

雷达对抗装备软件测试系统的设计

顾滨兵, 张峰, 李军锋

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 专业化的软件测试评估平台是该类装备软件测试的重要支撑; 为了对雷达对抗装备的显控、信号处理软件等进行全面、系统、准确的测试考核, 在复杂电磁环境下雷达对抗装备及其附属软件试验/测试方法的基础上, 研究建立雷达对抗装备软件测试系统, 来提高信号逼真、供可调可控的测试环境以及专业化、精确化的信号输入; 通过复杂环境、软硬约束、特定方法等的分析研究, 提出雷达对抗装备软件测试系统的主要设计思想, 进行功能、性能设计, 并给出该系统的主要组成和初步设计方案; 利用提出的设计思想和方案, 开展相应系统的研制, 该系统提供包括测试环境模拟生成方法、被测件运行驱动方法、测试执行与数据采集方法和测评过程管理方法的测试应用, 为全面地考核复杂电磁环境下雷达对抗装备软件提供更为有效的测试方法和更加丰富的技术手段。

关键词: 复杂电磁环境; 雷达对抗装备; 故障注入; 测试场景

Design of Software Testing System Used on Radar Countermeasures Equipment

Gu Binbing, Zhang Feng, Li Junfeng

(91404 Unit of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Professional platform for software testing and evaluation is an important support of equipment software testing. In order to conduct comprehensive, systematic and accurate testing on the display and control software, the signal processing software in radar countermeasures equipment, a software testing system used on radar countermeasures equipment was established. The testing system provided signal lifelike, adjustable and controllable test environment, specialized and accurate signal input, based on the test method of radar countermeasure equipment under complex electromagnetic environment. In this article, while its main design thought was put forward, main functions were cleared, major component and preliminary design scheme were given, through the analysis and research on complex environment, soft and hard constraints, specific methods. The system was found by the proposed design idea and plan. The system provides the test application of the test environment simulation generation method, the test piece running drive method, the test execution and data acquisition method and the evaluation process management method. In future, the software testing system will provide more effective testing methods and testing means of the more rich in order to creating more comprehensive testing on radar countermeasures equipment software under complicated electromagnetic environment.

Keywords: complicated electromagnetic environment; radar countermeasures equipment; fault injection, testing scene

0 引言

雷达对抗是在雷达信号环境范围内夺取制电磁权的重要作战行动^[1]。现代战争中, 信息化武器及电子设备在战场上得到广泛使用, 众多电磁辐射体集结在一定的作战空间内, 辐射源目标信号混杂重叠, 各种电磁信号交织在一起, 形成一个复杂密集, 动态变换的电磁环境^[2]。

在这种环境下, 要对敌方雷达进行有效的侦察和干扰, 就必须要求我军雷达对抗装备能够在每秒几百万的密度、目标众多的复杂电磁环境下要有较好的适应性和优异的处理能力^[3]。随着软件技术的发展, 雷达对抗装备的控制、处理软件的比重大大增加, 已成为雷达对抗装备的中枢神经, 为了能达到当前的作战要求, 在一定的硬件处理环境

保障下, 主要是要通过软件去实现装备的各种控制和处理功能。因此雷达对抗装备所属软件的优劣在很大程度上也反映了该装备性能的先进性。

与此同时, 随着软件比重的增大和作用地位的提高, 软件质量问题已成为装备质量问题的“焦点”和“瓶颈”。经过大量工程实践证明, 软件测试是保证软件质量和装备效能的重要环节和有效手段。装备交付部队使用必须通过专业软件测评机构的软件测评, 对其附属软件的战技指标、功能、完备性、可靠性, 进行全面的考核, 目前软件测评正在逐渐从手工测试向自动测试过渡^[4]。对于雷达对抗装备, 只有建立一个信号逼真、可调可控的测试环境, 提供专业化、精确化的信号输入, 才能对雷达对抗装备的显控、信号处理软件等进行全面、系统、准确的测试考核, 为评价装备软件的产品质量提供依据。所以为更好地保证测试任务的完成, 必须要建立相应专业化软件测试评估平台。

1 雷达对抗装备软件测试系统概述

当前, 由于软件测评机构一般现有的软件测试手段不能

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-10。

作者简介: 顾滨兵(1978-), 男, 高级工程师, 硕士研究生学历, 主要从事软件测试、软件工程方向的研究。

提供复杂电磁环境信号数据对雷达对抗装备的注入,只能依靠手工操作或设备研制单位提供的调试设备输入比较简单的调试数据,极大地限制了各种软件测试方法的运用,而各种现有的测试手段、测试工具和装设备没有一个很好的依托平台结合起来供测试使用,对雷达对抗装备软件在复杂电磁环境下的决策、引导、资源分配等能力的评价不够系统准确。在这种情况下为了系统地提高雷达对抗装备软件的测试能力,就必须研制雷达对抗装备软件的测试系统。

雷达对抗装备软件测试系统是该类装备软件测试的重要组成部分,建立了一个完整的测试平台,能够模拟整个雷达对抗装备软件的运行环境、外界使用环境,人工和程序自动生成各类正常和异常数据,制定了一个适合雷达对抗装备软件的测试体系、手段和评估标准,可以极大满足装备软件测试的需求,提高软件测试的效率,节省大量人力和物力。

2 雷达对抗装备软件测试系统的主要设计思路

研究建立雷达对抗装备软件测试系统,首先要以雷达对抗装备软件为对象,分析装备软件测试对其测试环境、测试流程、测试手段以及测试方法的特殊要求。

1) 能否构建接近战场条件的雷达对抗电磁信号环境是系统设计成败的关键^[5]。由于雷达对抗装备软件未来面临电磁环境的复杂性、不确定性和恶劣性,必须考虑复杂电磁环境对被测软件的信息处理能力和环境适应性的影响,决定了软件测试必须建立相应的测试环境,模拟的测试环境从实时性到传输格式都尽量与实战状态一致^[6]。

2) 必须分析被测软件如何受相应电磁信号处理硬件和电子战方法的约束,考虑装备软件在应对作战体系中严格的软硬件条件和对应战术逻辑的约束条件下,如何提供正确行为和满足性能要求,采用的软件测试手段必须能够提供替代的运行平台,并模拟相关的约束关系;

3) 在一般测试流程和测试方法的基础上,还要分析雷达对抗装备软件相关联的其它系统对复杂电磁环境以及其它处理,考虑被测软件在作战体系中的协调性,软件测试必须提供各种正常、异常输入,拓展特定的测试方法。

雷达对抗装备软件测试系统在这些特定要求基础上,着眼于现有软件测试流程、测试手段、测试工具以及相关研制试验场所已有的复杂电磁环境生成及监测资源,综合软件测试的复杂电磁环境生成、测试用信号数据注入、被测软件运行驱动、测试工具资源集成、测试结果数据获取以及测评过程管理等各种手段和方法。

雷达对抗装备软件测试系统的主要设计思路是:雷达对抗装备软件测试系统针对雷达对抗领域内不同类型的被测软件,通过编辑、设置及组合各种电磁信号数据、作战系统仿真模块产生的虚拟命令数据和生成特定的有源/无源干扰资源库等,来提供丰富的故障注入、边界值分析等测试手段,并利用数据接口结合已有的通用软件测试工具(McCabe、TestBed、Crests)、虚拟靶场测试软件 VTR,以

及现有测控装备等,对雷达对抗装备软件(包括雷达侦察系统软件、雷达有源干扰系统软件、雷达无源干扰系统软件以及雷达对抗相关的显控系统、战术软件等)在复杂电磁环境下的战技指标、功能、性能、安全可靠性进行科学的测试,对雷达对抗战术决策软件给出的最优方案性能给出准确评价。

3 雷达对抗装备软件测试系统的主要功能设计

雷达对抗装备软件测试系统的主要功能被设计成:针对雷达对抗装备软件,提供信号注入式的软件测试手段,通过模拟各种体制的电磁脉冲信号,或通过回故事先录取的现场真实电磁环境信号,将它们合成以建立测试用的“实战电磁环境”,将这些环境信号以中频为主、数字为辅的方式注入被测雷达对抗装备软件,集成各种测试工具和手段对软件进行动态测试,着重于在高密度信号条件下,对软件的侦收处理能力、决策能力、干扰决策合理性、干扰反应时间、干扰效果等给出定性、定量的考核,并完成测试数据的录取、处理及软件质量的综合评价。具体包括:

3.1 电子对抗电磁环境录取功能

利用电磁环境录取器录取雷达对抗现场的真实电磁环境数据,存入电磁环境数据库。在生成测试环境时,数据库中的数据信号可与模拟产生的电磁环境信号一起合成电磁环境数据,被软件测试使用。

3.2 电子对抗电磁环境生成功能

根据被测电子战装备的功能与战技需求,利用模拟器产生多种有源探测装备、新体制雷达等各种复杂体制的电磁脉冲信号,并自动生成,或通过人机接口直接选定或现场编辑所需的多种雷达的工作方式、脉压类型、重频、脉宽等参数,通过设置雷达对抗场景,综合使用模拟产生的电磁脉冲信号和提取数据库中的现场电磁环境数据合成综合战场电磁环境态势数据,以中频或数字信号方式注入被测件。

3.3 干扰资源发送功能

设置、模拟并生成有源/无源干扰资源库,通过对库中相关信息的设定,来测试被测件的战术决策模块、干扰资源分配模块等,并向雷达对抗的综合显控系统发送有源/无源干扰资源的相关信息;

3.4 测试环境及资源配置功能

针对不同的被测件类型,包括雷达侦察系统、雷达有源干扰系统、雷达无源干扰系统以及雷达对抗相关的显控系统、战术软件等,进行测试环境配置,调整模拟器资源,建立可供被测件运行和测试相配套的软件测试平台和提供相应的支持数据。

3.5 测试数据注入及综合测试功能

通过各种输入数据的设置和组合,综合利用各种测试方法(如等价类法、环境设定模拟、外部数据注入、人工故障注入、边界值分析^[7]等),并结合各种测试工具完成软件的功能、性能测试,特别是将这些方法和工具配合起来进行覆盖率测试、边界测试、安全性可靠性测试等,例如在各种数据输入条件下运行被测件并结合 McCabe 软件进行

覆盖率测试; 利用通用的测试工具 LoadRunner、各种调试助手作为数据驱动工具实施功能、性能测试^[8]; 提供数据接口, 利用现有的 VTR 软件, 对被测系统的雷达对抗过程进行仿真和推演; 通过开发与复杂电磁环境监测系统的相应接口, 可视化监视设置的电磁环境态势, 供测试使用等。

3.6 测试数据生成功能

当测试信号利用本系统多功能通用接口注入到被测设备后, 测试系统就能通过相应接口提取到被测设备的处理结果, 生成测试数据, 对测试数据进行记录、整理、分析和处理。

3.7 测试数据总结及评价功能

在测试数据的基础上, 对被测件的战技指标、功能、性能、可靠性等软件质量结合军用软件质量特性并依据一定的准则和处理算法进行评价, 得出综合结论。

4 雷达对抗装备软件测试系统的组成及设计方案

雷达对抗装备软件测试系统由复杂电磁环境合成及场景编辑系统、测试构建支持系统、测试数据录取处理系统、被测件质量评价系统和通用接口模块组成。其中复杂电磁环境合成及场景编辑系统包括多模式高性能复杂电磁环境模拟器、DDS/AWG 中频发生器、环境编辑合成及数据注入模块、通用雷达对抗电磁环境录取器、雷达对抗电磁环境数据库。测试构建支持系统包括综合显控与测试平台构建模块、作战系统仿真模块、有源/无源干扰资源、编辑人机接口、人工设置接口、复杂电磁环境模拟器。测试数据录取处理系统包括 VTR McCabe Crests for DSP 其它软件测试工具、电磁环境监测系统。被测件质量评价系统包括被测件质量评价、测试数据录取。该系统组成框图如图 1 所示。

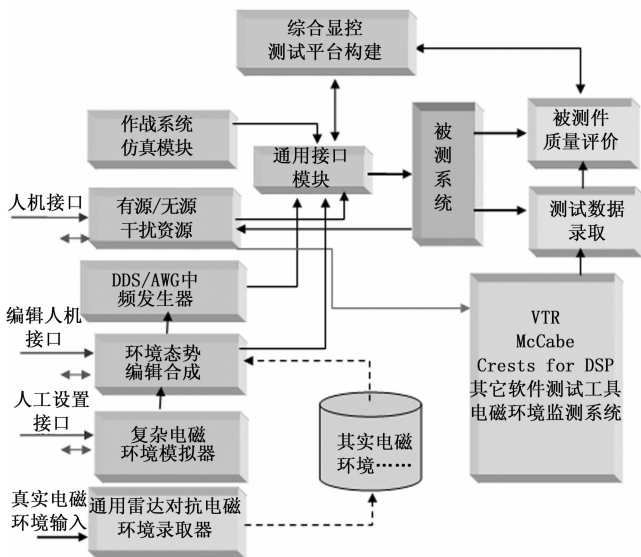


图 1 雷达对抗装备软件测试系统组成框图

4.1 多模复杂电磁环境模拟器

该设备是雷达对抗装备软件测试系统的关键组成部份, 由主计算机模块、高速信号发生与处理模块 (SPU)、时序控制模块、网络与高速数据通信模块、人机接口模块等组成。该模块的工作可受控于主控台的工作指令, 或采用自备式工作启动方式。模拟器缺省状态下具备 8 种常用测试

电磁环境, 当主控台给出电磁脉冲密度要求、以及别的一些工作要求时, 模拟器会自动选择相应的工作模式开始工作; 另也可按人工干预的指定模式工作, 当模拟器一开始工作, 其相应工作状态和电磁环境的标准值都可能通过网络通告“性能评估模块”, 供评估模块完成对被测系统的测试、评定工作。

现有雷达信号 (PDW) 数字模拟技术和中频产生技术能以数字信号方式和中频注入形式为雷达对抗装备软件测试提供多批次、宽频段、高密度、多体制、逼真、动态威胁信号的仿真电磁环境, 能够很方便地进行参数加载、卸载、编辑等功能, 并控制开关单部或多部信号。若测试要求发生变化时, 可通过人机接口, 重新配置、编辑新的电磁环境, 重新构建新“环境”, 首先要根据新环境的要求从数据库中调出满足工作要求的相应雷达、通信、干扰源, 并调配到一定数目, 没有满足的类型还可新建并增加。然后再根据需要对数据库中某雷达、干扰源、通信基站的细微特征进行编辑调整, 比如脉冲类型、工作模式、脉冲特征、PRI 等技术指标, 一旦设置完成, 需重新存库, 这样“模拟器”又增加了一种新的辐射源和你编辑的工作环境, 供测试使用, 并且以后也可随时调用。

4.2 环境态势编辑合成

该模块是雷达对抗装备软件测试系统能采用“真实电子战场电磁环境”进行测试、评估的关键设备, 他的主要功能就将真实电磁环境数据库的数据转换自己系统能用的时序 PDW 数据流供测试用, 另外它还能够将“多模复杂电磁环境模拟器”产生的测试信号与真实环境的电磁信号按准确的时序关系组合在一起构成测试系统所需的特定电子战电磁环境供系统使用。该设备与“多模复杂电磁环境模拟器”并列由主控台控制具体使用哪一个装备。该模块能够使本测试系统对被测装备在非实战环境下就可得到有效的测试与评估。

4.3 通用接口模块

因模拟器的 PDW 数据流将采用通用的超高速 LVDS 接口, 但因不同的被测设备都有各自的控制时序逻辑和并口/串口, 为了能完成被测装备与“仿真评估系统”方便、顺利对接, 特别研制该“通用接口模块”在不动任何硬件的情况下, 就可以方便的用留给用户的通用编程接口将模拟器与被测装备接到一起, 最终完成测试评估。

4.4 作战系统仿真软件

作战系统仿真软件是电子对抗装备软件测试系统的外围驱动数据来源, 根据作战系统的主要流程和工作原理, 对一般作战流程和相关接口关系、以及接口时序进行一定的模拟。涉及作战系统与电子对抗系统的接口复杂, 必须借助相关仿真软件等自动化测试手段才能进行全面细致的测试。

4.5 测试数据录取及处理分系统

测试数据录取及处理分系统主要负责录取、整理、分析、处理所有雷达对抗装备软件测试系统产生的数据, 并完成数据的格式转换, 形式化表示等, 要求具有合理有效

的处理方法、直观多样的显示形式和丰富的输出格式。由于采取自动化的数据录取,可以长时间纪录有效数据,便于捕捉被监控的数据曲线发生突变的地方一拐点,这一点往往就是饱和点或性能瓶颈^[9]。

4.6 被测件软件质量评价分系统

被测件软件质量评价分系统是本系统的重点也是难点,它从雷达对抗装备软件的战技指标、功能、性能入手,重点考察雷达对抗装备软件在复杂电磁环境下的行为和质量,本软件测评机构在“舰艇作战指挥系统技术应用软件测试和评估方法”、“舰载电子战系统软件测试和评估方法研究”等工作的基础上,开展软件质量评价方法的研究,并将成果应用到该系统。

雷达对抗装备软件测试系统在以上主要设备及软件的基础上,利用综合显控及测试平台构建模块针对不同的被测件,调整相应的测试环境和测试资源,配置与测试工具及其它装设备的相应接口形成测试平台,通过编辑、设置及组合各种电磁信号数据、作战系统仿真模块产生的虚拟命令数据和有源/无源干扰模拟器生成的模拟数据等以丰富的测试手段如故障注入、边界值分析、大数据量模拟,来对我军新研的雷达对抗装备软件在逼近真实的复杂电磁环境下的战技指标、功能、性能、安全可靠进行科学的测试,通过测试数据录取处理系统完成对测试数据的录取处理,使用被测件质量评价系统对被测件的软件质量,根据一定的准则和处理算法给出评价结论。特别是针对雷达侦察系统,该系统提供注入式的测试手段,利用复杂电磁环境模拟器模拟产生多种有源探测装备、新体制雷达等各种复杂体制的电磁脉冲信号,利用通用雷达对抗电磁环境录取器提取试验、训练等现场的“真实雷达对抗现场电磁环境”数据,并存入电磁环境数据库,通过环境编辑合成及数据注入模块设置“雷达对抗场景”,将这些电磁环境数据以不同的组合方式合成建立非现场“实战电磁环境”,并以中频方式为主、数字信号方式为辅注入到被测件,可以极大地丰富测试手段,增强测试能力,提高测试效率。

4.7 主要性能设计

1) 构造测试环境中的可仿真雷达类型应包括:常规脉冲雷达、线性调频雷达、非线性调频雷达、捷变频雷达、重频参差及抖动雷达、连续波雷达等;

2) 可仿真的雷达部数应不小于 200 部;

3) 操作反应时间应不大于 3 秒;

4) 显示刷新时间应不大于 2 秒;

5) 干扰样式应至少包括:噪声干扰、欺骗干扰;

6) 至少提供错误格式、超边界数据的异常报文输入手段,对雷达各参数具有边界数据、异常数据的模拟能力;

7) 软件质量评价应至少建立 3 层 30 个度量元以上的评价体系。

5 雷达对抗装备软件测试系统的应用

雷达对抗装备软件测试系统提供主要包括测试环境模拟生成方法、被测件运行驱动方法、测试执行与数据采集

方法和测评过程管理方法的测试应用。

1) 建立测试环境模拟生成及信号数据注入方案,综合利用内外场试验资源、软件测试资源、研制单位相关模拟仿真资源产生多种有源探测装备、新体制雷达等各种复杂体制的电磁脉冲信号,录取雷达对抗现场的电磁环境数据,存入电磁环境数据库,通过设置雷达对抗场景,综合使用模拟产生的电磁脉冲信号和数据库中的现场电磁环境数据合成综合战场电磁环境态势数据,注入被测件;

2) 针对不同被测件类型包括雷达侦察系统、雷达有源干扰系统、雷达无源干扰系统以及雷达对抗相关的显控系统、战术软件等,建立测试环境配置及资源调整方案,建立可供被测件运行和测试相配套的平台驱动方法;

3) 建立针对复杂电磁环境下雷达对抗装备软件的各种测试方法如等价类法、环境设定模拟、外部数据注入、人工故障注入、边界值分析等,建立已有测试手段、测试工具、测试资源的集成方法,进行覆盖率测试、边界测试、安全性可靠性测试等,建立测评数据采集机制和录取方法;

4) 结合软件测试平台以及通用测评的相关要求,建立一整套测评过程管理的配套方法能够进行测试要求管理、测试场景设置、测试方案及资源配置、测试用例管理、测试结果管理,并能根据测试策略(自顶向下或自下而上)灵活调整测试流程以及对文档、被测件的控制等。

本系统采用了雷达信号(PDW)数字模拟技术以视频注入形式为雷达对抗软件测试提供多批次、宽频段、高密度、多体制的数字环境,能够方便的进行参数加载、卸载和编辑功能,并控制参数格式和数据进行故障注入,与以往系统相比,结果如下:

1) 以往只是单纯模拟信号,当前将模拟的信号与实际信号混合,形成更为逼真的环境;

2) 可仿真的雷达部数从 120 部增加到 200 部;

3) 增加非线性调频雷达、连续波雷达等体制雷达的模拟;

4) 嵌入了常用的软件测试工具如 LoadRunner、McCabe 等;

5) 系统的操作响应时间和显示刷新时间均 <1.5 秒;

6) 基本形成了从场景设置到结果输出的全测试过程的文档生成和数据显示;

7) 建立 4 个层级,73 个度量元的软件工程质量评价体系及相应的计算。

6 结束语

本文以雷达对抗装备软件测试为对象,在复杂电磁环境下雷达对抗装备及其配属软件试验/测试方法的基础上,研究建立雷达对抗装备软件测试系统。采用专业化的软件测试平台,连接相应的信号模拟设备,在系统平台规划下,能够按照设定的战情,为被试雷达对抗装备提供逼真的动态信号环境^[10],对雷达对抗装备软件在模拟仿真条件下进行考核的同时,使用该系统组成更为合理的软件测评过程、

更为丰富的软件测试手段、更为有效的软件测试方法^[11], 系统全面地考核复杂电磁环境下雷达对抗装备软件的战术技术性能。

参考文献:

[1] 张澍范, 宛东生, 黄岩泉. 雷达对抗战术发展趋势浅析 [J]. 电子对抗技术, 2002, 17 (5): 3-7.

[2] 李兵舰, 吴小强. 现代雷达侦察技术特点及发展方向 [J]. 舰船电子对抗, 2007 (1): 19-20.

[3] 刘丽明, 黄文亮, 孙璐璐. 海战场复杂电磁环境构建方法 [J]. 舰船电子对抗, 2010 (4): 15-17.

[4] 陆海翔, 姚龙海. 雷达对抗侦察装备自动测试中的界面识别研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1889-1891.

[5] 贺彬, 韩英永, 崔瑞. 雷达对抗电磁环境建模与模拟软

(上接第 51 页)

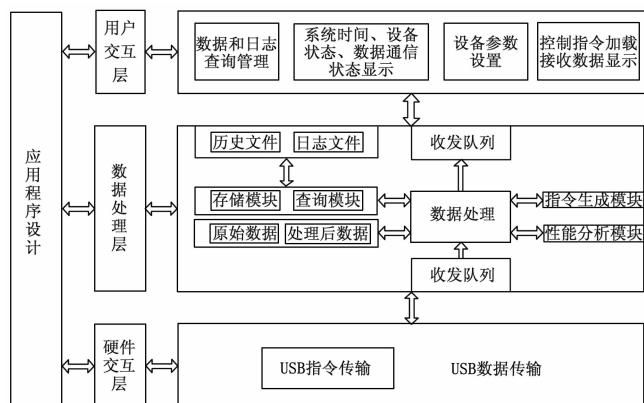


图 9 应用程序设计

- 2) CPU: 酷睿 I7-4790K.
 - 3) 内存: DDR3 8GB.
 - 4) 硬盘: 三星 512 G 固态硬盘.
- 测试结果见表 2。

表 2 测试结果

数据传输速率	软件实时处理		测试数据量	测试结果
	分包	比对		
100Mbps	有	有	200GB	无丢帧
200Mbps	有	有	200GB	无丢帧
400Mbps	有	有	200GB	无丢帧
800Mbps	有	有	200GB	无丢帧
1000Mbps	有	无	200GB	无丢帧
1000Mbps	有	有	200GB	偶尔丢帧
1200Mbps	无	无	200GB	无丢帧
1200Mbps	有	无	200GB	偶尔丢帧
1300Mbps	无	无	200GB	偶尔丢帧

测试平台测试结果如表 2 可以看出, 该测试平台具备数据收发、数据存储以及数据实时比对功能, 在开启软件实时分包、比对模式下, 数据的实时存储速率最大为 800 Mbps, 在关闭数据实时比对功能后, 数据实时存储速率最大为 1

件设计 [J]. 河北科技大学学报, 2011, 32 (S1): 38-41.

[6] 王玉祥, 张忠华. 海上测量船测控软件测试系统研究与应用 [J]. 遥测遥控, 2005, 26 (1): 1-4.

[7] GJB/Z 141-2004 军用软件测试指南 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部批准, 2004.

[8] 韩新宇, 何伟, 张凯. 基于 LoadRunner 自动化应用程序接口的舰船装备软件测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 163-166.

[9] 朱少民. 全程软件测试 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

[10] 陈行勇, 雷国强. 雷达对抗装备一体化试验设计框架电子信息对抗技术 [J], 2012, 27 (4): 61-64.

[11] 李强, 许少华, 范哲, 等. 电子对抗装备软件的测试策略与方法 [J], 装甲兵工程学院学报, 2004 (2): 48-52.

Gbps, 在关闭分包功能后, 数据实时存储速率最大为 1.2 Gbps 数据传输过程中无丢帧现象出现。由此可以看出, 该测试平台能够可靠的进行数据传输, 能够满足设计要求。

5 结论

本文设计并实现的基于 USB3.0 的小型化通用测试平台, 以其灵活、可靠, 成本低, 性能优越的特点, 可应用在卫星、船舶、导弹、火箭等领域的地面测试、控制, 高速数据存储, 回放, 分析等设备。目前, 该方案已经成功应用在多个型号的固存测试设备中, 具备广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 梁晓芬. USB3.0 超高速数据采集卡的设计与实现 [D]. 西安: 中科院西安光机所, 2014.

[2] 代月松. USB3.0 在存储测试系统中的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.

[3] 兀颖. 基于 USB3.0 的数据采集系统设计 [D]. 西安: 中科院西安光机所, 2013.

[4] 徐文波, 田耘. XILINX FPGA 开发实用教程 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[5] 薛园园, 赵建领. USB 应用开发宝典 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.

[6] Cypress Semiconductor. GPIF II Designer Guide [Z]. 2011.

[7] 陈莹. 基于 USB 的数据采集系统研究与设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2011.

[8] 程仁涛. 基于 FPGA 的 DDR3 控制器的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[9] 武刚. 基于 USB 的数据采集系统设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[10] 岳奎, 刘少君. USB 协议下的 PC 机与 FPGA 数据通信 [J]. 微型电脑应用, 2009, 25 (12): 46-52.

[11] 张聪. 基于 USB3.0 设备控制器的固件设计 [J]. 电子器件, 2013, 36 (3): 384-388.

[12] Cypress CyAPI Programmer's Reference [L]. <http://www.cypress.com> 2010.