

测试性验证试验中的故障样本综合加权分配方法

张西山¹, 黄考利², 敖贤野³, 连光耀², 邱文昊¹

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050003;

3. 中国人民解放军 66350 部队, 河北 保定 071000)

摘要: 针对目前测试性验证试验中故障样本分配考虑因素单一, 分配结果不太合理, 影响测试性验证评估准确度的问题, 文章综合考虑故障样本分配的影响因素, 提出了故障样本分配的综合加权方法; 首先, 在分析影响因素的基础上, 明确了综合加权分配算法; 然后对影响系数和影响因素的权值进行确定; 最后, 通过在某系统测试性验证试验中的应用表明, 该方法考虑因素更加全面, 与基于故障率的按比例分层抽样分配方法相比较, 故障样本分配结果更加合理, 测试性验证评估结果更加接近系统测试性设计的真实水平, 更具有工程应用价值。

关键词: 测试性验证试验; 故障样本分配; 影响因素; 综合加权

Synthetic Weighted Method of Failure Samples Allocation in Testability

Zhang Xishan¹, Huang Kaoli², Ao Xianye³, Lian Guangyao², Qiu Wenhao¹

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Ordnance Technological Research Institute,

Shijiazhuang 050003, China; 3. Unit 66350 of PLA, Baoding 071000, China)

Abstract: In the testability demonstration and evaluation test, the failure samples allocation considers single influence factor, the allocation result is not too reasonable, it affected the accuracy of the testability demonstration and evaluation result. In order to solve the problem, the synthetic weighted method of failure samples allocation was proposed which considered the failure samples allocation influence factors synthetically. Firstly, on the basis of analyzing the influence factors, it cleared the synthetic weighted allocation algorithm; Then, it determined the influence coefficient and the value of the influence factors; Finally, a testability demonstration and evaluation test had been done on certain system. The test result showed, the method proposed in this article considered more influence factors, comparing with the proportionate stratified sampling allocation based on failure rate, that the failure samples allocation based on the proposed method in this article was more rational and the result of demonstration test was much more approximate to the real level of product testability design, and it was more practical in project.

Keywords: testability demonstration tests; allocation of failure sample; influence factor; synthetic weighted

0 引言

故障样本分配是测试性验证试验中一项关键技术。小子样测试性验证评估试验中注入所有的故障模式是不现实的, 当试验样本量确定后, 如何将确定的故障样本量分配到装备系统各个组成单元是亟需解决的问题^[1-3]。现有的国内外相关标准^[4-5]都采用基于故障率的分层抽样技术进行故障样本分配, 它是根据装备的结构层次及故障率大小, 按比例把确定的故障样本量分配给装备的各组成单元, 这是一种典型的抽样技术。基于故障率的故障样本分配方法考虑因素比较单一, 忽略了其它因素对故障样本分配的影响, 在样本总量确定的情况下, 将造成样本量分配的不尽合理, 最终导致测试性验证评估结果不精确。

针对以上问题, 本文提出了一种故障样本综合加权分配方法。首先, 分析了故障样本分配的影响因素, 给出了故障样本

综合加权分配算法, 然后对影响因素的系数和权重进行确定, 最后通过实例验证了本文方法的有效性。

1 故障样本综合加权分配算法

1.1 故障样本分配的影响因素

故障样本分配中如果只考虑单一因素, 势必会造成分配结果不合理, 影响测试性验证评估的精度。在可以获得较多数据的情况下, 我们可以综合考虑各主要因素的加权分配方法。故障样本分配的主要影响因素如下。

故障率: 故障率是进行故障样本分配的一个重要影响因素, 故障率高的组成单元理应分配较多的故障样本, 其影响系数用 L_A 表示。

故障影响: 故障影响是指某个系统组成单元发生故障后对其它约束组成单元或系统的影响程度, 故障影响严重的单元理应分配较多的故障样本, 其影响系数用 L_F 表示。

平均故障修复时间 (MTTR): MTTR 与故障样本分配量成反比, MTTR 小的组成单元, 应分配较多的故障样本, 其影响系数用 L_M 表示。

测试费用: 测试费用越少的组成单元分配的故障样本量越

收稿日期: 2014-05-06; 修回日期: 2014-07-09。

作者简介: 张西山(1987-), 男, 河南淮滨人, 博士研究生, 主要从事装备测试性设计、分析与评估方向的研究。

多, 其影响系数用 L_C 表示。

1.2 故障样本综合加权分配算法

故障样本综合加权分配方法要求分析多种影响故障样本分配的系统组成单元特性, 根据有关工程分析数据或专家系统, 确定各个影响因素对系统组成单元的影响系数和加权系数, 然后按照有关数学模型计算出各组成单元的分配值。如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} n_i = n\xi_i \\ \xi_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^m L_i} \\ L_i = \omega_\lambda L_{\lambda_i} + \omega_F L_{F_i} + \omega_M L_{M_i} + \omega_C L_C \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 个组成单元的故障样本分配的相对权重; L_i 为第 i 个组成单元的总的影响系数; ω 为各个影响因素的权值, 依据各影响因素的重要性确定, 各影响因素权值之和等于 1。

从式 (1) 中可以看出, 要进行故障样本的分配, 必须要知道各个影响因素的影响系数和权值, 下面就利用一定的方法对其进行确定。

2 影响系数的确定

2.1 故障率影响系数 L_λ 的确定

1) 故障率影响系数 L_λ 。用各组成单元的故障率 λ_i 来表示, L_λ 用下式确定:

$$L_\lambda = \frac{\lambda_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (2)$$

2) 基于 Gamma 分布的故障率估计。对于寿命服从指数分布的系统, 通常取 Gamma 分布作为故障率的验前分布, 如下式所示^[6]:

$$\pi(\lambda) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \lambda^{a-1} e^{-b\lambda}, a, b > 0 \quad (3)$$

其中: $\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt, a, b$ 为 Gamma 分布超参数, 需要通过验前信息来确定。

装备研制早期, 在没有可靠性相关试验数据可以利用的情况下, 故障率先验信息往往由装备可靠性设计分析专家获得, 专家对故障率的规律性认识可以准确判断故障率的等级。下面通过 Gamma 分布不同分位数的方法求解 Gamma 分布超参数 a, b 。首先根据研制阶段装备试运行数据, 并结合装备研制可靠性专家经验得到故障率的量级 K , 以及故障率取极限最小值 LL 和极限最大值 UL 对应的置信度 $C1$ 和 $C2$; 然后由下式解出 Gamma 分布对应的分位数。

$$\begin{cases} \int_0^{LL} \frac{b^a}{\Gamma(a)} \lambda^{a-1} e^{-b\lambda} d\lambda = C1 \\ \int_0^{UL} \frac{b^a}{\Gamma(a)} \lambda^{a-1} e^{-b\lambda} d\lambda = C2 \end{cases} \quad (4)$$

求解 Gamma 分布均值就可以作为装备测试性验证试验中故障样本分配用故障率的点估计值, 即

$$\hat{\lambda} = \frac{a}{b} \quad (5)$$

2.2 故障影响系数 L_F 的确定

1) 故障影响系数 L_F 。用组成单元的故障模式严酷度评

分值之和 F_i 来表示, 故障影响系数 L_F 用下式确定:

$$L_F = \frac{F_i}{\sum_i F_i} \quad (6)$$

F_i 表示第 i 个组成单元的所有故障模式严酷度评分值之和。

2) 基于梯形模糊数的故障模式严酷度分析。故障模式严酷度分析具有一定的主观性和不确定性, 针对这个问题, 可以采用模糊语言的形式对故障模式严酷度加以判定。在故障模式严酷度等级划分的基础上, 对每个等级定义了一个梯形模糊数, 如表 1 所示。

表 1 严酷度分类准则和梯形模糊数

严酷度等级	故障影响的严重程度	梯形模糊数
I 级 (灾难的)	造成人员伤亡或系统损坏	(0.85, 0.95, 1, 1)
II 级 (致命的)	造成人员严重伤害或重大经济损失或系统严重损坏	(0.60, 0.75, 0.80, 0.90)
III 级 (中等的)	造成人员中度伤害或中度经济损失或系统中度损坏	(0.35, 0.45, 0.55, 0.65)
IV 级 (轻度的)	不会造成人员伤亡或轻度经济损失或系统轻度损坏, 导致非计划性维护和修理	(0, 0.15, 0.25, 0.40)

图 1 为每个故障模式严酷度等级对应的梯形隶属度函数, 其基本表达式可描述为 $f(f_1, f_2, f_3, f_4)$ 。

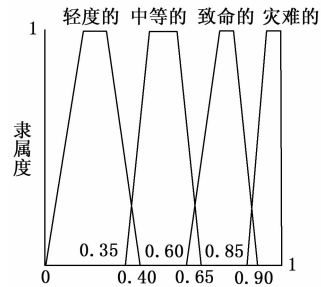


图 1 严酷度隶属度函数

梯形模糊数 $f(f_1, f_2, f_3, f_4)$ 去模糊值为:

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{4} \quad (7)$$

2.3 MTTR 影响系数 L_M 的确定

1) MTTR 影响系数 L_M 。用平均故障修复时间 M_i 表示, MTTR 影响系数 L_M 由下式来确定:

$$\begin{cases} L_M = \frac{\delta_i}{\sum_i \delta_i} \\ \delta_i = \frac{1}{M_i} \end{cases} \quad (8)$$

2) 基于随机加权的 MTTR 确定。根据维修性试验得到某单元平均故障修复时间样本为 $T_n = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, $E(T)$ 和 $D(T)$ 分别为 T 的未知期望值和方差, 下面运用随机加权法对 T 的未知期望值和方差进行估计。具体步骤如下^[7]。

步骤 1: 计算子样 T_n 的均值和方差, 如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \\ S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \end{cases} \quad (9)$$

步骤 2: 产生 N 组 Dirichlet 分布 $D(1,1,\dots,1)$ 的随机向量 $V = (V(1), V(2), \dots, V(N))$, 每一组 $V(i) = (Vi1, Vi2, \dots, Vin), i = 1, 2, \dots, N$ 可按如下方法生成: 设 v_1, \dots, v_{n-1} 是 $[0, 1]$ 上的均匀分布随机变量 V 的独立同分布序列, 按由小到大的次序重新排列, 得 v_1, \dots, v_{n-1} 的次序统计量: $v(1), v(2), \dots, v(n-1)$, 记 $v(0) = 0, v(n) = 1$ 。则 $V_{ij} = v(i) - v(i-1) (j = 1, 2, \dots, n)$ 的联合分布就是 $D(1,1,\dots,1)$, 它就是所需要的 Dirichlet 随机变量。

步骤 3: 计算 N 组随机加权子样 $D_n^1(i), D_n^2(i), i = 1, 2, \dots, N$, 即

$$\begin{cases} D_n^1(i) = \sum_{j=1}^n V_{ij} t_j - \bar{t} \\ D_n^2(i) = \frac{n}{n-1} \sum_{j=1}^n V_{ij} (t_j - \bar{t})^2 \end{cases} \quad (10)$$

步骤 4: 计算 T 的未知期望值和方差 $E(T)$ 和 $D(T)$ 如下:

$$\begin{cases} E(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\bar{t} - D_n^1(i)] \\ D(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\frac{n}{n-1} S^2 - D_n^2(i)] \end{cases} \quad (11)$$

2.4 测试费用影响系数 L_C 的确定

测试费用包括测试资源配置费用和测试过程费用。测试资源配置费用是指使用测试 T_i 所需要的测试资源费用, 用 C_{i1} 表示; 测试过程费用是指使用测试 T_i 所需要的人工、时间等成本, 用 C_{i2} 表示。那么测试费用可表示为^[8]:

$$C_i = C_{i1} + C_{i2} \quad (12)$$

测试费用影响系数 L_C 可用式 (13) 进行确定:

$$\begin{cases} L_C = \frac{\gamma_i}{\sum_i \gamma_i} \\ \gamma_i = \frac{1}{C_i} \end{cases} \quad (13)$$

3 影响因素权重的确定

在故障样本分配中各影响因素的权重是不一样的, 必须予以考虑。下面利用层次分析法确定故障样本分配影响因素的权值。

3.1 建立评判矩阵

针对故障样本分配, 利用专家系统对各影响因素进行两两比较, 并按其重要程度评定等级。表 2 列出了 9 个重要性等级及其赋值。

建立的判断矩阵如式 (14) 所示, l_{ij} 为 i 元素比 j 元素的重要程度。显而易见, $l_{ij} > 0, l_{ii} = 1, l_{ij} = \frac{1}{l_{ji}}$ 。

$$L_{4 \times 4} = \begin{pmatrix} L_A & L_F & L_M & L_C \\ L_A & 1 & l_{12} & l_{13} & l_{14} \\ L_F & \frac{1}{l_{12}} & 1 & \frac{1}{l_{32}} & \frac{1}{l_{42}} \\ L_M & \frac{1}{l_{13}} & l_{32} & 1 & \frac{1}{l_{43}} \\ L_C & \frac{1}{l_{14}} & l_{42} & l_{43} & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

表 2 元素两两比较时的重要性等级及其赋值

序号	重要性等级	赋值
1	i, j 两元素同样重要	1
2	i 元素比 j 元素稍重要	3
3	i 元素比 j 元素明显重要	5
4	i 元素比 j 元素强烈重要	7
5	i 元素比 j 元素极端重要	9
6	i 元素比 j 元素稍不重要	1/3
7	i 元素比 j 元素明显不重要	1/5
8	i 元素比 j 元素强烈不重要	1/7
9	i 元素比 j 元素极端不重要	1/9

3.2 计算权重向量

下面利用正规化求和法得到各影响因素的相对权重。

1) 将比较矩阵每一列正规化:

$$l'_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{k=1}^m b_{kj}}, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

2) 每一列正规化后的矩阵按行相加:

$$W_i = \sum_{j=1}^m l'_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

3) 对向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)^T$ 正规化:

$$\omega_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^m W_j}, i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

4) 得出的向量 $\omega_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 即为各影响因素的相对权重。

3.3 一致性检验

一致性检验是评价判断矩阵构造是否合理, 能否反映实际情况的标准。实际操作时, 引入变量一致性比率 CR 来检验一致性, 当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵具有一致性, 否则需要对判断矩阵进行调整, 直至满足一致性条件为止。 CR 用式 (18) 来表示:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (18)$$

式中, λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; RI 为随机一致性指标均值, 其值随判断矩阵阶数的不同而不同, 表 3 给出了 4~9 阶随机矩阵一致性指标均值。

表 3 一致性指标 RI 值

阶数	4	5	6	7	8	9
RI	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

4 案例应用

4.1 基于综合加权的故障样本分配

某装备系统由 5 个功能模块 A、B、C、D 和 E 组成, 如图 2 所示。下面利用本文提出的综合加权分配方法对其进行故障样本分配。

试验确定样本量 $n = 50$, 由公式 (4) (5) 确定系统各组成单元的故障率, 代入式 (2) 可以计算出故障率影响系数 L_A ; 通过专家系统对系统各组成单元的故障模式进行严酷度分析, 将分析结果代入式 (6) 可以求出故障影响系数 L_F ; 利用随机加权的方法, 运用公式 (9) (10) (11) 可以求出平

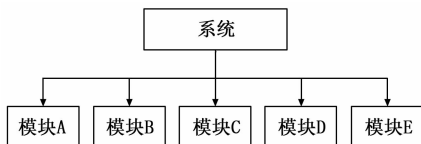


图 2 功能层次图

均故障修复时间 (MTTR), 代入式 (8) 得到 MTTR 影响系数 L_M ; 联立式 (12) (13) 求出测试费用影响系数 L_C 。各影响因素的相关数据如表 4~5 所示。

表 4 各影响因素有关数据

系统组成单元	故障率 (λ)	严酷度评分之和(F)	平均故障修复时间 (MTTR)	$\delta_i = \frac{1}{M_i}$	测试费用 (C)	$\gamma_i = \frac{1}{C_i}$
模块 A	30	3	15	0.0667	200	0.005
模块 B	30	2	15	0.0667	200	0.005
模块 C	100	5	25	0.04	250	0.004
模块 D	150	6	30	0.0333	220	0.0045
模块 E	50	4	20	0.05	150	0.0067
合计	$\sum \lambda_i = 360$	$\sum F_i = 20$		$\sum \delta_i = 0.2567$		$\sum \gamma_i = 0.0252$

表 5 各影响因素系数及权重

因素权重	$\omega_\lambda = 0.35$	$\omega_F = 0.30$	$\omega_M = 0.23$	$\omega_C = 0.12$	$\omega = 1$
系统组成单元	$L_\lambda = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i}$	$L_F = \frac{F_i}{\sum F_i}$	$L_M = \frac{\delta_i}{\sum \delta_i}$	$L_C = \frac{\gamma_i}{\sum \gamma_i}$	L_i
模块 A	0.0833	0.15	0.2598	0.1984	0.1577
模块 B	0.0833	0.10	0.2598	0.1984	0.1427
模块 C	0.2778	0.25	0.1559	0.1587	0.2272
模块 D	0.4167	0.30	0.1297	0.1786	0.2871
模块 E	0.1389	0.20	0.1948	0.2659	0.1853
合计					$\sum L_i = 1.0$

通过表 4 中的数据可以得到各影响因素的权值和影响系数, 结果如表 5 所示。利用表中的数据可求得 $\xi_A = 0.1577$, $\xi_B = 0.1427$, $\xi_C = 0.2272$, $\xi_D = 0.2871$, $\xi_E = 0.1853$, 将数据代入式 (1) 得 $n_A = 8$, $n_B = 7$, $n_C = 12$, $n_D = 15$, $n_E = 10$ 。考虑到样本分配中不足整数的都取大于分配值的最小整数, 故障样本总量多了两个, 总样本数为 52。

4.2 分配方法对比分析

下面利用文献 [5] 提到的基于故障率的故障样本分配方法进行上述某系统的故障样本分配, 由公式 (19):

$$\begin{cases} n_i = nC_{pi} \\ C_{pi} = \frac{Q_{\lambda_i} T_i}{\sum_i Q_{\lambda_i} T_i} \end{cases} \quad (19)$$

式中各字母的含义、数据及两种方法的故障样本分配结果如表 6 所示。通过对比分析两种方法的故障样本分配结果可以

发现:

1) 考虑到样本分配中不足整数的都取大于分配值的最小整数, 故障样本总量多了两个, 最后取为 52。

表 6 分配结果对比

系统组成单元	故障率 (λ)	单元数量 (Q)	工作时间系数 (T)	基于故障率的分配结果	综合加权分配结果
模块 A	30	1	1	5	8
模块 B	30	1	1	5	7
模块 C	100	1	1	14	12
模块 D	150	1	1	21	15
模块 E	50	1	1	7	10
合计	$\sum \lambda_i = 360$			52	52

2) 按照基于故障率的故障样本分配方法, 故障率比较高的模块 C 和模块 D 分到的故障样本自然也比较多; 由于综合加权分配方法综合考虑了其它因素, 模块 C 和模块 D 分到的故障样本减少了, 减少的故障样本分配到了虽然故障率比较低, 但平均故障修复时间和测试费用相对比较高的模块 A、模块 B 和模块 E。

3) 由于篇幅和计算量的限制, 本文不再对基于故障危害度的故障样本分配方法进行比较, 但可以肯定的是本文提出的方法考虑因素更加全面, 分配结果比基于故障危害度的故障样本分配结果也更加合理。

5 结论

本文针对测试性验证试验中故障样本分配问题, 分析了故障样本分配的影响因素, 提出了故障样本分配的综合加权方法。通过在某系统测试性验证试验中的应用表明, 该方法考虑因素更加全面, 与基于故障率的按比例分层抽样分配方法相比较, 故障样本分配结果更加合理, 测试性验证评估结果更加接近系统测试性设计的真实水平, 更具有工程应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 常春贺, 杨江平, 王 杰. 雷达装备测试性验证及应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (8): 1943-1949.
- [3] 徐 萍, 康 锐. 考虑 FDR 的测试性测定试验及其相关方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (3): 357-360.
- [4] MIL-HDBK-2165 Testability handbook for systems and equipment [S]. USA, 1995.
- [5] 石君友, 田 仲. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [6] 蒋英杰, 门志强, 谢红卫. 基于混合伽玛分布的 Bayes 可靠性评估方法 [J]. 计算技术与自动化, 2010, 29 (1): 106-109.
- [7] 张守玉, 封伟书. 基于随机加权法的装备平均维修时间验证研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20 (3): 100-103.
- [8] 陈 旦, 李光升, 黄 鑫, 等. 基于费用划分的测试复用问题研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1266-1268.