

## 基于多因子的机电设备测试性验证样本分配方案

何洋, 李洪涛, 王志新

(中国人民解放军92941部队93分队, 辽宁葫芦岛 125000)

**摘要:** 针对目前机电设备测试性验证试验中,因样本分配不合理导致试验结论置信度低的问题,通过分析影响试验结论置信度的4个关键因素即故障模式数、故障率、故障扩散强度总和与危害度,提出了基于多因子的样本分配方案。方案依据多因子综合相对比值,得出各UUT所分配的样本量,达到优化样本结构,提高样本集代表性的目的。对单步故障扩散算法进行了改进,改进后的算法可以更有效地计算故障扩散强度,并以某机电设备稳定跟踪平台为例进行了样本分配,比较分析抽样结果证明,应用该方案得到的样本结构更加合理,可以使试验结论有较好的置信度。

**关键词:** 机电设备; 测试性验证; 多因子; 样本分配; 故障扩散算法

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)01-0097-04

## A Multi-Factor Based Sample Allocation Scheme for Testability Verification of Electromechanical Equipment

HE Yang, LI Hong-tao, WANG Zhi-xin

(No.93 Element, No.92941 Unit of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** In the testability verification test for electromechanical equipment, the confidence level is usually low since the sample allocation method is not rational. To solve the problem, we proposed a new sample allocation method based on multi-factor by analyzing the key factors that have effect on the confidence level of conclusion. The sample size of each Unit Under Test (UUT) was calculated out according to the relative ratio of integrated multi-factor, which could optimize the failure sampling structure and improve the representation of failure sampling set. Moreover, the single-step failure propagation algorithm was improved, and the improved algorithm can calculate failure propagation intensity more effectively. We made sample allocation by taking a certain stabilization and tracking platform as an example. The result showed that the scheme can optimize failure sampling structure and improve the confidence level of the testability verification test conclusion.

**Key words:** electromechanical equipment; testability verification; multi-factor; sample allocation; failure propagation algorithm

### 0 引言

机电设备是指在机构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进电子技术,将机械装置与电子化设计及软件结合起来所构成的总称。其具有复合功能且适用面广,不仅广泛应用于民用(数控机床、工业机器人、工业制造等),而且在舰艇、飞机等军用领域中也大量应用。由于机电设备的系统结构越来越复杂,给机电设备故障诊断带来了困难,所以机电设备的

测试性设计现已成为一种必要,但如何对机电设备的测试性进行验证尚不成熟,其中有很多技术问题阻碍了机电设备测试性验证试验的开展,尤其因只单纯考虑一种因素或条件来进行样本分配,造成样本结构不合理,严重降低了试验结论的置信度,针对上述问题,可以综合考虑对样本结构优化起关键作用的多种因素来进行样本分配。本文提出基于多因子的样本分配方案,运用多因子综合算法计算各被测单元(UUT)试验样本量,可以得到一种较为优化的样本结构,使机电设备测试性验证试验结论的置信度得到提高。

### 1 样本分配

对机电设备进行故障模式影响及危害性分析(FM-

收稿日期:2013-11-03

修回日期:2013-11-28

作者简介:何洋(1986—),男,辽宁本溪人,硕士,助工,研究方向为导弹发射控制。

ECA),其故障模式种类繁多,为避免在其测试性验证试验中随机抽样误差过大等问题,提出了分层随机抽样理论,即将  $n$  个故障样本逐层分配到各 UUT 中,得到各 UUT 需要抽取的故障数量。提出 4 个定义解释分层随机抽样<sup>[1]</sup>。

**定义 1** 简单随机抽样:从总体的  $L$  个单元中一次整批抽取  $n$  个单元,设任何一个单元被抽中的概率都相等,任何  $n$  个不同单元组成的组合被抽中的概率也都相等,这种抽样称为简单随机抽样。

**定义 2** 层:如果一个包含  $N$  个单元的总体可以分成“不重不漏”的  $K$  个子总体,即每个单元必须属于一个子总体,则称这样的子总体为层。设  $K$  个子总体包含的单元数分别为  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ ,则有  $N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_k = N$ 。

**定义 3** 分层抽样:即抽样在每一层中独立进行,总的样本由各层样本组成,总体参数则根据各层样本参数的汇总做出估计,这种抽样就称为分层抽样,所得样本称为分层样本。设总的样本量为  $n$ ,从  $K$  个子总体中所抽取的样本量分别为  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ ,则有  $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$ 。

**定义 4** 分层随机抽样:如果每层中的抽样都是独立地按照简单随机抽样进行的,那么这样的分层抽样称为分层随机抽样,所得的样本称为分层随机样本。

分层随机抽样的首要工作是样本分配,即确定样本结构(每层所应该分配的试验样本数量),目前国内测试性验证相关标准中都是采取基于故障率的样本分配方案。现行美军标 MIL-HDBK-216 和 MIL-HDBK-470A 仍然是继承 MIL-STD-471A 通告 2 规定的基于故障率的分配方案,其中,故障率数据是基于 MIL-HDBK-217 标准中可靠性预测方法获得的,文献[2-4]也普遍采用这种分配方案。但基于故障率的分配方法是直接从可靠性验证中引申而来,没有综合考虑到影响装备测试性的关键因素,这样就造成了试验中分配的样本数不合理,最终导致试验评估结果与实际值的偏差,降低试验结果的置信度。

## 2 多因子样本分配方案

### 2.1 基于多因子的样本分配思想

一个代表性好、样本结构较为优化的试验样本集,在样本分配中必须充分考虑影响测试性验证试验评估结果置信度的多种因素。经分析,得出以下几种关键因素并对其进行定义。

**定义 5** 故障模式:是指产品故障的表现形式。

**定义 6** 故障率:是指产品在任意时刻尚未发生故障,在下一个单位时间内发生故障的概率。

**定义 7** 故障扩散强度:是指故障传播的能力。扩散强度越大,表示故障通过此线路越容易进行扩散,同时波及的范围也就越大。

**定义 8** 危害度总和( $C_r$ ):是指在给定的严酷度类别和任务阶段下,UUT 中所有故障模式的危害度( $C_{mj}$ )之和。

下面分别分析上述因素对样本分配的贡献。

#### 2.1.1 故障模式数

当考虑故障样本的分配以试验产品的复杂性为基础时,越复杂的产品故障模式也越多,试验样本总量确定后,可根据故障模式数量<sup>[5]</sup>依照分层抽样理论将样本量逐次分配到每个模块,这样对于每一个故障模式都近似是等概率抽取的,从而保证了试验参数估计的准确性。

#### 2.1.2 故障率

当考虑故障样本的分配以试验产品的复杂性、可靠性为基础时,试验样本总量确定后,可根据故障率比例并依照分层抽样理论将样本量逐级分配到子结构的各个单元,其故障率可从维修性验证试验中获得。

#### 2.1.3 故障扩散强度总和

传播型故障是指一种故障率低,可一旦发生则会传播扩散到其他元件,造成很坏影响的故障模式<sup>[6]</sup>。若对传播型故障的测试性设计不完备,不能正确检测和隔离,则给使用方造成的风险将会与常见故障风险总和相提并论。所以进行样本分配时,应保证故障扩散强度总和高的 UUT 分配较多的样本。文献[7]给出了单步故障扩散算法,可以抽象地计算故障扩散强度,本文在此基础上进行了改进,给出一种更具体有效的故障扩散算法。

故障模式之间具有复杂性和不确定性的关系,所以需要构建一种描述复杂系统故障传播扩散与分析的模型,来计算故障扩散强度,而利用模糊概率 Petri 网(Fuzzy Probability Petri Net, FPPN)模型<sup>[8]</sup>可以很好地计算故障扩散强度。该模型将 Petri 网技术、模糊与概率理论相融合,将变迁的激发作为故障的扩散,允许故障信息共享与叠加,即多个不同的变迁可以共享一个故障信息(激发完毕,变迁前置库所内的 Token 不消失),从而有效描述故障扩散和并发性的问题。用此模型构建复杂系统同一个单元的内部故障扩散行为,然后按照各单元的连接关系将各子网连接起来,形成整个系统的模糊概率 Petri 网。模糊概率 Petri 网具有强大的建模与逻辑推理能力,符合模块化建模的思想。

设某 UUT 的故障模式集为  $F = \{f_0, \dots, f_k, \dots, f_m\}$ ,其中,  $f_k$  为 UUT 的一个故障模式,  $m$  表示 UUT 的故障模式数量,  $I_k$  为  $f_k$  的故障扩散强度,  $I$  为该 UUT 的故障

扩散强度总和,即

$$I = \sum_{k=0}^m I_k \quad (1)$$

若故障  $f_k$  发生,并在已建立好的模糊概率 Petri 网模型中传播。设  $f_k$  经  $N$  步传播后,传播概率小于  $10^{-8}$ ,则此故障  $f_k$  不再传播。式(2)给出了故障  $f_k$  的故障扩散强度等于每一步的故障扩散强度之和。

$$I_k = \sum_{n=1}^N I^n \quad (2)$$

$$I^n = \sum_{j=1}^{Z_{n-1}} w_s \left( \sum_{i=1}^L w_{ji}^n \right) \quad (3)$$

式(3)中: $I^n$  为故障传播过程中,第  $n$  步的故障扩散强度; $Z_{n-1}$  为在第  $n-1$  步传播后,新产生故障模式的个数; $L$  为经过第  $n-1$  步扩散后各故障模式对应的传播路线个数之和; $w_s$  为跨可更换单元传播系数,用于强化故障跨可更换单元传播时的能力,并根据具体情况(比如单元重要度)来确定; $w_{ji}^n$  为经过第  $n-1$  步扩散后各故障模式对应的传播路线被选择的可能性, $w_{ji}^n$  分别用“0”和“1”表示,当故障可以通过该路线传播时,则对应的  $w_{ji}^n$  为 1,否则为 0。

利用上述改进后的单步故障扩散算法,可以更科学有效地计算某 UUT 的故障扩散强度总和  $I$ ,其操作流程如图 1 所示。

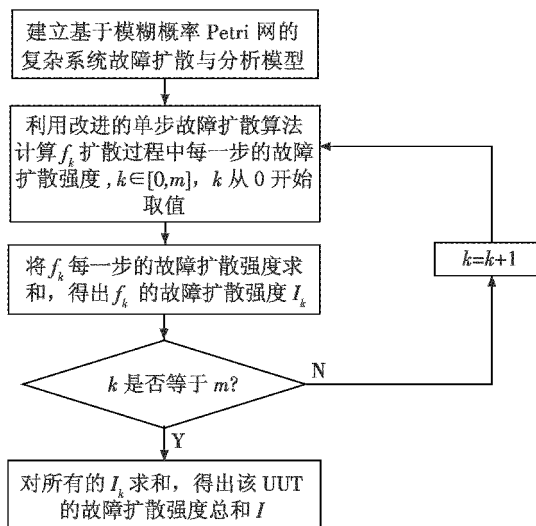


图 1 UUT 的故障扩散强度总和计算流程

Fig. 1 The flow chart for calculating fault propagation intensity of one UUT

### 2.1.4 危害度

某些 UUT 如果出现故障,其危害很大,在机电设备的测试性设计时会重点保障这些 UUT 的诊断,所以对这些 UUT 进行样本分配时应该考虑危害度的影响。在文献[9]中给出了危害度的计算方法,可用来求解 UUT 的危害度。

通过上述因素的分析,提出一种基于多因子综合的样本分配思想:故障样本的分配以 UUT 的故障模式数量、故障率、故障扩散强度总和及危害度为基础,根据这些因素得出多因子综合相对比值,当试验样本总量确定后,根据多因子综合相对比值依照分层抽样理论将样本量逐次分配到每个模块,从而保证机电设备测试性验证试验结论的置信度。

### 2.2 多因子综合算法

根据基于多因子综合的样本分配思想,将已确定的样本量总量  $n$ ,依据多因子综合相对比值分配到具体的 UUT,应该采取如下步骤。

1) 分析机电设备的物理结构层次。将系统分解成若干个子系统,把每个子系统分解成多个 UUT。

2) 分析得出每个 UUT 的危害度、故障率、包含的故障模式数量和这些故障模式的故障扩散强度总和,同时列出与这些故障模式相关的测试性数据,如工作时间、测试点位置、故障检测和隔离方法等。

3) 计算每个 UUT 的多因子综合相对比值  $w_i$ ,即

$$w_i = \frac{m_i \cdot C_{ri} \cdot \lambda_i \cdot T_i \cdot I_i}{\sum_j m_j \cdot C_{rj} \cdot \lambda_j \cdot T_j \cdot I_j} \quad (4)$$

式中: $m_i$  为第  $i$  个 UUT 所包含的故障模式数量; $C_{ri}$  为第  $i$  个 UUT 的危害度; $\lambda_i$  为第  $i$  个 UUT 的故障率; $I_i$  为第  $i$  个 UUT 中所有故障模式的故障扩散强度总和; $T_i$  为第  $i$  个 UUT 的工作时间系数,等于该单元工作时间与全程工作时间之比。

4) 计算出每个 UUT 应分配到的样本量  $n_i$ ,即

$$n_i = n \cdot w_i \quad (5)$$

5) 如果需继续向下一级分配样本,则重复 2) ~ 4),直至达到指定的层次。

### 3 案例分析

以文献[7]给出的某机电设备稳定跟踪平台为例,对其进行测试性验证试验故障样本分配,来比较两种分配方案的差别。已知试验样本量总量  $n$  为 56,要分配给 7 个不同的 UUT,现分别采用两种方案进行样本分配,并比较分配结果,分配结果如表 1 所示。

方案一是采用文献[10]中基于故障率的样本分配方案,依据故障率相对比值计算出每个 UUT 的样本数;方案二是本文采用的基于多因子综合的样本分配方案,首先通过 FMECA 分析得出每个 UUT 的故障模式数和故障率,运用 GJB/Z 1391-2006 中给出的危害度计算方法得出每个 UUT 的危害度,并利用本文改进后的单步故障扩散算法得出每个 UUT 的故障扩散强度总和,最后根据式(4)和式(5)得出每个 UUT 的样本数。从表 1 可以发现,方案二中总线和运动控制器

所分配的样本数明显不同于方案一所示,这是因为方案一仅单纯考虑故障率这一种因素来分配样本,而方案二综合考虑了危害度、故障率、故障扩散强度总和、故障模式数4种关键因素来分配样本。

通过以上分析可以证明方案二比方案一考虑的因素更加全面、科学,其样本结构更加合理,可以较好地检验出机电设备的测试性水平,提高测试性验证试验结论的置信度。

表1 两种分配方案结果对比

Table 1 Comparison of the two allocation schemes

UUT名称	故障模式名称	UUT危害度	UUT故障率/ ( $10^{-6}h^{-1}$ )	UUT故障扩散强度总和	故障模式数	工作时间系数	多因子综合相对比值	故障率相对比值	已知样本量 $n=56$	
									基于故障率的样本分配数(方案一)	基于多因子综合的样本分配数(方案二)
电机	定子与转子间间隙过大	18.50	0.62	5	3	1.0	0.1816	0.0863	5	10
	定子线圈断路									
	定子线圈短路									
陀螺	陀螺X轴零漂异常	8	1.21	6	4	1.0	0.2575	0.1559	9	14
	陀螺Y轴零漂异常									
	陀螺重心偏移 框架非等弹性变形									
速减器	减速器轴承卡死	10.11	1.00	2	3	1.0	0.0640	0.1392	8	4
	减速器轴承磨损									
	减速器动作反向									
主控计算机	内存变量异常翻转	7.20	0.91	2	1	1.0	0.0138	0.0633	4	1
电源	电机供电故障	5.30	0.80	3	3	1.0	0.0403	0.0557	3	2
	主控计算机供电故障									
	断电故障模拟									
总线	计算机总线通讯故障	4.80	2.00	2	2	1.0	0.0405	0.4175	23	2
	运动控制器总线通讯故障									
运动控制器	管脚故障	12.70	1.00	10	3	1.0	0.4022	0.0696	4	23
	接口故障									
	内部总线故障									

#### 4 结束语

本文分析了影响机电设备测试性验证试验样本分配的几个因素,其中,故障率、故障扩散强度总和、危害度和故障模式数是影响机电设备测试性验证试验结论置信度的4个关键因素,在样本分配中,必须充分考虑这4个因素。本文首次综合考虑了这几个重要因素,提出了基于多因子综合的样本分配思想,根据多因子综合相对比值进行样本分配,并且通过案例分析得出这种分配方案更加科学,可以提高机电设备测试性验证试验结论的置信度,但本文只是在定性上分析该方案可以提高试验结论置信度,在定量上置信度具体提高多少还有待继续研究。

#### 参考文献

[1] 杜子芳. 抽样技术及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005. (DU Z F. Sampling technique and its application[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2005.)

[2] PATTIPATI K R, ALEXANDRIDIS M G. Application of heuristic search and information theory to sequential fault diag-

nosis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(4):872-887.

- [3] 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,2003:363-396. (TIAN Z, SHI J Y. Testability analysis and verification of the system [M]. Beijing:Beijing Aeronautics and Astronautics University Press, 2003:363-396.)
- [4] 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. (LI T M, QIU J, LIU G J. The sample allocation plan of testability verification test based on failure rate [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9):1661-1665.)
- [5] 刘双双. 测试性验证试验中故障样本选取算法研究[D]. 武汉:海军工程大学,2010. (LIU S S. Study on failure sample selection algorithm in testability demonstration test [D]. Wuhan:Naval University of Engineering, 2010.)
- [6] 韩光臣,孙树栋,司书宾,等. 复杂系统故障传播与故障分析模型研究[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(6):794-798. (HAN G C, SUN S D, SI S B, et al. Rese-

(下转第108页)

算法在保证仿真效果的同时更具速度优势。

#### 4 总结

本文改进 Xdraw 算法,并利用雷达波束与光波的相似性,将通视性计算应用于威胁源探测范围分析,通过仿真验证了改进的 Xdraw 算法在大量 DEM 数据仿真计算时具有更高的运算速度。可以预见:若对特定高程间隔  $\Delta h$  做仿真,或按精度需求不等间隔做仿真,将不同高度的通视性计算结果同中心垂直叠加,再经过适当渲染即可形成威胁源完整的探测模型。

#### 参考文献

- [1] 秦昆. GIS 空间分析理论与方法[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社,2010:152-155. (QIN K. Theories and methods of spatial analysis in GIS[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2010:152-155.)
- [2] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社,2000. (LI Z L, ZHU Q. Mathematical elevation model[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2000.)
- [3] 鲁敏,张金芳,范植华,等. 基于 DEM 的视域分析与计算[J]. 计算机仿真,2006,23(5):171-176. (LU M, ZHANG J F, FAN Z H, et al. Viewshed analyzing and computing based on digital elevation model[J]. Computer Simulation, 2006, 23(5):171-176.)
- [4] MOET E, VAN KREVELD M, VAN OOSTROM R. Region intervisibility in terrains[R]. UU-CS-2005-028, 2005.
- [5] FRANKLIN W R, RAY C K, MEHTA S. Geometric algorithms for siting of air defense missile batteries[R]. DAAL03-86-D-0001, 1994.
- [6] TENG Y A, DE MENTHON D, DAVIS L S. Region-to-region visibility analysis using data parallel machines[J]. Concurrency: Concurrency Practice & Experience, 1993, 5(5):379-406.
- [7] KIDNER D B, SPARKES A J, DOREY M I, et al. Visibility analysis with in the multiscale implicit TIN[J]. Transaction in GIS, 2001, 5(1):19-37.
- [8] 缪贵术,屈军亮. 基于 Xdraw 算法的 SAR 航线规划[J]. 舰船电子工程,2011,31(10):52-55. (MIAO B S, QU J L. Airborne SAR flight planning based on Xdraw algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(10):52-55.)
- [9] 晁玉忠,张春明,张磊. 基于 DEM 数据库的可视域算法[J]. 计算机系统应用,2012,21(9):68-73. (CHAO Y Z, ZHANG C M, ZHANG L. Viewshed algorithm based on DEM database[J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(9):68-73.)
- [10] 赵鹏程. 多尺度 DEM 数据一致性检查方法探讨[J]. 测绘通报,2013(8):49-51. (ZHAO P C. Study on consistency check method of multiscale DEM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(8):49-51.)
- (上接第 100 页)
- arch on model of fault diagnosis and propagation in complex system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(6):794-798.)
- [7] 李天梅. 装备测试性验证试验优化设计与综合评估方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010. (LI T M. Research on optimization design and integrated evaluation of testability verification test for equipments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.)
- [8] 孙体忠,孙金标. 基于多层模糊 Petri 网的编队空战战术决策[J]. 电光与控制,2011,18(11):22-26. (SUN T Z, SUN J B. Tactical decision-making for formation air combat based on hierarchical fuzzy Petri net [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(11):22-26.)
- [9] GJB/Z 1391-2006. 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:中国标准出版社,2006:15-16. (GJB/Z 1391-2006. Guide to failure mode, effects and criticality analysis [S]. Beijing: The Standard Press of China, 2006:15-16.)
- [10] GJB 2547-1995. 装备测试性大纲[S]. 北京:中国标准出版社,1995. (GJB 2547-1995. Testability program for material [S]. Beijing: The Standard Press of China, 1995.)

欢迎投稿 网址: <http://www.dgykz.com>