

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306759

运载火箭电子设备测试性验证方法研究

汪芊芊 苏晗 林臻 王海涛 蓝鲲

(北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

摘要:装备测试性验证及 FMEA 分析传统按照单故障模式考虑,并采用抽样方法确定故障样本,并未考虑冗余模块的不同失效模式以及对故障模式的覆盖程度。针对运载火箭电子设备冗余功能验证需求、测试覆盖性需求等测试性验证需求和难点,在装备通用测试性验证方法基础上,提出冗余降级 FMEA 分析及故障覆盖率指标评估方法,形成了适用于运载火箭电子设备的测试性验证及评估方法,最后以某箭上电子设备为例进行了验证。结果证明,本文提出的冗余降级 FMEA 分析方法有效识别了运载火箭电子设备冗余模块的冗余性能降低和整体失效故障模式,并将冗余模块的故障模式纳入测试性指标评估,实现了测试性验证对于运载火箭电子设备冗余功能的考核;所提出的故障覆盖率指标评估方法及样本量补充方法有效提升了测试性验证对运载火箭故障模式的覆盖程度。本文方法适用于运载火箭电子设备的测试性验证及指标评估,并可推广至全箭电气系统。

关键词:测试性验证;冗余降级 FMEA 分析;故障覆盖率

中图分类号: TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510

Research on testability verification of launch vehicle electronic equipment

Wang Qianqian Su Han Lin Zhen Wang Haitao Lan Kun

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Testability verification and FMEA analysis of equipment consider single faults and use sampling methods to determine fault samples traditionally, without considering the different failure modes of redundant modules and the coverage rate of faults. Aiming at the requirements and difficulties of testability verification for launch vehicle electronic equipment, including redundant function verification requirements and testing coverage requirement etc., the functional degradation FMEA analysis method and evaluation method of coverage rate of fault modes was proposed on the basis of the general testability verification method of equipment, and a testability verification and evaluation method suitable for the launch vehicle electronic equipment was formed. An electronic equipment on the launch vehicle was taken as an example for modeling. The results proved that the method proposed in this paper effectively identified the redundant faults, and incorporate the fault modes of redundant modules into the evaluation of testability indicators. The faults of redundant modules were considered in the evaluation of testability indicators, and the verification of redundant functions of launch vehicle electronic equipment was assessed. The proposed fault coverage evaluation method and sample size supplement method effectively improve the coverage of testability verification for fault modes. It is suitable for testability verification and evaluation of launch vehicle electronic equipment, and can be extended to the electrical system of launch vehicle.

Keywords: testability verification; redundancy function degradation FMEA analysis; coverage rate of fault modes

0 引言

在当前高密度、高可靠、高效率的发射需求下,提高运载火箭的测试性水平成为提升运载火箭测发效率、降

低使用维护成本的有效途径,产品的测试性设计也是开展产品故障诊断的基础^[1-4]。同时,可重复使用运载火箭、智慧火箭^[5-6]等新型火箭的研制也对测试性提出了较高要求,运载火箭测试性水平成为关注的重点。

测试性验证及评估是评价产品实际测试性水平的重

要手段,针对测试性验证及评估方法的研究形成了很多成果^[7-15],测试性指标作为装备定型的依据,在航空、雷达等领域已经被纳入装备研制流程,在装备研制阶段或定型鉴定阶段开展专项测试性验证试验,评估装备测试性水平^[16-19]。现行装备通用测试性验证及评估方法及航空、船舶等领域装备目前采用的方法主要针对单故障模式开展分析及验证工作,即同一时刻只考虑一种故障模式发生的工况,不考虑多种故障模式的组合,底层元器件级的单一故障模式往往在向上一级传递的过程中,由于采用了元器件级的冗余设计、功能上的冗余设计,而导致该故障模式无法向上一级传递。通用测试性验证试验一般按照按比例分层抽样等方式确定测试性试验的故障样本,对于故障危害较大、较为关注的,但故障率较低的故障模式,往往无法被抽样,对这类故障模式的考核能力较低。

目前国内运载火箭领域对测试性验证尚处于摸索阶段,未形成规范有效的测试性验证及评估方法。在借鉴航空、雷达等相关领域的过程中发现,运载火箭的设计及使用模式有其自身特点,难以直接应用其他领域的现有方法,运载火箭十分注重可靠性设计,无论在器件级、单机级还是系统级均大量应用冗余设计,而目前测试性评估分析多采用单故障因素分析法,难以有效识别运载火箭冗余模块故障;且按照故障率进行分层抽样的方法难以抽取到故障率较低的故障模式,对于故障模式的覆盖程度较低。

本文针对运载火箭冗余功能验证需求、测试覆盖性需求等测试性验证需求,开展适用于运载火箭电子设备的测试性验证方案设计及其评估方法研究,并以某箭上单机为例进行了验证。实例证明,本文提出的测试性验证方法可有效识别运载火箭电子设备冗余模块的故障模式,并将冗余失效模式纳入测试性指标评估;所提出的故障覆盖性指标评估方法符合航天装备对测试覆盖性的质量管理要求,是检验运载火箭电子设备测试覆盖性的有效手段。

1 运载火箭电子设备测试性验证需求

1.1 运载火箭冗余设计对测试性验证的要求

故障模式及影响分析(FMEA)是分析产品可能的故障模式及其可能产生的影响的一种归纳分析方法,可分析得出产品的故障模式、故障影响、故障率等信息。FMEA分析结果是测试性试验的重要输入信息,试验方案、试验用例的设计均以FMEA分析的故障模式、故障原因及故障率数据为基础,因此FMEA分析的完整、合理及准确性在很大程度上决定了测试性试验验证的准确性与合理性。

FMEA分析方法一般按照自底向上的顺序,划分不同层级开展,对于运载火箭来说,包括板卡层、单机层、系统层、全箭层。从板卡层开始,参考文献[20]或领域内被认可的其他依据,梳理所有元器件相关故障模式、故障率,并分析其对单机层、系统层、全箭层的影响,同时梳理出针对该故障模式的检测手段;单机层的故障模式由板卡层的故障影响及板卡间接口的故障模式组成,以此逐层向上,最终形成全箭层故障模式及影响分析。

运载火箭为提升可靠性,从设计之初即采用了大量冗余手段,包括元器件级冗余,如控制类继电器串并联冗余设计;板卡级冗余,如箭上计算机内部集成多块CPU,对多块CPU运算结果进行冗余判别;单机级冗余,如单方向内设置多台速率陀螺,对陀螺输出结果进行冗余判别等。冗余设计可以实现一度故障下不影响火箭功能,是提升火箭飞行可靠性的重要手段,因此,对冗余功能的检查是运载火箭单机出所、火箭出厂前的重要测试项目,目的是确保箭上关键冗余模块在起飞前均正常工作,以确保飞行可靠性。

现有FMEA分析方法多采用单因素分析法,基于元器件的单点失效分析故障模式,不考虑冗余部件整体失效的故障模式。一方面,下一层级的冗余模块的冗余功能降低故障在自底向上的FMEA分析迭代中,由于未对上一层级造成显性的故障影响,因此冗余功能降低这类故障模式无法传递到上一层级;另一方面,单因素分析方法无法识别出冗余模块整体失效的故障模式。因此,如何识别运载火箭电子设备冗余失效故障模式并将其纳入测试性指标评估,是运载火箭测试性验证的难点和关键。

1.2 运载火箭测试覆盖性对测试性验证的要求

运载火箭的测试覆盖性指运载火箭各环节的各测试项目对产品功能、性能、接口、冗余及其他要求的测试覆盖程度。测试覆盖性分析工作从单机至分系统、总体逐层开展,对标任务书等技术文件要求,逐条分析产品/分系统/总体对设计要求的测试覆盖情况,在此基础上分析出全箭进发射场前的测试不覆盖项目、飞行前的测试不覆盖项目,并通过制定有效控制手段消除或降低测试不覆盖风险,是运载火箭质量控制的有效手段^[21]。

测试性针对故障模式开展工作,测试覆盖性针对正常功能、性能等要求开展工作,虽然测试性与测试覆盖性的出发角度不同,但二者殊途同归,最终均是为了通过各环节的测试项目实现对火箭是否可正常用于飞行的测试验证。而常规测试性验证多采用抽样方式在故障模式全集中抽取故障样本,对于故障率较低的故障,常无法被抽取到,其中存在的影响飞行成败的故障往往被忽略,难以达到对所关注的故障模式全部覆盖的效果,也不满足运载火箭全面质量控制的要求。因此,需要从指标体系制定和样本量抽取等方面,提升运载火箭测试性验证对故

障模式的覆盖程度。

2 运载火箭电子设备测试性验证试验方案设计与结果评估

针对运载火箭电子设备测试性验证的需求和难点,提出运载火箭电子设备测试性验证试验方案,如图1所示。试验整体流程与通用装备测试性验证流程一致:以FMEA分析结果为输入,根据测试性指标、置信度等要求确定初步样本量;并根据各故障的故障率、故障原因等进行样本量的分配、补充及故障样本库的建立;再结合样本量分配结果从故障样本库中选取相应数量的故障样本作为试验样本,确定各试验样本的注入位置、注入方法,制定试验程序,完成试验实施及结果评估。并针对运载火箭测试性验证特点和需求,从FMEA分析方法、故障样本选取方法、指标体系等方面提出优化方案。

测试性验证试验一般依托运载火箭散态产品实施,可在运载火箭工程研制初样或试样阶段开展,作为测试性指标评估的试验手段。

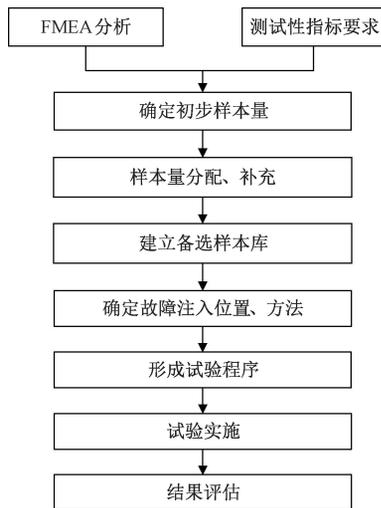


图1 运载火箭测试性验证试验流程

Fig.1 Testability verification process of launch vehicle

2.1 运载火箭电子设备测试性指标体系

为了提升运载火箭测试性验证对故障模式的覆盖程度,除传统的故障检测率、故障隔离率和虚警率外,本文提出“故障覆盖率”,作为运载火箭测试性指标体系的补充指标。故障检测率的计算考虑了各故障模式的故障率因素,更准确地模拟真实的故障发生场景,可准确评估产品的测试性水平;故障覆盖率关注测试项目设置对于故障模式覆盖的全面性,是结合测试性试验对传统运载火箭测试覆盖性的有效补充,可推进传统测试覆盖性由定性分析到定量试验验证的跨越。

1) 故障检测率

故障检测率(fault detection rate, FDR)指用规定的方法能够正确检测出的故障数与所发生的故障总数之比,其定量数学模型可表示为:

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

其中, N_T 表示实际发生的故障数, N_D 表示正确检测到的故障数。

2) 故障隔离率

故障隔离率(fault isolation rate, FIR)指用规定的方法将检测到的故障正确隔离到不大于规定模糊度L的故障数与检测到的故障数之比。其定量数学模型可表示为:

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

其中, N_L 表示正确隔离到故障隔离模糊度为L的故障数, N_D 表示正确检测到的故障数。

3) 虚警率

在规定的时间内发生的虚警率和同一时间内的故障指示总数之比,其定量数学模型可表示为:

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

其中, N_F 为真实故障检测数, N_{FA} 为虚警次数。

4) 故障覆盖率

故障覆盖率(fault coverage rate, FCR)指用规定的方法能够检测出的故障模式数与故障模式总数之比,其定量数学模型可表示为:

$$FCR = \frac{N_C}{N_M} \times 100\% \quad (4)$$

其中, N_M 表示故障模式总数, N_C 表示正确检测到的故障模式数。

2.2 冗余降级 FMEA 分析

针对运载火箭深度冗余设计的特点,以及通用FMEA分析方法难以识别出冗余故障的现状,提出冗余降级FMEA分析方法,针对冗余设计的元器件或单机等,设置冗余模块功能降级类故障模式,例如“XX主份功能丧失”、“XX备份功能丧失”、“XX冗余功能降低”;将冗余部分的故障传递至上层,实现对冗余故障模式的识别。同时针对具有冗余设计的模块(功能电路、单机或者系统),除由下一层级引入的冗余模块功能降级类故障模式之外,加入冗余模块整体失效的故障模式,避免传统单因素FMEA分析方法带来的冗余模块整体失效故障模式无法被识别的问题。

例如:两个电阻并联的电路分支,某一电阻断路,将带来“冗余功能降低”故障模式,两个电阻均失效,将带来“功能电路故障”故障模式。

2.3 样本量的确认、分配与补充

1) 初步样本量确定

运载火箭测试性试验属于成败型试验,即测试结果只分为测试通过和测试不通过,因此,选用基于二项分布的最低可接受值试验方案开展测试性试验。考虑接受概率及测试性指标要求值,按照式(5)确定开展试验所需的初步样本量:

$$\sum_{i=0}^c \binom{N}{i} (1 - R_i)^i R_i^{N-i} \leq \beta \quad (5)$$

其中, N 为样本量; c 为合格判定数; R_i 为测试性指标最低可接受值; β 为接受概率。

已知接受概率 β 及测试性指标要求值 R_i , 可由式(5)得到满足条件的多组样本量 (N, c) , 选取大于故障模式数 n 的样本量最小值作为初步样本量 N 。

2) 样本量分配

初步样本量确定以后,为了能够尽可能的模拟受试产品实际使用时发生故障的分布情况,以受试产品故障模式的故障相对发生频率为依据,采用按比例分层抽样方法进行抽样,从而得到各故障模式的样本量。具体分配方法见文献[22]。

3) 样本量补充

针对冗余模块整体失效的故障模式,由于整体失效多是由于冗余模块内的多个冗余组成部分同时失效,因此,整体失效故障模式的故障率呈指数降低,在样本量分配过程中按照比例分层抽样时,这类故障模式样本量为 0 的可能性较其余单点故障模式更高,然而这类故障模式造成的危害也往往很大,其被检测的需求也更高。

因此,本文针对运载火箭这一特点,从覆盖充分性的角度出发,对未被分配到故障样本的故障模式提出样本量补充原则:

(1) 仅对检测手段为待评估检测手段的故障模式进行样本量补充,对于无法采用各阶段测试手段进行检测的故障模式,不进行样本量补充;

(2) 补充样本量均为 1;

(3) 由于补充样本的故障率低,因此不参与故障检测率指标的计算,仅用于计算故障覆盖率,并可作为测试性定性要求分析的参考。

2.4 试验用例设计

样本量确定后,需根据 FMEA 分析结果对各个故障模式设计试验用例,指导试验实施。

故障样本库的建立用于确定注入各故障模式所依据的故障原因以及故障注入方式、注入成功判据、故障检测判据、故障隔离判据等试验因素。同一故障模式的故障原因若不止一个,则按照故障原因模拟注入由易到难对故障原因进行排序;若难以量化评估注入难度,则按照故

障原因对应的故障率由高到底进行排序,对应得到故障样本的排序,并按照如下方法选择故障样本:

(1) 如果受试产品某故障模式的备选故障样本总数大于分配的样本数量,则按照该故障模式对应的各备选故障样本的排序顺序选取故障样本,且每个故障样本只注入一次;

(2) 如果受试产品某故障模式的备选故障样本总数小于分配的样本数量,则按照该故障模式对应的各备选故障样本的排序顺序循环选取故障样本,每个样本的注入次数按照选取的次数进行累加;

(3) 试验用例的选择需考虑所关注的测试手段,如仅想获得 BIT 下的测试性水平,则只需选择测试手段为 BIT 的故障样本进行注入。

2.5 故障样本注入

故障样本注入指通过外部手段实现故障的模拟,使产品呈现预期的故障模式。故障注入操作对设备的影响应是可恢复的,不可对产品造成破坏性影响,不可影响产品的技术状态、功能性能。故障恢复后,应通过一定的测试手段确认产品恢复正常后再开展下一故障样本的注入。推荐的运载火箭故障注入方法包括:

1) 外部总线故障注入方法

在不对受试产品自身进行任何改动的条件下,在受试产品外部总线接口处,通过改变受试产品与其互连设备间的传输链路中的链路物理结构、信号、数据,实现故障的在线模拟或离线模拟。例如通过外部总线向产品发送指令,使产品处于离线状态,模拟产品失效。

2) 基于转接板或转接盒的故障注入方法

在受试产品内部各模块的接口间加入专制的转接电路板或转接盒,将内部信号引出,通过在转接电路板或转接盒上改变引出信号的通断、强度、形式等,实现故障的在线模拟或离线模拟。例如通过转接盒引出某一开关量信号,通过插拔转接盒上对应的接点模拟该开关量信号的断开和接通。

3) 拔插式故障注入方法

在确保不会造成不可恢复性影响的前提下,通过拔插元器件、电路板、导线、电缆、连接器等方式模拟产品故障,既包括设备的内部或者外部的连接组件(元器件、电路板、导线、电缆、连接器等)的拔出或插入,还包括器件的焊上或焊下。例如断开电阻、芯片的某一引脚。

2.6 指标评估

受试产品测试性试验的测试性指标的评估主要采用点估计和单侧置信下限估计的方法,两种方法的数学模型如下:

1) 点估计

$$\gamma = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \quad (6)$$

其中, γ 为故障检测率、故障隔离率、故障覆盖率的点估计值,故障覆盖率仅用点估计计算; M_1 为对于计算故障检测率来说,是用规定的方法正确检测到的故障数;对于计算故障隔离率来说,是用规定的方法正确隔离到小于等于 L (L 为故障隔离模糊度) 个可更换单元的故障数;对于故障覆盖率来说,是用规定的方法能够检测出的故障模式数; M_2 为对于计算故障检测率来说,是故障样本总数;对于计算故障隔离率来说,是用规定的方法正确检测到的故障数;对于故障覆盖率来说,是故障模式总数。

2) 单侧置信下限估计

$$\sum_{i=0}^F \binom{n}{i} R_L^{n-i} (1 - R_L)^i = 1 - C \quad (7)$$

其中, R_L 为故障检测率或故障隔离率的单侧置信估计下限值; C 为置信度; F 为故障检测或故障隔离失败的次数。

3 实例验证

安全控制器是实现火箭飞行过程中安全自毁、确保飞行安全的关键设备,是典型的运载火箭电子设备。本文以某型运载火箭安全控制器为对象,对其开展测试性

试验验证及评估。

1) FMEA 分析

采用冗余降级分析方法,依次开展安全控制器元器件级、功能电路级 FMEA 分析,共梳理得到 178 个功能电路级故障模式,并依据可靠性分析及可靠性试验数据,确定各故障模式故障率,形成安全控制器功能电路级 FMEA 分析结果,示例如表 1 所示,较传统 FMEA 分析方法多识别出 27 个冗余功能降级故障模式。可见,冗余降级 FMEA 分析方法可有效识别冗余模块功能故障。

2) 样本量的确认、分配与补充

选用基于二项分布的最低可接受值试验方案,确定初步样本量为大于故障模式数的最小值 180。采用按比例简单随机抽样方法,依据各故障模式的故障率进行样本量分配,有 59 个故障模式分得样本。对于未分配到样本量的 119 个故障模式,从覆盖充分性的角度出发,对非人工检测的 76 个故障模式开展样本量补充,抽取的样本与补充的样本共计 256 个。

3) 试验用例设计及实施

根据 FMEA 分析结果以及样本量分配结果建立故障样本库,共形成了 218 个故障样本,确定了其故障注入方式、检测手段等,示例如表 2 所示。无法实施故障注入的故障模式,通过审查确认是否可检测和可隔离。

表 1 安全控制器功能电路级 FMEA 分析示例

Table 1 FMEA analysis examples of safety controller on functional circuit level

功能电路名称	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度等级	故障检测方法	故障率
			对功能电路影响	对单机影响	对系统影响			
断电电路	断电冗余性能降低	K1B 触点粘结	断电冗余性能降低	断电冗余性能降低	安控器断电冗余性能降低	IV	人工检测	0.000 450 56
		K1C 触点粘结						
		K2B 触点粘结						
	无法断电	K1 线圈短路、断路 K2 线圈短路、断路	无法断电	无法断电	安控器无法断电	III	ATE	0.000 020 24

表 2 安全控制器故障样本示例

Table 2 Fault sample examples of safety controller

序号	故障模式	故障原因	故障注入类型	试验手段	注入成功判据	测试方法	检测指示/判据	样本量
1	断电冗余性能降低	K1B 触点粘结	插拔	将 K1 第 2 脚和第 4 脚短接	测试台发断电指令后,用万用表测量消反峰电路板 K1 第 2 脚和第 4 脚之间电阻小于 10 Ω ;	人工检测	测试台发断电指令后,用万用表测量消反峰电路板 K1 第 2 脚和第 4 脚之间电阻小于 10 Ω ;	1
2	无法断电	K1 线圈断路	插拔	将 K1 第 1 脚断开	测试台发断电指令后,用万用表测量消反峰电路板汇流条 2 与 K9 第 10 脚之间电阻小于 10 Ω ;	ATE	测试台发弹上断电指令后,测试台安控工作电压显示不为 0 V	1(补充样本)
3	箭上遥测起飞信号异常输出	K7 短路	插拔	将 K7 第 5 脚与第 8 脚短接	用万用表测量 153WY 连接器第 4、5 点之间电阻小于 10 Ω ;	ATE	测试台显示:弹上遥测起飞信号状态异常	1
4	起飞测试信号无法输出	K9 开路	插拔	将 K9 第 8 脚断开	测试台发起飞信号后,用万用表测量延时电路板 X3 第 47 脚与第 61 脚之间电压为 0 V;	ATE	测试台发起飞信号后,测试台显示:1553B 起飞状态异常	2
5	+5 V 无输出	GS1 开路	插拔	将 GS1 第 5 脚断开	用万用表测量测试电路板 C7 两端电压为 0 \pm 0.5 V;	ATE	测试台显示 1553B 通信异常	1

试验结果表明,初次分配的 180 个试验样本中,共有 92 个试验样本实现了故障检测(含通过审查确认的故障),覆盖 45 个故障模式,其中 79 个试验样本成功将故障定位到板卡级。在补充选取的 76 个试验样本中,共有 72 个试验样本实现了故障检测(含通过审查确认的故障),其中 65 个试验用例成功将故障定位到板卡级。将采用本文所述测试性验证方法得到的测试性指标评估结果与通用测试性验证方法进行了对比,如表 3 所示,可见:

1) 本文方法评估得到的故障检测率低于通用方法,主要原因是本文方法识别了冗余故障模式,而安控器单元测试设备对于器件级冗余故障的检测能力较弱,导致整体故障检测率降低;

2) 两种方法评估得到的故障隔离率接近,其中本文方法得到的故障隔离率略高,主要原因是可被检测到的冗余故障模式主要为冗余模块整体失效,此种故障模式较易被隔离。

3) 本文方法评估得出了故障覆盖率指标,反映了安全控制器测试台集成的测试项目可覆盖 65.73% 的故障模式,尚有 34.27% 的故障模式无法通过测试设备检测。

表 3 测试性指标评估结果对比

Table 3 Comparison of testability

	indicators evaluation results			%
测试性指标	故障检测率	故障隔离率	故障覆盖率	
本文方法	51.11	75.73	65.73	
通用方法	60.51	73.68	无	

综上,本文提出的测试性验证方法较通用方法,可有效识别出运载火箭电子设备冗余模块的冗余性能降低和整体失效故障模式,并准确评估了测试手段对于这类故障模式的故障检测和隔离能力;同时通过对样本量的补充以及对故障覆盖率指标的评估,提升了测试性验证对故障模式的覆盖程度,实现了测试覆盖性量化。

该方法对评估对象无特殊约束,同样适用于运载火箭系统级、全箭电气系统级测试性指标验证工作。

4 对运载火箭测试性设计的思考

1) 加强板卡、单机、系统级冗余设计,弱化元器件级冗余设计

冗余设计是运载火箭可靠性设计的重要手段,因此,运载火箭的测试性评估需覆盖对冗余功能故障的检测。传统运载火箭电气产品中存在大量元器件级冗余设计,而目前的测试手段难以实现元器件级的冗余检测,导致单机测试性降低,并带来全箭测试性的降低。因此,从测试性的角度考虑,相较于元器件级的冗余设计,更推荐进

行板卡级、单机级的冗余设计,板卡级、单机级的冗余设计较易设置测试手段,且便于在技术区、发射区的维修更换,也有利于提高运载火箭测试性水平。

2) 提升火箭 ATE 测试能力和 BIT 水平

复杂的 BIT 设计将导致箭上产品较无 BIT 设计的状态更为复杂,引入了 BIT 部分的可靠性、维修性等问题,也带来了 BIT 部分的故障模式。对于现役一次性使用运载火箭来说,增加 BIT 设计的费效比并不高。因此,现役火箭可结合地面设备升级改进,重点开展自动地面测试设备的设计,提升测试和诊断自动化程度,减少测试过程中的人工操作。

针对可重复使用运载火箭,火箭回收后再次使用之前,由于箭上产品的极性、软件状态正确性、电路设计正确性等均已在首次出厂及飞行中进行了充分验证,针对重复使用的场景,重点需对箭上设备自身的硬件功能、性能完好性进行测试。随着电子技术的发展,运载火箭箭上单机逐步采用总线架构,单机故障信息的自检、采集及上报更易实现,因此,针对可重复使用运载火箭,建议加强箭上单机 BIT 设计,并通过总线将 BIT 诊断信息下传至地面,辅助测发人员快速判断火箭健康水平。

3) 单机级测试性验证方法可推广至系统

本文以单机为例,开展了运载火箭测试性试验方案设计、实施及结果评估工作,验证了文中提出的测试性验证方法可行有效。此方法不区分单机或系统,电气系统也可视为一个巨型单机,系统内的单机可视为板卡或者元器件,同样可采用本文的方法开展测试性验证工作。因此,全箭电气系统级的测试性验证工作同样可采取本方法。

5 结论

本文针对运载火箭电子设备测试性验证的需求及难点,在装备通用测试性验证试验方法基础上,从指标体系制定、FMEA 分析方法、样本量选取方法等维度进行了优化完善,提出了一种适用于运载火箭电子设备的测试性验证试验方案及指标评估体系,并以某运载火箭安全控制器为例进行了验证,得出以下结论:

1) 通过冗余降级 FMEA 分析方法,可有效识别运载火箭电子设备冗余模块的冗余性能降低和整体失效的故障模式,并对此类故障的故障检测率和隔离率进行评估;通过对未抽样到的故障模式进行样本补充,可提升测试性验证对故障模式的覆盖程度,实现了测试覆盖性的定量评估,也更符合运载火箭的全面质量控制要求;

2) 本文提出的运载火箭测试性验证方法不仅适用于单机,也可推广至全箭电气系统,实现全箭电气系统测试性指标的评估。

参考文献

- [1] 王鸽,吴国新,刘秀丽. 基于 MADCNN 的故障诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 187-193.
WANG G, WU G X, LIU X L. Research on fault diagnosis method based on MADCNN [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3):187-193.
- [2] 辛佳雯,王睿,谢艳霞,等. 基于关键点检测的航空发动机螺栓安装缺陷自动化检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3):98-106.
XIN J W, WANG R, XIE Y X, et al. An automatic detection method of aero-engine bolt installation defects based on key point detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3):98-106.
- [3] 高洪青. 基于故障确认的一体化测试性试验验证平台[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11):249-251,279.
GAO H Q. Research on integrated testability verification platform based on fault identification [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(11):249-251,279.
- [4] 陈志会, 宁雷, 王鹏. 运载火箭助推器回收技术与启示[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(5):66-74.
CHENG ZH H, NING L, WANG P. The development of launch vehicle booster recovery technology [J]. Astronautical System Engineering, 2021, 5(5):66-74.
- [5] 岳梦云, 王伟, 张羲格. 人工智能在中国航天的应用与展望[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6):1-4.
YUE M Y, WANG W, ZHANG X G. Application and prospect of artificial intelligence in china aerospace[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(6):1-4.
- [6] ZHOU H, LI H M, QI G P, et al. Design for testability analysis and test plan optimization for launch vehicle[C]. Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (IEEE CGNCC 2016), 2016.
- [7] 孔令伟. 面向测试性试验的 FMECA 方法研究[J]. 河南科技, 2021, 4(1):9-12.
KONG L W. Research on the FMECA method suitable for testability test[J]. Henan Science and Technology, 2021, 4(1):9-12.
- [8] WANG L, LI Y, QIAN Y L, et al. A method of testability analysis and design based on FMEA extension[C]. 2017 IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2017.
- [9] 赵靖,吴栋. 测试性试验样本量按比例分层抽样补充分配方法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10):5.
ZHAO J, WU D. Research on supplementary distribution method of proportional stratified sampling for testability test sample size [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(10):5.
- [10] 王超. 虚实结合的测试性试验与综合评估技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
WANG CH. Testability test and integrated evaluation technology with virtual-physical test [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [11] QIU W H, LIAN G Y, LI H J, et al. Design and application of fault injection system for testability verification test [C]. Proceedings of 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019), 2019.
- [12] 杜熠,刘萌萌,宋成军,等. 面向复杂系统的测试性试验验证技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2):217-221.
DU Y, LIU M M, SONG CH J, et al. Research on complex systematic testability test verification technology [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(2):217-221.
- [13] 杨金鹏,连光耀,邱文昊,等. 装备测试性验证技术研究现状及发展趋势[J]. 现代防御技术, 2018, 46(2):186-192.
YANG J P, LIAN G Y, QIU W H, et al. Research status and development trend of equipment testability verification technology[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(2):186-192.
- [14] 张宇,程中华,连光耀,等. 基于霍尔三维结构的装备测试性验证试验框架设计[J]. 测控技术, 2023, 42(3):44-49.
ZHANG Y, CHENG ZH H, LIAN G Y, et al. Design of equipment testability verification test framework based on hall three-dimensional structure [J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(3):44-49.
- [15] LIU G J, ZHAO C X, QIN J, et al. Testability integrated evaluation method based on testability virtual test data [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(1):85-92.
- [16] 王东雷,胡泊. 舰载雷达测试性试验方法研究[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(4):15-18.
WANG D L, HU P. Research on testability test method of shipboard radar[J]. Radar & ECM, 2016, 36(4):15-18.
- [17] DOU K K, ZHAN M Y, LI Z, et al. Testability evaluation by multi-source bayes method applied in torpedo weapon system with improved jaccard similarity [C]. Conference Proceedings of 2021 4th international Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence (ACAI 2021), 2021.
- [18] 张艺琼,刘萌萌,宋成军. 基于离散程度分析的雷达系

- 统测试性试验方案设计方法[J]. 测控技术, 2020, 39(11):6-14.
- ZHANG Y Q, LIU M M, SONG CH J. Testability test scheme for radar subsystem based on measurement of dispersion analysis [J]. Measurement & Control Technology. 2020, 39(11):6-14.
- [19] 曾亮亮, 朱江雷, 张杰. 大型察打一体无人机系统级测试性试验技术与应用[J]. 测控技术, 2021, 40(2):7-12.
- ZENG L L, ZHU J L, ZHANG J. System level testability test technology and application of large recon/strike UAV Airborne System [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(2):7-12.
- [20] 电子设备可靠性预计手册: GJB/Z 299C-2006 [S]. 2006.
- Reliability prediction handbook for electronic equipment: GJB/Z 299C-2006[S]. 2006.
- [21] 张聪, 李森, 李新宇, 等. 面向运载火箭的测试覆盖性分析方法[J]. 质量与可靠性, 2017, 4(1):1-4.

ZHANG C, LI S, LI X Y, et al. A test coverage analysis method for launch vehicles[J]. Quality and Reliability, 2017, 4(1):1-4.

- [22] 维修性试验与评定: GJB2072-94[S]. 1994.
- Maintainability test and evaluation: GJB2072-94[S]. 1994.

作者简介



汪芊芊, 2014 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2017 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位, 现为北京宇航系统工程研究所工程师, 主要研究方向为运载火箭电气系统总体设计及测试性设计。

E-mail: lucky306@163.com

Wang Qianqian received her B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2014, M. Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 2017, respectively. Now she is an engineer in Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering. Her main research interests include electrical design and testability design for launch vehicles.