

基于模糊层次分析法的反无人机群效能评估

金子迪, 苏斌

(海军装备部装备招标中心, 北京 100071)

摘要:为解决无人机群作战威胁,本文以美国尼米兹航母、俄罗斯库兹涅佐夫航母为例对反无人机群效能进行研究,构建了反无人机群作战效能评估体系模型,选用基于三角模糊数表示重要度的模糊层次分析法,确定体系指标权重,证明了模型的有效性,以期为应对无人机群威胁提供参考。

关键词:无人机群;模糊层次分析法;作战效能;效能评估

中图分类号:V279

文献标识码:A

文章编号:1004-7344(2022)31-0133-03

0 引言

近年来,随着 MEMS 技术、通信导航技术和人工智能技术迅速发展,智能的无人机群作战方式将有可能颠覆未来战争的规则。无人机群作战是指由数量庞大、成本低廉的小型无人机组成蜂群作战系统,依托大数据、人工智能、无线自组网等技术协同作战。在未来战场上,由数量众多的无人机对作战目标进行超饱和攻击,能有效提升己方的作战效能。

矛盾的关系从来都是相辅相成的,无人机群作战的发展也促进了反无人机群作战的发展。目前反无人机群作战中,既有火力摧毁等硬杀伤手段,也有电子战干扰等软杀伤手段,两种手段各有优劣,但单独使用都没有特别好的作战效能。

1 模糊层次分析法概述

模糊层次分析法是一种定量与定性相结合的系统分析方法,在评估过程中把复杂问题分解为很多指标,将这些指标根据隶属关系分组,形成有序的层次结构。在每一层中,通过各元素两两对比得出针对上一层目标的相对重要性,并用数值标度,最后通过数学方法综合得出各指标相对于目标元素的权重数值。

2 反无人机群效能评估体系

应对无人机群作战,首先进行探测侦察,然后采取有效的欺骗防护或拦截毁伤手段。目前的反无人机策略主要由探测跟踪预警、伪装防护、欺骗干扰和打击毁伤组成。本文结合舰船的实际情况,依据以上四类准则建立舰船反无人机群作战效能评估体系,如图 1 所示。

2.1 探测跟踪

中远程警戒雷达是在距离较远时对载体进行探测跟踪。具体指标为:装备数量 D_1 、最大探测距离 D_2 、目标

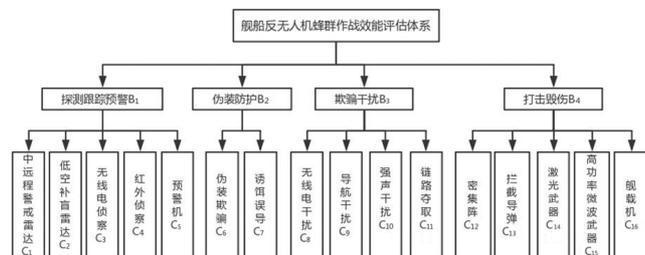


图 1 舰船反无人机群作战效能评估体系

跟踪数量 D_3 。无人机群通常采用低空飞行策略来躲避雷达的探测,体系中低空补盲雷达探测低空飞行中的无人机群。具体指标为:装备数量 D_4 、最大探测距离 D_5 、最大探测高度 D_6 、探测精度 D_7 。无线电侦察可以对无人机群的导航、制导、遥控等无线电信号进行侦测,判断无人机群的部署和动向^[1]。具体指标为:装备数量 D_8 、探测精度 D_9 、测频范围 D_{10} 。红外侦察是一种光学侦察,舰艇可利用红外探测跟踪系统,监视入侵的无人机群。具体指标为:装备数量 D_{11} 、探测精度 D_{12} 、最大探测距离 D_{13} 。预警机搜索和监视空中和海上目标,使用电子设备发现敌对目标,将信息传送到舰船指挥中心。具体指标为:装备数量 D_{14} 、最大探测距离 D_{15} 、目标跟踪数量 D_{16} 。

2.2 伪装防护

无人机群会选择舰艇上的一些高价值目标,通过超饱和攻击达到作战目的。舰船可以将雷达等高价值目标伪装,利用红外、微波、无线电等技术欺骗诱导无人机^[2]。伪装防护体系分为伪装欺骗和诱饵误导,具体指标为:伪装面积 D_{17} 、类型数量 D_{18} 、伪装装备数量 D_{19} 、诱导装备数量 D_{20} 、诱导时间长度 D_{21} 。

2.3 欺骗干扰

目前的电子战反无人机系统主要包括欺骗干扰型和信号入侵型,在评估体系中欺骗干扰型包括无线电

干扰、导航干扰和强声干扰,信号入侵型为链路夺取。无线电干扰影响无人机与指挥中心的联系和无人机之间的联系,具体指标为:装备数量 D_{22} 、干扰数量 D_{23} 、干扰频段 D_{24} 、干扰功率 D_{25} 。导航干扰影响无人机飞行路径,使其失去卫星导航的指引,具体指标为:装备数量 D_{26} 、干扰距离 D_{27} 、干扰功率 D_{28} 。强声干扰影响无人机的惯性导航模组,使其在失去卫星导航后进一步迷失方向,失去自主协调能力,具体指标为:装备数量 D_{29} 、干扰距离 D_{30} 。链路夺取通过阻断无人机的数据链路,侵入指挥系统控制无人机,具体指标为:装备数量 D_{31} 、夺取架次 D_{32} 。

2.4 打击毁伤

火力打击是对无人机群的硬杀伤,直接摧毁无人机,保护舰船安全。密集阵是舰船防御无人机群的最后一道防线,具体指标为:装备数量 D_{33} 、命中率 D_{34} 、射速 D_{35} 、存储弹药 D_{36} 。拦截导弹可以摧毁拦截无人机运输载体,发挥最大的作战效能,具体指标为:装备数量 D_{37} 、命中率 D_{38} 、存储弹药 D_{39} 。激光武器反应速度快,火力转移迅捷,是对付个体无人机的理想武器,具体指标为:装备数量 D_{40} 、命中率 D_{41} 、单次出光时长 D_{42} 。高功率微波武器是使用高功率微波束破坏无人机的电子设备,使无人机丧失性能,具体指标为:装备数量 D_{43} 、发射功率 D_{44} 、命中率 D_{45} 。舰载机可在空中对无人机群打击,保护舰艇安全,具体指标为:装备数量 D_{46} 、最大速度 D_{47} 、最大航程 D_{48} 。

3 评估体系权重的确定

3.1 三角模糊数

定义 1: 设论域 R 上的模糊集为 M , M 的隶属度函数 $\mu_M: R \rightarrow [0, 1]$ 表示为式 (1)。

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{x-u}{m-u} & x \in [m, u] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $l \leq m, l \leq u, l$ 和 u 分别为 M 的下界和上界值^[9]。 l 和 u 为模糊程度, $u-l$ 越大, 模糊的程度越强, m 是模糊集 M 的隶属度为 1 时的取值。三角模糊数的几何解释^[9]如图 2 所示。

三角模糊数 M 表示为 (l, m, u) , 其中 $x=m$ 时, x 完全属于 M , l 和 u 分别为下界和上界。在 l, u 以外的完全不属于模糊数 M 。

定义 2: 设有两个三角模糊数 $M_1=(l_1, m_1, u_1)$ 与 $M_2=(l_2, m_2, u_2)$, 则三角模糊数的基本运算如式 (2)~式 (5) 所示。



图 2 三角模糊数几何解释

$$M_1 \oplus M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (2)$$

$$M_1 \otimes M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (3)$$

$$\lambda \otimes M_1 = (\lambda \times l_1, \lambda \times m_1, \lambda \times u_1) \quad (4)$$

$$1/M_1 = (1/l_1, 1/m_1, 1/u_1) \quad (5)$$

3.2 构造判断矩阵

判断矩阵是层次结构中同一层的要素相对于上一层目标依据重要度两两对比形成的矩阵。在模糊层次分析法中,我们构造的基于三角模糊数判断矩阵为 $B=(b_{ij}) (n \times n)$, $b_{ij}=[l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}]$, 其中 m_{ij} 是中值, l_{ij} 和 u_{ij} 分别为下界值和上界值。在评判过程中一般有多人进行评判,我们取各要素的均值为最后的判断矩阵,由式 (6) 得出:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \otimes (b_{ij}^1 + b_{ij}^2 + \dots + b_{ij}^n) \quad (n=1, 2, \dots, H) \quad (6)$$

在指标评价的两两对比矩阵中,为了考虑人判断的模糊性,用三角模糊数 M_1, M_3, M_5, M_7, M_9 代替传统的 1、3、5、7、9, 而用 M_2, M_4, M_6, M_8 表示中间值。

根据三角模糊数和标度方法,建立舰船反无人机群作战效能评估体系的三角模糊数判断矩阵。经过多人打分,通过公式 (6) 得到最后的综合三角模糊数判断矩阵,如下所示为准则层 B 相对于目标 A 的判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} (1.00, 1.00, 1.00) & (3.00, 4.00, 4.50) & (0.21, 0.33, 0.38) & (0.25, 0.35, 0.67) \\ (0.23, 0.27, 0.38) & (1.00, 1.00, 1.00) & (0.58, 1.31, 1.67) & (0.20, 0.27, 0.27) \\ (3.00, 3.00, 5.00) & (1.67, 2.25, 3.50) & (1.00, 1.00, 1.00) & (0.63, 1.17, 2.00) \\ (2.00, 3.50, 4.50) & (4.00, 4.00, 5.50) & (0.67, 1.75, 2.50) & (1.00, 1.00, 1.00) \end{bmatrix}$$

同理,分别得到约束层 C 对准则层 B 和指标层 D 对约束层 C 的判断矩阵。

3.3 权重确定算法

在三角模糊数判断矩阵中,评判区间上边界 u 和下边界 l 之间的大小表示判断的模糊程度, $u-l$ 越大,表示判断的越模糊, $u-l$ 越小,表示判断越清晰,当 $u-l=0$ 时,表示判断是明确的。模糊层次分析法的权重算法有很多,通过对比决定使用文献[5]中的算法来计算权重。

3.4 权重结果

按照算法,分别计算得出各层次的权重如下。

(1)目标 A 的各指标权重为:

$$\omega_A = (0.2550, 0.2016, 0.2604, 0.2829)。$$

(2)准则层 B 的各个权重为:

$$\omega_{B_1} = (0.1871, 0.2271, 0.1935, 0.1781, 0.2142)；$$

$$\omega_{B_2} = (0.3356, 0.6644)；$$

$$\omega_{B_3} = (0.2827, 0.2942, 0.1676, 0.2556)；$$

$$\omega_{B_4} = (0.2191, 0.1758, 0.2012, 0.2184, 0.1854)。$$

(3)约束层 C 的各个权重为:

$$\omega_{C_1} = (0.3907, 0.2343, 0.3751)；$$

$$\omega_{C_2} = (0.2581, 0.2315, 0.2572, 0.2532)；$$

$$\omega_{C_3} = (0.3056, 0.2810, 0.4134)；$$

$$\omega_{C_4} = (0.3433, 0.2901, 0.3666)；$$

$$\omega_{C_5} = (0.3932, 0.2332, 0.3736)；$$

$$\omega_{C_6} = (0.3445, 0.2278, 0.4277)；$$

$$\omega_{C_7} = (0.5409, 0.4591)；$$

$$\omega_{C_8} = (0.2390, 0.2185, 0.2772, 0.2653)；$$

$$\omega_{C_9} = (0.3597, 0.3067, 0.3336)；$$

$$\omega_{C_{10}} = (0.5012, 0.4988)；$$

$$\omega_{C_{11}} = (0.5012, 0.4988)；$$

$$\omega_{C_{12}} = (0.2462, 0.2256, 0.2313, 0.2968)；$$

$$\omega_{C_{13}} = (0.3415, 0.2508, 0.4077)；$$

$$\omega_{C_{14}} = (0.3666, 0.3259, 0.3074)；$$

$$\omega_{C_{15}} = (0.3378, 0.2723, 0.3899)；$$

$$\omega_{C_{16}} = (0.4385, 0.2859, 0.2756)。$$

(4)各指标 D 的最终权重为:

$$\omega = (0.0186, 0.0112, 0.0179, 0.0149, 0.0134, 0.0149, 0.0147, 0.0151, 0.0139, 0.0204, 0.0156, 0.0132, 0.0167, 0.0215, 0.0127, 0.0204, 0.0130, 0.0086, 0.0161, 0.0248, 0.0210, 0.0116, 0.0106, 0.0135, 0.0129, 0.0213, 0.0181, 0.0197, 0.0253, 0.0251, 0.0233, 0.0231, 0.0130, 0.0119, 0.0122, 0.0157, 0.0219, 0.0161, 0.0262, 0.0201, 0.0178, 0.0168, 0.0170, 0.0137, 0.0196, 0.0266, 0.0173, 0.0167)。$$

4 实例分析

本文选取尼米兹级航母、库兹涅佐夫号航母和增加了激光武器、微波武器等反无人机装备的改进版尼米兹航母进行研究。实例一为尼米兹航母装备,实例二为库兹涅佐夫航母装备,实例三为改进后的尼米兹航母装备。通过实例一和实例二对比,验证评估模型的有

效性;通过实例一和实例三比,验证增加反无人机装备后的作战效能提高效果。通过不同实例的对比,分析装备各种武器的作战效果,为我军未来航母建设提供借鉴。

将实例一~实例三的数据搜集后,按照舰船反无人机群作战效能评估体系中各具体指标整理,然后将数据规范化处理,依据公式为:

$$Z_{ij} = \begin{cases} (1/y_{ij}) / \left[\sum_{i=1}^m (1/y_{ij})^2 \right]^{1/2}, & y_{ij} \in \text{成本型} \\ y_{ij} / \left(\sum_{i=1}^m y_{ij}^2 \right)^{1/2}, & y_{ij} \in \text{效益型} \end{cases}。$$

最后将舰船反无人机群作战效能评估体系中各指标权重与各实例中规范化处理后的数据相乘,得到不同实例中反无人机群作战效能的评估值,如表 1 所示。

表 1 实例评估值

实例一	实例二	实例三
0.2576	0.2469	0.4294

通过实例一与实例二的对比可知,尼米兹航母的作战效能高于库兹涅佐夫航母,并没有很大差距。通过实例一与实例三对比可知,增加了针对无人机的武器装备后的航母作战效能有了明显提高。在航母建设可以增加激光武器、高功率微波武器、导航干扰装置等专门针对无人机群的装备,应对日益发展的无人机群威胁。

参考文献

- [1] 姜宁,徐先云.防空作战威胁环境及伪装技术[J].航天电子对抗,2005,21(2):61-62.
- [2] 雷中原,梁义芝,王哲.基于模糊综合评判的舰艇电子战系统作战效能评估[J].电子信息对抗技术,2006,21(4):42-44.
- [3] 姜艳萍,樊治平.三角模糊数互补判断矩阵排序的一种实用方法[J].系统工程,2002,20(2):89-92.
- [4] 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.
- [5] 郭柳,顾雪峰,刘旺锁.舰载主炮武器系统在航阶段技术状态效能评估[J].兵器装备工程学报,2018,39(5):70-74.

收稿日期:2022-06-07

作者简介:金子迪(1996—),女,满族,北京人,硕士研究生,助理工程师,主要从事招标采购工作。

苏斌(1996—),男,汉族,山西吕梁人,硕士研究生,助理工程师,主要从事招标采购工作。