

引用格式:李远冬,岳瑞华,丁宸宇,等.基于改进D-S证据理论的导弹控制系统完好性评估[J].电光与控制,2020,27(2):85-89. LI Y D, YUE R H, DING C Y, et al. Performance evaluation of missile control system based on improved D-S evidence theory[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):85-89.

## 基于改进 D-S 证据理论的导弹控制系统完好性评估

李远冬, 岳瑞华, 丁宸宇, 蒲俊, 顾凡  
(火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘要:**针对传统的测试系统对导弹控制系统的完好性评估过于粗放的问题,提出利用隶属度函数将完好性状态等级细化。利用改进的D-S证据理论,有效地解决了在融合高冲突证据时出现错误的问题,将控制系统闭环模拟飞行测试的动、静态数据综合分析,得到模拟飞行过程中关键节点以及全过程的完好性状态等级,进而调整测试、维护周期。仿真验证了该方法的可行性。

**关键词:**导弹控制系统; D-S 证据理论; 闭环模拟飞行; 完好性评估

**中图分类号:** TJ765 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.018

## Performance Evaluation of Missile Control System Based on Improved D-S Evidence Theory

LI Yuandong, YUE Ruihua, DING Chenyu, PU Jun, GU Fan  
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In traditional test system, the evaluation of the performance of the missile control system is too rough and inaccurate, thus it is proposed to use the membership function to refine the performance status level. By using the improved D-S evidence theory, the problem of mistakes arisen when fusing the high-conflict evidences is solved, comprehensive analysis is made to the dynamic and static data of the closed-loop simulated test of the control system, and the performance status levels of the key nodes and the whole process during the simulated flight are obtained, according to which the test and maintenance cycle can be adjusted. The simulation verifies the feasibility of the method.

**Key words:** missile control system; D-S evidence theory; closed-loop simulated flight; performance evaluation

### 0 引言

导弹是一种长期贮存、一次性使用的武器装备,其质量的好坏直接影响发射能否成功。在使用前,对导弹的性能状态进行综合评估,选择出性能最好的导弹,能够提高发射成功率。在贮存期间,根据导弹的性能状态等级调整测试周期,如果性能良好,则可以减少测试次数,如果性能不稳定,则应适当增加测试次数,这样能够在提高工作效率的同时节省测试资源。

传统的导弹测试系统对导弹进行性能评估时,其结果只有“合格”与“不合格”两种<sup>[1]</sup>,这种评估方法过于粗放,无法得知导弹更确切的性能状态,以及导弹性

能的变化规律,因此提出利用隶属度函数对导弹控制系统性能等级进一步细化<sup>[2]</sup>。与此同时,传统的性能评估系统多数都是自下而上评估,即在对各个部件进行评估后,对导弹进行综合评估,这样缺乏整体性。目前科技水平显著提高,各部件出现问题的可能性比较小,更多的是整体上连接和协调配合的问题,因此采用自上而下评估,即根据导弹实际工作状况对导弹进行闭环模拟飞行测试,从整体上进行评估,可以提高准确性和有效性<sup>[3]</sup>。

证据网络是一种有向无环图模型,它由代表变量的节点和连接这些节点的有向边组成以及相应的关系参数构成,是图论与证据理论的结合,其核心是利用证据理论进行数据融合<sup>[4]</sup>。针对传统的D-S证据理论在融合数据过程中存在的问题,利用一种新的证据合成方法,对冲突数据进行处理,将测试数据进行融合<sup>[5]</sup>。

导弹是一个复杂的系统工程,控制系统是其重要

收稿日期:2019-03-14

修回日期:2019-12-18

作者简介:李远冬(1995—),男,吉林吉林人,硕士生,研究方向为检测诊断技术及自动化装置。

的组成部分,控制系统的完好性直接影响着导弹的整体性能。因此,本文根据实际发展需要,利用改进 D-S 证据理论分析导弹控制系统闭环模飞测试数据,从整体上对导弹控制系统进行完好性评估。

### 1 D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种推理算法,被广泛认为是概率论和贝叶斯理论的推广,在处理不确定信息方面有着明显优势,并且在数据信息融合、决策分析等领域得到广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。D-S 证据理论定义了空间  $\Theta$  为辨识框架,所有问题中的命题  $A$ ,都应该包含在幂集  $2^\Theta$  之中<sup>[8]</sup>,即

$$\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_M\} \quad (1)$$

定义映射:  $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  为辨识框架  $\Theta$  上的基本概率

赋值函数<sup>[9]</sup>,满足  $\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ 0 \leq m(A) \leq 1 \\ \sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \end{cases}$ 。D-S 证据理论利用

Dempster 合成规则,2 个证据体之间合成的定义为

$$\begin{cases} m_{12}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C)}{1 - k} & A \neq \emptyset \\ m_{12}(\emptyset) = 0 \\ K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\frac{1}{1-k}$  为归一化因子,能够确保对所有命题的支持度为 1,对新合成的证据体对空集  $\emptyset$  的支持度为 0,使用归一化因子可以保证归一性和非负性,其中  $K$  是冲突因子,表示证据体之间的冲突。多个证据体之间的合成与两个证据体之间的合成原理相同,合成公式为

$$\begin{cases} m(A) = \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq k \leq M} m_k(A_i)}{1 - k} & A \neq \emptyset \\ m(\emptyset) = 0 \\ K = \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{1 \leq k \leq M} m_k(A_i) \end{cases} \quad (3)$$

D-S 合成规则的图形表示如图 1 所示。

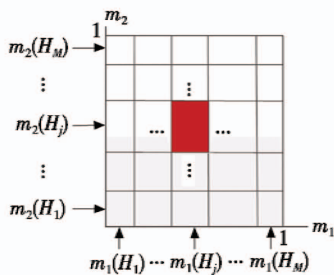


图 1 D-S 合成规则

Fig. 1 D-S combination rule

## 2 控制系统闭环模拟飞行测试原理及隶属度确定

### 2.1 控制系统闭环模拟飞行测试原理

在导弹控制系统闭环模拟飞行测试中,通过向加速度表、速率陀螺仪和平台框架角的力矩器上施加激励电流,可以使加速度表、速率陀螺仪和平台输出相应的导弹姿态信息。输出的状态信号通过弹载计算机和综合放大器作用到伺服机构,通过读取伺服回路反馈电位计信号,得到舵偏角,进而得到控制力矩,根据控制力矩改变导弹姿态的原理可以计算出下一时刻导弹的姿态信息(角加速度、角速度和角度)。

导弹在飞行过程中有几个重要的阶段,会遇到几种较大的干扰情况,也是导弹最容易出现问题的阶段,如射向变换、穿越大风区段、多级导弹的级间转换段等,在以上几个关键节点,对平台、速率陀螺仪和加速度表同时施加初始激励信号,其输出可以模拟导弹在关键节点的飞行状态,同时能够有效激发出故障模式。

在闭环模拟飞行测试当中,如果导弹控制系统能够对所施加的各个阶段的信号都能进行快速有效的调节,所测数据均在阈值范围内,并且动态性能良好,则说明导弹控制系统处于合格状态,否则处于故障状态。

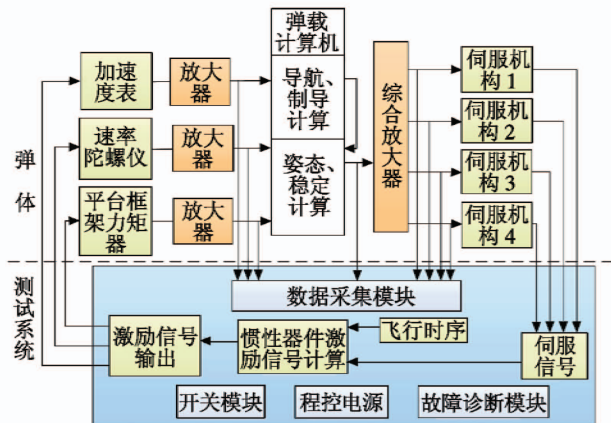


图 2 导弹控制系统闭环模拟飞行测试原理

Fig. 2 The closed-loop simulated flight test principle for missile control system

### 2.2 隶属度确定

根据闭环模拟飞行的测试原理,对导弹控制系统的划分只有“合格”与“不合格”两种,这种“是非制”的测试评估方式存在一定的弊端。如果导弹控制系统处于良好的状态,再对其进行频繁检测维护,则在很大程度上造成了人力、物力资源的浪费;如果控制系统处于出现故障的边缘,再继续按照原来的测试周期或测试方法进行测试维护,则会因维修维护不及时出现设备的完好率下降问题,影响发射成功率。

在充分考虑了测试参数和完好性等级划分合理性

的基础上,在测试参数动态特性正常的情况下,根据静态测试参数与阈值之间的关系,将控制系统划分为良好、较好、堪用、拟故障4个等级,如表1所示。

表1 导弹控制系统性能状态等级划分  
Table 1 Classification of performance status level of missile control system

性能状态等级划分	状态等级含义
良好	导弹控制系统所有性能参数均处于阈值范围内,并且接近标准值,远离阈值上下界
较好	导弹控制系统所有性能参数均处于阈值范围内,某些参数不断变化,且离阈值上下界较远
堪用	导弹控制系统所有性能参数均处于阈值范围内,某些参数不断变化,且离阈值上下界较近
拟故障	导弹控制系统所有性能参数均处于阈值范围内,且即将超出阈值上下界

导弹在长期的贮存过程中,由于受到环境的影响,其部件自身会发生变化,最终将会体现在测试参数的不断变化。如果导弹控制系统处于良好或者较好状态,则可以在保证发射成功率的同时适当降低测试维护频率,如果处于堪用或者拟故障状态,则需要增加测试维护的频率,确保导弹能够正常使用,如果处于故障状态,则要立即对其进行故障诊断。

在对导弹控制系统完好性进行评估时,无法确切说明导弹控制系统到底处于哪个状态等级,即各个状态之间没有明确的划分,因此通过隶属度函数来解决此问题。在导弹控制系统闭环模拟飞行测试中,为保证完好性评估的整体性,对测试过程中的舵偏角数据进行分析处理,首先要对舵偏角值进行归一化,用归一化的值对控制系统的完好性等级进行表示。

归一化的函数为

$$\lambda_i = \begin{cases} \left| \frac{x_i - x_s}{x_u - x_s} \right|^k & x_s \leq x_i \leq x_u \\ \left| \frac{x_i - x_s}{x_l - x_s} \right|^k & x_l \leq x_i \leq x_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_i$ 为第*i*个舵偏角的实际测量值; $x_s$ 为舵偏角的标准值; $x_u$ 为舵偏角的上阈值; $x_l$ 为舵偏角的下阈值; $k$ 为舵偏角的测试值对导弹控制系统性能状态的影响程度,一般取1。

导弹控制系统的完好性划分等级分为“良好”、“较好”、“堪用”、“拟故障”,相对于“是非制”的划分更加详细,结合导弹控制系统完好性等级划分方式与退化规律,参考领域专家经验知识,有如图3所示的隶属度函数曲线。

各个性能状态的隶属度函数分别为

$$\mu_1(\lambda_i) = \begin{cases} 1 & \lambda_i \leq 0.2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.2}(\lambda_i - 0.3) & 0.2 < \lambda_i \leq 0.4 \\ 0 & \lambda_i > 0.4 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_2(\lambda_i) = \begin{cases} 0 & \lambda_i \leq 0.2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.2}(\lambda_i - 0.3) & 0.2 < \lambda_i \leq 0.4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.3}(\lambda_i - 0.55) & 0.4 < \lambda_i \leq 0.7 \\ 0 & \lambda_i > 0.7 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_3(\lambda_i) = \begin{cases} 0 & \lambda_i \leq 0.4 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.3}(\lambda_i - 0.55) & 0.4 < \lambda_i \leq 0.7 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.2}(\lambda_i - 0.8) & 0.7 < \lambda_i \leq 0.9 \\ 0 & \lambda_i > 0.9 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_4(\lambda_i) = \begin{cases} 0 & \lambda_i \leq 0.7 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.2}(\lambda_i - 0.8) & 0.7 < \lambda_i \leq 0.9 \\ 1 & \lambda_i > 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mu_1(\lambda_i)$ , $\mu_2(\lambda_i)$ , $\mu_3(\lambda_i)$ 和 $\mu_4(\lambda_i)$ 为第*i*个测试数据归一化值 $\lambda_i$ ,分别属于良好、较好、堪用、拟故障性能状态的隶属度函数<sup>[10-11]</sup>。

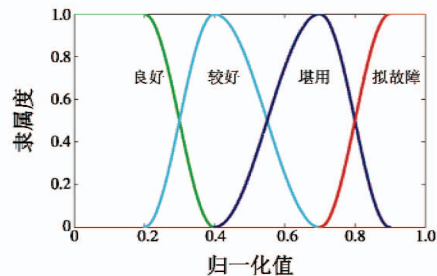


图3 岭形隶属度函数

Fig. 3 Ridge membership function

### 3 改进 D-S 证据理论的数据融合

证据理论的核心即为证据合成的方法,但 Dempster 所提出来的证据合成方法是有一定局限性的,当证据之间存在比较高的冲突或者完全冲突时,Dempster 所提出来的合成方法就失去了效果,并且可能得到完全错误的结果<sup>[12]</sup>。根据某导弹部件的2组实测数据,运用未改进的 D-S 证据理论进行数据融合,即运用式(2)进行数据融合,得到表2所示的融合结果。

表2 高冲突证据融合

Table 2 Fusing of high-conflict evidences

	良好	较好	堪用	拟故障	$\theta$
$m_1$	0	0.9500	0.0500	0	0
$m_2$	0	0	0.0100	0.9900	0
$m_{12}$	0	0	1.00	0	0

从表2可以看出,当证据冲突很高时,运用基本证据合成方法进行数据融合所得到的结果为堪用,实际

上该部件经过多位经验丰富专家综合诊断,它最有可能处于拟故障状态,因此证据合成结果错误。

在利用平均概率进行决策时是不收敛的,但是对于高冲突的证据来说,即使证据之间存在冲突,有很大一部分的证据也是可用的,利用平均概率能够得到更加合理一些的决策结果。因此,综合考虑平均概率和证据理论,构造一种新的组合规则,这样不仅可以克服“失效”的问题,而且不再需要对高冲突的证据全盘否定,能够实现对高冲突的证据合理有效的利用,在很大程度上提高了合成结果的可靠性和有效性<sup>[13-14]</sup>。改进证据理论为

$$\begin{cases} k = \sum_{x \cap y = \emptyset} m'(x)m_n(y) \\ m(\emptyset) = 0 \\ m(A) = \sum_{x \cap y = A} m'(x)m_n(y) + k[(n-1)m'(A) + m_n(A)]/n \end{cases} \quad (9)$$

假设有  $n$  个基本概率值  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n, m'$  是  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_{n-1}$  的组合结果。改进证据理论组合结果由两部分组成:一部分是 D-S 证据理论组合结果;另一部分是平均概率结果。 $k$  表示冲突系数,当冲突系数低,合成结果主要为 D-S 证据理论的组合结果;当冲突系数高,合成结果主要为平均概率结果。

依然以表 2 中数据为例,根据改进证据理论对其数据进行组合,即根据式(9)对数据进行融合,所得结果如表 3 所示。

表 3 高冲突证据改进融合

Table 3 Improved fusing of high-conflict evidences

基本概率值	良好	较好	堪用	拟故障	$\emptyset$
$m_1$	0	0.9500	0.0500	0	0
$m_2$	0	0	0.0100	0.9900	0
$m_{12}$	0	0.4748	0.0304	0.4948	0

从表 3 中结果可以看出,该部件大概率处于拟故障状态,与专家诊断结果相符,根据改进的证据理论进行融合的结果更合理,效果更理想。

在利用改进 D-S 证据理论对导弹控制系统的完好性进行评估时,首先判断控制系统是否处于合格状态,如果处于合格状态,再根据舵偏角与阈值之间的关系确定隶属度,利用改进 D-S 证据理论对控制系统的完好性进行更加具体的划分。

在完好性评估过程中,将每个关键节点的舵数据利用改进 D-S 证据理论进行融合,得到控制系统在此关键节点的完好性,其证据网络模型如图 4 所示, $X$  表示 I 舵和 III 舵基本概率值合成结果, $Y$  表示 II 舵和 IV 舵基本概率值合成结果, $Z$  表示总体合成结果。将各个关键节点的完好性再次进行数据融合,可以得到全

程测试数据的融合结果,综合来判定其完好性,其证据网络模型如图 5 所示。

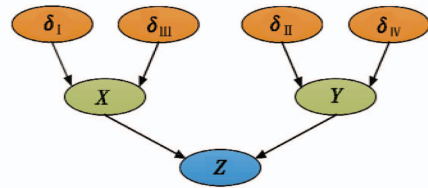


图 4 节点的证据网络模型

Fig. 4 Evidence network model of nodes

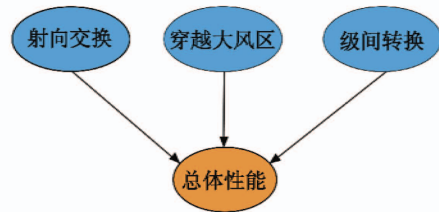


图 5 全过程的证据网络模型

Fig. 5 Evidence network model of the whole process

### 4 仿真验证

根据导弹控制系统闭环模拟飞行测试原理,导弹穿越大风区时,其舵偏角值的变化如图 6 所示,可以看出舵偏角呈现收敛的状态,能够对大干扰进行有效调节。

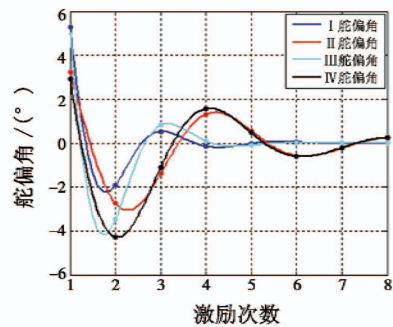


图 6 实际舵偏角

Fig. 6 Actual rudder deflections

其阶跃响应如图 7 所示,可以看出,由于导弹舵偏有一定范围,所以 I, III 舵出现削顶现象,根据实测系统的时域指标可以判断导弹的调节速度比较快,动态性能好。

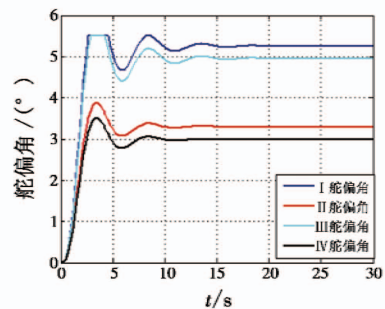


图 7 阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curves

综合分析,导弹控制系统处于合格状态,根据阶跃响应稳态数据与阈值之间的关系,融合各个舵的测试数据如表4所示。

表4 穿越大风区数据融合结果

Table 4 Data fusing when crossing the windy area

基本概率值	良好	较好	堪用	拟故障	$\emptyset$
$m_{\delta_1}$	0	0.9000	0.1000	0	0
$m_{\delta_{III}}$	0	0	0.8500	0.1500	0
$m_{\delta_{II}}$	0.8200	0.1800	0	0	0
$m_{\delta_{IV}}$	0	0.8900	0.1100	0	0
$m_z$	0.1248	0.6212	0.2291	0.0249	0

从表4可以看出,导弹控制系统在穿越大风区这个关键节点所处性能状态等级为较好,正在向堪用状态过渡。将几个阶段性能状态等级数据再次进行融合,得到全程的性能状态等级,则导弹控制系统处于良好状态可能性为0.1004,处于较好状态可能性为0.5918,处于堪用状态可能性为0.2166,处于拟故障状态可能性为0.0912。通过整体的完好性等级来看,导弹控制系统处于较好状态,正在向堪用状态过渡,此时可以适当提高测试、维护频率,保证导弹能够随时备战。

## 5 结论

本文利用改进 D-S 证据理论,有效利用和融合了导弹控制系统闭环模拟飞行测试中的动态、静态测试数据,得到导弹在模拟飞行过程中关键节点处的性能状态等级,以及全程的整体性能状态等级。解决了传统测试系统只能评估导弹控制系统是否合格的问题,将性能状态等级进行更细致的划分,依据性能等级对测试维护周期进行适当调节,在保证导弹性能状态的情况下节省了测试资源,对部队的现代化建设具有很大的作用。

## 参考文献

[1] 王军生,徐胜红,徐智明. 导弹贮存可靠性预测建模方法[J]. 战术导弹技术,2007(6):28-32.  
[2] 韩建立,陆巍巍,滕克难. 一种基于贮存可靠性数据的

导弹寿命预测方法[J]. 兵工自动化,2017(11):7-10.

- [3] ZHOU W G, LUO J R, JIA Y G, et al. Performance evaluation of radar and decoy system counteracting antiradiation missile[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(3):2026-2036.  
[4] 刘永安,程哲,徐保国. 信息融合的 D-S 证据理论综述[C]//中国控制与决策学术年会,2007:626-628, 633.  
[5] 丛林虎,徐廷学,董琪,等. 基于改进证据理论的导弹状态评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2016, 38(1):70-76.  
[6] 姜江. 证据网络模型及其推理算法[J]. 系统工程理论与实践,2015, 35(4):984-990.  
[7] 姜江. 证据网络建模、推理及学习方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.  
[8] 李志强,徐廷学,顾钧元,等. 基于 DS/AHP 的贝叶斯网络条件概率值确定方法[J]. 现代防御技术,2017(6):182-188.  
[9] 李文艺,吕现钊,郝保明. Dempster 合成规则的等效计算方法及其实现[J]. 许昌学院学报,2015, 34(2):65-69.  
[10] 徐廷学,李志强,顾钧元,等. 基于多状态贝叶斯网络的导弹质量状态评估[J]. 兵工学报,2018, 39(2):391-398.  
[11] 蒋金良,袁金晶,欧阳森. 基于改进隶属度函数的电能质量模糊综合评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2012, 40(11):107-112.  
[12] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1):1-9.  
[13] WANG R C. Analysis and improvement of combination rule in D-S theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562:3930-3934.  
[14] CHEN M, XIA X. A new combination rule of D-S theory[C]//IEEE International Conference on Computer Science & Automation Engineering, 2011. doi: 10.1109/CSAE.2011.5952664.