光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250416002

基于零差激光干涉的低频加速度计校准系统研究

楼丽涵[1]，左爱斌[2*]，周劲峰[1]，戴　荣[3]

（1. 北京工业大学 物理与光电工程学院，北京 100124；2. 中国计量科学研究院，北京 100029；
3. 云南省计量测试技术研究院，昆明 650100）

摘　要： 针对现有低频加速度计校准方法因数据量过大导致内存不足和处理速度慢的问题，设计了一种基于零差激光干涉的低频加速度计校准系统。通过分析非线性误差（特别是非正交相位误差），提出相应的误差补偿方法；结合动态逐次相位展开方法和自适应动态分解算法进行数据采集和处理，有效降低采样率和数据量，同时保证了校准精度。实验结果证明，该系统能够在0.1～80 Hz频率范围内对加速度计灵敏度进行精确校准，满足低频校准需求。

关键词： 加速度计校准；零差激光干涉仪；低频校准；非线性误差；动态相位连续展开；自适应动态分解算法

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0403－06

Low-Frequency Accelerometer Calibration System Based on Homodyne Laser Interferometry

LOU Lihan[1], ZUO Aibin[2], ZHOU Jinfeng[1], DAI Rong[3]

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, CHN; 3. Yunnan Institute of Measurement and Testing Technology, Kunming 650100, CHN)

Abstract: To solve the issues of insufficient memory and low processing speed caused by excessive data volume in low-frequency calibration under existing calibration methods, a low-frequency accelerometer calibration system based on homodyne laser interference is developed. The error-compensation method is proposed by analyzing nonlinear errors, particularly the non-orthogonal phase error. Using the dynamic successive phase unwrapping method and the self-adaptive dynamic decomposition algorithm for data acquisition and processing, the sampling rate and data volume are reduced, and the calibration accuracy is ensured. Experimental results show that the system can achieve high-accuracy sensitivity calibration of the accelerometer in the frequency range from 0.1 to 80 Hz and satisfy the test requirements of low-frequency calibration.

Key words: accelerometer calibration; homodyne laser interferometer; low-frequency calibration; nonlinear error; dynamic successive phase unwrapping; self-adaptive dynamic decomposition algorithm

0　引言

加速度传感器在航空航天、建筑工程、车辆船舶、精密仪器制造与检测、地震与海啸灾难预警等领域具有广泛的应用[1-2]，对安全监测、质量检验、故障诊断等方面具有重要意义。为确保传感器的测量效果，必须对其进行校准，校准的准确性直接决

收稿日期：2025－04－16.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFB3908102）.
* **通信作者：**左爱斌

定传感器测量精度[3-5]。因此,开展关于加速度传感器精确校准系统的研究非常重要。

根据校准环境不同,可分为现场校准和实验室校准[6]。前者包括离线法和原位法,常在使用过程中进行,为工程测试提供保障,但校准精度较低。而实验室校准精度较高,方法众多。Zhai等[7]设计一种高加速度标定系统,通过谐振光束在固有频率下的共振放大加速度幅度,从而产生高加速度值来校准传感器,但系统搭建和维护成本较高。杨明等[8]结合机器视觉方法和地球重力法,实现低频加速度计灵敏度幅值和相位高精度动态校准,但校准系统复杂、环境依赖性强。董雪明等[9]通过离心-振动复合校准装置进行加速度计整流误差试验,但仅局限于单个方向的研究,不够贴近真实校准环境。针对宽量程、高线性度要求的加速度计,其余方法均存在局限,常使用激光干涉法进行校准[10]。

常见的激光干涉法分为外差式激光干涉和零差式激光干涉。外差式激光干涉技术有效避免了直流电平漂移问题,具有测量精度高、抗干扰性强、线性度好等优点,但其光路结构复杂、制造成本高、测量范围有限[11-13]。零差激光干涉法是一种基于同频光干涉原理的精密测量技术,具备测量精确可靠、光路结构简单、成本低廉、性价比高的优点,故常使用零差激光干涉仪进行校准。但在低频校准时,零差激光干涉技术主要存在两方面问题:非线性误差和数据采集处理问题[14]。

本文基于零差激光干涉技术,对测试过程中的非线性误差进行分析,重点介绍非正交相位误差的修正方法;结合正弦逼近法、动态相位连续展开方法和自适应动态分解算法,解决低频校准时采样率过高、采样时间长所导致的数据量大、内存不足和计算速度慢等问题。在此基础上搭建低频加速度计校准系统,并通过实验验证该装置能够实现高精度校准。

1 低频加速度传感器校准系统

加速度传感器校准系统的结构组成如图1所示,主要包括振动激励系统、零差激光干涉测量系统和信号采集与处理系统。

标准振动台为被校准加速度计提供频率和振幅可调节的振动激励;零差激光干涉仪测量振动位移并输出干涉信号;数据采集卡同步采集干涉信号和被校准加速度计电信号,并通过计算机进行处理,自动计算得到传感器的灵敏度,实现幅相特性的精确校准。

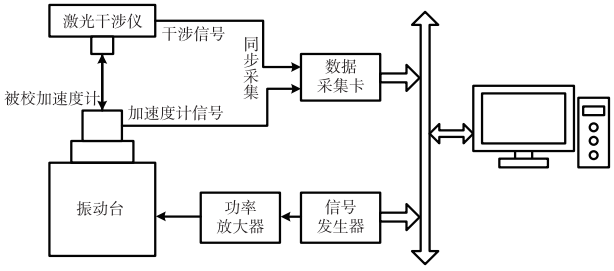


图1 低频加速度计校准系统

2 零差激光干涉仪

2.1 激光干涉仪测量原理

零差激光干涉仪原理图如图2所示。氦-氖激光器发出的线偏振光,经过扩束准直管后光束直径扩大,经过偏振片1后变为与分光棱镜的轴线成45°的线偏振光。再经过1/4波片带来90°的相位差,形成两束相互垂直的线偏振光。线偏振光通过分光棱镜后分为两路,一路是参考光,经过参考光反射镜组的一系列反射后到达参考光调节镜再原路返回;另一路是测量光,通过测量光反射镜组一系列反射后到达测量角锥棱镜,再反射到测量光调节镜后原路返回。参考光和测量光在分光棱镜处发生干涉,再通过后方的偏振分光棱镜分离,成为两束相互正交偏振的光束,最后分别由光电检测器1和光电检测器2接收。

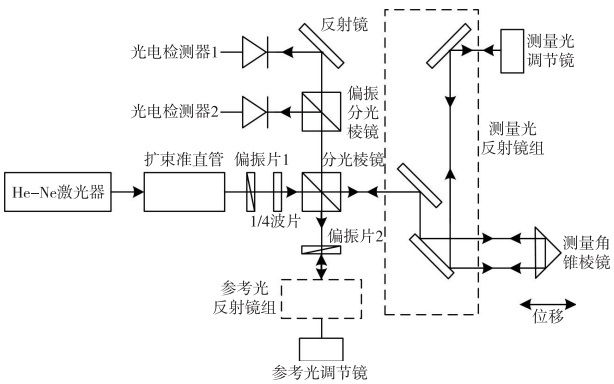


图2 零差激光干涉仪原理图

在理想条件下,光束垂直入射,两个光电检测器接收到的激光干涉信号幅度相等,相位差呈90°,分别按照正弦和余弦变化。两路激光干涉信号表达式为:

$$\begin{cases} I_1(t)=\dfrac{I_0}{4}+\dfrac{I_0}{4}\cos\varphi(t) \\ I_2(t)=\dfrac{I_0}{4}+\dfrac{I_0}{4}\sin\varphi(t) \end{cases} \tag{1}$$

对两路干涉信号按公式(2)进行反正切运算，并对相位$\varphi(t)$进行解包裹运算连续展开，得到实际相位，即：

$$\varphi(t)=\arctan\frac{I_2(t)-I_0/4}{I_1(t)-I_0/4}+x\pi, x=0,1,2\cdots \tag{2}$$

位移和相位的关系式为：

$$\varphi(t)=\frac{4\pi s(t)}{\lambda} \tag{3}$$

2.2　非线性误差补偿

在实际测量中，正交式激光干涉系统精度会受到很多因素影响，主要可归纳为三个方面[15-16]：第一，系统普遍存在直流漂移；第二，光路系统和光电转换系统会导致两路干涉信号的幅度不一致；第三，实际相位差与理想相位差存在偏差。这些问题会导致干涉仪测量出现额外的非线性误差，直接影响测量结果的准确性。输出的两路实际信号表示式为：

$$\begin{cases} I_{1d}(t)=V_1\cos\varphi(t)+p \\ I_{2d}(t)=V_2\sin\big(\varphi(t)+\delta\big)+q \end{cases} \tag{4}$$

实际测量中采用的He-Ne激光器输出稳定、外界干扰较小，还会通过一系列操作去除直流漂移、幅度不一致等误差影响。首先使用低通滤波器过滤高频噪声，再分别通过两路信号的极值进行归一化处理实现幅度调制，最后减去对应的均值去除直流漂移[17]。此时干涉信号中只具有相位差非正交误差，则信号表达式为：

$$\begin{cases} I_{1d}=\cos\varphi(t) \\ I_{2d}=\sin\big(\varphi(t)+\delta\big) \end{cases} \tag{5}$$

非正交相位误差的主要来源为波片安装的角度偏差。在实际情况中，装配过程的角度调节偏差、工作环境引起的机械漂移会导致波片光轴与理想安装角度出现偏移，进而产生非正交相位误差。利用琼斯矩阵，可从理论上分析非正交相位误差及其对波片安装角度偏差的灵敏度。

对两路干涉信号进行相位补偿，获得新的干涉信号表达式，设其为I_{1c}，I_{2c}，则其和原有的干涉信号表达式I_{1d}，I_{2d}的关系为：

$$\begin{cases} I_{1c}=I_{1d} \\ I_{2c}=\big(I_{2d}-I_{1d}\sin\delta\big)/\cos\delta \end{cases} \tag{6}$$

相位修正后的李萨如图形是一个标准的圆形，将公式(6)代入标准圆方程，得到：

$$I_{1d}^2+I_{2d}^2-2I_{1d}I_{2d}\sin\delta=\cos^2\delta \tag{7}$$

标准圆方程转化为椭圆方程形式，对其进行进一步处理，设$I_{1d}=r(\theta)\cos\theta$，$I_{2d}=r(\theta)\sin\theta$，将其代入公式(7)，椭圆的形状不变，且椭圆方程变为：

$$r(\theta)=\cos\delta\big(1-\sin\delta\cos2\theta\big)^{-1/2} \tag{8}$$

式中：

$$\begin{cases} r=\big(I_{1d}^2+I_{2d}^2\big)^{1/2} \\ \theta=\arctan\dfrac{I_{2d}}{I_{1d}} \end{cases} \tag{9}$$

根据公式(8)和(9)，通过最小二乘法计算出干涉信号相位非正交误差δ，即可实现对干涉信号的相位补偿。

3　数据采集与处理

同步采集干涉信号和被校加速度计输出信号，信号处理流程如图3所示。

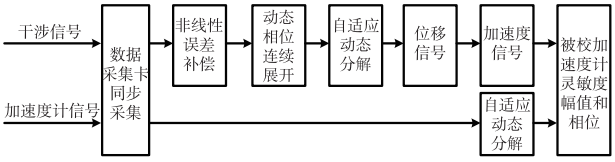


图3　信号处理流程图

通过滤波去噪、归一化调幅、均值去零偏和非正交相位补偿后去除非线性误差，获得相互正交的干涉信号；再通过动态相位连续展开方法和自适应动态分解算法拟合相位获得位移；最后进行二阶微分获得加速度。同时通过自适应动态分解拟合被校加速度计电信号，计算被校加速度计灵敏度。

3.1　动态相位连续展开方法

设经过非线性误差补偿后的两路干涉信号分别为$U_1(k)$和$U_2(k)$，$k=0,1,\cdots,N$，根据公式(10)算相位$\varphi(k)$：

$$\varphi(k)=\begin{cases} \arctan\dfrac{U_2(k)}{U_1(k)} & U_1(k),U_2(k)>0 \\ \arctan\dfrac{U_2(k)}{U_1(k)}+\pi & U_1(k),U_2(k)<0 \\ \arctan\dfrac{U_2(k)}{U_1(k)}+2\pi & U_1(k),U_2(k)<0 \end{cases} \tag{10}$$

为简化计算，对相位作归一化处理，即$\varphi(k)=\varphi(k)/2\pi$，则可得振动位移$s(k)$为：

$$s(k)=\frac{\lambda}{2}\left[n_k+\varphi(k)\right] \tag{11}$$

式中，n_k为待确定的某个整数。假设n_0，n_1已知，则可获得振动位移s_0，s_1，从而计算出0到1时间段的平均速度$v_{0,1}$为：

$$v_{0,1}=\frac{s_1-s_0}{\Delta t} \tag{12}$$

式中，Δt为采样时间间隔。进一步计算出1到2时间段的平均速度估计值$v_{1,2}$为：

$$v_{1,2}=v_{0,1}+a_1\Delta t \tag{13}$$

式中，a_1为时刻1的近似加速度。在实际校准中，基本对被校准加速度传感器的灵敏度具有事先预估，所以可以根据同步采样的加速度计输出获得比较可靠的加速度近似值。计算出$v_{1,2}$后即可获得时刻2的位移估计值$\hat{s}_2$和相位估计值$\hat{\varphi}_2$为：

$$\begin{cases}\hat{s}_2=s_1+v_{1,2}\Delta t\\ \hat{\varphi}_2=\dfrac{2s_2}{\lambda}-\mathrm{round}\left(\dfrac{2s_2}{\lambda}\right)\end{cases} \tag{14}$$

式中，round函数代表取最接近的整数。根据干涉信号可以求得真实的相位φ_2，所以可以得到相位的误差$\Delta\varphi_2$和对应的位移误差Δs_2为：

$$\begin{cases}\Delta\varphi_2=\varphi_2-\hat{\varphi}_2-\mathrm{round}\left(\varphi_2-\hat{\varphi}_2\right)\\ \Delta s_2=\dfrac{\lambda}{2}\Delta\varphi_2\end{cases} \tag{15}$$

则可以求得真实的位移s_2为：

$$s_2=\Delta s_2+\hat{s}_2 \tag{16}$$

根据上述方法即可依次计算后续采样点的真实位移值。在运算的初始步骤，对n_0，n_1进行假设，如果选择不同的n_0，n_1，只相当于改变起始点，位移波形产生平移，但不会影响加速度校准结果。该方法不同于普通的相位展开方法，利用已知的同一时刻加速度计加速度进行近似估计，降低了采样率，避免了因数据量过大导致的问题。

对采样率进行具体分析，最低采样率与加速度准确性相关。设加速度估计值的误差为a_e，则位移估计值的误差Δs为：

$$\Delta s=\frac{1}{2}a_e\Delta t^2 \tag{17}$$

要使采集的位移信号不出现间断点，Δs需要小于波长的1/4，则：

$$\Delta t<\sqrt{\frac{\lambda}{2a_e}} \tag{18}$$

设加速度最大值为a_e，比例系数$R=a_e/a_p$，则最低采样率f为：

$$f=\sqrt{\frac{2a_pR}{\lambda}} \tag{19}$$

若频率为10 Hz，加速度为10 m/s^2，采用奈奎斯特采样定理，采样率计算公式为$f=4v_p/\lambda$，采样率须达到1 MHz；而采用该动态相位连续展开方法，当加速度计灵敏度误差为0.1时，采样率仅需1.78 kHz，大大降低了采样率。

压缩感知法计算复杂度高，依赖稀疏性假设；MLPFS法需要训练数据，部署复杂度较高；此方法无需额外模拟器件，计算简单、适用性强、计算效率高，在确保测量精度的基础上实现了欠采样处理，减少了采样率和数据量，降低了数据处理和储存的难度。

3.2 自适应动态分解算法

将计算出的位移信号展开获得一系列线性方程，即：

$$s(k)=A\cos\omega k-B\sin\omega k+C,\ k=0,1,\cdots N \tag{20}$$

一般可采用基于最小二乘法的正弦逼近法进行拟合，计算A，B和C的大小。但在低频校准时，运动周期长，采样点多，数据量大，利用常规方法计算时运算量成倍增加，容易出现内存不足、计算速度慢等问题。所以采用自适应动态分解算法，结合数据量情况，选择合适的矩阵分割方法，将大矩阵变为小矩阵后再进行计算并重新组合，以减少计算量。求得A，B和C后即可获得位移的幅值s和相位φ_s，再对位移进行一阶和二阶微分，进而获得速度和加速度的幅值和相位。加速度的幅值a和相位φ_a可表示为：

$$\begin{cases}a=4\pi^2f^2s\\ \varphi_a=\varphi_s+\pi\end{cases} \tag{21}$$

对被校加速度传感器的输出信号采用相同的自适应动态分解算法拟合求解，算出输出信号的幅值u和相位φ_u。最终可以获得加速度传感器的灵敏度幅值S_a和相位$\Delta\varphi$为：

$$\begin{cases}S_a=u/a\\ \Delta\varphi=\varphi_u-\varphi_a\end{cases} \tag{22}$$

3.3 校准软件

使用LabVIEW软件编写程序实现加速度计的

自动校准。校准软件可实时显示频率、加速度、被校加速度机灵敏度、失真度等信息，自动保存生成测量结果文档。加速度计校准软件的主界面如图 4 所示。

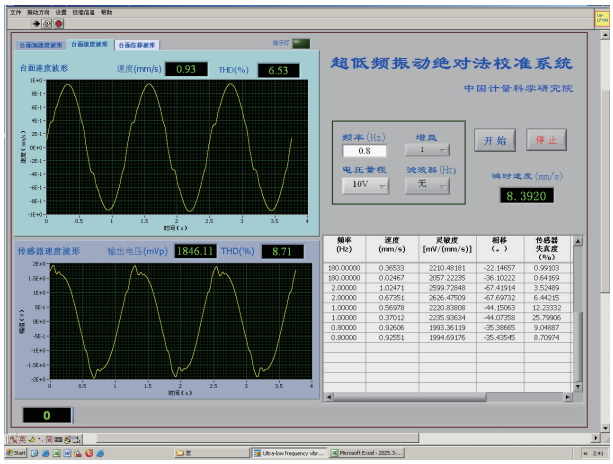


图 4　校准软件主界面

4　实验结果与分析

为验证所提出的基于零差激光干涉的低频加速度计校准系统的测试精度，搭建如图 5 所示的校准装置。选择振动频率范围为 0.005～80 Hz，最大位移大于 1 m 的标准低频振动台提供振动激励，选择改进的零差正交激光干涉仪进行测量，选择 16 位 4 通道的 NI PXI-5922 数据采集卡用来采集信号。通过该装置对 GL-A4 加速度计进行 0.1～80 Hz 频率范围内的频率响应校准和频率为 16 Hz 的灵敏度线性度校准。

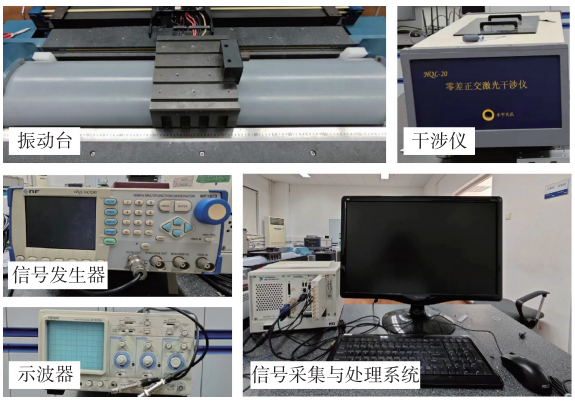


图 5　加速度计校准装置

GL-A4 加速度计的灵敏度校准数据如表 1 和表 2 所示，相应的校准结果如图 6 和 7 所示。通过本装置获得的灵敏度校准结果与加速度计厂家给出的灵敏度指标基本一致。

表 1　0.1~80 Hz 的频率响应校准

f/Hz	a/(mm/s^2)	S_a/[mV/(mm/s^2)]	$\Delta\varphi$/(°)
0.1	0.097 8	257.402 29	−0.047 29
0.2	0.482 03	257.180 93	−0.049 02
0.5	1.705 61	257.257 75	−0.061 91
1	2.007 21	257.022 49	−0.079 16
2	1.999 64	257.029 11	−0.158 03
5	2.034 92	256.874 27	−0.274 58
10	2.028 68	256.420 1	−0.548 05
16	2.024 44	255.849 1	−0.885 44
20	2.007 16	255.008 02	−1.138 59
30	2.003 82	253.167 85	−1.651 58
40	2.026 44	250.157 29	−2.213 54
50	2.019 17	248.449 72	−2.766 15
60	2.010 38	249.698 69	−3.329 91
70	2.007 48	247.082 52	−3.870 23
80	2.005 31	246.927 73	−4.394 61

表 2　16 Hz 的灵敏度线性度校准

f/Hz	a/(mm/s^2)	S_a/[mV/(mm/s^2)]	$\Delta\varphi$/(°)
16	1.096 76	256.003 26	−0.881 43
16	2.082 92	256.579 44	−0.876 75
16	5.062 6	256.624 69	−0.873 99
16	8.029 98	256.710 6	−0.870 90
16	10.482 16	256.907 47	−0.865 74
16	14.557 7	256.881 31	−0.862 94

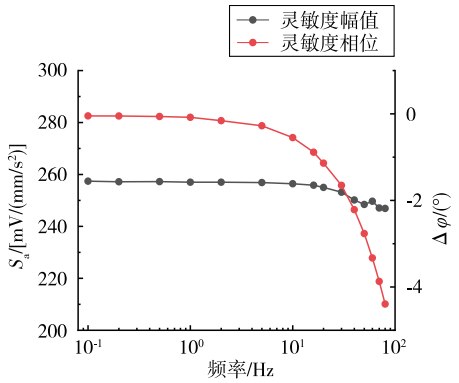


图 6　0.1～80 Hz 的频率响应校准结果

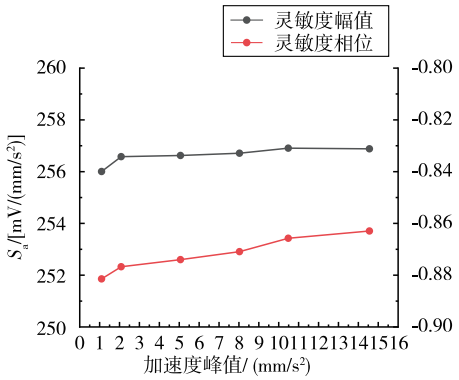


图 7　16 Hz 的灵敏度线性度校准结果

表1和表2给出校准装置在0.1～80 Hz和16 Hz的校准结果。根据校准数据可知，当频率发生变化时，灵敏度幅值变化较小，灵敏度相位在0.1～1 Hz范围内基本不变，在1～80 Hz范围内近似呈线性关系；当加速度幅值发生变化时，灵敏度幅值和相位变化较小且趋势基本相同。当频率低于1 Hz时，受振动台位移行程限制加速度幅值较小。低于0.1 Hz的校准实验留待后续进行。

5 结论

本文设计了一种基于零差激光干涉的低频加速度计校准系统，通过对非线性误差进行补偿，结合动态相位连续展开方法和自适应动态分解算法进行数据采集和处理，解决了数据量过大导致的内存不足和处理速度慢的问题，确保了校准精度。实验结果证明，该校准装置能够实现低频加速度计的校准，且具有较高的校准精度。

参考文献：

[1] Babatain W, Bhattacharjee S, Hussain A M, et al. Acceleration sensors: Sensing mechanisms, emerging fabrication strategies, materials, and applications [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3(2): 504-531.

[2] Guo Y, Chen M, Xiong L, et al. Fiber Bragg grating based acceleration sensors: A review [J]. Sensor Review, 2021, 41(1): 101-122.

[3] Yang M, Cai C, Wang Y, et al. A novel low frequency vibration measurement method based on single camera [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065: 222016.

[4] Ru X, Gu N, Shang H, et al. MEMS inertial sensor calibration technology: Current status and future trends [J]. Micromachines, 2022, 13(6): 879.

[5] Seeger B, Bruns T, Eichstädt S. Methods for dynamic calibration and augmentation of digital acceleration MEMS sensors [C]// 19th International Congress of Metrology (CIM2019), 2019: 22003.

[6] 吕思耀，蔡晨光，孔 明，等. 互易压电加速度计校准技术研究[J]. 计量学报，2023，44(7)：1080-1086.
Lü Siyao, Cai Chenguang, Kong Ming, et al. Research on calibration technology of reciprocal piezoelectric accelerometer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(7): 1080-1086.

[7] Zhai G, Yang X, Lv Q. A calibration system of resonant high-acceleration and metrological traceability [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 125904.

[8] 杨 明，赵焕兴，刘志华，等. 基于地球重力法的低频加速度计校准[J]. 计量学报，2022，43(8)：1064-1069.
Yang Ming, Zhao Huanxing, Liu Zhihua, et al. Calibration of low frequency accelerometer based on the earth's graviation method [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(8): 1064-1069.

[9] 董雪明，王敏林. 基于离心-振动复合装置的加速度计整流误差校准[J]. 计量学报，2022，43(9)：1166-1171.
Dong Xueming, Wang Minlin. Rectification error calibration of accelerometer based on centrifugal-vibration composite device [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(9): 1166-1171.

[10] International Organization for Standardization. ISO 16063-11: 1999. Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry[S]. Geneva: ISO, 1999.

[11] Yang M, Zhu H, Cai C, et al. Bandpass-sampling-based heterodyne interferometer signal acquisition for vibration measurements in primary vibration calibration [J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8586-8592.

[12] 王红杰，蔡晨光，刘志华，等. 基于激光干涉法的谐振式高加速度振动传感器校准技术研究[J]. 激光杂志，2021，42(2)：10-15.
Wang Hongjie, Cai Chenguang, Liu Zhihua, et al. Research on the high-acceleration with resonance vibration sensor calibration technology based on laser interferometry[J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 10-15.

[13] Sun H, Zhang D. Primary low-g shock acceleration calibration using laser interferometry[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2041(1): 012001.

[14] 崔俊宁，李 伟，边星元，等. 面向大振幅、长周期振动校准的零差正交激光干涉测振方法[J]. 红外与激光工程，2021，50(6)：225-232.
Cui Junning, Li Wei, Bian Xingyuan, et al. Homodyne quadrature laser interferometry measurement method for large amplitude, long cycle vibration calibration [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 225-232.

[15] Gregorcic P, Pozar T, Mozina J. Quadrature phase-shift error analysis using a homodyne laser interferometer [J]. Optics Express, 2009, 17(18): 16322-16331.

[16] von Martens H J, Link A, Schlaak H J, et al. Recent advances in vibration and shock measurements and calibrations using laser interferometry[J]. Proc. SPIE, 2004: 5503.

[17] 胡红波，于 梅. 零差激光干涉仪正交相位误差的分析[J]. 光电工程，2012，39(12)：55-62.
Hu Hongbo, Yu Mei. Analysis of quadrature phase-shift error for homodyne interferometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(12): 55-62.

作者简介：

楼丽涵(1998—)，女，硕士研究生，研究方向：光电检测与仪器仪表；

左爱斌(1975—)，男，副研究员，研究方向：激光技术及振动计量研究。