

文章编号:1671-1637(2026)03-0228-16

基于梯度优化的低空平面航路网规划方法

李杰¹, 沈堤¹, 余付平^{*1}, 郭艺夺²

(1. 空军工程大学空管领航学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘要:为解决低空航路网结构不完善、规划方法不成熟的问题,设计低空航路网结构并提出创新规划技术。结构上,构建“三层空域”整体框架(底层物流航路网、中层通行航路网、上层应急/公共航路网),内部采用单层双向航路设计,交叉点参考立交桥模式实现全向无等待通行;规划方法上,创新提出基于梯度优化的两阶段技术,全局规划通过路径规划算法生成航线,采用“扫描体”法识别转弯点与交叉点,经基于密度的带噪声应用空间聚类合并形成初始网络,局部优化将问题转化为航路汇聚点布局问题,设置9个移动方向构建方向矩阵,以航路网络总长度、航线总长度和安全约束为目标函数,通过动态更新转移概率迭代优化交叉点位置;以上海某区域为仿真场景,以150 m为高层建筑界定标准,设置12个起降点与34条航线验证。研究表明:规划的无冲突航路网,较现有方法迭代次数减少66%;85.3%的航线长度变化率为-10%~2%,未出现过度延长情况;节点布局规整,空域占用率与冲突风险显著降低。该结构框架与规划技术为城市低空航路网实际建设提供了可行方案,后续可拓展干线航路网规划研究。

关键词:低空交通;空域规划;梯度优化;低空航路网;航路汇聚点布局问题

中图分类号:U8 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.154

Low-altitude planar air route network planning method based on gradient optimization

LI Jie¹, SHEN Di¹, YU Fu-ping^{*1}, GUO Yi-duo²

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, Shaanxi, China;

2. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, Shaanxi, China)

Abstract: To address the problems of imperfect structure and immature planning method of low-altitude air route networks, the structure of low-altitude air route networks was designed and an innovative planning technology was proposed. In terms of structure, an overall “three-layer airspace” framework was constructed (the bottom layer is the logistics air route network, the middle layer is the commuter air route network, and the upper layer is the emergency/public air route network). A single-layer bidirectional air route design was adopted for the internal structure, with intersections referring to the overpass model to achieve omnidirectional non-waiting traffic. In terms of planning method, an innovative two-stage technology based on gradient optimization was proposed. In the global planning stage, a path planning algorithm was used to generate routes, the “scanning volume”

出版历程:2025-08-15 收稿,2025-12-02 修回,2026-01-23 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(2024-SKJJ-B-035)

作者简介:李杰(2000-),男,河南济源人,工学博士研究生, E-mail:18681899056@163.com。

*通信作者:余付平(1983-),女,河南商丘人,教授,博士, E-mail: junjingj@163.com。

引用格式:李杰,沈堤,余付平,等.基于梯度优化的低空平面航路网规划方法[J].交通运输工程学报,2026,26(3):228-243.

Citation: LI Jie, SHEN Di, YU Fu-ping, et al. Low-altitude planar air route network planning method based on gradient optimization [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 228-243.

method was adopted to identify turning points and intersection points, and density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) was employed to merge them to form an initial network. In the local optimization stage, the problem was transformed into the crossing waypoints location problem (CWLP), 9 movement directions were set to construct a direction matrix, and the total length of the air route network, the total length of routes, and safety constraints were taken as the objective function. The position of intersection points was iteratively optimized by dynamically updating the transition probability. With a certain area in Shanghai as the simulation scenario and 150 m as the standard for defining high-rise buildings, 12 take-off and landing points and 34 routes were set for verification. The results show that a conflict-free low-altitude air route network is successfully planned, with the number of iterations reduced by 66% compared with existing methods. 85.3% of the route length change rates are between -10% and 2% , with no excessive extension. The node layout is regular. The airspace occupancy rate and conflict risk are significantly reduced. The structural framework and planning technology provide a feasible scheme for the practical construction of urban low-altitude air route networks. The planning research of trunk air route networks can be expanded in the future.

Keywords: low-altitude traffic; airspace planning; gradient optimization; low-altitude air route network; crossing waypoints location problem

Publication history: Received 2025-08-15; Received in revised form 2025-12-02; Accepted 2026-01-23

Funding: National Social Science Foundation of China (2024-SKJJ-B-035)

* **Corresponding author:** YU Fu-ping, professor, PhD, E-mail: junjingj@163.com.

0 引言

城市交通拥堵问题是现代城市发展中普遍面临的难题,其影响涉及经济、社会、环境、生活质量等多个维度。根据百度地图智慧交通发布的《2025第1季度中国城市交通报告》,2025年一季度拥堵指数较去年同期在全国范围内都有所增长^[1]。造成城市交通拥堵的原因有三:一是城镇化的加速^[2],二是机动车保有量的增加^[3],三是城市交通的新形式发展缓慢^[1],由此可以看出新的交通样式能有效缓解城市交通问题。虽然地铁等交通工具极大地减少了地面交通拥挤的现状,但这些措施并不能从根本上解决日益增长的交通需求与有限交通基础设施之间的矛盾^[4]。城市空中交通是近些年发展的新城市交通样式,其充分利用城市空间的同时,也避免了地铁过于依靠基础设施的问题,由此引出的低空经济更成为近些年国家政府的热门话题^[5-7],低空航路网^[8-9]的运行概念也随着国内外学者的研究逐渐被接受。

低空航路网起源于“低空公共航路”的概念,该概念由廖小罕等^[10]首次提出,并于2018年提出了多级航路的规划研究方法。在2020年徐晨晨等^[11]首次对城市低空航路网络的规划方法进行设计。随后较为典型的是张洪海等^[12]利用空间剖分的手段对低

空航路网的主干航路以及干线航路进行了规划,利用聚类算法将较高建筑物聚类,生成具有代表性的障碍物点作为Voronoi种子节点并利用Voronoi图建立初始路由网络;Li等^[13]也使用类似的方法对主干航路网络进行规划,先提出了一套航路网络的构建方法,并根据构建的航路网络,以蚁群算法原理为基础提出了全局优化算法,对航路网络进行优化。此外,也有学者对低空航路的结构进行了研究,如设置穿越区^[14]或者设计交叉点结构^[15]。

但就目前发展而言,低空航路网的规划方法研究仍然较少,需借鉴其他领域相关研究进行发展。低空航路网属于航路网络的一种,航路网络是指为实现空中交通,根据不同的航路网络节点将航路连接而成的网络^[16],在各个领域如航海^[17]、民航^[18]、军事^[19]等领域有着广泛应用,其规划方法也具有较大参考价值。根据往年学者研究^[20-25],通常将航路网络规划分为全局航路网络规划和局部航路网络规划,即“0-1”和“1- n ”的过程。

在全局航路网络规划方法中,根据规划过程中的思路不同,总体划分为4类:基于节点间需求的全局航路网络规划方法、基于多级航路的全局航路网络规划方法^[25-29]、基于节点/航段合并的全局航路网络规划方法、基于空间剖分的全局航路网络规划方法。基于节点间需求的全局航路网络规划方法^[30-34]

的总体思路为根据节点之间的飞行需求建立航线,设置多种约束找到最优解的过程,基本按照中国民用航空局空中交通管理局2009年发布的《航路网络规划方法参考材料》^[32]中优化航路网络布局的原则进行:国境点航路的调整、航路汇聚点的设置、基于角度的航路调整、基于流量的航路调整、移动节点以及对于禁区规避。基于多级航路的全局航路网络规划方法的整体思路是:根据不同划分标准对航路网络进行分类,并针对不同航路网络的特点进行

规划(如民航^[35-36]和城市空中交通领域^[37]的枢纽干线网络、双层规划模型^[23,38-39]、多级规划^[25,40-41])。基于节点/航段合并的全局航路网络规划方法^[42-48,17]的整体思路是:在航线合并形成航路网络过程中,设计相应方法对航段或节点进行合并。基于空间剖分的全局航路网络规划方法的整体思路是对空域环境进行剖分,根据剖分结果确定枢纽点位置,连接枢纽点形成航路网络^[12,19,37]。其中各个思路优缺点及局限性如表1所示。

表1 全局航路网络规划总结

Table 1 Summary of global air route network planning

大类方法	子方法细分	优点	缺点	适用场景	局限性
基于节点需求的方法	考虑冲突约束	1.量化冲突(如交叉点数量),提升安全性;2.兼顾经济性与安全性目标	1.计算复杂,需迭代寻优;2.路径数量过多时,冲突消解效果下降	终端区过渡网络设计、城市低空交通(如无人机物流)	路径数量多时难以完全消解冲突,需依赖“申请-调度”机制补充
	不考虑冲突约束	1.模型简单,易实现;2.适用于大规模初始规划	1.易产生航线冲突(如夹角过小、航段不合理);2.结果需人工调整	中国/区域航路规划、城市空中交通初始阶段	结果可能不符合实际运行需求,需结合《航路网络规划方法参考材料》进行后期优化
基于多级航路的方法	枢纽/干线航路网络	1.层级清晰,适应不同流量需求;2.便于集中管理与调度	1.层级划分复杂,需协调各级网络关系;2.层级衔接可能存在效率损失	民航中国枢纽/干线网络、城市低空无人机网络	枢纽与干线的流量匹配难度大,易出现局部拥堵
	双层规划模型	1.兼顾管理者(上层)与用户(下层)视角;2.结果贴合实际流量需求	1.模型复杂,求解难度大;2.依赖上下层迭代效率,数据需求高	城市空中交通(如物流无人机网络)	迭代过程耗时,对算法性能要求高
	多级优化	1.逐步迭代,考虑因素全面(如正/负约束要素);2.可行性强,贴合实际环境	1.规划周期长,需多阶段验证;2.依赖实地测试反馈,推广成本高	低空航路网络	对环境数据(如障碍物、绿化带)依赖性强
基于节点/航段合并的方法	航段合并	1.减少航线数量,简化网络结构;2.降低冲突风险	1.仅适用于特定航线(如大圆航线);2.通用性差,仅70%航班适用	民航大圆航线、密集航线区域	难以推广至复杂空域(如城市低空)
	航段延长	1.通过延长航线合并节点,减少冲突;2.操作简单	1.研究较少,适用场景有限;2.依赖航线相近性,灵活性不足	低空无人机航路网络(航线密集区域)	仅能处理相近航线,对分散航线无效
	航迹挖掘	1.基于历史轨迹,贴合实际运行规律;2.适用于无预设路径的场景	1.依赖高质量航迹数据(如AIS);2.特征点(转向/速度)提取难度大	有大量历史轨迹的区域	小区域内易出现过多转向,需人工平滑
基于空域剖分的方法	空域剖分	1.节点定位明确,网络结构规整;2.适应复杂障碍物环境	1.剖分方法(如圆半径、聚类参数)对结果影响大;2.需适配不同空域环境	城市低空空域、军事战场空域	剖分参数需反复调试,否则易出现覆盖不均

在局部航路网络规划方法中,根据调整部分的不同分为航路汇聚点布局问题(Crossing Waypoints Location Problem, CWLP)和局部航路规划问题。航路汇聚点布局问题整体思路是通过移动汇聚点位置^[49-59],判断航路网络整体属性变化,引入优化算法寻找目标函数最优的位置完成布局优化。局部航路规划问题^[60-63]是对航路网络的局部进行路径规划的过程,实质上属于路径规划问题。其中各个思路优

缺点及局限性如表2所示。

上述所有规划方法并无明显优缺点,只是规划思路不同导致适用场景存在差异,因此需在使用过程中根据实际使用需要选择规划思路。但在城市空中交通使用场景中,城市存在复杂的低空环境以及多种考虑因素,仅靠全局或局部无法完成对整个低空航路网的规划工作,需在全局规划的基础上根据实际情况进行局部优化。因此在参考上述航路网络

表 2 局部航路规划总结
Table2 Summary of local air route planning

方法	优点	缺点	适用场景	局限性
航路汇聚点布局问题	1.优化节点位置,提升网络效率; 2.减少节点冲突(如合并相近节点)	1.易出现节点过近,需额外约束; 2.合并后可能出现容流不匹配	航路交叉节点优化、复杂空域节点调整	需反复进行合并—分解操作,计算成本高
局部航路规划问题	1.方法成熟,适用于局部调整; 2.能规避“三区”等约束	1.多依赖单一算法,复杂环境适应性有限; 2.动态调整能力弱	规避“三区”(禁区、限制区、危险区)、航路更新(如 RNAV/PBN 转变)	元胞自动机等方法在动态流量下适应性不足

规划研究成果的基础上,本文综合全局航路网络规划和局部航路网络规划两阶段,创新地提出使用航迹挖掘(节点扫描、节点合并)进行全局规划得到初始解,并将后续规划看成一个航路汇聚点布局问题,进而提出一种基于梯度优化的低空航路网规划技术,旨在得到较好低空航路网的同时提升运算效率;此外结合实际使用,对城市空域结构以及航路内部结构提出自身看法。

1 低空航路网结构设计

低空航路网是由航路组成的用于各类低空飞行器飞行的空域集合,如电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)、物流无人机等^[64],不同的飞行需求对空域的结构要求也差异较大。本文将低空航路网结构分为整体结构和内部结构。

1.1 整体结构

整体结构是指在城市空域范围内低空航路网的整体结构。针对不同需求,本文设计了3层空域的低空航路网结构,如图1所示。第1层物流航路网用于物流无人机飞行,满足未来外卖、快递、货运等物流需求,未来物流航路网应包含小型无人机和与地面货车职能相当的中大型无人机,因此从运输便利性和安全性的角度将物流航路网设置在了靠近地面的空域;第2层通行航路网是用于载人飞行器(如eVTOL等)飞行,根据城市内部设定的起降点及需求点,划设用于居民日常通行的航路网;第3层是用于规划突发情况时的应急航路(如临时航路),以及其他公共职能部门使用,如医疗、巡检等,避免与第2层航路网冲突。



图 1 整体结构

Fig. 1 Overall structure

在城市空中交通中,物流与通行等需求在城市空中交通是耦合的,即起降点和飞行路径选择大致相同,因此在规划航路网的过程中,物流航路网和通行航路网在垂直地面投影上相同,但在高度层上存在区别,一方面是为了避免由于飞行器性能不同导致的拥堵,另一方面也是为了保证通行安全。但应急/公共航路不做航路网上的规划,作为备用空域,仅在产生需求时规划单个航路以供使用。在通行航路网或者物流航路网内,根据设定的高度可同时存在多层航路网,提高空域利用率。在本研究中主要聚焦第2层通行航路网,由于通行航路网内不同高度层上的航路网规划方法应是相同,因此后续仅研究在单一高度层上的平面航路网规划问题。

1.2 内部结构

内部结构是指低空航路网内部航路及交叉点的结构设计。在民航中,同一航路上不同去向的飞机采用“东单西双”的飞行规则,即向东飞行的飞机使用单数高度层,向西飞行的飞机使用双数高度层。但该方法对于由航路组成的低空航路网来说无法实现,因此在航路上仍采用地面公路的单层双向划设,如图2所示。在双向航路中间设置隔离带,防止相向飞行的飞行器互相影响。交叉点也按照地面红绿灯模式运行,为提高通行效率,在部分交叉点可参照立交桥设置,如图3所示。在图中东西走向如标识1的飞行器左转时经上层(绿色)转向,南北走向的飞行器左转时经下层转向,通过该设计能够使得左右转的飞行器无需在交叉点等待,可直接转向,极大地提高了交叉点处效率。

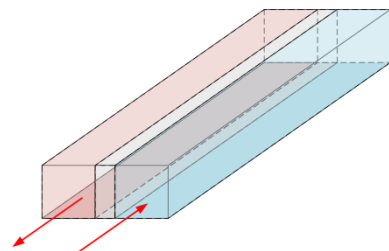


图 2 航路内部结构

Fig. 2 Internal structure of air routes

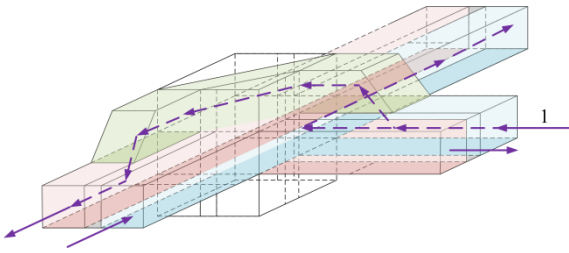


图3 交叉点内部结构

Fig. 3 Internal structure of intersections

针对该内部结构涉及的通行效率的问题,本文交叉点结构设计思路是参考立交桥,目的是为了保证能够在该节点处无需停止实现全向通行,减少拥堵产生的可能,考虑到立交桥设计在公路领域已经得到了很好的验证,因此在本文中便没有进一步验证。在运行过程中,若飞行需求超过该交叉点容量设计,则可向其他相邻高度层的航路网进行调度,仍满足飞行需求。

2 低空航路网规划方法设计

航路网规划问题通常分为全局航路网规划和局部航路网规划^[23-24]。全局航路网规划是在特定区域内对航路网进行重新规划,包括对航路点设计和航线的规划,即1-0-1或0-1的过程;局部航路网规划是指在现行航路网的基础上,对节点或航段进行局部优化和调整,即1-n的过程。而航路网又分为主干航路网和干线航路网,本文的研究对象是对主干低空航路网进行全局规划并进行局部优化。

本文方法整体分为6步,如图4所示。其中全局规划为单条航线规划、扫描转弯点、合并转弯点,局部优化为求初始解、梯度优化、节点移动。

2.1 全局规划

低空航路网的全局规划是根据城市中设置的起

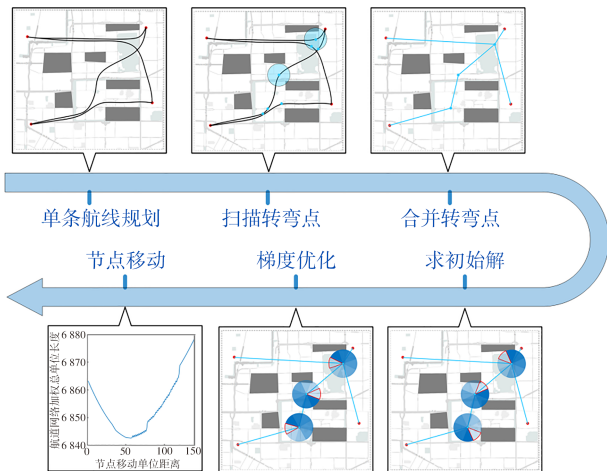


图4 规划方法流程

Fig. 4 Process of the planning method

降点和飞行需求,综合考虑建筑物障碍等约束对航路网进行规划的过程。整体思路是根据起降点之间的飞行需求建立多条航线,通过确定单条航线的转弯点,将所有转弯点合并形成航路网交叉点,进而连接形成低空航路网,其研究重点是如何根据多条飞行航迹按设计的思路合并形成航路网。

2.1.1 单条航线规划

规划单条航线不是本文研究重点,且仅是为了提供初始航线,因此直接使用路径规划算法进行规划,并做平滑处理。在规划时,由于航路不仅仅在空间上与建筑物产生冲突,由于噪音、坠地安全风险等因素需要对建筑物避让,因此需对障碍物范围进行界定。

本文设置的建筑物范围影响因素如下。

(1)噪音:飞行器低空飞行时产生的振动、螺旋桨旋转产生的噪音、鸣笛等多种来源的声音对航路附近居民的日常工作生活产生巨大影响。

(2)灯光:飞行器上存在多种指示灯,尤其在夜间飞行时,灯光严重影响建筑物内居民生活。

(3)碰撞风险:飞行器飞行仍具有一定的不稳定性,需与建筑物保持一定安全间隔保障居民安全。

根据上述影响因素,将影响范围 L_Y 量化为距离建筑物的距离,即大于该距离后认为对建筑物无影响,如噪音、灯光、碰撞风险距离分别为 L_z 、 L_g 和 L_p 。3种距离均为可调参数,可根据实际情况进行调整,如图5所示。建筑物影响范围 L_Y 是取3种影响距离的最大值,如下式

$$L_Y = \max\{L_z, L_g, L_p\} \quad (1)$$

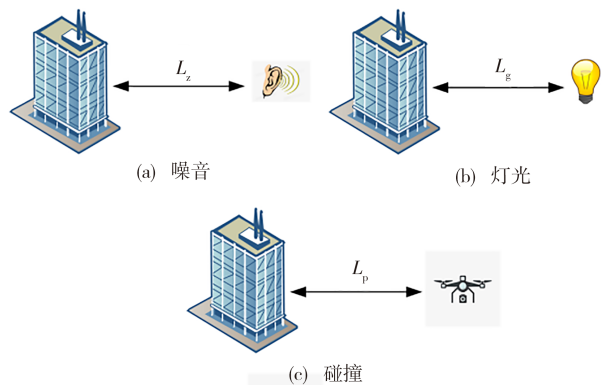


图5 影响范围

Fig. 5 Scope of influence

2.1.2 扫描转弯点、交叉点

(1)扫描转弯点

扫描转弯点是分别对单条航线进行处理,得到其转弯点及转弯区域,并进一步生成航路网内的节点。为得到转弯点,本文设计了一种“扫描体”判断

方法,在扫描过程中,将航线转换为由航线点组成的集合。扫描过程为使用下图所示的扫描体沿航线上的航线点前进,并判断航线点是否为转弯点。判断标准如下,当位于某个航线点时,得到以扫描半径为半径的圆与航线的两个交点,计算两交点与航线点的夹角,若大于判断标准值,如图6(a)所示,证明该航线点不处于转弯区域,转移至下一航线点;若小于判断标准值,则认为该航线点处于转弯区域,并将该航线点识别为转弯点

$$\begin{cases} \alpha_n \leq \beta & \text{节点}n\text{是转弯点} \\ \alpha_n > \beta & \text{节点}n\text{不是转弯点} \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为判断标准; α_n 为航线点处的夹角。

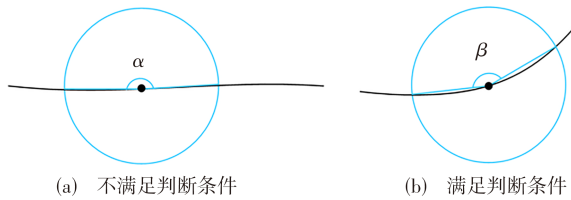


图6 判断标准
Fig. 6 Criteria for judgment

在扫描过程中,扫描体的属性也会影响扫描的结果,具体如下。

①扫描半径 R_s :扫描半径是指在扫描过程中一次进行判断的航段距离,即扫描体的半径。

②扫描密度 ρ_s :航线点的抽样密度,同一扫描半径下,密度越大,航线点越多,计算量越大,但计算更精细。

(2)扫描交叉点

扫描交叉点是指对两两航线进行处理,得到其交叉点或交叉区域,并进一步生成航路网内的节点。为得到交叉点,按照 X 轴等距在航线上取航线点,依次计算2个函数在 Y 轴上的差值 $F_c(X)$ 。判断为交叉点 X_i 的情况有3种,如图7所示。

①差值由大变小并小于某个值 Y_0 时,判定该区域航线接近,形成交叉区域,如图7(a)、(b)所示

$$\begin{cases} F'_c(X) < k_1 & X \leq X_i \\ F_c(X_i) \leq Y_0 \end{cases} \quad (3)$$

②差值等于0时,判定存在交叉点,如图7(c)所示

$$F_c(X) = 0 \quad (4)$$

③差值由某一较小区间突然变大时,判定该区域航线分离,存在交叉区域,如图7(d)所示

$$\begin{cases} F'_c(X) > k_2 & X \geq X_i \\ F'_c(X) \leq k_3 & X < X_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为判定区域航线的参数。

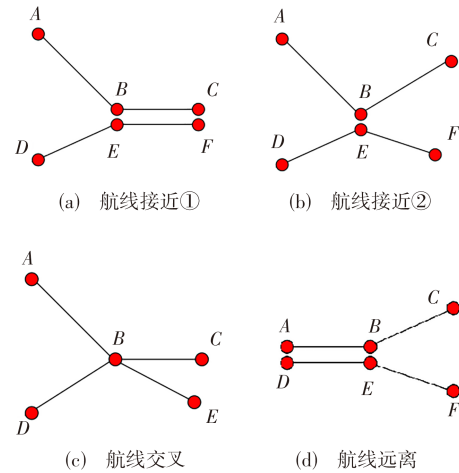


图7 确定交叉点

Fig. 7 Identify the intersection points

2.1.3 合并转弯点、交叉点

合并转弯点、交叉点是指将扫描得到的点进行聚类合并形成新的交叉点,并将新生成的交叉点连接形成低空航路网的过程。在聚类方法的选择上,由于交叉点和转弯点的形成一般存在聚集性,因此选用基于密度的带噪声应用空间聚类(Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)方法对上部分生成的节点进行聚类,使原始节点到新交叉点的距离整体较小。

2.2 局部优化

低空航路网局部优化问题是航路汇聚点优化问题(Crossing Waypoints Location Problem, CWLP),即通过移动交叉点的位置寻找全局最优时交叉点的坐标来完成优化。本文设计了一种基于梯度下降的低空航路网优化方法,通过寻找目标函数梯度下降时交叉点的移动方向,并结合交叉点向该方向移动时目标函数的变化情况,得到最优交叉点位置。梯度下降优化的原理如图8所示,以航段总长度为目标函数为例,当单个节点 B 向某一方向进行移动时,两个航段距离减小,并且航段总长度变短。

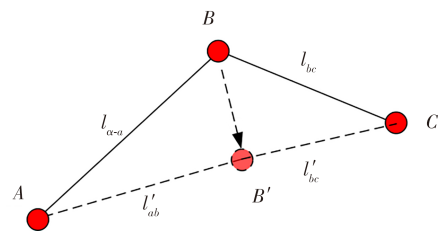


图8 节点移动对航段长度的影响

Fig. 8 Effect of node movement on leg length

在优化过程中,单个交叉点的移动会影响多个航段的变化,即使总航段长度变小,但对于某个航段而言长度可能会增加,如图9所示。因此本部

分优化寻求的是全局最优,在整体上使目标函数达到最优。

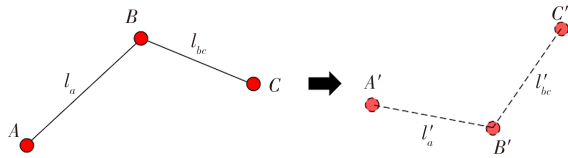


图9 航段长度变化

Fig. 9 Variation in leg length

2.2.1 求初始解

求初始解是给出交叉点移动的初始方向的过程。具体思路为单独移动某个交叉点得到该交叉点梯度下降的方向,将所有交叉点处理完成后得到一组初始解。

在本文中单个节点设置8个移动方向,由于可能存在8个方向移动都造成航路网络长度增加的情况,因此在梯度矩阵中加入第9个方向(如表3),即保持位置不移动,方向矩阵表示为

$$D_n = (d_1^n, d_2^n, \dots, d_9^n) \quad (6)$$

$$D_m = (D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n)^T \quad (7)$$

式中: d_i^n 为第 n 个交叉点的第 i 个移动方向; D_n 为交叉点 n 的方向矩阵; D_m 为迭代第 m 次的解。

梯度表示为交叉点在不同方向上移动时目标函数变化的值,如图10所示,其中颜色越深表示向该方向移动目标函数变化越大。在图10中,交叉点向正北方向移动时目标函数变化最大,第 n 个交叉点梯度矩阵 G_n 表示为

$$G_n = (g_1^n, g_2^n, \dots, g_9^n) \quad (8)$$

$$G = (G_1, G_2, \dots, G_{n-1}, G_n)^T \quad (9)$$

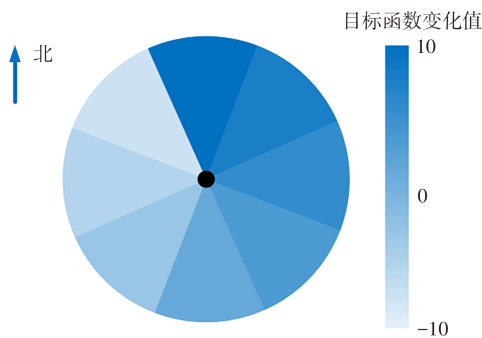


图10 梯度表示

Fig. 10 Representation of the gradient

求初始解时,根据交叉点移动时目标函数的变化,寻找单个交叉点最优移动方向,形成初始解 D_c

$$D'_c = (D'_1, D'_2, \dots, D'_{n-1}, D'_n)^T \quad (10)$$

2.2.2 梯度优化

梯度优化是通过寻找目标函数梯度下降方向来

进行优化的方法,即找到目标函数最优时交叉点移动方向的组合。具体思路是赋予每个交叉点不同移动方向转移概率,在迭代过程中,不断更新总长度下降的方向概率,最终找到总长度梯度下降的节点移动方向组合。此后根据节点移动和约束条件情况,得到目标函数最优的节点位置。单个交叉点转移概率矩阵为

$$P_n = (p_1^n, p_2^n, \dots, p_9^n) \quad (11)$$

转移概率的初始值为

$$p_i^n = \begin{cases} p_0 & d_i^n = \max(D_n) \\ (1 - p_0)/8 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: p_0 为初始概率值。

在初始阶段赋予每个交叉点的每个方向转移概率,即选择该方向移动的概率。此外, p_0 初始值设置不能过于接近1,给算法加入随机性来探索其他可能性。位置更新公式为

$$(x_n^m, y_n^m) = \begin{cases} (x_n^{m-1}, y_n^{m-1}) + d_i^n & p \leq p_0 \\ (x_n^{m-1}, y_n^{m-1}) + d_{\text{other}}^n & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: (x_n^m, y_n^m) 为当前位置; d_i^n 为方向 i 上的移动步长。

在迭代更新过程中,若按照方向矩阵 D_m 进行移动使得目标函数更优,则增加该交叉点方向组合下对应方向的转移概率,减小其他方向的转移概率,对于单个交叉点 n 的更新规则为

$$p_i^n = \begin{cases} p_i^n + \Delta p & \text{沿方向 } i \text{ 移动} \\ p_i^n - \Delta p/8 & \text{沿其他方向} \end{cases} \quad (14)$$

当某个交叉点的概率矩阵中某个方向的概率大于1时,该节点停止更新,直至所有节点完成更新。

在更新过程中设置以下约束条件。

(1)航路网络总长度约束 T_1 :航路网络总长度是指航路网络中相连节点之间航段的长度和。在实际情况中,航路网络总长度与空域占有率紧密相关,若该长度越长,城市空域占有率越大,对城市的遮蔽效应越大,对城市居民幸福感产生的负面影响越大,因此,在保证各需求点正常航行的基础上,航路网络总长度越小,达到的效果越好。航路网络总长度代价函数如下

$$T_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n L_{j,k} \quad A_{j,k} = 1 \quad (15)$$

$$L_{j,k} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \quad (16)$$

式中: $A_{j,k}$ 为连接矩阵,当 $A_{j,k} = 1$ 时,为节点 j 和节点 k 直接相连; $L_{j,k}$ 为连接节点 j 和节点 k 航段的

长度。

(2)航线总长度约束 T_2 :航线总长度是根据原始起降点之间的飞行需求,延低空航路网航行的长度和。该指标属于低空航路网的经济性指标,若总长度越大,则证明起降点之间飞行耗费的资源越多,经济性越差

$$T_2 = \sum_{h=1}^f L_h \quad (17)$$

$$L_h = L_{j,k}^1 + L_{j,k}^2 + \dots + L_{j,k}^n \quad (18)$$

式中: L_h 为单个飞行需求的航线长度。

(3)安全约束 T_3 :飞行器在空中飞行应及时避开高建筑物区域和飞行禁区,倘若进入则会对飞行器及居民安全产生极大威胁,因此需建立安全约束,惩罚函数如下

$$T_3 = \begin{cases} 0 & \text{危险区外} \\ \infty & \text{危险区内} \end{cases} \quad (19)$$

根据上述约束确定目标函数 T ,将 3 种约束的权重分别设置为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$,表示为

$$T = \omega_1 T_1 + \omega_2 T_2 + \omega_3 T_3 \quad (20)$$

其中, ω_3 由于对试验结果影响最大,且结果只有 2 种,因此将 ω_3 设置为 1,通过试验得知数据 T_2 和 T_3 在同一量级,且其对目标函数的影响相同,因此将 ω_1 和 ω_2 都设置为 0.5。

2.2.3 节点移动

经梯度优化后得到目标函数下降时对应的方向组合后,将交叉点向该方向移动,但所有节点向最优方向移动并不能一直保证航段总长度减小,如图 11 所示,当到达某一临界值后,继续向该方向移动可能会增加航段总长度。

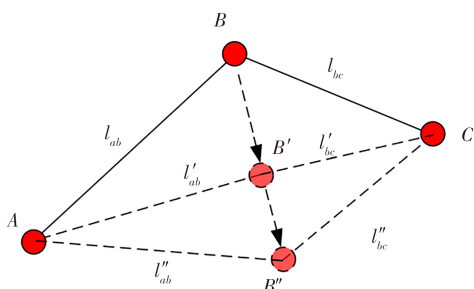


图 11 航段长度变化

Fig. 11 Variation in leg length

因此在向最优方向移动时,应关注记录目标函数的变化,当目标函数达到最优时,确定节点移动的距离。此外,移动过程中,交叉点移动可能导致航段与空域环境中障碍物产生新冲突,因此在某一航段产生冲突前,停止该航段对应两节点的移动,直至所有节点停止移动。如图 12 所示, A, B 节点到达

A', B' 后,由于障碍物(黑色阴影部分)的阻挡停止移动,而节点 C, D 继续移动至结束。

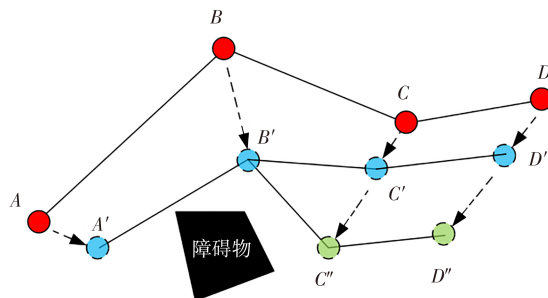


图 12 节点移动终止条件

Fig. 12 Termination condition for node movement

3 仿真验证

3.1 试验环境

仿真试验选取上海市区某一区域进行,在确定高建筑范围时,分别选取 100、150、200 m 的高度,如图 13 中,绿色区域为普通建筑,蓝色区域为超过某一高度的建筑。

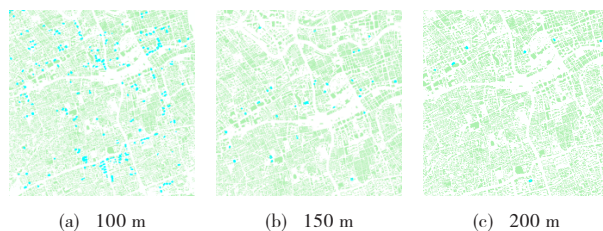


图 13 高层建筑分布

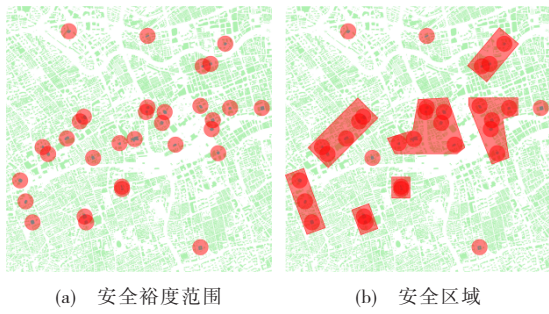
Fig. 13 Distribution of high-rise buildings

由图 13 可知,若以 100 m 为标准区分高建筑区域,则建筑较多,对飞行产生较大威胁,不符合实际情况;若以 200 m 为标准区分,则建筑较少,也不具有验证意义。因此本文选取 150 m 作为区分高建筑的标准。

避开高建筑并不意味着达到安全的要求,过于接近高建筑区域无论是对安全还是居民都将产生较大的影响。因此在建筑周围设置安全区域,本文在第 2.1.1 节已对安全余度进行了设置,如图 14(a) 中红色圆形所示。但由于部分建筑距离较近,因此将其合并形成安全区域,如图 14(b) 红色区域所示。

本文在此区域共设计 12 个起降点、34 条航线进行试验,由于路径规划及合并转弯点是为满足弯曲航线所设计,与后续影响不大,因此本文直接使用呈折线的航线进行处理,具体如图 15 所示。

如图 15 可知,当城区存在多个需求点时,为满足需求点之间的飞行需要,航线将更加错综复杂。不同于民航航线飞行批次较少,城市空中交通中飞行器



(a) 安全裕度范围 (b) 安全区域

图14 禁飞区域

Fig. 14 No-fly zone

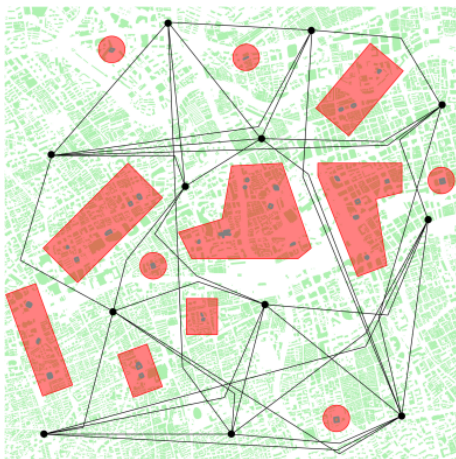


图15 需求点及航线

Fig. 15 Demand points and routes

规模较大,不可能对每个飞行器进行调控,况且在图16椭圆区域中,航线错综复杂,极大的增加了工作量,因此,使用空中航路网络的方法是必然选择。

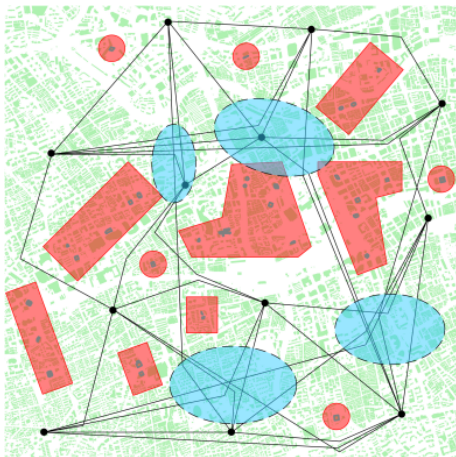
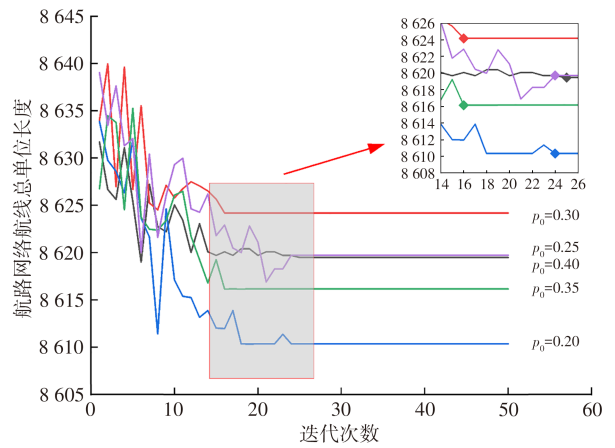


图16 冲突区域

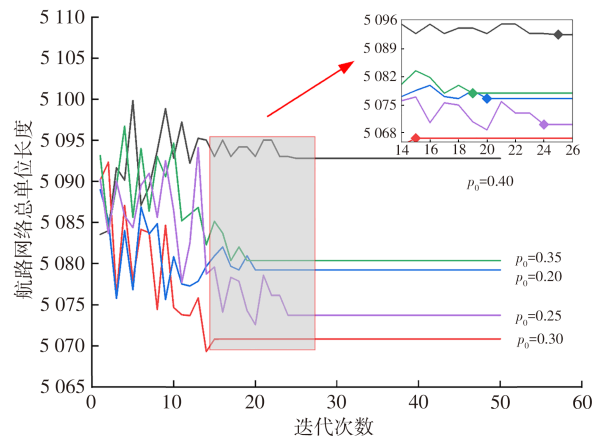
Fig. 16 Conflict zones

3.2 试验参数设置

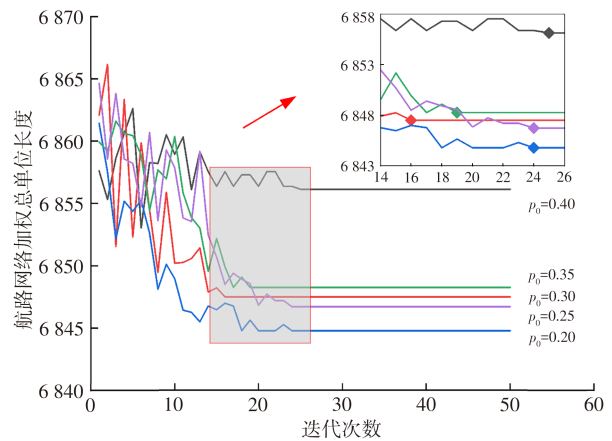
在本方法中主要涉及的参数为节点初始概率 p_0 和每次迭代更新的概率 Δp ,通过设置对比试验,根据参数变化时对目标函数及其内部指标的影响,确定参数。



(a) 航路网络航线总长度



(b) 航路网络总长度



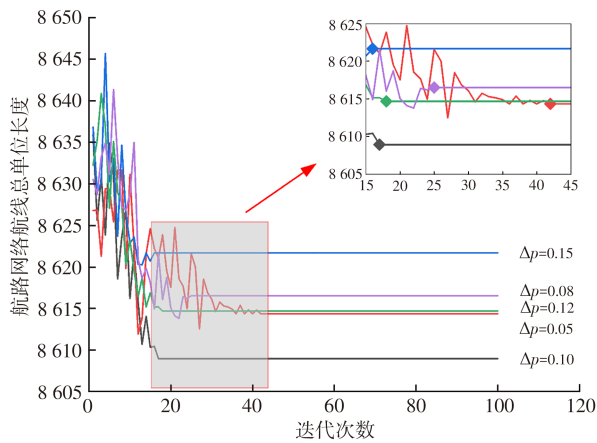
(c) 航路网络加权总长度

图17 初始概率对比

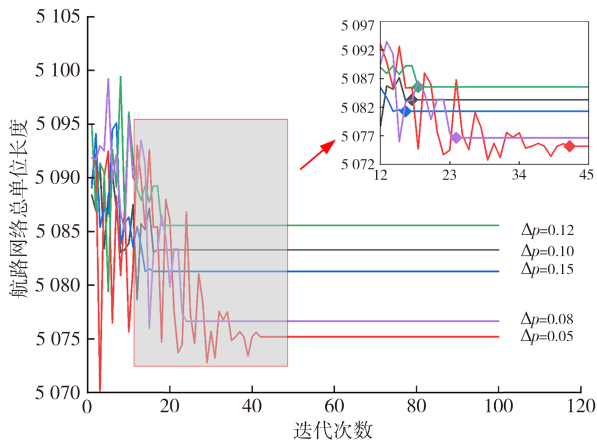
Fig. 17 Comparison of initial probabilities

如图17所示,共设置5组对比试验,初始概率分别为0.20、0.25、0.30、0.35、0.40,概率变化统一为0.10,通过试验结果可知,当初始概率 $p_0 = 0.30$ 时,收敛速度和收敛结果更好,因此确定初始概率 $p_0 = 0.30$ 。

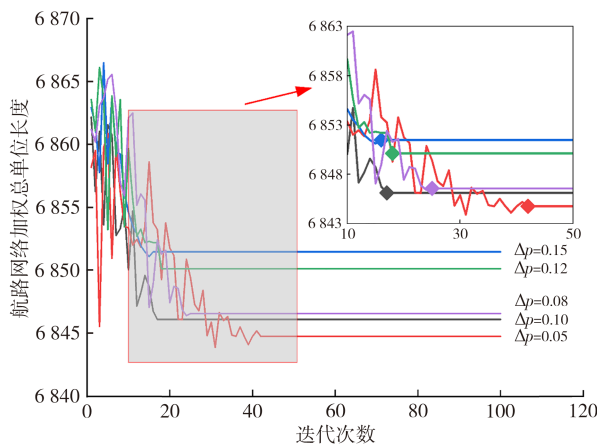
如图18所示,共设置5组对比试验,概率变化值分别为0.05、0.08、0.10、0.12、0.15,初始概率统一为0.30,通过试验结果可知,当概率变化 $\Delta p = 0.10$ 时,收敛速



(a) 航线网络航线总长度



(b) 航线网络总长度



(c) 航线网络加权总长度

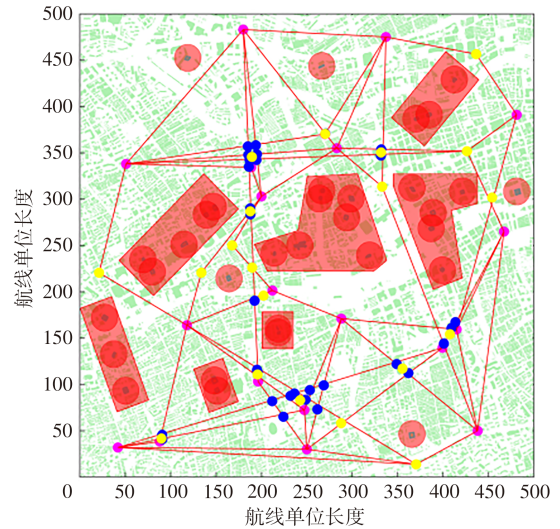
图 18 概率变化值对比

Fig.18 Comparison of probability change values

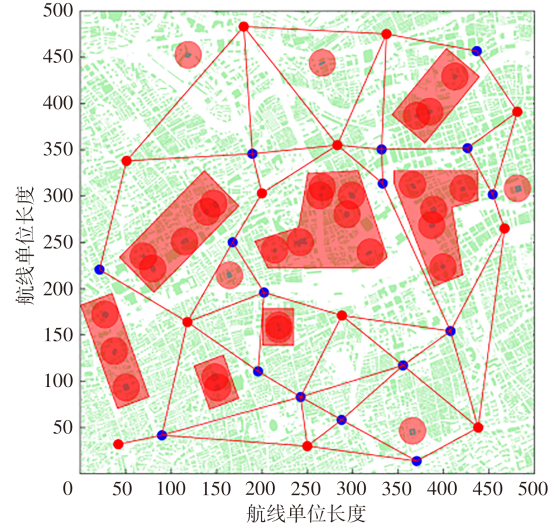
度和收敛结果更好,因此确定初始概率 $\Delta p = 0.10$ 。

3.3 合并转弯点

由于试验区域选取的个起降点和航线均为验证本文方法,无精确坐标,因此将试验区域整体抽象为 500×500 的区域,其中长度 1 仅代表长度大小,单位为单位长度。根据第 2.1.2 节所述方法得到如图 19 (a) 中所示蓝色转弯点和交叉点,并进行聚类合并形



(a) 合并转弯点



(b) 连接转弯点

图 19 合并转弯点

Fig. 19 Merge turning points

成黄色新交叉点。在合并过程中粉色起降点也参与合并,但若有余节点与之合并,则起降点不动,将其余节点合并至该需求点。合并结束将交叉点、起降点依次连接形成图 19(b) 所示航线网络,其中红色点为起降点,蓝色点为可移动的交叉点。

由图 19 可知,初步形成的航线网络由于是直接连接交叉点和起降点,仍存在许多冲突,导致在求初始解时结果不准确,因此对航线网络进行预处理,将冲突区域的交叉点移动,保证航段与障碍物无冲突,预处理结果如图 20 所示。

3.4 求初始解及梯度优化

根据 16 个转弯点的移动求得初始解如表 3 所示,图中数据为航线网络的不同转弯点单独向某个方向移动时,对航线网络目标函数产生的影响。

根据第 2.2 节所述方法对航线网络进行优化,得

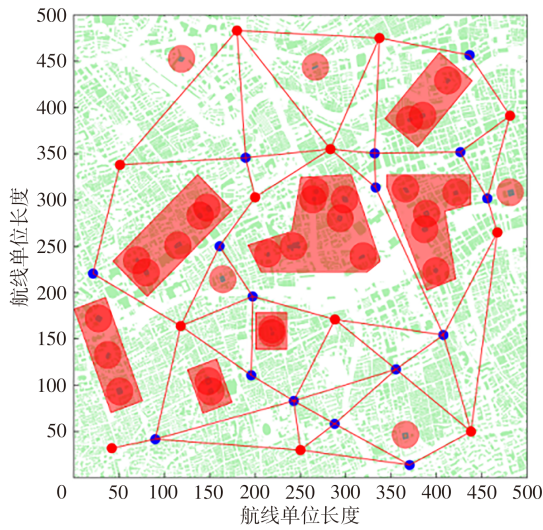


图 20 预处理结果

Fig. 20 Pre-treatment results

到交叉点的移动方向。

将交叉点按照各自方向进行移动,得到目标函数如图 21 所示,目标函数先下降再升高。图中后半段出现冲突是由于但出现图 12 所示情况,部分交叉点停止移动,但整体曲线趋势未发生变化。

按照图 21 中航道网络加权总长度最小处(菱形点)对应的各节点移动距离和表 4 所示各节点移动方向,将节点移动,得到图 22 所示结果。

3.5 结果分析

由本文方法优化的航路网络与预处理后的网络有改进,无论是在网络总长度、网络航线总长度,还是在各个航线长度上都有体现。如图 23 所示目标函数,在进行几十次迭代之后趋于稳定,达到了稳定状态,证明方法具有可行性。

表 3 节点在不同方向上的梯度

Table 3 Gradient of nodes in different directions

交叉点	梯度								
	[0,1]	[1,0]	[0,-1]	[-1,0]	[1,1]	[1,-1]	[-1,-1]	[-1,1]	[0,0]
1	-0.488	-0.318	0.477	0.312	-0.812	0.164	0.784	-0.170	0
2	0.046	0.114	-0.060	-0.136	0.158	0.056	-0.200	-0.086	0
3	0.069	0.045	-0.092	-0.071	0.113	-0.046	-0.166	0.000	0
4	-0.228	0.235	0.210	-0.249	0.006	0.446	-0.039	-0.477	0
5	0.345	0.827	-0.350	-0.834	1.171	0.478	-1.186	-0.488	0
6	0.546	-0.296	-0.553	0.267	0.242	-0.841	-0.294	0.821	0
7	0.646	0.018	-0.651	-0.053	0.656	-0.624	-0.714	0.601	0
8	-0.695	0.521	0.686	-0.542	-0.171	1.204	0.147	-1.241	0
9	-0.615	-0.414	0.596	0.395	-1.034	0.186	0.988	-0.215	0
10	0.281	-1.116	-0.297	1.098	-0.831	-1.418	0.803	1.375	0
11	-0.293	-0.682	0.265	0.668	-0.972	-0.420	0.937	0.370	0
12	0.798	-0.744	-0.818	0.740	0.054	-1.562	-0.078	1.538	0
13	0.032	-0.038	-0.065	0.024	-0.003	-0.106	-0.038	0.054	0
14	-0.051	0.438	0.018	-0.466	0.379	0.465	-0.456	-0.510	0
15	0.784	0.033	-0.800	-0.048	0.808	-0.757	-0.857	0.745	0
16	0.711	0.901	-0.736	-0.907	1.618	0.160	-1.638	-0.201	0

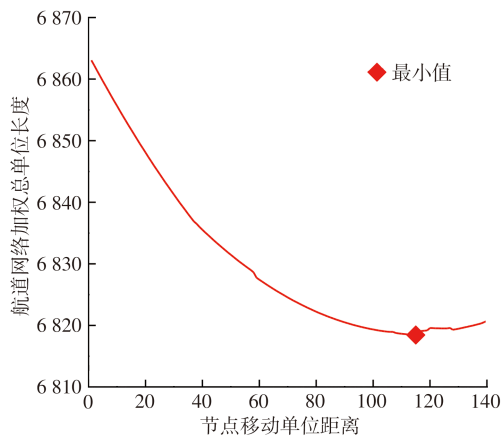


图 21 目标函数

Fig. 21 Objective function

其次,网络总长度反映了对城市空域的占用率,总长度越长,城市空域占用率越高,居民生活幸福指数越低,产生危险的区域越多。由图 24 可知,在本文中网络总长度随着优化不断降低,最终趋于稳定,达到理想要求。

网络航线总长度是反映居民需求点之间通行成本的重要指标,如图 25 可知,网络航线总长度随着优化最终降低并趋于稳定,而由图 26、27 可知,优化前后 34 条航线的长度变化不大,增加最大不超过 6%,而减小最大接近 8%,航线长度变化率基本在 -10%~2% 的区间中,占比达到 85.3%,证明该航路网络没有使得飞行航线过分延长,达到预期

表 4 梯度优化结果

Table 4 Gradient optimization results

交叉点	梯度								
	[0,1]	[1,0]	[0,-1]	[-1,0]	[1,1]	[1,-1]	[-1,-1]	[-1,1]	[0,0]
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0
14	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	0	0	0

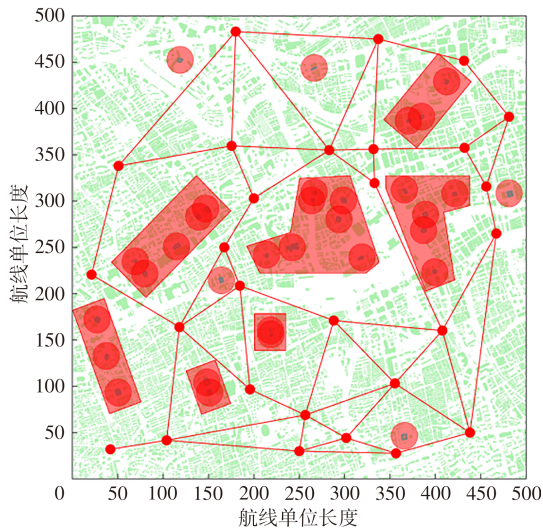


图 22 最终航路网

Fig. 22 Final route network

效果。

此外为体现方法优越性,使用参考文献[15]所示方法进行试验并对比,试验结果对比如图 28、29 所示,分析节点分布可知,本文方法的节点数量明显少于参考文献方法,在城市低空区域减少了大量的交叉,且本文方法所得结果无明显不合理处(如在对比方法中出现了转弯角过大、多个节点距离较近等情况),在节点布局、节点数量和安全性上更优;通过与本文试验结果图 22 对比可知,本文方法由航路网总长度和航路网航线总长度组成的目标函数低于参考文献方法,在总长度上更优,且迭代速度和结果都

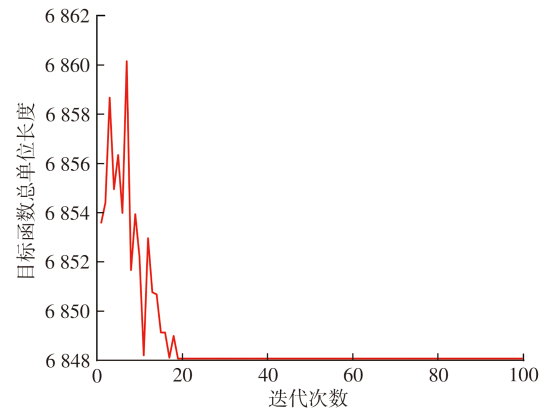


图 23 目标函数迭代

Fig. 23 Iteration of objective function

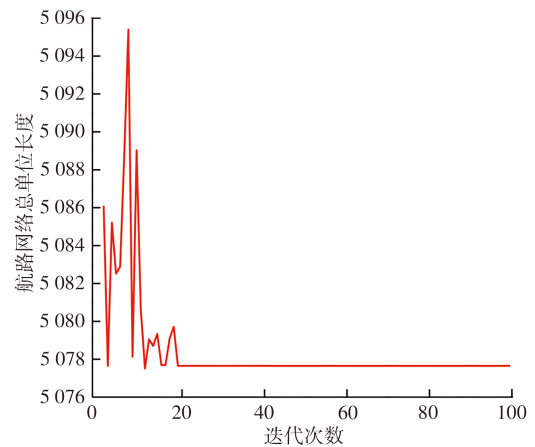


图 24 航路网总长度迭代

Fig. 24 Iterative of total air route network length

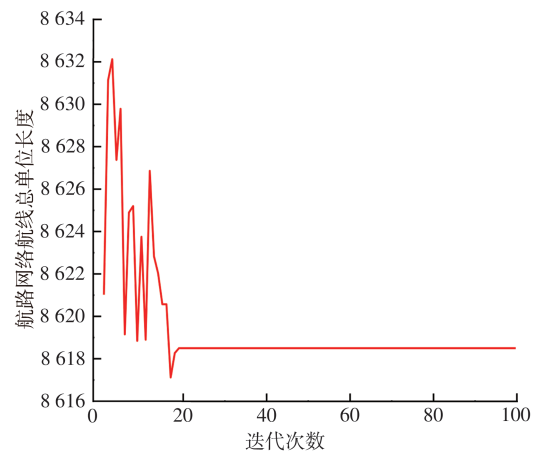


图 25 航路网航线总长度迭代

Fig. 25 Iterative of total air route length of air route network

优于文献[15]所提方法。

4 结 语

(1)针对低空航路网结构与规划方法问题,本文首先对航路网的规划方法进行了研究分析,以此引出本文使用的规划方法;其次对低空航路网的整体和内部结构进行了构想;然后将全局规划和局部

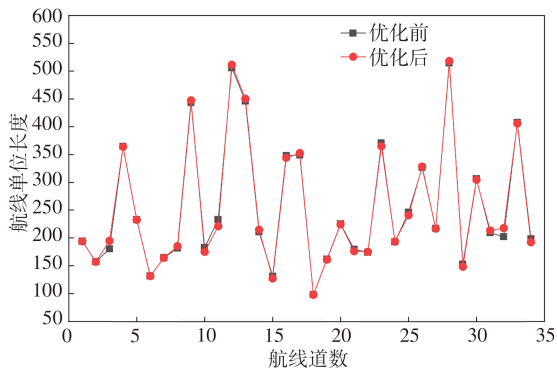


图26 航线长度优化前后对比

Fig. 26 Comparison of airway length before and after optimization

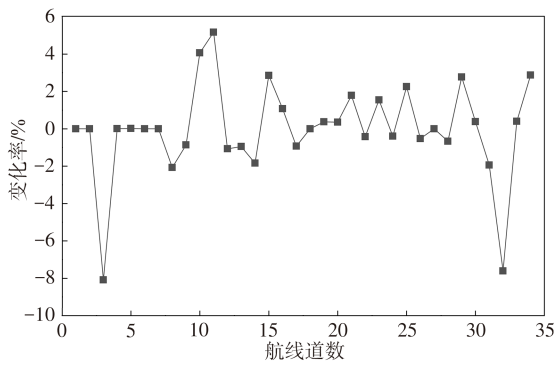


图27 航线长度变化率

Fig. 27 Rate of change of airway length

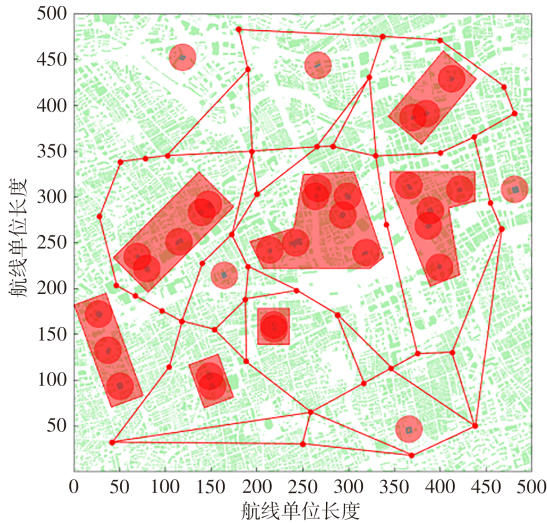


图28 对比试验结果

Fig. 28 Contrast experiment results

优化相结合,设计了主干低空航路网的规划方法,并进行了相关仿真验证。提出的规划方法通过全局规划确定初始航路网络,再使用局部优化寻找交叉点移动的方向与距离,能完成对给定区域低空航路网的规划。

(2)本文规划思路充分考虑起降点之间的飞行需求,为城市空中交通领域低空航路网的规划

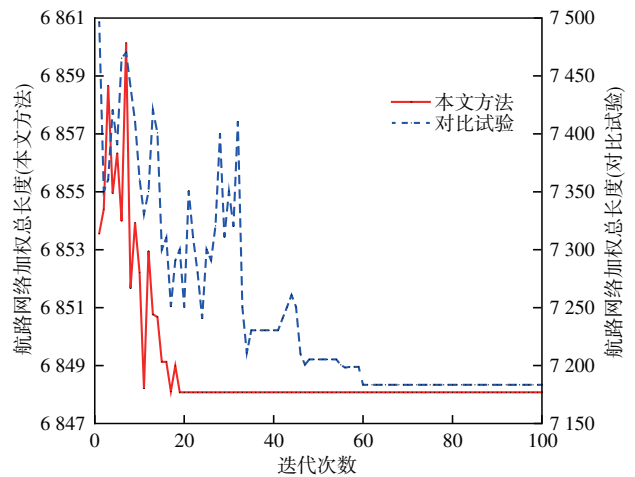


图29 航路网络加权总长度对比

提供了新思路。并通过实例验证了方法的可行共用性,通过与优化前纵向对比以及其他方法横向对比,体现出方法的优越性,收敛速度提升66%,效果略好于原方法。但受限于试验数据和环境,起降点数量以及飞行需求数量没有达到大规模飞行的标准。此外,本文仅对主干低空航路网进行了规划,未来将结合主干网络对于干线航路网的规划继续开展研究。

参考文献:

References:

[1] 百度地图. 2025 第 1 季度中国城市交通报告[R]. 北京: 百度地图, 2025.
Map Baidu. China urban traffic report: Q1 2025[R]. Beijing: Baidu Maps, 2025.

[2] 国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2025.
National bureau of statistics of China. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the 2024 national economic and social development[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2025.

[3] 刘志硕, 许俊哲, 李艳华, 等. 考虑路网负载均衡的 AGV 分拣系统动态路径规划方法[J]. 交通运输工程学报, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.120.
LIU Zhi-shuo, XU Jun-zhe, LI Yan-hua, et al. Dynamic path planning method with load balancing of road network for AGV-based sorting system[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.120.

[4] 吕迪, 王凯, 曲小波. 城市空中交通: 网络结构与运营规划[J]. 交通建设与管理, 2023(2): 78-81.
LYU Di, WANG Kai, QU Xiao-bo. Urban air traffic: Network structure and operation planning[J]. Transport Construction & Management, 2023(2): 78-81.

[5] 李嘉宝. 中国“低空经济”如何成为发展“新引擎”[EB/OL].

- (2025-02-24). <https://m.newsduan.com/static/content/WG/2025-02-24/1343542472428623315.html>.
- LI Jia-bao. How China's "low-altitude economy" becomes a new engine of development[EB/OL]. (2025-02-24). <https://m.newsduan.com/static/content/WG/2025-02-24/1343542472428623315.html>.
- [6] 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[R]. 北京: 国务院, 2021.
The State Council of the People's Republic of China. Outline of the national comprehensive three-dimensional transportation network plan[R]. Beijing: The State Council of the People's Republic of China, 2021.
- [7] 国务院. 中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定[R]. 北京: 国务院, 2024.
The State Council. Decision of the CPC central committee on further comprehensively deepening reform and advancing Chinese modernization[R]. Beijing: The State Council, 2024.
- [8] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向eVTOL航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35-54.
LI Cheng-long, QU Wen-qiu, LI Yan-dong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.
- [9] 张洪海, 夷珈, 李珊, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 78-93.
ZHANG Hong-hai, YI Jia, LI Shan, et al. Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78-93.
- [10] 廖小罕, 徐晨晨, 岳焕印. 基于地理信息的无人机低空公共航路规划研究[J]. 无人机, 2018, 19(2): 45-49.
LIAO Xiao-han, XU Chen-chen, YUE Huan-yin. Research on low-altitude public air route planning for UAVs based on geographic information[J]. Unmanned Vehicles, 2018, 19(2): 45-49.
- [11] 徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 917-930.
XU Chen-chen, YE Hu-ping, YUE Huan-yin, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: Theoretical system and technical roadmap[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 917-930.
- [12] ZHANG H H, TIAN T, FENG O G, et al. Research on public air route network planning of urban low-altitude logistics unmanned aerial vehicles[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 12021.
- [13] LI J, SHEN D, YU F P, et al. A method for air route network planning of urban air mobility[J]. Aerospace, 2024, 11(7): 584.
- [14] DAI W, PANG B Z, LOW K H. Conflict-free four-dimensional path planning for urban air mobility considering airspace occupancy[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107154.
- [15] LI J, SHEN D, YU F P, et al. Air channel planning based on improved deep Q-learning and artificial potential fields[J]. Aerospace, 2023, 10(9): 758.
- [16] SRIDHAR B, GRABBE S, SHETH K, et al. Initial study of tube networks for flexible airspace utilization[C]//AIAA. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2006: 1-9.
- [17] 马令琪. 基于信息熵和AIS数据的沿海水域船舶航路网构建[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
MA Ling-qi. Construction of ship route network in coastal waters based on information entropy and AIS data[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.
- [18] STUIVE L, GZARA F. Airspace network design for urban UAV traffic management with congestion[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 169: 104882.
- [19] 朱涛, 陈元, 丁轶. 空中航路网规划方法研究[J]. 信息化研究, 2019, 45(1): 13-17.
ZHU Tao, CHEN Yuan, DING Yi. Research on planning method of air route network[J]. Informatization Research, 2019, 45(1): 13-17.
- [20] 李珊, 张洪海, 李卓伦. 城市低空物流无人机立体航路网规划方法[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026, DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.163.
LI Shan, ZHANG Hong-hai, LI Zhuo-lun. Planning method for three-dimensional air route network of urban low-altitude logistics drones [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.163
- [21] SIDDIQUEE M W. Mathematical aids in air route network design[C]//IEEE. 1973 IEEE Conference on Decision and Control Including the 12th Symposium on Adaptive Processes. New York: IEEE, 1973: 651-654.
- [22] 酆晴云. 基于交通流特征的航路网节点布局优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
LI Qing-yun. Air route network node optimization based on traffic flow feature[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [23] LI S, ZHANG H H, YI J, et al. A bi-level planning approach of logistics unmanned aerial vehicle route network[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 141: 108572.
- [24] LI S, ZHANG H H, LI Z L, et al. An air route network planning model of logistics UAV terminal distribution in urban low altitude airspace[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13079.
- [25] 彭国栋. 航路网动态优化研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
PENG Guo-dong. Research on dynamic optimization of airway network[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021.
- [26] ZHAO S, ZHANG X J, ZHU Y B, et al. A methodology for designing transition route network between en-route airspace

- and terminal areas[C]//IEEE. 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2008: 1-7.
- [27] MOHAMED SALLEH M F B, CHI W C, WANG Z K, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C]//AIAA. 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. Reston: AIAA, 2018: 1-22.
- [28] TAN Q Y, WANG Z K, ONG Y S, et al. Evolutionary optimization-based mission planning for UAS traffic management (UTM)[C]//IEEE. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). New York: IEEE, 2019: 952-958.
- [29] 黄启翔,江志彬,张虹,等.基于NSGA-II算法的区级无人驾驶航空器起降点布局规划——以深圳市南山区为例[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026, DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.170. HUANG Qi-xiang, JIANG Zhi-bin, ZHANG Hong, et al. District-level layout planning of UAV takeoff and landing points based on the NSGA-II algorithm: A case study of Nanshan district, Shenzhen [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.170.
- [30] 戴福青,万小艳.主干航路网络规划方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 271-276. DAI Fu-qing, WAN Xiao-yan. Trunk route network planning method based on improved gravity model[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(3): 271-276.
- [31] 石新鹏.基于流量需求分布的航路网络优化[D].天津:中国民航大学, 2020. SHI Xin-peng. Route network optimization based on traffic demand distribution[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [32] IB-TM-2009-009,航路网络规划方法参考材料[S]. IB-TM-2009-009, Reference material for air route network planning methods[S].
- [33] 吴越,王莉莉.骨干航路网络的规划研究[J].中国民用航空, 2013(9): 57-59. WU Yue, WANG Li-li. To research the planning of backbone routes network[J]. China Civil Aviation, 2013(9): 57-59.
- [34] 王莉莉,吴越,吴桐水.基于几何航路汇聚点设置的骨干航路网络规划[J].中国民航大学学报, 2014, 32(2): 23-26. WANG Li-li, WU Yue, WU Tong-shui. Plan of backbone air route network based on route crossing waypoint setting by geometric method[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(2): 23-26.
- [35] RIVIERE T. Redesign of the European route network for sector-less[C]//IEEE. The 23rd Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2004: 1-11.
- [36] 王世锦,曹希,郇晴云,等.航路网络生成及优化[J].航空计算技术, 2016, 46(4): 4-8. WANG Shi-jin, CAO Xi, LI Qing-yun, et al. Generation and optimization of air route network based on complex network theory[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(4): 4-8.
- [37] 张洪海,于文娟,周锦伦,等.基于需求的城市低空无人机航路网络构建方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(4): 609-615. ZHANG Hong-hai, YU Wen-juan, ZHOU Jin-lun, et al. Demand-based route network construction method for urban low-altitude UAV[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2024, 48(4): 609-615.
- [38] WANG S J, LIN J J, HAN Y X. Air route network generation based on traffic assignment[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(2): 223-231.
- [39] 冯棣坤,张洪海,华明壮,等.面向城市低空物流的多层异质起降场点网络协同规划[J].交通运输工程学报, 2026, 26(2): 110-124. FENG Di-kun, ZHANG Hong-hai, HUA Ming-zhuang, et al. Multi-level heterogeneous landing site network collaborative planning for urban low-altitude logistics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(2): 110-124.
- [40] 黎涛,王洵,雷雨.基于构建城市低空空域的无人机航路网对策研究[J].科技创新与生产力, 2025, 46(7): 47-50. LI Tao, WANG Xun, LEI Yu. Research on countermeasures for UAV route network based on constructing urban low altitude airspace[J]. Taiyuan Science and Technology, 2025, 46(7): 47-50.
- [41] XU C C, LIAO X H, YE H P, et al. Iterative construction of low-altitude UAV air route network in urban areas: Case planning and assessment[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1534-1552.
- [42] XUE M, KOPARDEKAR P. High-capacity tube network design using the Hough transform[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(3): 788-795.
- [43] 王非,张洪海,冯讴歌,等.基于改进A*算法的物流无人机航路网络协同规划[J].现代交通与冶金材料, 2022, 2(5): 31-38. WANG Fei, ZHANG Hong-hai, FENG Ou-ge, et al. Research on the design method of vertical take-off and landing procedures for logistics drones in urban areas based on the improved A* algorithm[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2022, 2(5): 31-38.
- [44] 项迪,黄亮,周春辉,等.基于船舶轨迹挖掘的海上航路网络构建方法[J].交通信息与安全, 2023, 41(3): 69-79. XIANG Di, HUANG Liang, ZHOU Chun-hui, et al. A method of constructing maritime route network based on ship trajectory mining[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(3): 69-79.
- [45] 牟军敏,郭绍卿,张志江,等.基于AIS数据的水域航路网络提取方法[J].中国航海, 2023, 46(2): 152-160. MOU Jun-min, GUO Shao-qing, ZHANG Zhi-jiang, et al. Extraction of ship track pattern from AIS data[J]. Navigation

- of China, 2023, 46(2): 152-160.
- [46] 牛敬华, 马良荔, 覃基伟. 基于网格的航道模式提取算法研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(4): 94-99.
NIU Jing-hua, MA Liang-li, QIN Ji-wei. Research on sea route extraction algorithm based on grid[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(4): 94-99.
- [47] 陈宏昆, 蔡豪, 刘立国, 等. 基于船舶自动识别系统信息和Hough变换的海上船舶航道提取[J]. 计算机应用, 2018, 38(11): 3332-3335, 3341.
CHEN Hong-kun, CHA Hao, LIU Li-guo, et al. Vessel traffic pattern extraction based on automatic identification system data and Hough transformation[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(11): 3332-3335, 3341.
- [48] MCFADYEN A, BRUGGEMANN T. Unmanned air traffic network design concepts[C]//IEEE. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2017: 1-7.
- [49] CAI K Q, ZHANG J, ZHOU C. Optimization of the crossing Waypoints in air route network[C]//IEEE. 29th Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2010: 1-8.
- [50] 严伟, 王瑛, 孟祥飞, 等. 航路网航路点布局的多目标优化设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 20-26.
YAN Wei, WANG Ying, MENG Xiang-fei, et al. A multi-objective optimization design for crossing waypoints location in air route network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 20-26.
- [51] 陈才龙. 基于复杂网络的航路汇聚点布局优化方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
CHEN Cai-long. Research on optimization method based on complex network for crossing waypoints location[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [52] ZHOU C, ZHANG X J, CAI K Q, et al. Comprehensive learning multi-objective particle swarm optimizer for crossing waypoints location in air route network[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(3): 533-538.
- [53] CAI K Q, ZHANG J, ZHOU C, et al. Using computational intelligence for large scale air route networks design[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(9): 2790-2800.
- [54] 许有臣, 朱衍波. 航路网关键节点优化与“三区”避让设计方法[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(1): 41-45.
XU You-chen, ZHU Yan-bo. Methodology of key network nodes optimization and re-restricted airspace avoiding[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(1): 41-45.
- [55] 沐瑶, 贺亚光. 基于交通需求的航路网优化[J]. 中国科技信息, 2022(3): 19-22.
MU Yao, HE Ya-guang. Route network optimization based on traffic demand[J]. China Science and Technology Information, 2022(3): 19-22.
- [56] 陈振坤, 陈可嘉. 考虑点融合系统的进离场航路分配双目标规划模型[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.226.
CHEN Zhen-kun, CHEN Ke-jia. Bi-objective programming model for the assignment of arrival and departure routes considering the point merge system[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.226.
- [57] 辛正伟. 航路网规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
XIN Zheng-wei. Research on air route network planning technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [58] 郑煜坤, 王瑛, 李超, 等. 基于航路点布局的多目标网络结构优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 1-9.
ZHENG Yu-kun, WANG Ying, LI Chao, et al. Multi-objective network structure optimization method based on waypoint layout[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 1-9.
- [59] 魏志强, 安心. 基于值迭代的无人机动态避撞优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(3): 215-227.
WEI Zhi-qiang, AN Xin. A dynamic collision avoidance method for UAVs using value iteration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 215-227.
- [60] 曹希. 基于复杂网络理论的航路网生成及优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
CAO Xi. Air route network generation and optimization based on complex network theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [61] WANG S J, GONG Y H. Research on air route network nodes optimization with avoiding the three areas[J]. Safety Science, 2014, 66: 9-18.
- [62] 公言会. 航路网规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
GONG Yan-hui. Research on air route network planning technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [63] WANG Shi-jin, LI Qing-yun, CAO Xi, et al. Optimization of air route network nodes to avoid “Three Areas” based on an adaptive ant colony algorithm[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(4): 469-478.
- [64] 姜雨, 杨玲, 王华伟, 等. UAM起降设施选址与网络规划研究综述[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.284.
JIANG Yu, YANG Ling, WANG Hua-wei, et al. Research review on the vertiport location and network planning of UAM[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.284.
- [65] EMANI M E, COULIBALY A, DIAGNE S G, et al. Optimization of a route network in Dakar airspace: Surface navigation[J]. American Journal of Operations Research, 2022, 12(2): 64-81.