

文章编号: 1000-6893(2005)06-0691-05

基于通用充分性准则的测试性试验方案研究

石君友, 康 锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

Study on the Plan of Testability Demonstration Based on the General Adequacy Criterion

SHIJun-you, KANG Rui

(Department of Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 建立了故障模式与被测单元(UUT)特性之间的关系模型,根据关系模型建立了样本集的通用充分性准则。在通用充分性准则的基础上,研究了确定试验方案的新方法,包括确定样本量和建立样本集的方法,以及相应的合格判断方法。通过实例应用说明了方法的可行性。与现有方法相比,新方法更适用于现有的指标要求情况和多参数综合试验的需求,而且建立的样本集可以覆盖 UUT 的重要特性。

关键词: 充分性准则; 测试性试验; 方案; 样本量; 故障模式

中图分类号: TP302.8 **文献标识码:** A

Abstract: The relation model of failure modes and characters of the unit under test (UUT) is created. The general adequacy criterion for the sample set is proposed according to the relation model. Based on the general adequacy criterion, the new method for determining the demonstration's plan is studied, which includes the methods for determining sample size and creating sample set and the pass judgement. A case shows the feasibility of the new method. Comparing with the exist methods, the new method is more suitable for the exist state of the testability requirements and the integrative demonstration of multiple testability requirements, and the created sample set can coverage the important character of UUT.

Key words: adequacy criterion; testability demonstration; plan; sample size; failure mode

测试性试验是在实验室内通过注入一定数量的故障模式来验证被测单元(UUT)的机内测试(BIT)或者外部自动测试的诊断能力。由于采用故障注入方法很难模拟虚警情况,因此测试性试验主要用于验证故障检测率(FDR)、故障隔离率(FIR)指标。测试性试验方案主要包括样本量、样本集以及合格判据等三部分。现有的确定试验方案方法是以二项分布方法为首选^[1]。该方法根据双方风险和测试性指标要求计算出样本量和合格判定数,采用考虑故障率的随机抽样方法建立故障模式样本集,在试验后根据合格判定数进行故障诊断能力评价^[1~3]。这种方法具有如下的不足:

(1) 现有的产品仅提供了指标要求的最低可接受值,如何利用最低可接受值直接确定满足双方风险要求的样本量目前还缺少相应的手段,因此该方法不便于现有产品的验证。

(2) 采用合格判定数则不允许试验的样本量

发生变化,导致故障检测率和故障隔离率综合验证时在确定统一的试验样本量方面存在着困难。

(3) 在建立样本集时,仅考虑了故障率的影响,没有考虑样本集能否覆盖产品的重要特性,不能保证产品的测试性设计在试验中得到全面的考核,降低了试验结果的准确性。

为了弥补上述的不足,需要研究新的试验方案确定方法。根据测试性设计要求^[3,4],以及测试性试验的实践情况分析^[5],在建立故障模式样本集时是否考虑对 UUT 重要特性(如单元结构、功能、测试设计等)的覆盖,对试验验证结果的准确性都有很大的影响。因此,本文从样本集对 UUT 重要特性覆盖的需求出发,建立了样本集的通用充分性准则,并研究了基于通用充分性准则的试验方案设计。

1 通用充分性准则的建立

为了便于分析和构建样本集的通用充分性准则,需要首先分析确定故障模式与 UUT 特性之间的关系模型。

收稿日期:2004-08-16; 修订日期:2004-11-03

定义1 UUT的故障模式-特性关系模型。UUT的故障模式-特性关系模型是如下定义的三元组

$$R_U = (F_U, A_U, P_U) \quad (1)$$

式中: R_U 为UUT的故障模式-特性关系模型; F_U 为非空有限的UUT故障模式集合, $F_U = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, $f_i (i=1, \dots, m)$ 为UUT内的1个具体的故障模式, m 为UUT的故障模式数量; A_U 为特性 A 取值集合, $A_U = (a_1, a_2, \dots, a_q)$, $a_j (j=1, \dots, q)$ 为特性 A 的一个具体取值, q 为该特性各种取值的数量; P_U 为从 F_U 到 A_U 的映射函数, $P_U: F_U \rightarrow A_U$, $P_U(f_i)$ 是根据映射 P_U 确定的故障模式 f_i 对应的特性取值集合, $P_U(f_i) \subseteq A_U$,考虑到在 F_U 中存在与特性 A 不相关的故障模式,因此规定对不相关的故障模式,映射函数 P 的输出为空值。

仿照UUT的故障模式-特性关系模型可以建立样本集的故障模式-特性关系模型。

定义2 样本集的故障模式-特性关系模型。样本集的故障模式-特性关系模型是如下定义的三元组

$$R_S = (F_S, A_S, P_S) \quad (2)$$

式中: R_S 为样本集的故障模式-特性关系模型; F_S 为非空有限的样本集合, $F_S = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, $f_i (i=1, \dots, n) \in F_U$, n 为样本量; A_S 为特性 A 的取值集合, $A_S = (a_1, a_2, \dots, a_l)$, l 为集合 A_S 中的元素数量, $A_S \subseteq A_U$; P_S 为从 F_S 到 A_S 的映射函数, $P_S: F_S \rightarrow A_S$, P_S 是 P_U 在改变定义域之后的变形。

在上述关系模型定义的基础上,可以建立样本集的通用充分性准则。

定义3 样本集的通用充分性准则。已知样本集的故障模式-特性关系模型为 $R_S = (F_S, A_S, P_S)$,其对应的UUT故障模式-特性关系模型为 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$,则样本集 F_S 的通用充分性准则 C_A 为:当且仅当 A_S 的元素数量与 A_U 的元素数量相等时,样本集 F_S 关于UUT故障模式集合 F_U 在特性 A 上是充分的,记为 $C_A = \text{true}$;否则就是不充分的,记为 $C_A = \text{false}$ 。即

$$(|A_S| = |A_U|) \Leftrightarrow C_A = \text{true} \quad (3)$$

或者

$$(|A_S| \neq |A_U|) \Leftrightarrow C_A = \text{false} \quad (4)$$

式中: $|A_S|$ 为集合 A_S 的基数; $|A_U|$ 为集合 A_U 的基数。

通用充分性准则 $C_A = \text{true}$ 的内在含义是要

求 $A_S = A_U$,以保证样本集 F_S 可以覆盖与集合 F_U 相关的特性 A 所有取值。

当选择不同的具体特性时,通用充分性准则就变为相应的具体充分性准则。例如,如果选择UUT的结构特性,则可以得到结构覆盖充分性准则;如果选择UUT的功能特性,则可以得到功能覆盖充分性准则;如果选择UUT的测试特性,则可以得到测试覆盖充分性准则。

2 基于通用充分性准则的试验方案设计

在通用充分性准则的基础上,进行试验方案的设计需要解决如何确定样本量、如何建立样本集以及给出相应的合格判据。为此,需要首先在UUT故障模式-特性关系模型定义的基础上进一步建立故障模式特性等价集合的相关定义。

2.1 故障模式特性等价集合的相关定义

在定义1中,映射 P_U 将故障模式 f 映射到1个或者多个可能的特性值 a 。为了便于定义故障模式等价集合,这里将映射 P_U 分为两种情况:简单映射情况和复杂映射情况。下面分别对其进行分析。

定义4 简单映射。在UUT的故障模式-特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,如果下式成立,则称映射 P_U 为简单映射。

$$\forall f \in F_U (P_U(f) \subseteq A_U) \quad (|P_U(f)| = 1) \quad (5)$$

式中: $|P_U(f)|$ 为集合 $P_U(f)$ 的基数。

定义5 简单映射下的故障模式特性等价。在UUT的故障模式-特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,对故障模式集合 F_U 的两个不同元素 f_1 和 f_2 ,映射 P_U 将其映射到集合 A_U 中的同一个元素上,即

$$\exists f_1, f_2 \in F_U (f_1 \neq f_2) \quad (P_U(f_1) = P_U(f_2)) \quad (6)$$

则称 f_1 和 f_2 关于特性 A 等价。

定义6 简单映射下的故障模式特性等价集合。在UUT的故障模式-特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,任取 $a \in A_U$,定义集合 $F_a \subseteq F_U$,如果

$$\forall f \in F_U (f \in F_a) \Rightarrow (P_U(f) = \{a\}) \quad (7)$$

而且

$$\forall f \in F_U (f \notin F_a) \Rightarrow (P_U(f) \neq \{a\}) \quad (8)$$

则称集合 F_a 是特性 A 在取值 a 下的故障模式等价集合,简称为故障模式特性等价集合。

定义7 复杂映射。在 UUT 的故障模式 - 特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,如果下式成立,则称映射 P_U 为复杂映射。

$$\forall f \in F_U \cdot (P_U(f) \subseteq A_U) \quad (|P_U(f)| \geq 1) \quad (9)$$

定义8 复杂映射下的故障模式特性等价。在 UUT 的故障模式 - 特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,对故障模式集合 F_U 的两个不同元素 f_1 和 f_2 ,其映射输出集合 $P_U(f_1)$ 和 $P_U(f_2)$ 存在相同的元素,即

$$\exists f_1, f_2 \in F_U (f_1 \neq f_2) \quad (P_U(f_1) \cap P_U(f_2) \neq \emptyset) \quad (10)$$

则称 f_1 和 f_2 关于特性 A 等价。

定义9 复杂映射下的故障模式特性等价集合。在 UUT 的故障模式 - 特性关系模型 $R_U = (F_U, A_U, P_U)$ 中,任取 $a \in A$,定义集合 $F_a \subseteq F_U$,如果

$$\forall f \in F_U (f \in F_a \Leftrightarrow (a \in P_U(f))) \quad (11)$$

而且

$$\forall f \in F_U (f \notin F_a \Leftrightarrow (a \notin P_U(f))) \quad (12)$$

则称集合 F_a 是特性 A 在取值 a 下的故障模式等价集合,简称为故障模式特性等价集合。

对于给定的特性 A ,根据故障模式等价集合定义,可以在故障模式集合 F_U 的基础上,建立多个故障模式特性等价集合 F_a 。无论 P_U 属于简单映射还是属于复杂映射,特性 A 的每个取值都对应着一个故障模式特性等价集合,因此故障模式特性等价集合 F_a 的数量与集合 A_U 的基数相等。

2.2 基于通用充分性准则的样本量确定方法

由于特性 A 的每一个取值 a 都有对应的故障模式特性等价集合 F_a ,因此为了满足通用充分性准则 $C_A = \text{true}$,样本集至少要包含 UUT 每个故障模式特性等价集合中的一个元素,即

$$(\forall a \in A_U \exists (f \in F_a \mid f \in F_s)) \Leftrightarrow C_A = \text{true} \quad (13)$$

因此,根据通用充分性准则的要求,在确定 UUT 的故障模式样本量时,应该保证所有的故障模式等价集合都能抽到至少一个故障模式。为了使样本量的确定符合故障率比例关系,需要在如下定义的基础上确定出样本量的计算方法。

定义10 故障模式特性等价集合的故障率。假设第 j 个故障模式特性等价集合 F_{aj} 中含有 K_j 个故障模式,则其中所有故障模式的故障率之和称为该故障模式特性等价集合 F_{aj} 的故障率,即

$$r_{aj} = \frac{\sum_{i=1}^{K_j} f_i}{K_j} \quad (14)$$

式中: r_{aj} 为第 j 个故障模式特性等价集合 F_{aj} 的故障率; f_i 为集合 F_{aj} 中第 i 个故障模式的故障率; K_j 为集合 F_{aj} 中的故障模式数量。

考虑故障率比例关系时,故障率最小的故障模式特性等价集合分配到的样本数量也最少。为了保证故障率最小的故障模式特性等价集合能至少分配 1 个样本,总的样本量也必须达到一定的数量。据此,可以得到样本量 n 的计算公式

$$n = \frac{U}{\min} \quad (15)$$

式中: n 为样本量; U 为 UUT 的故障率; $\min = \min\{r_{aj}\}, (j = 1, \dots, |A_U|)$ 。

在根据式(15)计算样本量时,不需要考虑 UUT 的测试性指标要求,因此与现有的二项分布方法相比,本方法不仅适用于各种测试性指标要求形式的 UUT 验证,而且适用于故障检测率和故障隔离率综合验证的复杂情况。

2.3 基于通用充分性准则的样本集建立方法

根据通用充分性准则确定了样本量之后,还需要进行故障模式抽样,建立满足充分性准则的样本集。基于通用充分性准则的样本集建立流程如图 1 所示。

首先,根据故障模式特性等价集合的定义,在 UUT 故障模式集合 F_U 的基础上确定出所有的故障模式特性等价集合 F_a ,共有 m 个。根据式(14)计算出每个故障模式特性等价集合的故障率 r_{aj} ,并根据式(15)计算出样本量 n 。

然后,为了使样本集既满足充分性准则要求,又符合故障率比例关系,分 2 个步骤进行故障模式抽样。

第 1 步,在每个故障模式特性等价集合中,根据故障模式的故障率比率,各随机抽取 1 个故障模式构成初步的样本集 F_s 。此时样本集 F_s 只包含 m 个故障模式。

通常情况下样本量 n 都大于故障模式特性等价集合的数量 m ,此时需要第 2 步抽样。

第 2 步,在整个 F_U 内,根据故障模式的故障率比率,随机抽取 $n - m$ 个故障模式,与初步样本集合并构成最终的样本集 F_s 。此时样本集 F_s 包含 n 个故障模式。

根据这种方法建立的样本集,既能够保证对 UUT 重要特性的覆盖,又满足实际故障发生的

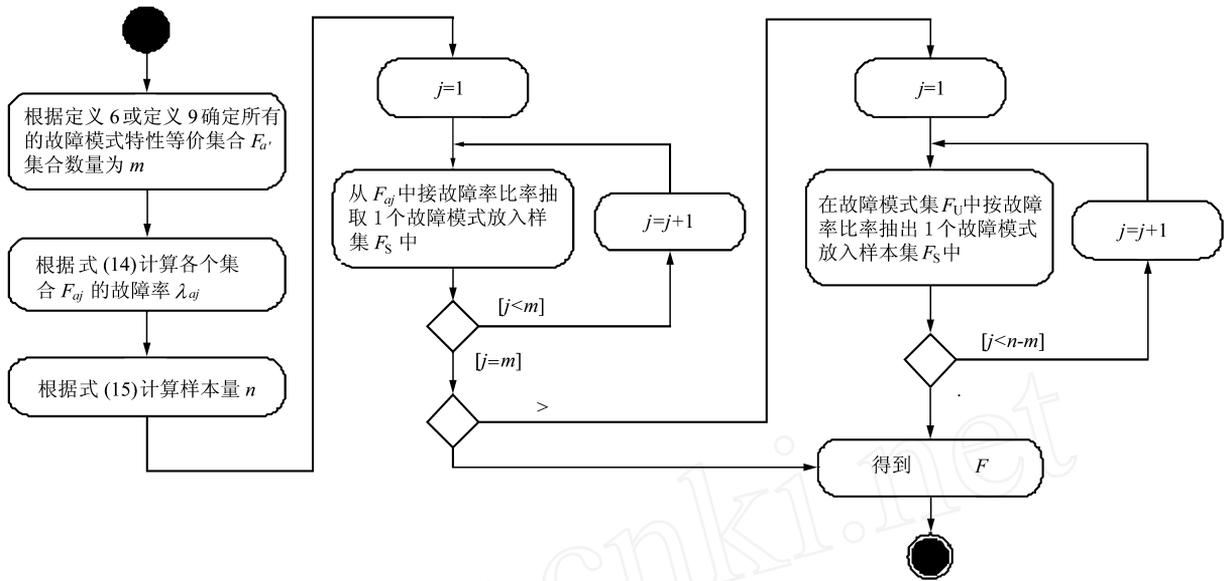


图1 建立样本集的流程

Fig. 1 The flow of creating sample set

统计关系。

2.4 合格判据的确定

前面给出了根据通用充分性准则确定出样本量和建立样本集的方法,在此基础上还需要给出相应的合格判据,以构成完整的试验方案。

这里采用参数评估比较方法进行合格判断,即根据试验数据评估 FDR、FIR 量值,并与要求值比较来判断是否合格。具体判断过程如下:

(1) 计算 FDR 和 FIR 的单侧置信下限
FDR 和 FIR 的单侧置信下限计算公式如下

$$\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} (1 - P_L)^i P_L^{n-i} = 1 - C \quad (16)$$

式中: P_L 为故障检测率或者故障隔离率的单侧置信下限; C 为参数评估的置信度,代替相应的试验风险; n 为样本量,对于 FDR 计算, n 为注入的故障模式数量(即样本集的样本量),对于 FIR 计算, n 为试验中成功检测出的故障模式数量; r 为试验的失败次数,对于 FDR 计算, r 为未能检测出的故障模式数量,对于 FIR 计算, r 为成功检测但没有正确隔离的故障模式数量。

由于式(16)计算困难,因此在实际应用中可以查阅相应的二项分布置信下限表直接得到相应的单侧置信下限。

(2) 合格判断 已知测试性参数(FDR 或者 FIR)在置信度 C 下的单侧置信下限为 P_L ,相应的指标最低可接受值为 $P_{L,S}$,如果

$$P_L \geq P_{L,S} \quad (17)$$

则在置信度 C 下该项参数指标合格,否则不合格。

3 实例应用

某控制装置需要验证其外部自动测试设备的故障诊断能力,指标要求如下:FDR 0.95,隔离到 1 个 SRU(车间可更换单元)的 FIR 0.90,隔离到 2 个 SRU 的 FIR 0.94。下面给出根据上述方法确定的综合试验方案,这里采用该控制设备的功能特性来具体化上述的通用充分性准则。

(1) 确定样本量 根据控制装置的故障模式影响分析(FMEA)资料确定了产品的所有元器件级故障模式,共 2278 个(详细列表略)。根据控制装置的设计资料确定产品的所有功能,共 14 个(见表 1)。根据 FMEA 资料和功能特性构建了 14 个故障模式功能等价集合(不包括对功能没有影响的故障模式),并计算出各个集合的故障率(见表 1),其中 $\min = 0.86 \times 10^{-6} / \text{h}$ 。

控制装置的故障率 $\nu = 230.25 \times 10^{-6} / \text{h}$,根据式(15)计算得到样本量为 268。

(2) 建立样本集 采用前面提供的样本集建立方法进行故障模式抽样,建立了样本集 F_S (详细列表略),样本量为 268。在样本集 F_S 中,属于 14 个故障模式功能等价集合的故障模式数量为 242 个,它们在不同功能上的分布如表 1 所示。样本集 F_S 中的其余 26 个故障模式对功能没有影响,考虑到外部测试设计完全采用功能检测方式,

则这些故障模式注入到控制装置后,肯定是不能检测到的,因此不需要实际注入,在结果计算时直接作为不能检测故障处理。

表1 样本量的分布
Table 1 The distribution of sample sizes

集合编号	对应的功能	等价集合 故障率 /($10^{-6} \cdot h^{-1}$)	样本量	样本量 分布
1	指令接收	13.72		16
2	数据接收	15.21		18
3	数据解码	14.94		18
4	信号变换	4.34		5
5	校正稳定	35.01		41
6	结构滤波	9.34		11
7	舵面分解	47.13	268	55
8	自检	21.64		26
9	开关信号控制	0.86		1
10	总线接口功能	22.23		28
11	内部信号连接	2.83		4
12	输出 +5V 直流电	5.95		7
13	输出 $\pm 15V$ 直流电	6.65		8
14	输出 $\pm 12V$ 直流电	4.36		4

从表1可以看出,这种方法建立的样本集能够保证控制装置的14个功能在试验中都会出现故障,使外部测试设计在试验中可以得到全面考核。

(3)合格判据 通过协商约定,确定置信度 $C=0.8$ 。根据试验结果采用二项分布方法计算3个参数的单侧置信下限,并根据式(17)分别判断3个参数是否合格。

4 结论

以样本集对 UUT 重要特性的覆盖需求为起点,建立了通用的充分性准则,并根据通用充分性准则进一步分析研究了确定试验方案的新方法。与现有方法相比,新方法更适用于现有产品的指标要求情况和多参数综合验证的需求,而且建立的样本集可以覆盖产品的重要特性,确保试验考

核的全面性。

此外,在实践中应用该方法时还需考虑样本量的实用性,即根据实际需要确定 n_{min} 的限制值,防止样本量过大。当故障模式特性等价集合的故障率小于限制值时,将其忽略,不参与样本量计算。

参考文献

- [1] 徐忠伟,周玉芬,徐松涛,等. 测试性验证中抽样方案的精确算法及应用[J]. 航空学报,2000,21(1):67-69.
Xu Z W, Zhou Y F, Xu S T, et al. Accurate algorithm of sampling plan and its application in testability demonstration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 67 - 69. (in Chinese)
- [2] GB2072-94, 维修性试验与评定[S]. 1994.
GB2072-94, Maintainability test and evaluation[S]. 1994. (in Chinese)
- [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.
Tian Z, Shi J Y. System testability design analysis and demonstration[M]. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [4] Pecht M, Dube M, Natishan M, et al. Evaluation of built-in test[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 266 - 271.
- [5] Barnett N. In-service reliability, maintainability and testability demonstrations - 15 years of experience [A]. In: proceedings annual reliability and maintainability symposium[C]. 2003. 587 - 592.

作者简介:

石君友(1973-) 男(满族),黑龙江人,博士。
E-mail: shijy016@sina.com。



康锐(1966-) 男,辽宁本溪人,教授,博士生导师。E-mail: kangrui@buaa.edu.cn。

(责任编辑:李铁柏)