

县-村配送模式下无人机三维路径规划

徐红艳, 柳国梁, 刘华琼*

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357

摘要:针对农村部分道路通行能力较差、快递配送成本较高等问题,构建由县级配送中心、无人机直配区、网格配送站、村级快递代收点组成的无人机县-村配送模式,以配送距离最小为目标,以无人机载质量和续航能力为约束条件搭建配送模型,考虑山峰、人口聚集集市及无人机禁飞区域,采用 Cubic-Sine 映射改进麻雀搜索算法,在三维空间求解无人机最优配送路径,以地形较复杂的 A 镇为算例,采用软件 MATLAB 仿真分析无人机配送路线。结果表明:基于改进麻雀搜索算法求解的无人机配送路径能有效避开较高的山峰、人口聚集的集市及禁飞区等无人机无法通行区域;采用无人机为 A 镇 3 处村级快递代收点配送快递的总距离为 9.27 km,配送成本约为 17.24 元,采用车辆配送总距离为 21.46 km,配送成本约为 59.66 元,相比车辆配送无人机配送距离与成本分别减小 56.8%、71.1%。在农村地区使用无人机配送可降低配送距离与成本,提高末端配送效率。

关键词:无人机配送;农村;路径优化;麻雀搜索算法

中图分类号:U126;TP18

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)04-0014-06

引用格式:徐红艳,柳国梁,刘华琼.县-村配送模式下无人机三维路径规划[J].山东交通学院学报,2024,32(4):14-19.

XU Hongyan, LIU Guoliang, LIU Huaqiong. Three-dimensional path planning for drones in county-to-village delivery model[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 14-19.

0 引言

我国农村部分地区的道路通行能力较差,村落布局分散,传统配送模式成本较高、效率较低,长物流链-低消费密度的状况长期制约农村物流发展^[1]。《“十四五”航空物流发展专项规划》明确提出:“探索构建通用航空物流网络,充分发挥无人机物流成本、效率优势,扩大交通不便地区无人机干-支-通配送网络,提升区域快捷配送、即时服务,在适宜地区,探索推动通用航空物流试点,助力‘快递进村’,延伸乡村物流服务网络,推进通用航空物流网络省际互通、市县互达、城乡兼顾”。无人机配送模式的出现为解决农村地区的快递配送问题带来新思路。

无人机在物流方面的应用受到越来越多的关注。Dorling 等^[2]考虑无人机飞行距离、载质量限制和充电需求等构建数学模型,优化无人机配送路径;Pugliese 等^[3]提出带时间约束的无人机配送问题,构建混合整数规划模型,优化无人机与地面配送车辆的任务分配和协作路径;Yurek 等^[4]以配送时间最短为目标,基于分解的迭代算法优化无人机及车辆的配送路径。农村地区一般无密集的高层建筑,空域管理和航向开辟政策较宽松,更适合无人机配送。郭秀萍等^[5]考虑无人机续航能力和载质量限制,设计三阶段求解算法,规划车辆-无人机联合配送路径;许文鑫等^[6]以总成本最小为目标,提出面向农村物流车辆-无人机协同配送策略,通过改进的遗传算法优化配送路线;陈亮^[7]研究农村地区无人机配送站点选址问题及无人机配送路径规划问题;刘浩^[8]以物流公司 Y 在农村某地区的试点为例,以物流成本最小为目

收稿日期:2023-11-22

第一作者简介:徐红艳(1998—),女,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为物流优化,E-mail:1829446516@qq.com。

* 通信作者简介:刘华琼(1979—),男,安徽巢湖人,教授,工学博士,主要研究方向为物流规划、物流优化、电商物流协同,E-mail:lhq5983442@163.com。

标,建立车辆与无人机协同配送的路径优化模型;蒋丽等^[9]针对农村末端配送问题,提出两阶段混合蚁群算法实现农村物流降本增效。以往研究多在理想环境下构建问题模型,对无人机飞行过程中的地面障碍、空中管制等影响因素考虑较少。

本文引入禁飞区及无人机限高约束,在县-村配送网络中设置直配区和网格配送站,采用麻雀搜索算法在三维空间规划无人机航迹,引入 Cubic-Sine 映射作为随机扰动函数,扰动麻雀搜索算法的最优解,提升算法探索能力,通过案例验证算法可行性,以为农村地区末端配送实现降本增效提供理论依据。

1 县-村配送模式

我国农村传统配送模式为县-乡-村3级配送网络,客户点分散,订单较少,末端配送成本较高,影响配送效率和成本。为提高农村地区的快递配送时效和灵活性,构建由县级配送中心、直配区、网格配送站、村级快递代收点组成的县-村快递配送模式,示意图如图1所示。

在县级配送中心下设直配区,根据县级配送中心配备的无人机最大航程设置服务半径,以县级配送中心为中心,位于半径内的客户点为直配区,由配送中心通过无人机直接配送快递,超出无人机载质量或体积较大等不适合无

人机配送的快递由快递员配送。不再严格执行行政区划由上级向下级层层配送的流程,考虑客户密度、村落地理位置等因素将农村区域网格化,每个网格内设置网格配送站,由卡车将该网格内的快递配送至网格配送站。网格配送站的快递通过无人机配送至各村快递代收点,超出无人机载质量或体积较大等不适合无人机配送的快递由快递员配送。

县-村配送模式下需各方协调配合实现快递快速配送,配送流程为:1)县级配送中心接到用户订单,判断快递是否在直配区内,若在,根据直配区内的快递质量和体积,匹配合适的配送方式,超出无人机配送能力的由快递员配送至直配区,其余快递均由无人机配送至直配区;若不在,转步骤2);2)采用车辆将快递集中运输至网格配送站;3)网格配送站综合考虑待配送包裹情况,分配任务,超出无人机配送能力的由快递员配送至村级快递代收点,其余快递均由无人机配送至村级快递代收点;4)无人机或快递员接收到网格配送站任务后,按规划的路径,将货物交付到指定地点;5)重复多次末端交付,直至完成所有订单交付任务。

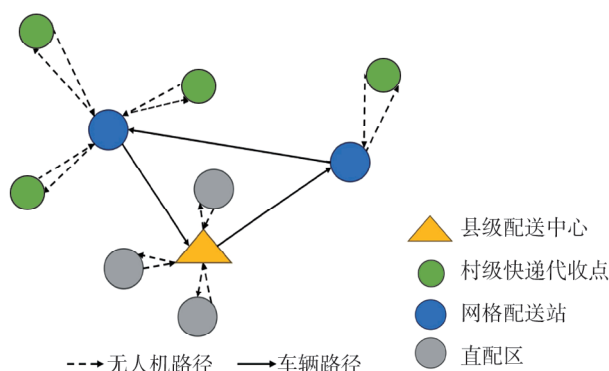


图1 县-村快递配送模式示意图

2 无人机路径优化

2.1 问题描述

对县-村配送模式下无人机配送路径优化问题作如下假设:物流配送网络中有1个县级配送中心、若干网格配送站和若干村级快递代收点;配送网络中有足够数量的无人机;已知县级配送中心、网格配送站和村级快递代收点的坐标;只能在节点处放飞或回收无人机;飞行期间通过智能系统规划无人机航迹,避开禁飞区和难以飞越地区,无人机起讫点均在禁飞区以外;无人机单位费用不随型号变化,单位距离能耗费不随载质量变化而变化。

2.2 模型构建

县级配送中心或网格配送站根据快递实际情况判断是否采用无人机配送,无人机配送时,搭载快递从站点出发到达收货点卸载货物后原路返回。以无人机配送距离最小为目标,构建由无人机载质量和续

航能力为约束条件的无人机配送模型,公式为

$$\min L = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^m 2d_{\alpha\beta} f_{\alpha\beta} T_{\alpha\beta},$$

s. t.

$$W_{\alpha\beta} f_{\alpha\beta} \leq W,$$

$$2d_{\alpha\beta} f_{\alpha\beta} \leq D,$$

$$T_{\alpha\beta} d_{\alpha\beta} \leq D/2,$$

$$\sum_{\beta=1}^m f_{\alpha\beta} = 1, \alpha = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{\alpha=1}^n T_{\alpha\beta} = 1, \beta = 1, 2, \dots, m,$$

式中: L 为无人机配送距离; n 为网格配送站数; m 为村级快递代收点数; $d_{\alpha\beta}$ 为网格配送站 α 出发至村级快递代收点 β 的距离; $f_{\alpha\beta}$ 为约束无人机飞行方向的决策变量, 无人机由网格配送站 α 到 村级快递代收点 β 时, $f_{\alpha\beta} = 1$, 否则, $f_{\alpha\beta} = 0$; $W_{\alpha\beta}$ 为村级快递代收点 β 所需快递的质量; W 为无人机最大载质量; D 为电量充足条件下无人机的最大航行距离; $T_{\alpha\beta}$ 为约束配送区域的决策变量, 村级快递代收点 β 被划分至网格配送站或配送中心 α 所负责的配送区域时, $T_{\alpha\beta} = 1$, 否则, $T_{\alpha\beta} = 0$ 。

无人机配送总费用 C 的目标函数为

$$\min C = 2(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^m d_{\alpha\beta} f_{\alpha\beta} T_{\alpha\beta},$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为无人机单位距离的能耗费、折旧费、维护费、维修费。

2.3 麻雀搜索算法

采用麻雀搜索算法模拟麻雀群体的觅食和反捕食行为。为完成觅食, 麻雀个体通常被分为探索者、追随者和警戒者, 在自然状态下, 个体间相互监视, 鸟群中的追随者为提高自身的捕食率, 通常会争夺高采食量同伴的食物资源, 种群中的个体通过不断变换位置探索最佳食物来源; 在觅食的同时, 所有个体均对周围环境保持警惕以防天敌的到来, 一旦发现危险则放弃食物, 保证安全, 该算法鲁棒性较好但容易陷入局部最优解^[10-13]。

带禁飞区约束的无人机配送路径问题较复杂, 考虑配送环境要求, 本文采用麻雀搜索算法求解无人机配送路径。考虑影响无人机航迹的山峰和禁飞区^[14-15], 搭建三维任务环境, 公式为:

$$Z(x, y) = \sin(y + a_1) + a_2 \sin x + a_3 \cos(a_4 \sqrt{x^2 + y^2}) + a_5 \cos y + a_6 \sin(a_6 \sqrt{x^2 + y^2}) + a_7 \cos y,$$

式中: $Z(x, y)$ 为坐标 (x, y) 处的地形高度; $a_1 \sim a_7$ 为常数, 用来改变地貌特征建立粗糙地面。

模拟障碍物公式为:

$$Z_{\mu}(X, Y) = \sum_{\mu} h_{\mu} \exp \left[-\left(\frac{X - X_{\mu}}{a_{\mu}} \right)^2 - \left(\frac{Y - Y_{\mu}}{b_{\mu}} \right)^2 \right],$$

式中: $Z_{\mu}(X, Y)$ 为点 (X, Y) 处的障碍物分布强度, h_{μ} 为障碍物强度系数, (X_{μ}, Y_{μ}) 为障碍物分布在 X 轴、 Y 轴上的中心位置, a_{μ} 、 b_{μ} 为障碍物沿 X 轴和 Y 轴的坡度。

在麻雀搜索算法中群体内的探索者可获得比追随者更大的觅食搜索范围, 探索者位置更新公式为:

$$\mathbf{x}_{e,i}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{e,i}^t \exp[-i/(\mu t_{\max})], & R_2 < S \\ \mathbf{x}_{e,i}^t + Q\mathbf{L}, & R_2 \geq S \end{cases},$$

式中: $\mathbf{x}_{e,i}^{t+1}$ 为第 i 只麻雀(探索者)在 $t+1$ 代的位置; $\mathbf{x}_{e,i}^t$ 为第 i 只麻雀(探索者)在 t 代的位置; μ 为随机数, $\mu = 0 \sim 1$; $t_{\max}$ 为最大迭代次数; R_2 为警觉阈值; S 为安全阈值; Q 为符合正态分布的随机数; $\mathbf{L}$ 为 d 维向量, 元素均为 1。

追随者的位置更新公式为:

$$\mathbf{x}_{f,i}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{\mathbf{x}_w^t - \mathbf{x}_{f,i}^t}{l^2}\right), i > n/2 \\ \mathbf{x}_p^t + |\mathbf{x}_{f,i}^t - \mathbf{x}_p^t| \mathbf{A}^+ \mathbf{L}, i \leq n/2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_{f,i}^{t+1}$ 为第 i 只麻雀(追随者)在 $t+1$ 代的位置; $\mathbf{x}_{f,i}^t$ 为第 i 只麻雀(追随者)在 t 代的位置; $\mathbf{x}_w^t$ 为第 t 次迭代中最差位置; $\mathbf{x}_p^t$ 为探索者占据的最优位置; $\mathbf{A}$ 为 1 行多列矩阵, 元素均为 1 或 -1, $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ 。

警戒者的位置更新公式为:

$$\mathbf{x}_{s,i}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_b^t + \alpha |\mathbf{x}_{s,i}^t - \mathbf{x}_b^t|, f_i > f_g \\ \mathbf{x}_{s,i}^t + k \left(\frac{|\mathbf{x}_{s,i}^t - \mathbf{x}_w^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right), f_i \leq f_g \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_{s,i}^{t+1}$ 为第 i 只麻雀(警戒者)在 $t+1$ 代的位置; $\mathbf{x}_{s,i}^t$ 为第 i 只麻雀(警戒者)在 t 代的位置; $\mathbf{x}_b^t$ 为第 t 次迭代中最优位置; α 为步长控制参数; k 为随机数, $k = 0 \sim 1$; f_i 为第 i 只麻雀的适应度; f_w 为当前最差适应度; f_g 为当前最佳适应度; ε 用以避免分母为 0, 本文中 $\varepsilon = 10^{-8}$ 。

2.4 改进的麻雀搜索算法

Cubic-Sine 映射是非线性动力系统, 公式为:

$$\begin{cases} x_{n+1} = a \sin(\pi x_n) + b \sin(\pi y_n) \\ y_{n+1} = c \sin(\pi x_n) + d \sin(\pi y_n) \end{cases},$$

式中: (x_{n+1}, y_{n+1}) 为系统第 $n+1$ 次的迭代变量, (x_n, y_n) 为系统第 n 次的迭代变量, a, b, c, d 为系统的映射参数。

将 Cubic-Sine 映射作为随机扰动函数, 对麻雀搜索算法中每次迭代的当前最优解进行随机扰动, 增加算法的多样性和探索能力。通过调整映射参数控制扰动的强度和频率, 平衡算法的探索能力, 提高算法的全局搜索能力和收敛速度。改进后麻雀搜索算法的步骤为: 1) 初始化麻雀数量及相关参数; 2) 采用 Cubic-Sine 映射初始化种群或随机扰动当前最优解; 3) 对算法适应度排序, 找出最佳、最差适应度; 4) 通过探索者位置更新公式更新探索者位置; 5) 根据式(1)更新追随者位置; 6) 根据式(2)更新警戒者位置; 7) 获取所有麻雀的最新位置, 若新位置优于旧位置, 则更新位置信息; 8) 判断是否满足结束条件, 若满足则输出最佳适应值, 否则重复步骤 2)~8)。

3 实例分析

3.1 案例简介

参考京东小壮 CT120 设置无人机参数, 最大飞行半径为 30 km, 最大载质量为 50 kg。可通过无人机配送农村货物中体积和质量较小的日用品, 采用车辆按原有路线配送体积和质量较大的家用电器等。A 镇主要地形为山地丘陵, 地貌较复杂, 公路建设难度较大, 基础道路建设水平低于省内其他地区, 传统的车辆运输费用高、效率低, 可采用无人机配送部分快递。

3.2 仿真结果与分析

采用软件 MATLAB 仿真无人机从网格配送站到某村快递代收点配送的路径规划。起点为网格配送站, 坐标为 (12.6 km, 4.3 km), 终点为村级快递代收点。设 A 镇有 3 处待配送的村级快递代收点, 终点 1~3 的坐标分别为 (7.6 km, 6.5 km) (9.8 km, 5.6 km) (6.0 km, 6.0 km), 考虑无人机飞行高度规划实际飞行路径。种群规模为 50, 最大迭代次数为 300, 飞行路线长度权重为 0.5, 飞行高度权重为 0.3, 其他因素权重为 0.2。基于改进麻雀搜索算法的无人机配送路径仿真结果如图 2 所示。由图 2 可知: 无人机根据起点和终点的地理位置自动规划的配送路径能有效避开较高的山峰、人口聚集的集市及其他禁飞区等。规划无人机路径时需综合考虑禁飞区和地势变化, 确保无人机安全高效地完成配送任务。

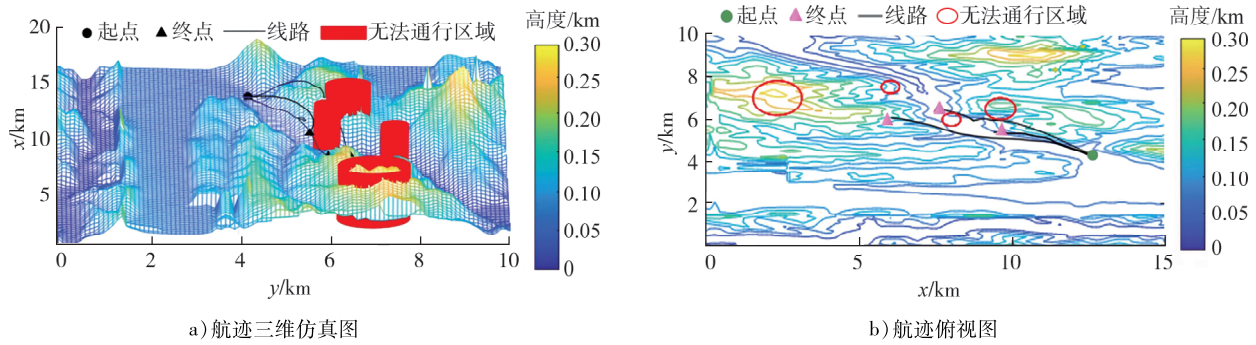


图2 基于改进麻雀搜索算法的无人机配送路径仿真结果

无人机配送距离随迭代次数的变化趋势如图3所示。由图3可知:从起点到终点1~3的无人机配送距离均随迭代次数的增大而减小;起点到终点1第1次迭代的配送距离为6.77 km,经100次迭代后配送距离不再变化,为3.05 km;起点到终点2第1次迭代的配送距离为5.66 km,经174次迭代后配送距离不再变化,为2.37 km;起点到终点3第1次迭代的配送距离为7.98 km,经178次迭代后配送距离不再变化,为3.85 km。

3.3 配送成本对比分析

车辆与无人机快递配送基本费用如表1所示^[16-17]。仅采用车辆为A镇的3处村级快递代收点配送时,配送总距离为21.46 km,由表1计算得往返配送成本约为59.66元;采用无人机配送时,配送总距离为9.27 km,往返配送成本约为17.24元,配送距离和配送成本分别减小56.8%、71.1%。

无人机配送节约成本主要体现在两方面:车辆的单位距离配送成本明显高于无人机,车辆在相同距离下的耗能是无人机的2倍^[18-19],在农村地区使用无人机替代车辆配送是企业降低成本的有效策略之一;在村落分散的山区,如果使用车辆逐一配送快递,路线迂回曲折,行驶距离较大,无人机能突破地形和空间限制,成为配送最佳选择。尽管无人机配送的初始投资成本较高,但随无人机制造技术的标准化和规模化发展,无人机的运输成本优势将愈加明显。

3.4 无人机最大载质量敏感性分析

以无人机最大载质量为自变量,配送成本为因变量,分析无人机载质量对配送成本的影响。无人机的最大载质量分别为10、20、30、40、50 kg时,以起点到终点1的航线为例,配送成本分别为51.12、28.40、17.04、17.04、11.36元。随无人机载质量增大,配送成本减小,但减小速度渐缓。无人机最大载质量增大,配送时可携带更多的快递,采用更少的无人机可配送更多的快递,物流成本降低;但无人机载质量过大有可能出现装载率不足,造成资源浪费,因此网格配送站可配备不同载质量的无人机,依据实际需配送的快递量优化配载,节约资源、降低成本。

4 结束语

基于县-村配送网络和车辆-无人机混合配送模式,探索适合农村的无人机配送系统,引入 Cubic-

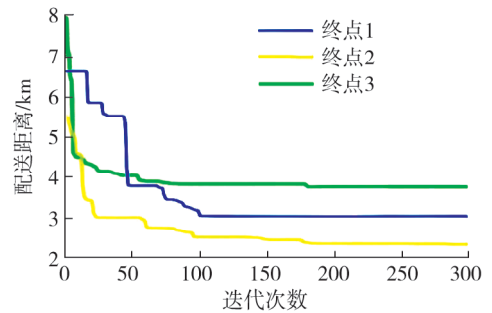


图3 无人机配送距离随迭代次数的变化趋势

表1 车辆与无人机快递配送基本费用

运输工具	费用项目	费用/(元·km ⁻¹)
车辆	燃料费	0.60
	折旧费	0.45
	人工费	0.30
	维修费	0.04
无人机	能耗费	0.30
	折旧费	0.30
	维护费	0.23
	维修费	0.10

Sine 映射改进麻雀搜索算法,避免传统算法过早收敛问题,在三维空间规划无人机航迹。以地貌较复杂的 A 镇为算例,基于改进麻雀搜索算法仿真无人机配送路径及距离。结果表明:在农村地区,特别是地势复杂的山区,无人机配送总距离及成本分别比车辆配送减小 56.8%、71.1%,无人机能绕过复杂的山地和交通障碍,可有效缩短配送距离;无人机单次配送成本比车辆配送成本小,说明在相同的配送任务下无人机能显著降低配送成本。网格配送站可配备多种型号的无人机,以满足不同的配送任务,充分利用资源,降低成本。

网格配送站需向所覆盖的多个村庄配送快递,下一步将考虑载质量、航程对无人机关敏度的影响,研究采用群控无人机由一点向多点的配送,进一步优化配送路径,降低农村地区的快递配送成本。

参考文献:

- [1] 常河山. 无人机配送,将如何重塑物流业未来?[EB/OL]. (2022-06-07)[2023-10-25]. <https://www.xd56b.com/home/daka/2022/0607/12720.html>.
- [2] 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.
- [3] PUGLIESE L D P, GUERRIERO F. Last-mile deliveries by using drones and classical vehicles[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Optimization and Decision Science. Sorrento, Italy: Springer, 2017: 557-565.
- [4] YUREK E E, OZMUTLU H C. A decomposition-based iterative optimization algorithm for traveling salesman problem with drone[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91: 249-262.
- [5] 郭秀萍,胡运霞. 卡车与无人机联合配送模式下物流调度的优化研究[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(1): 1-8.
- [6] 许文鑫,张敏,熊国文. 配送车与无人机的农村物流配送路径优化仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(6): 151-157.
- [7] 陈亮. 农村地区无人机配送选址及路径规划研究[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2022.
- [8] 刘浩. Y 物流公司车辆与无人机协同配送路径优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [9] 蒋丽,王洪艳,梁昌勇,等. 农村地区卡车与无人机协同配送路径优化[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(14): 306-314.
- [10] 白文杰,贾新春,吕腾. 改进麻雀搜索算法在三维路径规划中的应用[J]. 控制工程, 2022, 29(10): 1800-1809.
- [11] 王玲玲,孙磊,丁光平,等. 基于改进麻雀搜索算法的无人机航路规划研究[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(6): 55-60.
- [12] 舒聪. 面向无人机航迹规划的改进麻雀搜索算法及应用[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [13] 袁利君. 基于蚁群和麻雀搜索的无人机路径规划算法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [14] 李楠,薛建凯,舒慧生. 基于自适应 t 分布变异麻雀搜索算法的无人机航迹规划[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 69-74.
- [15] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用: 麻雀搜索算法[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [16] 周浪. 农村电商物流配送“配送车+无人机”路径优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [17] 陈海妹. 基于“卡车+无人机”模式农村电商物流配送路径优化研究[D]. 长安: 长安大学, 2021.
- [18] 刘平. 无人机送快递,助推物流业“智慧转型”[J]. 金融经济, 2016, 35(17): 39-40.
- [19] 郭朝飞. 京东投注无人机[J]. 中国企业家, 2018(14): 52-55.

Three-dimensional path planning for drones in county-to-village delivery model

XU Hongyan, LIU Guoliang, LIU Huaqiong*

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: Addressing issues such as poor rural road capacity and high delivery costs, a county-to-village drone
(下转第 56 页)