Management Science and Engineering 管理科学与工程, 2026, 15(6), 1199-1205
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mse
https://doi.org/10.12677/mse.2026.156115

Hans汉斯

多源观测与检索增强下低空配送工程调度优化

戴斯澄，刘勤明*

上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2026年10月11日；录用日期：2026年11月2日；发布日期：2026年11月13日

摘　要

低空配送调度缺乏可核查的空域观测依据与合规约束来源。本文以OpenSky匿名ADS-B深圳终端区快照、美团无人机公开运营信息与《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》为依据，构建“观测－检索－调度”三层工程框架，并设置双向信息流：观测到的飞行热点转化为调度模型的规避成本，召回的法规条文参数化生成GIS禁飞多边形作为硬约束。观测录得71条状态向量，真高300 m以下无ADS-B目标，显示常规监视存在盲区。BM25检索稳定召回真高120 m管制门槛、轻型机限速与投放申请等约束。深圳5节点算例中，双机优化将完工时间由55.1 min降至43.4 min，降幅21.1%。

关键词

低空经济，末端配送，无人机调度，检索增强生成，工程调度优化，ADS-B

Multi-Source Observation and RAG-Based Engineering Scheduling for Low-Altitude Delivery

Sicheng Dai, Qinming Liu*

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: October 11, 2026; accepted: November 2, 2026; published: November 13, 2026

Abstract

Using OpenSky ADS-B snapshots over Shenzhen, Meituan’s disclosed operations and the Interim Regulation on Unmanned Aircraft Flight Management, this paper builds an observation-retrieval-scheduling engineering framework with a bidirectional flow: flight hotspots become avoidance

*通讯作者。

文章引用：戴斯澄，刘勤明．多源观测与检索增强下低空配送工程调度优化[J]．管理科学与工程, 2026, 15(6): 1199-1205. DOI: 10.12677/mse.2026.156115

costs, and retrieved clauses become GIS no-fly polygons as hard constraints. No recorded state vector lies below 300 m, evidencing a surveillance blind spot; a clause-level BM25 index retrieves binding provisions such as the 120 m threshold to constrain a multi-drone routing model. On five Shenzhen nodes, two-drone optimization cuts the makespan from 55.1 to 43.4 min (−21.1%).

Keywords

Low-Altitude Economy, Last-Mile Delivery, Drone Scheduling, Retrieval-Augmented Generation, Engineering Scheduling Optimization, ADS-B

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

末端配送指商品从前置仓、配送站等末端节点送达消费者的最后一段物流环节。周学亨等[1]的研究总结了该环节长期依赖骑手与地面车辆、成本高且受拥堵制约的现实困境。无人驾驶航空器(下称无人机)为这一环节提供了垂直方向的替代运力。据美团官网与深圳市政府门户披露，其无人机已累计完成近 12 万单，平均配送时长约 12 分钟，地面方式接近 30 分钟；截至 2024 年 9 月底已在深圳、北京、上海等城市开通 43 条航线、累计超 36 万单，其中福田口岸航线为首条设于口岸区域的常态化配送航线，低空末端配送已从试验走向常态运营。

制度层面的进展同样迅速。刘亚亚等[2]梳理了低空经济的概念内涵与推进策略，强调制度供给是产业规模化的前提。2024 年低空经济首次写入政府工作报告；《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》[1]自 2024 年 1 月 1 日起施行，在行政法规层面统一了微型、轻型、小型等机型分类，并确立以真高 120 米为界的管制空域划分；《深圳经济特区低空经济产业促进条例》[2]同期施行，是首部以低空经济为专门对象的地方性法规。制度与运营的双重成熟，把“能不能飞”的争论推进为“在哪里飞、怎样排班”的工程问题。

运营规模扩张的同时，两个基础问题仍未被充分回答。其一，城市低空空域究竟“看得见”多少配送活动？现行空中交通监视以 ADS-B 等合作式监视为主，而配送无人机普遍不加装 Mode-S 应答机，其可观测性缺乏公开数据佐证。其二，调度决策所需的空域与机型约束散见于法规条文，如何把非结构化的法条转化为可计算的调度边界，缺少工程化的方法。廖望等[3]的评述亦指出，现有研究偏重宏观脉络梳理，对空域可观测性与合规约束工程化的讨论仍不充分。前者关系空域认知，后者关系合规落地，二者共同决定低空配送调度能否从经验排班走向有据可依的优化。

本文围绕上述两个问题展开。观测层面，调用 OpenSky 网络匿名接口对深圳终端区进行连续快照采样，刻画低空带内合作式监视目标的分布；方法层面，以《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》条文为知识库，借鉴 Lewis 等[4]提出的检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)思路召回与调度直接相关的合规约束；决策层面，将召回约束嵌入以完工时间为目标的末端配送调度模型，该模型与 Agatz 等[5]、Murray 等[6]研究的无人机辅助旅行商问题同源，并以深圳真实地理节点构成算例，对比单机最近邻基线与多机穷举优化的性能。

[1]https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6888800.htm
[2]https://www.szrd.gov.cn/v2/zx/qwfb/hygg/content/post_1123252.html

2. 数据来源与研究框架

2.1. 多源公开数据

研究使用四类公开数据。第一类为空域观测数据，来自 OpenSky 网络的匿名 REST 接口，按深圳终端区经纬度包围盒(22.44˚N~22.85˚N, 113.82˚E~114.42˚E)以 10 s 间隔连续拉取状态向量，共获得 60 帧、覆盖约 21 min；字段含 ICAO 地址、经纬度、气压高度、地速与航迹；采样时段选在低空交通低谷期，其后以同一参数对上海包围盒采样 60 帧作对照；该网络由志愿接收站汇聚 ADS-B 信号，众包数据体系见 Schäfer 等[7]。第二类为业务运营数据，取自美团官网与深圳市政府门户对航线、单量与时效的披露。第三类为规则数据，即《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》全文条文，作为合规约束的唯一权威来源。第四类为地理数据，节点坐标经 OpenStreetMap 衍生的 Photon 地理编码解析，底图源自 Haklay 等[8]维护的开放街图项目。

四类数据均可公开获取，原始快照与中间量以机器可读格式留存、可复算。

2.2. 研究框架

研究框架分为三层(图 1)。输入层汇聚上述四类数据；知识层将条例条文切分为可检索单元，建立 BM25 索引，按调度问题召回约束条款；决策层在召回约束划定的可行域内构造节点距离矩阵，求解配送调度方案。三层以“观测揭示盲区、检索补足规则、调度消费规则”为逻辑主线，把法规前置为建模输入而非事后校核。

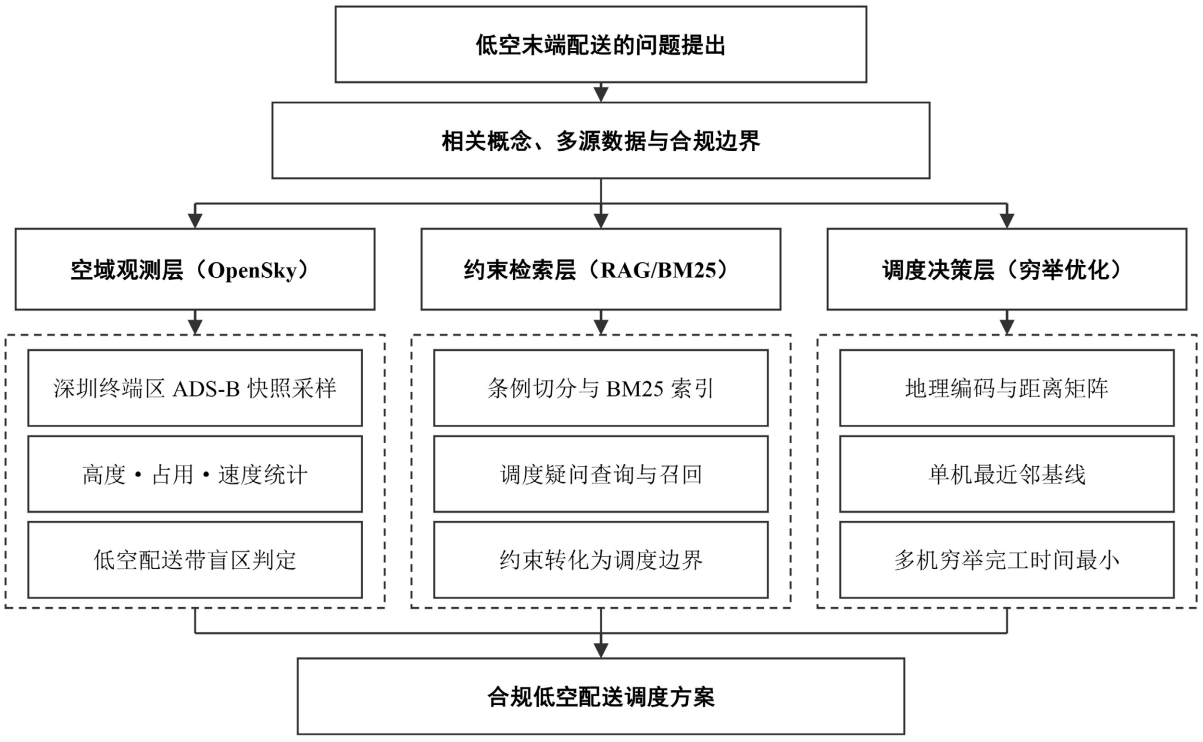


Figure 1. Research framework
图 1. 研究框架

三层间设置双向信息流。检索→调度：召回条文按真高门槛、机型限速与区域属性参数化，经 GIS 缓冲自动生成禁飞与限飞多边形，调度层须在多边形围定的可行域内规划航线，与 Kim 等[9]的空域地理

围栏机制同构；观测→调度：观测识别的飞行热点被映射为潜在冲突风险区，其规避成本计入目标函数。第 5 节已实例化前一方向：口岸与公园投送航段由第三十一条自动标记为需申报；后一方向的标定有待日间密集采样。

3. 低空空域观测特征：基于 OpenSky 的观察

对深圳终端区 60 帧快照的统计结果见图 2。采样窗口内共录得 71 条状态向量，对应 4 架唯一航空器，单帧同时在架目标数最高为 3，40 帧为非空快照。气压高度分布呈明显的双峰结构：一组集中于 1000~2000 m 与 4000~5000 m 的进离场爬升段，另一组位于 11,000~12,000 m 的巡航段，均值 5079 m，最低 564 m，最高 11,918 m；速度介于 85.6~237.2 m/s，均值 165.5 m/s。

双峰之间的 5000~11,000 m 过渡带计数为 0 (图 2(a)浅灰阴影)：该带为爬升下降的快速穿越层，窗口内无航空器停留，空档反映平飞聚集与样本有限，而非接口缺数。

值得强调的是真高 300 m 以下的低空配送带：该区间计数为 0，1000 m 以下仅 7 条且均属爬升或下降过渡，即配送无人机作业高度层内合作式监视未捕获任何目标，可判定为配送游离于 ADS-B 监视之外的结构性特征。由此得到两点动机：低空态势不能依赖 ADS-B 直接获取，需以规则与申报数据补足；配送方案须满足法规划定的空域与机型边界。

必须交代观测局限：采样落在凌晨，占用绝对值不能外推至日间高峰，且匿名接收站覆盖在空间上并不均匀。故 OpenSky 仅作监视盲区的证据而非轨迹来源，合规约束须取自法规文本。

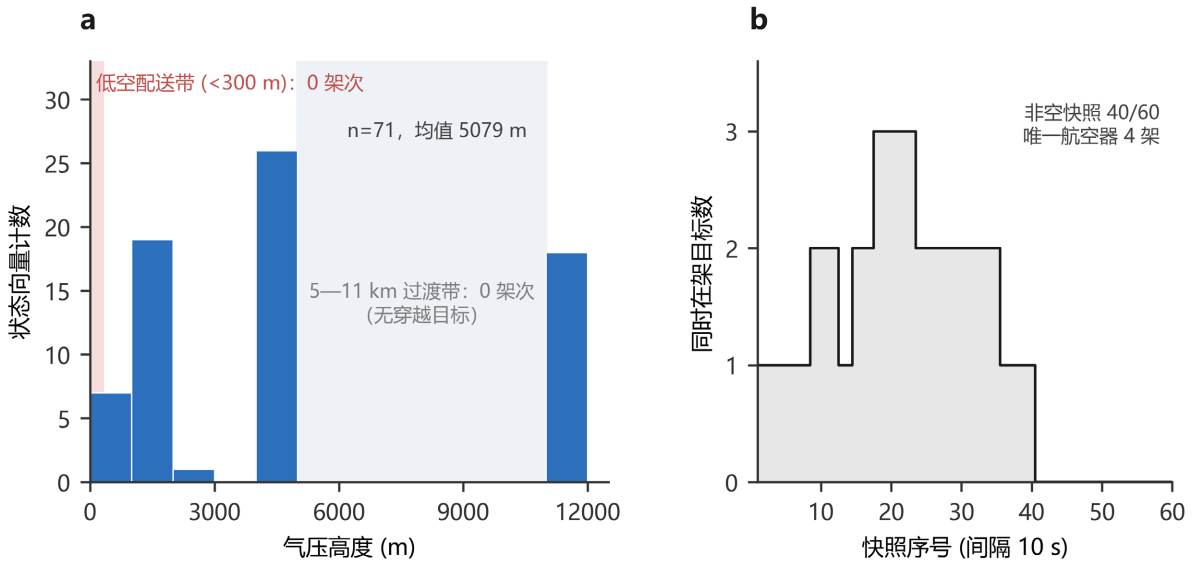


Figure 2. OpenSky observations over Shenzhen terminal area: (a) barometric altitude distribution (light red shading: low-altitude delivery band; light gray shading: 5-11 km transition band); (b) number of simultaneously airborne targets per snapshot
图 2. 深圳终端区 OpenSky 观测特征：(a) 气压高度分布，浅红阴影为低空配送带，浅灰阴影为 5~11 km 过渡带；(b) 单帧同时在架目标数

4. 面向合规约束的检索增强方法

条例共六十二条，逐条人工比对效率低且易遗漏。本文将每条条文作为一个文档单元，采用字符级一元与二元组合分词，建立 BM25 索引，沿用 Lewis 等[4]的检索增强范式，以调度设计中真实出现的疑问作为查询语句进行召回。表 1 给出四条查询及其首位命中。

Table 1. RAG queries and top hits of regulatory constraints
表 1. 约束知识检索(RAG)查询与首位召回结果

查询语句	首位召回条文	BM25 得分
管制空域与适飞空域的真高划分门槛是多少，轻型无人驾驶航空器可在何种空域内飞行	第十九条	31.719
无人驾驶航空器运载或者投放物品，是否需要提前提出飞行活动申请	第三十一条	43.496
轻型无人驾驶航空器的空机重量与最大起飞重量划分标准	第六十二条(术语)	22.990
小型无人驾驶航空器操控人员是否需要取得操控员执照	第十六条	32.837

检索打分采用 BM25 概率框架：查询词在条文中的词频经饱和函数压缩，避免长条文因词数多而垄断命中；逆文档频率对跨条文高频词降权；取 Robertson 等[10]推荐的 k1 = 1.5、b = 0.75 通行设置。中文不做词语级分词，以字符一元与二元组合为索引单元，使“真高”“管制空域”等术语无需分词器即可精确匹配。相较向量检索，BM25 打分确定、无需训练与嵌入模型，便于复算。

四条查询的首位召回均落在对应条款上：空域划分查询命中第十九条“真高 120 米以上空域应当划设为管制空域”；投放申请查询命中第三十一条关于运载危险品或投放物品需提出申请的规定；机型划分查询命中第六十二条轻型机定义(空机不超过 4 kg、最大起飞不超过 7 kg、平飞速度不超过 100 km/h)；操控资质查询命中第十六条。召回结果直接转化为硬约束：计划真高 100 m 低于 120 m 门槛；巡航 15 m/s 低于轻型机 100 km/h 上限；投放航段在生成阶段即标记为需申报。

5. 末端配送调度模型与算例

5.1. 节点与距离矩阵

算例以深圳 5 个真实地点为节点：配送站设于深业上城，投送点为深圳中心公园、人才公园、海风运动公园与福田口岸，均为美团无人机披露过的运营或投送区域。节点经纬度经 Photon 地理编码解析(底图源自 Haklay 等[8]的开放街图)，节点间距离采用大圆距离计算，结果见表 2。场景参数为模型设定：巡航 15 m/s、计划真高 100 m、起降开销 1.5 min、空投服务 2.0 min，与第 4 节召回的法规上限一致。

Table 2. Coordinates and great-circle distance matrix (km)
表 2. 节点坐标与节点间大圆距离矩阵(km)

节点	名称	纬度(˚N)	经度(˚E)	N0	N1	N2	N3	N4
N0	深业上城*	22.560	114.065	0.00	1.38	13.96	14.93	4.70
N1	中心公园 C2 区	22.549	114.072	1.38	0.00	14.25	14.96	3.63
N2	人才公园	22.515	113.938	13.96	14.25	0.00	2.90	12.79
N3	海风运动公园	22.489	113.942	14.93	14.96	2.90	0.00	12.83
N4	福田口岸	22.518	114.063	4.70	3.63	12.79	12.83	0.00

注：*为配送站；距离为节点间大圆距离。

5.2. 基线与优化策略

基线策略为单机最近邻：自配送站出发，每步选择距当前节点最近的未服务投送点，服务完毕后返回配送站。优化策略为多机穷举：将 4 个投送点的全排列按切分点划分为 m 条航线，交由 m 架无人机并行执行，枚举全部排列与切分组合，取完工时间(makespan，即各机中较晚返回时刻)最小者。全部组合毫

秒级枚举完成，所得解为全局最优。该问题与 Agatz 等[5]的旅行商加无人机模型、Murray 等[6]的飞翼伙伴旅行商模型同源；傅惠等[11]的综述亦作如是归类；Yan 等[12]的路径与调度联合优化模型是其一般形式，本文穷举解即其小规模精确解。

5.3. 结果分析

结果见表 3 与图 3。基线单机最近邻的航线为配送站－中心公园－福田口岸－人才公园－海风公园－配送站，总航程 35.62 km，完工时间 55.1 min。单机穷举最优 54.1 min，仅快基线 1.0 min，说明改善空间主要来自并行而非串行顺序。双机最优拆为两条航线：机 1 担中心公园与海风公园，机 2 担福田口岸与人才公园，完工 43.4 min，缩短 21.1%；三机完工进一步降至 38.2 min，缩短 30.7%，平均完成时间降至 14.2 min。

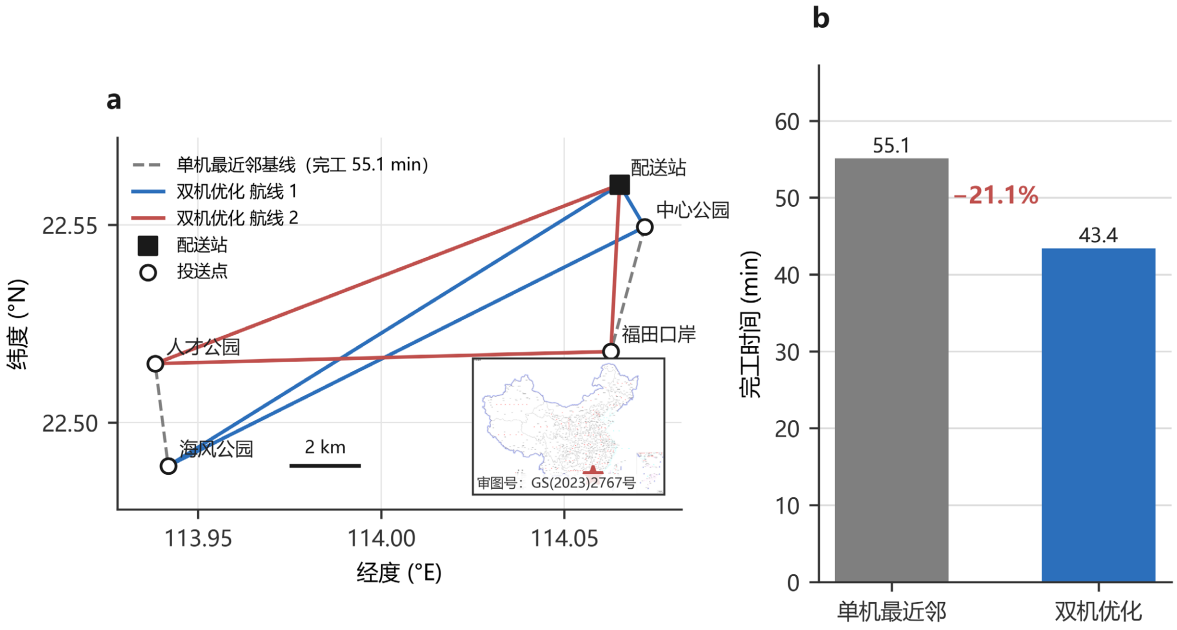


Figure 3. Scheduling case: (a) baseline and two-drone optimized routes (plotted with equal scale in WGS-84 coordinates; distances are given in Table 2); (b) makespan comparison
图 3. 调度算例：(a) 基线与双机优化航线(WGS-84 坐标等比例绘制，距离见表 2)；(b) 完工时间对比

Table 3. Comparison of scheduling schemes
表 3. 调度方案对比

方案	架次	总航程(km)	完工时间(min)	平均完成时间(min)
单机最近邻(基线)	1	35.62	55.1	21.2
1 机穷举最优	1	34.70	54.1	21.2
2 机穷举最优	2	62.72	43.4	21.5
3 机穷举最优	3	67.49	38.2	14.2

把架次作为变量观察边际收益：第二架无人机使完工时间下降 11.7 min，第三架仅再降 5.2 min，而总航程分别增加 27.10 km 与 4.77 km。完工时间对应时效承诺、总航程对应成本：时效优先的即时零售宜以航程换完工时间，成本敏感的日常补货则单机串行仍具合理性。各优化航线均保持在召回约束划定

的可行域内：计划真高 100 m、巡航 15 m/s，口岸与公园投送航段已按第三十一条标记为申报航段。

6. 结论与展望

本文以可核查的公开数据为底座，考察了低空配送调度中的空域认知与合规约束问题。OpenSky 快照显示深圳终端区低空配送带内合作式监视目标为零，说明低空态势不能由 ADS-B 直接获得；BM25 检索稳定召回真高、机型与申报等硬约束，使法规从文本进入模型；深圳真实节点算例表明双机并行可将完工时间缩短 21.1%、三机缩短 30.7%，且该收益以航程为代价，需按场景切换目标。框架不依赖特定城市与平台，更换包围盒、法规文本与节点数据即可迁移。

研究存在三点局限与后续方向。其一，OpenSky 采样密度与覆盖有限且窗口处于凌晨，观测结论需以更长期、多城市、覆盖日间高峰的采样检验。其二，算例为 5 节点小规模情形；规模扩大后需引入分支定界或列生成等精确方法，并考虑风场与电量等动态约束。其三，双向信息流仅部分落地：召回条文在算例中只以申报航段生效，禁飞多边形与规避成本有待工程实现；下一步可结合大语言模型在人工校核下完成法条到约束的结构化映射，并接入真实申报与 Remote-ID 数据。

致　谢

感谢上海理工大学管理学院对本篇论文工作的支持。

参考文献

[1] 周学亨, 卢建雄, 王俊伟, 等. 电商物流“最后一公里”问题及对策[J]. 电子商务评论, 2025, 14(6): 3054-3058.

[2] 刘亚亚, 杨德林, 戴永. 低空经济的概念内涵、发展特征与推进策略[J]. 技术经济, 2025, 44(3): 29-37.

[3] 廖望, 曹小曙, 袁立洋, 等. 国内外低空经济研究脉络与进展评述——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. 热带地理, 2025, 45(6): 937-953.

[4] Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., *et al*. (2020) Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Online, 6-12 December 2020, 9459-9474.

[5] Agatz, N., Bouman, P. and Schmidt, M. (2018) Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Science*, **52**, 965-981. https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0791

[6] Murray, C.C. and Chu, A.G. (2015) The Flying Sidekick Traveling Salesman Problem: Optimization of Drone-Assisted Parcel Delivery. *Transportation Research Part C*: *Emerging Technologies*, **54**, 86-109. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005

[7] Strohmeier, M., Olive, X., Lübbe, J., Schäfer, M. and Lenders, V. (2021) Crowdsourced Air Traffic Data from the Opensky Network 2019-2020. *Earth System Science Data*, **13**, 357-366. https://doi.org/10.5194/essd-13-357-2021

[8] Haklay, M. and Weber, P. (2008) Openstreetmap: User-Generated Street Maps. *IEEE Pervasive Computing*, **7**, 12-18. https://doi.org/10.1109/mprv.2008.80

[9] Kim, J. and Atkins, E. (2022) Airspace Geofencing and Flight Planning for Low-Altitude, Urban, Small Unmanned Aircraft Systems. *Applied Sciences*, **12**, Article 576. https://doi.org/10.3390/app12020576

[10] Robertson, S. and Zaragoza, H. (2009) The Probabilistic Relevance Framework: BM25 and Beyond. *Foundations and Trends in Information Retrieval*, **4**, 1-174. https://doi.org/10.1561/1500000019

[11] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. 工业工程, 2025, 28(1): 9-21.

[12] Yan, S., Sun, C.S. and Chen, Y.H. (2023) Optimal Routing and Scheduling of Unmanned Aerial Vehicles for Delivery Services. *Transportation Letters*, **16**, 764-775. https://doi.org/10.1080/19427867.2023.2237736