

---

# 电气测量及电能质量

## 实验指导书

上海交通大学

电气工程实验中心

2012年3月

---

# 目 录

目 录 .....	I
基于 Labview8.0 平台电气量测量的实验大纲 .....	1
1. 熟悉并掌握电气参数的转换和方法 .....	1
2. 电气参数的测量方法 .....	2
2.1 电压电流有效值的测量 .....	2
2.2 电网频率的测量 .....	2
2.3 视在功率、无功功率和功率因数的测量 .....	3
2.4 三相不平衡的测量 .....	4
2.5 电网谐波测量 .....	5
2.6 电压波动和闪变的测量 .....	6
3. 熟悉并掌握 LabVIEW 软件 .....	7
3.1 LabVIEW 开发平台简介 .....	7
3.2 LabVIEW 的特点 .....	9
4. 搭建硬件平台 LEM+PCR 6143+Labview 8.0 平台 .....	11
5. 电气量参数和电能质量相关测量 .....	12
5.1 软件的总体设计方案概述 .....	12
5.2 LabVIEW 中系统主程序模块的设计 .....	13
5.3 数据采集模块 .....	15
5.4 频率测量模块 .....	20
5.5 有效值测量模块 .....	21
5.6 三相不平衡度测量模块 .....	22
5.7 功率测量模块 .....	23
5.8 谐波测量模块 .....	24
5.9 闪变测量模块 .....	26
5.10 数据存储模块 .....	29
5.11 测试结果 .....	31
6. 实验心得与体会 .....	33

## 基于 Labview8.0 平台电气量测量的实验大纲

### 1. 熟悉并掌握电气参数的转换和方法



图 1-1 系统的硬件构成

采用 LabVIEW 的电气量测量系统软件是核心，但是硬件也是必须的，如图 1-1 所示，系统的硬件由传感器、信号调理电路、数据采集、计算机系统四大部分构成。模拟信号在进入数据采集卡之前应先通过传感器转换成符合采集卡量程要求的电压、电流信号，故需要把被测的强电信号转换成弱电信号，出于对系统的可靠性及安全性方面的考虑，仪器与各种强电信号在电气上必须是隔离的，不能把电压和电流信号直接送到数据采集卡，因此需要使用电压互感器(PT)和电流互感器(CT)。

当被检测的电压和电流信号波形发生了畸变即含有高次谐波时，采用一般的 PT 和 CT 变换过来的信号失真度很大，严重影响了分析结果，而采用闭环补偿原理的霍尔互感器就可以最小失真度转换原始信号，它具有很高的测量精度和很好的线性度，响应快，能够保证后续数据分析的准确性。采用闭环补偿霍尔电压互感器和电流互感器组成的电压和电流调理电路如图 1-2 和 1-3 所示。

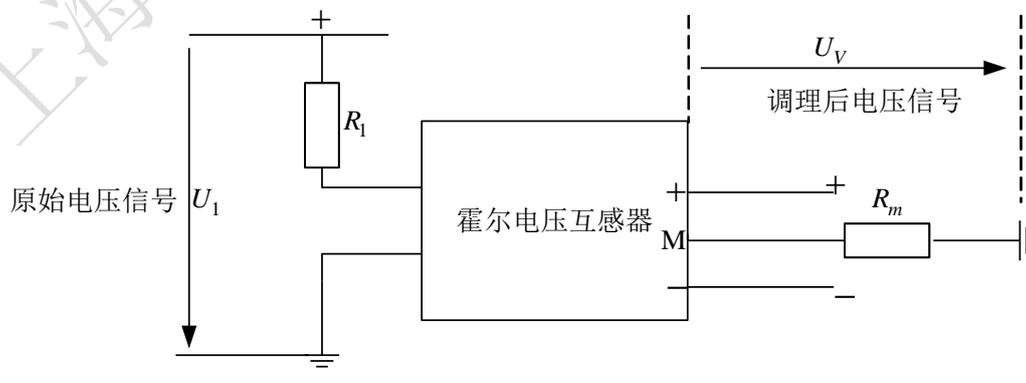


图 1-2 电压调理电路

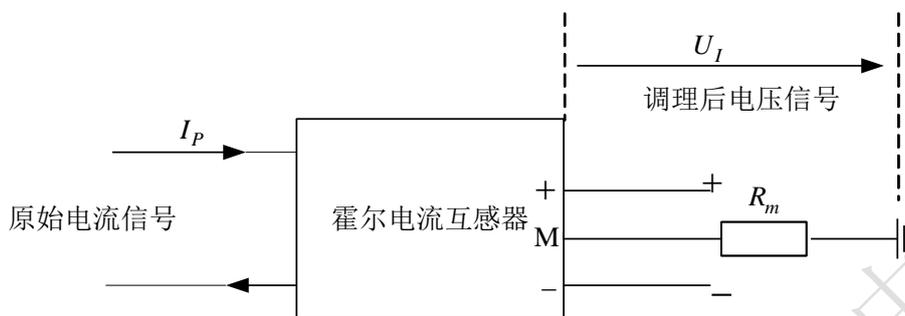


图 1-3 电压调理电路

经过信号调理，原始电压和电流信号已调理成适合数据采集卡进行 A/D 转换的信号，通过连接线，将信号接到数据采集卡的输入端。

## 2. 电气参数的测量方法

### 2.1 电压电流有效值的测量

按照基本定义计算，在连续的时间域中：

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt} \quad (2-1)$$

$u(t)$ ， $i(t)$  为电压电流瞬时值。若以采样周期  $T_s(\text{rad})$  对瞬时电压电流一周波采样  $N$  个点，则离散的电压电流和有功功率的计算方法如下：

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u^2(k)}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i^2(k)}, \quad P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k)i(k)} \quad (2-2)$$

### 2.2 电网频率的测量

对电网频率的测量采用过零检测法实现。数字式过零检测法是检测电网基波信号的相邻零点，其时刻假设为  $t_1$ 、 $t_2$ ，则周期  $T = t_2 - t_1$ ，在实际采样时，只需要通过计算此相邻两点间的采样点数，根据采样点数由  $T = n/f_s$ ，即可求得电网频率，其中  $f_s$  为采样频率。

在数字过零检测法测量电网频率时，要考虑到零点漂移带来的误差影响。由于温度的影响，采用的数据采集卡需要有温度漂移保护电路，才能保证温度在 0 到 55 摄氏度之间时的精确测量。

### 2.3 视在功率、无功功率和功率因数的测量

求出有功功率后，只要求出功率因数  $\cos\varphi$ 。根据定义： $\cos\varphi = P/S$ ， $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ ， $S = UI$ ，即可求出视在功率 S、无功功率 Q。对相位差可利用虚拟相关法测量。

#### (1) 虚拟相关法求相位差的原理

相关法利用两同频正弦信号的延时  $\tau=0$  时的互相关函数值与其相位差的余弦值成正比的原理获得相位差。由于噪声信号通常与有效信号相关性很小，因此该方法具有很好的噪声抑制能力。

假设有两个同频信号  $x(t)$ 、 $y(t)$ ，都被噪声污染，描述如下：

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + N_x(t) \quad (2-3)$$

$$y(t) = B \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + N_y(t) \quad (2-4)$$

其中 A、B 分别为  $x(t)$ 、 $y(t)$  的幅值； $N_x$ 、 $N_y$  分别为噪声信号。周期信号互相关函数的表达式为：

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (2-5)$$

其中 T 为信号周期，三式联合可得

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + N_x(t)] [B \sin(\omega_0(t+\tau) + \varphi_0) + N_y(t+\tau)] dt \quad (2-6)$$

当  $\tau=0$  时，理想情况下，噪声和信号不相关，且噪声之间也不相关，积分后得：

$$R_{xy}(0) = \frac{AB}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_0) \quad (2-7)$$

所以得到相位差为：

$$\text{phasedif} = \varphi_1 - \varphi_0 = \arccos\left(\frac{2R_{xy}(0)}{AB}\right) \quad (2-8)$$

另外，信号的幅值和和在延时  $\tau=0$  时的自相关函数值又有下面关系：

$$A = \sqrt{2R_x(0)}, \quad B = \sqrt{2R_y(0)} \quad (2-9)$$

这样通过两信号的自相关、互相关就可以求得它们的相位差。

离散时间表达式：实际处理的连续信号采样后的离散点序列。

$$R_{xy}^{\wedge}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} x[n]y[n], \quad R_x^{\wedge}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} x_{[n]}^2, \quad R_y^{\wedge}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} y_{[n]}^2 \quad (2-10)$$

其中  $k$  为采样点数。LabVIEW 提供了互相关和自相关软件包。

## (2) 虚拟相关法存在的问题

A. 当信号中存在噪声干扰时，用时延  $\tau=0$  时的自相关函数值  $R_x(0)$  求取信号幅值会引入较大误差。

a. 问题的提出：根据自相关函数的性质，噪声信号也在  $\tau=0$  时取得最大值，因而，当有效信号中含有噪声信号时，信号的自相关最大值是有效信号和噪声信号各自的自相关最大值叠加的结果，则用式(2-9)求取有效信号幅值的结构不准确。推导如下：对信号  $x(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + N_x(t)$ ，其  $\tau=0$  时的自相关函数  $R_x(0)$  为：

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [A\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + N_x(t)][A\sin(-\omega_0 t + \varphi_0) + N_x(-t)] dt \\ &= \frac{1}{2} A^2 + R_{N_x}(0) = R_f(0) + R_{N_x}(0) \end{aligned} \quad (2-11)$$

可见公式(2-9)给出的信号幅值  $A$  与  $R_x(0)$  之间的关系式不再成立。

b. 解决方法：在  $\tau$  到达一定值之后，含噪信号的自相关函数完全等于有效信号的自相关函数，这是由于噪声信号的自相关函数随着时延的增大迅速衰减。因此，对于正弦信号含有噪声的情况，完全可以用含噪信号自相关函数的次峰值来计算正弦波的幅值，此方法称为次峰值取代法。

B. 周期信号的自相关函数的离散计算式在所取总点数不等于整周期时存在计算误差。

这个问题可以用频率跟踪法解决，即时测量信号的当前频率，根据信号频率确定采样频率和采样总点数。

C. 相关法适用于对同频正弦信号求取相差，而对于含有多个频率分量的周期信号不适用。

## 2.4 三相不平衡的测量

对电力系统三相不平衡度的分析可以通过对称分量法进行，三相电压不平衡的测量采用对称分量法，把不平衡电压分解为正序、负序和零序分量实现。由于计及谐波的序分量计算十分复杂，目前仅考虑对基波信号进行序分量计算。用下面公式可计算各序电压和三相不平衡度：

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j120^\circ} & e^{-j240^\circ} \\ 1 & e^{-j240^\circ} & e^{-j120^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$\varepsilon = |U_2|/|U_1| \times 100\% \quad (2-13)$$

式中， $U_1$  为三相电压正序分量的均方根值，将不平衡的三相系统的电量按对称分量法分解后其正序对称系统中的分量。 $U_2$  为三相电压负序分量的均方根值，将不平衡的三相系统的电量按对称分量法分解后其负序对称系统中的分量。如果将式中的电压符号换为电流符号，就可以求出电流的三相不平衡度。

三相不平衡度测量需要计算的参数有：三相电压不平衡度、三相电流不平衡度。

## 2.5 电网谐波测量

对电压和电流的谐波在线测量是本系统最基本的功能，也是实现其它功能的基础。谐波测试的精确性直接关系到其它测试和分析的正确性和可信性。

目前，谐波测量最常用的方法为离散傅立叶变换(DFT)和快速傅立叶变换(FFT)。离散傅立叶变换的计算量与变换区间的长度  $N$  的平方成正比。谐波分析时，为保证计算精度， $N$  取值较大，因此计算量很大。快速傅立叶变换是离散傅立叶变换的快速算法，它能使 DFT 的运算效率提高 1~2 个数量级，因此在谐波分析中广泛采用。FFT 算法有基 2FFT 算法、基 4FFT 算法、混合基 FFT、分裂基 FFT 算法等多种不同的算法。这里采用其中最为常见的基 2FFT 算法。

对电压和电流信号进行同步采样，在一个工频周期内分别采样  $N$  点，得到离散数字序列  $\{u_k\}$  和  $\{i_k\}$ 。显然两序列均为实序列，将它们按下式构成一复序列  $\{f_k\}$ ：

$$f_k = u_k + ji_k \quad (k=0, 1, 2 \dots N-1) \quad (2-14)$$

$\{f_k\}$  的频谱为：

$$F_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (n=0,1,2,\dots,N-1) \quad (2-15)$$

对  $\{f_k\}$  按 FFT 算法求得  $F_n$  后, 容易推导出  $\{u_k\}$  和  $\{i_k\}$  的频谱分别为:

$$U_n = \frac{1}{2}(F_n + F_{N-n}^*) \quad I_n = \frac{1}{2j}(F_n - F_{N-n}^*) \quad (2-16)$$

上式即为第  $n$  次谐波电压和谐波电流相量表达式。由此可求得第  $n$  次谐波电压和谐波电流有效值  $U_n$ 、 $I_n$  及相位  $\phi_{un}$ 、 $\phi_{in}$ 。

于是电压、电流有效值为:

$$U = \sqrt{2 \sum_{n=1}^{N/2} U_n^2}, \quad I = \sqrt{2 \sum_{n=1}^{N/2} I_n^2} \quad (2-17)$$

某次谐波分量的大小, 以该次谐波的有效值与基波有效值的百分比表示, 称为该次谐波的含有率或畸变率, 第  $n$  次谐波含有率  $HD_n$  为:

$$HD_n = \frac{A_n}{A_1} \times 100\% \quad (2-18)$$

在电力系统中, 畸变波形因谐波引起的偏离正弦波形的程度, 以谐波失真度 THD 表示:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} A_i^2}}{A_1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (HD_i)^2} \quad (2-19)$$

## 2.6 电压波动和闪变的测量

电力系统的电压波动和闪变主要是由具有冲击性功率的负荷引起的, 如变频调速装置、炼钢电弧炉、电气化铁路和轧钢机等。这些非线性、不平衡冲击性负荷在生产过程中有功和无功功率随机地或周期性地大幅度变动, 当其波动电流流过供电线路阻抗时产生变动的压降, 导致同一电网上其它用户电压以相同的频率波动。这种电压幅值在一定范围内(通常为额定值的 90%—110%)有规律或随机地变化, 即称为电压波动。

电压波动是指一系列电压波动或工频电压包络线的周期变化。电压波动值为电压均方根值的两个极值  $U_{\max}$  与  $U_{\min}$  的差值, 通常用额定电压  $U_N$  的百分数表示其相对百分值  $d$  即

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \quad (2-20)$$

常用的电压波动检测方法有整流检测法、有效值检测法和同步检测法。IEC 推荐的闪变测量方法是同步检测法，即平方解调检波法。

为检测出电压波动分量，通常将电压波动看成以工频电压为载波(50Hz)、其电压的方均根值或峰值受到以电压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作是由各种频率分量合成。为使分析简化又不失一般性，研究电压波动的检测方法可分析单一频率的调幅波对工频载波的调制，将电压的瞬时值解析式写成：

$$u(t) = A(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (2-21)$$

式中： $A$ —工频载波电压的幅值； $\omega$ —工频载波电压的角频率； $m$ —调幅波电压的幅值； $\Omega$ —调幅波电压的角频率

按照同步检测方法，可将调制波电压自乘求平方，得到

$$\begin{aligned} u^2(t) = & \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + mA^2 \cos \Omega t + \frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\Omega t + \\ & \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \cos 2\omega t + \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega + \Omega)t + \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega - \Omega)t \\ & + \frac{mA^2}{2} \cos(2\omega + \Omega)t + \frac{mA^2}{2} \cos(2\omega - \Omega)t \end{aligned} \quad (2-22)$$

从上式可以看出，调制波电压的平方项除了有直流分量外，含有以下频率分量： $\Omega$ ， $2\Omega$ ， $\omega$ ， $2\omega$ ， $2(\omega \pm \Omega)$ ， $2\omega \pm \Omega$ 。

如果利用 0.05~35Hz 的带通滤波器滤除其中的直流分量和工频及以上频率的分量，并且考虑到，由于实际上的调制指数  $m$  远小于 1，存在的调幅波电压的倍频分量幅值远小于调幅波的幅值，可忽略不计。因此，滤波后便可实现解调，获得近似加权的调幅波电压  $v = m \cos \Omega t$ ，获得电压波动的分量。

要获得闪变值，就必须在取得电压波动信号  $v = m \cos \Omega t$  的基础上，根据人眼视感度曲线进行相应的处理即可。

### 3. 熟悉并掌握 LabVIEW 软件

#### 3.1 LabVIEW 开发平台简介

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 实验室虚拟仪器工程平台)是 NI 公司于 1986 年推出的一种高效的图形化软件开发环境, 是面向测量与自动化领域工程师、科学家及技术人员的一种优秀编程平台。LabVIEW 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。这是一个功能强大且灵活的软件。利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器, 其图形化的界面使得编程及使用过程都生动有趣。

图形化的程序语言, 又称为 G 语言, 它不同于常规的文本式编程语言而是一种图形化的程序语言。使用这种语言时, 基本上不写程序代码, 而是采用流程图来实现数据采集和控制、数据分析和数据表达。因此, LabVIEW 是一个面向最终用户的工具。它可以增强你构建自己的科学和工程系统的能力, 提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时, 可以大大提高工作效率。

LabVIEW 编写的程序称为虚拟仪器程序, 简称 VI。VI 包括三个部分: 前面板、框图程序和图标/连接器。

前面板是图形用户界面, 也就是 VI 的虚拟仪器面板, 相当于真实物理仪器的操作面板, 用于完成参数输入和输出结果显示。前面板中通常包含旋钮、按钮、图形以及其他控制 (Control) 和显示对象 (Indicator) 等对象。其中, 用于实现参数输入的图形对象被称为控件 (Control), 用于实现输出结果显示的图形对象被称为指示器 (Indicator)。“所见即所得”是前面板的特色, 这大大方便了对仪器虚拟面板的开发。

图 3-1 所示是一随机函数发生器的显示前面板。上面有一个显示对象, 以曲线的方式显示了所产生的一系列随机数, 其中按钮 stop 用来停止运行。

每一个程序的前面板都有相应的框图程序与之相对应, 框图程序就相当于传统程序的源代码。框图中的部件可以看成程序节点, 如循环控制、事件控制和算术功能等, 这些部件都用连线连接, 以定义框图内的数据流动方向。上例随机函数发生器对应的程序框图如图 3-2。

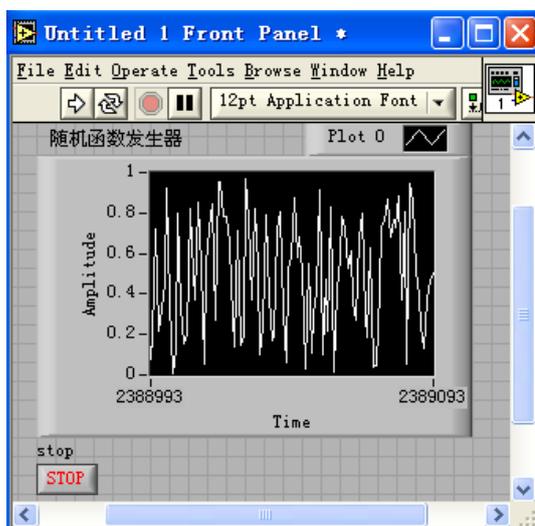


图 3-1 随机函数发生器(前面板)

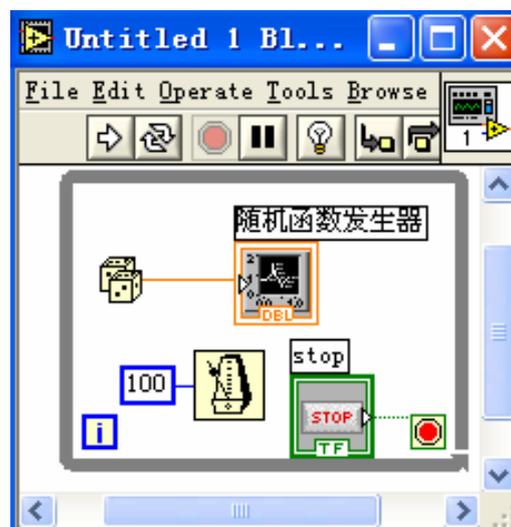


图 3-2 随机函数发生器 (程序框图)

每个 VI 都有其图标/连接器，这样在框图程序中它们可以作为子程序(子 VI)被调用，连接器表征这些 VI 的输入输出端口。用户可以把任意规模的程序功能模块封装成子 VI 以随时调用，并且，对子 VI 的调用阶数是没有限制的。使用子 VI 有助于实现程序结构的模块化，方便用户对程序的调试、理解和维护；通过设置子 VI，用户可以灵活的编制复杂的程序。

### 3.2 LabVIEW 的特点

LabVIEW 作为广泛应用并广受技术人员欢迎的虚拟仪器开发软件平台，它的很多优点是直接服务于虚拟仪器的开发研制工作的，除此之外，它还有很多其他方面的长处。对其特点简要介绍如下：

#### (1) 图形化的仪器编程环境

LabVIEW 采用 G 语言编程，G 语言被誉为工程师和科学家的语言。对熟悉仪器结构和硬件电路的工程技术人员，用 G 语言编程就像设计电路图一样，上手快，效率高。LabVIEW 开发平台通过“所见即所得”的可视化技术允许用户建立针对测量、监控等不同领域和不同行业的具有各自特点的人机界面。

#### (2) 支持各种数据采集与仪器通信应用

LabVIEW 的数据采集 DAQ 函数库支持 NI 公司生产的各种插卡式和分布式数据采集产品, 包括 ISA、EISA、PCI、PCMCIA 和 MacintoshNuBus 等各种总线产品, 提供工业 I/O 设备(如 PLC、资料记录器和单回路控制器等)的驱动程序, 以及符合工业标准的 VISA、GPIB、VXI 和 RS-232 驱动程序库。对于其他公司的数据采集产品, 只要提供了相应的驱动程序, 也能做到很好的兼容。

### **(3) 丰富的功能函数库**

LabVIEW 提供了大量的函数供用户调用。这些函数不仅包括底层数据采集模块的控制/驱动子程序, 设备驱动子程序和用于数值计算、数据分析处理的数学函数库, 还包括概率与统计、回归分析、信号处理、数字滤波、窗函数、三维图形处理等高级分析函数。用户只需直接调用, 就可免去自己编写程序的烦琐。

### **(4) 开放式的开发平台**

LabVIEW 提供了 DLL 接口。使得用户能够在 LabVIEW 平台上调用其它软件平台编译的模块, 并提供对 OLE 技术的支持 LabVIEW 提供了与 Lab Windows/CVI 源代码相互调用的接口, 使用户能够在 LabVIEW 平台上调用其他软件平台编译的模块, 实现在 LabVIEW 环境下控制一些定制的仪器硬件; 提供对 OLE(Object Linking and Embedding, 对象链接与嵌入技术)的支持, 可与其他应用软件一起构成更为强大的应用程序开发环境。

### **(5) 网络功能**

LabVIEW 支持基于 ActiveX、DDE、Data Socket 及 TCP/IP 协议, 因而能够与 Internet 用户交换信息, 共享资源。

### **(6) 灵活的程序调试手段**

用户可以在程序中设置断点, 单步执行程序等多种方式对源代码程序进行调试, 可以在程序的数据流上设置探针, 观察程序运行过程中数据的变化。

### **(7) 内置高效的程序编译器**

LabVIEW 采用编译方式运行 32 位应用程序, 执行速度与 C 语言不相上下。LabVIEW 内置有代码评估器, 可以将程序中对时间要求苛刻的部分代码进行分析并实现最优化。此外, LabVIEW 也可将程序转换为“.EXE”, 独立可执行文件。

### **(8) 支持多种系统平台**

LabVIEW 支持 Windows、Linux、SUNSPARC、Agilent-UX、Power Macintosh 等多种操作系统, 且在任何一个平台上开发的 LabVIEW 应用程序均可直接移植到其

他平台上。

综上所述，选用 LabVIEW 作为电气参数综合测试仪的开发工具，是因为它保证了仪器开发的方便、高效；方便了将来对仪器功能的扩展，便于进一步开发基于网络的分布式测量装置；开发、调试、移植及应用都很方便，没有后顾之忧。

#### 4. 搭建硬件平台 LEM+PCR 6143+Labview 8.0 平台

按照图 4-1 搭建了基于 LabVIEW 的电气量测量的硬件平台，它以通用计算机为核心，由用户设计定义，具有虚拟面板，测试功能由 LabVIEW 实现的一种计算机仪器系统，它不仅具有传统仪器、仪表的全部功能，同时还可以充分地利用计算机强大的信息处理能力、存储容量和网络功能，实现电气参数监测中的数据读取、存储、分析以及与数据库连接等，此外虚拟仪器具有功能丰富的面板，使得测量结果更加直观清晰。

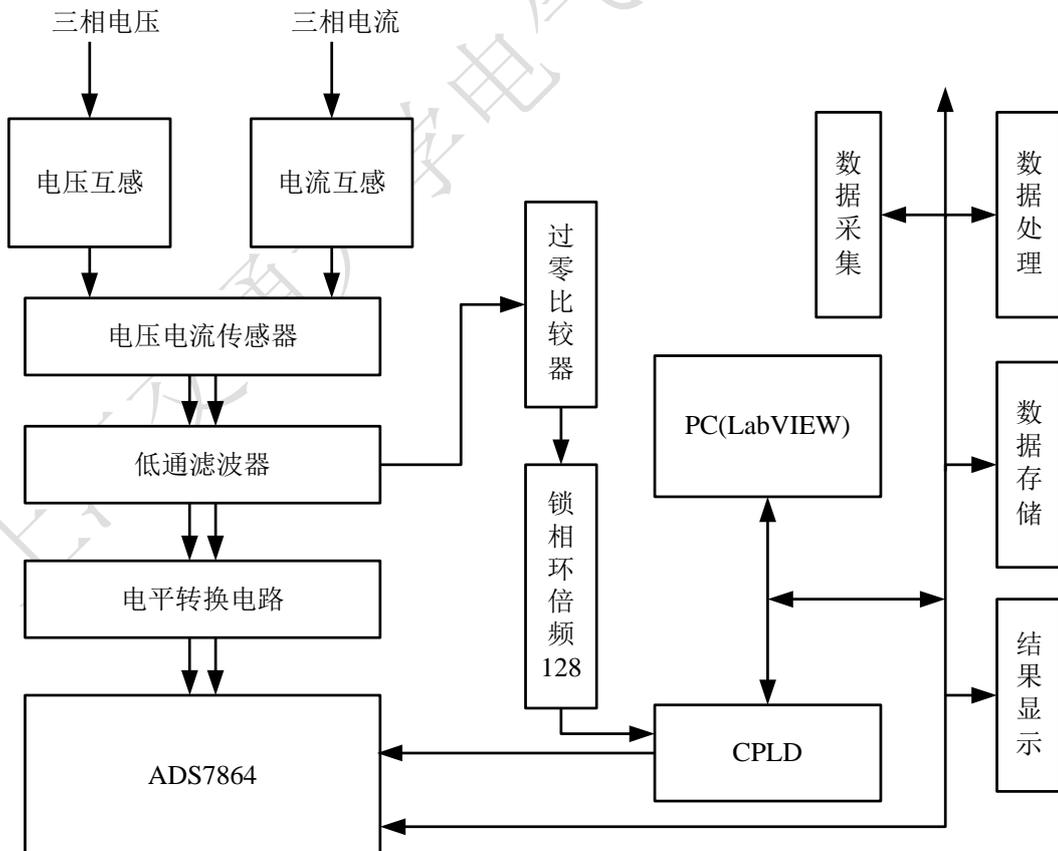


图 4-1 系统总体结构

图中，三相电压、电流经过电压/电流互感器后转换为标称值为 100V 和 5A 的电压、电流，再把该信号经过霍尔传感器 LEM 转换为跟随式的标称值为 5V 的电压信号。信号经过过零比较器生成频率相同的方波，经 CPLD 实现频率检测；同时信号经过低通滤波后，进入 A/D 转换器。含有虚拟仪器的计算机上实现对六路模拟信号 A/D 采集的控制，完成信号的处理分析、通信、存储等。这种基于 LabVIEW 的监测系统同样具备传统监测系统的三大功能模块：数据采集模块、数据处理模块和结果显示模块。其中，数据处理、数据存储、结果显示等模块完全是由计算机软件处理，它们的部分功能不受硬件限制，可以根据用户的需求随时增加修改模块，这一优势是传统仪器所无法比拟的。

## 5. 电气量参数和电能质量相关测量

### 5.1 软件的总体设计方案概述

在监测记录系统中，软件的功能不容忽视，它控制着整个装置的运行。在完成系统功能的条件下还需考虑到以下几点：

(1) 功能的可扩充性。远程监控系统所具有的功能应随着实际的需求而扩充，当实际应用中提出新的功能时，远程监控系统应能够很方便的在原有功能的基础上增加新的功能。

(2) 程序的可读性。程序的可读性对远程监控系统的后续维护、功能扩充、系统的使用都具有重要的意义。

(3) 系统的更新。当系统某些器件采用更高性能的器件时，系统的程序易于更新，适应新的系统。

(4) 程序的可移植性。远程监控系统的整个程序或完成某些功能的程序应可以移植到别的系统中。

基于 LabVIEW 的电能质量参数监测系统要实现的功能不是单一的，需要实现对

电压电流的有效值、电网频率、三相不平衡度、谐波含有率、闪变等不同参数的同时测量。在设计中我们采用模块化的方法，每一个功能模块完成相应的功能，最后通过整合，完成系统的设计。采用模块结构的最大的优点是效率高，由于模块共享数据，可以相互调用，因此可以非常灵活地组织每个模块，达到非常高的整体效率。如果需要对模块某一功能的升级只需要改写相应的模块，而不需要改动整个软件结构，当需要增加系统功能时也只需要增加相应的软件功能模块即可。

系统的功能模块主要包括：数据采集模块、频率测量模块、有效值测量模块、三相不平衡度测量模块、功率测量模块、谐波测量模块、闪变测量模块、数据存储模块等，如图 5-1 所示。下面就详细的阐述系统软件各个功能模块中参数的计算以及模块的设计。

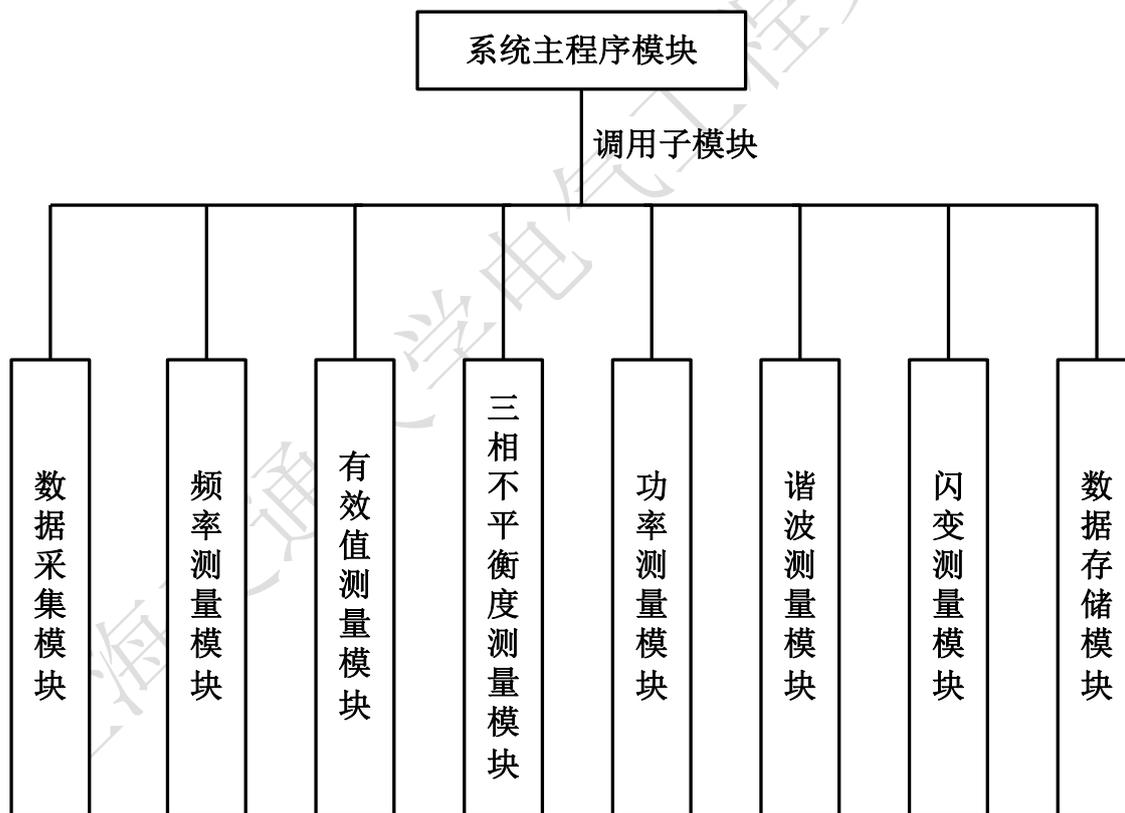


图 5-1 系统功能模块

## 5.2 LabVIEW 中系统主程序模块的设计

由于本设计中要测试的任务很多，无法用一个用户界面来完成所有的任务，可以通过分页的形式实现，LabVIEW 为用户提供的 Tab Control 控件可以实现分页思想。

在用户主程序的前面板中，我们利用 LabVIEW 提供的“Tab Control.vi”功能函数实现分页，每个页面完成不同的测试任务。系统以四页来实现整个监测任务的显示：采集与实时显示页面、伏安测量页面、功率测量页面、谐波测量页面以及数据存储页面，前面板如图 5-2 所示，此时显示的是伏安测量页面，它的程序框图如图 5-3 所示，每个页面完成不同的测试任务。

系统中每个功能模块分别设计成为不同的子程序(在 LabVIEW 中称作子 VI)，存放在硬盘中的某一位置，并且每个子程序都有自己的用户界面，分别调试，在需要时调用相应的子程序即可。伏安测量就是一个模块程序，从图 5-3 可以看出，伏安测量模块实现了对电压、电流有效值、不平衡度、频率等一系列参数的计算，要在一个程序中实现这么多的测量程序就会比较复杂，也难以调试。

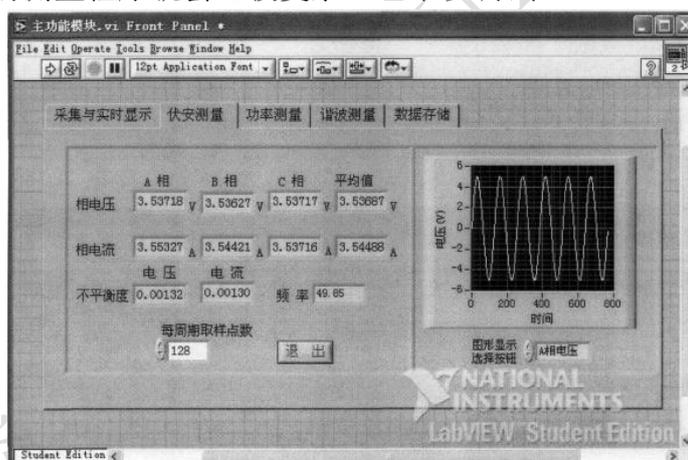


图 5-2 用户主程序前面板

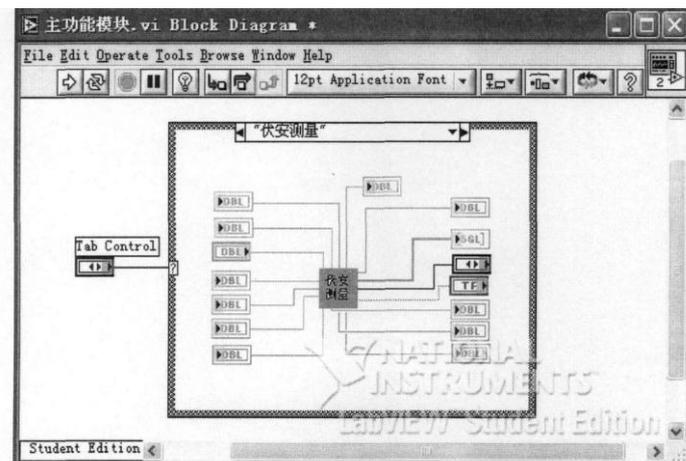


图 5-3 用户主程序程序框图

整个监测系统分成采集与实时显示、伏安测量、功率测量及谐波测量四个大的模块，用户主程序界面中以四页显示，同时他们也通过调用不同小的功能模块构成，概括起来，本设计中设计的功能模块有:数据采集模块、频率测量模块、有效值测量模块、三相不平衡度测量模块、功率测量模块、谐波测量模块、闪变测量模块及数据存储模块，下面分别加以介绍。

### 5.3 数据采集模块

LabVIEW 是美国 NI 公司推出的一种基于 G 语言(Graphics Language, 图形化编程语言)的虚拟仪器软件开发工具，具有强大的数据采集功能。它提供了大量的数据采集子程序，这些子程序从简单到高级，可以提供给用户使用。但这些子程序只支持 NI 的数据采集卡以及少数公司开发的支持 LabVIEW 平台的数据采集卡，而且这些卡的价格较昂贵。从成本方面考虑，本设计选用是美国德州仪器公司的 AD 转换器 ADS7864 来实现数据采集的功能。通过编写数据采集卡驱动程序实现 ADS7864 的数据采集。

#### (1)编写数据采集卡驱动程序的方式

编写数据采集卡驱动程序的方式有三种：端口直接操作、调用 DLL、使用 CIN(Code Interface Node, 外部代码节点)。

直接对端口操作，即利用 LabVIEW 中操作端口的节点 InPort.vi 与 OutPort.vi 对

板卡中的端口直接读写，利用这种方式可以方便的完成写入控制字、读出状态字等编程任务；动态连接库的调用是通过 CLF(Call Library Function)节点实现的，其中关键是对 CLF 节点的配置，即正确指定 DLL 文件路径、设置输入参数与返回参数等。CIN 方式利用外部代码节点，将 C 语言编写的代码自动连接到 LabVIEW 程序中，实现对板卡的各项设置和最终完成对数据的采集。可以说，三种方法各有其优点，可以根据自己的熟悉程度来选用一种最适合自己的方法。

本设计采用直接端口读写方式(I/O 方式)完成 ADS7864 驱动程序的编写。LabVIEW 中有两个直接访问底层设备的功能函数，即“**InPort.vi**”和“**OutPort.vi**”，如图×所示，这两个函数分别完成从设备的物理地址直接读取和输出数据的功能，通过直接读写寄存器可以提高数据的传输速率。端口 address 为读写数据的物理地址，通过选择可以实现 8 位、16 位、32 位的读写。

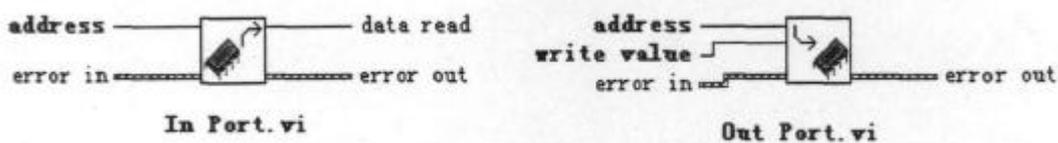


图 5-4 InPort.vi、OutPort.vi 图标及端口

## (2)在 LabVIEW 中编写 ADS7864 的驱动程序

在硬件地址译码部分已为 ADS7864 分配了相应的端口地址：片选信号 /CS(3F0H)、采样启动信号 /START(3F2H)、转换状态信号 EOC(3F4H)、复位信号 /RESET(3F6H)。ADS7864 的地址/方式(A2A1A0=110)、BYTE=0 等已通过硬件实现，采集流程如图 5-5 所示。

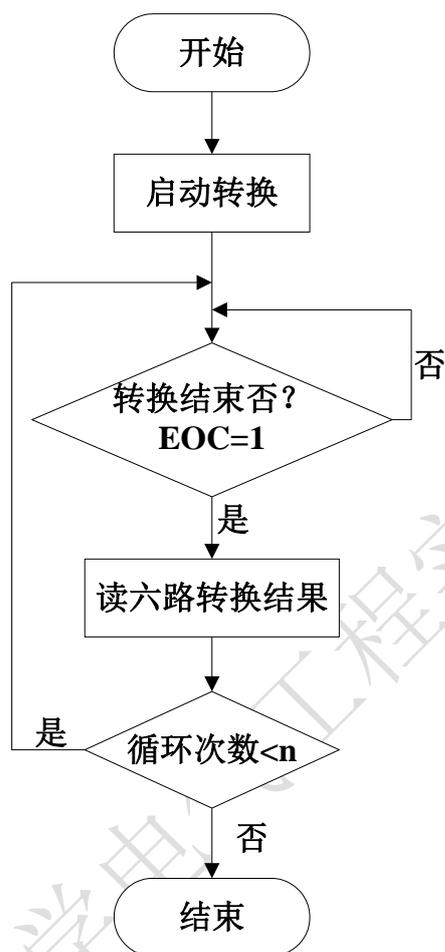


图 5-5 采集流程图

采用直接端口读写方式(I/O 方式)编写 ADS7864 驱动程，采集卡的工作方式为：软件启动、查询方式读取采样结果。

程序设计：用顺序控制结构(Sequence)来控制读写端口的前后次序，第一帧通过“Out Port.vi”对端口 3F2H 赋值 0，完成软件启动，如图 5-6 所示；第二帧通过 while 循环完成 1 周期 128 点数据的采集设计，通过顺序控制结构(Sequence)来控制每点的采集过程，第一帧利用“In Port.vi”从端口 3F4H 读取 8 位数据，通过 D0 查询 EOC 的状态，如图 5-7 所示；当 EOC=1 时执行第二帧程序，通过 while 循环从端口 3F0H 读取六路采样结果，因为读取的是 16 位的数据，所以此时选择 In Port16，程序框图如图 5-8 所示。

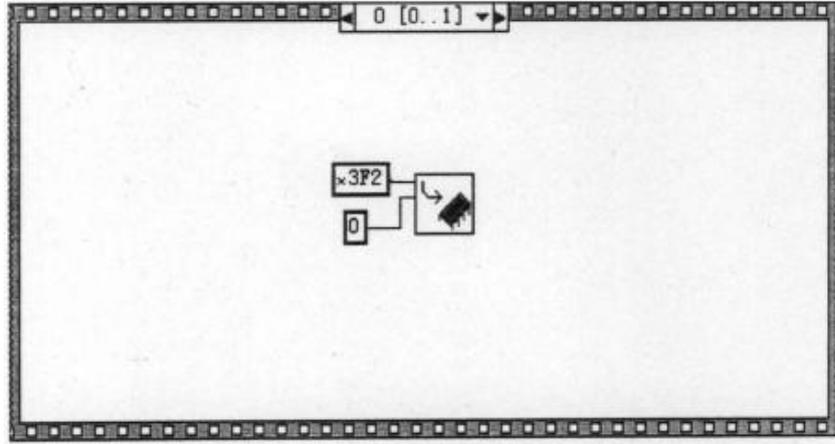


图 5-6 软启动程序框图

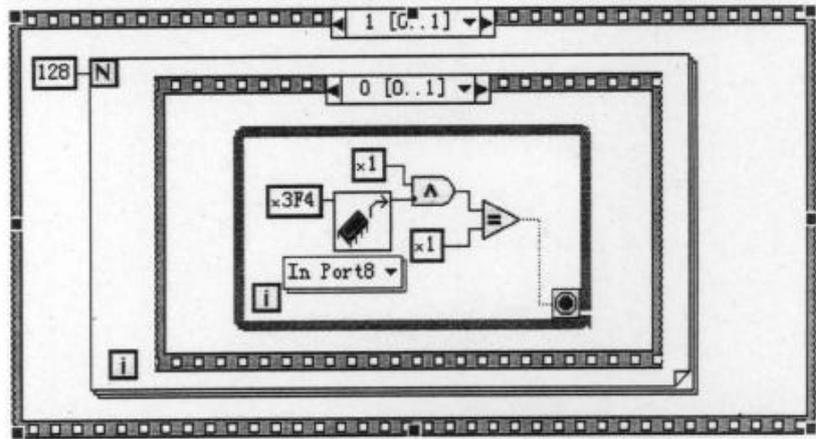


图 5-7 查询 EOC 状态程序框图

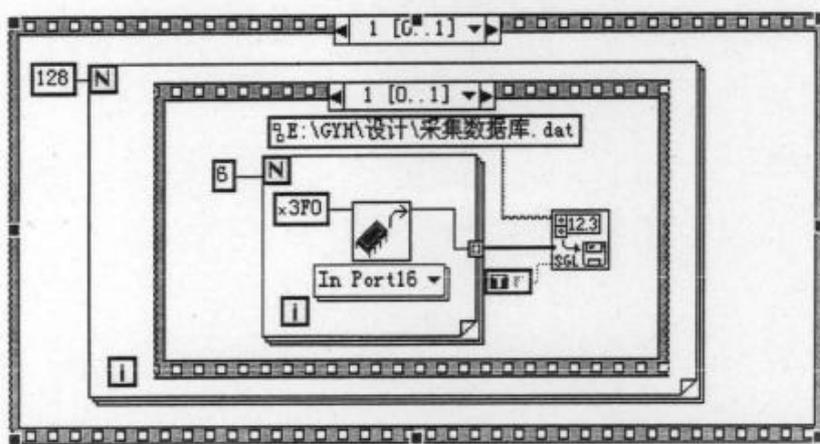


图 5-8 从端口读取采样结果程序框图

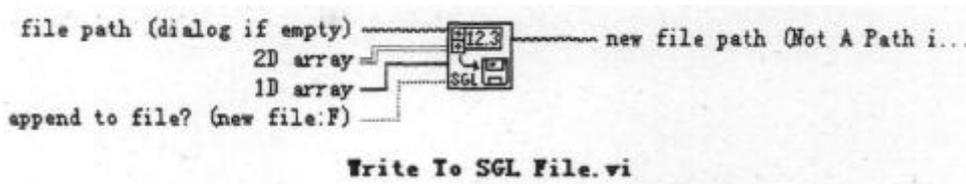


图 5-9 Write to SGL File.vi 图标及端口

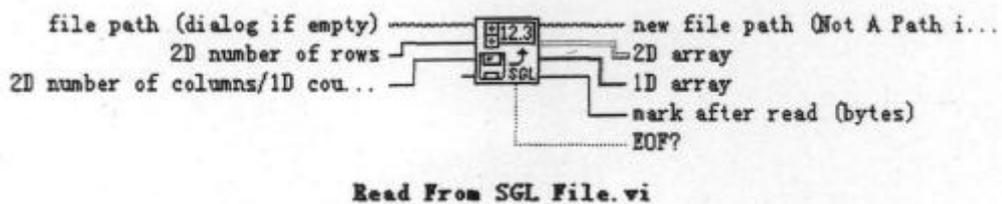


图 5-10 Read From SGL File.vi 图标及端口

为了方便后面处理工作的进行，采集的数据需要存储起来，这里利用 LabVIEW 提供的“Write to SGL File.vi”函数，如图 5-9 所示，将采集进来的数据存储为二进制格式的文件，存储路径为“E:\GYH\设计\采集数据库.dat”，这里“Write to SGL File.vi”函数的“append to file?”端口连接布尔常数 T，表示向“E:\GYH\设计\采集数据库.dat”文件里面添加新的数据，而不是覆盖里面的数据，实现文档的重复加载，利用“Read From SGL File.vi”函数如图 5-10 所示，通过设定读取路径可方便的实现存储数据的读取。

## 5.4 频率测量模块

考虑到频率值变化较小，本系统以连续采样 6 次，每次采样 6 个周期 768 个点，采样足够的数据后计算频率，最后计算 6 次的平均值。因为是连续采样的，这里可以直接计算 6 次频率的平均值，而不需要对 6 次分别计算频率后再求总平均值。

连续采样 6 次，每次采样 768 个点，一共采样到 4608 个点，根据过零点检测原理对这 4608 个点进行检测，得到所有的零点。因为相邻的两个零点之间采集的数据就是半个周期( $N/2$ )内采集的数据，由零点的个数及首尾零点的差值计算出  $N$  的平均值，再根据实际采样频率  $f_s$  利用  $f = f_s/N$  计算系统的频率。此外，由于谐波、扰动、噪声等高频分量会使一个电压周期含有多于两个的过零点，影响测量的准确度，因此在频率测量之前通过低通滤波器滤除信号中的高次谐波和直流分量。

图 5-11 是过零检测零位置的程序框图。采集到的数据存储于“E:\GYH\设计\采集数据库.dat”，以列存储为 A 相电压、A 相电流、B 相电压、B 相电流、C 相电压、C 相电流，图 5-12 为 A 相电压过零法测频率程序框图，利用“Index Array.vi”取出“采集数据库.dat”第一列数据，即 A 相电压，利用过零检测计算频率。

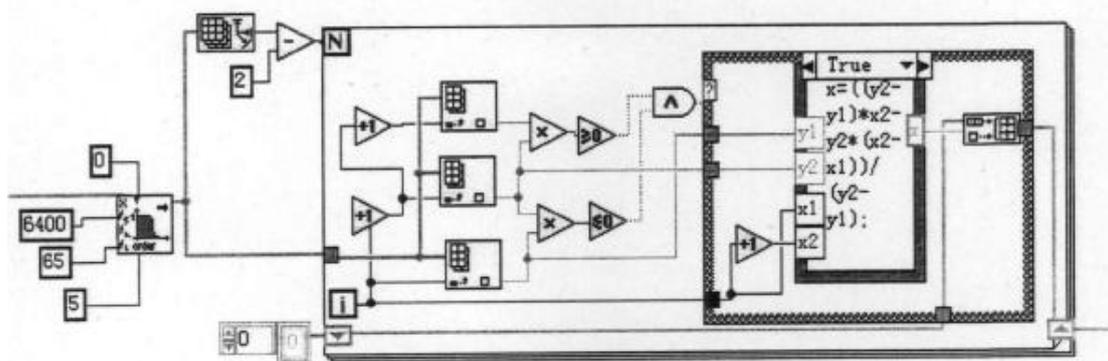


图 5-11 过零法检测零位置程序框图

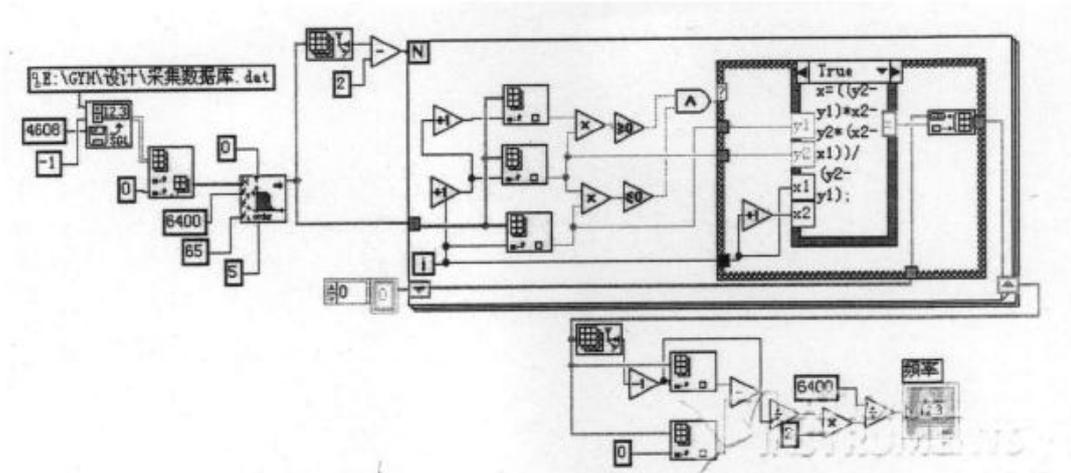


图 5-12 A 相电压过零检测计算频率程序框图

### 5.5 有效值测量模块

有效值测量模块设计的关键是电压、电流有效值子程序(子 VI)的设计，最终只要通过调用该子 VI 就能实现伏安测量模块的设计。通过前面检测算法里面提到的有效值计算公式完成有效值计算子程序的设计。图 5-13 为有效值计算子程序的程序框图。

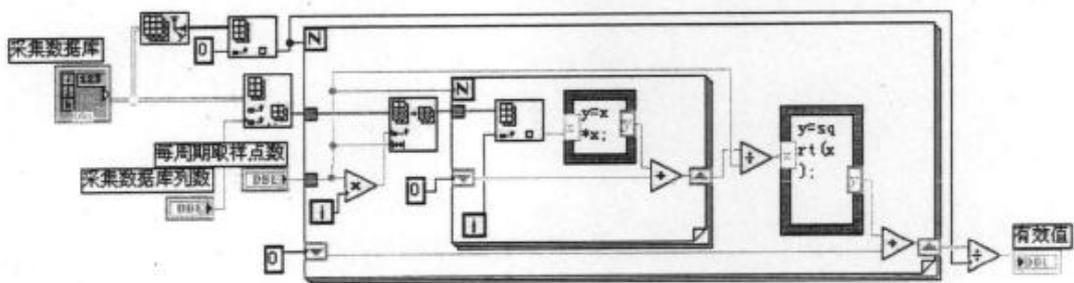


图 5-13 电压有效值计算程序框图

调用有效值计算子程序时，只要将前端的采集数据库数组以我们实际采集到的数据库代替即可，本设计中可通过“Read From SGL File.vi”函数从“采集数据库.dat”

文件中读取实际采集到的数据库；通过采集数据库列数参数的设置，控制三相电压或电流的有效值计算，如：当为 0 时即为 A 相电压有效值的计算。

## 5.6 三相不平衡度测量模块

基于 LabVIEW 的三相不平衡度的计算流程图如图 5-14 所示，此处以电压为例。三相电压不平衡度的程序框图如图 5-15 所示。从“采集数据库.dat”文件中利用“Index Array.vi”模块按列依次取出 A 相电压、A 相电流、B 相电压、B 相电流、C 相电压、C 相电流，利用“Extract Single Tone Information.vi”将采样得到的数字信号中的基波电压和电流在频域中分离出来，求出它们的幅值和相角，利用公式求得电压的三相不平衡度。三相电流不平衡度的程序设计和三相电压不平衡度设计一样，只是取“采集数据库.dat”的第一列、第三列、第五列数据完成计算。

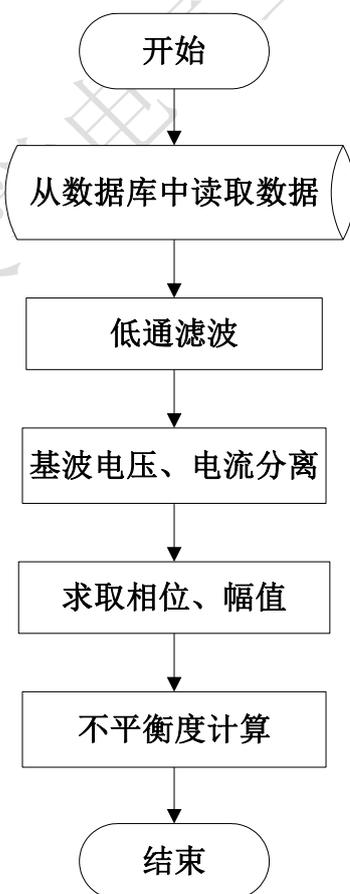


图 5-14 三相不平衡度计算流程图

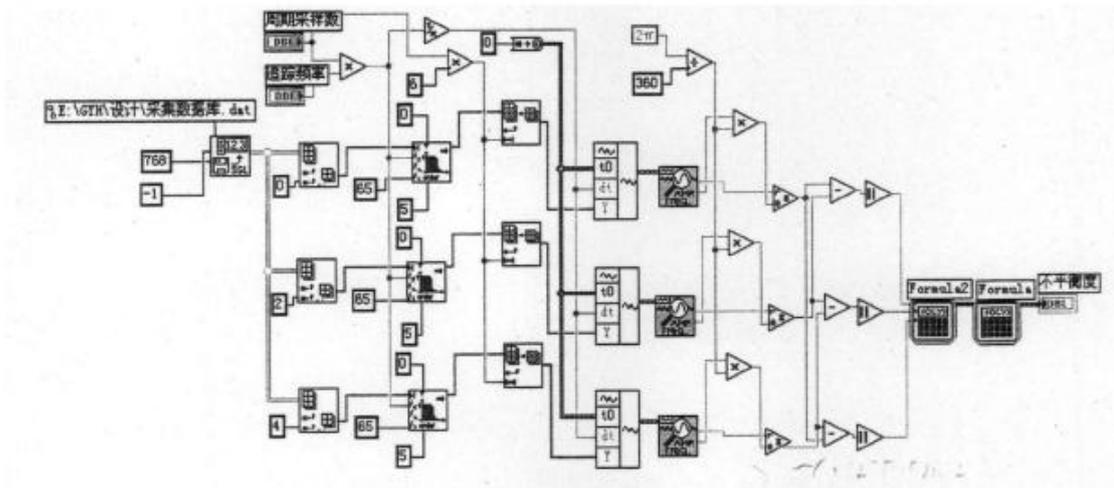


图 5-15 三相电压不平衡度的程序框图

## 5.7 功率测量模块

### A. 有功功率的计算

为了方便功率测量模块的设计，有功功率计算程序也定义为子 VI。“有功功率子程序.vi”，以供功率测量模块的调用。图 5-16 就是有功功率计算程序框图，完成了 A 相、B 相、C 相的有功功率计算，它们的计算方法相同，下面以 A 相的有功功率计算为例，具体说明有功功率的程序设计。

根据有功功率的定义，将“采集数据库.dat”的第一列(A 相电压采集数据)和第二列(A 相电流采集数据)的数据通过“Index Array.vi”功能函数取出，首先对一个周期内同一时间采集的电压与电流的瞬时值的乘积进行求和，然后除以一个周期所采集的数据点个数，所得到的就是有功功率，本设计中连续采样 6 个周期，因此取 6 次的平均值作为有功功率。

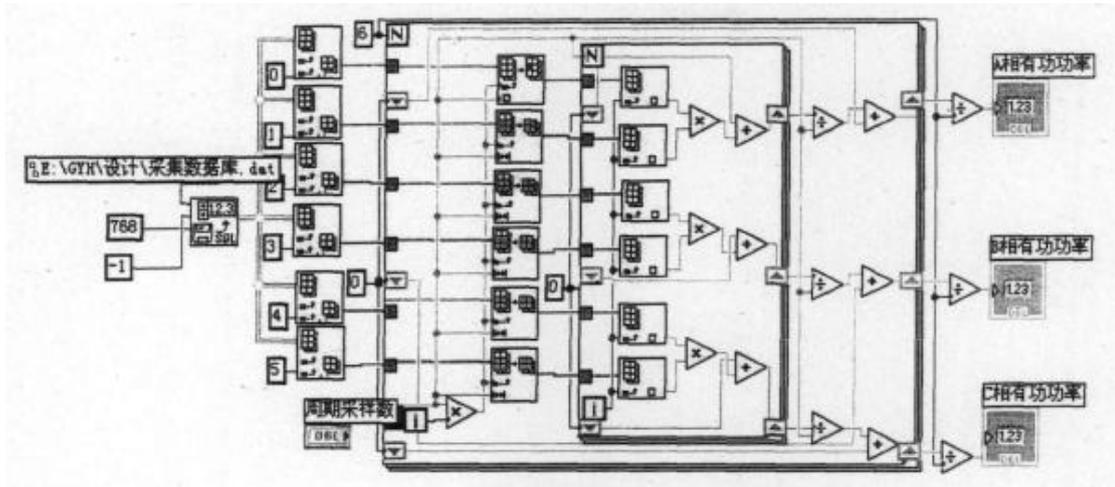


图 5-16 有功功率计算程序框图

### B. 视在功率、无功功率、功率因数的计算

图 5-17 是视在功率、无功功率、功率因数的程序框图。视在功率的计算相对比较简单，利用前面已经计算的电压和电流的有效值进行相乘，所得到的值就是视在功率。功率因数、无功功率的计算可以利用公式  $\cos \varphi = P/S$ ， $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$  进行计算。

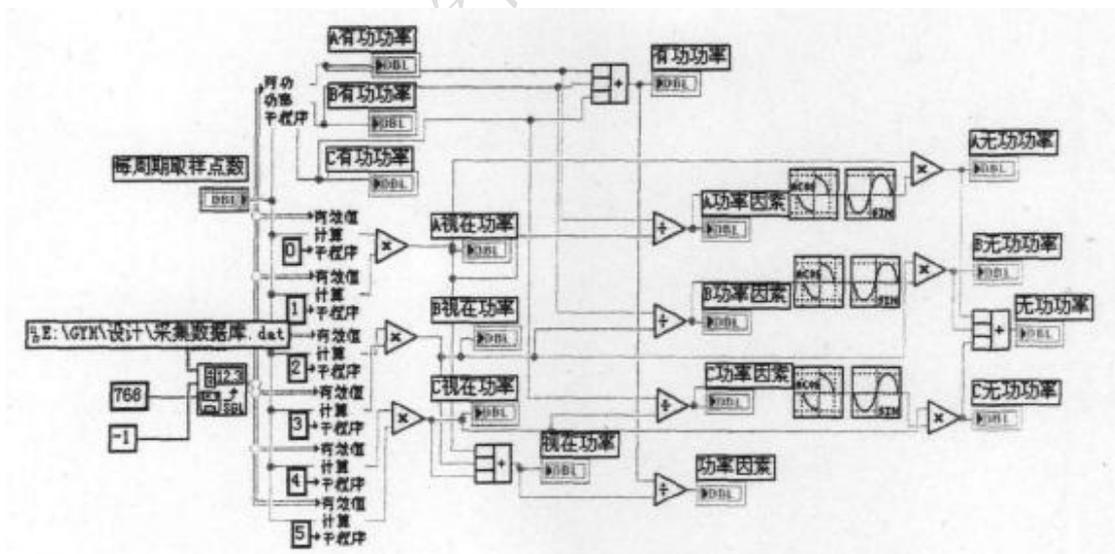


图 5-17 视在功率、无功功率、功率因数程序框图

## 5.8 谐波测量模块

为了减少泄漏误差，避免信号做谐波分析时发生混叠，先要对信号进行加窗处理，再通过 FFT 变换完成谐波分析。进行基于 LabVIEW 的谐波计算流程图如图 5-18 所示，这里以 A 相电压为例。

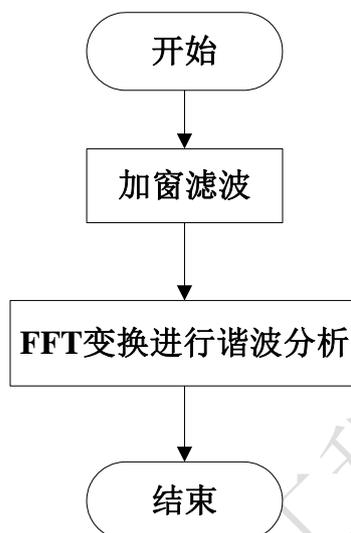


图 5-18 谐波计算流程图

LabVIEW 为我们提供了多个谐波分析的功能函数，它们功能各异，这里选用 LabVIEW 提供的“Harmonic Analyzer.vi”功能函数来实现谐波的测量，“Harmonic Analyzer.vi”是一个相对初级的谐波分析 VI，它通过对被测试信号的自功率谱的分析，输出各次谐波的频率和幅值、总谐波畸变比%THD 以及基波和各次谐波在能量谱中的比例，其图标及端口如图 5-19 所示。

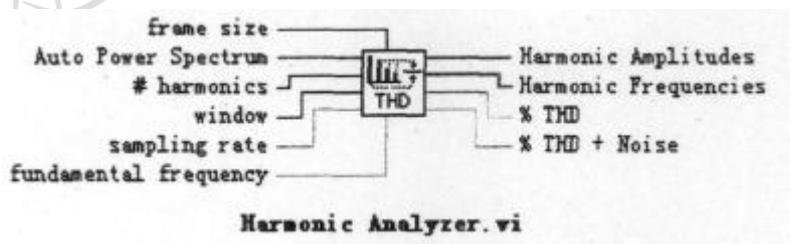


图 5-19 Harmonic Analyzer.vi 图标及端口

为了使用这个 VI，需要提供计算 THD 信号的能量谱，所以设计中选用了“Auto

Power Spectrum.vi”，同时“Scaled Time Domain Window.vi”为信号加载时域窗。

当需要对采集的数据进行谐波分析时，利用 Index Array 从数据库文件“采集数据库.dat”中分别取出每一列的数据，依次加载在功能函数“Scaled Time Domain Window.vi”的 waveform 引脚上，通过#harmonics 设置谐波次数；各次谐波的幅值和频率以数组形式显示出来，这其中包含基频成分；通过谐波幅值图形象显示除基波外各次谐波的幅值，通过“Delete From Array.vi”除去其中基波信号。图 5-20 为 A 相电压谐波测量的程序框图。A 相电流、B 相电压、B 相电流、C 相电压、C 相电流谐波测量程序框图与此类似，只要将“Index Array.vi”的 index(col)端口相应的改为 1、2、3、4、5 即可。

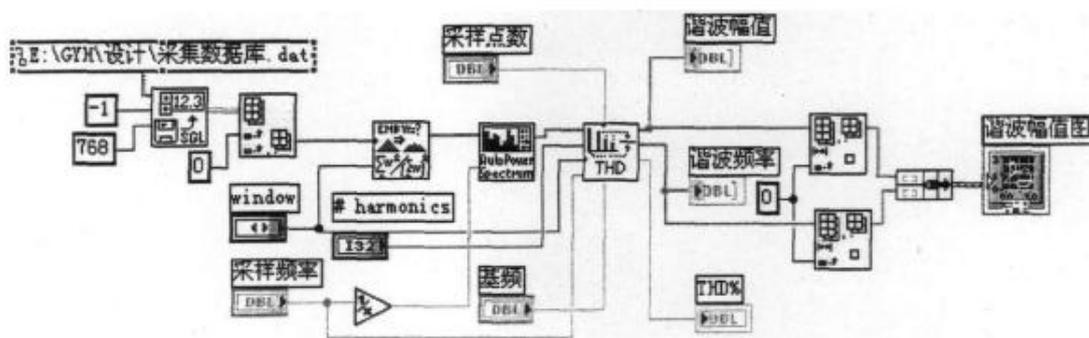


图 5-20 A 相电压谐波测量程序框图

## 5.9 闪变测量模块

### A. 瞬时闪变值的计算程序

采样频率为 6.4KHz，每一个周期的采样点数是 128 个，数据采集一次得到的波形数据包含 25600 个采样点，因此，一个波形数组中包含了 200 个周期的波形数据，每次可计算 200 个电压或者电流的有效值。

接着利用 LabVIEW 提供的功能函数 FFT Spectrum 对 200 个周期电压的有效值进行 FFT 变换，如图 5-21 所示，得到的序列是所采样电压的电压波动频率成分，其大小为电压波动的幅值。利用 Index Array 索引的功能将所有的序列依次取出，根据 IEC 规定视感度  $S=1$  觉察单位的电压波动(正弦波和矩形波)的值，可以查出每个频率对应

的  $S=1$  时的电压波动。

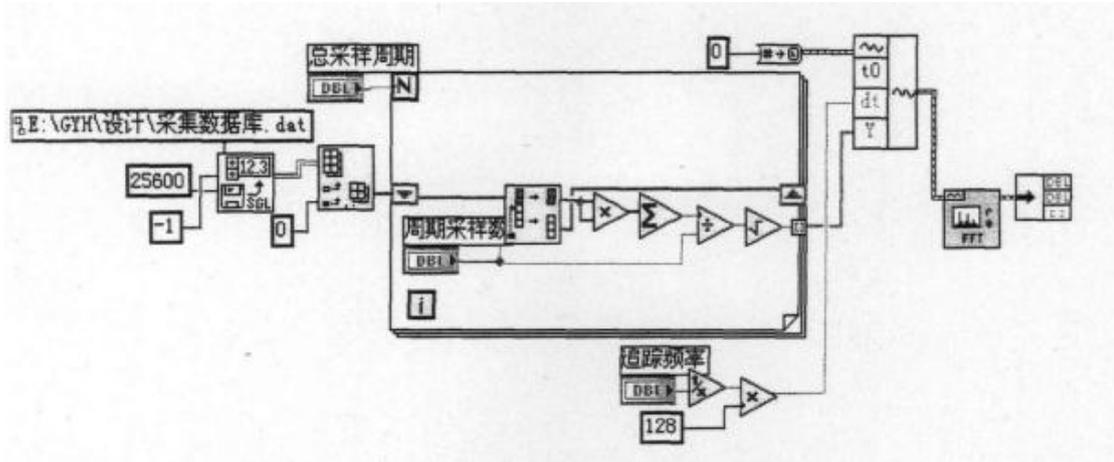


图 5-21 A 相电压有效值序列的 FFT 变换程序框图

电压有效值序列的 FFT 变换，选用的是波形 VI 中的“FFT Spectrum(Mag-Phase).vi”函数完成，其端口定义如图 5-22 所示。

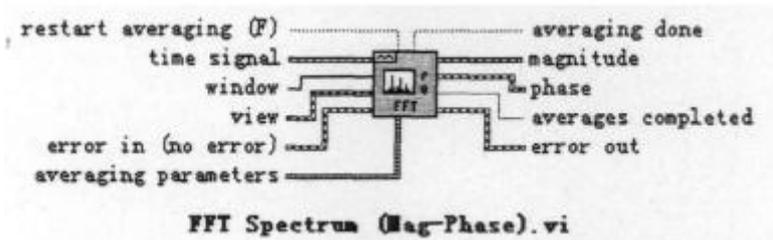


图 5-22 FFT Spectrum(Mag-Phase).vi 图标及端口

### B. 短时闪变值 $P_{st}$ 的计算程序

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (5-1)$$

用离散的方法计算出瞬时闪变值后就可以进一步计算短时间闪变值，本设计采用排序方法计算短时间闪变值，由于在一段时间内(10min)各瞬时闪变值是相等时间间隔上离散的  $S(k)$  序列，如果其中不小于某个瞬时闪变值  $p$  的所有项对应的时间占整个时段的  $N\%$ ，则其中不小于某个瞬时闪变值  $p$  的所有项的个数也应该占该时段内总瞬时闪变值个数的  $N\%$ ，故 CPF 曲线上 0.1%、1%、3%、10%、50% 纵坐标对应的

瞬时闪变值分别是  $P_{0.1}$ 、 $P_1$ 、 $P_3$ 、 $P_{10}$ 、 $P_{50}$  分别是该段时间内瞬时闪变值序列中的 99.9%、99%、97%、90%、50% 概率大值，只要将  $S(k)$  序列从大到小重新排列，找出其对应的概率大值代入式中即可。

瞬时闪变值采样的周期数(200)知道计算一个瞬时闪变值需要  $200 \times 0.02s = 4s$ ，所以在 10 分钟内就有 150 个瞬时闪变值，对所有的值按从大到小排列，然后利用 Index Array 索引分别取出序号为 0、14、12、54 的  $S(k)$  作为 99.9%、99%、97%、90%、50% 的概率大值，代入公式，短时间闪变值  $P_{st}$  的计算程序框图如图 5-23 所示。

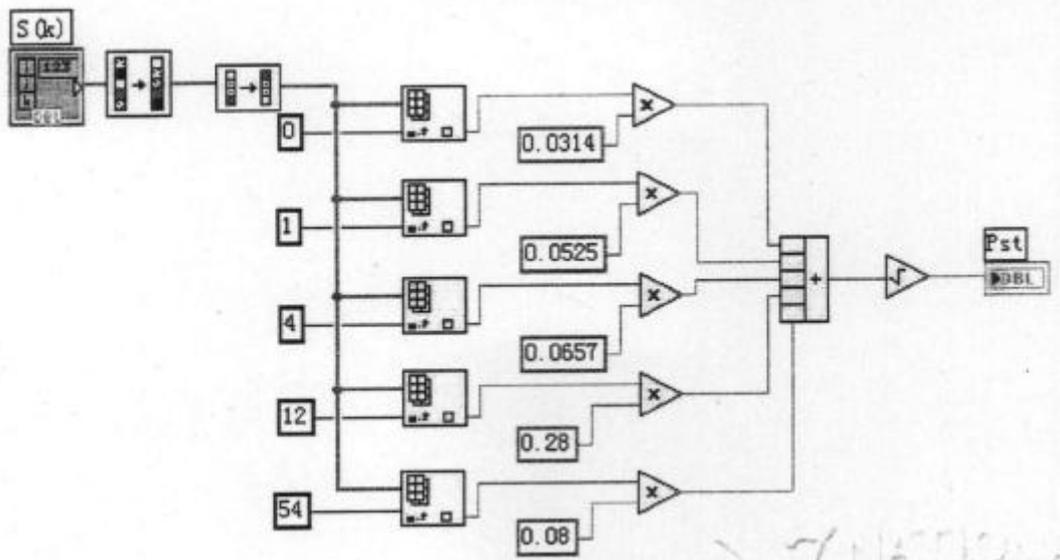


图 5-23 短时间闪变值  $P_{st}$  的计算程序框图

### C. 长时闪变值 $P_{lt}$ 的计算程序

长时间闪变严重度  $P_{lt}$  的计算则根据 UIE/IEC 推荐算式，在 2h 的长时间闪变值测量过程中，每 10min 测得一个短时间闪变值  $P_{st}$ ，则 2h 测得  $P_{st}$  的数量为 12，由 12 个  $P_{st}$  的立方均值可以求得长时间闪变严重度。具体程序框图如图 5-24 所示。

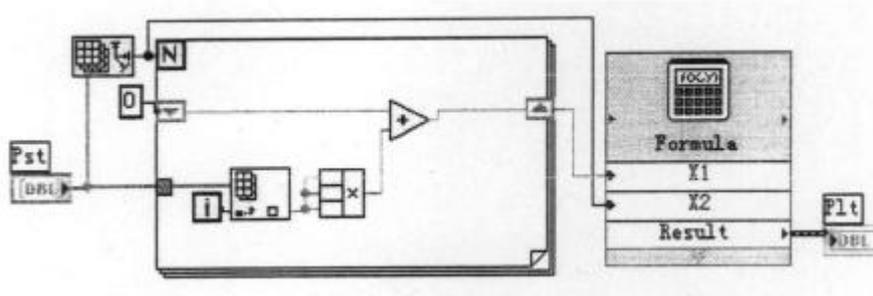


图 5-24 长时间闪变值  $P_{lt}$  的计算程序框图

### 5.10 数据存储模块

在使用 LabVIEW 的数据库接口工具包访问数据库存储数据时，只要掌握最基本的 SQL 语言就很方便的实现对数据库的操作，具体数据存储程序框图如图 5-25 所示。

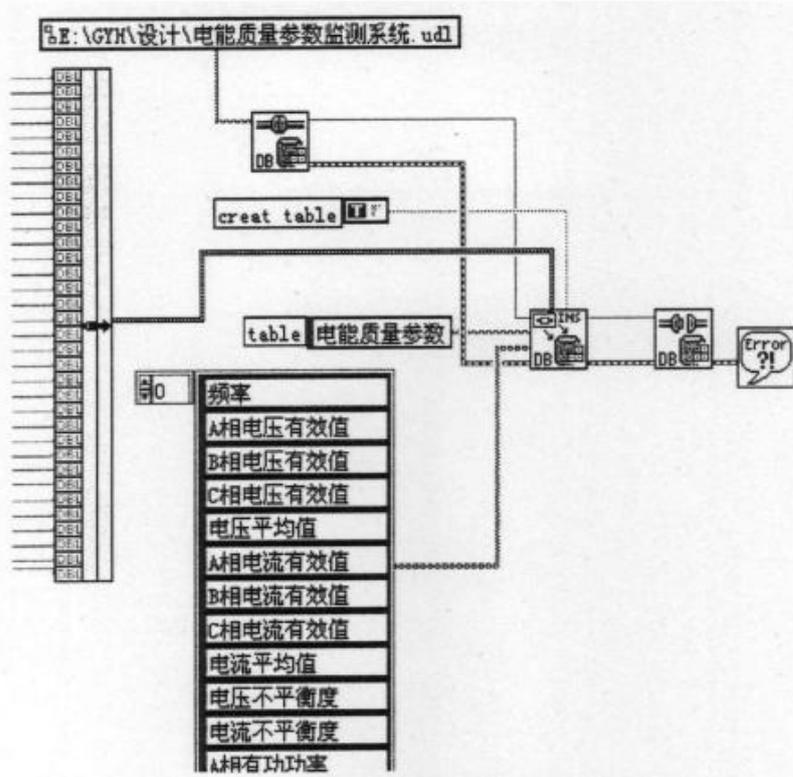


图 5-25 数据存储程序框图

本系统所使用的数据库，总共 34 个字段(三相电压有效值，三相电流有效值，电压、电流平均值，电压、电流不平衡度，三相有功功率、无功功率、功率因数及总值，三相谐波 THD%值)的数据需要存储到数据库中。在编写数据存储程序时，首先要打开数据库连接，使用“DB Tools Open Connection.vi”函数(如图 5-26 所示)打开已经生成的 UDL 文件(这里是 E:\GYH\设计\电能质量参数监测系统.udl)，然后通过“DB Tools Insert Data.vi”函数(如图 5-27 所示)将所需入库的字符串写进库中的相应位置，最后关闭数据库连接，使用“DB Tools Close Connection.vi”函数(如图 5-28)实现。

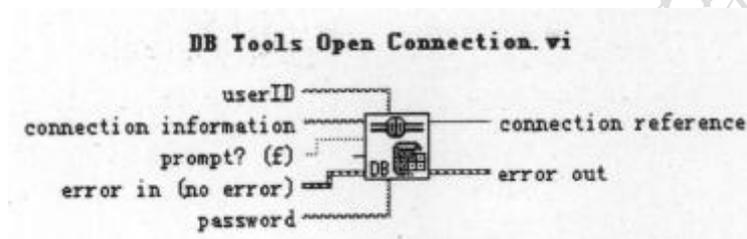


图 5-26 DB Tools Open Connection.vi 图标及端口

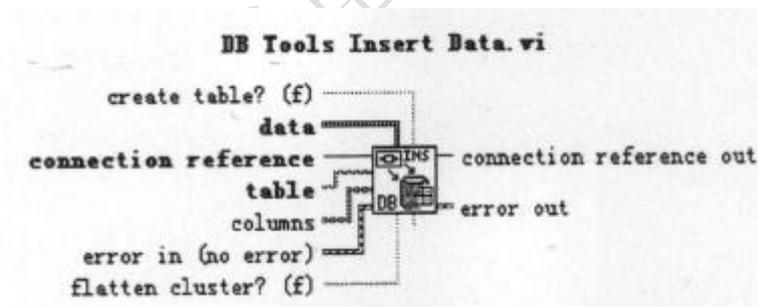


图 5-27 DB Tools Insert Data.vi 图标及端口

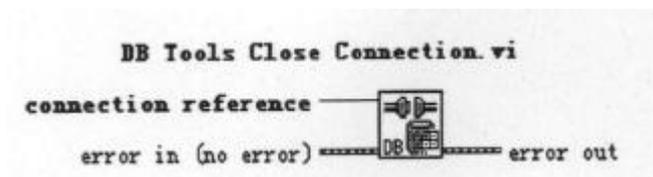


图 5-28 DB Tools Close Connection.vi 图标及端口

## 5.11 测试结果

### A. 伏安测量模块的测试

图 5-29 是伏安测量模块的测试结果。从图中可以看出伏安测量模块通过数值控件显示了三相电压、电流的有效值、相电压、相电流的平均值、电压不平衡度、电流不平衡度以及系统的频率值；图形控件是对三相电压、电流波形的监测，可以通过下方的“图形显示选择按钮”控件来选择显示 A 相电压、A 相电流、B 相电压、B 相电流、C 相电压、C 相电流；当图形控件显示的是相电压波形图时 Y 坐标标签为“电压(V)”，当显示的是相电流波形图时 Y 坐标标签为“电流(A)”。

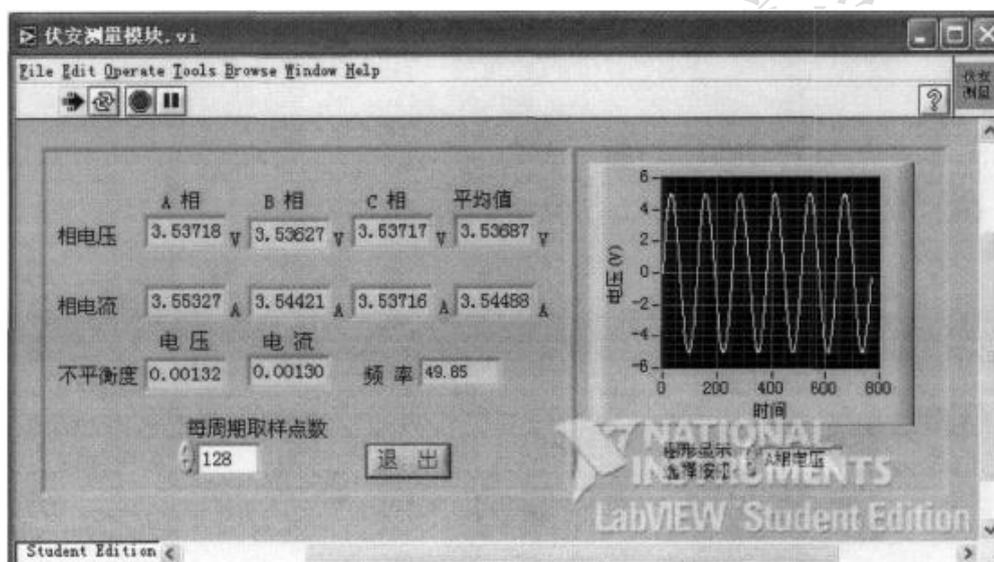


图 5-29 伏安测量模块测试结果

### B. 功率测量模块的测试

图 5-30 是功率测量模块的测试结果。功率测量模块通过数值控件显示了三相各自的有功功率值、无功功率值、视在功率值、功率因数以及总的有功功率值、无功功率值、视在功率值、功率因数。

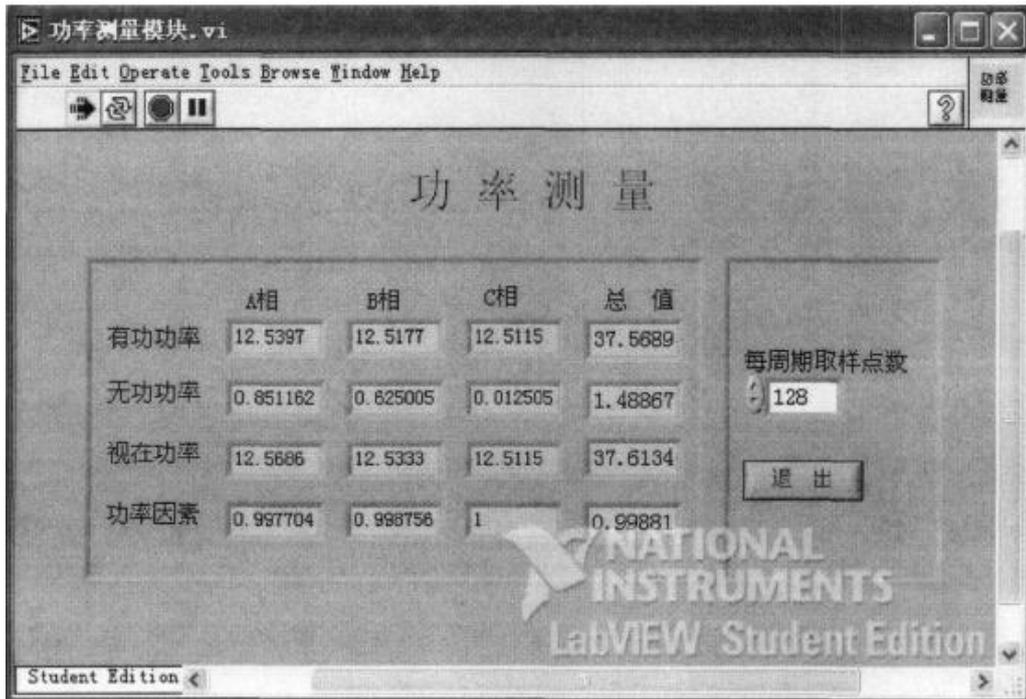


图 5-30 功率测量模块的测试结果

### C. 谐波测量模块的测试

图 5-31 是谐波测量模块的测试结果。从图中可以看出，谐波的测量包括谐波频率、谐波幅值、THD%，它们分别通过数组控件及数值控件加以显示，同时以图像控件显示除基波之外各次谐波的幅值。

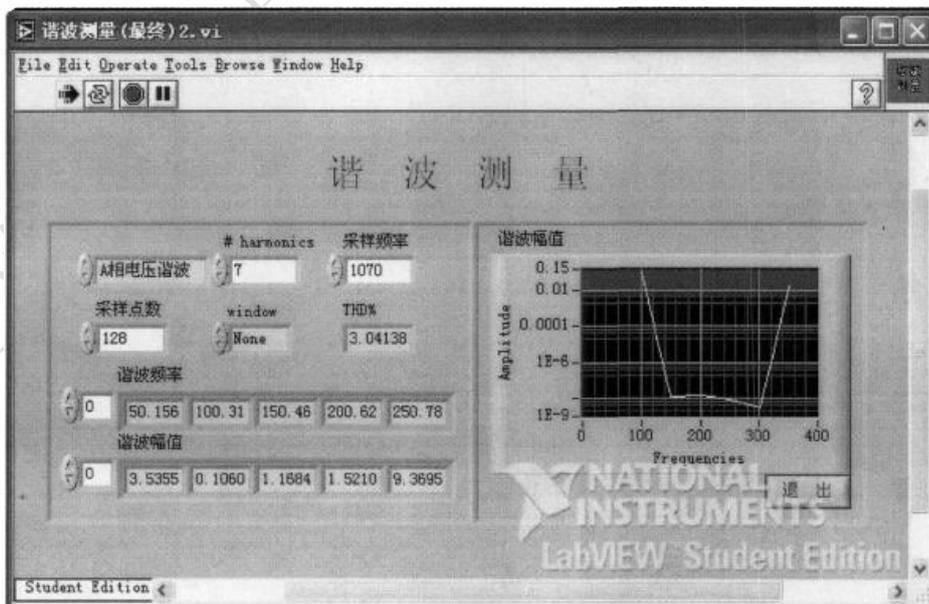


图 5-31 谐波测量模块的测试结果

## 6. 实验心得与体会

上海交通大学电气工程实验中心