

总线类测试系统的技术现状及发展方向

张荣, 王珏, 周继昆, 张毅, 郑敏

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 归纳了当前测试系统的主流总线架构形式, 对当前各种总线架构的测试系统性能及应用进行了分析, 同时对当前测试系统的主要软件设计技术现状进行研究。在此基础上, 提出了未来复杂测试系统研制的主要方向, 要满足未来复杂测试任务需求, 应加大应用 LXI 总线构建大型高精度混合型分布式测试系统。硬件方面, 将 VXI/PXI/PXI-E/PCI-E/USB3.0 总线进行组网集成, 满足大型应用测试中低速、高速、高精度的数据采集与传输测试需求; 软件方面, 应按照行业标准需求, 研制功能完备、满足特定行业应用的软件系统。

关键词: 测试系统; 总线架构; 网络分布式系统; 软硬件设计技术; USB3.0 总线

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.025

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0151-09

Technique Status and Development Direction of Bus-type Test System

ZHANG Rong, WANG Jue, ZHOU Ji-kun, ZHANG Yi, ZHENG Min
(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The work generalizes the mainstream bus architecture form of current testing systems and analyzes their performances and applications. It researches the main software design techniques state for current test systems and then puts forward the main direction of future development of testing system. To satisfy future complex test requirements, the main design direction of test systems is to develop large-scale and high precision mixed test systems based on LXI bus. In the aspect of hardware design, VXI/PXI/PXI-Express/PCI-Express/USB3.0 bus will be integrated by local area network to satisfy low-speed, high-speed and high precision data acquisition and transmission requirements. In the aspect of software design, it is necessary to research and develop a software system that has completed functions and can meet the needs of special applications according to industrial standards and needs.

KEY WORDS: testing equipment; bus architecture; network distributed system; software and hardware design technique; USB3.0 bus

测试系统是武器装备环境试验的重要配套设备, 是环境试验与综合评价技术^[1]研究的重要内

容。测试系统性能的优劣关系到试验数据采集的精准度, 直接影响试验数据的分析和试验结果的

收稿日期: 2016-05-14; 修订日期: 2016-06-03

Received: 2016-05-14; Revised: 2016-06-03

基金项目: 中国工程物理研究院总体工程研究所基地建设基金 PXI-64

Fund: PXI-64, Base Construction Fund, Institute of Systems Engineering, CAEP

作者简介: 张荣(1979—), 男, 四川资阳人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测试系统软硬件设计技术以及测试技术研究。

Biography: ZHANG Rong(1979—), Male, from Ziyang, Sichuan, Master, Senior engineer, Research focus: hardware and software design of test and control system and test technique.

评价,研究当前测试系统的设计技术具有重要意义。目前,测试系统的研制主要集中在两个方面:一是总线类测试系统集成化研制;二是基于底层 FPGA, DSP 等硬件平台以及嵌入式操作系统软件平台的嵌入式测试系统的研发。前者广泛应用于大型地面环境试验测试中,后者主要应用于航空航天测控系统、弹载测控系统以及某些异常环境试验的测试。测试系统研制的关键技术主要集中在测试系统的总线架构设计、测试系统同步触发设计、测试系统精确度设计以及测试系统的软件设计方面。从测试系统的开放程度可将测试系统的研发方式归结为两类:软硬件集成类测试系统的研制;专用类测试系统的研制。所谓集成类测试系统,其硬件系统采用模块化仪器通过积木堆叠方式完成设计,建立在一定的测试总线架构基础上,总线架构的优劣决定了测试系统的性能,而软件系统可根据用户功能需求进行定制开发;对于专用测试系统,其软硬件系统必须完全匹配,用户无法根据自己应用需求进行二次扩展设计,这类测试系统通常由专用的测试系统生产厂商提

供。文中研究了现有测试系统总线的性能以及测试系统的软硬件设计技术,展望了未来复杂测试系统的软硬件设计技术发展方向。

1 总线类测试系统架构设计

1.1 当前主流的测试系统架构

当前主流的总线类测试系统架构主要有五种: GPIB 总线架构^[2-4]、VXI 总线架构^[5-8]、PXI 总线架构^[9-12]、PXI-Express 总线架构^[13-16]以及其他基于通用 PC 总线^[17-21]的架构。各架构针对不同的测试对象,具有不同的特点,主要表现在数据传输速率、同步触发方式、通道数扩展等方面。

GPIB 总线架构测试系统由 GPIB 主控系统和多套测试终端系统组成,主控系统作为“讲者”通过 GPIB 总线与作为“听者”的各 GPIB 终端系统发送程控指令,各 GPIB 测试系统具有唯一地址,“讲者”系统同时最多控制 14 台“听者”系统,总线上某时只能有一个“讲者”,其架构如图 1 所示。



图 1 GPIB 总线架构测试设备设计方案

Fig.1 The design scheme based on GPIB bus architecture

GPIB 总线架构的系统体积与质量较大^[22],数据传输率低($\leq 1 \text{ MB/s}$),且必须使用 GPIB 控制卡与特殊电缆完成系统控制,测试成本较高。目前这种架构主要应用于数字万用表、数字频率计、频谱分析仪等专用仪器组网测试,以及导弹地面与弹上通信测试等数据传输率要求不高的分布式测试系统研制中,各系统不具备同步触发机制。VXI 总线建立在 VME 总线基础上,总线带宽可达 40 MB/s ^[23],质量轻,可配置使用的测试通道数多,但系统必须由 VXI 机箱、VXI 零槽控制器以及 1394 火线接口卡实现各槽 VXI 总线测量模块的控制。受系统带宽限制,在采样率相对较低($\leq 1 \text{ MHz}$)的测试系统构建时可采用,典型的应用是构建多通道振动测试系统。在同步触发方面,VXI 零槽控制器通过 VXI 机箱背板总线实现各 VXI 总线模块的同步触发控制,可构建同步测试系统。PXI 总线架构^[24-25]测试系统基于 PCI 总线,在 PCI 总线上增

加星型触发总线、RTSI 实时触发总线构成同步测试系统总线,总线传输速率达到 133 (主频为 33 MHz) $\sim 528 \text{ MB/s}$ (主频为 66 MHz),由 PXI 机箱、PXI 零槽控制器、PXI 测量模块组成。各 PXI 测量模块共享 PXI 总线带宽,相对 VXI 总线,系统带宽显著提高,并通过编程实现时钟与触发线路的路由,不仅适合多通道振动测试系统构建,还适合高采样频率($\geq 1 \text{ MHz}$)多路瞬态同步测试系统的构建。高采样率下的测试除依赖于总线传输带宽外,还跟采样模式相关,如采用板载缓存模式,总线的传输带宽可适度降低,依赖于采集板卡上的大容量缓存降低数据传输速率。中国工程物理研究院总体工程研究所在 2013 年联合北京中科泛华恒兴科技有限公司,完成了一套采样频率为 10 MHz ,板载缓存为 1 GB 的 64 通道瞬态数据采集系统,系统从完成数据采集到下载至计算机内存的时间为 3 min 。目前,PXI 机箱的槽数最大为 18 槽,受限于

槽数, 单机箱 PXI 总线测试系统的通道数不大, 要实现测量通道数的扩展, 需采用专门的 PXI 机箱同

步模块互连多个 PXI 机箱完成。VXI/PXI 总线架构测试系统设计方案如图 2 所示。



图 2 VXI/PXI 总线架构测试设备设计方案

Fig.2 The design scheme based on VXI/PXI bus architecture

在某些应用如微波与电磁兼容等方面的测试, 不仅要求测试系统的采样频率高 (≥ 1 MHz), 而且还要求长时间连续采集和存储数据, 这要求测试系统具备更高的数据传输带宽, 采用 PXI 总线已不能很好地满足测试要求。近年发展了 PXI-Express 总线, 借鉴 PCI-Express 总线技术, 在 PCI-Express 总线上增加定时与同步触发线路构建测试仪用总线。PXI-Express 总线采用 LVDS 电气接口标准和串行点对点通信技术, 确保每个测试模块独立享用传输带宽, 使用独立传输链路, 含 $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$, ..., $\times 32$ 等多种速率的链路, $\times 1$ 链路单向传输率可达 250 MB/s, $\times 4$ 链路传输率为 1 GB/s, $\times 32$ 时传输带宽可达 8 GB/s, 可完全满足多通道高采样率连续测试的应用需求。PXI-E 总线架构测试系统是目前高速数据采集领域的主流研制发展方向。中国工程物理研究院总体工程研究所在 2012 年研制了一套基于 PXI-Express 总线的 64 通道瞬态数据采集系统, 系统采样频率最高达 4 MHz, 流盘速度高达 220 MB/s, 稳定可靠地完成了多次大型跌落环境试验测试。

上述 VXI/PXI/PXI-Express 总线架构测试系统主要用于构建大型的单机及其级联型模块化测试系统, 对于某些小规模测试任务, 采用 VXI/PXI/PXI-Express 总线架构组建测试系统性价比不高, 而采用通用 PC 机/工控机与基于 PC 总线的数采卡即可完成测试任务。目前主要包括基于 PCI-Express 总线、USB 总线以及以太网总线三类测试系统。当前, 基于 PC 总线的测试系统研制的发展趋势是小型化与高速化, 这得益于 USB 总线以及以太网总线的快速发展, USB 总线由 USB2.0 (传输速率达 480 Mb/s) 发展至 USB3.0 总线^[26-30] (传输速率达 5 Gb/s), 以太网传输速率已从 10, 100 Mb/s 发展到 10 Gb/s。这两类总线解决了高采样率下的大数据量实时传输问题, 是目前 PC 类专用测试系统研制的热点方向。

从上述总线的传输速率看, 当前 USB3.0 总线

的速率已接近 PXI-Express 总线速率, 但在构建测试系统方面, PXI-Express 总线型系统需特制机箱, 而 USB3.0 总线使用信号线少, 传输速率高, 不需设计特定的机箱, 构建的测试系统体积小, 增加少量同步触发线即可实现同步测试系统的设计, 满足的应用领域将更加广泛。笔者预测, USB3.0 总线在未来高速测试系统研制中将占重大份额, 近年来已逐渐掀起研发热潮。中国工程物理研究院总体工程研究所目前正在论证一种小性化嵌入式高速采集与实时传输系统, 拟建通道为 50 ~ 100 个, 采样频率为 1 Hz ~ 10 MHz, 前端采用光纤远程传输数据, 后端采用 USB3.0 总线传递数据到计算机。这种测试系统将前端采集、信号调理等模块集中在一块电路板上, 多路振动和冲击信号的采集结果通过光纤和 USB3.0 总线实时传输, 可很大程度上减少测试系统的布线工作, 显著提高测试效率。

1.2 总线测试系统发展趋势

当前, 采用 GPIB/VXI/PXI/PXI-E 总线架构设计的测试系统可完成相对独立的测试任务, 但存在不足, 主要表现在以下方面。

1) 对于测量对象位置比较分散, 如火箭系统测试^[31]、导弹综合参数测试^[32]以及惯导平台^[33]等测试任务, 其测量信号种类繁多, 采样频率多种多样, 若采用多套独立测试系统, 则每套测试系统均必须带控制计算机和 GPIB/VXI/PXI 总线模块, 每个控制计算机再与系统服务器相连, 组成分布式测试系统。这种测试方式的每个测试节点均由计算机控制, 即便某测试节点只有一个测点, 也需要一台控制计算机和一台总线测试系统, 这将造成测试资源的大量浪费。

2) 高端武器装备自动测试系统要求快速应对战区变化的计量保障需求, 比如对于导弹机动发射任务中的各大型装备的测试, 其复杂度高, 测试系统种类多, 快速适应战区变化的能力就会较弱。

3) GPIB/VXI/PXI 总线测试仪器的计量校准尚不规范^[34], 试验现场快速进行仪器的故障诊断与实时校准比较困难。为解决这些问题, 安捷伦公司和 VXI 科技公司联合提出 LXI (LAN-based Extensions for Instrumentation) 总线^[35], 其基于成熟工业以太网技术, 通过扩展仪器所需的语言、命令、协议内容, 将 GPIB 总线的高性能, VXI/PXI 总线仪器的小尺寸以及 LAN 总线的高吞吐率等优点相结合。与普通 PC 机构建的网络测试系统相比, 其增加仪器必须的定时同步触发、冷却和电磁兼容性功能, 构成一种适用于自动测试系统的新一代模块化仪器平台标准, 使测试系统由“虚拟仪器”时代过渡到“网络仪器”时代, 是未来国内外军用测试系统研制与应用发展的主流测试总线技术, 这种架构的测试系统目前已开始逐步面市。

LXI 总线架构的测试系统硬件由测控服务器、集线器、交换机以及 LXI 测量模块组成, 不同于 VXI/PXI 总线架构的测试系统, 它无零槽控制器, 无背板总线。VXI/PXI 总线采用背板总线的定时和

触发机制解决各测试模块的同步, 而 LXI 总线测试仪器则根据应用的不同场合, 采用三类同步触发机制控制各 LXI 模块仪器的同步: 基于网络 UDP 协议的消息触发机制, 同步精度在 50 ms 内; 基于 IEEE1588 精准时钟同步协议机制, 同步精度在 100 ns 内; 基于菊花链/星型配置方式 (与 PXI 总线雷同) 的 LVDS 硬线触发机制, 同步精度在 5 ns 内。测控服务器通过 B/S (浏览器/服务器) 和 C/S (客户/服务器) 两种方式集中控制网络上的各 LXI 总线测试模块。

基于 LXI 总线的上述特点, 笔者提出一种大型混合总线测试系统架构设计如图 3 所示。利用这种架构, 除直接将具有 LXI 总线接口的系统接入系统外, 还可将 GPIB/VXI/PXI 等现有测试系统通过 LAN 口接入系统, 实现现有总线类测试系统的改造升级, 节省测试成本。不仅如此, 通过 USB3.0 总线转 LAN 总线模式, 基于 USB3.0 总线的 PC 类仪器或嵌入式仪器均可集成在 LXI 总线上, 从而完成比较复杂的分布式高速采集与数据传输测试任务。

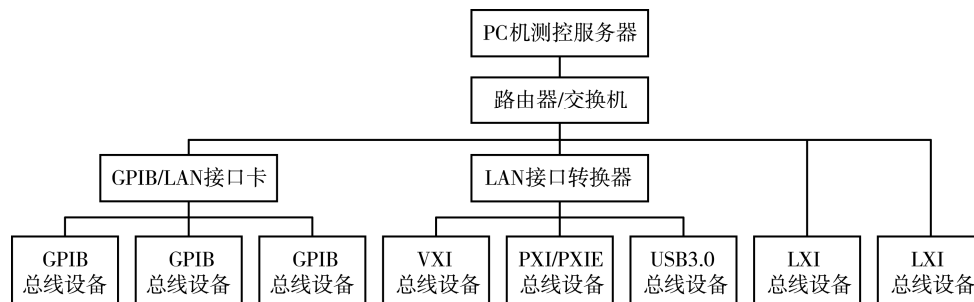


图 3 基于 LXI 总线构建大型混合分布式测试系统的方案

Fig.3 The large-scale distributed test system design scheme based on LXI bus architecture

军用测试系统采用 LXI 总线架构, 各类仪器系统在测试现场组网后即可快速组建测试系统, 断开网络即可实现快速机动, 并通过网络实现异地测试模块的故障诊断、远程控制、实时检测等。在武器试验、武器装备运行状态监测、数字化战场、核爆任务以及航天测试等方面^[35]具有应用前景。笔者认为, 在大型军用测试任务中, 采用如图 3 所示的总线架构组建大型混合总线的分步式测试系统, 可实现测试任务节点的集中调度, 测试数据流的集中汇集, 通过统一的 PC 机测控服务器平台, 实现大数据的融合分析, 从而为现场快速决策提供数据依据。这种大型混合总线测试系统在日益复杂的军用测试方面应用会更加广泛, 笔者认为, 这是未来测试系统发展的主流方向。因为在当前各种测试总线速率已定的情况下, 兼顾新旧测试系统功能应用,

覆盖全方位的测试能力, 上述架构无疑是最佳的。当然, 上述架构将演变出多种架构形式, 即凡是能将总线接口切换为 LAN 接口的测试系统, 均可接入 LXI 总线系统中, 比如 CAN 总线-LXI 总线系统、PCI-Express 转 LXI 总线系统等。需依据测试任务的规模和数据传输速率需求, 灵活构建基于 LXI 总线的混合型分步式测试系统, 从而满足特定场合的测试要求。

2 测试系统精度发展方向

测试系统的精度主要取决于数据采集卡的 A/D 转换精度, A/D 转换器的转换精度经历了 8 位/12 位/16 位的发展阶段。对于振动测试系统, 采集卡的精度在 12~16 位即可满足要求; 对于冲击测试

系统,采集卡的精度通常为 14~16 位。随着高保真音频、高精度称重、精密测距等精密测试应用需求,目前数据采集卡的 A/D 分辨率已向 18~24 位方向发展,并且涌现了大量产品,这类采集卡的 A/D 芯片采用“ $\Sigma-\Delta$ ”^[36—38]的过采样和噪声整形技术。与传统的 A/D 转换器相比,采集前端不需设计抗混叠低通滤波器,对前端的模拟信号调理电路要求不高,直接利用数倍于采样率的信号过采样输入信号,然后在其内部增加一个数字抽样滤波器对采集的信号滤波,滤波完成后进行信号降采样处理,得到满足采样率要求的高信噪比信号,实现宽频带弱信号的精确测试,主要应用在精密测量领域。从行业主流产品看,各大厂商都在开发 24 位的测试板卡,高分辨率的(≥ 24 bit)的测试系统将是未来测试系统的重要发展方向,其关键技术主要涉及数据采集板电路的精致布局布线设计技术、模拟信号精密调理电路设计等。中国工程物理研究院总体工程研究所在国家重大科学仪器专项——高精度惯性仪表校准检测项目中,设计了 24 位高精度数据采集卡,测试系统本底噪声为 400 μV ,有效实现了精密离心机动态半径测量不确定度为 0.21 μm 的高精度,这在 16 位分辨率的 A/D 中无法实现。同样,对于振动应变的测试,为提高测试精度,现在各厂家也广泛设计 24 位 A/D 采集卡完成。

3 软件设计技术研究

测试系统的软件在测试系统研制中扮演重要角色,其主要研究内容包括软件开发语言、软件功能模块的完备性设计两方面。

对于开发语言,主要集中在以 NI 公司的 LABVIEW 平台^[39]为主的仪器开发平台以及通用软件开发语言如 VC++, DELPHI, LabWindow/CVI 的开发平台。LABVIEW 作为仪器专用开发平台,提供了专业的测试程序设计架构、多线程自动协调调度与保护机制、网络接口控制、各类测试总线架构驱动等程序子集,更重要的是其集合了多类信号的时频分析、信号显示、存储与回调模块以及与第三方平台如 MATLAB 接口和基于 COM 组件的调用功能(如 DLL^[40—45]调用等)。可以说 LABVIEW 平台可完成任何其他编程语言可实现的程序设计,是目前最高效的测试系统软件开发语言。其他基于 VC++, DELPHI 等语言的软件开发平台,适合开

发一些小规模的测试软件,与 LABVIEW 相比,其缺点是明显的,对于多线程协调解决机制、网络编程以及信号处理等均较复杂。当前,对于 NI 硬件平台构建的测试系统,采用 LABVIEW 语言开发应用软件,而对于非 NI 硬件平台,采用的主要方式是将硬件的系统驱动程序、其他语言设计的算法等封装为 DLL 组件,由于 DLL 具有语言无关性特点,然后在 LABVIEW 下调用 DLL 即可实现硬件驱动、数据分析模块在 LABVIEW 环境下的集成处理等。目前,大部分测试系统生产厂商都采用这种基于 DLL 或 ActiveX^[46]接口规范实现软硬件集成开发或为用户提供部分功能模块的二次开发能力。

在软件功能的完备性方面,大部分国外厂商均提供行业功能完备的应用软件,如奥地利 Dewetron 公司、德国 m+p 数据采集系统公司在振动测试系统研制领域比较著名,这些厂商均提供完备的振动测试软件,其中包括了振动模态测试、各类振动信号处理与分析模块等,美国的 Nicolet 公司的冲击测试系统提供完整的冲击信号分析与处理软件。可以说,软件的功能模块是测试系统的重要卖点。而国内的测试系统生产商在软件设计方面存在差距,通常是针对具体的测试应用编制特定的软件,如国内的 TOPVIEW 公司、纵横测控有限公司、成都天奥测控技术有限公司的冲击测试软件产品都是这种情况。从调研资料看,在振动、冲击等行业测试领域内,各研发商都在主推功能完备的行业软件系统,考虑软件功能的覆盖性和不同行业应用的差异,各行业测试软件也留出二次开发接口,方便各式用户的特殊应用,但是行业软件的功能标准化设计是目前研发的重点和主要发展方向。

4 国内外总线类测试系统研制现状

在集成化总线测试系统开发方面,NI 公司作为 PXI 总线仪器硬件供应商,主要研制系列 PXI/PXI-E 总线测试产品,包括 PXI 机箱、PXI 数据采集卡,基本不提供用户完整的软硬件解决方案,测试软件大部分由用户自行开发,仅提供软硬件开发支持。国内,对于 PXI 总线测试系统的研发,在 PXI 硬件研发方面主要有北京中科泛华及其附属的泛华恒兴科技公司,NI 的大部分 PXI 总线数据采集卡硬件设计技术都已被其掌握并国产化,其采样分辨率从 12~24 位,包括同步与异步采集卡

等,采样频率覆盖了DC到数MHz。另外该公司推出一套完整的测试测量仪器系统通用平台开发软件XDesigner^[47],包括系统驱动管理、测试流程管理与数据采集等三个子模块,整合了各类模块化硬件和平台化软件处理,使用户能灵活配置测试系统,其缺点也明显,软件内部资源繁多,运行缓慢,也未完全包含行业标准相关完备的信号分析模块,该软件的具体应用官方报道较少。另外,凌华科技有限公司也是PXI/PXI-E总线测试系统硬件开发供应商,其PXI-E机箱的带宽已达8GB/s,适合构建超高速与超大容量的测试系统。该公司也未提供成套的测试系统软件,软件设计时,主要采用该公司的DAQMaster^[48]管理系统和接口,并通过DLL调用在LABVIEW中驱动板卡硬件,测试软件开发和调试的难度比NI硬件平台下更大。国内还有成都天奥测控技术有限公司、纵横测控技术有限公司开发的PXI总线类测试系统,其硬件开发能力尚可,但软件开发方面还大部分集中在应用VC++开发平台,除提供专用测试系统外,其提供板卡的DLL库供用户二次开发测试系统。在GPIB/VXI/LXI总线方面,国外Agilent公司和陕西海泰电子有限责任公司是主要产品提供商,在VXI总线方面主要是研制VXI总线同步数采卡、波形发生器等,在GPIB总线方面主要是PXI/USB-GPIB接口卡,对于LXI总线,主要是各类通用开关模块、任意波形发生器,这类总线也提供相关驱动程序供用户进行二次开发等。总而言之,基于总线式的测试系统构建,硬件平台主要依赖专业厂商的产品,测试软件则由用户根据自己的应用需求自行完成设计。

在专用测试系统研制方面,国外的著名厂商有奥地利的Dewetron公司以及美国Nicolet尼高力公司(现在由德国HBM公司接管)、德国的m+p公司。其中Dewetron公司是开发动态测试与瞬态测试系统的知名公司,其提供测试系统软硬件全套解决方案,其专用测试系统采用的总线主要是PCI/USB总线^[49],其数据采集分辨率为16~24位,同步采样,数据存储容量达1TB,通过级联,其测试系统的通道数可达1000通道以上。值得一提的是,该测试系统的应用软件功能齐全,除实时测试和分析电压、ICP、噪声等多种参数,完成实时试验数据采集和时频分析外,还具有专业的SIMO、SIMO和MIMO模态分析软件。美国的Nicolet公

司主要从事瞬态数据采集系统的研发,其硬件架构依然采用PCI总线背板结构,采用上下位机组网形式进行数据采集,上位机作为数据显示与存储器通过网络向下位机发送测试命令,下位机将测试结果实时返回上位机显示。单台测试系统的通道数达48个,同步采样频率为1MHz。其高速数据采集软件Perception^[50]包含了瞬态测试系统的时域、频域分析模块,与其他任何测试类应用软件相比,Perception软件采用专利技术StatStream技术。该技术采用数据的压缩编码技术,能在高速采集模式(1MHz)下连续显示测试的大量数据,10GB的数据可在10s内播放完成,并且该软件最大可支持1080个通道的信号分析。德国m+p公司是业界公认的优秀振动测试系统供应商,其振动测试硬件产品采用LXI总线架构设计,A/D采集精度达24位,软件功能完备,著名的VibRunner振动软件提供振动测试、模态分析、噪声测试分析功能,VibCon软件提供单轴、多轴振动控制等功能,广泛应用于我国航天测试、兵器测试以及诸多大学试验部中。国内著名的测试系统生产商是东方振动与噪声技术研究所,该所的测试系统主要以PCI总线和CPCI总线为主,数据采集分辨率为24位,采样频率为102.4kHz,动态范围为110dB,最为知名的是其应用软件DASP^[51],其包含完整的声学测试软件、模态分析和动力学分析软件、振动与冲击计量系统、旋转机械和故障诊断软件等模块,其硬件测试平台技术含量低,主要以测试软件研制为主。成都拓普测控技术有限公司采用PCI总线设计多通道的瞬态数据采集系统,其软件TopView2000^[52]功能相对简单,但包含通用的冲击测试信号分析模块,如GJB半正弦波套容差分析模块、冲击响应谱分析模块等,满足常用冲击测试的需要。纵横测控的Signal View通用信号处理软件在国内军用PXI/VXI总线专用测试系统中也具有一定的应用。另外,江苏东华测试技术研究所在国内振动应变测试系统研制方面能力较强,其应力应变测试系统主要基于USB与以太网模式传输数据,信号采集精度为24位,其测试软件采用VC++研制,功能相对简单。

综上所述,国内外专用测试系统的测试总线主要基于PCI/CPCI/USB/以太网组建,采样分辨率为16~24位,硬件研发不是重点,各公司的核心竞争力在其软件功能的设计上,软件设计体现在行业

应用标准化以及行业信号分析完备化两方面。

5 结语

从当前总线类测试系统的发展趋势看, 测试系统研制应向以下三方向发展。

1) 走行业标准化仪器设计道路。硬件上, 基于现有背板总线和数据采集卡构建通用测试硬件系统, 而对于异常复杂的综合测试系统, 主要应采用 LXI 总线对各类总线类系统进行集成, 采用分布式测试架构进行组网测试。软件上, 充分调研行业功能需求, 构建行业功能标准化的测试软件系统, 包括冲击测试软件与振动测试软件, 软硬件集成包装形成产品, 参与市场竞争。

2) 应用 USB3.0、光纤高速传输总线等目前先进的高速传输总线, 增加硬线触发信号, 研制基于 USB3.0 总线以及光纤高速传输总线的 PC 类仪器或便携式仪器, 并在采集模块中增加 LAN 收发器, 将 USB3.0、光纤高速总线测试仪器与 LXI 总线进行组网, 设计硬线触发与软件触发相结合的专用同步触发模块实现混合总线测试系统的同步, 满足相当复杂的高速分布式测试应用需求。

3) 研发分辨率 ≥ 24 bit 的高精度数据采集器是主流发展趋势。

总之, 必须加快先进高精度混合总线测试系统的研制, 为武器装备环境试验测试能力提升奠定技术基础。

参考文献:

- [1] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 武器装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 14—19.
ZHU Yao-chang, CHANG Wen-jun, FU Yun. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering, 2005, 2(1): 14—19.
- [2] 雷雨. 基于 GPIB 总线的接口模块的研究[J]. 西华大学自然科学版, 2006, 25(4): 95—97.
LEI Yu. Research of Interface Module Based on GPIB Bus[J]. Journal of Xihua University Natural Science, 2006, 25(4): 95—97.
- [3] 张金, 王伯雄, 张力新. 基于 LABVIEW 的 GPIB 总线独立仪器集成测试平台[J]. 仪表技术与传感器, 2010(9): 13—15.
ZHANG Jin, WANG Bo-xiong, ZHANG Li-xin. Independent Instrument Integrated Measurement Platform Based on LabVIEW Station and GPIB Bus[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(9): 13—15.
- [4] 张小琴, 林建辉. LabVIEW 环境下的 GPIB 总线虚拟仪器开发[J]. 中国测试技术, 2004(1): 53—55.
ZHANG Xiao-qin, LIN Jian-hui. Development of Virtual Instrument Based on GPIB Bus on LabVIEW Flat[J]. China Measurement Technology, 2004(1): 53—55.
- [5] 张勇, 毛凯, 杨光, 等. VXI 总线及其接口技术[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(8): 1072—1074.
ZHANG Yong, MAO Kai, YANG Guang, et al. VXI-Bus and Interface Technology[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(8): 1072—1074.
- [6] 陈卫兵, 任献彬, 李相平. VXI 总线测试系统及其总线控制方法[J]. 宇航计测技术, 2003, 23(5): 46—49.
CHEN Wei-bing, REN Xian-bin, LI Xiang-ping. VXI Bus Test System and Its Bus Controlling Method[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2003, 23(5): 46—49.
- [7] 喻剑锋, 宋忠平, 王仕成, 等. VXI 总线控制方式及其性能分析[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(2): 114—117.
YU Jian-feng, SONG Zhong-ping, WANG Shi-cheng, et al. VXI Controller's Configuration and Performance Analysis[J]. Computer Measurement & Control, 2003, 11(2): 114—117.
- [8] 高燕, 林建辉. 基于 VXI 总线仪器协议的测试系统硬件构成与数据处理方法[J]. 中国测试技术, 2004(2): 10—11.
GAO Yan, LIN Jian-hui. Hardware Composing and Data Collection Method of Testing System Based on VXI Bus Instrument Agreement[J]. China Measurement Technology, 2004(2): 10—11.
- [9] 邹永显, 闫存金. 基于 PXI 总线的自动测试方法研究[J]. 装甲兵装备技术研究, 2006, 2(1): 15—19.
ZOU Yong-xian, YAN Cun-jin. Study on Auto Test Method based on PXI Bus[J]. Research in Equipment and Technology for Armoured Force, 2006, 2(1): 15—19.
- [10] 汤秀芬, 魏凤兰. 基于 PXI 总线的虚拟仪器系统的探析[J]. 宁夏工程技术, 2003, 2(1): 73—74.
TANG Xiu-fen, WEI Feng-lan. Research and Analysis of Virtual Instruments on the Base of PXI Bus[J]. Ningxia Engineering Technology, 2003, 2(1): 73—74.
- [11] 王培元, 吴国庆. 基于 PXI 总线的海防雷达检测平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 18(11): 2582—2584.
WANG Pei-yuan, WU Guo-qing. Design of Testing System Based on PXI Bus for Coast Defence Radar[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 18(11): 2582—2584.
- [12] 张伏龙, 王涛. PXI 总线测试体系与应用[J]. 装甲兵装备技术研究, 2003(5): 39—43.
ZHANG Fu-long, WANG Tao. Test System and Application of PXI Bus[J]. Research in Equipment and Technology for Armoured Force, 2003(5): 39—43.
- [13] 孔凡全, 高晶晶, 姜开宇. 基于 PXI Express 总线的雷达综合测试系统[J]. 信息技术, 2014(1): 5—6.
KONG Fan-quan, GAO Jing-jing, LOU Kai-yu. Radar Synthetic Test System Based on PXI Express Bus[J].

- Science & Technology Information, 2014(1): 5—6.
- [14] 李红杰, 孟升卫, 徐聪. 基于FPGA的PXI Express接口设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(1): 152—154.
LI Hong-jie, MENG Wei-sheng, XU Cong. Design of PXI Express Interfacing Based on FPGA[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(1): 152—154.
- [15] 刘玄烨, 杨生胜, 秦晓刚, 等. 基于PXIe总线的高速数据采集程控系统[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 60—63.
LIU Xuan-ye, YANG Sheng-sheng, QIN Xiao-gang, et al. High-speed Data Acquisition System Based on PXIe Bus[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(1): 60—63.
- [16] 王志广, 崔佩佩. 基于PXIe-5641R板卡中频地物杂波信号源设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1621—1624.
WANG Zhi-guang, CUI Pei-pei. Design of IF Ground Clutter Resource Based on PXIe-5641R[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(6): 1621—1624.
- [17] 柴克廷, 朴成日, 崔汉国. 基于PC总线虚拟仪器的设计与实现[J]. 计算机工程, 2002, 28(2): 227—228.
CHAI Ke-ting, PIAO Cheng-ri, CUI Han-guo. Design and Realization of Virtual Instrument Based on PC Bus[J]. Computer Engineering, 2002, 28(2): 227—228.
- [18] 李国厚, 冯启高. 基于PC的测量和仪器总线技术及其发展[J]. 电子测量与仪器学报, 2000(z): 338—341.
LI Guo-hou, FENG Qi-gao. Technology and Its Development of Measurement and Instrument Based on PC[J]. Journal of Electronics Measurement and Instrument, 2000(z): 338—341.
- [19] 赵冬艳. PCIe高速串行总线技术应用研究[J]. 战术导弹控制技术, 2011, 28(1): 5—8.
ZHAO Dong-yan. Application Technique Research of PCI Express[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2011, 28(1): 5—8.
- [20] 马萍, 唐卫华, 李旭志. 基于PCI Express总线高速数采卡的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2008, 24(25): 116—118.
MA Ping, TANG Wei-hua, LI Xu-zhi. Design and Implementation of High-speed Data Acquisition Card Based PCI Express Bus[J]. Micro Computer Information, 2008, 24(25): 116—118.
- [21] 曹欣廷, 刘亚斌. 基于PCIe总线的红外探测器图像采集系统设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(22): 188—190.
CAO Xin-ting, LIU Ya-bin. Design of Infrared Detector Image Acquisition System Based on PCI Express[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(22): 188—190.
- [22] 黄韬, 彭刚锋, 樊江锋. LXI——新一代测试总线技术[J]. 航空计算技术, 2007, 37(1): 106—110.
HUANG Tao, PENG Gang-feng, FAN Jiang-feng. LXI—A Next-generation Bus Technology[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(1): 106—110.
- [23] 刘龙, 王伟平, 刘远飞. 自动测试系统的发展现状及前景[J]. 飞机设计, 2007, 27(4): 71—74.
LIU Long, WANG Wei-ping, LIU Yuan-fei. Advances in and Future Tendency of Automatic Test System[J]. Aircraft Design, 2007, 27(4): 71—74.
- [24] 罗秋风, 肖前贵. 飞控PXI型自动测试系统的实现[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(4): 768—771.
LUO Qiu-feng, XIAO Qian-gui. Implementation of Automatic Test System on PXI for Flight Control System[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(4): 768—771.
- [25] 徐欣, 周舟, 李楠, 等. 基于FPGA的PXIe总线DMA设计与实现[J]. 微处理器, 2010, 10(4): 10—13.
XU Xin, ZHOU Zhou, LI Nan, et al. The Design and Realization of PXIe Bus DMA Based on FPGA[J]. Microprocessor, 2010, 10(4): 10—13.
- [26] 兀颖. 基于USB3.0的数据采集系统设计[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
TU Ying. Design of High Speed Data Acquisition System Based on USB3.0[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Cas, 2013.
- [27] 谢秀峰. 基于USB3.0的数据采集系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2015.
XIE Xiu-feng. The Design of Data Acquisition System Based on USB3.0[D]. Taiyuan: North University Of China, 2015.
- [28] 岳孝忠, 裴东兴, 王健. 基于USB3.0接口高速数据采集系统的设计[J]. 电子器件, 2015, 38(1): 140—143.
YUE Xiao-zhong, PEI Dong-xing, WANG Jian. The Design of High-speed Data Acquisition System Based on the USB3.0 Interface[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 38(1): 140—143.
- [29] 储俊, 甄国勇. 基于USB3.0的高速读数盒设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(9): 2912—2914.
CHU Jun, ZHEN Guo-yong. Design of High-Speed Reading Box Based on USB3.0[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(9): 2912—2914.
- [30] 肖瞬金. 基于USB3.0超声射频信号的采集与传输系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
XIAO Shun-jin. Data Acquisition and Transmission of Ultrasonic RF Signal Based on USB3.0[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [31] 黄峰, 郭伟, 张雷, 等. 基于虚拟仪器的LXI总线导弹综合参数测试平台设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(7): 1579—1581.
HUANG Feng, GUO Wei, ZHANG Lei, et al. Design and Realization of LXI-based Missile Test System Based on LABVIEW[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(7): 1579—1581.
- [32] 宋文颖, 刘勇志, 冯林平. 基于LXI总线技术的惯导平台网络化测试系统设计[J]. 中国科技信息, 2010(16): 139—140.
SONG Wen-ying, LIU Yong-zhi, FENG Lin-ping. Design for Networked Testing System of Inertial Navigation Platform Based on LXI[J]. China Science and Technology Information, 2010(16): 139—140.
- [33] 朱宏声. LXI总线及其在军用测试系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2008(z): 356—359.

- ZHU Hong-sheng. The Applications of LXI Technology for Military Test System[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008(z): 356—359.
- [34] 蔡远文, 梁晓朋, 同江. 基于 LXI 总线技术的虚拟仪器测试系统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(5): 40—43.
- CAI Yuan-wen, LIANG Xiao-peng, TONG Jiang. Virtual Instrument Testing System Based on LXI Bus Technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(5): 40—43.
- [35] 同江, 蔡远文. LXI 总线在运载火箭测试中的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2): 45—47.
- TONG Jiang, CAI Yuan-wen. Application of LXI Bus in Test System for Launch Vehicles[J]. Missile and Space Vehicle, 2009(2): 45—47.
- [36] 易峰, 吴晓波. Σ - Δ A/D 转换器中抽样滤波器的设计与优化[J]. 微电子学, 2009, 39(3): 297—301.
- YI Feng, WU Xiao-bo. Design and Opt Imization of Decimation Filter in A/D Converter[J]. Microelectronics, 2009, 39(3): 297—301.
- [37] 韩毅. 24 位 A/D 以太网接口双路加速度采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008 (7): 39—42.
- HAN Yi. Ethernet Interface Dual Acceleration Acquisition System With 24 bit A/D Converter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(7): 39—42.
- [38] 李威. 宽频地震仪数据采集系统的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- LI Wei. The Data Acquisition System of Broad Band Seismic Recorder[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [39] 谢大刚, 侯冬云, 喻菁, 等. 基于虚拟仪器技术的电网监控系统的设计[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 68—70.
- XIE Da-gang, HOU Dong-yun, YU Jing, et al. Design of Power Grids Monitoring System Based on Virtual Instrument Technique[J]. Equipment Enviromental Engineering, 2008, 5(5): 68—70.
- [40] 陈秀芳. VC++中 DLL 的实现及其在数据采集控制中的应用[J]. 信息技术, 2004, 28(7): 92—94.
- CHENG Xiu-fang. Realization of DLL Driver in VC++ and Its Applications in Data Collection[J]. Information Technology, 2004, 28(7): 92—94.
- [41] 许剑, 邹小芳, 王建华. 在 LabVIEW 中利用 DLL 实现数据采集[J]. 微计算机信息, 2008, 24(13): 95—96.
- XU Jian, ZOU Xiao-fang, WANG Jian-hua. Realization of Data Acquisition with DLL in LabVIEW[J]. Micro Computer Information, 2008, 24(13): 95—96.
- [42] 铁勇, 罗忠, 白凤山. 用动态链接库(DLL)实现并口高速数据采集[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2001, 32(6): 679—681.
- TIE Yong, LUO Zhong, BAI Feng-shan. Implementation of High Speed Data Acquisition through LPT by DLL[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol, 2001, 32(6): 679—681.
- [43] 王少红, 徐小力. LabVIEW 下国产数据采集卡 DLL 的设计[J]. 北京机械工业学院学报, 2003, 18(3): 9—13.
- WANG Shao-hong, XU Xiao-li. The Design of DLL for the Domestic DAQ Card in LabVIEW[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2003, 18(3): 9—13.
- [44] 袁永, 段奇智, 张毅, 等. 油井数据采集及高效 DLL 函数数据传输性能实现[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(10): 1628—1631.
- YUAN Yong, DUAN Qi-zhi, ZHANG Yi, et al. Realization of Data Collection and Efficient Transmission for Oil Well Based on DLL Function[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 41(10): 1628—1631.
- [45] 侯志武, 褚金奎, 张段芹. 基于 ActiveX 控件的图象采集系统[J]. 微计算机信息, 2008, 24(30): 306—308.
- HOU Zhi-wu, CHU Jin-kui, ZHANG Duan-qin. An Image Acquisition System Based on ActiveX[J]. Micro Computer Information, 2008, 24(30): 306—308.
- [46] 金华强. 基于 ActiveX 技术的压缩机性能测试数据采集模块的封装[J]. 仪表技术与传感器, 2009(8): 108—110.
- JIN Hua-qiang. Encapsulation of Refrigeration Compressor Performance Test Data Acquisition Module Base on ActiveX Technique[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(8): 108—110.
- [47] PANSINO. XDesigner[EB/OL]. 2014. <http://xdesigner.pansion-solutions.com>.
- [48] ADLINK Technology inc. DAQ Master[EB/OL]. Oct 07, 2014.http://www.adlinktech.com/PD/web/PD_Search.php?keyword=DAQMASTER&cx=016815640841774267018%3A0ztywcaljra&cof=FORID%3A9&ie=UTF-8&oe=utf-8&adv_category=All.
- [49] 奥地利德维创有限公司. 德维创数据采集系统产品列表[EB/OL]. 2016. <http://www.dewetron.com.cn>.
- DEWETRON GmbH, AUSTRIA. DAQ Equipments list of dewetron[EB/OL]. 2016. <http://www.dewetron.com.cn>.
- [50] HBM Test and Measurement. Perception 高速数据采集软件介绍[EB/OL]. 2016. <http://www.hbm.com/cn/menu/support/softwart-firmware-download/data-acquisiton-systems/genesis-highspeed>.
- HBM Test and Measurement. Software Introduce of High-speed DAQ of Perception[EB/OL]. 2016. <http://www.hbm.com/cn/menu/support/softwart-firmware-download/data-acquisiton-systems/genesis-highspeed>.
- [51] 东方振动和噪声技术研究所. DASP 软件[EB/OL]. 2015. http://www.coinv.com/product_9.html.
- China Oriendt Institute of Noise&Vibration. DASP Software[EB/OL].2015.http://www.coinv.com/product_9.html.
- [52] 常安, 张亚迪, 田翠华, 等. PCI-20612 并行数据采集卡在过电压在线监测装置中的应用[J]. 电子元器件应用, 2008, 10(10): 18—21.
- CHANG An, ZHANG Ya-di, TIAN Cui-hua, et al. Application of PCI-20612 Parallel DAQ Card in Over-Voltage Watching on line Equipment[J]. Electronic Component & Device Applications, 2008, 10(10): 18—21.