

基于改进贝叶斯网络的察打一体无人机使用安全评估

周昱林, 刘树光, 王 柯

(空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051)

摘要 针对察打一体无人机作战任务复杂多样、测试数据难以获取、安全评估主观性强等问题, 提出一种改进的贝叶斯网络模型, 旨在通过该模型评估察打一体无人机的使用安全。根据察打一体无人机的作战特点, 将其划分为5个作战阶段, 识别不同阶段使用过程中的安全风险因素, 构建强对抗环境下察打一体无人机使用安全评估指标体系。基于指标体系, 确定贝叶斯网络的拓扑结构, 利用熵值法改进G1法求得根节点的先验概率, 利用EM算法得到子节点的条件概率。最后, 将数据导入GeNIe软件进行仿真, 得到察打一体无人机不同使用安全等级的概率分布, 并对模型进行逆向推理, 明确导致察打一体无人机发生安全事故的关键因素。

关键词 察打一体无人机; 使用安全评估; 指标体系; 贝叶斯网络

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.03.011

中图分类号 V279 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)03-0086-10

An Assessment on Use and Safety of Reconnaissance-Strike UAV Based on Improved Bayesian Network

ZHOU Yulin, LIU Shuguang, WANG Ke

(Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Aimed at the problems that reconnaissance-strike UAV is complex and diverse in combat tasks, difficult to obtain test data, and strong subjectivity in safety evaluation, an improved Bayesian network model is proposed to evaluate the deploying safety of the reconnaissance-strike UAV. According to the operational characteristics of the reconnaissance-strike UAV, five operational stages are divided, the safety risk factors in the use of different stages are identified, and the deploying safety evaluation index system of the reconnaissance-strike UAV in the strong confrontation environment is constructed. Based on the index system, the topological structure of Bayesian network is determined. The entropy method is utilized for improving the G1 method to obtain the prior probability of the root node, and the EM algorithm for obtaining the conditional probability of the child node. Finally, the data is imported into the GeNIe software for simulation, and the probability distribution of different use safety levels of reconnaissance-strike UAV is obtained. The reverse reasoning of the model is carried out to identify the key factors that lead to the safe-

收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(72271243); 国家社会科学基金重点项目(21AGL030)

作者简介: 周昱林(1997—), 男, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为无人机使用安全评估。E-mail: 920334600@qq.com

通信作者: 王 柯(1983—), 男, 陕西蓝田人, 讲师, 研究方向为无人机自主控制理论及应用。E-mail: 83225408@qq.com

引用格式: 周昱林, 刘树光, 王柯. 基于改进贝叶斯网络的察打一体无人机使用安全评估[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(3): 86-95. ZHOU Yulin, LIU Shuguang, WANG Ke. An Assessment on Use and Safety of Reconnaissance-Strike UAV Based on Improved Bayesian Network[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(3): 86-95.

ty accidents of the reconnaissance-strike UAV.

Key words reconnaissance-strike UAV; deploying safety assessment; indicator system; Bayesian network

察打一体无人机集战场侦察、远程打击、情报收集、电子对抗等多功能于一体,既能精确打击时敏小型及关键目标,又能提供地面目标定位与指示,支持空地联合作战及电子对抗,在现代军事行动中发挥着重要作用^[1-2]。由于察打一体无人机集成多种任务功能,系统复杂度高,使得其在执行任务时需协调多个子系统,增加了操作难度与潜在风险。这种系统的复杂性导致察打一体无人机在强对抗战场环境下易受到敌方压制、欺骗等干扰,使得无人机使用过程面临失控、坠毁、迫降等安全威胁^[3]。面对潜在安全威胁,有效评估察打一体无人机的使用安全,并根据评估结果指导其作战决策和安全使用,是确保察打一体无人机作战效能有效发挥的关键所在。

近年来,关于无人机安全评估方面的研究受到学术界和工业界广泛关注。现有文献中,学者们研究了无人机的安全状态分析方法,分别提出基于状态监测的安全评估策略^[4]以及风险评估管理策略^[5];在安全评估方面,提出了 STAP、FRAM 等安全模型^[6-7];在无人机安全评估方面,提出了无人机的安全评估框架^[8-9],构建了安全评估指标体系^[10-12],并对无人机安全评估进行了建模^[13],探讨了无人机执行任务时安全风险的定性及定量分析^[14]。上述研究表明,无人机的安全性分析在朝着系统化与多元化方向发展,且在无人机安全评估领域已形成一定理论基础和实践经验,但聚焦察打一体无人机及其使用安全,尚缺少全面的评估指标体系及合适的评估方法。

由于察打一体无人机通常需要在复杂多变的战场环境中执行任务,而现实战场环境往往难以通过测试平台完整地测试或模拟,即使在真实作战环境中,由于环境复杂、目标多样,数据收集也面临很大挑战,这导致察打一体无人机的测试数据获取存在一定的困难^[15-17],使得其在使用安全评估过程中高度依赖专家的经验 and 主观判断,因此选择符合察打一体无人机作战任务特点的使用安全评估方法至关重要。目前,已有研究者提出层次分析法、灰色系统理论、神经网络等多种安全评估方法,但这些方法均存在一定局限性。层次分析法主观性强,其权重分配高度依赖专家的个人判断^[18];灰色系统理论面对复杂问题时,其应用效果受到一定限制^[19];神经网络尽管有着强大的建模能力,但其有效性通常依赖于大量高质量的训练数据,这在实际应用中较难获

得^[20]。相比之下,贝叶斯网络作为一种先进的概率推理模型,凭借其概率推理机制,能够客观处理变量关系,减少主观偏差,在信息不完全或数据稀缺的情况下,依然能够进行稳健地推断,有效弥补了上述方法的不足^[21-26]。

本文聚焦察打一体无人机,融合其作战任务特点及大中型无人机的结构特点,构建强对抗环境下察打一体无人机使用安全评估指标体系,针对其作战任务复杂多样、测试数据难以获取、安全评估主观性强等问题,提出一种改进的贝叶斯网络评估方法,实现察打一体无人机使用安全评估,为其使用安全风险防控提供依据。

1 察打一体无人机使用安全评估指标体系

本文构建的强对抗环境下察打一体无人机使用安全评估指标体系与弱对抗环境相比,其核心特征在于敌方主动施加的对抗性威胁强度显著提升。具体而言,强对抗环境指无人机执行任务时面临敌方系统性、高强度的对抗行为,包括但不限于电磁干扰、欺骗攻击、网络攻击、物理拦截等,旨在削弱或破坏无人机的作战效能及使用安全性。

1.1 基于作战阶段的使用安全分析

作战阶段指在军事行动中,根据任务的不同需求和目标,将整个作战过程划分为一系列相对独立但又相互关联的阶段。这些阶段有助于系统化管理和执行作战任务,提高作战效率与成功率。察打一体无人机的作战阶段主要分为起飞爬升、巡航、侦察打击、着陆4个阶段^[27]。将上述阶段进一步细分,可得到以下5个阶段,如图1所示。

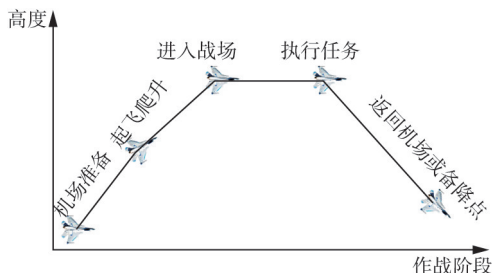


图1 察打一体无人机的作战阶段

Fig. 1 Operational phase of reconnaissance-strike UAV

机场准备可命名为准备阶段。在准备阶段主要

对无人机进行全面检查,确保其处于良好状态。同时,根据具体的任务需求,装载相应的武器和传感器(如空地导弹、制导炸弹、高清光电/红外摄像机、合成孔径雷达等),设定好飞行路线和作战计划。起飞爬升阶段是进入战场的第一步,需要综合考虑续航时间、速度、高度以及环境因素等多个方面。进入战场可命名为战场环境适应阶段,是动态感知和适应战场环境的过程。通过战场环境适应阶段的评估和优化工作,可以确保察打一体无人机在强对抗环境下保持较高的使用安全性。执行任务可命名为任务指挥控制阶段,是进行实时指挥和控制的环节,以确保任务顺利进行。任务指挥控制系统通常是一个相对独立的子系统,与无人机的其他系统在功能和结构上有所区分,将其单独评估有助于更清晰地识别潜在问题和改进点。返回机场或备降点可概括为返航阶段,是无人机完成任务后安全返回基地的过程。每阶段对应任务流程如图 2 所示。

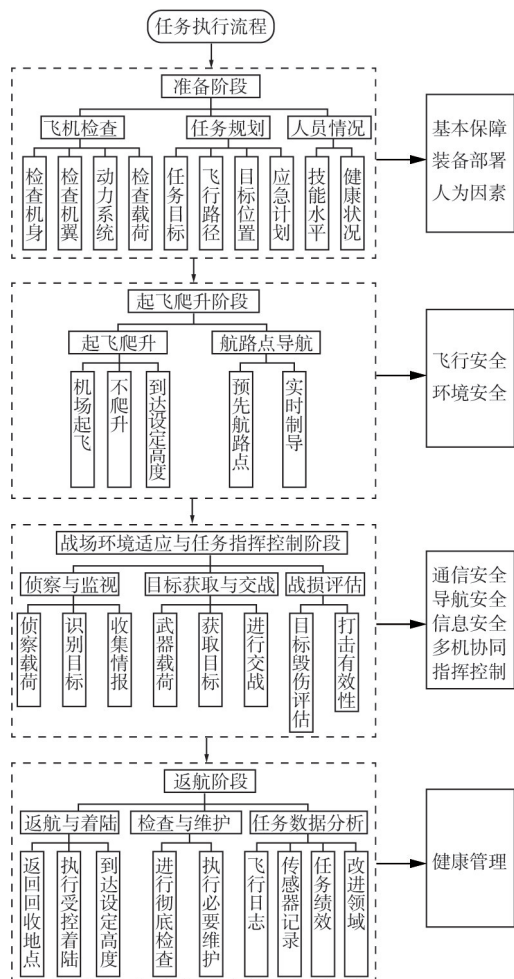


图 2 作战执行流程

Fig. 2 Operation execution process

1.2 察打一体无人机使用安全评估指标体系构建

科学、系统的指标体系是察打一体无人机使用

安全评估的基础,在整个评估过程中起决定性作用。无人机的健康检测数据通常只能反映无人机在特定时间和条件下的状态。这些数据可能无法反映强对抗环境下察打一体无人机的使用安全特性。测试数据是评估无人机性能、作战效果以及潜在风险的重要依据,它是指在真实作战环境下,对无人机性能、作战效果以及潜在风险进行测试时所产生的数据。在充分考虑察打一体无人机作战使用过程的基础上,首先划分察打一体无人机的作战阶段,其次梳理对应的任务流程,最后总结归纳出每个阶段需要评估的安全指标,基于全面性、科学性、层次性、简约性等基本原则,结合相关领域专家的见解,最终选定 32 个关键指标,用以评估察打一体无人机使用安全,如图 3 所示。

准备阶段涵盖 3 个要素。一是地面操控人员的专业能力与健康状态;二是装备配置的安全性,具体涉及侦察能力、武器载荷配置及抗干扰设备效能;三是确保基础飞行安全的能力,包含动力系统稳定性、传感系统准确性、飞行平台可靠性以及软硬件系统的安全性^[28]。

起飞爬升阶段包含 2 个维度。一是察打一体无人机的飞行性能,涵盖其续航时间、飞行速度及高度;二是无人机的环境适应性,特指在恶劣天气、复杂地形及电磁环境中的表现。

战场环境适应阶段包含 3 个方面。一是通信安全性,即察打一体无人机抵抗电磁干扰、欺骗信息及信息攻击的能力;二是导航安全性,包括抗导航欺骗及声波干扰的能力;三是信息安全,涵盖数据加密技术、信号传输的稳健性及雷达探测效能^[29]。

任务指挥控制阶段主要涉及 2 个领域。一是多机协同,需考虑组网通信的可靠性、航迹追踪的精确度及协同攻击的有效性;二是指挥控制,需关注目标定位的准确性、打击效能及反拦截能力^[30]。在图 2 察打一体无人机作战执行流程中,由于无人机进入战场与执行任务基本是同时进行的,且强对抗环境下无人机的抗反制能力在执行流程图中较难体现,所以将战场环境适应阶段与任务指挥控制阶段合并为 1 个阶段。但在使用安全评估指标体系中,这是 2 个需要分开来评估的阶段,分别从不同角度对察打一体无人机的性能和安全性进行评估,因此,将其分为 2 个阶段作为独立的评估指标。

返航阶段需对察打一体无人机在飞行中可能出现的故障进行实时监测,并具备一定的自主修复能力以确保安全返回机场或降落在备降点。

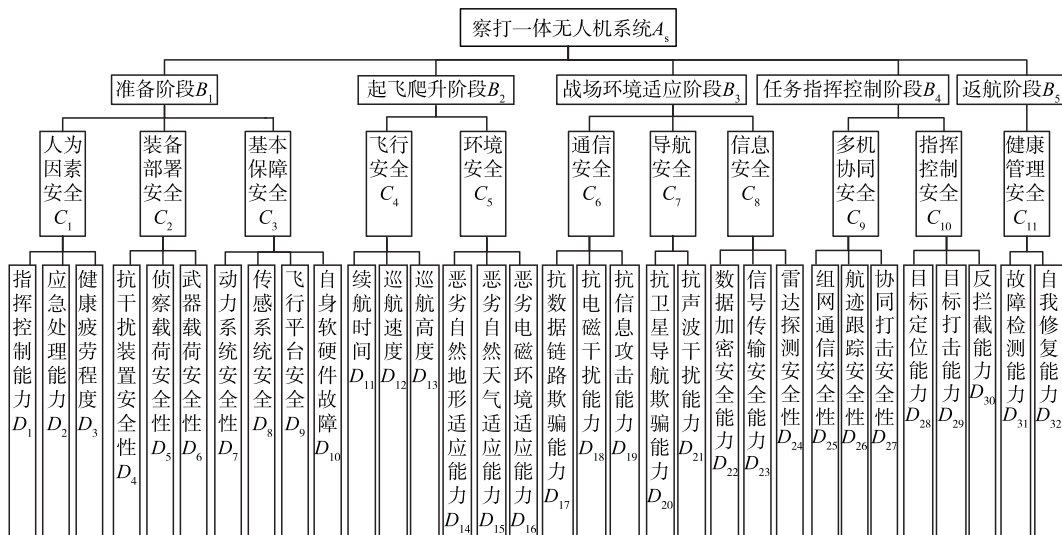


图3 察打一体无人机使用安全评估指标体系

Fig. 3 Deploying safety assessment index system for reconnaissance-strike UAV

2 改进贝叶斯网络评估模型

指标体系构建完成后,需要使用合适的安全评估方法对察打一体无人机的使用安全进行评估。针对察打一体无人机作战任务复杂多样、测试数据难以获取、安全评估主观性强等问题,本文使用改进后的贝叶斯网络对其使用安全进行评估。评估基本流程如图4所示。

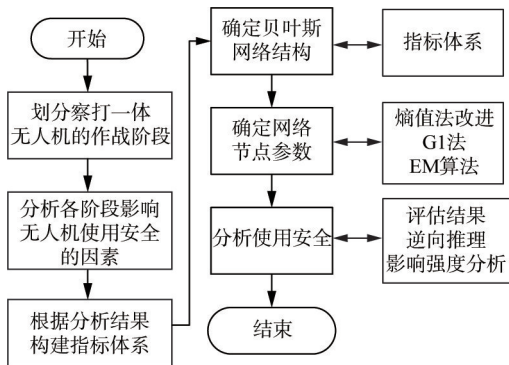


图4 使用安全评估流程

Fig. 4 Deploying the safety assessment process

2.1 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络(Bayesian network, BN)是一种基于概率图模型的统计推理工具,用于表示变量之间的条件依赖关系。它通过有向无环图(directed acyclic graphs, DAG)形式化地描绘了变量之间的因果关系,其中,节点代表随机变量,边表示变量之间的依赖关系。

贝叶斯定理是概率论中的基本定理,描述在观察到新证据后,如何更新对某一事件的概率。若已知观测数据 $D = \{X_1 = x_1, x_2, \dots, X_n = x_n\}$, 设 θ 为估计的参数,则有:

$$P(\theta | D, \zeta) = \frac{P(\theta | \zeta)P(D | \theta, \zeta)}{P(D | \zeta)} \quad (1)$$

式中: $P(\theta | D, \zeta)$ 为后验概率; $P(\theta | \zeta)$ 为先验概率; $P(D | \theta, \zeta)$ 为似然函数; D, ζ 分别为观测数据与上下文内容。

根据贝叶斯公式,当一个条件概率很难获得,而另一个条件概率比较容易得到时,可以从单个条件概率计算逆向的条件概率。式(1)可变形为:

$$P(A | B) = \frac{P(A)P(B | A)}{P(B)} \quad (2)$$

表示在已知事件 A 发生的条件下事件 B 发生的条件概率,可推测事件 B 发生的条件下事件 A 发生的概率。贝叶斯网络可以表示为:

$$G = \langle x, g, p \rangle \quad (3)$$

式中: G 为贝叶斯网络的集合; $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为贝叶斯网络所有的节点; g 表示节点之间的依赖关系,为 $n \times n$ 的矩阵; p 为条件概率表,表示每个节点 x 的条件概率。

链式法则可以将复杂的联合概率分布分解为各个节点条件概率的乘积。通过链式法则可知联合概率为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = P(X_1)P(X_2 | X_1) \cdots P(X_n | X_1, \dots, X_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, \dots, X_{i-1}) \quad (4)$$

贝叶斯网络由 1 组变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 构成,每 1 个节点对应 1 个变量。因为每个节点与除了其父节点之外的节点相互独立,利用条件独立性可以极大地减少计算量,即联合概率可以写成局部概率的乘积:

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_{ai}) \quad (5)$$

式中: P_{ai} 为节点 X_i 的父节点。

2.2 网络节点参数

鉴于察打一体无人机作战任务复杂多样、测试数据难以获取,所以在传统的贝叶斯网络中,根节点的先验概率及子节点的条件概率通常依赖于专家经验或统计方法确定,这在一定程度上限制了模型的准确性和适应性。针对这一问题,本文使用熵值法改进 G1 法来计算根节点的先验概率,同时引入期望最大化(expectation maximum, EM)算法进行参数学习以确定子节点的条件概率。

2.2.1 基于熵值改进的 G1 法确定先验概率

序关系分析法(order relation analysis method) 又称 G1 法,属于主观赋权法的一种。它是一种秩序性的评价方法,通过专家确定 2 个指标间的重要性程度,以此确定指标的权重。序关系易于理解,可以应用于定量或定性各种类型的数据,可以清晰地显示对象之间的相对顺序,便于进一步分析。但 G1 法往往受到评估者主观偏见的影响,而熵值法是基于数据本身的客观计算,将熵值法与 G1 法结合,可以降低主观因素对分析结果的影响,提高结果的客观性。主要操作步骤如下:

步骤 1 设需要评价的对象为 A , 对应有 n 个评价指标 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 共有 m 位该领域的专家 $M = (M_1, M_2, \dots, M_m)$ 参与评价。如果评价指标 X_i 的重要程度大于 X_j , 则记为 $X_i > X_j$ 。

步骤 2 专家从指标集中选择最为重要的指标, 记为 X_1^* 。

步骤 3 专家再从剩下的 $n-1$ 个指标中选择最为重要的指标, 记为 X_2^* 。

步骤 4 重复步骤 3, 直至最后 1 个指标。以此得到所有指标经过重新排序后的序关系:

$$X_1^* > X_2^* > X_3^* > \dots > X_{n-1}^* > X_n^* \quad (6)$$

步骤 5 计算在第 i 个专家下第 j 个指标的比重:

$$\omega_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (7)$$

式中: ω_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的比重, 信息效用值越大, 表明指标越重要, 对评价的重要性就越大, 其中, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; x_{ij}$ 为第 i 个专家对第 j 个指标的评价, 其中, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \sum_{i=1}^m x_{ij}$ 为所有专家对第 j 个指标的评价之和。

步骤 6 计算第 j 个指标的熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \omega_{ij} \ln(\omega_{ij}) \quad (8)$$

步骤 7 判断相邻指标重要程度之比:

$$r_k = \begin{cases} 1, & e_{j-1} < e_j \\ \frac{e_{j-1}}{e_j}, & e_{j-1} \geq e_j \end{cases}, k = n, n-1, \dots, 2 \quad (9)$$

式中: r_k 为相邻指标的熵值之比, 也被称作语气算子。

在 G1 法中, 语气算子主要用于表达语言中的肯定程度。目前国内常用 9 级算子法, 将评价或决策的对象分为 9 个等级, 每个等级对应 1 个算子或模糊集合。传统 G1 法在确定语气算子时往往依赖于主观判断, 导致评价结果的主观性和不一致性。而熵值法的引入, 通过数据自身的信息来确定权重, 避免了主观赋权的弊端。

步骤 8 计算指标权重。最后 1 个指标的权重 v_n 为:

$$v_n = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i)^{-1} \quad (10)$$

再根据:

$$\frac{v_{k-1}}{v_k} = r_k \quad (11)$$

就可以逆推得到所有指标的权重。

步骤 9 设指标的所有等级可以划分为 s 个, $L = (L_1, L_2, \dots, L_s)$, 并确定每个指标相对于等级的隶属度 μ :

$$\mu_{ij} = \frac{k}{m} \quad (12)$$

式中: μ_{ij} 为第 j 个指标隶属于等级 i 的隶属度; m 为评价者总人数; k 为第 j 个指标打分结果属于等级 i 的评价者人数。

步骤 10 计算根节点属于每个等级的先验概率:

$$P = \sum_{j=1}^n \mu_{ij} v_j, i = 1, 2, \dots, s \quad (13)$$

式中: v_j 为 n 个指标中第 j 个指标的权重; μ_{ij} 为每个指标隶属于等级 i 的隶属度。

2.2.2 基于 EM 算法学习子节点的条件概率

EM 算法是一种用于含有隐变量模型的参数估计方法, 对于缺失数据的情形, 通过迭代的方式优化模型参数。EM 算法为处理缺失数据和隐变量提供了强大的工具, 尤其是在贝叶斯网络中, 通过有效估计条件概率, 提高了模型的预测能力和应用效果。EM 算法由 2 个主要步骤组成:

步骤 1 期望步骤(E 步)。在当前贝叶斯模型参数 θ 估计下, 计算隐变量 $z^{(i)}$ 的后验概率, 即隐变量的期望, 作为隐变量现在的估计值。

$$Q_i(z^{(i)}) = p(z^{(i)} | x^{(i)}; \theta) \quad (14)$$

式中: $z^{(i)}$ 为隐变量,在贝叶斯网络中对应未观测到的节点; $x^{(i)}$ 为已观测变量,对应贝叶斯网络中已观测的节点; θ 为模型参数。

步骤 2 最大化步骤(M 步)。根据 E 步计算的期望值,更新参数 θ ,以最大化对数似然函数。

$$\theta = \operatorname{argmax}_{\theta} \sum_i \sum_{z^{(i)}} Q_i(z^{(i)}) \log \frac{p(x^{(i)}, z^{(i)}; \theta)}{Q_i(z^{(i)})} \quad (15)$$

式中: $p(x^{(i)}, z^{(i)}; \theta)$ 为在当前参数下的极大似然估计函数; i 为每个样本。

在 M 步中,利用 E 步计算出的后验概率,重新估计模型参数 θ ,使得极大似然估计函数最大化。需要考虑隐变量 $z^{(i)}$ 所有可能的取值,并根据它们在当前参数下的后验概率 $Q_i(z^{(i)})$ 来加权计算期望值。这意味着,对于每个样本 i ,不仅要考虑实际观测到的数据,还要综合考虑隐变量所有可能取值的影响。M 步将目标函数分解为各节点条件概率的对数之和,独立更新每个节点的参数,E 步与 M 步过程反复进行迭代,直到参数收敛。

通过上述对应关系,EM 算法能够将隐变量的不确定性转化为条件概率参数的更新依据,逐步优化贝叶斯网络模型,最终逼近数据的真实分布。

3 仿真与分析

危险严重性等级可分为 4 级,分别为灾难的、严重的、轻度的、轻微的^[31]。因此,对应将察打一体无人机使用安全分为 4 个等级。定义使用安全等级 A 为安全性很高,只有轻微的风险;使用安全等级 B 为安全性一般,但仍可能会发生较小的事故;使用安全等级 C 为安全性等级较低,可能会发生比较严重的事故;使用安全等级 D 为安全性极低,一旦出现问题会导致严重的损失和不可逆转的伤害。

3.1 参数计算

以指标体系中察打一体无人机的基本保障因素 C_3 为例,作为贝叶斯网络中的 1 个根节点,此时 C_3

具有 4 个父节点,分别是动力系统安全 D_7 、传感系统安全 D_8 、飞行平台安全 D_9 和自身软硬件故障 D_{10} 。本次评估共邀请 5 位无人机安全领域的专家,每项指标打分区间为 $[0,100]$ 。经过讨论,规定评分区间 $[90,100]$ 为好,记为 Good;评分区间 $[80,90)$ 为一般,记为 Medium;评分 80 分以下为差,记为 Bad。专家打分结果如表 1 所示。

表 1 基本保障安全专家打分表

Tab. 1 Scoring table for basic safety assurance experts

专家	D_7	D_8	D_9	D_{10}
1	85	91	90	87
2	92	76	95	91
3	88	89	82	90
4	87	80	87	83
5	74	83	78	69

根据式(1)~式(8),可计算出 D_7 、 D_8 、 D_9 、 D_{10} 的指标权重 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 计算结果为 0.314 2、0.254 5、0.216 6、0.214 7;由式(9)可得出 $D_7 \sim D_{10}$ 隶属于每个等级的隶属度;由式(10)可计算出 C_3 指标属于 Good、Medium、Bad 的概率分别为 28.6%、51.4%、20%,如图 5 所示。

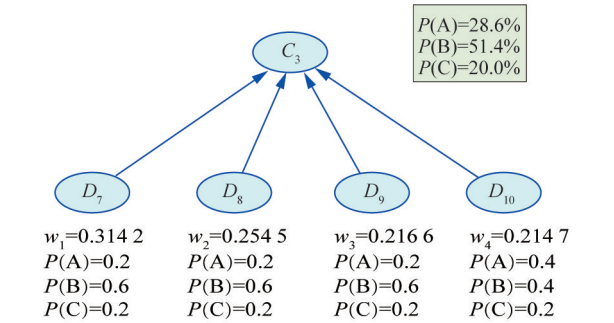


图 5 C_3 节点贝叶斯网络概率分布

Fig. 5 Bayesian network probability distribution of C_3 Nodes

使用 MATLAB 中的 BNT 工具箱,可以使用 EM 算法求得贝叶斯网络的参数。表 2 为准备阶段 B_1 的条件概率,其父节点有 3 个,分别为人为因素安全 C_1 、装备部署安全 C_2 、基本保障安全 C_3 。以此为例,可以得到贝叶斯网络中所有子节点的条件概率分布。

表 2 准备阶段条件概率表

Tab. 2 Probability of preparation stage conditions

C_1	C_2	C_3	Good	Medium	Bad
Good	Good	Good	0.769	0.198	0.033
Good	Good	Medium	0.693	0.243	0.066
Good	Good	Bad	0.467	0.341	0.192
Good	Medium	Good	0.691	0.243	0.066
Good	Medium	Medium	0.611	0.301	0.088
Good	Medium	Bad	0.421	0.319	0.260
Good	Bad	Good	0.467	0.341	0.192
Medium	Medium	Bad	0.461	0.330	0.209
Medium	Bad	Good	0.496	0.410	0.094
Medium	Bad	Medium	0.349	0.450	0.201
Medium	Bad	Bad	0.201	0.330	0.469
Bad	Good	Good	0.487	0.386	0.127
Bad	Good	Medium	0.367	0.411	0.222
Bad	Good	Bad	0.284	0.390	0.326

						续表					
C_1	C_2	C_3	Good	Medium	Bad	C_1	C_2	C_3	Good	Medium	Bad
Good	Bad	Medium	0.422	0.320	0.258	Bad	Medium	Good	0.465	0.402	0.133
Good	Bad	Bad	0.231	0.342	0.427	Bad	Medium	Medium	0.401	0.310	0.289
Medium	Good	Good	0.692	0.286	0.022	Bad	Medium	Bad	0.231	0.309	0.460
Medium	Good	Medium	0.631	0.361	0.008	Bad	Bad	Good	0.365	0.380	0.255
Medium	Good	Bad	0.500	0.342	0.158	Bad	Bad	Medium	0.301	0.390	0.309
Medium	Medium	Good	0.613	0.321	0.066	Bad	Bad	Bad	0.199	0.175	0.626
Medium	Medium	Medium	0.512	0.310	0.178						

3.2 仿真结果

常用的贝叶斯网络仿真软件有 GeNIe、Netica、Hugin、BayesiaLab 等。相比其他,GeNIe 具有易用性、功能强大、灵活性、开源性以及跨平台支持的优势,所以选择使用 GeNIe 进行仿真计算。将计算得

到的参数输入贝叶斯网络,仿真结果如图 6 所示。由于 GeNIe 仿真软件受限于系统默认的百分数取整规则,各节点的概率存在累积舍入误差,导致其概率之和可能出现约±1%的理论偏差,该数值特性属于离散化计算中的系统性误差范畴,后续不再阐述。

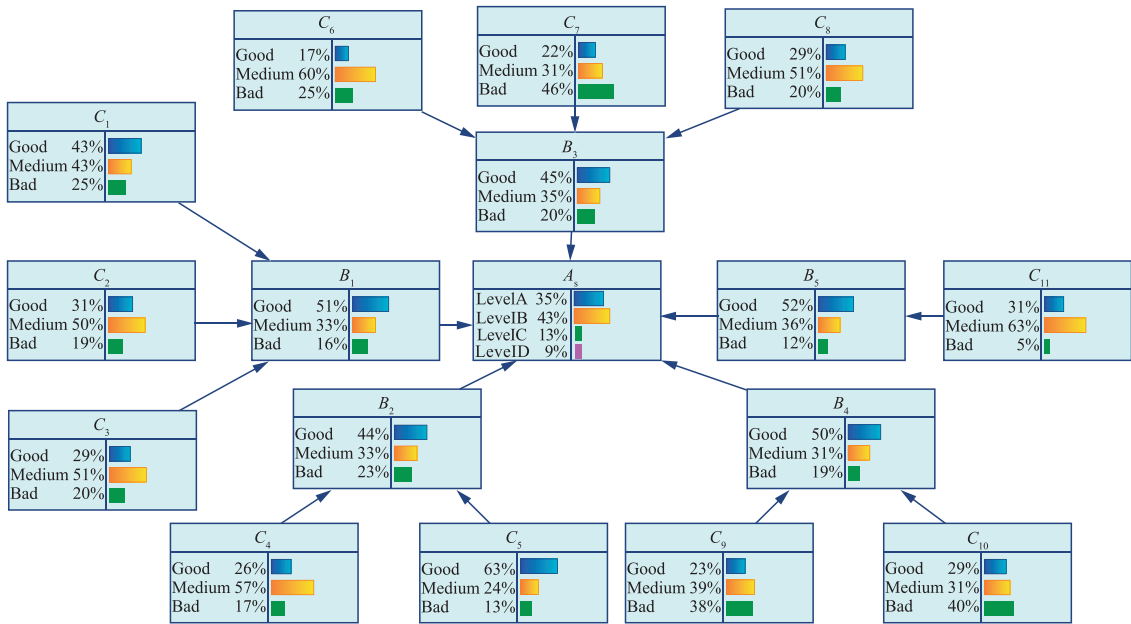


图 6 使用安全评估结果

Fig. 6 Deploying safety assessment results

从图中可以看出,无人机使用安全等级为 A、B、C、D 的概率分别为 35%、43%、13%、9%(实际结果为 35.1%、43.3%、13.1%、8.5%,图中百分数取整),总体使用安全等级为 B,即使用安全性一般。预备阶段 B_1 、起飞阶段 B_2 、战场环境适应阶段 B_3 、任务指挥控制阶段 B_4 、返航阶段 B_5 优秀的概率分别为 51%、44%、45%、50%、52%,一般的概率分别为 33%、33%、35%、31%、36%。分别将 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 节点中 Good 与 Medium 的值作差,并用 a 、 b 、 c 、 d 、 e 表示, $a=18\%$ 、 $b=11\%$ 、 $c=10\%$ 、 $d=19\%$ 、 $e=16\%$,差越大表示性能越好。 b 和 c 的值相对较小,说明无人机的起飞阶段和战场环境适应阶段的安全性有待提高。

3.3 仿真分析

3.3.1 逆向推理

通过将 A_3 的 LevelA 概率设置为 100%,就可以对模型进行更新,得到的结果如图 7 所示。从图中可以看出,所有节点的 Good 值都有所提高。对于 A 的几个节点, B_1 为 Good 的值由原来的 51% 提高到 56%,增加了 5%; B_2 为 Good 的值由原来的 44% 提高到 47%,增加了 3%; B_3 为 Good 的值由原来的 45% 提高到 52%,增加了 7%; B_4 为 Good 的值由原来的 50% 提高到 54%,增加了 4%。这一现象进一步说明了战场环境适应阶段对于察打一体无人机使用安全有比较大的影响。而战场环境适应阶段安全能力主要受到通信安全 C_6 、导航安全 C_7 和信息安全 C_8 的影响,说明要使无人机安全能力有所提升,需要保障无人机的通信链路安全能力。

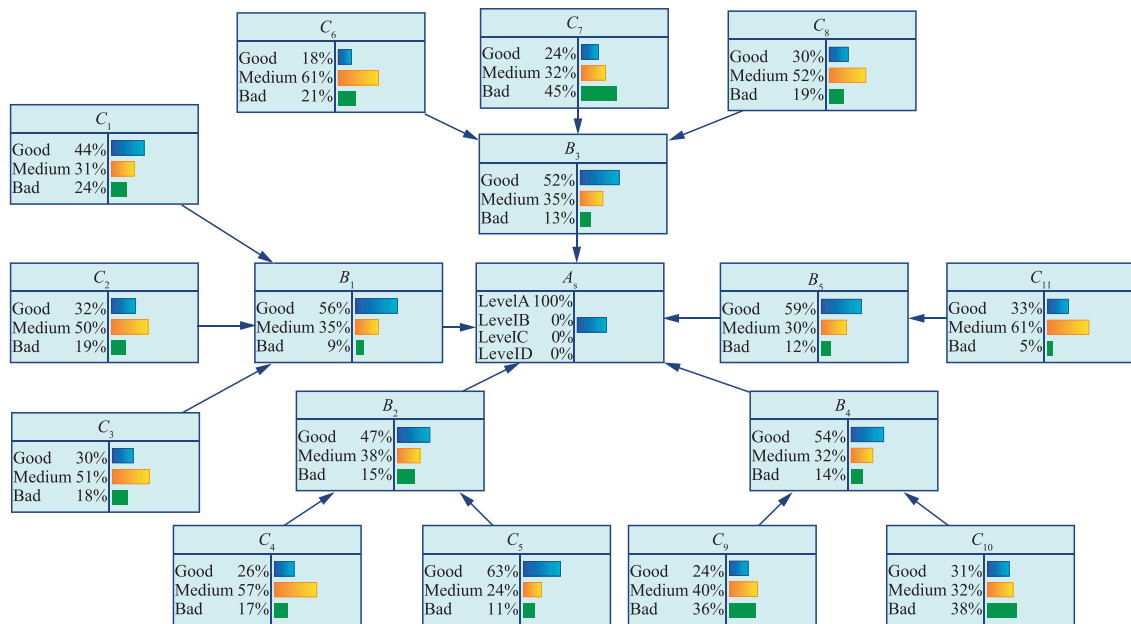


图 7 逆向推理结果

Fig. 7 Reverse reasoning results

3.3.2 仿真结果分析

在准备阶段,要对察打一体无人机的基本保障功能进行检查,并装载相应的武器和传感器。由仿真结果可知,基本保障功能安全性较低,在执行任务前需确保所有关键设备和系统经过彻底检查。

在起飞爬升阶段, C_4 和 C_5 为 Good 的概率分别为 26%和 63%,可以看出察打一体无人机的飞行性能较差,但环境适应性较好。这需要更加精细的任务规划来确保察打一体无人机高效、安全地完成任务。

察打一体无人机在进入战场环境后,敌方的压制、欺骗等干扰都会对其使用安全构成威胁,这一阶段对于察打一体无人机使用安全有较大影响。由图 6 可以看出, C_6 、 C_7 、 C_8 的影响强度分布近似,即无人机的通信安全、导航安全、信息安全影响程度相近,但导航系统为 Bad 的概率为 46%,安全性较低,需采用更先进的导航技术和设备,提高无人机的定位精度和抗干扰能力。

察打一体无人机的任务指挥控制阶段与返航阶段对其整体使用安全影响较小,且 2 个阶段的使用安全性较高。所以在指挥控制阶段和返航阶段,无人机相对稳定安全。

综上所述,察打一体无人机的基本保障功能安全性较低、飞行性能有限、导航系统的抗干扰能力较弱。在执行任务前需确保所有关键设备经过彻底检查,采用更先进的导航技术和设备,并且在执行任务中进行更加精细的任务规划,确保察打一体无人机的使用安全。

3.3.3 评估结果对比

传统的贝叶斯网络通过专家评分及统计的方式直接确定网络参数值,改进后的贝叶斯网络通过熵值法优化 G1 法和 EM 算法对参数进行计算,有着更加客观和精确的数据处理手段,2 种方法评估结果对比如图 8 所示。

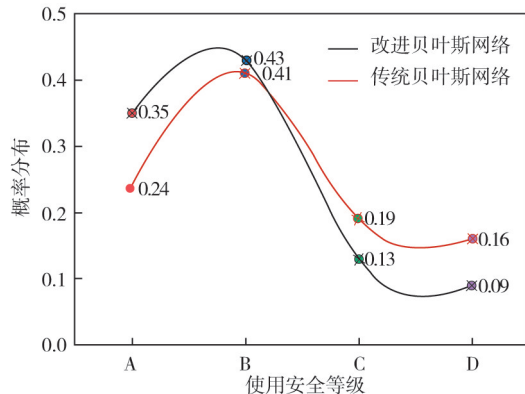


图 8 评估结果对比

Fig. 8 Comparison of evaluation results

从数据分布可见,传统方法下察打一体无人机使用安全等级 A、B、C、D 的概率分别为 24%、41%、19%、16%,其安全等级集中于 B(一般)且各等级间差异较小,表明评估结果存在一定模糊性。相比之下,改进后的贝叶斯网络通过熵值法优化 G1 法计算先验概率,并引入 EM 算法学习条件概率,评估结果中 4 个等级的概率分布分别为 35%、43%、13%、9%。改进后的贝叶斯网络显著提升了高安全等级 A 的概率(提升 11%),同时降低了低安全等级 C、D 的概率(分别降低 6%、7%),使得安全等

级分布更加集中于 A 和 B(合计占比 78%),等级间差异更为明显。这一结果表明,改进后的贝叶斯网络通过客观权重计算和参数优化,有效降低了专家主观性对评估结果的影响,增强了模型的区分度,尤其适用于使用安全性相近察打一体无人机的精细化评估,从而扩展了模型的适用场景。

4 结语

本文以不同作战阶段为流程构建了强对抗环境下察打一体无人机使用安全指标体系,根据危险严重性将察打一体无人机使用安全分为 4 个等级,并基于改进贝叶斯网络对其使用安全进行了评估,根据评估结果可知:

1)在难以获取察打一体无人机充分测试数据的情况下,改进后的贝叶斯网络以其处理复杂性和多变量条件概率分布的独特优势,克服了数据贫瘠下安全评估较为主观的问题,为无人机的使用安全评估提供了新的视角和解决方案。

2)改进后的贝叶斯网络,既保留了传统贝叶斯网络在处理复杂、不确定性问题上的强大能力,又通过引入熵值法优化先验概率计算和采用 EM 算法进行参数学习,显著增强了模型在不完全数据环境下的适应性和准确性,可适用于更广泛的应用场景。

后续随着数据的不断积累,可通过迭代反馈来调整贝叶斯网络的结构和节点参数,并针对察打一体无人机具体的作战任务进行使用安全分析,使模型逐渐趋向客观实际。根据使用安全评估结果可以更好地指导察打一体无人机的作战决策和安全使用,确保其作战效能有效发挥。

参考文献

- [1] 李屹东.大中型察打一体无人机系统综合设计技术[M].北京:航空工业出版社,2020.
LI Y D. Integrated Design Technology of Large and Middle-Sized Integrated Reconnaissance-Strike Unmanned Aircraft Systems[M]. Beijing: Aviation Industry Press,2020. (in Chinese)
- [2] 魏瑞轩,李学仁.先进无人机系统与作战运用[M].北京:国防工业出版社,2014.
WEI R X, LI X R. Advanced UAV System and Its Operational Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2014. (in Chinese)
- [3] 余纲正,罗天宇.军用无人机的使用偏好及安全影响[J].国际政治科学,2022,7(2): 42-85.
SHE G Z, LUO T Y. Quarterly Journal of International Politics,2022,7(2): 42-85. (in Chinese)
- [4] 李俨,陈海,张清江,等.无人机系统健康状态评估方

- 法研究[J].系统工程与电子技术,2011,33(3): 562-567,626.
LI Y, CHEN H, ZHANG Q J, et al. Assessment Method of Health Condition for UAV Systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(3): 562-567,626. (in Chinese)
- [5] 闫少琨.无人机运行安全风险评价[D].天津:中国民航大学,2018.
YAN S K. Evaluating the Risk of Unmanned Aircraft Operation[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China,2018. (in Chinese)
- [6] 郑磊,胡剑波.基于 STAMP/STPA 的机轮刹车系统安全性分析[J].航空学报,2017,38(1): 320144.
ZHENG L, HU J B. Safety Analysis of Wheel Brake System Based on STAMP/STPA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 320144. (in Chinese)
- [7] 甘旭升,崔浩林,吴亚荣.基于功能共振事故模型的航空事故分析[J].中国安全科学学报,2013,23(7): 67-72.
GAN X S, CUI H L, WU Y R. Analysis of Aviation Accident Based on Functional Resonance Accident Model[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 67-72. (in Chinese)
- [8] 王聪,姚慧敏,周仁建.以事故间隔为核心的中大型无人机地面撞击风险评估[J].科技通报,2023,39(10): 98-104.
WANG C, YAO H M, ZHOU R J. Medium and Large UAVs Ground Impact Risk Assessment with Accident Interval at Its Core[J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(10): 98-104. (in Chinese)
- [9] 曹晓威.民用飞机航空运营安全评估方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
CAO X W. Research on Safety Assessment Method of Civil Aircraft Aviation Operation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [10] 张洪海,严勇杰,邹依原,等.无人机安全风险指标及方法[J].指挥信息系统与技术,2022,13(2): 56-62,90.
ZHANG H H, YAN Y J, ZOU Y Y, et al. Safety Risk Assessment Index and Assessment Method for Unmanned Aerial Vehicles[J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(2): 56-62, 90. (in Chinese)
- [11] 刘峥峥,吕欣媛,侯泊江.无人机系统使用安全指标体系构建[J].中国科技信息,2024(2): 115-118.
LIU Z Z, LV X Y, HOU B J. Construction of UAV System Use Safety Index System[J]. China Science and Technology Information, 2024(2): 115-118. (in Chinese)
- [12] 刘峥峥,徐小杰,吕欣媛,等.无人机系统使用安全级别划分[J].中国科技信息,2024(5): 117-119,122.
LIU Z Z, XU X J, LV X Y, et al. Classification of Se-

- curity Levels for UAV Systems[J]. China Science and Technology Information, 2024(5): 117-119, 122. (in Chinese)
- [13] GONÇALVES P, SOBRAL J, FERREIRA L A. Unmanned Aerial Vehicle Safety Assessment Modelling through Petri Nets[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167: 383-393.
- [14] ALLOUCH A, KOUBÂA A, KHALGUI M, et al. Qualitative and Quantitative Risk Analysis and Safety Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Missions over the Internet [J]. IEEE Access, 2019, 7: 53392-53410.
- [15] 曾亮亮, 朱江雷, 张杰. 大型察打一体无人机系统级测试性试验技术与应用[J]. 测控技术, 2021, 40(2): 25-31.
- ZENG L L, ZHU J L, ZHANG J. System Level Testability Test Technology and Application of Large Recon/Strike UAV Airborne System [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(2): 25-31. (in Chinese)
- [16] 姜博文, 姜勤波, 齐世举, 等. 战场复杂电磁环境仿真平台的设计方案研究[J]. 现代防御技术, 2018, 46(2): 208-213.
- JIANG B W, JIANG Q B, QI S J, et al. Design of Complex Electromagnetic Environment Simulation Platform in Battlefield[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(2): 208-213. (in Chinese)
- [17] 张建华, 赵晨皓, 吕诚中. 察打一体无人机发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2018(2): 19-24, 56.
- ZHANG J H, ZHAO C H, LYU C Z. Development Status and Trend of UAV with Integrated Inspection and Shooting[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(2): 19-24, 56. (in Chinese)
- [18] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- GUO J Y, ZHANG Z B, SUN Q Y. Study and Applications of Analytic Hierarchy Process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese)
- [19] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
- LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in Grey Incidence Analysis Modelling[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046. (in Chinese)
- [20] 张驰, 郭媛, 黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 57-69.
- ZHANG C, GUO Y, LI M. Review of Development and Application of Artificial Neural Network Models [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 57-69. (in Chinese)
- [21] 厉海涛, 金光, 周经伦, 等. 贝叶斯网络推理算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 935-939.
- LI H T, JIN G, ZHOU J L, et al. Survey of Bayesian Network Inference Algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 935-939. (in Chinese)
- [22] 陈海洋, 尚珊珊, 任智芳, 等. 基于改进蚁狮优化的贝叶斯网络结构学习算法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(2): 104-111.
- CHEN H Y, SHANG S S, REN Z F, et al. Bayesian Network Structure Learning Algorithm Based on Improved Ant Lion Optimization [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(2): 104-111. (in Chinese)
- [23] 严惊涛, 刘树光, 杜梓冰. 贝叶斯网络的地对地攻击无人机自主能力评估[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(4): 92-98.
- YAN J T, LIU S G, DU Z B. Autonomous Capability Evaluation of Ground-Attack UAV Based on Bayesian Network[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(4): 92-98. (in Chinese)
- [24] ERSEL D, İÇEN D. Fuzzy Probability Calculation with Confidence Intervals in Bayesian Networks [J]. Soft Computing, 2016, 20(2): 819-829.
- [25] İÇEN D, ERSEL D. A New Approach for Probability Calculation of Fuzzy Events in Bayesian Networks[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2019, 108: 76-88.
- [26] ZAREI E, KHAKZAD N, COZZANI V, et al. Safety Analysis of Process Systems Using Fuzzy Bayesian Network (FBN)[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 57: 7-16.
- [27] 郑勇峰. 察打一体化无人机总体方案设计[D]. 电子科技大学, 2012.
- ZHENG Y F. Overall Scheme Design of chadha Integrated UAV[D]. University of Electronic Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [28] BALESTRIERI E, DAPONTE P, DE VITO L, et al. Sensors and Measurements for UAV Safety: an Overview[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8253.
- [29] 焦博, 丛佃伟. 导航干扰技术在无人机防御中的应用展望[J]. 无线电工程, 2021, 51(10): 1019-1024.
- JIAO B, CONG D W. Application Prospect of Navigation Jamming in UAV Defense [J]. Radio Engineering, 2021, 51(10): 1019-1024. (in Chinese)
- [30] 陈谋, 马浩翔, 雍可南, 等. 无人机安全飞行控制综述[J]. 机器人, 2023, 45(3): 345-366.
- CHEN M, MA H X, YONG K N, et al. Safety Flight Control of UAV: A Survey [J]. Robot, 2023, 45(3): 345-366. (in Chinese)
- [31] 王东. 武器装备安全性保证[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016.
- WANG D. Security Assurance of Weapons and Equipment [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2016. (in Chinese)

(编辑: 杜娟)