

基于 CompactRIO 的风力发电机健康监测平台的开发

吴建新 阎石 孙威 刘亚丁

沈阳建筑大学

应用领域：结构健康监测、多物理量数据采集等

挑战：众所周知，土木工程中的建筑安全问题一直是人们所关心的热点问题，其安全性直接关系到人的生命和财产安全。而结构健康监测系统则可以实时采集反应结构服役状况的相关数据，同时采用一定的损伤识别算法判断损伤的位置与程度，进而及时有效地评估结构的安全性，并对突发事件进行预警，因而可以有效地保障土木工程结构的建造和服役安全。然而，面对复杂恶劣的建筑环境，如何能够有效地确保健康监测系统准确可靠地运行，这对健康监测平台硬件的坚固性、可靠性以及便携性都提出的很高的要求。

应用方案：基于美国 NI 公司 CompactRIO 9074 嵌入式平台和 NI 9221、NI 9263、NI 9234 以及图形化编程软件 LabVIEW 等软硬件，开发了可实现对风力发电机基础的裂缝、压力以及风机塔架的振动进行健康监测的系统平台。通过在国电和风铁岭风机新建工程中风机健康监测项目的应用，对风力发电机的健康状态进行监测，同时也为实际工程的设计与施工提供指导与借鉴。

使用产品：

NI LabVIEW 2010 专业开发版

NI LabVIEW 2010 RT 模块

NI LabVIEW 2010 FPGA 模块

NI CompactRIO 9074 可重配置嵌入式机箱和智能实时控制器

NI 9221 8 通道大电压模拟输入模块

NI 9263 4 通道中电压模拟输出模块

NI 9234 4 通道 IEPE 输入模块

正文：

1、引言

风力发电是当前可再生能源中仅次于水力发电的技术最成熟、最具规模化开发的发电方式之一。我国的风能资源丰富，具有良好的开发前景。近年来随着国家政策的扶持、风机价格的降低与风电技术的逐步完善，风力发电得到了迅猛发展。在其漫长的服役过程中，风力发电机结构自身将不可避免的发生材料老化和徐变。同时，由于风机长期暴露于自然环境之中，往往受到不可抗力的自然灾害（如地震、洪水、飓风等）作用，这些内外各种因素的综合作用下，将不可避免地导致风机结构发生局部破坏。当损伤累积到一定程度时，甚至会导致整个结构的破坏，进而造成大量的人员及财产损失。

所以，如果能够通过一定的手段获取反应混凝土结构服役状况的相关数据（如应力、应变、温度、加速度以及裂缝的发展状况等），结合相应的损伤识别算法判断结构损伤程度，及时有效地评结构的安全性，并能够在结构出现损伤时就能对结构的损伤进行预警，就可以避免大量的人员及财产损失。结构健康监测作为一种能够通过获取结构的相关信息，及时发现结构的损伤，进而向用户做出安全预警的技术，是近年来土木工程领域的研究热点之一，故将结构健康监测技术应用到风机结构中有重大的现实意义及经济价值。

2、风机健康监测项目背景与监测目标

2.1 项目背景

国电铁岭开发区风电场新建工程位于辽宁省铁岭境内，装机容量为 49.5MW，拥有 33 台 1.5MW 风力发电机组。本工程风力发电机组采用国电联合动力技术有限公司制造的 UP82/1500 型 IIIA，轮毂高度 65m，叶轮直径 82.76m，如图 1 所示。该场地环绕八家子分布，地势较起伏，各个风机位主要位于丘陵的低山山头上如图 2 所示。地貌上属于丘陵地带，风机基础持力层为中风化花岗岩，开挖困难。



图 1 风力发电机



图 2 风机现场地貌

该工程的特点是在国内首次将岩石锚杆基础应用到风机基础结构中，该项技术的实施

将带来很好的经济效益与社会效益。然而，由于工作环境的复杂性、荷载的不确定性、基础工程材料性能的时变性等，需要对部分具有代表性的风机基础在使用期限内的健康状态进行有效监测，把握基础工程的性能状态，并掌握科学的数据，为该技术在全国范围内的推广奠定基础。本课题组基于美国国家仪器公司的 CompactRIO 嵌入式平台开发了一套健康监测系统。

2.2 监测目标

(1) 应力监测

利用力传感器实现对风机基础的混凝土应力状态的实时在线监测，为评估风机混凝土基础的承载力提供依据。

(2) 裂缝监测

利用压电智能骨料传感器实现对混凝土结构内部裂缝的发生与发展进行状态监测。

(3) 振动监测

通过加速度传感器获取风机结构的振动信息，对风机的验证风力机性能，可进一步优化产品设计。同时，在风力发电系统运行过程中实时在线监测振动并发送检测信息，根据相关信息可有效地控制风机的工作转态，从而有效的避免由于共振而造成的结构失效，并对超过一定幅度的振动进行安全预警。

3、风机健康监测平台的总体设计

系统的总体结构设计分为硬件配置和软件设计两部分，主要功能模块有主动监测模块、被动监测模块和加速度监测模块。系统总体设计方案的工作流程图（如图 3）和人机交互界面（如图 4）。

系统的硬件配置主要有传感器选择、数据采集仪器及其他附属设备。传感器选择的主要有压电智能骨料既作传感器又做驱动器，压电式加速度传感器。数据采集仪器以美国 NI 公司生产的 CompactRIO 嵌入式平台以及 NI 9263、NI 9221 和 NI 9234 等。其他附属设备有压电陶瓷驱动电源、电荷放大器、UPS 电源等。

系统的软件设计主要是基于 LabVIEW 图形化编程环境，选用美国 NI 公司开发的 LabVIEW 2010 开发软件和 LabVIEW RT 2010 工具包、LabVIEW FPGA 2010 工具包等开发配套模块的程序代码。主动监测模块可实现信号的发射、采集以及实时在线处理，裂缝的损伤识别和声光预警等；被动监测模块可实时采集结构的动态响应并进行一系列数据处理；加速度采集模块可实时对结构的加速度信号进行采集、滤波、频谱分析等。

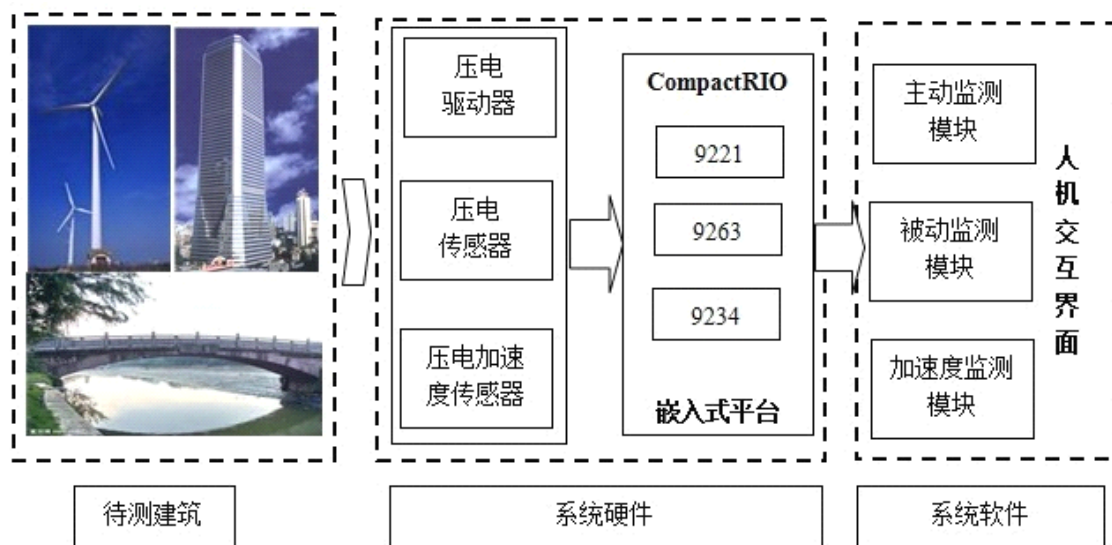


图 3 系统的工作流程图



图 4 人机交互界面

4、风机健康监测平台的软件设计

本系统的软件部分是采用模块化设计，其主要优点是便于后期根据实际的需要进行系统扩展。按各功能模块的作用不同具体分为主动监测模块、被动监测模块、加速度监测模块。

4.1 主动监测模块

本模块软件功能主要可实现信号发射与采集、信号处理分析、损伤识别、状态评估与安全预警和数据存储。人机交互界面如图 5 所示。其工作流程：首先，根据实际需要选择监测信号，本模块可提供扫频波和正弦波脉冲信号两种信号。由程序控制 CompactRIO 嵌入式平台和板卡 NI-9263 发射信号，NI-9221 采集信号。将实时采集原始信号进行滤波消噪，经预处理后进入损伤识别程序，采用基于能量衰减的损伤识别算法对结构裂缝损伤进

行判定，并绘制能量值历史曲线从宏观上对结构的健康状态进行表征。最后系统自动将损伤指数与相应阈值比较，从而对结构的健康状态实现声光预警。

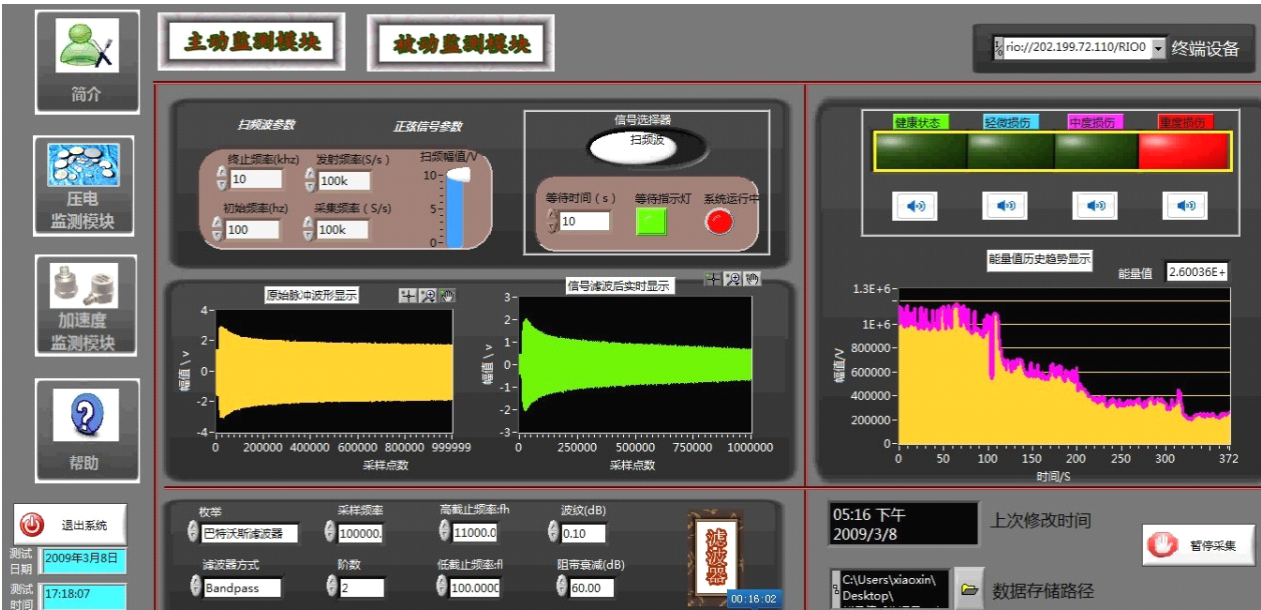


图 5 主动监测模块人机交互界面

1) 信号发射与采集程序设计

目前用于工程上的信号类型主要有：周期信号、脉冲信号、扫频信号以及随机信号等。根据实际频率、幅值、相位的不同，每个信号类型又变得多种多样。理论上，选取形式简单、信息丰富的信号对后期的数据处理和敏感信息的提取上有很大的好处。但是，由于不同的结构和材质中不同类型的信号对结构损伤的敏感性也不同，所以，具体的信号选取要是具体的情况而定，往往敏感信号的确定需要进行大量的试验验证才能确定。

综合各种信号的利弊，本系统可提供正弦信号和扫频信号作为监测信号，可根据实际情况进行选择。扫频信号的频率范围确定为 100Hz-10kHz，本系统的信号发射是基于 CompactRIO 平台利用可编程的 FPGA 技术实现的。在 LabVIEW 软件中的 FPGA 模块中为用户提供了丰富的函数代码，可为用户提供数学运算、控制等程序的编写。

2) 数据处理和分析

数据处理与分析模块主要实现的是对采集到的原始信号进行滤波消噪处理，并根据实际需要进行进一步的时域，频域或时频分析。本模块的设计流程图如图 6 所示。首先需要对采集的信号通过数据采集系统转化为电压信号输出，初步判断信号是否正常，若正常则根据需要对信号进行滤波消噪处理，若不正常则重新采集。之后对处理后的信号进行时域或频率分析获取有效地信息。

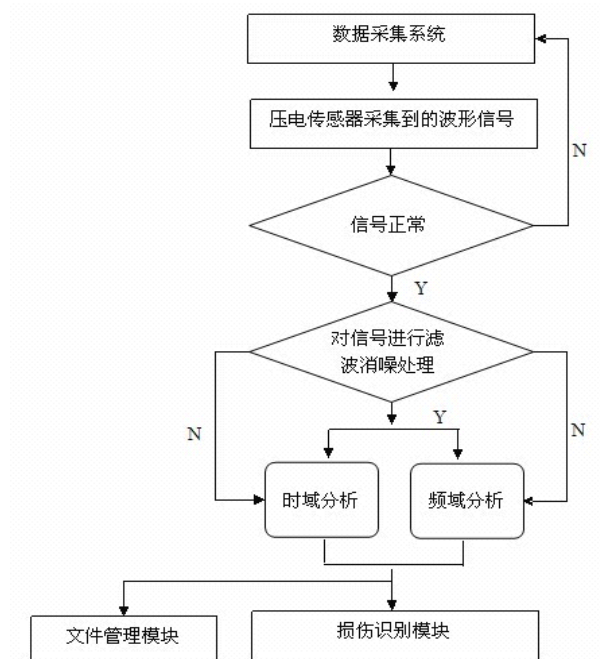


图 6 数据处理与分析模块工作流程图

3) 损伤识别与安全预警

在真正的结构健康监测系统中，往往要求损伤识别与安全预警是实时、在线和连续的。对于一个结构，如果我们想要掌握何时结构发生初始损伤，何时结构达到正常极限状态，何时超越承载能力极限状态，这些都需要我们对结构的损伤指数做一个较准确性的标定。当损伤指数超越一定的安全阈值时，即可通过声、光等形式向用户进行安全报警。本系统则通过对损伤指数的定义，利用程序自动进行损伤识别，对结构的不同状态实现声、光预警，最后通过能量值历史曲线对结构的裂缝整体发展趋势做出预测。流程图如图 7 所示。

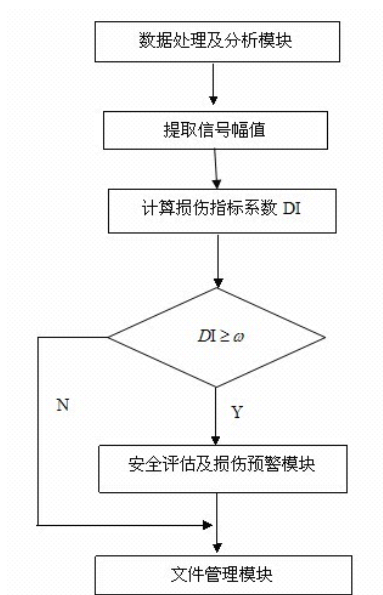


图 7 损伤识别及安全预警工作流程图

4.2 被动监测模块

本模块则是在主动监测模块的基础上进行开发。当需要对结构进行被动监测时，关闭系统的信号激励源，将压电智能骨料作为传感器，实时的采集结构的相关物理量。人机交互界面如图 8 所示。相对于主动监测模块，被动监测模块无论从设备还是软件上都相对来说有很大的简化。由于其无需激励源，其构成主要有传感器，数据采集系统构成。

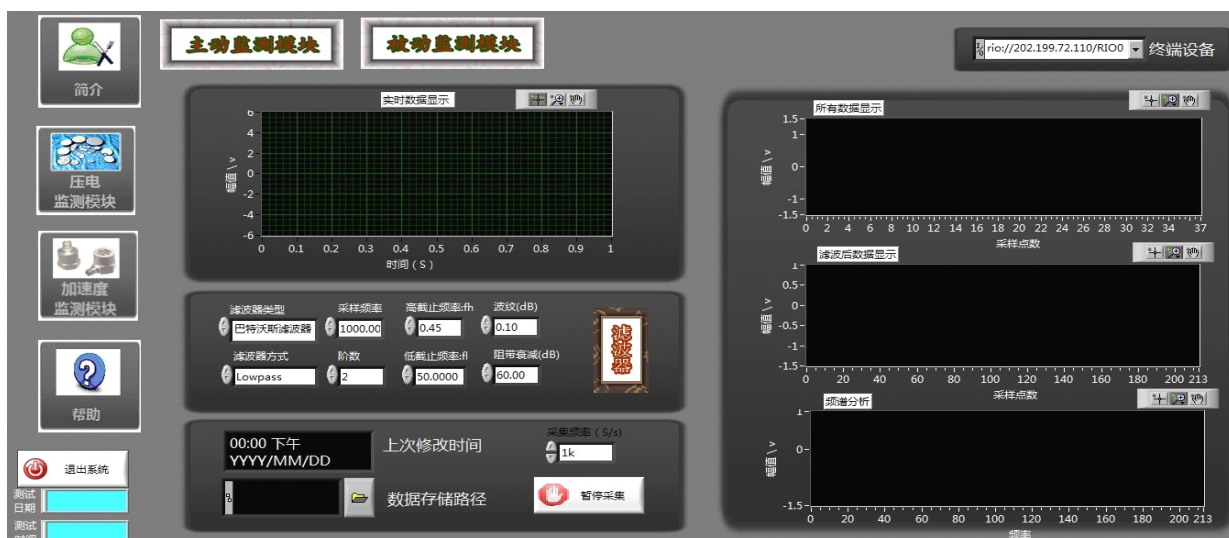


图 8 被动监测模块人机交互界面

在实际工程中，数据采集系统往往采集的是电压信号，所以一般需要将压电力传感器输出的电荷信号经电荷放大器转化为电压信号，再通过数据采集系统建立电压变化量与压力变化量的关系，则可实现对压力的采集。其工作流程图如图 9 所示。

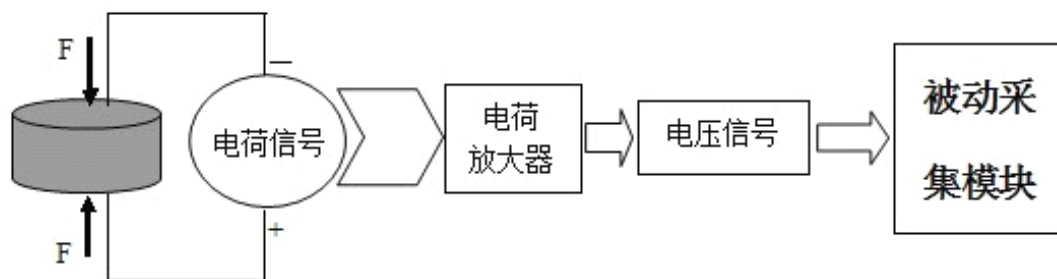


图 9 压电力传感器工作流程图

4.3 加速度监测模块

本模块主要是利用加速度传感器获取建筑结构在风、地震等荷载作用下的动态响应信号，以此为研究结构抗震、减振以及结构健康监测提供技术支持。主要构成有：加速度传感器、信号调理器、数据采集平台（CompactRIO 嵌入式平台和 NI 9234 模块）、上位机控制模块。

系统正常工作首先需要将传感器模块根据测量需要布置在结构上，再经信号调理器供电使传感器正常工作，同时也将传感器获取的信号转化为电压信号输入到数据采集模块。上位机控制模块则控制数据采集平台进行数据的采集和相关数据分析处理。系统工作流程

图如图 10 所示。

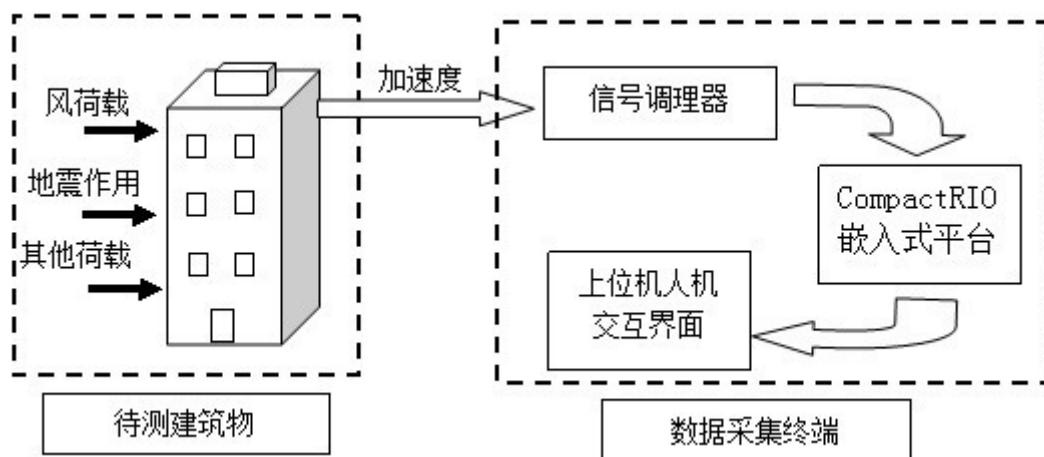


图 10 加速度监测模块工作流程图

本模块可以实现四通道数据实时采集，滤波处理，频谱分析、数据存储等功能，并且可进行峰值监测，当加速度超过一定阈值时，实现声光预警。在后期也可根据用户需要对其功能进行添加和修改。人机交互界面部分界面如图 11 所示。

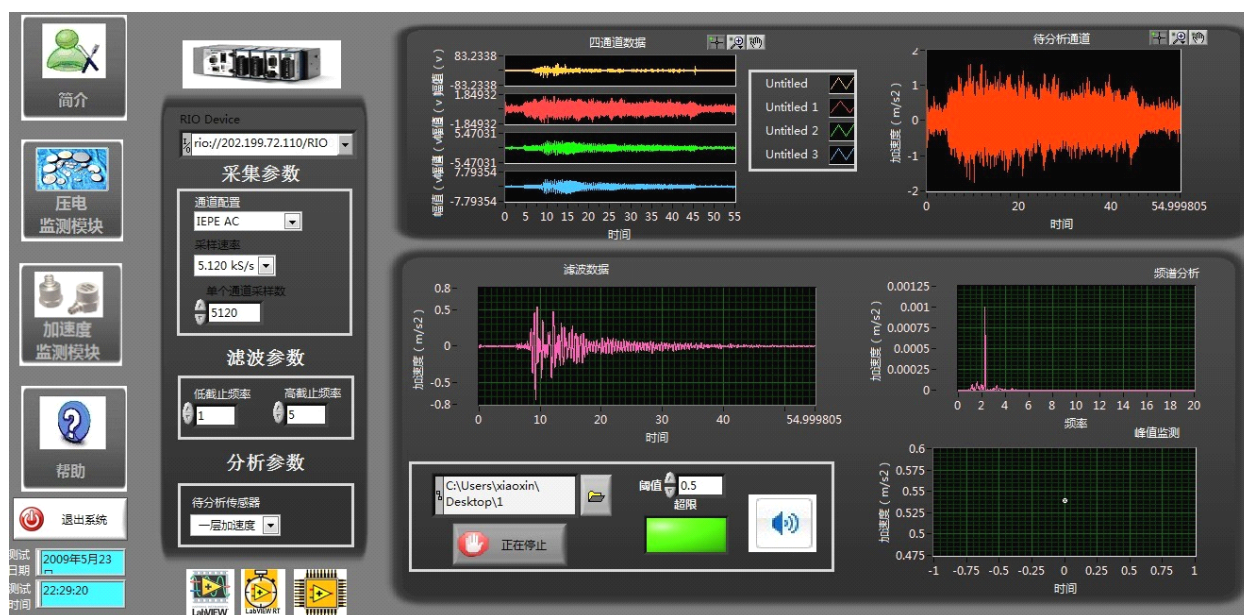
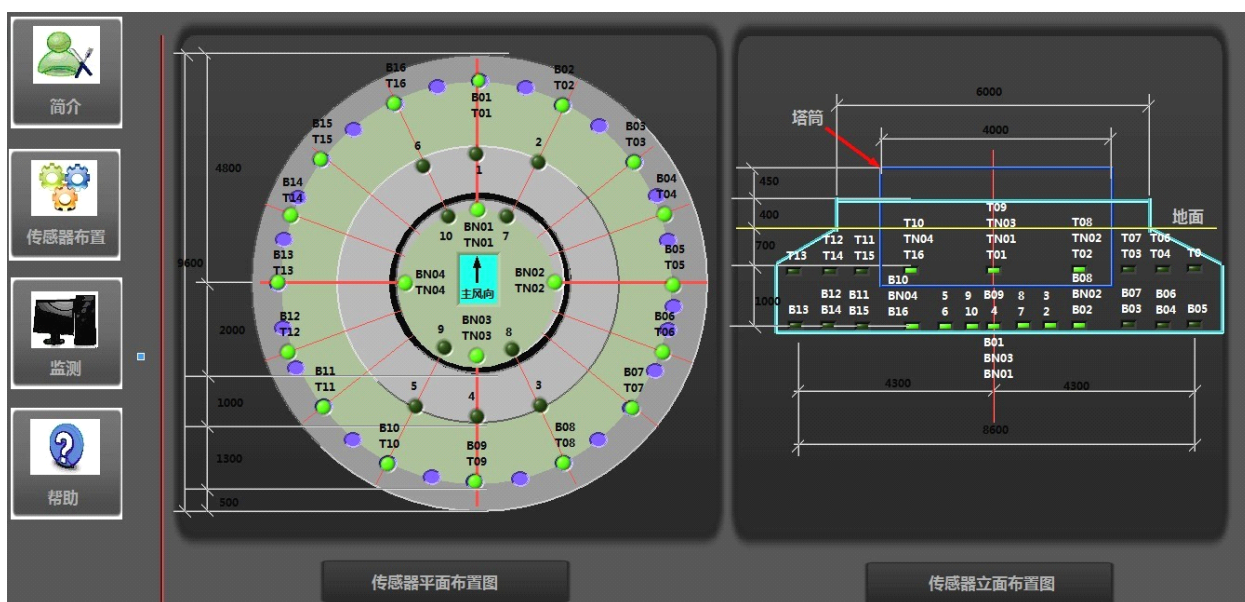


图 11 加速度监测模块人机交互界面

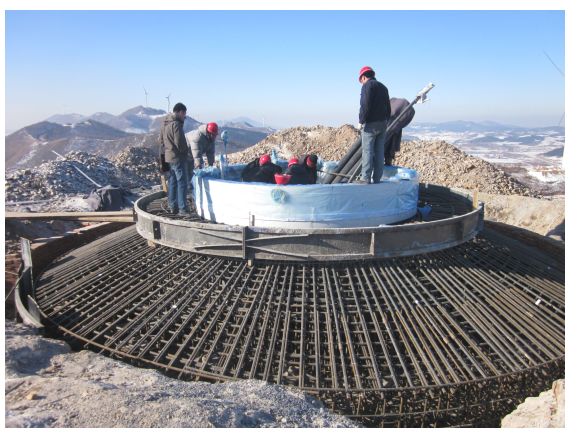
5、风机健康监测平台的现场应用

5.1 传感器的布置

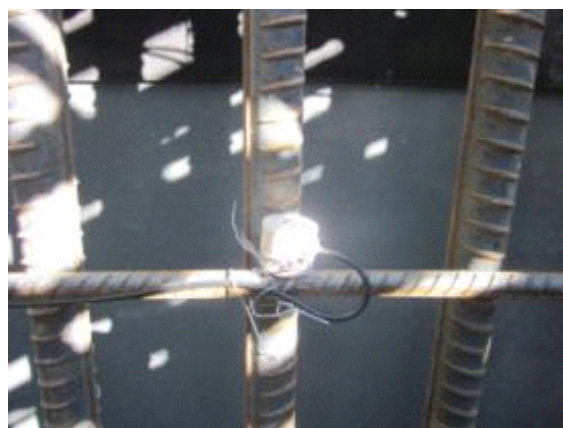
为了能够较准确地获取基础底部的受力状态，本方案中传感器的水平布置采用基底四周均匀布置，分内外两层，同时在主风向进行加密。竖向分两层布置，高度分别为-1.6m和-0.8m。具体布置详图如图 12 所示。



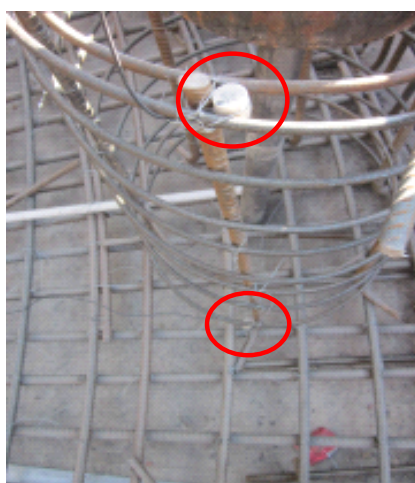
(a) 风机基础内部传感器布置方案图



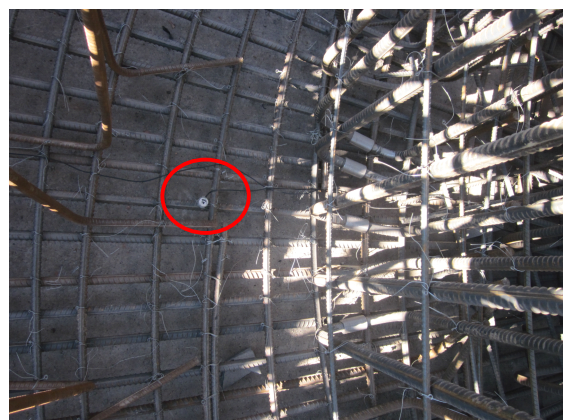
(b) 风机基础现场



(c) TN (-0.8m) 处传感器



(d) B/T (-1.6m/-0.8m) 处传感器



(e) 加密区 (-1.6m) 处传感器

图 12 传感器现场布置图

5.2 现场测试



图 13 风机场区



图 14 CompactRIO 数据采集平台

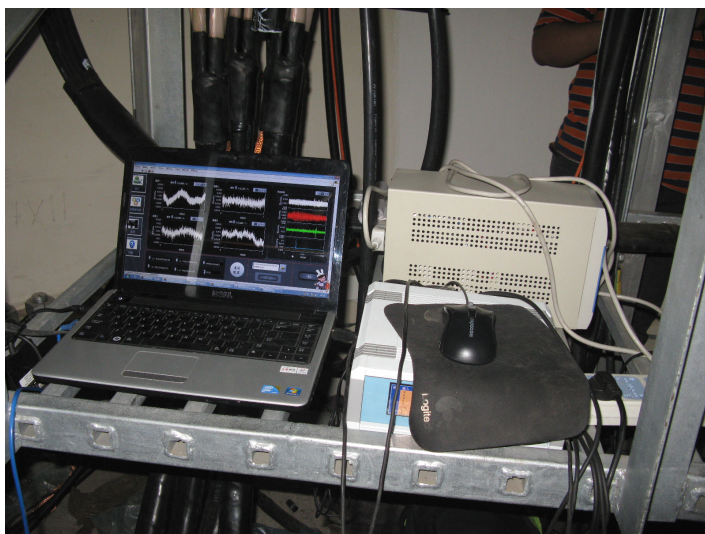


图 15 现场监测

6、结论

在 NI Labview 软件和 CompactRIO 嵌入式平台下，我们团队在很短的时间里，完成了结构健康监测系统的开发以及调试。对于土木工程学科的我们，Labview 图形化编程语言弥补了对以往对传统编程所需代码语言学习所耗费的大量时间，使得无论是工程技术人员还是高校教师学生都很容易上手。同时 CompactRIO 嵌入式平台的小巧坚固特性，完全解决了建筑现场的恶劣复杂的环境，基于此所开发的健康监测系统既便携有坚固可靠，实现了固定式健康监测系统到便携式健康监测系统的跨越。

最终通过我们的努力，在对我们课题组以前的压电智能结构研究的基础上，将其与所开发的健康监测系统相结合，通过现场测试，可以很好的对结构的裂缝损伤、振动、压力等信息进行实时在线的损伤识别与安全预警。完全实现了现代智能建筑结构与健康监测系统的融合，也为压电智能结构的普及做了很好的铺垫。

本系统将 NI 产品的灵活、坚固、便携的特点与压电智能结构的智能性相结合，为未来健康监测系统的普及起了很好的示范作用。通过在风力发电机健康监测项目中的应用，有效的证明了 CompactRIO 嵌入式平台在结构健康监测领域广泛的应用前景和巨大的经济价值。