DOI:10.14188/j.2095-6045.20250561

文章编号:2095-6045(2026)05-0098-07

基于无人机应用的低空经济三维航路规划系统构建与实现研究

何华贵[1]　郭　亮[2]

1 广州市基础地理信息中心(广州市规划和自然资源自动化中心),广东 广州, 510030

2 广州市城市规划勘测设计研究院,广东 广州, 510060

Research on the Construction and Implementation of a 3D Route Planning System for the Low-Altitude Economy Based on UAV Applications

HE Huagui[1]　*GUO Liang*[2]

1 Guangzhou Basic Geographic Information Center (Guangzhou Municipal Planning and Natural Resources Automation Center), Guangzhou 510030, China

2 Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

摘　要:随着低空经济的快速发展,无人机在物流配送、设施巡检、应急救援等场景中的规模化应用对航路规划系统提出了更高要求。为解决复杂低空环境下多源数据融合、实时规划计算与业务协同管理等关键技术挑战,本文设计并实现了一个基于模块化架构的三维航路规划系统。该系统整合了实时环境感知、智能航路规划与高性能计算等核心模块,采用分层架构实现了从数据采集到规划执行的全流程管理。通过实际应用验证,系统在三维航路生成、动态避障和多任务调度等方面表现出良好的稳定性和工程适用性,为低空经济背景下无人机的规模化应用提供了有效的系统解决方案。

关键词:低空经济;三维航路规划;实时环境感知;动态避障;多任务调度

中图分类号:P208;TP391

文献标志码:A

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy, the large-scale application of drones in logistics, infrastructure inspection, emergency response, and other scenarios has placed higher demands on route planning systems. To address the key technical challenges of multi-source data fusion, real-time planning computation, and operational coordination management in complex low-altitude environments, this paper designs and implements a modular architecture-based 3D route planning system. The system integrates core modules including real-time environmental perception, intelligent route planning, and high-performance computing, adopting a layered architecture to achieve end-to-end management from data acquisition to planning execution. Practical application verification demonstrates that the system exhibits good stability and engineering applicability in 3D route generation, dynamic obstacle avoidance, and multi-task scheduling, providing an effective systematic solution for the large-scale application of drones in the context of the low-altitude economy.

Key words: low-altitude economy; 3D route planning; real-time environmental perception; dynamic obstacle avoidance; multi-task scheduling

随着低空空域管理改革的深化与无人机技术的飞速发展,低空经济正逐步成为推动区域经济增长与产业升级的重要引擎[1-3]。无人机凭借其灵活机动、成本低廉及高效部署的特性,已广泛应用于物流配送[4]、农业植保[5]、应急救援[6]、城市安防[7]及环境监测[8,9]等诸多领域,为传统行业的数字化转型注入了全新活力。同时,政策环境的持续优化为低空经济的发展提供了坚实保障,《低空飞行服务保障体系建设总体方案》《国家综合立体交通网规划纲要》、国家2024年《政府工作报告》等政策文件的出台,为空域资源的有效利用和无人机规模化应用创造了有利条件。

然而,随着无人机应用场景的不断拓展和飞行量的急剧增加,传统分散的航路规划方式已难以满足复杂低空环境下的运行需求[10,11]。低空环境存在

引用格式:何华贵,郭亮. 基于无人机应用的低空经济三维航路规划系统构建与实现研究[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):98-104(HE Huagui, GUO Liang. Research on the Construction and Implementation of a 3D Route Planning System for the Low-Altitude Economy Based on UAV Applications[J]. Journal of Geomatics, 2026, 51(5): 98-104)

基金项目:数字广州城市三维底座及创新应用建设项目(广东省政府采购编号CZ2025-1446)。

大量静态障碍物和动态障碍物,还需考虑无人机性能约束与空域规则约束,同时需处理多源异构数据(地理、气象、动态目标)[12],这些因素对航路规划系统提出三大核心挑战:①多源异构数据融合与实时处理;②复杂三维空间下的实时航路规划计算;③面向规模化应用的多任务协同管理与调度。现有研究多聚焦于单一算法的优化[13-16],缺乏从系统层面整合数据、计算与业务协同的综合性解决方案。

针对上述挑战,本文首先构建了模块化、分层的系统架构,作为统筹解决多源数据融合、实时规划计算与业务协同管理的顶层框架;继而,深度融合实时环境感知、智能规划算法与高性能并行计算等关键技术,全面解决复杂环境下多源数据处理、实时航路规划及多任务协同的难题。最终,在湛江市某低空经济产业园的成功部署与应用,证实了该系统能够有效实现三维航路规划、动态避障与多任务调度等核心功能,展现了对复杂低空环境的实际支撑能力。

1　系统整体架构

为实现高效、安全的无人机三维航路规划,需构建一个能够统筹数据、算法与业务应用的综合性技术框架。本文设计了一种分层系统架构,旨在通过模块化与高内聚低耦合的原则,为环境感知、智能规划与多任务调度等核心功能的实现提供底层支撑。

1.1　分层架构设计

系统架构由基础设施层、数据资源层、决策规划层、业务应用层和用户交互层组成,各层通过定义良好的接口实现数据交换与服务调用,形成完整的系统解决方案(见图1)。

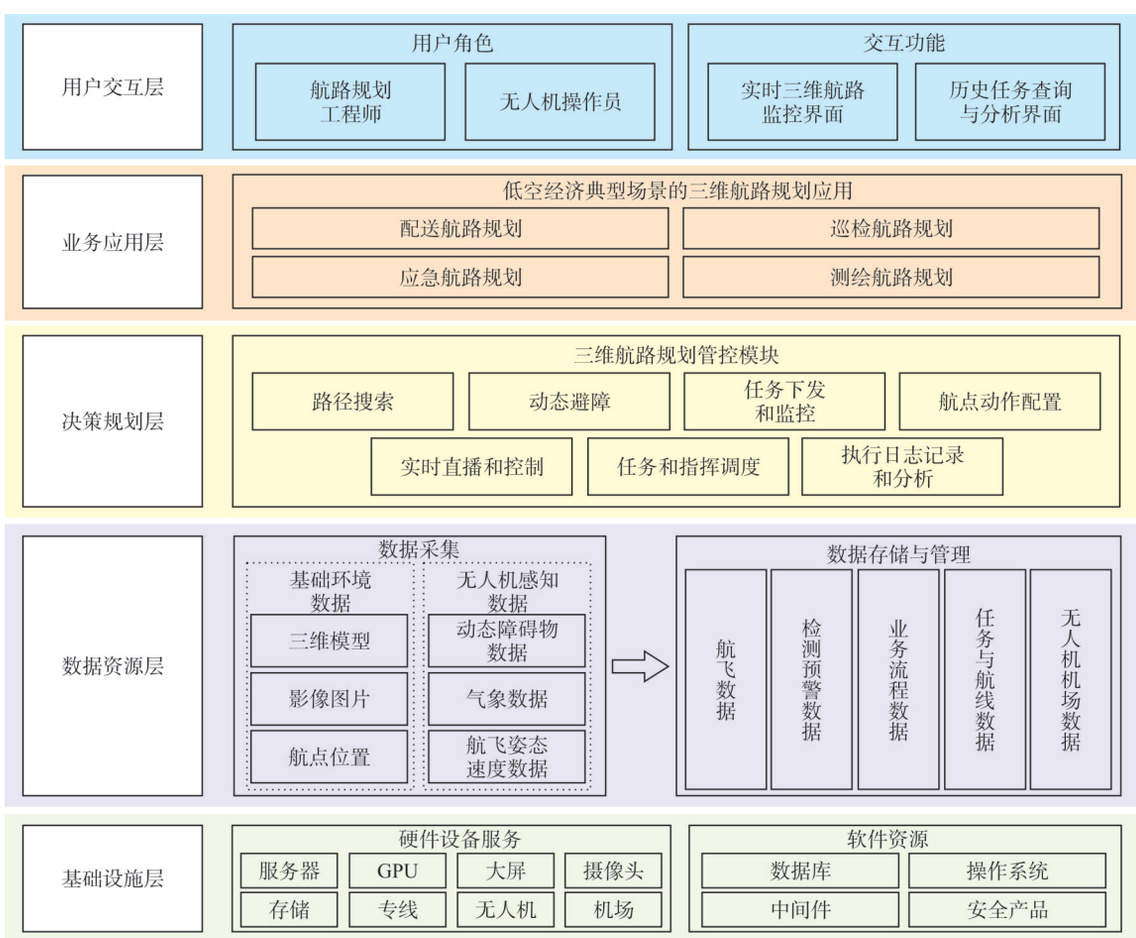


图 1　低空经济场景下无人机三维航路规划系统架构图

Fig. 1　System Architecture Diagram of UAV 3D Route Planning in Low-Altitude Economy Scenarios

1)基础设施层。系统提供底层计算、存储与网络支持,其组成包括GPU计算服务器、分布式存储系统、网络通信设备等硬件基础设施,以及无人机平台、机场设施和感知传感器等终端设备。在软件层面,该层集成操作系统、数据库管理系统、中间件及安全防护组件,为上层服务提供稳定的运行环境。

2)数据资源层。该层承担多源数据的集成、存储与管理职能,通过构建统一的数据处理管道,实现对基础地理信息(区域的数字高程模型、区域的三维倾斜摄影模型、空域矢量边界)、实时感知数据、动态

障碍物信息、气象数据及历史飞行数据的数据采集与预处理。该层采用“结构化＋非结构化”混合数据管理技术，对核心业务数据与影像、实时感知流等非结构化数据进行分类持久化存储与组织，形成系统化的数据服务体系，为上层决策提供统一、可靠的数据支撑。

3)决策规划层。该层作为系统的算法核心，包含航路规划、动态避障、任务调度、航点控制、实时监控与日志管理等模块。该层基于感知数据与环境模型，实现航路的生成、优化与实时重规划，并提供任务全生命周期的自动化决策支持。

4)业务应用层。该层面向低空经济典型场景提供专业化服务封装，目前支持物流配送、设施巡检、应急响应与地理测绘等四类应用的航路规划需求，体现系统在实际业务中的适用性。

5)用户交互层。该层提供任务规划、三维态势监控与历史数据分析等功能界面，服务于航路规划工程师与无人机操作员等不同角色用户，确保系统具备良好的可操作性与可维护性。

1.2 系统功能设计

在分层架构的支撑下，系统具体包含四大核心功能模块，共同构成完整的航路规划解决方案(见图2)。

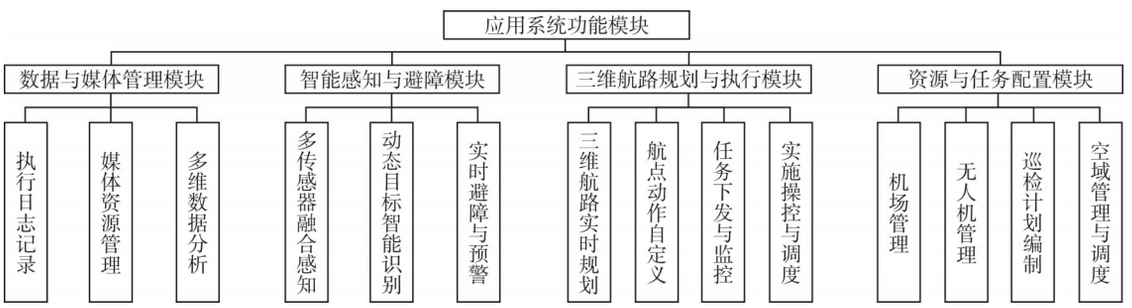


图 2 低空经济场景下无人机三维航路规划系统功能模块设计

Fig. 2 Functional Module Design of UAV 3D Route Planning System in Low-Altitude Economy Scenarios

1)数据与媒体管理模块。该模块主要构建于数据资源层之上，承担系统的数据治理职能，实现对多源异构数据的集成、清洗与融合处理，并负责任务执行过程中的媒体资源管理、多维数据分析与飞行记录归档。

2)智能感知与避障模块。该模块是决策规划层的关键能力之一，集成多传感器融合感知技术，具备动态目标识别、实时态势构建与避障预警功能。其直接依赖基础设施层的传感器数据，并为航路规划提供实时的环境认知，是实现飞行安全的核心保障。

3)三维航路规划与执行模块。该模块为系统核心模块，深度集成于决策规划层，并通过业务应用层封装为可执行服务。其提供基于环境感知与空域约束的实时三维航路规划，支持航点动作自定义、任务下发与全流程实时监控。

4)资源与任务配置模块：该模块在决策规划层实现调度算法，并通过业务应用层提供服务。负责机场、无人机等资源的统一管理、状态监控与任务编排，支持巡检计划编制与空域调度，确保多任务场景下的资源高效利用与协同运作。

2 关键技术

前文提出的分层系统架构，界定了无人机三维航路规划系统的层级构成与交互逻辑，为后续关键技术的落地提供了适配载体与实现支撑。在此基础上，将进一步阐述支撑系统高效运行的关键技术。

2.1 面向三维航路规划的混合规划策略

此项技术是架构中“决策规划层”的核心算法支撑，旨在解决复杂三维环境下的实时、安全航路规划问题。本系统采用“全局静态规划＋局部动态重规划”的混合策略，以平衡路径的全局最优性与局部避障的实时性。

(1)全局规划层。在全局规划层，系统采用基于图搜索的A*算法[17,18]，在三维栅格地图中生成静态最优参考路径。算法的核心在于以下评价函数：

$$f(n)=g(n)+h(n) \tag{1}$$

式中，$f(n)$是从起始节点经过节点n到达目标节点的估计总代价；$g(n)$是从起始节点到节点n的实际代价，综合考虑路径长度与高程变化惩罚；$h(n)$是从节点n到目标节点的启发式代价，通常采用欧几里得距离。

为进一步优化路径安全性，在$g(n)$中引入与最近障碍物距离相关的惩罚项$P_{obs}(n)$，修正后的代价函数为：

$$f(n)=g(n)+h(n)g'(n)=g(n)+\alpha\cdot P_{\mathrm{obs}}(n)$$

(2)

式中,α为安全权重系数。该层规划融入了数字高程模型、建筑物轮廓及空域规则等先验信息,确保生成的路径在宏观层面具备可飞行性、安全性与最优性。

(2)局部规划层。为应对未知动态障碍物,局部层采用动态窗口法(dynamic window approach, DWA)进行实时轨迹优化[19]。算法流程如下:

1)速度空间采样:在满足无人机运动学约束的速度空间V_d内生成一组轨迹样本:

$$V_d=\{(v,\omega)|v\in[v_{\min},v_{\max}],\omega\in[\omega_{\min},\omega_{\max}]\} \quad (3)$$

2)轨迹预测:对每一速度对(v,ω),预测未来短时间Δt内的运动轨迹。

3)多目标评价:通过评价函数$G(v,\omega)$选择最优轨迹:

$$G(v,\omega)=\alpha\cdot\text{heading}(v,\omega)+\beta\cdot\text{dist}(v,\omega)+\gamma\cdot\text{velocity}(v,\omega)+\delta\cdot\text{wind}(v,\omega) \quad (4)$$

式中,heading(v,ω)衡量轨迹方向与全局路径的贴合度;dist(v,ω)评估轨迹与最近障碍物的距离;velocity(v,ω)鼓励无人机以期望速度前进;wind(v,ω)为风阻代价因子,其计算基于风矢量$\vec{w}$与无人机航向$\vec{d}$的夹角θ:

$$\text{wind}(v,\omega)=\|\vec{w}\|\cdot\cos\theta \quad (5)$$

式中,$\alpha,\beta,\gamma,\delta$为权重系数。

此层级确保了无人机在飞行过程中具备在线避障与动态适应性,有效弥补了全局路径在动态环境中的不足。通过将风阻代价因子wind(v,ω)纳入DWA的评价体系,算法能够主动规避强逆风与湍流区,优先选择风阻较小的路径,从而在保证安全性的同时,显著提升航路的经济性与鲁棒性。

2.2　基于多传感器融合的SLAM实时感知与建图

为实现无人机在复杂低空环境中的自主导航,系统需要实时、高精度的环境认知与自身状态估计能力作为支撑。本文采用以激光雷达为主的多传感器融合SLAM技术[20,21],通过机载传感器采集环境信息,借助SLAM核心算法实现无人机位姿解算与场景三维点云地图构建。其产生的实时地图与位姿信息,一方面服务于“决策规划层”的实时避障决策;另一方面回传至“数据资源层”,驱动环境模型动态更新。

为抑制里程计累积导致的位姿漂移,本研究重点引入了闭环检测与位姿图优化机制[22,23]。闭环检测模块能够识别无人机重访历史区域的情形,提供全局一致性约束;位姿图优化模块则基于此类约束对轨迹与地图进行全局调整,显著提升系统的全局精度与一致性,从而为航路规划建立准确的空间参考框架。

此外,为实现感知结果的可视化监控与交互分析,系统集成基于WebGL的实时三维渲染界面,对SLAM生成的点云地图与无人机轨迹进行高效可视化,形成“感知-建图-可视化”的闭环交互流程,有效增强了系统的透明度与可控性。

2.3　支撑大规模应用的高性能计算架构

前述智能规划算法与实时环境感知模块均属计算密集型任务,对系统底层算力提出了严峻挑战。为此,本研究构建了基于私有化GPU云计算集群的高性能并行计算架构(见图3),作为“基础设施层”的核心设计,旨在满足低空经济场景下无人机大规模应用对计算效率、可靠性及可扩展性的要求。

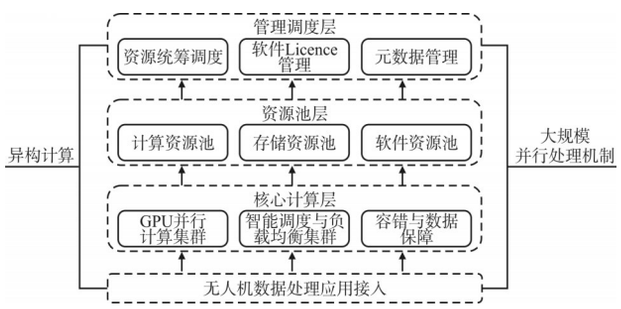


图 3　高性能并行计算架构

Fig. 3　High-Performance Parallel Computing Architecture

该架构采用异构计算与资源池化设计理念:GPU集群凭借高度并行计算能力,专注于“数据资源层”的三维环境建模、“决策规划层”的航路规划等计算密集型算法;CPU集群负责系统调度、I/O控制与逻辑管理。通过此种异构分工,为上层模块提供适配其需求的算力支撑,保障数据处理与规划决策的高效性。面对高并发任务调度需求,系统引入大规模并行处理机制[24-27],将并发规划任务动态分解并分配至多个计算节点并行执行,有效实现负载均衡,避免单点资源瓶颈。同时,采用软件浮动许可证机制,实现对GPU计算资源的集中管理与按需分配,有效保障了“业务应用层”在面对大规模并发任务时的快速响应能力。

3　系统实现与应用实例

本研究实现了一个面向低空经济的无人机三维航路规划系统,并将其部署于湛江市某低空经济产业园,通过在典型场景中的完整落地,综合检验了系统的实用性与稳定性。

3.1 系统开发与集成

系统基于高性能计算架构开发，采用模块化集成设计，支持低空三维航路规划功能（见图4）。前端基于 Cesium.js 引擎实现三维可视化展示，通过 WebSocket 协议与服务器端通信；服务器端依托 Linux 操作系统和 Nginx 中间件部署，采用 MySQL 数据库管理结构化数据，结合 GPU 加速计算集群（分布式架构），通过任务分片策略完成航路优化算法的并行处理；系统具备实时规划与验证能力。

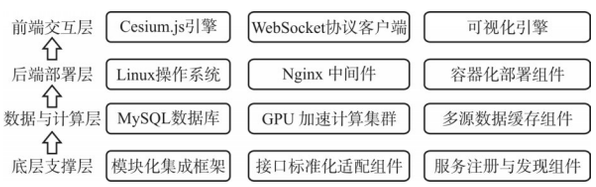


图 4 三维航路规划系统开发核心技术层级架构图

Fig. 4 Hierarchical Architecture of Core Technologies for 3D Route Planning System Development

3.2 典型应用场景分析

为验证系统在应对复杂低空环境挑战方面的能力，本研究将系统部署于湛江市某低空经济产业园，围绕多源数据融合、实时三维规划与多任务调度三大核心需求，开展典型场景下的功能适配性验证。园区具有建筑物密集、低空活动多样、动态干扰频繁等特征，传统手段难以满足立体化、实时化与规模化的运行需求。系统通过以下典型功能实现，有效应对前文中提出的关键挑战：

1）机场与无人机管理：针对园区内分布式无人机机场的规模化部署需求，系统构建了全维度的机场与无人机管控体系。在机场管理方面，依托卫星影像地图精准标注各机场空间位置与覆盖范围，实时采集并可视化呈现舱内环境温湿度等关键数据。对于机场下辖的无人机集群，系统实现了远程操控全流程覆盖，确保操作人员实时掌握设备运行情况（见图5）。此外，系统支持无人机固件远程升级与飞行参数个性化配置，通过标准化的设备管理流程，保障多机场、多无人机协同作业场景下巡检资源的稳定调度与高效利用，为规模化作业奠定设备管理基础。

2）多源数据融合与实时环境感知：为解决复杂低空环境下数据异构、实时性要求高的问题，系统构建了统一的空间数据底座，实现多源数据的深度融合与高效处理。数据层面整合园区高精度三维倾斜摄影模型、GIS 空域管控数据、实时气象数据及动态障碍物信息，通过标准化的数据处理管道完成清洗、



图 5 机场详细信息功能界面

Fig. 5 Detailed Airport Information Function Interface

整合与关联分析，形成完整的环境数据体系。感知层面依托机载多传感器融合 SLAM，实时采集环境信息并完成无人机位姿解算与场景三维点云地图构建，具备动态目标智能识别与环境模型动态更新能力，能够精准捕捉低空环境中各类动态干扰因素，为航路规划提供精准、实时的三维环境认知，有效支撑后续航路规划与避障决策的科学性（见图6）。

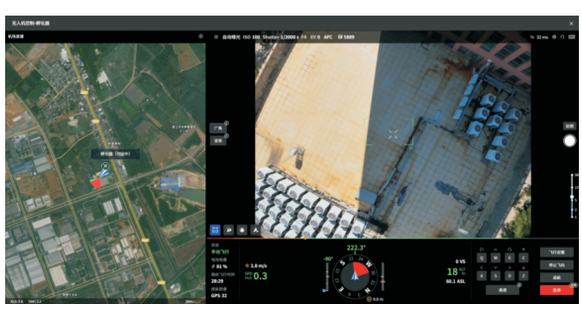


图 6 实时三维环境感知功能界面

Fig. 6 Real-Time 3D Environment Perception Function Interface

3）三维航路规划与动态避障：系统采用“全局 A*＋局部 DWA”的混合规划策略，结合 GPU 高性能计算架构，高效解决了复杂三维空间下的实时航路规划计算难题。系统可在 2.3 s 内完成 10 km 航程的复杂环境航路规划，且规划航路能充分规避立体障碍物，高程自适应调整精度达 0.1 m，满足精细化作业需求。在动态避障方面，系统响应时间低于 200 ms，能快速识别突发出现的动态障碍物并调整轨迹。同时，系统支持航点动作自定义配置与高程自适应调整，能够针对多层厂房、通信塔、高大植被等立体障碍物，通过实时环境感知，生成精准规避的路径，确保在飞行过程中全程避障，保障作业安全（见图7）。但极端天气（如强暴雨、雷暴、风速≥15 m/s）会影响传感器感知精度与航路优化效果，超高层建筑密集、低空飞行器频繁交叉的场景下，需人工微调局部航路。

4）多任务协同调度与资源管理：面向园区多任务并行执行的需求，系统构建了智能化的多任务协同调度与资源管理机制。系统支持多机场、多无人



图 7　三维航路规划功能界面

Fig. 7　3D Route Planning Function Interface

机的统一调度与任务编排,支持最多 100 个任务并发调度,在 10 个并发任务场景下,调度响应速度仅为 0.8 s,50 个并发任务时响应速度为 1.5 s。系统具备灵活的任务管理功能,包括任务创建、插队优先级设置、断点续飞、应急响应触发等,能够适配“日常巡检+应急响应”的混合作业场景(见图 8)。通过空域冲突检测算法,实时监测多无人机飞行轨迹,避免空域资源竞争与碰撞风险,同时基于任务优先级与资源状态进行动态负载均衡,确保资源高效利用。系统提供直观的任务监控界面,实时展示各任务执行状态(执行中、待执行、已完成)、剩余时间、无人机飞行状态等关键信息,同步记录预警信息,并统计预警次数、发生率与准确率,为任务调度优化与故障排查提供数据支撑,提升多任务场景下的作业协同效率与可靠性。



图 8　多任务协同调度与资源管理功能界面

Fig. 8　Multi-Task Collaborative Scheduling and Resource Management Function Interface

5)日志与飞行记录管理:自动归档机场操作日志、无人机飞行日志及任务数据,支持多维度查询与可视化分析,为巡检效果评估与故障溯源提供数据支撑(见图 9);同时集成 AI 智能报警功能,可对异常飞行参数(如电量骤降、图传中断)进行实时识别与告警配置。

6)动态监测数据接入与展示:依托园区地理信息平台,系统实现多源地图数据的标准化接入与融合渲染,包括电子地图、三维倾斜摄影模型、高分辨率卫星影像等,为航路规划提供精准的三维空间基

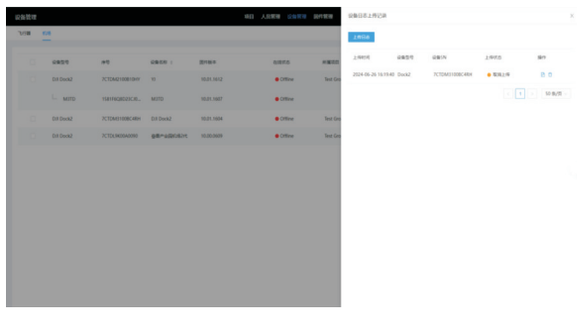


图 9　执行日志记录和分析功能界面

Fig. 9 Execution Log Recording and Analysis Function Interface

准。同时,集成“无人机-鹰眼-道路监控”多源视频数据,构建空中航迹与地面视角协同的监测体系,支持机场直播、无人机实时画面调取等功能,实现作业场景的全方位可视化监控。系统前端基于 Cesium.js 引擎实现三维可视化展示,通过 WebSocket 协议保障与服务器端的实时通信,能够直观呈现无人机飞行轨迹、机场分布、任务执行区域等关键信息,辅助操作人员进行场景化决策,提升航路规划的精准性与作业过程的可控性(见图 10)。



图 10　实时直播和控制功能界面

Fig. 10　Real-Time Live Streaming and Control Function Interface

通过三维航路规划系统的实际部署与应用,有效弥补了传统二维监控与人工巡检的不足,显著提升了园区低空监测的自动化与智能化水平。该实践不仅为园区构建“精细化低空治理体系”提供了技术支撑,也为同类低空经济场景,如城市新区、产业园区的无人机系统部署和规模化应用提供了可复用的功能适配与系统实现路径。

4　结束语

基于模块化架构设计,本研究集成三维航路规划、高性能计算与实时环境感知等关键技术,构建了一套面向低空经济的无人机三维航路规划系统。系统基于分层架构,依托 Cesium.js 三维引擎与 GPU 加速计算,实现了多源数据融合与实时规划决策,具备高内聚、低耦合的模块化特征。在湛江市某低空

经济产业园的实际部署中，系统完成了机场管理、无人机调度、三维航路规划与任务监控等功能的集成验证，表现出良好的稳定性与工程实用性，支持从任务规划到执行复盘的全流程闭环管理。本研究为低空经济中无人机的规模化应用提供了完整的系统级解决方案，其模块化设计与标准接口为后续功能扩展奠定了基础。未来通过引入人工智能与边缘计算，可进一步提升系统智能水平与响应能力。

参考文献

[1] 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)：1 966-1 981

[2] 廖小罕，黄耀欢，刘霞．低空经济时代地理信息科技发展的机遇和挑战[J]．地球信息科学学报，2025，27(1)：1-9

[3] 贺彪，郭仁忠，徐海，等．智慧城市操作系统的概念及技术体系[J]．测绘学报，2025，54(5)：785-794

[4] Song B D，Park K，Kim J．Persistent UAV Delivery Logistics：MILP Formulation and Efficient Heuristic[J]．Computers & Industrial Engineering，2018，120：418-428

[5] 兰玉彬，陈盛德，邓继忠，等．中国植保无人机发展形势及问题分析[J]．华南农业大学学报，2019，40(5)：217-225

[6] 晏磊，廖小罕，周成虎，等．中国无人机遥感技术突破与产业发展综述[J]．地球信息科学学报，2019，21(4)：476-495

[7] Kamarulzaman A M M，Jaafar W S W M，Said M N M，et al．UAV Implementations in Urban Planning and Related Sectors of Rapidly Developing Nations：A Review and Future Perspectives for Malaysia[J]．Remote Sensing，2023，15(11)：2845

[8] Al Amin A，Azam I，Masuduzzaman M，et al．Gravitational Search Algorithm Swarm-Based UAV Reconnaissance for Multiple Targets Detection in Unknown Environment[J]．IEEE Access，2025，13：36 897-36 908

[9] 黄正睿，潘淼鑫，陈崇成，等．集成LoRa与BDS的应急环境监测数据获取与传输技术[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2021，46(4)：530-537

[10] 张启瑞，魏瑞轩，何仁珂，等．城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]．控制理论与应用，2015，32(10)：1 407-1 413

[11] Wang X，Pan J S，Yang Q，et al．Modified Mayfly Algorithm for UAV Path Planning[J]．Drones，2022，6(5)：134

[12] 张宏宏，甘旭升，李双峰，等．复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]．仪器仪表学报，2021，42(1)：257-266

[13] Qu C，Gai W，Zhang J，et al．A Novel Hybrid Grey Wolf Optimizer Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Path Planning[J]．Knowledge-Based Systems，2020，194：105530

[14] 李兴超，魏瑞轩，张启瑞，等．元胞蚁群算法的城市楼宇间无人机航路规划[J]．空军工程大学学报(自然科学版)，2017，18(5)：19-23

[15] 冯国强，赵晓林，高关根，等．基于A*蚁群算法的无人机航路规划[J]．飞行力学，2018，36(5)：49-52

[16] 占伟伟，王伟，陈能成，等．一种利用改进A*算法的无人机航迹规划[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2015，40(3)：315-320

[17] 王天琦，杨丽英，黄朝雄，等．基于拓扑地图与A*算法的路径规划求解方法[J]．计算机应用研究，2025，42(9)：2 714-2 721

[18] Mandloi D，Arya R，Verma A K．Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Based on A* Algorithm and Its Variants in 3D Environment[J]．International Journal of System Assurance Engineering and Management，2021，12(5)：990-1 000

[19] Bai X，Jiang H，Cui J，et al．UAV Path Planning Based on Improved A* and DWA Algorithms[J]．International Journal of Aerospace Engineering，2021，2021：4511252

[20] Gupta A，Fernando X．Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Data Fusion in Unmanned Aerial Vehicles：Recent Advances and Challenges[J]．Drones，2022，6(4)：85

[21] 金泰宇，黄劲松．一种基于语义地图的激光雷达定位方法[J]．测绘地理信息，2022，47(4)：28-32

[22] 孔德慧，李文超，虞义兰，等．一种改进的面向SLAM系统的相机位姿估计方法[J]．华南理工大学学报(自然科学版)，2018，46(12)：10-19

[23] 胡章芳，鲍合章，陈旭，等．基于改进闭环检测算法的视觉同时定位与地图构建[J]．计算机应用，2018，38(3)：873-878

[24] 刘纪平，吴立新，董春，等．一种大规模空间数据流式并行处理方法研究[J]．测绘科学，2016，41(1)：89-93

[25] 郭蒙雨，康宏，袁晓洁．基于流式计算框架的实时数据库分区系统[J]．计算机工程，2017，43(11)：8-15

[26] Rossi L，Thuswaldner J M．A Number System with Base[J]．The American Mathematical Monthly，2022，129(6)：539-553

[27] 高阳．大规模主题建模方法研究[D]．苏州：苏州大学，2015

修回日期：2026-07-23

第一作者：何华贵，正高级工程师。研究方向为实景三维和时空智能。E-mail：gzhehuagui@163.com