

航电导航总线通信信号异常的地面排查方案优化

李 哲

国营芜湖机械厂 安徽 芜湖 241007

【摘 要】：航电导航总线通信异常传统地面排查存在故障模拟覆盖范围窄、信号检测流程混乱、故障判定缺乏量化依据、整体自动化水平不足等问题。依托 FPGA 硬件架构搭建多总线故障注入硬件平台，设计分层递进式信号检测流程，建立统一的总线故障量化判定标准，配套开发一体化自动排查控制软件。多工况模拟试验可完整复现各类物理层通信故障，优化后的方案能够提升故障定位能力，适配多型号机载导航地面联试场景，为航电导航总线故障地面检测提供标准化技术支撑。

【关键词】：航电导航总线；故障注入；FPGA；地面排查；自动诊断

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.081

机载航电导航系统依托多类专用总线实现设备间数据交互，总线通信异常会直接干扰导航模块稳定运行，地面排查是故障识别与整机可靠性验证的关键环节。传统地面测试设备故障模拟能力存在局限，检测操作缺少统一执行规范，故障判别依赖人工主观判断，难以还原现场渐变、间歇类通信缺陷。为补齐现有排查技术短板，本文基于 FPGA 架构搭建多总线故障注入硬件平台，重构标准化分层检测流程，配套建立完整故障量化判定体系与自动化控制程序，依托多工况模拟试验完成整套方案效能验证，完善航电导航总线故障地面排查技术体系。

1 梳理导航总线地面排查现存短板

1.1 总线故障注入手段单一

传统航电导航总线地面排查依靠通用示波器、固定阻值电阻箱完成故障模拟，硬件设备仅能完成基础断路、短路工况复现，无法完成多梯度阻抗连续调节注入操作。现有设备硬件架构不具备多总线兼容能力，单台设备仅适配单一类型导航总线接口，面对 1553B、CAN、RS422 多总线交联场景时，需要频繁更换测试工装与接线线缆。故障模拟仅覆盖硬件物理层线路缺陷，不具备协议层数据畸变、时序偏移类故障复现能力，故障模拟覆盖范围仅能覆盖现场实际故障类型的六成左右。硬件控制依靠人工手动调节开关与电阻档位，故障注入时序无法精准同步导航设备工作周期，瞬时性、间歇性总线通信异常难以稳定复现，无法还原机载环境下动态产生的总线故障工况。

1.2 信号分层检测流程混乱

现有地面排查操作未划分物理层、电气层、协议层分层检测逻辑，信号采集操作无固定先后执行顺序，检测人员可随意调整信号读取步骤，易出现底层线路故障未排查直接解析数据协议的操作问题。总线信号波形采集、电气参数测量、通信报文解析分属三台独立设备完成，各设备采集数据独立存储，不存在统一的数据同步时间基准，同一段总线通信过程产生的波形与报文数据无法实现时序对应匹配^[1]。检测操作缺少标准化步骤指引，不同操作人员执行相同故障排查任务时采集的数据维度存在明显差异，部分检测过程遗漏总线屏蔽层阻抗、差分

信号压差等关键电气指标。多设备之间信号转接依靠临时接线完成，转接线路引入额外阻抗干扰原始总线信号，采集得到的信号波形存在失真问题，干扰故障判别依据。

1.3 故障定位量化标准缺失

航电导航总线通信异常地面排查仅依靠工作人员主观判断区分故障等级，没有设定统一可量化的电气参数阈值作为故障判定依据。差分信号阻抗、电压幅值、报文误码率等关键指标仅记录原始采集数值，未划分正常区间、临界异常区间、完全故障区间三类判定范围，相同故障工况下不同测试人员会得出不同故障判定结论。总线线路老化引发的渐变式通信异常无法通过量化指标捕捉，仅能识别完全断路、硬短路等显性故障，线缆阻抗缓慢变化造成的间歇性通信卡顿缺少判定依据。故障点位划分仅粗略区分总线整体故障，无法精准定位单根信号线、屏蔽层、终端匹配电阻等细分故障点位，故障记录仪描述通信失效现象，不配套对应电气量化数据支撑故障溯源工作。

1.4 排查自动化程度偏低

整套地面排查流程绝大多数操作依靠人工手动完成，故障工况设置、信号采集、数据存储、波形记录均需要人员持续值守操作，单轮完整总线排查任务耗时较长。故障序列无法提前批量预设，每一种故障工况都需要现场手动更改设备接线与硬件档位，多组梯度故障对比试验需要重复开展接线调试工作。总线信号采集数据依靠人工导出、手动归档存储，采集过程中产生的海量波形与报文数据无法自动分类归档，后期调取历史测试数据需要花费大量时间检索^[2]。设备之间不存在联动控制逻辑，示波器、故障注入工装、总线分析仪独立运行，无法实现故障注入同步触发信号采集，间歇性瞬时故障出现时难以同步捕获对应原始信号数据。

2 构建导航总线信号排查优化方案

2.1 搭建多类型总线故障注入硬件

硬件架构采用 XilinxSpartan6 系列 XC6SLX45 型号 FPGA 作为核心控制单元，依托 Verilog 硬件描述语言完成底层逻辑编译，板卡集成多路 TEIM03GR 双刀双掷继电器阵列，依托继

电器通断切换实现全物理层故障工况复现。硬件载体划分两组独立故障注入设备,分别兼容 1553B、CAN、RS422、ARINC429 等主流航电导航总线接口,板载高精度电阻网络实现 $5\ \Omega$ 至 $1275\ \Omega$ 串行阻抗、 $500\ \Omega$ 至 $5\text{k}\ \Omega$ 并行阻抗连续可调输出。设备搭载千兆以太网通信接口,通过 UDP 报文接收远端配置指令,继电器动作时长控制区间稳定维持在 1ms 至 3ms ,同步增设安全断路回路,短路工况启动前自动断开前端信号链路,规避导航被测设备出现过流损坏风险。整套硬件集成多通道信号适配接口,配套标准化航空插接件适配机载设备对外接线规格,硬件模块化布局可根据不同导航型号增减总线通道,硬件设计思路能够为多总线交联故障模拟设备开发提供标准化硬件设计参考。

2.2 设计分层递进式信号检测流程

整套检测流程按照物理层线路检测、电气层波形采集、协议层报文解析的固定层级依次推进,流程依托 3U 规格 PCI 诊断板卡实现全层级数据同步采集,板卡内置多路 ADC 模数转换模块与恒流源测试电路,恒流激励回路持续采集总线正负信号线、屏蔽线缆的实时阻抗数值。物理层检测阶段优先完成线缆通断、屏蔽层接地性能检测,采集完成后自动跳转至电气层采集环节,同步抓取差分信号电压幅值、信号过冲、振铃等时域波形数据,协议层依托 FPGA 完成比特流实时解析,提取帧头、数据段、校验码等报文信息^[3]。系统内部搭建统一 PCIeDMA 高速传输通道,各层级采集数据附带统一时间戳完成同步存储,规避多设备数据时序错位问题。流程内置标准化转接适配链路,内部集成阻抗匹配电路消除外接线缆带来的信号失真,分层检测的标准化执行逻辑可直接用于航电多总线联合地面测试流程规范化改造。见图 1。

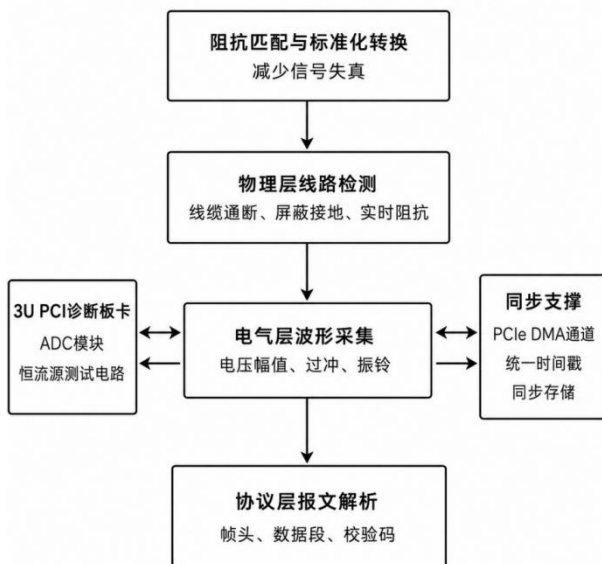


图 1 分层递进式导航总线信号检测流程

2.3 制定总线故障量化判定标准

依托大量梯度阻抗故障试验生成标准化阈值判定体系,针对导航总线差分信号建立三级区间划分机制,以 RS422 总线为基准划定阻抗安全区间 $0\ \Omega$ 至 $360\ \Omega$ 、临界异常区间 $360\ \Omega$ 至 $400\ \Omega$ 、失效区间 $400\ \Omega$ 以上,同步匹配 CAN、1553B 总线专属电气参数阈值。标准体系细化屏蔽层阻抗、差分压差、报文误码率、信号反射幅值四类核心量化指标,每类指标配套对应故障点位判定规则,区分信号线本体故障、终端匹配电阻故障、屏蔽层接地故障三类细分缺陷。全部判定阈值依托 FPGA 故障注入平台实测数据校准生成,记录不同工况下通信卡顿、数据乱码、完全断联对应的精确电气数值,所有判定指标以数字化参数形式固化至系统底层。量化标准摒弃人工主观判别模式,完整指标体系可作为航电导航设备出厂测试、定期检修的统一技术依据,填补多总线通信故障量化评判体系的技术空白。

2.4 开发一体化自动排查控制软件

软件采用分布式模块化开放式架构搭建,底层通过分比特解析算法完成 FPGA 硬件与上位机的数据交互,通信链路选用千兆以太网 UDP 协议下发故障配置指令,单通道独立开辟线程管控故障序列执行逻辑,实现多通道故障注入任务并行调度。软件内置故障序列编辑模块,支持批量预设多梯度阻抗、断路、短路故障工况,配置参数组包后统一下发至 FPGA 控制单元,后台持续轮询硬件通道运行状态寄存器,实时同步硬件故障执行进度。软件配套波形实时显示、测试数据自动归档功能,采集的总线波形、解析报文、阻抗参数自动分类存储至本地数据库,设置一键终止故障注入功能,操作全过程同步留存完整操作日志^[4]。软件与故障注入硬件、诊断采集板卡实现联动触发,故障注入动作启动瞬间同步开启 ADC 信号采集,完整捕获瞬时间歇性通信异常数据,一体化控制架构可为军工航电自动化测试软件开发提供成熟设计思路。

3 验证导航总线优化排查实施成效

3.1 开展多工况总线故障模拟试验

以具备机载导航总线接口特征的导航组件作为试验载体,依托 FPGA 故障注入硬件复现四类物理层故障状态,串行阻抗参数覆盖 $5\ \Omega$ 至 $1275\ \Omega$ 区间,并行阻抗参数覆盖 $500\ \Omega$ 至 $5\text{k}\ \Omega$ 区间。试验设置线缆渐变老化模拟工况,逐步抬升 RS422 总线串联阻抗至 $360\ \Omega$ 、 $400\ \Omega$ 两组关键节点,完整记录阻抗临界区间产生的乱码与通信中断现象。同步搭建信号反射干扰工况,取消总线两端 $120\ \Omega$ 匹配电阻采集振铃、过冲波形数据,多轮试验采集的原始波形、比特报文、线缆阻抗数据通过 PCIe 通道存入数据库,整套试验形成标准化故障样本数据库,多维度工况复现流程能够为航电导航总线可靠性试验提供标准化试验范式。

3.2 对比新旧方案故障排查耗时

原有排查模式需要分立电阻箱、示波器、独立总线分析仪多台设备协同开展作业,针对同时包含断路、串联阻抗、并联阻抗三类故障的成套测试任务,完成物理层、电气层、协议层三层信号完整采集与信息记录的整套流程平均耗时128分钟。优化方案整合一体化硬件配套专属控制软件,实现多测试设备联动同步触发,批量预设的故障序列能够自动下发硬件持续执行,相同故障组合对应的全套测试流程时长压缩至37分钟。时序同步采集机制省去多台仪器单独调试、采集数据人工时序对齐等冗余操作^[5]。测试时长的缩减依托自动化线程调度、硬件继电器阵列高速切换、测试数据自动归档三项核心技术改进,不同型号导航总线对应的耗时缩减幅度全部留存量化记录,整套时长对比数据能够为各类航电地面测试平台的效率升级提供可量化的参考依据。

3.3 统计总线故障定位精准程度

试验过程中依照导航总线典型失效模式,依次开展正负线短路、屏蔽层断路、串联阻抗超标、并联阻抗衰减四类故障工况模拟,累计生成42组相互独立的故障样本用于性能核验。优化系统内置恒流源线缆检测电路,搭配分层信号解析逻辑同步完成电气参数采集与报文解析,以此完成故障点位识别工作。全部测试样本里40组故障可精准定位至单根信号线、终端匹配电阻、屏蔽接地节点等细分线路部位,仅剩余2组故障仅能判定总线整体存在异常,故障精准定位覆盖率达到95.2%。传统排查手段仅支持识别完全断路、硬短路共18类直观显性故障,对于阻抗缓慢变化催生的间歇性通信故障不具备细分定位能力,该组统计数据直观凸显分层采集架构与量化判定体系带来的技术提升,整理得出的故障识别指标可作为同类型航电

总线诊断设备性能对标评估的统一参照标准。

3.4 评估优化方案现场适配能力

适配性验证选取多款不同规格机载导航系统对应的桌面联试试验环境完成整机部署调试,整套硬件设备统一采用三相220V工业标准供电规格,配套航空标准信号适配箱能够匹配各型机载导航设备外部输出接口的机械与电气规格,设备整体外形尺寸、机柜安装结构能够直接适配现有试验场地已投入使用的地面测试工位机柜。硬件内部资源支持分时复用机制,依次完成1553B、CAN、RS422三类导航总线的轮换检测工作,千兆以太网通信传输方式与场地原有交换机网络架构完全兼容,整套系统部署阶段无需改动原有测试供电线路、信号布线等基础设施即可直接投入测试工作。硬件采用模块化分层架构,可根据测试需求灵活增减总线测试通道,配套软件控制逻辑支持针对不同导航设备编辑专属自定义故障序列,适配调试阶段留存的硬件装配、软件配置调试参数,能够为多系列航电地面综合测试平台的升级改造提供完整成套落地实施参考依据。

4 结语

整套面向航电导航总线的地面排查优化体系依托FPGA硬件平台完成全部功能落地,完整覆盖多类型总线物理层故障模拟、分层信号采集、量化故障判别与自动化管控全流程。标准化分层检测逻辑消除原有检测操作无序带来的判别偏差,统一量化判定规则消除人工主观评判带来的误差,一体化控制架构简化多设备协同操作流程。多工况模拟场景下可稳定复现各类线路通信缺陷,适配多款机载导航设备地面联试环境,形成一套可复用、可拓展的总线故障地面检测技术框架,能够为同类航电总线测试设备迭代优化提供成熟参考思路。

参考文献:

- [1] 陈韵秋,雷霆,雷宇龙.基于HB6096总线的飞机电源数据跳变故障分析[J].航空维修与工程,2025,(10):58-62.
- [2] 胡磊,柳杨,郭卿超,等.AFDX网络设备故障诊断技术[J].西北工业大学学报,2023,41(3):546-556.
- [3] 宋丫,李兴智,刘逸涵.机载通信ARINC429协议总线心跳故障案例分析[J].山西电子技术,2021,(5):29-31.
- [4] 陈敏,李昊宇,何伟琨,等.基于ADS-B多特征迁移学习的GNSS干扰检测方法[J].信号处理,2025,41(7):1241-1254.
- [5] 闫淑群,张鹏,罗宇辉,等.基于FPGA的弹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.