

基于数字孪生的低空物流盲区 预感知避障策略研究

Research on Pre-Perception and Obstacle Avoidance Strategy for Blind Zones in Low-Altitude Logistics Based on Digital Twin

姜大鹏,孙 亮,沙默泉,孙建龙(中国联通智能城市研究院,北京 100048)

Jiang Dapeng, Sun Liang, Sha Moquan, Sun Jianlong (China Unicom Smart City Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

针对城市超低空物流场景下数字孪生全域感知不足、虚实同步滞后等问题,聚焦航线盲区与突发障碍响应,构建数字孪生智能决策技术体系,搭建几何—物理—规则三元耦合数字孪生底座,建立四维时空冲突检测模型,设计双层路径重规划策略并引入盲区暴露时间指标。理论仿真与数值算例结果表明,该体系在楼群盲区可实现理想条件下的冲突完全规避,显著提升避障路径的平滑性,并降低能耗,突破传统数字孪生应用局限,为数字孪生在低空经济规模化应用提供技术支撑。

关键词:

低空经济;数字孪生;低空数字孪生体;全域感知;
虚实同步;盲区预感知

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.07.007

文章编号: 1007-3043(2026)07-0037-07

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

To address the challenges of inadequate global perception and lagging virtual-real synchronization in digital twin systems for urban ultra-low-altitude logistics, it focuses on response to flight-path blind areas and sudden obstacles. A digital twin intelligent decision-making technical system is constructed, including a geometry-physics-rule ternary coupled digital twin foundation, a four-dimensional spatiotemporal conflict detection model, and a dual-layer path replanning strategy with the introduction of a blind area exposure time metric. Theoretical simulations and numerical examples demonstrate that the proposed system achieves complete conflict avoidance under ideal conditions in building blind areas, significantly improves the smoothness of obstacle avoidance paths, and substantially reduces the energy consumption, thereby overcoming the limitations of conventional digital twin applications and providing technical support for the large-scale deployment of digital twins in the low-altitude economy.

Keywords:

Low-altitude economy; Digital twin; Low-altitude digital twin; Global perception; Virtual-real synchronization; Blind zone pre-perception

引用格式:姜大鹏,孙亮,沙默泉,等. 基于数字孪生的低空物流盲区预感知避障策略研究[J]. 邮电设计技术, 2026(7): 37-43.

0 概述

低空经济被纳入国家战略性新兴产业体系后^[1-2],城市超低空物流正加速从试点验证向规模化商业运营迈进。高层建筑群形成的“城市峡谷”场景具有立体化、复杂化特征,叠加飞鸟群、未申报飞行设备等非

合作动态目标的随机干扰,显著降低了低空空域的可预测性与可管控性,对数字孪生技术的场景适配能力提出更高要求。当前无人机低空物流主流的“机载感知—本地规避”模式的本质是视距受限的被动式单机管控,它高度依赖物理端感知设备,在城市复杂场景中易因通信与视觉盲区频发而导致感知滞后并引发碰撞事故,难以满足高频高密度配送需求。

在现有研究中,数字孪生在低空物流场景的应用

收稿日期: 2026-05-12

存在明显短板:传统建模仅侧重几何维度,缺乏物理与规则的深度耦合;虚实同步延迟较高,不具备全域盲区预感知能力;与低空物联网、云边协同^[1]的融合较为碎片化,尚未形成完整的管控闭环。同时,也尚未构建适配城市超低空物流场景的数字孪生技术体系^[3-4],缺乏基于数字孪生的盲区风险前瞻建模、四维时空冲突识别与路径协同优化方法,难以实现低空物流的全域化、预测式管控。本文提出数字孪生驱动的航线盲区预感知动态避障策略,其核心是构建适配超低空复杂环境的高精度数字孪生底座,依托孪生体实现风险超前识别与智能决策,形成虚实闭环的数字孪生智能管控体系,并以无人机盲区避障为典型场景验证该体系的有效性,为数字孪生在低空物流规模化运营中的应用提供技术支撑。

1 城市低空数字孪生底座构建与多源感知数据融合

城市超低空物流运行环境具有显著的空间异质性与动态复杂性,物理端作业载体受建筑物遮挡与机载感知设备探测范围的约束,对突发性入侵障碍物的响应存在固有延迟。突破传统感知视距局限、应对低空场景突发冲突的核心在于构建高精度城市低空数字孪生底座,打通物理空间与数字空间信息壁垒,实现物理低空环境在数字空间的精准复现与实时映射,为后续盲区预感知及动态决策提供可计算、可推演的虚拟环境。

1.1 城市低空数字孪生体的三元耦合架构

城市低空数字孪生体的核心目标是打造几何、物理、规则一体化耦合空间,实现对超低空运行环境的全方位数字化映射,提升孪生体对物理环境的还原度与适配性。城市低空数字孪生体的三元耦合架构示意如图1所示,该架构清晰呈现了几何、物理、规则三大模型的耦合关系、核心组成及数据交互逻辑,为后续技术实现提供可视化支撑。

几何模型作为孪生空间的基础,依托倾斜摄影测量技术与高精度建筑信息模型(BIM),完成建筑轮廓、禁飞区边界等静态要素的厘米级复现,建模范围覆盖0~100 m超低空物流核心作业区,为盲区识别、路径规划提供精准的空间几何基准。物理模型与规则模型分别从环境约束与法规约束层面完善数字孪生体的场景适配能力。物理模型借助计算流体力学(CFD)模拟建筑群间的风场与气流扰动,以建筑布局、高度差

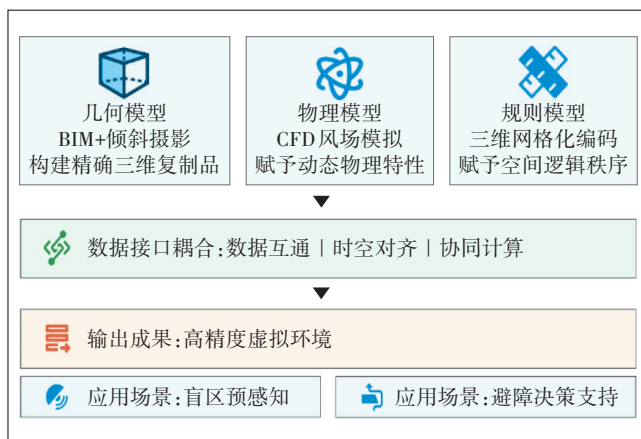


图1 城市低空数字孪生体三元耦合架构示意

及环境风速为核心输入,输出飞行路径的实时风场数据,结合低空作业动力学约束推演物理环境对作业姿态、轨迹的影响;规则模型采用“空间—时间—管制等级”三维网格化编码,将空域规范、禁限飞区等规则内嵌于孪生空间,以10 m×10 m×5 m的空间网格和分钟级时间网格为单元^[4],根据国家低空空域管理标准赋予网格适飞属性,为避障决策提供法规支撑。

为便于后续实验配置与工程落地,须明确三元耦合模型的核心参数,具体如表1所示。

表1 三元耦合模型核心参数

模型类型	核心技术	关键参数	核心功能
几何模型	倾斜摄影、BIM	建模精度:厘米级;覆盖范围:0~100 m	静态要素复现,提供空间基准
物理模型	CFD风场模拟	输入:建筑布局、环境风速;输出:实时风场数据	模拟环境扰动,提供物理约束
规则模型	三维网格化编码	网格尺寸:10 m×10 m×5 m ^[3] ;时间粒度:分钟级	嵌入空域规则,提供法规支撑

1.2 云边协同的多源异构数据融合机制

数字孪生体的还原精度与响应速度依赖多源异构感知数据的高效融合,为此,构建云边协同融合机制,实现物理环境在数字空间的瞬时映射,其数据处理流程分为采集、边缘处理以及云端融合3层^[1],可兼顾处理效率与融合精度。云边协同多源异构数据融合架构如图2所示,直观呈现了三层架构的协同逻辑,强化“分层处理、高效融合”的设计合理性。

数据采集层作为基础,融合了作业载体机载传感器、地面物联网节点、低空监视雷达及空域管理平台的多类数据,实现超低空物理环境的全域感知,为孪

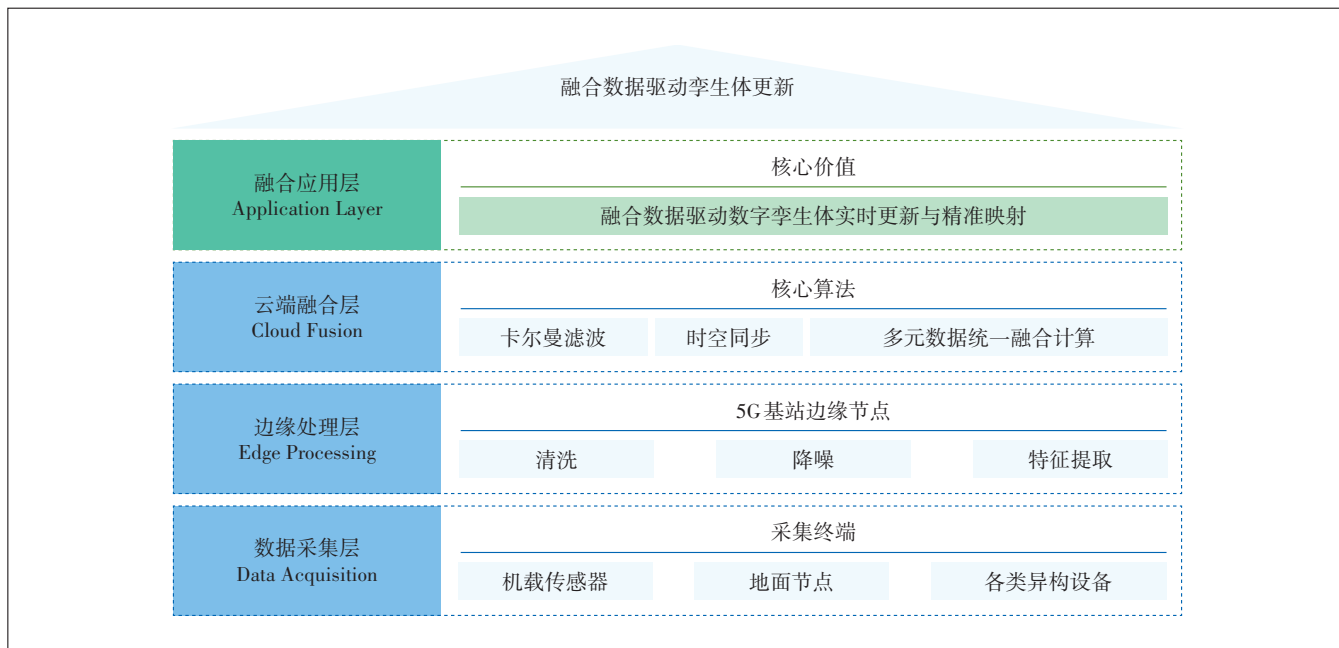


图2 云边协同多源异构数据融合架构

生体提供全量物理端输入。边缘处理层与云端融合层协同发力,进一步提升数据处理效率与融合精度。边缘处理层部署于5G基站侧边缘节点^[5],对海量原始数据进行实时清洗、降噪与降维处理,将延迟控制在10 ms以内^[6],完成数据初步筛选与特征提取,有效降低云端传输与处理压力;云端融合层通过UTC时间同步和WGS-84坐标系转换,解决不同感知源的时空错位问题,采用卡尔曼滤波算法进行特征级融合^[7],将处理后的数据与孪生体对应的实体进行关联,实现动态障碍物轨迹重构,确保虚实空间高度一致。

1.3 数字孪生环境的低延迟更新与同步机制

如图3所示,虚实同步闭环的运行流程清晰呈现了数据上传、指令下发及偏差修正的完整逻辑,直观体现了低延迟、高精度的核心优势,为后续实时决策提供支撑。

基于5G-A/6G uRLLC技术^[8]设计专用传输协议,构建低延迟更新与同步机制,实现厘米级空间精度、毫秒级时间精度的虚实同步,为实时决策提供保障。该传输协议的下行速率不低于1 Gbit/s,上行速率不低于500 Mbit/s,端到端延迟控制在20 ms以内^[5];同时引入前向纠错编码技术,有效规避信道干扰导致的数据丢失,保障物理端与数字孪生体之间数据交互的可靠性。

构建完整的虚实同步闭环,物理端状态数据以不

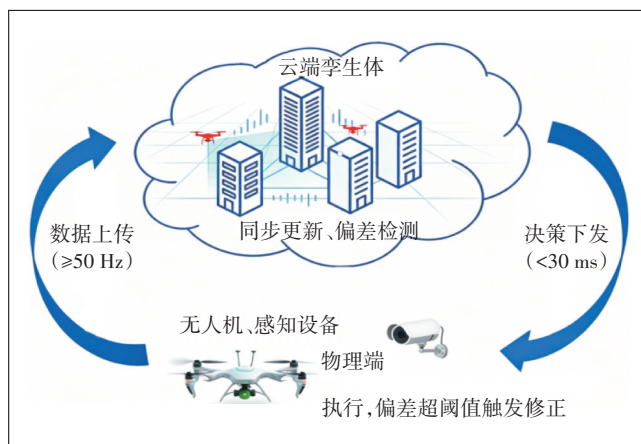


图3 数字孪生虚实同步闭环示意

低于50 Hz的频率上传至云端,实时驱动孪生模型完成同步动作;孪生体生成的决策结果则以低于30 ms的延迟下发至物理端^[9],为作业载体自主作业与调度及时提供依据。同时,设计动态偏差修正机制^[4],实时比对虚实空间实体状态,当空间偏差超过30 cm或时间偏差超过50 ms时,自动触发数据重融合与模型修正流程,确保数字孪生底座^[2]的可信度与精准度。

2 基于数字孪生的盲区预感知与动态避障决策机制

依托城市低空数字孪生底座,提出“盲区预感知”

概念框架,建立四维时空冲突检测模型,设计“全局拓扑重构+局部轨迹平滑”双层路径重规划策略,推动超低空物流管控从“被动响应”向“主动预测”跃升,形成完整的避障决策机制,为后续仿真验证提供理论支撑^[10]。

2.1 盲区预感知框架及实现逻辑

传统“感知—规避”低空管控模式高度依赖物理端机载传感器,属于局部感知模式。在“城市峡谷”场景中,非视距传播导致感知盲区显著,当障碍物突发切入时,安全响应窗口不足1 s,难以有效规避碰撞风险。“盲区预感知”框架^[11]作为孪生体全域感知能力的核心体现,通过数字孪生系统构建全局性低空环境虚拟镜像,将感知维度提升至城市级全域,其核心特征为“物理盲区,数字可见”^[12-13]。

盲区预感知框架与传统局部感知模式的对比如图4所示,直观体现了“物理盲区,数字可见”的核心优势,强化框架的创新性与实用性。

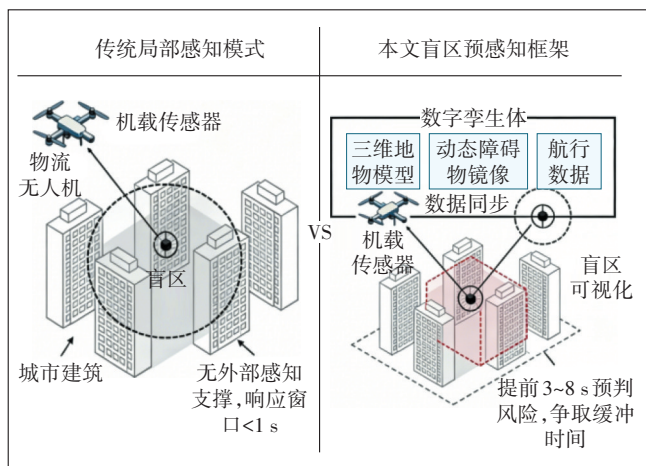


图4 盲区预感知框架与传统感知模式对比

该框架整合了孪生体高精度三维地物模型、动态障碍物状态镜像及航行数据,可在物理冲突发生前、障碍物进入物理端视距前,提前识别潜在风险区域,为避障决策争取3~8 s的缓冲时间^[1],从根源上解决感知响应滞后问题^[8]。其实现逻辑分为3步,且均依托数字孪生底座开展:一是孪生体基于几何模型与作业载体参数,动态计算物理端感知盲区并标记高风险区域;二是通过盲区周边分布式感知设备进行持续监测,将采集到的数据实时同步至孪生空间;三是将盲区内的动态目标轨迹与作业载体规划轨迹导入冲突检测模型^[14],提前预判时空交汇风险,触发避障决策

流程。

2.2 四维时空冲突检测模型

为实现低空全域潜在冲突的精准、超前识别,构建基于四维时空坐标系的冲突检测模型^[12],将低空静态、动态要素统一映射至时空流形,整合静态障碍物处理、动态障碍物轨迹预测及碰撞检测三大核心功能,协同支撑冲突检测精度与效率。

数字孪生体将建筑物等静态实体抽象为禁飞硬约束空间,在几何轮廓的基础上,根据作业速度动态扩展5~10 m的安全缓冲距离,并将处理后的约束空间映射至四维时空模型,作为不可侵入的永久避障区域^[13]。针对动态障碍物,依托孪生体全量数据,采用三层LSTM网络预测其未来轨迹^[10],捕捉非线性运动特征,模型输入包含障碍物运动参数及孪生体环境约束参数,输出为未来3~8 s的时空坐标,训练数据集基于10万条真实飞行日志与5万条人工生成轨迹构建^[12],通过数据增强提升泛化能力,输出障碍物时空概率分布。

碰撞检测采用动态层次包围盒树^[3]实现高精度计算,流程共分为4步:一是为各类目标构建融合时间属性的四维包围盒,尺寸随速度与预测误差动态调整;二是自底向上构建层次包围盒树,降低计算负载;三是在四维时空坐标中,以0.1 s的步长开展密集交集计算;四是判定冲突,当动态障碍物间距<3 m、静态障碍物间距<5 m时,输出冲突时间、位置与风险等级,为避障决策提供量化依据。

2.3 数字孪生驱动的预测式避障路径重规划策略

基于冲突检测结果,提出“全局拓扑重构+局部轨迹平滑”双层重规划策略。以未来3~8 s空域冲突概率为触发条件,将“盲区暴露时间”作为风险评估核心指标,兼顾避障安全、轨迹平滑与能耗。

在全局重构中,当孪生体检测到高风险区域时,启动路径重构。采用改进A*算法,设计包含路径长度、能耗、冲突概率及盲区暴露时间的多目标代价函数^[14],对路径进行平滑处理,使曲率变化率满足动力学约束(最大转弯角 $\leq 30^\circ/\text{s}$)^[15]。针对突发动态障碍物,采用MPC与改进人工势场法结合的混合算法。其中,MPC作为全局控制核心,设置2 s的滚动优化窗口;改进人工势场法用于局部修正^[16],解决局部最优与目标不可达的问题,输出平滑节能的局部轨迹^[17]并下发至物理端。盲区暴露时间定义为作业载体处于感知盲区内的持续时长,计算公式如下:

$$T_{BE} = \frac{L_B}{V_U} \cos \theta \quad (1)$$

其中, T_{BE} 为盲区暴露时间(s), L_B 为盲区内飞行路径长度(m), V_U 为作业载体飞行速度(m/s), θ 为航向与盲区边界的夹角($^{\circ}$)。将该指标纳入代价函数后, 孪生体预判需穿越盲区时, 会命令物理端降速 20%~50%、扩大安全间距 1~2 倍^[11,13], 以缩短盲区暴露时间, 从源头降低碰撞风险。

3 仿真实验与结果分析

基于前文构建的数字孪生底座与避障决策机制, 本节搭建软硬件协同半实物仿真系统, 围绕典型场景验证、多方法对比、复杂场景鲁棒性这 3 组实验展开分析, 从安全性、平滑性、经济性与实时性 4 个维度进行量化评估, 以验证所提的数字孪生技术体系在低空物流盲区避障场景中的应用有效性。

3.1 数字孪生全闭环技术路线

为保障仿真验证的完整性, 首先明确本文方法的技术闭环逻辑。如图 5 所示, 数字孪生全闭环技术路线完整呈现了物理端数据采集、孪生体推演决策、指令下发执行与状态反馈修正的全流程, 清晰界定各环节的协同关系, 为后续实验设计提供技术依据。

本文构建了感知—推演—决策—执行—反馈的数字孪生全闭环技术路线(见图 5), 各环节依托 5G-A/6G uRLLC 通信实现低延迟实时交互^[8]。其中, 数字孪生体承担全域环境映射、盲区风险预判、冲突检测与路径重规划等核心推演与决策任务, 物理端仅负责多源数据采集与指令精准执行。具体流程可概括为: 物

理端多源数据采集→数字孪生底座构建→云边协同数据融合→盲区预感知→四维时空冲突检测→双层路径重规划→物理端指令执行→运行状态反馈至孪生体。该闭环设计为避障策略的前瞻性与运行可靠性提供了基础保障^[2]。

3.2 仿真实验平台构建

为保证实验结果的可靠性与可复现性, 本文搭建了贴近城市超低空物流实际作业场景的软硬件协同半实物仿真平台。

在硬件方面, 仿真服务器配置能够满足孪生场景渲染、多源数据处理与复杂算法运算的需求; 无人机仿真终端可复现真实动力学特性, 感知设备覆盖低空物流的主流类型, 确保感知过程与实际场景一致。

在软件层面, 采用行业主流工具组合, 保障实验过程规范、结果可复现。基于 Unity3D 构建孪生仿真环境, 结合 Matlab/Simulink 完成核心算法验证, 通过 Python 实现模型训练, 各模块基于 ROS2 完成实时交互^[16]。实验采用真实飞行日志与典型动态目标轨迹数据, 核心参数参照行业标准与前文孪生底座设计指标^[4], 确保场景与参数的合理设置。

3.3 仿真场景建模

以真实城区环境为原型, 遵循真实还原、覆盖典型、兼顾极端的原则, 构建城市超低空物流仿真场景, 力求全面复现城市低空复杂运行环境, 使实验场景具备代表性。仿真场景覆盖低空物流核心作业高度区间, 采用倾斜摄影技术构建高精度数字孪生模型, 精准还原建筑轮廓、高度、间距等几何特征, 包含高层建筑群等静态障碍, 复现城市峡谷等典型低空物流环

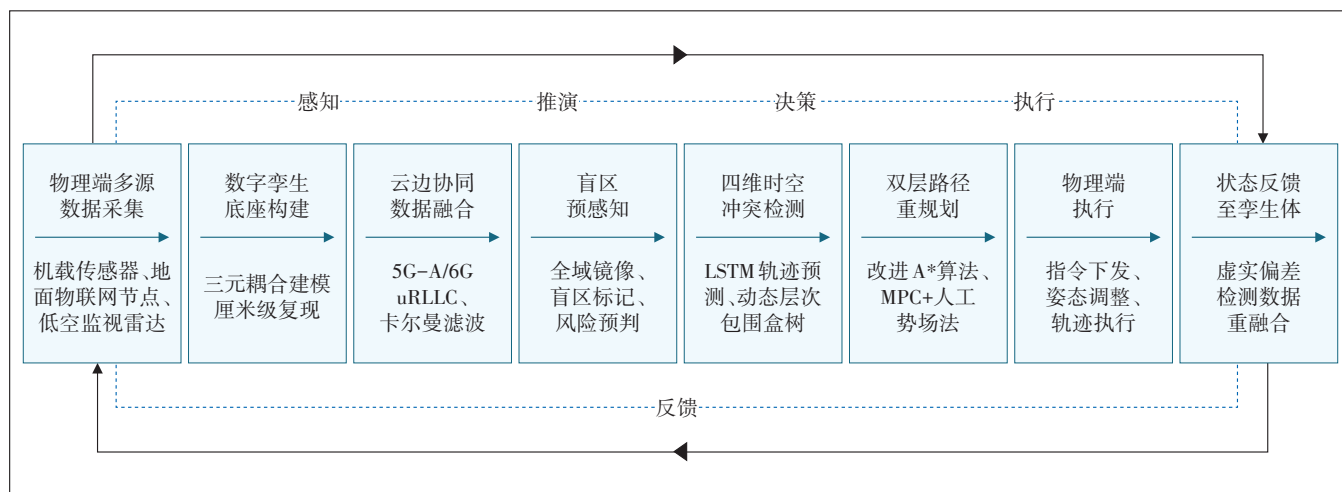


图5 数字孪生全闭环技术路线示意

境^[12](见图6)。

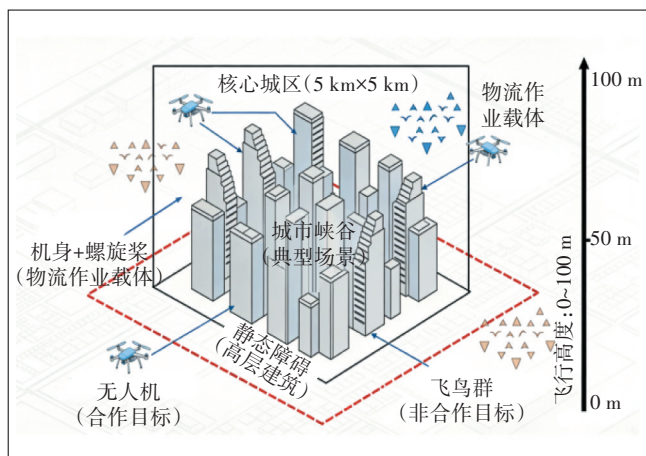


图6 城市超低空物流仿真场景示意

动态障碍物建模覆盖合作目标与非合作目标,以完整模拟低空物流中常见的动态干扰:合作目标模拟不同规格物流无人机的飞行状态;非合作目标则参照城市典型飞鸟运动特性,模拟随机移动与集群行为^[14]。此外,场景中还设置了复杂气象、短时通信中断等极端工况,用于验证所提数字孪生体系在复杂场景下的鲁棒性。

3.4 评价指标

实验从安全性、平滑性、经济性、实时性4个维度设置量化评价指标,围绕数字孪生体系的决策输出与执行效果展开,以全面、客观地评估盲区预感知避障策略。其中,安全性指标包含冲突规避成功率与平均避障响应时间,反映全域感知能力与超前决策精度^[13];平滑性采用避障路径平均曲率变化率,表征轨迹合理性与飞行平稳性;经济性以避障过程的平均能耗为指标,体现路径规划的能耗优化效果;实时性通过算法平均计算延迟来衡量,反映系统决策效率与实时响应能力。

3.5 实验结果与分析

3.5.1 典型场景验证

为验证所提出的数字孪生驱动避障策略在典型低空物流场景中的有效性,选取城市楼群盲区穿越与突发性动态障碍物规避这2类核心场景开展实验(见图7)。在城市楼群盲区穿越场景中,当无人机受建筑遮挡进入物理感知盲区、机载传感器无法探测临近目标时,数字孪生体依托高精度模型与边缘感知单元提供的实时数据,仍可在孪生空间内提前预判航迹冲突

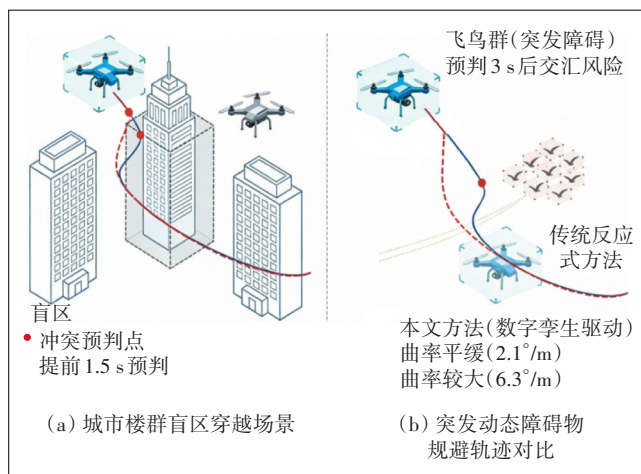


图7 典型场景避障效果示意

并发出调度指令,从而实现无碰撞安全通过[见图7(a)]。在突发性动态障碍物规避场景中,面对随机闯入航线的非合作目标,数字孪生体通过地面感知设备快速完成目标状态映射,提前预判未来时段内的航迹交汇风险[见图7(b)]。

仿真结果表明,数字孪生驱动策略可在物理视距之外实现盲区风险超前识别,所规划的避障路径曲率平缓、飞行姿态稳定,轨迹平滑性显著优于传统反应式避障方法;同时路径更趋节能,能耗控制效果提升明显,充分体现了超前决策在轨迹平滑性与能耗经济性方面^[17]的优势。

3.5.2 多方法对比实验

将本文方法与传统反应式避障、现有数字孪生避障、强化学习避障3种主流方法进行仿真对比^[15]。结果表明,本文所提方法在冲突规避可靠性、避障响应实时性、轨迹平滑度及能耗经济性方面均表现更优。具体而言,得益于盲区预感知能力突破了传统机载感知的视距限制,系统能够实现更高的冲突规避成功率;云边协同数据融合与四维时空冲突检测模型有效降低了决策延迟,提升了响应速度;双层路径重规划策略在保证安全的同时,优化了轨迹曲率与能耗水平。总体来看,本方法在上述各项指标上均优于现有的主流方法^[10]。

3.5.3 复杂场景鲁棒性实验

为检验所提体系在极端工况下的稳定运行能力,进一步在复杂环境下开展鲁棒性测试。实验结果表明,在强风气象、高密度多机并行运行、短时通信中断等复杂场景下^[1],本文所构建的数字孪生体系仍可保

持较高的冲突规避成功率与稳定的决策实时性,展现出良好的工程鲁棒性,能够满足城市复杂低空环境下高频高密度安全运行的需求^[11]。

3.5.4 实验误差分析

仿真实验取得了较为理想的结论,但仍存在一定误差。这些误差主要来源于数字孪生体系的3个核心环节:一是非合作动态障碍物建模的简化处理与真实随机性之间的差距;二是真实飞行日志中残留的测量误差;三是算法近似处理所引入的决策偏差。在后续研究中,将通过扩充真实轨迹数据、采用高精度传感器校准算法、引入误差补偿项等方式减小实验误差^[14],以进一步提升孪生模型的保真度与实际应用价值。

4 总结与展望

针对城市超低空物流场景下数字孪生应用不足及传统管控视距局限、响应滞后^[1]等问题,本文构建了数字孪生驱动的盲区预感知动态避障策略,以无人机盲区避障为典型场景验证了体系的有效性,实现了从局部感知到全域协同、从被动反应到主动预测的双重跃升。本研究构建了几何—物理—规则三元耦合数字孪生底座,实现厘米级环境复现与毫秒级虚实同步;“盲区预感知”框架突破视距限制,使物理盲区在数字端可见;四维时空冲突检测模型与双层路径重规划策略兼顾避障安全性、平滑性与能耗经济性,复杂场景下的冲突规避成功率不低于90%,为低空物流规模化运营提供了可行技术路径^[2]。然而,本研究的工程部署仍面临高精度地理信息安全合规、通信链路稳定性、大规模算力压力及真实数据依赖等挑战^[11,13],可分别借助联邦学习与国密加密、多链路冗余与机载应急逻辑、分布式调度与模型压缩、迁移学习等手段加以应对,并需分步试点、推动软硬件接口标准化。未来,研究将引入多模态大模型构建障碍物意图推理机制,推动空—地—车一体化立体交通数字孪生管控体系建设,联合产业界与政策制定者制定核心应用标准,并依托试点区域开展真实场景试飞验证^[16],加速数字孪生技术在低空经济领域的产业化落地。

参考文献:

- [1] 王梦宇,刘振宇,王玉伟. “双碳”目标下低空经济的AI变革之路[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2025,59(5):694-706.
- [2] Iqbal H, Godoy J, Martin B, et al. Seeing the city live: bridging edge

- vehicle perception and cloud digital twins to empower smart cities[J]. Smart Cities,2025,8(6):197.
- [3] Elsayed M, Mohamed M. Robust digital-twin airspace discretization and trajectory optimization for autonomous unmanned aerial vehicles[J]. Scientific Reports,2024,14(1):12506.
- [4] 王云涛,苏洲,邓毅,等. 无人机网络安全综述[J]. 网络空间安全科学学报,2025,3(1):2-18.
- [5] 张智博,常青,陈乐言,等. 低空信控与监视下的无人机自主通感与航迹规划方法[J]. 遥测遥控,2025,46(5):20-27.
- [6] 闫永刚,李新飞,沈志远,等. 考虑多约束因素的物流无人机网络高精度风险分析模型[J]. 南京航空航天大学学报(英文版),2024,41(2):218-232.
- [7] Liu Z Y, Li L H, Zhang X, et al. Considering both energy effectiveness and flight safety in UAV trajectory planning for intelligent logistics[J]. Vehicular Communications,2025,52:100885.
- [8] 柳伍生,余玉竹. 异构无人机群两级协同物流配送调度优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(4):78-92.
- [9] 刘润恺,胡伟,宋彦杰,等. 面向三维无人机物流路径规划问题的改进人工蜂群算法[J]. 控制理论与应用,2025,42(11):2274-2285.
- [10] 胡天亮,周帅昌,孟麒,等. 面向定制生产的云-边缘协同数字孪生制造平台关键技术研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2025,30(1):41-50.
- [11] 夏泳,田洛. 面向低空经济的空联网络组网关键技术研究综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2024,36(4):619-632.
- [12] 梁一婧. 考虑无人机-骑手协同服务的外卖配送路径优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(4):93-103.
- [13] 董超,尤嘉豪,张磊,等. 低空智联平台安全态势认知系统与实现[J]. 网络空间安全科学学报,2025,3(1):100-111.
- [14] Zhang T X, Grzelak D, Zhao W Q, et al. A review on the construction, modeling, and consistency of digital twins for advanced air mobility applications[J]. Drones,2025,9(6):394.
- [15] 肖智杰,谢嘉成,乔晓军,等. 边缘计算和数字孪生融合驱动的多机高效协同运行方法[J]. 工程设计学报,2025,32(5):579-589.
- [16] 胡克,孙洪飞. 未知混动态环境下多无人机轨迹规划[J]. 智能系统学报,2025,20(2):445-456.
- [17] 龙涓安,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.

作者简介:

姜大鹏,工程师,硕士,主要从事数字孪生产品、低空经济、遥感测绘研究工作;孙亮,高级工程师,高级经济师,硕士,主要从事数字政府、智慧城市等领域顶层设计及数字孪生科技创新工作;沙默泉,高级工程师,硕士,主要从事智慧城市、数字孪生创新产品研发相关工作;孙建龙,工程师,硕士,主要从事数字孪生产品、低空数字航路网、物联网研究工作。