

基于改进证据理论的导弹状态评价方法

丛林虎, 徐廷学, 董琪, 杨继坤

海军航空工程学院, 山东烟台 264001

摘要 为研究导弹状态评价方法, 将导弹的状态分为优、良、中、差和故障 5 个等级。若一个或多个状态参数测试不合格, 可以直接判定导弹处于故障状态; 若所有状态参数测试均合格, 表明导弹是合格的。对于测试合格的导弹, 在评价特征参数状态的基础上, 构建了基于改进证据理论的导弹状态评价模型, 对所有特征参数的状态合成并决策, 确定了测试合格的导弹的状态退化等级。针对利用证据理论在合成状态特征参数过程中的冲突分配问题, 在分析现有改进证据理论方法的基础上, 采用将全局冲突细分为局部冲突并按照冲突焦点元权重分配的方法, 对证据理论进行了改进, 通过实例分析, 验证了改进方法的有效性。

关键词 导弹状态评价; 证据理论; 冲突处理; 监测参数

中图分类号 TJ761

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.30.001

Missile Condition Assessment Based on Improved Evidence Theory

CONG Linhu, XU Tingxue, DONG Qi, YANG Jikun

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, Shandong Province, China

Abstract The method of missile condition assessment is researched. Missile condition is classified into five types: excellent, good, middle, poor and fault. If one or more characteristic parameters are unqualified, the missile condition is directly judged to be fault. If all characteristic parameters are qualified, the missile is qualified. To the qualified missile, a model of missile condition assessment based on an improved evidence theory is developed and the condition degradation grading of missile could be obtained by synthesizing the condition of all analog monitoring parameters on the basis of assessing characteristic parameter conditions. In order to use evidence theory to deal with conflict assignments in the process of synthesizing characteristic parameters, evidence theory is improved by using subdividing global conflicts into local conflicts and assigning conflicts according to the weight of conflict elements on the basis of analyzing improved evidence theories at present. Finally, the experimental result validates the rationality of the improved method.

Keywords missile condition assessment; evidence theory; conflict management; monitoring parameters

0 引言

导弹状态评价的基本方法主要有基于使用监测的方法及基于试验的方法^[1]。基于试验的方法虽然可以得出单枚导弹的贮存状态值, 但无论是自然贮存试验还是加速贮存试验, 其方法都是破坏性的, 试验后导弹均不能继续使用。所以, 基于试验的方法不适用于单枚导弹的贮存状态的评价。考虑到导弹的状态可以由通电测试时得到的测试信息进行表征, 在忽略自动测试设备误差的情况下, 监测参数的测试数据是导弹状态最直接的表征, 因此本文中采用测试数据对导弹系统测试时的状态进行评价。

1 导弹状态评价流程

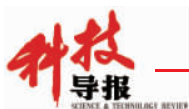
在对导弹状态进行评价之前, 先要确定导弹的状态等级。由于导弹属于非持续任务装备, 只能获得有限的离散测试信息, 所以状态等级的划分不能过于细致, 过于细致会导致难以定量界、定过多种类的状态等级分类。为了更好地描述导弹各系统的状态, 本文中导弹状态分为优、良、中、差、故障 5 个等级^[2]。

在状态评价中, 最基本的方法是将评价对象的状态分解为多个状态参数 $(X_1, X_2, \dots, X_n)^{[3,4]}$, 这些参数是时间的函数, 对每个参数进行量化并融合这些参数的量化值得出每个参

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-08-26

基金项目: 航空科学基金项目(20085584010-40108)

作者简介: 丛林虎, 博士研究生, 研究方向为后勤保障理论与技术, 电子信箱: 342743812@qq.com



数的隶属度,然后处理所有参数的隶属于某种状态的状态值,从而得到导弹技术状态的评价结果。

评价算法是评价的核心问题。目前常见的评价算法有多属性综合评价法、层次分析评价法、模糊数学分析评价法、灰色系统理论评价法、D-S 证据理论等。由于导弹测试数据样本少,参数种类多,评价结果需求精度较高,故本文采用 D-S 证据理论方法,并根据导弹测试数据的具体情况,对 D-S 证据理论进行了基于冲突焦元权重的局部冲突优化。状态评价的流程如图 1 所示。

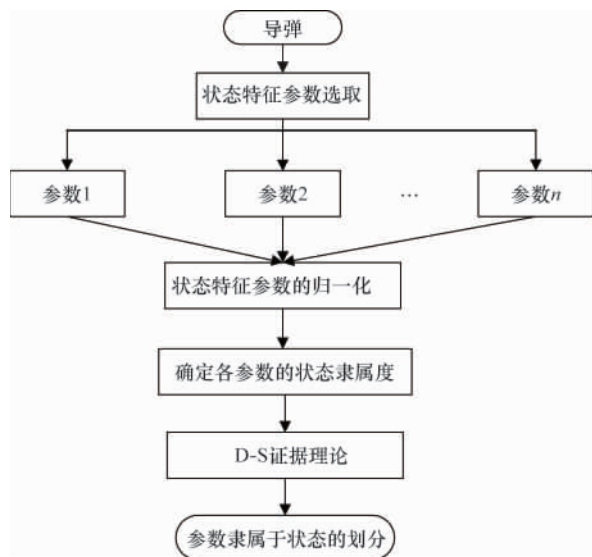


图 1 状态评价流程

Fig. 1 Flow chart of status evaluation

2 测试数据预处理

导弹的故障状态可以根据监测参数的测试结果是否超过阈值来判断,如果有一个监测参数的测试结果超过规定阈值,表明监测参数是不合格的,此时可以判定导弹处于故障状态;反之则表明监测参数是合格的,需要对测试合格的监测参数进行进一步分析^[9]。在不加说明的情况下本文中涉及的测试数据,均指在阈值范围内的测试数据。

2.1 状态特征参数的归一化

通常各监测参数的单位和量级在评价系统中是不相同的。为了能使各监测参数在评价导弹状态时能够具有可比性,必须对评价指标进行归一化处理。对导弹各系统的测试参数进行状态评价时,可用测试数据偏离标准值的程度来表征监测参数的状态。测试数据偏离标准值的程度越大,监测参数的状态越差,其归一化值越小^[9]。

假设导弹系统有 n 个监测参数,则第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个监测参数的归一化值 λ_i 可定义为:

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{\delta_1 - \Delta}{\delta_1} & x_s < x_i \leq x_u \\ \frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_2} & x_l \leq x_i \leq x_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_i 为第 i 个监测参数的实测值, x_s 为标准值, x_u 为上阈值, x_l 为下阈值, $\Delta = |x_i - x_s|$ 为实测值与标准值偏差的绝对值, $\delta_1 = |x_u - x_s|$ 为监测参数上最大允许误差的绝对值, $\delta_2 = |x_l - x_s|$ 为监测参数下最大允许误差的绝对值。

由式(1)可知,当监测参数的测试结果为标准值时其值为 1,表示该监测参数的状态最佳;随着实测值偏离标准值的程度变大,归一化值变小,监测参数的状态变差;当测试结果达到阈值时,归一化值为 0,此时监测参数的状态最差。

2.2 特征参数的状态隶属度

由于导弹各状态等级之间没有明确的界限划分,只有模糊的过渡区域,从而具有不确定性,这种不确定性是非随机的,因此对于导弹状态等级的不确定性,可用模糊集合理论进行处理。

定义 设论域 X 上的模糊集合 \tilde{A} 由隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表征,其中 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 在实轴上的闭区间 $[0,1]$ 取值, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 的值反映了 X 中元素 x 对 \tilde{A} 的隶属程度。

由上述定义可以看出,对于导弹而言,所有监测参数的集合可看作论域 X ,优、良、中、差状态等级可分别看作模糊集合 $\tilde{A}_i(i=1,2,3,4)$,即导弹系统任一监测参数可用隶属度函数来表述它与优、良、中、差状态等级之间的从属关系。由于监测参数测试数据的归一化值是对监测参数状态的表征,因此可以根据测试数据的归一化值来确定监测参数的隶属度函数。同时,由于三角型隶属度函数形状简单,并且与其他较复杂的隶属度函数得出的结果差别较小^[1],因此采用三角型隶属度函数,根据导弹系统状态退化的实际情况及专家经验,可得导弹系统监测参数的三角型隶属度函数如图 2 所示。

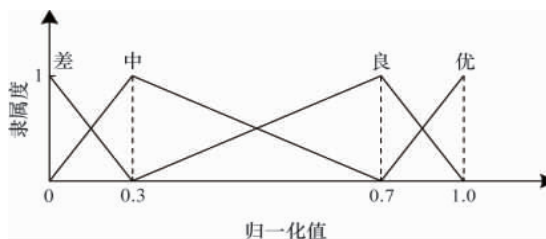


图 2 监测参数的三角型隶属度函数

Fig. 2 Triangle membership function of monitoring parameters

3 基于冲突焦元权重的局部冲突优化

证据理论由美国学者 Dempster 提出,后由 Shafer 加以扩充和发展,所以又称 D-S 理论^[8],其基本合成表达式为

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i) m_2(C_j)}{1 - K} & \forall A \subset U, A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为对应的基本概率赋值,焦元分别为 B_1, B_2, \dots, B_k 和

$C_1, C_2, \dots, C_r, K = \sum_{\substack{B_i, C_j \\ B_i \cap C_j = \phi}} m_1(B_i)m_2(C_j) < 1$, 反映了两个证据之间的

冲突程度, K 值越大, 表示证据间的冲突越大。证据理论在处理不确定信息方面有着明显优势, 并且已经在信息融合、决策分析和目标识别等领域取得了很好的应用成果。

证据理论的核心是证据合成方法, Dempster 提出的证据合成方法存在一定的局限性, 即当证据间存在高度冲突甚至完全冲突时, Dempster 合成方法会失效并得出有悖于常理的结果。Yager 针对此问题, 提出了一个新的证据合成公式^[9], 他认为冲突带来的完全是不确定性, 将冲突全部分配给了识别框架。Yager 合成方法消除了 Dempster 合成方法可能带来的错误结果, 但该合成方法同样存在着缺陷, 在证据合成过程中, 若有某一个或部分证据偏离标准值过大将会造成整个合成结果偏离实际。文献[10]在 Yager 合成方法的基础上做出了改进, 认为证据间的冲突是部分可用的, 在此基础上引入了证据可信度的概念并提出了一种新的合成公式。

本文中采用文献[11]中的观点, 认为冲突的大小并不能改变冲突再分配的空间, 只是决定了分配的比例, 即冲突只应该分配给引起冲突的焦元。为了有效处理冲突证据, 应将全局冲突分解为局部冲突, 然后将局部冲突按照产生冲突的焦元值的大小在产生冲突的焦元之间进行分配。如果某一焦元的值偏大, 那么在分配冲突时将会得到更多的份额。新的合成表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} & m(\phi) = 0 \\ & m(A) = \sum_{\substack{B_i, C_j \\ B_i \cap C_j = A}} m_1(B_i)m_2(C_j) + c(A) \quad (A \neq \phi, U) \\ & c(A) = \sum_{\substack{B_i, C_j \\ B_i \cap C_j = \phi \\ B_i \cup C_j = A}} \delta [m_1(B_i)m_2(C_j)] \\ & \delta_{B_i} = \frac{m_1(B_i)}{m_1(B_i) + m_2(C_j)}, \delta_{C_j} = \frac{m_2(C_j)}{m_1(B_i) + m_2(C_j)} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, $c(A)$ 为局部冲突, 因此本文中提出的合成公式是基于冲突完全可用思想的, 该合成方法得到的结果合理, 计算简便并具有较快的收敛速度。

4 实例分析

假设某型导弹可由 4 个独立不相关的监测参数表征, 对该导弹进行状态评估, 识别框架 $U = \{\text{优、良、中、差}\}$, 首先依据式(1)对这 4 个测试合格的状态参数进行归一化处理, 然后根据图 2 中的三角形隶属度函数分别确定这 4 个状态参数隶属于优、良、中、差状态等级的隶属度, 结果如表 1 所示。

表 1 监测参数状态评价结果
Table 1 Condition assessment result of monitoring parameters

监测参数	归一化值	状态等级隶属度			
		优	良	中	差
1	0.97	0.90	0.10	0	0
2	0.59	0	0.72	0.28	0
3	0.96	0.87	0.13	0	0
4	0.92	0.73	0.27	0	0

为了验证本文对 D-S 证据理论改进的优越性, 分别采用 D-S 合成方法、Yager 合成方法、文献[10]中的改进 D-S 合成方法及本文中提出的基于冲突焦元权重的局部冲突优化方法对表 1 中监测参数进行合成, 合成结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 当证据间存在高度冲突时, 经典 D-S 证据理论的合成公式不再适用。Yager 合成公式由于将冲突完全赋给了未知项, 从而导致最终无法得出确定的合成结果。本文中提出的合成公式可以很好地解决冲突的分配问题, 得到的合成结果正确, 相对于文献[10]中的合成方法收敛速度更快且计算简便、易于实现。

表 2 4 种合成公式状态评价结果

Table 2 Condition assessment result of four combination rules

合成公式	证据源	K	优	良	中	差	U
D-S 合成公式	参数 1, 2	0.9280	0	1.0000	0	0	0
	参数 1, 2, 3	0.9906	0	1.0000	0	0	0
	参数 1, 2, 3, 4	0.9975	0	1.0000	0	0	0
Yager 合成公式	参数 1, 2	0.9280	0	0.0720	0	0	0.9280
	参数 1, 2, 3	0.9906	0	0.0094	0	0	0.9906
	参数 1, 2, 3, 4	0.9975	0	0.0025	0	0	0.9975
文献[10]中合成公式	参数 1, 2	0.9280	0.1651	0.2224	0.0514	0	0.5611
	参数 1, 2, 3	0.9906	0.2963	0.1684	0.0468	0	0.4885
	参数 1, 2, 3, 4	0.9975	0.4439	0.2191	0.0497	0	0.2873
本文合成公式	参数 1, 2	—	0.5522	0.3674	0.0804	0	0
	参数 1, 2, 3	—	0.8273	0.1628	0.0099	0	0
	参数 1, 2, 3, 4	—	0.8766	0.1232	0.0002	0	0

5 结论

导弹是一个大型复杂系统,表征导弹状态的信息常常具有不精确性、不确定性等特点,从而导致导弹状态评价成为一个难点。通过对监测参数的测试数据进行归一化处理、构建三角型隶属度函数、改进证据理论等技术手段,建立了导弹状态评价模型。同时,为了更好地融合表征导弹状态的多个监测参数,对 D-S 证据理论中冲突分配问题进行了优化,通过与现有改进算法相比较,改进后的算法不仅能够有效解决证据间高度冲突的分配问题,而且收敛速度更快并易于实现。

参考文献 (References)

- [1] 孟蕾. 某型导弹基于状态的维修决策研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2012.
Meng Lei. Research on condition-based maintaining decisions of a certain type missile[D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012.
- [2] 姚云峰, 伍逸夫, 冯玉光. 装备健康状态评估方法研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 156-161.
Yao Yunfeng, Wu Yifu, Feng Yuguang. Modern Defence Technology, 2012, 40(5): 156-161.
- [3] 董玉亮, 顾煜炯, 肖官和, 等. 大型汽轮机组变权综合状态评价模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 33(2): 46-49.
Dong Yuliang, Gu Yujiong, Xiao Guanhe, et al. Journal of North China Electric Power University, 2005, 33(2): 46-49.
- [4] 郭利, 张锡恩, 马彦恒. 模糊数据融合算法在设备状态监测中的应用[J]. 传感器技术, 2004, 23(6): 73-74.
Guo Li, Zhang Xien, Ma Yanheng. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(6): 73-74.
- [5] 朱承治, 郭创新, 辛建波. 基于改进证据推理的变压器状态评估研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2332-2336.
Zhu Chengzhi, Guo Chuangxin, Xin Jianbo. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2332-2336.
- [6] 顾煜炯. 发电设备状态维修理论与技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
Gu Yujiong. Theories and techniques for condition maintenance of the power equipment[M]. Beijing: China Electricity Press, 2009.
- [7] 高占宝, 率行善, 梁旭. 复杂系统综合健康管理[J]. 测控技术, 2005, 24(8): 1-5.
Gao Zhanbao, Shuai Xingshan, Liang Xu. Measurement and Control Technology, 2005, 24(8): 1-5.
- [8] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
He You, Wang Guohong, Guan Xin, et al. Information fusion and application based on multi-sensor[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [9] Yager R R. On the D-S framework and new combination rules[J]. Information Science, 1987, 41(2): 93-138.
- [10] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式 [J]. 电子学报, 2000, 28(8): 117-119.
Sun Quan, Ye Xiuqing, Gu Weikang. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 117-119.
- [11] 郭华伟, 施文康, 刘清坤, 等. 一种新的证据组合规则[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(11): 1895-1900.
Guo Huawei, Shi Wenkang, Liu Qingkun, et al. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(11): 1895-1900.

(责任编辑 赵业玲)

· 学术动态 ·



2013 年诺贝尔生理学或医学奖揭晓

2013 年 10 月 7 日, 2013 年诺贝尔生理学或医学奖揭晓。美国科学家 James E. Rothman、Randy W. Schekman、德国科学家 Thomas C. Südhof 因“发现细胞内的主要运输系统——囊泡运输的调节机制”而获得 2013 年诺贝尔生理学或医学奖。

Randy Schekman 发现了囊泡传输所需的一组基因, James Rothman 阐明了囊泡是如何与目标融合并传递的蛋白质机器, Thomas Südhof 揭示了信号是如何引导囊泡精确释放被运输物的, 这 3 位科学家发现了细胞生理学的一个基础性过程, 揭开了细胞物质运输和投递的精确控制系统的面纱。

详见科学网 <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/10/283430.shtm>。