

基于主成分-层次分析的红外抗干扰评估方法研究

吴 鑫, 伍友利, 牛得清, 刘同鑫, 蔡宇轩, 许 瑞

(空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 为了提高红外抗干扰评估的客观性以及准确性, 针对层次分析法评估红外抗干扰能力过程中构建判别矩阵主观因素过强的问题, 提出了一种基于主成分-层次分析 (analytic hierarchy process, AHP) 的红外抗干扰评估方法。首先利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 法求解指标之间的相关系数矩阵, 提出平均影响度这一指标; 然后通过平均影响度大小, 根据既定的调整规则调整判别矩阵; 最后利用红外抗干扰仿真数据, 结合调整后的判别矩阵进行层次分析, 建立主成分-层次分析红外抗干扰评估模型。仿真结果表明: 该模型可以较好地评价相应干扰环境下红外对抗的评估结果, 使得对抗结果与评估打分呈负相关且打分结果以均线 $E=1.0$ 为界, 导弹命中则评估结果均在均线以上, 可以较为直观地观察在该对抗条件下的红外抗干扰评估结果。

关键词: 主成分分析; 层次分析; 指标体系; 红外抗干扰评估

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210060

Research on infrared anti-jamming evaluation method based on principal component-analytic hierarchy process

Wu Xin, Wu Youli, Niu Deqing, Liu Tongxin, Cai Yuxuan, Xu Rui

(College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to improve the objectivity and accuracy of infrared anti-jamming evaluation, aiming at the problem that the subjective factors of discriminant matrix are too strong in the process of evaluating infrared anti-jamming ability by analytic hierarchy process (AHP), an infrared anti-jamming evaluation method based on principal component-analytic hierarchy process was proposed. Firstly, the correlation coefficient matrix between indexes was solved by principal component analysis (PCA), and the index of average influence degree was put forward. Then, through this index value, the discriminant matrix was adjusted according to the established adjustment rules. Finally, using the infrared anti-jamming simulation data, combined with the adjusted discriminant matrix for AHP, the principal component-analytic hierarchy process infrared anti-jamming evaluation model was established. The simulation results show that the model can better evaluate the evaluation results of infrared countermeasure in the corresponding jamming environment, there is a negative correlation between the confrontation result and the evaluation score. The score is bounded by the $E=1.0$, and the evaluation results of missile hit are all above the average. The evaluation result of infrared anti-jamming under this countermeasure condition can be observed intuitively.

Key words: principal component analysis; analytic hierarchy process; index system; infrared anti-jamming evaluation

收稿日期: 2021-01-15; 修订日期: 2021-05-14

作者简介: 吴鑫, 男, 硕士生, 主要从事红外对抗方面的研究。

导师简介: 伍友利, 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事导弹制导与控制方面的研究。

0 引言

红外空空导弹凭借其机动灵活、制导精确、高效费比等优势,在近几次的局部战争中发挥了重要作用,各军事大国发现其在战争中的应用价值,竞相发展新型空空导弹^[1]。矛的尖利,必将引起盾的坚固。随着红外制导武器大量列装,红外干扰技术手段也在不断加强,目前国内外的主流干扰手段是红外诱饵弹与红外干扰机,其中红外干扰机是针对红外点源制导导弹,但由于红外成像制导导弹的性能比红外点源制导导弹更佳,因此红外诱饵弹应用普遍且装备量很大^[2]。红外导弹抗干扰能力试验设计与评估成为了近几十年来的一个重要课题^[3]。

20 世纪 90 年代初,红外抗干扰评估开始备受关注。由美国空军信息战中心 (AFIWC) 设计的高级红外干扰评估模型 (AIRSAM) 于 1992 年交付至美国国家航空情报中心 (NAIC),用以评估红外弹的抗干扰性能以及载机的干扰预测^[4]。20 世纪 90 年代末,韩国中央大学学者 Surng-Gabb Jahng 及其团队针对玫瑰扫描红外导引头、双色同心圆环掩模导引头等提出几种消除红外诱饵干扰信号的识别算法用以提高导引头的识别能力以及抗干扰能力^[5-7]。我国的红外抗干扰评估起步较晚,目前针对导引系统的抗干扰的评估准则主要包括:信息准则、概率准则、功率准则以及战术技术应用准则^[8];主流的抗干扰评估方法包括:概率统计法、加权平均法、贝叶斯方法、层次分析法等^[9],其中由美国运筹学家 T S Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的层次分析 (AHP) 法可以将具体问题分解为目标、准则、措施等层次,将人的思维过程层次化、数量化,为复杂的决策问题提供定量依据^[10],因此 AHP 在武器系统效能评估、红外抗干扰评估上得到充分应用。但 AHP 在使用过程中有一个明显弊端,其判别矩阵的确定主要还是依靠专家打分或者先验知识,主观性过强。

文中从红外导引头固有属性、抗干扰性能以及导弹战技性能指标三个方面构建红外空空导弹综合抗干扰性能指标体系。构建主成分-层次分析评估模型 (PC-HP Model),利用主成分分析 (PCA) 法中的相关系数矩阵对层次分析法的判别矩阵进行修正,解决评估过程中判别矩阵的一致性问题;最后利用红外抗干

扰仿真数据,通过 PC-HP 模型对所构建的红外抗干扰指标体系进行评估。仿真结果表明:评估打分以 $E=1.0$ 为均线,脱靶量小于 10 m 即认为导弹命中的评估结果均在均线以上,可以较为直观地看出每一次红外抗干扰结果的好坏,既保留了主成分分析法对原始数据的可解释性,又降低了层次分析法中主观性对评估的影响。

1 红外抗干扰指标体系构建

通过分析红外导引头各部分抗干扰工作原理以及红外弹抗干扰过程,导引头固有属性、抗干扰性能指标以及导弹战技性能指标是影响红外空空导弹综合抗干扰特性的三个方面。结合这三个部分的具体内容构建红外抗干扰综合指标体系。

1.1 导引头固有属性

红外成像导引头主要由光学成像系统和随动系统组成,这两个系统性能参数的好坏会直接影响导引头的抗干扰性能。

光学成像系统^[11]接收来自目标的红外辐射,形成数字灰度图像并对该图像进行处理,转换为电信号传递至随动系统。它的主要性能参数包括光通透率 (Light Transmittance, LT)、焦距 (Focal Length, FL)、视场角 (Field of View, FOV)、扫描帧速 (Scanning Frame Rate, SFR)、探测率 (Detection Rate, DR)、图像处理周期 (Image Processing Cycle, IPC)。

随动系统^[11]接收光学成像系统处理过后的电信号,完成控制与跟踪信息和信号处理,驱动导引头光轴向弹目视线与光轴之间误差减小的方向运动,使其对准目标,实现实时跟踪。其主要性能参数包括最大跟踪角速度 (Maximum Tracking Angular Velocity, MTAV)、框架角精度 (Frame Angle Accuracy, FAA) 和静态跟踪误差 (Static Tracking Error, STE)。

1.2 抗干扰性能指标

红外成像导引头的抗干扰性能受自身固有属性以及干扰环境的影响很大,即便是同一导引头在不同干扰环境下其干扰性能也将会不同;即便是同一干扰环境下,用不同的评估指标设计出的导引头其性能也会有天壤之别。通过分析,红外导引头的抗干扰性能主要体现在干扰条件下的识别能力和稳定跟踪能力两方面。

(1) 抗干扰识别能力

抗干扰识别能力是指红外成像导引头运用相应的目标识别算法,在打击目标的过程中,红外成像导引头从其所采集到的每一帧图像中识别出正确目标的能力^[12]。其性能指标包括检测概率 (Detection Probability, DP)、虚警概率 (False Alarm Probability, FAP)、单帧识别时间 (Single Frame Recognition Time, SFRT)、识别算法成功率 (Success Rate of Recognition Algorithm, SRRA)。

检测概率 (P_d) 是识别算法在干扰环境下可以正确检测出目标的概率,定义为:

$$P_d = N_1 / N \quad (1)$$

式中: N_1 为干扰环境下检测到目标的次数; N 为导引头检测总次数。

虚警概率 (P_x) 是导引头在识别过程中识别错误的概率,可表示为:

$$P_x = N_2 / N \quad (2)$$

式中: N_2 为红外导引头在识别过程中将非目标识别为目标的次数。

单帧识别时间是指导引系统从每一帧图像中提取出目标信息所需要的时间。单帧识别时间越短,留给制导系统的时间越多,导弹的抗干扰性能越好。

识别算法成功率是指在复杂干扰环境下,导引头的识别算法能正常运行并将目标成功识别的概率。

(2) 稳定跟踪能力^[13]

稳定跟踪能力涵盖了抗干扰跟踪能力和持续抗

干扰能力,抗干扰跟踪能力可以用导引头跟踪目标时预测的水平视线角速度与真实水平视线角速度的误差,即目标水平视线角误差 (Target Horizontal Line of Sight angle error, THLS) 来体现,将其定义为:

$$\eta = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\dot{q}_{HP} - \dot{q}_{HR}|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\dot{q}_{HR}|} \quad (3)$$

式中: η 为目标水平视线角误差; \dot{q}_{HP} 为跟踪目标时预测的水平视线角速度; \dot{q}_{HR} 为真实水平视线角速度。

持续抗干扰能力可用导引头能经受的抗干扰时间占整个弹道时间的比值,即干扰占空比 (Duty Ratio of Interference, DRI) 来表示,定义为:

$$\psi = t_{\text{under}} / t_{\text{tot}} \quad (4)$$

式中: ψ 为干扰占空比; t_{under} 为导引头能经受的抗干扰时间; t_{tot} 为弹道总时间。当 ψ 为 1 或接近于 1 时定义为全程抗干扰。

1.3 导弹战技性能指标

由参考文献 [14] 可知,弹目距离 (Distance Range, DR)、杀伤能力 (Kill Capacity, KC) 是影响导弹抗干扰效果的战技性能指标。除此之外,导引头抗干扰性能评估还涉及攻击区的划分,根据导弹的进入角划分为尾后攻击区、侧向攻击区、前向攻击区以及禁止攻击区,所以将进入角 (Entry Angle, EA) 也作为导弹战技性能指标之一^[15-17]。

综上所述,建立如图 1 所示的红外抗干扰综合评

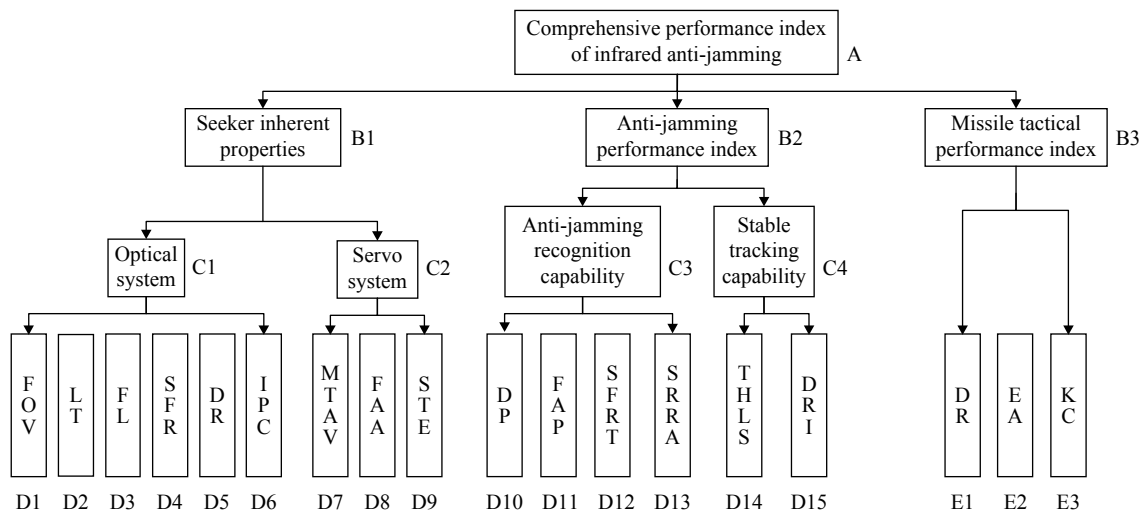


图 1 红外抗干扰综合评估指标体系

Fig.1 Infrared anti-interference comprehensive evaluation index system

估指标体系。

$$A = (a_{fg})_{n \times n} \quad (5)$$

2 主成分-层次分析模型构建

2.1 划分结构层次

首先将指标体系中的各因素划分为不同层次, 递归的结构层次一般由三个或三个以上层次组成, 红外抗干扰综合性能指标是本问题的预定目标 (目标层) 为 A 类; B 类与 C 类指标都是影响目标实现的准则 (准则层); D 类与 E 类指标为促使目标实现的措施 (措施层)。结构层次划分如图 1 所示。

2.2 主成分分析法修正判别矩阵

划分结构层次后, 需要对各层元素进行两两比较来构造出判别矩阵。传统判别矩阵的构建主要是基于德尔菲法, 但该方法的评价结果在很大程度上取决于评价者的主观因素, 主观性过强。故在德尔菲法的基础上引入主成分分析方法, 利用试验数据求解指标之间的相关系数并对其进行排序, 根据相关系数的大小来反映指标之间的相关程度, 从而对判别矩阵进行修正, 图 2 为 PCA 修正判别矩阵流程。

式中: a_{fg} 表示指标 f 与指标 g 相对于上一层级指标重要性的标度量化值, 其量化标度如表 1 所示。

表 1 量化标度

Tab.1 Quantitative scale

Comparison f and g	a_{fg}	a_{gf}
f is as important as g	1	1
f is slightly more important than g	3	1/3
f is more important than g	5	1/5
f is obviously more important than g	7	1/7
f is absolutely more important than g	9	1/9
Adjacent judgment median	2,4,6,8	1/2,1/4,1/6,1/8

将构建好的判别矩阵利用主成分分析法^[18]进行修正, 具体操作步骤如下:

(1) 构建原始数据矩阵 X 。假设有 m 条试验数据, 每条数据都有 n 个指标, 形成 $m \times n$ 的原始数据矩阵 X , 可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$ 为指标数; $j = 1, 2, \dots, m$ 为试验数据。

(2) 对原始数据标准化。由于构建的抗干扰评估指标具有不同的量纲与数量级, 因此需要进行标准化才能进行比较与分析, 故将 X 中的每一列 (代表一个指标字段) 进行零均值化处理, 表达式为:

$$\mu_{ji}^* = x_{ji} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

(3) 求数据零均值化后的相关系数矩阵 R , 可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

r_{uw} 表示指标 u 与指标 w 之间的相关系数 ($u = 1, 2, \dots, n; w = 1, 2, \dots, n$), 其求解公式为:

$$\begin{cases} r_{uw} = \frac{1}{m-1} \sum_j^m [(\mu_{ju}^*/s_u) \cdot (\mu_{jw}^*/s_w)] \\ s_k = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{m=1}^m \mu_{mk}^{*2}} \end{cases} \quad (9)$$

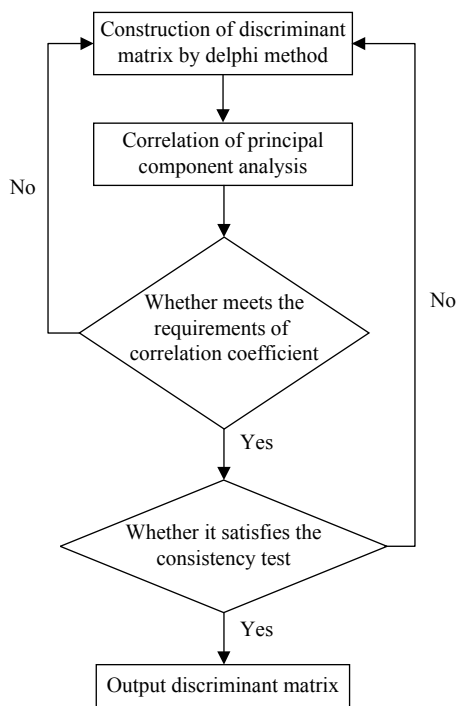


图 2 PCA 修正判别矩阵流程

Fig.2 Process of PCA modified discriminant matrix

德尔菲法构建判别矩阵, 对指标之间的重要程度采用九标度表示法进行量化, 得到两两比较判别矩阵:

(4) 求取平均影响度 R_i ^[19-20]。由相关系数矩阵可以看出, 有 $r_{ii}=1, r_{ij}=r_{ji} (i=1, 2, \dots, n)$, 故令:

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{ji} - 1 \quad (10)$$

R_i 反映了指标 X_i 对其他指标的影响程度。其中 r_{ji} 有可能出现负值, 即这两指标呈负相关, 在求解 R_i 时则取 $|r_{ji}|$, 即 $R_i = \sum_{j=1}^n |r_{ji}| - 1$ 。最后对求解出的 R_i 值进行排序, 利用排序结果对判别矩阵的标度值进行观测, 若标度值不符合排序结果, 则采用如下规则进行修正:

$$\begin{cases} a_{f_1g_1} + 1, a_{f_2g_1} - 1 \\ \frac{1}{a_{f_1g_1} - 1}, \frac{1}{a_{f_2g_1} + 1} \end{cases} \quad a_{f_1g_1} < a_{f_2g_1}, R_{f_1} > R_{f_2} \quad (11)$$

若 $a_{31}=2, a_{41}=3$ 而 $R_3 > R_4$, 则 $a_{31} + 1, a_{41} - 1$ 。

2.3 层次分析^[21-23]

2.3.1 计算各层指标权重

计算各层次指标权值可以等价为将主成分分析法修改过后的判别矩阵 A^* , 采用“求和法”来计算其相应的最大特征值与特征向量。

(1) 按列将判别矩阵 $A^* = (a_{fg}^*)_{n \times n}$ 进行归一化处理为:

$$\overline{(a_{fg}^*)}_{n \times n} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{a_{fg}^*}{\sum_{f=1}^n a_{fg}^*} \\ \vdots \\ \frac{a_{fg}^*}{\sum_{f=1}^n a_{fg}^*} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (12)$$

(2) 按行取总和:

$$\bar{\omega}_f = \sum_{g=1}^n \overline{a_{fg}^*} \quad (13)$$

(3) 对行和进行归一化处理, 得到权重系数:

$$\omega_f = \frac{\bar{\omega}_f}{\sum_{f=1}^n \bar{\omega}_f} \quad (14)$$

(4) 求最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{g=1}^n \frac{(A^* \omega)_g}{n \omega_g} \quad (15)$$

则 A^* 最大特征值 λ_{\max} 相应的特征向量 W 即为指标的权重向量。

2.3.2 一致性检验

计算一致性比例 CR :

$$CR = CI/RI \quad (16)$$

式中: $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$; RI 值通过查阅平均随机一致性指标表获得, 如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标

Tab.2 Mean random consistency index

Order (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

当 $CR < 0.1$ 时即可认为判别矩阵满足一致性, 否则返回德尔菲法重新建立判别矩阵, 循环进行上述步骤。

2.3.3 计算指标对总目标的合成总权

设第 $k-1$ 层的 n_{k-1} 个指标对红外导引系统的综合抗干扰性能的权重向量 $W^{(k-1)} = (W_1^{(k-1)}, W_2^{(k-1)}, \dots, W_{n_{k-1}}^{(k-1)})^T$, 记第 k 层上的 n_k 个指标对第 $(k-1)$ 层各指标的合成权重向量 $P^{(k)} = (P^{1(k)}, P^{2(k)}, \dots, P^{n_{k-1}(k)})_{n_k \times n_{k-1}}$, 则 k 层指标对红外导引系统综合抗干扰性能的合成权重向量 $W^{(k)}$ 为:

$$W^{(k)} = P^{(k)} W^{(k-1)} \quad (17)$$

递推可得:

$$W^{(k)} = P^{(k)} P^{(k-1)} \dots W^{(2)} \quad (18)$$

2.3.4 抗干扰评估打分

利用红外抗干扰仿真系统获取红外抗干扰数据, 构成仿真数据矩阵 $B = [B_1, B_2, \dots, B_k]$, 其中 $B_i (i=1, 2, \dots, k)$ 为每一条 m 维的抗干扰仿真数据, 采用 Z-Score 法对 B 开展标准化变换得到 B^* , B^* 与合成权重向量 $W^{(k)}$ 相乘, 获得每条抗干扰试验数据的评估结果, 计算公式为:

$$b_{ij}^* = \frac{b_{ij} - \bar{B}_j}{\sqrt{\text{var}(B_j)}} \quad (19)$$

$$E = B^* \cdot W^{(k)} \quad (20)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, m$ ； \bar{B}_j 和 $\text{var}(B_j)$ 分别为抗干扰数据 j 的均值与方差。

3 仿真试验

3.1 主成分分析相关性

利用抗干扰评估仿真系统获取 10 条指标数据构建 10×18 的原始矩阵，指标数据如表 3 所示，其中 D1 为视场角 (°)、D2 为光通透率、D3 为焦距 (cm)、D4 为扫描帧数 (fps)、D5 为探测率 ($10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)、D6 为图像处理周期 (ms)、D7 为最大跟踪角速度

((°/s)、D8 为框架角精度 ((°/s)、D9 为静态跟踪误差 ((°/s)、D10 为检测概率、D11 为虚警概率、D12 为单帧识别时间 (s)、D13 为识别算法成功率、D14 为目标水平视线角误差 (°)、D15 为干扰占空比、E1 为弹目距离 (km)、E2 为进入角 (°)、E3 为杀伤能力。

对原始矩阵标准化后求取指标之间的相关系数矩阵，利用公式 (10) 求出指标的平均影响度，如表 4 所示。由表 4 可知，水平视线角误差 (D14) 对其他指标的影响程度最大，其次为图像处理周期 (D6) 与探测率 (D5)，视场角 (D1) 对其他指标的影响程度最小。通过平均影响度值的大小，根据公式 (11) 的规则修改判别矩阵。

表 3 指标数据

Tab.3 Index data

No.	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	E1	E2	E3
1	10	0.965	27.3	2	4.9	15	14	0.3	0.05	0.774	0.075	0.001	0.92	0.18	1	4	10	0.9
2	7	0.987	27.2	2	5.7	16	13	0.2	0.04	0.595	0.016	0.0035	0.95	0.16	0.97	7	30	0.89
3	9	0.967	26.9	2	3.7	15	14	0.3	0.03	0.676	0.044	0.0022	0.91	0.21	0.82	6	60	0.93
4	8	0.975	26.8	2	4.3	15	15	0.4	0.05	0.88	0.059	0.0008	0.9	0.18	0.55	5	40	0.91
5	11	0.99	27.1	4	2.3	17	15	0.2	0.03	0.231	0.056	0.0028	0.93	0.19	0.73	4	90	0.88
6	6	0.985	27	4	2.8	20	14	0.3	0.04	0.702	0.05	0.0014	0.95	0.31	0.64	3	120	0.94
7	9	0.973	27.3	4	1.5	20	12	0.4	0.05	0.336	0.035	0.0045	0.93	0.84	0.46	8	150	0.87
8	12	0.983	26.9	2	3.3	19	13	0.3	0.03	0.498	0.026	0.0024	0.91	0.17	0.39	6	160	0.92
9	7	0.98	26.7	3	5.4	17	13	0.3	0.04	0.159	0.024	0.0032	0.92	0.2	0.84	5	70	0.93
10	8	0.95	27.2	4	4.7	15	14	0.2	0.05	0.967	0.047	0.0038	0.93	0.22	0.78	7	110	0.9

表 4 指标之间的平均影响度

Tab.4 Average influence degree between indexes

Index	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	E1	E2	E3
R_i	3.248	3.564	4.019	4.350	5.804	5.847	4.809	3.676	3.829	4.558	5.307	4.955	3.909	6.039	5.009	3.914	5.605	3.893

3.2 权重计算

通过德尔菲法构建的判别矩阵经过主成分分析法修正后，求解修正后的判别矩阵的最大特征值以及相对应的特征向量，并进行判别矩阵的一致性检验。

B 类指标对总目标的判别矩阵以及相对权重如表 5 所示。

C 类指标对 B 类指标的判别矩阵及相对权重如表 6 所示。

D 类指标对 C 类指标的判别矩阵及相对权重如

表 7~10 所示。

E 类指标对 B 类指标的判别矩阵及相对权重如表 11 所示。

表 5 A~B 判别矩阵及权重

Tab.5 A-B discriminant matrix and weight

R_A	B1	B2	B3	W_B
B1	1	1/7	2	0.131
B2	7	1	9	0.793
B3	1/2	1/9	1	0.076

表 6 B1、B2~C 判别矩阵及权重

Tab.6 B1, B2-C discriminant matrix and weight

R_{B1}	C1	C2	W_{C1}	R_{B2}	C3	C4	W_{C2}
C1	1	2	0.667	C3	1	5	0.833
C2	1/2	1	0.333	C4	1/5	1	0.167

表 7 D~C1 判别矩阵及权重

Tab.7 D-C1 discriminant matrix and weight

R_{C1}	D1	D2	D3	D4	D5	D6	W_{D1-6}
D1	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/5	0.046
D2	2	1	1/2	1/3	1/4	1/4	0.070
D3	3	2	1	1/2	1/3	1/3	0.112
D4	4	3	2	1	1/2	1/2	0.180
D5	5	4	3	2	1	1	0.296
D6	5	4	3	2	1	1	0.296

表 8 D~C2 判别矩阵及权重

Tab.8 D-C2 discriminant matrix and weight

R_{C2}	D7	D8	D9	W_{D7-9}
D7	1	3	2	0.540
D8	1/3	1	1/2	0.163
D9	1/2	2	1	0.297

表 9 D~C3 判别矩阵及权重

Tab.9 D-C3 discriminant matrix and weight

R_{C3}	D10	D11	D12	D13	W_{D10-13}
D10	1	1/4	1/2	2	0.135
D11	4	1	2	7	0.524
D12	2	1/2	1	4	0.271
D13	1/2	1/7	1/4	1	0.070

表 10 D~C4 判别矩阵及权重

Tab.10 D-C4 discriminant matrix and weight

R_{C4}	D14	D15	W_{D14-15}
D14	1	3	0.75
D15	1/3	1	0.25

对以上判别矩阵进行一致性检验, 检验结果均通过利用公式 (17)、(18) 计算措施层相对目标层的绝对权重 $W=[0.004\ 0.006\ 0.01\ 0.016\ 0.026\ 0.026\ 0.024\ 0.007\ 0.013\ 0.089\ 0.346\ 0.179\ 0.046\ 0.099\ 0.033\ 0.015\ 0.046\ 0.015]$ 。

表 11 E~B3 判别矩阵及权重

Tab.11 E-B3 discriminant matrix and weight

R_{B3}	E1	E2	E3	W_{E1-3}
E1	1	1/3	1	0.2
E2	3	1	3	0.6
E3	1	1/3	1	0.2

3.3 抗干扰评估打分

通过红外抗干扰仿真系统获取 15 组 18 维的抗干扰数据, 用公式 (19) 对抗干扰数据标准化, 用公式 (20) 对每条抗干扰数据进行评估打分, 原始数据以及最后的评估结果如表 12 所示。其中抗干扰数据包括诱饵投掷参数、弹目态势参数及目标机动参数, 仿真对抗结果为脱靶量 $MD(m)$, 且以 $MD < 10\text{ m}$ 视为导弹命中。

诱饵投掷参数包括: 投掷总数 N_s (个)、每次投掷个数 N_e (个)、每组投掷个数 N_f (个)、投掷时机 T_i (s)、投掷组内间隔 T_i (s)、投掷组间间隔 T_e (s)、投掷速度 V_f (m/s)、水平投掷角度 θ_l (°)、垂直投掷角度 θ_v (°); 弹目态势参数包括: 进入角 θ_m (°)、弹目距离 D_r (km); 目标机动参数包括: 平均加速度 aac (m/s²)、平均油门开度 $thro$ (°)、平均马赫数 Ma 、平均俯仰角 $pitch$ (°)、平均偏航角 yaw (°)、平均滚转角 $roll$ (°)。

从表 12 中可以看出, 不同的诱饵投掷策略、弹目态势以及目标机动方式所构成的红外干扰环境对红外系统的抗干扰能力会产生不同的影响。将最后的评估结果进行排序可以看出, 组别 1、4、7、12、13、14 的脱靶量均小于 10 m, 目标完全毁伤或失去作战能力, 相对应的评估结果均大于 1.0, 即在此干扰环境下红外导弹的抗干扰性能较好; 而其余组别的脱靶量均大于 10 m 且评估结果均小于 1.0, 即可认为在此干扰环境下红外导弹的抗干扰性能较差, 导弹脱靶。

将每组红外抗干扰数据的脱靶量与相应评估打分结果绘制如图 3 所示的对比图, 从图 3 中可以更加直观地看出脱靶量小于 10 m, 评估打分结果大于 1.0; 脱靶量大于 10 m, 打分结果小于 1.0。同时还可以看出脱靶量大小与评估打分结果大致呈负相关, 即脱靶量越大, 相应的评估打分越低。

同时将未用主成分分析法修正的判别矩阵进行正常的层次分析计算权重, 用同样的红外抗干扰数据进行评估打分, 结果如图 4 所示。从图 4 中可以看

表 12 红外抗干扰数据及评估结果

Tab.12 Infrared anti-jamming data and evaluation results

Group	N_s	N_e	N_f	T_f/s	T_e/s	$V_f/m \cdot s^{-1}$	$\theta_f/(\circ)$	$\theta_e/(\circ)$	$\theta_{mf}/(\circ)$	D_f/km	$acc/m \cdot s^{-2}$	$throl/(\circ)$	Ma	$pitch/(\circ)$	$yaw/(\circ)$	$roll/(\circ)$	MD	E	Rank
1	12	1	4	0.5	0.1	0.2	10	0	-90	10	4	0	2.001	0.860	1.453	0	2.017	1.804	1
2	24	1	6	0.5	0.4	0.8	10	60	-90	130	6	0	2.001	0.860	1.453	0	13.713	0.710	10
3	36	1	4	0.5	0.1	0.4	20	60	-90	70	8	0	2.001	0.860	1.453	0	187.404	0.641	13
4	12	2	6	2	0.4	0.8	40	150	90	30	5	15.526	0.724	2.236	-55.147	15.557	4.560	1.698	2
5	48	2	4	2.5	0.1	0.6	40	30	-60	90	4	15.526	0.724	2.236	-55.147	15.557	13.546	0.721	9
6	24	2	12	2	0.1	0.8	40	150	90	90	8	15.526	0.724	2.236	-55.147	15.557	450.930	0.361	15
7	12	1	6	0.5	0.1	0.8	30	60	-90	70	8	-24.523	2.044	0.939	1.141	77.102	5.321	1.472	3
8	36	1	4	0.5	0.4	0.8	10	60	-90	10	6	-24.523	2.044	0.939	1.141	77.102	12.705	0.798	8
9	24	1	12	1	0.1	0.2	20	120	-90	130	10	-24.523	2.044	0.939	1.141	77.102	370.244	0.391	14
10	48	2	4	1.5	0.1	0.8	10	0	60	140	7	-37.325	2.677	0.970	14.495	0.909	11.973	0.961	7
11	48	2	12	1.5	0.4	0.6	10	0	60	80	8	-37.325	2.677	0.970	14.495	0.909	169.682	0.659	12
12	12	2	4	1.5	0.1	0.2	20	0	60	20	6	-37.325	2.677	0.970	14.495	0.909	7.475	1.280	5
13	12	3	12	4	0.3	0.6	30	120	90	40	5	14.294	1.711	1.187	-10.307	-0.005	6.508	1.342	4
14	36	3	6	4	0.5	1	30	120	90	160	9	14.294	1.711	1.187	-10.307	-0.005	9.277	1.213	6
15	48	3	6	4	0.5	1	30	120	90	100	8	14.294	1.711	1.187	-10.307	-0.005	14.220	0.697	11

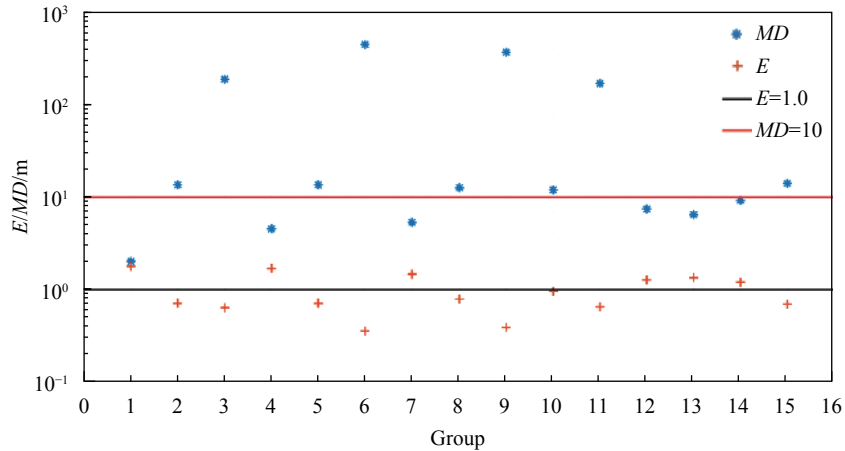


图 3 修正后的脱靶量与评估打分对比

Fig.3 Revised comparison of miss distance and evaluation score

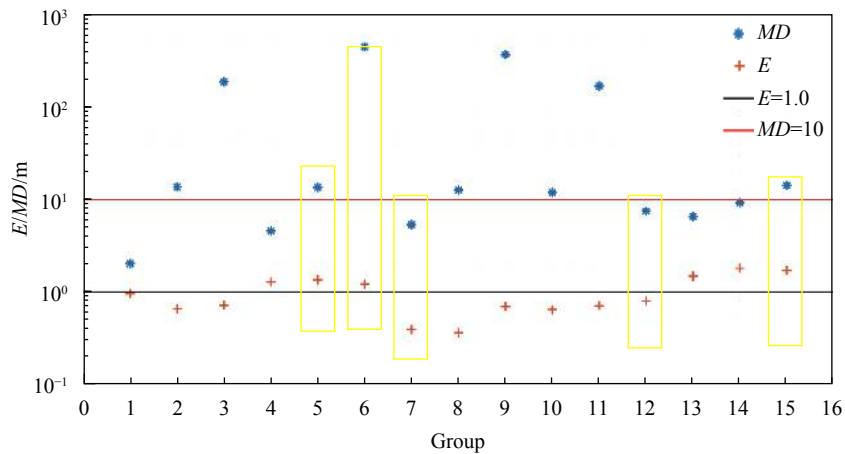


图 4 修正前的脱靶量与评估打分对比

Fig.4 Comparison of miss distance and evaluation score before correction

出,第 5、6、15 组试验,导弹脱靶量大于 10 m,但评分结果均在 $E=1.0$ 以上;而第 7、12 组试验,导弹脱靶量小于 10 m,但评分却低于 $E=1.0$ 。

4 结 论

文中基于主成分分析法构建主成分-层次分析评估模型,通过主成分分析法计算指标之间的平均影响度,根据平均影响度大小调整判别矩阵,降低判别矩阵的主观性,再进行层次分析、评估打分。主要得出以下结论:

(1) 通过主成分分析法求出指标之间的平均影响度,得出水平视线角误差对其他指标的影响程度最大,其次为图像处理周期与探测率,视场角对其他指标的影响程度最小;

(2) 通过对比试验可以直观地看出,由于构建的判别矩阵主观性太强,常规的层次分析法并不能很好地说明试验结果与评估打分之间的对应性;

(3) 由修正后的仿真结果得出该模型可以较好地评估红外抗干扰试验结果,使得抗干扰试验结果与评估结果呈一定相关性,即脱靶量越小评估打分越高,且目标命中(脱靶量小于 10 m)评估结果均在 $E=1.0$ 均线以上。

参考文献:

[1] Li Likun. Present situation and development direction of precision guidance technology [J]. *Aero Weaponry*, 2004(1): 1-4. (in Chinese)
 [2] Gao Wei, Sun Yifan. Test and Evaluation of Electronic

- Interference Effects of Precision Guided Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 119-123. (in Chinese)
- [3] Wang Xiaoming, Wang Mei. ECCM test technology for anti-aircraft missile weapon system [J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, 30(2): 34-38. (in Chinese)
- [4] Forrai D P, Maier J J. Generic models in the advanced IRCM assessment model [C]//Simulation Conference, Proceedings of the Winter, IEEE, 2001: 789-796
- [5] Surng-Gabb Jahng, Hong Hyun-Ki, Han Sung-Hyun. Dynamic simulation of the rosette scanning infrared seeker and an infrared counter-countermeasure using the moment technique [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5): 921-928.
- [6] Hong Hyun-Ki. Adaptive infrared counter-countermeasure for two-color spinning concentric-annular-ring reticle seeker [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(6): 1093-1099.
- [7] Surng-Gabb Jahng, Hong Hyun-Ki, Seo Dongsun, et al. New infrared counter-counter measure technique using an iterative self-organizing data analysis algorithm for the rosette scanning infrared seeker [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(9): 2397-2404.
- [8] Liu Zeyin. System effectiveness evaluation based on DODAF [D]. Harbin: Harbin University of Engineering, 2008. (in Chinese)
- [9] Wang Quan, Dong Weihao, Liu Xin'ai, et al. Analysis of evaluation for new infrared air-to-air missile countermeasures performance [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(3): 16-19. (in Chinese)
- [10] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234-281.
- [11] Yang Yihe, Yue Min, Zhou Weizhen. Infrared System [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 23-70. (in Chinese)
- [12] Zhou Yangheng, Cui Shaohui, Fang Dan. Construction of anti-jamming performance index system of infrared imaging seeker [J]. *Modern Defence Technology*, 2019, 47(3): 175-180. (in Chinese)
- [13] Tang Shanjun, Wang Feng, Chen Xiaodong. Anti-jamming performance index system and evaluation of infrared missile [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017(4): 144-149. (in Chinese)
- [14] Li Shenbo, Li Taorui, Tong Zhongxiang, et al. Influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0704004. (in Chinese)
- [15] Dong Minzhou, Yu Yunfeng, Yan Jie. AHP based on exponential scale for better evaluation of IR seeker's anti-jamming performance during missile research process [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2008, 6(1): 69-73. (in Chinese)
- [16] Xu Yang, Fang Yangwang, Wu Youli, et al. Association rule mining for the infrared countermeasure by the pf-growth algorithm[C]//Proceedings of the 37th China Control Conference, 2018: 8043-8048.
- [17] Han Peijun. Research on the anti-interference performance evaluation criterion and method of infrared guidance system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [18] Liang Shiming. Improvement of Saaty's analytic hierarchy process [J]. *Engineering Mathematics*, 1995(2): 140-141. (in Chinese)
- [19] Sun Min. Analysis of anti-jamming performance evaluation index of infrared guidance system based on analytic hierarchy process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] Li Lingjuan, Dou Kun. Research on the consistency of the judgment matrix in AHP [J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(10): 131-133. (in Chinese)
- [21] Liu Lijia, Hu Jianwang, Sun Huixian. Adjustment method of comparison matrix in analytic hierarchy process [J]. *Journal of Weapons and Equipment Engineering*, 2020, 41(2): 221-224. (in Chinese)
- [22] Zhou Zhihua. Machine Learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 229-232. (in Chinese)
- [23] Qu Dongsheng, Liu Lianwei, Fan Hongjie, et al. Evaluation method of infrared system countermeasures performance based on principal components analysis [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(6): 712-717. (in Chinese)