



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507532

引用格式:郑振岗,李新凯,孟月,等.城市低空空域物流无人机交叉口四维交通规划策略[J].科学技术与工程,2026,26(27):11884-11897.

Zheng Zhengang, Li Xinkai, Meng Yue, et al. Four-dimensional traffic planning strategy for logistics UAV intersections in urban low-altitude airspace[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11884-11897.

交通运输

城市低空空域物流无人机交叉口四维交通规划策略

郑振岗¹, 李新凯^{1*}, 孟月¹, 张宏立¹, 王向阳²

(1. 新疆大学智能科学与技术学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 清华大学航空发动机研究院, 北京 100084)

摘要 城市场景下短距无人机物流运输的快速发展,对城市空域规划的科学性与安全性提出了迫切需求,其中无人机航线交叉口的高效管控是亟待突破的关键技术瓶颈之一。以无人机航线交汇形成的交叉口为研究对象,首先系统梳理了航线交叉口设计的核心影响因素,综述了当前相关研究的进展与不足;进而聚焦受控平面交叉口这一典型场景,引入地面交通“信号灯”管控思想,结合立体交叉口的空间特性以及无人机低速、低高度的运行特征,构建了融合虚拟管道技术、信号灯控制逻辑与潮汐层动态调度机制的通用型物流无人机交叉口交通模型,设计了适配三维空域特性的相位相序方案与配套的信号灯优化控制策略。通过仿真实验对本文提出的策略进行验证,结果表明:该控制策略在全流量场景下均表现出优异性能,在高流量场景下,交叉口通行能力可提升47%,无人机平均通行可降低30%,在潮汐流量场景下优化效果更为显著,有效提升了交叉口运行的安全性与稳定性。研究成果为城市场景下无人机航线交叉口的规划设计、管控策略优化提供了理论支撑与技术参考,对推动无人机物流运输系统的规模化、规范化应用具有重要意义。

关键词 交通规划策略;城市物流无人机;城市交叉口;信号灯策略;虚拟管道

中图法分类号 U121 U8; 文献标志码 A

Four-dimensional Traffic Planning Strategy for Logistics UAV Intersections in Urban Low-altitude Airspace

ZHENG Zhen-gang¹, LI Xin-kai^{1*}, MENG Yue¹, ZHANG Hong-li¹, WANG Xiang-yang²

(1. School of Intelligent Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] With the rapid development of unmanned aerial vehicle (UAV) short-distance logistics transportation in urban scenarios, there is an urgent demand for the scientificity and safety of urban airspace planning, among which the efficient management and control of UAV route intersections constitutes one of the key technical bottlenecks. Taking the route intersections formed by the convergence of UAV routes as the research object, the core influencing factors of route intersection design were systematically sorted out, and the existing research progress and shortcomings were summarized. Furthermore, focusing on the typical scenario of controlled planar intersections, it was introduced the ground “traffic light” management concept, and combined the spatial characteristics of grade-separated intersections with the low-speed and low-altitude operational characteristics of UAVs, and constructs a general traffic model for logistics UAV intersections integrating virtual pipeline technology, traffic light control logic, and tidal layer dynamic scheduling mechanism. Additionally, a phase sequence scheme adapted to 3D airspace characteristics and a supporting optimized traffic light control strategy were designed. The proposed strategy was verified through simulation experiments, and the results show that the control strategy exhibits excellent performance in all traffic flow scenarios: in high-traffic scenarios, the traffic capacity of the intersection is increased by 47%, the average travel delay of UAVs is reduced by more than 30%, and the optimization effect is more significant in tidal traffic flow scenarios, effectively improving the operational safety and stability of the intersection. The research results provide theoretical support and technical reference for the planning and design of UAV route intersections and the optimization of management and control strategies in urban scenarios, and are of great significance for promoting the large-scale and standardized application of UAV logistics transportation systems.

收稿日期: 2025-10-29 修订日期: 2026-03-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区天山英才青年拔尖人才项目(2024TSYCCX0023);国家自然科学基金(62263030)

第一作者: 郑振岗(2001—),男,汉族,甘肃平凉人,硕士研究生。研究方向:物流交通与路径规划。E-mail:3321243459@qq.com。

*通信作者: 李新凯(1991—),男,汉族,山东德州人,博士,副教授。研究方向:无人系统与具身智能。E-mail:lxk@xju.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

[**Keywords**] traffic planning strategy; urban logistics UAV; urban intersection; signal light strategy; virtual pipeline

低空经济作为推动城市产业升级与交通模式创新的重要方向,自2024年被纳入中国政府工作报告,且国家发展改革委低空经济发展司正式成立以来,已经成为全国多地重点布局的新兴赛道,产业发展正式进入全面加速阶段^[1]。在此背景下,无人机短距物流运输凭借灵活高效的突出优势,成为低空经济落地应用的核心场景。目前,美团、京东等企业已经在江苏、广东等地区规划并建设低空航线网络及配套起降场,标志着无人机物流正从概念探索阶段正式迈向商业化运营实践^[2]。根据美团2024年发布的低空物流运营报告,其在深圳龙华区试点的12条低空物流航线中,4个航线交叉口的飞行冲突预警量占全航线总预警量的72%,交叉口通行延误占单架次配送总时长的35%以上;京东在江苏苏州的试点数据同样显示,当单个交叉口小时通行量超过40架次时,传统无管控模式下的冲突风险会提升3倍以上,通行效率下降45%。这些实际运营数据表明,在高密度城市场景中,无人机飞行需要同时规避建筑物这类静态障碍,以及多机交汇带来的动态冲突,如何构建安全高效且具备容量管理能力的空中网络结构,尤其是解决航线交叉口的管控难题,已经成为制约无人机物流规模化应用的核心问题。

为破解上述难题,学界已经开展了多维度探索。针对静态障碍规避,已有文献[3]提出基于Voronoi图的虚拟空中走廊设计方案,通过将航线约束在建筑物上方的安全区域,实现多机点对点通行的空间隔离;针对动态冲突预防,已有文献[4]进一步提出基于地面道路网络的空中路径规划思路,借助结构化航线降低碰撞概率,同时探索空域多层离散化技术,通过赋予无人机高度、航向与速度的自主选择空间,在提升空域容量的同时降低飞行成本。尽管这些研究为空中网络构建提供了基础支撑,但低空城市环境下的冲突解决仍然面临挑战。例如,基于风险的空域自适应管理策略虽然能够针对不同飞行冲突制定决策,但在交通密度显著提升时,算法可扩展性不足,难以保障管控效率^[5];无人机系统交通管理(unmanned aircraft system traffic management, UTM)中引入的冲突检测与解决(conflict detection and resolution, CD&R)功能,虽然通过非线性完整优化模型实现了大规模问题的求解,却在解决方案的最优性上做出了妥协^[6]。

现有研究普遍认同“冲突预防优于冲突解决”的理念^[7],而高度结构化的高架空中网络已经被证

实是践行这一理念的有效载体^[8]。此类网络的运行核心在于交叉口设计:在三维城市场景中,无人机需要在交叉口完成水平转向、横向换道与垂直高度转换,以此接入不同航线或高度层,因此交叉口的布局合理性与管控有效性直接决定了整个空中网络的运行效率^[9]。目前学界已经提出多种无人机航线交叉口布局及控制方法,但现有方案要么受限于特定场景,通用性不足;要么未充分融合空间隔离与信号管控逻辑,难以同时兼顾通行效率与冲突规避的双重需求。

鉴于此,以城市场景下的无人机航线交叉口为研究核心,首先系统梳理分析交叉口设计的关键影响因素,综合对比现有四类交叉口布局及控制方法的优势与局限;在此基础上,针对现有研究存在的三维空域特性适配不足、通行效率与安全性难以兼顾、潮汐流量场景适配性差等问题,提出融合虚拟管道技术与信号灯控制逻辑的通用型物流无人机交叉口交通模型,核心工作如下。

(1)构建融合物流专用层与潮汐过渡层的双层空域结构,突破传统单层空域的容量限制,可适配城市物流早晚高峰的潮汐流量特征,实现空域资源的动态高效利用。

(2)提出适配无人机三维飞行特性的双层交叉口相位相序设计原则,解决传统地面信号灯逻辑直接迁移引发的三维空域冲突问题,从时序与空域两个维度实现冲突主动预防,形成了覆盖三维空间与时间维度的四维交通规划体系;

(3)建立基于韦伯斯特模型的信号灯多目标优化控制策略,实现信号周期、绿信比与交通流量的动态协同优化,在保障通行安全的同时显著降低通行延误。

最后,以城市低空空域交叉口为研究对象,通过多场景仿真实验验证了所提模型的有效性。研究成果旨在为无人机航线交叉口的规划设计提供理论支撑,进而为降低城市低空空域管理难度、提升航路网整体运行的安全性与效率提供技术参考,推动无人机物流运输体系朝着规范化、规模化方向发展。

1 城市物流无人机交叉口交通研究现状

2022年,民航局针对城市低空空域范围内起降点、航线及交叉口等关键要素的界定问题,发布了《城市场景轻小型无人驾驶航空器物流航线划设规

范》^[10]。如图1所示,无人机航线交叉口可界定为:在无人机执行城市物流配送、低空巡检等特定飞行任务的场景下,运营主体依据任务需求规划无人机的标称航迹,也就是预设的标准飞行路径,并围绕该标称航迹划设出具备一定空间范围的管状空域,用于保障无人机飞行过程中的安全间隔,避免与其他空域使用者产生干扰;当两条及以上来自不同方向的标称航迹在三维空域中形成交汇时,交汇形成的节点即为无人机航线交叉口。作为多向交通流的交汇点,航迹交叉口的冲突风险十分突出,必须予以重点关注^[11]。

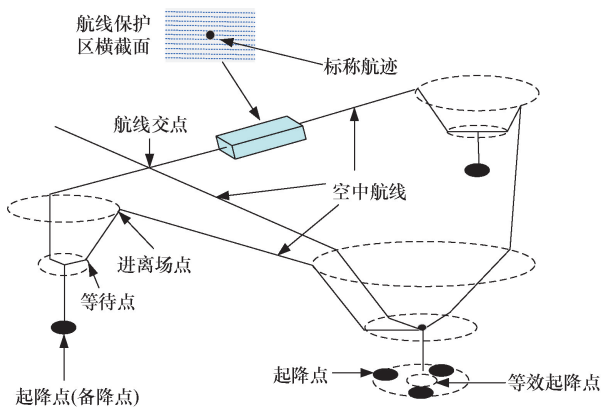


图1 无人机航线布局图

Fig. 1 UAVs route layout

1.1 影响因素分析

无人机航线交叉口与地面道路交叉口在交通流运行特征上存在共性:面对多源无人机流在交叉口形成的复杂交互场景,如何协同优化通行安全与效率,是交叉口规划设计中需要解决的核心矛盾。但二者在空间载体与管控逻辑上存在本质差异,地面道路交叉口依托实体路面构建,而无人机航线交叉口需通过导航信号在三维空域内完成虚拟划设^[12],环境的虚拟性引入了诸如导航精度、三维交互等一系列地面交通所不存在的新变量。结合现有研究成果,可将无人机航线交叉口设计的关键影响因素归纳为以下四类。

(1)碰撞风险管控。交叉口作为无人机交通流的核心汇聚节点,其空间内冲突点密集,易引发碰撞事故,且该风险的管控需突破地面车辆的管控逻辑。同地面交通相比,城市物流无人机在交叉口管控中其悬停能力存在两大局限。一是能量消耗速率较巡航状态提升30%~50%^[13],二是单次悬停时长受电池容量限制(通常不超过5 min),这使得“静止等待”模式难以直接应用于无人机交叉口。为此,现有研究提出两类针对性解决方案。一是构型优化策略:通过重构交叉口空间结构减少冲突点

数量,例如,在交叉口核心区域设置虚拟缓冲岛,将传统“十”字形交叉冲突点转化为“Y”字形分层汇聚点^[14],使不同方向无人机在空间上实现初步隔离;在交叉口空域沿垂直方向划分转向高度层,通过高度差实现直行与转向交通流的物理隔离。二是信号调控策略:借鉴地面交通信号灯的时序管控逻辑,设计无人机专属虚拟信号灯系统。该系统以“安全通过间隔”为核心标准(需结合无人机飞行速度、机身尺寸及反应时间动态计算),对每架无人机进入交叉口的时间节点与高度层进行双重管控,确保相邻无人机在时空维度上保持安全距离。

(2)无人机性能适配。无人机的运动性能与电池特性直接决定交叉口的设计参数,需在设计阶段进行针对性适配。在运动性能方面,高机动性无人机在交叉口转向过程中,可通过缩短转弯半径减少空域占用面积,进而提升交叉口单位时间内的通行量;而减速性能更优的无人机,能够缩短交叉口进口端的减速预备距离,使航线布局更紧凑。在电池特性方面,无人机在交叉口周边的操作(如减速、悬停、转向)会导致电能消耗显著增加。实测数据显示,转向操作的能耗较巡航状态提升约40%^[15],因此在交叉口设计中,需通过“优化航线曲率”“减少悬停等待时间”等方式,降低无人机的电量消耗,保障其后续飞行任务的完成度。

(3)下洗气流干扰规避。多旋翼无人机的旋翼旋转会产生向下的强气流(即下洗气流),该气流形成的空气漩涡会对处于其后方或下方的无人机造成显著干扰:一方面会导致后方无人机的升力不稳定,引发飞行姿态波动;另一方面可能改变下方无人机的飞行轨迹,增加碰撞风险。为规避此类干扰,交叉口设计需重点关注两方面:一是在水平与垂直方向设置合理间隔,通常要求相邻无人机的水平距离不小于旋翼直径的1.5倍,垂直距离不小于2 m^[16];二是优化航线方向布局,将近距离相邻航线的交通流设定为同向行驶,避免逆向行驶导致的“首尾衔接”式下洗气流干扰。

(4)通信导航信号保障。导航定位与通信传输是无人机在交叉口安全运行的基础,二者的信号质量直接影响交叉口的管控效果。若导航定位信号缺失(如被建筑物遮挡),无人机的空中位置保持精度会从 ± 0.5 m降至 ± 5 m以上,无法满足交叉口精细化管控的需求;若通信信号中断,无人机将无法接收信号灯指令与冲突预警信息,可能出现失控飞行。为此,无人机航线交叉口的选址需优先考虑通信导航信号条件,通常选择在高大建筑物上方空域,利用“高空无遮挡”的优势减少信号遮挡,同时

可在交叉口周边布设信号中继设备,进一步提升信号覆盖的稳定性。

此外,城市风场特性(如阵风风速、风向变化频率)会影响无人机的飞行稳定性,需在交叉口设计中加入风场适应性参数;地面人口密度则决定交叉口的安全冗余要求(人口密集区域需设置更大的应急避让空域);雨、雪、雾等特殊天气会降低无人机的感知精度,需配套设计天气自适应的信号管控策略。这些因素虽未在现有研究中形成统一标准,但均需在具体城市场景的交叉口设计中重点考量。

1.2 物流无人机交叉口交通模型形式及控制方法

在城市物流应用中,电动多旋翼轻小型无人驾驶航空器使用广泛,但其电池续航与飞行性能存在一定局限。为此,研究者已提出多种交叉口设计方案及管控策略,以提升运行效率。基于文献分析,综合考虑航线结构、无人机性能、交通流量以及运行规则与交叉口几何特征,将现有方案归纳为以下4类^[17]。

信号灯控制的平面交叉口按照航路结构可分为两类,如图2所示。第一类为单向单航平面型,以虚拟信号灯作为核心管控载体:每条航路仅设置一条单向航道,单个信号周期内仅允许一架无人机进入,通过“单航道结合单次单架”的模式减少空间冲突;运行过程中,交叉口控制程序生成调度指令,经由空地通信传输至无人机,调控无人机转向或在进口端悬停等待,保障通行秩序。第二类包含双向单航道型与多航道型,两类均采用信号灯管控,核心差异在于航路适配性:双向单航道适配需要双向通行的场景,多航道适配流量较大、需要多条并行航道的场景。在管控逻辑上,多航道需要协调不同航道的时空资源,信号配时与相位切换比双向单航道更为复杂,需要结合各航道的实时流量动态调整参数。

信号灯控制立体交叉口与平面交叉口的核心差异为“三维空域构型”,如图3所示。其空中走廊包含多条虚拟管道,每条管道明确固定走向(如东西向、南北向)与高度区间,立体交叉口的空域范围即由这些管道路径的重叠区域构成。管控上,该类交叉口依托信号灯系统引导无人机完成直行、左转、右转或管道入口悬停等待;因各管道高度分离,对应信号灯形成独立控制单元,指令传输与执行互不干扰,可避免平面交叉口的信号冲突问题。针对单向航路,构型设计了高度分层管控方案:以不同高度区间划分交通流(如80~90 m供直行、90~100 m供转向),并增设专用转向高度层(如90 m用于高度切换)。此设计既能从空间维度降低交汇冲突风险,又能通过高效利用高度资源提升交叉口通行容量。

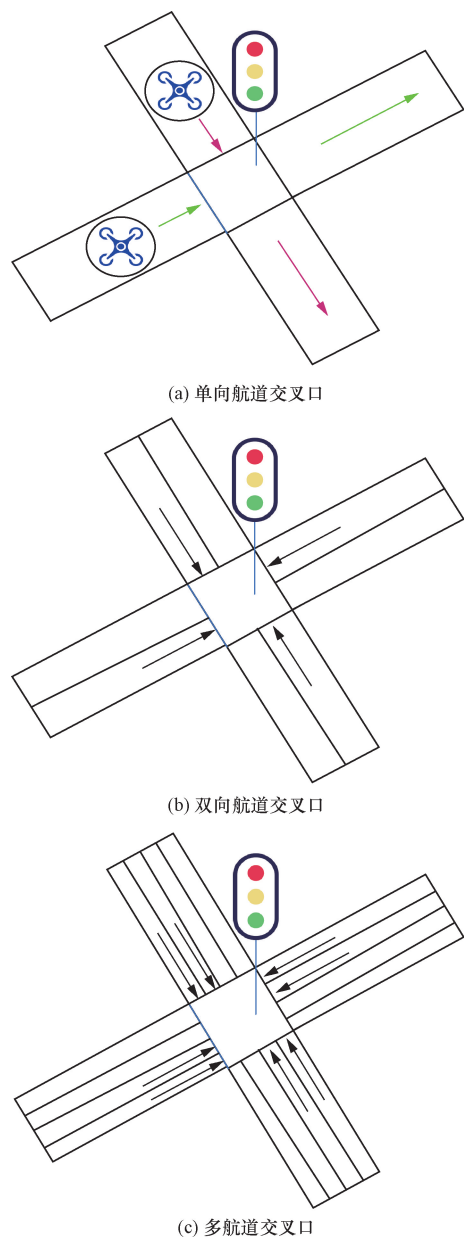


图2 信号灯平面交叉口类型

Fig. 2 Types of signal light planar intersection

无控制平面交叉口设计对无人机性能(如续航、机动性)依赖性高,主流形式为平面环形交叉口:中央设中心缓冲空域,在“航线无人机平面双向靠右运行”模式下,所有途经无人机(直行、左转、右转)均围绕该空域逆时针飞行,如图4所示。实际运行中,该构型可将传统交叉口的交通流冲突点转化为呈“Y”字形的交会区域,通过降低直接碰撞概率优化冲突风险等级。八边形交叉口,圆环形交叉口均属此类,核心差异在性能适配与适用场景:因无人机弧形航路耗电高于平飞,交叉口可根据八边形模型改造为适配航线数量少的场景;当航线数量增加,八边形与弧形路段适配性下降时,圆形因航路更连贯,更满足多航线交汇需求。

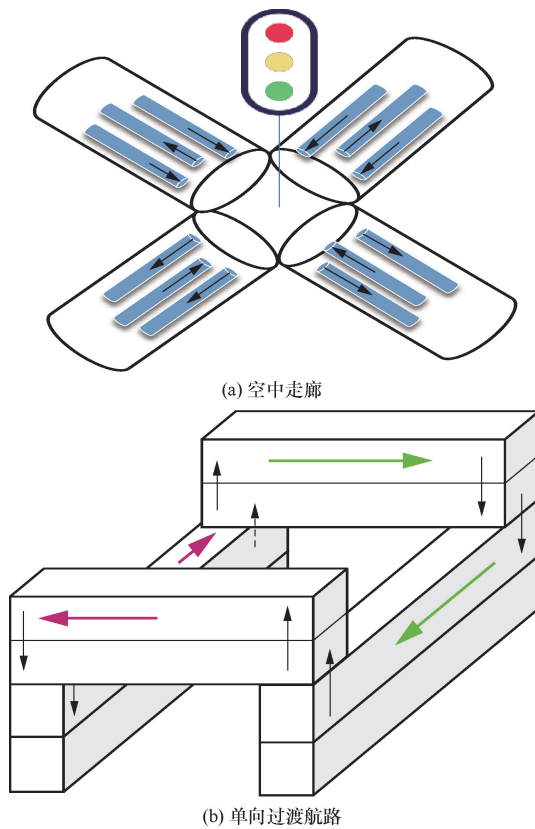


图3 信号灯控制立体交叉口

Fig. 3 Signal light controlled grade-separated intersection

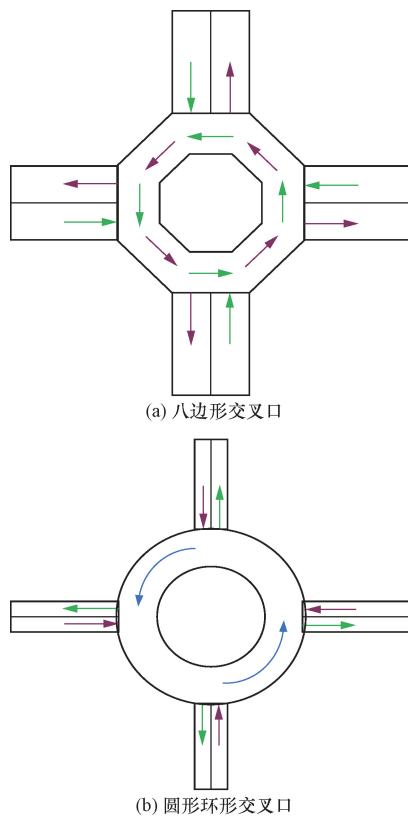


图4 无控制平面交叉口

Fig. 4 Uncontrolled planar intersection

在无控制立体交叉口设计中,根据航线交互方式可分为分离式与互通式两类。二者的航线交叉仅体现在二维平面投影上,实际空域中交通流并无物理交汇,如图5所示。分离式结构通过航路空间隔离避免冲突,无人机按预设航路稳定飞行即可保证安全,但不支持航向调整,适用于流量较低、航向固定的场景。互通式结构则具备更高运行灵活性,允许多架无人机在无额外管制条件下并行作业,并通过航路间设置的衔接过渡区实现自主转向,适应多方向飞行需求。

在上述各类交叉口构型中,信号灯控制立体交叉口具有通用适配性强的优势,符合空域环境高层建筑的城市物流航线场景需求。据此,选取该类型交叉口作为研究切入点,针对低空城市十字路口交叉场景,基于地面“信号灯”控制理论的核心思想,结合无人机可悬停等待及垂直飞行的特性,对交叉口内部及周边区域的无人机实施一体化控制,核心目标在于规避通行无人机与飞行通过交叉口排队等待无人机之间的冲突;同时,考虑信号相位设计与信号配时优化两个核心维度,构建不同交通流量场景下的信号灯控制策略,旨在减少无人机的通行延误时长。相关工作将为后续虚拟管道交叉口模型提出提供重要基础支撑。

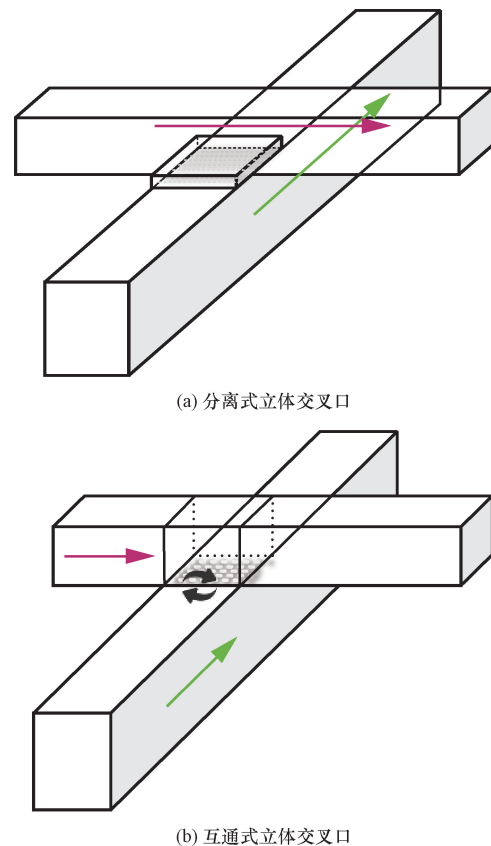


图5 无控制立体交叉口

Fig. 5 Uncontrolled grade-separated intersection

2 低空物流空域潮汐层划分

随着低空经济的快速发展,城市空中交通(urban air mobility, UAM)逐渐成为城市立体化运行的重要组成部分。无人机凭借其在物流运输、消防救援、地理测绘等领域的广泛应用,已成为各国空域资源开发利用的关键载体,并将深刻改变现有空域使用模式。空域作为飞行器运行的基本载体,指地表以上可供航空器飞行的大气空间。根据国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)标准,空域按空中交通服务与飞行要求划分为七类(A~G),其中A~E类为受控空域,F类与G类为非受控空域^[18]。

在空域垂直结构中,低空空域通常指真高1 000 m(含)以下空间,而真高120 m(含)以下被归类为超低空空域,属于G类非受控空域。据统计,中国2019年第一季度无人机飞行活动中,96.5%集中在超低空范围内,99.9%分布于低空以下空域,显示出低空域与无人机运行的高度关联性。中国于2024年实施的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》进一步明确,高度120 m以下为无人机适飞空域,120 m以上则为管制空域。基于此,聚焦于120 m以下空域中运行的小型物流运输无人机,开展相关航线规划与控制研究。

在Shrestha等^[19]的基础上,对120 m以下空域以20 m为单位再次分层,如图6所示,将60~80 m高度空域划为物流专用空域,将80~100 m空域划分为潮汐过渡空域,此空域用于交叉口物流无人机拥堵过渡与一些执行特殊任务的特种车辆专业空域。管道设计应确保其在水平、垂直及对角线方向均能与所有节点连接。同时,为提供安全冗余,任意两条管道之间必须保持不低于4 m的高度差,以防止相互干扰。航路的横截面尺寸根据无人机的自身特性进行界定,使无人机能够根据引导进行飞行。

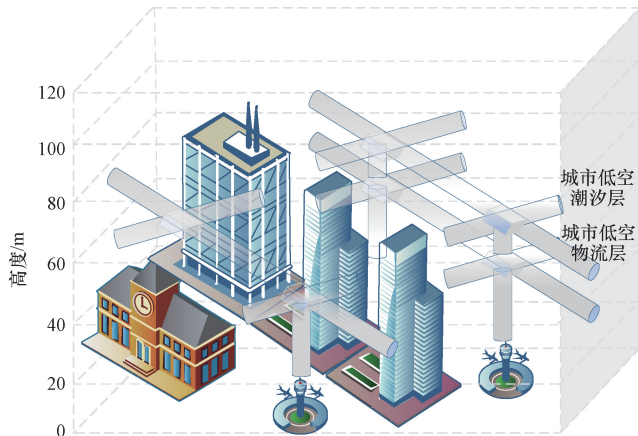


图6 低空城市空域划分

Fig. 6 Low-altitude urban airspace division

3 融合虚拟管道的信号灯控制逻辑的物流无人机交叉口交通模型

针对空域问题中城市短途无人机航线中交叉口的相关研究重点,聚焦3类核心内容:交叉口虚拟管道交通模型、双层交叉口相位相序原则、信号灯控制优化策略。通过借鉴地面交叉口管控经验并结合无人机空域运行特性,引入虚拟管道交通策略与“信号灯”控制策略,获得无人机航线交叉口从设计到管控的完整研究框架。

3.1 物流无人机交叉口虚拟管道交通模型

为在三维空间中为物流无人机规划出安全且符合可行域要求的飞行路径,引入三维空间虚拟管道方法^[20],该方法能清晰地指引无人机的行进方向,并凭借其光滑的边界特性,尤其适用于大规模机群的快速协同通行。虚拟管道具备一次性构建、重复使用的特点,在多智能体系统中,各单元仅需基于同一管道结构及自身相对位置信息即可实现安全导航,无需额外占用无线通信资源,从而有效降低系统计算与通信负担。该管道模型以一条脊曲线为核心,其法向布置有连续分布的弹性有界截面。这些截面能够根据环境动态调节自身面积与扁平程度,进而灵活调整可行区域范围。截面边界构成管道的约束界面,共同限定物流无人机的飞行通道。在本文中,虚拟管道被设定为具有固定半径、扁度与截面积的几何结构,通过融入微分几何理论,构建了基本虚拟管道模型,具体形式如图7所示。

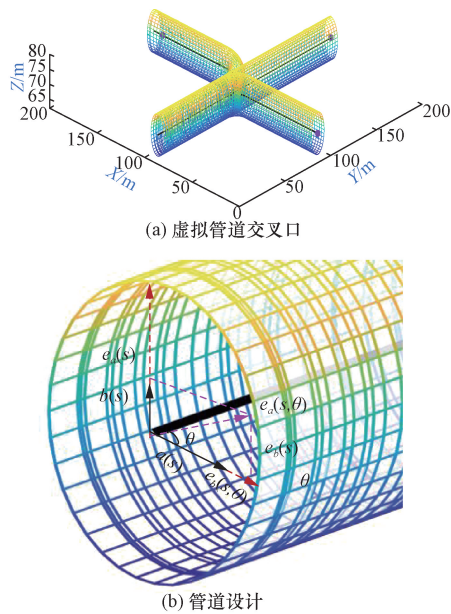
考虑三维欧氏空间中一条以弧长为 s 参数的曲线 $\mathbf{w}(s) = [x(s), y(s), z(s)]$,其定义域为 $s = [s_0, s_1] \in I_s$,且与时间 t 相关。假设存在参数 $I_s, I_\theta, I_\lambda \subset \mathbf{R}$,以及虚拟管道参数 $\theta \in I_\theta, \lambda \in I_\lambda$,使得虚拟管道 T 在Frenet标架中可表示为

$$\mathbf{T}(s, \theta, \lambda) = \mathbf{w}(s) + \lambda [\ell_a(s, \theta) \mathbf{a}(s) \cos \theta + \ell_b(s, \theta) \mathbf{b}(s) \sin \theta] \quad (1)$$

式(1)中: $\lambda \in [\lambda_{\min}(s), 1]$, $\lambda_{\min}(s)$ 为依赖于弧长 s 的实值函数,表示管道轴向伸缩的最小系数; $\theta \in [0, 2\pi] = I_\theta$ 为横截面内点与截面中心连线相对于管道主半轴的夹角,以逆时针方向为正; $\mathbf{w}(s)$ 为二阶连续可微的脊线函数; $\ell(s, \theta)$ 为横截面内点到截面中心距离的函数; $\ell_a(s, \theta)$ 和 $\ell_b(s, \theta)$ 分别为截面主、副半轴长度,二者关于 s 连续; $\mathbf{a}(s)$ 和 $\mathbf{b}(s)$ 分别为脊线在 $\mathbf{w}(s)$ 处的主法向量与副法向量。主法向量 $\mathbf{a}(s)$ 表达式为

$$\mathbf{a}(s) = \frac{\ddot{\mathbf{w}}(s)}{\|\ddot{\mathbf{w}}(s)\|} \quad (2)$$

在三维曲线几何中,同一弧长位置处的法向量方向不唯一。事实上,将式(2)所得主法向量 $\mathbf{a}(s)$



θ 为横截面内点与截面中心连线相对于管道主半轴的夹角, 以逆时针方向为正; $\ell_a(s)$ 、 $\ell_b(s)$ 分别为虚拟管道主半轴长, 为副半轴长度; $\ell_a(s, \theta)$ 和 $\ell_b(s, \theta)$ 分别为管道截面主、副半轴长度; $\mathbf{a}(s)$ 和 $\mathbf{b}(s)$ 分别为脊线在 $\mathbf{w}(s)$ 处的主法向量与副法向量

图7 虚拟管道交叉口模型

Fig. 7 Virtual pipeline intersection model

绕该点切线方向 $\dot{\mathbf{w}}(s)$ 旋转后, 所得向量仍可作为该弧长 s 处的主法向量。由于 s 为弧长参数, 其导数 $\dot{\mathbf{w}}(s) = [\dot{x}(s), \dot{y}(s), \dot{z}(s)]$ 为单位向量。为便于描述主法向量的旋转行为, 引入一个切线方向参考量 $\mathbf{w}: [0, l] \rightarrow \mathbf{R}^3$, 并定义旋转后的主法向量为

$$\mathbf{a}_r(s) = \frac{[\dot{x}(s), \dot{y}(s), 0] \mathbf{M}_r}{\sqrt{\dot{x}^2(s) + \dot{y}^2(s)}} \quad (3)$$

式(3)中: 旋转矩阵 $\mathbf{M}_r = [0, -1, 0; 1, 0, 0; 0, 0, 1]$ 。若旋转后结果为零向量, 即 $\mathbf{a}_r(s) = [0, 0, 0]$, 则取前一弧长位置的主法向量 $\mathbf{a}_r(s_i) = \mathbf{a}_r(s_{i-1})$ 。

对旋转后的主法向量 $\mathbf{a}_r(s)$ 施加如下约束, 以确保其方向合理。

(1) 非弧长 s 起点处的主法向量 $\mathbf{a}_r(s) \perp [0, 0, 1]$ 且 $\mathbf{a}_r(s_i) \mathbf{a}_r(s_{i-1}) > 0$ 为弧长 s 采样点标号。

(2) 弧长 s 上起点 s_0 处的主法向量 $\mathbf{a}_r(s_0)$ 需满足 $\mathbf{a}_r(s_0) \perp [0, 0, 1]$ 且 $\mathbf{a}_r(s_0)[0, 1, 0] > 0$ 。

(3) 若弧长 s 上起点 s_0 处管道横截面 $T(s_0, \theta, \lambda) \perp [0, 0, 1]$, 即主法向量 $\mathbf{a}_r(s_0) \perp [1, 0, 0]$ 且 $\mathbf{a}_r(s_0) \perp [0, 1, 0]$, 那么规定 s_0 处的主法向量 $\mathbf{a}_r(s_0) \perp [0, 1, 0]$ 。

副法向量 $\mathbf{b}(s)$ 表达式为

$$\mathbf{b}(s) = \frac{\mathbf{w}(s)}{\|\mathbf{w}(s)\|} \times \mathbf{a}_r(s) \quad (4)$$

为方便表述, 定义虚拟管面记为 $T_1(s, \theta) = T(s, \theta, 1)$; 虚拟管道在点 $\mathbf{w}(s_0)$ 处横截面记为 $T_{s_0}(\theta, \lambda) = T(s_0, \theta, \lambda)$; 虚拟管道主半轴长度记为 $\ell_a(s) = \ell(s, 0^\circ)$, 副半轴长度记为 $\ell_b(s) = \ell(s, 90^\circ)$ 。

如图7所示, 无人机在交叉口执行左转或右转动作时, 需严格在虚拟管道内完成, 且管道内转换区域的空间尺寸需满足无人机转弯所需的最小空域需求。与地面交通中司机通过视觉观察信号灯不同^[21], 空中信号灯系统将交叉口的实时通行权信息作为空域状态数据提前发布, 使临近无人机能够据此进行协同调度决策, 从而实现高效的预管理。

将信号灯控制下的无人机交叉口飞行过程进行剖析, 可划分为五个关键阶段场景, 如图8所示。

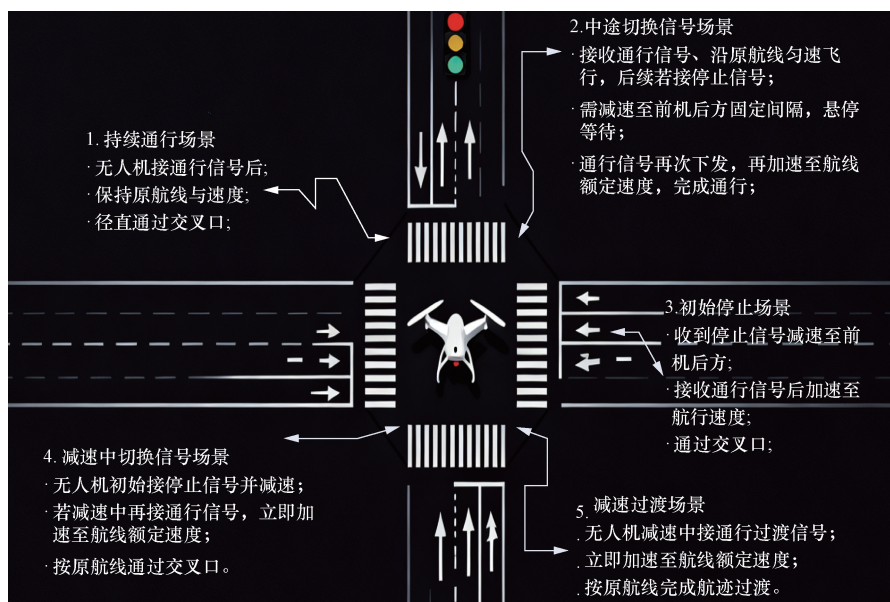


图8 五种典型场景

Fig. 8 Five typical scenarios

上述场景下,统一的行进指令保证了同航线无人机组的协同机动,从根本上规避了内部冲突。基于此,在无人机型号统一与集中控制的假设下,建立运动学与信号灯模型,即

$$\begin{cases} a = a_{\max}, & v < v_{\max} \\ a = 0, & v = v_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = 0, & t \in t_r, v = 0 \\ a = -a_{\max}, & t \in t_r, v > 0 \\ a = a_{\max}, & t \in t_g, v = at + v_{t-1} \\ a = a_{\max}, & t \in t_y, v = at + v_{t-1} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: a 和 v 分别为无人机的瞬时加速度与速度,其取值受上限 $a_{\max}$ 与 $v_{\max}$ 的约束; t_r 、 t_g 、 t_y 为当前红、绿、黄三种灯色信号时间。式(5)所示的加速度模型与式(6)所示的信号灯模型共同构成了信号状态与无人机动力学行为之间的关联机制。在无人机可同步接收信号的前提下,同一航路内的无人机将执行协同一致的机动指令。

3.2 潮汐分层虚拟管道交通模型

为了提高物流无人机在交叉口的通行效率,减缓交通延误,提出城市低空交叉口的物流潮汐层虚拟管道模型,如图9所示,其中低空潮汐层的构建方法与低空物流层一致。

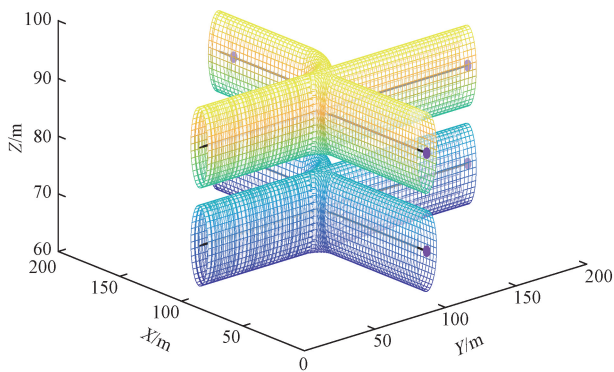


图9 潮汐分层虚拟管道模型

Fig. 9 Tidal layered virtual pipeline model

3.3 双层交叉口相位相序原则及假设

地面道路交叉口信号灯相位相序设计中,四岔路口通常配置东西向与南北向基础相位,并依据交通流量特征设置分相控制策略。此类设计虽能有效规范地面车辆通行秩序,但直接迁移至无人机交叉口存在适配局限。若单纯按航线走向分相(如仅东西/南北向)^[22],易产生无人机交叉口对向冲突,如东西向直飞与南北向右转无人机轨迹交会重叠,地面“按走向分相”无法规避此类三维空域冲突。因此,无人机航线交叉口的相位相序设计需突破地面道路的既有范式,构建适配低空飞行特性的全新

逻辑。

基于四岔路口航线网络拓扑结构,提出初始相位相序设计方案,如图10所示。该方案需满足以下四项核心原则。

(1)冲突规避原则:相位相序的设计逻辑需确保无人机在交叉口内部运行时,不同航线、不同方向的无人机无空间交会冲突,从时序与空域维度保障通行安全。

(2)航线转换原则:支持无人机从当前所在航线,向除掉头外的任意目标航线完成转换,满足多方向飞行任务的路径需求。

(3)程序安全原则:无人机依据信号灯指令执行全流程运行(含加速、减速、悬停、转向等动作)时,不存在因指令时序紊乱或逻辑矛盾导致的程序性冲突。

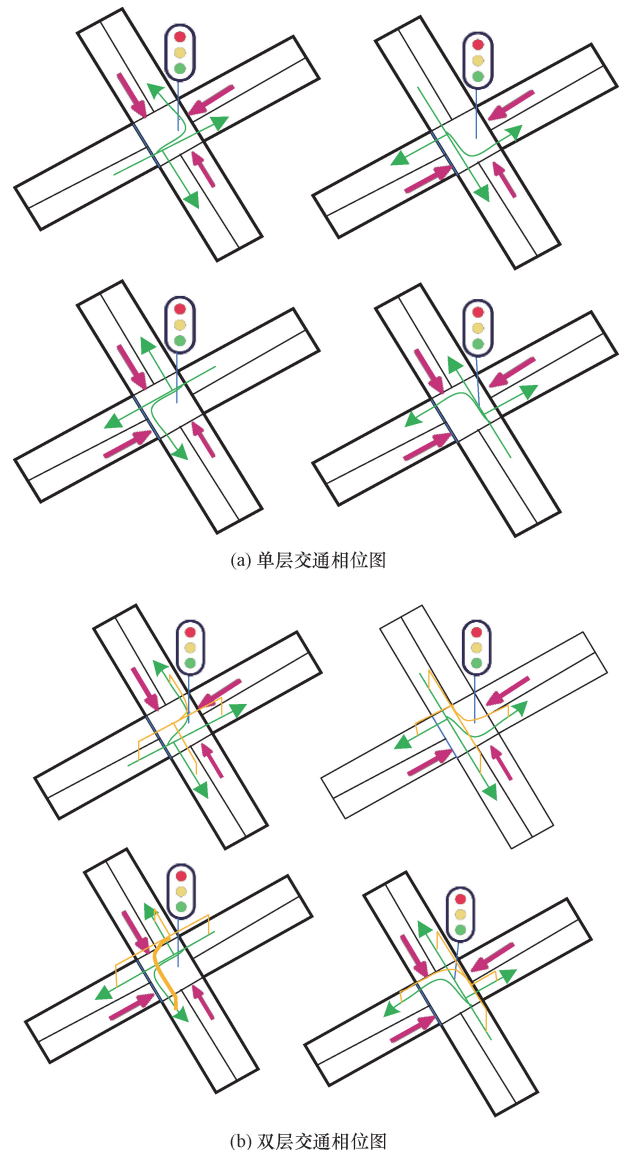


图10 交叉口信号相位设计

Fig. 10 Intersection signal phase design

(4)等待时效原则:无人机在交叉口的最大悬停等待时间,与该无人机单次完整飞行任务的总时间需保持合理比例,避免过长等待影响整体任务效率。

方案中,无人机依据信号灯指示通行:绿灯箭头方向允许进入交叉口;红灯信号则需在停止线前等待,进入悬停状态;黄色过渡箭头表示绿灯通行交叉口无人机密度大拥堵或者无人机优先级较高,可进入物流潮汐层进行飞行过渡。无人机进入交叉口后,需在圆形转向区域完成航向调整并进入目标航路。

为精准开展无人机飞行冲突探测与相位优化,结合低空无人机运动特性及现行空中交通管理规范,作如下假设。

(1)无人机简化为质点模型,暂不考虑机体尺寸、运动姿态及机动性能差异对冲突管理的影响。

(2)所有无人机的实时空间位置、飞行速度、航向角等状态参数均通过空地通信系统实时获取。

(3)在无冲突风险预警且未接收到调整指令时,无人机保持直线匀速飞行状态。

(4)实验场景设定为城市平坦区域,忽略地形起伏对飞行轨迹的影响。

(5)物流无人机均采用旋翼式构型,具备垂直起降与悬停等待能力。

(6)实验环境排除雨、雪、雷暴等恶劣天气因素的干扰。

(7)无人机到达交叉口的时间分布服从正态概率模型。

上述设计原则与假设共同构成了无人机航线交叉口信号控制的理论基础,为后续相位优化算法设计与冲突规避机制验证提供了边界条件与逻辑框架。

3.4 信号灯控制策略优化模型

在基于信号灯管理的无人机航线交叉口控制策略中,核心目标是实现飞行安全(冲突避免)与通行效率(延误最小)的协同优化。为此,借助韦伯斯特延误模型为延误提供量化依据。模型的建模基础是:无人机到达服从泊松分布,延误累积过程连续,且到离行为处于离散时间状态。在此假设下,可建立第*i*相位的平均延误表达式为

$$d_i = \frac{C(1 - \zeta_i)^2}{2(1 - \zeta_i x_i)} + \frac{1 - \zeta_i}{2q_i} + \frac{q_i}{2\zeta_i \lambda_i (\varepsilon_i \zeta_i - q)} \quad (7)$$

同时,第*i*相位的通行能力 Q_i 可表示为

$$Q_i = \varepsilon_i \zeta_i C \quad (8)$$

式中: d_i 为第*i*相位无人机流平均延误; ζ_i 为第*i*个

相位绿信比; x_i 为第*i*相位饱和度(到达流量与相位通行能力之比); ε_i 为第*i*个相位航路的饱和流量,指在一次连续绿灯信号时段内,进口航道中无人机越过出口道边线的流量; q_i 为第*i*相位无人机到达流量; Q_i 为第*i*相位无人机流所对应的到达率; C 为交叉口信号周期,即无人机从进口航道到出口道一次连续的绿灯信号时间时长。

在交叉口信号控制策略中,信号周期 C 的设定需适应交通流量的变化。低流量条件下应适当缩短周期以提高通行效率,其下限约束 $C \geq 7.5n$ (n 为相位数)。若周期低于该阈值,将导致部分相位的无人机无法在绿灯时间内完全通过交叉口,进而威胁运行安全。另一方面,为避免信号资源空置,当某相位航路内所有无人机均已通过时,周期上限设定为 $C \leq 22.5n$ 。综上,信号周期的有效取值范围为

$$7.5n \leq C \leq 22.5n \quad (9)$$

设损失时间为 L ,表达式为

$$L = C - \sum_{i=1}^n \zeta_i C \quad (10)$$

式(10)遵循交通信号控制的经典损失时间定义,反映了信号周期内无法用于无人机有效通行的时间总量,即总损失时间 L 等于信号周期 C 减去所有相位有效绿灯时间之和。其中,损失时间 L 为无人机在交叉口信号切换时隙产生的无效时间损耗,主要由单相位启动损失时间与单相位清空损失时间两部分构成:启动损失时间指无人机从航道待飞状态启动,加速至虚拟管道规定的正常通行速度所需的时间;清空损失时间指绿灯结束后,航道内剩余无人机完全通过交叉口边界、避免与后续相位无人机产生冲突所需的缓冲时间。结合城市市场景下物流无人机低速、低高度的运行特征,单相位损失时间 l_i

的取值范围为1~3 s,总损失时间 $L = \sum_{i=1}^n l_i$,随相位数 n 同步递增。该取值设计可保证损失时间在信号周期中的占比处于合理区间,既避免因损失时间占比过高降低通行效率,又与式(9)的信号周期约束范围相匹配,为后续多目标优化模型的构建奠定了严谨的参数基础。

进一步建立多目标优化函数为

$$\min(C, \zeta_i) = \sum_{i=1}^n (\omega_{1i} d_i + \omega_{2i} Q_i) \quad (11)$$

式(11)中:延误权重系数 ω_{1i} 为调节第*i*相位延误项在多目标优化函数中的重要程度。

在目标函数中,随着交叉口交通拥挤程度上升,延误项的权重应相应降低。由于各相位仅控制单一方向的交通流,将延误系数基准值设为1。定

义 Y 为交叉口总流量比,用于反映整体交通负荷,则延误权重系数可表示为

$$\omega_{1i} = \zeta_i y_i (1 - Y) \quad (12)$$

式(12)中: y_i 为第 i 相位流量比(到达流量与饱和流量之比),延误权重系数 ω_{1i} 取值与交叉口总流量比 Y 呈负相关, Y 越大(交通负荷越重), ω_{1i} 越小,以此降低延误项在优化中的权重,优先保障通行安全;结合无人机交叉口交通流特性, Y 的取值范围为 $0 \sim 1$ ($Y=0$ 表示无交通流, $Y=1$ 表示交通流达到饱和),因此 ω_{1i} 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。

同时,通行能力项的权重随交通拥堵加剧而提高,故其系数取为

$$\omega_{2i} = -Y \quad (13)$$

为保障交叉口运行处于良好状态,需对交通饱和度和设定合理约束,即

$$0.8 \leq x_i = \frac{y_i}{\zeta_i} < 1 \quad (14)$$

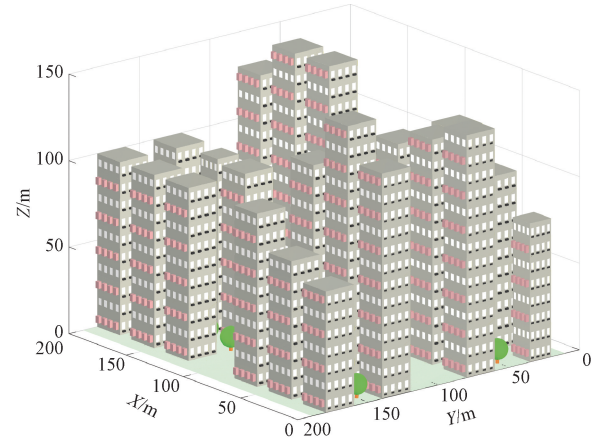
综上,可建立城市物流无人机航线信号灯交叉口的多目标优化模型为

$$\min(C, \zeta_i) = \sum_{i=1}^n [\zeta_i y_i (1 - Y) d_i - Y Q_i] \quad (15)$$

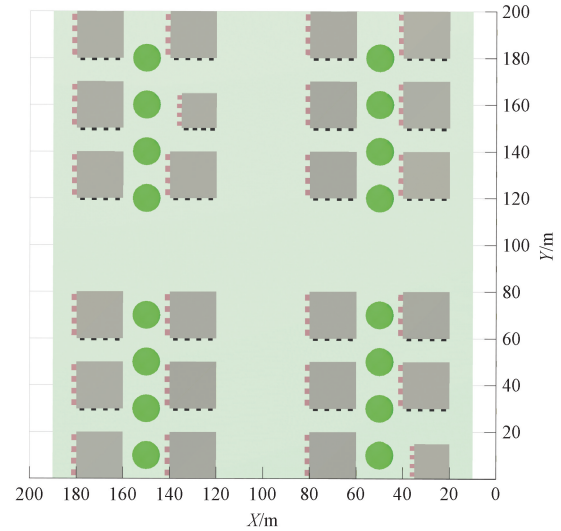
$$\text{s. t.} \begin{cases} 7.5n \leq C \leq 22.5n \\ 7.5n \leq \zeta_i C \leq C - 4(n-1) - L \\ \sum_{i=1}^n \zeta_i C + L = C \\ 0.8 \leq x_i = \frac{y_i}{\zeta_i} < 1 \end{cases} \quad (16)$$

4 模拟演示

构建用于策略模拟验证的三维环境如图 11(a) 所示。其地图尺寸为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 150 \text{ m}$,该十字路口环境由 24 栋高层城市建筑与 16 棵树组成。其中建筑物的最大高度为 150 m ,最小高度为 70 m ,平均每个建筑物占地面积为 40 m^2 ,树木的高度统一为 8 m 。如图 11(b) 所示,十字路口的长宽一致,均为 40 m ,符合国家的《城市综合交通体系规划标准》。为了验证所提融合虚拟管道信号灯控制逻辑的物流无人机交叉口交通模型策略的可行性,分别设计了物流无人机四交叉口同层模拟仿真实验与物流无人机四交叉口潮汐层模拟仿真实验。仿真基于城市低空交叉口环境,在配备 i7-9750H 处理器和 8 GB 内存的计算机上进行,环境建模仿真平台为 MATLAB 2021A,系统采用隐式信号控制,通过红、绿、黄灯色指令指挥无人机通行。设定相位 $n=4$ 以覆盖全部流线,无人机巡航速度为 20 m/s ,悬停至巡航的加速时间为 2 s 。



(a) 城市交叉口立体图



(b) 城市交叉口平面图

图 11 城市交叉口环境

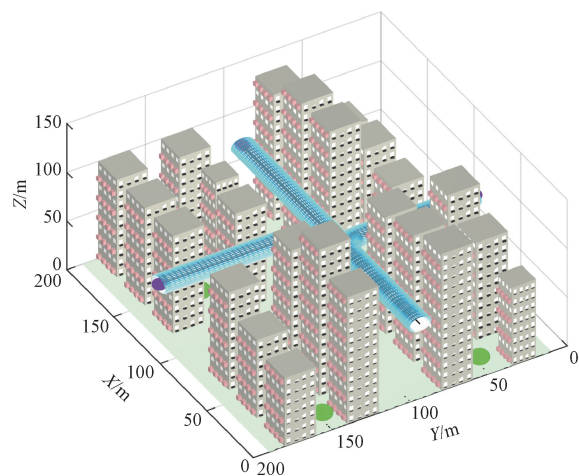
Fig. 11 Urban intersection environment

4.1 物流无人机四交叉口同层模拟

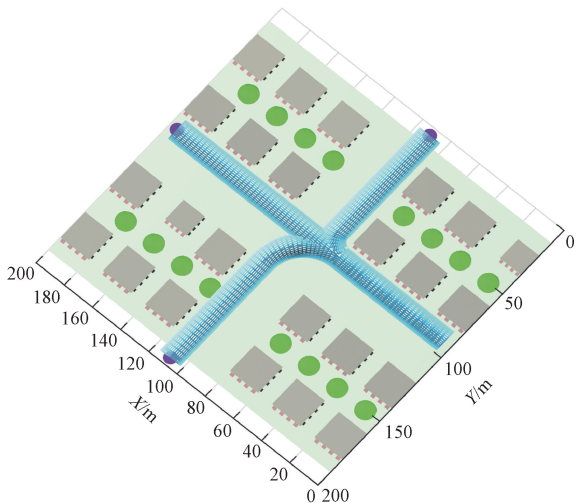
基于三维交叉口模型,设定无人机到达服从泊松分布,初始相位 $i=1$,信号接收半径 $R_{\text{sign}} = 200 \text{ m}$ 。控制策略生成流程为:按预设相位顺序下发指令,初始方案限定每航路每周期仅通行一架无人机;依次计算各相位延误与通行能力后,判断是否存在更优相位顺序,若存在则重新生成策略,否则输出当前策略并记录性能指标。交叉口空域与航路结构分别如图 12(b) 与图 12(a) 所示,其拓扑关系与相位相序同图 10(a)。无人机接收红、绿、黄信号后,将结合自身状态按以下规则响应。

(1)接收绿灯信号(巡航通行模式):无人机无需调整飞行状态,保持预设巡航速度 20 m/s 沿既定航线匀速通过交叉口,确保通行效率的同时避免空域资源浪费。

(2)接收红灯信号(动态过渡模式):无人机首先启动减速程序,将飞行速度降至安全过渡速度 ($5 \sim 8 \text{ m/s}$) 以预留调整空间,待信号灯切换为绿灯



(a) 交叉口同层模拟立体图



(b) 交叉口同层模拟平面图

图 12 交叉口同层模拟图

Fig. 12 Intersection same-layer simulation diagram

后,立即启动加速程序,直至速度回升至巡航速度,随后进入交叉口完成通行。

(3)接收红灯信号(悬停等待模式):无人机启动减速至悬停的控制逻辑,在航路进口端的虚拟停止线后方(距离停止线 10 ~ 15 m,预留安全缓冲距离)稳定悬停,待信号灯转为绿灯后再执行后续通行动作。

(4)接收绿灯信号(悬停启动模式):若无人机初始处于悬停等待状态,接收绿灯信号后将启动匀加速程序,按照预设加速度(通常为 0.5 ~ 1 m/s²)提升飞行速度,待速度达到巡航速度后,沿预设航线平稳通过交叉口。

4.2 物流无人机四交叉口潮汐层模拟

当单一航线无人机数量大于交叉口处的无人机容量,即交叉口处的无人机密度大于无人机管道规定密度,无人机执行四交叉口潮汐层规划策略,当无人机即将到达交叉口,判断相位下的通行能力

与延误情况是否满足物流配送时长与优先级,若当前物流无人机的优先级小于周围其他物流无人机,该无人机在此交叉口执行此相位交通规则;若当前物流无人机的优先级或特种无人机的优先级大于周围其他物流无人机,但由于交叉口通行缓慢,延误,可以执行潮汐层过渡策略。提升无人机高度由物流层到达潮汐层,随后切换到下一相位;在所有相位轮询结束后,生成的控制策略,会经过进一步评估,若存在更优相位序列则重新生成策略,否则输出当前策略并获取其延误与通行能力数据。当前无人机通过交叉口,到达所达目的地的最佳路径后,立即返回所属物流空域层。若当前无人机为执行任务的特种无人机,可继续在潮汐层飞行。图 13(a)模拟了六架物流无人机在三维城市低空交叉口的通行场景及管道规划。图 13(b)为三维物流层与潮汐层模拟展示,图 13(c)为物流层过渡到潮汐层,并返回到所属层的场景示意图。

4.3 对比分析

为验证本研究提出的信号灯控制方法对无人机航线交叉口的优化效果,参照文献[17]的交通流量划分标准设定仿真参数:高交通流量状态(即饱和

和流量系数)取 $Y = \sum_{i=1}^4 y_i / \sum_{i=1}^4 s_i = 1$, 中交通流量

状态取 $Y = \sum_{i=1}^4 y_i / \sum_{i=1}^4 s_i = 0.4$, 低交通流量状态取

$Y = \sum_{i=1}^4 y_i / \sum_{i=1}^4 s_i = 0.1$ (其中 y_i 为第 i 条航路的实际流量, s_i 为第 i 条航路的饱和流量)。基于该参数体系,对信号灯控制下的交叉口性能指标进行仿真测试,并与既有研究结果展开对比,核心结论如下。

4.3.1 性能指标对比与优化效果

本文研究方法与文献[17]在相同流量参数下的交叉口性能指标对比结果,如表 1 所示。

通行能力反映交通系统的服务效率,数值越高表示单位时间内可处理的交通对象越多。如图 14 所示,当交通流量比为 1.0(高流量场景)时,文献[17]方法通行能力约为 37 架,本文方法提升至 83 架,提升幅度超 124%;当交通流量比为 0.4(中流量场景)时,文献[17]方法为 12 架,本文方法提升至 23

表 1 不同交通流量下交叉口性能指标

Table 1 Intersection performance indicators under different traffic flows

流量状态	周期	绿信比
高流量 $Y=1.0$	90	0.262
中流量 $Y=0.4$	60	0.163
低流量 $Y=0.1$	30	0.148

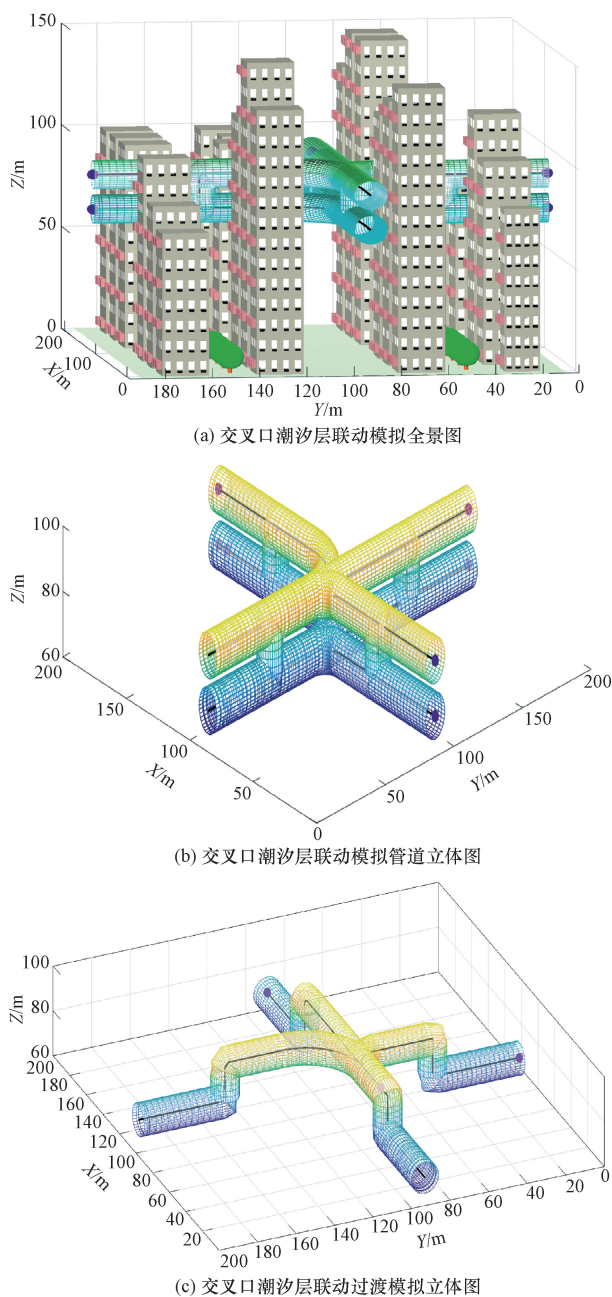


图 13 交叉口潮汐层联动模拟图

Fig. 13 Intersection tidal layer linkage simulation diagram

架,提升幅度约 91.7%;当交通流量比为 0.1 (低流量场景)时,文献[17]方法为 4 架,本文方法提升至 8 架,提升幅度达 100%。延误时间反映交通对象的等待或延迟程度,数值越低表示系统运行越顺畅。当交通流量比为 1.0 (高流量场景)时,文献[17]方法延误时间为 25.34 s,本文方法降至 15.62 s,降低幅度约 38.4%;当交通流量比为 0.4 (中流量场景)时,文献[17]方法为 15.37 s,本文方法降至 8.36 s,降低幅度约 45.6%;当交通流量比为 0.1 (低流量场景)时,文献[17]方法为 7.95 s,本文方法降至 6.4 s,降低幅度约 19.5%。

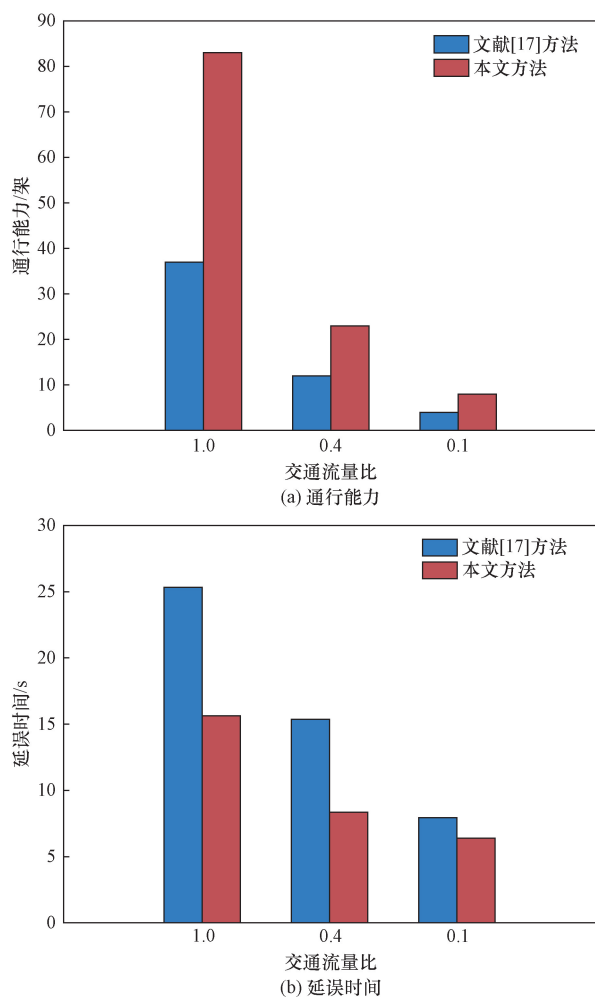


图 14 方法对比图

Fig. 14 The diagram of method comparison

本文方法在全流量场景下实现了通行能力的显著提升和延误时间的有效降低,尤其在高流量场景下提升幅度最大,有效缓解了拥堵压力;在中流量场景下优化效果最突出,提升了系统的服务流畅性;并且两种指标在低、中、高流量场景下均呈现一致性优化,说明本文方法对不同交通负荷的适配性强,具备应用价值。

4.3.2 优化机理分析

本文方法效果优于既有研究的核心原因,在于突破了传统“地面信号逻辑迁移”的局限,针对无人机低空飞行特性设计了两大关键改进。

(1) 三维相位相序优化:不同于既有研究仅按“东西/南北走向”划分相位,本方法结合无人机转向的三维轨迹(如左转无人机的高度层切换需求),将交叉口中的冲突转向动作分配至不同高度层的专属相位(如设置“物流层直行相位-潮汐层转向相位”),减少了同一平面内的无人机交会冲突,从而降低了因冲突导致的额外延误(占总延误的 30%~40%)。

(2)动态绿信比-周期协同模型:既有研究采用“变周期与静态绿信比”策略,高流量时需大幅延长周期以避免拥堵;本方法则构建了“绿信比与固定周期”协同优化模型,通过实时计算各航路的“流量-延误敏感度”,在周期增长至90 s(高流量)后,转而通过调整绿信比进一步提升通行能力,避免了周期过度延长导致的延误累积。

5 结论

以城市低空经济发展背景下的无人机航线交叉口为研究核心,针对当前城市物流无人机实际运营中交叉口冲突风险高、通行效率低、潮汐场景适配性差等痛点问题,系统梳理了无人机航线交叉口设计的关键影响因素与现有四类管控方案的优势与局限。通过借鉴地面交通交叉口成熟的管控经验,创新性地“信号灯”控制策略与虚拟管道技术、潮汐层动态调度机制融合,构建了适用于城市低空空域的通用化无人机交叉口四维交通规划模型,设计了适配无人机三维飞行特性的立体相位相序方案,并建立了信号灯控制策略的多目标优化模型。仿真实验结果表明,本文所提模型与策略在全流量场景下均实现了显著优化:高流量场景下交叉口通行能力提升47%,平均通行延误降低38.4%;潮汐流量场景下通行能力提升85.7%,延误降低57%,同时可有效保障无人机之间的安全间隔,降低冲突风险。研究成果可为无人机航线交叉口的规划设计与运营管理提供有效技术支撑,为低空物流航线网络建设提供理论参考,具有重要的理论价值。

针对未来研究方向,提出两点深化路径:一是进一步优化航路网络结构,充分挖掘无人机垂直起降与三维机动优势,探索基于全立体构型的交叉口控制方法,提升空域资源利用率;二是结合真实试点场景的运营数据,开展信号相位的精细化优化设计,量化分析不同相位方案对交叉口通行能力、延误特性及安全冗余的影响机制,为构建高效、安全的城市无人机交通管理系统提供更完善的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 杨子怡. 乘势5G-A加强低空通感网络基础设施建设[N]. 人民邮电, 2024-03-06(003).
Yang Ziyi. Taking advantage of the situation 5G-A strengthens the construction of low altitude communication network infrastructure [N]. People's Post and Telecommunications, 2024-03-06 (003).
- [2] 王志远. “空地一体智慧交通”落地深圳中国提速低空经济万亿级市场[N]. 中国青年报, 2025-08-14(008).
Wang Zhiyuan. “Integration of air-ground intelligent transportation” launched in Shenzhen: China accelerates the trillion-yuan market of

- low-altitude economy [N]. China Youth Daily, 2025-08-14 (008).
- [3] Zhang H H, Tian T, Feng O, et al. Research on public air route network planning of urban low-altitude logistics unmanned aerial vehicles[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 12021.
- [4] Mohamed-Salleg M F B, Cao C W, Wang Z K, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations [C]//2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace. Richardson: AIAA, 2018: 2260.
- [5] PANG B Z, Low K H, Lü C. Adaptive conflict resolution for multi-UAV 4D routes optimization using stochastic fractal search algorithm [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 139: 103666.
- [6] Li A, Hanson M, Zou B. Traffic management and resource allocation for UAV-based parcel delivery in low-altitude urban space[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 143: 103808.
- [7] Patrinoopoulou N, Daramouskas I, Lappas V, et al. Metropolis II: investigating the future shape of air traffic control in highly dense urban airspace[C]//2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). New York: IEEE, 2022: 649-655.
- [8] Bauranov A, Rakas J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.
- [9] Moosavi F, Farooq B. Sphereabout: a spherical intersection design for networked urban air mobility[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2507.01610, 2025.
- [10] 吕人力, 刘洋, 韩鹏. 城市场景轻小型无人驾驶航空器物流航线划设规范: MH/T4054—2022[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
Lü Renli, Liu Yang, Han Peng. Logistics route planning specification for light and small unmanned aerial vehicles in urban scenarios; MH/T 4054—2022 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.
- [11] Gharibi M, Boutaba R, Waslander S L. Internet of drones[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1148-1162.
- [12] 付金宇, 朱红, 杨子澳, 等. 时空运动耦合的地空协同智能配送规划方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2026, 58(1): 56-64.
Fu Jinyu, Zhu Hong, Yang Ziao, et al. A spatiotemporal motion-coupled intelligent dispatching planning method for ground-air collaboration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2026, 58(1): 56-64.
- [13] Sachamy D, Henderson T C. A lane-based approach for large-scale strategic conflict management for UAS service suppliers [C]//2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). New York: IEEE, 2019: 937-945.
- [14] He X, Quan Q. Air traffic network generation for UAVs at a low altitude based on digital maps [C]// 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2020: 6827-6832.
- [15] Quan Q, Li M X, Fu R. Sky highway design for dense traffic[J]. IFAC-Papers on Line, 2021, 54(2): 140-145.
- [16] Tony L A, Ghose D. Time-graded avoidance map for constrained aerial traffic [C]//AIAA Scitech 2022 Forum. San Diego: AIAA, 2022: 2158.
- [17] 赵鹏飞, 李亚鹏. 基于“信号灯”策略的无人机航线交叉口控制方法: 以杭州华正起降场空域为例[J]. 科学技术与工程,

- 2024, 24(27): 11909-11918.
- Zhao Yifei, Li Yapeng. UAV route intersection control method based on the “signal light” strategy: a case study of the airspace at Hangzhou Huazheng take-off and landing field[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(27): 11909-11918.
- [18] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓苇, 等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 64-70.
- Liu Quan, Chen Yaoyao, Hong Xiaowei, et al. International experience of urban low-altitude airspace planning for unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 64-70.
- [19] Shrestha R, Bajracharya R, Kim S. 6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: a perspective [J]. IEEE Access, 2021, 9: 91119-91136.
- [20] 吴尹菲, 李新凯, 张宏立, 等. 基于弹性面域特性的虚拟管道优化与设计[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(11): 3862-3873.
- Wu Yinfei, Li Xinkai, Zhang Hongli, et al. Optimization and design of virtual pipeline based on elastic surface domain characteristics[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(11): 3862-3873.
- [21] 中华人民共和国公安部. 道路交通信号灯设置与安装规范: GB 14886—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Specification for setting and installation of road traffic signal lights: GB 14886—2016 [S] Beijing: China Standard Publishing House, 2016.
- [22] 宋浪, 胡晓伟, 杨滨毓, 等. 平行流交叉口左转非机动车钩形转弯优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(3): 1-9.
- Song Lang, Hu Xiaowei, Yang Binyu, et al. Optimal design of hook turn for left-turning non-motorized vehicles at parallel flow intersections[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(3): 1-9.