

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.003

城市复杂环境下多目标无人机路径规划研究

李亚飞, 赵 瑞

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要: 针对当前无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)在城市范围内运行的噪声、成本与安全问题,对空域进行高度层划分,并在空气动力学等约束条件下,提出了基于噪声保护区的运行成本与坠地风险模型,满足UAV标准运行条件的同时,不仅降低其对环境和地面人群的噪声影响,还降低其运行成本与坠地风险。在此基础上,基于噪声保护区,运用改进Dubins路径规划方法,将Dubins路径规划思想与几何圆的切线相结合,增设节点处理,丰富UAV运行可选路径,并对路径进行优化处理。以Dijkstra算法为搜索最佳路径算法、总成本最低为目标,搜索一条UAV最佳运行路径,并与A*算法进行研究对比。仿真实验验证了所提模型和改进方法的有效性,降低了UAV运行噪声影响,缩减了运行成本,提高了运行的安全性和效率。据算例得出结果:双旋翼中型UAV(质量约15 kg,桨盘面积约1.313 m²)最佳运行高度为40 m,其运行最低总成本为5.42,较其余高度层运行总成本最高减少37.56%,最低减少5.91%。

关键词: 城市交通; 无人机; 噪声保护区; 运行坠地风险; 改进Dubins; 路径规划

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)06-1002-11

Research on Multi-target UAV Path Planning in Urban Complex Environments

LI Yafei, ZHAO Rui

(Air Traffic Management Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the noise, cost and safety problems of current unmanned aerial vehicle (UAV) operation within cities, this paper divides the airspace into layers by altitudes and proposes an operation cost and crash risk model based on noise protection zones under aerodynamic and other constraints. This model satisfies the standard operation conditions of UAVs, and reduces the noise impact on the environment and the ground population, as well as operation cost and crash risk. Thus, based on the noise protection zone, the improved Dubins path planning method is used. It combines the Dubins path planning idea with the tangent line of the geometric circle, and adds node processing to enrich the optional paths for UAV operation and optimize the paths. As the Dijkstra algorithm is used as the the best path searching algorithm, and the lowest total cost is set as the goal, a UAV optimal operation path is searched and compared with the A* algorithm. Simulation experiments verify the effectiveness of the proposed model and the improved method. They reduce the noise impact of UAV operation and the operation cost, and improve the safety and efficiency of the operation. The results indicate that the optimal operation altitude of the example UAV, a biplane medium-sized UAV with a mass of 15 kg and a paddle disk area of about 1.313 m², is 40 m, and its operation minimum total cost is 5.42; compared with the results in the other altitude layers, the total operation cost is reduced by 37.56% at

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(3122024055)。

收稿日期: 2024-08-07; **修订日期:** 2024-11-17

通信作者: 李亚飞, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: commissioner@126.com。

引用格式: 李亚飞, 赵瑞. 城市复杂环境下多目标无人机路径规划研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6):1002-1012. LI Yafei, ZHAO Rui. Research on multi-target UAV path planning in urban complex environments[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6):1002-1012.

most and 5.91% at least.

Key words: urban traffic; unmanned aerial vehicle (UAV); noise protection zone; operating and crash risk; improved Dubins; path planning

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)广泛应用于城市是未来的一大趋势^[1],可以较好解决物流运输问题。与传统物流运输相比,UAV具有突破空间限制的运行方式,可以高效地在城市空域内执行配送任务^[2]。UAV配送须解决的问题为:(1)为UAV合理规划出安全高效的运行路径;(2)将UAV运行的影响(噪声影响)与成本(噪声、能耗与坠地风险成本)降至最低。

近年来,针对UAV在城市范围内运行所带来的噪声影响展开了大量的研究。对于UAV噪声的评估大多使用数值模拟方法,对其进行建模处理^[3];另有结合气象条件,用声学测量设备评估UAV噪声^[4]。风力扰动、环境因素、机身设计、飞行操作等都是影响UAV噪声大小的关键因素^[5]。

许多学者在研究UAV路径规划问题的同时,也考虑UAV噪声、能耗、协同性、安全等问题,以及在不同城市环境和空间维度研究UAV路径规划问题。张洪海等^[6]将栅格法与改进A*算法结合,将UAV噪声视为运行成本之一,向栅格存入估价函数成本,运用动态步长搜索,规划UAV飞行路径。胡小兵等^[7]提出了一种综合考虑UAV性能约束的涟漪扩散算法,并对城市建模,在建筑模型中搜索最佳飞行路径。Tan等^[8]用飞行模拟在微观层面对UAV在城市内飞行的噪声影响进行建模,并通过启发式算法优化飞行路径,促进UAV在城市中运行的发展。Chan等^[9]在城市低空环境下,提出在风动力学下的UAV节能路径规划模型,提高安全性,降低运行能耗。丁敏等^[10]提出一种改进蝴蝶优化算法,在规划UAV三维运行路径时,大大提高了全局搜索的效率与精度。Sun等^[11]针对城市物流UAV流量拥堵问题,提出两层模拟退火算法,提高了运行效率。Zhou等^[12]针对障碍物众多的复杂环境,提出基于NSGA-II的双目标路径规划方法,更好解决UAV协同运行问题。

上述针对UAV路径规划的文献,考虑了UAV性能与运行成本,降低了UAV运行危险性,提高了路径规划的效率和准确性。在前人研究的基础上,本文提出了新的噪声保护区模型,从多角度全面考虑UAV运行的噪声影响,并综合考虑UAV运行中的噪声、能耗与安全问题,设计了UAV路径规划模型。

本文提出在复杂城市环境下基于噪声保护区考虑噪声、能耗与坠地风险成本的多目标UAV路径规划方法。具有以下创新点:

(1)提出噪声保护区。在降低甚至消除UAV对周围环境噪声影响的同时,保障飞行安全,为城市环境下的路径规划提供一种新的模型与方案。

(2)改进Dubins路径规划方法。结合几何圆的切线,基于噪声保护区规划路径,细致划分路径节点,在噪声影响最小的基础上,使得路径更平滑、可选性更高,运行成本最低,安全性更高。

(3)提出总成本目标函数。使用归一化方法,多目标考虑能耗、噪声以及坠地风险成本。基于噪声保护区,考虑UAV对环境噪声影响的同时,在总成本目标函数中增加对地面人群噪声影响,对噪声研究更全面。

1 问题描述

某城市空域内UAV从一点到达另一点执行任务,起点、终点位置已知。为其规划一条最佳运行路径,满足UAV的运行要求。

对研究过程中所需条件进行假定:(1)UAV运行最高高度不超过120 m,最低高度不低于20 m;(2)UAV垂直起降阶段仅考虑能耗成本;(3)所有航段均满足UAV的性能约束。

1.1 城市建模

城市各建筑物位置、高度等参数已知。从建筑物的俯视角度,对其建模处理。在外围增设外接圆,建筑物的中心为外接圆的圆心,圆心到建筑物边界上最远点的距离为外接圆半径。本文研究将该外接圆模型替代建筑物,不仅可以提高路径规划效率,还可以避免UAV与建筑物产生冲突风险,提高运行安全。

城市内某些位置存在建筑群,建筑群中各建筑物之间的距离很小。建模处理时,可将这一小范围内建筑群视为一体,以该建筑群的中心为圆心建模,建模如图1所示。

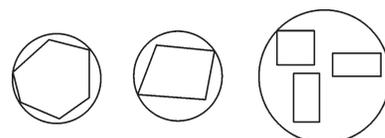


图1 建筑物建模示意图

Fig.1 Schematic diagram of building modeling

1.2 城市空域划分

获取 UAV 运行空域内建筑物参数,划分高度层;两个高度层之间为一个高度区间。飞行高度层划分情况如图 2 所示。为 UAV 合理分配运行高度层可显著提高工作效率,降低运行成本,提高飞行安全性。

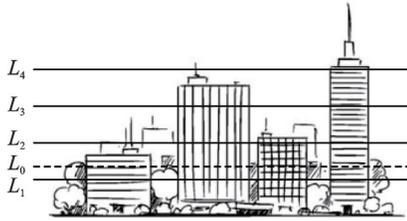


图2 飞行高度层划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of flight levels

当 UAV 在同一高度区间内不同高度层飞行时,高度区间内建筑物位置不变,视为所规划路径不变。图 2 中将 UAV 运行空域划分为 4 个高度层 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。图 2 中高度层 L_0 为 UAV 运行对地面人群造成噪声影响的临界高度,即当 UAV 运行高度低于 L_0 时,其运行将对地面人群产生噪声影响;当 UAV 运行高度高于 L_0 时,其运行对地面人群不再产生噪声影响。 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 对应高度可根据不同城市与地区具体情况进行划分。

不同地区、不同高度层空气密度有所差异,根据 Base of Aircraft Data(BADA)手册规定^[13],标准大气海平面高度所规定的空气密度与温度分别为: $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}/288.15 \text{ K}$ 。空气密度与温度随着高度的增加而降低,高度每增加 100 m,气温降低 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$,空气密度与温度随高度变化表达式为

$$T = T_0 - 0.6(H + H_a) \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{-g}{K_T \zeta} - 1} \quad (2)$$

式中: T 为外界温度; H 和 H_a 为 UAV 运行真高与标高; ρ 为空气密度; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; K_T 为对流层顶下温度梯度,取值为 -0.0065 K/m ; ζ 为空气气体常数,取值为 $287.05287 \text{ m}^2/\text{Ks}^2$ 。

2 模型及算法设计

2.1 噪声保护区模型

当前针对噪声的研究大多根据噪声监测和评估设备来进行,相应研究模型较少。本文提出的噪声保护区模型与以往不同,噪声保护区增设在建筑物周围,规避对建筑物的噪声影响范围,旨在从根本上降低 UAV 运行噪声影响,实现 UAV 低噪声

低成本运行,甚至实现在一定高度之上无噪声低成本运行。此外,噪声保护区还具有碰撞保护区的优点,在降低噪声影响的同时,还可避免 UAV 与建筑物发生碰撞冲突,提高 UAV 运行安全性。噪声保护区为城市环保和飞行安全等方面提供巨大帮助,为 UAV 在城市空域内运行提供新的方案和保障。

本文主要考虑的 UAV 噪声为运行时所产生的旋转噪声。UAV 的单个电机螺旋桨的旋转噪声可以表示为^[14-15]

$$P_{\text{rel}} = \frac{169.3mB_L R_L M_t}{DA_L} \left[\frac{0.76P_h}{M_t^2} - T_{\text{mi}} \cos \theta \right] \quad (3)$$

$$P_{\text{SPL}} = 20 \lg \left(\frac{nP_{\text{rel}}}{10P_0} \right) \quad (4)$$

式中: P_{rel} 为旋转噪声; m 为谐波顺序; B_L 为螺旋桨叶片数量; R_L 为螺旋桨半径; M_t 为叶尖马赫数; D 为 UAV 距测量点距离; A_L 为螺旋桨桨盘面积; P_h 为吸收功率; T_{mi} 为电机推力; θ 为 UAV 与测量点夹角; P_{SPL} 为声压级; n 为电机数量; P_0 为参考声压。

噪声保护区宽度即 UAV 运行对建筑物产生噪声影响的范围,根据式(3,4)推导出

$$W = \frac{16.93mB_L n R_L M_t}{P_0 10^{\left(\frac{P_{\text{SPL}}}{20}\right)} A_L} \left[\frac{0.76P_h}{M_t^2} - T_{\text{mi}} \cos \theta \right] \quad (5)$$

式中 W 为噪声保护区宽度。

根据式(5)可得出噪声保护区的宽度 W ,对式(5)中的推力做进一步表述,运用 Burgers 推力模型^[16],得出每个电机的推力为

$$T_{\text{mi}} = \left(\frac{1}{2} V_\infty^2 + \frac{1}{6} V_{\text{tip}}^2 \right) \rho \eta A_b \quad (6)$$

$$V_{\text{tip}} = \pi N d \quad (7)$$

式中: V_∞ 为 UAV 空速; V_{tip} 为螺旋桨桨尖速度; η 为功与动能归一化推力比; A_b 为螺旋桨叶片总面积; N 为螺旋桨每秒转数; d 为螺旋桨直径。

噪声保护区模型如图 3 所示。圆心点 O 为建筑物中心, r 为建筑物外接圆模型半径,根据噪声保护区模型确定 UAV 噪声产生影响范围 W ,将 W 加设到建筑物模型中, $R(R = r + W)$ 为 O 点到噪声保护区外侧圆半径。噪声保护区范围即建筑物外接圆到保护区外侧圆的环形区域。

当 UAV 运行路径经过噪声保护区区域时,将对建筑物产生噪声影响,即与噪声保护区产生冲突,即当 UAV 到达噪声保护区边界时冲突开始,其运行对建筑物产生噪声影响,并且噪声影响随其进入噪声保护区深度的增加而增大。

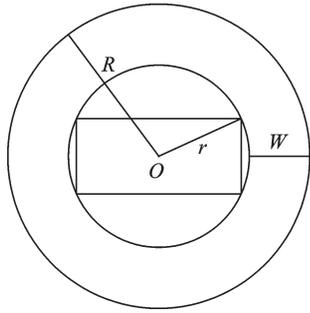


图3 噪声保护区示意图

Fig.3 Schematic diagram of noise protection zones

2.2 噪声成本模型

当UAV运行高度较低时,将对地面人群产生噪声影响。噪声影响会随着运行高度的增加而减小,到达一定高度后将不再对地面人群产生噪声影响。当UAV在低高度飞行,尤其经过一些公众场所等人群密集区域时,产生的噪声影响十分严重。UAV对人噪声影响如图4所示。

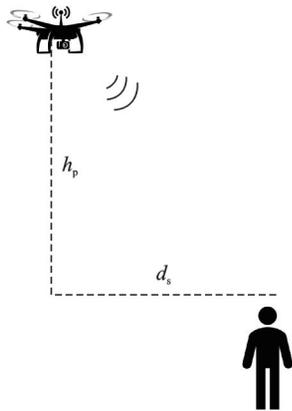


图4 UAV对人的噪声影响示意图

Fig.4 Schematic diagram of the noise impact of UAV on people

图4中 h_p 为UAV距人头顶的高度, d_s 为UAV距人的水平距离。声音传播可以近似为球面扩散,UAV运行噪声成本可表示为^[17]

$$S_o = \omega S_c \frac{1}{h_p^2 + d_s^2} \quad (8)$$

式中: S_o 为噪声成本; ω 为声强到声级转换系数; S_c 为参考噪声。

人口密度是衡量UAV对人群噪声影响的关键因素之一。假设规划路径区域的中心位置人口密度最高(繁华区域),在区域中心以圆的形式向外扩散,随着距离区域中心越远,人口密度降低。为更好地评估城市区域内人口密度分布情况,使用重力模型^[18],其表达式为

$$\phi_p = e^{(1-r^2)} \phi_{p,AVG} \quad (9)$$

式中: ϕ_p 为UAV距离中心半径为 r 的区域内的人口密度; r 为距离城市中心点距离; $\phi_{p,AVG}$ 为区域内平均人口密度。

所规划航路由 n 个航段组成,每2个节点之间为一个航段,每个航段人口密度定义为该航段各处人口密度的平均值。总噪声成本为

$$P_i = \phi_{p,i,AVG} \cdot A_d \quad (10)$$

$$S_{p,i} = S_o \cdot P_i \quad (11)$$

$$S_p = \sum_{i=1}^j S_{p,i} \quad (12)$$

式中: j 为航段数量; P_i 为航段 i 上平均人口数量(向上取整); $\phi_{p,i,AVG}$ 为航段 i 上平均人口密度; A_d 为航段 i 向两侧加宽 d_s 后的区域面积; $S_{p,i}$ 为航段 i 上的总噪声成本; S_p 为总噪声成本。

2.3 能耗成本模型

UAV运行能耗是需要着重考虑的成本之一。可将UAV运行分为3个阶段:水平运行阶段、垂直起飞阶段和垂直降落阶段,不同飞行阶段的电池输出功率、能耗均不相同。

当UAV处于垂直起飞、降落阶段,电机推力主要用于克服自身重力,此阶段电池输出功率^[19]为

$$P_L = \frac{1}{W_p W_m W_{ESC}} \sqrt{\frac{(Mg)^3}{2\rho A_L \tau}} \quad (13)$$

式中: P_L 为UAV垂直起飞降落阶段输出功率; W_p 、 W_m 、 W_{ESC} 分别为螺旋桨工作效率、电机工作效率、电调工作效率; M 为UAV总质量; τ 为修正因子。

当UAV处于水平运行阶段,电机推力主要用于克服空气阻力,此阶段电池输出功率为

$$P_H = \frac{1}{W_p W_m W_{ESC}} \left(\frac{1}{2} \rho V_H^3 \sigma C_{D0} + \frac{2kM^2 g^2}{\rho \sigma V_H} \right) \quad (14)$$

式中: P_H 为UAV水平运行阶段输出功率; V_H 为水平飞行速度; σ 为迎风面积; C_{D0} 为零阻力升力系数; k 为诱导阻力因子。

UAV运行时的电池输出功率与空气密度相关,地点标高为 H_1 ,UAV运行真高为 H_2 ,飞行水平距离为 L ,如图5所示。

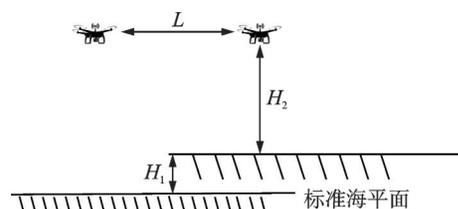


图5 UAV水平飞行示意图

Fig.5 Schematic diagram of UAV horizontal flight

图5情况下,UAV水平飞行阶段能耗为^[19]

$$E_H = \frac{L}{V_H} P_H \quad (15)$$

式中 E_H 为UAV水平飞行阶段能耗。

UAV所处高度层空气密度为

$$\rho = \rho_0 \left[\frac{T_0 - 0.6(H_1 + H_2)}{T_0} \right]^{\frac{-\rho}{K_T \tau}} \quad (16)$$

UAV垂直起飞与降落阶段能耗为

$$E_U = \int_0^{\frac{H_2}{V_U}} \frac{1}{W_P W_M W_{ESC}} \sqrt{\frac{(Mg)^3}{2\rho_U A_L \tau}} dt \quad (17)$$

$$E_D = \int_0^{\frac{H_2}{V_D}} \frac{1}{W_P W_M W_{ESC}} \sqrt{\frac{(Mg)^3}{2\rho_D A_L \tau}} dt \quad (18)$$

$$\rho_U = \rho_0 \left[\frac{T_0 - 0.6(H_1 + V_U t)}{T_0} \right]^{\frac{-\rho}{K_T \tau}} \quad (19)$$

$$\rho_D = \rho_0 \left[\frac{T_0 - 0.6(H_1 + H_2 - V_D t)}{T_0} \right]^{\frac{-\rho}{K_T \tau}} \quad (20)$$

式中: V_U 与 V_D 分别为UAV垂直起飞、降落阶段速度; E_U 与 E_D 分别为UAV垂直起飞、降落阶段能耗; ρ_U 和 ρ_D 分别为UAV垂直起飞、降落阶段空气密度; t 为飞行时间。

UAV运行过程总能耗成本 E_N 为

$$E_N = E_U + E_H + E_D \quad (21)$$

2.4 坠地风险成本模型

UAV坠落是其运行需着重考虑的安全风险,会对地面行人造成安全隐患。UAV在不同高度层运行时,由于高度不同,飞跃障碍物的数量和位置各不同。飞跃障碍物可看作为地面行人提供遮蔽,使行人更为安全。建筑物遮蔽如图6所示。

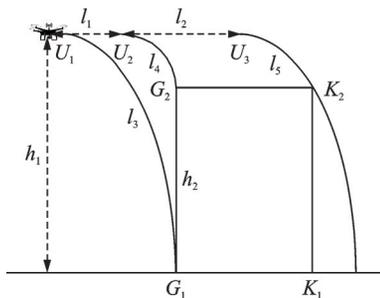


图6 建筑物遮蔽示意图

Fig.6 Schematic diagram of building sheltering

图6中 $G_1 K_1 K_2 G_2$ 为建筑物横截面, h_1 为UAV当前高度; h_2 为建筑物高度; U_1, U_2, U_3 为UAV运行路径上的3个位置; l_3, l_4, l_5 为UAV 3种坠落轨迹, l_3 为UAV于 U_1 位置坠落至建筑物底部 G_1, l_4 为UAV于 U_2 位置坠落于建筑物顶端 G_2, l_5 为

UAV产生坠地风险的临界轨迹曲线; l_1 与 l_2 为UAV运行时可遮蔽的运行路径长度,具体模型如下^[20]。

l_2 长度为UAV飞行经过的建筑物长度, l_1 长度为

$$l_1 = l_{U_1 G_1} - l_{U_2 G_2} \quad (22)$$

UAV坠落时间为

$$t(h) = \sqrt{\frac{2M}{C_D A_y \rho g}} \ln \left(\exp \left(\frac{C_D A_y \rho h}{2M} \right) + \sqrt{\exp \left(\frac{C_D A_y \rho h}{M} \right) - 1} \right) \quad (23)$$

式中: $t(h)$ 为UAV于相应高度 h 时的坠落时间; C_D 为空气阻力系数; A_y 为垂直迎风面积。

由式(23)可得出式(22)中的 $l_{U_1 G_1}$ 与 $l_{U_2 G_2}$ 为

$$l_{U_1 G_1} = \frac{2M}{C_D A_x \rho} \ln \left(\frac{C_D A_x \rho V_H t(h_1) + 2M}{2M} \right) \quad (24)$$

$$l_{U_2 G_2} = \frac{2M}{C_D A_x \rho} \ln \left(\frac{C_D A_x \rho V_H t(h_1 - h_2) + 2M}{2M} \right) \quad (25)$$

式中: $l_{U_1 G_1}$ 与 $l_{U_2 G_2}$ 分别为 U_1 至 G_1 的水平距离、 U_2 至 G_2 的水平距离; A_x 为UAV水平迎风面积。

UAV运行的建筑物遮蔽路径长度 l_z 为

$$l_z = l_1 + l_2 \quad (26)$$

假设UAV在某运行过程中,经过 a 个建筑物,运行路径总长度为 l_T ,危险路径长度为 l_D ,危险路径表达式为

$$l_D = l_T - \sum_{i=1}^a l_{z,i} \quad (27)$$

式中 $l_{z,i}$ 为第 i 个建筑物的遮蔽路径长度。

文献[21]对UAV撞击行人的致死率 I 进行了研究,根据式(27)可得坠地风险成本 C_R 为

$$C_R = \frac{\vartheta I A_x \psi_P l_D}{V_H} \quad (28)$$

式中: ϑ 为UAV自身失控坠落的概率, I 为撞击行人致死率。

2.5 总成本目标函数

在评估UAV运行成本时,在各高度层上,以各保护区间所构成的路径为各航段,对UAV运行路径进行分段研究。根据上述各成本模型,获取UAV在不同高度层上,各航段运行的能耗、噪声与坠地风险成本,在这3类成本数据中各获取相应最大成本值。再根据获取的最大成本值,运用总成本目标函数,用累加方式对UAV运行路径总成本进行归一化研究。对UAV各路径进行全面的成本评估,规划出UAV最佳运行路径。

总成本函数运用最大值函数归一化方法^[22]与成本模型相结合,综合考虑 UAV 运行的能耗、噪声与坠地风险成本,其表达式为

$$C = \sum_{i=1}^j \left(\frac{E_{N,i}}{E_{N,\text{MAX}}} + \frac{S_{P,i}}{S_{P,\text{MAX}}} + \frac{C_{R,i}}{C_{R,\text{MAX}}} \right) \quad (29)$$

式中: C 为总成本; $E_{N,i}$ 、 $S_{P,i}$ 、 $C_{R,i}$ 分别为航段*i*的能耗成本、噪声成本、坠地风险成本; $E_{N,\text{MAX}}$ 、 $S_{P,\text{MAX}}$ 、 $C_{R,\text{MAX}}$ 分别为各航段中最大的能耗成本、噪声成本、坠地风险成本。

2.6 改进 Dubins 路径规划

传统 Dubins 路径规划是一种适用范围广泛的路径规划思想,可以根据具体的使用场景进行改进。本文将传统 Dubins 路径规划思想与几何圆切线相结合,提出改进 Dubins 路径规划。所规划出的路径是一种曲线路径,可以分为圆弧路径和直线路径两部分,通过依次连接两个给定的节点得出一条简短且平滑的运行路径。

基于噪声保护区,用改进 Dubins 路径规划方法规划出所有可运行路径;再用 Dijkstra 算法,依据成本模型与总成本目标函数,搜索出 UAV 从起点通过各节点到达终点的一条最佳运行路径。改进 Dubins 路径与节点示意图如图 7 所示。

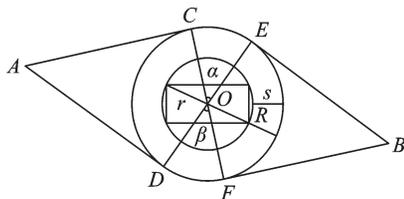


图 7 Dubins 路径与节点示意图
Fig.7 Schematic diagram of Dubins paths and nodes

图 7 中:圆 $CEFD$ 为噪声保护区范围边界; O 点为圆心; A 、 B 分别为起始节点与目标节点; C 、 D 、 E 、 F 为所引切线的切点,将它们同样视为节点。UAV 从节点 A 点飞往节点 B 点有两条路径,分别为切线 $AC \rightarrow$ 圆弧 $CE \rightarrow$ 切线 EB 和切线 $AD \rightarrow$ 圆弧 $DF \rightarrow$ 切线 FB , 圆心到各切点的线段成一定角度, OC 与 OE 成 α 角, OD 与 OF 成 β 角。假设 A 点到圆心 O 距离为 D_1 , B 点到圆心 O 距离为 D_2 , AB 路径直线长度为 D_3 , 则对各路径长度的计算模型^[21]可表示为

$$L_{ACEB} = \sqrt{D_1^2 - R^2} + \sqrt{D_2^2 - R^2} + \left[\arccos\left(\frac{D_3^2 - D_1^2 - D_2^2}{2}\right) - \arccos\left(\frac{R}{D_1}\right) - \arccos\left(\frac{R}{D_2}\right) \right] R \quad (30)$$

$$L_{ADFB} = \sqrt{D_1^2 - R^2} + \sqrt{D_2^2 - R^2} + \left[2\pi - \arccos\left(\frac{D_3^2 - D_1^2 - D_2^2}{2}\right) - \arccos\left(\frac{R}{D_1}\right) - \arccos\left(\frac{R}{D_2}\right) \right] R \quad (31)$$

上述示例为 UAV 绕过单个噪声保护区的简易 Dubins 路径。

复杂情况下, UAV 需要绕过多个建筑从而到达目的地。复杂情况下的 Dubins 路径如图 8 所示。

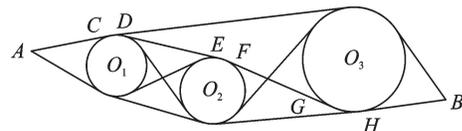


图 8 复杂情况的 Dubins 路径示意图
Fig.8 Schematic diagram of Dubins paths for a complex case

图 8 中, UAV 从地点 A 飞往地点 B 需绕过多个建筑物,用改进 Dubins 方法在各噪声保护区模型之间用几何切线找到最短运行路径,增设节点(各切点: C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 仅为示例节点)处理,根据实际情况和所需目标去除不符合要求的路径。改进 Dubins 方法可得到多条从起点到达终点的路径,为 UAV 在城市空域内的运行和路径规划提供方案和依据。

在某些情况下,噪声保护区模型之间的路径存在相交情况,使得在搜索路径过程中,下一起始节点位于上一结束节点的后方,无法顺畅地为 UAV 进行路径搜索,需要对其进行优化处理。如图 9 所示,当存在路径相交情况时,可在该侧方从起点越过 O_1 的噪声保护区直接向 O_2 的噪声保护区引切线,避免路径相交。该优化处理缩短了路径距离,又提高了搜索效率,降低运行成本。

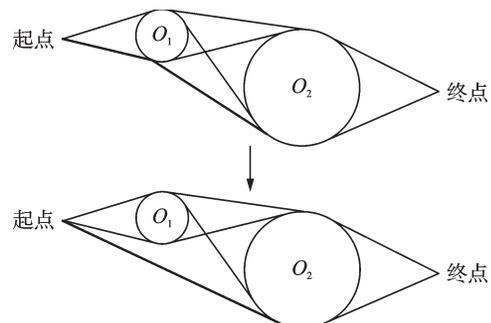


图 9 路径优化处理示意图
Fig.9 Schematic diagram of path optimization process

2.7 Dijkstra 算法

根据 2.6 节中的路径规划方法可以获得 UAV

在城市空域内所有满足运行要求的可行路径与节点。基于这些节点与路径,运用Dijkstra算法在众多可行路径与节点中搜索一条UAV最佳运行路径^[19]。

Dijkstra算法是一种依赖贪婪策略,在加权图中寻找从一个起始节点到其他所有节点的最短路径的算法。具有高效简便的特点,被广为使用。本文,运用该算法搜索最佳运行路径,以起点、终点和各路径节点作为算法中的搜索节点,以成本模型与总成本目标函数为每一段路径的(直线路径和圆弧路径)附加成本权值。Dijkstra算法搜索可以遍历所有的节点,直至搜索到达终点,搜索结束,并得出一条总成本最低的运行路径。Dijkstra算法搜索结果如图10所示。

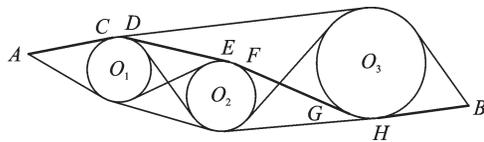


图10 Dijkstra算法搜索结果示意图

Fig.10 Schematic diagram of Dijkstra algorithm search results

路径规划中常用Dijkstra、A*等算法来搜索最佳运行路径。本文主要用Dijkstra算法作为搜索最佳运行路径的算法。A*算法作为一种经典的启发式搜索算法,可以通过总成本目标函数(同Dijkstra算法的总成本目标函数),依次选择成本(所用UAV参数和成本模型与Dijkstra算法所用相同)最小的节点规划出最佳运行路径。因此,选择A*算法与本文使用的Dijkstra算法进行研究结果比对。

3 算例分析

3.1 参数设置

噪声保护区模型参数^[23]如表1所示,其中参数为UAV通用参数,可根据不同机型而变化。

表1 噪声保护区模型参数

Table 1 Parameters of noise protection zone model

参数	数值	参数	数值
p_0/Pa	2×10^{-5}	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
m	12	B_L	2
R_L/m	0.632	A_L/m^2	1.313
P_h/W	8.432	$V_\infty/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15
M_t	0.233	$N/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	20
d/m	1.264	A_b/m^2	0.53
$\theta/(\text{°})$	0	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.225
η	0.7	M/kg	15

能耗成本模型参数^[19]如表2所示。

表2 能耗成本模型参数

Table 2 Parameters of the energy cost model

参数	数值	参数	数值
W_P	0.8	W_M	0.8
W_{ESC}	0.8	τ	0.94
$V_H/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15	$V_U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5
$V_D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5	k	0.13
σ/m^2	0.75	C_{D0}	0.015

噪声成本模型参数^[24]如表3所示。

表3 噪声成本模型参数

Table 3 Parameters of the noise cost model

参数	数值	参数	数值
ω	0.7	$\psi_{P,\text{AVG}}/(\text{人}\cdot\text{km}^{-2})$	6 000
d_s/ft	30		

坠地风险成本模型参数^[20-21]如表4所示。

表4 坠地风险成本模型参数

Table 4 Parameters of the crash risk cost model

参数	数值	参数	数值
C_D	0.3	A_x/m^2	0.234
A_y/m^2	0.47	ϑ	6.04×10^{-5}

超过一定高度将不对地面人群产生噪声影响,该噪声阈值定义为50 dB^[17]。根据文献[17]可得该噪声阈值所对应的飞行高度为28 m,即UAV飞行高度低于28 m时,将对地面人群产生噪声影响。

选取大型城市建筑物密集区域(包含单个建筑与建筑群),范围为900 m×900 m,起点坐标为(37,851),终点坐标为(846,59),对该区域内建筑物标号并进行建模,如图11所示。

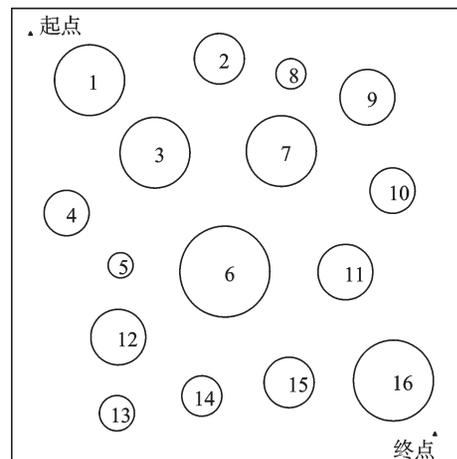


图11 建筑物分布示意图

Fig.11 Schematic diagram of building distribution

建筑物的各参数信息如表 5 所示。

表 5 建筑物参数

Table 5 Building parameters

建筑物编号	圆心坐标/m	圆半径/m	建筑物高度/m
1	(155,759)	70	50
2	(415,802)	50	25
3	(286,616)	70	90
4	(110,496)	45	30
5	(218,393)	25	18
6	(426,380)	90	95
7	(539,619)	70	65
8	(558,772)	30	14
9	(711,725)	55	65
10	(761,541)	45	45
11	(667,380)	55	90
12	(213,251)	55	85
13	(210,100)	35	16
14	(380,134)	40	15
15	(554,161)	50	45
16	(763,165)	80	65

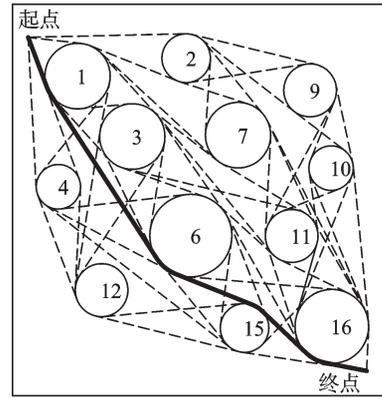
3.2 路径规划

eVTOL UAV 在城市空域内的运行高度不得高于 120 m, 因此对城市 120 m 以下空域进行飞行高度层划分。以 20 m 为 UAV 最低运行高度, 共划分 20 m, 40 m, 60 m, 80 m 这 4 个高度层(80 m 以上的建筑物较少, 因此最高高度层设置为 80 m 以上), 分别对应(20 m, 40 m)、(40 m, 60 m)、(60 m, 80 m)和 80 m 以上 4 个高度区间。

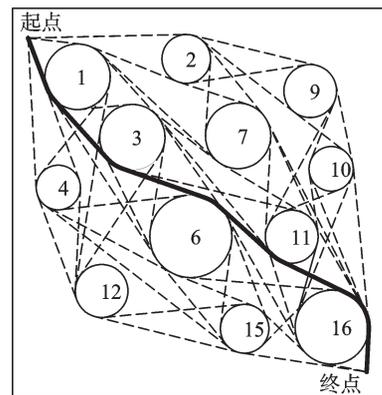
(1) 飞行高度为 20 m 时, 去掉低于该高度层的建筑, 保留编号为 1、2、3、4、6、7、9、10、11、12、15、16 的建筑。根据式(5)该高度层的噪声保护区 $W=8\text{ m}$ 、 $S_0=72\text{ dB}$ 。对建筑物模型加设噪声保护区, Dijkstra 算法与 A* 算法路径规划结果如图 12 所示。

20 m 高度层低于高度阈值, 在此高度层上总成本考虑能耗成本、噪声成本、坠地风险成本。根据式(12, 21, 28, 29)得到 Dijkstra 算法的最优路径的噪声成本 $S_p=2.48$, 能耗成本 $E_N=18\ 989.29\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.53$ 以及总成本 $C=8.33$ 。由 A* 算法所得噪声成本 $S_p=2.61$, 能耗成本 $E_N=19\ 358.1\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.69$ 以及总成本 $C=8.68$ 。

(2) 飞行高度为 40 m 时, 去掉低于该高度层的建筑, 保留编号为 1、3、6、7、9、10、11、12、15、16 的建筑。根据式(5), 该高度噪声保护区的 $W=17\text{ m}$, 对建筑物模型加设噪声保护区, Dijkstra 算法与 A* 算法路径规划结果如图 13 所示。

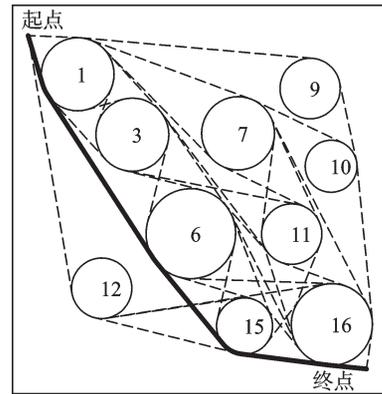


(a) Dijkstra algorithm

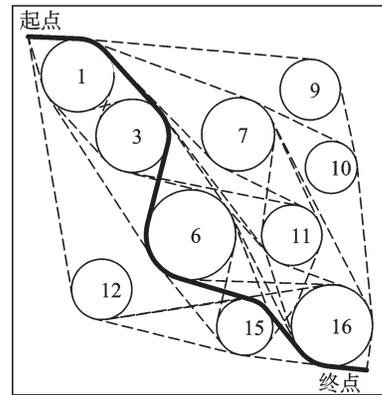


(b) A* algorithm

图 12 20 m 高度层规划路径对比图
Fig.12 Comparison of planned paths at 20 m flight level



(a) Dijkstra algorithm



(b) A* algorithm

图 13 40 m 高度层规划路径对比图
Fig.13 Comparison of planned paths at 40 m flight level

在 40 m 高度层上无噪声成本影响, 因此总成本仅考虑能耗成本与坠地风险成本。根据式(21,

28, 29)得到Dijkstra算法的最优路径的能耗成本 $E_N=24\ 185.82\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.31$, 总成本 $C=5.42$ 。由A*算法所得能耗成本 $E_N=25\ 753.58\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.46$, 总成本为 $C=5.76$ 。

(3)飞行高度为60 m时,去掉低于该高度层的建筑,保留编号为3、6、7、9、11、12、16的建筑。根据式(5),该高度噪声保护区的 $W=26\text{ m}$,对建筑物模型加设噪声保护区,Dijkstra算法与A*算法路径规划结果如图14所示。

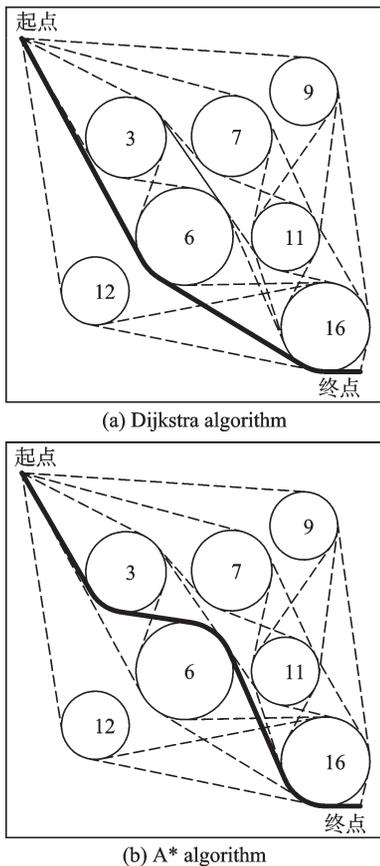


图14 60 m高度层规划路径对比图
Fig.14 Comparison of planned paths at 60 m flight level

在60 m高度层上无噪声成本影响,因此总成本仅考虑能耗成本与坠地风险成本。根据式(21, 28, 29)得到Dijkstra算法的最优路径的能耗成本 $E_N=28\ 790.9\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.39$, 总成本 $C=6.15$ 。由A*算法所得能耗成本 $E_N=29\ 306.96\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.56$, 总成本为 $C=6.38$ 。

(4)飞行高度为80 m时,去掉低于该高度层的建筑,保留编号为3、6、11、12的建筑。根据式(5),该高度噪声保护区的 $W=34\text{ m}$,对建筑物模型加设噪声保护区,Dijkstra算法与A*算法路径规划结果如图15所示。

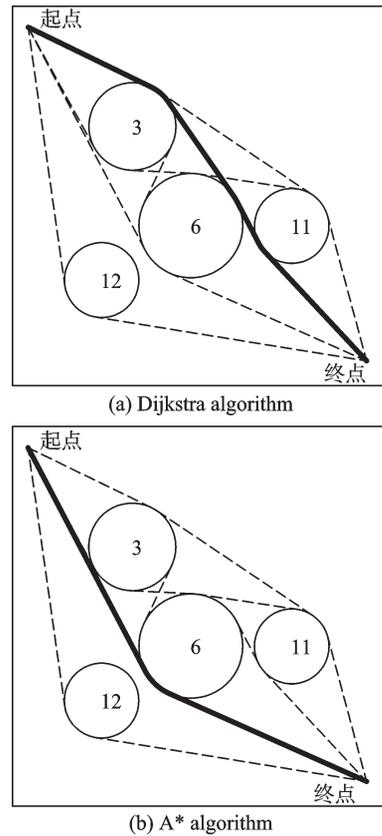


图15 80 m高度层规划路径对比图
Fig.15 Comparison of planned paths at 80 m flight level

在80 m高度层上无噪声成本影响,因此总成本仅考虑能耗成本与坠地风险成本。根据式(21, 28, 29)得到Dijkstra算法的最优路径的能耗成本 $E_N=33\ 369.32\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=2.72$, 总成本 $C=6.38$ 。由A*算法所得能耗成本 $E_N=33\ 821.76\text{ J}$, 坠地风险成本 $C_R=3.01$, 总成本为 $C=6.72$ 。

3.3 仿真结果分析

据图12~15所示,虚线为在各高度层上用改进Dubins路径规划方法得出的所有可运行路径;实线为根据总成本目标函数与Dijkstra算法所得出的各高度层上的最佳运行路径。可以看出,基于噪声保护区进行UAV路径规划,不仅可以最小化UAV运行产生的噪声影响,还能将UAV运行噪声、能耗成本、坠地风险降至最低,提高飞行安全性与经济性。

根据Dijkstra算法得到UAV在不同高度层上的最佳运行路径的各项成本如表6所示。根据A*算法得到UAV在不同高度层上的最佳运行路径的各项成本如表7所示。

仿真结果表明,本文所提出的模型与算法能够实现UAV在城市空域内的高高度无噪声低成本运行,在低高度实现低噪声低成本运行,安全性高。根据数据对比可以得出:本文所用路径规划中

表6 Dijkstra算法所得最佳路径的运行成本

Table 6 Operating costs of the best paths by Dijkstra algorithm

飞行高度层/m	水平飞行功率/W	遮蔽路径长度/m	噪声成本	坠地风险成本	能耗成本	总能耗/J	总成本
20	184.66	0	2.48	2.53	3.32	18 989.29	8.33
40	188.10	0	0	2.31	3.11	24 185.82	5.42
60	191.79	128.01	0	2.39	3.76	28 790.90	6.15
80	195.74	379.39	0	2.72	3.66	33 369.32	6.38

表7 A*算法所得最佳路径的运行成本

Table 7 Operating costs of the best paths by A* algorithm

飞行高度层/m	水平飞行功率/W	遮蔽路径长度	噪声成本	坠地风险成本	能耗成本	总能耗/J	总成本
20	184.66	0	2.61	2.69	3.38	19 358.10	8.68
40	188.10	0	0	2.46	3.30	25 753.58	5.76
60	191.79	146.3	0	2.56	3.82	29 306.96	6.38
80	195.74	365.32	0	3.01	3.71	33 821.76	6.72

的算法具有较好效果,可有效应用于实际;且效果优于A*算法。根据仿真结果,所选双旋翼中型UAV(质量约15 kg,桨盘面积约1.313 m²)的最佳运行高度可选择40 m,在该高度层运行噪声影响最小,安全性最高,总成本最低,为5.42。

4 结 论

针对UAV运行噪声与安全问题,在满足UAV运行标准条件下,考虑城市环境、空域特点和人口密度等现实因素,提出噪声保护区模型、成本模型和坠地风险成本模型,基于噪声保护区,研究了UAV在不同高度层、各种现实因素情况下的最低噪声影响以及最小成本与坠地风险的多目标路径规划。对Dubins路径规划方法进行改进,以Dijkstra为搜索算法,实现在不同高度层上规划并搜索出最佳运行路径。所规划路径可能存在距离少量增加情况,但最终结果使得噪声成本、能耗成本和坠地风险成本综合最低,考虑的综合成本远优于基于最小距离的成本。势能与路径长度等问题均是影响UAV运行成本大小的重要因素,在未来有待结合考虑,进行更深入研究。

通过本文的研究可以得出,噪声保护区显著减轻了UAV在城市环境中飞行所产生的噪声影响,有效降低了其运行成本与坠地风险,提高了安全性,为UAV在复杂城市空间的应用提供创新性的解决方案和支持。当前研究聚焦于单一UAV的运行效率和安全性。未来的研究将探讨多UAV的协同作业的策略;有待更细致地划分UAV运行高度层;采用更先进的模型与算法来综合考量UAV的噪声问题、运行成本与安全风险,旨在开发出更加符合实际需求、安全高效的UAV运行路径规划方法。

参考文献:

- [1] LEE H W, LEE C S. Research on logistics of intelligent unmanned aerial vehicle integration system[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 36: 100534.
- [2] 魏明,孙雅茹,孙博,等.基于深度强化学习的无人机线路及路径协同规划[J].中国安全科学学报,2023,33(8):68-76.
WEI Ming, SUN Yaru, SUN Bo, et al. UAV distribution route and flight path collaborative planning based on deep reinforcement learning[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 68-76.
- [3] BIAN H Y, TAN Q C, ZHONG S Y, et al. Assessment of UAM and drone noise impact on the environment based on virtual flights[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 106996.
- [4] RAMOS-ROMERO C, GREEN N, TORIJA A J, et al. On-field noise measurements and acoustic characterisation of multi-rotor small unmanned aerial systems [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 141: 108537.
- [5] 唐毅,王征,谢志明,等.多旋翼无人机抗风能力及降噪研究[J].电声技术,2022,46(8):102-105.
TANG Yi, WANG Zheng, XIE Zhiming, et al. Research on wind resistance and noise reduction of multi-rotor UAV[J]. Audio Engineering, 2022, 46(8): 102-105.
- [6] 张洪海,张连东,刘峰,等.城市低空物流无人机航迹规划模型研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(1):256-264.
ZHANG Honghai, ZHANG Liandong, LIU Hao, et al. Track planning model for logistics unmanned aerial vehicle in urban low-altitude airspace[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information

- Technology, 2022, 22(1): 256-264.
- [7] 胡小兵, 杨常澍, 周隽. 复杂城市环境下无人机路网模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 251-261.
HU Xiaobing, YANG Changshu, ZHOU Jun. Route network modeling for unmanned aerial vehicle in complex urban environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(4): 251-261.
- [8] TAN Q C, LI Y H, WU H, et al. Enhancing sustainable urban air transportation: Low-noise UAV flight planning using noise assessment simulator[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 147: 109071.
- [9] CHAN Y Y, NG K K H, LEE C K M, et al. Wind dynamic and energy-efficiency path planning for unmanned aerial vehicles in the lower-level airspace and urban air mobility context[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 57: 103202.
- [10] 丁敏, 夏兴宇, 邹永杰, 等. 基于改进蝴蝶优化算法的无人机3-D航迹规划方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 851-858.
DING Min, XIA Xingyu, ZOU Yongjie, et al. 3-D track planning method of UAV based on improved butterfly optimization algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 851-858.
- [11] SUN X X, PAN S, BAO N, et al. Hybrid ant colony and intelligent water drop algorithm for route planning of unmanned aerial vehicles[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 111: 108957.
- [12] ZHOU T W, ZHOU Z H, QIU H Y, et al. Two-stage knowledge-assisted coevolutionary NSGA-II for bi-objective path planning of multiple unmanned aerial vehicles[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 90: 101680.
- [13] EUROCONTROL. Revision summary document for the base of aircraft data (BADA) (Revision 3.8): EEC Technical/Scientific Report No. 2010-004[R]. [S.l.]: EUROCONTROL, 2010.
- [14] MADE J E, KURTZ D W. A review of aerodynamic noise from propellers, rotors, and lift fans: NASA-CR-107568[R]. [S.l.]: NASA, 1970.
- [15] GHOREYSHI M, AREF P, WISNIEWSKI C F, et al. Computational investigation of quiet propeller designs for small unmanned aerial vehicles[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 138: 108351.
- [16] BURGERS P. A thrust equation treats propellers and rotors as aerodynamic cycles and calculates their thrust without resorting to the blade element method[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2019, 6(5): 1427.
- [17] TORIJA A J, LI Z G, SELF R H. Effects of a hovering unmanned aerial vehicle on urban soundscapes perception[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 78: 102195.
- [18] YAO Y, LIU X P, LI X, et al. Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(6): 1220-1244.
- [19] LI Y F, LIU M H. Path planning of electric VTOL UAV considering minimum energy consumption in urban areas[J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13421.
- [20] 李亚飞, 刘明欢, 王莉莉. 建筑物影响下的无人机城区运行风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 136-142.
LI Yafei, LIU Minghuan, WANG Lili. Risk assessment of urban UAV operation under influence of buildings[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 136-142.
- [21] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts[C]//Proceedings of 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Ajaccio, France: IEEE, 2008: 709-716.
- [22] SINGH D, SINGH B. Feature wise normalization: An effective way of normalizing data[J]. Pattern Recognition, 2022, 122: 108307.
- [23] 赵巍飞, 郑雨欣. 城市物流无人机飞行任务剖面构建与优化[J]. 飞行力学, 2021, 39(3): 54-59, 67.
ZHAO Yifei, ZHENG Yuxin. Construction and optimization of flight mission profile of urban logistics UAV[J]. Flight Dynamics, 2021, 39(3): 54-59, 67.
- [24] ALEXANDER W N, WHELCHER J. Flyover noise of multi-rotor sUAS[J]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2019, 259(7): 2548-2558.

(编辑:张蓓)