

面向产品检验的自动测试系统的快速开发方法

康京山, 赵文明, 李立哲, 王丽红, 恽江雨

(中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对产品研制生产企业为实现产品检验中电性能测试而开发自动测试系统的需求, 提出了以充分利用企业现有仪器、快速构建测试系统、提高自动化程度为目标的硬件体系结构设计; 提出了一种软件体系结构设计并开发了应用框架软件, 该设计采用一种开放式的自动测试脚本, 提高对测试需求变化的快速适应能力, 采用仪器驱动封装层屏蔽不同驱动体系结构之间以及不同仪器驱动程序之间的差异, 从而为测试程序的可移植性以及仪器的互换性提供支持, 采用便于软件重用的设计以缩短软件开发周期; 结合应用案例, 给出了系统开发的详细过程与验证结果; 对于产品检验自动测试系统开发中重要技术选择以及硬件与软件的开发具有参考价值。

关键词: 自动测试系统 (ATS); 通用接口总线 (GPIB); 局域网在仪器领域的扩展 (LXI); 测试程序 (TP); 虚拟仪器软件体系结构 (VISA); 可互换虚拟仪器 (IVI); 可互换性

Rapid Development Approach for Automatic Test Systems for Product Inspection

KANG Jingshan, ZHAO Wenming, LI Lizhe, WANG Lihong, XI Jiangyu

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the requirement of developing automatic test systems for product development and production enterprises to realize electrical performance testing in product inspection, a hardware architecture is presented, which aims at fully utilizing the existing instruments of the enterprise, rapidly building test system and improving automation degree. A software architecture design is put forward, and an application framework software is developed. The design uses an open test script file to improve the ability to quickly adapt to changes in test requirements, and utilizes an instrument driver encapsulation layer to shield the differences between different driver architectures and between different instrument driver programs, so as to support the portability of test programs and the interchangeability of instruments, and shorten the software development cycle for software reuse. The detailed steps of system development and verification results are presented with an application case. It is important reference value for technology selections and hardware and software development of automatic test systems in product inspection.

Keywords: automatic test system (ATS); general purpose interface bus (GPIB); LAN extension for instruments (LXI); test program (TP); virtual instrument software architecture (VISA); interchangeable virtual instrument (IVI); interchangeability

0 引言

为保证质量, 需在研制和生产各阶段对不同装配层次的产品进行各种目的的检验, 以判定产品各项功能性能是否符合规定要求, 为系统集成、产品交付等提供决策依据。

功能性能检验一般采用测试方式进行。所谓测试,

是指按照规定的程序确定产品的一种或多种特性的过程^[1]。

实践中, 受研制生产项目进度影响, 留给产品检验的时间周期较短, 传统手工测试方式难以满足进度要求, 迫切需要开发自动测试系统 (ATS) 实现自动测试。

受需求牵引和技术推动, ATS 从 20 世纪 50 年代

收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-05-15。

作者简介: 康京山 (1965-), 男, 硕士, 研究员。

引用格式: 康京山, 赵文明, 李立哲, 等. 面向产品检验的自动测试系统的快速开发方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 18-29, 46.

开始,先后经历了基于专用接口互连的封闭系统、由台式程控仪器通过标准接口互连组成的系统、由模块化仪器组成的系统等发展阶段^[2-3]。由于它在国防和国民经济许多行业具有重要价值,因而受到各相关方重视。例如,美国国防部(DoD)针对此前各军种分别发展ATS存在的采购和保障成本高、互操作性差等问题,制定了ATS政策,要求“应该优先采用经批准的DoD ATS系列来满足自动测试保障需求”,目标是降低DoD的ATS采购成本和保障成本;促进跨军种的互操作性;缩小后勤保障规模;提高测试的质量^[4]。由ATS执委会(ED, executive directorate)负责政策的组织实施,由跨军种的ATS管委会(AMB, ATS management board)组建多个综合产品团队(IPT, integrated product team)负责ATS采购与研究开发环境的特定方面,其中,下一代自动测试系统综合产品团队(NxTest IPT)的主要任务是降低DoD ATS成本以及提高互操作性^[5]。在NxTest IPT之下成立了ATS框架工作组(FWG),定义DoD的ATS技术框架^[6-7],确定ATS组成要素以及接口标准。

在ATS的技术研究和标准化方面也取得了长足进展。主要围绕缩短开发周期、降低成本、缩小体积、提高测试质量、实现更大范围的互操作性、提高系统的开放性等方面展开,主要包括:1)采用模块化、开放性、标准化、通用的或综合的ATS体系结构,通过增量式开发满足不同产品的测试需求^[8-9];2)在软件体系结构设计方面,合理划分层次、使用组件技术,采用标准接口并广泛采用测试领域和其它相关领域标准,提高体系结构的通用性、开放性、可扩充性,并实现软件组件的重用和测试程序的可移植性^[10];3)采用先进仪器总线、并行测试等技术提高测试性能^[9,11];4)采用合成仪器技术,充分利用计算机软件处理能力,降低成本,缩小体积和保障规模,增加灵活性和提高测试质量^[12];5)实现仪器互换性,降低测试仪器被淘汰时系统升级的技术难度和成本^[13-14];6)采用基于多传感器信息融合的故障诊断技术^[3,15],提高故障诊断的准确性;7)采用网络化测试技术,提高ATS部署的灵活性,适应更广泛的应用场景^[15-16];8)采用COTS(商用货架产品)技术,加快ATS硬件和软件开发并降低成本等^[12,17]。

但是,具体到面向产品检验中的自动测试开发,在实践中存在以下困难:

1)开发ATS时特别是由产品研制生产企业自行开发时,面对自动测试与测量仪器领域众多的技术体制、标准体系、开发平台应该如何选择,缺乏系统性指导方法。

2)开发周期长,难以快速响应测试需求。ATS用于产品检验,须在检验开始前完成开发并进行必要的验

证、确认(计量)和使用培训。但是,往往由于缺乏预计或难以预计,未能提前开发,等到识别出测试需求时,受检验周期的限制,已经来不及开发。

3)开发效费比不高,制约其应用。由于许多ATS是为某类产品专门开发的,只有产品长期、大批量生产情况下,才能达到适当的效费比。但是,在许多行业或企业,产品特点是多品种、小批量,这就要求更严格控制ATS开发成本。

4)使用灵活性不足,难以快速响应测试需求变化。一方面,由于产品技术更新、用户定制等原因,往往由不同版本或派生型产品构成一个产品系列,ATS要面对的不是单一产品,而是系列产品。另一方面,即使对于同一种产品,对于不同测试目的和时机,测试内容和测试保障条件可能也不相同。面对这些测试需求的变化,许多ATS需要进行的软硬件修改太多,响应速度慢。

针对这些问题,本文试图提出一种开发周期短、费用低、能够灵活方便适应使用需求变化并具有较好普适性的ATS快速开发方法,然后按照该方法结合具体被测产品实际开发ATS并进行功能性能验证,从而验证方法的可行性和有效性。

1 ATS硬件设计方法

1.1 仪器类型的分析与选择

硬件是ATS实现自动测试的基础条件,要构建ATS首先需要选择用于向被测单元(UUT)^[1]发送激励信号和对UUT的输出信号进行测量的仪器。按物理形态有以下几种方案。

1.1.1 基于数据采集卡的仪器

通过插入到计算机扩展槽中的数据采集(DAQ, data acquisition)卡,必要时与外置装置结合使用,实现现场信号采集、信号调理、数据采集,由计算机软件进行测量或测试控制。该方案充分利用计算机的扩展能力,无需购置仪器,实现成本低,适合测试功能较为简单或单一的应用场合。

1.1.2 独立仪器

也称为台式仪器或堆叠式(Rack-and-Stack)仪器^[18]。根据测试需求,分析测试点的分布以及需要产生的激励信号和测量的信号种类、幅度、精度等,进而选择若干台可控程独立仪器,由一台计算机作为远程控制器进行控制,构成ATS。每台仪器既可通过面板手动操作,又可由控制器通过编程接口在远程控制下工作。

该方案优点:1)作为通用仪器容易获得;2)部署灵活,当测试点分布在不同地理位置时(例如当被测对象为信息系统或者通信网络时),构成ATS的各独立仪

器可采用分布式部署；3) ATS 发生故障时，可采用仪器手动操作与程控操作相对等措施，易于隔离和排除故障^[18]。

1.1.3 模块化仪器系统

根据测试任务需求，选择配备相应仪器模块，插入标准的测试仪器机箱。机箱零槽或者系统槽电路板为嵌入式测试控制器，通过部署在背板上的某种标准仪器控制总线，实现对其余各插槽仪器模块的控制，从而构成具有多种测量能力的仪器系统。

随着计算技术的进步，越来越多的测量部分和激励部分由软件来实现，而且允许充分重用各种硬件要素（如处理器、A/D 转换器、D/A 转换器、信号调理器、开关等），充分降低每项仪器功能的采购成本和生存周期成本。因而，有时也将此类仪器称为合成仪器（SI, synthetic instrument），即通过标准化的接口将一系列基本的硬件和软件模块进行连接的可重复配置多功能仪器组^[1]，也称为综合仪器^[19]。

该方案优点：1) 支持仪器测试能力重构。通过加载适当软件和重新配置，赋予系统新的测试能力；2) 由于省去各模块仪器的机箱、电源、操作按钮或键盘、显示器等，特别是通过使用软件代替硬件以及共享处理能力消除硬件冗余，缩小体积，降低重量和功耗，便于部署在多种搭载平台，例如随同被测产品交付用户等；3) 由于标准化程度高，可按需配置各插槽仪器模块，包括来自不同厂商的产品，能够实现复杂的测试功能，应用前景广阔。随着技术实用化程度提高^[20-21]，合成仪器已经纳入美军 NxTest 等下一代自动测试系统^[22]以及应用到对遗留自动测试系统或设备的升级改造之中^[23]。

这 3 种方案各有优缺点，为了做出选择，需对 ATS 功能需求、约束条件和可用测试资源进行分析：

1) 功能需求分析：按测试目的，可将测试分为一致性测试和诊断测试。前者是为了证明产品性能与应用标准和规范相一致而专门进行的测试^[1]。后者是为了对 UUT 故障进行隔离或证实其确有故障，或为了把故障隔离到更低产品层次而对 UUT 进行的测试。产品检验中的测试主要是一致性测试。对于一些重要产品，需配备为生存周期各阶段提供伴随保障的 ATS，用于产品每次使用前状态就绪检查、开机自检、在线监测、故障检测、将故障隔离到现场可更换单元（LRU）或车间可更换单元（SRU）、修理后状态确认检验等。

2) 约束条件分析：对于用于产品检验的 ATS，产品检验场所通常对其体积、功耗等不做严格限制。而对于用于特定产品伴随保障的 ATS，常常需要交付给用户甚至随同被测产品部署，因此，必须满足用户关于保障产品的接口、结构尺寸、功耗、环境适应性等各项

约束。

3) 可用测试资源分析：各企业为了支持各种产品在不同产品层次的调试、检验等工作，已经积累了大量的独立仪器。

综上，我们认为，面向产品检验的 ATS 应优选基于独立仪器的设计方案。其优点是：（1）无需重复购置仪器，加快系统构建；（2）以标准仪器为基础进行测试，易于实现从手工测试到自动测试的平滑过渡，测试结果的可信性和准确性容易得到各相关方认可；（3）灵活性强，执行自动测试任务前，将若干仪器互连快速构建 ATS，测试任务结束后，这些仪器又可分散使用。这对于多品种、小批量的应用场合尤为重要。

考虑到技术的发展，可在方案中留有合成仪器系统接入 ATS 的能力。

1.2 仪器总线的分析与选择

测试仪器确定后，需选择测试控制器与仪器间或仪器与仪器间的通信总线。经过多年发展，仪器总线种类较多，常用的有：

1.2.1 GPIB（通用接口总线）

1972 年，惠普公司为了推进计算机与测试仪器之间接口的标准化，提出了仪器标准接口（HP-IB）^[24]，于 1975 年被 IEEE 接纳为 IEEE 488 标准。

该接口允许最多 15 个装置（指测试控制器和仪器）共享一条 8 比特并行电气总线，采用专用电缆连接，总传输路径不超过 20 米。其优点是：作为首款标准化程控仪器总线，由于其加固设计和可靠的服务而受到普遍认可，成为独立程控仪器的基本配置；使用简单。缺点是：1) 传输速率低成为制约系统性能提升的瓶颈。随着仪器背板总线速率提高和仪器内存容量迅速增大，几毫秒内产生的数据通过 GPIB 上传到系统控制器可能需要几分钟^[25]；2) 允许接入的仪器数量、线缆长度等严重受限；3) 需要在计算机中插入 GPIB 卡或连接外置的 GPIB 转换装置。

1.2.2 VXI（VME 总线在仪器领域的扩展）

为了大幅度压缩测试系统的体积，1987 年 VXI 联盟成立，提出了对 VME 总线进行改进的总线规范，于 1992 年被 IEEE 接纳为 IEEE 1155 标准^[26]。

它主要支持模块化仪器，最多支持 256 个装置。其优点是：由于结构紧凑，传输速率相比于 GPIB 有大幅提高，支持仪器之间的同步，因此成为一种高性能的总线结构，适用于组建对测试精度和测试速度要求较高的系统，主要用于航空航天等重要领域。其缺点主要是成本较高。

1.2.3 PXI（PCI 总线在仪器领域的扩展）

1997 年由 NI 公司发布，1998 年被采纳为行业标准^[26]。

它在 CompactPCI 基础上, 增加了触发、系统时钟及用于仪器之间的控制和同步的本地总线, 共有 3U 和 6U 两种结构形态。其优点是: 在保持结构紧凑、高吞吐量、精密时钟同步的基础上, 进一步降低成本。

1.2.4 LXI (局域网在仪器领域的扩展)

2004 年, 安捷伦技术公司和 VXI 技术公司, 为解决基于独立仪器的测试与测量应用中 GPIB 总线传输速率低、仪器接入数量和部署范围受限等问题, 推出了 LXI 总线^[25,27-28]。

LXI 以以太网的连通性为基础, 针对测量与测试应用进行了扩展。定义了 A、B、C 三类仪器。C 类是 LXI 的基础类仪器, 定义作为在一个以太网环境下的成员应该具有的仪器特性。B 类仪器可用于分布式应用, 在 C 类基础上增加了基于 IEEE 1588 的时间同步和基于 LAN 的触发控制。A 类仪器用于高精度或低延迟的应用, 在 B 类基础上, 增加硬件触发总线。LXI 的优点是: 由于基于以太网, 因此具有数据传输速率高、传输距离不受限、组网灵活、成本低、容易获得等优势, 更为重要的是它将从未来以太网价格和性能的改进受益^[25]。

1.2.5 其它接口

除上述专门用于仪器控制的总线之外, 还可直接采用计算机领域常用通信接口实现仪器控制^[25]。例如, 1) RS 232C 及其派生型 (如 RS 422 或 RS 485 等), 其应用广泛, 但是由于传输速率比较低, 近年来在计算机上直接提供该类接口的越来越少; 2) USB, 其在计算机外设如鼠标键盘甚至消费电子等方面应用非常普遍, 不仅成本低, 传输速率较高, 而且支持热插拔, 但是, 应用于自动测试领域时, 需要注意其缺乏牢固连接、抗干扰能力弱等问题; 3) FireWire, 基于苹果公司的技术, 1995 年被采纳为 IEEE1394 标准, 可提供高达 400 Mbit/s 或 800 Mbit/s 的传输速率, 常用于为外置硬盘驱动器等提供高速互连接口。

在选择仪器总线时主要考虑: 已选定的仪器对总线的支持能力; 系统是否要求总线支持仪器之间的时间同步和触发; 要求仪器总线支持的传输速率; 需经仪器总线互连的要素的数量及分布情况; 可靠性、环境适应性等要求; 基于该总线开发 ATS 所需的经济成本、时间周期; 仪器领域接口标准发展趋势等。

对于面向产品检验的 ATS, 考虑到: 1) 主要基于独立仪器而非模块化仪器系统; 2) 测试仪器生产年代不同, 支持的总线类型并不完全相同; 3) 投入使用后, 作为组成要素的各种仪器的升级换代是不可避免的而且在时间上是不同步的; 4) 对于复杂系统, 往往任何一种单一的总线类型都难以满足要求, 因此, 一般应考虑混合仪器总线而不是单一类型总线。本文选择 LXI、

GPIB、LAN、RS 232C 等混合仪器总线进行讨论。

1.3 对被测单元的一体化控制

在产品设计中, “通用化、系列化、组合化 (模块化)” 设计理念获得广泛认可和应用, 越来越多的被测产品需要设置工作模式和参数, 以适应不同需求或场景。例如, 某产品既可部署在通信系统的中心站, 又可部署在外围站, 两种情况下产品功能和性能并不完全相同。再如, 某通信设备各接口可以设置不同的传输速率、可以使能不同的链路层协议等。

为保证测试的完备性, 测试必须覆盖 UUT 各种工作模式、各种工作参数。大多数 UUT 除了具有本地设置/查询/更改操作手段 (如位于产品面板上的显示屏、按键) 以外, 还具有远程控制接口, 接收来自远端的操作控制命令或者向远端报送状态变化或告警信息等。例如, 产品通过远程控制接口接受来自网络管理或运行维护系统的集中管理。为保证 ATS 具有较高的自动化程度, 需在测试控制器与 UUT 远程控制接口之间建立通信链路, 实现对 UUT 的一体化操作控制。

1.4 硬件系统的构建

根据仪器选择、测试总线选择、被测产品一体化控制接口选择结果, 即可构建 ATS 的硬件系统。图 1 给出了 ATS 硬件构建的一个示例。

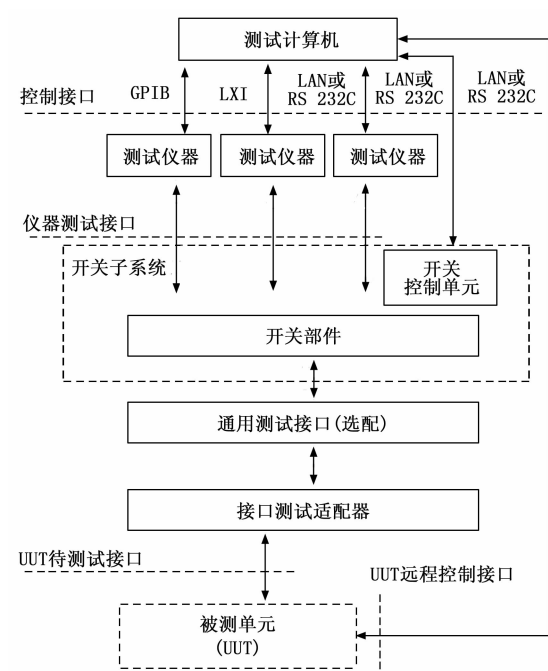


图 1 面向产品检验的 ATS 硬件组成示例

其中:
1) 测试计算机, 作为测试控制器, 通过对各种测试仪器、开关子系统、UUT 等的操作控制, 使各组成部分协同工作, 按用户要求完成测试任务并生成测试结果。

2) 测试仪器, 用于向 UUT 产生激励信号和/或对 UUT 输出信号进行测量。

3) 开关子系统, 由开关控制单元和各类开关部件组成, 用于构建或切换测试仪器与 UUT 适当接口之间的信号通路。

4) 通用测试接口, 是将通用自动测试设备的所有激励与测量资源按规范引至连接标准端口的装置^[1]。当需要利用同一 ATS 对多种产品进行测试时, 可能需要配置该接口以屏蔽被测产品的差异。在设计通用测试接口时, 应保证插针定义唯一性、资源配置最大化、资源定义规范化、保留扩展空间等^[29]。

5) 接口测试适配器, 是在被测单元和自动测试设备之间, 提供电子、电气和机械兼容连接与调节的一个或一系列装置^[1]。它与具体被测产品、测试项目以及测试程序密切相关。即使对于同一产品同一组测试项目, 不同测试程序所需接口测试适配器也可能不同。

2 ATS 软件设计方法

2.1 软件开发平台的选择

ATS 软件运行在测试计算机上, 对测试系统的功能性能及可扩展性等起着决定作用。当前, ATS 软件大多基于测试系统软件开发平台进行开发, 以便于充分利用平台提供的各种资源。而且, 在同一企业内部各 ATS 开发尽可能选择相同平台, 更容易保证测试程序集 (TPS)、仪器驱动程序等在不同测试系统之间的重用或移植。

面向 ATS 的软件开发平台, 也称为应用开发环境 (ADE), 种类繁多。为了便于分析, 本文将其分为两大类:

1) 综合性 ATS 软件开发平台:

这类开发平台面向特定应用领域测试需求, 按照某种技术体制、标准体系、设计理念, 对 ATS 软件开发提供多方位的、综合性的支持。典型代表有 TYX 公司的基于 ATLAS 测试语言的 PAWS^[30-31], GDE 系统公司的测试开发环境 TOP TEST^{TM[32-33]}, ARINC 为航空电子测试系统开发的商用软件 SMART^{TM[34]}, 电科 41 所的以 TestCenter 为代表的自动测试软件开发平台^[35], 中航工业 634 所的可视化测试程序集成环境 GTEST^[36]等。

2) 基础性软件开发平台:

这一类软件开发平台只为 ATS 软件开发提供一些基础性的、共性的支撑, 至于技术体制以及所遵循的标准体系等, 由开发人员自行选择。常用平台或工具有:

(1) 文本编程语言类: C、C++、VB、VC、LabWindows/CVI 等;

(2) 图形化编程语言类: NI 公司开发的 LabVIEW、HP 公司开发的 VEE 等。

3) 分析与选择:

尽管综合性软件平台为测试软件开发提供更高程度支持, 被许多大型重要测试系统开发所采用, 但是针对面向产品检验 ATS 软件开发, 在不同程度上存在以下不足:

(1) 与我们已经确定的硬件设计思路不相适应。例如, 有些平台更适用于模块化仪器, 而我们采用的是基于独立仪器的硬件设计方案。

(2) 这类平台大多用于伴随某一特定领域产品生存周期各阶段、各场景、各产品层次的 ATS 的开发, 通常采用基于信号的测试方法而不是基于仪器的测试方法, 不论测试资源还是被测产品都是通过信号模型和它们的特有属性来描述, 建模等开发工作量较大。对于在较短时间周期内开发面向多种产品的一致性测试的自动测试系统, 其开发效率不高, 而其它方面优势又难以充分发挥。

(3) 在提供较高程度系统设计的同时, 也在不同程度上限制了选择的灵活性。

(4) 获取成本较高, 所需培训周期较长。

基于以上分析, 我们选择了基础性软件开发平台。考虑到基于图形化编程语言平台编程比较简单、直观, 一般 ATS 软件开发可优先选用图形化编程平台。可根据各具体开发平台的特点、在业界认可及支持程度、团队已有技术基础和可重用成果等因素, 在 LabVIEW 和 VEE 等平台中做出具体选择。

2.2 ATS 软件体系结构设计

软件体系结构 (Software Architecture), 是对系统整体结构设计的刻画, 包括全局组织与控制结构, 构件间通信、同步和数据访问的协议, 设计元素间的功能分配、物理分布、设计元素集成、伸缩性和性能、设计选择等^[37]。

优秀的体系结构通常是一个系统开发取得成功的决定性因素, 这是因为^[38]: 1) 它在软件开发中为不同人员提供交流手段; 2) 在软件系统设计的早期做出设计决策, 明确系统实现的约束条件, 决定软件开发和维护的组织方式, 制约着系统的质量属性; 3) 作为一种可重用模型, 通过抽象可以使那些经过实践验证表明非常有效的构件在类似软件开发中得到重用。

我们在进行 ATS 软件体系结构设计时强调以下几项原则:

1) 适用性原则。必须适用于已经确定的 ATS 硬件设计及软件开发平台。

2) 抽象原则。通过抽象对普遍的、具有相同特征和属性的事物进行概括。

- 3) 封装和信息屏蔽原则。强调隐藏各部分处理的复杂性, 规定简单统一的访问方式, 增强软件的可维护性。
- 4) 模块化原则。模块化是保证软件可重用、可移植、可扩展、可维护等的重要基础, 而这些特性对于 ATS 的快速构建以及持续发展是必不可少的。
- 5) 有利于软件成果重用的原则。各层次软件成果的重用, 是缩短 ATS 软件开发周期并降低开发费用的关键。
- 6) 最大限度适应测试需求变化的原则。
- 基于这些原则, 提出了一种 ATS 软件体系结构, 如图 2 所示。

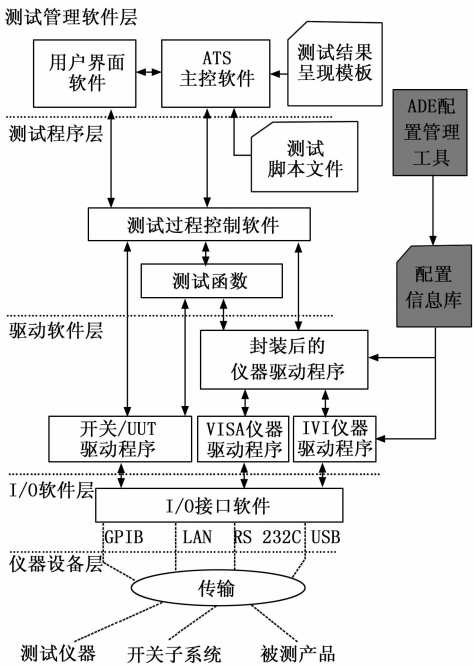


图 2 提出的 ATS 软件体系结构

其中, 我们将 ATS 软件自上至下划分为测试管理软件层、测试程序层、驱动软件层、I/O 软件层, 另外需利用应用开发环境配置管理工具对测试资源进行必要配置。

2.2.1 测试管理软件层

实现对整个测试系统的管理与控制, 是测试系统运行的引擎。不因测试需求和测试实现方法的变化而变化, 可在面向不同 UUT 的 ATS 之间实现共享或重用。具体包括:

- 1) ATS 主控软件, 负责 ATS 软件的综合管理, 包括:
- (1) 在测试执行前的准备阶段, 主要通过人机界面实现一系列基本配置, 如被测产品系列及具体产品型号的选择, 待批量测试的产品数量及编号, 测试脚本文件的创建/修改等。

(2) 在测试执行阶段, 读取测试脚本文件的每一个条目 (对应于 EXCEL 文件的一行), 根据条目类型分别组织进行处理, 在人机界面动态显示并暂存正在进行的测试项目的测试实例、实测值及是否符合预期结果等。

(3) 测试执行之后, 支持用户查看测试结果和按照测试结果呈现模板生成测试记录或者测试报告。

2) 用户界面软件, 实现 ATS 的图形化人机交互界面。

3) 测试结果呈现模板, 规定产品自动测试结果文档的格式。不同行业、不同领域甚至不同的最终用户, 可能对这些文档有不同的要求。

2.2.2 测试程序层

测试程序 (TP), 即自动测试设备执行的代码序列, 它给自动测试设备提供一组能自动确定 UUT 工作条件和在 UUT 内检测并隔离故障的指令^[1]。它是按照具体测试需求和测试实现方法编写的。我们将其划分为测试脚本文件、测试过程控制软件和测试函数 3 部分:

1) 测试脚本文件。根据自动测试需求, 按约定的格式, 描述某一次测试任务的测试内容、所用测试仪器、测试参数、合格判定准则、测试顺序等。考虑到产品检验人员习惯按检验项目表进行检验并记录检验结果, 我们采用基于 EXCEL 格式的表格来定义测试脚本, 通过位于每一行第一列的关键字, 将 EXCEL 文件的行划分为以下几类:

(1) 测试项目条目: 给出即将进行的功能性能测试项目名称和实现该测试所需仪器的描述。测试项目 (test item), 由测试序列或测试动作组成, 根据测试需求定义的一组测试内容, 用于确定 UUT 某一功能/参数是否合格^[1]。通常对应产品检验中某一个检验项目 (如通道隔离度测试), 也可从方便自动测试组织实施的角度出发, 将若干个独立的检验项目 (检验指标) 组合成一个更大测试项目 (即项目组), 或者反过来将一个测试项目分解为若干个便于实施的测试项目 (即子项目)。仪器描述部分包括仪器类型 (如频谱分析仪) 和仪器逻辑名称 (如 SpecAn1), 通过逻辑名称区别系统中的每一台仪器。仪器描述部分用于建立测试资源与测试项目之间的关联关系, 而且当 ATS 中对于同一测试项目有不同测试方法时, 通过所用仪器也可以加以区别。

(2) 测试实例条目: 是测试项目的实例化和具体化, 明确测试的具体对象 (如端口、接口、信道、时隙、频点等)、具体参数、具体合格判定阈值等, 是可以实际实施的测试项目。

(3) 信息条目: 显示在人机界面上, 提示使用人员注意的事项或需要进行的操作。例如, 要开始一个新的

测试项目时,可能需要提示操作人员确认被测产品及 ATS 各组成部分是否准备就绪,得到确认后方可进行测试。有时可能从 ATS 开发的效费比和时间周期角度权衡分析,需使用人员参与少量操作配合 ATS 完成测试。

(4) 执行顺序控制条目:用于控制测试脚本是顺序执行还是需跳转到特定位置执行。例如,在进行产品可靠性试验或环境适应性试验时,可以持续地自动循环执行某些测试项目,防止遗漏瞬态故障或间歇性故障。

(5) 注释条目:用于提高测试脚本的可读性、可维护性,例如,说明相应字段确切含义、格式化要求、数量单位等。

测试脚本文件对于 ATS 的使用人员是开放的,既可以通过 ATS 提供的界面也可通过 EXCEL 对其进行创建和更改,提高 ATS 软件使用灵活性。推荐的、典型的或曾经使用并得到验证的测试脚本文件构成测试脚本库,为后续选择使用提供便利。

2) 测试过程控制软件。将 ATS 主控软件推送的“测试项目条目”或“测试实例条目”信息按约定格式进行解析和处理。对于测试项目条目,将内部状态切换到即将进行的测试项目,调用测试函数实现所用到的各台仪器的初始化,为处理该测试项目下的具体测试实例做好准备。对于测试实例条目,对测试仪器、开关子系统、被测产品进行协同操作控制,对 UUT 进行所需测量获取仪器测量值,进行必要的数据处理(例如考虑因自动化测试增加了开关子系统而带来的线路损耗进而进行数据补偿)得到实测值,按照合格判定准则判定是否合格,并将实测值和合格判定结论反馈给 ATS 主控软件。必要时,在测试过程中也可直接通过人机界面呈现测试信息(如波形等测试中间结果)或读取人工输入信息(如个别需人工配合操作的项)。

3) 测试函数。设计测试函数的目的是提高软件的模块化程度进而提高软件的可重用性。可将测试过程中某些具体的或者专门的处理,特别是预计具有潜在重用性的一些处理程序,封装为测试函数。企业在同一行业领域内开发面向不同被测产品的 ATS,将积累大量测试函数,如果对其封装方式等做出约定,可形成企业的可重用测试函数库,通过重用缩短后续 ATS 软件开发周期。

2.2.3 驱动软件层

为测试仪器、开关子系统、被测产品的操作与控制提供支撑,具体包括:

1) 封装后的仪器驱动程序。大多数 ATS 体系结构,如基于 ATLAS 的体系结构、LM-STAR(洛马之星)、美国空军的 VDATS 等,在 TP 与仪器驱动程序之间有一个叫做封装(wrapper)的抽象层^[39,14]。通过

对仪器驱动程序的封装,可以隔离仪器驱动方面的差异对 TP 的影响,使得测试过程控制软件、测试函数使用某种通用的仪器接口而不是具体厂商型号的仪器接口,进而为 TP 在不同 ATS 之间的可移植性以及系统中仪器互换性提供支持。

仪器驱动方面的差异包括两个层次:(1)在仪器驱动体系结构层面,有 VISA^[40]、IVI^[40~42]两种体系结构,二者对上层软件开放的接口或者使用方式并不相同。对于 IVI,上层软件通常访问 IVI 类(IVI-Class)驱动程序^[43](如频谱分析仪类、信号发生器类);而对于 VISA,上层软件直接访问具体仪器的驱动程序;(2)不同厂商的同类仪器或同一厂商不同年代仪器的 VISA 驱动程序之间,可能存在一些差异,例如虽然符合 SCPI(标准命令程控仪器)格式要求,但是在语义上并不完全统一。

通过对各种仪器驱动程序按照约定的格式进行封装,形成统一的向上层软件开放的接口。当上层软件需要访问相应仪器驱动程序时,能够通过访问配置信息库,向目的地址发送 SCPI 公共指令询问,获取仪器厂商及型号等信息,经过必要的数据处理或参数格式转换后最终访问具体的 IVI 类驱动程序或具体仪器的 VISA 驱动程序。

此外,在封装软件中还可以实现错误处理、功能定制等功能^[39]。

2) 仪器驱动程序。用于实现对测试仪器的操作控制,例如初始化、参数设置、启动、停止、读取结果等。商用仪器的仪器驱动程序由厂商提供适合的驱动程序安装包,也可由 ATS 软件开发人员根据仪器编程手册和所使用的软件开发平台自行开发驱动程序。

对于 IVI 驱动程序,为了实现从 IVI 类驱动程序向面向具体仪器的 IVI 专用驱动程序的映射进而操控实际仪器,需要访问配置信息库获取实际的仪器配置信息。

3) 开关/UUT 驱动程序。开关子系统驱动程序和被测产品的驱动程序,为实现对开关子系统和被测产品的操作和控制提供支持。需按照要实现的功能、采用的通信接口及协议等进行开发,通常封装成 API 供 TP 调用。

2.2.4 I/O 软件层

实现各种 I/O 接口的操作控制,支持测试计算机与测试仪器、开关子系统、被测产品之间的通信。

2.2.5 ADE 配置管理工具及信息库

应用开发环境(ADE)通常具有进行测试资源配置所需的工具,配置结果放入配置信息库供其它软件使用。例如,在 LabVIEW 开发环境中,可利用 NI 公司开发的配置工具 MAX(测量与自动化管理器),对 TP 所用到的每一台仪器的仪器总线方式、仪器地址、IVI

仪器驱动程序等进行配置, 从而实现仪器逻辑名与实际仪器的绑定。

2.3 软件实现

考虑项目团队人员经验和已有可重用成果, 在软件实现时我们选择了 VEE 开发平台; 按所提出的体系结构, 为测试脚本文件定义了主要的关键字 (见表 1); 开发了主控软件、人机界面软件等。图 3 给出了测试执行阶段主控软件读取测试脚本文件进行处理的简要流程。

表 1 测试脚本文件主要关键字示例

关键字	含义	位置
TEST_ITEM	测试项目条目	首列
TEST_INSTANCE	测试实例条目	首列
TEST_INFORMATION	提示信息条目	首列
TEST_LABEL	执行顺序控制条目—位置标号	首列
TEST_GOTO	执行顺序控制条目—跳转到标号	首列
TEST_REM	注释条目	首列

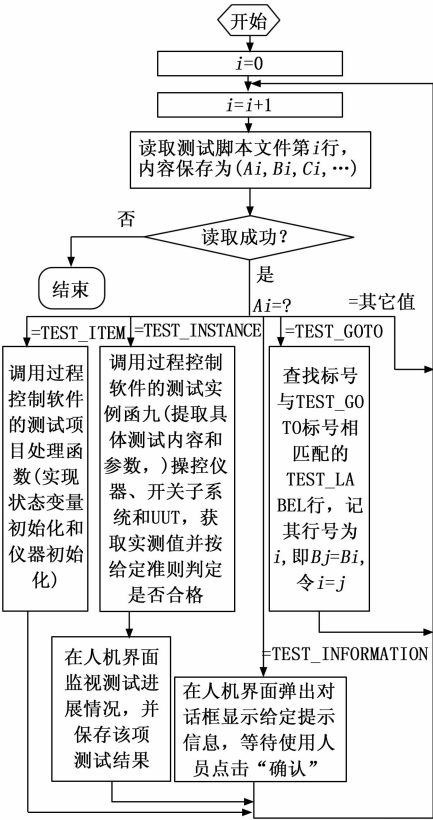


图 3 主控软件测试脚本处理流程 (测试执行阶段)

3 实验结果与分析

为验证所提出的 ATS 开发方法的可行性并评估其性能, 现以一款产品为案例, 介绍硬件和软件开发步骤以及 ATS 验证结果。

3.1 自动测试需求

被测产品为某频段 (4×4) 交换矩阵, 实现 4 路输

入 4 路输出信号 (上行、下行) 的全交换功能, 具有以下接口:

- 1) 上行输入接口, 4 个;
- 2) 上行输出接口, 4 个;
- 3) 下行输入接口, 4 个;
- 4) 下行输出接口, 4 个;
- 5) 10 MHz 参考源输入接口, 1 个;
- 6) 远控接口 (以太网口), 1 个。

通过远控接口, 可切换被测产品输入接口到输出接口的通道, 可设置参考源为“外参考源”或“内参考源”。

需实现的自动测试项目及要求见表 2。

表 2 自动测试项目及要求

测试项目	测试内容及要求
增益测试	1) 上行通道: 在规定频带内, 被测设备输入到输出间共 16 路通道的增益均满足 (0 ± 3) dB。 2) 下行通道: 同上行通道。
带内波动测试	1) 上行通道: 在规定频带内, 被测设备输入到输出间共 16 路通道的带内波动均满足 ≤ 3 dBp-p/500 MHz。 2) 下行通道: 同上行通道。
通道隔离度测试	1) 上行通道: 在规定频带内, 被测设备输入到输出间共 48 路通道的通道隔离度均满足 ≥ 55 dB。 2) 下行通道: 同上行通道。
1 dB 压缩点输出功率测试	1) 上行通道: 输入 1 对输出 1、输入 2 对输出 2、输入 3 对输出 3、输入 4 对输出 4 共 4 条通道的 1 dB 压缩点输出功率 $P-1$ dB ≥ 0 dBm。 2) 下行通道: 同上行通道。
10 MHz 输出电平测试	1) 上行通道 (内参考源): 在规定频带内, 被测设备 4 路输出通道的 10 MHz 输出电平 ≥ 0 dBm。上行通道 (外参考源) 同上。 2) 下行通道 (内参考源): 在规定频带内, 被测设备 4 路输入通道的 10 MHz 输出电平 ≥ 0 dBm。下行通道 (外参考源) 同上。

3.2 ATS 硬件设计

- 1) 测试仪器: 沿用手工测试时所用可编程仪器: N5230A 型矢量网络分析仪 1 台, 用于增益、带内波动、通道隔离度测试; E8251A 型信号发生器、8563EC 型频谱分析仪各 1 台用于 1 dB 压缩点输出功率、10 MHz 输出电平测试。
- 2) 测试计算机: PC 机 1 台。
- 3) 开关子系统: 开关子系统打通测试仪器与 UUT 被测接口之间信号通路。如果按照完全自动测试进行设计, 所需开关子系统容量较大, 使用的开关部件和互连电缆较多, 购置成本较高, 而且校准工作量大。经权衡分析, 我们确定 ATS 应达到的自动化程度为: 在每一个测试项目内实现全自动测试, 在不同测试项目之间允许手动调整连接关系。

为此, 采购了 2 个 1×2 开关部件、4 个 1×4 开关部件, 自行开发了能够根据来自测试计算机的指令对各开关部件进行通路切换控制操作的开关控制单元, 按照图 4 所示的连接关系互连, 并进行供电及机械结构设计, 形成了开关子系统。

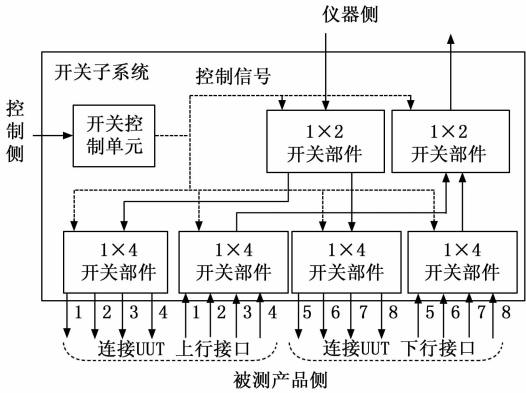
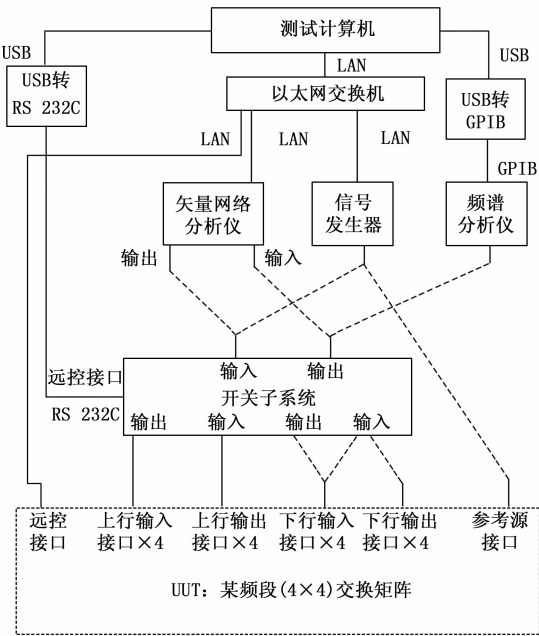


图 4 开关子系统连接框图

4) 其它辅助装置:
根据测试仪器、开关子系统、被测产品互连需求, 选择以太网交换机、 GPIB 转换盒、互连电缆等辅助装置。图 5 给出了 ATS 硬件组成框图。



图例: --- 不同测试项目之间可能需要切换的连接

图 5 实验案例 ATS 硬件组成框图

3.3 测试程序设计

针对自动测试要求, 编写了测试脚本文件, 开发测试过程控制软件以及相应的测试函数。限于篇幅, 表 3 给出了测试脚本文件中通道隔离度测试相关内容的一部分, 图 6 给出了过程控制软件中关于通道隔离度测试的简要处理流程。

表 3 测试脚本文件中通道隔离度测试部分示例

条目标志 字段 (Ai)	第一字 段 (Bi)	第二字 段 (Ci)	测试参数 字段 (Di)	合格判 定准则 字段 (Ei)
TEST_ INFORMATION	通道隔离度测试: 确认矢量网络分析仪经开关子系统与被测矩阵之间连接			
TEST_ITEM	通道隔 离度	INSTR_TYPE = 矢量网络分 析仪; LOGIC AL_NAME= VectorNA1		
TEST_REM	对于上行通道: 在被测矩阵中建立以 Di 为输入以 Bi 为输出的通道; 将仪器输出端导通至 Di 接口, 将仪器的输入端导通至 Ci 接口, 测得当输入接口为 Di 时, 输出接口 Ci 对接口 Bi 的通道隔离度, 共需测量 48 项指标。			
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 2	输入 1	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 2	输入 2	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 2	输入 3	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 2	输入 4	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 3	输入 1	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 3	输入 2	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 3	输入 3	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 3	输入 4	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 4	输入 1	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 4	输入 2	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 4	输入 3	≥55 dB
TEST_INSTANCE	上行输出 1	输出 4	输入 4	≥55 dB
.....				
TEST_REM	对于下行通道: 在被测矩阵中建立以 Bi 为输入以 Di 为输出的通道; 将仪器输出端导通至 Ci 接口, 将仪器的输入端导通至 Di 接口, 测得当输出接口为 Di 时, 输入接口 Ci 对接口 Bi 的通道隔离度, 共需测量 48 项指标。			
TEST_INSTANCE	下行输入 1	输入 2	输出 1	≥55 dB
.....				

3.4 驱动程序

3.4.1 仪器驱动程序及封装

虽然 IVI 驱动的仪器实现仪器互换较为方便, 但是有些仪器未提供 IVI-COM 驱动程序包, 有些仪器类型 IVI 基金会尚未推出相应的 IVI 类驱动规范, 而目前 VISA 驱动在仪器实际应用中最为普及, 因此, 本案例主用 VISA 驱动程序 (除仪器互换试验外)。

由于结合企业仪器计量自动化的需要已经开发了各仪器封装程序, 与我们在 ATS 中采用的驱动程序封装格式相同, 因此无需另行开发封装程序。图 7 以频谱分析仪为例给出了封装后仪器驱动库结构。

3.4.2 开关子系统驱动程序

测试计算机采用自定义通信协议通过开关子系统的

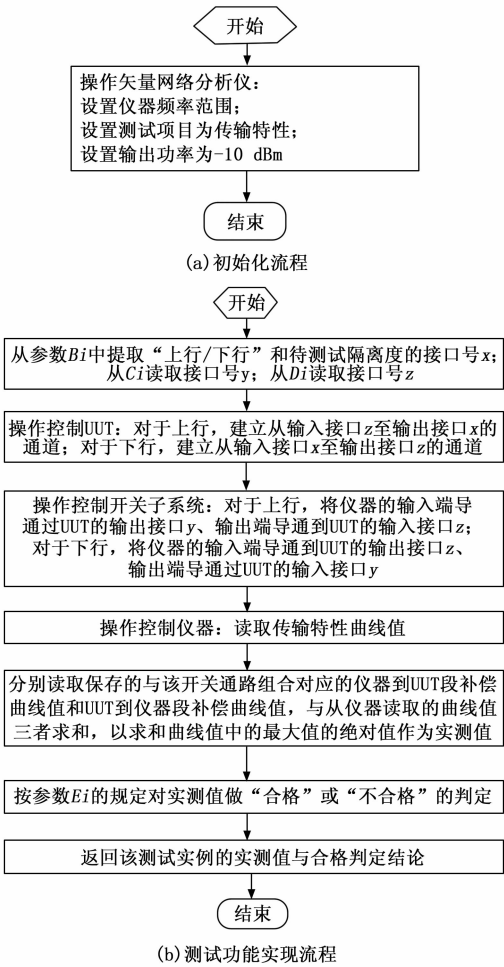


图 6 过程控制软件中通道隔离度测试处理流程

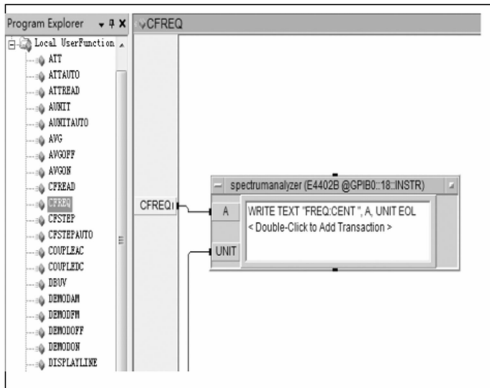


图 7 封装后频谱分析仪驱动程序库结构示意图

控制单元实现对开关子系统的操作控制, 主要包括: (1) 初始化 (状态及连接关系清零); (2) 建立指定输入接口到指定输出接口的连接。根据协议开发了计算机侧的驱动程序以及开关控制单元侧的开关控制程序。

3.4.3 UUT 驱动程序

按照被测产品远程控制接口协议标准, 开发了自动测试所需的驱动程序, 功能包括: (1) 按照给定参数建

立上行/下行输入接口到输出接口的通道; (2) 设置参考源为“外参考源”或“内参考源”。

3.5 开关子系统通路损耗的测量

与传统手工测试相比, ATS 在测试仪器与 UUT 之间增加了开关子系统, 因此, 在进行自动测试之前, 除了与手工测试一样需要对仪器进行校准之外, 还需要对所用开关子系统引入的损耗进行测量, 用于自动测试时的补偿。以通道隔离度测试为例, 采用分段测量方法, 从仪器到 UUT 方向有 8 条通路 (见图 4), 通过电缆连接构成“仪器—开关子系统—仪器”环路后, 分别测量得到每一条通路的传输特性曲线, 保存到测试计算机中。类似地, 分别测量得到 8 条从 UUT 到仪器方向通路的传输特性曲线。

进行 UUT 通道隔离度自动测试时, 在仪器测量曲线值基础上, 分别调取相应的从仪器到 UUT 和从 UUT 到仪器两段通路所对应的传输特性曲线值进行补偿 (见图 6)。

3.6 ATS 的验证

通过 VEE 的仪器配置管理工具 Instrument Manager 对 3 台仪器进行配置后, 进行了以下验证:

1) 自动测试功能的验证:

按测试脚本文件运行自动测试, 测试过程中在人机界面监视测试进展情况, 测试结束时按要求生成测试记录和测试报告。结果符合预期。图 8 为增益和带内波动测试截图。



图 8 测试进展情况监视人机界面

2) 测试精度的验证:

采用人机比对方法进行验证, 在重复性测量条件^[44]下, 针对同一经检验合格的性能稳定的被测产品, 对于相同测试项目, 利用相同测试仪器和原理, 分别进行自动测试和传统手工测试各 10 次, 实测值的平均值分别记为 $\bar{x}_{ATS}$ 和 $\bar{x}_{manual}$, 若满足:

$$|\bar{x}_{ATS} - \bar{x}_{manual}| \leq \sqrt{2}U \quad (1)$$

则判定 ATS 测试精度符合要求^[45]。其中, U 为 ATS 测量被测产品的扩展不确定度^[44], 可按以下公

式^[46]计算：

$$U = k \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}$$
 (2)

其中： k 为包含因子（一般取 $k=2$ ）， N 为不确定度分量的总个数， u_i 为测量不确定度的第 i 个分量。

经 5 个测试项目的比对验证，ATS 的测试精度符合要求。以其中的通道隔离度为例，经分析，该测试项的不确定度来源共有两项，矢量网络分析仪传输测量不准确引入的不确定度 $u_1=0.225$ dB，以及 ATS 测量被测产品通道隔离度的重复性引入的不确定度 $u_2=0.029$ dB，按式（2）计算得到 $U\approx0.45$ dB（ $k=2$ ）。为了覆盖构成开关子系统中各开关部件通路及连接电缆，将从仪器到 UUT 方向的 8 条通路和从 UUT 到仪器方向的 8 条通路（见图 4），按照便于测试的角度两两组合得到 8 种组合，从测试脚本文件（见表 2）中选择一个与组合相对应的测试实例，分别进行自动测试和手工测试，按式（1）进行判断。表 4 给出了通道隔离度测试比对验证汇总数据，表 5 给出了表 4 中第一种通路组合的详细实测数据。

表 4 通道隔离度比对验证汇总数据

覆盖的通路组合	选择的测试实例(Bi,Ci,Di)	自动测试均值/dB	手动测试均值/dB	均值差值绝对值/dB	验证判据/dB	结论
(1,2)	(上行输出 1,输出 2,输入 1)	64.764	64.759	0.005	0.64	合格
(2,3)	(上行输出 1,输出 3,输入 2)	63.710	63.718	0.008	0.64	合格
(3,4)	(上行输出 1,输出 4,输入 3)	84.489	84.793	0.304	0.64	合格
(4,1)	(上行输出 2,输出 1,输入 4)	72.218	72.448	0.230	0.64	合格
(5,8)	(下行输入 2,输入 1,输出 4)	69.213	69.022	0.191	0.64	合格
(6,5)	(下行输入 1,输入 2,输出 1)	72.307	72.663	0.356	0.64	合格
(7,6)	(下行输入 1,输入 3,输出 2)	65.561	65.903	0.342	0.64	合格
(8,7)	(下行输入 1,输入 4,输出 3)	71.601	71.731	0.130	0.64	合格

3) 对测试需求变化的响应能力的验证：

修改测试脚本文件，包括删减某个测试项目及其测试实例；删减测试项目中某一测试实例；修改某一测试实例的参数或合格判定阈值；修改测试项目的先后次序，然后运行 ATS，通过人机界面查看自动测试进行情况与对测试脚本文件所做修改是吻合的。

4) 支持仪器互换能力的验证：

先后进行了两组仪器互换试验。

(1) VISA 仪器之间互换：用罗德与施瓦茨公司的

表 5 通路组合(1,2)的比对验证详细数据

重复测量序号	自动测试实测值/dB	手动测试实测值/dB
1	64.74	64.75
2	64.75	64.77
3	64.76	64.76
4	64.78	64.79
5	64.75	64.70
6	64.78	64.77
7	64.82	64.80
8	64.76	64.73
9	64.75	64.78
10	64.75	64.74
平均值	64.764	64.759
平均值之差的绝对值	0.005 dB	
验证判据 U	0.64 dB	
验证结论	合格	

FSW26 型频谱分析仪替换了原来安捷伦公司的 8563EC 型频谱分析仪。在确认已有 FSW26 型频谱分析仪的 VISA 驱动程序之后，通过 VEE 的仪器配置工具，配置对应的总线方式及地址，以 1 dB 压缩点输出功率测试项目为代表，连接测试仪器等并运行 ATS，能够正常进行测试。

(2) IVI 仪器之间的互换：对于案例中所用到的仪器类型，由于案例团队没有可用来做互换试验的其他厂商 IVI-COM 驱动程序，因此，只进行了同一厂商的 IVI 仪器之间的互换试验。用安捷伦公司 E8257D 型信号发生器替换了原来 E8251A 型信号发生器，通过配置工具，配置新仪器总线方式和地址，仍选择以 1 dB 压缩点输出功率测试项目为代表，替换后 ATS 能够正常运行。

顺便指出，上述两组试验中，也可在仪器侧而不在测试计算机侧进行配置，使替换前后总线方式与地址保持不变，效果相同。

3.7 实验结论

ATS 开发及验证结果表明：1) 提出的硬件、软件开发方法能够指导面向产品检验 ATS 的快速开发；2) 开发的 ATS 满足自动测试功能及精度要求，能够快速适应测试需求变化，仪器互换能力得到了一定验证。

4 结束语

本文针对产品检验中自动测试需求特点，从产品研发生产企业的视角，提出了优选基于独立仪器集成、采用混合仪器总线、将被测产品与测试仪器和开关子系统一体化控制的 ATS 硬件体系结构设计思想。

为提高 ATS 面对测试需求的变化进行快速响应能力和软件可重用性，提出了一种 ATS 软件体系结构并开发了相应软件。其中，测试管理软件实现自动测试的管理功能，不因被测产品和测试内容的不同而变化，因

此是可重用的。将面向具体测试需求的测试程序进一步划分为测试脚本文件、过程控制软件、测试函数三部分。测试脚本文件是符合约定格式的开放性的 EXCEL 文件,允许在 ATS 的使用阶段根据测试需求进行修改;测试函数有利于企业在特定领域长期积累形成可重用库,进一步缩短 ATS 软件开发时间。

未来,随着更大范围实际应用,将对所提出的开发方法进行完善,例如进一步扩充测试脚本的能力,支持线损测量自动化,对于驱动程序封装进行优化设计,支持更复杂情况下的仪器互换并进行充分验证等。

参考文献:

- [1] 邵云峰,顾彬彬,马晓东,等. 测试与诊断术语: GJB 3385A-2020 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2020, 7.
- [2] 齐永龙,宋 斌,刘道煦. 国外自动测试系统发展综述 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (12): 1-4.
- [3] 杜 里,张其善. 电子装备自动测试系统发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (6): 1019-1021.
- [4] ROSS W A. Moving toward a DoD automatic test system standard [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2006: 739-747.
- [5] BURDEN J, CURRY P A, ROBY D, et al. Introduction to the next generation automatic test system (NGATS) [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2005: 16-19.
- [6] MALESICH M, FOX K. Overview and guidance for the DoD ATS framework [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2006: 748-754.
- [7] MALESICH M. Advances in DoD's ATS framework [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2007: 11-16.
- [8] 刘福军,蔡德咏,孟 晨,等. 下一代自动测试系统体系结构研究进展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 339-341.
- [9] 赖 根,肖明清,夏 锐,等. 国外自动测试系统发展现状综述 [J]. 探测与控制学报, 2005, 27 (3): 26-30.
- [10] 李宝安,李行善. 自动测试系统 (ATS) 软件的发展及关键技术 [J]. 测控技术, 2003, 22 (1): 1-4.
- [11] 郭荣斌,赵秀才. 自动测试系统的发展趋势 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33 (6): 1-4.
- [12] GOLDEN O, STARKLOFF E. Developing synthetic Instruments with COTS technologies [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2006: 32-37.
- [13] TACHA N, MCCARTHY A, POWELL B, et al. How to mitigate hardware obsolescence in next-generation test systems [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2009: 229-234.
- [14] HANEY M. The pitfalls of instrument compatibility [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2014: 1-6.
- [15] 贾志军,颜国强,吴国庆,等. 外军 ATE/ATS 技术的发展趋势 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (1): 1-4.
- [16] 刘向阳,冷春雪,黄启陶,等. 自动测试技术在航天中的应用现状及发展趋势 [J]. 宇航测试技术, 2018, 38 (1): 1-5.
- [17] NEAG I A. Minimizing lifecycle cost of ATS solutions through COTS software design [C] // IEL Citation, 2003: 129-133.
- [18] CIMINO C. Rack-and-stack instruments: often a better choice than VXI or PXI systems [J]. IEE Computing & Control Engineering, 2005: 16-19.
- [19] 李 华. 综合仪器和新一代自动化测试系统 [J]. 国外电子测量技术, 2005, 24 (12): 1-4.
- [20] ORLET J L, MURDOCK G L. Practical implementation of synthetic instrumentation [C] // IEL Citation, 2004: 154-157.
- [21] BROWN S. Real world applications of synthetic instrumentation [C] // IEL Citation, 2004: 434-439.
- [22] ROSS W A. The impact of next generation test technology on aviation maintenance [C] // IEL Citation, 2003: 2-9.
- [23] ORLET J L, MURDOCK G L. Synthetic instrument COSSI - an architectural approach to technology insertion in legacy systems [C] // IEL Citation, 2003: 551-554.
- [24] RYLAND J. Can LXI replace GPIB? [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2005: 739-743.
- [25] ORLET J L, YOST L J, GOODALL M L. LXI - an integrators view [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2007: 490-497.
- [26] GUTTERMAN L. PXI: the future of test [C] // IEL Citation, 2002: 205-214.
- [27] FRANKLIN P F. LXI clears the way to smarter instruments [C] // IEEE AUTOTESTCON, 2006: 136-140.
- [28] SEMANCIK J. LXI: a shift in the functional test paradigm [C] // Systems Readiness Technology Conference, 2006: 116-121.
- [29] 张列刚,吴 晖,张焕春. 通用 ATS 实现技术研究 [J]. 电讯技术, 2004 (2): 83-88.
- [30] 刘 畅,李显甫. 一种自动测试系统的开发平台—PAWS [J]. 测控技术, 2003, 22 (12): 16-18.
- [31] 王俭勤,李永明,杜延飞. 美国海军自动测试设备 RT-CASS 的软件平台—PAWS [J]. 测控技术, 2005, 24 (4): 46-48.
- [32] O' TOOLE K, SALOPEK P. Next generation graphical development environment for test [C] // IEL Citation, 1998: 145-148.

(下转第 46 页)