

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.015

# 反无人机作战侦察情报系统作战效能评估

王远航, 杨作宾, 杨军佳

(陆军炮兵防空兵学院郑州校区, 郑州 450052)

**摘要:** 针对反无人机作战侦察情报系统的作战效能评估问题, 构建一种作战效能评估模型。对侦察情报系统作战使命、主要功能进行分析, 构建效能评估指标体系并进行优化; 利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊综合评估法对其作战效能进行评估, 并给出评估结果。结果表明: 该方法逻辑清晰、可操作性强、计算结果简单明确, 便于决策者接受和理解。

**关键词:** 作战效能; 侦察情报; 指标体系

**中图分类号:** TJ99 **文献标志码:** A

## Operational Effectiveness Evaluation of Anti-UAV Operational Reconnaissance Intelligence System

Wang Yuanhang, Yang Zuobin, Yang Junjia

(Zhengzhou Campus, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of operational effectiveness evaluation of anti-UAV reconnaissance intelligence system, an operational effectiveness evaluation model is constructed. The operational mission and main functions of the reconnaissance and intelligence system are analyzed, and the effectiveness evaluation index system is constructed and optimized. The analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method are used to evaluate the operational effectiveness of the reconnaissance and intelligence system, and the evaluation results are given. The results show that the method has clear logic, strong operability, and simple and clear calculation results, which is easy for decision makers to accept and understand.

**Keywords:** operational effectiveness; reconnaissance intelligence; index system

### 0 引言

近年来, 随着无人机技术的发展, 尤其是小型无人机技术的发展, 无人机在军民领域都得到了广泛应用。小型无人机具有隐身性能好、操作使用简单、突防能力强、获取渠道丰富、使用样式灵活多变等特点, 使其能够很好地执行袭扰、侦察、打击和评估等任务, 促进无人机在军事上的运用越来越广泛<sup>[1]</sup>。2018年初, 俄罗斯驻叙利亚赫迈米姆空军基地和塔尔图斯海军基地遭受一定规模的无人机蜂群的袭击, 俄罗斯利用“铠甲-S”防空系统和电子对抗力量, 成功击落和诱骗了部分无人机, 使得赫迈米姆空军基地和塔尔图斯海军基地免受损失<sup>[2]</sup>; 2020年9月的纳卡冲突, 阿塞拜疆仅凭无人机在战场的出色运用, 就取得了令世界惊叹的战果, 引起了世界各国对无人机作战运用的广泛关注<sup>[3]</sup>。

无人机在战场的出色表现, 促使世界各主要军事强国思考如何应对无人机带来的军事威胁, 尤其是小/微型无人机, 纷纷着手研究反无人机作战。小

/微型无人机的侦察探测是反无人机作战的起点和源头, 也一直是制约各国反无人机作战的关键因素。受小/微型无人机技术特点的影响, 对其侦察探测需要复合运用多种探测手段, 组网运用才能实现反无人机作战的侦察情报功能。对其侦察情报系统进行作战效能评估, 可以帮助研究人员更好地了解系统的战技特点、作战使用过程中能力发挥的程度和需要改进的问题, 为指挥员指导部队运用装备、研创训法战法提供辅助决策依据, 具有重要的现实意义。笔者以某反无人机作战侦察情报系统为研究对象, 首先根据探测手段的特点建立相应的评估指标体系, 然后利用层次分析法(AHP)和模糊综合评判法对其作战效能进行评估, 得到评估结果。

### 1 作战效能评估指标体系

指标体系是效能评估方法和评估对象之间的纽带<sup>[4]</sup>, 一套准确清晰、科学合理的指标体系对于作战效能的评估具有重要意义<sup>[5]</sup>。作战效能评估的指

收稿日期: 2022-07-13; 修回日期: 2022-08-19

作者简介: 王远航(1990—), 男, 河南人, 从事作战效能评估、电子防空、反无人机作战研究。E-mail: 969747628@qq.com。

标体系必须建立在武器装备特定的作战任务和作战背景基础上,按照系统性、层次化、可量化的原则来进行构建,通过对装备的战技性能进行梳理归类,建立与之相应的评估指标集;遴选出对作战效能影响程度较大的指标,构建效能评估的指标体系。

### 1.1 侦察情报系统概况

如图 1 所示,反无人机作战侦察情报系统主要由雷达探测、无线电侦测、光电探测等能力分系统组成。无线电侦测是一种被动探测方式,通过对无人机遥控遥测信号的侦察,实现对目标的发现和测向,这种探测方式具有隐蔽性好、不易暴露的优点,但当小/微型无人机处于无线电静默状态时,则无法正常工作。无线电侦测主要可以实现测频、测向,编组使用时具备对飞控人员溯源定位的能力。雷达探测方式能够全天候工作,探测的精度高、稳定性好,但对于低径向飞行速度等特殊情况,存在探测概率较低的问题,主要可以实现对小微型无人机的定位、测速、测距和多目标跟踪等功能。光电探测主要利用可见光和近红外波段的电磁波,可见光探测的原理和人肉眼对物体的识别过程类似,利用空中的小/微型无人机反射的可见光,对目标进行成像、识别和定位;近红外波段探测主要利用小/微型无人机的电动机在工作过程中产生红外热辐射,从而实现对其跟踪定位等功能。

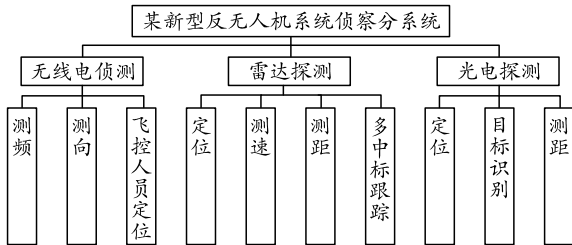


图 1 反无人机作战侦察情报系统功能组成

### 1.2 评估指标构建

根据系统的作战任务,结合侦察情报系统所能实现的主要功能,在分析侦察情报系统能力指标的基础上,对其能力指标进行分解,找出支撑其功能实现的性能指标,然后对性能指标的重要性程度进行分析,筛选出对能力实现贡献较大的关键指标,以此来构建效能评估的指标体系<sup>[6]</sup>。

#### 1.2.1 无线电侦测能力指标

无线电侦测能力的实现主要是通过对无线电信号进行接收,然后对信号的特征进行分析,以此来判断该信号是否是无人机的下行信号。通过对侦察

结果的实时统计,可以得到遥控链路信号的频率、幅度、方位以及时间信息,进而对目标信号进行快速参数测量和分析,为下一步实施定位和干扰打下基础。由此可得,决定无线电侦测能力大小的主要指标有侦测频率的范围、测向精度、测频精度和反应时间等。

#### 1.2.2 雷达探测能力指标

雷达探测是当前对空中目标探测的最主要手段之一,基本工作原理为主动向空中发射电磁波,通过接收经空中目标反射的电磁波来实现对其定位、测速、测距等功能,支撑雷达实现对空探测能力的技术指标主要有探测距离、探测概率、方位测量精度、俯仰测量精度、同时跟踪目标数和可探测目标的速度范围等。

#### 1.2.3 光电探测能力指标

光电探测主要由红外热像仪、激光测距仪和电视组成,可以实现对目标的光电探测成像,经过计算得到目标的位置信息。影响光电探测能力的主要技术指标有跟踪角速度的范围、跟踪精度、激光测距的精度和系统的反应时间等。

由此,可得到反无人机作战侦察情报分系统效能评估的指标体系。主要由 3 个一级指标和 14 个二级指标组成,如图 2 所示。

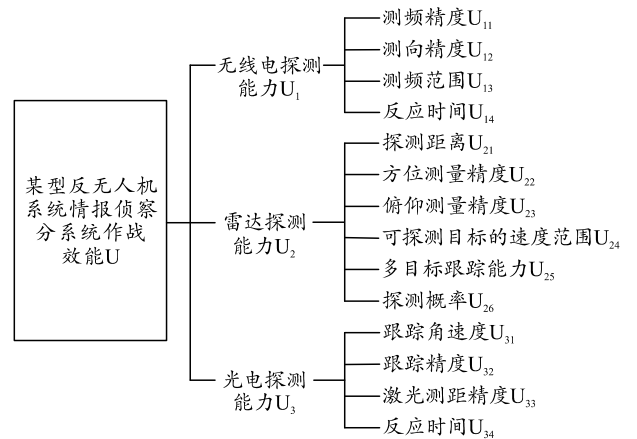


图 2 反无人机作战侦察情报分系统效能评估指标体系

## 2 评估模型建立

### 2.1 基于 AHP 的指标权重计算

笔者采用 AHP 来确定指标的权重,区分 2 个层次对指标权重进行计算,分别是层次单排序和层次总排序。层次单排序是指某一指标相对于其上一层指标的重要程度,主要衡量的是某一指标下并列的不同子指标之间重要性差别;层次总排序是指最底

层的指标相对于总目标的重要性程度，用来衡量所有底层指标之间的相对重要性<sup>[7]</sup>。

### 2.1.1 构造判断矩阵

对于某一指标下的  $n$  个子指标，构建  $A_{ij}(n \times n)$  的矩阵， $a_{ij}$  体现指标  $i$  相对于指标  $j$  的重要程度。为了更直观地表示指标间的重要程度关系，引入 9 级标度法，即用数字 1~9 表示指标相互之间重要性区别，具体含义如表 1 所示。

表 1 判断矩阵的重要性标度值及其含义

序号	指标 $i$ 和 $j$ 之间相互关系含义	$C_{ij}$ 数值
1	指标 $i$ 和 $j$ 同等重要	1
2	指标 $i$ 比指标 $j$ 稍微重要	3
3	指标 $i$ 比指标 $j$ 明显重要	5
4	指标 $i$ 比指标 $j$ 十分重要	7
5	指标 $i$ 比指标 $j$ 极其重要	9
6	指标 $i$ 比指标 $j$ 稍微不重要	1/3
7	指标 $i$ 比指标 $j$ 明显不重要	1/5
8	指标 $i$ 比指标 $j$ 十分不重要	1/7
9	指标 $i$ 比指标 $j$ 极其不重要	1/9

当  $C_{ij}$  的取值为 2、4、6、8 或 1/2、1/4、1/6、1/8 时表示指标  $i$  相对于指标  $j$  的重要性介于 1、3、5、7、9 或 1、1/3、1/5、1/7、1/9 之间，指标相互之间的重要性关系均由专家根据其经验进行直观的判断和打分。

假设某一由  $n$  个指标构成的指标体系，采用 AHP 进行权重计算时，专家根据自己的经验和专业知识，对  $n$  个指标相互之间的重要性进行两两比较，可得该指标体系的判断矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.1.2 指标权重求解

利用 AHP 来求解指标权重的计算问题，可将其归结为求判断矩阵的特征向量和最大特征根问题，笔者利用方根法来求解判断矩阵的近似特征向量和最大特征根<sup>[8]</sup>。

Step1: 将判断矩阵按行求积：

$$M_i = \prod_{j=1}^n A_{ij}, i=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Step2: 求解  $M_i$  的  $n$  次方根：

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}, i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

向量  $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]$  即为判断矩阵的近似特征向量。

Step3: 对  $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]$  进行归一化处理：

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^n \bar{W}_j, i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

向量  $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$  就是所求的特征向量，其中  $W_i$  为第  $i$  个指标在其上级指标中所占的比重。

### 2.1.3 一致性检验

由于对这种多指标的体系进行两两比较打分的过程中，专家仅凭个人经验和专业知识，很难做到每个判断都能保持一致性，指标集越大，这种不一致性出现的可能性越大；因此，需要对判断矩阵的一致进行检验，避免出现  $i$  比  $j$  重要， $j$  比  $k$  重要，而  $k$  又比  $i$  重要的违反常识的逻辑错误。

根据矩阵的理论知道，可用最大特征根来判断矩阵偏离完成一致性的程度，检验算法为：

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1). \quad (5)$$

判断矩阵的最大特征根求法为：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (AW)_i / nW_i. \quad (6)$$

式中  $(AW)_i$  为  $AW$  中的第  $i$  个元素。

当矩阵的维数偏大时，需要对其一致性指标进行修正，引入  $RI$  修正因子， $RI$  的取值如表 2 所示。

表 2 RI 取值表

维数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

判断矩阵的一致性指标  $CR$  与  $RI$  的关系计为：

$$CR = CI / RI. \quad (7)$$

当  $CR < 0.1$  时，认为此时判断矩阵具有较为满意的一致性。

## 2.2 基于模糊综合评估法的作战效能评估模型

评价武器装备的某一能力指标在作战中效能发挥程度往往没有绝对的标准，需要军事专家根据其作战和训练经验，并结合武器装备所处的体系来进行综合权衡。同一能力指标在不同作战场景下的效能发挥程度也各不相同，所以对具体的能力指标不能简单的以好与坏来进行区分，它是模糊的，具有不确定性。比如反无人机作战侦察情报系统各能力指标，无法用绝对的数值来断定其是好是坏，只能用其隶属于某一个评价的概率来描述；因此，可以用模糊综合评估法对这类问题进行评价。

1) 确定评价因素集。

影响反无人机作战侦察情报系统作战效能的因

素主要是上面提到的 14 个能力指标,因此构建因素集为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_{14}\} \tag{8}$$

2) 确定评价集。

评价集包含的元素既不能太多,也不能太单一,元素太多会导致专家在评价的过程中产生困扰,元素太少则无法有效地区分评价对象。因此,笔者采用 5 级评价体制,构建评价集为:

$$V = \{\text{优,良,中,差,极差}\} \tag{9}$$

3) 根据系统的实际使用者和专家对指标  $k$  的评价,得到单个指标  $k$  的模糊评价矩阵  $D_k$ 。

$$D_k = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{15} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{n5} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,  $d_{ij}$  为第  $i$  个使用者或专家对该指标关于评价集中第  $j$  个评价等级的隶属度。

$$\sum_{j=1}^5 d_{ij} = 1 \tag{11}$$

令

$$r_{kj} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_{ij}, j=1, 2, \dots, 5 \tag{12}$$

第  $k$  个指标关于评价集  $V$  的隶属度矩阵为  $R_k$ 。

$$R_k = [r_{k1} \ r_{k2} \ \dots \ r_{k5}] \tag{13}$$

模糊评价矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{k5} \end{bmatrix} \tag{14}$$

4) 计算评价结果向量  $E$ 。

$$E = W \cdot R \tag{15}$$

### 3 实例分析

1) 层次单排序。

对于侦察情报系统的 3 个一级指标,根据专家咨询,可以写出其判断矩阵,记为  $B_0$ :

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

对于侦察情报系统的 3 个一级指标下属的二级指标,根据专家咨询,可以写出相应的判断矩阵,分别记作  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ ,如下所示:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 3 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 3 & 1/2 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 1/5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 1/7 \\ 1/7 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 1/5 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 2 & 5 & 7 & 5 & 7 & 1 \end{bmatrix}。$$

对判断矩阵  $B_0$  计算得:

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0.258 \\ 0.637 \\ 0.105 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 3.039, CI = 0.019,$$

$$RI = 0.58, CR = 0.033。$$

对判断矩阵  $B_1$  计算得:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.519 \\ 0.263 \\ 0.121 \\ 0.097 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4.233, CI = 0.074,$$

$$RI = 0.90, CR = 0.082。$$

对判断矩阵  $B_2$  计算得:

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.273 \\ 0.128 \\ 0.081 \\ 0.057 \\ 0.043 \\ 0.418 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 6.61, CI = 0.122,$$

$$RI = 1.24, CR = 0.098。$$

对判断矩阵  $B_3$  计算得:

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0.257 \\ 0.146 \\ 0.067 \\ 0.530 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4.162, CI = 0.054,$$

$$RI = 0.9, CR = 0.06。$$

2) 层次总排序。

各底层指标  $i$  相对于总目标的权重  $w_i$  为:

$$w_{\text{总}ij} = w_i \times w_{ij}, i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, m。$$

式中:  $w_i$  为一级指标中第  $i$  个指标的单排序权重;  $w_{ij}$  为第  $i$  个一级指标下的第  $j$  个二级指标的单排序权重。计算底层指标对于总目标的权重向量  $W$  为:

$$W = [0.134 \quad 0.068 \quad 0.031 \quad 0.025 \quad 0.174 \quad 0.082 \quad 0.052 \quad 0.036 \quad 0.027 \quad 0.266 \quad 0.027 \quad 0.015 \quad 0.007 \quad 0.056]。$$

3) 模糊评价矩阵构建。

对于指标测频精度  $U_{11}$ ，根据 6 个使用者和专家的打分情况可得其模糊评价矩阵  $D_{11}$ ：

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}。$$

指标  $U_{11}$  关于评价集的隶属度向量  $R_{11}$  为：

$$R_{11} = [0.183 \quad 0.433 \quad 0.217 \quad 0.117 \quad 0.050]。$$

同理，可计算其余指标关于评价集的隶属度向量，进而求得模糊评价矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 0.183 & 0.433 & 0.217 & 0.117 & 0.050 \\ 0.236 & 0.281 & 0.384 & 0.060 & 0.039 \\ 0.132 & 0.352 & 0.352 & 0.132 & 0.032 \\ 0.117 & 0.217 & 0.421 & 0.132 & 0.113 \\ 0.167 & 0.342 & 0.183 & 0.217 & 0.091 \\ 0.352 & 0.433 & 0.117 & 0.098 & 0.000 \\ 0.217 & 0.433 & 0.217 & 0.133 & 0.000 \\ 0.117 & 0.217 & 0.183 & 0.433 & 0.050 \\ 0.433 & 0.312 & 0.217 & 0.038 & 0.000 \\ 0.217 & 0.321 & 0.352 & 0.050 & 0.050 \\ 0.256 & 0.433 & 0.126 & 0.106 & 0.079 \\ 0.351 & 0.238 & 0.316 & 0.095 & 0.000 \\ 0.237 & 0.281 & 0.196 & 0.206 & 0.080 \\ 0.033 & 0.317 & 0.217 & 0.117 & 0.316 \end{bmatrix}。$$

4) 作战效能评估计算。

由  $E = W \cdot R$  可求得：

$$E = [0.206 \quad 0.349 \quad 0.257 \quad 0.126 \quad 0.063]。$$

则系统的作战效能评价在评价集  $V$  上分布情况如表 3 所示。

表 3 作战效能评估结果

优	良	中	差	极差
0.206	0.349	0.257	0.126	0.063

从评估结果中可以看出，反无人机作战侦察情报系统的作战效能处于优、良的隶属度为 0.555，根据最大隶属度原则，可以对其作战效能整体评价为良。

#### 4 结束语

反无人机作战侦察情报系统的作战效能评估是一项复杂而细致的工作。笔者采用 AHP 和模糊综合评估法，将定性分析和定量分析结合起来，具有逻辑清晰、可操作性强的特点，计算结果也简单明确，容易被决策者接受和理解。

#### 参考文献：

- [1] 罗海龙, 武剑, 许乾坤. 无人机蜂群作战运用探析[J]. 军民两用技术与产品, 2020(7): 20-23.
- [2] 陈银娣. 当前世界主要反无人机方案及技术发展综述 [EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/255185284\\_6357922018](https://www.sohu.com/a/255185284_6357922018), 2018-09-21.
- [3] 郝雅楠, 孔超, 关晓红. 国外无人机作战运用与发展态势分析—关于纳卡冲突事件的思考[J]. 国防科技工业, 2021(2): 50-53.
- [4] 吴溪, 王铁虎, 高振辉. 武器装备作战试验评估指标体系构建及优化方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(3): 75-80.
- [5] 贾哲, 王锐华, 马贤明. 数据链装备作战试验评估指标体系[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(1): 21-27.
- [6] 刘仁争, 田康生, 李宏权, 等. 预警雷达情报质量评估指标体系构建问题研究[J]. 空军工程大学学报, 2019, 19(4): 49-52.
- [7] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [8] 张杰, 唐宏, 苏凯, 等. 效能评估方法研究 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.