

基于 LabVIEW 的三种相位差测量法的对比分析

任海东 尹文庆* 胡 飞

(南京农业大学电气工程系, 南京 210031)

摘 要 在介绍测量相位差的三种算法即过零点法、相关法和频谱分析法的原理的基础上运用 LabVIEW 虚拟仪器分别实现了这三种算法,并分析了这三种算法产生误差的原因,提高相位差测量精度的方法,通过对三种算法进行比较分析指出了各自适用的场合。

关键词 LabVIEW 相位差 过零点法 相关法 频谱分析法

中图分类号 TP274; **文献标志码** A

相位差是工业测控领域经常需要测量的参数,如电力系统中功率因数的测量,电机扭矩的测量,铁路系统中相敏轨道电路相位差的测量以及科氏质量计中的相位差测量等。而相位差的测量不同于传统的电压、电流信号的测量,它是一个比较量,测量两路信号之间的相位差,不仅需要保证两路信号的频率相同,而且要排除由于两路信号幅值等其它因素不一致而造成的影响^[1]。目前常用的相位差检测算法有过零点法、相关法和频谱分析法,在同一测量环境下三种算法的测量精度有很大的差别,因此解决如何选取适当的算法,提高相位差检测精度这一问题具有很大的应用价值。

1 过零点法

1.1 过零点法原理及其 LabVIEW 编程

过零点法的原理是:分别确定两个同为下降趋势(或上升趋势)的同频信号过零点的时刻,计算其时间差,然后根据时间来计算相位差^[2,3]。图1所

示,为两个同频的正弦信号,其过零点时差为 Δt ,由下式(1)计算相位差。

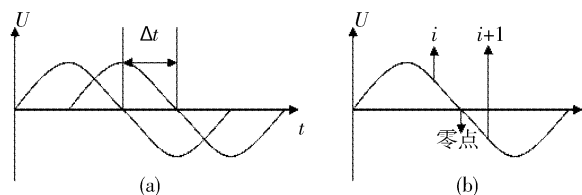


图1 过零点法基本原理

$$\Delta\phi = \left(\frac{\Delta t}{T}\right) \times 360 \quad (1)$$

式(1)中 T 为信号周期,式(1)可用模拟电路实现,而在虚拟仪器中,信号是 A/D 采样量化后的离散信号,故式(1)不能直接应用,设信号1首次经过的零点对应数组的第 i 元素,信号2首次经过的零点对应数组的第 j 元素(两信号的过零点均为下降趋势时的零点),采用下式计算相位差。

$$\Delta e = \frac{360}{n} = 360 \left(\frac{f}{f_s}\right) \quad (2)$$

$$\Delta\phi = j\Delta e - i\Delta e = (j-i)\Delta e = 360(j-i) \left(\frac{f}{f_s}\right) \quad (3)$$

式中 Δe 为相邻两个采集点信号的相位角之差; f 为被测信号频率; f_s 为采样频率;当采样频率较高或者被测信号幅值较小时,在信号零点附近可能会出现第 h 个采样点到第 k 个采样点间值均为零的现象,但信号只有一个过零点(对应数组第 i 元素),可由

2009年9月28日收到

第一作者简介:任海东(1983—),男,江苏省滨海县人,硕士研究生,研究方向:智能检测与智能控制。E-mail:haidong_ren@yahoo.com.cn

*通信作者简介:尹文庆(1959—)男,湖北人,教授,博导,博士,研究方向:农业机器人、智能检测与控制技术。

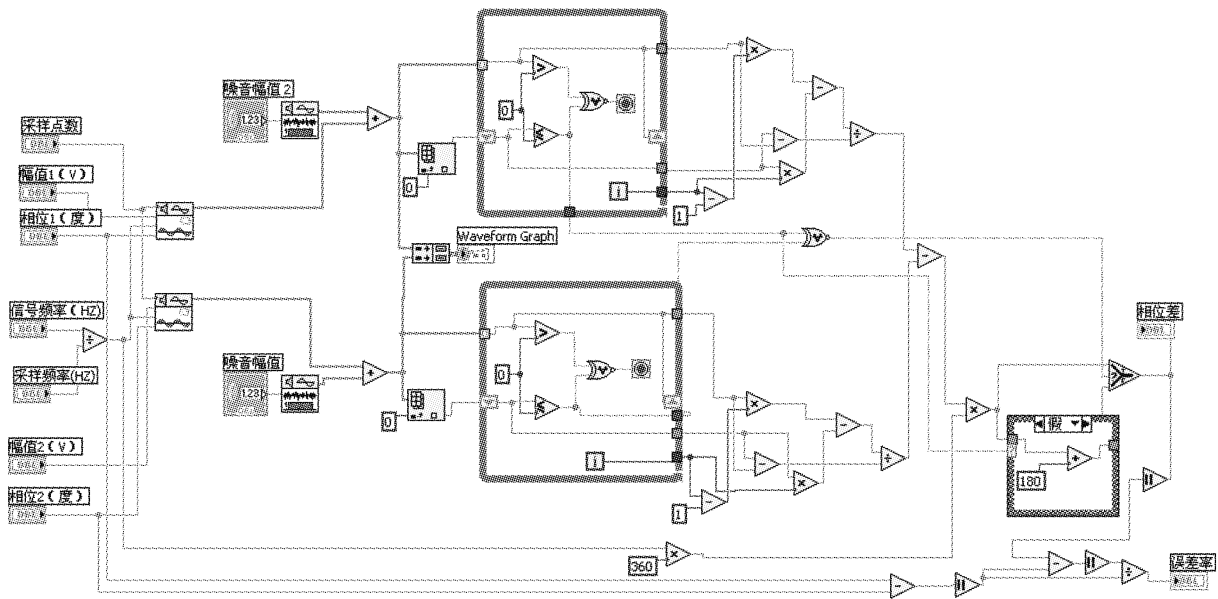


图2 过零点法程序

式 $i = \frac{(h+k)}{2}$ 求出。同时,在实际测量中,通常直接测到零点的几率比较小,而采集的是零点两侧的样本数据。如图1(b)所示的第 i 和第 $i+1$ 个采集点,可将这两个采集点之间的信号用直线来简化,此时过零点时间采用下式计算

$$t = t_{i+1} - \frac{f_s y_{i+1}}{(y_i - y_{i+1})} = \frac{(i+1)}{f_s} - \frac{f_s y_{i+1}}{(y_i - y_{i+1})} \quad (4)$$

式(4)中 t_{i+1} 为第 $i+1$ 个采样点的采样时间; y_i 和 y_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 个采样点对应的幅值。

由式(4)可以得到两同频信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相位差为:

$$\Delta\phi = 360(t_x - t_y)f \quad (5)$$

在LabVIEW编程时,找出信号1中满足 $y_i > 0$ 且 $y_{i+1} = 0$ 或 $y_{i+1} < 0$ 的第 i 个采集点,同理找出信号2中对应的第 j 个采集点,再由式(4)和(5)可求得两信号的相位差。LabVIEW程序如图2所示。

1.2 过零点法误差分析

过零点法相位差测量产生的误差来源主要有如下因素。

1.2.1 数据采集卡的位数

假设信号为正弦信号 $x(t) = A\sin(\omega t + \theta)$,采

集卡的分辨率为 N 位,测得最小幅值为 $u_{\min} = \frac{A}{2^N}$,设

相位分辨率为 φ ,则有: $\frac{A}{2^N} = A\sin\varphi$,由此可以得到相

位分辨率与数据采集卡位数有这样的关系: $\frac{1}{2^N} =$

$\sin\varphi$ 。因此可以得到结论,数据采集卡分辨率越高,所测得的相位差也就越精确。

1.2.2 信号的采样频率

设信号的频率为 f ,采样频率为 f_s ,则可以得到

相位分辨率 φ 与 f 及 f_s 之间的关系式为: $\varphi = 2\pi \frac{f}{f_s}$,

即采样频率越高测得的相位差越精确。

在仿真实验中,取峰值为5 V,频率为500 Hz的正弦信号(混合同频0.1 V的均匀白噪音),采样频率分别取10 kHz、50 kHz、100 kHz,测量值如表1所示:

表1 采样频率与相位差测量的关系

真实相位差/(°)	采样频率/kHz	测得相位差/(°)	误差率/%
30	10	29.88	0.400
30	50	29.94	0.200
30	100	30.05	0.167

1.2.3 信号的幅值与信号的干扰

由于采集卡的分辨率是固定的,最小分辨幅值也就固定,当信号幅值过小或者有信号干扰时,在零点周围几个采样点会被误判为零点,而过零点法最基本的就是判断零点,这样会带来较大误差。

2 相关法

2.1 相关法原理及其 LabVIEW 编程

相关法是利用两同频正弦信号在延时 $\tau = 0$ 时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^[4,5]。假设有两个同频信号,其描述如下

$$\begin{cases} x(t) = A \sin(\omega t + \theta_1) + N_x(t) \\ y(t) = B \sin(\omega t + \theta_2) + N_y(t) \\ \Delta\phi = \theta_1 - \theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 $N_x(t)$, $N_y(t)$ 为噪声信号, ω 为信号的角速度, θ_1 为信号 $x(t)$ 的初始相位, θ_2 为信号 $y(t)$ 的初始相位。

两信号的互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin(\omega t + \theta_1) + N_x(t)] \times \\ &\quad [B \sin(\omega(t+\tau) + \theta_2) + N_y(t+\tau)]dt \end{aligned} \quad (7)$$

取 $\tau = 0$ 。由于信号与噪音相关的可能性很小,且两个噪音之间相关的可能性更小,因此可得

$$\begin{aligned} R_{xy}(0) &= \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin(\omega t + \theta_1) + N_x(t)] \times \\ &\quad [B \sin(\omega t + \theta_2) + N_y(t)]dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [AB \sin(\omega t + \theta_1) \sin(\omega t + \theta_2)]dt = \\ &= \frac{AB}{2} \cos \Delta\phi \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta\phi = \arccos \frac{2R_{xy}(0)}{AB} \quad (9)$$

信号的幅值和和在延时 $\tau = 0$ 时的自相关函数值有下述关系

$$A = \sqrt{2R_x(0)}, B = \sqrt{2R_y(0)}。$$

式(9)可写成:

$$\Delta\phi = \arccos \frac{2R_{xy}(0)}{AB} = \arccos \frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_x(0)R_y(0)}} \quad (10)$$

在 LabVIEW 编程中,被测信号经 A/D 转化为离散信号,两信号的自相关函数及互相关函数的计算公式如下

$$R_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]x[n] \quad (11)$$

$$R_y(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n]y[n] \quad (12)$$

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n] \quad (13)$$

相关法用 LabVIEW 实现编程如图 3 所示。

2.2 相关法误差分析

由于有效信号通常与噪声信号相关性很小,因而使用相关法测量相位差能很好地抑制噪声。其测量误差主要由周期信号的自相关函数的离散计算式所取的总点数不等于整周期以及交流信号的频率不稳定所引起,如下。

取峰值为 5 V,频率为 500 Hz 的正弦仿真信号(混合同频 0.1V 的均匀白噪音)。

令采样频率为 1 000 Hz,采样数分别取 50、100、1 000 时,采样点数与相位差测量精度关系如表 2。

表 2 采样点数与相位差测量关系

真实相位 差/(°)	采样数	测得相位 差/(°)	误差 率/%
30	50	30.49	1.633
30	100	30.31	1.033
30	1000	29.98	0.067

当采集频率为 1 000 Hz,采样数为 1 000 时,交流信号频率变化与相位差测量精度关系如表 3。

表 3 交流信号频率变化与相位差的关系

真实相位 差/(°)	信号 1 频 率/Hz	信号 2 频 率/Hz	测得相位 差/(°)	误差 率/%
30	50	49.4	30.46	1.533
30	50	49.6	30.19	0.633
30	50	50	30.02	0.067

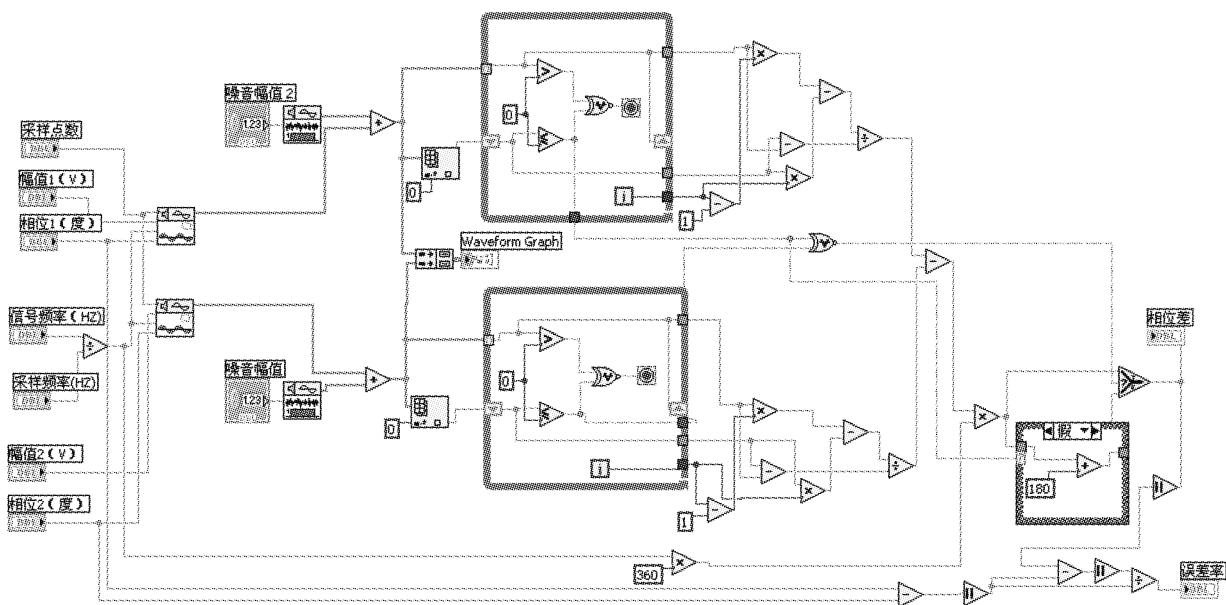


图3 相关法程序

3 频谱分析法

3.1 频谱分析法原理及其 LabVIEW 编程

频谱分析法是通过离散傅里叶法对被检测信号进行频谱分析,从而获得信号的相频特性,然后计算两信号在主频率处的相位差值^[6,7]。

在有限区间 $(t, t+T)$ 内,绝对可积的任一周期函数 $x(t)$ 可以展开成傅里叶级数。

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (14)$$

式(14)中 a_n 、 b_n 为傅里叶系数,

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cos n\omega t dt, b_n = \frac{2}{T} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \sin n\omega t dt。$$

$$\text{令 } A_0 = \frac{a_0}{2}, a_n = A_n \sin \phi_n, b_n = A_n \cos \phi_n, \text{式(14)}$$

可写成:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (15)$$

ϕ_n 为 n 次谐波的初相位,其中基波的初相位为:

$$\phi_1 = \arctan \frac{a_1}{b_1}。$$

由式(15)可知一个周期信号可以用一个直流

分量和一系列谐波的线性叠加来表示,只要求出傅里叶系数 a_n 和 b_n 即可求出任意谐波的初相位 ϕ_n ,在相位差测量中只要求出基波的初相位 ϕ_1 即可。

在 LabVIEW 中,模拟信号经 A/D 转换成离散时间信号,设在周期函数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的一个周期内有 N 个采样点,则他们的基波傅里叶系数和初相位的计算式如下

$$\begin{cases} a_{x1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos \frac{2\pi k}{N} \\ b_{x1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin \frac{2\pi k}{N} \\ \phi_{x1} = \arctan \frac{a_{x1}}{b_{x1}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} a_{y1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos \frac{2\pi k}{N} \\ b_{y1} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin \frac{2\pi k}{N} \\ \phi_{y1} = \arctan \frac{a_{y1}}{b_{y1}} \end{cases} \quad (17)$$

$x(t)$ 和 $y(t)$ 的基波分量的相位差为

$$\Delta\phi = \phi_{y1} - \phi_{x1} = \arctan \frac{a_{y1}}{b_{y1}} - \arctan \frac{a_{x1}}{b_{x1}}。$$

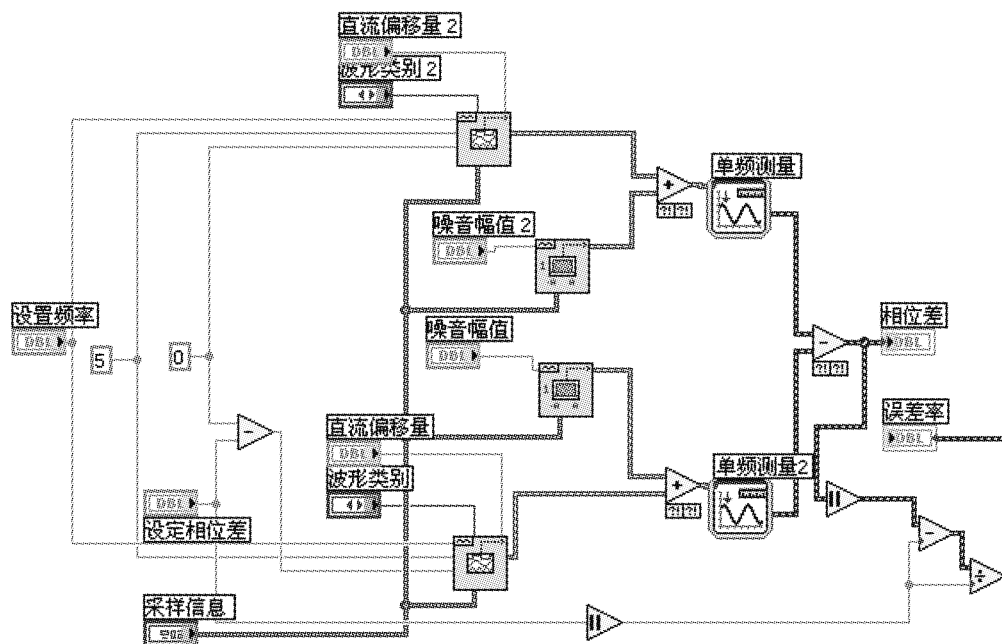


图4 频谱分析法程序

利用 LabVIEW 中 Extract Single Tone Information. VI 模块对信号进行加窗和离散傅里叶变换从而对信号进行频谱分析,程序图 4 所示。

3.2 频谱分析法误差分析

频谱分析法虽然避免了谐波的干扰,但是对连续信号采样时,时域无限长的信号数据序列要截断,这相当于原函数乘以矩形窗函数,而窗外的时域信息则全部丢失,从而导致时域频谱丢失(即泄漏),由此会导致误差的产生。不同长度的窗函数泄漏情况是不一样的,为减少泄漏引入的误差,应使窗长等于信号周期的整数倍。此外,适当的提高采样频率 f_s 也可以减少误差。

4 结论

过零点法检测相位时,如何准确判定过零点是该方法的关键。该方法适用于信号幅值较大的情况,同时应该尽量提高信号的采样频率。在测量前预先对信号进行滤波去噪处理,对过零点附近的数据进行适当的拟合,都有利于抑制零点噪声,提高测量精度。

相关分析法对于信号中的直流偏移、噪声等干扰特别是随机干扰具有很强的抑制能力,但该方法测量相位差的精度易受信号的信噪比、采集卡的分辨率以及采样数等影响,因此要尽量提高采集卡分辨率和增加采样数,从而使信噪比降低,测量误差减小。由于随着信号频率的增加,噪声的影响会变大,故该方法较适用于频率较低的信号,特别是对超低频信号的测量具有其他测量法不可比拟的优点。

频谱分析法对噪声和干扰有一定的抑制作用,但是由于傅立叶变换中所用的参考信号都是标准的正弦和余弦信号,因此该方法对处理其他非正弦信号效果较差,作用有限。

参 考 文 献

- 1 叶 林,周 弘,张 洪,等. 相位差的几种测量方法和测量精度分析. 电测与仪表,2006;(4):11—14
- 2 白 鹏,王建华,刘君华. 基于虚拟仪器的相位测量算法研究. 电测与仪表,2002;(8):20—22
- 3 张 克,张 威,王潇洒,等. 基于时间法的虚拟相位差计的设计. 北京石油化工学院学报,2008;(3):36—39
- 4 解东光,任先文,谷延辉,等. 基于虚拟一起技术的相位测量,东北电力学院学报,2004;(8):86—90

- 5 吴俊清. 基于虚拟仪器的相位差测量研究. 北京理工大学学报, 2005; (5): 435—437
- 6 林顺英, 卫翀华. 基于 LabVIEW 的虚拟频谱分析法测量相位差的实现. 北京石油化工学院学报, 2006; (3): 13—15
- 7 郑利锋, 杨小雪, 张汉全. 基于 LabVIEW 的虚拟频谱分析仪设计. 高性能计算技术, 2002; (5): 4—7

Contrast and Analysis of Three Measuring Methods for Phase Difference Based on LabVIEW

REN Hai-dong, YIN Wen-qing, HU Fei

(The Department of Electrical Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, P. R. China)

[**Abstract**] Phase difference is an extremely important parameter in many fields such as electrical technology, industrial automation, intelligent control, communications and electronic technology *etc.* The basic principles of three types of phase measurement algorithm is described, which is over-zero method, correlation method and spectrum analysis method, and them are achieved with LabVIEW respectively. At the same, the causes of errors of these three algorithms are analyzed and the method of improving the measurement accuracy is proposed. Finally, through a comparative analysis of the three algorithms, the applicable occasions for each algorithm are offered.

[**Key words**] LabVIEW phase difference over-zero method correlation method spectrum analysis method

(上接第 258 页)

Design of Air Condition Intelligent Control System Based on SPCE061A

ZHAO Qiang

(Liaoning Shihua University, Fushun 113001, P. R. China)

[**Abstract**] An air condition intelligent control system was designed using single chip and digital thermal sensor. The air-conditioning control systems theory and design programs used SPCE061A single chip as the controlling core was introduced. First, set the required temperature manually, the digital thermal sensor DS18B20 gather temperature and then send to single chip, *via* single chip stop working for compressor operation and air-conditioning to achieve state control of the indoor temperature regulation. Besides that, design a system of sources of interference and anti-interference measures to make air - conditioning controlling system more stable. An air condition intelligent control system based on SPCE061A may be easy to achieve modular products and intelligent features, ease of linking with various compressors and increasing the level of air conditioning intelligent control and safety performance significantly.

[**Key words**] air conditioner SPCE061A digital thermal sensor temperature control