

文章编号 1004-924X(2002)01-0008-06

电子隧道加速度计输出信号的分析与处理

韩 荔, 龙志峰, 李庆祥, 白立芬

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 介绍了一种新型电子隧道加速度计的工作原理, 详细分析了该加速度计输出信号的有效成分及噪声与干扰, 设计了利用 LabVIEW 虚拟仪器开发平台的信号分析与处理程序。基于对电子隧道输出信号的分析, 仿真了相应的模拟信号, 并且通过对该模拟信号的软件处理, 抑制了噪声, 消除了工频干扰, 将被噪声淹没的有效成分提取出来, 从而证明了该方法的有效性。

关键词: 电子隧道加速度计; 信号处理; 虚拟仪器

中图分类号: TH824.4 文献标识码: A

1 引言

80年代中期, 应用扫描隧道显微镜的电子隧道原理, 研究者们设计出了电子隧道传感器, 并利用微电子机械系统技术实现了微型化和集成化。电子隧道传感器在传感性能、减少传感器质量和功耗方面都比常规传感器有很大提高, 已经被用做电磁辐射的信号检测仪、微波信号源和数字开关元件等。

在研制新型传感器方面, 我国与发达国家相比, 现今还处在实验室研究阶段。

2 原理及系统概述

电子隧道传感器头的基本原理是电子隧道效应, 当两个电极相当接近时, 在外电场的作用下形成隧道, 产生电流:

$$I \propto V_b \exp(-A \sqrt{\varphi} S), \quad (1)$$

式中, V_b : 电极间偏置电压; φ : 有效势垒高度; S : 电极间隙; A : 常数($A = 1.025eV^{-1/2} \text{ \AA}^{-1}$)。

由(1)式可见, 电流 I 与电极间隙 S 成负指数关系。图1为电子隧道传感器微机械传感器头的原理示意图。其中的可动质量块将可以感应垂

直于其支撑方向的外界加速度, 并在其作用下作受迫振动。振动的检测将采用微隧道结构, 两个隧道电极分别装在质量块(振动梁)和探针上, 外界施加的振动使隧道电极间隙发生变化, 即使隧道电流发生变化。

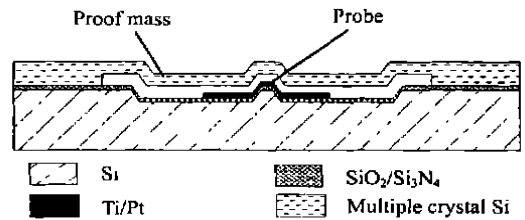


图1 电子隧道传感器的原理示意图

Fig. 1 Theoretical sketch map of an electronic tunneling sensor.

图2是整个系统的结构框图。传感器质量块感受外界加速度, 隧道电流输出, 经过反馈电路处理, 驱动静电致动器对质量块(振动梁)的位置进行控制, 保持隧道间隙恒定, 记录致动器的输出电压, 即可知外界加速度。

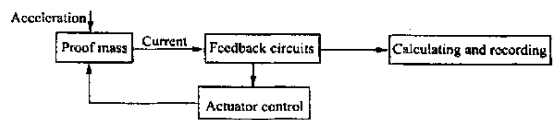


图2 闭环系统框图

Fig. 2 Block diagram of the closed-loop system.

3 信号分析

当电子隧道加速度计在外界加速度的作用下, 振动梁电极与探针的距离在大约 10 \AA 的范围时, 其间会产生隧道电流, 该有效信号是交直流混叠信号, 幅值在 1 nA 左右, 频率范围为 $20 \text{ Hz} \sim 3 \text{ kHz}$ 。用公式(2)表达如下:

$$y(t) = A_0 \cos(f_0 t - \varphi_0) + A, \quad (2)$$

式中, A_0 : 振幅; φ_0 : 初相角; f_0 : 频率; A : 直流成分。

由此可知, 反馈电路所要检测的信号是属微弱信号范畴。由于当检测量甚为微弱时, 有用的被测信号可能被大量的噪声和干扰所淹没, 使测量受到限制, 所以系统设计中的噪声分析非常重要, 任何一个环节的疏忽都会导致系统的失败。

噪声普遍存在于检测系统和电路之中, 成为限制测量信号的主要因素。噪声主要包括加速度计表头的机械噪声、反馈控制电路的热噪声、散粒噪声等等。

对于加速度计表头机械噪声, 其噪声的幅值如(3)式所示^[4]:

$$\sqrt{a^2 / \mathcal{N}} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_0}{m_p Q}}, \quad (3)$$

式中: k_B : 波尔兹曼常数; T : 温度; ω_0 : 试验质量块的谐振频率; m_p : 试验质量块质量; Q : 机械品质因数。

当谐振频率为 700 Hz , 质量为 30 mg , Q 为 1.5 , 噪声源预计是 $0.13 \mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。因此该噪声降低的方法是提高试验质量块质量 m_p 以及 Q 值, 根据其他加速度计的研究经验, 降低其周围的气压, 例如对其进行真空封装也会改善噪声影响。虽然这个噪声源在设计时便加以考虑, 相对电子元件噪声影响不是最大的, 但它决定了系统噪声的最低限, 所以也应尽可能减小。

反馈电路元件的噪声也是不可忽略的。各部分之间的连接电阻所产生的噪声主要有两类: 即热噪声和过剩噪声。前者与频带有关, 需要采用滤波技术, 后者是由于直流电流流经电阻所产生的低频噪声, 其大小与电阻本身性能有关, 一般可以采用过剩噪声小且精度高的金属膜电阻。对于电路元件中的电容, 理想的电容是不产生噪声的, 但实际上, 由于有介质的损耗, 也存在一定的噪声。另一方面, 电容由于其本身具有高通的性质,

对电子不规则运动或电火花都有缓解抑制作用, 所以电容对电路的噪声影响不大。

除了噪声以外, 装置在工作中还可能接收到各种干扰。干扰包括工频干扰、电磁波干扰、接地干扰等。干扰有时候会造成很严重的影响, 因此微弱信号检测不仅要降低各元件的内部噪声, 而且要消除外界干扰。首先将信号引入处理电路时, 要采用屏蔽电缆; 对于工频干扰, 采用 50 Hz 陷波电路降低; 另外, 电路板合理布线方式也是降噪的有效方法。

在分析了噪声的产生原因和参考了国内外大量文献的基础上, 本文利用虚拟仪器开发平台 LabView, 对微弱信号检测作了初步的研究。

4 利用虚拟仪器检测微弱信号

虚拟仪器(virtual instrument)是信号采集、处理和计算机技术相结合的产物, 借助硬件和软件模块, 进行数据采集、处理、分析、存储和输出; LabView 是美国国家仪器公司(National Instruments)开发的虚拟仪器开发平台, 利用该软件可以进行信号的分析处理。

检测框图如图 3 所示:

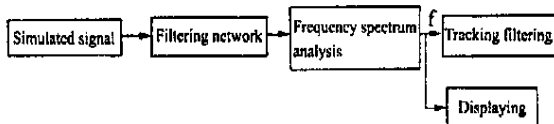


图 3 检测框图

Fig. 3 Block diagram of the processing.

编制软件时先分别编制子 vi 程序, 然后再构造完整的信号处理程序。

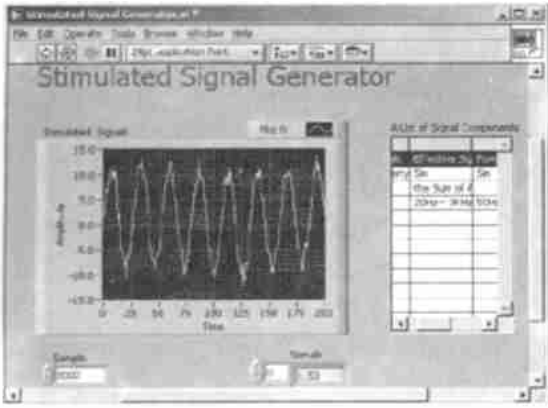
1) 模拟信号源

LabView 设计如图 4 所示。

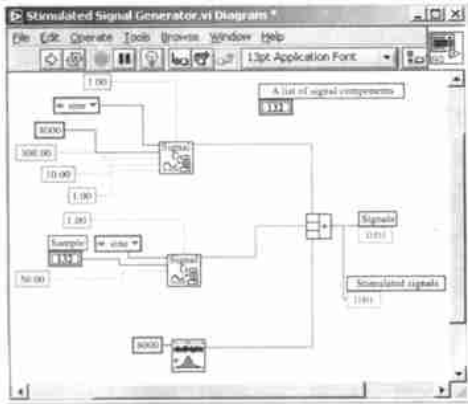
信号的成分主要包括:

① 有效信号为交直流混叠信号, 交流信号幅值最大为 10 V , 初设置频率 300 Hz , 直流信号为 1 V 。考虑到真实待测微弱电流信号可以通过电流电压转换, 前置放大后, 再经数据采集卡进入计算机处理, 所以这里将模拟信号源设置这样的数值, 是有一定根据的;

② 工频 50 Hz 正弦信号: 考虑到实际环境中, 工频 50 Hz 信号会通过信号输出线或电源耦合到有效



(a) 前面板
(a) Front panel.



(b) 后面板
(b) Back panel.

图 4 模拟信号

Fig. 4 Simulated signal

信号, 所以模拟信号中加入这一信号;

® 高斯白噪声: 模拟其他干扰及噪声。

由上述分析可以构造模拟信号:

$$y(t) = A_0 \cos(f_0 t - \varphi_0) + A + \cos(f' t) + \sum_{i=1}^n A_i \cos(f_i t - \varphi_i), \quad (4)$$

式中前两项如(2)式所示, 为有效信号。模拟过程中取 $A_0 = 10V$; $\varphi_0 = 0$; $f_0 = 300Hz$; $A = 1V$; $f' = 50Hz$, 模拟工频信号; 最后一项模拟其他噪声信号。

2) 滤波网络

如图 5 所示, 由 20Hz 高通和 3KHz 低通构成带通滤波器, 初步滤除有效信号带宽外的信号; 然后经过 50Hz 陷波滤波器, 有效消除工频干扰。此时输出信号近似可以用式(5)表示:

$$y(t) = A_0 \cos(f_0 t - \varphi_0) + \sum_{i=1}^n A_i \cos(f_i t - \varphi_i), \quad (5)$$

式中, A_i : 各频率成分的振幅; φ_i : 各频率成分的初相角; f_i : 各成分的频率。

该输出信号末项与(4)末项成分不同, 因为通过上述滤波, 有些噪声成分被消除。

3) 频谱分析

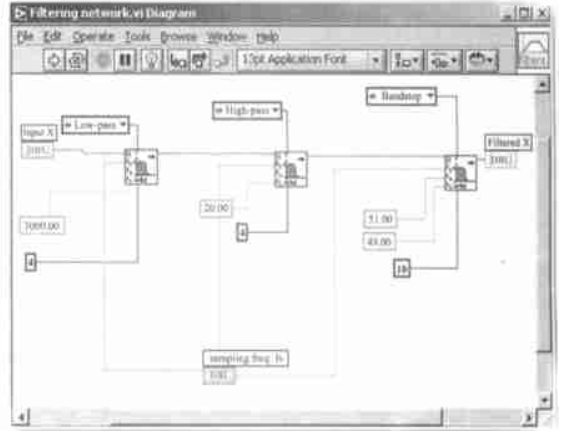


图 5 滤波网络

Fig. 5 Filtering network.

利用 FFT 快速变换进行频谱分析, 得到信号的幅值频谱和相位频谱。其后面板如图 6 所示。

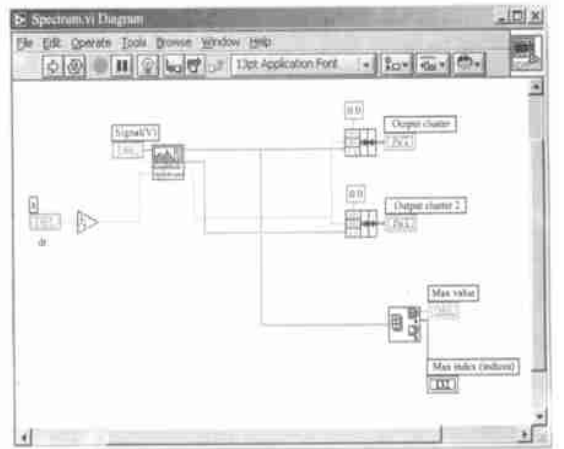


图 6 频谱分析

Fig. 6 Frequency spectrum analysis

进行频谱分析的中心环节利用了 LabView library 中的子 vi: Amplitude and Phase Spectrum. vi。

利用频谱分析还可以得到待处理信号的频率, 由此可以建立跟踪滤波器, 用已知的频率为参考信号提供参数。

4) 跟踪滤波(图 7)

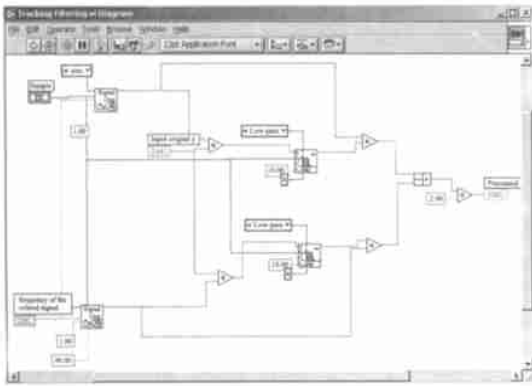


图 7 跟踪滤波

Fig. 7 Tracking filtering.

通过跟踪滤波进一步消除噪声。

跟踪滤波原理如下:

经过普通滤波网络处理后的信号如式 (5) 所示, 得到 $y(t)$ 。

跟踪滤波所需参考信号

$$x_1(t) = \sin f_0 t, \quad (6)$$

$$x_2(t) = \cos f_0 t. \quad (7)$$

第一次相乘((5) × (6) = (8), (5) × (7) = (9)) 后有:

$$y(t)x_1(t) = 1/2A_0 \sin(\varphi_0) + A_0 \sin(2f_0 t - \varphi_0) +$$

$$1/2 \sum_{i=1}^n A_i \{ \sin[(f_0 + f_i)t - \varphi_i] + \sin[(f_0 - f_i)t + \varphi_i] \}, \quad (8)$$

$$y(t)x_2(t) = 1/2A_0 \cos(\varphi_0) + A_0 \cos(2f_0 t - \varphi_0) +$$

$$1/2 \sum_{i=1}^n A_i \{ \cos[(f_0 + f_i)t - \varphi_i] + \cos[(f_0 - f_i)t + \varphi_i] \}. \quad (9)$$

若设置低通滤波器截止频率足够低, 使所有交流信号旁路, 输出只保留直流成分, 则有

$$R_{yx1}(0) = 1/2A_0 \sin \varphi_0 = x, \quad (10)$$

$$R_{yx2}(0) = 1/2A_0 \cos \varphi_0 = y. \quad (11)$$

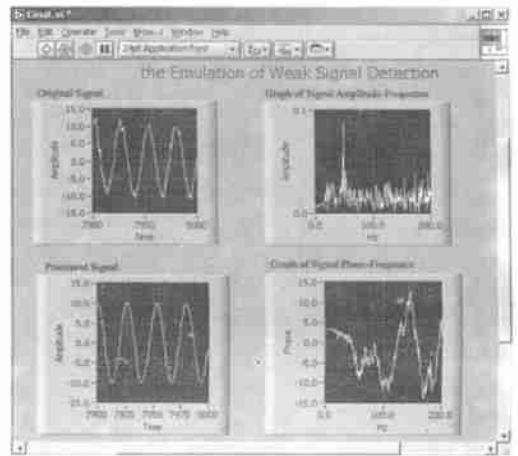
最后对两信号拟合, 可以得到处理后的信号:

$$y(t) = 1/2A_0 \cos(f_0 t - \varphi_0), \quad (12)$$

经过这样的处理, 式(5)与式(11)对比, 高斯噪声即被除去, 有效的交流信号即可被检测出来。

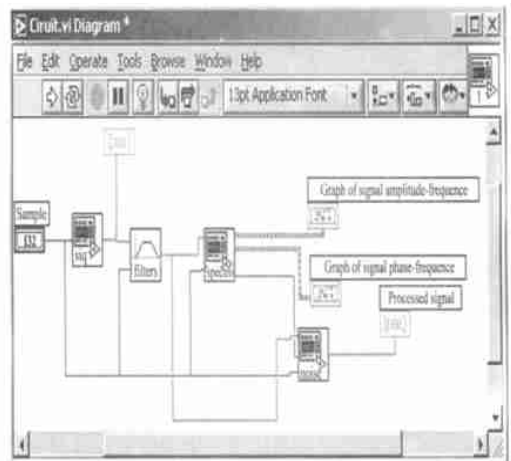
5) 总体系统(图 8)

由图 9(b) 所示可见, 经过处理, 有效信号被检测, 大部分干扰和噪声都被消除和抑制了。在此基础上, 配置有关数据采集卡等硬件, 就可以检测真实电流信号。



(a) 前面板

(a) Front panel.

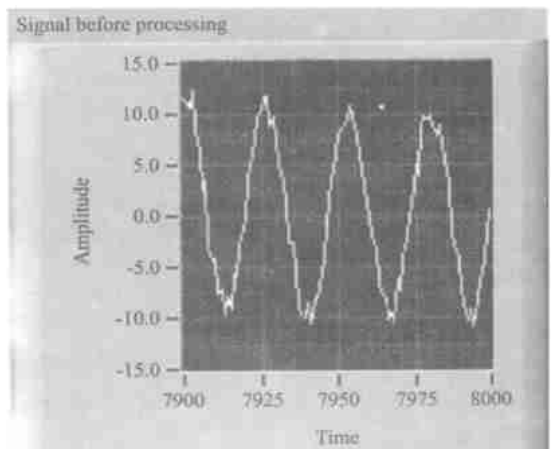


(b) 后面板

(b) Back panel.

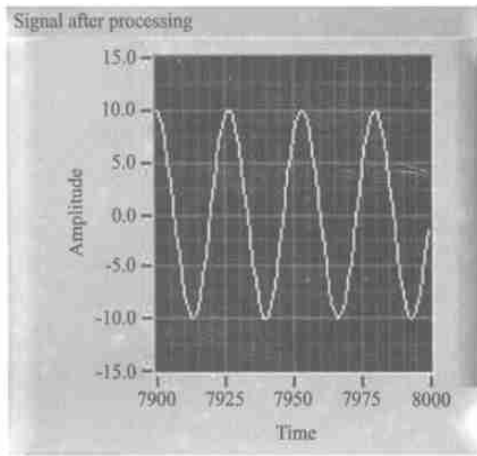
图 8 整体系统示意图

Fig. 8 Sketch map of the overall system.



(a) 处理之前的信号

(a) Signal before processing.



(b) 处理之后的信号

(b) Signal after processing.

图 9 处理前和处理后信号的显示

Fig. 9 Displaying of signals before processing and after processing.

5 结 论

从电子隧道传感器的原理出发,分析了信号成分,设计了静电力反馈控制方案,利用 LabView 软件进行了模拟信号分析与处理,并得到如下结论:

1) 随着信号分析软件的进一步改进,以及硬件和前置电路的合理配置,可以适合电子隧道传感器隧道电流的检测及系统的控制;

2) 虚拟仪器软件的使用,使分析与处理方便快捷,参数调整灵活,在信号分析与处理中可以发挥一定作用。

参考文献:

- [1] Waltman S B, Kaiser W J. An electron tunneling sensor[J]. *Sensors and Actuators*, 1989, 19: 201- 210.
- [2] Yen Ch W, Khalil N. A low - voltage bulk- silicon tunneling- based microaccelerometer[A]. *Technical Digest International Electron Devices Meeting*. 1995 Sponsored by: IEEE[C]. 1995. 593- 596.
- [3] Yen Ch W, Khalil N. CMOS interface circuitry for a low - voltage, micromachined tunneling accelerometer[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 7(1) : 6- 15.
- [4] 陈佳圭. 微弱信号检测[M]. 北京:中央广播电视大学出版社, 1987.
- [5] 戴逸松. 电子系统噪声及低噪声设计方法[M]. 长春:吉林人民出版社, 1984.
- [6] 龙志峰. 虚拟仪器在测试技术中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 1999, 20(4) : 87- 89.
- [7] 周华, 沈连官, 尤辉, 等. 电容式微加速度计结构的建模及仿真[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(4) : 59- 64.

Output signal analysis and processing of an electronic tunneling accelerator

HAN Li, LONG Zhi- feng, LI Qing- xiang, BAI Li- fen

(*Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The principle of a new electronic tunneling accelerator is introduced and the desired component, the noise and the disturbance of the sensor's output signals are analyzed in detail. With the LabVIEW virtual instrument development platform, the method of signal analysis and processing is designed. Based on the analysis of the output signals of the electronic tunneling, the related simulative signals have been simulated and processed, thus restraining the noise and deleting the power frequency disturbance. Finally the desired component concealed by the noise has been obtained.

Key words: electronic tunneling accelerators; signal processing; virtual instruments

作者简介: 韩 荔(1978-), 女, 内蒙古自治区人, 北京清华大学精密仪器与机械学系在读硕士研究生, 主要研究方向: 测控技术与仪器、微硅电子隧道加速度传感器控制与性能测试、微弱信号检测, E_mail: hanli00@mails.tsinghua.edu.cn;

龙志峰(1974-), 男, 广东省人, 北京清华大学精密仪器与机械学系在读博士研究生, 主要研究方向: 微硅电子隧道加速度传感器的设计、加工工艺、制作; 微弱信号检测、加速度信号检测和反馈控制, 以及微机械器件的前沿发展, E_mail: lognzf@post.pim.tsinghua.edu.cn;

李庆祥(1939-), 男, 河北省人, 北京清华大学精密仪器与机械学系教授、博士生导师, 主要研究方向: 光存储系统集成与微型化、微纳米测量技术、微型机械;

白立芬(1968-), 女, 内蒙古自治区人, 北京清华大学精密仪器与机械学系讲师, 在职博士研究生, 主要研究方向: 光存储系统集成与微型化、微纳米测量技术。