

社论：

低空经济基础设施工程科技

陈志杰^{*1}, 沈向洋², 曹先彬³, Mark HANSEN⁴

¹空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 中国南京市, 210007

²粤港澳大湾区数字经济研究院 (IDEA 研究院), 中国深圳市, 518045

³北京航空航天大学电子信息工程学院, 中国北京市, 100191

⁴加州大学伯克利分校土木与环境工程系, 美国加州伯克利, 94720-1710

E-mail: zj-chen@vip.sina.com; hshum@idea.edu.cn; xbciao@buaa.edu.cn; mhansen@ee.berkeley.edu

<https://doi.org/10.1631/FITEE.2530000>

低空经济有着巨大发展潜力, 未来 10 年内全球有望达到万亿美元规模。在中国, 它被视为国家战略性新兴产业的标志, 代表着新质生产力。探索面向低空经济基础设施的创新工程科技, 有望推动相关领域的可持续增长。低空经济范围覆盖地面到空中, 其基础设施涵盖通信、导航、监视、气象、运行等多个方面。预期未来, 其特征将是“互操作性、智能互联、安全高效”。第六代无线通信 (6G) 网络、卫星互联网、卫星遥感、低空微气象、先进监视系统以及大规模人工智能 (AI) 模型的融合, 将显著增强低空经济基础设施的能力, 成为其高质量发展的关键驱动力。近年来, 低空经济新型基础设施技术取得显著进展。然而, 基础理论和核心技术研发的突破值得更多关注, 且技术实施仍面临多方面挑战。

1. 低空基础设施总体系统与集成技术

低空基础设施正朝着集成化和智能化的系统级解决方案演进。其发展涵盖了从顶层架构设计、物理设施建设到数字系统构建的全链条, 亦包括“数字低空”总体系统、面向低空应用的综合大语言模型 (LLM) 等顶层设计, 以及垂直起降场等关键物理节点的工程技术, 旨在为低空活动建立坚实的物理与数字基础。

2. 信息基础设施与技术

低空经济要求信息感知与传输能力向高精度、高可靠性、广覆盖全面升级。为实现对低空空域活动的有效监管与支持, 核心信息基础设施技术——通信、导航、监视 (CNS) 与气象——的突破至关重要。具体方向包括广域低空通信、高精度智能监视与定位导航以及高效准确的气象观测与预报服务, 这些共同构成低空运行的感知与类神经网络。

3. 数字化空域与运行管理基础设施与技术

空域与运行管理的核心正朝着数据驱动和智能决策转变。数字孪生、信息融合和空域数字化技术正在构建一个反映现实的动态数字化空域。在此基础上, 迫切需要开发用于空域运行能力精确预测、智能交通管制、多模式集成运行和实时态势感知的智能算法。这将实现空域资源高效、灵活、自动化的分配, 以及智能化的运行管控。

4. 低空安全基础设施与技术

构建全面深入的安全防护体系是低空经济可持续发展的前提。安全是低空经济的生命线, 其基础设施必须涵盖数据与通信安全、运行控制安全、应急避撞、环境保护和风险表征的多维度技术解决方案。这将贯穿基础设施生命周期和提高所有运行流程的弹性保障能力。

为促进学术界与产业界紧密合作，加速低空经济基础设施的理论研究、关键技术和实际工程应用，中国工程院院刊《信息与电子工程前沿（英文）》（简称 FITEE）邀请陈志杰教授牵头组织“低空经济基础设施工程科技”专题。征集低空基础设施总体系统架构设计、信息感知、智能运行、安全保障等关键领域稿件。经严格同行评审，最终遴选出 5 篇研究论文。这些论文从不同视角探讨了与低空经济基础设施工程科技相关的前沿议题和创新解决方案。

低空起降设施的科学选址是构建城市空中交通网络的基础。乐美龙与合作者将其建模为一个容量约束设施选址问题，提出一种名为 SPID 的深度强化学习求解框架。该框架通过多头注意力机制和门控循环单元网络，有效融合候选站点的静态属性与系统状态的动态信息，实现了选址决策的端到端优化。实验表明，SPID 框架在地理覆盖率、有效覆盖率和设施利用率等关键社会效益指标上显著优于传统聚类方法和图神经网络模型。此外，能为核心求解器提供高质量初始解，为大规模低空基础设施的快速智能化规划提供有效工具。

结构化低空航路的规划与调度优化对于提高城市空中交通运行效率至关重要。李伟钢与合作者提出 Eixão-UAM 框架，用于巴西利亚城市空域低空航路的迭代设计与调度优化。该研究结合巴西的空中交通管理体系，设计出空域分层结构和地面设施模块化，并开发了调度仿真系统。其创新点在于引入大语言模型进行目标函数参数生成和辅助诊断，实现算法迭代的智能加速。结果表明，大语言模型可以作为工程预案生成与推理的高效伙伴，且调度性能更多取决于目标函数与系统多目标的对齐，而非算法本身的复杂性。这为低空航路的智能化设计与运行提供了可扩展的理论和方法。

动态多飞行器任务分配是低空应急物流与灾害响应的核心挑战。针对此问题，郭通与合作者提出一种新颖的协同进化遗传规划（CoGP）框架。与传统的单树遗传规划方法相比，CoGP 协同进化两个相互作用的种群，分别致力于任务优先级排序和飞行器选择的启发式搜索，从而显式建模这两个相互依赖的决策阶段之间的耦合关系。该方法采用多维度终端集来捕捉动态状态，并通过设计低层次启发式模板将进化的树结构快速转换为可执行的任务分配策略。针对灾后应急投送的基准实例开展的大量实验表明，CoGP 优于最新启发式和基于遗传规划的方法，在复杂动态环境中展现出良好的适应性、可扩展性和实时响应能力。

低空“低慢小”无人机的可靠探测是空域安全管理的一个突出挑战。传统的雷达、射频和声学探测方法在复杂环境中存在局限，难以同时实现远距离、高精度和强抗干扰能力。周斌与合作者提出一种融合“猫眼效应”与深度学习的主动光学探测方案。该系统采用共光路全景扫描光学结构，结合近红外激光与可见光成像，通过目标光学窗口的强反射特性增强回波信号。在算法层面，构建了 SKNet21 双网络架构并嵌入局部金字塔注意力模块，实现了对低信噪比小目标的高精度识别与虚警抑制。实验表明，该方法的平均精度均值（mAP@0.50）达到 0.809，计算吞吐量为 49.8 GFLOPs，为复杂环境下全天候、高可靠的低空无人机探测提供了新的技术途径。

低空数字智能网络的高效运行亟需打破通信、感知、导航、控制系统孤立设计的传统范式。当前多系统分离部署导致资源利用率低、协同响应速度慢，难以支撑未来高密度、高动态的低空活动。张奇勋与合作者提出一种名为 LADIN 的 3 层集成架构，旨在实现从硬件到服务的全链条深度协同。该架构以通信感知一体化（ISAC）为核心，在基础设施层基于正交频分复用（OFDM）设计统一波形，以实现通信与感知的功能融合。在数据融合层，通过可插拔的反投影适配器构建统一的时空特征空间。在服务与管理层，支持意图驱动的闭环控制和资源虚拟化。研究团队搭建了多模态硬件实验平台，进行了包括多频协同感知和多模态融合定位在内的一系列测试，验证了该系统在目标跟踪和低雷达散射截面目标检测方面的显著性能提升。这项工作为未来低空数字智能网络的系统级集成与标准化部署提供了重要的架构参考和技术验证。

本期专题涵盖了当前低空经济基础设施工程科技相关的多个研究主题，从设施选址、空域设计到动态调度、安全监控和网络架构。我们希望这组多样但相互关联的主题能够对关注低空经济或相关领域的人们有所裨益。

最后，我们要特别感谢各位作者、评审人以及其他参与者对本专题的支持与宝贵贡献，感谢编辑部工作人员、FITEE 顾问卢锡城院士以及主编潘云鹤院士和费爱国院士。

客编简介：

陈志杰获空军工程大学博士学位。现任空中交通管理系统与技术国家重点实验室主任，中国工程院院士。曾任国家空管技术专家委员会组长，深度参与“八五”到“十四五”规划期间中国空管系统的规划。长期从事空中交通管制技术的研究与工程实践，在自动化空中交通管制模型与概念建立、自动化空管系统研发、战场空域协同控制等方面做出开创性和奠基性贡献。

沈向洋获卡耐基梅隆大学计算机学院机器人学博士学位。现任粤港澳大湾区数字经济研究院（IDEA 研究院）理事长、香港科技大学校董事会主席。他是美国国家工程院外籍院士、英国皇家工程院国际院士、ACM 会士、IEEE 会士。2020 年 3 月以前，担任微软公司执行副总裁，负责人工智能研究。其研究聚焦于计算机视觉、计算机图形学、人机交互与人工智能的交叉领域。

曹先彬获中国科学技术大学博士学位。现任北京航空航天大学电子信息工程学院院长、综合交通大数据应用技术国家工程实验室主任、空地一体新航行系统技术全国重点实验室副主任。长期从事航空航天机动通信、协同组网与管控的理论研究、技术攻关与系统研发。曾获多项国家级和省部级奖项。

Mark HANSEN 分别于 1988 和 1984 年获加州大学伯克利分校交通运输工程学博士学位和城市与区域规划硕士学位，1980 年获耶鲁学院物理与哲学学士学位。自 1988 年起任教于加州大学伯克利分校，从助理教授晋升至正教授。兼任中国民航大学蓝天学者讲座教授和南京航空航天大学名誉教授。担任美国国家航空运营研究卓越中心（NEXTOR）联合主任。曾任空侧和空域容量和延误分会主席。其研究集中于航空运输系统、空中交通管理和运输经济学。