文章编号：1003-1421(2026)01-0070-09
引用格式：范爱华，朱俊洪，苏畅，等.我国铁路行业发展低空经济面临的机遇、挑战和对策探讨[J].铁道运输与经济，2026，48(1)：70-78.
FAN Aihua，ZHU Junhong，SU Chang，et al. Opportunities，Challenges，and Countermeasures for Development of Low-Altitude Economy in China's Railway Industry[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：70-78.

我国铁路行业发展低空经济面临的机遇、挑战和对策探讨

范爱华[1]，朱俊洪[2]，苏　畅[2]，赵柯焱[3]，李飞龙[4]

(1.许昌学院 智能交通学院，河南 许昌　461000；2.河南低空经济发展集团有限公司，河南 郑州　450000；3.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；4.民航机场规划设计研究总院有限公司 姜昌山大师工作室，北京　100029)

摘　要：针对我国铁路行业融合低空经济的迫切需求，基于PEST模型评估宏观环境，系统剖析了其在解决“最后一公里”难题、突破运维瓶颈、提升安全和效率的内生驱动力。进而聚焦行业的特殊性，识别了其在绝对安全容错、强电磁环境干扰、线性廊道空域管理、场景驱动的商业模式可行性等多重挑战。基于此，结合行业现状，提出了“由内向外、试点先行、效益驱动”的发展策略。具体对策包括：优先布局智能巡检等内部提效场景，稳步拓展“低空+铁路”市场化应用；攻克高抗扰度技术，建立适应铁路环境的电磁兼容认证体系；打破部门壁垒，强化“空-地一体化”协同联动管理机制；构建务实创新的商业模式并推动产业链协同。研究旨在为铁路行业抢抓战略机遇、培育新质生产力提供参考。

关键词：低空经济；铁路运输；运输经济；通用航空；立体交通
中图分类号：U29；V279　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250126001

Opportunities，Challenges，and Countermeasures for Development of Low-Altitude Economy in China's Railway Industry

FAN Aihua[1]，ZHU Junhong[2]，SU Chang[2]，ZHAO Keyan[3]，LI Feilong[4]

(1. School of Intelligent Transportation，Xuchang University，Xuchang 461000，Henan，China；2. Henan Low-Altitude Economy Development Group Co.，Ltd，Zhengzhou 450000，Henan，China；3. School of Traffic and Transportation，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China；4. Jiang Changshan Master Studio，China Airport Planning and Design Institute Co.，Ltd，Beijing 100029，China)

Abstract: To address the urgent need to integrate the low-altitude economy into China's railway industry，this paper evaluated the macro-environment based on the PEST model. The endogenous drivers for solving “last-mile” connectivity problems，breaking through operation and maintenance bottlenecks，and improving operational efficiency and safety were systematically analyzed. Furthermore，focusing on the specificity of the railway industry，it identified multiple challenges regarding absolute safety and fault tolerance requirements，strong electromagnetic environment interference，linear corridor airspace management，and scenario-driven business model feasibility.

收稿日期：2025-01-26　　**修订日期**：2025-12-04
基金项目：河南省软科学项目(252400411219)；河南省高等学校重点科研项目(24B580005)

Based on these analyses and the current industry status, a development strategy focusing on “from inside to outside, pilot-first, and efficiency-driven” principles was proposed. Specific countermeasures included: prioritizing internal efficiency enhancement scenarios such as intelligent inspection while steadily expanding market-oriented “low-altitude + railway” applications; overcoming technical barriers in high interference immunity and establishing an electromagnetic compatibility certification system adapted to railway environments; breaking departmental barriers to strengthen an “air-ground integrated” collaborative linkage mechanism, and constructing pragmatic and innovative business models while promoting industrial chain collaboration. This study aims to provide references for the railway industry to seize strategic opportunities and cultivate new quality productive forces.

Keywords: Low-Altitude Economy; Railway Transportation; Transportation Economy; General Aviation; Three-Dimensional Transportation

0　引言

低空经济是以低空空域资源为依托，以低空飞行活动为牵引，以技术融合创新为驱动，辐射带动多领域融合发展的综合性经济形态[1]。发展低空经济是党中央、国务院做出的重大战略部署，党的二十届三中全会明确提出发展通用航空和低空经济，更加肯定了低空经济的战略性新兴产业地位。当前，我国促进低空经济发展的政策举措相继出台，基础设施加速布局，应用场景持续拓展，低空经济与相关产业的融合发展有序推进。从全球来看，美国在2020年发布《先进空中交通(AAM)：国家蓝图(2020)》[2]，并先后通过《先进空中交通协调及领导法案》[3]、《先进空中交通基础设施现代化(AAIM)法案》[4]，持续增强其在先进空中交通领域的主导权；欧盟在2019年发布2019/945号和2019/947号实施条例[5-6]，规定了无人机在欧洲天空安全运行框架，并于2022年发布《无人机战略2.0》[7]，打造智能和可持续的无人机生态系统。以无人机为载体的低空经济正成为全球竞逐的焦点，而我国凭借在低空领域技术创新与制度创新，有望引领全球低空经济产业发展。

在此背景下，以无人机应用为代表的低空经济新模式迅速发展，将传统二维交通空间拓展至三维立体低空空域，深刻塑造社会发展新空间。在铁路行业，无人机已应用在铁路编组站探索开展智能巡检[8]、应急物资的协同运输[9]等场景，显著提升铁路巡检效率，部分地区探索旅客和货物的末端接驳服务[10]，开辟“低空+高铁客运”[11]、“铁路+低空速递”[12]等创新业务模式，为铁路行业注入新的增长动能。综合分析表明，现有研究多集中于单一技术在特定场景下的局部应用，尚缺乏对“低空+铁路”进行系统性、全局性融合发展的顶层设计与路径探讨。基于此，系统分析铁路行业发展低空经济的内在驱动力、面临的特殊挑战及可行路径，探讨“低空+铁路”融合发展的必要性和发展对策，为我国铁路行业创造新需求、培育新供给，开辟产业发展新赛道提供参考。

1　低空经济发展分析

低空经济既继承了传统通用航空业态，又融合了以无人机为支撑的新型低空生产服务方式，在政策引导、技术创新和市场需求等多重因素叠加下，正在加速重构经济社会发展空间。

1.1　政策环境分析

近年来，我国持续完善低空经济发展政策体系，在低空空域管理改革、低空飞行服务保障体系建设、通用航空运营及装备制造等方面出台了一系列的政策法规，国家级低空经济发展政策如表1所示，国家发展和改革委员会新设低空经济发展司，为低空经济产业高质量发展奠定了坚实基础。党的二十届三中全会明确提出发展通用航空和低空经济，为开辟低空经济新赛道坚定了信心，引领了方向，明确了路径[13]。同时，全国各地也抢抓机遇，约有30个省(区、市)将发展低空经济纳入2025年政府工作报告，北京、安徽、湖南、河南等省(市)密集发布促进低空经济高质量发展的实施方案，深圳、广州、苏州等地出台低空经济市级立法。在政策引领和产业共振的推动下，为铁路行业在低空经济领域的探索和应用创造了有利的政策环境。

1.2　经济环境分析

低空经济产业链条长、辐射范围广，极具成长

表1　国家级低空经济发展政策

Tab.1　National-level low-altitude economic development policy

发布时间	发布机构	文件名称
2010年8月	中华人民共和国国务院 中华人民共和国中央军事委员会	《关于深化我国低空空域管理改革的意见》
2016年5月	中华人民共和国国务院办公厅	《关于促进通用航空业发展的指导意见》
2021年2月	中国共产党中央委员会 中华人民共和国国务院	《国家综合立体交通网规划纲要》
2022年2月	中国民用航空局	《“十四五”通用航空发展专项规划》
2023年5月	中华人民共和国国务院 中华人民共和国中央军事委员会	《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》
2023年12月	中央空中交通管理委员会制定 中国民用航空局发布	《国家空域基础分类方法》
2024年1月	中华人民共和国工业和信息化部等七部门	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》
2024年3月	中华人民共和国工业和信息化部等四部门	《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》
2024年7月	中国共产党中央委员会	《关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》
2024年11月	中华人民共和国交通运输部 中华人民共和国国家发展和改革委员会	《交通物流降本提质增效行动计划》
2024年11月	低空产业联盟	《新能源新构型低空装备安全技术体系报告(2024版)》
2024年11月	中华人民共和国交通运输部	《通用机场管理规定》
2024年12月	中国共产党中央委员会办公厅 中华人民共和国国务院办公厅	《关于加快建设统一开放的交通运输市场的意见》

性和带动性，依托传统通用航空和新型无人驾驶航空器的低空飞行活动，广泛应用于各种产业形态之中，在促进经济发展、加强社会保障、服务国防事业等方面发挥着日益重要的作用[14]。根据中国民用航空局(以下简称“民航局”)预测[15]，2025年我国低空经济市场规模将达到1.5万亿元，2035年有望达到3.5万亿元。从铁路行业来看，铁路运输具有覆盖广、运量大、成本低等特点，是我国资源要素流通的“主动脉”，但其运营线路的固定性也带来了难以克服的瓶颈。一是“最后一公里”难题，铁路客货运输高度依赖固定的线路和站点，旅客“站到门”和货物的“场到端”接驳是其服务链的短板，制约了全过程运输效率和客户体验。二是运维成本高、风险大，铁路桥梁、道岔、接触网等沿线基础巡检维护工作量巨大，传统人工作业效率低、成本高，且常伴随高风险作业环境，安全压力巨大。三是应急响应局限性，当铁路沿线发生落石、洪水等自然灾害导致线路中断时，铁路自身的应急抢险能力受限于地面交通的可达性，物资调运和现场勘察效率不高。低空经济以其超视距、高机动性和网络化飞行等特点，为突破上述瓶颈提供了全新的解决方案。通过将铁路的二维交通空间拓展至三维立体低空空域，容量高维且可扩展，通过无人机巡检、应急物资运输等应用，显著提升铁路运营的安全性和效率，未来更有望解决旅客和货物的末端接驳等问题，为铁路行业开辟新的市场需求，打造经济增长新引擎。

1.3　社会环境分析

近年来，我国在低空空域改革、新型基础设施建设及场景应用等方面均取得诸多突破，社会公众对低空经济的认知度和接受度显著提升，这为铁路行业开展低空经济业务奠定了坚实的社会基础。在低空空域管理改革方面，2023年12月，中央空中交通管理委员会制定了《国家空域基础分类方法》，首次提出G类、W类非管制空域，为低空空域充分使用释放空间。在低空运营实践方面，传统通用航空市场稳步扩大，无人机应用呈爆发式增长，据民航局统计，截至2024年底，我国无人机运营单位总数超过2万家，累计飞行时间达2 666万h，同比增长15%[16]。无人机已广泛应用于农林植保、巡查监测、航空测绘、应急救援、低空物流等领域，低空经济新业态、新模式持续拓展。此外，民航局先后在全国设立20个无人驾驶航空基地(试验区)，探索无人驾驶航空行业管理与社会管理深度融合新路径。

1.4　技术环境分析

凭借技术创新和应用创新，我国无人机产业迅速崛起，在无人机电动能源、导航与控制、光学技术等方面处于国际领先地位。以无人机整机制造为

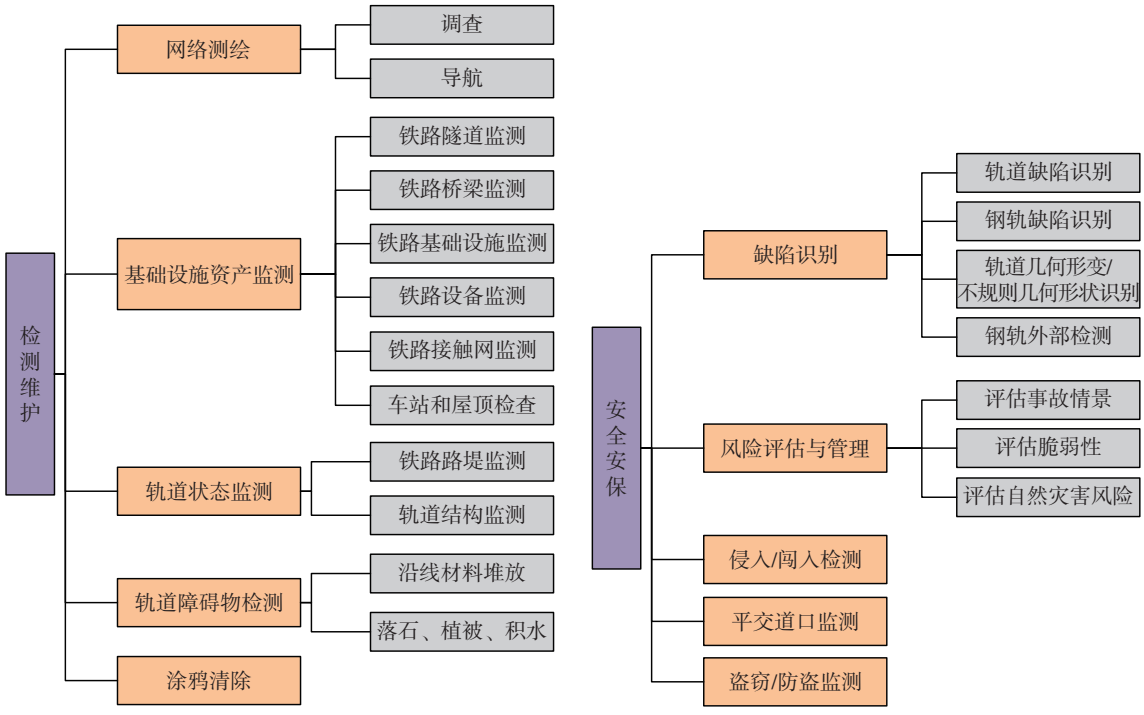
核心，低空飞行应用为牵引，我国在无人机制造、低空智能管控和探测感知等技术方面日趋成熟。在无人机制造方面，据统计，我国在无人机领域的专利申请量约占全球70%，已成为全球无人机市场的主要生产国和出口国[17]。此外，我国在电动垂直起降航空器(eVTOL)领域也展现出强大的后发优势，亿航EH216-S是全球首个三证齐全的eVTOL产品[18]，多款载人/物流eVTOL开展验证适飞，未来空中交通的核心技术正在加速成熟。在低空智能管控方面，随着北斗低空增强系统和5G-A技术的商业化应用，并融合雷达、ADS-B等多源数据，实现对低空飞行的精准定位和导航，有效提升对“异构、高密度、高频次、高复杂性”的低空飞行活动的安全管控能力。

2　铁路行业发展低空经济现状分析

铁路是国家战略性、先导性、关键性重大基础设施，为保障列车安全高效运行，铁路部门必须对沿线的轨道、桥隧、接触网等关键设施进行常态化巡检与维护。长期以来，人工巡检模式面临着巡检效率低、数据精度欠佳、运营成本高、作业灵活性受限等问题，且复杂的户外环境和高风险作业性质，对巡检人员及铁路运输安全构成潜在威胁。得益于无人机及低空探测感知技术的突破，无人机搭载高清影像、红外热感、激光雷达等传感器，结合高精度卫星定位与智能化航线规划，极大地提高了铁路巡检效率和数据获取精度，推动铁路巡检和运维体系安全、经济、高效，国内外学者对其应用开展了广泛研究，铁路行业也开始引入无人机开展相关作业。

在文献研究方面，Askarzadeh等[19]对无人机在铁路状态监测中的应用进行了综述，选取2014—2022年间的47篇代表性文献，按照无人机在铁路巡检与监测中的应用分为钢轨裂隙等缺陷识别、自然灾害等紧急情况下的模拟和评估风险、高精度铁路网和地形图绘制、桥梁隧道等基础设施监测、轨道沉降等状况监测和落石等障碍物检测6大类，并对铁路巡检与监测中应用无人机的潜在效益进行了总结，主要包括降低成本、提高安全性、节省时间、提高机动性和灵活性、提高可靠性5大方面。无人机在铁路检测维护和安全安保领域的应用分类如图1所示。

在经济效益方面，“欧洲铁路研究与创新合作



a　检测维护领域
a　Inspection and maintenance fields

b　安全安保领域
b　Safety and security fields

图1　无人机在铁路检测维护和安全安保领域的应用分类

Fig.1　Classification of drone applications in railway inspection and maintenance, safety, and security

计划”研究认为，应用无人机可降低20%的能源成本、提升10%的整体效率、避免了因检查期间关闭生产线而导致运输能力的下降[20]。根据美国联邦铁路局(FRA)管理报告，2021年铁路系统事故导致的经济损失达2.488亿美元，其中，人为失误和轨道路基问题导致的经济损失分别占比36%和34%[21]，无人机能通过高频次地巡查产生高分辨率图像，以识别大部分事故原因，如道岔转换位置错误、可巡视的轨道和路基问题等[22]。无人机飞行灵活、覆盖范围广、巡检精度高，一方面使用无人机检查轨道、桥梁、隧道时，正常的列车运行和其他运营可以继续进行，减小对铁路运行的干扰；另一方面无人机拍摄的高分辨率图像通过摄影测量拼接，创建高质量的2D图形、3D模型和具有360度视角的点云评估，结合人工智能算法识别在目视检查中可能忽略的问题。Rampriya等[23]基于无人机捕获的315张原始图像，通过数据增强技术和图像标注，建立了用于铁路语义分割和障碍物检测的数据集，是首个公开的、基于低空无人机的铁路语义分割和障碍物检测数据集。

在实际应用中，英国铁路网公司(Network Rail)利用配备高分辨率摄像头的无人机，对轨道几何状态、扣件系统完整性、道砟状况以及沿线植被侵限等问题进行定期检查，识别潜在缺陷和维护需求，提高检查效率和数据质量[24]。美国伯林顿北方圣太菲铁路公司(BNSF)将无人机应用于铁路基础设施检查与维护中，利用无人机搭载高分辨率相机和传感器，评估铁路桥梁结构完整性、识别裂缝、腐蚀、部件松动或其他潜在缺陷，极大地降低检查人员的安全作业风险[25]。印度铁路公司(Indian Railways)表示，57%的重大列车事故是由疏忽的铁路工人所造成[26]，因此，采用先进技术对于提高乘客安全至关重要，印度铁路公司已采购无人机用于铁路安全和乘客安全监测，并开展无人机操作和维护方面的培训[27]。

近年来，我国铁路行业也积极探索无人机的应用。2018年，周志龙[28]针对铁路货运站场作业风险高和效率低的问题，设计了无人机在货运站现场作业的管理系统。2021年12月，国家铁路局印发《“十四五”铁路科技创新规划》，提出研究北斗卫星导航、机载雷达、无人机低空遥感、航空物探等技术，推动空天地一体化勘察技术、卫星定位测量方法系统应用。在此政策指引下，国内科研机构与产业界围绕无人机在铁路领域的应用展开了广泛的探索与实践，当前研究热点主要集中于铁路基础设施的智能巡检技术研究与应用[29–31]，无人机作业中的安全风险评估[32]，保障线路安全的无人机反制技术[33]，铁路巡检无人机操控人员胜任力模型构建对策[34]等。除此之外，还有学者将无人机应用于铁路运营调度组织中，如针对中长距离应急物资的“火车–卡车–无人机”协同运输，构建了整数规划模型，以使协同运输的总成本最小，结合无人机充分发挥铁路中长距离的运输优势[9]。在铁路车站非正常接发列车作业时，引入无人机参与设备监测检测、辅助接发车、凭证传递等任务，实现人机协同，实现成本低、耗时少、安全性高的多重效果，提高铁路运输的智慧化水平[35]。中国铁路通信信号集团有限公司自主研发铁路行业无人机巡检平台，利用高空视角，对铁路编组站的车辆巡检、安防巡视、线路巡检提供安效双优保障，探索“低空+铁路”应用与场景创新。

3　铁路行业发展低空经济面临的挑战

低空经济作为一种新兴的经济形态，其发展普遍面临空域管理、法律法规、公众接受度等共性挑战，而铁路作为国家关键的基础设施，其对安全性的极致要求和独特的运营环境，决定铁路行业发展低空经济呈现出显著的行业特殊性和复杂性。

3.1　极端严苛的安全冗余与容错机制要求

运营安全的“绝对性”是铁路行业发展低空经济的首要挑战，铁路运输系统安全遵循“故障–安全”原则，任何子系统的失效都不能导致灾难性后果，将低空飞行器引入铁路运营环境，对铁路安全体系构成冲击。一方面，低空飞行器自身的故障与铁路运营环境中的既有风险相互叠加，可能产生非线性、难以预测的“级联失效”[36]。另一方面，安全冗余设计的标准极为严苛。铁路场景要求的安全目标水平极高，飞行器必须在动力、控制、导航等关键系统上具备多重物理冗余和异构冗余，以确保在单一甚至多重故障下仍能保持安全飞行或受控降落，不仅需要突破现有航空器设计的技术瓶颈，更

将导致其制造成本和维护复杂度呈指数级增长，构成重大的技术经济壁垒。

3.2　强电磁环境下的兼容性与抗干扰挑战

电气化铁路沿线特有的强电磁环境对低空飞行器构成电磁兼容性挑战，飞行器必须具备极高的抗扰度，既要能抵抗外部强电磁干扰，又不能对铁路既有的通信、信号和控制系统产生有害干扰。铁路牵引供电系统产生的高压、大电流会在接触网周围形成工频和高次谐波的强交变电磁场[37]，其场强远超常规环境，可能干扰低空飞行器的定位、传感器和飞控系统，造成飞行姿态失稳甚至失控，降低其作业的可靠性和安全性。同时，飞行器运行依赖的数据链、图传系统等无线电发射设备，工作频率可能与铁路专网通信系统或列车控制系统产生互调干扰，可能会降低铁路通信信噪比，甚至阻塞信道，影响行车安全指令的可靠传输。因此，如何对飞行器进行有效的电磁屏蔽设计、抗干扰算法优化，并建立严苛的“空-地”双向兼容测试与认证体系，是低空飞行器在铁路场景规模化应用的技术性挑战。

3.3　复杂动态线性廊道空域协同管理难题

铁路沿线狭长连续的“廊道空域”对传统空域管理模式带来挑战，低空飞行器在铁路沿线必须克服空域的高度异构性和动态时变性，构建空域动态协同管理机制，确保飞行安全合规和可监控。一方面，铁路属于狭长的线性廊道，在地理上跨越不同的行政区划和空域管制扇区，穿越城市、山区、平原等多种地貌，导致其在不同空域的管制要求、通信覆盖和气象条件呈现高度的异构性。另一方面，列车的运行本身具有动态性，需要设置排他性安全保护区的“移动禁飞区”，使廊道空域的可用性和限制条件具有强烈的时变性，低空飞行作业必须与铁路地面行车调度指挥系统实现深度耦合，以确保飞行器及飞行活动不影响行车安全。此外，低空飞行活动计划的申报、审批必须与军民航空管部门协同联动，打破军民航、铁路等多部门间的体制机制壁垒，建立“空-地一体化”协同决策机制，实现低空飞行监管系统与铁路运输调度指挥系统之间的数据互联互通和指令协同。

3.4　场景驱动的商业模式可行性挑战

铁路运输的核心优势在于其规模化、低成本的大众运输能力，而当前低空经济业态和商业模式仍处于探索期，在缺乏清晰、可信的投资回报预期前，铁路部门作为重资产、高负债的企业，面临低空飞行商业模式的可行性挑战。在旅客短途接驳方面，铁路枢纽已经建立了快速公交、地铁快线、出租车等较为成熟的和经济的短途接驳，而低空载客普遍具有高成本、小众化的特点，其“时间效率”是否能支撑高昂的运输成本仍需验证。在运营维护和物流方面，引入无人机虽然能提升一定的效率，但由于采购飞行器、配置自动化机巢和建立管控平台需要高昂的初始投资，并且需要维护保养和专业技术人员等持续性的运营成本，其全生命周期的综合成本效益是否优于优化后的人工作业或成熟的“铁路+货车”联运模式，需要通过精细的经济模型量化评估和实证检验[38]，构成了低空商业模式推广的现实障碍。

4　铁路行业发展低空经济的对策探讨

低空经济应用场景多元，能够有效融合衔接各类交通方式，实现综合立体交通发展新格局。而面对低空经济发展的安全、技术、管理与商业模式等特殊挑战，铁路行业应秉持务实审慎态度，采取“由内向外、试点先行、效益驱动”的务实策略，聚焦提升铁路自身运营维护效率和安全性，稳步释放“低空+铁路”融合价值。

4.1　构建精准务实的行业发展策略

针对铁路运营安全的严苛要求与商业模式可行性的双重挑战，铁路行业应将风险管控与经济效益评估置于首位。一方面，优先聚焦于铁路自身运营维护的“内部提效”场景，在特定路段探索将无人机巡检、应急勘察、安防监控等风险相对可控、价值创造路径清晰的应用作为切入点，通过探索替代高风险、低效率的人工作业，实现降本增效和安全水平提升。另一方面，审慎探索对外服务的商业应用，对于旅客接驳与干线物流等市场化应用，应坚持试点先行原则，选择特定枢纽或线路开展小范围、全要素的技术与商业模式验证。通过精准的成本效益核算与市场需求分析，找到真正具备竞争优势和盈利能力的细分场景，避免在商业逻辑尚未清晰前进行大规模基础设施投资。同时，必须将铁路

无人机主动防御和反制能力建设作为同步推进的核心任务，研究制定反制技术标准、部署规范和应急预案，确保铁路运输绝对安全。

4.2　构建高标准电磁兼容认证体系

为应对强电磁干扰环境下的兼容性挑战，应建立独具铁路行业特色的技术标准与验证体系，为低空飞行器的准入和安全运行提供技术基石。一方面，针对强电磁干扰下的导航、通信与飞控难题，应设立专项课题，集中力量研发高抗扰度的飞行器硬件、高鲁棒性的融合导航算法以及可靠的通信链路技术，通过技术攻关，确保飞行器在铁路复杂电磁环境下的性能稳定性和安全性。另一方面，牵头制定覆盖电磁兼容性、功能安全、数据接口、运营流程等方面的行业标准，并建设专业的铁路环境测试场或认证实验室，确保引入铁路应用的低空飞行器及其配套系统通过该体系的严格测试与认证，确保技术装备的适用性与可靠性，为规模化应用扫清技术障碍。

4.3　强化一体化协同联动管理机制

为有效管理铁路沿线狭长复杂的“廊道空域”，必须强化与军民航、地方政府等多方的协同联动，构建权责清晰、高效顺畅的“空-地一体化”协同联动管理机制。首先，应积极推动建立铁路廊道空域的协同管理模式，向国家及地方空域管理机构提出沿线低空飞行的空域使用需求，共同探索“廊道空域”的精细化划设、动态化管理和信息共享机制，通过建立常态化的沟通渠道和应急联动预案，确保空域资源的安全有序利用。其次，研发部署“空-地一体化”协同决策平台，在技术上实现低空飞行监管系统与铁路运输调度指挥系统的深度融合与数据贯通，为低空飞行活动提供动态的飞行许可与路径规划建议，通过技术赋能实现运行层面的高效协同与安全闭环。

4.4　探索创新可持续的商业模式

铁路行业应发挥自身场景优势，积极培育产业生态，通过模式创新探索可持续的商业路径。一方面，通过联合低空飞行器制造商、核心部件供应商、解决方案集成商及科研院所，构建开放的产业发展联盟，铁路部门提供真实的应用场景和数据，引导产业链上下游企业针对铁路行业的特殊需求进行定制化研发和产品迭代，共同降低技术应用成本，提升解决方案的适配性。另一方面，可探索与地方政府、产业资本、专业运营商成立合资公司等模式，共同参与“低空+铁路”基础设施的投资、建设与运营，通过引入社会资本和专业的市场化运营团队，不仅能减轻铁路自身的投资压力，还能激发市场活力，加速探索数据服务、应急保障服务、定制化物流等多元可持续的盈利模式，推动“低空+铁路”融合发展的良性循环。

5　结束语

低空经济作为新质生产力的典型代表，在推动产业升级、促进经济社会发展等方面具有重要的作用。当前，随着低空经济发展的顶层设计逐步完善，技术支撑日趋成熟，应用场景不断拓展，以及政策引领和产业协同共振的推动，低空经济必将成为我国经济发展新的增长点。通过系统性分析探讨，铁路行业发展低空经济应聚焦提升运维效率与安全水平的内生性战略需求，探索破解自身“最后一公里”瓶颈，为实现二维线性网络向三维立体交通体系演进赋能。然而，“低空+铁路”应用场景面临运营安全的“绝对性”要求、强电磁干扰环境下的技术兼容性、线性廊道空域的动态协同管理以及商业模式的经济可行性等多重挑战。为此，铁路行业应采取审慎务实的发展态度和实施路径，通过构建精准务实的行业发展策略，先行建立行业技术标准与验证体系，构建空地一体化运行机制，并通过培育产业生态和创新合作模式，探索“低空+铁路”新需求创造、新消费牵引和新供给培育，共同推进新时代新征程综合立体交通新篇章。

参考文献：

[1] 欧阳桃花，郑舒文. 基于共同演化的低空经济产业生态策略研究：以“低空航空器+”为例[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版)，2024，37(5)：109-119.
OUYANG Taohua，ZHENG Shuwen. Industrial Ecological Strategies of Low-Altitude Economy Based on Co-Evolution：Taking“Low-Altitude Aircraft+”as an Example[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)，2024，37(5)：109-119.

[2] National Academies of Sciences，Engineering，and Medicine.

Advancing Aerial Mobility: A National Blueprint[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2020.

[3] Congress Government. H. R. 1339-117th Congress (2021—2022): Advanced Air Mobility Coordination and Leadership Act[EB/OL]. (2021-11-04) [2025-04-22]. https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/1339.

[4] Congress Government. H. R. 6270-117th Congress (2021—2022): Advanced Aviation Infrastructure Modernization Act or the AAIM Act[EB/OL]. (2022-06-13)[2025-04-22]. https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/6270.

[5] European Union. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on Unmanned Aircraft Systems and on Third-Country Operators of Unmanned Aircraft Systems[EB/OL]. (2019-06-11)[2025-04-22]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/uri=CELEX%3A32019R0945.

[6] European Union. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the Rules and Procedures for the Operation of Unmanned Aircraft[EB/OL]. (2019-06-11) [2025-04-22]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/uri= CELEX%3A32019R0947.

[7] European Commission. Drone Strategy 2.0: Creating a Large-Scale European Drone Market[EB/OL]. (2022-11-29)[2025-08-20]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7076.

[8] 中国铁路通信信号集团有限公司. 中国通号铁路编组站无人机智能巡检系统在成都北编组站成功部署应用[EB/OL]. (2024-12-31)[2025-04-22]. http://www.crsc.com.cn/news/tsi_1197_3994_83796.html.

[9] 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.

[10] 孙卫国，吕人力，李凌威，等. 低空经济面临的机遇、挑战与城市空中交通规划展望[J]. 城市交通，2025，23(2)：13-19，127.
SUN Weiguo, LYU Renli, LI Lingwei, et al. Opportunities and Challenges for Low-Altitude Economy and Future Prospects of Urban Air Mobility Planning[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(2): 13-19, 127.

[11] 中国交通新闻网. 杭绍台“低空+高铁”开拓联运新场景[EB/OL]. (2024-12-27)[2025-09-25]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202412/t20241227_4161721.html.

[12] 中国交通新闻网. 云南最高千万元奖励支持低空产业延链补链[EB/OL]. (2025-08-20)[2025-09-25]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202508/t20250820_4175081.html.

[13] 交通运输部官网. 以改革创新为动力 推动低空经济高质量发展[EB/OL]. (2024-07-29)[2025-01-20]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202407/t20240729_4145477.html.

[14] 粤港澳大湾区数字经济研究院. 低空经济发展白皮书-深圳方案[EB/OL]. (2022-11-22)[2025-01-22]. https://www.idea.edu.cn/news/2512.html.

[15] 国家发展和改革委员会. 低空经济发展前景可期[EB/OL]. (2024-11-29)[2025-09-22]. https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202411/t20241129_1394729.html.

[16] 中国民航网. 2024年通用航空和低空经济安全有序发展[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-04-22]. http://www.caacnews.com.cn/special/2025zhuanti/8274/2019gzhltwd/202501/t20250109_1384058.html.

[17] 沈映春. 低空经济的内涵、特征和运行模式[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版)，2025，46(1)：108-117，F0002.
SHEN Yingchun. Low-Altitude Economy: Definition, Characteristics and Operation Modes[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 108-117, F0002.

[18] 中国新闻网. 全球首张无人驾驶载人航空器生产许可证颁发[EB/OL]. (2024-04-09)[2025-01-22]. https://mp.weixin.qq.com/s/sTqpxYqQj4IrU3jwrLh1Eg.

[19] ASKARZADEH T, BRIDGELALL R, TOLLIVER D D. Systematic Literature Review of Drone Utility in Railway Condition Monitoring[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149(6): 04023041.

[20] BANIĆ M L, MILTENOVIĆ A, PAVLOVIĆ M, et al. Intelligent Machine Vision Based Railway Infrastructure Inspection and Monitoring Using Uav[J]. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 2019, 17(3): 357.

[21] U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration. Accident Data, Reporting, and Investigations[EB/OL]. [2025-09-21]. https://railroads.dot.gov/railroad-safety/accident-data-reporting-and-investigations-0.

[22] ALAWAD H, KAEWUNRUEN S. 5G Intelligence Underpinning Railway Safety in the COVID-19 Era[J]. Frontiers in Built

Environment，2021，7：639753.

[23] RAMPRIYA S R，AL-SHEHARI T，NATHAN S，et al. An Unmanned Aerial Vehicle Captured Dataset for Railroad Segmentation and Obstacle Detection[J]. Scientific Data，2024，11：1315.

[24] Network Rail. Drones or Unmanned Aircraft Systems (UAS) [EB/OL]. [2025-04-22]. https：//www. networkrail. co. uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/our-fleet-machines-and-vehicles/air-operations/drones-or-unmanned-aircraft-systems-uas/.

[25] BNSF Railway. Eyes in the Sky，Feet on the Ground：BNSF Employee Pilots Unmanned Aerial Systems[EB/OL]. (2021-10-21) [2025-04-22]. https：//www. bnsf. com/news-media/railtalk/innovation/nickdryer. html.

[26] The Times of India. RTI Report about Train Accidents Across India[EB/OL]. (2022-06-26)[2025-09-23]. https：//timesofindia. indiatimes. com/city/agra/57-major-train-accidents-across-india-due-to-negligence-of-rail-staff-rti/articleshow/92465403. cms.

[27] The Economic Times. Indian Railways Procures Ninja Drones for Security Surveillance and Passenger Safety[EB/OL]. (2020-08-22) [2025-09-23]. https：//economictimes. indiatimes. com/industry/transportation/railways/indian-railways-introduces-drone-based-surveillance-system-for-rail-security/articleshow/77621214. cms from=mdr.

[28] 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.

[29] 史　龙，孙　亮，叶　轲，等. 低空铁路巡检场景技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(5)：1-8.
SHI Long，SUN Liang，YE Ke，et al. Technical Research on Low-Altitude Railway Inspection Scenario[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(5)：1-8.

[30] 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.

[31] 梁　烨. 铁路工务路桥无人机自动化巡检应用[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(4)：11-18.
LIANG Ye. Application of UAV Automatic Inspection for Railway Lines and Bridges by Railway Permanent Way Department[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(4)：11-18.

[32] 戴　融，武　昊. 地铁巡检场景的无人机安全风险评估机制研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(6)：9-16.
DAI Rong，WU Hao. Research on Safety Risk Assessment Mechanism of UAV in Subway Inspection Scenarios[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(6)：9-16.

[33] 安志航，杨轶轩，曹鹤飞，等. 基于定向发射的铁路沿线无人机反制技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(3)：15-20.
AN Zhihang，YANG Yixuan，CAO Hefei，et al. Research on Drone Countermeasure Technology along Railway Lines Based on Directional Transmission[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2025，22(3)：15-20.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 郑亚晶. 铁路路网能力可靠性、能力适应性及抗毁性研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.

[37] 李　萌. 高速铁路信号系统车载设备电磁兼容风险研究[D]. 北京：北京交通大学，2021.

[38] 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.

(责任编辑　吴文娟)