

公路交通基础设施“四网融合”发展研究

卢春芳¹, 翁孟勇^{2*}, 刘飞², 孙虎成², 付振茹², 孙静²

(1. 中国铁道学会, 北京 100844; 2. 中国公路学会, 北京 100011)

摘要: 面对快速发展的信息通信技术和能源产业变革, 推动公路交通基础设施与运输服务、信息、能源的融合, 可以有效提升交通运输体系效率, 助力未来综合交通运输基础设施科技创新和高质量发展。本文围绕建设交通强国等国家重大战略需求, 从理论层面明确了“四网融合”的内涵与特征, 从能源、信息、服务等方面梳理了公路交通基础设施效能利用的现实基础, 分析了我国公路交通基础设施“四网融合”的发展现状和存在问题, 提出了我国公路交通基础设施“四网融合”发展的总体思路、目标、系统架构和发展模式。研究提出了我国公路交通基础设施“四网融合”的重点任务, 包括构建基于“四网融合”的新型基础设施体系、建立稳定可靠的公路基础设施能源供给体系、升级泛在先进的公路基础设施信息服务体系和构建“四网融合”多业态一体化服务体系。研究建议, 建立符合“四网融合”发展特点的管理机制、建立符合新技术应用特点的引导机制、构建完善的“四网融合”标准规范体系、建立健全实施监测评估与开放合作机制, 以此推进公路交通运输效能利用水平的提升。

关键词: 交通强国; 数字化; 智慧公路; 效能提升; 四网融合; 交能融合; 设施共享

中图分类号: U495 **文献标识码:** A

Four-Network Integration in the Highway Infrastructure Field of China

Lu Chunfang¹, Weng Mengyong^{2*}, Liu Fei², Sun Hucheng², Fu Zhenru², Sun Jing²

(1. China Railway Society, Beijing 100844, China; 2. China Highway and Transportation Society, Beijing 100011, China)

Abstract: Considering the rapid development of information and communication technologies as well as the transformation of the energy industry, it is necessary to integrate the transportation infrastructure with the transport service, information, and energy sectors, thereby enhancing the service capabilities of the transportation system and promoting technological innovation and high-quality development of the comprehensive transportation infrastructure. Focusing on boosting China's strength in transportation, this study clarifies the definition and characteristics of four-network integration (i.e., integration of the transportation infrastructure, transport service, information, and energy networks), and reviews the practical basis for improving the efficiency of the highway infrastructure from energy, information, service and other aspects. Moreover, it analyzes the development status and existing problems regarding four-network integration in the highway infrastructure field of China, and proposes the general idea, goals, system framework, and development modes of four-network integration in the field. Key tasks include building a new infrastructure system based on four-network integration, establishing a stable and reliable energy supply system for the highway infrastructure, upgrading the information service system, and building a multi-industry integrated service system for four-network integration. Furthermore, the study suggests the establishment of a management mechanism in line with the characteristics of four-network integration, a guidance mechanism in

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2024-11-26

通讯作者: *翁孟勇, 中国公路学会理事长, 研究方向为交通运输规划与管理; E-mail: wmy@chts.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“综合交通运输体系效率提升战略”(2022-PP-06)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

line with the application characteristics of new technologies, a sound standards and specification system for four-network integration, and an implementation monitoring, evaluation, and cooperation mechanism.

Keywords: boost China's strength in transportation; digitization; smart highway; efficiency improvement; integration of the four networks; integration of transportation and energy sectors; facility sharing

一、前言

交通运输基础设施是推动社会经济发展、国防安全的重要保障。面对快速发展的信息通信技术和能源产业变革,我国在开展公路建设与运营时,积极推动传统基础设施全面转型升级,注重创新驱动发展,呈现出网络化、智能化、电力化发展的新态势^[1-5]。随着土地、环境、资源、资金等约束趋紧,公路交通在支撑国家重大战略实施、服务区域协调发展、保障和改善民生、安全绿色发展等方面发挥了重要作用。交通强国等战略明确提出,推进交通基础设施网与运输服务网、信息网、能源网融合发展(简称“四网融合”),实现公路基础设施的建设、运营、管理、服务等过程与新一代信息、能源技术在设施、技术、管理、服务方面深度融合发展^[6-9];党的二十届三中全会明确提出,健全新型基础设施融合利用机制,推进传统基础设施数字化改造^[10]。“四网融合”作为交通行业发展的新引擎和新动能,是当前提升综合交通运输体系效率的核心内容之一和未来综合交通运输基础设施科技创新的重要方向,将成为我国跨交通、能源等行业发展新质生产力的重要领域,也是综合交通创新和高质量发展的高地。

社会经济的发展带来了运输需求持续稳定增长,对公路基础设施整体运行效率和潜力的发挥提出了更高的要求,然而受限于土地供给、环境保护要求等刚性约束条件,我国运输需求旺盛的东部地区已无法再继续采用大规模建设线性基础设施的发展模式;公众对出行安全、个性化、定制化出行服务体验的需求,加之在城市群、都市圈的发展背景下,出行距离变长,对长距离、跨区域和短距离、高频次的运输服务质量提出了更高要求;面临恶劣天气和突发事件带来的基础设施网络应急协调管理能力提升要求,构建网络化、智能化的运行管理与服务体系变得极为重要。与新时代赋予交通运输行业的使命定位相比,我国公路交通基础设施建设仍存在效能利用失衡、效能提升手段单一,“四网融

合”的理论方法不完善、衔接与协同效果不理想,各地的实践探索以单独场景为主、缺少系统架构和顶层设计等问题,亟需开展公路交通基础设施“四网融合”研究,提升公路交通基础设施的效能。

本文围绕综合交通基础设施利用效能提升需求,分析“四网融合”对公路基础设施效能提升的意义,总结发展现状及存在的问题,提出我国公路交通基础设施“四网融合”的目标思路、系统架构、发展模式、重点任务和保障措施,为推动公路交通基础设施效能提升研究提供参考。

二、“四网融合”对公路基础设施效能提升的意义

(一)“四网融合”的内涵与特征

“四网融合”作为学科交叉、跨界融合的创新应用,实质是由信息系统、能源系统、交通基础设施以及运输服务网络共同组成的综合协同运行体系。该体系注重信息技术、能源技术在综合交通基础设施领域的创新应用,是“四网”由各自发展转型为共享协同、融合发展的必然选择,具有广泛互联、智慧高效、高度协同、清洁低碳、开放共享的特点。具体来看,①交通基础设施网,基于《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》的要求,以高速公路为主的新型公路基础设施,即数字化、网联化、智能化的公路基础设施,兼顾影响全路网运行效率的重要设施(桥梁、隧道、服务区);②运输服务网,面向信息化、智能化高速公路的出行以及信息服务,主要以出行服务为主;③信息网,即通信信息基础设施网,主要指公路基础设施的沿线感知、信息传输与服务、云计算、数据共享等方面的通信信息基础设施;④能源网,即能源基础设施网,包括智能电网、变电站、配气站以及负责能源传输的输电线路、管道等线性基础设施及枢纽基础设施。

“四网融合”的特征主要体现在5个方面。①融合集约,通过融合不同领域的基础设施网络,

实现一体化与协同发展，促进有限资源的高效利用，提高基础设施利用效率。② 协同高效，同步规划和建设信息网、能源网、交通网等基础设施网络，在各类云平台和数据中心的协同作用下，提供更精准有效的行业管理服务和便捷高效的客货运输服务，满足不同的运输服务需求。③ 绿色发展，通过优化综合交通的运输结构、用能结构，减少交通拥堵和排放，降低交通能耗，推动交通运输行业的绿色发展。④ 智能管理，借助先进的技术手段，实现交通运输基础设施网络和运输服务网络的智能化管理，提高交通运营效率和服务水平^[11]。⑤ 智慧服务，借助互联网、大数据、人工智能等技术的发展，推动车路协同、自动驾驶、伴随式服务的发展和迭代升级，进一步提高出行服务质量和用户体验^[12,13]。

(二) “四网融合”对公路基础设施效能提升的作用

1. 有效改善交通拥堵，提高路网运行效率

道路数字化、智慧化的不断提升以及相应基础设施的升级迭代，为改善拥堵状况、提升交通效率、优化出行服务提供了新的解决方案。目前。我国各地的实践表明，传统高速公路通过科技手段可以实现智慧扩容，在不同速度下（40~200 km/h），无人驾驶状态的道路通行能力将提升 21.6%~64.9%，部分地区的高速公路甚至可以在不进行改/扩建的条件下实现通行能力翻倍的运行效果^[14-16]。

2. 全面提升路网韧性和抗干扰能力

推动公路交通基础设施“四网融合”，运用车路协同技术，在实现道路精细感知、实时分析、用户触达的条件下，通过路侧设备的感知能力向车辆发送超视距的行车诱导信息，如道路边界、标志标牌信息、周边车辆实时位置和态势信息、车道偏离警告等，允许具备实时车路通信功能的车辆上路行驶；布设各类冰雪消融设施设备和加强恶劣天气行车引导，可以减少恶劣天气带来的高速公路无法通行情况，进而提升公路路网的韧性和抗干扰能力。

3. 提升公路交通安全水平

新一代信息技术与交通、道路、基础设施的深度融合，可实现对重点路段、重要节点的全面感知和监测。管理人员可以实时了解道路上发生的交通

活动和事件，实现对道路的精细化、实时化运营管理和控制，在一定程度上减少事故的发生，同时可运用现代科技信息技术分析事故的成因、掌握发展规律、实施相关的管控策略、设计主动安全技术，从更多维度提供安全保障^[17-19]。例如，运用驾驶员疲劳预警系统，可以对疲劳驾驶进行智能监测与自动预警，减少驾驶员疲劳驾驶的发生与潜在危害，有效提高驾驶员的出行安全；带有防撞系统的公共汽车和车辆可以在碰撞前警告司机前方有潜在的危险，帮助驾驶员防止或减轻碰撞。

4. 有效缓解公路交通的用能、供能紧张问题

公路交通基础设施与能源网的有效融合，可以扩展陆域能源的供给形式，依托微电网、物联网、大数据等技术，优化智慧高速能源网络的“发储配用”布局，能够进一步提升公路全域的供电可靠性^[20-24]。新能源的应用是交能融合的主要内容，通过在高速公路沿线布设光伏发电设备，可以有效缓解公路用能紧张问题。公路沿线服务区的充电设施建设是与能源网融合发展的核心内容之一，有利于缓解新能源汽车的用能压力，进一步缓解供能紧张的问题。

5. 提升公路基础设施的精细化管理养护水平

公路养护在公路交通运输安全和路网稳定运行方面发挥着重要作用。在公路养护过程中，应用新一代信息技术，形成智慧感知、智能管控的综合管理服务，能够解决传统人工手段效率低下等问题，延长道路使用寿命，提升道路性能指标，为公众提供更加安全、可靠、舒适的行车环境^[25-27]。

6. 全面提升出行服务体验

公路交通基础设施“四网融合”可以加快公路运行管理机构对交通事故、特殊天气等突发事件的反应和处置速度，最大限度地降低负面事件对车辆通行的影响；可以提供精准化的信息服务，及时、准确发布占路、阻断、灾害等路面灾害信息以及交通设施异常等预警信息，为公众出行提供精准、优质的信息服务。面向自动驾驶的车路协同技术可以带来包括安全预警、协同驾驶、自动驾驶辅助、出行引导等伴随式服务，显著提高公路使用者的用户体验。此外，“四网融合”带来的技术升级可以推动和支撑新一代收费政策的实施，让通过税收等政策手段进一步调节路网整体效能成为可能^[28-30]。

三、我国公路交通基础设施“四网融合”发展现状及存在的问题

(一) 我国公路交通基础设施“四网融合”发展现状

1. 充分发挥政策引领和试点示范作用

近年来,我国高度重视公路基础设施智慧化、信息化的发展,相继发布了多个战略性、指导性文件。2019年,中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》,强调大力发展智慧交通,推动新技术与交通行业深度融合,打造一流设施、一流技术、一流管理、一流服务,建成人民满意、保障有力、世界前列的交通强国。2021年,中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》,明确提出推进交通基础设施数字化、网联化,推动卫星通信技术、新一代通信技术、高分遥感卫星在交通运输业的应用,打造全覆盖、可替代、保安全的行业北斗高精度基础服务网。与此同时,各部委相继发布了《“十四五”大数据产业发展规划》(2021年)、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》(2022年)、《交通领域科技创新中长期发展规划纲要(2021—2035年)》(2022年)等重要政策文件,均对智慧公路试点示范、深度融合的智慧交通建设、基础设施智能化升级等做出进一步指导和明确,着力发展第五代移动通信(5G)、车路协同等智慧公路配套产业,加快实现智慧交通、绿色交通、平安交通、综合交通,建设交通强国。目前,我国进一步加快智能技术的深度推广和应用,发挥智能技术在交通系统建设、运营中的重要作用,推动公路基础设施提质增效。

2. 数字化设计与建造为公路基础设施打造重要底座

在公路交通基础设施的工程建设阶段,运用数字化勘察设计、智慧工地建设、工厂化建设和数字

化交付等手段,有效缩短了工程建设工期,提高了工程建设效率,降低了工程建设成本,提高了工程建设质量,延长了结构寿命,提升了施工过程的安全性和管理效率。例如,G524常熟段智慧公路科技示范工程,为提高信息化与智能化施工水平,依据桥梁主体设计图纸,搭建整桥建筑信息模型(BIM),并在施工过程中根据设计变更及现场技术资料对模型进行更新,实现由二维设计图纸向三维信息模型的转变,提升施工可视化程度。同时,通过无人机航拍激光扫描,结合二维设计图纸绘制BIM模型,实现三维碰撞检查、场布模型搭建、施工组织与交通组织等功能,如图1所示。

3. 智慧化运行与管理实现公路基础设施扩容增效

在运行管控阶段,运用智慧化技术,进一步提高路网的运行效率。据测算,在复杂的实际路网条件下,采用智慧运营和管控措施,可以提高通行效率20%左右;通过增加感知设施、采用管控策略、建设特定应用场景,可以显著提升公路的安全应急能力水平;通过使用特定的智能化管控设备,结合消冰融雪、限速管制等技术手段,可以实现雪天不封路;在路面安装智慧车道钉等行车诱导标识,可以提升雨雾天气、夜间行车的安全;利用智能光感设施消除隧道黑白洞效应,可以实现隧道进洞不减速通行。“四网融合”提升公路交通基础设施的效能场景如图2所示。

4. 智能化管理实现公路基础设施运维降本增效

在管理养护阶段,结合运用信息化技术,科学制定养护计划,可以提高公路养护的科学决策水平、降低养护资金成本、提高基础设施的使用寿命。调研数据显示,以全寿命周期理论分析为基础,选取全长100 km的高速公路为例,开展智慧养护的建设成本、养护费用与传统模式相比,分别

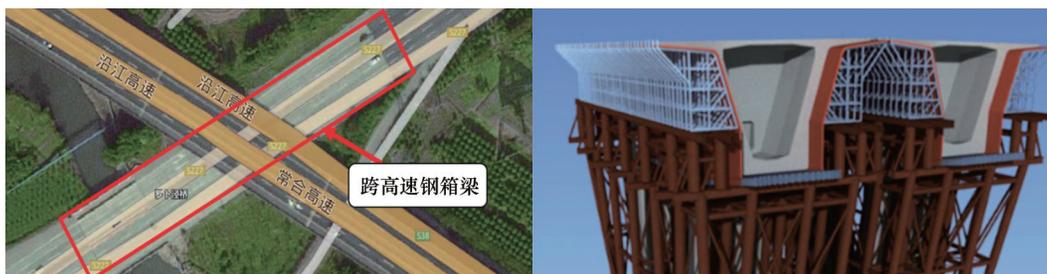


图1 BIM设计生成三维模型(G524常熟段)



图2 “四网融合”提升基础设施效能场景

下降了41.4%、36.5%。此外，公路基础设施智慧化管理养护还可以降低养护施工对路网正常通行的影响，以沪宁高速公路为例，苏州段首次使用路面摊铺“无人碾压”智慧养护施工技术，使路网影响率降低了36%。

5. 服务创新与融合不断催生公路运输新业态与新服务

公路基础设施与信息网的有效融合全面提升了高速公路的运营效能。在行业管理方面，高速公路运营管理部门对路网信息的感知、管控等更加精细化和全局化，实现了对全网路的数字化感知能力；通过智能感知采集、组网通信和多源数据分析，可以对路网交通运行状态进行准确评估和趋势预判，实现主动交通管控和高效处置。在基础设施维护方面，利用信息技术开展在役公路养护管理的数字化，可以对桥梁、隧道、地质灾害进行监测预警，基础设施长期性能开展跟踪观测，公路全生命周期进行资产管理等，推动公路基础设施业务形态的提升和完善。

6. 清洁化能源为公路设施提供稳定可靠动力保障

利用交通基础设施用地与空间资源，开发利用风能、光能、地热能、潮汐能等可再生能源发电，成为当前公路基础设施与能源融合发展的重点领域。在实践中，多以公路工程为主要载体，依托路侧边坡、枢纽互通、服务区废弃与取弃土场等闲散土地资源，建设风电、光伏、储能、充（换）电站、加氢站等清洁供能设施，为公路工程建设、客货运输等提供绿色能源。从实施效果来看，各地的公路基础设施与能源融合项目克服跨行业、跨部门审批协调难度大，技术指导和标准规范体系缺失等问题，采用“自发自用，余电上网”的模式，对缓解项目所在地用电高峰形成了有力补充。

（二）我国公路交通基础设施“四网融合”存在的问题

1. 缺乏公路交通基础设施“四网融合”的顶层设计

公路交通基础设施“四网融合”涵盖交通、能源、通信等多个行业管理部门和运营主体，各个行业均提出了各自的发展战略和发展目标，但对于融合发展的基本概念、途径手段、方式方法和目标效果都没有明确的要求。目前，国家相关政策、文件等主要鼓励和支持公路交通基础设施“四网融合”发展，但未明确全国统一的发展目标和路径，缺乏顶层设计。另外，由于缺乏统一目标和路径规划，各地的发展体系模式多样，路网的整体协同发展难度较大。

2. 与信息网、能源网的融合深度不足

随着我国智慧高速公路的不断发展，车路协同、自动驾驶、新能源汽车的应用带来了高速公路用能需求和数据信息规模的指数级增长。在用能方面，能源供应需要全路域覆盖，需求量是传统高速公路的5~6倍，对用能品质也提出了更高要求。在数据信息方面，受限于基础设施建设不完善、技术水平不高等因素，公路网的信息基础设施还无法支撑大规模的车路协同、自动驾驶、更高级别的车道管控等业务领域的数据传输与存储需求。

3. 工程技术等各类标准规范不统一

公路、能源、通信领域在基础设施建设标准方面存在较大差异，尤其是对消防安全、网络维护、安全运维等，不同领域的设施设备在同一个项目单位上共同实施需要解决大量的技术标准规范不统一问题。例如，公路的标准规范主要关注道路工程、交通工程等方面，而信息基础设施则涉及通信、计算机等领域，能源基础设施又与电力、燃气等领域相关。技术标准的制定需要协调各方利益，涉及多个部门和单位，导致标准制定

过程复杂，难以在短时间内达成一致。不同地区在公路、信息和能源基础设施建设方面的发展水平和需求存在差异，融合难度较大，难以采用统一的技术标准规范。

4. 跨部门、跨地区协同难度大

交通、汽车、通信、信息、能源等行业的运营管理涉及交通、公安、应急等部门，跨行业、跨部门的产业协作在规划协同、业务联通、数据共享、管理联动等方面存在诸多问题，缺乏多部门协同推进“四网融合”的发展机制。从地理空间上看，“四网融合”涉及不同省级行政区划，各省之间、各一体化区域之间的协同难度大。

5. 在实践中存在碎片化、场景化问题

交通基础设施有天然的时间和空间属性，通常要涵盖上百种设备、涉及数十个业务系统，随着海量数据的汇集，“四网融合”也暴露出了一些问题。行业管理依赖的业务系统平台松散，存在重复开发等现象，造成资源浪费、建设周期拉长、工作效率降低；系统打通难，不同业务领域、不同系统间的数据难以打通；数据安全问题难以充分保障，涉及行业敏感数据、大数据分析等方面的数据安全问题，存在一定的安全风险。此外，现阶段对“数字底座”的探索大多停留在数据的汇聚层面，尚未实现真正意义上的全生命周期打通、共享、交互。

四、我国公路交通基础设施“四网融合”发展的总体思路、目标与系统架构

（一）总体思路

我国在发展公路交通基础设施“四网融合”方面，需要以“四网融合”为主线，推进统筹集约和科技创新为主攻方向，统筹谋划“四网融合”的基础设施共享共建，逐步推动设施融合、数据融合、服务融合、生态融合，建设协同创新、智能高效、以人为本、共享发展的“四网融合”体系，有效提升公路基础设施在综合交通运输体系中的效能水平，为实现交通强国提供坚实支撑。

（二）发展目标

“四网融合”系统的实质是将公路基础设施网、能源网、信息网和运输服务网进行统筹融合，以实

现设施共享、信息互通、服务互联、生态互惠。按照交通强国战略目标的推进路径，结合“四网融合”的发展需求，划分了公路交通基础设施“四网融合”的发展阶段（见图3）。

1. 面向2035年：技术探索与基础融合阶段

以“四网融合”示范工程为切入点，完善顶层设计，建立和健全“四网融合”整体架构，逐步完善技术标准体系，探索新技术的研发与应用，突破融合技术难点和制度瓶颈。在物理层面，基本实现公路基础设施网、信息网、能源网的“通道共用、节点共建、设备共享、终端集成”，形成泛在智慧、高效协同的新型国家基础设施网络体系；在数据层面，基本实现各部门系统数据、业务数据、企业数据与用户数据的共享互通。到2035年，逐步实现基础设施网、能源网、信息网的物理实体空间和数字虚拟空间高度交互融合，实现公路设施网、能源网、信息网的全面感知、即时互联、精准管控和智能调度，交通与能源、信息、文旅、物流等多业态融合的一体化服务更加完善。其中，公路设施网、能源网和信息网的顶层设计、统筹布局规划、有序建设取得实质性成效，全国联网的公路运行管理平台基本建成，全网统一的运行标准、服务规则得到推行。通过差异化的收费、拥堵收费等政策，调节路网拥堵路段交通流，优化高速公路网与普通公路网的资源配置。基本形成统一的综合基础设施服务平台，初步建成公路交通、能源供销、信息通信集成的数据中心，基本具备提供差异化、定制化服务的能力；高速公路服务区充电服务全覆盖，高速公路隧道、服务区基本实现智慧能源管控。

2. 面向2050年：服务融合与产业协作阶段

到2050年，我国公路交通基础设施网、能源网、信息网的物理实体空间和数字虚拟空间高度交互融合，交通与能源、信息、文旅、物流等多业态融合的一体化服务更加完善。在业务层面，统一实施各类项目的规划建设，联合开展技术研发、营销服务和经营管理，在能源、交通、信息的运行调度上实现综合统筹与协调调度。在产业层面，进一步拓展“交通+”的服务应用场景，推动交通领域“车路云”一体化发展；在智能电网、大数据等领域深入开展产业合作，以电力为主、多能互补的新型公路交通能源供给体系基本建成；天地一体、结构合理的公路交通信息通信网络基本建成，可提供大带宽、低

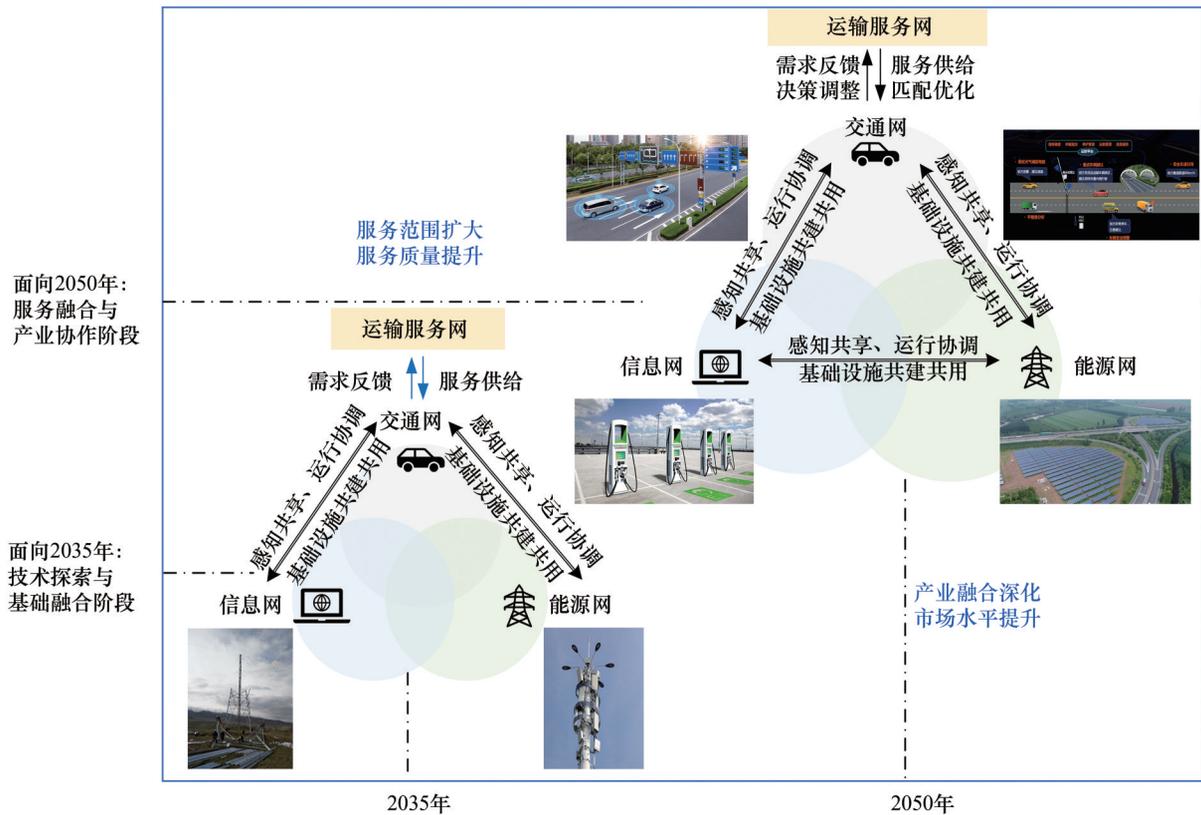


图3 我国公路交通基础设施“四网融合”的发展目标

时延、高可靠的通信服务；新模式、新业态更加丰富，综合基础设施运营商探索发展取得成效。

(三) 系统架构

公路交通基础设施“四网融合”将独立发展的4个网络融合集成为可以协同为社会服务的高级基础设施网络。以5G、数据中心、云计算等前沿技术为支撑，实现“四网”终端的互联互通，推动交通、能源、信息、服务各类数据跨平台共享，充分挖掘数据价值，实现“四网”高效协同、供需互动，进而实现降低成本、提高效率、优化服务的目的。

公路交通基础设施“四网融合”的系统架构由基础层、数据层、平台层与场景应用层组成，如图4所示。①基础层由公路设施、能源、信息系统的一系列物理实体设施组成，包括公路路网、路侧感知与服务设施、传统大电网、光伏设施、光纤系统、通信基站等。基础层通过各网基础设施的统筹规划、共建共享来降低建设成本、提高设施利用率，实现基础设施融合。②数据层在采集基础设施

网、能源网与运输服务网的数据基础上，通过信息网整合采集基础层海量、高维、异构的运行数据，监测并感知基础层的运行状态，实现数据融合。③平台层以数据处理与优化算法为核心，兼顾“四网”不同的运行特性，特别是需求和供给在时间、空间上的不同分布特性，形成统一的综合运行协调与优化调度系统，实现系统融合。④场景应用层是“四网融合”的核心，通过融合能源、交通、信息服务等需求，提供一体化的综合运营和能源互联网等服务，使综合服务全过程更高效、更节能、更便捷，最终实现“四网”绿色低碳、安全可靠、智慧协同和经济高效的高质量融合发展。

(四) 发展模式

当前，我国大力推进数据资源赋能交通发展，构建泛在先进的交通信息基础设施，打造顺畅高效、绿色集约、智能可靠的国家综合立体交通网。我国公路交通基础设施“四网融合”的发展模式如图5所示，包括设施融合、数据融合、业务融合与产业融合。

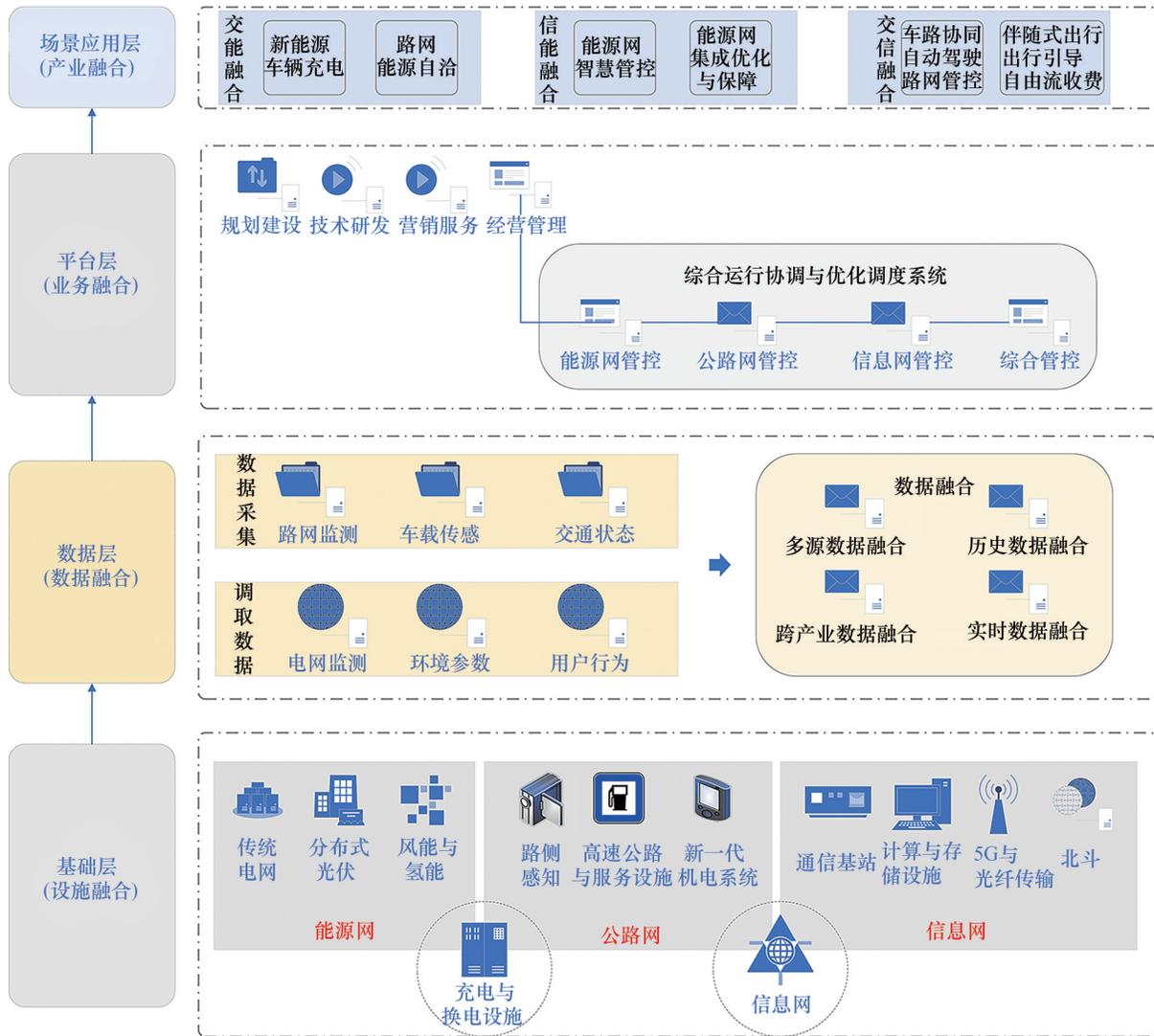


图4 我国公路交通基础设施“四网融合”的系统架构

1. 设施融合

通过物理层的协同发展，推动“四网”在通道、枢纽、设备和终端等层次的共享，主要体现在公路交通基础设施的通道共用、枢纽共建、设备共享、终端集成等方面。① 通道共用。能源网需要建设电力塔铺设架空线路，信息网需要建设通信塔铺设光缆或挂载基站，电力塔、通信塔是能源网和信息网空中走廊的重要节点。推动电力塔和通信塔“双塔合一”，可以提高通信光缆和基站建设效率，降低建设成本，减少新增通信铁塔基站占用土地资源，促进绿色协调发展。② 枢纽共建。能源网有能源基地、变电站/换流站等能量生产和转换枢纽；交通网有人流、物流集散中心等客/货运枢纽，以及大量加油站、充（换）电站等能量补给节点；信

息网有大量通信基站等信息传输节点以及服务器、数据中心等信息存储与交换枢纽。推动变电站与充（换）电站以及信息数据中心、客货运输枢纽与充（换）电站、能源基地与信息数据中心等形式的枢纽或节点共建，通过枢纽共建，提高土地和空间等资源的利用效率，降低建设成本，增强公路交通基础设施“四网融合”的系统功能并提高运行水平。③ 设备共享。公路交通基础设施、运输服务、能源、信息“四网”的覆盖范围大、设备数量多，实现设备功能集成，将带来显著的经济和环境效益。智慧路灯、电力光纤、载波通信、传感测量装置等的集成是设备融合的重点。智慧路灯能够集成照明、基站、监控、充电等功能，是智慧城市的基础智能单位；电力光纤和载波通信可以实现电力、信

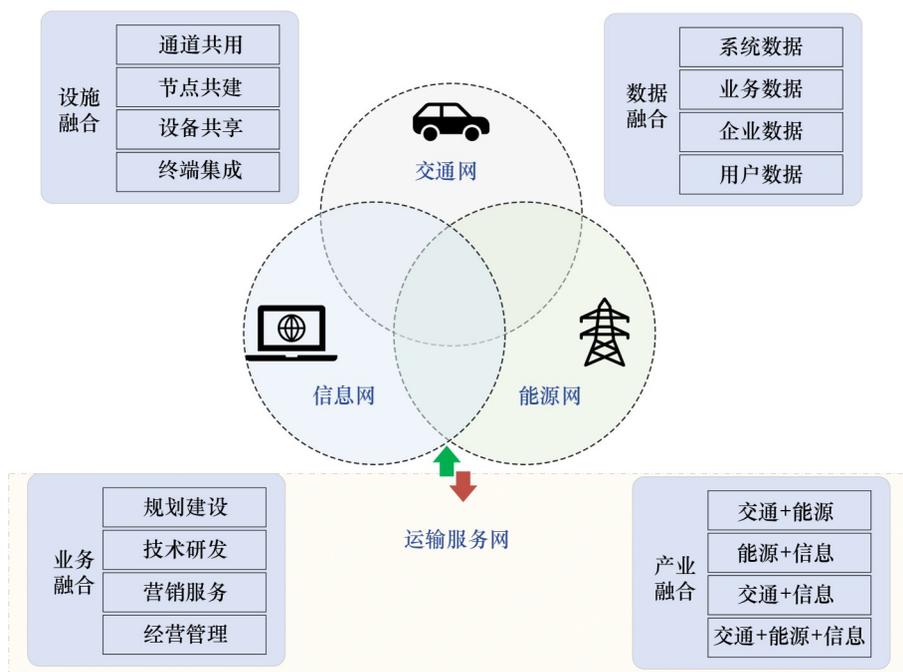


图5 我国公路交通基础设施“四网融合”的发展模式

息传输合二为一，提高设备利用效率；传感测量装置的共用能够推动设备信息共享，提高系统运行效率。④ 终端集成。终端是“四网”实现商业价值的重要手段。信息网的终端主要包括计算机、智能手机等，能源网的终端主要有智能家居等用电设备、智能电能表等信息采集设备，交通网的终端主要包括各类交通工具及车载系统等。终端融合主要包括硬件集成和软件集成，前者依托芯片和材料技术，实现单个终端集成多个硬件功能应用，后者是将多个软件功能集成到同一个软件里。

2. 数据融合

通过数据层的高效贯通，推动各类数据跨平台共享，构建“四网”大数据平台，实现数据充分融合，消除“信息孤岛”，挖掘数据更大价值，创造更大效益。数据融合的重点是推动系统数据、企业数据、用户数据等的融合。① 系统数据融合是实现“四网”协同运行、提高系统效率的关键。作为网络型基础设施，“四网”运行数据具有采集点多、频度高、数据总量大、完整度高等特点，通过系统数据融合，可以对“四网”运行状态进行全面系统分析，实现协同运行。② 企业数据融合，网络型基础设施涉及的企业数量多，推动企业各部门、各业务之间的横向数据协同，可以缩短管理链条、压缩业务流程、提高企业运营效率。③ 用户数据融合是

开展业务服务和商业模式创新的基础。用户大数据已成为企业重要的战略资源。“四网”用户数据融合，可以将分散的用户数据集中到一起，形成用户大数据；依托大数据分析，生成精准的“用户画像”，分析用户的主要偏好、行为习惯和潜在需求，为用户提供更适宜和高效的服务。

3. 业务融合

通过应用层的有效衔接，推动“四网”业务协同和服务创新，实现业务深度融合，提高企业效益和客户服务水平。重点是推动“四网”的规划建设、技术研发、营销服务、经营管理等业务融合。① 规划建设。加强对能源网、交通网与信息网规划的统筹衔接，建立以整体发展规划为统领，分领域、分区域发展规划为支撑的“四网”规划体系，促进有效衔接和相互协调。在建设过程中，可以建立跨领域、跨专业的团队来负责“四网”共同设施的运营维护，进而更好推进项目建设、提升建设质量和效率、降低成本。② 技术研发。智慧能源、智能交通的发展将推动大数据、云计算、物联网、移动互联网等信息技术与能源电力、交通技术的融合创新，促进跨领域联合研究、协同创新。“四网融合”将带来用户需求的快速变化、推动产品快速迭代，进而压缩技术研发与应用链条，提高研发效率。③ 营销服务。整合“四网”的各类营销渠道，

推动线上与线下渠道相结合,将实体营业厅与互联网服务平台、智能终端等进行有机结合,可以提高营销和服务效率。整合业务报装、电费缴纳等能源服务,网约车、导航等出行服务以及相关信息服务,拓展服务内容,为用户提供多元化服务。④ 经营管理。“四网融合”将促进企业管理协同化和信息化,对不同业务实施分类高效管理,优化交叉业务流程,提高业务协同能力。

4. 产业融合

通过业态层的协同创新,打破行业壁垒,实现产业跨界融合,培育新业态、新模式和新产业,构建“四网融合”产业生态圈。重点是聚焦“交通+能源”“交通+信息”等产业形态,推动智慧能源、智慧交通、大数据等新兴产业发展。① “交通+能源”融合。推动交通用能向电能和氢能为主转变,推动公路光伏发电、汽车无线充电等设施的建设,将促进光伏和无线充电等产业的发展。② “交通+信息”融合,将推动运载工具和路网的信息化、智能化,推动智慧物流、无人配送、智能仓储、网络约车、共享汽车等商业模式的发展,推动传统交通运输产业的智慧化发展。

整体来看,公路交通基础设施“四网融合”将推动产业高效协同、跨界融合。智慧路灯、充电桩、多站融合、城市综合管廊等新装备、新设施的大量建设,将改变传统的“四网”产业发展模式和结构,形成以清洁电力、电动交通和数据信息为核心的融合产业生态圈。“四网”通过基础层、数据层、平台层、场景应用层的有效对接,融合设施、数据、业务和产业等四大领域,实现能源流、人流、物流、信息流的高效协同,提升资源利用效率和生产要素配置能力,促进价值流的跨界流动,形成协同创新、开放共享、合作共赢的价值网络。

五、我国公路交通基础设施“四网融合”的重点任务

(一) 构建基于“四网融合”的新型基础设施体系

构建“四网融合”的新型基础设施网络体系。强化顶层设计,共享规划方案,推动交通、能源、信息部门间形成良好的协同。通过物理层协同发展,推动“四网”通道、枢纽、设备和终端集成共享,实现基础设施有效融合,减少土地和空间占

用,提高投入产出。重点推动空中走廊、地上通道、地下及水下管廊等通道共用,能源网、交通网和信息网的枢纽共建,电力光纤、智慧路灯等设备复用与共享,智能电表、车载终端、智能手机等终端软硬件集成。

建设综合基础设施智能调度体系。持续完善路网运行监测管理与服务平台,建立全天候路网监测调度中心,实现“云网边端”互联的全息感知、精准预警、科学决策和智能调度,实现“可视、可测、可控、可服务”。推进基础设施网与能源网、信息网各自独立的感知-决策-控制系统之间实现融合感知、即时互联、精准管控、协同决策与智能调度,实现基于实时信息的优化决策与控制。

推动交通、能源、通信网络新型基础设施示范工程建设。充分发挥示范工程的引领作用,选择京港澳、沪蓉高速等重大通道以及长江三角洲、珠江三角洲城市群,分别开展多站融合、共享铁塔等重点方向的示范。① 以变电站、5G基站的集约建设和运营为先导,以5G布点为切入,逐步引入边缘数据中心建设,带动包括芯片研发、设备制造、运营维护等在内的能源、信息通信领域全产业链发展,实现多站融合;通过5G基站和边缘数据中心形成的广覆盖、低延迟、大带宽的通信网络与即时响应的边缘计算能力,支撑新兴智能化服务应用需求。随着核心基础业务体系的成熟和发展,可引入环境监测站、北斗地基增强站、储能站、分布式新能源发电站等站点的建设和运营,逐步形成区域级的集约共享。② 以共享的方式在电力铁塔上加装通信设备,将光缆、通信基站、移动天线等通信设施附属在输电杆塔上,使电力铁塔设施实现再利用,大幅减少建设成本,缩短信息通信建站周期,有力推动5G等网络的推广应用。

(二) 建立稳定可靠的公路基础设施能源供给体系

以交通基础设施为载体,结合清洁能源利用资源禀赋特性,充分依托和优化利用交通基础设施空间、沿线立体空间等路网线形区域进行清洁能源资源开发,打造线形能源流;具备大规模集中用电区域性的空间资源和地面资源典型场景,建设域性能源流;最终创建满足交通发展需求的“点、线和区域”相结合的立体化的交通基础设施清洁能源分布式供给网络,从而实现交通基础设施与能源基础设

施的深度融合。

推动交通运输与能源在规划、建设、运营等环节的统筹实施。综合考虑交通基础设施沿线的用能负荷情况、附近区域的新能源资源情况、大电网支撑能力，在规划阶段开展交通基础设施与能源基础设施的深度融合，最大化提升绿色能源自洽率。在设计阶段，将交通基础设施与能源基础设施进行一体化设计，通过二者的有机融合集约化利用土地空间，避免重复施工，降低建设成本。在施工阶段，综合考虑施工期与运营期的用能需求，选择合适地点先行建设绿色施工供能站；在工程完工后，绿色施工供能站可以扩建为永久性的综合能源供给站。建立交/直流混合微电网和智慧能源管控系统，基于柔性直流输电技术，打造全线柔性互联网络，实现能源灵活调控，各微网间的能量灵活互济。

建立安全稳定的公路新型能源供给体系。推动公路与骨干电网统筹布局、协同建设，新增跨省跨区电力输送通道建设，优先考虑在公路通道沿线布设，配电网改造升级应充分考虑公路交通用能保障，满足快速增长的电动化公路交通工具和智慧公路装备运行的用电需求。利用价格等机制，充分发挥公路交通就地就近消纳新能源、参与电力需求侧响应的潜力，高比例释放电动汽车用电负荷的弹性。结合燃料电池重卡技术成熟度和推广应用需要，适时布局建设加氢设施。

有序推进公路沿线光伏资源的开发利用。积极推进公路沿线服务区、下边坡等构造物的光伏开发利用，推广光伏发电与建筑一体化应用，推动“源网荷储”一体化发展，就地补充公路设施设备运行和交通车辆电力需求，在满足交通用能的基础上实现余电上网。

完善公路服务区充（换）电设施网络。加快公路服务区的大功率快充设施建设，全面推动车桩协同发展。促进电动汽车与智能电网间的能量和信息双向互动，开展“光储充换”相结合的新型充（换）电站试点示范应用。结合新能源、清洁能源重型卡车的应用试点，部署建设一批换电站、加氢站。在建设时序上，优先推动城市群区域服务区充电车位建设，逐步扩大至“6轴7廊8通道”沿线服务区，最后推广至全国。

（三）升级泛在先进的公路基础设施信息服务体系

升级完善全国高速公路沿线有线传输网。统筹高速公路沿线管网资源，升级完善覆盖高速公路全线的高速公路光纤网和电信运营商专线，形成双备份的行业传输网。其中，高速公路光纤网以传输海量的视频、图片等非结构化数据为主，电信运营商专线以传输可靠性要求高的路网运行状态感知、基础设施运行状态监测、行业管理与服务等结构化数据为主。

逐步推进高速公路沿线无线通信专网。探索5G在公路领域的应用场景，结合5G商用部署，充分利用高速公路沿线基础设施、电力、管网等资源，逐步推进5G网络在高速公路沿线的覆盖。到2035年，主要从城市周边公路网，逐步向重点路段、服务区、桥隧等关键节点覆盖；到2050年，重点面向车路协同、自动驾驶应用场景，结合专用短程通信、蜂窝车联网等多种通信方式，建设新一代车用无线通信网络，逐步覆盖骨干高速公路全线。

完善北斗地基增强加密网。在国家北斗地基增强框架网和各地区、通信运营商、行业等建设的加密网的基础上，在国家统一规划和标准的指导下，重点结合高速公路、长大桥梁和长隧道等应用场景需求，在公路沿线补点加密建设北斗地基增强基站，逐步覆盖高速公路全线。

统筹推进新基建和传统基建。完善和修订公路基础设施工程建设规范，将公路新型基础设施纳入公路基础设施工程建设内容，实现同步规划、同步设计、同步建设、同步运维。构建智慧公路评价指标体系，指导智慧高速公路设计和建设。

（四）构建“四网融合”多业态一体化服务体系

以高品质的综合服务需求为导向，推动“四网融合”产业生态联合创新，引导构建跨领域、跨区域的“一张网”协同运营服务模式，实现服务融合、生态融合，提供交通、旅游、商贸、物流、能源等多业态融合的一体化服务，全面实现“人享其行，物畅其流”。

构建统一的信息共享交换平台。加强跨区域、跨路网之间的信息共享和协同，推进信息服务范围从区域路网、跨区域路网向跨路网（高速公路和普通公路）的逐步拓展，实现公路信息服务“一

张网”。

构建统一的综合服务平台。利用大数据、互联网、人工智能等技术，研究用户的交通、用能、通信等行为习惯和特征，建立“1+1>2”的全局最优供需匹配策略，通过统一的综合服务平台，实现站点供给能力、动态线路规划、实时定价策略等的优化调整，引导用户调整出行、充电、消费等行为，提供需求响应式的“交通+能源+通信”的融合服务，提升用户体验。

强化引导，促进产业生态圈融合创新。发挥市场机制在“四网融合”的资源配置决定性作用，引导社会各方投入“四网融合”发展，共同构建基于市场机制运营的“四网融合”运营服务新模式。推进智慧公路、智慧能源、互联网、出行服务、物流服务、信息服务、汽车制造业等行业融合。

六、保障我国公路交通基础设施“四网融合”的对策建议

（一）建立符合“四网融合”发展特点的管理机制

推动相关行业主管部门加强沟通协调，推动中央与地方之间、区域之间的政策协同，加强规划建设、技术标准、投融资、运营管理等跨行业综合政策制定和引导。创新规划理念和方式方法，从规划源头转变条块分割的发展模式，建立统一衔接的“四网融合”统筹规划体系，健全规划衔接协调机制，明确衔接原则和重点，规范衔接程序，确保各类规划协调一致。

建议由相关管理部门牵头，组织“产学研金服”成立各类技术和产业联盟，搭建产业协作平台，开展共性和关键技术的联合攻关，共同研究统一的技术标准和规范，开展一致化行动，加快产业化进程。共同研究“四网融合”中长期发展战略，制定统一的发展路线图、分级分类标准，对法律法规、技术标准和效能评价进行整体架构；制定协同化的产业政策；各部门分工协作，采取一致化行动，分别制定国家层面的行业标准；构建一体化系统产业生态发展基础平台和协同创新平台；多渠道利用金融工具，搭建消费和金融服务场景，推动产业生态建设。

（二）建立符合新技术应用特点的引导机制

推动相关行业主管部门加强沟通协调，加强规划建设、技术标准、投融资、运营管理等跨行业综合政策的制定和引导。创新建设运营、金融投资、标准协同、政策保障等机制，强化全过程、全方位协同，拓宽融资渠道，提供稳定健康的资金与政策保障。

在交能融合方面，引导和强化换电重型卡车推广的市场机制。在现有的换电车型的国家公告基础之上，允许车企根据市场的需要自主拓展。在保障安全的基础上，允许在已公告并上牌车辆上使用不同品牌的合规电池，实现移动能源资产（电池）共享运营。同时，将重污染的企业清洁化的运输要求纳入到企业环境监管指标，并与企业的评级、产能限制、资源保供等相衔接。

重点加强新技术、新设备、新材料研发，在能源、信息、交通领域实现关键技术突破，注重交叉学科、跨界融合技术的创新发展，在新能源储能、新一代通信技术、大数据、云计算、人工智能、区块链、无人驾驶、车联网、车路协同服务等方面尽快取得一批创新成果，不断提升“四网融合”技术经济性。

（三）构建完善的“四网融合”标准规范体系

研究制定覆盖规划设计、建设运营、管理维护等全生命周期的“四网融合”标准体系。完善既有交通基础设施标准规范中信息化、电力化的相应内容，及时调整与“四网融合”不相适应的条文，保障基础设施数字化设施的同步建设、一体运营、一体养护。制定标准体系制定/修订计划，有序组织“四网融合”相关标准的制定和修订工作。研究制定“四网融合”相应的标准规范体系，涵盖智慧公路全生命周期、全过程管理服务以及基础支撑。汲取各地智慧公路建设指南的经验，按照服务牵引、技术融合、数据连通共享原则，打通技术通用标准、产品标准、管理服务标准、数据标准。加强“四网融合”产品生产、设计施工、运营维护等全链条标准衔接，提升“四网融合”工程规范化水平。加快出台共享换电、数据交换等方面的国家技术标准。

（四）建立健全实施监测评估与开放合作的机制

结合国家重要综合交通基础设施通道扩能改

造,围绕“四网融合”建设重点,选择规划建设和正在开展的依托工程或项目,开展试点示范建设,进一步积累经验。适时开展实施情况监测分析和总结评估,强化监测评估结果应用。建立规划和标准实施监督考核机制,探索实行考核结果与被考核责任主体绩效相挂钩。

秉持开放包容、共建共享精神,打造跨国界、跨领域、跨专业的国际合作平台,推动有关国际组织、社会团体、企业单位、科研院所、高等院校共同参与“四网融合”发展,在政策机制、技术标准、国际规则、理念传播、工程建设、人才培养等方面开展合作。通过国家级基金带动社会资本跟进,鼓励社会资本设立相关产业基金,共同推进技术研发、成果转化和产业融合发展。

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: September 20, 2024; **Revised date:** November 26, 2024

Corresponding author: Weng Mengyong is the president of China Highway and Transportation Society. His research field is transportation planning and management. E-mail: wmy@chts.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Comprehensive Transport System Efficiency Improvement Strategy” (2022-PP-06)

参考文献

- 岳超,钟佳儒,宁启立,等.新技术形势下“车能路云”融合发展战略研究[J].中国工程科学,2024,26(1):45-58.
Yue C, Zhong J R, Ning Q L, et al. Development strategy of vehicle-energy-road-cloud collaboration in the new technological situation [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 45-58.
- 贾利民,师瑞峰,吉莉,等.我国道路交通与能源融合发展战略研究[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.
- 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,2022,24(3):153-162.
Yang Y P, Wu P, Cheng P, et al. Development strategy for energy system of land transport in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 153-162.
- 朱志方.公路交通机电通信技术的应用与研究[J].运输经理世界,2021(14):114-116.
Zhu Z F. Application and research of electromechanical communication technology in highway traffic [J]. Transportation Manager World, 2021 (14): 114-116.
- 高吉鹏.现代通信技术在高速公路机电系统中的应用[J].中华建设,2021(4):155-157.
Gao J P. Application of modern communication technology in expressway electromechanical system [J]. China Construction, 2021 (4): 155-157.
- 陈楠梓,周伟:以数字化推动新时代公路交通高质量发展[J].交通建设与管理,2023(6):20-23.
Chen N P, Zhou Wei: Promoting the high-quality development of highway traffic in the new era with digitalization [J]. Transport Construction & Management, 2023 (6): 20-23.
- 伍朝辉,徐建达,符志强,等.交通强国建设视域下公路交通数字孪生体系架构、关键技术与实践案例[J].交通运输研究,2023,9(4):104-124.
Wu Z H, Xu J D, Fu Z Q, et al. System architecture, key technologies, and practical cases of highway traffic digital twin from the perspective of building a country with strong transportation network [J]. Transport Research, 2023, 9(4): 104-124.
- 刘婧雯,车春江,闻静.高速公路充电基础设施发展对策研究[J].交通运输部管理干部学院学报,2023,33(3):20-24.
Liu J W, Che C J, Wen J. The strategies for China's development of charging infrastructure on expressways [J]. Journal of Transport Management Institute Ministry of Transport, 2023, 33(3): 20-24.
- 张勇,蒲勇健,史乐峰.电动汽车充电基础设施建设与政府策略分析[J].中国软科学,2014(6):167-181.
Zhang Y, Pu Y J, Shi L F. Analysis on electric vehicle charging infrastructure and government strategy [J]. China Soft Science, 2014 (6): 167-181.
- 新华社.中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[EB/OL]. [2024-07-18][2024-08-01]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm.
Xinhua News Agency. Decision of the Central Committee of the Communist Party of China on further comprehensively deepening reform and promoting Chinese-style modernization [EB/OL]. [2024-07-18][2024-08-01]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm.
- 高奎刚,张艳,王骋程.智慧高速的“山东模式”[J].中国公路,2022(12):44-47.
Gao K G, Zhang Y, Wang C C. The “Shandong model” of intelligent expressway [J]. China Highway, 2022 (12): 44-47.
- 王阳生.5G+智慧高速业务场景探讨[J].中国交通信息化,2021(S1):17-20.
Wang Y S. Discussion on 5G+ intelligent high-speed business scenarios [J]. China ITS Journal, 2021 (S1): 17-20.
- 耿驰远,顾莉.智慧高速实践探索[J].中国交通信息化,2022(S1):15-19.
Geng C Y, Gu L. Practice exploration of intelligent high-speed [J]. China ITS Journal, 2022 (S1): 15-19.
- 杨阳,石英杰.沪宁高速公路智慧扩容内涵及实现路径[J].公路,2021,66(8):271-274.
Yang Y, Shi Y J. Connotation and realization path of intelligent expansion of Shanghai-Nanjing Expressway [J]. Highway, 2021, 66(8): 271-274.
- 华静,王潇旋.强力扩容构建智慧交通格局[N].兰州日报,2024-02-26(08).
Hua J, Wang X X. Strong capacity to build intelligent traffic pattern [N]. Lanzhou Daily, 2024-02-26(08).
- 廖圣龙.智慧管控让扩容施工更安全[J].中国公路,2024(10):

- 26–29.
- Liao S L. Intelligent control makes expansion construction safer [J]. *China Highway*, 2024 (10): 26–29.
- [17] 安鑫. 智慧高速公路基于安全的车路协同应用场景探索 [J]. *车时代*, 2021 (1): 169–170.
- An X. Exploration of safety-based vehicle–road cooperation application scenario of smart expressway [J]. *Automobile Times*, 2021 (1): 169–170.
- [18] 张洪满. 基于驾乘人员需求的智慧高速公路“全方位服务”探讨 [J]. *西部交通科技*, 2021 (10): 169–171.
- Zhang H M. Discussion on “all-round service” of smart expressway based on the demand of drivers and passengers [J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2021 (10): 169–171.
- [19] 袁航, 王豫炜. 基于全生命周期管控的智慧高速建设探究 [J]. *中国交通信息化*, 2021 (2): 132–134.
- Yuan H, Wang Y W. Research on smart high-speed construction based on life cycle management and control [J]. *China ITS Journal*, 2021 (2): 132–134.
- [20] 鲁彬彬. 绿色公路理念在高速公路设计中的实践 [J]. *河南科技*, 2021, 40(12): 103–105.
- Lu B B. Practice of green highway concept in expressway design [J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(12): 103–105.
- [21] 王珂. “三网融合”路域产业发展的数字体系建设思路 [J]. *网络安全技术与应用*, 2024 (10): 99–100.
- Wang K. Digital system construction of “triple play integration” road area industrial development [J]. *Network Security Technology & Application*, 2024 (10): 99–100.
- [22] 张力, 刘海洋, 段德萱, 等. 交能融合背景下的高速公路光储充一体化发展路线展望 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(5): 86–94.
- Zhang L, Liu H Y, Duan D X, et al. Prospects for the development path of highway PV–storage–charging integration under the background of transportation and energy integration [J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(5): 86–94.
- [23] 闫苏, 王军强, 徐亚东, 等. 交通与能源融合发展的现状与展望 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 21(4): 1–27.
- Yan S, Wang J Q, Xu Y D, et al. Current status and prospects of integrated development of transportation and energy [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2024, 21(4): 1–27.
- [24] 黄仙, 叶笑容, 纪文童, 等. 高速公路自洽能源系统规划中的经济性特点 [J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(4): 56–70.
- Huang X, Ye X R, Ji W T, et al. Economic characteristics of highway self-consistent energy system planning [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(4): 56–70.
- [25] 王亮, 徐润, 梁春颖, 等. 智慧高速管理模式构建与实践研究 [J]. *建筑经济*, 2024, 45(S1): 721–726.
- Wang L, Xu R, Liang C Y, et al. Research on construction and practice of smart expressway management mode [J]. *Construction Economy*, 2024, 45(S1): 721–726.
- [26] 陆遨. “互联网+”智慧高速公路养护管理技术探索 [J]. *中国信息化*, 2024 (4): 43–45.
- Lu A. Exploration of “Internet +” intelligent highway maintenance and management technology [J]. *Zhongguo Xinxihua*, 2024 (4): 43–45.
- [27] 解冬东. 5G 技术在高速公路养护工程全过程智慧化管控的应用 [J]. *中国交通信息化*, 2023 (12): 32–35.
- Xie D D. Application of 5G technology in the intelligent management and control of the whole process of expressway maintenance engineering [J]. *China ITS Journal*, 2023 (12): 32–35.
- [28] 李萍. 高速公路收费站智慧收费及运维保障研究 [J]. *运输经理世界*, 2024 (24): 53–55.
- Li P. Research on intelligent toll collection and operation and maintenance of highway toll station [J]. *Transport Business China*, 2024 (24): 53–55.
- [29] 孙婧. 高速公路收费的进阶之路——智慧收费站建设探讨 [J]. *中国交通信息化*, 2024 (6): 18–24.
- Sun J. The advanced road of highway tolling—Discussion on the construction of intelligent toll station [J]. *China ITS Journal*, 2024 (6): 18–24.
- [30] 徐超. 京沪高速公路改扩建中的数字化智慧化建设探索 [J]. *中国交通信息化*, 2024 (2): 101–105.
- Xu C. Exploration of digital intelligent construction in the reconstruction and expansion of Beijing–Shanghai expressway [J]. *China ITS Journal*, 2024 (2): 101–105.