

引用格式: 逯程, 徐廷学, 王虹. 基于云模型与证据理论的雷达导引头状态评估[J]. 电光与控制, 2018, 25(6): 44-47. LU C, XU T X, WANG H. Condition assessment of radar seeker based on cloud model and evidence theory[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6): 44-47.

## 基于云模型与证据理论的雷达导引头状态评估

逯程<sup>1</sup>, 徐廷学<sup>1</sup>, 王虹<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学兵器科学与技术系, 山东烟台 264001; 2. 中央军委联合参谋部第55研究所, 北京 100094)

**摘要:** 作为视情维修(CBM)的关键环节, 状态评估对装备后续CBM决策工作具有重要影响。为了使状态评估更加准确合理, 针对现有评估方法主观性较强等问题, 提出一种基于云模型与D-S证据理论(DST)的装备状态评估模型。第一步利用云模型求取状态指标的隶属度, 第二步进行证据源修正, 最后通过D-S证据理论融合装备多个测试指标得到评估结果。通过雷达导引头状态评估实例分析, 验证了新方法的合理性。

**关键词:** 状态评估; 故障诊断; 云模型; 灰靶贡献度; D-S证据理论; 雷达导引头

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.010

## Condition Assessment of Radar Seeker Based on Cloud Model and Evidence Theory

LU Cheng<sup>1</sup>, XU Ting-xue<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>

(1. Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China;  
2. No.55 Institute, Joint Staff Department, Beijing 100094, China)

**Abstract:** As the key link of Condition-Based Maintenance (CBM), condition assessment has an important influence on the subsequent CBM decision-making of equipment. In order to make the status assessment more accurate and reasonable, a method of equipment condition assessment based on cloud model and D-S evidence theory is put forward to overcome the strong subjectivity of existing evaluation methods. The first step is to use the cloud model to obtain the membership degree of the state index, and the second step is to modify the source of the evidence. Finally, the multiple evaluation indexes are fused by D-S evidence theory, and the evaluation results are obtained. The rationality of the new method is verified by the example analysis of radar seeker condition evaluation.

**Key words:** condition assessment; fault diagnosis; cloud model; grey target contribution degree; D-S evidence theory; radar seeker

### 0 引言

随着装备结构日趋复杂, 故障诊断及维修保障模式也面临新的挑战, 视情维修(CBM)正逐步取代传统的定时维修, 成为装备综合保障工作发展的新趋势<sup>[1]</sup>。装备的技术状态评估作为CBM的重要环节, 能够为装备维修决策提供依据和支持, 对于实现装备精确保障任务具有重要意义。

随着信息融合技术的发展, D-S证据理论在装备状

态评估方面已经成功运用<sup>[2-3]</sup>。作为一种不确定性推理方法, 20世纪60年代D-S证据理论<sup>[4]</sup>诞生于美国学者DEMPSTER在多值映射方面的工作, 后由其学生SHAFFER加以扩充和完善。相对于传统的概率理论, 证据理论所定义的置信函数和似真函数, 对信息的狭义不确定性等认知方面的表示、度量、处理都更为灵活, 这就更加有利于描述来自不同渠道的不完整的模糊信息; 同时, 由于Dempster证据合成公式的引入, 利用多源信息获得的估计结果也更加可靠。

现有的装备技术状态评估主要集中在层次分析法<sup>[5]</sup>、模糊集合理论<sup>[6-7]</sup>、人工神经网络<sup>[8]</sup>、隐Markov模型<sup>[9]</sup>、贝叶斯网络<sup>[10]</sup>等方法, 而装备性能测试数据较少, 存在各种不确定性问题, 传统单一方法较难取得准确可信的评估结果。作为处理模糊性与随机性的有

收稿日期: 2017-06-03

修回日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51605487); 山东省自然科学基金(ZR2016FQ03)

作者简介: 逯程(1990—), 男, 山东泰安人, 博士生, 研究方向为装备综合保障理论与技术。

力工具,云理论<sup>[11]</sup>能够实现定性与定量信息的转换,为状态评估研究提供了一个新的思路。

基于以上分析,本文将云模型与 D-S 证据理论相结合,在隶属度赋值与证据源修正的基础上,通过 D-S 证据理论融合装备多个测试指标得到评估结果。雷达导引头状态评估实例验证了新方法的合理性。

## 1 D-S 证据理论及云模型

### 1.1 D-S 证据理论

**定义 1** 在专家系统中,设  $U$  为由一些有限的互不相容的元素组成的命题集合,则称  $U$  为识别框架, $\emptyset$  表示空的命题集合,若函数  $m: 2^U \rightarrow [0,1]$  满足

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq U} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则称  $m(A)$  为  $A$  的基本可信度分配函数(BPA),它表明对命题  $A$  的精确信任程度或对  $A$  的直接支持。若  $\forall A \subseteq U$ ,且满足  $m(A) > 0$ ,则称  $A$  为证据的焦点,所有焦点的并集称为核。

**定义 2** 设  $U$  为一个识别框架, $m: 2^U \rightarrow [0,1]$  是  $U$  上的 BPA,由

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad \forall A \subseteq U \quad (2)$$

定义的函数  $Bel: 2^U \rightarrow [0,1]$  称为  $U$  上的信度函数。 $Bel(A)$  可以理解为证据对命题  $A$  的总支持度,由此可知, $Bel(\emptyset) = 0, Bel(U) = 1$ 。

Dempster 证据组合规则如下<sup>[12]</sup>:设  $Bel_1$  和  $Bel_2$  分别为识别框架  $U$  上的两个信度函数, $m_1$  和  $m_2$  分别是其对应的 BPA,焦点分别为  $A_1, \dots, A_k$ , 和  $B_1, \dots, B_r$ , 则有

$$\begin{cases} m(C) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - K} \quad \forall C \subseteq U, C \neq \emptyset \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)$ ,表示各证据源矛盾程度的测度, $K$  越大,表明证据源间的矛盾越激烈,若  $K = 1$ ,

认为证据矛盾,不存在联合 BPA,系数  $\frac{1}{1-K}$  称为正则化因子,其作用是在证据合成时避免将非零概率的信任赋给空集。

### 1.2 云模型

**定义 3** 设  $C$  为论域  $U$  上的一个定性概念, $x \in U$  为  $C$  的一次随机实现,且  $x \sim N(E_x, E'_n)$ ,则正态云模型即  $x$  在论域  $U$  上的分布<sup>[13]</sup>。

在正态云模型  $C(E_x, E_n, H_e)$  中,期望  $E_x$  反映了隶属度云的重心特征,熵  $E_n$  表示空间范围内可被接受的属性,超熵  $H_e$  则反映云滴的离散程度。因此,测试指

标的云关联确定度求取算法如下:

- 1) 生成随机数  $E'_n \sim N(E_n, H_e)$ ;
- 2) 指标  $x$  与该云的关联度为

$$\mu = \exp\left[\frac{-(x - E_x)^2}{2(E'_n)}\right] \quad (4)$$

## 2 基于云模型与证据理论的状态评估方法

### 2.1 装备特征参数隶属度求取算法

本文针对某导引头 4 个关键测试参数  $c_1, c_2, c_3$  和  $c_4$  进行分析,将导引头分为良好、较好、堪用、拟故障和故障 5 个状态层级。具体参数数据如表 1 所示。

表 1 原始数据及指标具体参数

Table 1 Raw data and specific parameters

特征参数	实测值	标准值	上阈值	下阈值
$c_1$	3.79	3.60	3.90	3.30
$c_2$	7.24	6.25	8.00	4.50
$c_3$	2.03	1.50	2.50	0.50
$c_4$	0.63	0.50	0.90	0.10

基于传统模糊理论的状态评估主观性太强,而云模型可以有效解决各评估指标因素随机性和模糊性的问题,还可以避免传统隶属函数构造过程中数据归一化所带来的信息损失。

在 DST 模型下,每个状态类的隶属度都假定为先前技术索引间隔的标准值  $E_x$ 。云模型的分布根据先前技术指标和区间值的具体要求进行调整,其中, $E_n = (c_{\max} - c_{\min})/6$ 。

### 2.2 基于灰靶贡献度的证据源修正算法

在整合过程中的证据理论将证据源同等对待,但不同的特征参数对状态等级的影响程度也有差异,一些较差的状态参数会影响综合设备的最终状态,因此有必要对于证据源进行融合前的修正调整。

基于灰靶理论<sup>[14]</sup>对证据源进行修正,将参数对标准靶心的贡献度与其重要程度相对应,具体步骤如下。

1) 根据各特征参数标准值确定标准模式  $v_0 = (v_0(1), v_0(2), \dots, v_0(n))$ ,  $v_0(n)$  为第  $n$  个特征参数的标准值。

2) 根据历史数据确定第  $k$  个参数序列  $v(k) = (v_1(k), v_2(k), \dots, v_m(k))$ , 并进行统一测度变换

$$x_i(k) = T_\gamma v_i(k) = \frac{\min\{v_i(k), v_0(k)\}}{\max\{v_i(k), v_0(k)\}} \quad (5)$$

3) 计算参数  $k$  在差异信息空间中的灰关联系数

$$\gamma(x_i(0), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(0, k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_i(0, k)}{\Delta_i(0, k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_i(0, k)} \quad (6)$$

式中,  $\Delta_i(0, k) = |x_i(0) - x_i(k)|$ 。

4) 计算参数  $k$  的贡献度,即参数  $k$  对装备状态的



影响程度为

$$\gamma_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma(x_i(0), x_i(k)) \quad (7)$$

参数  $k$  的灰靶贡献度向量为

$$\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) \quad (8)$$

5) 设  $\gamma_{\max} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$ ,  $\alpha_i = \gamma_i / \gamma_{\max}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为隶属度调整参数, 则修正后的特征参数  $i$  证据源下各状态等级焦元的模糊隶属度为

$$\mu_i^*(A_k) = \alpha_i \mu_i(A_k) \quad (9)$$

式中,  $k=1, 2, \dots, d_i$ ,  $d_i$  为  $i$  证据源中非  $U$  焦元的个数。

为满足定义 2 的条件, 还需补充定义

$$\mu_i^*(U) = 1 - \sum_{i=1}^{d_i} \mu_i^*(A_k) \quad (10)$$

### 2.3 状态评估流程

首先选择能够反映设备状态的特征参数, 如果一个或多个参数超过阈值, 则设备故障, 需要立即安排相关技术人员进行设备维护, 否则转移到退化状态的评估过程, 分为良好、较好、堪用、拟故障 4 个等级<sup>[15]</sup>。

评估过程首先利用 2.1 节隶属度算法得到隶属度, 然后利用 2.2 节方法对隶属度进行优化, 最后在隶属度转化为 BPA 后, 利用 D-S 证据融合得到最终结果。评估流程如图 1 所示。

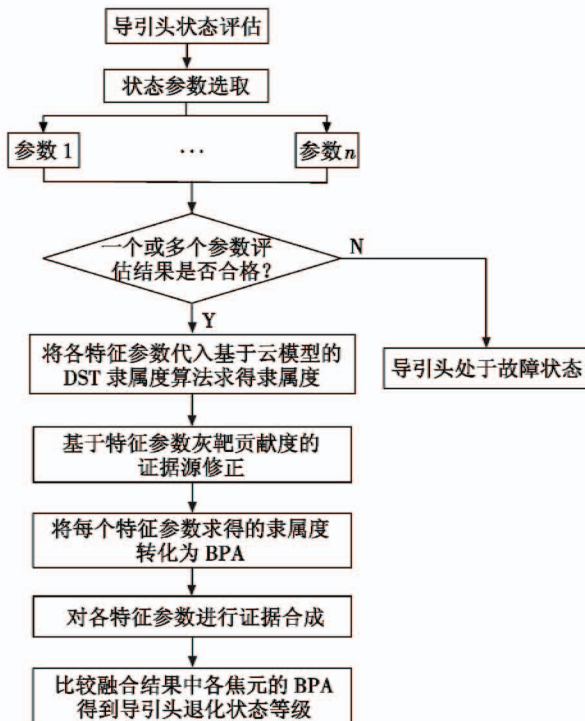


图 1 状态评估流程

Fig. 1 Flow chart of status evaluation

### 3 实例分析

根据某团 7 年的导引头开机检测数据记录进行仿真分析, 期间导引头未发生故障现象, 且最后一年的导

弹雷达单元测试结果为合格状态, 利用云模型与证据理论进行状态评估。

通过原始测试数据得到 4 个状态的云隶属度, 如表 2 所示。

表 2 各参数状态等级云隶属度

Table 2 Cloud membership degree of parameter status class

状态分类	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$D_1$	0	0	0	0.553 4
$D_2$	0.001 3	0.137 6	0.321 1	0.319 5
$D_3$	0.593 9	0.463 2	0.333 4	0.026 7
$D_4$	0.000 3	0	0	0

进一步计算得到 4 个特征参数的隶属度调整系数分别为 0.298, 1, 0.731 和 0.269, 根据式(5) ~ (12) 进行证据源修正, 结果如表 3 所示。

表 3 特征参数修正 BPA

Table 3 Modified BPA of characteristic parameters

特征参数	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
$c_1$	0	3.8E-4	0.177 0	8.94E-5
$c_2$	0	0.137 6	0.463 2	0
$c_3$	0	0.234 7	0.243 7	0
$c_4$	0.148 9	0.085 9	0.007 2	0

利用修正后的 BPA 进行证据融合, 采用文献[16] 中的合成公式进行计算, 得到状态评估结果如表 4 所示。

表 4 状态评估结果

Table 4 Condition assessment results

状态分类	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$U$
合成结果	0	0.210 5	0.789 5	0	0

本文利用正态云模型改进了传统的模糊隶属度的计算方式, 客观性较强, 而采用文献[17] 的决策方法判定该导引头的最终状态为堪用状态。

进一步分析, 由于导弹处于贮存状态, 中间没有进行修理, 性能状态应逐渐劣化, 通过对前 6 年的导引头状态进行评估, 结果分别为良好、良好、较好、较好、较好, 符合实际情况, 该纵向比较法<sup>[15]</sup> 也验证了本文评估方法的合理性。

### 4 结束语

本文建立了基于云模型和证据理论的状态评估方法。首先, 基于云模型计算特征参数的隶属度, 然后根据特征参数的灰色目标贡献度对证据源进行修正, 最后, 将不同参数的 BPA 进行融合, 得到评估结果。雷达导引头的评估算例验证了新方法是客观合理的, 也为下一步的状态预测与维修决策奠定了基础。

### 参考文献

[1] BROWN E R, MCCOLLOM N N, MOORE E E, et al.

- Prognostics and health management a data-driven approach to supporting the F-35 Lightning II [C]//Aerospace Conference, IEEE, 2007:1-12.
- [2] LIAO J, BI Y, NUGENT C. Using the Dempster-Shafer theory of evidence with a revised lattice structure for activity recognition [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(1):74-82.
- [3] 高峰, 唐卓贞. 基于 DS 证据理论的船舶电子设备状态预测方法 [J]. 船电技术, 2011, 31(2):45-48.
- [4] SMARANDACHE F, DEZERT J. Applications and advances of DSmT for information fusion [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2006, 368(2):417.
- [5] 于文武, 许春生, 康力平. 基于 AHP 的航空发动机健康评估系统设计 [J]. 航空计算技术, 2007, 37(1):73-74.
- [6] AMMAR S, DUNCOMBE W, JUMP B, et al. Constructing a fuzzy-knowledge-based-system; an application for assessing the financial condition of public schools [J]. Expert Systems with Applications, 2004, 27(3):349-364.
- [7] KAWAMURA K, MIYAMOTO A. Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system [J]. Computers & Structures, 2003, 81(18):1931-1940.
- [8] AZADI M, POURAKBAR S, KASHFI A. Assessment of optimum settlement of structure adjacent urban tunnel by using neural network methods [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37:1-9.
- [9] PENG Y, DONG M. A prognosis method using age-dependent hidden semi-Markov model for equipment health prediction [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(1):237-252.
- [10] JIN G, MATTHEWS D E, ZHOU Z. A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries in spacecraft [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 113:7-20.
- [11] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(8):28-34.
- [12] 苏晓燕. 关联证据融合研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [13] WANG G, XU C, LI D. Generic normal cloud model [J]. Information Sciences, 2014, 280:1-15.
- [14] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002:172-195.
- [15] 姚云峰, 伍逸夫, 冯玉光, 等. 装备健康状态评估方法研究 [J]. 现代防御技术, 2012, 40(5):156-161.
- [16] 张仕新, 笱翔, 李浩. 基于云重心评估法和熵值法的装备技术状态评估 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12):4015-4018.
- [17] 丛林虎, 徐廷学, 董琪, 等. 基于改进证据理论的导弹状态评价方法 [J]. 科技导报, 2013, 31(30):15-18.
- (上接第 34 页)
- [10] 周家新, 陈建勇, 单志超, 等. 航空磁探中潜艇磁场建模方法分析 [J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(1):143-148.
- [11] 翁行泰, 曹梅芬. 磁异探潜中潜艇的数学模型 [J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(3):27-32.
- [12] 林春生. 舰船磁场信号检测与磁性目标定位 [D]. 武汉: 海军工程大学, 1996.
- [13] LIU Z, PANG H, PAN M. Calibration and compensation of geomagnetic vector measurement system and improvement of magnetic anomaly detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(3):447-451.
- [14] 周耀忠, 张国友. 舰船磁场分析计算 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004:104-200.
- [15] OLIVIER C, COULOMB J, BONGIRAUD J. Recent improvements for solving inverse magnetostatic problem applied to thin shells [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):1005-1008.
- [16] 郭志道, 陈超, 陶春辉, 等. 有限长圆柱体磁异常场全空间正演方法 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(4):1557-1570.
- [17] 刘胜道, 刘大明, 肖昌汉, 等. 基于遗传算法的磁性目标磁模型 [J]. 武汉理工大学学报, 2008, 32(6):1017-1020.
- [18] 张朝阳, 肖昌汉, 徐杰. 基于微粒群优化算法的舰船磁模型分析 [J]. 华中科技大学学报, 2010, 38(11):124-128.
- [19] SHEINKER A, SALOMONSKI N, GINZBURG B, et al. Aeromagnetic search using genetic algorithm [C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, 2005:492-495.