

基于 FPGA 的振动分析算法研究

李旋, 李学华

(成都信息工程大学电子工程学院 四川 成都 610225)

摘要: 在振动分析中,常常需要得到振动速度和位移的有效值。首先对振动加速度信号进行积分运算,得到速度和位移信号,再计算其有效值。利用最小二乘法去除积分趋势项的算法,在 FPGA 中实现了对振动加速度信号的积分和有效值运算,仿真表明其结果是正确的。算法可以在便携式测量仪器的设计中得到应用。

关键词: 测试计量技术及仪器; 信号检测与信息处理; 数字积分; 最小二乘法; 真有效值

中图分类号: TH825

文献标志码: A

0 引言

电力、石化和冶金等行业的关键设备,如汽轮机、发电机、燃气轮机、压缩机、风机、泵等,这些设备出现故障后,大多会造成严重的经济损失,因此,关键设备的故障诊断显得越来越重要。影响设备安全、稳定运行的主要因素是振动,振动是设备的“体温计”。采集设备关键部位的振动信号意义重大,常常以此来判断设备的运行情况,便于设备状态维修工作的大力开展。当前国内的振动分析仪^[1]普遍采用模拟积分,精度不高,可能会影响到设备运行状态的准确判断。因此,采用数字积分来获得速度和位移^[2-7]更为准确和可靠,在实际测量中有着良好的效果。

但是,要得到准确的速度和位移信号,必须对积分后的信号进行去趋势项的处理。文中研究在 FPGA 中进行数字积分以及用最小二乘法对速度和位移信号去除趋势项的方法,并实现了有效值计算。通过仿真验证,此方法准确可靠。

1 振动分析算法原理

原理如图 1 所示,首先,设备振动加速度信号由振动加速度传感器感应并转换为电压信号,A/D 芯片对电压信号进行采集,将模拟信号转换为数字信号;其次,对数字信号进行 FIR 高通滤波^[8-10],目的是去除零频直流分量和对积分运算影响较大的低频分量;然后,对加速度信号进行有效值计算,一次积分和两次积分运算;最后,用最小二乘法对速度和位移信号进行多项式拟合,去除速度信号的一次趋势项,再计算其有效

值;同理,去除位移信号的二次趋势项后,计算其有效值。

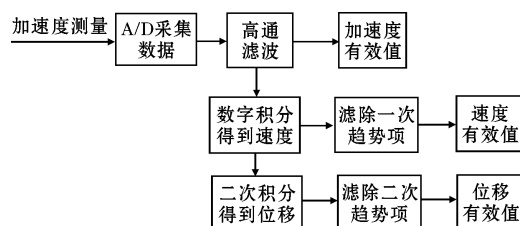


图1 振动信号测量原理图

1.1 数字积分及趋势项拟合

实际采集到的信号不一定是整周期信号,对信号进行 FIR 高通滤波,并不能完全去除直流成分。假设滤波后的信号为 $y(t) = f(t) + \alpha$ (这里采用连续函数表示),对其进行数字积分运算^[12]。考虑到保证计算的实时性,采用简单的矩形积分。速度和位移计算公式为

$$V(n) = \sum_{i=1}^n a(i) / f_s \quad (1)$$

$$S(n) = \sum_{i=1}^n V(i) / f_s \quad (2)$$

其中 a 为加速度信号, V 为速度信号, S 为位移信号, f_s 为采样频率。误差 α 在一次积分运算后产生一次趋势项 αt 。此外,由于积分初值的不确定,积分后的信号还包含了直流分量 β 。因此速度信号的表达式为: $v(t) = \int y(t) dt = \int f(t) dt + \alpha t + \beta$; 同理,对速度信号积分后会产生二次趋势项 $\alpha t^2 + \beta t$ 。因此,在积分运算后必须对信号进行去除趋势项处理。

设对速度信号的拟合多项式为 $Y = C \cdot n + D$, 首

先计算 $L1 = \sum_{i=1}^N i$, $L2 = \sum_{i=1}^N i^2$, $R = \sum_{i=1}^N v(i)$, $Q =$

收稿日期: 2015-01-00

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41375043)

$\sum_{i=1}^N i \cdot v(i)$ 则

$$C = (n \cdot Q - L1 \cdot R) / (n \cdot L2 - L1 \cdot L1) \quad (3)$$

$$D = (L2 \cdot R - L1 \cdot Q) / (n \cdot L2 - L1 \cdot L1) \quad (4)$$

其中 $n=1, 2, \dots, N$ (N 为采样点数)。设对位移信号的

$$E = \frac{t \cdot h2^2 - p \cdot h2 \cdot h3 - h4 \cdot r \cdot h2 + r \cdot h3^2 - h1 \cdot t \cdot h3 + h1 \cdot h4 \cdot p}{h4 \cdot h1^2 - 2 \cdot h1 \cdot h2 \cdot h3 + h2^3 - h4 \cdot m \cdot h2 + m \cdot h3^2} \quad (5)$$

$$D = \frac{h2^2 \cdot p + h1 \cdot h4 \cdot r - h2 \cdot h3 \cdot r - h1 \cdot h2 \cdot t - h4 \cdot m \cdot p + h3 \cdot m \cdot t}{h4 \cdot h1^2 - 2 \cdot h1 \cdot h2 \cdot h3 + h2^3 - h4 \cdot m \cdot h2 + m \cdot h3^2} \quad (6)$$

$$C = \frac{t \cdot h1^2 - p \cdot h1 \cdot h2 - h3 \cdot r \cdot h1 + r \cdot h2^2 - m \cdot t \cdot h2 + h3 \cdot m \cdot p}{h4 \cdot h1^2 - 2 \cdot h1 \cdot h2 \cdot h3 + h2^3 - h4 \cdot m \cdot h2 + m \cdot h3^2} \quad (7)$$

其中 $n=1, 2, \dots, N$ (N 为采样点数) $m=N$ 。

用 LMS 计算出速度和位移的拟合多项式后, 对应点减去趋势项, 便可得到纠正的速度和位移信号。

1.2 有效值计算

在物理学上, 有效值的定义为: 若某一交流电压 $u(t)$ 在一个周期内通过纯阻负载产生的热量, 与一个直流电压 U 在同样情况下产生的热量相等, 则 U 的数值即为 $u(t)$ 的有效值。对于一个理想正弦波而言, 其有效值是幅度除以 $\sqrt{2}$, 但对于复杂波形的有效值, 需要用均方根值计算公式, 得到真有效值 (true-RMS)。均方根值计算公式为

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(n)} \quad (8)$$

其中 N 为采样点数。

2 MATLAB 算法仿真

2.1 信号含有直流分量

假设振动加速度信号是含有一定直流分量干扰的理想正弦波信号, 振幅为 $14.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 信号频率 50 Hz , 直流分量 $-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 采样频率为 4 kHz , 采样点数 1000 。信号表达式为: $y(i) = 14.14 \cdot \sin(0.025 \cdot \pi \cdot i) - 0.2$, 式中 $i=1, 2, \dots, 1000$ 。波形如图 2 所示。

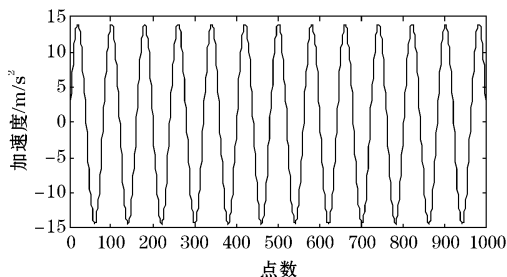
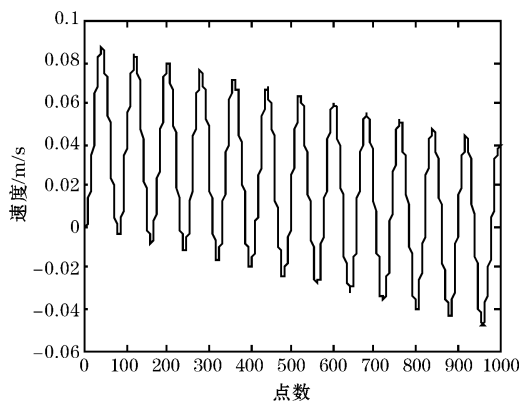


图2 加速度信号

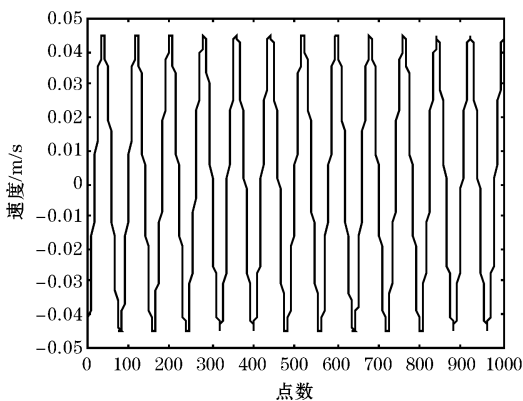
拟合多项式为 $Y = C \cdot n^2 + D \cdot n + E$ 。首先计算

$$h1 = \sum_{i=1}^N i, h2 = \sum_{i=1}^N i^2, h3 = \sum_{i=1}^N i^3, h4 = \sum_{i=1}^N i^4,$$

$$r = \sum_{i=1}^N s(i), p = \sum_{i=1}^N i \cdot s(i), t = \sum_{i=1}^N i^2 \cdot s(i) \text{ 则}$$



(a) 未处理

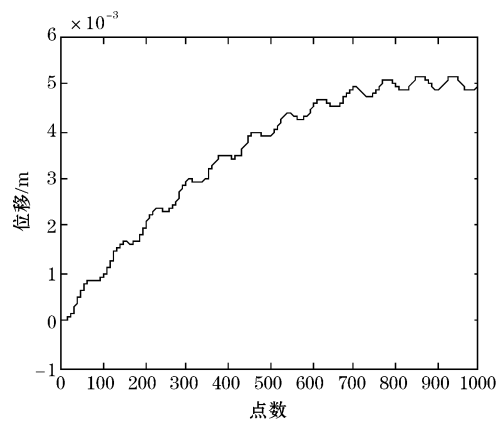


(b) 处理后

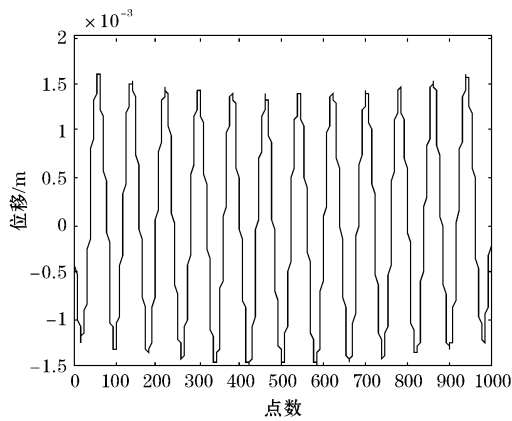
图3 未处理和处理后的速度信号

根据式 (1) 对加速度信号进行一次积分, 如图 3(a) 所示。积分后的速度信号含一次函数趋势项, 波形有下移趋势; 根据式 (3) 和式 (4) 计算出一次多项式系数, 把速度信号各点对应的趋势项值减去, 便得到修正后的波形, 由图可见处理效果良好。

根据式 (2) 对加速度信号进行二次积分, 如图 4(a) 所示, 积分后的位移信号含二次函数趋势项, 波形呈抛物线形状; 根据式 (5) ~ (7) 计算出波形的二次多项式系数, 将位移信号各点对应的趋势项值减去, 得到校正后的位移信号。



(a) 未处理



(b) 处理后

图4 未处理和处理后的位移信号

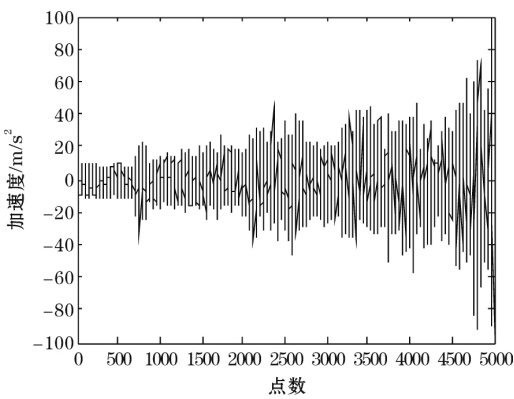
如表 1 所示 ,采用公式 (8) 计算有效值 ,首先分别计算出理想正弦波(不含直流分量)和积分得到的速度、位移波形的有效值;然后计算出含有直流分量干扰的正弦波信号及修正后的速度、位移波形的有效值。可以看出 ,计算结果较为准确。

表 1 信号有效值

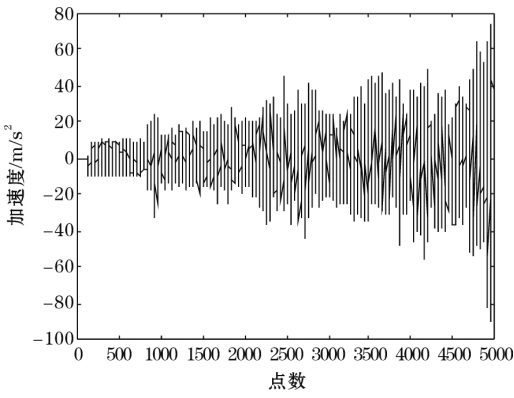
	加速度信号 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	速度信号 / mm/s	位移信号 / μm
理想值	9.998	31.81	101.20
计算值	9.993	31.83	100.96

2.2 实际振动信号

实际振动信号存在直流分量和复杂的低频分量干扰信号 ,使积分后的波形含有复杂的趋势项 ,无法进行有效值计算。因此 ,在积分前首先进行 FIR 高通滤波 ,滤除低于 20 Hz 的低频信号。采集到的振动信号如图 5 所示 ,信号频率范围为 0 ~ 1 kHz ,采样频率为 2 kHz ,采样点数为 5000。

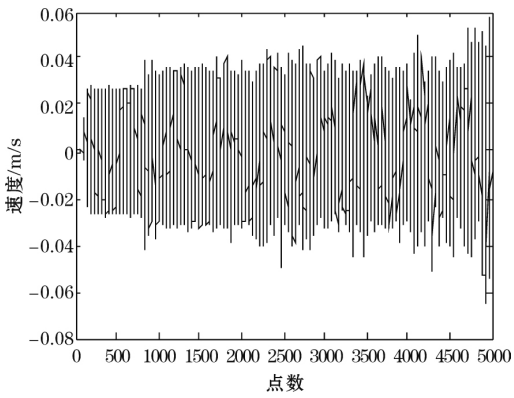


(a) 未滤波

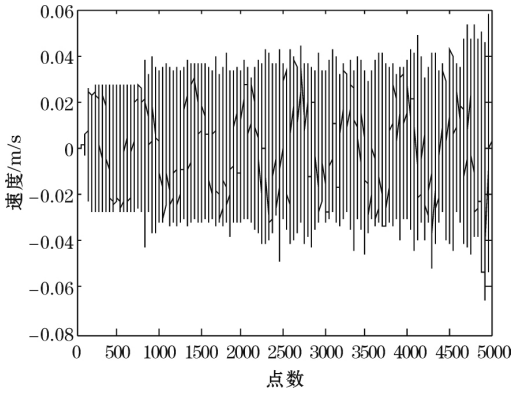


(b) 滤波后

图5 未滤波和滤波后的加速度信号

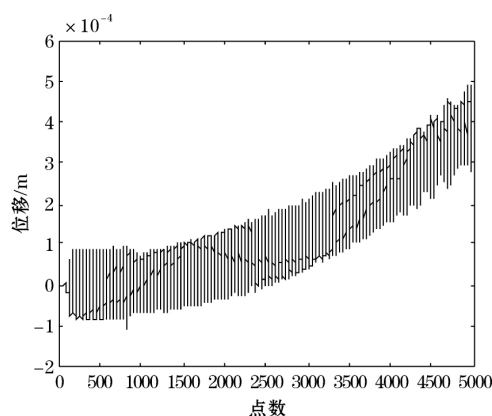


(a) 未滤波

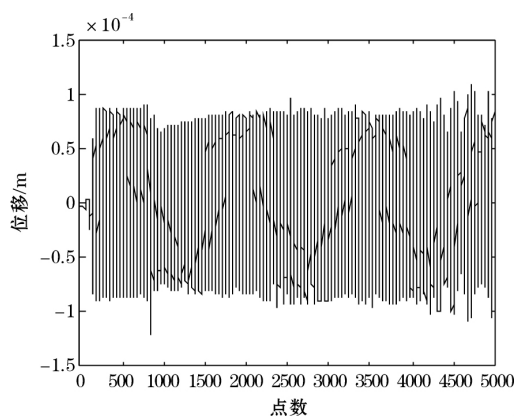


(b) 滤波后

图6 未滤波和滤波后的速度信号



(a) 未滤波



(b) 滤波后

图7 未滤波和滤波后的位移信号

如图6所示,由于滤波后的加速度信号只含有极少量直流分量,因此一次趋势不明显;二次积分后得到位移信号,二次趋势较为明显,采用最小二乘法去除二次趋势项后,波形得到良好修正。计算出加速度有效值为 $14.672 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,速度有效值为 19.85 mm/s ,位移有效值为 $58.33 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3 FPGA 算法实现

为便于说明,采用理想正弦波进行分析。实验用到的A/D芯片为24位ADS1271,采样率为20 KHz,理想正弦波信号振幅为2.5 V,频率为100 Hz,计算点数为4096。FPGA程序流程如图8所示。

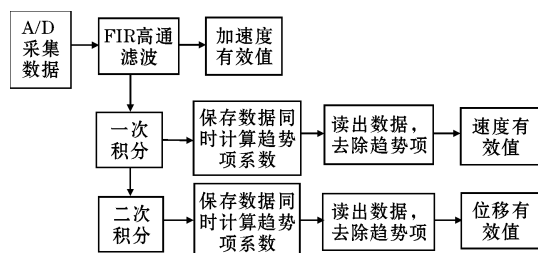


图8 程序流程图

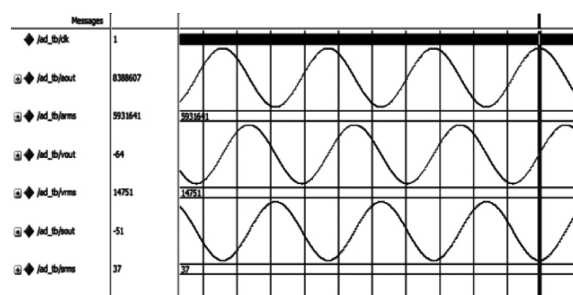


图9 ModelSim 波形仿真图

首先,通过SPI口将A/D采集到的数据读出,数据是24位补码格式,范围是 $-2^{23} \sim +2^{23}$,对应信号电压范围是 $-2.5 \text{ V} \sim +2.5 \text{ V}$;然后采用FIR IP核对信号进行高通滤波,将滤波后的数据进行一次和二次积分,并将积分结果写入SDRAM中,同时计算趋势项系数,4096个数据计算完后,将数据读出减去各点的趋势项值,得到修正后的波形数据,计算有效值。从图9可以看出,加速度信号的波形幅度为8388607,有效值为5931641;速度信号的波形幅度为20861,有效值为14751;位移信号的波形幅度为52,有效值为37。有效值结果乘以 $\sqrt{2}$ 等于幅度值,证明结果正确。

4 结束语

由MATLAB的仿真结果看出,算法可以有效的去除积分后的趋势项得到近似正确的波形,并且由于采用的是离散信号计算的方法,完全可以在FPGA中实现数字积分运算和有效值计算,FPGA仿真结果也说明了这一点。目前基于加速度、速度、位移振动信号特征分析的诊断技术已经成为目前较实用的故障诊断方法,振动检测仪器^[13-15]的研制开发前景广阔。通过对最小二乘法的运用,在FPGA中实现了积分趋势项的去除,并完成了有效值计算。

参考文献:

- [1] 李学军,蒋玲莉,褚福磊. 便携式位移-加速度振动信号测试系统软硬件设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 56-61.
- [2] 顾名坤,吕振华. 基于振动加速度测量的振动速度和位移信号识别方法探讨[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(4): 522-526.
- [3] 陈为真,汪秉文,胡晓娅. 基于时域积分的加速度信号处理[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 1-4.
- [4] 陈培永,王彤. 动态加速度信号的时频域积分方

- 法[J]. 江苏航空 2011: 73 - 76.
- [5] 周小祥, 陈尔奎, 吕桂庆, 等. 基于数字积分和 LMS 的振动加速度信号处理[J]. 自动化仪表, 2006 27(9): 51 - 53.
- [6] Stiros S C. Errors in velocities and displacements deduced from accelerographs: an approach based on the theory of error propagation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28: 415 - 420.
- [7] Yang J, Li J, Lin G. A simple approach to integration of acceleration data for dynamic soil structure interaction analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2006 26: 725 - 734.
- [8] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2006.
- [9] Smyth A, Wu Meiliang. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2007, 21: 706 - 723.
- [10] 方新磊, 郝伟, 陈宏. 基于频域滤波的加速度信号处理[J]. 仪表技术与传感器 2012, (4): 94 - 96.
- [11] 任健, 高晓蓉. 基于 FPGA 的 FFT 处理器设计[J]. 现代电子技术 2010 24: 142 - 144.
- [12] 李红. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [13] 汪祖民, 孙慧琳. 机械设备故障预警中的振动信号采集与处理系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014, (8): 63 - 65.
- [14] 林乐新, 宣海军. 旋转机械单通道轴振动测量仪[J]. 仪表技术与传感器 2009, (9): 26 - 28.
- [15] 张峰, 赵慧昌, 石现峰. 便携式多通道振动信号分析仪数采模块设计[J]. 自动化与仪表, 2014, (1): 15 - 18.

Research on Vibration Analysis Algorithm based on FPGA

LI Xuan, LI Xue-hua

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In vibration analysis, it is often necessary to obtain the effective value of vibration velocity and displacement. Firstly it is necessary to conduct the integral operation of vibration acceleration signal to obtain the velocity and displacement signal. Then the RMS can be calculated. Using the least square method to remove integral trend, the integral and RMS operation of vibration acceleration signal can be realized in FPGA. The simulation shows that the result is correct. The algorithm can be applied in the design of portable measuring instruments.

Key words: measurement technology and instruments; signal detection and information processing; numeric integration; LMS(least mean square); True-RMS