

环境试验与评价

振动信号的全频带三参量测量

牛宝良

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 解决振动信号的加速度、速度、位移三参量全频带测量问题。**方法** 提出一种由振动加速度信号、位移信号生成全频带位移、速度、加速度信号的方法, 对实测位移信号微分并低通滤波, 对实测加速度信号积分并高通滤波, 然后两者相加, 得到全频段的加速度、速度、位移信号, 所用的微分、积分、滤波都是用离散传函表示。**结果** 不论是正弦振动还是随机振动, 生成的位移、速度、加速度信号与正确的位移、速度、加速度信号一致。**结论** 该方法可以由实测位移信号、加速度信号实时生成全频带三参量信号。

关键词: 位移; 速度; 加速度; 三参量控制; 振动; 信号处理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.12.010

中图分类号: TJ01; TN713.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)12-0051-04

Three Variable Measurement on Whole Frequency Band of Vibration Signal

NIU Bao-liang

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To solve problems in whole frequency band measurement of vibration signal from three variables: acceleration, velocity and displacement. **Methods** This paper presented a method to generate displacement, velocity and acceleration signal of whole frequency band from displacement signal and acceleration signal. Displacement signal was derived and filtered by low-pass filter. Acceleration signal was integrated and filtered by high-pass filter. Then the displacement, velocity, acceleration signal of the whole frequency band was obtained by integrating the two results. Derivative, integrator, filter were all described in Z transfer function. **Results** S Displacement, velocity, acceleration signal generated in both sinusoidal vibration and random vibration were quite consistent with exact displacement, velocity, acceleration signal. **Conclusion** The presented method can generate real-timely displacement, velocity, acceleration signal from displacement signal and acceleration signal.

KEY WORDS: displacement; velocity; acceleration; three variable control; vibration; signal process

振动问题当今工程界的重要问题之一, 振动测量是其中的重要一环。振动测量通常涉及振动位移、速度、加速度。比如在液压振动台领域, 为了提高振动台的频率特性、跟随精度, 振动台控制系统引入了三参量控制技术^[1-4], 即反馈信号由早期的单一参量位移信号增加到加速度信号、速度信号和位移信号三个参量。目前工程界应用最广的是振动加速度传感器, 其次是位移传感器, 速度传感器很少, 且性能不令人满意。文献[7]测试了3种常用的速度传感器, 性能都

很不理想, 但是速度信号有时也不可缺少。比如文献[8]提到上海贝岭微电子有限公司大规模集成电路的设备对其基础的隔振要求很高, 美方验收小组提出要测量速度。

加速度传感器又主要有低频、高频两类, 低频通常能覆盖直流, 即可以测量静态的加速度, 但是上限频率不高, 一般几百到一千赫兹, 高频加速度传感器上限频率可以到十几千赫兹, 但下限频率一般在2~5 Hz。位移传感器可以从直流开始, 但上限频率一般

也不高,加之随着频率的增加,位移信号迅速减小,高频段信噪比也会很差。综上所述,用单一的传感器,是得不到全频带的位移、速度、加速度信号的。

文中提出了根据实测位移、实测加速度获得全频带位移、速度、加速度信号的方法,开展了正弦扫频、随机振动两种信号的仿真,且考虑位移信号施加少量噪声、加速度施加少量直偏,通过仿真验证了方法的正确性。

1 基于离散数字算法的位移、速度、加速度合成

文献[6]给出了一种合成速度的方法如图1所示。文献[9]给出了一种合成速度的方法如图2所示,同样遵循 $H_{LP}(s) + H_{HP}(s) = 1$ 的原则,与文献[6]的区别在于:微分、积分、滤波全部由离散传函表示;滤波器参数的设计,并强调要选择二阶滤波器。

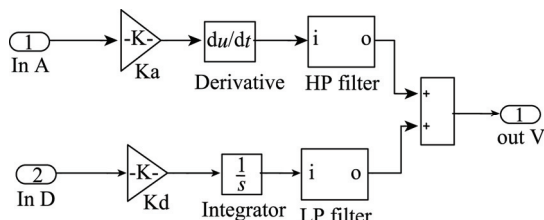


图1 文献[6]提出的速度生成器原理图

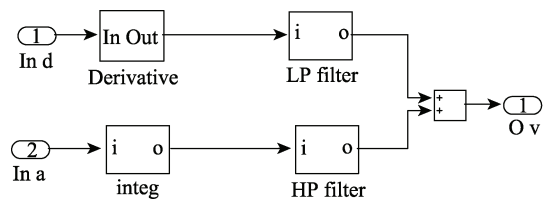


图2 文献[7]提出的速度生成器原理

本文是文献[9]的推广,不仅是合成全频带速度信号,还同时获得全频带的位移信号、加速度信号。即由位移信号生成低频段的速度、加速度,由加速度信号生成高频段的位移、速度信号,用高通、低通滤波器把低频段、高频段接起来,获得全频带三参数参量。高通、低通滤波器的共振频率选择在位移传感器、加速度传感器都有正确幅值、相位的频段,比如5~20 Hz。阻尼比选择0.1~0.7之间。

对于位移合成,原理如图3所示。位移传感器测得低频段(包括直流)的位移信号,加速度位移转换模块(a to d 模块)生成高频段的位移信号,低通滤波器(LP filter 模块)选取低频段位移信号,高通滤波器(HP filter 模块)选取高频段位移信号,两者合成得到全频段位移信号。加速度位移转换模块的原理见图4,是一个单自由度系统,可以把加速度转换成相应的位移,它的共振频率要低于高低通滤波器的频率。高低通滤波器与文献[9]完全相同,可参考文献[10],此处不再赘述。

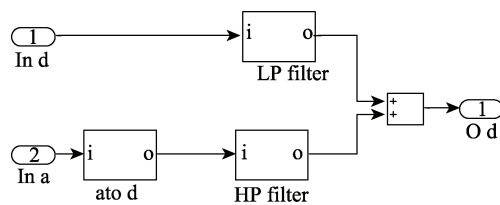


图3 位移合成原理

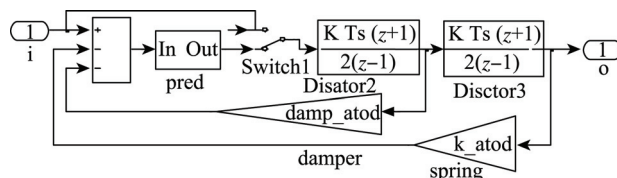


图4 加速度转换成位移原理

对于速度合成,原理与图2相同,但模块内部有所不同。微分器采用如图5所示的微分器,它的频率特性见图6。其优点是高频段增益得以抑制,对高频噪声的放大作用小,低频段相位与理想微分器一致。加速度转换到速度的积分器的原理如图7所示。

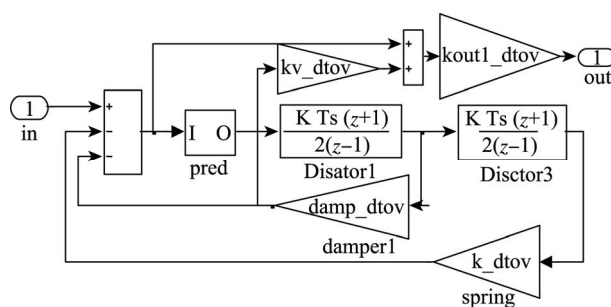


图5 微分器原理

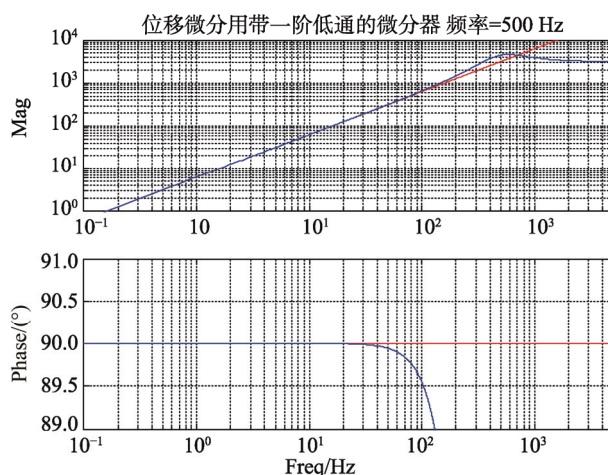


图6 微分器频率特性

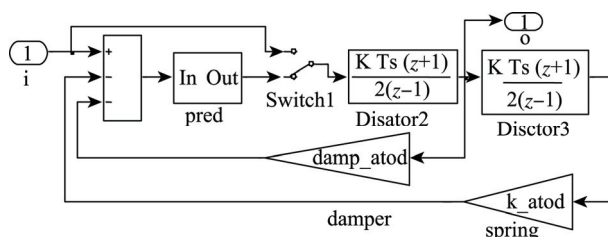


图7 积分器原理

对于加速度合成,原理如图 8 所示。位移经过两次微分得到低频段的加速度。微分器采用图 5 所示的微分器。高低通滤波器与前述的位移合成时的一致。

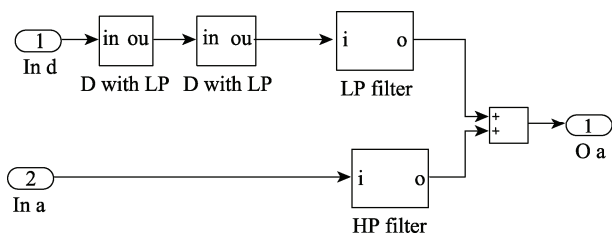


图 8 加速度合成原理

2 仿真

2.1 仿真模型及模型的主要参数

为了验证所提出方法的可行性和效果,构建了图 9 所示的仿真模型。avd generator 是信号发生器模块,可生成正弦扫频、随机两种信号,生成满足微积分关系的位移、速度、加速度信号。在加速度信号上叠加了直流分量,在位移信号上叠加了随机噪声,以模拟实际的测量情况。

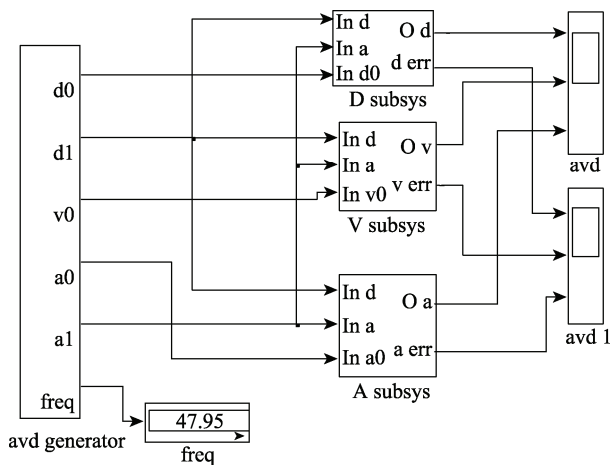


图 9 全频带位移、速度、加速度信号合成仿真模型

主要参数: 仿真采样间隔为 $50 \mu\text{s}$; 扫频范围为 $2 \sim 2000 \text{ Hz}$; 高通/低通滤波器共振频率为 10 Hz , 阻尼比为 0.7 ; 加速度积分到位移的积分器共振频率为 0.1 Hz , 阻尼比为 0.7 ; 位移微分到速度的微分器的共振频率为 500 Hz , 阻尼比为 0.5 ; 加速度积分到速度的积分器共振频率为 0.1 Hz , 阻尼比为 0.7 ;

2.2 正弦仿真

开展了正弦仿真,仿真证明 $1 \sim 2000 \text{ Hz}$ 范围可行。为了能看清楚波形,图 10 至图 12 给出的是 $2 \sim 20 \text{ Hz}$ 扫频的位移、速度、加速度结果。位移最大峰值为 65.381 mm , 误差峰值为 1.299 mm , 相对误差为 1.98% ; 速度最大峰值为 0.794 m/s , 误差峰值为 0.01585 m/s , 相对误差为 2.00% ; 加速度最大峰值为

10 m/s^2 , 误差峰值为 0.0092 m/s^2 , 相对误差为 0.093% ;

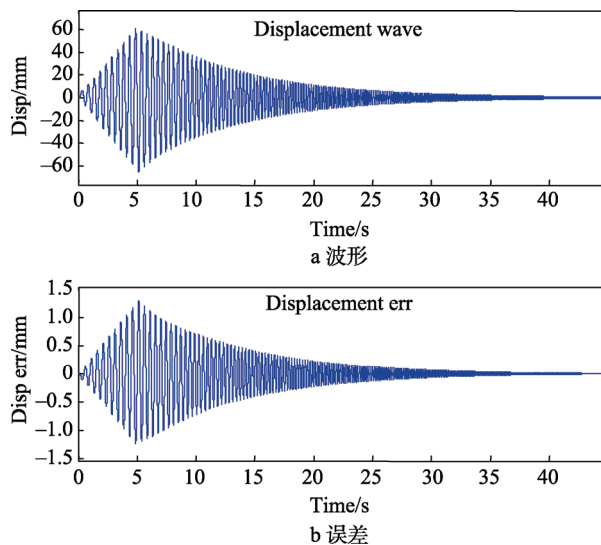


图 10 位移波形及误差

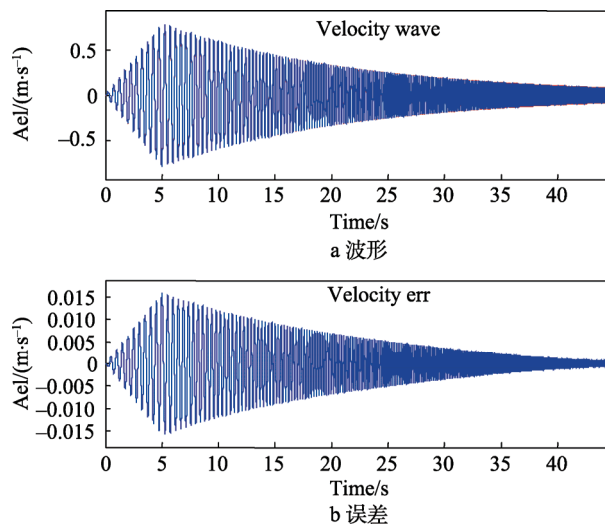


图 11 速度波形及误差

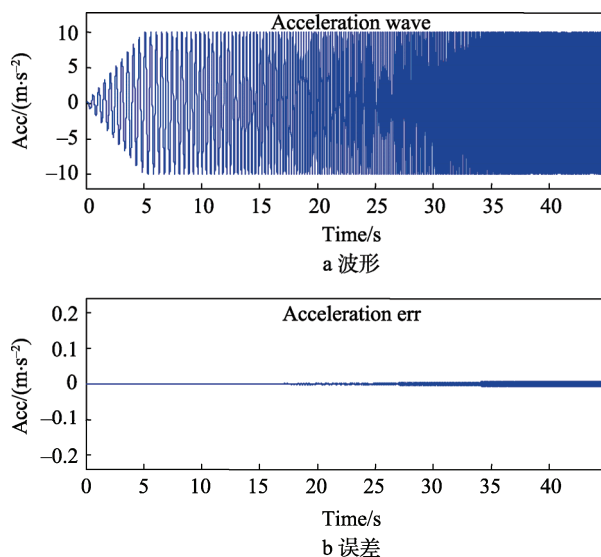


图 12 加速度波形及误差

2.3 随机仿真结果

开展了随机振动信号仿真。图13至图15给出的随机振动的位移、速度、加速度结果。位移最大峰值为135.93 mm, 误差峰值为1.6186 mm, 相对误差为1.19%; 速度最大峰值为0.112 m/s, 误差峰值为0.001 646 m/s, 相对误差为1.47%; 速度最大峰值为14.992 m/s², 误差峰值为0.006 347 m/s², 相对误差为0.042%;

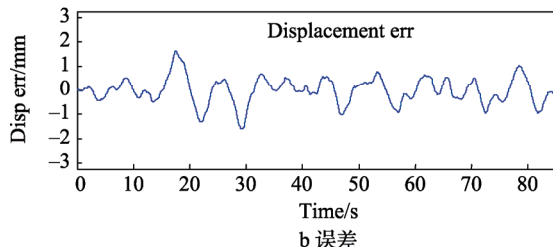
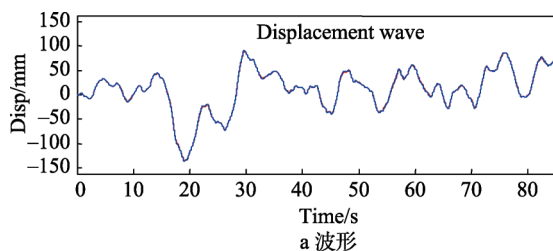


图13 位移波形及误差

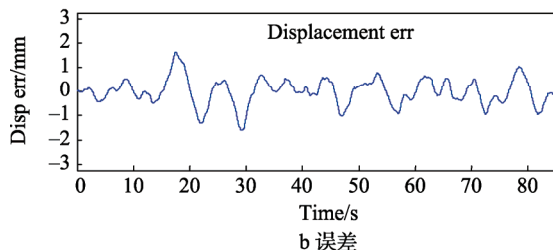
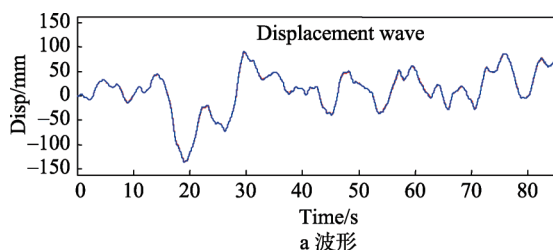


图14 速度波形及误差

3 结论

文中所提出的由位移、加速度信号生成全频带位移、速度、加速度信号的方法, 克服了单一传感器的频带限制, 实现了全频带三参量信号实时输出。

采用基于SDOF的滤波器设计的低通、高通、积分器、微分器, 仅需截止频率、阻尼比两个参数, 且参数的意义明确。提出的带低通功能的微分器, 在低频段有正确的相位, 高频段有较好的噪声抑制功能,

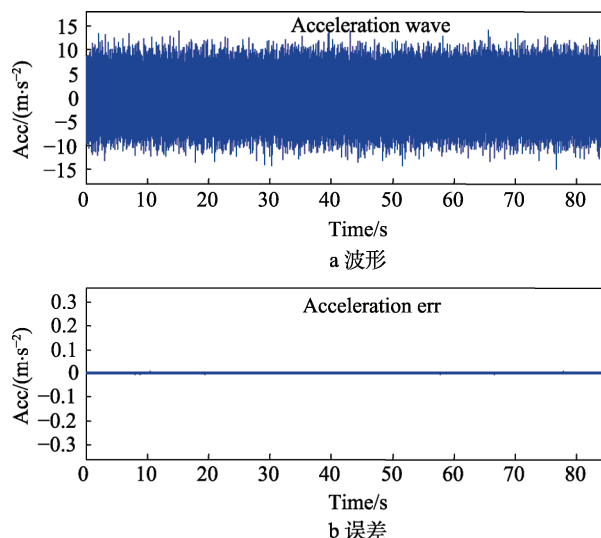


图15 加速度波形及误差

在三参量合成中发挥了重要作用。

Simulink 仿真表明, 不论是正弦振动信号, 还是随机振动信号, 即使在有直偏和噪声情况下, 也能获得好的位移、速度、加速度信号, 且具有较高的精度。

研究发现, 压电加速度传感器得到的低频段加速度信号与真实加速度之间存在相位差, 因此, 低通高通转换频率应该足够高, 使得该频率处相位差基本为0的频率, 否则对低频段的精度有较大影响。

参考文献:

- [1] 韩俊伟, 于丽明, 赵慧, 等. 地震模拟振动台三状态控制的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999(3): 21-23.
- [2] 关广丰, 熊伟, 王海涛, 等. 6自由度液压振动台伺服控制策略[J]. 液压与气动, 2008(10): 29-32.
- [3] 刘拓, 刘一江, 易伟建. 神经网络多参量地震模拟试验台控制算法[J]. 噪声与振动控制, 2010(5): 43-46.
- [4] 唐贞云, 李振宝, 纪金豹, 等. 地震模拟振动台控制系统的发展[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 162-169.
- [5] 纪金豹, 李振宝, 唐贞云, 倪志伟. 地震模拟振动台反馈控制系统的速度合成方法[J]. 北京工业大学学报, 2012(7): 1032-1035.
- [6] 陈晓东, 陈世荣, 李志远. 基桩动测传感器频响特性的测试分析[C]// 第十一届全国振动与噪声高技术及应用会议论文集. 1999: 307-301
- [7] 沈剑昊, 沈伟. 精密设备基础振动速度值的测定[C]// 第十一届全国振动与噪声高技术及应用会议论文集. 1999: 362-366
- [8] 牛宝良. 由振动加速度、位移生成速度信号方法[C]// 第十八届电子技术学术年会论文集. 广州, 2016: 301-304.
- [9] 牛宝良. 基于单自由度振动模型的FIR数字滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(5): 702-706.