

无人机集群对地作战任务可靠性评估

齐小刚¹, 周雨桐^{1,*}, 刘立芳²

(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科学与技术学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群执行对地攻击任务可靠性评估问题,考虑实际作战环境和任务规划,建立了一种适用于具体任务过程的可靠性评估方法。首先,建立了 UAV 集群作战的时态异构网络模型,用时态打击链模拟 UAV 集群任务规划和协同作战过程。然后,基于连续时间马尔可夫链(continuous-time Markov chain, CTMC)建立了 UAV 集群在威胁区域飞行的生存概率模型。进而,综合 UAV 集群的作战能力和生存概率,提出了任务可靠性评估方法。最后,通过实例分析,验证了该模型的实用性和合理性。该模型考虑到各方面影响战果的因素,贴合实际,为 UAV 集群任务可靠性评估和决策提供了参考。

关键词: 无人机集群; 对地作战; 任务可靠性; 时态异构作战网络; 马尔可夫生存概率

中图分类号: V 279

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2023.09.38

Evaluation of the reliability of UAV swarm for ground combat missions

QI Xiaogang¹, ZHOU Yutong^{1,*}, LIU Lifang²

(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)

Abstract: Aiming at the reliability assessment problem of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm ground attack mission, considering the actual combat environment and mission planning, a reliability evaluation method suitable for specific mission scenarios is established. Firstly, a temporal heterogeneous network model of UAV swarm operation is established, and the mission planning and collaborative operation process of UAV swarm are simulated by temporal strike chain. Then, based on the continuous-time Markov chain (CTMC), a survival probability model of UAV swarm flying in the threat area is established. Furthermore, based on the combat capability and survival probability of UAV swarm, a mission reliability evaluation method is proposed. Finally, through case analysis, the practicability and rationality of the model are verified. The model takes into account the factors affecting the results of the battle is realistic, and provides a reference for UAV swarm mission reliability evaluation and decision-making.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV) swarm; ground operations; mission reliability; temporal heterogeneous combat networks; Markov survival probability

0 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)执行对地作战任务具有成本低、效率高等优势,在现代战场中应用越来越广泛。使用 UAV 进行进攻作战、非常规作战、高价值目标打击成为 UAV 发展的一个重要趋势^[1]。

随着 UAV 系统自主性、网络通信技术和群体智能理论的发展,UAV 以集群形式执行任务是未来的应用趋势^[2]。UAV 集群具有一定的冗余性和鲁棒性^[3-4],即使部分 UAV 坠毁,集群仍能完成任务。因此,相对于传统单体可靠性而言,集群面向任务的可靠性评估更具实际意义。近年来,有一种针对任务可靠性量化的应用,对 UAV 集群

收稿日期:2022-11-30; 修回日期:2023-03-10; 网络优先出版日期:2023-04-27。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230427.1621.016.html>

基金项目: 技术基础项目(212ZQT42004)资助课题

* 通讯作者。

引用格式: 齐小刚, 周雨桐, 刘立芳. 无人机集群对地作战任务可靠性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(9): 2971-2978.

Reference format: QI X G, ZHOU Y T, LIU L F. Evaluation of the reliability of UAV swarm for ground combat missions[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(9): 2971-2978.

系统进行任务可靠性预测并将其作为重要因素帮助指挥人员进行任务决策^[6]。作战指挥人员可以在任务开始前预测 UAV 集群的任务可靠性,以保证任务成功率。

目前,在 UAV 集群任务可靠性方面已有很多研究。一部分基于传统可靠性分析方法进行推广。文献[5-6]使用二元决策图和分阶段任务方法评估 UAV 集群任务可靠性;文献[7]考虑几个自治系统执行的任务,并提出一种通过扩展二元决策图技术来预测任务可靠性的方法;文献[8]提出连续系统多级平衡 UAV 的可靠性建模和估计。还有基于概率论方法^[9]、划分多级系统^[10-12]、基于 Agent 建模与仿真系统建模^[13-17]和连续时间马尔可夫链(continuous-time Markov chain,CTMC)等建模方法^[18]。此外,用复杂网络对集群进行建模是目前一种比较热门的方法。文献[19]建立了 UAV 集群的多层次网络模型,根据网络的连通性和脆弱性评估群的任务可靠性;文献[20]用多态网络建模 UAV 集群,提出考虑信息交换能力的任务可靠性评估方法;文献[21-22]用 k/n 系统对 UAV 集群进行建模,并基于重要性度量提出结构优化模型和数量优化模型。

上述研究成果从各个角度对 UAV 集群作战系统进行建模和可靠性评估。然而,对于对地作战任务的 UAV 集群任务可靠性评估尚没有一套成熟的方法。在 UAV 集群执行对地作战任务过程中,其任务可靠性不仅受到集群自身能力的影响,还会受到作战环境和任务规划的影响。针对上述问题,本文面向 UAV 集群对地作战过程,定义了时态打击链(temporal operational chain, TOC)来描述 UAV 集群对敌方目标的攻击方式,建立了更贴合实际作战场景的集群任务可靠性评估方法,并且通过实例验证了该方法的合理性。

1 UAV 集群时态异构作战网络模型

1.1 TOC 的概念

Cares 的信息时代作战模型^[23]将作战体系抽象为由节点和连接节点的链路组成的集合。战场上的作战单元可以分为 4 种类型:传感器节点(S)、决策节点(D)、火力节点(I)和目标节点(T)。对应于 UAV 集群作战体系,其作战单元也可以分为侦察 UAV、决策 UAV、打击 UAV 和敌方目标 4 种类型,各作战单元之间的作战关系抽象为链路,各链路类型的具体含义如表 1 所示。

表 1 UAV 集群异构作战网络链路分类及含义

Table 1 Classification and meaning of UAV swarm heterogeneous combat network links

链路类型	含义
T→S	侦察 UAV 对目标实施侦察或情报搜集
S→S	侦察 UAV 之间进行情报信息共享
S→D	侦察 UAV 将探测的信息上传到决策 UAV
D→D	决策 UAV 通过信息交流进行信息共享
D→I	决策 UAV 向打击 UAV 发送打击指令
I→T	打击 UAV 对目标实施打击行动

根据现代作战循环理论,作战行动是一个包括观察、调整、决策和行动的循环过程^[24]。其中,侦察节点检测敌方目标并将情报传输给决策节点,在数据融合和信息分析之后,决策节点做出决策并对打击节点下达攻击命令,然后打击节点响应命令并对敌方目标执行军事打击。考虑 UAV 集群作战状态随时间不断变化,所以其作战网络应具有时态性^[25]。UAV 集群对敌方目标的攻击方式可以由 TOC 来描述。一个基本的 TOC 由一个目标节点,一个侦察节点,一个决策节点和一个打击节点组成,如图 1(a)所示。而考虑 UAV 集群协同侦察和协同决策的功能,广义 TOC 如图 1(b)所示。

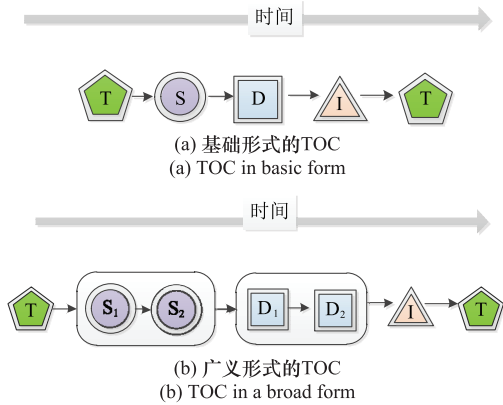


图 1 不同类型的 TOC
Fig. 1 Different types of TOC

1.2 UAV 群时态异构作战网络

UAV 集群作战系统可以建模为异构作战网络: $G=(V,E)$ 。其中, V 表示节点集,节点集合: $V=V^S \cup V^D \cup V^I \cup V^T$, V^S, V^D, V^I 分别表示侦察 UAV 节点集、决策 UAV 节点集和打击 UAV 节点集, V^T 表示目标节点集。 E 表示节点之间的链路集, $E=E_{TS} \cup E_{SS} \cup E_{SD} \cup E_{DD} \cup E_{DI} \cup E_{IT}$,各链路类型的具体含义如表 1 所示。

UAV 集群作战过程中,UAV 集群根据任务规划与敌方目标形成相应的 TOC,这些 TOC 相互交织,形成一个时态作战网络(temporal combat networks,TCN)。TCN 中两节点之间的联通状态可以由连接函数表示:

$$a(i,j,t)=\begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 在 } t \text{ 时间连接} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

2 UAV 生存概率模型

UAV 能够执行任务的前提,是在任务结束之前存活。而 UAV 在执行任务的过程中可能面临障碍物碰撞和敌方火力打击等多方威胁。有效的航路规划能帮助 UAV 规避一定的风险,本文认为航路规划理论上为 UAV 选择了避开障碍物且满足时间限制的航路。本文主要考虑敌方防空系统(如高炮和地空导弹等)对 UAV 的威胁。

2.1 基于 CTMC 的 UAV 生存概率模型

对敌方防空系统的威胁评估是对敌方意图和能力的分析^[26]。而敌人的能力和意图具有不确定性,可以认为 UAV 的生存状态是一个随机过程。因为 UAV 在敌方防空区域飞行的状态只与现在的状态和敌方威胁有关,与之前的状态无关,所以可以基于 CTMC 建立 UAV 生存概率模型^[27]。

相比于单架飞机而言,UAV 集群中的单体 UAV 具有特殊性。UAV 集群在执行任务时需要保持通信和一定的队形,因此可以把 UAV 集群看作一个整体。其中,每个单体 UAV 在执行任务的过程中可能处于 5 种状态:未被探测、被探测、被跟踪、被打击和坠毁。将 UAV 在敌方威胁区域飞行的状态看作是 UAV 处于这 5 种状态下的随机过程,如图 2 所示。

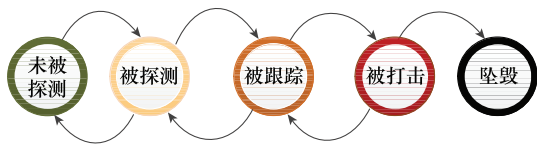


图 2 UAV 状态转移图

Fig. 2 UAV status transfer diagram

这些状态之间可能的转换取决于 UAV 在威胁区域的内部还是外部。当 UAV 进入敌方一个雷达探测区域时,将先被探测。一段时间后,雷达就能够对其进行稳定跟踪,做好发射武器的准备。当 UAV 离开雷达探测区域后,雷达就失去了对其进行探测,但是因为雷达组网系统具有记忆性,所以在一段时间内雷达仍可以预测其运动,经过更长的时间,UAV 就被完全遗忘了。当 UAV 进入敌方打击区域,在敌方雷达对 UAV 稳定跟踪的前提下,敌方武器系统可以启动对 UAV 的打击。当 UAV 飞离打击区域时,敌方打击立即停止。

在 t 时刻从状态 i 到状态 j 的转移速率用强度 $\lambda_{ij}(t)$ 来描述。当在 t 时刻状态 i 到状态 j 的转移不可能发生时, $\lambda_{ij}(t) = 0$ 。马尔可夫模型与泊松过程密切相关,其强度可以解释为转移前的预期逗留时间的倒数^[28]。于是转移率矩阵 $Q(t)_{(5 \times 5)}$ 元素可以表示为

$$Q_{ij}(t) = \begin{cases} \lambda_{ij}(t) = \frac{1}{\tau_{ij}(t)}, & i \neq j \\ -\sum_{k \neq i} \lambda_{ik}(t), & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为在 t 时刻从状态 i 到状态 j 转移的预期逗留时间。

2.2 状态转移前预期逗留时间的计算

UAV 集群的数量会影响敌方威胁区域对单体 UAV 的威胁程度。一方面,UAV 集群的数量越多,整体目标越大,单体 UAV 被敌方发现的概率就越大;另一方面,UAV 集群数量越多,敌方应对单体 UAV 的火力被分散,则单体

UAV 被打击的概率就会下降。下面分别讨论 UAV 在敌方雷达区域和打击区域内,状态转移前的预期逗留时间。

2.2.1 雷达探测区域

UAV 集群进入雷达探测区域后,雷达以一定的速度对覆盖区域进行扫描,每隔 t_{12} 将覆盖区域扫描一周,每次扫描有一定的概率扫描到目标。雷达发现目标后,经过一段时间 τ_{23} 可以形成稳定追踪。

雷达对目标的瞬时探测概率采用单元平均恒虚警处理模型计算^[29],雷达对目标的瞬时探测概率,由目标的雷达散射截面(radar cross section, RCS)和目标与雷达之间的距离决定。其对 RCS 为 σ_0 ,距离为 R_0 的目标探测信噪比为 S_0 ,则其对 RCS 为 σ ,距离为 R 的目标探测信噪比 S 为

$$S = \frac{R_0^4 \sigma}{R^4 \sigma_0} S_0 \quad (3)$$

雷达对目标的探测概率为

$$P_d = \left(1 + \frac{\alpha_{CA}/N}{1 + \text{SNR}}\right)^{-N} \quad (4)$$

$$\alpha_{CA} = N(P_{fa}^{-1/N} - 1) \quad (5)$$

式中: α_{CA} 为恒虚警处理常数; N 为参考单元个数; P_{fa} 为虚警概率; SNR 为信噪比。

雷达探测到 UAV 集群的时间服从离散分布:

$$P(T = it_0) = \prod_{j=0}^{i-1} (1 - P_d^{t+jt_0}) \cdot P_d^{t+it_0}$$

在同一雷达探测区域,UAV 集群与雷达的距离取 UAV 集群在该雷达范围内的平均距离。则发现探测到 UAV 集群时间的分布可以简化为几何分布,且预计探测时间:

$$\tau_{12} = E(T) = \frac{t_{12}}{P_d} \quad (6)$$

当 UAV 集群离开敌方探测区域后,预计经过 τ_{32} 时间,敌方雷达失去对 UAV 集群的稳定跟踪,再经过 τ_{21} ,敌方雷达丢失 UAV 集群。

2.2.2 打击区域

UAV 集群进入敌方打击区域后,若敌方雷达已形成稳定跟踪,经过 τ_{34} 的武器准备时间就可以对 UAV 集群进行打击。假设敌人打击时目标的选择是随机的,则每个 UAV 在第 i 顺序第被打击的概率是相同的,都是 $1/n$,每次打击 UAV 的毁伤概率为 P_h ,则第 i 架被打击的 UAV 预计毁伤时间为

$$\tau_{45}^i = \frac{it_{45}}{P_h} \quad (7)$$

所以,每架 UAV 的毁伤期望时间:

$$\tau_{45} = E(T_s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{it_{45}}{P_h} \quad (8)$$

式中: t_{45} 为武器单发间隔时间。

2.3 UAV 生存概率计算

实际敌方的雷达探测或火力打击区域通常会有重叠。假设不同雷达或不同火力之间相互独立地探测或打击,一

个被多雷达或火力所覆盖区域的状态转移速率,表示为所有覆盖该区域的雷达或火力区域的转移速率之和:

$$\lambda_{ij}^{\text{tot}} = \sum \lambda_{ij} \quad (9)$$

综上,UAV 集群在同一雷达和火力区域上飞行时,转移速率矩阵相同,在路线穿过雷达或火力区域边界的时间点上发生变化。生存模型的转移速率矩阵可以写成分段常数矩阵:

$$Q(t) = \begin{cases} Q_0, & t_0 \leq t < t_1 \\ Q_1, & t_1 \leq t < t_2 \\ Q_2, & t_2 \leq t < t_3 \\ \vdots \end{cases} \quad (10)$$

设 $\mathbf{p}_{\text{TM}}^{\text{T}}(t_n)$ 是描述生存模型状态概率的向量,对于路线上的时间点 t_n , $\mathbf{p}_{\text{TM}}^{\text{T}}(t_n)$ 递归计算为

$$\mathbf{p}_{\text{TM}}^{\text{T}}(t_n) = \mathbf{p}_{\text{TM}}^{\text{T}}(t_{n-1}) \mathbf{e}^{Q_{n-1}^{\text{T}}(t_n - t_{n-1})} \quad (11)$$

单体 UAV 在时间 t 的生存概率:

$$p_i(t) = 1 - p_{\text{TM}}^{(5)}(t) \quad (12)$$

3 UAV 集群任务可靠性评估

作战指挥中心通过任务分配为每个目标 T_i 分配了执行该任务的 UAV 子群 $G_i = V_i^{\text{S}} \cup V_i^{\text{D}} \cup V_i^{\text{I}}$ 。这些 UAV 子群在相同的时间段内不相交,每个子群 G_i 与其目标 T_i 在执行任务期间组成一些 TOC。UAV 集群任务可靠性取决于这些 TOC 的连通状态和作战能力。

3.1 TOC 的作战能力

3.1.1 连通 TOC 的作战能力

对于某个连通的 TOC: l_k ,构成 l_k 的 UAV 集 $Q_k = Q_k^{\text{S}} \cup Q_k^{\text{D}} \cup \{V_k^{\text{I}}\}$,其中侦察 UAV 数量为 n^{S} ,决策 UAV 数量为 n^{D} 。 l_k 的作战能力可以表示如下:

$$U(l_k) = C^{\text{S}} \cdot C^{\text{D}} \cdot C^{\text{I}} \quad (13)$$

式中: $C^{\text{S}}, C^{\text{D}}, C^{\text{I}}$ 分别为 l_k 在该时刻的侦察能力、决策能力和打击能力。

l_k 在该时刻的侦察能力 C^{S} ,即 l_k 包含的侦察 UAV 集 Q_k^{S} 的协同侦察能力表示如下:

$$C^{\text{S}} = 1 - (1 - p^{\text{S}})^{n^{\text{S}}} \quad (14)$$

式中: p^{S} 为单体侦察 UAV 的任务能力。

同理, l_k 在该时刻的决策能力 C^{D} ,即 l_k 包含的决策 UAV 集 Q_k^{D} 的协同决策能力表示如下:

$$C^{\text{D}} = 1 - (1 - p^{\text{D}})^{n^{\text{D}}} \quad (15)$$

式中: p^{D} 为单体决策 UAV 的任务能力。

l_k 在该时刻的打击能力 C^{I} ,即打击 UAV: V_k^{I} 所携带的武器对目标的摧毁能力 p^{I} 。

3.1.2 TOC 重构过程

UAV 集群在受到攻击后可能出现某些 UAV 坠毁,导致所在 TOC 失效的情况。而 UAV 集群具有一定的恢复能力,可以进行链路重构。TOC 内的 UAV 能够相互通信,

具备链路重构的前提,所以考虑链路内的恢复情况,如图 3 所示。当某个 UAV 坠毁导致链路断裂时,如果还有同类型替代 UAV,则链路两端的节点重连。如果没有同类型替代 UAV,则该 TOC 失败。

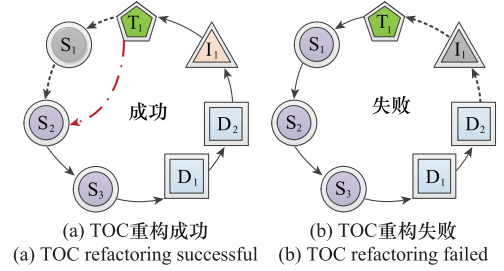


图 3 TOC 内重构过程

Fig. 3 Reconstruction process within the TOC

3.1.3 考虑链路重构的 TOC 作战能力

因为 UAV 在执行任务的过程中面临坠毁的风险,所以实际 TOC 的作战能力还要考虑 TOC 的连通状态。如果 UAV 坠毁导致 TOC 断裂,还要考虑 TOC 的重构。

TOC 断裂后能够进行重构并且继续执行任务的前提是,分别至少有一个正常运行的侦察 UAV、决策 UAV 和打击 UAV 来构成 TOC 的基本形式。所以满足上述 TOC 能够通过链路重构的条件是:正常运行的侦察 UAV 数量 i 和正常运行的决策 UAV 数量 j 都不少于 1 个并且打击 UAV 正常运行。

正常运行的 UAV 通过重构组成新的 TOC,有 $i(i=1, 2, \dots, n^{\text{S}})$ 架侦察 UAV 和 $j(j=1, 2, \dots, n^{\text{D}})$ 架决策 UAV 正常运行时,新 TOC 的作战能力 U_{ij} ,根据连通 TOC 的作战能力的计算方法可得

$$U_{ij} = [1 - (1 - p^{\text{S}})^i] \cdot [1 - (1 - p^{\text{D}})^j] \cdot p^{\text{I}} \quad (16)$$

设单架 UAV 生存概率为 p_i ,则有 i 架侦察 UAV 和 j 架决策 UAV 正常运行并且打击 UAV 正常运行的概率 P_{ij} 为

$$P_{ij} = C_n^i \cdot (p_i)^i (1 - p_i)^{n^{\text{S}} - i} \cdot C_n^j \cdot (p_j)^j (1 - p_j)^{n^{\text{D}} - j} \cdot p_i \quad (17)$$

因此,考虑重构的 TOC 作战能力计算如下:

$$U'(l_k) = \sum_{i=1}^{n^{\text{S}}} \sum_{j=1}^{n^{\text{D}}} U_{ij} \cdot P_{ij} \quad (18)$$

3.2 UAV 集群执行任务可靠性

对于单个目标,对应执行该任务的 UAV 子群有一组 TOC: $L(v) = \{l_k\}, k=1, 2, \dots, m$ 用于打击该目标,这意味着具有 m 种手段摧毁目标,所以该子群对目标的打击能力可以表示如下:

$$E(v) = \sum_{l_k \in L(v)} U'(l_k) \quad (19)$$

式中: $U(l_k)$ 是打击链的作战能力。当 UAV 集群的作战能力大于任务需求时,UAV 集群能够完成任务,故可靠度最高为 1。

设 UAV 集群总共需要打击 M 个目标, UAV 集群总的任务可靠度为

$$R = \sum_{i=1}^M a_i \cdot E_i(v)$$

(20)

式中: a_i 是子目标 i 的重要度, $a_i \in [0,1]$, 且满足 $\sum_{i=1}^M a_i = 1$ 。

4 仿真分析

4.1 想定背景

本节以 UAV 集群执行对地打击任务为例, 评估该作战场景下 UAV 集群的任务可靠性。执行任务的 UAV 集群包含侦察 UAV、决策 UAV 和打击 UAV 3 种类型, 假设相同类型的 UAV 性能相同。设置在 UAV 集群内, 每 12 架 UAV 组成一个编队协同执行任务。编队内不同类型 UAV 的组成表示如下: $(n^S:n^D:n^I)$, 编队内 TOC 形式统一设置为如图 4 所示, 因此一个编队内共形成 n^I 条这样的 TOC。派出不同数量 UAV 编队执行任务的火力分配如表 2 所示。

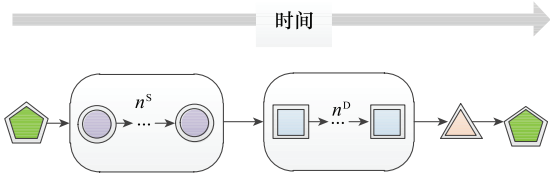


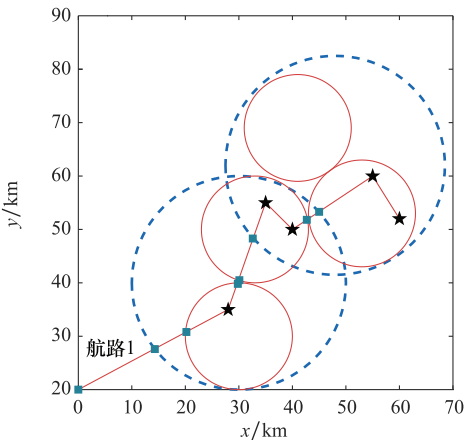
图 4 $(n^S:n^D:n^I)$ 编队内的 TOC 形式

Fig. 4 Form of TOC within the $(n^S:n^D:n^I)$ formation

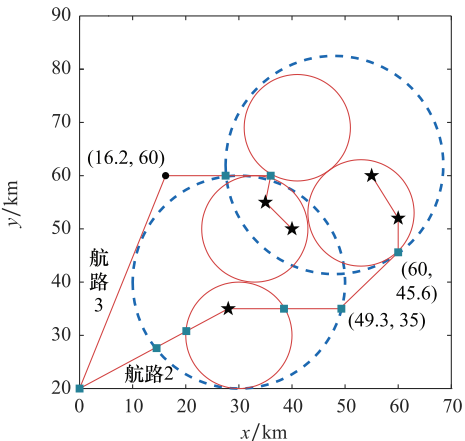
表 2 不同集群数量下的火力分配

目标	总编队数量			
	2	3	4	5
T ₁	1	2	2	3
T ₂	1	1	2	2
T ₃	1	1	2	2
T ₄	1	2	2	3
T ₅	1	2	2	3

作战场景设置如图 5 所示, 任务区域中分布圆形的威胁区域, 其中包括 2 个雷达探测区域, 中心坐标分别为 (28, 35) 和 (35, 55); 还有 4 个火力打击区域, 中心坐标分别为 (28, 35), (35, 55), (40, 50), (55, 60)。任务区域中散布着 5 个任务目标(T1~T5), 目标的重要度都设为 0.2, 其坐标依次为 (28, 35), (35, 55), (40, 50), (55, 60), (60, 52)。在此作战场景下, 本节为 UAV 集群设置了两种任务路线: 一种是集体行动的单航路任务路线, 如图 5(a) 所示, 另一种是集群分开行动的双航路任务路线, 如图 5(b) 所示。所规划的航路连接各目标, 目标以外的航路转弯点的坐标已在图 5 上标出。UAV 集群沿规划航路前往任务区域, 依次打击航路上的目标, 其他各参数设置如表 3 所示。



(a) 单航路任务路线
(a) Mission routes on one route



(b) 双航路任务路线
(b) Mission routes on two routes

● : 探测区域; ○ : 打击区域; ★ : 目标; ■ : 航路点。

图 5 任务环境和任务路线

Fig. 5 Mission environment and mission route

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

装备	参数	取值
雷达区域	目标 RCS σ_0/m^2	5
	目标探测距离 R_0/km	20
	目标探测概率 P_{d0}	0.9
	探测虚警概率 P_{fa0}	10^{-6}
	恒虚警处理参考单元数 N	16
	搜索循环时间 t_s/s	5
	预计形成追踪时间 τ_{23}/s	10
	失去追踪时间 τ_{32}/s	5
	遗忘时间 τ_{21}/s	10
	最大射程 R_h/km	10
火力区域	武器准备时间 τ_{34}/s	5
	单发毁伤概率 P_h	0.6
	发射间隔时间 t_h/s	5

续表 3
Continued Table 3

装备	参数	取值
UAV	巡航速度/(km/s)	0.2
	巡航高度/km	9
	平均 RCS σ_a/m^2	1
	单机侦察能力 p^s	0.1
	单机决策能力 p^d	0.3
	单机打击能力 p^l	0.2

4.2 UAV 生存概率仿真

在上述任务场景下,设置 UAV 集群数量 $n=36$ 。模拟 UAV 集群按照航路 2 飞行时,单体 UAV 状态概率随时间的变化,仿真结果如图 6 所示。UAV 集群在进入第一个雷达探测区域后,被检测、跟踪的状态概率开始增加。进入到打击区域后,被打击和坠毁的状态概率开始增加,坠毁概率增加也使得被检测、跟踪和打击的状态概率减小。当集群离开打击区域时,被打击的状态概率立刻降为 0,坠毁状态不再增加,UAV 仍处于敌方探测区域,所以探测识别概率继续增加。当集群离开探测区域时,由于雷达具有记忆性,所以被探测和识别的概率不会立刻变为 0,而是慢慢变小,最终雷达失去对 UAV 的跟踪。此后,集群同时进入新的探测和打击区域,被识别、被跟踪、被打击和坠毁的状态概率依次开始增加。

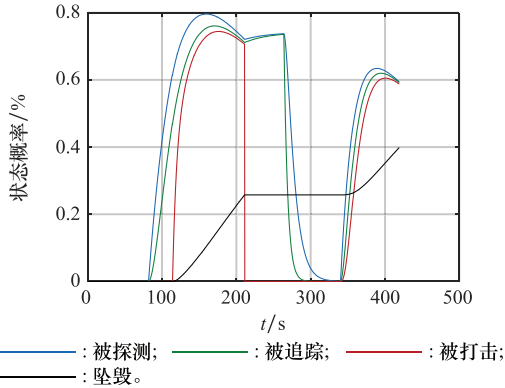


图 6 集群按照航路 2 飞行时 UAV 的状态概率

Fig. 6 Probability of the state of the UAV when the swarm flies according to route 2

为分析集群数量变化和航路规划对单体 UAV 生存概率的影响,让集群分别按照航路 1 和航路 2 飞行,并设置不同的集群数量进行仿真,UAV 的坠毁概率变化如图 7 所示。由仿真结果可以看出,UAV 集群沿航路 1 飞行比沿航路 2 飞行的单机坠毁概率普遍要高。这是因为沿航路 1 所经过的威胁区域多,沿航路 2 经过的威胁区域较少且中间穿插着无威胁航段,使得被跟踪的 UAV 被敌方雷达遗忘。并且不管走航路 1 还是航路 2,单机的坠毁概率随着集群数量增多先上升后下降。这是因为集群数量未达到一定量时,敌方打击能力足以应付 UAV 集群,集群数量对敌方对单体 UAV 的打击能力的影响不大。而集群数量增多会使得单体 UAV 的被探测概率升高,UAV 被探测又是坠毁的前提,因此集群数量增加会使得坠毁概率上升。当集群数量进一步增大,由于敌方武器打击能力有限,集群数量增多

分散了敌方武器对单机的打击强度,使得单机被打击的概率下降,故单机的坠毁概率下降。

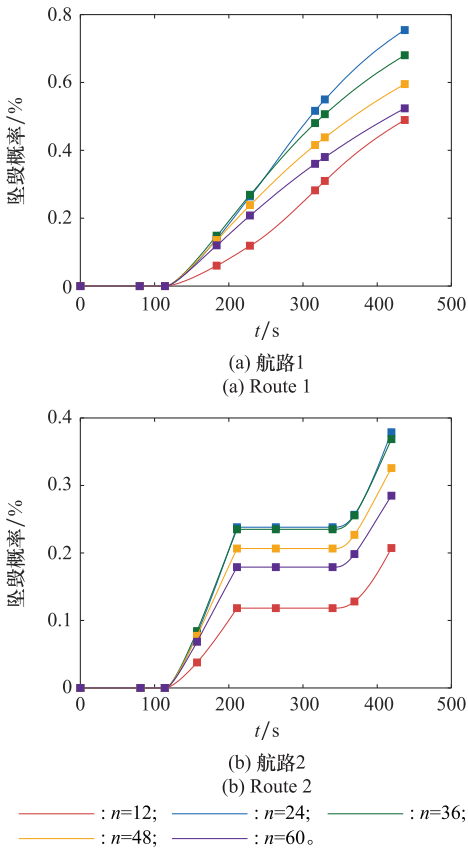


图 7 集群数量对单体 UAV 坠毁概率的影响

Fig. 7 Effect of the number of swarms on the crash probability of a single UAV

4.3 集群任务可靠性仿真

在完成 UAV 集群生存状态仿真的基础上,对不同任务路线以及不同编队组成形式下的任务可靠度进行对比。先设定 UAV 集群按照(5:2:5)形式编队,比较集群分别走单航路任务路线和双航路任务路线执行任务的可靠度。设置不同集群数量进行仿真,仿真结果如图 8 所示。

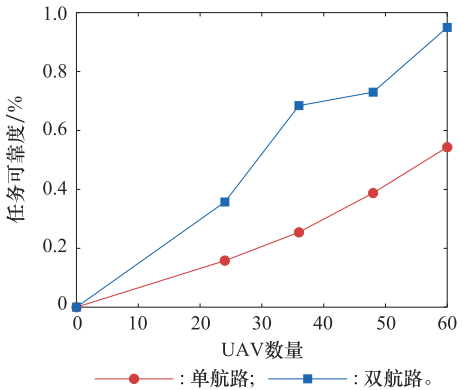


图 8 任务路线对任务可靠度的影响

Fig. 8 Effect of the mission route on mission reliability

再设定 UAV 集群走双航路的任务路线, 比较集群按照(5:2:5)、(6:2:4)和(4:3:5)形式编队的任务可靠度。设置不同集群数量进行仿真, 仿真结果如图9所示。

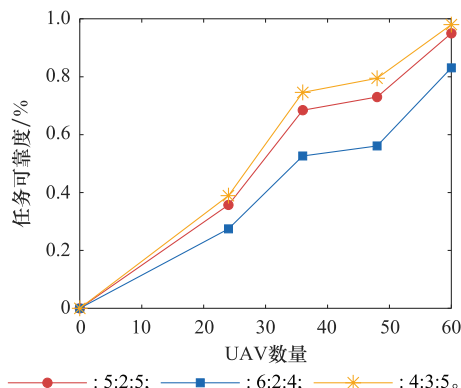


图9 编队组成形式对任务可靠度的影响

Fig. 9 Effect of formation composition on mission reliability

由仿真结果可知, 单航路执行任务的可靠度明显低于双航路的任务可靠度。这是因为单航路 UAV 集群经过的威胁区域多, 导致 UAV 的生存概率小, 从而降低了任务可靠度。说明任务路线会影响任务的可靠度, 多方向突围避免 UAV 集群长时间暴露在威胁区域。并且还可以看出, 不管是单航路还是双航路, 集群任务的可靠度都随着集群数量的增多而升高。这说明增加 UAV 数量能够提升集群 TCN 的作战能力, 从而提高集群任务的可靠度。

由仿真结果可知, 在3种编队组成形式下, UAV 集群的任务可靠度都随着集群数量的增多而升高, 统一编队数量下, 采用不同编队形式的任务可靠度也不同。这是因为不同类型的 UAV 单体的任务能力不同, 并且不同的编队形式导致 UAV 集群和目标之间形成不同的 TCN, 尽管集群数量相同, 其作战能力有差异, 所以任务可靠性也有差异。说明编队组成和 TCN 的组成方式会影响任务的可靠度。

5 结论

本文建立了 UAV 集群面向对地作战过程的任务可靠性评估模型, 该模型基于 UAV 集群的异构特性和 UAV 集群执行任务过程的时态性, 考虑了敌方威胁和集群任务规划, 适用于具体任务作战情景。经过仿真验证, 该模型符合 UAV 集群作战规律, 具有合理性; 可以用来比较在特定任务环境下, 不同任务规划方案和 UAV 性能对 UAV 集群任务可靠性的影响, 为作战任务规划提供了参考。

参考文献

[1] 屈高敏, 董彦非, 岳源. 对地攻击型 UAV 作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(4): 145-149.
QU G M, DONG Y F, YUE Y. Evaluation of combat effectiveness of ground attack UAV [J]. Fire Power and Command and Control, 2016, 41(4): 145-149.

[2] ZHANG J L, YAN J G, ZHANG P. Multi-UAV formation control based on a novel back-stepping approach[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2437-2448.
[3] YUAN Z H, JIN J, SUN L L, et al. Ultra-reliable IoT communications with UAVs: a swarm use case[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(12): 90-96.
[4] TARAPORE D, CHRISTENSEN A L, TIMMIS J. Generic, scalable and decentralized fault detection for robot swarms[J]. PloS One, 2017, 12(8): e0182058.
[5] ANDREWS J D, POOLE J, CHEN W H. Fast mission reliability prediction for unmanned aerial vehicles [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 120(12): 3-9.
[6] PRESCOTT D, REMENYTE-PRESCOTT R, REED S, et al. A reliability analysis method using binary decision diagrams in phased mission planning [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009, 223(2): 133-143.
[7] PRESCOTT D, ANDREWS J, DOWNES C. Multiplatform phased mission reliability modelling for mission planning [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009, 223(1): 27-39.
[8] GUO J B, ELSAYED E A. Reliability of balanced multi-level unmanned aerial vehicles [J]. Computers and Operations Research, 2019, 106: 1-13.
[9] KRESS M, BAGGESEN A, GOFER E. Probability modeling of autonomous unmanned combat aerial vehicles (UCAVs) [J]. Military Operations Research, 2006, 11(4): 5-24.
[10] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Formation and adjustment of manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement system [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 756-767.
[11] JIAO Z Q, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. MAV/UAV task coalition phased-formation method [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(2): 402-414.
[12] ZHONG Y, YAO P Y, WAN L J, et al. Intervention decision-making in MAV/UAV cooperative engagement based on human factors engineering [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(3): 530-538.
[13] TRAN H T, DOMERCANT J C, MAVRIS D N. Evaluating the agility of adaptive command and control networks from a cyber complex adaptive systems perspective [J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2015, 12(4): 405-422.
[14] 郎奇佳, 宋笔锋, 裴扬. 基于 Agent 建模的机载激光武器系统作战效能影响因素分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 826-835.
YUN Q J, SONG B F, PEI Y, et al. Analysis of the factors influencing the combat effectiveness of airborne laser weapon system based on agent modeling [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 826-835.
[15] TRAN H T, DOMERCANT J C, MAVRIS D N. Evaluating the agility of adaptive command and control networks from a

- cyber complex adaptive systems perspective[J]. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 2015, 12(4): 405–422.
- [16] GAO Y, LIU H, ZHOU Y M. An evaluation method of combat aircraft contribution effectiveness based on mission success space design [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2019, 20(1): 273–286.
- [17] 刘文金, 裴扬, 葛玉雪, 等. 基于 ABMS 的对地攻击型 UAV 体系贡献率评估[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 436–449.
LIU J W, PEI Y, GE Y X, et al. System-of-systems contribution evaluation of ground-attack UCAV based on ABMS[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 43(9): 436–449.
- [18] 黄树彩, 谢家豪, 韦道知, 等. UAV 集群作战中连续时间 Markov 链模型的求解方法[J]. *国防科技大学报*, 2022, 44(4): 43–51.
HUANG S C, XIE J H, WEI D Z, et al. Solution to continuous time Markov chain model for unmanned aerial vehicle swarm operation[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(4): 43–51.
- [19] WANG L Z, ZHAO X J, ZHANG Y, et al. Unmanned aerial vehicle swarm mission reliability modeling and evaluation method oriented to systematic and networked mission[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 466–478.
- [20] XU B, LIU T, BAI G H, et al. A multistate network approach for reliability evaluation of unmanned swarms by considering information exchange capacity [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 219(3): 108221.
- [21] DUI H Y, ZHANG C, BAI G H, et al. Mission reliability modeling of UAV swarm and its structure optimization based on importance measure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215(11): 107879.
- [22] FENG Q, LIU M, DUI H Y, et al. Importance measure-based phased mission reliability and UAV number optimization for swarm[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 223(7): 108478.
- [23] CARES J R. Information age combat model[C]//*Proc. of the 9th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 2014.
- [24] ZHANG S T, DOU Y J, ZHAO Q S. Evaluation of capability of weapon system of systems based on multi-scenario[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 3181(926/930): 3806–3811.
- [25] LI J C, ZHAO D L, JIANG J, et al. Capability oriented equipment contribution analysis in temporal combat networks[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 696–704.
- [26] LOONEY C, LIANG L. Cognitive situation and threat assessments of ground battlespaces[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(4): 297–308.
- [27] BOGUSLAVSKIY J A. Estimation of a matrix of intensities for model of Markov process[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2004, 166(2): 282–290.
- [28] YATES R, GOODMAN D. Probability and stochastic processes: a friendly introduction for electrical and computer engineers[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [29] RICHARDS M. Fundamentals of radar signal processing[M]. New York: McGraw Hill, 2005.

作者简介

齐小刚(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为系统建模与故障诊断。

周雨桐(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统可靠性。

刘立芳(1972—),女,教授,博士,主要研究方向为数据处理与智能计算。