文章编号：1003-1421(2026)01-0046-13
引用格式：李慧，蔡伯根，吴大勇，等. 低空无人机技术在铁路行业的应用与展望[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：46-58.
LI Hui，CAI Baigen，WU Dayong，et al. Application and Prospect of Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology in Railway Industry[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：46-58.

低空无人机技术在铁路行业的应用与展望

李　慧[1,2]，蔡伯根[1]，吴大勇[2]，傅卫国[2]，任志恒[2]，王　娟[2]

(1.北京交通大学 自动化与智能学院，北京　100044；2.北京鼎兴达信息科技股份有限公司，北京　100070)

摘　要：随着低空经济与“无人机+”应用的快速发展，低空无人机凭借高机动性、多传感器集成、高效率与低成本等优势，为各行业提供了新型技术手段。铁路作为国家关键交通基础设施，在工程建设、营运巡检、应急响应与安全管理等方面面临更高要求，低空无人机技术的应用潜力日益显著。通过系统梳理低空无人机技术的应用现状与发展趋势，重点探讨其在铁路领域中的应用需求、技术体系与典型场景，并剖析了当前面临的多源数据融合不足、通信与续航能力有限、安全可靠性与数据质量不足、模型精度与铁路行业需求不匹配、政策法规与人才支撑薄弱等挑战。在此基础上，提出低空无人机技术通过深度融合5G通信、人工智能与云计算等前沿技术，构建跨部门协同机制，推进标准体系建设、法规完善与人才培养等发展策略，以支持铁路系统智能化、信息化与数字化转型，助力铁路行业高质量发展。

关键词：低空经济；无人机技术；铁路应用；人工智能；智慧铁路
中图分类号：U29；V279　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250728003

Application and Prospect of Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology in Railway Industry

LI Hui[1,2]，CAI Baigen[1]，WU Dayong[2]，FU Weiguo[2]，REN Zhiheng[2]，WANG Juan[2]

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Beijing Topxingda Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy (LAE) and the expansion of “unmanned aerial vehicle (UAV+)” applications, low-altitude UAVs have emerged as an innovative technical solution across various industries, leveraging advantages such as high manoeuvrability, multi-sensor integration, high efficiency, and low operational costs. The railway sector, being a critical component of national transport infrastructure, faces increasingly demanding requirements in areas such as engineering construction, operational inspection, emergency response, and safety management. This has heightened the potential application of low-altitude UAV technology within the industry. This paper provided a systematic review of the current applications and development trends of low-altitude UAV technology, with a focus on its application requirements, technical framework, and typical scenarios in the railway sector. It further examined existing challenges,

收稿日期：2025-07-28　　**修订日期**：2025-12-08
通信作者：傅卫国(1972—)，男，江西南昌人，北京鼎兴达信息科技股份有限公司高级工程师。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300501)

including insufficient multi-source data fusion, limitations in communication and endurance, issues concerning safety reliability and data quality, a mismatch between model accuracy and railway-specific requirements, as well as shortcomings in policy regulations and professional expertise. Based on this analysis, the study on low-altitude UAV technology proposed strategies such as deeper integration of cutting-edge technologies including 5G communications, artificial intelligence, and cloud computing; the establishment of cross-departmental collaboration mechanisms, and the advancement of standardisation systems, regulatory improvements, and talent development. These measures aim to support the intelligentization, informatization, and digital transformation of railway systems, thereby contributing to high-quality development in the railway industry.

Keywords: Low-Altitude Economy; Unmanned Aerial Vehicle Technology; Railway Application; Artificial Intelligence; Smart Railway

随着通航产业链拓展和“无人机+”的新业态生成，中国经济领域正开创一种新经济模式——低空经济模式[1]。“低空经济”是一种依托1 000 m以下(最高3 000 m)空域，运用民用载人或无人航空器开展载人、载货等多样化飞行服务，进而促进相关产业融合创新的综合性经济业态[2]。低空经济正逐步成为引领城市交通变革的重要驱动力，是新质生产力的典型代表。《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》中指出：“我国电动汽车、轨道交通等新能源装备领域积累了技术优势，形成了先进工业基础，为航空制造业绿色化发展提供了契机。”将轨道交通积累的核心技术能力延伸到城市空中交通系统，可助力空中交通实现安全化、智能化和智慧化。未来低空经济发展趋势包括以下几方面。①政策加码，战略定位上升：各国政府将低空交通纳入战略，政策支持不断加码(如中国低空经济、美国AAM、欧盟UAM等)，未来政策将侧重空域开放、财政支持、试点示范等。②技术标准与监管体系完善：数字化空域管理系统(UTM/U-space等)逐步投入使用。各国加快适航标准和飞行规范的制定，推动全球低空交通治理框架。③“低空+”多行业融合：低空技术与传统行业(如物流、农业、文旅等)深度融合，创造新应用场景。传统行业积极投资和参与低空经济，共建产业生态。④低空经济运营探索：深圳粤港澳大湾区数字经济研究院自主研发智能融合低空系统(SILAS)；苏州出台全国首部《低空空中交通规则(试行)》；成都发布《促进军民融合产业加快发展的若干政策措施》。

铁路系统作为我国经济社会腾飞的重要引擎，铁路运输作用显著。通过近十几年的大规模建设，我国建成了世界顶尖的高速铁路网络，其标准最高、速度最快、里程最长、覆盖最广。高速铁路更是我国对外开放“走出去”战略中的关键载体。据统计，2024年底我国高速铁路营业里程达到4.8万km，占全球总量70%以上[3]。高速铁路旅客发送量累计达229亿人次。如今，高速铁路承担了全国铁路近八成(约76%)的旅客发送量和近七成(约69%)的旅客周转量，在综合交通体系中的占比也分别达到约19%和31%，确立了其在中长途客运的核心地位。这显著改善了以往高峰期运力严重不足的状况，有力支撑了国家经济发展与民众便捷出行。2024年全国两会，“低空经济”作为国民经济新增长引擎首次被写入政府工作报告。“低空+”创新模式正迅速改变着测绘、电力、农业、物流、交通等多领域的运作方式，蕴藏着重构传统空间利用方式与推动产业升级的巨大潜能。铁路行业加速探索“低空+轨道交通”融合应用模式。我国幅员辽阔，铁路布局“八纵八横”，而且跨区域极广，环境复杂多样。随着列车运行速度提高和路网密度增加，安全隐患也随之日益增加。低空无人机技术凭借灵活性强、成本低、数据获取能力强等优势，成为铁路智能化转型的关键突破口，对于保障铁路运输安全具有重要的现实意义。

1　国内外研究现状

根据中国民用航空局的数据显示，预估2035年我国低空经济市场规模有望达到3.5万亿元[4]。在这一进程中，无人机市场扮演着关键角色并保持增势。通常所称的低空无人机，其活动范围限定在1 000 m(含)以下的低空及超低空空域，凭借其便捷、灵活、安全、高效和低成本等多重优势，在各行业的应用也进入快速发展阶段。低空无人机在各行业应用对比分析如表1所示，其为轨道交通[5]、电网巡检[6]、

农林植保[7]、地形测绘[8]、物流运输[9-10]、工程建设[11]、应急救援[12]等在内的各领域带来了全新的解决方案。UPS使用Matternet送医样本，Wing公司在澳大利亚、芬兰和美国多地配送外卖，美国Zipline在非洲国家送血浆，加拿大能源公司使用无人机检查输油管道和风电叶片等。K-MAX执行夜间灭火任务，日本雅马哈农业无人机全球扩展。“低空+物流”如美团、顺丰已试点常态化航线；应急救援如森林防火、地震灾区通信保障成为重点方向；AI、北斗、5G-A技术融合加速赋能传统行业。

国内外铁路低空无人机应用对比如表2所示，美国、欧盟、日本等国家和地区较早开展了无人机在铁路行业的研究与应用。为推进无人机融入国家空域系统，美国制定了实施步骤与战略方案，并颁布《小型无人机系统操作规则》，对无人机的运行规范、操作员资质及飞行限制等作出规定，为铁路领域应用提供了政策依据。同样，欧洲航空安全局(EASA)于2019年发布了统一法规，详细规范了欧洲单一空域内的无人机运行，包括操作类别、风险分级及操作员资质等级要求。欧盟在低空无人机管理方面采取了统一的监管措施[13]。

随着低空经济的迅速崛起，国内铁路无人机的应用研究也日益受到关注[14-15]，如空域航线申请、飞行计划申报的审批时长>24 h；从“单一航拍”到“多传感器融合”(LiDAR+红外)再到“集群协同”，当前技术瓶颈亟需解决(如-30 ℃低温下电池续航缩短)。对比电网、物流等行业与铁路的差异，如电网无人机可在输电线路正上方飞行，而铁路受《无人驾驶航空器铁路应用安全管理办法》限制，需在距正线50 m外飞行，因此铁路无人机需更强的侧视成像能力。北京全路通信信号研究设计院集团有限公司联合中国铁路成都局集团有限公司，在成都北编组站完成全国首个铁路编组站无人机智能巡检系统的部署应用。交控科技(香港)有限公司及香港铁路有限公司携手合作，在香港科学园设立“低空轨道研究中心”，共同探索低空无人机技术在铁路领域的创新应用。

综上所述，针对国内外铁路低空无人机应用存在的共性痛点，聚焦铁路“高安全、跨地形、多部门协同”特性，突破“电磁干扰与闭环缺失”等技术瓶颈，设计“问题识别-技术适配-试点验证-标准固化”四阶段流程，构建“巡检-识别-维修-溯源”全流程智能闭环，解决“标准空白与审批低效”，为铁路智能化转型提供可落地的技术范式，未来可推广至全国“八纵八横”高铁网络。

2　铁路行业应用需求分析

依据《铁路安全生产“十四五”规划》中“基

表1　低空无人机在各行业应用对比分析

Tab.1　Comparative analysis of low-altitude UAV applications in various industries

行业领域	核心应用场景	核心技术方案	优势效果	尚未解决的问题
铁路	基础设施巡检	激光雷达(LiDAR)+AI缺陷识别	故障检出率94.26%，效率提升4倍	接触网电磁干扰，空域协调难
电网	输电线路热缺陷监测	红外热成像+无人机集群	巡检效率提升8倍，成本降低60%	山区复杂地形避障，雷雨天气作业限制
农林	植保喷洒	雾化喷头+GPS定点飞行	亩均作业时间缩短至5 min，药效提升20%	作物高度差异导致喷洒不均，电池续航短
物流	末端配送	多旋翼无人机+自动起降平台	3 km内配送时间≤15 min	载重有限，恶劣天气无法配送
应急救援	灾情侦察	红外热像仪+通信中继	灾情勘察时间缩短70%	复杂环境通信中断，人员定位精度不足

表2　国内外铁路低空无人机应用对比

Tab.2　Comparison of low-altitude UAV applications for railway in China and abroad

	空域协调机制	核心技术适配性	跨部门协同	典型场景覆盖
美国	分级空域(1 000 m以下分类管控)，审批时长12 h	单一红外热成像(侧重接触网测温)	联邦-州分权协调(效率低)	仅接触网/轨道巡检(单场景)
欧盟	全空域统一调度，审批时长8 h	多机协同(侧重环境监测)	欧盟统一调度中心(成本高)	巡检+环境监测(双场景)
中国	需距铁路正线50 m外飞行，审批时长>24 h	多传感器融合(LiDAR+光学)但无抗干扰设计	民航-铁路试点协同(无固定流程)	巡检+应急(多场景但无闭环)
拟突破方向	建立“铁路专属空域分区申请”机制，审批时长压缩至8 h内	研发“抗电磁干扰”传感器，缺陷识别准确率提升	设计“问题识别-技术适配-试点验证-标准固化”流程	构建“巡检-识别-维修-溯源”全流程智能闭环

础设施智能化运维”“运输安全风险防控”“应急救援能力提升”三大重点任务，明确应用需求方向。

2.1　铁路低空经济发展基础

中共中央办公厅、国务院办公厅《关于加快建设统一开放的交通运输市场的意见》明确提出“深化低空空域管理改革，发展通用航空和低空经济”，并将铁路纳入综合交通运输体系协同发展框架。中国民用航空局与中国国家铁路集团有限公司签署的《推进空铁联运高质量发展战略合作协议》，从规划衔接、设施共建、服务标准统一等7方面推动铁路与低空交通融合。

轨道交通几十年积累的高密度、高安全性的列车运行控制(如基于通信的列车自动控制、移动闭塞)技术，可以迁移应用到低空无人机的管控。稳定、可靠的通信网络是确保铁路安全和低空飞行安全的关键。企业正在攻关诸如“静电+雷达”融合探测系统以及ID-Space低空空域智能管控系统等技术，为“低空+轨道”模式提供坚实的通信、感知和控制支撑。这些技术是实现车、站、空信息实时交互，保障低空无人机在铁路枢纽周边有序运行的基础。

2.2　铁路基础设施巡检需求

铁路基础设施作为铁路运输系统的基石，其结构完整性与功能可靠性直接决定了铁路运输的安全与效率。根据《铁路技术管理规程》及相关维修规则，铁路工务设备(如桥梁、隧道、路基、站房等)与供电设备(如接触网、变电所等)需按规定周期开展系统性巡检，以识别潜在缺陷并指导维护作业。目前，我国铁路巡检仍主要依赖人工方式，存在以下突出局限：一是人力投入大、巡检周期长、成本高昂；二是受地形与设施结构限制，部分区域人员可达性差，存在视角盲区；三是巡检质量受人员经验与状态影响显著，易因疲劳或主观判断误差导致漏检、误检；四是难以实现设施状态的高频次、全覆盖、数字化记录与分析。

低空无人机巡检技术凭借其高机动性、灵活作业视角及快速响应能力，正逐步成为铁路基础设施智能运维的重要发展方向。无人机可迅速抵达预定区段，在短时间内完成对长大线路、复杂结构设施的多角度、近距离检测任务，有效覆盖人工难以触及的区域。通过搭载高清可见光相机，低空无人机能够捕捉扣件松动、轨枕裂缝、涂层剥落等表观病害；结合红外热成像设备，可实现对接触网过热异常、电气连接缺陷等隐患的早期识别与预警[16]。该技术显著提升了铁路基础设施巡检的覆盖率、精度与信息化水平，为实现“预防性维护”与“精准化管控”奠定了技术基础。

2.3　铁路运输安全保障需求

铁路运输安全是铁路运营管理的核心目标，关系到人民生命财产与社会经济稳定。近年来，受全球气候变化影响，我国区域性极端天气事件增多，铁路沿线滑坡、泥石流等地质灾害频发，对列车运行构成严重威胁。同时，铁路周边工程建设、非法侵入、异物侵限等人为与环境因素亦不断加剧运输安全风险。传统人工巡检方式在面对范围广、类型多、环境复杂的铁路外部安全隐患时，存在效率低、视角有限、响应迟缓等问题。

低空无人机系统为铁路外部环境安全监测提供了高效、灵活的技术手段。通过定期巡航与实时数据传输，无人机可对铁路沿线进行全方位、多角度的空中巡查。借助搭载的高清摄像设备与智能识别算法，系统能够自动检测限界内异物并发出预警，实现对安全隐患的早发现、早处置。在复杂地理环境中，无人机可迅速覆盖边坡、桥梁下方、山林等人工难以到达区段，显著提升排查效率与质量。通过视频监控，能够对铁路周边施工行为进行动态监管，防止违规作业影响铁路设施安全[17-18]。低空无人机技术为铁路运输安全环境治理与灾害预警防控提供了关键方法，是实现“立体防控、智能护航”的重要技术路径[19]。

2.4　铁路应急救援需求

铁路应急救援系指在铁路事故发生后，为最大限度减少人员伤亡与财产损失、尽快恢复运输秩序而实施的紧急处置行动。救援效率高度依赖于对事故现场信息的快速、准确获取，包括事故点地理位置、列车状态、人员受困情况、环境障碍物分布等。传统应急救援方式在信息获取层面存在明显短板：一是救援人员进入复杂事故现场(如山区、隧道、桥梁等)速度缓慢；二是现场烟、雾、暗光等条件限制人工侦察效能；三是信息传递滞后或不完整，影响指挥决策的及时性与科学性。

低空无人机凭借其快速部署、高空视角、机动灵活等优势，在铁路应急救援中具有不可替代的作用。事故发生后，无人机可第一时间飞抵现场，不受地形与路面条件限制，开展大范围空中侦察。结合激光雷达扫描，可快速生成事故现场三维实景模型，直观呈现环境结构与障碍物分布，为救援路径规划与方案制定提供高精度地理信息支持。此外，无人机还可作为移动通信中继平台，在公网信号中断区域建立临时通信链路，保障现场与指挥中心之间的音视频传输与指令下达。通过将多源感知数据实时回传至指挥系统，无人机显著增强了救援决策的信息维度与反应速度，为实现“侦-控-救-援”一体化指挥提供了关键技术支撑[20]。

3　低空无人机在铁路行业应用的技术体系

低空无人机铁路应用技术体系主要包括飞行平台、传感器系统与低空管控平台等[21]，实现了从数据采集、信息提取到应用服务的全流程闭环。该体系核心特征涵盖飞行平台机动性、传感器数据可用性及管控平台数据处理与传输的时效性[22]，铁路低空无人机技术框架如图1所示。

3.1　低空无人机飞行平台

低空无人机飞行平台作为低空技术体系的核心载体，根据飞行机制、飞行高度、飞行航时和应用场景，低空无人机飞行平台的分类及特点如表3所示，主要可分为多旋翼无人机、复合翼无人机、固定翼无人机和仿生无人机[23]。

3.2　低空无人机传感器系统

低空无人机传感器系统是低空信息采集的核心，主要传感器设备包括光学成像、红外热成像与激光雷达等类型[24]。各类传感器功能互补：光学传感器提供高分辨率空间影像，红外设备识别热异常，激光雷达获取精确三维点云。依托多传感器融合技术，可采集图像、视频、点云及环境参数等多模态数据，满足铁路巡检与监测的多样化需求。该集成策略显著提升了故障识别精度与系统智能水平。



图1　铁路低空无人机技术框架

Fig.1　Technical framework of low-altitude UAVs for railway

表3　低空无人机飞行平台的分类及特点

Tab.3　Classification and characteristics of low-altitude UAV flight platforms

平台类型	飞行机制	飞行高度	飞行航时	典型应用
多旋翼无人机	旋翼提供升力	500 m以下	20~40 min	城市物流、救援、巡检等
复合翼无人机	结合固定翼和旋翼倾转旋翼或双模飞行	2 000~5 000 m	2~12 h	侦察、货运等垂直起降以及长航时任务
固定翼无人机	机翼升力、螺旋桨或喷气推力	10 000 m以上	2~24 h	长航时巡逻、测绘、环境监测等
仿生无人机	受鸟类、昆虫、蝙蝠等飞行动力学启发	3 000 m以下	1~3 h	微型探测、生物研究等

3.3　低空无人机管控平台

低空无人机管控平台是实现低空作业安全与高效运行的关键支撑，具备任务调度、空域管理、通信链路与实时监控等功能[25]。5G 通信技术凭借高速率、低延时与大带宽特性，保障了数据的稳定传输与实时处理，提高了地面控制中心的数据接收能力。实际应用中，系统常整合地面站与云端平台[26]，依托铁路沿线的地理与环境信息，通过气象、空域与障碍物数据的实时分析，实现智能航迹规划与自主避障(视觉与毫米波雷达等)，增强复杂环境下的飞行安全性。低空无人机智能分析过程如图 2 所示，借助多源数据融合与深度学习算法，可有效识别铁路设施故障，支撑运维决策，提升自动化水平[27−28]。该平台实现了对飞行任务的全流程动态管控，进一步提高安全性与作业效率[29]。在应急救援场景中，多采用机动性更强的移动指挥平台，以保障数据的实时性与响应能力[30]。随着低空空域开放与多平台协同的发展，低空无人机管控平台将进一步朝智能化、网络化与集成化方向演进。

4　典型应用场景

低空无人机技术凭借其机动灵活、快速部署、高效采集数据以及空基作业对地形的高适应性，正逐步成为铁路安全风险识别与运维管理的重要技术手段。以人工智能技术为支撑，低空无人机移动视频系统可实现铁路建设施工、运营巡检、公安执法、应急救援等多场景的智能检测与主动报警功能。铁路低空无人机典型应用场景如图 3 所示[31−32]。

4.1　工程建设监测

基于低空无人机航拍影像，可实现对铁路工程施工进度的实时精准监控，辅助管理人员比对计划与实际进展，动态优化施工组织。如图 3a 所示，通过预设飞行任务，低空无人机可定期采集作业区域的高清影像数据，并借助专业测绘软件生成二维正射影像或高精度三维实景模型。调度人员可在模型上进行直接量测与工程量统计，清晰标注各地块施工状态，为资源调配与进度管控提供可视化决策依据。

4.2　铁路沿线巡检

利用低空无人机搭载激光雷达、光学相机等传感器，可实现铁路沿线设施自动化巡检。系统可对轨道两侧防护栅栏进行毫米级精度扫描，识别锈蚀、断裂、倾斜等结构性缺陷。如图 3b 所示，结合激光测距模块与 AI 识别算法，管理平台可自动测算栅栏受损长度与面积，并触发短信告警。以卡斯柯无人机巡检系统为例，该系统融合数字孪生与人工智能技术，实现设备故障与环境异常的自动识别，准确率超过 90%，显著提升运维效率，降低人工成本与安全风险[33]。除铁路运维外，该技术还可扩展应用于河道巡查、防洪评估与工程检测等领域。借助低空无人机货舱运输能力，可开展运维物资应急配送，充分发挥其垂直起降灵活、响应迅速、载荷适应性强等优势，在常态化巡检的同时，为供

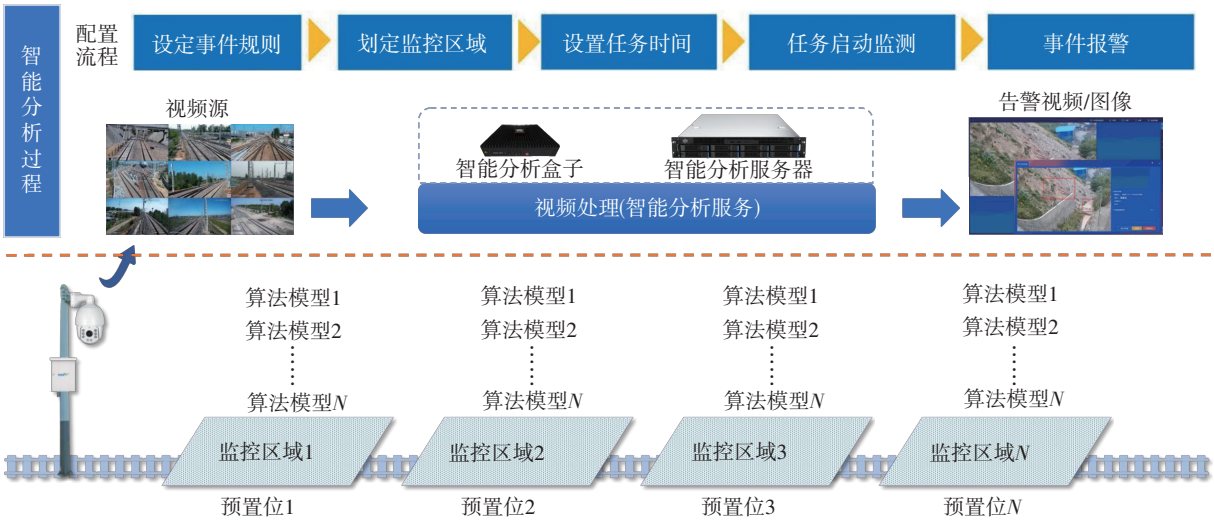
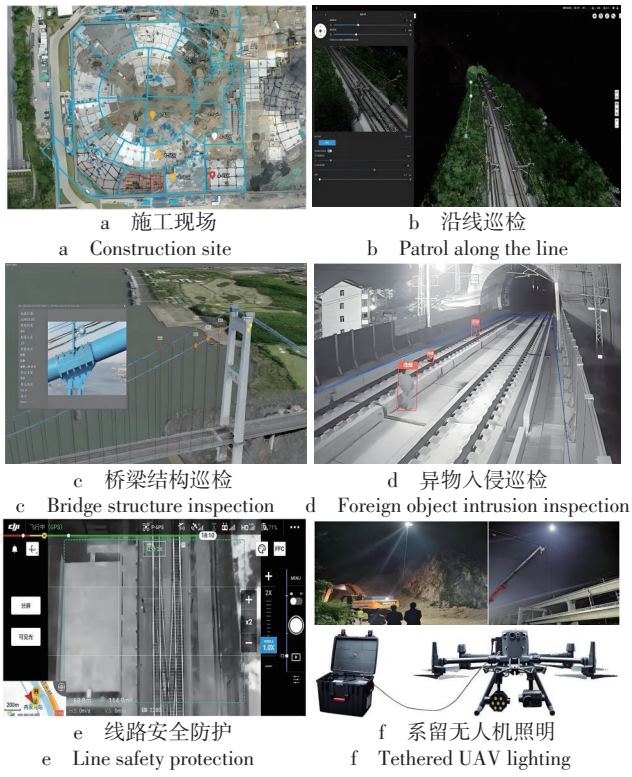


图 2　低空无人机智能分析过程

Fig.2　Intelligent analysis process of low-altitude UAVs



a　施工现场
a　Construction site

b　沿线巡检
b　Patrol along the line

c　桥梁结构巡检
c　Bridge structure inspection

d　异物入侵巡检
d　Foreign object intrusion inspection

e　线路安全防护
e　Line safety protection

f　系留无人机照明
f　Tethered UAV lighting

图3　铁路低空无人机典型应用场景

Fig.3　Typical application scenarios of low-altitude UAVs for railway

电、电务、工务等多专业提供紧急物资配送服务，实现“一机多能、一飞多用”，提升设备综合使用效益与运维响应能力。

4.3　桥梁结构巡检

低空无人机配备中长焦相机与可调云台(如上仰80°)，可对桥梁墩台、梁体焊缝等关键部位进行近距离高清图像采集，结合深度学习算法实现裂缝、锈蚀、螺栓松动等多类病害的自动识别与分析[34]，如图3c所示。进一步结合贴近摄影测量等三维建模技术，可生成桥梁数字化档案，为结构健康评估与养护决策提供高精度数据基础。

4.4　异物入侵巡检

通过规划自动化仿地航线，并融合红外热成像与可见光双光检测技术，低空无人机可有效识别铁路沿线人员、动物、落石等侵入目标，如图3d所示。在夜间巡检中，热成像模块可基于体温特征捕捉入侵信号，AI模型实时判断并推送告警信息至运维平台。配合固定式无人机运维基站，系统支持“边飞边传”功能，操作人员可实时定位目标坐标，调度巡护人员现场处置，将响应时间缩短至10 min以内[35]。

4.5　安全管理与巡防

低空无人机为重点区域安保提供了空中监测手段，增强了对铁路沿线非法入侵、盗割电缆、设施破坏等行为的立体防控能力。尤其在夜间或偏远区段，无人机可实施常态化巡查，覆盖安保区监测、山体滑坡识别、防洪评估等任务。如图3e所示，以北京全路通信信号研究设计院集团有限公司研发的长航程复合翼无人机为例，其搭载可见光吊舱，可对铁路通道环境进行持续监控。如在宝成线(宝鸡—成都)冉家河站夜间巡视中，通过无人机红外热成像系统发现接触网支柱旁有可疑人员，从发现至现场处置仅用时8 min，较人工巡检效率提升68%。

4.6　应急救援应用

4.6.1　灾情侦察

在铁路自然灾害或事故发生后，无人机可迅速抵达现场，安全、高效、全面地采集现场图像与视频数据，通过无人机管理云平台实时回传至指挥中心与移动终端，为灾情评估与事故分析保留关键证据。指挥人员可远程规划航线、接管飞行任务，降低现场操作门槛，支持跨部门协同调度与救援方案制定。

4.6.2　抢修保障

在洪涝、事故等导致铁路中断需紧急抢通时，系留无人机可提供持续、灵活的空基照明支持[36–37]，如图3f所示。其具备3项优势：一是在夜间施工中可配合大功率云台照明灯长时间悬停，提供高亮度、广范围照明，保障作业安全与进度；二是照明亮度可达3万lm以上，功率达300 W，照明范围可随飞行高度灵活调整；三是灯光可与云台相机联动，克服传统地面照明灵活性不足的局限。

4.6.3　物资投放与人员搜救

在地形复杂、通信信号弱的偏远地区，遭遇洪水、地震、滑坡、泥石流等灾害导致线路中断后，无人机集群可协同构建应急通信链路，搭载云台探照灯、相机、喊话器、抛投箱与通信中继设备，克服交通阻碍，实施快速搜救与现场监测。首架无人机精准定位救援点并捕获现场信号，经由中继节点按最优路径回传至指挥部，智能救援系统结构如图4所示，实现语音、视频直播、灾情全景影像与三维模型数据的实时传输，助力指挥人员快速研判现场态势，评估损毁程度(如路基塌方长度、桥梁损毁

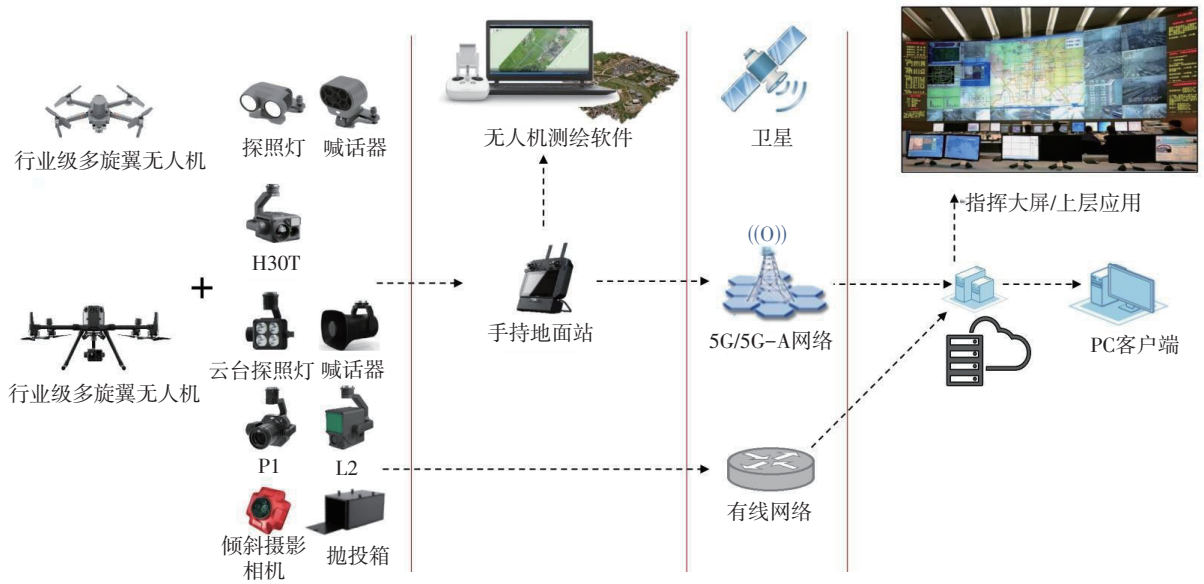


图4　智能救援系统结构

Fig.4　Structure of intelligent rescue system

状况)，为开展正确的抢险营救决策提供第一手资料。例如，在山西某铁路抢险中，采用“固定翼无人机+多旋翼无人机”协同作业模式，12 h内完成200 km线路的灾情数据采集与处理任务。随着5G与人工智能技术的深度融合，低空无人机在应急救援中的通信支持与协同作业能力将进一步提升。多旋翼无人机搭载“抗干扰通信中继”，填补隧道盲区信号；结合“火车-卡车-无人机”应急物资协同运输[38]，通过携带应急物资投放装置，将药品、食品、通信设备等物资投放到受灾区域；利用搭载的生命探测仪等设备进行人员搜救，缩短搜救时间，提高救援效率；同时灾情数据与维修方案同步至铁路指挥中心，形成“侦察-通信-物资-抢修”应急闭环，使得救援成本和救援时效性的优势越发显著[39-40]。

5　低空无人机技术在铁路应用的现实挑战

尽管低空无人机技术在铁路领域已取得一定进展，其规模化应用仍面临多方面挑战。技术层面包括极端天气(强风、高温、严寒、乱流等)对飞行性能与续航的影响，复杂环境下通信可靠性低、数据稳定性不足、多源数据融合与集成应用欠缺，以及模型精度与铁路实际需求不匹配等问题。体系层面则存在规范流程缺失、跨部门协同不足、应急保障机制不完善、政策法规滞后及专业人才短缺等瓶颈，亟需通过持续技术研发与体系优化予以解决。

5.1　多源数据融合与集成应用

低空无人机可获取多模态、高时空分辨率的铁路设施设备状态数据，支持全方位铁路巡检与监测任务。实现多源数据有效融合是全面评估铁路设施健康状态的关键。当前融合过程中主要存在3类局限：①数据格式差异引入误差，降低数据可用性；②数据多批次采集导致时空不一致，难以统一管理；③混合使用不同定位系统(如米级GPS与厘米级RTK GPS)将导致整体定位精度下降，影响细小目标的识别与几何测量[41]。

5.2　续航能力与通信稳定性

在山区、隧道等复杂铁路环境中，卫星信号易受干扰，影响无人机定位精度与通信连续性，威胁实时探测与救援效率。多旋翼无人机受限于续航短与载荷能力，难以支持长距离巡检任务。同时，现有低空通信网络存在覆盖差、速率低与管理效率低下等问题，通感一体等新一代通信导航技术尚未规模化应用，制约高密度无人机作业。空域申请与飞行许可流程复杂，也限制了铁路低空无人机应用的效率与范围。

5.3　数据质量和安全管控

低空数据质量受气象与光照条件影响显著。研究表明，强风、雨雾等天气会导致无人机平台稳定性

下降，影像出现模糊、偏移、色彩失真或重叠不足等问题，严重影响铁路病害识别与三维建模精度[42]。数据安全方面，低空无人机在铁路巡检过程中采集的高分辨率影像可能包含敏感信息，存在隐私泄露与国家安全风险。目前行业缺乏统一的数据安全管理规范，脱敏技术与涉及国家安全的数据分级管理机制不完善，关键基础设施(桥梁、隧道等)数据的存储、传输与使用环节存在隐患。作业安全方面，铁路低空飞行缺乏专项标准，包括安全距离、应急处置与气象限制等规范尚未健全，通信导航监视(CNS)系统在复杂电磁与气象环境中的连续性仍面临挑战[43]。

5.4　模型精度与铁路行业需求

现有铁路病害检测算法多针对单一场景设计，在实际应用中因气象干扰与结构差异导致泛化能力不足。例如，轨道部件传统目标检测算法未能充分利用部件间几何关系，易发生漏检，给铁路长期安全运营造成隐患。尽管无人机影像可识别线路基础设施及周边异物，现有异物入侵检测模型仍局限于有限类别，风险分级单一，难以适应开放环境下的实际需求。

5.5　政策法规与铁路专业人才培养

低空无人机在铁路应用面临空域管理分散、协调审批复杂等法规制度障碍。尽管各地陆续推出空管规章并推进监视平台建设，仍存在监管覆盖不足、动态空域分配机制不成熟、起降点布局不均等问题。同时，跨领域标准不统一、追溯监管困难也制约实际运行。人才方面，低空无人机技术涉及到多个领域的知识和技能，既熟悉航空技术、电子信息、计算机科学，又掌握铁路专业的复合型人才短缺，低空作业的细化操作规范、标准协同协议和安全规程尚不完善，制约了低空无人机技术在铁路行业的深入应用和推广。

6　发展策略

为推进铁路低空无人机应用从单点/局部调查向全线智能巡查转型，需系统解决标准缺失、空域审批、安全控制、技术整合与人才短缺等关键问题，建议采用“问题识别–技术适配–试点验证–标准固化”的闭环实施流程，铁路低空无人机应用实施流程如图5所示，协同推进技术迭代与产业升级。深度融合北斗、5G、大数据与人工智能等关键技术，重点突破铁路复杂环境下的低空无人机飞行控制、高精度定位、智能识别与数据处理等共性瓶颈，构建面向不同任务的机载传感器体系与智能识别算法，实现从信息采集到状态评估的全链条智能化，推动铁路低空技术体系现代化。

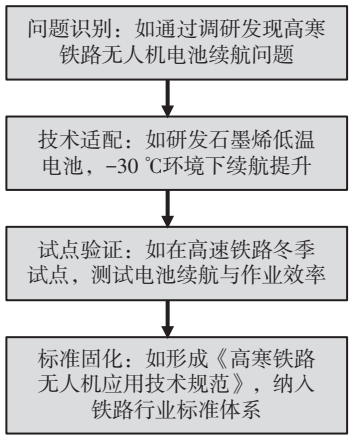


图5　铁路低空无人机应用实施流程

Fig.5　Implementation process of low-altitude UAV application in railway

6.1　强化顶层设计与标准体系

建议由交通运输主管部门牵头制定《铁路低空无人机巡检技术标准》，明确作业流程、数据采集、质量控制与安全规范。建立分级分类标准体系，适应不同类型铁路和对象的差异化需求。构建低空多源数据共享平台，推动数据资源的开放共享和深度挖掘，为技术创新提供数据支撑。同时，将低空无人机巡检纳入铁路养护技术规范体系，明确其在日常养护、定期检测和应急响应中的定位和作用。

6.2　推进基础设施与协同感知能力建设

推广“低空无人机+便携充电站”及系留低空无人机等续航提升方案，选用高抗风、耐高温机型，增强通信冗余与任务规划能力。发展混合动力平台以提高续航与载荷，推进多机协同控制。加快通用起降场点布局，建设通感一体网络，实现关键区域低空连续感知与通信管控。借助分布式协同定位技术，集成超宽带(UWB)、蓝牙等近距通信模块，通过5G–A等网络实现集群内高精度定位与数据同步。结合边缘计算与人工智能，提升低空无人机多基站协同感知与管理水平。构建“卫星+固定翼/大型无人机+多旋翼无人机+地面传感”空天地

一体化监测体系，形成铁路设施全生命周期智能运维方案，提升铁路管理系统整体智能化水平[44-45]。

6.3　构建跨部门协同管理机制

鉴于低空飞行活动涉及民航、交通、公安等多部门管理，建议建立跨领域协调机制，简化审批流程，设立铁路无人机应用“绿色通道”。推动成立省、市级低空无人机调度中心，实现区域资源统筹与任务协同，提升设备利用与应急响应效率。加强铁路与航空、通信、电子信息等行业的跨领域协同合作，共同开展低空无人机技术研发、规模化应用、标准制定等工作，形成产业生态合力，推动低空无人机技术在铁路领域的快速发展，为铁路行业的现代化建设提供有力支撑。

6.4　深化核心技术与融合应用

推动低空无人机技术与大数据、人工智能、云计算、5G通信、数字孪生等深度融合，实现气象、地图与障碍物数据的实时更新及飞行器动态路径规划，提升复杂气象环境下飞行安全性。研发分布式轻量化智能算法，支持无人机集群协同决策，增强系统鲁棒性与实时性。人机交互技术通过态势感知建模，建立空间实体与逻辑指令的映射关系，辅助操作员高效决策与指挥。发展多模态人机交互，融合视觉、语音与手势识别技术，提高操作效率与安全性。通过持续技术演进，全面提升低空无人机在感知能力、自主决策、续航能力与环境适应性方面的性能，支撑更精准的故障识别与灾害响应。

6.5　完善法规体系与人才培养机制

建议完善《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》《低空经济空中交通管理条例》等相关法规，明确空域使用规则、飞行规范与责任认定，解决审批模糊与监管重叠问题，促进低空无人机在铁路施工管理、营运巡检、应急救援等场景应用高效落地。工业和信息化部加强“全国一套标准接口、一张网”建设，推进低空智联网、起降场、通信导航等标准统一，避免区域割裂，降低跨区域运营成本。鼓励交通运输部门联合高等院校、科研机构与企业建立低空无人机技术培训基地，明晰一线铁路低空无人机操控人员所欠缺和需提升的能力，设计分级培训课程体系，开展分层次、分类别的专业人才培训[46]。支持成立行业技术创新联盟，推动产学研合作及上下游企业(如电池供应商、通信服务商)协同，共享技术与市场资源，降低研发与运营成本[47]。加速低空装备向低碳、零碳演进，发展新能源无人机成为主流。构建基于AI的空域管理系统，提前规划空域资源，根据实时飞行需求(如应急救援)通过低空智联网动态分配空域资源，提升资源利用效率，推动低空无人机技术低碳化、智能化发展。

7　结束语

低空经济的蓬勃发展不仅是技术与产业的突破，更是国家战略与经济转型的重要支柱。随着精准定位、多源感知、人机交互等技术的持续进步，低空无人机技术在铁路行业应用前景广阔。其在工程建设、运营巡检、安全管控与应急救援等方面深度融合，推动无人机系统在感知能力、自主决策、续航能力及环境适应性方面不断升级。尽管目前低空技术已在铁路领域取得显著成效，仍面临多源数据融合实时性、算法鲁棒性、通信稳定性、安全可靠性、续航限制及恶劣天气适应性等现实挑战，同时专业人才缺乏与高培训成本也制约其规模化推广。未来需通过技术、制度与模式协同创新，持续优化低空无人机技术体系，将其打造为铁路现代化发展的重要技术支撑，为实现铁路行业降本增效、培育新质生产力提供示范。

参考文献：

[1] 陈志杰，朱永文，刘　杨. 基于数字化空域系统的城市无人机管理对策研究[J]. 中国民航大学学报，2023，41(3)：8-12，64.

[2] 李　慧，蔡伯根，傅卫国，等. 铁路基础设施低空无人机巡检现状与应对策略[J]. 铁道通信信号，2025，61(6)：1-10.
LI Hui，CAI Baigen，FU Weiguo，et al. Current Situation and Countermeasures of Low-Altitude UAV Inspection of Railway Infrastructure[J]. Railway Signalling & Communication，2025，61(6)：1-10.

[3] 发展和改革部. 中国国家铁路集团有限公司2024年统计公报[EB/OL]. (2025-02-28)[2025-03-05]. http：//www. china-railway. com. cn/xwzx/zhxw/202503/t20250305_143296. html.

[4] 工业和信息化部，科学技术部，财政部，等. 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)[EB/OL]. (2024-03-

27)[2025-01-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.

[5] 魏培勇，金晓武，焦 利，等. 铁路无人机巡检技术研究与应用[J]. 铁道建筑，2023，63(4)：108-113.
WEI Peiyong，JIN Xiaowu，JIAO Li，et al. Research and Application of Railway UAV Patrol Inspection Technology[J]. Railway Engineering，2023，63(4)：108-113.

[6] 刘传洋，吴一全，刘景景. 无人机航拍图像中电力线检测方法研究进展[J]. 中国图象图形学报，2023，28(10)：3025-3048.
LIU Chuanyang，WU Yiquan，LIU Jingjing. The Growth of UAV Aerial Images-Related Power Lines Detection：A Literature Review of 2023[J]. Journal of Image and Graphics，2023，28(10)：3025-3048.

[7] 杜小强，李卓林，马锃宏，等. 基于空间注意力和可变形卷积的无人机田间障碍物检测[J]. 农业机械学报，2023，54(2)：275-283.
DU Xiaoqiang，LI Zhuolin，MA Zenghong，et al. UAV Field Obstacle Detection Based on Spatial Attention and Deformable Convolution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(2)：275-283.

[8] 晏 军，杨银波，何元甲，等. 无人机摄影测量三维建模与地形测量精度分析[J]. 测绘通报，2023(S1)：54-58.
YAN Jun，YANG Yinbo，HE Yuanjia，et al. Accuracy Analysis of 3D Modeling of UAV Photogrammetry and Topographic Survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping，2023(S1)：54-58.

[9] 周志龙. 货运站无人机现场作业管理系统研究[J]. 铁道货运，2018，36(3)：31-35.
ZHOU Zhilong. A Research on the UAE Field Operation Management System in the Freight Yard[J]. Railway Freight Transport，2018，36(3)：31-35.

[10] 宫志锋，杨志勇，邢爱华，等. 依托无人机提升铁路货运外勤作业品质分析与思考[J]. 铁道货运，2023，41(2)：48-53.
GONG Zhifeng，YANG Zhiyong，XING Aihua，et al. Analysis and Thinking on Improving the Field Operation Quality of Railway Freight Relying on UAV[J]. Railway Freight Transport，2023，41(2)：48-53.

[11] 闫文娟，王水璋. 无人机倾斜摄影航测技术与BIM结合在智慧工地系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(10)：59-65.
YAN Wenjuan，WANG Shuizhang. Application of Unmanned Aerial Vehicle Tilt Photography Aerial Survey Technology Combined with BIM in Smart Site System[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2019，33(10)：59-65.

[12] 杜梦瑶，许 凯，张 淼，等. 基于区块链的无人机群可靠应急搜救模型[J]. 系统仿真学报，2023，35(12)：2537-2549.
DU Mengyao，XU Kai，ZHANG Miao，et al. Reliable Emergency Rescue Model of UAVs Based on Blockchain[J]. Journal of System Simulation，2023，35(12)：2537-2549.

[13] 张 军，陈 磊，高智杰，等. 低空无人机技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学，2025，27(2)：73-85.
ZHANG Jun，CHEN Lei，GAO Zhijie，et al. Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology：Current Status and Prospects[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(2)：73-85.

[14] 秦暄阳，张 喆，王浩宇，等. 国内外铁路巡检无人机应用现状分析(上)[J]. 铁道技术监督，2024，52(1)：48-51，55.
QIN Xuanyang，ZHANG Zhe，WANG Haoyu，et al. Analysis on the Application Status of Railway Inspection Unmanned Aerial Vihicle at Home and Abroad (Part 1 of 2)[J]. Railway Quality Control，2024，52(1)：48-51，55.

[15] 杨 飞，涂文靖，魏子龙，等. 铁路工务、电务、供电检测装备发展现状综述[J]. 交通运输工程学报，2023，23(1)：47-69.
YANG Fei，TU Wenjing，WEI Zilong，et al. Review on Development Status of Inspection Equipment for Track Maintenance，Communication and Signaling，and Power Supply of Railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2023，23(1)：47-69.

[16] WU Y，QIN Y，QIAN Y，et al. Hybrid Deep Learning Architecture for Rail Surface Segmentation and Surface Defect Detection[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering，2022，37(2)：227-244.

[17] CUI J，QIN Y，WU Y，et al. Skip Connection YOLO Architecture for Noise Barrier Defect Detection Using UAV-Based Images in High Speed Railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2023：1-16.

[18] 蔡伯根，李智宇，王 剑，等. 面向铁路巡检的低空无人机智能感知与精密定位研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(1)：1-12.

CAI Baigen，LI Zhiyu，WANG Jian，et al. Research on Intelligent Sensing and Precise Positioning of Low-Altitude UAV for Railway Inspection[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(1)：1-12.

[19] 赵明丽，马小龙，曹若飞. 基于无人机的铁路非正常接发列车作业方案设计[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：30-39.
ZHAO Mingli，MA Xiaolong，CAO Ruofei. UAV-Assisted Operation Design for Abnormal Train Reception and Departure in Railway[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：30-39.

[20] 李　斌，张俊武，王　爽. 铁路防洪防灾无人机智能巡检关键技术应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(3)：1-8.
LI Bin，ZHANG Junwu，WANG Shuang. Research on Application of Key Technologies for UAV Intelligent Inspection of Railway Flood Control and Disaster Prevention[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(3)：1-8.

[21] XIANG T Z，XIA G S，ZHANG L P. Mini-Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing：Techniques，Applications，and Prospects[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine，2019，7(3)：29-63.

[22] FENG L，CHEN S S，ZHANG C，et al. A Comprehensive Review on Recent Applications of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing with Various Sensors for High-Throughput Plant Phenotyping[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2021，182：106033.

[23] ZHANG B W，SONG Z X，ZHAO F，et al. Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles[J]. Energies，2022，15(2)：1-25.

[24] FINN R L，WRIGHT D. Unmanned Aircraft Systems：Surveillance，Ethics and Privacy in Civil Applications[J]. Computer Law & Security Review，2012，28(2)：184-194.

[25] BIÇICI S，ZEYBEK M. An Approach for the Automated Extraction of Road Surface Distress from a UAV-Derived Point Cloud[J]. Automation in Construction，2021，122：103475.

[26] 缑永涛，李文博，段学锋. 基于无人机的路桥病害检测系统[J]. 测绘通报，2022(12)：141-146，169.
GOU Yongtao，LI Wenbo，DUAN Xuefeng. Road and Bridge Disease Detection System Based on UAV[J]. Bulletin of Surveying and Mapping，2022(12)：141-146，169.

[27] 郭建雄，周　慧，黄吴蒙，等. 基于无人机低空遥感网的智能巡检系统架构研究[J]. 自动化应用，2024(9)：19-21.
GUO Jianxiong，ZHOU Hui，HUANG Wumeng，et al. Research on Intelligent Inspection System Architecture Based on Low Altitude Remote Sensing Network of UAV[J]. Automation Application，2024(9)：19-21.

[28] 闻洪峰. 基于AI技术的无人机机载前端智能识别技术研究[J]. 信息技术与信息化，2023(5)：208-211.

[29] BUTILĂ E V，BOBOC R G，BUTILĂ E V，et al. Urban Traffic Monitoring and Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)：A Systematic Literature Review[J]. Remote Sensing，2022，14(3)：1-28.

[30] SAFAVI F，RAHNEMOONFAR M. Comparative Study of Real-Time Semantic Segmentation Networks in Aerial Images during Flooding Events[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing，2023，16：4-20.

[31] ZHAN D，JING D Y，WU M L，et al. An Accurate and Efficient Vision Measurement Approach for Railway Catenary Geometry Parameters[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2018，67(12)：2841-2853.

[32] 李明祥，苏立轩，赵崇景，等. GSM-R基站高空区域电磁环境影响分析[J]. 铁道通信信号，2022，58(3)：60-63，67.
LI Mingxiang，SU Lixuan，ZHAO Chongjing，et al. Impact Analysis of Electromagnetic Environment of GSM-R Base Station's High Altitude Area[J]. Railway Signalling & Communication，2022，58(3)：60-63，67.

[33] 中国经济新闻网. 从轨道到低空卡斯柯以智控技术赋能综合立体交通新格局[EB/OL]. (2025-07-25)[2025-07-25]. https：//www. cet. com. cn/wzsy/ycxw/10234522. shtml.

[34] 牟宗涵. 基于无人机图像的铁路桥梁钢结构表面缺陷智能识别方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[35] 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司. 成都北编组站无人机智能巡检系统运维报告[R]. 北京：北京全路通信信号研究设计院集团有限公司，2024.

[36] 郎为民，马卫国，赵卓萍，等. 系留无人机系统研究[J]. 电信快报，2022(11)：1-6.

[37] 赵　强，刘志明. 无人机在铁路行业的应用探索与实践[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(1)：13-18.
ZHAO Qiang，LIU Zhiming. Application Exploration and Practice of UAVs in Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(1)：13-18.

[38] 钟导峰，尹传忠，梁亚莉，等. 应急物资“火车-卡车-无人机”协同运输优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：40-50，58.
ZHONG Daofeng，YIN Chuanzhong，LIANG Yali，et al. Optimization of Train-Truck-Drone Cooperative Transportation for Emergency Supplies[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：40-50，58.

[39] 陈兆芳，李文静，黄文翰. 需求不确定下卡车-无人机协同的路径优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：60-72.
CHEN Zhaofang，LI Wenjing，HUANG Wenhan. Research on Path Optimization of Truck-Drone Collaboration under Uncertain Demand[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(10)：60-72.

[40] 李 楠，侯云娇，祁 帅，等. 重载飞艇在空铁联运中的应用前景分析与展望[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：44-49，83.
LI Nan，HOU Yunjiao，QI Shuai，et al. Analysis and Prospect of Application of Heavy-Lift Airship in Air-Rail Intermodal Transport[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(10)：44-49，83.

[41] YANG J X，LI H，ZOU J Z，et al. Concrete Crack Segmentation Based on UAV-Enabled Edge Computing[J]. Neurocomputing，2022，485：233-241.

[42] YANG B，WANG D C，ZHANG R J. Methods to Mitigate the Impact of Work Environment on the Measurement of Building Surface Temperature by Unmanned Aerial Vehicle Onboard Thermal Imaging System[J]. Energy and Buildings，2024，324：114872.

[43] WANG N，MUTZNER N，BLANCHET K. Societal Acceptance of Urban Drones：A Scoping Literature Review[J]. Technology in Society，2023，75：102377.

[44] 刘 亿，栾 中，李 平，等. 数字孪生技术在智能车站领域应用展望[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：157-165，177.
LIU Yi，LUAN Zhong，LI Ping，et al. Prospect for the Application of Digital Twin Technology in the Field of Intelligent Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：157-165，177.

[45] 刘佳雯，王锣莹，沈 通，等. 国内外低空经济发展及其在铁路领域的应用场景研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：30-43.
LIU Jiawen，WANG Liuying，SHEN Tong，et al. Low-Altitude Economy Development in China and Abroad and Its Application Scenarios in Railways[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(10)：30-43.

[46] 李 超，江 南，张 兵. 铁路巡检无人机操控人员胜任力模型研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：51-58.
LI Chao，JIANG Nan，ZHANG Bing. Competency Model of Unmanned Aerial Vehicle Operators for Railway Inspection[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：51-58.

[47] 刘 磊，游玉石，王志军，等. 低空技术在铁路巡查中的经济效益分析[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：50-59.
LIU Lei，YOU Yushi，WANG Zhijun，et al. Economic Benefit Analysis of Low-Altitude Technology in Railway Inspection[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(10)：50-59.

(责任编辑 吴文娟)