

## 高冲击试验测试装置及校准技术研究

许朝阳<sup>1</sup>, 张振海<sup>1</sup>, 牛兰杰<sup>2</sup>, 李科杰<sup>1</sup>, 张大治<sup>3</sup>, 宋钱骞<sup>1,4</sup>, 张振山<sup>5</sup>, 孙浩琳<sup>3</sup>

(1 北京理工大学 北京 100081;

2 西安机电信息技术研究所 西安 710065;

3 航空工业北京长城计量测试技术研究所 北京 100095;

4 北京旋极信息技术股份有限公司 北京 100094;

5 北京海泰微纳科技发展有限公司 北京 102200)

**摘要:** 研制出 Hopkinson 杆(霍普金森杆)高冲击加载装置, 搭建起高冲击测试校准系统, 基于 LabVIEW 和 Matlab 软件开发环境, 编写系统控制程序, 数据分析与处理程序, 以高冲击 MEMS 加速度传感器为被测对象, 开展冲击测试与校准技术研究, 解算出传感器冲击灵敏度和频率响应指标。试验结果表明: 利用该试验测试装置对冲击传感器进行测试校准, 满足传感器主要静态指标测试要求; 对传感器频响指标进行测试校准, 得到传感器幅频特性和相频特性曲线, 满足传感器动态特性测试要求。该 Hopkinson 杆冲击试验测试校准装置及测控系统能够实现冲击加速度传感器主要静态特性和动态特性的测试校准要求, 平均灵敏度为  $0.657\ 548\ \mu\text{V/g}$ , 不确定度优于 4%, 幅值线性度偏差  $\leq \pm 5\%$  的工作频带为 12.5 kHz。本研究对高冲击试验测试的应用提供一定借鉴和参考。

**关键词:** 霍普金森杆; 测试校准; 高冲击传感器; 灵敏度; 频率响应

中图分类号: TP212.1; TB936 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)03-0069-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221203001

引用格式: 许朝阳, 张振海, 牛兰杰, 等. 高冲击试验测试装置及校准技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 69-77.

## Study on dynamic calibration of high-impact test and measuring system

XU Zhaoyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhenhai<sup>1</sup>, NIU Lanjie<sup>2</sup>, LI Kejie<sup>1</sup>, ZHANG Dazhi<sup>3</sup>,

SONG Qianqian<sup>1,4</sup>, ZHANG Zhenshan<sup>5</sup>, SUN Haolin<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China;

3. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

4. Beijing Watertek Information Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;

5. Beijing High-tech Micro & Nano Technology Development Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** Based on the Hopkinson bar shock test system, the cylindrical projectile is used to hit the elastic long pole. It's convenient for the controlling of the system to design the single-chip computer control box and the upper computer software. The strain gauge is used to collect the stress wave pulse signal in the elastic long rod. The software is written to complete the test and calibration of the sensor in LabVIEW and Matlab environment, which is used to calculate the sensitivity parameters and frequency response curve calculation of the sensor. The quasi-static performance and dynamic performance of the acceleration sensor should be calibrated to ensure the normal using of the sensor in practice. After experimental verification, the shock calibration system with narrow pulse width signal for MEMS sensor basically meet the design requirements, which have good running condition and available test results, mean sensitivity is  $0.657\ 548\ \mu\text{V/g}$ , uncertainty of measurement is within 4%. The amplitude linearity bias is less than  $\pm 5\%$ , and working band is 12.5 kHz. This paper provides a certain reference significance and function for the measurement and calibration of high-impact MEMS acceleration sensors.

基金项目: 科工局国防技术基础项目资助 (202020230028); 装备预先研究背景项目资助 (ZW040202)

通信作者: 张振海 (zhzhang@bit.edu.cn)

收稿日期: 2022-12-03 修回日期: 2023-01-23

**Keywords:** Hopkinson bar; Measurement and calibration; High-impact sensor; Sensitivity parameters; Frequency response

**Citation:** XU Zhaoyang, ZHANG Zhenhai, NIU Lanjie, et al. Study on dynamic calibration of high-impact test and measuring system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 69–77.

## 引 言

硬目标侵彻武器是打击敌方高价值目标的撒手锏武器, 关键技术之一就是智能灵巧引信, 其核心器件高冲击加速度传感器的作用是准确识别楼层数, 实现精确炸点起爆控制, 达到最佳毁伤效果<sup>[1]</sup>。为了保证高冲击加速度传感器在实际工程应用中可靠工作, 特别是在极端恶劣强冲击环境下不发生失效, 需要对传感器主要静态参数指标和动态参数指标进行测试校准。静态参数的测试校准主要针对峰值灵敏度、不确定度等指标; 动态参数的测试校准主要针对频率响应, 通常以工作频带作为统一的量化指标<sup>[2]</sup>。

高冲击加速度传感器的灵敏度测试校准方法主要有比较法和绝对法两种。比较法是工程中常用方法, 即: 待测传感器和标准传感器背靠背刚性硬连接安装在同一支砧体上。将待测传感器的输出与标准传感器的输出信号进行比较, 依据标准传感器已知特性指标, 以及两支传感器输出值, 解算出待测传感器性能指标。绝对法是指利用冲击校准装置, 通过直接测量冲击加速度峰值和脉宽, 以及待测传感器的输出值, 来确定该传感器性能参数的一种方法。改变校准装置的激励频率, 可以绘制出传感器的幅频特性和相频特性。中北大学以空气炮作为冲击加载激励源, 利用激光干涉测振仪记录冲击的全过程, 实现传感器冲击灵敏度测试校准<sup>[3]</sup>。中国科技大学采用 Hopkinson 杆校准装置, 对石英压电传感器测量进行冲击测试与校准<sup>[4]</sup>。南京机械高等专科学校从理论上进行分析, 给出了利用 Hopkinson 杆作为冲击加载试验装置, 以应变片作为测量手段进行传感器灵敏度测试的方法<sup>[5]</sup>。西北工业大学使用 Hopkinson 压杆技术和应变式传感测试技术, 完成了对冲击加速度传感器灵敏度的测试校准<sup>[6]</sup>。传统的 Hopkinson 杆冲击校准装置的弹丸与 Hopkinson 杆冲击端部距离一定, 冲击加速度峰值主要依靠压缩空气加载压力调节, 压力越大, 峰值越高。本文设计的 Hopkinson 杆冲击校准装置的特色是弹丸与 Hopkinson 杆冲击端部距离可灵活调节, 通过安装在电磁铁连

接杆前端的电磁铁吸住弹丸, 前后移动, 调整弹丸与 Hopkinson 杆端面之间的距离, 并与压缩空气加载压力两者配合, 共同调节冲击加速度峰值, 调节方式更加灵活、便捷。

本文以 Hopkinson 杆作为冲击信号激励发生装置, 以应变式传感测试系统输出信号作为冲击激励基准信号, 以实验室自研的 Hopkinson 杆冲击加载装置及测控软件系统为试验条件, 基于美国国家仪器公司 NI 公司高速多通道数据采集器及 LabVIEW 虚拟仪器程序开发环境, 进行程序设计实现多通道数据采集, 基于 Matlab 程序设计进行数据处理与解算, 实现了被校传感器的主要静态特性指标和动态特性的测试校准, 简化了操作流程, 提高了测试效率。

## 1 Hopkinson 杆冲击校准装置设计与原理分析

### 1.1 冲击校准装置设计与试验系统搭建

本文研制的 Hopkinson 杆冲击校准装置试验系统框图和实物图如图 1 和图 2 所示, Hopkinson 杆为长 2 m、直径 12 mm 的细长圆棒, 采用钛合金材料, 其基本原理为: 压缩空气驱动试验弹丸沿直线运动与 Hopkinson 杆首端的端面碰撞, 应力波沿 Hopkinson 杆高速传播。被校传感器安装在砧体上, 两者共同安装于 Hopkinson 杆尾端的端面上, 应力波传播至 Hopkinson 杆端面, 激励产生冲击加速度, 作用于砧体和传感器。砧体与传感器通过螺纹硬连接安装在 Hopkinson 杆端面上, 在螺纹连接处均匀涂抹凡士林, 利于高频信号传播。

冲击校准装置的激励弹丸为直径 12 mm、长 20 mm 的平端面不锈钢圆柱形结构, 压缩空气的加载压力可以依据期望冲击加速度峰值灵活设定。弹丸与 Hopkinson 杆端面距离一定时, 压缩空气的压力大小决定了冲击加速度激励峰值的大小, 改变距离和压力大小可以调节冲击加速度激励峰值。冲击加载时弹丸不发生变形, 产生的应力波(为弹性波)近似于半正弦波形, 其宽度为几十微秒。在 Hopkinson 杆中间位置贴两支应变片, 以检测弹性波。应变片贴在 Hopkinson 杆中间位置, 即距离杆端

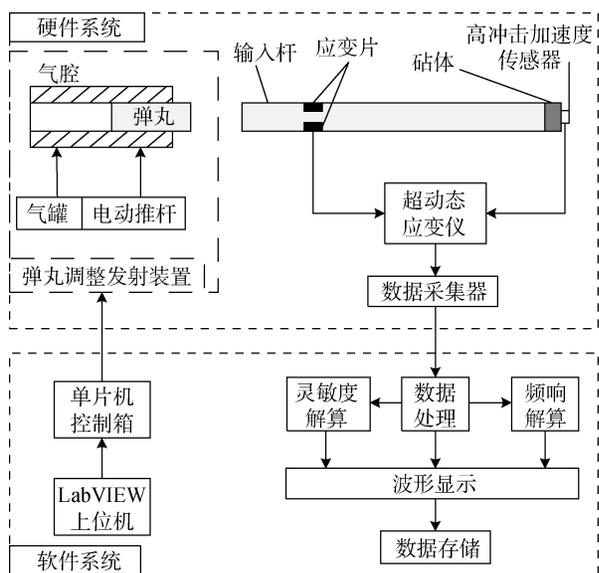


图 1 Hopkinson 杆高冲击试验系统框图

Fig.1 Schematic diagram of Hopkinson bar high-impact test system



图 2 Hopkinson 杆高冲击试验系统实物图

Fig.2 Experimental device of Hopkinson bar high-impact test system

面 1 米左右的位置，以区分入射波和反射波，避免应力波在 Hopkinson 杆中来回振荡导致波形叠加在一起不易辨识。应变片与动态应变仪接线盒组成惠斯通半桥电路，应变式传感测试系统测量得到的应变信号与被校传感器信号经调理放大后，进入 NI 高速采集器，编写 LabVIEW 数据采集程序，自动存储于计算机硬盘，经由 Matlab 数据处理程序进行信号解算。LabVIEW 程序和单片机硬件测控系统共同完成 Hopkinson 杆测试校准任务。

Hopkinson 杆弹丸发射装置的实物图和结构示意图如图 3 和图 4 所示。其工作过程为：首先，通过安装在电磁铁连接杆前端的电磁铁吸住弹丸，步进电机工作，推杆调整弹丸与 Hopkinson 杆端面之间的距离，移动至发射位置完成初始后，电磁

铁断电，推杆退回原位；其次，手动打开进气阀门，向气罐中加载压缩空气至指定气压；然后，等一切准备就绪，按下发射按钮，气罐中的压缩空气通过气腔上方进气口突然释放，压缩空气驱动弹丸在气腔中加速向前运动，撞击 Hopkinson 杆端面，完成一次冲击加载与测试。与传统的 Hopkinson 杆冲击加载装置相比，通过电磁铁吸附和步进电机推杆方式，快速调节弹丸与 Hopkinson 杆端面的距离，精确控制冲击加速度峰值，是本研究中冲击校准装置的特色和优势。

气腔 进气口 电磁铁连接杆 步进推杆

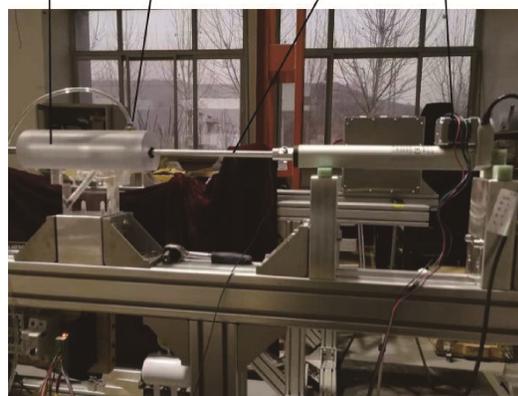


图 3 弹丸发射装置实物图

Fig.3 Experimental device of cylindrical projectile device

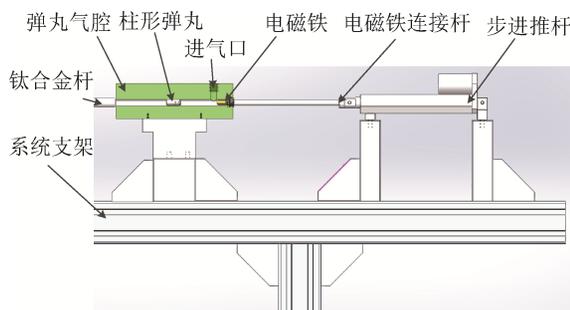


图 4 弹丸击发装置结构示意图

Fig.4 Structure sketch of cylindrical projectile device

### 1.2 Hopkinson 杆冲击加载原理分析

程序控制系统软件界面和单片机控制系统如图 5 和图 6 所示，由 LabVIEW 程序软件与单片机硬件系统联合控制。LabVIEW 上位机软件通过串口向单片机控制系统发送命令，实现调整弹丸位置、击发弹丸、气罐进气等功能；单片机解析 LabVIEW 上位机软件发送的命令，完成相应控制动作。

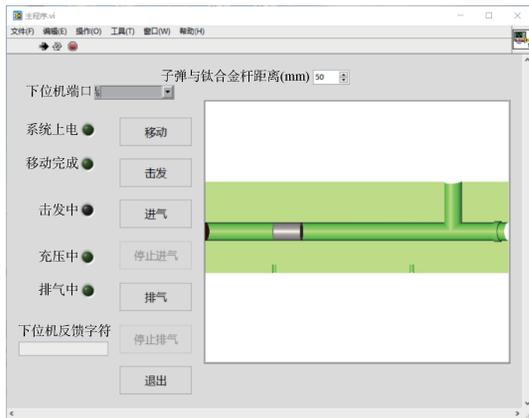


图 5 LabVIEW 上位机软件界面

Fig.5 Upper computer software based on LabVIEW

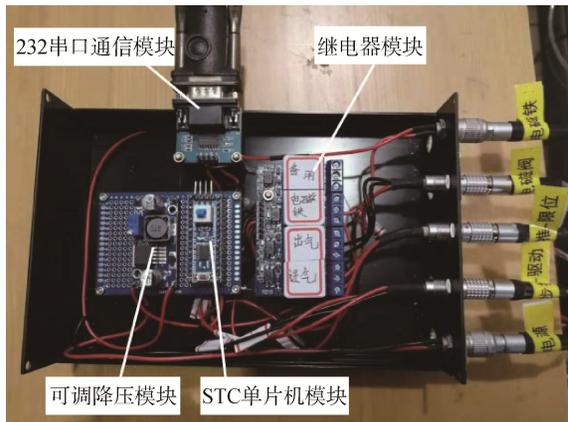


图 6 单片机控制系统

Fig.6 Single-chip computer control system

一根均匀的弹性长杆, 杆的一端受到外力冲击作用时, 杆内产生轴向微小变形。取变形前( $t=0$ 时刻)的质点的空间位置作为物质坐标, 把位移  $U$  看成质点坐标  $x$  和时间  $t$  的函数:  $U=F(x, t)$ , 自变量  $x$  称为物质坐标, 并选取杆轴线为  $x$  轴向。假定: 杆在变形时, 杆的横截面保持平面, 沿截面只有均匀的轴向应力, 应力只是应变的单值函数, 则一维杆中应力波传播的一维波动方程为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - C_0 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

假设应力波在杆中传播的衰减效应和弥散效应可以忽略, 得到杆的自由端质点速度为

$$V_1 = 2C_0 \varepsilon(t) \quad (2)$$

其中,  $C_0$  为应力波在长杆中传播的速度。

基于应变式传感器与动态应变仪构成的惠斯通电桥电路, 测量杆中传播的应变信号, 动态应变仪出厂测试应变片灵敏度系数是  $K=2.0$ , 当使用灵敏

度系数为  $K_p$  的应变片进行测量时, 实际应变值为

$$\varepsilon_p = \frac{K}{K_p} \varepsilon_c \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_p$  为实际的应变值;  $\varepsilon_c$  为测得的应变值;  $K_p$  为电阻应变片的灵敏度。

计算时加入应变片灵敏度修正系数, 因此 Hopkinson 杆端面激励速度为

$$V_1 = 2C_0 \varepsilon_p(t) \quad (4)$$

若被测传感器的灵敏度为  $S_a$ , 放大器增益为  $K_a$ , 输出的电压幅值为  $U_a$ , 则被测传感器受到的冲击加速度激励为

$$a_1(t) = \frac{U_a(t)}{(S_a K_a)} \quad (5)$$

被测传感器安装面的速度为

$$V_2 = \int_0^t \frac{U_a(\tau)}{S_a K_a} d\tau \quad (6)$$

被测传感器通过安装螺钉与 Hopkinson 杆端面紧密相接, 且加载脉冲为压缩脉冲, 当被测传感器的质量可以忽略不计时, 其所受到的速度与界面的质点速度相等。公式(4)与公式(6)中的速度相等, 即可得到传感器的灵敏度。

$$C_0 \varepsilon(t) = \int_0^t \frac{U_a(\tau)}{2S_a K_a} d\tau \quad (7)$$

$$S_a(t) = \frac{\int_0^t U_a(\tau) d\tau}{2C_0 \varepsilon_p(t)} \quad (8)$$

也可以利用位移相等进行推导分析。将公式(4)和公式(6)在加载脉宽范围  $[0, T]$  内积分后相等, 可得到灵敏度系数的平均值<sup>[7]</sup>。

$$S_a = \frac{\int_0^T \int_0^t U_a(\tau) d\tau dt}{2K_a C_0 \int_0^T \varepsilon_p(t) dt} \quad (9)$$

Hopkinson 杆也被称为 Davies Bar 或 Kolsky Bar<sup>[8]</sup>, 试验研究表明: 若要使一维应力波在杆中传播过程中, 衰减效应和弥散效应可以忽略, 则应变脉冲的波长要远大于 Hopkinson 杆的直径。应力波在杆中的传播频率为

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10)$$

波长计算公式为

$$\lambda = \frac{C_0}{f} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11),得波长为

$$\lambda = 2LC_0 \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (12)$$

式中:  $L$  表示杆的长度;  $E$  表示弹性模量;  $\rho$  表示杆的材料密度;  $f$  表示应力波频率;  $\lambda$  表示应力波长。

本文研制的 Hopkinson 杆冲击试验加载装置, Hopkinson 杆材料为钛合金, 其弹性模量  $E_{Ti} = 11.76 \times 10^4$  MPa, 密度  $\rho_{Ti} = 4.52$  g/cm<sup>3</sup>, Hopkinson 杆长度为 2 000 mm, 直径为 12 mm, 应力波在钛合金材料中的传播速度  $C_0 = 5 100$  m/s, 根据公式(12)计算应力波波长为

$$\lambda = 2LC_0 \sqrt{\frac{\rho}{E}} = 2 \times 2 \times 5 100 \times \sqrt{\frac{4.52}{11.76 \times 10^{10}}} = 0.13 \text{ m} = 130 \text{ mm}$$

被测传感器与安装砧体总长度小于 13 mm, 远小于该应力波的波长。另外, 该 Hopkinson 杆直径  $D = 12$  mm,  $\lambda \gg D$  的条件也满足。

### 1.3 应变式传感器测试信号修正

在截取有效数据段应变式传感器测试信号的脉宽时, 所测弹性波为半正弦信号, 其下降段波形不光滑, 有不同程度的波动, 导致半正弦波形的脉宽时间延长, 计算结果产生较大误差。为了减小计算结果的误差, 需要对应变片脉宽信号进行修正, 流程图如图 7 所示。首先, 从全部测试信号的波形中截取半正弦波形内的有效信号数据段 Str\_Data, 为了避免信号采样点数量过少, 对截取后的脉宽信号进行三次样条插值 Str\_Data\_interp, 之后对插值信号 Str\_Data\_interp 进行微分 D\_Str\_Data\_interp, 对微分信号 D\_Str\_Data\_interp 在最低点拉平, 将信号积分运算, 最终修正后的波形如图 8 所示。与之前信号相比, 应变片信号有较大改善。

## 2 实验结果与分析

本文研制的 Hopkinson 杆冲击校准装置, 被校对象为单轴冲击 MEMS 传感器, 传感器编号为 CCJ-YZ-201-Y050342。被校传感器桥压设置为 10 V, 信号放大倍数设置为 40 倍; 粘贴在 Hopkinson 杆中间的两支应变片以半桥电路形式接入, 惠斯通电桥的桥臂电阻为 120  $\Omega$ 。为了提高应变片信号的信噪比, 应变片的桥压设置为 4 V, 信号放大倍数设置为 100 倍。由于 Hopkinson 杆测试时信号脉宽窄, 仅为几十微秒, 为防止滤波处理引起传

感器信号和应变片信号失真, 应变仪测试通道低通滤波截止频率设置为 500 kHz。

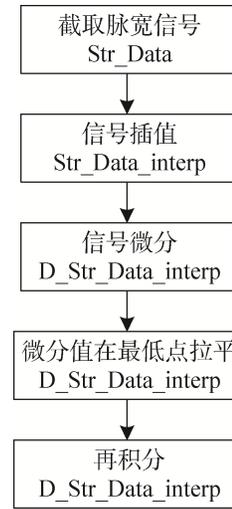


图 7 信号修正流程图

Fig.7 Schematic diagram of signal correction

在冲击加载试验测试过程中, 以不同的加载压力击发弹丸, 进行了 11 次冲击加载测试, 图 9 为采集的典型原始数据波形, 红色波形为应变片测试通道测量的应力波激励起的冲击加速度信号, 蓝色波形为被测传感器的输出响应信号。从图中可以看出: 两条曲线第一个波形的时间差  $\Delta t \approx 0.2$  s, 应力波在钛合金杆中的波速  $C_0 = 5 100$  m/s, 计算得到被测传感器与应变片之间的距离大约为 1.02 m, 与实际距离 1.01 m 几乎完全一致。在 Hopkinson 杆应力波信号解算时, 根据公式(9), 灵敏度解算只需要分析测试信号的第一个波峰, 其余波形为应力波在 Hopkinson 杆中来回振荡产生的波形, 可以忽略, 因此激励信号和响应信号只保留第一个波峰。图 10 为截取的第一个波形有效信号, 并进行归一化处理, 图中波形基本吻合, 表明实验采集到的数据有效。

### 2.1 传感器静态性能指标测试

表 1 给出了解算后的测试结果。  $a$  为冲击加速度,  $\tau$  为信号脉冲宽度,  $S_a$  为解算出的传感器灵敏度,  $S_a^b$  为该支传感器的理论灵敏度,  $\bar{S}_a$  为测试解算出的灵敏度平均值,  $K_a$  为测试灵敏度偏差,  $Q_a$  为灵敏度不确定度,  $\bar{K}_a$  为测试灵敏度偏差均值。由公式(9)可得到传感器灵敏度。被测传感器理论灵敏度为 0.65  $\mu$ V/g, 从表 1 中可以看出, 除第五次测试灵敏度偏差为 7.98% 外, 其余测试结果灵敏度偏

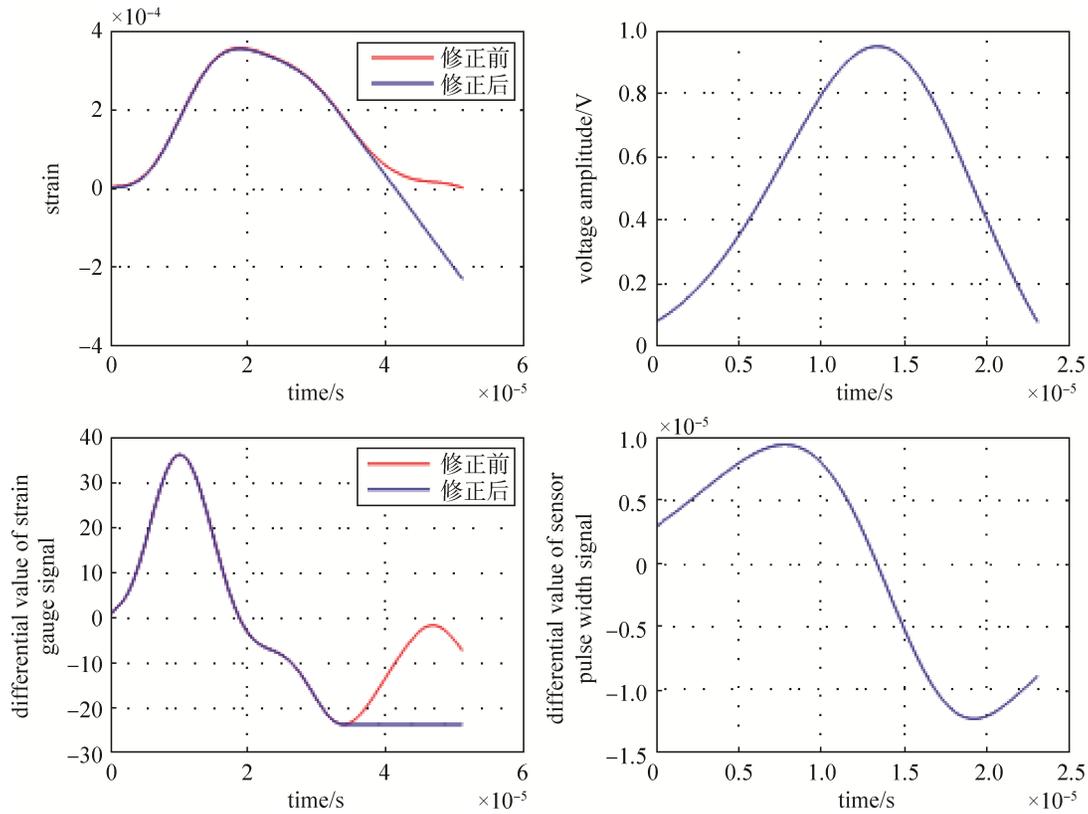


图 8 应变测试信号修正曲线

Fig.8 Waveform of strain gauge signal correction

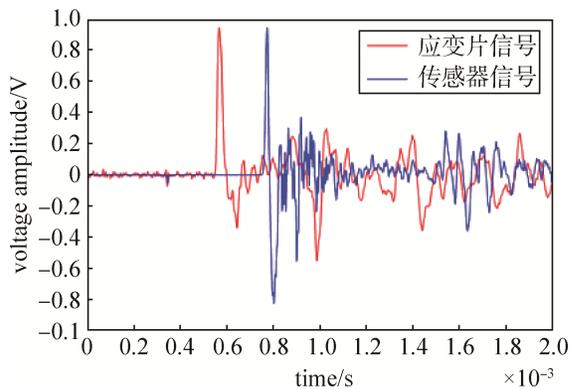


图 9 传感器和应变片原始信号

Fig.9 Original waveform of sensor and strain gauge signal

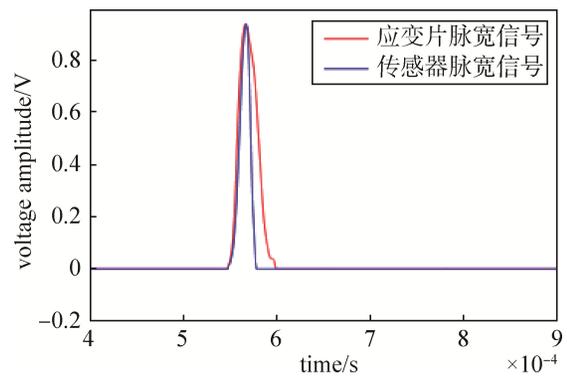


图 10 归一化后的信号波形

Fig.10 Signal waveform of normalization signal

差均不超过 4%，平均灵敏度为  $0.657\ 548\ \mu\text{V/g}$ ，平均灵敏度偏差为 1.16%，满足测试校准要求。图 11 给出了被校传感器灵敏度偏差的分布情况，该支传感器的不确定度去除第五次试验偏差较大的试验数据，总不确定度在 1%~4% 范围。

### 2.2 传感器动态参数指标测试

对于有较高频率测试的被测环境和场景要求，传感器静态参数指标(灵敏度和不确定度)测试校准

已经不能满足需求，需要测试传感器的动态参数指标<sup>[9]</sup>。如图 12 所示，在频域动态性能指标中，常用的参数指标为传感器的工作频带  $\omega_g$  和谐振频率  $\omega_x$ 。工作频带也称为带宽，即对数幅频特性曲线幅值误差为  $\pm 5\%$  或  $\pm 10\%$ (要求较高的情况为  $\pm 1\%$  或  $\pm 2\%$  等)的两种频带  $\omega_{g2}$  或  $\omega_{g1}$ ，谐振频率  $\omega_x$  为对数幅频特性曲线峰值所对应的频率。一般对相位也有要求，例如，在工作频带内相位变化应小于 5、10 或其他规定的数值，需要测试相频特性

表1 传感器测试校准数据

Table 1 Experimental results of sensor data

序号	$a/g$	$\tau/\mu s$	$S_a/(\mu V/g)$	$S_a^b/(\mu V/g)$	$K_a/\%$	$\bar{S}_a/(\mu V/g)$	$Q_a/\%$	$\bar{K}_a/\%$
1	8 737	30	0.638 81		1.72		2.85	
2	9 480	31	0.667 34		2.67		1.49	
3	12 831	27	0.638 06		1.84		2.96	
4	13 414	29	0.635 12		2.29		3.41	
5	14 686	29	0.701 89		7.98		6.74	
6	15 596	28	0.669 61	0.65	3.02	0.657 548	1.83	1.16
7	17 796	27	0.648 84		0.18		1.32	
8	19 544	27	0.642 83		1.1		2.24	
9	21 699	27	0.676 39		4.00		2.87	
10	22 269	28	0.669 53		3.00		1.82	
11	23 677	26	0.644 61		0.83		1.97	

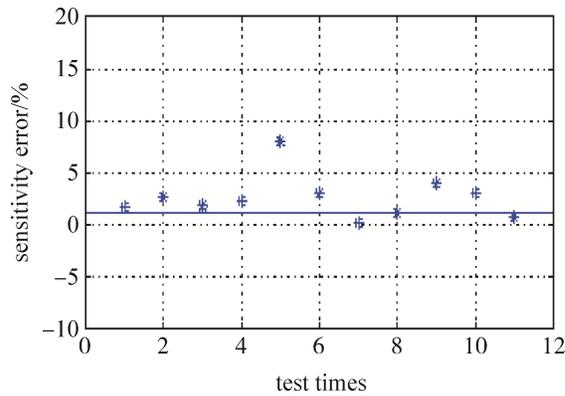


图11 被校传感器灵敏度偏差分布曲线

Fig.11 Bias distribution curve of sensor sensitivity curve.

本文将应变片构成惠斯通电桥电路测试信号, 作为传感器的输入激励信号  $x(t)$ , 传感器输出信号为响应信号  $y(t)$ , 将输入信号和输出信号分别进行傅里叶变换, 得到激励信号和响应信号在频域上的频谱  $X(j\omega)$  和  $Y(j\omega)$ , 传感器的频率响应函数  $H(j\omega)$  为  $X(j\omega)$  和  $Y(j\omega)$  的比值<sup>[10]</sup>, 表达式为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{FFT(y(t))}{FFT(x(t))} \quad (13)$$

传感器的幅频特性可表示为

$$A(\omega) = |H(j\omega)| \quad (14)$$

传感器的相频特性可表示为

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} H(j\omega) \quad (15)$$

在计算传感器频响曲线时, 为了避免反射激励的影响, 截断应变片测量的激励信号和传感器

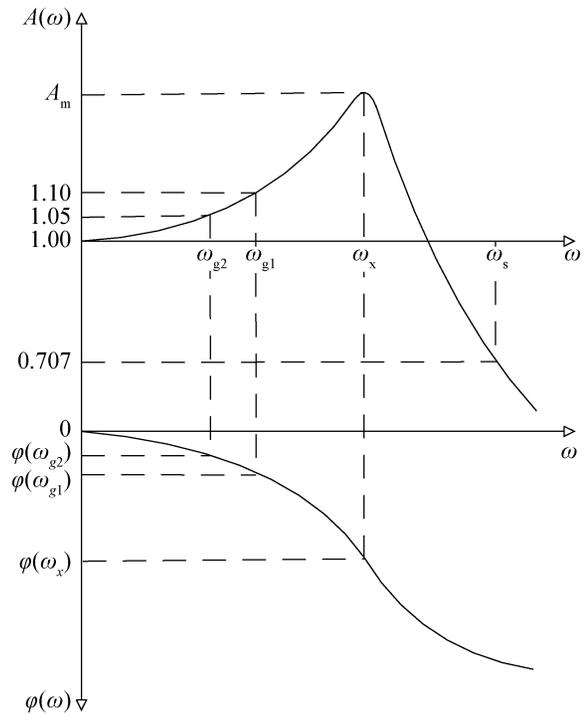


图12 二阶欠阻尼系统的频率特性

Fig.12 Frequency characteristics of second order underdamped system

的响应信号, 图13和图14为应变片和传感器截断后的信号曲线, 横坐标为时间, 纵坐标为归一化后的值。图15和图16为截断后应变片和传感器信号幅频特性曲线, 图17为传感器频响特性曲线, 横坐标为取对数后的频率值, 纵坐标为对数坐标。从图中可以观察到幅频特性曲线中有明显的平直段, 被校传感器幅值误差为  $\pm 10\%$  的工作频带或  $\omega_{g1} =$

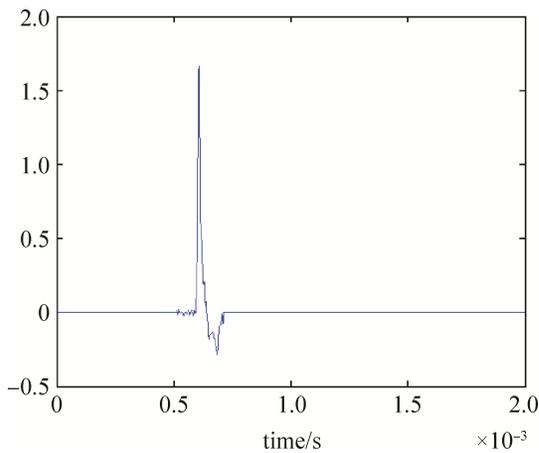


图 13 截断后信号的应变片信号曲线

Fig.13 Correction waveform of strain gauge signal

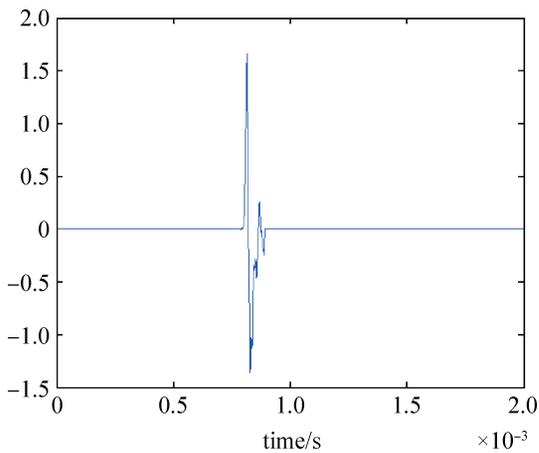


图 14 截断后信号的传感器信号曲线

Fig.14 Correction waveform of sensor signal

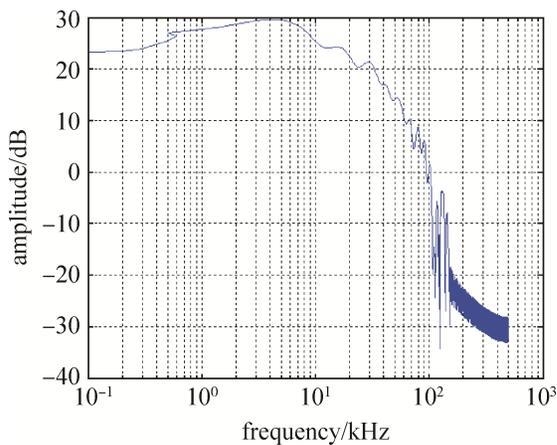


图 15 截断后应变片信号幅频特性曲线

Fig.15 Amplitude frequency characteristic curve of strain gauge signal

18.5 kHz, 幅值误差为  $\pm 5\%$  的工作频带  $\omega_{g2} = 12.5$  kHz, 谐振频率在  $\omega_x = 40$  kHz<sup>[11-14]</sup>。

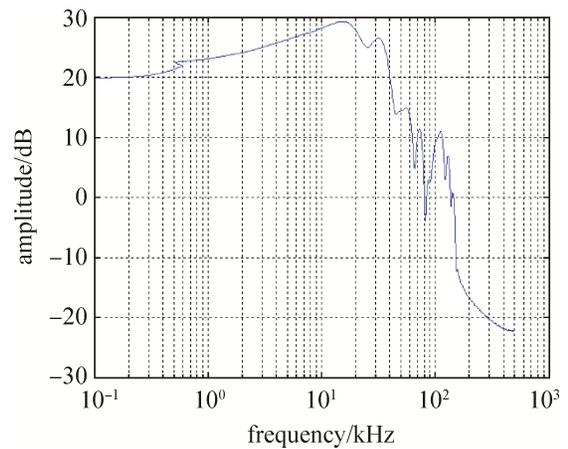


图 16 截断后传感器信号幅频特性曲线

Fig.16 Amplitude frequency characteristic curve of sensor signal

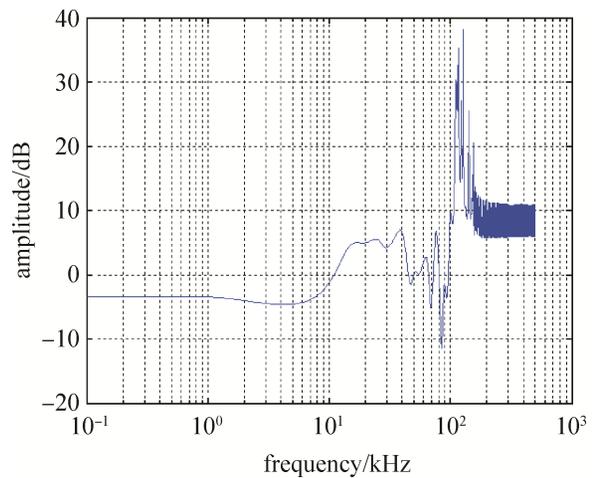


图 17 传感器频率响应曲线

Fig.17 Frequency characteristic curve of sensor

### 3 结束语

本文研制出一套 Hopkinson 杆冲击试验校准装置, 并对高冲击加速度传感器进行冲击测试校准, 以柱形子弹撞击 Hopkinson 杆产生窄脉冲正弦激励, 以应变式传感器和动态应变仪构成的惠斯通电桥电路作为应变测试手段, 基于 LabVIEW 程序和单片机硬件测控系统协同控制, 实现 Hopkinson 杆高冲击测试校准。试验结果表明: 利用该 Hopkinson 杆冲击试验校准装置及测控系统, 能够快速准确地解算出传感器灵敏度和频率响应参数, 实现了对传感器主要静态参数和动态参数快速测试校准, 可广泛应用于高冲击加速度传感器试验测试校准, 为相关研究提供借鉴和参考, 具有重要

的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 张振海, 张振山, 胡红波, 等. 高冲击传感器、极端环境试验测试与计量校准[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 12-23.  
ZHANG Zhenhai, ZHANG Zhenshan, HU Hongbo, et al. Testing and calibration technology of high-g accelerometer and extreme harsh environment test[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(4): 12-23.
- [2] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] 夏伟强. 高冲击加速度测试系统的校准研究[D]. 太原: 中北大学, 2007.
- [4] 王文军, 胡时胜. 高g值加速度传感器的标定[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6): 568-571.  
WANG Wenjun, HU Shijun. Calibration of high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 568-571.
- [5] 盛党红. 标定高g值加速度传感器的方法[J]. 实用测试技术, 1999(6): 33-35.
- [6] 李玉龙, 郭伟国, 贾德新. 高g值加速度传感器校准系统的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(1): 90-96.  
LI Yulong, GUO Weiguo, JIA Dexin, et al. An equipment for calibrating high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 90-96.
- [7] DAVIES R. M. A critical study of the Hopkinson pressure bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990), 1948, 240(821): 375-457.
- [8] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] 黄俊钦. 测试系统动力学及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [10] 潘龙丽, 石云波, 周智君, 等. MEMS高量程加速度传感器的动态特性分析[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1392-1394.  
PAN Longli, SHI Yunbo, ZHOU Zhijun, et al. Dynamic characteristic analysis of MEMS high-range accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1392-1394.
- [11] 刘伊, 范锦彪, 王燕. 基于高冲击台的高量程加速度传感器动态性能分析[J]. 电子器件, 2016, 39(6): 1445-1448.  
LIU Yi, FAN Jinbiao, WANG Yan. Based on high impact accelerometer the dynamic performance analysis of high-level acceleration sensors[J]. 电子器件, 2016, 39(6): 1445-1448.
- [12] 周智君, 石云波, 唐军, 等. 一种大量程加速度传感器的性能测试[J]. 传感技术学报, 2013, 26(6): 834-837.  
ZHOU Zhijun, SHI Yunbo, TANG Jun, et al. Performance testing of a high range accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(6): 834-837.
- [13] 刘波, 程祥利, 杨荷, 等. 基于Hopkinson杆的加速度传感器测试系统仿真与测试研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6): 120-127.  
LIU Bo, CHEN Xiangli, YANG He, et al. Simulation and testing of dynamic loading system for accelerometer based on Hopkinson bar[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6): 120-127.
- [14] 李玺, 范锦彪, 王燕, 等. 基于Hopkinson杆的窄脉冲校准系统[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(1): 124-126, 130.  
LI Xi, FAN Jinbiao, WANG Yan, et al. The narrow pulse calibration system based on Hopkinson bar[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(1): 124-126, 130.

### [作者简介]

许朝阳 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为高冲击试验测试与校准技术。

张振海 1974年生, 博士, 副教授, 博导, 主要研究方向为强冲击试验测试与计量校准。

牛兰杰 1971年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为引信技术。

李科杰 1946年生, 学士, 教授, 主要研究方向为传感与测控技术。

张大治 1977年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为高冲击计量技术。

宋钱骞 1986年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为复杂信号测试与研发管理。

张振山 1970年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高端仪器仪表、设备开发及大项目研发管理。

孙浩琳 1989年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高冲击校准技术。

(本文编辑: 傅 杰)