

文章编号: 1005-0523(2019)06-0039-08

# 改进 A\* 算法的物流无人机运输路径规划

许卫卫, 张启钱, 邹依原, 张洪海, 陈雨童

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 针对低空环境下物流无人机运输路径规划问题, 综合考虑低空规划空域、物理性能等内外限制, 设计了一种改进 A\* 算法用以快速解算路径。该算法以栅格法飞行区域建模为基础, 为适用无人机航空物流运输, 在成本函数中引入栅格危险度并增加飞行时间、能源消耗等代价, 同时采用动态加权法对估计函数的权值赋值。在既定的路径规划环境及物流无人机性能约束下, 仿真结果表明: 该算法能快速规划出危险度小、能耗少的避障运输路径, 且性能相比原算法、蚁群算法优; 并得出最佳路径所对应的栅格粒度大小与代价权重值取值, 验证了本算法的有效性。

**关键词:** 运输路径规划; 物流无人机; 改进 A\* 算法; 栅格法; 栅格危险度; 动态加权

中图分类号: V279.3

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.007

无人机作为我国科技创新的重要产业, 正处于井喷式发展时期。其技术日臻成熟, 应用领域不断扩大, 如军事侦查、电力巡检、货物运输等<sup>[1]</sup>。在实际应用中无人机路径规划已成为自主控制改进的重要方面, 因此研究无人机路径规划技术有重要意义。

国内外对军用无人机路径规划研究成果较多, 涉及民用无人机的少, 且主要对巡检、农林作业等路径进行规划<sup>[2-3]</sup>, 关于物流无人机路径规划的研究则更少。物流无人机航空物流特点导致路径规划时考虑的因素更多, 故低空环境下物流无人机路径规划是目前研究的重点。

纵观已有研究成果, 部分学者对无人机在货物运输方面的可行性进行了研究分析, 并总结制约其发展的关键因素, 如智能避障、续航能力、运营风险、使用成本等<sup>[4-5]</sup>。部分学者针对智能避障、路径规划展开了相应研究, 在时间窗、载荷、能耗约束等限制条件下, 分别将改进粒子群算法、模拟退火算法运用于此, 并验证相应算法的有效性<sup>[6-7]</sup>。针对续航能力, 部分学者构建了物流无人机电量消耗率随货物载荷的变化函数与能耗模型<sup>[7-9]</sup>, 并就不同场景进行了仿真研究与分析。此外, 部分学者从无人机性能角度展开研究, 建立了考虑物理特性和飞行任务特点的无人机性能模型<sup>[10]</sup>。综上所述, 无人机路径规划研究虽取得较多成果, 但随着物流应用领域的出现其模型及算法将不完全适用。且已有物流无人机相关研究主要面向飞行行为、管理控制, 考虑的路径影响要素也单一有限; 复杂的低空环境导致规划时需综合考虑外部环境与自身限制, 且对搜索效率要求高, 故原算法无法满足要求。

基于上述分析, 本文考虑了规划空域及无人机运输飞行路径的要求, 提出一种基于改进 A\* 算法的路径搜索策略: 首先, 采用栅格法构建飞行空域栅格模型, 分析物流无人机性能约束; 其次, 融合飞行时间、货物载重、电量消耗等影响要素重点设计了 A\* 算法的具体改进方案及实现流程; 最后, 进行基于改进 A\* 算法物流无人机运输路径规划的仿真, 验证了算法的有效性, 同时分析出最合适的栅格粒度大小和代价权重值设置。

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61573181); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20180726)

作者简介: 许卫卫(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者: 张洪海(1979—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为空中交通管理。

## 1 物流无人机运输路径规划建模

### 1.1 问题描述及相关假设

某区域有多个分快递站且都配备物流无人机,利用无人机代替车辆完成货物运输任务。假设物流无人机均为充电旋翼式无人机,对货物载重、能耗等有限制。为确保将货物安全准时运输至分快递站,在无人机飞行前需对其路径进行规划。本文假设仅对物流无人机巡航阶段路径进行规划,则无人机的运动简化为二维平面的运动。

无人机路径规划时如下条件已知:① 起始巡航点  $start$ , 终止巡航点  $end$  位置;② 无人机性能约束;③ 飞行空域信息;④ 无人机恒速飞行。

### 1.2 栅格法规划空域建模

规划空域建模是规划路径的第一步,采用栅格法对飞行环境进行建模。设物流无人机运输任务规划环境是一个矩形区域,记为  $OABC$ ,以  $O$  为原点建立直角坐标系。将机动性能约束、飞行空域等信息考虑在内,确定栅格粒度大小。则规划空间可划分为  $u \times v$  个栅格,将栅格中心点作为待选飞行路径点。 $u$  和  $v$  的计算式如下

$$u = UP \left[ \frac{x}{N_{\text{grid}}} \right] \quad (1)$$

$$v = UP \left[ \frac{y}{N_{\text{grid}}} \right] \quad (2)$$

式中: $x, y$  分别为规划空域的长度,宽度; $N_{\text{grid}}$  为栅格粒度大小; $u, v$  为划分栅格个数; $UP[\ ]$  为自定义函数,计算式为

$$UP[*] = \begin{cases} *, & * \text{ 为} \\ \text{int}(*)+1, & * \text{ 不} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{int}(*)$  为取整函数。

依据栅格中是否存在障碍物对栅格进行分类,若栅格中存在地形地物等障碍,则定义此格为障碍栅格,并将栅格图中对应位置赋值为 1;否则为自由栅格,赋值为 0。

### 1.3 无人机性能约束

规划路径时以物流无人机为主体,考虑其自身性能约束,使规划的路径满足飞行要求,否则无人机将不能准确跟踪生成的路径飞行。由于物流无人机做定高巡航飞行,故主要考虑如下性能约束。

1) 最远航程。物流无人机的电池电量有限导致其在起止巡航点间的飞行航程不能超过最远航程,且飞行航程定义为各飞行路径段航程之和,约束条件为

$$\sum_{i=1}^n l_i \leq L_{\text{max}} \quad (4)$$

式中: $l_i$  为各飞行路径段航程; $n$  为路径段数目; $L_{\text{max}}$  为最远航程。

2) 最小路径段长度。最小路径段长度是为防止无人机频繁调整姿态,在改变飞行姿态前必须直飞的最短距离,约束条件为

$$\forall l_i \geq L_{\text{min}} \quad (5)$$

式中: $l_i$  为各路径段航程; $L_{\text{min}}$  为最小路径段长度。

3) 最大转弯角。为保证无人机姿态稳定,在飞行过程中若需改变方向,转弯的角度限定在一定范围内即小于等于最大转弯角,约束条件为

$$0 \leq \beta \leq \beta_{\text{max}} \quad (6)$$

式中: $\beta$  为无人机实际转弯角; $\beta_{\text{max}}$  为最大转弯角。

4) 最大能耗。由于技术发展水平限制,每块电池在充满电后只能维持一段飞行时间,即实际飞行所耗电应满足

$$E_{re} \leq E_{total} \quad (7)$$

式中: $E_{re}$  为实际耗能; $E_{total}$  为最大能耗。

5) 最大货物载荷。物流无人机不能无限制装载货物,存在最大货物载重约束,则实际装载货物重量应满足

$$Q \leq Q_{max} \quad (8)$$

式中: $Q$  为实际货物重量; $Q_{max}$  为最大货物载荷。

## 2 改进 A\* 算法建立

### 2.1 传统 A\* 算法原理及存在问题

传统 A\* 算法对待扩展飞行路径点  $n$  的选择通过估计成本函数  $f(n)$  判断,通常要求获得巡航飞行总航程最短的路径。估计成本函数为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (9)$$

式中: $g(n)$  为起始巡航点至待扩展路径点  $n$  的实际飞行航程; $h(n)$  为待扩展路径点  $n$  至终止巡航点的预估飞行航程。

传统 A\* 算法的实施流程参见文献[11],本文不再赘述。

采用原 A\* 算法解算物流无人机运输巡航路径时,存在以下问题:①  $f(n)$  仅计算飞行航程,未考虑电量消耗、货物载重、飞行时间等代价,不符合实际要求;② 忽略自由栅格位置的差异性而同等看待,空域环境及障碍物对路径点选择的影响未体现;③ 未考虑物流无人机机动行为对路径选择的影响;④ 原算法扩展路径点时前期和后期的效率、精度不匹配。针对上述问题对 A\* 算法进行如下具体改进设计。

### 2.2 具体设计

#### 2.2.1 新增栅格危险度

本文定义栅格危险度来衡量路径点周围环境对该点的危险程度,对原栅格环境中标记为 1 的栅格不做改变,对标记为 0 的栅格将其值重新标为其危险度。计算危险度时可用该路径点周围标记为 1 的栅格数目比上周围总栅格数目,计算式为

$$danger(n) = \frac{sum\_obstacle}{sum\_surround} \quad (10)$$

式中: $danger(n)$  为路径点  $n$  的危险度; $sum\_obstacle$  为路径点周围障碍栅格个数; $sum\_surround$  为路径点周围栅格总个数。危险度越大说明路径点所处环境越危险,在扩展下一路径点时应选择危险值较小的路径点。

#### 2.2.2 改进实际成本函数 $g(n)$

无人机物流运输受时效性及电量限制,但原  $g(n)$  函数仅计算飞行航程代价,考虑因素单一。为缩短物流无人机飞至终止巡航点用时,节省飞行耗能,在  $g(n)$  函数中考虑该代价。由于无人机不同机动行为对电量的消耗是不同的<sup>[9]</sup>,所以在  $g(n)$  中将巡航时的电量消耗进行计算。假设无人机水平面内运动的单位电量消耗为距离的  $\lambda$  倍,则此时  $g'(n)$  为

$$g'(n) = g(n-1) + \alpha_1 t(n-1, n) + \alpha_2 \lambda (|x_n - x_{n-1}| + |y_n - y_{n-1}|) \quad (11)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2$  分别为飞行时间,电量消耗代价的权重系数; $\lambda$  为单位距离水平运动耗能; $(x_n, y_n), (x_{n-1}, y_{n-1})$  为相邻两路径点坐标; $t(n-1, n)$  为相邻路径点间飞行时间,其计算式为

$$t(n-1, n) = \frac{|x_n - x_{n-1}| + |y_n - y_{n-1}|}{v} \quad (12)$$

式中: $v$  为物流无人机飞行速度。

文献[12]表明电池电量一定时无人机的飞行时间、电量消耗等随载重增加而线性增加,因此本文定义货物重量惩罚系数对飞行成本进行惩罚。假设货物重量惩罚系数与货物重量呈正比线性关系,关系式为

$$\tau(Q) = \frac{\tau_{max} - 1}{Q_{max}} Q + 1 \quad (13)$$

式中: $\tau(Q)$ 为货物重量惩罚系数; $\tau_{\max}$ 为货物重量惩罚系数最大值; $Q_{\max}$ 为最大货物载荷; $Q$ 为货物重量。

为适用栅格危险度所表征的环境, $g(n)$ 函数应计算路径点处栅格的危险度。当运输质量为 $Q$ 的货物时,物流无人机在路径点 $n$ 处的 $g_Q(n)$ 表达式为

$$g_Q(n)=g_Q(n-1)+\alpha_1\tau(Q)t(n-1,n)+\alpha_2\tau(Q)\lambda(|x_n-x_{n-1}|+|y_n-y_{n-1}|)+\alpha_3\text{danger}(n) \quad (14)$$

式中: $\alpha_3$ 为栅格危险度的权重系数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 满足 $\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1$ ,调节该值大小可决定在路径搜索中时间、电量消耗和飞行安全的相对重要性。

### 2.2.3 改进启发式函数 $h(n)$

原启发函数仅计算预估航程,未体现任务时间、耗能对扩展路径点的影响,为选取飞至终止巡航点耗费成本小的路径点,应计算剩余可用时间及电池电量,并将该值与预定飞至终止巡航点 $end$ 总巡航时间、电量作比较以获得估计成本值最小的路径点。

改进后启发式函数 $h_Q(n)$ 的表达式为

$$h_Q(n)=|T+E_{\text{total}}-t(n, end)-E(n, end)| \quad (15)$$

式中: $T$ 为预定巡航总时间, $T=t_2-t_1$ , $t_1$ 为巡航开始时刻, $t_2$ 为结束巡航最晚时刻; $t(n, end)$ , $E(n, end)$ 分别为从路径点 $n$ 到终止巡航点 $end$ 的预计飞行时间及电量,其计算式分别为

$$t(n, end)=\frac{|x_{end}-x_n|+|y_{end}-y_n|}{v} \quad (16)$$

$$E(n, end)=\lambda(|x_{end}-x_n|+|y_{end}-y_n|) \quad (17)$$

式中: $(x_n, y_n)$ , $(x_{end}, y_{end})$ 分别为路径点 $n$ 和终止巡航点坐标; $v$ 为飞行速度; $\lambda$ 为单位距离水平运动耗能。

### 2.2.4 动态加权估计成本函数

传统A\*算法中实际成本函数和启发式函数对估计成本函数的贡献度相等使得搜索速度慢,为保证算法在搜索精度达到要求的基础上提高效率,对实际成本函数的权重进行动态赋值,记 $g_Q(n)$ 的权重系数为

$$W(n)=\begin{cases} w_{\max}, w > w_{\max} \\ w, w_{\min} \leq w \leq w_{\max} \\ w_{\min}, w < w_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $w_{\max}, w_{\min}$ 分别为 $g_Q(n)$ 权重系数的最大值及最小值, $w$ 的计算方法为

$$w=\frac{g_Q(n)}{\alpha_1 T+\alpha_2 E_{\text{total}}} \quad (19)$$

式中: $g_Q(n)$ 为当前路径点的实际成本值; $\alpha_1, \alpha_2$ 为飞行时间、能耗代价的权重系数; $T$ 为预定巡航总时间; $E_{\text{total}}$ 为最大能耗。

在扩展路径点前期 $W(n)$ 值太小导致扩展范围也小和搜索精度低,而为保证搜索精度因此规定了 $W(n)$ 的最小值。当飞行路径点越靠近终止巡航点时 $W(n)$ 值大导致搜索精度高、范围大,但效率降低,则为保证搜索效率而规定了 $W(n)$ 的最大值。

在搜索下一路径点时为了能更快到达终止巡航点附近,对启发式函数设计惩罚权重 $W'(n)$ ,该惩罚值与待搜索路径点到终止巡航点的飞行代价成正比,飞行代价高的路径点对应的 $W'(n)$ 值大,反之则惩罚权重数值小。 $W'(n)$ 的计算式为

$$W'(n)=\frac{h_Q(n)}{\alpha_1 T+\alpha_2 E_{\text{total}}} \quad (20)$$

式中: $h_Q(n)$ 为当前路径点的启发函数值; $\alpha_1, \alpha_2$ 为飞行时间、能耗代价的权重系数; $T$ 为预定巡航总时间; $E_{\text{total}}$ 为最大能耗。

本文采用的改进动态加权估计成本函数为式(21),根据路径点整体变化的动态权重可在接近终止巡航点时提高扩展速率

$$f_Q(n)=W(n)g_Q(n)+W'(n)h_Q(n) \quad (21)$$

### 2.3 实现步骤

Step1:输入物流无人机性能约束、起止巡航点坐标、货物重量、预定巡航时间。

Step2:确定栅格粒度大小,计算栅格危险度值。

Step3:建立 OPEN 列表和 CLOSE 列表,将起始巡航点加入 OPEN 列表,将危险度为 1 的路径点加入 CLOSE 列表。

Step4:循环执行下述步骤:

Step4.1:搜索前一路径点周围栅格危险度不为 1 的路径点并放入 OPEN 列表,计算其  $g_Q(n), h_Q(n)$  和  $f_Q(n)$  值,选择  $f_Q(n)$  值最小的点为当前正扩展路径点并记作 A。

Step4.2:将 A 移入 CLOSE 列表。

Step4.3:判断 A 周围的路径点,若其危险度为 1 则跳过该点,否则扩展该路径点并记为 B,求  $g_Q(B), h_Q(B)$  和  $f_Q(B)$  值,再进行以下判断:

Step4.3.1:若 B 已在 OPEN 列表中则表明 B 先前已被扩展,此时需确定 B 的最优父节点。记对原先 B 求得的估计成本值为  $f_Q(B')$ ,若  $f_Q(B) < f_Q(B')$ ,B 的父节点为 A,若  $f_Q(B) > f_Q(B')$ ,则 B 的父节点不变。

Step4.3.2:若 B 已在 CLOSE 列表中则跳过 B。

Step4.3.3:若 B 既不在 OPEN 列表也不在 CLOSE 列表中,则将其移入 OPEN 列表并在 OPEN 列表中对估计成本值的大小按升序排序,选出  $f_Q(n)$  值最小的点为下一路径点。

Step5:当路径点已到终止巡航点所在栅格或未扩展到终止巡航点但 OPEN 列表为空时搜索结束,终止 Step4。

Step6:从终止巡航点所在栅格通过各路径点的父节点反向回溯直至起始巡航点可得物流无人机巡航飞行路径,算法结束。

## 3 仿真实验分析

### 3.1 仿真实验环境及初始化

仿真条件如下:CPU i7-6700 计算机,主频 3.4 GHz,内存 8 G,实验工具为 MATLAB R2014b。为验证改进 A\* 算法用于物流无人机运输路径规划的有效性,假设任务规划环境是长宽分别为 20 km 的空间区域。为真实模拟物流无人机飞行路径产生的过程,仿真实验的参数按表 1 进行设置。

表 1 仿真参数  
Tab.1 Simulation parameter

参数	值	参数	值
最远航程 <sup>[13]</sup> $L_{max}/\text{km}$	52	最小路径段长度 <sup>[13]</sup> $L_{min}/\text{km}$	1
最大转弯角 <sup>[13]</sup> $\beta_{max}$	$\pi/2$	货物质量 $Q/\text{kg}$	3
总电能 <sup>[9]</sup> $E_{total}/\text{J}$	5 500	最大货物载重 <sup>[12]</sup> $Q_{max}/\text{kg}$	8
飞行时间权重 $\alpha_1$	0.1	速度 $v/(\text{km}/\text{h})$	20
电量消耗权重 $\alpha_2$	0.4	惩罚系数 $\tau(Q)$	1.75
危险度权重 $\alpha_3$	0.5	栅格粒度大小 $N_{grid}/\text{km}$	1
惩罚系数最大值 <sup>[12]</sup> $\tau_{max}$	3	$g_Q(n)$ 系数最小值 <sup>[14]</sup> $w_{min}$	0.5
单位距离水平运动耗能 <sup>[9]</sup> $\lambda/(\text{J}/\text{km})$	106	$g_Q(n)$ 系数最大值 <sup>[14]</sup> $w_{max}$	0.8
巡航开始时刻 $t_1/\text{时}$	0	巡航结束时刻 $t_2/\text{时}$	2
起始巡航点 $start$ 坐标	(1,20)	终止巡航点 $end$ 坐标	(20,1)

注:表中参数右上角“[ ]”表明该参数借鉴对应文献中参数值设置方法进行赋值。  
 (C) 1994-2026 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 3.2 结果分析

采用改进 A\* 算法及原 A\* 算法得到物流无人机运输路径结果如图 1 所示,并从路径点数、路径航程、电量消耗等方面对比,见表 2。由图可知物流无人机安全从起始巡航点飞至终止巡航点且有效地对飞行空域中的障碍物进行规避。为进一步分析本文算法规划性能,再采用蚁群算法对无人机货物运输路径进行规划,路径数据见表 3。

由表 2、表 3 可知,改进 A\* 算法搜索的路径虽然在路径点数上比原 A\* 算法、蚁群算法分别增加 5.9%、28.6%,在路径航程上比蚁群算法增加 2.3%,但在其他对比指标上本文算法性能均表现更优。其中,规划时间最大提速 34.3%,路径危险度降低 30.4%,这也表明上文引入栅格危险度、动态加权  $f(n)$  函数改进的合理性。

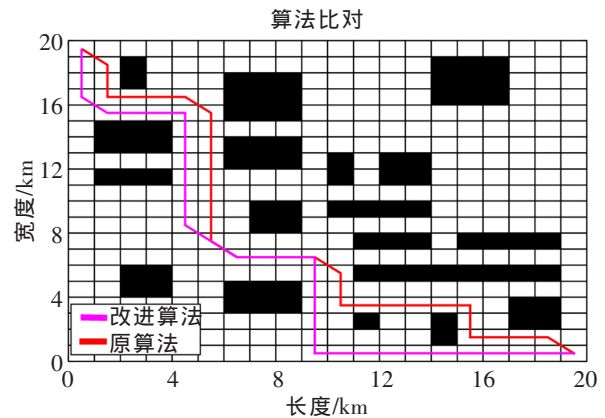


图 1 路径规划对比结果

Fig.1 The comparison result of path planning

表 2 改进算法与原算法规划结果对比

Tab.2 Comparison of the improved algorithm and the original algorithm

算法	路径点数/个	路径航程/km	电量消耗/J	路径危险度	规划时间/s
原 A* 算法	34	37.6	4558	4.13	3.1
改进 A* 算法	36	36.2	4028	3.35	2.3
变化率/%	增加 5.9	减少 3.8	减少 11.6	减少 18.9	提速 25.8

表 3 改进算法与蚁群算法规划结果对比

Tab.3 Comparison of the improved algorithm and ant colony algorithm

算法	路径点数/个	路径航程/km	电量消耗/J	路径危险度	规划时间/s
蚁群算法	28	35.4	4876	4.37	3.5
改进 A* 算法	36	36.2	4028	3.35	2.3
变化率/%	增加 28.6	增加 2.3	减少 17.4	减少 30.4	提速 34.3

### 3.3 参数优化

在解算物流无人机运输路径时,栅格粒度大小  $N_{grid}$  和代价权重值组合  $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$  的设置会对规划结果产生影响。本文采用对照实验法分析参数  $N_{grid}$  和  $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$  的取值对路径结果的影响。

#### 3.3.1 栅格粒度大小分析

保持代价权重值  $\alpha_1=0.1, \alpha_2=0.4, \alpha_3=0.5$  设置不变,栅格粒度大小  $N_{grid}$  分别取 0.5, 1, 1.5 km 和 2 km,在其余参数设置及规划环境相同的条件下再进行多组对照实验,记录各组实验规划出的路径数据,并画出变化图如图 2、图 3。

由图 2、图 3 可看出:路径航程、电量消耗及危险度同栅格粒度大小呈现先减小后增大的变化趋势,路径点数同栅格粒度大小一直呈下降趋势。当栅格粒度大小变化时,  $N_{grid}$  越小,环境划设精细,但扩展路径点数增多,需要更多存储空间且耗时长;  $N_{grid}$  越大,环境划设粗糙,路径点减少且效率提高,但难保证航程等成本减

小。同时分析出,在  $N_{grid}=1.5\text{ km}$  分界线两侧,规划出运输路径的航程、能耗和危险度均为对比实验中的最小值。综上所述,本文算法选择规划性能较好的  $1.5\text{ km}$  为最优的栅格粒度大小设置。

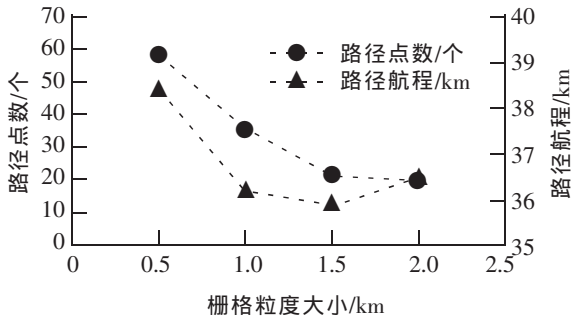


图 2 路径点数、路径航程随 Ngrid 变化  
Fig.2 Point, length varying with Ngrid

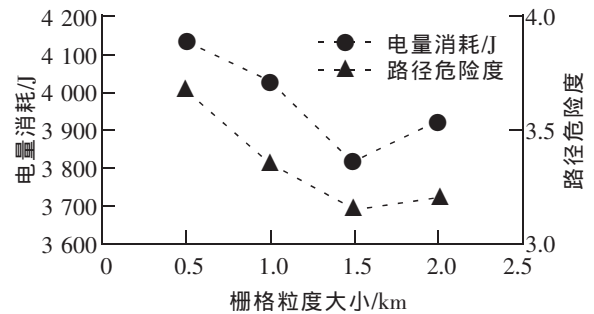


图 3 电量消耗、路径危险度随 Ngrid 变化  
Fig.3 Consumption, danger risk varying with Ngrid

### 3.3.2 代价权重值分析

保持栅格粒度大小  $N_{grid}=1.5\text{ km}$  设置不变,由于无人机运输路径对安全要求高,故固定危险度权重系数  $\alpha_3$  为 0.5 不变,分析系数  $\alpha_1, \alpha_2$  取值对路径的影响。在其余参数设置及规划环境相同的条件下进行四组对照实验:①  $\alpha_1=0.1, \alpha_2=0.4$ ;②  $\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.3$ ;③  $\alpha_1=0.3, \alpha_2=0.2$ ;④  $\alpha_1=0.4, \alpha_2=0.1$ 。记录各组实验规划出的路径数据,并画出变化图如图 4、图 5。

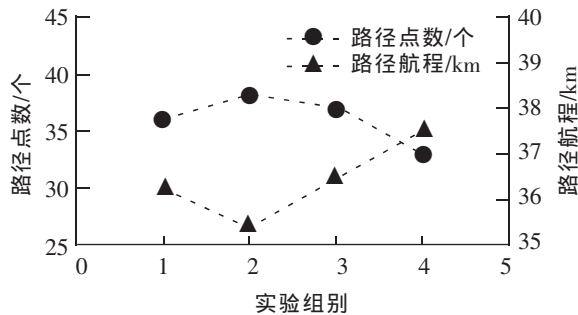


图 4 路径点数、路径航程随代价权重变化  
Fig.4 Point, length varying with cost weight

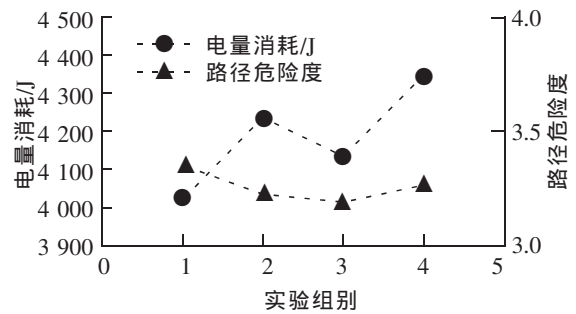


图 5 电量消耗、路径危险度随代价权重变  
Fig.5 Consumption, danger risk varying with cost weight

结合图 4、图 5 可发现:路径点数、航程、电量消耗及危险度值的变化随着各代价权重值的取值不同也有明显的变化波动趋势。当危险度权重取值一定时,由图 5 可知物流无人机运输路径危险度变化不大;但随着飞行时间、能耗的权重变化,其余对比指标变化大。飞行时间权重越大,路径点相应变少,但航程、电量消耗等有所增加;电量消耗权重越大,能耗相应变少,但航程、路径点数有增加趋势。实际飞行时若电池电量不充足,则无人机无法完成运输任务,故飞行耗能权重应比时间权重重大。综上分析,本文选择  $\alpha_1=0.1, \alpha_2=0.4, \alpha_3=0.5$  为最优的代价权重组合设置。

## 4 结论

随着科技的快速发展,无人机应用领域正从军用转向民用,其中将其用于物流运输便成为关注的焦点,故研究物流无人机路径规划技术有重要实用意义。A\* 算法在路径规划方面存在优势,可实现安全最优飞行路径的快速解算,因此本文提出改进 A\* 算法的物流无人机运输路径规划方法。仿真结果表明,该算法可有效规划物流无人机避障运输路径,且当栅格粒度大小为  $1.5\text{ m}$ ,代价权重值分别为 0.1, 0.4, 0.5 时,路径最佳。该法可推广应用至其他物流场景,为后续高维度空间中实时动态的物流无人机路径规划等相关研究提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] GOODCHILD A, TOY J. Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO<sub>2</sub> emissions in the delivery service industry[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 61: 58–67.
- [2] ROBERGE V, TARBOUCHI M, LABONTE G. Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(5): 2105–2117.
- [3] PAPACHRISTOS C, KAMEL M, MARIJA POPOVI, et al. Autonomous exploration and inspection path planning for aerial robots using the robot operating system[J]. *Studies in Computational Intelligence*, 2018, 778: 67–111.
- [4] 翁丹宁. 无人机物流配送的主要影响因素分析[J]. *企业改革与管理*, 2015(8): 170+218.
- [5] 吴永鑫. 物流无人机在中国农村电商物流市场应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [6] JIANG X, YE Y, YE Y. Method of task assignment for UAV based on particle swarm optimization in logistics[C]//*Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence*. ACM, 2017: 113–117.
- [7] DORLING K, HEINRICHS J, MESSIER G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, 47(1): 70–85.
- [8] TORABBEIGI M, LIM G J, KIM S J. Drone delivery scheduling optimization considering payload-induced battery consumption rates[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019(2): 1–17.
- [9] GOSS K, MUSMECI R, SILVESTRI S. Realistic models for characterizing the performance of unmanned aerial vehicles[C]//*2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. Canada: IEEE, 2017: 1–9.
- [10] ABEYWICKRAMAHV, JAYAWICKRAMA B A, HE Y, et al. Comprehensive energy consumption model for unmanned aerial vehicles, based on empirical studies of battery performance[C]//*IEEE Access*, 2018: 58383–58394.
- [11] 任逸晖. 一种新的4D航路规划算法及其仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [12] BYUNG D S, KYUNGSU P, JONGHOE K. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 120: 418–428.
- [13] 李月茹. 四旋翼无人机航迹规划算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [14] 刘源, 王海泉. 基于理论最短距离变权重A\*算法的路径规划[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(4): 175–178.

## Research on Transportation Path Planning for Logistics UAV Based on Improved A\* Algorithm

XuWeiwei, Zhang Qiqian, ZouYiyuan, Zhang Honghai, Chen Yutong

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

**Abstract:** To solve the problem of logistics UAV transportation path planning in low-altitude environment, considering the internal and external constraints of low-altitude planning airspace and physical performance, an improved A\* algorithm is designed to plan the path quickly. To apply the method to the transportation for logistics UAV, the algorithm uses the grid method to model the environment. It also introduces grid's danger rate and the cost of flight time and energy consumption in the cost function. At the same time, the dynamic weighting method is applied to estimate the function. The simulation results show that the algorithm can plan the obstacle-avoidance transportation paths with low risk and low energy consumption quickly under the constraints of the assumed environment and UAV performances. Also, its performance is superior to the original algorithm and ant colony algorithm. Meanwhile, the corresponding grid length and weight value of the optimized path are obtained, and the effectiveness of the algorithm is verified.

**Key words:** transportation path planning; logistics UAV; improved A\* algorithm; grid method; grid's danger rate; dynamic weight value