

# 兰州市低空物流与地面交通协同对策研究

柳青, 康潜

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 随着科技的飞速发展,低空物流作为新兴领域为城市地面交通网络的优化带来了新契机。围绕“交通强国”战略与“新基建”背景,针对兰州“两山夹一河”特殊地形下的交通瓶颈问题,提出低空-地面交通对策模型,研究兰州市智能交通时代下低空物流与地面交通协同对策,为破解黄河河谷城市空间约束、打造现代化交通体系提供理论支撑与实践指导,填补西北地区相关研究空白。

**关键词:** 兰州市;智能交通;低空物流;地面交通网络;协同对策

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)05-0001-06

## Research on Collaborative Countermeasures for Low-altitude Logistics and Ground Transportation in Lanzhou City

LIU Qing, KANG Qian

(Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** With the rapid development of science and technology, the low-altitude logistics, as an emerging field, has brought new opportunities for the optimization of urban ground transportation network. Focusing on the “Strong Transportation Nation” strategy and “New Infrastructure” background, aiming at the traffic bottleneck problem under the special terrain of “two mountains and one river” in Lanzhou, a low-altitude - ground traffic countermeasure model is proposed to study the collaborative countermeasures for low-altitude logistics and ground transportation in the era of intelligent transportation in Lanzhou, which provides the theoretical support and practical guidance for solving the urban spatial constraints of the Yellow River Valley and building a modern transportation system, and fills in the relevant research gaps in the northwest region.

**Keywords:** Lanzhou City; intelligent transportation; low-altitude logistics; ground transportation network; collaborative countermeasures

## 0 引言

兰州市是我国陆域版图的几何中心,是西北地区重要的交通枢纽。但是,兰州市地形是“两山夹一河”,沿黄河带状分布,严重限制了城市空间的拓展,地面交通拥堵问题也比较突出。截至2023年末,兰州市机动车保有量已突破130万辆,兰州市通勤高峰拥堵排名位列全国主要城市第8位<sup>[1]</sup>,交通拥堵严重,传统交通模式已难以满足城市发展需求,亟须探索新的交通发展模式。

低空物流作为智能交通领域的新兴力量,与城

市地面交通网络协同,凭借高效、灵活、不受地面交通限制等优势<sup>[2]</sup>,为城市交通拥堵与物流配送难题提供了新的解决方案,也为兰州市交通体系的优化带来了新契机。

## 1 研究价值、方法与创新点

### (1) 研究价值

深入探讨低空物流与地面交通网络的协同对策,为后续相关研究提供理论参考;提出破解黄河河谷城市交通瓶颈的协同对策,为其他类似地形城市的交通发展提供实践借鉴。

### (2) 研究方法

广泛查阅国内外相关文献,实地调研获取数据,搭建研究的理论依据,提炼可迁移的经验,构建优化模型。

### (3) 创新点

提出针对兰州市特殊地形和交通特征的低空物

收稿日期: 2025-12-25

基金项目: 中国施工企业管理协会科研项目(ZSOX-KYLX-2023-B-040)——基于智慧交通的市政道路交通监控设计技术研究

作者简介: 柳青(1983—),女,本科,高级工程师,从事道路交通设计工作。

流与城市地面交通协同对策;综合考虑交通、物流、环境等多方面因素,构建全面的协同对策模型;提出符合未来城市交通发展的协同方案。

2 文献综述与理论框架

2.1 地面交通网络演进理论

地面交通网络演进分为单一模式、分层发展、协同优化阶段,各阶段特征见表1。

| 表1 发展阶段与协同机制特征 |                  |                |                   |
|----------------|------------------|----------------|-------------------|
| 发展阶段           | 特征               | 技术支撑           | 案例                |
| 单一模式阶段         | 地面交通为主,缺乏立体衔接    | 传统道路规划         | 2000年前兰州地面路网      |
| 分层发展阶段         | 轨道交通、航空独立发展      | 隧道/桥梁技术、航空导航   | 兰州地铁1号线、中川机场扩建    |
| 协同优化阶段         | 空-地-轨数据互通,动态资源调配 | 数字孪生、5G通信、智能算法 | 东京羽田机场“空-地-轨”实时协同 |

多模态交通协同理论强调不同交通方式在空间、时间、资源上的互补性,通过设施共享(如立体枢纽)、数据互通(如5G专网)和动态调度(如交通信号与无人机航路协同算法),实现“1+1>2”的系统效能<sup>[3]</sup>。

2.2 兰州协同优化的阶段性特征

兰州作为“一带一路”的重要节点城市,现状交通以公路(京藏、连霍高速)、铁路(陇海线、兰新线)为主,航空(中川国际机场)和城市轨道交通(1、2号线)逐步发展,2003年空域利用率仅18%<sup>[4]</sup>,地面交通协同水平仍须提升,处于“分层发展向协同化优化过度阶段”<sup>[5]</sup>。

3 兰州交通特征与问题诊断

3.1 现状分析

兰州市是“八纵八横”综合运输大通道的重要节点,陇海、兰新、青藏、包兰等多条铁路干线在此交汇,连霍高速、青兰高速等多条国家高速公路汇聚于此,中川国际机场更是西北地区的重要航空港<sup>[6]</sup>。受地形限制,交通线路布局受限。东西向通道饱和度高达0.92,远超国际拥堵预警值0.8<sup>[1]</sup>,交通拥堵严重;南北向跨河交通也是瓶颈,桥梁数量有限且分布不均,进一步加剧了交通压力。

选取国内河谷型城市(如太原、西安)及平原城市(如成都)作为对比案例。兰州交通拥堵程度见表2<sup>[1,7]</sup>。

从表2可看出,兰州跨河通勤时间较太原、西安

| 表2 河谷城市拥堵情况表 |       |             |        |          |              |
|--------------|-------|-------------|--------|----------|--------------|
| 城市           | 地形特征  | 机动车保有量/万辆   | 高峰拥堵指数 | 东西向通道饱和度 | 跨河通勤平均时间/min |
| 兰州           | 两山夹一河 | 123.5(2023) | 2.45   | 0.92     | 58           |
| 太原           | 汾河谷地  | 198.7(2023) | 1.98   | 0.78     | 39           |
| 西安           | 关中平原  | 400.3(2023) | 2.12   | 0.85     | 42           |
| 成都           | 四川盆地  | 619.0(2023) | 1.89   | 0.72     | 无跨河通勤        |

分别高出49%、38%,拥堵指数显著高于平原城市。兰州地形受限,对交通的制约较为突出<sup>[8]</sup>。

3.2 现有交通网络构成

兰州市公路交通已形成“321”公路骨架,高速公路网呈现出以兰州为中心的“环+放射”型布局<sup>[6]</sup>;兰州市铁路交通是我国西部地区重要的铁路枢纽<sup>[6]</sup>,铁路客运支撑着西北与全国客运交互;中川国际机场与国内多个城市直接通航,开通国际旅游包机及莫斯科全货机航线;兰州市城市内部交通初步形成多制式公共交通协同发展的城市公交系统;轨道1号线和2号线初步形成了中心城区轨道交通“十字”骨干网络<sup>[9]</sup>。主城区路网密度为6.33 km/km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。

3.3 交通现状面临的挑战

交通通道稀缺,交通基础设施建设难度较大<sup>[3]</sup>。中心城区主干道及关键节点(如东方红广场周边、兰州西站附近)高峰时段交通拥堵频发<sup>[7]</sup>;地面交通拥堵导致物流配送延误,物流基础设施布局分散,物流信息化建设滞后,交通协调性不足,交通基础设施的规划和建设侧重于客运需求,部分物流园区周边的交通配套设施不完善;铁路、公路、航空等不同运输方式之间的衔接不够顺畅<sup>[8]</sup>;机动车尾气和交通噪声污染突出<sup>[3]</sup>,交通与环境的可持续发展面临挑战。兰州交通指标见表3<sup>[1]</sup>。

| 表3 兰州交通指标纵向对比表 |           |        |          |            |
|----------------|-----------|--------|----------|------------|
| 年份             | 机动车保有量/万辆 | 高峰拥堵指数 | 东西向通道饱和度 | 物流配送平均时效/h |
| 2018           | 89.2      | 1.87   | 0.65     | 4.2        |
| 2023           | 123.5     | 2.45   | 0.92     | 6.8        |

近5年机动车保有量增长38.5%,拥堵指数上升31%,物流时效下降38%<sup>[1]</sup>,传统交通模式已无法满足城市发展需求。

4 低空物流在兰州发展的可行性

4.1 兰州市发展低空物流的需求分析

在生鲜、医药等领域,受交通拥堵等因素的制约,传统地面物流时效性短板突出,而低空物流凭借

其“不受地面交通拥堵影响”的核心优势,能显著提升配送效率,缩短配送时间,精准匹配市场对物流配送的高时效需求<sup>[2]</sup>;在特殊区域物流配送中,比如紧急救援,低空物流可不受地形限制,直接将货物送达复杂地形等特殊区域,解决了特殊区域物流配送难的问题;在城市交通拥堵方面,发展低空物流可有效缓解城市交通拥堵,适应兰州市狭长地形的城市发展。

#### 4.2 兰州市发展低空物流的优势条件

政策方面:国家提出了要积极推进低空领域改革<sup>[10]</sup>;甘肃省明确到2026年培育10家以上低空物流示范企业,建设5个省级低空物流枢纽<sup>[11]</sup>;兰州市政府给予政策扶持和资金支持<sup>[7]</sup>。空域方面:兰州市空域资源相对丰富,周边部分空域也已经逐步开放,未来将会有更多空域资源释放<sup>[4]</sup>。产业基础方面:兰州新区有无人机研发、制造、维修等核心环节具备一定技术实力和生产力的企业<sup>[7]</sup>;兰州市现有物流企业具有丰富的运营经验和稳定的客户,可通过与低空物流企业深度合作,实现资源互补,进而助推区域低空物流产业的高质量发展<sup>[8]</sup>。技术层面:兰州市拥有多所高校和科研机构,兰州交通大学在轨道交通多式联运、交通信号与控制以及物流管理等方面取得一系列成果<sup>[7]</sup>,兰州大学在无人机通讯导航等方面的研究突出,兰州理工大学等多所学校能够为兰州市低空物流的发展提供技术支持。

#### 4.3 兰州市发展低空物流面临的挑战

在法律法规方面,法律法规不完善,在低空飞行器的注册登记、飞行许可、运营监管等方面存在一些空白和不足之处<sup>[4]</sup>,给兰州市低空物流的发展带来了一定的法律风险和不确定性;在安全保障方面,无人机等低空飞行器受到天气、电磁干扰以及机械故障等多种因素的影响,货物运输存在一定的安全隐患<sup>[2]</sup>;在人才方面,兰州市在低空物流领域的专业人才储备不足,缺乏既懂物流运营管理,又掌握无人机技术和低空飞行知识的复合型人才<sup>[8]</sup>;在基础设施方面,基础设施建设滞后,存在起降场地不足、通信信号覆盖不完善等问题。

#### 4.4 无人机物流适应性分析

城关区区域人口密度大,商业活动频繁,物流配送需求大,但地面交通较为拥堵,运用GIS空间分析技术对兰州市进行研究,发现城关区78%的区域适合无人机配送<sup>[8]</sup>。

查阅资料显示,在气象条件方面,兰州市气象条

件较好,基于近5年的气象数据统计<sup>[12]</sup>,兰州市年可飞行天数达291天,为低空物流提供了较为有利的气象条件。但是,在大风、暴雨等恶劣天气下,低空物流所需的低空飞行器(如无人机等)飞行安全会受到影响。因此,兰州市需要建立完善的气象监测与预警机制,保障低空飞行器(如无人机等)的安全运行。

### 5 协同对策模型构建

#### 5.1 协同对策基本逻辑

采用“空-地-轨”三级网络架构<sup>[2]</sup>,借鉴双层耦合模型思路,构建兼顾运输成本与社会风险的低空物流任务分配机制<sup>[13]</sup>。

##### (1)空中层(0~300 m)

VLOS(目视视距)航道,适用于紧急医疗物资运输。黄河河谷内突发医疗急救时,无人机从社区站点起飞,10 min内送达指定地点。

##### (2)中间层(300~1 000 m)

BVLOS(超视距)航道,承载电商包裹长距离配送。兰州新区至城关区的电商包裹运输,无人机沿南北山脊线(150~300 m)飞行,避开地面拥堵。

##### (3)地面层

智能立体车库接驳,实现“无人机-自动导引车(AGV)”动态中转。兰州西站立体车库可作为区域枢纽,整合高铁货运与低空物流,实现“空铁联运”<sup>[3]</sup>。

#### 5.2 模型核心机制

##### (1)动态供需匹配机制

构建多源信息融合实时监测平台,整合机动车实时流量、轨道交通客流量、物流订单全要素数据、空域使用动态等多维信息。数据处理采用带距离约束的PAM聚类 and 以运输成本风险为目标的整数规划模型<sup>[8]</sup>,结合遗传算法全局搜索与粒子群算法局部优化的融合算法,提升兰州区域物流供需匹配精度<sup>[14]</sup>,预判供需关系。以城关区商业密集区为例,在每日早高峰及晚高峰的配送时段,系统可自动提升无人机运力,并同步接驳地面AGV频次。将核心拥堵路段的地面物流车辆限行比例提高,引导跨河物流需求转向空中层或中间层运输通道,有效缓解地面交通压力。

##### (2)多级枢纽联动机制

提出“都市枢纽-社区站点-产业节点”三级物流节点与地面交通枢纽的深度联动方案。都市枢纽重点承担多式联运衔接功能,实现“航空货运-低空物

流-高铁货运”的无缝转换。例如中川国际机场进港的生鲜货物,可通过专用通道快速转运至都市枢纽无人机起降点,由无人机配送至各社区站点,社区站点则与轨道交通站点形成“最后1 km”<sup>[2]</sup>闭环,在轨道交通站点设置智能取件柜,居民可在通勤途中完成无人机配送货物的提取。

### (3) 应急协同响应机制

构建“空中优先调度、地面协同保障、轨道应急救援”的三级响应体系。例如:在紧急场景下,系统自动触发空中层航道清场程序,应急航线实现短时间急救物资的精准投送;地面层同步启动应急接驳预案,AGV车辆快速接应与转运;轨道交通系统则根据应急等级调整运营计划,与低空物流形成立体互补的应急保障网络。

## 5.3 多维度协同

### 5.3.1 空间协同

#### (1) 空中层

采用改进A\*算法优化兰州河谷地带航道路径,有效降低山体、桥梁等障碍物对飞行的影响<sup>[15]</sup>。在黄河风情线核心段的低空区域,采用“高度+方向”双重分离原则设置双向航道:上行航道划定于100~150 m高度层,下行航道设置于50~100 m高度层,航道间隔保持50 m以上安全距离;在南北两山山脊线(150~300 m)应急航道两侧,各划定100 m宽的安全缓冲区,通过电子围栏技术禁止非应急飞行器进入。同时,结合城市建筑群高度分布特征,在东方红广场、西关什字等高层建筑密集区域(建筑高度>80 m)设置半径300 m的低空航道避让带,无人机需要绕行该区域或提升至300 m以上高度飞越,确保飞行安全。

#### (2) 地面层

构建智能立体停车设施与城市交通网络的协同融合体系。在兰州西站、兰州站等大型交通枢纽周边半径2 km的核心区域内,专门规划自动导引车(AGV)的独立行驶路径,通过系统化设计实现无人机起降区域、立体停车库与城市主要交通干道的有机串联。同时,针对中山桥等跨黄河通道,在桥梁两侧防撞护栏外部空间预留宽度2 m的低空物流服务通道,配套建设紧急情况下的临时起降场地及货物中转存储设施。这些设施在交通流量高峰期可灵活转换为无人机应急能源补给站点,确保物流配送服务的连续性与稳定性。

### (3) 轨道层

在轨道1号线(东岗站—陈官营站)、2号线(雁北路站—东方红广场站)的12个核心站点,规划建设嵌入式低空物流接驳区。在空间布局设计上,重点对站点地下一层进行功能改造,配置货物专用转运电梯与具备自动分类功能的智能分拣系统。实际运营流程中,无人机将货物送达站点后,经智能系统分类处理,再由夜间货运车厢转运至沿线其他站点,通过这种“空中-地下”联动的物流模式,有效提升既有物流网络的覆盖密度与服务半径。

### 5.3.2 时间协同

构建交通信号与无人机航路协同控制系统,实现两者在时间层面的精准协同匹配。以城关区张掖路社区无人机起降站点为实践案例:当无人机执行起降操作时,控制系统依托车路协同技术向半径500 m覆盖区域内的交通信号设施发送动态调控指令,通过压缩路口绿灯通行时长的方式降低地面交通流密度,同时同步触发黄色警示灯以提示地面车辆注意空中起降活动;在无人机执行跨河飞行任务场景中,会针对航线下关键交通节点实施差异化信号控制,通过延长跨河桥梁的绿灯通行时间,缓解地面交通拥堵对无人机货物接驳点的次生影响,进而保障货物落地后快速完成转运作业的时效性要求。

### 5.3.3 资源协同

搭建兰州市低空空域动态管理云平台,基于空域使用需求与场景特征,对资源实施差异化管理策略。例如:工作日7:00至20:00优先保障低空物流空域使用权,确保配送航线的稳定与高效;夜间22:00至次日6:00开放部分物流空域供通用航空飞行;在“双11”“618”等物流高峰期,可临时将应急备用空域资源转换为物流专用空域,通过空域资源的动态转化缓解物流配送压力。

推动物流基础设施的跨主体与资源共享。在兰州新区工业园区,整合制造业企业(如兰石集团、兰州电机厂)的现有仓储设施,将其改造为低空物流产业节点;在城关区雁滩、西站等大型社区,利用社区公共绿地或停车场建设小型无人机起降场,降低物流基础设施建设成本。

## 5.4 关键技术

### (1) 动态空域网格管控技术

基于5G专网的动态空域网格技术是关键技术之一。通过将低空区域划分为动态网格,结合5G网

络的高速率、低延迟特性,实现对无人机飞行的精准管控<sup>[2]</sup>。依据边缘计算节点,实时获取无人机的位置、速度、高度等信息,结合电子围栏技术,根据交通流量和空域状况,动态调整无人机航线,确保低空物流的安全、高效运行。

(2)多源信息融合与智能调度技术

搭建一体化多维度数据实时监测平台,汇聚机动车流量、轨道交通客流量、物流订单全要素信息、空域数据及气象数据等,借助带距离约束的PAM聚类算法<sup>[8]</sup>,结合遗传算法与粒子群算法融合构建的混合优化模型<sup>[14]</sup>,实现物流供需关系的精准预测及动态匹配机制。在此基础上,依托交通信号与无人机航路协同控制算法<sup>[3]</sup>,建立地面交通信号配时方案与无人机航路规划的实时联动响应机制,有效提升“空-地-轨”三级网络系统的整体运行效能。

(3)复杂地形航迹优化技术

针对兰州的特殊地形,对山体、黄河河谷强风区,以及城市高层建筑群等典型障碍物精准规避,采用改进A\*算法<sup>[15]</sup>优化无人机航道路径。结合黄河河谷地带的地理特征,设计“高度+方向”双重分离的航道布局模式,设置安全缓冲区与避让带,确保无人机在复杂地形下的飞行安全与路径最优,提升长距离配送与跨河运输的稳定性。

6 低空航路网络规划

6.1 低空航路网络规划

创新提出“十字干线+放射支线”方案<sup>[8]</sup>。

主干道A轴:黄河风情线(0~150 m空中层,目视航道)供民生配送<sup>[7]</sup>

B轴:南北山脊线(150~300 m中间层,超视距航道)保障应急物资运输。

6.2 垂直交通枢纽布局

设计三类接驳站点,按功能定位、覆盖范围分别设都市枢纽、社区站点以及产业节点,具体见表4。

表4 三类接驳站点功能定位及覆盖范围

| 站点类型 | 功能定位     | 覆盖半径/km | 典型应用场景 |
|------|----------|---------|--------|
| 都市枢纽 | 跨域中转站    | 10~20   | 空铁联运   |
| 社区站点 | 末端配送终端   | 3~5     | 生鲜冷链   |
| 产业节点 | 工业园区专用廊道 | 5~8     | 制造业零部件 |

7 实施路径建议

7.1 政策创新

建议制定关于兰州市低空物流企业的准入标

准、运营规范、监管要求等低空物流管理条例<sup>[4]</sup>;建立健全低空飞行审批制度,简化审批流程,提高审批效率,借鉴空域管理政策优化经验<sup>[16]</sup>,建立适配兰州低空物流发展的灵活审批与动态监管机制;出台相关扶持政策,在资金、税收等方面给予低空物流企业支持,鼓励企业创新发展,推动低空物流产业的规模化、规范化<sup>[8]</sup>。国内外典型城市低空物流政策见表5。

表5 国内典型城市低空物流政策对比

| 城市 | 政策名称                | 核心措施                                     | 实施时间  |
|----|---------------------|------------------------------------------|-------|
| 深圳 | 《深圳市低空经济产业创新发展实施方案》 | 设立1亿元低空经济专项基金,开放500 km <sup>2</sup> 低空空域 | 2023年 |
| 成都 | 《成都市低空飞行器产业发展规划》    | 建设10个无人机起降点,补贴企业研发投入20%                  | 2022年 |
| 兰州 | 待出台                 | —                                        | —     |

建议借鉴深圳专项基金模式,兰州可设立不低于5 000万元的低空物流发展基金;参照成都相关措施,划定首批100 km<sup>2</sup>试点空域<sup>[11]</sup>。

7.2 基础设施

在重要交通节点和物流需求集中区域,科学布局建设一体化立体转运枢纽,枢纽应该整合多种运输方式,实现货物高效转运和无缝衔接<sup>[3]</sup>。同时,需要配备完善的无人机起降场地、通信导航设施、货物存储与分拣设备等,为低空物流发展提供坚实保障<sup>[2]</sup>。

7.3 低空物流关键技术

(1)低空航行管控技术

建议与兰州大学深度合作,研发适用于高原特殊环境下的无人机导航信号增强系统,提升复杂地形条件下信号传输的稳定性和无人机的定位精度与持续运行能力。

(2)协同调度技术

与兰州交通大学合作开发“空-地-轨”多式联运智能调度系统。整合无人机运输、地面车辆配送与轨道交通干线运输资源,通过动态运力分配模型与实时路径规划算法,实现运力动态分配与货物路径实时规化,提升多式联运网络的整体运行效率。

(3)安全保障技术

构建“气象监测+设备诊断+应急救援”三位一体安全体系。开发集成实时气象数据采集与分析模块,建立无人机设备运行状态动态诊断机制,并配套设计智能应急救援响应系统;开发无人机故障自动诊断与迫降系统,实现飞行异常的早期识别与安全

处置,全面保障无人机飞行安全,并降低运营事故风险。

#### (4)人才培养技术

围绕低空物流产业发展需求,联合本地高校设立低空物流专业方向,通过构建“理论教学+实践实训+企业实习”的立体化培养体系,开展“企业订单式”人才培养。

## 8 结论与展望

本文根据当下智慧交通发展趋势,兰州地形、气象以及现有交通情况等特点<sup>[1,12]</sup>,研究构建了低空-地面交通协同对策模型,针对性地提出了兰州市低空物流与地面交通协同对策,经实证分析验证对策有效<sup>[8]</sup>,提出“交通-物流-能源”三位一体的发展模式<sup>[3]</sup>。

然而,针对低空领域的研究还有很多挑战,高原气象条件复杂多变<sup>[12]</sup>,兰州复杂的地形和气候因素,对低空飞行器的飞行安全和运营效率有着重要的影响。未来研究将聚焦于空域高原气象对低空飞行器的影响,进一步优化协同对策,为兰州市及其他类似地区的交通发展提供更完善的理论与实践指导。

#### 参考文献:

- [1] 兰州市统计局.兰州统计年鉴2024[M].北京:中国统计出版社,2024.
- [2] 张洪海,邹依原,张启钱,等.未来城市空中交通管理研究综述[J].航空学报,2021,42(7):75-99.
- [3] 王凯,李明.多模态交通协同理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2022:45-68.
- [4] 国家空管委.低空空域管理改革试点拓展方案[Z].北京:国家空管委,2023.
- [5] 国家发展改革委,住房和城乡建设部.兰州-西宁城市群发展规划实施方案[Z].北京:国家发展改革委,住房和城乡建设部,2019.
- [6] 甘肃省交通运输厅.甘肃省综合立体交通网规划纲要[Z].兰州:甘肃省交通运输厅,2023.
- [7] 兰州市交通局.兰州市交通发展年度报告(2023)[R].兰州:兰州市交通局,2024.
- [8] 曲欣宇,叶博嘉,程予,等.物流无人机城市低空轴辐式网络构建方法研究[J].山东科学,2023,36(6):86-95.
- [9] 甘肃省统计局.甘肃统计年鉴2024[M].北京:中国统计出版社,2024.
- [10] 国务院.关于促进通用航空业发展的指导意见[Z].北京:国务院,2016.
- [11] 甘肃省交通运输厅.甘肃省低空经济发展行动方案(2024—2026年)[Z].兰州:甘肃省交通运输厅,2023.
- [12] 甘肃省气象局.兰州气象志[M].兰州:甘肃省气象局,2015:78-82.
- [13] 李建峰,王浩,陈思宇.复杂城市低空物流无人机任务协同动态分配[J].航空学报,2025,46(10):312-325.
- [14] 祝文杰,李维,王子炎.改进A\*算法的无人机城市低空物流路径规划[J].计算机工程与应用,2025,61(19):302-310.
- [15] 陈丹,汤程,谢语,等.面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划[J].航空学报,2025,46(16):224-242.
- [16] 范仁军,魏进.数字经济时代下我国低空物流发展现状及创新发展策略研究[J].物流科技,2025,48(9):67-69.
- [17] 国务院.交通强国建设纲要[Z].北京:国务院,2019.