

航空设备通用自动测试平台研究

文永明¹, 余锋祥²

(1. 中国人民解放军第五七一八工厂, 广西 桂林 541000;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 随着现阶段智能制造及高新技术的高速发展, 现代航空设备的型号种类愈发丰富, 设备功能先进, 随之技术复杂程度也日益提高, 这些现代化的设备在提高航空设备作战效能的同时, 也带来了繁杂的测试、诊断和保障问题; 由于设备的技术复杂程度越来越高, 使得故障检测与诊断变得越来越困难; 设备出现故障后, 不能及时修复, 严重影响了设备战备完好性, 也增加了设备的保障费用; 设计提出了一种航空设备通用自动测试平台, 采用开放的体系结构、开放的标准和新一代测试技术, 实现了设备自动检测设备的综合化、通用化、系列化和标准化, 解决了设备测试和保障问题的同时最大限度地减少检测设备种类, 提高检测设备技术水平, 以较低的费用实现设备的快速高效检测和维修。

关键词: 航空设备; 通用自动测试平台; 测试和保障

Research on General Automatic Test Platform for Aviation Equipment

Wen Yongming¹, Yu Fengxiang²

(1. No. 5718 of the Chinese PLA factory, Guilin 541000, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp, Beijing 100041, China)

Abstract: With the rapid development of intelligent manufacturing and high-tech at the present stage, the types of modern aviation equipment are becoming more and more abundant, the equipment functions are advanced, and the technical complexity is also increasing. These modern equipments improve the operational effectiveness of aviation equipment. Brought complicated testing, diagnosis and security issues. As the technical complexity of the equipment becomes higher and higher, fault detection and diagnosis become more and more difficult. After the equipment fails, it cannot be repaired in time, which seriously affects the integrity of the equipment. Also increases the cost of equipment support. The design proposes a universal automatic test platform for aviation equipment. It adopts an open architecture, open standards and a new generation of test technology to realize the integration, generalization, serialization and standardization of automatic equipment detection equipment, and solve the equipment test and While ensuring the problem, the type of testing equipment is minimized, the technical level of the testing equipment is improved, and the equipment is quickly and efficiently detected and repaired at a low cost.

Keywords: aviation equipment; general automatic test platform; test and support

0 引言

随着现阶段智能制造及高新技术的高速发展, 现代航空设备的型号种类愈发丰富, 设备功能先进, 这些现代化的设备在提高航空设备作战效能的同时, 也带来了繁重的测试、诊断等保障问题^[1]。由于设备的技术复杂性增加, 使得检查其技术状况、进行故障检测与诊断变得越来越困难。设备出现故障后, 由于测试维修困难, 不能及时修复, 严重影响了设备战备完好性, 也增加了设备的备件费用和保障费用。现代战争要求航空设备有高的战备完好性和较低的使用保障费用, 还应能快速机动转场作战。

自动检测设备 (ATE) 是提高航空设备战备完好性的重要保障设备, 是保证航空设备作战效能发挥的重要手段^[2]。但我国航空设备的 ATE 存在诸多问题, 以飞机 ATE

为例: 一是缺乏统一的规划, 一般是按型号配套研制, 一个型号一个体系, 一个机载设备一个检测设备, 标准化、系列化和通用化程度低; 二是数量多、体积大, 缺少标准化和综合化, 机动性、部署性差, 不能满足现代战争机动作战的需要; 三是维修保障困难, 设备部队的检测设备可靠性低、维修性差, 而且采用的技术五花八门, 设备之间通用性差, 备件供应困难^[3]。

在此背景下, 本文研究的航空设备通用自动测试平台, 可实现航空设备自动检测设备的综合化、通用化、系列化和标准化, 最大限度地减少检测设备种类, 提高检测设备技术水平, 以较低的费用实现设备的快速高效检测和维修。

1 平台总体定位与需求

航空设备通用自动测试平台是一型开放式、通用化测试设备, 从航空设备的保障设备组成来看, 平台属于航空设备通用自动测试系统 (以下简称航空设备 ATS) 的一部分, 它只提供设备测试所需的软硬件资源, 通过平台提供的软件二次开发环境, 能够开发各个被测对象的测试程序,

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-02-26。

作者简介: 文永明 (1967-), 男, 大学本科, 广西桂林人, 高级工程师, 主要从事测试技术, 装备维修, 装备保障, 装备可靠性等方向的研究。

通过平台通用的物理测试接口, 可设计相应的测试适配器与被测对象交联对接。将平台加上测试程序集 (TPS), 才能构成完整的航空设备通用自动测试系统, 部署在部队级维修机构或基地级修理机构, 可实现对多型航空设备的电子、特设和军械类设备的功能检查、性能测试、参数调整、故障诊断等功能。

从使用功能要求、被测对象的技术特点、部署机构的使用操作人员等情况来看, 平台有以下总体需求需要重点满足:

- 1) 平台的整体架构的通用化, 满足多个型号的使用。系统总体规模可控, 不能无限堆叠;
- 2) 平台的升级、扩展能力。能够便于典型产品的测试程序集 (TPS) 升级, 便于新型号的加装;
- 3) 平台的经济性。平台应能够灵活构型, 可裁减和可重构, 降低系统的整体设计研制和采购费用;
- 4) 平台的信息化水平。应将平台视为信息化保障设备家族的一员, 充分考虑信息共享策略, 重点实现设备故障复现、隔离与定位以及全寿命周期的管理。

2 平台硬件的总体设计

2.1 总体设计思路

根据需求分析, 平台是建立在高度标准化基础上的一个综合测试软硬件平台。一方面通过系统物理资源接口规范、硬件驱动规范和限制专用资源, 实现平台硬件的标准化并且确保系统平台的总体规模可控, 另一方面通过遵循基于 ATMML 等测试信息交换标准体系^[4], 实现软件平台的标准化以及测试程序集 TPS 与系统平台的无关, 使系统平台具有很强的扩展性和生命力, 同时能够减少系统的规模, 达到最优的经济性目标。为此, 平台总体设计遵循以下思路:

- 1) 研制开发贯彻标准。平台总体设计方案充分贯彻相关标准要求 (含相关国家标准、国军标、引用的 IEEE 组织相关标准、相关标准草案、以及行业测试标准), 通过细化设计方案和研制过程逐一响应各项标准的要求。
- 2) 成熟度与先进性并重。充分考虑以成熟货架产品来构建本平台。但为了保证系统的小型化和扩展性, 某些硬件设计采用灵活度高的先进技术 (如合成仪器技术)。
- 3) 国产化和自主可控。选用国产元器件、零部件、仪器设备和软件等成熟货架产品, 确保较低的寿命周期费用, 规避未来的保障风险。
- 4) 适应航空设备综合保障体系的要求, 平台主要部署在部队级或基地级修理机构, 采用的测试与诊断体系结构要符合这一框架。
- 5) 经济性。综合评估各种策略的费效比。如硬件资源的购置费用和研发费用、软件平台的开发费用、未来的升级扩展费用、产品交付后的保障费用 (如备品备件、技术资料、人员培训) 等。
- 6) 信息化。要支持与其它保障设备的信息交互和实现

综合诊断; 要具备与部队保障信息系统的数据交换接口。

7) 技术资料标准化。平台随机技术资料符合航空运输协会 (ATA) / 国防工业协会 (ASD) 《基于公共数据源数据库的技术出版物国家规范》(4.0 以上版本) 的数据库, 内容覆盖平台关键功能模块的研制, 并支持基于数据库分布交互式电子手册 (IETM) 和纸质用户技术资料。

2.2 硬件平台总体架构

通用自动测试平台属于航空设备 ATS 的一部分, 航空设备 ATS 由平台和 TPS 组成, TPS 由测试适配器、测试电缆和测试程序组成。通用自动测试平台、TPS 与被测对象 UUT 构成的系统体系架构可由数据交换接口和物理信息接口 (如图 1) 两大接口串联起来。

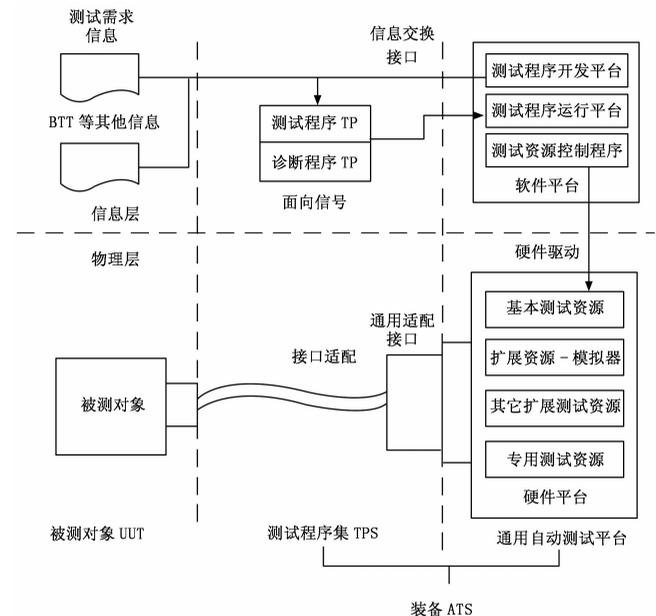


图 1 系统体系架构

要实现被测对象 UUT 的测试, 物理上需通过接口转换与适配和平台进行信号互连; 软件上, 需将 UUT 的测试需求抽象描述成测试信息, 并基于某种标准语言开发出测试程序 TP, 平台软件通过解析 TP、控制仪器资源提供相应的激励和测量相应的响应, 完成测试内容。

通用自动测试平台不同于以往测试系统的一个关键点, 是需要达到软硬件无关以及实现 TPS 可移植的目标。为实现该目标, 需设计一个开放的自动测试系统体系架构, 制定相关软硬件要素, 各要素之间的信息交换接口需要通过制定标准和规范进行约束同时还要制定可扩展的方案, 以确保将来其他航空设备平台产品测试的升级。

平台标准化体系的基本特征是采用开放的体系结构、开放的标准和新一代测试技术。其实质首先是改善设备系统整个生命周期内信息流复用; 其次较大地减少测试程序集更换宿主主机工程成本; 加强测试仪器的互操作性和互换性, 而不会损失先前的 ATE 投资费用^[5]。平台的软硬件体系架构如图 2 所示。

平台的物理层由仪器资源、仪器总线、测试计算机、公共测试接口组成；软件层由仪器控制、测试程序开发和测试程序运行构成；交换信息层则由信号模型、仪器设备描述、测试工作站、被测对象、测试适配器、测试配置、测试过程、测试结果描述、诊断信息等元素构成。在这三个层次上，相互间重要的交互接口信息包括：

- 1) 测试适配接口。用来约束测试仪器资源与被测对象之间的物理信号连接。
- 2) 测试资源仪器层和信号层控制。用来实现计算机对测试资源的控制，测试资源仪器层的控制是基于物理的方式，不具备软硬件无关性，需通过设计面向信号层的控制才能实现软硬件无关。
- 3) 测试流程信息。主要指测试流程序列，基于面向信号的方式描述。
- 4) 测试程序 TP 关键元素模型。主要包括 UUT 模型、工作站模型、适配器模型、仪器设备模型。这些模型主要用来匹配测试程序路径。
- 5) 测试配置信息。用来描述某一特定 UUT 所需的全部测试资产。
- 6) 测试结果导出。主要是测试结果的数据标准。需考虑到未来与保障信息系统之间的互连。
- 7) 诊断信息导入。主要是测试性建模仿真工具的诊断模型信息导入，或其他保障测试设备的诊断信息导入。

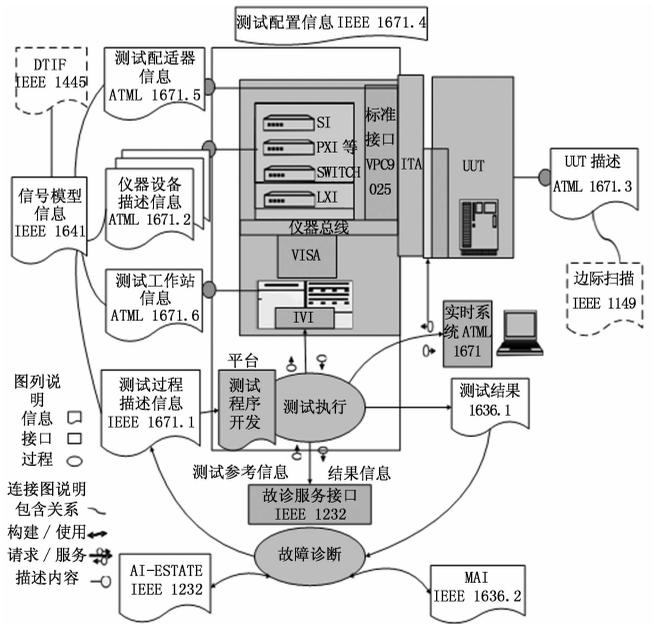


图 2 平台的硬件体系架构

2.3 平台设计实现的关键技术

通用自动测试平台采用的是国内自主研发的以先进 PXIe 高速测试总线模块为核心的硬件平台。其核心是必须突破以下几个方面的关键技术点：

- 1) 解决 PXIe 总线背板、嵌入式控制器和 PXIe 桥接器的国产化；

- 2) 实现自主可控的基于 PXIe 总线的高性能基础测量模块群，主要包括信号发生、信号采集和数字通信与测试三大部分。

图 3 为 PXIe 接口电路设计原理框图，目前已突破了基于交换架构的高速测试总线平台技术、5 GSa/s 高速任意波发生技术、20 GSa/s 高速交叉采样技术、2.5 Gbps 高速数字 I/O 等关键技术，成功研制了 PXI Express 总线的机箱/控制器平台产品、高速信号采集、高速任意波形发生器和高速数字 I/O 等系列产品，并得到了大量的推广应用，完全实现了 PXI/PXIe 测试总线产品的自主可控。

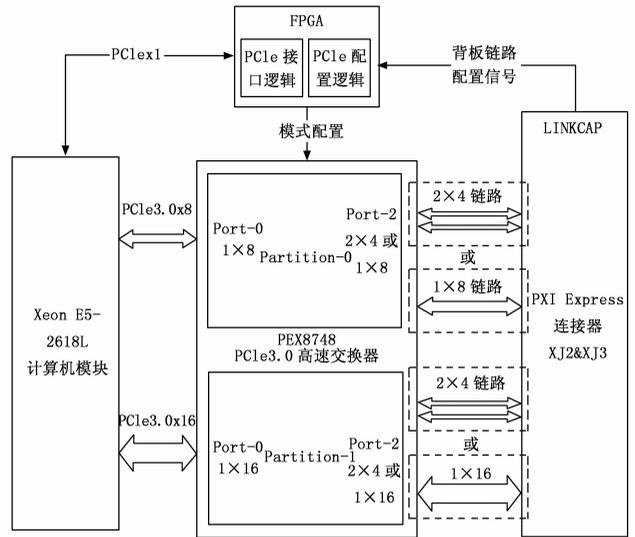


图 3 PXIe 接口电路设计

3 平台软件的总体设计

3.1 系统工作原理

通用自动测试平台由硬件平台和软件平台组成。硬件平台主要是由测控计算机、高性能测试资源群和测试适配接口组成，测试资源群是硬件平台的核心，包括基本资源、扩展系统和专用资源，采用标准总线仪器实现。平台采用的是以 PXIe/PXI 总线为主，以 LXI 总线为辅的混合总线架构，其中基本资源由 PXIe/PXI 总线模块实现，电源类资源和扩展资源（主要是大气全静压源资源、通用射频微波和多种模拟器资源等）采用 LXI 总线技术实现。

软件平台按层次划分可分为驱动层、数据交换层、控制层、业务层和展示层。其中驱动控制层实现与硬件之间的控制，主要包括仪器驱动、VISA 库和资源管理模块，本平台拟采用 IVI 驱动或符合 IVI 扩展要求的驱动以保证未来同类硬件模块的升级；数据交换层主要实现软件平台的内、外部数据的调用和处理，主要包括与 TPS 生成和移植相关的数据、平台的模型数据、结果数据、测试与诊断模型数据等；控制层的核心是资源调度引擎和任务调度引擎，用来管理和控制由 TPS 生成的测试序列；业务层按功能可划分为测试程序开发和 TPS 运行两大模块，其中测试程序开

发用来完成 TP 程序的开发、预编译以及导入导出, TPS 运行模块实现 TP 程序的加载和运行; 展示层主要是软件人机交互环境, 包括管理程序主框架、测试程序开发界面环境、TPS 运行界面环境等。

平台采用基于信息流的方式而不是简单的计算机控制硬件的方式, 实现与被测对象的测试。每一条需要计算机控制执行的激励或测量动作都依据标准编制成与硬件无关的可交换信息, 并且每个动作根据其所需的硬件资源、测试路径进行分层, 屏蔽物理差异, 确保其描述信息能够在其他平台上互用, 这样以实现 TPS 移植和软硬件无关的目标。

3.2 通用自动测试平台软件设计

本文研究的平台软件是依照基于交换架构的标准体系构建的自动测试平台, 打破了航空设备测试中普遍采用的通用仪表加专用测试工具的模式。其核心是软硬件无关, 使平台的组态更为灵活, 软件平台和硬件平台可以方便的裁剪重构。将一系列开发的标准体系结合起来, 并将标准之中松散的约束转换成具体且可实现的设计规范, 构建与研制目标相适应的自动测试平台体系架构。对标准族的理解以及关键元素的制定, 以及对软硬件交换信息的标准化设计是本平台设计的难点, 在通用自动测试平台体系架构构建和总体设计中, 解决了以下几个关键技术点:

1) 充分理解、消化、吸收了平台研制中引用的几十个标准, 结合在通用自动测试系统方面的设计经验, 制定了符合这些标准体系的平台体系结构, 制定了其关键软硬件元素和信息交换接口, 并依此完成软硬件平台的设计。

2) 对 ATML 标准族进行了应用层面的扩展。ATML 体系框架是通用自动测试平台信息交换的基础, 结合平台资源情况和被测产品的实际需求, 开展了信号描述的扩展, 即从 IEEE1641 标准定义的 31 种, 扩展到近百种 (包含了采用合成仪器技术的模拟器信号)、复杂测试流程调用的扩展 (包括总线类、多线程、多信号同步、特殊程序调用)、信息交换的扩展等, 以屏蔽 ATML 标准体系目前的缺陷。

3) 采用了“软件定义测量”先进理念。在硬件平台中, 采用多功能复合模块、多总线综合模块和合成仪器技术, 支持一般信号、总线通信和微波扩展资源的重构^[6]。软件定义的测量可以通过支持重新配置仪器以实现各种任务, 在设备测试领域已得到广泛的认可。软件定义的仪器系统所具备的灵活性, 使得用户可以为各种不同的测量重新配置测试系统, 也可满足采用相同设备针对多个参数进行特定测量的要求。同时, 软件定义的测量方式缩减了测试成本与测试仪器的占用空间, 较好地满足了对平台综合化、智能化要求高的测试需求。

4) 对硬件模块可互换的扩展。对非 IVI 类型的仪器, 提出了面向信号的驱动扩展实现模式, 并提出了相应规范, 以保证未来同类仪器可互换和升级。

5) 从长远看, 如果能够统一被测产品 UUT 的测试性

相关标准和规范, 如测试接口、测试内容及深度、总线消息格式、产品标校准则, 则将进一步提升平台的综合能力。

3.3 自主可控合成仪器技术

平台的扩展系统采用了合成仪器技术, 由自主研制的硬件模块构成, 主要包括上、下变频器, 基带信号源和数字化仪等模块。

采用合成仪器技术与 PXIe 总线技术相结合, 构建了一套合成仪器平台, 实现了不同微波测量仪器和激励源的重构, 具体包括:

1) 硬件接口统一化。为基带信号源、数字化仪、上变频、下变频等四类模块的硬件接口进行了统一规定, 在硬件资源上, 实现这几类模块的互换, 实现硬件架构的标准化。实现 12 种综合射频模拟器的硬件的标准化, 即模拟器通过系统中规定的基带源、数字化仪、上下变频模块可构建。

2) 软件接口统一化。遵循 IVI 规范, 对每类模块的驱动函数和调用方式都进行了明确的定义, 当系统升级更换硬件模块后, 系统的测试程序无需改动, 满足良好的兼容性。

3) 支持采用两级配置的方式实现在相同的硬件资源上构建不同的仪器功能。上位机根据配置调用不同的算法包程序, 下位机则对应根据不同仪器配置不同 IP, 同时对每类 IP 进行通用化设计, 保证其参数配置符合标准化要求。通过这两级配置, 在同一套硬件资源下, 实现不同的仪器测试功能。

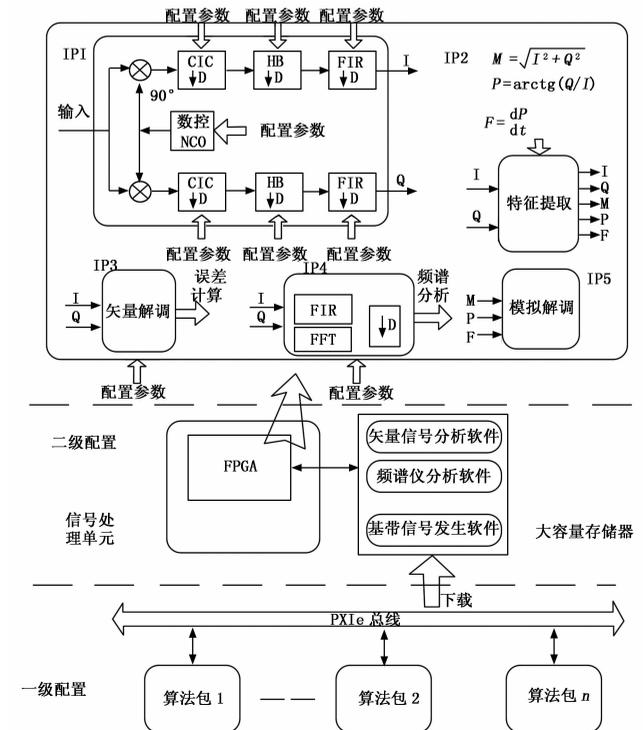


图 4 可重配置技术实现工作原理

3.4 基于 ATML 的测试程序跨平台可移植软件平台技术

遵循 ATML 体系标准，从理论上说是可解决测试程序的跨平台可移植问题。但由于 ATML 标准体系庞杂，要完整的实现测试程序的跨平台可移植，涉及到 ATML 标准多个层面信息的共同遵循和统一认知：

1) 测试程序开发过程中，需依照标准的定义，分别构建被测对象、适配器、测试描述以及测试系统等相关模型（涉及到 IEEE1671.1、1671.3、1671.5、1671.6 等标准），开发的各个信息模型均需符合对应的 XSD 规范并通过验证，实现词法、语法上的认知统一；

2) 可移植操作过程中对于被测对象、适配器、测试描述以及测试系统等相关模型（涉及到 IEEE1671.1、1671.3、1671.5、1671.6 等标准），其标准中涉及到的信号、Port、Connector、Pin、NetworkList、EntryPoints、Actions、TestGroups 等各类基本元素的定义以及模型框架结构信息，各类 Operation 动作语句以及执行的逻辑顺序信息，测试过程中的 Testresults、Outcomes 等结构信息均应实现在 ATML 元素语义层面上的统一认知。

通用自动测试平台软件平台依据扩展标准进行了完善开发，测试软件的设计流程如图 5 所示。平台全面符合 ATML 及扩展标准，包括测试程序开发平台、测试程序运行平台和测试诊断运行引擎和公共组件库，已完成了对以下关键技术点的攻关并经过实践验证：

1) 仪器资源面向信号描述的扩展。需要对 IEEE1641 和 IEEE716 标准之外的仪器资源进行面向信号的描述，如气象雷达目标模拟等特殊激励信号，并对未来可能会扩展的硬件资源制定相应的面向信号扩展的规范。

2) IVI 驱动的扩展。IVI 技术是测试系统、测试程序真正实现与硬件无关性、仪器可互换性的关键技术，目的是允许用户把标准的 IVI 组件集成到不同的软件、硬件系统中。但目前 IVI 只定义了 11 类仪器，还需对本项目其他特殊的仪器资源进行符合 IVI 扩展的定义，尤其是合成仪器的扩展。

3) 数字总线 ICD 的调用扩展。基于 ICD 数据库实现数字总线通信测试是设备最常用的使用方法，需定义 ICD 数据库调用的扩展标准。

4) 其他特殊调用的扩展。测试程序里的一些特殊逻辑和与实时性关系较大的特殊调用，如多个信号的同步产生于测试、合成仪器/多功能仪器等复杂仪器的调用、人工交互环节、多线程、动态库调用等。除实现这些功能之外，还需明确其测试信息交换属性。

5) 第三程序载入功能，为实现软件的扩展兼容第三方的动态库的调用提供了方便。该功能可以将已知或未知的程序通过接口调用，自动转化生成软件平台可以识别的程序，并按照指定的方法进行运行，将运行后的结果发送给软件平台。软件平台将第三程序进行统一管理，以供测试程序开发和运行使用。

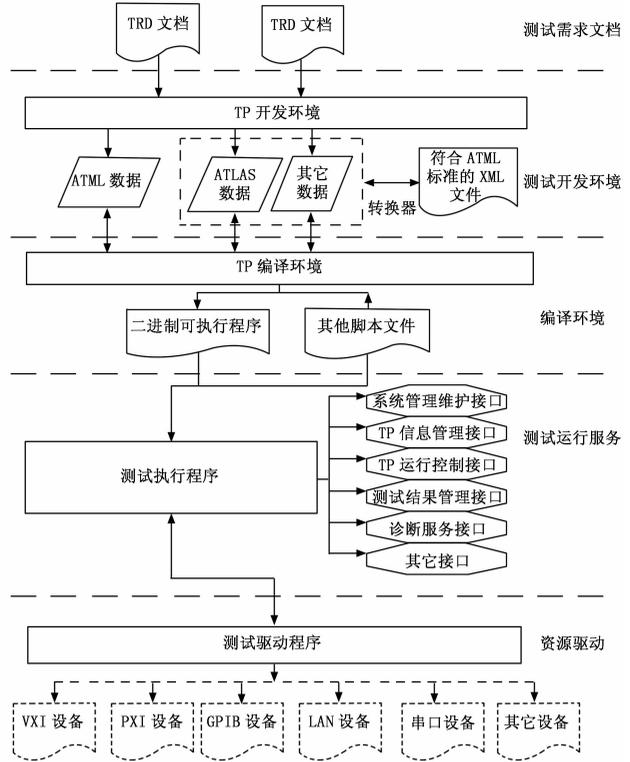


图 5 测试软件的设计流程

4 应用效果分析

航空设备通用自动测试平台自研制完成后，顺利通过了各项验证试验，且已完成了某型航空设备多型 UUT 对接验证测试，该平台体现出较好的使用性能和应用效果。初步的应用结果表明，平台具备以下技术特点：

1) 立足航空设备测试需求，采用通用化、开放性架构，满足了多任务剖面、多对象的测试保障需求，并向未来兼容

相比与传统专用测试系统的体系架构，系统的架构完全吸收了国外 LM-STAR、ARGCS、E-CASS 以及民航的 GTEC 系统的架构标准，在设计理念方面完全采用了通用化、开放性的设计思路进行，能实现需求提出的不同任务剖面、不同航空设备的测试需求，具备的扩展性同样能够满足未来系统扩展和对象兼容的需求。

2) 采用国产化自主知识产权的软硬件体系和产品，从底层到应用层，全面实现系统的一体化自研集成与安全可控

平台采用了国产成熟的软硬件体系和产品。底层的硬件仪器方面，自主研制的各类仪器模块、合成仪器产品，元器件国产化率达到 90% 以上；底层软件方面，自主设计集成 VXI/PXI/LXI 总线于一体的 VISA 库软件，实现了 VISA 库所要求的各项功能。具有自主知识产权的软硬件体系和产品已在多项测试诊断系统项目中得到应用，可靠性、稳定性、安全性得到了充分的验证。因此能够全面实现平

台的一体化自研集成与安全可控。

3) 采用软件定义的模块化合成仪器, 实现平台的小型化、高集成、可重构、可裁减与可扩展

平台创新采用了软件定义的模块化合成仪器技术, 开发航空综合模拟器, 实现平台小型化、高集成、可重构、可裁剪与可扩展, 极大地降低模拟器的体积和数量。通过对模拟设备进行专业化整合, 遵循通用化设计思路, 在结构、接口、硬件配置及软件集成等方面充分考虑测试资源柔性测试和扩展, 并对不同对象实现柔性化测试, 最大程度的体现通用化。

4) 基于 ATML 标准开发自主知识产权的软件平台, 实现 TP 跨平台移植

通用自动测试平台软件平台是一款具有鲜明技术特点和技术先进性的软件, 其技术特点表现在面向信号 ATML 自动测试体系的本地化融合与工程化应用; 其技术先进性主要体现在开发国产化自主可控仪器驱动并配合国产化软硬件环境使用。

5 结束语

航空设备通用自动测试平台的应用是为最大限度地减少检测设备种类, 提高检测设备技术水平, 以较低的费用

（上接第 9 页）

单独对比第 5 与第 9 组测试数据, 当任意波函数信号发生器无干扰信号输出时, 将程控衰减器的衰减值由 30 dB 调整为 40 dB, 信息采集节点组网单元内有 19 个从节点掉线。组网中继深度由 5 级降低为 3 级。组网耗时和轮询耗时因衰减值的增加, 从节点需要反复中继转发信号进行握手而延长。

5 结语

为充分发挥工业化与信息化在生产要素配置中的优化与集成作用, 在建设与发展智慧工厂的背景下, 设计了一种智慧工厂信息采集节点组网能力测试平台。该平台采用电磁兼容性良好的铝制组网单元作为信息采集节点从节点的测试载体, 可为从节点提供工作电压和信号耦合通信渠道。每个组网单元可以容纳 16 个信息采集节点从节点, 而整个测试平台可为 15 个组网单元提供空间位置和电源条件。也即, 测试平台的从节点容量为 240 个。另外, 测试平台采用三级高低频组合电源滤波器, 可以有效隔绝 120 kHz ~ 40 MHz 的干扰信号, 使得测试数据可信、可控、可靠, 适用于目前主流的电力线通信产品的组网能力测试。依据本测试平台获得的测试数据、评测结果, 可以形成一种行业测试体系, 凝练一种新的测试方法论和测试规范。

参考文献:

- [1] 李金华. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示 [J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2015 (5): 71-79.
- [2] 王喜文. 工业 4.0: 智能工业 [J]. 物联网技术, 2013, 12: 3

实现设备的快速高效检测和维修。目前平台已投入使用, 工作状态稳定可靠, 已实现了多型设备的功能检查、性能测试、参数调整、故障诊断等使用需求, 同时, 在测试程序跨平台移植方面, 已初步完成了多型设备测试程序移植验证工作, 为通用自动测试平台在其他型号航空设备中的应用打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] 曲建岭, 王 新. 面向故障诊断的自动测试系统 [J]. 测控技术, 2009, 28 (1): 1-4.
- [2] 杨 云, 任建军, 姜 涛. 发展军用航空装备新型通用测试平台 [J]. 航空维修与工程, 2004, (1): 51-52.
- [3] 史彦斌, 段哲民. 航空电子综合测试系统的发展现状及趋势 [J]. 计测技术, 2005, 25 (4): 1-2.
- [4] Gorringer C, Seavey M. Current ATML standards status [J]. 2007 IEEE Autotestcon 2007.
- [5] 孟汉城, 奚全生. 美国自动测试联合技术体系结构的发展 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (4): 620-624.
- [6] 方葛丰, 黄珍元, 宋 斌. 合成仪器技术的发展及应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 595-597.
- [3] 李少壮, 张泽光, 李洪波. 从“工业 4.0”看工业计量的未来 [J]. 计测技术, 2015, 35 (6): 1-5.
- [4] 张丽敏. 大数据环境下联合云计算技术的企业信息化转变 [J]. 自动化与仪器仪表, 2018 (3): 134-135, 139.
- [5] 徐培富, 张成挺. 物联网技术在现代烟草物流体系中的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (8): 178-179, 182.
- [6] 王成仁, 张 箐, 景春梅. 新型工业化背景下中小企业发展的战略选择 [J]. 中国经贸导刊, 2013, (10): 59-60.
- [7] 李宏宇, 张庆广, 王云龙. S7-1200PLC 基于 Modbus 通信协议的数据采集及远程传送应用 [J]. 黑龙江冶金, 2014, 34 (4): 31-32.
- [8] 邹 航. 宽带电力线载波点对点通信性能测试平台设计 [J]. 电测与仪表, 2016, 53 (21): 100-105.
- [9] 肖 勇, 张 捷, 党三磊, 等. 智能计量设备电力线载波通信测试系统的设计 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (13): 14-20.
- [10] 张 彤, 李 慧, 邓广昌, 等. 电力终端智能检测专家库管理系统 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (13): 33-36.
- [11] 邓桂平, 魏胜清, 郭 玥. 低压电力线载波点对点通信性能测试系统设计与研究 [J]. 仪表技术, 2013, (1): 1-4.
- [12] 刘 勇, 张明旭, 李贤伟, 等. 低压载波通讯测试仪的开发与应用 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (15): 114-118.
- [13] 郭 宝, 刘 毅, 张 阳. NB-IoT 组网规划分析 [J]. 移动通信, 2018, 42 (3): 48-53.
- [14] 洪为伟, 徐 政. 电力载波多联机空调通信系统的设计与开发 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (8): 2187-2191, 2196.
- [15] 余粉英. 电力线载波结合无线组网在数据采集系统的应用 [J]. 技术与市场, 2017, 24 (12): 222.