

文章编号:1000-6893(2009)05-0901-05

# 测试性研制阶段数据评估验证方法

石君友, 田仲

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191)

## Testability Verification Method Based on Data Evaluation in Development Phase

Shi Junyou, Tian Zhong

(Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**摘要:** 分析了现有测试性验证方法应用情况, 阐述了测试性研制阶段数据评估验证方法的必要性。通过与现有测试性验证方法的对比分析, 提出了一种新的测试性验证方法, 并说明了该验证方法的含义和特点。该验证方法可用于故障检测率、故障隔离率和虚警率的验证。建立了该验证方法的工作框架, 包括验证要求、验证程序、验证技术和验证组织。重点阐述了该验证方法的两种工作方式实施流程、适用的最小样本量范围、测试性数据收集表格和测试性数据判据。其中, 测试性数据收集表格可以记录故障检测、故障隔离和虚警信息。进行了案例应用, 给出了数据分析结果和经验总结。案例应用表明该方法能够达到测试性验证的效果。

**关键词:** 测试性; 验证; 数据评估; 数据判据; 研制阶段; 样本量; 故障检测

**中图分类号:** TP302.8 **文献标识码:** A

**Abstract:** The application of existing testability verification methods is analyzed, and the necessity of a testability verification method based on data evaluation in development phase is described. Based on a comparison with the existing testability verification methods, a new method is proposed, and the meanings and characteristics of this method are enunciated. This method can be used to verify fault detection rate, fault isolation rate, and false alarm rate. The work frame of this verification method is established, which includes verification requirements, procedure, technique, and organization. The flow chart for the implementation of two work modes, the applicable range of minimum sample size, the tables for collecting testability data, and the testability data criteria for this verification method are described in detail. Information about fault detection, fault isolation, and false alarm can be recorded in the collection table of testability data. A case application is described. The data analysis results and conclusions drawn are provided. The case shows that this method can satisfy the requirements of testability verification.

**Key words:** testability; verification; data evaluation; data criterion; development phase; sample size; fault detection

测试性验证是指为确定产品是否达到规定的测试性要求而进行的试验与评价工作<sup>[1]</sup>。目前, 公开文献中提出的测试性验证方法包括基于故障注入技术的试验验证方法<sup>[2-9]</sup>和现场数据评估验证方法<sup>[10-15]</sup>。试验验证方法是通过将故障注入到产品实物中来验证机内测试(BIT)或者外部测试(自动测试设备(ATE)与人工测试)的故障诊断能力<sup>[2]</sup>。现场数据评估验证方法是通过收集产品在现场使用过程中的故障相关数据来验证 BIT 或者外部测试的故障诊断能力<sup>[10]</sup>。

## 1 研制阶段数据评估验证方法

### 1.1 方法含义

研制阶段数据评估验证方法是通过规范收集和统计产品在研制阶段各项测试、试验中发生的故障及其检测隔离数据, 根据该数据进行测试性参数的评估, 判断是否满足规定的测试性要求, 并给出测试性参数的点估计和置信限估计。

研制阶段数据评估验证方法适用的测试性参数包括: BIT 的故障检测率、故障隔离率和虚警率, 以及外部测试的故障检测率、故障隔离率和虚警率。

研制阶段数据评估验证方法需要收集产品在研制阶段各项测试和试验中的自然故障数据、相应的检测指示数据、隔离指示数据、虚警指示数据,进行统计计算。

## 1.2 方法特点

表1给出了研制阶段数据评估验证方法、试验验证方法与现场数据评估验证方法的主要对比项目。

表1 方法对比

对比项目	研制阶段数据评估验证方法	试验验证方法	现场数据评估验证方法
数据来源	装备、系统和LRU,SRU级产品的各类调试和试验	小型系统和LRU,SRU级产品的故障注入试验	装备级应用
故障类型	自然发生	注入/模拟	自然发生
实施单位	承制方	承制方	使用方和第三方
实施时间	设计定型前	设计定型前	设计定型前后
技术状态	初样、试样设计定型	设计定型	设计定型

注:LRU—外场可更换单元;SRU—车间可更换单元

在数据来源方面,研制阶段数据评估验证方法使用了装备、系统和LRU,SRU等各层次产品的各类调试、联试、检测、性能试验、环境试验和可靠性试验中的数据。试验验证方法仅使用了小型系统和LRU,SRU级产品的故障注入试验数据,而现场数据评估验证方法使用装备级应用中的数据。

在故障类型方面,研制阶段数据评估验证方法和现场数据评估验证方法都是针对自然发生的故障,而试验验证方法是针对注入和模拟的故障。

在实施单位方面,研制阶段数据评估验证和试验验证都是由承制方完成,而现场数据评估验证则由使用方和第三方(如试用单位)完成。

在实施时间方面,研制阶段数据评估验证和试验验证都是在装备设计定型之前完成,而现场数据评估验证在装备设计定型之前和之后都要进行。

## 2 工作框架

研制阶段数据评估验证方法的工作框架如图1所示,主要包括验证要求、验证程序、验证技术和验证组织4个部分,其中重点内容说明如下。

### 2.1 验证要求

验证要求如下:

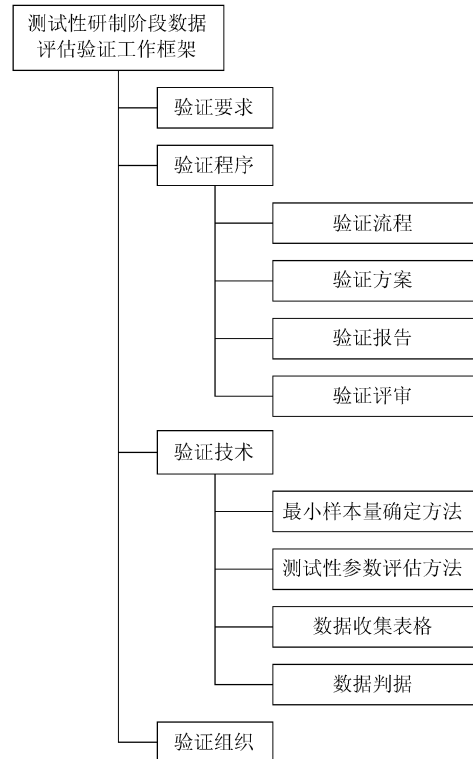


图1 验证工作框架

Fig. 1 Framework of verification

(1) 成立产品研制阶段数据评估验证工作组织机构,负责验证实施与过程控制。

(2) 依据型号的大纲和计划制定产品的研制阶段数据评估验证实施方案。

(3) 在研制阶段早期及时制定专用数据收集表格,用于后续研制阶段的数据收集,防止仅依赖可靠性数据收集方法导致的测试性信息丢失。

(4) 收集研制阶段产品各种调试和试验中的相关数据。

(5) 对收集到的数据进行分析判别,剔除无效数据。

(6) 最终评估数据量应不低于最小样本量要求,并采用二项分布模型进行测试性参数的置信限计算。

(7) 编写验证报告,并通过评审确认验证结论。

### 2.2 验证流程

研制阶段数据评估验证的流程如图2所示。验证工作的实施分两种方式:早期规划方式和后期补作方式。

早期规划方式是在产品研制初期即规划进行研制阶段数据评估验证,制定完整的验证方案。验证方案应该至少明确最小样本量要求、数据收

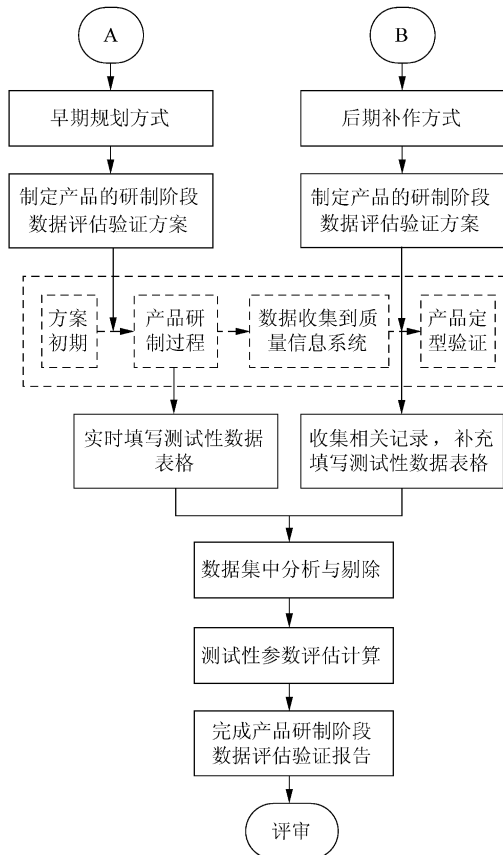


图 2 验证流程  
Fig. 2 Flow of verification

集表格、数据收集范围和方式、数据判据和测试性参数评估计算方法。

后期补作方式在产品研制的后期决定进行研制阶段数据评估验证,此时制定必要的验证方案,并直接分析产品研制过程中的试验和调试数据记录资料,从中提取产品发生的故障和测试数据,补充填写到测试性数据表格中。但由于记录资料中的测试性信息多不完整,需要附加额外的数据确认工作。

### 2.3 样本量确定与测试性参数评估方法

最小样本量是在样本零失败情况下参数评估下限值满足指标要求的最低样本量。对故障检测率,该样本量是最少故障次数;对故障隔离率,该样本量是最少检测故障次数;对虚警率,该样本量是最少故障报警次数,而不是最少虚警次数。采用文献[10]提供的二项分布模型进行故障检测率、故障隔离率和虚警率验证的最小样本量计算和参数评估计算。其中,虚警率按故障指示成功率(1-虚警率)换算。

考虑故障指示成功率在内,多数装备常用的测试性指标范围是 0.90~0.98,在常用置信度

0.90 下,根据二项分布模型确定的最小样本量在 22~114 之间。

因此,当最终评估样本量小于 22 时,不能应用研制阶段数据评估验证方法;当最终评估样本量大于 114 时,可以应用研制阶段数据评估验证方法;当最终评估样本量在 22~114 之间时,需要通过具体分析来确定是否可以应用研制阶段数据评估验证方法。

### 2.4 数据收集表格

研制阶段数据评估验证的测试性数据收集表格如表 2 所示。

表 2 测试性数据表  
Table 2 Testability data table

序号	日期		
产品名称	技术状态	<input type="checkbox"/> 初样	<input type="checkbox"/> 设计定型
故障发现时机		<input type="checkbox"/> 调试	<input type="checkbox"/> 例行检测
		<input type="checkbox"/> 联试	<input type="checkbox"/> 环境试验
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 性能试验
			<input type="checkbox"/> 可靠性试验
现象描述			
故障报警情况	<input type="checkbox"/> BIT 报警	BIT 工作模式	
		报警信息	
		隔离级别	
		模糊度	
		故障单元	
	<input type="checkbox"/> ATE 报警	报警信息	
		隔离级别	
		故障单元	
	<input type="checkbox"/> 人工发现	故障单元	
故障确认	<input type="checkbox"/> 存在故障	真实故障单元	
	<input type="checkbox"/> 无故障	<input type="checkbox"/> BIT 虚警	<input type="checkbox"/> ATE 虚警
		<input type="checkbox"/> 人工测试虚警	

该数据表可以对产品的技术状态、故障发现时机、故障现象、故障报警情况和故障确认等各项测试性信息进行全面的记录,避免测试性信息的丢失。

### 2.5 数据判据

测试性数据判据是研制阶段数据评估验证方法有效性的重要保证。验证组织者应该根据验证的具体对象特点,制定相应的测试性数据判据。

测试性数据判据除了常规的故障检测、故障隔离和虚警判据外,还应该特别明确如下问题:

(1) 技术变更 故障模块的设计或技术原理发生变更,在后续研制中取消了该模块,导致定型产品中不会出现此类问题,则该数据应该剔除。

(2) 测试范围 故障模块在要求规定的测试对象范围之外,则该数据应该剔除。

(3) 测试时机 对于非持续监测的 BIT(例如加电 BIT),在 BIT 运行之后工作阶段出现的故障,应该从该 BIT 的关联数据中剔除。如果故障后再次运行了 BIT,则该数据不用剔除。

(4) 质量问题 对于非故障性质的质量问题,如导线长度不符合要求、插头与插座不匹配等,应该剔除。

(5) 非责任故障 对于非责任性原因导致的故障,应该剔除。

## 2.6 验证组织

研制阶段数据评估验证在组织机构上包括验证领导小组和验证工作组。

### (1) 验证领导小组

验证领导小组应由订购方和承制方人员组成,负责验证的前期工作(如组建测试性验证工作组、制定验证规划、人员培训等)和验证实施过程中争执的裁决、验证内容变更的审批。

### (2) 验证工作组

验证工作组的组长由一名领导小组成员担任,组员以承制方人员为主,包括必要的订购方人员和第三方专家。工作组负责实施验证的各项具体工作,包括制定验证方案、进行数据记录收集和分析、制定验证报告等。

## 3 案例应用

### 3.1 案例说明

针对某导弹的定型需求,采用后期补作方式的研制阶段数据评估验证方法进行测试性验证。该导弹要求在一级测试中采用加电 BIT 进行导弹多个舱段的检测,发现故障后整弹更换,因此只提出故障检测率和虚警率要求,无故障隔离率要求。

### 3.2 验证应用

根据需求成立了验证工作组,负责制定验证方案相关内容,并进行数据收集分析和编制验证报告。

在验证方案中,确定导弹故障数据最小样本

量为 32,BIT 故障报警数据最小样本量为 59。通过对导弹研制过程中的故障报告与纠正措施系统(FRACAS)资料进行查询,共收集到初样阶段(C)、试样 1 阶段(S1)、试样 2 阶段(S2)、定型阶段(D)前期的原始数据 271 条。根据制定的数据判据,剔除数据 128 条,剩余有效数据 143 条,如表 3 所示。剔除数据的具体分布情况如表 4 所示。

表 3 全部数据表

Table 3 Total data table

阶段	原始数据量	剔除数据量	剩余数据量
C	41	23	18
S1	87	42	45
S2	98	44	54
D	45	19	26
合计	271	128	143

表 4 剔除数据表

Table 4 Deleting data table

剔除类别	数量	比例/%
技术变更(相关模块取消)	19	13.29
超出测试范围(如遥测舱、发射装置、软件等)	53	37.06
错过测试时机(在 BIT 运行结束后靶试中发生)	13	9.09
质量问题(多种非故障的质量问题)	30	20.98
非责任故障(外接设备故障或者外接电信号超标导致)	28	19.58
合计	143	100

在 143 条剩余数据中,包含 132 条 BIT 能检测故障数据和 3 条 BIT 虚警数据,经过计算表明,在规定置信度下 BIT 的故障检测率和虚警率验证值满足指标要求。最后完成了验证报告作为定型附件材料之一交付评审。

### 3.3 经验总结

通过案例应用,得到如下的经验:

(1) 在研制阶段,能否收集到足够的样本量是该方法是否适用的关键。案例中的收集数据量是剩余数据的近 1.9 倍,因此可以初步确定收集数据量最好大于最小样本量的 2 倍。

(2) 由于测试性指标的关系,验证故障检测率和隔离率要求所需的最小样本量相对少于验证虚警率所需的最小样本量,因此该方法更适用于

验证故障检测率和故障隔离率。

(3) 当把整弹的剩余数据平分到5个舱段时,每个舱段只有约28个数据,已经不满足最小样本量要求。因此,该方法更适用于装备和系统级产品的验证。

(4) 制定完整和有效的数据判据是保证验证方法应用置信程度的重要保证。

(5) 利用计算辅助软件可以提高工作效率。

(6) FRACAS中多处测试性信息记录不完整,采用后期补作方式,需要获取技术人员的原始记录信息进行确认,增加了很多工作量。

(7) 测试性数据表的格式和内容需要根据实际情况进行适当调整。

#### 4 结束语

研制阶段数据评估验证方法是目前技术难度最低的一种测试性验证方法,通过案例应用证实该方法具有可行性,在样本量满足要求时能够达到测试性验证的效果,为该方法在其他装备研制中推广应用提供了重要的经验。

应用该方法的关键点是获取足够的数据、制定完整有效的数据判据和准确的数据分析与确认。目前尚未建立起覆盖各类装备的完备数据判据,因此该方法还需在今后的应用和经验总结中不断完善。

#### 参 考 文 献

- [1] GJB451A-2005 可靠性维修性保障性术语[S]. 2005. GJB451A-2005 Reliability, maintainability and supportability terms[S]. 2005. (in Chinese)
- [2] 石君友,李郑. 自动控制故障注入设备的设计与实现[J]. 航空学报,2007,28(3):556-560. Shi Junyou, Li Zheng. Design and implementation of automatic control fault insertion equipment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 556-560. (in Chinese)
- [3] 孟晓风,王国华. 基于证据理论的TPS诊断性能综合评定[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(11):1324-1327. Meng Xiaofeng, Wang Guohua. Comprehensive TPS diagnostic capability assessment methodology based on Dempster/shafer evidence theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1324-1327. (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 the plan of testability demonstration based on the general adequacy criterion[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 691-695. (in Chinese)
- [5] 徐萍,康锐. 测试性试验验证中的故障注入系统框架研究[J]. 测控技术,2004,23(8):12-14. Xu Ping, Kang Rui. Research of fault injection system framework in testability experimental validation [J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23(8): 12-14. (in Chinese)
- [6] Shannon R, Quiter J, D'Annunzio A, et al. A systems approach to diagnostic ambiguity reduction in naval avionic systems[C] // Proceedings of 2005 IEEE Autotestcon. 2005: 194-200.
- [7] Maxwell P. The design, implementation and analysis of test experiments[C] // Proceedings of 2006 IEEE International Test Conference. 2006: 1-9.
- [8] Chang Q, Chen J H. Design of equipment fault injection system based on BIT[C] // Proceedings of 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. 2007: 362-365.
- [9] Zhang J Y. Design and verification for VAC SOC in mixed DFT frame[C] // Proceedings of 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. 2006: 2043-2045.
- [10] 石君友,田仲. 机内测试定量要求的现场试验验证方法研究[J]. 航空学报,2006,27(9):883-887. Shi Junyou, Tian Zhong. Study on field demonstration method for quantitative built in test requirements[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(9): 883-887. (in Chinese)
- [11] Ungar L Y. Design for diagnosability guidelines[C] // Proceedings of 2007 IEEE Autotestcon. 2007: 6-15.
- [12] Westervelt K. Fixing BIT on the V-22 osprey[C] // Proceeding of 2006 IEEE Aerospace Conference. 2006: 8.
- [13] Heitlager I. A Practical model for measuring maintainability[C] // Proceedings of 6th International Conference on the Quality of Information and Communications Technology. 2007: 30-39.
- [14] Ottavi M. Evaluating the yield of repairable SRAMs for ATE[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(10): 1704-1712.
- [15] Arnold R. Evaluating ATE-equipment for volume diagnosis[C] // Proceedings of 2005 IEEE International Test Conference. 2005: 9.

#### 作者简介:

石君友(1973—) 男,博士,高级工程师。主要研究方向:电子产品的可靠性、测试性设计分析与验证。

Tel: 010-82316441

E-mail: shijy016@sina.com

田仲(1935—) 男,研究员。主要研究方向:电子产品的测试性设计分析与验证。

(责任编辑:李铁柏,杨冬)