



## 本科生毕业论文（设计）



题    目 基于虚拟仪器的电能质量监测系统

学    院 电气信息学院

专    业 自 动 化

学生姓名 徐 迅

学    号 0643031276 年 级 2006

指导教师 雷 勇

教务处制表

二〇一〇年 六 月 九 日

# 基于虚拟仪器的电能质量监测系统

自动化专业

学生：徐迅

指导老师：雷勇

**摘要：**随着国家经济发展，现代电力系统中负荷结构发生了重大变化，各种不平衡、冲击性、非线性负载容量不断增加，导致电能质量问题日益严峻。同时各种精密测量仪器、计算机控制系统等敏感负荷的广泛使用，对电能质量有着更高的要求。虚拟仪器技术是上世纪90年代兴起的一门集计算机技术和仪器技术的计算机辅助测量技术，体现了“软件就是仪器”的全新概念，实现了用虚拟的计算机“软面板”代替传统仪器的“硬面板”，极大地降低了仪器开发的成本和时间。目前国内使用的各种电能质量测量仪器由于开发时间早、技术相对落后，测量的精度和实时性尚不能完全满足测量要，针对以上问题，该方案将虚拟仪器技术与电能质量监测相结合，通过电压、电流互感器将高压信号转换成0~5V跟踪电压信号，经过抗混叠滤波、采样、AD转换后送入计算机，在计算机端以NI LabVIEW8.5为分析平台，实现了对三相交流电压、电流有效值、频率、功率等基本电量的测量和谐波分析、三相不平衡度和电压闪变的分析与实时显示。对提出的基本电量测量和电能质量指标算法在LabVIEW8.5中仿真，获得了较好的结果；最后在三相变压器平台上测试本系统，取得了预期的效果。

**关键词：**电能质量；虚拟仪器；电压闪变；电网频率测量；变压器；

# Power Quality Monitoring System based on Virtual Instrument

## Automation

**Student:** Xu Xun

**Advisor:** Lei Yong

**ABSTRACT:** With the development of economy, power load structure has changed greatly. The amount of unbalance impulsive and nonlinear load continues to grow causing increasingly serious power quality problem. At the same time, a variety of sensitive load like precise measurement equipment and computer-based control system are being widely used, which requiring power supply with better quality. Virtual Instrument (VI) is a kind of computer-aided measurement technique combining computer engineering and instrumentation technique which initially emerged in the 1990s. Owing to the VI technique not only the new concept ‘software is equipment’ came into being, but also the hard interface of traditional equipment was replaced by virtual computer GUI, which shorten the research period and reduced the cost. At present, because of early technique limitation, the precision level and real-time of domestic power quality monitoring system cannot satisfy the requirement. Concerning above problems, this paper integrates VI techniques and power quality monitoring standards setting up a monitoring system. Through voltage and current transformer high voltage signals are transformed into Tracking voltage within 0~5V, which signals are then filtered, sampled, AD converted and sent to PC. Base-on NI LabVIEW8.5, measurement of basic parameters like voltage and current root mean square(RMS), frequency and power as well as analyzing of power quality indicators like harmonic analysis, three phase unbalance and voltage flicker analysis are realized on PC. The proposed algorithm in measurement and analyzing are simulated in LabVIEW8.5 circumstance. At last, experiments are done on three phase transducers and expected results are brought about.

**Keywords:** Power Quality; Virtual Instrument; Voltage Flicker; Power Grid Frequency Detect; Transformer;

## 目 录

摘要.....	2
Abstract.....	3
1 绪 论.....	6
1.1 引言.....	6
1.3 国内外研究现状.....	6
1.4 本文的主要工作.....	7
2 电能质量的指标.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 稳态电能质量的基本指标.....	10
2.2.1 供电电压允许偏差.....	11
2.2.2 电力系统频率允许偏差.....	11
2.2.3 公用电网谐波.....	12
2.2.4 三相电压允许不平衡度.....	14
2.2.5 电压波动与闪变.....	15
3 电能质量指标在 LabVIEW 中的测量分析方法.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 LabVIEW8.5 开发平台.....	17
3.2.1 虚拟仪器的基本概念.....	17
3.2.2 LabVIEW8.5 编程方法及数据结构.....	18
3.3 基本量的测量方法.....	19
3.3.1 电压有效值测量.....	19
3.3.2 电流有效值测量.....	20
3.3.3 频率测量.....	20
3.3.4 功率测量.....	25
3.4 电能质量指标的分析方法.....	27
3.4.1 谐波分析.....	27
3.4.2 三相不平衡度分析.....	28
3.4.3 电压闪变分析.....	29
3.5 电能质量监测系统的仿真测试.....	31
3.5.1 对标准正弦信号的测试.....	32
3.5.2 对叠加噪声的仿真电压、电流信号测试.....	32
4 基于虚拟仪器电能质量监测系统软硬件结构及功能.....	34
4.1 电能质量监测系统的基本结构.....	34
4.2 系统硬件结构.....	35
4.2.1 互感器.....	35
4.2.2 信号调理电路.....	36
4.2.3 数据采集设备.....	38
4.4 系统软件结构.....	39
4.4.1 人机界面.....	40
4.4.2 数据采集.....	41
4.4.3 数据分析.....	44

---

4.4.4 数据存储.....	44
<b>5 电能质量监测系统在电机学实验中的应用.....</b>	<b>47</b>
5.2 电能质量监测系统在变压器空载实验中的应用 .....	47
5.2.1 变压器空载运行对电能质量的影响.....	47
5.2.2 变压器实验平台 .....	48
5.2.3 变压器空载运行测量结果.....	48
<b>6 结论和展望.....</b>	<b>53</b>
6.1 本文结论.....	53
6.2 工作展望.....	53
<b>致  谢.....</b>	<b>54</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>55</b>

## 1 绪 论

### 1.1 引言

随着我国国民经济的快速发展,各行业对电力能源的需求日益增加,对电力系统供电质量的要求更达到了新的高度。一方面由于用电负荷日趋复杂化和多样化,特别是干扰性负荷,如各种电力整流设备、大容量调速电机、电弧炉、无功补偿电源、电气化铁道等电力电子装置和非线性、不对称设备的不断涌入,使电力系统的电能质量受到严重影响和威胁;另一方面随着科学技术的进步,大量对电能质量非常敏感的负荷例如精密电子仪器、电子计算机等在生产生活中扮演着越来越重要的角色,它们服务的用户例如高度自动化的工厂、高性能大型计算机、医院、银行等除了对供电的可靠性有极高的要求外还对供电的电能质量有极高的要求,如果电能质量的问题严重将使一些对电能质量敏感的负载不能正常工作从而造成巨大的经济损失<sup>[2]</sup>。

此外,在电力市场运行机制下,电能作为一种特殊商品,各个独立电能生产者在发电侧展开竞争,输配电系统(即电力公司)与发电分离独立经营,在这样一个开放和竞争的运行环境下,电力部门和用户必然对电能质量提出越来越高的要求。据国际会议报告介绍,在美国每年由于电能质量下降所引起的经济损失高达数百亿美元。劣质电能引发电网大面积停电,造成用户生产力下降,其社会影响力和经济损失也是相当严重的。因此,不论是发电方、供电公司还是用户,都对电能质量给予了越来越多的关注<sup>[1,15]</sup>。

因此,为了保证电力系统的安全和用户用电的可靠性,需要对发电侧和用电侧分别进行电能质量检测和分析,为此研制一种新型的电能质量监测装置,集测量、分析和通讯等功能于一体,有效的进行电能质量监测,对于保证电力系统运行的安全性、经济性和可靠性均具有重要意义。

### 1.3 国内外研究现状

电能质量监测的发展经历了三个阶段,即模拟检测、数字化检测和以计算机为核心的自动检测。模拟检测的自动化程度低、系统结构复杂,以模拟技术处理检测信号。数字化检测将模拟信号转化为数字信号,利用专用数字信号处理技术和软硬件技术检测信号。随着计算机技术的发展,二十世纪七十年代后出现了以计算机为核心的自动检测系统,使电

能质量监测在向智能化的发展方向迈出了一大步<sup>[4]</sup>。

传统的电能质量模拟监测系统、数字化监测系统和以计算机为核心的电能质量自动监测系统，具有独立的机箱设备和操作前面板，前面板上装有开关、旋钮、显示屏等组建，各系统的功能由设备供应商设计、制造，而用户难以根据实际需要更改系统的功能和结构。由于以硬件为核心，系统体积庞大，功能单一，成本高，更新周期长，运行可靠性受到制约，而且系统任何更改、升级都涉及硬件电路和系统结构的改动。因此，研制测量准确、可靠性高且集电流、电压、频率、功率等基本电量参数测量和各项电能质量指标分析功能的灵活的新型智能电能质量监测系统，具有积极的社会意义和广阔的市场前景<sup>[2]</sup>。

二十世纪九十年代以来，世界各发达国家积极重视电力系统的运行质量，电能质量测量仪器发展迅猛。瑞士LEM集团公司、澳大利亚红相公司、美国FLUKE公司、Quatech公司、NI公司、意大利HT公司、英国Solartorn公司等著名测控企业在电能质量的智能化检测仪器方面进行了大量的研究开发工作，有关电能量参数测量仪器已形成批量产品，产生了规模效益。随着微电子技术的发展，DSP、嵌入式系统、高精度ADC等技术已经广泛应用到专用电能质量监测设备中，使得电能质量监测设备的功能愈发强大、准确度越来越高，美国FLUKE公司的F1430系列电能质量分析仪具有各通道200KS/s的同步采样能力、对电压变化趋势的记录可长达450天，国内保定联智电气有限公司的LZ-DZ3000C 电能质量在线监测装置以32位DSP和ARM处理为核心，具备16位每周波512点同步采样能力，同时还可以通过RS232、RS485和以太网方式连接外部设备，便于构建网络化电能质量监测系统。目前国内外各类电能质量监测、分析设备需求量大、价格昂贵、利润空间大，例如美国Fluke 435 电能质量分析仪售价高达6万元以上。面对机遇与挑战，国内各大高校、研究所和生产企业在电能质量监测、分析设备的研发方面已经做出巨大投入<sup>[2,4]</sup>。

## 1.4 本文的主要工作

本文根据国家电能质量标准，选择电压偏差、频率偏差、谐波、三相不平衡度、电压波动与闪变五项主要电能质量指标作为分析对象，研制出了基于NI LabVIEW 8.5虚拟仪器平台的电能质量监测系统，系统通过三相电压、电流互感器将待测量母线三相电压、电流变换成0~5V标准跟踪电压输出。6通道的输出电压信号通过NI USB6210数据采集器进行采样保持、AD转换、编码后将采样后的波形数组信号通过USB总线传输到PC端，最后在PC端借助LabVIEW平台编程对6路波形数组进行有效值、频率、相位等基本参数测量，再根据计算获得的数据进行前述5项指标的分析，最后将三相电压、电流波形、有效值、频率、偏差、谐波分析结果、三相不平衡度分析结果和电压波动与闪变分析结果显示在系统前面板上。在此基础上，根据电机学变压器实验指导内容，实现了变压器空载和短路实验的自动完成，相比传统电机学实验电压、电流、功率单独分时测量，基于虚拟仪器的电能质量监

测系统实现了变压器实验的自动化,大大提高了测量精度,并提供了传统测量手段所无法观察到的实验现象。

本文主要工作包括:

- (1) 参考相关论文、书籍、标准,了解电能质量问题的定义和内容,明确本文重点分析的内容。
- (2) 熟悉NI LabVIEW8.5编程软件,完成测量、分析电能质量各指标的模块设计参考现有方案,并综合本电能质量监测系统的设计功能,选择合适的传感器、数据采集设备等硬件。
- (3) 在LabVIEW环境下测试系统对各设计指标的测量分析能力。
- (4) 将设计的电能质量监测系统与电机学实验结合,在三相变压器空载运行条件下测试本系统。



## 2 电能质量的指标

### 2.1 引言

在众多能源类型中，电能是一种具有高效率和广泛适应性的能源，通过各种用电设备，可以转换成热能、机械能等其他形式的能量。也可以转换成在其他领域和场合所使用的电能形态<sup>[1]</sup>。

正是由于电能自身的属性，为保证电能安全经济地输送、分配和使用，理想情况下的供电系统应具有的基本特征包括：

- (1) 以单一恒定的电网额定频率、规定的若干电压等级和以正弦波形变化的交流电向用户输送电能，并且能够保证上述特性在不同用电负荷条件下的恒定。
- (2) 保持三相交流电压和电流的平衡，同时能够让电能传输效率最大，各用电负荷之间互不干扰。
- (3) 保证向用户持续供电，保证用电设备的正常运作，并且在任意时刻系统中能量的供需都是平衡的。

上述理想供电系统的基本特征构成了正常供电运行对电能质量的基本要求，图2-1 所示形象地指明了本文讨论的电能质量问题是由电压、频率和连续供电这三个基本要素所共同决定的<sup>[1, 2]</sup>。

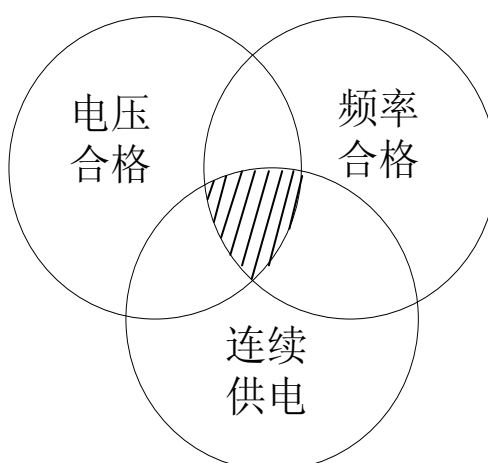


图2-1 电能质量问题

## 2.2 稳态电能质量的基本指标

电能质量标准就是针对电网安全经济运行、用户正常使用电能所要求达到的电能质量指标做出的规定。是电能质量监督管理，推广电能质量控制技术和维护供电、用户多方权益的法律基础。目前世界各大工业化国家均根据本国国情制定了相应的电能质量相关标准。在国际上通行的电能质量相关标准则主要是由国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）所制定<sup>[1]</sup>。而我国自20世纪80年代以来，先后有6项电能质量国家标准问世，如表2-1所示

表2-1 国家电能质量标准

标准编号	标准名称
GB 12325-1990	电能质量 供电电压允许偏差
GB/T 14549-1993	电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543-1995	电能质量 三相电压允许不平衡度
GB/T 15945-1995	电能质量 电力系统频率允许偏差
GB 12326-2000	电能质量 电压波动与闪变
GB/T 18481-2001	电能质量 暂时过电压和瞬态过电压

对于理想的三相交流系统，如式2-1

$$\begin{cases} U_a = A \sin(\omega t + \varphi_a) \\ U_b = A \sin(\omega t + \varphi_b) \\ U_c = A \sin(\omega t + \varphi_c) \end{cases} \quad (2-1)$$

从上式中不难看出，三相电压各自的幅值A，角频率 $\omega$ ，相位偏差以及谐波的引入均会导致实际三相交流系统与理想系统之间产生偏差，由此对电能质量的指标可以由以下几个方面加以考虑<sup>[5]</sup>：

- (1) 电压幅值，即三相电压幅值与理想电压幅值的偏差及电压幅值的波动于闪变
- (2) 电压频率，即三相电压频率与理想电压频率之间的偏差
- (3) 电压波形，即三相电压波形在引入谐波相对于理想正弦波形畸变程度
- (4) 三相平衡度，即三相电压幅值之间是否平衡

因此综合国家电能质量标准和实际三相交流系统可测量性，最终确定了本文分析的五项主要电能质量指标

- (1) 供电电压允许偏差
- (2) 电力系统频率允许偏差
- (3) 公用电网谐波
- (4) 三相电压允许不平衡度
- (5) 电压波动与闪变

### 2.2.1 供电电压允许偏差

电能质量的重要指标之一就是电压，因此对电压偏差的测量显得最为基础。通常系统电压产生偏差的根本原因是在于系统无功功率不平衡<sup>[1]</sup>。

当供电系统处在稳态运行时，某节点的实际测量电压 $U_{re}$  (V/kV) 和系统额定电压 $U_N$  (V/kV) 之差与额定电压 $U_N$  (V/kV) 的百分比就是节点的电压偏差 $\Delta U$  (%)，如式2-2。

$$\Delta U = \frac{U_{re} - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (2-2)$$

供电电压偏差较大时，用电设备和电网会受到极大危害。按照额定电压条件设计制造的用电设备运行在在电压偏差较大情况下，用电设备性能及效率将会降低，并且可能由于电压、电流过大而使用电设备受到损坏，例如，白炽灯在实际电压低于额定电压时，发光亮度呈加速下降的趋势，异步电机在电压过低时，电枢电流过大，导致寿命缩短等等。

对于输电线路，线路电压过低会导致最大功率大幅下降，甚至会引起频率不稳定；电压过高时，又会使铁芯饱和，产生高次谐波问题。

因此根据国家电能质量标准GB12325-1990《电能质量 供电电压允许偏差》，我国目前已经对35kV及以下的供电电压偏差做出了如下规定<sup>[1]</sup>：

- (1) 35kV及以上电压正负偏差绝对值之和不大于额定电压的10%
- (2) 10kV及以下的三相供电电压偏差容许范围在额定电压的 $\pm 7\%$ 以内
- (3) 220V单相供电电压偏差容许范围为额定电压的 $-10\% \sim 7\%$ 之间

### 2.2.2 电力系统频率允许偏差

电力系统在稳定运行时，当发电机发出的电能等于用电设备消耗的电能和传输等过程中损耗的电能时，发电机组才能保持稳定的转速。在实际运行中，电力负荷在不断的变化，发电机发出的功率也随之变化，如果系统发出的总功率大于当前负荷消耗的有功功率，则系统频率将会上升，反之，系统频率将会下降，正常情况下系统发出功率与负荷消耗功率的动态平衡保证了系统频率的动态稳定<sup>[1]</sup>。

电力系统在稳态运行条件下，系统频率的实际值 $f$  (Hz) 与系统额定频率 $f_N$  (Hz) 之差 $\Delta f$  (Hz) 即为频率偏差，如式2-3：

$$\Delta f = f - f_N \quad (2-3)$$

根据国家电能质量标准GB/T 15945-1995《电能质量 电力系统频率允许偏差》，正常情况下，电力系统频率偏差允许范围在 $\pm 0.2$ Hz以内。在日本等发达国家，该标准通常在 $\pm 0.08$ Hz以内<sup>[1]</sup>。

通常电力系统频率一旦出现较大偏差，会对用电负荷和电网产生极大危害；系统频率

出现偏差时，会引起工业用户广泛使用的异步电动机转速变化，从而影响生产质量。同时一些电子设备在频率偏差较大时也无法正常工作；发电机组在电力系统频率出现偏差时工作效率将会降低，甚至导致系统电压、频率崩溃。

### 2.2.3 公用电网谐波

理想情况下的电力系统应该具有单一频率、正弦波形，然而随着现代工业技术的迅速发展，诸如电弧炉、电力电子换流器等非线性负荷的大量使用，使得谐波电流被注入到电力系统并会产生非线性电压下降最终导致电压、电流波形的畸变<sup>[1]</sup>。

谐波的国际通用定义是单周期电气量的正弦波分量，频率为基波频率的整数倍。即h次谐波频率 $f_h$ 与基波频率 $f_1$ 的关系为 $f_h = h \times f_1$ 。除谐波外，实际工程中与谐波问题相关的概念还包括间谐波、次谐波和谐波暂态现象，本文主要分析基波的整数倍谐波问题。

由傅里叶变换的概念可知，任意满足狄里克雷条件的非正弦周期函数可以分解为一系列正弦函数的级数<sup>[11]</sup>，如式2-4：

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2-4)$$

对于电力系统谐波分析，电压和电流信号可以看做周期性信号，因此可以将周期性的电压电流信号以傅里叶级数的形式表示

$$u(t) = \sum_{h=1}^M \sqrt{2} U_h \sin(\omega_1 h t + \alpha_h)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^M \sqrt{2} I_h \sin(\omega_1 h t + \beta_h)$$

其中 $\omega_1$ 为电力系统基波角频率

h为最高次谐波次数

$U_h$ ， $I_h$ 分别为第h次谐波电压、电流有效值

$\alpha_h$ ， $\beta_h$ 分别为第h次谐波电压、电流初相角

M为分析到最高次谐波数，通常谐波分析最高次数不大于50

在基于傅里叶级数分析的基础上，可以获得受谐波污染后畸变的电压、电流有效值 $U_{rms}$ 、 $I_{rms}$ 可以由式2-5, 2-6 表示

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^M U_h^2} \quad (2-5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^M I_h^2} \quad (2-6)$$

其中h为谐波次数

根据以上计算得到的电压、电流参数，国家电能质量标准《电能质量 公用电网谐波》规定了以h次谐波含有率 $HR_h$ (%)和电网总谐波畸变率THD(%)两组参数作为电网谐波的衡量标准<sup>[1]</sup>，即

$HR_h$ 表示第h次谐波分量的大小，以第h次谐波分量有效值 $U_h$ 、 $I_h$ 与基波分量有效值 $U_1$ 、 $I_1$ 的百分比

第h次电压谐波含有率 $HRU_h$ ，如式2-7

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (2-7)$$

第h次电流谐波含有率 $HRI_h$ ，如式2-8

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (2-8)$$

THD表示因谐波而引起实际电压电流波形偏离正弦波的程度，以各次谐波分量有效值的平方和开根号与基波分量有效值的百分比<sup>[1]</sup>

电压总谐波畸变率 $THD_u$ ，如式2-9

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (2-9)$$

电流总谐波畸变率 $THD_i$ ，如式2-10

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2-10)$$

谐波的引入会给正常生产和生活带来很大的危害，并主要体现在对电力与信号的干扰方面<sup>[1]</sup>。

在电力危害方面

- (1) 电机运转时，会产生谐波损耗，并发热
- (2) 谐波峰值会产生过电压，导致电气元件和设备的损坏
- (3) 感应式电能计量表会产生计量偏差

信号干扰方面

- (1) 对通信系统产生电磁波干扰，导致通信质量降低
- (2) 对功率处理器自身的安全运行产生影响

因此，国家电能质量标准《电能质量 公用电网谐波》中对公用电网谐波电压限值的规定<sup>[1]</sup>见表2-2

表2-2 电能质量公用电网谐波限值

电网标称电压(kV)	电网总谐波畸变率(%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

### 2.2.4 三相电压允许不平衡度

三相系统可以被分成对称三相系统和不对称三相系统两类。在理想三相电力系统中，三相电压、电流、频率相等，且任意两相相位差为 $120^\circ$ ，此时系统被称为对称三相系统，否则即为不对称三相系统。同时三相系统又可以被分成平衡三相系统和不平衡三相系统。当在任意时刻三相总功率不随时间变化，则被称为三相平衡系统，否则即为三相不平衡系统。根据电工学理论推导可以证明对称三相系统瞬时总功率总是常数，而三相系统的不对称将会引起不平衡，因此本文对三相不对称和三相不平衡问题不做区分<sup>[1]</sup>。

电力系统的三相不平衡主要分为事故性和费事故性两种，本文主要分析在正常运行条件下的三相不平衡问题。

由对称分量法，任意三相系统的电压电流都可以分解成正序、负序和零序三个对称分量。因此三相系统电压不平衡度 $\varepsilon_u(\%)$ 和电流不平衡度 $\varepsilon_i(\%)$ 即可由分解出的电压负序分量有效值 $U_2$ (kV/V)电流负序分量有效值 $I_2$ (kA/A)分别和电压正序分量有效值 $U_1$ (kV/V)电流正序分量有效值 $I_1$ (kA/A)的比值来定义<sup>[1]</sup>，如式2-11, 2-12

$$\varepsilon_u = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (2-11)$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (2-12)$$

对任意不平衡三相电压、电流分解为正序 $U_1$ 、负序 $U_2$ 和零序分量 $U_0$ 的计算可以由式2-13所示的对称分量法来完成

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_+ \\ \dot{U}_- \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

式中,  $\alpha = e^{i120^\circ}$

然而, 在实际工程应用中, 按照对称分量法对电压、电流分解成正序、负序和零序的方法需要三相电量的幅值和相位且较为繁琐。通常情况下, 我们往往只获得了三相电压、电流的有效值  $U_{ar}, U_{br}, U_{cr}$  (V),  $I_{ar}, I_{br}, I_{cr}$  (A), 因此在不含零序分量的三相系统中, 可以推导出由式2-14表示的简化算法<sup>[2]</sup>。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100\% \quad (2-14)$$

式 中  $L = \frac{a^4 + b^4 + c^4}{(a^4 + b^4 + c^4)^2}$  其中a, b, c分别为三相电量有效值。

电力系统在正常情况下运行时, 系统的三相不平衡是由供电和用电不平衡所共同引起的。供电线路的不平衡是导致供电环节不平衡的主要原因, 而导致整个系统不平衡的主要原因还是在于用电环节的三相不平衡, 其中三相负荷不对称是引起系统三相不平衡的最重要原因。

当系统处于三相不平衡状态时, 不平衡三相电压、电流包含大量的负序分量, 将对用电设备产生影响。例如电动机运行在三相不平衡供电状态时, 由于负序分量产生的制动转矩, 不仅工作效率降低而且会因负序电流大而导致使用寿命缩短。变压器工作于三相不平衡状态时, 可能因某相电流已经达到额定值而另外两相还未达到额定值而降低工作效率, 等等<sup>[1]</sup>。

为此, 我国国家电能质量标准《电能质量 三相电压允许不平衡度》中规定了电力系统连接点电压不平衡度在2%以内, 短时不平衡度小于4%;接在公共连接地的用户引起的该点电压不平衡度在1.3%以内<sup>[1]</sup>。

### 2.2.5 电压波动与闪变

理想三相交流供电系统的电压和电流有效值保持恒定, 且负荷特性与系统电压水平无关。然而, 上述条件在实际系统中并不能被满足, 供电系统电压总是在发生着变化, 因此凡是电压有效值随时间发生变化的现象均可被称为电压变动 (Voltage-RMS Change)<sup>[1]</sup>

作为典型的电压变动现象, 电压波动 (Voltage Fluctuation) 是指电压幅值在一定范围内有规则变动时, 电压变动或工频电压包络线内的周期性变化。电压波动值d(%) 为电

压方均根最大值 $U_{\max}$ (V)与最小值 $U_{\min}$ (V)之差相对额定电压 $U_N$ (V)的百分比, 如式2-15。

$$d = \frac{U_{r\max} - U_{r\min}}{U_{rN}} \quad (2-15)$$

与电压偏差一样, 电压波动属于典型的电压变动现象, 但是电压波动主要是由波动性负荷运行时频繁地从配电系统获取快速变动电能引起的, 造成公共连接点电压在短时间内快速剧烈变动, 从而较大地偏离标称电压值, 因此电压波动也可以被称为快速电压变动。在实际运行中, 电压波动主要是由大量波动性负荷的并入引起的, 例如频繁启制动和间歇性通断电的电动机、电焊机以及造成供电点出现随机电压变动的电弧炉等用电设备。在波动性负荷中, 电弧炉导致的电压波动最为严重<sup>[1]</sup>。因此, 针对电压波动, 国家电能质量标准《电能质量 电压波动与闪变》对在特定频率范围内电压波动的限度做出了如表2-3规定

**表2-3 电能质量电压波动与于闪变限度**

变动频度 $r(h^{-1})$	波动限值d(%)		变动频度 $r(h^{-1})$	波动限值d (%)	
	LV、MV	HV		LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3	$10 < r \leq 100$	2	1.5
$r \leq 10$	3	2.5	$100 < r \leq 1000$	1.25	1

表中标称电压 $U_N$ (kV)等级划分为

- (1) 低压(LV):  $U_N \leq 1\text{kV}$ ;
- (2) 中压(MV):  $1\text{kV} < U_N \leq 35\text{kV}$
- (3) 高压(HV):  $35\text{kV} < U_N \leq 220\text{kV}$



### 3 电能质量指标在 LabVIEW 中的测量分析方法

#### 3.1 引言

通过上一章对国家电能质量标准和可测量性的分析,我们确定了本文重点分析的5相电能质量指标。为了能够实现对上述5项指标的准确分析,需要测量和计算的基本电量包括:三相电压有效值 $U_{ar}$ ,  $U_{br}$ ,  $U_{cr}$ 、三相电流有效值 $I_{ar}$ ,  $I_{br}$ ,  $I_{cr}$ 、系统频率 $f$ 、三相视在功率 $S$ 、三相有功功率 $P$ ;在此基础上根据各项电能质量指标的定义和算法,计算出电压偏差 $\Delta U$ 、频率偏差 $\Delta f$ 、电压及电流各次谐波分量及总谐波畸变率THD、三相不平衡度 $\varepsilon_u$ 、 $\varepsilon_i$ 和短时电压闪变值 $P_{st}$ 。

#### 3.2 LabVIEW 8.5 开发平台

##### 3.2.1 虚拟仪器的基本概念

虚拟仪器(Virtual Instrument, 简称 VI)是 20 世纪 90 年兴起的一项测控技术,是仪器技术与计算机技术深层次结合的产物。它将传统仪器由专用硬件实现的数据分析处理与显示功能,改由功能强大的 PC 计算机及其显示器来完成,并配置以获取调理信号为主要目的 I/O 接口设备(如数据采集卡 USB 传输、GPIB 总线仪器、VXI 总线仪器模块、串口 RS232/RS485 仪器等);再编制不同测量功能的软件对采集获得的信号数据进行分析处理及显示。以这种方式构成了计算机仪器系统。从某种意义上来说,“软件就是仪器”<sup>[14]</sup>。

当前,用于虚拟仪器的开发平台主要分为两类:面向对象的编程平台和图形化编程平台。以 Visual C++和 Visual Basic 代表的面向对象编程平台在处理底层驱动的灵活性方面具有一定优势,但编程难度较大,开发周期较长且不易进行更改、升级和维护。

NI LabVIEW 系列是目前业界使用最为广泛,性能最为强大的图形化编程平台,已经成为虚拟仪器开发的首选工具。NI LabVIEW 具有极为简便的图形化编程界面、强大的数学分析功能、极强的编程时效性、可嵌入编译传统编程语言、大量的数据交互设备支持等特点。NI LabVIEW 开发平台不仅集成了传统虚拟仪器的所有功能,还对互联网应用,控制仿真,嵌入式开发等周边领域具有极强的支持能力,NI 公司特别推出了针对不同应用功能的编程工具包,基于 NI LabVIEW 平台开发远程监测,集散式检测控制系统,先进及复杂系统控制,已经成为测控领域重点研究的内容<sup>[15]</sup>。因此,本文选择了 NI LabVIEW 8.5 平台作为电能质量各项指标的运算平台和显示接口。

### 3.2.2 LabVIEW8.5 编程方法及数据结构

LabVIEW8.5 以下简称 LV 是一款典型的图形化编程语言,与 C 语言、Basic 语言、Pascal 语言等传统代码编程语言有很多的相似之处,如具有相似的数据结构、数据流控制、程序调试流程以及模块化编程思想等等。当然, LV 和代码编程语言在编程方式上存在着显著的差异,如 LV 编程分为前面板与程序框图两部分,其中前面板与 Visual Basic 类似,可以显示图形、文字,调用各种显示控件,实现图形用户界面功能,但与 Visual Basic 等不同的是 LV 程序框图也是图形化编程,传统代码编程中的循环、选择分支结构在 LV 中以矩形框表示,在循环框内的操作即为循环执行的内容。LV 的函数调用是由一个个方框型函数子节点和它们之间的信号连线来完成,其函数子节点具有传统代码编程函数的特点,有输入、输出接口,并完成特定功能,但由于函数子节点的插入删除完全图形化,且子节点之间的参数传递由连线完成,因此基于 LV 的程序具有更高的可读性和可移植性,并且由于图形化的高度封装性,代码编程中的常出现的代码输入错误在图形化编程中可以被很好地克服。相比于传统代码编程的串行执行, LV 的一大特点是伪并行执行程序,在执行需要同步运算功能的程序时相对于传统代码编程语言的串行执行有一定优势。除了能够以图像化的方式编程, LV 还提供了丰富的应用程序接口,可以将通过嵌入 C, Matlab 代码来实现底层软件驱动和复杂的数学运算<sup>[14]</sup>。

在本文涉及的电能质量监测系统中,传感器和数据采集设备可以将220V三相交流电压、电流转换成幅值在 $\pm 5$ 以内的6组波形数组用于后续处理。波形数组  $\{x[n], dt\}$  是由浮点型一维数组  $x[n]$  和一个浮点型变量  $dt$  组成的结构体,其中  $x[n]$  表示经传感器  $K$  倍线性降压并 AD 转换后的电压、电流波形在采样点处的幅值序列,  $dt$  表示相邻两采样点间的时间间隔,与采样率  $F_s$  互为倒数关系。

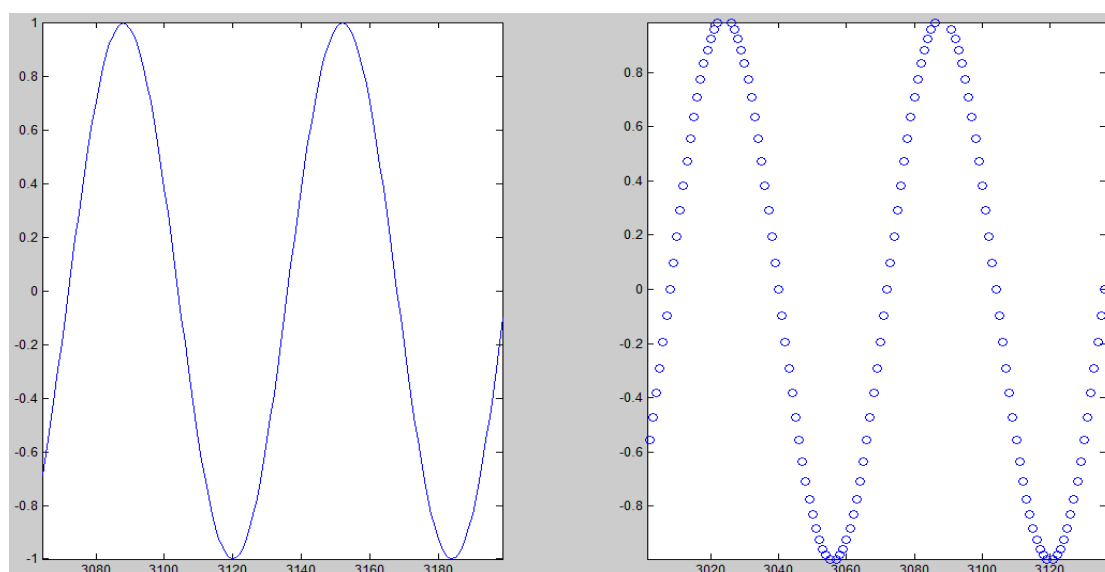


图3-1 连续信号与采样后信号

因此在计算机内部三相交流电压、电流是由6组一维数组 $x[n]$ 和时间间隔 $dt$ 表示，对原来模拟电压、电流的分析也转化为对采样后波形数组的离散信号分析，这是一系列基于计算机的电能质量分析的基础。图3-1表示原始电压、电流信号与计算机内波形数组的对应关系。其中‘o’代表采样点处信号的幅值。

### 3.3 基本量的测量方法

#### 3.3.1 电压有效值测量

对于式3-1所示标准正弦信号 $u(t)$ ，其有效值 $U_{rms}$ 计算如式 3-2

$$u(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3-1)$$

$$U_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (3-2)$$

而实际电压信号并非标准正弦波形，主要含有谐波分量，因此若按3-2式仅对基波分量计算电压有效值会导致高次谐波能量被忽略，这显然是不符合测量标准的。为此，考虑到本文设计的测量系统可分析至基波的50次谐波的能力，由式3-2可以实现对电压有效值的测量功能

由于本文选用的数据采集卡可以以足够的采样率对电压信号采样，并且电压信号最终被转化为波形数组，根据式3-3可以通过直接对被采样后的离散电压信号 $u(n)$ 求均方根即为电压有效值

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)} \quad (3-3)$$

其中 $N$ 为采样数，图3-2为在LV中实现的电压有效值测量函数子节点

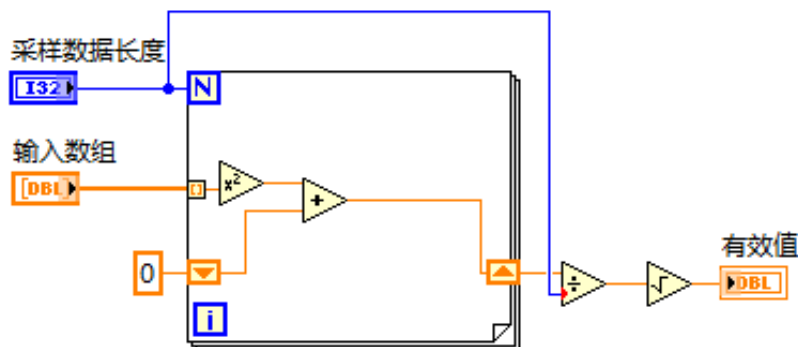


图3-2 LabVIEW中有效值测量函数子节点

### 3.3.2 电流有效值测量

电流有效值的测量方法与电压有效值测量方法类似

### 3.3.3 频率测量

电力系统频率是电能质量的重要指标同时又是实施安全稳定控制的状态反馈量，具有重大意义。目前对电力系统频率的测量通常采取以下几类方法<sup>[3]</sup>

- (1) 周期法又称过零法 (Zero-Crossing Algorithm)，通过测量信号波形相邻两个过零点的时间差推断出信号的频率，对于标准正弦信号周期法能够测量出准确的结果，但是通常被测量电压、电流信号包含噪声并混有高次谐波，此时信号波形发生畸变，基波信号一个周期内畸变后的波形可能会多次过零点，此时采用周期法测量不能得出正确的频率。
- (2) 解析法，将待测频率转换成样本值的显函数来估计，但数学推导较为复杂，信号观测模型较为简单，难以应用在谐波、非周期分量和噪声影响，可以用在对速度和精度要求不高的分析场合。
- (3) 最小二乘法 (Least error square algorithm)，在最小方差意义下实现样本数据与模型的最佳拟合，通常情况下，最小二乘法抑制随机噪声能力较强，在对谐波、衰减直流等非特征信号分析的能力与观测模型的选取有很大关系。
- (4) 离散傅里叶变换 (DFT) 及其改进法，对被测量信号做 DFT 变换，获得信号幅度谱，幅度谱幅值最大的谱线号所对应的模拟频率即为被测量信号的基波频率。相对于前述三种方法，DFT 及其改进法具有抗噪声和谐波性能好，算法简便，具有现成计算模块等优势，同时在结合数据加窗和插值 FFT 改进算法后可以很好地解决因采样不同步而引起的频谱泄露和栅栏效应问题，因此本文选择了该方法作为频率测量的基本方法。

根据数字信号处理相关知识可知，离散序列的离散时间傅里叶变换 (DTFT) 即为序列的频谱，它是数字角频率  $\omega$  的连续函数，鉴于计算机可以处理的离散序列必须为有限长度序列，且角频率  $\omega$  也需离散化，因此离散傅里叶变换 (DFT) 成为了计算机对离散序列做频域分析的工具<sup>[11]</sup>。

对于长度为  $N$  的因果序列  $x(n)$ ，其 DFT 序列  $X(k)$  定义为式 3-4

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-4)$$

其中旋转因子  $W_N = e^{-j2\pi/N}$

相应幅度谱  $|X(k)|$  可表示为式 3-5

$$|X(k)| = \sqrt{X_R^2(k) + X_I^2(k)} \quad (3-5)$$

其中  $X_R(k)$ 、 $X_I(k)$  分别为序列  $X(k)$  的实部和虚部

对于式3-6所示频率为  $f$ ，长度为  $N$  的离散正弦信号  $x(n)$

$$x(n) = \sin(2\pi f \frac{n}{N}), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-6)$$

其DFT序列由式3-7

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\pi f \frac{n}{N}) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-7) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\pi f \frac{n}{N}) [\cos(2\pi k \frac{n}{N}) - j \sin(2\pi k \frac{n}{N})] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \{ \sin[2\pi(f+k) \frac{n}{N}] - \sin[2\pi(f-k) \frac{n}{N}] \} - j \{ \cos[2\pi(f-k) \frac{n}{N}] - \cos[2\pi(f+k) \frac{n}{N}] \} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sin[2\pi(f-k) \frac{n}{N}] - j \cos[2\pi(f-k) \frac{n}{N}] \end{aligned}$$

只有当  $f=k$  时， $X(k) \neq 0$ ，所以

$$\begin{aligned} X(k) &= \begin{cases} -\frac{1}{2} j \sum_{n=0}^{N-1} 1, & f = k \\ 0, & f \neq k \end{cases} \\ &= \begin{cases} -\frac{N-1}{2} j, & f = k \\ 0, & f \neq k \end{cases} \end{aligned}$$

因此对于单频信号，其DFT序列只有在谱线号等于对应模拟频率时幅度谱才不为零，由此即可检测出单频信号的频率。然而实际电压、电流信号并非上述理想情况中所假设的单频正弦信号，而是频率在50Hz附近波动，且夹杂噪声和谐波的畸变信号，因此固定采样率的数据采集设备不能对电压、电流信号同步采样，即采样率不为被采样信号频率整数倍，仅仅采用上述DFT测量方法不能实现系统频率的精确测量。为了实现对电力系统频率的准确测量，首先要分析基于FFT的频谱分析的概念<sup>[12]</sup>。

## 1. 采样定理

通过DFT对连续信号进行频谱分析首先需要将被测量连续信号离散化，这个过程就称为采样。在数学上，将连续信号离散化通常用一组周期冲激串与被采样信号相乘，该冲激串周期  $T$  即为采样周期，其倒数  $F_s = 1/T$  即为采样率。对于频率范围在  $\omega_m$  的带限信号，采样后频谱为原连续信号频谱以  $\omega_s$  周期移位且幅度变为原来  $1/T$  后叠加而成的周期性函数，当采样角频率  $\omega_s = 2\pi F_s$  大于带限信号带宽  $\omega_m$  两倍时，移位后的连续信号频谱不会相互重叠，

在通过增益为T，带宽为 $\omega_M$ 对低通滤波器后原连续函数可以不失真地恢复，此时 $\omega_M$ 被称为奈奎斯特频率<sup>[11]</sup>。简而言之，采样定理表明了当采样率大于被采样信号最大频率分量的两倍时，可以不失真地恢复被采样信号。当采样角频率 $\omega_s$ 小于被采样信号最大频率分量 $\omega_M$ 的两倍时，原连续信号的频谱移位后将互相重叠，这种现象被称为频谱混叠，此时信号中大于奈奎斯特频率的分量将混叠到低频分量中。

## 2. 频率分辨率和栅栏效应

频率分辨率是指根据离散信号的离散傅里叶变换序列，能够计算出的最小模拟频率步进量的能力。结合本文数据采集设定参数，以满足采样定理的采样率 $F_s$ 对模拟正弦信号采样，每次采集N个点后，数据送入计算机处理一次，采样后的离散信号由式3-8表示。

$$x(t) = \sin(\omega t)$$

$$x(n) = \sin(\omega \frac{n}{F_s}), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-8)$$

对采样信号做快速傅里叶变换得到的频谱序列长度为N，根据数字角频率与模拟频率的关系<sup>[12]</sup>，频谱序列两条相邻谱线的间隔 $\Delta \omega = 2\pi/N$ 所代表的模拟频率 $\Delta f$ 为 $F_s/N$ ，而变换后的频谱也为长度N的离散序列，因此在每两根谱线之间的频率信息就不能有DFT序列表示，这种现象被称为栅栏效应。通常在对电压、电流信号采样时采样率为6400Hz，在不采用其他补偿算法的前提下，要实现频率测量达到0.2Hz的分辨率则采样数要达到 $6400 \times 5 = 32000$ ，即每5秒钟才能计算出一次频率，在实时监测系统中这显然是不可接受的。

## 3. 频率泄露

计算可处理的数据必须为有限长度，因此采样后信号 $x(n)$ 必须被截取有限长度，才能送入计算机分析，若直接将离散信号 $x(n)$ 截取 $n=0$ 到 $n=N-1$ 的数据即相当于将 $x(n)$ 在时域中与式3-9 表示的矩形窗相乘<sup>[12]</sup>。

$$w(n) = \begin{cases} 0, & \text{otherwise} \\ 1, & 0 \leq n < N \end{cases} \quad (3-9)$$

式3-10所示为矩形窗对应的频谱 $W(e^{j\omega})$

$$W(e^{j\omega}) = \frac{\sin(\omega N / 2)}{\sin(\omega / 2)} e^{-j\omega(\frac{N-1}{2})} \quad (3-10)$$

6400点矩形窗的主瓣幅度谱见图3-3

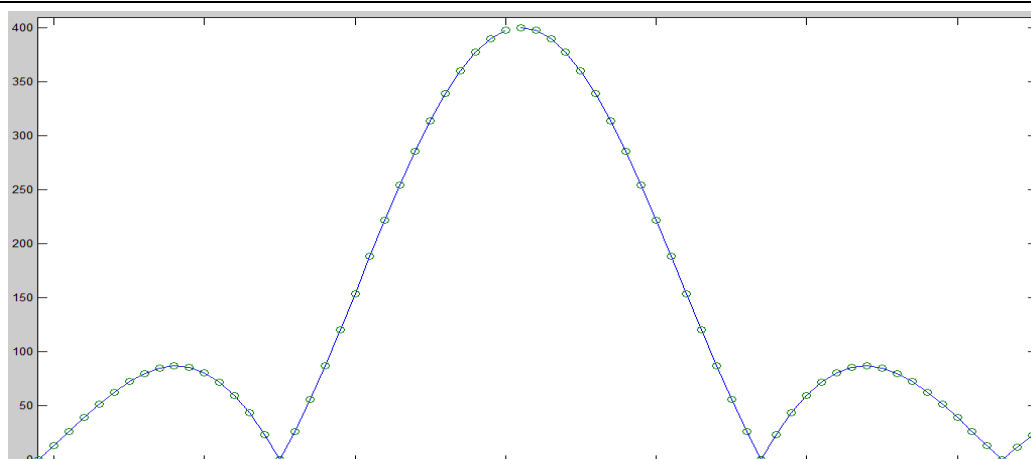


图3-3 6400点矩形窗主瓣幅度谱

离散信号与窗函数在时域中的乘积对应在频域中的卷积，由上图可知，原本单一频率的离散信号在频域中仅在单一频率出具有幅值，但在和窗函数频谱卷积后，能量将散播到其他频率上，原本单一频率信号在被截取后频谱上产生了多个频率分量，这种现象被称为频谱泄露，频谱泄露现象将给后续的频率分析和谐波分析带来很大误差<sup>[12]</sup>。

为了能够尽量消除离散序列截取后造成的频谱泄露带来的影响，目前主要采用选择特定的窗函数来截取序列。本文选择了hanning窗作为截取序列的窗函数，式3-11分别为hanning窗的时域表达式。

$$w_h(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / N) (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (3-11)$$

图3-4为1600点hanning窗时域图形

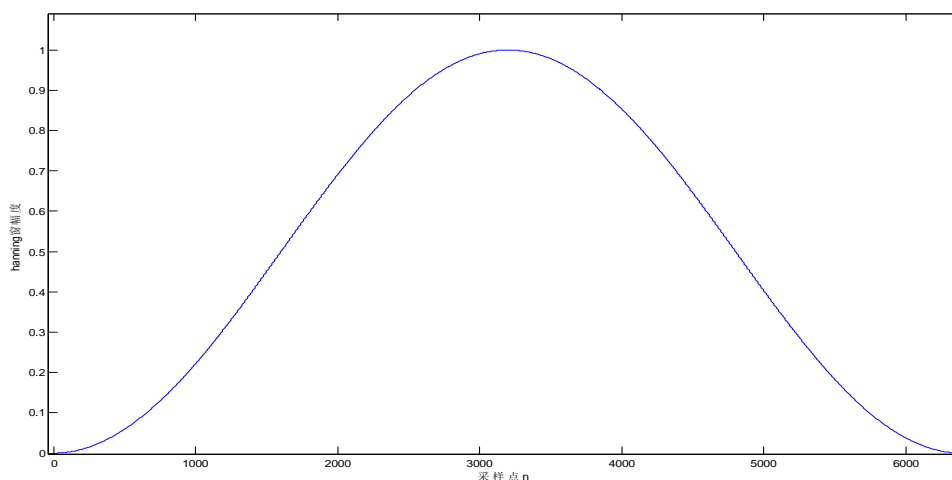


图3-4 6400点时域hanning窗

在分析上述两个FFT频谱分析基本概念后，确定了频率测量的基本流程，见图3-5

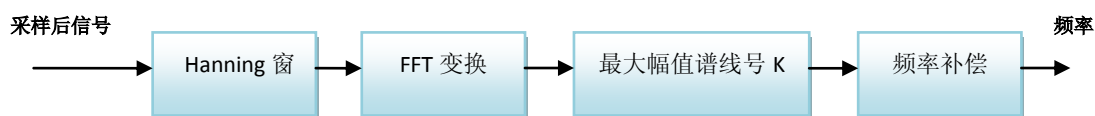


图3-5 频率测量流程图

最后本文选择了差值FFT算法实现频率补偿模块，原始信号为任意初相位正弦信号，在采样不同步时，可以对信号的FFT序列结果作相应的处理，最终得到信号的真实频率<sup>[10]</sup>。

对式3-8所示实际频率为 $f$ 的离散正弦信号，设其加窗FFT幅度谱最大幅值谱线号 $K$ ，对应模拟频率 $f_0$ ，则可设 $\Delta f$ 使 $f=f_0+\Delta f$ ，只要能求出 $\Delta f$ 即可得到被测信号的真实频率。当采样率为 $F_s$ ，采样数为 $N$ 时， $f_0$ 与 $K$ 的关系如式3-12

$$f_0 = k \frac{F_s}{N} \quad (3-12)$$

为分析方便，设 $F_s=N$ ，则 $f=k+\Delta f$ 。

此时测量频率 $f$ 的问题转化为求取 $\Delta f$ 的值，为便于分析，设如式3-13所示输入简谐信号

$$x(t) = e^{j2\pi ft} \quad (3-13)$$

以 $F_s$ 采样率采样该信号，对采样后离散序列做离散时间傅里叶变换（DTFT）得到傅里叶变换表达式为式3-14。

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi\delta(\omega - \omega_0 + 2\pi k) \quad (3-14)$$

其中 $\omega_0=2\pi f/N$

根据图3-5频率测量流程，需要对输入信号采样后用式3-11表示的hanning窗截取出有限长度的序列。hanning窗的DTFT为式3-15。

$$W_h(e^{j\omega}) = 0.5 \frac{\sin(N\omega/2)}{\sin(\omega/2)} + 0.25 \left( \frac{\sin N(\omega - \frac{2\pi}{N-1})}{\sin((\omega - \frac{2\pi}{N-1})/2)} + \frac{\sin N(\omega + \frac{2\pi}{N-1})}{\sin((\omega + \frac{2\pi}{N-1})/2)} \right) \quad (3-15)$$

由傅里叶变换性质可知，时域中两信号相乘等价于频域中的卷积，因此，经过hanning窗截取后的信号 $X_h(e^{j\omega})$ 如下：

$$\begin{aligned} X_h(e^{j\omega}) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\theta}) W_h(e^{j(\omega-\theta)}) d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} (X(e^{j\theta}) W_h(e^{j(\omega-\theta)})) \big|_{\theta=\omega_0} \\ &= W_h(e^{j(\omega-\omega_0)}) e^{-j\frac{N-1}{2}(\omega-\omega_0)} \end{aligned} \quad (3-15)$$

由DTFT与DFT的对应关系可知，将上式以 $\omega = \frac{2\pi k}{N}$ 离散化后可得到对应时域离散信号的DFT序列，设DFT序列幅值最大点对应的谱线号为 $k_m$ ，则被测量信号 $f=k_m+\Delta f$ 。对应DFT序列 $k_m$ 号谱线的DTFT连续角频率 $\omega_m = \frac{2\pi k_m}{N}$ ，由式3-15可得：



$$\begin{cases} |X_h(e^{j\omega})|_{\omega=k_m \frac{2\pi}{N}} \approx \frac{\sin(\pi\Delta f)}{2\Delta f(1-\Delta f^2)\pi} & (1) \\ |X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m+1)\frac{2\pi}{N}} \approx \frac{\sin(\pi\Delta f)}{2\Delta f(1-\Delta f)(2-\Delta f)\pi} & (2) \\ |X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m-1)\frac{2\pi}{N}} \approx \frac{\sin(\pi\Delta f)}{2\Delta f(1+\Delta f)(2+\Delta f)\pi} & (3) \end{cases} \quad (3-16)$$

设 $X_m$ 为式3-16中2式与3式较大的一个，则可设  $\beta_m = \frac{|X_h(e^{j\omega})|_{\omega=2\pi k_m/N}}{X_m}$

当 $|X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m+1)\frac{2\pi}{N}} > |X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m-1)\frac{2\pi}{N}}$  时，可得  $\Delta f = \frac{\beta_m - 2}{1 + \beta_m}$

当 $|X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m+1)\frac{2\pi}{N}} < |X_h(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m-1)\frac{2\pi}{N}}$  时，可得  $\Delta f = \frac{2 - \beta_m}{1 + \beta_m}$

至此，可求出 $\Delta f$ ，则对应的实际频率 $f = k_m + \Delta f$

LabVIEW中实现频率测量的函数子节点如图3-6所示

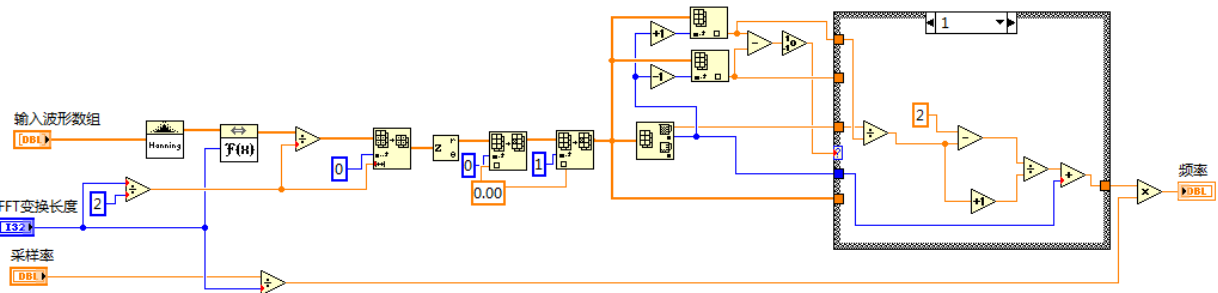


图3-6 LabVIEW频率测量函数子节点

### 3.3.4 功率测量

电网的根本功能是传输电能，因此功率在电力系统在设计运行中占有非常重要的地位。系统中有功和无功功率可以反映系统的运行状况，功率因数对电力设备的利用效率有着重要影响<sup>[1]</sup>。

对于实际的三相交流系统，由于电压、电流均含有一定比例的高次谐波成分而导致波形畸变，因此传统的正弦电路功率计算方法并不完全适用于三相交流系统。

根据有功功率 $P(w)$ 等于一个周期 $T$ 内瞬时功率的均值，可以得到非正弦条件某一相有功功率的计算方法如式3-18，三相总功率即为各相功率之和。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \sum_h U_h I_h \cos \varphi \quad (3-18)$$

其中 $U_h$ 、 $I_h$ 分别为 $h$ 次谐波电压、电流有效值。

对于满足采样定理采样的离散化电压信号 $u(k)$ 和电流信号 $i(k)$   $k=1, 2, 3\cdots N$ ，其中 $N$ 为采样点数，可将上式进一步转化为式3-19，从而实现在计算机中有功功率实时计算。

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k)i(k) \quad (3-19)$$

由于只有相同频率的电压与电流才能构成有功功率，与式3-17同理，可以定义非正弦条件下单相无功功率 $Q_f$  (W)<sup>[1]</sup>如式3-20

$$Q_f = \sum_h U_h I_h \sin \varphi \quad (3-20)$$

然而根据式 定义的无功功率 $Q_f$ 可能出现不同次谐波分别产生容性无功和感性无功而相互抵消的情况，这将会导致功率因数 $\cos \Phi$  小于1时出现无功功率为0的情况，这种不同次谐波间无功相互抵消显然是不合理的。目前针对电压、电流均为非正弦波形的情况，无功功率 $Q_f$ 的测量方法尚未得到有效的解决<sup>[1]</sup>。

在非正弦条件下，单相视在功率 $S$  (VA) 仍被定义为电压有效值 $U_{rms}$ 、电流有效值 $I_{rms}$ 的乘积如式3-21

$$S = U_{rms} I_{rms} = \sqrt{\sum_h U_h^2 \sum_h I_h^2} \quad (3-21)$$

但与正弦条件下功率定义不同的是，非正弦条件下视在功率 $S$ 与有功功率 $P$ 和无功功率 $Q_f$ 的关系已经不能由 $S^2 = P^2 + Q_f^2$ 来表示了，因此引入了畸变功率 $D$  (Distortion Power) 的概念<sup>[1]</sup>， $S, P, Q_f, D$ 的关系可由式3-22表示

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_f^2} \quad (3-22)$$

在系统实际运行时，电压通常能较好地保持正弦波形，因此可推导出电压正弦波形下A相视在功率 $S$ ，有功功率 $P$ ，无功功率 $Q_f$ 和畸变功率 $D$ 在的计算方法如下。

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k)i(k)$$

$$Q_f = U_{ar} I_{ar1} \sin \varphi$$

$$S = U_{ar} I_{ar1}$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_f^2}$$

其中 $U_{ar}$ 为A相电压有效值， $I_{ar1}$ 为A相基波电流有效值

根据传统功率因数 $PF$ 的定义，功率因数可由式3-23表示

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3-23)$$

图3-7所示为LabVIEW8.5中单相功率测量函数子节点

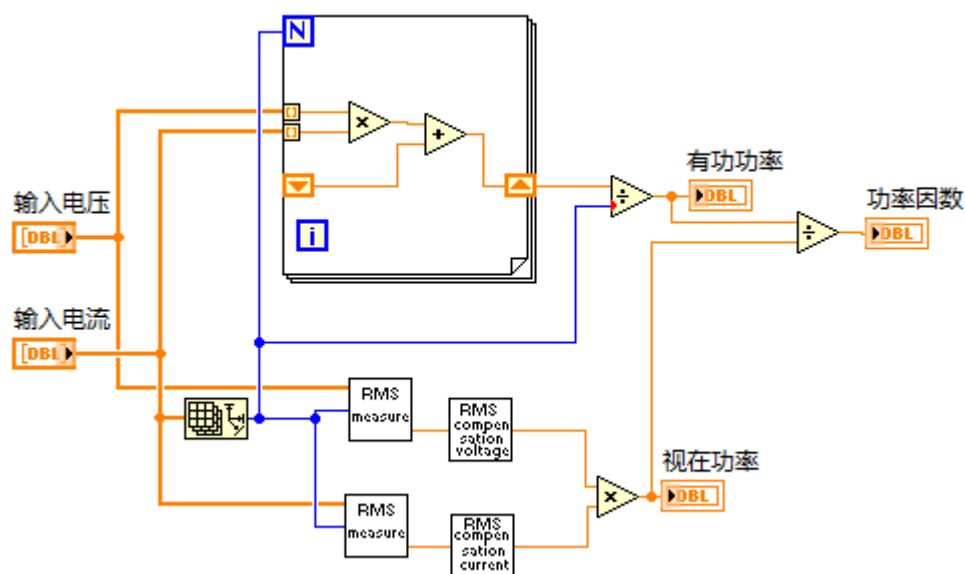


图3-7 LabVIEW单相功率测量函数子节点

### 3.4 电能质量指标的分析方法

根据对三相交流系统基本电量的测量结果，结合各稳态电能质量指标的定义，可以实现对谐波分析、三相不平衡度分析和电压闪变与波动分析。

#### 3.4.1 谐波分析

与3.2.2所述频率测量方式类似，DFT(FFT)频谱分析方法也是电网谐波分析的主要手段。按照国家A类电能质量监测仪器标准，谐波分析最高次数要达到基波的50次谐波。与频率测量相似，求出三相交流电压、电流信号的频谱，寻找对应基波频率 $f$ 的谱线号 $h$ 对应的幅度，即可实现对电压、电流信号的50次谐波分析功能。在NI LabVIEW8.5中系统提供了谐波分析的函数子节点，其输入参数为待测量信号波形数组 $\{u(n), dt\}$ 和对待测信号所要分析到的最高次谐波次数 $h$ ，输出为检测到基波 $f_1$ ，总谐波畸变率THD和各次谐波幅值 $Amp[h]$ ，在根据式2-7, 2-8各次谐波含有率定义，计算出 $HR_h^{[1]}$ 。图3-8所示为LV中实现50次谐波分析的函数子节点。

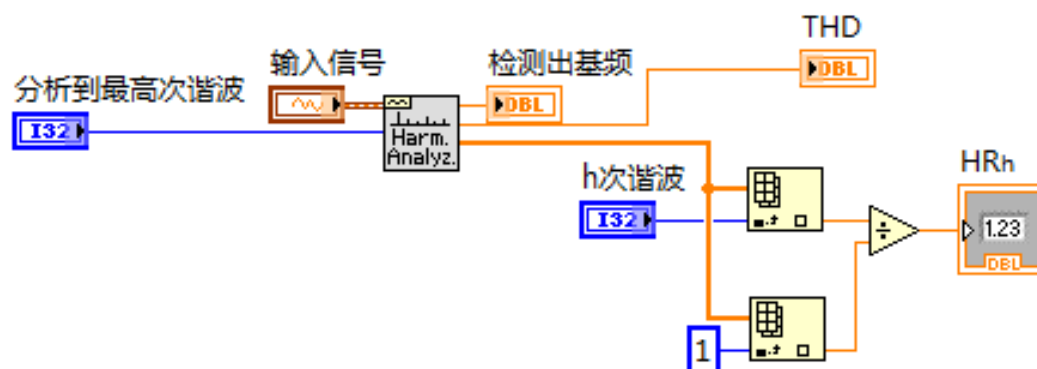


图3-8 LabVIEW谐波分析函数子节点

### 3.4.2 三相不平衡度分析

根据第二章所述的系统三相不平衡度定义，对不含零序分量的三相交流系统，可以采用式2-14表示的三相不平衡度简化公式<sup>[1]</sup>，因此本文选择该计算方法来实现三相不平衡度分析。

通过3.3.1节所述方法，可以得到三相交流系统电压、电流有效值 $U_{ar}$ ， $U_{br}$ ， $U_{cr}$ 和 $I_{ar}$ ， $I_{br}$ ， $I_{cr}$ 。因此直接将三相电压或电流有效值带入式，即可分别求出三相交流系统的电压、电流不平衡度<sup>[4]</sup>，图3-9表示了三相电压不平衡度的分析流程图。

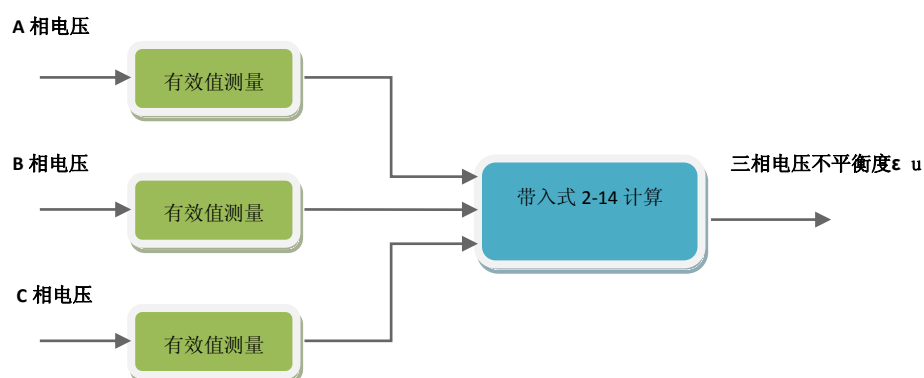


图3-9 三相不平衡度计算流程图

在LV中实现式2-14所表示的计算公式可以通过嵌入C代码的方式来完成，即可以提高计算效率，又能简化程序图形界面，便于修改。图3-10所示为LV中实现三相不平衡度分析的函数子节点。

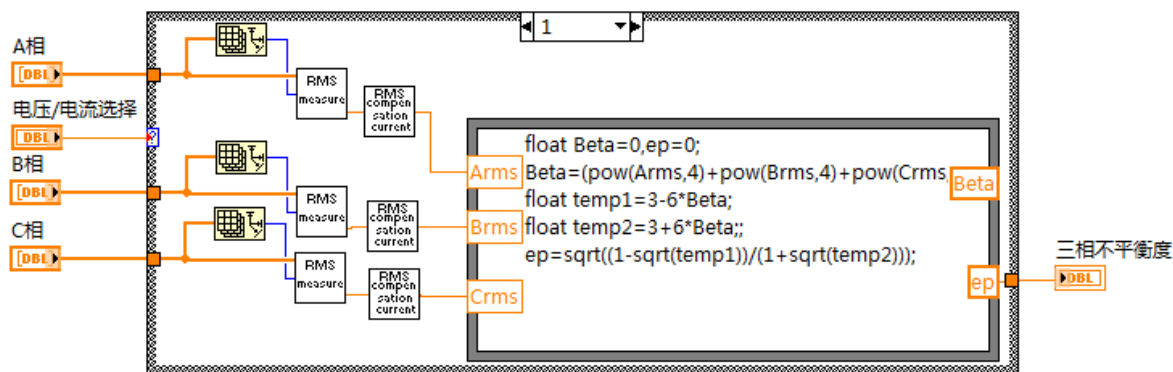


图3-10 LabVIEW三相不平衡度分析函数子节点

### 3.4.3 电压闪变分析

闪变 (flicker) 是指人眼对灯光照度波动的一种主观感觉。闪变分为瞬时闪变、短时闪变和长时闪变。对一段时间内的瞬时闪变做统计分析, 可以得到短时间闪变严重度和长时间闪变严重度, 以短时间闪变10min, 长时闪变为2h计算一次。对于短时间闪变, 根据10min 内对瞬时闪变视感度测量值 ( $S(t)$  曲线) 的统计, 可以得到瞬时闪变视感度的概率统计, 进而可以求出瞬时闪变视感度的累计概率函数 (CPF), 根据 CPF可以做出闪变的统计评定, 即短时间闪变值 $P_{st}^{[6,7]}$ , 如式3-24:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (3-24)$$

式中 $P_{0.1}$ 、 $P_1$ 、 $P_{10}$ 、 $P_{50}$ 分别是统计时间内超过累计时间0.1%、1%、10%、50% 的闪变值, 它们对应 $S(t)$ 从小到大排序, 选取99.9%、99%、97%、90%和50%概率大值。对长时间闪变值 $P_{lt}$ , 统计时间上需要1 小时以上, 国际标准通常规定为2小时。根据IEC的推荐, 对于已顺序测得的 $N$ 个10分钟短时间闪变值 $P_{sti}$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) 数据 $P_{lt}$ 可以通过式3-25求得:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{sti}^3} \quad (3-25)$$

波动的供电电压可由一个稳定的工频电压信号作载波, 叠加一个有规则或无规则的调幅波信号组成, 调幅波可包含单个或多个频率分量。为便于说明闪变仪的设计原理, 假设输入的电压信号 $u(t)$ 为式3-26

$$u(t) = \sqrt{2}U(1 + \sum_f m_f \cos \varphi_f) \cos(\omega_f t) \quad (3-26)$$

式中:  $U$ 为电网额定电压有效值;  $\omega_f$ 为电网工频电压角频率;  $m_f$ 为调幅波中频率为 $f$  的电压分量峰值与电网额定电压峰值之比;  $\varphi_f$ 为调幅波中频率为 $f$  的电压分量的角频率。稳定的工频电压不会引起闪变, 而电压中的调幅波成分是引起闪变的主要因素。发达国家的实验数据表明, 调幅波幅值越大且频率越接近8.8Hz, 造成的闪变程度越剧烈。因此, 对闪变

的研究就归结为对调幅波的研究。电压波动与闪变的测量是与它们的评估标准紧密相连的，IEC 推荐的采用230V 照明电压、60W 白炽灯的闪变实验与我国220V 照明电压较为接近，该方案为本文主要采用的电压波动与闪变测试方案<sup>[6]</sup>。IEC 给出的闪变仪测量原理框图如图3-11所示：

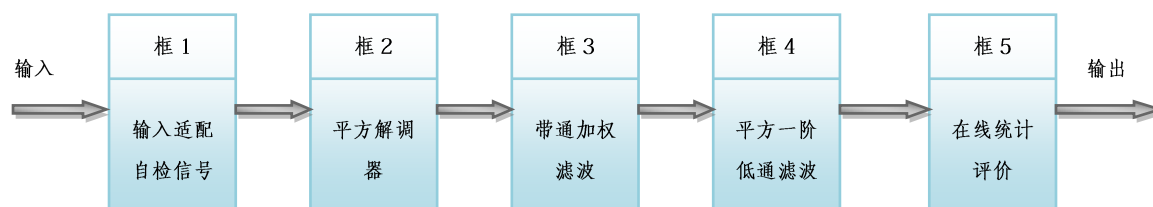


图3-11 电压闪变分析流程图

框1 为输入级，它除了用于实现把不同等级的电源电压（从电压互感器或输入变压器二次侧取得）降压到适用于仪器内部电路电压值的功能外，还产生标准的调制波，便于仪器自检。框2、3、4 综合模拟了灯-眼-脑环节对电压波动的生理反应。其中框2 对电压波动分量进行解调，获得与电压变动成线性关系的电压。框3 的带通加权滤波器反映了人对60W、230V 钨丝灯在不同频率的电压波动下照度变化的敏感程度，通频带为0.05Hz~35Hz。框4包含一个平方器和时间常数为300ms的低通滤波器，用来模拟灯-眼-脑环节对灯光照度变化的暂态非线性响应和由S（t）曲线做出的CPF曲线示例记忆效应。框4的输出S（t）反映了人的视觉对电压波动的瞬时闪变感觉水平，当S（t）=1时表示人能够察觉闪变，可对S（t）作不同的处理来反映电网电压引起的闪变程度。进入框5的S（t）值是用积累概率函数CPF的方法进行分析，在观察期内（10分钟），对上述信号进行统计输出结果<sup>[6,8]</sup>。

图3-12所示为LV中实现电压闪变分析的函数子节点

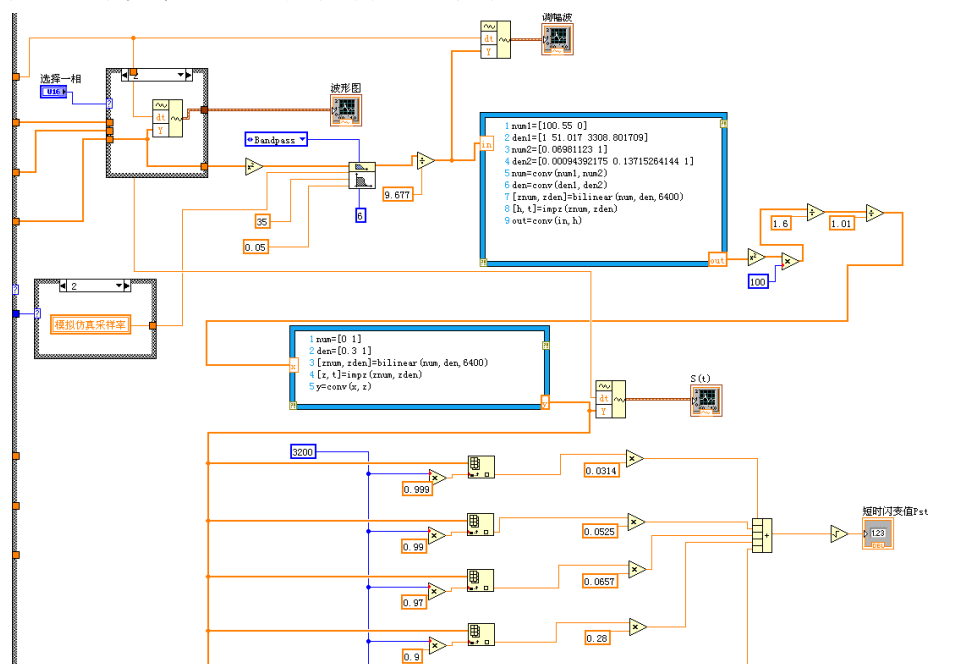


图3-12 LabVIEW电压闪变函数子节点

### 3.5 电能质量监测系统的仿真测试

为验证本文设计的电能质量监测系统对基本电量的测量和电能质量指标的分析功能，本章选择在模拟仿真条件下，对正弦、方波和包含最高至9次谐波并叠加高斯白噪声的仿真电压、电流信号进行测量和分析，以验证本文设计的测量、分析算法的准确性。

由于电机和变压器运行时会向空间辐射电磁波，因此电压和电流信号在传输过程中不可避免地会受到较大的干扰。为了验证本系统对噪声干扰下输入信号的测量和分析能力，本文选择了对输入的用户自定义信号叠加加性高斯白噪声的方式来模拟传感器输出的电压、电流信号可能受到的干扰。

对于某噪声，若其幅度分布服从高斯分布，而功率谱密度又是均匀分布的，则称其为高斯白噪声。对于特定的高斯白噪声离散序列，其采样点幅度的概率密度函数总是大致服从如式3-27所示的正态分布，其频谱在频域内大致均匀分布，图3-27所示为正态分布的概率密度。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-27)$$

在LabVIEW8.5中可使用系统提供的生成连续正态分布随机数函数子节点来产生高斯白噪声序列。

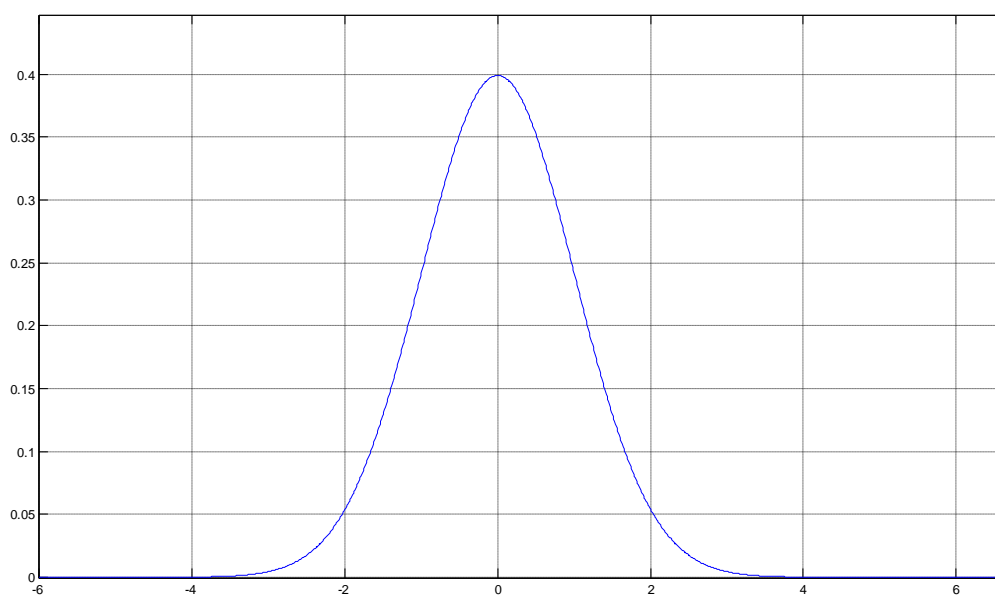


图5-1 正态分布概率密度

### 3.5.1 对标准正弦信号的测试

标准的正弦信号是单频信号，对标准正弦信号的测量可以验证本系统的有效值、频率和功率测量功能的准确性。在系统开始运行后，选择模拟仿真模式，分别设定仿真正弦信号的幅值、频率和相位差，共测量4组参数不同的仿真信号，其中第三组和第四组仿真信号叠加了不同标准差的高斯白噪声，仿真结果如表3-1所示

表3-1 仿真正弦信号测试结果

	设定值				测量值			
	第一组	第二组	第三组	第四组	第一组	第二组	第三组	第四组
有效值	3.536	3.525	3.536	3.545	3.536	3.525	3.535	3.546
频率	50	50.015	50	49.085	50	50.015	50	49.085
相位差	0°	45°	10°	60°	0°	45°	10°	59.9°
(功率 因数)	(1)	(0.7071)	(0.985)	(0.5)	(1)	(0.707)	(0.985)	(0.501)
白噪声 标准差	0	0	0.1	0.1				

由上表可看出，系统的有效值、频率测量功能在被测信号噪声较大的情况下仍然较为准确

### 3.5.2 对叠加噪声的仿真电压、电流信号测试

电力系统中的电压、电流通常不是标准正弦波形，而是包含了各高次谐波的畸变波形。其波形现状与各次谐波的幅值和相位均有关系。为验证本系统对叠加了噪声的畸变电压波形的谐波分析能力，采用如式3-28所示的模拟仿真信号为输入电压信号，对比其实测结果与理论值。

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f_1 t + \varphi_n) \quad (3-28)$$

式中 $a_n$ 为各次谐波幅值， $f_1$ 为基波频率， $\varphi_n$ 为各次谐波初相位

在畸变电压信号上叠加标准差为0.05的高斯白噪声后测量结果如表3-2所示



表3-2 叠加噪声的畸变信号测试结果

谐波次数	幅值 (含有率%)		初相位 (°)
	理论值	实测值	理论值
1	3.1 (100)	(100)	0
2	0.05 (1.61)	(1.62)	0
3	0.95 (30.65)	(30.65)	165
4	0.02 (0.65)	(0.65)	0
5	0.15 (4.84)	(4.84)	175
6	0.01 (0.33)	(0.29)	0
7	0.1 (3.23)	(3.22)	165
8	0 (0)	(0.05)	0
9	0.06 (1.94)	(1.97)	175
THD (%)	31.48	31.28	
基频 (Hz)	50	50.00	

由上表可以看出，在叠加噪声的情况下，本系统的谐波分析功能仍较为精确。

根据对以上两组仿真信号的测试，本系统设计的有效值、频率和谐波分析功能的准确性得到了验证，因此本章介绍的测量和分析算法是可行的。

## 4 基于虚拟仪器电能质量监测系统软硬件结构及功能

### 4.1 电能质量监测系统的基本结构

本文设计的电能质量监测系统主要由三相电压、电流互感器、信号调理电路、数据采集设备和计算机终端程序四部分组成，如图4-1所示。

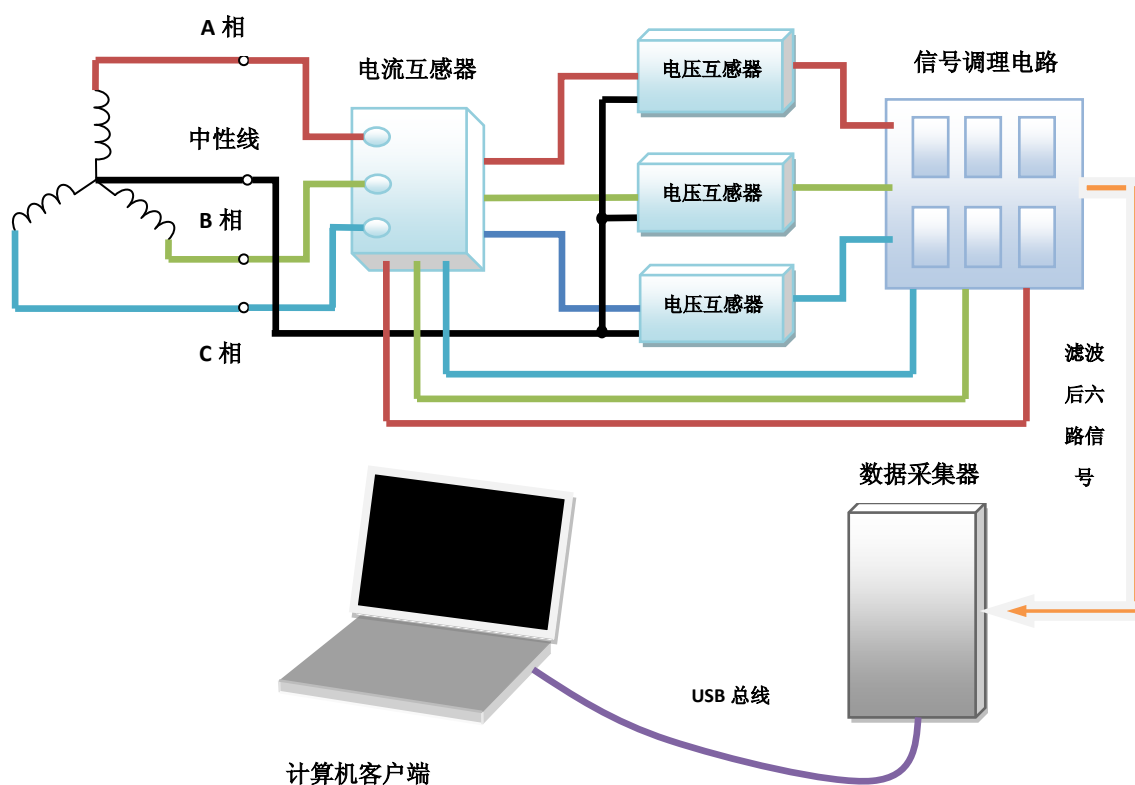


图4-1 电能质量监测系统结构图

三相交流电压、电流互感器分别将0~500V电压信号和0~8A电流信号线性转换为6路0~5V跟踪电压信号；六路信号进过信号调理电路进行抗混叠滤波和放大，消除高频噪声信号引起的频谱混叠现象；NI USB6210数据采集器对信号调理电路输出的六路信号采样、AD转换，通过USB总线将数据送入计算机；在计算机端，以NI LabVIEW8.5为平台，编写测量分析程序实现实时波形显示、基本量测量和电能质量指标的分析并记录采集波形数据。

## 4.2 系统硬件结构

本系统硬件部分包括电压互感器和电流互感器、四阶butterworth抗混叠模拟滤波器和数据采集器四个部分。

### 4.2.1 互感器

电压、电流互感器由公共铁芯和缠绕其上的两个相互绝缘绕组组成，可将较大的交流电流转换成适于仪表测量的电流或电压信号，其原边绕组匝数 $W_1$ ，副边绕组匝数 $W_2$ ，则电压变比 $K_u=W_1/W_2$ 。当原边为高压交流信号时，副边感应电压为原边电压的 $\frac{1}{K_u}$ ，感应电流为原边电流 $K_u$ 倍。电压互感器将高压交流电变送为0~5V标准测量信号，当电流互感器副边串接适当的电流电压变送器后，可将变送后电流信号转换成0~5V标准测量信号<sup>[16]</sup>。

本文选择了绵阳维博电子有限责任公司的3只WBV1411U07型单相电量隔离电压互感器和一只WB3I411U37型三相电量隔离电流互感器。单相电压互感器测试灵活，既可测线电压也可测相电压，但接线较为繁杂；三相电流互感器能同时测量三相电流。这两类传感器采用特制隔离模块，对电网和电路中的交流电流、电压进行实时测量，将其变换为标准的跟踪电压输出。具有高精度、高隔离、宽频响、低漂移、温度范围宽等特点。采用卡装式结构，结构紧凑，安装方便，适用于电力系统3相电路的实时检测<sup>[12]</sup>。

主要技术指标如表4-1所示

表4-1 电压、电流互感器技术指标

类型	单相电压互感器	三相电流互感器
型号	WBV411U07	WB3I411U37
输入	AC 0-500V	AC 0-8A
输出	AC 0-5V	AC 0-5V
辅助电源	±12V	±12V
精确度级	0.1级	0.2级
响应时间	15us	15us

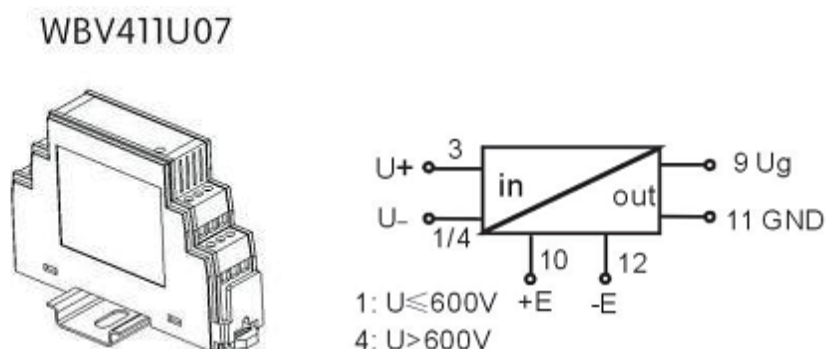


图4-2 电压互感器封装

图4-2所示为单相电压传感器WBV411U07，右图所示接线图中3、4为单相交流电压输入端口，10、12分别为正负12V电源供电端口，9为跟踪电压输出端口，11为输出公共地端口。

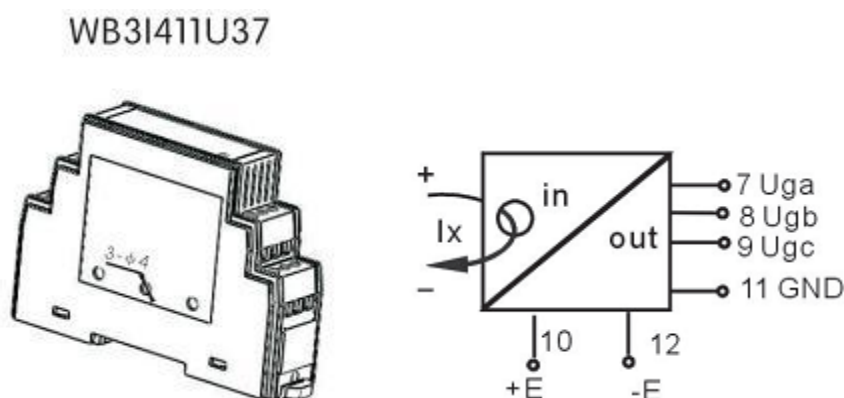


图4-3 电流互感器封装

图4-3所示为三相电流传感器WB3I411U37，三相交流电流A、B、C分别通过穿孔输入，10、12为正负12V电源供电端口，7、8、9分别对应三相电流A、B、C的跟踪电压输出口，11为公共地端口。值得注意的是，电压传感器、电流传感器以及后续的信号调理电路、A/D采集卡的所有地线都应统一，并最终与直流供电电源的地线相连。

本文选择的单相电压互感器输入电压(有效值，下同)范围为0~500V，输出电压信号为0~5V，因此电压互感器变比为100，数据采集器采样、AD转换后计算机中测量得到的电压值乘以100即为原边实际电压；电流互感器输入0~8A，输出电压信号0~5V，变比为1.6，因此在计算机中测量得到的电流值乘以1.6即为原边实际电流。

#### 4.2.2 信号调理电路

信号调理电路主要用于对互感器输出的电压、电流跟踪信号进行抗混叠滤波。对于某被采样信号，在满足采样定理<sup>[11]</sup>的条件下，即采样率 $F_s$ 大于被采样信号最大频率分量两倍的时候，采样后信号频谱为互相不重叠的周期序列。抗混叠滤波器用于滤除电压、电流信号中的高频噪声，以防高频噪声在采样过程中能量混叠到低频信息中。根据国家电能质量标准对电力谐波测量仪器的规定，A级仪器频率分析范围在0~2500Hz之间，即基波的50

次谐波。因此，本文设计的抗混叠滤波器应为截止频率在2500Hz附近的低通滤波器，同时还要保证滤波器幅频响应在通带内尽可能平坦，过度频带尽可能窄，阻带没有纹波。综合以上对抗混叠滤波器的几点要求，本文选择使用截止频率在2800Hz，品质因数 $Q=2.5$ 的4阶Butterworth低通滤波器来实现抗混叠滤波功能<sup>[12]</sup>。图4-4所示为使用Matlab设计出的4阶Butterworth低通滤波器频率响应。

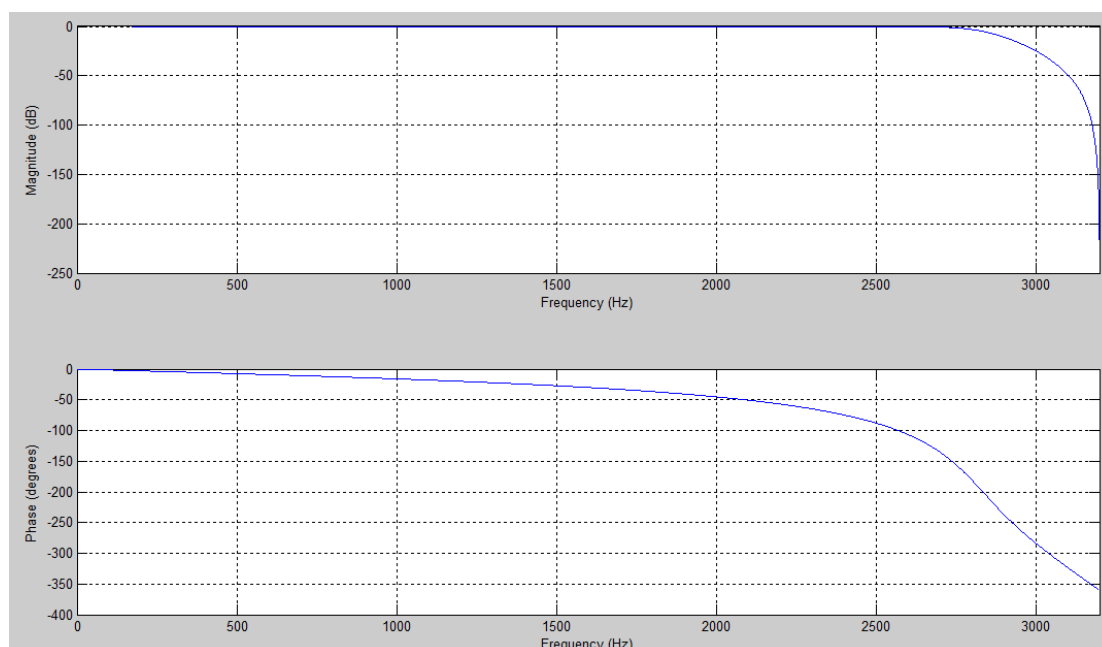


图4-4 4阶Butterworth低通滤波器频率响应

在滤波器硬件实现方面，本文选用一块MAXIM275滤波芯片。MAXIM275集成了2个独立的2阶有源滤波器，中心频率在100Hz~300kHz间，谐波失真度小于-86dB，在全温度条件内，信噪比最大可达83dB<sup>[12]</sup>。

图4-5所示为基于MAXIM275的4阶Butterworth低通滤波器电路图，各电阻阻值见表4-1

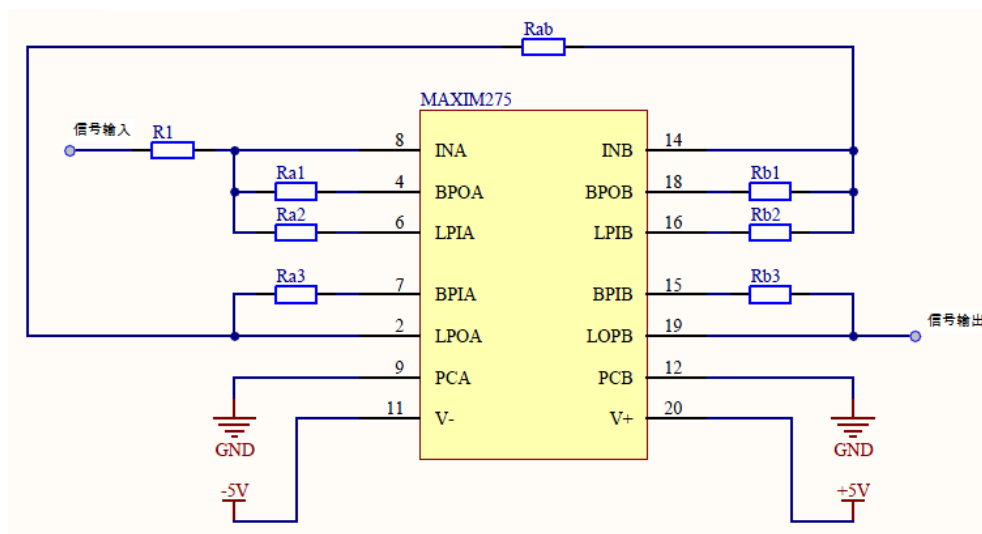


图4-5 基于MAXIM275的滤波器电路

表4-1 图4-5中各电阻阻值

R1	Ra1	Ra2	Ra3	Rab	Rb1	Rb2	Rb3
143k $\Omega$	77.3k $\Omega$	709k $\Omega$	714k $\Omega$	143k $\Omega$	186.6k $\Omega$	709k $\Omega$	714k $\Omega$

### 4.2.3 数据采集设备

电压、电流信号的准确采集是所有电能质量指标分析的基础，为实现高精度、高采样率和方便变成，本文选用了NI USB6210数据采集器，对滤波后信号进行AD转换，并通过USB总线将波形数据传输到计算机。NI USB6210性能如下

- ① 具有16路16位模拟输入端口，单路输入最大采样率可达250Ks/s
- ② 拥有4路数字输入和4路数字输出
- ③ 两个32位计数器
- ④ 任意输入通道可编程

本系统主要使用了NI USB6210数据采集器的模拟输入端口，数据采集器对单通道输入模拟信号可以最大250kS/s的采样速递对其进行AD转换，当输入通道数 $n>1$ 时，采集器可以将最大采样率平分给个通道，即此时每通道最大采样率为 $250/n$  kS/s。输入模拟信号可以差分、共地单端输入(RSE)和不共地单端输入(NRSE)三种方式连接到数据采集卡。

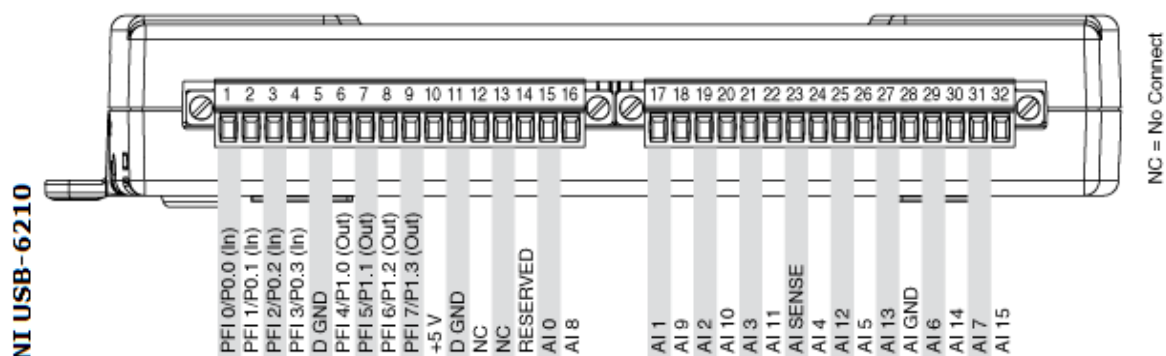


图4-6 NI USB6210接口图

图4-6所示为NI USB6210数据采集器引脚图，模拟输入部分包括AI0~AI15、AIGND和AISENSE。当设置通道 $n$ 为差分输入模式时，被测信号双端口分别接到AI $n$ 和AI $n+8$ 。此时数据采集器工作原理如图4-7所示，信号源V1输出端口分别接到采集器内部的运算放大器，AI $n$ 与AI $n+8$ 端口间的电压差被输入并AD转换。当系统工作环境电磁干扰较大，或信号线过长等易引入噪声的环境适于使用差分输入方式

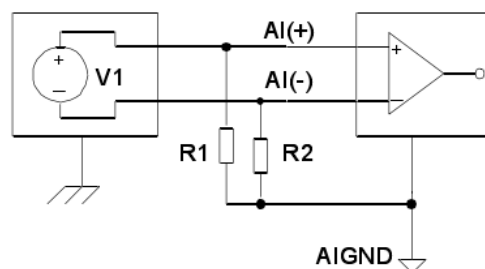


图4-7 差分方式输入原理图

当设置输入方式为RSE时，采集器工作原理由图4-8所示，此时Vn信号源的输出端口分别于AIn和AIGND相连接，若有多个输入信号，其地线都连接到数据采集器的AIGND。当系统工作环境引入噪声较小且需测量通道数较大时，可以采用此输入方式。

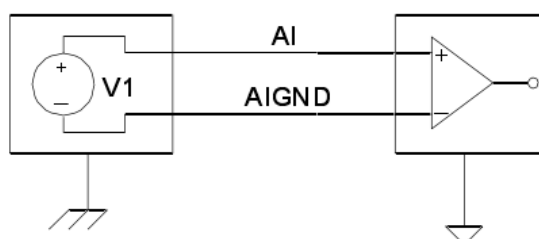


图4-8 RSE输入原理图

在本系统中，共需采集六路信号，且每路信号都需以相同的采样率采样，因此最终选择了以RSE方式将电压、电流互感器输出信号连接至数据采集器，4只互感器的地线GND都连接至数据采集器的AIGND端口。

## 4.4 系统软件结构

本文根据第三章所述的测量分析内容，设计了基于LabVIEW8.5的电能质量监测系统客户端。客户端软件的设计由人机界面、数据采集、数据分析和数据存储四个逻辑部分完成。用户在进行操作时，在人机界面设定初始化参数、选择系统工作模式（数据采集、波形回放、模拟仿真三种工作模式）；数据采集部分根据用户选择的工作模式分别实现从数据采集器中获取数据、从硬盘中读取存储的实测数据和产生用户设定的波形数据；数据分析部分用于实现第三章所述的基本电量和电能质量指标的测量和分析；数据存储部分则完成数据采集和模拟仿真模式下的波形数据记录和波形回放模式下的波形数据读取功能。由于LabVIEW具有伪并行执行的能力，因此本文设计的系统在每次采样循环内，可以同时完成数据分析计算和波形数据保存的功能。系统程序流程如图4-9所示

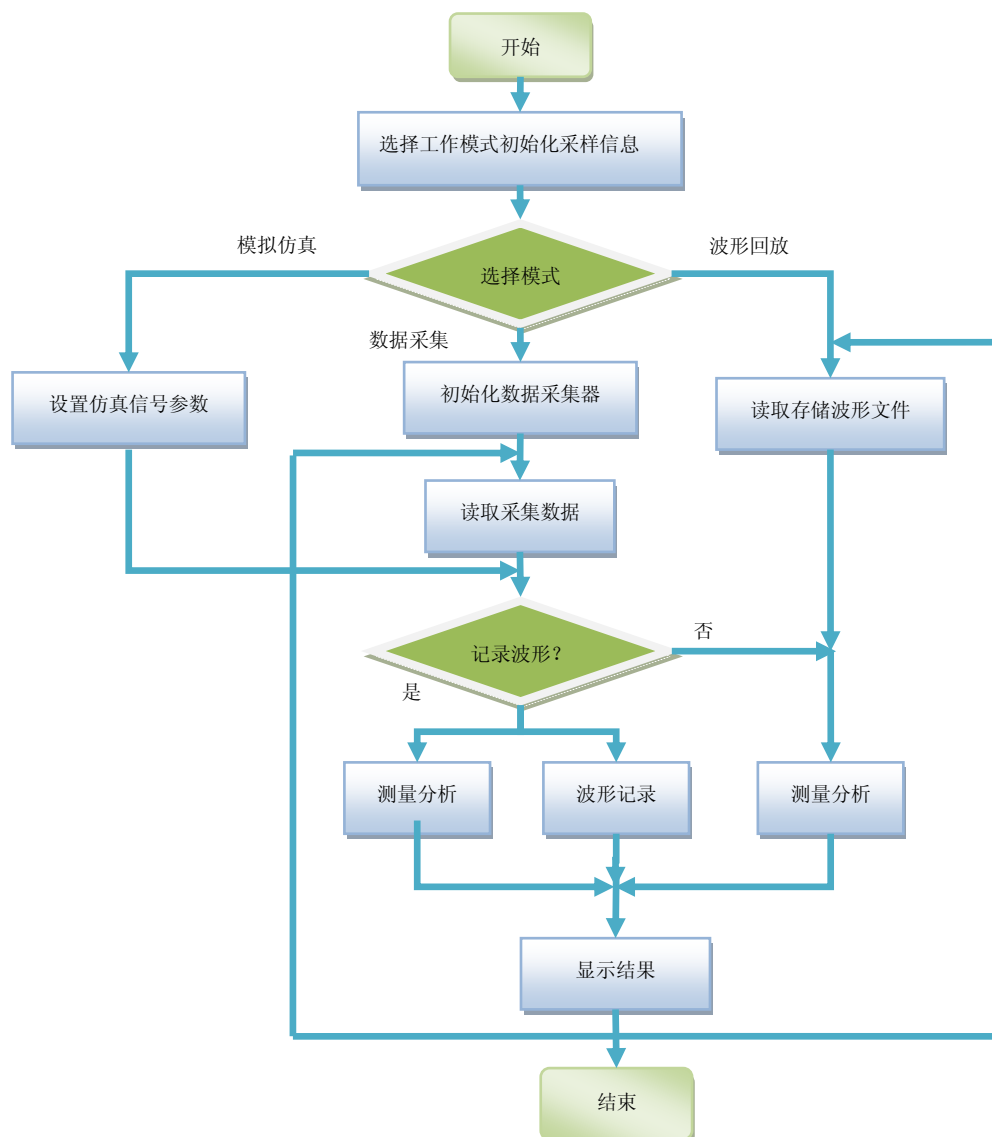


图4-9 系统程序流程图

#### 4.4.1 人机界面

本系统软件部分设计的首要任务就是确定客户端人机界面的结构，NI LabVIEW8.5提供了丰富的图形化控件用以美化系统前面板，包括波形图显示、数值显示与输入、文本显示与输入、表格显示与输入等，为实现操作简便、直观的测量系统前面板提供了强有力的工具。根据电能质量监测系统要实现的几项测量分析功能，最终本文选择了以选项卡的形式作为客户端基本界面，其中选项卡包含了基本设定、基本参数测量、功率测量、谐波分析、三相不平衡度和电压波动与闪变6个选项<sup>[17]</sup>。

用户在打开本系统后，首先进入基本设定选板，在该选板内可以设定系统工作方式和参数，工作方式包括数据采集波形回放和模拟仿真。若设定为数据采集，则系统将会启动



数据采集器采集真实信号，并可以通过打开数据记录开关在观察任意面板过程中记录当前三相电压、电流波形并保存到当前工作路径所指定的文件夹，供离线分析；设定为波形回放时，系统会从当前工作路径中读取以前存储的电压、电流波形数据，模拟真实采样时的工作情景；设定为模拟仿真时，系统发生用户设定信号供测量分析。在基本设定选板中还需设定两种工作方式下的采样率 $F_s$ 、采样数 $N$ 和系统工作路径，其中需注意模拟仿真时的采样率和采样数必须与被读取波形数据的采样率和采样数一致。图4-10所示为系统前面板基本设定选项卡内容



图4-10 前面板选项卡基本内容

基本参数测量选项卡中包括了三相电压、电流波形的有效值、峰峰值、实时显示和系统频率显示；谐波分析选项卡中包括了谐波分析次数设定、总谐波畸变率THD显示、各次谐波含有率 $HR_n$ 和图形化显示的谐波幅度图；电压波动于闪变选项卡中包含了三相选择下拉列表、原始波形图、调幅波形图、视感度曲线和短时闪变值 $P_{st}$ 显示。

#### 4.4.2 数据采集

数据采集时一切分析的前提，在数据采集模式下，测量实际电压、电流信号时需选择合适的采样率和采样数才能为后续分析模块提供正确数据。单通道采样率的确定可以由以下三个约束条件来确定

- (1)根据本系统设计的谐波分析能力，即分析到基波的50次谐波，则被采样电压、电流信号有用信息的最大频率分量为2500Hz。由采样定理可知要完整地获得被采样信号中的信息，采样率 $F_s$ 必须大于被采样信号最大频率分量的两倍<sup>[11]</sup>，即 $F_s \geq 5000\text{Hz}$ 。

(2)同时，为了尽可能避免因采样不同步而导致的频谱泄露问题，单相信号的采样率 $F_s$ 应为系统频率50Hz的整数倍，即 $F_s=n \times 50, n \in \mathbb{Z}^+$ 。

(3)对被采样信号做FFT测量系统频率和做谐波分析应尽可能使输入的电压、电流波形数组长度为2的整数次幂，即满足一个电压、电流信号周期内采样点数 $F_s/50=2m, m \in \mathbb{Z}^+$

由以上三个约束条件可以得出当 $m=7$ 即 $F_s=6400\text{Hz}$ ，每个电压信号周期内采集128个点时恰能够满足上述条件。且不会因采样率高使运算量过大<sup>[12]</sup>。

每通道采样数 $N$ 表示数据采集器每采集 $N$ 个样本就将其传输到计算机，并由计算机完成所有基本电量测量和电能质量指标分析。 $N$ 的大小决定了计算机计算所有参数的最大时间限制为 $N/F_s$ 秒和系统前面板的数据刷新频率。因此如果 $N$ 取值过大，则可能因数据采集器的存储器空间不足而丢失部分数据，且前面板刷新速率慢，失去了实时监控的价值；若 $N$ 取值太小则计算机可能不能再 $N/F_s$ 秒内完成所有运算，且前面板数据刷新太快，人眼无法看清。经过实际试验发现， $0.5\text{s} \sim 1\text{s}$ 的前面板刷新周期，即 $3200 \leq N \leq 6400$ 是比较适合人眼观察且平衡数据采集器存储容量和计算机处理速度，再综合采样率约束条件(3)，即 $N=2m, m \in \mathbb{Z}^+$ ，最终确定 $N=4096$ 时能够取得最好效果。

### 数据采集模式

在硬件方面4.2.3节已经介绍了本系统选用了NI USB6210数据采集器，且电压、电流信号以RSE方式接入数据采集器，最后波形数据通过USB总线传输到计算机。在计算机端NI公司提供了Measurement&Explorer数据采集器驱动程序，通过该驱动提供的数据采集函数子节点可以非常便捷地实现数据采集器工作参数设定和输出数据的读取，该函数子节点输入包括单通道采样率、单通道采样数等，输出为分别对应三相电压、电流信号的六路波形数组，图4-10所示为在LabVIEW8.5中的数据采集部分（数据采集模式）程序。

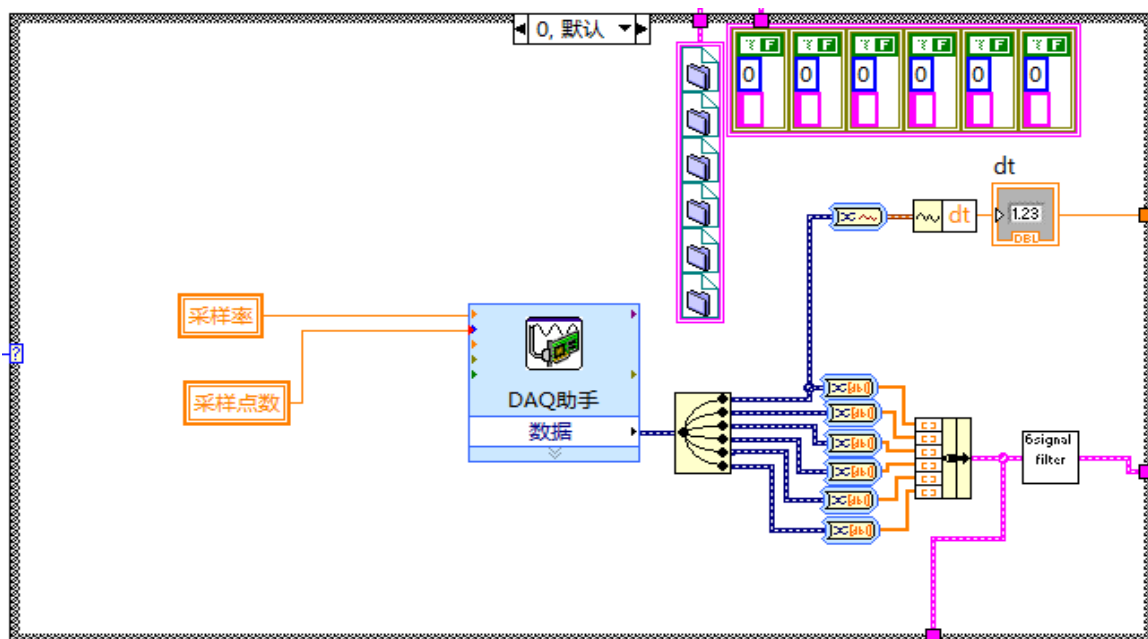


图4-10 LabVIEW数据采集部分（数据采集模式）程序

### 波形回放模式

用户在实验或监测电能质量时，通常希望能够将实测波形数据保存下来，以供实验后离线分析，因此，本文设计的电能质量监测系统设置了波形回放模式，可以将用户以前实验中记录的波形以模拟实际采样过程的方式重现。

以往实验过程中记录的波形结果保存在硬盘中，在选择波形回放模式时，用户在前面板基本设定中选择波形记录文件路径、设定要读取的波形文件创建时的采样率和采样数。系统开始运行后，数据采集部分输出读取的六路电压、电流波形数组，同时每次读取后延时真实采样条件下的采样时间 $= \text{采样数} N \times \text{采样周期} 1/F_s$ ，以模拟真实采样情景。图4-11所示为LabVIEW中数据采集部分（波形回放）程序框图

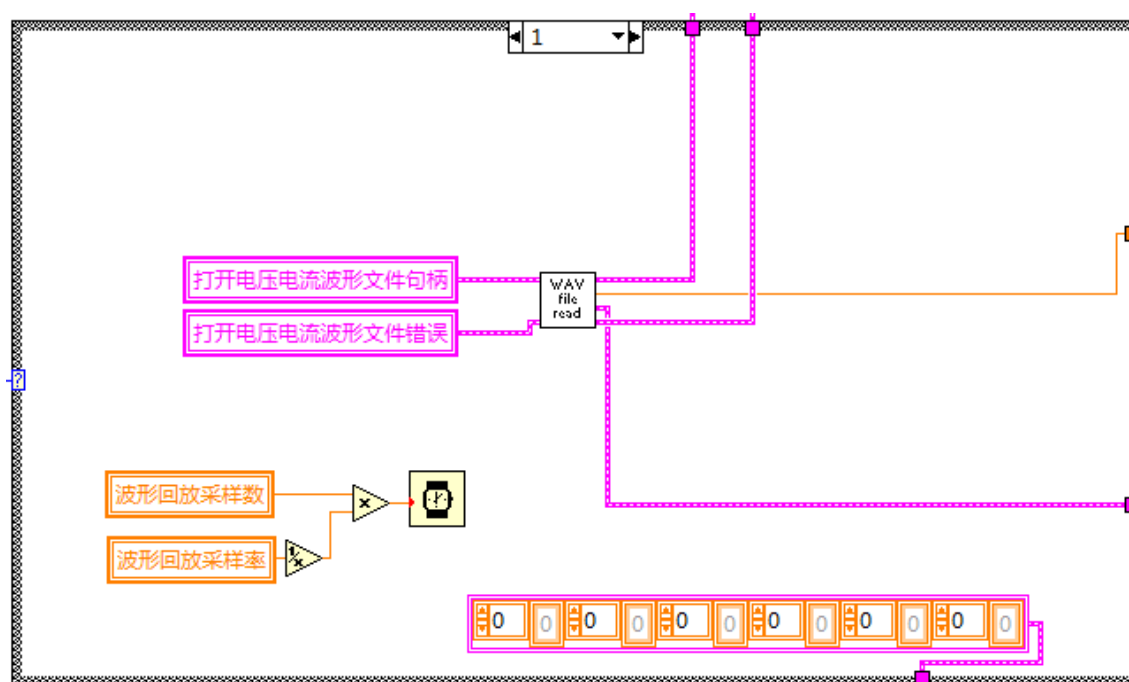


图4-11 LabVIEW中数据采集部分（波形回放）程序框图

### 模拟仿真模式

在实际测量之前，本系统首先需要通过测量分析一些特征信号验证测量功能的准确性，同时对于初次使用本系统的用户也可以通过使用本系统测量分析一些自定义的信号以熟悉本系统的使用方法，因此本文在系统中设置了模拟仿真模式。在模拟仿真模式下，用户可以设定发生标准正弦波、方波、三角波信号的幅值、频率和方波占空比，也可以自定义各次谐波的幅度和初相位，以模拟实际电网中的畸变电压和电流，在发生的两种类型信号中，用户均可以叠加不同标准差的高斯白噪声，以模拟真实条件下测量信号可能受到的干扰。

在选择模拟仿真模式时，用户可以在前面板基本设定选项卡中选择仿真信号类型，设

定信号参数。系统开始运行后，若用户选择发生标准信号，则系统根据输入参数产生标准的正弦、方波和三角波信号；若用户选择自定义信号，系统根据用户设定的各次谐波参数（各次谐波幅值、初相位）分别发生各次单频正弦信号，然后将各单频信号线性叠加并输出。图4-12所示为LabVIEW中数据采集部分（模拟仿真）程序框图

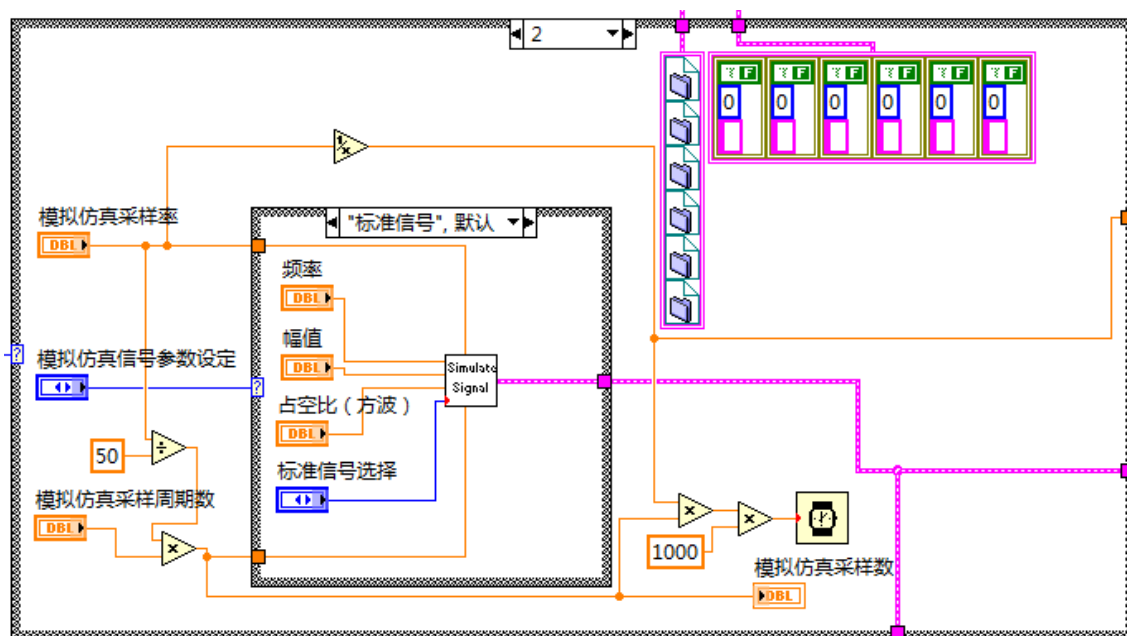


图4-12 LabVIEW中数据采集部分（模拟仿真）程序框图

#### 4.4.3 数据分析

数据分析是对采样后转换为波形数组的三相电压、电流信号进行基本电量测量和电能质量指标分析。根据4.4.1所述客户端人机界面设计，在同一时刻用户只能观察6个选项卡中的一个，此时只需执行当前用户观察选项卡所涉及的部分程序，而其它5个选项卡所涉及的测量和分析运算可以暂时停止执行以节省系统资源。因此，为了提高计算机运算效率，客户端程序框图中设置了6分支的选择结构，根据用户当前所选择的选项卡号，执行对应的分支程序。最后将第三章所述的每个功能函数子节点分别添加到6个分支中即可提高程序的运行效率。

#### 4.4.4 数据存储

在实时监测系统电能质量的同时，用户往往希望将当前的电压、电流波形保存到硬盘，用于验证新测量分析算法、辨识系统模型等扩展应用。为此，本文设计了数据存储模块来

实现对三相电压、电流波形数组的存储，并可以在用户选择波形回放模式时，读取原来存储的波形数据。

NI LabVIEW8.5具有强大的文件操作功能，可以通过调用文件操作函数子节点来实现对文件读写的功能<sup>[14]</sup>。表4-2为LabVIEW8.5能够操作的文件类型，和各自的特点。

表4-2 LabVIEW中各种文件类型特点

文件类型	特点
ASCII文本文件	由ASCII码组成，待记录数据将被转换成ASCII码存储在文件中，占用空间大，读写速度慢，读取程序复杂
电子表格文件	特殊的文本文件，添加了特殊标志，适于用电子表格类程序处理
二进制文件	存储转换成机器码的数据，读写速度快，占用空间小，但通用性较差
LV测量文件	LabVIEW设计的文件存储格式，提供专门函数子节点进行读写操作，但不能自定义编辑存储规则
波形文件	与LV测量文件类似，用于波形文件存储

根据用户实际需要，本数据存储功能需要具备以下几点功能

- (1) 数据采集过程中，用户可以从任意时刻开始记录电压、电流波形
- (2) 在记录过程中可以随时中断波形记录，等待一段时间后然后恢复波形记录
- (3) 单独按钮，按下后直接停止记录波形，生成记录文件

综合表4-1各种文件类型存储方式的优缺点，再结合上述设计的波形读取要求，最后本文选择了二进制文件的数据存储格式。其工作流程见图4-12，用户进入系统选择数据采集模式，完成基本参数设定后波形记录文件即被创建；数据采集过程中，每次数据采集器采样4096个点的数据送入计算机，波形数组的长度为4096的一维数组 $x[n]$ 和时间间隔 $dt$ 被写入记录文件；当中断记录时，波形输入写入暂停；停止记录波形后，写入记录波形长度，关闭波形记录文件，文件数据存储结构如图4-11。

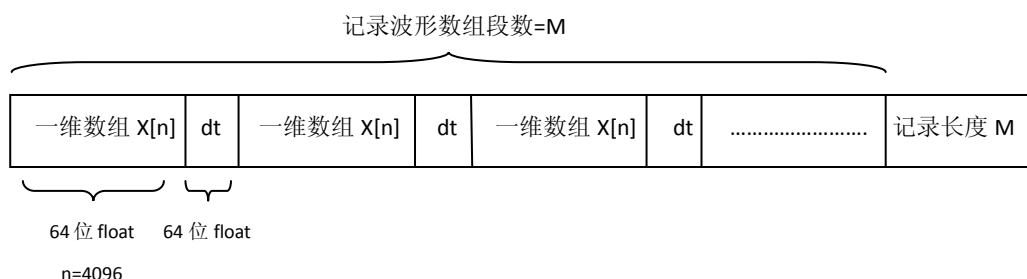


图4-11 波形记录文件结构

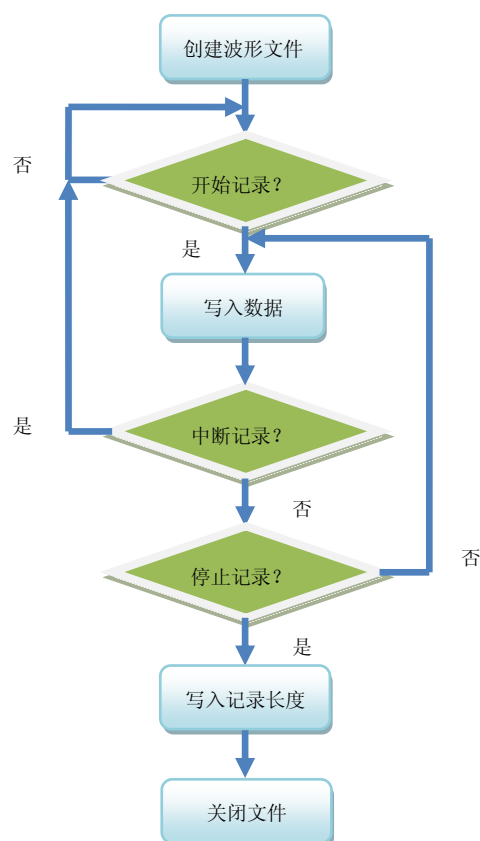


图4-12 波形文件存储程序流程图

读取波形的操作与存储过程类似，用户进入系统后，选择模拟仿真工作模式，完成参数设定后，系统打开波形记录文件；读取记录长度；每次读取一段波形数组，即长度为4096的一维数组 $x[n]$ 和时间间隔 $dt$ ；读完文件后关闭。为仿照实际数据采集情景，每次读取数据的时间间隔为 $4096/6400=0.64s$ ，程序流程见图4-13。

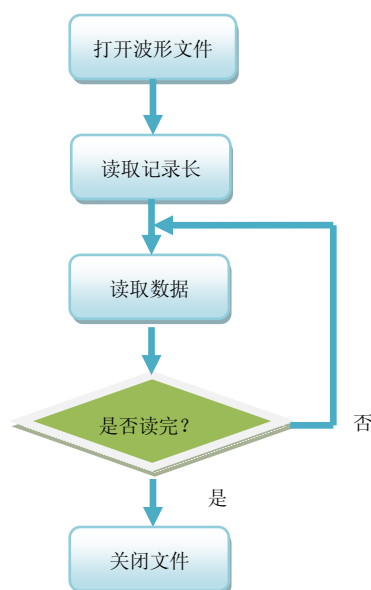


图4-13 波形文件读取程序流程图

## 5 电能质量监测系统在电机学实验中的应用

### 5.1 电能质量监测系统在变压器空载实验中的应用

电机学是电力系统及其自动化专业非常重要的一门专业基础课，其理论与实际的联系非常紧密，配套实验课程主要关注变压器、同步电机和异步电机的空载与短路实验。然而目前电机学实验的电量测量方法主要由实验者手动完成，实验者用电压表、电流表和功率表测量三相交流电压、电流有效值和功率，在根据。但由于测量过程不同步，即电压、电流有效值的测量不能同时进行，因此实验结果会因电网输入电压的波动而产生误差。此外，在电机学中对诸如变压器空载相电压波形的分析很难在传统实验中得以直观验证。因此，电机学实验中引入功能更加强大的测试系统显得尤为必要<sup>[18]</sup>。

本文设计的电能质量监测系统能够同时测量三相电压、电流有效值和功率，实时显示三相电压、电流波形。因此在电机学实验中引入本系统能够提高实验过程的智能化和测量结果的精确度和直观性。

变压器空载实验在电机学实验中具有一定代表性，单相变压器空载运行时，原边绕组接到电网，副边开路。此时，原边相电压为正弦波形，原边电流(激磁电流)用于建立变压器铁芯中的主磁通 $\Phi$ ，由于铁芯材料的磁化曲线具有非线性特性，当主磁通 $\Phi$ 饱和后，要使磁通继续增大，则激磁电流需增大的量比主磁通 $\Phi$ 不饱和时要大得多，为保证主磁通按正弦波形变化，激磁电流波形将会畸变为尖顶波。将激磁电流波形按傅里叶级数可分解为基波、3次谐波、5次谐波等奇次谐波<sup>[18]</sup>。

#### 5.1.1 变压器空载运行对电能质量的影响

三心五柱式变压器接成Y/Y连接组空载运行时，原边接入电网，激磁电流中的3次谐波分量无法流通，因此电流波形接近正弦波，激励出的主磁通将是平顶波，其中包含大量的奇次谐波分量。奇次谐波磁通可以在三相各自的主磁路中闭合，因此对象各自感应电势的奇次谐波分量会很大，导致相电压波形畸变。正是由于三心五柱式变压器空载运行时相电压波形含有大量奇次谐波，畸变严重，因此可以变压器空载运行模拟电弧炉、电力电子换流器等非线性负荷所引起的电网谐波问题，利用这个特性测试本文设计的电能质量监测系统可以取得较为明显的测量结果<sup>[18]</sup>。



### 5.1.2 变压器实验平台

本文选用了四川大学电气信息学院电机试验室的三相变压器作为电能质量监测系统测试平台<sup>[19]</sup>，其具体参数见表5-1。

表5-1 变压器参数

磁路系统	三心五相式
联接组	Y/Y
额定视在功率	3kVA
电压额定变比	$V_{1N}/V_{2N}=380V/190V$
电流额定变比	$I_{1N}/I_{2N}=4.5A/9.1A$

### 5.1.3 变压器空载运行测量结果

利用本文设计的电能质量监测系统，在四川大学电气信息学院电机式实验室对变压器输入端的电网电压和Y/Y连接空载运行的三心五柱式变压器相电压、电流进行了测量和分析。测量电网输入三相电压时，三只电压互感器输入分别为电网A、B、C三相输入；测量变压器空载运行时，三只电压互感器输入分别为变压器A、B、C三相相电压，三相电流互感器输入为变压器原边三相相电流，电网输入三相电压有效值为220V。

电网电能质量监测各选项卡内容  
电网输入三相电压波形，如图5-2所示

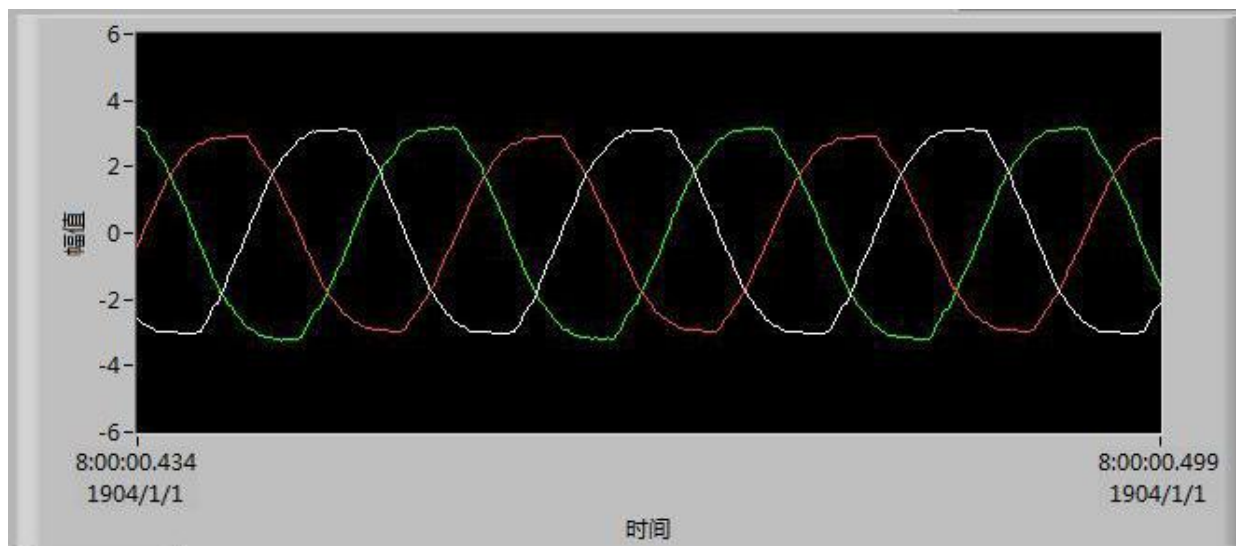


图5-2 电网输入电压波形

从上图可以看出电网输入三相电压波形比较接近正弦波



对电网三相电压中A相电压做谐波分析结果如图5-3所示

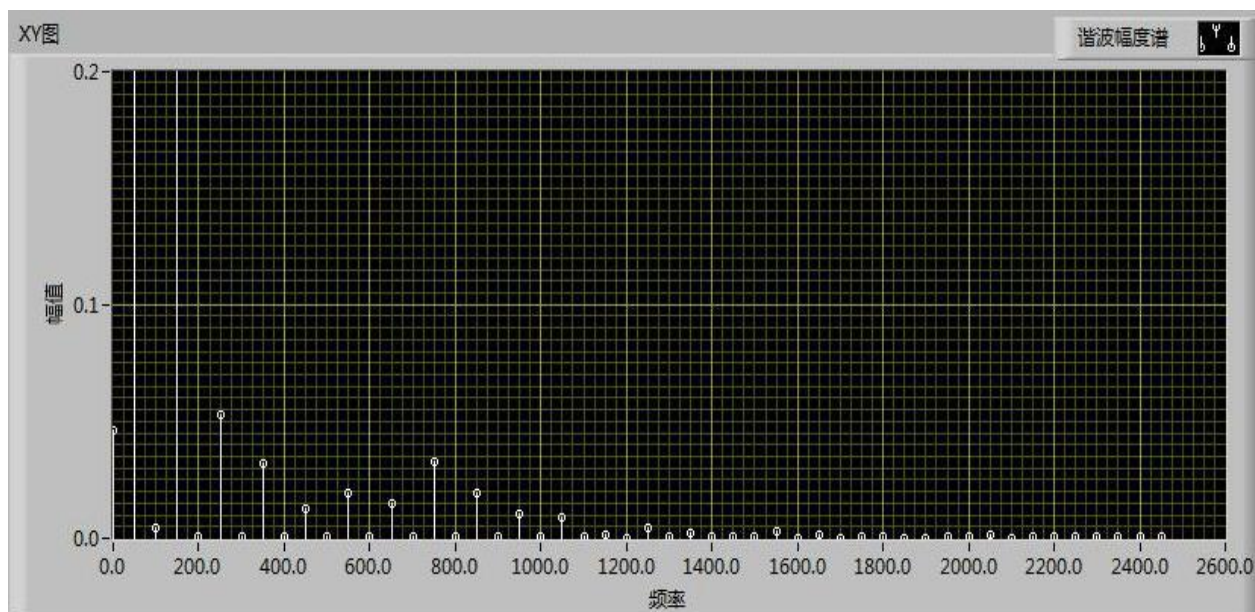


图5-3 A相谐波分析结果

由图5-3可看出变压器空载波形三次谐波含量很大，与前文所分析结果吻合

对电网三相电压中A相电压做电压闪变分析结果如图5-4所示

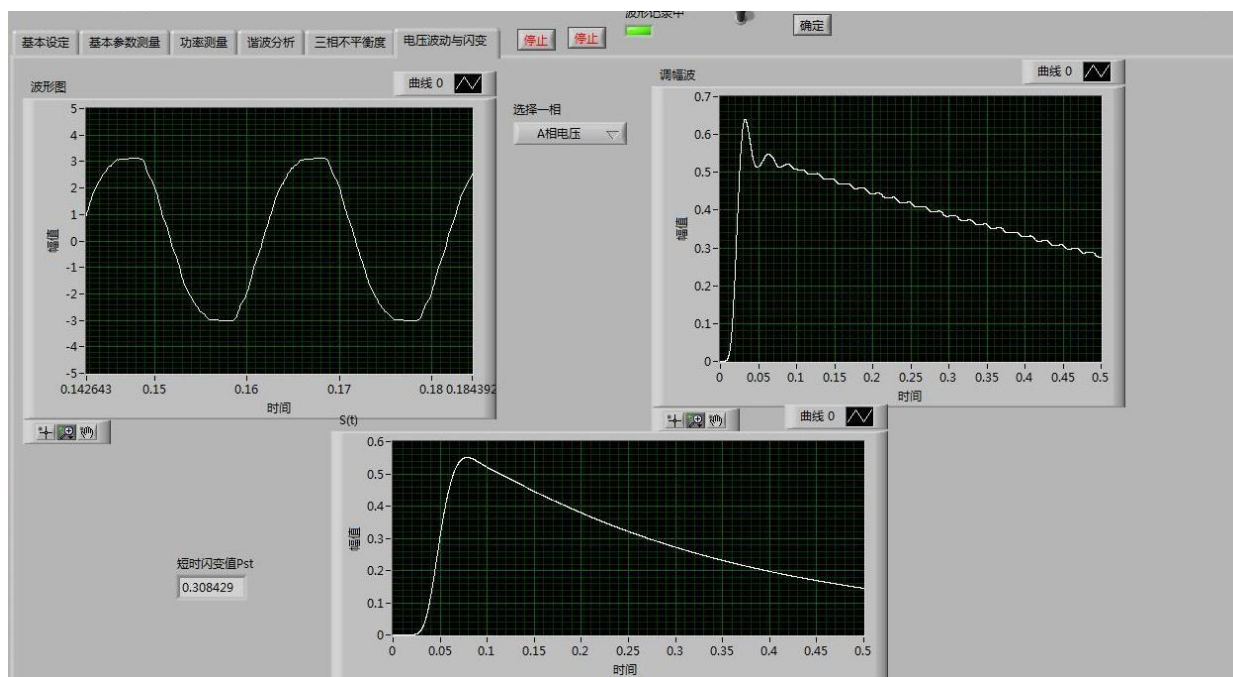


图5-4 A相电压闪变分析结果

表5-2为电网输入三相电压电能质量监测系统测量分析结果

表5-2 电网输入三相电压电能质量监测分析结果

电压有效值 (V) /偏差 (%)	237.099 / 7.77%	239.985 / 9.08%	240.568 / 9.35%
频率 (Hz)	50.001		
总谐波畸变率 THD (%)	6.955%	6.832%	6.912%
三相不平衡度	0.274		
瞬时电压闪变值Pst	0.308	0.297	0.302

由5.2.1节分析已知，三心五柱式变压器原边电压为正弦波形时，相电压波形会发生严重畸变，其中主要含有奇数次谐波。

图5-5所示为变压器空载运行时系统前面板的基本参数测量选项卡内容。

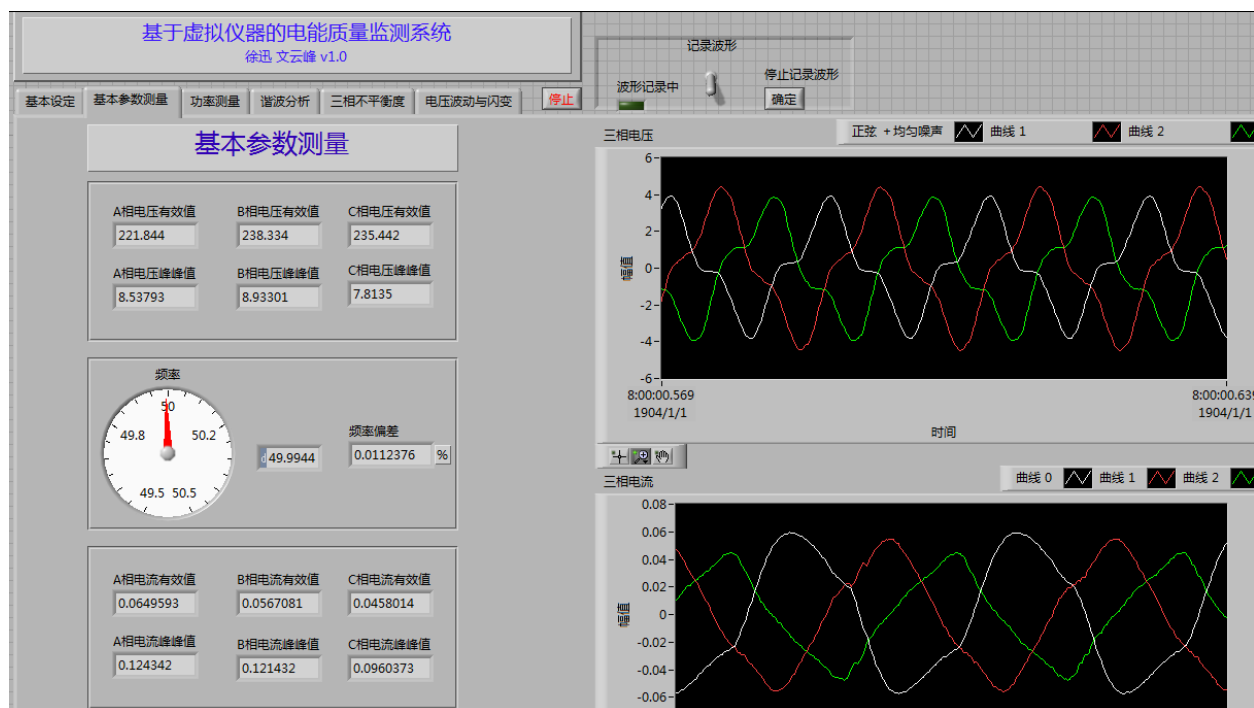


图5-5 变压器空载运行时系统基本参数测量前面板

由上图可以看出变压器空载运行时电压波形发生严重畸变，而电流波形较为接近正弦波形。对电压信号做谐波分析可以直观地看出当前电压波形的各次谐波含 $HRU_h$ 有率及总畸变率THD，如图5-6所示。

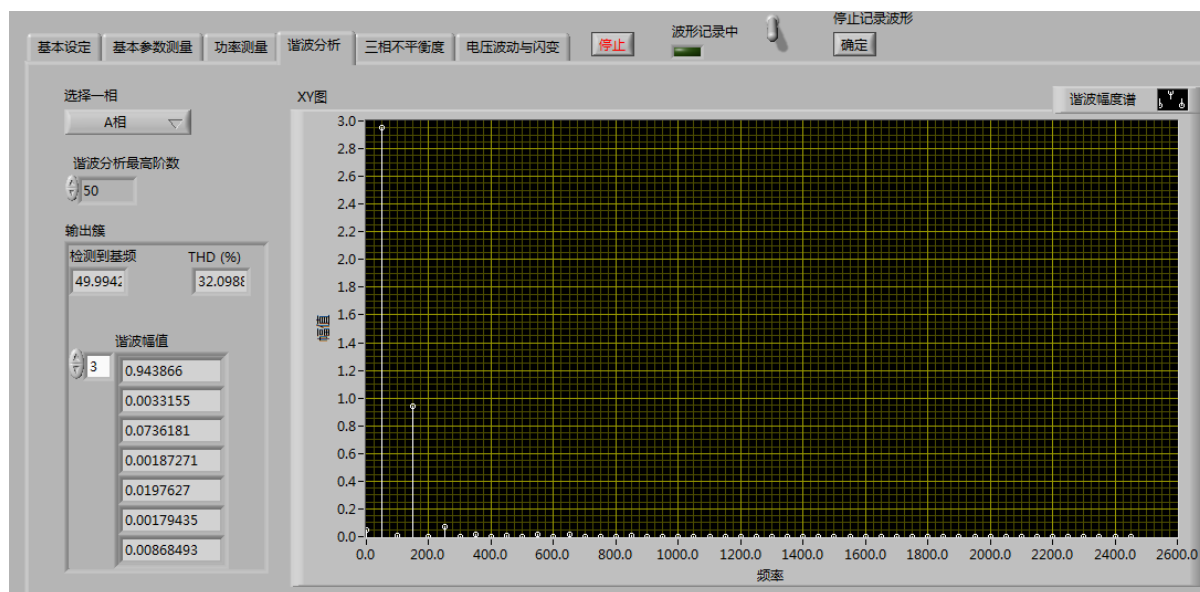


图5-6 变压器空载运行谐波分析结果

最后对A相相电压做电压闪变分析，结果如图5-7所示。

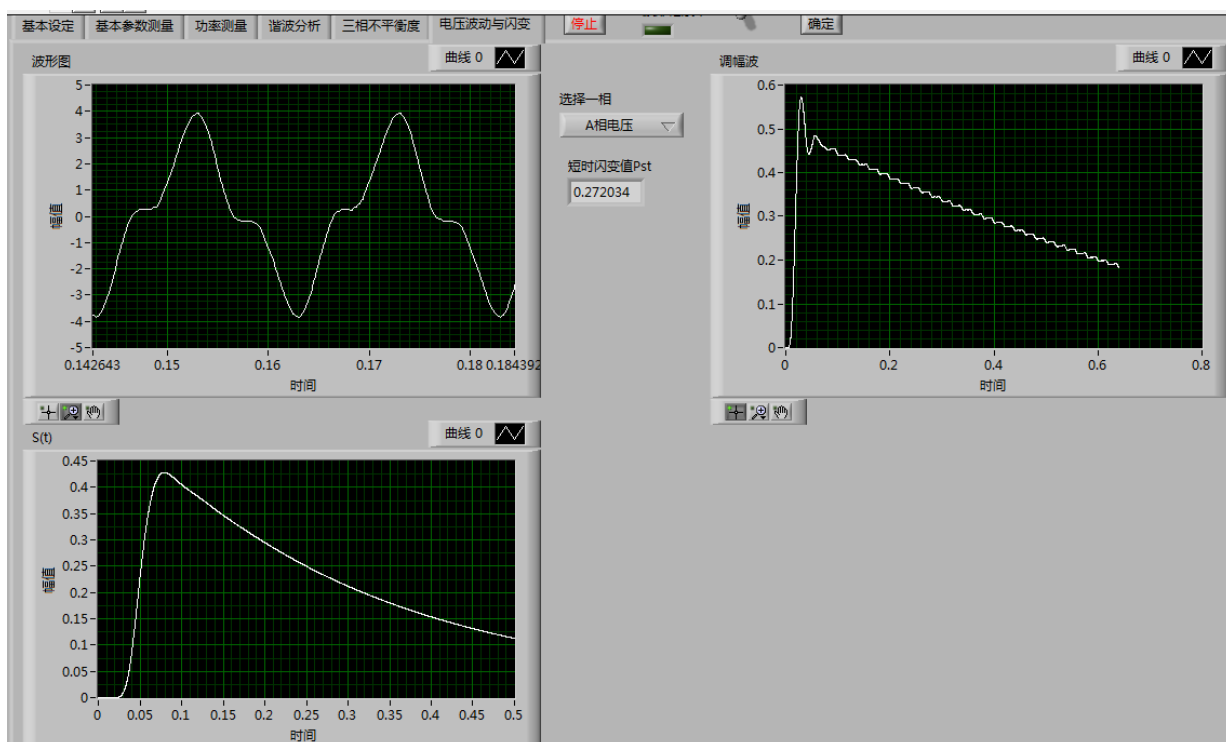


图5-7 变压器空载运行电压闪变分析结果

表5-3所示为变压器空载运行时电能质量监测系统测量分析结果

表5-3 变压器空载运行电能质量分析结果

电压有效值 (V)	258.589	256.341	255.807
电流有效值 (A)	0.0467	0.0504	0.0495
频率 (Hz)		49.987	
总谐波畸变率 THD (%)	32.039	30.245	31.302
三相电压不平衡度		0.2954	
瞬时电压闪变值Pst	0.2735	0.2854	0.3040

实验结果表明, 通过对电网输入三相电压和变压器空载运行时三相相电压、电流的测量, 并分析其电能质量, 本系统基本完成了设计的电能质量分析功能, 并为电机学实验提供了更加简便、精确的测量方法, 实现了设计要求。

## 6 结论和展望

### 6.1 本文结论

伴随计算机技术的发展和通用数据采集设备成本的不断下降，虚拟仪器技术凭借便捷、友好的编程环境、强大的数学分析功能，已经在各种监控、测试方案得到广泛应用，并且随着虚拟仪器软硬件技术可靠性的提高，在先进和复杂控制领域中也逐步出现虚拟仪器的身影。

本文着重对基于虚拟仪器的电能质量监测系统的性能指标和工作原理做出了详细的阐述和分析，并在此基础上完成了软硬件结构的设计和实际测量。本文主要工作现总结如下：

- (1) 根据国家电能质量标准和实际电量可测量性，确定了本文重点分析的五项电能质量指标。
- (2) 以NI LabVIEW8.5为平台，结合各项电能质量指标的数学定义，推导出了基本电量在LabVIEW8.5中的实现方式，其中重点就电力系统频率测量方法——FFT及其改进算法做出了数学推导，并分析了FFT栅栏效应和因数据截断及采样不同步所引起的频谱泄露问题，参考现有方法，通过频率补偿方法实现了频率的精确测量。
- (3) 分析了电能质量监测系统的软硬件结构，根据选用的互感器、数据采集器和软件环境设计了系统客户端程序。
- (4) 将设计的电能质量监测系统应用到电机学实验中，并测试了系统的对各设计指标的分析能力。

### 6.2 工作展望

本文设计的基于虚拟仪器的电能质量监测系统在实际测量实验中取得了比较好的结果，但仍存在系统运算量大，界面人性化不足等问题，因此，在未来的工作中对本系统做出如下几点展望：

- (1) 根据各项电能质量指标，通过在程序框图中调用DLL方式，进一步提高基本电量测量和电能质量指标分析算法效率。
- (2) 美化系统客户端前面板，另用户对各项参数一目了然。
- (3) 实现系统客户端的远程发布，用于实现基于网络的电能质量监测系统，并实现对如异步电机等被测量对象的控制和模型辨识功能。
- (4) 将设计的电能质量监测系统应用到电机学实验中，并测试了系统的对各设计指标的分析能力。

## 致 谢

四年之前，我带着理想和憧憬来到四川大学，一句“海纳百川，有容乃大”让我震撼不已。四年后，即将毕业之际，回首整个大学生涯，我感慨万千。在这四年里，所学到的知识和技巧让我终生受用，所遇见的每一位同学、每一位老师让我终生难忘。我懂得做人的道理，也懂得了自我价值的实现是为人民服务。我感谢你，亲爱的母校！

能够顺利地完成毕业设计，我首先要感谢我的指导老师雷勇教授，为我们创造了良好的学习环境和科研条件。雷老师平时工作忙、时间紧，而我本身所需要学习的东西较多，进入课题慢，但是雷老师从没对我埋怨和批评，有的只是耐心和鼓励。同时，雷老师高度的责任心、渊博的知识和严谨的治学态度也感染了我，为我们树立了良好的榜样，让我受益匪浅，在此我谨表深深的谢意。

本论文的完成还得到了文云峰同学和段述江老师的帮助，实验室良好的氛围，让我对完成论文充满了信心，和师兄们的交流，让我对课题有了丰富的想法，极大地开阔了我的思路，在此向他们表示我最诚挚的感谢。

最后，我要特别感谢我的父母和女朋友，他们一直在默默无闻的给我莫大的支持，让我有机会来到四川大学学习，完成了四年大学生涯。同时，当我遇到困难的时候，他们总是鼓励我。正是因为他们的关心和支持，我才能顺利的完成我的论文。

## 参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制. 第一版. 北京: 中国电力出版社, 2004.2
- [2] 莫昕. 电能质量在线分析仪的设计与实现. 清华大学工学硕士学位论文, 2002.5
- [3] 马永强. 基于虚拟仪器的电能质量实时监测分析系统研究. 重庆大学硕士学位论文, 2009.5
- [4] 方向东. 基于虚拟仪器的电力参数自动测试系统. 湖南大学同等学力硕士学位论文, 2004.9
- [5] 姚刚. 基于 LabVIEW 的电能质量监测与分析系统. 华北电力大学硕士学位论文, 2003.12
- [6] 李启斌, 陈建业. 基于虚拟仪器的电压闪变测量模块设计. 大功率变流技术, 2008.6
- [7] 贺建闽. 闪变仪研制及其在电气化铁道的应用. 西南交通大学学报, 2004.4
- [8] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 1995.6.14
- [9] Adly A. Girgis. A New FFT-Based Digital Frequency Relay for Load Shedding. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982.2.2
- [10] 祁才君. 应用插值 FFT 算法精确估计电网谐波参数. 浙江大学学报(工学版), 2003.1
- [11] Alan V. Oppenheim. 信号与系统. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.3
- [12] 刘益成. 数字信号处理. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2009.1
- [13] Sanjit K. Mitra. 数字信号处理——基于计算机的方法(第二版). 第一版. 北京: 清华大学出版社, 2001.9
- [14] 零点工作室. LabVIEW8.20 中文版编程应用. 第一版. 北京: 电子工业出版社, 2008.1
- [15] 张重雄. 虚拟仪器技术分析与设计. 第一版. 北京: 电子工业出版社, 2007.8
- [16] 蓝永林. 交流电能计量. 第一版. 北京: 中国计量出版社, 2009.1
- [17] Phang Yoke Yin. Remote Power Quality Monitoring and Analysis System Using LabVIEW Software. I2MTC 2009 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009.5
- [18] 谢应璞. 电机学. 第一版. 成都: 四川大学出版社, 1994.12
- [19] 苏翼德. 电机学实验指导书. 四川大学水电学院, 电气信息学院, 2005.4