

# 贝叶斯网络的地对地攻击无人机自主能力评估

严惊涛<sup>1</sup>, 刘树光<sup>1\*</sup>, 杜梓冰<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051;

2. 中国飞行试验研究院, 西安, 710089)

**摘要** 作战任务条件下评估地对地攻击无人机自主能力,是无人机作战使用亟待解决的关键问题之一。针对地对地攻击无人机作战流程与特点,选取感知探测、规划决策、作战执行、安全管理和学习进化5个紧密贴合其作战运用特点的自主能力影响因素,构建面向全任务过程的地对地攻击无人机自主能力评估指标体系。基于贝叶斯网络建立自主能力评估模型,利用改进熵权法确定根节点的先验概率,并运用贝叶斯软件 Netica 进行实例仿真。针对地对地攻击无人机任务前、任务中和任务后的自主能力,利用因果推理、截断分析推理和影响因素推理3种推理模式进行仿真验证及推理分析,根据仿真验证结果给出了各个阶段自主能力的动态调整建议。

**关键词** 作战任务阶段;自主能力;贝叶斯网络;动态评估

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.04.014

**中图分类号** V279 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)04-0089-07

## Autonomous Capability Evaluation of Ground-Attack UAV Based on Bayesian Network

YAN Jingtao<sup>1</sup>, LIU Shuguang<sup>1\*</sup>, DU Zibing<sup>2</sup>

(1. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract** Evaluating the autonomous capability of ground-attack unmanned aerial vehicle (UAV) under the condition of combat mission is one of the key problems to be solved urgently in the combat use of UAV. According to the operational process and characteristics of ground-attack UAV, five autonomous capability influencing factors closely fitting its operational characteristics are selected, including perceptual detection, planning and decision-making, operational execution, security management and learning evolution, to build an evaluation index system of autonomous capability of ground-attack UAV for the whole mission process. An autonomous capability evaluation model is established based on Bayesian network, the prior probability of root node is determined by improved entropy weight method, and an example is simulated by Bayesian software Netica. Aiming at the autonomous capability of ground-attack UAV before, during and after mission, three reasoning modes of causal reasoning, truncation analysis reasoning and influencing factor reasoning are used for simulation verification and reasoning analysis. According to the simu-

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61973253)

作者简介: 严惊涛(1998—),男,湖北黄冈人,硕士生,研究方向为无人机自主作战效能评估。E-mail:1743852710@qq.com

通信作者: 刘树光(1981—),男,山西怀仁人,副教授,研究方向为无人机自主控制理论及应用。E-mail:dawny418@163.com

**引用格式:** 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): 89-95. YAN Jingtao, LIU Shuguang, DU Zibing. Autonomous Capability Evaluation of Ground-Attack UAV Based on Bayesian Network[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(4): 89-95.

lation verification results, the dynamic adjustment suggestions of autonomous capability in each stage are given.

**Key words** operational mission phase; autonomy; Bayesian network; dynamic evaluation

作为承担未来战争“无人作战”“空中进攻”任务的重要作战平台,对地攻击无人机的任务领域和作战使用方式不断拓展,从辅助、支援作战向进攻作战、非常规作战、编队集群作战等高智能模式转变<sup>[1]</sup>,这就使得对地攻击无人机必须具备很高的自主能力。结合作战任务研究对地攻击无人机自主能力评估问题,对深度挖掘对地攻击无人机作战潜力具有重要意义。

在自主能力评估框架研究方面,比较典型的有Sheridan的自动装置等级(levels of automation, LOA)、自主控制水平等级(autonomous control level, ACL)、无人系统自主性等级(autonomy levels for unmanned systems, ALFUS)、人机权限四级模型等<sup>[2]</sup>。在自主能力评价模型方面,文献[3]依据无人平台自主能力分级的原则和方法,提出了二维度和四维度的自主能力分级模型;文献[4]提出一种神经网络评价方法,实现了多元信息的有效集成;文献[5]基于灰色关联分析法评价无人机自主能力,可以区分不同类型无人机的自主能力等级;文献[6]基于层次分析法,实现了大中型无人机自主能力定量评价。

综合分析公开文献可以发现,国内外在无人机自主能力评估方面的研究还处于起步阶段,缺乏完整的理论体系,并且已有的研究成果主要是以评价方法为导向的静态综合评价,没有结合作战任务和战场态势的动态变化,对无人机自主能力进行动态评估<sup>[7]</sup>。贝叶斯网络具备不确定知识表达和推理分析能力,能够实现复杂条件下不确定信息的有效评估和决策。

因此,本文结合对地攻击无人机使命任务和作战流程,建立面向全任务过程的自主能力评估指标体系;针对自主能力评估过程的随机性和不确定性,提出一种基于贝叶斯网络的自主能力评估方法,并综合运用改进熵权法和隶属度加权法确定节点参数,实现自主能力的动态评估和可视化推理分析。

## 1 自主能力评估指标体系

科学合理的指标体系是无人机自主能力评估和动态调整的基础。本文依据对地攻击无人机使命任务和作战过程,构建面向全任务过程的自主能力评

估指标体系。

### 1.1 对地攻击无人机作战过程分析

作为未来信息化战争重要的空战武器装备,对地攻击无人机拥有超长的续航能力、强大的挂载能力和快速的反应速度,具备纵深攻击和拦截作战能力,能够执行战略支援、隐蔽突防、压制防空等作战任务<sup>[8]</sup>。对地攻击无人机执行作战任务具有过程性和阶段性特点<sup>[9]</sup>,因此,对无人机作战过程进行系统分析有利于构建完善的自主能力评估指标体系。在所执行的作战任务中,隐蔽突防任务的复杂程度最高,其作战过程分为5个阶段,如图1所示。

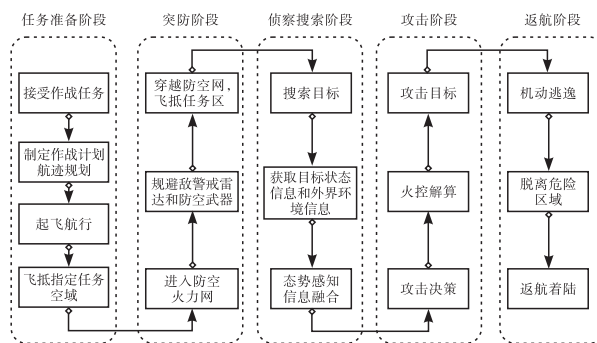


图1 对地攻击无人机作战流程图

1)任务准备阶段。无人机指挥所领受作战任务,研究分析并制定作战计划,给对地攻击无人机组订任务规划结果,包括航路规划和目标分配方案。机务工作准备完毕后,无人机起飞并飞抵指定任务空域。

2)突防阶段。飞抵指定任务空域后,若不满足敌防区外发射武器的条件,则依靠隐身性能、电子干扰和机动能力对敌防空火力网进行突防。

3)侦察搜索阶段。进入目标区域,利用机载传感器和探测雷达获取战场环境和地面目标的状态信息,进行信息融合并分析敌我相对态势,为攻击决策提供数据支撑。

4)攻击阶段。形成攻击决策后,根据无人机和地面目标的相对位置进行火控解算,选择武器攻击既定目标。

5)返航阶段。任务完成后,进行机动逃逸以迅速脱离危险区域,按照任务规划或重规划航线返航着陆。

实际的作战任务过程更为复杂,对地攻击无人机可能面临许多突发的不确定事件<sup>[10]</sup>,作战过程是一个动态的演化过程。因此,对地攻击无人机自主能力评估需要考虑3个问题:一是正向问题,当给定

作战方案时,综合考虑任务复杂度、环境因素和无人机自身性能等众多因素<sup>[11]</sup>,确定无人机自主能力等级,从而实现既定作战目标和效果;二是中间干涉问题,在作战任务过程中,由于环境、敌我态势和作战任务的改变,需要及时调整自主能力;三是逆向问题,如果无法达到期望的自主能力,需要如何调整以接近期望的自主能力。

1.2 地对地攻击无人机自主能力评估指标体系

自主能力为地对地攻击无人机适应高对抗战场环境及执行复杂任务提供了有力支撑,作战任务是驱动地对地攻击无人机自主能力动态调整的关键因素。由作战过程分析可知,地对地攻击无人机执行隐蔽突防任务时,感知(observe)、判断(orient)、决策(decide)、行动(act)环节(OODA)在 5 个不同任务过程中的侧重不同,意味着不同任务过程对自主能力的需求也不同。

基于 OODA 作战环理论,同时考虑地对地攻击无人机执行任务时的安全性和智能性要求,借鉴文献[4]的相关研究成果,围绕感知探测、规划决策、作战执行、安全管理和学习进化 5 个方面构建自主能力评估指标体系,如表 1 所示。其中,感知探测能力是无人机作战行动和自主能力调整的先决要素;规划决策能力是无人机对地面目标进行自主攻击的关键;作战执行能力是无人机执行战术任务和自主摧毁敌方地面目标的能力;安全管理能力是无人机实现自主飞行的基本保障;学习进化能力是无人机作战效能增长及智能自主的重要体现。

为反应总体目标层指标在不同作战阶段的能力水平,选取 19 个影响任务进程的关键指标作为第 2 层指标。以机载装备系统的性能或所表现的局部能力对作战过程层指标的支撑程度为依据,选取关键机载装备参数或系统局部性能作为第 3 层指标,对指标进一步细化分解。

表 1 地对地攻击无人机自主能力评估指标体系

总体目标层	作战过程层	局部性能/装备性能层
感知探测能力 A <sub>1</sub>	态势感知能力 B <sub>1</sub>	信息域水平 C <sub>1</sub>
		认知域水平 C <sub>2</sub>
	环境感知能力 B <sub>2</sub>	自身状态感知 C <sub>3</sub>
		周围环境感知 C <sub>4</sub>
	目标探测能力 B <sub>3</sub>	SAR 侦察能力 C <sub>5</sub>
		红外侦察能力 C <sub>6</sub>
		光电侦察能力 C <sub>7</sub>
	信息融合能力 B <sub>4</sub>	信息接收能力 C <sub>8</sub>
		信息处理能力 C <sub>9</sub>
		数据共享能力 C <sub>10</sub>

表 1(续)

总体目标层	作战过程层	局部性能/装备性能层	
地对地攻击无人机自主能力	规划决策能力 A <sub>2</sub>	任务规划能力 B <sub>5</sub>	目标选择能力 C <sub>11</sub>
			目标分配能力 C <sub>12</sub>
			航路规划能力 C <sub>13</sub>
			规划算法效能 C <sub>14</sub>
		指令理解能力 B <sub>6</sub>	指令数据量 C <sub>15</sub>
			信息熵 C <sub>16</sub>
		战术决策能力 B <sub>7</sub>	决策因素属性值 C <sub>17</sub>
			作战策略指令值 C <sub>18</sub>
			战术规则推理值 C <sub>19</sub>
	环境适应能力 B <sub>8</sub>	物理环境适应能力 C <sub>20</sub>	
		电磁环境适应能力 C <sub>21</sub>	
	作战执行能力 A <sub>3</sub>	飞行能力 B <sub>9</sub>	基本飞行性能 C <sub>22</sub>
			续航性能 C <sub>23</sub>
			机动飞行性能 C <sub>24</sub>
		突防能力 B <sub>10</sub>	装甲系数 C <sub>25</sub>
			突防机动能力 C <sub>26</sub>
			突防最低高度 C <sub>27</sub>
			突防速度 C <sub>28</sub>
		对地攻击能力 B <sub>11</sub>	外挂数量 C <sub>29</sub>
			武器精度系数 C <sub>30</sub>
			发现目标能力系数 C <sub>31</sub>
链路通信能力 B <sub>12</sub>		武器射程 C <sub>32</sub>	
		连通性 C <sub>33</sub>	
		有效性 C <sub>34</sub>	
生存能力 B <sub>13</sub>		可靠性 C <sub>35</sub>	
		雷达反射截面 C <sub>36</sub>	
	飞机几何尺寸 C <sub>37</sub>		
安全管理能力 A <sub>4</sub>	健康管理能力 B <sub>14</sub>	电子对抗能力系数 C <sub>38</sub>	
		故障检测 C <sub>39</sub>	
		故障预测 C <sub>40</sub>	
	抗干扰/防欺骗 B <sub>15</sub>	故障诊断 C <sub>41</sub>	
		灵敏度 C <sub>42</sub>	
		干扰容限 C <sub>43</sub>	
		扩频增益 C <sub>44</sub>	
	学习进化能力 A <sub>5</sub>	人机融合能力 B <sub>16</sub>	人机接口 C <sub>45</sub>
			人机分工 C <sub>46</sub>
人机协同 C <sub>47</sub>			
训练能力 B <sub>17</sub>		模拟训练 C <sub>48</sub>	
		综合理论训练 C <sub>49</sub>	
		实装训练 C <sub>50</sub>	
行为记忆能力 B <sub>18</sub>		瞬时记忆 C <sub>51</sub>	
		工作记忆 C <sub>52</sub>	
	长期记忆 C <sub>53</sub>		
组网通信能力 B <sub>19</sub>	组网方式 C <sub>54</sub>		
	网络 MAC 协议 C <sub>55</sub>		

## 2 基于 BN 网络的自主能力评估模型

根据作战任务复杂性和自主能力评估过程的不确定性,本文利用贝叶斯网络进行自主能力评估,首先综合改进熵权法和隶属度加权法确定根节点先验概率,基于专家评价法确定子节点条件概率;其次通过贝叶斯网络的 3 种推理模式,进行自主能力动态评估;最后根据仿真结果,给出自主能力调整建议,基本流程如图 2 所示。

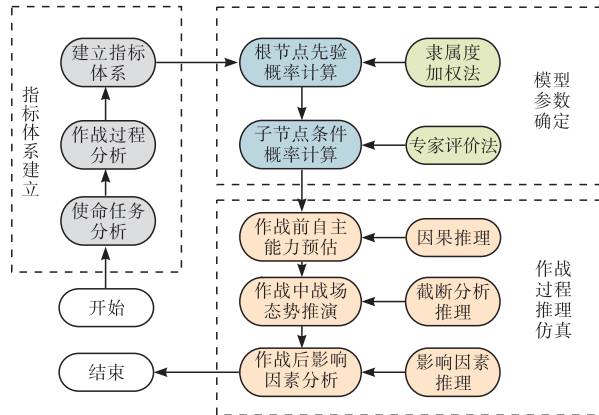


图 2 自主能力评估流程

### 2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络 (Bayesian network, BN) 又称信用网,它是以概率论和图论为基础,以有向边表示变量之间的因果关系,以条件概率表示变量之间关系的强弱<sup>[12]</sup>,描述问题具有形式直观的特点。BN 可用二元组  $N = \langle G, P \rangle$  表示,其中  $G = \langle X, A \rangle$  为有向无环图,其节点  $X = \{X_i\}, i = 1, 2, \dots, n, A \subseteq X \times X$  表示有向边的集合; $P = \{P(X_i | Pa(X_i)), X_i \in X\}$  为条件概率的集合。在贝叶斯网络中,离散变量集合  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  的联合概率分布  $P(X)$  表示为:

$$P(X) = P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i)) \quad (1)$$

### 2.2 贝叶斯网络推理

在知识不确定和信息不完备情况下,贝叶斯网络的强大推理能力能够有效融合多源信息,对不确定性问题进行决策分析、推理学习和动态评估。贝叶斯网络有 3 种推理模式:

1) 因果推理:一种正向推理过程,根据成因信息推测出结果,由父节点的条件概率推测子节点的条件概率。假设所有父节点  $E_i$  组成的证据集合为  $E_C$ ,则在此情况下子节点  $M$  状态为  $M_j$  的概率为:

$$\begin{aligned} P(M = M_j / E_C) &= P(M = M_j | E_1 = e_1, \\ E_2 = e_2, \dots, E_n = e_n) &= \\ \frac{P(M = M_j, E_1 = e_1, E_2 = e_2, \dots, E_n = e_n)}{P(E_1 = e_1, E_2 = e_2, \dots, E_n = e_n)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $E_i \in E_C; P(E_1 = e_1, E_2 = e_2, \dots, E_n = e_n)$  为状态已知节点的联合概率; $n$  为状态已知的父节点个数; $P(M = M_j | E_1 = e_1, E_2 = e_2, \dots, E_n = e_n)$  为向前传导的条件概率。

2) 影响因素推理:又称诊断推理,是一种由果到因的反向推理方式。通过改变子节点条件概率,观察相关父节点在状态空间中取每种状态的概率,进而分析子指标对上层指标的影响程度。假设已知子节点状态为  $M = M_j$ ,则父节点后验概率分布为:

$$P(E_i = e_i | M = M_j) = \frac{P(E_i = e_i) P(M = M_j | E_i = e_i)}{P(M = M_j)} \quad (3)$$

3) 截断分析推理:综合因果推理的前向推理能力和影响因素推理的逆向诊断能力。当中间指标节点的取值固定时,一方面可以通过前向推理得到评估指标节点的状态,另一方面可通过逆向诊断得出子指标的影响程度。

3 种推理模式可以很好地解决 1.1 节提出的问题。针对任务前的正向问题,采用因果推理分析本次任务所需自主能力,为战场态势评估提供依据;针对任务中的中间干涉问题,采用截断分析推理,对动态演化的战场态势进行推理分析,快速应对突发情况;针对任务后的逆向问题,对无人机的自主能力影响因素进行分析,形成评价报告,为下次作战行动提供自主能力调整策略。

### 2.3 贝叶斯网络节点参数

贝叶斯网络的节点参数包括根节点先验概率和子节点条件概率。为处理无序的底层数据,综合改进熵权法和隶属度加权两种方法计算根节点先验概率;为紧密结合作战任务过程,利用专家评价法确定子节点条件概率。

#### 2.3.1 根节点先验概率

贝叶斯网络根节点先验概率是进行最终评估的基础,本文提出一种基于改进熵权的隶属度加权法,主要步骤如下:

Step 1 利用改进熵权法确定指标权重。

① 收集子指标数据,得到  $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ ,  $\mathbf{X}_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T, j = 1, 2, \dots, m$ 。

② 计算信息熵:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n [f_{ij} \ln(f_{ij})], j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中:  $f_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}; k = 1 / \ln n$ 。

③ 计算信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - H_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

值得注意的是,根据式(5)计算权重,当  $H_j \rightarrow 1$

时,信息熵差值的微小变化就会导致熵权差异较大的异常现象。针对该问题,对式(5)进行改进:

$$d'_j = \sum_{k=1}^m H_k + 1 - 2H_j \quad (6)$$

④确定指标权重:  $\omega_j = d'_j / \sum_{j=1}^m d'_j$ 。

Step 2 采用隶属度加权法确定根节点先验概率。

①划分根节点属性等级  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_s\}$ , 并确定第  $j$  个子指标属于等级  $V_i$  的隶属度  $\gamma_{ij}$ ;

②隶属度加权求得根节点属于等级  $V_i$  的先验概率  $P_{V_i} = \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \omega_j (i = 1, 2, \dots, s)$ , 根节点先验概率为  $P = \{p_{V_1}, p_{V_2}, \dots, p_{V_s}\}$ 。

### 2.3.2 子节点条件概率

由于缺乏实际观测数据,难以进行有效的参数学习,本文利用专家评价法确定子节点条件概率(CPT),为说明方法,在由节点 A、B、C 构成的贝叶斯网络中,假设 A、B 为节点 C 的父节点。首先根据专家经验和历史数据的分类,划分节点属性等级,设节点 A、B、C 的属性等级均为  $V = \{好, 差\}$ ;而后,邀请专家评定打分,得节点 C 的条件概率,见表 2。

表 2 节点 C 的 CPT

A	B	C	
		好	差
好	好	$n_{11}/n$	$n_{12}/n$
	差	$n_{21}/n$	$n_{22}/n$
好	好	$n_{31}/n$	$n_{32}/n$
	差	$n_{41}/n$	$n_{42}/n$

## 3 仿真验证与分析评估

假定某型地对地攻击无人机领受地对地攻击任务,按照 1.1 节介绍的作战流程开展行动,需要对其自主能力进行评估。无人机自主能力发展趋势是遥控-半自主-全自主,因此,将对地攻击无人机自主能力分为一级(遥控)、二级(半自主)和三级(完全自主)3 个等级。

### 3.1 节点参数确定

节点参数确定一直是一个难点问题,本文采用基于改进熵权的隶属度加权法确定先验概率。改进熵权法改良了传统熵权公式的缺陷,能够有效反应数据的变异程度;隶属度加权法可以综合考虑数据特征,得到更为精确的先验概率。以节点  $B_5$  为例,邀请无人机研制和使用专家组成评估组(专家数量  $n=10$ ),采用模糊分类方法建立子指标  $B_5$  属性等级集合,规定 90 分以上为好,80~90 分为一般,80

分以下为差,如表 3 所示。

根据表 3 给出的子指标数据,通过 Step1 计算步骤,可得根节点  $B_5$  的子指标权重为  $\omega = \{0.3485, 0.2576, 0.2201, 0.1738\}$

表 3 根节点  $B_5$  指标数据

序号	目标选择能力	目标分配能力	航路规划能力	规划算法效能
1	94	90	85	83
2	81	95	88	78
3	93	85	85	75
4	82	86	90	80
5	95	93	91	86
6	97	96	86	75
7	94	95	78	73
8	80	82	77	75
9	95	84	86	80
10	96	81	78	82

根据表 3 中子指标的数据和规定的属性等级划分,得到节点  $B_5$  的子指标隶属度,如表 4 所示。

表 4 节点  $B_5$  子指标隶属度

属性	好	一般	差
目标选择能力	0.7	0.3	0.0
目标分配能力	0.5	0.5	0.0
航路规划能力	0.2	0.5	0.3
规划算法效能	0.0	0.5	0.5

根据 Step2 计算节点  $B_5$  的先验概率为  $P = \{0.4168, 0.2493, 0.3339\}$

### 3.2 基于作战任务阶段的自主能力分析推理

作战任务是驱动无人机自主能力动态变化的关键因素。利用 2.2 节介绍的推理方式,分别对作战任务前、中和作战任务后 3 个过程进行自主能力推理分析,挖掘深层次的作战信息。

1)作战任务前自主能力预估。作战任务前预估本次任务所需自主能力,实现对战场态势的整体把控。输入各节点参数,采用因果推理,运行仿真工具 Netica,得到图 3 所示的评估结果。由图 3 可知,地对地攻击无人机自主能力等级为三级、二级、一级的概率分别是 50.5%、41.4%、8.05%,由最大概率隶属原则可知自主能力等级为三级,表明执行此任务需要较高的自主能力。分别对比子指标  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  的 good、common、bad 的值,可知无人机的行为执行能力和感知探测能力较强,而安全管理能力和学习进化能力偏弱。

2)作战任务中战场态势推演。随着任务进程的推进,无人机将面临复杂多变的战场环境带来的不

确定性事件。如何适应急剧动态变化的战场场景，并对多元信息进行有效分析、归纳和判断，成为作战过程中自主能力决策的关键。以突防阶段为例，假设敌防空火力及兵力部署情况已知，并且指挥中心

将相关数据传输给对地攻击无人机，则在突防阶段，无人机不需要过多的感知探测能力，将其 bad 值设为 100% 并更新模型，见图 4。

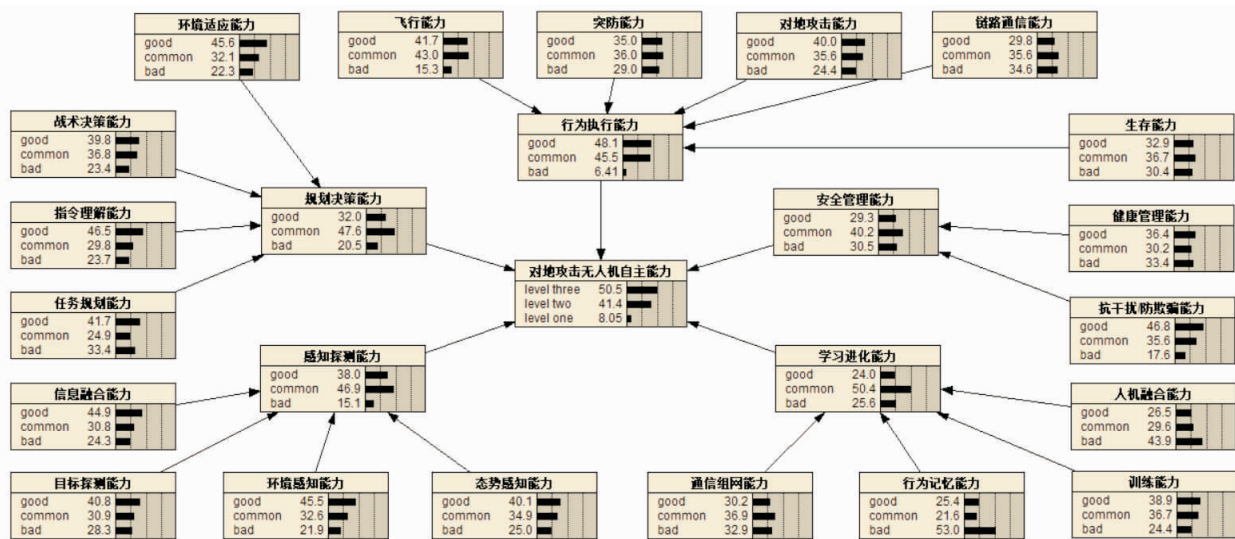


图3 贝叶斯网络自主能力评估模型

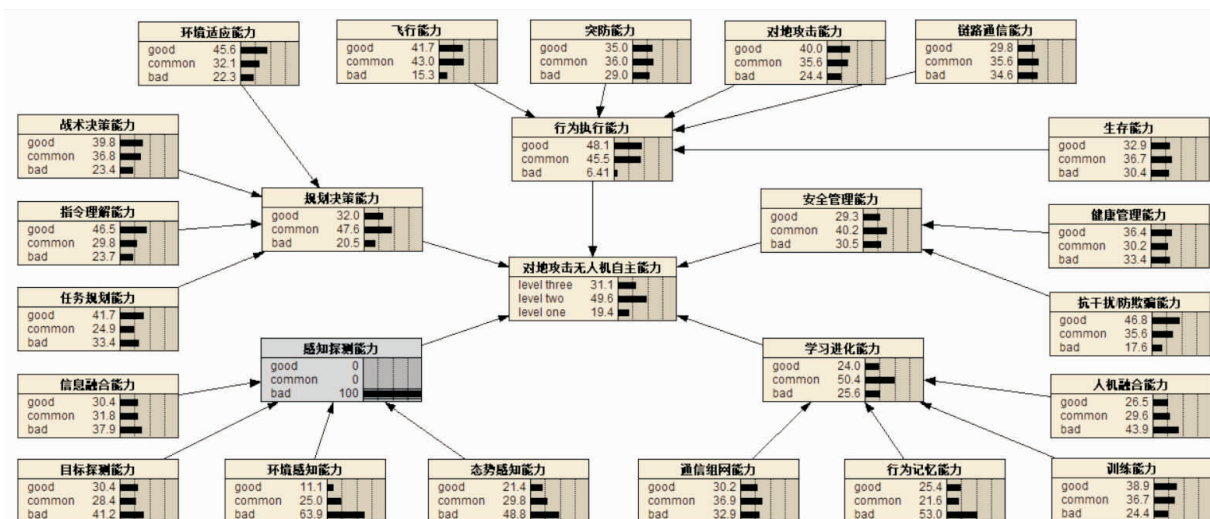


图4 证据更新后的贝叶斯网络评估结果图

此时，无人机自主能力等级为二级。对比图 3 和图 4，态势感知能力、环境感知能力、目标探测能力和信息融合能力的 good 值分别降低 18.7%、34.4%、10.4%、14.5%，表明感知探测能力受环境感知能力影响较大。

3) 作战任务后自主能力影响因素分析。作战任务结束后，对本次任务进行总结分析，找出影响自主能力的关键因素。假设本次任务所需自主能力等级为完全自主(自主能力为三级的概率设为 100%)，记为  $A=A_c$ ，采用影响因素推理更新模型。对比各个节点先验概率和后验概率的变化，并进行排序，排序结果见表 5。

针对指标的重要程度分析，采用概率重要度和

关键重要度<sup>[13]</sup>来验证影响因素推理的有效性。

概率重要度描述根节点状态的变化对叶节点的影响，计算公式为：

$$I_P(i) = P(A=A_c | L_i=L_g) + P(A=A_c | L_i=L_c) - 2P(A=A_c | L_i=L_b) \quad (7)$$

式中： $L_i$  表示根节点  $i$  的属性等级； $L_g$ 、 $L_c$ 、 $L_b$  分别表示属性等级为 good、common、bad。

关键重要度综合概率和敏感两个方面考虑子指标对自主能力的贡献程度，即子指标的关键程度，其计算公式为：

$$I_c(i) = \frac{P(L_i=L_g)}{P(A=A_c)} I_P(i) \quad (8)$$

根据式(7)、(8)计算根节点的关键重要度，计算结果见表 5。

表5 影响因素推理和关键重要度排序

指标名称	推理排序	$I_c$	$I_c$ 排序
态势感知能力	1	0.123 1	1
环境感知能力	2	0.121 6	3
目标探测能力	8	0.101 6	8
信息融合能力	14	0.068 5	14
任务规划能力	3	0.121 8	2
指令理解能力	6	0.115 1	6
战术决策能力	17	0.052 8	17
环境适应能力	13	0.074 9	13
飞行能力	7	0.108 2	7
突防能力	4	0.116 5	4
对地攻击能力	10	0.094 0	9
链路通信能力	5	0.115 4	5
生存能力	16	0.063 2	16
健康管理能力	12	0.085 0	12
抗干扰/防欺骗	9	0.093 7	10
人机融合能力	15	0.065 1	15
训练能力	11	0.089 4	11
行为记忆能力	18	0.049 7	18
组网通信能力	19	0.037 1	19

### 3.3 基于仿真结果的自主能力调整建议

作战任务前,根据实际任务情况预估所需自主能力,选择合适的无人机机型和载荷类型。由图3可知,该无人机的感知探测能力和作战执行能力较强,而安全管理能力和学习进化能力偏弱。因此,在飞行任务前需要做好安全检查工作,以弥补无人机安全管理能力的不足,而学习进化能力偏弱是目前无人机的共性问题,但学习进化能力是高端智能无人机自主能力的重要体现,不容忽视。

作战任务中,根据战场态势及任务情况调整无人机自主能力。由图4可知,若战场态势已知,无人机不需要太高的自主能力。对比感知探测能力子指标的概率变化值,可以发现感知探测能力的最大影响因素为环境感知能力。因此,在应急情况下调整无人机感知探测能力,需要着重注意环境感知能力。

作战任务后,综合影响因素推理和关键重要度来分析自主能力影响因素。由表5可知,两种排序结果差别不大,自主能力主要影响因素为态势感知能力、环境感知能力、任务规划能力、突防能力和链路通信能力。其中,感知能力是对地攻击无人机自主作战的先决要素;任务规划能力是无人机适应复杂战场环境的根本保证;突防能力是任务成败的关键因素;链路通信能力是联合作战和编队集群的基本保障。仿真结果符合客观实际,证明贝叶斯网络评估模型具有一定的合理性。

## 4 结语

1)基于OODA理论,构建了面向全任务过程的

评估指标体系,建立了自主能力评估与作战任务的关联关系,满足了不同任务阶段的作战需求。

2)贝叶斯网络模型的3种推理模式较好解决了作战过程中的正向问题、中间干涉问题和逆向问题,为复杂环境下自主能力决策提供了依据。

需要指出的是,作战任务过程中的不确定因素和不可控因素过于繁多,评估模型的有效性还需要进一步结合任务实际进行检验,评估体系也需要根据任务类型进行调整和优化。

### 参考文献

- [1] 王桂芝,沈卫. 国外战术无人机系统与技术发展分析[J]. 飞航导弹, 2020(9):71-74.
- [2] 杜梓冰,陈银娣. 无人机自主作战能力试验评价技术综述[J]. 航空兵器, 2021,28(6):58-65.
- [3] 王新星. 无人平台自主能力分级模型研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012:9-20.
- [4] 丰雨轩,刘树光,解武杰,等. 基于改进Hopfield神经网络的攻击型无人机自主能力评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2021,47(4):835-843.
- [5] 丰雨轩,刘树光,解武杰. 基于灰色关联分析的打击型无人机自主能力评价[J]. 电光与控制, 2021,28(6):16-19.
- [6] 尹文强. 基于改进层次分析法的无人机自主能力评价方法[J]. 飞行力学, 2021,39(5):82-87.
- [7] 刘树光,茹乐,王柯. 无人机自主性评价方法新进展[J]. 飞航导弹, 2019(2):43-49.
- [8] 岳源. 对地攻击型无人机作战仿真建模研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2015:13-25.
- [9] 董文洪,马培蓓,纪军. 攻击型无人机作战过程研究[J]. 战术导弹技术, 2018(1):9-15.
- [10] 苗壮,孙盛智,段炼,等. 军用无人机关键技术发展应用及主要作战样式研究[J]. 飞航导弹, 2020(9):52-56.
- [11] HAN J, CHO Y, KIM J, et al. Autonomous Collision Detection and Avoidance for ARAGON USV: Development and Field Tests[J]. Journal of Field Robotics, 2020,37(6):987-1002.
- [12] CUI Y, QUDDUS N, MASHUGA C V. Bayesian Network and Game Theory Risk Assessment Model for Third-Party Damage to Oil and Gas Pipelines [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 134:178-188.
- [13] XIAHOU T, LIU Y, JIANG T. Extended Composite Importance Measures for Multi-State Systems with Epistemic Uncertainty of State Assignment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 109:305-329.

(编辑:姚树峰)