

我国综合交通工程科技现状及未来发展

何洪文^{1,2*}, 孙逢春^{1,2}, 李梦林³

(1. 电动汽车国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;
3. 燕山大学车辆与能源学院, 河北秦皇岛 066000)

摘要: 深入探讨综合交通工程科技发展的需求目标和共性难题, 有助于推动我国综合交通的持续进步。本文从道路交通、轨道交通、水路交通、航空交通、城市综合交通5个维度梳理了我国交通工程科技的发展现状, 总结了由交通系统网联化、交通出行共享化、交通管控智慧化、交通运载运行协同化、交通布局立体化表征的我国综合交通工程科技的未来趋势。研究认为, 可在综合交通体系化构建、综合交通数字化基础服务平台、综合交通指挥调度中心、综合交通相关服务等方向实施综合交通工程科技攻关, 建议构建综合交通新体系、培育交通出行新模式、形成一体化综合交通网、建设多基综合交通枢纽、实施智能网联立体交通重大工程, 以此精准驱动我国综合交通的高质量发展。

关键词: 综合交通; 工程科技; 智能网联; 智慧调度; 立体交通

中图分类号: U1 **文献标识码:** A

Current Status and Future Development of Integrated Transportation Technology in China

He Hongwen^{1,2*}, Sun Fengchun^{1,2}, Li Menglin³

(1. National Engineering Research Center of Electric Vehicles, Beijing 100081, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, Hebei, China)

Abstract: In-depth exploration of the goals and common challenges in the development of integrated transportation technology is crucial for promoting the continuous progress of integrated transportation in China. This study reviews the current state of transportation engineering and technology in China from five dimensions: road, rail, water, aviation, and urban-integrated transportations. The future trends of integrated transportation engineering and technology in China are summarized, characterized by networking of transportation systems, shared mobility, intelligent traffic control, coordinated transportation operation, and three-dimensional transportation layout. The study suggests that comprehensive transportation engineering and technology breakthroughs can be achieved through the construction of an integrated transportation system, establishment of a digital infrastructure platform for transportation, development of comprehensive transportation command and control centers, and implementation of related services. The following strategic measures are recommended: constructing a new integrated transportation system, fostering new models of transportation and mobility, establishing an integrated transportation network, building multi-modal transportation hubs, and implementing major projects in intelligent and connected three-dimensional transportation. These initiatives will effectively drive the

收稿日期: 2023-09-05; **修回日期:** 2023-11-18

通讯作者: *何洪文, 电动汽车国家工程研究中心 / 北京理工大学机械与车辆学院教授, 研究方向为综合交通发展战略研究;
E-mail: hwhebit@bit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国智能交通关键技术问题研究”(2022-HY-05)

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

high-quality development of integrated transportation in China.

Keywords: integrated transportation; engineering technology; intelligent connected; smart dispatching; three-dimensional transportation

一、前言

交通运输是现代化经济体系建设的先行领域和交通强国建设的重要支撑^[1,2]。当前,我国综合交通运输网络总里程超过 6×10^6 km,建成了全球最大规模的高速铁路网、高速公路网和世界级港口群。然而,交通运输领域的碳排放量约占我国碳排放总量的10%,是雾霾天气和城市热岛效应的主要诱因之一^[3],在“双碳”战略背景下,加快发展绿色、低碳运输体系至关重要。随着交通系统建设更为复杂化和精细化,路网的“扩改”进程与机动车增速存在明显的不匹配,导致交通事故频发、交通拥堵成为常态。综合交通集成了道路、轨道、水路、航空、城市综合等交通模式,通过开展相应的科技创新,有望在优化交通系统性能、实现可持续发展中发挥关键作用。我国虽然在基础设施网络、综合交通运输体系、运输装备技术等领域取得了瞩目成就,但不平衡、不充分等结构性问题仍然存在;综合交通网络结构仍待优化,统筹融合、互通韧性亟待加强,综合交通的质量效率不适应经济社会快速发展的需求。因此,着力解决现代交通面临的排放治理、交通运输难题,推动建设可持续智能交通系统,成为综合交通领域亟待解决的关键问题。

综合交通发展需要秉持科技创新与安全智慧绿色理念,而综合交通工程科技得益于第五代移动通信(5G)、大数据等信息技术以及新能源等新兴技术的持续进步,进入了跨领域、多元化的发展阶段,如高效互通的交通体系成为研究热点^[4,5]、清洁能源交通运输装备的创新和完善^[6,7]。在智慧交通体系迅速发展的背景下,综合各类交通形式,合理运用绿色高效的交通运输装备,助力实现交通领域的全面互通互联和高效调度。这既是释放交通系统流通和节能潜力的有效途径,也是设计未来交通智慧互联顶层架构的必要手段。因此,破解综合交通工程发展困境,关键在于构建交通网络综合立体、交通出行便捷顺畅、智慧交通融合发展的现代智能交通新格局。

本文立足交通强国战略背景,聚焦包括道路交通、轨道交通、水路交通、航空交通、城市综合交

通在内的多元交通形态,梳理发展现状、辨识未来趋势、论证科技攻关方向,以期前瞻探讨我国综合交通及其科技发展新格局,为我国综合交通高质量发展研究提供启发和参考。

二、我国综合交通工程科技的发展现状

(一) 道路交通领域工程科技发展现状

道路交通系统是社会发展、经济发展以及物质结构的重要组成部分,得益于兼具规模和高效的公路网络,我国已建成世界领先的公路货运交通体系。截至2022年年底,我国公路通车里程为 5.35×10^6 km,其中高速公路里程为 1.77×10^5 km^[8],实现从“连线成片”到“基本成网”、从高速公路到普通公路衔接连贯的层层辐射格局,道路网络布局实现规模和质量双跃升。2022年,我国全年累计公路货运量达 3.712×10^{10} t,累计公路旅客客运量为 3.55×10^9 人次。在道路交通工具方面,截至2022年年底,全国机动车保有量为 4.17×10^8 辆,其中汽车保有量为 3.19×10^8 辆^[9,10]。为解决机动车尾气带来的空气污染和碳排放问题,我国大力发展以纯电驱动为特征的新能源汽车并实现规模化应用(新能源汽车保有量为 1.31×10^7 辆),已成为全球最大的新能源汽车市场,保有量持续位居全球第一。道路运载车辆电动化的不断升级,大幅提升了汽车的碳减排进程,为世界节能减排事业做出了卓越贡献^[11,12]。

随着新能源汽车技术的不断进步,智能化、网联化和信息化成为汽车发展的主流技术方向,自动驾驶、车路协同、智能网联等新兴技术赋能道路交通系统并示范应用,智能交通中出现了更多中国标准、中国方案。移动互联网发展促成了共享道路出行,大数据智能交通出行为道路交通提供了更好的出行链选择,在提高人们出行效率和体验的同时,缓解了交通拥堵,降低了环境噪声作用^[13]。智能化、信息化的道路交通管控系统已经成为城市调控交通、疏通拥堵、提高道路运行效率和节能减排的重要手段^[14]。目前,北京建成了包括交通事故应急管理系统、高速公路管理系统、公交指挥调度管

理系统在内的智能交通管理体系；广州建成了集静态交通信息管理系统、运输物流信息平台、信息网络共享平台于一体的智能交通体系。郑州智慧岛智能网联电动公共交通把智慧的车与智慧的路结合起来（见图1），通过信息整合平台发布操控指令，实现了自动驾驶、自动充电、智能调度等功能，提升车辆运行效率高达50%，与普通新能源汽车相比可以降低10%以上的能耗，实现了“车-路-场-云”的一体化智能协同控制。尽管我国新能源汽车领域在一定程度上领跑世界，但在汽车技术自主创新和核心零部件研发方面还有待提升，尤其是车用芯片、汽车研发软件等仍受制于人，亟需加大投入和研发力度，提升自主创新能力。

（二）轨道交通领域工程科技发展现状

轨道交通是现代长途运输的主要方式之一，其运营成本低、输送量大、受环境影响小，特别是在地形复杂、地区环境差异大的地区能够最大程度发挥其优势。出于对我国地理和经济形势的战略考量，大力发展铁路运输产业是时代之需。目前，我国的轨道交通系统正在向高速、智能化和绿色化的方向发展。截至2022年年底，我国铁路运营里程达 1.55×10^5 km，其中高速铁路运营里程为 4.2×10^4 km。2022年，全年客运周转量为6577.53亿人·千米，货

运周转量为35 945.69亿吨·千米，交通运输量稳居世界第一^[8]。尤其在高速铁路（高铁）行业，我国的高铁运营总里程高于除中国外世界排名前十国家高铁里程的总和，高铁相关技术已成为我国的“名片”。随着相关技术的进步和迭代更新，我国轨道交通系统已形成以高铁、普列、城市轻轨、地铁的整机制造、核心系统、关键零部件协同发展的产业集群优势。我国已经成功研发了多款高速列车，具有运行速度快、能耗低、环境影响小等优势，并广泛应用了智能乘客信息系统，可提供实时的列车到站时间、座位分布和列车运行信息等。我国高铁动车组在世界最高铁路——青藏铁路的试运行证明了在复杂环境中的轨道交通处理能力已处于世界领先。此外，低运能小型化磁悬浮列车为城际中短距交通提供新动能，时速600 km的高速磁悬浮列车为高速陆路交通提供了示范。

城市轨道交通线路增长迅速，截至2022年年底，全国有53个城市开通运营了城市轨道交通线路，共计有轨道交通线路292条、车站5609座、运营里程为9555 km，其中地铁运营里程超过8000 km^[8]。轨道交通管控系统逐步实现智能化发展，通过运用大数据、人工智能技术对列车运行状态进行实时监控和预测；通过推动运营管控信息系统建设，加强了轨道交通运营数据的统计和分析，优化了运营计划

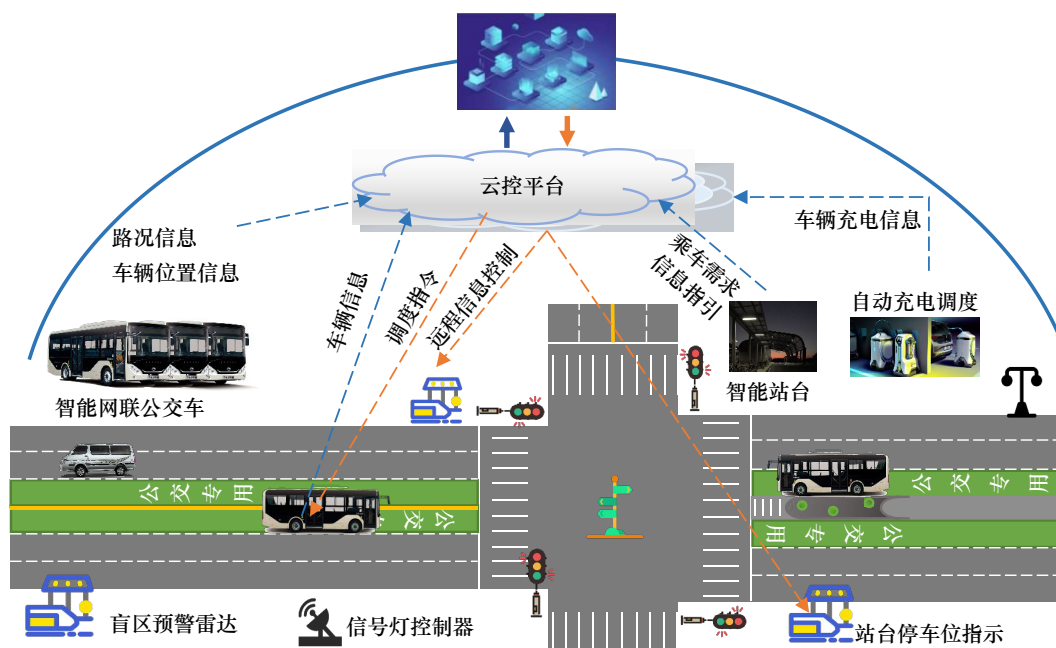


图1 “车-路-场-云”一体化协同控制

和资源配置,实现了智能化技术的应用验证。北京地铁将国际领先的超高速无线通信5G技术应用于车-地通信系统,切实解决了地铁通信信号难以持续稳定的难题,为乘客提供更为舒适和便利的乘车体验;深圳地铁打造了世界首座“数智城轨底座”,构建了基于“云网协同”的一体化基础设施平台,建设了智慧车站;上海地铁集成众多先进技术,建设了国内运营里程最长的全自动无人驾驶国际最高等级的GoA4级地铁线路,在实现无人驾驶的同时降低了运营复杂度,提升了出行效率。

随着我国“八横八纵”高铁网络的加密成型和智能化技术的应用,轨道交通网络将为人们提供更全面、更便捷的出行服务,更多的出行方式选择空间,显著提升出行效率和出行质量。但我国轨道交通工程科技领域的发展也存在诸多不足。例如,我国列车全自动运营尚无全寿命周期内的成本数据,无法进行成本比较;全自动无人驾驶列车在缺乏合理管理和维护情况下的风险尚无法准确评估;高铁与一般轨道的互通接驳难且地区标准不统一,导致轨道系统的互联化进程缓慢;轨道运输设备的节能新技术推广仍然滞后于目前的技术更新^[15],设备的节能性能有待提升,亟需推动节能技术在已投入运营的轨道车辆中予以融合应用^[16]。

(三) 水路交通领域

水运作为交通运输体系中货物周转量比例最高的交通运输方式,具有运能大、成本低、污染小、占地少等优势,在我国综合运输体系中占据重要地位^[17]。我国现已成为世界上具有重要影响力的水运大国。2022年,我国港口规模位列世界第一,拥有生产性码头泊位 2.1×10^4 个,货物吞吐量为 1.568×10^{10} t,集装箱吞吐量超过 2.9×10^8 标准集装箱(TEU)^[18]。在全球港口货物吞吐量、集装箱吞吐量排名前10的港口中,来自我国的港口分别占8席、7席^[19]。截至2022年年底,我国内河航道的通航里程为 1.28×10^5 km,居世界第一,全国累计内河航道水路货物运输量达 8.55×10^9 t,同比增长3.8%;我国海运船队规模持续壮大,海运船队运力规模达 3.1×10^8 载重吨,居世界第二位^[8]。中远海运集团有限公司、招商局集团有限公司的经营船舶运力规模分别居全球综合类航运企业第一位、第二位。我国水路交通的规模和运力均位居世界前列,已形

成较为完善的水路交通运输体系。

随着运输船舶少人化、谱系化和信息化的发展,我国水运交通关键技术取得重要进展。①在船舶技术方面,大型船舶的设计和建造技术处于世界一流水平,基础超大型船闸等通航建筑物的设计运行技术世界领先。我国绿色船舶产业进步明显,特别是能够代表绿色船舶设计制造水平的液化天然气(LNG)船业,在全球仅有8家相关资质船厂情况下独占5席。②在港口建设方面,截至2021年年底,我国已累计建成集装箱自动化码头10个,居世界首位,在自动化码头设计建造和港口机械设备制造等相关领域积累了国际领先的技术^[20]。通过运用大数据、人工智能等先进的信息技术,我国逐步建立了智能化船舶交通管控系统,对船舶运行状态进行实时监控和预测。2021年,全球首创具有“智慧大脑”的天津港正式投入运营,为世界港口的智能化、低碳化转型升级提供了参考。

目前,我国积极推进港口、航道等水运基础设施建设,以满足国内外的贸易需求。虽然水运网络规模大、设施齐全、分布广泛,但仍存在内河国家级航道通达范围不足、高级航道占比偏低^[21]和信息化程度不高等短板,大中型邮轮、大型LNG船舶、极地航行船舶、新能源船舶等自主设计建造能力与国际领先水平有一定差距。

(四) 航空交通领域

航空运输具有作业空间广、运输距离长、时效性强等特点,与全球化交通发展趋势高度适配。虽然我国航空交通发展起步较晚,但在经济全球化的大背景下,我国的航空交通发展迅速,规模和运力均居于世界前列^[22]。截至2022年年底,我国拥有民航运输飞机4165架、通用航空器3177架,机场总设计容量为 1.5×10^9 人次,运输机场总数为254个,通用机场为总数399个。2022年的航空运输总周转量为 5.993×10^{10} t·km、旅客运输量为 2.5×10^8 人次、货运吞吐量为 6.076×10^6 t^[8,23]。我国已初步建成京津冀、长江三角洲、粤港澳大湾区和成渝四大世界级机场群。尽管我国在航空交通领域取得较大进步,但由于发展时间较短,与民航运输发展成熟的国家相比,我国的航空交通发展规模仍有较大提升空间。

在航空交通科技层面,我国取得了长足的进

步。C919客机的成功首飞和适航，标志着我国已具备自主研发大型喷气式民用客机的能力，相关技术进入世界先进水平。北京大兴国际机场首次实现高铁下穿航站楼、场内100%新能源车辆作业，并配套完备的自动化空管系统，在运行效率、绿色指标、航空管理方面均处于世界领先水平。我国已建立全国统一的空中交通管理网络，实现了航空器的全球协调和管理；我国自主研发的北斗卫星导航系统，作为全球卫星导航系统的重要组成部分，为航空器提供高精度的导航服务。此外，得益于我国基建能力的快速提升，与航空业配套的基础设施建设水平也位居世界前列。在飞机构型设计、电子器件制造、通信能力等方面不断取得突破，已具备领先优势。在航空安全保障方面，鲜有发生特别重大的航空安全事故，并初步实现了对空管制系统等关键技术的突破。

但与国际先进水平相比，我国的航空交通技术整体仍有不足，在航空器、发动机、机场设施的建设和升级等方面还较多依赖国外供应商；空中交通管理虽然已初步建成，但自主研发和应用的能力水平有待提高，在航空器流量控制和航班延误管理等方面仍存在“卡脖子”的被动局面。

（五）城市综合交通领域

随着城市化进程加快，传统的城市平面发展模式带来的空间短缺、生产效率低下和环境破坏等问题日益凸显^[24]。城市地区人口密集、人员流动频繁、交通运输强度大且频次高、多种交通方式并存、交通结构复杂且注重时效，城市交通的综合立体化应用可有效缓解城市交通拥堵，成为多样性出行的必然选择，同时合理的交通立体规划有利于引导城市空间结构调整、优化空间布局、避免城市交通水平蔓延的粗放发展，提高交通出行效率。

目前，我国已有多个城市打造了现代化城市立体交通系统。青岛提出了“海陆空铁”四维立体交通模式，建立了以国际化空港、现代化海港为中心，以高铁、高速公路为骨干，与城市交通系统紧密衔接的现代化立体综合交通运输体系；扬州提出了“水陆空”一体化交通模式，利用长江水道对接现代航运体系，完善以“五纵七横”为布局的复合城市快速路网，建成并运营了扬州泰州国际机场，投资建设集美食、风景、产业、文化等功能于一体

的交通枢纽站；成都提出了站城一体化立体交通模式，地铁线路无缝衔接商贸中心，全力提速城市建设；重庆提出了“五线一区间”公交化列车运营模式，将城铁车站深度融入城市空间，最大程度利用城市空间资源。

通过城市交通的综合立体化拓展，将城市空间中地面、地下和高架交通相组合，道路、铁路、水路、空中交通等多种交通形式相结合，形成了现代化城市立体交通系统的多维联合交通新模式。但新模式存在与原有的城市规划和设计冲突、缺乏系统性和综合性等问题，亟待解决。同时，在节能减排方面，新能源汽车和共享化交通工具在非一线城市推广乏力，不利于这些城市的出行减碳。

三、综合交通工程科技的未来趋势

（一）交通系统网联化

网络通信、人工智能、物联网等技术的快速发展，推动了交通领域的技术变革^[25]，使交通系统的网联化程度明显提高。基于车联网的智能交通系统将实现车辆与交通设施的实时连接，通过数据共享、信息交互等方式来增强交通管理和服务的水平。智能交通系统利用大数据技术分析交通流量、路况等数据，预测交通拥堵情况和事故风险，并实现精细化的调度和决策^[26]。网络通信技术使各种交通信息能够实时传递，有效协调不同区域之间的交通流动；同时，大数据技术保证了数据流之间的互操作性和互换性，为交通系统的运营管理提供了新的可能。

充分利用人工智能、自动驾驶、网络通信、大数据等技术，构建以高维数据为基础、以通信网络为纽带、以高效快捷为核心的服务体系，将车、路、云、网、图等交通核心要素全面联通，深度变革传统分散式交通，使交通系统要素形成协同优化、统一结合的整体，而不再是分散的交通个体。在集合智能交通系统中车、路信息优化与统一的统筹管理下，交通系统中的个体行为将更加合理，交通出行效率与交通管控水平将得到质的提升^[15]。交通系统网联化发展将为构建现代化综合交通体系提供平台支撑，为人们提供更加便捷、高效、安全、绿色的出行体验。

（二）交通出行共享化

共享交通模式以其高周转率、高分享率的特性被认为是提高交通运输效率的重要方法，在促进低碳出行、减少尾气污染排放、缓解交通拥堵等方面产生了积极影响^[27,28]。智能交通系统的大数据平台、云端预测与调控能力将为共享交通模式的发展提供新思路。在智能互联的交通环境下，共享交通管理系统可依托大数据平台、5G技术对交通系统信息进行动态感知，建立智能化的云端管理、调度平台；在云端进行数据融合后通过人工智能、深度神经网络等智能算法来预测未来交通信息变化态势，通过优化空座利用率和车辆调度等措施主动规划交通系统中的共享交通工具分布。共享交通工具的智能互联和云端调控，为交通系统的动态供需平衡提供了新的技术手段，助力解决城市交通低效、拥堵和停车难等问题。交通出行的共享化发展将进一步提高交通系统的整体效能，提高交通工具的周转率与分享率，在不增加或少增加交通工具与设施供给的基础上，满足快速城镇化进程中居民消费升级的机动出行需求。

（三）交通管控智慧化

智能汽车、智能交通和智慧城市三者相互依存，共同助力城市综合交通管控智慧化（见图2）。智能汽车的智能互联、自动驾驶、共享出行和电力驱动将成为智慧城市的重要一环；智慧城市通过大数据平台服务体系、虚拟城市地理环境、网络传输基础设施、城市物联网等为智能交通提供全面支撑；智能交通依托互联网、大数据、人工智能、云平台为智能汽车提供服务。

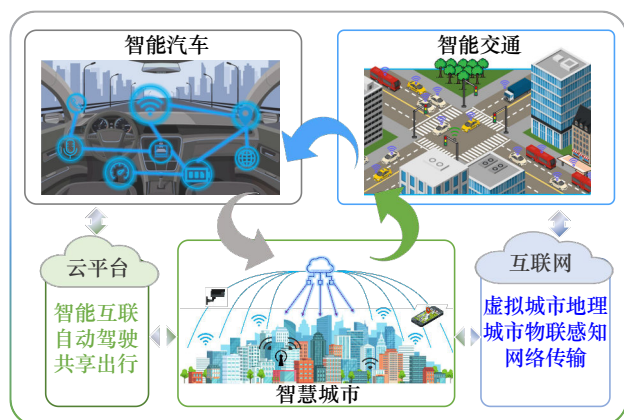


图2 智慧化交通管控——高效便捷出行

对车载传感器、图像采集、基础设施状态感知、高精地图等多源交通信息的深度融合与挖掘以及高算力支持下的协同决策，共同助力自动驾驶车辆能力升级^[29]。智慧城市大脑则赋能智慧交通，提供更精准的车站信息、换乘方案和候车时间预测等服务，通过场站视频监控系统、动态交通流量感知系统等公共交通感知系统，与云端智能调度系统协同助力城市公共交通的智慧化高效精准调度、协同优化决策，提供更安全、更舒适、更节能、更环保的驾驶方式和出行方式。

（四）交通运载运行协同化

在高效的智能交通体系下，智能运载、智慧城市、智能交通三者将互相依托、深度融合（见图3）。智慧城市通过云脑平台、电子地标感知网络、5G网络组成的信息网，为智能交通提供全方位的软硬件支撑；智能汽车的智能感知、网络交互和智能运营依托由智能交通服务层、设施层、终端层和传输层共同组成的智能交通网，促进交通运载的协同化发展^[30,31]。

运载网联化协同智能化道路基础设施，推动了多级化智能网联交通体系建设。智能运载、智慧城市和智能交通三者间的深度融合，将引导产生新的需求并进一步促进交通基础设施、新型运载工具技术的变革，如智能运载技术带动新型运载工具的产生和发展，形成诸如飞行汽车、智能物流机器人等新兴技术，而相关技术和变革进一步推动交通基础设施的配套创新。通过综合交通与运载工具相互融合、协同发展，推动交通运载迭代升级和技术创新的螺旋式上升，向更加智能化、便捷化和绿色化迈进。

（五）交通布局立体化

交通布局发展将呈现深度立体化，具体表现为空间布局立体化、交通换乘枢纽化和运载工具多栖化。空间布局立体化是交通布局立体化的物质基础，在合理规划地面交通的同时，积极探索并发展城市地铁、立体交通桥、海底隧道等新型立体交通基础设施，助力实现交通空间布局立体化，最大限度利用空间资源，提高综合交通系统的便捷性。交通换乘枢纽化是交通布局立体化的衔接途径，在不同空间与不同交通方式之间建立起以区位需求为核心、以通畅安全为目标的高效交通换乘枢纽，实现

交通立体空间资源的高水平利用^[32]；通过公交、地铁、轻轨等不同交通方式的无缝衔接，方便市民出行，加速货物物流分发，同时也提高了城市容量和效率，减少了城市道路拥堵和交通压力（见图4）。运载工具多栖化是交通布局立体化的重要补充，多栖化运载工具能够更好地适应未来智能交通需求和立体空间资源布局，为交通布局立体化提供更多选择，满足人们对出行方式的多元化需求，提高交通运输效率和便捷性，推动智能交通系统的创新和升级。

四、我国综合交通工程科技攻关方向

（一）综合交通体系化构建

综合交通体系化建设需要充分发挥各类交通方式的优势，将智能化、网联化技术与交通一体化建设有机融合并实现广泛应用，在提供良好出行服务的同时减少交通运输行业的能源消耗，以此实现交通方式的统一调度，促进绿色低碳社会发展，形成灵活、高效的交通新体系。综合交通体系化建设基于信息化技术统筹“路-云”设施、数据支持、立

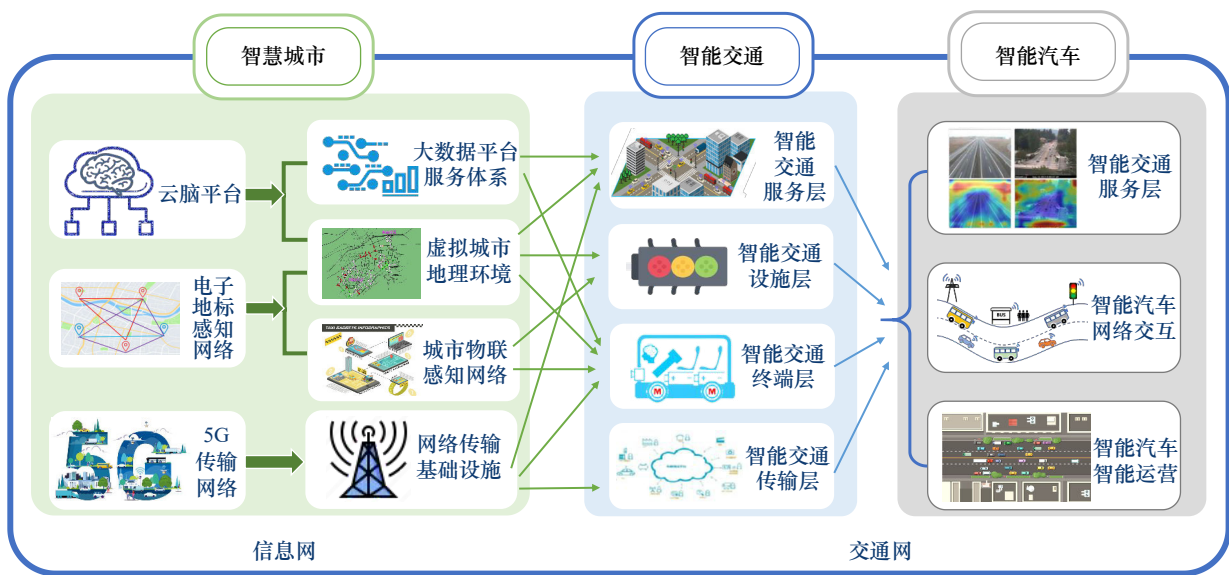


图3 多级化智能网联交通体系

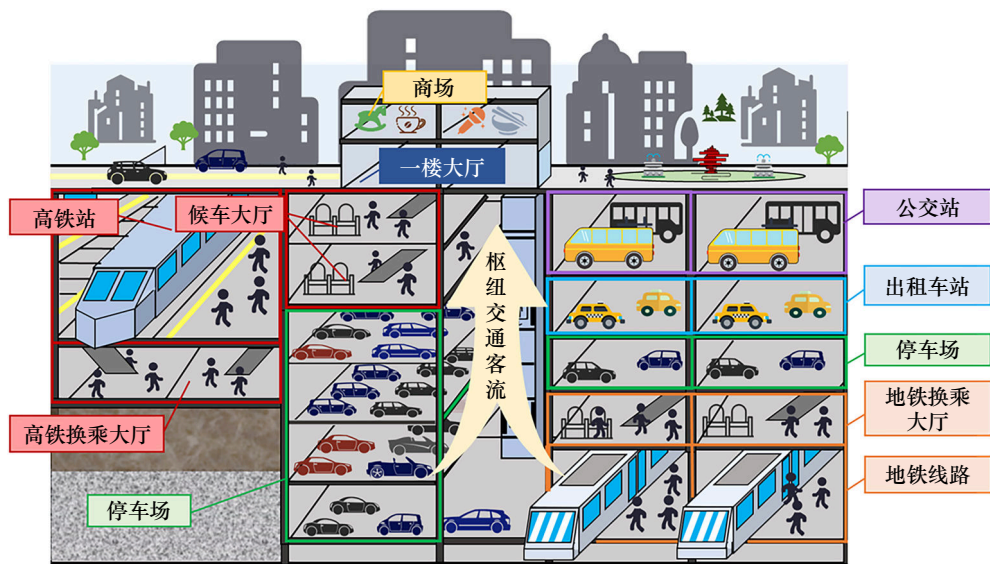


图4 交通换乘枢纽化

体服务等通用能力,形成综合交通“数字底座”,构建全方位、立体化的基础服务平台;建立多层级、全方位、立体化的交通枢纽,实现交通统一调度,形成互惠互赢、协调共进的交通新体系,构建无缝衔接、高效便捷的综合交通指挥调度中心;基于现有交通服务产业,构建广领域、多维度、全周期的个性化出行服务体系,大力发展新能源交通技术,提供便捷、可靠、舒适、绿色的乘坐体验。

(二) 综合交通数字化基础服务平台技术攻关

面向综合交通信息化建设需求,利用5G网络、云平台、大数据等技术整合各要素信息,考虑发展程度、建设能力、维护效率等实际因素统筹综合交通数字化基础服务平台建设,最大程度发挥已有信息资源价值。①在基础设施建设方面,完善物理基站建设,铺设光纤网络,提升端到端移动在线服务技术;制定合理保护措施,实现性能持久、快速维护的目的。②在交通服务建设方面,集成城际、陆、水、空出行信息,通过深度学习等技术提取隐含信息,合理设置交通工具调度规则;根据个人出行规律制定个性化出行服务。③在交通信息管理方面,根据现实需要,制定与时俱进的保密规则,加强网络安全设计,谨防信息泄露。

(三) 综合交通指挥调度中心技术攻关

实地调研地区交通战略等级和信息化水平,建设广领域、多维度、分层级的综合交通指挥调度中心,深度分析各交通方式的优劣,实现资源科学整合,提升出行效率,顺应绿色低碳时代潮流。①在交通工具转换方面,整合轨道、公路、水运、航空等主要交通方式,构建快速过渡、简单换乘的一体化转移通道。②在交通指挥方面,依据不同交通方式和地区差异,制定包括交通灯控制系统、公交调度系统、物流运输系统等在内的交通调度规则。③在物理设施建设方面,提升安全设计水平,优化交通网络架构,加强相关人才队伍建设,为设施维护、重整提供保障。

(四) 综合交通相关服务技术攻关

基于综合交通未来规划,引导相关产业转型升级,跟进全领域、广覆盖、个性化服务建设,综合考虑时间成本、经济压力、观光体验、乘坐舒适性

等主、客观因素,发挥地区资源优势,力争服务建设最优。①在产业结构化升级方面,根据地区环境及出行差异,规划交通设施的配置位置及规模,持续跟进信息化、智能化、多元化服务产业投入,提升共享化、集成化、便捷化交通工具出行体验。②在相关技术储备方面,围绕国家相关升级要求,明确发展目标、制定阶段性规划、培养高层次人才,加大科研投入,实现技术不断层、发展不停滞、产业不短缺的健康化服务体系。③在交通工具发展方面,聚焦新能源技术,依托国家政策,加大相关投入,促进节能减排产业发展,将先进技术与新能源载具有机结合,提升出行效率和乘坐体验。

五、我国综合交通工程科技发展建议

(一) 构建综合交通新体系

建立跨部门、跨行业、跨平台的协调机制,健全信息共享机制,推进空间分布的立体化建设,促进交通通道发展的综合化、立体化。坚持电动化、网联化、智能化发展方向,充分发挥不同交通方式的比较优势和协同互补作用。积极推进各种交通工具信息互联、空间互补的综合式、立体式多层级交通新体系建设,推动资源充分调配和空间全方位利用。

(二) 培育交通出行新模式

构建公交优先的立体多层式、循环化快速进出外部集散体系、多点分散的换乘便捷一体化内部集散体系。加强区域综合交通网络协调运营与服务、城市综合交通协同管控,建立紧凑、灵活、立体化的换乘系统,形成全天候、一体化的换乘环境,实现空间共享、综合交通枢纽的快速集散。优化密集型的综合交通枢纽,实现资源配置、各种交通工具的有序衔接,构建智能化、人性化的集约共享综合交通出行新模式。

(三) 形成一体化综合交通网

面向城市群、都市圈,构筑多层级、一体化的综合交通线网体系,统筹集约利用综合运输通道,构建空间分布相对集中、枢纽功能融合互补、运行组织协同高效的综合交通枢纽集群。融合发展多种运输方式,提高集群内枢纽城市的协同效率,建设

综合性交通主轴，构建多方式便捷交通走廊，实现航空网、铁路网、公路网、水运网互联互通，全面提升综合交通运输协同运行水平和主动安全保障能力。

（四）建设多基综合交通枢纽

构建多基综合交通枢纽，打破多模式交通枢纽分管的条块分割，加强多基枢纽建设的统筹协调，通过交通多网融合、快捷互联和协同运行等实现人员高效换乘、货物高效换装和多交通便捷接驳。打造融合轨道、公路、水运、航空为一体的海、陆、空协同枢纽体系，实现更高层面的客货供需动态平衡，全面提升跨区域人员流动、货物中转集散和资源的高效配置。

（五）实施智能网联立体交通重大工程

建立创新型、智能化的立体交通体系。建议依托交通运输重大项目、综合交通枢纽设施、重点科技创新平台、科技场馆等资源，实施智能网联立体交通重大工程，加强跨部门协同，强化上下游联动，推动“产学研”紧密合作进行技术攻关。按照“全国123出行交通圈”的目标要求，建设网联化、协同化、智慧化、绿色化的城市立体交通系统并在有条件的区域开展先行先试。

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 5, 2023; **Revised date:** November 18, 2023

Corresponding author: He Hongwen is a professor from National Engineering Research Center of Electric Vehicles, and School of Mechanical Engineering of Beijing Institute of Technology. His major research field is comprehensive transportation development strategy. E-mail: hwhebit@bit.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Key Technologies for Intelligent Transportation in China” (2022-HY-05)

参考文献

- [1] 张军, 王云鹏, 鲁光泉, 等. 中国综合交通工程科技2035发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 43–49.
Zhang J, Wang Y P, Lu G Q, et al. Development strategy for China's integrated transportation engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 43–49.
- [2] 郑健龙. 在“中国梦”的伟大进程中探究现代化交通强国之路——评《“中国梦”进程中的交通强国战略研究》[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 285.
Zheng J L. Exploring the road to a modern transportation power in

- the great process of “Chinese dream” —Comment on *strategic research on a transportation power in the process of “Chinese dream”* [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 285.
- [3] Cao C, Lee X H, Liu S D, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12509.
- [4] Diao M, Kong H, Zhao J H. Impacts of transportation network companies on urban mobility [J]. Nature Sustainability, 2021, 4: 494–500.
- [5] 钱志鸿, 田春生, 郭银景, 等. 智能网联交通系统的关键技术与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 2–19.
Qian Z H, Tian C S, Guo Y J, et al. The key technology and development of intelligent and connected transportation system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(1): 2–19.
- [6] 抄佩佩, 高金燕, 杨洋, 等. 新能源汽车国家发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 69–75.
Chao P P, Gao J Y, Yang Y, et al. Research on the new energy vehicles industry's national development strategy [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(4): 69–75.
- [7] Stolz B, Held M, Georges G, et al. Techno-economic analysis of renewable fuels for ships carrying bulk cargo in Europe [J]. Nature Energy, 2022, 7: 203–212.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2023-06-16)[2023-11-08]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transportation industry in 2022 [EB/OL]. (2023-06-16)[2023-11-08]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [9] 中国政府网. 2022年我国机动车保有量达4.17亿辆 [EB/OL]. (2023-01-11)[2023-11-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736176.htm.
Chinese Government Website. In 2022, the number of motor vehicles in China reached 417 million [EB/OL]. (2023-01-11)[2023-11-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736176.htm.
- [10] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2023-02-28)[2023-11-08]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2022 [EB/OL]. (2023-02-28)[2023-11-08]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.
- [11] Isik M, Dodder R, Kaplan P O. Transportation emissions scenarios for New York City under different carbon intensities of electricity and electric vehicle adoption rates [J]. Nature Energy, 2021, 6: 92–104.
- [12] 孙逢春, 何洪文. 电动商用车系统工程技术体系及关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 59–67.
Sun F C, He H W. Key technologies for system engineering of electric commercial vehicles [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(1): 59–67.
- [13] 钟志华, 乔英俊, 王建强, 等. 新时代汽车强国战略研究综述(二)[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 11–19.

- Zhong Z H, Qiao Y J, Wang J Q, et al. Summary of strategy research on automobile power in new era (II) [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(1): 11–19.
- [14] Lyu Z H, Shang W L. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review [J]. *Green Technologies and Sustainability*, 2023, 1(1): 100002.
- [15] 高柯夫, 孙宏彬, 王楠, 等. “互联网+”智能交通发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(4): 101–105.
Gao K F, Sun H B, Wang N, et al. Development strategy of Internet plus intelligent transportation [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(4): 101–105.
- [16] Li Q, Meng X, Gao F, et al. Approximate cost-optimal energy management of hydrogen electric multiple unit trains using double Q-learning algorithm [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(9): 9099–9110.
- [17] 陈胜营. 贯彻落实《交通强国建设纲要》奋力开创交通规划新局面 [J]. *中国水运*, 2021 (2): 20–21.
Chen S Y. Carry out the outline of building a powerful transportation country and strive to create a new situation in transportation planning [J]. *China Water Transport*, 2021 (2): 20–21.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 2022 年 12 月全国港口货物、集装箱吞吐量 [EB/OL]. (2023-01-30)[2023-11-09]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202301/t20230130_3747863.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. National port cargo and container throughput in December 2022 [EB/OL]. (2023-01-30)[2023-11-09]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202301/t20230130_3747863.html.
- [19] 中国政府网. 去年海洋经济生产总值逾 9.46 万亿我国港口规模稳居世界第一 [EB/OL]. (2023-04-14)[2023-12-08]. https://www.gov.cn/lianbo/2023-04/14/content_5751415.htm.
China Government Website. Last year, the total output value of China's maritime economy exceeded 9.46 trillion yuan, and the scale of our ports remained the largest in the world [EB/OL]. (2023-04-14)[2023-11-08]. https://www.gov.cn/lianbo/2023-04/14/content_5751415.htm.
- [20] 中国政府网. 我国自动化集装箱码头已建和在建规模均居世界首位 [EB/OL]. (2021-11-30)[2023-11-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/30/content_5654959.htm.
China Government Website. China's automated container terminals, both those already built and those under construction, have the largest scale in the world [EB/OL]. (2021-11-30)[2023-11-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/30/content_5654959.htm.
- [21] 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.
- [22] 刘志强. 综合交通运输网络总里程超 600 万公里 [N]. *人民日报*, 2023-02-27 (01).
Liu Z Q. The total mileage of the comprehensive transportation network exceeds 6 million kilometers [N]. *People's Daily*, 2023-02-27 (01).
- [23] 中国民航局. 2022 年民航行业发展统计公报 [EB/OL]. (2023-05-10)[2023-11-08]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202305/t20230510_218565.html.
China Civil Aviation Administration. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2022 [EB/OL]. (2023-05-10)[2023-11-08]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202305/t20230510_218565.html.
- [24] Liu Y S, Zhou Y. Territory spatial planning and national governance system in China [J]. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105288.
- [25] 王之中, 皮大伟, 吴兵. 从工程科学走向工程技术—新时期交通与运载工程学科发展与展望 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 1–5.
Wang Z Z, Pi D W, Wu B. From engineering science towards engineering technology: Development and prospect of transportation and vehicle engineering in new era [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(5): 1–5.
- [26] Mollah M B, Zhao J, Niyato D, et al. Blockchain for the Internet of vehicles towards intelligent transportation systems: A survey [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4157–4185.
- [27] Mouratidis K, Peters S, van Wee B. Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 92: 102716.
- [28] Shaheen S, Cohen A, Chan N, et al. Sharing strategies: Carsharing, shared micromobility (bikesharing and scooter sharing), transportation network companies, microtransit, and other innovative mobility modes [M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 237–262.
- [29] Feng S, Sun H W, Yan X T, et al. Dense reinforcement learning for safety validation of autonomous vehicles [J]. *Nature*, 2023, 615: 620–627.
- [30] Liu T, Cats O, Gkiotsalitis K. A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 133: 103450.
- [31] 王云鹏, 鲁光泉, 于海洋. 车路协同环境下的交通工程 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(2): 106–110.
Wang Y P, Lu G Q, Yu H Y. Traffic engineering considering cooperative vehicle infrastructure system [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(2): 106–110.
- [32] Basallo-Triana M J, Vidal-Holguín C J, Bravo-Bastidas J J. Planning and design of intermodal hub networks: A literature review [J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 136: 105469.