



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 基于状态切换的杂草测绘无人机集群失效控制算法

何勇, 徐鑫, 郭晓彤

引用本文:

何勇, 徐鑫, 郭晓彤. 基于状态切换的杂草测绘无人机集群失效控制算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1587–1594.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1325>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大规模固定翼无人机集群编队控制方法

Formation control of large-scale fixed-wing unmanned aerial vehicle swarms

控制与决策. 2021, 36(9): 2063–2073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0076>

#### 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>

#### 分布式无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

#### 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>

# 基于状态切换的杂草测绘无人机集群失效控制算法

何勇<sup>†</sup>, 徐鑫, 郭晓彤

(东南大学 经济管理学院, 南京 210096)

**摘要:** 设计一套基于状态切换的杂草测绘无人机集群级联失效控制算法. 首先, 分析农业测绘无人机集群的作业场景特征, 并基于此将杂草测绘无人机集群的单机节点状态划分为初级态、中级态和高级态 3 种类型; 然后, 结合复杂网络基本原理提出一套基于单机节点状态切换和最小负载原则的失效控制算法; 最后, 通过数值算例和综合对比分析验证所提出算法的有效性和最佳使用条件. 可以发现, 不同失效过程对集群保持结构稳定和功能稳定的影响程度不同: 中级态节点初始失效时网络的受影响程度最大; 高级态节点初始失效时失效控制算法的效果最为显著; 单机测绘半径和集群含有的低级态单机数目是影响集群测绘面积的两个因素, 二者与集群测绘面积呈正相关, 且前者对于监控面积的提升效果更加显著.

**关键词:** 复杂网络; 杂草测绘; 无人机集群; 级联失效; 控制算法

中图分类号: N949

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1325

引用格式: 何勇, 徐鑫, 郭晓彤. 基于状态切换的杂草测绘无人机集群失效控制算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1587-1594.

## Failure control algorithm of weed mapping UAV swarm based on state switching

HE Yong<sup>†</sup>, XU Xin, GUO Xiao-tong

(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The weed mapping UAV swarm is studied and a cascade failure control algorithm based on state switching is designed. First, we analyze the agricultural mapping UAV swarm's characteristics of the working environment, then the single-machine node state of the weed mapping UAV cluster is divided into three types: Primary state, intermediate state, and advanced state. Secondly, a set of failure control algorithms are designed based on the principle of single-node state switching and minimum load. Finally, the validity and optimal operating conditions of the algorithm are verified by numerical studies. The results show that: Different failure processes have different degrees of influence on the structural stability and functional stability of the cluster, and the network is most affected when the intermediate node fails initially. The failure control algorithm has the most significant effect when the high-state node fails; The mapping radius of a certain node and the number of low-state nodes contained in the cluster are the most important factors affecting the cluster mapping. The two factors are positively correlated with the mapping area of the UAV swarm and the former always has a more significant effect on the improvement of the monitoring area.

**Keywords:** complex network; weed mapping; UAV swarm; cascading failure; control algorithm

## 0 引言

与传统农业相比, 精准农业强调通过农业生产与先进信息技术的深度结合, 最终提升农业综合效益. 无人机作为参与现代农业的典型技术代表, 具备机动性、灵活性和高效率等方面的技术优势, 无人机群能够发挥更大的规模优势和效率优势. 目前, 无人机和无人机群在农林植保领域的适用场景正变得越来越

广泛<sup>[1-2]</sup>, 相关市场规模也在专业技术升级的推动下不断增大. 针对农业生产中长期存在的大规模田地中早期病虫害的信息监测和杂草地地图绘制等需求, 无人机群能够通过数量上的优势和内部协同实现任务目标<sup>[3-5]</sup>. 尽管已有利用无人机群开展杂草测绘作业的典型案例, 相关专业技术也在不断更新迭代, 但一些关键问题和潜在挑战仍然存在. 目前, 针对测绘集

收稿日期: 2022-07-24; 录用日期: 2023-02-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72171047, 71771053); 江苏省自然科学基金项目(BK20201144).

责任编辑: 吴立刚.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: hy@seu.edu.cn.

群管理技术的研究较少,且无人机集群技术与杂草测绘场景的融合程度不够.基于此,本文以杂草测绘集群为研究对象,提出一套考虑杂草测绘集群作业特征的可靠性建模方法,为大规模农场的作业效率和效果提升提供技术支持.

近年来,集群机器人、物联网与无人机技术的结合等在精准农业方面的应用受到了广泛关注<sup>[6-9]</sup>.文献<sup>[10-12]</sup>对相关研究进行了梳理和总结.在算法方面,现有研究大多将改进后的极大似然算法、粒子群算法等通用算法<sup>[13-17]</sup>应用于各类场景作业,但是,存在无人机群技术与农业场景特征的契合程度不够高,集群组网可靠性相关技术并未将实际场景特征量化为参数指标等问题,导致集群执行作业时效率低下或效果不显著.基于此,本文提出基于最小测绘通信压力的组网控制算法.

目前,对于农用无人机群的应用研究仍然不深入,在无人机群理论研究领域,鲜有文献从集群管理角度展开研究,对应用场景的特征考虑尚不充分.大多研究方法仅从现有相关算法的基础上进行优化迭代.基于此,本文综合考虑无人机群在农业领域应用时集群规模较小、测绘通信压力变化程度较大、节点状态存在差异性、环境不确定性大等特征,设计适用于杂草测绘的无人机群可靠性建模方案;以测绘通信压力最小化原则作为集群组网的核心原则,以状态分类和状态切换作为集群发生级联失效后控制算法起作用的重要基础,以集群综合结构矩阵最小变化量为优化目标,通过相关算法进行求解,并设置对照组验证算法和恢复策略的有效性.

## 1 集群和作业场景特征分析

本节对比分析传统无人机集群与杂草测绘无人机集群在结构特征和应用场景特征方面的差异,并基于此,提出测绘通信压力相关指标,为后文集群失效控制算法研究提供指标基础.

### 1.1 作业场景特征

在结构特征方面,相较于传统无人机集群对集群规模要求视任务复杂度而定、单体成员存在异构以及存在分层拓扑的特点,杂草测绘无人机集群拥有对集群规模要求较小、同构不同权且不存在分层拓扑的特点.在场景特征方面,传统无人机集群目标集中程度视任务类型而定,单机任务完成方式一般为高空远距离,且其节点失效类型为蓄意攻击或随机攻击;杂草测绘无人机集群目标集中程度较高,单机任务完成方式为超低空近距离,节点失效类型为随机失效.

### 1.2 场景特征与测绘通信压力

为了量化作业场景特征给集群带来的影响,本节提出节点测绘通信压力(pressure of communication for node, PCN)和连边测绘通信压力(pressure of communication for edge, PCE),该指标也是后续设计控制算法的基础.节点测绘通信压力是在考虑单机节点能力上限的基础上,衡量节点剩余可承受负载大小的指标.一般而言,测绘通信压力越大,剩余可承受负载能力越小,节点吸收周围区域风险的能力越弱,该节点越易出现故障.考虑到节点测绘通信压力与网络其他成员联动,从复杂网络拓扑特征的角度定义节点测绘通信压力,其计算方式如下式所示:

$$PCN_l = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{\deg(i)} PCN_i + \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \left( \prod_{m=1}^{N_{sp}^j} \frac{1}{\deg(m)} \right) PCN_j, \quad l = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

其中:  $N_1$  为所有与节点  $l$  直接相连的其他节点数;  $N_2$  为所有与节点  $l$  间接相连的其他节点数;  $N$  为无人机杂草测绘集群中节点的总个数 ( $N_1 + N_2 + 1 = n$ );  $PCN_l$  为节点  $l$  的可承受的测绘通信压力;  $N_{sp}^j$  为节点  $j$  不与节点  $l$  直接相连,节点  $j$  到节点  $l$  的最短路径上经过的其他节点数(包含节点  $j$ ).

连边测绘通信压力是节点测绘通信压力的衍生指标,反映了任意两个节点间通信的难易程度和压力大小. PCE 值越大,表明对应节点间的通信较为频繁且通信压力较大;反之,则表明该连边潜在的通信能力尚未被充分利用.计算方式如下式所示:

$$PCE_{ij} = \begin{cases} \lambda_0 \left| \frac{1}{\deg(n_i)} - \frac{1}{\deg(n_j)} \right| \cdot |PCN_i - PCN_j|, & \deg(n_i) \neq \deg(n_j), PCN_i \neq PCN_j; \\ \lambda_1 \left| \frac{1}{\deg(n_i)} - \frac{1}{\deg(n_j)} \right|, & \deg(n_i) \neq \deg(n_j), PCN_i = PCN_j; \\ \lambda_2 |PCN_i - PCN_j|, & \deg(n_i) = \deg(n_j), PCN_i \neq PCN_j; \\ \min\{PCE_{lm}\}, & \deg(n_i) = \deg(n_j), PCN_i = PCN_j. \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见,连边的通信承载压力受到对应节点的测绘通信压力的影响,当对应节点的度值相等时,PCE值与对应节点的PCN差值的绝对值正相关.

## 2 考虑状态切换的集群失效控制算法

本节将提出一套考虑状态切换的失效传递算法,并结合3种失效情形和对比案例展开讨论,验证所提出算法在降低失效影响程度和提升网络稳定性方面的优势.

### 2.1 失效传递原则

集群中能够针对单机状态特征进行分类的基础为过载现象,网络过载的假设为每个节点成员均存在一定能力上限,超过该上限后对应的节点将失效.无人机集群中的单机也存在过载现象,因此,需要针对单机有限能力进行差异化的功能分配,进而划分出不同的单机状态类型.

从应用场景角度而言,状态分类可依据不同单机节点在功能分配方面的差异,因地制宜地切换角色来适应动态变化的环境,充分发挥单机节点的潜在能力,并保证杂草测绘集群的高稳定性.从集群网络结构而言,对节点进行分类的依据是节点在网络中所处的拓扑结构差异.从分类标准而言,按照总负载恒定且分配比例不定的原则,状态分为3类:高级态 $H$ 、中级态 $M$ 和初级态 $L$ .  $Q_{\max}$  ( $Q_{\max} = Q_{\max}^{\text{non-s}} + Q_{\max}^s$ ) 为节点最大负载能力,  $Q_{\max}^{\text{non-s}}$  和  $Q_{\max}^s$  分别为用于非监控任务和监控任务的节点负载. 当  $Q_{\max}^{\text{non-s}} : Q_{\max}^s > 1$  时,节点状态处于高级态;当  $Q_{\max}^{\text{non-s}} : Q_{\max}^s = 1$  时,节点状态处于中级态;当  $Q_{\max}^{\text{non-s}} : Q_{\max}^s < 1$  时,节点状态处于初级态. 不同状态类型的特征如表1所示.

表1 分类节点的状态特征

指标类型	高级态(H)	中级态(M)	初级态(L)
功能数量	多	中	少
单节点的监控半径	小	中	大
剩余承压能力	弱	中	强

由表1可见,节点的负载能力是一定的:高级态承担了包括控制、中继和任务在内的多种功能,其剩余的通信承压能力最小,且其功能较多,用于任务的负载也较小,该类单机节点的监控半径也相对较小;初级态由于功能单一,其监控半径和剩余承压能力均相对较大;而中级态节点的各项指标介于高级态与初级态之间.

另一方面,每个节点的状态可依据内部结构调整和外部环境的改变进行切换,以保证网络在结构和功能方面的稳定性.状态切换的两个原则分别为充分

表2 不同状态间的转换优先级

初始失效节点的状态	不同状态转换的优先级(从高到低)
初级态(L)	$M$ 转换为 $H$ ; $L$ 转换为 $M$ ; $L$ 转换为 $H$
中级态(M)	$L$ 转换为 $M$ ; $L$ 转换为 $H$ ; $M$ 转换为 $H$
高级态(H)	$M$ 转换为 $H$ ; $L$ 转换为 $H$ ; $L$ 转换为 $M$

利用剩余通信承载能力和切换成本,3种状态的切换优先级如表2所示.

由表2可见,状态切换的方向是单向的,即仅从低级状态切换至高级状态,原因是低级状态节点的剩余承压能力总是强于高级态节点,这种切换有助于充分发挥节点潜在能力,进而维持网络的持续性稳定.此外,不同状态的节点间跨级存在一定切换成本,故不同状态的节点初始失效时,对应的状态切换优先级存在差异.

### 2.2 3种失效类型下的控制算法

本文通过设计失效控制算法以确保集群在面对不确定性故障时最大程度地保持网络结构和功能的稳定,进而确保集群能够正常开展杂草测绘作业.本节将分别讨论3种状态的节点初始失效时具体的失效传递特征及其差异.此外,通过对关键指标的设定和对照组(随机模式)的对比分析,探究3种情形下最小负载失效传递模式的优势.

按照最小负载的原则,高级态节点初始失效时,会涉及到相邻节点从 $M$ 态转换为 $H$ 态,其具体的传递机制如算法1所示.

**算法1** 考虑测绘状态切换的失效控制算法( $H$ 态节点初始失效).

输入: 正在运行的网络 $\text{Network}^0$ ,某一处于 $H$ 态的单机节点 $n_i^H$ ,失效节点累计数 $S$ ,所有失效节点的集合 $F_i$ ;

输出: 含有节点总数为 $(N - S^*)$ 的无人机集群网络 $\text{Network}^*$ ,失效节点累计数 $S^*$ ,所有失效节点的集合 $F_i^*$ ,基于通信拓扑的邻接矩阵 $E_{ij}^*$ ,更新后的网络PCN值.

step 1:  $S = 1, F_i = \{n_i^H\}$  //记录本次失效节点的累计数 $S$ 和所有失效节点成员的集合 $F_i$ .

step 2: 使得  $\text{PCN}_i^{H,\text{old}} = \text{PCN}_i^{H,\text{whole}}$  //更新计算所有处于高级态的单个无人机节点的测绘通信压力值.

step 3: 遍历所有与初始节点相邻的节点,并找到PCN值最小的节点 $n_{j_x}$ .

step 4:  $\text{state}(n_{j_x} = M \rightarrow H)$  //节点 $n_{j_x}$ 的测绘状态从中级切换为高级,取代初始失效节点 $n_i^H$ .

step 5: 比较  $\text{PCN}_i^{H,\text{old}}$  与  $\left( C_{j_x \max}^{H,\text{old}} - \sum_{k_x \in B_{k_x \rightarrow j_x}} \frac{1}{\text{deg}(k_x)} \text{PCN}_{k_x}^{M,\text{old}} \right), \forall k_x \in B_{k_x \rightarrow j_x}, d_{k_x \rightarrow j_x} = 1$  //比较节点由于状态切换新承担的测绘通信压力与该节点原有的剩余可承担测绘通信压力,直至前者小于后者.

step 6: 直至

$$\sum_{i \in F_i} \text{PCN}_i^{H,\text{old}} <$$

$$C_{(i+1)\max}^{H,old} - \sum_{(i+1) \in C_{(i+1) \rightarrow i}} \frac{1}{\deg(i+1)} \text{PCN}_{i+1}^{M,old},$$

$\forall (i+1) \in C_{(i+1) \rightarrow i}, d_{(i+1) \rightarrow i} = 1$  //结束.

step 7: 更新计算与节点  $n_{j_x}$  相邻的后续失效节点的剩余可承担测绘通信压力.

step 8:  $F_i^* = \{n_i^M, n_{j_x}^M, n_{k_x}^M, \dots\}, S^* = \text{count}(F_i^*) - 1$  //更新计算累计数  $S^*$  和所有失效节点成员的集合  $F_i^*$ .

step 9: 更新  $\text{PCN}_m^{(\cdot),\text{whole}}, m \notin F_i^*; d_{ab} = 0, a, b \in F_i^*$  //重新计算网络所有未失效节点的测绘通信压力,并取消所有与失效节点直接相连的其他通信连接.

step 10: 返回  $\text{Network}^*, E_{ij}^*$  //输出含有节点总数为  $(N - S^*)$  的无人机集群网络  $\text{Network}^*$  以及基于通信拓扑的邻接矩阵  $E_{ij}^*$ .

$H$  态节点失效后有3个关键阶段: 1) 在初始失效节点周围找到PCN值最小的节点,并将其由  $M$  态转换为  $H$  态. 2) 判断该节点的剩余承载能力是否能够完全吸收原  $H$  态节点失效后释放的通信压力,若能,则失效不再向周围传递,失效结束;否则,继续向周围传递,直至某个节点的剩余承载能力能完全吸收所用释放的通信压力. 3) 失效结束后,所有节点的PCN值被重新分配,网络再次达到稳定运行状态.

与高级态节点初始失效情形相比,中级状态节点初始失效时需要考虑是否存在相应节点的状态转换过程,与  $H$  态节点初始失效情形相比,  $M$  态节点初始失效时,需要考虑是否存在状态切换,其具体的失效传递机制如算法2所示.可以看出,当存在直接与初始失效的  $M$  态节点相连的  $L$  态节点时,对应含有最小PCN值的  $L$  态节点状态转换为  $M$  态;否则,不存在该种状态切换,初始失效  $M$  态节点周围的含有最小PCN值的  $M$  态节点成为替代节点,其余关键环节与  $H$  态节点失效情形一致.不同于  $H$  态与  $M$  态节点初始失效时较为复杂的判定逻辑,初级状态节点初始失效时与其相邻的  $M$  态或  $H$  态节点可直接吸收其原本承担的较小的通信承载压力.

**算法2** 考虑测绘状态切换的失效控制算法( $M$  态节点初始失效).

输入: 正在运行的网络  $\text{Network}^0$ , 某一处于  $H$  态的单机节点  $n_i^M$ , 失效节点累计数  $S$ , 所有失效节点的集合  $F_i$ ;

输出: 含有节点总数为  $(N - S^*)$  的无人机集群网络  $\text{Network}^*$ , 失效节点累计数  $S^*$ , 所有失效节点的集合  $F_i^*$ , 基于通信拓扑的邻接矩阵  $E_{ij}^*$ , 更新后的网络PCN值.

step 1:  $S = 1, F_i = \{n_i^M\}$  //记录本次失效节点的

累计数  $S$  和所有失效节点成员的集合  $F_i$ .

step 2: 若  $\exists d_{ij} = 1$  和  $\text{state}(n_j) = L$  //当存在与节点  $n_i^M$  直接相邻的初级态节点的情形.

step 3: 若  $\text{count}(N_j) = k > 1$  和  $N_j = \{n_j, j = 1, 2, \dots, k\}$  //当该初级态节点的总个数大于1的情形.

step 4: 集合  $N_j$  中测绘通信压力最小值对应的初级态节点  $j_x$ .

step 5:  $\text{state}(n_{j_x}) = L \rightarrow M$  //节点  $n_{j_x}$  的测绘状态从中级切换为高级,取代初始失效节点  $n_i^M$ .

step 6: 否则,  $\text{state}(n_j) = L \rightarrow M$  //节点  $n_{j_x}$  的测绘状态从中级切换为高级,取代初始失效节点  $n_i^M$ .

step 7: 判断结束:  $S = 2, F_i = \{n_i^M, n_{j_x}^M\}$  or  $\{n_i^M, n_j^M\}$  //更新计算累计数  $S^*$  和所有失效节点成员的集合  $F_i^*$ .

step 8: 否则,  $\text{PCN}_i^{M,old} = \text{PCN}_i^{M,whole}$  //当不存在直接相邻的初级态节点时,更新计算所有处于中级态的单个无人机节点的测绘通信压力值.

step 9: 遍历所有与初始节点相邻的中级态节点,并找到PCN值最小的节点  $n_{j_x}$ .

判断结束.

step 10: 比较节点由于状态切换新承担的测绘通信压力和该节点原有的剩余可承担测绘通信压力,直至前者小于后者.

step 11: 直至

$$\sum_{i \in F_i} \text{PCN}_i^{M,old} <$$

$$C_{(i+1)\max}^{M,old} - \sum_{(i+1) \in C_{(i+1) \rightarrow i}} \frac{1}{\deg(i+1)} \text{PCN}_{i+1}^{M,old},$$

$$\forall (i+1) \in C_{(i+1) \rightarrow i}, d_{(i+1) \rightarrow i} = 1,$$

结束.

step 12: 更新计算与节点  $n_{j_x}$  相邻的后续失效节点的剩余可承担测绘通信压力.

step 13:  $F_i^* = \{n_i^M, n_{j_x}^M, \dots\}, S^* = \text{count}(F_i^*) - 1$  //更新计算累计数  $S^*$  和所有失效节点成员的集合  $F_i^*$ .

step 14: 更新  $\text{PCN}_m^{(\cdot),\text{whole}}, m \notin F_i^*; d_{ab} = 0, a, b \in F_i^*$  //重新计算网络所有未失效节点的测绘通信压力,并取消所有与失效节点直接相连的其他通信连接.

step 15: 返回  $\text{Network}^*, E_{ij}^*$  //输出含有节点总数为  $(N - S^*)$  的无人机集群网络  $\text{Network}^*$  以及基于通信拓扑的邻接矩阵  $E_{ij}^*$ .

不同于  $H$  态和  $M$  态节点初始失效时较为复杂的判定逻辑,初级状态节点初始失效时的传递机制如算法3所示.可以看出,当  $L$  态节点初始失效时,与其相邻的  $M$  态或  $H$  态节点可直接吸收其原本承担的

较小的通信承载压力.

**算法3** 考虑测绘状态切换的失效控制算法( $L$ 态节点初始失效).

输入: 正在运行的网络 $\text{Network}^0$ , 某一处于 $H$ 态的单机节点 $n_i^L$ , 失效节点累计数 $S$ , 所有失效节点的集合 $F_i$ ;

输出: 含有节点总数为 $(N - S^*)$ 的无人机集群网络 $\text{Network}^*$ , 失效节点累计数 $S^*$ , 所有失效节点的集合 $F_i^*$ , 基于通信拓扑的邻接矩阵 $E_{ij}^*$ , 更新后的网络PCN值.

step 1:  $S = 1, F_i = \{n_i^L\}$  //记录本次失效节点的累计数 $S$ 和所有失效节点成员的集合 $F_i$ .

step 2: 若 $\exists d_{ij} = 1$ 和 $\text{state}(n_j) = H$  //当存在与节点 $n_i^L$ 相邻的高级态节点 $n_j$ 时.

step 3:  $\text{PCN}_j^{H,\text{new}} = \text{PCN}_j^{H,\text{old}} + \text{PCN}_i^{L,\text{old}}$  //更新后节点 $n_j$ 的测绘通信压力是原有部分与失效节点 $n_i^L$ 部分之和.

step 4: 否则, 若 $\exists d_{ij} = 1$ 和 $\text{state}(n_j) = M$  //当存在与失效节点 $n_i^L$ 相邻的中级态节点 $n_j$ 时.

step 5:  $\text{PCN}_j^{M,\text{new}} = \text{PCN}_j^{M,\text{old}} + \text{PCN}_i^{L,\text{old}}$  //更新后节点 $n_j$ 的测绘通信压力是原有部分与失效节点 $n_i^L$ 部分之和.

判断结束.

step 6:  $S = 2, F_i^* = \{n_i^L, n_j^{(\cdot)}\}$  //更新计算累计数 $S^*$ 和所有失效节点成员的集合 $F_i^*$ .

step 7: 更新 $\text{PCN}_m^{(\cdot),\text{whole}}, m \notin F_i^*; d_{ab} = 0, a, b \in F_i^*$  //重新计算网络所有未失效节点的测绘通信压力, 并取消所有与失效节点直接相连的其他通信连接.

step 8: 返回 $\text{Network}^*, E_{ij}^*$  //输出含有节点总数为 $(N - S^*)$ 的无人机集群网络 $\text{Network}^*$ 以及基于通信拓扑的邻接矩阵 $E_{ij}^*$ .

### 2.3 算法有效性分析

本节将结合所提出失效算法, 设计反映集群网络结构和功能稳定性的指标, 为算例分析中验证算法有效性提供比较对象. 基于无人机集群的任务导向性特征, 考虑结构稳定性和功能稳定性两个维度相关指标, 即通过探究集群PCE值相关指标衡量集群失效前后的结构稳定性, 通过探究任务完成情况相关指标衡量集群失效前后的功能稳定性.

一方面, 通过两个指标衡量集群的结构稳定性: 1) 失效前后每条边测绘通信压力的平均变化情况; 2) 失效前后任意两个不相邻节点间的平均测绘通信压力的变化情况. 二者分别从局部个体和网络整体的角度, 度量网络失效前后网络拓扑结构的变化程度, 其计算公式如下式所示:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta \text{PCE}_{ij}}{\text{PCE}_{ij}}, i, j \in \text{更新后的集群网络}. \quad (3)$$

$$\Delta \text{PCE}_{ij} = \text{PCE}_{ij}^{\text{new}} - \text{PCE}_{ij}^{\text{old}}. \quad (4)$$

$$\overline{\Delta \text{PCE}_{ij}} = \frac{1}{\text{num}(e_{ij})} \Delta \text{PCE}_{ij},$$

$$i, j \in \text{更新后的集群网络}. \quad (5)$$

$$\text{PCC}_{ij} = \begin{cases} \text{PCE}_{ij}, d_{ij} = 1; \\ \max\{\text{PCE}_{ik_1}, \text{PCE}_{k_1k_2}, \dots, \text{PCE}_{k_nj}\}, d_{ij} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

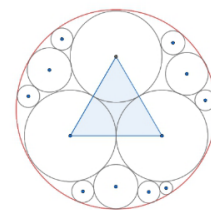
另一方面, 通过设定任务完成情况指标衡量集群功能稳定性. 杂草测绘集群的任务为测绘杂草地, 并最终合并形成完整的杂草地. 测绘面积大小反映了集群任务完成情况, 因此, 本节将失效前后集群的测绘面积作为衡量功能稳定性的指标, 如下式所示:

$$R = r_j \left( 1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{N_j}\right)} \right); \quad (7)$$

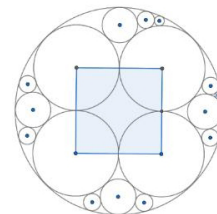
$$N_j = \text{count}(n_j), \text{state}(n_j) = L; \quad (8)$$

$$S(r_j, N_j) = \pi R^2 = \pi r_j^2 \left( 1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{N_j}\right)} \right)^2. \quad (9)$$

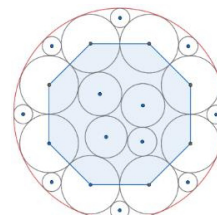
其中:  $N_j$ 为集群中含有 $L$ 态节点的总数目,  $r_j$ 为 $L$ 态单机节点的测绘覆盖半径,  $R$ 为集群整体的测绘覆盖半径,  $S(r_j, N_j)$ 为该种条件下集群整体所能够覆盖



(a) 含有3个 $L$ 态单机节点



(b) 含有4个 $L$ 态单机节点



(c) 含有8个 $L$ 态单机节点

图1 不同 $L$ 态节点数目下集群测绘覆盖面积示意图

的全部测绘区域. 图1为含有不同 $L$ 态节点数目下测绘覆盖面积的示意图.

考虑到大规模农场的常见形状为矩形,而无人机的测绘区域以该机为中心呈圆形分布,为了简化比较过程,在集群正常运作时不考虑集群无法完全覆盖整个农场区域的情形,将集群整体所能够覆盖的圆形测绘区域视为衡量任务完成情况的关键指标.

### 3 算例分析

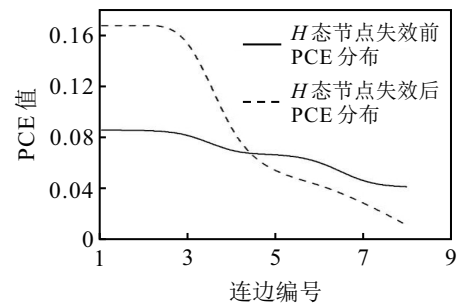
为了更加切合实际情形并降低复杂度,算例分析采用10个无人机节点验证网络内部的演化情况,组网原则为前文所述网络平均最小测绘通信压力,并将相关参数取1或0. 在缺失值处理方面,将影响对比分析过程的单条数据作加权平均化处理,其中权重依据该节点对度分布情况确定权重. 若该条数据不影响对比分析过程,则剔除该条数据. 此外,为了便于后续在同一范围内比较PCE变化量差异,将PCE值作归一化处理. 最后根据组网原则差异,依据随机原则设置对照组集群进行验证.

#### 3.1 不同失效类型下网络状态分析

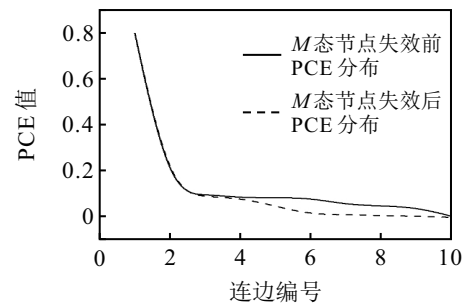
PCE分布的稳定对于维持集群稳定性有重要作用,稳定的PCE分布下各单机节点间存在较多的通信冗余,有助于集群增强潜在风险的吸收能力. 本节探究4种不同失效类型下,失效前后集群的PCE分布变化情况.

图2为4种失效情形下的PCE分布变化情况. 由图2可见,从连边通信压力值的分散程度上看: $M$ 态节点失效前后相关连边的PCE分布最分散,值区间范围为 $[0, 0.8]$ ;其余3种失效情形下的PCE分布较为集中,PCE区间范围为 $[0, 0.18]$ . 可见, $M$ 态节点失效时对网络相关连边的状态影响最大,可能原因是 $M$ 态节点主要功能为中继,只要网络处于运行状态,控制或任务功能的实现均需要中继节点的正常运转.

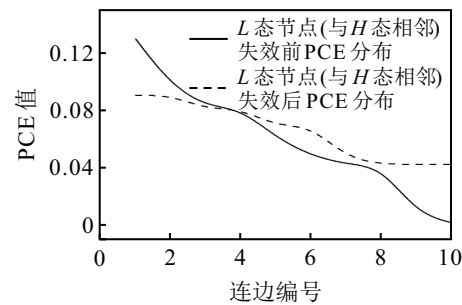
从失效前后的PCE值分布差异上看,共有3种情形: $H$ 态节点失效后相关连边的PCE值极差变大,与 $H$ 态相邻的 $L$ 态节点失效后相关连边的PCE值极差变小,而 $M$ 态节点和与 $M$ 态相邻的 $L$ 态节点失效后相关连边的PCE值极难以保持稳定. 一般而言,PCE极差越大,节点和连边中剩余可利用程度越大,网络吸收风险的能力也越强. 可以看出, $H$ 态节点失效后,大量负载被释放,网络负载分配更加不均匀,其风险吸收能力也有所提高. 相反地,与其直接相连的 $L$ 态节点失效后,潜在负载分配对象减少,网络失效后只能在少数固定节点间进行负载重分配,风险吸收能力降低. 而与 $M$ 态相关的节点失效后,由于该类节点在



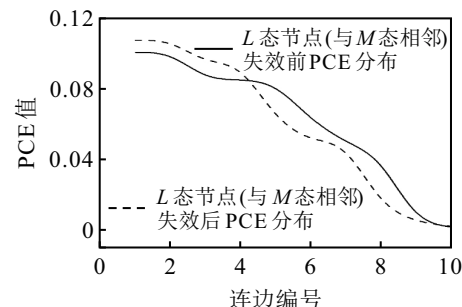
(a)  $H$ 态节点失效



(b)  $M$ 态节点失效



(c) 邻 $H$ 的 $L$ 态节点失效



(d) 邻 $M$ 的 $L$ 态节点失效

图2 4种失效情形下的PCE分布变化情况

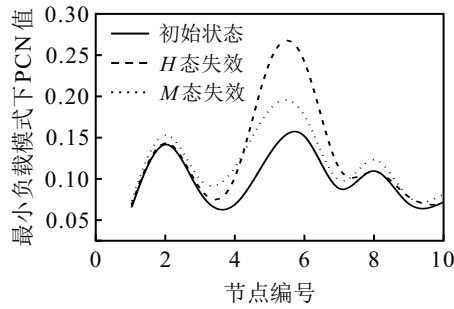
网络中数目较多,一般不涉及与 $H$ 态和 $L$ 态状态节点的切换,风险吸收能力保持稳定.

#### 3.2 不同失效模式下网络状态分析

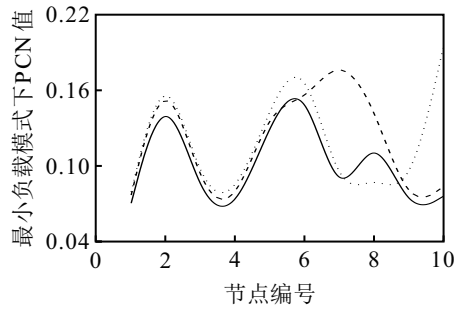
PCN的变化情况分析是从单机节点的角度观测其在失效前后测绘压力的变化情况. 本节分别在最小测绘通信压力模式和随机模式下,对比分析4种失效类型下PCN值的失效前后变化情况,如图3和图4所示.

从不同失效类型角度看,无论是最小负载模式还是随机模式, $H$ 态节点和 $M$ 态节点失效后会导致每个节点的PCN值增加,进而导致网络整体的PCN负

载增加,网络风险应对能力会降低,而L态节点失效对网络风险应对能力的抑制效应更弱.



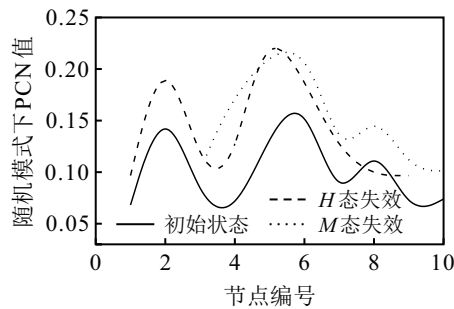
(a) H态和M态的节点失效



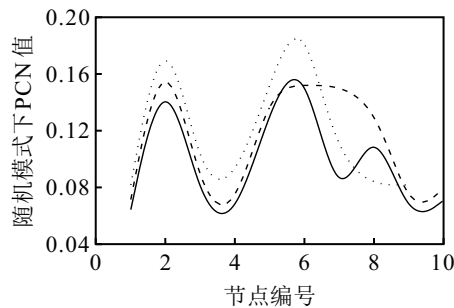
--- 与H态相邻的L态失效    — 初始状态  
..... 与M态相邻的L态失效

(b) 邻H的L态和邻M的L态节点失效

图3 最小负载模式下不同状态节点失效前后的PCN分布



(a) H态和M态的节点失效



--- 与H态相邻的L态失效    — 初始状态  
..... 与M态相邻的L态失效

(b) 邻H的L态和邻M的L态节点失效

图4 随机模式下不同状态节点失效前后的PCN分布

从不同失效传递模式上看,当H态或M态节点失效时,与随机模式相比,最小负载模式下的失效传递机制能够适当降低网络整体的PCN平均值,进而减少网络的风险应对能力的降低程度,最终起到维持

网络持续稳定的作用.而当L态失效时,最小负载模式下的失效传递机制所起的作用较小,并不能显著降低整体的PCN平均值.

### 4 结论

本文探究了应用于杂草测绘的无人机集群的作业场景特征,并提出了一种基于最小负载原则和考虑状态切换的集群失效控制算法.主要内容如下.

1) 无人机集群的性能分布特征呈中心化.不同类型节点失效前后PCN和PCE分布在最小测绘压力模式和随机模式下的失效过程均保持一致,即靠近网络内部的节点的PCN和PCE值越大,靠近外部的节点的PCN和PCE值越小.

2) 不同失效过程对集群的影响存在差异: M态节点失效时对网络相关连边的状态影响最大, H态节点失效时对集群结构稳定性的影响次之, L态节点失效对集群影响最小.

3) 当H态或M态节点失效时,最小负载模式下的失效传递机制能够适当降低网络整体PCN平均值,进而提高集群再次面对故障时的风险吸收能力,最终起到维持网络持续稳定的作用.而当L态节点失效时,最小负载模式下的失效传递机制所起的作用较小,并不能显著降低整体PCN平均值.此外,当H态节点失效时,考虑状态切换的失效控制算法的效果是最显著的.

未来,如何考虑不同农作物类型、不同作业阶段以及不同作业方式等垂类场景差异对无人机群的构建原则和维护重点的影响,制定针对具体场景的无人机群个性化解决方案值得进一步研究.

### 参考文献(References)

[1] Amarasingam N, Salgadoe A S A, Powell K, et al. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022, 26: 100712.

[2] 马书英, 郭增长, 王双亭, 等. 板栗树红蜘蛛虫害无人机高光谱遥感监测研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 171-180.  
(Ma S Y, Guo Z Z, Wang S T, et al. Hyperspectral remote sensing monitoring of Chinese chestnut red mite insect pests in UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 171-180.)

[3] Chen H B, Lan Y B, Fritz B K, et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle(UAV)[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,

- 2021, 14(1): 38-49.
- [4] 杜蒙蒙, 刘颖超, 姬江涛, 等. 基于无人机与激光测距技术的农田地形测绘[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 60-67.  
(Du M M, Liu Y C, Ji J T, et al. Farmland topographic mapping based on UAV and LiDAR technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 60-67.)
- [5] 朱红艳. 基于无人机低空遥感的油菜表型信息获取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
(Zhu H Y. Acquisition and methodology of oilseed rape phenotyping based on low-altitude remote sensing of UAV[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.)
- [6] Albiero D, Garcia A P, Umezu C K, et al. Swarm robots in mechanized agricultural operations: A review about challenges for research[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106608.
- [7] Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture[J]. Computer Networks, 2020, 172: 107148.
- [8] Boursianis A D, Papadopoulou M S, Diamantoulakis P, et al. Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review[J]. Internet of Things, 2022, 18: 100187.
- [9] Qayyum T, Trabelsi Z, Malik A, et al. Trajectory design for UAV-based data collection using clustering model in smart farming[J]. Sensors, 2021, 22(1): 1-20.
- [10] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2020年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 233-247.  
(Duan H B, Shen Y K, Zhao Y J, et al. Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2020[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(1): 233-247.)
- [11] 刘树光, 刘荣华, 王欢, 等. 国外无人机集群协同控制技术新进展[J]. 飞航导弹, 2021(8): 24-31.  
(Liu S G, Liu R H, Wang H, et al. New progress of cooperative control technology of UAV cluster abroad[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(8): 24-31.)
- [12] 李鹏举, 毛鹏军, 耿乾, 等. 无人机集群技术研究现状与趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 25-32.  
(Li P J, Mao P J, Geng Q, et al. Research status and trend of UAV swarm technology[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(4): 25-32.)
- [13] 郑红星, 郭继峰, 谢旭东, 等. 一种未知动态环境下异构无人机集群分布式联盟形成方法[J]. 宇航学报, 2022, 43(2): 189-197.  
(Zheng H X, Guo J F, Xie X D, et al. A distributed coalition formation method of heterogeneous UAV swarm in unknown dynamic environment[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(2): 189-197.)
- [14] Wang Z C, Sun H M, Li H, et al. AOA positioning and path optimization of UAV swarm based on A-optimality[J]. IEEE Access, 2022, 10: 14946-14958.
- [15] Mao Q, Zhang L, Hu F, et al. Deep learning (DL)-based adaptive transport layer control in UAV swarm networks[J]. Computer Networks, 2021, 201: 108511.
- [16] 张祥银, 夏爽, 张天. 基于自适应遗传学习粒子群算法的多无人机协同任务分配[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0240.  
(Zhang X Y, Xia S, Zhang T. Adaptive genetic learning particle swarm optimization based cooperative task allocation for multi-UAVs[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0240.)
- [17] 杜云, 贾慧敏, 邵士凯, 等. 面向多目标侦察任务的无人机航线规划[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1191-1198.  
(Du Y, Jia H M, Shao S K, et al. UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1191-1198.)

## 作者简介

何勇(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、农业系统工程、复杂网络等研究, E-mail: hy@seu.edu.cn;

徐鑫(1996—), 男, 硕士生, 从事复杂网络、系统可靠性等研究, E-mail: xuxin\_wz1@163.com;

郭晓彤(1999—), 女, 博士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: gxt@seu.edu.cn.