

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。

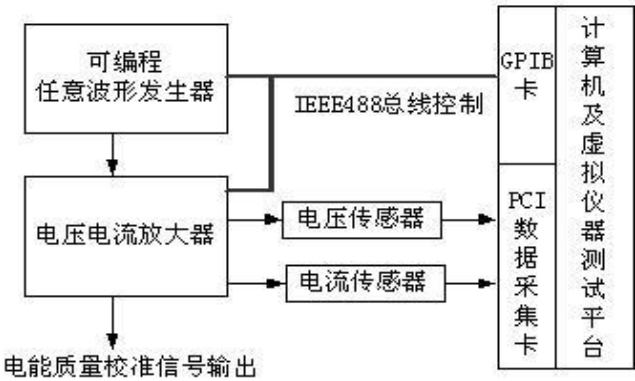


图 1 电能质量校验装置原理图



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 ($P_{\max}=1$)
- 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：

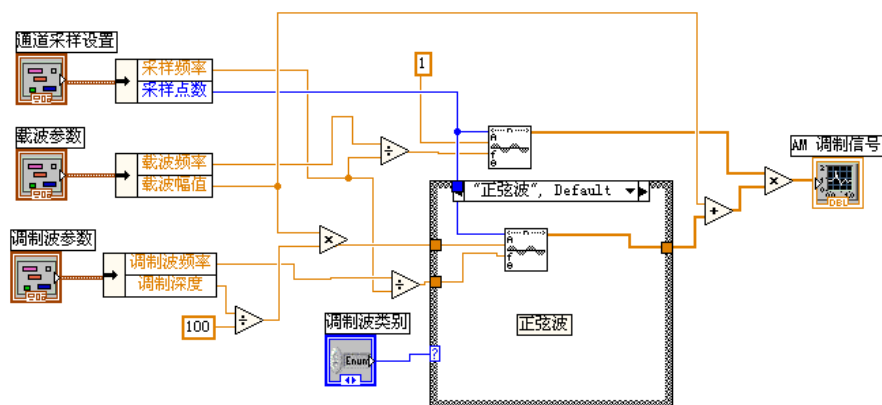


图3 闪变信号产生程序

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

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。

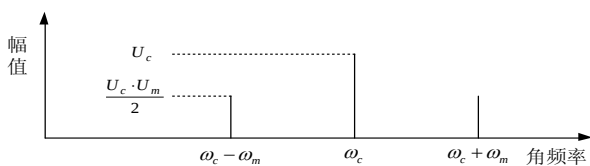


图4 正弦波幅度调制信号分析

对于方波信号，可以认为由一系列奇次谐波合成的信号。

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

则方波幅度调制信号为：

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

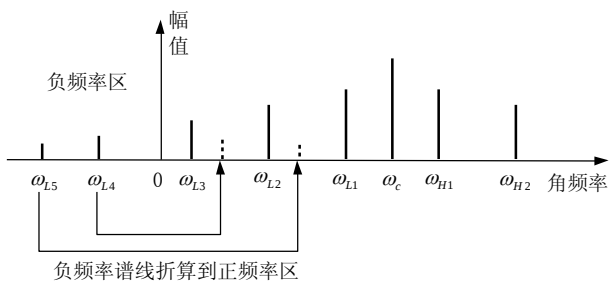


图5 方波幅度调制信号分析

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：
 $\omega_{L1} = \omega_c - \omega_m$ ，
 $\omega_{L2} = \omega_c - 3\omega_m$ ， $\omega_{L3} = \omega_c - 5\omega_m$ ，
 $\omega_{L4} = \omega_c - 7\omega_m$ ， $\omega_{L5} = \omega_c - 9\omega_m$ ，
 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，并使得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一定的应用。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。