

FDR 验证试验的故障样本分配策略研究

王志, 李星新, 王成, 于永利

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 故障率作为测试性验证试验故障样本分配的主要影响因素, 针对一些情况下使得故障样本分配结果的合理性不足的问题, 以故障检测率 (FDR, Fault Detection Rate) 作为验证指标, 提出了一种考虑严酷度的样本故障模式选取方法; 利用基于模糊证据推理的方法解决了故障模式严酷度排序问题; 通过对相关标准中涉及的故障样本分配策略进行梳理, 针对现行多因子综合加权比例分配方法不足之处, 根据故障模式种类与验证样本量的数量关系, 区分不同情况, 借助预选样本集随机抽样、考虑严酷度的取整策略, 以及动态概率调整, 合理改善了故障率主体分配方案进行故障模式选取时样本分配集中不合理的状况; 以某装备单元的 FDR 验证试验为例, 验证了所提故障样本分配方法的可行性合理性。

关键词: 测试性验证; 故障检测率; 样本分配策略; 严酷度; 模糊证据推理

Research on Fault Sample Allocation Strategy for Fault Detection Rate Verification Test

WANG Zhi, LI Xingxin, WANG Cheng, YU Yongli

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the failure rate is the main influencing factor of failure sample allocation in testability verification test, which makes the rationality of failure sample allocation result insufficient in some cases, and the failure detection rate (FDR) is taken as the verification index, a sample failure mode selection method considering severity is proposed. Based on fuzzy evidential reasoning, the method is used to solve the problem of fault mode severity ranking. By sorting out the fault sample allocation strategies involved in the relevant standards, aiming at the shortcomings of the current multi factor comprehensive weighted proportional allocation method, different situations are distinguished according to the quantitative relationship between the type of fault mode and the number of verification samples, with the help of random sampling of preselected sample set, rounding strategy of considering the severity, and dynamic probability adjustment, It reasonably improves the unreasonable condition of sample distribution concentration when the failure rate subject allocation scheme selects the failure mode. Taking the testability verification test of a certain unit as an example, the feasibility and rationality of the proposed fault sample allocation method are verified.

Keywords: test verification; fault detection rate; sample allocation strategy; severity; fuzzy evidential reasoning

0 引言

在装备试验过程中, 为了节省试验经费和避免重复工作、拖延进度, 装备测试性试验一般与维修性试验同时进行, 其样本的分配和模拟故障策略与维修性试验中维修作业样本的分配与故障模拟相同^[1]。这样的试验方法虽然确保了测试性验证试验故障样本的真实性, 但对于装备的部分组成单元来说, 在有限的试验期间内出现的自然故障数量较少, 甚至无故障。基于该样本分配方案, 这些组成单元分配的故障样本量也常为 0, 这样使得测试性验证不充分、不全面, 导致试验评估结果存在偏差。而且当验证样本量能对所有故障模式多次覆盖时, 对维修性验证来说, 即使是模拟 (注入) 同一故障, 其故障修复时间也不一定相同, 而对测试性验证来说, 同一故障模式多次注入意义不大, 且容易出现故障率高的故障样本被重复选取而故障

率低但其他指标高的样本没有选中, 最终导致样本结构不合理。

针对上述问题, 文献 [2-8] 分别对故障样本分配所考虑的影响因素进行了扩充, 包括故障率、危害度、严酷度、扩散度、被检测难度、故障影响、平均修复时间、故障隔离时间等, 并对提高部分因素的计算精度进行了研究。故障样本的分配大多采用基于数理统计中分层抽样的方法^[9], 主要考虑故障的某一个属性或多个属性综合加权, 然后在已知故障样本总量的情况下, 依据量化属性值按比例进行抽样。目前, 故障样本分配问题主要侧重于研究如何更加全面地考虑影响分配比例计算的因子、多因子的加权策略以及如何提高这些因子的计算精度, 故障样本分配的合理性有了明显提高。例如, 文献 [10] 提出了一种故障样本综合加权分配方法, 提高了分配结果的合理性。但是, 该方法采用基于专家经验加权的方法计算指标权重,

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-14。

作者简介: 王志 (1998-), 男, 河南鹤壁人, 在读硕士研究生, 主要从事装备通用质量特性、装备试验评价方向的研究。

引用格式: 王志, 李星新, 王成, 等. FDR 验证试验的故障样本分配策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 298-303.

权值分配的主观性较强, 故障样本分配结果的置信度不高; 文献 [11] 提出了一种基于故障属性的分配方案, 比较全面地考虑了各种故障属性。但是, 该方法关于严酷度的计算方法考虑情况比较简单, 计算结果精度不高, 并且忽略了指标权重的计算; 这些方法大都以故障检测率指标的验证为例, 进行了案例说明。但其适用性还有待进一步证明, 文献验证案例中涉及的单元故障模式种类数都比较少, 且比例抽样产生的小数取整规则没有合理的解决。本文主要考虑故障检测率 (FDR, fault detection rate) 的验证, 通过对标准中验证方案进行梳理, 对上述相关文献研究, 针对 FDR 验证试验的故障样本分配策略问题, 区分不同情况, 提出了综合考虑严酷度的以故障率为主体开展故障模式选取的方法, 旨在为测试性验证故障样本的分配工作提供合理、可行的实施方法。

1 测试性验证试验故障样本分配策略研究

1.1 测试性验证试验中的抽样检验模型

GJB8895 将测试性验证试验定义为, 为确定产品是否达到规定的测试性要求, 由订购方认可的试验机构按选定的验证试验方案, 进行故障抽样并在产品实物或试验件上开展的故障注入或模拟试验。故障检测率作为测试性最重要的定量指标之一, 其定义为用规定的方法正确检测到的故障数与故障总数之比, 常用百分数表示。测试性指标体系中, 故障检测率、故障隔离率、虚警率的抽样检验都是计数抽样检验。以故障检测率的验证试验为例, 其检验模型可用图 1 表示^[12]。

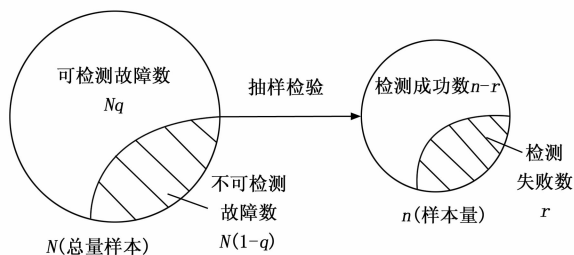


图 1 故障检测率抽样检验模型

取 c 为合格判定数, 当检测失败数 $r \leq c$ 认为检测试验通过, 反之, 不通过。

其中, 总体为 N 次故障检测结果构成的集合, q 为总体的故障检测率。需要注意的是, 测试性试验中总体容量 N 不明确, 由于认知的有限以及故障发生的不确定性, 测试性试验实施时无法获得故障检测所构成的全集。相比于样本容量 n , 认为 $N \gg n$ 。 q 可以假定为一个定值, 只能通过样本对其进行统计推断。做出正确推断的前提是: 所选取的 n 个样本具有代表性和独立性, 即要求每一个个体都有同等机会被选入样本, 而且被选样本的取值不受其他样本取值的影响。

1.2 测试性验证方案及样本分配策略

故障样本分配策略即研究如何把抽样检验方案确定的故

障样本总量 n 分配到装备具体的各个单元、不同的故障模式中, 以便于开展故障注入实验。研究样本的分配问题, 必须先考虑已知信息, 根据不同验证方案的应用条件限制, 进行验证方案选取。此外, 虽然各个验证方案都会对样本量 n 提出要求, 但是如果只从确定的故障样本量 n 出发进行样本量分配问题的研究, 而不明确指出所采取的验证方案, 就会造成忽略 n 值需要调整时 (如小数取整) 判别数 c 主导变化的情况, 如文献 [13] 样本量需要调整时简单的将试验样本量 43 (故障判据为 5) 调整为 44, 但是若前期是由表 1 中方案 3 确定的样本量 n , 这个调整至少变为 48 (不改变双方风险相等的前提), 对应故障判据为 6。即没有考虑到所做调整与验证方案的匹配性。因此, 必须先进行验证方案研究。

通过对文献 [14-15] 中提及的各种测试性验证方案 (故障检测率均适用) 进行梳理, 按照其样本量的确定方法进行归类, 总结所涉及标准中采取的样本分配策略^[16-18]。

根据前面的抽样检验模型, 试验中注入一个故障能被检测 (隔离) 的概率为 q , 前提是这个故障样本是从 N 中随机抽取的, 对于一个已知故障的注入来说, 注入后被检测与否是确定的, 即概率为 1 或 0 (不考虑有时成功有时失败情况)。因此, 标准中提及的样本分配方案都强调了基于故障率 (主体) 的分配方案: 故障率高的组成单元 (故障模式频数比大的故障模式) 在故障检测总体样本 N 构成中会提供较大比重的样本, 其被随机抽取的概率相应也高, 即这些影响分配比例计算的因子 (如故障率、工作时间、单元数量) 的考虑, 更全面的反映了真实的构成数量比, 有助于对实际 FDR 做出推断。但是, 当验证样本量要求能对所有故障模式多次覆盖时, 按故障率为主体来制定故障样本分配方案, 考虑因素比较单一, 导致故障率高的故障样本重复选取而故障率相对发生频率小但严酷度或其他指标高的故障模式, 分配样本数量常为 0, 验证效果不够令人满意。标准虽然提及了分配集中不合理问题, 但并未提出统一的分配调整方案。因此, 在不破坏抽样检验样本抽取代表性独立性要求前提下, 合理考虑其他影响因素, 并明确调整方案, 是十分有必要的。

2 考虑严酷度排序的 FDR 验证试验故障样本分配策略

2.1 考虑严酷度排序的 FDR 验证试验故障样本分配策略

根据相关输入信息, 确定验证方案, 按照方案确定样本量 n , 明确其可调整的值。首先进行故障样本量分配, 完成单元样本数量分配后再进行故障模式选取。根据分配结果, 按照故障模式种类数、验证样本量及预选样本量 (取验证样本量的 3 或 4 倍) 数量关系区分不同情况。严酷度反映的是故障发生后对装备的影响程度, 订购方重点关注严酷度高的故障模式的检测^[19]。因此需要综合考虑严酷度进行样本选取。记故障模式种类数为 D_z 、预选样本数量为 D_Y 、验证样本数量为 D_p , 根据三者的数量关系区分如下情况:

1) $D_z \geq D_Y$ 时 ($d_1 = D_z - D_Y$), 按不同故障模式的故障率占比抽取预选样本数量, 计算结果大于等于 1 的按四

舍五人进行取整。根据故障模式严酷度，对于分配数量不足 1 的，按严酷度排序从低到高依次删除 d_1 个。其余计算结果不足 1 的调整为 1，需要在剩余故障模式严酷度排序低于自身的且数量大于等于 2 的故障模式集合中取严酷度最低的做减法（数量不少于 1），至分配完毕。随后，不同个数不同故障模式种类组成预选样本集，进行简单随机抽样，遵循每个样本个体只使用一次原则抽样，当随机抽样选中一个故障模式时，该种故障模式被选中概率相应变化（变小），其它样本被选中概率不变。

2) $D_Y > D_Z \geq D_P$ 时 ($d_2 = D_Y - D_Z$)，首先每个故障模式种类拥有 1 个样本， d_2 按照故障率进行分配，分配后按严酷度进行排序，两端向中间进行两两配对，严酷度高的向上取整，低的向下取整，奇数情况中间的按照补差策略取整。随后，由不同个数不同故障模式种类组成预选样本集，抽样方法同上。

3) $D_P > D_Z$ 时，($d_3 = D_P - D_Z$)，首先每个故障模式种类拥有 1 个样本， d_3 处理方法同 d_2 。即可完成故障模式选取。

针对 FDR 检验问题，考虑多因子加权后按比例计算的方法无法合理的处理故障模式种类数接近所需故障样本数量的情况。例如某单元有 10 种故障模式需要选 8 个故障样本，若按多因子加权比例进行计算，这种情况下由于取整问题实际上人为破坏了所考虑因素规定的比例。因此，考虑故障样本的充分性要求^[20]，当出现情况 2 或 3 时，预选样本集中每种故障模式都有至少 1 个。当出现情况 1 时，删除故障率低且严酷度低的故障模式后使得预选样本集中每种故障模式都有 1 个。考虑严酷度排序采用不同的取整策略，通过借助预选样本集，由数量占比体现被选中概率，保证了故障率差距，而采用被选中概率动态变化（单独减小），合理增加了严酷度高样本被选中概率。进行随机抽样达到验证个数即可，不用再考虑取整问题。

2.2 基于模糊证据推理的严酷度排序方法

上述方法中的核心是解决故障模式的严酷度排序问题。文献 [19] 关于严酷度评分将其分为 4 个等级的方法，不能很好地解决更多故障模式时的一致排序问题。本文采用模糊证据推理和灰色关联理论对严酷度进行评价并排序。依据标准提及的打分规则，将严酷度评价的考虑因素细分为人员危害性 (P)、财产危害性 (W)、任务危害性 (T) 三项。采用 5 个模糊评价等级进行评价，即 $H = \{H_{11}, H_{22}, H_{33}, H_{44}, H_{55}\} = \{\text{很低, 低, 中等, 高, 很高}\}$ 。假设单个模糊评价等级之间相互独立且只有相邻等级之间存在相交情况。利用梯形分布来表示 5 个评价等级^[21]，如图 2 所示。

利用模糊证据推理置信结构可以使评估人员灵活的对故障模式的三项危害性进行评价：如任务危害性评价为“高”，对应 $\{(H_{44}, 1.0)\}$ 这种置信结构。 $\{(H_{15}, 1.0)\}$ 表示对应评估等级可以从“很低”到“很高”中的任意一个。设 L 名专家 (E_1, \dots, E_L) 对 K 个故障模式 ($FM_1,$

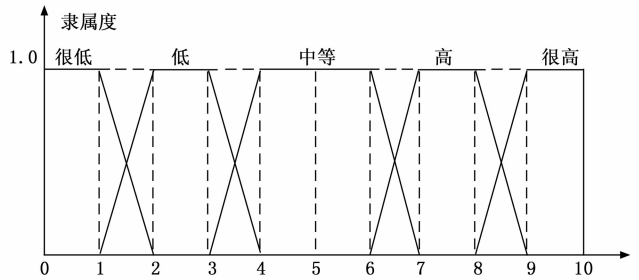


图 2 梯形分布表示评价等级的模糊隶属函数

\dots, FM_k) 关于 N 个评价因素项 (D_1, \dots, D_n) 进行评价。

记 $\{(H_{ij}, \beta_{ij}^l(FM_k, D_n))\}, i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 5$ 为专家 E_l 对于故障模式 FM_k 关于评价因素 D_n 进行评价得到的置信结构。其中 H_{ij} ($i = 1, \dots, 4; j = i + 1 = 1, \dots, 5$) 为等级 H_{ii} 与 H_{jj} 之间的区间模糊评价等级， $i = j$ 时即模糊评价等级 H_{ii} 。 L 个专家对每个故障模式关于各评价因素项进行综合。记为：

$$\tilde{X}_k(n) = \{(H_{ij}, \beta_{ij}(FM_k, D_n))\}$$

其中： $\beta_{ij}(FM_k, D_n)$ 称为综合置信度。各专家 E_l 的权重 $W_l > 0, \sum_{l=1}^L W_l = 1$ 。

$$\beta_{ij}(FM_k, D_n) = \sum_{l=1}^L W_l \beta_{ij}^l(FM_k, D_n)$$

$$i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 5; k = 1, \dots, K; n = 1, \dots, N(1)$$

K 个故障模式关于 N 个评价因素的综合置信结构构成模糊置信决策矩阵：

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} \tilde{X}_1(1) & \tilde{X}_1(2) & \dots & \tilde{X}_1(N) \\ \tilde{X}_2(1) & \tilde{X}_2(2) & \dots & \tilde{X}_2(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{X}_K(1) & \tilde{X}_K(2) & \dots & \tilde{X}_K(N) \end{pmatrix}$$

利用文献 [21-22] 提及方法进行去模糊化，即：

$$h_{ij} = \frac{\sum_{q=0}^n (b_q - c)}{\sum_{q=0}^n (b_q - c) - \sum_{q=0}^n (a_q - d)}$$

$$i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

h_{ij} 为 H_{ij} 去模糊化后的明确值。此时计算故障模式 FM_k 关于评价因素 D_n 的总置信度为具体值。

$$X_k(n) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 h_{ij} \beta_{ij}(FM_k, D_n)$$

$$k = 1, \dots, K; n = 1, \dots, N \quad (3)$$

模糊置信决策矩阵也可完成去模糊化。

采用灰色关联理论确定故障模式 ESR 排序。建立由所有评价因素的理想水平确定的参考矩阵 X_0 ，计算灰色关联度 R 。有下式：

$$R = \sum_{n=1}^N \lambda_n r\{X_0(n), X_k(n)\} \quad (4)$$

式中 λ_n 为综合评价因素权重。 $r\{X_0(n), X_k(n)\}$ 为所有故障模式的各个评价因素的灰色关联系数。

$$r\{X_0(n), X_k(n)\} =$$

$$\frac{\min_k \min_n |X_0(n) - X_k(n)| + \alpha \max_k \max_n |X_0(n) - X_k(n)|}{|\min_k \min_n |X_0(n) - X_k(n)| + \alpha \max_k \max_n |X_0(n) - X_k(n)|} \quad (5)$$

α 称为分辨系数, 常取 0.5。不改变 ESR 排序。若理想水平取 0 值, 则 X_0 为 $K \times N$ 阶的零矩阵。计算灰色关联度值越小, ESR 排序值越小。

3 应用案例

已知某型导弹由致冷组件、防振器、整流器、剪切支架、锁制器、电路盒等模块组成。由二项分布法求得试验方案为 (50, 5)。其制冷组件共有 11 种故障模式: 密封圈 A 失效、压力表失效、电磁开关部件失效、导管零部件失效、排气嘴失效、充气阀漏气、密封圈 B 失效、转接头材料缺陷、致冷导管护口变形、电磁开关漏气、单向阀失效, 依次记为 $FM_i (i=1, \dots, 11)$ 。分配的故障样本量为 8 个, 由 4 名专家对 11 个故障模式的严酷度围绕 P 、 W 、 T 三方

面进行评价。已知专家权重依次为 0.3、0.2、0.3、0.2, 评价影响因素权重为 $P: \lambda_1=0.4, W: \lambda_2=0.3, T: \lambda_3=0.3$ 。利用 2.2 节方法确定严酷度指标排序。首先将专家评价信息构成模糊置信结构, 如表 1 所示。利用式 (1) 合成综合置信结构。如表 2 所示。利用式 (2) 和式 (3) 进行去模糊化, 得到明确的置信决策矩阵。 P 、 W 、 T 理想水平取 0 值, 参考矩阵 X_0 为 11×3 阶的零矩阵。由表 4 得到比较矩阵 X , 易计算出关联系数。以 FM_1 的关联度计算为例, 读取比较矩阵的第一行, 得到 $X_1(1)=0.6040, X_1(2)=0.4168, X_1(3)=0.5825$, 对应的参考数列即 $X_0(n)=\{0, 0, 0\}$ 。两级最小以及最大值即 $\min_k \min_n |X_0(n) - X_k(n)|=0.1558, \max_k \max_n |X_0(n) - X_k(n)|=0.6914$, 代入公式 (5), 计算得 $r\{X_0(1), X_1(1)\}=0.528, r\{X_0(2), X_1(2)\}=0.6577, r\{X_0(3), X_1(3)\}=0.528$ 。

表 1 专家评价信息模糊置信结构

评价因素	专家	故障模式										
		FM_1	FM_2	FM_3	FM_4	FM_5	FM_6	FM_7	FM_8	FM_9	FM_{10}	FM_{11}
P	D ₁	H ₄₄	H ₂₂	H ₁₁	H ₄₄	H ₂₂	H ₂₂	H ₂₂	H ₃₃	H ₂₂	(H ₃₃ , 0.5) (H ₄₄ , 0.5)	H ₄₄
	D ₂	(H ₃₃ , 0.9)	H ₂₂	H ₁₂	H ₄₄	H ₂₂	H ₂₂	H ₁₂	H ₃₃	H ₁₂	H ₃₃	H ₃₃
	D ₃	H ₃₃	H ₁₁	H ₁₁	H ₄₄	H ₂₂	H ₂₂	H ₁₂	H ₃₃	H ₁₂	H ₃₃	H ₃₄
	D ₄	H ₄₄	H ₁₁	H ₁₁	H ₃₃	(H ₂₂ , 0.2) (H ₃₅ , 0.8)	H ₂₂	H ₁₁	H ₃₃	H ₁₁	H ₃₃	H ₃₃
W	D ₁	H ₃₃	H ₂₃	H ₁₂	H ₄₄	H ₂₂	H ₃₃	H ₁₂	H ₃₃	(H ₂₂ , 0.6)	H ₂₂	H ₃₃
	D ₂	H ₂₂	H ₂₂	H ₁₁	(H ₃₃ , 0.4) (H ₄₄ , 0.6)	(H ₃₃ , 0.6)	H ₂₂	(H ₁₃ , 0.4) (H ₂₂ , 0.6)	H ₄₅	H ₁₂	H ₃₃	H ₃₃
	D ₃	H ₃₃	H ₁₁	H ₁₁	H ₄₄	H ₂₂	H ₂₂	H ₂₂	H ₄₄	H ₂₂	(H ₂₃ , 0.5) (H ₃₄ , 0.5)	H ₃₄
	D ₄	H ₂₂	H ₁₃	H ₁₁	H ₃₃	H ₂₂	H ₃₃	H ₁₂	(H ₃₃ , 0.5) (H ₄₄ , 0.5)	H ₁₂	H ₃₃	H ₃₃
T	D ₁	H ₃₄	H ₂₂	H ₂₂	H ₃₄	(H ₂₂ , 0.5) (H ₃₃ , 0.5)	H ₃₃	H ₁₁	H ₃₃	H ₁₂	H ₄₄	H ₄₄
	D ₂	H ₃₃	H ₁₃	H ₁₂	H ₃₃	H ₂₂	H ₃₃	H ₁₁	H ₄₄	H ₁₁	H ₃₃	(H ₃₃ , 0.5) (H ₄₄ , 0.5)
	D ₃	H ₄₄	H ₂₂	H ₁₂	H ₄₄	H ₂₂	H ₃₃	H ₁₂	H ₃₄	H ₂₂	H ₃₃	H ₄₄
	D ₄	H ₃₃	H ₁₃	H ₁₁	H ₃₃	H ₂₂	H ₃₃	H ₁₁	H ₃₃	H ₁₂	H ₃₃	H ₃₃

表 2 专家评价信息综合置信结构

故障模式	P	W	T
FM_1	{(H ₁₅ , 0.02), (H ₃₃ , 0.48), (H ₄₄ , 0.5)}	{(H ₂₂ , 0.4), (H ₃₃ , 0.6)}	{(H ₃₃ , 0.4), (H ₃₄ , 0.3), (H ₄₄ , 0.3)}
FM_2	{(H ₁₁ , 0.5), (H ₁₂ , 0.5)}	{(H ₁₁ , 0.3), (H ₁₃ , 0.2), (H ₂₂ , 0.2), (H ₂₃ , 0.3)}	{(H ₁₃ , 0.4), (H ₂₂ , 0.6)}
FM_3	{(H ₁₁ , 0.8), (H ₁₂ , 0.2)}	{(H ₁₁ , 0.7), (H ₁₂ , 0.3)}	{(H ₁₁ , 0.2), (H ₁₂ , 0.5), (H ₂₂ , 0.3)}
FM_4	{(H ₃₃ , 0.2), (H ₄₄ , 0.8)}	{(H ₃₃ , 0.08), (H ₄₄ , 0.92)}	{(H ₃₃ , 0.4), (H ₃₄ , 0.3), (H ₄₄ , 0.3)}
FM_5	{(H ₂₂ , 0.84), (H ₃₅ , 0.16)}	{(H ₁₅ , 0.08), (H ₂₂ , 0.8), (H ₃₃ , 0.12)}	{(H ₂₂ , 0.85), (H ₃₃ , 0.15)}
FM_6	{(H ₂₂ , 1)}	{(H ₂₂ , 0.5), (H ₃₃ , 0.5)}	{(H ₃₃ , 1)}
FM_7	{(H ₁₁ , 0.2), (H ₁₂ , 0.5), (H ₂₂ , 0.3)}	{(H ₁₂ , 0.5), (H ₁₃ , 0.42), (H ₂₂ , 0.08)}	{(H ₁₁ , 0.7), (H ₁₂ , 0.3)}
FM_8	{(H ₃₃ , 1)}	{(H ₃₃ , 0.4), (H ₄₄ , 0.4), (H ₄₅ , 0.2)}	{(H ₃₃ , 0.5), (H ₃₄ , 0.3), (H ₄₄ , 0.2)}
FM_9	{(H ₁₁ , 0.2), (H ₁₂ , 0.5), (H ₂₂ , 0.3)}	{(H ₁₂ , 0.4), (H ₁₅ , 0.12), (H ₂₂ , 0.48)}	{(H ₁₁ , 0.2), (H ₁₂ , 0.5), (H ₂₂ , 0.3)}
FM_{10}	{(H ₃₃ , 0.85), (H ₄₄ , 0.15)}	{(H ₂₂ , 0.3), (H ₂₃ , 0.15), (H ₃₃ , 0.4), (H ₃₄ , 0.15)}	{(H ₃₃ , 0.7), (H ₄₄ , 0.3)}
FM_{11}	{(H ₃₃ , 0.4), (H ₃₄ , 0.3), (H ₄₄ , 0.3)}	{(H ₃₃ , 0.8), (H ₃₄ , 0.2)}	{(H ₃₃ , 0.3), (H ₄₄ , 0.7)}

表 3 模糊评价等级去模糊化

评价等级	H ₁₁	H ₁₂	H ₁₃	H ₁₄	H ₁₅	H ₂₂	H ₂₃	H ₂₄	H ₂₅	H ₃₃	H ₃₄	H ₃₅	H ₄₄	H ₄₅	H ₅₅
b _{ij}	0.130	0.259	0.394	0.459	0.5	0.292	0.433	0.5	0.541	0.5	0.567	0.606	0.708	0.741	0.87

$X_1(3)\} = 0.5403$, 由公式 (4) 求得 $R_1 = 0.5706$ 。同理计算得到各故障模式的关联度见表 4 第五列。最终得到关联度排序为 $FM_4 < FM_{11} < FM_8 < FM_1 < FM_{10} < FM_6 < FM_5 < FM_9 < FM_2 < FM_7 < FM_3$ 。

表 4 ESR 总评价信息

故障模式	P	M	T	灰色关联度
FM ₁	0.604 0	0.416 8	0.582 5	0.570 6
FM ₂	0.194 5	0.306 1	0.332 8	0.823 9
FM ₃	0.155 8	0.168 7	0.243 1	0.947 9
FM ₄	0.666 4	0.691 4	0.582 5	0.505 4
FM ₅	0.342 2	0.333 6	0.323 2	0.738 0
FM ₆	0.292 0	0.396 0	0.500 0	0.695 3
FM ₇	0.243 1	0.318 3	0.168 7	0.859 8
FM ₈	0.500 0	0.631 4	0.561 7	0.557 0
FM ₉	0.243 1	0.373 3	0.243 1	0.805 5
FM ₁₀	0.531 2	0.437 6	0.562 4	0.586 5
FM ₁₁	0.582 5	0.513 4	0.645 6	0.543 0

故障率数据及严酷度排序见表 5。按照本文做法, 需要先选取 24 个样本个体构成预选随机抽样样本集, 属于情况 2。 $d_2 = 13$, 将其按照故障率分配给每种故障模式, 根据其严酷度等级排序进行取整调整, 得到 24 个预选样本集, 进行随机抽样挑选 8 个验证样本即可, 一次抽样结果见表 5。与按照故障率分配, 及文献 [4] 考虑故障率、危害度、扩散度、环境因子、被检测难度的综合加权分配方案结果进行对比。

表 5 几种分配方案结果对比

故障模式	故障率	严酷度排序	综合加权比例	故障率分配		综合加权分配		本文方法	
				取整前	取整后	取整前	取整后	预选个数	抽样结果
FM ₁	0.327	4	0.057	0.568	1	0.456	0	2	1
FM ₂	1.050	9	0.075	1.823	2	0.6	1	3	1
FM ₃	1.400	11	0.102	2.431	2	0.816	1	4	1
FM ₄	0.021	1	0.09	0.036	0	0.72	1	2	1
FM ₅	0.088	7	0.05	0.153	0	0.4	0	1	0
FM ₆	0.581	6	0.085	1.009	1	0.68	1	2	1
FM ₇	0.032	10	0.077	0.056	0	0.616	1	1	0
FM ₈	0.045	3	0.064	0.078	0	0.512	0	2	1
FM ₉	0.560	8	0.272	0.972	1	2.176	2	2	0
FM ₁₀	0.433	5	0.096	0.752	1	0.768	1	3	1
FM ₁₁	0.071	2	0.032	0.123	0	0.256	0	2	1

由分配结果可知, 按故障率的分配方案不会兼顾严酷度等级高的故障模式, 综合加权比例分配方法结果受因素

权重影响较大, 其取整策略一定程度上破坏了实际考虑的加权比例。本文方法避免了按比例分配样本时的取整问题, 合理改善了仅仅考虑故障率的分配方案造成的样本分配集中不合理的状况。

4 结束语

本文结合测试性验证试验故障样本分配的工程实践特点, 提出了一种用于 FDR 验证中故障样本分配工作的故障模式选取方法, 提出了基于模糊证据推理的故障模式严酷度排序解决策略。该方法借助预选样本集随机抽样、考虑严酷度的取整策略, 以及动态概率调整, 有效改善了故障率主体分配方案进行故障模式选取时样本分配集中不合理的状况。针对现行一些故障样本分配方法的不足之处, 进行了合理改进。经过实例验证, 所提方法对于科学、有效地开展装备测试性验证试验工作具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] GJB2072-94, 维修性试验与评定 [S]. 1994.
- [2] 余思奇, 景博, 黄以铎. 基于贡献度的测试性验证试验样本分配方案研究 [J]. 中国测试, 2015, 41 (2): 91-95.
- [3] 何洋, 李洪涛, 王志新. 基于多因子的机电设备测试性验证样本分配方案 [J]. 电光与控制, 2015, 22 (1): 97-100.
- [4] 刘磊, 宋家友. 故障样本的多指标集成加权分配方法 [J]. 计算机工程与科学, 2019, 41 (4): 742-749.
- [5] 赵建扬, 李小珉, 雷琴. 基于危害度相对比值的故障样本分配方案 [J]. 探测与控制学报, 2011, 33 (2): 55-59.
- [6] 李天梅, 邱静, 刘冠军. 基于故障率的测试性验证试验故障样本分配方案 [J]. 航空学报, 2009, 30 (9): 1661-1665.
- [7] 李睿峰, 李文海等. 基于物理注入的模拟电路故障样本选取方法研究 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (1): 90-94.
- [8] 苏月, 景博, 余思奇, 等. 基于理想度的故障样本集评估优选方法研究 [J]. 测控技术, 2015, 34 (11): 29-32, 36.
- [9] 张如佩. 飞控系统的故障样本选取与故障注入方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [10] 张西山, 黄考利, 敖贤野, 等. 测试性验证试验中的故障样本综合加权分配方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 139-142.
- [11] 邓露, 许爱强, 赵秀丽. 基于故障属性的测试性验证试验样本分配方案 [J]. 测试技术学报, 2014, 28 (2): 103-107.
- [12] 邱静. 装备测试性试验与评价技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [13] 张艺琼, 刘萌萌, 李蟠, 等. 测试性验证试验方的工程修

正方法研究 [J]. 测控技术, 2013, 32 (2): 126 - 127.

[14] GJB2547A - 12, 装备测试性工作通用要求 [S]. 2012.

[15] 田 仲, 石君友. 现有测试性验证方法分析与建议 [J]. 质量与可靠性, 2006 (2): 47 - 51

[16] GJB1135.3 - 91, 地空导弹武器系统维修性评审、试验与评定 [S]. 1991.

[17] GJB1770.3 - 93, 对空情报雷达维修性 维修性试验与评定 [S]. 1993.

[18] GJB368A - 94, 装备维修性通用大纲 [S]. 1994.

[19] GJBZ1391 - 06 故障模式、影响及危害性分析指南 [S].

2006.

[20] 石君友, 康 锐. 基于通用充分性准则的测试性试验方案研究 [J]. 航空学报, 2005, 26 (6): 691 - 695.

[21] 刘 彤, 刘虎沉, 林清恋. 基于模糊证据推理和灰色关联理论的 FMEA 方法 [J]. 模糊系统与数学, 2011, 25 (2): 71 - 80.

[22] CHEN C B, KLIEN C M. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic, Part B1997, 27 (1): 26 - 35.

(上接第 285 页)

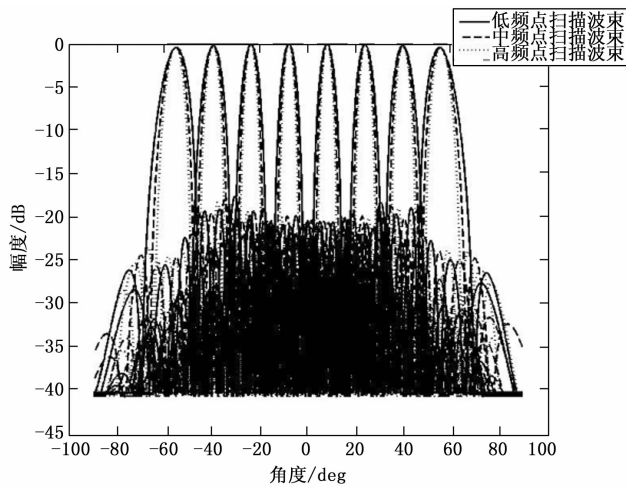


图 9 8 波束数据波形图

DBF 系统对 FPGA 的高速接口资源、计算资源要求极高; 若宽带多波束集中做加权运算, 则 FPGA 资源严重不足。针对该问题, 本文提出了一种基于交错透传的宽带数字多波束合成技术, 采用逐层逐级分解的方式进行数据合成处理, 解决了宽带多波束合成集中运算时, FPGA 资源不够用的难题。文中详细描述了宽带信号的高速数据采集、海量数据的高效传输以及宽带采集产生的大容量数据的多波束合成算法, 最后通过测试 16 通道、瞬时带宽 1 GHz 的宽带输入信号, 经过数据采集、传输、数据加权、求和之后形成 8 个波束。测试数据所形成的波形图与预期波束指向一致, 验证了该技术的正确性和有效性, 具有较强的工程应用推广价值。

参考文献:

[1] 向海生, 杨宇宸, 夏润梁. 基于多波束网络的宽带阵列接收系统 [J]. 雷达科学与技术, 2018, 16 (5): 578 - 582.

[2] 陶书豪. 多波束并行宽带雷达侦察接收数字实现技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[3] 毛睿达. 宽带数字侦察接收机的波束形成算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

[4] 边 疆, 顾明超, 杜宇峰. 一种基于频域滤波的宽带校准和宽

[5] 代大海, 邢世其, 王 玺, 等. 数字阵列合成孔径雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.

[6] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1 (1): 11 - 16.

[7] 吴曼青, 葛家龙. 数字阵列合成孔径雷达 [J]. 雷达科学与技术, 2009, 7 (1): 1 - 9.

[8] 王 建, 郑一农, 何子远. 阵列天线理论与工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

[9] 顾明超, 李春晓, 边疆, 等. 基于 FPGA 的超宽带数字波束形成技术 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48 (1): 173 - 179.

[10] ZHOU Y S, LI J, ZHANG H C, et al. Internal Calibration for Airborne X-Band DBF-SAR Imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021; 1 - 5.

[11] 彭宏涛, 朱德智. 基于 Farrow 滤波器的宽带数字波束形成技术研究及实现 [J]. 舰船电子对抗, 2015, 38 (2): 37 - 41.

[12] 龚仕仙, 魏玺章, 黎 湘, 等. 宽带数字信号接收机综述 [J]. 电子学报, 2013, 41 (5): 949 - 959.

[13] 刘良琦. 宽带阵列数字波束形成技术研究 [D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2019.

[14] 高 健. 宽带数字波束形成技术的工程应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

[15] 向 聪. 阵列自适应波束形成及空时自适应处理方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

[16] 管金称, 李会勇, 谢菊兰. 宽带自适应和差波束形成与测角方法研究 [J]. 信息处理, 2020, 36 (7): 1085 - 1095.

[17] 向 巍, 葛志强, 崔 剑, 等. 多通道相控阵自适应数字单脉冲合成方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (4): 765 - 771.

[18] 吴 卫, 章文星. 宽带数字阵列数字时延技术研究及硬件实现 [J]. 雷达与对抗, 2014, 34 (2): 30 - 34.

[19] 张玉喜, 王 建, 秦亚萍, 等. 宽带阵列雷达波束合成技术研究 [J]. 雷达与对抗, 2010, 30 (2): 13 - 17.

[20] 陈新竹, 吴 洁, 舒 汀, 等. 基于子带化的宽带数字波束形成延时补偿新方法 [J]. 现代雷达, 2016, 38 (12): 27 - 30.

[21] 毕 杨, 甘 甜. 基于 Olen-Compton 的恒定响应宽带波束形成算法 [J]. 无线电工程, 2018, 48 (1): 22 - 25.