

交通基础设施数字化转型的实践探索与推进路径

徐磊

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 在投资增速放缓和高质量发展要求提升的背景下, 交通基础设施数字化转型成为提升运行效率与安全水平的重要手段。以浙江省首批示范建设为切入点, 梳理其“一廊两翼全网”总体布局、20项重点任务及初步成效, 并对比江苏、上海等地的典型做法, 总结当前转型中存在的标准不统一、数据壁垒、AI泛化能力弱、存量设施改造难、可持续运营机制不足等现实瓶颈。在此基础上, 提出加强区域协同、推动多元共治、完善制度保障等务实建议, 为“十五五”时期交通数字化从试点走向推广提供参考。

关键词: 交通基础设施; 数字化转型; 智慧交通

中图分类号: U111

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0025-06

Practical Exploration and Implementation Pathway of Digital Transformation in Transportation Infrastructures

XU Lei

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: Against the backdrop of slowing investment growth and rising demands for high-quality development, the digital transformation of transportation infrastructures has become a key approach to improve operational efficiency and safety level. Taking the first batch of demonstration projects in Zhejiang Province as the entry point, its overall layout of “One Corridor, Two Wings and Integrated Network”, 20 priority tasks and early achievements are sorted out. Compared with the typical practices in Jiangsu and Shanghai, the common bottlenecks such as inconsistent standards, data silos, limited generalization of AI models, difficulties in reconstructing existing facilities, and unclear sustainability mechanisms are summarized. On this basis, the practical recommendations are proposed, such as enhancing regional coordination, promoting multi-element co-governance, and strengthening institutional guarantee, which provides a reference for the digitalization of transportation to move from pilot projects to promotion during the “15th Five-Year Plan” period.

Keywords: transportation infrastructure; digital transformation; intelligent transportation

0 引言

当前, 我国经济社会发展已全面迈入统筹高质量发展与高水平安全的新阶段。在这一历史方位下, 传统以规模扩张为导向的交通基础设施建设模式难以为继, 投资增速持续放缓, 结构性、功能性短板日益凸显。与此同时, 新一轮科技革命和产业变革加速演进, 以5G、人工智能、大数据、物联网、数字孪生等为代表的数字技术正深度重塑交通行业, 为基础设施的智能化升级提供了强大的技术支撑^[1]。

学术界对交通基础设施数字化转型的内涵、路径和挑战已展开广泛探讨。在技术应用层面, 学者多聚焦于具体场景的智能化实践。例如, 沈炳等^[2]基于江苏昆山、辽宁、新疆、山西和济南等地的智慧交通案例, 系统分析了其架构、关键技术和实施成效, 强调数据融合、跨部门协同和动态服务对提升交通效率的关键作用, 并指出技术标准、安全治理与可持续运营等现实挑战。张虎等^[3]结合国内智慧高速公路协同试点, 提出“车-路-云”一体化系统架构, 梳理了其关键技术、典型应用场景和设施构成。陈禹^[4]以上海为例, 探讨了数字孪生技术在智慧交通建设中的机遇与瓶颈。在水运领域, 倪慧洋^[5]以南通港为样本, 通过定性、定量方法评估其智慧化发展

收稿日期: 2025-01-09

作者简介: 徐磊(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事公路设计工作。

现状,提出应构建智慧发展指数以引导港口高质量转型。周道喜^[6]则指出,基于大数据的智慧交通系统已在多个城市试点中验证了其降低高峰延误的有效性,并将向实时化、智能化方向演进。在理论和模式层面,唐新华^[7]从新型基础设施与科技产业发展的关联出发,探讨其在国家治理体系现代化中的功能定位,为科技、产业与战略协同发展提供理论参考。

然而,现有研究多集中于单一技术或局部场景,缺乏在省级乃至区域尺度上,对“智慧扩容、安全增效、产业融合、机制创新”等多维目标的系统整合,也缺少可复制、可推广的实践路径总结。尤其在“十五五”规划编制前期,亟需从先行示范区经验中提炼具有普适性的方法论。

在此背景下,推动交通基础设施数字化转型,已不再是“可选项”,而是关乎国家现代化进程、安全韧性提升与新质生产力培育的“必由之路”。

交通基础设施数字化转型高度契合国家战略顶层设计。党的二十大报告明确提出“加快建设交通强国”、“加快发展数字经济,促进数字经济和实体经济深度融合”^[8];《数字中国建设整体布局规划》^[9]进一步强调“推动交通基础设施智能化改造”;而“十四五”以来持续推进的“新基建”部署^[10],以及在“十四五”规划前期研究中,交通数字化已被多地和相关部门列为基础设施现代化升级的重点方向。可以说,“数字中国”与“交通强国”两大国家战略的深度融合,正在为交通基础设施数字化转型提供前所未有的政策势能和发展空间。

因此,系统梳理交通基础设施数字化转型的时代动因、战略价值和实践路径,不仅具有重要的理论意义,更对指导“十五五”时期科学谋划交通高质量发展具有紧迫的现实需求。本文立足国家战略导向,结合地方先行实践,探讨交通基础设施数字化转型的推进逻辑、关键瓶颈和优化策略;同时通过梳理交通基础设施数字化转型的政策逻辑和实践路径,为相关决策及实施提供参考。

1 浙江省交通基础设施数字化转型的实践进展

1.1 实施背景

浙江作为数字化转型的先行者,是全国最先开始智慧高速建设试点的省份,“浙运安”、“浙网通”等一些应用场景已落地实施并取得较好成效,全省交通领域数字经济蓬勃发展。省委、省政府领导也高

度重视数字化转型升级工作,在首批公路水路数字化转型试点省份申报时,要求浙江高度重视试点工作,推动形成一批可复制、可推广的先进经验和典型成果。2024年7月,交通运输部、财政部正式公布公路水路交通基础设施数字化转型升级第一批示范区域名单^[11],明确浙江省作为首批示范省份,需加快推进“一廊两翼全网”高品质一体化交通基础设施数字化转型示范通道及网络建设。

1.2 总体目标

2024年,浙江省交通运输厅印发了《浙江省“一廊两翼全网”高品质一体化交通基础设施数字化转型升级示范通道及网络实施方案》^[12]。浙江省示范通道及网络总体布局为“一廊贯通、两翼互联、全网协同”,其中“一廊”为沪昆走廊浙江段,“两翼”为以杭州国际性综合交通枢纽为核心,与宁波、南京国家综合交通枢纽实现互联互通的公路水路设施;“全网”为全省公路水路基础设施网络协同运行,示范通道及网络共涉及公路2 943 km、航道1 259 km。

重点任务方面,按照有效场景规模覆盖、一体化任务全部实施、示范性任务特色突出的思路,围绕基础设施智慧扩容、安全增效、跨领域产业融合、体制机制创新开展20项工作任务(含智慧站点等全部7项一体化任务、干线通道主动管控等13项示范性任务),并将20项工作任务纳入14个建设方案(项目)统筹实施,通过3年左右时间,力争完成全省98%的繁忙国家高速公路、35%的繁忙普通国道和95%的重要国家高等级航道数字化转型升级。

1.3 任务落实情况

公路水路基础设施数字化转型升级建设共4个板块、20项任务,其中一体化任务7个,示范性任务13个。4个板块分别为智慧扩容、推动基础设施安全增效、推动跨领域产业融合和推动体制机制创新。各板块主要任务分解如表1所示。

1.4 成效分析

1.4.1 公路出行:效率提速、安全提档

收费站通行更顺畅。2025年春运期间,智慧升级收费站拥堵次数下降20%,拥堵时长降低32%,减少了司乘人员等待时间。

拥堵时长和事故数量大幅压降。G15杭州湾跨海大桥等34个易堵路段动态开放硬路肩后,严重拥堵时长减少39%、事故率降92%、收费站关闭降62%,出行顺畅度显著提升;沪杭甬高速相关路段百万车公里事故数量降28%、伤亡人数降90%、3 km以

表 1 公路水路基础设施数字化转型升级建设共 4 个板块

板块名称	序号	任务名称
智慧扩容	1	智慧站点
	2	“一张网”出行服务
	3	智慧服务区
	4	航道养护尺度动态服务
	5	电子航道图“一张图”服务
	6	干线通道主动管控
	7	智慧船闸(“闸港区船”联动)
推动基础设施安全增效	1	路网运行监测预警
	2	数字治超及大件运输全链条监管
	3	智慧隧道
	4	基础设施监测预警
	5	重点车辆主动预警(“浙运安”)
	6	应急智慧智能调度(“阳光救援”服务)
	7	航道运行监测预警与应急智慧智能调度
推动跨领域产业融合	1	车路云协同应用
	2	船岸云协同试点
推动体制机制创新	1	推动构建协同联动管理和服务机制
	2	探索建立数据运营机制
	3	构筑共建共享数字底座
	4	完善标准规范体系

上拥堵缓行时长降 93%,安全风险得到了有效防控。

救援服务全省覆盖。“浙路救援”平台实现“一键报警—精准派单—快速理赔”全流程数字化,2025 年春运日均救援近 1 100 起,救援力量到场时间为 10.1 min(提升 32%)、完成救援时间为 13.5 min(提升 55%),免费救援服务实现“一次都不用跑”。

1.4.2 水路运输:物流降本、服务提质

“浙闸通”智慧调度惠民生。“浙闸通”覆盖全省 16 座船闸,船户通过手机“一键过闸”,过闸效率的提升,助力降低物流成本 2 亿元。船闸全年可运行时间提升 7%、用户满意度提升 10%,入选全国交通设施数字化升级十大典型案例。

这些成效聚焦拥堵治理、事故压降、救援提速、物流降本等民众核心关切,以量化成果体现数字化转型的惠民实效,显著提升了群众出行体验与获得感。

2 全国其他省市案例

2.1 江苏省:“一轴一网两融合”构建交通数字化走廊

江苏省以打造开放畅达的数字化转型升级大通道为核心,形成“一轴一网两融合”布局^[13],推动交通基础设施智慧化成网。

2.1.1 发展思路与布局

“一轴”依托京津冀—长三角主轴沿海通道及京

沪通道,缓解南北向骨干通道拥堵,强化交通安全精细化管理。“一网”覆盖沿江城市群,通过多层次、网络化设施布局,服务长三角—成渝主轴等通道高强度出行需求。“两融合”推动公路、水路空间场景整合(高速公路与普通国道、内河航道与沿海航道协同),并依托数字底座实现数据互联互通,构建统一行业数据支撑体系。

2.1.2 推进路径与成果

围绕交通基础设施智慧扩容、安全增效等 25 个任务方向,实施 17 个重点项目。重点包括以下 3 方面。

- (1)智慧扩容:优先推进 147 km 高速公路路段升级,2026 年底完成 775 km;内河航道覆盖 475 km,京杭运河待闸时间减少 2 h,单船月增 1 航次。
- (2)安全增效:建设基础设施监测预警、数字治超等场景,2026 年覆盖 150 km 路网;雨雾天气少封路、不封路,事故率下降 10% 以上。
- (3)机制创新:深化高速公路经营单位、公安交警、交通执法等“一路多方”协作机制,优化高速公路与普通国道“高普联动”,强化沪苏浙皖跨区域协同。

目前,全省高速公路达 L2 级智慧水平,国省干线公路智能化升级率达 80%,建成 4 000 km 内河电子航道图、1 079 km 智能感知航道;江苏省干线通道主动管控试点任务等入选交通运输部首批 15 项交通强国专项试点。

2.1.3 典型案例:超饱和干线通道智慧扩容

以沪宁高速公路江苏段为试点,依托“4+1”技术体系(应急车道动态管控、主线精细化管控等),应用初期实现通行流量提升 12%、平均速度提升 19%、事故率下降 29%、拥堵时间缩短 48%。2024 年应急车道开放 757 次,增加通行车辆约 264.2 万辆;2025 年春运期间开放 141 次,通行量同比增 125%。单公里投资成本仅为物理扩容的 1/10,模式推广至全国 10 余省份,获中国公路学会奖、长三角智能交通大赛一等奖等。

2.2 上海市:洋山四期码头全流程自动化协同作业

上海市洋山四期自动化集装箱码头以“码头全域全流程智能协同决策与高效执行”为目标,构建覆盖全时域、全场景的数字化管控体系,推动码头作业向无人化、绿色化转型^[14]。

2.2.1 核心做法

- (1)系统协同:自主研发智能码头操作系统(ITOS),与设备控制系统(ECS)联动,实现岸桥、

AGV、轨道吊等设备协同调度。

(2)基础设施智能化:铺设6万余枚磁钉保障AGV精准导航,全球首用双箱自动化轨道吊和自动换电AGV;推行“预检—分流—放行”闸口体系,集成测试、维修、换电区域。

(3)通信与远控:引入5G固网通信技术,实现百公里外岸桥远程操控,强化恶劣天气作业稳定性;配套建设作业管理、能耗监测等子系统,实现全流程数字化管控与节能。

2.2.2 主要成果

(1)作业效率领先:2023年吞吐量达635.8万TEU(超设计能力),单船平均效率47.33自然箱/h,岸桥单机最高效率57.17自然箱/h。2023年洋山港居世界银行发布的全球港口运营效率首位,支撑上海港连续13年全球集装箱吞吐量第一。

(2)智能化与绿色化提升:人员投入减少70%,劳动生产率较传统码头提升213%,效率较2017年提升30%;能耗监测系统助力全流程零排放,AGV自动换电技术显著降低碳排放。

3 “十五五”时期交通基础设施数字化转型的政策导向与发展路径

3.1 国家“十五五”规划对交通数字化的新要求

《国民经济和社会发展的第十五个五年规划的建议》^[15]提出深入推进数字中国建设。健全数据要素基础制度,建设开放、共享、安全的全国一体化数据市场,深化数据资源开发利用。全面实施“人工智能+”行动,以人工智能引领科研范式变革,加强人工智能与产业发展、社会治理之间的结合,抢占人工智能产业应用制高点,全方位赋能千行百业。

《关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型的通知》(财建[2024]96号)^[16]要求公路、水路交通基础设施数字化转型主要包括以下几个方向:一是推动基础设施智慧扩容,推动大数据、物联网、人工智能、北斗导航等新技术与交通基础设施深度融合,体系化部署运行状态感知设备和通信传输网络等,提升承载能力和通行效率;二是推动基础设施安全增效,加快安全监测、运行管控和应急调度体系数字化改造,建设数字化管养系统、运行监测预警平台、数字治超及大件运输全链条监管系统、应急指挥调度系统等平台,提高风险识别预警和快速处置能力;三是推动跨领域产业融合,推进车路云、船岸云一体化试点,布局智能化路侧基础设施,在重

点航段加强复杂场景感知;四是推动体制机制创新,健全跨部门协同联动机制和项目全生命周期数字化管理,完善标准规范,探索数据确权、流通和应用机制,推动产业融合与制度创新。

3.2 浙江省“十五五”交通数字化政策导向

浙江省综合交通运输发展“十五五”规划思路提出高质量完成公路、水路数字化转型升级试点,围绕“一廊两翼全网”总体布局,强化存量挖潜、数字赋能,重点实施智慧站点、智慧船闸、车路云、船岸云等14个创新场景建设。推进行业数据互联共享,探索人工智能在拥堵分析、运营管控等场景应用落地。同时探索运用物联网、卫星遥感、无人机测绘等新技术,完善多源立体监测网络,强化网络和重要基础设施安全风险识别和感知能力,保障高速公路异常事件发现率明显提升,实现特长隧道、特大桥梁异常事件发现率分别达90%、70%以上。

浙江省公路“十五五”发展思路明确加快落实全省“一廊两翼全网”交通基础设施数字化转型升级示范方案,围绕2943 km公路数字化转型重点任务,实现数字化转型示范通道通行效率提升超20%,突发应急事件响应效率提升30%,带动数字化转型工作从示范通道向公路全网拓展。加快建设全省数字公路基础底座建设,开展公路实景化“一张图”建设,逐步实现全省1.3万 km国省干线和11万 km农村公路数字化全覆盖。

浙江省水运发展“十五五”规划思路要求系统推进智慧港口建设,加快宁波舟山港自动化改造,推动无人集卡水平运输规模化应用和离岛作业常态化。实施内河智慧港口改造提升,探索自动驾驶、无人集卡在港区和重点集疏运线路的示范应用。打造智慧航道示范通道,基本完成省内16座营运船闸、21座水上综合服务区、1200 km骨干航道智慧化改造。全面升级“浙港通”应用,持续迭代“浙闸通”平台。开展智能船舶关键技术研发,打造内河示范智能船舶,推动“两客一危”船舶智能化改造和内河船舶智能感知设备全覆盖。开展智慧绿色“双五星”数智生态港、多能融合零碳智慧港口、长距离大尺度航运隧道与船闸组合通航设施、传统码头航道数智化提升等关键技术研究,发展港航新质生产力。

浙江省智慧交通“十五五”规划专篇提出构建行业管理数字底座、构建运营协同数据底座以及探索建立数据运营机制。强化高速公路感知能力,构建公路数据运营联盟,提升数字化管理水平,深化服务

一体化,实现多元主体统一信息入口、一体化服务。加速10万t级及以上码头智能感知网建设,推进港口调度一体化和服务一体化。加快内河高等级智慧航道建设,提升航道通航能力和智能化水平。同时以基础设施数字化转型升级示范为牵引,统筹实施“14个项目4方面、20项任务清单”,打造16个特色场景,推动“一廊贯通、两翼互联、全网协同”。

4 当前推进过程中面临的主要难点和瓶颈

尽管交通基础设施数字化转型已取得阶段性成效,但在向纵深推进过程中,仍面临多重障碍,亟需破解。

4.1 缺乏统一标准与规划

各地、各部门在数据格式、通信协议、系统接口等方面标准不一,导致“信息孤岛”和重复建设。

4.2 数据壁垒严重

感知数据(如视频、雷达、地磁)、业务数据(如收费、养护、执法)分散在不同系统中,难以打通。

4.3 AI模型泛化能力不足

现有智能算法多基于特定场景训练,难以适应复杂多变的实际交通环境。

4.4 存量设施改造难度大

历史包袱沉重:大量既有道路、桥梁、隧道未预留数字化接口,改造成本高、施工干扰大。

4.5 投资回报和可持续运营机制不清晰

初期投入巨大:感知设备、通信网络、数据中心等基础设施建设成本高昂。

商业模式不成熟:除政府财政外,缺乏可持续的市场化收益机制(如数据服务、增值服务)。

运维能力不足:基层单位缺乏专业人才和技术支撑,导致系统“建而不用”或“用而不优”。

5 深化浙江交通基础设施数字化转型的对策建议

5.1 加强示范引领

随着第二批示范省份的确定,全国范围内示范通道里程的增加,跨区域、跨省份的衔接要求显著提升。下阶段工作应在“1.0”工作经验和基础上,整合行业现有资源,提高统一性、整体性和协同性。统筹高效地抓好项目实施和工作的创新模式,破解难题,形成经验,在推动全省范围内连片成网的同时,主动做好与长三角区域及其他周边省份的对接,促进示范通道共建共享,确保数字化转型升级工作在新的

阶段发挥更大效益,持续示范引领。

5.2 加强数据共享

目前交通基础设施数字化转型升级中已建立多主体一体化数据运营模式。但在实际运行中,数据共享的深度和广度仍需进一步拓展,部分数据在不同主体之间共享的实时性和准确性有待提高,影响跨部门、跨区域协同的效率。在下阶段“2.0”项目工作中,应进一步完善数据共享机制,确保数据的实时传输和准确共享。加强数据标准的统一,制定更加详细的数据接口规范,确保不同系统之间的数据能够无缝对接,为跨部门、跨区域协同提供更有力的数据支持。

5.3 加强技术应用

目前数字化转型过程中应用的一些新技术还处于探索阶段,技术稳定性和可靠性还需进一步验证,影响系统的整体运行效率和用户体验。在下阶段“2.0”项目工作中,应加速开展关键技术攻关,加大验证工作,提升技术的成熟度和可靠性。鼓励行业内外相关企业、研究单位等多元主体积极参与“2.0”研究、设计和建设。加强技术培训和人才队伍建设,提高相关人员对新技术的理解和应用能力,为技术的推广和应用提供人才保障。

5.4 加强动态评估

根据目前数字化转型方案实施情况,从报部备案阶段到设计审批阶段,部分建设内容和部分实施范围都结合实际情况作优化调整,将相关工作任务纳入数字化转型工作一并先行,因此建议在下阶段“2.0”项目工作中,应进一步建立实施动态评估机制,及时发现问题并进行优化调整。

6 结 语

数字化转型正逐步从简单的技术叠加向系统化的重构转变。这不仅仅是关于部署更多的感知设备或搭建新的平台,而是需要通过数据驱动、人工智能赋能及机制创新来实现基础设施全生命周期管理的智能化,提高安全性和韧性,并促进跨领域产业融合。展望“十五五”时期,交通基础设施数字化转型应在以下几个方面继续努力:

(1)加强网络协同。由单点示范转向更大范围内的网络协同,强化不同省份之间、不同交通方式之间的系统集成,避免重复建设和资源浪费。

(2)探索多元共治模式。从政府主导逐渐过渡到多方参与的治理模式,积极构建数据要素市场,尝

试建立包括使用者付费在内的多种商业模式,确保数字化转型项目的可持续性。

(3)深化制度创新。不仅仅关注硬件设施和技术能力的提升,还需注重相关制度的完善,比如加快制定统一的标准体系,明确数据所有权和使用规则,建立健全的绩效评估机制等。

作为改革前沿阵地,浙江省应充分利用自身的优势,在解决数据共享难题、验证AI技术的应用效果以及探索低成本改造既有设施等方面积累经验,形成可复制推广的做法,为全国其他地区的交通基础设施数字化转型提供参考案例。通过这些努力,可以更好地利用数字技术改善公众出行体验,增强国家供应链的安全性和稳定性,支持现代化产业的发展。

参考文献:

- [1] 谢贤君,郁俊莉.融资结构与企业数字化转型——基于直接融资与间接融资的视角[J].经济经纬,2023(5):99-112.
- [2] 沈炳,王丹莉,李昆袁.智慧交通系统建设的关键技术与应用实践[J].智能建筑与智慧城市,2025(增刊2):57-59.
- [3] 张虎,陈鸿睿,陈真,等.车路协同系统发展现状及其在智慧高速中的应用研究[J].科技创新与应用,2025,15(5):189-192.
- [4] 陈禹.基于数字孪生的智慧交通建设[J].上海公路,2025(1):122-129;234.

- [5] 倪慧洋.创建智慧发展指数引导智慧港口高质量发展研究[J].交通科技与管理,2025,6(24):170-172.
- [6] 周道喜.基于大数据的城市智慧交通拥堵预测与疏导策略研究[J].中国信息化,2025(12):181-182.
- [7] 唐新华.新型基础设施在国家治理现代化建设中的功能研究[J].中国科学院院刊,2021,36(1):79-85.
- [8] 习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[M].北京:人民出版社,2022.
- [9] 中共中央,国务院.数字中国建设整体布局规划[Z].2023.
- [10] 国家发展改革委,工业和信息化部.关于加快推动新型基础设施建设的意见(发改高技[2020]552号)[Z].2020.
- [11] 交通运输部.公路水路交通基础设施数字化转型升级第一批示范区域名单公告[Z].2024.
- [12] 浙江省交通运输厅.浙江省“一廊两翼全网”高品质一体化交通基础设施数字化转型升级示范通道及网络实施方案[R].杭州:浙江省交通运输厅,2024.
- [13] 江苏省交通运输厅.江苏省交通基础设施数字化转型“一轴一网两融合”实施方案[R].南京:江苏省交通运输厅,2024.
- [14] 上海国际港务(集团)股份有限公司.洋山四期自动化码头智能操作系统(ITOS)技术白皮书[R].上海:上海国际港务(集团)股份有限公司,2023.
- [15] 中共中央.中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议[Z].2025.
- [16] 财政部,交通运输部.关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型升级的通知(财建[2024]96号)[Z].2024.

(上接第12页)

- Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 9136-9145.
- [71] Matteo B, Caterina C D, Nadia M P. New infrastructures for Urban Air Mobility systems: A systematic review on vertiport location and capacity[J]. Journal of Air Transport Management, 2023, 112.
- [72] 廖小罕,屈文秋.低空经济时代城市空中交通公共航路发展思考[J].城市交通,2025,23(2):20-28.
- [73] Vascik P D, Hansman R J. Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of Their Sensitivity to Topological and Operational Factors[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. Virginia: AIAA, 2019.

- [74] 杨秀玉.基于5G移动通信的无人机与民用飞机防相撞技术研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2019.
- [75] 马宁,曹云峰.面向无人机自主着陆的视觉感知与位姿估计方法综述[J].自动化学报,2024,50(7):1284-1304.
- [76] 中国民用航空局空管行业管理办公室.民用微轻小型无人驾驶航空器系统运行识别概念(暂行)[EB/OL].(2022-03-11)[2024-09-24].<https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202203/P020220311405155337057.pdf>.
- [77] 韩萍,卢晓光,刘海涛,等.卫星通信导航监视技术及其民航应用[J].卫星应用,2023(3):23-30.