

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.006

基于多特征量的 D 矩阵模型的建立与分析*

孙萌 景博 黄以锋 焦晓璇 徐光跃
(空军工程大学 航空航天工程学院 西安 710038)

摘要:针对基于单特征量的 D 矩阵模型会损失测试信号的大量信息的问题,提出了一种基于多特征量的可测性分析模型。首先,在研究 D 矩阵模型的基础上,对测试信号进行特征提取和多值编码,建立了基于多特征量的 D 矩阵模型。其次,基于信息熵制定诊断策略和生成故障诊断树,并对模型进行测试性分析,评估其诊断能力。结果表明,与单特征量的 D 矩阵模型相比,基于多特征量的 D 矩阵模型选用的测试点数和模糊组数小,故障隔离率高,诊断测试步骤数少,平均测试费用低。

关键词: 相关性模型; D 矩阵模型; 多特征量; 信息熵

中图分类号: TN707; TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Establishment and analysis of D matrix model based on multi-feature quantity

Sun Meng Jing Bo Huang Yifeng Jiao Xiaoxuan Xu Guangyue

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the D matrix model based on single feature quantity can lose a lot of information about the test signal, a testability analysis model based on multi-feature quantity is proposed. Firstly, based on the study of D matrix model, the feature extraction and multi-value coding of the test signal are carried out, and a D matrix model based on multi-feature quantity is established. Then, the diagnostic strategies are developed based on the information entropy, the fault diagnosis tree is generated, and the model is analyzed to assess its diagnostic capabilities. The results show that the D matrix model based on multi-feature quantity adopts a smaller number of test points and fuzzy group, and has a higher fault isolation rate, less diagnostic test step, and lower average test cost compared with the D matrix model based on the single feature quantity.

Keywords: dependency matrix; D matrix model; multi-feature quantity; information entropy

0 引 言

测试性是系统和设备的一种便于测试和诊断的设计特性,对现代武器装备及各种复杂系统的可靠性、安全性等有很大的影响,是武器装备质量特性的关键组成成分^[1]。通过良好的测试性设计,可以确定产品的运行状态,对其内部故障进行准确隔离,减少系统的保障费用^[2]。

系统测试性模型的建立是进行测试性预计、分析、验证与评价的基础,使用标准化的形式对系统中的模块、故

障、故障概率、测试、测试位置以及它们之间的相互关系进行描述^[3]。国外 De Paul 提出了最早应用于测试性分析和设计的逻辑模型^[4],之后发展成为相关性模型。Zhao 等人^[5]在相关性模型的基础上利用故障响应特征信息对故障对进行编码,提高了故障分辨能力。Zhang 等人^[6]针对故障和测试之间的相关性存在时间延迟、故障之间存在耦合等现象,提出了动态诊断推理模型。国内对相关性模型的测试要素进行扩展,杨鹏等人^[7]提出了不确定相关性矩阵模型,用于描述故障和测试之间的不确定相关性,他们又在二值测试的基础上研究了多值测试相关性模型,并提出了相应的诊断策略优化算法。

收稿日期:2017-03 Received Date: 2017-03

* 基金项目:航空科学基金(20142896022)资助项目

Long 等人^[8] 提出在模拟电路中通过时域和频域的特征分析建立多特征模型进行故障诊断。李旻等人^[9] 提出了多特征故障字典模型,用于模拟电路的可测试性分析。然而基于单特征量建立的相关性数学模型(即 D 矩阵模型)会损失测试信号的大量信息,降低测试的精度和效率。采用多特征模型能有效地利用测试信号的信息,但是有关多特征的模型是整合了模拟电路的故障字典与多特征分析方法,在建立模型时没有考虑测试代价和故障概率等测试性参数,测试性分析时只采用了检测率和隔离率,忽略了模糊组、测试代价等测试性指标的对比。

本文首先对测试信号进行分析,提取多个相关特征量,在此基础上,对相关数学模型进行分析与改进,建立基于多特征量的 D 矩阵模型。然后,基于信息熵制定诊断策略,并进行测试性分析。结果表明,本文模型能够减少测试点和模糊组数,降低测试代价,提高故障隔离率。

1 D 矩阵模型

相关性模型是一种可测性分析模型,该模型以有向图的方式来表达测试点和被测对象组成单元、两个测试点或者两个组成单元之间的逻辑关系^[10]。

相关性模型的建立包括如下3个基本假设。

1) 被测对象只有两种状态:正常状态,被测单元(UUT)正常工作;故障状态,UUT不能正常工作。

2) 当UUT不能正常工作时,只有其中一个部件产生故障,其他部件处于正常状态。

3) 被测对象的状态由每一个组成单元的状态决定。

相关性模型包括图示模型和数学模型。相关性图示模型是基于UUT的功能框图以图形的方式来表示测试点和组成单元之间的逻辑关系^[11]。UUT的相关性数学模型也称为 D 矩阵模型,用矩阵表示如下:

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵的第 i 行 $f_i = [d_{i1} d_{i2} \cdots d_{in}]$ 是指第 i 个组成部件在每个测试点检测到的故障信息。它表明了 f_i 和各个测试点 $t_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 的相关性。而矩阵的第 j 列 $t_j = [d_{1j} d_{2j} \cdots d_{mj}]^T$ 是指在第 j 个测试点上检测到各组成部件的故障信息。它表明了 t_j 与各组成部件 $f_i (i=1, 2, \cdots, m)$ 的相关性。

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & T_j \text{ 与 } F_i \text{ 相关} \\ 0, & T_j \text{ 与 } F_i \text{ 不相关} \end{cases}$$

D 矩阵反映了测试点与组成部件之间的故障信息,包括每个测试点检测到各组成部件的故障信息和故障状

态时可用于检测的测试点。

2 基于多特征量的 D 矩阵模型

基于单特征量建立的 D 矩阵模型中,每一个测试点对应一列可测得各部件的故障信息。常见的测试信号如电压、电流等就只包含一个特征量,则可以直接建立 D 矩阵模型。但是,在工程应用中通过传感器等采集到的测试信号包括多种不同的特征量,如在机载燃油泵实验中对振动信号进行3层小波包分解,选取4个低频段的能量作为振动信号特征参数,并且在不同的故障类型下特征参数的变化是不同的^[12]。仅采用单特征量建立的 D 矩阵模型会损失测试信号的大量信息,从而降低测试精度和效率。

基于多特征量的 D 矩阵模型充分利用了测试信号的信息。首先,分析测试点的测试信号,从中尽可能多地获取多组特征量。针对同一个测试点的多组特征量彼此之间不是相互独立的,然后,对同一个测试点的多特征量进行多值编码,得到基于多特征量的 D 矩阵模型。基于多特征量的 D 矩阵模型设计的具体步骤如下。

1) 测试信号特征提取:对测试点的测试信号进行分析,尽可能多地提取特征量,在不同的故障类型下特征量有区别时,即为选用的多特征量,若特征量无区别时,只需选用其中一个特征量来表示该测试点的测试信息。

2) 多特征值编码:同一个测试点的多特征量是相关的,对每个测试点多特征量出现的状态进行多值定义编码。当同一个测试点有 n 个特征量时,其多值编码的个数不超过 2^n 。

3) 基于多特征量 D 矩阵的建立:用新定义的多值编码代替原有测试点的故障信息,得到基于多特征量的 D 矩阵。

4) 简化基于多特征量的 D 矩阵。

为了减小计算工作量,对基于多特征量的 D 矩阵进行简化^[13]。简化内容包括以下两个方面。

(1) 对比基于多特征量的 D 矩阵的各列,如果有相同的列 $T_k = T_g$,且 $k \neq g$,则 T_k 和 T_g 是冗余的测试点,通常选用测试代价小的测试点,并在基于多特征量的 D 矩阵中只保留该测试点对应的列。

(2) 对比基于多特征量的 D 矩阵的各行,如果有相同的行 $F_x = F_y$ 且 $x \neq y$,则故障 F_x 和 F_y 不能通过这些测试点进行区分,可将有相同行的故障类作为一个模糊组,并在基于多特征量的 D 矩阵中合并相同行作为模糊组的行。

3 模型测试性分析

通过模型测试性分析验证基于多特征量的 D 矩阵

模型的有效性。模型测试性分析的流程包括建立相关性模型,优选测试点,建立故障诊断树,计算诊断能力。具体的流程如图 1 所示。

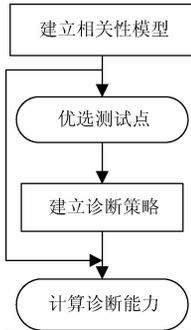


图 1 模型测试性分析流程

Fig. 1 Flow chart of model testability analysis

给定系统共有 6 种故障模式及相应的故障概率、3 个备选测试点以及相应的测试费用,并且在测试点 t_2 有 3 组特征量 E_{x0} 、 E_{x1} 和 E_{x2} ,测试点 t_3 有 3 组特征量 E_{y0} 、 E_{y1} 和 E_{y2} ,初始相关矩阵如表 1 所示。

表 1 初始相关矩阵

Table 1 The initial correlative matrix

F	t_1		t_2			t_3		P	
	10	5	E_{x0}	E_{x1}	E_{x2}	E_{y0}	E_{y1}		E_{y2}
f_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.71
f_1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.07
f_2	1	0	1	1	1	0	0	1	0.04
f_3	1	0	1	0	0	0	0	1	0.03
f_4	0	1	1	1	1	1	1	1	0.11
f_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0.04

3.1 建立相关性模型

针对单个测试点单特征量建立的 D 矩阵模型,对于单个测试点多特征量时,选用任意一组特征量即可建立 D 矩阵模型。在给定系统的初始相关矩阵中,测试点 t_2 有 3 组特征量 E_{x0} 、 E_{x1} 和 E_{x2} ,测试点 t_3 有 3 组特征量 E_{y0} 、 E_{y1} 和 E_{y2} ,分别选用测试点 t_2 和 t_3 的一组特征量可建立 9 种不同的 D 矩阵模型,采用特征量 E_{x0} 作为 t_2 的测试结果,特征量 E_{y0} 作为 t_3 的测试结果建立 D 矩阵 1,如表 2 所示。采用特征量 E_{x0} 作为 t_2 的测试结果,特征量 E_{y1} 作为 t_3 的测试结果建立 D 矩阵 2,如表 3 所示,依此命名不同的特征量对应的 D 矩阵。

基于多特征量的 D 矩阵模型在测试点 t_2 采用特征量 E_{x0} 、 E_{x1} 和 E_{x2} 作为测试结果,在测试点 t_3 采用特征量 E_{y0} 、 E_{y1} 和 E_{y2} 作为测试结果,具体步骤如下。

表 2 D 矩阵 1

Table 2 D matrix 1

F	t_1	t_2	t_3	P
	10	5	7	
f_0	0	0	0	0.71
f_1	1	1	1	0.07
f_2	1	0	1	0.04
f_3	1	0	0	0.03
f_4	0	1	1	0.11
f_5	1	1	1	0.04

表 3 D 矩阵 2

Table 3 D matrix 2

F	t_1	t_2	t_3	P
	10	5	7	
f_0	0	0	0	0.71
f_1	1	1	1	0.07
f_2	1	1	0	0.04
f_3	1	1	0	0.03
f_4	0	1	1	0.11
f_5	1	1	1	0.04

1)对测试信号进行特征提取:在表 1 的初始相关矩阵中可知, E_{x0} 、 E_{x1} 和 E_{x2} 对于同一个故障的故障信息不同,所以在测试点 t_2 有 3 个特征量, E_{y0} 、 E_{y1} 和 E_{y2} 对于同一个故障的故障信息不同,所以在测试点 t_3 也有 3 个特征量。

2)多特征值编码:在同一个测试点 t_2 提取到 3 组相关的特征量 E_{x0} 、 E_{x1} 和 E_{x2} ,共有 4 个状态 000、111、011、010,对其进行多值编码,000 编码为 0,111 编码为 1,011 编码为 2,010 编码为 3。在同一个测试点 t_3 提取到 3 组相关的特征量 E_{y0} 、 E_{y1} 和 E_{y2} ,共有 4 个状态 000、111、101、001,对其进行多值编码,000 编码为 0,111 编码为 1,101 编码为 2,001 编码为 3。

3)基于多特征量 D 矩阵的建立:用新定义的编码代替原有测试点的多特征量,得到表 4 所示的基于多特征量的 D 矩阵。

表 4 基于多特征量的 D 矩阵

Table 4 D matrix based on multi-feature quantity

F	t_1	t_2	t_3	P
	10	5	7	
f_0	0	0	0	0.71
f_1	1	1	1	0.07
f_2	1	2	2	0.04
f_3	1	3	3	0.03
f_4	0	1	1	0.11
f_5	1	1	1	0.04

4)简化基于多特征量的 D 矩阵。

(1)在新建立的基于多特征量的 D 矩阵中,有相同

的列 $t_2 = t_3$, t_2 和 t_3 是冗余的测试点,且 t_2 的测试代价小于 t_3 的测试代价,故保留测试点 t_2 , 去除测试点 t_3 。

(2) 在新建立的基于多特征量的 D 矩阵中,有相同的行 $f_1 = f_5$, 故障 f_1 和 f_2 不能通过这些测试点进行区分,将 f_1 和 f_5 作为一个模糊组。

通过识别冗余测试点和故障隔离的模糊组,即可得到最简基于多特征量的 D 矩阵如表 5 所示。

表 5 最简基于多特征量的 D 矩阵

Table 5 The simplified D matrix based on multi-feature quantity

F	t_1	t_2	t_3	P
f_0	0	0	0	0.71
$f_{1,5}$	1	1	1	0.11
f_2	1	2	2	0.04
f_3	1	3	3	0.03
f_4	0	1	1	0.11

3.2 优选测试点

针对给定的系统,在相关性模型的基础上,采用基于信息熵的诊断策略优选测试点。基于信息熵的诊断策略是利用信息熵的大小反映出故障模式导致系统故障的程度,在测试的过程中,应优先选择单位费用信息熵最大的测试点作为优选测试点^[14-15]。

具体的计算过程如下:

1) 设给定系统的状态集合为 $x = F$, 备选的测试点集合为 $t = T$ 。

2) 用备选测试集中的每个测试 t_j 对所有的状态进行划分,并依据式(2)和(3)计算在该测试点通过概率 $p(x_{jP})$ 和失败概率 $p(x_{jF})$ 。

$$p(x_{jP}) = \frac{\sum_{f_i \in x} [1 - d_{ij}] p(f_i)}{\hat{p}(x)} \quad (2)$$

$$p(x_{jF}) = 1 - p(x_{jP}) \quad (3)$$

式中: $\hat{p}(x) = \sum_{f_i \in x} p(f_i)$; $x = x_{jP} \cup x_{jF}$ 。

3) 根据每个测试点 t_j 的通过概率 $p(x_{jP})$ 和失败概率 $p(x_{jF})$ 计算其信息量。

$$I(x, t_j) = - \{ p(x_{jP}) \log_2 p(x_{jP}) + p(x_{jF}) \log_2 p(x_{jF}) \} \quad (4)$$

4) 从备选测试集中选择单位信息量最大的测试 t_k 。

5) 采用测试 t_k 将给定系统的状态集 x 划分为两个子集:通过子集和失败子集。

6) 对两个子集,分别重复步骤 2) ~ 5), 直到故障诊断树完全建立。

对于 9 个单特征量 D 矩阵均采用基于信息熵的优化策略建立诊断树,其中 D 矩阵 1 和 D 矩阵 2 的故障诊断

树如图 2 和 3 所示。对于最简基于多特征量的 D 矩阵采用基于信息熵的多值属性系统诊断策略,建立的诊断树如图 4 所示。

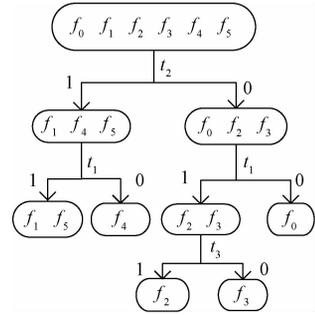


图 2 D 矩阵 1 的诊断树

Fig. 2 The fault diagnosis tree of D matrix 1

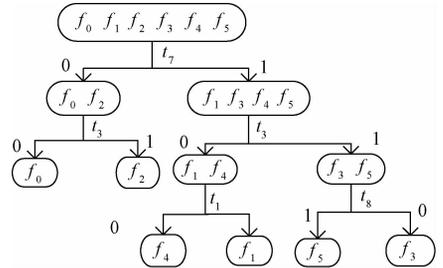


图 3 D 矩阵 2 的诊断树

Fig. 3 The fault diagnosis tree of D matrix 2

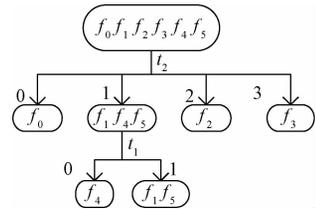


图 4 基于多特征量的 D 矩阵的诊断树

Fig. 4 The fault diagnosis tree of D matrix based on multi-feature quantity

3.3 诊断能力计算

根据建立的故障诊断树,可统计分析得出的测试性参数有选用的测试点数、模糊组、故障检测率 FDR、故障隔离率 FIR、诊断测试平均步骤数、期望费用等^[16]。

1) 选用的测试点数和模糊组

根据测试点优选的结果和 D 矩阵模型就可以统计出选用的测试点数目,以及节省的测试点。

2) 故障检测率 FDR、故障隔离率 FIR

$$FDR = \frac{U_{FD}}{U_T} \times 100\% \quad (5)$$

$$FIR = \frac{U_{FI}}{U_{FD}} \times 100\% \quad (6)$$

$$FIR1 = \frac{U_{FD1}}{U_T} \times 100\% \quad (7)$$

$$FIR2 = \frac{U_{FD2}}{U_T} \times 100\% \quad (8)$$

$$FIR3 = \frac{U_{FD3}}{U_T} \times 100\% \quad (9)$$

式中： U_{FD} 为优选的测试点可以检测到的 UUT 组成部件的个数， U_{FD1} 为优选的测试点可以检测到的单个 UUT 组成部件的个数， U_{FD2} 为优选的测试点可以检测到的 2 个 UUT 组成部件的个数， U_{FD3} 为优选的测试点可以检测到的 3 个 UUT 组成部件的个数， U_{F1} 为优选的测试点能够隔离到的 UUT 组成部件的个数， U_T 为 UUT 组成单元总数。

3) 诊断测试步骤数

故障诊断测试步骤是依据故障诊断树计算的。平均故障诊断测试步骤数 N_D 为：

$$N_D = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} k_i \quad (10)$$

式中： k_i 为第 i 个分支上的节点数； m_0 为诊断树的分支数目。

4) 平均测试费用 C_D

$$\min J = \sum_{i=0}^m \left\{ \sum_{j=1}^{|p_i|} c_{p_{ij}} \right\} p(f_i) \quad (11)$$

式中： p_i 表示故障隔离时优选的测试点的序列。 $|p_i|$ 表示优选的测试点序列 p_i 中测试点的容量。

根据相关性数学模型计算这些测试性参数，模型测试性分析结果如表 6 所示。

表 6 模型测试性分析结果

Table 6 The results of model testability analysis

特征量	测试点数	模糊组数	FDR	FIR1/%	FIR2/%	FIR3/%	N_D	平均测试费用	
D 矩阵 1	(t_1, E_{x0}, E_{y0})	3	1	100	80	20	0	2.07	15.49
D 矩阵 2	(t_1, E_{x0}, E_{y1})	3	2	100	50	50	0	1.51	9.23
D 矩阵 3	(t_1, E_{x0}, E_{y2})	3	2	100	50	50	0	2	12.66
D 矩阵 4	(t_1, E_{x1}, E_{y0})	3	1	100	75	0	25	1.47	9.16
D 矩阵 5	(t_1, E_{x1}, E_{y1})	3	2	100	50	50	0	1.51	9.23
D 矩阵 6	(t_1, E_{x1}, E_{y2})	2	1	100	67	0	0	1.29	7.3
D 矩阵 7	(t_1, E_{x2}, E_{y0})	2	1	100	75	0	25	2	15
D 矩阵 8	(t_1, E_{x2}, E_{y1})	3	1	100	80	20	0	2.15	16.05
D 矩阵 9	(t_1, E_{x2}, E_{y2})	3	1	100	75	0	25	2	12.78
多特征量矩阵	$(t_1, E_{x0}, E_{x1}, E_{x2}, E_{y0}, E_{y1}, E_{y2})$	2	1	100	80	20	0	1.22	7.2

模型测试性分析结果表明，测试性分析结果与特征量的选取有关，比较 9 组单特征量 D 矩阵，选取的特征量对于测试点数、模糊组数、FIR、 N_D 、平均测试费用都有影响。通过与多组单特征量 D 矩阵模型对比，基于多特征量的 D 矩阵模型测试点数和模糊组数少，故障隔离率高，诊断测试步骤数少，平均测试费用最低，更有利于故障的高效检测和隔离。

4 结 论

工程实际中，通常能够从测试点的信号中提取出多个相关的特征量，而不同的特征量分别从不同的侧面反映系统或部件的工作及健康状态。基于此，本文首先分析测试信号，提取了测试信号的多个特征量。然后，根据提取的特征量，进行多值编码，并建立了多特征量的 D 矩阵模型。最后，基于信息熵理论，进行诊断策略优化，同时结合实例对比分析了多特征量 D 矩阵模型与单特征量 D 矩阵模型。结果表明，本文提出的多特征量 D 矩阵模型，进行诊断时所选取的测试点数和模糊组数少，故障隔离率高，诊断测试步骤数少，平均测试费用低。

参考文献

[1] 田仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 90-91.
TIAN ZH, SHI J Y. System Testability Design Analysis and Verification[M]. Beijing: Beihang University Press, 2003:90-91.

[2] 石君友. 测试性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-2.
SHI J Y. Testability Design Analysis and Verification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:1-2.

[3] TAN X D, LUO J L, LI Q, et al, Fault evolution-test dependency modeling for mechanical systems [J], Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2015, 16(10):848-857.

[4] DE P. Logic modeling as a tool for testability [C]. Proceedings of the IEEE Autotestcon, 1985: 203-207.

[5] ZHAO D S, HE Y Z. A new test points selection method for analog fault dictionary techniques [J]. Analog Integrated Circuits & Signal Processing, 2015, 82(2): 435-448.

- [6] ZHANG S, PATTIPATI K, HU Z, et al. Dynamic coupled fault diagnosis with propagation and observation delays [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Systems, 2013, 46(6) : 1424-1439.
- [7] 杨鹏, 邱静, 刘冠军. 测试不可靠条件下的诊断策略优化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (4) : 850-854.
YANG P, QIU J, LIU G J. Optimization method for diagnostic strategy with unreliable test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (4) : 850-854.
- [8] LONG B, TIAN SH L, WANG H J. Feature vector selection method using mahalanobis distance for diagnostics of analog circuits based on LS-SVM [J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 2012, 28(5) : 745-755.
- [9] 李旻, 王彩利, 龙兵, 等. 多特征故障字典及其在模拟电路可测性分析中应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3) : 368-374.
LI M, WANG C L, LONG B, et al. Multi-feature fault dictionary and its application in testability analysis for analog circuits [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(3) : 368-374.
- [10] 张伟昆. 测试性分析与评估体系的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5) : 38-42.
ZHANG W K. Research on testability analysis and evaluation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(5) : 38-42.
- [11] 邱静, 刘冠军, 杨鹏, 等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
QIU J, LIU G J, YANG P, et al. Design of weapon system testability modeling and analysis [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [12] 焦晓璇, 景博, 黄以锋, 等. 基于小波包 BP-AdaBoost 算法的机载燃油泵故障诊断研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9) : 1797-1986.
JIAO X X, JING B, HUANG Y F, et al. Research on fault diagnosis for airborne fuel pump based on wavelet package and BP-AdaBoost algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (9) : 1797-1986.
- [13] 马瑞萍, 董海迪, 马长李. 基于故障-信息相关性矩阵的测试性分析 [J]. 兵工自动化, 2016, 35(5) : 5-8.
MA R P, DONG H D, MA CH L. Testability analysis based on fault- test dependency matrix [J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 37(9) : 5-8.
- [14] 黄以锋, 景博, 茹常剑. 基于信息熵的多值属性系统诊断策略优化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5) : 1004-1007.
HUANG Y F, JING B, RU CH J. Optimal method of diagnosis strategy in multi-value attribute system based on information entropy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5) : 1004-1007.
- [15] 黄以锋, 景博, 夏岩. 基于信息熵的电路测点优化策略 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11) : 4149-4151.
HUANG Y F, JING B, XIA Y. Optimal strategy of test point selection for circuit based on information [J]. Application Research of Computers, 2010, 27 (11) : 4149-4151.
- [16] WANG C, QIU J, LIU G J, et al. Testability evaluation using prior information of multiple sources [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014(4) : 867-874.

作者简介



孙萌, 2016 年于西北大学获得学士学位, 现为空军工程大学在读硕士研究生, 主要研究方向为故障预测与健康管理的。

E-mail: 2445625046@qq.com

Sun Meng received B. Sc. from Northwest University in 2016. And now, she is M. Sc. candidate in Air Force Engineering University. Her main research direction is fault prognosis and health management.



景博, 1996 年于空军工程大学获得硕士学位, 2002 年于西北工业大学获得博士学位, 现为空军工程大学教授, 主要研究方向为故障预测与健康管理的、智能算法、无线传感器网络、数据融合。

E-mail: jingbo_sensor@163.com

Jing Bo received M. Sc. from Air Force Engineering University in 1996, and Ph. D. from Northwestern Polytechnical University in 2002, respectively. And now, she is a professor in Air Force Engineering University. Her main research direction is fault prognosis and health management, intelligent algorithms, wireless sensor networks, and data fusion.