

压电惯性式振动加速度虚拟仪器测控系统

马鸿文, 王艳芬, 于国防, 陈治国

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:基于虚拟仪器技术研发了压电惯性式振动加速度测振系统,分析了压电惯性式振动加速度传感器的力学模型、工作原理及其测量电路,在信号处理中运用了相关滤波原理。试验结果表明,采用高速数据采集卡、压电传感器及 LabVIEW2010 软硬件平台实现了准确、高效、实时的自动化测振系统。

关键词:压电惯性式振动加速度传感器;相关滤波;虚拟仪器;LabVIEW

中图分类号:TP27

文献标识码:B

Inertial Type Piezoelectric Vibration Acceleration Control System Based on Virtual Instrument

MA Hongwen, WANG Yanfen, YU Guofang, CHEN Zhiguo

(College of Information and Electric Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the virtual instrument technology, the inertial type piezoelectric vibration acceleration control system has been designed and fabricated in this work. The mechanics model, operating principle and measurement circuit of the piezoelectric vibration acceleration sensor have been analyzed, and the relevant filtering principle has been used in the signal processing technology. A real-time automation vibration test system with high accuracy and efficiency has been realized by using the high-speed data acquisition, piezoelectric sensor and LabVIEW2010 software.

Key words: inertial type piezoelectric vibration acceleration sensor; relevant filter; virtual instrument; LabVIEW

0 引言

各种机械设备(如电动机,各种车辆飞机引擎)处于运动时,都存在不同程度的振动。多数情况下机械振动会破坏机器的正常工作,降低机器、设备的使用寿命。所以必须对设备的振动状况进行 24 h 不间断地监视和诊断,从而及时地发现运转机器的性能变化及故障,防止事故的发生。研制开发压电惯性式振动加速度虚拟仪器测控系统具有重要的实际应用意义。

1 压电惯性式振动加速度传感器的结构和原理分析^[1-2]

1.1 惯性式测振传感器的力学模型

惯性式测振传感器的结构简化的力学模型如图 1 所示。它是由质量块、弹簧、阻尼器组成的二阶惯性系统。传感器壳体固定在被测物体上,当被测物体振动时,引起传感器惯性系统产生受迫振动。通

过测量惯性质量块的运动参数,便可求出被测振动量的大小。图 1 中, $x(t)$ 为被测物体振动位移, $y(t)$ 为惯性质量块的振动位移, $z(t)$ 为惯性质量块相对被测物体的振动位移, $z(t) = y(t) - x(t)$, m 为质量块质量, k_m 为支撑质量块的弹簧刚度, c 为阻尼系数。则惯性质量块的动力方程式可写成:

$$m\ddot{y} + c\dot{z} + k_m z = 0 \quad (1)$$

将 $z(t) = y(t) - x(t)$ 代入式(1)得

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + k_m z = -m\ddot{x} \quad (2)$$

令 $\omega_n = \sqrt{k_m/m}$, $c/m = 2\xi\omega_n$, 所以式(2)可简化为标准形式:

$$\ddot{z} + 2\xi\omega_n \dot{z} + \omega_n^2 z = -\ddot{x} \quad (3)$$

设被测物体的振动为简谐振动,即

$$x = x_m \sin \omega t \quad (4)$$

则式(3)变为

$$\ddot{z} + 2\xi\omega_n \dot{z} + \omega_n^2 z = x_m \omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

收稿日期:2011-03-09

基金项目:江苏省高等教育教改研究立项课题基金资助项目(2011JSJG273)

作者简介:马鸿文(1967-),女,江苏徐州人,高级实验师,硕士,主要从事传感与检测技术、信号处理、电力电子与电力传动的研究。E-mail: mhwwxq@126.com。

求解式(5)得质量块 m 的相对振动位移 $z(t)$ 为

$$z(t) = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \cdot x_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

式中: $\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1-(\omega/\omega_n)^2} \right]$ 为相位差; x_m 为被测物体的最大振幅; ω 为被测振动的角频率; ξ 为惯性系统阻尼比; ω_n 为惯性系统的固有角频率。

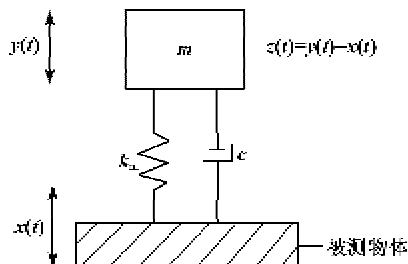


图1 惯性式测振传感器的力学模型

1.2 压电式惯性加速度传感器结构及原理分析

图2为压电式惯性加速度传感器结构原理图。在其内部通常有以高密度合金制成的惯性质量块，当壳体连同基座和被测对象一起运动时，惯性质量块相对于壳体或基座产生位移，由此位移产生的弹性力加于压电元件上，在压电元件的两个端面上就产生了极性相反的电荷。属于惯性式传感器压电式传感器通常不用阻尼元件，且其元件的内部阻尼也很小($\xi < 0.02$)，系统可视为无阻尼系统即 $\xi = 0$ 。图2中， k_1 为弹簧刚度， k_2 为压电元件的刚度， m_s 为惯性质量块质量， m_b 为壳体或基座的质量。系统等效刚度 $k_m = k_1 + k_2$ ，系统折算质量 $M = m_s m_b / (m_s + m_b)$ ，系统的固有角频率为 ω_n ，满足

$$\omega_n^2 = \frac{k_m}{M} = \frac{(k_1 + k_2)(m_s + m_b)}{m_s \cdot m_b} \quad (7)$$

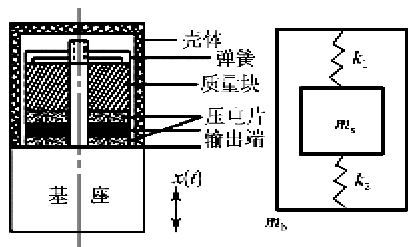


图2 压电式惯性加速度传感器结构原理图

根据式(6)、(7)并代入 $\xi = 0$ ，得到质量块相对于壳体或基座的振动位移

$$z(t) = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{[1-(\omega/\omega_n)^2]} x_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

式中 $\varphi = 0$ ，所以作用在压电元件上的力

$$F = k_2 \cdot z(t) = \frac{k_2(\omega/\omega_n)^2}{[1-(\omega/\omega_n)^2]} x_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (9)$$

式中 $\varphi = 0$ 。

假设压电元件的压电系数为 d_{33} ，则压电元件表面产生的电荷 $Q = d_{33}F$ ，即

$$Q = \frac{d_{33}k_2(\omega/\omega_n)^2}{[1-(\omega/\omega_n)^2]} x_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

1.3 压电惯性式振动加速度传感器的测量电路——电荷放大器

综上所述可知，压电传感器可等效为一电荷源。由于压电传感器本身产生的电荷量较小，而内阻较大，因此其输出信号微弱，测量电路常需接入电荷放大器即带电容负反馈的高增益运算放大器。目的是：

- 1) 高输出阻抗变换为低输出阻抗。
- 2) 放大传感器输出的信号。

等效电路图如图3所示。图中， C_a 、 R_a 为压电传感器的等效电容和漏电阻； C_e 为引线电容； C_i 、 R_i 为放大器的输入电容和输入电阻； C_f 为反馈电容。当放大器的开环放大增益足够大时，且忽略 R_a 和 R_i (认为其无穷大) 根据运放的工作原理可知，后续放大电路的输出为

$$U_{out} \approx -Q/C_f \quad (11)$$

把式(10)代入式(11)可得

$$U_{out} \approx -Q/C_f \approx \frac{-d_{33}k_2(\omega/\omega_n)^2}{C_f[1-(\omega/\omega_n)^2]} x_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (12)$$

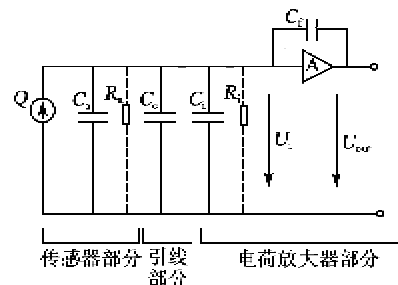


图3 压电惯性式振动加速度传感器的测量电路

1.4 压电惯性式振动加速度传感器测量系统电压灵敏度的幅频和相频特性

因为前面的分析均假设按简谐规律振动，即 $x = x_m \sin \omega t$ ，则振动加速度为

$$a = \ddot{x} = -x_m \omega^2 \sin \omega t \quad (13)$$

设压电惯性式振动加速度传感器测量系统的电压灵敏度为 $S_{uu} = U_{out}/a$ ，则结合式(12)、(13)有

$$S_{au} = U_{out}/a \approx \frac{d_{33}k_2}{\omega_n^2 C_f [1 - (\omega/\omega_n)^2]} \quad (14)$$

其幅频特性为

$$|S_{au}| \approx \left| \frac{d_{33}k_2}{\omega_n^2 C_f [1 - (\omega/\omega_n)^2]} \right| \quad (15)$$

相频特性为

$$\varphi = 0 \quad (16)$$

从式(15)可知,当 $\omega \ll \omega_n$ 时, $|S_{au}| \approx \left| \frac{d_{33}k_2}{\omega_n^2 C_f} \right|$,

即当 $\omega \ll \omega_n$ 时,电压灵敏度与被测频率无关,而与压电加速度传感器本身和处理电路的参数 $d_{33}, k_2, \omega_n, C_f$ 有关,且相位差不变,可用式(15)、(16)对压电惯性式测振传感器进行设计和精确标定。

2 相关滤波原理^[5-6]

由于压电加速度传感器检测到的常携带有随机噪声的电信号,如果要精确测振幅和频率,必须把随机噪声滤除。利用自相关函数可识别和检测淹没在随机信号中的周期信号。如果 $x(t)$ 为正弦信号 $s(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ 叠加了不相关的宽带随机噪声 $n(t)$,即

$$x(t) = s(t) + n(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + n(t) \quad (17)$$

则 $x(t)$ 的自相关函数为

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t)x(t+\tau)) dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [s(t)s(t+\tau) + n(t)n(t+\tau) + \\ &+ s(t)n(t+\tau) + n(t)s(t+\tau)] dt = \\ &= R_s(\tau) + R_n(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) \end{aligned} \quad (18)$$

因为 $s(t)$ 与宽带随机噪声 $n(t)$ 不相关,即

$$R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0 \quad (19)$$

并且因为 $n(t)$ 为宽带随机噪声,则 $R_n(\tau)$ 集中表现在 $\tau=0$ 附近,当 τ 很大时, $R_n(\tau) \rightarrow 0$, 所以式(18)变为

$$R_x(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos(\omega\tau) \quad (20)$$

即 $x(t)$ 经过相关处理后保留了原信号的幅值和频率信息,但失去了原信号的初相位信息,起到了滤除携带的随机噪声的滤波作用。由 $R_x(\tau)$ 可反推 $s(t)$ 的幅值 A 和频率 ω 。

3 基于虚拟仪器的压电惯性式振动加速度

测量系统软硬件设计及试验结果

3.1 硬件系统设计

压电惯性式振动加速度测量系统试验硬件电路

主要包括振动台和压电传感器(采用高联传感公司 CSY-2000 型传感器试验台),激振源部分,电荷放大器调理电路,USB6009 采集卡,PC 机等,如图 4 所示。把调理电路后的加速度信号通过 USB-6009 型数据采集卡的 A/D 口,USB 通讯总线送入 PC 机进行处理。USB-6009 内有 8 路模拟输入通道(14 位 A/D 转换分辨率,采样频率为 48 kHz),由于本次采用一路扫描方式进行 A/D 转换,所以本系统采样频率取为 10 kHz,待读取采样为 10 000 个点,方式为连续,对地采样方式。

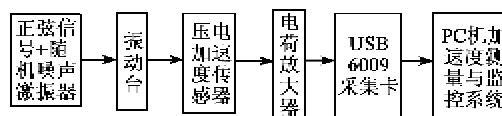


图4 振动加速度测量系统硬件试验电路框图

3.2 软件系统设计^[7-8]

软件开发平台为美国 NI 公司的 LabVIEW2010。USB-6009 型数据采集卡配套驱动程序为 DAQmx9.22。配合 LabVIEW2010 中的 DAQ 助手进行加速度电信号采集。软件总体流程框图如图 5 所示。其功能为数据采集,参数设置,数据处理,时域频域功率谱显示,越限报警等。

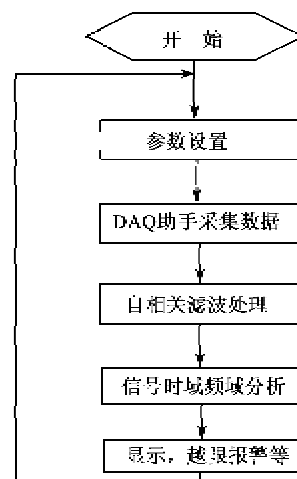


图5 系统流程图

3.3 系统运行试验及虚拟仪器前面板显示图

本试验系统激振器频率从 10~2 000 Hz,随机噪声信号幅值可调,图 6 为 100 Hz 的振动信号虚拟仪器前面板显示图。由图可知,可精确测振动加速度信号的幅值和频率,自相关滤波前后的时域和功率谱波形显示也得到了实验验证,通过设置最大加速度阈值,振动加速度得到了实时监控和越限报警等。

(下转第 69 页)