

基于信号的飞机自动测试系统设计

郝向阳¹, 田建宙², 高歆卓², 孟亮², 钱洪美³

(1. 航空工业陕西飞机工业有限责任公司, 西安 723213;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 中国融通安防国际集团有限公司, 北京 100007)

摘要: 飞机机载设备的高效测试和故障定位通过对机载设备的物理信号(如电压、电流、频率、振动等)进行实时采集和解析的;并结合智能诊断算法进行;测试系统采用自动查询的方式寻找系统中满足被测需求的测试仪器;通过分析测试程序所需信号的属性来输出信号;基于 ATML 标准的面向信号飞机自动测试系统采用了测试信号建模技术、信号与测试资源自动映射技术,通过 ATML 标准的自动测试软件来实现飞机自动测试系统之间的测试程序的共享;通过对测试单元的测试需求的解析梳理,编写符合测试需求的测试程序来控制测试系统中的各种仪器资源完成对飞机机载设备的测试验证;通过验证;这套系统比传统的方法在故障检测率和检测效率上都有了明显的提高。

关键词: 面向信号的飞机自动测试系统; ATML 标准; 开放式架构; 测试信号建模技术; 信号与测试资源自动映射技术

Design of Aircraft Automatic Test System Based on Signals

HAO Xiangyang¹, TIAN Jianzhou², GAO Xinzhuo², MENG Liang², QIAN Hongmei³

(1. Shanxi Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 723213, China;

2. Aerospace Measurement & Control, Beijing 100041, China;

3. China Rongtong Security International Group Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The efficient testing and fault location of aircraft onboard equipment are achieved through real-time collection and analysis of physical signals (such as voltage, current, frequency, vibration, etc.) from onboard equipment, which are carried out in combination with intelligent diagnostic algorithms. The testing system adopts an automatic query method to search for the testing instruments that meet requirements in the system. The signals are output by analyzing the attributes required by the testing program. The signal-oriented aircraft automatic testing system based on ATML standard adopts the testing signal modeling technology and the automatic mapping technology between signals and test resources. The sharing of testing programs among aircraft automatic test systems is achieved through the automatic testing software of ATML standard; The requirements of testing units are analyzed and sorted out to write a testing program that meets the testing requirements, control various instrument resources in the test system, and complete the testing and verification of the aircraft's onboard equipment. Through verification, this system has significant advantages over traditional methods in fault detection rate and detection efficiency.

Keywords: signal-oriented aircraft automatic testing system; ATML standard; open architecture; testing signal modeling technology; automatic mapping technology between signals and testing resources

0 引言

现代航空器型号日益多样化,其搭载的尖端航电系统已成为决定其效能的核心要素。随着机载设备技术复杂度的不断提升,其技术状态监测及故障诊断的难度呈

现几何级增长态势。这种技术演进在增强航空平台能力的同时,也衍生出复杂的维护保障挑战:设备故障后的检测排查周期延长直接影响航空装备的出勤率,更导致备件储备与后勤维护成本显著攀升。面对信息化对飞机高可用率、低成本保障和快速部署能力提出的严苛要

收稿日期:2025-05-14; 修回日期:2025-06-05。

作者简介:郝向阳(1980-),男,硕士研究生,高级工程师。

引用格式:郝向阳,田建宙,高歆卓,等.基于信号的飞机自动测试系统设计[J].计算机测量与控制,2025,33(7):90-96,104.

面向信号的测试主要是指测试系统不需要指定某一测试系统中的仪器进行激励信号的输出或信号采集,测试系统将自动去查找系统中具有该能力的测试仪器,通过分析测试程序所需信号的属性来输出信号。它可以精准验证底层信号,确保系统可靠性,可以直接测试信号的物理属性和逻辑属性,确保信号在电磁干扰和振动等严苛环境下能够准确测试与输出;测试程序可以进行跨平台移植,相同的测试对象,只要测试系统技术指标满足要求,即可利用现有的测试程序对测试对象进行测试,无需再次开发,比 C909/C919 等飞机的各种机载测试部件,测试程序只需开发一次即可,无需在不同的面向信号的飞机自动测试系统中进行二次开发,节约人力资源,节省开支。它还能够较低成本下高效快速地检测和定位机载设备的故障,同时提升检测设备的技术

1.1 测试系统的实现原理

本系统创新采用标准化信息流驱动机制，通过抽象化建模实现测试系统的跨平台移植。所有激励信号生成与参数测量指令均转化为标准化可移植数据包，通过设备资源需求分级、信号路径虚拟化等技术手段，构建物理层差异隔离机制。该架构设计有效达成软硬件目标，确保测试 TP 在不同技术平台间的无缝迁移与复用。

本系统与国外典型的飞机装备测试系统包括洛克希德·马丁公司的 CASS 和法宇航 ATEC 6 系列的自动测试系统平台相比,在吸取国外自动化测试系统的优点上,覆盖 CASS 和 ATEC6 的基本功能和性能外,更强

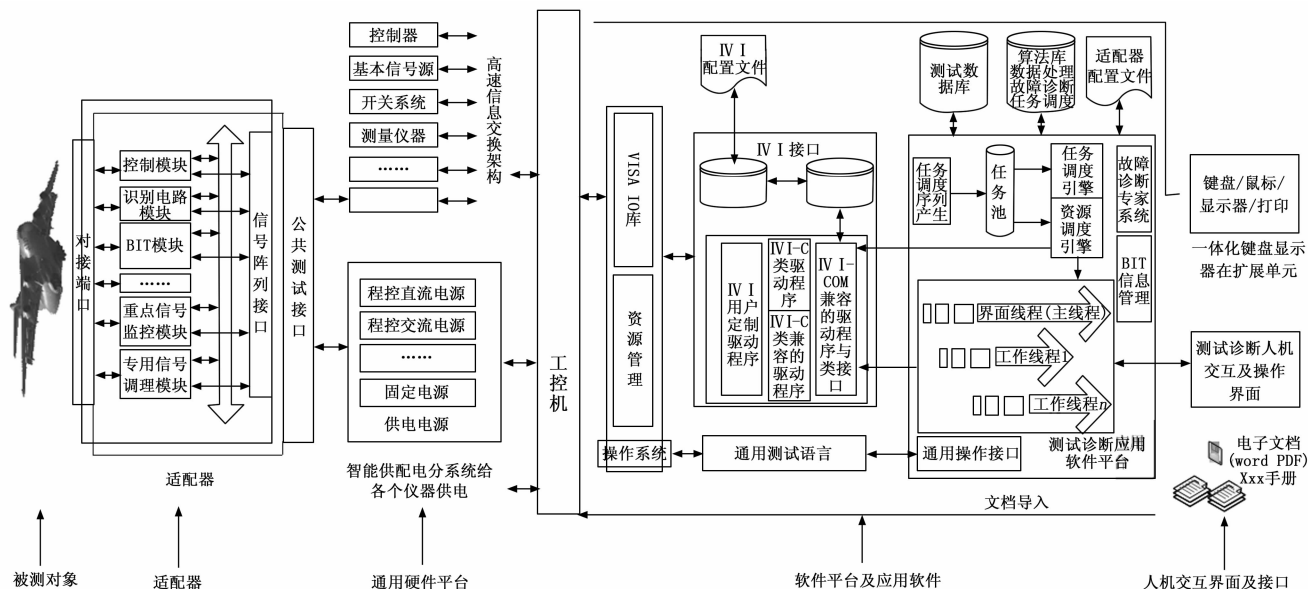


图 1 测试系统原理框图

调飞机装备测试的通用性、扩展性以及与其它测试设备的信息交互能力。面向信号的飞机自动测试系统与美国海军的 CASS 系统和法宇航 ATEC 6 系列产品技术比较情况如表 1 所示。

表 1 与国外同类测试产品技术比较

产品类型	面向信号的飞机自动测试系统	CASS(洛克希德·马丁)	ATEC 6 (法宇航)
维护级别	二级和三级测试维护,通过剪裁组装也可以构成便携式仪器,用于原位测试和故障诊断。	二级和三级测试维护,通过剪裁组装也可以构成便携式仪器,用于原位测试和故障诊断。	二级和三级测试维护
种类	包括 2 种标准的结构形式,2 种结构采用相同的软件和硬件,以便测试资源互换。	包括 4 种标准的结构形式,4 种结构采用相同的软件和硬件,以便测试资源互换。	多种配置,主要的有 4 类
仪器总线	PXIe/PXI 总线为主,LXI 总线为辅的混合总线仪器资源	采用 VXI 总线仪器资源	VXI 总线仪器资源
测试程序语言	ATLASS 或 ATML 开发 ATLASS 和 ATML 执行	测试程序语言 C / ATLAS 的 CASS 子集,增加了 AT-ML 组件工具。	ATLAS
开发运行软件	VITE3.0,图形化人机界面提供完整的 TPS 开发、调试和工作环境。	PAWS (专业 ATLAS 工作环境)软件,提供完整的 TPS 开发、调试和工作环境。	图形化人机界面提供完整的 TPS 开发、调试和工作环境。
操作界面	中文	英文	英文
与其他测试设备的协调工作能力	在吸取国外自动化测试系统的优点上,更强调装备测试的通用性以及与其它测试设备的信息交互能力。	在测试对象的范围中不能涵盖其他机型的产品,并且与其他通用测试系统地兼容能力以及协调工作的能力仍然有待提高。	在测试对象的范围中不能涵盖其他机型的产品,并且与其他通用测试系统地兼容能力以及协调工作的能力仍然有待提高。

1.2 测试系统的架构设计

面向信号的自动测试系统由面向信号的自动测试平台、测试 UUT 所需的适配器、测试时使用的电缆和为被测单元编写的测试 TP 组成。面向信号的自动测试系统与被测 UUT 通过数据交换接口和物理信息接口进行串联。面向信号的自动测试系统与被测试 UUT 组成的系统架构如图 2 所示。

对被测试单元进行测试时,第一步需要进行物理上的连接,需要将测试单元通过测试线缆直接连接或者通过测试线缆先连接至适配器再通过适配器将物理接口连

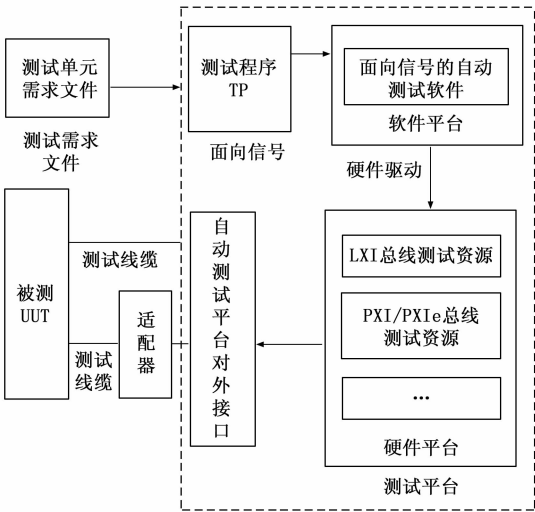


图 2 测试系统架构图

接至面向信号的飞机自动测试系统对外输出接口中,以实现测试单元与系统的物理连接;软件上需要将测试单元的测试需求进行解析梳理,编写符合测试需求的测试程序,测试程序在测试系统的软件中运行,控制系统中的各种仪器资源,为测试单元提供所需的激励和响应,来完成对被测单元的测试内容。

面向信号的飞机自动测试系统采用开放式的架构、开放式的标准以及全新的面向信号的测试技术。其目的是对信息在飞机系统全寿命周期内的循环使用进行改进(只要测试单元相同,在任何飞机中只需提供一次测试信息);同时更大程度地降低了更换自动测试系统所需要付出的研发成本(被测单元从一个面向信号的测试系统到另一个面向信号的测试系统,无需进行二次开发);在不增加任何费用的情况下(目的是允许在现行系统中植入新的技术或功能,而不增加新的投资),加强测试仪器的可移植性。

面向信号的飞机自动测试系统物理层是由测试资源及总线、控制器、测试系统对外输出接口组成;软件层由测试系统资源驱动和测试软件构成;信息交互层是由被测单元信息、测试适配器信息、测试线缆信息、仪器设备信息和信号模型信息等组成,具体如下。

被测单元信息:作为测试系统的被测资源,通过模型的建立,可以对其进行有效的识别、测试等;

测试适配器信息:它是面向信号的测试系统和被测 UUT 的桥梁;

测试线缆信息:对被测单元的连接线缆进行的描述;

测试系统信息:它主要是对面向信号的测试平台对外输出的各种信号进行建模,主要描述面向信号的测试平台的输出资源;

仪器设备信息:主要描述测试系统中的各仪器能力

并进行建模；

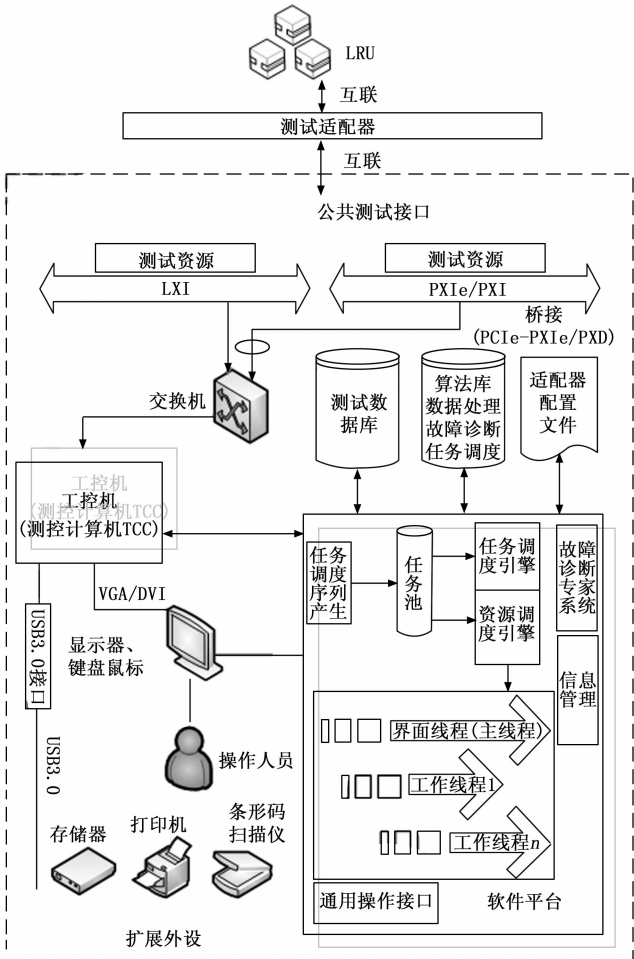
信号模型信息：对测试系统中的各种信号属性进行描述，并进行建模。

系统框架采用 IEEE1671（ATML）的体系标准，使得不同的自动测试平台之间进行信息交流，实现不同自动测试平台测试流程的共享和重用。在不同的面向信号的飞机自动测试系统中，同时采用 XML 文件对 ATML 内容进行了定义，使得各数据之间可以相互交互，所以同一个 UUT 测试流程可以在不同的面向信号的测试系统中进行测试，不必再开发新的测试流程。

2 系统硬件设计

2.1 系统硬件设计原理

以测控计算机为核心的面向信号的自动测试系统，硬件平台从整体上利用全新的高速测试总线 PXIe 为核心，同时可以兼容 PXI/LXI 总线的仪器来实现基本系统的硬件架构，采用网络拓扑架构进行数据的交换。面向信号的自动测试系统的硬件在标准总线系统和网络化交换的结构下，可方便的进行裁剪，同时便于扩展，并可进行升级。如图 3 所示为它的功能实现原理图。



自动测试系统硬件实现原理图
图 3 测试系统硬件原理框图

面向信号的飞机自动测试系统硬件平台各组成核心要素或子要素实现原理如下。

测控计算机—工控机：完成系统的综合控制，提供良好的人机交互界面，实现测试人员对设备的操作，实现对 PXIe/PXI 机箱的桥接控制，以及对供电电源和系统测试资源的网络化控制；

测试资源：包括 PXIe/PXI 总线和 LXI 总线仪器，仪器模块包括激励/采集类、交直流电源类、电子负载类、通信类仪器通道资源，为系统提供基础测试通道资源；

其他扩展系统资源：包括微波信号源、频谱仪、电台综测仪、微波附件组合和一些专用模拟器，微波信号源、频谱仪和电台综测仪提供被测对象测试中宽频带的微波激励、频谱测量及调制解调功能等；微波附件组合主要实现系统输出及采集信号的通道切换、扩展、衰减、检波等功能，并在满足测试功能需求的基础上保证测试设备与被测对象的安全；

供电电源：提供被测组合单元供电所需交直流电源、中频电源等；

智能供配电组合：实现平台智能供配电、供电保护、环境/电源参数监控警报等功能；

公共测试接口：将系统测试资源集中起来，是系统与被测对象连接的公共硬件接口。面板接口包括微波射频类和通信类接口，实现系统与被测对象的直通互连。

仪器总线是平台核心要素之一，也是提升测试吞吐速度和设备信息化程度的关键环节。将目前行业内标准仪器控制总线对比如表 2 所示，可见 PXIe 总线具有带宽较高、模块化、结构尺寸小等优点，非常适合需高速信息交互、高信息吞吐量的微波类仪器、中频数字化仪、高清视频发生与采集及高速航电总线类仪器资源的控制；PXI 总线具有成熟度高、性价比高、模块化、结

表 2 仪器总线对比表

名称 特性	PXIe	PXI	LXI	VXI	GPIB
类型	模块化总线	模块化总线	分立仪器总线	模块化总线	分立仪器总线
成熟度	成熟度高、型谱较全	成熟度高、型谱全	型谱有限	成熟度高、型谱全	成熟度高、型谱全
带宽特性	250 MB/s(×1) 6 GB/s(3×4)	132 MB/s	12.5 MB/s 125 MB/s	40 MB/s	1.8 MB/s
坚固性和可靠性	良好	良好	较好	良好	最佳
设置与安装	良好	良好	较好	良好	良好
尺寸	小	小	较大	较大	较大
坚固性和可靠性	较好	较好	一般	良好	最佳
设置安装	较好	一般	一般	良好	良好
价格	较低	较低	较低	较高	较低

构尺寸小等优点, 适合中低频激励与响应类仪器的控制; LXI 总线为分立式仪器资源, 适合对程控交直流电源、电子负载类等资源的分布式控制; GPIB 总线为分立式仪器控制总线, 适合对传统、成熟仪器资源或专测的控制。

2.2 测试信号建模技术

从测试需求的提出到完成测试程序的执行, 与信号有着千丝万缕的联系, 信号是面向信号测试系统软件平台的核心。实现测试系统软件平台正常运行的前提条件就是对信号进行建模, 建模分为动态建模和静态建模: 静态建模, 其主要描述被测单元的测试需求和自动测试系统当中的仪器物理资源; 动态建模, 其主要目的是将测试程序中的逻辑信息映射到所对应的系统测试仪器上, 使测试系统满足测试程序要求。作为信号的载体, 信号建模确保了系统中信号信息的正确传递, 并使使用者可以扩展系统的信号能力。

为了适应测试需求, 方便用户扩展信号, 信号建模需要逐层实现服务管理层 SML、区块链 BSC 以及分布式服务框架 TSF 的定义、连接关系、编译及仿真, 采用如图 4 所示的体系结构。

整个软件分为三层, 以 XML 文件为整个软件数据层的 BSC 组件模型库保存了整个平台的基础数据; TSF 的信号属性编辑是 TSF 信号的逻辑层, 用户可以通过使用 BSC 组件层的信号获得新的 TSF 信号。

信号建模工具通过提供信号模型库管理、BSC 组件管理、TSF 信号管理以及 TSF 信号仿真管理实现了信号组件的扩展。

测试信号建模完成之后需要对其准确性和可靠性进行验证, 利用 TSF 信号仿真管理功能, 读取相应信号库的 XML 文档, 选择信号库中的某一信号, 根据用户录入的信号属性值, 通过解析信号结构, 生成仿真波形数据, 显示信号波形, 验证该信号是否为预期信号。信号仿真工具的整体设计流程如图 5 所示。

2.3 信号与测试资源自动映射技术

信号与测试资源自动映射技术是硬件测试、仿真和虚拟化领域的重要研究方向, 旨在通过 ATML 的标准规范, 将测试需求动态匹配到最优化的硬件资源上。

通过分析测试通导与之相匹配的模型, 完成虚拟资源与测试需求资源的映射, 然后再经过逻辑资源和信号模型, 将其分配到与之能力匹配的仪器资源驱动上, 完成对仪器设备的控制。

测试信号与硬件资源自动映射的总体目标是通过一定的调度规则, 实现用户设置的信号模型与实际物理仪器的智能映射。其原理框如图 6 所示。

根据图 6 所示, 测试诊断运行时服务采用面向信号的测试方法, 完成对信号模型的测试过程, 分别采用 6 个步骤: “设置信号” “建立连接” “测量数据” “数据比较” “断开连接” 和 “复位”。其中, 在“设置

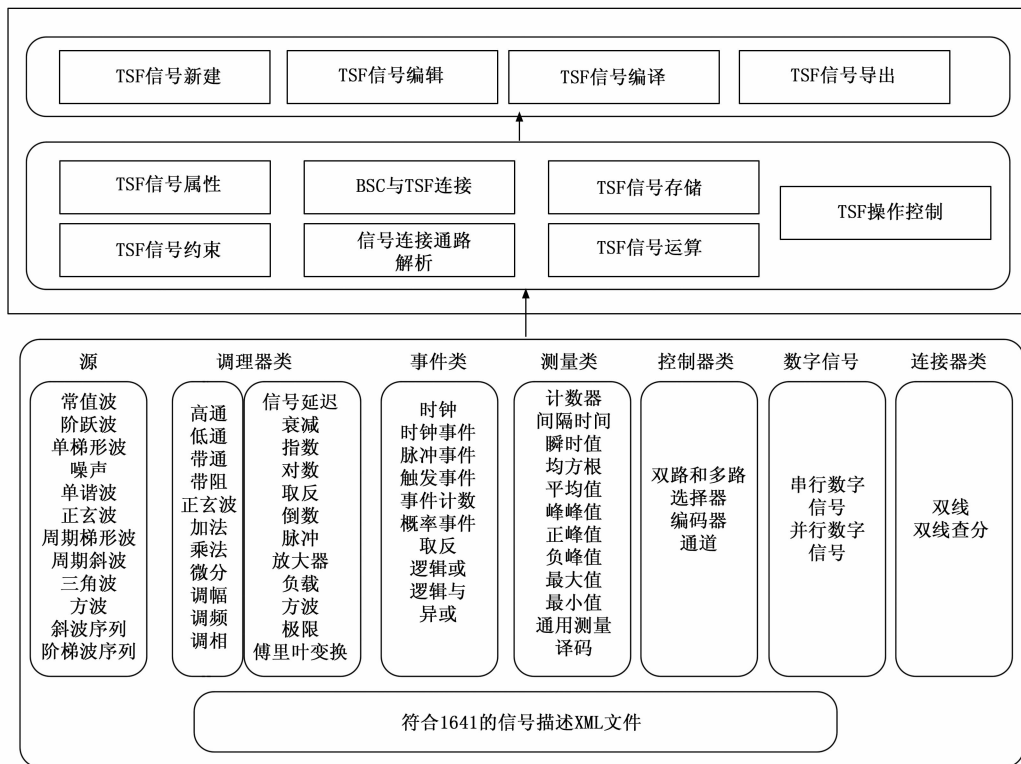


图 4 信号建模流程图

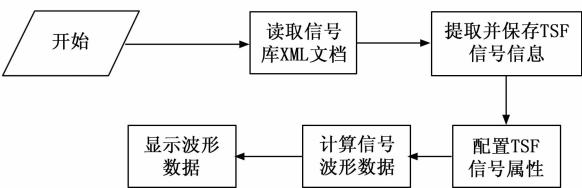


图 5 信号仿真工具的整体设计流程图

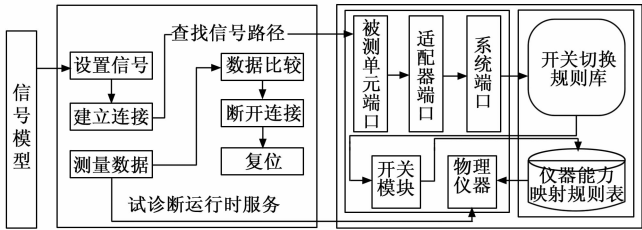


图 6 自动映射技术原理图

信号”阶段加载信号模型，在测试资源的配置信息查找信号路径中会调用“建立连接”，从而完成自动映射资源的过程。

3 系统软件设计

3.1 软件功能原理

面向信号的自动测试系统软件是根据《航空设备自动测试系统通用要求：软件》及其引用的相关标准族群（核心为 IEEE1671：ATML 标准族群）制定的。测试系统软件可以对被测 UUT 进行故障定位和功能性能的测试。可实现信号、被测单元、适配器、测试系统接口、仪器仪表和测试策略等软硬件资源的协同开发，信息共享，提高整体的开发效率。

测试程序开发环境中设计有一系列的模型库，如信号模型、仪器模型等。其功能原理如图 7 所示。

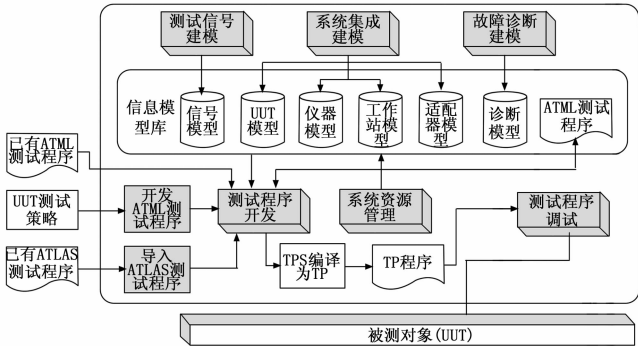


图 7 面向信号的自动测试系统软件平台原理图

为实现系统架构的灵活演进与高效维护，本方案采用分层式组件设计理念，其技术实现如下图所示。系统通过四级架构实现技术隔离：标准数据层与设备驱动抽象层构成技术底座，软件接口层建立标准化通信通道，逻辑控制层集成智能控制引擎，应用层实现可视化功能

封装。各层级采用正交化设计原则，其中标准数据层固化元数据交换标准，逻辑控制层构建硬件差异屏蔽机制，软件接口层提供各仪器功能化接口，逻辑控制层实施动态资源调配策略，应用交互层搭载可视化测试开发环境，形成支持独立升级的弹性架构体系。

1) 标准数据层和仪器驱动层：

ATML 标准化测试描述语言规范化整合了检测设备、流程逻辑、接口适配及结果数据的语义表达范式，作为基础数据交互介质，依托数据库实现中间计算数据与算法逻辑的持久化存储。IVI 设备抽象层构建了仪器驱动抽象接口体系，通过操作系统资源分配机制与 VISA 函数库的平台依赖性，确立设备资源的跨平台兼容能力。

2) 软件接口层：

接口层创新性集成三类规范化服务接口：ATML 语义解析接口、数据库接口及 IVI 设备控制接口，形成面向测试仪器特征参数、测试时序逻辑及资源配置方案的业务抽象模型。该设计策略有效突破系统兼容瓶颈并提升功能扩展能力。

3) 逻辑控制层：

逻辑控制层实施多维度系统管控，集成资源智能分配引擎、人机交互事件处理机制、跨模块数据协同传输通道、指令响应映射矩阵、逻辑状态控制单元、动态内存优化模块及设备指令序列生成器等核心组件，构建全链路操作体系，确保用户交互行为的合规性、操作链路的完整性及功能实现的可靠性。

4) 测试应用层：

应用层构建可视化测试建模平台，提供图形化检测流程设计工具、故障诊断行为定义环境及智能化测试执行框架，支持从需求建模到现场实施的端到端工程闭环。

通过这种四级架构设计，系统实现了信息表达范式统一与功能模块化重组。各功能层级具备自主迭代能力，既可独立演进又能协同优化，最终形成具备高度平台适应性与弹性扩展空间的智能检测解决方案体系。

3.2 软件实现流程

测试工程集成环境提供全要素建模能力，涵盖信号特征、待测装置、接口组件、测试工装及仪器参数等数字化定义功能。通过构建基于 XML 架构的标准化工程文档体系，完整描述测试策略配置、被测单元技术规格、适配接口参数、测试工装拓扑及仪器性能指标等核心要素，实现测试序列脚本生成、故障诊断树构建、系统配置文件编译及可执行测试程序集的自动生成。该环境集成代码编译验证与调试工具链，支持从需求建模到可执行程序的全生命周期管理，并具备跨平台移植适配能力。系统功能架构包含四大核心模块：测试策略规划器、资源建模工具集、程序调试分析器及移植适配管理器，细分为被测单元数字化建

模、接口适配配置、线缆拓扑设计、测试工装配置、仪器特征建模、测试流程编排、诊断规则定义、代码编译验证和跨平台迁移适配九大工程组件。测试系统采用信号流驱动架构，将测试行为解构为信号需求定义、信号获取机制及信号处理逻辑三个维度。通过建立信号抽象层实现测试人员与物理仪器的逻辑连接，工程师仅需掌握被测设备信号特性即可通过可视化界面完成测试需求编制与系统操作。该架构通过标准化协议封装和信号操作抽象化设计，构建如图 8 所示的层次化软件框架，显著降低测试开发的专业门槛。

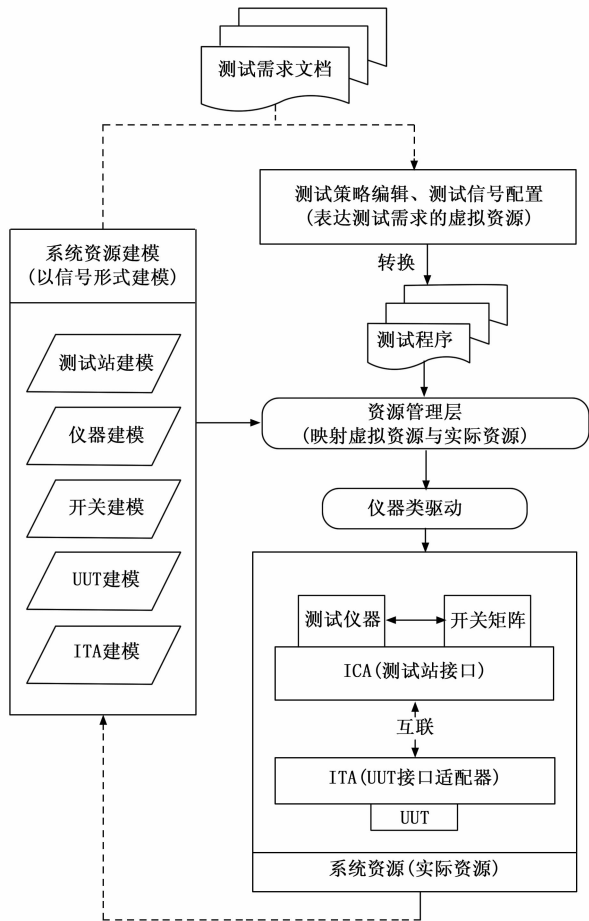


图 8 软件的实现结构图

测试程序开发平台为用户提供图形化的流程开发模式，而无需再编程。帮助用户灵活、方便、快捷地建立起完整的测试流程，同时在线诊断的引入，实现了测试与诊断的一体化开发过程。它采用信号驱动型开发范式，为工程师提供可视化流程编排环境。用户依据被测设备的技术规范，可通过拓扑化编排工具配置激励生成与响应采集的时序逻辑链，经语义化编译引擎完成资源拓扑解析，最终生成规范化的全链路测试方案。该平台通过信号时序建模、资源智能绑定及流程完整性验证三重机制，实现从需求定义到可执行测试序列的标准化转

换。测试程序开发的功能是为用户提供一个测试程序编辑（配置）、编译、调试、发布的集成开发环境。

4 试验验证

设备的地面验证试验中，面向信号的飞机自动测试系统已顺利完成了工程验证。该系统可对飞机上的机载设备进行全面测试，并可以进行机载设备的故障定位与故障诊断。某一个机载设备被测单元的测试程序也可以成功的移植于另外一套面向信号的飞机自动测试系统（不同厂家生产属于双备份之一）中。测试结果可信，符合设计要求。图 9~10 为某型飞机中某机载设备的测试结果。

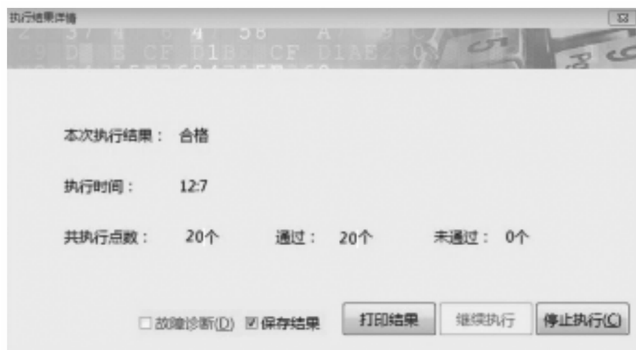


图 9 面向信号测试系统测试结果

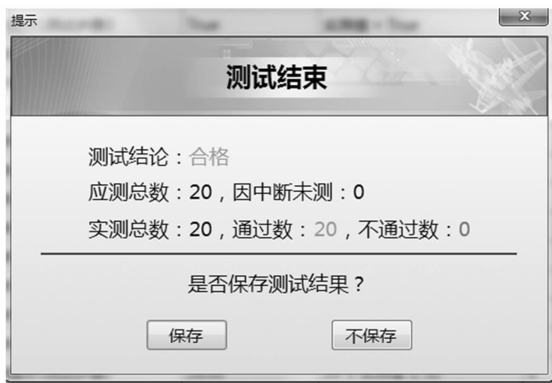


图 10 移植到其他面向信号测试系统测试结果

5 结束语

面向信号的飞机自动测试系统可以有效的解决跨平台移植问题，它可以避免对相同的机载设备进行重复的TP开发，大大节约了成本节省了时间；可以在较低成本下高效快速地检测和定位机载设备的故障，同时提升检测设备的技术水平。但目前还有一定的局限性，跨平台移植只能在不同的面向信号的测试系统中进行，而各个成品厂都有自己独立的测试仪器，他们都是自己独立开发的面向仪器产品，这导致了通用测试平台推广受到影响，国内各个飞机厂家还未建立健全的飞机测试平台，当机载设备出现故障时，第一时间想到的是退给成

（下转第 104 页）