

电子装备测试性融合评估方法

尹园威, 马俊涛, 姚智刚, 解辉, 史林, 吕萌

(陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘要: 测试性是装备通用质量特性之一, 其设计水平直接影响了装备保障效能的发挥, 如何更加真实地评估装备的测试性水平是当前研究的热点; 在研制阶段, 装备实物测试性试验数据数量少、获取难、费用高, 可认为是“小子样”数据, 为了更加全面客观地评价装备的测试性水平, 需要充分利用测试性仿真试验获取仿真数据进行融合评估; 进行测试性仿真试验时, 研究电子装备的仿真模型、故障模型、仿真故障注入方法, 获取测试性仿真数据; 在此基础上, 将仿真试验数据作为验前信息并进行的处理, 结合“小子样”装备实物试验数据, 采用贝叶斯方法进行测试性试验数据的融合来评估装备的测试性水平, 提高评估结果的客观性和可信度; 通过案例分析, 验证了测试性融合评估方法的有效性。

关键词: 电子装备; 测试性; 小子样; 融合评估

Fusion Evaluation Method of Electronic Equipment Testability with Small Sample

Yin Yuanwei, Ma Juntao, Yao Zhigang, Xie Hui, Shi Lin, Lv Meng

(Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The testability is one of the general quality characteristics in equipment, and the design level of testability is an important factor which affecting the support effectiveness playing, and how to evaluate the testability of equipment more authentically is the focus of current research. In the development stage, the objective testability test data from physical experiment are few, difficult to obtain and expensive, which can be considered as “small sample” data. In order to evaluate the testability of equipment more comprehensively and objectively, it is necessary to make full use of testability simulation test to obtain simulation data for fusion evaluation. When conducting testability simulation test, the simulation model, fault model and simulation fault injection method of electronic equipment are studied to obtain testability simulation data. On this basis, the simulation test data is treated as pre-test information and combined with the physical test data of “small sample” equipment, the testability of the equipment is evaluated by integrating the testability test data with the Bayesian method, so as to improve the objectivity and credibility of the evaluation results. Through case analysis, the effectiveness of the testability fusion evaluation method is verified.

Keywords: electronic equipment; testability; small sample; fusion evaluation

0 引言

测试性是装备通用质量特性之一, 在 GJB 2547A-2012 中的定义为: “产品能及时、准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降程度), 并隔离其内部故障的一种设计特性”^[1]。测试性作为装备的通用质量特性之一, 在大型复杂装备的全寿命周期过程中起了重要作用^[2-4]。测试性参数主要包括故障检测率(FDR)、故障隔离率(FIR)、故障虚警率(FAR)等。

测试性评估, 是指采用相应的理论与方法来评价装备测试性参数达到什么样水平的过程。如: 装备设计特性的测试性定量评价、测试性建模分析与评估、研制阶段的仿真试验评估与样机试验评估、定型阶段装备实物试验的测

试性评估和综合分析评价等, 均是测试性试验与评估的内容。测试性评估的目的主要有 3 个: 1) 对本阶段装备的测试性水平进行评估, 为是否转入下一阶段提供依据; 2) 是测试性验证试验, 为装备定型提供依据; 3) 装备使用后的测试性信息收集与评价, 为研发新型装备和性能改进提供参考。

实装测试性试验存在几个问题: 1) 在研和新列装的电子装备数量少, 使用大数定律的统计方法进行测试性试验, 缺乏足够的时间和样本量, 而且装备高可靠性的设计使得自然发生的故障数量少; 2) 新型复杂装备集成度高、结构复杂, 测试难度大, 费用高; 3) 实物故障注入会对装备造成损坏, 影响装备的列装使用, 风险大。随着建模仿真技术的发展, 装备测试性仿真试验成为测试性评估工作的重要发展方向, 具有实装试验所不具备的优点: 1) 降低了可访问性的限制, 可将故障注入到任何位置; 2) 较少依赖辅助设备与系统接口, 也避免了硬件的损坏; 3) 易改动、可重复、费用低, 可获取大量试验数据。

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-09-05。

基金项目: “十三五”部委级预研项目(41402050102)。

作者简介: 尹园威(1984-), 男, 河南安阳人, 博士, 讲师, 主要从事测试性验证与评估, 雷达信号处理方向的研究。

因此,用于测试性评估的装备实装试验数据属于“小子样”数据,需要综合使用其他信息来弥补小子样实物试验数据的不足,本文采用贝叶斯数据融合的方法融合仿真数据与实装试验数据,以提高测试性评估的客观性与可信度。

1 测试性仿真数据获取

测试性仿真数据的获取主要依靠装备的仿真试验,是用于获取测试性仿真试验数据的主要途径,主要包含两项技术:1) 装备仿真模型与故障模型的建立;2) 故障模型的建立;3) 故障模式选择与仿真故障注入。

1.1 装备仿真模型

对于大型复杂电子装备仿真模型的建立,可采用模块化、层次化的思想,使用宏建模技术,对某个分系统或部组件进行建模,将其分解为若干块子电路,之后再组合完成系统的仿真模型。

模块化设计的实现步骤是:将装备整体电路依其结构与功能分割成合适的子电路,对各子电路进行分别绘制,完成所有子电路的建模,最后通过连接属性将它们组合起来,形成整体电路。各子电路都需要经过完整的设计,因此每个子电路用“块”表示,可在不同的地方重复使用,这就是模块化的含义。

层次化结构是将电路在垂直方向进行“分割”,每个模块可以由几个内部模块所组成,一直“分割”到最后层模块,形成层次化结构。在仿真软件中,是通过层间的输入/输出端口、层次方块和层次管脚实现逻辑上的互联互通。

1.2 装备故障模型

通过装备可靠性资料、设计资料、专家经验等信息分析装备的故障模式和故障位置等,并在仿真环境下建立故障模型^[5-6]。建立故障仿真模型需要解决以下这几个问题:

1) 元器件级的故障建模。仿真模型应该能够准确地表达各元器件故障模式的功能行为,达到表现该故障模式的效果,实现途径有重组法和替换法。

2) 故障宏模型。可以把系统中较为复杂的故障模式使用等效替代的方法将其简化,只考虑输入/输出特性的近似建模方法,降低了故障建模的复杂度。对于大型复杂电路或者无法了解其内部结构的电路,需要使用故障宏模型的方法解决“黑匣”问题。

3) 层次故障的建模。测试性试验需要确定装备的故障层次,依据装备物理特性与故障特性,采用由下而上的故障建模策略,从底层元器件故障向上到分系统故障来建立层次故障^[7-8]。

1.3 仿真故障注入

通过试验方案确定注入的故障模式、数量、故障位置等,使用故障模型代替原有的正常模型,施加相应激励即可完成故障的注入。故障仿真注入方法的显著优点是:可以尽早建立装备电路的故障仿真模型并进行故障注入,降

低了试验成本,并且加快了测试性工作的进程。

在相应的测试资源条件下对故障进行检测/隔离,并与故障注入信息进行对比分析,经过统计得到 FDR/FIR 等测试性参数,获取装备测试性仿真试验数据。

2 测试性数据融合评估方法

测试性数据融合是一种关于测试性数据处理的研究,综合利用多种数据,对装备测试性进行全面多维的分析,实质是利用数学方法的技术手段将不同来源的数据进行综合,得到更全面客观的结论。本文中测试性数据主要包括两部分:测试性仿真试验数据和测试性实装试验数据,因此主要研究这两类试验数据的融合处理方法。

2.1 贝叶斯数据融合

由于装备实装试验数据较少导致装备故障信息的缺失,可以看作是“小子样”数据,因此我们考虑采用贝叶斯理论将测试性仿真试验信息作为验前信息使用起来,以指导现场试验或者作为现场试验的补充。

把未知参数 θ 看成随机变量,则验后分布为给定样本之后的条件分布密度这种方法是与样本相关的,可以充分地利用验前信息,解决小子样试验情况下的统计分析问题。

贝叶斯数据融合公式为:

$$\pi(\theta | x) = \frac{f(\theta | x)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} f(\theta | x)\pi(\theta)d\theta} \quad (1)$$

其中: θ 代表需要进行评价的参数; x 为样本观测值; $f(\theta | x)$ 为样本的密度函数; $\pi(\theta)$ 为验前分布密度函数; Θ 为 θ 的取值范围。

在该公式中, $\pi(\theta)$ 是在进行试验之前就已经获取的验前分布情况,这种知识就称为验前信息,并且满足 $\int_{\Theta} \pi(\theta) d\theta = 1$ 。验后分布 $\pi(\theta | x)$ 是验前信息、样本信息、总体信息的综合,是使用总体信息与样本信息对验前信息 $\pi(\theta)$ 的调整^[9-11]。基于 Bayes 的数据融合过程如图 1 所示。

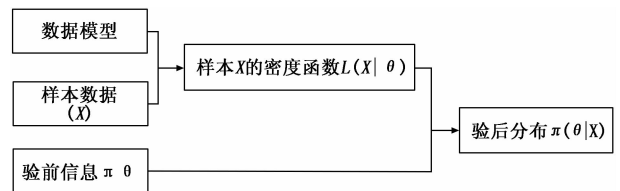


图 1 Bayes 数据融合原理

2.2 验前分布的确定

测试性验前信息是利用 Bayes 分析方法进行测试性评估和验证的基础,大量可信的验前信息是进行测试性有效评估的前提。测试性验前信息的来源多种多样,主要有这几类^[12]:1) 测试性设计分析专家在装备研制过程中,得到的大量测试性经验知识;2) 在设计研制阶段,历次子系统/部组件试验得到的测试性信息;3) 通过建立装备虚拟样机、仿真模型等技术进行故障注入,得到的测试性试验数据;4) 装备新型号的研制,一般与原型号有着一定的技术

继承, 因此可以间接利用原有的测试性信息。

如果使用仿真试验数据作为验前信息进行数据融合, 需要确定使用的验前信息与现场试验信息服从同一分布, 两者是相容的、一致的, 试验产品具有技术状态的一致性。之后使用验前信息来确定参数的验前分布, 再利用试验数据确定参数的验后分布。

对于试验数据验前分布的确定, 通常有这几种方法:

1) Bootstrap 方法; 2) 随机加权法; 3) 最大熵法; 4) 经验 Bayes 方法; 5) 共轭分布法。工程上经常用共轭分布法进行运算。

共轭分布的定义为: 设 θ 是总体分布中的参数, $\pi(\theta)$ 是 θ 的验前分布, 如果后验分布 $\pi(\theta | x)$ 与验前分布 $\pi(\theta)$ 具有相同的函数形式, 则称 $\pi(\theta)$ 是 θ 的共轭验前分布, 即验前、验后的分布具有相同的形式。

在 FDR/FIR 的测试性评估试验中, 结果只有两种情况: 检测成功和检测失败。其总体分布为二项分布, 采用的共轭分布为贝塔分布, 贝塔分布是解决 FDR/FIR 验证评价的关键, 其主要性质包括: 贝塔分布曲线与分布参数的关系、先验分布的期望与方差、后验分布一阶矩 (期望) 与二阶矩。

对于成败型数据 $X = (n, f)$, FDR/FIR 的估计值 q 认为是成功次数 $s (s = n - f)$ 出现的概率, 其数学模型为:

$$P(q | X) = C_n^s q^s (1 - q)^f \quad (2)$$

对于贝塔分布, 其密度函数为:

$$\pi(q | a, b) = Be(q; a, b) = \frac{1}{B(a, b)} q^{a-1} (1 - q)^{b-1} \quad (3)$$

作为先验分布, 贝塔分布的期望 $E[q]$ 和方差 $D[q]$ 的表达式:

$$\begin{cases} E[q] = \frac{a}{a+b} \\ D[q] = \frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)} \end{cases} \quad (4)$$

确定验前分布 $Be(q; a, b)$ 后, 现场试验数据为 $X = (n, f)$, q 的似然函数为: $L(X | q) = C_n^f q^f (1 - q)^{n-f}$, 由 Bayes 公式可以推导出成功率 q 的后验分布。

$$\begin{aligned} q &= \pi(q | X) = \frac{\pi(q; a, b) L(X | q)}{\int_0^1 \pi(q; a, b) L(X | q) dq} = \\ &= \frac{\frac{q^{a-1} (1 - q)^{b-1}}{B(a, b)} q^f (1 - q)^{n-f}}{\int_0^1 \frac{q^{a-1} (1 - q)^{b-1}}{B(a, b)} q^f (1 - q)^{n-f} dq} = \\ &= \frac{q^{a+f-1} (1 - q)^{b+n-f-1}}{\int_0^1 q^{a+f-1} (1 - q)^{b+n-f-1} dq} = q^{a+f-1} (1 - q)^{b+n-f-1} \cdot \\ &\frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(b+f)\Gamma(a+s)} = Be(q; a+s, b+f) \end{aligned} \quad (5)$$

在平方损失下, FDR/FIR 的 Bayes 估计为其后验期望值 (一阶验后矩):

$$\hat{q}_B = E[q | X] = \int_0^1 q \cdot \pi(q | X) dq =$$

$$\begin{aligned} &\int_0^1 q^{a+s} (1 - q)^{b+f-1} \frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(b+f)\Gamma(a+s)} dq = \\ &\frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(b+f)\Gamma(a+s)} \int_0^1 q^{a+s} (1 - q)^{b+f-1} dq = \\ &\frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(b+f)\Gamma(a+s)} \cdot \frac{\Gamma(b+f)\Gamma(a+s+1)}{\Gamma(a+b+n+1)} \end{aligned} \quad (6)$$

经推导计算可得:

$$\hat{q}_B = \frac{(a+b+n-1)!(a+s)!}{(a+b+n)!(a+s-1)!} = \frac{a+s}{a+b+n} \quad (7)$$

2.3 验前信息的处理

当获得了大量仿真的先验信息之后, 需要对其进行处理, 一般是对验前分布或者验前参数进行综合, 得到可以使用的验前信息。这里给出两种先验信息的处理方法: 等效法与拟合法, 具体如下:

假设使用测试性仿真试验得到 m 批次的试验数据, 记作: $(n_1, s_1), (n_2, s_2), \dots, (n_m, s_m)$, 其中 $n_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是第 i 次试验中的故障总数, $s_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是第 i 次试验中的可以检测到的故障数, 与贝塔分布中参数的关系是 $a_i = s_i, b_i = f_i, f_i = n_i - s_i$ 。

2.3.1 等效法

主要思想为: 将得到的多组试验数据中将试验次数最小的数值作为先验等效的试验, 将等效故障检测率为每次试验的故障检测率的加权和, 等效的成功检测次数为等效故障数乘以等效故障检测率。由于是对同一系统进行故障注入并进行测试, 可认为每批次故障检测率的权重是相同的, 即 $\omega_i = \frac{1}{m}$, 等效方法采用的公式为:

$$\begin{cases} n' = \min\{n_i, i = 1, 2, \dots, m\} \\ s' = n' \times p' = n' \times \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{s_i}{n_i} \end{cases} \quad (8)$$

其中: n' 为验前信息等效的总试验次数, s' 为等效的试验成功次数。那么验前分布的超参数 a, b 分别为: $a = s'$ 和 $b = n' - s'$ 。

2.3.2 拟合法

拟合法的思想为: 对每次观测到的成败型试验数据, 都对其进行相应贝塔分布的拟合, 使用 Bootstrap 方法得到贝塔分布的参数估计值 a_i, b_i 与在相应置信度下参数值的估计区间 $[a_{i,L}, a_{i,U}]$ 与 $[b_{i,L}, b_{i,U}]$, 其区间长度分别记为: \vec{a}_i 与 \vec{b}_i , 区间的长度可认为是估计的精度, 将其区间长度的倒数作为该参数的可信度 η_i , 归一化之后得到相应参数的权重 ω_i , 经加权平均后得到验前信息分布参数的估计值。其数学模型为:

$$\begin{cases} \eta_{ai} = 1/\vec{a}_i \\ \omega_{ai} = \eta_{ai} / \sum_{i=1}^m \eta_{ai} \\ a' = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i \omega_{ai} \end{cases} \text{ 与 } \begin{cases} \eta_{bi} = 1/\vec{b}_i \\ \omega_{bi} = \eta_{bi} / \sum_{i=1}^m \eta_{bi} \\ b' = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i \omega_{bi} \end{cases} \quad (9)$$

使用两种方法得到先验分布的参数估计值之后, 使用贝

表 1 仿真试验数据的处理

试验数据 (n_i, f_i)	等效法 q_i	拟合法				
		(a_i, b_i)	[$a_{i,L}, a_{i,U}$]	[$b_{i,L}, b_{i,U}$]	w_{ai}	w_{bi}
(63,2)	0.968 3	(60.10,1.88)	[43.455 4,83.107 1]	[1.408 6,2.506 8]	0.211 0	0.199 6
(61,2)	0.967 2	(59.18,2.34)	[43.356 4,80.773 7]	[1.777 1,3.099 5]	0.199 2	0.240 3
(58,1)	0.982 8	(58.43,0.92)	[42.110 3,81.077 1]	[0.732 1,1.160 2]	0.207 4	0.077 9
(68,3)	0.955 9	(63.38,2.68)	[49.402 5,81.305 0]	[2.072 3,3.476 4]	0.169 8	0.255 2
(58,2)	0.965 5	(57.56,2.14)	[40.954 4,80.899 9]	[1.602 4,2.851 6]	0.212 6	0.227 0
等效法: $n'=58, s'=56.1324, q'=0.9678$,得到: $(a',b')=(58,1.8676)$ 。						
拟合法: $a'=59.5873, b'=2.1789, q'=0.9647$,得到: $(a',b')=(59.5873, 2.1789)$ 。						

表 2 贝叶斯方法的数据融合评估结果

	先验分布参数 (a', b')	现场数据 (n, f)	后验分布参数 (a, b)	点估计	置信下限	置信区间
					(置信度为 0.9)	
等效法	(58,1.867 6)	(6,1)	(63,2.867 6)	0.956 5	0.903 9	[0.889 1,0.988 5]
拟合法	(59.587 3, 2.178 9)		(64.587 3,3.178 9)	0.953 1	0.900 7	[0.885 9,0.986 4]

叶斯融合的方法与实物试验数据相融合，可得到验后分布参数，即可得到测试性融合评估的结果。

3 实例分析

对某型装备建立仿真模型之后进行测试性仿真验证试验，以 FDR 参数为例进行分析，得到五组 (n, f) 数据，分别为：(63, 2)、(61, 2)、(58, 1)、(68, 3)、(58, 2)，在装备实物上展开测试性试验，得到一组数据为 (6, 1)。

分别采用上叙的两种方法进行计算，得到先验分布超参数。将仿真数据作为先验信息，使用等效法和拟合法对先验分布的参数进行估计，得到的验前信息数据的处理结果如表 1 所示。使用贝叶斯融合方法对仿真数据和实物数据进行融合，由贝塔分布的性质得到测试性参数的验后分布参数与点估计值，并运用相应置信度下区间估计的公式得到数据融合评估结果如表 2 所示。

该装备测试性设计的目标值为 0.9，最低要求值为 0.8。在只有现场试验数据 (6, 1) 的情况下，当置信度为 0.9 时，查表可得其单侧置信下限值为 0.4897，这个数据实在太低，令人难以接受。当采用贝叶斯数据融合的测试性评估方法时，融合仿真试验的测试性先验信息，使得在相同的实装试验数据下，置信下限值达到 0.9 以上，能够得出测试性水平合格的结论。同时也可以看出，文中给出的两种验前信息处理方法效果基本相同，得到的评估结果相差非常小，均可以应用于测试性评估工作中。

4 结束语

本文基于测试性仿真试验的贝叶斯数据融合方法，通过获取测试性仿真试验数据弥补现场实装试验数据量的不足，将仿真试验数据看作先验信息，与实装试验数据相融合得到测试性评估结果。当融合了先验信息后，在相同置信度的情况下能够在对实装“小子样”测试性试验数据进

行正确的处理，得到更加合理可信的综合评估结果。

参考文献:

- [1] GJB 2547A—2012. 装备测试性工作通用要求 [S]. 2012.
- [2] 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.
- [3] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 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.
- [5] 张毅. 模拟电路测试性仿真验证平台设计与实现 [D]. 西安: 西安交通大学, 2010.
- [6] Yin Y W, Shang C X, Ma Y H, et al. The application of fault injection using circuit simulation in testability [A]. 2013 International Conference on Precision Mechanical Instruments and Measurement Technology [C]. Shijiazhuang, 2013.
- [7] Yin Y W, Shang C X, Ma Y H, et al. The research on electronic equipment's testability integrated demonstration [A]. 2012 International Conference of Prognostics and Health Management [C]. Beijing, 2012.
- [8] 宋丽蔚, 李刚. 基于的电子设备故障自动注入平台研究 [J]. 中国测试, 2012, 38 (4): 99-102.
- [9] 刘刚, 吕建伟, 胡斌. 复杂装备测试性建模问题研究 [J]. 舰船电子工程, 2013 (5): 137-139.
- [10] Jize N, Wysocki P, Temple G. Testability modeling and analysis of a rocket engine test stand [A]. Proceedings of 2005 IEEE Aerospace Conference [C]. 2005: 3874-3895.
- [11] Zhou Y K, Ruan S, Pattipati K R, et al. Dynamic multiple-fault diagnosis with imperfect test [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics A, 2009, 39 (5): 1224-1236.
- [12] 郑锦. 武器装备小子样试验前信息分析 [J]. 海军大连舰艇学院学报, 2009, 32 (3): 27-30.