自身服务区、路侧边坡、场站等基础设施开展资产能源化潜力开发，实现清洁能源的自洽供给，从而为这种由交通系统智能化带来的能源需求增长提供一种新的系统解决方案 [3]，通过道路资产能源化部分或全部实现能源自洽供给，将能源、交通两个由条块分割、行业隔离且各自发展的系统逐渐演变为相互融合、集成衔接的协同发展形态，最终形成清洁低碳、融合高效的新型交通自洽能源体系。这不仅是加快能源变革与交通转型、经济社会可持续发展的必然趋势，也是增强能源和交通行业的低碳化、绿色化发展水平，支撑“碳达峰、碳中和”目标落地的必由之路 [21]。

四、我国道路交通与能源融合发展的潜力评估

为分析道路交通系统自洽能源供给的可行性及其降碳前景，本文在我国典型高速公路利用自身基础设施风、光自然资源禀赋满足自身用能的自洽测算分

析基础上，提出了我国道路交通能源融合发展路径。

(一) 我国高速公路自洽能源开发潜力评估

本文以我国高速公路基础设施蕴含的风能、太阳能自然资源禀赋为例，展示道路交通系统的自洽能源开发潜力。图1、图2分别给出了道路交通系统自身资产光、风自然禀赋能源化的潜力评估流程 [1,2,22]，相关结果均由公开数据测算获得 [23]。

1. 风能可开发潜力

在风能经由机电设备转换为电能总输出效率为30%的假设前提下，我国高速公路系统乐观场景下的风能可装机容量约为 5.7×10^{10} kW，年均发电量约为 3.6×10^{12} kW·h；一般场景下的风能可装机容量约为 2.25×10^{10} kW，年均发电量约为 1.6×10^{12} kW·h [23]。风能开发潜力十分巨大。

2. 太阳能可开发潜力

在太阳能经由光电设备转换为电能总输出效率为30%的假设前提下，我国高速公路系统乐观场景下的太阳能可装机容量约为 1.0×10^8 kW，年均发电量约为 1.937×10^{11} kW·h；一般场景下的太阳能可装机容量约为 1.3×10^7 kW，年均发电量约为 2.52×10^{10} kW·h [2]。太阳能开发潜力也十分巨大。

综上可知，我国高速公路利用自身基础设施开展风、光清洁能源的开发利用潜力巨大、前景广阔。

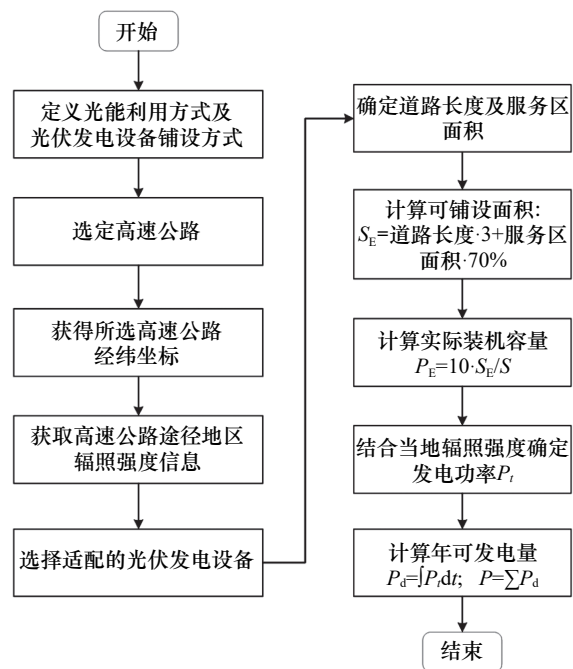


图1 高速公路自身资产可开发光伏潜力测算流程

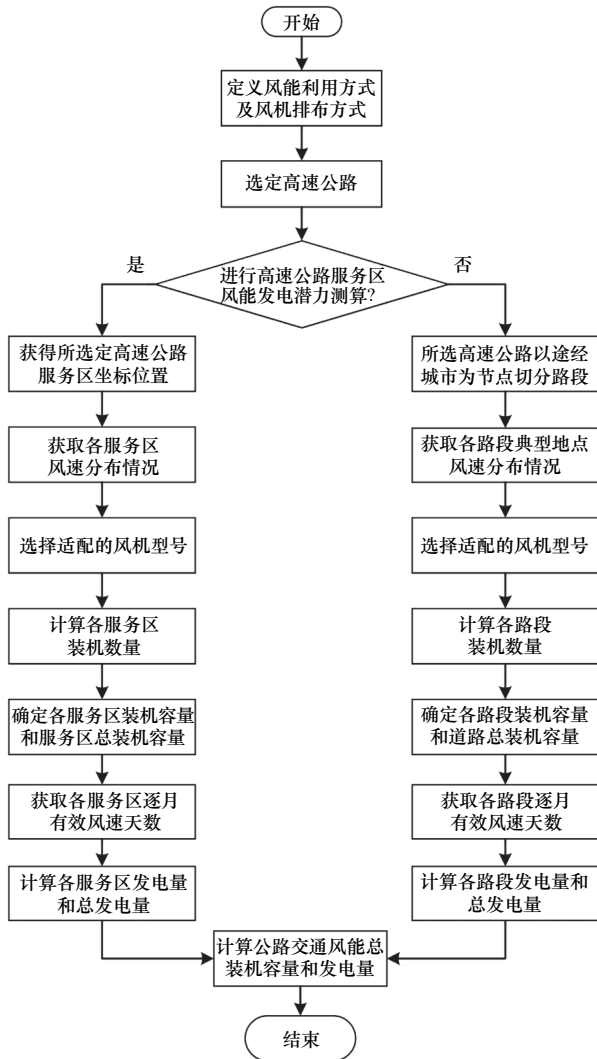


图2 利用高速公路自身资产可开发风能潜力测算流程

(二) 我国高速公路系统用能需求分析

本文针对高速公路基础设施能耗与载运装备能耗两类系统分析其用能需求，图3、图4分别给出了高速公路系统基础设施与载运装备能耗的测算流程[24~27]，相关结果均由公开数据测算获得[23]。

1. 交通基础设施能耗

公路交通基础设施包括服务区、隧道、桥梁、收费站、沿线设备等，根据公开数据测算，我国公路系统服务区年均能耗约为 5.36×10^9 kW·h，隧道年均能耗约为 1.067×10^{10} kW·h，桥梁年均能耗约为 9.31×10^9 kW·h，收费站年均能耗约为 4.45×10^5 kW·h，沿线设备年均能耗约为 2.276×10^6 kW·h。因此公路系统基础设施年均总能耗约为 2.535×10^{10} kW·h，根据高速公路占比可测算出其基础设施年均能耗约为 1.799×10^{10} kW·h。

2. 交通载运装备能耗

根据国家统计年鉴的各类车型占比、全国年总客运周转量，可以折算不同车型百公里人均油耗量，再通过内燃机在相同运输里程下的消耗油量折算为标准煤、进而转换为电动汽车对应的电量消耗，可以测算出全国道路交通载运装备的总耗电量[23]。结果表明，我国道路交通车辆年均总耗电量约为 2.9×10^{12} kW·h。

(三) 高速公路系统能源自洽供给与碳排放分析

由上述分析不难看出，对道路交通系统而言，

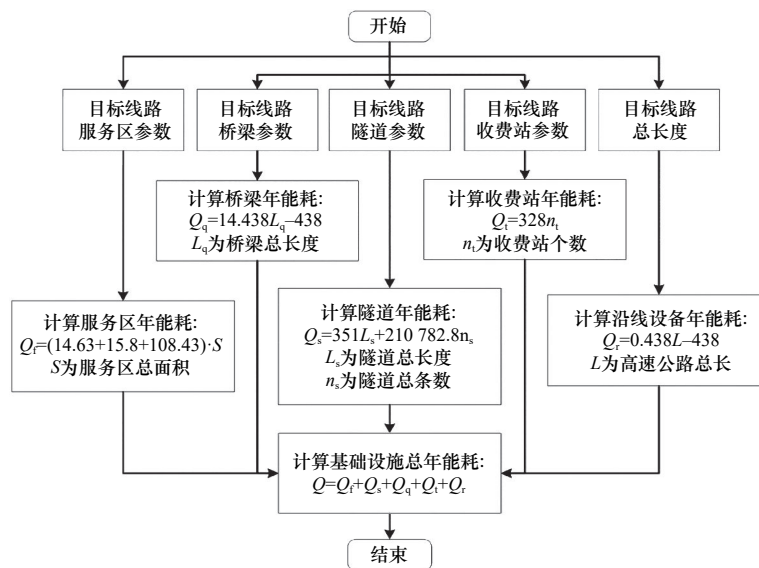


图3 我国高速公路系统基础设施能耗测算流程

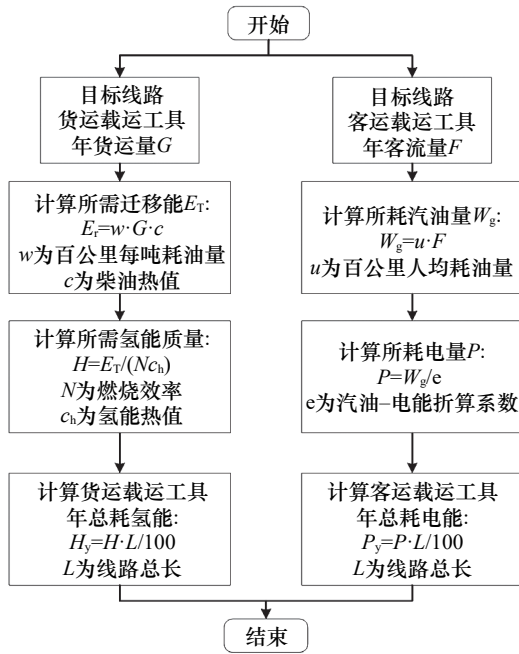


图4 我国高速公路系统载运装备能耗测算流程

载运装备能耗体量远大于交通基础设施能耗，因此交通系统实现“碳达峰、碳中和”目标与能源清洁自洽供给的关键是道路交通系统多大比例的载运装备用能可以实现自洽供给。由我国高速公路可再生能源自然资源禀赋与高速公路系统能耗测算结果，可以分析出我国高速公路系统清洁能源自洽供给的自洽率及与之对应的碳减排量 [23]。

1. 我国高速公路能源自洽分析

按照交通系统自洽率测算模型，结合上述高速公路太阳能开发潜力与交通基础设施能耗数据可知，我国高速公路系统在不考虑载运装备能耗前提下，乐观场景下仅利用太阳能就可以实现的自洽供能比例达到132%，一般场景下仅利用太阳能实现自洽供能的比例也可达到56% [2]。

若考虑道路交通基础设施、载运装备的总能耗情景下，综合利用风能、太阳能两类自然资源禀赋时，我国高速公路系统一般场景下的清洁能源供给的总自洽率可达72.8%，新能源渗透率可达75.2% [23]。

2. 我国高速公路交通碳减排量

按照道路交通系统碳减排量计算模型可知，我国高速公路系统一般场景下年均电力减碳量可达 1.31×10^8 t，高速公路系统年均生物碳汇可达 2.5×10^7 t [23]。

因此，我国道路系统能源自洽供给率、系统碳减排量均具备十分广阔的开发前景。

五、我国道路交通与能源融合发展路径

(一) 道路交通与能源融合发展模式

1. 基础设施资产能源化是我国道路交通与能源融合的主要路径

如前文所述，我国道路交通系统自身基础设施资产能源化潜力极其巨大，在此模式下的交通系统能源自洽率、系统碳减排前景十分广阔。因此，道路交通与能源融合的主要路径为：开发基于道路交通自身基础设施的风、光自然资源禀赋，形成自洽供给的交通能源系统，从而构建交通系统能源供给分布式、清洁化、可再生、近零排放的系统解决方案。

2. 道路交通自洽能源系统是开展道路交通与能源融合的主要目标

以“碳达峰、碳中和”目标为牵引，综合考虑国家能源安全，以及道路交通智能化、绿色化用能需求等因素，规划设计并实现道路交通系统可再生清洁能源产销一体化自洽能源系统，构建分布式源-网-荷-储-充道路交通自洽能源系统，是道路交通与能源融合的主要目标。

3. 场景驱动的交通与能源融合发展模式

综合考虑我国气象特征、经济与人口特征，结合我国地势三大阶梯特征，可将我国地理空间因骨干电网分布、交通负荷需求分布等实际情况划分为12种能源交通融合场景 [23]，划分原则如图5所示，详细区域划分如表1所示。

与我国地势三大阶梯一一对应的划分方式符合“碳达峰、碳中和”目标要求，可以按照每个地区的减碳量与比例进行能源交通融合发展的路径规划。减碳主要从电能替代减排、生物汇碳及经济融碳三个方面统筹考虑，同时结合各区域自洽率与渗透率指标提出开发的优先等级。

三大阶梯跟“风光资源网、电网充电桩网以及负荷网叠加的12种场景”分别对应。其中，第一阶梯对应的融合场景包括：场景1、3、4、5、12，其中3、4场景为典型场景；第二阶梯对应的融合场景包括：场景1、2、3、5、6、8、9、10、11、12，其中1、2、5、8、9、10、11、12场景为典型场景；

第三阶梯对应的融合场景包括场景2、3、4、6、7、8、10，其中2、3、4、6、7场景为典型场景。将上述12种场景按照资源属性、电网属性以及道路负荷属性进行耦合，可以构建出四种特定模式下的道路交通能源系统建设方案，分别是交通专用的能源系统、交通特用的能源系统、交通适用的能源系统以及能源支持的交通系统 [3]，这四种特定模式、交通与能源间互动联系、交通能源融合12种应用场景之间的映射关系如图6所示。

(二) 不同场景下道路交通与能源融合成效综合评价

针对我国道路交通与清洁能源融合发展的场景与模式，按照道路交通与自然资源禀赋不同主导地位配置方案，以交通网、能源网与信息网三网互动为基础支撑条件，对覆盖我国全域12种典型交通能

源融合场景开展上述交通清洁能源开发利用的自洽率、渗透率、新能源发电的绿电替代减排量、环境恢复后的生物汇碳，以及当地的碳排放空间、经济效益等综合成效开展评估测算，所得结果如图7所示。可以看出，各场景区域由于自然资源禀赋与既有能源网（主要是电网）支撑条件的差异呈现出特色鲜明、差异巨大的开发利用前景。

(三) 我国道路交通与能源融合发展路线图

图7表明，在综合考虑道路通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，应当按照优先开发场景1、5区域，其次开发场景2、3、4、6、7、8、9、10区域，最后可据未来需求开发场景11、12区域的顺序，梯次开发利用交通基础设施资产能源化潜力。最终形成我国道

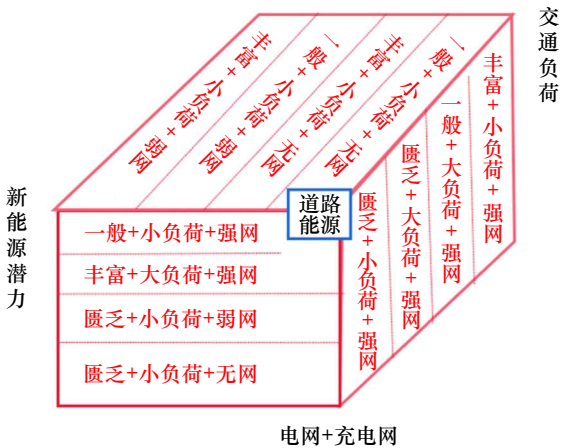


图5 我国道路交通能源融合12种场景的划分原则

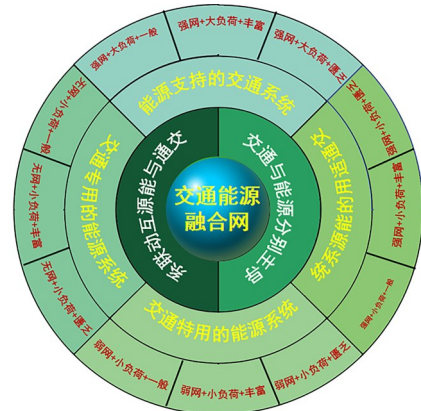


图6 我国道路交通与能源融合的特定制式、应用场景适配映射关系图

表1 我国道路交通能源融合12种场景的划分区域

| 场景 | 模式 | 主要地区 |
|----|-----------|-------------------------|
| 1 | 丰富+小负荷+弱网 | 新疆地区 |
| 2 | 一般+小负荷+弱网 | 塔里木盆地地区，吉林省、辽宁省、海南省等 |
| 3 | 丰富+小负荷+无网 | 西藏地区（东南部除外）、内蒙古东北部等 |
| 4 | 一般+小负荷+无网 | 黑龙江省东北部、藏东南地区等 |
| 5 | 丰富+小负荷+强网 | 内蒙古中西部、青海、宁夏、甘肃北部、云南北部等 |
| 6 | 一般+大负荷+强网 | 京津冀地区 |
| 7 | 匮乏+大负荷+强网 | 华东、华南地区 |
| 8 | 匮乏+小负荷+强网 | 华中、重庆、贵州等 |
| 9 | 一般+小负荷+强网 | 甘肃南部、云南南部 |
| 10 | 丰富+大负荷+强网 | 华北东中部地区 |
| 11 | 匮乏+小负荷+弱网 | 陕川交界 |
| 12 | 匮乏+小负荷+无网 | 四川西部 |

路交通与能源融合发展的总路线图，如图8所示。

六、对策建议

(一) 技术创新方面

1. 强化能源交通融合技术研发，推进全产业链发展

发挥中国科学院、中国工程院相关院所，国家部委、央企所属的各交通和能源规划设计院，教育部与行业重点院校的智库优势，借助国家科技研发体系给予交通自洽能源系统规划、设计技术体系，以及高效能、高弹性、自洽供给的道路交通与能源融合发展示范验证体系化装备系统研制与工程应用验证，优化清洁交通自洽能源系统有机融入道路交通系统的规划、建设、运营、维护与管理各个环节，突破道路载运装备清洁能源动力应用的基础性、系统性关键技术。创新构建共同推进道路交

与能源融合规模化应用的产业链和保障链。

2. 推进道路交通与新能源基础技术创新，助力跨学科创新融合

发挥科技创新驱动的关键作用，加强道路交通与能源融合的新技术、新装备和新材料研发，在道路交通和能源领域实现关键技术突破，要特别注重能源与交通两大领域的交叉学科、跨界融合技术的创新发展，在自洽微电网、柔性直流输电、大容量复合储能、新能源与氢能高效利用、交通能源及信息物理融合、人工智能与大数据应用等方面尽快取得创新性成果，助力道路交通与能源融合发展。

(二) 政策方面

1. 完善顶层设计，加强道路交通与能源融合总体规划

发挥国家科技计划和行业发展规划的统领作用，深化能源与交通领域重大战略问题研究。将交

| 场景 | 电能减排指数 | 植被减排指数 | 投资收益比 | 渗透率 | 自洽率 | 减排量占碳排放空间比 | 综合评价 |
|----|--------|--------|-------|-------|-------|------------|-------|
| 1 | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 2 | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 3 | ★★★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 4 | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ |
| 5 | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 6 | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 7 | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★★★ |
| 8 | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★★★ |
| 9 | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★★★ |
| 10 | ★★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ |
| 11 | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★ |
| 12 | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★ |

图7 我国12种交通能源融合场景对应的减碳、经济效益与交通属性综合评价结果

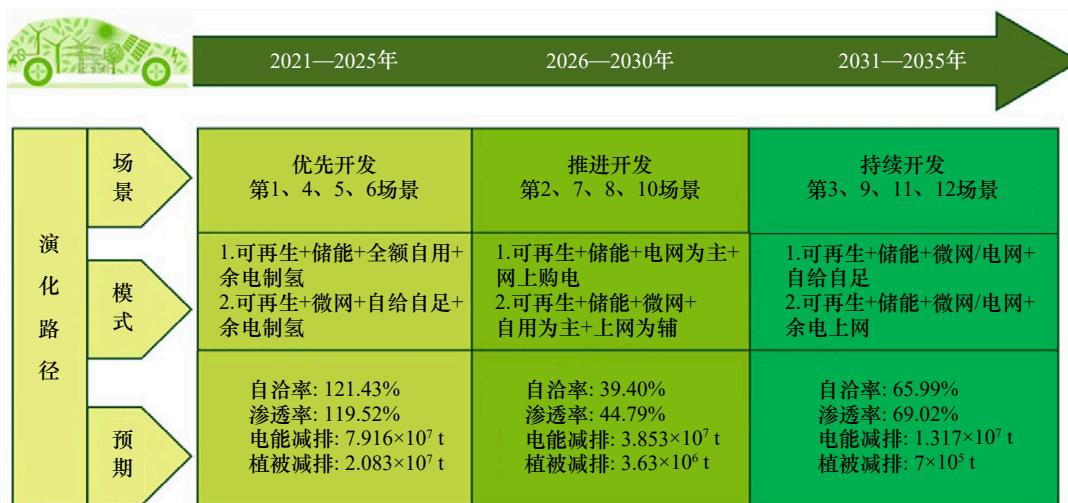


图8 我国道路交通与能源融合发展路线图

通与能源融合发展纳入国家发展战略,普及交通与能源融合的概念及其内涵。开展交通与能源融合发展规划研究和顶层设计,发挥我国特有的制度综合优势,持续引领交通能源融合发展。

2. 制定扶持政策,尝试市场化道路交通与能源融合的运营新模式

充分发挥政策引导作用,借助“交通强国”与“国家综合立体交通网”等规划纲要建设契机,出台精准财政补贴政策,扶持与激励相关企业或团体开展试点示范,先行先试;发挥市场机制在交通、能源及二者融合领域的资源配置决定性作用,引导社会各方投入交通与能源融合发展,共同构建基于市场机制运营的交通能源融合新模式。

3. 吸纳国际经验,构建泛国际化交通能源融合的合作平台

推动我国与有关国际组织,以及国内社会团体、能源企业、科研机构与高等院校间共同开展交通与能源融合的合作研究和学术交流,加快对国际交通能源融合领域先进典范与成功案例的引进吸收,为实现国际层面的交通能源融合发展打造跨国界、跨领域、跨专业的国际合作平台。

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 18, 2022; **Revised date:** April 13, 2022

Corresponding author: Shi Ruifeng is a professor from the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University. His major research field is the theory and method of energy and transportation integration development. E-mail: shi.ruifeng@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] 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]. Journal of Solar Energy, 2021, 42 (6): 409–418.
- [2] 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. Research on the energy potential of land transportation infrastructure assets in China [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] 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. Form, mode and solution of land transportation energy integration in China [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [4] Ji L, Yu Z, Ma J, et al. The potential of photovoltaics to power the railway system in China [J]. Energies, 2020, 15(13):1–17.
- [5] 朱瑞兆, 薛桁. 中国风能区划 [J]. 太阳能学报, 1983 (2): 9–18.
Zhu R Z, Xue H. Wind energy zoning in China [J]. Journal of Solar Energy, 1983 (2): 9–18.
- [6] Siyal S, Mentis D, Mortberg U, et al. A preliminary assessment of wind generated hydrogen production potential to reduce the gasoline fuel used in road transport sector of Sweden [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(20): 6501–6511.
- [7] 北极星太阳能光伏网. 我国太阳能资源分布概述 [EB/OL]. (2014-07-24)[2022-01-10]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20140724/530875.shtml>.
Polaris Solar Photovoltaic Website. Overview of the distribution of solar energy resources in China [EB/OL] (2014-07-24)[2022-01-10]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20140724/530875.shtml>.
- [8] Pei J, Zhou B, Lyu L. E-Road: The largest energy supply of the future? [J]. Applied Energy, 2019, 241:174–183.
- [9] Hao W, Jasim A F, Chen X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review [J]. Applied Energy, 2018, 212: 1083–1094.
- [10] Duarte F, Ferreira A. Energy harvesting on road pavements: State of the art [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2016, 169: 79–90.
- [11] International Council on Clean Transportation. Beyond road vehicles: Survey of zero-emission technology options across the transport sector [EB/OL]. (2018-07-18) [2022-01-30]. <https://theicct.org/publication/beyond-road-vehicles-survey-of-zero-emission-technology-options-across-the-transport-sector/>.
- [12] International Energy Agency. Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025 [EB/OL]. (2020-11) [2022-01-30]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>.
- [13] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2021, 29: 1–16 (2021-08-20)[2022-01-30]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539>.
Jiang L Z, Bie C H, Long T. et al. Development mode and key operation technology of energy transportation integration system [J/OL]. Chinese Journal of electrical engineering, 2021, 29: 1–16 (2021-08-20)[2022-01-30]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539>.
- [14] 何正友, 向悦萍, 廖凯, 等. 能源–交通–信息三网融合发展的需求、形态及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 73–86.
He Z Y, Xiang Y P, Liao K, et al. Demand, form and key technology of integrated development of energy, transportation and information networks [J]. Power System Automation, 2021, 45(16): 73–86.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 《2020年全国收费公路统计公报》解读 [EB/OL]. (2021-10-28)[2022-01-30]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202110/t20211027_3623202.html.
Ministry of Transport of People’s Republic of China. Interpretation

- of 2020 national toll road statistical bulletin [EB/OL]. (2021-10-28)[2022-01-30]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202110/t20211027_3623202.html.
- [16] 中华人民共和国公安部. 2021年全国机动车保有量达3.95亿 新能源汽车同比增59.25% [EB/OL]. (2022-01-11) [2022-01-30]. http://www.caam.org.cn/search/con_5235344.html. Ministry of Public Security of People's Republic of China. In 2021 the number of motor vehicles in China reached 395 million, with a year-on-year increase of 59.25% [EB/OL]. (2021-10-28) [2022-01-30]. http://www.caam.org.cn/search/con_5235344.html.
- [17] 赵作智. 氢能如何助力交通版块的去碳化 [EB/OL]. (2022-01-07) [2022-01-30]. <https://www.yicai.com/news/101282745.html>. Zhao Z Z. How hydrogen energy can help decarbonize the traffic section [EB/OL]. (2022-01-07) [2022-01-30]. <https://www.yicai.com/news/101282745.html>.
- [18] 丁怡婷. 解好可再生能源替代“多元方程” [N]. 人民日报, 2022-01-06(005). Ding Y T. Solve the “multivariate equation” of renewable energy substitution [N]. People's Daily, 2022-01-06(005).
- [19] 国务院. 《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》印发——加快向交通强国迈进 [EB/OL]. (2022-01-24) [2022-01-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/24/content_5670112.htm. The State Council. The “14th five year plan” for the development of modern comprehensive transportation system was printed and distributed: Accelerating the progress towards a powerful transportation country [EB/OL]. (2022-01-24) [2022-01-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/24/content_5670112.html.
- [20] 李彦宏. 智能交通 [M]. 北京: 人民出版社, 2021. Li R. Intelligent transportation [M]. Beijing: People's Publishing House, 2021.
- [21] 托尼·西巴. 能源和交通的清洁革命 [M]. 秦海岩, 张谨, 于贵勇译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2018. Tony S. Clean revolution in energy and transportation [M]. Translated by Qin H Y, Zhang J, Yu G Y. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2018.
- [22] 舟丹. 风力发电机的工作原理和效率 [J]. 中外能源, 2012, 17(3): 55. Zhou D. The working principle and efficiency of wind turbine [J]. Sino-Global Energy, 2012, 17(3): 55.
- [23] 贾利民, 师瑞峰, 吉莉, 等. 轨道与道路交通与能源融合发展战略研究报告—道路篇 [R]. 北京: 中国工程院, 2022. Jia L M, Shi R F, Ji L, et al. Research report on integrated development strategy of rail and road transportation and energy: Road [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2022.
- [24] 苑广普, 矫立超, 戎贤, 等. 高速公路服务区被动式超低能耗建筑实践研究 [J]. 建筑节能, 2019, 47(1): 82–87. Yuan G P, Jiao L C, Rong X, et al. Passive ultra-low energy consumption building in expressway service area [J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(1): 82–87.
- [25] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T D71—2004公路隧道交通工程设计规范 [S]. 2004. Ministry of Transport of People's Republic of China. JTG/T D71—2004 Design specification for traffic engineering of highway tunnel [S]. 2004.
- [26] 王兆泰, 姚天宇, 杨威, 等. 浅谈大型桥梁的照明供配电设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2020 (12): 224–225, 230. Wang Z T, Yao T Y, Yang W, et al. Brief discussion on design of lighting, power supply and distribution for large bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020 (12): 224–225, 230.
- [27] 李志锋, 王小军. 高速公路运营期节能减排评估标准体系构建 [J]. 公路交通技术, 2020, 36(3): 132–139. Li Z F, Wang X J. Establishment of energy-saving and emission-reduction evaluation standard system in operating stage of expressway [J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 36(3): 132–139.