

航空电子设备自动化测试及关键技术研究

屈一帅 陈堂辉 武磊

中航工业陕西飞机工业有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17200

[摘要] 航空电子设备作为保障飞行安全与性能的核心,其自动化测试至关重要。本文深入分析航空电子设备在硬件架构、软件功能及可靠性方面的特性,构建针对性测试需求模型。设计分层式、模块化且可扩展的测试系统架构,攻克接口标准化与测试环境搭建难题。重点研究测试脚本生成、智能用例优化等关键技术,并指出当前局限,展望数字孪生等未来方向,提升测试效能。

[关键词] 航空电子设备; 自动化测试; 关键技术

中图分类号: V24 **文献标识码:** A

Research on Automated Testing and Key Technologies for Avionics Equipment

Yishuai Qu Tanghui Chen Lei Wu

AVIC Shaanxi Aircraft Industry (Group) Co., Ltd.

[Abstract] As the core component ensuring flight safety and performance, automated testing of avionics equipment is of paramount importance. This paper conducts an in-depth analysis of the hardware architecture, software functionality, and reliability characteristics of avionics equipment, constructing a targeted testing requirement model. A hierarchical, modular, and scalable testing system architecture is designed, addressing challenges in interface standardization and testing environment setup. Key technologies such as test script generation and intelligent test case optimization are emphasized, while current limitations are identified. Future directions, including digital twin applications, are proposed to enhance testing efficiency.

[Key words] Avionics Equipment; Automated Testing; Key Technologies

引言

在航空领域,航空电子设备是保障飞行安全、实现高效飞行的关键所在,其性能与可靠性直接关系到整个航空系统的运行质量。随着航空技术的飞速发展,航空电子设备日益复杂,传统测试方法面临效率低、覆盖度不足等挑战。自动化测试凭借高效、精准、可重复等优势,成为提升航空电子设备测试水平的重要方向。深入研究其自动化测试及关键技术,对保障航空安全、推动航空技术进步意义重大。

1 航空电子设备自动化测试需求分析与建模

1.1 航空电子设备特性分析

(1) 硬件架构: 核心采用ARINC600/664总线架构,ARINC600规范定义模块化硬件接口,支持设备快速更换与扩展;ARINC664 (AFDX)实现高带宽、低延迟数据传输,满足多设备协同需求。同时,FPGA芯片广泛应用于信号处理、逻辑控制模块,需重点测试其时序逻辑与硬件资源利用率,确保硬件层面的稳定性与兼容性。(2) 软件功能: 涵盖导航、通信、飞控三大核心系统。导航系统依赖GPS/惯性导航融合算法,需验证定位精度与抗干扰能力;通信系统支持VHF/UHF等多频段数据交互,需测试信号传输

速率与误码率;飞控系统作为关键控制单元,需重点校验舵面控制指令的实时性与准确性,保障飞行安全。(3) 可靠性要求: 需通过故障注入测试模拟传感器失效、总线中断等异常场景,验证设备故障响应机制;同时,设备普遍采用余度设计(如双余度CPU、三余度传感器),需测试余度切换的无缝性与切换时间,确保单一故障不影响系统正常运行^[1]。

1.2 测试需求建模方法

(1) 基于UML的测试场景建模: 利用用例图描述测试场景边界,时序图刻画设备交互流程,状态图分析系统状态转换逻辑,为测试用例设计提供可视化依据。(2) 形式化验证需求: 采用TLA+语言构建系统数学模型,通过逻辑公式定义设备功能需求与约束条件,利用模型检测工具验证需求一致性与完整性,避免模糊需求导致的测试漏洞。(3) 测试用例生成策略: 基于组合测试方法覆盖多参数交互场景,降低测试冗余;结合等价类划分,将输入输出数据分类,选取典型用例验证核心功能,平衡测试效率与覆盖度。

1.3 自动化测试可行性分析

(1) 接口标准化程度: AFDX、1553B等总线接口具备统一协

议规范,可开发标准化测试适配器,实现测试设备与被测对象的快速对接,减少接口兼容性问题,为自动化测试奠定基础。(2)测试环境搭建难点: HIL仿真需构建高保真硬件回路,模拟飞行姿态、环境干扰等复杂场景,存在硬件选型难、仿真时延控制难等问题;半实物测试需整合真实设备与仿真模块,需解决信号同步与数据交互难题,需投入专项资源突破技术瓶颈。

2 航空电子设备自动化测试系统架构设计

2.1 系统总体架构

(1)分层设计:数据层作为基础支撑,负责存储测试用例库、设备参数库、历史测试数据及日志信息,采用分布式数据库架构保障数据安全性与存取效率,同时通过数据加密技术防止敏感信息泄露;逻辑层承担核心业务处理,整合测试需求分析、用例生成、流程规划等功能,通过算法引擎实现测试策略优化与故障逻辑判断,为执行层提供精准指令;执行层聚焦硬件交互,连接测试仪器(如示波器、信号发生器)与被测设备,接收逻辑层指令并执行测试操作,实时反馈硬件状态与测试数据,三层通过标准化接口实现数据交互与指令传递,确保系统运行流畅^[2]。(2)模块化与可扩展性要求:系统采用模块化设计,将各功能拆分为独立模块(如资源管理模块、数据采集模块),模块间通过标准化协议通信,支持按需增减模块(如新增射频测试模块适配雷达设备测试需求);硬件层面预留仪器接口插槽与通信端口,软件层面采用插件化架构,支持新测试算法、新设备驱动的快速集成,满足不同型号航空电子设备(如导航仪、飞控计算机)的测试需求,同时适应未来技术升级与功能扩展。

2.2 关键子系统设计

(1)测试资源管理模块:通过仪器调度算法实时监控测试仪器状态(如空闲、占用、故障),根据测试任务需求自动分配最优仪器资源,避免资源冲突;通道分配功能支持多通道并行管理,可根据测试信号类型(如模拟信号、数字信号)分配对应测试通道,同时具备通道故障检测与自动切换能力,保障测试连续性。(2)测试执行引擎:具备脚本解析功能,可兼容Python、Tcl等多种脚本语言,将自动化脚本转换为硬件可执行指令;支持并行测试控制,通过多线程技术同时执行多个测试任务(如同一设备的多模块测试、多台设备的同步测试),大幅提升测试效率,同时实时监控任务执行进度,出现异常时自动暂停并触发告警。(3)数据采集与分析模块:通过高精度数据采集卡实时采集被测设备输出信号(如电压、电流、通信报文),采样率最高可达1GS/s,确保数据准确性;内置异常检测算法,对比采集数据与预设阈值,发现数据异常时立即标记并记录异常时刻与特征,为故障诊断提供数据支撑。(4)人机交互界面:采用可视化设计,提供测试任务创建、参数配置、流程监控的图形化操作界面,支持拖拽式搭建测试流程;自动生成测试结果报告,包含测试数据表格、波形图、故障分析结论,支持PDF、Excel等格式导出,同时提供报告在线预览与历史报告查询功能,方便测试人员快速分析测试结果^[3]。

2.3 标准化与兼容性设计

(1)支持ATML标准:遵循ATML规范定义测试信息模型(如测试描述、仪器信息、结果数据),采用XML格式存储与传输测试数据,实现测试数据在不同测试系统间的共享与交互,避免因数据格式不统一导致的信息孤岛问题,同时提升测试系统与外部工具(如测试管理软件、故障诊断平台)的兼容性。(2)跨平台适配:软件层面采用跨平台开发框架(如Qt),确保核心功能在Windows(适用于桌面端操作)、Linux(适用于服务器端数据处理)、VxWorks(适用于嵌入式实时测试场景)系统下稳定运行;硬件驱动层针对不同操作系统进行适配开发,解决设备驱动兼容性问题,满足航空电子设备在不同测试环境下的应用需求。

3 航空电子设备自动化测试关键技术研究

3.1 测试脚本自动化生成技术

(1)基于模型驱动(MBD)的脚本生成方法:以UML或SysML构建的测试场景模型为输入,通过模型解析器提取测试步骤、参数约束与预期结果,结合预设的脚本模板(如Python、Tcl),自动生成可执行测试脚本。该方法无需人工编写代码,减少语法错误,同时模型与脚本联动更新,当测试需求变更时,修改模型即可同步生成新脚本,提升脚本开发效率。(2)自然语言处理(NLP)辅助用例转换:对自然语言描述的测试需求文档进行分词、语义分析与实体识别,提取“测试对象-操作行为-判定条件”等关键信息,映射为标准化测试用例结构,再通过脚本生成引擎转换为自动化脚本。支持专业术语库自定义,适配航空领域专属表述,降低非技术人员参与测试脚本开发的门槛^[4]。

3.2 智能测试用例优化

(1)遗传算法在测试路径规划中的应用:将测试路径抽象为染色体,以路径覆盖度、执行效率为适应度函数,通过选择、交叉、变异操作迭代优化,筛选出覆盖关键功能且冗余度低的测试路径。针对航空电子设备复杂状态转换场景,可缩短路径搜索时间,提升测试覆盖率。(2)机器学习驱动的用例优先级排序:基于历史测试数据,利用随机森林、神经网络等模型学习故障发生概率、用例执行成本等特征,对测试用例进行优先级排序,使高风险功能对应的用例优先执行,在测试资源有限时快速暴露关键故障,减少故障排查时间。

3.3 实时故障诊断与定位

(1)基于时间序列分析的异常检测:对测试过程中采集的电压、信号时序数据,采用LSTM、ARIMA等模型构建正常数据时序特征,实时对比实际数据与模型预测值,当偏差超出阈值时判定为异常,可快速捕捉瞬时故障(如总线瞬时中断),实现故障实时预警。(2)深度学习模型在故障分类中的实践:以故障注入测试获取的多维度数据(如波形特征、日志信息)为训练集,构建CNN或Transformer模型,对故障类型(如传感器失效、软件逻辑错误)进行分类,分类准确率可达95%以上,同时输出故障置信度,辅助工程师精准定位故障源^[5]。

3.4 测试数据管理技术

(1)大数据存储与高效检索方案:采用HDFS分布式存储架构存储海量测试数据(如历史测试报告、波形文件),结合

Elasticsearch构建全文检索引擎,支持按测试时间、设备型号、故障类型等多维度检索,检索响应时间控制在秒级,满足数据快速追溯需求。(2)测试结果可视化与趋势分析:通过ECharts、Matplotlib等工具生成测试数据趋势图(如故障发生率变化曲线)、对比图(如不同批次设备测试结果差异),直观展示测试规律;利用时序分析模型预测设备潜在故障风险,为航空电子设备可靠性评估提供数据支撑。

4 航空电子设备自动化测试挑战与未来展望

4.1 当前技术局限性

(1)非标接口适配难题:航空电子设备型号多样,部分老旧设备或定制化设备采用非标接口,缺乏统一协议规范。适配时需针对性开发专用驱动与适配器,不仅增加研发成本与周期,还易因接口兼容性问题导致测试中断。同时,非标接口数据格式不统一,需额外进行数据转换处理,降低测试数据流转效率,难以融入标准化自动化测试流程。(2)复杂系统级测试覆盖率不足:航空电子系统多模块高度集成,存在复杂的交联关系与隐藏状态。现有自动化测试多聚焦于单一模块功能验证,对多模块协同工作场景、极端工况下的系统响应测试覆盖不足。且部分系统故障具有偶发性与关联性,现有测试用例难以全面模拟,导致潜在故障无法被有效检测,影响系统可靠性评估准确性。

4.2 未来发展方向

(1)数字孪生技术在测试中的应用:构建与物理设备1:1映射的数字孪生模型,可在虚拟环境中模拟设备全生命周期运行状态,包括极端工况、故障演化过程等。通过虚拟测试提前发现物理测试难以覆盖的问题,减少物理设备损耗与测试成本。同时,可将虚拟测试数据与物理测试数据融合,优化测试用例,提升测试覆盖率与准确性。(2)5G/6G通信下的远程测试:依托5G/6G高带宽、低时延、广连接特性,实现测试设备与异地航空电子设备的远程互联。测试人员可在远端实时控制测试流程、采集测

试数据,打破地域限制。尤其适用于航空设备外场测试、多地协同测试场景,大幅提升测试灵活性与效率,降低人员现场作业风险与成本。(3)自主测试机器人与AI协同:研发具备自主移动、设备对接能力的测试机器人,搭配AI算法实现测试全流程自主化。AI可实时分析测试数据,动态调整测试策略,指导机器人优先测试高风险模块;机器人则执行物理接口对接、测试操作等任务,形成“AI决策-机器人执行”的协同模式。该模式可减少人工干预,提升测试效率,尤其适用于大规模、多批次航空电子设备测试场景。

5 结束语

航空电子设备自动化测试及关键技术研究,是顺应航空技术发展潮流的必然之举。通过对设备特性剖析、测试需求建模,构建起科学合理的测试系统架构,并攻克脚本生成、用例优化等关键技术,有效提升了测试的效率与准确性。然而,当前仍面临非标接口适配等局限。未来,数字孪生、5G/6G远程测试等新技术的融入,将为航空电子设备测试带来新契机,持续推动航空事业迈向新高度。

[参考文献]

- [1]张楠.通用航空机载电子设备故障维修对策[J].电子技术与软件工程,2020,(01):87-88.
- [2]尚浩,刘美山.飞机航空电子设备故障类型与诊断技术研究[J].电子测试,2022,(06):99-101.
- [3]胡绍炀.探讨航空电子设备故障分析及维修[J].中国设备工程,2022,(16):159-161.
- [4]王圣博.A350航空电子设备故障诊断技术研究综述[J].建筑技术科学,2023,(12):75-76.
- [5]张金宗.航空电子设备PHM关键技术研究综述[J].建筑技术科学,2025,(06):52-54.