

控制与决策

Control and Decision

面向突发故障的分布式多无人机任务重规划方法

周文惠, 齐瑞云, 姜斌

引用本文:

周文惠, 齐瑞云, 姜斌. 面向突发故障的分布式多无人机任务重规划方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1373–1385.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于群智能—一致性理论的无人机编队全过程飞行航迹规划方法](#)

Swarm intelligence and consensus theory based trajectory planning for a complete flight of UAV formation

控制与决策. 2023, 38(5): 1464–1472 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0831>

[基于APNODE-MS算法的无人机航迹规划](#)

UAV trajectory planning based on APNODE-MS algorithm

控制与决策. 2022, 37(7): 1695–1704 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1818>

[多无人机协同直播场景下自适应任务卸载决策](#)

Adaptive task offloading decision of multi-UAVs cooperation in live broadcasting scenario

控制与决策. 2021, 36(4): 974–982 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1104>

[多无人机协同直播场景下自适应任务卸载决策](#)

Adaptive task offloading decision of multi-UAVs cooperation in live broadcasting scenario

控制与决策. 2021, 36(4): 974–982 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1104>

[微型无人机集群低时延组网规划方法](#)

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

面向突发故障的分布式多无人机任务重规划方法

周文惠, 齐瑞云[†], 姜斌

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106)

摘要: 针对分布式多无人机系统执行任务时发生故障的情况, 提出一种面向故障的任务重规划方法. 首先, 依据分布式架构, 考虑通信延迟约束, 建立多无人机系统遭遇故障时的局部任务重规划问题模型, 设计故障无人机、健康无人机的重规划框架. 依此框架, 考虑无人机调度时所需的空、时间资源, 根据故障后的无人机通信拓扑, 制定子系统划分规则; 然后, 根据子系统内在线无人机与待执行任务间的映射关系, 提出基于收益动态调整规则和一致性协调规则的拍卖算法, 实现针对不同情况的任务重分配; 最后, 考虑任务重分配与航迹重规划间的耦合关系, 在任务重分配阶段引入 RRT* 算法预估的航迹代价, 使得分配结果更合理. 仿真结果表明, 在考虑实际环境中无人机会发生故障的情况, 该方法能够有效完成任务重规划.

关键词: 分布式; 无人机; 任务规划; 航迹预估; 突发故障; 拍卖算法

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1022

引用格式: 周文惠, 齐瑞云, 姜斌. 面向突发故障的分布式多无人机任务重规划方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1373-1385.

Mission replanning method of distributed multiple unmanned aerial vehicles for pop-up faults

ZHOU Wen-hui, QI Rui-yun[†], JIANG Bin

(College of Automation and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To solve the problem of task reallocation and path replanning for distributed multiple unmanned aerial vehicles (multi-UAVs) when pop-faults happen in their missions' execution, a mission replanning method is proposed. First, according to the distributed framework, a model of the local mission replanning when pop-up faults happen to multi-UAVs is constructed, considering the communication delay. Then, replanning frameworks for malfunctioning UAVs and healthy UAVs are established respectively. Considering the utilization of space and time in UAVs scheduling and communication topology after faults happening, a subsystem division rule is presented. In addition, the mapping relationships between the UAVs and the tasks in the subsystems may differ from others', so auction algorithms based on dynamic benefit and consensus rules are proposed respectively. Considering the coupling between task reallocation and path replanning, an estimation about flight route using the RRT* algorithm is introduced in the task reallocation, so that the results will be more reasonable. The simulation results show that, the proposed method can effectively solve the problem of mission replanning when pop-faults happen in the multi-UAVs in real environment.

Keywords: distributed; multi-UAVs; mission planning; path estimation; pop-up faults; auction algorithm

0 引言

近年来, 多智能体/无人机系统在诸如地震救灾、森林灭火、农业灌溉等民用领域越来越受青睐^[1-2], 在实际任务执行过程中难免会有故障发生. 分布式系统相较于集中式, 其计算成本低、自主性强, 且能够随机应变^[3], 可有效避免因中心故障导致系统决策失败, 具有高抗风险性. 有些故障智能体/无人机可通过

容错控制恢复性能. 文献[4]设计了固定时间收敛的容错控制器, 以应对执行器故障等情况; 文献[5]设计了循环小波模糊神经网络学习系统, 以补偿故障引起的未知项; 文献[6]提出了两层容错协同控制框架, 以减轻部分控制失效故障的影响. 这些成果在应对内部执行器故障、传感器故障等控制问题时, 均具有一定有效性. 但是对于某些可能导致无人机完全失效

收稿日期: 2022-06-10; 录用日期: 2022-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62020106003); 江苏省自然科学基金项目(BK20222012).

责任编辑: 杨涛.

[†]通讯作者. E-mail: ruiyun.qi@nuaa.edu.cn.

的故障,如在极端环境中坠毁等,仅容错控制无法解决问题.面对执行任务能力丧失或下降的无人机,系统可从任务规划层面进行决策,重新分配任务和规划航迹,尽可能保证任务顺利完成.

在任务重规划领域已有一些研究成果,文献[7]考虑任务执行过程中,发生无人机失效和目标新增两种突发情况,提出了基于分合粒子群的任务重分配策略,但是该策略是基于集中式架构的,不能直接适用于分布式架构.文献[8]考虑新增威胁、新增目标以及无人机故障或损毁3种情况,提出了基于改进合同网算法的任务重分配方法,但是该方法并未考虑到突发情况发生后,周围环境的变化以及系统模型的更新.在其他领域,文献[9]研究了单颗卫星面对动态机遇目标时的任务重规划问题,文献[10]提出了空间站短期任务重规划方法,这些文献的研究思路可借鉴,但是它们并不能直接适用于以多无人机系统为研究对象的重规划问题中.因此,如何设计应对突发故障的任务重规划方法成为研究的重点和难点.

任务(初)规划问题是指在满足约束条件的前提下,找到多无人机系统执行任务的最优规划方案,使得成本最小、收益最大,一般在起飞前进行,为离线规划.任务重规划问题是指在按原有方案执行任务期间,由于突发故障,系统需要在一定时间内制定新的方案,尽可能使得成本最低、收益最高,为在线规划.两者本质上均为组合优化问题,研究方法可借鉴,不同的是在线规划相较于离线规划,对于求解时间要求较高,必要时可牺牲对最优性的追求.在任务规划框架中,任务分配属于高层决策,航迹规划属于底层实现.在已有的诸多研究中,总是将任务分配和航迹规划拆分为2个独立的子问题,按照解耦后的逻辑顺序分别进行研究,忽略了飞行航迹对任务分配过程的影响,其得到的分配结果往往非最优.受此启发,本文在任务重分配过程中引入航迹代价估值,使得重分配结果更加合理.

针对任务分配问题,主要有类市场机制、多智能体决策^[11]、基于种群优化等方法,其中类市场机制应用最为广泛^[12].相较于合同网算法,拍卖算法规则明确,可操作性强,且易于协商防止冲突^[13],更适合求解需要在短时间内进行任务合理分配,寻找最优或较优解的问题.为此,本文在传统拍卖算法的基础上进行改进,使其适用于故障下的任务重分配问题.针对航迹规划问题,主要有传统算法、启发式算法、智能仿生算法等^[14-15].其中启发式搜索算法如RRT*(rapidly-exploring random trees*),在实时性和搜索速度上具有

明显优势,但是不适用于规划满足无人机动力量约束条件的精确航迹,可用于航迹预估;智能仿生算法如PSO(particle swarm optimization)算法,其结构简单,全局寻优能力强,适用于精确航迹规划.为节约计算时间、节省空间调度,面对庞大的多无人机系统,无需因局部几架无人机故障,而全体进行任务重规划.本文利用无人机间的通信协同,形成局部的重规划子系统,避免全局重规划的资源浪费.

综上,本文提出一种面向突发故障的分布式任务重规划方法,主要内容如下.

1)建立多无人机面向故障的局部任务重规划问题模型,设计故障无人机、健康无人机的重规划框架,其中包括制定子系统划分规则以及任务重规划算法.

2)依据在线无人机与待执行任务间的映射关系,提出基于收益动态调整规则和一致性协调规则的拍卖算法;同时考虑任务重分配与航迹重规划间的耦合,在任务重分配阶段引入RRT*算法得到的航迹代价估值,而后更改执行任务目标的无人机利用PSO重新规划精确航迹.

3)构建符合本文局部任务重规划问题模型的场景,并通过仿真验证所提出重规划框架和算法应对突发故障的有效性.

1 问题描述及建模

1.1 问题描述

在某区域有多项任务等待执行,初始时刻,地面中心站根据已知的环境信息、任务信息和无人机信息,制定了一套最佳任务分配方案,并为每架无人机规划一条最优飞行轨迹,无人机按照此方案执行任务.在飞行过程中,某一时刻,突然有几架无人机发生故障.若在自我检测和故障评估后,无人机无法按照初始方案执行任务,则与相邻的其他无人机通信,请求重新规划任务.考虑到实际环境中无人机的通信距离有限以及重新分配任务、规划航迹和调度无人机所需的时间、空间资源不宜过多,全局的任务重规划方法可能无法满足要求.因此,可根据需求将整个系统划分为多个子系统,每个子系统内部进行局部任务重规划.考虑无人机实际飞行轨迹对分配任务的影响,引入航迹代价估计值作为任务重分配的重要参数.需要说明的是,本文所说的突发故障,不特指某种具体的情境,包括但不限于自身零部件的损伤、电池电量不足等内部原因以及周围环境差、电磁干扰强等外部原因造成无人机执行任务能力下降或丧失的情况.

为简化问题,作出以下假设.

假设1 飞行环境、任务信息、故障信息均已知,包括但不限于:障碍物的位置和位置、任务的优先级和位置、故障类型和等级;

假设2 一架无人机最多执行一个任务,但是一个任务可被分配给多架无人机;

假设3 每架无人机的通信半径相等,且直接通信信号流畅。

基于以上假设,现有 M 个任务等待执行,为提高任务完成率,派出 $N(N \geq M)$ 架无人机去执行任务,此时无人机与任务间为多对一的映射关系。 t 时刻,有无人机突发故障,任务重规划系统立即作出应答,其邻域内的其他无人机积极响应,目标是在满足多约束条件的前提下,制定出一套较优的重规划方案,使得任务完成率最高、效益之和较大。此处的任务效益值之和实际上指的是“局部的全局效益”,即局部重规划子系统内的全局效益。

1.2 问题模型

根据第 1.1 节的重规划过程描述,多无人机面对突发故障需要制定新的任务规划方案,该问题包含了无人机、任务、障碍物和约束条件等重要元素。

定义无人机属性集合如下:

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}, \quad (1)$$

$$U_i = \{U_i^{\text{num}}, U_i^{\text{loc}}, U_i^{\text{state}}, U_i^{\text{re}}\}. \quad (2)$$

其中: U 为无人机; U_i^{num} 为无人机 i 的编号; U_i^{loc} 为无人机 i 的位置; $U_i^{\text{state}} \in \{S_{\text{No}}, S_{\text{Fa}}\}$ 为无人机 i 的状态, S_{No} 为健康状态, $S_{\text{Fa}} = \{S_{\text{Fa}}^{\text{type}}, S_{\text{Fa}}^{\text{level}}\}$ 为故障状态, $S_{\text{Fa}}^{\text{type}} \in \{v_{\text{NF}}, v_{\text{AF}}\}$ 为故障类型, v_{NF} 为断飞型,即受该故障影响,无人机不具备继续飞行能力, v_{AF} 为允飞型,即虽然受该故障影响,但是无人机还能继续飞行, $S_{\text{Fa}}^{\text{level}} \in \{v_{\text{Ca}}, v_{\text{Ha}}, v_{\text{Ma}}\}$ 为故障等级, v_{Ca} 为重大型, v_{Ha} 为中度型, v_{Ma} 为轻微型; U_i^{re} 为无人机 i 的可靠度,即无人机能够完成任务的可靠性大小,越多的无人机执行同一个任务,该任务被顺利完成的可能性越高。

定义任务属性集合如下:

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}, \quad (3)$$

$$T_j = \{T_j^{\text{num}}, T_j^{\text{loc}}, T_j^{\text{value}}, T_j^{\text{pri}}\}. \quad (4)$$

其中: T 为任务; T_j^{num} 为任务 j 的编号; T_j^{loc} 为任务 j 的位置; T_j^{value} 为任务 j 的初始价值,即完成任务 j 可得到的收益回报; $T_j^{\text{pri}} \in \{p_{\text{Ur}}, p_{\text{Cr}}, p_{\text{Ge}}\}$ 为任务 j 的优先级, p_{Ur} 为最高级,属于紧急任务需要立即执行, p_{Cr} 为次高级,属于重要任务需要优先实行, p_{Ge} 为最低级,属于常规任务。

任务重分配模块在完全不知道无人机飞行轨迹

的情况下,其运行性能会受到影响,且得到的分配结果也非最优。若在其运行时频繁或长时间地调用航迹重规划模块,也会造成大量时间资源的浪费。因此,考虑两者间的耦合关系,并尽可能节约时间资源,本文在任务重分配中引入航迹代价估值,以此代替最终精确飞行轨迹,这样既可使得分配过程更加合理,又可节省时间,提高效率。

在此基础上,可得出整个系统的任务重规划数学模型如下:

$$R = \max \sum_{j=1}^M (R_j), \quad (5)$$

$$R_j = w_1 \times r_j - w_2 \times \sum_{i=1}^N \chi_{ij} C_{ij}. \quad (6)$$

其中: R 为任务重规划的总收益; R_j 为完成任务 T_j 得到的收益; r_j 为执行任务 T_j 可得到的期望效益; C_{ij} 为无人机 U_i 完成任务 T_j 所付出的代价; χ_{ij} 为决策系数, $\chi_{ij} \in \{0, 1\}$, 若 $\chi_{ij} = 1$, 则无人机 U_i 执行任务 T_j , 若 $\chi_{ij} = 0$, 则无人机 U_i 不执行任务 T_j ; w_1 和 w_2 为任务效益和航迹代价的权重系数。

任务 T_j 的期望效益 r_j 既与其自身初始价值有关,又与分配到执行该任务的无人机可靠性有关。由于故障对无人机执行任务能力的影响,同一任务被不同无人机执行时,其被顺利完成的概率也不同。因此,参考并联模型的可靠性计算公式, r_j 可表示为

$$r_j = T_j^{\text{value}} \times \text{Re}_j, \quad (7)$$

$$\text{Re}_j = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\chi_{ij} \lambda_i \sigma_i U_i^{\text{re}}}). \quad (8)$$

其中: Re_j 为任务 T_j 被顺利完成的概率; λ_i 为无人机 U_i 的可靠性系数; σ_i 为给定正常数; $U_i^{\text{re}} \in [0, 1]$, 若 $U_i^{\text{re}} = 0$, 则无人机完全无法执行任务 T_j , 若 $U_i^{\text{re}} = 1$, 则无人机一定能够完成任务 T_j 。当无人机突发故障后,其可靠性会降低。由此可知,当多无人机执行同一个任务时,其可靠性是大于其中任一单无人机的。

无人机 U_i 执行任务 T_j 的航迹代价 C_{ij} 主要与无人机的飞行距离和飞行过程中障碍物的影响有关,可表示为

$$C_{ij} = \frac{1}{L^{\max}(i)} \sum_{k=1}^{n_j} (c_1 \times \|l_k\| + c_2 \times e^{-\frac{d_k^2}{R_k^2}}), \quad (9)$$

$$L^{\max}(i) = \max \left(\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{n_j} \|l_k\| \right). \quad (10)$$

其中: $L^{\max}(i)$ 为无人机 U_i 执行任务所需飞行距离的最大值; l_k 为二维航迹向量,表示第 k 段航迹,即第 k 个航迹节点与第 $(k+1)$ 个航迹节点间的航迹; $\|l_k\|$

为 l_k 的长度标量; n_j 为无人机 U_i 飞往任务 T_j 的航迹节点总数; c_1 为飞行距离对无人机航迹规划影响的权重, $c_1 \in [0, 1]$; d_k 为当前无人机与威胁中心的距离; R_k 为第 k 个航迹节点处飞行威胁的衰减半径; c_2 为飞行威胁对无人机航迹规划影响的权重, $c_2 \in [0, 1]$.

在分布式系统中,多无人机主要通过互相间的通信交流信息,以协作完成任务,通常可用无向图表示其通信拓扑结构.故障无人机在评估自己性能下降或无法执行任务后,需要向其他无人机传递信息寻求帮助.在实际环境中,无人机的通信距离是有限的,只能与周围一定距离内的无人机直接共享信息,同时存在通信延迟现象,即无人机于 t 时刻发送信息,其通信范围内的无人机于 $(t + \Delta t)$ 时刻收到该信息.除此以外,信息也可经过中间层传递,使得无人机能够与其通信范围外的无人机间接进行通信^[16],此时信息发送与接收间的延迟长短取决于信息被传递的次数,信息于 t 时刻发送,于 $t + (n + 1) \times \Delta t$ 时刻接收, n 为中继无人机个数.在分布式多无人机通信拓扑中,多层间接通信累计所花费的时间会影响到整个任务重规划的进程和结果,不可忽略不计.

本文将无人机的通信范围简化为圆,并将其定义为通信圆,即以该无人机为圆心,其通信范围为半径的圆.每架无人机均可与其通信圆内的所有无人机直接通信,如图1所示,其中 U 为无人机, R 为通信圆半径.图1中: U_1 、 U_2 、 U_3 三者互相均在对方的通信范围内,均可进行直接通信; U_4 、 U_6 需要通过中继无人机 U_5 进行间接通信, U_4 于 t 时刻发出信息, U_6 于 $(t + 2\Delta t)$ 时刻收到信息.

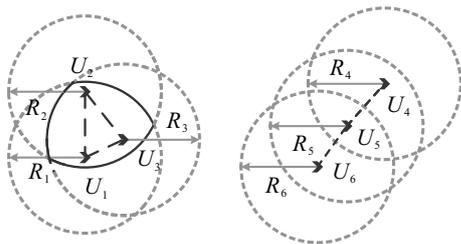


图1 分布式多无人机通信拓扑示意图

1.3 约束条件

1) 任务优先级约束.若多架无人机故障后无法继续飞行,导致能够执行任务的无人机少于待执行的任务,此时面临有些任务无法完成的情况,则优先级高的任务应被优先选择,优先级低的任务面临被放弃的可能性.同理,若无人机数量冗余,应优先分配多架无人机给优先级高的任务,以保证其能够被顺利完成.这便是任务优先级约束, p_{Ur} 型任务优先级最高,其次是 p_{Cr} 型任务,最后是 p_{Ge} 型任务.

2) 最大飞行航程(时间)约束.每架无人机在起飞前电池电量一定,所以它能够飞行的最大航程也已确定,在无人机飞行速度一定时,可等效为最长飞行时间.若不在这之前到达终点将会面临无人机飞行不稳定,甚至掉落造成损失和伤害的危险.为保证任务完成的可靠性,无人机在执行任务过程中飞行的总距离应小于或等于预先设定好的最大航程,即

$$L = \sum_{k=1}^n \|l_k\| \leq L_{\max}. \quad (11)$$

其中: L 为无人机飞行的总航程, L_{\max} 为预先设定的最大航程, n 为一条完整航迹中的航迹节点总数.

除此以外,还有无人机动力学约束、无人机躲避障碍物约束、无人机防撞约束等,这部分内容已有诸多工作可参考,本文不再赘述.

2 任务重规划方法

在分布式多无人机系统中,每架无人机均可作为一个决策者参与到群体决策.若有无人机发生故障,且无法执行初始任务,此时应与其相邻的无人机通信进行故障信息和重规划信息的交互.

2.1 故障状态评估

无人机发生故障后,故障诊断系统会先对其进行故障检测,评估其执行任务的能力.同时向相邻无人机发送故障信息,并等待接收响应.

1) 能力损伤评估.硬件故障如机翼断裂、软件故障如导航系统失灵发生后,无人机无法继续健康飞行;面对如电池电量所剩不足等情况,无人机仍然具备执行任务的能力.因此,该环节主要判断故障无人机能否继续飞行,得到故障类型.

2) 性能衰减评估.故障无人机即使能够继续飞行,其飞行性能也会受到影响,如能够继续飞行的距离缩短、飞行高度降低等.因此,该环节主要评估无人机性能,得到故障等级.

2.2 重规划预处理

故障评估后,若无人机出现无法继续飞行等不能执行初始任务的情况,便需要进行重规划.在此之前,需要根据故障评估结果,进行预处理工作.

1) 问题模型更新.无人机突发故障后,可能会对其模型产生影响,主要体现在约束条件的改变上,如无人机电池故障会导致最大飞行航程约束改变,或机翼故障会导致无法实现大幅度转弯动作,即最大转弯角约束改变等.同时,也可能会影响整个系统的模型,若是退出任务的无人机数目过多,还会改变无人机与任务间的映射关系,由“多对一”变为“一一对应”等.根据不同的突发故障,问题模型会相应地进行更

新.

2) 任务评估更新. 这一环节故障无人机和健康无人机均需要执行. 故障无人机在确定能够继续飞行, 且更新模型后, 首先要对自己的初始任务进行评估, 以确定能否继续执行. 若不能则立刻对其他任务进行评估, 以确定是否有任务可执行; 若无则退出本次任务; 若有则进入子系统划分环节. 因此, 这一环节会输出3种结果: 执行原任务、退出任务、执行新任务.

以电池电量不足为例, 其故障类型为允飞型, 不同的故障等级对应无人机接下来能够飞行的距离长短不同. 此时, 无人机便需计算自己与初始任务间的距离以确定能否执行. 若不能则计算与其他任务间的距离; 若有可执行任务则进入子系统划分环节; 若无则退出. 其中进行距离计算时, 不能只简单地计算其直线距离, 必须考虑环境中的障碍物, 否则会出现直线距离符合, 而因躲避障碍物实际距离超出约束的情况. 但是该环节所花费的计算时间不宜过长, 因此采用RRT*算法快速规划航迹, 并计算航迹代价估计值, 以便后续进行任务重分配, 详见第2.4节.

健康无人机在接收到相邻无人机的故障信息后, 也将更新自己的任务评估, 估计执行各任务所要付出的航迹代价, 为后续可能需要进行的重规划提前准备节省时间.

3) 子系统划分. 故障无人机确定无法执行初始任务后, 将向相邻无人机发送任务重规划请求. 根据第1.1节可知, 为节约资源, 可将整个系统划分为多个子系统, 进行局部任务重规划. 因此, 本文提出基于通信圆的子系统划分规则, 根据这个规则将相关无人机划分至同一个子系统内, 并统计其中退出任务的无人机(以下称“离线无人机”)和参与任务重规划的无人机(以下称“在线无人机”)两者的数量.

考虑到通信距离有限以及存在通信延迟, 无人机互相间并不能实时共享信息, 但是可将时间延迟控制在一定范围内. 一个信息被传递的次数越多, 其实时性越差, 一定次数后, 这个信息便失去了参考价值, 没有再继续传递的必要了. 为了保证任务重规划的效率, 本文假设一个信息最多被传递2次, 即2架无人机若想共享信息, 要么可直接通信, 要么至多通过1架中继无人机间接通信. 对于无人机 U_i 及其通信圆内其他无人机而言, U_i 可与它们直接信息交互, 但是它们两两间并不一定均能够直接通信, 不过 U_i 可作为它们的中继无人机, 使得它们互相间均能够间接通信, 且信息传递次数小于等于2次.

在多无人机系统执行任务过程中, 若只有1架无

人机发生故障, 则它只需与其通信圆内的无人机一起进行任务重规划; 若不止1架无人机故障, 则应根据一定准则确定任务重规划子系统. 以2架无人机发生故障为例, 若它们之间相距很远, 且通信圆相离, 则各自与其通信圆内的无人机重规划任务, 此时2个子系统内的信息传递次数均小于等于2次; 若两者通信圆相交, 但是它们之间的距离大于通信半径, 则依旧将其分为2个独立的子系统, 且系统内信息传递次数均小于等于2次; 若它们之间的距离小于通信半径, 即互相处于对方的通信范围内, 比较2个通信圆内无人机数量的多少, 选择其中数量较多的构成一个大子系统, 此时系统内的信息传递次数也小于等于2次.

当2架故障无人机的距离大于通信半径, 但是其通信圆相交时, 若没有无人机处于其交集, 则直接各自分开规划; 若有健康无人机处于其交集, 则它需选择其中一架给予反馈, 此时应遵守一定准则. 首先根据故障等级, 选择等级较高者给予反馈; 若故障等级相同, 则为了保证资源的均衡分配, 根据各自通信圆内的无人机数量, 选择较少者给予反馈; 若通信圆内无人机数量相等, 则根据距离, 选择较近者给予反馈.

综上所述, 以无人机 U_m 、 U_n 发生故障为例, $m < n$.

1) 若 $d_{mn} \leq R$, $N_m > N_n$, 则 U_n 加入 U_m 的通信圆构成一个大的子系统; 反之, 则 U_m 加入 U_n 的通信圆.

2) 若 $R < d_m \leq 2R$, 以健康无人机 U_i 为例, 它同时接收到 U_m 、 U_n 的故障信息: 若 $x_m > x_n$, 则 $c_i = m$, 反之, $x_m < x_n$, 则 $c_i = n$; 若 $x_m = x_n$, $N_m < N_n$, 则 $c_i = m$, 反之, $N_m > N_n$, 则 $c_i = n$; 若 $x_m = x_n$, $N_m = N_n$, $d_{im} \leq d_{in}$, 则 $c_i = m$, 反之, $d_{im} > d_{in}$, 则 $c_i = n$.

3) 若 $d_{mn} > 2R$, U_m 、 U_n 与各自通信圆内的健康无人机一起进行任务重规划.

其中: R 为无人机的通信半径; d_{mn} 为无人机 U_m 与 U_n 间的距离; c_i 为健康无人机 U_i 所选择加入的子系统; x_m 、 x_n 分别为无人机 U_m 、 U_n 的故障等级, 数值越小, 故障等级越低; N_m 、 N_n 分别为无人机 U_m 、 U_n 通信圆内无人机数量; d_{im} 、 d_{in} 分别为健康无人机 U_i 与无人机 U_m 、 U_n 间的距离. 子系统划分规则如图2所示.

以2架无人机突发故障为例提出的子系统划分规则, 可推广到多架无人机, 即当多架无人机发生故障时, 若它们相距较近, 则可形成一个大的子系统进行任务重规划; 若相距较远则分开规划, 接收到多架重规划请求的健康无人机也可按照故障等级高低、无人机数量多少以及距离远近的顺序进行判断, 选择

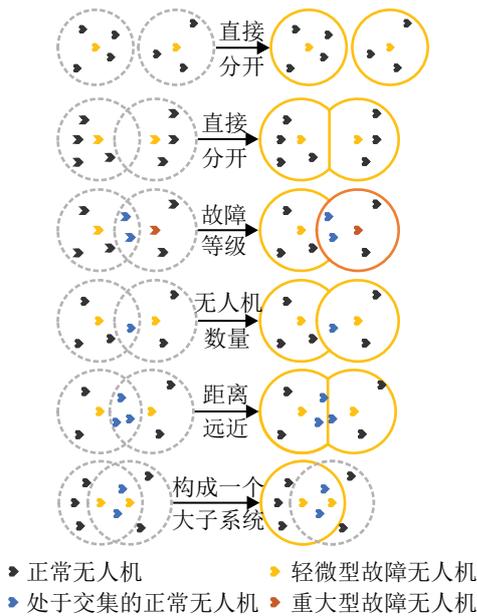


图2 子系统划分规则示意图

自己想加入的子系统. 因此, 一个子系统内可能存在多架故障无人机, 其故障严重程度决定在线无人机数量的多少, 也决定任务重规划方法的选择, 如图3所示.

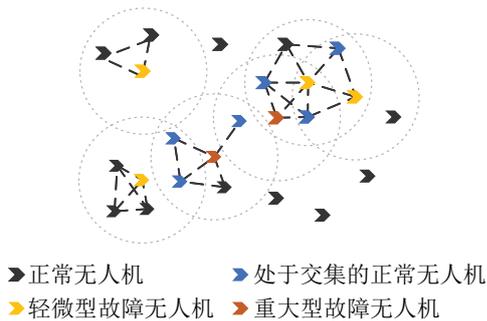


图3 多无人机子系统划分示意图

在执行任务过程中, 分布式通信拓扑不是一成不变的, 它会随着无人机位置的变化而改变, 会出现一开始属于一个子系统, 后来飞行过程中渐渐疏远, 失去直接通信的情况. 为了保证任务重规划过程的顺利进行, 需要使得子系统中中继通信节点保持稳定, 同时若出现重规划过程中有无人机脱离子系统的情况, 需要及时应对. 整个重规划过程由4大模块组成, 分别为故障评估、重规划预处理、任务重分配和航迹重规划, 每个模块又由1~3个小环节组成. 其中, 在重规划预处理和任务重分配过程中, 无人机间均需要通过通信交流信息, 以完成相应工作. 因此, 至少在任务重分配模块结束前, 子系统内的无人机应能够一直保持通信. 假设整个重规划过程需要耗费的时长为 t_d , 包括无人机间通信消耗的总时长、任务重分配算法和航迹重规划算法消耗的总时长等. 为防止中途脱离通信带来的不便, 如二次重新规划的时间浪费

等, 各无人机在 t 时刻通信伊始, 便根据自己的初始航迹预估 $(t + t_d + \delta)$ 时刻自己所处的位置, δ 为预留的裕值. 据此便可确定 $(t + t_d + \delta)$ 时刻的通信拓扑, 这样可提前避免重规划途中, 通信拓扑突变的情况.

2.3 任务重分配

任务重分配问题指多无人机系统因突发故障无法按初始任务分配方案完成任务, 或初始方案无法满足故障后的系统要求, 此时需要在一定时间内重新分配任务, 尽可能获得最多的任务收益. 为使得任务重分配的结果更加合理, 本文在计算任务收益时, 将减去第2.2节中任务评估环节得到的航迹代价估计值. 根据第1.1节中的假设2可知, 当在线无人机数量大于任务数量时, 无人机与任务间的映射关系为多对一; 当在线无人机数量小于任务数量时, 系统不得不作出选择放弃执行相应数量的任务, 以保证至少能够完成与在线无人机数量相同的任务, 将故障带来的损失降到最低, 此时无人机与任务间的映射关系为一一对应.

放弃任务的选择需要遵循一定的规则, 首先放弃优先级最低的任务, 若优先级相同, 则首先放弃初始收益值最低的任务. 因此, 本小节分为“多对一”和“一一对应”两种情况进行考虑, 分别提出基于收益动态调整规则和基于一致性协调规则的两种任务重分配算法, 详见第3节.

2.4 航迹重规划

航迹重规划问题指多无人机系统为应对突发故障, 给每架无人机重新分配了新的任务, 此时无人机需根据新的任务重新规划飞行航迹, 尽可能使得飞行代价最低. 研究该问题时需考虑无人机动力学约束、最大航程约束、避障约束等.

本文采用基于RRT*的算法^[7]进行在线航迹代价估计. 航迹代价估计首要要求的是快速性, 其次是最优性, 即得到一条避开障碍物的可行航迹即可, 不追求其是所有可行航迹里代价最小的. RRT*算法的快速性, 很符合在线航迹代价估计的要求.

2.5 任务重规划框架

根据以上提出的任务重规划方法, 可得到故障无人机和健康无人机的任务重规划框架, 如图4所示. 该任务重规划方法, 可推广到子系统有多架故障无人机的情况. 若某架故障无人机在评估自身能执行原任务后, 接收到了其他故障无人机发出的重规划请求, 则给予积极反馈, 并评估自己执行其他任务的能力, 以便后续进行任务重规划. 此时, 重规划后该故障无人机并不一定执行其原任务.

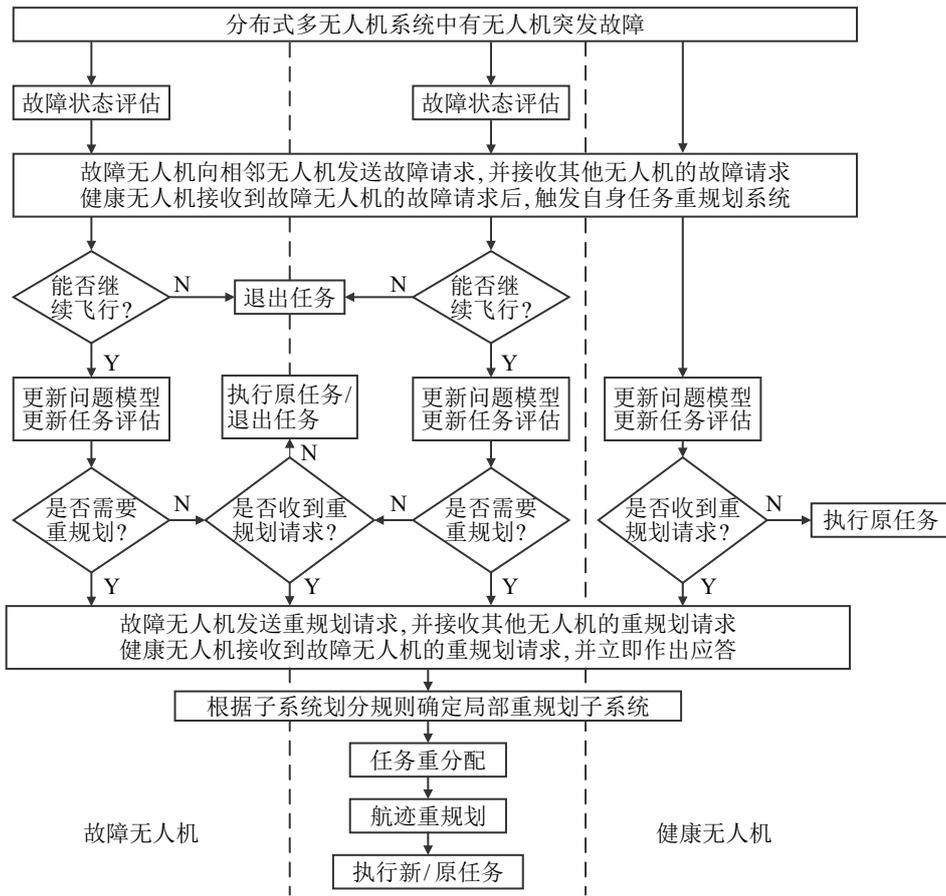


图4 故障无人机和健康无人机任务重规划框架

3 任务重分配算法

在分布式多无人机系统中,没有明确的拍卖者和竞拍者^[18-19],各无人机也没有全局视野,需要通过互相间的通信交流任务重分配信息.在分布式拍卖算法中,每架无人机选择自己获利最高的任务投标,与其他无人机通信交流各任务的投标情况,并与和自己投标同一任务的无人机协商以统一报价,若所有任务均被投标,则任务重分配过程结束;若有任务未被投标,则进入下一次循环,无人机会在统一报价的基础上提高报价.每架无人机对任务的估价应由完成该任务可获得的收益减去执行该任务所付出的代价.在拍卖过程中,随循环改变的是各无人机对任务的报价,当报价高到一定程度时,利益最高的任务发生变化,无人机改变投标对象.各无人机提高报价的幅度是不一样的,这取决于当前其最高利益与次高利益间的差值,所以最终一定会有某个时刻达到利益平衡,所有任务均能够被投标.

无人机发生故障后,其性能会受到影响,子系统在进行重规划时,花费的时间越多,故障无人机性能可能越差,因此提出基于收益动态调整规则和一致性协调规则的拍卖算法,必要时可牺牲对最优解的追求.

3.1 基于收益动态调整规则的拍卖算法

当在线无人机数量大于任务数量时,无人机与任务间的映射关系为多对一,因此必定每个时刻都会有任务被多架无人机投标,但是一个任务被投标的越多,其他任务被投标的越少,便会出现有任务没有被投标的情况.此时,引入收益动态调整规则,在任务初

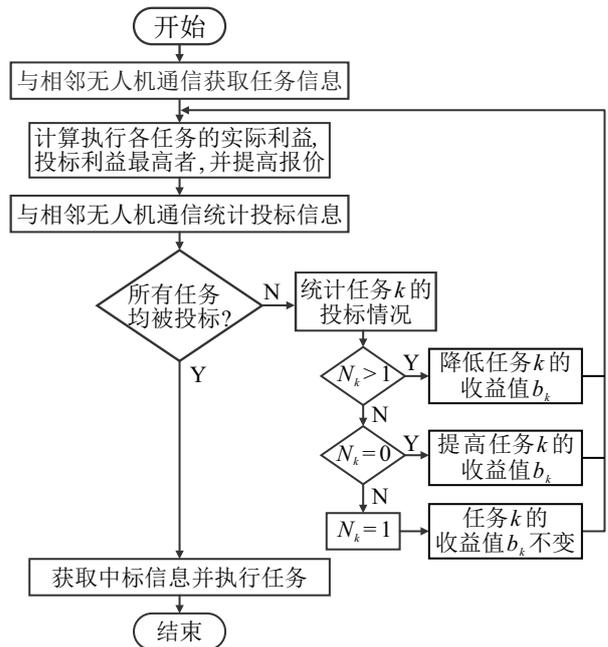


图5 基于收益动态调整规则的拍卖算法流程

始收益值的基础上,根据任务被投标的次数,动态调整更新收益值. 将被投标次数较多的任务收益值降低,此时估价降低,报价提高,实际利益降低,其下一次被投标的可能性降低;将没有被投标的任务收益值提高,估价提高,报价不变,实际利益增加,其下一次被投标的可能性增加. 在动态调整收益时,其幅度应与任务优先级相关,优先级越高的任务在没有被投标时提高的幅度应越大,被多次投标时降低的幅度应越小. 算法步骤如图5所示.

以关于任务 T_k 的分配为例, N_k 为投标任务 T_k 的无人机数目, b_k 为任务 T_k 的收益值,初值为任务 T_k 的初始收益值 T_k^{value} , b_{\max} 为任务收益动态调整上限, α_k 为幅度调节因子.

- 1) 若 $N_k = 0$, 则 $b_k = b_k + \alpha_k \frac{1}{N} (b_{\max} - b_k)$;
- 2) 若 $N_k = 1$, 则 $b_k = b_k$;
- 3) 若 $N_k > 1$, 则 $b_k = b_k - \alpha_k \frac{(N_k - 1)}{N} (b_{\max} - b_k)$.

综上所述,收益动态调整公式可表示为

$$b_k = b_k - \alpha_k \frac{(N_k - 1)}{N} (b_{\max} - b_k). \quad (12)$$

3.2 基于一致性协调规则的拍卖算法

当在线无人机数量小于任务数量时,无人机与任务间的映射关系为一一对应,此时也可直接利用第3.1节的算法进行任务重分配,但是一一对应具有特殊性,引入一致性协调规则将会更快得到分配结果. 一一对应的映射关系意味着每个任务需要且只需要1架无人机投标,当其被多次投标时,故障等级较高的无人机优先中标,若故障等级一样,则实际利

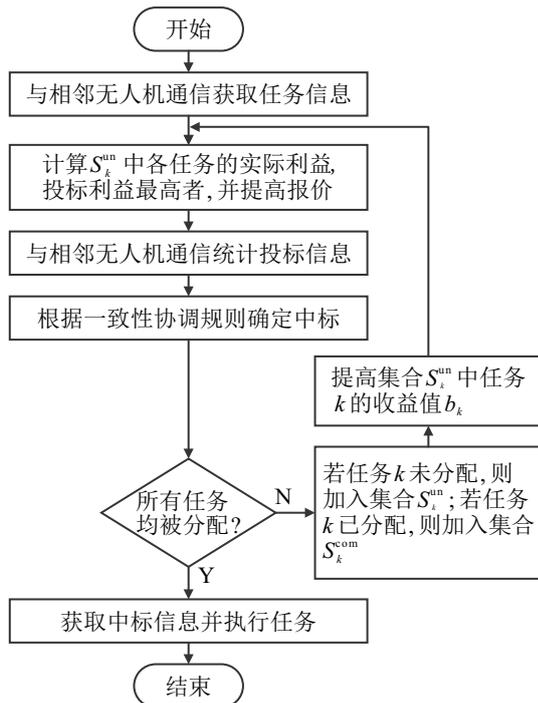


图6 基于一致性协调规则的拍卖算法流程

益较高的无人机优先中标;当其没有被投标时,则提高其收益值. 任务 T_k 若已被分配,则放入集合 S_k^{com} ; 若未被分配,则放入集合 S_k^m . 算法步骤如图6所示.

以关于任务 T_k 的分配为例, e_k 为对任务 T_k 的分配结果,无人机 U_m 和 U_n 同时投标任务 T_k , $m < n$.

- 1) 若 $x_m > x_n$, 则 $e_k = m$;
- 2) 若 $x_m = x_n$, 且 $r_{mk} \geq r_{nk}$, 则 $e_k = m$.

其中: x_m 和 x_n 分别为无人机 U_m 、 U_n 的状态,数值越大,故障等级越高,健康无人机该值为0; r_{mk} 和 r_{nk} 分别为无人机 U_m 、 U_n 执行任务 T_k 的实际利益.

4 仿真实验

为了验证所提出任务重规划方法,本节设置了3组仿真. 在第4.1节中,验证子系统划分规则在示例场景中的应用;在第4.2节中,验证任务重分配阶段基于收益动态调整规则的拍卖算法,并引入RRT*算法估计航迹代价值,应用于在线无人机数量大于任务数量的场景;验证基于一致性协调规则的拍卖算法,并采用RRT*算法进行航迹代价估计,应用于在线无人机数量小于任务数量的场景. 在第4.3节中,对第4.2节中的仿真进行对比分析.

4.1 子系统划分示例场景仿真

任务区域中共有100架无人机在飞往目标点执行任务, t 时刻,突然有15架无人机发生故障,请求任

表1 $(t + t_d + \delta)$ 时刻各无人机的信息

无人机编号	$(t + t_d + \delta)$ 时刻 位置/km	$(t + t_d + \delta)$ 时刻 通信圆内无人机编号	故障等级
1	(3.40, 0.63)	2, 4, 29	健康
2	(3.13, 0.66)	1, 23, 29, 50	轻微型
4	(3.79, 0.60)	1, 5, 7, 58, 82	轻微型
11	(1.15, 0.40)	46, 47, 59, 61	轻微型
14	(0.59, 2.52)	32, 39, 42, 65, 67, 71	健康
19	(3.59, 2.54)	6, 15, 21, 25, 64	健康
20	(3.60, 1.84)	22, 25, 74, 76	健康
22	(3.80, 1.60)	20, 24, 26, 56, 74, 76, 78	轻微型
25	(3.36, 2.21)	15, 19, 20, 21, 27, 74	轻微型
36	(1.67, 1.48)	30, 48, 53, 57	健康
37	(1.73, 2.72)	33, 40, 43, 44	中度型
42	(0.97, 2.70)	14, 41, 43, 44, 71	重大型
43	(1.34, 2.95)	37, 42, 44, 75	健康
44	(1.35, 2.46)	37, 42, 43, 54, 71	健康
46	(1.07, 0.80)	9, 11, 48, 49, 59, 68	中度型
48	(1.46, 1.09)	36, 46, 49, 59, 69	轻微型
49	(1.06, 1.28)	9, 45, 46, 48	健康
53	(1.90, 1.75)	30, 34, 36, 57, 72	健康
57	(1.50, 1.80)	34, 35, 36, 53, 54	轻微型
59	(1.30, 0.65)	11, 46, 47, 48, 69	健康
64	(3.64, 3.00)	6, 19, 51, 52, 77	中度型
65	(0.37, 2.22)	14, 38, 67, 73	中度型
72	(2.33, 1.70)	16, 18, 30, 53	重大型
74	(3.38, 1.82)	17, 20, 22, 25, 27, 91	健康
90	(2.50, 3.75)	60, 86, 94	中度型
92	(3.13, 3.78)	93, 95	重大型

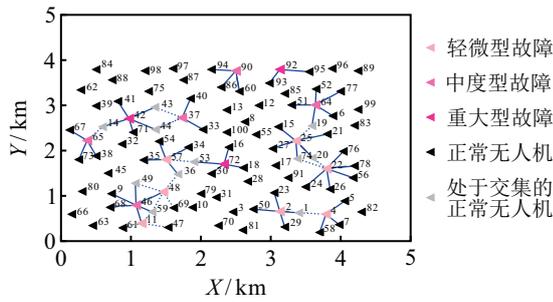


图7 子系统划分示意图

表2 子系统划分结果

子系统	子系统内无人机编号	说明
S_2	1, 2, 23, 29, 50	共5架, 其中 U_2 故障
S_4	4, 5, 7, 58, 82	共5架, 其中 U_4 故障
S_{22}	22, 24, 26, 56, 76, 78	共6架, 其中 U_{22} 故障
S_{25}	15, 20, 21, 25, 27, 74	共6架, 其中 U_{25} 故障
S_{37}	33, 37, 40	共3架, 其中 U_{37} 故障
S_{42}	14, 41, 42, 43, 44, 71	共6架, 其中 U_{42} 故障
S_{46}	9, 11, 46, 48, 49, 59, 68	共7架, 其中 U_{11} 、 U_{46} 、 U_{48} 故障
S_{57}	34, 35, 36, 54, 57	共5架, 其中 U_2 故障
S_{64}	6, 19, 51, 52, 64, 77	共6架, 其中 U_2 故障
S_{65}	38, 65, 67, 73	共4架, 其中 U_2 故障
S_{72}	16, 18, 30, 53, 72	共5架, 其中 U_2 故障
S_{90}	60, 86, 90, 94	共4架, 其中 U_2 故障
S_{92}	92, 93, 95	共3架, 其中 U_2 故障

务重规划,并预估($t + t_d + \delta$)时刻各自的位置,每架无人机的通信半径均为500 m. 各无人机($t + t_d + \delta$)时刻的状态信息和所处的位置信息如表1所示,根据子系统划分规则仿真的结果如图7和表2所示.

在 t 时刻发生故障的15架无人机中,轻微型故障7架,中度型故障5架,重大型故障3架. 根据子系统划分规则,相距较远的直接各自分开规划,相距小于2个通信半径的需要根据不同情况进行进一步划分,最终它们形成了13个局部任务重规划的子系统. U_{90} 与 U_{92} 相距大于1个通信半径小于2个通信半径,但是它们的交集处并没有无人机需要作出选择,因此也直接各自分开规划,形成 S_{90} 和与 S_{92} 两个子系统. 但是,在有多架无人机故障的复杂场景中,处于交集中需要作出选择的健康无人机还是不少的. 其中:根据故障等级作出选择的有5架,分别为 U_{14} 、 U_{19} 、 U_{43} 、 U_{44} 和 U_{53} ;根据无人机数量多少作出选择的有2架,分别为 U_{20} 、 U_{74} ;根据距离远近作出选择的有 U_1 . 除此以外,有几架处于交集处的无人机不需要纠结选择什么,因为向它们传递故障信号的无人机间的距离小于1个通信半径,一定会合在一起进行规划,如 U_{49} 与 U_{59} ; U_{36} 不需要纠结的原因是 U_{48} 选择加入以 U_{46} 为中心的子系统,放弃 U_{36} 和 U_{69} , U_{36} 只有加入子系统 S_{57} 这一个选择.

图7中,可较为直观地看到多无人机故障复杂场景下,重规划子系统的形成过程. 第2.2节中以2架无

人机故障为例提出的子系统划分规则,可以很好地推广适用于多架无人机间,如子系统 S_{46} 中有3架故障无人机,子系统 S_{42} 为 U_{42} 与 U_{65} 、 U_{37} 根据故障等级博弈的结果,子系统 S_{25} 的形成过程中, U_{25} 先是因故障等级低于 U_{64} 而失去了 U_{19} ,后又因无人机数量较少得到了 U_{20} 和 U_{74} . 同时,在最终形成的13个子系统中,根据其通信拓扑结构,可发现其内部信息传递次数均小于等于2次,也意味着任何2架无人机间均可通过直接通信或一定时间内的间接通信共享信息,这为接下来的任务重规划过程奠定了良好的通信基础.

4.2 多无人机任务重规划

4.2.1 在线无人机数量多于待执行任务

设飞行范围为 $2500\text{ m} \times 2500\text{ m}$ 的正方形区域,区域中有10个障碍物,子系统内有7架无人机,通信半径为600 m,待执行任务5个,具体信息如表3和表4所示.

表3 障碍物信息

障碍物	位置参数/km	形状参数/m	是否对无人机有威胁
O_1	(0.35, 0.63)	$R = 152$	是
O_2	(0.63, 0.57)	$R = 133$	否
O_3	(0.47, 1.50)	$R = 133$	否
O_4	(0.70, 1.50)	$R = 100$	是
O_5	(0.95, 1.50)	$R = 152$	否
O_6	(1.15, 0.68)	$R = 122$	是
O_7	(1.30, 0.50)	$R = 111$	否
O_8	(1.40, 0.85)	$R = 133$	否
O_9	(1.50, 1.40)	$R = 180$	是
O_{10}	(1.70, 0.28)	$R = 152$	否

表4 任务信息

任务	位置参数/km	任务优先级	初始分配无人机
T_1	(0.40, 0.40)	最低级	U_1
T_2	(0.76, 1.80)	次高级	U_3
T_3	(1.79, 1.66)	最高级	U_5, U_6
T_4	(1.65, 0.66)	次高级	U_4
T_5	(2.00, 0.28)	最高级	U_2, U_7

假设 t 时刻 U_1 、 U_2 、 U_4 三架无人机突发故障,故障诊断系统进行故障评估,此时各无人机状态如表5和图8(a)所示,并向相邻无人机发送故障信息. 根据故障诊断结果, U_1 为允飞-重大型故障,能够飞行约400 m, U_2 为允飞-轻微型故障,能够飞行约1400 m,

表5 无人机 t 时刻信息

无人机	位置参数/km	故障诊断结果
U_1	(0.44, 0.93)	允飞型,重大型,最多飞行400 m
U_2	(0.88, 0.66)	允飞型,轻微型,最多飞行1400 m
U_3	(0.68, 1.19)	健康
U_4	(0.75, 0.80)	允飞型,中度型,最多飞行900 m
U_5	(1.16, 0.97)	健康
U_6	(0.97, 1.08)	健康
U_7	(0.71, 0.31)	健康

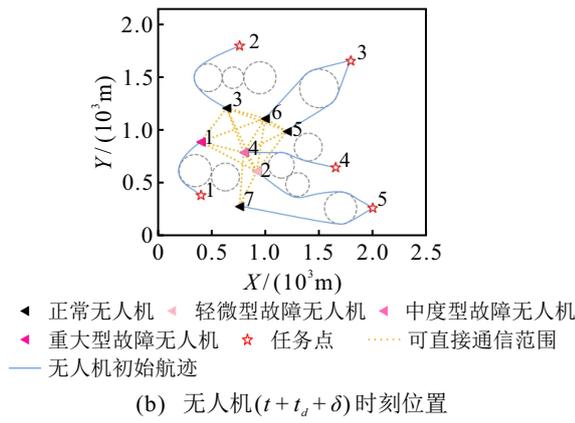
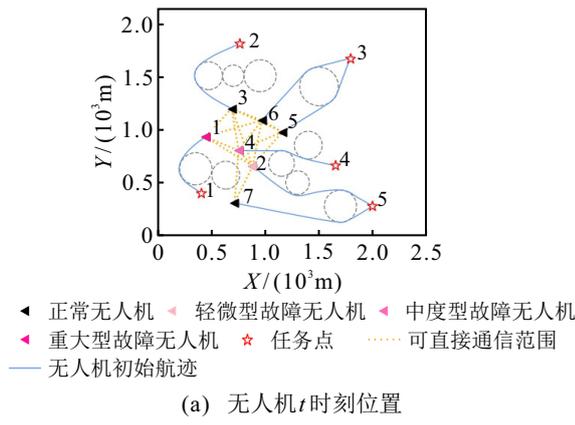


图8 子系统内各无人机通信状态

表6 无人机 $(t+t_d+\delta)$ 时刻预估信息

无人机	预估位置/km	执行原任务 所剩飞行距离/m	可直接通信无人机
U_1	(0.40, 0.90)	697	U_2, U_3, U_4, U_6
U_2	(0.92, 0.62)	1553	U_1, U_4, U_5, U_6, U_7
U_3	(0.64, 1.22)	1149	U_1, U_2, U_4, U_5, U_6
U_4	(0.80, 0.80)	914	$U_1, U_2, U_3, U_5, U_6, U_7$
U_5	(1.20, 1.00)	963	U_2, U_4, U_6
U_6	(1.00, 1.12)	1023	U_2, U_3, U_4, U_5
U_7	(0.76, 0.30)	1421	U_2, U_4

U_4 为允飞-中度型故障,能够飞行约900m。同时,所有无人机均需预估 $(t+t_d+\delta)$ 时刻自己的状态,以便后续进行任务重分配,如表6和图8(b)所示。

根据故障诊断结果,利用快速航迹规划对除了原任务外的其他任务进行评估,结果如表7和图9所示。

根据任务评估结果, U_1 因重大故障离线退出任务, U_4 突发中度型故障,能够继续飞行但是剩余飞行

表7 无人机航迹预估结果

无人机	预估与各任务间的航程/m					说明
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	
U_1	697	1254	1631	1305	1770	无可执行任务
U_2	597	1400	1416	968	1553	可执行 T_1, T_2, T_4
U_3	1102	1149	1281	1249	1650	任务均可执行
U_4	761	1341	1418	914	1403	仅可执行 T_1
U_5	1074	1014	963	652	1157	任务均可执行
U_6	1078	902	1023	847	1324	任务均可执行
U_7	374	1770	1776	1046	1421	任务均可执行

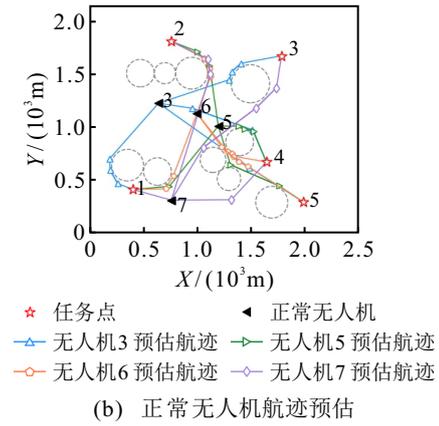
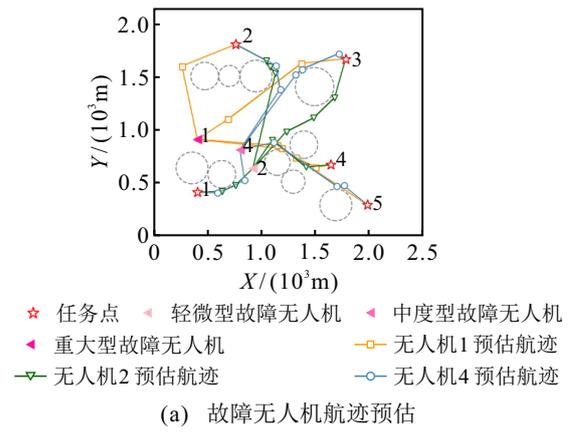


图9 子系统内各无人机航迹预估

表8 在线无人机数量大于任务数量的任务重规划结果

无人机	初规划	重规划	说明
U_1	执行 T_1	无任务执行	退出任务
U_2	执行 T_5	执行 T_4	执行新任务,重规划航迹
U_3	执行 T_2	执行 T_2	执行原任务,原航迹飞行
U_4	执行 T_4	执行 T_1	执行新任务,重规划航迹
U_5	执行 T_3	执行 T_3	执行原任务,原航迹飞行
U_6	执行 T_3	执行 T_3	执行原任务,原航迹飞行
U_7	执行 T_5	执行 T_5	执行原任务,原航迹飞行

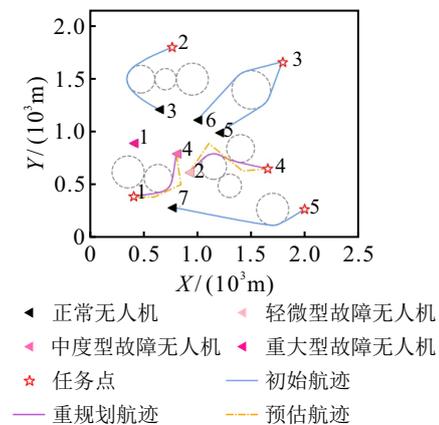


图10 在线无人机数量大于任务数量的任务重规划

距离缩短,仅能够执行任务 T_1, U_2 虽然突发故障,但是因其故障等级较低,还能够继续执行除 T_3, T_5 外的大部分任务。在满足这一故障约束的前提下,此时在线无人机共6架,待执行的任务为5个,为保证任务完

成率,寻求子系统收益的较大值,适用第3.1节的基于收益动态调整规则的拍卖算法进行任务重规划,仿真结果如表8和图10所示.可以发现, U_1 未完成的任务 T_1 转由 U_4 完成,而 U_4 的原始任务 T_4 转由 U_2 完成,其余无人机执行的任务内容并未改变, U_2 、 U_4 需重新规划飞行轨迹.

此结果,既考虑了故障无人机自身的能力损伤和性能衰减,又保证了5个任务的完成率为100%,并在此基础上寻求收益.其中航迹代价估计得到的结果,可帮助故障无人机更加精确地评估任务以及在任务重分配时能够计算更贴近实际的任务收益.

4.2.2 在线无人机数量少于待执行任务

在第4.2.1节中,3架无人机发生故障,最终1架退出本次任务,使得在线无人机数量大于待执行的任务数量.若当时退出任务的无人机数量增多至3架,使得在线无人机数量小于待执行的任务数量,便适用第3.2节的重分配算法.

设飞行范围为 $2500\text{ m} \times 2500\text{ m}$ 的正方形区域,区域中有10个障碍物,子系统内有7架无人机,通信半径为 600 m ,待执行任务5个,具体信息如表3和表4所示.

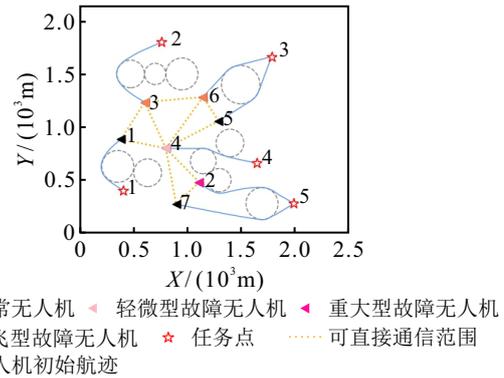
t_1 时刻,假设 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_6 四架无人机突发故障,故障诊断系统进行故障评估,得知 U_2 为允飞-重大型故障,能够飞行约 400 m , U_4 为允飞-轻微型故障,能够飞行约 1400 m , U_3 、 U_6 为断飞型故障,不具备继续飞行的能力.同时,所有无人机预估($t + t_d + \delta$)时刻自己的状态,如表9和图11所示.可以发现, U_6 在($t_1 + t_d + \delta$)时刻将只能与 U_5 通信,不符合信息最大传递次数小于等于2次的要求,因此将不参与子系统的重规划.

表9 无人机状态信息

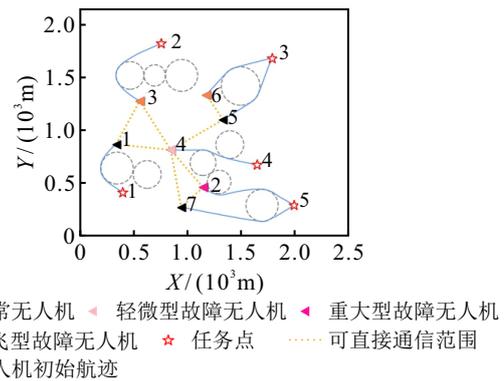
无人机	t_1 时刻/km	($t_1 + t_d + \delta$)时刻/km	($t_1 + t_d + \delta$)时刻可直接通信无人机
U_1	(0.38, 0.88)	(0.34, 0.85)	U_2, U_3, U_4, U_6
U_2	(1.11, 0.48)	(1.15, 0.50)	U_1, U_4, U_5, U_6, U_7
U_3	(0.60, 1.24)	(0.56, 1.26)	U_1, U_2, U_4, U_5, U_6
U_4	(0.80, 0.80)	(0.85, 0.80)	$U_1, U_2, U_3, U_5, U_6, U_7$
U_5	(1.29, 1.06)	(1.34, 1.08)	U_2, U_4, U_6
U_6	(1.15, 1.28)	(1.18, 1.32)	U_2, U_3, U_4, U_5
U_7	(0.90, 0.27)	(0.95, 0.26)	U_2, U_4

根据故障诊断结果,无人机利用快速航迹规划对除原任务外的其他任务进行评估,结果如表10和图12所示.

故障评估后, U_2 因重大型故障无法执行任何任务, U_4 因轻微型故障仍然可执行所有任务.此时在线无人机共4架,待执行的任务为5个,由于1架无人机



(a) 无人机 t 时刻位置



(b) 无人机($t_1 + t_d + \delta$)时刻位置

图11 子系统内各无人机通信状态

表10 无人机航迹预估结果

无人机	预估与各任务间的航程/m					说明
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	
U_1	643	1234	1704	1400	1969	可执行所有任务
U_2	752	1639	1593	676	943	无可执行任务
U_4	772	1261	1345	911	1311	可执行所有任务
U_5	1217	976	831	547	1050	可执行所有任务
U_7	563	1756	1767	929	1113	可执行所有任务

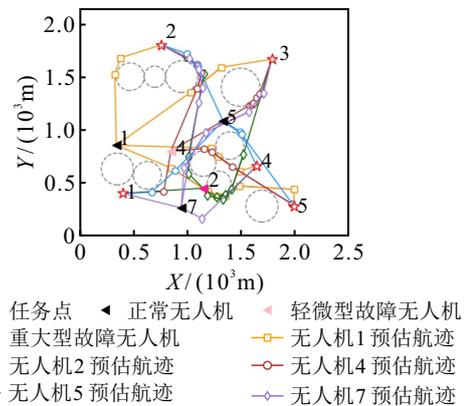


图12 子系统内各无人机航迹预估

最多能够执行1个任务,为最大化任务完成率,必须放弃1个任务,且其他4个任务必须完成,因此转换为“一一对应”的分配问题.根据任务优先级, T_1 由于任务等级最低被放弃执行,采用第3.2节的任务重规划方法,仿真结果如表11和图13所示.可以发现, U_3 未

完成的任务 T_2 转由 U_1 完成,其余无人机执行的任务内容并未改变, U_1 需重新规划飞行轨迹.

此结果,既考虑了故障无人机自身的能力损伤和性能衰减,又保证了任务完成率最大化为80%,并在此基础上寻求收益.其中航迹代价估计得到的结果,可帮助故障无人机更加精确地评估任务以及在任务重分配时能够计算更贴近实际的任务收益.

表 11 在线无人机数量小于任务数量的任务重规划结果

无人机	初规划	重规划	说明
U_1	执行 T_1	执行 T_2	执行新任务,重规划航迹
U_2	执行 T_5	无法任务执行	退出任务
U_3	执行 T_2	无法执行任务	退出任务
U_4	执行 T_4	执行 T_4	执行原任务,原航迹飞行
U_5	执行 T_3	执行 T_3	执行原任务,原航迹飞行
U_6	执行 T_3	无法执行任务	退出任务
U_7	执行 T_5	执行 T_5	执行原任务,原航迹飞行

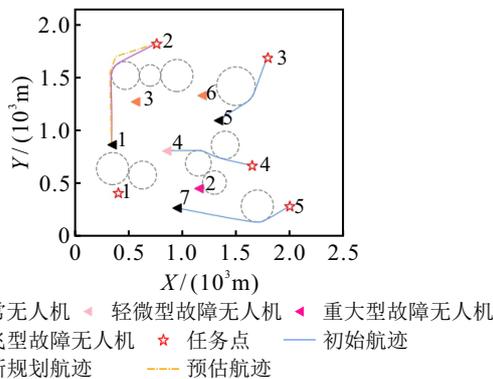


图 13 在线无人机数量小于任务数量的任务重规划

4.2.3 仿真说明

由第4.2.1节可知,航迹预估后能够继续执行任务的无人机只有6架,它们需要进行根据已知的信息进行任务重分配.相较于传统拍卖算法,本文引入收益动态调整公式的拍卖算法能够明显更快地得到满足要求的任务重分配结果,如图14所示.

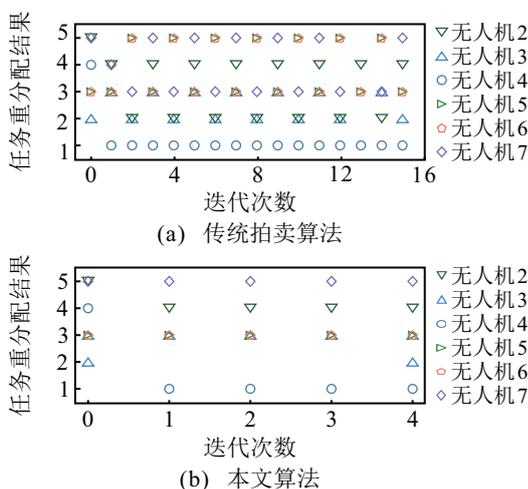


图 14 任务重分配结果对比

用于航迹预估的算法需要具备较快的搜索速度,以节省时间.同为节点扩展算法,RRT*和A*算法在航迹预估时的对比如图15所示.由图15可见,每架无人机在进行自身航迹预估所花费的时间,RRT*略微快一点.

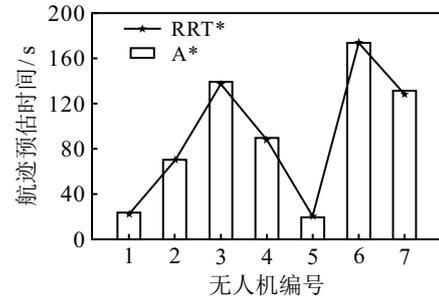


图 15 航迹预估时间对比

5 结论

针对分布式多无人机系统在面对突发故障时如何进行任务重规划这一问题,本文采用局部调度思想,提出了局部子系统任务重规划方法.根据故障后的无人机通信拓扑,提出子系统划分规则,以节约时间空间资源;根据在线无人机与任务间的映射关系,提出了基于收益动态调整 and 一致性协调两种规则的任务重分配算法,以解决“多对一”和“一一对应”两种问题模型.同时,为了使得任务重分配结果更加合理,引入基于RRT*的航迹代价估计,既能够在重分配时考虑飞行轨迹的影响,又能够不浪费时间进行精确最优航迹重规划.仿真结果表明,该方法能够快速地将100架多无人机系统分解为13个子系统,进行局部调度;能够在6架在线无人机5个任务以及4架在线无人机5个任务两种情况下,快速得到新的规划结果.

参考文献(References)

[1] 姜霞, 曾宪琳, 孙健, 等. 多飞行器的分布式优化研究现状与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 524551. (Jiang X, Zeng X L, Sun J, et al. Research status and prospect of distributed optimization for multiple aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524551.)

[2] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 023732. (Wang X K, Liu Z H, Cong Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 023732.)

[3] 朱晓宇, 何兵, 刘刚, 等. 基于一致性差分进化的分布式任务分配[J]. 电光与控制, 2021, 28(9): 20-24. (Zhu X Y, He B, Liu G, et al. Consensus-based differential evolution for decentralized task allocation[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 20-24.)

[4] Cheng W L, Zhang K, Jiang B, et al. Fixed-time

- fault-tolerant formation control for heterogeneous multi-agent systems with parameter uncertainties and disturbances[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, 68(5): 2121-2133.
- [5] Yu Z Q, Zhang Y M, Jiang B, et al. Fractional-order adaptive fault-tolerant synchronization tracking control of networked fixed-wing UAVs against actuator-sensor faults via intelligent learning mechanism[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(12): 5539-5553.
- [6] Yang H L, Jiang B, Yang H, et al. Fault-tolerant cooperative control for multiple vehicle systems based on topology reconfiguration[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(7): 6649-6661.
- [7] 许书诚, 王琪, 刘贤敏. 基于分合粒子群算法的多无人机任务重分配[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(4): 188-191.
(Xu S C, Wang Q, Liu X M. Multi-UAV dynamic task assignment by particle swarm optimization algorithm based on division and union strategy[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(4): 188-191.)
- [8] 张安, 毕文豪, 邱鹏, 等. 基于改进合同网的多UAV打击地面TST任务重分配[J]. *战术导弹技术*, 2019(2): 39-46.
(Zhang A, Bi W H, Qiu P, et al. Mission re-assignment for attacking ground TSTs with multi-UAVs based on improved CNP[J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(2): 39-46.)
- [9] 刘勇, Jaubert Jean, 吴海燕, 等. 一种面向动态需求的多优先级天文观测卫星任务重规划方法[J]. *空间科学学报*, 2020, 40(3): 401-407.
(Liu Y, Jaubert J, Wu H Y, et al. Research on multi-priority astronomical observing satellite task replanning method for dynamic requirement[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(3): 401-407.)
- [10] 史兼郡, 张进, 罗亚中, 等. 基于深度强化学习算法的空间站任务重规划方法[J]. *载人航天*, 2020, 26(4): 469-476.
(Shi J J, Zhang J, Luo Y Z, et al. Re-planning method for space station mission based on deep reinforcement learning algorithm[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(4): 469-476.)
- [11] 贾高伟, 王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(1): 99-111.
(Jia G W, Wang J F. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(1): 99-111.)
- [12] 陈侠, 乔艳芝. 无人机任务分配综述[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2016, 33(6): 1-7.
(Chen X, Qiao Y Z. Summary of unmanned aerial vehicle task allocation[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2016, 33(6): 1-7.)
- [13] Fu X W, Feng P, Gao X G. Swarm UAVs task and resource dynamic assignment algorithm based on task sequence mechanism[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 41090-41100.
- [14] 庞强伟, 胡永江, 李文广. 多无人机多目标协同侦察航迹规划算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(3): 340-348.
(Pang Q W, Hu Y J, Li W G. Path planning algorithm for multi-UAVs cooperative reconnaissance on multiple targets[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(3): 340-348.)
- [15] 周德云, 王鹏飞, 李泉扬, 等. 基于多目标优化算法的多无人机协同航迹规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(4): 782-787.
(Zhou D Y, Wang P F, Li X Y, et al. Cooperative path planning of multi-UAV based on multi-objective optimization algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(4): 782-787.)
- [16] 陈璞, 严飞, 刘钊, 等. 通信约束下异构多无人机任务分配方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 313-326.
(Chen P, Yan F, Liu Z, et al. Communication-constrained task allocation of heterogeneous UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(8): 313-326.)
- [17] 阮晓钢, 周静, 张晶晶, 等. 基于子目标搜索的机器人目标导向RRT路径规划算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(10): 2543-2548.
(Ruan X G, Zhou J, Zhang J J, et al. Robot goal guide RRT path planning based on sub-target search[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(10): 2543-2548.)
- [18] 杨惠珍, 王强. 基于动态蚁群劳动分工模型的多AUV任务分配方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1911-1919.
(Yang H Z, Wang Q. A multi-AUV dynamic task allocation method based on antcolony labor division model[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(8): 1911-1919.)
- [19] 黄亭飞, 程光权, 黄魁华, 等. 基于DQN的多类型拦截装备复合式反无人机任务分配方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 142-150.
(Huang T F, Cheng G Q, Huang K H, et al. Task assignment method of compound anti-drone based on DQN for multi type interception equipment[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 142-150.)

作者简介

周文惠(1998—), 女, 硕士生, 从事多智能体任务分配、路径规划等研究, E-mail: zhouwenhui@nuaa.edu.cn;

齐瑞云(1979—), 女, 教授, 博士生导师, 从事航空航天器智能控制与容错控制等研究, E-mail: ruiyun.qi@nuaa.edu.cn;

姜斌(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错控制及其在飞机、卫星和高速列车中的应用等研究, E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)