

文章编号: 1674-8190(2023)02-024-11

低空无人机路径规划算法综述

刘庆健¹, 疏利生², 刘刚², 李翱²

(1. 浙江建德通用航空研究院, 杭州 311612)

(2. 浙江省交通运输科学研究院 航空研究所, 杭州 310023)

摘要: 随着无人机技术的发展, 无人机在低空的应用场景越来越多, 复杂的低空环境对无人机路径规划算法提出了新的要求。本文总结了近年来常用的无人机路径规划算法, 包括图搜索算法, 线性规划算法, 智能优化算法(遗传算法、粒子群算法、蚁群算法), 强化学习算法; 对这些算法的原理、适用场景及其优缺点进行了归纳分析; 并基于无人机发展现状对无人机路径规划算法进行了展望。

关键词: 无人机; 路径规划; 算法原理; 研究展望

中图分类号: V279; TP18

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.02.03

A survey of low altitude UAV path planning algorithms

LIU Qingjian¹, SHU Lisheng², LIU Gang², LI Ao²

(1. Zhejiang Jiande General Aviation Research Institute, Hangzhou 311612, China)

(2. Aviation Research Institute, Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 310023, China)

Abstract: With the diversification of UAV application scenarios, there are more and more application scenarios of UAVs at low altitudes, and the complex low-altitude environment puts forward new requirements for UAV path planning algorithms. This paper summarizes the UAV path planning algorithms commonly used by scholars in recent years, including graph search algorithm, linear programming algorithm, intelligent optimization algorithm (genetic algorithm, particle swarm optimization algorithm, ant colony optimization algorithm), reinforcement learning algorithm; summarizes the principles, applicable scenarios, advantages and disadvantages of the algorithm, and makes a prospect of UAV path planning algorithms based on the development status of UAVs.

Key words: UAV; path planning; algorithm principle; research prospect

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划项目(2022C01055); 浙江省通用航空运行技术研究重点实验室开放基金(JDGA2020-2)

通信作者: 疏利生, shulisheng@nuaa.edu.cn

引用格式: 刘庆健, 疏利生, 刘刚, 等. 低空无人机路径规划算法综述[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 24-34.

LIU Qingjian, SHU Lisheng, LIU Gang, et al. A survey of low altitude UAV path planning algorithms[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 24-34. (in Chinese)

0 引言

随着无人机(Unmanned Aerial Vehicle, 简称 UAV)技术的发展,无人机在各个领域展现出了良好的应用前景。实际数据表明,无人机具备操作简便,持续作战能力强,能降低人力成本等优点。目前无人机在低空环境中与行业应用结合,能代替一些人力难以操作的任务,比如桥隧损害检测、高空抛洒物识别、河道巡检、边坡塌方巡检、安防巡检、航拍等。无人机路径规划(Path Planning)是无人机执行任务的基础,其目的是在特定环境下规划起始位置和目标位置之间的最优路径。近年来,越来越多的研究者结合低空环境、运用多种算法对此进行了研究,常用的算法包括图搜索算法^[1]、运筹学线性规划方法^[2]、传统/改进的智能优化算法^[3]以及机器学习算法^[4]等。

本文首先对常用的无人机路径规划算法进行归纳分类,其次对路径规划过程中算法应用方法进行了分析,然后对关键技术等进行综述,最后通过比较各类算法的优缺点,从无人机低空应用场景出发,对无人机路径规划算法的发展进行展望。

1 无人机路径规划算法

无人机路径规划是指根据无人机任务分配,规划满足安全条件的飞行路径,也称为航迹规划(Route Planning)。本文归纳众多研究人员对于无人机路径规划主要采用的算法,按照算法性质分为图搜索算法、线性规划算法、智能优化算法和机器学习算法四类。

1.1 图搜索算法

图搜索算法是图论中应用最广泛的算法。其中,Dijkstra作为经典的图搜索算法,在求解最短路问题中表现出比深度优先搜索、广度优先搜索更高的搜索效率。随着研究问题的深入,实际场景中障碍物并不规则,不能简单地以节点和线段的形式体现出来,且随着地图的增大,节点数的增多,求解最短路的算法执行效率太低。因此,为权衡效率和路线质量,找到一个相对较优解,荷兰科学家迪杰斯特拉等对Dijkstra算法进行优化,提出了A*算法和D*算法^[5]。

此外,近年来人们运用快速扩展随机树(Rapid-exploration Random Tree, 简称RRT)算法进行

无人机路径规划,RRT算法具有随机性强、搜索效率高、高维场景算法复杂程度低、易实现等优点^[6]。

A*算法是一种启发式算法,即无人机在开始运动时从初始状态搜索评估最好的新的位置,从新的位置继续搜索,直到到达最终位置,这样可以去除很多无谓的搜索路径,达到提高效率的目的。算法流程如图1所示。

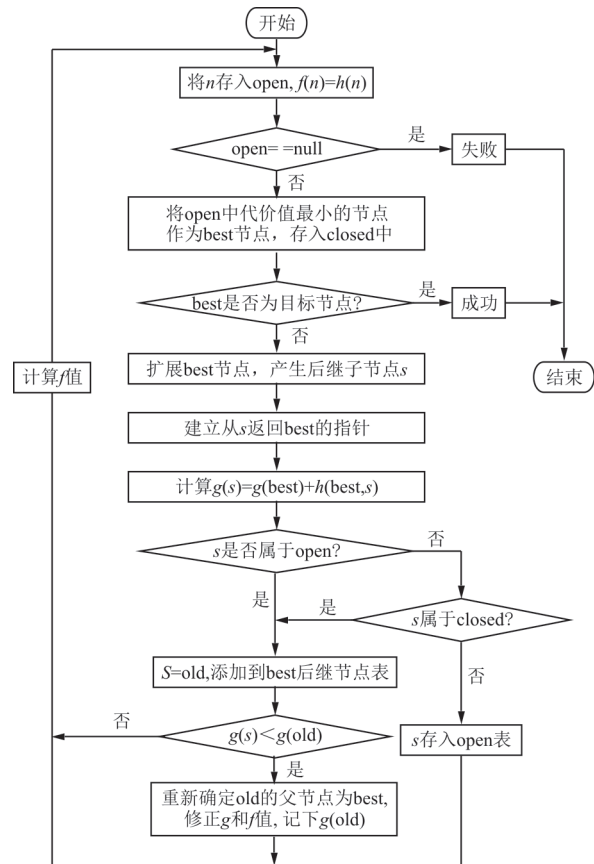


图1 A*算法流程图

Fig. 1 A* algorithm flow chart

占伟伟等^[7]针对低空无人机三维战场环境的路径规划问题,提出了一种基于改进A*算法的UAV路径规划算法,该算法满足UAV安全、升降率和转弯半径等性能约束;Wang Hongwei等^[8]针对无人机的路径规划问题,提出了一种基于平滑A*算法的移动机器人路径规划算法,该算法对其规划的无人机路径进行了平滑处理,使无人机飞行路径满足性能约束;Ren T等^[9]针对复杂环境下的无人机路径规划问题,提出了一种基于改进A*算法的无人机三维路径规划算法,该算法对传统A*算法的搜索空间进行了扩展,从而有效地提高了算法的准确性和安全性;Wu X L等^[10]针对传统基于多方向的A*算法扩展效率不高的缺点,提出

了一种双向自适应 A* 算法,该算法采用自适应步长和权重策略,有效地提高了算法的搜索速度和精度;付道阔等^[11]针对传统 A* 算法的缺点,分别对 A* 算法的代价函数和启发函数进行改进,并引入变步长搜索节点法以提高算法的搜索效率,从而提高了无人机的飞行效率和动态避障能力。

D* 算法是一种高效的动态路径规划方法,是在 A* 算法的基础上,对二次路径规划进行改进而得到的启发式搜索算法。其基本思想是,利用启发函数计算无人机飞行路径上各节点的代价估计值,以计算出最小代价估计值所对应的节点作为理想目标,并进行迭代循环搜索周围各节点的代价估计值,如果失败,则选择其他候选飞行路径进行搜索,直到找到理想的目标节点为止。当无人机在飞行过程中遇到动态的障碍物时,D* 算法则利用已计算过节点的信息进行二次规划,重新找到从当前飞行节点到目标节点的最优路径。D* 算法具体流程如图 2 所示。

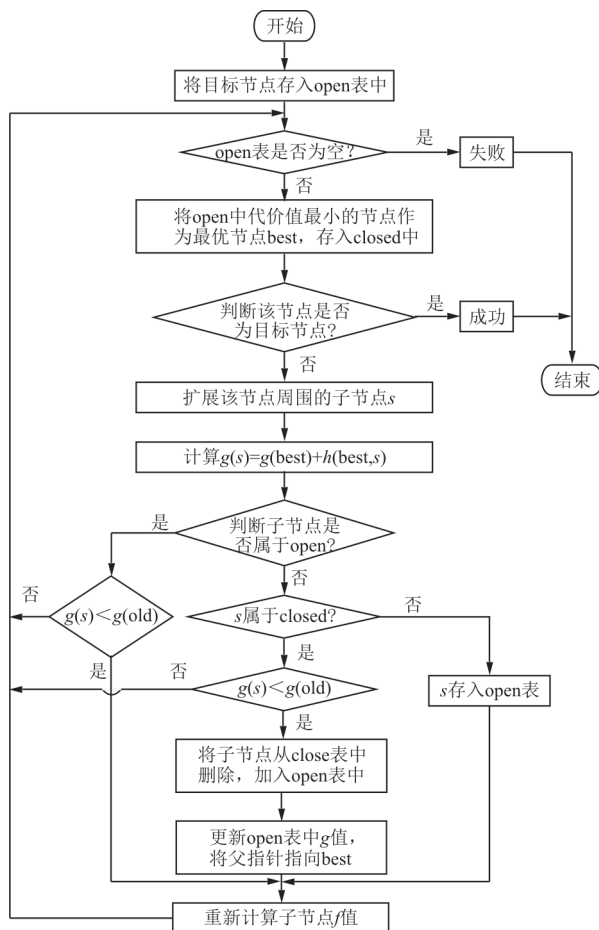


图 2 D* 算法流程图

Fig. 2 D* algorithm flow chart

C. Saranya 等^[12]针对复杂环境的路径规划问题,提出了一种改进的 D* 算法,将地形坡度引入成本函数计算,通过仿真与实验证明了该算法的有效性,其可用于保障无人机在复杂环境中的飞行安全;I. Maurović 等^[13]提出了一种基于带负边权的 D* 最短路径图搜索算法,用于在考虑定位不确定性的情况下寻找最短路径,真实场景中的实验验证了该算法的有效性;赵娟^[14]提出了一种启发点引导 D* 算法扩展的无人机航迹规划策略,并通过仿真实验证明了启发点 D* 算法在有方向约束的无人机航迹规划问题中的有效性;王帅军等^[15]对传统 D* 算法子节点的选取方式和启发函数进行了改进,缩短了无人机路径规划的时间,提高了路径规划的质量;张飞等^[16]提出了一种基于改进 D* 算法的多旋翼无人机室内路径规划算法,通过引入碰撞因子对传统的 D* 算法进行改进,更好地保障了无人机的飞行安全;吴剑等^[17]提出了一种结合 D* 算法和卡尔曼滤波算法的动态航路规划算法,实验结果表明该算法可有效缩短航程,提高了路径规划的质量。

RRT 算法是一种在多维空间中有效率的规划方法。原始的 RRT 算法是通过一个初始点作为根节点,通过随机采样,增加叶子节点的方式,生成一个随机扩展树,当随机树中的叶子节点包含了目标点或进入了目标区域,便可以在随机树中找到一条由树节点组成的从初始点到目标点的路径。RRT 算法原理如图 3 所示。

袁一帆等^[18]针对无人机路径规划问题应用 RRT 算法,通过引入启发式函数、贪婪算法和 B 样条曲线方法规划无人机飞行路径,仿真结果表明优化后的 RRT 算法在搜索时间和路径平滑性上有更好的效率;卢成阳等^[19]针对复杂城市环境下的无人机三维路径规划问题,在 T-RRT 算法中结合 A* 算法,以危险度、路径长度等多维度计算路径成本,进行路径搜索,仿真结果表明所提算法生成的路径在城市三维环境下长度、安全性和平滑性效率更高;潘楠等^[20]在无人机城市巡防路径规划问题中运用改进的 RRT 算法初始化航迹,建立考虑任务执行率、航迹代价和撞击代价的多无人机任务规划模型,仿真结果表明所提算法与其他算法相比,在鲁棒性、搜索效率方面均有所提高,在无人机路径规划问题的仿真中表现优异;陈锦涛等^[21]针对室内复杂火场环境下的无人机路径规划

问题,将两次动态规划方法与RRT算法相结合,提高了路径规划效率和可靠性,并通过仿真验证算法的有效性;陈侠等^[22]针对无人机路径规划算法效率低的问题,将人工势场法、遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)和RRT算法相融合,提出一种改进的RRT算法(ARF-RRT),该算法通过人工势场法提高了RRT算法搜索树的搜索效率,并通过GA算法优化RRT算法生成路径,获得较优路径,通过仿真验证所提算法在路径长度和搜索时间上的改进效率。

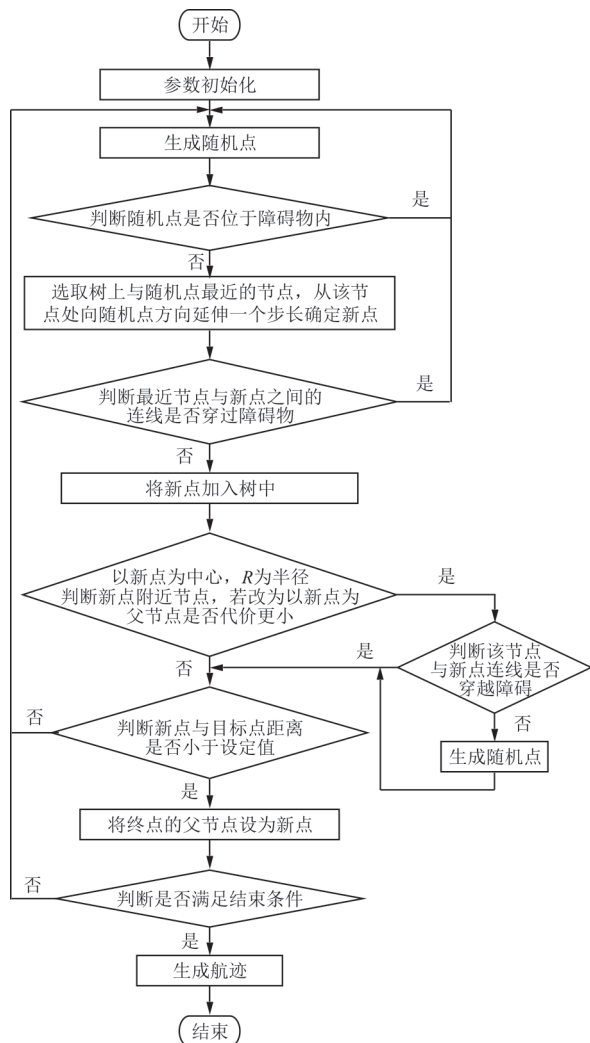


图 3 RRT算法流程图

Fig. 3 RRT algorithm flow chart

1.2 线性规划算法

线性规划算法是一种研究线性约束条件下线性目标函数极值的数学理论和方法,广泛应用于军事、工程技术、计算机等领域。与其他算法相比,线性规划算法具有计算简单、高效,可实时进

行解算等特点,在无人机路径规划中也得到了广泛应用。

Yang J等^[23]提出了一种基于混合整数线性规划的无人机冲突解决算法,该算法通过将非线性安全分离约束映射到正弦值空间,为成对冲突的无人机建立安全分离的线性约束,而后构建混合整数线性规划(MILP)模型,目标是将总体成本降至最低,并通过仿真实验验证了该算法的有效性;姬翔^[24]在现有研究的基础上,除了以路径距离特征作为决策变量外,还将路径转角特征也作为决策变量,提出了一种转角与距离融合的旋翼无人机能耗优化路径规划算法,该算法将转角与距离融合的能耗优化路径规划问题建模为0~1整数线性规划问题,并结合贪心策略设计算法,从而实现了更节能的路径规划,多个场景下的仿真实验证明了该算法的有效性;杨健等^[25]提出了一种基于空间映射的异构无人机在线冲突消解算法,该算法针对异构无人机集中式冲突消解问题构建混合整数线性规划模型,目标是 minimized 无人机与期望飞行方向的偏移量以减少无人机多余的机动消耗,仿真实验证明了该模型的有效性;胡春鹤等^[26]面向多架无人机的空中加油问题,提出了一种基于混合整数线性规划的无人机空中加油三维最优会合航路规划算法,该算法根据加、受油机在各加油区域的最短会合时间,将最优分配问题建模为整数线性规划问题,并求解得到加油机与各无人机的最优会合点,实验结果表明该算法可以保证空中加油会合任务在最短时间内完成;叶青松等^[27]针对多无人机编队协同目标分配的问题,提出了一种两阶段目标分配方法,将该问题分解成编队级分配和编队内分配2个阶段:首先通过K-Medoids聚类算法实现编队级目标分配,将目标簇分配到无人机编队,然后通过混合整数线性规划模型和蚁群算法实现编队内目标分配,将目标分配到无人机。通过两阶段求解,降低了多无人机编队协同目标分配问题的求解难度,仿真结果表明该方法可行且有效,能够提高求解效率,大幅度缩短求解时间;颜骥等^[28]提出了一种基于混合整数线性规划的多无人机编队对敌防空火力压制协同任务分配模型,以决策变量表征无人机和对应任务之间的指派关系,引入连续时间决策变量来表示任务的执行时间,并通过对决策变量之间的线性等式和不等式的数学描述,建立无人机之间

和无人机执行任务之间合理的协同约束关系,仿真实验表明了该模型的合理性。

1.3 智能优化算法

智能优化算法是通过模拟或揭示某些自然界的现象、过程或生物群体的智能行为而发展得到的,它们普遍具有简单、通用、便于并行处理等优点。在无人机路径规划方面,遗传算法、粒子群算法、蚁群算法和混合算法等应用较多。

1.3.1 遗传算法

遗传算法是一种经典的启发式智能优化算法,其核心思想来源于达尔文生物进化论优胜劣汰的理念,变异和交叉是GA的核心步骤。GA迭代过程如图4所示。

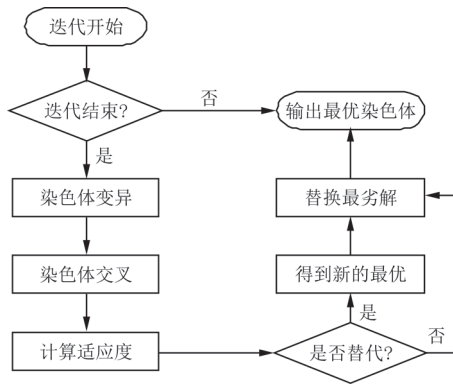


图4 GA迭代过程

Fig. 4 Iterative process of GA

C. E. Lin等^[29]为解决多目标无人机路径规划问题,保证路径规划的安全性和可行性,建立了无人机系统距离矩阵,运用GA进行路径规划,动态规划算法以调整无人机集群的飞行排序;Hao Z等^[30]在无人机路径规划过程中,考虑无人机障碍约束和性能约束,以规划轨迹长度最短为目标函数,提出一种基于改进GA和A*算法的系统定位精度的无人机路径规划方法,达到了精准定位修正轨迹次数最少的目标;袁梦顺等^[31]针对多无人机协同航迹规划问题,将NSGA-III算法、人工势场法和蚁群算法进行融合设计,对航迹代价、空间协同约束和时间协同约束建模并作为代价函数进行多目标函数求解,在二维和三维的栅格环境中进行仿真验证,得到了安全和代价较小的多无人机航迹;A. A. Bandala等^[32]提出了一种基于遗传算法的四旋翼无人机航迹规划算法,该算法使用遗传算法来确定四旋翼在给定一个目标点的情况

下必须行驶的最短路径,以节省能源和时间,避免撞到障碍物,仿真证明了该算法的有效性;Y. V. Pehlivanoglu^[33]提出了一种新的基于Voronoi图的振动遗传算法用于无人机的路径规划,该算法在初始化种群阶段使用了聚类方法和Voronoi图的概念,大幅缩短了算法的计算时间,提高了算法的运行效率;徐正军等^[34]对传统的遗传算法进行改进,引入组合变异算子,提出了基于自适应遗传算法的无人机航迹规划方法并进行了仿真验证。

1.3.2 粒子群算法

粒子群(Particle Swarm Optimization,简称PSO)算法于1995年由Eberhart提出,其核心思想在于个体之间的协作和信息共享,通过群体信息共享来决定下一步的动作搜索最优值。PSO算法流程如图5所示。

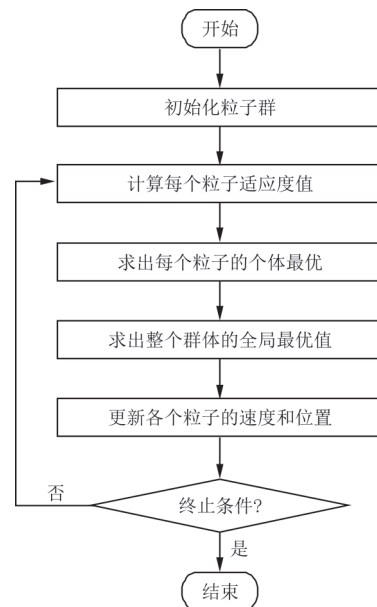


图5 标准PSO算法流程图

Fig. 5 Standard PSO algorithm flow chart

M. D. Phung等^[35]将路径规划转化为优化问题,建立成本函数,将无人机安全运行条件设为约束,运用球向量的粒子群优化(PSO)算法,表征无人机速度、转向角和爬升/俯冲角之间的对应关系,解决了无人机在受到多重威胁的复杂环境中的路径规划问题;J. J. Shin等^[36]针对雷达制导地对空导弹(SAM)和未知威胁在内的动态路径规划问题,将地形掩蔽、非各向同性雷达截面(RCS)和无人机的动态约束作为威胁成本,提出一种改进PSO算法来寻找最优路径,并对生成的路径进行3D路径平滑处理;S. S. Shao等^[37]针对三维环境中

无人机路径规划问题,运用改进 PSO 算法进行路径规划,改进 PSO 算法基于混沌 Logistic 映射来改进粒子初步分布,将常用的常加速系数和最大速度设计为自适应线性变加速系数以提高解的精确性,此外,提出了一种粒子变异替换策略,提高了最优解的求解效率,对地形和威胁约束下的无人机集群进行了蒙特卡洛模拟,验证所提方法的有效性;朱红果等^[38]针对多 UAV 协同应用场景,借鉴粒子群(PSO)算法的思想,采用新的编码方式和优化策略,提出了一种综合考虑任务分配和航迹规划因素的航迹规划算法,并进行了仿真实验验证;Yong T 等^[39]提出了一种基于改进 PSO 算法的已知环境路径规划算法,该算法将连接起始节点和目标节点的路径编码为粒子,根据障碍物的位置研究粒子的特定“活动区域”,在该区域内生成初始粒子群,粒子在“活动区域”中飞行以搜索最佳路径,通过仿真实验验证了该算法的有效性;韩庆田^[40]基于改进的 PSO 算法建立了多 UAV 协同任务分配模型,将任务类型匹配信息作为启发信息,同时提出了分组任务调整、飞行时间调整、任务交叉消解、时序先后调整等冲突消解处理策略并进行了仿真验证。

1.3.3 蚁群算法

蚁群(ACO)算法是受到自然界中蚂蚁觅食行为启发而提出的仿生群智能优化算法,通过信息素浓度来进行状态转移,达到优化问题寻优的目标。ACO 算法流程如图 6 所示。

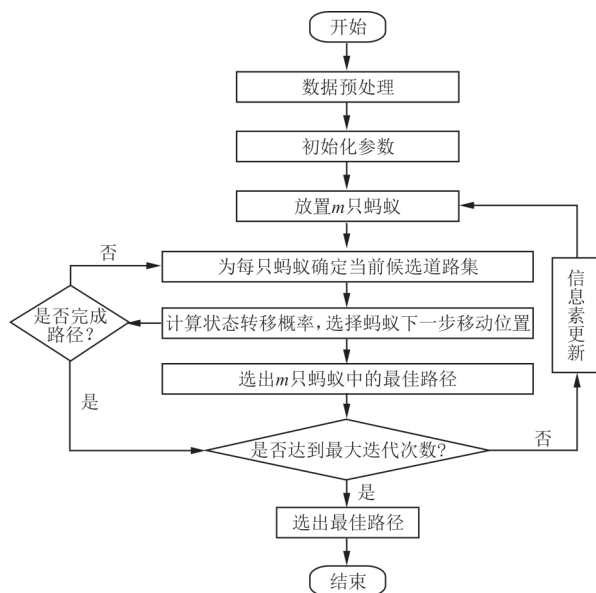


图 6 ACO 算法流程图

Fig. 6 ACO algorithm flow chart

S. Konatowski^[41]考虑危险性和距离因素为每一条路径设置优先级,运用 ACO 算法综合求解多无人机的路径规划问题,该算法输出的是一组可行解,通过适应度函数来评估解的优劣性;张耀中等^[42]针对无人机在飞行过程中遇到的火力拦截、地形障碍和恶劣天气等因素,构建环境威胁概率密度分布图,考虑无人机性能约束和时空协同约束,以路径损毁概率最小、任务航程最短构建综合代价目标函数,采用协同多种群 ACO 进化策略求解模型,并通过仿真计算表明算法的实用性;赵丹等^[43]结合蚁群算法的分布机制、信息反馈机制和粒子群算法收敛速度快、搜索能力强的特点,为无人机在三维山峰群等威胁环境中的路径规划提出一种 ACO-PSO 融合算法,缩短了搜索时间,提高了搜索效率,保障了规划航线的完整性和最优性;王振华等^[44]提出了一种基于改进多目标蚁群算法的无人机路径规划算法,仿真实验结果表明,该算法有效提高了路径搜索的效率和质量;Duan H 等^[45]针对无人作战飞机的三维路径规划问题,提出了一种基于混合启发式蚁群算法和差分进化算法的无人战斗机三维路径规划算法,利用进化算法对改进蚁群优化模型的信息素路径进行优化,无人机便可以通过连接三维网格中选定的节点来找到安全路径,同时避免威胁区域,并消耗最少的燃料,该方法在保持基本蚁群算法鲁棒性的同时,加快了算法的全局收敛速度;辛建霖等^[46]针对传统无人机航迹规划方法存在的求解效率不高、实时性较差、容易陷入局部最优等问题,提出一种基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划算法,引入启发式信息,采用 Logistic 混沌映射初始化信息素,增加解的多样性的同时提高了算法收敛速度,算法中、后期采用多航迹选择策略和模拟退火机制,提高全局搜索能力,避免因收敛速度过快而陷入局部最优解,仿真实验验证了该算法的有效性;张耀中等^[47]还针对无人机飞行过程中威胁源的差异性,结合 UAV 自身飞行的约束,提出了一种基于改进 ACO 算法的多 UAV 协同路径规划算法。

1.4 强化学习算法

强化学习(Reinforcement Learning, 简称 RL)作为机器学习的一个重要分支,现阶段被广泛应用于交通控制^[48]和机器人移动^[49]的研究中,如自动/辅助驾驶^[50]、地面交通路径寻优^[51]、无人机避障与路径规划^[52]等。

强化学习是一种不需要先验知识,可根据环境直接进行试错迭代获取反馈信息来优化决策的人工智能算法,其核心——马尔可夫序列过程与交通网络的需求高度吻合,而 UAV 的路径规划也是一种网络寻优过程,因此 RL 在 UAV 路径规划中的研究愈加广泛。近年来,研究者们多采用强化学习中的 DQN(Deep Q-Learning)算法进行路径规划^[53-54]。DQN 算法是一种将 Q-Learning 算法通过神经网络来近似值函数的一种方法,算法流程如图 7 所示。

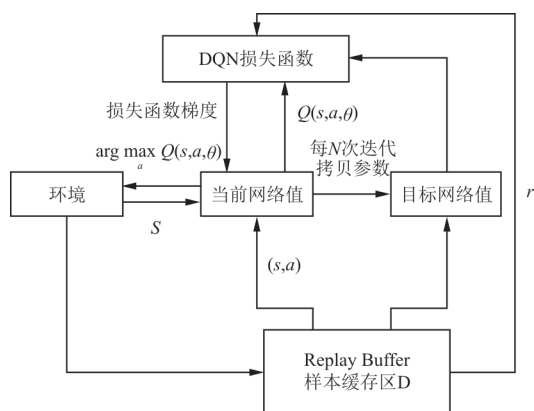


图 7 DQN 算法流程图

Fig. 7 DQN algorithm flow chart

在 DQN 算法迭代过程中,首先将环境状态 s_t 传入当前值网络,以 ϵ 概率随机选择一个动作 a_t ,执行动作得到新的状态 s_{t+1} 和奖励值 r_t ,将 (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) 存入样本缓存区 D 中,然后从 D 中随机选择采集样本进行训练,最后根据 TD 损失函数进行目标网络参数更新,更新参数的方法为随机梯度下降,每隔 N 次迭代拷贝参数到目标值网络进行参数更新训练。

其中,TD 误差更新公式为

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (1)$$

损失函数为

$$L(\theta) = E \left[T_Q - Q(s, a, \theta) \right]^2 \quad (2)$$

T_Q 为优化目标,其表示方法为

$$T_Q = r + \gamma \max_a (s_{t+1}, a, \theta') \quad (3)$$

近年来,基于 RL 算法的无人机路径规划的研究很多,A. A. Maw 等^[55]将 A* 算法与 RL 结合,利用 A* 算法的全局搜索能力和 RL 面对局部障碍物的决策避让能力进行路径规划,在 AirSim 平台进行了模拟和实验,证明所提算法的有效性,该算法适用于三维环境下的路径规划,但未考虑算法复杂度高、收敛难度大的问题;周彬等^[56]针对无人机自主导航的问题,提出了一种基于导向强化 Q 学习的路径规划方法,该方法在 Q-Learning 算法的基础上,根据接收到的信号强度设计回报值函数,实现了在栅格化区域模型中自主导航和快速路径规划,但是该方法适用于二维平面,对三维环境带来的多维计算量大的问题需要考虑,此外, Q-Learning 算法易过拟合,易陷于局部最优的问题也有待验证;董加鑫^[57]基于 DQN 算法设计了一套无人机区域覆盖路径规划算法,其优点在于不仅实现了静态环境下的路径规划,还考虑了动态环境下移动障碍物避障的问题,但是算法的假设环境是一个二维平面,未考虑三维环境下无人机动作设计、模拟环境的实现以及算法效率的提升;何金等^[54]为解决无人机无模型路径规划的问题,提出了一种环境信息未知情况下基于势函数(PF)优化的 DQN 路径规划方法,将 360° 等分成若干个角度作为航向角建立无人机的动作空间,设计目标和障碍物对无人机的势函数奖赏,刻画了不同动作对无人机的影响,并进行仿真实验验证;牟治宇等^[4]提出了一种新的 option-DQN 算法,实现了高效的无人机数据采集和路径规划,仿真实验表明该算法的计算速度快、效率高。

2 算法对比

尽管无人机路径规划的算法多种多样,但是每种算法都有各自的优点、缺点以及其所适用的场景。上文所介绍的各个算法之间的对比如表 1 所示。

表1 现有无人机路径规划算法对比
Table 1 Comparison of existing UAV path planning algorithms

算法类型	优点	缺点
图搜索算法	A* 不会形成局部最优解,灵活多变,可优化性强	增加了计算量,有时会造成过渡转折的情形
	D* 提高了二次路径规划的效率	复杂环境下,算法的搜索空间将大幅增加,降低了路径规划的效率并增加了算法的时间成本
	RRT 快速、随机、能够应付多种复杂场景	不能得到最优路径,对于狭窄通道,往往难以突破,搜索效率较低
线性规划算法	MILP 简单、高效、计算速度快、易于工程实现	有限的计算时间内无法处理决策变量较多的问题
智能优化算法	GA 良好的全局搜索能力,过程简单,易于扩展	搜索速度较慢,易陷入局部最优
	PSO 通用性强,原理简单,收敛速度快	局部搜索能力较差,搜索精度不够,不能保证搜索到全局最优解
	ACO 具有很强的鲁棒性和并行搜索能力,易于扩展	参数设置依赖于经验,算法的计算量大,时间成本高
人工智能算法	DQN 通用性强,可产生大量样本供监督学习	只能处理只需短时记忆问题,不一定收敛,需要精良调参

3 未来研究展望

目前面向行业应用的无人机的飞行高度处于400 m以下的低空环境中,低空复杂的环境和无人机应用对路径规划算法有了新的要求。结合无人机发展现状和趋势,对低空无人机路径规划算法提出如下展望。

首先,目前的无人机路径规划算法环境设置单一,需要考虑不同场景下的算法实用性和障碍物约束建模。民用无人机的应用高度通常集中于0~400 m之间,但是,在此区间内无人机遇到的障碍物通常是不尽相同的,因此,无人机路径规划算法需要进一步考虑不同作业场景(高度、风速、温度、湿度等)以及对0~400 m之间可能的障碍物进行约束建模,从而保障无人机能够针对特定的飞行环境,做出相应的决策以适应不同的应用情况。

其次,研究适用性较强的融合路径规划算法成为未来无人机路径规划算法的重要趋势。针对无人机路径规划问题,人们已经运用了多种路径规划算法规划路径,但是各算法因为本身的算法性质不同,存在一定的局限性,因此可采用组合不同的算法来进行路径规划。如其他算法和强化学习算法的结合,能有效提高算法的实时决策能力,为实现无人机动态路径规划提供了很好的方向。以桥梁无人机巡检为例,首先应考虑无人机续航、桥梁特点、桥梁局部空间尺寸、传感器类型/限制/特点、巡检任务类型、气象条件、地理环境等因素,采用启发式优化方法计算最优巡检路线。此外,由于导航信号丢失、风切变、控制信号遮挡延时等不确定因素,无人机的实际飞行路线易偏离预设航线,特别是在桥底、背面或者复杂桥梁结

构空间(钢桁架桥)等场景飞行。因此研究基于深度学习的复杂环境自主避撞方法,学习历史飞行数据,结合视觉组合导航技术,感知周围环境,实现自主避撞。将启发式算法和深度学习算法结合,实现路线寻优和自主避障,能有效解决桥梁无人机巡检的路径规划问题。

最后,无人机集群化、高密度、多编队路径规划算法将成为未来无人机路径规划算法重点研究方向。目前的无人机路径规划算法大部分是对单无人机进行路径规划,而无人机的发展正朝着集群化、智能化方向不断深入,如现在各大科研院所研究的多任务无人机管理系统等,未来的无人机应用将会体现出大规模、智能化以及多编队协同的特点。因此,未来研究无人机集群的全局路径规划方法将会成为促进无人机行业发展的重要支撑。

4 结束语

无人机正以不同的方式与各行各业紧密结合,低空应用场景越来越多,路径规划是无人机发展的基础,算法设计应结合低空不同的应用场景,以解决问题为导向,与行业结合,为无人机行业发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘君兰, 张文博, 姬红兵, 等. 无人机集群路径规划算法研究综述[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(1): 9-12.
LIU Junlan, ZHANG Wenbo, JI Hongbing, et al. A review of UAV cluster path planning algorithm[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(1): 9-12. (in Chinese)
- [2] RUZ J J, AREVALO O, CRUZ J M D L, et al. Using MILP for UAVs trajectory optimization under radar detection risk[C]// IEEE Conference on Emerging Technologies

- &. Factory Automation. Prague, Czech Republic: IEEE, 2006: 1-11.
- [3] 袁麟博, 章卫国, 李广文. 一种基于遗传算法—模式搜索法的无人机路径规划[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3): 279-282.
YUAN Linbo, ZHANG Weiguo, LI Guangwen. An unmanned aircraft path planning method based on genetic algorithms and one mode search [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 279-282. (in Chinese)
- [4] 牟治宇, 张煜, 范典, 等. 基于深度强化学习的无人机数据采集和路径规划研究[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 42-51.
MOU Zhiyu, ZHANG Yu, FAN Dian, et al. Research on UAV data acquisition and route planning based on deep enhanced learning [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 42-51. (in Chinese)
- [5] FERGUSON D, STENTZ A. Field D*: an interpolation-based path planner and replanner [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [6] 田疆, 李二超. 用于无人机三维航迹规划改进连接型快速扩展随机树算法[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 514-522.
TIAN Jiang, LI Erchao. An improved RRT-connect algorithm used for UAV 3D trajectory planning [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 514-522. (in Chinese)
- [7] 占伟伟, 王伟, 陈能成, 等. 一种利用改进 A* 算法的无人机航迹规划[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 315-320.
ZHAN Weiwei, WANG Wei, CHEN Nengcheng, et al. An unmanned aircraft track planning using the improved A* algorithm [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(3): 315-320. (in Chinese)
- [8] WANG Hongwei, MA Yong, XIE Yong. Mobile robot optimal path planning based on smoothing A* algorithm [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(11): 1647-1650.
- [9] REN T, RUI Z, JIE X, et al. Three-dimensional path planning of UAV based on an improved A* algorithm [C]// 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Nanjing: IEEE, 2017: 140-145.
- [10] WU X L, XU L, ZHEN R, et al. Bi-directional adaptive A* algorithm toward optimal path planning for large-scale UAV under multi-constraints [J]. IEEE Access, 2020, 8: 85431-85440.
- [11] 付道阔, 范平清, 改进 A* 算法的三维无人机路径规划[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(12): 11-15.
FU Daokuo, FAN Pingqing. Three-dimensional UAV path planning based on improved A* algorithm [J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(12): 11-15. (in Chinese)
- [12] SARANYA C, UNNIKRISHNAN M, ALI S A, et al. Terrain based D algorithm for path planning [J]. IFAC Papers on Line, 2016, 49(1): 178-182.
- [13] MAUROVIĆ I, SEDER M, LENAC K, et al. Path planning for active SLAM based on the D* algorithm with negative edge weights [J]. IEEE Transactions on System Man & Cybernetics Systems, 2018, 48(8): 1321-1331.
- [14] 赵娟. 启发点引导 D* 算法扩展的无人机航迹规划策略[J]. 机械设计与制造, 2020(2): 23-27.
ZHAO Juan. Heuristic point guided D* algorithm extended UAV path planning strategy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(2): 23-27. (in Chinese)
- [15] 王帅军, 胡立坤, 王一飞. 基于改进 D* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(4): 40-46.
WANG Shuaijun, HU Likun, WANG Yifei. Path planning for indoor mobile robot based on improved D* algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(4): 40-46. (in Chinese)
- [16] 张飞, 白伟, 乔耀华, 等. 基于改进 D* 算法的无人机室内路径规划[J]. 智能系统学报, 2019, 14(4): 662-669.
ZHANG Fei, BAI Wei, QIAO Yaohua, et al. Unmanned aerial vehicle indoor path planning based on improved D* algorithm [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(4): 662-669. (in Chinese)
- [17] 吴剑, 张东豪. 基于卡尔曼滤波和 D* 算法的动态目标航路规划[J]. 电光与控制, 2014, 21(8): 9-12.
WU Jian, ZHANG Donghao. Dynamic target route planning based on Kalman filter and D* algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(8): 9-12. (in Chinese)
- [18] 袁一帆, 吴德伟, 戴传金, 等. 基于 RRT 算法改进的无人机航迹规划研究[J]. 战术导弹技术, 2022(5): 126-133.
YUAN Yifan, WU Dewei, DAI Chuanjin, et al. Research on UAV's path planning based on improved RRT algorithm [J]. Tactical Missile Technology, 2022(5): 126-133. (in Chinese)
- [19] 卢成阳, 王文格. 复杂城市环境下无人机三维路径规划[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(5): 184-194.
LU Chengyang, WANG Wenge. 3D path planning of UAV in complex urban environment [J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(5): 184-194. (in Chinese)
- [20] 潘楠, 张森寒, 韩宇航, 等. 面向城市巡防的多无人机协同航迹规划[J]. 信息与控制, 2022, 51(4): 411-422.
PAN Nan, ZHANG Miaohan, HAN Yuhang, et al. Coordinated path planning of multi-UAV for urban patrol [J]. Information and Control, 2022, 51(4): 411-422. (in Chinese)
- [21] 陈锦涛, 李鸿一, 任鸿儒, 等. 基于 RRT 森林算法的高层消防无人机室内协同路径规划[J]. 自动化学报, 2021, 45: 1-12.
CHEN Jintao, LI Hongyi, REN Hongru, et al. Cooperative indoor path planning of multi-UAVs for high-rise fire fighting based on RRT-forest algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 45: 1-12. (in Chinese)
- [22] 陈侠, 刘奎武, 毛海亮. 基于 APF-RRT 算法的无人机航

- 迹规划[J]. 电光与控制, 2022, 29(5): 17-22.
CHEN Xia, LIU Kuiwu, MAO Hailiang. UAV path planning based on APF-RRT algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(5): 17-22. (in Chinese)
- [23] YANG J, XU X, YIN D, et al. A space mapping based 0-1 linear model for onboard conflict resolution of heterogeneous unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7455-7465.
- [24] 姬翔. 多特征融合的旋翼无人机能耗优化路径规划方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
JI Xiang. Research on energy consumption optimization path planning method of rotorcraft UAV based on multi-feature fusion [D]. Xi'an: Northwest University, 2021. (in Chinese)
- [25] 杨健, 钟紫凡, 杨少博. 基于空间映射的异构无人机在线冲突消解算法[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(3): 112-119.
YANG Jian, ZHONG Zifan, YANG Shaobo. Online conflict resolution algorithm for heterogeneous UAV based on spatial mapping [J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(3): 112-119. (in Chinese)
- [26] 胡春鹤, 陈宗基. 多无人机空中加油的最优会合航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1400-1406.
HU Chunhe, CHEN Zongji. Optimal rendezvous route planning for aerial refueling of multiple UAVs[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1400-1406. (in Chinese)
- [27] 叶青松, 胡笑旋, 马华伟. 多无人机编队协同目标分配的两阶段求解方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015(10): 1431-1436.
YE Qingsong, HU Xiaoxuan, MA Huawei. A two-stage method for cooperative target allocation in UAV teams[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015(10): 1431-1436. (in Chinese)
- [28] 颜骥, 李相民, 刘波, 等. 基于 MILP 的多无人机对敌防空火力压制[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(4): 73-78.
YAN Ji, LI Xiangmin, LIU Bo, et al. Multi UAV suppression of on enemy air defense based on MILP[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014, 29(4): 73-78. (in Chinese)
- [29] LIN C E, SYU Y M. GA/DP hybrid solution for UAV multi-target path planning[J]. Journal of Aeronautics Astro-nautics & Aviation, 2016, 48(3): 203-220.
- [30] HAO Z, XIONG H L, LIU Y, et al. Trajectory planning algorithm of UAV based on system positioning accuracy constraints[J]. Electronics, 2020, 9(2): 250.
- [31] 袁梦顺, 陈谋, 吴庆宪. 基于 NSGA-III 算法的多无人机协同航迹规划[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(3): 295-302.
YUAN Mengshun, CHEN Mou, WU Qingxian. Collaborative flight path planning of multiple UAVs based on NSGA-III algorithm [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2021, 39(3): 295-302. (in Chinese)
- [32] BANDALA A A, GALVEZ R L, DADIOS E P. Path planning for quadrotor UAV using genetic algorithm [C]// 2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). Palawan, Philippines: IEEE, 2015: 12-19.
- [33] PEHLIVANOGLU Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 47-55.
- [34] 徐正军, 唐硕. 基于自适应遗传算法的无人机航迹规划方法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(19): 5-12.
XU Zhengjun, TANG Shuo. Research on UAV trajectory planning method based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19): 5-12. (in Chinese)
- [35] PHUNG M D, HA Q P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization [J]. Applied Soft Computing, 2021(2): 107376.
- [36] SHIN J J, BANG H. UAV path planning under dynamic threats using an improved PSO algorithm[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020(10): 1-17.
- [37] SHAO S S, YU P A, CH B, et al. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization[J]. ISA Transactions, 2020, 97: 415-430.
- [38] 朱红果, 郑昌文. 一种基于 PSO 的多 UAV 协同航迹规划方法[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(10): 142-144, 149.
ZHU Hongguo, ZHENG Changwen. A collaborative path planning method for multi-UAV based on PSO[J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(10): 142-144, 149. (in Chinese)
- [39] YONG T, LI Q, WANG L, et al. An improved PSO for path planning of mobile robots and its parameters discussion [C]// 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Dalian, China: IEEE, 2010: 79-88.
- [40] 韩庆田. 基于改进 PSO 的多 UAV 协同任务分配研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 74-78.
HAN Qingtian. Research on multi-UAV cooperative task assignment based on improved PSO [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 74-78. (in Chinese)
- [41] KONATOWSKI S. Application of the ACO algorithm for UAV path planning[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, 1(7): 117-121.
- [42] 张耀中, 李寄玮, 胡波, 等. 基于改进 ACO 算法的多 UAV 协同航路规划[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5): 139-145.
ZHANG Yaozhong, LI Jiwei, HU Bo, et al. Multi-UAV cooperative route planning based on improved ACO algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(5):

- 139-145. (in Chinese)
- [43] 赵丹, 戚龙. 基于蚁群-粒子群融合算法的无人机三维航迹规划研究[J]. 吉林化工学院学报, 2017, 34(3): 93-98. ZHAO Dan, QI Long. Three-dimensional route planning of UAV based on ACO-PSO algorithm[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2017, 34(3): 93-98. (in Chinese)
- [44] 王振华, 章卫国, 李广文. 基于改进多目标蚁群算法的无人机路径规划[J]. 计算机应用研究, 2009(6): 105-108. WANG Zhenhua, ZHANG Weiguo, LI Guangwen. Unmanned aerial vehicle path planning based on improved multi-objective ant colony algorithm [J]. Application Research of Computers, 2009(6): 105-108. (in Chinese)
- [45] DUAN H, YU Y, ZHANG X, et al. Three-dimension path planning for UCAV using hybrid meta-heuristic ACO-DE algorithm[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2010, 18(8): 1104-1115.
- [46] 辛建霖, 左家亮, 岳龙飞, 等. 基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 60-67. XIN Jianlin, ZUO Jialiang, YUE Longfei, et al. Based on the improved heuristic ant colony algorithm of UAV autonomous path planning [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 60-67. (in Chinese)
- [47] 张耀中, 李寄玮, 胡波, 等. 基于改进ACO算法的多UAV协同航路规划[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5): 44-50. ZHANG Yaozhong, LI Jiwei, Hu Bo, et al. Collaborative route planning for multi-UAV based on improved ACO Algorithm [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(5): 44-50. (in Chinese)
- [48] BAZZAN A L C, KLÜGL F. Introduction to intelligent systems in traffic and transportation [J]. Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning, 2013, 7(3): 1-137.
- [49] 徐东伟, 周磊, 王达, 等. 基于深度强化学习的城市交通信号控制综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(1): 15-30. XU Dongwei, ZHOU Lei, WANG Da, et al. Reinforcement learning based on the depth of the urban traffic signal control review [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(1): 15-30. (in Chinese)
- [50] 王军, 杨云霄, 李莉. 基于改进深度强化学习的移动机器人路径规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(22): 19-24. WANG Jun, YANG Yunxiao, LI Li. Reinforcement learning based on improved depth of mobile robot path planning [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(22): 19-24. (in Chinese)
- [51] 李懿, 韩春华, 钱熙, 等. 基于深度强化学习的公路初始路径寻优方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 98-103. LI Yi, HAN Chunhua, QIAN Xi, et al. Highway initial path optimization method based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 98-103. (in Chinese)
- [52] LEE J W. iADA*-RL: Anytime graph-based path planning with deep reinforcement learning for an autonomous UAV [J]. Applied Sciences, 2021, 11: 1-7.
- [53] 孔维仁, 周德云, 赵艺阳, 等. 基于深度强化学习与自学习的多无人机近距空战机动策略生成算法[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(2): 11-19. KONG Weiren, ZHOU Deyun, ZHAO Yiyang, et al. Maneuvering strategy generation algorithm based on deep reinforcement learning and self-learning for multiple unmanned aerial vehicles in close air combat [J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(2): 11-19. (in Chinese)
- [54] 何金, 丁勇, 杨勇, 等. 未知环境下基于PF-DQN的无人机路径规划[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 116-123. HE Jin, DING Yong, YANG Yong, et al. Unmanned aerial vehicle path planning based on PF-DQN in unknown environment [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(9): 116-123. (in Chinese)
- [55] MAW A A, TYAN M, NGUYEN T A, et al. iADA*-RL: anytime graph-based path planning with deep reinforcement learning for an autonomous UAV [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3948.
- [56] 周彬, 郭艳, 李宁, 等. 基于导向强化Q学习的无人机路径规划[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 498-505. ZHOU Bin, GUO Yan, LI Ning, et al. Path planning of UAV using guided enhancement Q-learning algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 498-505. (in Chinese)
- [57] 董加鑫. 基于深度强化学习的无人机区域覆盖路径规划研究[J]. 工业控制计算机, 2021(5): 80-82. DONG Jiaxin. Area coverage path planning of UAV based on deep reinforcement learning [J]. Industrial Control Computer, 2021(5): 80-82. (in Chinese)

作者简介:

刘庆健(1985—),男,博士,讲师。主要研究方向:通用航空法规体系重构,通用航空企业风险风控。

疏利生(1994—),男,硕士,初级工程师。主要研究方向:机场场面运行,无人机飞行控制。

刘刚(1975—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:通用航空发展,机场运行管理。

李翱(1987—),男,硕士,中级工程师。主要研究方向:通航运行管理,无人机飞行控制。

(编辑:马文静)