

大型相控阵雷达系统安全性综合评价*

夏亮, 杨江平, 刘根, 侯晓东, 张雪
(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘要:针对大型相控阵雷达系统安全性因素多、评价困难的特点,分析并建立了大型相控阵雷达系统安全评价指标体系。提出了一种基于改进模糊层次分析法、熵权法和拉格朗日算法确定综合权重的方法,并建立了雷达系统安全性模糊综合评价模型。以某型大型相控阵雷达系统的安全性评价为例,运用所提方法确定该雷达系统的安全性指标综合权重,并进行安全性综合评价。将该方法与传统 AHP 评价法进行对比分析,验证了该方法的科学性和合理性。

关键词:模糊层次分析法;熵权法;大型相控阵雷达系统;安全性评价

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-108-07

Safety comprehensive evaluation of large phase array radar system

XIA Liang, YANG Jiangping, LIU Gen, HOU Xiaodong, ZHANG Xue
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In view of the LPAR (large phased array radar) system has too much safety factors and it is difficult to evaluate. Firstly, the LPAR safety evaluation index system based on the radar characteristic was analyzed and established. Secondly, a method to determine the comprehensive weight based on the improved FAHP (fuzzy analytic hierarchy process), entropy weigh and Lagrange algorithm was put forward, and the safety fuzzy comprehensive evaluation model was established. Thirdly, taking safety evaluation of the certain LPAR system as an example, the safety comprehensive weight of the LPAR system was determined by the proposed method, the safety evaluation was carried out by the established model. Finally, this method is compared with the traditional AHP method, and the feasibility and rationality of the method are verified.

Keywords: fuzzy analytic hierarchy process; entropy weight; large phased array radar system; safety evaluation

大型相控阵雷达装备作为我军战略预警系统中的重要组成部分,具有科技含量高、系统结构复杂、装备数量少、价格昂贵的特点;安全性是武器装备重要的通用质量特性之一,是保证大型相控阵雷达装备战备完好性和任务持续性的重要前提。目前,国内对于此类装备的安全性研究还处于空白状态,因此,找到合适的安全性分析和评价方法显得尤为迫切。

安全性评价是一个定性定量相结合的多目标、多准则的复杂问题。常用的评价方法有层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 法、模糊理论评价法、熵权法、多因素综合评价法等,例如高炜等^[1]提出利用改进的可拓 AHP 和动态加权相结合的方法对航天高技术进行综合评价,并用实际算例验证了指标体系的科学性和评价方法的可行性及有效性。毕义明等^[2]提出了一种基于模糊理论和证据理论的综合评价方法,对核武器系

统的安全性进行了综合评价,该方法对系统故障模式进行逐层考察,运用层次结构进行递归评价,通过具体的案例验证了该方法的有效性,为核安全管理和决策提供了可靠依据。杨玉中等^[3]提出基于熵权的逼近理想解的排序方法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 评价煤矿运输系统的安全性,该方法可以避免低层次多因素权重确定的主观性,通过对具体案例的计算,可以找出子系统存在的问题并提出相应的改进措施。刘彦等^[4]采用 AHP 和模糊综合评价法对相控阵雷达在反辐射战斗中的毁伤情况进行评价,该方法考虑到了影响评价的多种因素和毁伤评价过程的模糊性对评价结果的影响,可操作性强。但是由上述各种方法确定的指标权重主观性较强,不能够客观反映各指标因素在系统中的影响力,因此需要一种更加科学、客观、准确的方法来确定指标权重。

* 收稿日期:2017-12-19

基金项目:军内科研资助项目(ZBGC415238CT)

作者简介:夏亮(1991—),男,湖北仙桃人,博士研究生,E-mail:xialiang0720@163.com;

杨江平(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yjp_wh@163.com

大型相控阵雷达系统涉及的安全性因素众多,评价过程的重难点问题是如何确定各指标因素的权重,采用 AHP 时,各评价指标的权值通过人为操作进行判断选取,容易造成信息损失过多^[5-6];利用熵权法可以解决信息损失过多的问题,能够充分保留原始数据的信息,但是某些指标在计算过程中有可能被中和^[7]。

针对以上问题,本文采用改进的 AHP 和熵权法来确定综合权重,然后运用模糊综合评价的方法对大型相控阵雷达系统的安全性进行评价。

1 安全性分析和评价指标体系的建立

通过查阅资料、部队调研、咨询专家,并结合装备的自身特点,本文从三个层次构造安全性评价指标体系,分别是目标层、准则层和指标层。其中,目标层是大型相控阵雷达系统安全性评价指标体系,记为 U ;准则层包括大型相控阵雷达的各个分系统,即阵面分系统、综合信息处理控制分系统、供电分系统、冷却分系统和伺服分系统这五个分系统,分别记为 $U_1 \sim U_5$,下面对各个分系统进行安全性分析。

天线阵面分系统为高集成、模块化、可拆装的有源阵天线阵面,天线骨架作为支撑结构,其安全性至关重要,因此天线骨架结构安全性应该作为评价指标之一,记为 U_{11} ;天线阵面上有数以千计的 T/R 组件,T/R 组件设计的安全性也应作

为评价指标之一,记为 U_{12} ;此外,人员高空作业的安全性也应作为评价指标之一,记为 U_{13} ;天线阵面高度高,电子器件密集,因此容易遭受雷击,对于雷击风险防范情况也应作为评价指标之一,记为 U_{14} 。

综合信息处理控制分系统的设备主要包括显控台、电子设备机柜、配电和消防等,其中主要的安全风险包括数字阵列系统安全性、信号处理系统安全性、指挥控制系统安全性和信息交换系统安全性,分别记为 $U_{21} \sim U_{24}$ 。

供电分系统是雷达系统供电的来源,主要由柴油发电机组、控制柜、并联开关柜、配电柜以及一些辅助设施组成,对于其安全性分析,主要包括接地系统铺设情况、场地防护措施安装情况、供电检查覆盖情况和油库消防和防雷措施,分别记为 $U_{31} \sim U_{34}$ 。

冷却分系统主要由阵面冷却设备、方位水铰链、环控机组和末端冷却机组组成,它的安全性主要包括冷却单元安全性,供液单元安全性和控制单元安全性,分别记为 $U_{41} \sim U_{43}$ 。

伺服分系统的安全性包括方位支撑结构安全性、仰俯支撑结构安全性、方位水铰链安全性和俯仰水铰链安全性,分别记为 $U_{51} \sim U_{54}$ 。

完整的大型相控阵雷达系统安全性指标评价体系如图 1 所示。

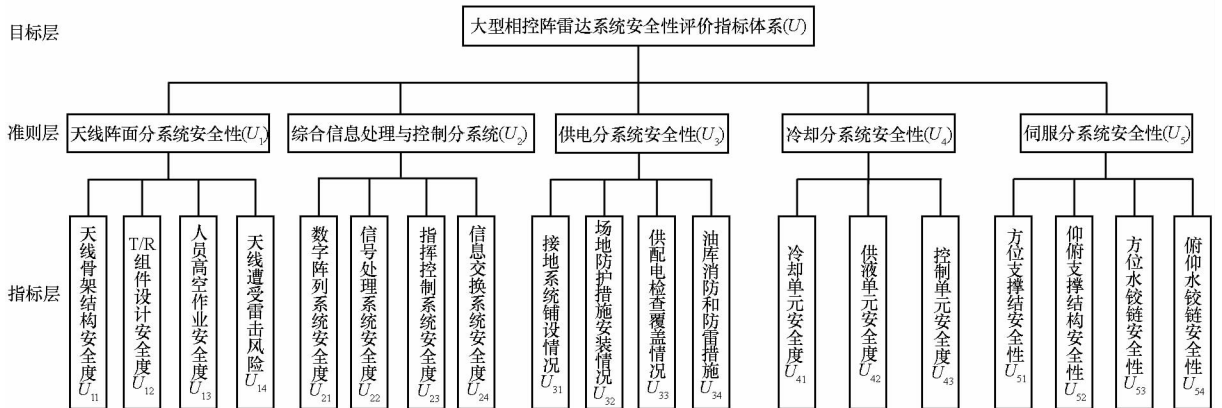


图 1 大型相控阵雷达系统安全性评价指标体系结构示意图

Fig. 1 Structural chart of safety evaluation index of LPAR system

2 综合权重的确定

大型相控阵雷达系统安全性风险因素众多,如何才能真实反映每一个风险对于系统的影响,就需要科学客观地确定每个指标的大小。然而在利用 AHP 进行分析时,由于人为判断的主观性和片面性,传统的 AHP 法略有不足,专家的主观因

素占主导地位,影响了评判结果的客观性;在使用熵权法进行分析时,某些特别危险的评价指标,很可能会被其他危险指数低的指标给中和,从而降低总体评价的危险程度,失去公正性。针对这两种问题,本文先采用改进的 AHP 确定指标的等级权重;然后采用熵权法确定指标的属性权重;最后采用拉格朗日算子将两者组合,确定综合权重。

2.1 改进 AHP 确定权重

传统的 AHP 法存在的问题:在构建判断矩阵时,要对处于同一层次的所有因素进行两两比较,若该层次中需要比较的因素有 n 个,那么专家组需要做出 $n(n-1)/2$ 次判断才能构造出判断矩阵。这种方法对专家组来说过于繁杂,而且容易产生厌烦情绪,做出的判断也不够客观。

为了解决这个问题,本文提出了一种改进的 AHP 法,其具体的步骤如下。

Step1: 对指标进行打分。按照指标的重要程度,用 1~9 的分数对指标进行打分,极其重要的指标为 9 分,极其不重要的指标为 1 分,其余的指标根据表 1 进行打分。

表 1 指标分值情况
Tab.1 Index score

分值	重要程度
1	极其不重要
3	不重要
5	中等重要
7	重要
9	极其重要
2,4,6,8	介于上述两相邻分值尺度之间

Step2: 构造改进判断矩阵。通过对指标分值的计算来确定判断矩阵 A , 设 b_i 和 b_j 为某一层次中两个指标因素的分值, 则 A 中的元素 a_{ij} 可以表示为:

$$a_{ij} = \begin{cases} b_i - b_j + 1 & b_i > b_j \\ 1 & b_i = b_j \\ \frac{1}{|b_i - b_j| + 1} & b_i < b_j \end{cases} \quad (1)$$

构造的判断矩阵 A 可以表示为:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

Step3: 计算权重。

根据公式分别计算矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 和最大特征向量 w'_i 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw'_i)_i}{nw'_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$w'_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (4)$$

最大特征向量 w'_i 即为指标的层次权重。

2.2 熵权法确定权重

熵权法求解的过程可以转换为多对象多指标的评价问题, 设有 m 个评价指标, n 个评价对象, 形成评价矩阵 $F = (f_{ij})_{m \times n}$:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, f_{ij} 为第 j 个项目在第 i 个指标下的评价值。

对于这类评价问题, 求各指标熵权的过程如下。

Step1: 计算第 j 个对象在第 i 个评语下的比重 p_{ij} , 即

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^n f_{ij}} \quad (6)$$

Step2: 计算第 i 个指标的熵值 e_i , 即

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (7)$$

Step3: 计算第 i 个指标的熵权值 w''_i , 即

$$w''_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=1}^m e_i} \quad (8)$$

经过上述计算, 即可确定各指标属性权重。

2.3 确定综合权重

以上用改进的 AHP 和熵权法分别计算了各指标的层次权重和属性权重, 下面运用拉格朗日算子计算各指标的综合权重。

$$w_i = \frac{\sqrt{w'_i w''_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w'_i w''_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中, w'_i 为指标的层次权重, w''_i 为指标的属性权重。

通过上面的计算就可以得到指标的综合权重, 拉格朗日算法确定的权重兼具 AHP 指标的层次性和熵权法对指标自身信息最大化的保留, 同时避免了 AHP 确定指标的主观性和熵权法对于危险指标的中和, 使得指标体系的权重更加合理、科学。

3 模糊综合评价法

3.1 各类集合的确定

进行模糊综合评价的第一步是确定指标集、权重集和评语集, 本文安全指标评价体系由图 1 已经给出, 可以分为主指标集和子指标集; 权重集可由上述综合权重法求得, 也可分为主权重集和

子权重集。具体的表示方法见表 2。

表 2 因素集和权重集的表示方法

Tab.2 Presentation of factor set and weight set

各类集合	表示方法
主指标集	$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$
主权重集	$W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}$
子指标集	$U_k = \{U_{k1}, U_{k2}, \dots, U_{kn}\}$
子权重集	$W_k = \{W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}\}$

评语集是评判者对被评价对象所做评语的集合,通常用 V 表示,即 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。根据安全性评价的一般规则,本文 m 取 5,将大型相控阵雷达系统的安全性评语集 V 分为五个等级,即 $V = \{优秀、良好、中、一般、差\}$ 。

3.2 建立模糊评价矩阵

模糊综合评价的第二步是建立模糊评价矩阵,首先对指标集中的单个指标 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 作评价,从指标 u_i 的角度确定其对评语集 $v_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的隶属程度,然后得出评价结果 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in [0, 1]^m$,最后对每一个因素集进行模糊评价,即可得到模糊评价矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $r_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 表示因素层 u_i 对于第 j 级评语 v_j 的隶属度。

3.3 模糊运算

模糊综合评价的第三步是进行模糊运算,利用模糊算子“ \circ ”对安全评价指标权重集 W 与模糊评价矩阵 R 进行模糊变化,得到模糊综合评价结果 B 。

$$B = W \circ R \quad (11)$$

对于多个层次的评价,采取从低层到高层的方法,逐层进行评价,然后求得最后评价结果。

4 实例计算与分析

本文以某型相控阵雷达系统的安全性评价为例,运用上述确定的综合权重和模糊综合评价模型,对装备进行安全性评价。

4.1 确定综合权重

4.1.1 改进 AHP 确定权重

Step1:按照图 2 所示的工作流程,首先由专

家组对各指标进行打分,由于篇幅限制,本文只对准则层指标权重的确定给出计算过程。准则层的打分结果按照 $U_1 \sim U_5$ 的顺序依次为 6, 8, 7, 5, 4。

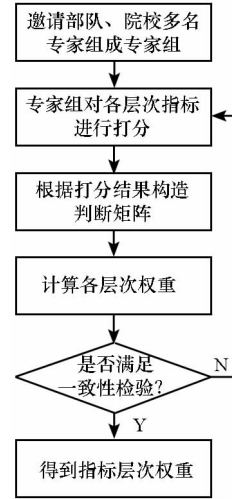


图 2 改进 AHP 确定层次权重流程图

Fig.2 Flow chart of improved AHP to determine hierarchical weight

Step2:根据打分结果,按照本文确定的准则,构造改进判断矩阵 A_U ,即

$$A_U = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 4 & 5 \\ 2 & 1/2 & 1 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

Step3:计算准则层的层次权重。

根据式(3)和式(4)计算准则层的层次权重,得到如下结果:

$$w'_u = (0.1599, 0.4185, 0.2625, 0.0973, 0.0618)$$

利用 MATLAB 计算了准则层的层次权重,并画出了示意图,如图 3 所示。从图 3 可以看出,虽然对 AHP 方法进行了改进,但可以看到,通过层次分析法确定的权重相互之间差距很大,得到的结果不够客观。

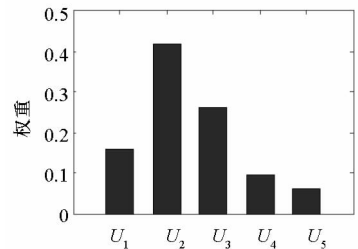


图 3 准则层层次权重示意图

Fig.3 Diagram of standard layer hierarchy weight

4.1.2 熵权法确定权重

Step1:按照图 4 所示的工作流程,首先请专

家组按照本文确定的评语集对指标体系中的各个项目进行评价,然后汇总评价结果,根据公式计算出最终结果。

$$r_{ij} = x_n / N \quad (12)$$

式中, x_n 为某项指标 u_{ij} 被专家组评为 v_n 的次数, N 为专家人数。专家评价结果见表 3,由于篇幅限制,本文只列出准则层指标的评价结果。

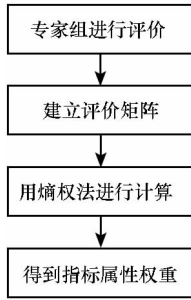


图 4 熵权法确定属性权重流程图
Fig. 4 Flow chart of entropy weight to determine attribute weight

表 3 专家评价结果

Tab. 3 Result of expert evaluation

准则层	优秀	良好	中	一般	差	%
U_1	32	41	16	7	4	
U_2	31	45	12	8	4	
U_3	35	42	15	5	3	
U_4	30	44	14	9	3	
U_5	29	43	17	6	5	

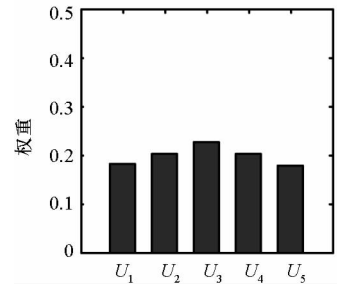


图 5 准则层属性权重示意图

Fig. 5 Diagram of standard layer attribute weight

4.1.3 确定综合权重

按照本文确定的拉格朗日求综合权重的算法,根据式(9)可以确定准则层的综合权重为:
 $w_u = (0.179\ 8, 0.306\ 9, 0.257\ 2, 0.145\ 0, 0.111\ 1)$

图 6 为准则层综合权重示意图,从图中可以看到,由改进 AHP 和熵权法确定的综合权重,既克服了 AHP 的主观性,同时也避免了危险因素被中和,更加具有科学性和客观性。

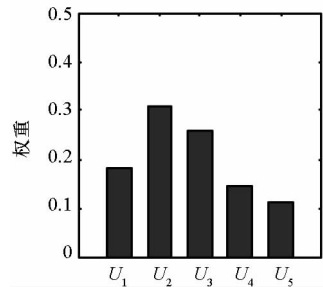


图 6 准则层综合权重示意图

Fig. 6 Diagram of standard layer attribute comprehensive weight

Step2: 建立评价矩阵。

根据专家评价结果,建立评价矩阵 R_U 。

$$R_U = \begin{bmatrix} 32 & 31 & 35 & 30 & 29 \\ 41 & 45 & 42 & 44 & 43 \\ 16 & 12 & 15 & 14 & 17 \\ 7 & 8 & 5 & 9 & 6 \\ 4 & 4 & 3 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

Step3: 确定权重。

按照熵权法确定权重的计算原理,运用 MATLAB 软件计算准则层的属性权重,结果如下。
 $w_u'' = (0.184\ 6, 0.205\ 5, 0.230\ 2, 0.197\ 4, 0.182\ 3)$

图 5 所示为熵权法确定的准则层属性权重,从图中可以看出,通过熵权法确定的权重可以有效减少主观因素带来的影响,但是某些危险指标可能被中和。

按照上述办法,可以求得指标层的权重,从而得到整体的属性权重。

4.2 模糊综合评价

Step1: 对指标层进行评价根据图 7 所示的评价流程,首先对指标层进行模糊综合评价,基于篇幅限制,本文直接给出指标层的评价结果,如表 4 所示。

Step2: 对准则层进行评价。

将指标层的模糊评价结果作为准则层的模糊评价矩阵,利用式(13)进行计算,得到准则层的模糊评价结果。

$$B = W \cdot R$$

$$= (0.179\ 8, 0.306\ 9, 0.257\ 2, 0.145\ 0, 0.111\ 1) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 30.27 & 47.70 & 13.47 & 6.27 & 2.27 \\ 34.21 & 47.24 & 14.28 & 3.27 & 1.00 \\ 32.26 & 48.55 & 11.74 & 6.25 & 1.45 \\ 29.30 & 47.36 & 14.73 & 6.61 & 2.00 \\ 28.01 & 48.83 & 15.30 & 6.41 & 1.45 \end{bmatrix}$$

$$= (31.60\ 47.85\ 13.65\ 5.41\ 1.54)$$

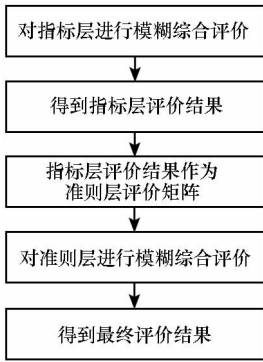


图 7 模糊综合评价流程图

Fig. 7 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation

表 4 指标层评价结果

Tab. 4 Evaluation result of index layer %

分系统	优秀	良好	中	一般	差
U_1	30.27	47.70	13.47	6.27	2.27
U_2	34.21	47.24	14.28	3.27	1.00
U_3	32.26	48.55	11.74	6.25	1.45
U_4	29.30	47.36	14.73	6.61	2.00
U_5	28.01	48.83	15.30	6.41	1.45

图 8 为利用本文方法得到的评价结果,根据最大隶属度原则,本文评定大型相控阵雷达系统的安全性为良好。另外根据表 4 指标层的评价结果,雷达系统五个分系统的安全性排序为: $U_2 > U_3 > U_1 > U_4 > U_5$,说明冷却分系统和伺服分系统的安全性需要进一步加强。

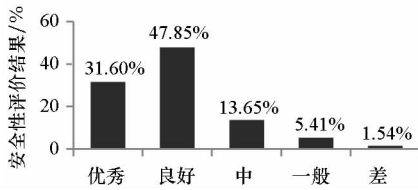


图 8 大型相控阵雷达系统安全性评价结果

Fig. 8 Safety evaluation result of LPAR system

5 对比分析

为了更好地检验改进 FAHP 和熵权法综合评价方法的科学性和合理性,将用传统 AHP 方法得到的评价结果与利用该方法得到的评价结果进行对比分析。由于篇幅限制,对于传统 AHP 方法的求解过程不赘述。

运用传统 AHP 方法,可以求得准则层权重为:

$$w = (0.195\ 0, 0.432\ 1, 0.222\ 5, 0.094\ 9, 0.055\ 5)$$

传统 AHP 准则层权重示意图如图 9 所示。将图 6 和图 9 进行对比分析,可以发现利用传统 AHP 法求得的权重,主观性较强,因素之间的差异性较大,个别因素的权重被弱化;但是利用改进 AHP 法和熵权法求得的综合权重可以很好地解决权重主观性较大的问题,求得的权重既克服了主观因素,也保留了权重之间的差异性,更具科学性和客观性。

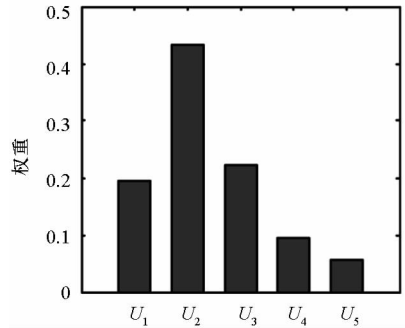


图 9 传统 AHP 准则层权重示意图

Fig. 9 Diagram of traditional AHP standard layer attribute weight

由传统 AHP 法求得的最终评价结果如图 10 所示。

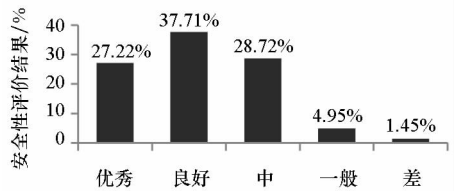


图 10 传统 AHP 安全性评价结果

Fig. 10 Safety evaluation result of traditional AHP

从图 10 可以看出,根据最大隶属度原则,由传统 AHP 求得的安全性评价结果也为良好,但是对比图 8 进行分析,可以发现由传统 AHP 得到的结果中“优秀”“良好”“中”三者的百分比相近,区分度不够,结果的可信度不高;而在由改进 FAHP 和熵权法求得的结果中,“良好”占的比例接近 50%,和其他评语所占比例差距明显,结果更具有说服力。

综上所述,经过和传统 AHP 评价法对比分析,可以发现改进 FAHP 和熵权法综合评价法在确定因素权重时,能够避免传统 AHP 法自身的主观性,同时能够最大可能地保留因素的自然属性,更具科学性和客观性;在求解评价结果时,综合评价法得到的评价结果,各评语区分度高、可信性强、结论更具有说服力。

6 结论

本文对大型相控阵雷达的五个分系统进行了安全性分析并构造了雷达系统安全性评价体系;提出了一种基于改进 AHP 和熵权法确定综合权重的方法,构造了雷达系统模糊综合评价模型;对某型大型相控阵雷达系统安全性进行评价,得到总体评价结果和各个分系统的安全性排序;将改进 FAHP 和熵权法综合评价法和传统 AHP 评价法进行对比分析,验证了该方法的先进性和合理性。本文所提方法为武器装备系统的安全性分析和评价提供了一种新的思路。

参考文献 (References)

- [1] 高伟,张庆普,敦晓彪,等. 基于改进的可拓层次分析法和动态加权的航天高技术综合评价研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 102-109.
GAO Wei, ZHANG Qingpu, DUN Xiaobiao, et al. Comprehensive assessment of advanced military aerospace technologies based on improved EAHP and dynamic weighting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(1): 102-109. (in Chinese)
- [2] 毕义明,王莲芬,李红文. 核安全定量评估的模糊—证据推理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(12): 1501-1504.
BI Yiming, WANG Lianfen, LI Hongwen. Fuzzy evidential reasoning algorithm for nuclear safety quantitative evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(12): 1501-1504. (in Chinese)
- [3] 杨玉中,立云. 煤矿运输安全性评价的基于熵权的 TOPSIS 方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11): 228-232.
YANG Yuzhong, LI Yun. TOPSIS based on entropy weight for safety evaluation coalmine transportation system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(11): 228-232. (in Chinese)
- [4] 刘彦,裴晓羽,吕中杰,等. 基于层次分析—模糊综合评价法的相控阵雷达毁伤评估[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(10): 996-1000.
LIU Yan, PEI Xiaoyu, LYU Zhongjie, et al. Damage assessment of phased array antenna based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive assessment[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(10): 996-1000. (in Chinese)
- [5] Fu H P, Chu K K, Lin S W, et al. A study on factors for retailers implementing CPFR—a fuzzy AHP analysis [J]. Systems Engineering Society of China, 2010, 19(2): 192-209.
- [6] Xiu Z X, Liu B H, Xie Q H, et al. Assessment of structural stability in Bohai Sea area based on AHP-GDM model [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(4): 41-48.
- [7] 顾晓光,马义中,张延静,等. 基于置信水平和熵权法的参数和容差经济性设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 73-80.
GU Xiaoguang, MA Yizhong, ZHANG Yanjing, et al. Parameter and tolerance economic design based on confidence level and entropy method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11): 73-80. (in Chinese)