

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.26

高精度低冲击加速度校准装置研究

孙浩琳, 张大治

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 基于 ISO 国际标准设计了碰撞式高精度低冲击加速度校准装置, 在冲击加速度峰值 $20 \sim 10000 \text{ m/s}^2$, 冲击脉宽 $0.5 \sim 10 \text{ ms}$ 范围内实现产生半正弦波形的冲击加速度传感器的高精度校准。介绍了校准装置的构成和工作原理, 通过与冲击加速度国家基准的比对, 结果表明本装置可实现 0.5% ($k=2$) 的冲击加速度校准不确定度。本装置提升了我国冲击加速度校准装置的准确度, 满足航空航天、交通运输、汽车工业等领域广泛存在的对冲击加速度计的高精度校准需求。

关键词: 碰撞式; 低冲击; 高精度校准; 比对; 测量不确定度

中图分类号: TB936; TB934

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0172-06

Research on the Calibrating Device for High Precision and Low Impact Acceleration

SUN Haolin, ZHANG Dazhi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper introduces a high precision and low impact acceleration calibration device based on ISO international standard. The high precision calibration of the acceleration sensor that generates a half sinusoidal waveform is realized in the peak acceleration range of $20 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ and the pulse width range of $0.5 \sim 10 \text{ ms}$. It is shown that this device can realize the uncertainty of impact acceleration calibration of 0.5% ($k=2$) through comparison with the national benchmark of impact acceleration. The device improves the accuracy of the standard device of impact acceleration. It meets the need of high precision calibration of impact accelerometers in aerospace, transportation and automobile industry.

Key words: collision type; low impact; high precision calibration; comparison; measurement uncertainty

0 引言

在飞行员安全防护、汽车安全测试、火箭分离、卫星状态监测、MEMS 性能验证以及舰载机起落架性能测试等领域, 广泛存在对 10000 m/s^2 以内冲击加速度的高精度测量需求^[1], ISO 国际标准^[2]、欧洲安全标准^[3]均对冲击加速度测量范围和精度给出严格的规定。中国计量院建立的冲击加速度国家基准仅在 $50 \sim 20000 \text{ m/s}^2$ 范围内实现加速度幅值校准不确定度为 0.5% ^[3-6], 在低于 50 m/s^2 的冲击加速度幅值时无法实现同样精度的校准^[4]。本文采用激光干涉绝对法测量技术作为高精度低冲击加速度校准装置的溯源手段^[5], 针对在 $20 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ 加速度范围内, 通过引入精密空气轴承导向的冲击弹体砧体和组合式冲击动力源, 建立了基于激光干涉法的高精度低冲击加速度校准装置, 实现 0.5% ($k=2$) 的冲击加速度幅值测量不确定度, 将低冲击加速度幅值由 50 m/s^2 扩展到 20 m/s^2 , 极大的扩展和提升了我国冲击加速度的校准范围。

1 标准装置原理

高精度低冲击加速度校准装置由冲击激励系统、激光干涉测量系统、被校传感器测量系统、数据采集系统四部分组成, 标准装置原理如图 1 所示。冲击激励系统的激励源部分由电磁锤和空气锤组合构成, 弹体和砧体通过高精密空气轴承支撑, 运动时可不受摩擦力影响。当电磁锤或空气锤撞击能自由移动的弹体时, 弹体与砧体发生碰撞, 砧体做自由直线加速运动, 安装在弹体和砧体之间的波形发生器可在碰撞过程中产生不同冲击脉宽的波形, 被校加速度传感器安装在砧体端面, 冲击加速度的峰值和脉宽大小由激光干涉仪测量得到, 通过数据采集及处理得到加速度传感器的校准结果。图中频谱分析仪用于对激光干涉仪和被校传感器测量得到的冲击加速度波形进行频谱分析, 从频域对冲击激励装置的重复性进行分析和验证, 以确保被校传感器在校准过程中能够获得高重复的动态激励, 从而进一步提升其校准结果的重复性。

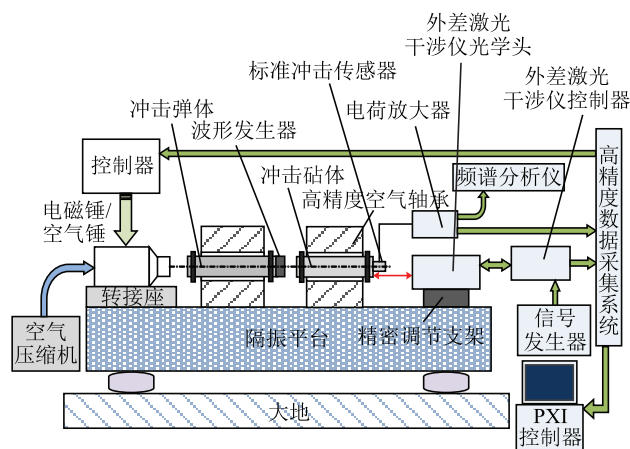


图1 高精度低冲击加速度校准装置原理图

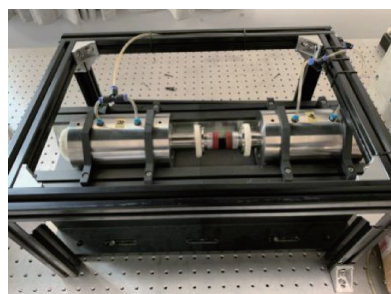


图3 弹砧碰撞结构实物图

电磁锤的主要优点是控制精度高，能产生高重复性的加速度波形，但是能够提供的冲击能量较低^[6]，因此主要针对 $20 \sim 5000 \text{ m/s}^2$ 冲击加速度幅值范围的冲击能量激励；空气锤的主要特点是冲击能量较高，可产生较高的加速度峰值，主要针对 $2000 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ 冲击加速度幅值范围的冲击能量激励，但控制精度相比电磁锤较低一些^[7]，因此，本装置的空气锤通过数字压力表及软件反馈控制的方式，提高了空气锤的控制精度，实现了在较高的冲击加速度量程范围内与电磁锤同样的控制精度，本装置通过采用组合式冲击激励源的方式，可覆盖较宽的冲击加速度激励范围。

冲击激励系统的机械部分结构如图2所示。

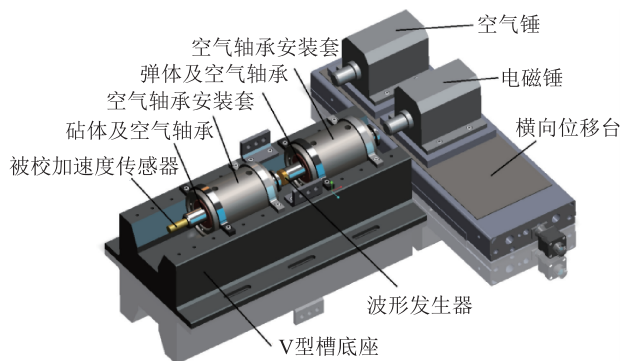


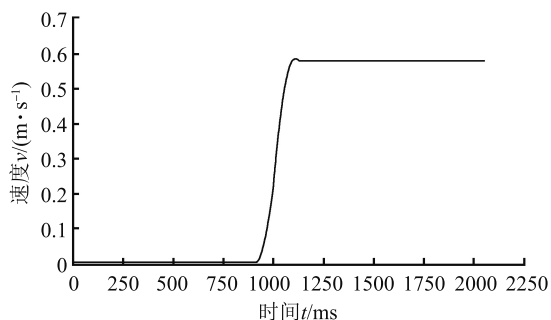
图2 冲击激励系统机械结构组成示意图

空气轴承支撑的弹砧碰撞结构如图3所示，空气轴承安装套里面各安装了两个尺寸结构相同的高精密空气轴承，通过空气轴承安装套中间的限位结构和轴承端盖对高精密空气轴承进行固定，弹体或砧体分别由两个高精密空气轴承共同支撑，在空气轴承安装套内壁对应的位置设计了匹配的进出气口，通过接入气软管将一定气压的气流顺利进入高精密空气轴承，通

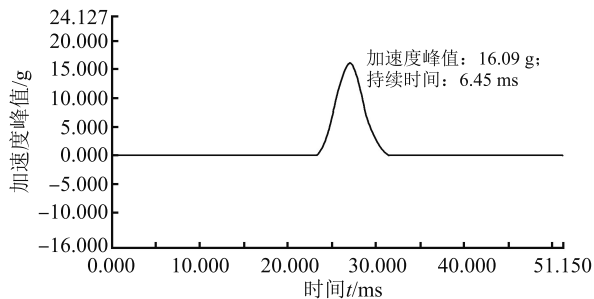
过该结构实现了弹体和砧体对称力支撑，同时确保弹体和砧体在安装后两者中心轴线的同轴度相对偏差在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以内，使其在碰撞过程中可以对心自由无摩擦碰撞，避免了弹体和砧体在碰撞过程中受非对称力支撑导致的旋转，减少横向运动。

2 加速度测量信号处理

被校加速度计安装在冲击运动砧体上，其敏感方向和冲击运动方向一致。高精度低冲击加速度校准装置产生的速度和加速度波形如图4所示。与基于 Hopkinson 杆的高冲击加速度测量的脉冲应力波传递原理不同的是^[8]，碰撞式低冲击加速度标准装置测量的是砧体机械运动的速度，由图4(a)所示，当冲击运动砧体受到弹体碰撞运动时，在采样时间内，砧体由静止做加速度运动，加速到一定速度后，做匀速运动。通过对速度求导，即得到如图4(b)所示得脉冲加速度波



(a) 速度波形



(b) 加速度波形

图4 低冲击速度和加速度波形

形。速度和加速度大小由激励源锤体和砧体撞击能量大小决定，传感器和激光干涉测量系统测量砧体的运动速度和加速度，由于砧体采用了空气轴承支撑的形式，使得速度和加速度波形平滑，比较理想。

砧体运动速度 $[v(t)]$ 与激光多普勒频移 $\Delta f_d(t)$ 成正比关系。砧体运动速度方程为

$$v(t) = k_{fv} \times \Delta f_d(t)$$

(1)

式中： $v(t)$ 为砧体运动速度，m/s； $\Delta f_d(t)$ 为激光多普勒频移，Hz； k_{fv} 为比例系数，m。

将式(1)作微分处理可得

$$a(t) = k_{fv} \times \frac{d[\Delta f_d(t)]}{dt}$$

(2)

式中： $a(t)$ 为冲击运动加速度，m/s²。

轴向激光干涉加速度测量方向跟运动方向一致，即轴向测速，比例系数 k_{fv} 由式(3)得到

$$k_{fv} = \frac{\lambda}{2}$$

(3)

式中： λ 为激光波长，m。

3 校准试验及不确定度评估

对 Endevco 公司的 2270 标准传感器在高精度低冲击加速度校准装置上进行校准试验，冲击加速度峰值范围为 20 ~ 10000 m/s²，根据加速度峰值范围和脉宽持续时间范围，综合选择波形发生器缓冲垫的材质、厚度。校准结果如表 1 所示。

表 1 冲击加速度传感器校准结果

序号	加速度/ (m · s ⁻²)	脉宽/ms	灵敏度/ (mV · (m · s ⁻²) ⁻¹)
1	20.43	10.32	0.2022
2	118.1	8.08	0.2023
3	591.6	6.66	0.2024
4	1025	4.28	0.2026
5	2038	2.01	0.2028
6	3109	1.88	0.2025
7	4093	0.79	0.2027
8	5138	0.71	0.2023
9	6031	0.65	0.2024
10	7205	0.62	0.2025
11	8087	0.56	0.2024
12	9165	0.54	0.2025
13	10074	0.51	0.2024

重复性计算结果如表 2 所示。

表 2 重复性试验结果

序号	加速度/ (m · s ⁻²)	脉宽/ms	灵敏度/ (mV · (m · s ⁻²) ⁻¹)
1	5072	0.73	0.2067
2	5077	0.72	0.2066
3	5069	0.72	0.2067
4	5085	0.73	0.2068
5	5084	0.72	0.2066
6	5084	0.72	0.2067
7	5065	0.73	0.2067
8	5070	0.73	0.2066
9	5066	0.73	0.2067
10	5069	0.72	0.2067
平均值 $\bar{x} = 5074.1$			

根据重复性计算公式 $S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$ ，可知，高精度低冲击加速度校准装置的加速度幅值测量重复性 $u_r = 0.1533\%$ 。

从以上数据结果可以看出，由于低冲击加速度标准装置的空气锤和电磁锤激励源击打的控制准确度较高，同时碰撞的弹体和砧体通过空气轴承支撑，由此使本装置产生冲击加速度波形的峰值和脉宽具有很好的重复性，校准结果准确可靠。

根据表 1 和表 2 的数据，参考 ISO16063 - 13：2001《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》^[9]，对不确定度分量评估计算。该校准装置的加速度幅值测量不确定度分量共由 10 项构成。

1) 采样间隔引入的相对标准不确定度 u_1

数据采集卡机箱控制器采用美国 NI 公司的型号为 PXI - 1073，根据其说明书的技术指标，其时钟相对标准不确定度 $u_1 = 1.0 \times 10^{-6}$ 。

2) 激光波长不稳定度引入的相对标准不确定度 u_2

根据航空工业计量所对激光波长的测量结果，其相对标准不确定度 $u_2 = 2 \times 10^{-6}$ 。

3) 相位测量误差引入的相对标准不确定度 u_3

多普勒相位不确定度对冲击位移测量的影响，按照激光干涉仪引入的误差分析结果，包括光电转换部

分噪声、采样噪声以及采集系统的分辨力等^[10]，在我们的处理方法中，多普勒相位的分辨力为 π （即半个多普勒周期），而噪声以及所采用的数据采集卡的电压垂直分辨力对相位的影响远远小于此数，可以忽略不计。

位移 $s(t)$ 和 $\phi(t)$ 相位的关系为

$$s(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi(t) \quad (4)$$

弧度 π 相位分辨力对应的位移分辨力为 $0.16 \mu\text{m}$ 则

$$u_D = \frac{0.16}{2\sqrt{3}} = 0.046 \mu\text{m}$$

当加速度峰值 $a_p = 20 \text{ m/s}^2$ ，冲击脉宽时间 $T = 10 \text{ ms}$ 时，对应产生的冲击位移 $S_{ap} = 667 \mu\text{m}$ ，由此相位误差引入的相对标准不确定度为 $\frac{u_D}{S_{ap}} = 6.9 \times 10^{-5}$ 。

当加速度峰值 $a_p = 10000 \text{ m/s}^2$ ，冲击脉宽时间 $T = 0.5 \text{ ms}$ 时，对应产生的冲击位移为 $S_{ap} = 834 \mu\text{m}$ ，由此相位误差引入的相对标准不确定度为 $\frac{u_D}{S_{ap}} = 5.6 \times 10^{-5}$ 。

取以上计算结果的最大值，可知相位测量误差引入的相对标准不确定度为 $u_3 = 6.9 \times 10^{-5}$ 。

4) 数据处理方法引入的加速度峰值测量的相对标准不确定度 u_4

采用实验方法测定此项标准不确定度。峰值为 a_p ，持续时间为 T 的半正弦冲击脉冲的冲击位移为

$$s(t) = \frac{a_p T^2}{\pi^2} \left(\frac{\pi t}{T} - \sin \frac{\pi t}{T} \right) \quad (0 < t < T) \quad (5)$$

$$s(t) = \frac{a_p T^2}{\pi} \left(\frac{2t}{T} - 1 \right) \quad (t > T) \quad (6)$$

多普勒信号的相位 $\phi(t)$

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot s(t) \quad (7)$$

用计算机产生10%噪声的多普勒信号的数学模型 $Doppler(t) = A \sin \phi(t) + RandRea(+A/10, -A/10)$ 进行计算。

经计算，当加速度峰值 $a_p = 20 \text{ m/s}^2$ ，冲击脉宽时间 $T = 10 \text{ ms}$ 时，加速度峰值测量不确定度为 $\frac{u_m}{a_p} = 0.08\%$ ；当加速度峰值 $a_p = 10000 \text{ m/s}^2$ ，冲击脉宽时间 $T = 0.5 \text{ ms}$ 时，加速度峰值测量不确定度为 $\frac{u_m}{a_p} = 0.11\%$ 。

取以上计算结果的最大值，因此，由数据处理方法引入的加速度峰值测量的相对标准不确定度 $u_4 = 1.1 \times 10^{-3}$ 。

5) 零加速度引入的相对标准不确定度 u_5

零加速度主要为激光本身或者冲击激励源受到环

境机械干扰产生，主要由放大器与加速度传感器的特性决定^[11]，经过试验分析表明该不确定度 $u_5 = 1.0 \times 10^{-3}$ 。

6) 砧体谐振频率对参考加速度测量影响引入的相对标准不确定度 u_6

对于激光干涉法测量得到的冲击加速度，砧体的谐振频率为 18 kHz ，通过低通滤波器正反两次滤波后，其引入的相对标准不确定度 $u_6 = 1.0 \times 10^{-3}$ 。

7) 横向运动引入的相对标准不确定度 u_7

采用美国 ENDEVCO 公司型号为 66A50 的三轴加速度传感器来测试冲击激励机产生的横向运动^[12]，在最大的冲击加速度条件下，主轴方向与其他两个方向均方根加速度的比值小于3%。校准所使用的加速度传感器为美国 ENDEVCO 的型号为 2270 的标准加速度传感器，根据其说明书，其横向灵敏度优于2%，得到横向运动引入的相对不确定度 $u_7 = 0.03 \times \frac{0.02}{\sqrt{2}} = 4.2 \times 10^{-4}$ 。

8) 冲击激励机与激光干涉测量部分的相对位运动引入的相对标准不确定度 u_8

将一个低频的加速度传感器安装在台面上，测量机械冲击激励机产生满量程冲击加速度峰值条件下伺服加速度传感器的输出，两者对应的峰值加速度的比值小于 2.0×10^{-4} ，服从均匀分布，则相对标准不确定度 $u_8 = 1.0 \times 10^{-4}$ 。

9) 冲击加速度幅值激励重复性误差引入的相对标准不确定度 u_9

冲击加速度幅值的不同将会导致冲击波形频带宽度的变化，由于两者具有不同的非线性动态特征，因此这种影响可能会导致不同的测量结果偏差^[13]。冲击激励装置在最低加速度点(20 m/s^2)处加速度幅值激励重复性最差，通过在实验中进行冲击波形的频谱分析和提取，引入的相对标准不确定度 $u_9 = 5.0 \times 10^{-4}$ 。

10) 冲击加速度计幅值灵敏度重复测量引入的相对标准不确定度 u_{10}

按照不确定度 A 类评定方法，将被校加速度传感器置于某一特定的冲击加速度激励条件下，校准其冲击灵敏度共计10次，通过冲击灵敏度反向推算冲击加速度激励幅值的重复性^[14]，计算其相对标准不确定度 $u_{10} = 1.5 \times 10^{-3}$ 。

根据以上计算结果，测量不确定度分量如表3所示，结果显示标准装置的加速度幅值测量扩展不确定度为0.5% ($k=2$)。

表 3 加速度幅值测量不确定度分量表

影响量类别	标准不确定度分量来源	相对标准不确定度分量大小 u_x
参考冲击加速度	采样间隔引入的相对标准不确定度 u_1	1.0×10^{-6}
	激光波长不稳定度引入的相对标准不确定度 u_2	2.0×10^{-6}
	相位测量误差引入的相对标准不确定度 u_3	6.9×10^{-5}
	数据处理方法引入的加速度峰值测量的相对标准不确定度 u_4	1.1×10^{-3}
其他	零加速度对标准不确定度的影响 u_5	1.0×10^{-3}
	砧体谐振频率的影响 u_6	1.0×10^{-3}
	横向运动的影响 u_7	4.2×10^{-4}
	冲击激励机与激光测量部分的相对运动的影响 u_8	1.0×10^{-4}
	冲击加速度幅值激励重复性误差的影响 u_9	5.0×10^{-4}
	加速度幅值灵敏度重复测量的影响 u_{10}	1.5×10^{-3}
合成标准不确定度 $u_c = 2.5 \times 10^{-3}$; 相对扩展不确定度($k=2$) $U_{rel} = 5.0 \times 10^{-3}$		

4 计量比对验证

将设计的高精度低冲击加速度校准装置与冲击加速度国家基准作比对, 指标对照见表 4。

表 4 本装置与国家基准指标对照

设备名称	加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	脉冲持续 时间/ms	不确定度 $U_{rel}/\%$ ($k=2$)
国家基准	$50 \sim 2.0 \times 10^4$	$0.2 \sim 10$	0.5
本装置	$20 \sim 1.0 \times 10^4$	$0.5 \sim 10$	0.5

表 4 验证了本装置的不确定度评估的准确性。

根据各个加速度峰值点的校准结果, 用归一化偏差 E_n 值评价比对测量结果的等效度与不确定度为

$$E_n = \frac{|d_i - d_j|}{\sqrt{U_i^2 + U_j^2}}$$

式中: d_i, d_j 分别为两次实验的灵敏度值; U_i, U_j 分别为两个标准装置的相对扩展不确定度, 根据比对结果一致性判定原则: 当 $E_n \leq 1$ 时, 比对结果可接受; 当 $E_n > 1$ 时, 比对结果不可接受^[15]。

本次比对结果一致性计算结果如表 5 所示。

表 5 比对数据

中国计量院			航空工业计量所			比对结果
标准加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	标准脉冲持续 时间/ms	灵敏度/ ($\text{mV} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$)	标准加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	标准脉冲持续 时间/ms	灵敏度/ ($\text{mV} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$)	E_n 值
58.24	8.35	0.1963	50.53	8.52	0.2022	0.8344
621.33	6.85	0.1972	682.71	6.66	0.2024	0.7354
1548.7	1.64	0.1973	1533.5	1.28	0.2026	0.7495
5380.8	0.753	0.1973	5351.3	0.72	0.2025	0.7354
7511.8	0.606	0.1974	7136.4	0.62	0.2024	0.7071
10123	0.482	0.1974	10142	0.54	0.2024	0.7071

表 5 中比对 $E_n \leq 1$, 根据比对结果一致性判定原则可知, 校准结果与中国计量院国家基准比对结果较好, 验证高精度低冲击加速度校准装置的不确定度评估结果可以达到 0.5% ($k=2$)。

5 结论

高精度低冲击加速度校准装置在 $20 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ 的加速度范围内, 实现 0.5% ($k=2$) 的加速度幅值测

量不确定度,并通过与中国计量科学研究院的进行对比,验证了装置的不确定度指标的准确性,在不同的冲击加速度量值范围,极大的提升了我国高精度冲击加速度校准范围和准确度,使我国低冲击加速度校准能力达到国际先进水平。

参考文献

- [1] 梁志国,吕国义,尹肖,等.民用飞机测试体系的讨论[J].计测技术,2018,38(4):1-5.
- [2] ISO 16063-13:2001 Methods for the calibration of vibration and shock transducers-Part13: Primary shock calibration using laser interferometry [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.
- [3] Sun H L, Liang Z G, Zhang D Z. Both Frequency Shift and Phase Shift Evaluation on calibration of laser vibrometer[J]. AIVELA 2018 Journal of Physics, 2018, 1149: 012017.
- [4] 胡红波,孙桥,黄宇中.不同冲击激励系统绝对法冲击校准比对可行性的研究[J].振动与冲击,2012,31(20):27-31.
- [5] 于梅,胡红波,左爱斌.新一代冲击加速度国家基准装置的研究与建立[J].振动与冲击,2013,32(10):124-129.
- [6] 梁志国,尹肖,孙浩琳.计量校准中的复杂环境的剖析与应对策略[J].计测技术,2018,38(2):4-8.
- [7] 梁志国,吕国义,尹肖,等.民用飞机测试体系的讨论[J].计测技术,2018,38(4):1-5.
- [8] 胡红波,于梅.冲击激励脉宽对加速度计校准结果的影响[J].计量技术,2012(7):47-49.
- [9] 魏青轩,王建林,付雪松.基于DTC-LS的加速度计动态模型参数辨识[J].仪器仪表学报,2017,38(12):2924-2932.
- [10] 戴景钊,张大治,段小燕.光子多普勒测速系统信号解调方法比较[J].计测技术,2019,39(5):1-7.
- [11] 梁志国,张大治.复杂系统的计量性设计与评估[J].计测技术,2017,37(5):1-6.
- [12] 梁志国,张大治,吕华溢.动态校准、动态测试与动态测量的辨析[J].计测技术,2017,37(1):30-34.
- [13] 何旋,曹亦庆,李善明.便携式冲击加速度激励装置研究[J].计测技术,2019,39(6):40-45.
- [14] 张洁文,秦敏,刘科.冲击传感器不同安装方式对校准结果的影响分析[J].计测技术,2016,36(1):46-49.
- [15] 王雪琴,曹亦庆.冲击加速度传感器系统辨识技术研究[J].计测技术,2018,38(S1):105-107.

收稿日期:2021-02-03

基金项目:国家“十三五”技术基础科研项目(JSJC2016205A015)

作者简介

孙浩琳(1989-),男,工程师,主要研究方向为振动冲击动态测试与校准。

