

# 基于双边矢量概率矩阵的故障 诊断方法研究

张 昭<sup>1</sup>, 陈 展<sup>2</sup>, 余敦俊<sup>3</sup>

(1. 中国航天科工集团公司, 北京 100854; 2. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京 100074;  
3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要:** 为了实现武器装备在测试数据“不确定”、“小子样”、“不完备”情况下的故障诊断, 提出基于双边矢量概率矩阵的故障诊断方法; 该方法以武器装备的 FMEA 报告、专家经验和历史案例为基础, 分析武器装备中故障原因、故障模式、测试项目间存在的相关性关系, 并利用测试项目和故障模式的相关性强弱及测试顺序, 结合模糊层次分析法和贝叶斯理论, 生成故障原因—故障模式—测试项目双边矢量概率矩阵; 在武器装备测试过程中出现故障时, 可利用双边矢量概率矩阵对故障现象进行推理, 获得导致该故障现象产生的故障原因的可能性大小, 从而进行故障原因定位; 最后, 利用某型装备的部件进行了验证, 试验结果证明, 该方法能够对武器装备的故障进行推理诊断。

**关键词:** 双边矢量矩阵; 概率矩阵; 不完备; 小样本

## Research on Fault Diagnosis Method Based on Bilateral Vector Probability Matrix

Zhang Zhao<sup>1</sup>, Chen Zhan<sup>2</sup>, She Dunjun<sup>3</sup>

(1. China Aerospace Science And Industry Corporation, Beijing 100854, China;  
2. The Third Military Representative office of Seafarers Beijing, Beijing 100074, China;  
3. Beijing Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In order to realize the fault diagnosis of weapon equipment under the condition of “uncertain”, “little sample” and “incomplete” test data, a fault diagnosis method based on bilateral vector probability matrix is proposed; this method is based on the FMEA report of weapon equipment, expert experience and Based on historical cases, analyze the correlation between the causes of failures, failure modes, and test items in weapons and equipment, and use the correlation between test items and failure modes and the test sequence, combined with fuzzy analytic hierarchy process and Bayesian theory, To generate the cause of the failure—failure mode—the bilateral vector probability matrix of the test item; when a failure occurs during the testing of weapons and equipment, the bilateral vector probability matrix can be used to infer the failure phenomenon to obtain the probability of the cause of the failure caused by the failure phenomenon In order to locate the cause of the fault; finally, the components of a certain type of equipment were used for verification. The test results proved that the method can reasonably diagnose the fault of the weapon equipment.

**Keywords:** bilateral vector matrix; probability matrix; incomplete; small sample

## 0 引言

在信息化作战中, 武器装备呈现出技术含量高、使用强度高、损失和消耗数量大等特点, 对武器装备及时有效的诊断维修, 将对战争进程和结局产生决定性的影响。

随着多专业和学科的不断融合, 针对武器装备领域故障诊断技术的研究, 国内外学者做了不少相应的工作, 并取得了一定的成果。美国华盛顿大学工程学院的 Nathaniel Guy 博士, 从时序的角度对武器装备上遥测数据进行分析, 以数据相关性的可视化过程为判定依据, 从数据间的依赖关系和正常的相关关系间的偏差来判断系统是否发生故

障<sup>[1]</sup>。梁瑞胜、孙有田、周希等人提出了一种基于小波包变换的残差能量方法, 对武器装备动态测试数据进行分析处理, 得到武器装备的故障特征, 在此基础上利用神经网络实现了故障诊断和定位<sup>[2]</sup>。英国赫尔大学工程与计算机科学学院的 Sohag Kabir 博士利用故障模式影响、危害分析报告, 结合故障树分析法对武器装备的故障可能性进行分析<sup>[3]</sup>。上述三种方法要求测试分析人员对武器装备的整个工作流程细节了解的非常清晰透彻, 且需要大量完备的测试数据作为支撑。

紧密结合工程实际, 研究目前复杂装备诊断领域相关内容, 当前基于自动测试系统的测试结果中存在很多“不知道”、“不明确”、“不一致”等不确定因素, 且测试样本数据呈现“小子样”、“不完备”的特点; 上述的诊断方法难以适应这类复杂装备的诊断。而概率在解决复杂系统不

收稿日期:2020-03-31; 修回日期:2020-05-06。

作者简介:张 昭(1984-),男,河南南阳人,工学硕士,高级工程师,主要从事自动化测试和装备综合保障等方向的研究。

确定性和关联性引起的故障有很大的优势。因此，提出了一种基于双边矢量概率矩阵的故障诊断方法。

### 1 双边相关性矩阵

#### 1.1 相关性矩阵

“相关”表示两个元素  $X_i$  和  $Y_i$  是彼此关联、相互牵涉的，即表示两元素之间的共享关系或因果关系。相关性矩阵则是表示两组元素  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\}, Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_n\}$  之间的因果关系。

1) 故障原因和故障模式间的相关性矩阵：

通过对复杂装备的 FMEA 报告分析可以获取故障原因节点集合  $c = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_r\}$  和故障模式节点集合  $m = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_m\}$ ，故障原因—故障模式相关性矩阵的具体定义如下<sup>[4]</sup>：

$$C_{m \times n} = \begin{bmatrix} m_1 & \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_r \end{bmatrix} \\ m_2 & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1r} \end{bmatrix} \\ \vdots & \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \\ m_m & \begin{bmatrix} c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mr} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 中，行向量  $\alpha = [c_{i1} \ c_{i2} \ \dots \ c_{ir}]$  表示所有的故障原因  $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_r$  对故障模式  $m_i$  产生的影响情况；列向量  $\beta_j = [c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{ij}, \dots, c_{rj}]^T$  表示故障原因  $c_i$  对应的所有故障模式  $m_1, m_2, \dots, m_m$  产生的影响情况。 $C_{m \times n}$  是一个二值矩阵，即矩阵中任意一个单元  $c_{ij}$  的取值只能是 0 或 1，1 表示故障原因  $c_i$  能够导致故障模式  $m_j$  的产生，反之，0 表示不能产生<sup>[5]</sup>。

2) 故障模式和测试项目间的相关性矩阵：

通过分析故障模式与信号、信号与测试项目之间的相关性，以获取故障—信号—测试模型而生成测试与故障模式之间的依赖关系。

故障模式—测试相关性矩阵的具体定义如下：

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} m_1 & \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_n \end{bmatrix} \\ m_2 & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \end{bmatrix} \\ \vdots & \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \\ m_m & \begin{bmatrix} d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 中，行向量  $\alpha_i = [d_{i1} \ d_{i2} \ \dots \ d_{in}]$  表示所有的测试项目  $t_1, t_2, \dots, t_n$  对故障模式  $m_i$  激励信号的响应；列向量  $\beta_j = [d_{1j} \ d_{2j} \ \dots \ d_{mj}]^T$  表示测试项目  $t_j$  对应的所有故障模式  $m_1, m_2, \dots, m_m$  激励信号的响应。 $D_{m \times n}$  是一个二值矩阵，即矩阵中任意一个单元  $d_{jk}$  的取值只能是 0 或 1，1 表示故障模式  $m_j$  的激励能够被测试项目  $t_k$  检测，反之，0 表示不能检测。

#### 1.2 双边相关性矩阵

故障原因—故障模式相关性矩阵  $C_{m \times n}$  和故障模式—测试项目相关性矩阵  $D_{m \times n}$  分别表示了故障原因与故障模式、

故障模式与测试项目间的因果关系，对两个矩阵进行合并生成双边相关性矩阵，如式 (3) 所示：

$$B_{m \times (n+r)} = C_{m \times r} \oplus D_{m \times n} = \begin{bmatrix} c_r & \dots & c_2 & c_1 & \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_n \end{bmatrix} \\ c_{1r} & \dots & c_{12} & c_{11} & m_1 & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \end{bmatrix} \\ c_{2r} & \dots & c_{22} & c_{21} & m_2 & \begin{bmatrix} d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \\ c_{mr} & \dots & c_{m2} & c_{m1} & m_m & \begin{bmatrix} d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

即双边相关性矩阵实现了故障原因、故障模式、测试项目三者之间的因果关系的表达。可以利用双边相关性矩阵中各个元素取值判定它们之间的相关性关系，即双边相关性矩阵  $B_{m \times (n+r)}$  中元素  $c_{ij}$  取值为 1 时，表示故障原因  $c_i$  与故障模式  $m_j$  相关，相反，元素  $c_{ij}$  取值为 0 时，则表示故障原因  $c_i$  和故障模式  $m_j$  间不相关；双边相关性矩阵  $B_{m \times (n+r)}$  中元素  $d_{jk}$  取值为 1 时，表示故障模式  $m_j$  与测试项目  $t_k$  相关，相反，元素  $d_{jk}$  取值为 0 时，则表示故障模式  $m_j$  和测试项目  $t_k$  间不相关。

### 2 故障原因—故障模式—测试项目双边矢量概率矩阵

#### 2.1 双边矢量矩阵

武器装备的测试项目一般是根据故障模式进行设立，即故障模式是与某个测试项目呈强相关的，而与其他的测试项目呈弱相关或不相关的关系，则相关性矩阵大部分行向量中存在一个元素“1”是与某个测试项目呈一阶相关，其他的“1”是高阶相关或不相关。将相关性矩阵中测试项目的顺序按照测试流程的顺序进行排列，结合以往的测试数据和专家经验，通过三角模糊层次分析法获取测试项目与故障模式的相关度，将故障模式顺序按照测试项目与其的强相关性进行排序，构建一个能够表示测试时序和故障模式与测试项目相关性强弱的双边矢量矩阵  $\overrightarrow{B_{m \times (n+r)}}$ 。

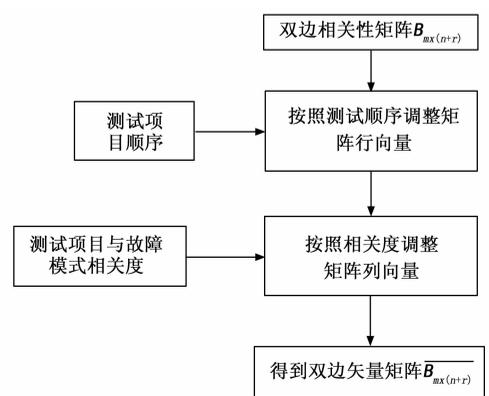


图 1 双边矢量矩阵求取流程图

#### 2.2 双边矢量概率矩阵

在双边矢量矩阵  $\overrightarrow{B_{m \times (n+r)}}$  的基础上，仅需获取矩阵



在诊断流程中，首先通过测试项目的判定规则对来自武器装备的测试数据进行分析处理，针对测试数据不满足判定规则的情况，利用故障原因—故障模式—测试项目双边矢量概率矩阵，分析不通过的测试项目对应的所有故障模式及故障原因发生的可能性，提取最大可能性的故障模式及故障原因作为诊断结果。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 某装备的局部 FME (C) A 分析

以某装备的局部 FME (C) A 分析报告为基础，分析故障原因、故障模式、检测手段等方面信息，得出故障原因包括：电阻网络短路  $c_1$ 、通用门电路短路  $c_2$ 、晶振电压不当  $c_3$ 、运算放大器 N9 功能失效  $c_4$ ，故障模式包括：供电指令未发出  $m_1$ 、RS422 接口不工作  $m_2$  和 PU 模块工作状态错误  $m_3$ ，测试项目包括：供电指令检查  $t_1$ 、RS422 接口检查  $t_2$  和 PU 模块工作检查  $t_3$ 。分析故障原因、故障模式、测试项目间相关性关系，按照公式 (3) 构建双边相关性矩阵  $B_{3 \times (3+4)}$ ，如表 1 所示。

表 1 故障原因—故障模式—测试项目双边相关性矩阵  $B_{3 \times (3+4)}$

$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_1$		$t_1$	$t_2$	$t_3$
0	1	1	1	$m_1$	1	0	0
0	1	1	0	$m_2$	0	1	1
0	1	0	1	$m_3$	1	1	1

#### 3.2 构建双边矢量概率矩阵

在某次按照  $t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_1$  测试过程中，出现“供电指令检查  $t_1$ ”报错。结合以往的测试数据和专家经验，利用三角模糊层次分析法获取测试项目与故障模式的相关度，将故障模式顺序按照测试项目与其的强相关性进行排序，获得双边矢量矩阵  $\overrightarrow{B}_{3 \times (3+4)}$ ，如表 2 所示。

表 2 故障原因—故障模式—测试项目双边矢量矩阵  $\overrightarrow{B}_{3 \times (3+4)}$

$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_1$		$t_2$	$t_3$	$t_1$
0	1	1	1	$m_2$	1	1	0
0	1	1	0	$m_3$	1	1	1
0	1	0	1	$m_1$	0	0	1

按照第 2.2 节分析思路，结合表 2 双边矢量矩阵  $\overrightarrow{B}_{3 \times (3+4)}$  的结果，请三位权重相同的专家对  $\overrightarrow{B}_{3 \times (3+4)}$  中各个故障原因、故障模式、测试项目间关系进行评估，并结合历史测试案例，获得双边矢量概率矩阵  $\overrightarrow{\Pi}_{3 \times (3+4)} (\overrightarrow{P})$ ，如表 3 所示。

表 3 对于  $\overrightarrow{\Pi}_{3 \times (3+4)} (\overrightarrow{P})$  事件发生概率语言值

$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_1$		$t_2$	$t_3$	$t_1$
0	0.35	0.85	0.51	$m_2$	0.85	0.30	0
0.22	0.75	0.45	0	$m_3$	0.20	0.77	0.24
0	0.21	0	0.65	$m_1$	0	0	0.68

#### 3.3 基于双边矢量概率矩阵的故障诊断

在此次测试过程中，测试项目  $t_1$  没有通过，通过双边矢量概率矩阵  $\overrightarrow{\Pi}_{3 \times (3+4)} (\overrightarrow{P})$  可知该次测试不通过可能由故障模式  $m_1$  和  $m_3$  引起，且故障模式  $m_1$  可能性最大 (0.68)，而导致故障模式  $m_1$  产生的故障原因包括  $c_1$  和  $c_3$  两种，其中  $c_1$  可能性最大 (0.65)，即诊断后起该次测试项目  $t_1$  未通过的故障原因是  $c_1$ 。

通过上述的双边矢量概率矩阵可以有效地将故障原因、故障模式、测试项目、系统工作流程和历史试验数据有机的结合起来，解决相关性矩阵中大部分故障模糊组的解耦问题。

### 4 结束语

本文以 FMEA 报告、专家经验为基础，获取表示故障原因与故障模式、故障模式与测试项目间的因果关系的双边相关性矩阵，利用测试项目和故障模式的相关性强弱和测试顺序构建矢量矩阵，并通过模糊层次分析法和贝叶斯理论获取双边矢量矩阵概率参数，为工程应用中武器装备的测试采样点布置不全、测试信息丢失所导致“不确定”、“小子样”、“不完备”等困难条件下的故障诊断提供了一种新思路。

#### 参考文献:

- [1] Nathaniel Guy. Techniques for Fault Detection and Visualization of Telemetry Dependence Relationships for Root Cause Fault Analysis in Complex Systems [D]. University of Washington, 2016.
- [2] 梁瑞胜, 孙有田, 周希亚. 小波包变换和神经网络的某型导弹故障诊断方法研究 [J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23 (2): 217-220.
- [3] SohagKabir. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis [D]. University of Hull, Hull, HU6 7RX, UK, 2017.
- [4] 张磊. 一种基于 FMEA 的贝叶斯诊断网络 [J]. 军民两用技术与产品, 2007, 37 (23): 148-155.
- [5] 魏清新, 王坤明, 孙萍. 基于多信号流图模型的导弹系统级故障诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (3): 109-111.
- [6] 金一山. 基于模糊层次分析法的软件项目风险管理研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [7] 王双成. 贝叶斯网络学习、推理与应用 [M]. 上海: 立信会计出版社, 2010.
- [8] Hierarchical hybrid testability modeling and evaluation method base on information fusion. Xishan Zhang, Kaoli Huang, Pengcheng Yan, and Guangyao Lian. Journal of Systems Engineering and Electronics [J]. 2015, 26 (3): 523-532.