

基于虚拟仪器技术的比较法相位型振动测量系统

The Vibration Calibration System Based on Virtual Instrument Technology

作者：孙 桥 于 梅

职称：工程师 高级工程师

单位：中国计量科学研究院力学处

应用领域：研究和开发

使用的产品：LabVIEW 7 Express；PXI1002；PXI6115；PXI8330；PCI8330；GPIB卡

挑战：将绝对法振动校准中正弦逼近的算法运用于振动比较法校准中，构建基于虚拟仪器技术的比较法相位型振动测量系统，替代分离仪器组合或系统的传统实现方案，在小相位差的测量上实现小数点后第二位无误差、与相位标准同等级的精确测量。

应用方案：使用 National Instruments公司的LabVIEW虚拟仪器软件开发平台和PXI6115、PXI8330、PCI8330等硬件板卡，

介绍

随着国民经济和科学技术的快速发展，在测试振动传感器幅频特性的同时，相频特性的测试已经显得越来越重要了。ISO 16063-21“比较法振动校准”明确提出测试振动传感器幅值灵敏度的同时需增加相位移测试。作者将用于振动传感器绝对法校准的正弦逼近算法，应用于比较法的测量之中。采用NI公司高性能同步数据采集卡及高档微机的虚拟仪器架构，实现1Hz~10kHz宽频带范围内振动传感器幅相特性的精确测量，并且在小相位差的测量上实现了与

产生一定频率的标准正弦激励信号，经功率放大器放大后推动振动台运动。参考加速度计和被校加速度计以背靠背的方式安装在振动台上，两路信号经前置放大器放大后由选择开关分别连接电压表、相位计、示波器及失真度仪。在选定校准频率及加速度下，由数字电压表读出参考传感器和被校传感器的电压幅值，相位计读出两传感器的相位差。加速度传感器幅相特性的求解就是要分别绘出加速度传感器幅值灵敏度与相移在频域的两条特性曲线。

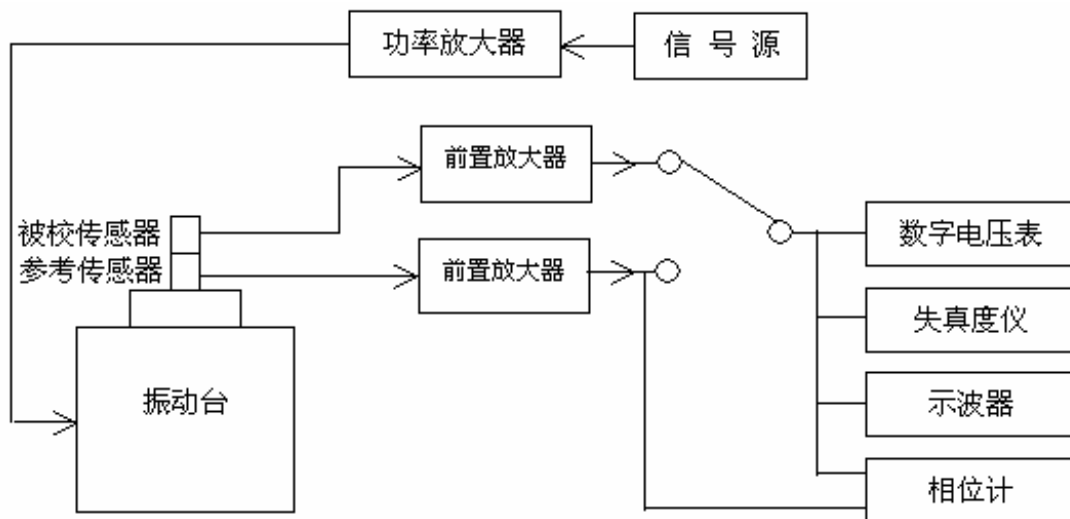


图1 比较法幅相特性测量原理示意图

来开发一个经济、灵活的基于PXI的相位型振动测量系统，在宽频带范围内实现加速度传感器复合灵敏度的精确校准。

相位标准同等级的精确测量。

振动比较法幅相特性测量原理

振动比较法幅相特性测量系统的组成如图1所示。信号源

此系统硬件是关键，测量方法成熟、应用广泛，但是所用配套设备较多，操作繁琐；价格昂贵，维护费用高；技术更新周期长。由于整个测量过程中人工操

作，难免会引入由人工读数等因素造成的偏差。

基于虚拟仪器技术的比较法振动幅相特性测量系统

在计算机技术和测量技术高速发展的今天，测试自动化已成必然趋势，基于虚拟仪器技术的测量系统可以让开发者自行定义仪器功能，显示了易操作性和灵活性的特点。

图2所示为基于虚拟仪器技术的比较法振动幅相特性测量系统的实现方案。计算机通过 GPIB 卡控制信号源产生一定频率的标准正弦激励信号，经功率放大器放大后推动振动台运动。参考加速度计和被校加速度计输出两路包含幅值和相位信息的信号，并经前置放大器放大后，由高速同步数据采集卡完成信号同步采集，并输入计算机供软件进行数据处理。软件通过数学解算得出参考加速度计和被校加速度计的幅值和初相位，从而得出给定频率下的被校加速度计幅值灵敏度和相位移。

在这个虚拟仪器系统中，两

通道同步高速数据采集卡和计算机仅仅是信号输入和输出、软件赖以存在和运行的物理环境，而软件才是整个系统籍以实现硬件管理和仪器功能的核心。高性能的数采卡、运算速度极高的计算机和功能强大的虚拟仪器开发软件提供了软硬件平台，使得本系统完成大量繁琐的数据分析处理和复杂的数学解算变得相对容易，也使得系统采用数字运算替代模拟测量的处理模式成为可能。

算法原理及实现

加速度传感器输出为正弦信号，其中：

参考加速度传感器输出

$$u_1 = \hat{u}_1 \cos(\omega t + j_{u1})$$

被校加速度传感器输出

$$u_2 = \hat{u}_2 \cos(\omega t + j_{u2})$$

(1)

在 $t_0 < t < t_0 + T_{Meas}$ 测

量时间内，以相同的时间间隔

$$\Delta t = t_i - t_{i-1}$$

，对传感器输出的两路电压信号连续进行同步采样，通过 A/D 变换，将两列信号连续的时间函数变成离散时间序列。由此，可以获得参考加速度传感器输出信号的 $N + 1$

个采样序列 $\{u_1(t_i)\}$ ，并构建出

$N + 1$ 个 (2) 式组成的线性方程组：

$$u_1(t_i) = A_{u1} \cos \omega t_i - B_{u1} \sin \omega t_i + C_{u1}$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\text{其中, } A_{u1} = \hat{u}_1 \cos j_{u1},$$

$$B_{u1} = \hat{u}_1 \sin j_{u1}, \quad C_{u1} \text{ 为常数。}$$

对于由 (2) 式组成的线性矛盾方程组，可以得到一个三行三列法方程，由此可解得唯一的 A_{u1} 和 B_{u1} 的值。由 A_{u1} 和 B_{u1} 可以算出参考加速度传感器输出信号的幅值 \hat{u}_1 和初相位 j_{u1} ：

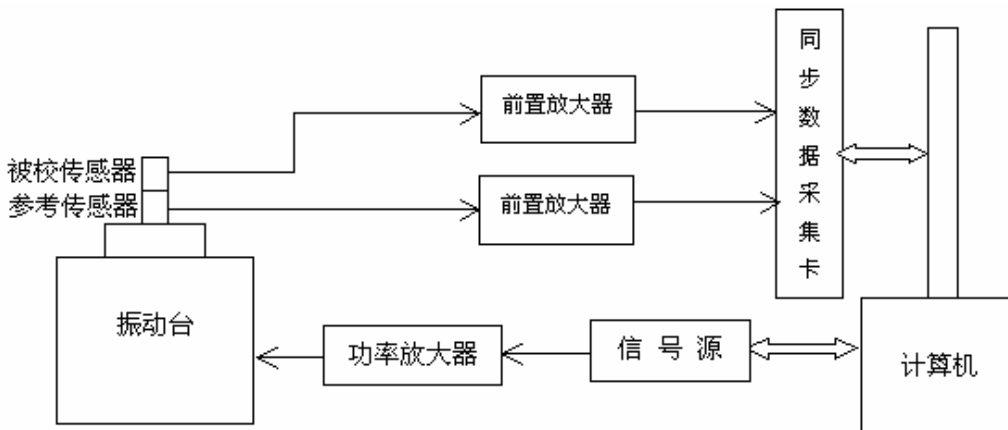


图2 基于虚拟仪器技术的比较法振动幅相特性测量系统

$$\hat{u}_1 = \sqrt{A_{u1}^2 + B_{u1}^2} \quad (3)$$

$$j_{u1} = \arctan \frac{B_{u1}}{A_{u1}} \quad (4)$$

同理，运用正弦逼近的算法可以求得被校加速度传感器输出信号的幅值和初相位。由上述参考传感器和被校传感器输出信号的幅值和初相位可以得出给定频率下的被校加速度传感器的灵敏度幅值及相位移。从而取代了图1传统分离仪器构架中电压表和相位计的测量功能。

对于参考加速度计输出的周期为 $T = 2\pi / \omega_0$ 的正弦电信号进行快速傅立叶变换(FFT)求出加速度计时域信号的自功率谱，进行谐波分析求出各次谐波的频率和幅值，并由下式求出总的谐波失真度(THD)：

$$\%THD = \frac{100 \sqrt{A(f_2)^2 + A(f_3)^2 + \dots + A(f_m)^2}}{A(f_1)} \quad (5)$$

式中，m为总谐波次数。利用谐波分析，还能够估算出振动台台体的振动频率。LabVIEW提供的一组VI能够很好的完成上述任务，自功率谱VI——Auto Power Spectrum用FFT求出时域信号的自功率谱，谐波分析VI—

—Harmonic Analyzer可以给出各次谐波的频率和幅值。

LabVIEW提供的一组用于数据采集和读取等操作的中级VI，如AI CONFIG、AI START、AI READ、AI CLEAR，可以方便的控制数据采集卡，并将模拟信号变为数字信号、传输至计算机内存供软件处理。这些VI不仅可以设置触发、耦合、采集定时、复位以及附加的硬件功能，而且还可以对数据采集全过程进行控制。LabVIEW中函数面板的Advanced Linear algebra子面板则包含矩阵运算和线性方程组求解等多个VI，可以用于超定方程组的求解。

通过实践，我们初步领略到LabVIEW这一图形化编程软件功能的强大，受益匪浅。它大量的数据采集和分析函数、仪器驱动函数可以使用户方便的进行数据采集和仪器控制，并且无需花大的气力就能创作出多窗口

的友好用户界面。
测试实例及分析

两通道同步数据采集卡采用美国NI公司的PXI-6115，它有两块独立的ADC芯片可以保证两通道间精确同步，两通道共用板上同一个晶振时基，通道间时间滞后为纳秒数量级。两个模拟输入通道为12位分辨率，采样

速率可高达10MHz，以DMA方式将信号直接传输至计算机主内存。板上带有FIFO缓存，每路信号增益可调，并可选择耦合方式。

● 相位测量的验证试验

在小相位差(10°)多个频率点(1Hz-10kHz内国标规定的参考点及插入的其它频率点)不同信号幅度的测试条件下，用美国Clarke-hess(New York)生产的5500-2型标准相位仪对比较法振动幅相特性测量系统进行相位测量的验证试验。5500-2型标准相位仪分辨率为0.001°，准确度为0.04°。比较法振动幅相特性测量系统测量结果均为10次测量的平均值。从下列两个表及图3的频响曲线(试验条件:电压幅值1V，相位移0.5°)可以看出，比较法振动幅相特性测量系统在小相位差的测量中，实现了小数点后第二位无误差、与标准相位仪同等级的精确测量。这是由于高性能的两通道同步数据采集卡为相位信息正弦逼近法求解提供了两路信号同时触发、同步采集、同时结束的硬件保证。

表1. 相位测量验证试验
试验条件：频率160Hz，电压幅值1V

| | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 标准相位移 (°) | 0.000 | 0.050 | 0.100 | 0.200 | 0.500 | 1.000 | 2.000 | 5.000 | 10.000 |
| 测量相位移 (°) | 0.000 | 0.050 | 0.101 | 0.201 | 0.500 | 1.000 | 2.000 | 5.001 | 10.000 |
| | 0.000 | 0.050 | 0.100 | 0.200 | 0.500 | 0.999 | 1.999 | 5.000 | 10.001 |
| | 0.000 | 0.049 | 0.100 | 0.200 | 0.499 | 0.999 | 1.998 | 4.999 | 10.001 |
| 最大相对误差 (°) | / | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 示值变动性 (%) | / | 2.01 | 1.00 | 0.50 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.04 | 0.01 |

表 2. 幅值线性验证试验
试验条件：频率 160Hz，相位移 0.5°

输入数据采集卡，由正弦逼近法数据分析处理软件，进行曲线拟合、数据处理，完成幅值和初相

统在幅值测量上，其误差并不取决于数据采集卡的量化误差，测量精度较高，并且还具受噪声

| | | | | | | |
|---------------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 标准相位幅值 (mV) | 50.000 | 100.000 | 200.000 | 500.000 | 1000.000 | 3000.000 |
| 测量相位移 (°) | 0.500 | 0.501 | 0.497 | 0.497 | 0.496 | 0.497 |

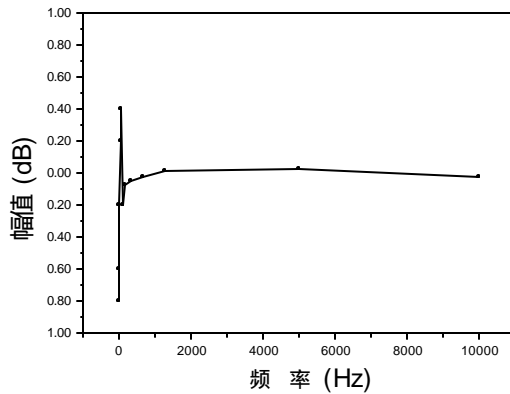


图3 相频特性验证试验

- 曲线拟合试验

Agilent3458A 进行电压测量，以便与比较法振动幅相特性测量系统的测量值进行比对。

位的求解。
另外两路信号，由两个数字电压表 HP34401A 及

和失真影响较小的优点。

- 比较法装置验证试验

选用原北戴河无线电厂的两只 YD84A 压电加速度计和两台扬州无线电二厂的电荷放大器 YE5858 配套，分别组成参考加速度计套组和被校加速度计套组，被校加速度计安装在校准振动台内装参考加速度计的支架上，并保证两只传感器同轴。参考加速度计套组的电荷灵敏度为 $13.0\text{pC} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。将与参考加速度计配套的电荷放大器衰减档

| 频率 (Hz) | 80 | | | 160 | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.1V | 0.5V | 1V | 0.1V | 0.5V | 1V |
| HP34401A (V_{RMS}) | 0.07121 | 0.35614 | 0.70689 | 0.07121 | 0.35618 | 0.70705 |
| Agilent3458A (V_{RMS}) | 0.07123 | 0.35622 | 0.70713 | 0.07123 | 0.35626 | 0.70725 |
| 幅度测量值 (V_{RMS}) | 0.07121 | 0.35633 | 0.70714 | 0.07121 | 0.35629 | 0.70727 |
| | 0.07125 | 0.35630 | 0.70677 | 0.07124 | 0.35618 | 0.70692 |

表 3. 幅值测量比对试验

以美国 Agilent 公司的函数发生器 33250A 为信号源，该信号源 80MHz 以内重复频率误差小于 3×10^{-7} ，50mV ~5V 范围内电压输出幅度误差为 $\pm 0.08\%$ ($f=1\text{kHz}$ 50Ω)。在 ISO 推荐的 160Hz、80Hz、40Hz、16Hz、8Hz 参考频率点及 315Hz、630Hz、1250Hz 共 8 个频率点，由 33250A 产生不同幅值的标准正弦信号。将输出信号分为四路，其中两路直接

比对试验结果表明，以上测量准确度大致在同一水平。在 8Hz 以下的低频段，正弦逼近法测算的电压幅值更为精确。表 3 所示为第一、第二参考点，33250A 产生 100mV、500mV 及 1V 的标准正弦信号，HP34401A、Agilent3458A 和比较法振动幅相特性测量系统的测量值的试验结果。由于采用正弦逼近算法，比较法振动幅相特性测量系

置为 10Unit/V，在振动频率为 160Hz、加速度幅值为 10m/s^2 的参考点，施加正弦振动激励。调整被校加速度计套组的电荷放大器归一化，使其输出的电压值与参考加速度计套组的输出尽可能地相等，此时得到被校加速度计套组的电荷灵敏度为 $12.8 \text{pC} / \text{Unit}$ 。

参考与被校两路电压输出信号见图 4 所示，图中两路信号

相位移近似为 180° 这是由两支加速度计尾对尾反向安装所造成的。利用正弦逼近法求解得出两支传感器的相位移为 0.02° ，振动台的谐波失真度为 1.17% （谐波次数取 $n=20$ ），由频谱分析计算得出振动台的振动频率为 160.00Hz 。

结束语

(1) 本文将用于振动绝对法校准的正弦逼近理论，应用于比较法的数据处理中，实现宽频带范围内振动传感器幅相特性的精确测量。

(2) 测量系统采用高性能的双通道同步数据采集卡及高

系统实现方案，能够实现相位的精确求解，指标明显高于一般等级的相位计，性价比高。

(3) 正弦逼近法理论成熟、方法可行、测量范围较宽，具有很大的推广应用价值。将正弦逼近法与虚拟仪器技术相结合，应用于振动、冲击计量测试领域，

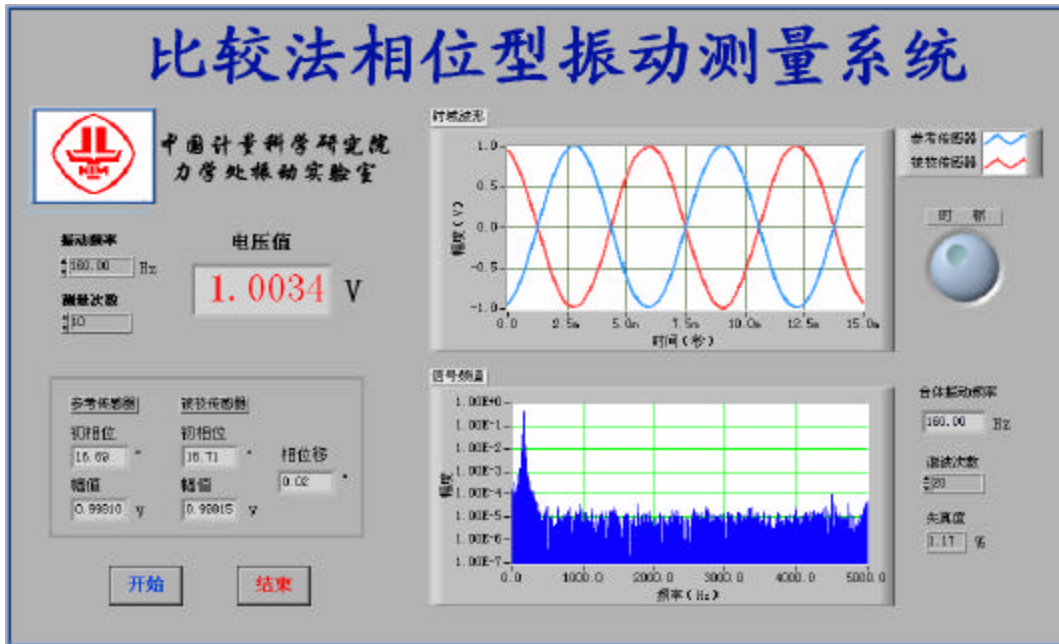


图4 比较法振动幅相特性测量系统测得的两路振动信号

档微机的虚拟仪器架构，取代由电压表、相位计、示波器、失真度仪等分离仪器组成的传统

实现振动、冲击传感器的幅相特性的准确测量及工程测试，将具有重大的意义。