

Signal Processing of the Accelerometer MMA7360 Based on Small Displacement Measurement *

ZHOU Jianzhong^{1*}, LIU Rong^{1,2}, LIU Ming^{1,2}

1. Digital Engineering Research and Simulation Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper introduces the principle of Accelerometer MMA7360, and discusses a novel method of signal processing for the accelerometer based on small displacement measurement which used for monitoring train escaping. After analysing the feature of accelerator signal of small displacement, we give the realtime position compensation method, and exploit the lowpass infinite impulse response digital filter to denoise the noises which are caused by oscillation or environmental disturbance. Experiments show that the method can realtime monitor the small displacement of measured object.

Key words: small displacement; accelerometer; MMA7360; signal processing
EEACC: 7220; 7320E

微移动监测系统中 MMA7360 的加速度信号处理研究 *

周建中^{1*}, 刘蓉^{1,2}, 刘明^{1,2}

1. 华中科技大学数字化工程与仿真中心 武汉 430074;
2. 华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079

摘要: 介绍新型高精度三轴加速度传感器 MMA7360, 给出列车防溜逸在线采集加速度信号及获取实时微移动信息的监测方案。本文重点分析 MMA7360 的加速度信号特征, 利用数字滤波及位置实时校正处理, 能有效消除振动和环境噪声干扰引起的测量误差, 实现微移动实时监测。

关键词: 微移动; 加速度传感器; MMA7360; 信号处理

中图分类号: TN911.7; TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)09-1575-05

停放在铁路站场的列车等车辆, 因站场坡度、风速、振动等极易发生自动溜逸事故, 采用制动铁鞋是目前我国防止列车溜逸的主要措施。传统的制动铁鞋没有任何信息提示, 依靠值班员现场巡查监测是否发生列车溜逸, 这种人工管理误差大, 特别是存在不能及时发现列车溜逸的严重安全隐患。近年来, 铁路部门开始引入可以自动监测实时状态的微移动监测装置, 该装置通过传感器采集制动铁鞋的运动信号, 由嵌入式微处理器分析判断列车是否发生溜逸, 并将实时状态信息无线传送给中心控制室。但是, 由于铁路站场噪声干扰严重, 特别是过往列车引起的铁鞋振动, 使得监

测装置容易误判铁鞋发生移动而报警, 这一问题一直未能有效解决, 因而影响制动铁鞋在铁路站场的推广使用。

运动检测^[1]常用位移传感器与加速度传感器实现。作为微移动监测的便携式设备, 不仅需要传感器芯片封装微小, 而且要求传感器本身能低功耗、低电压运行, 并具备快速响应速度特性。Freescale 公司的 MMA 系列新型三轴加速度传感器由于敏感度高、价格便宜、封装微小、功耗低、稳定可靠, 是理想的移动感应解决方案。

本文给出一种基于 MMA 系列加速度传感器的便携式微移动监测方案。该方案选用加速度传感

基金项目: 科技部水利部公益性行业科研专项资助(200701008)

收稿日期: 2008-04-20 修改日期: 2008-05-10

器 MMA7360 测量运动对象的加速度信号,利用 ADI公司的微控制器 ADUC841 作为核心控制器,控制其内置的模数转换器对加速度信号进行采样及 A/D 转换。微位移的检测要求加速度传感器有较高的灵敏度,而振动等干扰使得加速度信号极容易淹没在噪声信号中。本文研究便携式微移动监测中 MMA7360 的加速度信号的处理,针对加速度传感器对安装位置的敏感性,分析加速度信号的位置校正处理,设计 Butterworth 低通 IIR 数字滤波器对干扰信号进行滤波处理,并给出由 MMA7360 获取微位移值的计算方法。实验和实际应用表明,本文给出的加速度信号处理方法能有效克服传感器安装位置和环境振动噪声等的影响,能实时监测运动状态信息。

1 加速度传感器 MMA7360

MMA7360 是 Freescale 开发的电容性三轴向低重力加速计^[2],采用了 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技术。MEMS 由微型的电机结构组成,采用“微加工”工艺制造,例如体微加工,有选择地蚀刻硅晶圆的几个部分,以及表面微加工,在硅晶圆表面建立薄膜结构。加速度传感器的简化物理模型由一对挠性轴、及其支撑的极板及中间极板上的检测质量块组成,如图 1 所示。Z 轴技术可以视为一个活动的电容,沿着它接收加速度方向的移动。X 轴向技术包括一个可移动物体和双重固定横梁。每对感应单元横梁包括两个背对背的电容器。当给定一加速度时,中间物体就会偏离无加速度时的位置,改变横梁之间的距离,电容值也随着极板间距离的改变而改变。具体地, $C = NA / D$, 其中 A 是横梁的作用面积, ϵ 是介电常数, D 是横梁之间的距离, N 是横梁的数量。电容值经过容压变换器转换为电压值,经过增益放大器、滤波器和温度补偿以电压的形式作为输出信号。MMA7360 的输出偏置电压和灵敏度与输入电压成线性的比例的关系。当输入电压增加的时候,灵敏度和偏置也会随之线性增加;反之减小。这就使得加速度输出的模拟信号经 A/D 转换为数字信号过程中避免了错误感应。

MMA7360 的可选灵敏度允许是 1.5 g/6 g,采用 3 mm × 5 mm × 1 mm 的 LGA 封装,比 QFN 封装的体积小 71%,适合占地空间小的便携式应用。MMA7360 的功能框图如图 2 所示。X、Y、Z 三个垂直方向的加速度由 G-Cell 传感单元感知并经过容压变换器、增益放大、滤波器和温度补偿后以电压

信号输出。

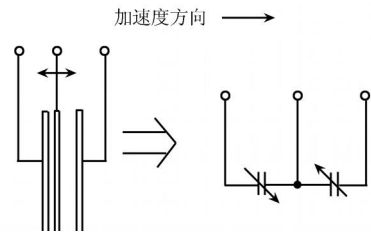


图 1 加速度传感器的简化物理模型

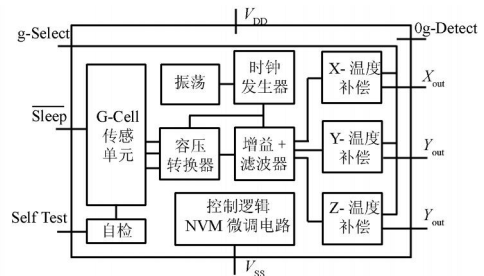


图 2 MMA7360 的功能框图

2 微移动监测系统方案

便携式微移动监测系统集信号采集、分析、监测、无线通信和报警功能于一体,系统设计如图 3 所示,由微移动信号采集模块、信号处理与数据分析模块、无线数据传输模块、电源模块构成,可实时对微移动进行监测。

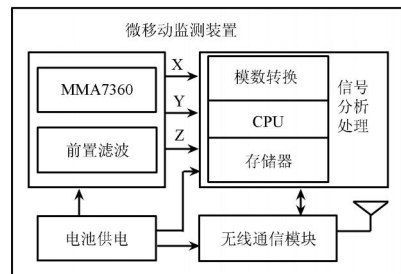


图 3 便携式微移动监测装置系统结构图

在系统设计中,为简化硬件电路,选用高集成度的微处理器 ADUC841^[3]进行信号分析与处理。ADUC841 是 ADI 公司新推出的微处理器,内置 8 个独立的 12 bit ADC 通道、2 个独立的 12 bit DAC 通道和温度传感器,芯片内还提供高精度、低偏差并经过工厂校准的 2.5 V 参考电压。MMA7360 和 ADUC841 的接口电路如图 4 所示。设置 MMA7360 加速度的范围为 ±1.5 g,传感器感知三维加速度信号,传送给微处理器进行处理。由于 MMA7360 内部采用开关电容滤波器,需要在 X_{OUT}、Y_{OUT}和 Z_{OUT}三个输出端分别接 RC 滤波器,以滤除时钟噪声。三维模拟加速度信号经微处理器内置的三通道 A/D 转换后,由 CPU 进行数字信号处理。

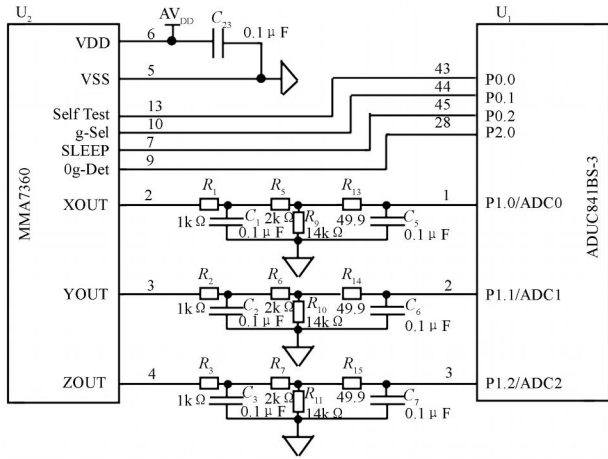


图 4 MMA7360 与 ADUC841 接口原理图

3 加速度信号处理

微移动监测要求加速度传感器有较高的灵敏度。加速度传感器不仅敏感地球本身的重力加速度,而且敏感各种因素带来的加速度,比如由于周围环境干扰而引起冲击振动等,这对于计算水平位移来说就是干扰信号,必须加以剔除。另外,由于传感器芯片的焊接和便携设备在现场的安装位置因素,加速度计的垂直轴往往与重力加速度方向成一定夹角,存在一定的测量误差。因此,对加速度信号进行校正处理和去噪对系统的性能至关重要。

3.1 位置校正处理

加速度传感器的三轴方向分别用 x, y, z 表示,对应的三轴输出加速度分别是 a_x, a_y, a_z 。假设重力加速度方向与加速度传感器的 xy 平面成 α 角,而重力加速度在 xy 平面的投影与 x 成 β 角,如图 5 所示。通过测量便携式装置静止时的三维加速度值可以计算出倾斜角 α 和 β ,从而对后续测量的加速度值进行校正补偿。

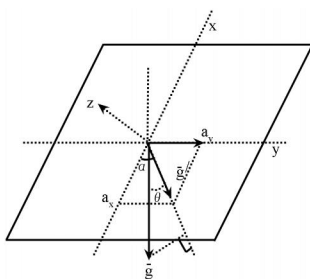


图 5 重力加速度与加速度传感器的位置关系

假设静止时加速度计的三轴测量值分别为 a_{ix}, a_{iy}, a_{iz} , 已知重力加速度 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$, 则有

$$g_j = \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2} \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{g_j}{g} \quad (2)$$

$$\cos \beta = \frac{a_{ix}}{g_j} \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)可计算出倾斜角 α 和 β 。

令制动铁鞋的实际三轴加速度值分别用 A_x, A_y, A_z 表示,其中 A_x 表示重力加速度方向加速度值, A_y 表示水平前进方向加速度值, A_z 表示左右方向加速度值,而加速度计三个方向的测量值分别为 a_x, a_y, a_z ,可由倾斜角和测量值计算

$$A_y = a_y \sin \alpha \sin \beta - a_z \sin \alpha \cos \beta + a_x \cos \alpha \sin \beta \quad (4)$$

$$A_z = a_y \sin \alpha \cos \beta + a_z \sin \alpha \sin \beta - a_x \cos \alpha \cos \beta \quad (5)$$

$$A_x = a_x \sin \alpha - a_y \cos \alpha \sin \beta + a_z \cos \alpha \cos \beta \quad (6)$$

水平方向、前后方向和重力加速度方向的加速度值可分别计算出来,由此可计算出制动铁鞋在三个方向的运动情况。

3.2 加速度信号去噪

在实际应用环境中,存在各种形式的电磁干扰和机械振动,这些噪声信号的频带宽、信号强,与被测对象较微弱的微移动信号混杂在一起,如果简单采用常规的抗干扰、去噪声处理,很容易将有用的微移动信号淹没而无法提取。可行的方法是运用低通滤波器滤掉高频噪声信号,滤波后的结果才能作为计算物体位移的有用信息。

由于无限冲激响应数字滤波器结构上存在从输入到输出的反馈,在实际设计中可用较少的阶数满足性能要求,并且只要设计的滤波器阻带截止频率合适、阻带衰减足够大,就可以基本滤除干扰信号。在实时应用中,占用较少的 CPU 存储单元和少量的运算次数就可达到信号去噪的目的。因此,在便携式设备中,考虑到系统的体积和制造成本等因素的影响,通常选择设计无限冲激响应数字滤波器进行信号处理。

为了消除不同频率振动而相应产生的各种频率的交流信号,本文设计一个 Butterworth 低通 IIR 数字滤波器对信号进行滤波^[47]。低通 Butterworth 数字滤波器的幅度函数为:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\frac{\omega}{c})^{2N}} \quad (7)$$

式中 N 为整数,是滤波器的阶次, c 是 3 db 截止频率, N 越大,则过渡带越陡。Butterworth 数字滤波器采用双线性变换法设计,首先将数字滤波器的频率指标 $\{\omega_k\}$ 由 $\omega_k = \frac{2}{T} \tan(\frac{\omega_k T}{2})$ 转换为模拟滤波器的频率指标 $\{\omega_k\}$,由模拟滤波器的指标设计传递函数,再进行 Z 变换。图 6 为某段含有振动噪声的加速度信号经过低通数字滤波后的结果。

从图6中可以看到,加速度传感器在振动情况下输出信号是围绕某个值上下变化的,滤波后的信号基本呈一条直线。这说明设计的 Butterworth 滤波器能有效地滤除噪声信号,滤波后的信号可以较真实反映重力加速度的大小。

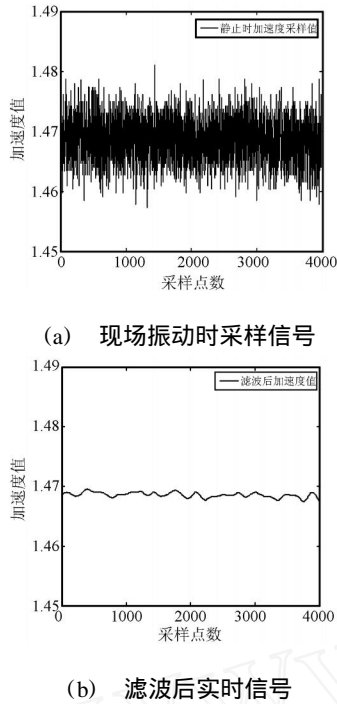


图6 静止时水平方向加速度信号

4 微位移计算

经过位置校正和信号去噪后的加速度信号可以用来分析被测对象的运动特征。判断列车是否发生溜逸,需要同时引入加速度信号和位移信息建立较为复杂的数学模型,并且考虑信号的同步性等问题。由于篇幅限制,这里主要介绍获取微位移信息的计算方法。

设 a_i, v_i, s_i 分别表示第 i 时刻的加速度、速度和位移, t 为采样时间间隔,则有

$$v_i = v_{i-1} + \frac{a_{i-1} + a_i}{2} t \tag{8}$$

第 i 时刻的相对位移为

$$s_i = s_i - s_{i-1} = v_i t = v_{i-1} t + \frac{a_{i-1} + a_i}{2} t^2 \tag{9}$$

由此,可推导出第 N 时刻运动对象的位移为

$$S_N = \sum_{i=1}^N v_{i-1} t + \sum_{i=1}^N \frac{a_{i-1} + a_i}{2} t^2 = \sum_{i=1}^N v_1 t + \sum_{i=1}^N \left[\frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_2 + a_3}{2} + \dots + \frac{a_{i-1} + a_i}{2} \right] t^2 = N \times v_0 \times t + \sum_{i=1}^N \left[\frac{a_0 + a_i}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} a_j \right] t^2 \tag{10}$$

5 实验结果与分析

为了证实运用加速度传感器进行微移动监测的可行性,将微移动监测系统固定在制动铁鞋内,并将铁鞋安放到铁轨上。当附近铁轨上有列车通过时,铁鞋会出现较强烈的上下振动。设置系统的采样频率为 125 Hz。当以约每秒 3 cm 的速度轻轻推动铁鞋向水平方向移动时,采集的加速度波形及滤波后的波形如图7所示。由滤波后的信号波形可以看出,前 10 s(对应前 1250 个采样点)处于静止状态,从第 11 s 开始有缓慢移动。

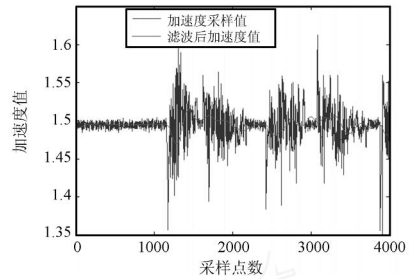


图7 由静止到移动时水平方向加速度波形

运用微位移计算式(10)分别计算图6和图7的加速度对应的移动位移量,如图8所示。

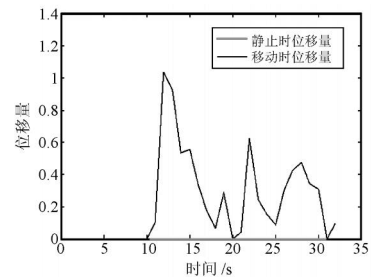


图8 制动铁鞋静止和移动时的位移量

由图8可知,当物体静止时,计算的位移量为 0,当物体发生移动时,由微位移计算式可以计算出每一秒的相对位移量。对比图7滤波后的加速度波形可以看出加速度变化和位移量间的对应关系。

6 结论

本文给出的便携式微移动监测系统采用加速度传感器 MMA7360 测量运动加速度信号,首先通过对传感器三轴方向的加速度进行校正,克服由于传感器位置安装偏斜对测量精度的影响,然后采用 Butterworth 低通 IIR 数字滤波器滤除高频干扰信号,计算出三轴方向的移动位移量,最终实现对微移动进行监测。大量实验和实际应用表明,本文加速度信号处理方法有效克服了安装位置和环境振动等噪声的影响,能实时监测被测对象的运动状态信息。

参考文献:

- [1] 王昌明, 孔德仁, 何云峰编著. 传感与测试技术[M]. 北京航空航天大学出版社, 2005. 6.
- [2] www.freescale.com.cn/products/sensors/MMA7360.asp [EB/OL].
- [3] www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/, ADUC 841_842_843.pdf [EB/OL].
- [4] Davy J L, Dunn I P. The Statistical Bandwidth of Butterworth Filters[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 115(3): 539-549.
- [5] arbieri R, Farella E, et. al. A Low-Power Motion Capture System with Integrated Accelerometers[C]// Proceedings of 2004 First Consumer Communications And Networking Conference, 2004, 418-423.
- [6] Averbuch A Z, Pevnyi A B, Zheludev V A. Butterworth Wavelet Transforms Derived from Discrete Interpolatory Splines: Recursive Implementation [J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2363-2382.
- [7] 程佩青著. 数字信号处理教程(第二版)[M]. 清华大学出版社, 2001. 8.



周建中(1959),男,教授,博导。研究方向为高性能网络与智能信息系统。



刘蓉(1969),女,副教授,研究方向为模式识别与智能信息处理,liurong@phy.ccnu.edu.cn

www.cnki.net