

FAHP 的主动雷达导引头干扰效能评估

杨远志¹, 王 星¹, 陈 游¹, 范翔宇¹, 韩小妹²

(1. 空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.上海航天局 802 所军代室,上海,200090)

摘要 传统的层次分析法(AHP)通常采用 1~9 标度量化判断矩阵,由于此标度方法存在一致性差、人为主观性强等不足,不便于对雷达导引头干扰效能进行评估。采用指数标度对 AHP 加以改进,并建立了对主动雷达导引头干扰效能进行评估的模糊综合评判模型,根据导引头固有抗干扰能力和工作特性建立适用于导引头的效能评估指标体系,运用模糊评判方法确定隶属函数,采用指数标度 AHP 确定各指标权重。并以噪声干扰为例,验证了该模型的有效性。仿真结果表明,采用指数标度的模糊层次分析法(FAHP)得到的一致性比例为 0,降低了人为主观因素的影响,提高了对雷达导引头干扰效能评估的准确性和可信度。

关键词 雷达导引头;干扰效能;指数标度;层次分析法;模糊综合评判

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.007

中图分类号 TN97;V24 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0031-06

An Evaluation of Jamming Effectiveness on Radar Seeker Based on FAHP with Index Scale

YANG Yuanzhi¹, WANG Xing¹, CHEN You¹, FAN Xiangyu¹, HAN Xiaomei²

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Representative of Space Agency, Office 802 in Shanghai, Shanghai 200090, China)

Abstract: The traditional Analytic Hierarchy Process (AHP) is always adopting 1~9 criterion quantitative ability to judge matrix. By so doing, the criterion is poor in consistency, and strong in man-made subjective. This paper proposes an index scale to improve AHP, and establishes a fuzzy comprehensive evaluation model to evaluate the jamming effectiveness on radar seeker. The paper builds up an evaluation index system suitable to the radar seeker according to the work principle and function features. The membership function is defined with fuzzy comprehensive evaluation, and the weight vector is fixed with AHP of index system. Finally, noise jamming is chosen as an example to verify the effectiveness of the model. The results show that the consistency ratio of fuzzy Analytic Hierarchy Process with index scale is zero, thus reducing the influence of subjective factor and increasing veracity and reliability of effectiveness evaluation.

Key words: radar seeker; jamming effectiveness; index scale; AHP; fuzzy synthetic evaluation

对导弹进行有效的电子干扰是空战中载机应对 主动雷达制导导弹威胁,提高战场生存能力的关键,

收稿日期:2015-06-30

基金项目:陕西省自然科学基金(2012JQ8019)

作者简介:杨远志(1991-),男,四川绵竹人,硕士生,主要从事电子对抗理论与技术研究.E-mail:yyzyangyuanzhi@163.com

引用格式:杨远志,王星,陈游,等.FAHP的主动雷达导引头干扰效能评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):31-36. YANG Yuanzhi, WANG Xing, CHEN You, et al. An Evaluation of Jamming Effectiveness on Radar Seeker Based on FAHP with Index Scale[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 31-36.

如何对主动雷达导引头的干扰效果进行有效评估已成为当前亟待解决的问题。然而,采用实弹打靶的方式进行评估存在费用高、实施难等缺点,因此只有对导引头工作特性进行分析,并选择合适的评估方法对干扰效果做出科学、合理的评价,才能为决策部门提供重要的辅助决策手段和参考意见^[1]。

现有成果对干扰效能进行评估的方法较多,主要有层次分析法^[2-4],灰色关联法^[5-6],模糊层次分析法^[7-9]等,由于影响导引头干扰效果的因素繁多,且各因素间在干扰过程中所起的作用,以及干扰效果本身均具有模糊性,层次分析法和灰色关联法难以对具有模糊性的干扰效果进行评估,而模糊层次分析法可以综合考虑各种因素的影响,处理其他方法无法处理的模糊信息,对导引头干扰效能做出综合判断和决策。但模糊层次分析法采用1~9标度AHP来确定指标权重,存在人为主观性强、一致性差等缺点,指数标度AHP在量化构建判断矩阵时,其一致性比例都等于0,在一定程度上降低了人为主观因素的影响,使得评估结果准确度更高。因此,本文采用指数标度AHP对FAHP进行改进,建立模糊综合评判模型,实现对主动雷达导引头干扰效能的有效评估。

1 指数标度 AHP

在运用模糊层次分析法对导引头干扰效能进行评估时,影响评估结果准确性和可信度的关键在于运用AHP进行指标权重的确定。

传统AHP通常采用1~9标度量化的判断矩阵,这种度量方法不仅会引起判断矩阵一致性与判断思维一致性不等价,使矩阵一致性指标不能真正反映思维一致性程度^[10],而且还会导致实际结果与思维判断不一致,出现与客观排序相反的现象^[11]。

同时,由于人为主观因素的影响,导致评估的结果不够准确、客观。而在雷达导引头的干扰性能评估中,对结果的客观性和准确性要求较高^[12]。

因此,在建立判断矩阵时应当尽可能地排除人为主观因素的影响,满足一致性要求,以便评估的结果能够真实地反映对导引头的干扰性能。基于此,本文提出用指数标度改进的层次分析法来确定因素权重。

指数标度是依据心理学上的韦伯-费希纳定律^[13]建立“等距分级,等比赋值”的一种新的权重标度。指数标度与传统标度的具体划分见文献^[11]。

2 指标体系的建立

对主动雷达导引头的干扰效能是指干扰作用对

雷达导引头产生的破坏、损伤效应,与干扰方和导引头两者均有关系,不论采取什么样的干扰措施,对导引头的干扰效能最终要反映到导引头的技术指标上。因此,本文基于概率准则建立指标体系,即以干扰作用前后导引头与干扰效能相关的关键性能的变化为依据评估干扰效果,建立通用的干扰效能评估指标体系。

要确定主动雷达导引头的关键技术指标,就必须对导引头的工作过程进行分析。主动雷达导引头在导弹末制导阶段对其攻击的目标进行截获、跟踪,并引导导弹最终击中目标,从开机到击中目标的这段时间里,按其工作任务可以分为2个阶段,即搜索截获阶段和跟踪阶段^[14]。

搜索截获阶段,导引头完成对目标的角度截获、速度截获或距离截获,如果在预定的空域中未能发现目标,即启动搜索功能,直到截获目标,从而转入对目标的跟踪。在这个阶段,自卫距离、有效截获时间、干扰作用因子3个指标可以衡量干扰效能。

跟踪阶段,导引头截获目标后转入对目标的自动跟踪状态,并连续测量目标的运动参数,控制导弹飞向目标。在这个阶段,对导引头干扰效能的评估通常以有效跟踪概率、距离跟踪误差、速度跟踪误差、角度跟踪误差4个指标来衡量。

现有先进空空雷达制导导弹大多具有较强的抗干扰能力,因此对导引头干扰效能的评估也必须考虑导引头的抗干扰能力。雷达导引头的抗干扰一般通过以下2个方面实现^[15]:第1,改进雷达工作体制,如采用相控阵、单脉冲、全相参等工作体制;第2,采用多种抗干扰技术措施。如频率捷变、副瓣抑制、脉冲压缩等技术。

本文将干扰效能分为导引头固有抗干扰能力、对搜索截获过程干扰效能、对跟踪过程干扰效能3个指标 u_1 、 u_2 、 u_3 ,导引头固有抗干扰能力包括工作体制抗干扰因子 u_{11} 、技术措施抗干扰因子 u_{12} ;搜索截获过程干扰效能包括自卫距离 u_{21} 、干扰作用因子 u_{22} 、有效截获时间 u_{23} ;跟踪过程干扰效能包括有效跟踪概率 u_{31} 、距离跟踪误差 u_{32} 、速度跟踪误差 u_{33} 、角度跟踪误差 u_{34} 4个指标。

2.1 工作体制抗干扰因子

采用专家打分的评估的方法对其量化。经过分析建立的工作体制抗干扰因子模型为:

$$E_j = 1 - \sum_{i=1}^6 \omega_i \mu_i \quad (1)$$

式中: ω_i 取值为0或1,某型雷达采用了该体制,则 $\omega_i = 1$,否则 $\omega_i = 0$; μ_i 为第 i 种工作体制相对导引头抗干扰性能的贡献度(见表1)。 E_j 介于0~1之间,且取值越大,干扰效果越好。

表 1 工作体制对导引头抗干扰性能的贡献度

Tab.1 The contribution of modulation scheme to radar seeker's anti-jamming performance

工作体制	相控阵	单脉冲	全相参	连续波	线扫收发	圆锥扫描
μ_i	0.285 7	0.250 0	0.214 3	0.142 9	0.071 4	0.035 7

2.2 技术措施抗干扰因子

根据专家打分,目前雷达广泛采用的 12 种抗干扰措施有跟踪干扰源模式(HOJ)、频率捷变、动目标检测(MTD)、恒虚警、脉冲压缩、极化可变、单脉冲、副瓣抑制、宽限窄、变重频、频率分集、复杂信号等,各措施对导引头抗干扰能力的贡献度 μ_j 分别为:0.190 5、0.142 9、0.095 2、0.095 2、0.095 2、0.071 4、0.071 4、0.047 6、0.047 6、0.047 6、0.047 6、0.047 6。

在实际应用中,采取多种技术措施后,导引头的抗干扰能力近似于各自抗干扰能力的和值,因此,可建立技术措施抗干扰因子模型为:

$$E_a = 1 - \sum_{j=1}^{12} \omega_j \mu_j \quad (2)$$

式中: ω_j 取值为 0 或 1,某型雷达采用了该体制,则 $\omega_j = 1$,否则 $\omega_j = 0$; μ_j 为第 j 种抗干扰措施对导引头抗干扰性能的贡献度。 E_a 介于 0 ~ 1 之间,且取值越大,干扰效果越好。

2.3 自卫距离

自卫距离是干扰对导引头有效作用的最小干扰距离,计算公式如下^[16]:

$$R_0 = \sqrt{\frac{P_t G_t \sigma K_j B_j}{P_j G_j \gamma_j 4\pi B_r}} \quad (3)$$

式中: P_j 为干扰机功率; G_j 干扰机天线增益; B_r 为导引头接收机带宽; P_t 为导引头发射机功率; G_t 为导引头天线增益; σ 为目标散射截面积; B_j 为干扰接收机带宽; γ_j 为干扰与雷达信号的极化失配系数; K_j 为产生有效干扰所需的最小压制系数,对导引头干扰有效一般要求 $K_j \geq 10$ 。

用导引头最大探测距离 R_{max} 的损失状况来衡量干扰效能,定义最大探测距离损失度 E_r ,作为自卫距离的归一化指标:

$$E_r = (R_{max} - R_0) / R_{max} \quad (4)$$

式中: E_r 介于 0 ~ 1 之间,取值越大,干扰的效果越好。

2.4 干扰作用因子

干扰作用因子 F_p 主要从功率层面来考虑干扰效果,是雷达受到干扰后和未受到干扰时其输出端干信比的比值,即:

$$F_p = (J/S)_j / (J/S)_0 \quad (5)$$

本文取 $F_p \geq 2K_j$ 时,评价结果为“很好”; $F_p \leq$

$K_j / 2$ 时,评价结果为“很差”。对其进行归一化处理,得到下式:

$$E_p = \begin{cases} 1 & , F_p \geq 2K_j \\ \frac{2}{3} \frac{F_p - K_j/2}{K_j} & , K_j/2 < F_p < 2K_j \\ 0 & , F_p \leq K_j/2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明归一化因子 E_p 越大,干扰后的干信比越大,则干扰效果越好。

2.5 有效截获时间

有效截获时间是指从导引头开始工作到真实目标被雷达系统发现的时间间隔 T_c 。比较干扰前后截获时间的变化,可以定义截获时间的归一化指标 E_t 为^[17]:

$$E_t = (T'_c - T_c) / T'_c \quad (7)$$

式中: T'_c 是被干扰后导引头截获时间。同样 E_t 在 0 ~ 1 之间变化,取值越大,干扰效果越好。

2.6 有效跟踪概率

有效跟踪是指导弹导引头输出的测量信息结果,能够引导导弹完成正常的跟踪引导过程,而不产生较大的误差工作状态。在某种典型空战对抗下进行 N 次仿真,如果导引头只有 M 次建立了有效跟踪,定义有效跟踪概率的归一化指标为:

$$E_c = 1 - M/N \quad (8)$$

式中: E_c 取值介于 0 ~ 1 之间,取值越大,其干扰效果越好。

2.7 距离(速度、角度)跟踪误差

导引头作为制导雷达,跟踪测量误差是十分重要的参数指标。对于压制性干扰而言,由噪声引起的某一跟踪误差 σ_j 与干信比具有如下关系^[18]:

$$\sigma_j = 0.647 5 \varphi x \frac{\sqrt{J/S}}{k_m \sqrt{2n}} + \sum_{i=1}^m \sigma_i \quad (9)$$

式中: φ 为平滑系数; x 为被测参数; k_m 为系数; n 为测量次数; J/S 为干信比; $\sigma_1 \sim \sigma_m$ 是系统测量误差。根据受到干扰后,接收机干信比的变化情况,可以分别得到干扰前后跟踪误差的变化结果。

以误差增大倍数来衡量干扰效果,得到跟踪误差的归一化评估指标为:

$$E_e = \frac{\sigma_j - \sigma}{\sigma_j} \quad (10)$$

式中: E_e 介于 0 ~ 1 之间,取值越大,干扰果越好。

3 导引头干扰效能评估模型

对雷达导引头干扰效能进行评估,其具体的模型为:首先建立影响导引头干扰效能的因素集 u ,也就是评估的指标体系;其次确定评价集,用诸如

“很好、好、一般、差、很差”的一组模糊语言评价干扰效果的优劣;接着确定隶属函数,计算得到各指标对应的隶属度,继而得到相对于上层元素的隶属度矩阵 R 。在进行上述步骤的同时,运用指数标度 AHP 构造层次结构以及判断矩阵,并得到各指标的权重向量 w 。最后利用综合评判 $B=W \circ R$ 得出综合评判结果(\circ 为模糊算子)。

3.1 建立因素集

根据上述评估指标体系,可以建立因素集为 $u = \{u_1, u_2, u_3\}$, $u_1 = \{u_{11}, u_{12}\}$, $u_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}$, $u_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}\}$ 。

3.2 确定评价集

评价集是对评价对象可能作出的评价结果所组成的结果,可表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$, 其中 v_p ($p = 1, 2, \dots, q$) 是可能作出的第 p 个结果。本文把干扰效果划分为 5 个等级。评判集为 $V = \{\text{很好, 好, 一般, 差, 很差}\}$ 。

3.3 确定隶属函数

隶属函数是用于表征模糊集合的数学工具。在干扰效能评估中,隶属函数的确定一般要根据产生干扰效能的原理,结合其数学表达式或作用方程,选择能够合理反映因素对干扰效能影响程度的隶属函数。为研究规则的完备性、相容性,获取更多的评估效果,本文的隶属函数选择为正态分布型^[17],即:

$$r_{ij}(x) = \exp\left[-\frac{(x_{ij} - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right] \quad (11)$$

μ_j, σ_j 为第 j 个评价等级对应的分布参数。根据多位专家经验知识确定 μ_j, σ_j 取值见表 2。

表 2 参数 $[\mu_j, \sigma_j]$ 取值

Tab.2 The value of $[\mu_j, \sigma_j]$

评价等级	很好	好	一般	差	很差
$[\mu_j, \sigma_j]$	[0.9,0.2]	[0.7,0.2]	[0.5,0.2]	[0.3,0.2]	[0.1,0.2]

3.4 计算因素权重

权重用于描述各指标相对于上级评价指标的相对重要程度。一般情况下,各个因素在评判中具有不同的重要性,对各个因素 u_i 对应地分配不同的权重 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 从而得权重集。针对前文分析的传统标度层次分析法确定权重带来的缺点与不足,本文采用指数标度的 AHP 计算各因素的相对权重。具体的构权步骤^[19]如下:

1)依据指数标度,构造评定指标两两判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

2)通过求解矩阵 A 的特征方程 $A\lambda = W\lambda$, 计算最大特征值 λ_{\max} 和对应的特征向量 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$, 即得到权重向量 W 。

3)一致性检验。在构造两两判断矩阵时,由于客观事物的复杂性以及人类判断能力的差别,构造

的判断矩阵难以达到完全一致。因此,需要对所构造的判断矩阵进行随机一致性检验^[20]。

3.5 模糊综合算法

根据上述计算结果,可以得到模糊综合评判集:

$$B = W \circ R \quad (12)$$

式中: \circ 为模糊算子,常用的算子有极大极小型、乘积取大型、加权平均型等。

对于雷达导引头来说,对其的干扰效能是所有因素的一个综合体现,因此我们采用加权平均型算子 $M(\circ,)$ 作为计算该系统的模糊算子。

3.6 评判结果处理

确定最终评判结果,本文采用最大隶属度方法:取模糊综合评判集 $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ 中最大评判指标记为 b_0 , 与 b_0 相应的评价结果为最终评判的结果。

4 实例计算

以噪声调频干扰为例,假设一种单脉冲主动雷达导引头采取了 HOJ、恒虚警、MTD3 种抗干扰技术,其雷达天线发射功率 300 W,增益 30 dB,中频带宽 4 MHz,工作比 $d = 0.01$,对 RCS 为 5 m^2 的目标作用距离为 20 km;机载自卫干扰机功率 50 W,天线增益 10 dB,噪声干扰带宽 40 MHz,极化失配系数 3 dB。根据上述计算得自卫距离 1 459 m,在弹目距离为 10 km 时,噪声进入接收端的干信比为 9.8 dB。

分别采用指数标度和 1~9 标度层次分析法,综合各专家评估意见,建立判断矩阵,并进行一致性检验,最终得到各指标的权重,见表 3。

表 3 不同标度的指标权重值

Tab.3 The index's weight of different scales

一级指标	指数标度 1~9 权重	二级指标	指数标度 1~9 权重	二级指标	指数标度 1~9 权重
u_1	0.208 8	0.105 8	u_{11}	0.431 8	0.333 3
			u_{12}	0.568 2	0.666 7
			u_{21}	0.496 0	0.625 0
u_2	0.315 3	0.259 2	u_{22}	0.217 6	0.136 5
			u_{23}	0.286 4	0.238 5
			u_{31}	0.254 9	0.223 0
u_3	0.475 9	0.634 9	u_{32}	0.122 6	0.092 0
			u_{33}	0.254 9	0.263 9
			u_{34}	0.367 6	0.421 2

根据指数标度层次分析法得到的指标权重进行模糊评判。由上述模糊评估方法中隶属函数、评价指标得到对雷达导引头干扰效能评估的一级模糊矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.754 8 & 0.969 2 & 0.457 8 & 0.079 5 & 0.005 1 \\ 0.211 9 & 0.748 3 & 0.972 0 & 0.464 4 & 0.081 6 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.000 7 & 0.020 1 & 0.199 7 & 0.979 2 & 0.729 1 \\ 0.002 9 & 0.054 1 & 0.367 5 & 0.842 7 & 0.917 5 \\ 0.407 5 & 0.943 8 & 0.804 3 & 0.252 1 & 0.029 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.216 3 & 0.754 8 & 0.969 2 & 0.457 8 & 0.079 6 \\ 0.909 7 & 0.852 5 & 0.293 9 & 0.037 3 & 0.001 7 \\ 0.462 9 & 0.756 2 & 0.755 2 & 0.127 8 & 0.018 3 \\ 0.000 9 & 0.022 8 & 0.216 3 & 0.754 8 & 0.969 2 \end{bmatrix}$$

R_1 是对导引头固有抗干扰能力干扰效能的模糊矩阵, R_2 是对截获过程干扰效能模糊矩阵, R_3 是对跟踪过程干扰效能模糊矩阵。采用加权平均型算子进行评估计算,由综合评判模型 $B_i = W_i \cdot R_i$, 得出一级评判结果为:

$$B_1 = \{0.446 3, 0.843 7, 0.750 0, 0.298 2, 0.048 6\}$$

$$B_2 = \{0.117 7, 0.292 0, 0.409 4, 0.741 3, 0.569 6\}$$

$$B_3 = \{0.285 0, 0.49 81, 0.555 1, 0.431 3, 0.381 4\}$$

归一化结果为:

$$B'_1 = \{0.187 0, 0.353 5, 0.314 2, 0.124 9, 0.020 4\}$$

$$B'_2 = \{0.055 3, 0.137 1, 0.192 2, 0.348 0, 0.267 4\}$$

$$B'_3 = \{0.132 5, 0.231 6, 0.258 1, 0.200 5, 0.177 3\}$$

则二级模糊矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.187 0 & 0.353 5 & 0.314 2 & 0.124 9 & 0.020 4 \\ 0.055 3 & 0.137 1 & 0.192 2 & 0.348 0 & 0.267 4 \\ 0.132 5 & 0.231 6 & 0.258 1 & 0.200 5 & 0.177 3 \end{bmatrix}$$

由 $B = W \cdot R$, 得二级评判结果为:

$$B = \{0.119 5, 0.227 3, 0.229 0, 0.231 2, 0.172 9\}$$

对评判结果进行处理,得到表 4 评估结果。

表 4 不同标度得到的最终评判结果

Tab.4 The final evaluation of differentscales

总指标	指数标度 1~9 标度		一级指标	指数标度 1~9 标度	
	权重	权重		权重	权重
u	差	一般	u_1	好	好
			u_2	差	一般
			u_3	一般	差

从表 3 可以看出,指数标度削弱了跟踪过程干扰效能的权重,加大了固有抗干扰能力和截获过程干扰效能的权重。并且所有通过指数标度 AHP 建立的判断矩阵在解决上述问题中是一致性最优的,即一致性比例都等于 0。因此,采用指数标度法构建判断矩阵,在一定程度上降低了人为主观因素的影响,提高了对雷达导引头干扰效能评估的准确性和可信度。

对表 4 进行分析,对比最终的总指标评估结果,可以发现用指数标度层次分析法进行模糊综合评估

得到的结果为“差”,而用 1~9 标度层次分析法进行模糊综合评估得到的结果为“一般”。实例采用的雷达导引头具有被动跟踪干扰源(HOJ)模式,大功率的干扰信号更是直接暴露了自身的位置信息,造成了“引火烧身”的后果,实际干扰效果较差,因此,指数标度的模糊综合评估结果更加合理。综上所述,可以得出结论:采用指数标度层次分析法进行模糊综合评估比采用 1~9 标度层次分析法进行模糊综合评估具有更好地适用性和合理性。

5 结语

对主动雷达导引头干扰效能的评估可以为导引头抗干扰能力的设计、论证提供理论依据,为干扰措施的选择提供指导。本文针对传统的 1~9 标度 AHP 主观因素强、一致性差等不足之处,提出了一种改进的指数标度的 AHP,并在此基础上建立了对雷达导引头干扰效能进行评估的模糊综合评判模型。经过实例验证,采用改进后的算法,角度跟踪误差等指标权重以及总指标评估结果都更加合理,并且判断矩阵一致性比例都等于 0,降低了人为主观因素的影响,提高了主动雷达导引头干扰效能评估结果的准确性和客观性。

参考文献(References):

[1] 文谷生,廖学兵,黄林昊,等. 基于模糊综合评估法的某综合信息系统评估[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2338-2341.
WEN Gusheng, LIAO Xuebing, HUANG Linhao, et al. Evaluation of the Integrate Information System Based on the Fuzzy Synthetic Evaluation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6):2338-2341. (in Chinese)

[2] QIAO Z, XUANHHI Y, ZHANG Qiao, YANG Xuanhui. AHP-based Evaluation Index System of Information Literacy Research and Application[C]//2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIID). Shenzhen: ICIII, 2011: 285-289.

[3] JEVNIK Simona, KAIAOIU Fatma, ERYURUK Selin-Hanife, et al. Evaluation of a Garment Fit Model Using AHP[J]. Fibres Text East Eur, 2015, 23(2): 116-122.

[4] LI Ang, LI Junqiu, LI Huimin. AHP-based Evaluation on College Teachers' Classroom Teaching Quality Taking T College as An Example[C]//2011 International Conference on Business Management and Electronic Information (BMEI). Guangzhou BMEI, 2011: 558-560.

[5] ZHAN Bin, ZENG Yuan. Port Service Supply Chain Performance Evaluation Based on GRA[C]//2011

- IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE). Wuhan CCIE, 2011:421-424.
- [6] JING Du, LI Daoliang, LI Hongwen, et al. Grey Evaluation Model of Rural Informatization Level [C]//2010 World Automation Congress (WAC). Kobe WAC, 2010:371-376.
- [7] TAN Weikai, GUO Aihuang, QIAN Yeqing. Performance Evaluation Method for Small Cells Based on FAHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 36(8): 1651-1655.
- [8] ZHANG Jiahua. Risk Evaluation Model for Collaborative Projects Based on Fuzzy AHP Method [C]//2014 the 6th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Zhangjiajie, 2014: 564-567.
- [9] WANG Chongcai, ZHANG Mingli, TU Jianbo. Competitiveness Evaluation of China Chain Retail Enterprises Based on AHP-Fuzzy [C]//2013 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). Dongguan SOLI, 2013: 160-165.
- [10] 吕跃进, 张维. 指数标度在 AHP 标度系统中的重要作用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(5): 452-456.
LÜ Yuejin, ZHANG Wei. Kernel Function of Index Scale in AHP Scale System [J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(5): 452-456. (in Chinese)
- [11] 吕跃进, 张维, 曾雪兰. 指数标度与 1~9 标度互不相容及其比较研究[J]. 工程数学学报, 2003, 20(8): 77-81.
LÜ Yuejin, ZHANG Wei, ZENG Xuelan. Exponential Scale Not Being Consistent with 1~9 Scale [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2003, 20(8): 77-81. (in Chinese)
- [12] 韩本刚, 董敏周, 于云峰, 等. 用基于指数标度的层次分析法评估红外导弹导引头抗干扰性能[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(1): 69-73.
HAN Bengang, DONG Minzhou, YU Yunfeng, et al. 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, 26(1): 69-73. (in Chinese)
- [13] 孙汝亭. 心理学 [M]. 南宁: 广西人民出版社, 1982.
SUN Ruting. Psychology [M]. Nanning: Guangxi People Press, 1982. (in Chinese)
- [14] 高静. 主动雷达导引头抗干扰性能评估[J]. 航空兵器, 2004(4): 16-18.
GAO Jing. Evaluation of Anti-jamming Ability of Active Radar Seerer [J]. Aero Weaponry, 2004(4): 16-18. (in Chinese)
- [15] 杜海文, 孟领坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达综合抗干扰能力评估[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(5): 54-61.
DU Haiwen, MENG Lingpo, MA Hongbin. The Study of Comprehensive Anti-jamming Ability of Guidance Radar of Air Defense Missile Weapon System [J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(5): 54-61. (in Chinese)
- [16] 王星. 航空电子对抗原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
WANG Xing. Airborne Countermeasure Theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [17] 周颖, 王雪松, 王国玉. 基于战区弹道导弹突防的雷达干扰效果模糊评估[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(7): 807-809.
ZHOU Ying, WANG Xuesong, WANG Guoyu, et al. Fuzzy Evaluation on Radar Jamming Effect Based on Ballistic Missile Penetration [J]. Systems Engineering and Electronic, 2003, 25(7): 807-809. (in Chinese)
- [18] 雷腾, 胡国平, 金耀东. 基于多级模糊综合评判的雷达抗干扰性能评估[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 128-132.
LEI Teng, HU Guoping, JIN Yaodong. Evaluation Method of Anti-jamming Performance for Radar Based on The Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(1): 128-132. (in Chinese)
- [19] WENG Yu, ZHANG Chuang, LIU Yanfei. Evaluation of Teaching Quality System Designing Based on AHP [C]//2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications, Ottawa, On, 2014: 438-440.
- [20] HAN Jingyuan, WANG Tao. Core Competence Evaluation Based on AHP and Grey Evaluation Method [C]//2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC). Guilin: ICMLC, 2011: 990-994.

(编辑: 姚树峰)