

加速度信号积分求解位移方法研究

庞家志, 孙佳川, 刘泽丰

(中国航天科工集团第二研究院二〇一所, 北京 100854)

摘要: **目的** 研究动力学环境试验分析中时域积分算法和频域积分算法两种加速度信号积分求解位移方法。**方法** 动力学环境试验中, 利用不同算法对被试品测点处所采集到的加速度信号进行二次积分处理, 计算求解位移。采集过程中, 再利用激光传感器测量位移, 以激光所测位移为基准, 对比分析不同算法求解结果的准确性, 并分析其结果的误差来源、其优缺点及适用范围。**结果** 在动力学环境试验的不同工况下, 两种不同积分法得到的位移数据与激光测定数据基本重合, 积分得到的位移最大误差均小于5%, 符合实际应用需求。时域积分算法在两次积分中受到噪声以及直流分量误差的影响较大; 频域积分算法的计算结果相对更加准确, 但是受到低频误差影响较大, 具有低频敏感性。**结论** 在动力学环境试验中, 时域积分算法适用于噪声和直流分量可忽略的情况, 频域积分算法适应于低频误差较小的情况。对加速度信号数据进行必要且有效的预处理后, 时域积分算法和频域积分算法的位移积分结果都具有较高的准确性, 能够满足一般工程实际中的测试需求。

关键词: 动力学环境试验; 加速度; 位移; 积分; 误差

中图分类号: V41; TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)12-0042-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.008

Research on the Method of Solving Displacement by Integrating Acceleration Signal

PANG Jia-zhi, SUN Jia-chuan, LIU Ze-feng

(Institute 201 of the Second Academy of China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: This paper studies two acceleration signal integration methods to solve displacement in time domain integration algorithm and frequency domain integration algorithm in dynamic environment test analysis. In the dynamic environment test, different algorithms are used to perform quadratic integration processing on the acceleration signal collected at the measuring point of the test product to calculate and solve the displacement. In the acquisition process, the laser sensor is used to measure the displacement. Based on the measurement results of laser displacement sensor, the accuracy, error sources, advantages and disadvantages and application scope of two different integral methods is compared and analyzed. Under different working conditions of dynamic environment test, the displacement data obtained by two different integration methods are basically coincident with the laser measurement data and the maximum error of displacement obtained by two kinds of integral methods is less than 5%. These all meet the needs of practical application. The time domain integration algorithm is greatly affected by noise and DC component error. The result of frequency domain integration algorithm is more accurate relatively, but it is greatly af-

收稿日期: 2021-07-17; 修订日期: 2021-08-22

Received: 2021-07-17; Revised: 2021-08-22

作者简介: 庞家志(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境与可靠性工程。

Biography: PANG Jia-zhi (1986—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: environment and reliability engineering.

引文格式: 庞家志, 孙佳川, 刘泽丰. 加速度信号积分求解位移方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 042-050.

PANG Jia-zhi, SUN Jia-chuan, LIU Ze-feng. Research on the method of solving displacement by integrating acceleration signal[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 042-050.

ected by low frequency error and it has low frequency sensitivity. In the dynamic environment test, the time domain integration algorithm is suitable for the case that the noise and DC component can be ignored. And the frequency domain integral algorithm is suitable for the case of small low frequency error. After necessary and effective preprocessing of acceleration signal data, the displacement results obtained by time domain integration algorithm and frequency domain integration algorithm have high accuracy. Therefore, both methods can meet the actual test requirements of general engineering.

KEY WORDS: dynamic environment test; acceleration; displacement; integral; error

在产品可靠性试验中, 被试品结构部件在振动、冲击等载荷作用下的动力学响应是考核焦点之一。产品的部分结构在动载荷作用下发生的位移是否与其他部位产生干涉、是否会影响被试品的结构性能, 是产品可靠性考核的一个必要项目。

目前, 测试位移的主要方法有两种: 非接触式测位移方法和接触式测位移方法。

非接触式测位移法主要是利用各种位移传感器, 将传感器安装在刚性很好的基础结构上, 直接测得待测点与位移传感器的相对位移^[1]。

接触式测量主要是利用加速度传感器, 直接安装在被试品的待测点上, 将测得的加速度信号进行积分处理, 得位移值^[2-4]。利用加速度传感器的接触式测量方法较为方便, 但是测试过程中的干扰等也会极大地影响测量位移的准确度^[5-6]。

当在利用加速度传感器测量位移时, 应注意以下情况。

1) 测量方法的确定。因为加速度传感器测量的信号是以地面为参照物的, 所以测量得出的位移为被测件相对于地面的位移, 其位移量不仅包含被测件相对于振动台台面的位移, 同时还包含振动台整个台体相对于地面的位移。因此, 为测得被测件真正的位移变形大小, 需要确定位移测量基准点, 并在基准点处布置加速度传感器, 实际计算时, 应将基准点处的位移数据扣除。

2) 传感器的选择。首先, 在利用加速度测量位移时, 由于低频处的位移较大, 因而应选择低频响应较好的加速度传感器, 特别是在开展量级较大的冲击试验时, 较大的试验载荷会对加速度传感器及传感器线的技术指标提出较高的要求, 应避免在低频处出现“零漂”现象, 否则会引起较大的试验误差; 其次, 应选择质量较小的加速度传感器, 从而避免传感器的质量惯性作用对被测件的影响; 第三, 由于被测件的位移往往不是单一方向的位移, 因此, 为获得被测件实际的位移状态, 应优先选择三向传感器, 并根据三个方向的矢量叠加结果计算最终位移^[7]。

3) 滤波频率的选择。不同频段的噪声信号在积分后会对计算结果造成较大的影响, 不进行任何处理而直接积分得到的结果会严重偏离真实结果。因此, 在进行加速度积分计算位移前, 应对加速度信号进行频域分析, 观察加速度信号在不同频段频率分量的响

应情况, 进而根据实际情况剔除无用信号, 最终得到可靠结果^[8-11]。

文中通过对不同位移测试方法的对比验证研究, 对比了不同加速度信号积分算法求解位移的精确性, 并以激光位移传感器实测位移结果作为验证, 确定了位移测试误差影响因素及测试精度, 分析了不同积分算法的优缺点及适用范围。该研究有助于试品在动力环境载荷作用下的位移测量, 具有较好的实际应用价值。

1 试验

1.1 加速度信号的预处理

加速度信号的预处理是为了让试验中采集到的加速度信号能尽可能还原实际状况。

1.1.1 消除多项式趋势项

趋势项指的是偏离基线随时间变化的过程, 主要是由于试验中加速度传感器受到多种环境因素的干扰所致, 趋势项一般存在于所采集的加速度信号的低频区域^[12-14]。趋势项的存在直接影响着所采集加速度信号的准确性, 去除趋势项一般利用多项式最小二乘法^[15]。

在加速度积分计算位移过程中, 由于要经过两次积分, 因此存在一次趋势项和二次趋势项。对于一次线性趋势项, 可以直接通过线性拟合消除; 对于二次趋势项, 可通过多项式拟合进行消除。冲击信号中, 去除一次项趋势项前后的信号对比如图 1 所示。从图 1a 可以明显看出, 趋势项随时间推移而持续增大, 信号失真严重; 随机振动信号中, 去除二次趋势项前后对比如图 2 所示。由于图 2 中的两对比信号已经去除了一次项, 在进行二次积分后, 二次趋势项去除前后对比起来并不明显, 但为保障积分结果的准确性, 去除二次项还是必要的。

1.1.2 平滑数据

由于环境干扰以及测试时的不确定性, 一般在数据采集过程中, 数据采集仪所采集的加速度信号中免不了有环境噪声, 则未经处理的时域曲线是不平滑的, 噪声过大必然会影响分析的准确性^[16]。因此应选择合适的数据平滑方法, 使时域曲线变得平滑, 去除噪声的干扰, 还原真实的数据。常用平滑数据方法主要有回归平滑法、移动窗口平均法、移动窗口拟合多

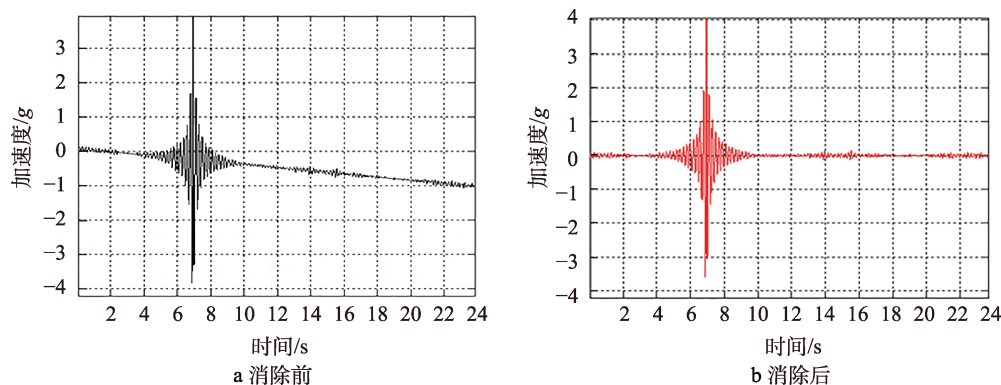


图1 冲击信号消除一次趋势项前后对比

Fig.1 Comparison chart of shock signal (a) before and (b) after eliminating primary trend term

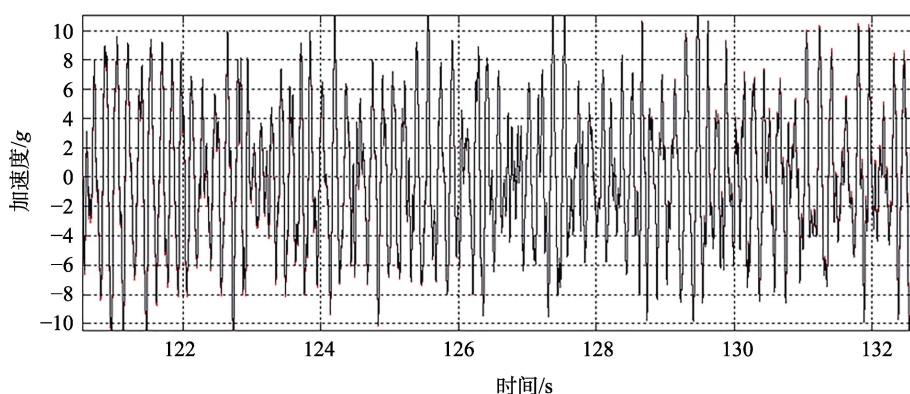


图2 随机信号消除二次趋势项前后对比

Fig.2 The comparison chart of random signal before and after eliminating quadratic trend term

项式法、小波变换法等。此次处理随机振动信号选择的是移动窗口平均法,数据平滑处理前后的曲线对比如图3所示。由图3可知,通过平滑处理,曲线中的不规则尖峰被平滑为光滑的曲线。

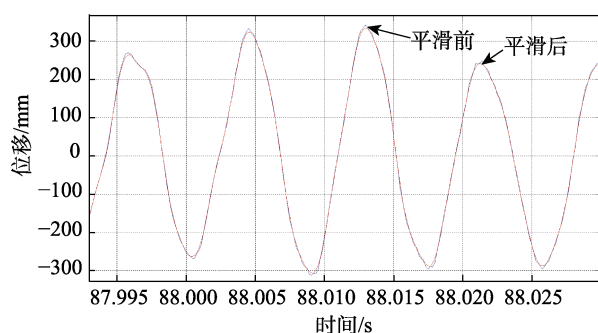


图3 随机振动信号平滑前后对比

Fig.3 The comparison chart of random signal before and after with smooth signal

1.2 加速度积分算法及试验验证

1.2.1 时域积分算法

时域积分算法是将处理好的时域加速度数据进行二次积分,从而得到位移数据。

假设测得的某一加速度信号为 a :

$$a(t) = f(t) + \varepsilon \quad (1)$$

其中 ε 为测量误差。

一次积分得:

$$v(t) = \int a(t)dt = \int (f(t) + \varepsilon)dt = \int f(t)dt + \varepsilon t + \zeta \quad (2)$$

二次积分:

$$s(t) = \int v(t)dt = \int (f(t) + \varepsilon)dt = \int \left(\int f(t)dt \right) dt + \frac{1}{2} \varepsilon t^2 + \zeta t + \eta \quad (3)$$

经过二次积分得到位移 s 。由式(3)可知,多次积分后,测量误差 ε 的作用被放大,导致位移 s 的结果与真实情况有很大偏差。因此,在积分前需要先去除加速度信号中的测量误差等直流分量。

去除直流分量的方法一般是去除信号的均值,此时加速度信号为:

$$a(t) = f(t) - \bar{a} \quad (4)$$

某扫频试验中采集到的加速度信号如图4所示。对加速度数据进行一次项及二次项去除,利用梯形积分直接进行二次积分得到的位移结果如图5所示。由图5可知,二次计算得到的位移数据仍有较大的趋势项干扰。因此,在一次积分得到速度数据后,仍要进行趋势项的消除,然后再进行积分,由此得到的位移数据如图6所示。

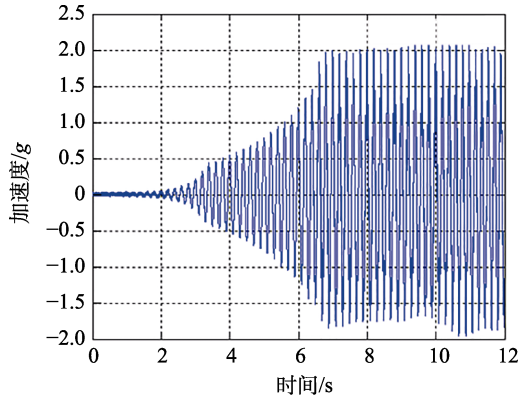


图 4 采集到的加速度信号
Fig.4 Collected acceleration signal

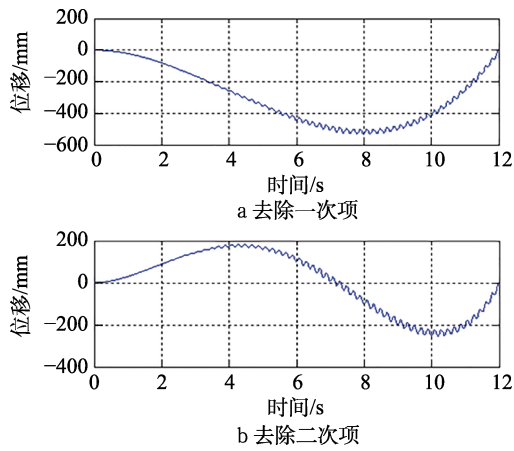


图 5 原始数据去除一次项及二次项后得到的位移数据
Fig.5 The displacement data obtained by removing the first or second terms from the original data: a) removing first terms; b) removing second terms

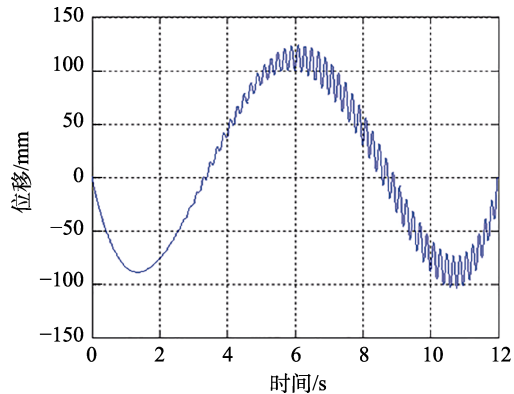


图 6 速度数据去除趋势项后得到的位移数据
Fig.6 Displacement data obtained by removing trend term from velocity data

由图 6 可以看出,虽然在对加速度数据一次积分后去除了趋势项,但积分后的位移数据仍有趋势项存在。经分析可知,该趋势项由低频位移干扰造成,通过傅里叶变换在频域内对数据进行分析,如图 7 所示。可以发现,低频干扰主要集中在 3 Hz 以下。对位移数据进行通带滤波,得到的最终位移数据如图 8 所示。

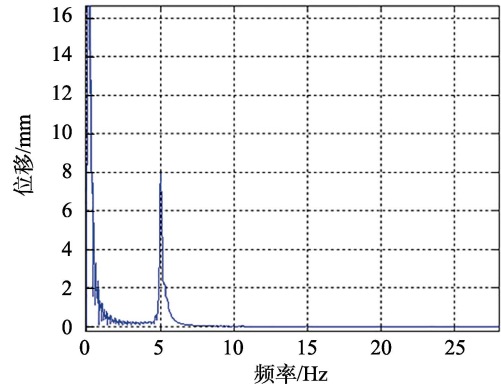


图 7 位移数据的频谱分析
Fig.7 Spectrum analysis of displacement data

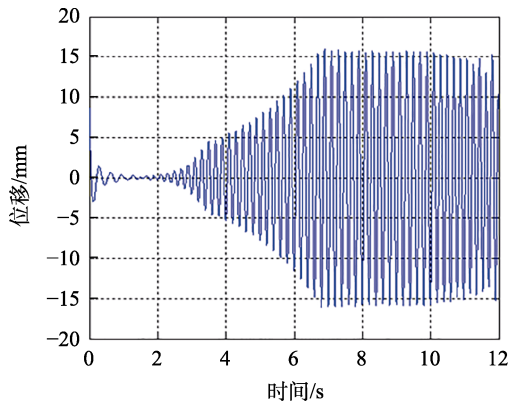


图 8 滤波后的时域积分位移数据
Fig.8 Time domain integral displacement data after filtering

1.2.2 频域积分算法

频域积分算法是将时域数据通过傅里叶变换转换为频域数据,在频域中解决时域计算无法解决的响应问题,得到精确解^[17-19]。在振动加速度测试中,通过傅里叶变换得到加速度信号的频域数据,再进行积分,积分频谱图中无用的部分即是趋势项,进而将其剔除。频域积分结果通过傅里叶逆变换,就可以得到时域的积分结果,即位移数据。

对于某一加速度信号 a ,经傅立叶变换得到其频域值:

$$A(k) = \sum_{k=0}^{N-1} a_n e^{-2\pi k j r / N} \quad (5)$$

一次积分得:

$$V(r) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2\pi k j \Delta f} H(k) A(k) e^{2\pi k j r / N} \quad (6)$$

二次积分得:

$$S(r) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(2\pi k \Delta f)^2} H(k) A(k) e^{2\pi k j r / N} \quad (7)$$

其中:

$$H(k) = \begin{cases} 1 & f_m \leq k \Delta f \leq f_n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A(k)$ 为加速度 a 的频域转换; $V(k)$ 为速度 v 的频域转换; $S(r)$ 为位移 s 的频域转换; Δf 为频率

的分辨率; j 为虚数单位; f_m 为下限截止频率; f_n 为上限截止频率。

由式(6)、(7)可知,频域积分时,数据测量误差的作用在积分后无放大,此时计算结果较频域积分算法会更准确。但是,频域积分时,低频信号中的数据误差会随之作为分母,这样误差在计算后会变得非常大。

一般加速度传感器在低频区域的测试精度较差,因此在使用频域积分算法时,低频区域是一个重要误差来源。

对 1.2.1 小节中所使用的试验数据进行相同的去除趋势项等预处理,再通过频域积分算法进行积分得到位移数据,如图 9 所示。将频域积分与时域积分的数据结果对比,如图 10 所示。由图 10 可知,预处理后的时域积分数据结果与频域积分数据结果十分接近,并没有较显著的差异。

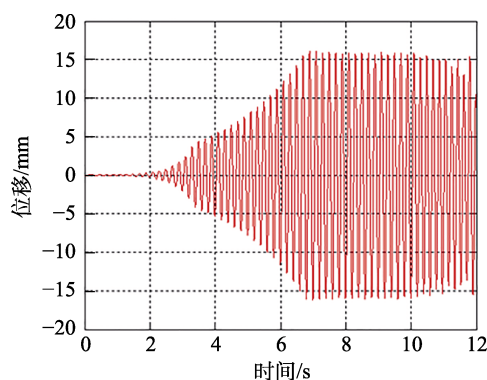


图 9 滤波后的频域积分位移数据

Fig.9 Filtered frequency domain integral displacement data

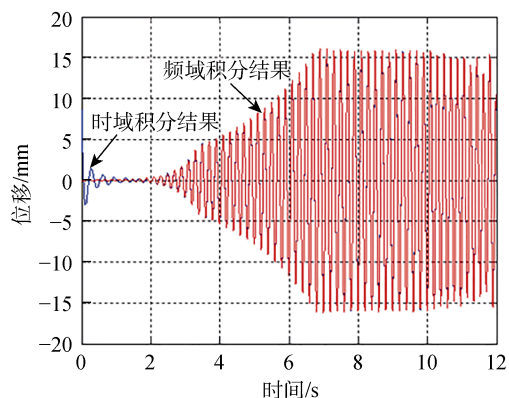


图 10 时域频域积分位移数据对比

Fig.10 Comparison of time and frequency domain integral displacement data

1.3 试验开展与数据采集

为进一步验证时域积分算法和频域积分算法这两种积分算法的准确度,以及两种积分算法能否满足不同工况下位移测量的需要,设定扫频振动试验、随机振动试验、半正弦冲击试验和冲击响应谱试验等 4 种不同试验典型的振动及冲击试验条件,对每种试验条件分别开展试验,并同步进行加速度数据采集和激光位移数据采集。试验开展与数据测量采集方式如图 11 所示。将被测品刚性固定在激振设备上,以实现各种试验条件。为加强测试的准确性,将测量加速度传感器刚性固定于被测品的待测点,再利用激光位移传感器,将激光测点直接对焦于加速度传感器表面上。

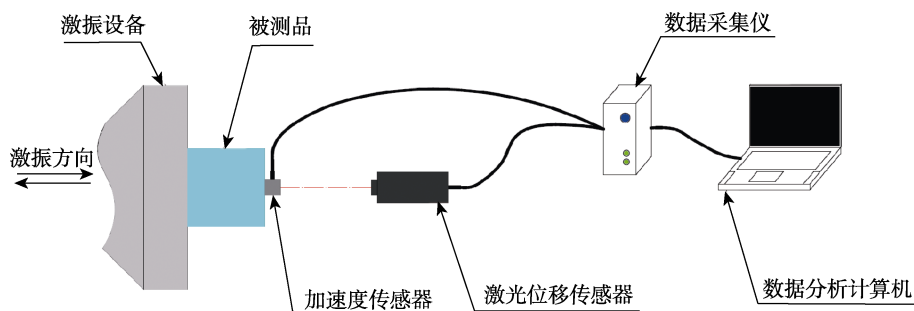


图 11 试验开展与数据测量采集方式

Fig.11 Schematic diagram of test development and data acquisition

2 结果及分析

2.1 积分算法的试验验证

在不同工况下,利用不同积分算法得到的试验结果如图 12—14 所示。由图可知,不同积分结果与激光测定结果数据基本重合,说明了积分结果的精确性。

2.2 误差结果分析

在扫频振动、随机振动、半正弦冲击、冲击响应谱等不同工况下的最大位移处,利用时域积分、频域

积分、激光直接测量得到的位移结果见表 1。以激光位移传感器测试结果为基准,时域及频域积分计算误差见表 2。由表 2 可知,无论是时域积分还是频域积分,加速度积分计算得到的位移最大误差均小于 5%,符合实际应用需求。

2.3 误差来源分析

在振动测试和信号采集过程中,由于环境中各种因素的干扰,导致所采集到的加速度数据中存在各种噪声信号和直流分量的数据。经过分析,总结出此次信号误差来源主要包含以下几项。

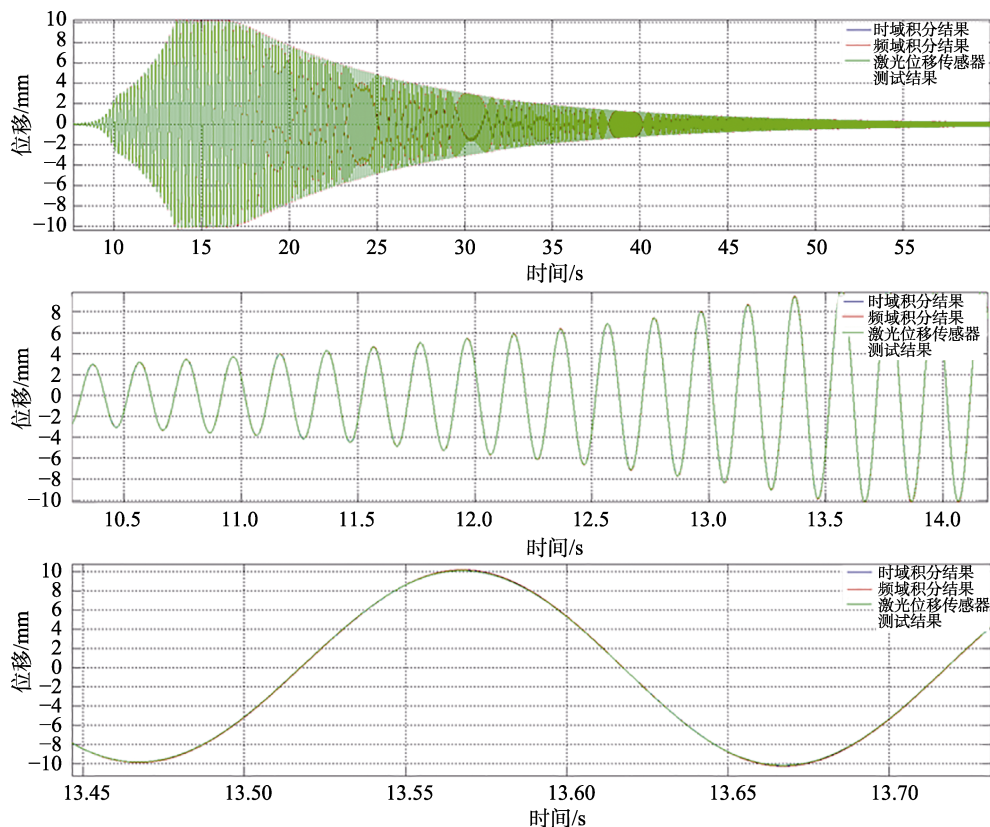


图 12 扫频条件下时域积分结果、频域积分结果与激光测量位移数据对比

Fig.12 Comparison of time, frequency domain integral displacement data and laser measured displacement data under swept frequency condition

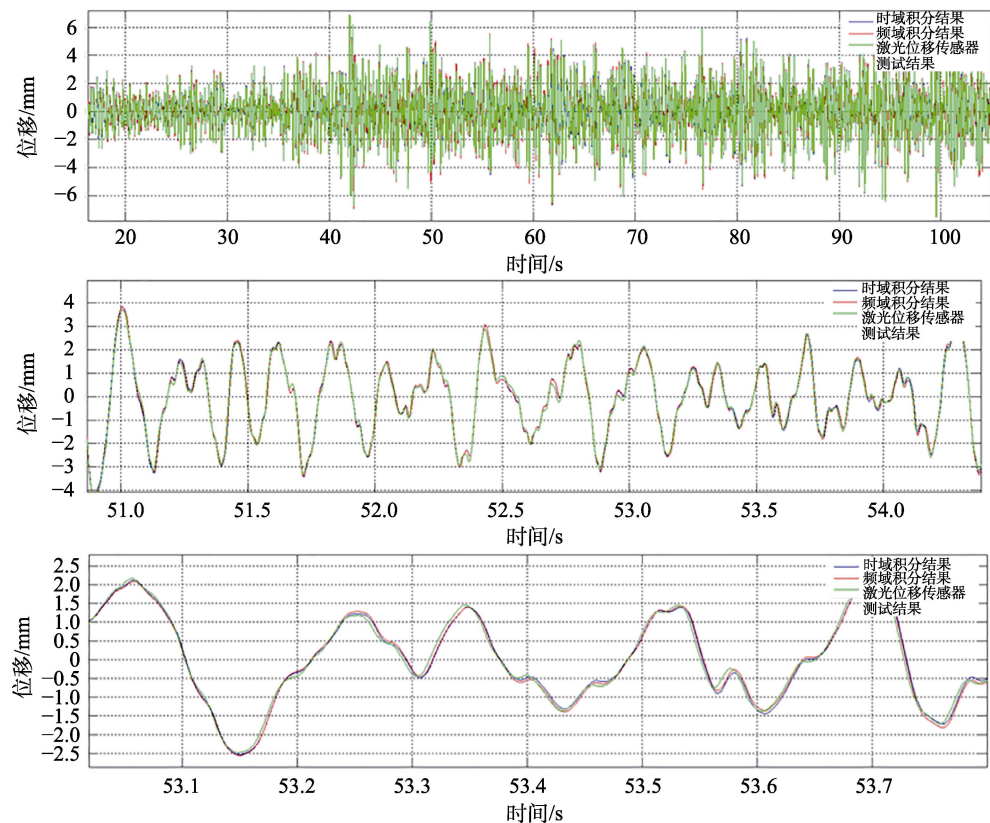


图 13 随机振动条件下时域积分结果、频域积分结果与激光测量位移数据对比

Fig.13 Comparison of time, frequency domain integral displacement data and laser measured displacement data under the condition of random vibration

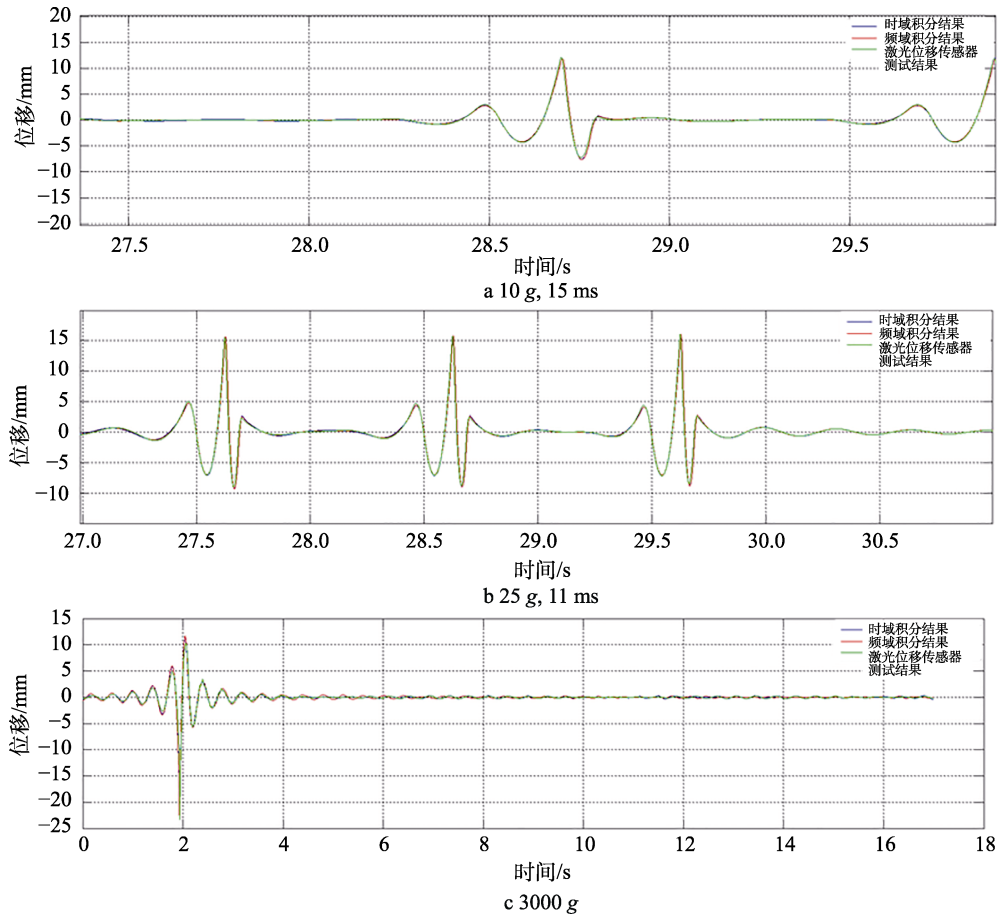


图 14 冲击响应谱条件下时域积分结果、频域积分结果与激光测量位移数据对比

Fig.14 Comparison of time, frequency domain integral displacement data and laser measured displacement data under the condition of shock response spectrum

表 1 不同工况下计算及测量得到的最大位移处数值

Tab.1 The maximum displacement value calculated and measured under different working conditions

	扫频振动	随机振动	半正弦冲击 1	半正弦冲击 2	冲击响应谱	mm
时域积分	10.243	6.727	11.903	16.039	22.215	
频域积分	10.262	6.627	11.917	16.038	22.661	
激光测量	10.164	6.903	12.079	15.976	23.284	

表 2 时域及频域积分相对误差大小

Tab.2 Relative error of time domain and frequency domain integration

	扫频振动	随机振动	半正弦冲击 1	半正弦冲击 2	冲击响应谱	平均误差	%
时域积分	0.78	2.55	1.46	0.394	4.6	1.96	
频域积分	0.96	4.00	1.34	0.388	2.7	1.88	

1) 传感器本身存在误差。动态误差：由于传感器的结构所致，其对于快速响应时有一定的阻尼，会导致响应时间延迟、振幅失真和相位失真；频率失真误差：频率范围是指传感器正常工作的频带，传感器测试到的振动信号在这个频带外的分量可能会远大于或小于实际振动信号的分量，被测量的振动信号频率超出仪器使用频率范围时，测量结果将产生重大误差。

2) 环境误差。影响加速度传感器使用精度的环

境因素包括温度、湿度、噪声、电磁干扰等，即便对信号进行滤波等降噪预处理，也不可能完全去除信号中的干扰。

3) 使用误差。较大尺寸和质量的传感器特别会对一些试验模型产生较大的附加质量影响，致使测试结果出现较大误差。

4) 数据采样频率引起的误差。在积分计算过程中，频率分辨率越高，积分计算精度越高。因此，设

置较高的采样频率将会降低计算结果的误差,而较低的采样频率将引起较大的误差。

5) 应用误差。试验人员操作过程中的操作误差,包括传感器安装固定不牢固、安装位置偏差、安装角度偏差等。

6) 数字信号处理过程中加速度积分误差。时域积分算法中,在试验中测试所采集到的加速度数据中包含着环境噪声和直流分量,即便对信号进行去除趋势项、平滑数据等预处理,也不能完全去除所有引起误差的数据。同时,在时域积分时,残余的测量误差经过2次积分,会被放大,导致积分得到的位移结果存在误差。频域积分算法中,由式(7)可知,分母的 $(2\pi k\Delta f)^2$ 项导致积分精度具有低频敏感性。因此,在对采集到的加速度信号进行频域积分后,加速度数据低频区域的测量误差会被放大,高频区域的测量误差会被缩小,表现为低频区域的幅值增大,而高频区域的幅值衰减。而加速度传感器的自身属性导致其精度在低频区域较差,因此,在频域积分时的误差主要源自加速度数据的低频区域。

2.4 频率适用范围分析

通过分析可知,在确定频率适用范围时,一方面,应考虑到加速度的幅频特性,令被测加速度的信号频率落在传感器正常工作频率的范围区间,从源头上避免测量过程中引入的直接测量误差;另一方面,应提高加速度信号的采样频率,来提高计算精度。

此外,由于频域积分精度对低阶截止频率敏感,因此在确定频域积分算法的频率适用范围时,应关注低频截止频率^[20]。当低频截止频率选择偏高时,此时虽然计算精度得到提高,但是会过滤掉被测品结构的部分真实低频位移;当低频截止频率选择偏低时,外部环境等干扰因素会导致积分位移曲线在低频处呈现出明显的时域幅值振荡,即出现偏离真实位移较大的情况。在一般工程中,经常关注的是被测品结构的最大位移。由于其最大位移往往发生在其结构的一阶共振频点处,因此一般在工程中确定低频截止频率时,一种是采用对低频进行位移标定的方法;另外一种是采用将结构共振点附近较为关注的频率作为下限频率的方法,在避免不必要频率影响同时,提高算法计算的准确度。

3 结论

文中利用不同算法对加速度积分求解位移进行了计算及分析,并与激光位移传感器的测量结果进行对比,验证了积分算法的准确性,同时对积分算法的误差来源进行了分析。研究结果表明,在动力学环境试验中,时域积分算法适用于噪声和直流分量可忽略的情况,频域积分算法适应于低频误差较小的情况。在确定频率适用范围且对加速度信号数据进行必要、

有效的预处理后,其位移积分结果具有较高的准确性,能够满足一般工程实际测试需求。

参考文献:

- [1] 王宝元, 邵小军. 炮口振动响应实验测试方法综述[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 31(3): 112-116.
WANG Bao-yuan, SHAO Xiao-jun. Summarization of the measurement method for muzzle vibration responses[J]. Journal of Gun launch & control, 2010, 31(3): 112-116.
- [2] 吴叶晨, 陶俊勇, 蒋瑜, 等. 超高斯振动加速度信号的积分方法与试验研究[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(S2): 310-314.
WU Ye-chen, TAO Jun-yong, JIANG Yu, et al. Integration methods and experimental study for super-Gaussian vibration acceleration signals[J]. Journal of data acquisition and processing, 2012, 27(S2): 310-314.
- [3] 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(S1): 73-76.
CHEN Pei-yong, WANG Tong. Time frequency domain integration method of dynamic acceleration signal[J]. Jiangsu aviation, 2011(S1): 73-76.
- [4] 王建锋, 马建, 马荣贵, 等. 动位移的加速度精确测量技术研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 201-202.
WANG Jian-feng, MA Jian, MA Rong-gui, et al. Study on calculation of dynamic displacement from time-frequency integration of acceleration[J]. Computer science, 2010, 37(12): 201-202.
- [5] 周英杰. 加速度测试积分位移算法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
ZHOU Ying-jie. A study on integral algorithm for acceleration test to get displacement and application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 何鹏举, 冯亮. 加速度信号随机噪声及趋势项实时消除方法研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(14): 18-22.
HE Peng-ju, FENG Liang. Study on the real-time elimination method of random noise and trend terms in acceleration signal[J]. Electronic design engineering, 2013, 21(14): 18-22.
- [7] 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.
LI Zhi-yong. The method of the vibration signal process based on frequency domain integration[J]. Auto mobile science & technology, 2009(5): 28-30.
- [8] 刘继承, 徐庆华, 查建新. 用加速度传感器测量振动位移的方法[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 69-71.
LIU Ji-cheng, XU Qing-hua, ZHA Jian-xin. Method of vibration displacement measured with acceleration sensor[J]. Modern radar, 2007, 29(5): 69-71.
- [9] 职保平, 马震岳, 王溢波, 等. 用于水电站振动信号的积分算法[J]. 振动测试与诊断, 2011, 31(5): 610-613, 665.
ZHI Bao-ping, MA Zhen-yue, WANG Yi-bo, et al. Inte-

- gration algorithm for hydropower house vibration signal[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2011, 31(5): 610-613, 665.
- [10] 李东文. 振动加速度信号直接数字积分的 DSP 实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
LI Dong-wen. Realization of direct digital integration method for vibration acceleration signal based on DSP[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [11] 蔡烽, 王大元. 基于 EMD 的加速度信号积分变换[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 12-13.
CAI Feng, WANG Da-yuan. Acceleration integration transformation based on EMD[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2006, 27(S1): 12-13.
- [12] 唐世振. 基于 MATLAB 的振动信号采集与分析系统的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
TANG Shi-zhen. A vibration signal acquisition and analysis system based on MATLAB[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [13] 林楠, 李东升, 李宏男. 基于零初值的测试加速度积分速度与位移的方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 602-614.
LIN Nan, LI Dong-sheng, LI Hong-nan. Novel integration method of measured acceleration to velocity and displacement based on zero initial condition[J]. Scientia sinica (technologica), 2016, 46(6): 602-614.
- [14] 初昀, 常敏, 王戈. 基于油田示功仪的加速度信号处理方法[J]. 数据通信, 2014(1): 43-46.
CHU Yun, CHANG Min, WANG Ge. Acceleration signal processing method based on oil field indicator[J]. Data communications, 2014(1): 43-46.
- [15] 章萌, 张增利, 唐云龙. 空气加热器振动信号的测量与处理研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2031-2032, 2036.
ZHANG Meng, ZHANG Zeng-li, TANG Yun-long. Study on measurement and processing of vibration signal for air heater[J]. Computer measurement & control, 2014, 22(7): 2031-2032, 2036.
- [16] 陈海龙, 汪伟, 栾军英. 振动信号数值积分分析及积分误差分离方法研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(9): 1319-1323.
CHEN Hai-long, WANG Wei, LUAN Jun-ying. Numerical integration of vibration signal analysis and integral error separation method[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2014, 33(9): 1319-1323.
- [17] 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, 65.
LI Qiang, WANG Tai-yong, XU Yong-gang. The modification of the vibration parameter transform based on frequency domain integration[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2005(9): 60-61, 65.
- [18] 许志杰. 有理拟合最小二乘复频域模态参数识别研究及软件实现[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
XU Zhi-jie. Research of modal parameter identification based on rational fitting least squares complex frequency domain method and software implementation[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [19] 徐庆华. 试采用 FFT 方法实现加速度、速度与位移的相互转换[J]. 振动测试与诊断, 1997(4): 30-34.
XU Qing-hua. Conversion between vibrational acceleration, velocity and displacement using FFT[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 1997(4): 30-34.
- [20] 张志, 孟少平, 周臻, 等. 振动台试验加速度积分方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(4): 627-633, 725.
ZHANG Zhi, MENG Shao-ping, ZHOU Zhen, et al. Numerical integration method of acceleration recodes for shaking table test[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2013, 33(4): 627-633, 725.