考虑 FDR的测试性测定试验及其相关方法

徐 萍 康 锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 针对装备研制过程中,缺乏试验手段测定产品测试性水平,确定其与规定要求间的差距的情况,界定了测试性试验和测试性测定试验的概念,在仅考虑测定故障检测率(FDR, Fault Detection Rate)的情况下,研究给出了基于功能相关特征矩阵和重要度特征的故障特征建模方法,构建了二元组故障特征模型,用于测定 FDR试验的试验样本选取. 在该种试验样本选取方法中,为了减少进行故障注入试验时,注入不同故障样本的工作量和复杂度,充分考虑了试验样本间的等效关系,定义了等价集合和等效样本的概念,并在此基础上给出了考虑等效样本存在的试验结果评估方法. 该研究在某型导弹飞控系统中取得了很好的应用.

关 键 词: 故障; 测试性; 试验; 样本选取; 评估

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0357-04

Concept of testability determine test and relative method for FDR

Xu Ping Kang Rui

(Dept of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve absence problem of the method in determining the product's testability level and find the difference between the practical testability situation and the requirements, the concepts of testability test and testability determine test was proposed. With the only consideration of fault detection rate (FDR), the method to establish fault character model (FCM) was given, which is based on the fault-function relation matrix and fault weightiness. Two-tuples FCM was illustrated and the flow to select sample based on two-tuples FCM in testability determine test was given. To simplify the workload and the complexity of the fault injection test, the equivalent relation between test samples were researched. The equivalent set and the equivalent injection sample (EIS) were defined. The relative method of result evaluation for FDR was researched. An example on a control system in some missile was illustrated, and the results show that the methods introduced are correct and feasible.

Key words: fault; testability; experiments; sampling; evaluation

在国内外的相关标准和文献[1-2]中,都强调了通过基于故障注入的试验验证方法来验证产品的测试性水平. 但大量文献中也指出这种试验验证结果与现实存在偏差,最新的研究报告显示,这种情况目前依然存在. 主要原因之一在于直到产品的设计定型阶段,才开展测试性试验验证,不利于尽早发现产品的测试性缺陷,以便及时进行改进,耽误了测试性设计增长的最好时机. 能否在装备设计研制过程中,运用试验的手段和方法测定产品的测试性情况,确定产品的测试性水平与规定要求间的差距越来越成为研制方所关心的问题.

针对上述问题,本文界定了测试性测定试验的概念,并在仅考虑故障检测率(FDR, Fault Detection Rate)的情况下,研究给出了测试性测定试验的试验样本选取方法和试验结果评估方法. 这些方法在某型导弹的飞控系统中得到了很好的应用.

收稿日期: 2006-05-08

作者简介: 徐 萍(1978-),女,辽宁鞍山人,博士生, pingxu@buaa.edu.cn

1 概 念

1.1 测试性试验

定义 1 测试性试验 (TE, Testability Experiments),即是为提高产品的测试性水平,评价其是否满足测试性要求而进行的各种试验的总称.

1.2 测试性测定试验

定义 2 测试性测定试验,即为确定产品当前的测试性水平与规定要求的差距而开展的测试性试验.其主要内容是,在研制产品的仿真模型或测试性试验样机上,根据设计规范要求,注入一定数量的故障,用拟采取的测试性设计规定的测试方法进行故障检测和隔离,采集试验数据并对其进行分析处理,确定产品的测试性水平,判断其与规定的设计要求的差距.

2 样本选取方法

2.1 故障特征模型

从上述定义中可以看出测试性测定试验中的样本是“产品的故障”,但并不是产品所有的故障都可以作为试验样本,这就需要对产品的故障进行分析,提取出与测试性测定试验相关的特征,构建产品的故障特征模型,从而为方便、自动地进行试验样本选取提供依据.故障特征建模方法即根据试验目标,对与测试性试验相关的故障信息进行建模的方法.在文献[3]中,分析并给出了测试性试验中的二元组故障特征模型 $F_{CM2}^{D} = <R_{Dj}, \omega_j>$,其中 R_{Dj} 为产品某故障的功能相关特征矩阵;ω_j 为该故障对应的重要度值.

2.1.1 功能相关特征矩阵

设产品所有待检测功能故障由 F_n 表示

$$F_n = (F_{n1}, F_{n2}, \cdots, F_{ni}, \cdots, F_{nn})^{T} \tag{1}$$

产品的所有故障由 F_m 表示 (F_m 可通过故障模式影响及危害性分析、故障树分析、事件树分析和初步危险分析等方法获得).

$$F_m = (F_{m1}, F_{m2}, \cdots, F_{mj}, \cdots, F_{mm})^{T} \tag{2}$$

则定义功能-故障信息模型如下:

$$F_n = R_D \cdot F_m \tag{3}$$

具体为

$$R_D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{im} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}_{n\times m} \tag{4}$$

其中,a_{ij} 代表产品的故障 F_{mj} 与产品的待检测功能故障 F_{ni} 之间的相关性系数,且

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表明故障 } F_{mj} \text{ 与产品的待测功能 } F_{ni} \text{ 之间相关} \\ 0 & \text{表明故障 } F_{mi} \text{ 与产品的待测功能 } F_{ni} \text{ 之间不相关} \end{cases}$$

显然,式(4)还可以用下式表达:

$$R_D = [R_{1D}, R_{2D}, \cdots, R_{iD}, \cdots, R_{nD}]_{n\times 1} = [R_{D1}, R_{D2}, \cdots, R_{Dj}, \cdots, R_{Dm}]_{1\times m} \tag{5}$$

其中,$R_{iD} = [a_{i1}, \cdots, a_{ij}, \cdots, a_{im}]_{1\times m}$ 且 $i \in [1, n] \cap i \in$ 自然数;$R_{Dj} = [a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{ij}, \cdots, a_{nj}]_{n\times 1}^{T}$ 且 $j \in [1, m] \cap j \in$ 自然数.

定义 3 功能相关特征矩阵,将满足式(5)的 R_{Dj} 定义为故障 F_{mj} 的功能相关特征矩阵.

定义 4 关于 F_{ni} 的等价集合,定义对应 R_{iD} 中元素为1的故障 F_m,构成关于 F_{ni} 的等价集.

显然,在样本选取过程中,会出现两种情况:

1) 由于同一故障可能属于多个等价集合,进行试验时,该元素可能被多次抽取,即可以仅通过一次注入,但等效于多个试验样本的注入;

2) 在建立的试验样本集中,由于考虑到注入的方便性和可实施性,对于部分不便于注入的试验样本,通过注入与其在同一等价集合中重要度相同的样本来等效.则此时,这个等效样本的一次注入等效于多个试验样本的注入.

定义 5 等效注入样本 (EIS, Equivalent Injection Sample),将符合上述任一种情况的试验样本称为等效注入样本,其所等效注入的试验样本数量称为等效量 (EN, Equivalent Number).

2.1.2 重要度特征

从上述分析可以看出,当进行试验样本选取时,从等价集合 EF_{ni} ($i \in [1, n] \cap i \in N$) 中,按照等概率的方式进行样本抽取,所选取的试验样本集基本能够覆盖产品全部故障检测的能力和要求,但这种抽取方式,是在把等价集合中的故障认为同等重要的前提下进行的,但实际上每个故障的重要程度都不相同,例如某些故障为致命故障,其严酷度是Ⅰ级,而某些故障的发生将不会对系统造成任何影响,其严酷度为Ⅳ级;再如某些故障的发生将导致巨大的经济损失,而某些故障则不会.因此在进行故障分析时,仅考虑上述特征——功能相关特征是不够的,还需考虑故障本身的重要度特征,以便在进行试验样本选取时,尽可能选用重要度高的故障作为试验样本.

设 ω 表示故障的重要程度,则 F_{mj} 对应的重

要度值为 ω_j,考虑风险优先数某种程度上可以综合反映产品的重要度信息,这里推荐使用风险优先数值作为 ω_j.

2.1.3　样本选取流程及步骤

根据故障特征模型的定义,本文构建基于 F^{D}_{CM2}的试验样本选取流程如图 1所示.

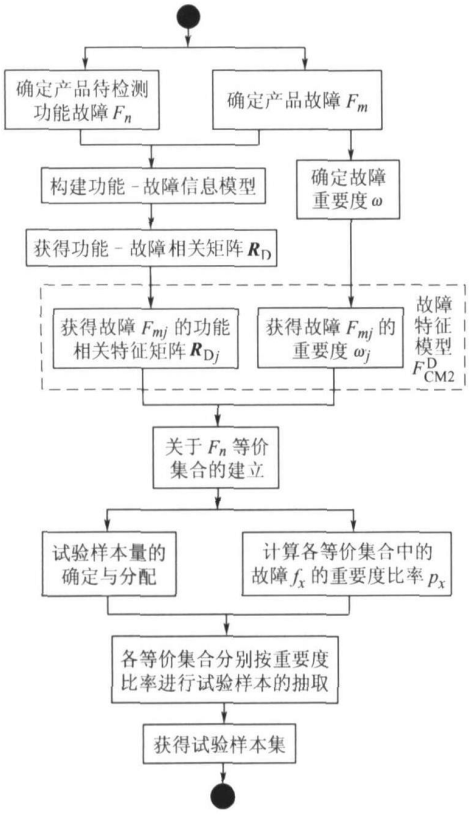

图 1　基于 F^{D}_{CM2}的测试性测定试验样本选取流程

3　评估方法

分析上述测试性测定试验中的样本选取方法,可以发现其具有以下两个特点:样本的选取带有针对性和确定性;存在等效注入样本(EIS).

由第 1个特点可知,如果排除故障分析时,由于对产品故障认识不清及分析人员经验不足引入的误差,基本可以认为通过上述方法选取出的试验样本集可以覆盖产品全部故障检测的能力和要求,则在计算 FDR的估计值时,可以采用简单的点估计法,相应的计算结果的误差可以利用专家打分法或 delphi法给出.这样一方面可以保证评估值具有较高的准确度,另一方面计算过程将变得非常简单易行.

另外考虑到等效注入样本的存在,在统计检测到的故障数时,需作如下处理:①如果等效注入样本 f_i(等效量为 ξ_i)被检测到,则在统计检测到的故障数时,需在实际检测到的故障个数 p基础上,增加 $(\xi_i - 1)$;②如果等效注入样本 f_i(等效量为 ξ_i)未被检测到,则勿需作任何处理.

于是,给出计算 FDR点估计值 $(\hat{d})$公式

$$\hat{d} = \frac{p + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i (\xi_i - 1)}{n} \times 100\% \qquad (6)$$

其中,n为试验样本量;m为样本集中等效样本个数;ξ_i为等效样本 f_i($i \in [1, m]$对应的等效量;p为试验中实际检测到的故障个数.

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & \text{当等效检测样本 } f_i \text{ 未被检测到时} \\ 1 & \text{当等效检测样本 } f_i \text{ 被检测到时} \end{cases}$$

建议 $\hat{d}$的误差 δ_{FDR}采用专家打分法获得,评价内容至少包括如下条目:①产品是否是成熟产品,进行产品故障分析时是否有同类产品可供参考;②产品故障分析人员对产品的了解程度;③产品故障分析人员是否具有丰富的故障分析经验,是否能够熟练掌握 FMECA(故障模式影响及危害性分析)、FTA(故障树分析)等方法.

4　应用案例

4.1　案例说明

以某型导弹飞控组件为被测对象进行测试性测定试验,测定的参数为组件级 BIT(机内自检测)的故障检测率 R_{FD}.

4.2　试验样本选取

4.2.1　产品故障分析

该飞控组件属于 LRU(现场可更换单元)级产品,根据设计规范,该飞控组件包括 6个组成单元(SRU(车间可更换单元)).对产品待测功能故障进行分析,根据其设计资料,飞控组件的 BIT贮存在飞控计算机中.分析确定该飞控组件的待测功能故障有 12个.设产品 LRU级 BIT所有待测功能故障由 F_n表示,则 $F_n = (F_{n1}, F_{n2}, \cdots, F_{n12})^{T}$.另外,对飞控组件进行器件级 FMECA,共确定产品元器件级故障模式 2278个(详细列表略).

4.2.2　F^{D}_{CM2}的建立

对上述故障模式,利用故障功能相关特征信息表,收集各特征值信息,从而建立相应故障特征模型.考虑篇幅及密级等问题,仅以电源板为例(见表 1).以故障模式 P_1为例,构建其二元组故障特征模型,其他略.

$$F_{CMP_1} = <(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^{T}, 18>$$

4.2.3　等价集合的建立

仍以电源板中的故障模式为例,构建关于 F_{n1}的等价集 EF_{n1}如下,其他等价集合略.

$\{P_1, P_3, P_4, P_6, P_8, P_9, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}\}$

表 1 故障功能相关特征信息表(电源板)

代码	故障 F_{mj}	功能相关特征矩阵 R_{Dj}	重要度 ω_j
P_1	滤波器短路	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	18
P_2	滤波器性能退化	$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$	20
P_3	电容开路	$(1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,1,1)^T$	3
P_4	电容短路	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	9
P_5	电容参漂	$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$	2
P_6	电阻开路	$(1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,1,1)^T$	5
P_7	电阻参漂	$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$	4
P_8	电源模块性能退化	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	26
P_9	电源模块低温不启动	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	24
P_{10}	电源模块漏气	$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$	20
P_{11}	电源模块开路	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	20
P_{12}	电源模块短路	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	22
P_{13}	接插件接触不良	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	10
P_{14}	接插件开路	$(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)^T$	8

4.2.4 样本量的确定及分配[4]

根据上述方法可构建飞控组件的 12个等价集合,计算出各个集合的故障率及飞控组件总的故障率,根据公式 $n \geq \lambda_u / \lambda_{min}$,得到样本量为 $n \geq 81$个,这里取最小值 81个.

4.2.5 试验样本的抽取

由于等效样本的存在(见表 2),实际需要注入样本数为 35个,详细试验样本列表略.

4.3 试验数据

按照上述试验方案开展测试性试验,具体试验数据收集表略,这里仅给出汇总信息.

BIT实际检测故障 28个,存在等效注入样本 9个,每个等效样本对应的等效量以及该等效样本的检测情况(检测到时 $\alpha_i = 1$)如表 2所示.

表 2 检测等效样本对应的等效量

等效样本序号	等效量 ξ_i	是否检测到 α_i	等效样本序号	等效量 ξ_i	是否检测到 α_i
1	3	0	6	6	0
2	8	1	7	10	1
3	4	1	8	4	1
4	5	1	9	9	0
5	6	1			

4.4 试验结果评估

根据公式(6)计算该飞控组件 FDR的点估计值

$$\hat{d} = \frac{p + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i (\xi_i - 1)}{n} \times 100\% = \frac{28 + (7 + 3 + 4 + 5 + 9 + 3)}{81} \times 100\% = \frac{59}{81} \times 100\% = 72.8\%$$

考虑到该产品中只有 30%为新研,其他均沿用已有的成熟产品;整个故障分析均有产品的设计人员参与;故障分析过程中,有可靠性专业人员全程参与,估算 FDR的点估计误差 δ_{FDR}为 0.1.在试验目标中,规定故障检测率最低可接收值为 50%.通过该试验说明,该飞控组件的 BIT检测能力已符合规定要求,也正与产品的真实情况相符.

5 结束语

本文针对工程实际需求,给出了测试性测定试验的概念,并就测试性测定试验中与 FDR相关的试验样本选取方法和结果评估方法开展了深入的研究.具体言之,在考虑功能相关特征矩阵和重要度特征的基础上,构建了二元组故障特征模型 F^D_{CM2},并在 F^D_{CM2}的基础上,给出了仅考虑 FDR的测试性测定试验样本选取流程以及与之相对应的结果评估方法.在本文的最后,以某型导弹飞控组件为被测对象进行了测试性测定试验.通过该应用研究,可以看出本文给出的测试性试验方法是可行的,并且通过这些试验方法可以精确的获得产品的测试性水平.本文的研究为设计人员,在工程研制阶段,测定产品的 FDR提供了有效的方法.为了使该研究可以获得更广泛的应用,还应给出测定产品的 FIR的有效的方法.

参考文献 (References)

[1] MIL-STD-2165A, Testability program for systems and equipments[S]

[2] GJB2547-95,装备测试性大纲[S]
GJB2547-95, Testability program for material [S] (in Chinese)

[3] 徐萍. 测试性试验方法与试验平台研究[D]. 北京:北京航空航天大学工程系统工程系, 2006
Xu Ping The method and platform in testability test[D]. Beijing: Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006 (in Chinese)

[4] 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
Shi Junyou, Kang Rui Study on plan of testability demonstration based on the general adequacy criterion[J]. ACTA Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 691 - 695 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)