



多约束下无人机的任务规划研究综述

齐小刚, 李博, 范英盛, 刘立芳

引用本文:

齐小刚, 李博, 范英盛, 等. 多约束下无人机的任务规划研究综述[J]. *智能系统学报*, 2020, 15(2): 204–217.

QI Xiaogang, LI Bo, FAN Yingsheng, et al. A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(2): 204–217.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811018>

您可能感兴趣的其他文章

面向环境探测的多智能体自组织目标搜索算法

Self-organizing target search algorithm of multi-agent system for environment detection
智能系统学报. 2020, 15(2): 289–295 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201908023>

基于改进D*算法的无人机室内路径规划

UAV indoor path planning based on improved D* algorithm
智能系统学报. 2019, 14(4): 662–669 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201803031>

面向多机器人动态任务分配的事件驱动免疫网络算法

Event-driven immune network algorithm for multi-robot dynamic task allocation
智能系统学报. 2018, 13(6): 952–958 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201707022>

基于滚动时域的无人机动态航迹规划

Dynamic UAV trajectory planning based on receding horizon
智能系统学报. 2018, 13(4): 524–533 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201708031>

一种面向任务的对地观测卫星Agent团队构建方法

Agent team formation approach for task-oriented earth observation satellite
智能系统学报. 2017, 12(5): 653–660 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201706017>

基于蚁群算法的四旋翼航迹规划

Four-rotor route planning based on the ant colony algorithm
智能系统学报. 2016, 11(2): 216–225 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201509009>

 微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201811018

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20190409.0932.010.html>

多约束下无人机的任务规划研究综述

齐小刚^{1,3}, 李博¹, 范英盛¹, 刘立芳^{2,3}

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071; 3. 西安电子科技大学 宁波信息技术研究院, 浙江 宁波 315200)

摘要: 高度信息化的发展使得无人机作战优势凸显。准确的无人机任务规划技术是完成给定任务的重要保障。任务分配、路径规划是构成无人机任务规划技术的两个核心部分。基于该技术, 首先讨论了无人机任务规划的发展状况、分类标准、体系结构。其次, 分别详细介绍了影响任务分配、路径规划的重要指标, 如分类标准、约束指标、相应模型、代表算法、评价指标等, 然后, 分别分析对比求解任务分配的启发式算法、数学规划方法、随机智能优化算法的优缺点和求解路径规划的数学规划方法、人工势场法、基于图论学、智能优化算法的优缺点; 最后, 总结了无人机任务规划存在的开放性问题、未来发展方向和研究重点。

关键词: 无人机; 任务规划; 任务分配; 路径规划; 启发式算法; 智能优化算法; 平滑处理; 可飞性

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)02-0204-14

中文引用格式: 齐小刚, 李博, 范英盛, 等. 多约束下无人机的任务规划研究综述 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 204-217.
英文引用格式: QI Xiaogang, LI Bo, FAN Yingsheng, et al. A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(2): 204-217.

A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints

QI Xiaogang^{1,3}, LI Bo¹, FAN Yingsheng¹, LIU Lifang^{2,3}

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. Xidian-Ningbo Information Technology Institute, Ningbo 315200, China)

Abstract: Depending on the highly developed information technology, unmanned aerial vehicles (UAVs) have shown unprecedented advantages in combat. Accurate mission planning technique for UAVs provides an important guarantee for completing a given mission. Task assignment and path planning are the two core components of the mission planning technology for UAVs. Based on this technology, first, the development status, classification standards, and architecture of the mission planning for UAVs are discussed. Second, the important indicators, which affect task assignment and path planning are described in detail; they include classification criteria, constraint indicator, corresponding model, representative algorithm, and evaluation indicator. Then, the strength and weakness of the algorithms for solving tasks are compared, such as heuristic algorithm, mathematical programming method, and stochastic intelligent optimization algorithm. Similarly, for the path planning problem, the advantages and disadvantages of its algorithms, which include mathematical programming method, artificial potential field method, graphic-based method, and intelligent optimization algorithm, are also analyzed. Finally, open problems, the future work, and the research focus in UAVs mission planning are summarized.

Keywords: unmanned aerial vehicle; mission planning; task assignment; path planning; heuristic algorithm; intelligence optimization algorithm; smoothing; flyable

收稿日期: 2018-11-24. 网络出版日期: 2019-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61877067, 61572435); 教育部-中国移动联合基金项目 (MCM20170103); 西安市科技创新项目 (201805029YD7CG13-6); 宁波市自然科学基金项目 (2016A610035, 2017A610119).

通信作者: 李博. E-mail: libo202017@163.com.

近年来, 随着科学技术的不断发展, 信息技术的日新月异, 战争的智能化、信息化和一体化, 使得任务规划成为高技术战争的重要支撑。自 1917 年美国研制出第一架无人机以来, 无人机先后经历了靶机、侦察机和诱饵机几个发展阶段。无人

机^[1,2]作为一种可重复使用的飞行器,以其结构简单、续航时间长、造价低、隐蔽性强和安全性高等优势,广泛地应用在信息化战争中执行监视、侦察、攻击、战场评估、精确打击、充当诱饵等任务,极大地提高了部队的指挥控制和多兵种协同作战的能力。早在越南战争、中东战争、科索沃战争、海湾战争及阿富汗战争中,无人机以其出色的表现受到世界各国的广泛关注。

美国是无人机任务规划起步最早、发展最快、技术最先进的国家,在国外无人机技术发展的同时,中国也先后开启了无人机任务规划的研究。其中,北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学和哈尔滨工业大学等高校先后成立了无人机相关研究机构,并取得了可喜的研究成果。自2000年以来一些民用无人机投入研制,无人机任务规划系统也从最初的平台向多平台交互发展,目前有国防科技大学的多无人机协同任务资源分配与编队轨迹优化研究^[3],哈尔滨工业大学的多无人机系统的协同目标分配和航迹规划方法研究^[4]、西北工业大学的无人机航路规划方法研究^[5]和北京航空航天大学无人机路径规划技术研究^[6]等。此外,2015年我国在纪念抗战70周年阅兵式上,首次展示了作战无人机,这表明了我国无人机的发展已经走向高新技术的前沿。

随着全球格局的不断演变、军事科技的飞速发展,武器装备由机械化发展为信息化,战争方式较以前有了翻天覆地的变化。单无人机执行任务的局限性,使得多机协同作战成为当下研究的热点。多机协同执行高危任务,一方面可有效地降低毁伤概率,另一方面可提高战斗力。在多机协同执行任务中,当整个无人机系统达到最优时,并不能保证每架无人机均能达到最优。本文是在现有文献综述^[7-11]基础上,对无人机任务规划技术做详细论述。

任务规划(mission planning, MP)^[12-13]是指根据作战任务要求、战场环境、敌我双方的作战配置和任务载荷等约束条件,规划出作战过程、任务分配和行动路线等。任务规划是各类飞行器,尤其军用飞行器执行任务的重要保证。任务分配和路径规划是任务规划的两个核心组成部分。无人机任务分配问题^[14-16]是在满足环境要素和任务需求条件下,为多无人机分配一个或一组有序的任务,在最大程度完成任务的基础上,最优化无人机系统的整体效率和资源配比。无人机路径规划^[14-18]实质上是一个多约束、多目标的组合优化问题,根据任务要求、威胁分布、实时机动性能、

燃料限制等约束,规划出一条可飞、可行和安全的航迹。任务规划按时间划分有离线任务规划和实时在线任务规划;按规划的对象划分有单无人机任务规划和集群无人机系统任务规划。按实现方式划分有手动任务规划和自动任务规划^[12]。手动任务规划是指规划人员按照已有的信息和任务要求,辅助计算机来确定无人机的路径、目标要求和载荷配置。自动任务规划指完全由规划系统自动生成。从空间角度划分有全局任务规划和局部任务规划。全局任务规划多用于目标静止或障碍物已知的战场环境;局部任务规划多用于复杂动态环境下。

本文在全面收集、阅读现有文献基础上,论述了3种求解无人机任务分配的方法;4种求解路径规划的方法;分析对比了相应典型算法的基本原理和优缺点;综合考虑了可飞性、时限性、任务均衡、威胁规避和优先级等约束指标,同时,也对初步规划出的路径的平滑处理方法进行了探讨;最后,指出无人机任务规划研究存在的不足和亟待进一步解决的问题。

1 任务规划

无人机系统相较于单架无人机具有更好的容错性和鲁棒性,可以通过各无人机之间的信息交流,提高完成任务的效率;在多变的战场环境中,各无人机可以实时调整路线,规避障碍和威胁,提高作战效能,增强规划路径的可靠性。

无人机系统作为一种典型的多智能体系统,可以在无人员参与下自主控制和执行任务^[19],其飞行路径与有人机相比,无人机更加依赖预先规划的路径和实时路径规划,对所规划的路径要求更高,故不能简单照搬有人机的路径规划方案。任务规划的影响要素众多且相互耦合,约束条件的非线性、作战过程的复杂性、战场环境的不可测性和规划过程的马尔可夫性^[20]等,增加了无人机在作战过程中的难度。为了保证无人机能够在指定时间完成指定作战任务,必须综合考虑战场环境威胁和任务要求等因素,为无人机制定出在何时何地执行何种任务的可行路线。

无人机路径规划是物理可飞性、路径安全性、战术可行性、规划实时性、任务可靠性的统一^[14]。在规划的内容上,任务规划^[21]已经超越了对作战的定性指导和定量计算,主要表现在对作战环境、作战资源和具体作战样式的精确化、数字化描述。任务规划是作战的灵魂,在使用方式上,规范化指导作战人员的操作行为,并将规划结果

直接加载给无人机设备。

任务分配和路径规划是无人机任务规划的两个重要环节,这两个过程是紧密相连的。在规划过程中既要考虑燃料消耗、战场环境威胁、飞行时间和转弯半径、爬升率等显性约束,也要考虑威胁碰撞、任务均衡、攻击序列和目标价值等隐性约束。图 1 是无人机任务规划流程图。

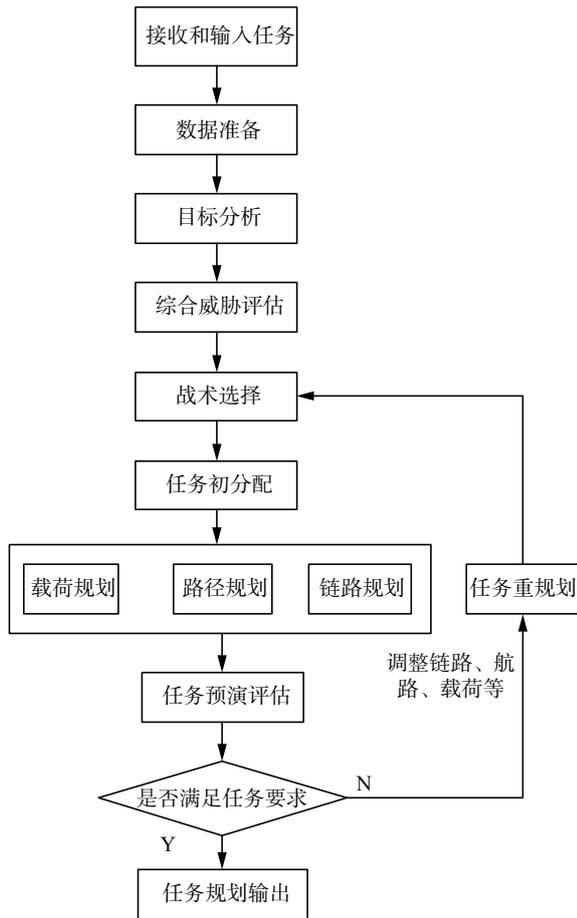


图 1 无人机任务规划流程

Fig. 1 The framework of UAV mission planning

无人机任务规划技术是通过接收和输入任务模块接收来自上级的作战任务信息;其次,通过信息采集和管理模块进行相关数据准备、分析,并结合实时情报或数据库中的气象、威胁和目标等,建立约束条件,给出战术及初步任务分配结果;然后,由环境建模,对载荷、航路和链路进行规划分配,通过对任务进行预演,评估所规划任务的安全性、效能及完成的程度,确定优劣,对不满足规划要求的进行重规划循环处理,直到所规划路径达到最佳,最后,按照标准格式输出规划的结果,并加载到无人机终端平台。

1.1 多无人机的任务分配问题

任务分配^[21-22]是运筹学中基本的组合优化问题。多无人机任务分配^[14]是指在给定无人机种

类和数量前提下,充分考虑战场环境、任务要求和载荷能力约束,研究如何将合适的任务在合适的时间分配给合适的无人机,从而为每架无人机分配一个或一组有序的任务,使得无人机整体作战效率达到最优。多无人机本质上是单无人机通过信息交互进行协同合作,其中协同^[21]是指在任务分配基础上确定各个平台要执行的任务和执行任务的先后顺序。典型的任务分配模型有基于旅行商(travelling salesman problem, TSP)模型,混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)模型、车辆路由问题(VRP)模型^[23]、指派问题模型及运输问题模型。其中,混合整数线性规划模型具有较强的可扩展性,在任务规划问题中得到广泛应用。指派问题模型实质上是 0-1 规划问题的一种特例。

1.1.1 任务分配约束指标及问题建模

无人机任务分配的约束指标主要有任务均衡、毁伤代价、飞行距离、消耗成本与规划目标收益等。其中,任务均衡其目的是实现无人机的负载均衡,从而降低无人机在执行任务时的损伤率。任务均衡可分为多个并行任务的均衡和各子问题的均衡。图 2 为无人机任务分配结构图。

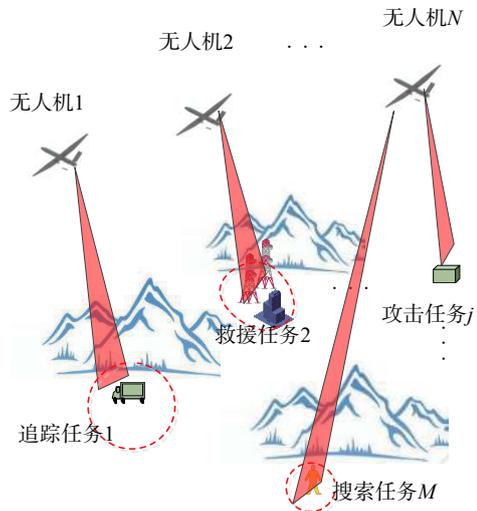


图 2 无人机任务分配图

Fig. 2 Task assignment of UAV

假设有 M 项任务、N 架无人机,每架无人机可执行多项任务、但每项任务只能分配给一架无人机。任务分配的目标是最优化全局目标函数^[24]。

$$\min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M R_{ij} \cdot s_{ij} \right)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N s_{ij} \leq 1, \forall j \in J, s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{无人机 } i \text{ 分配到任务 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^N s_{ij} \leq 1$ 保证每项任务最多被执行一次; R_{ij}

是第 i 架无人机, 执行第 j 项任务时的代价。

1.1.2 多无人机任务分配分类标准

任务分配从任务角度, 可以分为单任务分配和多任务分配。单任务分配指每架无人机最多被分配一项任务, 且能够顺利完成。多任务分配指每架无人机被分配的任务不止一项, 且被分配的任务具有一定的耦合性。从目标状态划分可以分为静态任务分配、动态任务分配^[22,25]和综合任务分配。静态任务分配指多无人机系统攻击或侦查多个位置坐标已知的静态目标。动态任务分配指无人机侦查或攻击状态位置随战场环境而变化的目标; 按照无人机执行任务的方式和任务之间的关联性分为相关性任务分配和独立性任务分配。

1.1.3 典型的多无人机任务分配模型和代表算法

单无人机的多任务时序分配可以简单地抽象为旅行商问题模型; 多无人机多任务的目标分配可简化为指派问题模型。旅行商问题 (travelling salesman problem, TSP)^[26-28] 模型原理是一个商人要遍历 n 个城市, 需要从多条路径中选择一条最短路径, 且这条路径将所有城市遍历一遍后, 能够回到起点。TSP 问题是一个 NP 问题, 目前没有较好的精确算法得到最优解, 多使用智能优化算法得到次优解。指派问题 (assignment problem, AP) 模型原理是将 n 个人和 n 项任务一一对应, 实现最佳完成任务的目的。指派问题可用匈牙利算法来求解。

求解任务分配问题的方法有启发式算法、数学规划方法和随机性智能优化算法。

1) 启发式算法。启发式算法是指在不能直接求解问题最优解下, 折中得到满足计算时间和分配目的的次优解。其代表性的算法有禁忌搜索 (tabu search, TS)、模拟退火 (simulated annealing, SA)、遗传算法 (genetic algorithm, GA) 与聚类算法。启发式算法简单易行、计算速度快、兼容性强。然而, 计算量较大、对初始参数要求较高、且不能保证得到最优解。

禁忌搜索算法^[29-32] 是 Glover 于 1977 年提出, 通过引入的存储结构和相应的禁忌准则以避免迂回搜索, 由藐视准则赦免一些被禁忌的优良状态, 以达到全局优化。禁忌搜索算法具有独特的记忆功能、爬山搜索能力强及收敛速度快等优势, 然而搜索邻域、禁忌表及初始解选取对其影响较大。

遗传算法^[30-36] 是通过模拟达尔文提出的生物进化论的自然选择和遗传学机理, 达到搜索最优解的目的。在遗传算法中, 通过种群个体的变异、交叉和遗传等操作模拟染色体的进化行为,

然后, 对新个体进行适应度估计, 挑选出最优个体进行下一轮循环。遗传算法具有较强的全局搜索能力、搜索效率高和鲁棒性强等优点。但是, 该算法实时性较差, 收敛速度较慢, 运算时间较长, 效率低, 易出现早熟现象, 进而使算法陷入局部最优。图 3 是遗传算法在无人机任务分配中的结构流程。

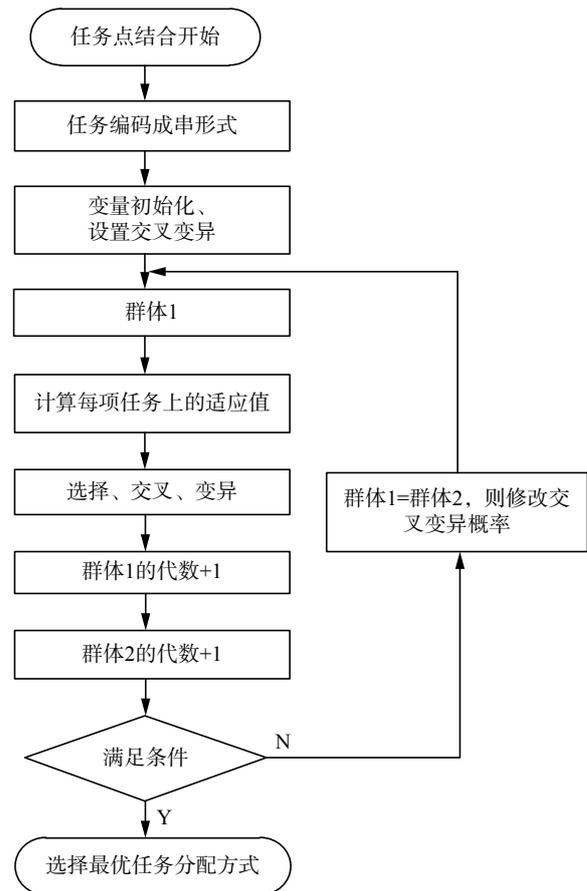


图 3 遗传算法在任务分配中的流程图

Fig. 3 The framework of GA in task assignment

聚类算法中常用的有 K-means 算法。K-means^[37] 算法其思想是在 n 个数据中, 任意选择 m 个作为初始聚类中心, 然后将每个任务作为簇, 进行聚类。该方法是以平均值作为聚类中心的分割聚类法, 多用于连续性空间。算法的时间复杂度、空间复杂度低。

2) 数学规划方法。数学规划方法主要有枚举法 (enumeration algorithm)、动态规划 (dynamic)。

动态规划是 20 世纪 50 年代初, 美国数学家 R. E. Bellman 等在研究多阶段决策优化问题时提出的, 其思想是将多阶段决策问题转化为单阶段优化问题, 以降低决策问题的难度。动态^[14] 是指在问题的多阶段决策中, 当决策顺序和步骤有所变化时, 将引起状态的变化和转移。动态规划的实现效率较高, 但是易出现维数灾难。该算法不

像其他算法那样有明确的步骤, 需要结合动态规划的思想设计相应的优化算法。

分支定界法^[38]是一种求解整数规划^[39]问题常用的广度优先算法, 它把全部可行解空间反复的分割成越来越小的子集, 即分支; 然后, 对每个子集内的解集, 计算下一个目标的上下界, 即定界; 每次分支之后, 凡是不满足界限要求的可行解目标值直接删除, 即剪枝; 最后, 将剩下的子集加入到可行集中, 如此循环重复, 直至找到问题的可行解; 分支定界算法多用于求解约束条件和变量数目较少的约束问题的一个解或在求解的一组解中找到满足某一约束条件的极值, 该算法灵活且便于求解, 但计算量较大, 且求解效率低。

3) 随机性智能优化算法。随机性智能优化算法^[40-41]是受自然现象或社会行为启发而发展的一种随机搜索方法, 最早于 20 世纪 70 年代被提出, 该算法在求解大规模优化问题时, 可获得较好的解。进化算法、群智能算法、人工免疫算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法是典型的智能优化算法。

群智能优化算法于 1989 年由 Gerardo B 提出, 是将代表候选解的多个个体组成一个群体, 通过部分或全体之间的信息交互, 达到寻优的目的。代表性的算法有粒子群优化算法、蚁群优化和鱼群算法。

进化算法 (evolutionary computation)^[42-43]是以达尔文的进化论为基础, 是自然界与遗传机制的自组织、自适应搜索过程, 主要由选择、重组和变异 3 个环节组成。代表性的算法有遗传算法、差分进化算法等。

粒子群优化算法^[44-46]是模拟鸟群寻找食物的一种方法, 1995 年粒子群算法由 Kennedy 和 Eberhart 首次提出, 其原理是通过更新惯性系数、社会系数和认知系数, 由适应度函数评估局部最优和全局最优等操作, 实现集群最优搜索。粒子群算法计算简单、鲁棒性好、搜索能力强且收敛速度快, 然而该算法易出现早熟收敛和停滞倾向。

蚁群算法^[19,47-48]是一种启发式算法, 依据蚂蚁在行动中留下的信息素, 其他蚂蚁通过协同感知信息素浓度, 倾向于向信息素浓度高的位置移动, 最终以一种有效的方式找到蚁穴到食物之间的最短路径。ACO 算法关键在于信息素更新、状态转移和启发式函数的构建。该算法搜索较优解的能力强, 扩充性好, 但是易陷入对某一区域的过度搜索, 且求解速度较慢。蚁群优化算法是 M.

Dorigo 等在蚁群算法基础上进一步发展的一种通用的优化技术^[48-50]。其流程图见图 4。

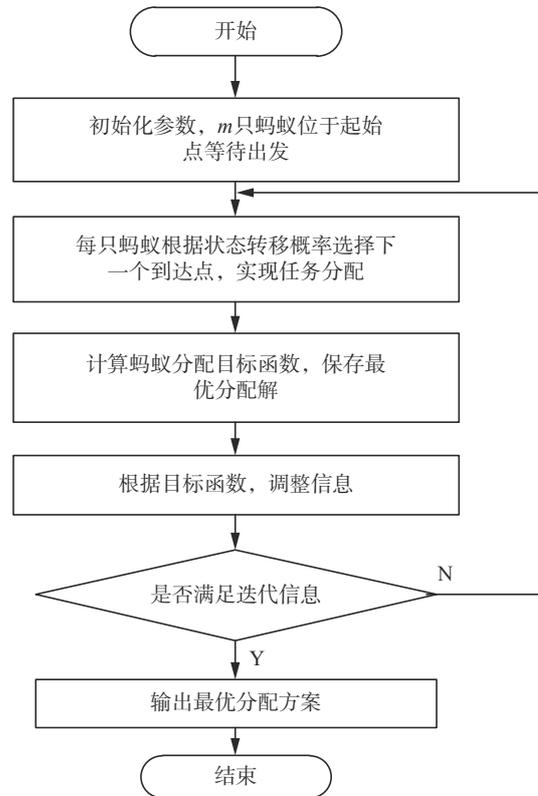


图 4 蚁群优化算法求解任务分配
Fig. 4 The framework of ACO in task allocation

由上可知随机智能算法易实现、搜索能力强、鲁棒性好、计算复杂度低且性能优越, 在大规模并行计算中优势凸显。典型的智能优化算法: 蚁群算法、遗传算法和模拟退火算法均具有较强的鲁棒性, 且扩展性强, 能与其他算法混合使用。遗传算法可适用于大规模、非线性问题, 通用性强。蚁群算法和模拟退火算法易求得全局最优解, 而粒子群优化算法求得的解多为局部最优。粒子群算法相较于其他智能算法的显著区别在于算法中需要调整的参数少。在一些典型的优化问题中, 粒子群算法比遗传算法获得更好的优化结果^[51]。

综上所述, 无人机任务分配的目的即是寻找最优匹配方案, 任务分配和路径规划是两个密不可分的环节, 在最优分配的基础上, 才能规划出可行、安全的飞行路径。本节在给出任务分配的相关概念基础上, 就任务分配的几个约束指标给出常用模型及分类标准, 由 2 种典型的任务分配模型引出启发式算法、数学规划方法和随机性智能优化算法 3 种求解任务分配的方法, 并给出相应算法的优缺点。表 1 是任务分配算法的对比结果。

表 1 任务分配算法对比
Table 1 Comparison of task allocation algorithms

任务分配	求解算法	容错性	鲁棒性	动态性	协同性	精确性	规模大小	计算速度
启发式算法	聚类算法	较强	差	强	强	低	大	快
数学规划方法	枚举法	强	强	弱	强	高	小	慢
	动态规划法	弱	较强	强	强	高	大	快
	分支定界方法	强	强	弱	弱	高	大	快
	混合整数线性规划法	弱	较强	强	强	高	大	较快
	匈牙利算法	弱	强	弱	强	高	大	慢
随机性智能优化算法	禁忌搜索算法	强	较强	强	强	较高	小	快
	模拟退火算法	强	较强	较强	强	较高	小	快
	遗传算法	强	强	较强	强	较高	大	慢
	粒子群优化算法	较强	较强	强	弱	较高	大	快
	蚁群优化算法	强	强	强	强	较高	大	快
	进化算法	强	强	强	强	较高	大	快

1.2 多无人机的路径规划

随着军事需求的不断增加,多无人机协同路径规划问题^[21]、未知环境中动态规划问题逐渐成为当前研究多无人机路径规划的重点。相较于单无人机路径规划问题,多无人机协同路径规划在求解方式和计算量上有一定的难度。

路径规划是任务规划的核心环节,无人机路径规划^[14,52]是指在给定的规划空间中,找出无人机从起始位置到目标位置,且满足约束条件和性能指标的最优飞行路径。路径规划是有约束的非线性规划问题,可用式(2)表示:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } x \in \Omega \end{cases} \quad (2)$$

这里 $f(x)$ 是目标函数, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$ 为决策变量, $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ 是约束集。

为了保证规划路径的可实现性、安全性和最优性,必须综合考虑平台机动性能等约束。多无人机路径规划研究的重点是建立描述具体任务的数学模型,设定约束条件和优化求解的方法。当战场态势发生改变或作战任务发生变更时,原规划路径不再满足当前需求,需要重新按照飞行器的飞行状态、油耗量、威胁程度和时间最小原则重新规划新的航线。下面是无人机路径规划的步骤。

- 1) 根据起始点、任务区域、环境地形条件及空中威胁,确定路径规划的规划空间;
- 2) 根据任务约束、飞行器的性能限制,确定路径规划的约束条件和数学模型;
- 3) 选择合适的搜索算法,在规划空间中寻找满足约束条件的最优可行路径;
- 4) 对搜索到的路径进行平滑和评估处理;

5) 输出规划的路径结果。

1.2.1 多无人机路径规划的约束指标

多无人机路径规划的约束条件^[20,53-55]有地形环境约束、平台自身约束、任务约束、可飞性约束、威胁约束、时限性约束、优先级约束和能量约束等。

1) 平台自身约束。最大、最小飞行高度将直接影响无人机在飞行中遇到威胁时能否安全行驶,并顺利完成任务。最大飞行高度通常比无人机的实际升限稍低些,最小飞行高度通常是用地面的相对高度表示,若飞行过低,将增加与地面相撞的概率。

最大、最小飞行速度保证了无人机在某段飞行路段内,其飞行速度保持在某一有限区间内。无人机的动力系统和环境因素是影响速度的主要因素。

最大转向角决定着每架无人机的转弯半径和飞行速率,它影响无人机从某段航路飞到另一段航路时能否避免频繁的转弯。

最小转弯半径受空气速度和无人机的机动性能影响,无人机在飞行过程中,其转弯半径不得小于最小转弯半径。

最大爬升角、下滑角控制着无人机机身的垂直姿态,将保证规划路径的高度方向、下滑角度在某一区间内。

2) 任务约束。时间约束指无人机完成规划任务所需的总时间长度。

路径约束中的重要约束是最大路径长度值,若是所规划的路径超出这一有效值,则规划出的路径是无效的。最大路径长度取决于无人机自身

携带的燃料、无人机所允许的飞行速度和飞行时间。

3) 可飞性约束。现有算法规划出的路径多是由直线组成,而在实际的飞行中直线交叉位置很难保证路径的可行性。Dubins^[56-58] 路径、二维 Clothoid、PH 曲线^[59-60] 和 Metropolis criterion^[46] 可用于平滑处理无人机的飞行路径。在用 Dubins 曲线平滑处理路径时,由于 Dubin 曲率的不变性,可将 Dubins 曲线结合 Clothoid 或 PH 曲线来优化路径^[4]。

4) 威胁约束。无人机路径规划面临的威胁主要有地形威胁、环境威胁和敌方威胁,根据威胁的强度和覆盖范围将其分为点威胁和区域威胁。点威胁指无人机仅受某单一威胁源影响。区域威胁指由多个威胁源组成的扇状威胁域。威胁的大小和强度将直接影响规划中无人机的路径选择、载荷约束和武器的使用。

5) 时限性约束。无人机路径规划的时限性主要指无人机系统的时间约束、空间约束和顺序约束。时间约束是指在执行飞行任务时,根据执行任务的优先级和无人机自身机动性能约束,规划出无人机飞行时间的先后顺序;空间约束保证了每架无人机的飞行路径无交叉碰撞。顺序约束是指规划出无人机飞行的先后顺序。时间约束、空间约束和顺序约束是密不可分的,可通过时间调配避开空间规划和顺序规划的冲突,也可以通过空间调配避免时间规划和顺序规划上的冲突等。

6) 优先级约束。无人机任务规划中,为了便于任务分配和避免无人机在飞行中发生碰撞等,由不同的规划系统和平台,给出机上编号、任务的重要度、目标的重要度和规划路径的长短等优先级评价指标,现给出以下约定。

①在任务规划中任务急迫解决的程度越高,优先级越高;

②在任务规划中任务的重要程度越高,优先级就越高;

③在任务规划中,当遇到地形、环境威胁和碰撞威胁时,优先解决使目标函数最优的无人机路线和相应的任务分配

7) 能量约束。考虑到无人机在执行任务阶段可能出现因能量不足而导致规划失败的问题,规划中安排携带能量少的无人机执行路径较短、级别较轻的任务,携带能量较多的无人机执行级别较高、路径较长的任务。

8) 载荷和链路约束。为每架无人机实现“量力而行”,即根据不同无人机执行任务的类型和功能不同,为不同无人机分配适宜的任务载荷,减

少无人机在执行任务阶段因链路中断,导致规划失败。

1.2.2 多无人机路径规划的分类标准

根据规划空间的特性可分为二维路径规划和三维路径规划;根据规划的时间特性分为预先静态路径规划和实时动态路径规划;根据规划对象的数量分为单机路径规划和多机协同路径规划。预先静态路径规划是指无人机起飞前,已知威胁和目标位置等信息,所规划出的路径精度高,但实时性差。实时动态路径规划,重在“实时性”,在规划中遇到威胁时,无人机能够实时调整路线,重新规划出满足新的约束条件的路径。

1.2.3 多无人机路径规划的基本方法

近年来关于无人机路径规划的研究已有很多,这里将求解路径规划的方法分为数学规划方法、人工势场法^[61]、基于图形学的方法和智能优化算法 4 种。

1) 数学规划方法。数学规划方法有动态规划算法和非线性规划算法。其中,非线性规划方法于 1939 年首次被提出后,主要用于求解非线性目标函数或约束条件中含有非线性约束的问题。非线性规划问题又可分为有约束的非线性规划问题和无约束的非线性规划问题。

2) 人工势场法。美国斯坦福大学教授 Oussama Khatib 于 20 世纪 80 年代首次提出了人工势场法^[62-64],该算法主要是在无人机任务规划空间中虚拟出指向目标的引力和远离障碍物的斥力,从而组成人工力场。人工势场法多用于求解局部最优问题,其模型简单、计算量小、实时性好、效率高、导向性强且易实现。

3) 基于图形学的方法。基于图形学的路径规划方法有拓扑法^[65]、Dijkstra 路径搜索算法、模拟退火算法、栅格法^[66]、A* 算法、Voronoi 图法和随机路标图 (PRM) 法等。

Dijkstra 路径搜索算法^[67] 于 1959 年由荷兰科学家 Dijkstra 提出,用于扫描搜索从初始位置到目标位置的最短路径。该算法简单易行,多用于规模较小的网络。

栅格法^[68-69] 于 1968 年由 W. E. Howden 首次提出,并应用在路径规划中。为了便于计算机处理,将连续空间离散化为网格单元,然后采用启发式算法在网格单元中搜索最优路径。栅格化的网格大小将直接影响算法的性能。在路径规划中,蚁群算法、遗传算法^[67] 和神经网络算法都会对任务区域做栅格化处理。

模拟退火算法 (simulated annealing, SA) 受启

发于固体退火。它是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优方法, 算法在搜索中加入随机因素, 使规划的结果跳出局部最优, 然后, 以一定的概率迭代更新得到全局最优。

Voronoi 图法^[70]是根据已知威胁的分布情况, 然后搜索图中的可行路段以构造最优路径。Voronoi 图法计算速度快, 但规划中, 未考虑威胁的类型和差别, 而将其简单的处理为点目标, 使得规划的路径需要再进行优化处理。Voronoi 图法多是与其他算法结合使用。

随机路标图 (PRM) 法^[7,71]于 1992 年由 Overmars 首先提出, 此方法是把需要规划的目标, 随机采样生成路标图, 然后在生成的路标图中搜索最优路径。PRM 法规划路径的时间长度直接影响规划的路径质量, 时间越长, 路径质量越高。但是, 该算法实时性较差。

A* 算法^[72-74]是一种启发式算法, 在将规划空间中靠近初始点的节点用 Dijkstra 算法处理, 靠近目标点的节点用 BFS 算法处理。A* 算法表示式 (3) 所示:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3)$$

式中: $f(n)$ 是当前节点 n 总的代价估计函数; $g(n)$ 是搜索空间中从起始点到当前节点 n 之间的距离代价函数值; $h(n)$ 是从当前节点 n 到目标节点的启发式评估代价值。启发式函数 $h(n)$ 是算法求解的核心。A* 算法虽然克服了盲目搜索, 但是, 内存大、计算复杂, 多用于静态环境中, 图 5 为 A* 算法流程图。

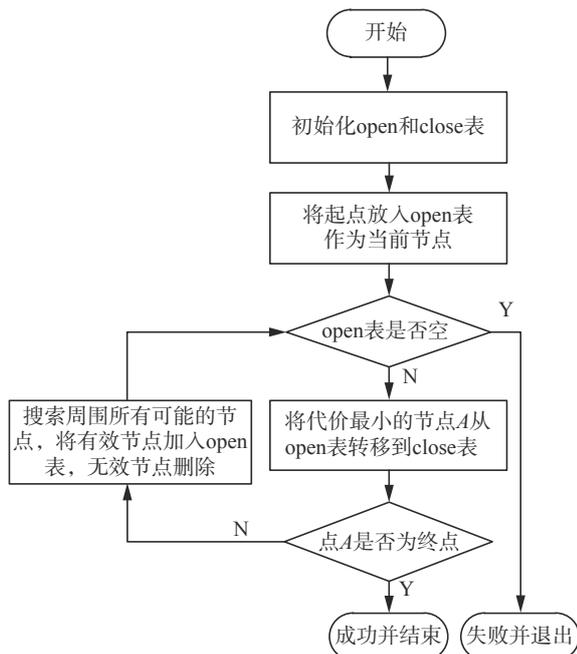


图 5 A* 算法流程图

Fig. 5 The framework of A* algorithm

4) 智能优化算法。主要由群类优化算法和仿生学算法组成。智能优化算法多以牺牲最优性换取算法的计算速度。仿生学算法主要是通过模拟动物行为, 规划路径的实现效果较佳。

1.2.4 多无人机路径规划数学表达式和问题建模

规划的路径可表示成空间位置点序列模式, $P_i(x, y, z, \alpha, \beta)$ 表示无人机的初始位置状态, $P_i(x, y, z, \alpha, \beta)$ 表示无人机的终点位置状态, 这里 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 表示第 i 架无人机的初始点位置, α_i 表示第 i 架无人机的航偏角, β_i 是第 i 架无人机的航迹方位角, $r(q)$ 表示产生的路径, q 为路径约束参数, 既可表示一条航程限制的直线路径长度, 也可表示满足转弯角度限制路径的曲率, 由上, 第 j 架无人机从起点 p_{ij} 到终点 p_{ij} 的路径规划 $r_j(q)$ 可用数学表达式 (4) 表示:

$$p_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}) \xrightarrow{r_j(q)} p_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

上述环境约束、平台自身约束、任务约束等均记为 $\prod_{all} r_i(q)$, 则路径规划数学表达式 (4) 可表示为

$$p_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}) \xrightarrow{\prod_{all} r_i(q)} p_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

三维空间中, 规划路径的可飞性由曲率 λ 和挠率 τ 共同决定。任务总约束条件记为 $\prod_{all} r_i(q)$, 可以表示为

$$\prod = \begin{cases} \prod_i, \lambda \leq \lambda_{max} \\ \prod_\tau, \tau \leq \tau_{max} \\ \prod_{safe}, r_m \cap r_n = \emptyset, m \neq n \end{cases} \quad (6)$$

这里 \prod_{safe} 表示无人机的安全性。

上述数学规划方法、人工势场法、基于图形的方法和智能优化算法在规划路径时, 很多未考虑运动学约束。由于无人机飞行是一个复杂过程, 受各种因素的影响。现假设无人机质量恒为常数、忽略地球的曲率且重力加速度不随飞行高度的变化而变化。无人机动力学方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dx(i)}{di} = \cos \alpha(i) \cos \beta(i) \\ \frac{dy(i)}{di} = \sin \alpha(i) \cos \beta(i) \\ \frac{dz(i)}{di} = \sin \beta(i) \\ \frac{d\alpha(i)}{di} = \gamma_1 \\ \frac{d\beta(i)}{di} = \gamma_2 \end{cases} \quad (7)$$

这里 $p_i = (x(i), y(i), z(i))$ 是初始点位置, α_i 航偏角, β_i 是航迹方位角, α_i 和 β_i 是控制输入变量, $\beta_{min} \leq \beta(s) \leq \beta_{max}$ 。曲率半径为

$$R(s) = \frac{1}{\sqrt{\gamma_1^2(s)\cos^2\beta(s) + \gamma_2^2(s)}} \quad (8)$$

其中 $R_{\min} \leq R(s) \leq R_{\max}$ 。

最优控制问题可以转化为最短路径问题 $\min \int_0^{s_i} ds$, 这里 s_i 表示所规划路径的长度, 即三维空间的路径规划问题可转化为求解目标函数的最优化问题。

1.2.5 路径规划的平滑处理

路径平滑处理是无人机能否沿着所规划路径安全、顺利飞行的保证。在空间约减的基础上, 受机动性能限制, 上述算法规划的路径多是以直线相连, 会产生较多的拐点, 为适应无人机的飞行要求, 需对规划路径优化处理。路径优化处理的目的是在规划的基础上, 进一步验证路径的可飞性。常见的优化路径的方法有曲线拟合、二次 B 样条插值法、三次 B 样条插值法、RTS 平滑和圆弧拟合法^[4,12,75]。B 样条^[18,76-77]最早由 Isaac Jacob Schoenberg 于 1946 年提出, 其曲率变化均匀, 曲线高阶导数连续, 局部控制能力较强。 $n+1$ 个控制节点 $(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ 的 n 次 B 样条可以表示为

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{note}_i \leq t < \text{note}_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$B_{i,k}(t) = \frac{(t - \text{note}_i)B_{i,k-1}(t)}{\text{note}_{i+k} - \text{note}_i} + \frac{(\text{note}_{i+k} - t)B_{i-1,k-1}(t)}{\text{note}_{i+k} - \text{note}_{i+1}} \quad (10)$$

这里 $\text{note}_i=0, i < k, \text{note}_i=i-k+1, k \leq i < n, \text{note}_i=n-k+2, n < i$ 。则坐标可以表示为

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^n x_i \cdot B_{i,k}(t) \\ y(t) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot B_{i,k}(t) \\ z(t) = \sum_{i=0}^n z_i \cdot B_{i,k}(t) \end{cases} \quad (11)$$

这里 $0 \leq t \leq 1, B_{i,k}(t)$ 表示曲线的混合函数。

1.2.6 多无人机路径规划的评价指标

评估路径的优劣是任务规划系统整体效能评估的一个重要组成部分, 规划的路径受规划模型、所用算法影响, 需要综合考虑各项因素, 并对各项评价指标进行量化处理, 从而确定影响路径规划各指标的权重, 便于计算综合约束指标, 实现对规划路径的选优。现将多无人机路径规划的评价指标列为飞行时间、路径距离、规避威胁的能力和规划路径的可靠性 4 种。图 6 是无人机路径规划的评价指标结构图。

飞行时间指无人机从初始点到目标点的时间

长度, 飞行时间受飞机的机动性能、障碍物、地形、环境威胁等因素影响, 无人机规划路径的总时间要小于规定的总时间。

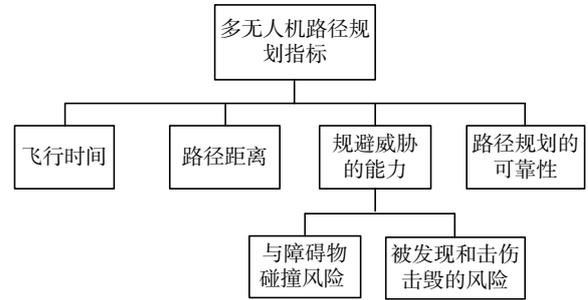


图 6 路径规划的评价指标

Fig. 6 Indicators on path planning

路径距离的长度是无人机从起始点到目标点的空间距离, 规划的路径长度需满足小于允许的最大长度。

规避威胁的能力指无人机避开各种障碍物, 如山地、丘陵、房屋建筑等障碍物的能力。规避风险能力越强, 规划路径可飞性就越高。

规划路径的可靠性是指在一定的时间、空间约束下, 无人机在规划的路径上安全飞行的概率大小。

航迹评价的量化表达式可表示为

$$J = \arg \max \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3 + \omega_4 J_4 \quad (12)$$

其中, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$, 这里 J 表示评价函数, J_1, J_2, J_3 和 J_4 分别表示飞行时间、路径距离、规避威胁的能力和规划路径可靠性的无量纲值, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 分别是其对应的权重系数。针对特定问题, 确定单项指标在综合指标中的权重系数, 最后, 得到表征整体航迹性能优越的无量纲值。

现对评价指标做如下约定: 所规划路径的飞行时间越短, 无人机能耗能量越少, 则规划的航迹性能越优; 在满足约束条件下, 规划的路径越短, 则无人机消耗的燃油越少, 遇到威胁的概率越低, 则规划的航迹性能越优; 规避威胁的能力越强, 则规划的路径健壮性越高, 重规划的成本就越低, 航迹性能越优。规划路径的可靠性越高, 遇到威胁时被损坏的概率就越低, 航迹性能越优。

在分析完成无人机路径规划步骤的基础上, 就路径规划的 8 个约束条件, 给出数学规划方法、人工势场法、基于图形学的方法和智能优化算法 4 种规划方法的应用环境和优缺点, 概述了路径规划的问题建模和平滑处理方法, 最后, 讨论分析了无人机路径规划的 4 个评价指标及其量化方法。表 2 是路径规划相应算法的对比结果。

表 2 路径规划算法对比
Table 2 Comparison of path planning algorithms

算法	对比分析
数学规划方法	动态规划法 用于研究可分为多个决策阶段的组合优化问题。 该方法精确度高、鲁棒性强、规划速度快;但是复杂度高。
	非线性规划算法 使用范围有一定的局限性。 该算法的精确性高,鲁棒性强;但是计算时间较长,规划速度较慢、复杂度高。
人工势场法	用于无人机的静态和动态路径规划。 该算法简单易实现、计算时间短,规划出的路径较平滑、实时性较好;但是易陷入局部最优,且障碍物附近目标不可达。
基于图形学的方法	模拟退火算法 该算法属于典型的随机算法,计算时间越长,优化结果越好、可快速收敛到全局最优;但时空复杂度较高。
	栅格法 该方法主要用于环境建模,栅格的大小,将直接影响规划能力和规划精度。 该方法简单易实现、精确度较高、但是计算复杂度大。
	A*算法 该算法是用于全局路径规划最好的算法之一。 A*算法结构直观、易实现、搜索效率高、收敛性强,并且在静态环境下一定能找到最优路径;当问题规模较大时,时空复杂度很高,该算法只能生成一条路径。
智能优化算法	Voronoi图法 用于解决无人机航迹规划。 该方法规划出的路径安全性高,威胁代价和计算量低,计算效率高;但是实时性较差。
	随机路标图 (PRM)法 该方法用于完全随机的采样策略中。 该方法精确度较高、规划速度快;但是鲁棒性差、其路径规划的计算量及实时性受空间采样点影响大。
	群类优化算法 主要用于解决工程问题,可定性分析,但不能定量证明。 该算法自组织性强、鲁棒性强、可扩展性强;但是计算量大、收敛速度慢、收敛精度低、易出现早熟、空间复杂度高。
	仿生学算法 该算法简单易实现,时空复杂度低、自适应性和自学习能力较强、鲁棒性强;但是搜索过程中具有很多不确定性、使用范围有限,延展性(性能与规模矛盾)低。

2 开放性问题 and 未来发展方向

2.1 目前存在的问题

相较于单架无人机任务规划而言,多无人机执行任务规划问题面临更多的困难。主要困难有多无人机协同目标分配模型的统一、协同约束条件的选取和计算、多无人机间协同路径规划与平滑处理,及遇到突发威胁时多无人机路径重规划问题。国内外对无人机任务规划问题已经有了大量的研究,但是依旧存在以下问题需要解决:

1) 建模方面,由于各无人机的飞行性能、飞行距离、飞行速度、执行任务的自身性能和目标的类型和属性不同,导致多无人机在执行任务阶段执行效果差,飞行航线交叉等问题;另外,现有的无人机任务规划方法、算法不统一,导致任务分配和路径规划存在效率低下、重规划等问题,并且现有文献多是将无人机任务规划抽象为过于理想、便于求解的某种现有模型,所以,实现建模

的有效性和求解的复杂性是当下无人机任务规划急需解决的问题。

2) 多无人机任务分配模型中,应恰当约束载荷分配,以减少执行任务的无人机与目标之间的不适组合问题;多无人机任务分配问题相较于单无人机任务分配问题,约束条件更多,计算更加复杂。在任务分配阶段,既要考虑单架无人机的自主性,也需要考虑该无人机与其同时执行任务的其他无人机间的协调配合问题;在编队飞行中,提高各无人机间的信息融合,将有助于增加任务分配的鲁棒性和精确性;现有任务分配模型多假设目标状态和位置已知,然而,实际作战环境的高动态性、复杂性和不确定性,使得无人机任务分配容错性低、自适应性差。故有效地动态任务分配算法,将提高无人机应对动态环境的自适应和自组织能力。

3) 路径规划在燃料量、转向角、无人机飞行高度、无人机飞行时间等单机约束和时空约束条

件下, 确保所规划路径的可飞性是多无人机路径规划问题的成功所在, 也是求解任务规划方法的重难点。

4) 在路径规划中有效地提炼系统信息和环境信息是提高无人机规划路径效率的关键; 现有路径规划过于重视路径优化, 而忽略了算法收敛速度; 在无人机系统执行任务中, 环境的改变和突发威胁等不确定性因素, 可能导致已规划的部分路径失效或出现协同失效等问题, 多机协同任务重规划是解决无人机执行任务时出现故障的有效手段, 快速有效地应对环境变化并实时调整路线, 是提高任务规划时效性和准确性的重要保证。

2.2 未来发展趋势

1) 路径规划中由于规划空间的广阔性、约束条件的复杂性和模型建立的困难性, 在任务分配和路径规划前, 需要一个适当的环境规划表示方法, 能够实时合理地表征任务规划的环境信息。

2) 准确量化无人机的飞行高度、速度、地面跟踪等约束条件, 将使目标函数更易确定, 飞行器的生存概率更高; 使规划的路径最大程度满足飞行距离、最小拐弯半径和最大爬升角和下滑角等约束条件是当前路径规划需要解决的难点问题。

3) 许多任务需要预先规划出多条飞行航迹。现有的大多数航迹规划算法都是从一个初始状态开始搜索, 最后得到一个全局或者局部最优解, 但是不能得到多条路径, 寻找一种快速、有效规划出无人机多条航迹的算法也是值得研究的重点。

4) 有效地为每一架无人机生成有效的路径规划, 协调各无人机之间的信息交互, 路径平滑处理和人机交互能力是无人机任务规划研究的重难点。

5) 当下提出的任务规划算法多具有局限性, 可以将多种算法有效结合在一起, 取长补短从而改善优化效果。

3 结束语

本文从无人机任务规划的相关工作开始, 介绍了无人机任务分配和路径规划的基本概念、分类标准及模型建立与算法等, 并分析对比了相应算法的优缺点。重点剖析了任务分配和路径规划的常用算法, 最后, 总结分析了当下无人机任务规划存在的问题和发展前景。故而研究高效、灵活的无人机任务规划技术是信息化时代不可或缺的一部分, 具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 秦博, 王蕾. 无人机发展综述 [J]. *飞航导弹*, 2002(8):

4-10.

QIN Bo, WANG Lei. Overview of UAV development[J]. *Winged missiles journal*, 2002(8): 4-10.

[2] 孔嘉诚. 无人机 (UAV) 架构发展历程和方向 [J]. *中国新通信*, 2018, 20(2): 74.

KONG Jiacheng. Architecture development history and direction of UAV[J]. *China new telecommunications*, 2018, 20(2): 74.

[3] 李远. 多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

LI Yuan. Research on resources allocation and formation trajectories optimization for multiple UAVs cooperation mission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.

[4] 赵明. 多无人机的协同目标分配和航迹规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

ZHAO Ming. Research on cooperative target assignment and path planning for multi-Unmanned aircraft system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[5] 柳长安. 无人机航路规划方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

LIU Chang'an. Study on route planning method of UAV[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.

[6] ZHANG Xiangyin, DUAN Haibin. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning[J]. *Applied soft computing*, 2015, 26: 270-284.

[7] 杜萍, 杨春. 飞行器航迹规划算法综述 [J]. *飞行力学*, 2005, 23(2): 10-14.

DU Ping, YANG Chun. Introduction of air vehicle path planning algorithms[J]. *Flight dynamics*, 2005, 23(2): 10-14.

[8] 闵昌万, 袁建平. 军用飞行器航迹规划综述 [J]. *飞行力学*, 1998, 16(4): 14-19.

MIN Changwan, YUAN Jianping. Introduction of military aircraft route planning[J]. *Flight dynamics*, 1998, 16(4): 14-19.

[9] 王春颖, 刘平, 秦洪政. 移动机器人的智能路径规划算法综述 [J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(8): 5-8.

WANG Chunying, LIU Ping, QIN Hongzheng. Review on intelligent path planning algorithm of mobile robots[J]. *Transducer and microsystem technologies*, 2018, 37(8): 5-8.

[10] 杨晨, 张少卿, 孟光磊. 多无人机协同任务规划研究 [J]. *指挥与控制学报*, 2018, 4(3): 234-248.

YANG Chen, ZHANG Shaoqing, MENG Guanglei. Multi-UAV cooperative mission planning[J]. *Journal of command and control*, 2018, 4(3): 234-248.

[11] 邢立宁, 陈英武. 任务规划系统研究综述 [J]. *火力与指*

- 挥控制, 2006, 31(4): 1–4.
XING Lining, CHEN Yingwu. Overviews on mission planning system research[J]. *Fire control and command control*, 2006, 31(4): 1–4.
- [12] 魏瑞轩, 李学仁. 先进无人机系统与作战运用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [13] 孙鑫, 陈晓东, 曹晓文, 等. 军用任务规划技术综述与展望 [J]. 指挥与控制学报, 2018, 3(4): 289–298.
SUN Xin, CHEN Xiaodong, CAO Xiaowen, et al. Review and prospect of military mission planning technology[J]. *Journal of command and control*, 2018, 3(4): 289–298.
- [14] 毛红保, 田松, 晁爱农. 无人机任务规划 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [15] SUD A, ANDERSEN E, CURTIS S, et al. Real-Time path planning in dynamic virtual environments using multi-agent navigation graphs[J]. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2008, 14(3): 526–538.
- [16] 林林. 基于协同机制的多无人机任务规划研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [17] 叶文, 廉华耕, 漆云海, 等. 无人机航路规划算法研究 [J]. *电光与控制*, 2011, 18(2): 8–12, 17.
YE Wen, LIAN Huageng, QI Yunhai, et al. Path planning algorithm for UAV[J]. *Electronics optics & control*, 2011, 18(2): 8–12, 17.
- [18] BABEL L. Coordinated target assignment and UAV path planning with timing constraints[J]. *Journal of intelligent & robotic systems*, 2018.
- [19] ZHEN Ziyang, XING Dongjing, GAO Chen. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm[J]. *Aerospace science and technology*, 2018, 76: 402–411.
- [20] ZHENG Changwen, LI Lei, XU Fanjiang, et al. Evolutionary route planner for Unmanned Air Vehicles[J]. *IEEE transactions on robotics*, 2005, 21(4): 609–620.
- [21] BELLINGHAM J, TILLERSON M, RICHARDS A, et al. Multi-task allocation and path planning for cooperating UAVs[C]//Proceedings of Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms, Conference on Coordination, Control and Optimization. [S. l.]: 2001: 1–19.
- [22] 陈星. 无人机多目标的航线规划和任务分配算法研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018.
CHEN Xing. Research on multi-objective route planning and task allocation algorithm for UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [23] BROWN D T. Routing unmanned aerial vehicles while considering general restricted operating zones[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2001.
- [24] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [25] BUI H, HAN Xu, MANDAL S, et al. Optimization-based decision support algorithms for a team-in-the-loop planning experiment[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio, TX, USA, 2009: 4684–4689.
- [26] 梁星星, 马扬, 冯昞赫, 等. 面向多旅行商问题的多目标模拟退火算法研究 [J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 80–86.
LIANG Xingxing, MA Yang, FENG Yanghe, et al. Research on multi-objective simulated annealing algorithm for multi-traveling salesman problem[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 40(3): 80–86.
- [27] SOYLU B. A general variable neighborhood search heuristic for multiple traveling salesmen problem[J]. *Computers & industrial engineering*, 2015, 90: 390–401.
- [28] KOTA L, JARMAI K. Mathematical modeling of multiple tour multiple traveling salesman problem using evolutionary programming[J]. *Applied mathematical modeling*, 2015, 39(12): 3410–3433.
- [29] 刘光远, 贺一, 温万惠. 禁忌搜索算法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [30] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [31] 夏洁, 高金源, 余舟毅. 基于禁忌搜索的启发式任务路径规划算法 [J]. 控制与决策, 2002, 17(S1): 773–776.
XIA Jie, GAO Jinyuan, YU Zhouyi. Heuristics decision algorithm for mission path planning based on tabu search[J]. *Control and decision*, 2002, 17(S1): 773–776.
- [32] 丁明跃. 无人飞行器航迹规划 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [33] 王宝广. 无人机任务规划系统研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
WANG Baoguang. The research of unmanned aerial vehicles mission planning system[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
- [34] 贾广芝. 基于遗传算法和稀疏 A* 算法的无人机三维航迹规划研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
JIA Guangzhi. Research on three-dimensional path planning of UAV based on genetic algorithm and sparse A* algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [35] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [36] 李华昌, 谢淑兰, 易忠胜. 遗传算法的原理与应用 [J]. *矿冶*, 2005, 14(1): 87–90.
LI Huachang, XIE Shulan, YI Zhongsheng. Theory and application of genetic algorithm[J]. *Mining and metallurgy*, 2005, 14(1): 87–90.
- [37] 周爱武, 于亚飞. K-Means 聚类算法的研究 [J]. *计算机*

- 技术与发展, 2011, 21(2): 62–65.
- ZHOU Aiwu, YU Yafei. The research about clustering algorithm of K-Means[J]. *Computer technology and development*, 2011, 21(2): 62–65.
- [38] BORCHERS B. MINLP: branch and bound methods[M]// FLOUDAS C A, PARDALOS P M. Encyclopedia of Optimization. Boston, MA: Springer, 2001.
- [39] 叶媛媛, 闵春平, 朱华勇, 等. 基于整数规划的多UCAV任务分配问题研究[J]. *信息与控制*, 2005, 34(5): 548–552.
- YE Yuanyuan, MIN Chunping, ZHU Huayong, et al. Multiple UCAV mission assignment based on integer programming[J]. *Information and control*, 2005, 34(5): 548–552.
- [40] 杨杰, 席建祥, 王成, 等. 多无人机协同巡视任务规划方法综述[J]. *飞行力学*, 2018, 36(5): 1–6.
- YANG Jie, XI Jianxiang, WANG Chneg, et al. Summary of multi-UAV cooperative patrol task planning methods[J]. *Flight dynamics*, 2018, 36(5): 1–6.
- [41] 程春英. 群体智能算法的研究及MATLAB实现[M]. 赤峰: 内蒙古科学技术出版社, 2015.
- [42] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [43] 云庆夏. 进化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [44] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia, 2002: 1942–1948.
- [45] 李士波. 基于粒子群算法的多无人机任务分配[J]. *软件导刊*, 2018, 17(7): 193–195, 213.
- LI Shibo. Multi-UCAV mission allocation based on particle swarm optimization[J]. *Software guide*, 2018, 17(7): 193–195, 213.
- [46] WU Xiande, BAI Wenbin, XIE Yaen, et al. A hybrid algorithm of particle swarm optimization, metropolis criterion and RTS smoother for path planning of UAVs[J]. *Applied soft computing*, 2018, 73: 735–747.
- [47] 彭斯俊, 黄樟灿, 刘道海, 等. 基于蚂蚁系统的TSP问题的新算法[J]. *武汉汽车工业大学学报*, 1998, 20(5): 88–92.
- PENG Sijun, HUANG Zhangan, LIU Daohai, et al. Ant colony system: a new algorithm for TSP[J]. *Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University*, 1998, 20(5): 88–92.
- [48] 杨剑峰. 蚁群算法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- YANG Jianfeng. Research on Ant colony algorithm and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [49] DORIGO M, STÜTZLE T. The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications, and advances[M]// GLOVER F, KOCHENBERGER G A. Handbook of Metaheuristics. Boston, MA: Springer, 2003: 250–285.
- [50] 段海滨, 丁全心, 常俊杰, 等. 基于并行蚁群优化的多UCAV任务分配仿真平台[J]. *航空学报*, 2008, 29(S1): 192–197.
- DUAN Haibin, DING Quanxin, CHANG Junjie, et al. Multi-UCAVs task assignment simulation platform based on parallel ant colony optimization[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2008, 29(S1): 192–197.
- [51] 高尚, 杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [52] 符小卫, 高晓光. 威胁联网环境下多无人机协同控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [53] 郑昌文, 严平, 丁明跃, 等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. *宇航学报*, 2007, 28(6): 1441–1446.
- ZHENG Changwen, YAN Ping, DING Mingyue, et al. Research status and trend of route planning for flying vehicles[J]. *Journal of astronautics*, 2007, 28(6): 1441–1446.
- [54] BORTOFF S A. Path planning for UAVs[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago, IL, USA, 2002: 364–368.
- [55] 孙洪俊. 小型无人机多机路径协同规划方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- SUN Hongjun. Research on the collaborative planning method of Multi -Small UAV path[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [56] WANG Yu, WANG Shuo, TAN Min, et al. Real-time dynamic dubins-helix method for 3-D trajectory smoothing[J]. *IEEE transactions on control systems technology*, 2015, 23(2): 730–736.
- [57] AMBROSINO G, ARIOLA M, CINIGLIO U, et al. Algorithms for 3D UAV Path Generation and Tracking[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, USA, 2006: 5275–5280.
- [58] DUBINS L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents[J]. *American journal of mathematics*, 1957, 79(3): 497–516.
- [59] 韩松臣, 秦俊奇, 韩品尧, 等. 马尔可夫决策过程在目标分配中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1996, 28(2): 32–36.
- HAN Songchen, QIN Junqi, HAN Pinyao, et al. An application of the Markov decision process to target assignment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1996, 28(2): 32–36.
- [60] ZENG Wenhui, YI Jin, RAO Xiao, et al. A two-stage path planning approach for multiple car-like robots based on PH curves and a modified harmony search algorithm[J]. *Engineering optimization*, 2017, 49(11): 1995–2012.

- [61] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, MO, USA, 2003: 500-505.
- [62] CONN R A, KAM M. Robot motion planning on N-dimensional star worlds among moving obstacles[J]. *IEEE transactions on robotics and automation*, 1998, 14(2): 320-325.
- [63] 宋佳瑞. 基于人工势场法的机器人避障问题研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
SONG Jiarui. Obstacle avoidance problem study of Robot Based on Artificial Potential field method[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [64] 刘砚菊, 代涛, 宋建辉. 改进人工势场法的路径规划算法研究 [J]. *沈阳理工大学学报*, 2017, 36(1): 61-65, 76.
LIU Yanju, DAI Tao, SONG Jianhui. Research of path planning algorithm based on improved artificial potential Field[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2017, 36(1): 61-65, 76.
- [65] 艾海舟, 张钺. 基于拓扑的路径规划问题的图形解法 [J]. *机器人*, 1990, 12(5): 20-24.
AI Haizhou, ZHANG Bo. A graphic approach to path planning problem based on topological method[J]. *Robot*, 1990, 12(5): 20-24.
- [66] 王娟娟, 曹凯. 基于栅格法的机器人路径规划 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2009(4): 14-17.
WANG Juanjuan, CAO Kai. Path-planning for robot based on grid algorithm[J]. *Agricultural equipment & vehicle engineering*, 2009(4): 14-17.
- [67] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现 [J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, 24(3): 209-212.
YUE Yang, GONG Jianya. An efficient implementation of shortest path algorithm based on Dijkstra Algorithm[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, 24(3): 209-212.
- [68] 皇甫淑云, 唐守锋, 童紫原, 等. 自主移动机器人路径规划方法研究综述 [J]. *软件导刊*, 2018, 17(10): 1-5.
HUANGFU Shuyun, TANG Shoufeng, TONG Ziyuan, et al. A survey of path planning methods for autonomous mobile robots[J]. *Software guide*, 2018, 17(10): 1-5.
- [69] HE Xiaoxi, CHEN Leiting. Path planning based on Grid-Potential fields[C]//Proceedings of 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Hubei, China, 2008: 1114-1116.
- [70] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. *IEEE transactions on robotics and automation*, 2002, 18(6): 911-922.
- [71] OVERMARS M H. A random approach to motion planning[R]. RUU-CS-92-32. The Netherlands: Utrecht University, 1992.
- [72] 齐乃明, 孙小雷, 董程, 等. 航迹预测的多无人机任务规划方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(4): 32-36.
QI Naiming, SUN Xiaolei, DONG Cheng, et al. Mission planning based on path prediction for multiple UAVs[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(4): 32-36.
- [73] CAO Wen, SHI Hui, ZHU Shulong, et al. Application of an improved A* algorithm in route planning[C]//Proceedings of 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. Xiamen, China, 2009: 253-257.
- [74] 史辉, 曹闻, 朱述龙, 等. A* 算法的改进及其在路径规划中的应用 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2009, 32(6): 208-211.
SHI Hui, CAO Wen, ZHU Shulong, et al. Application of an improved A* Algorithm in shortest route planning[J]. *Geomatics & spatial information technology*, 2009, 32(6): 208-211.
- [75] TSOURDOS A, WHITE B, SHANMUGAVEL M. 无人机协同路径规划 [M]. 祝小平, 周洲, 王译译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [76] 闫俊丰. 无人机航路规划评估及修正方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [77] NIKOLOS I K, VALAVANIS K P, TSOURVELOUDIS N C, et al. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part B (cybernetics)*, 2003, 33(6): 898-912.

作者简介:



齐小刚, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与仿真、网络算法设计与应用。申请专利 47 项 (授权 19 项), 登记软件著作权 4 项。发表学术论文 100 余篇。



李博, 硕士研究生, 主要研究方向为网络协同定位与任务规划。



范英盛, 博士研究生, 主要研究方向为移动网络协同定位。