

一种通用测试系统故障诊断功能设计

张素明, 赵小卓, 张翔, 阎小涛

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 为了解决运载火箭测试过程中测试项目多、测试流程复杂、测试时间长的问题, 一般采用具有故障诊断功能的通用测试系统, 实现自动化测试; 通过综合分析运载火箭测试项目需求, 研究通用测试系统运行过程对故障诊断功能需求, 提出了一种通用测试系统故障诊断功能设计方案, 包括故障诊断的系统架构、线路诊断、测试平台自检、测试流程监测、故障定位, 以及信息应用等功能; 通过该故障诊断功能设计, 简化了测试项目, 实现了运载火箭的快速自动化测试、性能监测与状态评估, 保障火箭的安全可靠运行, 并可为维修决策提供支持。

关键词: 故障诊断; 通用测试; 信息应用

A Fault Diagnosis System Design for General Test Platform

Zhang Suming, Zhao Xiaozhuo, Zhang Xiang, Yan Xiaotao

(Beijing Astronautics System Engineering Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: As the pre-launch testing process is very complex and the number of critical parameters and fault modes in monitor are quite large, which brings command staffs a lot of burdens and pressures coming from fault diagnosis, a general test platform with fault diagnosis is used in launch vehicles' pre-launch testing process. By a requirement analysis of diagnosis function for the platform, a fault diagnosis system for the platform is proposed in this paper, including system architecture, BIT, process monitoring, fault location, and information application. With this intelligent function, a quick automatic testing system can be used in pre-launch testing process, and efficient auxiliary information can be provided for maintenance decision making.

Keywords: fault diagnosis; general test; information application

0 引言

随着火箭发射密度越来越高, 运载火箭在测试过程中将面临着测试准备时间短、测试人员少、使用环境恶劣等特点。在设计火箭的通用测试系统时, 往往可靠性要求高, 易于使用, 还可能不断需要不断改型与升级, 这就使得通用测试系统的复杂程度逐步提升。

美军第四代战斗机 F-35 的通用测试系统“洛马之星”(LM-Star), 是目前世界上最先进的自动化测试系统, 它通过智能化机内自测试(BIT)技术、一体化测试诊断技术、综合健康管理等, 实现整个武器装备信息资源的合理利用, 提高故障应急处理的准确性、全面性和自动化程度, 保障武器装备的安全可靠运行, 为维修决策提供支持。

在自动化测试技术、智能故障诊断技术以及数据可视化技术的基础上, 通用测试系统的故障诊断功能设计是实现运载火箭的快速测试、性能监测与状态评估的基础, 可以有效解决测试过程状态监测、故障快速定位、快速保障、信息化程度较低等问题。

1 功能需求分析

运载火箭从单机测试、总装出厂测试、技术区测试、发射区测试, 以及射前自检测测试等, 测试项目的综合程度逐步提

高, 对测试时间要求也越来越高。

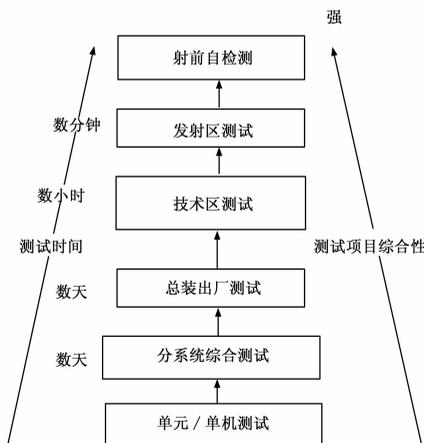


图1 火箭测试项目对比图

一般在技术准备区的测试时间要求为数小时, 从发射区测试到射前自检测, 测试时间要求为数分钟。随着测试项目综合性要求的提高, 测试过程必须通过减少测试操作和协调调度环节, 提高测试系统的智能化水平来实现, 这就对测试过程中的故障诊断提出了功能需求。综合分析测试过程的故障诊断功能需求, 主要包括以下几方面。

1.1 线路诊断

为了提高测试效率, 同时利用通用测试平台对各类测试接口和资源用以管理的优势, 可以将线路测试功能设计成自动化

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2016-02-15。

作者简介: 张素明(1984-), 男, 湖南常德人, 工程师, 主要从事运载火箭的信息应用、故障诊断与健康管理系统设计与技术方向的研究。

过程,一方面用于在对火箭设备加电测试前的测试接口连接状态的检查,确认测试接口连接状态的正确性,各设备连接的正确性检测和诊断;另一方面,在测试过程中,对线路在通电过程中的漏电监测,确保系统中不存在潜通路或异常通路的存在。

1.2 测试系统自检

通用测试系统自检功能主要完成对系统的硬件进行检测,实现的功能主要包括设备 BIT、总线检测、电源检测、存储器模块、AD/DA 模块检测等,同时测试系统自检测将上述的自检检测信息进行信息综合管理和应用。

1.3 实时状态监测

状态监测功能一方面用于对火箭在测试过程中的关键状态和检测参数进行智能监测,在发生异常/故障时提示系统进行报警或预警;另一方面用于对测试流程的实时监测,包含测试项、测试时序、测试覆盖性等方面,与标准测试流程进行对比分析,并给出测试结果的快速分析结果。

1.4 实时诊断定位

在火箭状态出现异常时,需实时进行故障检测与定位,为维修保障提供支持。故障诊断功能针对火箭状态和测试流程监测的异常信息,进行故障检测与定位分析,通过对箭上、地面故障的定位,实现对于箭上故障,定位到单机,对于地面设备,定位到板卡级,并给出故障可能出现的原因、位置和解决措施,辅助相关技术人员进行故障排查分析和后续维修。

1.5 火箭健康管理

火箭健康管理主要将火箭所有的测试信息进行综合管理与分析。火箭健康管理具体包括全寿命周期信息管理、包络分析、数据趋势分析、健康指标评估等,并根据分析结果实现对火箭多个维度的信息进行统计,对火箭进行发射评估。

2 故障诊断功能架构

故障诊断功能由线路诊断硬件模块、硬件设备检测模块、故障诊断服务器,以及相应的软件组成,功能架构与信息流如下图所示,其中:

1) 线路诊断硬件模块为独立的硬件模块,完成通用测试平台与火箭或被测对象的连接状态的检测和实时监测,包括线路连接的正确性,供电线路的漏电、潜通路监测等,将监测参数通过网络发送给故障诊断服务器;

2) 硬件设备检测模块为通用测试平台各硬件设备/板卡的故障检测功能相关硬件的统称,其存在于各硬件设备/板卡的硬件设计上,如测试主控板上的自检测功能模块、AD、DA 板卡的自检测功能设计等;

3) 故障诊断服务器用于运行故障诊断软件,实现故障诊断功能;

4) 故障诊断软件包括数据收发处理模块、故障诊断模块与数据可视化模块。其中故障诊断模块作为故障诊断的核心软件,负责测试结果相关的分析、诊断、评估等各种智能算法的后台实现,实时自动生成故障诊断报告。

3 故障诊断功能设计

3.1 线路诊断硬件设计

线路诊断硬件主要包括数据采集模块、矩阵控制模块和组

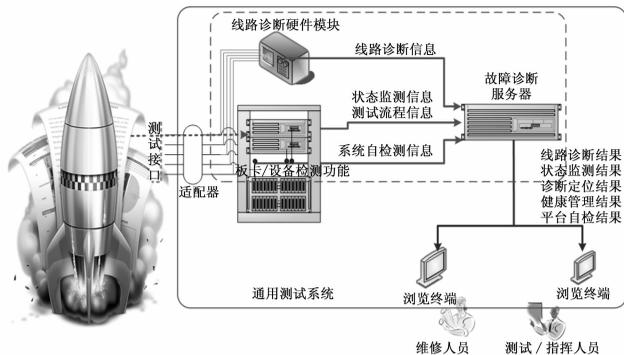


图 2 故障诊断功能架构与信息流图

合电源模块等,其中数据采集和矩阵控制模块统一由故障诊断服务器上的故障诊断软件进行调度,实现相应的线路故障诊断功能。

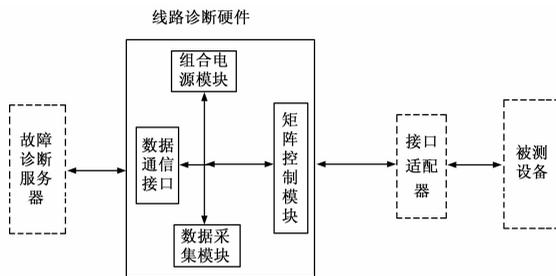


图 3 线路诊断硬件组成

故障诊断服务器上的故障诊断软件发送协议给线路诊断的硬件,线路诊断的硬件中开关矩阵控制模块根据协议进行译码,控制继电器开关矩阵,数据采集模块进行数据采集,将采集的数据传送给故障诊断服务器。

在数据采集模块中,设置了漏电监测模块。通常采用漏电表监测的方法,漏电监测的两种原理图如图 4 所示。左图所示方法的优点在于可连续监测,可使用单极性 μA 表,但面板上需二块表头指示。使用右图所示方法的优点在于使用双极性中间指令仪表、面板上用一块表头。

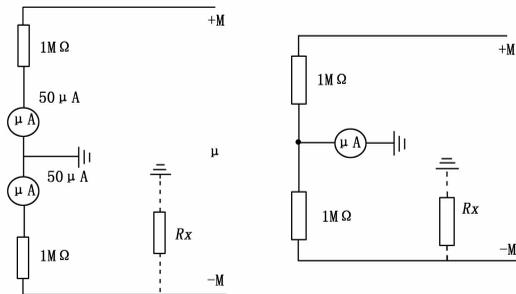


图 4 漏电监测方法示意图

3.2 测试系统自检设计

3.2.1 设备 BIT

针对具有 BIT 功能的测试设备,内部通过处理器完成自检测,并将自检测信息上报给故障诊断服务器。通用测试系统中 BIT 设备包括电源及配电设备、测试主控板、导航信号模拟板、服务器等。

根据软件知识库中预设的合格门限，对各设备的实时 BIT 数据进行上下限判读，连续三次超限则认为设备异常。

3.2.2 总线检测

在检测过程中，需监测总线系统的系统性能参数，包括总线负载、总线使用效率、总线利用率、延迟时间、平均等待时间、可靠性、信息传输的准确性（误码率和误字率）。

1) 总线负载：实际传输量与最大允许传输量之比值，包括数据和内部开销，反映系统的扩充余量；

2) 总线利用率：衡量总线上信息传输拥挤程度，即总线商信息传输时间与全部时间的比值，为支持系统扩展并防止总线堵塞，必须留有余量；

3) 延迟时间：在信源处信息启动时间与吸收点处执行时间的差值；

4) 平均等待时间：指非用期性异步消息的传送所等待的平均时间。

3.2.3 A/D、D/A、I/O 通路检测

A/D、D/A、I/O 模块检测用于 A/D 通道、D/A 通道、I/O 通道等检查。利用系统内部的信号激励源产生激励信号，通过 A/D、D/A、I/O 间信号相互的相互转化，进行模拟信号的采集、对比与确认（包括端口的信号、信号属性、属性范围），形成自检回路，完成该模块的检测校验等功能。

3.3 实时监测与故障诊断功能设计

为确保测试的准确性和安全性，测试阶段有一套严格的测试流程，按照流程，设备会发出一系列指令，根据指令各系统会执行一系列动作，并达到一定的状态。如果设备未能正常有序地完成流程中的各项工作，则有可能会影响火箭的正常功能，甚至是带来严重的安全问题。对于测试流程的智能监测与诊断，需要基于的各类测试参数综合进行分析，而且该流程涉及多个系统多个参数的时序关系与变化过程，因此适合采用专家系统集中进行监测与诊断。

通用测试系统能获得箭上所有测试数据和地面测试设备的状态信息，故障诊断功能通过运用多种诊断推理方法，实现对运载火箭多种类型故障的诊断和分析。多种诊断推理算法运行在诊断推理平台上，该平台是一种面向被诊断对象，用于建立和部署故障诊断应用的一种集成开发环境。诊断推理平台为多类型故障诊断提供通用的基础性信息平台；在此平台上，可针对不同类型故障，通过不同诊断推理方法、借助不同诊断推理知识来实施故障诊断推理。

对于测试过程出现的异常参数，采用故障定位算法，通过地面设备状态信息来隔离箭一地故障；对于箭上故障，对特定故障模式进行诊断定位，箭上定位到设备级。地面测试设备通过 BIT 测试，定位到板卡级。

诊断推理平台按运行方式分为实时运行子平台和开发维护子平台两部分，如下图所示。

一是实时运行子平台，包括推理中心、数据库、知识库、客户端和诊断算法插件，其中推理中心通过加载诊断算法插件、运用知识完成诊断推理活动，数据库用于数据存储，知识库用于诊断知识的存储。客户端统一完成故障信息的显示。

二是开发维护子平台，包括算法插件管理平台和知识管理平台。算法插件管理平台用于管理诊断推理算法和数据处理算

法；知识管理平台用于对多策略故障诊断所需的诊断推理知识进行统一的编辑与管理，并采用多种方式生成知识库，包括根据历史数据的知识挖掘来自动生成诊断推理所需的判据等。

当出现测试数据异常时，自动进入故障定位流程。

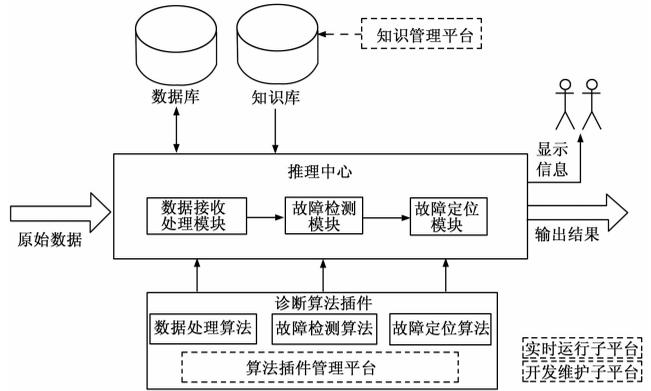


图 5 故障诊断推理平台架构

3.4 火箭健康管理功能设计

3.4.1 功能组成及信息流

火箭健康管理功能用于对火箭在使用与维护过程中累积的各类测试数据进行综合应用，支持的功能主要包括：

发射评估：实现对火箭的发射风险评估，对火箭运行状态满足发射要求的程度进行评估、综合评分，辅助指挥人员进行发射决策。

自主式维修保养：检测前，对各系统关键参数和关键功能单元的状态进行诊断与评估，给出需要重点关注的维修或测试项目建议以及需要的维修保养资源信息，实现火箭发射前的视情维修。

测试数据综合分析：按照用户设定的数据分析项目列表，自动对测试数据进行诊断、包络分析、趋势分析，分析结果最终以检测分析报告的形式呈现给用户。

健康信息定制推送：针对用户的特殊使用需求，对健康信息进行筛选、整理，将定制后的健康监测信息推送给用户，提高健康管理的灵活性。

功能组成与信息流如图 6 所示。

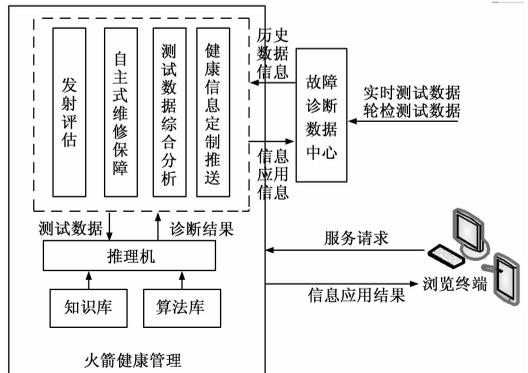


图 6 火箭健康管理功能组成及信息流

3.4.2 发射评估

基于 FMEA 及风险管理理论，对火箭在发射过程中的各

种失效模式进行风险分析,根据失效的频率度与严重度,计算出各种失效的风险指数,根据风险指数筛选出火箭的关键射前状态,并将关键射前状态分为否决项和减分项两类。发射前,对关键射前状态逐项进行诊断,根据诊断结果对装备运行状态满足发射要求的程度进行综合打分,列出存在的风险项及其风险指数,并给出最终的发射评估建议。

基于成熟的 FMEA 及风险管理理论,对火箭的发射过程进行风险分析,具体步骤如下:

- 1) 明确射前状态:明确发射前需要满足的射前状态;
- 2) 明确失效模式:针对列出的各项射前状态,确定其可能出现的失效模式;
- 3) 分析失效原因:针对各种失效模式,分析可能的失效原因;
- 4) 分析失效影响:针对每个失效原因,分析由该原因所引起的失效对发射的影响;
- 5) 计算风险指数:针对每个失效原因,根据该原因可能引起失效的频率度与造成影响的严重度,计算由该原因所引起失效的风险指数;
- 6) 筛选关键射前状态:根据各射前状态所对应失效模式的风险指数高低,筛选出火箭的关键射前状态;
- 7) 关键射前状态分类:根据失效的影响,从关键射前状态的失效模式中筛选出发射否决项,剩下的失效模式为发射减分项;
- 8) 打分采用百分制,对火箭进行射前评估打分。

3.4.3 自主式维修保障

对各系统的关键参数、关键功能单元进行故障诊断,并分析性能参数的变化趋势,评估功能单元性能退化所处的阶段,给出检测过程中需要重点关注的维修或测试项目建议,实现火箭的视情维修。针对需要重点关注的维修或测试项目建议,给出检测过程中所需的备件列表及备件的分布情况,以及相关的电子操作与维修手册、历史维修记录、故障模式信息等,实现火箭的先导式后勤保障。

3.4.4 测试数据综合分析

用户事先确定需要进行诊断、包络分析、趋势分析的参数范围,并提前录入好相关判据知识。测试完成后,故障诊断软件参照设定的参数范围,根据判据知识,自动完成相应参数的诊断、包络分析、趋势分析工作,并将分析结果按照指定报告模板,生成数据综合分析报告。用户可在维修保障资源管理中对分析报告进行统一管理。

故障诊断由多策略诊断推理平台实现,诊断策略选用基于专家系统的故障诊断。包络分析、趋势分析分别由包络分析功能、趋势分析功能提供接口来实现。

包络分析功能提供历史包络曲线生成与基于历史包络的数据分析两种服务。用户首先利用历史测试数据,生成参数的历史包络曲线,并统一存储管理。在数据分析过程中,用户可以利用生成的历史包络曲线,对参数在一段时期内的超包络、超设计域的情况进行统计分析。

趋势分析功能提供两种趋势分析服务,分别为:1)对正

常情况下处于稳态的参数出现的偏离其稳态的趋势变化进行检测分析;2)评估功能单元性能退化所处的阶段,即针对参数的趋势分析与针对功能单元性能的趋势分析。

3.4.5 健康信息定制推送

针对指挥人员、技术人员、维修人员的特殊使用需求,提供故障定制信息、参数定制信息、发射评估定制信息的定制推送功能,推送途径包括网络推送和北斗短报文推送两种,网络推送的信息用 B/S 浏览终端在信息应用中心客户端进行浏览,北斗短报文推送的信息由北斗便携式接收终端进行浏览。

考虑到北斗短报文传输设备对所发送短报文在容量及发送时间间隔上的限制,健康管理信息短报文应尽量通过编码的方式,将全箭故障信息进行统一编码管理,精简至单条短报文的数据容量范围之内。

4 试验结果分析

通过通用测试系统故障诊断功能设计和实现,实现了运载火箭全箭测试状态下的自动化测试过程,极大的简化了地面设备的综合试验过程,同时将全箭一次总检查测试的时间缩短 1/3。

通过线路自动诊断功能简化了试验中的地面设备准备过程,节省了传统人工线路检测时间。通过实时监测测试过程的状态数据,确保了测试过程的正确,测试参数的准确,以及测试过程的安全,减轻了测试人员的工作强度和压力,减少了实现现场数据判读人员。

同时,通过火箭的健康管理功能设计,增强了数据的综合应用,并与现有的综合保障信息化系统实现无缝衔接。

5 结论

本文针对通用测试系统的故障诊断功能需求,设计了线路诊断、测试系统自检、实时状态监测和诊断定位,以及火箭的健康管理功能。该故障诊断功能设计解决了:①测试前线路、硬件设备状态的快速自动检查;②测试过程状态监测和故障的快速定位;③测试后的数据综合分析和健康管理应用等影响测试效率的问题。

该功能设计与通用测试系统功能进行集成,共同形成故障诊断功能,在软、硬件设计上与通用测试系统相结合,该设计具有一定的通用性,可提升通用测试系统的自动化和智能化水平。

参考文献:

- [1] By ARINC. ARINC 608A Design Guidance for Avionics Test Equipment [S]. 1993
- [2] Stephen B. Johnson, John C. System Health Management Theory and Design Strategies [R]. AIAA 2011-1493, March 2011.
- [3] 彭刚峰,基于 NxTest 的军用自动测试系统研究 [J]. 航空计算技术, 2008 (2): 93-95.
- [4] 尚永爽,赵秀丽,孟上. 航空装备综合地面健康管理研究 [J]. 电子测量技术, 2010 (9): 110-113.
- [5] 赵宁社,翟正军,王国庆. 新一代航空电子综合化及预测与健康管理技术 [J]. 测控技术, 2011 (1): 1-5.