• 专题一：双清论坛“低空经济信息系统与安全管理理论及关键技术” •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0038

面向低空产业链的试飞能力建设和空域治理思考*

潘卫军[1**] 王洪棣[2] 张溢博[3]

1. 中国民用航空飞行学院 民航飞行技术与飞行安全科研基地，广汉 618307
2. 西南交通大学 交通运输与物流学院，成都 610031
3. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院，广汉 618307

[**摘 要**] 低空经济作为国家战略性新兴产业，涵盖低空制造、飞行活动与运行保障等环节，链条长、辐射广、新业旺。当前我国通用航空飞行小时少，新机型研制周期长，电动垂直起降(electric Vertical Take-off and Landing，eVTOL)飞行器等新型航空器适航取证难，导致上游研发与中游试飞衔接不畅，限制了下游的运营发展；同时，飞行器数量激增与管控资源有限的矛盾突出，导致行业运行安全压力日益加重。本文开展了通过强化试飞能力建设与完善空域治理体系打通产业链堵点的思考，提出强化试飞装备与基地建设，促进设计、制造、试飞协同，缩短适航取证周期。构建高中低空一体化空域治理与分级管控机制，对大型高速航空器实施精确管控，对小型低速航空器实行备案制与责任后置管理，以平衡空域安全与运行效率。

[**关键词**] 低空经济；试飞能力；空域治理；产业链

低空经济是以低空空域(1 000米以下)开放与管理优化为基础，融合通用航空、低空飞行器制造、低空服务等多领域的综合性产业体系[1]。在全球科技革命和产业变革加速演进背景下，低空经济成为衡量国家科技实力、产业竞争力和区域经济活力的重要标志。其中通用航空指除公共航空运输外，利用民用航空器所进行的各类飞行活动，涵盖工农业作业飞行、航空体育活动、应急救援飞行、空中旅游飞行等[2]。作为一个跨行业、多主体参与的系统性经济形态，低空经济的发展依托从制造、保障到运营与服务的完整产业链协同，其总体结构如图1所示。

图1展示了低空经济产业链的总体构成及其协同路径。产业链主要包括四大板块：低空制造业、低空保障业、低空飞行业和低空综合服务业。其中，低空制造业以飞行器设计研发、关键材料与部件生产为核心，为运营与飞行环节提供硬件基础；低空保障业由飞行试验与适航支撑体系、低空空域治理与空管体系、低空飞行服务保障体系构成。飞行试验与适航支撑体系面向航空器研发验证与适航取证，承担性能测试与安全评估功能；低空空域治理与空管体系提供空域划设、动态调配及分类管控，实现精细化治理；低空飞行服务保障体系则以通信、导航、监视、气象及空管协同为核心要素，构建全时、全域、全要素的飞行运行保障体系。低空飞行业则是产业链的直接应用场景，包括以人为主的低空运输飞行，以载货为主的低空物流飞行，以及航空拍摄、灯光表演、农林植保、灾难救援、电力巡检等低空作业飞行；低空综合服务业涵盖航空培训、航空租赁、航空金融、航空保险、航空会展、航空文化旅游等相关服务产业，构成运行过程中的支撑保障体系。在此框架下，空域治理与试飞适航发挥关键纽带作用：一方面，空域治理提供统一的规则体系，实现“静态划设+动态调配”，保障产业链环节之间的有序衔接；另一方面，试飞适航为

收稿日期：2025-08-19；修回日期：2025-11-27
* 本文根据国家自然科学基金委员会第407期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者，Email：wjpan@cafuc.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目(U2333207，U2333209)、中央高校基本科研业务费专项资金(24CAFUC01002)的资助。

引用格式： 潘卫军，王洪棣，张溢博. 面向低空产业链的试飞能力建设和空域治理思考. 中国科学基金，2026，40(1)：85–94.
Pan WJ，Wang YD，Zhang YB. Thoughts on the construction of test flight capabilities and airspace governance for the low-altitude industrial chain. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2026，40(1)：85–94.(in Chinese)

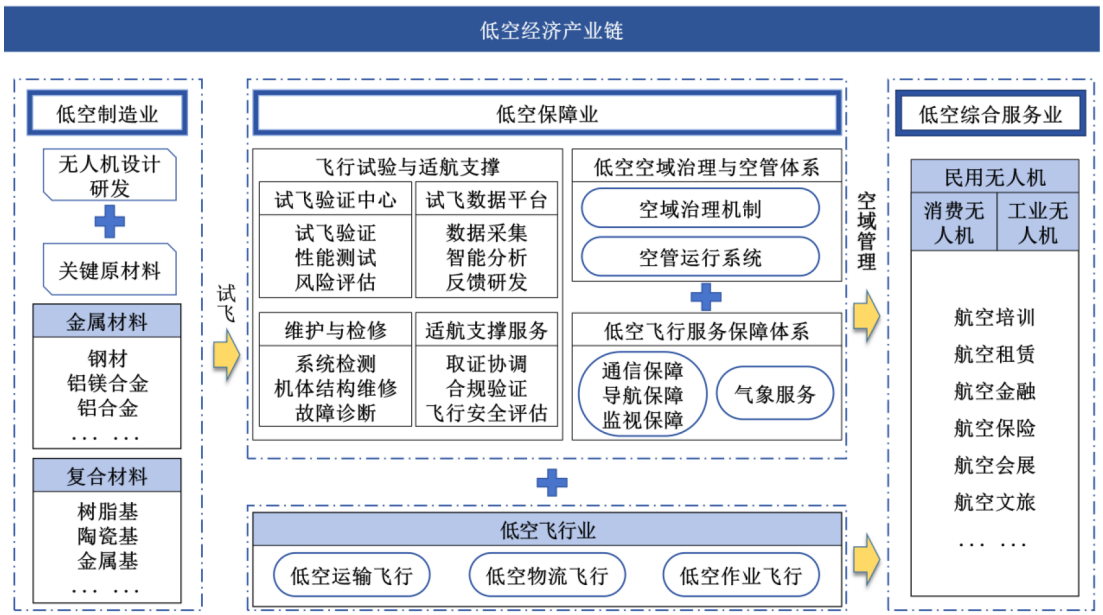


图1 低空经济产业链协同框架

Fig.1 Collaborative Framework of the Low-altitude Economy Industrial Chain

新机型与新应用提供性能验证和安全认证,推动标准体系的形成和跨环节数据的互认。二者共同作用,促使低空制造、运营、飞行与服务四个环节实现深度融合,构建起研发—验证—运行—服务的闭环协同体系。

尽管现有研究为低空经济的发展提供了有益的政策解读与国际经验借鉴,但总体仍停留在应用与描述层面,对支撑该领域走向成熟与规范化的深层科学问题挖掘不足。复杂系统治理强调以系统思维统筹航空器、空域、技术与政策,保障低空经济的高效与可持续运行。低空经济的理论价值在于揭示其背后复杂系统的运行规律与相互作用机制,本文探讨其中匹配低空产业链发展的空域治理问题和试飞能力建设高效协同的问题。

随着空域使用主体爆发式增长,空域资源稀缺矛盾急速加剧,传统分区管控模式已难以支撑高频次、动态化的运行需求。如何在复杂系统框架下实现政府、军方、企业与公众间的多方协调,构建兼具“高中低空一体化”静态分层与“动态灵活调配”能力的治理机制,成为关键科学问题。通过融合北斗导航、大数据与人工智能技术,可实现空域资源的动态感知、预测与智能调度,形成以数据驱动、规则约束和协同决策为特征的精细化管理体系,为低空运行安全与效率提升提供科学支撑。其次,试飞能力建设的技术与制度协同问题是连接研发与应用的关键环节。试飞不仅是验证飞行器性能与安全的技术过程,更是技术标准、适航规则与监管体系的交汇点。当前我国在试飞环节仍存在验证体系分散、管理机制碎片化等问题,制约了新型飞行器的适航取证与商业化进程。如何将人工智能、大数据等技术手段融入试飞全过程,实现性能评估与风险量化;如何在制度设计中引入绩效导向与第三方服务机制,构建高效、透明的监管体系,是当前亟需破解的关键问题。其本质在于探索技术系统与制度体系的协同演化路径,以形成科学、灵活、可持续的现代化试飞能力体系,为低空经济的安全运行与快速迭代提供基础支撑。综上,匹配低空产业链发展的空域治理和试飞能力建设高效协同构成低空经济复杂系统研究的核心问题,问题的解决有助于为我国构建安全、高效、可持续的低空运行体系。

1 国际低空政策与产业链协同探索

欧美国家凭借前瞻性的战略布局、持续的技术研发投入及灵活的监管体系迭代,在先进空中交通(Advanced Air Mobiity,AAM)领域长期保持全球领先地位,围绕低空资源高效配置、新型航空器适航认证突破及商业化运营壁垒破除所开展的系统性探索,为全球低空经济规范化、可持续发展提供了关键参考范式。其中,美国侧重以监管机制革新破解市场准入难题,推动超视距飞行等高频次应用落地;欧洲则聚焦数字化空域服务生态构建,实现多类型飞行活动的协同管控。二者虽在实施路径上各有侧重,但均以打通AAM规模化发展的核心堵点为目标,形成了兼具创新性与可操作性的治理框架。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,U. S.,NASA)提出AAM概念,将城市空中

交通（Urban：Air · Mobility，UAM）、区域空中交通（Regional Air · Mobility，RAM）与超低空无人机运行（Unmanned：Aircraft System · Traffc · Management，UTM）纳入一体化管理框架，强调产业链协同联动[3,4]。2025年8月，美国联邦航空局（Federal Aviation Administration，FAA）发布了旨在降低超视距飞行（Beyond Visual Line of Sight，BVLOS）运行门槛、推动规模化商业运营的历史性提案[5,6]。该提案在400英尺以下空域内显著放宽了600千克以下无人机的超视距飞行条件，并首次系统构建了支撑商业运营的管理框架[7-9]。核心创新包括：创设第146部分规则体系，确立自动化数据服务提供商的认证标准与责任边界，支撑空域冲突探测与合规监控等关键服务；推行基于风险的绩效标准（Performance-Based Requirement，PBR），以数字化手段替代烦琐审批，实现监管标准化与透明化；建立飞行全生命周期安全监督机制，要求运营商实施完整的安全管理体系与运行记录；简化低风险、高频次BVLOS任务审批，允许固定区域年度备案运行，显著降低行政成本；鼓励第三方专业服务机构参与空域信息、飞行计划与安全监控服务，形成政府与市场共治的监管格局。实践表明，该新规在激发市场活力、促进技术创新、提升监管效率与保障飞行安全方面成效显著，BVLOS申请量增长约40%，无人机物流、测绘、应急救援等应用快速扩张；监管资源配置更加精准，违规率显著下降。FAA通过“技术松绑、流程再造、责任强化”实现了低空经济领域的“放管服”平衡，形成以数据驱动和绩效导向为特征的新型监管体系。

欧洲的“U-Space”计划则以数字化空域服务为核心，通过标准化接口实现飞行计划审批、动态信息发布与实时监控自动化的统一运行框架[10]。欧洲航空安全局（European Union Aviation Safety Agency，EASA）进一步针对eVTOL飞行器等新型航空器，制定了渐进式适航认证规范[11-13]，根据技术成熟度动态调整标准，为制造业提供可预期的取证路径。这一模式与美国AAM体系相互呼应，共同体现了以数字化监管和产业协同为核心特征的低空治理理念。

2　我国低空经济发展现状及核心问题

2021年《国家综合立体交通网规划纲要》首次在国家层面提出“大力发展低空经济”[14]，2023年12月的中央经济工作会议将其纳入国家战略性新兴产业[15]。2025年7月，中国民用航空局（以下简称“民航局”）整合成立通用航空和低空经济工作领导小组，聚焦发展规划、适航审定、安全监管等核心任务，标志着我国低空经济进入系统化、规范化推进阶段[16]。

我国已构建以《中华人民共和国民用航空法》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》为基础、民航局专项政策为补充的法规体系。2025年二季度全国共发布相关政策110条[17,18]，覆盖空域治理、基础设施、产业培育、安全监管等领域。湖南、江西、安徽等地低空空域开放试点持续推进，财政补贴、税收优惠等政策有效激发了市场活力。技术创新加速突破，大疆、亿航智能、峰飞航空等企业在eVTOL飞行器研发与适航取证方面取得标志性成果[19]。与此同时，低空通信、导航、监视体系日趋完善，人工智能与大数据在低空交通管理中的应用显著提升了系统智能化水平。政策与技术双轮驱动下，2025年上半年低空经济一级市场融资额突破17亿元[20]，投资涵盖研发、运营及基础设施建设，合肥、上海、深圳等地率先启动eVTOL飞行器商业化试点，美团、顺丰等企业积极探索无人机物流，推动应用场景加速落地。低空经济产业链已覆盖研发制造、飞行运营、保障服务等环节，显著带动区域经济转型。民航局预测2025年市场规模将突破1.5万亿元，2035年有望达3.5万亿元，每增加1亿元产值可带动约200个就业岗位[21]。但我国仍面临“双重瓶颈”：通航机型研制周期长、eVTOL飞行器适航标准缺失，导致研发与应用脱节；飞行器数量激增，保有量已超50万架，传统空域管控模式难以适应新业态[22,23]。

在此背景下，强化试飞能力建设与推进空域精细化治理，成为打通产业链堵点、提升运行效率的关键路径。理论上，空域治理对稀缺低空资源进行分类管控与一体化管理，实现安全与效率平衡，可拓展空域治理与产业协同理论在低空经济领域的应用；实践上，空域治理则为政策制定和安全高效运行提供重要支撑。产业链协同是指产业链各环节通过资源整合、流程优化、信息共享等实现高效衔接，提高产业整体竞争力[24]。然而与欧美相比，在产业呈现爆发式增长的同时，我国低空经济的理论基础与系统化治理能力仍相对滞后，我国过去研究更多聚焦政策法规解读与技术应用探索，尚缺乏对核心科学问题的系统性研究。近年来我国在政策引导、技术创新与市场拓展等多个维度均取得了显著进展，快速发展中也暴露出若干结构性矛盾与瓶颈问题，主要集中在试飞能力不足制约产业链中游转化、空域治理粗放难以适应高频次飞行需求两个方面。

2.1　试飞能力不足制约产业链中游转化

通用航空器因其结构复杂性导致研制周期显著延长，根据《中国通用航空发展报告》，传统通用航空器从研发到量产普遍需8年以上[25]。eVTOL飞行器具备电动驱动、垂直起降及环保高效等技术特性，主要应用于城市

交通、应急救援和物流配送[26]。eVTOL飞行器等新业态航空器虽然具备较强市场潜力，但因适航标准缺失、试飞能力不足等因素，企业在产品研发和适航取证过程中缺乏明确、统一的指引，加上试飞基础条件不足，仍有大量型号在适航审定中面临周期延长的困境，从而造成上游研发投入与中游应用转化脱节，导致适航取证进度明显滞后。例如，亿航智能EH216-S从研制到获得民航局颁发的标准适航证，耗时3年以上[27]；峰飞航空V2000CG亦在类似周期内取得全球首个吨位级eVTOL飞行器型号合格证[28]。适航审定的完整流程通常如图2所示。

2.2 空域治理粗放难以适应高频次飞行需求

我国低空经济规模已从2023年的5 059.5亿元增长至2024年的6 702.5亿元，预计2025年将突破8 500亿元，2026年有望实现万亿级跨越[29]。表1从航空器数量、飞行架次、日均飞行小时三个维度，对比了2023年三类航空器的情况。表中整体呈现出无人驾驶航空器在数量、飞行架次方面的优势，不同类型航空器在各运营维度表现出差异化的特点[30]。随着低空飞行器数量快速增长，而空域管控资源有限，现有管控体系仍高度依赖传统的审批模式，未能有效区分大型高空高速飞行器与小型低空低速航空器，导致“混合管理”效率低下、针对性不足[1]。2024年全国发生多起无人机违规飞行事件，充分暴露出管控资源配置与快速增长的飞行需求之间的结构性失衡。部分地区低空空域开放程度不足，限制了产业发展的规模。同时，空域管理技术手段相对落后，监控能力存在短板，难以实现对低空飞行器的全程精准监管，安全风险隐患日益增大，制约了低空经济的规模化运营，低空空域治理滞后于产业实践需求。鉴于低空飞行器型号繁多、应用场景差异巨大，制定统一且精细化的技术、安全和服务标准面临困难，亟待跳出传统航空标准框架，探索更具包容性和适应性的监管新思路。

低空经济产业链由上游的研发制造、中游的试飞适航以及下游的运营服务三大环节构成。目前，我国低空经济产业链仍存在上下游衔接不畅的问题。其中，试飞作为连接研发制造与商业运营的关键枢纽，其能力不足已成为制约产业链协同发展的核心问题。

在上游，研发制造环节缺乏与中游试飞和适航取证的高效互动机制，导致试飞数据未能充分反馈用于设计优化，适航审定过程存在反馈滞后，延长了产品从设计到市场的周期。在下游，运营服务主体缺乏提前介入试飞和审定过程的渠道，难以及时根据试飞结果优化运行模式与服务方案，影响了商业化应用的效率和安全性。因此，强化试飞能力建设，构建覆盖设计、制造、试飞、运营全链条的协同机制，是打通产业链堵点、提升整体效率的关键路径。此外，专业人才短缺问题也日益凸显。低空经济作为典型的技术和知识密集型产业，对航空器研发设计、试飞验证、运营服务等各环节的专业人才需求旺盛且多元。然而，当前该领域兼具技术创新能力与产业实践经验的复合型人才供给明显不足，已成为制约产业创新能力提升与可持续发展的关键瓶颈。通过系统提升试飞能力，推动产业链各环节围绕试飞形成高效协同，不仅有助于缩短适航取证周期、加速科技成果转化，也能为低空经济的安全、规范与规模化发展提供坚实支撑。

3 试飞能力支撑产业链协同的关键路径

3.1 试飞能力对产业链协同的作用机制

试飞作为航空器由研发设计迈向商业运营的关键环节，其效能直接决定适航取证效率与产业链衔接速度，对疏通中游堵点具有决定性作用。试飞的核心功能体现在三个方面：首先，试飞是航空器性能验证与设计优化的重要手段。通过系统化测试，可全面评估动力、导航、控制、气动布局等关键性能指标，及时暴露设计缺陷与潜在安全隐患，为上游研发提供科学依据。例

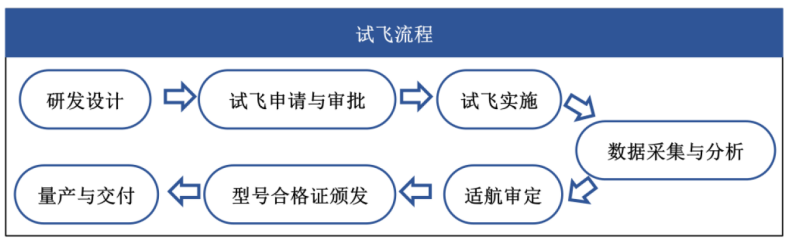


图2 试飞流程图
Fig.2 Test Flight Flowchart

表1 2023年不同航空器对比表
Table 1 Comparison of Different Aircraft in 2023

	2023年航空器数量	2023年飞行架次	2023年日均飞行小时
无人驾驶航空器	282万	25 700万	6.33万
有人驾驶航空器(通用)	3 303	238万	3 756
有人驾驶航空器(运输)	4 270	492万	3.34万

如，eVTOL飞行器在悬停、续航与应急处置等试飞中，常出现电池续航不足、控制稳定性偏低等关键问题，经针对性改进后产品安全性与可靠性显著提升。其次，试飞数据是适航审定流程的核心支撑，直接影响取证周期长短。审定机构需依托翔实、规范的试飞数据评估安全与性能标准，唯有通过验证的机型方可投入商业运营。美国Joby Aviation通过建设专业化试飞基地并积累高质量数据，将eVTOL飞行器适航取证周期缩短至3年，并于2025年实现全球首个在公共机场间的载人飞行[31]，为商业化应用奠定了基础。现代化试飞体系是推动产业协同的重要平台。最后，高水平试飞基地能够集聚研发机构、制造企业、适航机构和运营商，实现资源共享与信息互通：研发方可依托基地验证设计，制造方依据反馈优化工艺，审定方实时掌握性能数据，运营方提前熟悉设备特性，从而形成协同高效、互利共赢的产业生态。

此外，系统性的试飞能力建设是防控低空经济发展风险的重要保障。覆盖极限工况的充分试飞可在商业化前识别安全隐患，显著降低事故率与社会风险。长期积累的试飞数据还可支撑行业标准与安全规范的制定，为低空飞行的规范化与可持续发展提供实证基础。由此可见，强化试飞能力建设，实现性能验证、取证支撑与产业协同的多维联动，是打通低空经济中游环节、加速成果转化与提升系统韧性的核心路径。

3.2　强化试飞能力建设的具体措施

为切实解决试飞环节薄弱、取证周期冗长等核心瓶颈问题，需系统性地推出一系列强化试飞能力建设的务实举措。以下措施旨在从基础设施、服务生态、标准规范、人才支撑与技术创新等关键维度协同发力，构建高效、规范、可持续的试飞支撑体系。

为强化试飞基础能力，需构建覆盖广泛、功能互补的多级试飞基地网络。应建设一批覆盖高原、沿海、沙漠、丛林等复杂环境与极端气候的国家级综合试飞基地，配备先进测试与监控设备，满足eVTOL飞行器、无人机等多元化低空航空器的全方位试飞需求。同时结合区域特色，布局聚焦城市低空运行、物流航线等场景的专项试飞基地，并鼓励企业自建试飞场地用于研发验证。为提升网络效能，应建立全国性试飞数据共享平台与标准机制，推动数据互联互通，助力企业数据获取、审定效率提升及科研深化。应同步培育专业化第三方试飞服务生态，鼓励机构提供试飞方案设计、组织实施与数据分析等全链条服务，满足市场多元需求，政府需加强监管以保障服务水准与数据可靠性。同时，加快建立统一试飞标准体系，出台低空航空器试飞技术相关规范，明确关键性能测试方法与判定标准，推动试飞过程标准化与结果可比。此外，应加强试飞人才队伍建设，支持高校开设相关专业并深化产学研合作，系统开展在职人员理论与实操培训，提升试飞员综合能力。推动试飞关键技术与装备创新，加大高精度传感器、实时数据分析系统等研发投入，促进人工智能、大数据、物联网等技术在试飞中的应用，提升测试智能化水平与整体效能。

通过多级基地网络布局、专业服务生态培育、统一标准规范引领、高素质人才培养以及前沿技术创新驱动，不仅能有效疏通当前产业链中游的试飞瓶颈、显著缩短适航取证周期，更能为低空飞行器的安全可靠运行和整个产业的持续创新升级提供坚实保障。

4　空域精细化治理构建分类管控机制

4.1　高中低空一体化空域治理体系框架

在着力强化试飞能力建设以疏通产业链中游堵点的同时，有效化解日益加剧的空域治理矛盾、释放低空空域资源潜力，是支撑我国低空经济规模化、高质量发展的另一核心支柱。针对所揭示的低空飞行器激增与传统管控模式不适配、安全风险上升等关键挑战，需构建一套适应低空经济特点、兼顾效率与安全的精细化空域分类管控体系。其核心在于推行“静态划设为基础、动态调配为关键”的高中低空一体化管理模式，以实现空域资源的优化配置与高效利用。

空域的科学分层划设是精细化管理的基石。应依据飞行器运行高度、速度、任务性质及风险特征，将空域明确划分为三个层级，如图3所示：高空管制区（6 000米以上），主要服务于公共航空运输等大型高速航空器，实行严格统一的空中交通管制，确保飞行间隔与绝对安全；中低空融合区（1 000~6 000米），作为通用航空、商业航空及部分高性能无人机等多种飞行活动的混合运行空域，需实施分类管控并辅以动态流量调配机制，平衡不同用户需求；低空开放区（1 000米以下），则主要面向无人机物流配送、城市空中交通、低空旅游观光等低空经济核心业态，实行相对宽松的准入政策，鼓励市场主体广泛参与，激发市场活力[32]。类似地，低空细分方案如Amazon将500英尺以下空域划为低速、快速运输及禁飞三层，为垂直交通分离提供参考[33]。

低空智联网可以作为统一的低空飞行管理信息平台，全面整合来自导航定位、实时气象、空域通信、分布式算力节点等的多源异构数据资源，实现常态化的空域使用效能监测，定期评估各层级空域的关键运行指标。基于多维数据的科学分析结果，应建立快速响应机制，

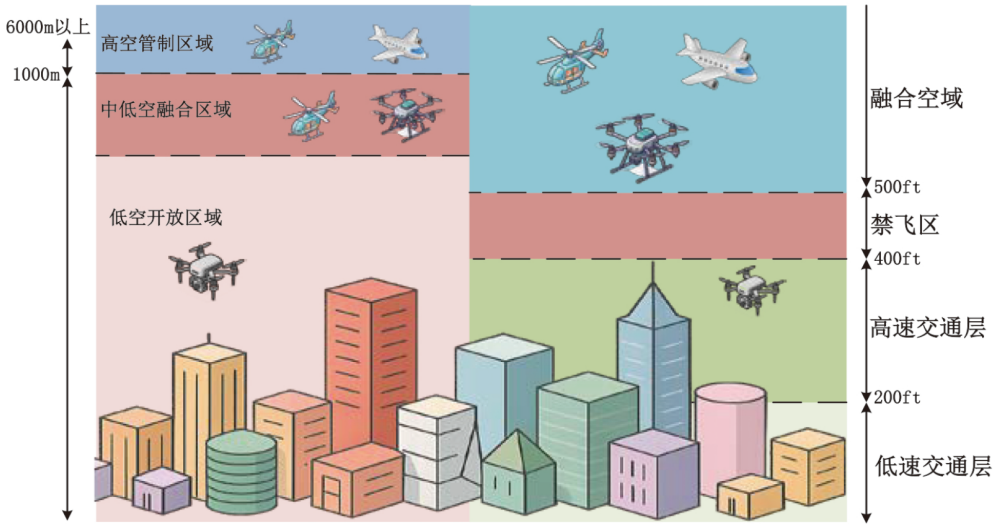


图3 空域分层示意图与亚马逊空域分层对比图

Fig.3 Schematic Diagram of Airspace Stratification and Comparison Diagram of Amazon Airspace Stratification

及时、灵活地调整空域划设边界、容量分配及使用规则。低空智联网的建设可以为静态划设提供依据，为动态调配提供决策支持，为各类用户提供便捷服务，最终实现空域资源的智能化、精细化、高效化管理。

“静态划设+动态调配”的双层框架，结合低空智联网的深度支撑，共同构成了适应低空经济发展需求的精细化空域分类管控体系的核心骨架。然而，要将这一框架有效落地，还需在监管模式创新、运行规则细化以及关键技术能力建设等方面配套跟进。

4.2 构建“管理—空域—技术”三位一体的分类精准管控机制

在确立了“静态划设+动态调配”的空域分类管控核心框架后，对低空经济中数量庞大、类型多样、运行场景复杂的小型、低空、低速航空器实施有效监管，成为确保该框架顺畅运行的关键。针对传统审批模式难以适应低空高频次、灵活化飞行需求的问题，亟需推行监管模式创新与特色技术应用的双轮驱动。其核心思路在于，对小型低空低速航空器实施以“备案制为主、责任后置强化”的差异化监管策略，并针对不同空域场景实施分类精准管控。

4.2.1 推行“备案制+责任后置”的监管新模式特色监管体系

在空域物理结构之上，针对小型、低空、低速航空器，构建“备案便捷化、责任明晰化、监管智能化”的特色管理体系是提升监管效能的关键。如图4所示，飞行前，运营单位或个人可通过统一的低空飞行管理信息平台，在线提交航空器基础信息、计划飞行范围、时间段及操作人员资质证明等必要数据，完成简易备案程序即可获准飞行，大幅简化甚至免除复杂的预先审批流程。同时，必须明确并强化违规飞行的法律责任追究机制，对未按规定备案、擅自超出备案范围飞行、侵入禁限飞区、干扰其他航空器正常运行或影响航空安全等行为，依法依规实施严格处罚。这种“责任后置”模式的核心在于强化运营主体的安全责任意识，促使其自觉遵守规则、主动规避风险。为增强约束力，应配套建立低空飞行领域失信联合惩戒机制，将严重违规的单位和个人纳入失信名单，在航空器购买注册、飞行计划审批(备案)、参与低空经济运营活动等方面实施必要限制。必须强制或广泛推广航空器自动广播式身份识别与实时位置信息技术，并结合电子围栏(Geofencing)等数字化边界管控技术，实现对航空器身份、位置、运行轨迹的精准溯源和对预设飞行范围的有效约束，为事中监管和事后追责提供坚实的技术证据链。

构建“主动探测、精准识别、快速处置”的一体化防控能力应对非合作无人机风险。在关键基础设施和敏感区域周边部署多种探测手段，形成立体化监测网络；通过数据融合技术，主动发现和跟踪非合作目标。建立分级响应机制，根据无人机的行为特征、所在空域敏感性及潜在意图，将其划分为低威胁、中等威胁和高威胁三类。低威胁以“监视与通报”为主，中等威胁采取非破坏性干预，高威胁依法处置以迅速消除威胁并追查。将非合作目标处置机制与合作目标监管体系联动，统一纳入低空飞行管理信息平台。

4.2.2 场景化分类管控下的空域资源的精准配置

依据空域环境特征和风险等级实施场景化分类管控是精细化管理的必然要求。为实现此目标，在借鉴并

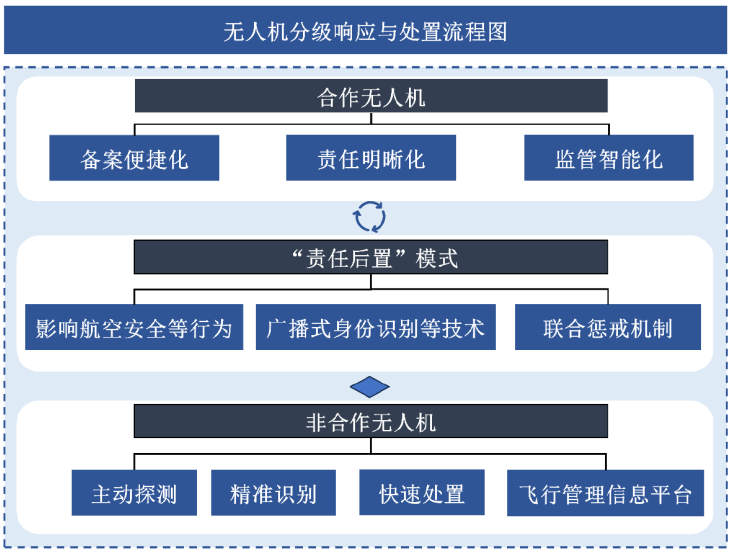


图4　无人机分级响应与处置流程图

Fig.4　Flowchart of the Hierarchical Response and Disposal of Unmanned Aerial Vehicles

发展国际通行的空域分类理念基础上,我国国家空域基础分类方法提出了针对性的空域划分方案,如图5所示,将低空空域精细划分为G类与W类等类型,并据此施行差异化管控策略。G/W类空域精细管理的核心在于明确规则界定,将空域属性与运行风险精准匹配,从而实现该严则严、该松则松的治理效能[34]。

G类与W类均属于非管制空域范畴,二者均不依赖传统空中交通管制服务。其中,G类作为一般非管制空域,划设范围既包含民用运输机场、通用航空机场上空以外真高300米以下的核心区域,也涵盖平均海平面高度6 000米以下、不影响民航公共运输飞行与军事飞行的延伸空域;管理上仅提供飞行信息服务,但需对空域实现监视覆盖,允许仪表飞行或目视飞行,驾驶员具备相应资质。W类作为G类空域的子层级,聚焦G类空域内真高120米以下的低空域,是低空经济的核心活动层;管理上无专门空中交通管制服务,依托技术手段实现自主管控与协同避让,且仅限微型、轻型、小型无人驾驶航空器飞行,飞行过程中须广播式自动发送识别信息,其中小型无人机操控员需取得相应执照;主要承载消费级无人机娱乐(如航拍)、行业级无人机作业(如物流配送、低空巡检)等场景。二者形成的层级体系保障了低空空域的整体开放效率,通过技术应用与资质要求确立低空运行的安全底线[34]。

4.2.3　基于北斗网格码的空域精细化管理技术实现

空域栅格化管理模式是实现精细化监管的关键路径之一,其核心在于将空域资源分解为统一、细化的空

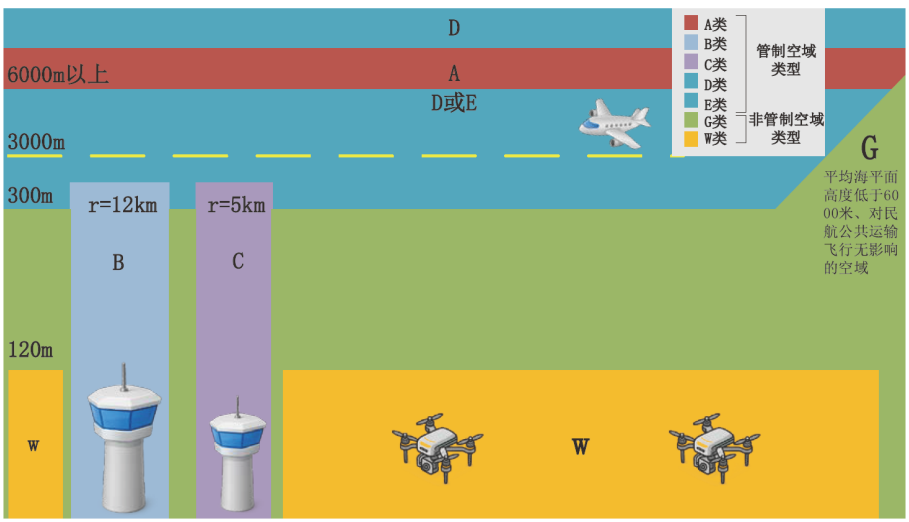


图5　国家空域分类基础示意简图

Fig.5　Basic Schematic Diagram of National Airspace Classification

间单元,实现空域管理精度与使用效率的双提升。如图6所示,基于北斗三维网格位置码的空域栅格化与分层建模可按经纬度进行水平划分、按高度进行垂直分层:宏观层级覆盖广域空域,中观层级适配城市运行,微观层级实现高精度建模。多层栅格嵌套构建出可扩展的空域分层体系。该模式可将建筑、树木、电线等障碍物映射为三维栅格单元,实现低空环境的数字化表达,支持空域信息共享、流量调控与冲突预防。从理论上看,分层栅格思想可依据运行环境差异动态调整尺度,高空区域采用粗粒度栅格提升计算效率,近地低空采用细粒度栅格强化环境刻画与安全约束。在应用层面,结合北斗网格码机制可为每个栅格赋予唯一空间标识,实现空域资源的标准化编码与数字化管理。栅格化+网格码融合路径,不仅显著提升低空环境建模的精细化与标准化水平,也为空域治理、动态调配和精确导航提供统一的空间基准与信息支撑,为低空经济的安全高效运行奠定基础。

航空器空域栅格化管理的核心在于通过精细化技术手段提升空域资源利用率,在保障安全的同时支撑多航空器协同运行。北斗网格标准依托中国北斗卫星导航系统,为空域治理提供高精度、高可靠的定位与导航支撑[35]。该标准将地球空间细分为多层级、递归的三维立体网格,并以二进制编码实现高效识别与管理,具备米级乃至厘米级定位精度。随着层级细化,空域单元更加精确,无人机可依据所在网格动态规划航迹与高度,从而有效规避冲突、提升低空运行安全与效率[36]。该标准还具有良好的兼容与扩展能力,可与GeoSOT体系无缝衔接,并与主流地图图幅保持一致,显著提升其在低空空域治理中的适配性与拓展潜力。

5 结论与展望

综上所述,本研究论证了试飞能力强化与空域治理创新在推动我国低空经济高质量发展中的核心作用。加强试飞能力建设与建立精细化空域分类管控机制,是破解发展瓶颈的两条关键路径。

加强试飞能力建设,是推动低空经济产业链由上游研发向中游应用高效转化的关键途径。通过建设多层级试飞基地网络,完善审批与监管流程,建立覆盖设计、制造、运行与安全的标准体系,培养试飞与适航审定专业人才,并加大技术创新投入,可显著提升试飞效能、缩短低空航空器取证周期、加速成果产业化转化。

构建“高中低空一体化”空域治理体系,推行基于风险等级的分类管控机制,是实现低空产业安全与效率协同发展的重要举措。应科学划分空域类型,建立动态评估与调整机制,依托低空智联网构建统一数字化管理平台,形成政府主导、军民协同、企业参与、第三方服务的多元共治格局。对高空高速飞行器实施严格监控与全生命周期管理,对低空低速航空器实行“备案制+责任后置”的差异化监管。

推动低空经济由试点示范迈向规模化、高效协同,需从法规标准、技术创新、产业培育与人才体系四方面协同发力。应完善法律框架,统一适航与运行标准,完善政策制度、核心技术突破与空域治理改革的系统推进。加快通信导航、智能空域治理、能源动力等关键技术突破;推动人工智能、大数据、物联网深度融合,提升运行智能化水平;完善产学研用机制与人才培养体系,

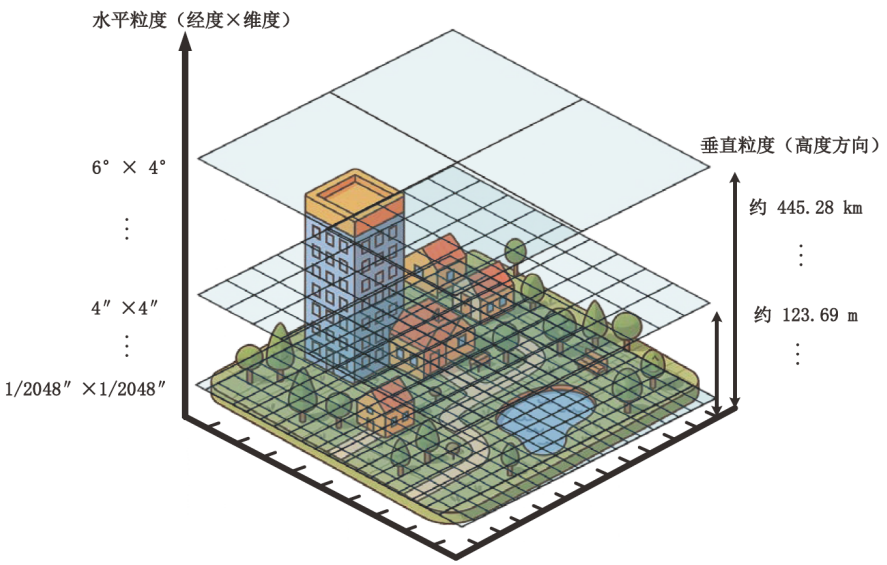


图6 低空空域栅格化与分层建模示意图

Fig.6 Schematic Diagram of Rasterization and Hierarchical Modeling of Low-altitude Airspace

培育具有国际竞争力的创新企业与产业集群。

参 考 文 献

[1] 国家发展和改革委员会. 我国低空经济发展面临的问题与政策建议.（2024-12-30）/[2025-08-18]. https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202412/t20241230_1395328.html.

[2] 王若源. 论中国通用航空行业管理法律体系的构建. 北京航空航天大学学报(社会科学版),2018,31(5):63—68.
Wang RY. On the construction of the legal system for the management of China's general aviation industry. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition),2018,31(5):63—68. (in Chinese)

[3] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Advanced air mobility mission. (2025-04-10)/[2025-08-18]. https://www.nasa.gov/mission/aam/.

[4] Federal Aviation Administration. Urban air mobility concept of operations version 2.0. (2023-04-26)/[2025-08-18]. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0.pdf.

[5] U.S. Department of Transportation,Office of Inspector General. FAA has made progress in advancing BVLOS drone operations but can do more to achieve program goals and improve data analysis. (2025-06-30)/[2025-08-18]. https://www.oig.dot.gov/sites/default/files/library-items/FAA%20BVLOS%20Drone%20Operations%20Final%20Report_6.30.2025.pdf.

[6] AUVSI. Unlocking Routine BVLOS Operations:AUVSI's initial analysis of the FAA's NPRM. (2025-08-13)/[2025-08-18]. https://www.auvsi.org/unlocking-routine-bvlos-operations-auvsis-initial-analysis-of-the-faas-nprm/.

[7] Federal Aviation Administration. Section 4:Airspace access for UAS. (2020)/[2025-08-18]. https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap11_section_4.html.

[8] Federal Aviation Administration. Small Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations (Part 107). [2025-08-18]. https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107.

[9] Federal Aviation Administration. Notice of proposed rulemaking—Part 108:Normalizing UAS beyond visual line of sight operations. (2025-08-07)/[2025-08-18]. https://www.faa.gov/newsroom/BVLOS_NPRM_-website_version.pdf.

[10] Ariante G,Del Core G. Unmanned aircraft systems (UASs):Current state,emerging technologies,and future trends. Drones,2025,9(1):59.

[11] European Union Aviation Safety Agency (EASA). Easy access rules for small category VCA. (2024-11-04)/[2025-08-18]. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-small-category-vca.

[12] European Union Aviation Safety Agency (EASA). Special condition for VTOL and means of compliance (MOC-4 and MOC-5 SC-VTOL). (2025-07-18)/[2025-08-18]. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol.

[13] European Commission. European Commission adopts regulatory package,giving go-ahead for VTOL operations and air taxis. (2024-04-10)/[2025-08-18]. https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/european-commission-adopts-regulatory-package-giving-go-ahead-vtol.

[14] 国务院. 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》.（2021-02-24）/[2025-08-18]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.

[15] 人民网. 低空经济:加快发展新质生产力的重要方向.（2025-01-17）/[2025-10-07]. http://theory.people.com.cn/n1/2025/0117/c40531-40403683.html.

[16] 中国民用航空局. 民航局成立通用航空和低空经济工作领导小组.（2025-07-04）/[2025-08-18]. http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202507/t20250704_227863.html.

[17] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国民用航空法.（2021-04-29）/[2025-08-18]. https://flk.npc.gov.cn/detail2.html ZmY4MDgxODE3YWIyMmI4YTAxN2FiZDgzYmZlMzA2MDI.

[18] 国务院,中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例.（2023-06-28）/[2025-08-18]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6888800.html.

[19] 亿航智能控股有限公司. 亿航智能EH216-S无人驾驶载人航空器系统获得中国民航局颁发的标准适航证,并交付给广州客户.（2023-12-21）/[2025-08-18]. https://www.ehang.com/news/1022.html.

[20] 来觅数据(RimePEVC). 低空经济2025年上半年投融市场报告.（2025-08-06）/[2025-08-18]. https://rimedata.com/login redirectUrl=Lw==.

[21] 王姣娥,杜德林,陈卓,等. 中国低空经济发展报告(2025). 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2025.

[22] 人民网. 低空经济正向万亿元级新蓝海挺进.（2025-05-21）/[2025-08-18]. https://finance.people.com.cn/n1/2025/0521/c1004-40484524.html.

[23] 国资委. 统筹协同推进低空经济发展.（2025-05-13）/[2025-08-18]. https://wap.sasac.gov.cn/n2588025/n2588134/c33502480/content.html.

[24] 国务院办公厅. 关于积极推进供应链创新与应用的指导意见.（2017-10-05）/[2025-08-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-10/05/content_52297.html.

[25] 中国民用航空局发展计划司. 中国通用航空发展报告(2024). 北京:中国民用航空局发展计划司,2024.

[26] Federal Aviation Administration,Transportation Security Administration. Normalizing Unmanned Aircraft Systems Beyond Visual Line of Sight Operations. (2025-08-07)/[2025-08-18]. https://www.federalregister.gov/documents/2025/08/07/2025-14992/normalizing-unmanned-aircraft-systems-beyond-visual-line-of-sight-operations.

[27] 中国民用航空局航空器适航审定司. 关于就亿航 EH216-S 型无人驾驶航空器系统 型号合格审定项目专用条件征求意见的通知.（2021-12-02）/[2025-08-18]. https://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202112/t20211203_210396.html.

[28] 中国民用航空局华东地区管理局. 华东局向峰飞公司颁发 V2000CG 无人驾驶航空器系统型号合格证.（2024-04-10）/[2025-10-07]. http://www.caac.gov.cn/PHONE/GLJ_PHONE/HDGLJ/HD_XWZX/202404/t20240410_223477.html.

[29] 中国新技术新产品杂志社. 中国低空经济发展调查报告(2022-2025).（2025-09-15）/[2025-09-15].https://kjj.wulanchabu.gov.cn/gnwkjdt/1883739.html.

[30] 工信部赛迪研究院(赛迪顾问股份有限公司智能装备产业研究中心). 中国低空经济发展研究报告 (2024).（2024-04-01）/[2025-08-18]. https://m.book118.com/html/2024/1025/7051055060006164.shtm.

[31] Joby Aviation Inc. Joby Achieves the First Piloted eVTOL Air Taxi Flight Between Two Public Airports. (2025-08-15)/[2025-08-18].

https://www.jobyaviation.com/news/first-piloted-eVTOL-air-taxi-flight-between-two-public-airports/.

[32] Pan WJ,Gao JW,Wang X,et al. Urban drone stations siting optimization based on hybrid algorithm of MILP and machine learning. Heliyon,2024,10(12):e32928.

[33] AMAZON. Revising the airspace model for the safe integration of small unmanned aircraft systems. [2025-08-18]. https://images-na. ssl-images-ama zon. com/images/G/01/112715/down load/Amazon_Revising_the_Airspace_ Model_for_the_Safe_Integration_of_ sUAS.pdf.

[34] 高健伟. 基于时空特征的城市W类空域动态管控研究. 广汉:中国民用航空飞行学院,2025.

[35] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 北斗网格位置码(GB/T 39409-2020). (2020-11-19)/[2025-08-18]. https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo hcno=77B7EA113926D3247F9688324-D4A91C8.

[36] Pan WJ,Qin LR,He QY,et al. Three-dimensional flight conflict detection and resolution based on particle swarm optimization. Aerospace,2023,10(9):740.

Thoughts on the Construction of Test Flight Capabilities and Airspace Governance for the Low-altitude Industrial Chain

Weijun Pan[1*] Yidi Wang[2] Yibo Zhang[3]

1. *CAAC Academy of Flight Technology and Safety, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China*
2. *School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*
3. *School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China*

Abstract Low-altitude economy,as a national strategic emerging industry,covers links such as low-altitude manufacturing,flight activities and operation support. It has a long chain,wide radiation and a thriving new industry. At present,China's general aviation flight hours are limited,the development cycle of new aircraft models is long,and it is difficult to obtain airworthiness certification for new aircraft such as electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft,which leads to poor connection between upstream research and development and midstream test flights,restricting the development of downstream operations. At the same time,due to the prominent contradiction between the sharp increase in the number of aircraft and the limited control resources,the pressure on the safety of industry operations is increasing day by day. This article conducts thoughts on strengthening the construction of test flight capabilities and improving the airspace governance system to remove the bottlenecks in the industrial chain. It proposes to enhance the construction of test flight equipment and bases,promote the coordination among design,manufacturing and test flights,and shorten the airworthiness certification cycle. Establish an integrated airspace governance and hierarchical control mechanism for high,medium and low-altitude airspace,implement precise control over large high-speed aircraft,and adopt a filing system and post-responsibility management for small low-speed aircraft to balance airspace safety and operational efficiency.

Keywords low-altitude economy;test flight capability;airspace governance;industrial chain

潘卫军 博士,中国民用航空飞行学院教授。四川省学术和技术带头人,中国民用航空局专家、首批创新团队牵头人,中国航空学会国际合作工作委员会委员,中国航空学会空管分会副主任委员,世界交通运输大会航空运输学部运行安全学科主席。主要研究领域为空管新技术、精细化融合空域管控、通用航空应急救援、计算机应用技术、管制语音和图像等关键技术研究以及标准建设。

(责任编辑 王 磊 张 强)

* Corresponding Author,Email:wjpan@cafuc.edu.cn