

森林消防灭火中直升机吊桶灭火机群最优调度方法研究

杨启科

中国消防救援学院, 北京 102202

摘 要： 本文提出遗传算法优化直升机在灭火任务中的调度策略，从而提高整体灭火效率，提升直升机吊桶灭火作业的效果。根据灭火效率（如灭火时间、覆盖面积等）评估每个方案的性能，选择适应度高的方案进行交叉和变异，以生成下一代种群。通过交叉操作生成新的调度方案，并对部分方案进行变异以增加多样性。通过应用遗传算法，您能够有效地解决直升机吊桶灭火的调度问题，提出了一种优化策略，能够显著提高灭火效率。这一研究不仅为相关领域提供了理论基础，也具有实际应用价值，为未来的应急响应提供了参考。研究表明，遗传算法能显著提高灭火效率，并为应急响应提供优化辅助决策。未来可扩展模型的复杂度，引入多目标优化以平衡不同的调度需求。为此研究为直升机灭火调度提供了一种有效的解决方案，具有实际应用价值，为未来的火灾应急管理提供了参考。

关 键 词： 森林灭火；直升机；吊桶灭火；调度；遗传算法

Study on optimal dispatching method of helicopter bucket fire extinguishing group in forest fire fighting

Yang Qike

China Fire and Rescue College, Beijing 102202

Abstract： This article proposes a genetic algorithm to optimize the scheduling strategy of helicopters in firefighting tasks, thereby improving overall firefighting efficiency and enhancing the effectiveness of helicopter bucket firefighting operations. Evaluate the performance of each plan based on fire extinguishing efficiency (such as fire extinguishing time, coverage area, etc.), and select the plan with high adaptability for crossover and mutation to generate the next generation population. Generate new scheduling schemes through cross operation and mutate some schemes to increase diversity. By applying genetic algorithms, you can effectively solve the scheduling problem of helicopter bucket firefighting and propose an optimization strategy that can significantly improve firefighting efficiency. This study not only provides a theoretical basis for related fields, but also has practical application value, providing reference for future emergency response. Research has shown that genetic algorithms can significantly improve fire extinguishing efficiency and provide optimized decision-making assistance for emergency response. The complexity of future scalable models is addressed by introducing multi-objective optimization to balance different scheduling requirements. This study provides an effective solution for helicopter firefighting dispatch, which has practical application value and provides reference for future fire emergency management.

Keywords： forest firefighting; helicopter; bucket firefighting; scheduling; genetic algorithm

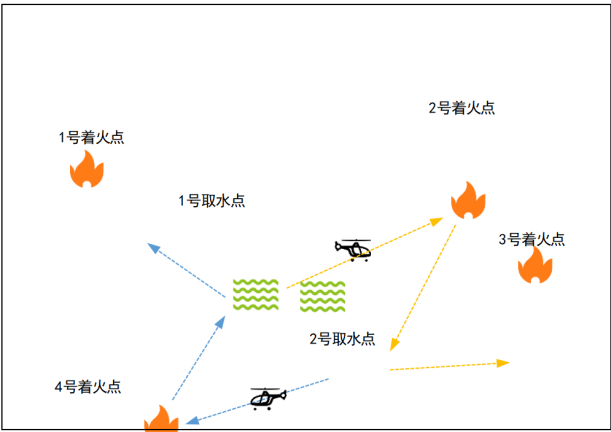
一、问题的提出

在森林火灾灭火过程中，直升机灭火是一种常用且有效的手段。科学有效地组织和调配直升机对整个灭火方案的制定和实施至关重要，它直接影响着消防救援行动的成效。技术性数据支持，还要求地面指挥团队与直升机操作团队之间的良好沟通和协调。通过科学的模型和算法，可以有效地解决直升机在消防救援中的调度和航迹规划问题。在实际操作中，结合现代技术如无人机场路径规划、实时数据分析等，将进一步提高森林火灾救援的时效性和合理性。这不仅有助于灭火效率的提高，也能减少对生态环境的影响，保护生态资源^[1]。

二、模型概述

（一）问题假设

在森林火灾救援中，直升机吊桶洒水灭火的调度问题是一个复杂的优化问题，涉及多个要素和约束条件。直升机的起始位置会影响第一阶段的飞行路径和时间。确保每架直升机在灭火过程中不会超出最大飞行时间限制。每架直升机在一定时间内所能提供的最大灭火量，防止资源消耗过度。设计合理的飞行路径，以保证直升机能够高效完成任务，避免无谓的飞行^[2]。使用图论算法（如Dijkstra算法或A*算法）进行路径优化，确保每架直升机的飞行路径最短。根据直升机的性能和可用性，合理分配灭火任务^[3]。



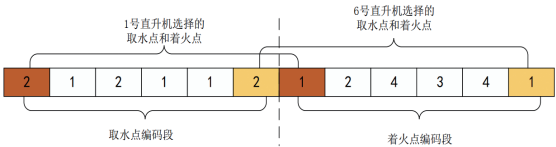
> 图 2.1 直升机吊桶灭火调度示意图

(二) 模型的搭建

根据火场监测数据确定初始的着火点，并记录各个着火点的位置和火势大小。收集火场的实时监测数据，包括各个着火点的位置、火势强度、风向、温度和湿度等。在每个决策阶段，选择当前灭火成本最低的着火点进行扑救。考虑直升机的出发点、飞行路径和到达时间，优先扑救火势最急迫的点^[4]。监测灭火效果，包括火势控制情况和实际消耗的灭火水量。根据灭火结果和直升机的运输情况，调整后续调度方案，提高响应效率。通过以上步骤，可以更有效地设计直升机在灭火任务中的调度方案，为火灾应对提供支持^[5]。依次设计后续周期的最优调度安排：重复上述步骤，在每个调度周期中重新评估火势和着火点的优先级，并设计最优的调度安排来最小化灭火水量的加权值，直至所有着火点被扑灭^[7]。

(三) 基于遗传算法的设计

在森林火灾扑灭的过程中，直升机调度方案的有效性至关重要。根据您提供的染色体结构 {2,1,2,1,1,2,1,2,4,3,4,1}，我们可以对每架直升机的飞行路径进行详细解读和分析。以下是每架直升机的详细任务安排：第1架直升机从 2 个取水点出发 → 到 1 个着火点收集水源，扑灭第一个着火点。第2架直升机从 1 个取水点出发 → 到 2 个着火点快速飞往多个着火点，以尽量减小火势蔓延。第3架直升机从 2 个取水点出发 → 到 1 个着火点类似于第1架，再次进行重点火源的扑灭。第4架直升机从 1 个取水点出发 → 到 1 个着火点专注于单一火源，确保扑灭。第5架直升机从 2 个取水点出发 → 到 2 个着火点同时处理两个火源，增加灭火效率。第6架直升机从 1 个取水点出发 → 到 2 个着火点灵活运用水源，对火势进行蔓延控制。第7架直升机从 1 个取水点出发 → 到 2 个着火点同样处理多个火源，强化响应能力。根据火势动态变化，及时调整飞行路径，并确保在关键时刻到达最需要干预的火点。



> 图 2.2 染色体结构表示

在实践中，还可能需要根据问题的特点进行一些改进和优化，例如调整选择、交叉和变异的概率，采用多种父代选择策略等。

三、基于遗传算法的森林消防灭火算例分析 2.3 参数假设

本文仿真实验的参数设置为：取水点的个数 $I=2$ ，着火点的个数 $J=4$ ，其他参数设置如表 3.1、表 3.2 所示。GA 算法的各类参数为：种群中染色体的个数为 $N=1500$ ，最大迭代次数为 $M=200$ ，染色体交叉概率为 $P_c=0.8$ ，基因变异概率为 $P_m=0.05$ ^[8]。

表 3.1 各着火点相关参数设置

	1 号着火点	2 号着火点	3 号着火点	4 号着火点
A_j	20	15	15	10
L_j	0.3	0.25	0.25	0.2
a_j	0.12	0.06	0.1	0.06

表 3.2 各取水点到各着火点距离 (km)

	1 号着火点	2 号着火点	3 号着火点	4 号着火点
1 号取水点	20	25	15	20
2 号取水点	30	10	25	15

(一) 实验结果

(二) 直升机数量相对着火点数量多与少情形对比分析

表 3.3 实验仿真结果 (K = 6)

直升机数量 K = 6					
各着火点对应编号					
	调度周期	1	2	3	4
灭火所需水量变化	1	0.48	15.28	15.31	10.21
	2	0.51	10.34	0.84	10.45
	3	0.53	0	0.88	2.03
	4	0	0	0	0
各周期最优染色体	1	11111111111111			
	2	111112333332			
	3	121212424242			
	4	111122433112			

表 3.4 实验仿真结果 (K = 2)

直升机数量 K = 2					
各着火点对应编号					
	调度周期	1	2	3	4
灭火所需水量变化	1	0.48	15.28	15.31	10.21
	2	0.51	10.34	0.84	10.45
	3	0.53	0	0.88	2.03
	4	0	0	0	0
各周期最优染色体	1	11111111111111			
	2	111112333332			
	3	121212424242			
	4	111122433112			

经对表 3.3 仿真结果分析,得到以下结论:

1. 从通过上述调度方案的安排,6架直升机在4个调度周期内高效地完成了灭火任务。这样的调度策略展示了本模型和算法在优化灭火资源配置方面的有效性,并为在实际操作中的应用提供了可靠的依据^[9]。

应用2架直升机实施吊桶灭火时,共经历了8个调度周期完成灭火任务,对应调度方案为:

$$\sum_{i=1}^I s_{k,i}^{(1)}=1,$$
$$\sum_{i=1}^I s_{k,i}^{(2)}=1,$$
$$t_j^{(1)}=\left(\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^Kx_{k,j}^{(1)}s_{k,i}^{(1)}w_{i,j}\right)/\sum_{k=1}^Kx_{k,j}^{(1)};$$

2. 实验设置的4个着火点,按照初始灭火需水量、火势蔓延速度和灭火优先级划分,1号着火点危害程度最大,其次是2号着火点和3号着火点相当,最后是4号着火点。本实验验证了灭火调度策略中,着火点的灭火优先级和火势蔓延速度对灭火效率的重要影响。优先级越高、火势蔓延速度越快的着火点,直升机的灭火资源分配会更加侧重于这些着火点,以期达到最大灭火效

率。以上结果与实验的预期目标相符,为后续的实际灭火操作提供了理论依据^[10]。

3. 直升机不同调度模式对灭火效率的影响对比分析

直升机灵活选取着火点灭火的调度方式比直升机逐个对各个着火点灭火的调度方式更加高效。通过以上对比可以看出,灵活选择着火点的调度方式不仅缩短了灭火时间,还提高了整体灭火效率。这种方法特别适用于各着火点初始灭火需水量较大时,表现更为明显。

表 3.5 本文调度方式各着火点火势持续蔓延时间(单位:h)

调度周期	1号着火点	2号着火点	3号着火点	4号着火点
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.40	0.40	0.40	0.40
3	0.55	0.55	0.55	0.55
4	0.75	0.75	0.75	0.75
5	0.83	0.75	0.90	0.83
6	1.00	0.85	0.93	1.00
7	1.05	0.98	1.08	1.1
8	1.35	1.43		

参考文献

[1] 郑昌文, 严平, 丁明跃, 等. 飞行器航迹规划 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] Doeblner J., Gesting P., Valasek J. Real-time path planning and terrain obstacle avoidance for general aviation aircraft [C]. Aiaa Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006, 5825: 1-12.

[3] 袁梦顺, 陈谋, 邵书义, 等. 基于改进精英蚁群算法的无人机三维航迹规划 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(02): 37-42.

[4] Pongsakornsathien N., Bijjahalli S., Gardi A., et al. A performance-based airspace model for unmanned aircraft systems traffic management [J]. Aerospace, 2020, 7(11): 1-25.

[5] Deng L., Yuan H., Huang L., et al. Post-earthquake search via an autonomous UAV: hybrid algorithm and 3D path planning [C]. Proceedings of the 14th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). IEEE, 2018: 1329-1334.

[6] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[7] 费惠佳, 徐海, 焦鹏. 雷达空中目标三维航迹生成方法研究 [J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(05): 97-100+104.

[8] Xia Z., Pan W. Researches on the coordinated rescue of multi-helicopters based on feasibility matrix and track planning [C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), Atlantis Press, 2013: 181-184.

[9] 潘卫军, 罗小林, 康瑞. 基于 GIS 的直升机山区救援飞行路径规划 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(5): 156-160.

[10] 刘振, 史建国, 高晓光. 图形模型在航迹规划中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(11): 20-22.