引文格式：洪俊成,姚毅,王雅敏,等. 基于数字孪生的城市低空管理平台建设研究与应用[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):55-59. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.06.010

基于数字孪生的城市低空管理平台建设研究与应用

洪俊成，姚　毅，王雅敏*，李炜妮
（浙大启真未来城市科技（杭州）有限公司，浙江 杭州 310000）

摘　要：低空经济是重要的国家战略性新兴产业之一。在低空经济活动日益活跃、管理复杂性与安全风险同步攀升的背景下，如何利用数字孪生技术建设城市低空管理平台，更好地完成管理工作是地方政府相关部门需要重点关注的领域。以杭州市为研究对象，概述了数字孪生技术在城市低空管理平台中的建设方案，详细介绍了低空经济“三张网”和智能应用工具集的场景应用。研究表明数字孪生技术能够实现“数据采集-AI分析-闭环处理”的一体化、全流程管理，大幅提升了基础设施选址、航路航线布局和空域管理等场景的效率，辅助政府智能决策，为以后基于数字孪生的城市低空管理平台建设提供重要参考。

关键词：数字孪生；低空经济；城市管理；空域管理
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0055-05

Research and Application of the Urban Low-altitude Management Platform Construction Based on Digital Twin

HONG Juncheng, YAO Yi, WANG Yamin, LI Weini
（Zhejiang University Qizhen Future City Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310000, China）

Abstract: Low-altitude economy stands as one of the pivotal national strategic emerging industries. Against the backdrop of increasingly vibrant low-altitude economic activities coupled with the simultaneous escalation of management complexity and safety risks, how to leverage digital twin technology to build an urban low-altitude management platform and optimize management work has become a key priority for relevant local government departments. Taking Hangzhou City, Zhejiang Province, China as the study case, we outlined the construction scheme of digital twin technology in the urban low-altitude management platform, and elaborated the scenario applications of the “Three Networks” for low-altitude economy as well as the intelligent application toolset. The research results demonstrate that digital twin technology enables integrated and full-cycle management covering “data collection, AI analysis, and closed-loop handling”, which significantly enhances the efficiency of scenarios including infrastructure site selection, air route layout and airspace management. This study has the potential to assist local governments in making intelligent decisions, and provides important references for the construction of urban low-altitude management platforms based on digital twin technology in the future.

Key words: digital twin, low-altitude economy, urban management, airspace management

2024 年 3 月 12 日，低空经济首次写入政府工作报告，标志着低空经济上升到国家战略。与此同时，《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》于 2024 年 1 月 1 日正式施行，标志着低空经济进入“有法可依”的时代。在条例中，首次明确了县级以上人民政府在无人驾驶航空器管理工作中的责任[1]。根据中国民航局预测，2035 年低空经济市场规模有望突破 3.5 万亿元。近两年，随着低空经济的蓬勃发展，管理的复杂性和安全风险也在同步攀升，地方政府为落实相关管理职责，均在推进城市低空管理平台建设，在广东省、安徽省、江苏省、浙江省等地已落地实践。

低空经济作为一种以飞行活动为核心的新型经济形态[2]，数字孪生技术所特有的仿真模拟、虚实映射等属性在低空经济领域有很大的应用潜力[3-4]。从现有文献研究来看，已有学者聚焦数字孪生技术在低空运行服务和低空监管中的应用，也有学者针对低空运行服务与监管平台的整体设计展开研究[5-11]。然而，现有研究存在一些局限性，一是现有研究重心偏向理论探索与范式构建，应用导向性不足。多数成果聚焦于数字孪生技术在低空运行服务、低空监管的理论框架或设计思路，缺乏对技术落地过程中实际问题的考量，且未充分结合城市低空管理的实际业务需求，打造可直接落地的智能化应用场景。

项目来源：浙江省科技计划资助项目（2025C01087）。
第一作者简介：洪俊成（1993—），硕士，高级工程师，从事智慧城市、低空经济等工作，E-mail：21514036@zju.edu.cn。
通信作者：王雅敏（1994—），硕士，工程师，从事数据要素、低空经济等工作，E-mail：wangyamin1994@163.com。

二是当前的低空管理与服务平台仍以基础的业务流程管理和静态数据可视化分析为主，未能充分发挥数字孪生技术“虚实联动、仿真推演、智能决策”的核心优势。鉴于此，本文以杭州市为研究对象，围绕城市低空管理需求，综合运用数字孪生、人工智能和大数据等新兴技术，打造基于数字孪生的城市低空管理平台，覆盖低空基础设施网、低空航路航线网、低空飞行服务网“三张网”，涵盖设施现状评价、选址决策、实时航线展示、历史航线分析、低空气象分析和低空通信分析等功能，辅助地方政府智能决策。

1 平台架构

低空经济数字孪生综合管理服务平台以UE5引擎为核心，采用云边端协同架构。前端依托UE5 UMG UI系统集成ECharts图表组件，通过WebView嵌入前端可视化图表，结合Pixel Streaming串流技术适配Web、移动端交互；后端负责物联数据接收、业务逻辑运算及数据存储管理，通过MQTT协议实现与无人机、机巢等物联设备的双向通信，采用MongoDB与PostgreSQL混合存储架构分类管理低空多源异构数据。平台整体架构见图1。

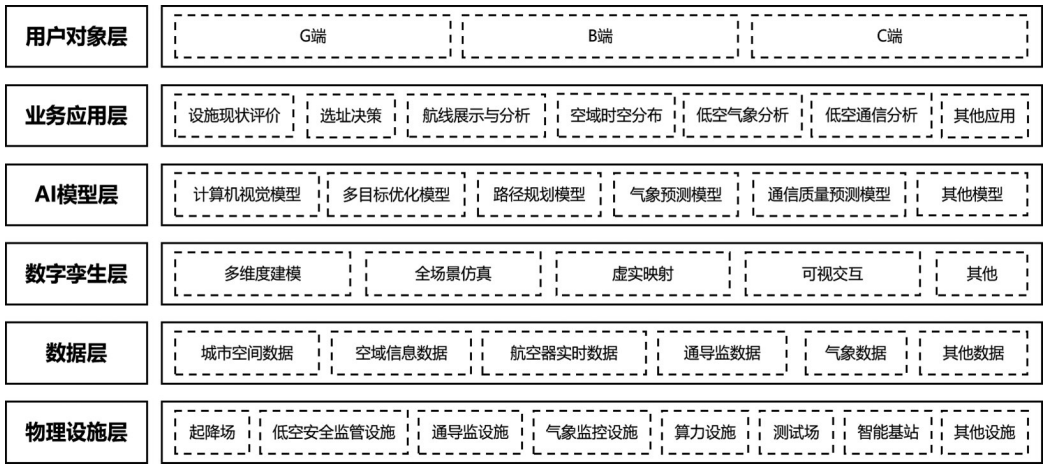


图1 平台架构图

2 关键技术

1）数据采集与物联传输。倾斜摄影测量借助无人机搭载高精度传感器，从1个垂直、4个倾斜角度采集低空影像，经技术校正消除误差，提取视差与深度信息解算空间关系，生成高密度点云并完成三维重建[12]。结合北斗网络RTK定位实现坐标校准，依托MQTT协议完成无人机、机巢等物联设备数据实时传输，搭配加密机制保障数据安全，为数字孪生场景构建提供高精度数据支撑[13]。

2）程序化建模与实时渲染。基于UE5引擎的图形处理与自动化建模能力，实现低空场景的高效构建与高保真渲染，解决传统建模流程复杂、渲染效果失真等问题，支撑数字孪生场景的动态更新与可视化展示。构建低空场景标准模型库与材质库，包含地形、建筑、飞行器、机巢等组件[14]，通过UE5编辑器工具蓝图脚本实现模型自动生成与属性绑定。

3）物联感知与虚实映射。为低空设备构建完整数字孪生体，映射物理属性与运行参数，通过实时数据驱动实现虚拟模型与物理设备动态同步[15]。基于UE5 PhysX引擎模拟气流、障碍物等环境干扰，预演飞行起降、多机协同等流程，采用结构语义约束配准方法优化虚实融合精度，形成“感知–仿真–控制”闭环，支撑低空作业优化决策[16]。

4）智能分析与辅助决策。融合建筑信息模型（building information modeling，BIM）、地理信息系统（geographic information system，GIS）、飞行轨迹等多源数据，采用改进YOLOv5s算法提升低空小目标检测精度，虚警率控制在3%以内[9]。结合ConvLSTM算法预测短时气象变化（如风速、风向），通过图神经网络（graph neural network，GNN）算法编码地形与障碍物信息优化路径规划，基于飞行轨迹推演构建冲突预警模型，自动生成最优处置方案，赋能低空智能管控[17–18]。

5）跨终端协同与平台集成。采用UE5 Pixel Streaming实时云渲染技术，将渲染任务部署于云端，通过WebRTC低时延传输协议，将场景流推送至Web、移动端[19]。通过负载均衡与自适应细节层次（level of detail，LOD）策略，动态调整渲染精度，搭配统一交互接口支持多终端操作，大幅降低应用门

槛，保障跨终端流畅交互体验。

3　建设内容

杭州市作为全国十强城市、创新活力之城，是低空经济的先行者。2024 年 6 月 27 日，杭州市人民政府办公厅印发《杭州市低空经济高质量发展实施方案（2024—2027 年）》，明确指出推进三张网建设，到 2027 年，建成统一管理服务平台，实现“三张网”全覆盖。在这样的政策指引下，我们以杭州市为研究对象，围绕城市低空管理中的核心诉求，开展基于数字孪生的城市低空管理平台建设，通过数字孪生、大数据、人工智能等新兴技术，完成低空基础设施网、低空航路航线网和低空飞行服务网“三张网”以及数字化应用工具的开发建设。

3.1　基础设施网

基础设施网是指涵盖各类低空经济设施的基础设施，主要功能包括低空基础设施相关的可视化图表和应用工具集。可视化图表涵盖基础设施情况、低空侦测、区域设施设备状态和设备详细列表，所有设施的占比、类型和状态一目了然。应用工具集包括现状评价和选址决策 2 个应用工具。现状评价工具对无人机起降场、载人飞行器起降场、低空安全监管设施开展数据分析，结合设施服务半径和可达时间计算覆盖率。在具体操作层面，可以通过关键词搜索、选择行政区域和矩形/圆形/多边形框选三种方式，完成指定设施区域、覆盖范围和覆盖类的计算，实现该类设施的现状评价，具体呈现效果见图 2。在技术层面，可达性分析以缓冲区分析为基础，融合改进两步移动搜索法（2SFCA）与网络分析技术进行优化，弥补单一缓冲区分析忽略空间约束的局限，提升覆盖评估的精准度与场景适配性[20]，算法核心逻辑见图 3。



图 2　基础设施网–现状评价

审图号：GS(2025)1508

选址决策工具依托多目标优化选址模型，通过对同一批设施数据分析，输出新增设施前后的优化结果，辅助政府智能决策。在具体操作层面，选择区域和设施类型后，通过创建点位新增设施，系统可以自动计算得到原覆盖率和现覆盖率，便于直观展示和对比，具体呈现效果见图 4。在技术层面，本平台采用基于 NSGA–II 遗传算法的多目标优化选址模型，该模型以最大化服务覆盖率、最小化建设成本、规避净空约束为核心目标，通过全局寻优生成 Pareto 最优选址解集，具体逻辑见图 5。

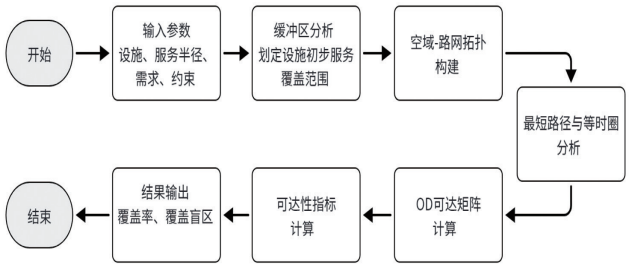


图 3　可达性分析算法模型逻辑图



图 4　基础设施网–选址决策

审图号：GS(2025)1508

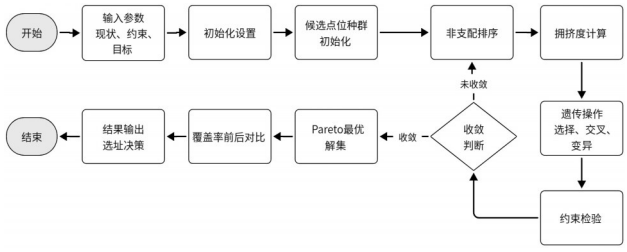


图 5　多目标优化算法模型逻辑图

3.2　航路航线网

航路航线网是指航路航线的网络化布局，主要功能包含航路航线相关的可视化图表和应用工具集。可视化图表涵盖区域飞行情况、执飞情况和 0 ~ 120 m 实时气象情况。应用工具集包含实时航线展示和历史航线分析 2 个应用工具。选中某条航线，地图从平面切换为立体视角，以弹窗形式显示执飞 ID、类型和时间。选择正在执飞的任务，基于飞行器、空间数据和目标跟踪模型，实时呈现执飞航线状态和高度，同步显示飞行速度和航线执飞百分比，规避潜在的飞行冲突和风险，具体呈现效果见图 6。选择历史飞行任

务，基于时序数据分析模型，可以揭示历史航线的运行规律，为后续的运行效率提升奠定基础，具体呈现效果见图7。



图6 航路航线网–实时航线展示

审图号：GS(2025)1508



图7 航路航线网–历史航线分析

审图号：GS(2025)1508

本模块采用图神经网络（GNN）与飞行轨迹推演相结合的方式，构建了低空航线智能管控算法体系。首先，将地形高程、障碍物分布、禁飞区、空域约束等空间要素抽象为拓扑图结构，通过图神经网络对空间环境进行特征编码，学习障碍物、地形与空域通行代价之间的关联关系，实现复杂低空环境的精细化表达；在此基础上，以飞行安全、路径最短、能耗最优为目标开展多目标路径优化，自动生成满足空域规则与飞行性能的最优路径。同时，基于实时飞行位置、速度、航向信息，通过轨迹预测模型对未来时段飞行态势进行推演，构建冲突检测与风险判别模型，实时判断航空器之间、航空器与障碍物之间是否存在碰撞风险；当预警条件触发时，系统结合 GNN 编码的空域环境信息，自动生成包括高度调整、航向改变、临时绕飞、就近降落等最优处置方案，实现从 “环境感知 — 路径规划 — 冲突预警 — 智能处置” 的全流程闭环管控。具体算法逻辑见图8。

3.3 飞行服务网

飞行服务网是为低空用户提供空域审批、通信导航、气象等综合性服务，主要功能包含飞行服务相关

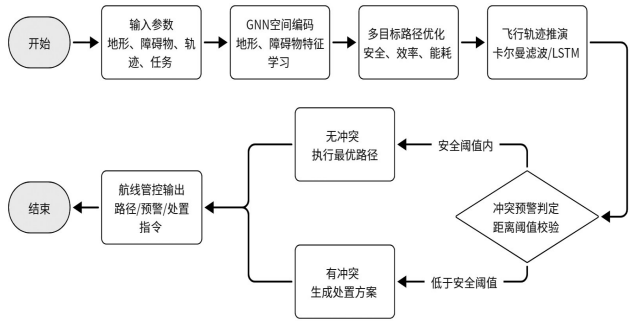


图8 低空航线管控算法模型逻辑图

的可视化图表和应用工具集。可视化图表中主要包含空域动态、空域审批和航道态势等内容。在空域管理方面，基于禁飞区、限飞区、临时区、宜飞区和航道数据，通过北斗网格位置码[21]技术对城市全域实现三维网格化管理，为空域审批提供了有力的技术支持。应用工具集包含空域时空分析、通信信号分析、天气气象分析3个应用工具。在空域时空分析中，基于各类空域和审批数据，利用时序数据分析模型，分析特定区域的空域使用情况，有利于空域的高效利用和及时释放，具体呈现效果见图9。



图9 飞行服务网–空域时空分析

审图号：GS(2025)1508

通信信号强度对低空安全具有重要意义，基于通信强度、干扰信号、信噪比等数据，通过深度学习回归模型，自动计算通信链路的稳定性，并自动输出通信信号强/中等/偏弱/弱/无信号的分级预警，提升执飞航线的通信信号保障，是保障低空安全的重要要素，具体呈现效果见图10。

在微气象层面，基于风速、温度、湿度、气压、雨量、能见度、云量、云底高、地磁暴和太阳辐射等多源数据，通过时空融合深度学习模型，预测特定区域小时级的低空气象变化，并按照等级智能预警，超过阈值后暂停航线执飞，为短时空域管理和航线执飞提供数据支撑，具体呈现效果见图11。在技术层面，本平台采用ConvLSTM短时气象预测算法作为低空飞行气象保障的核心技术，该算法通过将LSTM细胞状态

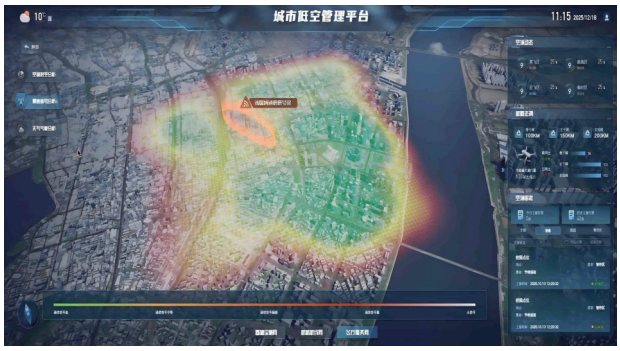


图10　飞行服务网–通信信号分析

审图号：GS(2025)1508

与门控机制中的全连接操作替换为卷积操作，突破了传统气象预测“时空关联性捕捉不足、短时预测精度低”的瓶颈，实现对气象数据时空特征的同步学习。

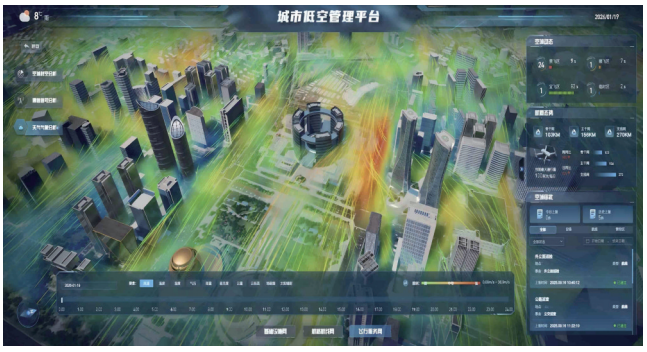


图11　飞行服务网–天气气象分析

审图号：GS(2025)1508

4　结　语

本文以杭州市为研究对象，探讨了基于数字孪生的城市低空管理平台的建设思路和实践经验，建立了一整套集多维建模、仿真模拟、智能分析于一体的服务管理平台，构建了低空经济数字空间与物理空间相对应的数字孪生城市管理新范式，形成了“数据采集– AI分析–闭环处理”的一体化、全流程体系，大大提升了低空经济基础设施网、航路航线网和飞行服务网“三张网”的数字化管理，设施现状评价、选址决策、实时航线展示、历史航线分析、空域时空分布、低空气象分析和低空通信分析等7个应用工具，更进一步促进了低空场景的落地，有效推动了数字孪生技术在低空经济领域的应用。本文的研究成果对未来的城市低空管理建设有一定的借鉴意义，随着技术的迭代和多元场景的落地，基于数字孪生的城市低空管理平台将会取得更大的进展[2]。

参考文献

[1]　石靖敏. 中国民用无人机管理[M]. 北京:机械工业出版社,2024

[2]　刘梦,薛天娇,霍小军,等. 数字孪生赋能低空经济高质量发展[J].中国电信业,2024,25(12):21-25

[3]　徐健,徐坚,汪剑,等. 数字孪生汉江堤防工程管理平台建设研究与应用:以汉江矾口段为例[J]. 地理空间信息,2025,23(11):95-97

[4]　郁金宝,张浩锋,齐欢,等. 数字孪生技术在电网智能化运检业务中的应用[J]. 地理空间信息,2025,23(3):109-113

[5]　邹根兰. 数字孪生技术在低空运行服务与监管中的应用[J]. 数字技术与应用,2025,43(12):141-143

[6]　董绍轩. 基于数字孪生的低空运行服务与监管平台设计[J]. 数字技术与应用,2025,43(6):173-175

[7]　喻鹏,谭灿,李文璟,等. 数字孪生驱动的低空智联网自智管控架构及关键技术[J].中国科学(信息科学),2025,55(10):2449-2470

[8]　沈高青,蔡圣所,雷磊,等. 基于数字孪生和强化学习的低空智联网协同认知干扰[J].数据采集与处理,2024,39(1):15-30

[9]　龙泺安,杨云龙,王晗,等. 低空物流数字基础设施及数字孪生应用综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(4):1-19

[10]　吴志轩,傅惠,彭双勇,等. 基于数字孪生的多模式低空物流配送系统设计[J].工业工程,2026,32(1):1-14

[11]　胡海东,李肇嘉,伍朝辉,等. 数字孪生赋能低空交通关键技术体系及综合管控平台架构[J]. 交通运输研究,2025,11(6):203-214

[12]　郭颖斐,李莎莎. 融合激光点云的无人机近景摄影测量在古建筑实景三维重建中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(12):198-200

[13]　张楚谦,郭景武,王星超,等. 基于COFDM技术与MQTT协议的多旋翼无人机信号中继传输技术研究[J]. 湖北电力,2022,46(4):120-124

[14]　朱宏,高凤燕. 基于UE5的实时渲染动画《江南烟雨》创作解析[J]. 电脑知识与技术,2024,26(2):105-108

[15]　王岩,寇浩楠,张旭辉,等. 数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制方法[J]. 中国矿业大学学报,2025,54(2):330-342

[16]　胡校飞,周杨,蓝朝桢,等. 结构语义辅助约束的数字孪生场景虚实配准方法[J]. 地球信息科学学报,2023,25(5):883-895

[17]　黄启桥,麦雄发,李玲,等. 基于ConvLSTM的广西短临降水预报[J]. 气象研究与应用,2021,42(4):44-49

[18]　谢华,韩斯特,尹嘉男,等. 城市低空无人机飞行计划协同推演与优化调配方法[J]. 航空学报,2024,45(19):269-291

[19]　庞南茜,李俊,沈博文,等. 基于UE+推流架构的数字孪生楼宇建模及可视化应用[J]. 中国建设信息化,2024,29(13):86-90

[20]　王涵. 计算机辅助公共服务设施的可达性分析[J]. 无线互联科技,2020,17(16):79-81

[21]　北斗网格位置码:GB/T 39409-2020 [S]. 北京:中国标准出版社,2021