

基于 CompactRIO 的变压器直流偏磁监测系统

刘闯

上海电力公司电力科学研究院

摘要：高压直流系统单极大地回线运行时，对于同一地区的交流系统可能产生影响，两个处于不同直流电位的变电站经输电线路构成回路，将有直流电流流到变压器中性点和变压器绕组。变压器会出现直流偏磁现象，造成变压器噪声增大，振动加剧等。上海电网是典型的多端直流和多馈入直流系统，已有多个直流接地极投入运行，变压器的直流偏磁影响已经显现，对变压器的危害是长期的，而目前还没有一套行之有效的质量检验方法。因此有必要建立一套有效的变压器直流偏磁的实时监测系统。本文提出了一整套基于 NI 公司 CompactRIO 的全自动、高精度、实时变压器直流偏磁监测系统。

关键词：变压器；中性点；直流偏磁；电流检测；振动检测；加速度

作者简介：刘 闯(1987-)，男，硕士，工程师，主要研究电力设备在线监测。

中图分类号：TM721.1

文献标识码：A

DC Bias Monitoring System of Power Transformer Based on CompactRIO

LIU Chuang

(Institute of Electric Power Science Research, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: When the single earth-return line of HVDC (High voltage direct current) system is functioning, the AC system in the same area will probably be influenced. Because two converting station at different DC potential constitute a loop via transmission line, causing certain direct current moving into the transformer neutral point and winding. The transformer DC magnetic biasing phenomenon will appear, leading increased noise and vibration of transformer. Shanghai grid is the typical multi-DC and multi-infeed HVDC system, with several DC grounding-electrodes in service. The influence of transformer DC magnetic biasing already exists and will do harm to transformers in a long term, while there's no set of effective quality inspection method. Therefore, it is necessary to establish a set of real-time monitoring system for transformer DC magnetic biasing. In this paper, a set of automatic, high-accuracy and real-time monitoring system designing scheme is proposed. The monitoring system can display the amplitude and polarity of main transformer's neutral point direct current, and the amplitude changes of vibration. It can also show the relationship between the distribution rule of main transformer's neutral point direct current and the amplitude of vibration, providing the basis for judging the degree of transformer DC magnetic biasing.

Key words: power transformer; neutral point; DC bias; current detection; vibration detection; acceleration

题记：项目开发不能只凭借着一时的头脑发热，而是正确的方法和大量时间的投入，最为重要的是设计一个易于开发、实现的方案。做实际的装置与科研不同之处就在于必须要考虑很多实际的问题，不仅要考虑性能，还要考虑到所选择的材料是否易于购买，及配货周期，大量地与多个厂家沟通、协调。另外，还是要

根据公司的特点设计方案，不同于外企研究院，专门有工程部门配合研究人员推进产品的开发，作为以科技报告为主要产出的电科院，并不开发相关的装置和产品，这就缺少相应的支撑部门和人员，所需要做的就是掌握核心技术，具有复制、修改的能力，完全拥有自主知识产权，具体的实现细节并不是重点。根据上述的分析，NI 公司的产品最适合本文监测设备的开发，NI 公司的硬件产品性能优良、完善，而且与开发软件 LabVIEW 集成度高，这就将工作量集中到 LabVIEW 程序开发中，极大地简化了工作量，也让本次项目开发的最终完成有了可能。确定了 NI 产品组成的方案后，很方便在 NI 的官方网站上下载一个有相关性的例程，在 NI 产品的采购过程中，NI 公司热情地提供了产品试用的机会，很方便就可以进行验证方案的试验，证明了方案的可行性，下面的过程就是不断地优化、完善，工作方向和思路明确，可保证不会白白浪费时间。

应用领域： 电力设备诊断、远程数据监测、分布式数据采集

挑战： 本监测系统的目标是：变压器中性点电流和变压器箱体的振动，振动通过检测加速度来反应。电流检测的难点：测量的电流范围大，而且要保证整个测量范围内的相对精度，需要多个量程霍尔电流传感器配合检测。加速度检测的难点：加速度传感器采用压电式的 IEPE 传感器，采集卡需要提供恒流源激励；要求可扩展到多个加速度传感器测量点，采样端口多，最高达到 24 个；采样速率要求高，需达到 50kHz 及以上；采样的数据量大，通信的信息量大；所采集的数据存储也较为困难，为了方便查询，数据存储的格式需要特别设计。

应用方案： 本方案在吸取当下的直流监测系统优点的同时，还考虑直流偏磁对变压器影响即增加了振动的监测，通过同时监测主变中性点直流电流和变压器的振动，实时掌握变压器发生直流偏磁的情况。本方案提出的监测系统是一整套全自动、高精度、实时监测系统，能实时显示主变中性点直流电流幅值和极性，及振动的幅值变化，能清晰地显示各变电站主变中性点直流电流的分布规律及与振动大小的关系，为判断变压器直流偏磁的程度提供依据。直流电流的监测方案已很成熟，主要考虑的是所要求的大范围内保证精度的要求；再根据上述分析的

加速度检测方案，考虑到还需要开发监测台 PC 的界面，选择基于 Labview 的开发平台，可直接使用该软件开发 PC 界面，将数据通过光纤以太网传输到监测台 PC。本项目的核心在于将众多 IEPE 采集卡端口与电流采集端口集成到一个平台，对这些信号进行分析和处理，IEPE 采集卡端口可根据测试点的数量选择。

使用的产品：

LabVIEW 8.6.1 软件开发平台

LabVIEW RT 8.6.1 实时模块

LabVIEW FPGA 8.6.1 工具包

LabVIEW Sound and Vibration 7.0 工具包

LabVIEW Database Conectivity 1.0.2 工具包

CompactRIO-9014 嵌入式控制器

CompactRIO-9114 可重新配置嵌入式机箱

Compact-9239 高速电压信号隔离采集模块

Compact-9234 IEPE 专用采集模块

Compact-9401 高速 TTL 双向数字 I/O 模块

正文：

一、 引言

上海电网长期供不应求、电力不足，已经发展成为典型的受端电网。目前已经投运两条 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电工程。上海电网将成为典型的多端直流和多馈入直流系统，将有多个直流接地极投入运行。高压直流系统单极大地回线运行时，巨大的直流电流经直流接地极流入大地，并在较大范围内造成地电位的明显变化。这种地电位的变化，对于同一地区的交流系统可能产生影响。两个处于不同直流电位的变电站经输电线路构成回路，会产生直流电流通过变压器中性点和变压器绕组。使得变压器出现直流偏磁现象，造成变压器噪声增大，振动加剧等^{[1][2][3]}。

上海电网中，以上影响已经显现，如 220kV 干练站的主变中性点电流超过 44.5A，并产生达 94dB 以上的噪声；葛南线直流单极运行时造成附近 220kV 银河、目华站主变噪声明显增大等。直流偏磁对变压器的危害是长期的，目前变压器生产厂家对承受直流偏磁的变压器长期运行的可靠性不做保证，并且没有一套行之有效的质量检验方法。因此非常有必要建立一套有效的实时监测系统^{[4][5]}。

二、 变压器直流偏磁监测系统组成

变压器对于一个变电站至关重要，是变电站中主要组成部分，是核心部件，每个变电站中变压器的正常运行就显得至关重要。

变压器直流监测组成框图如图 1 所示，它主要由五部分组成：(1)变压器中性点霍尔电流传感器(CT)和振动传感器；(2)实时采集设备，实时采集 CT 和振动传感器监测到的信号，并进行相应的算法；(3)无线通讯设备，将实时采集设备与控制器的监测 PC 相连；(4)控制室的监测 PC 可以通过无线通讯接收实时采集设备监测到的数据，并可改变采集的参数；(5)各变电站的监测 PC 通过市公司在变电站中铺设的光纤网进行数据传输和汇总，在远程状态监测中心（如电科院）可以查看监测的各个变电站直流偏磁情况，并可对监测设备进行控制。

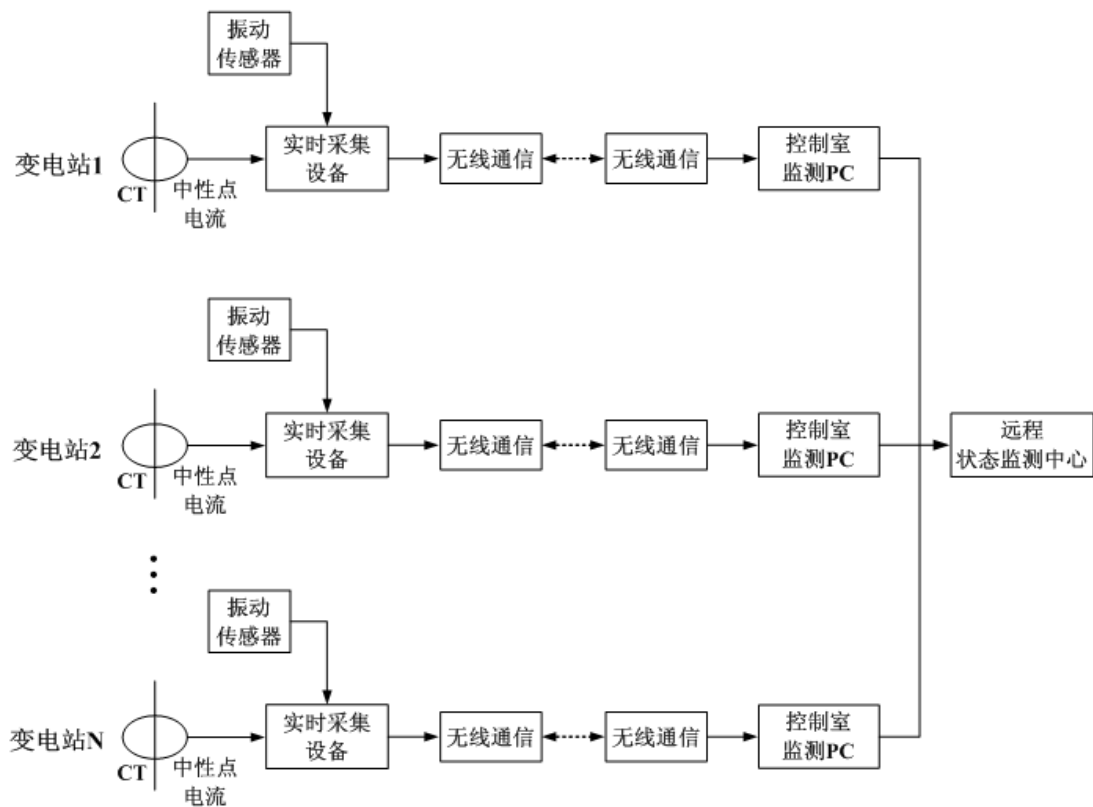


图 1 变压器直流偏磁监测系统结构示意图

三、 变压器直流偏磁监测系统设计方案

直流电流的监测方案已很成熟，主要考虑的是所要求的大范围内保证精度的要求；再根据上述分析的加速度检测方案，考虑到还需要开发监测台 PC 的界面，选择基于 Labview 的开发平台，可直接使用该软件开发 PC 界面，将数据通过光纤以太网传输到监测台 PC。本项目的核心在于将众多 IEPE 采集卡端口与电流采集端口集成到一个平台，对这些信号进行分析和处理，IEPE 采集卡端口可根据测试点的数量选择。

基于 Labview 开发平台，采集卡和控制器的全部采用高性能工业级 NI 器件。如图 2 所示，电流的采样卡选择 NI-9239；加速度采集卡采用自带恒流源的 IEPE 专用采集卡 NI-9234；工业实时控制器采用 cRIO-9014；可配置机箱采用 cRIO-9114，可扩展 8 块采集卡。

NI-9014 为嵌入式实时控制器，具有 -40 ~ 70°C 的操作温度范围，400MHz

处理器、128M DRAM、2GB 非易失存储介质。CompactRIO 嵌入式控制器的设计极为坚固、可靠且电源能耗低，其 9VDC 和 35VDC 两种电源输入可用于 CompactRIO 机箱/模块的隔离供电。

□ NI-9114 为 8 槽嵌入式机箱，具有-40 ~ 70°C 的操作温度范围，3 百万可重新配置 I/O(RIO)，FPGA 核心具有高超的处理能力，使用 LabVIEW 自动生成自定义控制和信号处理电路。

□ NI-9234 为 4 通道 C 系列动态数据采集卡，自带 2mA IEPE 恒流源激励，可进行高精度的加速度测量，4 条输入通道借助自动调节采样率的内置抗混叠滤波器(Delta-Sigma)，可同时以每通道高达 51.2 kS/s 采样信号。

□ NI-9401 为 8 通道 C 系列高速数字 I/O 模块，100ns 超高速数字输入输出，输入和输出的方向按半字节(4 位)进行配置，可用 LabVIEW 对 NI-9401 编程，进行 3 种配置：8 路数字输出、8 路数字输出或 4 路数字输入和 4 路数字输出。

□ NI-9239 为 4 通道 C 系列模拟输入模块，具有高速、准确的设计特点，分辨率、扫描率和输入范围方面同样具有优势。4 条通道之间彼此隔离，借助通道间的隔离，包括待测设备在内的整套系统可以免受隔离等级内的电压尖脉的损害。4 条输入通道借助自动调节采样率的内置抗混叠滤波器(Delta-Sigma)，可同时以每通道高达 50 kS/s 采样信号

本监测系统是安装在变电站中监测主变压器，变电站中规定不能随意施工、布线，因此现场的监测设备与控制楼中的上位机服务器之间的通信方式采用无线 Mesh 方式，Mesh 网络可自动连接组成子网，且传输速度快，在变电站中多个变压器进行监测时，互相之间可自动形成网络，不需要额外的中继点，安装方便、节约成本。

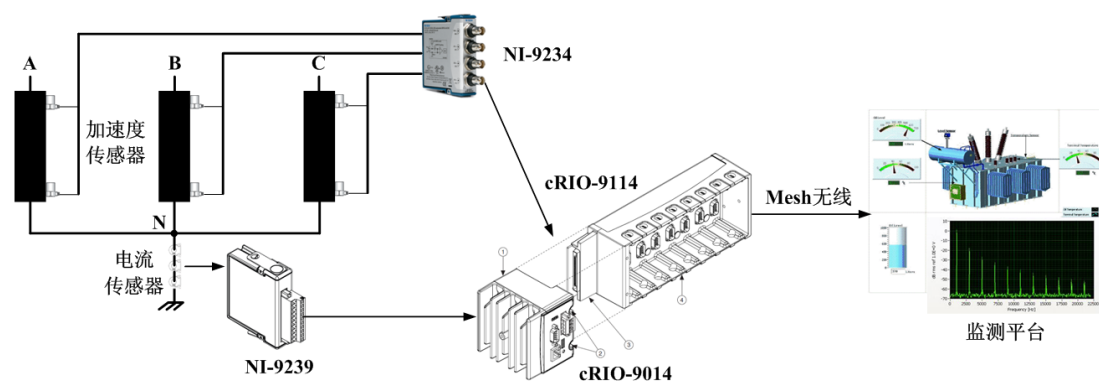


图 2 可扩展 8 个采集卡的监测系统

根据监测的要求及相关技术难点的分析，经过大量的调研工作，确定了电流的监测方法和霍尔电流传感器的参数，寻找具有相应经验的厂商订做；对于振动的监测，采用加速度来反应振动的情况，根据上述分析，选择了合适的加速度传感器，并进行了相应的计算，确定方案的可行性。

对于整体方案的选择，理论上分析通过后，进行了验证性的测试，如图 3 所示，为整体测试结构图，测试对象选择调压器，三维加速度传感器通过磁铁底座吸附在调压器的侧壁，传感器信号线连接到采集卡，采集卡通过 FPGA 对数据进行缓存后传输到控制器中处理，通过 FFT、功率谱等算法后将结果通过以太网传输到上位机，在用户界面中显示出来。

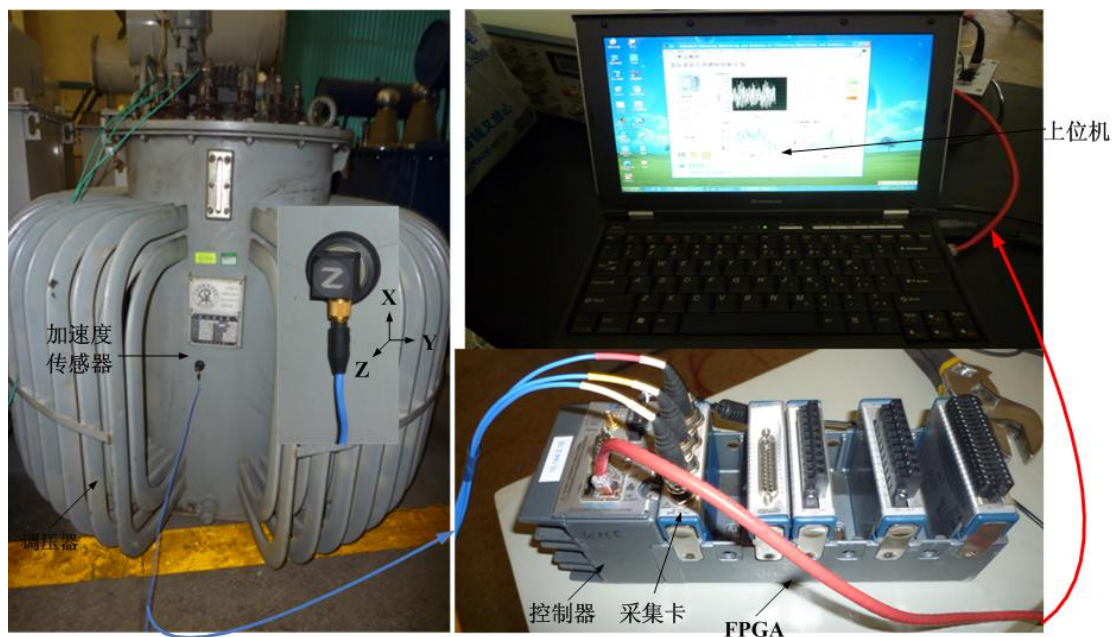


图 3 整体测试结构图

接下来将重点介绍变压器直流偏磁监测系统的电流和加速度的信号采集、处理算法的研究、无线通信方式、监测数据的存储设计。

1、电流和加速度的信号采集

1.1 电流信号采集

电流检测的难点：测量的电流范围大，而且要保证整个测量范围内的相对精度，需要多个量程霍尔电流传感器配合检测。通入下述的方法可以解决电流检测的技术难点^{[7][8]}。

如图 4 所示， 电流监测模块包括：3 个霍尔电流传感器、2 个电源控制装置、MUX、ADC 模块、量程判定和控制器，其中：霍尔电流传感器 1 的量程最大，一直上电工作不需要电源控制装置，霍尔电流传感器 2 和 3 都需要电源控制装置，MUX 用于选择输入的霍尔电流传感器通道，ADC 模块将霍尔电流传感器的模拟信号转换为数字信号输入到控制器。通过量程判定预先判断电流的量程并依据判定的量程选择相应的电流传感器，然后通过多路模拟开关选择电流传感器通道进行采样，接着通过数模转换模块转换为数字信号后输入到控制器，以及控制器发送触发信号对电流传感器进行断电处理，提出一种变压器中性点的、大范围的、可保证大范围内精度的电流检测方法。

电流检测方法，包括：

- 步骤一、通过量程判定预先判断电流的量程；
- 步骤二、依据判定的量程选择相应的电流传感器；
- 步骤三、通过多路模拟开关选择电流传感器通道进行采样；
- 步骤四、通过数模转换模块转换为数字信号后输入到控制器；
- 步骤五、控制器发送触发信号对电流传感器进行断电处理。

为了配合此种电流监测的方法，专门设计了量程判定单元和霍尔电流传感器专用的电源控制模块。

电流采集卡选择 NI-9239，4 条通道隔离采样可把 3 个霍尔电流传感器的采样隔离，彼此之间不影响，防止变压器的地电位对电流采集的干扰，保证了采集的准确性。量程较小的霍尔电流传感器 2 和 3 需要电源控制模块，而电源控制模块的输入信号是通过 NI-9401 发出的。cRIO 控制器及机箱并没有可用作控制的输出端口，必须通过 I/O 类的模块实现，通过 NI-9239、NI-9401 就可以实现电流信号采集的闭环控制，克服上上述分析的电流检测的难点，实现了保证相对精度的满量程电流测量。

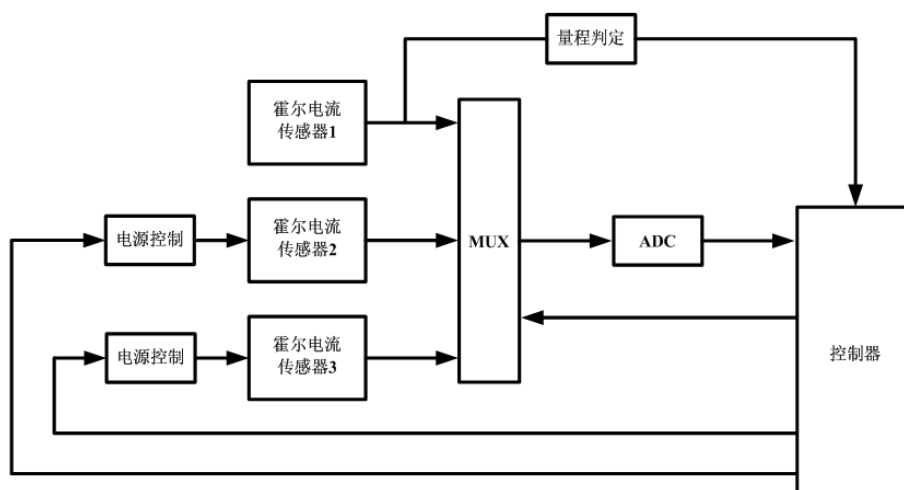


图 4 电流采样装置示意图

1.2 加速度信号采集

加速度检测的难点：加速度传感器采用压电式的 IEPE 传感器，采集卡需要提供恒流源激励；要求可扩展到多个加速度传感器测量点，检测端口多，最高达到 24 个；采集速率要求高，需达到 50kHz 及以上。

加速度信号的采集卡选择 NI-9234，每个采集卡可检测 4 路信号，而且给加速度传感器提供 2 mA IEPE 恒流源激励，将加速度传感器的电容量信号变为电压信号，采集卡 NI-9239 检测到电压信号后转变为加速度的量程值。检测到的加速度信号数据量很大，数据处理、数据存储和数据传输将在下文中介绍。

2、处理算法的研究

对于电流检测，检测到的结果是交流电流与直流电流，通过中性点的交流电流为 50Hz 整数倍的正弦波，需通过一定的算法将交、直流电流分离，对于此算法，经过研究，已找到了较好的分离算法。

加速度检测到的信号最终被频域处理，以此观察振动的幅值，由于振动的频率较高，因此加速度检测的采样率也较高，采用传统的 FFT 处理算法，要达到较好的频率处理效果，并保证频域的分辨率，所需要采样的数据量与采样率有关，

数据量很大，会给无线通信和数据的存储增加难度，例如，采样率 10kS/s，需要采样 10000 个点，才能达到频率分辨率为 1。由于我们只关心 50Hz 整数倍处的频率，因此，只要精确地得到该处的频域幅值即可，如何在尽量少的数据量下，得到精确的局部频域幅值，这就需要研究局部细化的 FFT 算法，使得采样率较高，采样的数据量较少时，仍然可以得到想要的结果。

LabVIEW 中涵盖了大量的函数模块，还集成了很多数据处理和分析的工具包以及功能强大的 Express VI，这都使得在 LabVIEW 中实现算法变得很轻松。本文中的直流偏磁监测设备所需要的主要算法有两个：一是电流采集后需要分离出其中的交流、直流成分；二是加速度信号采集后需要进行局部细化 FFT 变换。这两种算法在 LabVIEW 中都有可用的 VI 模块，还可以模拟分析实现最优效果的算法阶数。

3、无线通信方式

如图 1 所示，在现场的实时采集设备与控制室的监测 PC 之间采用无线通讯方式，本监测系统选择使用新颖的 Mesh 无线网络通讯方式，并进行了测试。如图 5 所示，无线模块之间可达到的通信量最高为 25Mbps(3.125MB/s)。

NI 9234 或 NI 9239 的采样位数为 24 位，考虑到方向位等，因此每个采样点由 32 位组成，即每个采样点的数据量为 32bit(比特)，采样率最高为 51.2kS/s，即每秒采样 51.2k 个数据点，每个数据点由 32bit 组成，因此一个通道需要的实时通信速率为：1.6384Mbit/s，监测 6 路振动信号和 1 路电流信号，所需要的实时持续的通讯速率为：11.4688Mbit/s，即 1.4336MB/s(B，字节，1B = 8bit)，Mesh 无线网络可满足需求。实际数据采集中会设置采集间隔，间隔在 1 分钟以上，通信量会较小一些，因此，对于全部可扩展的 24 路加速度检测，该通讯方法仍能达到要求。

LabVIEW 高度集成了各种通信方式，具有强大的通信功能，这种功能使得 LabVIEW 很容易编写出具有强大通信能力的应用软件，实现现场监测设备与上位机服务器之间的通信。

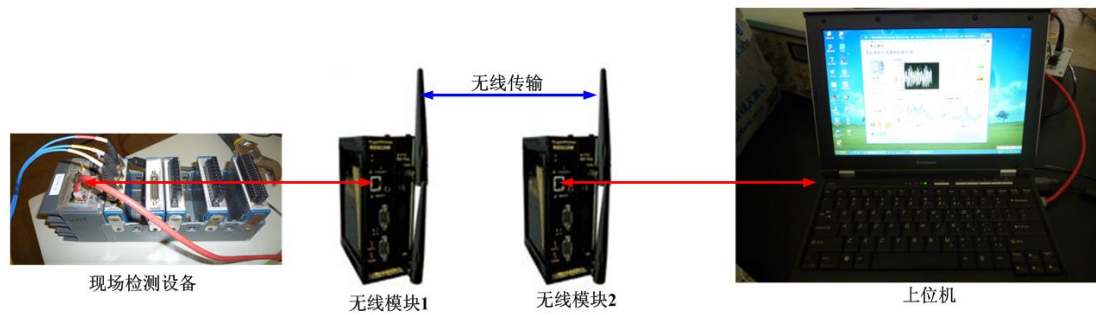


图 5 Mesh 通讯测试结构图

4、监测数据的存储设计

变压器直流偏磁监测系统的监测对象是电流和加速度，电流通过算法分离出其中的直流分量，加速度信号需要频域处理，因此监测系统保存的数据有两种，一种是时域数据，另一种是频域数据。时域数据的横坐标是时间，纵坐标是采集到的数据点；频域数据的横坐标是频率，纵坐标是加速度采集数据频域变换后的幅值。因此，存储的时候，使用三种表格存储相应的数据。

时域数据的数据量最大，按照某个固定的时间间隔产生一张表格，表格只存储采样的数据点，即时域波形的纵坐标。对于一个关系型数据库而言，行数和列数都在一定的限制范围内，处于限定的范围内的执行效率才是最高的。针对于时域采样数据的特点，列数很少，而行数非常多，如果按照行数累加存储，当行数达到限定范围，再转移到后面的列从头开始存储，那么将瞬间增加很大的存储空间，对于数据存储来说是不好的，因此采用的存储方法是按列逐次存储，即存储一次采集的数据，紧接着在后面的列中存储数据，达到列限定的数量时，转移到下一行存储。这种存储方法可以最大效率的利用数据库中的表文件，但是读取数据的时候，如果整个表格内搜寻将非常麻烦，影响执行的效率，因此，在将数据块存储的时候，需要将这个采样时刻的对应存入表的列记录，读取的时候，在相应的几列中搜寻即可。时域数据的存储，并没有存储横坐标，其横坐标的信息将在主数据表中提取。

频域数据的存储，为了防止在传递过程中的畸变，频域变换在现场控制器中实现，将频域的结果传输到上位机中存储，电力变压器所监测的加速度信号的频

域分析由于其自身运行的特点，频谱都在 50Hz 的整数倍，其他频率的幅值基本为零，可忽略，可只将 50Hz 的整数倍频率幅值存储，通常只关心 2k 频率内的频谱，只需存储不超过 40 个数据点，非常节约存储成本，而且读取迅速。横坐标是固定的，读取 50Hz 整数倍的幅值可直接查看频域图谱。

主数据表中存储每个采样时刻的时间，时域波形的采样频率，以及所需要的特征值。在每次采样后，要对电流信号进行算法分离出其中的直流分量，对于加速度监测，需要计算出这个时刻振动量最大的值，或者其他特征量，在查看历史数据的时候，直接从主表中提取这些特征值信息绘制成图表，对于某个异常的值可查看当前的时域波形和对应的频率图谱，时域波形的横坐标根据其采样频率即可推出来，算法非常简单。并且还要存储时域数据存储到的相应列数。

LabVIEW 的数据存储功能极其强大，一方面对于测量数据的存储，有多种存储格式，非常便于存储、显示和访问，该部分的 VI 都集中在 Measurement File/Storage VIs；另一方面，LabVIEW 还可以与其他数据库进行交互存储，开发了专用的 Database Connectivity 工具包。本文中的数据存储采用数据库与 TDMS 结合的存储方式，电流和加速度检测的原始测量文件存储在 TDMS 中，占用的空间小，便于访问和显示而且 TDMS 操作函数众多，可实现较为强大的功能；原始数据的分析结果以及特征值存储在 Access 数据库中，结构清晰，便于调用历史数据和管理已存储的原始测量数据 TDMS 文件。Access 数据库中的数据还便于远程访问和控制，可以此实现直流偏磁监测系统的远程访问和控制。

四、 软件实现与现场成果

控制室中的监测 PC 存储现场监测到的数据及实时控制器处理后的结果，监测 PC 放置在控制室中，要求：界面友好，易理解，采用 B/S 结构，便于远程的查看和控制。控制室监测 PC 的软件设计还要求可显示当前的实时数据，并可设定各种程度的警报，便于提醒值班人员；可查看历史监测数据，便于以后的研究工作，且出现故障时，便于查看相应的数据，根据上述的数据存储设计，查看历史数据可根据特征值来选择相应时刻的历史数据，查看数据具有针对性；可对监

测过程的采集参数进行设定，如：间隔周期、采样率、采样点数、频率分析的长度等。如图 6 所示，为变压器直流偏磁监测系统的主界面。主界面中可以清晰查看每个加速度传感器和霍尔电流传感器的工作状态，并用 LED 指示上位机服务器(监测 PC)与现场监测设备的通信状态。对于本次检测关注的重点：中性点直流电流和加速度频域幅值，都在主界面中显示出来，并且分析了加速度幅值最大值，并显示最大值处的频率。直流电流和加速度频域幅值都分别设定了报警门限值，显示清晰明了。



图 6 变压器直流偏磁监测系统的主界面

点击右下方“查看实时波形”可查看当前测量的实时波形图，如图 7 所示。左侧显示加速度的波形图，可选择安装的加速度检测点时域波形和对应的频域波形；右侧显示测量电流的波形，分别是原始电流波形和经过滤波分析处理后的交流电流波形。

对于直流偏磁的历史数据分析很重要，找出变压器中性点电流与加速度频域幅值的关系主要依靠对历史数据的分析。对于上位机服务器(监测 PC)，历史数据的查看采用特征值查看方式，如图 8 所示，为变压器直流偏磁监测的历史数据查看。特征值为直流电流、各检测点的加速度频域幅值等，可查看一定时间范围内某个特征值的变化趋势，对于异常的点位，通过鼠标直接选择该点即可查看对应的波形图标。

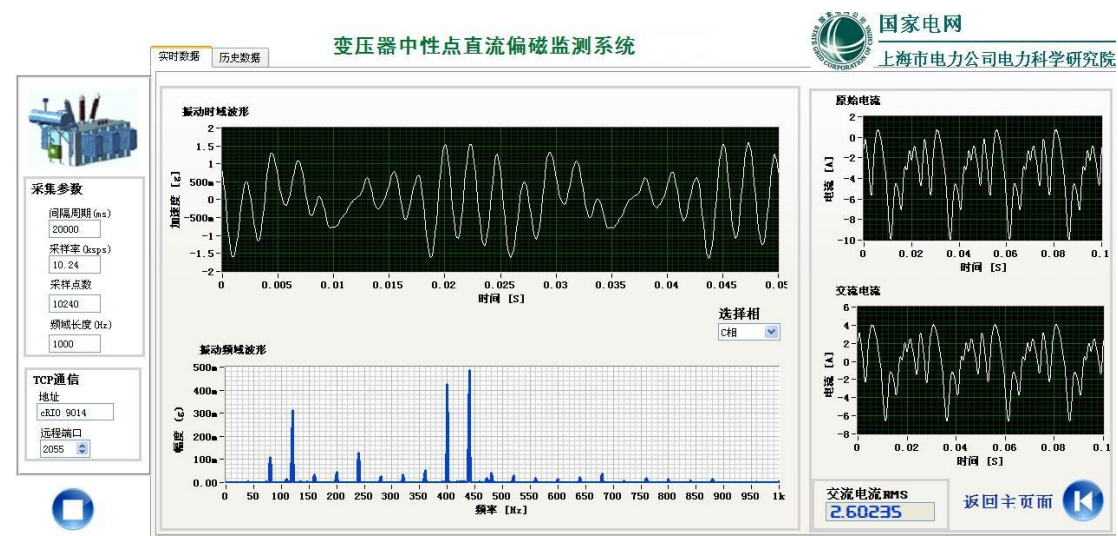


图 7 变压器直流偏磁监测系统的实时数据查看界面

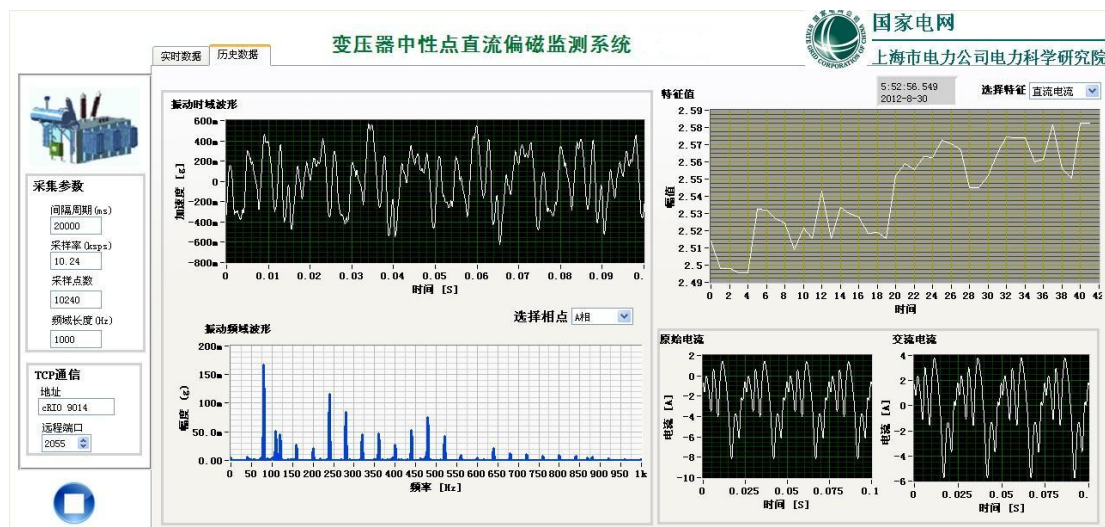


图 8 变压器直流偏磁监测系统的历史数据查看界面

该套变压器直流偏磁监测系统完成开发后，已经完成了两个变电站的安装运行工作，如图 9 为变压器直流偏磁监测设备所监测的变压器安装图，如图 10 所示为变压器直流偏磁监测设备完成后的柜体图，NI CompactRIO 系列控制器放置在柜体中，该套设备时刻测量变压器中性点通入的直流电流，并分析变压器箱体受到的振动影响，设定了直流电流和振动的报警限值，达到报警限值后说明变压器处于危险运行中，变电站的值班人员可根据报警采取相应的处理措施，全面保障变压器的安全和增加变压器的使用寿命。



图 9 变压器监测现场的安装图



图 10 变压器直流偏磁监测设备柜体图

五、 结论

为了研究直流偏磁对变压器的影响，以及找出有效的直流偏磁抑制措施，本文详细说明了变压器直流偏磁监测系统的整体设计方案、该方案的具体硬件设备、变压器的电流和加速度检测方法、现场设备与上位机服务器(监测 PC)之间

的无线通信、采集到电流和加速度数据后的处理算法、监测数据的存储方式、上位机服务器(监测 PC)的界面设计, 按此方案设计的高精度直流偏磁监测系统, 能实时显示主变中性点直流电流幅值和极性, 及加速度的频域幅值变化, 能清晰地显示各变电站主变中性点直流电流的分布规律及与加速度频域幅值的对应关系, 为研究变压器直流偏磁及抑制措施提供原始数据和依据。

[参考文献]

- [1] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 印永华. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(13):1-7.
- [2] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术, 2005,29(3):9-14.
- [3] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流偏磁对变压器的影响[J]. 中国电力, 2004, 37(8): 41-43.
- [4] 赵杰, 曾嵘, 黎小林, 等. HVDC输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- [5] 李长益. 直流单极运行对交流变压器的影响[J]. 华东电力, 2005,33(1):36-39.
- [6] 张轶君. 变压器直流偏磁引起的振动噪声监测方法研究[D]. 北京: 华东电力大学, 2008.
- [7] 李红雨, 吴隆辉, 卓放, 等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(13):57-62.
- [8] 李亮, 阚沛文, 陈亮. 新型霍尔传感器在电流检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2005,4:3-5.