

任务驱动的直升机应急救援路径规划研究



赵娟¹, 王永虎^{2,*}

¹重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074

²重庆交通大学航空学院, 重庆 400074

摘要:近年来,国内外各类自然灾害和突发事件频发,应急救援的需求逐渐增加。直升机以其救援速度快、效率高、专业性强等优越性在应急救援中得到广泛应用,但是在直升机应急救援中的路径规划缺少任务驱动的考虑,易造成直升机应急救援效率的不足,并且往往会忽略任务环境的影响,造成救援任务的失败甚至是直升机事故。本研究根据直升机应急救援任务的分类,重点研究了灭火和医疗救护两种任务的救援需求和特点。在考虑复杂地形环境对救援任务威胁的基础上,通过理论分析、建模仿真,利用A*算法规划出直升机在灭火和医疗救护任务下的可行路径,并利用ArcGIS中的高程数据获得飞行高度轨迹。通过合理规划直升机的飞行路径和高度轨迹,可以最大程度地避免地形威胁,提高救援任务的成功率,并确保直升机和乘员的安全。

关键词:直升机应急救援;任务驱动;路径规划;救援效率

DOI: [10.57237/j.jsts.2024.01.002](https://doi.org/10.57237/j.jsts.2024.01.002)

Task-Driven Research on Helicopter Emergency Rescue Path Planning

Juan Zhao¹, Yonghu Wang^{2,*}

¹College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

²School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: In recent years, various natural disasters and emergencies have occurred frequently at home and abroad, and the demand for emergency rescue has gradually increased. Helicopters are widely used in emergency rescue due to their advantages such as fast rescue speed, high efficiency, and strong professionalism. However, the path planning in helicopter emergency rescue lacks mission-driven considerations, which can easily lead to insufficient helicopter emergency rescue efficiency, and often the impact of the mission environment will be ignored, resulting in the failure of the rescue mission or even a helicopter accident. Based on the classification of helicopter emergency rescue missions, this study focuses on the rescue needs and characteristics of fire extinguishing and medical rescue missions. On the basis of considering the threat of complex terrain environment to rescue missions, through theoretical analysis, modeling and simulation, the A* algorithm is used to plan the feasible path of the helicopter in fire-fighting and medical rescue missions, and the altitude data in ArcGIS is used to obtain the flight height trajectory. By properly planning the helicopter's flight path and altitude trajectory, terrain threats can be avoided to the greatest extent, the success rate of

*通信作者: 王永虎, wangyonghu@cqjtu.edu.cn

rescue missions can be improved, and the safety of the helicopter and crew can be ensured.

Keywords: Helicopter Emergency Rescue; Task-Driven; Path Planning; Rescue Efficiency

1 引言

中国国土面积辽阔，面临各种突发自然灾害和紧急情况的可能性多种多样。仅在 2023 年就经历了松花江的洪水、新疆阿图什地区发生的 5.4 级地震，以及神舟十六号载人飞船返回舱着陆后的地面搜救等紧急事件。这些事件使得中国航空救援和应急任务变得日益紧迫，对中国的航空救援能力提出了更高的要求。在这种背景下，迫切需要提升中国的航空救援能力，以更有效地响应各类紧急情况。直升机作为航空应急救援工作利器，是航空救援体系中最关键的装备，直升机以其快速性、灵活性和直达性等优势，可以快速到达高原、沿海、山区等复杂灾难现场，实施搜索、医疗、物资运输、起吊及空中指挥等工作，在自然灾害、消防救援、重大突发事件等方面发挥着核心作用[1]，在专业的航空救援队伍中，直升机已成为不可或缺的中坚力量。

为了能让直升机在复杂地形中规划出最优路线，郑潇雨[2]根据复杂地形的典型模型，结合指定直升机机型的性能，研究了不同目标函数下的直升机应急救援最佳路径算法与 GIS 实现；石璐璐等[3]利用任务区域的高程数据，规划出满足任务约束条件和直升机平台性能约束的规划航路；夏正洪等[4]基于 A*搜索算法，提出了救援直升机二维航迹规划方法，在满足安全间隔的前提下，求解可行最短飞行路径；黄邦菊等[5]将 GIS 技术与 Dijkstra 算法结合起来，以西南某复杂地形地区直升机救援为例，求解了直升机救援飞行最佳路径，验证了该方法的实用性，可为直升机救援路径的选址提供科学的方法；Yang 等人使用蒙特卡洛树搜索完成城市飞行流通中的自主飞行任务[6]。为了最大限度地发挥飞行优势，面向应急救援任务的直升机航路规划集中在三维空间，三维路径搜索中应用最广泛的一类是 A*算法[7]。本文利用 A*算法来解决直升机路径规划问题，通过代价函数和启发函数的作用影响，在待选的航迹节点集合中，逐步搜索最小代价的节点，并将其作为下一步的扩展节点，直至找到目标点。相较于其他启发式算法，A*算法更适用于在复杂地形下规划直升机的三维航迹。现今，对于直升机应急救援

的路径规划方法有很多，但往往缺少对不同救援任务的深入考虑，易造成直升机救援效率的不足，甚至是造成救援任务的失败和直升机事故。本文从灭火和医疗救护的任务需求出发，考虑在复杂地形环境下，利用 A*算法给出直升机救援的路径规划方案，从而高效完成任务。

2 直升机应急救援任务

2.1 任务分类

基于中国多种类型突发事件频发的基本国情，在对于航空应急救援任务进行分类后，提出不同类型突发事件对应的直升机应急救援任务组合，可以提供更加精确更加具有现实意义的决策参考。通过分类，可以更好地理解任务的本质和特点，有针对性地开展路径规划和救援操作。

中国航空应急救援任务的分类通常基于多个因素，包括任务性质、应急事件类型、所需专业技能和资源等。还需要参考国内外的相关法律法规以及各个机构单位的应急救援预案，国内外的航空应急救援具体案例和直升机的研发和使用情况。根据这些重要依据，将航空应急救援任务主要分为十一类[8]，如表 1。

表 1 航空应急救援任务分类

任务分类	
运出人员	吊挂运出人员
	机降运出人员
运入人员	机降运入应急救援人员和搜救犬
	其他空降方式运入救援人员
运送物资	机降运输救灾物资
	吊挂运输大型设备
	空投物资
	财产外运
航空医疗服务	转移伤员，进行空中转运
	途中救治
搜索人员	搜索人员：海上搜救，野外搜救
灾情侦查	航空摄影
	空中巡逻与监控，无人区受灾情况巡视 视察灾情，情报收集

任务分类	
应急通信	通信中继与联络
	现场指挥，交通疏导，紧急疏散
喷洒药剂	卫生防疫
	灭虫
干预天气	增雨
	减雨
	驱雹
灭火	吊桶灭火
	撒液灭火
其他	其他

2.2 任务需求

本文主要针对灭火和航空医疗两个任务。随着直升机技术的成熟和直升机数量的增多，直升机利用其在空中的机动性能，在森林火灾、城市高层建筑火灾、船舶火灾等灭火救援中的应用越来越多。消防飞机一般需要装备各种灭火专用设备，如消防水箱、消防水炮、泡沫发生器、火灾侦查系统、救援设备及其他设备。直升机机降、索降和吊桶灭火是三种不同的灭火方式，其中吊桶灭火是利用直升机外挂吊桶载水，从空中直接将水喷洒在火头和火线上，进而控制火势、扑灭林火。实践证明，直升机吊桶灭火已成为西南高原林区空中直接灭火最直接、最有效的手段[9]。在直升机救火任务中，灭火效率是最重要的考虑因素，直升机要精确投放水或灭火剂，控制火势蔓延，也可重复投放减少复燃的可能性。具体作业过程中，直升机先进行取水作业，包括选择合适的水源确定取水点，按照规范操作和作业要求进行取水，然后飞往火场，进行洒水作业，撤离火场返回取水点取水，重复作业，直至完成灭火任务。因此，在对直升机灭火任务进行路径规划时需要考虑到直升机的取水点位置，使得飞行路径最短，提高灭火效率。

将直升机应用于医疗救护可以在救护车难以到达、到达需要很长时间或待救援人员伤情严重情况下，快速运送病人或伤员到医院，航空医疗是应急救护系统的重要组成部分。应用直升机实施航空医疗时需根据任务需要针对性的配置机载装备和医疗救护人员。机载装备应包括诸如氧气瓶、心电仪、呼吸机、担架等装备[10]。在直升机医疗救护的任务中，时间最短是最

重要的考虑因素，直升机要在最短的时间内到达事发地点，对受伤人员进行急救处理，以提高其生存率。因此，在对直升机医疗救护任务进行路径规划时要尽量使直升机飞行线路最短。

3 A*算法

在三维栅格空间中，某一节点可选择的扩展节点有 26 个，对应分布在其前、后、上、下、左、右的 6 个平面。但直升机正常飞行过程中应该始终沿着其前进的方向运动，因此，直升机可选择的扩展节点应是其前方平面内的 9 个栅格节点[11]。这样可以减少不必要的搜索点，有效提高搜索效率。

将代价函数表示为：

$$f(n) = \alpha L(n) + \beta S(n) + \omega h(n) \quad (1)$$

式中， α 、 β 和 ω 分别表示航程代价、平稳代价和启发函数的权重系数。 $L(n)$ 为航程代价，即当前航路点及之前所有航路点的相邻航路点距离之和； $S(n)$ 为平稳代价，即发生飞行姿态转变的相邻航路点数之和； $h(n)$ 为启发函数，即当前节点到目标节点的欧拉距离。为避免各个子代价函数数量级差异较大，进行归一化处理：

$$\overline{L(n)} = \frac{L(n) - \min(L(n))}{\max(L(n)) - \min(L(n))} \quad (2)$$

$$\overline{S(n)} = \frac{S(n) - \min(S(n))}{\max(S(n)) - \min(S(n))} \quad (3)$$

$$\overline{h(n)} = \frac{h(n) - \min(h(n))}{\max(h(n)) - \min(h(n))} \quad (4)$$

改进后的代价函数：

$$\overline{f(n)} = \alpha \overline{L(n)} + \beta \overline{S(n)} + \omega \overline{h(n)} \quad (5)$$

A*算法首先建立栅格化规划空间，明确搜索策略，然后利用改进的代价函数从起始节点依次判断、选取下一个扩展节点，并将待扩展的节点放入 open 链表，已扩展的节点放入 close 链表[12]，不断循环，直到目标节点被找到。算法流程如图 1。

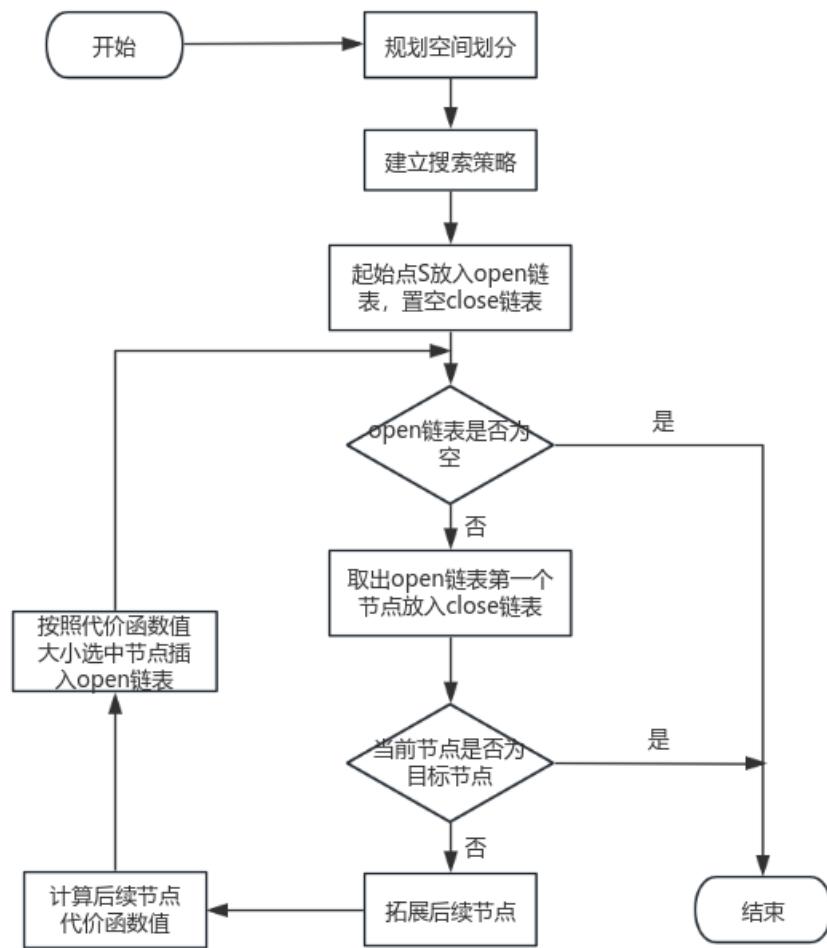


图 1 算法流程图

4 飞行环境建模

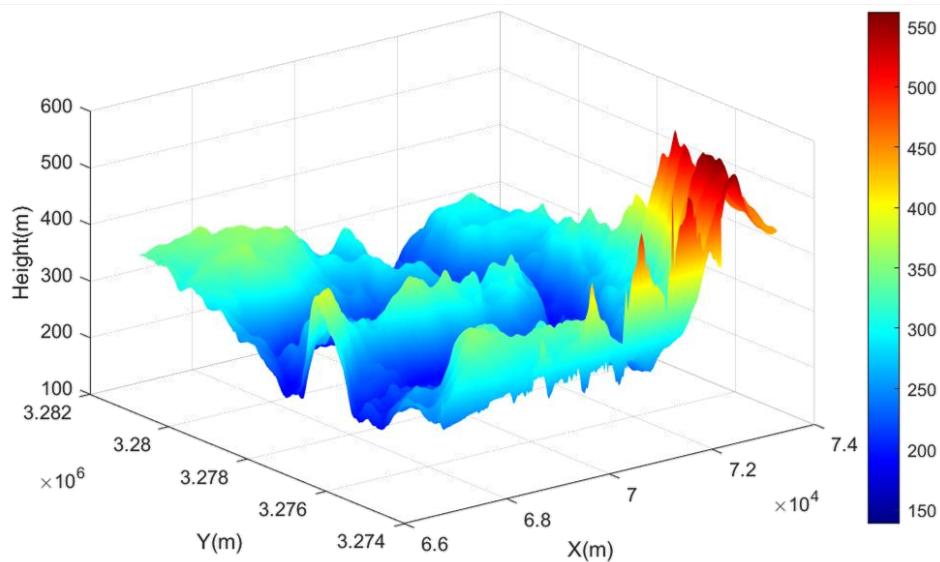


图 2 MATLAB 呈现的地形高程图

飞行环境建模就是对地理信息的处理,直接影响航路规划的质量,是航路规划首先需要解决的问题。本文使用地理空间数据云提供的 ASTERG DEM 30M 分辨率数字高程 (DEM) 数据。DEM 是对地球表面地形地貌的一种离散化数字表达方式,可用于提取出地理坐标对应的高程值,能够很好表示地形的特点和变化特征,是目前应用最为广泛的地理信息研究工具[13]。将获取的数据导入 ArcGIS 中,借助 ArcGIS 得到该地形的经度、维度、高度集合,将其导入到 MATLAB 软件得到地形高程图,如图 2 所示。为了防止地形威胁影响航迹规划中的安全,将地形高程整体抬高 30m,得到可飞区域。最后利用栅格法将直升机作业空间按照一定的划分粒度分解为相互连接且不重叠的网格单元[14],三维环境信息便转化为离散的栅格信息,直升机在空间的移动过程即为由一个栅格节点移动到另一个相邻栅格节点的过程。

5 仿真与分析

在建立的飞行环境模型中,利用改进 A*算法分别规划直升机灭火和医疗救护任务的路径,假设两个任务的出发地点和事发地点相同。

5.1 灭火任务下的路径

结合灭火的任务需求,直升机需要先到火场周边河流取水,再到达事发地点灭火。算法经过 59 次迭代,最终得到一条安全可行的平滑三维航迹,如图 3 所示,图 4 是俯视图。结合路径在 ArcGIS 中的高程数据,又直升机吊桶灭火飞行作业属于直升机外载荷飞行[15],

因此直升机飞行高度要加上吊桶的绳索长度,得到直升机此时的飞行高度轨迹,如图 5 所示。

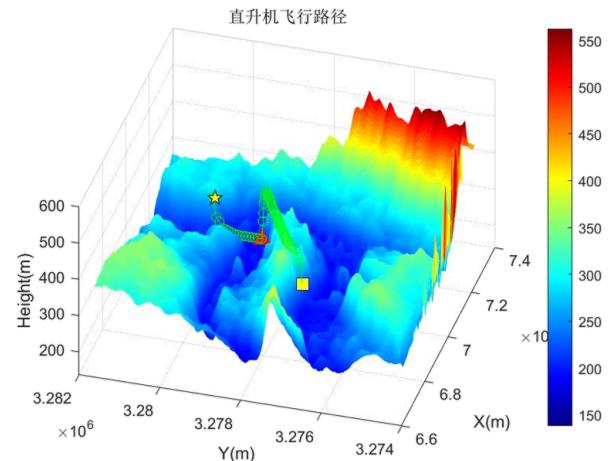


图 3 直升机灭火飞行路径图

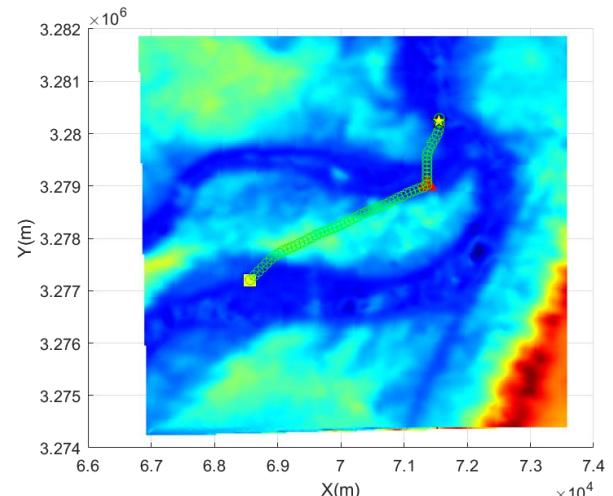


图 4 路径俯视图

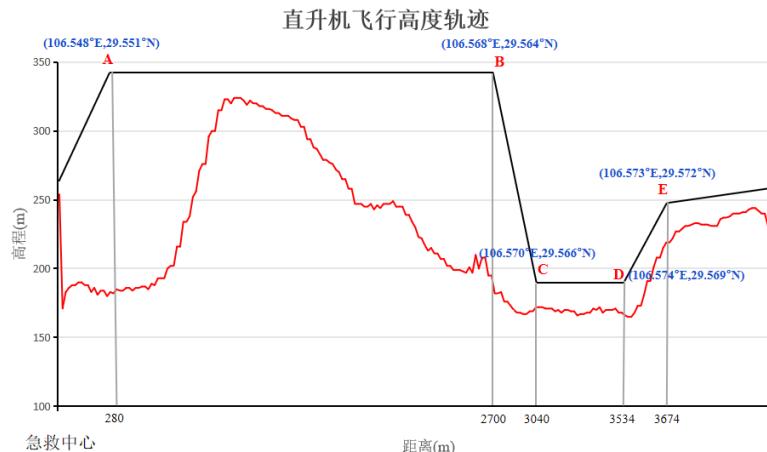


图 5 直升机灭火飞行高度轨迹

整个路径可以分为两部分：取水前和取水后。整个路径尽量保持了飞行动作的连续性，到达取水点前保持相对稳定的高度，避开了地形威胁且转折点较少；取水后先保持高度不变，后渐进上升到达事发点。

5.2 医疗救护任务下的路径

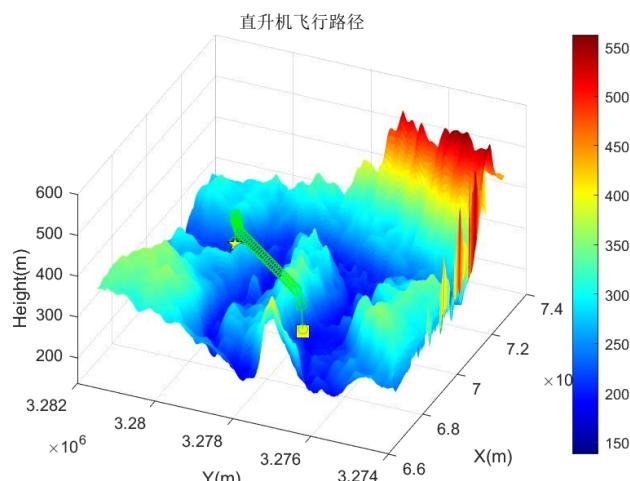


图 6 直升机医疗救护飞行路径图

考虑医疗救护的任务需求，直升机需要以最短的时间到达事发地，救治伤员。算法经过 46 次迭代，最终得到一条安全可行的平滑三维航迹，如图 6 所示，图 7 是俯视图。这条路径充分考虑了医疗救护任务的紧急性，尽量减少到达事发地的时间。结合路径在 ArcGIS 中的高程数据，得到直升机此时的飞行高度轨迹，如图 8 所示。

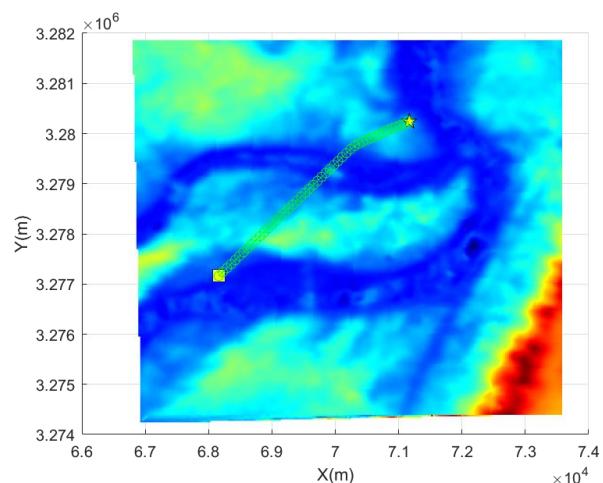


图 7 路径俯视图

直升机飞行高度轨迹

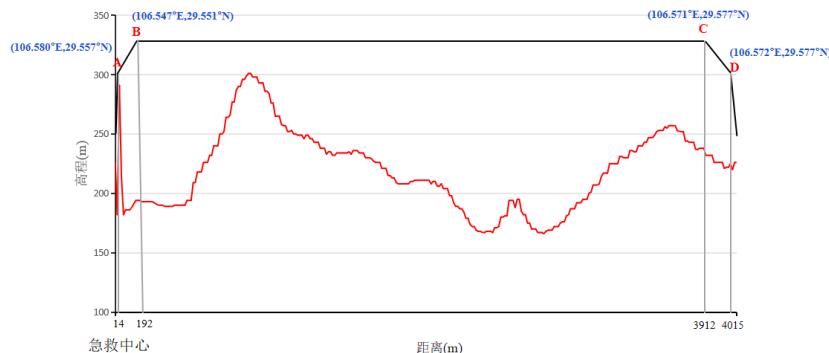


图 8 直升机医疗救护飞行高度轨迹

整个路径尽量保持了飞行动作的连续性，根据地形的高程变化，直升机起飞后保持相对稳定的高度，并避开了地形障碍逐渐向目标点靠近，路径规划考虑了地形障碍，使得直升机的飞行高度能够适应地形的起伏，最后逐渐下降到目标点。整个路径的转折点较少，有效降低了飞行操作难度，提高了任务执行的安全性和效率。这种规划不仅使得飞行过程更为平稳，同时也充分考虑了地形的复杂性，为直升机医疗救护任务的成功执行提供了可行的飞行路径。

6 结论

本文分析了直升机灭火和医疗救护任务的需求，利用改进 A* 算法对在复杂地形下相同起点和终点的两个不同应急救援任务进行路径规划，并且结合 ArcGIS 高程数据得到直升机飞行高度轨迹。对比两个任务的路径，虽然它们起止点相同、都要在同一片区域内避免地形威胁、尽量使飞行航线平滑且最少化拐点，但

直升机飞行的路径是不同的，这是由应急救援任务的需求所决定的。利用改进的 A*算法，充分考虑应急救援任务需求，可以有效提高直升机响应能力和救援效率。除了地形威胁，任务驱动下直升机路径规划的影响因素还有很多需要考虑，如风、高压线等，本文中将直升机自身的约束条件以及真实环境理想化，在实际运用中，还需要进一步的优化。

参考文献

- [1] 邵玄玄, 徐新. 国内航空救援直升机现状及发展策略研究 [J]. 科技视界, 2022, (08): 30-33.
- [2] 郑潇雨. 基于 GIS 的复杂地形下直升机救援飞行路径优化 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2013.
- [3] 石璐璐, 徐金明. 基于地形的直升机路径规划算法研究 [J]. 直升机技术, 2021(02): 38-42.
- [4] 夏正洪, 潘卫军. 多救援直升机多目标分配与航迹规划研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10226-10230.
- [5] Yang X, Wei P. Autonomous On-Demand Free Flight Operationsin Urban Air Mobility using Monte Carlo Tree Search [C]/International Conferenceon Research in Air Transportation (ICRAT). 2018.
- [6] 黄邦菊, 林俊松, 郑潇雨, 方学东. 复杂地形下直升机救援最佳飞行路径分析 [J]. 测绘地理信息, 2013, 38(05): 42-44+48.
- [7] 梁宵, 王宏伦, 孟光磊等. 三维真实地形环境下无人机救援航路规划方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(07): 1183-1187.
- [8] 罗丹. 基于航空应急救援任务的直升机需求研究 [D]. 中国民航大学, 2019.
- [9] 张平. 森林火灾现场指挥扑救决策研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [10] 秦帅星. 基于装备协同的航空应急救援运行机制研究 [D]. 中国民航大学, 2018.
- [11] 李周烁. 森林火灾直升机救援飞行调度及航迹规划研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [12] 麦晓春, 张新征, 杨厚强等. 基于微软机器人控制仿真平台的路径规划仿真 [J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 55-58+101.
- [13] 何鑫. 多因素影响下的通航应急救援资源调度关键技术研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- [14] 陈呈. 基于改进栅格法和人工势场法的无人艇路径规划研究 [D]. 江苏科技大学, 2018.
- [15] 中国民用航空局飞行标准司. 直升机安全运行指南 [Z]. 2014.