

# 基于故障注入的雷达装备测试性验证试验方法

尹园威, 尚朝轩, 马彦恒, 李刚

(军械工程学院 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为将测试性验证工作充分应用于雷达装备中, 分析现有测试性验证工作的流程以及方法; 现在的测试性验证工作一般采用三阶段评定法: 测试性设计核查、试验验证和使用评价, 这些方法都是在相应的阶段进行的, 得到本阶段测试性验证的结果; 对雷达装备采用故障注入的方法进行测试性验证试验, 进行故障检测和数据收集处理得出相应的测试性指标参数, 用来评定雷达装备当前的测试性水平是否合格并给出接收或者拒收的结论。

**关键词:** 测试性; 验证评估; 故障注入

## Research on Radar Equipment Testability Verification

Yin Yuanwei, Shang Chaoxuan, Ma Yanheng, Li Gang

(Electronic and Optical Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to take the testability verification work fully into radar equipment, analyze the existing validation processes and methods. Test validation generally uses a three-stage evaluation method; design for testability verification, test validation and evaluation of using. These methods are at the appropriate stage and verify the results of testability in this stage. The commonly used method is fault injection and achieves the indicator parameters by fault detection. Using the method of fault injection in radar equipment testability verification to get the current testability level, and then gives acceptance or reject conclusion.

**Keywords:** testability; verification and evaluation; fault injection

### 0 引言

现在国军标和美军标对测试性的定义大同小异, 其含义都是相同的。这里采用 GJB 2547 里的定义: 测试性是指产品能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降)并隔离器内部故障的一种设计特性<sup>[1-4]</sup>。这种设计特性是为了提高装备性能检测、故障检测/隔离、抑制虚警以及进行故障预测的能力, 使用的主要技术方法有: 固有测试性设计、BIT 设计、外部测试、人工测试、综合诊断和健康管理等<sup>[4]</sup>。为了确认装备测试性设计的正确性、及时发现设计中存在的缺陷并检查产品是否达到了测试性设计的要求, 需要进行测试性的验证评估。根据我国国情, 最常用的验证评估方法为三阶段评定法, 根据时间的推移, 采用不同的方法, 实现测试性的验证评估工作。本文以某型雷达为对象, 结合实际情况, 在试验阶段采用物理故障注入的方式进行验证, 实现了该装备的测试性验证工作。

### 1 测试性验证评估工作流程及指标

#### 1.1 测试性验证评估工作流程

工作流程图如图 1 所示。测试性验证评估工作流程一般包括以下步骤<sup>[1-3]</sup>:

- (1) 制定测试性验证大纲/计划, 组织成立测试性验证组织。
- (2) 依据测试性验证计划规定, 完成试验产品及测试设备

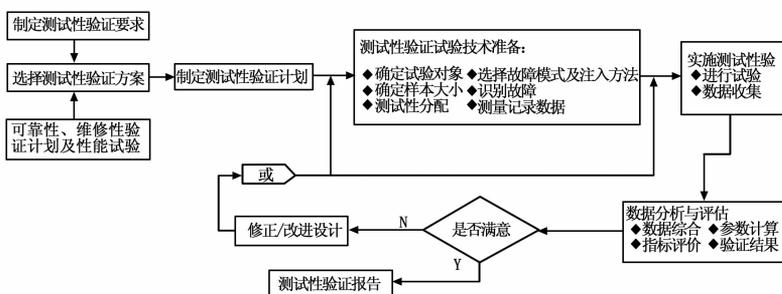


图 1 测试性验证工作流程图

的准备工作, 制定产品的测试性试验验证方案。

(3) 依据试验方案实施故障注入, 可利用简单工具进行手工操作方式注入故障, 也可以利用注入设备实施半自动化注入故障。

(4) 在试验过程中, 将故障及其检测、隔离数据和虚警数据记录到数据表中。

(5) 对记录的数据进行综合分析, 统计故障检测与隔离成功的样本数量, 评估 FDR 和 FIR 的量值, 并依据试验方案进行判决。

(6) 编写产品测试性试验验证报告。

(7) 组织评审, 确认产品的测试性验证评估结果。

#### 1.2 测试性指标

测试性定量指标主要有故障检测率 (FDR: Fault Detection Rate)、故障隔离率 (FIR: Fault Isolation Rate) 和虚警率 (FAR: False Alarm Rate)<sup>[1-4]</sup>。

(1) 故障检测率: 一般定义是在规定的时间内, 通过给定测点能够在规定工作时间  $T$  内正确检测到故障数  $N_D$  与规定工作时间  $T$  内发生故障总数  $N_T$  之比, 用百分数表示。数学公式

收稿日期: 2014-01-19; 修回日期: 2014-03-17。

基金项目: 总装预先研究项目(51319040201)。

作者简介: 尹园威(1984-), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事装备测试性验证与评估方向的研究。

为:

$$FDR = \frac{N_D}{N_T} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 故障隔离率:在规定时间内,通过电路所提供测点能够在规定条件下用规定方法正确隔离到小于等于  $L$  个可更换单元的故障数  $N_L$  与同一时间内检测到的故障数  $N_D$  之比,用百分数表示。数学公式为:

$$FIR = \frac{N_L}{N_D} \times 100\% \quad (2)$$

(3) 虚警率:规定工作时间内,发生虚警数  $N_{FA}$  与同一时间内的故障检测总数之比,当通过测点检测到被测单元有故障,而实际上该单元没有发生故障。数学公式为:

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N_F + N_{FA}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $N_F$  为真实故障检测数。由于虚警率的产生因素较多,包括电路本身、环境因素、人为因素等。所以在进行测试的验证时,通常之采用故障检测率和故障隔离率。

### 1.3 三阶段评定法<sup>[1-2]</sup>

测试性评定工作贯穿于产品设计、试验和使用的全过程,以保证测试性设计的高水平。通常采用的是三阶段评定法来评估产品的测试性水平,即进行测试性核查、试验验证和使用评价及其结果的综合分析。

#### 1.3.1 测试性核查

这一工作的主要方法为:

①通过对故障模式、影响及测试方法分析、测试性预计等测试性设计与分析资料进行核查。

②在生产产品之前,使用各种成熟的测试性建模与仿真技术,对产品的测试性进行评估。

③利用研制过程中的各种试验,如利用样机或者模型进行研制试验、性能调试、故障诊断、可靠性/维修性试验、环境试验等。

④对相似产品进行对比分析,或者使用以前同类装备测试性资料进行参考。

这是测试性增长的第一阶段,是产品测试性成熟过程的重要部分,相当于产品设计定型前的测试性摸底性质的试验。最终目的是尽早发现设计缺陷,指导改进测试性设计,提高产品测试性水平。并在此过程中积累故障检测、故障隔离和虚警的信息,估计产品的故障诊断能力和虚警问题,为是否具备设计定型条件提供依据。

#### 1.3.2 试验验证

一般是在产品设计定型或交付使用前进行,重点是判断测试性定量水平是否达到要求。试验验证包括以下3个部分<sup>[1-2]</sup>。

(1) 确定故障样本量:

确定样本量要遵循3个步骤。

首先,根据试验用样本的充分性确定样本量。要按照所有功能故障都能够被检测隔离的要求,对产品所有组成单元进行故障模式、故障率和故障注入方法的分析,确保每个组成单元的所有功能故障至少有一个样本。因此根据该原则确定的故障样本量  $n_1$  为:

$$n_1 = \frac{\lambda_U}{\lambda_{\min}} \quad (4)$$

式中,  $n_1$  为充分检验所需样本量;  $\lambda_U$  为产品的故障率;  $\lambda_{\min}$  为产品组成单元功能故障率中的最小故障率值。

其次,考虑最少样本量要求。为满足指标统计评估要求,验证试验用故障样本量的下限为:

$$n_2 = \frac{\log(1-C)}{\log R_L} \quad (5)$$

式中,  $R_L$  是测试性指标的最低可接受值;  $n_2$  为达到  $R_L$  所需的最低样本量,为正整数;  $C$  为置信水平。根据  $R_L$  和  $C$  的要求值,通过查最小样本量数据表可得出  $n_2$  的值。

最后,在  $n_1$  和  $n_2$  中取较大者确定综合试验用样本量  $n$ 。

$$n = \max(n_1, n_2) \quad (6)$$

如果出现  $n_2 > n_1$  的情况,可分别给故障率高的功能故障增加样本,一直到所需的样本量为止。

(2) 样本量分配<sup>[6-8]</sup>:

采用 GJB 2072—94《维修性试验与评定》中的样本分配方法,按比例分层抽样分配方法,将故障样本量分配给各组成单元的故障模式。因此某故障模式  $F_i$  的样本数计算公式为:

$$n_{F_i} = n \frac{\lambda_{F_i}}{\lambda_U} \quad (7)$$

式中,  $n_{F_i}$  为分配给第  $i$  个故障模式的样本数;  $\lambda_{F_i}$  为第  $i$  个故障模式的故障率;  $\lambda_U$  为产品的故障率。

(3) 参数评估与验证:

按照数学模型划分的评估验证的方法有:基于二项分布、基于正态分布、基于泊松分布、基于多项式分布和基于超几何分布的方法。文献 [6] 和 [7] 对测试性验证方法进行了深入的分析和研究,可为读者提供参考。根据不同的条件选择最合适的数学模型,根据公式确定合格判定数  $c$  的值,最后的判决准则即是当注入  $n$  个故障样本时,检测(或隔离)失败次数  $F$  小于等于  $c$  时,认为合格;否则认为不合格。

#### 1.3.3 使用评价

该阶段是在实际使用条件下确认产品测试性/BIT 设计水平的方法,由于在研制阶段获得的测试性水平与实际使用情况有较大的差异,因此实际使用时得出的评价结果是必须进行的,且该结果是最具说服力的。该方法是对自然发生故障时的测试、维修情况进行统计分析,评估装备现有测试性水平。具体的步骤为:收集使用期间的数据、对数据进行分析、评估其测试性水平。当发现存在测试性缺陷或者不能满足使用要求时,可提出测试性改进的要求和建议,以便于组织实施改进措施,并对装备的使用、检测和维修提供参考信息,为装备改型和新研装备提供有益的参考。

## 2 故障注入方法研究

故障注入是测试性验证试验技术的主要内容,是测试性验证试验工作得以实现的基础。故障注入的方法可分为物理故障注入方法、仿真故障注入方法或者两者的结合。在此,我们将需要将硬件进行物理改动以实现故障的方法称为物理故障注入;将不需要改动硬件、使用软件或者在仿真环境下以实现故障的方法称为仿真故障注入方法。

### 2.1 物理故障注入方法

预选故障样本之后,在装备上使用物理的方法注入一定数量的故障,使用一定的测试方法进行故障检测与隔离,根据结果估计装备的测试性水平,并判断其是否达标。试验验证在装备或其某系统生产出来之后进行,该方法具有很高的真实性。

根据选定的故障模型,采用人工的方法使某部分发生故障并施加于运行特定工作环境中,实现该系统的错误和失效的发

生,并观测和获取系统对所注入故障的反映信息,并对获取的信息进行分析,从而为试验者提供有关结果<sup>[9-10]</sup>。在装备自身上模拟出一定数量的故障类型(短路、开路、固高、桥接等),经过测试得出故障检测率和故障隔离率。这种方法可以进行几乎实时性的测试,并且能够允许很多的故障注入同时进行,但存在容易造成装备的损坏和部分故障无法注入的缺点。

采用物理故障注入的试验验证工作流程图如图 2 所示:

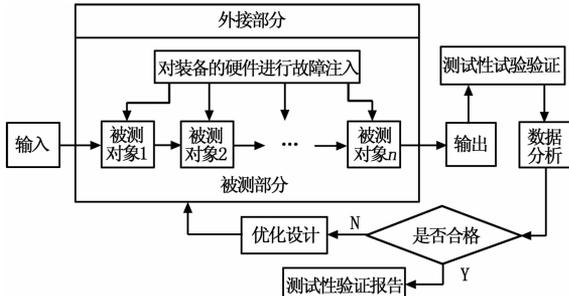


图 2 测试性试验验证流程图

### 2.2 仿真故障注入方法

仿真验证是通过电路仿真的方法对装备系统电路的测试性进行验证的方法,可以用在装备原理图设计出来之后的任何阶段。该方法是利用电路仿真软件对装备电路进行仿真,然后按照选定的故障模型,用仿真的方法将故障注入到装备电路的仿真模型中去,上述工作都是在电路仿真环境中进行的,而故障样本集的选择和故障样本的分配则是完全按照试验验证中的步骤进行的。在装备进行生产之前,可采用该方法进行测试性的验证,不但能够节约生产费用和验证费用,而且对其它验证方法起到补充完善的作用,更好的指导装备的测试性工作。

仿真验证所采用的软件是 PSpice,能够把仿真与电路原理图的设计紧密的结合在一起,广泛应用于各种电路分析,可以满足复杂电子电路动态仿真的要求。在软件中需要建立电路的故障模型,方法是:(1)在该软件中直接修改元器件仿真模型中相应的参数。(2)在正常仿真模型上串联或者并联一个新的模型器件,构成故障仿真模型,然后封装成一个整体,构成元器件故障仿真模型<sup>[11]</sup>。

仿真验证流程图如图 3 所示。

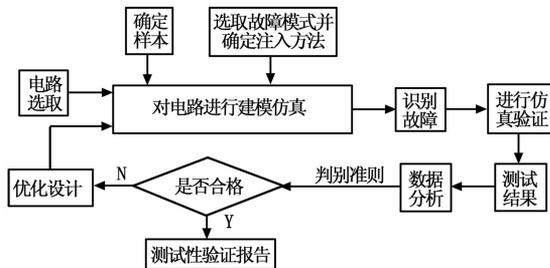


图 3 测试性仿真验证流程框图

### 3 某型雷达的测试性验证方法

根据前面的分析,以某型雷达为对象,以 FDR 为验证指标,采用仿真故障注入的方法进行验证,检验该装备的测试性水平。该装备由 14 个系统组成,测试级别为分系统级。进行验证之前,根据指导原则确定以下几项具体工作内容。

(1) 获取各系统失效率数据。来自装备可靠性分析及可靠

性试验数据。对获得的失效率数据作归一化处理,作为各分系统分配故障样本量的依据。

(2) 故障样本量的确定及分配。根据最少样本量原则可得出  $n \geq 22$ ,故障样本量不能少于 22 个;样本的分配根据 GJB2072—94 规定的方法,按照系统的失效率进行分配,根据测试覆盖性原则,每个系统里至少注入一个故障。

(3) 验证方案的采用。验证方案具有四种方案可用,即估计参数量值的验证方案、最低可接受值的验证方案、考虑双方风险的验证方案、正态分布的验证方案。本文根据实际情况,考虑承制方和订购方风险,采用考虑双方风险的验证方案。根据各参数指标的设置,其中  $\alpha = 0.2 = \beta, q_0 = 0.95$ ,查表可得,验证方案为 (42, 2),其中 42 为抽样数量,大于 22,符合要求,2 是故障检测最大失败次数。根据以上分析,根据各系统失效率数据进行样本分配,如表 1 所示。

表 1 某型雷达的系统组成、失效率及样本分配

序号	系统组成	失效率	归一化	样本分配
1	显示系统	111.967 8	0.05	2
2	火控计算机系统	90.732 0	0.04	2
3	天线馈线系统	121.689 6	0.06	2
4	II 波段发射系统	657.341 1	0.29	13
5	天控系统	261.600 1	0.12	5
6	I 波段发射系统	157.607 1	0.07	3
7	定时测距系统	55.137 1	0.03	1
8	电视跟踪系统	39.430 1	0.02	1
9	激光测距机	40.411 4	0.02	1
10	II 波段接收系统	9.039 1	0.04	2
11	电源系统	180.319 9	0.08	3
12	跳频系统	64.820 7	0.03	1
13	动目标处理系统	54.899 8	0.03	1
14	I 波段发射系统	250.313 2	0.12	5

(4) 数据收集及结果判定。根据结果进行判定:若未检测出的故障大于 2 个,拒收,该装备的测试性需要改进;若小于等于 2 个,则认为合格,接收。经过仿真故障注入后进行故障检测,得到故障检测率为 100%,则测试性水平达标。

(5) 生成测试性验证报告。主要包括测试时间、测试人、装备名称、测试级别、故障样本集、选用的故障样本量、抽样方案、故障注入方法、合格判据及验证结果等,形成技术资料供专家参考。

### 4 结束语

本文分析了军用标准以及各参考书中测试性验证工作的方法,得出一般的测试性指导原则和具体的实施方法,以某型雷达装备为对象,在试验阶段对其系统级实施了测试性验证工作,实现了对该装备的测试性验证,为该类装备的测试性验证找出了一种具体的方法,具有指导意义。不足之处在于测试级别为装备的系统级,对系统内部的故障模式以及重要度没有进行分析,这也是以后工作的一个方向。

#### 参考文献:

[1] 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.

### 3.2 硬件组成

武控系统故障诊断与维修设备硬件由三部分组成, 即便携式测试设备、多功能显控台和测试接口。便携式测试设备为多功能显控台提供通用测试环境, 实现维修时的故障定位、排故指导、修复验证及备品备件的日常测试维护, 通过加装 IETM 的平台信息数据库, 实现多功能显控台电子资料的交互式查询和软、硬件产品的信息查询。如图 6 所示。

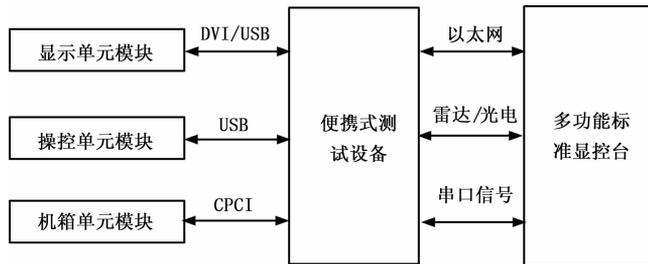


图 6 设备硬件模块组成图

### 3.3 硬件集成

表 1 便携式测试设备硬件配置

系统组成	模块名称	说明
显示单元	液晶显示器	14 英寸 LCD 显示器
操控单元	标准键盘	字符输入、文字编辑
	触摸板	触摸式光标输入
电子机箱单元	电源模块	提供直流电源
	CPU 主处理模块	CPCI 总线主板
	视频转接板	提供视频输出
	双冗余以太网模块	100M/1000M 自适应
	双冗余 CAN 模块	支持 CAN2.0A/B 规范
	串口通讯模块	RS232/RS422/485 接口
	综合显示处理模块	综合显示
	视频接口处理模块	综合显示扩展
	硬件 I/O 类模块	标准化 I/O 类处理
	视频采集模块	采集 TV、VGA 信号
	串口采集模块	RS232/422/485 模式
	Aric429 模块	Aric429 模块
	1553B 采集模块	采集 1553B 接口数据
	其他模块	完成用户的专用功能
结构体	CPCI 总线形式	

本文便携式测试设备电子机箱单元选用 CPCI 总线形式,

(上接第 2130 页)

[2] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[3] 薛嘉, 蔡金燕, 马飒飒. 基于虚拟仪器的雷达装备 ATS 使用测试性验证系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (12): 2795 - 2798.

[4] GJB2547—95, 装备测试性大纲 [S]. 1996.

[5] 李天梅. 装备测试性验证试验优化与综合评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

[6] 马彦恒, 韩九强, 李刚. 测试性评估与验证的超几何分布法

和标准显控台一起, 构成故障诊断与维修设备。作为测试机设备时, 考虑到以后的扩展需求, 内部配置电源模块、主处理模块、双冗余网络模块、显示处理模块、视频接口处理模块、CAN 总线模块、串口通讯模块、I/O 类模块等。硬件配置如表 1 所示, 通讯板卡槽位布局(不含视频接口扩展模块)如表 2 所示。

表 2 作为测试机设备 CPCI 计算机内部槽位布局

模块名称	槽位布局
主处理模块	1 槽
双网络冗余模块	2 槽
综合显示处理模块	3 槽
串口通信模块	4 槽
视频接口处理模块	5 槽
CAN 总线模块	6 槽
标准化硬件 I/O 模块	7 槽
预留模块(用于安装模拟测试模块)	8 槽
电源模块	电源槽
调试接口区域	

### 4 测试结果

本文采用 TEAMS 软件, 在对武控系统测试性需求分析的基础上, 构建了故障模型, 生成了诊断策略; 其次利用 IETM 技术, 设计了面向舰员(艇员)或基层修理所装备操作人员的 IETM 主题框架; 最后通过开发硬件设备, 开发的武器控制系统故障诊断与维修设备, 能够定位武控系统故障和提供维修策略, 实现了部队舰员级和中继级自主维修, 解决了装备故障时依据经验或依赖厂家维修的现状, 提高了装备自主保障能力。

#### 参考文献:

[1] 樊大地, 王宏力, 等. TEAMS 在故障诊断中的应用研究 [J]. 装备制造技术, 2008, (9): 126.

[2] 田华明, 孙华, 等. 复杂电子系统的 TEAMS 的测试性研究 [J]. 测控技术, 2009, 28 (9): 73.

[3] Eric L Jorgensen. DoD classes of electronic technical manuals [R]. West Bethesda: CDNSWC, 1994.

[4] 王崇. 国内外 IETM 研究与应用现状分析 [J]. 航空标准化与质量, 2009, (233): 20 - 23.

[5] 刘双双, 叶晓慧, 等. 嵌入故障诊断策略的 IETM 的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 1965.

[6] 王立兵, 马彦恒, 李泽天. PSpice 仿真的测试性验证方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43 (3): 42 - 44, 64.

[7] 周玉芬, 徐松涛, 高锡俊, 等. 测试性验证的理论和研究方法研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1996, 37 (2): 10 - 15.

[8] 王立兵. 雷达固有测试性验证方法研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008.

[9] 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.

[10] GJB2072—94, 维修性试验与评定 [S]. 1995.

[11] 王立兵, 马彦恒, 李泽天. PSpice 仿真的测试性验证方法研究 [J]. 火力指挥与控制, 2009, 34 (12): 131 - 134.