## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

1.1.2 研究意义

### 1.2 文献综述

1.2.1无人机集群发展概述

1.2.2无人机集群建模研究现状

1.2.3 无人机集群韧性评估研究现状

1.2.4 无人机集群韧性优化研究现状

### 1.3 研究内容及创新点

1.3.1 主要研究内容

1.3.2 本文创新点

1.3.3 论文组织结构

## 第二章 面向多域察打任务的无人机集群建模

### 2.1 主要概念

2.1.1 无人机集群相关概念

2.1.2 杀伤网相关概念

### 2.2 基于杀伤网的无人机集群静态网络建模

2.2.1 无人机集群网络建模分析

2.2.2 无人机集群节点建模

2.2.3 无人机集群边关系建模

2.2.4 无人机集群的网络模式

### 2.3 基于Anylogic的无人机集群动态行为建模

2.3.1 任务背景描述

2.3.2 装备实体构建

2.3.3 装备边关系构建

2.3.4 集群参数设置

2.3.5 网络拓扑结构设计

2.3.6 信息传递

2.3.7 协同策略设计

2.3.8 攻击策略设计

### 2.4 本章小结

## 第三章 面向多域察打任务的无人机集群韧性评估

### 3.1 无人机集群韧性评估框架

3.1.1 面向多域察打任务的无人机集群韧性概念内涵

3.1.2 无人机集群韧性评估框架

### 3.2 面向多域察打任务的无人机集群韧性评估

3.2.1 无人机集群韧性过程模型构建

3.2.2 基于杀伤网的集群效能指标构建

3.2.3 面向多域察打任务的无人机集群韧性评估

3.2.1 韧性评估分析

### 3.3 本章小结

## 第四章 基于多域协同策略的无人机集群韧性优化

### 4.1 问题描述

### 4.2 基于经典指标的无人机集群韧性优化

4.2.1 基于节点重要性指标的无人机集群韧性优化

4.2.2 基于韧性贡献率的无人机集群韧性优化

### 4.3 基于遗传算法的无人机集群韧性优化

4.3.1 约束条件

4.3.2 优化模型

4.3.3 基于遗传算法的无人机集群韧性优化算法

## 第五章 无人机集群韧性分析示例研究

### 5.1 作战想定

5.1.1 场景描述

5.1.2 装备体系描述

### 5.2 无人机集群杀伤网建模分析

5.2.1 杀伤网静态结构模型构建

5.2.2 作战过程仿真模型构建

### 5.3 无人机集群韧性评估过程

5.3.1 数据准备

5.3.2 作战效能计算

5.3.3 韧性计算

### 5.4 基于多域协同策略的无人机集群韧性优化

5.4.1 最优协同策略分析

5.4.2 不同协同策略下韧性对比分析

## 第六章 结论与展望

### 6.1 论文的主要贡献

### 6.2 论文未来研究工作

绪论

### 1.3 研究内容及创新点

1.3.1 主要研究内容

1.3.2 本文创新点

本文的创新点如下：

1. **提出了静态网络结构和动态演化仿真结合的无人机集群模型**

现有的研究通常单纯基于复杂网络对无人机集群建模或者基于仿真对作战过程模拟，前者无法体现无人机集群的动态性，而后者在定量描述系统的效能方面存在一定缺陷。而本文将网络和仿真结合起来共同对无人机集群进行建模，运用网络的方法刻画无人机集群的静态结构对作战系统进行评估，运用仿真的方法刻画作战过程并获取评估所需要的仿真数据，充分发挥二者的优点共同刻画无人机集群，既能便于定量描述又能完整刻画无人机集群的涌现性、动态性等特点。

1. **构建了。。韧性评估方法**

现有的研究通常单纯基于复杂网络对无人机集群建模或者基于仿真对作战过程模拟，前者无法体现无人机集群的动态性，而后者在定量描述系统的效能方面存在一定缺陷。而本文将网络和仿真结合起来共同对无人机集群进行建模

因此本文同时考虑基于复杂网络和基于仿真的方法，综合计算整个作战过程无人机集群的韧性。

1. **基于韧性的智能化作战体系节点保护方法**

装备容易受到敌方攻击、故障等多种干扰，即节点容易受到破坏。而节点的损坏会导致节点间关系失效等一系列连锁反应，甚至有时会产生级联失效，使体系存在全局崩溃的风险。利用在多域协同察打任务中作战活动在多个区域的特性，通过协调其他区域集群中的非重要节点接替该区域受扰集群中的重要节点，以提高受扰动集群的性能。目前的研究大多集中于对节点的保护，但是对于多域协同策略的研究还较少。因此本文考虑多域协同策略基于遗传算法来优化无人机集群韧性。

面向多域察打任务的无人机集群建模

* 1. 主要概念
     1. 无人机集群相关概念
     2. 杀伤网相关概念
  2. 基于作战环的杀伤网静态结构建模
     1. 杀伤网网络建模分析

马赛克战的作战要素或节点是基于OODA循环构造的，马赛克兵力结构是由分类的平台组成，当它们组合在一起时，就是完成的OODA循环和杀伤链。Boyd上校将我方对敌方的一次作战行动分解为观察（Observe）-判断（Orient）-决策（Decide）-行动（Act）四个过程，构成一个作战循环，或称为OODA环。我军在OODA循环理论的基础上考虑我军的实际情况提出了作战环理念，具体定义如下：

**【定义2-1】作战环：**为了完成特定的作战任务, 武器装备体系中的侦察类、决策类、攻击类等武器装备实体与敌方目标实体构成的闭合回路。

在OODA循环过程中，必然会形成众多的作战环，集群中的各种装备会包含在各种不同的作战环中。且由于作战目标不同，作战任务不同，所形成的作战环也各不相同。因此本文基于作战环的方法考虑以上建模需要注意的四点对杀伤网的静态网络结构进行建模，作战环示意图如图所示。



图 作战环示意图

杀伤网静态网络结构建模步骤如下：

**Step1：**明确作战任务；

**Step2：**根据作战任务抽取敌方目标；

**Step3：**节点建模描述，综合考虑节点身份、类型、所在域、潜在功能、实际功能、能力等属性；

**Step4：**边建模描述，充分考虑不同节点间的关系；

**Step5：**最终形成杀伤网拓扑结构。

* + 1. 杀伤网节点建模

在无人机集群作战中存在不同类型的装备，需要对不同装备进行规范化描述，以为后续韧性评估提供基础。根据作战主要考虑的因素，装备节点主要考虑：节点身份、作战域、潜在功能、实际类型、能力、位置和状态，因此可以构成一个七元组，如下所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

（1）节点身份

节点身份表示作战时装备所属的阵营，本文只考虑两方的对抗，不考虑多方中立、参战的情况，因此节点身份只有红蓝两方，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

其中表示红方，表示蓝方。

（2）作战域

多域作战战略中心主任Jeffrey Reilly对作战域的定义：“作战域是关键的宏观机动空间。”信息化战争以来，目前存在六个域：空中、海上、陆地、太空、网络空间和认知域。考虑到实际普遍的作战场景，本文这里只考虑陆、海、空三个域，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

其中表示陆，表示海，表示空。

（3）功能

功能是指装备在一项作战任务中实际发挥的功能，根据作战环的定义，装备有侦察类、决策类和打击类三种功能。侦察类指在作战过程中能对战场和目标实施侦察、搜集信息和预警的装备；决策类指将搜集到的信息进行分析决策，对其他装备下达指令的装备；打击类是服从指令对敌方目标实施打击和干扰的装备。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

其中表示侦察类，表示决策类，表示打击类。

（4）装备能力

本文主要研究与装备节点相关的四个能力，侦察能力、通信能力、决策能力和打击能力，分别用，,和表示。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.6) |

（5）位置

位置表示装备在作战过程中实际所处的位置，一般用横坐标、纵坐标和高度确定，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7) |

其中x表示横坐标，y表示纵坐标，z表示高度。

（6）状态

状态表示装备节点在作战中是否处于连接状态，因为杀伤网中不是所有装备都处于相连状态。全相连体系必然是最好的，但实际中由于资源约束无法做到。受到干扰后集群会考虑资源约束对杀伤网动态重组，有的装备会被选择参与作战任务，而有的装备则会被要求随时待命为下一项作战任务做准备：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.8) |

其中表示处于行动状态，表示处于待命等待状态。

此外值得注意的是，由于所处阵营不同，针对敌方装备（红方装备），本文将所有敌方装备都设置为敌方目标，用表示。

* + 1. 杀伤网边关系建模

杀伤网边关系建模是对装备间的交互关系的抽象。加上敌方目标一共有四种类型的装备，按照排列组合，装备间存在16种连接方式，但其中某些连接方式发生概率极小或不符合实际情况。因此可以得到以下7种连接类型：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.9) |

表2.1 杀伤网中节点间连接类型

|  |  |
| --- | --- |
| 边类型 | 含义 |
|  | 侦察装备间的信息共享 |
|  | 侦察装备将侦察到的情报传输给决策装备 |
|  | 决策装备间的指挥协同 |
|  | 决策装备对打击装备下达指令 |
|  | 打击装备对敌方目标进行打击干扰 |
|  | 侦察装备获取敌方情报 |
|  | 决策装备对侦察装备下达指令 |

根据以上边的类型以及含义，对边的交互关系进行分类，共以下四类：

（1）侦察边

侦察边描述的是侦察装备与敌方目标之间的连边关系，即。主要是为了评估装备的侦察能力。描述在作战任务中实际发挥侦察功能的装备对敌方目标进行侦察、跟踪、监视获取敌方信息。

（2）通信边

通信边主要包含两种情况：与同级通信，信息共享；向上级通信，汇报情况。即包含：、和。主要是为了评估装备间的通信能力。

（3）指控边

指控边主要描述决策装备对获取的信息进行处理，对下级装备下达指令的过程，主要描述装备的指挥决策能力。包括：和。

（4）打击边

打击边主要描述打击装备收到决策装备的指令后对敌方目标实施打击的过程，即。主要为了评估打击装备的打击能力。

* + 1. 杀伤网的网络模式

在杀伤网中，如果不对作战环的样式进行规范，由于边关系的多样性，以敌方目标为初始节点和结束节点的作战环数量可以有无穷多种，比如，。过长的作战环并不利于高度复杂变化的环境，也不利于评估中对作战环数量的计算。因此本文引用元路径的概念，作战环其实是特殊的元路径。

**【定义2-2】网络模式：**网络模式是异质网络的元描述，即特定的对象类型通过特定的关系类型相互作用，表示为，其中和表示节点类型集合和关系类型集合。

**【定义2-3】元路径[] ：**元路径是在网络模式上定义的一条路径，表示节点和之间的关系序列，，其中和。

本文引用文献[]中列举的作战网络中常用的作战环类型来规范杀伤网中存在的常用的元路径，如下表所示，以帮助后续的评估计算。

表2.2 杀伤网中常用的元路径以及含义

| 元路径 | 含义 |
| --- | --- |
|  | 典型作战环 |
|  | 包含侦察装备信息共享的作战环 |
|  | 包含决策装备协同指挥的作战环 |
|  | 包含信息共享和协同指挥的作战环 |
|  | 包含信息反馈的作战环 |
|  | 包含信息共享和信息反馈的作战环 |
|  | 包含协同指挥和信息反馈的作战环 |

* 1. 基于Anylogic的动态演化建模
     1. 任务背景描述
        1. 任务背景基本假设

在建立多域察打任务模型前，需要对战场环境、敌方目标、无人机集群和敌方目标做如下基本假设。

**（1）战场环境假设**

在多域察打一体任务中，假设我方有三个无人机集群，前往边境开展察击任务。三个无人机集群分别与敌方空中的无人机集群、地面的雷达站、海上的舰艇作战。三个无人机集群飞行高度在三个平面上，但映射到二维平面上的作战区域没有交集，且集群内的所有无人机飞行高度在同一平面上。因此，将红蓝双方的战场区域简化为二维空间。

**（2）敌方目标**

敌方目标包括空中的无人机集群、地面的雷达站、海上的舰艇三个部分。空中的无人机集群设置为高速动态目标，地面的雷达站设置为静态目标，海上的舰艇设置为低速动态目标。用价值𝑇来表征敌方目标的重要程度，同时敌方目标的价值还表示被摧毁的难易程度，𝑇越大说明摧毁敌方目标所需耗费的资源越多。无人机集群对敌方目标发动攻击时，敌方目标的价值将逐渐减小，当减小至0时，则认为敌方目标被完全摧毁。

敌方目标会对我方无人机发动攻击，若无人机被击中将失去作战能力从而无法完成任务。

**（3）无人机集群**

1）无人机集群的通讯带宽是有限的，在有限的带宽条件下，无人机集群不能组成全连通网络，需要设计无人机集群的网络拓扑结构，以提高集群的通信能力和抗毁能力。

2）三个无人机集群均为由侦察无人机、指控无人机和攻击无人机组成异构的集群。侦察无人机负责执行侦察任务，目标是对战场区域开展搜索，最大化的覆盖监视区域以尽可能多的发现敌方目标；攻击无人机负责执行攻击任务，目标是通过多机协作，以协同攻击的方式在最短的时间内摧毁发现的敌人；指控无人机负责在侦察和攻击无人机之间进行信息的接收和再发布，相当于一个小型的指挥和控制中心，目的是为侦察无人机和攻击无人机的察打一体协同提供管理和决策支撑。

3）无人机之间具有简单的指控关系，侦察无人机无法直接对攻击无人机下达攻击命令，只能先将信息发送给指控无人机，由指控无人机做出判断并发布协同攻击命令给攻击无人机。

* + - 1. 任务目标及基本流程

**（1）任务目标**

在执行察打一体任务时，无人机集群的任务目标是完成战场区域的侦察，对侦察中发现的敌方目标进行协同攻击，达到发现即摧毁的目标。

**（2）基本流程**

在执行察打一体任务过程中，无人机集群的工作流程如图所示。

在初始时刻，侦察无人机按照设定的协同侦察方案进行运动侦察，在发现敌方目标后，便向可以通讯的侦察无人机和所属的指控无人机汇报侦察的内容；指控无人机在收到侦察的信息后，根据敌方目标的类别，计算摧毁敌方目标所需的攻击火力，然后向所属的攻击无人机发布攻击命令；最后，攻击无人机在接收到命令后，根据自身任务状态和相对位置远近决定是否前往，若决定前往协助，则该无人机由随机状态变为赶路状态，以需要协同攻击的队友所在位置作为目标位置，在规避障碍的前提下选择最短路径前往目标位置，在到达目标位置后，任务状态自动切换为攻击状态，与队友一起对敌方目标开展协同攻击。

* + 1. 装备实体构建

主体用“turtles”表示，用它来构建智能化装备体系中的装备实体模型。考虑到实体装备的功能，通常对其设置一些属性，例如主体坐标，归属阵营，是否可移动，是否可正常使用，侦察、通讯、打击范围，速度等，如下表所示。依据收集到的具体装备信息对装备属性进行赋值。

表2.3 装备实体属性构建

|  |  |
| --- | --- |
| 属性 | 含义 |
|  | 装备编号 |
|  | 装备的移动方向 |
|  | 装备的坐标 |
|  | 装备的阵营，1表示红方，2表示蓝方 |
|  | 装备的类型，1表示侦察装备，2表示指控装备，3表示打击装备 |
|  | 装备节点的大小 |
|  | 装备的可移动性，0表示不可移动，1表示可移动 |
|  | 装备的可用性，0表示不可用，1表示可用 |
|  | 装备的侦察范围 |
|  | 装备的最大侦察数量 |
|  | 装备的通信范围 |
|  | 装备的最大通信数量 |
|  | 装备的打击范围 |
|  | 装备的最大打击数量 |
|  | 打击装备的命中概率 |
|  | 装备是否具有指控能力，0表示不具有，1表示具有 |
|  | 目标装备集合，用于储存由侦察装备侦察到的目标装备 |
|  | 装备的机动速度 |
|  | 目标装备的位置信息 |
|  | 装备的承受力，表示装备可抵挡敌方攻击的次数 |

* + 1. 装备边关系构建

交互关系用“links”表示，实体之间的连接关系有侦察，通信，指控和打击，因此分别对四种边关系进行links建模。无人机集群装备的智能性以及自主决策能力的体现主要依赖与边关系的构建。考虑到无人机集群可以动态重组恢复自身性能的特点，对边关系的构建除了体现装备间的交互关系，还构建了集群简单的恢复机制，即使某些装备被敌方所攻击，也能通过一定规则快速重连边对体系进行一定恢复。

* + - 1. 侦察边关系构建

侦察边的构建思想是侦察装备对距离最近的可最大侦察数量的敌方装备进行侦察。侦察边在作战过程中伴随着装备的移动而不断发生变化，具体构建思路如下所示。

对于每个可用且可侦察范围大于零的侦察装备*i*：

Step1 :如果侦察装备*i*可侦察范围内的敌方装备数量大于其最大侦察数量，则选取距离最近的个装备，构建由敌方装备指向侦察装备*i*的连边；

Step2 :如果侦察装备*i*可侦察范围内的蓝方装备数量小于等于其最大侦察数量，则直接构建由敌方装备指向侦察装备*i*的连边；

Step3 :记录所有敌方装备的位置信息。

* + - 1. 通信边与指控边关系构建

通信边与指控边在本质上都是我方装备间的信息传输，只是指控边存在一个上下级关系，因此在仿真中统一构建。其构建思路与侦察边的构建一致，都是在可通信范围内选择最近的可通信数量个的装备。这样就形成了一个简单的恢复机制，即使与之通信的某装备被攻击，该装备也能快速生成新的通信边与其他装备通信，具体构建思路如下所示。

对于每个可用且可通信范围大于零的己方装备*i*：

Step1 :如果装备*i*可通信范围内的己方装备数量大于其最大通信数量，则依据2.3.5的网络生成规则，构建由己方其他装备指向装备*i*的连边，同时共享敌方装备信息。

Step2 :如果装备*i*可通信范围内的己方装备数量小于等于其最大通信数量，则直接构建由己方其他装备指向装备*i*的连边，同时共享敌方装备信息。

* + - 1. 打击边关系构建

打击边关系的构建思想是优先攻击承受力低的装备，具体构建思路如下所示。

对于每个可用且可打击范围大于零的己方装备*i*：

Step1 :如果装备*i*获得的位置信息中，可打击范围内的敌方装备数量大于其最大打击数量，则选取承受力最低的个装备，构建由己方装备*i*指向敌方装备的连边。

Step2 : 如果装备*i*获得的位置信息中，可打击范围内的敌方装备数量小于等于其最大打击数量，则直接构建由己方装备*i*指向敌方装备的连边。

* + 1. 集群参数设置

无人机集群察打一体任务建模时，参数设置可分为战场环境参数、集群系统层面参数以及无人机 agent 个体层面参数，参数设置如表所示。



**（1）战场环境参数**

战场环境参数主要包括战场区域面积𝛺、敌方目标数量𝑇和敌方目标价值。战场区域面积：战场区域被均匀分为𝑀个大小相同的单元，面积大小设置为80\*80个单元，每个单元用中心坐标𝑔 = [𝑥, 𝑦]表示，𝑢𝑖,𝑡 = [𝑥𝑖,𝑡 , 𝑦𝑖,𝑡 ]表示无人机𝑖在𝑡时刻的位置。

敌方目标数量：敌方目标为静态目标，数量设置为 50，在任务过程中随机分布于战场。假设𝑡时刻有𝑛个敌方目标被消灭，则𝑡+ 1时刻将在战场中随机新生成𝑛个敌方目标，以确保总的敌方目标数量保持不变。

敌方目标价值：假设敌方目标为不同的实体，每个实体的价值用𝑇𝑙𝑖𝑓𝑒进行表征，不同价值的敌方目标被摧毁难度各不相同，价值越高所需耗费的攻击资源越多。

**（2）无人机集群参数**

无人机集群层面参数主要包括集群规模和网络连接边数。

集群规模：无人机集群中侦察无人机数量设置为𝑁1，攻击无人机数量设置为𝑁2，指控无人机数量设置为𝑁3。

网络连接边数：网络连接边数主要用于表征无人机集群的通讯带宽。对于侦察无人机和攻击无人机，两者内部网络的平均连接边数设置为2，即侦察无人机内部网络和攻击无人机内部网络的总边数分别为2𝑁1和2𝑁2。指控无人机内部网络设置为全连通网络，故内部网络的总边数为𝑁3(𝑁3−1)/2。每架指控无人机分别与两个侦察无人机和攻击无人机相连接，故指控网络的总连接边数4𝑁3。

**（3）无人机单机参数**

无人机单机参数主要包括侦察半径𝑅𝑆、通讯半径𝑅𝐶、侦察时的正确率𝑝和虚警率𝑞、运动速度𝑣、攻击火力以及协同半径等。

通讯半径：无人机的通讯半径设置为足以覆盖整个战场区域𝛺，以便于网络拓扑结构按需设计而不受距离限制。

侦察半径：为确保侦察的绝对准确，以便于攻击无人机对敌方目标发动协同攻击快速消灭敌人。本章假设侦察无人机选用高精度传感器，每次仅对自己所在的单元位置进行侦察，即侦察半径设置为𝑅𝑆=1。

侦察正确率和虚警率：侦察设备的准确率和侦察范围通常成反比，在本次任务中侦察无人机的正确率𝑝设置为100%，虚警率𝑞设置为0。

侦察结果：无人机agent𝑖在𝑡时刻对单元区域𝑔的侦察结果定义为𝑍𝑖,𝑔,𝑡，𝑍𝑖,𝑔,𝑡取值结果为0或𝑇𝑙𝑖𝑓𝑒。𝑍𝑖,𝑔,𝑡=0表示𝑡时刻在单元区域𝑔中不存在敌方目标，𝑍𝑖,𝑔,𝑡=𝑇𝑙𝑖𝑓𝑒表示𝑡时刻在单元区域𝑔中有寿命为𝑇𝑙𝑖𝑓𝑒的敌方目标存在。

攻击火力：攻击无人机的单机攻击火力设置为𝑈𝑖，表示每个时间步长发动攻击对敌方目标所造成的危害。

协同半径：定义为攻击无人机是否参与协同攻击的最远距离，在小于协同半径范围内的协同攻击请求，无人机将基于自身状态决定是否前往，在超过协同半径范围内的协同攻击请求，无人机将予以拒绝。

运动速度：无人机集群中所有无人机采用简化的运动模型，无人机可沿周围九个方格移动，每次移动的速度为1单元/步长。

* + 1. 网络拓扑结构设计

网络拓扑结构会影响无人机集群的信息交互模式及通信效率，进而对无人机集群的任务协同产生重要影响，因此网络拓扑结构的设计变得尤为重要。

本文根据无人机类别，按照分类组网的思路来完成无人机集群组网设计。首先，无人机集群中所有侦察无人机进行内部组网，以便于侦察无人机之间侦察信息的交流共享和协同侦察行动的展开；其次，集群中所有攻击无人机进行内部组网，以便于攻击信息的传递和协同攻击行动的展开；再次，所有指控无人机进行内部组网，以便实现指控信息的交流；最后，指控无人机与侦察无人机、攻击无人机之间建立连接，以确保整个集群的指控信息连通。

由于真实的无人机集群网络模型难以获取，可利用目前已有的复杂网络模型生成[sun]。目前，常用的自动生成网络模型有：全连接网络、规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络五种。

以10架侦察无人机、5架指控无人机和10架攻击无人机组成的无人机集群为例，完成组网后的网络拓扑结构示意图如图所示。

1. 考虑通信距离的连边规则

在实现无人机组网时，我们需要特别考虑到无人机的通信距离。通信距离直接影响了无人机之间的连接可能性。在实际情况下，如果两架无人机之间的距离超出了它们各自的通信范围，那么它们之间就不存在建立连接的条件。因此，在构建无人机网络时，我们需要根据无人机的通信距离来合理规划和配置网络结构，以确保网络的有效性和稳定性。

1. 侦察无人机内部组网

侦察无人机之间基于复杂网络模型中的无标度网络组网形成固定网络拓扑结构，以提高无人机集群的信息传递效率。 Albert-László Barabási和Réka Albert认为以前的许多网络模型都没有考虑到实际网络的增长特性和优先连接特性，在1999年提出无标度网络（BA网络）[]。该模型网络是通过节点的不断增长而来，新节点在加入时会优先与度高的节点相连。BA无标度网络模型的生成原理如下：网络初始为具有*m*0 个节点的连通图，每次引入一个新节点，该节点连接到*m*个已存在的节点上（*m ≤ m*0）。一个新节点与一个已经存在的节点i相连接的概率与节点*i*的度*ki*和节点*j*的度*kj*之间满足如下关系：



1. 指控无人机内部组网

指控无人机之间由于数目较少且十分重要，因此进行全连通连接，形成全连通网络。全连通网络是任意两个节点间都有链路连接[]。

1. 攻击无人机内部组网

攻击无人机之间的组网是在复杂网络模型中的无标度网络的基础上完成的，该内部网络主要用于攻击无人机之间攻击信息的共享，以尽快实现对敌方目标的协同攻击。网络生成原理如下：网络初始包含*m*0个节点，并以连通图的形式存在。在随后的迭代过程中，每次加入一个新节点，并根据一定的概率与现有节点建立连接。新节点与网络中节点i连边的概率分为两种情况：一是当概率是0.8时，新节点与节点i的连边概率与节点i的度值成正比，这意味着节点i的度值越高，新节点更倾向于与其连接；二是当概率是0.2时，新节点与节点i的连边概率与节点i的度值成反比，这意味着对于度值较高的节点i，新节点与其连接的概率相对较低。这个过程会一直重复进行，直到网络中所有节点都被考虑过。通过这种方式，网络不仅保持了连通性，而且能够根据节点的度值进行自适应调整。

1. 指控网络设计

每架指控无人机随机选择一定比例的侦察无人机进行连接，被选中的侦察无人机负责向该指控无人机传递信息；同样地，每架指控无人机随机选择一定比例的攻击无人机进行连接，有攻击任务时将向相连的攻击无人机发送协同攻击命令。

* + 1. 信息传递

如果侦察无人机在执行侦察任务时发现敌方目标，它会立即将获取的信息发送给其通信范围内的与之相连的所有侦察无人机和指控无人机。这些无人机之间建立起了紧密的通信网络，确保信息能够迅速传递。收到信息的侦察无人机还会将收到的信息进一步传递给通信范围内与之相连的指控无人机。通过这样的层级传递，信息能够快速地传递给更多的无人机。最终，这些信息会汇集到指控无人机上，再由指控无人机在任务分配之后，指挥攻击无人机对敌方目标发起攻击。这样的协同工作模式能够提高攻击的效率和精度，确保打击的有效性。

* + 1. 协同策略设计

对于侦察无人机，存在两者情况。当侦察无人机之间有重心的时候，弹簧模型，没有重心，就随机运动。

对于攻击无人机，当没有收到敌方装备信息时，就采用领导者模型的4.8公式，当收到敌方装备信息时，采用领导者模型的4.11公式。

对于指控无人机，采用领导者模型的4.8公式。

* + 1. 攻击策略设计

在军事任务中，无人机集群的作战环境充满不确定性，经常面临恶劣天气、高性能的综合防空系统、强烈的电磁干扰以及定向能武器等各种严峻挑战。由于这些因素，无人机集群容易受到节点故障、外界的恶意攻击等扰动的影响。这可能导致无人机性能下降，甚至失去完成任务的能力。

为了更好地理解无人机集群在执行任务时可能遇到的问题，本文主要关注它们在物理层面所遭遇的攻击。利用网络中节点移除的方法来模拟无人机受到攻击，从而模拟无人机因各种原因无法执行任务的情况。

在攻击方式上，本文采用两种模式：随机攻击和恶意攻击。随机攻击策略主要用于模拟攻击方对我方无人机集群信息一无所知的情况，因此选择随机攻击的方式来发起对我方无人机的攻击。而恶意攻击策略则是在攻击方对我方无人机信息完全了解的情况下采用的，每次攻击都会挑选我方的核心无人机进行打击，旨在最大程度地造成我方无人机的损害。通过这两种攻击模式的模拟和研究，我们可以更深入地了解无人机集群在面对不同威胁时的生存能力和任务完成能力，为未来的无人机集群设计和作战策略提供重要的理论依据和实践指导。

**（1）随机攻击**

在随机攻击模式下，敌方会每隔一个时间步随机选择我方三个集群中的任意一个无人机进行攻击。这种攻击方式的目的是通过随机打击来消耗我方无人机的数量和资源，降低其整体作战能力。

**（2）基于节点度的恶意攻击**

在基于节点度的恶意攻击中，攻击方会根据我方无人机在网络中的节点度值来选择目标进行攻击。节点度值反映了无人机在网络中的重要性和连接程度，因此攻击方会优先攻击那些具有较高节点度值的无人机，以期望对整个无人机集群造成更大的破坏。这种攻击方式的特点在于其针对性，攻击方对我方无人机的节点度值进行评估，并挑选出关键的无人机进行打击。通过攻击这些关键节点，攻击方可以有效地破坏我方无人机集群的通信链路和指挥控制能力，降低集群的整体性能和任务完成能力。

**（3）基于介数的恶意攻击**

基于介数（节点介数定义为网络中所有最短路径中经过该节点的路径的数目占最短路径总数的比例）的恶意攻击是一种更为复杂的攻击方式。在这种攻击中，攻击方会根据无人机在网络中的介数中心性来选择目标进行攻击。介数中心性反映了无人机在网络中的重要性和影响力，通过攻击这些具有高介数中心性的无人机，攻击方可以有效地控制网络中的信息流动，干扰指挥控制信号，破坏无人机集群的整体协调性和稳定性。这种攻击方式的特点在于其全局性，攻击方需要了解整个网络的拓扑结构和通信模式，以便挑选出关键的无人机进行打击。

**（4）基于贪心策略的恶意攻击**

攻击方会以干扰无人机数目最多为目的来选择干扰点。他们不会考虑全局最优解，而是采取一种局部最优的策略，即贪心思想。在干扰点半径 1.2 范围内的无人机都被毁伤。

按照上述四个规则进行攻击和移除无人机节点，直到所设定的攻击数量。通过以上四个规则的攻击和移除操作，本文模拟了一个完整的无人机集群受到敌方攻击的过程。在仿真中，我们将按照设定的攻击数量进行模拟，并对不同规则下的攻击效果进行了分析和比较，从而深入了解无人机集群在面对不同威胁时的生存能力和任务完成能力，为未来的无人机集群设计和作战策略提供重要的理论依据和实践指导。

面向多域察打任务的无人机集群韧性评估方法

* 1. 无人机集群韧性评估框架
     1. 面向多域察打任务的无人机集群韧性概念内涵

**【定义3-1】面向多域察打任务的无人机集群韧性：**在执行多域察打任务的过程中，无人机集群韧性主要衡量其在应对不确定性因素、干扰和攻击等扰动因素时，利用自适应、自主控制等技术和协同策略，最大限度地减少扰动对集群的影响，并快速恢复到正常运行状态，以保证多域察打任务的顺利完成。无人机集群韧性是衡量其适应不断变化的战场环境、有效应对复杂挑战的重要标准。

* + 1. 集群韧性过程模型构建
    2. 无人机集群韧性评估框架
  1. 面向多域察打任务的无人机集群韧性评估
     1. 基于杀伤网的集群效能指标构建
     2. 韧性评估分析