

DOI: 10.3901/JME.2022.10.361

无人机集群任务可靠性建模及重要度分析*

白光晗¹ 张 驰¹ 兑红炎^{2,3} 张云安¹ 陶俊勇¹

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073;

2. 郑州大学管理工程学院 郑州 450001;

3. 洛阳职业技术学院商学院 洛阳 471000)

摘要: 面对复杂、高对抗的战场环境,传统以平台为中心的静态可靠性评估难以满足无人机集群执行多样化任务的可靠性分析需求。由于无人机集群本身具有一定的冗余性,对其可靠性的研究重点已转变为以任务为中心的可靠性。及时、准确评估无人机集群任务可靠性,并分析集群的薄弱环节,对于任务规划、决策制定和提高任务成功率具有重要意义。根据集群的编队队形和任务,建立基于一维线性连续 n 中取 k 系统和二维连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统的无人机集群任务可靠性模型,并得出当集群中不同位置的某架或某些无人机失效时对集群任务可靠性变化以及性能的影响。然后分别建立无人机集群在一维、二维空间的 Birnbaum 重要度和综合重要度分析模型,确定集群中的薄弱环节和关键无人机。最后基于不同编队形式的无人机集群任务可靠性算例,分析无人机失效对集群任务可靠性以及性能的影响,验证了提出方法的正确性和有效性。

关键词: 可靠性; 无人机集群; Birnbaum 重要度; 综合重要度; 系统性能

中图分类号: TB114

Mission Reliability Modeling and Importance Analysis of UAV Swarm

BAI Guanghan¹ ZHANG Chi¹ DUI Hongyan^{2,3} ZHANG Yunan¹ TAO Junyong¹

(1. College of Intelligence Science and Technology,

National University of Defense Technology, Changsha 410073;

2. School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001;

3. School of Business, Luoyang Vocational & Technical College, Luoyang 471000)

Abstract: Traditional platform-centric static reliability assessment cannot meet the reliability analysis requirements of UAV swarms for diversified tasks under complex and confrontational battlefield. Due to the redundancy of UAV swarms, the research focus on its reliability has changed to mission-centric reliability, which is of great significance for mission planning, decision-making and improving mission success rate. According to the formation and task of the swarm, a mission reliability model of the UAV swarm based on the one-dimensional linear continuous k -out-of- n system and the two-dimensional linear continuous (r, s) -out-of- (m, n) system is developed. The influence on the mission reliability change and performance of the swarm was obtained when one or several UAVs fail. Next, the Birnbaum importance and Integrated importance measure of UAV swarms in one-dimensional and two-dimensional spaces are proposed respectively. The impact of changes in the reliability of UAVs in different locations on the performance of the swarm is analyzed. Then weak links and key UAV in the swarm are determined. Finally, based on the case study of UAV swarm in different formations, the impact of UAVs failure on swarm mission reliability and performance is analyzed and the correctness and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words: reliability; UAV swarm; Birnbaum importance measure; integrated importance measure; system performance

0 前言

人工智能技术作为信息技术发展的高级阶段,

近年来在军事领域的应用得到了世界各国的高度关注,武器系统智能化成为智能化作战研究的主要趋势之一。基于人工智能优势的军事智能化技术被认为是最有可能改变未来战争格局和形态的关键技术。未来战争中将广泛地使用包括人工智能、机器学习和大数据等的计算技术,从而形成对战争形态产生颠覆性改变的作战能力。这些技术的应用将促使产生具有不同程度自主能力的武器系统,在武器系统自主性的基础上,集群对抗作为未来战场上的

* 国家自然科学基金(72071182, U1904211)、教育部人文社科规划基金(20YJA630012)、军委科技委基础加强计划技术领域基金(2019-JCJQ-JJ-180, ZZKY-YX-10-03)、河南省高校科技创新人才支持计划(22HASTIT022)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS007)和河南省科技攻关(222102520019)资助项目。20210530收到初稿,20210930收到修改稿

作战样式成为了当前军事智能化研究领域的热点问题。

无人机集群是由具备一定自主能力的无人机组成,并通过无人机间的实时数据共享、动态组网、协同配合,实现整体任务达成的系统。通过集群中具有自主性的个体简单行为交互,可以形成解决宏观复杂问题的能力,即集群智能。这种自主集群作战样式的出现将转变传统的指挥控制方式,增加未来战争的复杂性。单个无人机由于受到探测能力、武器载荷等因素限制,难以完成复杂的作战任务。无人机集群可将功能模块化,大幅降低开发和采购成本,在数量和规模优势下,还可根据任务类型进行不同功能机型的自由组合,使集群具有更强的生存能力、扩展性和任务完成能力。在实际作战中,准确、快速地评估和预测无人机集群在对抗环境下的性能对于任务规划、决策制定和提高任务成功率具有重要意义。在当前结构组成、技术状态和环境条件下,无人机集群任务可靠性评估是集群性能评估的重要组成部分。

1 介绍

由于无人机集群本身具有一定的冗余性,对其可靠性的研究重点已从以“平台为中心的可靠性”向“以任务为中心的可靠性”转变。传统以平台为中心、静态的可靠性评估,难以满足无人机集群在多种复杂环境下执行多样化任务的可靠性分析需求。无人机集群的任务可靠性是集群在规定的任务时间、规定的任务环境下完成规定任务的能力。在复杂对抗环境中,利用大量具有自主作战能力的无人机组成集群突破敌方防御体系,对目标实施协同搜索、协同干扰、协同攻击、协同察/打等任务是集群作战的典型样式。即使有一些无人机因为自身故障、外部环境、敌方干扰等因素的影响失效或坠毁,集群仍然能够完成任务。

1.1 文献综述

在无人机任务可靠性研究方面,PRESCOTT 等^[1]提出了采用二元决策图对以无人机为例的多阶段任务系统进行任务规划的方法。在此基础上,PRESCOTT 等^[2]还对多个平台(集群)执行任务的多阶段任务系统建模过程进行了相关研究。PETRITOLI 等^[3]基于可靠性和维护评估,为无人飞行器的维护活动建立更有效的间隔,通过评估置信区间的不确定性,确定了新的软故障极限,以确保

适当的预防性维护间隔。HU 等^[4]提出了可以有效地评估低成本无人机上的容错控制系统的可靠性的框架,通过将新的故障检测性能指标与关键分解相结合来捕获不同故障检测通道中的交互,并且可以从故障检测算法的随机模型中进行计算。LIU 等^[5]研究了系统可靠性和任务不确定性对巡逻和目标识别任务对无人机性能的影响。IANOVSK 等^[6]通过一个军事情报部门的现实问题,提出了无人机最优航线的策略,从而最大化集群的可用性。针对无人机在受到环境障碍或人为干扰下通讯很容易中断的情况,SECINTI 等^[7]将弹性措施紧密集成到网络设计中,提出了一种基于软件定义网络架构的无人机集群空中网络管理协议。考虑到无人机的可靠性和使用寿命,司小胜等^[8]详细分析和阐述了智能化设备的剩余寿命预测方法,并针对退化模型进行了建模和剩余寿命估计^[9]。

线型编队的无人机集群相当于一维集群,可以将其拟合为线性连续 n 中取 k 系统。矩形编队的无人机集群相当于二维集群,可以拟合为连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统,无人机集群中只要保证不出现连续 k 架无人机或 $r \times s$ 的矩形区域内无人机均失效的情况,整个集群将仍可以继续完成任务。GUO 等^[10]提出了针对线性连续 n 中取 k 系统多级平衡无人机的可靠性建模和估计。针对线性连续 n 中取 k 系统和连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统,AMARI 等^[11]基于多阶段和连续 n 中取 k 系统建立了模型,并提出了一种计算可靠性的迭代算法。GREGORY 等^[12]在此基础上提出了一种优化方法,使得计算效率更高,并且研究了共因失效的问题。CUI 等^[13]提出了拥有共享节点的线性连续 n 中取 k 系统,给出了可靠性计算公式。根据 Y-M 算法,CUI 等^[14]提出了一个基于 Y-M 算法的方法计算连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统的可靠性,并给出了可靠性计算公式。HABIB 等^[15]提出了考虑系统中组件失效数量时连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统的可靠性。DUI 等^[16]提出了针对线性连续 n 中取 k 系统最佳结构的重要度分析。ZHU 等^[17]对多个线性连续 n 中取 k 系统中与马尔科夫相关的组件的联合可靠性重要度进行了分析。由于无人机集群相互协调相互配合,刘宇等^[18]利用马尔科夫模型对存在载荷动态分配机制的多状态系统进行可靠性建模和可靠度计算,同时刘宇等^[19]提出一种考虑认知不确定性的多状态系统 Birnbaum 重要度分析方法,利用证据理论和马尔科夫模型分别开展认知不确定性量化和多状态系统可靠性建模。

1.2 研究动机

在以上分析中, 缺乏对不同维度的无人机集群执行任务时的系统整体可靠性的研究, 缺乏对无人机集群中某个或某些无人机可靠性变化对整个集群性能影响的分析, 未能指出无人机集群在执行任务时处于哪个位置的无人机是整个集群的关键组件, 缺乏当无人机集群中部分无人机失效或毁伤时, 应如何临时对结构进行变化调整使整个集群在保证整体阵型的情况下完成任务。

因此, 本文将不同无人机集群执行任务时的编队即线型编队队形或者矩形编队队形拟合为线性连续 n 中取 k 系统和连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统。我们给出了两种编队情况下, 无人机集群的可靠性模型, 并结合 Birnbaum 重要度和综合重要度两种不同的重要度分析方法, 得出位于集群不同位置的某架无人机或某些无人机的可靠性变化时对整体集群性能的影响, 根据重要度分析得出哪些位置的无人机或者无人机群是线型无人机集群或者矩形无人机集群的关键无人机, 同时得出哪些为非关键无人机。最后通过数据仿真得出关于无人机集群的性质并进行案例分析。这样在无人机集群执行任务前, 指挥人员可以根据作战目标, 在任务开始前预测无人机集群的任务可靠性, 以确定无人机集群是否能完成指定的任务, 如果不能, 则重新进行任务规划。这样可以极大的提升系统整体的性能, 同样可以保证最大程度的应对接下来的任务。同时可为无人机集群进行重构提供可靠度指标参考。

2 无人机集群任务可靠性存在的问题

无人机集群是大量无人机通过相互协同、相互配合以及相互完善来执行任务的, 为了提高任务成功率, 每个无人机必须能够相互传递信息。而当无人机集群执行不同的任务时, 编队结构也会随之不同。无人机集群更多为线型编队队形或者矩形编队队形, 其中每个无人机能够无线通信周围相邻的无人机。

以侦察任务为例, 任务成功的判据是完成指定区域的侦察全覆盖。其中无人机集群执行任务时的编队即线型编队队形或者矩形编队队形拟合为线性连续 n 中取 k 系统和连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统。如图 1 所示, 在任务开始前无人机集群包含 n 架可正常运行的无人机。无人机集群在指定的区域内执行任务时, 每个无人机被认为是一个具有有限执行范围的探测传感器, 为了保证完成任务的成功率, 每

个无人机的执行范围是存在重叠的。即使有连续 $k-1$ 架无人机失效, 无人机集群也可以成功完成任务。只有当有连续 k 架或以上无人机失效时, 任务才会失败。

如图 2 所示, 在任务开始前无人机集群共包含 $m \times n$ 架可正常运行的无人机, 每架无人机可执行范围为以自身为中心的相邻四个 1×1 的矩形区域。即使有多架无人机失效, 只要不出现 2×2 的矩形区域内无人机均失效的情况, 都可以通过周围相邻的无人机将失效无人机执行区域进行全方位覆盖。只有当有 2×2 的矩形区域内或更大区域内无人机全部失效时, 才会出现无法侦察的区域, 任务才会失败。

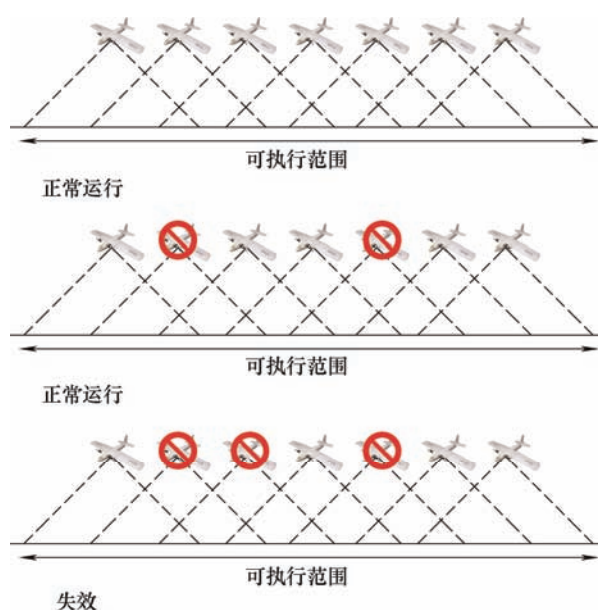


图 1 一维无人机集群任务模型

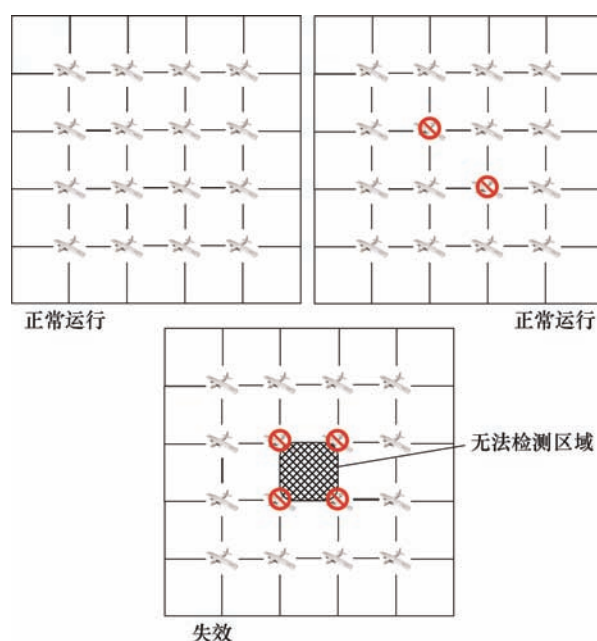


图 2 二维无人机集群任务模型

尽管无人机集群的规模越来越大,但这种系统的任务可靠性却很少受到重视,而且系统中不同位置上的无人机对整体性能的影响也很少受到重视。主要存在问题如下。

(1) 现阶段缺乏对不同维度的无人机集群执行任务时的集群整体可靠性的研究,缺乏对无人机集群中某个或某些无人机可靠性变化对整个集群性能影响的分析。例如如图 1 所示,当所有无人机均正常运行时,集群处于正常运行状态且可靠性较高;当存在非序贯两个无人机(第 2 架和第 5 架)失效即可靠性降为 0 时,集群仍可以正常执行任务且可靠性仍保持较高状态;当存在序贯两架无人机(第 2 和第 3 架)失效时,则系统可靠性降为 0,无法正常运行。所以不同位置的无人机以及不同数量的无人机的可靠性变化对整个集群性能影响是不同的,这是现阶段无人机集群研究存在的问题之一。

(2) 现阶段缺乏对无人机集群在执行任务时处于哪个位置的无人机是整个集群的关键单机的指出。同样以图 1 为例,线性编队的无人机集群执行任务时,所有的无人机中存在重要度最高即当其可靠性变化对整体性能变化影响最大的一架,此时,这个无人机则为集群的关键单机。

(3) 现阶段缺乏当无人机集群受到攻击且出现无人机被击落时,应如何临时对结构进行变化调整使整个集群在保证整体阵型不存在侦测盲区的情况下完成任务的指导。如图 2 失效模型所示,已经存在 2×2 的矩形区域失效,这种状态下系统整体已经存在无法检测区域面临任务失败的风险。但此时可以将非关键列或者非关键行的无人机在保证不会再次出现失效区域的前提下,将部分无人机调整至已失效区域来弥补空缺。例如可以将(1, 1)无人机调整至(3, 2)处,此时系统整体将可以正常运行。

3 无人机集群任务可靠性与重要度

针对上文所提到的无人机集群存在的问题,本节提出了基于序贯表决系统的无人机集群可靠性模型以及基于序贯表决系统的无人机集群重要度分析模型来对这些问题进行研究和分析。

3.1 基于一维序贯表决模型的无人机集群可靠性模型

当无人机集群采取线性编队的方式执行任务时,相当于一个线性连续 n 中取 k 系统。CUI 等^[14]通过有限马尔可夫链嵌入法推导出线性连续 n 中取 k 系统的可靠性方程。首先定义一个具有有限空间

状态 S 的马尔可夫链 $\{Y(t), t=0, 1, 2, \dots\}$, 其中 $S = \{0, 1, \dots, k\}$ 。再通过有限马尔可夫链嵌入法将各个组件逐个嵌入到系统中。线性连续 n 中取 k 系统的可靠性方程为

$$R = \pi_0 \prod_{i=1}^n A_i U^T \quad (1)$$

式中, $\pi_0 = (1, 0, \dots, 0)_{1 \times [k+1]}$, 为系统的初始状态概率分布。矩阵 $U = (1, 1, \dots, 1, 0)_{1 \times [k+1]}$ 则是对系统处于工作状态的概率值求和。

3.2 基于二维序贯表决模型的无人机集群可靠性模型

当无人机集群采取矩形方阵编队的方式执行任务时,相当于一个连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统。与线性连续 n 中取 k 系统的相同,仍采取有限马尔可夫链嵌入法来推导出连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统的可靠性方程。

令 $\Phi_{(r,s,m,h)} \in \{0, 1\}$ 。当 $\Phi_{(r,s,m,h)}$ 为 0 时,则意味着在 m 行和前 h 列的矩形区域内不存在 $r \times s$ 矩形区域内无人机均失效的情况,反之,则在 m 行和前 h 列的矩形区域内存在 $r \times s$ 矩形区域内无人机均失效的情况。定义两组 $1 \times (m-r+1)$ 的向量组,定义 $\mathbf{X}_h = (x_{1h}, x_{2h}, \dots, x_{(m-r+1)h})^T$ 代表第 h 列无人机的状态,其中 $x_{ih} = 0, 1$ 。当 $x_{ih} = 1$ 时,则无人机 $(i, h), (i+1, h), \dots, (i+r-1, h)$ 均是失效的,而当 $x_{ih} = 0$ 时,则无人机 $(i, h), (i+1, h), \dots, (i+r-1, h)$ 中至少存在一架无人机正常工作。对于向量组 \mathbf{X}_h , 其中在 1 之间至少存在 r 个 0 或者不存在 0, 否则是与实际相悖的。例如,当 $m=6$ 且 $r=2$ 时,对于第 h 列所有状态的可能性为

$$\{\mathbf{X}_h\} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

而 $(1, 0, 1, a, b)^T, (a, 1, 0, 1, b)^T, (a, b, 1, 0, 1)^T (a, b = 0, 1)$ 这三种情况之所以不存在,是因为 1 与 1 之间只存在 1 个 0 是不符合实际的。

定义向量组 $\mathbf{Y}_h = (y_{1h}, y_{2h}, \dots, y_{(m-r+1)h})^T$, 其中

$y_{ih} = 0, 1, \dots, s-1$ 。当 $y_{ih} = s' (1 \leq s' \leq s-1)$ 时, 则代表着在 $r \times s'$ 的矩形区域内所有的无人机均失效, 其中无人机 (i, h) 位于整个矩形区域的右上角, 同时, 在 $r \times (s'+1)$ 的矩形区域内至少存在一个无人机正常工作, 即代表着在 $r \times (s'+1)$ 的矩形区域内的无人机没有全部失效。定义一个具有有限空间状态 T 的马尔可夫链 $\{Y^T(t), t \geq 0\}$, 其中

$$\begin{aligned} T = & \{\varepsilon_0 = Y(t) : \max\{y_{ih}\} = 0, \Phi_{(r,s,m,h)} = 0\} \cup \\ & \{\varepsilon_1 = Y(t) : \max\{y_{ih}\} = 1, \Phi_{(r,s,m,h)} = 0\} \cup \\ & \{\varepsilon_2 = Y(t) : \max\{y_{ih}\} = 2, \Phi_{(r,s,m,h)} = 0\} \cup \dots \cup \\ & \{\varepsilon_{s-1} = Y(t) : \max\{y_{ih}\} = s-1, \Phi_{(r,s,m,h)} = 0\} \cup \\ & \{\varepsilon_s = Y(t) : \Phi_{(r,s,m,h)} = 1\}. \end{aligned}$$

式中, $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{s-1}, \varepsilon_s$ 均为符合相对应状态的集合。

(1) 当由连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统中前 h 列组成的子系统最后的一列不存在连续 r 架失效的无人机且整个系统仍正常工作时, $T = \varepsilon_0$ 。

(2) 当由连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统中前 h 列组成的子系统中, 在最后 $i (1 \leq i \leq h)$ 列中存在 $r \times i$ 的矩形区域均为失效无人机且在最后 $i+1$ 列中不存在 $r \times i$ 的矩形区域均为失效无人机组成时, $T = \varepsilon_i$ 。

(3) 当连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统中前 h 列组成的子系统中, 至少存在一个 $r \times s$ 的矩形区域均为失效组件组成即系统整体失效时, $T = \varepsilon_s$ 。

例如, 连续 $(4, 6)$ 中取 $(2, 3)$ 中其所有可能的状态空间 T 为

$$\begin{aligned} T = & \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \cup \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \cup \\ & \left\{ \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\} \cup \{\varepsilon_s\} \\ & \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\} \end{aligned}$$

对状态转移矩阵 A_h , 定义 $M(Y_h, X_{h+1}) = Y_{h+1}$,

$$y_{i(h+1)} = \begin{cases} 0 & x_{i(h+1)} = 0 \\ x_{i(h+1)} + y_{ih} & x_{i(h+1)} = 1 \end{cases}$$

(1) 对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统中的第 $h+1$ 列, 如果 $\{M(Y_h, X_{h+1})\} = i < s$, 则 $P(Y^T(h+1) = \varepsilon_i Y^T(h) \neq \varepsilon_s) = P(X_{h+1}), 0 \leq i \leq s-1$ 。

(2) 对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统中的第 $h+1$ 列, 如果 $\{M(Y_h, X_{h+1})\} = s$, 则 $P(Y^T(h+1) = \varepsilon_s Y^T(h) = \varepsilon_{s-1}) = P(X_{h+1})$ 。

(3) $P(Y^T(h+1) = \varepsilon_s Y^T(h) = \varepsilon_s) = 1$ 。

(4) 其余情况状态转移概率均为 0。

综上所述, 连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统的可靠性方程为

$$R = \pi_0 \prod_{h=1}^n A_h U^T. \quad (2)$$

式中, $\pi_0 = (1, 0, \dots, 0)_{1 \times T}$ 为系统的初始状态概率分布。矩阵 $U = (1, 1, \dots, 1, 0)_{1 \times T}$ 则是对系统处于工作状态的概率值求和。

3.3 基于一维序贯表决模型的无人机集群重要度分析模型

组件 i 在 t 时刻的 Birnbaum 重要度定义为

$$I(BM)_i^t = \Pr\{\Phi(X(t)) = 1 | X_i(t) = 1\} - \Pr\{\Phi(X(t)) = 1 | X_i(t) = 0\} \quad (3)$$

组件 i 的综合重要度定义为

$$I(IIM)_i^t = \Pr\{X_i(t) = 1\} \cdot \lambda_i(t) \cdot I(BM)_i^t. \quad (4)$$

式中, $\lambda_i(t)$ 为组件 i 在 t 时刻的失效率。

根据式(3), 对于线性连续 n 中取 k 系统, 组件 i 在 t 时刻的 Birnbaum 重要度定义为

$$\begin{aligned} I(BM)_i^t &= \frac{\partial R_{k/n}^t}{\partial p_i(t)} = \\ & R_{k/n}^t(X_i(t) = 1) - R_{k/n}^t(X_i(t) = 0) = \\ & \frac{R_{k/i-1}^t R_{k/n-i}^t - R_{k/n}^t}{1 - p_i(t)}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $R_{k/n}^t$ 为线性连续 n 中取 k 系统在 t 时刻的可靠性。式中 $R_{k/i-1}^t$ 为线性连续 $i-1$ 中取 k 系统(由组件 $1, 2, \dots, i-1$ 构成)在 t 时刻的可靠性。式中 $R_{k/n-i}^t$ 为线性连续 $n-i$ 中取 k 系统(由组件 $n-i+1, n-i+2, \dots, n-1, n$ 构成)在 t 时刻的可靠性。

对于组件 i 系统的可靠性为

$$\begin{aligned} R_n &= p_i \left(\frac{R(p_1, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n) - R(p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n)}{R(p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n)} \right) + \\ & R(p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n) \end{aligned} \quad (6)$$

而对于线性连续 n 中取 k 系统来说

$$\begin{aligned} R(p_1, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n) &= \\ R(p_1, \dots, p_{i-1}) R(p_{i+1}, \dots, p_n) &= R_{k/i-1}^t R_{k/n-i}^t \end{aligned} \quad (7)$$

根据组件 i 的 Birnbaum 重要度定义即式(3)可以

得到

$$I(BM)_i = R(p_1, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n) - R(p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n) \quad (8)$$

结合式(6)~(8)我们可以得到

$$I(BM)_i = \frac{R_{k/i-1} R'_{k/n-i} - R_{k/n}}{1 - p_i}$$

根据式(4)、(5), 对于线性连续 n 中取 k 系统, 组件 i 在 t 时刻的综合重要度定义为

$$I(IIM)_i^t = \Pr\{X_i(t) = 1\} \cdot \lambda_i(t) \cdot I(BM)_i^t = p_i(t) \cdot \lambda_i(t) \cdot \frac{R'_{k/i-1} R'_{k/n-i} - R'_{k/n}}{1 - p_i(t)} \quad (9)$$

3.4 基于二维序贯表决模型的无人机集群重要度分析模型

对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统来说, 其中某一个组件的可靠性状态变化对整体系统性能的影响并不是特别显著, 所以应分析其中某一列或者某一行组件构成的子系统的可靠性变化对整体系统性能的影响, 而这个子系统就相当于一个线性连续 n 中取 k 系统。

根据式(3), 对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统, 某列组件构成的子系统 j 在 t 时刻的 Birnbaum 重要度定

义为

$$I(BM)_j^t = \frac{R'_{(r,s)/(m,j-1)} R'_{(r,s)/(m,n-j)} - R'_{(r,s)/(m,n)}}{1 - R'_{r/m}} \quad (10)$$

式中, $R'_{(r,s)/(m,n)}$ 为连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统在 t 时刻的可靠性, $R'_{(r,s)/(m,j-1)}$ 为连续 $(m, j-1)$ 中取 (r, s) 系统在 t 时刻的可靠性, $R'_{(r,s)/(m,n-j)}$ 为连续 $(m, n-j)$ 中取 (r, s) 系统在 t 时刻的可靠性, $R'_{r/m}$ 为线性连续 m 中取 r 系统在 t 时刻的可靠性。

$$R'_{(r,s)/(m,j-1)} = R'_{(r,s)/(m,j-1)} \begin{pmatrix} p'_{(1,1)} & p'_{(1,2)} & \cdots & p'_{(1,j-1)} \\ p'_{(2,1)} & p'_{(2,2)} & \cdots & p'_{(2,j-1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,1)} & p'_{(m,2)} & \cdots & p'_{(m,j-1)} \end{pmatrix}$$

$$R'_{(r,s)/(m,n-j)} = \begin{pmatrix} p'_{(1,n-j+1)} & p'_{(1,n-j+2)} & \cdots & p'_{(1,n)} \\ p'_{(2,n-j+1)} & p'_{(2,n-j+2)} & \cdots & p'_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,n-j+1)} & p'_{(m,n-j+2)} & \cdots & p'_{(m,n)} \end{pmatrix}$$

根据式(6), 对于子系统 j 在 t 时刻系统的可靠性为

$$R'_{(r,s)/(m,n)} = R'_{(r,s)/(m,n)} \begin{pmatrix} p'_{(1,j)} & p'_{(2,j)} & \cdots & p'_{(m,j)} \end{pmatrix} \times \left[\begin{pmatrix} p'_{(1,1)} & p'_{(1,2)} & \cdots & p'_{(1,j-1)} & 1 & p'_{(1,j+1)} & \cdots & p'_{(1,n)} \\ p'_{(2,1)} & p'_{(2,2)} & \cdots & p'_{(2,j-1)} & 1 & p'_{(2,j+1)} & \cdots & p'_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,1)} & p'_{(m,2)} & \cdots & p'_{(m,j-1)} & 1 & p'_{(m,j+1)} & \cdots & p'_{(m,n)} \end{pmatrix} - R'_{(r,s)/(m,n)} \begin{pmatrix} p'_{(1,1)} & p'_{(1,2)} & \cdots & p'_{(1,j-1)} & 0 & p'_{(1,j+1)} & \cdots & p'_{(1,n)} \\ p'_{(2,1)} & p'_{(2,2)} & \cdots & p'_{(2,j-1)} & 0 & p'_{(2,j+1)} & \cdots & p'_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,1)} & p'_{(m,2)} & \cdots & p'_{(m,j-1)} & 0 & p'_{(m,j+1)} & \cdots & p'_{(m,n)} \end{pmatrix} - R'_{(r,s)/(m,n)} \begin{pmatrix} p'_{(1,1)} & p'_{(1,2)} & \cdots & p'_{(1,j-1)} & 0 & p'_{(1,j+1)} & \cdots & p'_{(1,n)} \\ p'_{(2,1)} & p'_{(2,2)} & \cdots & p'_{(2,j-1)} & 0 & p'_{(2,j+1)} & \cdots & p'_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,1)} & p'_{(m,2)} & \cdots & p'_{(m,j-1)} & 0 & p'_{(m,j+1)} & \cdots & p'_{(m,n)} \end{pmatrix} \right] \quad (11)$$

对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统来说

$$R'_{(r,s)/(m,n)} \begin{pmatrix} p'_{(1,1)} & p'_{(1,2)} & \cdots & p'_{(1,j-1)} & 1 & p'_{(1,j+1)} & \cdots & p'_{(1,n)} \\ p'_{(2,1)} & p'_{(2,2)} & \cdots & p'_{(2,j-1)} & 1 & p'_{(2,j+1)} & \cdots & p'_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p'_{(m,1)} & p'_{(m,2)} & \cdots & p'_{(m,j-1)} & 1 & p'_{(m,j+1)} & \cdots & p'_{(m,n)} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
& R_{(r,s)/(m,j-1)}^t \begin{pmatrix} p_{(1,1)}^t & p_{(1,2)}^t & \cdots & p_{(1,j-1)}^t \\ p_{(2,1)}^t & p_{(2,2)}^t & \cdots & p_{(2,j-1)}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{(m,1)}^t & p_{(m,2)}^t & \cdots & p_{(m,j-1)}^t \end{pmatrix} \times \\
& R_{(r,s)/(m,n-j)}^t \begin{pmatrix} p_{(1,n-j+1)}^t & p_{(1,n-j+2)}^t & \cdots & p_{(1,n)}^t \\ p_{(2,n-j+1)}^t & p_{(2,n-j+2)}^t & \cdots & p_{(2,n)}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{(m,n-j+1)}^t & p_{(m,n-j+2)}^t & \cdots & p_{(m,n)}^t \end{pmatrix} = \\
& R_{(r,s)/(m,j-1)}^t R_{(r,s)/(m,n-j)}^t
\end{aligned} \quad (12)$$

根据 Birnbaum 重要度定义即式(3)可以得到

$$\begin{aligned}
& I(BM)_j^t = \\
& R_{(r,s)/(m,n)}^t \begin{pmatrix} p_{(1,1)}^t & p_{(1,2)}^t & \cdots & p_{(1,j-1)}^t & 1 & p_{(1,j+1)}^t & \cdots & p_{(1,n)}^t \\ p_{(2,1)}^t & p_{(2,2)}^t & \cdots & p_{(2,j-1)}^t & 1 & p_{(2,j+1)}^t & \cdots & p_{(2,n)}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{(m,1)}^t & p_{(m,2)}^t & \cdots & p_{(m,j-1)}^t & 1 & p_{(m,j+1)}^t & \cdots & p_{(m,n)}^t \end{pmatrix} - \\
& R_{(r,s)/(m,n)}^t \begin{pmatrix} p_{(1,1)}^t & p_{(1,2)}^t & \cdots & p_{(1,j-1)}^t & 0 & p_{(1,j+1)}^t & \cdots & p_{(1,n)}^t \\ p_{(2,1)}^t & p_{(2,2)}^t & \cdots & p_{(2,j-1)}^t & 0 & p_{(2,j+1)}^t & \cdots & p_{(2,n)}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{(m,1)}^t & p_{(m,2)}^t & \cdots & p_{(m,j-1)}^t & 0 & p_{(m,j+1)}^t & \cdots & p_{(m,n)}^t \end{pmatrix}
\end{aligned} \quad (13)$$

所以结合式(11)~(13), 我们可以得到

$$I(BM)_j^t = \frac{R_{(r,s)/(m,j-1)}^t R_{(r,s)/(m,n-j)}^t - R_{(r,s)/(m,n)}^t}{1 - R_{r/m}^t}.$$

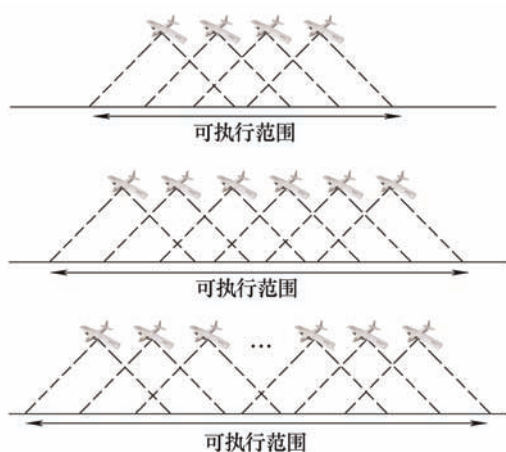
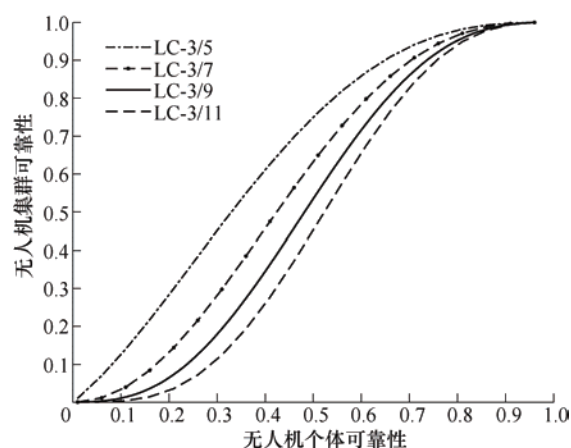
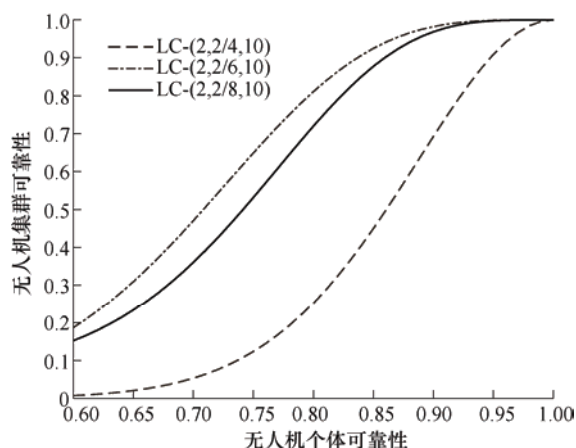
根据式(4)、(10), 对于连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统, 某列组件构成的子系统 j 在 t 时刻的综合重要度定义为

$$I(IIM)_j^t = R_{r/m}^t \times \lambda_j(t) \times \frac{R_{(r,s)/(m,j-1)}^t R_{(r,s)/(m,n-j)}^t - R_{(r,s)/(m,n)}^t}{1 - R_{r/m}^t}. \quad (14)$$

4 案例分析

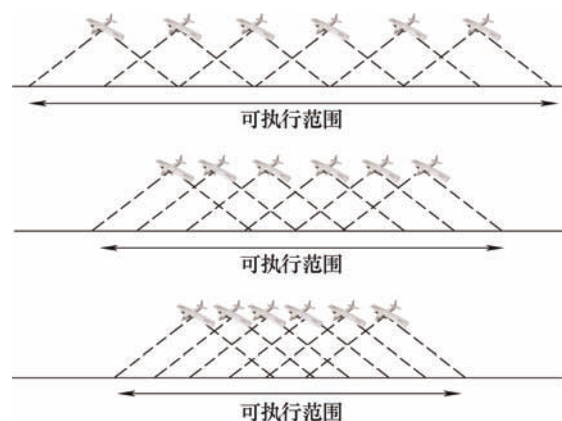
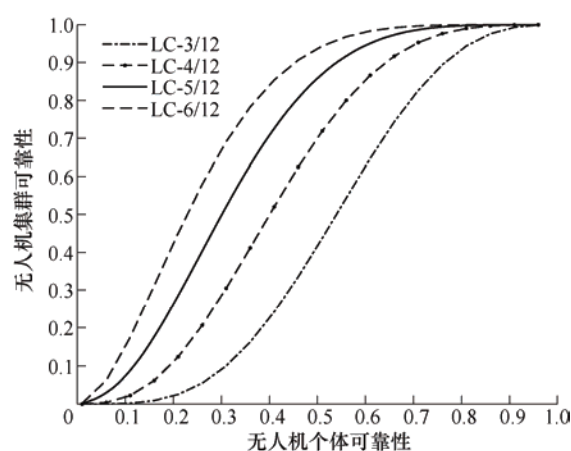
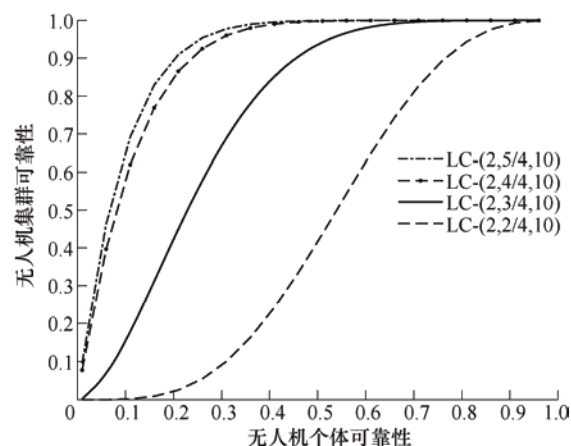
本节以无人机集群执行侦察任务为背景, 分别给出在一维线性编队和二维矩形编队两种集群架构下的可靠性和重要度分析。如图 3 所示, 当每架无人机执行范围固定时即 k 值或 (r, s) 值相同, 集群规模越大, 侦察覆盖范围越大。而此时无人机集群的可靠性变化如图 4 和图 5 所示。对于线性编队无人机集群, 当固定 $k=3, n$ 分别为 5, 7, 9 和 11 时, 可以得到当无人机自身可靠性一

定且 k 值一定时, 随着 n 值的增大, 集群可靠性是在不断减小的, 当无人机自身可靠性不断接近 1 时, 不同 n 值之间集群可靠性的差距同样也是在不断减小的直至为 1。之所以出现这种情形是因为对于线性编队无人机集群, 当 k 值固定时, 无人机数量越多, 可能发生连续 k 架无人机失效的概率也就越大, 导致集群整体可靠性随 n 值的增大而减小。对于矩形编队无人机集群, 当固定 $(r, s)=(2, 2)$, 考虑两种情况: ① m 固定, n 分别为 4, 10, 20; ② n 固定, m 分别为 4, 6, 8。结果和线性编队无人机集群类似, 当无人机自身可靠性一定且 r, s, m 值一定时, 随者 n 值的增大, 系统可靠性是在不断减小的。但是当无人机自身可靠性一定且 r, s, n 值一定时, 随着 m 值的增大, 集群可靠性是先增大后减小的, 当 $m=6$ 时, 系统可靠性为最大。根据这两种不同的变化, 我们可以得到, 对于矩形编队无人机集群 (r, s) 值固定时, 在可以满足完成任务的情况下, 应尽量减少其编队的 n 值即编队列的数量, 并根据其 (r, s) 值选取一个最佳的 m 值即编队行的数量, 不宜过大或过小。

图 3 无人机集群 k 值固定时执行任务示意图图 4 线性编队无人机集群 k 值固定时系统可靠性变化图 5 矩形编队无人机集群 (r, s) 值固定时系统可靠性变化

当每架无人机执行范围随着不同阶段任务需求不同而导致要覆盖的区域是不同时,如图 6 所示,不同的队形配置和不同的 k 值或 (r, s) 值,因为较大的区域使得无人机集群更加分散,降低了系统冗余度,导致 k 值或 (r, s) 值降低,而较小的区域使得无人机集群更加集中,增大系统冗余度,导致 k 值或 (r, s) 值增大。而此时无人机集群的可靠性变化如

图 7 和图 8 所示。

图 6 无人机集群 k 值变化时执行任务示意图图 7 线性编队无人机集群 k 值变化时系统可靠性变化图 8 矩形编队无人机集群 s 值变化时系统可靠性变化

对于线性编队无人机集群,当固定 $n=12$,令 k 分别为 3、4、5 和 6 时,可以得到当无人机自身可靠性固定且 n 值固定时,随着 k 值的增大,集群整体任务可靠性也随之增大。因为当无人机集群数目固定且更加集中时,此时将增大系统的冗余度,即更多的无人机会更有更大面积的侦察范围重叠,所以线性编队无人机集群前往某一特定区域执行任务

时, 派遣越多的无人机将增加任务可靠性。对于矩形编队无人机集群, 当固定 $(m, n)=(4, 10)$, 且 r 固定, s 分别为 2, 3, 4 和 5 时, 可以得出当无人机自身可靠性固定且 (m, n) 值固定时, 随着 s 值的增大, 系统整体可靠性也随之增大。当 $s=5, s=4$ 时, 系统整体可靠性比较接近, 即使在单个无人机可靠性仅为 0.2 时, 集群整体的任务可靠性也可以达到 0.8 至 0.9, 当 $s=2$ 时, 单个无人机可靠性为 0.8 时, 集群任务可靠性才达到 0.8。这说明 s 值的变化, 对系统整体变化幅度影响较大, 但是当 s 增大至某一值时, 即使再增加, 集群任务可靠性的增加不再明显。所以针对矩形编队无人机集群来说, 根据 r, m, n 值, 可以选取最佳的 s 值, 即通过改变无人机集群列与列之间的间距来改变 s 值。

当无人机集群执行任务时, 会有一定的概率被敌军发现并被攻击(本文默认无人机受到攻击后, 直接失效即可靠性变为 0), 由于无人机上存在防护系统, 所以会有一定的概率躲避攻击, 使攻击失效。若存在无人机被攻击失效时, 对系统整体的性能会有一定的影响, 所以分析不同位置的无人机随着时间推移对系统整体重要度的影响程度是有必要的。假设每架无人机寿命服从威布尔分布, 其累积失效

函数为 $F = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)$ 。

对于 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群, 由于不同的无人机毕竟存在各种参数上的差异, 所以每架无人机的可靠性变化也存在细微的差别, 我们得出当每架无人机可靠性变化不同时, 位于系统不同位置的无人机随时间推移的 Birnbaum 重要度和综合重要度, 如图 9 和图 10 所示。

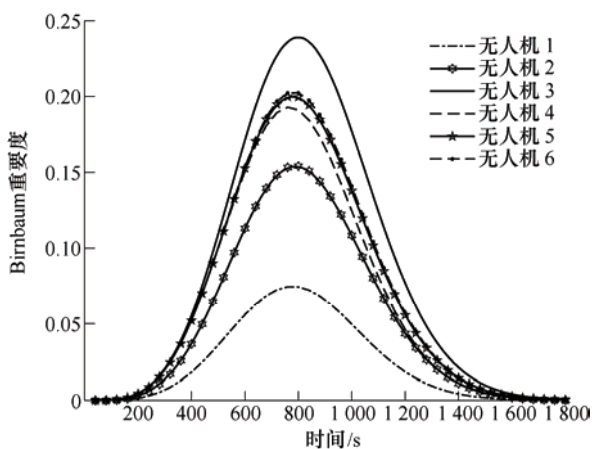


图 9 $n=12, k=3$ 线性编队无人机集群中不同位置无人机的 Birnbaum 重要度

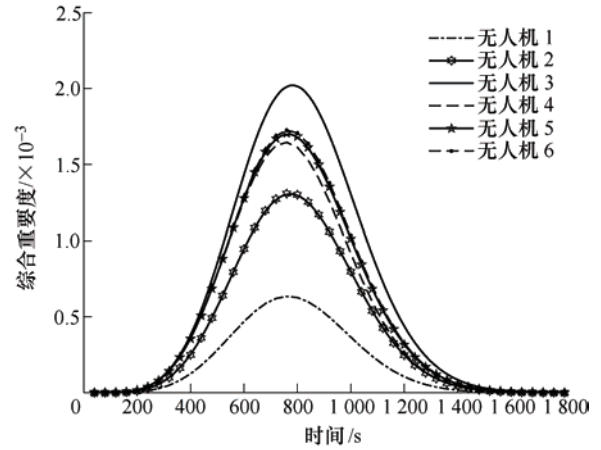


图 10 $n=12, k=3$ 线性编队无人机集群中不同位置无人机的综合重要度

从图中我们可以看出前 6 架无人机的重要度随着时间的推移先增大后减小。其中前 6 架无人机的 Birnbaum 重要度在 $t=[800, 1000]$ 时达到最大值, 在 $t=550$ 以及 $t=1050$ 时, 发生了图形的交叉, 我们可以得到

$$\begin{cases} I_6^{BM} < I_1^{BM} < I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_2^{BM} < I_3^{BM} & t \leq 550 \\ I_1^{BM} < I_6^{BM} < I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_2^{BM} < I_3^{BM} & 550 < t \leq 1050 \\ I_1^{BM} < I_4^{BM} < I_2^{BM} < I_6^{BM} < I_5^{BM} < I_3^{BM} & 1050 < t \end{cases}$$

其中第 3 架无人机的重要度在任意时刻都是最大的。在任务前期, 第 2 架以及第 3 架无人机的重要度较高, 而在执行任务的后期, 则第 3 架和第 5 架的重要度较高, 即对系统整体性能影响较大。前 6 架无人机的综合重要度在 $t=[600, 800]$ 时达到最大值, 其中和 Birnbaum 重要度一样, 第 3 架无人机的重要度一直最高。在任务前期, 第 3 架和第 4 架无人机的综合重要度较高; 任务中期时, 第 3、4、5 架无人机重要度较高; 任务后期则是第 3 架和第 5 架无人机重要度较高。

若无人机在遭受到攻击而防护系统没有成功闪避时, 则无人机被击落, 可靠性直接降为 0。对于 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群在不同位置无人机被击落前后两种不同重要度的变化如图 11 和图 12 所示。

对于 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群前 6 架无人机在 $t=700$ 遭受到攻击前, Birnbaum 重要度均处于上升阶段, 受到攻击失效后, 重要度均大幅下降, 而且不同位置无人机之间的重要度发生了变化

$$\begin{cases} I_1^{BM} < I_6^{BM} < I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_2^{BM} < I_3^{BM} & t \leq 700 \\ I_1^{BM} < I_2^{BM} < I_4^{BM} < I_5^{BM} < I_6^{BM} < I_3^{BM} & t > 700 \end{cases}$$

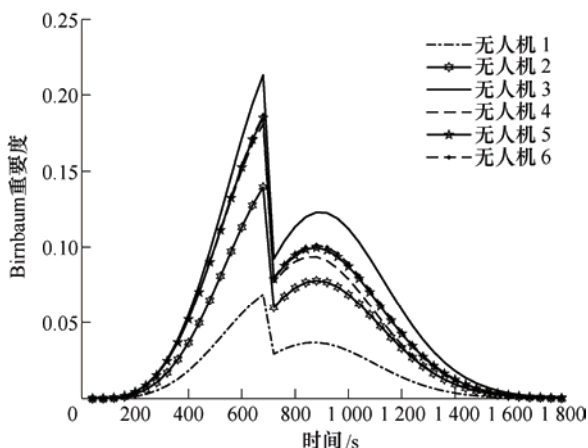


图 11 $n=12, k=3$ 线性编队无人机集群 $t=700$ 时受到攻击前后的 Birnbaum 重要度变化

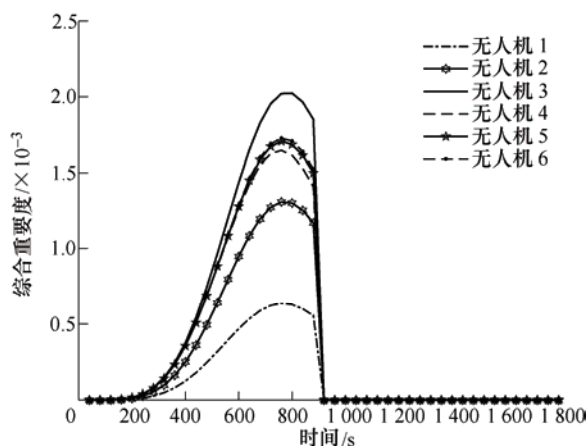


图 12 $n=12, k=3$ 线性编队无人机集群 $t=900$ 时受到攻击前后的综合重要度变化

除了第 1 架和第 3 架无人机重要度排名没有发生变化, 其余四架无人机的重要度排名均发生了逆转, 而且在受到攻击后, 所有无人机的重要度会随着时间的推移先上升后下架, 并在 $t=900$ 时达到第二次高峰。所以当 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群遭受到攻击后, 应及时进行调整, 及时检测第 3、5、6 架无人机的状态, 若这三架无人机的其中某个或某些发生失效, 在系统仍可以正常运行的情况下, 将其余位置可正常运行的无人机调整至此位置使无人机集群整体性能达到最佳。 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群前 6 架无人机 $t=900$ 遭受到攻击后, 所有位置无人机的综合重要度均为 0, 主要是因为自身的可靠性为 0, 综合重要的其中的一个乘积因子为 0, 则导致综合重要的为 0。

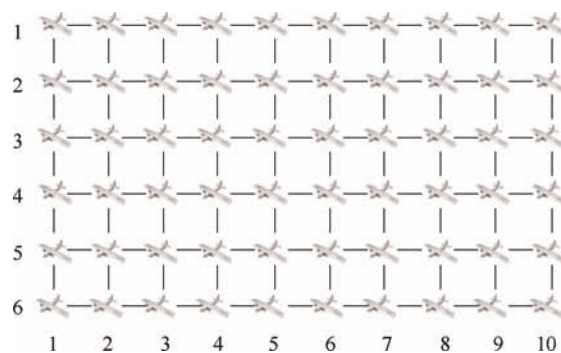


图 13 $(r, s)=(2, 2), (m, n)=(6, 10)$ 的矩形编队无人机集群

以 $(r, s)=(2, 2), (m, n)=(6, 10)$ 的矩形编队无人机集群为例, 总共 60 架无人机, 每架无人机的侦测范围为相邻四周的小方格, 只有出现 2×2 的矩形区域均为失效无人机才会出现无法侦测区域, 此时任务失败。同样的, 矩形编队无人机集群受到攻击后, 直接失效即可靠性变为 0。因为无人机数量较多, 且 $(r, s)=(2, 2)$, 单个无人机的可靠性变化对整体系统的影响较小, 故研究某一行或者某一列无人机可靠性的变化对整体系统性能的影响。对如图 14 和图 15 所示, 此为 $(r, s)=(2, 2), (m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群在未受攻击或攻击被防护系统闪避时, 不同列的无人机群的 Birnbaum 重要度以及综合重要度变化。

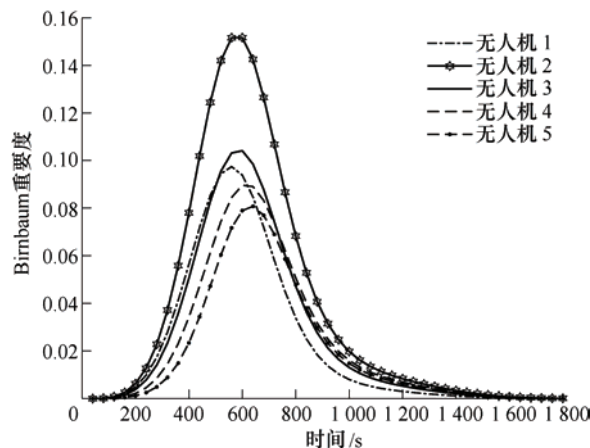


图 14 $(r, s)=(2, 2), (m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群的 Birnbaum 重要度

由图 14 可知, $(r, s)=(2, 2), (m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群前 5 列无人机群的 Birnbaum 重要度随着时间的推移先增大后减小, 在 $t=600$ 附近取最大值。

$$\begin{cases} I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_3^{BM} < I_1^{BM} < I_2^{BM} & t \leq 600 \\ I_1^{BM} < I_3^{BM} < I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_2^{BM} & t > 600 \end{cases}$$

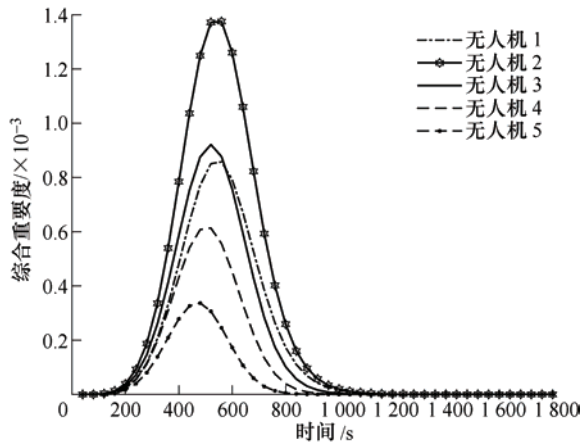


图 15 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群的综合重要度

全阶段, 第 2 列无人机群的重要度最高。在任务前期, 第 1 列无人机群的重要度仅次于第 2 列, 但是在重要度达到最高峰之后, 第 1 列的重要度快速下降至最后, 而其余列无人机群的重要度则发生了逆转。故在任务前期, 控制台应密切关注第 1 列以及第 2 列无人机群的状态信息, 而在后期则应投入更多的资源在第 2 列以及第 4 列上。

由图 15 可知, $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群前 5 列无人机群的综合重要度随着时间的推移先增大后减小, 在 $t=[500, 600]$ 时各列无人机群重要度取最大值。相对于各列的 Birnbaum 重要度变化情况, 综合重要度则趋近于稳定, 除了在 $t=600$ 时第 3 列无人机群重要度发生下滑, 其余重要度排名无明显变化。

$$\begin{cases} I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_1^{BM} < I_3^{BM} < I_2^{BM} & t \leq 600 \\ I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_3^{BM} < I_1^{BM} < I_2^{BM} & t > 600 \end{cases}$$

综合两种重要度分析, $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群前 5 列无人机群中, 第 2 列无人机群为系统的关键组件, 它对系统整体性能的影响最大, 而第 5 列则为重要度最低的无人机群, 故若在资源有限的情况下, 应主要对第 2 列无人机群进行维护。

若某列无人机在遭受到攻击而防护系统没有成功闪避时, 则无人机被击落, 可靠性直接降为 0。对于 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群在不同列的无人机群被击落前后两种不同重要度的变化如图 16 和图 17 所示。

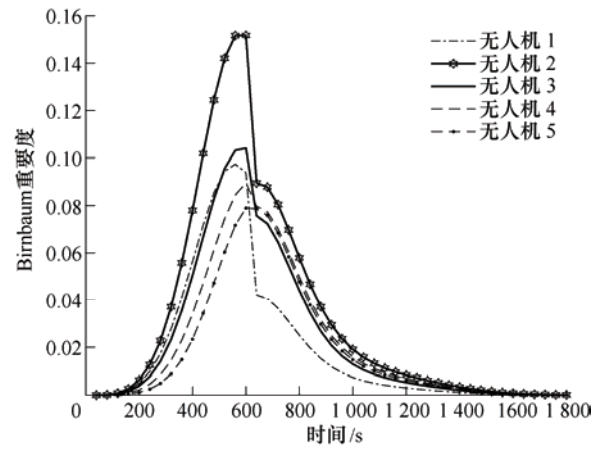


图 16 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群 $t=600$ 时受到攻击的 Birnbaum 重要度变化

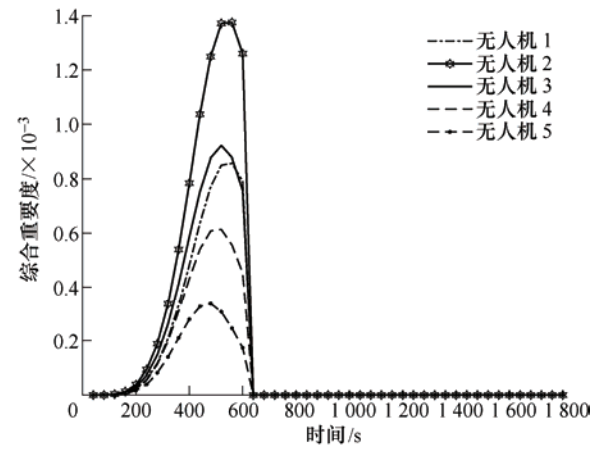


图 17 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群 $t=600$ 时受到攻击的综合重要度变化

由图 16 可知, $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群在 $t=600$ 受到攻击之前 Birnbaum 重要度均为上升阶段, 与未受到攻击时的重要度排名保持一致, 当受到攻击存在某列无人机群发生失效时, 第 2 列以及第 1 列无人机群的 Birnbaum 重要度发生大幅度下降, 特别是第 2 列无人机群的重要度下跌至与其他列无人机群相近, 第 3 列和第 4 列无人机群重要度小幅度下降, 而第 5 列无人机集群的重要度几乎无变化, 随后各列无人机群重要度先缓慢下降后变快再变缓直至为 0。

$$\begin{cases} I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_1^{BM} < I_3^{BM} < I_2^{BM} & t \leq 600 \\ I_5^{BM} < I_4^{BM} < I_3^{BM} < I_1^{BM} < I_2^{BM} & t > 600 \end{cases}$$

所以在 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群前 5 列中, 受到攻击存在失效情况时, 最为稳定的是第 5 列无人机群, 前后几乎不发生重要度上的波动, 而未受到攻击重要度最高的第 1 列和第

2 列无人机群在受到攻击失效后的大幅度下跌致使系统整体性能下降明显,故在执行任务前,在一定资源的限制下,应对这两列无人机群进行特殊的预防性维修甚至提升其防护系统。发生攻击后,应在系统仍可正常运行的条件下,通过集群重构,将第 1, 3 列仍可正常运行的无人机调整位置至第 2 以及第 4 列,尽可能提升无人机集群整体的性能。而 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群在 $t=600$ 受到攻击后各列无人机群的综合重要度呈断崖式下跌直至为 0,与线性编队无人机集群一样,由于自身无人机群的可靠性下降至 0,导致该列的综合重要度为 0。

5 总结与展望

本文将不同无人机集群执行任务时的编队即线性编队队形或者矩形编队队形拟合为线性连续 n 中取 k 系统和连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统。我们给出了两种编队情况下,无人机集群的可靠性方程,接着通过可靠性方程并结 Birnbaum 重要度和综合重要度两种不同的重要度分析方法,得出位于集群不同位置的某架无人机或某些无人机的可靠性变化时对整体集群性能的影响。

(1) 在可靠性方面,线性编队无人机集群中,当 k 固定且 $k=3$ 时,系统整体可靠性随 n 的增大而减小;当 n 固定且 $n=12$ 时,系统整体可靠性随着 k 值的增大而增大。

(2) 在矩形编队无人机集群中,当 r, s, m 固定且 $r=2, s=2, m=4$ 时,系统整体可靠性随 n 值的增大而减小;当 r, s, n 固定且 $r=2, s=2, n=10$ 时,系统整体可靠性随着 m 增大先增大后减小,在 $m=6$ 时取最大值;当 r, m, n 固定且 $r=2, m=4, n=10$ 时,系统整体可靠性随着 s 的增大而增大,当 s 值增大至 4 时,系统整体可靠性增加的幅度已不再明显。

(3) 在重要度方面,对于 $n=12, k=3$ 的线性编队无人机集群,第 3 架以及相对称的第 10 架无人机为整个集群的关键组件,而且在受到攻击存在失效情况后,应在保证系统可正常运行的情况下将其余可正常运行的无人机补充至第 3、6、7、10 的位置,可以更加明显的提升系统的整体性能。

(4) 对于 $(r, s)=(2, 2)$, $(m, n)=(6, 10)$ 矩形编队无人机集群,第 2 列以及相对称的第 9 列无人机群为整个系统的关键组件,在受到攻击存在失效情况后,应在保证系统可正常运行的情况下将其余列可正常

运行的无人机补充至第 2、4、7、9 列无人机群中,可以更加明显的提升系统的整体性能。

通过这些分析可以为无人机集群可靠地完成使命任务、优化无人机集群的组织架构设计提供决策辅助和技术支持,使我军在智能无人作战体系中形成非对称优势。未来我们计划将对三维立体编队无人机集群的可靠性以及某一面的无人机群可靠性变化对整体集群性能影响进行研究,相当于连续 (h, i, j) 中取 (r, s, t) 系统。与研究连续 (m, n) 中取 (r, s) 系统类似,将增加一个新的向量组 Z 来分析三维的可靠性方程,从而推导出三维的重要度方程。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] PRESCOTT D, ANDREWS J, DOWNES C. Multiplatform phased mission reliability modelling for mission planning[J]. Journal of Risk & Reliability, 2009, 223(1): 27-39.
- [3] PETRITOLI E, LECCESE F, CIANI L. Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2018, 18(9): 250-258.
- [4] HU B, SEILER P. Pivotal decomposition for reliability analysis of fault tolerant control systems on unmanned aerial vehicles[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 140(6): 130-141.
- [5] LIU D, JARAMILLO M, VINCENZI D. The effects of system reliability and mission uncertainty on autonomous unmanned aerial vehicle operator performance under high time pressure[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2015, 25(5): 515-522.
- [6] IANOVSKY E, KREIMER J. An optimal routing policy for unmanned aerial vehicles (analytical and cross-entropy simulation approach)[J]. Annals of Operations Research, 2011, 189(1): 215-253.
- [7] SECINTI G, DARIAN P, CANBERK B, et al. SDNs in the sky: Obust end-to-end connectivity for aerial vehicular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 16-21.
- [8] 裴洪, 胡昌华, 司小胜, 等. 基于机器学习的设备剩余寿命预测方法综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 1-13.

- PEI Hong, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Review of machine learning based remaining useful life prediction methods for equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 1-13.
- [9] 唐圣金, 郭晓松, 司小胜, 等. 步进应力加速退化试验的建模与剩余寿命估计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 33-40.
- TANG Shengjin, GUO Xiaosong, SI Xiaosheng, et al. Step stress accelerated degradation process modeling and remaining useful life estimation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 33-40.
- [10] GUO J, ELSAYED E. Reliability of balanced multi-level unmanned arial vehicles[J]. Computers & Operations Research, 2019, 16(2): 1-13.
- [11] AMARI S, XING L. Reliability analysis of k -out-of- n systems with phased-mission requirements[J]. International Journal of Performability Engineering, 2011, 7(6): 604-609.
- [12] LEVITIN G, XING L, YU S. Optimal connecting elements allocation in linear consecutively-connected systems with phased mission and common cause failures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 130(5): 85-94.
- [13] LIN C, CUI L, COIT D, et al. Reliability modeling on consecutive- (k, r) -out-of- (n, r) : F linear zigzag structure and circular polygon structure[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(3): 1509-1521.
- [14] ZHAO X, CUI L, ZHAO W, et al. Exact reliability of a linear connected- (r, s) -out-of- (m, n) : F system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(3): 689-698.
- [15] HABIB A, YUGE T, AL-SEEDY R, et al. Reliability of a consecutive (r, s) -out-of- (m, n) : F lattice system with conditions on the number of failed components in the system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(3): 531-538.
- [16] DUI H, SI S, YAM R. Importance measures for optimal structure in linear consecutive- k -out-of- n systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 169(2): 339-350.
- [17] ZHU X, BOUSHABA M, REGHIOUA M. Joint reliability importance in a consecutive- k -out-of- n : F system and an m -consecutive- k -out-of- n : F system for Markov-dependent components[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(2): 784-798.
- [18] 刘宇, 李翔宇, 张小虎. 考虑载荷动态分配机制的多状态系统可靠性建模及优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 197-205.
- LIU Yu, LI Xiangyu, ZHANG Xiaohu. Multi-state system reliability modeling and optimization with considering dynamic load distribution mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 197-205.
- [19] 夏侯唐凡, 刘宇, 张皓冬, 等. 考虑认知不确定性的多状态系统 Birnbaum 重要度分析方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 223-232.
- XIAHOU Tangfan, LIU Yu, ZHANG Haodong, et al. Birnbaum importance measure of multi-state systems under epistemic uncertainty[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 223-232.

作者简介: 白光晗, 男, 1986 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为复杂系统可靠性和弹性评估, 智能集群失效分析与韧性设计, 装备综合保障体系建模与抗毁性设计。

E-mail: baiguanghan@nudt.edu.cn

兑红炎(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为系统可靠性, 重要度, 无人机集群。

E-mail: duihongyan@zzu.edu.cn