

# 城市低空物流无人机航迹规划模型研究

张洪海\*, 张连东, 刘皞, 钟罡

(南京航空航天大学, 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 为提高物流无人机在城市低空环境下配送的安全性和公众接受程度, 保证运输经济性, 提出一种考虑运行风险、噪声水平和运输成本的城市低空物流无人机航迹规划方法。采用栅格法进行空域环境表征, 建立基于风险的城市空域环境模型。结合物流配送要求, 建立多目标、多约束的物流无人机航迹规划模型。采用改进A\*算法进行求解: 为降低航迹代价, 设计估价函数预估成本; 为保证飞行安全, 引入安全保护区确保间隔; 为提升搜索效率, 采用动态步长加快搜索进程。仿真结果表明: 本文模型和算法所得航迹的运行风险小、噪声水平低、运输成本低, 能够实现多目标优化。分析模型参数可知, 当各子目标代价权重分别为0.6、0.1和0.3时, 规划航迹最优。保证其余参数不变, 增大安全间隔, 则风险代价、运输成本代价总体呈增加趋势, 噪声代价减少。在本文规划环境下, 参考大疆经纬200无人机参数, 在安全间隔取15 m时, 综合代价最小。

**关键词:** 航空运输; 航迹规划; 改进A\*算法; 物流无人机; 风险评估

## Track Planning Model for Logistics Unmanned Aerial Vehicle in Urban Low-altitude Airspace

ZHANG Hong-hai\*, ZHANG Lian-dong, LIU Hao, ZHONG Gang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** To improve the delivery safety and public acceptance of logistics unmanned aerial vehicle (UAV) in urban low-altitude airspace, and ensure the transportation economy, this paper proposed a track planning method for logistics UAV in urban low-altitude and considered the operational risk, noise level and transportation cost. The airspace was characterized by the grid method, and a risk-based urban airspace model was developed. A multi-objective and multi-constraint model of logistics UAV track planning was established combined with the requirements of logistics distribution. The improved A\* algorithm was used to solve the problem. The evaluation function was designed to estimate the costs. The safety protection area was introduced to ensure separation and flight safety. To improve the search efficiency, a dynamic step length method was adopted to speed up the search process. The simulation results show that the proposed model and algorithm can achieve multi-objective optimization with low operational risk, low noise level, and low transportation cost. By analyzing the model parameters, when the cost weights of each sub-target are respectively 0.6, 0.1 and 0.3, the planned flight track is optimal. If the remaining parameters remain unchanged and the safety separation is improved, the risk cost and transportation cost would generally increase, and the noise cost would decrease. In the planning environment of this paper, with reference to the parameters of DJI Matrice200, the comprehensive cost is minimum when the safety separation is set at 15 meters.

**Keywords:** air transportation; track planning; improved A\* algorithm; logistics unmanned aerial vehicle (UAV); risk assessment

## 0 引言

随着物流行业智能化需求的提升,使用无人机进行城市“最后一公里”配送成为行业发展趋势。在城市环境下,需预先为无人机规划出安全、经济、公众接受度高的航迹,以保证配送任务的完成。

目前,针对城市物流配送的无人机航迹规划技术研究较少。对于密集障碍物环境,文献[1]提出基于快速扩展随机树的固定翼无人机航迹规划方法,实现对静态障碍物的规避。文献[2]提出基于DOP图(Dilution of Precision Maps)的多无人机航迹规划方法,可满足多机楼宇间飞行的导航精度要求。文献[3]考虑城市风场环境,其航迹设计准则能够较好适应风场干扰。针对无人机物流运输航迹规划,文献[4]提出静态和动态航迹规划方法,对偏远地区配送航迹规划有指导意义。文献[5]将栅格危险度作为子目标函数,得到飞行平稳、安全度高的物流配送航迹。文献[6]引入危险度因子表征环境风险,提高了航迹的安全性。综上可知,当前研究多考虑无人机受到的环境威胁,例如,满足避障要求<sup>[1,4]</sup>,增强导航性能<sup>[2]</sup>,适应风场环境<sup>[3]</sup>等;或将航迹风险简化为栅格危险度考虑<sup>[5-6]</sup>,未考虑无人机对周围环境,尤其对地面人群的影响。

针对以上问题,本文建立基于风险的城市空域环境模型,构建多目标物流无人机航迹规划模型,设计改进A\*算法求解,得到高安全、低噪声、低成本的运输航迹。

## 1 问题建模

### 1.1 问题描述

设某城市区域建有一无人机物流配送中心,现需完成点对点配送任务。配送中心和目标配送点的位置已知,采用一台充电旋翼式物流无人机配送,需为其规划预先飞行航迹,以满足配送要求。

### 1.2 城市空域环境建模

#### 1.2.1 空域环境表征

以 $O$ 为原点建立空间直角坐标系,将城市空域等分成 $u \times v \times w$ 个3维栅格。设栅格划分精度为 $r$ ,其中,可飞区代表可扩展栅格,禁飞和障碍物区代表无法扩展栅格。设栅格中心点为 $p_{abc}$ , $a$ 、 $b$ 、 $c$ 表示栅格中心点在 $x$ 轴、 $y$ 轴和 $z$ 轴方向上的序号, $a=1,2,\dots,v$ , $b=1,2,\dots,u$ , $c=1,2,\dots,w$ 。 $p_{abc}$ 的坐标为 $p(x,y,z)$ ,其中, $x=a \times r$ , $y=b \times r$ ,

$z=c \times r$ 。物流无人机可由两相邻可飞栅格的中心点平行栅格的边、面对角线或沿体对角线飞行,航迹节点扩展如图1所示。

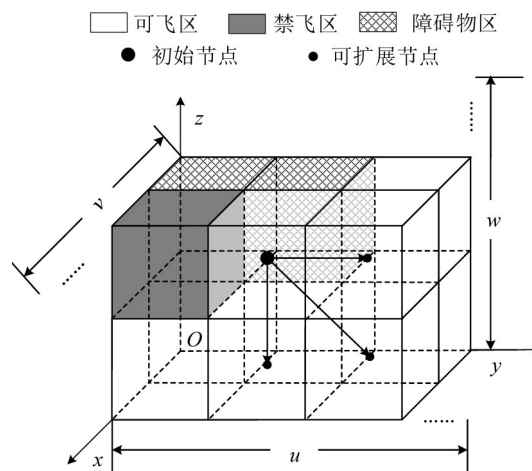


图1 航迹节点扩展

Fig. 1 Illustration of track nodes extension

#### 1.2.2 空域风险评估

以物流无人机失控坠落造成地面人员死亡率作为运行风险的衡量指标,考虑以下因素计算无人机在空域中的风险值。

##### (1) 地面人口数量

设坐标 $p(x,y,z)$ 处对应的地面人口数量为 $N_{\text{exp}}(x,y)$ ,计算式<sup>[7]</sup>为

$$N_{\text{exp}}(x,y) = A_{\text{exp}} \cdot \rho_{\text{peo}}(x,y) \quad (1)$$

式中: $A_{\text{exp}}$ 为坠落区域面积; $\rho_{\text{peo}}(x,y)$ 为坐标 $p(x,y,z)$ 处对应的地面人口密度。考虑水平风对无人机坠落的影响,坠落区域 $A_{\text{exp}}$ 为

$$A_{\text{exp}} = \pi(r_{\text{uav}} + r_{\text{peo}})^2 + 2(r_{\text{uav}} + r_{\text{peo}})d \quad (2)$$

$$d = \frac{h_{\text{peo}}}{\tan(\gamma)} = h_{\text{peo}} \frac{\max(v_{\text{ox}}, v_{\text{wind}})}{v_y} \quad (3)$$

$$v_y = \sqrt{\frac{2(m_{\text{uav}} + m_{\text{cargo}})g}{C_d A_{\text{uav}} \rho_{\text{air}}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h_{\text{uav}} A_{\text{uav}} C_d \rho_{\text{air}}}{m_{\text{uav}} + m_{\text{cargo}}}\right) \right]} \quad (4)$$

式中: $r_{\text{uav}}$ 为物流无人机半径; $r_{\text{peo}}$ 为成年人平均半径; $d$ 为无人机坠落偏移水平距离; $h_{\text{peo}}$ 为成年人平均高度; $\gamma$ 为坠落角度; $v_{\text{ox}}$ 为无人机运行水平速度; $v_{\text{wind}}$ 为水平风速,保守考虑为与 $v_{\text{ox}}$ 同向; $v_y$ 为垂直坠落速度<sup>[8]</sup>; $m_{\text{uav}}$ 为物流无人机质量; $m_{\text{cargo}}$ 为货物质量; $g$ 为重力加速度; $C_d$ 为阻力系数; $A_{\text{uav}}$ 为无人机横截面积; $\rho_{\text{air}}$ 为空气密度; $h_{\text{uav}}$ 为无人机高度。坠落区域如图2所示。

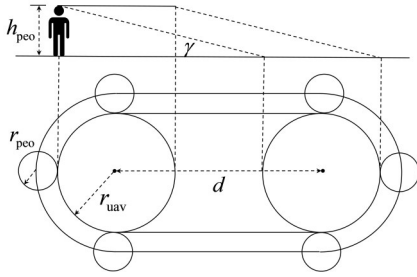


图2 坠落区域

Fig. 2 Illustration of casualty area for UAV falling

## (2) 地物遮蔽情况

城市中建筑、植被等对于缓解物流无人机坠落风险具有积极作用,可用遮蔽因子  $P_s$  表示,其取值如表1所示。

表1 遮蔽因子取值<sup>[7]</sup>

Table 1 Value of Sheltering factor

取值	区域划分
0.00	无遮蔽
0.25	稀疏的树木
0.50	车辆和低矮建筑物
0.75	高层建筑物
1.00	工业建筑

## (3) 人员伤亡程度

物流无人机坠落对人的伤害程度主要取决于撞击动能  $E_{\text{imp}}$ ,即

$$E_{\text{imp}} = \frac{1}{2}(m_{\text{uav}} + m_{\text{cargo}})v_{\text{imp}}^2 \quad (5)$$

式中:  $v_{\text{imp}}$  为撞击速度,公式为

$$v_{\text{imp}}^2 = [\max(v_{\text{ox}}, v_{\text{wind}})]^2 + v_y^2 \quad (6)$$

## (4) 风险值计算

物流无人机在坐标  $p(x, y, z)$  处产生的风险值  $R_{\text{uav}}(x, y, z)$  为

$$R_{\text{uav}}(x, y, z) = P_{\text{fal}} \cdot N_{\text{exp}}(x, y) \cdot P_{\text{ded}}(x, y, z) \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{fal}}$  为无人机失控坠落概率;  $P_{\text{ded}}(x, y, z)$  为在坐标  $p(x, y, z)$  处坠落时,对地面人员的致死概率,计算式<sup>[7]</sup>为

$$P_{\text{ded}}(x, y, z) = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left[ \frac{\beta}{E_{\text{imp}}(x, y, z)} \right]^{\frac{1}{4p_s(x, y)}}}} \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为  $p_s = 0.5$  时,造成50%死亡率的撞击动能;  $\beta$  为  $p_s$  趋近于0时,造成死亡的撞击动能;  $E_{\text{imp}}(x, y, z)$  为在坐标  $p(x, y, z)$  处坠落的撞击动能,计算时取  $z = h_{\text{uav}}$ ;  $p_s(x, y)$  为坐标  $p(x, y, z)$  对应的地面遮蔽因子。

## 1.2.3 空域环境生成

设栅格中心点  $p_{abc}$  风险值为  $R(x, y, z)$ ,即

$$R(x, y, z) = \begin{cases} 1, & p_{abc} \text{ 对应障碍物或禁飞区栅格} \\ 1, & R_{\text{uav}}(x, y, z) \geq E \\ R_{\text{uav}}(x, y, z), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $E$  为等效安全水平<sup>[7]</sup>;  $R_{\text{uav}}(x, y, z)$  为符合等效安全水平要求的  $R_{\text{uav}}(x, y, z)$  归一化后的值。由此得到基于风险的城市低空空域环境,可扩展航迹点集合为  $U = \{p_{abc} | R(x, y, z) \neq 1\}$ 。

## 1.3 航迹规划模型

## 1.3.1 目标函数

设物流配送中心  $D$  坐标为  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ , 目标配送点  $G$  坐标为  $P_n(x_n, y_n, z_n)$ , 途经航迹点坐标为  $P_u(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i$  表示途经航迹点序号,  $i = 1, 2, \dots, n-1$ ,  $n$  为航迹点序号最大值。航迹代价如下。

## (1) 风险代价

以配送安全性作为首要因素,航迹风险代价  $C_r$  为

$$C_r = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [R_i(x_i, y_i, z_i) + R_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})] \cdot d_{i,i-1} \quad (10)$$

式中:  $R_i(x_i, y_i, z_i)$  为坐标  $P_u(x_i, y_i, z_i)$  对应的风险值;  $R_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  为坐标  $P_u(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  对应的风险值;  $d_{i,i-1}$  为坐标  $P_u(x_i, y_i, z_i)$  和  $P_u(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  间的欧式距离。

## (2) 噪声代价

为减少无人机对地面噪声影响,提高城市居民接受程度,将航迹噪声代价  $C_n$  表示为

$$C_n = \sum_{i=1}^n \left( \bar{L}_i \cdot \frac{d_{i,i-1}}{r} \right) \quad (11)$$

$$\bar{L}_i = 10 \lg \left[ \frac{1}{2} \times (10^{0.1L_{i-1}} + 10^{0.1L_i}) \right] \quad (12)$$

$$L_i = L_0 + 12.5 \lg \left( \frac{h_0}{h_i} \right) \quad (13)$$

式中:  $\bar{L}_i$  为无人机从第  $i-1$  到第  $i$  个航迹点对地面声暴露级的均值;  $r$  为栅格划分精度;  $L_i$  和  $L_{i-1}$  分别为无人机在坐标  $P_u(x_i, y_i, z_i)$  和  $P_u(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  处对地面声暴露级<sup>[9]</sup>;  $L_0$  为参考高度  $h_0$  处对地面声暴露级;  $h_i$  为当前坐标点高度。

当航迹点确定后,  $C_n$  可转化为等效连续声

级为

$$C_n = 10 \lg \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 T_i} t_i \right) \quad (14)$$

式中:  $t_i$  为坐标  $P_u(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  至  $P_u(x_i, y_i, z_i)$  的飞行时长。

### (3) 运输成本代价

无人机运输成本是充电费用的函数,考虑不同机动方式和货物质量下电量消耗差异性<sup>[6]</sup>,将运输成本代价  $C_p$  表示为

$$C_p = \sum_{i=1}^n \left[ p_h \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} + \right. \quad (15)$$

$$\left. p_v |z_i - z_{i-1}| \right] \cdot \tau(m_{\text{cargo}}) \cdot f_c$$

$$\tau(m_{\text{cargo}}) = \frac{\tau_{\max} - 1}{m_{\max}} m_{\text{cargo}} + 1 \quad (16)$$

式中:  $p_h$  为单位水平距离能耗;  $p_v$  为单位垂直距离能耗;  $\tau(m_{\text{cargo}})$  为载货质量为  $m_{\text{cargo}}$  时的货物质量惩罚系数<sup>[6]</sup>;  $\tau_{\max}$  为货物质量惩罚系数最大值;  $m_{\max}$  为货物质量最大值;  $f_c$  为单位能耗支付费用。

综上所述,最终目标函数  $C$  为

$$\min C = \omega_1 C_r + \omega_2 C_n + \omega_3 C_p \quad (17)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为风险、噪声和运输成本代价权重系数,且  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

### 1.3.2 约束条件

#### (1) 飞行高度

$$H_{\min} \leq z_i \leq H_{\max}, \forall i \quad (18)$$

式中:  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  为飞行高度上限和下限。

#### (2) 安全间隔

物流无人机须保持与障碍物的安全间隔,即

$$\sqrt{(x_i - x_{ob})^2 + (y_i - y_{ob})^2 + (z_i - z_{ob})^2} \geq D_{\min}, \forall i \quad (19)$$

式中:  $x_{ob}$ 、 $y_{ob}$  和  $z_{ob}$  为距离无人机最近障碍物坐标;  $D_{\min}$  为最小安全间隔。

#### (3) 运行风险

物流无人机运行风险需满足等效安全水平要求,即

$$R_{\text{uav}}(x_i, y_i, z_i) \leq E, \forall i \quad (20)$$

式中:  $R_{\text{uav}}(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个航迹点风险值。

#### (4) 运行噪声

物流无人机对地面声暴露级受限,即

$$L'_i \leq L_{\text{std}}, \forall i \quad (21)$$

式中:  $L'_i$  为第  $i$  个航迹点对地面声暴露级转化到参

考高度的值;  $L_{\text{std}}$  为参考高度(76 m)处声暴露级限制值。

#### (5) 最大航程

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \leq L_{\max} \quad (22)$$

式中:  $L_{\max}$  为最远可飞距离。

#### (6) 最大起飞质量

$$m_{\text{uav}} + m_{\text{cargo}} \leq M \quad (23)$$

式中:  $M$  为最大起飞质量。

#### (7) 最大风速

物流无人机运行受风速限制,即

$$v_{\text{wr}} \leq v_{\text{wm}} \quad (24)$$

式中:  $v_{\text{wr}}$  为实际运行风速;  $v_{\text{wm}}$  为无人机最大可承受风速。

## 2 算法设计

### 2.1 A\*算法原理

A\*算法通过估价函数  $f(x)$  判断航迹点优劣,即

$$f(x) = g(x) + h(x) \quad (25)$$

式中:  $g(x)$  为实际代价函数,表示物流配送中心  $D$  至扩展航迹点  $P_x$  的实际代价;  $h(x)$  为启发函数,表示当前扩展航迹点  $P_x$  至目标配送点  $G$  的预估代价。

### 2.2 改进A\*算法

#### 2.2.1 估价函数设计

##### (1) 实际代价函数

根据式(17),可得实际代价函数  $g(x)$  为

$$g(x) = \omega_1 C_r^{(0)}(x) + \omega_2 C_n^{(0)}(x) + \omega_3 C_p^{(0)}(x) \quad (26)$$

式中:  $C_r^{(0)}(x)$ 、 $C_n^{(0)}(x)$ 、 $C_p^{(0)}(x)$  分别为物流配送中心  $D$  至扩展航迹点  $P_x$  的实际风险、噪声和运输成本代价。

##### (2) 启发函数

启发函数  $h(x)$  需尽可能准确估算到目标配送点  $G$  的代价值,以获得更优航迹点,即

$$h(x) = \omega_1 C_r^{(G)}(x) + \omega_2 C_n^{(G)}(x) + \omega_3 C_p^{(G)}(x) \quad (27)$$

式中:  $C_r^{(G)}(x)$ 、 $C_n^{(G)}(x)$ 、 $C_p^{(G)}(x)$  分别为当前扩展航迹点  $P_x$  至目标配送点  $G$  的预估风险、噪声和运输成本代价。各预估代价计算公式为

$$C_r^{(G)}(x) = R_0 \sqrt{(x_n - x_x)^2 + (y_n - y_x)^2 + (z_n - z_x)^2} \quad (28)$$



$$C_n^{(G)}(x) = L_{A0} \frac{\sqrt{(x_n - x_x)^2 + (y_n - y_x)^2 + (z_n - z_x)^2}}{r} \quad (29)$$

$$C_p^{(G)}(x) = \left[ p_h \sqrt{(x_n - x_x)^2 + (y_n - y_x)^2} + p_v |z_n - z_x| \right] \cdot \tau(m_{\text{cargo}}) \cdot f_e \quad (30)$$

式中:  $R_0$  为地图栅格风险预估值;  $x_x$ 、 $y_x$  和  $z_x$  为当前扩展航迹点  $P_x$  坐标;  $L_{A0}$  为对地面声暴露级预估值。

### 2.2.2 安全保护区

为保证最小安全间隔,引入安全保护区。如图3所示,其由  $n_s \times n_s \times n_s$  个小正方体组成,中心位置为当前扩展航迹点  $P_x$ ,  $n_s$  计算式为

$$n_s = 2 \times \text{int}\left(\frac{D_{\min}}{r}\right) + 1 \quad (31)$$

式中:  $\text{int}(\cdot)$  为向上取整函数。

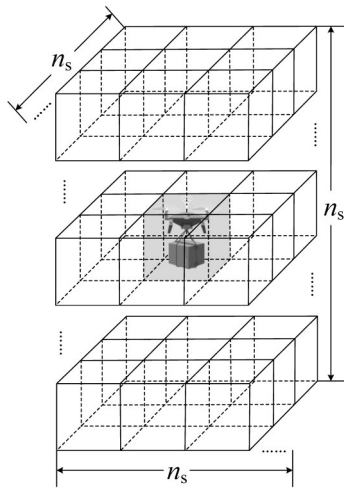


图3 安全保护区

Fig. 3 Illustration of safety protection area

将小正方体与空域栅格相对应,若安全保护区最外侧存在风险值为1的小正方体,则对点  $P_x$  的估价函数  $f'(x)$  添加惩罚项  $m(x)$ ,即

$$f'(x) = g(x) + h(x) + \lambda \cdot m(x) \quad (32)$$

$$m(x) = \sum_{k=1, n_s} \sum_{l=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} m_{l,j,k} + \sum_{k=2}^{n_s-1} \left( \sum_{l=1, n_s} \sum_{j=1}^{n_s} m_{l,j,k} + \sum_{j=1, n_s} \sum_{l=2}^{n_s-1} m_{l,j,k} \right) \quad (33)$$

式中:  $m_{l,j,k}$  为安全保护区第  $l$  行第  $j$  列的第  $k$  层小正方体对应栅格的风险值,当  $m_{l,j,k} < 1$  时,取  $m_{l,j,k} = 0$ ;  $\lambda$  为惩罚系数。通过对  $f'(x)$  进行惩罚,避免扩展到不满足安全间隔的航迹点。

### 2.2.3 动态步长调整

根据障碍物密度和距目标配送点距离,动态调整步长。设当前扩展航迹点  $P_x$  周围以最大步长  $\eta_{\max}$  计算的栅格总数为  $N_0$ ,障碍物密度  $\rho_{\text{obst}}$  为

$$\rho_{\text{obst}} = \frac{N_{\text{obst}}}{N_0} \quad (34)$$

式中:  $N_{\text{obst}}$  为点  $P_x$  周围最大步长  $\eta_{\max}$  范围内障碍物栅格数量。

动态步长  $\eta$  可表示为

$$\eta = \begin{cases} \eta_{\max}, & \rho_{\text{obst}} = 0 \text{ 且 } d_{pG} > d_0 \\ \eta_{\text{mid}}, & 0 < \rho_{\text{obst}} < \varepsilon \text{ 且 } d_{pG} > d_0 \\ \eta_{\min}, & \varepsilon \leq \rho_{\text{obst}} \text{ 或 } d_{pG} \leq d_0 \end{cases} \quad (35)$$

式中:  $\eta_{\max}$ 、 $\eta_{\text{mid}}$  和  $\eta_{\min}$  分别为最大、中间和最小步长;  $d_{pG}$  为点  $P_x$  距目标配送点  $G$  的距离;  $d_0$  为距离阈值;  $\varepsilon$  为障碍物密度阈值。

### 2.3 航迹平滑

采用3次B样条曲线对初始航迹进行平滑,  $N$  次B样条曲线表达式  $S(t)$  为

$$S(t) = \sum_{f=0}^N P_f B_{f,N}(t), t \in [0, 1] \quad (36)$$

式中:  $P_f$  为第  $f$  个控制点;  $B_{f,N}(t)$  为第  $f$  个  $N$  次B样条基函数,  $N$  取3。

### 2.4 算法流程

改进A\*算法流程图如图4所示。

## 3 仿真分析

### 3.1 参数设置

选取墨尔本地理高程数据进行仿真,设禁飞区坐标范围为  $\{(885, 510), (1045, 455), (1075, 555), (925, 615)\}$ , 高度0~300 m。地面人口密度与建筑高度成正比,范围取  $15 \times 10^{-3} \sim 35 \times 10^{-3}$  人·m<sup>-2</sup>。遮蔽因子  $p_s$  在建筑高度大于15 m处取0.75,低于15 m处取0.5。无人机主要参数参考大疆经纬200设置,空域环境模型和航迹规划模型参数如表2和表3所示。

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 空域环境模型验证

根据式(9)和表2参数生成的运行风险如图5所示。

风险值越高表示无人机运行风险越大,障碍物和禁飞区的风险值取1。由图5可知,随着高度的增加物流无人机整体运行风险值逐渐增高。高度

50 m时,城市空域割裂,可飞区域风险值低于0.3,表明此高度飞行对地面运行风险相对较低;高度150 m时,空域变得开阔,但整体运行风险值增大,处于0.3~0.7之间;高度300 m时,空域连结成片,除

禁飞区外,整体运行风险处于0.5以上,部分人口密集区超过0.7,表明此高度飞行对地面产生的风险相对较高。

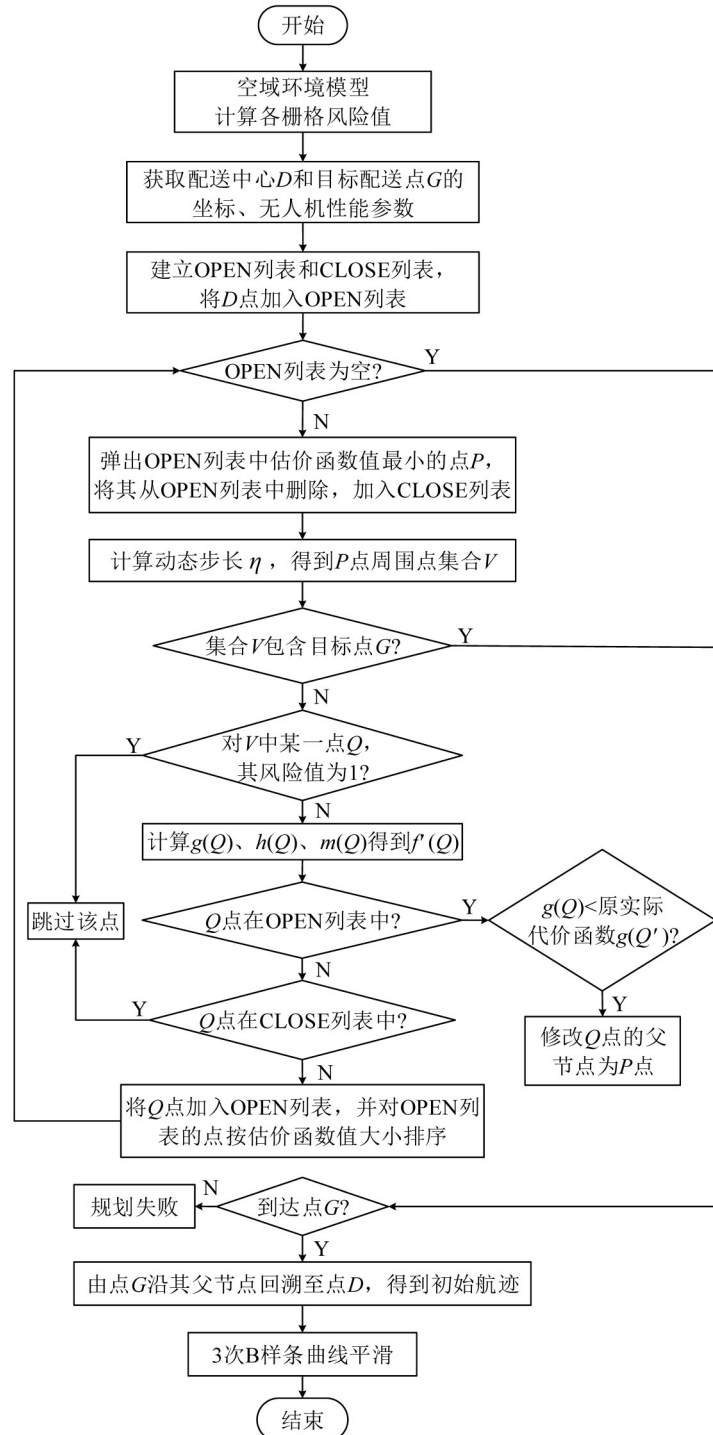


图4 算法流程

Fig. 4 Flow of proposed algorithm

### 3.2.2 算法分析与对比

采用改进A\*算法、传统A\*算法和文献[5]算法

进行航迹规划,结果如图6、表4和表5所示。

表2 空域环境模型参数<sup>[7]</sup>

Table 2 Parameters setting in airspace model

参数	数值	参数	数值
$r_{\text{uav}}/\text{m}$	0.6	$m_{\text{uav}}/\text{kg}$	4
$r_{\text{pecu}}/\text{m}$	0.3	$m_{\text{cargo}}/\text{kg}$	2
$\alpha/\text{J}$	$10^6$	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
$\beta/\text{J}$	100	$\rho_{\text{air}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.225
$h_{\text{pecu}}/\text{m}$	1.8	$C_d$	0.3
$P_{\text{fal}}/\text{h}^{-1}$	$6.04\times 10^{-5}$	$A_{\text{uav}}/\text{m}^2$	0.12
$r/\text{m}$	5	$E/\text{h}^{-1}$	$1\times 10^{-6}$
$v_{\text{wind}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	12	$v_{\text{ox}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10

由图6中可知,改进A\*算法航迹绕行少、更为平滑;由表4和表5可知,其风险代价、噪声代价、运输成本代价相较传统A\*算法分别下降3.88%、0.45%和5.60%,相较文献[5]算法分别下降3.56%、3.12%和10.06%,表明估价函数能够引导算法搜索得到较优航迹点。

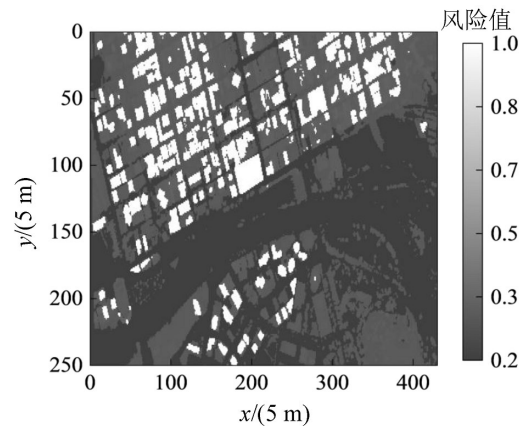
表3 航迹规划模型参数<sup>[6]</sup>

Table 3 Parameters setting in track planning model and algorithm

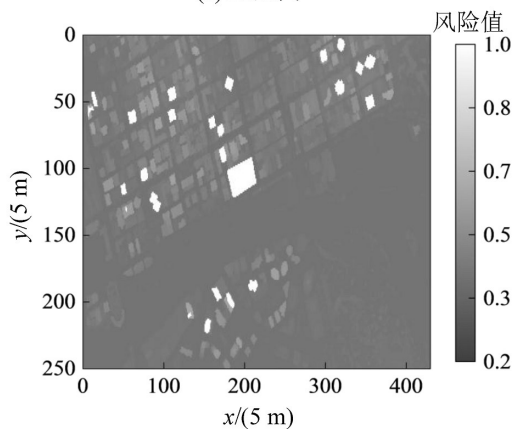
参数	数值	参数	数值
$L_0/\text{dB}$	63	$M/\text{kg}$	6
$h_0/\text{ft}$	150	$L_{A0}/\text{dB}$	55
$p_h/(\text{J}\cdot\text{m}^{-1})$	106	$\omega_1$	0.5
$p_v/(\text{J}\cdot\text{m}^{-1})$	340	$\omega_2$	0.3
$\tau_{\text{max}}$	3	$\omega_3$	0.2
$m_{\text{max}}/\text{kg}$	2	$D$ 点坐标	(275, 360, 50)
$f_c/(\text{元}\cdot\text{kWh}^{-1})$	1.2	$G$ 点坐标	(1650, 875, 50)
$H_{\text{min}}/\text{m}$	20	$R_0$	0.41
$H_{\text{max}}/\text{m}$	150	$\lambda$	100
$D_{\text{min}}/\text{m}$	10	$\eta_{\text{max}}$	3
$L_{\text{max}}/\text{km}$	27.5	$\eta_{\text{mid}}$	2
$L_{\text{sid}}/\text{dB}$	67	$\eta_{\text{min}}$	1
$\varepsilon/\%$	0.5	$d_0/\text{m}$	30
$v_{\text{wm}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	12	$v_{\text{wr}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	12



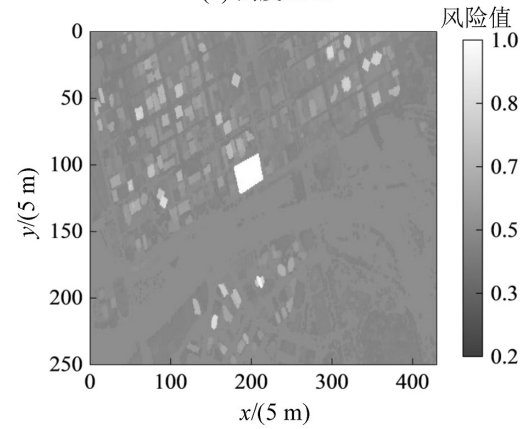
(a) 卫星图



(b) 高度50 m



(c) 高度150 m



(d) 高度300 m

图5 不同高度物流无人机运行风险图

Fig. 5 Operational risk diagram of logistics UAV at different heights

相较传统A\*算法,本文算法在航迹点数和规划时长上优势明显,分别减少35.17%和42.72%。这是由于采用动态步长,在障碍物稀疏时可减少不

必要航迹点,更利于飞行。此外,大步长有利于快速接近目标配送点,提高运算速度。相较文献[5]算法,本文算法进一步降低风险代价,表明基于风险

的城市低空空域环境,能够更加准确地量化物流无人机运行风险,提升配送安全性。同时,通过增加噪声代价,降低了航迹噪声水平,减少对社区居民影响。

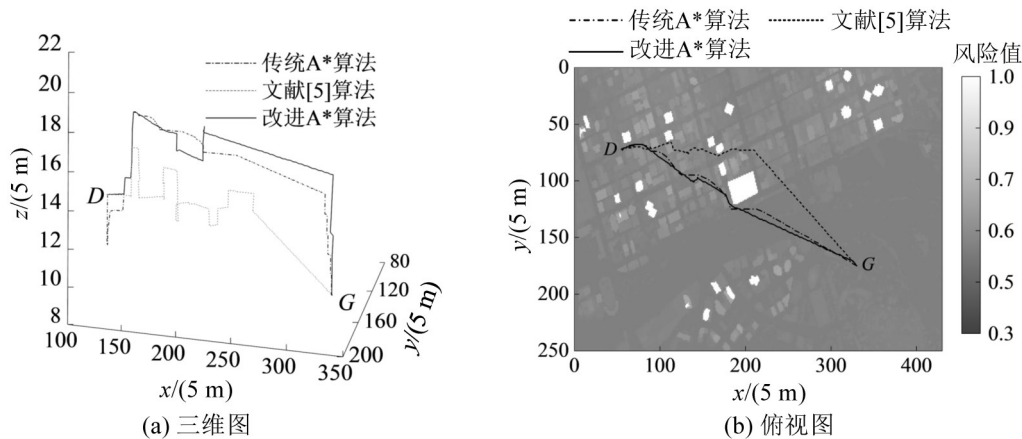


图6 不同算法航迹规划结果

Fig. 6 Results of different algorithms for track planning

表4 传统A\*算法和改进A\*算法航迹规划结果对比

Table 4 Comparison of track planning results between traditional A\* algorithm and improved A\* algorithm

参数	传统A*算法	改进A*算法	变化率/%
风险代价	528.8404	508.3114	-3.88
噪声代价/dB	60.7288	60.4567	-0.45
运输成本代价/元	0.1999	0.1887	-5.60
航迹点数/个	290	188	-35.17
规划时长/s	9.9510	5.6997	-42.72

表5 文献[5]算法和改进A\*算法航迹规划结果对比

Table 5 Comparison of track planning results between algorithm in reference [5] and improved A\* algorithm

参数	文献[5]算法	改进A*算法	变化率/%
风险代价	527.0546	508.3114	-3.56
噪声代价/dB	62.4048	60.4567	-3.12
运输成本代价/元	0.2098	0.1887	-10.06

3.2.3 模型参数设置分析

(1) 代价权重系数

设置不同代价权重系数组合分析求解结果。各子目标代价权重以0.1为步长从0.1~0.8依次变化,各权重组合下的综合代价 $C_o$ 为

$$C_o = \sum_{q=1}^3 \omega_{oq} c_{oq} \tag{37}$$

式中: $c_{oq}$ 为第 $o$ 个代价权重组合下第 $q$ 个子目标函数的归一化值; $\omega_{oq}$ 为第 $o$ 个代价权重组合下第 $q$ 个子目标函数的权重值。计算结果如图7所示,其中点越小表示综合代价值越小。

取综合代价最小点,绘制其至3个坐标轴的垂

线,可知对应的权重组合为风险代价权重 $\omega_1=0.6$ ,噪声代价权重 $\omega_2=0.1$ ,运输成本代价权重 $\omega_3=0.3$ ,取其为最优权重组合。

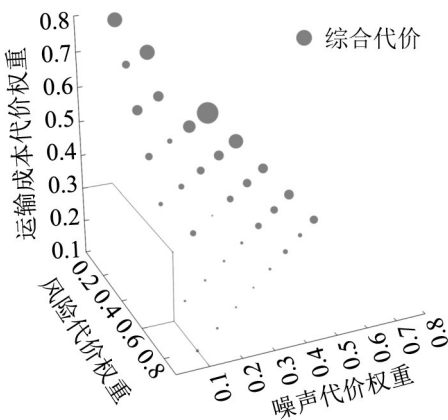


图7 不同权重组合计算结果

Fig. 7 Different weight combination calculation results

(2) 安全间隔

在最优权重组合下,最小安全间隔 $D_{\min}$ 由5~30 m以每5 m变化,实验结果如图8所示。

由图8(a)可知,随着安全间隔增加,运输成本和风险代价总体呈增加趋势,而噪声代价减小。这是因为安全间隔增大,导致无人机需从建筑物上方飞越,提高了运行风险,且爬升高度耗电量大,增加了运输成本,则对地噪声因此减少。根据式(37)计算不同安全间隔下的综合代价值,由图8(b)可知,在本文规划环境和权重设定下,参考大疆经纬200无人机参数,当最小安全间隔 $D_{\min}$ 取15 m时,综合代价最小为0.301。



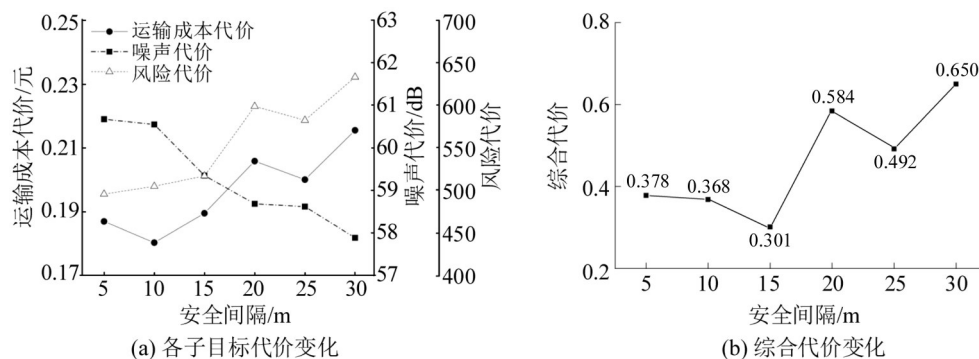


图8 不同安全间隔影响

Fig. 8 Influence of different safety separations

#### 4 结论

本文通过建立基于风险的城市低空空域环境,以风险、噪声和运输成本代价最小为目标函数,考虑安全间隔、运行风险、运行噪声等约束,构建符合城市配送实际的物流无人机航迹规划模型。提出改进A\*算法进行求解,仿真实验表明,本文算法规划时间短、航迹质量优,可生成高安全、低噪声、低成本的航迹。在本文规划环境下,参考大疆经纬200无人机参数,当各子目标代价权重分别为0.6、0.1和0.3,安全间隔取15 m时,规划航迹综合代价最优。

#### 参考文献

- [1] RAMANA M V, VARMA S A, KOTHARI M. Motion planning for a fixed-wing UAV in urban environments[J]. International Federation of Automatic Control-Papers Online, 2016, 49(1): 419-424.
- [2] CAUSA F, FASANO G. Multiple UAVs trajectory generation and waypoint assignment in urban environment based on DOP maps[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106507.
- [3] 李俨,王重,齐延军,等.城市风场环境中的无人机快速航迹规划方法[J].航空学报,2016,37(3): 949-959. [LI Y, WANG Z, QI Y J, et al. A rapid trajectory planning algorithm for UAV in urban areas with wind fields[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 949-959.]
- [4] 徐宏飞.面向智慧避障的物流无人机航迹规划研究[D].北京:北京交通大学,2019. [XU H F. The study about the track planning of express unmanned aerial vehicle(UAV) for intelligent obstacle avoidance[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.]
- [5] 张洪海,李翰,刘峰,等.城市区域物流无人机路径规划[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(6): 26-33. [ZHANG H H, LI H, LIU H, et al. Path planning for logistics unmanned aerial vehicle in urban area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(6): 26-33.]
- [6] 张启钱,许卫卫,张洪海,等.复杂低空物流无人机路径规划[J].北京航空航天大学学报,2020,46(7): 1275-1286. [ZHANG Q Q, XU W W, ZHANG H H, et al. Path planning for logistics UAV in complex low-altitude airspace[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1275-1286.]
- [7] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system[M]. Berlin: Springer Press, 2009.
- [8] KOH C H, LOW K H, LEI L, et al. Weight threshold estimation of falling UAVs(unmanned aerial vehicles) based on impact energy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 93: 228-255.
- [9] SENZIG D A, MARSAN M, CUTLER C J, et al. Sound exposure level duration adjustments in UAS rotorcraft noise certification tests[R]. Washington: FAA, 2018.