

现代智慧测量仪器的软件体系研究

沈松¹ 刘通² 应怀樵¹

1.北京东方振动和噪声技术研究所

2.上海理工大学光电信息与计算机工程学院

摘要: 随着自动测试技术与物联网系统的飞速发展,前端测量仪器的智慧化能力显得越来越重要。本文主要从功能需求的角度分析现代智慧测量仪器的软件体系,分析了嵌入端、桌面端、云端3大平台的软件功能需求,研究了内部测量计算软件、交互协同和同步软件、分析评估与决策软件3大方面的内容;最后以北京东方振动和噪声技术研究所(COINV)的INV3062C动态信号测量和动力学评估仪器以及在高铁动力学性能监测中的应用,通过实例展现了各软件之间的联系和作用。

关键词: 测量仪器;云计算;嵌入式;自动测试

1 引言

从19世纪欧洲出现的完全依靠硬件来实现的模拟测量仪器,到20世纪70年代随着微处理器的诞生以及计算机软件 and 微电子等技术的迅猛发展而诞生的智能测量仪器,测量仪器走过了模拟式、数字式、智能式3个阶段。从20世纪80年代起,以数据采集和软件技术和PC机为载体,开始出现第4代仪器,从此进入虚拟仪器VI时代;再到现在,随着互联网的迅速发展,

“云计算”和大数据处理技术的时代来临,测量仪器也来到了智慧仪器的时代。

软件在现代仪器中具有极其重要的作用,早在虚拟仪器时代,就通过软件,一方面提升仪器的性能,另一方面极大地丰富测量仪器的功能。现代智慧测量仪器,在高性能的先进硬件平台基础上,依赖复杂的软件系统,完成信号的智能测量、设备对象的自动化测试、云测试与大数据处

理、优越的人际交互体验、专业的分析处理和决策等。现代智慧测量仪器不仅是自动测试系统的前端仪器,也将成为未来物联网系统的终端设备。本文将从功能需求角度,分析和讨论智慧测量仪器的软件体系。

2 工作模式与软件平台

随着智慧测量仪器的发展,智慧测量仪器有3种较为常见的工作模式(如图1所示),分别是传统联机模式、脱机独立模式和云测试模式,需

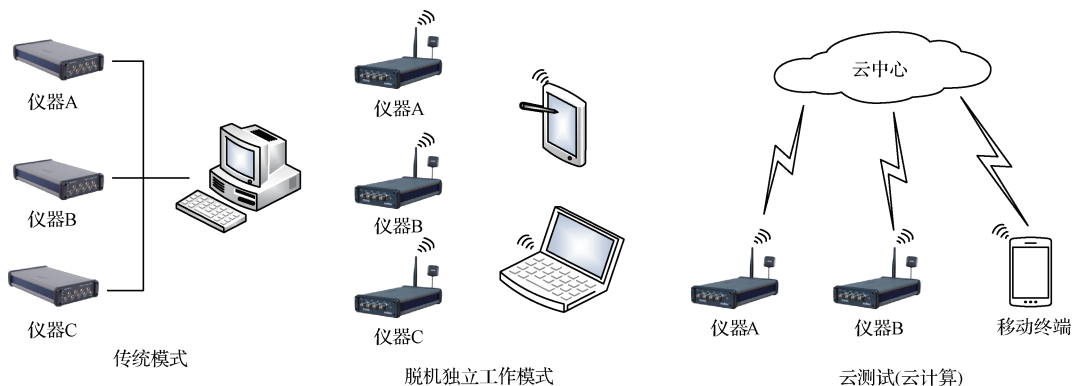


图1 智慧仪器的3种常见工作模式

要在嵌入端、桌面端和云端分析组织软件架构,实现内部测量计算、交互协同和同步、分析评估和决策3大功能。

2.1 智慧仪器的3种常见工作模式

常见的工作模式如图1所示。传统联机模式,即通过上位机PC软件进行参数设置、采集、存储、处理数据的方式,这种方式是虚拟仪器的主要模式,虽然充分利用了软件功能,但是却不同程度地附属并受限于计算机,人机不可分离,适于实验室操作,难以满足工业现场和野外作业的需求,难以实现远程操控。其次是脱机独立工作模式,即测量仪器可以摆脱上位机的桌面软件,通过嵌入端功能软件、浏览器Web软件或者移动终端的APP软件进行操作,初步实现测量仪器的智慧性,可以不用接触采集仪器就可以操作设备,方便便携,但是实现的操作和功能相对简单,缺省复杂的分析和处理。最后是云测试模式,所有前端硬件设备和操作人员的移动终端等都是通过云中心进行连接的,在该种模式下用户在任何地点、任何

时间对分布于全球范围的仪器进行直接的操控和数据获取,云中心具有专业分析和大数据分析的能力,是仪器智慧性的重要特征。

2.2 3大平台软件的立体架构

根据智慧仪器的功能应用场景,需要在至少3个平台上设计一系列软件,并且这些软件形成了相互联系和依赖的立体架构。

1) 嵌入软件,运行于仪器硬件内部的嵌入系统,可进行自动化的测量和信号的实时计算。这部分软件常常被作为硬件的一部分向用户提供。

2) 桌面软件,目前多数人还较为习惯在PC上对仪器进行操控的软件,可进行测量信号的分析处理和基于数学模型和少量事件统计的诊断和决策。桌面软件多以软件产品的形式提供给用户。

3) 云端软件,是云测试的服务中心,可进行数据融合和分析,基于大数据挖掘的诊断和决策。云端的软件一般不再是产品形式,而是以服务形式向用户提供,也是将软件从产品转向服务的重要手段。

3 内部测量计算软件

智慧测量仪器的核心是内部计算软件,它大致可分为基础测量软件、数字信号实时处理软件、智能工作软件3个部分,一般工作流程如图2所示。

3.1 基础测量软件

基础测量软件,主要完成对物理信号的采集和基本处理过程,是测量仪器的最根本功能,这部分一般被认为主要由硬件电路完成,但现代硬件设计中却是离不开软件的。基础测量软件一般包括两个部分,即运行于FPGA上的逻辑控制软件,和为上层软件调用的硬件功能驱动API软件,主要实现信号调理控制、ADC控制、时钟同步、时序控制、硬件触发控制等,此外还包含一些先进的特殊逻辑功能,例如多核自动量程、自我校准检测、综合时钟同步、任意时钟频率生成等。

3.2 实时处理软件

实时处理软件对采集或AD转换来的数字信号进行实时计算和处理,通常运行于DSP、GPU等专门的实时处

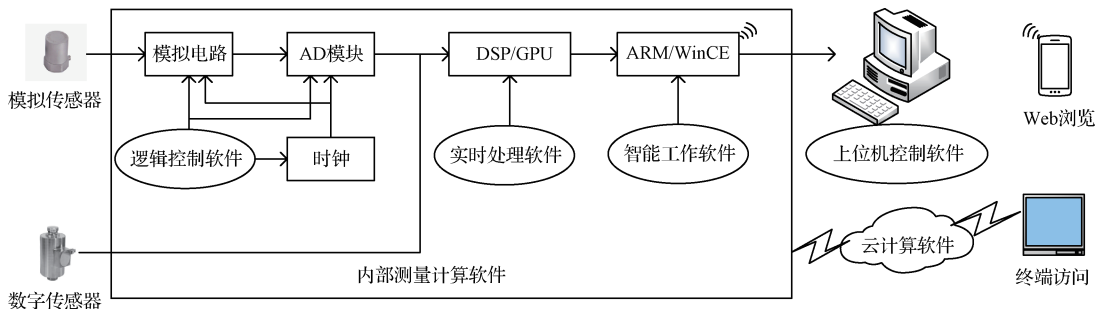


图2 智慧仪器的工作流程

理芯片上和一些高性能嵌入式CPU芯片上，主要完成计算量很大的数据运算功能，例如对数据的校准、统计、滤波等预处理，动态信号的FFT、矩阵运算等，以及图像信号的编码、识别等。

3.3 智能工作软件

智能工作软件一般为运行于ARM/Linux、WinCE等嵌入式系统上的应用软件形式，除了完成对FPGA基础测量软件和DSP实时处理软件的调度外，可充分发挥软件的优势，根据采集的信号、工作的场景、上层的控制等信息，更加智能地完成自动化测试、远程控制、仪器级联等智慧测量功能，同时基于灵活多样的对外接口，实现与移动终端、PC机、云中心的连接，是智慧测量仪器的智慧核心。

以轨道交通的轮轨力智慧监测仪器为例，仪器可自动判断列车的到来并启动信号的采集，待列车经过之后，立即对采集数据进行分析，完成动力学参数的安全评估，最后自动将测量和评估结果上传至云中心，由云

中心进行趋势分析、报警判别和大数据处理等。

4 交互、协同和同步软件

测量仪器必然要接收操作人员的指令，测试结果也总是需要呈现和存储。而智慧测量仪器则应具有更加丰富的外设接口，不仅提供更加优越的人机交互体验，还应该能与其他工控系统或互联网信息系统进行交互。

随着自动测试系统的测量物理量种类和覆盖范围的不断扩大，测量仪器的硬件形式从传统的一体式仪器到模块化仪器再到分布式仪器。分布式测量仪器具有小型化、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。仪器的分布化不仅适合大型结构和大型工程的测量，而且符合自动测试技术的发展要求，更将是未来物联网的主要形式。但是，分布也带来了仪器间互联和同步等新的问题，随之就需要仪器协同软件和时钟同步软件的支持。有关交互、协同和同步软件如图3所示。

4.1 外设驱动软件

智慧测量仪器的交互和协同，都是通过各种外设及接口进行的，因此外设驱动软件是此部分的基础，而各种设备都可能出现在智慧测量仪器中，如键盘、屏幕、触控、存储等外设，GPIB、USB、SCSI、CAN、ZigBee、RS232/485等数字接口，而各种有线和无线的以太网接口，更将是最重要的数据接口之一。

4.2 交互软件

交互软件主要包括两大类：与操作者的人机交互，以及与其他设备的系统交互。

人机交互软件是操作者对仪器进行参数设置以及数据操作的主要途径，根据常见的3种工作模式，传统模式下需要设计PC端的桌面软件，脱机独立模式下可设计键盘屏幕操作软件、触屏界面软件、Web页面软件、手机APP软件等多种形式，而云测试模式下，云中心的测试服务软件是最主要的。

与其他系统的交互是智慧测量仪器的重要特征之一。在工业制造领域

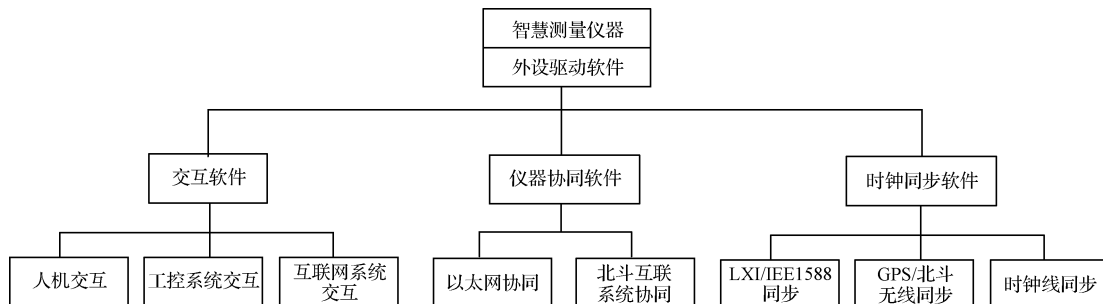


图3 交互、协同和同步软件

的工控系统交互，常常通过CAN、485等接口实现。测量仪器一方面需要从设备的PLC工控平台取得参考数据，另一方面又将测量和评估结果反馈给工控平台，从而实现智能制造的关键一环。在互联网等数字领域，则是需要与数字城市等各种信息化平台进行数据交换，依靠云测试模式中的云中心服务软件则更加易于完成这项任务。

4.3 仪器协同软件

对于分布式仪器而言，随着自动测试技术的系统化要求和大数据的数据融合要求，测量不同物理量的同类仪器和不同仪器之间，需要能够协同工作，获取具有严格对应关系的各种数据信息，为先进的分析评估软件提供全面的数据源。两种具有代表性的协调软件是通过以太网和北斗系统实现的。

逐步成为主流的以太网数据接口，是实现此功能的主要手段。同类

仪器之间、不同类仪器之间、仪器与云中心之间、仪器与操作终端之间，可以轻易地通过以太网进行各种触发信息量的传递，达到仪器间的协同和协调。

值得一提的是，中国的北斗系统为仪器提供了一种能够脱离网络的全新手段。不同于只能单向接收的GPS系统，北斗系统还具有互发短信息的功能，使得两台没有任何网络连接的仪器，可以实现信息的互通互联。

4.4 时钟同步软件

随着现代测试技术对精度的不断追求，仪器间仅仅协同还是远远不够的，灵活全面精确的时钟同步才是精密测量的基础。以100m/s的速度运行的高铁为例，车厢上与轨道上的仪器之间哪怕相差0.1s都代表了10m的距离误差，像结构模态分析等相位相关的动态信号处理方法则需要ms以下的同步精度，而通信仪器则更需要ns级的精度。

最早期是使用时钟同步线来解决此问题的，但是分布式仪器可能分布于几十、几百公里范围内，并且工作于各种现场环境下，因此COINV几年前提出的CXI综合时钟同步技术（如图4所示）就显得非常有效了。CXI在一台仪器中，集成设计了同步线硬同步、LXI/IEEE1588的以太网有线同步、GPS无线同步和北斗无线同步技术，几种方式通过软件系统自动择优协调工作，实现了分布于全球任意位置处、任意多台的前端仪器的精密同步。

5 分析、评估与决策软件

前述的各种软件，不论如何复杂，其目的都是为了完成信号的测量。但是，在实际工程中，测量只是手段，不是目的。因此作为未来智能测量仪器的发展方向，仪器应能继续对信号数据进行分析处理，对被测量对象进行性能和安全评估，直至为测量的最终目标提供决策。可按如下功能进行设计：

1) 数据融合，对于相互关联、统一参考的各类物理量数据的融合处理，实现被测对象的全方位分析；

2) 数字信号处理，对于已知数学模型，实现各种信号分析处理算法，获取直接分析结果；

3) 大数据挖掘，对于未知数学模型，进行大数据统计模型分析，通过深度学习的方法，进行科学的分析和处理；

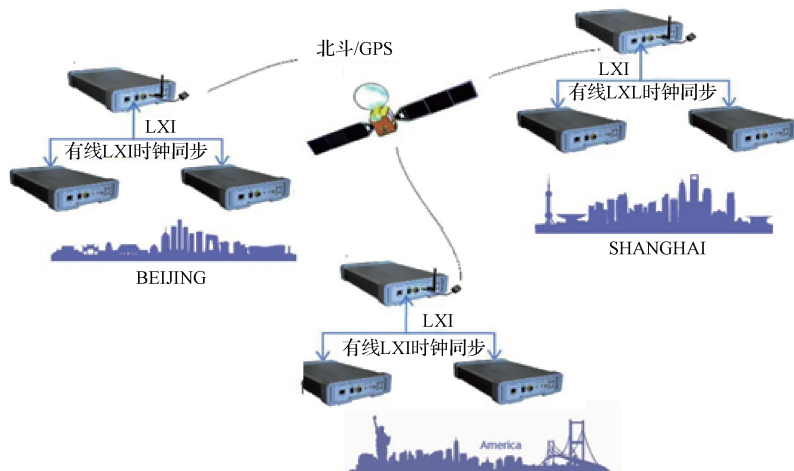


图4 CXI综合时间同步技术

4) 评估与决策, 是测量的最终目的, 通过上述信号处理和大数据统计结果, 对被测对象的性能进行评价, 对生产运行的安全进行评估, 最终提供可靠的智能化的决策;

5) 云测试服务, 是未来智慧仪器的发展方向, 是各前端仪器与操作终端的枢纽, 是数据融合、大数据分析 and 评估计算的平台。云端的软件不会以产品形式销售给用户, 而是提供各种测量和分析的服务, 使得软件实现了由产品向服务的转变。

这部分软件功能各异, 也常常较为复杂, 因此一般在PC桌面端和云端完成。但是随着嵌入式系统性能的不不断提升, 越来越多的功能也逐渐转移到仪器的嵌入系统应用软件中。

6 应用案例

INV3062C是由COINV按照现代智慧仪器思路进行设计的典型分布式测量仪器, 用于振动噪声等动态信号测量分析和结构动力学安全评估等,

采用FPGA、DSP和ARM 3处理器协同工作, 具有前面所讨论的大多数功能和特性。

在INV3062C内部, FPGA系统上运行的逻辑控制软件完成了信号滤波、增益等调理, 以及120 dB动态范围的24位ADC的模数转换, 并且通过控制DDS实现采样频率在1 Hz~216 kHz范围内连续调节, 此外还有效调配了IEEE1588、GPS、北斗和外输入时钟的择优使用, 同时实现了仪器间的CXI时钟同步; 在DSP系统上运行的数字信号处理软件, 完成了数据的预处理、IIR和FIR计算、FFT计算等功能, 另外还设计了独特的变时基、微积分转换、传递函数反演等传统仪器几乎无法实现的特殊功能; 在ARM系统上运行Linux操作系统和复杂的嵌入应用软件, 不仅完成各种离线数据采集功能, 还支持了WiFi-AP路由、WiFi-Station模式、3G/4G通信、POE、USB外置存储、

RS232/485、CAN等接口, 更完成了移动终端Web页面、PC桌面软件DASP的连接和云智慧系统MTS软件

的连接。INV3062C支持云智慧测试技术, 通过该技术操作人员可随时随地完全掌控分布于全球范围内的任意多台仪器, 实现真正意义上的“互联网+”测试。

目前INV3062C已经在桥梁建筑、轨道交通、飞行器等诸多方面得到应用, 以高铁运行的轮轨系统动力学监测系统中的应用为例, 系统如图5所示。

一部分仪器随车安装在车厢部位, 称之为车上仪器, 实时测量着车体振动、转向架振动和受力等信号, 并连续进行记录; 另一部分仪器则安装在桥梁上的铁轨附近, 称之为轨上仪器, 实时测量着轨道的横向力、垂直力、加速度, 以及桥梁的振动速度、位移和动挠度。当轨上的某一台

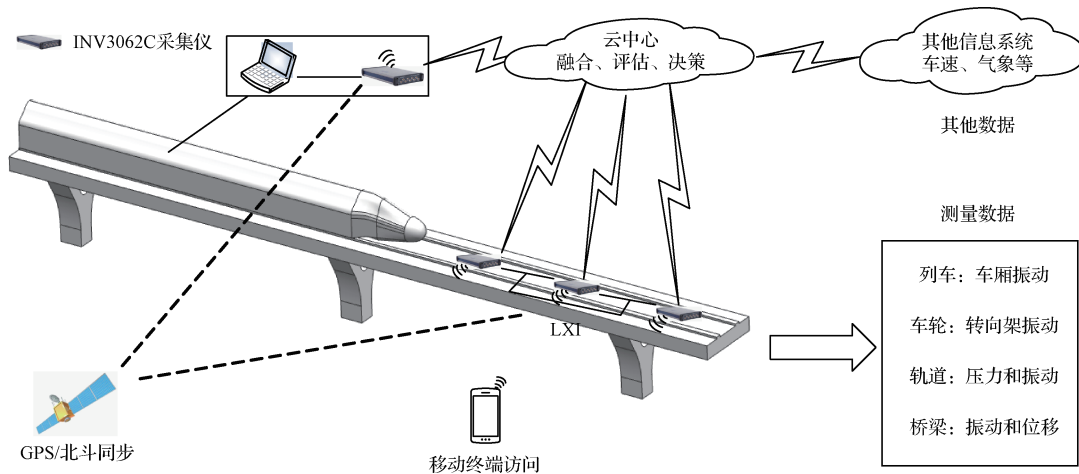


图5 高铁轮轨动力性能监测中的INV3062C充分体现了现代智慧仪器的优越性

仪器最先发现列车到来,会立即给其他位置的仪器发出触发信号量,所有轨上仪器同时完成列车经过时的所有信号测量,并完成单次列车经过时的安全系数评估。

两部分仪器,各自通过基于LXI/IEEE1588的以太网同步软件实现同步采样,而两部分仪器又分别与GPS/北斗系统进行时钟同步,从而实现了车上车下所有仪器的时钟同步。

所有仪器的测量数据和单车评估结果,都自动发送到云中心,同时云中心还从其他系统中获取了列车车型、运行参数、气象条件等参考数据。云中心汇集融合了全国多个地点的每一次列车经过时采集的大量动力学数据和参考数据,逐渐形成了大数据系统,不仅可实现趋势预测和预警,更实现了将列车的单车安全评估

发展为系统安全评估,为高铁的设计、试验、验证、运行、调控等提供了极具价值的决策依据。

7 结 论

智慧测量仪器在嵌入、桌面、云端3大平台上设计的一系列软件,完成了内部测量计算、交互协调和同步、分析评估和决策3大类数十种功能,依靠强大的软件体系,已经从单一形式的测试仪器向全方位、多平台立体的测量系统转变,也实现了仪器从基本的测量功能发展到评估决策系统,代表了自动测试系统的发展方向,符合了物联网的应用需求。

智慧测量仪器还将进一步向超低功耗、微型化发展,甚至整个仪器硬件可以集成到传感器的内部,从而发展到未来智慧传感器的新方向。

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”[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 507-514.
- [2] 沈松, 应怀樵, 葛宝珊. 云智慧测试技术的实现框架研究[M]. 现代振动与噪声技术(第10卷), 北京: 航空工业出版社, 2012: 383-387.
- [3] 李树彪, 韩敬伟. 基于多任务的智能测量仪器嵌入式软件设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(增刊1): 1-7.
- [4] 刘曙光, 王斌. 智能仪器仪表的进展与展望[J]. 自动化与仪表, 2001, 16(4): 1-5.
- [5] 沈松. 分布式测量和云智慧测量技术[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 1-7.