

基于 FPGA 的火箭多种通讯总线故障注入和自动诊断系统的设计与实现

闫淑群, 张鹏, 罗宇辉, 陈二雷, 张言

(西安现代控制技术研究, 西安 710065)

摘要: 在火箭研制过程中需要对火箭制导控制部件进行故障注入, 模拟弹上总线通讯故障, 进行研究性测试; 对总线通讯质量进行测试验证, 提出一种面向火箭的多种类型总线故障注入和自动诊断系统; 故障注入板卡为制导控制部件提供多种类型总线信号的物理层的断路故障注入、短路故障注入、串行阻抗故障注入、并行阻抗故障注入; 设计了基于 FPGA 的体系架构, 构建了测试系统; 论述了故障注入、诊断系统的工作原理、系统体架构和硬件设计, 并阐述了故障注入、故障诊断方法实现; 试验表明该诊断系统通过故障注入, 能够模拟物理线路中的一些故障, 对系统的稳定性和鲁棒性进行检测; 对火箭联试测试过程中的总线通讯自动全面评价, 并给出定量测试分析结果的诊断报告。

关键词: 故障注入; 总线诊断; FPGA; 导弹武器系统

Design and Implementation on Fault Injection and Automatic Diagnosis System for Multiple Communication Buses of Missiles and Rockets Based on FPGA

YAN Shuqun, ZHANG Peng, LUO Yuhui, CHEN Erlei, ZHANG Yan

(Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the process of missile development, it is necessary to inject faults into missile guidance control components, simulate communication faults on missile bus, and conduct research testing; By testing and verifying the quality of bus communication, a multi type bus fault injection and automatic diagnosis system for missiles and rockets is proposed. The fault injector provides various types of bus signals for guidance and control components, including open circuit fault injection, short circuit fault injection, serial impedance fault injection, parallel impedance fault injection in physical layer. An architecture based on FPGA is designed, and a testing system is built. The working principle, system architecture and hardware design of the fault injection and diagnosis system are discussed, and the fault injection and fault diagnosis method is implemented. Experimental results show that the diagnosis system can simulate some faults in physical circuit through fault injection and detect the stability and robustness of the system; It evaluates the quality of bus communication automatically and comprehensively during missile testing, and presents the diagnosis report of quantitative analysis.

Keywords: fault injection; bus diagnosis; FPGA; missile weapon system

0 引言

为了对武器发射分系统的可靠性进行充分的检测, 往往需要模拟各种异常的情况, 以此来检测被测设备对于异常情况的处理^[1]。故障注入平台可用于高稳定、高可靠性产品的调试、测试和验证过程。通过模拟系统在运行过程中可能出现的异常来实现火箭产品的故障模拟、故障定位和故障分析^[2]。故障注入和自动诊断系统主要用于向待测系统注入各种预先设定的故障模式, 根据被测试系统的响应快速诊断系统中可能存在的缺陷。当某制导控制部件出

现通讯故障时, 之前使用高速示波器采集并分析 RS422、CAN、1553B 等总线的电气特性和协议层参数, 排查过程存在测试环节复杂、分析不够全面、对测试人员的电气专业水平要求较高, 测试周期长, 面临多种多样的潜在技术风险等弊端, 缺少一种量化诊断武器系统总线通讯鲁棒性和考核总线通讯的工作边界的测试系统^[3]。目前国内外实现故障注入主要有两种方式: 一是被测系统通过软件测试系统进行信号注入; 二是通过专用的电阻箱、程控电源等提供电气层的故障注入。前者主要应用在软件协议层故障

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-12-27。

作者简介: 闫淑群(1980-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 闫淑群, 张鹏, 罗宇辉, 等. 基于 FPGA 的火箭多种通讯总线故障注入和自动诊断系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 65-70.

方面,实现过程包含软件系统的多个环节,无法模拟硬件数据链路层的故障。后者对总线类型选择、故障模式、故障类型、故障注入参数,设置时序控制和数据流等软件算法无法提供测试条件^[4-5]。因此针对以上情况,提出了一种多种通讯总线故障注入和自动诊断系统,为制导控制部件提供多种类型总线信号物理层故障注入系统,以满足项目联试等试验的迫切需要。

1 系统的组成和基本工作原理

通讯总线故障注入和诊断系统由故障注入设备、诊断单元、信号适配箱、电源时序器和软件等组成^[6],通过 PCIe 和以太网进行相关设备的配置与管理。

故障注入设备基本工作原理如下:在上位机选择故障注入总线类型、故障模式、故障类型、故障注入参数,设置时序控制,按照配置参数选择故障用例库,时钟、总线通信速度,上位机通过 UDP 协议发送给故障注入设备注入配置参数,按照时序将数据发送到故障注入板卡, FPGA 通过控制设备中的继电器来完成短路、断路、串行阻抗和并行阻抗功能的实现, FPGA 采用 Verilog 语言通过以太网解析上位机软件配置的指令,转换成对继电器的控制信号 DIO,从而控制继电器的闭合和断开,实现物理层故障注入的功能。在故障注入中,故障注入设备作为第三方设备串接到被测产品中,分别实现模拟信号物理层故障注入的相关测试。完成 1553B、CAN、RS422 信号的故障注入,虽然信号类型较多,但是通过集成到两台故障注入设备中,将能够完成相应的故障注入功能。采用专用的故障注入板卡,故障注入板卡结构原理如图 1 所示。

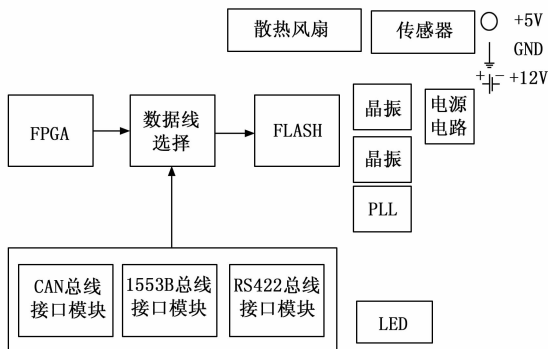


图 1 故障注入设备结构原理图

总线诊断分析板卡的硬件原理如图 2 所示,总线诊断分析基本工作原理如下:ADC 功能模块实时采集 RS422 总线、CAN 总线、1553B 总线等总线信号波形,采集的信号由 FPGA 进行解析,包括电气特性解析和协议层解析,并将解析的结果和采集的原始数据通过 PCIe 接口上传到数据服务器,并由故障注入系统管理软件完成后续的解析显示和数据存储功能。故障诊断设备能够对 1553B、CAN、RS422 总线的各种故障进行诊断分析,分为物理层诊断分

析、电气层以及协议层诊断分析^[7-8]。

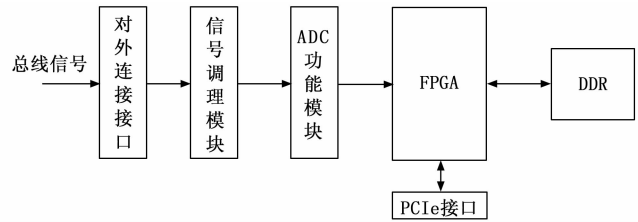


图 2 总线诊断分析板卡的硬件原理框图

故障注入和诊断系统结构原理如图 3 所示。故障注入设备共有两台,实现 RS232、1553B、ARINC429、CAN、RS422、RS485、以太网、AFDX、AD/DA、I/O 信号的故障注入,故障注入主要是完成物理层相关的故障模拟,包括短路、断路、串联阻抗、并联阻抗等。电源(AC-DC 转换)、带保险电源插座(15 A, 250 V)、开关(绿色,带灯)、接地柱。三相 220 V 电源供电。故障注入板卡 FPGA 芯片选用的是 Xilinx 公司生产的 FPGA, spartan6 系列的 XC6SLX45,该芯片逻辑资源、存储资源完全满足故障注入逻辑实现需要。故障注入所用继电器选用 TE 公司的双刀双掷继电器 IM03GR,由继电器开关配合来实现对电路的故障注入,本系统采用 +5 V 供电。继电器的特征参数如下所示:1)线圈为 +5 V 供电;2)继电器动作时间为 1 ms,最大 3 ms;3)继电器释放时间为 3 ms,最大 5 ms;4)最大持续电流为 2 A;5)单只功耗 140 mW。总线诊断设备共一台,能够实现 CAN、1553B、RS422 的信号诊断功能。该设备在进行相应总线诊断的过程中,可以进行分时复用,通过选择不同的总线实现不同的信号诊断。诊断过程中能够对波形采集的数据以及解析的 bit 数据进行存储,同时将抽样的数据上传至上位机进行波形的实时显示。信号适配箱用于和被测设备进行对接,实现两个主要功能,首先是与设备进行无缝对接功能,信号适配箱上有各个总线、信号的互联接口,通过连接线缆与被测设备对接,其次是完成和故障注入设备对接以及与总线诊断设备对接。

1553B 故障注入通道串入到正常通信的目标系统中,在上位机人机交互界面设置断路故障、短路故障、串行阻抗故障、并行阻抗故障。1553B 故障注入连接如图 4 所示。上位机与故障注入通道/设备之间采用 1 000 M 以太网进行通信。分别对 A、B 网设计一个通道来实现对 1553B 总线的两个网进行故障注入^[9-10]。

1.1 断路故障

断路故障采用 FPGA 控制断路继电器的通断来实现,1553B 短路故障注入原理如图 5 所示,故障注入时,将屏蔽线作为信号线处理,其他总线类似。

故障注入软件(模块)通过发送通断指令,并通过以太网送给 FPGA, FPGA 解析完成通断指令之后,按照设定要求控制继电器通断,实现 1553B 总线正、负和屏蔽线的断开故障。

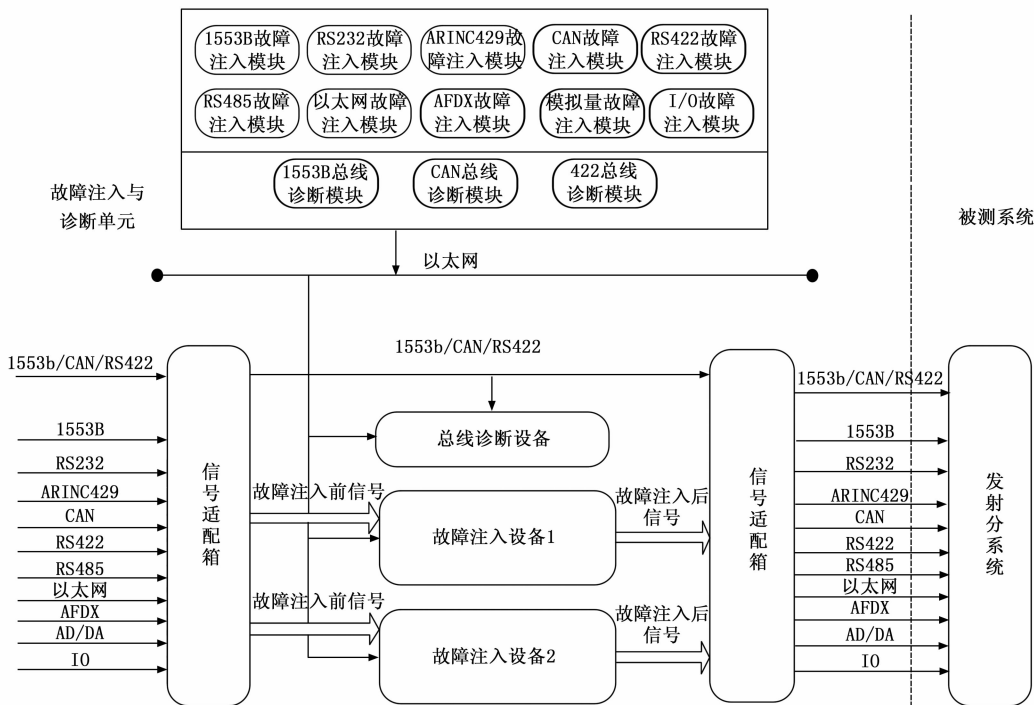


图 3 故障注入和诊断系统结构原理图

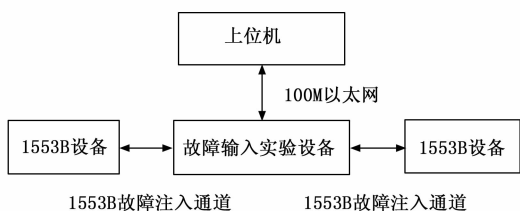


图 4 1553B 故障注入连接图

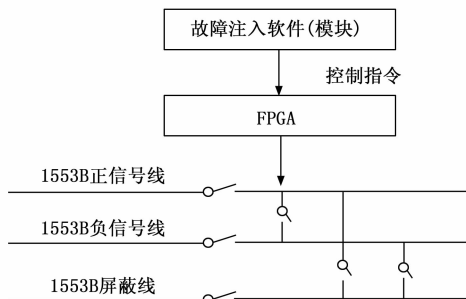


图 6 1553B 短路故障注入原理图

防止激励设备的信号线对地短路造成设备损坏。

1.3 串行阻抗故障

实现 1553B 总线串联阻抗注入，串行阻抗值为 $5 \Omega \sim 1.275 \text{ k}\Omega$ ，步进 5Ω 。实现过程中，上位机发送相关控制指令给 FPGA，FPGA 解析相关控制指令之后，通过控制对应的继电器实现阻抗控制。当对应的电阻的继电器断开，将相应的电阻注入线路中，通过 S0~S7 和 K0~K7 的组合，实现串行阻抗值为 $5 \Omega \sim 1.275 \text{ k}\Omega$ ，步进 5Ω 的阻抗注入的功能，1553B 串行阻抗注入原理如图 7 所示。

1.4 并行阻抗故障

实现 1553B 总线并联阻抗注入，并行阻抗值为 $500 \Omega \sim 5 \text{ k}\Omega$ ，步进 500Ω 。开关 S1 和 S6 为信号线之间并联阻抗的使能开关，开关 K1 和 K6 为正信号线对屏蔽并联阻抗的使能开关，开关 J1 和 J6 为负信号线对屏蔽并联阻抗的使能开关，当需要进行并联阻抗注入时，打开阻值相对应的开关，同时闭合相应的使能开关即可。上位机发送相关控制指令

1.2 短路故障

实现 1553B 总线的正信号线对屏蔽短路、总线的负信号线对屏蔽短路和总线的正负信号线之间短路故障，采用 FPGA 控制短路继电器的方式实现，1553B 短路故障注入原理如图 6 所示（1553B 总线 A 网短路故障示意）。

考虑到对测试设备的安全性，短路时可以先将断路继电器打开，断开和激励设备的连接后再进行短路故障，以

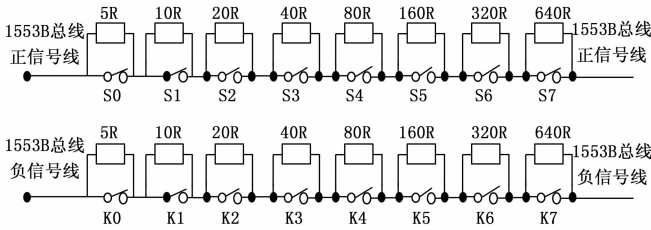


图 7 1553B 串行阻抗注入原理图

给 FPGA，FPGA 解析相关控制指令之后，通过控制对应的继电器实现阻抗控制。当对应的电阻的继电器断开，将相应的并联电阻注入线路中，通过 S1~S6、K1~K6 和 J1~J6 的组合，实现并行阻抗值为 $500\ \Omega \sim 5\ \text{k}\Omega$ ，步进 $500\ \Omega$ 。1553B 正负信号线之间并行阻抗故障注入原理如图 8 所示。1553B 正信号线与屏蔽线之间并行阻抗故障注入原理如图 9 所示。1553B 负信号线与屏蔽线之间并行阻抗故障注入原理如图 10 所示。

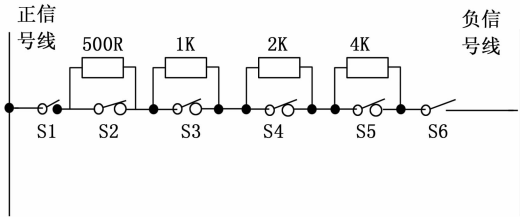


图 8 1553B 正负信号线之间并行阻抗故障注入原理图

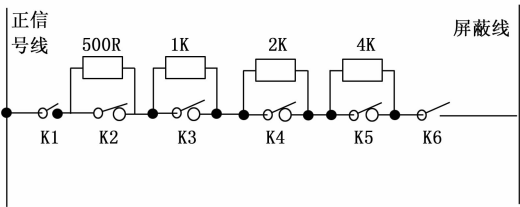


图 9 1553B 正信号线与屏蔽线之间并行阻抗故障注入原理图

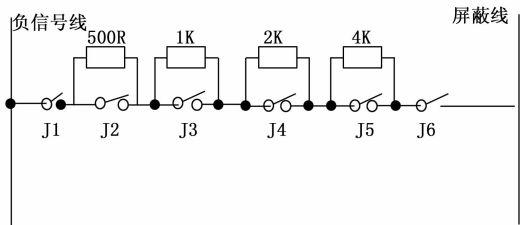


图 10 1553B 负信号线与屏蔽线之间并行阻抗故障注入原理图

1.5 诊断单元

总线诊断单元的物理层专用诊断板卡采用 3U 的 PCI 接口。1553B 总线、CAN 总线、RS422 总线的连接线缆为双绞屏蔽线，包括信号正线、信号负线和屏蔽线（或信号地线）。诊断原理是将线缆的电阻转变成电压，根据电压的数

值计算出线缆电阻。根据线缆阻值，判断线缆的短路或开路状态。线缆检测连接如图 11 所示，板载继电器开关控制线缆两端测试线路，测试输入为信号正线、信号负线、屏蔽线中任意选择一路。通过切换 S1, S2 开关，可以实现正信号线、负信号线、屏蔽线以及短路、开路检测^[11]。

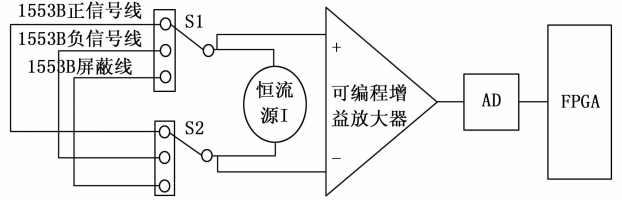


图 11 1553B 线缆测试原理图

1.6 电源时序器

电源时序器能够按照预先设置的由后级到前级的时序给用电设备供电。电源时序器的结构原理如图 12 所示。

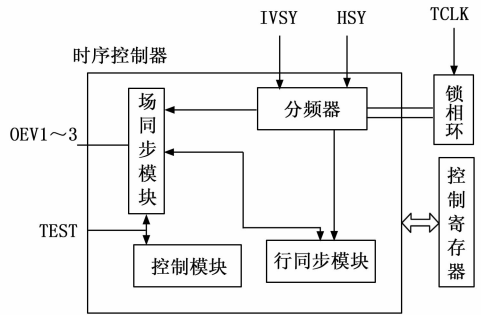


图 12 电源时序器的结构原理图

1.7 信号适配箱

信号适配箱用于连接故障注入设备、故障注入设备与用户设备。信号适配箱前面板出线端口连接器选用规定航空插接件，后面板出线端口与故障注入设备连接器相同。线序调整通过信号适配箱内部实现^[12-13]。

1.8 互联线缆

互联线缆包括各设备接入千兆以太网交换机所需线材、各设备供电线缆、故障注入设备、故障注入设备与信号适配箱互联线缆。

2 系统软件总体设计

基于“通用化、模块化和系列化”的设计思想，故障注入采用基于分布式、开放式的体系架构进行设计^[14-15]。导弹故障注入和诊断系统的测试对象为弹箭，故障注入模式分为手动和自动；故障注入类型包括：短路故障、断路故障、串行阻抗故障、并行阻抗故障。故障注入管理软件主要实现用户权限管理、故障模式配置、故障序列产生、故障流程管理等功能^[16-17]。系统采用的分 bit 解析算法和基于 PCIE 的 DMA 传输，完成上层应用与底层 FPGA 的数据交互。总线诊断设备共一台，能够实现 CAN、1553B、RS422 的信号诊断功能。该设备在进行相应总线诊断的过程中，

可以进行分时复用, 通过选择不同的总线实现不同的信号诊断。诊断过程中能够对波形采集的数据以及解析的 bit 数据进行存储, 同时将抽样的数据上传至上位机进行波形的实时显示。

在上位机主界面上的“故障注入”标签页面上, 执行故障注入操作。用户需设置故障注入参数, 通过此故障注入目录树可配置要执行故障注入的接口类型、各接口类型中的故障序列, 通过双击树状节点上的标签, 可实现选择、不选择, 通过右键菜单可执行全选、全部选操作。

故障序列注入以通道为单位, 分别对选择发送的通道发送故障序列配置, 给通道发送第一个故障序列后, 监听通道的执行状态, 当通道执行完第一个故障序列后, 再下发第二个故障序列, 为保证故障下发以及故障监控正确, 故障下发时, 对每个选择发送故障序列的通道使用一个线程来维护其序列的执行以及监控。

线程的执行顺序流程如图 13 所示。

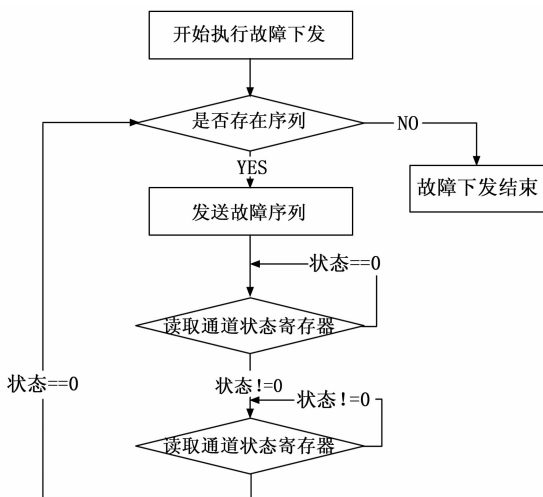


图 13 故障下发流程图

故障注入软件设计及实现流程如下, 读取故障类型和故障注入模式; 配置故障注入参数, 包括总线类型、注入通道、正负极性、阻抗数值; 生成配置参数全局变量; 上位机发送故障注入指令, 组包以太网报文, 采用 UDP 协议的发送函数发给故障注入板卡; 故障注入板卡读取报文; 上位机查询各通道故障是否执行完毕的轮巡状态; 下位机返回执行状态。故障注入的软件设计流程如图 14 所示。

故障注入过程中, 单击“故障注入中”按钮可中止故障注入过程; 在执行上述操作的同时, 软件自动存储故障注入结果和操作日志。故障流程管理界面可对各接口类型的故障流程进行配置。通过故障流程目录树上的添加、删除按钮可实现故障流程的添加、删除。各故障流程按接口类型进行分类^[18]。

3 实际应用与分析

3.1 试验步骤和方法

在设置界面配置故障注入单元的相关参数和总线通信

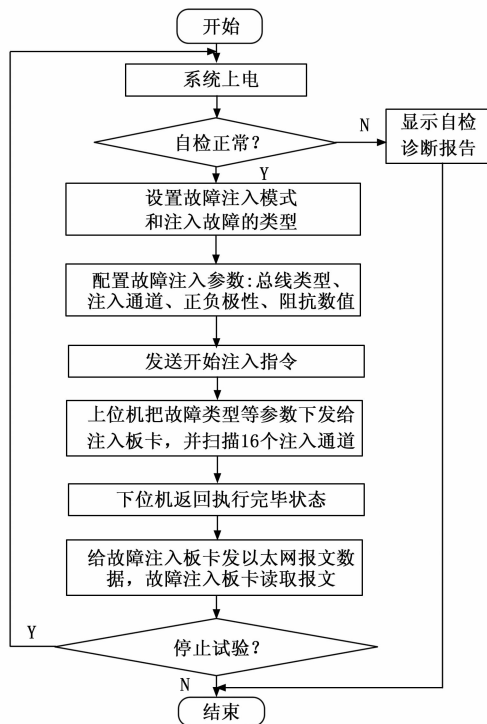


图 14 故障注入软件设计流程图

参数。软件进入到故障注入的执行页面, 页面左侧有“故障注入目录树”, 即故障注入设备和故障注入设备的通道列表^[19-21]。

进入故障流程管理界面, 设置各个通道的故障试验流程以及各个故障项的内容和参数。验证采用的方式是采用第三方检测设备, 测试断路、短路、串行阻抗、并行阻抗的故障注入结果和总线诊断设备结果一致。

3.2 试验数据

应用故障注入设备对某型导弹 RS232 通讯总线分别注入断路故障、串联阻抗 20 Ω、串联阻抗 50 Ω、并联阻抗 20 Ω, 提供了对导弹制导控制部件通讯多种总线故障注入后的导弹工作。

3.3 试验结果分析

通过对 RS422 总线物理层注入故障, 建立总线诊断边界样本数据库。总线通讯时, 模拟延长通讯线缆, 注入串联阻抗故障, 在正信号和地之间逐渐加大阻抗, 发现当信号和地之间串联阻抗 400 Ω 时, 通讯为临界状态。当总线阻抗大于等于 400 Ω 时, 通讯中断。当总线阻抗接近 400 Ω 时, 通讯数据出现乱码; 当总线阻抗小于等于 360 Ω 时, 通讯数据正常。

总线监测单元监测超轻型空地导弹联试时测试惯导发送给遥测的 RS422 信号时, RS422 信号正向反射和负向反射对 RS422 信号通讯产生振铃或过冲的影响, 在 RS422 信号源端和终端串行 120 Ω 的电阻来消灭信号二次反射和一次反射, 达到过冲和振铃消失的效果。匹配阻抗加在传输线上, 信号过来直接流过去, 不会有信号反射回来。

在导弹和火箭的桌面联试试验时,故障注入已应用在多个型号项目测试中,自动化测试系统提供了故障注入和验证诊断注入结果的方法。故障注入单元精准便捷地验证目标系统的容错能力、鲁棒性和可靠性,适用于国防兵器、航天、航空等领域。

未来故障注入国防军工、航天中的应用研究解决的问题如下:1) 尝试将多种总线的电气层的故障注入引入到故障注入单元中,如对 RS422 总线波特率、校验位的故障注入;对 CAN 总线波特率的故障注入;2) 将多种总线的协议层的故障注入引入到故障注入单元中,如对 RS422 总线的数据帧帧头、长度、信息体、校验位的故障注入。对 CAN 总线的数据帧帧头、数据场、CRC 场的故障注入,模拟制导控制系统在运行时发生数据错误,提高系统的软错误检测和容错能力。

4 结束语

基于 FPGA 的导弹通讯总线的故障注入和诊断系统实现了对多种常用总线通讯的故障注入和测试,提高了导弹研究性测试的手段,具有较高的准确性、可靠性和快捷性。系统模块化、通用化的设计思想,使系统具有较好的稳定性和可扩展性。导弹总线诊断系统为导弹的通讯测试发挥了重要作用,对导弹的作战效能提供了有力支持。

参考文献:

- [1] 顾向荣. 基于 CAN 的磁浮列车车载诊断网络系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 144-146.
- [2] 赵迪. 基于 CAN 总线的分布式监测诊断技术研究 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29 (12): 3212-3214.
- [3] 李晓颖. 某导弹武器系统 1553B 总线监测系统的设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36 (1): 171-173.
- [4] 林智伟, 蒋东方, 牛鹏宇. 基于 FPGA 与 ARM 单片机的 CAN 总线分析仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2308-2311.
- [5] 凌威. AVR 单片机的 CAN 总线分析仪设计 [J]. 单片机与

嵌入式系统应用, 2008, 9: 54-57.

- [6] 肖楚璇, 谢晓方, 李德栋, 等. 航空军械 1553B 总线监测技术 [J]. 兵工自动化, 2010, 12: 52-72.
- [7] 蒋国峰, 白红. 1553B 总线监控器的设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (17): 98-100.
- [8] 杨建新, 张军. 机载双余度 1553B 总线检测研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 1962-1985.
- [9] MIL-STD-1553B 飞机内部时分制指令/响应式多路传输数据总线 [S]. 美国军用标准, 1978.
- [10] 彭国金, 刘曼婷, 张娟. 飞行试验测试采集的 AFDX 总线检测分析技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 311-324.
- [11] 王晓飞, 闫淑群. 低速总线分析系统的设计实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 25-31.
- [12] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] 陈保社, 刘恒, 蔡昱. 某型自行火炮水平角速度传感器智能检测仪设计 [J]. 电子设计工程, 2012, 20 (8): 40-42.
- [14] 吴汉平. 军用航空电子系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [15] 王勇. 机载计算机总线技术 [M]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2005.
- [16] DDC. MIL-STD-1553A/B designer's guide [S]. U. S. A: DDC Date Device Corporation, 1999.
- [17] 顾明剑. 1553B 总线控制方法研究 [J]. 红外, 2004, 21 (12): 21-27.
- [18] 史国庆. 1553B 总线检测仪系统软件设计 [J]. 火力指挥与控制, 2009, 34 (6): 141-144.
- [19] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [20] 陈煜, 张彦铎, 王春梅. 基于 429 总线的某飞行器测试仪开发与测试 [J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33 (4): 77-80.
- [21] 熊华刚, 王中华. 先进航空电子综合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

~~~~~  
(上接第 64 页)

- [12] 张成, 郭玉英, 朱正为. 基于线性自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 飞行力学, 2021, 39 (3): 75-81.
- [13] 张劼, 李宁洲, 张晓娟, 等. 基于自适应变异遗传算法的多无人机航迹协同 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (11): 18-23.
- [14] 蔡星娟, 胡钊鸣, 张志霞, 等. 基于高维多目标优化的多无人机协同航迹规划 [J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51 (6): 985-996.
- [15] 白云鹏, 林志鹏, 段洪涛, 等. 面向频谱测绘任务的多无人机协同航迹规划方法 [J]. 信号处理, 2022, 38 (12): 2563-2571.
- [16] 何文彪, 胡永江, 李文广. 基于改进哈里斯鹰算法的异构无人机协同侦察航迹规划 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31

- [17] 戴邵武, 赵超轮, 李飞, 等. 一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法 [J]. 控制与决策, 2023, 38 (3): 706-714.
- [18] 陈方正郝绍杰. 城市环境下单无人机测向定位航迹优化算法 [J]. 国防科技大学学报, 2022, 44 (6): 126-133.
- [19] 王晓海, 孟秀云, 李传旭. 基于 MPC 的无人机航迹跟踪控制器设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (1): 191-198.
- [20] 刘韪, 蒋海峰, 董磊, 等. 基于 CRS-RRT 算法的无人机航迹规划 [J]. 光电与控制, 2023, 30 (7): 35-39.
- [21] 李芹, 刘旭林, 李荣昊, 等. 基于野外台站无人机组网遥感仿真航迹规划 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23 (5): 948-957.