

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0072

基于组合赋权的对地攻击无人机自主能力云模型评价

严惊涛, 刘树光*

(空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051)

摘 要: 针对对地攻击无人机自主能力量化评价的不确定性问题, 提出基于组合赋权的云模型评价方法。基于认知控制结构, 从感知探测、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价指标体系。运用基于博弈论的组合赋权方法, 结合改进层次分析法和改进熵权法确定组合权重, 克服了单一赋权方法确定指标权重的片面性。考虑自主能力评价过程的模糊性和随机性, 提出一种对地攻击无人机自主能力云模型评价方法, 采用浮动云算法实现评价指标云的有效综合。对 3 种对地攻击无人机进行仿真验证, 结果表明: 所提方法综合考虑评价对象的主客观因素, 消除了单一赋权方法的局限性, 权重分配科学合理。自主能力云模型量化评价能够有效区分不同类型对地攻击无人机自主能力等级的差异性, 评价结果准确可信。

关 键 词: 自主能力; 对地攻击无人机; 组合赋权; 博弈论; 云模型

中图分类号: V279

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)12-3500-11

当前战争形态正由信息化向智能化转变, 智能无人成为未来战争的典型特征之一。智能自主技术与无人系统融合发展形成的智能自主无人系统, 成为影响战争进程的颠覆性科学技术^[1-2]。对地攻击无人机作为航空领域典型的无人作战平台, 其作战时空、使命任务和作战样式不断拓展^[3], 决定了对地攻击无人机必须具备很高的自主能力。构建科学合理的自主能力评价指标体系, 提出与作战任务相匹配的自主能力等级划分标准, 建立行之有效的评价模型, 可以为复杂任务下无人机自主能力调整提供决策依据, 具有重要的军事意义和实用价值。

对地攻击无人机自主能力评价的不确定性主要来源于 3 个方面: 对无人系统认知的不确定性、监测信息的不确定性和模型的不确定性, 这 3 个不确定性贯穿整个评价过程, 很大程度影响评价结果的可信度和准确性。对无人系统认知的不确定性主要体现在自主性内涵研究及指标体系构建方面, 已有的研究成果针对自主性概念及自主能力等级

划分作了科学阐述, 如自主控制水平等级 (autonomous control level, ACL)、无人系统自主性等级 (autonomy levels for unmanned systems, ALFUS)、人机权限四级模型和自主系统参考框架等^[4], 但这些方法没有说明如何建立科学合理的评价指标体系, 且很难摆脱主体认知的局限性。监测信息和模型的不确定性主要体现在评价方法及评价模型确定方面, 许多学者利用不同的方法模型对该问题进行了研究, 如层次分析法^[5]、神经网络方法^[6]、灰色关联分析法^[7]、模糊数学法^[8]、贝叶斯网络模型^[9]等, 但上述方法难以同时兼顾模糊性、随机性、指标权重三者对评价结果的影响, 在实际运用中存在一定弊端, 如层次分析法过于依赖主观认识, 容易脱离实际, 神经网络方法需要大量数据支撑, 且难以解释评价结果, 灰色关联分析法趋于均化, 分辨率低, 不易区分不同自主能力等级的差异, 模糊数学法在实际运用中仅考虑了评价的模糊性忽略了随机性, 且难以确定隶属度函数。

收稿日期: 2022-02-14; 录用日期: 2022-04-18; 网络出版时间: 2022-04-25 10:44
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220424.1516.001.html
* 通信作者. E-mail: dawny418@163.com
引用格式: 严惊涛, 刘树光. 基于组合赋权的对地攻击无人机自主能力云模型评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (12): 3500-3510.
YAN J T, LIU S G. Combination weighting based cloud model evaluation of autonomous capability of ground-attack UAV[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (12): 3500-3510 (in Chinese).

针对上述问题, 本文基于认知控制结构建立自主能力评价指标体系, 提出与任务难度相适应的自主能力等级划分标准; 运用基于博弈论的组合赋权方法确定组合权重; 引入云模型评价方法, 结合组合权重和浮动云算法确定综合云, 计算综合云与标准云的相似度, 实现对地攻击无人机自主能力的量化评价。

1 自主能力评价指标体系及等级划分

1.1 基于认知控制结构的自主能力评价指标

自主能力是无人系统进行感知、分析、交流、规划决策和行为的综合体现, 反映无人系统的智能化程度^[10]。目前, 国内外学者针对无人系统自主性框架和自主控制结构进行了研究, 提出了双坐标法、三坐标法、蛛网模型等^[11]方法。这些方法阐述了自主能力概念, 并对如何表征自主能力等级提出具体的分级标准和原则, 具有一定的适用价值, 但并未说明如何将这些标准和原则转换为可实际操作的评价指标, 存在对无人系统认知上的不确定性。

“世界上并不存在完全自主的无人系统, 所有的自主无人系统都是人机联合的认知系统。”无人系统自主性本质是由无人自主系统替代有人驾驶飞机/驾驶员完成作战任务的智能行为能力^[12], 而人脑是已知的最高级智能系统。因此, 类比人类认知控制行为来研究无人机自主决策机制, 对于构建科学合理的自主能力评价指标体系具有重要意义。

在复杂动态的战场环境下, 实现自主决策系统模拟人类大脑思维, 必须将人类的智能结构映射到无人机自主系统控制模型(见图 1), 主要思路体现在以下 5 个方面:

1) 感知探测。感知探测是智能控制的前提和基础, 人的感知信息的获取手段是多源的, 无人机则在飞行过程中利用多种传感器感知周围环境和自身状态。

2) 价值判断/规划决策。价值判断/规划决策是智能控制的核心, 无人机需要具备模拟人类思维的规划决策系统, 进行一定程度的自主决策。

3) 环境模型。人的智能主要表现在认知上, 即人脑中建立一个与外界世界相匹配的环境模型, 无人机也可通过不断学习训练生成类似模型。

4) 行为执行。人通过执行器官将大脑的思维决策与真实的外界环境联系起来, 并通过不断实践去适应和改造环境, 无人机通过执行机构完成起飞、巡航、执行任务、返航、着陆等动作。

5) 安全管理。人的自我安全管理是潜意识行为, 贯穿于认知活动的各个环节, 无人机则需要有专门的安全管理系统对传感器、执行机构等部件进行实时健康监控和管理。

值得注意的是, 人类智能的核心在于价值判断, 即哲学领域的价值观问题, 这是人类有别于机器等其他智能体的本质特征^[13]。无人系统通过双向数据库进行学习训练, 可以在一定规则内模拟人的行为活动, 但无法形成人类思维、想象、判断等主观能动性。因此, 无人系统的自主并不意味着完全脱离人的控制, 即使无人系统达到最高自主能力水平“全自主”, 最终决策权仍归人所有。

根据以上分析, 从感知探测、规划决策、作战执行、安全管理和学习进化 5 个方面构建对地攻击无人机自主能力评价指标, 如图 2 所示。其中, 感知探测能力是无人机通过机载传感器感知自身

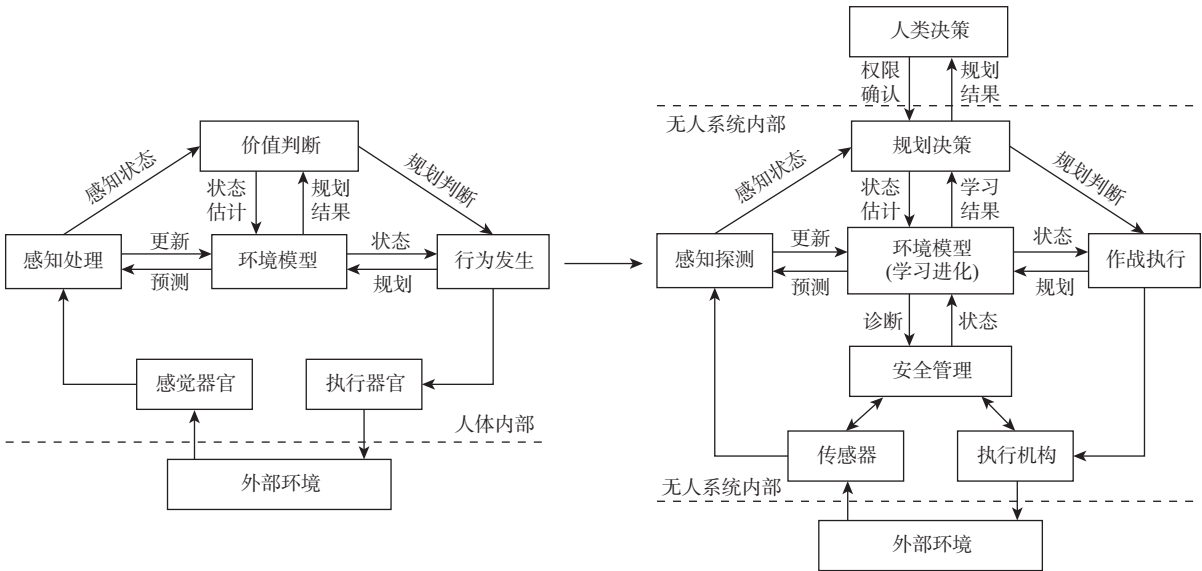


图 1 人类/无人系统智能结构

Fig. 1 Intelligent structure of human/unmanned system

和周围环境,探测任务目标动态信息,并进行融合处理的能力。选取态势感知、环境感知、目标探测和信息融合 4 个子能力来评估感知探测能力。规划决策系统是无人机对地面目标进行自主攻击的关键,为使无人机能够理解人机交互指令,完成任务规划和战术决策,并能适应瞬息万变的战场环境,选取任务规划、指令理解、战术决策和环境适应 4 个子能力来评估规划决策能力。作战执行能力是无人机自主摧毁敌方地面目标的能力,考虑到无人机在执行任务时,需要具备良好的机动、攻击、通信性能和生存防护能力,将飞行能

力、突防能力、对地攻击能力、链路通信能力和生存能力作为衡量作战执行能力的子能力。安全管理能力是无人机实现自主飞行的基本保障,飞行过程中,无人机需要借助数据监测和推理,对系统故障进行预测、隔离,并能在电磁对抗环境中抗遥控指令与导航信息欺骗,即需要具备健康管理和抗干扰/防欺骗能力。学习进化是无人机通过人机交互、强化训练、行为记忆、组网通信等实现自主作战效能增长提升的能力,是智能自主的重要体现,通过人机融合、训练、行为记忆和组网通信 4 个子能力进行评估。

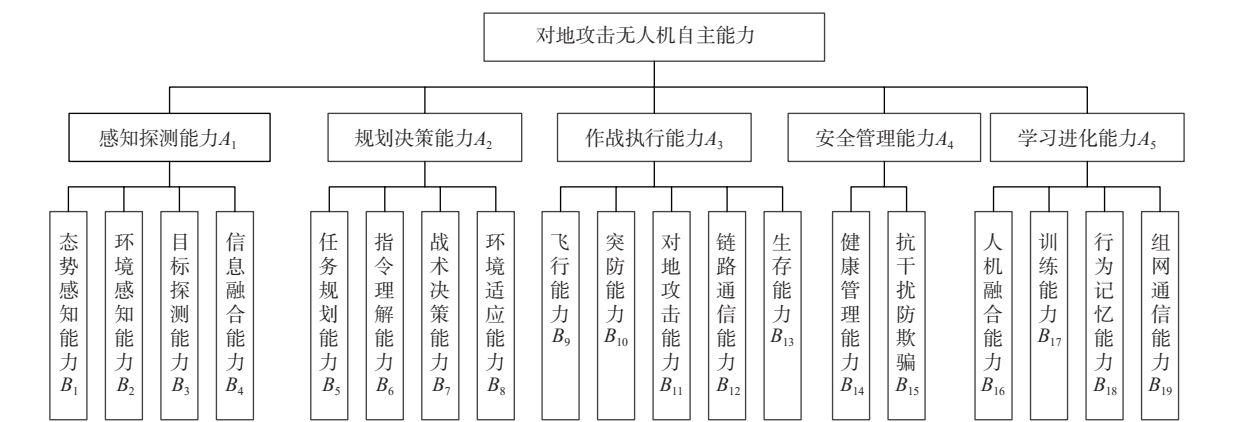


图 2 对地攻击无人机自主能力评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of autonomous capability of ground-attack UAV

1.2 自主能力等级划分标准

目前,国内外学者提出了多种自主能力等级分级方法,如自动装置等级(levels of automation, LOA)、ACL、ALFUS等。然而,这些方法依然存在一定缺陷,具体表现为:①自主能力等级分级的主线倾向于自主系统的技术发展规律,而对“任务执行有效性”关注不够,不便于衡量智能自主无人机能够胜任任何难度的作战任务;②总体分级较为粗糙,每级的技术特点和子能力特征缺乏具体描述。

针对以上问题,本文从作战任务的角度出发,借鉴 LOA、ACL、ALFUS 等研究成果,将感知探测、规划决策、作战执行、安全管理和学习进化 5 个自主能力影响因素融入对地攻击无人机各个作战环节之中,综合考虑任务难度和无人机自主能力发展脉络^[14],将对地攻击无人机自主能力等级分为 5 级,并结合文献[15],补充完善每个自主能力等级影响因素的具体内涵,如表 1 所示。

该等级划分将任务难度纳入衡量标准,体现了从单机到多机、集群的层级跨越,任务复杂度逐渐

表 1 自主能力等级划分标准						
Table 1 Classification standard of autonomous capability						
等级及 分值区间	等级描述	感知探测能力	规划决策能力	作战执行能力	安全管理能力	学习进化能力
I [0,25]	单机简单计划任务	探测地面特定目标	执行预编程的规划任务	单机对地攻击	状态报告	计算、存储、数据处理
II (25,50]	单机复杂计划任务	外部态势及自身态势感知	面向飞行状态的适应性规划	单机攻击并毁伤评估	实时故障诊断与隔离	程序自动化
III (50,75]	单机实时规划任务	复杂环境感知	航路重规划	及时规避部分威胁	简单故障修复	计算智能、智能算法
IV (75,90]	多机任务协同	多机信息共享	长机分配战术决策	多机协助攻击	故障预测及容错控制	简单思维智慧
V (90,100]	全自主集群	分布式/集群态势感知与信息共享	分布式/集群战略决策	集群协同攻击	群组诊断、冲突消解	认知/记忆智能、自主学习

增加, 智能化水平不断提升的趋势。其中, I~Ⅲ级是现有无人机单机自主能力水平的具体体现^[6], IV、V 级是对多机自主和集群自主的合理构想^[17], 并且各层指标直接与任务挂钩, 具有明确的军事和物理含义, 可直观、系统地区分不同自主能力等级及能力因素。

2 基于云模型和组合赋权的自主能力量化评价模型

本节针对评价中监测信息的不确定性和模型

的不确定性问题, 结合博弈论组合赋权和云模型, 构建自主能力量化评价模型, 具体流程如图 3 所示。基于博弈论的组合赋权法, 能够综合考虑主客观信息对评价结果的影响, 相较于传统赋权方法具有明显优势。云模型是一种有效的混合认知技术, 是解决不确定性问题的典型方法, 通过期望、熵和超熵 3 个数字特征来反映评价中的模糊性和随机性, 实现定性概念和定量数值的相互转化, 更优于传统评价方法。

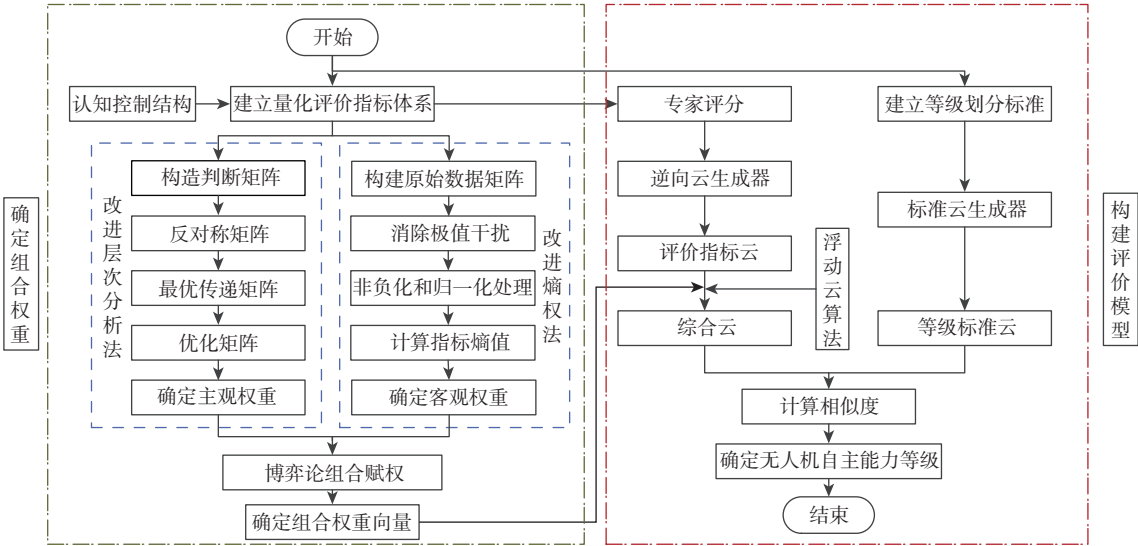


图 3 自主能力评价流程

Fig. 3 Flow chart of evaluation of autonomous capability

2.1 基于博弈论的组合赋权

确定指标权重是进行自主能力评价的基础, 主客观组合赋权法是近年的研究热点, 该方法可以权衡主观赋权法和客观赋权法的利弊, 既考虑客观数据的实际规律, 又能反映评价者的决策意图。因此, 本文在对层次分析法和熵权法改进的基础上, 引入博弈论思想确定最优组合权重。

2.1.1 改进层次分析法

层次分析法是一种定性定量相结合的决策分析方法^[18], 但主观性较强, 需要进行多次一致性检验并修正判断矩阵, 导致计算繁琐。本文针对该问题, 对传统层次分析法进行改进, 具体步骤如下:

步骤 1 构造判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \tag{1}$$

式中: a_{ij} 为第 i 个因素相对于第 j 个因素的重要程度, 并且满足 $a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ij} > 0, a_{ii} = 1$ 。

步骤 2 根据 $b_{ij} = \lg a_{ij}$, 得到判断矩阵 A 的反对称矩阵 B , 其特点为 $b_{ji} = -b_{ij}$ 。

步骤 3 根据式 (2) 得到反对称矩阵 B 的最优传递矩阵 C , 使得 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_{ij} - b_{ij})^2$ 最小。

$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk}) \tag{2}$$

步骤 4 构造优化矩阵 A^* , 其中, $a_{ij}^* = 10^{c_{ij}}$ 。

步骤 5 确定权重向量 W 。

① 将优化矩阵 A^* 归一化:

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij}^* / \sum_{i=1}^n a_{ij}^* \tag{3}$$

② 按行相加得和向量:

$$W'_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \tag{4}$$

③ 将和向量进行归一化, 得到优化矩阵的特征向量, 即所求权重向量:

$$W_i = W'_i / \sum_{i=1}^n W'_i \tag{5}$$

2.1.2 改进熵权法

熵权法是一种应用广泛的客观赋权法, 可以充分挖掘原始数据信息^[19], 但易受极端数据的干扰, 且当熵值处于特定区间时, 信息熵的微小差距会导致熵权成倍数变化。因此, 本文引入标准化处理法

消除极值干扰,并对信息熵计算公式进行改进,具体步骤如下:

步骤 1 构建原始数据矩阵 R' :

$$R' = (x_{ij})_{n \times m} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: m 为评价指标个数; n 为数据样本个数; x_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标的属性值。

步骤 2 采用标准化处理法消除极值干扰,标准化变化公式为

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \quad (7)$$

式中: $\bar{x}_j$ 为第 j 项指标观测值的均值; s_j 为第 j 项指标观测值的标准差。

步骤 3 指标非负化处理。熵权法要求指标值为正,因此,采用平移法使得后续信息熵的计算有意义。公式如下:

$$x_{ij}^+ = x_{ij}^* + l \quad (8)$$

式中: x_{ij}^+ 为经过非负化处理后的指标值; l 为平移距离,需要根据实际情况进行取舍^[20]。

步骤 4 归一化处理。公式如下:

$$R = (y_{ij})_{n \times m} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$y_{ij} = x_{ij}^+ / \sum_{i=1}^n x_{ij}^+ \quad (10)$$

式中: y_{ij} 为第 j 项指标的第 i 个评分经过归一化处理后的数值。

步骤 5 计算各指标信息熵:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n (y_{ij} \ln y_{ij}) \quad (11)$$

式中: $k = 1 / \ln n$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤 6 根据信息熵确定指标权重:

$$\begin{aligned} w_j &= \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m w_j &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

值得注意的是,根据式(12)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。针对这一问题,对熵权的计算公式进行改进,公式为

$$\begin{aligned} w_j &= \frac{\sum_{k=1}^m H_k + 1 - 2H_j}{\sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^m H_k + 1 - 2H_j \right)} \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m w_j &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

2.1.3 组合赋权法

针对组合赋权方面的研究,已有成果主要采取加法合成、乘法合成的方法,将不同权重进行简单合成,并未深入研究如何协调不同权重方法之间的冲突,以实现最优或次优的权重组合。

博弈论^[21]即对策论,是研究具有竞争性事物的一种运筹学方法。在博弈论中,多个决策主体通过相互竞争和妥协,实现自身利益最大化或损失最小化的决策均衡。借鉴博弈论思想,将主客观权重视为非合作博弈中的决策主体,双方在不断冲突中寻找利益平衡点,实现最优的权重组合,从而使指标赋权更加科学合理^[22]。具体过程如下:

将通过改进层次分析法和改进熵权法得到的指标权重分别记为 $w_1 = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n})$ 和 $w_2 = (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n})$,再由 w_1 和 w_2 的线性组合构造组合权重,公式为

$$w = \alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T \quad (14)$$

式中: α_1 、 α_2 分别为主、客观权重的组合系数。

根据博弈论原理求解 Nash 均衡点,即在不同权重之间寻找平衡,极小化组合权重和主客观权重之间的偏差,其目标函数和约束条件为

$$\begin{aligned} \min & (\|w - w_1^T\|_2 + \|w - w_2^T\|_2) = \\ & \min (\|\alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T - w_1^T\|_2 + \|\alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T - w_2^T\|_2) \\ \text{s.t. } & \sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

通过求解该模型,可获得综合考虑主观人为因素和客观数据规律的最优组合权重。该问题为求解等式约束条件下的极小值,构造拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(\alpha_1, \alpha_2, \lambda) &= \|\alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T - w_1^T\|_2 + \\ & \|\alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T - w_2^T\|_2 + \frac{\lambda}{2} \left(\sum_{k=1}^2 \alpha_k - 1 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: λ 为拉格朗日因子。

根据微分原理^[23],式(16)的最优一阶导数条件为

$$\begin{cases} \alpha_1 w_1 w_1^T + \alpha_2 w_1 w_2^T = w_1 w_1^T \\ \alpha_1 w_2 w_1^T + \alpha_2 w_2 w_2^T = w_2 w_2^T \end{cases} \quad (17)$$

对应的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据式(18)求得组合系数 α_1 、 α_2 ,并进行归一化处理:

$$\alpha_i^* = \alpha_i / \sum_{i=1}^2 \alpha_i \quad (19)$$

最终的组合权重为

$$\boldsymbol{w}^* = \alpha_1^* \boldsymbol{w}_1^{\top} + \alpha_2^* \boldsymbol{w}_2^{\top} \tag{20}$$

2.2 基于云模型的自主能力评价方法

在模糊数学和概率论的基础上发展形成的云模型理论,充分考虑了评价对象的数据特征,可以实现定性概念和定量数值之间的转换^[24],较好地解决自主能力评价中的模糊性和随机性问题。

2.2.1 基本理论

定义 1 设集合 $U = \{x\}$, 称为论域, C 为论域 U 上的概念, 若 $x \in U$ 为 C 的一次随机实现, 则 x 对 C 的隶属度 $\mu(x)$ 为具有稳定倾向的随机数, 即

$$\mu(x): U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \tag{21}$$

定义 2 设 U 为论域, $U = \{x\}$ 为评价标准的定量区间, C 为对应 U 的语义值, 即为自主能力评价指标等级的定性概念。定量值 $x \in U$, 且 x 为 C 的一次随机实现, 若满足: $x \sim N(E_x, E_x'^2)$, 其中, $E_n' \sim N(E_n, H_e^2)$, H_e^2 为云的超熵, 且对 C 的隶属度满足:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n'^2}} \tag{22}$$

则称 x 为云滴, x 在论域 U 上的分布为云模型, 记为 $C(x)$ 。

2.2.2 确定评价标准云

根据自主能力等级划分个数, 将指标评价论域 U 划分成 L 个子区间, 其中, 第 i 个子区间为 $[l_i^{\min}, l_i^{\max}]$, 该子区间对应的评价标准云 $Cloud_i$ 的数字特征为 (E_{Xi}, E_{Ni}, H_{Ei}) , 计算公式如下:

$$\begin{cases} E_{Xi} = (l_i^{\max} + l_i^{\min})/2 \\ E_{Ni} = (l_i^{\max} - l_i^{\min})/(2\sqrt{2\ln 2}) \\ H_{Ei} = h \end{cases} \tag{23}$$

式中: E_{Xi} 、 E_{Ni} 、 H_{Ei} 分别为第 i 个区间标准云的期望、熵、超熵; h 为常数, 需根据实际模糊阔度进行调整, 本文取 $h = E_{Ni}/10$ 。

2.2.3 确定评价因素云和综合云

各个指标的评价因素云通过对专家打分 $\boldsymbol{Z}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im}), i = 1, 2, \dots, I$, 进行处理得到, 其中, I 为专家个数, m 为指标个数。第 j 个指标评价云为 $C_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}), j = 1, 2, \dots, m$, 计算公式为

$$\begin{cases} E_{xj} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I z_{ij} \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I |z_{ij} - E_{xj}| \\ H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \end{cases} \tag{24}$$

式中: $S_j^2 = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (z_{ij} - E_{xj})^2$ 为第 j 个指标的专家评

分的方差。

由于专家认知差异导致指标云分布较为分散, 采用浮动云算法确定综合云。浮动云算法可以有效解决概念和认知的稀疏问题, 当浮动云从指标云 C_i 向指标云 C_{i+1} 移动时, 该云受前朵云 C_i 的影响逐渐减小, 受后朵云 C_{i+1} 的影响逐渐增大, 反映指标云之间的空白语言值^[25]。浮动云计算公式为

$$\begin{cases} E_X = \frac{E_{x1}w_1^* + E_{x2}w_2^* + \dots + E_{xn}w_n}{w_1^* + w_2^* + \dots + w_n} \\ E_N = \frac{E_{n1}(w_1^*)^2 + E_{n2}(w_2^*)^2 + \dots + E_{nn}w_n^2}{(w_1^*)^2 + (w_2^*)^2 + \dots + w_n^2} \\ H_E = \frac{H_{e1}(w_1^*)^2 + H_{e2}(w_2^*)^2 + \dots + H_{en}w_n^2}{(w_1^*)^2 + (w_2^*)^2 + \dots + w_n^2} \end{cases} \tag{25}$$

式中: $w_1^*, w_2, \dots, w_n$ 为指标的组合权重值。

综合考虑不同指标对评价结果的影响, 通过组合权重和浮动云算法实现底层指标云的集结, 且通过浮动云的凝聚性来判断集结效果, 即云滴的离散程度越大, 集结效果越差。

2.2.4 计算云相似度并确定自主能力等级

计算综合评价云和各自主能力等级标准云之间的云相似度 ξ_i , 以确定自主能力等级。 ξ_i 计算步骤如下:

步骤 1 在综合评价云中生成一个以 E_N 为期望、 H_E^2 为方差的正态随机数 $E_{Xk} \sim N(E_N, H_E^2)$ 。

步骤 2 在综合评价云中生成一个以 E_X 为期望、 E_{Xk}^2 为方差的正态随机数 $x_k \sim N(E_X, E_{Xk}^2)$ 。

步骤 3 将 x_k 代入评价等级 i 的标准云 $Cloud_i$ 期望方程, 计算 $\mu_k = \exp[-(x_k - E_{Xi})^2/(2E_{Ni}^2)]$ 。

步骤 4 重复步骤 2、步骤 3 n 次, 计算相似度 $\xi_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_k$, 相似度越大, 则说明综合评定等级与该标准等级越接近。

3 自主能力综合评价仿真分析

选取 3 种典型对地攻击无人机(分别记为 UAV1、UAV2、UAV3), 其基本性能参数如表 2 所示。以图 2 评价指标体系为依据, 运用本文提出的基于组合赋权的云模型评价方法, 开展自主能力量化评价。

3.1 获取指标量化值

3 种无人机对应的指标量化值通过以下方法获取: ①理论公式计算, 利用表 2 中的基本参数, 通过理论公式^[26-28]推导得到 B_3 、 B_4 、 $B_{10} \sim B_{13}$ 指标量化值; ②借鉴文献成果, 根据已有的方法模型^[29-30], 在基本参数范围内多次取值, 计算其平均值, 得到 B_1 、 B_5 、 B_7 指标的量化值; ③专家打分, 针对无人机当前所具备的能力水平, 专家按照 1~9 标度法打

分得到 B_2 、 B_8 、 $B_{16} \sim B_{19}$ 指标量化值;④仿真实验,利用实验室无人机飞行仿真平台,采用不同无人机模型进行仿真实验,模拟得到指令数据传输量、飞行数据、飞机完好率、干扰抑制度等仿真数据,从而得到指标 B_6 、 B_9 、 B_{14} 、 B_{15} 的量化值^[30-32]。通过上述方法获取19个指标的量化值,指标类型均为

效益型指标,因此,采用极差变换法进行标准化处理,得到如表3所示的指标量化值矩阵,极差变换法公式为

$$q_{ij} = \frac{p_{ij} - \min(p_j)}{\max(p_j) - \min(p_j)} \quad i = 1, 2, \cdots, n, j = 1, 2, \cdots, m$$

(26)

表2 无人机基本性能参数
Table 2 Basic performance parameters of UAV

UAV	长/m	翼展/m	高/m	翼面积/m ²	最大起飞重量/kg	升限/m	最高速度/(km·h ⁻¹)	巡航速度/(km·h ⁻¹)
UAV1	11.7	24	3.8	29.5	5 670	12 192	460	398
UAV2	8	17	2.1	17.8	1 633	8 800	280	110
UAV3	8.22	14.8	2.1	11.5	1 020	7 620	217	165

UAV	雷达分辨率/m	目标定位精度/m	导弹外挂数量/枚	起降距离/m	续航时间/h	有效载荷/kg	发动机功率/kW	最大航程/km
UAV1	0.1	0.10	8	600	40	1 360	661.5	10 186
UAV2	0.2	0.20	4	640	30	360	99.2	4 800
UAV3	0.3	0.25	2	667	24	200	84.5	3 704

表3 归一化指标量化值
Table 3 Normalized index quantization value

UAV	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
UAV1	0.84	0.87	0.75	0.66	0.81	0.73	0.71	0.73	0.67	0.82
UAV2	0.56	0.75	0.61	0.62	0.54	0.62	0.57	0.61	0.62	0.57
UAV3	0.40	0.62	0.43	0.42	0.43	0.46	0.46	0.55	0.47	0.43

UAV	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}
UAV1	0.76	0.74	0.81	0.82	0.79	0.80	0.88	0.80	0.80
UAV2	0.53	0.65	0.71	0.62	0.59	0.58	0.54	0.56	0.68
UAV3	0.38	0.52	0.60	0.44	0.46	0.41	0.44	0.45	0.50

3.2 计算组合权重

根据第1节建立的自主能力评价指标体系,请无人作战领域的专家对指标因素两两之间的相对重要程度进行打分,利用改进层次分析法计算指标的主观权重。依据表3所示的指标量化值,利用改进熵权法计算客观权重。基于博弈论组合赋权法,得到最优组合权重,主客观权重及组合权重如表4所示,权重分布如图4所示。

由图4可知:① B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_7 、 B_{15} 等5个指标的主客观权重值较为一致,而其余指标的权重值差异较大,客观权重明显倾向 B_1 、 B_{11} 、 B_{17} 3个指标,主观权相对均衡,但无法突出主要性能指标。②基于博弈论的组合赋权法最大限度地克服了单一方法带来的片面性,协调和均衡了主客观方法的作用和影响。

3.3 生成评价标准云

根据表1划分的自主能力等级及评分区间,利用式(23)计算标准云模型参数,如表5所示。

根据正向云发生器原理^[25],将表5中标准云模型参数及1 000个云滴数量作为输入,得到每个云滴在数域中的坐标及每个云滴代表概念的确定

表4 指标权重及UAV1云模型特征参数
Table 4 Index weight, and characteristic parameters of UAV1 cloud model

指标	主观权重	客观权重	组合权重	UAV1指标云
B_1	0.072 6	0.094 8	0.089 6	(62.6,2.44,0.14)
B_2	0.071 7	0.022 7	0.034 1	(68.4,3.38,0.96)
B_3	0.059 9	0.056 4	0.057 2	(55.6,2.71,1.18)
B_4	0.040 4	0.041 2	0.041 0	(60.0,3.38,0.79)
B_5	0.071 8	0.073 4	0.073 0	(62.4,6.74,2.98)
B_6	0.067 8	0.039 8	0.046 3	(67.8,2.76,1.68)
B_7	0.031 1	0.031 5	0.031 4	(63.0,2.13,1.02)
B_8	0.044 1	0.015 3	0.022 0	(59.6,1.74,0.85)
B_9	0.063 8	0.028 8	0.037 0	(66.2,4.61,2.53)
B_{10}	0.068 7	0.075 4	0.073 8	(60.2,3.01,0.53)
B_{11}	0.055 4	0.086 5	0.079 2	(64.8,1.88,1.37)
B_{12}	0.068 0	0.023 1	0.033 6	(72.4,1.57,0.91)
B_{13}	0.037 2	0.015 4	0.020 5	(56.8,5.73,1.65)
B_{14}	0.050 1	0.069 7	0.065 1	(59.2,2.36,0.54)
B_{15}	0.055 2	0.054 3	0.054 5	(57.4,1.42,0.66)
B_{16}	0.038 4	0.071 5	0.063 8	(63.0,1.57,0.08)
B_{17}	0.052 7	0.098 6	0.087 9	(66.4,1.67,0.49)
B_{18}	0.029 3	0.067 1	0.058 3	(64.8,2.37,0.86)
B_{19}	0.021 9	0.034 5	0.031 6	(69.6,1.93,1.15)

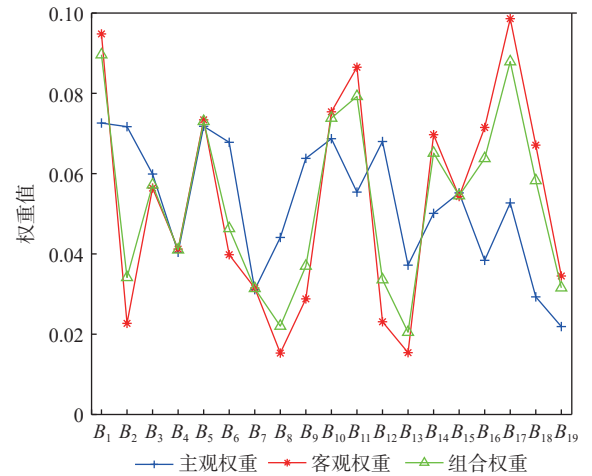


图 4 自主能力评价指标权重分布

Fig. 4 Weight distribution of evaluation index of autonomous capability

表 5 自主能力等级标准云模型

Table 5 Cloud model of autonomous capability level standard		
等级	分值区间	云模型特征参数
I	[0,25]	(12.5,10.617,1.06)
II	(25,50]	(37.5,10.617,1.06)
III	(50,75]	(62.5,10.617,1.06)
IV	(75,90]	(82.5,6.370,0.64)
V	(90,100]	(95,4.247,0.42)

度。依次生成 5 个自主能力等级的标准云图,如图 5 所示。图中,从左到右依次是 I ~ V 级对应的标准云,分别以红蓝绿黄紫不同颜色表示。

3.4 计算各指标云和综合云

以 UAV1 为例,根据 15 位无人作战领域的专

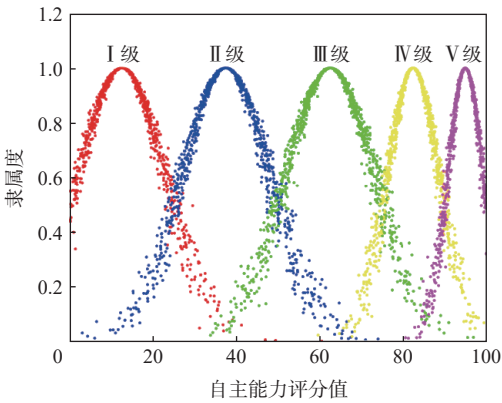


图 5 自主能力评价等级标准云图

Fig. 5 Cloud chart of evaluation level standard of autonomous capability

家对各指标的评价结果(见表 6),由式 (24) 计算得到各指标云 $C_j(E_{xj},E_{nj},H_{ej})$,计算结果见表 4 的第 5 列。

采用浮动云算法计算综合云,将组合权重和指标云代入式 (25),得到自主能力评价综合云为 $C(63.0,2.70,0.94)$,如图 6 所示。

同理,可得到 UAV2、UAV3 的综合云分别为 $C'(31.8,4.16,0.51)$, $C''(18.9,3.19,1.72)$ 。

3.5 自主能力等级综合评定

分别计算 3 种无人机综合云与 5 个自主能力等级标准云的相似度,以最大相似度确定无人机综合评价结果,如表 7 所示。同时,为验证方法的科学性和合理性,将本文方法与其他方法对比(以 UAV1 的综合评价结果为例),如图 7 所示。

结果表明,UAV1、UAV2、UAV3 自主能力等级分别为Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级,与其他评价方法的结果一致,但本文方法分辨率更高,易于区分不同自主

表 6 UAV1 专家评分

Table 6 UAV1 expert scoring																			
专家	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅	B ₁₆	B ₁₇	B ₁₈	B ₁₉
1	62	72	57	66	60	64	65	56	66	54	71	73	47	55	59	64	67	65	73
2	64	65	60	59	73	68	63	59	54	58	65	72	52	61	56	63	68	63	68
3	59	72	51	55	54	69	60	61	71	69	65	72	61	63	59	60	70	68	67
4	67	68	56	57	64	68	64	60	75	60	66	75	62	60	57	66	74	62	71
5	64	70	56	58	60	71	62	57	62	59	64	70	63	58	58	64	64	64	69
6	58	71	54	64	56	63	60	59	62	54	62	72	55	57	57	63	63	63	70
7	60	66	61	62	58	68	70	63	65	62	64	76	56	60	58	63	66	65	70
8	60	65	55	63	58	65	64	61	68	63	64	74	42	62	57	61	67	66	70
9	64	71	56	61	55	68	62	61	65	60	65	71	62	56	56	64	69	69	69
10	63	63	54	55	70	72	63	60	64	59	63	72	62	61	57	65	70	68	67
11	64	70	53	58	69	70	60	59	69	59	68	72	54	56	55	62	62	62	67
12	64	70	57	63	65	70	65	59	65	63	65	70	62	59	60	64	64	64	69
13	62	67	58	59	66	65	62	58	65	62	65	73	59	60	56	62	65	63	72
14	75	72	54	59	58	65	62	61	67	61	62	75	58	59	59	61	67	67	69
15	63	65	52	61	70	71	63	60	75	60	63	69	57	61	57	63	61	63	73

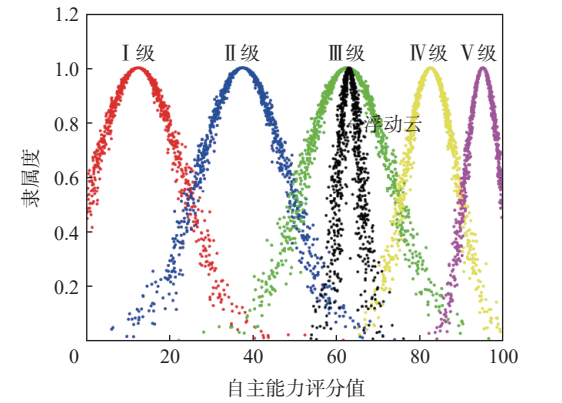


图 6 UAV1 自主能力综合云图

Fig. 6 Comprehensive cloud map of UAV1 autonomous capability

表 7 相似度及等级评定结果

Table 7 Similarity and grade evaluation results

UAV	自相似度					评定结果		
	I	II	III	IV	V	本文方法	灰色关联	贝叶斯网络
UAV1	0	0.07	0.96	0.02	0	III	III	III
UAV2	0.21	0.82	0.02	0	0	II	II	II
UAV3	0.76	0.23	0.01	0	0	I	I	I

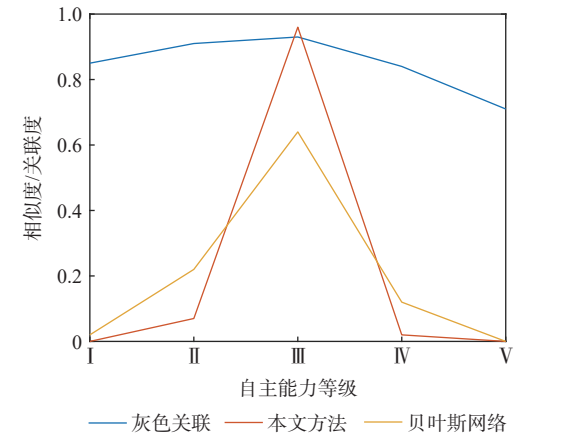


图 7 本文方法与其他评价方法对比

Fig. 7 Comparison with other evaluation methods

能力等级的无人机,降低了评价结果的模糊性。本文方法优势在于:①基于博弈论的组合赋权法,很好地权衡了主客观因素,提升了指标赋权的科学性;②引进云模型,根据正向云发生器,将自主能力评价过程中的模糊性和随机性转化为定量值;③采用浮动云算法,消除了专家认知上的差异性;④基于云模型的自主能力评价,不仅给出了评价结果的期望值,而且给出了评价结果的可信度和稳定性。

3.6 构建快速评估模型

依据 2.2.4 节的相似度计算步骤,得到无人机指标值与综合评价结果的相似度及平均相似度分

布,如图 8 和图 9 所示。相似度反映了该指标与综合评价结果的一致程度,相似度越高,该指标越能反映自主能力水平的高低。

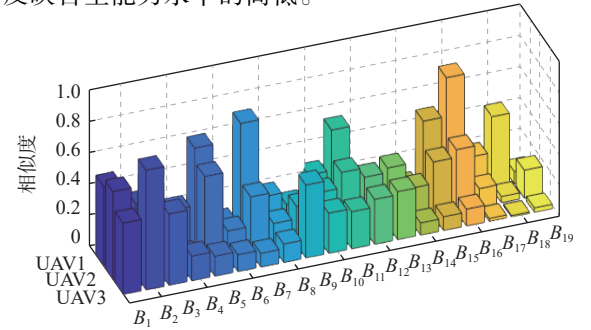


图 8 指标与综合评价结果相似度分布

Fig. 8 Similarity distribution of between indicators and comprehensive evaluation results

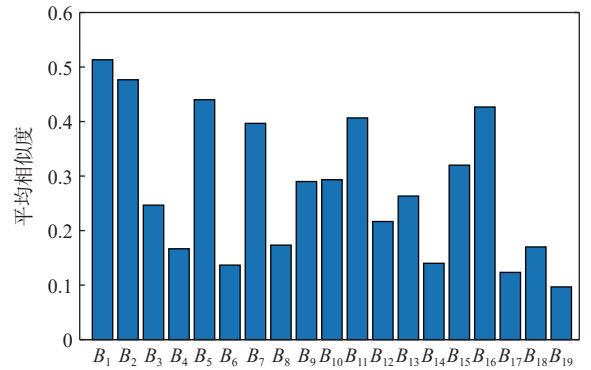


图 9 指标与综合评价结果平均相似度分布

Fig. 9 Average similarity distribution between indicators and comprehensive evaluation results

由图 8 和图 9 可知,不同自主能力等级的无人机主要性能指标不同,而 B_1 、 B_2 、 B_5 、 B_7 、 B_{11} 、 B_{16} 的平均相似度较高,在极端场景下利用该组指标对自主能力进行粗略评估,可提高评估效率,快速应对突发态势。

4 结 论

本文基于认知控制结构,建立对地攻击无人机自主能力评价指标体系,结合博弈论组合赋权和云模型实现了对地攻击无人机自主能力量化评价,并通过实例分析验证了所提方法,结果表明:

- 1) 基于博弈论的组合赋权法,将改进后的层次分析法和熵权法有机结合,很大程度消除了单一方法所产生的局限性。
- 2) 将云模型运用到自主能力量化评价中,能够较好地处理评价的模糊性和随机性问题,评价结果更为准确。
- 3) 在紧急条件下需要快速确定无人机自主能力时,选取与自主能力水平相似度高的 6 个指标进行评估,快速形成应对方案。

参考文献 (References)

[1] 卢新来, 杜子亮, 许赞. 航空人工智能概念与应用发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 251-264.

LU X L, DU Z L, XU Y. Review on basic concept and applications for artificial intelligence in aviation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 251-264 (in Chinese).

[2] LANDRETH L J M. Autonomous horizons: The way forward[R]. Washington D.C.: Office of the Air Force Chief Scientist, 2019.

[3] 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.

DONG W H, MA P B, JI J. Research on combat processing of UCAV[J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 9-15 (in Chinese).

[4] 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.

DU Z B, CHEN Y D. Review on testing and evaluation of UAV's autonomous operational ability[J]. Aero Weaponry, 2021, 28(6): 58-65 (in Chinese).

[5] 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.

YIN W Q. Research on UAV autonomy capability evaluation method based on improved analytic hierarchy process[J]. Flight Dynamics, 2021, 39(5): 82-87 (in Chinese).

[6] 丰雨轩, 刘树光, 解武杰, 等. 基于改进Hopfield神经网络的对地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.

FENG Y X, LIU S G, XIE W J, et al. Autonomous capability evaluation of ground-attack UAV based on improved Hopfield neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(4): 835-843 (in Chinese).

[7] 丰雨轩, 刘树光, 解武杰. 基于灰色关联分析的对地攻击型无人机自主能力评价[J]. 光电与控制, 2021, 28(6): 16-19.

FENG Y X, LIU S G, XIE W J. Autonomous capability evaluation of ground-attacking UAVs based on gray relational analysis[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(6): 16-19 (in Chinese).

[8] HAN Y M, FANG D, ZHANG H Y, et al. Evaluation of attack capability of UAV intelligent swarm based on AHP fuzzy evaluation[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020, 1651(1): 012012.

[9] 陈宏建. 基于贝叶斯网络的无人机编队作战效能评估方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

CHEN H J. Research on combat effectiveness evaluation method of UAV formation based on Bayesian network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020 (in Chinese).

[10] ELTABEY M M, MAWGOUD A A, ABU-TALLEB A. The autonomy evolution in unmanned aerial vehicle: Theory, challenges and techniques[C]// Proceedings of the International conference on Advances Intelligent Systems and Informatics. Berlin: Springer, 2020: 527-536.

[11] 王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法[J]. 科学通报, 2012, 57(15): 1290-1299.

WANG Y C, LIU J G. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(15): 1290-1299 (in Chinese).

[12] MORENO-JIMÉNEZ J M, AGUARÓN J, ESCOBAR M T, et al. Group decision support using the analytic hierarchy process[M]// KILGOUR D M, EDEN C. Handbook of group decision and negotiation. Berlin: Springer, 2021: 947-975.

[13] NG J. Delphi method: A qualitative approach for quantitative results[J]. Value in Health, 2018, 21: S54.

[14] 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.

LIU S G, RU L, WANG K. New progress in evaluation methods of UAV autonomy[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(2): 43-49 (in Chinese).

[15] CLOUGH B T. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway?[C]//Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. Amsterdam: Elsevier, 2002: 313-319.

[16] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1075-1083.

CHEN Z J, WEI J Z, WANG Y X, et al. UAV autonomous control levels and system structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1075-1083 (in Chinese).

[17] 邹立岩, 张明智, 荣明. 智能无人机集群概念及主要发展趋势分析[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 1-11.

ZOU L Y, ZHANG M Z, RONG M. Analysis of intelligent unmanned aircraft systems swarm concept and main development trend[J]. Tactical Missile Technology, 2019(5): 1-11 (in Chinese).

[18] 王红旗, 牟泽龙, 郭亚子. 基于层次分析与模糊综合评价的无人机精确保障效能评估[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(5): 109-112.

WANG H Q, MOU Z L, GUO Y Z. Effectiveness evaluation of UAV precise support based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(5): 109-112 (in Chinese).

[19] 董晓旭, 何安瑞, 孙文权, 等. 应用熵权-TOPSIS法的加热炉炉温在线设定模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(7): 119-124.

DONG X X, HE A R, SUN W Q, et al. On-line temperature setup model of reheating furnace based on entropy weight-TOPSIS method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(7): 119-124 (in Chinese).

[20] QIAO C, WANG Y, LI C H, et al. Application of extension theory based on improved entropy weight method to rock slope analysis in cold regions[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(6): 4315-4327.

[21] MARDEN J R, SHAMMA J S. Game theory and control[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2018, 1: 105-134.

[22] WU Z Y, CHEN G D, YAO J J. A driving safety evaluation algorithm based on TOPSIS model of game theory combination[C]// Proceedings of the 7th Asia International Symposium on Mechatronics. Berlin: Springer, 2019: 756-768.

[23] LAI C G, CHEN X H, CHEN X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243-1259.

[24] WANG K Q, LIU H C, LIU L P, et al. Green supplier evaluation and selection using cloud model theory and the QUALIFLEX method[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 688.

[25] WU H W, ZHEN J, ZHANG J. Urban rail transit operation safety

evaluation based on an improved CRITIC method and cloud model[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 16: 100206.

[26] 权家乐, 钱杭. 基于指数模型的无人机侦察能力评估[J]. 科技创新与应用, 2020(9): 65-66.

QUAN J L, QIAN H. Evaluation of UAV reconnaissance capability based on exponential model[J]. Technology Innovation and Application, 2020(9): 65-66(in Chinese).

[27] 阴小晖. 有人机/无人机协同作战效能评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.

YIN X H. Research on the effectiveness evaluation for cooperative combat of manned vehicle /unmanned aerial vehicle[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013(in Chinese).

[28] 董彦非, 胡涛. 战斗机综合作战效能评估建模方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 9-11.

DONG Y F, HU T. Synthesized combat effectiveness assessment modeling method for fighter plane[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(2): 9-11(in Chinese).

[29] 潘长鹏, 韩玉龙, 庄益夫. 舰载无人机编队协同对海突击作战效能评估指标体系研究[J]. 战术导弹技术, 2019(2): 25-32.

PAN C P, HAN Y L, ZHUANG Y F. Research on the operational effectiveness evaluation indices system of ship-based UAV formation cooperative air-to-sea attack[J]. Tactical Missile Technology, 2019(2): 25-32(in Chinese).

[30] 赵海涛, 高士顺, 王海军, 等. 无人机自主通信和组网能力评估方法[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 87-98.

ZHAO H T, GAO S S, WANG H J, et al. Evaluation method for autonomous communication and networking capability of UAV[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 87-98(in Chinese).

[31] 屈高敏. 对地攻击型无人机作战效能评估与软件开发[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

QU G M. The research of UCAV effectiveness assessment and software development[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015(in Chinese).

[32] 闫云斌, 田庆民, 王永川, 等. 无人机数据链系统抗干扰性能评估指标及其测试方法[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3925-3928.

YAN Y B, TIAN Q M, WANG Y C, et al. Evaluation indicator and test method of anti-jamming evaluation indicator for unmanned vehicle data link[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(12): 3925-3928(in Chinese).

Combination weighting based cloud model evaluation of autonomous capability of ground-attack UAV

YAN Jingtao, LIU Shuguang*

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

Abstract: To address the uncertainty in quantitative evaluation of autonomous capability of ground-attack UAVs, an evaluation method with the cloud model is proposed based on combined weightings. Based on the cognitive control structure, the evaluation index system of autonomous capability is constructed from five aspects: perceptual detection, planning and decision-making, combat execution, security management, and learning evolution. The one sidedness of determining the index weight by a single weighting method is overcome, using the combination weighting method based on game theory, and combined with the improved analytic hierarchy process and the improved entropy weight method to determine the combination weight. Considering the fuzziness and randomness of the autonomous capability evaluation process, an evaluation method based on cloud model is proposed for the autonomous capability of ground-attack UAVs, and the floating cloud algorithm is used to realize the effective synthesis of the evaluation index cloud. The simulation results of three ground-attack UAVs show that the proposed method considers both subjective and objective factors of the evaluation object, eliminates the limitations of a single weighting method, and achieves scientific and reasonable weight distribution. The quantitative evaluation of autonomous capability of the cloud model can effectively distinguish autonomous capability levels of different types of ground-attack UAVs, with accurate and reliable evaluation results.

Keywords: autonomous capability; ground-attack UAV; combination weighting; game theory; cloud model