

分布式测量和云智慧测量技术

沈松

北京东方振动和噪声技术研究所

摘要: 在工程现场测量中,随着测试对象分布范围和测试通道数目的急剧增长,分布式测量技术以其智能性、分布性、灵活性、轻便性等特点,正逐渐替代传统的集中式测量。分布式测量需要解决分布和同步等众多技术难题,因此需要采用诸如智能硬件技术和云计算软件技术等不同于传统的全新设计思想和架构形式。随着分布范围从局域网扩展到全球互联网,分布式测量技术将最终发展为云智慧测量技术。

关键词: 分布式测量;云智慧测量;智能硬件;云计算

1 从集中到分布

伴随着国防工业、民用工业等各项技术的发展,测试系统通道数急剧增长。静态/准动态测试仪器上升至几千甚至几万通道;动态测试仪器也上升至几百甚至几千通道。早期的集中式解决方案多基于VXI、PXI、CPCI等总线技术的机箱板卡式采集设备。

当测量仪器从实验室走到工程现场时,这种集中式测试系统由于设备和通道的集中性,已经越来越难以应对新的挑战:测量对象的地域分散化、数据海量性、采集环境复杂化等等,也出现了诸多问题,如布线问题、可靠性问题、行驶或飞行设备测试中的仪器体积、供电、时钟同步等问题。

北京东方振动和噪声技术研究所(以下简称COINV)从2007年开始,以高铁线路测试为背景,开始研究可在几十公里范围内进行同步测量的分布式测量技术,解决了分布和同步的

各种难题,走出了分布式测量的道路,为大型工程的复杂测量问题开辟出全新的方向。

分布式测量技术的仪器具有小型化、低功耗、智能化、自动工作等特点,采用传输距离远且稳定的以太

网接口,且将测试仪器分布到测点附近,通过以太网数据级联、CXI时钟同步的形式进行动静态信号的分布式同步测量。图1以测点繁多的飞机动态试验为例,显示了分布式测量相对于集中式测量的优势。

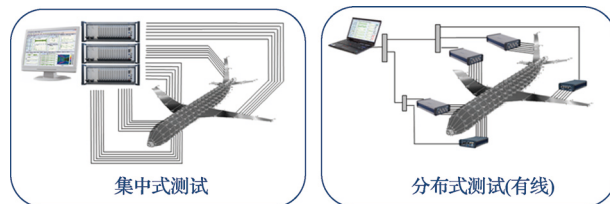


图1 集中式和分布式测量的比较

随着我国高铁的迅速发展,高铁线路已经分布于大江南北,分布式测量的地理范围也扩展至几千公里,未来还将扩展至全球范围。2009年11月,COINV名誉所长应怀樵教授,在桂林召开的全国第三届虚拟仪器大会上,结合智能测量的核心算法、智能硬件和云计算软件等技术,首次提出了云智慧测量的

思想,成为了分布式测量的未来发展方向。

2 分布式架构的分布与同步

分布式测量从物理上需要将仪器分布到前端测点附近,因此单个前端仪器通道数变少、功耗降低、体积减小,但是却需要更加智能化和自动化,每台前端仪器不仅可以独立工作,而且需要具有与其他仪器协同工

作的能Ⓕ力，更需要具备操作人员远程非现场操作的能力。

分布后的仪器，将面临一个新的挑战，即时钟同步问题，尤其对于动态信号和高精测量，仪器间的时钟同步是必不可少的。如何让分布各地的仪器在同一时钟步调下进行测量工作，是真正实现分布式测量的关键。

2.1 基于以太网的分布式架构

目前实现仪器分布的最好办法是通过网络技术进行仪器的级联和通

信。前端仪器通过以太网接口进行联网，对于简单的系统可在局域网中连入计算机进行所有仪器的控制 and 数据传输，更先进的系统则需要在网络中建立服务中心，实现对仪器和操作人员的控制指令发送和数据传输等高级管理功能。

若基于互联网建立的测量仪器网络系统，即云智慧测量系统，则需要建立云中心，将分布于全球的前端仪器和操作人员联系起来。

在该架构形式下，前端仪器必须是按智能硬件的思想进行设计，具有自主的测量和通信能力，而云智慧服务软件系统，更是有别于传统仪器的重要一环。

2.2 3种典型的分布式测量模式

通过网络进行数据传输，存在安全与便捷的矛盾，COINV根据应用需求不同，逐步发展了3种分布式测量模式：有线测量、无线测量和离线测量，如图2所示。



图2 3种分布式测量模式

有线方式下通过网线进行连接，数据传输实时并可靠，相比集中式测量布线大大减少，但仍然是需要进行分布范围内的布线。

无线方式下则通过WIFI进行连接，完全省去了布线问题，操作起来更加便捷，但是却不可避免存在数据安全问题。

离线方式下实际不进行数据的连接和传输，而是实时将测量数据保存在各台仪器内部，待测量结束后，再从仪器下载数据进行处理。该方式下，虽然需要事后的数据下载操作，但在测量过程中，不仅操作方便，而且数据安全。

2.3 基于CXI的综合时钟同步架构

将仪器分布级联是较为容易实现的，但前端仪器可能分布于世界各地，此时仪器间的时钟同步问题就变的非常

困难。COINV发展的CXI综合同步技术，集成了多种本地设备的有线同步技术和异地设备的无线同步技术。图3表示了CXI综合时钟同步的应用方式。

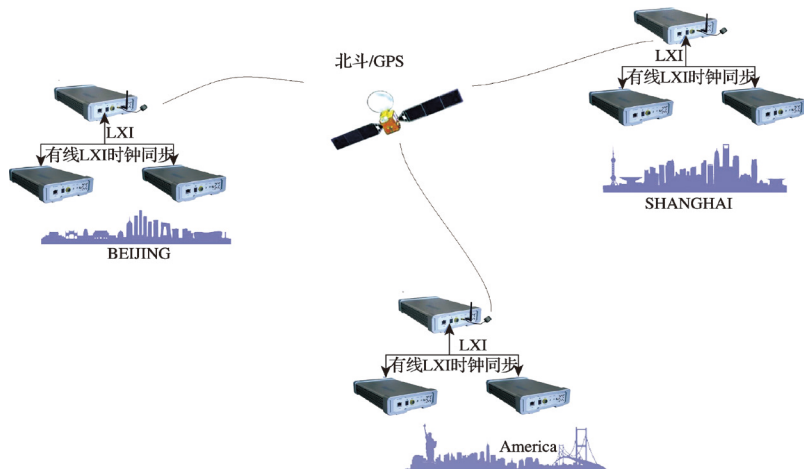


图3 北斗/GPS无线同步与LXI (IEEE1588) 有线同步的CXI集成应用

1) 本地设备的有线时钟同步

对于在几百米范围内的连接在子局域网内的多前端测量设备,可利用LXI标准的时钟同步技术。LXI是基于IEEE1588协议实现的国际上最新的专门针对测试仪器而发展的同步技术,同时前端检测设备还将设计符合IEEE802.3af标准的以太网供电PoE技术。按此设计的前端智慧采集检测设备只需连接一条网线即可完成信息传递、供电和时钟同步功能,而无需额外的时钟同步线和电源线。

2) 异地设备的无线时钟同步

对于相距较远甚至在不同城市之间的前端测量设备,只能通过无线方式进行时钟同步。早在2008年COINV开发的仪器中已经具备了通过接收GPS卫星信号实现位于不同地点仪器的时钟同步,在2013年COINV又实现了基于我国北斗系统的时钟同步技术。

3) CXI综合时钟同步

所谓CXI是进行集成的时钟同步,在智慧型测试仪器中需要将基于以太网的有线同步技术和基于GPS、北斗的无线同步技术进行集成使用,通过FPGA系统使3种同步方式有机结合,最终实现分布于不同区域乃至世界各地的所有智慧型测试仪器均可进行时钟同步。

图3为CXI同步的示意图。在分布于各地的若干台仪器通过以太网连接进行LXI/IEEE1588同步,每个LXI的子网内至少需要一台仪器具有北斗/GPS同步能力。作为最佳主时钟源,同其他子网的最佳主时钟源进行无线

同步,最终连入该系统的所有前端仪器都实现时钟同步功能,并且同时进行同步的仪器数量几乎不受限制。

2.4 全球分布的云智慧测量

当分布式测量的地域范围扩展至全球,仪器网络从局域网扩展至互联网,数据服务中心扩展至云计算服务中心时,分布式测量将发展至下一个阶段——云智慧测量。

云智慧测量系统的结构如图4所示。其各部分(包括前端硬件、操作人员、云中心、显示终端等)分布在全球各地,全部通过互联网进行连接。用户使用可接入互联网的终端设备(如笔记本电脑、平板电脑、智能手机等),无需安装软件,通过浏览器直接访问云计算中心,发出各种测试参数的设置和启停指令。

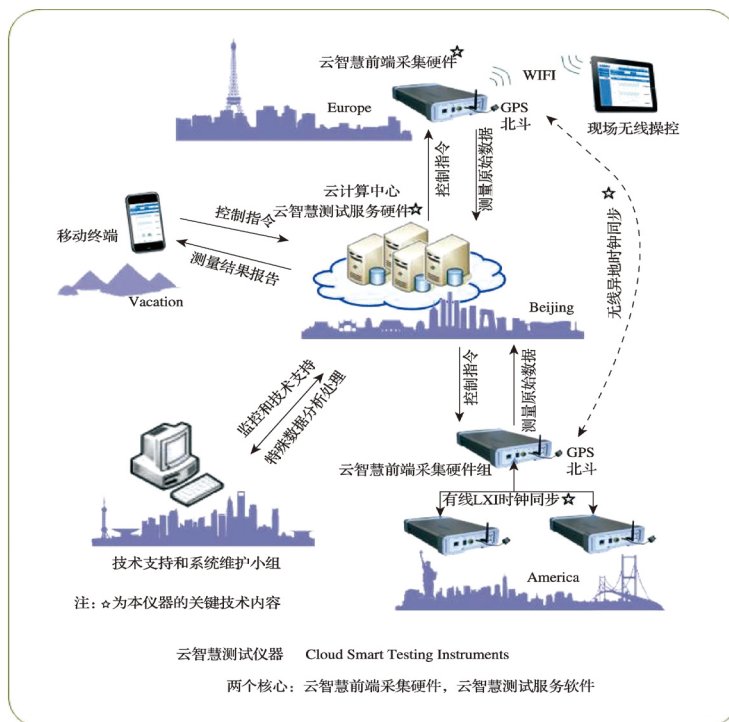


图4 云智慧测试的基本结构

云计算中心将这些指令发送到分布于多个现场地点的前端检测硬件。前端检测硬件接收到指令后,通过嵌入式系统控制AD硬件自动完成信号采集,接着进入DSP完成实时处理,最后将测量信息自动发送到云计算中心。

云智慧测试服务软件系统在云计

算中心收集管理和存储来自前端硬件的所有信息,自动完成大批量数据的计算和融合,生成最终试验报告,传回到用户手中。

3 分布式/云智慧测量的仪器设计

3.1 智慧型测量的核心算法

智慧型测量仪器有别于一般的云

计算系统,分布式前端硬件要能在真正意义上与云计算技术结合,其中一个关键点在于仪器的智慧工作能力,保证其高精度、高智能和自动化。因此除了采用的多嵌入式硬件设计、云计算测试服务软件等技术外,更需要大量的核心算法,解决将云计算应用到工程中的实际难题,这些算法通过在前端硬件中的DSP、FPGA和ARM以及后端数据融合中心的各级别的软件系统来实现。

对于分布式云智慧测试仪器,尤其是针对动态信号的测试,一般需要解决仪器的自动量程设置、自动测试参数设置、传感器的自动识别、信号特性自动分析和辨识、自动数据微积分处理、异常信号的自动判别等问题,以适应智慧型测试系统中由于操作人员远离硬件仪器而无法进行人工操作的情况。目前COINV在此方面已经取得以下成果:

①采用多核采集思路的超量程技术,解决测量仪器中量程的自动设置问题;

②高精度频率、幅值和相位计算算法,解决动态信号的测量参数的自动设置问题;

③动态信号的全程微积分算法,解决动态信号的特性自动转换和异常判别;

④集成时钟同步(CXI)算法,解决分布式仪器间的精确时钟同步问题;

⑤系统传递特性反演算法,解决动态信号特有的频响特性的自动扩展

问题;

⑥传感器和采集仪的异常检测和在线校准算法,解决硬件系统自检和自校准问题。

3.2 前端智能硬件

位于测试现场的“分布式前端测量硬件”直接连接各种智能传感器,利用嵌入式系统的能力和内嵌数据层融合的智慧算法,无需连接计算机,可独立完成对各种动、静态信号的自动化信息采集和预处理,并直接连接互联网进行远程控制和信息传输。而可以分布全球的各台采集硬件之间还应具备同步采集功能。

可见,前端硬件是基于嵌入式系统进行设计的智能硬件。COINV更是采用多嵌入式系统设计了动态信号测量硬件,在此系统中同时使用了FPGA、DSP和ARM三个CPU系统,三者协同工作,各自发挥最高效率。

其中FPGA主要用于实现仪器内部的逻辑控制、全程控调理、双核采集、时钟同步等逻辑功能,DSP主要进行实时信号处理,包含滤波、频谱、互谱、FRF、指标统计等计算功能,而ARM中运行了Linux系统,实现存储、LAN、WIFI、远程升级等各种I/O操作。

前端测量硬件,需要在精密性、智慧性和可靠性3个方面具有突出的表现。

在精密性方面,包含了多种信号接入并实现高精度信号调理和数据采

集、基于CXI的精密时钟同步等内容。

在智慧性方面,包含了自动化测量、离线工作、自动量程、自动识别传感器、自动扩展系统频响、自动微积分计算、自动适应多种通信方式、自动上网、远程升级、远程监控等能力。

在可靠性方面,包含可测量信号的抗电磁干扰能力,以及数据传输的安全性。对于关键性的应用,例如国防军工、公共设施、医疗器械等方面,除必须通过政府相关法律法规的许可认证外,可以使用私有网络搭建云子中心形式。

3.3 云计算数据服务软件

1) 基于云计算和并行处理技术的服务软件设计

使用软件算法实现仪器功能是现代仪器的重要特征之一,云智慧测试技术的一个关键问题就是如何设计出既符合云计算技术,又适合工程应用,并以提供服务为主要形式的测试服务软件系统。当前虚拟仪器的单机版软件模式将转变为支持并行计算、网格计算等方法的云计算模式,人机交互模式则使用服务器/浏览器的架构方式,在对数据处理的方式上还需要满足多用户的协同处理,在软件的商业模式上则需要设计成服务模式,云端软件基于云计算技术完成大量信息的并行存储和复杂分析,而分析结果和报告通过浏览器方式输出到各种终端设备上。

2) 数据融合和流程自动化的设计
不同传感器拾取的不同类型的

信号数据都汇入数据融合中心，加上具有时钟同步或时间对齐的特征，就可进一步进行数据融合以分析和展现各类信号之间的相互内在关系。利用数据融合的结果，可为桥梁等结构的健康状态判定提供更全面的依据，也可提高机械设备故障定位的准确性和可靠性。用户根据实际情况可自由选择数据的分析方法、处理流程和结果形式。对于极大量的信号数据，还需要在数据融合中心自动完成从存储、预处理、分析到后处理报告的全部流程。图5为COINV使用的数据流程自动化的处理方式。

3) 多用户系统、定制服务接口及行业专家联合诊断

所有测试数据都已经在数据融合中心进行集中存储和处理，因此测试分析软件系统需要设计为多用户系统，使多名用户和行业专家同时登录系统，对数据计算结果进行远程联合分析，给出进一步的诊断结论。

对于各用户而言，具有统一的操作界面显示，与操作系统平台无关；操作人员不需要接受过多的复杂的培训，也不需要经历烦琐复杂的软件安装、配置和信息存储空间的分配；监测连入网络中的各种测量设备可以被划分到不同的项目中分别进行管理，而操作人员也可以按组进行管理，并设有不同的权限，处理相应的业务；而对开发者来说，无需开发专用的客户端软件，客户端功能模块经过Web服务器就可以发布系统的升级和维

护。

3.4 未来的测量服务模式

按照云智慧测量系统的描述，系统中的前端智能硬件、云中心服务软件和用户都是分布在互（物）联网的不同节点上。在整个测试过程中，用户使用终端设备只进行测试分析指令的发出和结果报告的接收，其中的信号测量和数据分析过程由智慧型测试系统自动完成，或者由专业人员为用户提供定制的测试分析服务。用户无需深入了解仪器的操作方式和数据分析的原理知识。

此时，用户得到的并不是仪器产品，而是测试分析服务，这就形成了智慧型测试仪器的服务型特点，使得云智慧测试仪器从传统的产品形式转为现代的服务形式。

4 测量和监测应用

4.1 现场测量

分布式和云智慧测量技术在大部分的现场测量任务中具有传统方法难以比拟的优势，尤其在恶劣危险环境下的远程实时测量、大型试验中多人交叉操作多台仪器、现场测量的远程指导等方面。

以高速铁路轨测试任务为例，测试过程中人员不可靠近测试设备所在现场。每次在短暂停运间隙中安装完仪器设备后，人员必须离开。此类大型试验常常同时布置几十甚至几百台采集仪器，并同时有几十人参与，需要实现多人需要交叉操作各台仪器和大量的数据。而列车一旦开始运行，

则需要连续测量几十天，虽然期间任何人员不得进入测试区域，却要求及时获取最新的测量数据，并进行处理后形成每日测试报告。

传统测量模式几乎无法胜任此项工作，COINV也正是以此为契机，逐步发展了分布式测量技术。现在，测试人员只需在现场布置好传感器和前端采集硬件，然后就可以回到城市办公室中完成剩下的各项工作。

4.2 大型监测

分布式和云智慧测量技术目前已经应用于风电等机械设备故障监测以及桥梁等大型结构的健康监测。在减少现场布线、仪器间远距离无线同步等方面表现了优异的性能，而云计算中心的数据融合技术，可以汇集各类不同的动态、静态信号，提供更加准确的健康评估手段。此外云智慧测试技术更可以提供随时随地的监控能力，各级相关人员通过任何一台可上网的终端设备（iPad或智能手机等），无需安装软件，可以随时随地了解任何一台设备的实时监测状态以及历史趋势数据等。

4.3 应用实例

目前，由COINV研制的云智慧测试系统，已经运用到了中国铁道科学院、渤海海洋平台振动实验中心、向家坝及其周边城市区域振动云监测、重庆地铁受施工爆破冲击监视、若干个跨海大桥和公路桥健康状态在线监测等项目中，可以实现在北京（或任

意地点)通过互联网对高铁线路、渤海海洋、向家坝、重庆地铁、杭州湾跨海大桥等位置的采集仪进行操控和处理,如图6~图10所示为一些使用智能手机或iPad通过智慧型系统进行实时监控的图像。



图6 在向家坝及周边城市的应用



图7 实时显示各个监测点的振动



图8 在重庆某地铁的应用



图9 在厦门某港口的应用



图10 在线分析

例如在向家坝及水富县城区的振动、噪声和次声监测，在坝体和城区布置了150多个监测点，各个测点的前端仪器直接通过3G网络连接简易云中

心，并通过GPS卫星同步。该项目经过一年多的24 h连续监测和2013全年数据积累，研究了泄洪调配方式与辐射振动声波大小的关系，得到非常宝贵的结论和经验，使得水坝泄洪引起的环境振动减小到以前的1/5~1/3。

可见分布式云智慧测量技术更有意义的目标在于实现上述应用的同时，不仅仅是简单的监控，而且能对多种智能传感器的数据融合和分析计算，并对结果给出更深层的分析，以达到避免不必要风险或出现险情时能做出快速的反应和事故原因分析。

5 结束语

分布式测量技术是现场测试的发展趋势，是解决大型工程中复杂测量问题的新途径，并且最终会发展至云智慧测量阶段。由核心智慧算法、前端智能硬件和云计算服务软件系统组成的全新仪器架构方式，是完全符合

工业4.0概念和标准的仪器发展方向的工程项目通用型测试分析仪器，并服务于工业4.0时代智慧工厂的智能化生产。基于该技术的云智慧仪器更是典型的智能硬件的代表，实现“互联网+”测试的应用。

参考文献

- [1] 应怀樵. 云智慧仪器与云智慧测试时代数采DAQ、虚拟仪器VI和试验室网络云时代[C]. 现代振动与噪声技术(第8卷). 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [2] 应怀樵. 虚拟仪器、卡泰仪器与智慧仪器的发展历程及趋势[C]. 现代振动与噪声技术(第9卷). 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [3] 沈松, 应怀樵, 郝磊, 等. 云监测系统的研究与应用[C]. 现代振动与噪声技术(第10卷). 北京: 航空工业出版社, 2012.