文章编号：1003-1421(2026)06-0052-09
引用格式：张光源. 低空经济与铁路系统的协同发展探讨[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：52-60.
ZHANG Guangyuan. Study on Synergistic Development of Low-Altitude Economy and Railway System[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：52-60.

低空经济与铁路系统的协同发展探讨

张光源

(中铁二院工程集团有限责任公司 土木建筑设计研究一院，四川 成都 610031)

摘 要：随着交通强国战略的深入推进，低空经济与铁路系统的协同发展成为构建现代化综合交通运输体系的重要课题。通过对比分析二者在设施特性、运输效能和技术应用等方面的差异，揭示了低空经济具有动态可重构性，而铁路系统则具备大运量优势。研究发现，无人机技术在铁路勘察设计、智能巡检等领域的应用已取得显著成效，并成功实现“高铁+无人机”联运模式。然而，空域资源冲突、电磁干扰等问题仍制约着二者协同发展。为此，研究提出“规划-建设-管理”三位一体策略，包括制定统一标准、共建基础设施平台和完善协同监管机制，并建议通过预留廊道、标准协同等举措推动深度融合。研究表明，低空经济与铁路系统将形成“以赋能为主、竞争为辅”的良性互动关系，为综合立体交通网络发展提供新动能。

关键词：低空经济；铁路；低空基础设施；立体交通
中图分类号：U2-9 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250928003

Study on Synergistic Development of Low-Altitude Economy and Railway System

ZHANG Guangyuan

(No.1 Research Institute of Civil and Architectural Design, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: With the deepening implementation of the strategy for building China's strength in transportation, the synergistic development of the low-altitude economy and railway system has become a crucial subject in constructing a modern integrated transportation system. Through comparative analysis of their differences in infrastructure characteristics, transport efficiency, and technological applications, it was revealed in this paper that the low-altitude economy has dynamic reconfigurability, while the railway system has a large-capacity advantage. The research finds that the application of unmanned aerial vehicle technology in fields such as railway survey and design, as well as intelligent inspection has achieved significant results, and the intermodal model of "high speed railway + unmanned aerial vehicle" is successfully realized. However, problems such as airspace resource conflicts and electromagnetic interference still constrain the synergistic development of the two. Therefore, a trinity strategy of “planning, construction, and management” is proposed, including formulating unified standards, jointly building infrastructure platforms, and improving collaborative regulatory mechanisms, and measures such as reserving corridors and standard synergy are suggested to promote deep integration. The research shows that the low-altitude

收稿日期：2025-09-28

economy and railway system will form a virtuous interactive relationship characterized by "empowerment as the core and competition as the supplement", providing new momentum for the development of a comprehensive three-dimensional transport network.

Keywords: Low-Altitude Economy; Railway; Low-Altitude Infrastructure; Three-Dimensional Transportation

0　引言

随着《交通强国建设纲要》的深入实施，我国立体交通网络建设进入加速期。2021年，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》，明确提出构建“全国123出行交通圈”和“全球123快货物流圈”的战略目标，并首次将低空经济纳入国家交通体系。四川、江苏、河南等省份陆续开展低空空域协同管理改革试点，值得注意的是，各省份已制定的实施细则均特别强调“需建立低空交通与地面交通的协同机制”[1]，这为研究低空经济与传统铁路系统的交互关系提供了政策依据。

在各种政策背景下，低空经济作为新兴交通形态快速发展，截至2025年已形成涵盖无人机物流、城市空中交通(UAM)、应急救援等多元业态的产业生态。当前低空经济的规模化发展，标志着立体交通协同将进入“三维整合”新阶段，而低空经济的崛起正在重塑综合交通运输体系格局。随着低空经济与铁路系统在设施、运输和技术上的互补性日益凸显，二者的协同发展成为构建现代化综合交通运输体系的必然选择。这种演进不仅能有效提升综合运输效率，拓展服务范围，还能显著增强应急保障能力，是实现资源优化配置和综合效能提升的关键路径。

1　低空经济发展现状及趋势

1.1　政策驱动

在国家政策的引导下，目前全国近30省份将低空经济纳入政府工作报告，或出台相关政策，在产业扶持、资金支持、空域开放等方面给予大力支持。2024年，《国家空域基础分类方法》使得管制区域划分更加科学，且首次划分出了低空非管制区域(G类为300 m以下、W类为120 m以下)，为低空飞行提供更广阔的自由空间[2]。

1.2　市场规模与产业基础

据中国航空器拥有者及驾驶员协会(AOPA)通用机场研究中心统计，截至2024年底，全国建成通用机场475个、飞行服务站32个，但起降点覆盖率低(每万平方公里仅2.5个)，基础设施分布不均衡。全国已注册民用无人机超220万架，通用航空器超3 200架，2024年低空飞行架次超3.4亿次。据统计，2025年上半年新增低空经济相关企业1.2万余家，较2024年同比增幅超过200%，现总量已超8.6万家。目前投产的低空航空器及起降场示意图如图1所示。



图1　低空航空器及起降场示意图

Fig.1　Schematic diagram of low-altitude aircraft and takeoff and landing sites

1.3　基础设施技术

2024年11月，在工业和信息化部装备工业发展中心指导下，低空产业联盟发布的《低空智能网联体系参考架构》为行业发展提供了技术蓝图。在此基础上，深圳、上海、苏州、南京、成都、珠海等城市相继出台了低空飞行服务能力的建设规划，其中部分城市的新一代低空飞行服务平台已实现上线运行。

2024年11月6日，由铁路卫星与新技术应用专委会主办、中国铁路通信信号股份有限公司承办的“低空经济技术在铁路应用交流研讨会”在京成功举办。会议围绕低空经济技术感知反制、无人机巡检、低空智能勘测等方面的技术与创新实例，分享最新研究成果，共同进行技术交流研讨。此次研讨会汇聚了各方智慧，为低空经济技术在铁路行业的应用提供了新思路和新方向。

2025年，动力系统、导航与感知系统等多项低空经济所需关键技术装备列入国家专项和国家各项

研发计划，中大型无人机、新型电动垂直起降飞行器(eVTOL)等有望实现突破性进展，低空装备向无人化、电动化、智能化方向深入迈进。

低空经济预计将成为万亿级市场，依托我国超大规模市场、全产业链配套及政策优势，有望复制高速铁路、新能源汽车的成功路径。

1.4　产业生态与技术瓶颈

低空经济已形成涵盖物流、UAM、应急救援等多元业态的产业生态。然而，当前无人机在续航能力、载重限制等方面仍存在技术瓶颈，影响了其大规模应用。同时，低空基础设施分布不均、起降点覆盖率低的问题也亟待解决。

2　低空经济与铁路特征差异

2.1　设施特征

低空经济的设施特征主要体现在其城市立体交通网络的构建上。其基础设施体系包括3类核心网络：一是满足不同运行场景的机场、起降点和维修站等地面设施网；二是系统完备的通信、导航、气象、监测等低空信息保障网；三是具备全域数据共享能力的低空飞行服务网。在使用布局上具有鲜明的空间分层特征，通常将300 m以下空域划分为物流专用层、观光层、应急层等多功能空域。

铁路设施则呈现典型的线性网络特征，由相互联结的干线、支线、联络线以及车站枢纽构成网状系统，其空间布局遵循“枢纽锚定全网”原则。铁路网络形态可分为放射形、环+放射形、方格形等多种类型。

铁路设施建设主要分布在地面或地下，具有高固定成本特征，轨道网络一旦建成便难以调整。与之不同的是，低空经济设施具有更强的动态可重构性，其起降点可依托高速公路服务区、景区停车场等现有节点进行快速部署，飞行轨迹也可根据运输需求快速进行调整。

2.2　运输特征

低空经济的运输特征表现为显著的短途高效性。其运载器具跑道助跑短，甚至多有垂直起降能力，无需跑道助跑。在运输效率方面，低空物流可突破地理障碍实现点对点直达运输，实现覆盖150 km内全境1 h内必达，突出了短距离的时效性，如中国电信集团有限公司在青海构建的5G无人机医疗通道，使偏远地区血样运输时间从4 h缩短至40 min[3]。低空运输还具有成本优势，无人机配送无需大规模地面基础设施投入，可降低30%以上的末端物流成本。但低空运输也存在很多限制条件，一方面受限于当前技术条件，其单次运载量通常较小，且续航能力有限；另一方面受限于天气条件，如在雷雨、大风、浓雾等恶劣天气下难以完成运输任务。

铁路运输则展现出截然不同的特征。其核心优势在于大运量长距离运输能力。在运输效率方面，虽不及航空速度快，但具有更高的准点率和更低的单位能耗。铁路运输还展现出极强的抗风险能力，基本不受天气影响，一般通过预警和巡查看守排除外部环境干扰，也可实现运输重大事故率较其他运输方式更低。但铁路运输存在明显的路径依赖性，必须依托固定轨道网络，难以实现门到门服务，在短途运输和灵活调度方面劣势明显。

2.3　运营模式

低空经济的运营模式核心在于“动态网络响应”，其本质是一个基于实时需求的分布式调度系统。它依托空域网格与数字平台，对零散、多变的运输任务进行即时匹配与路径规划，表现为高度灵活的点对点、非线性和按需服务。

与之形成鲜明对比的是铁路的“计划线性流程”模式，其运营核心是沿固定轨道组织大规模流量，通过集中的时刻表与调度指令，实现旅客或货物在预设干线上高效、批量地移动，呈现出强烈的计划性、规模性与标准化特征。

2.4　经济特征

低空经济本质上体现为一种“范围经济”。其商业逻辑的根基在于利用同一空中网格化基础设施与飞行器平台，通过灵活适配的运营模式，来满足物流、载人、巡检、应急救援等高度异质化和碎片化的市场需求。这种模式的核心驱动力是网络效应与需求响应的敏捷性，其价值随着应用场景的丰富和网络节点的增加而呈指数级增长，资产复用率极高，资本支出也相对分散且具有模块化特征。

反观铁路经济，则深度锚定于“规模经济”与“密度经济”。其巨大的沉没成本沉淀于专用的线性物理网络(轨道)，这决定了其必须通过组织大规模、

标准化的客货流，在固定干线上实现极高的运输密度，才能摊薄单位成本、实现盈利。因此，铁路的商业模式依赖于长期、稳定的宏观流量规划，其成本结构刚性，市场边界相对清晰，具有强烈的自然垄断属性。

3　低空技术在铁路系统中的应用

低空技术在铁路领域的应用已形成体系化布局，主要包括勘察设计、智能巡检、应急物流和空铁联运4大方向。这些技术通过无人机、eVTOL等装备的部署，显著提升了铁路系统的智能化水平和运营效率。

3.1　勘察设计

传统铁路勘察设计依赖人工测量和物理设备，在复杂地形和极端环境下，工程师们不得不冒险翻过丛山、攀上陡坡、跨过深涧，存在效率低、安全风险高、数据整合困难等核心问题。低空技术其实在几年前就已经在铁路勘察设计中进行使用，主要应用于地形测绘与地质勘探，实现了从“铁脚板”到“智慧眼”的变革。通过搭载激光雷达和高分辨率相机的无人机，结合线路、桥梁、隧道、地质、站场等各专业的需求，在铁路沿线复杂区域或工点，进行多源数据采集和处理分析，获取高精度实景三维模型，为重要地段或工点方案设计提供基础数据支撑，实现多源异构数据的深度融合，保证数据的现势性、完备性以及精度要求，以生产不同细节层次的实景三维模型，保障了智能铁路不同数据需求，无人机在复杂地形区域现场勘察及数据采集如图2所示。在工作效率上，单架次1 h可完成约10 km线路扫描，较人工提升60%，整体缩短勘察设计周期。在近几年高原铁路的勘察设计中已全面采用定制无人机完成勘测，解决了传统人工勘察难以覆盖的复杂地形问题。

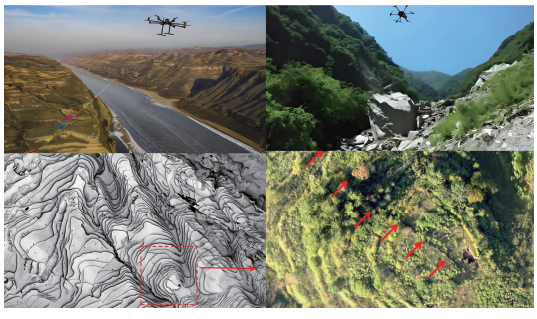

图2　无人机在复杂地形区域现场勘察及数据采集

Fig.2　On-site reconnaissance and data acquisition by unmanned aerial vehicle in complex terrain areas

在铁路勘察设计中，还使用到了航空物探技术，通过飞行器搭载磁力仪、重力仪等地球物理仪器，从空中测量磁场、重力场等物理场变化，以探测地下地质结构和矿产资源。其核心优势在于高效覆盖大面积区域(日作业可达数千平方公里)，尤其适用于地形复杂或人力难以到达的区域(如高原、荒漠)，应用包括活动断层探测以及环境监测(冰川厚度测量)等。此外，低空遥感技术还可辅助识别地质灾害风险点，为铁路线路设计提供实时地质数据支持。

3.2　智能巡检与维护

我国铁路智能运维已取得了一定的进展，铁路部门通过大力推进信息化建设，构建了一系列铁路智能运维系统，涵盖了铁路线路、桥梁、隧道、供电系统、信号系统等多个关键领域，但是，传统的铁路运维方式仍面临诸多挑战。在效率方面，人工巡检和传统检测设备的检测速度相对较慢，难以满足铁路线路不断增长的运维需求。尤其是一些偏远地区或复杂地形区域，人工巡检的难度较大，耗时较长，导致巡检周期延长，难以及时发现和处理潜在问题。在准确性上，人工巡检容易受到主观因素的影响，如巡检人员的经验、疲劳程度等，可能会导致漏检或误判。同时，传统检测设备的检测精度和可靠性也存在一定的局限性，对于一些微小的病害和早期故障难以准确识别。成本方面，铁路运维需要投入大量的人力、物力和财力。人工巡检需要配备大量的巡检人员，人工成本较高；传统检测设备的购置、维护和运行成本也不容忽视[4]。此外，随着铁路里程的不断增加和运维要求的不断提高，运维成本还将持续上升。安全保障方面，铁路作为重要的交通基础设施，其安全运行至关重要。传统运维方式在面对突发自然灾害(如地震、洪水、泥石流等)和人为破坏时，往往难以及时做出响应，存在较大的安全隐患。

当前，铁路基础设施巡检已逐渐引入低空无人机技术，众多企业和机构积极探索，并取得了一系列成果。通过搭载高分辨率光学设备与多类型传感器，实现对轨道、桥梁、隧道及电气化设备等关键

设施的监测，无人机桥梁智能巡检工作技术架构图如图3所示。针对铁路电务系统结构复杂、设备分布广、地形环境多变等痛点，重庆电务段以通号低空智能科技有限公司无人机飞控系统为核心，深度融合AI视觉识别技术，构建低空飞行巡检解决方案。采用上下行线路双向边侧精准飞行模式，实现无人机在距离轨道外侧80~120 m安全区域内双侧同步精准取景，确保全方位无死角覆盖巡检场景，不仅大幅提升了巡检的安全性与可靠性，而且为后续智能补拍、精细点检和灾害预警等深度应用开拓了广阔空间。



图3　无人机桥梁智能巡检工作技术架构图

Fig.3　Technical architecture of unmanned aerial vehicle-based intelligent bridge inspection workflow

无人机智能巡检系统在京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)多个区段进行了试验验证，实际应用表明，较传统人工模式效率提升较为明显[5]，传统巡检与无人机巡检的效能对比分析如表1所示，尤其在复杂地形作业中，既能规避人员高空作业风险，又可突破地理条件限制完成全覆盖检测；同时无人机巡检系统可自动识别设备故障、环境异常等隐患，识别准确率超90%。总体而言，低空无人机技术显著提升了铁路运维的敏捷性与安全性[6-7]。

3.3　应急物流

在铁路低空技术体系中，已通过构建“无人机空中补给走廊”，实现了对受灾区域或受阻列车的精准空投与快速转运，将传统陆路难以逾越的障碍转化为空中通途，系统性地提升了整个铁路应急响应网络的韧性与运输效率。实践中，如2024年广东韶关洪灾救援中，铁路部门利用停靠于京广线(北京—广州)安全区段的动检列车作为前沿基站，在3 h内通过8架无人机，向多个已成“孤岛”的村落投送了超过200 kg的应急物资，成功验证了“铁路大动脉稳运输、无人机微循环精投送”的联动模式。此方案不仅极大提升了极端条件下的应急响应速度与精度，更将铁路系统的战略支点作用，从单纯的运输通道，延伸为全天候、立体化的生命保障枢纽。

3.4　空铁联运

自2024年下半年起，深圳、广州等城市试点“高铁+空中出租车”联运服务，旅客可在枢纽站直接换乘低空飞行器，缩短全程出行时间，将旅客联运体验升级；在旅游场景中，“高铁抵达+低空观光”模式丰富旅游产品组合，提升铁路沿线资源价值。以深圳北站为例，其“低空+高铁”联运模式已形成示范效应。该项目坐落于深圳北站东广场C1单体处，现场设有314 m^2的直升机坪，可向市民提供业内高水准的空中的士包机运输服务，深圳北站全国首个“低空+铁路”联运服务如图4所示。联运服务分别设有城际航线和市内航线，中山城际航线25 min即可抵达，较陆路交通耗时缩短60%，市内航线则可以飞往深圳各区。

4　国际经验启示

4.1　典型模式：日本与德国

在国际实践中，日本与德国分别代表了技术应用与制度创新的2种典型模式。

表1　传统巡检与无人机巡检的效能对比分析

Tab.1　Comparative analysis of efficiency between traditional inspection and unmanned aerial vehicle inspection

项目	传统人工巡检方式	无人机智能巡检系统	效能提升幅度
作业效率	5~8 km/人天	30~50 km/机天	提高6~10倍
单次作业成本	约800~1 200元/km	约200~350元/km	降低65%~75%
缺陷识别率	约75%~85%(受人员经验影响大)	90%~98%(AI算法辅助)	提升15%~20%
响应速度	发现问题后平均4~6 h到达现场	15~30 min内可部署	提升10~20倍
数据完整性	人工记录，易遗漏	全线路高清影像+三维建模	100%覆盖
安全风险	需上线作业，存在人身安全风险	远程操作，零接触风险	完全规避
特殊环境适应	恶劣环境/夜间作业受限	配备红外/激光雷达，全天候作业能力	提升300%
数据追溯性	纸质记录，查询困难	数字化存档，可回溯分析	提升显著



图4　深圳北站全国首个“低空+铁路”联运服务

Fig.4　China’s first “low-altitude + railway” intermodal service at Shenzhenbei Station

（1）日本新干线自2023年起全面部署“无人机+AI”夜间巡检系统，其核心在于：①采用即时定位与地图构建技术的无人机集群，可在90 min内完成300 km轨道巡检；②通过深度学习算法分析2.4万张/夜的红外图像，实现轨道扣件缺失识别准确率98.7%(JR东日本铁路公司2024年报数据)；③建立“铁路空域走廊”管理制度，将凌晨0:00—4:00设为无人机专属作业时段。

（2）德国则侧重货运接驳体系创新，德国铁路(DB)与Volocopter合作开展的“最后一公里”试点项目显示：①在慕尼黑中央车站设置垂直起降场，通过标准化货柜(尺寸800 mm×800 mm×1 000 mm)实现无人机与铁路集装箱无缝对接；②采用区块链技术追踪多式联运货物，使中转时间缩短至12 min(传统方式需45 min)。

4.2　监管体系：美国与欧盟

欧美监管体系呈现显著差异化特征：美国联邦航空管理局(FAA)根据美国联邦监管法规第14卷第107部分规定，铁路沿线无人机飞行限高为120 m(距轨道中心线水平距离≤30 m时)，且需额外申请夜间飞行豁免；欧洲航空安全局(EASA)则通过特定操作风险评估框架实施动态管理，允许经认证的运营商在铁路禁区执行超视距飞行。相较而言，我国2023年发布的现行《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(国令第761号)对铁路保护区的限制距离暂无明确说明，但正在修订的《低空飞行服务保障体系建设实施方案》可借鉴相关经验，建立“铁路低空绿色通道”分级管理制度。

4.3　全球低空经济发展特征与趋势

当前全球低空经济正呈现技术驱动与政策适配协同发展的趋势。从技术层面看，国外技术的实践标志着无人机应用已突破单一场景，共同验证了低空技术在提升传统交通体系效能方面的价值[8]。政策创新方面，欧美形成“严限制”与“动态放”2种典型监管范式，美国通过明确参数划定安全边界，欧盟则采用风险评估机制释放超视距飞行潜力，这种差异化路径提供了不同的政策工具箱[9]。值得关注的是，2024年国际民航组织(ICAO)发布的《城市空中交通指南》推动形成全球技术标准框架，新加坡、迪拜等城市已开展跨境无人机货运走廊试验，韩国更将低空经济纳入“数字新政2.0”战略支柱。据摩根士丹利预测，到2030年全球低空经济规模将突破1.5万亿美元，其中亚太地区增速达28%领跑全球。未来发展趋势将呈现3个特征：一是空域管理向“数字孪生+动态定价”演进，如英国正在测试的空中交通管理系统2.0版本；二是应用场景向医疗急救、城市消防等公共服务领域延伸；三是技术标准与监管规则加速国际协同。

5　低空技术对我国铁路的影响分析

5.1　对铁路的功能互补

5.1.1　短途分流与长距强化

低空运输在300 km内短途场景(如城市群通勤、紧急物流)时效优势显著，缓解铁路短途运力压力；铁路聚焦中长距离干线运输，低空经济释放其运能，促进路网功能分层优化。

5.1.2　特殊场景能力延伸

在传统铁路运输难以覆盖的山区、海岛等特殊地理区域，无人机物流可依托铁路站点形成补给节点，扩展铁路服务半径[10]。在铁路遭遇自然灾害或突发事件时，无人机可快速向现场运输救援物资或抢修设备，缩短应急响应时间。同时eVTOL还能进行伤员紧急转运、给养物资运输等。当前，一些低空经济试点城市已开展无人机应急运输演练，保障铁路系统的连续性和安全性[11]。

5.2　加强铁路协同赋能

5.2.1　智能巡检与安全保障

无人机搭载AI识别系统可对铁路轨道、隧道实施高空动态监测，实时回传安全隐患信息(如异物侵入、结构变形)，显著降低人工巡检成本与风

险。铁路周边低空智能巡检，将推动铁路维护向智能化、无人化转型。

虽然低空智能技术为铁路运维提供了更好的保障，但在暴雨、大风等极端天气下，低空飞行器难以保障自身的正常运作，仍无法完全替代传统的巡检方式。

5.2.2　立体物流网络构建

铁路干线运输与无人机末端配送结合，形成“铁路+低空”联运。大宗货物依托铁路跨区域运输，高时效小件通过无人机完成“最后一公里”配送，解决偏远地区覆盖难题；在沿线站点增设低空起降场，可实现货物“轨空无缝转运”[12]。

5.2.3　旅客联运多元化选择

“高铁+低空”联运模式挖掘铁路沿线资源附加值，推动“运输通道”向“消费场景”转型。目前空铁旅客联运已取得初步示范成效，随着低空经济的发展，产品不断升级及研发，联运成本也将逐步降低，为旅客无缝换乘提供多元化出行选择。

5.3　冲突与资源重构

5.3.1　短途客流竞争

低空载人运输在城际短途市场可能分流铁路高频旅客，尤其商务出行群体。在100~300 km城际场景中，低空载人运输速度优势(如1 h直达)可显著压缩高速铁路需中转的耗时，当前低空载人运输仍以应急、文旅等特需场景为主，随着低空经济的规模化发展，未来低空运输技术发展更加成熟，成本将持续下降，城际分流效应将更显著。

5.3.2　空域资源协调需求

铁路信号塔、供电线等基础设施对低空飞行会形成空间障碍与电磁干扰，而低空飞行器与铁路系统在电磁兼容性、通信频段协调性等方面也存在技术冲突。因此，低空航线规划需与铁路廊道空间实施协同管理，通过空域分层设计、动态监测及标准统一，确保二者在立体交通网络中的安全高效运行。

5.3.3　安全与监管问题

小型低空飞行器受外部环境影响较大，坠毁风险较高，对于无人机自身损毁影响有限，而一旦威胁到铁路线路的安全就是大事。因此，在飞行器与铁路行驶的轨迹交叉区段，必须建立严格的空间隔离与防控机制。

5.4　经济与社会效益

在运维方面，可降低65%~75%单公里成本，显著减少人工安全风险与设备维护支出；在运输协同方面，针对地形复杂、交通不便的偏远地区，“铁路干线+无人机末端”模式通过减少中转环节与人力依赖，展现出降低末端配送成本的潜力，而高铁站起降场模块化改造形成的多式联运枢纽，能提升换乘效率并节约土地资源；此外，低空应急响应体系可将铁路抢修物资运输时间较传统方式显著压缩，大幅降低事故次生损失。尽管存在城际短途分流潜在风险，但整体上低空经济通过技术赋能与资源整合，可为铁路系统创造“降本增效”的净经济效益。

6　低空经济与铁路未来融合及协同对策

6.1　廊道及接口规划预留

低空飞行器与铁路设施空间布局缺乏协同，存在航线交叉冲突与安全距离标准缺失。当前铁路选线设计未充分考虑低空廊道预留要求，后续协同发展面临物理空间障碍。建议将低空廊道标准纳入铁路选线技术规范体系，通过科学划定铁路沿线低空飞行器专属交叉立体通道和水平分区(低空地面设施与铁路轨道保持安全距离)的技术参数，综合考虑立体交通规划；针对低空飞行器对铁路产生的高空坠物风险防控，工程实施时应同步考虑预留智能安防设施，有效实现铁路与低空交通的运输保障和安全协同。

6.2　地面设施统筹建设

交通枢纽低空接驳功能缺失，既有车站缺乏起降场配置标准，新建站场未将低空交通纳入一体化设计。建议在新建高铁站建设中，采用模块化设计理念[13]，将屋顶或站前广场设起降场作为标准配置。对于既有普速站，可在站前广场配置可拆卸式起降平台，兼容物流无人机。通过站城一体化的立体空间结构，实现高速铁路、地铁、公交与低空交通的多维衔接。这种整合模式不仅能有效节约土地资源，还可显著提升不同交通方式间的换乘效率，构建高效集约的综合交通枢纽体系。

6.3　技术协同创新路径

当前低空与铁路领域存在显著的技术标准差异，存在一些冲突点需要解决，例如民航划设的

300 m以下低空走廊与铁路接触网安全距离标准冲突，以及无人机5.8 GHz频段与铁路GSM-R系统存在同频干扰风险。建议在电气化铁路区段开展分级测试，量化无人机通信受电弓电磁干扰的阈值(如距离接触网50 m/100 m/200 m)，并建立低空飞行器电磁辐射发射测试、电磁抗扰度测试、传导骚扰测试等标准流程；同时考虑在无人机设计中增加电磁屏蔽层，提高设备抗干扰能力，同时开发专用通信频段，避免与铁路信号系统产生干扰；另外，建议建立分级预警机制并联合开发相应系统，在飞行器侵入铁路系统预设的“核心区”触发预警后，将自动降低列车速度，或者飞行器自动返航或悬停。

6.4　标准化保障体系构建

当前低空交通与铁路领域之间存在显著的法规与技术标准缺口，亟需构建覆盖全环节的标准化保障体系，包括制定诸如“低空-铁路联运通用技术要求”“设计衔接规范”“安全监督管理细则”“铁路沿线低空飞行器避障技术标准”等基础性文件，同时整合现有法规并新增专项条款以填补空白[14]；目前，航空与铁路行业已经联合启动编制《铁路基础设施无人机巡检技术要求与管理规范》。此外，可建立联合调度平台，实现数据共享、智能路径规划及应急协同处置。通过技术标准与智能平台的联动，提升运输效率与安全性，为未来立体交通网络提供示范支持[15]。

6.5　复合型人才培养

2024年《中国低空经济发展白皮书》显示，全国同时掌握航空法规与铁路标准的复合型技术人才严重紧缺，特别是在空铁联运系统设计、跨领域设备兼容测试、协同运营安全管理等领域存在严重人才断层。参考2024年低空产业联盟发布的“智能网联架构”，建议设置“低空飞行管控”与“铁路智能运维”双模块课程，加速培育既掌握无人机巡检技术又熟悉铁路安全标准的复合型工程师[16]。

6.6　研究体系完善

空铁协同前沿技术研究滞后，缺乏系统性科研布局，在关键领域存在技术空白，建议重点开展以下研究。

（1）量子通信技术应用研究：当前电气化铁路产生的强电磁干扰严重影响无人机通信质量，亟需构建可靠传输机制。研究应通过建立QKD测试平台模拟接触网干扰环境，开发专用量子通信协议，采用“实验室模拟+现场实测”双轨法验证通信质量指标，形成适配低空-铁路场景的技术标准体系，为跨系统数据传输提供安全保障。

（2）数字孪生仿真平台开发：传统仿真技术难以支撑百万级飞行器与列车的协同推演需求[17]。研究路径包括整合BIM+GIS数据构建基础设施数字底座，开发多智能体协同算法，采用多学科交叉方法融合计算机科学与交通运输工程知识，建立可视化交互界面以实现立体交通系统的精细化仿真分析。

（3）空铁联运保险精算模型：缺乏科学风险评估体系制约着商业保险产品开发。应基于历史事故数据建立无人机坠毁概率模型，运用机器学习技术开发动态定价算法，通过蒙特卡洛模拟验证模型有效性，制定标准化保险条款模板，为市场推广提供定价依据。

（4）社会接受度与噪音影响评估：低空飞行器与铁路噪音叠加可能引发沿线居民双重投诉。研究应采用“定量调查+定性访谈+实地测量”综合方法，建立噪音传播模型预测叠加效应，结合社会心理学理论分析公众接受阈值。

（5）极端天气应急协同机制：在极端天气频发背景下需强化系统协同响应能力。研究应建立预警信息与运行状态联动机制，开发多灾种应急处置预案库，运用情景构建技术推演最优应对策略，建立标准化跨系统协作流程，保障运输安全连续性。

7　结束语

研究系统探讨了低空经济与铁路系统的互动关系，揭示了这一新型经济形态不仅为铁路运输提供了技术互补和效率提升的机遇，同时也带来了有限的竞争压力，呈现出“赋能为主、竞争为辅”的显著特征。为实现资源的最优配置，亟需通过政策工具的精准引导，促进低空经济与铁路系统的协同发展。需要指出的是，虽然我国低空经济仍处于起步阶段，但在基础设施和技术能力方面具备较好的发展条件，发展前景较为广阔，且技术提升上存在许多变量，故当前研究存在一定局限性，未来仍需经过大量的探索与实践，通过制度创新和技术创新的

双轮驱动，推动低空经济与铁路系统的深度融合发展。

参考文献：

[1] 赵光辉，李重荣．低空经济协同发展助推新质生产力发展的逻辑与路径[J]．企业科技与发展，2025(1)：22-28.

[2] 宋　丹，徐　政．低空经济赋能高质量发展的内在逻辑与实践路径[J]．湖南社会科学，2024(5)：65-75.
SONG Dan，XU Zheng．The Inner Logic and Practical Strategy of Low Altitude Economy Empowering High Quality Development[J]．Social Sciences in Hunan，2024(5)：65-75.

[3] 崔　粲．无人机航拍在铁路事故救援中应用思考[J]．铁路通信信号工程技术，2016，13(1)：48-51.
CUI Can．Thought of Applying Unmanned Aerial Vehicle Photograph System in Railway Accident Rescue[J]．Railway Signalling & Communication Engineering，2016，13(1)：48-51.

[4] 陈俊安，邓贤军，陈蔚卓，等．基于图像识别的多旋翼无人机自主巡检时目前自动锁定技术[J]．数码精品世界，2021(3)：16-17.

[5] 秦　勇，邵长虹，杨怀志，等．京沪高铁基础设施无人机智能巡检系统关键技术[J]．中国铁路，2024(4)：15-21.
QIN Yong，SHAO Changhong，YANG Huaizhi，et al．Key Technologies of UAV Intelligent Patrol Inspection System for Beijing-Shanghai HSR Infrastructure[J]．Chinese Railways，2024(4)：15-21.

[6] 秦　勇，张紫城，杨怀志，等．轨道交通基础设施自主无人机智能巡检技术现状与发展趋势[J]．铁路通信信号工程技术，2025，22(2)：1-10.
QIN Yong，ZHANG Zicheng，YANG Huaizhi，et al．Current Status and Development Trends of Autonomous UAV Intelligent Inspection Technology for Railway Infrastructure[J]．Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(2)：1-10.

[7] 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.

[8] LIU H．Rail Transit Inspection Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Systems[M]．Amsterdam：Elsevier，2020.

[9] AELA P，CHI H L，FARES A，et al．UAV-Based Studies in Railway Infrastructure Monitoring[J]．Automation in Construction，2024，167：105714.

[10] 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.

[11] 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，LIU Tan，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.

[12] 徐笑阳．低空经济与道路联运融合发展问题研究[J]．中国企业经营管理知识仓库，2025，23(1)：11-14.

[13] 廖小罕，徐晨晨，叶虎平．低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]．中国科学院院刊，2024，39(11)：1966-1981.
LIAO Xiaohan，XU Chenchen，YE Huping．Benefits and Challenges of Constructing Low-Altitude Air Route Network Infrastructure for Developing Low-Altitude Economy[J]．Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2024，39(11)：1966-1981.

[14] 郜春海，朱　力，苗　佳，等．低空经济与城市轨道交通融合的技术路径与应用前景[J]．都市快轨交通，2025，38(2)：14-21.
GAO Chunhai，ZHU Li，MIAO Jia，et al．Technological Pathways and Application Prospects of Low-Altitude Economy and Rail Transit Integration[J]．Urban Rapid Rail Transit，2025，38(2)：14-21.

[15] 林　云．新基建背景下低空经济应对策略研究[J]．活力，2025，43(17)：157-159.

[16] 陈　曦．低空经济视域下人才培养模式重构与就业效能研究[J]．公关世界，2025(18)：29-31.

[17] 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.

(责任编辑　吴文娟)