

风力发电已成为全球可再生能源中的一项重要内容。世界风能协会称：2000 至 2006 年间，全球风力发电的规模扩大了 4 倍。风电产业的工程师正借助 NI 技术开展各项研究，内容从风力机叶片的设计和生 产，到对风电场部署的涡轮进行在线机器状态监控。本手册将帮助工程师和研究人员了解如何应用 NI LabVIEW 软件和硬件，监控风电机组的振动、设计更优良的控制算法、制造涡轮叶片。最终目标是：获得更为高效而安全的风力发电类可再生能源。

内容摘要：

一 风能发电设备的结构设计验证

结构设计验证所需要的一些技术：

I.	结构分析.....	2
	-振动和结构分析的软硬件平台.....	2
	-多通道振动信号之间的精确同步.....	3
	-客户案例：Meazza 体育场利用 NI CompactRIO 构建结构分析系统	5
II.	风力发电机的控制与仿真分析.....	8
	-使用 LabVIEW 进行控制与仿真分析.....	8
	-客户案例：西门子开发一套动态涡轮仿真器用于蒸气涡轮控制器测试.....	9
III.	性能验证——功率测量与性能测试.....	12
	-虚拟仪器技术——模块化、自定义的测试测量平台.....	12
	-虚拟仪器技术用于功率测量与性能测试.....	13
	-客户案例：风力发电机主变速箱的测试.....	14
IV.	能量存储系统.....	17
	-客户案例：燃料电池动力系统仿真及实时控制平台开发.....	18

二 风能发电设备的嵌入式监控维护

I.	风力发电设备的机器状态监测.....	23
	-风力发电设备机器状态监测的要求.....	23
	-NI CompactRIO 嵌入式采集和控制系统是设备监测的理想平台	23
	-风力发电设备常见故障及监测方法.....	23
	-通过 NI 的软硬件平台进行设备监测和故障诊断	23
	-客户案例：通过 NI LabVIEW 和 CompactRIO 构建发电设备的在线诊断系统	24
V.	电能质量的监测与分析.....	27
	-电能质量的监测.....	27
	-电能质量的分析.....	31
	-客户案例：电能质量的实时监控与分析系统.....	32
	-客户案例：基于 LabVIEW 的电能质量校验装置的开发.....	35
VI.	现场测试与环境监测.....	38
	-现场测试.....	38
	-客户案例：构建风力发电机的移动测试平台：电压跌落发生器及测量、处理、记录.....	38
	-环境监测.....	40
	-客户案例：NI Compact RIO 模块在海洋环境多物理场测量中的应用	41

一 风能发电设备的结构设计测试

结构设计测试所需要的一些技术：

I. 结构分析

结构分析确保了风力机叶片和风力发电机塔架安全而可靠的运行。测试内容包括：数百路同步采集通道的动态应变与振动测量、全模型与比例模型测试、疲劳测试（单轴和多轴）、静强度与极限强度测试、无损检测(NDT)、应力可视化、声发射、位移、刚度和机械分析。

振动和结构分析的软硬件平台

NI 提供了大量用于创建自定义测量及分析系统的工具。该平台由功能强大的 LabVIEW 图形化开发软件和尖端的基于计算机的测量硬件所组成。您将体验到在振动和结构分析系统中前所未有的低价位、强大性能和高度灵活性。



a) 声音和振动测试平台

NI 声音和振动测试平台十分适于振动分析、结构测试与分析、NVH 测量、噪音和振动控制、音频测试、声学测量、环境噪音测试、机器状态监控、旋转机械评估及其他各种应用。

- 模块化 24 位或 16 位动态信号采集硬件
- 2 到 5000 条同步数据采集通道
- 基于 LabVIEW 的开放而功能强大的声音和振动测量及分析
- 音频、振动、频谱和频率分析

动态信号采集硬件

[新！高通道数：NI 449x](#)

单个 PXI 模块可同时提供 16 个 24 位模拟输入通道，单个 PXI 机箱提供多达 272 个通道，分布式 PXI 系统可提供 13000 多个同步通道。模块采样率为 204.8kS/s，多达 4 个可选的通道增益范围。

[高性能：NI 446X](#)

NI 446x 设备的动态范围为 118dB，有六个增益设置范围可以从 $\pm 316\text{mV}$ 到 $\pm 42\text{V}$ ，采样速度高达 208.8kS/s。24 位模拟输出也可用于激励响应等应用。

[输入通道灵活性：NI 447x](#)

以 102.4kS/s 的速度采集加速计、接近传感器或直流耦合信号数据，其在 PXI 和 PCI 平台中的动态范围都为 110dB。

[便携式：C 系列](#)

对于车载、现场测试或者嵌入式应用，动态范围在 102dB 的 C 系列模块采样率可达 51.2kS/s，并且具备抗混滤波器和 IEPE 传感器激励。

声音和振动分析软件

[NI 声音和振动测量套件](#)

声音和振动测量套件 6.0 是美国国家仪器有限公司应用非常广泛的信号处理工具，主要用于 NVH（噪音、振动和舒适度），机械状态监控，以及包括频率、倍频程和阶次分析等音频测试。

[NI 声音和振动工具包](#)

声音和振动工具包 6.0 为噪音、声学 and 振动测量应用提供了大量最为常用的分析函数。

b) 应变, 温度, 和通用数据采集调理平台

使用 NI 数据采集设备, 可灵活进行传感器和信号的数据采集记录。利用可互换、模块化的测量工具与软件, 您能够轻松配置或完善程序, 进而帮助您结合当前和未来的需求, 设计测试系统。模块适用于: 热电偶、应变片、RTD、电阻、电流、加速度传感器、测压元件等项目。

[NI SCXI 信号采集平台](#)

各种模拟和数字信号调理模块构成了 SCXI 系统的基础。模拟输入模块可对热电偶、应变计、RTD、热敏电阻、毫伏源、最高 250 V_{rm} 的电压源和电流源的输入信号进行放大、隔离和复用。您能对任何模拟输入、模拟输出、数字 I/O 以及开关模块的进行搭配和组合, 以满足您应用程序的具体需求。

[基于 USB 的采集调理系统](#)

NI CompactDAQ 硬件为各种传感器提供了简单方便的即插即用 USB 连接, 以及工作台、现场和生产线上的电子测量方案。NI CompactDAQ 集易用性、低价位和模块化仪器的灵活性等优点于一身, 在精小便携、简单易用、低价位的系统中实现快速精确的测量应用。

[坚固、嵌入式、可重新配置的采集调理系统](#)

NI CompactRIO 是一款低成本、可重新配置的控制和采集系统, 专为需要高性能和高可靠性的应用而设计。该系统包含一个开放的嵌入式架构以及小型、坚固且可热插拔的工业 I/O 模块。这些模块具有可靠的环境评级, 其中包含的 50 g 冲击和 3 g 振动评级适用于工业环境。

多通道振动信号之间的精确同步——1 基于 PXI 平台的定时和同步

结构测试、噪声排放或声全息等声音和振动应用常需使用数百路同步输入通道。PXI 定时和同步模块利用触发总线、星形触发以及 PXI 的系统参考时钟来实现高级的多设备同步。通过共享定时和同步, 可执行高级触发方案, 或者将多个设备同步作为一台整体设备运行, 适用于需要极高通道数的应用。这些模块可使您同步声音和振动测量中超过 5000 路动态信号采集的通道。

可实现 51 个 PXI 机箱间多达 663 个 PXI-4472 模块(5,304 路通道)的同步

产生具有高稳定性的 OCXO PXI 系统参考时钟(CLK10)

机箱可在 200 米范围内分布

产生高精度 DDS 时钟

在 1KHz 信号下, 实现所有通道之间相位失真小于 0.1 度



PXI (CompactPCI eXtensions for Instrumentation) 是建立在 PC 机技术之上的模块化 I/O 的标准。PXI 为基于 PC 机的结构添加了集成定时和同步、工业条件坚固性, 以及更多的通道数。PXI 是一个系统联盟标准, 已经得到 65 家公司的支持。

PXI 提供的定时和同步结构是另一项至关重要的测试技术。使用这些功能, 多个模块化 I/O 设备的定时特性能够实现精确的同步, 大大提高了精度和吞吐量。PXI 背板包括共享触发器、一个高稳定的共享时钟, 以及一组保证同步性能的星型触发线路。如图 1 所示。

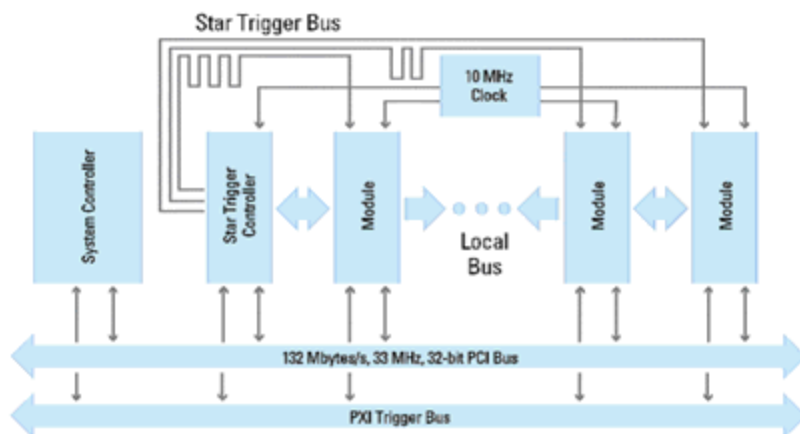


图 1 PXI 平台包含定时和同步的专用资源

说明：PXI（PCI eXtension for Instrumentation）是一个稳固的、基于 PC 的测量与自动化系统平台。PXI 将 PCI 电气总线的特性与 CompactPCI 稳固的、模块化欧卡封装相结合，在此基础上还增加了专门的同步总线 and 关键软件特性。PXI 是一种兼具高性能和低成本测量与自动化系统部署平台。这些系统所服务的应用包括制造测试、军事与航空、机器监视、汽车和工业测试等。PXI 于 1997 年开始开发并在 1998 年发布，作为一种开放的业界标准，PXI 的引入是为了满足对复杂仪器系统日益增长的需求。如今，PXI 由 PXI 系统联盟（PXISA）监管，该组织由超过 70 家公司组成，并以推进 PXI 标准、确保互操作性和维护 PXI 规范为宗旨。欲了解关于 PXISA 以及 PXI 规范的更多信息，请访问 www.pxisa.org。

多通道振动之间的精确同步——2 GPS 同步

DSA 设备的 GPS 同步体系结构

在决定使用何种同步方案的时候，同步精度是一个很重要的考虑因素。采用有线同步解决方案，您能够得到最高的同步精度，但是您的系统将会受到线缆长度的限制。采用 GPS 同步方案，时间精度会因为 GPS 信号的误差而下降，但是测量系统能够放置在 GPS 信号可到达的任何地方。

GPS 允许整个系统结构具有一定的灵活性，每个节点不需要是完全相同的。例如在很多应用中，传感器在整个测试地区不是平均分布的，这就意味着测量设备需要有相对应的物理分布。采用 GPS 同步，可以在某个节点只有 16 个通道，而在其他的节点有 400 个通道。如果一个特定的地点需要很多通道，可以采用多个 PXI/CompactRIO 机箱通过有线解决方案来进行内部同步，同时其本身作为一个节点加入到 GPS 同步系统之中。这就是一个混合有线和 GPS 同步系统的例子。下面给出的图例说明了如何使用单个 GPS 系统进行单个到多个 PXI/CompactRIO 机箱的同步。

GPS 的典型同步误差在 $\pm 25\text{ns}$ 之间，能够满足绝大部分系统的同步需求。

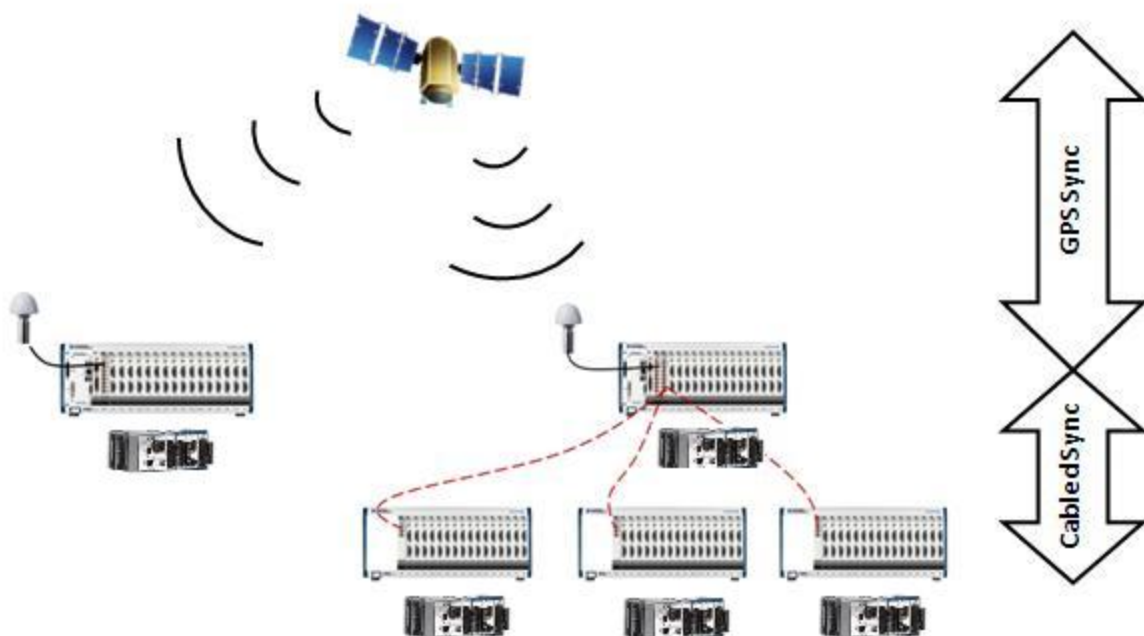


Figure : This system implements a hybrid synchronization scheme with both GPS and cabled synchronization.

客户案例：Meazza 体育场利用 NI CompactRIO 构建结构监测系统

作者： A.卡布里奥利 M.瓦纳利 乔瓦尼.莫斯奇奥尼 A.西伽达

单位： 米兰理工大学

应用领域：

大型建筑结构监测

产品：

CompactRIO、LabVIEW、LabVIEW FPGA、LabVIEW Real-time

挑战：

为大型体育场的结构监测搭建一个连续、实时的振动监控系统

解决方案：

根据建筑物结构设计和开发一个传感器安装方案和分布式数据采集/存储系统

用户感言：



“使用 LabVIEW 和 CompactRIO 平台，系统的软件架构变得非常灵活——无需高级软件技巧，即可在任何时刻做对系统任意的修改。”

项目背景

米兰的梅亚查体育场（又名圣西罗）作为大型体育场，一直面临着一些建筑结构上问题，比如人们使用建筑物内部设施带来的结构应力（举办音乐会时乐曲、歌曲带来的振动）。米兰市政府请米兰理工大学（是意大利最大也最负盛名理工科大学）对梅亚查体育场进行研究，并设计一个新型的监控系统，能够测量振动、金属部件腐蚀和其他物理参数。整个监控系统必须坚固耐用、适用于体育场环境，可以克服高温、强振以及复杂的电磁环境等不利因素。

米兰梅亚查体育场兴建于 1925 年，与 50 年代和 80 年代扩建了中圈和外圈看台，可容纳八万名观众。最初体育场用于足球比赛，从 80 年代后期开始，体育场也举办非体育活动，比如音乐会、演唱会等。

在足球比赛和音乐会期间，人们会感觉到体育场有强烈振动。这是由于成千上万的人随着音乐的旋律跳跃和舞动引起的。为了应对这样的问题，米兰理工使用结构评估、模态分析、动/静态测量和腐蚀测评等方法研究了体育场的状态。通过大量的实验和数据分析表明，有必要为进行振动、应力、温度和其他物理量的定量分析搭建一个实时监控系統，以评估长时间下体育场的结构特性、变化趋势，并预报危险情况。

体育场举办音乐活动时，观众随着旋律摇摆、舞动或者跳跃，引起结构振动。振动幅度随着这种由观众引起的、交替性的外力而变化。振动的强度不仅于观众人有关，如果歌曲的节奏（引起的观众的运动）与结构的固有频率匹配时，振动会明显加强。因此，需要测量这种情况下的振动，在达到引起破坏的量级之前采取控制措施。

应用方案

监控系统必须连续测量 0~50Hz 振动范围内相关的物理量，进行可靠的数据采集、存储和传输。米兰理工大学的力学和热学测量组曾经为很多建筑搭建过实时监控系統，在这一领域享有盛誉。对于梅亚查体育场的应用，他们基于 CompactRIO 平台搭建一个业内领先水平的系統，并利用 LabVIEW 图形化编程环境开发了功能强大的软件程序。

传感器的功能是量化各种物理量，从传感器的角度来看，为了尽可能保证采集精度，采集模块和传感器之间的连线需要尽可能的缩短。从网络的角度来看，布线越长越好，这样采集模块可以集中而变少。因此这两者之间有一个妥协。因为测量中大量使用了加速度计，所以使用 ICP 标准的加速度计可在两者之间找到比较好的平衡。

PC 安放在一个受保护的环境中，作为系統的主控端。在通常的操作条件下，他主要是收集和分析各个采集节点上的数据。在搭建过程中，它还可以在配置节点和校准传感器时作为人机界面。PC 还可以作为 Internet 网上远程访问本系統的网关。

这个测试系統的关键部分是如何经济有效的放置分布式的数据采集节点。最终目的就是在上万部手机、成百电视信号收发天线和无数的电力传输的环境下，减少传感器连线，改善采集效果。

使用 CompactRIO，系統有了可靠的数据采集节点，并且把数据有效的存储在本地。通常主控 PC 负责协调这些节点，并且控制数据存储和回传。如果主控 PC 不能正常工作，每一个 CompactRIO 节点仍然可以采集数据，并独立保存数天的数据。CompactRIO 提供了强大的计算和存储功能，小巧的体积，并能承受高湿度等不利环境因素。

此外，很重要的是它具有很好的扩展、升级的性能。一个大规模的系统节点数和信号接入类型非常重要。尤其对于动态信号采集，CompactRIO 平台还提供了数字和模拟的滤波器。

LabVIEW 是一种方便快捷的开发语言，力学组的研究人员一部分工作需要对其底层的采集程序修改代码。使用 **LabVIEW**，无需高级软件技巧，即可在任何时刻对系统进行任意的修改。系统的管理软件提供了非常灵活、便捷界面，从底层配置到常规控制。经过长时间运行，证明系统稳定可靠。最后，作者致谢米兰市政府、国际和米兰足球协会的支持。

II. 风力发电机的控制与仿真分析

使用 LabVIEW 进行控制与仿真分析

风电机组运行时的各个环节，都需要高级控制算法的参与。NI 工具现已用作涡轮中嵌入式控制算法的开发和测试，其中包括：针对涡轮功率曲线的扭矩和速度测量。NI LabVIEW 图形化开发环境与现有实时硬件之间的紧密集成可以帮助您在快速控制原型设计(RCP)和硬件在环(hardware-in-the-loop)仿真过程中完成控制设计的验证。

a) 控制系统的快速原型设计

利用 NI LabVIEW 图形化开发环境和现成的数据采集硬件，您可以通过将真实世界的 I/O 添加至早期的设计中以确保控制设计的完美，也可以轻松地将一个控制模型配置到可与任何信号相连接的实时硬件中运行。

b) 硬件在环测试

对于模拟真实设备来测试控制模型的应用来说，NI 所提供的软硬件平台再完美不过。利用 LabVIEW FPGA 和可重复配置 I/O(RIO)，您可以将模型配置到实时硬件上，还可以模拟复杂的传感器。

c) 将软硬件重复用于系统测试

利用 LabVIEW 的灵活性，在开发系统和生产测试时，您可以再使用设计和验证阶段的测试软、硬件，从而节省了大量的时间和开发成本。

推荐软件

LabVIEW RT(实时)模块

LabVIEW RT 模块扩展了 LabVIEW 开发环境的应用范围，它可以把应用程序下载至一个专用的实时目标硬件上执行，从而保证控制器及设备的仿真法则得以确定执行。

LabVIEW 控制设计和仿真工具套件

LabVIEW 控制设计和仿真包是一套简化控制系统开发的工具包。这个工具包包含有一年的标准服务，确保您可及时获得最新版本的软件以及一对一的直接技术支持服务。

LabVIEW 仿真接口工具包

运用 LabVIEW 界面仿真工具包您可以将 Simulink 模型无缝地导入 LabVIEW 并连接至各种实时硬件，然后通过 LabVIEW 图形化编程来轻松地检验、设计和验证 MathWorks, Inc.

Simulink 模型。*需要 MathWorks, Inc. Real-Time Workshop。

LabVIEW FPGA 模块

LabVIEW FPGA 模块通过扩展 LabVIEW 开发环境，可以将应用程序下载至 NI RIO 硬件上的 FPGA 芯片中。

推荐硬件

NI PXI 实时控制器

通过将设备和控制模型配置到 NI PXI 平台，您可以快速地利用现成的硬件对控制器进行原型设计。而且使用高性能 PXI I/O 模块，您可以集成任何型号传感器的信号。

NI CompactRIO 可重新配置嵌入式系统

NI CompactRIO 是一个低成本、可重复配置的控制和采集系统，它可将可热交换的小型高强度工业 I/O 模块与一个开放的嵌入式架构相结合起来。

NI 可重新配置 I/O

NI 可重复配置 I/O 硬件由用户可配置的 FPGA 所驱动，您可以利用 LabVIEW FPGA 模块创建 LabVIEW 程序来配置 FPGA。您的程序将在硬件上执行，从而可以对可重复配置 I/O 硬件上的所有 I/O 信号进行直接的、实时的控制。

客户案例：西门子开发一套动态涡轮仿真器用于蒸气涡轮控制器测试

Siemens Develops a Dynamic Turbine Simulator for Steam Turbine Controller Examination

作者:

Eckart Brackenhauer, Siemens;

Eberhard Schmidt, Siemens

应用领域:

能源/动力, 工业控制/仪器/系统, 机械/力学

使用的产品:

LabVIEW, LabVIEW Real-Time, LabVIEW 仿真接口工具包, PXI/CompactPCI

挑战:

为蒸汽涡轮控制器的工厂验收测试 (FAT) 开发实时仿真器

解决方案:

采用美国国家仪器的 LabVIEW、LabVIEW Real-Time、LabVIEW 仿真接口工具包和 PXI-1042、PXI-6527、PXI-6733、PXI-6052E 及 PXI-8716RT 模块开发系统

实现质量保障测试

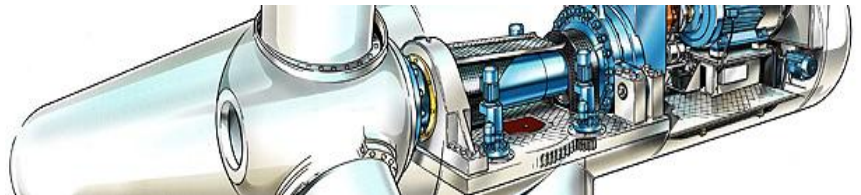
在自动蒸汽涡轮控制器交付用户之前, 我们对涡轮校准仪的软硬件进行了测试。FAT 是产品质量保障体系的一部分。我们在不同操作环境下运行自动控制器以检查系统扰动。用户代表通常会关注自己设立的测试指标。我们只有在测试结果令用户满意后才交付涡轮控制器。

进行 FAT 测试时, 首先必须用仿真控制系统闭合涡轮控制器自动控制回路。我们开发了实时涡轮仿真器, 它与涡轮控制器的 I/O 信号相连。仿真器根据涡轮控制器计算出合适的过程参数, 作为反馈来调整信号。我们专门为计算提供了一个动态的处理模型, 它包括一台蒸汽发生器和涡轮、重新配置站、冷凝器、信号发生器和电路网络。利用这个模型, 我们能够测试不同的运行模式, 比如涡轮机以特定的转速启动, 在负载或压力控制状况下运行, 空转时减少负载、去除负载以及关闭涡轮机等。除了实际的功能性测试, 涡轮机仿真器有助于在实际运转前, 进行参数调节及优化。我们提供了简单的涡轮机控制器模型, 用户能够在没有测试涡轮机的情况下, 运行涡轮机仿真器。

为了测试不同类型的蒸汽涡轮控制器, 仿真器提供了以下接口:

- 16 位模拟输入
- 16 位模拟输出
- 24 位模拟输入
- 24 位模拟输出

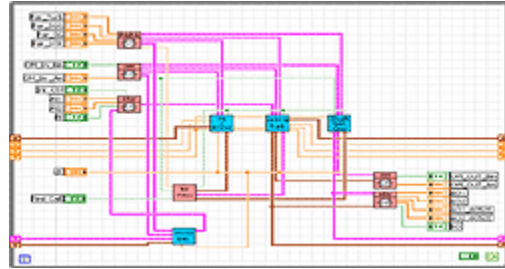
此外, 仿真器还具有:



- 2 ms 循环时间
- 确定的实时特性
- 便携性及现场连接性
- 模块化编程

我们将涡轮仿真器的开发分为三个阶段：

选择仿真器系统（第一阶段）



我们对于多种实时系统的软硬件开发能力进行了评估，我们的标准包括性能、编程难易度、可视化界面、输入输出的硬件接口（驱动函数）及机动性。同时还要能够重用由 MathWorks 公司的 MATLAB® 及 Simulink® 软件所编写的涡轮模型。我们决定采用以下软硬件来实现系统：

- NI PXI-1042 机箱带 NI PXI-8176 实时控制器
- NI PXI-6527 (24 位数字输入/输出板卡)
- NI PXI-6733 (两块 8 通道模拟输出板卡，16 位分辨率)
- NI PXI-6052E (两块多功能板卡，8 位模拟输入)
- NI LabVIEW
- NI LabVIEW 实时模块
- NI LabVIEW 仿真接口工具包

Structuring the Signal Conditioning Rack (Phase 2)

搭建信号调理层的结构（第二阶段）

由于蒸汽涡轮自动控制器和仿真器之间传输的模拟信号电平范围存在差异，首先要对其进行转换。蒸汽涡轮自动控制器提供 ± 20 mA 输出信号，但需要 $4 \sim 20$ mA 的输入信号。同时考虑到测量速度，需要三个频率在 $0 \sim 3.6$ kHz 之间的信号。PXI 模块的电压范围为 ± 10 V。所以在做信号调理时，我们在 ATR Industrial Electronics 的基础上开发了 19 in. 的机架，能够快速、简单地与预制的 PXI 电缆连接。

进行环境开发实现硬件通道（第三阶段）

我们才用 PXI 硬件模块上的时钟来保证仿真器的实时性能。一块多功能数据采集模块（PXI-6052E）提供了连续的时钟脉冲，通过背板总线（RTSI）来同步触发另一模块。计算仿真模块的循环也通过同样的时钟脉冲触发。我们在程序中指定了时钟脉冲（如：500 脉冲/s = 2 ms），如果实时测试产生误差时还可进行调整。

循环的执行分为两步。第一步，系统读取输入信号并将上一循环的计算结果输出；第二步，系统通过上一时刻读取的数据来计算模型，并将计算结果送入移位寄存器供下一循环中使用。

我们通过 LabVIEW 将控制模块及 I/O 循环设置为临界时间级(time-critical priority)。这样就避免了其它循环引起的中断或冲突，也确保了仿真循环的实时确定性。

仿真器由两个独立运行的程序和计算机系统组成，第一个系统是 PXI 实时系统，在 NI PXI-8176 控制器上运行实时操作系统完成模块计算工作；第二个系统是笔记本（主机），运行 Windows 2000 及 LabVIEW，它包

含了用户界面及完成模块参数的计算。我们通过标准 TCP/IP 协议连接主机和实时系统。将仿真程序从主机笔记本上下载到实时系统，然后在主机上运行基于 Windows 的用户界面。

在仿真器测试时，主机与实时系统的临界时间程序间必须能够无障碍地完成数据交换，所以系统通过实时 FIFO 传输数据。通过实时 FIFO，系统在模型、用户界面、及硬件接口间传输信号。主机系统通过计算几何学及涡轮热力学的局部观测数据为模型提供参数。

操作人员能够设置不同的工作环境，并在用户界面上显示出来，同时还将显示如涡轮转数、涡轮压力、涡轮控制阀开口等重要过程变量。此外，系统能够以图表的形式显示以上过程变量，并在控制界面中以时间为坐标显示涡轮机控制器的输出变量。为保证清晰的模型结构及主机功能，并能够适用于各类涡轮，我们遵循严格的模块化结构。这一点尤其重要，这样即使用户不是非常熟悉 LabVIEW 知识，也能进行简单的改变和调节。

我们以严格等级方式设计过程模型。我们采用了数据阵列（数组），并将其转换成簇的形式，为不同模型模块提供参数，同时保证硬件与用户界面间必需的数据交换。簇能够同时用于命名独立元素（数据）和结构。它能够分等级，并且簇的嵌套深度和与之连接的模块的深度对应。簇在整个模型中以数据管道形式使用。子模块通过“按名称解除捆绑”函数来解压数据。但是，系统必须将数据和数组之间进行相互转换，因为只有数组形式才能通过实时 FIFO 传输。所以仿真器能够适用于各类涡轮，在采用不同涡轮，如双压力级涡轮时，我们只需要修改或调整涡轮模块。

满足性能要求

我们第一个仿真器测试能够满足性能要求（整个处理过程在 2ms 内）及操作要求（改变方案及操作流程）。系统的开发完全由 LabVIEW 程序员完成，尽管执行环境的开发非常困难我们还是成功采用 NI 产品完成了项目。

由于动态涡轮仿真器系统的高性能需求，我们决定开发另一个仿真系统，能够实现同时测试不同的涡轮控制器。新系统同样采用 PXI 系统及实时控制器（PXI-1042 及 PXI-8176）。为提高控制循环率，我们将第一个系统的 I/O 硬件换成三块 FPGA I/O 卡（PXI-7831R），这款 FPGA 卡能够更有效完成信号输入输出的并行处理。此外，FPGA 卡的驱动与传统 DAQ 驱动或 NI-DAQmx 驱动相比，CPU 占用率更小，从而我们能够采用计算量更大的模块。

我们还采用了新的 LabVIEW 仿真模块，取代了 LabVIEW 的一般算法来设计模型。这个工具包专门为了仿真而设计，简化了仿真模型的实现，特别是在使用到某些已经在 MATLAB 及 Simulink 中实现过的模型时，可以通过 Simulink Translator 工具将它们直接转化为 LabVIEW 程序。

III. 性能验证——功率测量与性能测试

虚拟仪器技术——模块化、自定义的测试测量平台

虚拟仪器技术是针对测试测量的创新性解决方案。集快速开发软件和模块化的、灵活的硬件于一身，用户可以方便地创建自定义测试系统。

虚拟仪器提供：

- 直观的软件工具，用于快速测试开发；
- 基于创新性商用技术的快速、精确的、模块化 I/O；
- 基于 PC 技术的平台，集成同步功能，获得高精度和大吞吐量。

快速测试开发软件

因为自动化越来越成为快速测试复杂产品的必要条件，所以软件已经成为所有测试系统至关重要的要素 – 从设计验证一直到高度自动化的制造测试。要快速交付能够适应测试新功能的测试系统需要一套集成的测试开发工具。如下图所示，这些工具包括测试管理、测试开发和 I/O 驱动程序。



图 新一代测试技术的完整软件结构

模块化 I/O

第二个至关重要的测试技术是模块化 I/O，包括模块化仪器和数据采集等技术。此测量硬件布置在一块印刷电路板上，可以插入到 PC 或 PXI 底板中。模块化 I/O 采用商业芯片技术以较低的成本创建高性能虚拟仪器。ADC、DAC、FGPA 和 DSP 等商业技术的广泛使用使模块化 I/O 的功能和性能迅速改善。下图所示是模块化数字化仪的当前性能，通过频率（将信号数字化的速度）和位（数字化精度）来表现。在很多情况下，虚拟仪器的精度超过了传统仪器。

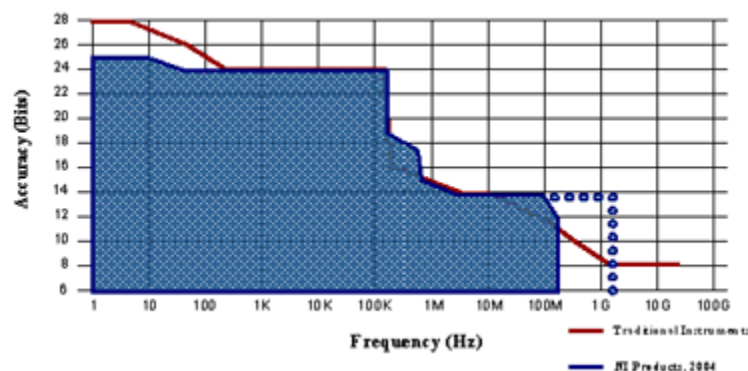


图 虚拟仪器系统的测量能力超过传统仪器

基于 PC 技术的测试平台

PXI (CompactPCI eXtensions for Instrumentation) 是建立在 PC 机技术之上的模块化 I/O 的标准。PXI 为基于 PC 机的结构添加了集成定时和同步、工业条件坚固性, 以及更多的通道数。PXI 是一个系统联盟标准, 已经得到 65 家公司的支持。PXI 提供的定时和同步结构是另一项至关重要的测试技术。使用这些功能, 多个模块化 I/O 设备的定时特性能够实现精确的同步, 大大提高了精度和吞吐量。

NI CompactRIO 可编程自动化控制器组合 RT(实时)和 FPGA 技术, 用一种小型、坚固的工业控制与采集平台为用户提供超高性能。这个低成本结构包括一个可重配置 I/O FPGA 核 (以提供专用硬件电路的可靠性和硅片上的并行执行性能)、一个实时嵌入式处理器 (用于独立和分布式实时操作, 通过一个内置的基于 web 的人机接口) 和工业级可互换的模拟和数字 I/O 模块 (以直接连接工业传感器和激励装置)。通过 NI LabVIEW 图形开发环境 (可用于诸如机器控制、振动监测、独立/分布式控制和采集等各种工业应用), 对整个 NI CompactRIO 嵌入式系统进行编程, 从而大大缩短开发时间。

虚拟仪器技术用于功率测量和性能测试

如需全面评估风力机系统, 便需要分析变速箱疲劳性、模拟风力机控制、测试瞬态运行, 并测试特定规范中的振动与声音特性。安装之前, 针对特定速度/扭矩测试点, 工程师必须在全功率兼全速的条件下, 测量变速箱性能。工程师时常收集振动、噪声、油温和齿轮啮合阶次分析方面的数据。

此外, 一个实时平台的可靠性和确定性对于一些测试应用来说至关重要, 如集成了控制功能的测试应用, 损毁性测试应用, 疲劳测试应用, 或者需要使用昂贵资源的测试应用。

实时操作系统提供了更高等级的可靠性, 因为它们专为特定的测量和控制任务而设计, 因此避免了通用操作系统的脆弱性问题。NI LabVIEW 实时模块为您提供专用实时系统的可靠性的同时, 无需您了解实时开发的底层细节。而且, 您可以使用熟悉的 NI LabVIEW 图形化开发环境来开发您的应用程序, 然后将它下载至一个专用的实时目标硬件上运行, 以实现以下各种应用:

集成式的测试和控制

利用 NI 模块化仪器创建确定的、具有微秒级软件抖动和高精度测量的控制应用

可靠的延续/持续性能测试

开发可靠的系统用于诸如生命周期测试、疲劳测试、损毁性原型测试或使用高贵资源的测试应用。

自主测试系统

使用现成的硬件平台来创建可以自主可靠运行的独立测试及数据记录系统。

推荐软件

LabVIEW RT(实时)模块

LabVIEW RT 模块扩展了 LabVIEW 开发环境的应用范围, 可以把应用程序下载至一个实时目标硬件上运行, 从而保证您的测试和测量应用程序有一个最可靠的执行平台。

LabVIEW FPGA 模块

LabVIEW FPGA 模块将 LabVIEW 开发环境进行了扩展, 使您可以将应用程序下载到 NI 可配置 I/O(RIO)硬件上的 FPGA 芯片中运行。

LabVIEW Execution Trace(执行跟踪)工具包

LabVIEW 执行追踪工具包是 LabVIEW RT 模块的一个附加工具包, 它为那些在 LabVIEW 实时目标上运行的应用程序提供了精确的调试和比对。

推荐硬件

NI PXI 实时控制器

结合 LabVIEW RT 模块与 PXI 创建高精度测量系统和高速控制应用。NI 提供各种广泛的 PXI/CompactPCI I/O 模块以供选择, 以集成模拟、数字、计数器/定时器、机器视觉和运动控制信号。

NI 数据采集设备

使用即测即用的硬件来连接各种模拟、数字、计数器/定时器和动态信号。使用专为开发 LabVIEW 实时应用程序优化的 NI 数据采集软件节省大量开发时间。

NI 可重新配置 I/O

使用 LabVIEW FPGA 自定义 I/O 硬件用于快速响应系统, 包括高速 I/O 处理、快速输出发生和板上决策。

NI 模块化仪器

充分利用 PXI 或 PCI 接口的高性能数字化仪、函数发生器和任意波形发生器、高速数字 I/O、数字万用表及 RF 测量硬件。

客户案例：风力发电机主变速箱的测试

Wind Turbine Main Gearbox Test Stand

GE Wind Energy, Erie, PA



测试平台用于 1.5mW 变速箱的事后检修，能够测定振动和声学特性，同时校验输出速度和载荷需求是否符合规格。待测单元（UUT）与同类变速箱连接，后者反转运行，用于模拟风力涡轮的扭矩。整个测试台由四台 GE 牵引发动机驱动和带载，并由 LabVIEW 进行控制。

从设计工业涡轮测试电池到开发火力发电站，为了提高风力涡轮效率，Emprise 公司（NI 系统联盟商）的工程师希望结合最佳的电子、机械设计，开发出高成本效益的解决方案。Emprise 与发电站的制造商合作，开发了如燃气轮机和燃料电池，从而成功解决了所有测试问题。

项目问题定义的概述

GE Wind Energy 公司希望拓展风力涡轮发电机的生产，决定在位于宾夕法尼亚州伊利市的 GE Transportation 工厂内设置关键变速箱装配线。因为工厂内已有设备都不具备对产品的测试能力，所以该项目非常适合在那里展开。

在完成风力涡轮发电塔的装载和安装前，必须对变速箱的性能进行校验。校验要求变速箱以最大功率全速运行，以此来完成速度/扭矩测试及精确数据采集，如振动、噪声、润滑油温度及齿轮啮合关系等数据。

由于测试过程中测试变速箱需要快速移动，使得问题进一步复杂化。此外，测试地点为主要生产现场，生产与测试之间将产生噪声干扰，同时又缺少动力隔离或机器底座来支撑测试设备。公用工程系统也需要升级，以提供最大 1.5 mW 的驱动功率。

在达到以上要求后，还需要有经验的 GE 技术人员来操作测试设备，而非计算机工程师。因而，计算机控制的数据采集及控制系统必须具备高鲁棒性，且用户界面友好。

技术方案

变速箱测试台最关键的技术问题是模拟 578,000 lb-ft, 18 rpm 的风力涡轮输入，风力涡轮变速箱是仅有的满足条件的设备。因此，采用另一台同样的变速箱（旋转方向相反）作为理想的速度/扭矩源。

被测变速箱与另一台固定安装的风力涡轮变速箱的输入轴相连，由 1.5 mW 电机系统驱动固定变速箱的输出轴，进而驱动被测变速箱在一定的转速和扭矩下工作。1.5 mW 发生器系统与被测变速箱的输出轴连接，模拟定量负载。

驱动电机频率可变，交流供电由固态驱动控制。驱动将直流功率转换为交流功率，这样两台驱动的直流电路能够互相连接，将产生功率看作负载，再反馈回驱动电机转换器，以此来仿真风力涡轮发电机的输入功率。

GE Transportation 还制造了轮式电机和驱动，用于露天采矿卡车及机车。分析显示两台 GEB-16A4 型轮式电机能够为测试提供要求的速度、扭矩及功率。同样地，驱动电机的阻断功能可以有效模拟发电机的负载。



图 1 显示了上述的闭环概念。反转变速箱产生高扭矩，功率循环通过固态驱动器从发电机送到驱动电机。系统损耗由连接在公用电力线与驱动 DC buss 之间的 600 kW 转换器补偿。

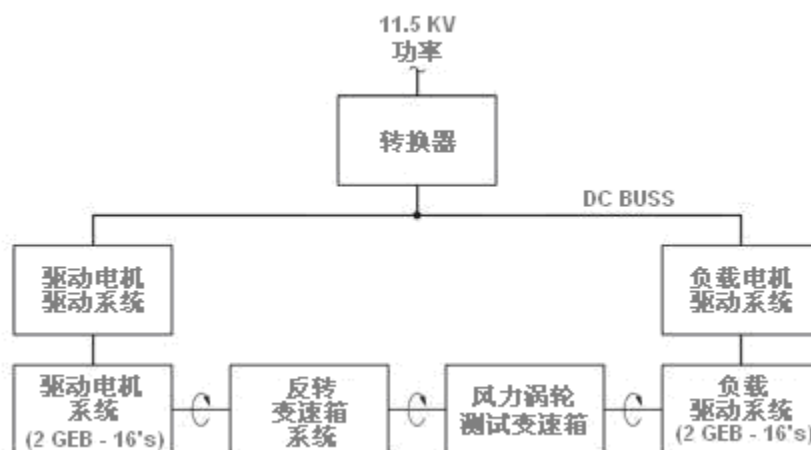


图 1 - 闭环驱动/负载系统

两台变速箱通常安装在弹性衬底上以减小噪声和振动影响。测试装置复制上述弹性安装的特点。但同时带来的问题是，非固定式的安装使得测试变速箱和反转变速箱之间存在安装校准问题。

由于测试变速箱要求能够快速安装和移动，两台变速器之间需要一个滑动齿联轴器。这种类型的联轴器能够快速提供高扭矩连接，但不能传递轴端所需的弯曲力矩。

在螺旋千斤顶上安装定位锁能够解决上述问题。当测试变速箱就位后，锥形销插入联轴器间来支撑两台变速箱的悬挂状态。然后通过插销和螺栓连接齿联轴器，从而传递轴的扭矩。

采用液压制动收缩盘（Ringfedder 制造）来连接齿联轴器和测试变速箱的输入轴，缩短了安装时间。

测试台的地面安装还存在两个问题。第一，由于不具备地面安装条件，测试台没有动力隔离；第二，测试地点在轮式驱动电机装配线周围，噪声干扰是一个很大的问题。

将大型钢结构直接置于工厂地面的隔离垫层上就能很好地解决安装基座的问题。结构基座在两天内安装完毕，为测试提供了驱动线所需的坚固、无振动的环境。图 2 显示了布局概念。

图中还显示了，电机安装在隔离噪声的围栏内，并与外部的强制风冷系统连接。这一结构将测试和工厂地面与噪声、冷却系统的电机隔离开。

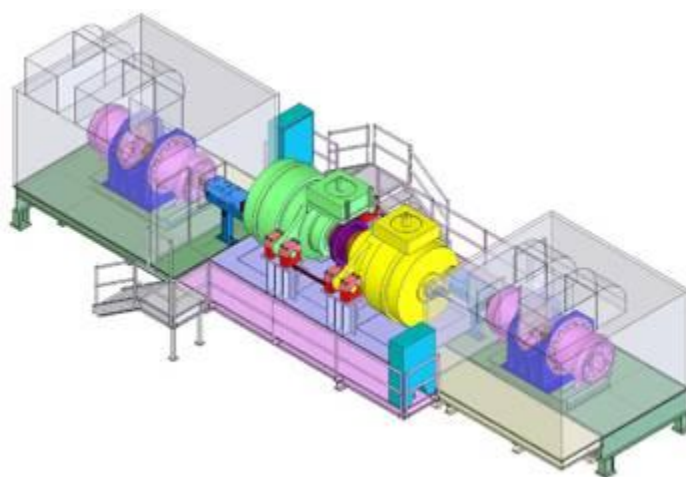


图 2 - 总体布局

数据采集系统使用的是美国国家仪器的 **FieldPoint** 系统，带有自定义软件，操作非常简单。**GE** 测试技术人员快速掌握了控制技术，能够高效地完成验收测试及文档结果处理。

结果

可再生负载系统是测试所需的网络能量最小化，同时保障满负载能力。独立支撑结构简化了安装及后续测试时的重新布置工作。便捷的速变联轴器/定位锁方式证实是一种理想的方法，也符合项目时间要求。

计算机化的控制系统提高了测量的速度，也保证了测试数据的精度和可重复性。

在已有技术上的创新性应用

Emprise 公司提供了几种计算机控制的变速箱测试设备，但风力涡轮项目是最大型的一个。另外几个燃气轮机项目也采用独立基座，但本项目的方法特别适用于高扭矩的变速箱测试。

高扭矩、速变的联轴器可能是最大的创新点。齿联轴器常用于该类应用，但刚性定位锁方案是一种独特的设计。这种方法保障了高扭矩的传递、便于快速安装，允许在测试环境下采用弹性体支撑。

复杂性

项目中最复杂的问题是如何让越野轮式电机和驱动适用于风力涡轮变速箱的测试应用。这种方案需要对软硬件进行大幅修改。电机要串联地工作，驱动由普通直流线路供电。由 **DC** 电阻器实现紧急制动。

在最终配置中，电机/驱动的组合提供了精确的扭矩和速度控制，并在指定工作范围内保持稳定。

满足甚至超越客户/业主的需求

项目目标涉及按照客户的测试程序对新装配的变速箱进行测试。这一程序包括负载运行下对真实风力涡轮的仿真。当变速箱工作于一定速度和扭矩时，测试系统采集振动、噪声、润滑油温度、压力及清洁度等数据，同时检查齿轮啮合模式。

在满足以上条件的同时，还需要考虑首期交付进度。从而，测试设备和首个变速箱成品才能同时装配。**Emprise** 公司的工程师与 **GE** 的工程师及其它咨询人员紧密合作，成功协作完成项目，及时实现首期测试。项目成本也在预算之内。

注：**Emprise** 公司是 **NI** 在美国的系统联盟商

IV. 能量存储系统

无论使用氢气、电气、化工还是机械形态的资源，为循环的电力资源（如：风能、太阳能和混合动力的再生）存储大量能源，都是一项挑战。目前，电池阵、燃料电池、超级电容器等各类技术正应运而生。这些系统为仿真、测试、控制和监测，提出了新的挑战。NI 产品通过为能量存储系统(ESS)提供贯穿其生命周期的统一平台，削减上述领域的成本和上市时间。

带隔离的测量

与高压 ESS 协同工作时，总是难以对高电压进行精确的测量。简单的数据采集(DAQ)设备，无法胜任常用的电压范围超过 300 VDC 的终端应用。NI 带隔离的 DAQ 产品适合于在产品开发、终端测试和产品内的监测系统中进行测量。

控制设计和仿真

燃料电池、电池和超级电容器的行为受到诸多变量的影响，因而难以与其他设备协同工作。构建完整系统模型的能力，有助于设计安全和控制系统。实施优秀控制策略并展现 ESS 的最佳特性，能够使 ESS 的寿命、性能和安全性获得显著提高。

硬件在环(HIL) 仿真

高级 ESS 需要复杂的控制器和管理系统，以确保获得最优性能、防止热故障与电气故障，并监控各个电池。重现危险条件的难度，为这些控制器的测试和验证提出了挑战。HIL 仿真却能帮助复制困难情景下的各类信号，从而全方位测试并提高 ESS 控制器的性能。

客户案例:

燃料电池动力系统仿真及实时控制平台开发

金振华；欧阳明高；卢青春；高大威

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 基于虚拟仪器开发环境开发了燃料电池混合动力仿真与实时控制系统,建立了基于模型的控制器开发平台。对混合动力系统中各部件进行了建模,采用 LabVIEW Simulation Module 开发了燃料电池动力系统仿真软件,基于嵌入式 PC 和 LabVIEW Real Time Module 开发了实时控制系统。实际应用表明仿真与实时控制系统工作可靠,为燃料电池汽车开发提供了有力的工具。

关键词: 燃料电池动力系统; 仿真软件; 实时控制系统

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 47030

Development of simulation and real time control platform for fuel cell powertrain

Jin Zhenhua, Ouyang Minggao, Lu Qingchun, Gao Dawei

(Tsinghua University, State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Beijing 100084)

Abstract: Based on virtual instrument development workbench, simulation and real time control system for fuel cell powertrain is developed and a model based controller development platform is constructed. Sub-systems of powertrain is modeled and simulation software is developed with LabVIEW Simulation Module. Real time control system is constructed with embedded PC and LabVIEW Real Time Module. Application of the platform shows the system works well and provides a powerful tool for fuel cell vehicle development.

Key words: fuel cell powertrain, simulation software, real time control system

1. 引言

随着能源和环保问题日益显著,具有高效率低污染特点的燃料电池汽车正成为汽车技术研究和开发的热点^[1-2]。燃料电池动力系统一般采用以蓄电池或超级电容作为辅助能源的混合动力结构,包括燃料电池发动机、DC/DC 变换器、蓄电池或超级电容、电机等部件,各部件在整车控制器的控制下协调工作。目前控制器的开发广泛采用 V 型开发模式,其中建模仿真和快速原型是开发过程中的两个重要手段,这种基于模型的开发过程可减少开发周期并降低开发成本^[3-5]。ADVISOR 和 PSAT 是目前国内外应用广泛的汽车动力系统仿真软件^[6],但这些软件只具备离线仿真功能,另外增加不同的动力系统构型和修改控制策略很不方便。

DSPACE 是应用较多的控制系统快速原型及硬件在环平台^[7],由于采用了专用的硬件系统,成本较高,不便于功能扩展,另外也缺少配套的仿真软件支持。

近年来虚拟仪器技术发展迅速,已成为测试领域的主流技术。LabVIEW 是目前广泛使用的虚拟仪器开发环境^[8],其功能覆盖了测试、设计和嵌入式应用等领域,其中 LabVIEW Simulation Module、LabVIEW Real Time Module、LabVIEW Embedded Development Module 等模块提供了仿真、实时控制、嵌入式开发等功能,对控制系统开发过程的建模仿真、原型设计和目标系统设计等阶段提供了全面支持。本文论述了在虚拟仪器开发环境 LabVIEW 下燃料电池动力系统仿真和实时控制平台的开发,一方面 LabVIEW 图形化编程环境以及丰富的仪器驱动支持可大大提高开发效率,另外采

国家 863 点动汽车重大专项(2003AA501100)

用嵌入式 PC 搭建实时控制系统可提高系统的可扩展能力并降低系统成本。

2. 仿真与控制平台总体设计

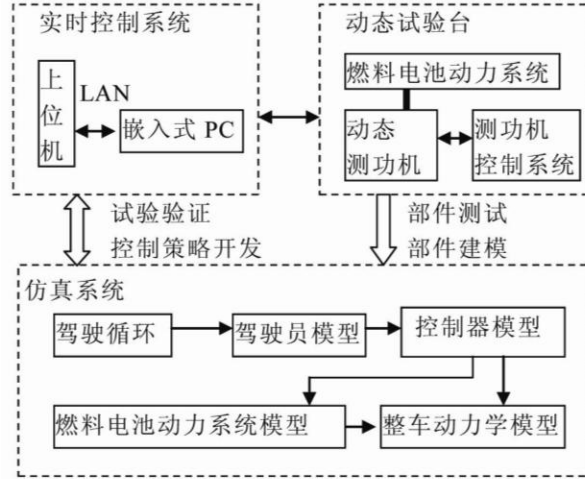


图 1 仿真与控制平台总体设计

燃料电池动力系统仿真及实时控制平台的总体设计如图 1 所示。动态试验台包括交流测功机及其控制系统，燃料电池动力系统包括燃料电池发动机、DC/DC 变换器、蓄电池、电机等部件，在动态试验台上可进行部件特性测试，也可以模拟汽车道路运行工况。实时控制系统由上位机和嵌入式 PC 组成，在手动模式下可控制各部件进行特性试验，在自动模式下运行整车控制程序实现控制器快速原型开发。实时控制系统通过 CAN 接口与动力系统各部件通讯，通过模拟量接口采集动态试验台发送的模拟量信号。仿真系统包括燃料电池动力系统部件模型、整车动力学模型、驾驶员模型以及控制器模型，采用前向仿真结构，在仿真系统上可进行动力系统构型研究、控制策略开发等工作。

该平台支持基于模型的控制策略开发流程，包括以下几个步骤：燃料电池动力系统各部件在动态试验台上进行测试，获取部件特性参数；将提取的部件参数输入仿真系统，在仿真系统中进行控制策略开发；在实时控制系统中对控制策略进行验证。

3. 仿真系统设计

3.1 部件建模

燃料电池发动机模型如(1)式(2)式所示。燃料电池发动机极化特性曲线采用一维查表加惯性环节修正，燃料电池发动机氢气消耗量随功率变化曲线采用

一维查表。其输入参数为发动机输出电流 I_{fc} ，输出参数包括发动机输出电压 V_{fc} ，氢气消耗量 m_{H_2} 。

$$V_{fc} = f(I_{fc}) \frac{1}{Ts + 1}; \quad (1)$$

$$m_{H_2} = f(P_{fc}); \quad (2)$$

DC/DC 变换器模型如式(3)(4)所示，根据输出电压 V_{out} 、输出电流 I_{out} 、效率 η_{dc} 和输入电压 V_{in} 计算输入电流 I_{in} ，效率采用二维查表。

$$I_{in} = V_{out} \cdot I_{out} / V_{in} / \eta_{dc}; \quad (3)$$

$$\eta_{dc} = f(V_{in} / V_{out}, P_{out}); \quad (4)$$

蓄电池模型采用 Rint 模型，如(5)(6)式所示。蓄电池模型根据充放电电流 I_{bat} 计算端电压 V_{bat} ，开路电压 V_{oc} 随 SOC 变化，采用一维查表；内阻 R_{int} 随 SOC 和充放电电流变化，采用二维查表。

$$V_{bat} = V_{oc} - I_{bat} R_{int}; \quad (5)$$

$$R_{int} = f(I_{bat}, SOC); \quad V_{oc} = f(SOC); \quad (6)$$

电机模型根据设定扭矩 T_{cmd} 以及当前转速 $Speed$ 和电压下 V_{bus} 外特性扭矩 T_{max} 计算电机输出扭矩 T_{motor} ，根据输出功率 P_{motor} 及效率 η_m 计算输入电流 I_{motor} ， T_{max} 根据电压和转速二维查表得到， η_m 根据电压、转速、扭矩三维查表得到。

$$T_{motor} = f(T_{cmd}, T_{max}); \quad (7)$$

$$T_{max} = f(V_{bus}, Speed); \quad (8)$$

$$I_{motor} = P_{motor} \times 1000 / (\eta_m \times V_{motor}); \quad (9)$$

$$\eta_m = f(V_{bus}, Speed, T_{motor}); \quad (10)$$

车辆动力学模型输入参数包括扭矩、档位以及整车参数，根据汽车行驶方程计算当前车速及加速度。驾驶员模型采用变参数 PI 控制器，根据设定车速和实际车速计算加速踏板和制动踏板位置。

以上各模型所需参数是在动态试验台上对部件进行特性试验获取的。比如电机模型外特性参数的提取过程如下：1) 设定 DC/DC 工作在恒压模式下；2) 电机扭矩设定为最大值；3) 测功机转速由 200r/min 上升到最大电机转速；4) 记录转速扭矩变化曲线得到该电压下外特性曲线；5) 改变 DC/DC 设定电压重复步骤 1 至 4。图 2 为通过试验取得的电机外特性 MAP 图，图 3 为额定电压下电机效率 MAP 图。

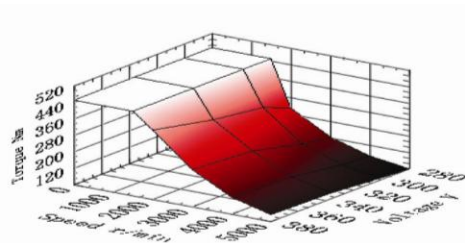


图 2 电机外特性 MAP 图

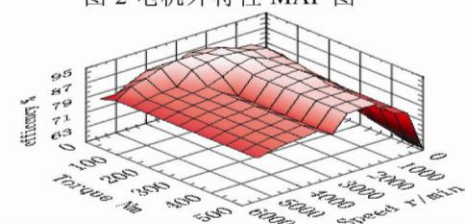


图 3 额定电压下电机效率 MAP 图

通过在动态试验台上进行动态工况试验可对部件模型进行验证。将动态工况下试验测得的电机转速、扭矩和电压数据输入模型，计算得到电机输入电流和实测电机电流的曲线比对如图 4 所示。

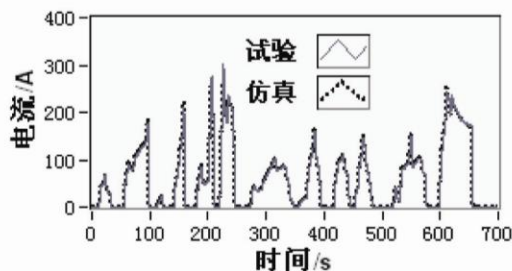


图 4 电机模型验证

3. 2 仿真系统设计

仿真系统基于 LabVIEW Simulation Module 开发，该模块是安装在 LabVIEW 下的一个工具包，包含仿真软件需要的各类功能模块，其编程方式与 LabVIEW 环境相同。

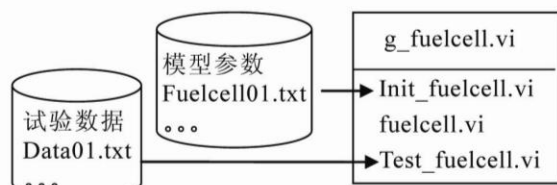


图 5 燃料电池模型结构

首先搭建各部件模型，将各子系统模型存入燃料电池动力系统模型库。燃料电池模型实现如图 5 所示，Fuelcell01.txt 存储了一种型号燃料电池的模型参数，Init_fuelcell.vi 初始化子程序从模型参数文件

中读取数据放入 g_fuelcell.vi 中的全局型变量中。fuelcell.vi 是模型子程序，Test_fuelcell.vi 是模型测试程序，从试验数据文件 Data01.txt 读取数据，调用 fuelcell.vi 进行仿真运算，并与试验结果进行比较。燃料电池模型在 LabVIEW 下的图形代码如图 5 所示。

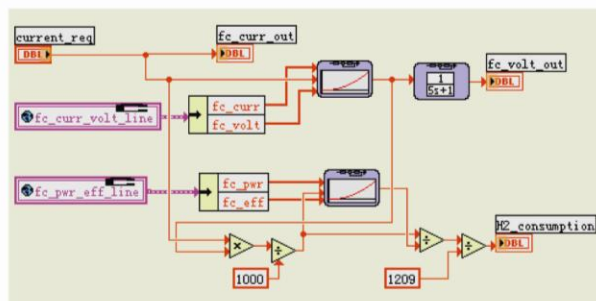


图 6 燃料电池模型的 LabVIEW 图形代码

根据不同燃料电池动力系统构型将各部件模型组合在一起即可搭建燃料电池动力系统仿真程序。该程序首先调用各模型的初试化子程序进行模型初始化，然后在运行仿真循环进行仿真运算，最后对仿真结果进行处理并显示在虚拟仪器面板上。图 7 为燃料电池混合动力系统的仿真程序代码。

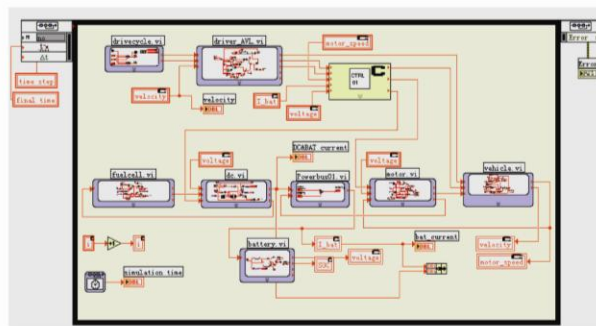


图 7 燃料电池混合动力系统仿真程序

4. 实时控制系统设计

实时控制系统基于嵌入式 PC 和 LabVIEW Real Time Module 开发，系统结构如图 8 所示。上位机是一台通用 PC，在 LabVIEW RT 环境下编写实时控制程序，然后通过 LAN 总线下载到下位机运行。下位机采用一块嵌入式 PC 主板，硬件配置位 Celeron-M 600MHz CPU、256M 内存、512M CF 存储卡。嵌入式 PC 通过 PCI 总线扩展通讯接口和数据采集接口，系统具有 2 通道 CAN 接口、16 路 AD、2 路 DA 和 16 路开关量通道，输入信号经过信号调理单元与采集卡连接。下位机运行 PharLab 的 ETS 实时操作系统，同时 LabVIEW RT 提供 NI-DAQmx 和 NI-CAN 仪器驱

动支持 CAN 通讯以及模拟量输入输出操作。

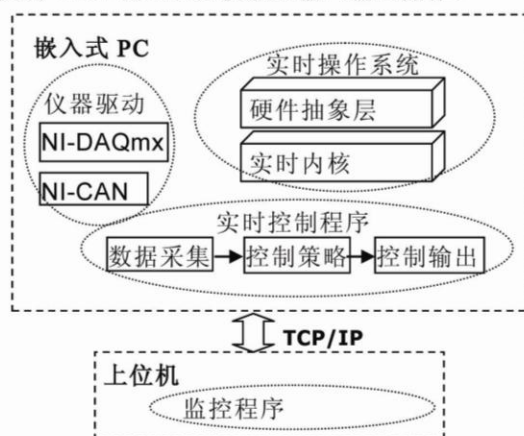


图 8 实时控制系统结构

在实时控制程序内对循环时间以及程序运行时间进行了监控，实时控制周期设定为 50ms，图 8 显示了 500 个周期的循环运行时间，波动在 15 微秒以内，具有较高的实时性。图 9 为控制程序运行时间，在 4 毫秒左右，因此嵌入式 PC 的性能能够满足开发要求。

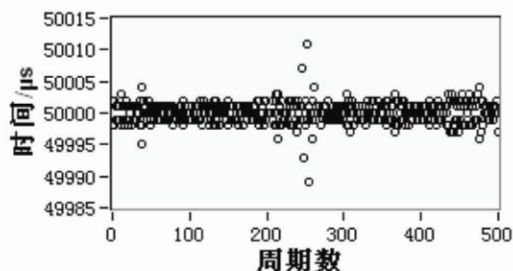


图 8 循环运行时间

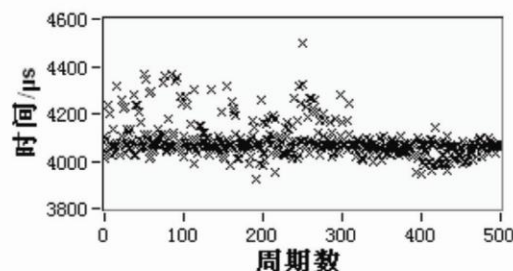


图 9 控制程序运行时间

5. 平台应用

应用开发的仿真及实时控制平台进行了燃料电池动力系统构型及控制策略研究。图 10 为采用负荷跟踪控制策略下燃料电池蓄电池混合动力系统仿真运算结果与应用实时控制系统在动态试验台上的试验结果对比曲线，可以看到仿真结果与实测结果接近，实时控制系统运行可靠。

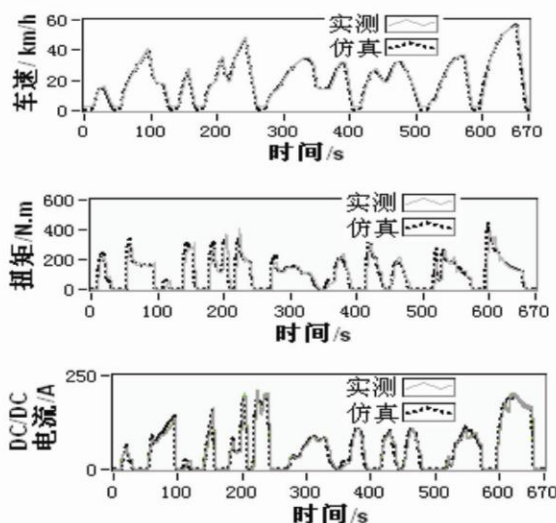


图 10 控制程序运行时间

6. 结束语

应用 LabVIEW Simulation Module 开发了燃料电池混合动力仿真系统，基于嵌入式 PC 和 LabVIEW RT 开发了实时控制系统，所建立的系统能够支持基于模型的控制器的开发流程。虚拟仪器环境下的图形化编程、丰富的仪器驱动以及友好的人机界面等特点提高了系统开发效率。实际应用表明仿真系统具有良好的精度，实时控制系统工作可靠、功能便于扩展，为燃料电池动力系统的研究提供了高效的开发平台。

参考文献

- [1]Tatsuaki Yokoyama, Yoshiaki Naganuma, Katsushi Kuriyama. Development of Fuel Cell Hybrid Bus[C]. Fuel Cell Power for Transportation 2003,Warrendale, 2003: 69-76.
- [2]陈全世, 仇斌, 谢起成. 燃料电池电动汽车[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. 1-3
- [3]C. PARK, K. OH, D. KIM. Development of fuel cell hybrid electric vehicle performance simulator[J] International Journal of Automotive Technology, 2004, 5(4): 287-295
- [4]李建秋, 田光宇, 卢青春, 等. 利用 V 型开发模式研制燃料电池混合动力客车的整车控制器[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 30-36

- [5]何彬, 华剑锋, 李建秋, 等. 燃料电池汽车整车控制器仿真测试平台研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1694-1698
- [6]程莺, 冯能莲, 李国强, 等. ADVISOR 混合动力电动汽车仿真系统的二次开发及应用[J]. 汽车工程, 2004, 26(3): 249-252
- [7]马培蓓, 吴进华, 纪军, 等. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用[J]系统仿真学报, 2004, 16(4): 667-670
- [8]王永晔, 张颖, 程璇, 等. 基于 LabVIEW 电滞回线测试系统的开发[J] 仪器仪表学报, 2006, 27(5): 501-504

二 风能发电设备的嵌入式监控维护

I. 风力发电设备的机器状态监测

尖端的风力发电机设备由价格高昂的大型机械构建而成，并需要振动监控和预测性维护。监测系统既须在范围宽广的温度中运行，也须支持高级分析和控制算法，从而在最大化发电量的同时，将应力降至最小。

风力发电设备监测系统的要求

- 较小的嵌入式系统，可用于各种恶劣环境
- 多个处理节点之间可以无缝的连接
- 在线的实时分析与记录

NI CompactRIO 嵌入式采集和控制系统是设备监测的理想平台

- 轻巧、坚固的工业控制和采集系统，符合高级工业认证/评级要求
- 基于以太网的分布式拓扑结构
- 带有实时处理器和可重新配置 FPGA 功能，用于可靠独立的嵌入式或分布式应用



风力发电设备常见故障及监测方法

常见故障及检测方法

- a. 轴承故障
 - 包络检测
 - 频谱分析
- b. 齿轮箱故障
 - 包络检测
 - 频谱分析
 - 倒谱分析
- c. 风机外壳振动过大
 - 振动级检测
 - 阶次分析

通过 NI 的软硬件平台进行设备监测和故障诊断

机器状态监控(Machine Condition Monitoring)可帮助企业消除计划外的储运损耗、优化机器性能、缩短返修时间并降低维护成本。面向机器诊断和在线监督的 NI 状态监测系统已经在各种涡轮、压缩机、生成器和其他设备中，获得成功应用。NI 系统既可轻松连接振动传感器（如：放射状与轴向型接近式探针、IEPE 加速计，及激光转速表与关键矢量等转速表），也可轻松连接其他过程变量（如：温度或动态压力）。NI 状态监控平台的范围从便携的 USB 即插即用式系统，延伸至配备板载分析与控制的嵌入式以太网式数据记录器，且均能进行 24 位高速测量。另外，配备 NI LabVIEW 图形化开发环境的 NI 声音和振动测量套件具有数百个信号处理函数（包括：光谱分析和阶次跟踪及自定义用户界面上的自动报告生成。）

监控单位和传感器——NI 机器监控系统的单平台连接可自定义的加速度传感器、接近式探针、转速表或关键矢量，从而与透平机械、压缩机、生成器和往复机械配合使用。

传感器信号调理——NI 系统兼容第三方信号调理器（如：接近式探针驱动和电荷放大器）；您也可以将内置 IEPE 流源和全桥电阻用于传感器信号调理。

模拟和数字 I/O 模块——具有防混叠功能的 24 路模拟输入凭借最高精度的性能，提供着业内领先的测量。您可在 30 多种模块中进行选择，匹配理想的系统。

I/O 模块平台——插入 USB 平台，可构筑便携式、诊断型机器监控系统；选择坚固的嵌入式平台则能够在以太网上部署与网络连接在线机器监督系统。

分析和处理软件——快速运行系统并进行常规分析（如：FFT 或阶次跟踪）；在单一且使用简便的应用程序开发环境中，实施您的算法与 IP。

网络和显示器的硬件及软件——NI 系统能够连接已有的维护软件和操作软件、能够将数据记入自定义数据库、能够在本地或网上显示机器性能趋势和经分析的结果。

客户案例：通过 NI LabVIEW 和 CompactRIO 构建发电设备的在线诊断系统

NI LabVIEW and CompactRIO Keep Power Plants Online

VESKI 的计算机诊断系统软件配合 NI LabVIEW 及 CompactRIO 辅助振动监控系统

作者：

Boris Meško - VESKI

Ozren Orešković - VESKI

Ozren Husnjak - VESKI

应用领域：

能源/电力

产品：

实时模块, CompactRIO, LabVIEW, FPGA 模块, 软件

挑战：

开发具有成本效益并且可靠的系统，实现对克罗地亚发电站机械设备的监控

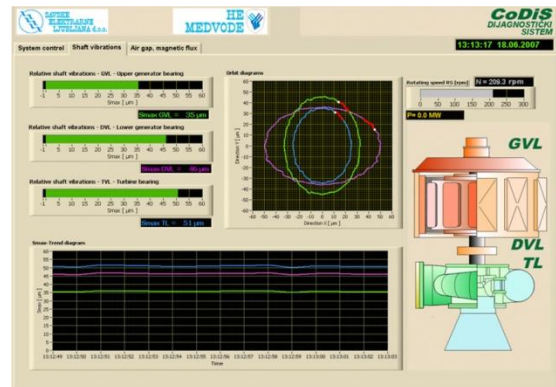
解决方案：

采用基于美国国家仪器 LabVIEW 及 CompactRIO 产品的 VESKI 计算机诊断系统（CoDiS）监控软件，实现局域网兼容的连续振动监控系统。

“连续监控振动及其它信号是预测力学行为及效率的关键，且往往要求连续数据采集及在线数据库分析。VESKI 是一家致力于振动分析及诊断的克罗地亚咨询公司，他们的 CoDiS 监控软件以 NI LabVIEW 及 NI CompactRIO 为核心工具。”

机械振动对旋转电机部件是有害的，在很多场合，极大的降低了机械的可操作性和寿命。连续监控振动及其它信号是预测力学行为及效率的关键，且往往要求连续数据采集及在线数据库分析。

VESKI 是一家致力于振动分析及诊断的克罗地亚咨询公司，他们的 CoDiS 监控软件以 NI LabVIEW 及 NI CompactRIO 为核心工具。



这项软件方案开发，能够帮助 11 家克罗地亚发电站降低发电机维护及修理成本。当接手这项工作时，我们希望通过 LabVIEW 及 CompactRIO 来开发一个可以自定义的系统。

机器监控及诊断

对发电站来说在线监控系统是尤其必需的，它能够预测系统故障、识别系统运行中的不稳定性。监控系统还能用于流线型的常规维护，从而保证长时期的使用，避免严重损失。

CoDiS 被安装在克罗地亚、斯洛文尼亚、Lagarfoss、冰岛的 30 多个发电机上。现代工业监控系统通常要求采集振动、温度、压力、流量等数据，并同时维护准确的数据库管理。我们设计了 CoDiS 来监控转子振动、定子和基座动力、空气间隙状态、电力产生过程、电力品质及大型旋转电机的水力学量。CoDiS 是模块化的、可调节的，能够根据用户需求设计及自定义。整个应用程序基于 LabVIEW 开发，程序中的所有分析及数据库程序都适用于自定义在线监控及数据采集。

系统通过 CompactRIO 来实现同步诊断功能及保护。

CoDiS 包括四部分组件：

- CoDiS-DM (持续诊断性监控系统)
- CoDiS-TR (瞬时记录器)
- CoDiS-RT (信令及保护系统的常规实时监控)
- CoDiS-RM (持续诊断性转子监控)

CoDiS-DM	CoDiS-TR	CoDiS-RT	CoDiS-RM
诊断性监控	瞬时监控	常规监控	转子监控
连续采集、分析及数据库记录	以触发为标志，进行连续的触发采集，并进行分析记录	<ul style="list-style-type: none"> 连续采集、分析及 D/A 转换 保护功能 	<ul style="list-style-type: none"> 连续采集及转子信号分析 转子与定子间信号的无线传输
实现	实现	实现	实现
探测及测量持续的状态变化	瞬时记录及探测	信令及保护系统的应用	信号发送及保护系统中的应用

系统配置

采用 CompactRIO 及美国国家仪器的 FieldPoint，能够设计出高度可配置系统，实现高性能及高可靠性。CompactRIO 采用了可重新配置 I/O(RIO) 的 FPGA 技术，同时具备状态监控及保护单元的功能。

监控系统由以下部分组成：

- 测量部件，包括所有传感器及数据采集硬件
- 信号调理部件
- CompactRIO 处理单元，带 PDA 本地控制单元，用于数据采集及分析
- 中央计算机，为局域网用户提供持续的数据库及分析程序

系统还包括以模拟输出或 fieldbus 输出与 SCADA 系统进行通信。

CoDiS 包括对以下特性的持续监控及诊断：

- 相关轴振动
- 轴承绝对振动
- 转子轴向定位
- 空气间隙最小值
- 转子极磁通量
- 电量参数，如电流、电压
- 相位对称性、功率角
- 总谐波失真(THD)
- 静态、准静态参数
- 温度及过程参数
- 水力学参数(功率, η)
- 有功功率、无功功率

高压泵中安装的状态监控及保护单元 – Lagarfoss 岛

配置 CompactRIO 系统实现相关轴振动及转速监控，同时提供超速保护。系统监控两台水轮发电机，每台发电机都采用 CompactRIO 作为处理单元。

每台监控设备包括：

- 六个位移传感器用于相关轴振动测量
- 两个位移传感器用于转速测量
- 一块 9201 模块用于数据采集
- 两块 NI 9265 模拟输出模块用于 SCADA 信号测量趋势
- 一块 NI 9481 模块执行保护功能
- NI cRIO-9002 带 cRIO-9101 嵌入式可配置机箱

CompactRIO 系统监控：

- 六路模拟输入信号，单位伏特（X、Y 轴各三组轴承）
- 两路模拟输入信号，单位伏特（冗余超速保护）
- 六路模拟电流输出信号（SCADA 趋势）
- 四路继电器数字输出信号，每个方向两路（警报发出与解除）

所有相关数据，包括波形及分析结果，均作为共享变量在网上共享。通过使用 NI 产品，VESKI 使发电站的维护及修理成本降低了 50%。

II. 电能质量的监测与分析

电能质量的监测

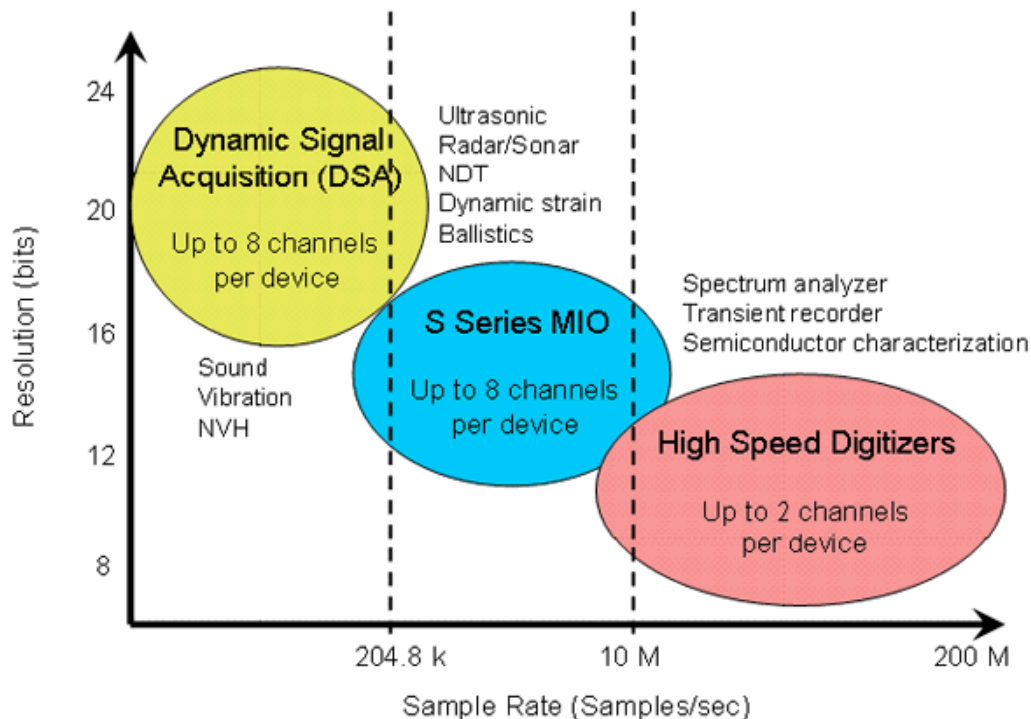
风电机组的输出功率质量，是定义可再生能源质量的一项指标。利用特定站点的风速与功率输出测量功率曲线、发电机和电力系统组件效率，利用能源输出预计，工程师可确定装置的使用寿命和动力性能。

NI 的电能质量监控解决方案中，坚固的硬件适于波形测量，灵活的软件则能够执行各类电力监控、电能质量或电能计量分析。您可以在多个通道中同时进行方均根(RMS)、功率因数、频率分析（快速傅立叶变换）和谐波分析等测量。通过 NI LabVIEW 图形化开发环境和 NI 电能监控系统，您可集成硬件测量和分析，并缩短开发时间。

a) 同步采样用于相位校准

计算有功功率和功率三角形时，测量电压和电流波形之间的相位偏差至关重要。如需测量该相位偏差，您必须在每路通道上同时采集数据以维持现有相位角，并不得通过仪器引入其他相位偏差。

NI 产品中有多个系列可以提供同步采样功能。这些产品的采样速率范围从次赫兹(sub-Hz)到 200MHz，分辨率在 8 位到 24 位之间。基于其功能和大小尺寸的范围，这些产品能够应用于相当广泛的领域，从声音、振动到瞬态信号记录。



	动态信号采集	S 系列多功能 DAQ	高速数字化仪
同步采样	√	√	√
分辨率（位）	可达 24 位	可达 16 位	可达 14 位
采样率（采样点数/秒）	可达 204.8 k	可达 10 M	可达 200 M
通道数	可达 8 个	可达 8 个	可达 2 个
抗混滤波	√	部分支持	√
板载内存	--	可达 64M 采样点	可达 256M 采样点
计数器	--	√	--
数字 I/O	--	可达 8 位	--
模拟输出通道	可达 2 个	可达 2 个	--
总线	PCI, PXI	PCI, PXI	PCI, PXI, PCMCIA
带宽	可达 92 KHz	可达 7.2MHz	可达 150 MHz
价格	1995 美元起	995 美元起	1295 美元起

b) 隔离技术用于更为安全而精确的测量

隔离通过在测量设备中创建物理隔离，提高精度、简化安装，更为重要的是，它为高压作业中的系统赋予了安全性。简单的数据采集 (DAQ) 设备，无法胜任常用的电压范围超过 300 VDC 的终端应用。NI 带隔离的 DAQ 产品适合于在产品开发、终端测试和产品内的监测系统中进行测量。

高电压测量和隔离

在测量高电压时需要考虑很多因素。在设计一个数据采集系统时，提出的第一个问题就是该系统安全与否。进行高电压测量，不仅对设备、被测单元有伤害性，甚至对您个人及同事的人身安全都存在着危险性。为了确保系统安全，应该使用绝缘测量设备，以在用户和危险电压之间提供一个绝缘障壁。

隔离，是在物理和电气上将测量设备分离成两部分的方法，可分为电气隔离和安全隔离。电气隔离是两个电气系统之间的地没有相连。电气隔离可以断开接地环路，扩大数据采集系统的共模范围，还可以将信号地参考点的电压拉平到单个系统的地。安全隔离参考标准对保护个人远离危险电压有

专门的规定，并对电气系统的性能进行评定，以避免高压和瞬变电压击穿边界传输到其他用户可能接触的电气系统等情况的发生。

在数据采集系统中安装隔离装置主要有三个功能：防止接地环路，抑制共模电压，和提供安全保障。

接地环路

接地环路是数据采集应用中最常见的噪音源。这种情况发生在当电路中相连的两个端点处于不同的地电位上，导致两点间产生电流。系统的本地地电势可能比最近建筑物的地电势高或者低几伏特，而附近的雷击也可能导致此差值上升至几百或者几千伏特。这种额外电压不仅本身会导致测量的重大误差，而且电流会在附近导线中产生耦合电压。该误差可以瞬变信号和周期信号出现。例如，如果接地环路由 60 赫兹交流电源线形成，那么不必要的交流信号在测量中将以周期性电压误差出现。

当接地环路存在，被测电压 V_m 就是信号电压 V_s 和电势差 ΔV_g 之和，后者是信号源地和测量系统地之间的电势差值（如下图所示）。这个电势通常不是直流电平；因此，形成了一个受到噪音干扰的测量系统，在读取过程中包含了电源线频率（60Hz）成分。

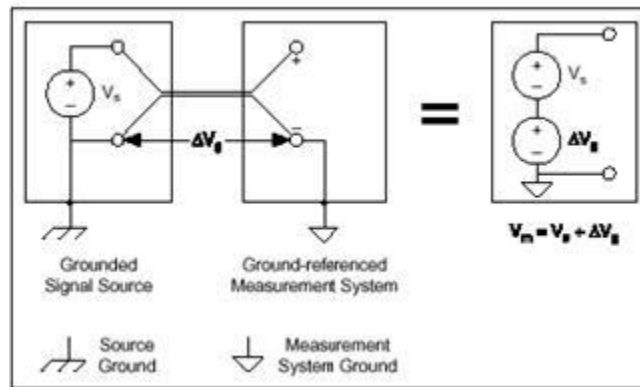


图. 由地参考系统测量的接地信号引入了接地环路

为了避免接地环路，就要确保测量系统中只有一个地参考点，或者使用隔离的测量硬件。使用隔离的测量硬件消除了信号源地和测量设备之间的连接路径，这样就可以防止多个接地点之间的电流流动。

NI 9229 模拟输入模块提供 250V 的通道至通道隔离。



图. NI 9229 通道至通道隔离模拟输入模块

共模电压

一个理想的差分测量系统只反映两个端点——正极 (+) 和负极 (-) 输入的电势差。两根导线间的差分电压就是有效信号，然而不必要信号很可能存在，这种情况在差分双线的两导线上都很常见。该电压就是常说的共模电压。理想的差分测量系统能够完全抑制共模电压，更不用说测量。然而，实际设备有很多限制条件限定了抑制共模电压的能力，这些限制条件由共模电压范围和共模抑制比（CMRR）等参数描述。

共模电压范围的定义是指测量系统各输入端对地的最大允许电压摆幅。违反了该限制条件，不仅会产生测量误差，而且可能损坏板卡上的元件。

共模抑制比描述的是测量系统抑制共模电压的能力。共模抑制比越高的放大器对抑制共模电压的效果越显著。

在非隔离差分测量系统中，在电路输入端和输出端之间仍存在导电通道。因此，放大器的电气特性限制了输入端上共模信号电平的抑制。使用隔离放大器就可以消除导电电气路径，而共模抑制比也显著增大。

隔离拓扑结构

当配置测量系统时候，了解设备的隔离拓扑结构是很重要的。不同的拓扑结构有着不同的相关成本和速度的考虑。

通道至通道

最稳健的隔离拓扑结构是通道至通道隔离。在这种拓扑结构中，每个通道之间以及同其他非隔离系统元件之间都是隔离的。另外，每个通道都有自己隔离的电源。

考虑到速度，有多种结构可以选择。每个通道使用一个模拟数字转换器（ADC）和一个隔离放大器的话，速度会明显变快，因为所有通道可以并联接入。[NI 9229](#) 和 [NI 9239](#) 模拟输入模块提供通道至通道隔离来给予最高的测量准确性。

一种成本效益好而速度相对较慢的结构是各个隔离输入通道多路复用到一个 ADC 上。

另一种提供通道至通道隔离的方法就是所有通道共用一个隔离电源。在这种情况下，除非您使用的是前端衰减器，否则放大器的共模范围受限于电源的供应路径。

组

另一种隔离拓扑结构包括组合或集合多个通道来实现共享单个隔离放大器。在这种拓扑结构中，通道间的共模电压差是受限的，但是通道组之间以及与测量系统非隔离部件的共模电压可能会很大。通道之间不是隔离的，但是通道组同其他组和地是隔离的。这种拓扑结构是低成本的隔离解决方案，因为这种设计共用一个隔离放大器和电源。

大多数 NI C 系列模拟输入模块都是组隔离的，如 NI 9201 和 NI 9221，可以提供成本较低的准确的模拟测量。

开始浏览您的测量工作：NI LabVIEW

一旦将传感器同测量仪器相连，就可以使用 LabVIEW 图形化编程软件对数据进行可视化处理和分析。（见下图）

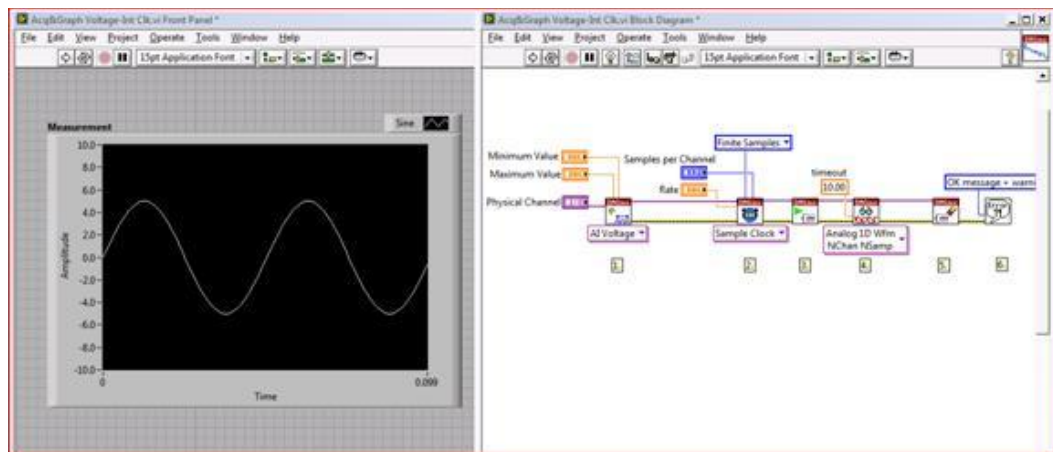


图. LabVIEW 电压测量

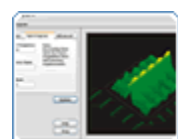
电能质量的分析

NI LabVIEW 软件内置 600 多个分析函数，用于信号生成、频率分析、概率、统计、数学运算、曲线拟合、插值、数字信号处理等等各种数据分析应用。此外，您还可以将 NI LabVIEW 扩展诸多特定的信号处理应用中，如声音与振动、机器视觉、RF/通信测量、瞬态/短时持续信号分析等等。

测量和数学分析

现代测量应用常需要进行信号采集、处理和分析。NI LabVIEW 含有超过 600 个内置函数，其功能包括：

- 从采集到的数据和单一的测量中提取信息
- 生成、修改、处理并分析信号



- 在应用程序中增添智能化及决策功能
- 执行在线和离线的信号处理和分析
- 使用通用和专用的工具及附加工具
- 创建仿真系统，以探讨设计问题或进行概念演示

令测量化繁为简

论算法有多复杂，LabVIEW 分析工具始终方便易用。超过 15 种分析 Express VI 具有交互式配置对话，通过即时预览分析结果，降低了在应用中执行测量分析的复杂程度。这些或其它[测量分析](#)工具可直接输入从数据采集硬件中获取的实际时域信号，并提供制作图表、图形或进一步信号处理所需的结果。使用以上功能，您可以轻松地确定信号的特征，如 DC/RMS 水平、总谐波失真(THD/SINAD)、频率响应和互功率谱等。



选择最恰当的方法

使用 LabVIEW，您可以在多种编程方法中选择，以实现数学、信号处理和分析。这使得您可以自由选择最适合您的应用问题的解决方案。

举例来说，您可以使用图形化数据流编程方式，它是 LabVIEW 的一个基本部分，类似方块图。如需要文本编程方式，您可以使用 MathScript，它是一个面向数学的文本编程语言，带有交互式的和可编程的接口。

如对灵活性要求较高，您还可以方便地把外部软件与您的 LabVIEW 应用程序结合使用。例如，您可以从一个 DLL 或第三方软件(如 Microsoft Excel 或 MathWorks 公司的 MATLAB 软件)环境中调用定制的信号处理或数学函数。

适用于特定应用的信号处理功能

工程师、科学家和研究人员常使用 LabVIEW 分析工具在航空、汽车、生命科学、通信、电子和半导体行业的不同领域创建测量和自动化应用程序。对于 [RF 和通信测试](#)，[声音和振动](#)，[机器视觉](#)等特定应用，您可以通过 [LabVIEW 附加工具软件](#)将 LabVIEW 扩展到这些特定的应用中。

MATLAB 是 The MathWorks, Inc.公司的注册商标。所有其他注册商标是它们各自所有者的财产。

客户案例：电能质量的实时监控与分析系统

Real-Time Monitoring and Analysis System for Power Quality

作者：

Chin Siet Choo - Ngee Ann Polytechnic
Mark Kubis - Ngee Ann Polytechnic

应用领域：

能源/电力

产品：

PXI/CompactPCI, LabVIEW

挑战：

对商业及工业设备电能质量的监控、分析及仿真

解决方案:

采用 LabVIEW 及 PXI 设计移动式功率品质测量分析系统

“结合 LabVIEW 中功能强大的分析工具及高性能的基于 Pentium 处理器的 PXI 嵌入式控制器，能够实现对频率偏移的实时控制，检测变形与尖峰。

介绍

近年来，电能质量已经成为重要焦点而越来越受到公用工程、设备、咨询工程师们的关注。现有的商业、工业设备和仪器，如数字计算机、电力电子设备及自动化设备，都对电源干扰很敏感。电源干扰发生频繁是由于不断增加的节能设备，如开关电源、变速装置转换器等。对电源干扰进行监控及数据采集实现对电能质量的研究势在必行。

为了更好地了解电能质量问题，必须有一套全面的监控及数据采集系统，籍此来描述干扰及电能质量变化。我们需要一套可配置、可编程的 PXI/CompactPCI 高性能 PC 系统，配合高速数据采集单元及软件支持来实现性能要求。

在这个项目中，我们采用美国国家仪器 PXI 硬件及 LabVIEW 图形化编程软件来设计系统。LabVIEW 中的分析及显示工具是最理想的选择。结合 LabVIEW 中功能强大的分析工具及高性能基于 Pentium 的 PXI 嵌入式控制器，能够实现对频率偏移的实时监控，检测变形与波峰。高速数据采集能够为详细的谐波、相位偏移分析及电力分析提供有效的分辨率。

硬件

系统由美国国家仪器 PXI Pentium 233 MHz 嵌入式计算机及 PXI-6070E 多功能数据采集板卡构成。我们采用 SCXI-1120 及 SCXI-1327 接线端子来将电网电压与计算机隔离开，将其衰减至能够适用于数据采集卡的电压范围，并采用电流探针来监控电流。

系统描述

我们将系统进行配置以实现以下任务：

连续事件及频率监控模式

在这一模式下，系统对电压及电流的输入采样，实现对波形失效和脉冲干扰的连续搜索，记录指定时间内的所有事件及波形的振幅偏移，并用时间戳标记。

在监控过程中，被记录的事件的状态将显示在前面板上。频率的监控由 PXI-6007E 上的计数器完成，通过测量 10 个输入信号的周期换算得到。我们还搭建了一个简单的 TTL 电路，包含施密特门、十进制计数器、触发器，它将电压信号转换成 TTL 电平，为计数器产生一个选通信号。门信号将在 10 个输入波形的周期的时间内保持开状态。之后通过 PXI-6070E 发出的数字信号使电路复位，循环进行后续的频率测量。频率的当前值会在前面板上显示。监控完成后，将显示所有被记录事件的波形，并标记时间信息。

高速电压电流采集模式

该模式下将对电压和电流的波形进行采样和保存，以供事后分析。可供用户选择的采样率决定分析结果的分辨率。在采集过程中，我们将部分采样数据显示在前面板上。采集过程采用硬件或软件触发，在电压过零点开始采样。用户提供的注释、数据、时间及采样设置将作为文件头写入每个采样数据文件。该模式下可在指定时间片内实现连续采样，也可由用户控制采样起始中止。

分析面板上具有以下功能：

- 从硬盘种选择数据文件
- 采用图表方式显示所选文件的波形
- 谐波分析 – 软件可以打开测量文件中指定周期数的数据，从而对于所有波形或者波形中的某一部分进行谐波分析，最后将结果以柱状图或文本形式显示

通常，我们采用 25 个测量周期的数据进行分析，最后能显示每个被分析周期内的总谐波失真。此外，还能在所有测量周期中选择五个谐波来观察其趋势。

- 相位偏移分析 - 可选择性地扫描测量数据文件，读取指定数量的周期，对其电压电流波形进行相位偏移计算，结果以相位-时间为坐标轴显示。
- 功率分析 - 计算并显示真实的功率因数、实际功率 (W)、表现功率 (VA) 及无功功率 (VAR)

仿真模式

软件还能够通过仿真产生电压电流输入波形。我们可以人为设置噪声、谐波、相偏参数，以及随机尖峰脉冲和失真，以此模拟随机产生的波形。在仿真模式下，将发生波形作为输入源，并可以对其进行高速数据流盘。此外还能将发生波形送入数据采集卡上的数模转换器，并对结果进行测量和分析。

结论

电力线监控系统的原型基于高性能 **PXI** 硬件来实现电压和电流波形的采集及显示，系统能够对波形的失真、脉冲干扰、频率偏移进行监控。高速数据采集卡以足够的时间分辨率采集并保存数据，并实现对于波形的后分析。**LabVIEW** 的分析工具能够方便的实现谐波、相位偏移及功率分析的算法。通过对仿真器编程产生不同负载下的典型波形来达到演示和教学目的。由于编程界面的灵活性和可扩展性，在目前的系统建模基础上还能进一步提高分析能力及功能性。

关于作者:

Chin Siet Choo – 拥有澳大利亚新南威尔士大学学士学位。目前担任新加坡义安理工学院电子工程系讲师。

Mark Kubis – 拥有波兰玛丽居里大学物理学硕士学位。目前作为新加坡义安理工学院电子工程系访问讲师，还是 NI 澳大利亚联盟计划成员。

客户案例：

基于 LabVIEW 的电能质量校验装置的开发

作者：闫华光，李华，赵莎，于海波

职务：测试工程师

公司：中国电力科学研究院

应用领域：电力行业

挑战：传统的电能质量校验设备功能固定，人工操作复杂，而且随着校准项目的增加，需要增加相关仪器；操作及数据记录都非常不便，而采用虚拟仪器技术，大大缩小了仪器硬件的成本和体积，提高校准测试的自动化水平，彻底改变传统计量单位手工测量、人工操作、人工计算的状态。

应用方案：使用 NI 的 LabVIEW 图形化开发环境、数据采集卡及 GPIB 总线构建自动化测试系统，并通过不同的软件模块实现具有多种校准功能，大大增强了系统的自动化程度、可靠性和准确性。该校准装置可完成电能质量分析测量仪器的频率偏差、交流电压有效值偏差、闪变值及谐波（间谐波）含有率等主要电能质量各项技术指标的校准工作。

使用的产品：

LabVIEW 7.0

PCI-4474 动态信号采集卡

PCI-GPIB 仪器通信接口

介绍：随着我国经济建设的发展，电力系统中的非线性负荷、冲击负荷使电网的污染日趋严重，各种类型的电能质量分析仪被投入使用。为保证这些设备测试、分析的准确，借鉴对计量器具的管理经验，对电能质量测试分析设备进行校准就显得非常必要。本文介绍了基于 LabVIEW 的电能质量校验装置的功能原理、硬件结构、测试软件的设计思想，以及应用 LabVIEW 软件的实现方法。

一、系统原理概述

系统组成原理图见图 1。其基本原

理是：由虚拟仪器测试平台通过 GPIB 卡控制任意波形发生器产生谐波信号、正弦波调制信号或方波调制信号，经电压、电流功率放大器放大到目标电压、电流值，然后由数据采集卡从放大器输出端采取信号进行分析，计算谐波幅值及电压波动量，监视信号源的变化情况。随后，将输出信号与计量标准表进行对比分析，根据分析结果对软件程序中的波形参数进行修正，从而使加载到被测设备上的信号达到某一目标精度要求。本系统以标准的插入式数据采集卡来取代传统测量仪器以完成数据采集的任务，采用 NI 高精度的动态信号采集卡 PCI 4474，进行谐波和闪变信号的采集和分析，通过 GPIB 总线对任意波形发生器、电压电流放大器进行仪器控制和数据传输，同时利用 PC 机强大的硬软件资源，由虚拟仪器软件开发平台来控制 and 协调整个系统的工作。软件操作界面见图 2。系统软件主要包括四个软件模块：①任意波形发生功能模块；②谐波功能校准测试模块：包括电力系统谐波及间谐波的产生，在谐波校准界面上，可以进行电压电流输出通道、谐波总数、谐波次数及谐波含有率的选择，用户不仅可以逐一进行单

次谐波电压和电流的校准测试，同时还可以叠加两个或三个不同次数谐波的校准测试；③闪变功能校准测试模块：包括正弦波调制信号及方波调制产生，可以进行闪变校验点的选择，产生 $P_{st}=1.00 \sim 5.00$ 的方波波动信号；④频谱分析及反馈修正模块：来监视输出信号的稳定性及准确性。

二、谐波信号产生及分析

在电力系统中，对于周期为 $T=2\pi/\omega$ 的非正弦电量，以电压 $u(t)$ 为例，在满足狄里赫利条件下，可分解为以下的傅立叶级数形式：

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

式中当 $n \geq 2$ 时， $a_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$ 为对应于 n 次的单次谐波分量。

利用 LabVIEW 软件里的 formula waveform.vi，输入谐波（间谐波）公式，则该 VI 产生谐波数据，然后将离散化的数据送入任意波形发生器，从而产生实际的谐波信号。

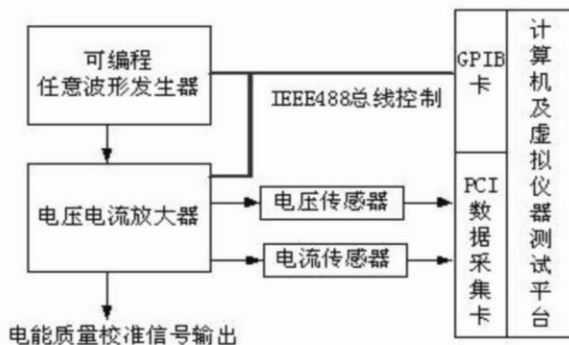


图 1 电能质量校验装置原理图



图2 软件操作界面

在进行谐波信号分析时,采用的测量算法主要是离散傅立叶变换(DFT)和快速傅立叶变换(FFT),其 n 次谐波电压向量的实部和虚部分别为:

$$u_{Rn} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right)$$

$$u_{In} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right)$$

利用上式可计算基波和各次谐波的实部和虚部,进而可以计算幅值 U_n 和相角 φ_n 。为分析每次谐波的大小,单次谐波的含有率 HRU 通常用该次谐波幅值的有效值与基波幅值的有效值之比百分比来表示,如 n 次谐波电压含有率 HRU _{n} 为:

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\%$$

谐波偏离正弦波形的程度,则以谐波畸变率 THD 来表示,它等于各次谐波有效值的平方和的平均根与基波有效值的百分比。利用 Harmonic Analysis.VI 可得到各次谐波的幅值

和相位及总谐波畸变率 THD。

三、闪变信号产生及分析

根据国家标准 GB12326—2000《电能质量—电压允许波动和闪变》和 IEC 标准 IEC868 及 IEC61000-4-15,完整的闪变仪性能校验程序包括以下两步:

①用正弦/方波调制产生的电压波动来校验闪变仪的单位视感度($P_{st}=1$)

②用方波调制产生的电压波动来校验闪变仪的短时间单位闪变曲线($P_{st}=1$)

在校验闪变仪中使用的基本电压波动的波形有两种:正弦调制波和等间距矩形(方波)调制波,调制频率范围在 0~25Hz。电压波动现象通常被看成是以工频电压为载波,其电压的幅值受到以波动分量作为调幅波的调制。对于任何波形的调幅波均可看成由各种频率分量合成的信号。但在校验电压波动闪变测量仪时所用的信号为单一频率调幅波对工频载波的调制波。闪变信号发生程序见图 3。

对于波动频率较慢的调制信号,可以用时域分析法进行分析,通过数字采样来计算一个周期的有效值,然后得出调制深度。调制深度通常由下式来计算(U_{\max} 和 U_{\min} 分别为调制电压信号中的最大及最小值):

$$\frac{\Delta U}{U} \% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{(U_{\max} + U_{\min})/2} \times 100\%$$

对于波动频率较快的调制信号,采用频域法进行分析。对于正弦波调制信号,设载波角频率为 ω_c ,

调幅信号角频率为 ω_m ,即有:

$$u_c = U_c \sin(\omega_c t)$$

$$u_m = U_m \sin(\omega_m t)$$

则正弦波幅度调制信号为:

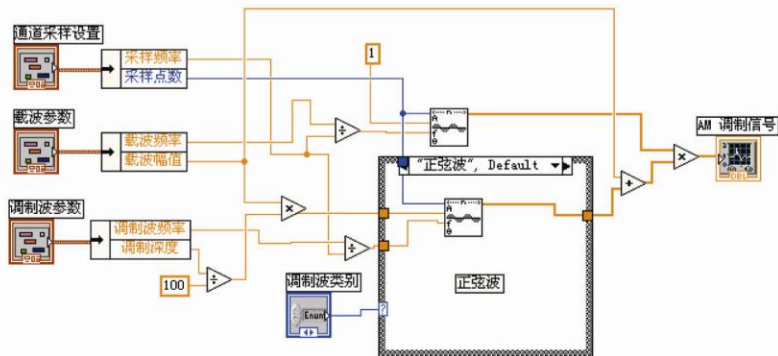


图3 闪变信号产生程序

$$\begin{aligned} u_{am} &= u_c(1 + u_m) \\ &= U_c \sin(\omega_c t) + U_m U_c \sin(\omega_m t) \sin(\omega_c t) \\ &= U_c \sin(\omega_c t) + \frac{1}{2} U_m U_c [\cos(\omega_c - \omega_m)t \\ &\quad + \cos(\omega_c + \omega_m)t] \end{aligned}$$

对于上述信号进行傅立叶变换，
可得出三个频谱分量，即可得出载波
及调幅波信号的幅值。

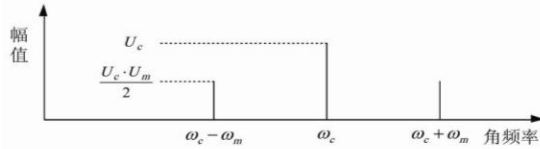


图4 正弦波幅度调制信号分析

对于方波信号，可以认为由一系列奇次谐波合成的信号。

$$\begin{aligned} u_m &= \frac{4U_m}{\pi} \left[\sin(\omega_m t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_m t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_m t) + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{k} \sin(k\omega_m t) + \dots \right] \quad k \text{ 为奇数。} \end{aligned}$$

则方波幅度调制信号为：

$$\begin{aligned} u_{am} &= u_c(1 + u_m) \\ &= U_c \sin(\omega_c t) + \frac{4U_c U_m}{\pi} [\sin(\omega_m t) \sin(\omega_c t) + \\ &\quad \frac{1}{3} \sin(3\omega_m t) \sin(\omega_c t) + \dots] \\ &= U_c \sin(\omega_c t) + \frac{2U_c U_m}{\pi} \{ [\cos(\omega_c - \omega_m)t + \\ &\quad \cos(\omega_c + \omega_m)t] + \frac{1}{3} [\cos(\omega_c - 3\omega_m)t + \cos(\omega_c + 3\omega_m)t] + \dots \} \end{aligned}$$

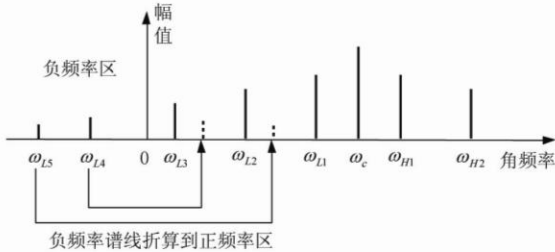


图5 方波幅度调制信号分析

假设调制频率 $\omega_m = 8\text{Hz}$ ，频谱分析
见图5，位于主频 ω_c 的右边的频谱线
有：
 $\omega_{H1} = \omega_c + \omega_m$ ， $\omega_{H2} = \omega_c + 3\omega_m$ ，

位于主频 ω_c 的左边的频谱线有：

$$\begin{aligned} \omega_{L1} &= \omega_c - \omega_m \\ \omega_{L2} &= \omega_c - 3\omega_m, \quad \omega_{L3} = \omega_c - 5\omega_m, \\ \omega_{L4} &= \omega_c - 7\omega_m, \quad \omega_{L5} = \omega_c - 9\omega_m, \end{aligned}$$

其中 ω_{L4} 、 ω_{L5} 为负频率，为计算分析方便，折算到频率正轴进行分析。
方波幅值调制的 FFT 分析有大量的频谱线，但在进行闪变分析时，只需提取其中的一条谱线和载波谱线 ω_c ，即可得出载波及调幅波信号的幅值。

四、数据采集

该装置数据采集部分采用 PCI-4474，是美国 NI 公司专用于动态信号分析的高精度数据采集卡。该卡具有 4 个伪差分模拟输入通道，每个通道最大采样率为 102.4KS/s，正负 10V 的电压输入范围，24 位采样分辨率，可以用模拟和数字两种触发方式进行数据采集。数据采集使用 AI waveform scan.VI，该 VI 可以指定的采样率从电压电流通道采集指定点数的数据。然后通过 FFT 计算对谐波及闪变信号进行频谱分析，监视源的变化情况。

五、应用 LabVIEW 开发的优点

电能质量校验装置主要对电能质量分析仪的谐波含有率、闪变、频率偏差等功能进行校准，采用传统的校准设备功能固定，人工操作复杂，而且随着校准项目的增加，需要增加相关的硬件或仪器，设备庞大，操作及数据记录都非常不便，应用虚拟仪器技术可以很好的解决这些问题，通过软件编程就可定义和实现多台仪器的功能，用软件在显示屏上生成仪器控制面板，完成多种功能的校准测试。同

时，软件采用图形化语言 LabVIEW 编程，面向测试工程师，编程方便，人机交互界面友好，并具有强大的数据可视化分析和仪器控制能力，软件内具封装好的控件和函数，简单易用，极大的提高了开发的工作效率，并使后期的系统维护和升级较为方便。

六、技术指标及精度

在进行谐波电压、电流考核时，对 2~50 次的谐波电压、电流的输出准确度及最大偏差进行多次测试和分析，得出的谐波技术指标见表 1。

表1 谐波电压电流技术指标：

谐波含有率(%)	谐波电压误差限	谐波电流误差限
20.00	0.2%U _h	0.2%I _h
10.00	0.2%U _h	0.5%I _h
5.00	0.2%U _h	0.5%I _h
3.00	0.5%U _h	1.5%I _h
1.00	0.015%U _N	0.025%I _N

七、总结

为了使电能质量校验装置产业化、实用化，电科院开发了基于虚拟仪器技术的电能质量校验装置，本装置是以 PC 机为核心组建的自动测试系统，大大增强了系统的自动化程度、可靠性和准确性。

近几年来，虚拟仪器技术在中国得到了长足的发展，在电力系统诸如电能计量、设备校验与测试、电力系统状态监控等领域也得到了广泛的应用。在专用测量系统方面，虚拟仪器的发展空间更为广阔。无所不在的计算机应用为虚拟仪器的推广提供了良好的基础。实际运行表明：采用虚拟仪器技术开发的电能质量校验装置，具有界面友好、功能强大、操作方便、运行稳定、精度高等特点，该装置的推广和使用，将极大提高电能质量分析仪的测试精度及校准水平，为电力系统电能质量的提高和改善提供准确的依据和技术保障。

III. 现场测试与环境监测

现场测试

工程师在对风电机组进行现场测试时，须使用应变计、加速计、电流和电压传感器等各种传感器，测量涡轮在运行时的载荷。现场测试监控着：电能质量与产量、结构完整性、噪音/声发射、电力输出、环境条件。

NI CompactDAQ 硬件为各种传感器提供了简单方便的即插即用 USB 连接，以及现场、生产线和工作台上的电子测量方案。NI CompactDAQ 集易用性、低价位和模块化仪器的灵活性等优点于一身，在精小便携、简单易用、低价位的系统中实现快速精确的测量应用。

NI CompactDAQ 可选方案

隔离类型

[组隔离](#)

[通道间隔离](#)

[通道-接地隔离](#)

测量类型

[基于桥路的传感器](#)

[电流](#)

[数字](#)

[IEPE 加速度传感器](#)

[RTD](#)

[电阻](#)

[热敏电阻](#)

[热电偶](#)

[电压](#)

客户案例：构建风力发电机的移动测试平台：电压跌落发生器及测量、处理、记录

Testing Wind Turbines: Control of a Mobile Voltage Dip Generator, Measurements and Data Post Processing Using NI PXI

作者：

Ana Morales - Energy To Quality S.L.

Xavier Robe - Energy To Quality S.L.

应用领域：

能源/电力

产品：

挑战：

在风电场的风力涡轮发电机满量程测试中，对中等电压跌落发生器（最高 36kV）实现绝对安全控制，能够在特定相角闭合断路器，通过特殊系统来记录信号并进行数据后处理。



解决方案:

带数据采集卡及 HV 数字输入/输出的 NI PXI/SCXI 混合机箱，配以数字保护继电器来保障安全性，通过 LabVIEW 友好的用户界面来实现控制及信号采集，调用 Matlab 函数实现后处理。

“通过 PXI 机箱传送断路器的状态，并执行用户发出的指令。如果数据通信中断或应用失效，系统将所有开关及断路器置于‘安全状态’”。

介绍:

Energy To Quality (E2Q) 公司在现场测试风力涡轮发电机方面已有 2 年多的经验。测试设备被安装在拖车中，并能够在中压电网中产生短路电路。根据电压分压器的原理，短路电路实际上由断路器激励产生。为了提供友好的用户界面，并满足用户的最新需求，最新版的电压跌落发生器通过 NI PXI/SCXI 系统来控制。在中压及高压等级上，需要考虑的首要因素是操作人员的安全性，其次是设备的安全性。

需求:

人为地在中压电网中产生短路电路有一定风险，首先要考虑的也是最重要的，就是之前提到的人员安全问题。除了设备器件的尺寸和标准测量保护之外，控制系统要求很高的可靠性，能够防止任何可能造成人员和设备损害的误操作。此外，要求友好的用户界面，能够近似实时地显示测试信号。近来，用户提出了新的控制性能需求：断路器要能够在特定相角产生电压跌落。实际上，风力涡轮发电机上安装的电力电子转换器能够在这一闭合角作相应操作，系统必须能够控制（断/通）4MV 开关及断路器，同时能够在任一时刻实现短路、通路或接地。

系统实现:

断路器的控制电压为 125Vdc，由整流器和一组备用电源提供，并且能够指示具体状态。电压和电流的测量由 110Vac 的二级电压电流变压器完成。评估各类需求，实际系统选择了 NI PXI/SCXI 机箱，它具有比标准 PXI 系统更高的输入电压。由于开关闸上将消耗很高功率，为了克服这一问题，控制断路器数字输出与可编程数字保护继电器连接，实现对中压器件的控制。PXI 的数字输出与继电器的数字输入相连。由于加入了保护继电器，NI PXI/SCXI 控制系统自身的保护功能就不需要了，因此节省下来的计算能力可用于应对第二个挑战：超高速相位角估计。这里通过 LabVIEW 编程来优化系统性能。对于需要消耗大量时间的图形化用户界面运算，在远程计算机上实现。远程计算机在拖车的安全距离之外，通过 TCP 协议与 PXI 机箱通信。PXI 机箱传送断路器的状态，并执行用户命令。如果通信中断或应用程序崩溃，系统会将所有开关及断路器置于‘安全状态’。

在新设计中，状态将显示在用户界面上，从而相对简化了对电压跌落器的操作。操作人能够通过断通键控制所有开关及断路器；程序中的互锁功能可以自动防止误操作。操作者还可以在产生电压跌落的过成中设置不同的参数，如：持续时间、有功功率范围、无功功率范围及相角等。在开始之后，系统等待状态定义，决定对断路器的断通控制。有功功率、无功功率及相角都由特定的算法实时计算得到。为实现精确地在特定相角闭合还需要相当高的采样率（几 kHz）。

同一系统同时被用于在电压跌落测试中记录信号。系统采用 IEEE COMTRADE 格式保存时间序列。后处理及报表自动生成通过于独立的 Matlab 应用程序接口而完成。测试后一分钟内就能得到结果，了解风力涡轮发电机是否根据传输网络操作者的要求，在低电压状态下运行。

结论:

移动式电压跌落发生器的控制系统已经完成现场测试与实现，与以往系统相比，它具有三大显著优势：图形化友好的用户界面、逻辑编程避免误操作、相角控制的新功能。用户能在一分钟之内得到测试结果，了解风力涡轮发电机是否满足工作要求。设计的多功能性使得控制系统能够通过简单的调整而满足今后几年内用户可能提出的性能要求。

环境监测

随着人们对环境气候变化影响的日益关注，全球各地都在致力于减少温室气体的排放量。对环境进行测量与监控的需求因而显得日益迫切。无论是监控土壤、水和空气的完整性，还是管控大型生产设备排入环境中的化学品剂量，NI 推出的软硬件工具均能帮助构建自定义系统，以满足您的监控需求。无论是在工厂车间，还是在森林冠层，工业级可编程自动化控制器 (PAC) 适合各类严酷环境，并提供数据记录、分析和测量功能。

a) 排放监控

借助 NI PAC，您不仅能够监控和记录排放数据，还能够通过其高级分析和通信功能，集成应用中的智能控制，进而提升系统的整体效能。访问 www.ni.com 了解您如何使用这些独立式发布系统，实现自动化的监控、校准和维护。

b) 水监控

NI 分布式 I/O 系统提供的水监控应用，具有工业级坚固性和灵活性，可连接任意传感器。NI 软硬件可部署于各类环境，从尘土飞扬的农田，到核电站，乃至外海。

c) 系统和过程监视

NI 工具有助于您对系统状态和过程进行监控，抵御环境危害。NI 嵌入式控制器的实时分析能力，可及时发送警告并控制险情，以防造成重大影响。

客户案例：

NI Compact RIO 模块在海洋环境多物理场测量中的应用

作者：田稷，吕俊军，张静

工作职务：工程师，主任，工程师

公司名称：大连测控技术研究所

应用领域：研究开发

挑战：随着对海洋方面研究的日趋广泛，对于海洋中各种环境物理场的关注也越来越多，这就需要对海洋环境多物理场进行全面广泛的测量，而传统的测试手段已经无法满足现在的测量需要，尤其是在需要多个环境物理场同时进行测量的时候，繁多的各物理场采集系统硬件设备大大降低了测量的灵活性以及系统的安全性和可靠性。因此，开发小型化，智能化的现代测量系统成为了一大挑战。

应用方案：采用NI公司的NI CompactRIO控制和采集系统，基于LabVIEW开发平台和LabVIEW RT实时系统，构建了一个小巧、灵活、安全可靠的海洋环境多物理场测量系统，实现对水下测量系统的控制，实时测量、结果显示并存储。该系统充分利用了LabVIEW易学易用的特点，结合NI Compact RIO灵活可靠的特性，使之能满足海洋环境多物理场测量的复杂需求。

使用的产品：

LabVIEW 8.0 图形化开发环境

LabVIEW RT LabVIEW RT(实时模块)

LabVIEW FPGA LabVIEW FPGA模块

NI cRIO-9004 嵌入式实时控制器

NI cRIO-9233 动态信号采集模块

NI cRIO-9103 可再配置嵌入式机箱

介绍：

在进行海洋环境多物理场测量时，对系统的要求是要满足多种物理场不同的参数要求，多点同测，实时便捷，灵活小巧，低功耗，布放方便。而传统的测量系统，体积庞大，灵活性差，且

操作繁琐。本系统基于LabVIEW 8.0的图形化开发环境，利用NI-Compact RIO实时采集模块开发的测试系统，不仅具备了传统海洋环境水下物理场测试系统的数据采集、传输与存储等功能模块，还可组成分布式采集系统，同时，其灵巧的外形，廉价的成本，简单灵活的操作也大大方便了测试人员的工作。

正文：

一、引言

近些年来，随着人类对于海洋开发力度的增加，关于海洋方面的研究越来越广泛深入。相应地，海洋中各种环境物理场也成为了研究关注的焦点。因为对于海洋环境物理场的了解，意味着人们可以更加熟悉海洋，利用其环境物理场的变化规律，使我们在海洋地质勘测、地震预警、海洋捕捞、石油勘探等领域，更加的方便、有效。

而随着海洋物理场水下物理场测量测试需求的增加，传统的测试手段已经无法满足现在的测量需要，繁多的各物理场采集系统硬件设备测量灵活性差，系统的安全性和可靠性低的缺点，已严重限制了在需要多个环境物理场同时进行测量中的应用。因此，对于一个小型化、智能化、布放便捷的海洋环境物理场测量系统的研究开发已经成为必需。

二、硬件系统介绍：

1. 系统总体设计思想：

本系统是基于海洋中多个环境物理场的综合测量方法。海洋环境物理场包括多种物理环境，有传统的声、以及近些年来逐渐引入的磁、电、水压，甚至于刚刚引起关注的光、荧光、地震波，各个物理场均有其特有的特性，这让现

有的水下物理场采集系统越来越无法满足测量的需要；对于海洋的环境物理场，单点的测量系统所获取的数据已经无法满足对于海洋环境物理场测量与分析的需求，而通过水下测量阵的多点探测，可以搜集到测量海域内大量的海洋环境物理场数据，为研究人员准确的确定物理场的参数提供了方便。

同时，为了预测海洋环境物理场的变化趋势，一个能够长期在水下工作的测量系统也是必须的。对于本系统的设计，需要一个多点采集阵列，通过岸上的PC机，对水下的各个采集点进行控制，各个采集点将采集到的数据通过光纤传送到岸上，进行显示和处理，基于以上几点考虑以及根据海上作业的特殊需要，我们对于本套系统提出的要求是：

(1) 智能化：灵活多样的测量方式，因为水下的多种物理场，其对采样率、采样精度的要求不同；快捷、方便的采集软件，利于程序员调试、测量人员操作；

(3) 小型化：为了方便海上实测、布放的需要，以及对于水密舱的设计需要，小型的采集系统将是我们的首选。

(2) 系统的安全、稳定性：系统可以长期、稳定的进行数据采集工作，这就要求系统水密性高，在海上要适应不同的温度条件，耐水流冲击以及布放时的冲撞，同时，长期工作时的功耗低，散热性好，能够保证系统的稳定工作。

综上所述，在对多个采集系统进行综合比较分析之后，我们选择了NI公司的NI CompactRIO控制和采集系统。该系统是一种小巧而坚固的工业化控制和采集系统，采用可重新配置I/O (reconfigurable I/O, 缩写为RIO) FPGA技术实现超高性能和可自定义功能。NI

CompactRIO 包含一个实时控制器与可重新配置的 FPGA 芯片, 适用于可靠的独立嵌入式或分布式应用系统; 其多样的热插拔工业 I/O 模块, 内置可直接和传感器/调节器连接的信号调理, 均符合大多数海洋环境物理场测量的需要; 优良的抗震耐温性能超越了老式的采集系统, 保证了测试的可靠性与安全性; 小巧的外形, 使得系统的体积大大减少, 方便了研究人员的海上布放与测量工作; 较低的功耗, 也使得系统工作的稳定性增强; 同时, NI 公司的 LabVIEW 和 LabVIEW RT 模块、LabVIEW FPGA 模块提供了良好的图形化开发环境, 利用 LabVIEW 软件, 可以快捷的设置 NI cRIO 采集模块的采集属性; 对于整个水下测量系统, 可以利用 NI cRIO 系统集成的接口设备以及便捷的软件设置, 将水下各个测量点方便的集成在一起, 并通过网络, 和岸上工作站相连。

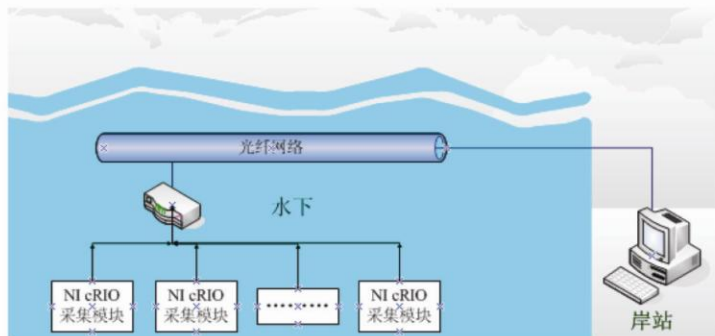


图1 海洋环境多物理场测量阵

2. 硬件简介

2.1 NI cRIO-9004 特性指标:

配置有一个串口和 10/100M 自适应以太网接口, 由此和其他设备及 PC 机连接; 工作电压范围在 11 到 30V 之间, 当有 8 个采集通道同时工作的情况下, 功耗只有 24W; 有 512M 的存储空间以及 64M 的 DRAM; LabVIEW RT 操作系统。

2.2 NI cRIO-9103 特性指标:

4 个模块插槽; 3 百万门可再配置 FPGA 系统; 196KB RAM;

2.3 cRIO-9233 特性指标:

通道数.....4 个模拟输入通道
A/D 转换精度.....24 bits
数据采样率.....2K/s~50K/s
时钟频率.....12.8MHz

3. 单个水下采集模块硬件系统架构

在多个水下物理场进行测量时, 对每个物理场的采样要求并不相同, 对于交变物理场, 可以利用 NI cRIO-9233 采集器设置采样率来采集, 采样率要求最高达到 10K, 而对于直流信号, 系统中利用单片机, 将信号采集进来, 通过 NI cRIO-9004 控制器的串口, 将数据传给上位机, 进行显示和保存。海洋环境多物理场测量阵如图 1 所示。

对于水下测量系统来说, 系统的布放是测量的一个重要组成部分, 系统布放的成功与否直接影响了测量结果以及后期的数据分析与处理, 系统在水下的姿态、位置正确, 是我们进行数据采集的保证。为此, 我们在系统中集成了姿态仪, 通过它们掌握测量系统在水下的位置以及姿态信息, 姿态信息同直流信号共用一个单片机来进行采集控制,

而数据利用串口通过单片机传送给 NI cRIO-9004, 并通过网络传送到上位机的显控界面。

单个水下采集模块硬件系统架构如图 2 所示:

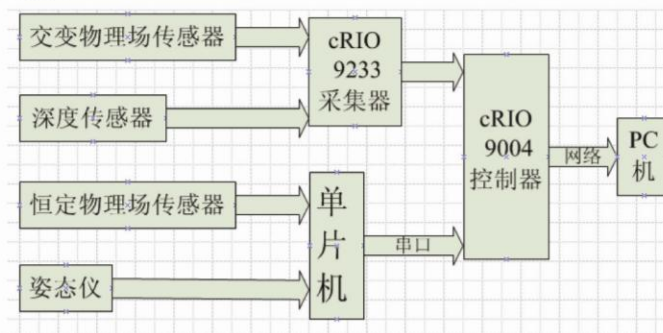


图2 采集系统框架图

三、软件系统介绍:

1. 软件简介:

软件所使用的开发平台为 NI 公司的 LabVIEW 软件。LabVIEW 是 NI 公司开发的一种目前应用最广、发展最快、功能最强的图形化开发平台。它是一种适合任何编程任务, 具有扩展函数库的通用编程环境, 定义了数据模型、结构类型和模块调用语法规则等编程语言的基本要素; 它的扩展函数库面向数据采集、GPIB 和串行仪器控制, 以及数据分析、数据显示和数据存储; 提供了与遵从 GPIB、VXI、RS-232、RS-485 协议的硬件及数据采集卡的全部功能, 还内置了 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数, 不需要编写程序代码, 而是利用编程人员熟悉的术语, 图表和概念, 来绘制程序流程图, 直观清晰, 并且包括了常用的程序调试工具, 简化了程序的开发时间和难度。

2. 编程思路说明

本系统的软件编程主要是需要实现对各个物理场采集的控制, 按需要的采样率要求进行数据采集; 将采集信号传送到上位机的用户界面上, 实时显示, 方便测试人员对测量体的布放、调试以及对目标的测量。

对于本系统来说, 工作的重点是编译各个物理场采集控制模块, 并将各采集模块同姿态仪控制模块集成在一起, 形成一个成熟的系统采集控制软件, 可以便捷的对各个采集模块进行控制, 实时的显示采集结果、存储数据, 更重要的是要让程序的采集模块之间即不相互产生冲突, 也不会因为运行速度的问题产生丢点和串道。

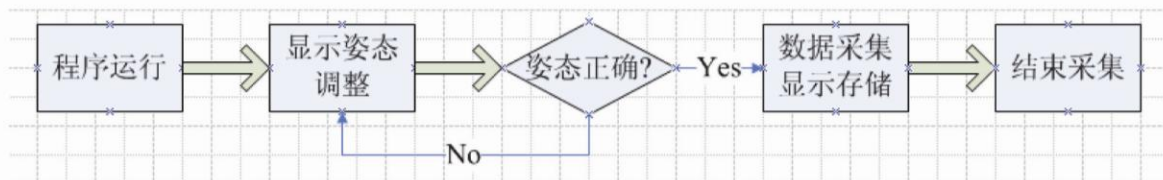


图3 程序流程图

2.1 NI cRIO-9233 控制采集部分，利用 NI cRIO-9233 采集水下物理场交变部分，软件设计的关键问题首先是要保证两个 NI cRIO-9233 的同步，这在 Project 中通过设置两个 cRIO-9233 的硬件属性，可以将两个 NI cRIO-9233 的时钟设为同步，达到要求；其次是保证信号不会产生丢点和串道，根据采样率的要求，最高要达到 10K 的采样率，选择 DMA FIFO 的方式，可以解决这个问题。采集到的数据，通过对 DMA 的读取，经过二进制到十进制的转换，进行显示和存储以及后期的数据处理。同

时，在程序中还集成了错误报警，当程序出错时，可以及时的提醒测量人员。

2.2 cRIO-9004 与单片机的串口通信

在本系统中，集成了对于海洋环境物理场直流信号的采集模块以及姿态仪与漏水报警的控制和数据采集模块，利用单片机控制各个模块的采集，将信号通过串口传给 NI cRIO-9004，并在上位机显示与存储。

姿态仪和环境物理场采集模块的工作通过上位机给单片机发送命令进行切换，方便测量人员的观测和控制，

同时，当漏水报警启动时，单片机将发送报警信号而不再发送其他信号，通过对信号的判断，进行软件报警。

在对水下测量体进行布放的时候，程序发送姿态仪工作指令给单片机，然后，读取串口数据，并按照姿态仪的数据传输格式，将从串口得到的姿态仪数据提取出来并显示，同时增加报警判断，根据需要设定姿态判断规则，当系统姿态达到一定的角度，程序开始报警。

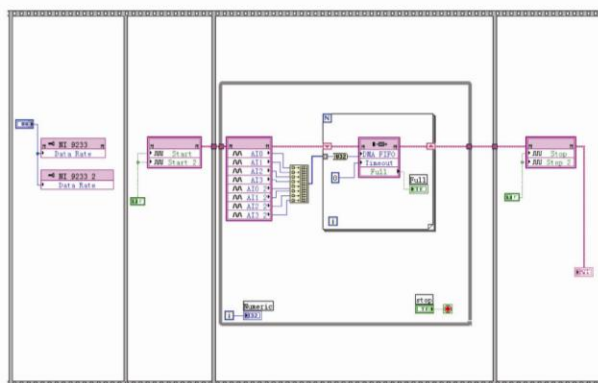


图4 FPGA.vi 的程序部分

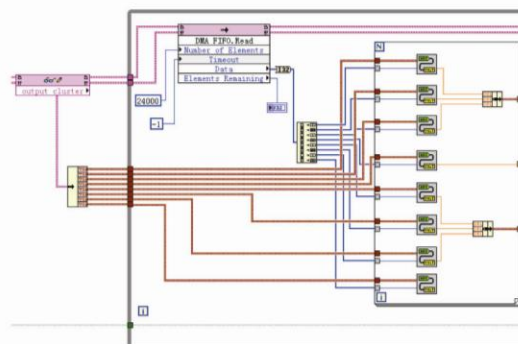


图5 上位机中DMA 的数据读取和转换



图6 姿态仪界面

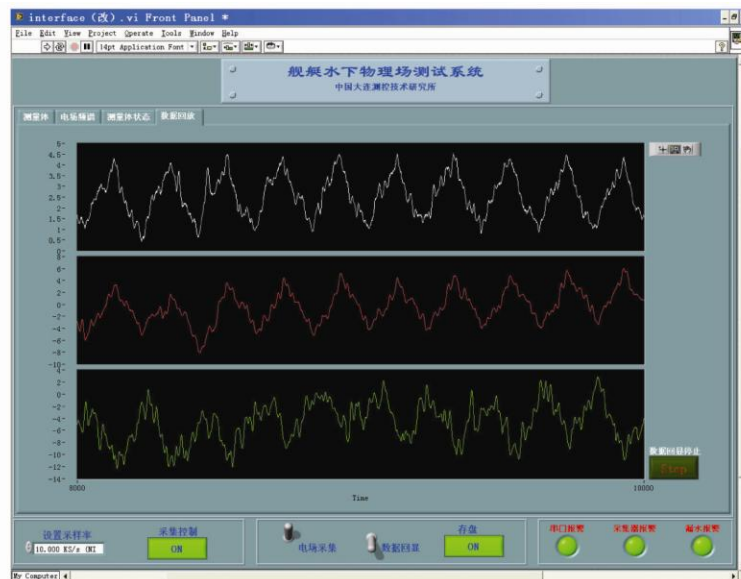


图7 数据回放界面

当水下测量体姿态稳定之后,通过程序设定的切换按钮,给单片机发送指令,结束姿态仪数据的采集并发送稳恒物理场传感器工作指令,开始稳恒物理场的数据采集,根据单片机的数据传输格式,读出串口中的字符串,并将其分解,转换为 10 进制数值,并根据规则将其换算为实际的物理量,显示出来。

四、结论

本文讨论了基于 National Instruments 公司的 NI CompactRIO 控制和采集系统和图形化的编程开发平台 LabVIEW 而构建的海洋环境多物理场测量系统。由于很好的利用了 NI CompactRIO——小巧而坚固的工业化控制和采集系统灵活,可靠等多项特性,并且结合了 LabVIEW 这一强大、高效的软件开发平台,使得整个自动化控制和采集系统能成功的应用于海洋环境多物理场的测量中,解决了传统测量系统体积庞大,灵活性差,且操作繁琐

的难题。这也使海上实验变得更加的方便、快捷和易于维护。通过已研制样机的实验,其多点同测,稳定可靠,实时便捷,灵活小巧,低功耗,布放方便等诸多优点,很好地证明了测量系统能够满足海上多种物理场实验的不同参数要求。该系统的成功开发,也展现了 NI 公司的虚拟仪器技术在测试测量领域内的良好应用前景,为今后海洋环境多物理场测量阵的研制提供了极为有力的参考。

附录:

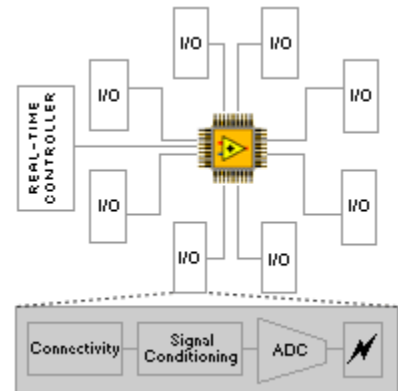
NI CompactRIO 嵌入式采集和控制系统

- 轻巧、坚固的工业控制和采集系统，符合高级工业认证/评级要求
- 基于以太网的分布式拓扑结构
- 带有实时处理器和可重新配置 FPGA 功能，用于可靠独立的嵌入式或分布式应用
- 利用 NI LabVIEW 图形化编程提供快速开发
- 基于 NI 可重新配置 I/O(RIO)技术，适于超高性能和自定义应用
- 低成本构架，可使用低层次硬件资源
- 随附热插拔工业 I/O 模块，内置信号调理功能，可直接连接传感器和激励器
- 自定义设计控制或采集电路(25 ns 定时/触发)
- 操作温度范围：-40 to 70 °C (-40 to 158 °F)
- 隔离能力高达 2,300 Vrms
- 冲击力为 50 g
- 国际安全标准、EMC 和环保证书
- 第 1 类，第 2 组危险地区等级
- 双 11-30 VDC 电源输入，小功率消耗(标准功率：7-10 W)



NI CompactRIO 是一款高级嵌入式控制和采集系统，基于 NI 可重新配置 I/O(RIO)技术。控制和采集系统厂商广泛使用现场可编程门阵列 (FPGA)设备，因为其具有性能优良、可重新配置、规格小巧和工程开发成本低等特点。如今，LabVIEW 编程人员无需掌握专门的硬件设计语言，如 VHDL，就可使用用户可编程的 FPGA 来创建高度优化的可重新配置的控制和采集系统。借助 NI CompactRIO，用户可以快速创建嵌入式控制或采集系统。该系统可与自定义设计的硬件电路在优化性能上相媲美。

NI CompactRIO 不仅具备实时嵌入式处理器的低功率能耗功能，还兼有 RIO FPGA 芯片集的优越性能。RIO 核心具有内置式数据传输机制，可将数据传输到嵌入式处理器，用于实时分析、事后处理、数据记录或与联网主机通信。借助 LabVIEW FPGA 的基本 I/O 功能，CompactRIO 可将硬件与每个 I/O 模块的 I/O 电路直接连接。每个 I/O 模块具有内置式连接、信号调理、转换电路（如 ADC 或 DAC）以及可选的隔离屏障等功能。构建成本低，可使用低层次硬件资源。



I/O 模块

每个 CompactRIO I/O 模块都具有内置式信号调理功能，包含螺栓端子、BNC 或 DSUB 连接器。通过在模块上集成接线盒，CompactRIO 系统大大降低了空间需求和现场布线成本。有各种 I/O 类型可供选择，如 ± 80 mV 热电偶输入、 ± 10 V 同步采样模拟输入/输出、配有 1A 电流驱动的 24V 工业数字 I/O、用于编码器的 5V 调节电源输出的差分/TTL 数字输入以及 250 Vrm 通用数字输入等。该模块的内置信号调理功能扩展了电压范围或工业信号类型，因而可将 CompactRIO 模块直接与传感器和激励器相连。

实时处理器

CompactRIO 嵌入式系统包含一款工业 200 MHz Pentium 类处理器，用于可靠确定地执行 LabVIEW Real-

Time 应用程序。内置 LabVIEW 功能有千余种，可用于创建多线程嵌入式系统，使之具有实时控制、分析、数据记录 and 通信等功能。

性能

FPGA 电路是一款具有并行处理能力、可重新配置的计算引擎，可在芯片的硅电路中执行 LabVIEW 应用程序。使用嵌入式 RIO FPGA 硬件，您可以超过 100 kS/s 的循环速率运行多循环 PID 控制系统。还可以高达 1 MS/s 的循环速率运行数字控制系统，以 40 MHz (25 ns) 的单周期循环速率评估多个 Boolean 逻辑。RIO 核心具有并行处理能力，因此增加运算不会降低 FPGA 应用程序的运行速度。CompactRIO 具有 4 个 8 槽机箱，可在 1 百万到 3 百万门 FPGA 芯片内选择。

尺寸和重量

尺寸、重量和 I/O 通道密度严格按照同类嵌入式应用要求设计。一款 4 槽可重新配置嵌入式系统的规格是 179.6×88.1×88.1 mm (7.07×3.47×3.47 in.)，重 1.58 kg(3.47 lb)。一款配有 32 通道 I/O 模块的 8 槽机箱可承载最大通道数为 9.7 g/ch(0.34 oz/ch)，通道数体积为 8.2 cm³/通道(0.50 in³/ch)。

应用范例

CompactRIO 具有成本低、可靠性强、适于高容量嵌入式测量和控制应用等特点，为大量工业和应用难题提供了解决方案。范例涉及重工业机器控制、车载数据采集、机器状态监测和快速控制成型。

- 批量控制
- 离散控制
- 运动控制
- 车载数据采集
- 机器状态监测
- 快速控制原型化
- 工业控制和采集
- 分布式数据采集和控制
- 移动式/便携式噪音、振动和粗糙程度(NVH)分析

CompactRIO 平台有两种配置选择:

可重新配置的嵌入式系统具有两种配置：模块化配置和集成化配置。在模块化配置中，嵌入式控制器的机箱包含 FPGA，并能单独出售。模块化配置提供最为灵活的系统配置和性能选择。集成化配置将控制器和包含 FPGA 的机箱都结合在一个单元里。该配置具备优异的系统性能，是高容量应用的理想选择。