

基于故障确认的一体化测试性试验验证平台

高洪青

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 针对目前测试性试验中缺乏有效的试验验证平台的现状, 创新性地提出了基于故障确认的一体化平台, 具备装备功能性能测试、故障注入、测试性评估等功能; 通过对测试性试验验证流程及步骤的论述, 结合直接故障注入、等效故障注入、实际故障统计、测试性仿真分析等进行测试性综合评估, 对一体化平台的硬件组成和软件框架进行了详细论述; 最终将一体化平台应用于某型相控阵雷达的测试性评估试验, 具有很强的工程推广价值。

关键词: 测试性综合评估; 一体化验证平台; 故障注入; 测试性试验

Research on Integrated Testability Verification Platform Based on Fault Identification

Gao Hongqing

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: At present, the useful platform for testability evaluation in testability verification is lacking. In order to solve the problem, the testability verification platform based on fault identification integrated with overall performance measurement, fault injection and testability verification is presented innovatively. By expatiating the flow and steps of testability evaluation and verification, the method of integrated evaluation is given by combining the directly fault injection, equivalent fault injection, and practical fault statistic with the analysis of testability simulation. The hardware architecture and software framework are detailed explained. The platform is used in the testability verification of some kind of active phased array radar, and has a great guide for engineering application.

Keywords: testability integrated evaluation; integrated verification platform; fault injection; testability verification

0 引言

测试性是指产品能够及时、准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降), 并隔离其内部故障的一种设计特性, 测试性水平的高低直接影响着装备的维修保障能力和作战效能的发挥, 也制约着武器装备全寿命周期的维护成本。^[1]

测试性指标在方案设计阶段通过测试性建模、故障模式分析、故障树分析等手段进行设计保证; 在研制阶段通过测试性试验, 分析其测试性设计的正确性、合理性并识别设计缺陷、检测装备是否已经完全实现了测试性设计要求, 并通过设计改进使其满足测试性设计要求, 实现测试性的增长; 而在设计定型阶段则需开展测试性验证试验, 对装备的测试性指标进行定量考核^[2-3]。

美国等发达国家在武器装备的测试性指标的试验验证上研究较深, 如今已广泛应用于航天、航空、航海、导弹等复杂系统中。我国由于测试性验证评价体系构建的不完善, 测试性验证平台研究成果非常少, 往往只是结合定型和试用阶段的试验数据, 间接性地获取部分测试性相关数据, 对测试性指标进行定性的考核和评价, 结果往往不能客观的评估装备的测试性指标。

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-31。

作者简介: 高洪青(1975-) 男, 研究员级高工, 主要从事雷达测试技术、综合保障方向的研究。

1 测试性指标试验构架及原理

1.1 测试性指标

根据 GJB2547A-2012《装备测试性工作通用要求》, 测试性要求包括定性要求和定量要求。

测试性定性要求一般包括: a) 合理划分功能和结构的要求; b) 测试点要求; c) 嵌入式诊断要求; d) 故障信息要求; e) 外部诊断测试要求。测试性定量要求一般包括: a) 故障检测率 FDR; b) 严重故障检测率 (CFDR); c) 故障隔离率 (FIR); d) 虚警率 (FAR); e) 故障检测时间 (FDT); f) 故障隔离时间 (FIT)。^[2]

1.2 试验验证方法

文献 [2] 对测试性试验评估的故障模式集的确 定、故障样本量的确认分配与补充、测试性指标的 点估计等方法进行了充分论述。

通常测试性试验验证方式包括直接试验验证和间接试验验证。

直接试验验证通过在装备上通过物理手段进行现场注入故障, 而且由于自然故障的信息量受限, 不足以支撑测试性试验验证的样本数, 因此大量的测试性验证试验样本都通过故障注入的方式, 通过人为制造的故障进行。这种故障注入方式也是目前国内外普遍采用的测试性试验手段, 评估方法和流程也比较成熟。如美军在机载火控雷达 APG-66 上进行测试性试验时, 即通过故障注入的方式验证了 1 398 个故障样本, 以验证评估雷达的测试性水平^[4]。

间接试验是在装备设计方案基础上，通过建立各类电路特性模型，通过分立元器件、电路、组件、功能模块、设备和系统的典型故障模式，故障传递路径，评价系统的测试性指标，目前尚处于起步阶段。

因此在装备的测试性试验中，主要采用直接试验方法，同时检查军标要求的定性要求和定量指标。故障模式集的确定、故障样本数量的确认分配与补充、测试性指标的点估计与置信下限等需根据装备的实际情况进行分析和确定^[3]。

然而随着武器装备的集成度越来越高，高速数字电路的大量应用，实际注入故障越来越难，风险越来越大。以数字相控阵雷达的数字 T/R 组件为例，其原理框图如图 1 所示，组件集成了射频信号产生、放大、接收、高速信号 A/D、多通道接收数据合成、光电转换、定时和控制等功能，电路模块功能非常复杂，集成度高，包含射频电路和高速数字电路。其典型的故障模式包括：输出信号小、通道之间幅度和相位不一致故障、高速串行数据时钟失效、控制信息帧不连续、光传输链路不一致等。这些故障模式采用传统的故障方式注入的后果是故障可能不能被恢复。为解决实际故障注入的难题，需采用非破坏性的等效注入故障方法^[5]。

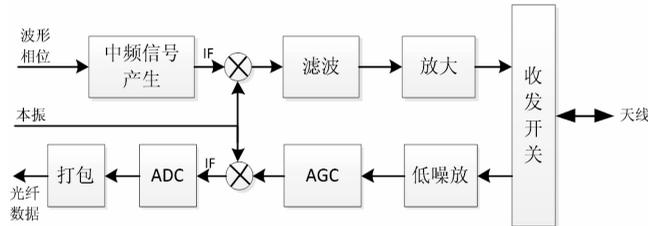


图 1 数字 TR 组件原理

1.3 测试性试验验证流程

测试性试验验证流程如图 2 所示。

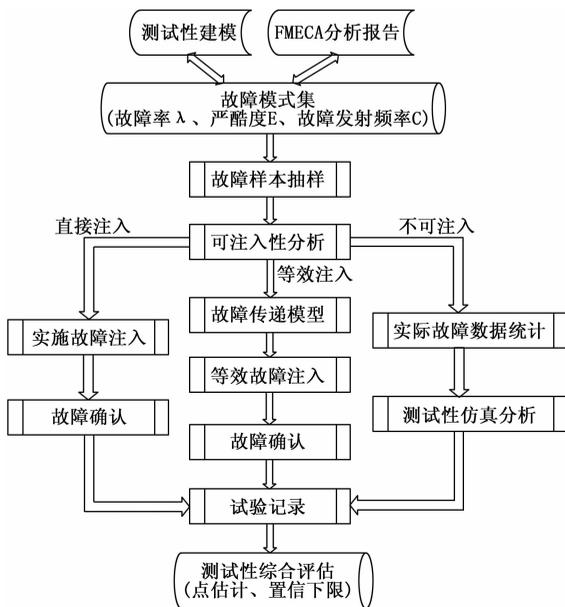


图 2 测试性试验验证流程

确定用于测试性试验验证的故障模式集（包括每个故障模式的故障率、严酷度、故障发生频率、故障影响等因素）；

2) 依据测试性指标分配和预计值，结合样本分配的数学模型、单元装机数、故障率、严酷度等因素，进行故障样本抽样；

3) 可注入性分析：对于抽样后的故障样本进行可注入性分析，决定是采用直接故障注入、等效故障注入或无法注入；

4) 直接故障注入：对可直接故障注入的故障模式，通过故障注入设备直接进行故障注入，并依据对功能、性能指标的测试进行故障确认；

5) 等效故障注入：对无法采用直接故障注入的故障模式，依据对故障模式的影响度和故障传递模型分析，采用等效故障注入和故障确认；

6) 对不可物理注入的故障模式，对联试、试验、试用过程中实际发生过的故障，采用统计、分析的方法记录，对从未发生过的故障，通过测试性仿真分析的方法模拟故障注入分析和记录；

7) 测试性综合评估，根据步骤 4) ~6) 中的试验进行记录，综合评估出测试性指标的点估计和置信下限。

2 硬件平台

一体化测试性试验验证平台从测试性设计数据、指标要求入手，分析系统、分系统、模块的各类故障模式，通过故障传递机理和故障注入的可行性研究，针对不同的故障模式，分别选择直接故障注入、或等效故障注入等方式进行故障注入^[6]。试验平台将故障注入功能和故障确认功能采用一体化设计，平台集成了故障注入设备、BIT 信息采集设备、故障诊断系统以及其它测试仪器，平台通过故障注入设备对雷达实物进行故障注入，并通过故障确认设备对故障注入的有效性进行验证，同时启动雷达的各种 BIT 方式，查看测试性对故障判定和隔离的结果，给出测试性指标的评估结论和改进建议。平台能确认故障注入是否成功，并包括试验策略生成、自动收集和分析试验数据、自动生成测试报告等功能^[7]。

一体化平台采用基于标准模块的通用化架构，软件采用构件化动态加载技术，实现试验验证平台的通用化和可扩展性，通过接口适配器的扩展和软件构件的动态加载，可以满足多型装备的测试性指标验证和评估。

2.1 硬件平台框架

验证平台满足装备装机环境的全仿真、工作总线与测试总线的融合，通过一体化设计，平台具备功能测试、性能指标测试、接口测试、故障注入测试、故障确认测试、测试性评估等项目的自动化、数字化和信息化。平台满足装备功能性能指标测试的全覆盖，用于故障注入后对装备功能性能指标偏离的故障确认测试，平台集成总线故障注入器、直接故障注入设备、等效故障注入设备、故障注入适配器等，通过辅助试验策略生成、雷达 BIT 信息采集、故障诊断与隔离等智能流程，实现测试性指标的智能化验证与评估。

1) 根据装备的测试性建模分析和 FMECA 分析报告，

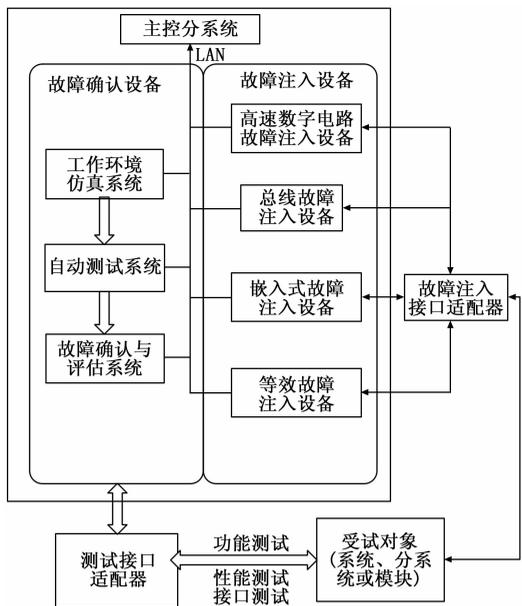


图 3 测试性试验验证平台硬件框图

2.2 故障注入设备

故障注入是测试性验证试验的关键步骤，故障是否成功注入到装备中直接影响到测试性验证指标的样本数和置信值。本文中采用的故障注入设备包括高速数字电路故障注入设备、总线故障注入设备、嵌入式故障注入设备等。

高速数字电路故障注入设备，给予边界扫描链路，通过扫描链中的测试访问端口进行访问和控制，并注入控制指令。在不改变被验证对象硬件状态和软件状态的情况下，将故障注入到电路中，实现大规模集成数字电路 FPGA 等器件的管脚或者管脚组合的电平状态（固高、固低、悬空）的故障模拟和注入。高速数字电路故障注入设备采用“CPU+FPGA”架构实现，CPU 作为核心控制器和通信中心，根据指令选择相应的边界扫描测试策略，FPGA 实现主要逻辑功能，测试结果通过 LAN 接口送到上位机。

总线故障注入设备，具有总线状态及数据的实时监测功能，使用中将该设备串接到被测装备中，可以准确地发现、隔离、定位总线中出现的故障，并能实时分析记录所有的总线数据，分析故障是否成功注入，支持 USB、1553B、ARINC429、RS232/422/485、CAN 等总线。

嵌入式故障注入设备，用于高速数字串行总线的故障模拟和故障注入，采用高性能 FPGA 芯片，实现高速数字串行总线的转接，在装备正常工作时，不影响其工作状态，确保高速串行总线的正常通讯和数据传输。故障注入时，利用 FPGA 可编程的特点，根据不同的故障模式，通过软件编程的方法，对嵌入式注入设备的 FPGA 芯片进行重新编程，以等效式预置故障，完成故障注入。

2.3 故障确认设备

故障确认设备是测试性验证试验成败的关键步骤，是故障是否成功注入的判据，也是反映装备故障模式及影响分析结果正确性的依据。本文中的故障确认设备包括工作环境仿真系统、自动测试系统、故障确认与评估系统。

测试性验证工作一般采用离线方式在试验室环境中开展，工作环境仿真系统用于仿真装备工作所需的控制、总线、射频、模拟、电源等信号的仿真，并可在上位机的控制下实时地将装备置于不同的工作方式，满足测试性试验验证的需求；自动测试系统由具备程控功能的测试仪表组成，采用基于 LAN 总线的架构，在故障成功注入后自动完成装备功能和性能指标参数的自动测试、故障检测、诊断与隔离，同时读取装备 BIT 自检的故障代码和故障信息，通过故障确认与评估子系统自动地将隔离结果与 BIT 自检结果进行比对，在大量故障注入样本的基础上自动完成测试性指标的评估。

3 软件平台

一体化试验验证平台软件采用层次化结构，包括以核心层的故障可注入性分析、测试性评估、故障传递模型、核心数据库为基础，通过以测试性建模和 FMECA 分析结果作为测试性输入，在可注入性分析的基础上进行故障注入，通过故障传递和功能性能测试进行故障确认，依据故障样本抽样方法、测试性指标估计等开展测试性试验，并通过优化策略和优化方法提出测试性优化方案。软件拓扑结构如图 4 所示。

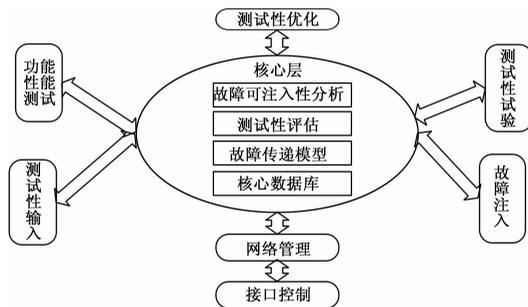


图 4 测试性试验验证平台软件拓扑图

3.1 软件功能

软件的主要的功能包括：

- 1) 功能和性能测试：基于工作环境仿真，自动完成雷达功能、性能指标的自动测试；
- 2) 故障注入：根据故障模式及传递模型，进行直接注入、注入设备注入或等效注入；
- 3) 故障确认：故障注入后，通过功能性能测试判定雷达功能性能的指标偏离，用于确认故障已正确注入，同时启动雷达 BIT，查看测试性对故障判定和隔离的结果；
- 4) 测试性评估与优化：根据测试性的结果，对测试性指标进行评估或优化。
- 5) 系统与数据管理：包括对操作员的账号、登录密码、权限、描述信息等方面的管理，保障系统的安全性和可管理性。

6) 系统状态监控：对系统中的测试资源进行监控，隔离故障仪器/模块，并记录故障信息；查询历次测试数据等用户可按编号、试验日期等关键字方式显示或打印测试结果、数据表格等。