

基于不确定性与重要度的改进 DS_mT 健康状态评估

邱文昊¹, 黄考利², 连光耀², 张西山¹, 田 杰¹

(1. 军械工程学院 四系, 石家庄 050003;

2. 军械技术研究所 一室, 石家庄 050003)

摘 要: 针对目前健康状态评估准确度不高、客观性不强的问题,引入评估指标的不确定性和重要度,提出一种基于不确定性和重要度的改进 DS_mT(Dezert-Smarandache theory)健康状态评估方法。首先,引入指标不确定性和重要度作为加权因子,能够得到比较合理的指标权重;其次,采用模糊综合评判方法,通过构造三角形梯形隶属度函数确定各指标的广义基本信度赋值;然后,基于指标权重对广义基本信度赋值进行改进 DS_mT 融合,得到各指标的广义基本信度赋值加权融合后的评估结果;最后,以某供电系统为例进行了实例验证,结果表明该方法能够赋予各评估指标较合理的权重,健康状态评估结果与系统实际运行状态相符。

关 键 词: 健康状态评估; 改进 DS_mT; 不确定性; 重要度; 模糊综合评判

中图分类号: V212.4; TP206⁺.3

文献标志码: A

Health status assessment based on uncertainty and importance degree improved DS_mT

QIU Wen-hao¹, HUANG Kao-li², LIAN Guang-yao²,
ZHANG Xi-shan¹, TIAN Jie¹

(1. The Fourth Department, Ordnance Engineering College,
Shijiazhuang 050003, China;

2. The First Research Room,

Ordnance Technology Research Institute, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Considering the health status assessment problem of lower accuracy and objectivity, the index uncertainty and importance degree was introduced, and then a method of health status assessment based on uncertainty and importance degree improved DS_mT (Dezert-Smarandache theory) was proposed. Firstly, the uncertainty and importance degree was employed to determine the reasonable weight of index. Then the method of fuzzy comprehensive evaluation was used to determine the basic belief assignment of each index by building triangle trapezoidal membership function, and then the basic belief assignment was combined to get the assessment results using the weight DS_mT fusion rule based on the index weight. Finally, the method was used to evaluate a power supply system. The results indicate that the proposed method can assign reasonable weight to the index, and the health

收稿日期: 2015-04-30

基金项目: 预先研究科研项目(51327030104)

作者简介: 邱文昊(1990—),男,硕士生,主要从事故障预测与健康管理研究。

引用格式: 邱文昊,黄考利,连光耀,等. 基于不确定性与重要度的改进 DS_mT 健康状态评估[J]. 航空动力学报,2017,32(1):96-104. QIU Wenhao, HUANG Kaoli, LIAN Guangyao, et al. Health status assessment based on uncertainty and importance degree improved DS_mT[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 96-104.

status assessment result is consistent with the actual state.

Key words: health status assessment; improved DSmT; uncertainty; importance degree; fuzzy comprehensive evaluation

信息化条件下装备结构日益复杂,故障发生率较高,导致装备全寿命周期的维修保障费用越来越高,同时定期维修和事后维修仍为当前的主要维修方式,特别是定期维修的预防性维修方式,对于有规律可循的机械部组件可以通过定时定程的方式进行预防性维修,而电类部组件故障的失效机理明显不同于机械部组件,具有随机性、间歇性、耦合性等特点,采用现有的维修制度容易产生过度维修或失修,基于状态的维修(condition-based maintenance, CBM)能有效解决此类问题,即基于装备的运行数据评估系统的运行状态,在可能出现性能下降前实施预防性维修,进而降低维修保障费用,而实现基于状态的维修的关键环节就是健康状态评估。

目前,健康状态评估较多地应用于桥梁、电力设备以及航空航天领域,比较常用的评估方法有模糊综合评判法^[1]、灰色聚类法^[2]、Bayes 网络法^[3]和人工神经网络法^[4]。利用 Bayes 网络和人工神经网络的方法进行健康状态评估往往需要较大训练样本^[5-6]。文献[7]改进了传统以概率为主的故障模式、影响及危害分析,提出用故障发生后的严酷度级别进行危害分析的方法对分系统进行健康状态评估;文献[8]利用 D-S(Dempster-Shafer)证据理论对不确定信息进行融合;文献[9]应用模糊灰色理论评估高压断路器状态建立了递阶层次分析模型;文献[10]提出更具客观性的熵权灰色关联和 D-S 证据理论结合的评估方法。上述评估方法大多是针对评估对象的特点研究特定的评估方法,应用领域有限。DSmT 是一种数据融合的新方法,可以解决由信度函数所表示的任意独立信息源的数据融合问题,能有效处理强冲突证据的融合问题。目前,DSmT 主要应用于敌我识别、故障诊断、机器人环境感知等领域,其较好的信息融合能力没有应用到多指标融合的健康状态评估中,而且目前的 DSmT 融合方法应用也没有考虑信息的不确定性与重要度,指标权重确定上存在一定的不足。与其他方法相比,融合了不确定性与重要度的 DSmT 健康状态评估方法存在一定优势,不仅能处理证据冲突问题,而且能从主客观考虑对指标进行赋权。D-S 证据理论不能有效处理证据冲突较大的融合问题;基于信息熵的权

重确定方法只考虑了数据本身,没有考虑系统结构等诸多因素;人工智能方法通常需要较大的训练样本,而且提高模型的训练精度是普遍存在的难题;故障模式、影响及危害分析方法过程比较繁琐,而且分析结果对评估结果影响很大,主观性较强;层次分析法仅从主观考虑系统不同层次的对比,缺乏对客观数据的处理;基于模糊理论的方法模糊算子的选择对评估结果影响较大。

因此,本文提出利用不确定性和重要度改进 DSmT 融合和模糊综合评判的方法进行健康状态评估,该方法不仅能解决评估指标间证据冲突问题,还考虑从主客观赋予评估指标不同权重,能最大程度提高评估的准确性。首先,建立评估对象的指标体系,对采集数据进行预处理;然后基于指标不确定性与重要度计算各指标权重;接着采用模糊综合评判方法,通过构造三角形梯形隶属度函数确定各指标的广义基本信度赋值;最后,基于指标权重对广义基本信度赋值进行改进 DSmT 融合,得到评估结果。

1 改进 DSmT 融合规则

1.1 DSmT 融合规则

DSmT 是 2001 年由 Dezert 和 Smarandache 提出的一种将似是而非推理方法和自相矛盾用于数据融合的新理论^[11-13],下面给出 DSmT 的基本定义。

定义 1 超幂集 D^θ

$\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ 为包含 n 个完备命题的识别框架,定义超幂集 D^θ 为 Θ 中命题,以及通过 $\cup$ 和 $\cap$ 的运算组成的所有的复合命题的集合,满足以下条件:

- 1) $\emptyset, \theta_1, \dots, \theta_n \in D^\theta$.
- 2) 如果 $A, B \subset D^\theta$, 那么 $A \cap B \subset D^\theta, A \cup B \subset D^\theta$.
- 3) 除了条件 1) 和条件 2) 中包含的命题,再没有其他命题属于 D^θ .

定义 2 广义基本信度赋值

在识别框架 $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ 下,存在一组映射 $m(\cdot): D^\theta \rightarrow [0, 1]$, 满足下式

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A \subset D^\theta} m(A) = 1 \quad (1)$$

则 $m(A)$ 为 A 的广义基本信度赋值.

定义 3 经典 DSm 组合规则

对于识别框架 Θ 不加其他约束条件的自由 DSm 模型 $M^f(\Theta)$, 设两个高度冲突的证据源的广义基本信度赋值为 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$, 经典的 DSm 组合规则 $m_{M^f(\Theta)}(\cdot) \triangleq [m_1 \oplus m_2](\cdot)$ 定义如下:

$$\begin{aligned} \forall A \neq \emptyset \subset D^\theta, \\ m_{M^f(\Theta)}(A) \triangleq [m_1 \oplus m_2](A) = \\ \sum_{\substack{X_1, X_2 \in D^\theta \\ (X_1 \cap X_2) = A}} m_1(X_1) m_2(X_2) \end{aligned} \quad (2)$$

由于 D^θ 的命题是由识别框架 Θ 中通过 $\cup$ 和 $\cap$ 的运算组成的, 因此 Θ 中命题个数的增加导致超幂集 D^θ 中命题个数也急剧增加, 当 Θ 中只有 5 个命题时, D^θ 中的命题数就会增加到 167 个, 而得到准确的健康状态等级才是健康状态评估的目的, 通常不需要将命题如此细化, 因此可以把评估识别框架里不需要的命题的信度分配给其他命题, 采用 PCR5 (proportional conflict redistribution rules 5) 比例冲突重新分配原则^[14] 进行冲突再分配:

$$\begin{aligned} \forall A \neq \emptyset \in D^\theta \\ m_{M^f(\Theta)}(A) \triangleq [m_1 \oplus m_2](A) = \\ \sum_{\substack{X_1, X_2 \in D^\theta \\ (X_1 \cap X_2) = A}} m_1(X_1) m_2(X_2) + \\ \sum_{\substack{X_1 \in D^\theta \\ X_1 \cap A = \emptyset}} \left[\frac{m_1^2(A) m_2(X_1)}{m_1(A) + m_2(X_1)} + \frac{m_2^2(A) m_1(X_1)}{m_2(A) + m_1(X_1)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 证据 1 的 X_1 和证据 2 的 X_2 , 以及证据 1 的 X_2 和证据 2 的 X_1 的冲突构成了证据间的冲突, 而冲突证据的信度就是根据 PCR5 比例冲突重新分配原则重新分配到 X_1 和 X_2 的组合信度上.

上述组合规则是对证据进行等权值的信息融合, 没有考虑不同证据的信任度, 可以认为是忽略了一部分先验信息^[15], 这种情况下直接进行 DSmT 融合会导致结果不够准确. 如果能结合先验信息, 即各个证据权值, 进行信息融合, 能够得到更加准确的融合结果.

1.2 基于信息熵的指标不确定性确定

信息熵用于表示数据的有效信息量, 信息熵越大, 数据提供信息就越多^[16], 依据 Shannon 熵理论, 信息熵表达式为

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_a P_i \quad (4)$$

式中 P_i 为事件 i 发生的概率, 信息熵的单位与 a 的值有关, 当 $a=2$ 时, 单位为比特 (bit); 当 $a=e$ 时, 单位为奈特 (nat), 一般理论推理都以 e 为底数; a 也可以为其他值, 并且其对应的单位可以互换.

设 n 个评估对象, m 个评估指标的原始数据矩阵为

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

式中 x_{ij} 表示第 i 个评估对象的第 j 个评估指标的原始数值, 对 X_{ij} 按式(5)~式(7)进行标准化.

最大最优型指标

$$b_{ij} = 1 - \frac{c_{\min} - c_i}{c_{\min}} \quad (5)$$

最小最优型指标

$$b_{ij} = 1 - \frac{c_i - c_{\max}}{c_{\max}} \quad (6)$$

偏差型指标

$$b_{ij} = 1 - \left| \frac{c_i - c_{\max}}{c_{\max}} \right| \quad (7)$$

上式中 $c_{\min}$ 为指标的警戒值或注意值, $c_{\max}$ 为故障状态的最大值, c_i 为指标的测量值, $c_{\max}$ 为指标的最优值; b_{ij} 为第 i 个评估对象的第 j 个评估指标标准化数值, $b_{ij} \in [0, 1]$. 则对原始数据进行标准化后的矩阵为 $B = (b_{ij})_{m \times n}$.

对于 n 个评估对象, m 个评价指标的评估问题, 定义第 j 个评价指标的不确定性为

$$I(x_j) = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

式中 $k = 1/\ln n$, $f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij}$. 规定当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$.

评估指标不确定性的值表示监测数据的有效信息量的相对大小, 评估指标不确定性越大, 评估指标数据的信息量越大, 对评估对象的作用也就越大, 相应的权重就越大. 但是, 不确定性仅从监测数据的角度反映了有效信息量的相对大小, 如果仅用评估指标不确定性来计算评估指标的权重是不太合理的, 因为由评估指标计算得到系统健康状态等级需要考虑包括结构功能在内的诸多因素, 仅依据评估指标不确定性来分配权重是不够合理的. 因此, 需要综合考虑系统各方面因素, 下

面引入评估指标重要度的概念对基于不确定性的权重确定方法进行改进。

1.3 基于层次分析法的评估指标重要度确定

构造评估对象的结构层次模型,在层次化模型^[17]下,对评估指标相对于评估对象的重要程度按表 1 进行两两比较得到比较矩阵 $\mathbf{A} = \{a_{ij}^c\}$ 。

表 1 三标度及其含义
Table 1 Three-scale and meaning

标度	含义
0	两个比较元素,前者更重要
1	两个比较元素,两者同等重要
2	两个比较元素,后者更重要

由式(9)计算得到重要性序列指数 u_i 为比较矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 i 行元素之和,令 $u_{\max} = \max(u_i)$, $u_{\min} = \min(u_i)$ 。

$$u_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}^c \tag{9}$$

通过下式确定判断矩阵 $\mathbf{D} = (d_{ij})_{n \times m}$

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{u_i - u_j}{u_{\max} - u_{\min}}(b_m^c - 1) + 1 & u_i > u_j \\ 1 & u_i = u_j \\ \left[\frac{u_j - u_i}{u_{\max} - u_{\min}}(b_m^c - 1) \right]^{-1} & u_i < u_j \end{cases} \tag{10}$$

式中 b_m^c 为基点比较标度,将标度按照九标度判断规则进行比较后可得 b_m^c 值。

将判断矩阵 $\mathbf{D}$ 中元素按列相加,可以得到各评价指标相对于评估对象的重要度为

$$\mathbf{Z}_j = \sum_{i=1}^n d_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \tag{11}$$

1.4 不确定性与重要度结合的改进 DS_mT 融合

记评估对象指标的不确定性为 $\mathbf{I}_j$,重要度为 $\mathbf{Z}_j$,则进行 DS_mT 融合的权重为

$$W_{(\omega)_j} = \left[\frac{\mathbf{I}_j}{\sum_{j=1}^m \mathbf{I}_j} \cdot \frac{\mathbf{Z}_j}{\sum_{j=1}^m \mathbf{Z}_j} \right] \bigg/ \left[\sum_{j=1}^m \frac{\mathbf{I}_j}{\sum_{j=1}^m \mathbf{I}_j} \cdot \frac{\mathbf{Z}_j}{\sum_{j=1}^m \mathbf{Z}_j} \right] \tag{12}$$

令 $\omega_{I_j} = \mathbf{I}_j / \sum_{j=1}^m \mathbf{I}_j$, $\omega_{Z_j} = \mathbf{Z}_j / \sum_{j=1}^m \mathbf{Z}_j$, 则式(12)可简化为

$$W_{(\omega)_j} = \omega_{I_j} \omega_{Z_j} / \sum_{j=1}^m (\omega_{I_j} \omega_{Z_j}) \tag{13}$$

利用不确定性和重要度确定评估指标权重的

方法不仅考虑了指标数据本身的信息量,还考虑了系统结构功能,通过专家确定各指标的重要度,比较合理。

那么,考虑各评估指标权重的改进 DS_mT 融合公式为

$$\begin{aligned} \forall A \neq \emptyset \in D^\theta \\ m_{M^f(\theta)}(A) \triangleq (m'_1 \oplus m'_2)(A) = \\ \sum_{\substack{X_1, X_2 \in D^\theta \\ (X_1 \cap X_2) = A}} m'_1(X_1) m'_2(X_2) + \\ \sum_{\substack{X_1 \in D^\theta \\ X_1 \cap A = \emptyset}} \left[\frac{m'_2(A) m'_1(X_1)}{m'_1(A) + m'_2(X_1)} + \frac{m'_2(A) m'_1(X_1)}{m'_2(A) + m'_1(X_1)} \right] \end{aligned} \tag{14}$$

其中

$$m'(\cdot) = W_{(\omega)_j} m(\cdot) \tag{15}$$

由式(14)可以看出,如果一个评估指标通过指标不确定性和重要度确定的权值越大,其在 DS_mT 融合中所占的比重就会越大,对于健康状态评估的作用也就越大.对于两个以上证据源的加权融合规则可以根据式(14)通过多个证据两两组合得到。

2 基于模糊综合评判的广义基本信度赋值确定

由 DS_mT 相关理论可知,基于 DS_mT 的信息融合方法是对广义基本信度赋值进行融合,因此必须首先确定广义基本信度赋值,下面采用模糊综合评判的方法构造广义基本信度赋值。

2.1 因素集与评语集

根据评估对象的性能特点以及评估对象的维修保障要求确定的评估结果组成的集合称为评语集,即健康状态等级,通常分为 5 个等级^[17],记为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$.能够反应评估对象运行状态的指标组成的集合称为因素集,表示为 $U = \{u_1^i, u_2^i, u_3^i, \dots, u_n^i\}$ 。

2.2 隶属度函数构造

因素集 U 到评语集 V 的映射称为隶属度函数,各健康状态等级对应的的 5 个隶属度函数定义为: h_1 表示健康, h_2 表示亚健康, h_3 表示可用, h_4 表示故障, h_5 表示报废.根据描述直观、计算简单的原则,隶属度函数在没有特殊要求时通常表示为转折可变的分段线性函数,如图 1 所示,本文采用三角形和梯形结合的隶属度函数,其中转折可由相关领域专家依据经验给出. $[0, e_1]$,

$[e_1, e_2], [e_2, e_3], [e_3, e_4], [e_4, 1]$ 分别为 $h_5 \sim h_1$ 的主值区间.

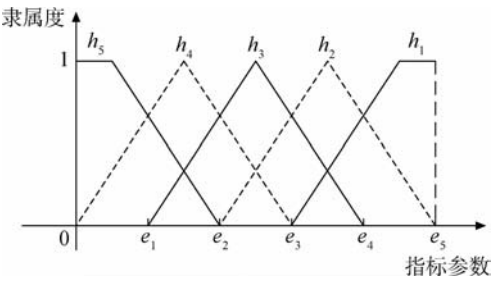


图 1 三角形梯形隶属度函数
Fig. 1 Triangle trapezoid membership function

将指标实测值进行标准化后的数据代入各隶属度函数得到实测指标对各健康状态等级的隶属度矩阵 M_i

$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{15} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & \cdots & m_{i5} \end{bmatrix}$$

其中 m_{ij} 为指标隶属于评语集中等级的隶属度. 由于数据是按规定时间随机采集的, 因此不同监测数据权重应该是相等的, 采用式 (16) 加权平均型模糊算子将各隶属度进行等权值综合得到一个指标的隶属度.

$$f_{\Sigma}(x_1, x_2, \cdots x_n) = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (16)$$

其中 w_i 为第 i 个因素在综合评判中的权重.
各指标对应的广义基本信度赋值 $m(\cdot)$ 由式 (17) 将各指标隶属度矩阵根据按行归一化计算得到.

$$m_j = m_{ij} / \sum_{j=1}^n m_{ij} \quad (17)$$

3 实例分析

3.1 构建评估指标体系

以某装备供电系统为例, 首先构建由关键组成部件和各部件参数构成的系统两级评估指标体系, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 某装备供电系统状态评估因素集可以表示为: 第 1 级评估因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{蓄电池, 主机电源, 辅机电源}\}$; 第 2 级评估因素集^[18] $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \cdots, u_{im}\}$, 其中 u_{ij} 为第 i 个一级元素的第 j 个评价指标.

3.2 原始数据标准化

由图 2 可知, 对供电系统进行健康状态评估的指标值单位量纲不同, 为将不同的指标值融合, 需要将检测仪采集的原始数据按式 (5)~式 (7) 进行标准化处理, 转换成 $[0, 1]$ 范围内的量纲归一化数据. 标准化处理后的数据见表 2.

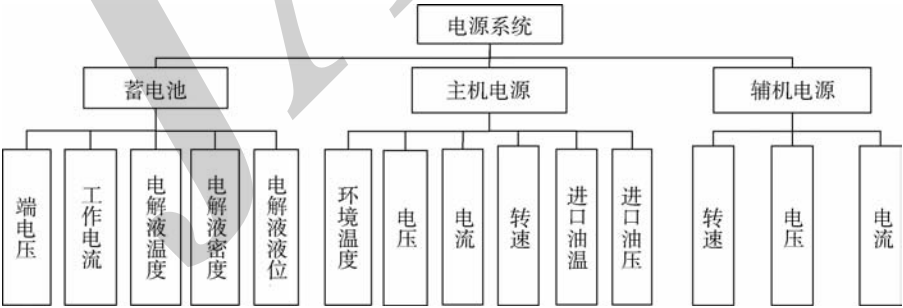


图 2 供电系统评估指标体系
Fig. 2 Assessment index of power supply system

表 2 健康状态评估指标标准化数据
Table 2 Standardized data of health status assessment index

序号	蓄电池					主机电源					辅机电源		
	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{31}	u_{32}	u_{33}
1	0.9017	0.3324	0.9150	0.9652	0.9315	0.2684	0.9685	0.8100	0.8426	0.9523	0.6484	0.1667	0.6247
2	0.8735	0.4286	0.4230	0.6453	0.5500	0.3771	0.5510	0.2075	0.5500	0.5194	0.5984	0.2412	0.5891
3	0.4250	0.7200	0.7700	0.2328	0.2415	0.6000	0.2432	0.7425	0.1000	0.2156	0.4113	0.5000	0.7125

3.3 权重确定

以蓄电池为例,计算蓄电池各指标的权重. 首先对原始数据进行归一化得到各指标处理后的矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} 0.2229 & 0.0822 & 0.2262 & 0.2386 & 0.2302 \\ 0.2991 & 0.1468 & 0.1448 & 0.2210 & 0.1883 \\ 0.1779 & 0.3013 & 0.3223 & 0.0974 & 0.1011 \end{bmatrix}$$

由式(8)计算可得指标不确定性 $I(x_j) = [0.9127 \ 0.7723 \ 0.8929 \ 0.8214 \ 0.8048]$, 从而求得 $\omega_{I_j} = [0.2171 \ 0.1837 \ 0.2124 \ 0.1954 \ 0.1914]$.

专家评判指标的相对重要性得到的比较矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
, 蓄电池评价指标的重要

性排序为 $u_{15} > u_{14} > u_{13} > u_{11} > u_{12}$, 按九标度比较 u_{15} 与 u_{12} 的相对重要程度为 3, 即 $b_m^c = 3$, 由式(9)~ 式(10)得判断矩阵 $D =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ 0.5 & 0.33 & 1 & 2 & 3 \\ 0.33 & 0.25 & 0.5 & 4 & 2 \\ 0.25 & 0.2 & 0.33 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$
, 则由式(11)可求

得指标重要度 $Z_j = [4.08 \ 2.28 \ 6.83 \ 13.5 \ 15]$, 从而求得 $\omega_{Z_j} = [0.0979 \ 0.0547 \ 0.1638 \ 0.3238 \ 0.3598]$. 由式(13)得 $W_{(Z)_j} = [0.1072 \ 0.0507 \ 0.1755 \ 0.3192 \ 0.3474]$ 利用上述方法可得主机电源各指标权值 $W_{(Z)_j} = [0.2067 \ 0.1406 \ 0.1547 \ 0.2193 \ 0.1573 \ 0.1214]$, 辅机电源各指标权值 $W_{(Z)_j} = [0.3593 \ 0.3841 \ 0.2566]$.

3.4 供电系统各组成部件健康状态评估

采用模糊综合评判确定广义基本信度赋值, 首先要构造隶属度函数, 根据专家经验确定隶属度函数的主值区间, 得到隶属度函数表达式为

$$h_1 = \begin{cases} 0 & x < 0.6 \\ \frac{x-0.6}{0.3} & 0.6 \leq x \leq 0.9 \\ 1 & x \geq 0.9 \end{cases}$$

$$h_2 = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{x-0.4}{0.3} & 0.4 \leq x \leq 0.7 \\ \frac{1-x}{0.3} & 0.7 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

$$h_3 = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{x-0.2}{0.3} & 0.2 \leq x \leq 0.5 \\ \frac{0.8-x}{0.3} & 0.5 \leq x \leq 0.8 \end{cases}$$

$$h_4 = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{x}{0.3} & 0 \leq x \leq 0.3 \\ \frac{0.6-x}{0.3} & 0.3 \leq x \leq 0.6 \end{cases}$$

$$h_5 = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{0.4-x}{0.3} & 0.1 \leq x \leq 0.4 \\ 1 & x \leq 0.1 \end{cases} \quad (18)$$

将表 2 中的数据代入式(18)就可以得到各评估指标对应的隶属度矩阵 M_i , 由式(17)归一化就得到对应各指标的广义基本信度赋值 $m(\cdot)$. 表 3、表 4、表 5 分别为蓄电池、主机电源、辅机电源各指标的广义基本信度赋值.

结合 3.3 节得到的各指标权值根据式(14)和式(15)融合得到的供电系统各组成部件的健康状态等级如表 6 所示.

表 3 蓄电池各指标广义基本信度赋值
Table 3 Each index generalization basic belief assignment of battery

参数	健康	亚健康	可用	故障	报废
端电压 m_1	0.4688	0.2042	0.1839	0.1431	0
工作 电流 m_2	0.0872	0.2242	0.3205	0.3190	0.0491
电解液 温度 m_3	0.3796	0.2730	0.2044	0.1430	0
电解液 密度 m_4	0.2847	0.2309	0.1547	0.1919	0.1378
电解液 液位 m_5	0.2381	0.1734	0.2313	0.2314	0.1258

表 4 主机电源各指标广义基本信度赋值
Table 4 Each index generalization basic belief assignment of the host power

参数	健康	亚健康	可用	故障	报废
环境 温度 m_1	0	0.1549	0.3450	0.3805	0.1196
电压 m_2	0.2452	0.1491	0.2388	0.2388	0.1281
电流 m_3	0.2786	0.3538	0.0514	0.1640	0.1522
转速 m_4	0.1941	0.2459	0.2000	0.1200	0.2400
进口 油温 m_5	0.2412	0.1343	0.2381	0.2381	0.1483
进口 油压 m_6	0.0384	0.3632	0.1509	0.1509	0

表 5 辅机电源各指标广义基本信度赋值
Table 5 Each index generalization basic belief assignment of the auxiliary power

参数	健康	亚健康	可用	故障	报废
转速 m_1	0	0.0746	0.2544	0.3787	0.2924
电压 m_2	0.0197	0.3439	0.4815	0.1549	0
电流 m_3	0.0836	0.2568	0.2568	0.2116	0.1911

表 6 供电系统各关键部件健康状态等级
Table 6 Key component health status level of power supply system

参数	健康	亚健康	可用	故障	报废
蓄电池 m_1	0.2811	0.1748	0.2267	0.2226	0.0948
主机 电源 m_2	0.0939	0.2032	0.3373	0.3012	0.0644
辅机 电源 m_3	0.0158	0.2235	0.4049	0.2308	0.1249

将表 6 中各组成部件的健康状态等级作为对供电系统进行健康状态等级评估的 3 个证据源,也就是作为供电系统的广义基本信度赋值对其进行评估,根据上述各关键部件健康状态等级的计算步骤可以得出各部件的权值 $W_{(z)}_j = [0.1624$
 $0.3008 \quad 0.5368]$,进行改进 DS_mT 融合得到的供电系统健康状态等级如表 7 所示。

利用本文采集数据进行 DS_mT 融合得到的供电系统健康状态等级如表 8 所示。

供电系统的实际健康状态可由领域专家、使用人员、维修人员和检测人员通过打分评判方式确定,这种评判方法虽然具有一定主观性,但是对于定性分析健康状态等级具有一定参考价值,综合各领域专家意见得出的健康状态结果如表 9 所示。

表 7 供电系统改进 DS_mT 融合健康状态评估结果
Table 7 Health status assessment result with improved DS_mT fusion of the power supply system

健康状态等级	健康	亚健康	可用	故障	报废
信度值	0.0206	0.2092	0.4290	0.2463	0.0949

表 8 供电系统 DS_mT 融合健康状态评估结果
Table 8 Health status assessment result with DS_mT fusion of the power supply system

健康状态等级	健康	亚健康	可用	故障	报废
信度值	0.2181	0.3004	0.2811	0.1527	0.0481

表 9 供电系统健康状态专家评判结果
Table 9 Health status assessment result with expert evaluation of the power supply system

健康状态等级	健康	亚健康	可用	故障	报废
信度值	0	0.20	0.55	0.25	0

改进 DS_mT 融合、DS_mT 融合和实际健康状态评估的结果对比如图 3 所示。

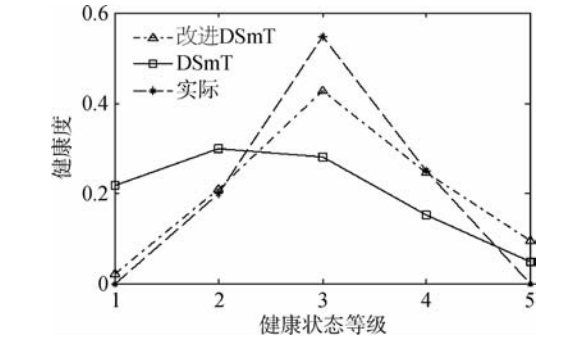


图 3 健康状态评估结果对比图
Fig. 3 Comparison of health status evaluation results

根据以上评估结果,

1) 本文提出的健康状态评估方法能够实现
对多指标系统的健康状态评估,

2) 分析表 7 的评估结果可以看出,通过改进 DS_mT 对证据源融合后供电系统对于可用状态 h_3 等级的信度赋值最高,因此该供电系统的健康状态等级为可用,由于 h_4 比 h_2 的信度赋值高,因此认为其状态有变差的趋势,这与实际健康状态符. DS_mT 融合后的结果对亚健康状态 h_2 等级的信度赋值最高,而且 h_2 和 h_3 等级的区分度不大,很难判断系统处于何种健康状态. 通过图 3 也可以看出,本文提出的方法评估结果与实际情况更加接近,评估效果更好.

4 结 论

1) 本文主要对健康状态评估方法进行研究,提出了基于指标不确定性和重要度的改进 DS_mT 健康状态评估方法,并以某供电系统为例,验证了该方法的有效性.

2) 运用 DS_mT 理论解决高冲突证据融合的能力,提出改进的 DS_mT 信息融合算法,通过基于不确定性和重要度结合的权值计算方法赋予每个指标较合理的权值,避免了将反映系统健康状态的各因素等权值融合,同时针对复杂系统评估问题,提出采用能够通过模糊关系定量描述因素集与状态间的关系的模糊综合评判方法确定广义基本信度赋值.

3) 实例验证表明,该评估方法能够通过赋予评估指标较合理的权重对系统健康状态进行客观有效地评估,准确确定系统健康状态.

参考文献:

[1] 李鑫,刘莹莹,李赣华,等. 基于模糊变权原理的卫星健康评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 476-480.
LI Xin, LIU Yingying, LI Ganhua, et al. Assessment of satellite health state based on fuzzy variable weight theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 476-480. (in Chinese)

[2] 邢宏珍,黄仙. 基于灰色综合聚类分析法的发电设备状态评价[J]. 现代电力, 2007, 24(1): 63-67.
XING Hongzhen, HUANG Xian. Evaluation on conditions of equipment in power plant based in grey synthetic clustering method[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(1): 63-67. (in Chinese)

[3] 崔晓飞,蒋科艺,王永华. 基于贝叶斯信息融合的航空发动机健康状态评估方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(4): 39-42.
CUI Xiaofei, JIANG Keyi, WANG Yonghua. Research on aero-engine health condition evaluation technology based on Bayesian fusion[J]. Gas Turbine Experiment and Re-

search, 2009, 22(4): 39-42. (in Chinese)

[4] 宁梓呈,郑玉航,王爱亮. 基于 PCA-GA-BP 神经网络的状态评估算法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(9): 27-30.
NING Zicheng, ZHENG Yuhang, WANG Ailiang. Condition estimating algorithm based on PCA-GA-BP neural network[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(9): 27-30. (in Chinese)

[5] 安实,龙江. 基于贝叶斯网络的卫星型号系统状态评估模型[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 548-551.
AN Shi, LONG Jiang. Model of satellite system state evaluation based on Bayers network[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(5): 548-551. (in Chinese)

[6] 尚鑫,徐岳,马保林,等. 基于神经网络的混凝土斜拉桥健康状态评估[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(8): 80-83.
SHANG Xin, XU Yue, MA Baolin, et al. Health condition assessment of concrete cable-stayed bridge based on ANN [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(8): 80-83. (in Chinese)

[7] 李俨,陈海,张清江,等. 无人机系统健康状态评估方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 562-567.
LI Yan, CHEN Hai, ZHANG Qingjiang, et al. Assessment method of health condition for UAV systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(3): 562-567. (in Chinese)

[8] 耿俊豹,黄树红,金家善,等. 基于 D-S 证据理论的舰船技术状态评估方法[J]. 舰船科学技术, 2006, 2(3): 99-102.
GENG Junbao, HUANG Shuhong, JIN Jiashan, et al. A method for ship technical condition evaluation based on D-S evidence theory[J]. Ship Science and Technology, 2006, 2(3): 99-102. (in Chinese)

[9] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167. (in Chinese)

[10] 李特,冯琦,张堃. 基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论的威胁评估[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 380-382.
LI Te, FENG Qi, ZHANG Kun. Threat assessment based on entropy weight grey incidence and D-S theory of evidence[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(2): 380-382. (in Chinese)

[11] WEN Chenglin, XU Xiaobin, JIANG Haina, et al. A new DS_mT combination rule in open frame of discernment and its application [J]. Science China: Information Sciences, 2012, 55(3): 551-557.

[12] HU Lifang, GUAN Xin, HE You. Efficient combination rule of Dezert-Smarandache theory[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(6): 1139-1144.

[13] 李新德,杨伟东,吴雪健. 一种快速分层递阶 DS_mT 近似推理融合方法: B[J]. 电子学报, 2011, 39(3A): 31-36.

LI Xinde, YANG Weidong, WU Xuejian. A fast approximate reasoning method in hierarchical DS_mT: B[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3A): 31-36. (in Chinese)

[14] 黄心汉, 李新德. DS_mT 理论及其在信息融合中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 14-65.

[15] 孟光磊, 龚光红. 证据源权重的计算及其在证据融合中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(11): 1365-1368.

MENG Guanglei, GONG Guanghong. Weight coefficients calculation for evidence sources and it's application in evidences fusion[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(11): 1365-1368. (in Chinese)

[16] ZOU Zhihong, YUN Yi, SUN Jingnan. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020-1023.

[17] 古莹奎, 黄开启. 基于领域专家知识的发动机模糊可靠性分配方法[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(5): 1143-1149.

GU Yingkui, HUANG Kaiqi. Fuzzy reliability allocation method for engine based on the experts' knowledge[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(5): 1143-1149. (in Chinese)

[18] 赵德孜, 温卫东, 段成美. 基于模糊数的航空发动机可靠性预计模型[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(3): 320-325.

ZHAO Dezi, WEN Weidong, DUAN Chengmei. A model of aeroengine reliability prediction based on fuzzy number[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(3): 320-325. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)