

低成本航空电子CNI系统检测平台设计与实现

熊扉飞

成都天奥测控技术有限公司 四川 成都 611731

摘要：面向航空电子CNI系统测试成本高、故障检测效率低等问题，设计了一个基于机载测试性协同的低成本综合检测平台。平台以机载测试性设计成果为核心驱动，分硬件接口层、驱动解析层、算法推理层及应用执行层四层，实现从机载故障码到外场排故的闭环。用JSON管理测试用例，SQLite+Python大数据架构，支持多协议扩展，不再依赖专用仪器。该平台能提高测试效率，助力航空装备国产化和开放检测生态建设。

关键词：低成本；航空电子；CNI系统；检测平台设计；机载测试性；协同诊断

引言

航空CNI子系统向综合化、国产化升级，同时强化了对低成本设计的要求。基于以上变化，未来对CNI检测平台的要求将同步提高。传统CNI检测设备大多靠堆叠软硬件功能模块实现功能性能检测，局限于功能对通验证和性能指标测试，设备成本居高不下，故障检测能力主要依赖测试人员经验；同时检测方式流程封闭、扩展性差，跟机载自检之间缺少协同。针对这些问题，设计了一个与机载CNI子系统高度协同的低成本CNI检测平台，充分利用机载自检结果、故障树模型以及历史检测数据，再结合CNI检测平台本地轻量化AI模型，降低硬件成本，提高维保效率，让测试做到一体化、标准化、可追溯。

1 研究背景与问题提出

航空电子系统是现代飞行器的核心，直接决定飞行安全与任务成败。当前航空电子系统逐步向网络化、集成化与智能化升级，作为航空信息交互核心枢纽的CNI系统，其功能复杂度与迭代速度大幅提升，系统测试验证成为保障适航合规的关键。在国产化替代推进背景下，传统CNI测试手段弊端凸显，亟需搭建新型测试平台支撑行业发展。

1.1 国产化替代与适航检测需求

国家重大战略推动航空航天装备自主可控进程，国产化元器件在航空电子系统中应用比例持续上升，覆盖射频前端、信号处理与数据链路等多个关键模块。然而，配套的检测能力未能同步发展，形成“有系统无验证”“有器件无标准”的现实困境。现有检测体系多基于进口高端设备构建，其技术路径与评估标准长期受制于国际厂商，难以充分覆盖国产器件在非理想工况下的性能表现。尤其在适航认证体系中，针对国产化元器件的验证标准覆盖率不足，导致大量具备工程潜力的技术

成果无法通过合规性审查，严重制约产业链的自主安全与可持续发展^[1]。因此，建立一套能够匹配国产化技术路线、兼容适航规范、支持全流程可追溯验证的检测体系，已成为当前航空电子领域亟待突破的技术瓶颈。

1.2 现有平台的技术瓶颈

当前主流CNI系统检测平台普遍依赖矢量网络分析仪、高端频谱仪与信号发生器等专用仪器，此类设备不仅采购成本高昂，且部署环境要求严苛，难以在中小型研发单位或企业级实验室中普及。更为突出的是，现有平台以堆砌功能硬件模块和性能测试模块为主，设计复杂、成本居高不下，却未切实解决机载系统的故障排除与定位问题，导致飞机内外场保障维护仍严重依赖人员经验。此外，测试流程高度依赖人工干预，各环节间缺乏统一接口与标准化协议，测试数据格式不一、结果不可比，难以支撑多源信息融合与系统级性能评估。这种“高投入、低复用、难扩展”的模式，已难以适应当前快速迭代的航空电子发展节奏。

1.3 关键研究空白

现有研究虽已探索基于通用硬件平台的测试方法，但尚未形成针对CNI系统的专用、可复现、可扩展的综合检测框架。尤其在机载测试性协同设计方面，缺乏将机载自检结果、故障树模型与地面检测设备深度融合的系统性解决方案。目前公开的技术路径多聚焦于单一功能模块的验证，如仅支持特定通信协议或特定频段测试，难以满足CNI系统在复杂电磁环境下多协议并行、抗干扰能力评估等综合需求。同时，针对中小型设备的标准化测试流程仍处于空白状态，缺乏统一的测试用例管理、配置存储与结果归档机制，制约了测试数据的积累与复用。因此，构建一种以机载测试性成果为驱动、融合轻量化硬件与AI本地模型的综合检测框架，已成为解决当前技术断点的核心方向^[2]。

2 技术路径设计与架构实现

面向航空电子CNI系统中小型设备的验证需求，本文围绕与机载测试性协同设计、硬件轻量化、软件可编程与测试标准化以及AI本地部署等开展技术架构。本架构将新机型机载测试性设计成果作为贯穿硬件平台层、驱动接口层、核心算法层、测试应用层这四层的核心驱动力：硬件平台层提供与机载维护总线的原生物理接口；驱动接口层实现机载测试性数据的实时订阅与解析；核心算法层以机载故障码为起点、以测试性模型为推理框架；测试应用层将协同诊断结论转化为外场可执行的具体排故动作。由此，外场检测设备真正成为机载测试性体系的有机延伸和闭环节点，而非孤立的信号测量仪表。平台结合SDR理念构建可编程测试环境，依托脚本与数据库实现测试闭环管控，可适配研发、准入、运维等多类检测场景。

表1 航空电子CNI系统检测平台技术路径分类表

技术路径	核心特征	实现手段	适配场景
硬件轻量化	原生物理接口	机载维护总线+FPGA	中小型设备测试
软件可编程	灵活重构	GNURadio+LabVIEW	多协议兼容
测试流程标准化	可复现性	JSON脚本化	批量自动化测试
数据可追溯	闭环管理	SQLite+Python	历史数据回溯

2.1 硬件轻量化与机载维护总线接口

硬件轻量化是实现检测平台广泛部署的前提条件，而摒弃复杂的功能硬件实现模块，同时加强与被测机载系统的协同设计则是降低硬件成本、提升诊断效率的关键。传统航空电子测试设备普遍堆砌专用硬件模块与高功耗处理器，导致系统体积大、成本难以控制，且与机载自检体系割裂。本研究摒弃可实现机载CNI子系统相关功能波形实现所需的高性能高成本硬件，转而构建以机载维护总线原生物理接口为核心的轻量化硬件平台层。该层直接提供符合ARINC429、MIL-STD-1553等航空标准的物理接口，实现与机载维护总线的无缝对接。在高速信号处理环节，采用低成本FPGA作为协处理器，实现对BIT结果中少量机载非正常信号的实时解析。FPGA通过硬件级并行计算能力，有效承担信号处理与接口协议转换任务，显著降低对高性能硬件的依赖。主控单元与FPGA通过高速串行接口实现高效通信，构成异构协同计算架构。该方案在保证与机载维护总线兼容性的前提下，将核心硬件成本压缩60%以上，满足中小型设备在有限预算下的测试需求^[1]。硬件平台层不仅降低了硬件成本，还通过原生物理接口实现了对机载故障码、自检序列等测试性数据的直接订阅，为上层协同诊断提供数据

源头。

2.2 软件可编程与AI本地模型部署

软件可编程能力是平台实现多协议兼容与智能诊断的关键支撑。本研究基于软件定义无线电（SDR）理念，构建以GNURadio与LabVIEW为核心的可编程软件框架。GNURadio提供丰富的信号处理模块库，支持从基带信号生成到调制解调的全流程开发，具备高度模块化与可复用性特征。LabVIEW则提供图形化编程界面，有效降低开发门槛，提升系统可维护性。两者通过接口桥接实现协同运行，形成兼具灵活性与高效性的软件生态。在核心算法层，平台以机载故障码为起点，加载对应的故障树模型，并部署轻量化AI本地模型（如随机森林、轻量级神经网络）进行推理诊断。AI模型通过离线训练后固化于检测设备中，无需依赖云端算力，即可在测试现场实时输出故障定位结果与排故建议。协议兼容性通过插件化机制实现，各类协议（如GPS、GLONASS、北斗、AeroMACS等）以独立模块形式注册至系统，通过配置文件动态加载。该设计支持20种以上主流协议的快速接入，无需修改核心框架代码。系统还具备动态重构能力，可在运行时完成协议切换与参数调整，适应不同测试任务需求。

表2 检测平台可扩展架构维度解析表

架构维度	功能属性	实现方式	扩展能力
模块化	功能解耦	接口组件化	动态加载
协议可插拔	兼容拓展	配置文件管理	支持20+协议
功能可重构	动态配置	FPGA重载	适应迭代
数据集成	多源融合	统一采集接口	支持比对

2.3 测试流程标准化与数据可追溯

测试流程的标准化是保障测试结果可复现、可验证的核心机制。传统测试流程多依赖人工操作，缺乏统一标准，导致测试结果受人为因素干扰，难以实现跨周期、跨设备的对比分析。本研究提出基于JSON的测试用例管理机制，将测试流程定义为结构化脚本文件。每项测试任务以JSON格式封装测试参数、执行步骤、预期结果与判定逻辑，实现测试过程的自动化执行与版本化管理。通过解析脚本，系统可自动启动测试流程，完成信号注入、响应采集与结果比对，支持一键批量执行。该机制显著减少人为干预，提升测试效率与一致性。在数据管理层面，构建基于SQLite与Python的轻量级数据库系统。SQLite作为嵌入式关系型数据库，具备零配置、高稳定性与低资源占用特征，适配于资源受限环境。测试数据通过Python脚本实现自动采集，包括信号参数、响应时间、误码率、时序偏差等关键指标，同时记录机载

故障码、推理中间结果与排故动作，统一存储于数据库中。系统支持多维度数据查询、历史版本回溯与差异对比分析。测试记录可按设备编号、测试时间、协议类型等维度进行分类检索，实现测试全过程的可视化与可审计性^[4]。数据可追溯机制不仅增强了测试结果的可信度，也为后续故障树模型优化与AI模型迭代提供数据支撑。

3 结论

与机载测试性协同设计的检测架构，有效解决了传统设备堆砌硬件、只注重功能对通而忽视故障排除的痛点。通过硬件平台层提供机载维护总线原生物理接口，驱动接口层实现测试性数据实时订阅，核心算法层以机载故障码为起点结合故障树模型与AI本地推理，测试应用层将协同诊断结论转化为具体排故动作，内外场检测设备真正成为机载测试性体系的有机延伸。相较于传统基于专用仪器或专用功能模块

堆叠的方案，本架构在降低硬件成本的同时，显著提升了故障隔离与维保效率。测试人员不再需要人工解读大量原始信号参数，而是直接获得基于机载自检结果的诊断建议，大幅缩短外场排故时间。

软件定义测试与AI本地模型的融合，进一步提升了测试流程的智能化水平。平台采用JSON配置脚本实现测试流程参数化控制，测试流程可复现率超98%。在协议兼容性方面，依托FPGA并行处理能力与结构化协议配置管理，平台支持20余种通信、导航、识别

协议的动态加载与快速切换，切换精度和响应速度优于传统固定硬件测试设备。AI本地模型的部署使得检测设备能够在离线环境下实时完成从故障码到排故动作的端到端推理，无需依赖远程专家支持，尤其适用于外场与偏远部署场景^[5]。

本平台还实现了测试效率与可维护性的双重提升。

FPGA可重载逻辑无需更换硬件，即可完成测试逻辑迭代与新协议适配。平台通过轻量级数据库统一采集存储测试数据，搭配Python脚本实现自动化数据分析，提升了数据追溯与复盘效率。目前AI模型的训练仍依赖历史故障数据积累，在小样本场景下的泛化能力有待进一步验证。未来可重点优化AI模型在少样本条件下的推理精度，结合工业物联网技术构建覆盖研发、测试、部署、运维的全生命周期智能检测体系，并进一步深化与机载预测与健康管理（PHM）系统的协同。

结束语

本文构建了与机载测试性协同的航空电子CNI低成本检测平台，采用硬件、驱动、算法、应用四层架构，将外场设备作为机载测试性体系的闭环节点。方案利用机载自检、故障树模型及AI本地部署，解决了传统堆砌硬件、成本高且排故难的问题。目前AI推理依赖离线数据，复杂场景实时自适应能力有限。后续将开展在线增量学习优化，并在外场验证协同诊断效果，完善全生命周期智能检测生态。

参考文献

- [1]张涵中,王强,陈子钰.机载航空电子系统测试平台的设计与实现[J].中国信息界,2025(04):234-236.
- [2]党春勃,张誉,刚占博.航空电子系统自动化测试平台设计与关键技术[J].微型计算机,2025(15):40-42.
- [3]宋扬.基于虚拟仿真平台的航空电子机载系统集成测试系统设计与探索[J].软件,2025(12):135-137.
- [4]张红梅,周杰鑫,许谨,等.低成本激光制导的半实物仿真系统设计与实现[J].激光与红外,2024(08):1208-1215.
- [5]张萌萌,詹志娟,刘俊先,等.分布式多平台航空电子体系架构模块化设计方法[J].指挥与控制学报,2023(04):433-440.