

基于 ATML 的分布式 ATS 架构研究

刘兆庆, 乔立岩

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 自动测试系统 ATS 通用化是测试与诊断技术的重要发展方向, 直接决定了系统的设计维护成本、技术寿命和测试诊断性能。现有的通用 ATS 主要采用集中式系统架构, 系统维护成本和难度较高, 信息互通性和通用化程度不理想。针对集中式 ATS 架构的局限性, 设计并验证了一种基于自动测试标记语言 ATML 标准集、以网络为中心的分布式通用 ATS 架构。经验证演示实验, 该架构较好地解决了仪器和系统的互换性问题, 并通过发掘仪器的智能性, 缓解了网络的延时问题和带宽压力, 对构建通用 ATS 具有重要工程意义。

关键词: 自动测试系统; 自动测试标记语言; 架构; 通用化

中图分类号: TP216.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-4080 (2018) 03-0038-09

Research on Distributed ATS Architecture Based on ATML

LIU Zhaoqing, QIAO Liyan

(Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The generality of an Automatic Test System (ATS) is an important development direction of testing and diagnosis technologies, which determines the design and maintenance cost, technical life, and test diagnosis performance of the system directly. The existing general ATS mainly adopts centralized system architecture, which leads to high cost and difficult system maintenance. Besides, the information interoperability and generalization of such architecture are not satisfactory. According to at the shortages of the centralized architecture of ATS, this paper designs and verifies a distributed ATS architecture based on the Automatic Test Markup Language standard and the network. The simulation results demonstrate that the distributed architecture can not only solve the interchangeability of instruments and systems much better, but also alleviate the problem of network delay and bandwidth pressure by exploring the intelligence of instruments. Both the analysis and simulation results show that the distributed architecture based on ATML has important engineering meaning for building a general ATS.

Key words: ATS; ATML; Framework; Generality

0 引言

以计算机技术为核心的自动测试系统 ATS (Automatic Test System) 是实现电子设备故障诊断、健康管理和功能性测试的重要保障。自 20 世纪 70 年代以来, ATS 已经历了专用 ATS、机架

堆叠式 ATS、基于背板的模块化 ATS、开放系统架构 ATS 等 4 个发展阶段^[1], 通用化一直贯穿于 ATS 发展过程。

测试系统通用化最初的目标是仪器互连及操作接口的标准化, 随着测试总线技术和相应软件规范的推陈出新, 该目标得以充分地实现。但由

收稿日期: 2017-08-22; 修订日期: 2017-10-08

作者简介: 刘兆庆 (1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为自动测试理论及应用。E-mail: liuzq@hit.edu.cn

于测试目标类别及数量规模的迅速膨胀, 被测设备研制、生产、部署和维护全生命周期中的测试成本急剧升高; 不同型号、类型产品间测试资源共享也愈发突出^[2], 因此, ATS 测试程序集可移植性和仪器互操作性、互换性成为 ATS 通用性新的研究热点, 它直接决定了系统的设计周期、维护成本、技术寿命、测试诊断性能、对新技术和被测对象的适应性^[3]。

为推进 ATS 的通用化, 重点解决测试程序集 (Test Program Set, TPS) 的可移植性和仪器的互换性问题, 业界先后推出了 ATLAS (Abbreviated Test Language for Avionics System)、SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)、VPP (VXI Plug&Play)、IVI (Interchangeable Virtual Instrument)、ATML (Automatic Test Markup Language) 等技术规范, 并在此基础上构建了通用 ATS 开放系统架构。目前, 主流的通用 ATS 主要采用集中式系统架构, 即以测试计算机为系统控制核心, 借助虚拟仪器和测试总线技术, 实现对系统组件的控制^[4]。在该架构下, 仪器仅作为测试操作的执行机构, ATS 的信息处理和协调控制性能直接受制于测试计算机和测试总线性能, 系统软件规模臃肿, 设计维护成本较高, 系统的信息互通性和通用化程度不理想。

针对集中式 ATS 架构的固有缺陷, 本文采用 LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) 为系统主干, 设计了一种基于 ATML 标准集、以网络为中心的分布式通用 ATS 架构, 并采用自研的硬件设备和软件工具搭建验证演示系统, 验证其可行性和合理性。

1 ATS 通用化技术概述

1.1 ATS 通用化基本原理

如图 1 所示, ATS 是自动测试设备、TPS、TPS 开发工具集等软硬件组件的有机结合体。构建通用 ATS 的关键, 是实现 TPS 可移植性和仪器互换性、互操作性。基本解决思想是对 ATE (Automatic Test Equipment) 的功能进行规范化定义或封装, 进而实现 ATE 驱动程序和硬件资源的标准化对接^[5]。即尽可能避免 TPS 直接操作 ATE, 通过标准化驱动程序或测试程序接口, 实现 TPS 的硬件无关性和可重用性。基于该设计思路, 业界从 ATS 的不同技术应用角度, 提供了多

种技术规范和解决方案。

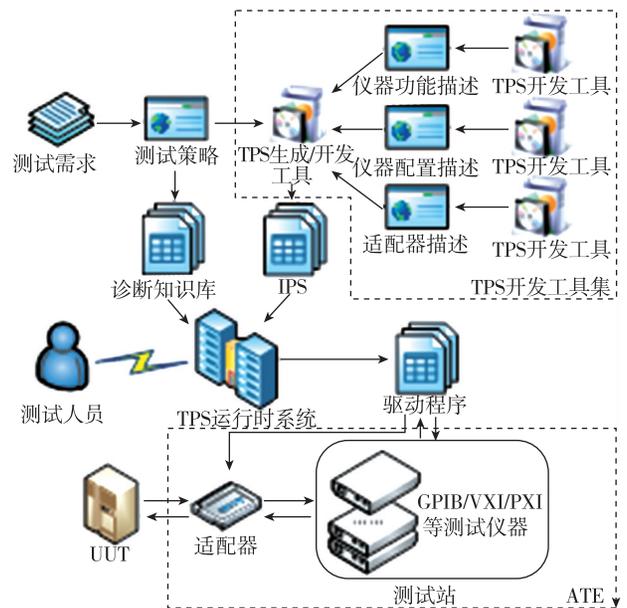


图 1 ATS 逻辑结构简图

Fig. 1 ATS logical structure diagram

1) 仪器互换性技术, 主要实现仪器控制接口的标准化, 包括 SCPI、VPP、IVI 等, 其分别定义了程控仪器命令、仪器驱动函数、仪器测试功能和软件接口的标准; 2) 测试软件标准化技术, 以广域测试标准 (A Broad-Based Environment for Test, AB-BET) 为代表, 定义了开放的系统软件架构和信息交互框架, 通过标准化组件间的信息接口、服务机制、控制流程, 推进测试系统的标准化^[6]; 3) 面向信号的测试语言, 包括 ATLAS、STD (Signal and Test Definition)、ATML 等, 以面向信号的语义实现仪器功能和接口的标准定义; 4) 合成仪器技术, 结合面向信号的测试语言, 采用标准化的信号功能模块构建仪器, 借助软件算法和可重构技术, 实现仪器对 TPS 的自适应。

经历多年的技术发展和市场选择, 上述构建通用化 ATS 所需关键技术标准已日趋成熟。然而, 由于其分别针对 ATS 通用化的某一方面或层面, 且存在不同的应用局限性或技术缺陷, 均无法独立构建通用 ATS。实现 ATS 通用化的有效技术途径是构建开放系统架构, 利用商业标准定义系统行为和元素, 通过标准化系统内接口、服务、协议、数据格式, 实现仪器的互换性、TPS 的可移植性, 以及 ATS 间的互操作性^[7]。

20 世纪 90 年代, 美国国防部 (US Department of Defense, DoD) 联合各军/兵种和 IEEE 电子系统

测试诊断标准协调委员会 (Standard Coordinating Committee 20, SCC20)、LXI 联盟、Boeing、Rohde&Schwarz 等标准化组织或工业企业, 共同开展名为 NxTest 的下一代 ATS 研究工作, 并于 1996 年开始联合制定 DoD ATS 框架^[8]。如图 2 所示, DoD ATS 框架采用模块化设计和开放系统架构, 借助 ABBET、ATML、STD 等商业标准, 从模型、组件、接口、规范等 4 个方面定义了 20 余个关键元

素, 全面覆盖了 TPS、ATE、UUT (Unit Under Test) 等 ATS 组成部分。由于 DoD ATS 框架大量采用商用技术和产品, 重点关注测试信息和系统接口的标准化, 可根据技术发展和产品换代, 灵活地进行调整、拓展和升级。同时, 通过吸收面向信号的测试语言、合成仪器、并行测试、综合诊断等先进测试技术, 进一步提高了 ATS 测试能力, 缩减了测试时间^[9]。

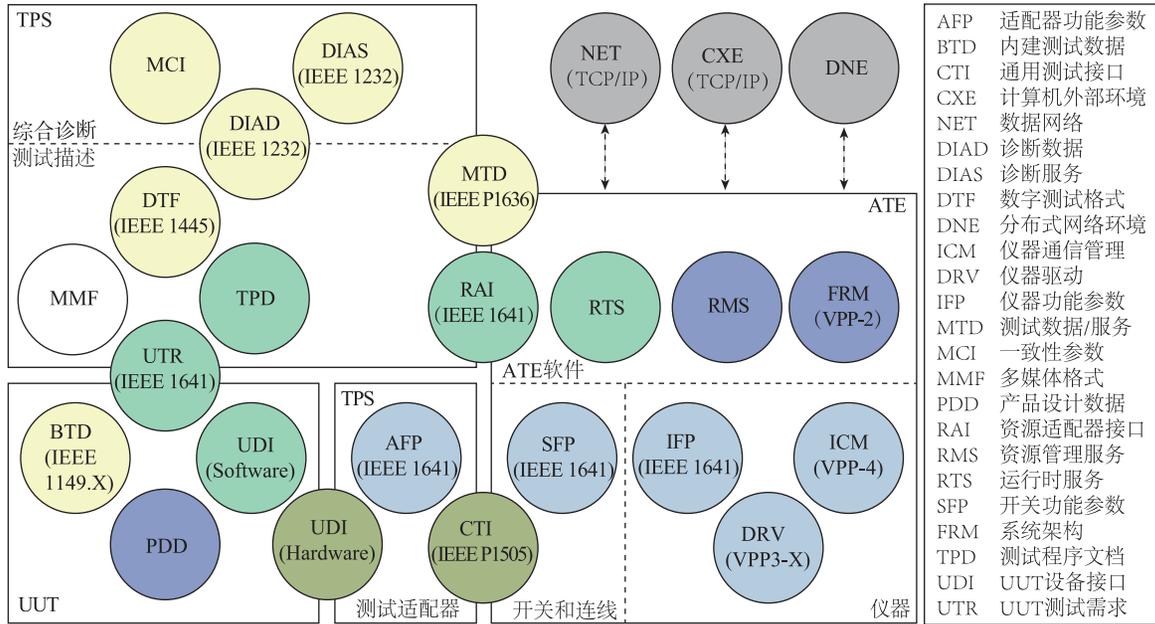


图 2 DoD ATS 框架组成示意图

Fig. 2 DoD ATS framework

1.2 集中式 ATS 架构局限性

目前, DoD ATS 框架已被确立为美军 ATS 的强制性标准, 并初步形成了以军/兵种为单位的系列化、标准化的 DoD ATS 家族^[10]。DoD ATS 框架成功的基础是采用基于 ATML 的开放系统架构, 以分层、分类组织的商业标准集替代单一的技术标准, 以面向信号的信息标准化替代驱动接口标准化。从而较好地实现了 TPS 的可移植性, 并降低了系统管理、维护和升级难度。以 SCC20 ATML Demo Phase I 系统为例, 由于沿袭了传统 ATS 的运行机制和部分技术规范, 具有较突出的技术局限性, 如图 3 所示。

1) 系统性能受限。集中式系统架构下, 作为系统核心的测试计算机和测试总线常常成为性能瓶颈, 即使仪器本身具有计算、存储等能力, 也难以融入系统进行统一调度。而单纯提高计算机和总线性能也难以取得系统性能等量的提升, 同

时带来成本的倍增。

2) 仪器智能性和信息互通性应用受阻。由于仪器仅为测试执行机构, 其任务管理、信息处理、组件通信等必须借助测试计算机完成, 在浪费部分高端仪器计算和存储资源的同时, 阻碍了仪器间信息互通性的应用, 加大了系统通信主干的压力。

3) 软件层次臃肿。DoD ATS 框架仍通过 VISA (Virtual Instrument Software Architecture) 库和 IVI 驱动程序实现仪器控制, ATML 仅作为调用仪器驱动程序的信息接口, 而非独立的互换性解决方案, 系统的软件规模和设计成本进一步膨胀。

4) 仪器互换性问题未有效解决。由于系统采用 IVI 驱动程序实现仪器互换, 而 IVI 规范以功能对仪器进行分类, 无法覆盖所有仪器, 并且对于专用仪器、复合功能仪器、合成仪器支持较差, 系统的仪器互换性问题不能得到本质解决。

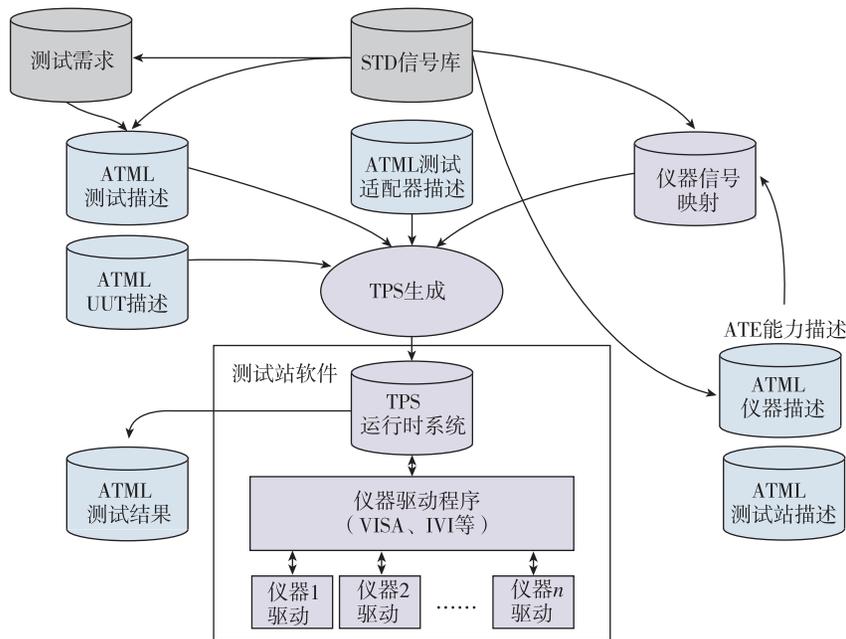


图 3 SCC20 ATML Demo Phase I 系统架构

Fig. 3 SCC20 ATML Demo Phase I system architecture

2 基于 ATML 的分布式 ATS 架构

2.1 基于 ATML 的分布式 ATS 架构技术可行性

引发 DoD ATS 框架技术局限性的直接因素，是采用以测试计算机为中心的集中式系统架构，并试图借助 IVI 等技术，以标准化软件接口的形式解决系统组件的互换性问题。LXI 技术和 ATML 标准集的出现，为构建通用 ATS 提供了一种分布式解决方案，即以 LXI 为系统主干，通过网络互联系统内具有独立控制、通信和信息处理能力的智能仪器，并以符合 ATML 标准集的管理任务、交互信息、协作测试。一方面，由于采用 ATML 作为系统各环节测试信息标准，通过充分利用其面向信号的特性，可有效增强仪器互换性。另一方面，由于系统和测试任务的控制主体转变为各智能仪器，借助仪器的计算、存储、触发等资源，可有效缓解系统的性能压力。相对于以 DoD ATS 框架为代表的集中式 ATS 架构，其具有较强的可行性和技术优势。

1) 通用化。面向信号的 ATML 标准集能够最大程度地解决 TPS 可移植性问题，而采用 ATML 作为消息基 LXI 仪器的通信格式，借助嵌入式系统和网络技术实现 ATML 测试信息的解析执行，可有效实现系统组件的互换性和通用化。

2) 数据带宽和延迟。LXI (典型带宽 12.5MB/s)

相对于 PXI/PXIe (典型带宽 132MB/S 或 4000MB/s) 并不具备优势，但通过利用仪器的计算和存储资源对本地原始数据进行处理或存储，系统带宽需求和压力可显著下降。此外，利用 LXI 同步与触发机制，可降低网络延迟的不确定性，有效保障测试操作的实时性。

3) 系统的可扩展性和成本。LAN 是工业界最稳定、开放、廉价的技术标准^[1]，XML 是以太网应用的信息交互标准，LXI 和 ATML 分别继承了其优良的特性。采用 LXI 为主干集成系统，借助 ATML 标准化各环节信息，可构建高聚合、低耦合、经济的通用 ATS。

2.2 基于 ATML 的分布式 ATS 架构设计

综合考虑通用 ATS 应用需求和 LXI 技术特点，本文设计了一种基于 ATML 的分布式通用 ATS 架构。如图 4 所示，其可划分为系统层、网络连通层和仪器层。系统层以测试计算机为载体，包含了管理、开发、执行测试诊断任务所需的软件工具和用户接口；网络连通层采用标准 LXI 接口集成各测试设备和提供信息交互媒介；仪器层主要采用支持 LXI 接口的智能仪器，提供测试诊断功能。系统层与仪器层内部，以及系统层与仪器层之间的信息交互格式，均遵循 ATML 标准集。仪器间的协作与测试任务的推进，采用 LXI 同步与触发机制提供驱动信号。其基本运行原理如下文所述。

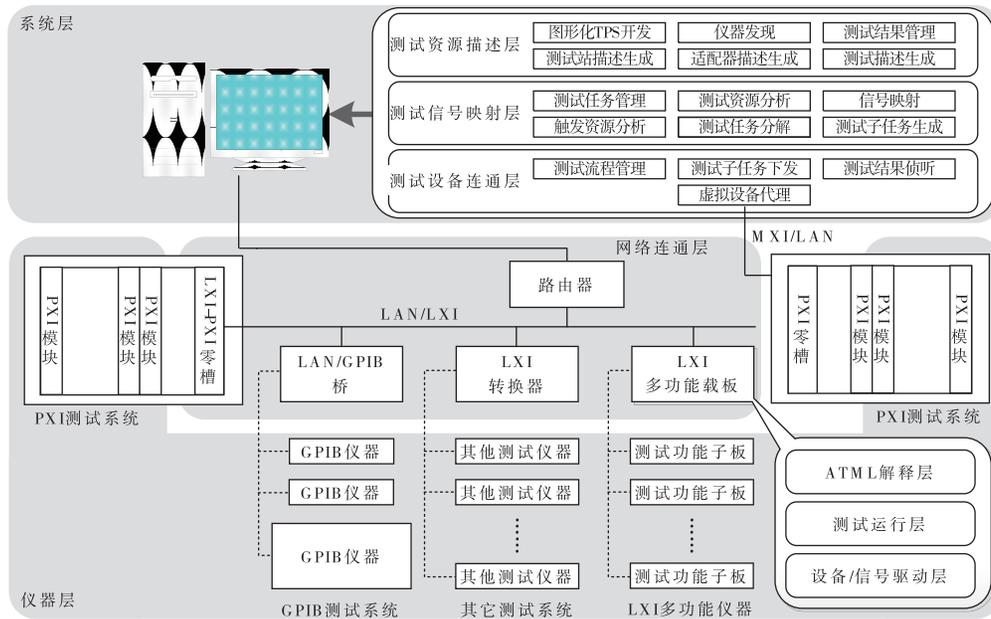


图4 基于ATML的分布式通用ATS系统架构

Fig. 4 Distributed general ATS system architecture based on ATML

(1) 仪器智能性与信息互通性应用

该架构选用配备可扩展软件系统的仪器或总线桥，以LXI为主干组建混合测试系统。借助仪器的计算、存储和网络通信资源，实现ATML测试信息的分布式处理与交换。

① ATML信息解析应用。经拓展测试计算机、仪器或总线桥的软件系统，可利用ATML解析技术，实现各系统节点内ATML文件的生成、发布、解析、执行，并借助LXI LAN消息或其他网络通信机制，实现系统层与仪器层、仪器与仪

器之间的ATML标准信息交互，从而推进系统组件的通用与互换。

② 处理器和存储资源应用。仪器或总线桥可对原始测试数据进行预处理或暂存，从而动态利用系统闲置带宽，并缓解混合测试系统带宽压力。

③ 测试资源管理应用。经配备测试资源管理器软件，仪器或总线桥可实现对多个测试子任务的管理和调配，从而实现分布式的并行测试，提高仪器利用率。

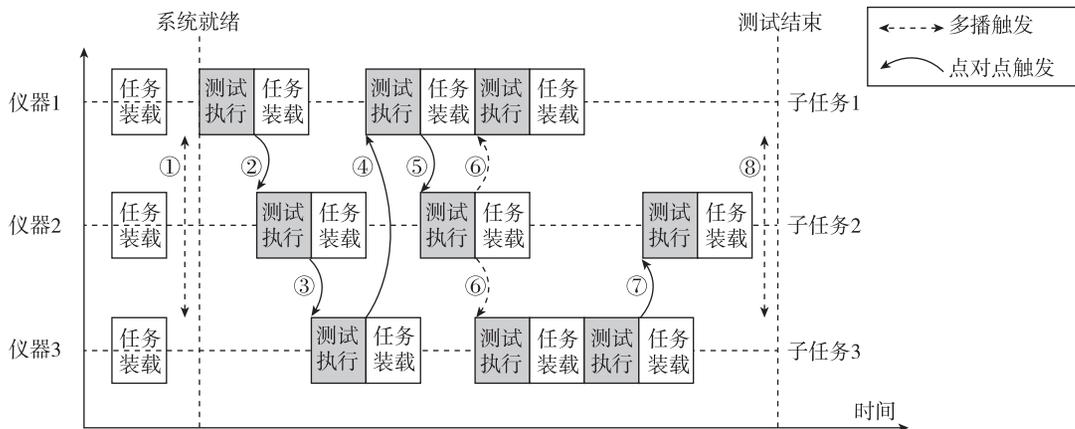


图5 LXI同步与触发机制应用原理

Fig. 5 Application of LXI synchronization and trigger mechanism

(2) 同步与触发机制应用

如图5所示，各仪器以测试操作为单位逐步执行测试任务，测试操作的执行，可分为任务装载和

测试执行两个阶段。在任务装载阶段，仪器对测试功能模块和触发系统进行预编程；在测试执行阶段，外来的触发信号将激活本地仪器执行预编程的测试

操作。以同步与触发机制为驱动测试操作执行，在缓解网络延时问题的同时，构建了两级流水机制，并利用 LXI 触发的多播机制，实现系统状态广播（如图 5 中的①和⑧）和并行测试（如图 5 中的⑥）^[11-12]。

3) ATML 标准集应用与管理如图 6 所示，该

架构选用 ATML 测试描述、仪器描述、测试站描述、测试适配器描述、测试结果等作为系统测试信息标准。采用高聚合、低耦合的软件设计思想，各组件或环节之间的信息交互、发布和调用均采用 ATML，可有效保障系统组件互换性和信息互通性。

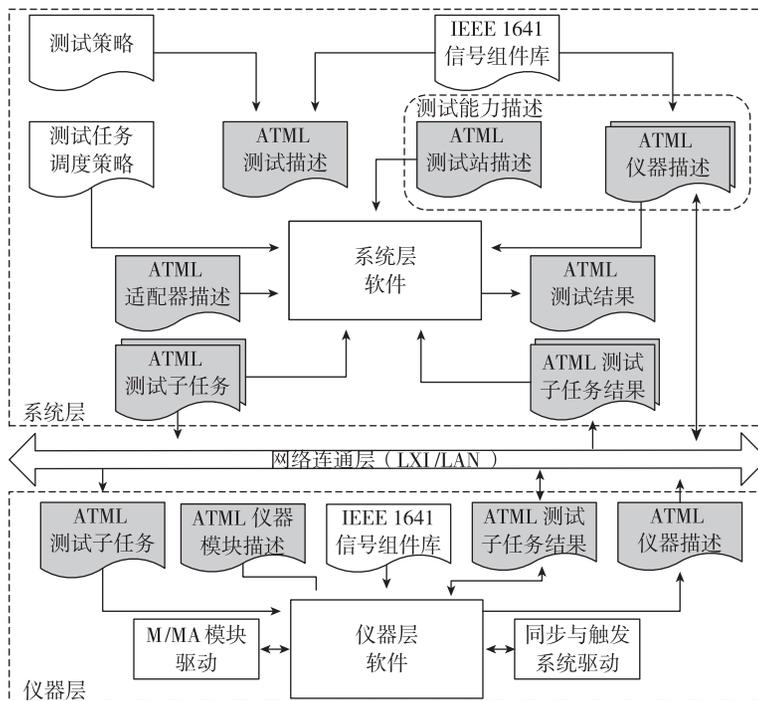


图 6 ATML 标准集应用原理

Fig. 6 ATML standard set application diagram

3 验证演示系统设计

根据第 2 节阐述的系统架构和层次功能，本文采用模块化的软件设计思想，分别设计实现了系统层和仪器层软件，并根据实用化测试需求，以自研软件工具和硬件设备，搭建了验证演示系统和设计验证演示实验，检验分布式 ATS 架构的合理性与可行性。

3.1 系统层软件设计

系统层软件架构如图 7 所示，为实现与 ATML 货架产品工具的兼容，根据功能需求封装为多个分立的 ATML 工具，然后以集成开发环境的形式进行整合。系统层软件采用 Java RCP 技术开发，主要在测试计算机端提供测试开发平台和用户管理接口，可划分为测试资源描述层、测试信号映射层、测试设备连通层。

1) 测试资源描述层。采用 dom4j 解析器，根据用户测试需求生成 ATML 测试描述；采用基于

mDNS/DNS-SD 的仪器发现工具和适配器发现工具，发现并解析设备域名，然后从设备内置的服务器下载 ATML 仪器描述和适配器描述；采用测试站描述生成工具，根据已获取的仪器描述和用户配置信息，生成 ATML 测试站描述；采用 MySQL 数据库，实现对 ATML 测试结果描述的分析综合和测试报表的生成。

2) 测试信号映射层。根据测试资源描述层的 ATML 文件，依次进行信号路径分析、触发资源分析、测试资源分析、测试流程分析，在对比信号类型、参数、时序关系的基础上，将测试需求信号映射至仪器功能信号，并根据损耗均衡策略进行测试子任务分解，插入仪器间触发信号，生成 ATML 测试子任务。

3) 测试设备连通层。采用 SOAP 协议，发送 ATML 测试子任务给仪器，并接收返回的测试结果描述。

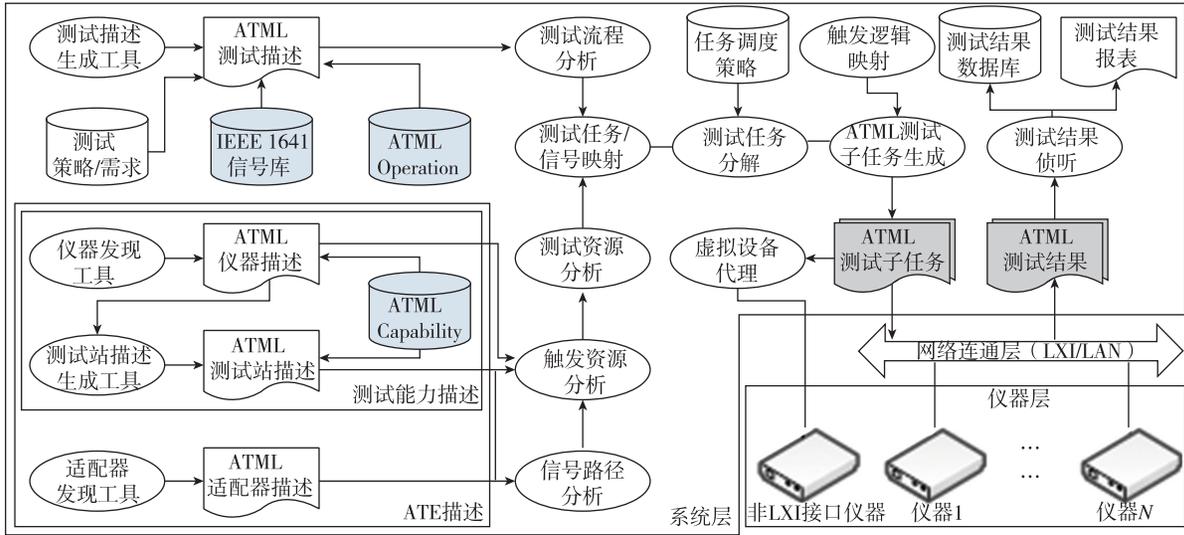


图7 系统层软件架构

Fig. 7 Software architecture of system layer

3.2 仪器层软件设计

仪器层软件设计如图8所示，采用面向对象的C语言开发，主要在仪器端嵌入式系统内，实现

ATML测试子任务和测试结果的解析、管理、执行，可划分为ATML解析层、测试运行层、信号驱动层。

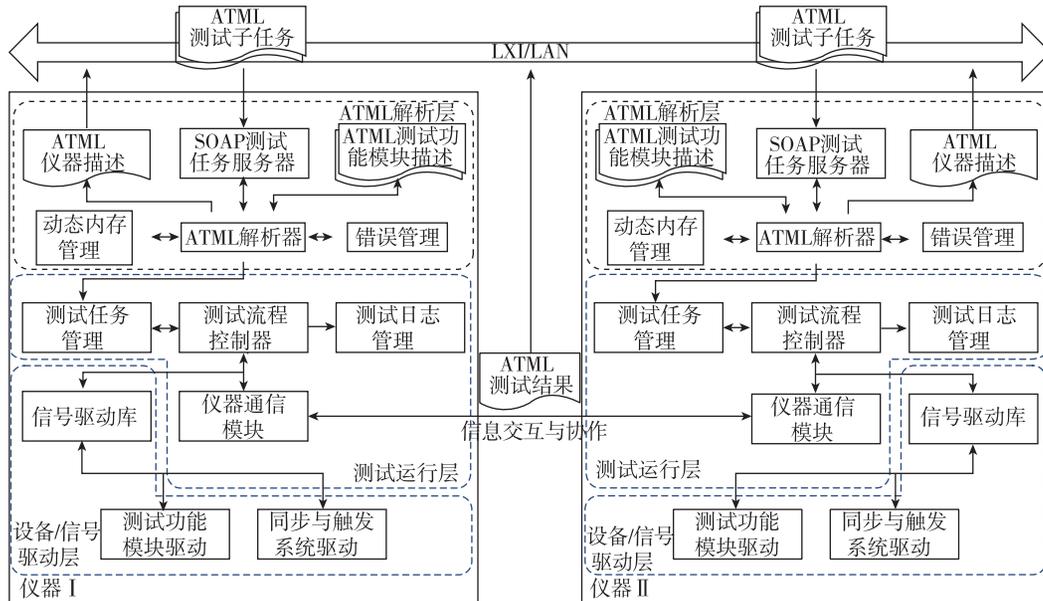


图8 仪器层软件架构

Fig. 8 Software architecture of instrument layer

1) ATML解析层。采用Axis2/C SOAP服务器接收ATML测试子任务和返回ATML测试结果描述；采用基于expat的ATML解析器，根据本地测试资源和测试数据，分别生成ATML仪器描述和测试结果描述，并将ATML测试子任务解析为测试序列，导入测试运行层；利用操作系统接口，重点实现对ATML解析器的动态内存管理

和错误管理。

2) 测试运行层。利用测试任务管理模块，实现对本地多组测试序列的管理和调度，逐次传递给测试流程控制器；利用测试流程控制器，根据顺序、循环、分支测试流程，以及测试信号间的时序关系，将测试序列中的测试操作，依次映射为面向信号的驱动调用；采用仪器通信模块，利

用 LXI LAN 消息多播机制，实现测试任务和仪器状态的发布。

3) 设备/信号驱动层。参照 STD 信号组件库，在测试功能模块驱动和同步触发系统驱动的基础上，封装并提供面向信号的驱动库。

3.3 验证演示系统设计

本文采用自研的仪器、测试适配器、UUT 和电缆搭建验证演示系统，进行测试诊断实验。如图 9 所示，该系统采用 4 台自研的 LXI 多功能仪器，分别插接 2 个外购或自研的 M/MA 测试功能模块，经测试电缆和测试适配器，连接至 UUT 测试端口。各 LXI 多功能仪器均安装至全宽 ATS 机架，经网线连接至 Symmetricom SyncSwitch TC100 型透明时钟，通过工控计算机进行系统控制和监视，并采用 Pickering 60 - 985 型触发电缆构建仪器间 LXI 硬件触发链路。

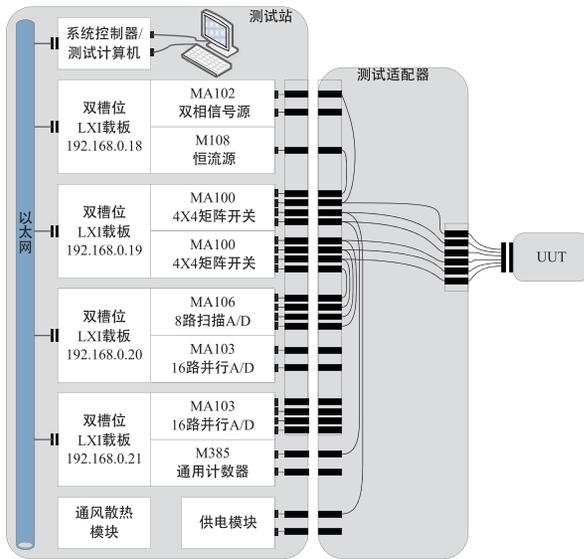


图 9 验证演示系统硬件组成

Fig. 9 Hardware composition of verification demonstration system

参照 SCC20 ATML Demo Phase I 项目的演示实验，本文采用 IEEE 1671.1 - 2009 Annex B 中提供的开放 UUT 故障模型电路和测试策略，设计 UUT 和验证演示实验，对本文设计的系统架构和软件工具进行验证^[13]。如图 10 所示，本文设计的 UUT 以共射极基本放大电路为基础，引出 V_i 、 V_o 、 V_{cc} 等测试点以提供电路静态或动态参数测试接口，并通过跳线实现对 UUT 各元件短路或开路故障的注入。

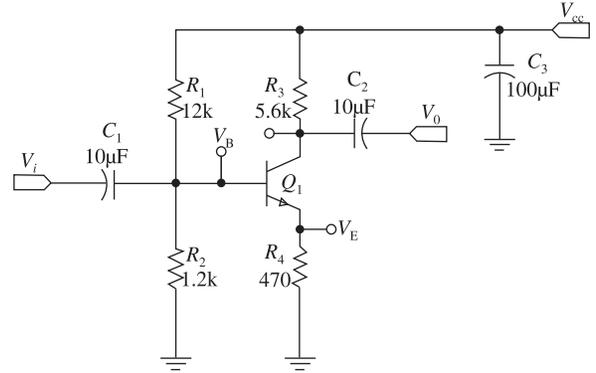


图 10 验证演示系统 UUT 故障模型电路

Fig. 10 UUT fault model circuit

如图 11 所示，以系统层软件为控制平台，经手工导入或自动发现 ATML 测试描述、仪器描述、测试站描述、适配器描述等文件，系统层将执行信号映射和任务分配，进而面向各仪器生成和下发分立的测试子任务文件。各仪器以同步与触发为驱动完成测试任务后，系统将生成 ATML 测试结果描述，并显示 UUT 故障隔离和诊断结论。经实验验证，该系统能够按预定流程完成测试操作，各环节涉及的 ATML 文件，均通过了 XMLSpy 软件的 XML Schema 校验，符合 ATML 标准集和 LXI 规范。

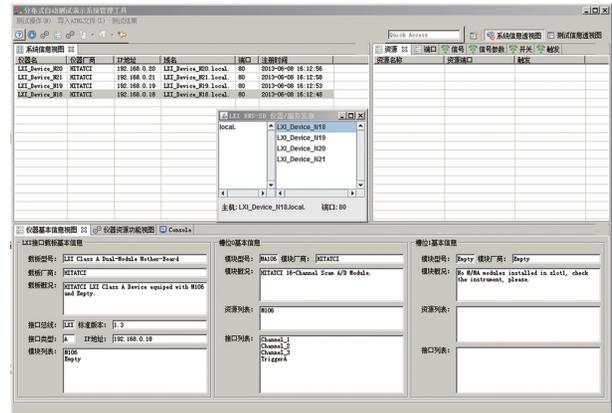


图 11 系统层软件运行界面

Fig. 11 System layer software

4 结论与展望

本文针对 ATS 的通用化需求，以及集中式 ATS 架构普遍存在的性能和互换性问题，设计并初步验证了一种基于 ATML 的分布式通用 ATS 架构。该架构采用 LXI 为系统主干融合各测试总线，以网络为中心，以 ATML 为信息交互标准，

(下转第 70 页)

- the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 2000: 46-54.
- [14] Hirzinger G, Albu-Schaffer A, Hahnle M, et al. On a new generation of torque controlled light-weight robots [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, 2001, 4: 3356-3363.
- [15] Hirzinger G, Butterfass J, Grebenstein M, et al. Space Robotics-Driver for a new mechatronic Generation of light-weight arms and multifingered hands [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, Como, 2001: 1160-1168.
- [16] Hirzinger G, Sporer N, Albu-Schaffer A, et al. DLR's torque-controlled light weight robot III-are we reaching the technological limits now? [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, 2002, 2: 1710-1716.
- [17] ESA Web. ERA: European Robotic Arm [EB/OL]. http://www.esa.int/esaHS/ESAQEI0VMOC_iss_0.html, 2009-02.
- [18] Didot F, Dettmann J, Losito S, et al. JERICO: A demonstration of autonomous robotic servicing on the Mir space station [J]. Robotics and autonomous systems, 1998, 23 (1-2): 29-36.

(上接第 45 页)

以 LXI 同步与触发为驱动。通过充分利用网络和 XML 的跨平台特性,有效保障了系统的通用化,提高了仪器的互换性和互操作性。通过发掘仪器的智能性和信息互通性,缓解了 ATS 日益增长的数据带宽压力,较好地解决了网络延时的不确定性问题,并提供了一种可行的分布式并行测试方案。经验证演示实验,该架构满足 ATS 通用化需求和实用需要,具备较好的可行性和合理性。

参考文献

- [1] 刘正升, 万程亮, 蒋志忠, 等. 自动测试系统中新技术的发展及应用 [J]. 中国测试, 2009, 35 (04): 58-61.
- [2] Liu Z Q, Qiao L Y, Peng Y, et al. The design and verification of a LXI based distributed universal ATS architecture [C]. Autotestcon 2012 IEEE, 2012: 254-261.
- [3] Ross W A. The impact of next generation test technology on aviation maintenance [C]. Autotestcon 2003 IEEE, 2003: 2-9.
- [4] Gorringer C, Neag I A, Taylor R. ATML demonstration [C]. Autotestcon 2009 IEEE, 2009: 322-327.
- [5] 黄建军, 杨江平, 彭飞. 通用自动测试系统 (ATS) 体系结构及关键技术 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34 (3): 71-74.
- [6] Weiss D H. Principles of a broad based environment for test (ABBET) demonstration (PAD): "ABBET in action" [C]. Autotestcon' 95 Systems Readiness: Test Technology for the 21st Century Record. 1995: 69-74.
- [7] DoD ATS Executive Directorate. DoD ATS Architecture Guide [EB/OL]. 1999 [2013-5-8]. http://www.acq.osd.mil/ats/DoD_ATS_Architecture_Guide.doc.
- [8] Ross W A. Moving toward a DoD automatic test system standard [C]. Autotestcon 2006 IEEE, 2006: 739-747.
- [9] Meng J S, Li T Y, Xie Y L. Synthetic test equipment using PXI based instrumentation [C]. IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis, 2009: 1-4.
- [10] Krayewsky M, Bond M. LM-STAR technology support solution [C]. Autotestcon 2004 Proceedings, 2004: 129-135.
- [11] Li Z, Zhou F L, Yao X J. Research on LXI trigger bus [C]. International Conference on Embedded Software and Systems, 2009: 553-558.
- [12] Mueller J E. Using LXI events in ATS [C]. 2006 IEEE Autotestcon - IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2006: 452-460.
- [13] IEEE Trial-Use Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test Equipment and Test Information via XML: Exchanging Test Descriptions [S]. New York: IEEE, 2009.