

文章编号: 1671-7449(2024)02-0120-09

基于冲击法的压电式力传感器灵敏度研究

王振, 范海艇*, 施娟, 王军, 李政

(上海市质量监督检验技术研究院, 上海 201114)

摘要: 为了开展冲击力校准装置下压电式力传感器动态灵敏度的校准, 介绍了基于自由落体的落锤冲击力模型和基于空气轴承悬浮支撑的水平式质量块冲击碰撞的模型; 通过4阶Butterworth低通滤波, 研究加速度信号波形的滤波平滑, 比较了不同截止频率的滤波效果; 通过激光测振仪和标准加速度计测量加速度的对比试验, 研究加速度绝对测量法与比较测量法对力传感器动态灵敏度校准精度的影响。试验结果表明, 激光测振仪测量加速度须通过微分解调, 要选择合适上限截止频率的4阶Butterworth低通滤波器进行滤波平滑处理; 激光干涉绝对法复现的动态力精度为2%, 加速度计比较法复现的动态力精度为4%; 激光干涉绝对法校准的灵敏度波动性比加速度计比较法校准的灵敏度波动性小。

关键词: 灵敏度; 力传感器; 校准; 动态特性; 巴特沃斯滤波器

中图分类号: TB936

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.02.004

引用格式: 王振, 范海艇, 施娟, 等. 基于冲击法的压电式力传感器灵敏度研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 120-128.

WANG Zhen, FAN Haiting, SHI Juan, et al. Study on sensitivity of piezoelectric force sensors based on impact method[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2): 120-128.

Study on Sensitivity of Piezoelectric Force Sensors Based on Impact Method

WANG Zhen, FAN Haiting*, SHI Juan, WANG Jun, LI Zheng

(Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 201114, China)

Abstract: In order to calibrate the dynamic sensitivity of piezoelectric force sensors under the impact force calibration device, the drop hammer impact force model based on free-falling bodies and the horizontal mass block impact collision model based on air-bearing suspension support was first introduced. Then, through 4th order Butterworth low-pass filtering, the filtering smoothness of acceleration signal waveform was studied, and the filtering effects of different cut-off frequencies were compared. Finally, a comparative experiment was conducted on the measurement of acceleration using a laser vibrometer and a standard accelerometer to investigate the impact of the absolute acceleration measurement method and comparative measurement method on the accuracy of dynamic sensitivity calibration of force sensors. The experimental results indicate that the acceleration measurement of the laser vibration meter must be achieved through differential demodulation, and a 4-order Butterworth low-pass filter with an appropriate upper cut-off frequency should be selected for filtering and smoothing processing; The dynamic force accuracy reproduced by the absolute laser interference method is 2%, and the dynamic force accuracy reproduced by the accelerometer comparison method is 4%; The

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 上海市质量监督检验技术研究院青年科技启明星资助项目(QMX-2022-10-JL)

作者简介: 王振(1988-), 男, 中级工程师, 主要从事动力学、加速度和冲击计量测试研究。E-mail: wangzhen@sqi.org.cn。

* 通信作者: 范海艇(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事动力学计量与校准技术研究。E-mail: fanht@sqi.org.cn。

sensitivity fluctuation of laser interference absolute method calibration is smaller than that of accelerometer comparison method calibration.

Key words: sensitivity; force sensor; calibration; dynamic characteristic; Butterworth filter

0 引言

压电式力传感器在航空零部件疲劳测试、飞机起落架着陆冲击力测试和汽车碰撞试验等领域中有着广泛应用。国内外一般针对压电式动态力传感器的校准有正弦力法、脉冲冲击法和阶跃力法等,并建立了相应的校准装置^[1-3]。阶跃力法中常用的负阶跃力可通过材料脆性断裂实现,可测试的动态力幅值较高,可实现宽频灵敏度的校准,但是校准力值和下降时间受断裂材料及其尺寸的选择影响。张逸飞等^[4]研究了快开阀阶跃压力装置上升时间的影响因素,结果表明,压力上升时间与低压腔长度呈正相关。正弦力法基于电动振动试验系统,通过稳态正弦激励信号对传感器进行校准,不仅具有较高的灵敏度和测量精度,而且接近实际零部件周期频率测试的工况,但是力幅值受限于正弦推力的限制,测试的动态力幅值相对较低。脉冲冲击法常用的设备为落锤式冲击力校准装置,通过撞击不同材质硬度的缓冲垫获得不同时间脉宽的冲击力,不仅符合工程实际测量中碰撞测试情况,而且测试的动态力幅值较大,但是灵敏度、精度和波动误差较大^[5]。江文松等^[6]利用落锤式冲击力校准装置,通过载荷重构的冲击力校准方法,提高了冲击力的测量精度;商一奇等^[7,8]设计改进了落锤式冲击力校准装置的提升和扶正机构及落锤质量块,提高了动态力校准的准确性和重复性,落锤冲击法也广泛应用于动态压力传感器校准;施庆祥等^[9]基于预压水激波管开展了对压力传感器动态校准试验的动态特性研究;顾廷炜等^[10]提出一种基于落锤装置的力监测压力绝对校准方法,可准确测量重锤和活塞杆之间的撞击力,提高了压力校准精度。

传统的落锤脉冲冲击法和正弦力法校准动态力传感器都是通过标准加速度计测量加速度复现动态力^[11,12]。随着激光技术的发展,运用激光干涉技术使得加速度测量达到很高的测量精度^[13]。梁志国^[14]在激光干涉法校准冲击加速度时,研究了微分运算的滤波问题,提出了一种基于冲击速度曲线阶跃上升时间的局域平均滤波差分方法,

并与 ISO 标准推荐方法总体相符合;孟峰等^[15]在落锤脉冲式动态力校准装置上研究了应变式力传感器的动态特性,通过激光干涉仪测量加速度,使得应变式动态力测量不确定度进一步提高。

现代较先进的冲击装置为水平式瞬态碰撞冲击力校准装置,其原理是通过高压弹簧动力锤冲击其中一个质量块,在空气轴承悬浮支撑的导轨上沿轴向无摩擦冲击碰撞另外一个安装了动态力传感器的质量块,产生冲击力,激光测振仪或加速度计测量质量块冲击加速度,通过质量和冲击加速度复现动态力。采用水平碰撞式冲击力校准装置可以较小的尺寸结构获得较大的力值、可以高精度控制两质量块的运行轨迹,不受质量块重力加速度影响、具有较宽的量程和脉宽。卢小犇等^[16]详细介绍了横向气浮冲击结构的水平脉冲力法校准装置的相关结构和工作原理,同时介绍了基于外差式激光干涉仪的绝对测量法的原理;Kobusch 等^[17]利用水平冲击激励,进行了 3 种数学模型的力传感器动态校准的研究,比较分析不同数学模型的适用性,开展了估计传感器模型参数的方法研究。

本文以 Kistler 9321 型压电式单分量力传感器为例,利用水平冲击力校准装置,从时域方面开展对压电式力传感器动态灵敏度校准的研究,比较激光测振仪的加速度绝对法和加速度计的比较法复现冲击力的误差,研究压电式力传感器在冲击碰撞测试下的动态特性。

1 脉冲冲击法力传感器校准模型

常见的落锤式冲击力校准装置如图 1 所示。其中上图为配套激光测振仪绝对法复现加速度,下图为配套标准加速度计比较法复现加速度。主要区别为激光干涉仪绝对法测量加速度为非接触式,加速度直接溯源到长度和时间等基本量,测量精度高;标准加速度计测量加速度为接触式测量,测量精度相对较低。动态力传感器安装于隔振地基的砧座上,一定质量的锤头从高处自由落下,通过碰撞产生冲击力传递给动态力传感器。

可将压电式力传感器等效一个线性二阶单自由度模型,缓冲垫假设为单自由度弹簧阻尼系

统,其弹性力为 F'_k ;阻尼力为 F'_c ;其中 m_c 为落锤质量; m_b 为压电式力传感器顶部等效质量; m_t 为压电式力传感器底部等效质量; F_k 为压电式力传感器内部的弹性力; F_c 为压电式力传感器的阻尼力; a_c 为通过加速度计或激光测振仪测得的落锤加速度。其受力分析如图 2 所示。

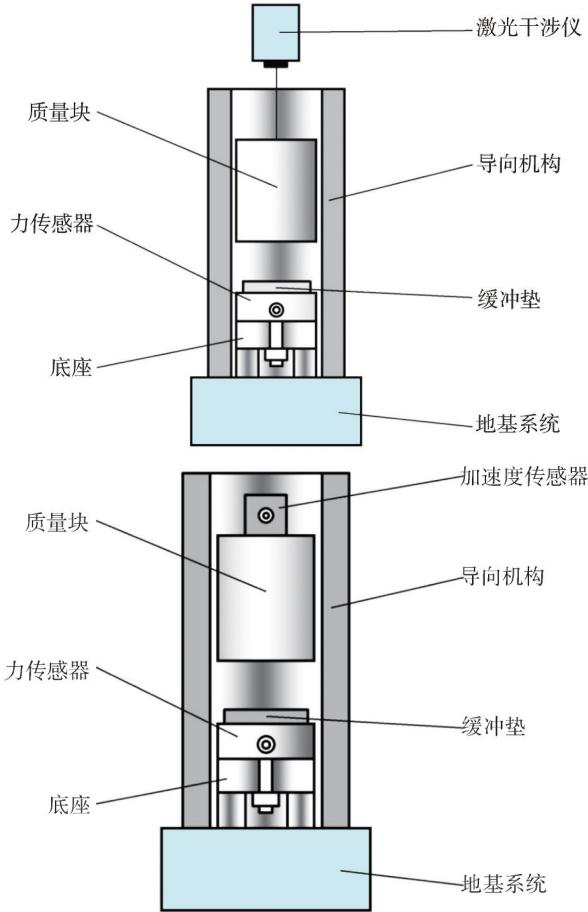


图 1 落锤式冲击力校准装置结构简图

Fig. 1 Structural diagram of drop hammer impact force calibration device

根据达朗贝尔原理,对落锤质量块分析建立动平衡方程为

$$-m_c a_c + F'_k + F'_c = 0, \quad (1)$$

$$F'_k + F'_c = m_c a_c. \quad (2)$$

对力传感器进行分析,建立动平衡方程

$$F'_k + F'_c - (F_k + F_c) - m_b a_b = 0, \quad (3)$$

$$(F_k + F_c) - F_t - m_t a_t = 0. \quad (4)$$

推导得

$$F_k = (F'_k + F'_c) - m_b a_b - F_c, \quad (5)$$

$$F_t = F_k + F_c - m_t a_t. \quad (6)$$

一般落锤质量远大于力传感器端部等效质量,在不考虑 F_c 和压电式力传感器顶部质量的惯

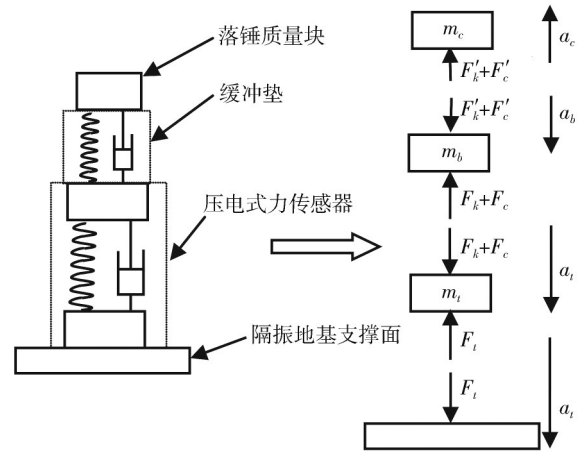


图 2 力传感器受力示意图(落锤式冲击力法)

Fig. 2 Schematic diagram of force sensor (drop hammer impact force method)

性力影响下,把式(2)代入式(5)得

$$F_k = m_c a_c, \quad (7)$$

此即为落锤冲击力校准压电式动态力传感器原理。

水平碰撞动态力校准装置的结构简图如图 3 所示,设质量块 m_2 ;力传感器及连接螺栓为整体刚性;激光测振仪或标准加速度计测得的质量块 m_2 端部加速度为 a_0 ,同样,根据传感器数学模型,得压电式力传感器

$$F_k = m_0 a_0, \quad (8)$$

式中: m_0 为质量块 m_2 和力传感器及连接传感器的螺栓及缓冲垫等在质量块 m_2 上的总质量。此即为水平式冲击力校准动态力传感器原理。

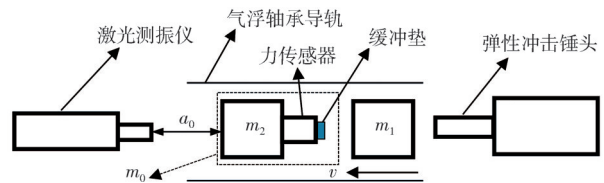


图 3 水平式冲击力校准装置结构简图

Fig. 3 Structure diagram of horizontal impact force calibration device

以水平冲击力校准装置为例,设 S 为电荷放大器上设置的初始灵敏度(一般为出厂参考灵敏度); F 为压电式力传感器输出值,根据传感器灵敏度定义可知,校准灵敏度

$$S_0 = \frac{S \cdot F}{m_0 a_0}. \quad (9)$$

2 试验及结果分析

2.1 标准仪器及设备连接介绍

试验所用的水平式冲击力校准装置如图 4 所

示,为比较激光测振仪和标准加速度计复现的动态力精度,将标准加速度计固定在质量块 m_2 上,同时,通过激光测振仪和标准加速度计测量加速度。质量块 m_2 质量为21.5 kg,称量压电式力传感器及连接传感器的螺栓及橡胶冲击头和标准加速度计质量,得总质量 $m_0=23.13$ kg。选用的高速同步数据采集仪为BK公司的LAN-XI 3050-A-060型数据采集前端和PULSE分析软件系统;加速计适调仪为BK的2647A型电荷电压转换器;选用 Kistler的8002K型标准加速度计;与压电式力

传感器连接的电荷放大器为Kistler的5018型电荷放大器;激光测振仪选用Polytec的OFV-5000高性能控制器,OFV-525激光头。激光测振仪输出的是基于多普勒外差干涉法测得的速度原始信号,加速度信号需经微分调解获得。将力传感器接采集仪通道1;激光测振仪输出速度信号接采集仪通道2;标准加速度计信号接采集仪通道3。选用高中低3种不同橡胶硬度的冲击头,以实现不同时间脉宽的脉冲冲击力,试验时将其螺纹连接到被测压电式力传感器上,如图5所示。

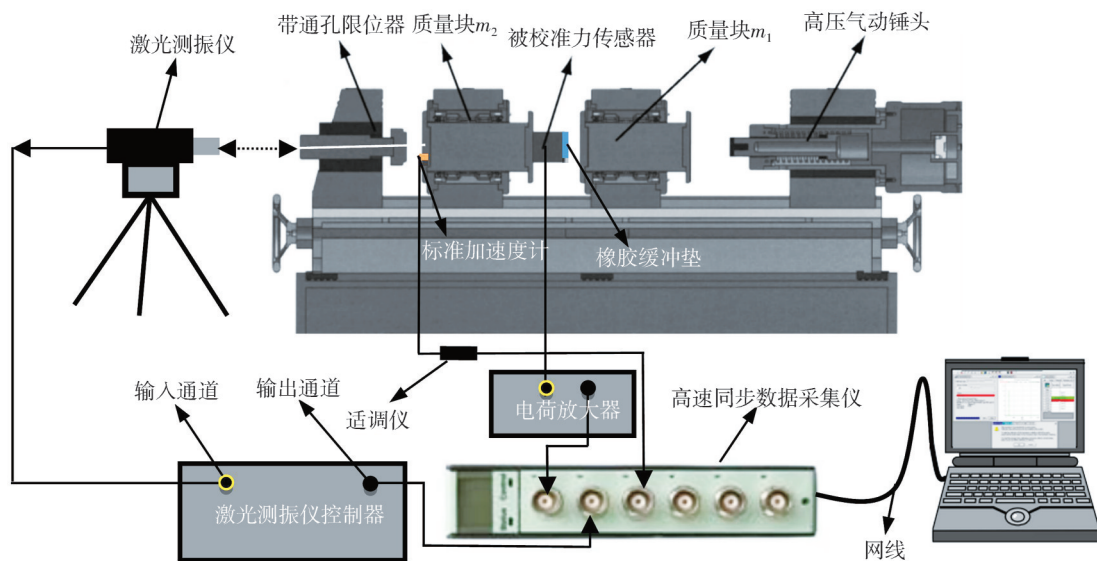


图4 水平式冲击力校准装置及设备连接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of horizontal impact force calibration device and equipment connection



图5 碰撞冲击的橡胶缓冲垫及传感器安装图

Fig. 5 Installation diagram of rubber buffer and sensor for collision impact

2.2 原始信号的采集及分析处理

通过高硬度冲击碰撞头(硬度:90 HA,绿色)进行测试,在电荷放大器上设置出厂参考灵敏度 -3.666 pC/N,PULSE分析软件系统中分析频率设置为6.4 kHz,分析软件系统默认为的采样频率为分析频率的2.56倍,即16 384 Hz。设置Trigger触发并同步采集记录输出信号,导入Matlab数值分析软件中细化波形如图6所示。将通道2的速度信号经一阶差分,微分解调获得加速度信号,如图7所

示。根据JJF1156—2006计量技术规范中对冲击脉宽持续时间的定义,脉冲的物理量上升到某一设定值(峰值的分数值)和下降到该值的时间间隔,对实测脉冲通常取0.1的最大值作为设定值。

分析如下:

1)图6中通道1的半正弦脉冲力脉宽持续时间约为13.93 ms,通道3的标准加速度计的加速度半正弦脉冲持续时间约为13.81 ms,通道2的激光测振仪测得的速度信号的最大值的0.1到最大值的0.9之间时间宽约为13.88 ms,三者时间脉宽相差很小,

而且通过图6可知,脉冲力的峰值发生时间与标准加速度计的加速度峰值发生时间仅仅相差0.2 ms。说明了瞬态碰撞加速度和力传感器输出信号发生的同时性。

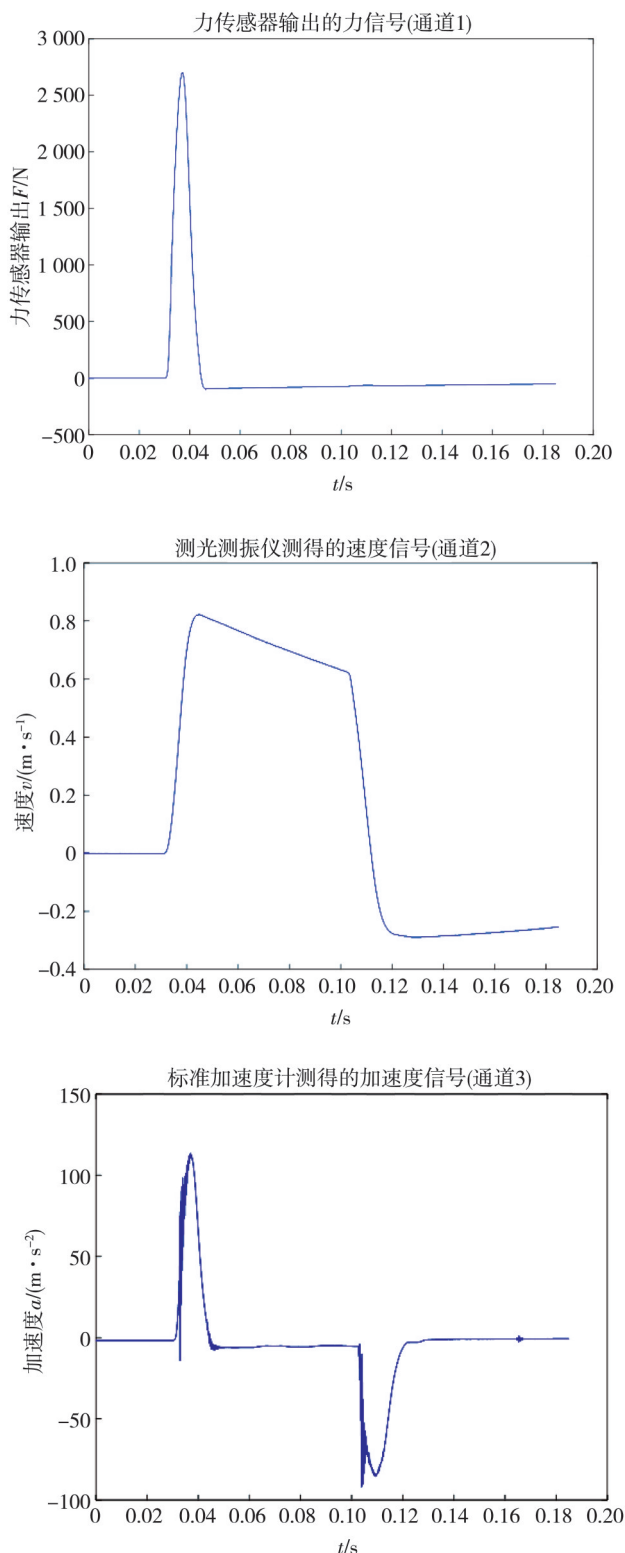


图6 原始信号波形图

Fig. 6 Original Signal Waveform

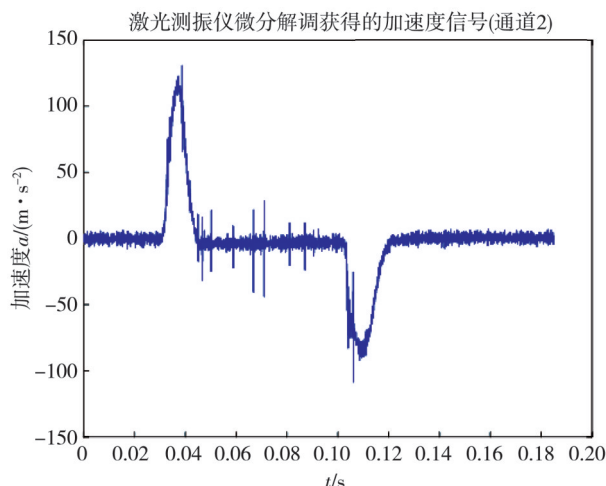


图7 通道2信号微分解调加速度波形图

Fig. 7 Differential Demodulation Acceleration Waveform of Channel 2 Signal

2) 通过图6可知,通道1力传感器输出的力值波形和通道2激光测振仪输出的速度波形非常光滑,而通道3标准加速度计输出信号含有噪声干扰,图像边缘有毛刺不光滑,可通过数字信号滤波进行光滑处理。

3) 图6的通道3标准加速度计输出信号出现倒立的半正弦脉冲波形图,而通道1力传感器输出的力值并没有倒立的半正弦脉冲波形图,其原因是由于质量块在冲击碰撞后经短暂运动碰到装置的弹性保护插销后形成一个反向的加速度半正弦波形,而力传感器并未再次受到反方向的冲击力。弹性保护插销装置结构细节如图5所示。

4) 通过图7可知,通道2的激光测振仪测得的速度信号通过微分解调得到的加速度信号波形图毛刺较大,其主要由于激光光束通过带孔限位器时反光信号较弱,光的散斑效应导致反射回系统的光在短时间内出现短暂中断,含有随机冲击噪声干扰,造成微分解调的波形不光滑。

由于在冲击碰撞过程中,通道1的力传感器输出半正弦信号非常平顺光滑,为了保证校准结果的准确可靠,必须对加速度进行平滑降噪滤波处理。根据加速度信号的频谱分析,干扰噪声主要在低频。

2.3 加速度信号的滤波平滑处理

通过激光测振仪进行冲击振动获得的加速度参数,必须通过相邻采样时刻的数值差分运算。由于量化误差和原始信号混叠随机噪声等干扰,导致加速度信号的波形图不光滑,有毛刺。为获

得真实有效的加速度波形, 必须进行平滑滤波处理。而滤波器及滤波参数的选取及滤波到什么程度, 一直困扰着振动冲击行业, 极大地制约限制了冲击加速度校准准确度的提高。

鉴于巴特沃斯(Butterworth)的通频带内的频域相应曲线很大限度平坦光滑, 在阻频带逐渐下降为零等特点, 通过激光干涉绝对法校准冲击加速度计时, 国家标准^[18]建议使用 IIR 滤波器中的 4 阶递归巴特沃斯(Butterworth)低通滤波器, 针对近似正弦平方的加速度波形, 其截止频率不应大于 $16/T$; 对于高斯形冲击加速度波形, 截止频率不应大于 $5/T$, 其中 T 为脉冲持续时间。通常有

些冲击加速度波是复杂波形形状, 既非高斯形状, 也非正弦平方波形状, 很难确定合适的滤波参数。针对这种情况, 需要有极丰富的实践经验才能选取合适的滤波参数, 以实现获取冲击测试中接近真实峰值的信号。

根据脉冲持续时间 T 约为 14 ms, 则 $5/T$ 约为 357 Hz, $16/T$ 约为 1 143 Hz。设置 4 阶 Butterworth 低通滤波器中的采用频率 F_s 为 16 384 Hz, 终止频率的衰减为 3 dB, 分别研究截止频率 F_c 为 357 Hz 和 1 143 Hz 的时域信号滤波效果, 见图 8 和图 9, Butterworth 滤波器的幅频响应如图 10 所示。

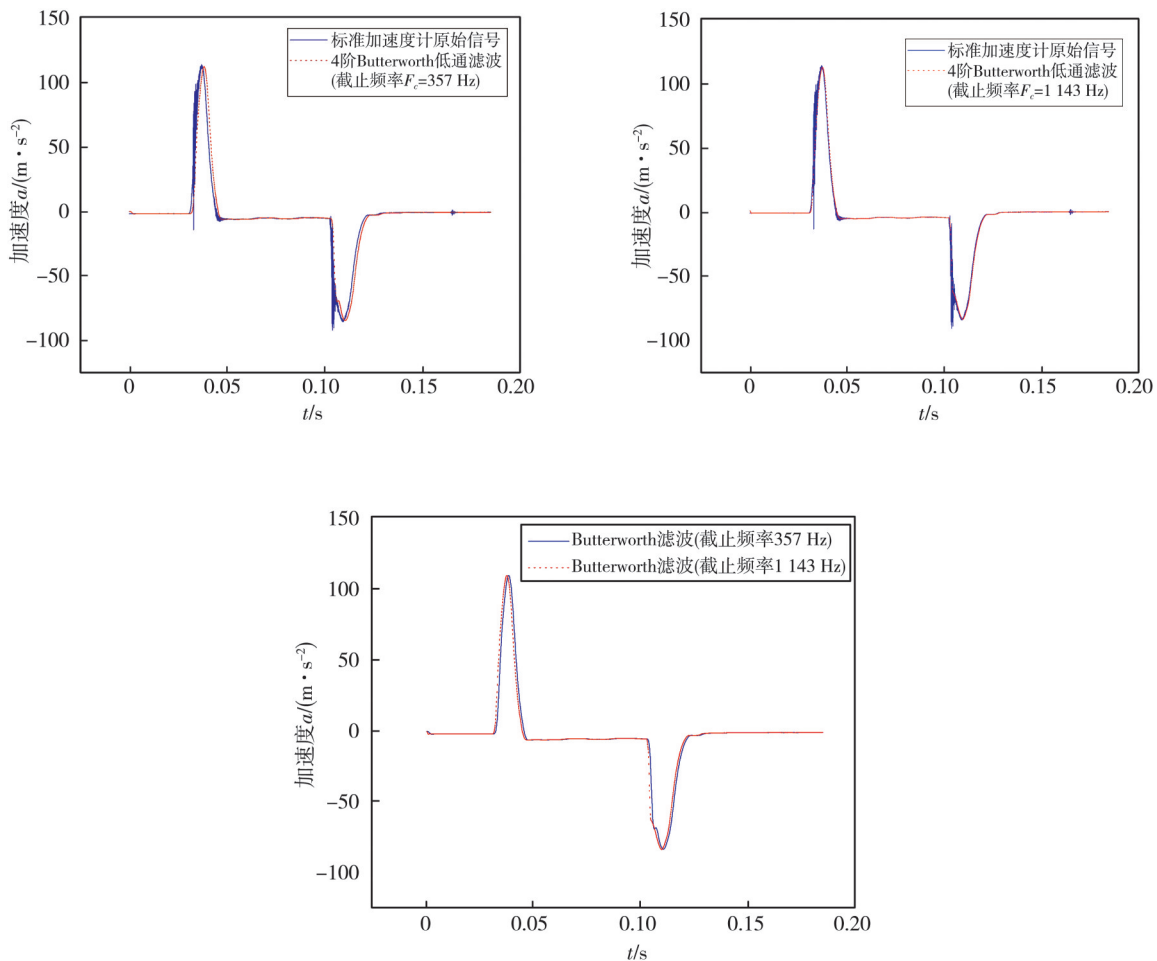


图 8 4 阶 Butterworth 滤波(通道 3)

Fig. 8 4th order Butterworth filtering (channel 3)

通过图 8 和图 9 可知, 对于此次低强度冲击测试, $5/T$ 的截止频率的滤波相对于原始采集信号有明显的相位偏移现象, $16/T$ 的截止频率的设置相对于 $5/T$ 的截止频率的设置对信号的相位偏移较小。实际测试中, 每次冲击碰撞产生的波形

都不相同, 而且不精确, 与标准半正弦波的差异很大, 有可能介于高斯和半正弦平方波形状之间, 滤波器的上限截止频率的具体选择, 需根据实际情况而定。特别对于高强度冲击测试时, 如何选取滤波器类型和参数仍需深入研究。

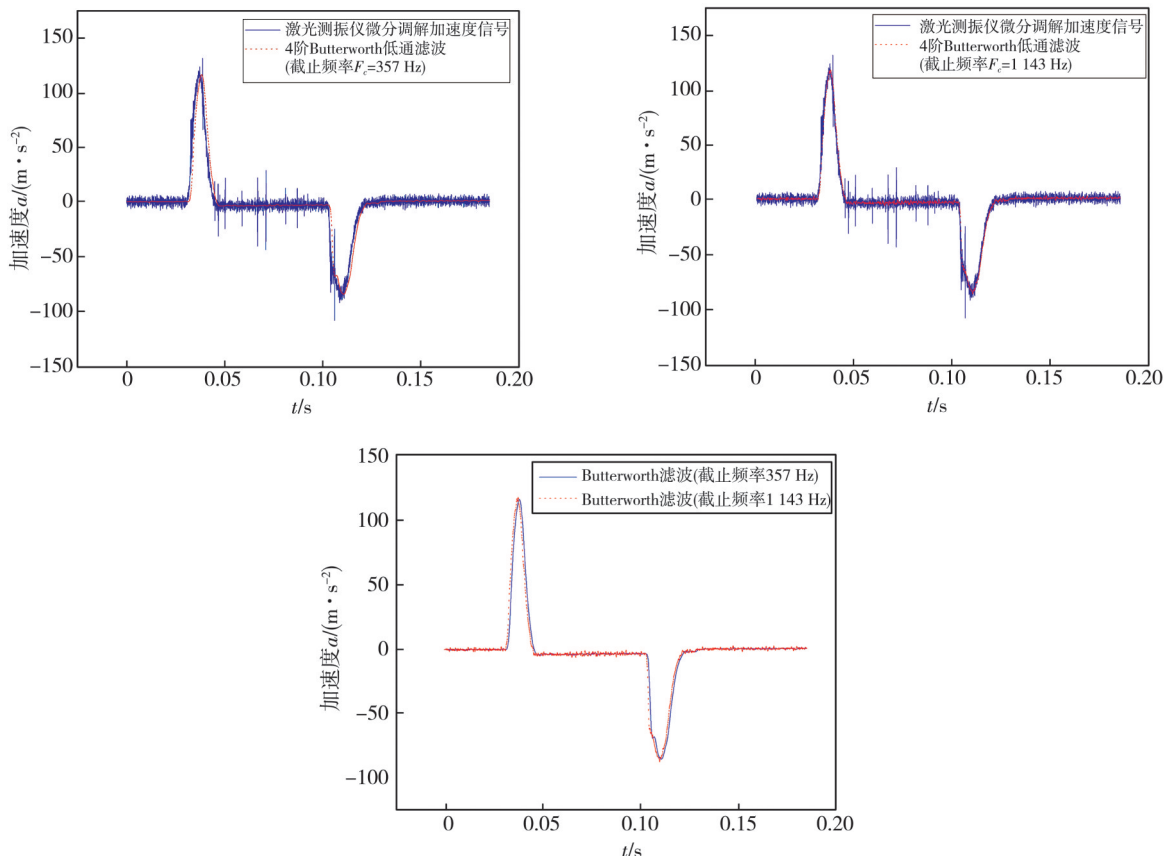


图9 4阶 Butterworth 低通滤波(通道2微分解调信号)

Fig. 9 4th order Butterworth low-pass filtering (channel 2 differential demodulation signal)

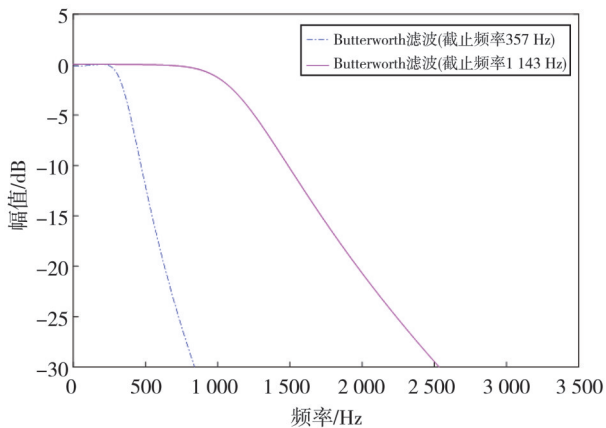


图10 4阶 Butterworth 低通滤波器幅频响应

Fig. 10 Amplitude frequency response of 4th order Butterworth low-pass filter

2.4 力传感器灵敏度的误差及波动

为保证测量精度的可比性,统一设置4阶 Butterworth 滤波器参数,低通截止频率设为1 143 Hz;终止频率的衰减为3 dB;保持滤波一致。同样在电荷放大器上设置出厂参考灵敏度为3.666 pC/N,通过3种不同橡胶硬度的冲击头在2 000~3 000 N范围进行多组测试,数据如表1所示。

以出厂参考灵敏度-3.666 pC/N为参考值,比较标准加速度计和激光测振仪的灵敏度误差,如图11所示。

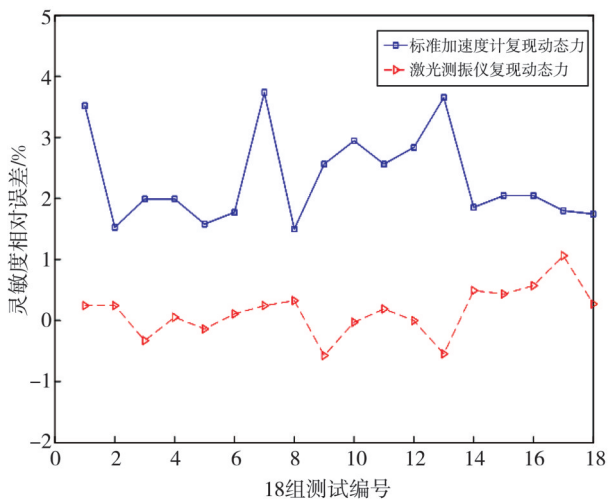


图11 力传感器灵敏度误差图

Fig. 11 Sensitivity error diagram of force sensor

分别计算标准加速度计和激光测振仪测得的18组灵敏度均值,根据如下贝塞尔公式分别计算灵敏度标准差

$$s(s_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=18} (s_{0i} - \bar{s}_0)^2}{n-1}}, \quad (10)$$

式中： s_{0i} 为第 i 次灵敏度测量结果； \bar{s}_0 为 18 组灵敏度平均值； $s(s_0)$ 为灵敏度的标准差。

表 1 3 种不同橡胶硬度冲击头测试数据表

Tab. 1 Test data of three different rubber hardness impact heads

试验次数	通道 1 峰值/N	通道 3 峰值/(m·s ⁻²)	根据 1 和 3 通道计算灵敏度/(pC·N ⁻¹)	通道 2 峰值/(m·s ⁻²)	根据 1 和 2 通道计算灵敏度 S ₀ /(pC·N ⁻¹)	脉宽持续时间/ms
冲击头 (绿色) 90HA	1	2 703.4	112.9	3.795	116.6	3.675
	2	3 086	131.4	3.722	133.1	3.675
	3	3 068.8	130.1	3.739	133.1	3.654
	4	2 920.6	123.8	3.739	126.2	3.668
	5	3 005.3	127.9	3.724	130.1	3.661
	6	2 843.3	120.8	3.731	122.8	3.670
冲击头 (红色) 50HA	1	2 343.9	97.68	3.803	101.1	3.675
	2	2 378.3	101.3	3.721	102.5	3.678
	3	2 393.9	100.9	3.760	104.1	3.645
	4	2 254.1	94.67	3.774	97.49	3.665
	5	2 218.4	93.51	3.760	95.74	3.673
	6	2 275.5	95.67	3.770	98.38	3.666
冲击头 (黑色) 70HA	1	2 498	104.2	3.800	108.6	3.646
	2	2 601.2	110.4	3.734	111.9	3.684
	3	2 627.1	111.3	3.741	113.1	3.682
	4	2 568.3	108.8	3.741	110.4	3.687
	5	2 592.2	110.1	3.732	110.9	3.705
	6	2 544.3	108.11	3.730	109.7	3.676

比较两种加速度测量方法下灵敏度波动的差异性, 见图 12 所示。其中“■”表示力传感器灵敏度算术平均值, 上下延伸线表示灵敏度的标准差。

算的灵敏度波动相对较小。

3 结束语

本文利用水平式冲击力校准装置, 开展了压电式力传感器灵敏度校准的研究及分析, 主要结论为:

1) 脉冲冲击力法适合应用于冲击碰撞环境下的传感器校准, 可以实现更大幅值量程和覆盖更宽的测量频带^[4], 但是冲击力法相比于正弦法校准动态力传感器的精度较低。

2) 基于激光外差干涉法测量冲击加速计复现的动态力相比于通过标准加速计复现的动态力不仅精度高, 而且灵敏度波动小。

3) 激光测振仪测量加速度须通过微分解调, 进行数值差分运算。随机噪声和量化误差等影响, 导致加速度信号的波形相比于通过加速计测量的信号不光滑且毛刺更明显, 必须选择合适数字滤波器平滑滤波处理。比较了设置 5/T 和 16/T 上限截止频率的 4 阶 Butterworth 低通滤波器, 其中 16/T 的上限截止频率滤波后波形相位偏移较小。

参考文献:

[1] KUMME R. Investigation of the comparison method for the dynamic calibration of force transducer [J].

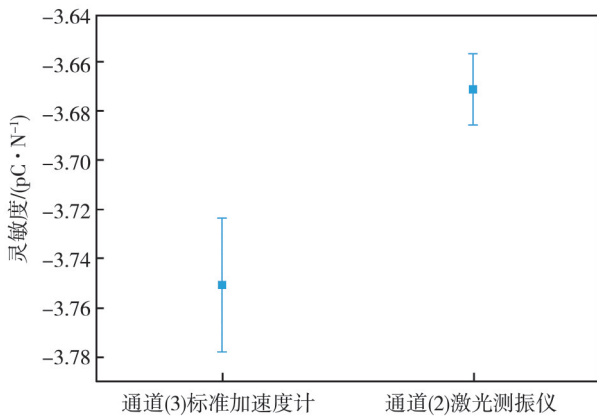


图 12 传感器灵敏度均值及标准差

Fig. 12 Mean and standard deviation of sensor sensitivity

通过图 11 可知, 通过标准加速计复现动态力的灵敏度相对误差为 4%, 而通过激光测振仪复现的动态力灵敏度相对误差不大于 2%。

通过图 12 可知, 通过激光测振仪复现动态力灵敏度的均值相比于标准加速计复现的动态力灵敏度更接近出厂参考灵敏度, 而且, 通过激光测振仪计算的灵敏度相比于通过标准加速计计

- Measurement, 1998, 23: 239-245.
- [2] SAHOO N, SURYAVAMSHI K, REDDY K P J. et al. Dynamic force balances for short-duration hypersonic testing [J]. *Fluids: Facilities Experiments*, 2005, 38(5): 606-614.
- [3] FU J Y. Measurement of steep impulse response of a force transducer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14: 65-69.
- [4] 张逸飞, 孔德仁, 施宇成, 等. 基于预压水激波管的压力传感器动态校准实验研究[J]. *测试技术学报*, 2021, 35(2): 107-113.
ZHANG Yifei, KONG Deren, SHI Yucheng. Research on influencing factors of step pressure rise time of quick-opening valve device [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2021, 35(2): 107-113. (in Chinese)
- [5] 商佳尚, 王宇. 动态力校准中需要规范的若干问题[J]. *计测技术*, 2014, 34(2): 1-5.
SHANG Jiashang, WANG Yu. Problems needing specification in dynamic force calibrations [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(2): 1-5. (in Chinese)
- [6] 江文松, 罗哉, 王中宇, 等. 基于载荷重构的冲击力校准方法[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 22-26.
JIANG Wensong, LUO Zai, WANG Zhongyu, et al. Impact force calibration method based on load reconstruction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 22-26. (in Chinese)
- [7] 商一奇, 李善明, 曹亦庆, 等. 脉冲力校准装置提升及扶正机构设计及数据验证 [J]. *计测技术*, 2017, 37(6): 35-39.
SHANG Yiqi, LI Shanming, CAO Yiqing, et al. Design and data verification of lifting and righting mechanism of impulse force generator [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(6): 35-39. (in Chinese)
- [8] 商一奇, 何旋, 李善明, 等. 脉冲力校准装置锤体质量块设计及数据验证 [J]. *计测技术*, 2018, 38(2): 26-29.
SHANG Yiqi, HE Xuan, LI Shanming, et al. The designs and data verification of hammer mass block of impulse force generator [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(2): 26-29. (in Chinese)
- [9] 施祥庆, 徐春冬, 孔德仁, 等. 基于预压水激波管的压力传感器动态校准实验研究 [J]. *测试技术学报*, 2020, 34(5): 401-406.
SHI Xiangqing, XU Chundong, KONG Deren, et al. Experimental study on dynamic calibration of pressure sensor based on pre-pressure water shock tube [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2020, 34(5): 401-406. (in Chinese)
- [10] 顾廷炜, 孔德仁, 商飞, 等. 基于落锤装置的力监测压力绝对校准方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3): 750-756.
GU Tingwei, KONG Deren, SHANG Fei, et al. Research on an absolute calibration method of monitoring pressure by force sensor based on drop-weight device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3): 750-756. (in Chinese)
- [11] 国家技术监督局. 动态力传感器检定规程: JJG 632-1989 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [12] 顾宝栋, 陈怀海, 申凡, 等. 力传感器动态标定及其精度分析研究 [J]. *振动与冲击*, 2005, 24(2): 95-98.
GU Baodong, CHEN Huaihai, SHEN Fan, et al. Research on dynamic calibration of force sensor and its precision analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(2): 95-98. (in Chinese)
- [13] 胡红波, 于梅. 激光干涉法冲击绝对校准的研究 [J]. *计量学报*, 2015, 36(4): 397-402.
HU Hongbo, YU Mei. Investigation of shock calibration using laser interferometry [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(4): 397-402. (in Chinese)
- [14] 梁志国. 冲击加速度校准中微分过程及峰值滤波的问题讨论 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(22): 73-79.
LIANG Zhiguo. A discussion on differential processing and peak filtering in impulse acceleration calibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(22): 73-79. (in Chinese)
- [15] 孟峰, 张跃, 李涛, 等. 脉冲式动态力校准装置的研究 [J]. *船舶工程*, 2012, 34(S2): 77-79.
MENG Feng, ZHANG Yue, LI Tao, et al. Research of calibration machine of impulse type dynamic force [J]. *Ship Engineering*, 2012, 34(S2): 77-79. (in Chinese)
- [16] 卢小霖, 翟琼劫, 屠淳, 等. 压电式动态力传感器校准方法的研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(5): 261-265.
LU Xiaoben, ZHAI Qiongjie, TU Chun, et al. Calibration method of piezoelectric dynamic force sensor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(5): 261-265. (in Chinese)
- [17] KOBUSCH M, KLAUS L, BRUNS T. Investigations for the model-based dynamic calibration of force transducers by using shock forces [C]//IMEKO TC22 Conference on Vibration Measurement, 2014: 1-4.
- [18] 振动与冲击传感器校准方法—第13部分: 激光干涉法冲击绝对校准: GB/T 20485. 13—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.