[新设备・新材料・新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.06.012

基于加速度频域积分的振动位移测量系统

林 培¹, 许杨剑¹, 陈栋栋², 鞠晓喆¹, 梁利华^{1*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310020)

摘 要:常规的振动位移监测设备存在价格昂贵、受传感器安装位置以及空间的限制等缺点,很难在工业领域里大规模 地推广应用。由于加速度与位移之间存在着积分运算关系,且加速度信号比较容易测量,因此,课题组对加速度频域积 分方法进行了研究,并利用 LabVIEW 虚拟仪器平台和 MATLAB 开发出一套简易且具有较高精度的振动位移测量系统。 为了进一步验证当前系统的有效性,课题组以振动平台作为实验对象,将当前系统测量的位移与数字图像相关(digital image correlation,DIC)方法测量的位移进行了对比研究。实验结果表明所提出的振动位移测量系统具有较高的测量 精度。

关键 词:位移信号;加速度信号;频域积分;LabVIEW;数字图像相关
 中图分类号:TP274.2
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2022)06-0071-05

Vibration Displacement Measurement System Based on Acceleration Integral in Frequency Domain

LIN Pei¹, XU Yangjian¹, CHEN Dongdong², JU Xiaozhe¹, LIANG Lihua^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;2. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Conventional vibration displacement monitoring equipment was expensive, limited by the installation location and space of sensors, and was difficult to be widely used in the industrial field. Due to the integral operation relationship between acceleration and displacement, and the relatively easily measured acceleration signal, the acceleration frequency domain integral method was studied, and a set of simple and high precision vibration displacement measurement system was developed by using LabVIEW virtual instrument platform and MATLAB. In order to further verify the effectiveness of the current system, the displacement measured by the current system was compared with that measured by digital image correlation (DIC) with the vibration platform as the experimental object. Experimental results show that the current low cost vibration displacement measurement system has high precision.

Keywords: displacement signal; acceleration signal; frequency domain integral; LabVIEW; DIC (Digital Image Correlation)

在许多场合下需要对结构的振动位移进行测量, 例如设备动态特性的研究、地震学科的研究以及桥梁 建筑的振动研究^[12]。杨春^[3]利用激光传感器实现了 对船舶结构的振动测量。王荣林等^[4]利用激光传感 器和 LabVIEW 虚拟仪器平台开发了振动位移测量系 统。朱坚民等^[5]利用激光测振仪对铣床铣刀的振动 位移进行测量。李红伟等^[6]利用2个对称放置的电涡 流传感器,采用差动相反的思想对磁悬浮转子的轴向 位移进行测量。孙志敬等^[7]利用电涡流传感器对压 缩机的振动进行监测。激光位移传感器具有测量精度 高的优点,但激光传感器对安装位置要求较高且测试 所得位移信号容易失真。电涡流传感器对被测对象的

收稿日期:2022-06-20;修回日期:2022-10-08

基金项目:浙江省"尖兵""领雁"研发攻关计划资助(项目编号:2022C01175)。

第一作者简介:林培(1995),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为故障诊断。通信作者:梁利华(1973),男,浙江温岭人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能器件可靠性。E-mail:lianglihua@zjut.edu.cn

材料、表面状态都比较敏感,同时电涡流传感器的安装 要求也比较高。

加速度传感器具有体积小、质量小和频率范围宽 等优点,是工程应用中常用的振动测量传感器之一。 由于加速度与位移之间具有积分运算关系,因此可以 通过对测量的加速度信号进行积分运算求取位移信 号。Arias-Lara 等^[8]对不同加速度积分方法进行研究, 通过实验表明:利用加速度积分求取位移是可行的,积 分方法的选取需要根据位移幅值、波形类型等因素来 确定。Brandt 等^[9]研究了加速度频域积分方法以及加 权叠加(weighted overlap-add, WOLA)技术的加速度积 分方法并与时域积分方法进行比较,通过实验表明:频 域加速度积分的精度受数据长度影响, WOLA 技术则 只适用于稳态情况。李强等^[10]将加速度信号转化到频 域,并对低频部分清零,在频域对加速度信号进行变换, 实现对位移的求取。周小祥等[11]利用加速度时域积分 求取位移,针对时域积分容易产生趋势项的问题,利用 最小二乘法对趋势项进行消除。但这些研究大多应用 于线下求解计算,并未应用于实际工程中的在线测量。

针对上述情况,课题组通过对加速度积分方法进行研究,借助 LabVIEW 平台和 MATLAB 开发了基于加速度频域积分的位移测量系统。通过与 DIC 位移测量方法进行比较,对本系统的测量效果进行了验证。

1 加速度积分方法

动态信号的积分可分为硬件积分和软件积分。硬 件积分主要利用积分电路实现,但不适用于测量包含 复杂频率成分的信号;软件积分则分为时域和频域积 分,主要通过软件算法实现。

1.1 时域积分方法

由于存在各种干扰因素,实际测量得到的加速度 信号中会包含直流分量δ,所以加速度信号表达式为:

$$a = a(t) + \delta_{\circ} \tag{1}$$

对加速度信号进行积分得到速度信号:

$$v = \int a(t) + \delta dt = v(t) + \delta t + \varepsilon_{\circ}$$
(2)

对速度信号进行积分得到位移信号:

$$s = \int v dt = s(t) + \frac{1}{2} \delta t^2 + \varepsilon t + e_0 \qquad (3)$$

式中:δ为趋势项中二次项系数,ε为趋势项中一次项

系数,e为趋势项中常数项。

从式(2)和式(3)可以看出,由于加速度信号中 包含直流分量 δ ,使得加速度信号在作时域积分时会 引入一次趋势项($\delta t + \varepsilon$)和二次趋势项($\frac{1}{2}\delta t^2 + \varepsilon t + e$),通常情况下可通过多项式拟合的方式从积分 信号中予以消除。

1.2 频域积分算法

根据傅里叶变换公式,加速度信号在某一频率ω 的傅里叶分量可以表示成:

$$a(t) = A e^{j\omega t} \,_{\circ} \tag{4}$$

式中:a(t) 对应频率 ω 时的傅里叶分量,A 对应频率 ω 时加速度信号的系数。

对加速度信号作积分运算得到速度信号:

$$v(t) = \int a(t) dt = \int A e^{j\omega t} dt = \frac{A}{j\omega} e^{j\omega t} \circ (5)$$

再对速度信号作积分运算可得位移信号:

$$s(t) = \int v(t) dt = \int \frac{A}{j\omega} e^{j\omega t} dt = -\frac{A}{\omega^2} e^{j\omega t} \,_{\circ} \qquad (6)$$

利用频域积分求位移信号时需要先对加速度信号 进行傅里叶变换,对加速度信号的频域乘以 – 1/ω² 得 到位移的频域信号,再对位移的频域信号进行傅里叶 逆变换,即可得到位移的时域信号。

1.3 正弦叠加信号仿真

以含噪信号:

 $a(t) = 0.8 \sin (29\pi t^2) + 1.2 \sin (41\pi t) + 2.0 \sin (63\pi t) + rand ()$

为例,分别采用时域积分和频域积分的方法求取位移, 结果如图1所示。可以看出,频域积分效果要好于时 域积分,不易受噪声影响。





图 1 含噪声信号时域积分与频域积分结果 Figure 1 Results of time domain integration and frequency domain integration of signal with noisy

2 测量系统程序设计

LabVIEW 是一款图像化程序开发软件,广泛应用 于测量系统的编写^[12-13]。MATLAB 作为一款强大的 数学计算软件,可以实现复杂的数学算法。课题组借 助 LabVIEW 和 MATLAB 开发了基于加速度频域积分 的位移测量系统;利用 LabVIEW 实现加速度信号采集 和处理;通过 LabVIEW 中的 MathScipt 窗口实现对 MATLAB 编写的加速度频域积分程序的调用。位移测 量系统流程如图 2 所示。





3 频域加速度积分误差分析

在利用加速度频域积分求取位移时,需要进行频 域滤波以及时域和频域的相互转化。为了更精确地得 到位移测量结果,需要对加速度频域积分误差进行 分析。

3.1 误差评价指标

为了对加速度信号积分结果进行评估,引入峰值 误差和差值误差^[14]:

$$E_{rp} = \frac{1}{2} \times \left\{ \left| \frac{\max \left[S'(t) \right] - \max \left[S(t) \right] \right]}{\max \left[S(t) \right]} \right| + \left| \frac{\min \left[S'(t) \right] - \min \left[S(t) \right]}{\min \left[S(t) \right]} \right| \right\};$$
(7)
$$E_{rr} = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{\left| \max \left[S'(t) - S(t) \right] \right|}{\max \left[S(t) \right]} + \frac{\left| \min \left[S'(t) - S(t) \right] \right|}{\min \left[S(t) \right]} \right\} \right\}$$
(8)

式中:S'(t)为加速度积分求得的位移,S(t)为位移传 感器测得的位移。

峰值误差 E_{n} 用来衡量 S'(t) 峰值相对于 S(t) 的 峰值的误差;差值误差 E_{n} 用来衡量 [S'(t) - S(t)]的 峰值相对于 S(t) 峰值的误差。

3.2 截止频率对频域积分结果的影响

以含噪声信号:

 $a(t) = 0.8 \sin (29\pi t^2) + 1.2 \sin (41\pi t) + 2.0 \sin (63\pi t) + rand ()$

为例,选取不同的低截止频率进行频域积分,误差如表 1 所示。从表中可以看出,低截止频率对频域积分的 结果影响较大,选取合适的低截止频率可以有效地滤 除低频干扰。在实际应用时,可先通过频谱分析了解 信号中所含有的频率成分,选取合适的低截止频率。

表1 不同截止频率下频域积分的误差

Table 1 Error of frequency domain integration

at different truncation frequencies

截止频率/Hz	峰值误差/%	差值误差/%
2	279.50	2.80
6	40.00	3.60
10	2.20	2.70
14	1.20	4.76
18	37.16	1.46

3.3 频率分辨率对频域积分结果的影响

以信号 $y = \sin(2\pi ft) + rand()$ 为例,分别对 f =10.0和10.2Hz的信号进行频域积分,取采样频率 f_s 为1000Hz,采样点数 N为1000,结果如图3所示。 可以看出,2个信号均为低频信号且频率相近,但积分 结果相差较大。这是由于信号的频率分辨率为 $\Delta f =$ $f_s/N = 1000/1000 = 1$ Hz引起的,当f = 10.2Hz时,f不为 Δf 的整数倍,即没有做到整周期采样从而产生了 栅栏效应,造成频域成分丢失。在实际工程应用时可 通过选择合适的采样频率 f_s 和采样点数 N来提高频 率分辨率,以尽可能地整周期截取信号来减小栅栏效 应所带来的误差。





4 有效性验证实验

4.1 基于 DIC 方法的振动位移测量实验

数字图像相关方法(digital image correlation,DIC) 通过计算物体变形前后数字图形的相关性来获取感兴 趣区域的位置信息,常用于物体表面位移和应变的测 量^[15]。DIC 对实验环境要求极为宽松,并且具有全场 测量、抗干扰能力强以及测量精度高等优点。因此可 以利用高速相机对振动的物体进行连续拍摄,实现对 振动位移的精确测量。基于 DIC 的振动位移测量系 统如图 4 所示。

通过将本系统测得的位移与 DIC 方法测得的位 移进行比较,可以对本系统的有效性进行验证。测量 时在振动平台上放置加速度传感器和散斑图片用来测 量振动平台竖直方向上的振动位移,设置加速度信号 的采样频率为1 000 Hz, DIC 的拍摄间隔分别设置为 66 和 100 ms。



图4 振动位移测试装置

Figure 4 Vibration displacement testing device

4.2 测量结果分析

由于实验过程中位移测量和加速度测量不是同一测试系统,很难保证加速度信号和位移信号在时间轴上的同步。因此后续对数据进行处理时按照 DIC 测量的结果在本系统测得的位移信号中提取对应的值,以确保二者在时间轴上尽量保持一致。测量结果与测量误差如表2 和图5 所示。可以看出,课题组开发的基于加速度频域积分的位移测量系统测量的位移结果与 DIC 的测量结果基本吻合,测量误差较小,可以满足实际的工程需求。

表2 DIC 与加速度频域积分测量误差

Table 2 Measurement error of DIC and

acceleration integration in frequency domain





图 5 DIC 与加速度频域积分测量结果 Figure 5 Measurement results of DIC and acceleration integration in frequency domain

5 结论

针对某些场合下难以利用位移传感器对振动位移 进行测量的问题,课题组选用加速度积分的方法来测 量振动位移。通过仿真和实验得出以下结论:

 1)频域积分可以避免二次积分所带来的误差,相 较于时域积分具有更高的稳定性;

 2)频域积分的误差主要取决于低截止频率和频率分辨率,可以通过选择合适的低截止频率以及提高 采样频率来减小误差;

3)利用 LabVIEW 和 MATLAB 联合编程开发的基 于加速度频域积分的位移测量系统具有较高的测量精 度,可以满足实际测量要求。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 李智勇.基于频域积分的振动信号处理方法[J].汽车科技,2009
 (5):28-30.
- [3] 杨春. 一种基于激光位移传感器的高精度振动位移测量方法[J].
 中国水运(下半月),2021,21(5):59-61.
- [4] 王荣林,倪文彬,曲波.基于 LabView 的激光振动位移测试系统设计[J].中国制造业信息化,2012,41(13):55-57.
- [5] 朱坚民,王健,张统超,等.基于刀具振动位移的动态铣削力测量 方法[J].仪器仪表学报,2014(12):2772-2782.
- [6] 李红伟,刘淑琴,于文涛,等.电涡流传感器检测磁悬浮转子轴向 位移的方法[J].仪器仪表学报,2011,32(7):1441-1448.
- [7] 孙志敬,刘欢,侯文峰. 电涡流位移传感器在压缩机中的应用[J]. 机床与液压,2021,49(19):68-71.
- [8] ARIAS-LARA D, DE-LA-COLINA J. Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records [J]. Measurement, 2017, 114:261 – 273.
- [9] BRANDT A, BRINCKER R. Integrating time signals in frequency domain: comparison with time domain integration [J]. Measurement, 2014,58:511-519.
- [10] 李强,王太勇,胥永刚.基于频域积分的振动参量转换修正算法
 [J].组合机床与自动化加工技术,2005(9):60-61.
- [11] 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.
- [12] 罗瑜.基于 Labview 的位移测量系统设计[J].电子设计工程, 2021,29(7):63-67.
- [13] 李愿平,王志华,蔡志文.基于 LabVIEW 的轴承动载荷测量系统
 [J].舰船电子工程,2021,41(7):171-178.
- [14] 胡玉梅,周英杰,朱浩,等.基于趋势项误差控制的频域积分算法 研究与应用[J].振动与冲击,2015,34(2):175.
- [15] FADIJI T, COETZEE C J, OPARA U L. Evaluating the displacement field of paperboard packages subjected to compression loading using digital image correlation (DIC) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 123:60 - 71.

(上接第70页)

- [10] CHEN F, ZHANG C J, ZHAO B W, et al. A speed-up way of template matching using normalized cross-correlation [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 313-314:1188-1191.
- [11] DAI Y, XU T, FENG Z Q, et al. Cotton flow velocity measurement based on image cross-correlation and Kalman filtering algorithm for foreign fibre elimination [J]. The Journal of the Textile Institute, 2021:1-8.
- [12] 李庆园.面向双目立体视觉车辆测速系统的匹配算法优化研究
 [D].中原工学院,2021:32-36.
- [13] 李继辉.双目视觉车速测量的研究及实现[D].太原理工大学, 2018:70-75.
- [14] 田杰,徐忠民.基于 ROI 提取和改进 SURF 算法的图像匹配方法 研究[J].新型工业化,2021,11(8):3-5.
- [15] 常子霆,施雨晴,王俊,等.基于双目视觉的车辆速度测量方法
 [J].计算机科学,2021,48(9):135-139.