

基于熵权法和组合隶属函数的雷达质量评估方法研究

朱常安^{1,2}, 胡文华¹, 郭宝峰¹, 薛东方¹, 尹园威¹

(1. 陆军工程大学 石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 61035 部队, 北京 100094)

摘要: 为较好地评价雷达质量状况, 针对雷达系统的功能特性和评估需求, 区分监测数据、履历数据和环境数据, 构建了雷达质量评估的三层指标体系; 为反映监测数据因素的客观性, 采用熵权法确定测试数据指标权重; 为避免单一隶属函数可能会出现隶属度突变的问题, 运用组合隶属函数的方法进行评价; 该方法首先计算各指标在不同隶属函数条件下的评价信息, 而后对每种隶属函数的评判情况进行组合优化, 以增加评估结果的可信度; 通过定性分析和定量计算, 对某型雷达的质量状态进行了模糊综合评判, 验证了该评估算法的有效性, 对雷达系统操作应用和维修保障具有一定的参考价值。

关键词: 雷达; 质量评估; 模糊综合评判; 熵权法; 隶属度; 组合隶属函数

Research on Radar Quality Evaluation Method Based on Entropy Weight Method and Combined Membership Function

ZHU Changan^{1,2}, HU Wenhua¹, GUO Baofeng¹, XUE Dongfang¹, YIN Yuanwei¹

(1. Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Unit 61035 of PLA, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to better evaluate the radar quality, aiming at the functional characteristics and evaluation requirements of the radar system, monitoring data, historical data and environmental data are distinguished, and a three-layer index system for radar quality evaluation is constructed. In order to reflect the objectivity of the monitoring data factors, the entropy weight method is used to determine the weight of the test data indicators. For avoiding the problem of sudden membership degree of the single membership function, the method of combining with the membership functions is used for the evaluation. The evaluation information of each index is firstly calculated by the method under the different membership function conditions, then the evaluation conditions of each membership function is combined and optimized to increase the credibility of the evaluation results. Through the qualitative analysis and quantitative calculation, the fuzzy comprehensive evaluation of the quality status for a certain type of radar is carried out, and the validity of the evaluation algorithm is verified, which has certain reference value for the operation, application and maintenance of the radar system.

Keywords: radar; quality assessment; fuzzy comprehensive evaluation; entropy weight method; membership degree; combined membership function

0 引言

根据军事百科全书中的相关定义, 装备质量是指“装备的固有特性满足要求的程度”, 其固有特性分为功能特性和保障特性。功能特性主要有机动性、防护能力、火力、通讯能力等; 保障特性主要包括可靠性、维修性、保障性、测试性和安全性等。对于不同类型的装备有不同的研究角度, 其质量也有不同的具体内涵^[1]。近年来, 随着复杂装备的系统集成化、操控信息化的程度越来越高, 对其操作使用和保养维修提出了更高的要求, 因此, 准确评价其质量状况具有重要意义^[2]。雷达作为航空航天领域的“千里眼”“顺风耳”, 具有目标探测、侦察预警、导航跟踪等强大功能, 是现代化武器系统的重要组成部分^[3]。对雷达系

统进行质量评估, 能够为雷达设备的生产研发、性能改进提供数据支撑, 为使用和维护雷达装备提供科学依据^[4-5]。关于复杂装备质量评估的研究方法比较多, 大致可以分为三大类^[6]: 1) 基于统计决策的方法, 主要有层次分析法、模糊综合评判法、加权法、证据理论评估法; 2) 基于数据挖掘的方法, 主要有关联规则法、聚类分析法等; 3) 基于机器学习的方法, 主要包括支持向量机法、贝叶斯网络法和人工神经网络法。由于雷达系统结构复杂、技术密集, 对其质量评估不仅要考虑装备本身, 还要兼顾雷达的履历数据、环境应力信息、操作应用能力等因素。其中部分因素无法通过数据直观体现, 仅靠数据驱动的评估方法难以满足指标需求, 需要依据专家的经验知识进一步评判^[7-8]。因此, 本文对雷达系统进行评估时, 采用模糊综合评判的

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-03-29。

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019506037)。

作者简介: 朱常安(1989-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事雷达信号处理、状态监测和雷达装备保障方向的研究。

通讯作者: 胡文华(1970-), 男, 湖北天门人, 博士, 副教授, 主要从事雷达信号处理、状态监测与故障诊断方向的研究。

引用格式: 朱常安, 胡文华, 郭宝峰, 等. 基于熵权法和组合隶属函数的雷达质量评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 302-

方法, 将定性分析和定量计算相结合, 以满足各个指标的评估需求。针对测试数据, 通过组合隶属度函数获取评价信息, 对不能用数据直接表示的指标, 则采用专家打分的方法, 兼顾考虑了指标因素的主观性和客观性。

1 模糊综合评判相关理论

1.1 模糊综合评判模型

模糊综合评判是综合考虑各种影响因子, 运用模糊数学理论对被评对象给出综合评价的一种方法。该方法能够对被评对象按照综合评分的高低进行排序和评价, 还可依照最大隶属度原则, 对照模糊评价集上的值判定对象所属的评估等级。

模糊综合评价实施步骤^[9]:

1) 首先确定需要评价的指标因素集合 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。

2) 确定评语集合 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$; 无论被评价的指标有多少个层次, 评语集只有一个。式中的 m 表示评语等级的个数, 一般情况下取 4~9, 常用的是 4 级或 5 级。

3) 建立模糊评判矩阵: 对因素集中每个因素 U_i 进行单因素评判, U_i 在评语集中 V_j 的隶属度为 r_{ij} , 由此建立模糊评判矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

4) 确定权重集: 由于不同的评价因素其重要程度有所不同, 所以对各因素分配不同的权重, 以体现重要度的差别。如因素 U_i 的权值为 w_i , 所有因素的权重集为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$ 。

5) 模糊评判计算: 建立模糊评判计算模型 $B = W \circ R$, 其中“ \circ ”表示模糊综合算子。为避免主观性, 本文对雷达质量评估分析不会对某个指标存在偏好, 所以选取加权平均型的模糊综合算子 ($\circ, +, \cdot$), 该型算子能够依据指标权重的大小充分考虑指标的所有信息。

6) 对评价结果进行分析: 针对模糊综合计算所得结果进行分析评价, 以此确定评判等级。对模糊结果向量常用的分析方法有模糊向量单值化法、最大隶属度原则等^[10]。

1.2 隶属度

1965 年, 美国自动控制专家 L. A. Zadeh 教授提出了隶属度的概念, 用以定量描述模糊性对象。隶属度通过隶属函数表现出来, 在模糊评判过程中, 起着关联评价元素与评价等级的作用, 正确选取或构造隶属函数是影响综合评判效果的关键^[11]。传统的模糊综合评判采用一种隶属度函数进行评估, 这就要求隶属度函数尽可能符合所评对象的应用实际, 对函数的选择要求比较高。在工程应用中, 因评价标准划分的不同或监测数据的异常, 有时可能会发生隶属度突变的情况, 影响整体评价效果^[12]。为解决这一不足, 本文选用组合隶属函数进行隶属度的改进计算, 尽量使各指标隶属函数合

理可信, 消除隶属度突变的不利影响。

确定隶属度的常用方法有 3 种: 专家打分法、模糊统计法、模糊分布法。专家打分是由专家根据一些准则或经验对评价对象某些指标进行打分确定; 模糊统计法是通过拟合原始数据的连续分布函数, 来推算表达结果^[13]; 模糊分布表达的是实数域 R 上模糊集合的隶属函数。区分不同的应用研究, 应选择不同的隶属函数。由于雷达系统的底层参数不符合连续分布, 因此模糊统计法并不适用, 本文选取模糊分布和专家打分的方法相结合, 依据雷达应用实际确定模糊分布参数。

1.3 组合隶属函数的构建

模糊隶属度函数分为 3 种类型, 即偏小型、偏大型、中间型。其分布形式主要有三角形、梯形、抛物线型、柯西分布、岭形分布和正态分布等^[14]。在评估过程中, 选择不同类型的隶属度函数其评价结果也会有所差异。与单一隶属度函数相比, 组合隶属函数的优点是对多个隶属函数的信息优化组合, 充分利用多种评价信息, 消除单一隶属函数可能发生异常突变的不利影响, 使所求的隶属度可信性更高^[15]。在许多应用中也验证了组合评估模型可以有效减小波动, 提高评估值的稳定性和可信度。

组合隶属函数的构造步骤如下^[16-17]:

1) 根据选定的评估要素、评价等级, 以及参数特性选择合适的隶属度函数。

2) 计算单一评价要素在不同隶属函数条件下的隶属度, 而后求出该要素的隶属度均值:

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j \quad (1)$$

式中的 r_i 是指某单个要素在第 i 个隶属函数下算出的隶属度值; n 指的是共有 n 种隶属度函数。

3) 构造组合隶属函数。本文采用方差-协方差组合优选的方法求组合隶属函数。设 r_1, r_2 是同一评价要素对应同一个评语等级在两个不同隶属函数下求得的隶属度, \bar{r} 则是 r_1, r_2 的无偏隶属度, r_c 是加权平均后得到的组合隶属度值。 r_1, r_2 和 r_c 三者偏离 \bar{r} 的误差分别是 e_1, e_2 和 e_c , w_1 与 w_2 是分别对应两种隶属函数的权重系数, 其中 $w_1 + w_2 = 1$, 则有 $r_c = w_1 r_1 + w_2 r_2$ 。若 r_c 也是无偏的, 则有 $e_c = e_1 + e_2$, 从而 e_c 的方差为:

$$\text{Var}(e_c) = w_1^2 \text{Var}(e_1) + w_2^2 \text{Var}(e_2) + 2w_1 w_2 \text{cov}(e_1, e_2)$$

关于 w_1 对于 $\text{Var}(e_c)$ 求极小值, 得:

$$w_1 = \frac{\text{Var}(e_2) - \text{cov}(e_1, e_2)}{\text{Var}(e_1) + \text{Var}(e_2) - 2\text{cov}(e_1, e_2)} \quad (2)$$

因 $w_2 = 1 - w_1$, 令方差 $\text{Var}(e_1) = \sigma_{11}$, $\text{Var}(e_2) = \sigma_{22}$, 协方差 $\text{cov}(e_1, e_2) = \sigma_{12}$, 由 e_1, e_2 相互独立, 则协方差 $\text{cov}(e_1, e_2) = \sigma_{12} = 0$, 则有:

$$w_1 = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}, w_2 = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \quad (3)$$

将以上过程推广计算, 设有 n 个隶属函数, 其所求得的隶属度值分别为 r_1, r_2, \dots, r_n , 各自相对于 \bar{r} 的误差的方差分别为 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{nn}$, 在工程应用中, 通常认为各函数所

求得的隶属度之间的误差是不相关的。在 $\sum w_i = 1$ 的条件下求 $Var(e_c)$ 的极小值, 引入 Lagrange 乘子来求解, 可以得到各个隶属函数的权重:

$$w_i = \frac{1}{\sigma_{i1} \left(\frac{1}{\sigma_{11}} + \frac{1}{\sigma_{22}} + \dots + \frac{1}{\sigma_{mm}} \right)} \quad (4)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$ 。由此可见, σ_{ii} 越小, 隶属函数求出的隶属度越接近平均值, 所得的权重就越大。明显可知, 若 r_1, r_2, \dots, r_n 都为零, 则 w_i 相同。根据以上步骤可以计算出每个隶属函数的权重, 因此构造最终的组合隶属函数为:

$$r_c = w_1 r_1 + w_2 r_2 + \dots + w_n r_n \quad (5)$$

新的隶属函数对各隶属函数进行了优化组合, 突出了实用性较好的函数的作用, 又兼顾了实用性一般的函数信息, 从而使最终的评判结果可信度更高。

2 雷达装备质量评估模型

2.1 雷达质量评估步骤

根据以上理论, 可以构造某雷达系统的质量评估模型, 其基本实施步骤为:

第一步, 依据雷达功能特性进行评估指标分析, 收集获取监测数据、履历数据和环境数据等评价因素, 分类确定底层指标, 区分目标层和指标层, 建立评估体系。

第二步, 确定评语集, 即为雷达系统划分质量评价等级, 根据雷达装备实际, 一般划分“较差、一般、良好、优秀”4个质量等级。

第三步, 根据已经确定的底层指标元素, 区分定性指标和定量指标分别计算隶属度。对于能够通过测试所得的指标数据, 选取合适类型的隶属函数计算各自对应的隶属度。本文选择3种类型的隶属函数分别对底层元素指标进行隶属度计算, 而后运用方差-协方差法求解各指标的组合格隶属度。对于不能用数据表述的定性指标, 则采用专家打分的方法确定指标的隶属度。

第四步, 基于确定的评价指标和构建的评估体系, 由下而上分层构造模糊评判矩阵, 并对矩阵进行归一化处理获得标准化矩阵。运用熵权法, 对标准化矩阵内的指标元素逐层计算其熵值和权重。

第五步, 基于求出的各层次指标权重和各底层指标因素的隶属度, 进行模糊综合评判计算, 求得评价结果, 确定雷达系统的质量等级。

其中, 各指标的熵权、隶属度和最终模糊综合评判的计算均借助 Matlab 软件程序来实现。

2.2 熵权法基本理论

熵 (Entropy) 最初是由热力学研究中提出的一个物理量, 用以刻画分子状态在某一系统中的出现程度。应用于信息论后, 熵主要用来表征系统的无序程度, 能够反映每个指标在一个系统或样本中所占信息量的多少^[18]。熵权法就是从信号系统科学发展出来的一种权重计算方法, 该方法能将评价指标包含的信息进行综合量化与赋权, 具有一定的客观性, 可以有效减轻评估过程中主观因素对评价结

果的影响, 在工程实践领域有广泛应用。

在装备质量的评价分析中, 各评判指标重要程度不同, 可以用熵的概念反映各指标因素所占的权重比例, 即某一指标因素的信息熵越大, 说明该指标变异度越小, 在评价中包含的信息量小, 其所占的权重比例越小。反之, 指标的信息熵越小, 变异程度越大, 反映的信息量大, 其权重值也越大^[19]。

熵权法确定指标权重具体步骤如下^[20]:

1) 建立标准化样本矩阵:

设一个样本空间中有 m 个评价要素, n 个评价指标, 形成样本的判断矩阵 $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{m \times n}$, 将该矩阵进行归一化处理, 得到样本标准化矩阵 $\mathbf{Z} = [z_{ij}]_{m \times n}$, 其中, r_{ij} 和 z_{ij} 分别为原判断矩阵和标准化后矩阵中的元素。

2) 计算每组样本中单个指标所占的比例:

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}$$

其中: a_{ij} 表示第 j 个指标下, 第 i 个元素的占比。

3) 计算每个评价指标的熵值:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \ln a_{ij}$$

4) 确定指标的熵权:

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}$$

通过以上步骤计算, 可得到所有指标的权重向量 \mathbf{W} , 记为矩阵 $\mathbf{W} = (w_j)_{1 \times n}$ 。

2.3 雷达装备评价指标体系及权重

通过调查研究发现, 传统的雷达质量评定和等级划分方法, 过多依赖贮存年限和维修次数等装备的设计数据、履历数据等因素, 而对其他指标的描述过于主观, 尤其对装备实际的测试数据利用不足, 存在一定的片面性。本文在兼顾雷达设计履历和环境因素的基础上, 综合考虑雷达的整机性能指标和工作状态参数等监测数据, 从较为全面的角度对其质量状态进行评价。经充分征求专家意见, 结合应用实际, 区分目标层和指标层, 将某雷达底层参数合理归类, 构建雷达系统的三级评价指标体系, 如图 1 所示。其中, 监测数据指标分为整机性能指标 (包括发射机功率、噪声系数、幅相一致性、幅频特性、改善因子、天线增益、驻波系数、暂态特性、跟踪性能) 和工作状态数据 (包括 P 显扫描线长度、发射机紧急开机时间、发射机高压、脉冲宽度、接收机场放电流、接收机本振检测电平、天线转速和电源电压)。履历数据分为齐套性指标 (包括装备完好率、备品附件齐全率)、可靠性指标 (包括等效服役时间、平均故障时间、机械性能)、维修性指标 (包括维修保养情况、关重部件磨损情况、锈蚀老化情况)。环境数据分为地域环境 (包括气候地区、海拔高度、电磁环境) 和天气环境 (包括雨雪、盐雾、沙尘、温度、湿度)。

根据上述指标体系结构, 运用熵权法的计算步骤, 采用 Matlab 软件进行运算, 得到雷达系统各级指标因素的权重划分, 具体如表 1 所示。

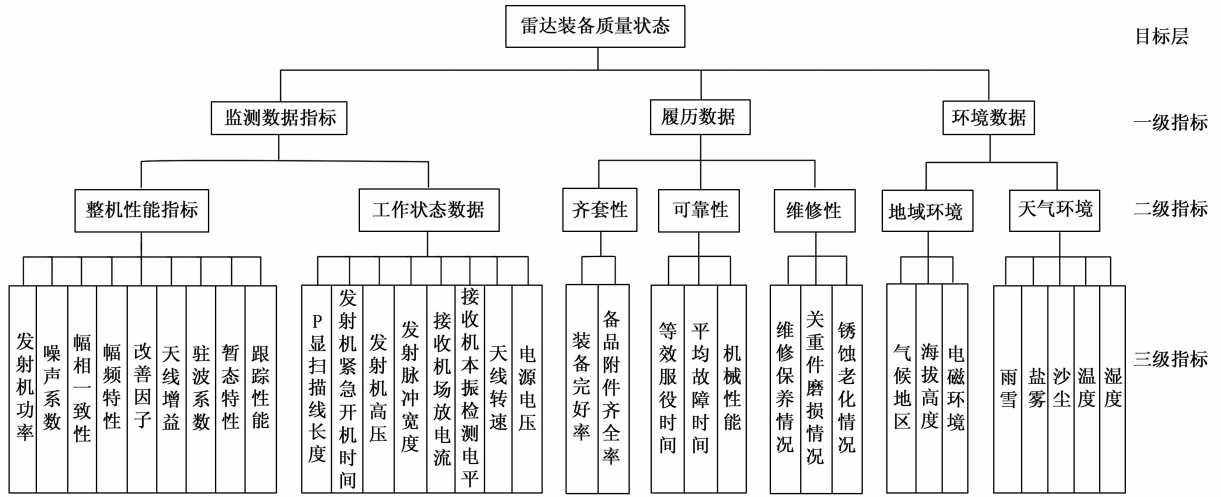


图 1 某型雷达质量评估指标体系结构

表 1 某型雷达系统各级评估指标权重

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
监测数据指标	0.379 1	整机性能指标	0.585 8	发射机功率	0.218 3
				噪声系数	0.128 8
				幅相一致性	0.091 8
				幅频特性	0.080 9
				改善因子	0.081 8
				天线增益	0.124 1
				驻波系数	0.095 7
				暂态特性	0.080 9
		跟踪性能	0.086 8		
		工作状态数据	0.414 2	P 显扫描线长度	0.102 2
				发射机紧急开机时间	0.148 5
				发射机高压	0.138 6
				发射脉冲宽度	0.101 7
				接收机场放电流	0.114 7
接收机本振检测电平	0.104 1				
履历数据	0.312	齐套性	0.412 1	装备完好率	0.562 1
				备品附件齐全率	0.437 9
		可靠性	0.291 3	等效服役时间	0.418 3
				平均故障时间	0.284 1
		维修性	0.296 6	机械性能	0.297 6
				维修保养情况	0.348 2
				关重件磨损情况	0.388 5
环境数据	0.308 9	地域环境	0.531 6	锈蚀老化情况	0.263 3
				气候地区	0.376 6
				海拔高度	0.298 9
		天气环境	0.468 4	电磁环境	0.324 5
				雨雪	0.271 5
				盐雾	0.160 1
				沙尘	0.201 7
				湿度	0.192 8
湿度	0.173 8				

3 模糊综合评判计算

依照模糊评判流程, 在确定评价指标因素后, 需要确定评价准则, 评价准则因评价目标不同也有所区别。通常依据系统的评价目标和参数的属性确定评价准则。结合雷达工作效能, 本文建立 4 个等级的评估标准: 1) 优秀: 0.8~1; 2) 良好: 0.6~0.8; 3) 一般: 0.4~0.6; 4) 较差: 0~0.4。确定了各指标权重和隶属度后, 采用加权求和算子 (·, +) 进行模糊计算。

3.1 某型雷达底层指标边界值及测试值

模糊综合评判的方法是由下至上逐层进行评估计算, 上层的隶属函数由其下层计算而来^[21]。因此, 掌握最底层指标的属性及边界值是评估运算的基础。本文以某型雷达为研究对象, 根据其具体指标参数的取值范围, 并加以实际测量, 列出其底层评估指标的边界值及测试值, 部分数据如表 2 所示。

表 2 某型雷达装备底层指标边界值及测试值

指标	边界值		测试值
	X1	X2	
幅频特性/MHz	2	3	2.7
改善因子/dB	45	60	50
幅相一致性	0.01	0.05	0.03
P 显扫描线长度/mm	60	70	67
发射机紧急开机时间/s	25	35	31
接收机场放电流/mA	37	43	39
接收机本振检测电平/V	2.5	4.5	3.2
电源电压/V	198	242	219
...
...
...

3.2 基于组合隶属函数的模糊综合评价

根据雷达系统涉及的评价因素、评判等级和指标数据特性, 选择中间型的隶属函数计算隶属度, 能提高指标数据的普适性。Trapmf (梯形)、Dsigmf (双 S 形) 和 Pimf

(π 形)这3种类型的隶属函数都是中间型的函数,且在区间分布上图形结构相似,符合模糊数学的特性。因此本文选择上述3种隶属函数分别进行计算,依照表2中雷达底层指标的边界值和测试值,求得各指标关于评语集的隶属函数,再利用方差-协方差优选法构造组合隶属函数,从而计算出各指标的最终隶属度。通过Matlab程序运算,得到如表3所示的各指标具体隶属度值。针对优秀、良好、一般、较差4个评级标准,图2~5分别给出了梯形、双S形、 π 形以及组合后的隶属函数曲线。经组合改进的隶属度函数,可信度更高,能够简化对数据的要求,提高评估的可靠性。

表3 某型雷达底层指标隶属度关系

	梯形隶属函数				双S形隶属函数			
	较差	一般	良好	优秀	较差	一般	良好	优秀
评语集隶属度	较差	一般	良好	优秀	较差	一般	良好	优秀
发射机功率	0.25	0.69	1.00	0.79	0.00	1.00	1.00	0.00
噪声系数	0.00	0.00	0.33	1.00	0.20	0.33	0.45	0.60
幅相一致性	0.71	0.84	0.67	0.36	0.50	0.30	0.08	0.01
幅频特性	0.00	0.25	1.00	0.86	0.07	0.17	0.36	0.37
改善因子	0.00	0.83	0.83	0.00	0.50	1.00	0.00	0.00
天线增益	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.50
驻波系数	0.00	0.29	0.59	1.00	0.11	0.24	0.28	0.30
P显扫描线长度	0.00	0.00	0.85	0.67	0.00	0.00	1.00	0.00
发射机紧急开机时间	0.00	0.29	1.00	1.00	0.00	1.00	0.79	0.50
发射机高压	0.00	0.00	1.00	0.62	0.00	0.50	1.00	0.00
发射脉冲宽度	0.00	0.29	1.00	1.00	0.03	0.04	0.09	0.11
接收机场放电流	0.00	1.00	1.00	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
接收机本振检测电平	0.49	1.00	1.00	0.33	0.54	0.67	0.49	0.23
天线转速	0.00	0.26	0.75	0.91	0.00	1.00	1.00	0.00
电源电压	0.21	0.93	1.00	0.73	0.00	1.00	0.80	0.00
	π 形隶属函数				组合隶属度函数			
评语集隶属度	较差	一般	良好	优秀	较差	一般	良好	优秀
发射机功率	0.13	0.81	0.90	0.91	0.13	0.81	0.98	0.70
噪声系数	0.00	0.00	0.22	1.00	0.04	0.07	0.33	0.60
幅相一致性	0.83	0.95	0.78	0.26	0.70	0.77	0.59	0.36
幅频特性	0.00	0.13	1.00	0.96	0.01	0.17	0.87	0.81
改善因子	0.00	0.94	0.94	0.00	0.10	0.94	0.70	0.19
天线增益	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.60	1.00	0.90
驻波系数	0.00	0.16	0.66	1.00	0.02	0.24	0.55	0.66
P显扫描线长度	0.00	0.00	1.00	0.78	0.00	0.00	0.97	0.63
发射机紧急开机时间	0.00	0.17	1.00	1.00	0.00	0.39	0.96	0.90
发射机高压	0.00	0.00	0.83	0.72	0.00	0.10	0.97	0.60
发射脉冲宽度	0.00	0.16	1.00	1.00	0.01	0.16	0.82	0.82
接收机场放电流	0.00	0.80	1.00	0.00	0.10	0.96	0.90	0.20
接收机本振检测电平	0.37	1.00	1.00	0.22	0.48	0.93	0.90	0.43
天线转速	0.00	0.14	1.00	0.98	0.00	0.36	0.75	0.76
电源电压	0.09	0.99	1.00	0.86	0.09	0.98	0.96	0.67

对无法直接测量的指标参数,其隶属度采用专家打分的方式给出。某型雷达指标的专家打分隶属度关系见表4,由此确定了雷达系统所有定性指标和定量指标的隶属度。求得各指标的权重和隶属度后,采用加权求和算子($\odot, +$)

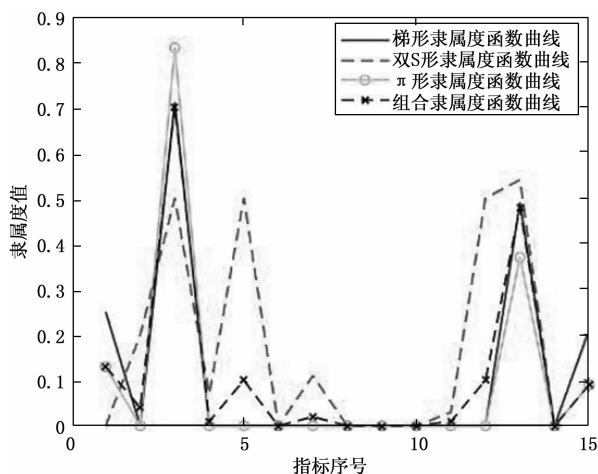


图2 较差等级隶属度对比曲线

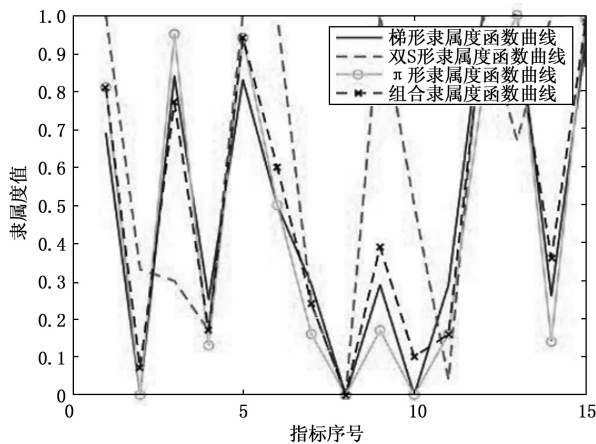


图3 一般等级隶属度对比曲线

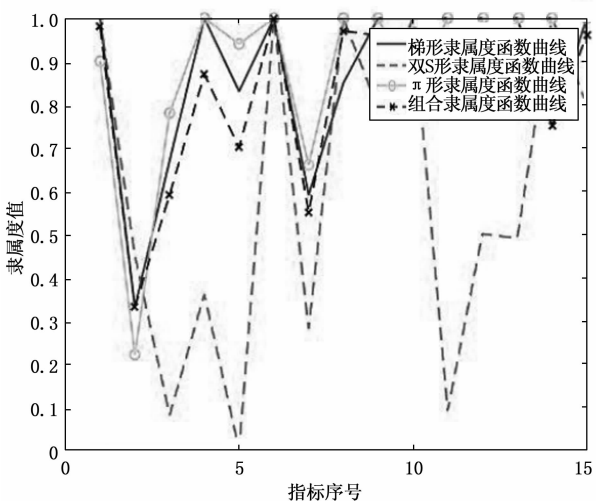


图4 良好等级隶属度对比曲线

进行模糊计算。按照整机性能指标、工作状态数据、齐套性、可靠性、维修性、地域环境、天气环境7个方面构造一级评判矩阵。以可靠性指标为例,对其进行一级模糊评判计算:

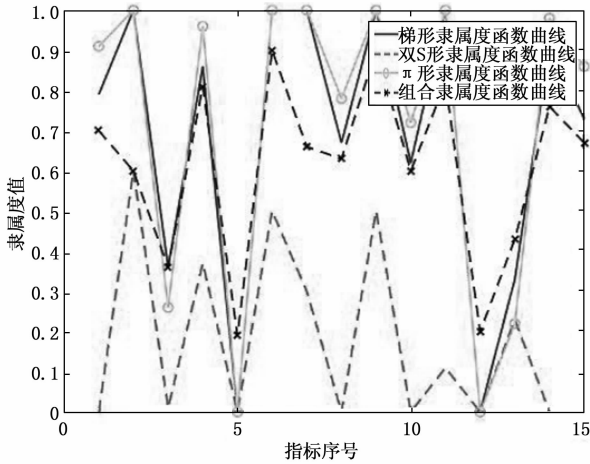


图 5 优秀等级隶属度对比曲线

表 4 某型雷达指标专家打分隶属度关系表

评语集隶属度	评语集隶属度				评语集隶属度	评语集隶属度			
	较差	一般	良好	优秀		较差	一般	良好	优秀
暂态特性	0	0.2	0.6	0.7	锈蚀老化情况	0.1	0.3	0.4	0.6
跟踪性能	0	0.3	0.7	0.8	气候地区	0	0.2	0.5	0.4
装备完好率	0.1	0.4	0.6	0.8	海拔高度	0.1	0.2	0.5	0.6
备品附件齐全率	0	0.3	0.7	0.8	电磁环境	0.2	0.3	0.5	0.3
等效服役时间	0	0.5	0.7	0.9	雨雪	0.1	0.2	0.4	0.6
平均故障时间	0.2	0.2	0.5	0.4	盐雾	0	0.1	0.7	0.5
机械性能	0	0.2	0.6	0.8	沙尘	0.3	0.4	0.5	0.3
维修保养情况	0.1	0.3	0.6	0.9	温度	0.1	0.4	0.7	0.5
关重件磨损情况	0.2	0.2	0.6	0.8	湿度	0.1	0.3	0.5	0.8

$$B_1 = W_1 \cdot R_1 =$$

$$(0.4183, 0.2841, 0.2976) \begin{pmatrix} 0 & 0.5 & 0.7 & 0.9 \\ 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.4 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.8 \end{pmatrix} =$$

$$(0.0568, 0.3255, 0.6134, 0.7282)$$

同理, 可以求得其他一级评判矩阵的评价结果。

依次采用自下而上多级模糊综合评判的方法, 逐层运算, 得到最终的评价结果向量: $A = (0.0975 \ 0.3486 \ 0.6482 \ 0.6321)$, 依据最大隶属度原则, 该型雷达的质量等级为良好。

4 结束语

本文以某型雷达为研究对象, 建立了雷达系统的评估指标体系和评价模型, 采用熵权法确定评价指标权重, 采用组合隶属函数的方法计算底层指标隶属度, 有效避免了单一隶属度函数可能产生的隶属度突变问题。利用模糊综合评价计算评估结果, 较好地专家知识的主观性与监测数值的客观性相结合, 较为全面地对雷达系统质量进行了评价。通过对某型雷达评价实例分析, 其评判结果符合预期, 验证了该评估方法的有效性, 对雷达维修保障有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 何 榕, 王大旌, 崔帅豪. 基于复杂网络理论的网络化作战体系结构效能评估 [J]. 兵工自动化, 2021, 40 (1): 43-19.
- [2] 赵丽琴, 刘 昶, 曹明生, 等. 复杂装备健康度评估方法研究综述 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 1-7.
- [3] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [4] 卜广志. 基于 AOE 模型的装备对作战体系的贡献率评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (12): 18-22.
- [5] 张新勋, 张 兵, 杨康峰. 一种定量雷达设备质量比较评判方法 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40 (9): 121-123.
- [6] 张子伟, 郭齐胜, 董志明, 等. 体系作战效能评估与优化方法综述 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (2): 303-313.
- [7] 郑 潇. 体系效能仿真分析优化方法与工具研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 周兴旺, 从福仲, 庞世春. 基于 BN-and-BP 神经网络融合的陆空联合作战效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43 (4): 3-8.
- [9] 杨远志, 王 星, 程嗣怡, 等. 基于模糊层次分析法的雷达导引头干扰效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (10): 10-14.
- [10] 李海霞. 基于模糊控制理论的建设项目经济效果评价研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2013.
- [11] 李 明. 基于安全监测的水库岸坡故障预测与健康评价研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [12] 杨家豪, 欧阳森, 石怡理, 等. 一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用 [J]. 电工电能新技术, 2014, 33 (2): 63-69.
- [13] 袁永真, 裴发根, 张鹏辉, 等. 利用模糊统计法进行天然气水合物靶区预测——以青海木里地区为例 [J]. 物探与化探, 2017, 41 (6): 1281-1286.
- [14] 张 月, 赵 罡, 胡春光, 等. 基于改进优化隶属度函数的便携式电量计量装置综合评估方法 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (11): 186-193.
- [15] 裴乐萍. 县级区域短期电力负荷预测研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [16] 张云超, 黄 铭, 姚亮. 基于检测资料的闸门安全状态模糊综合评判 [J]. 水力发电, 2019, 45 (3): 85-89.
- [17] 郭煜涛, 谢丽蓉, 包洪印, 等. 基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估 [J]. 新疆大学学报, 2022, 39 (1): 119-128.
- [18] 王 磊. 基于熵权法-BP 神经网络的城市中心区低效用地识别评价研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [19] 孙希彤, 刘秋生, 王乐军. 基于改进权值和 TOPSIS 质量评估方 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (1): 228-231, 238.
- [20] 秦园丽, 张训立, 高桂清, 等. 基于 ANP-熵权法的反舰导弹作战体系效能评估 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (15): 48-53.
- [21] 邓辉咏, 王 炎, 王 涛, 等. 基于 Vague 理论和模糊综合评判的火箭炮效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (10): 130-133.