

# 高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试技术

郝彦朋, 张振海, 许朝阳, 何光

(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对高冲击加速度传感器的频响计量测试问题, 设计了一种可实现冲击加速度传感器频响窄脉冲标定系统; 该系统采用 Hopkinson 杆为试验装置, 以激光多普勒测速仪作为基准信号测量装置, 基于窄脉冲频响计量测试原理, 采用汉宁窗和三次插值方法对信号进行处理, 基于 LabVIEW 和 Matlab 开发环境编写数据处理程序, 实现对被校 MEMS 冲击传感器频响的快速解算; 试验结果表明, 该系统能够快速解算出高冲击加速度传感器的幅频特性函数, 对传感器工作频带的估计误差低于 10%; 该系统避免了不同窄脉冲激励条件下, 对基准信号和加速度传感器输出信号进行处理的复杂流程, 采用适于常规输入信号的信号处理方法, 提升了约 20% 的频响测试效率, 实现了对加速度传感器频响的快速标定测试。

**关键词:** 高冲击加速度传感器; 频响测试; 窄脉冲; 霍普金森杆

## High-g Accelerometer Frequency Response Calibration Test Technology Based on Narrow Pulse Principle

Hao Yanpeng, Zhang Zhenhai, Xu Chaoyang, He Guang

(School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to calibrate the frequency response of high-g accelerometer, a system for calibrating the frequency response of high-g accelerometer with narrow pulse width is designed in this paper. The system uses the Hopkinson bar as the test device, the laser Doppler velocimeter as the reference signal measuring device, based on the measurement principle of narrow pulse frequency response. The Hanning window and cubic interpolation method with higher accuracy are selected to process the signal, and the program is written on the LabVIEW and MATLAB development environment to realize the calculation of the frequency response of the calibrated MEMS high g accelerometer. The test results show that the system can calculate the amplitude-frequency characteristics of high-g accelerometers, the estimated error of the working frequency band of the sensor is less than 10%, and the obtained sensor frequency response characteristics are consistent. So as to improve the efficiency of frequency response calculation, the system abandons the previous specialized signal processing method, adopts a signal processing method that is generally applicable to input signals, improved the frequency response test efficiency by about 20%, and this system is practical in the fast calibration test of accelerometer frequency response.

**Keywords:** high-g accelerometer; frequency response test; narrow shock pulse; Hopkinson bar

## 0 引言

传感器是各种信息获取测试系统的核心元件。高冲击加速度传感器作为高过载测量的关键, 被广泛应用于侵略引信、机械冲击试验、跌落与碰撞试验、武器与火箭试验等测试研究。对高冲击加速度传感器的标定校准是为了获取传感器的动态和静态性能指标, 以利于补偿传感器在经受大过载后的参数偏移<sup>[1-3]</sup>。

高冲击加速度传感器主要用于瞬态冲击动态信号的测

量, 这就需要传感器有良好的动态特性, 对高冲击传感器的动态特性校准十分必要。传感器的动态特性可以通过时域和频域两种分析方法描述, 其中频域方法应用更为广泛。通常以工作频带这个频域的指标作为统一的量化指标, 即定义幅值误差、相位误差小于某个区间的频率范围作为传感器的工作频带。当被校传感器的动态特性不能满足要求时, 可在实际使用过程中通过改善传感器的结构和参数进行动态补偿, 提高传感器的动态性能范围, 使加速度数据的测量结果更加准确, 适用范围更广<sup>[4-5]</sup>。

本文提出了一种高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试技术, 以 Hopkinson 杆作为激励信号发生装置, 采用窄脉冲校准原理, 以激光多普勒测速仪测量基准信号, 运用 MATLAB 和 LabVIEW 实现信号处理和频响解算, 解算出高冲击加速度传感器的频响特性。本文中高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试软件程序将参数设置、数据处理、频响解算、波形显示、数据存储等模块集成一体, 能够方便地调节参数适应不同的高冲击加速度传感器在不同

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-08-21。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61773059); 国防技术基础科研项目(2020148); 国家标准制定项目(202020230028)。

作者简介: 郝彦朋(1993-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 加速度传感器测试技术方向的研究。

通讯作者: 张振海(1974-), 男, 吉林抚松人, 工学博士, 博士后, 副教授, 博士生导师, 主要从事特种军用 MEMS 芯片、超高冲击传感器、极端环境试验与计量测试的基础理论、工程应用与产业化方向的研究。

尺寸 Hopkinson 杆平台上的频响校准测试; 采用了加窗和三次插值的数据处理方法, 降低了快速傅里叶变换造成的频谱泄漏和栅栏效应对精度的影响, 使该软件系统能够适应大多数高冲击加速度传感器的频响校准, 解决了之前需针对特定信号的特点选择不同信号处理方法的问题, 简化了频响校准的操作流程。

## 1 系统结构及原理

本文设计的高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试系统主要由硬件系统和软件系统两部分构成。硬件系统由 Hopkinson 杆、传感器安装砧体、钢珠气动发射与回收装置、激光多普勒测速仪、超动态应变仪、数据采集装置等组成。软件部分主要由数据处理、频响解算、波形显示、存储输出等模块构成, 在 Matlab 和 LabVIEW 平台下编程实现。系统总体结构如图 1 所示。

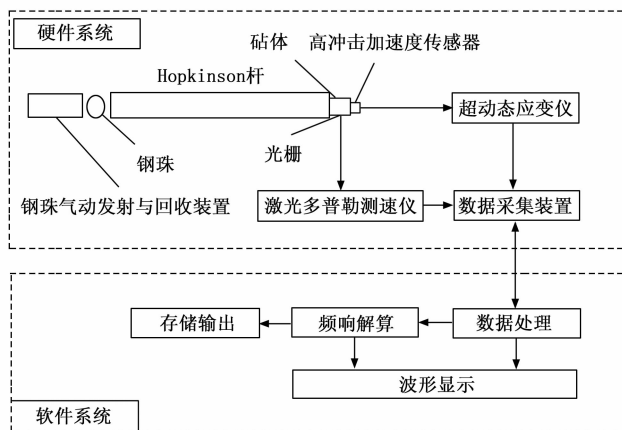


图 1 高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试系统组成

Hopkinson 杆是系统的激励信号发生装置, 钢珠在压缩空气推动下由钢珠气动发射与回收装置瞬态发射出, 钢珠与钛合金杆的左端发生碰撞后被安全回收。瞬时的碰撞过程产生了脉冲宽度极窄的应力波, 沿着杆的轴向快速传递到右端<sup>[6]</sup>。窄脉冲加速度信号加载到硬连接于钛合金杆右端的高冲击加速度传感器, 由激光多普勒测速仪获取输入传感器的激励信号。高冲击加速度传感器输出的响应信号经过超动态应变仪的放大, 由数据采集设备采集和存储, 交由软件系统处理。软件系统先对两路窄脉冲信号进行数据处理, 再进行频响解算, 得到传感器的幅频特性并存储为数据文件。

## 2 窄脉冲频响校准方法

### 2.1 频响校准的性能指标

对高冲击加速度传感器进行频响校准就是要在容许误差范围内测出传感器在频域中的动态性能指标。传感器幅频特性曲线如图 3 所示, 其中, 谐振频率  $\omega_r$  为对数幅频特性曲线上峰值所对应的频率, 对数幅频特性曲线上幅值误差为  $\pm 10\%$  (或  $\pm 5\%$ ) 处所对应的频率即为传感器的工作频带  $\omega_g$ , 是传感器无失真测试的条件; 传感器对数幅频

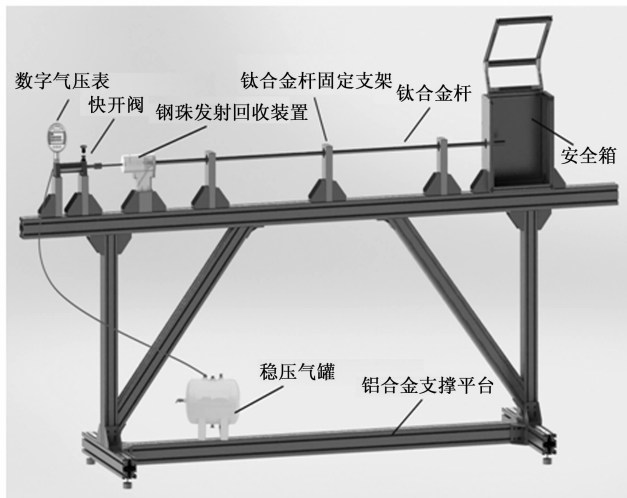


图 2 Hopkinson 杆试验装置

特性曲线上幅值误差在  $\pm 3$  dB 处所对应的频率即为传感器的通频带  $\omega_b$ <sup>[7]</sup>。通频带一般大于一阶谐振频率, 在谐振频率附近传感器动态性能会有较大波动, 所以工作频带对衡量传感器的动态特性更具价值。

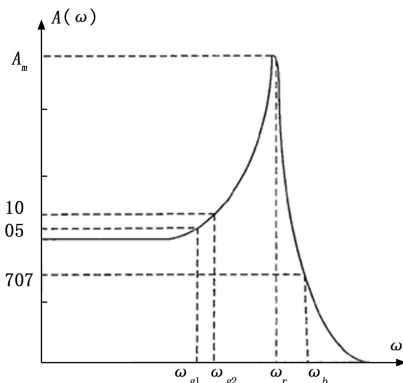


图 3 传感器频响性能指标

### 2.2 窄脉冲校准理论

频响校准的激励信号的频谱要尽可能覆盖被校传感器的各阶模态频率, 高冲击加速度传感器的工作频带在其一阶模态频率之前, 一般为固有频率的  $1/5 \sim 1/3$ <sup>[8]</sup>。高冲击加速度传感器的谐振频率较高, 这就需要有较宽的频谱范围的激励信号才能将高冲击加速度传感器的谐振频率激励出来。单位脉冲信号 ( $\delta$  信号), 幅值为无穷大, 脉冲宽度为 0, 频谱覆盖  $0 \sim \infty$  区间, 是高冲击加速度传感器频响校准的最佳激励信号。但是,  $\delta$  信号是一种理论信号, 现实中只能采用脉宽极小、幅值有限的窄脉冲信号 (即准  $\delta$  信号) 来做为激励源。窄脉冲信号的幅频特性曲线在部分的频段内呈现平直性, 这个频率范围只和脉冲的宽度有关, 而脉冲的波形对频率范围的影响不大。

由图 4 可知, 脉宽越窄信号的高频分量就越丰富, 作为激励源的窄脉冲信号脉宽越窄越能充分激起传感器的各

阶模态。

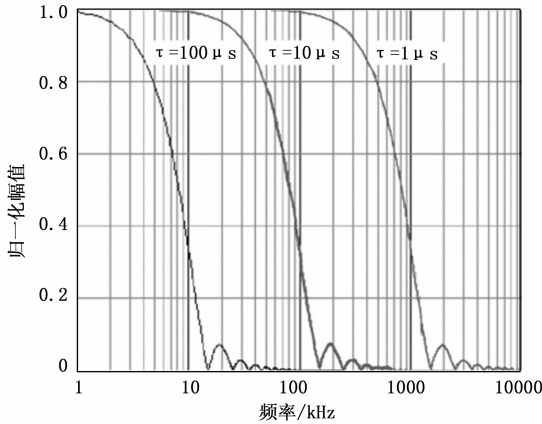


图 4 不同脉宽的半正弦信号的归一化频谱

参考文献 [9] 给出了对不同谐振频率的高冲击加速度传感器的动态特性校准所需窄脉冲的最大脉宽准则：

$$\tau_{\max} = \frac{1.5}{f_x} \quad (1)$$

其中： $\tau_{\max}$  为窄脉冲信号的最大脉宽， $f_x$  为加速度传感器的谐振频率。

在窄脉冲信号满足该准则的情况下，可以近似将其等效为  $\delta$  脉冲，加速度传感器对冲激信号的响应模型如图 5 所示，利用式 (2) 的进行求解。

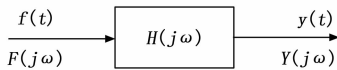


图 5 加速度传感器频率特性校准原理框图

$$y(t) = f(t) * h(t) \quad (2)$$

其中： $f(t)$  为输入传感器的激励信号； $y(t)$  为传感器的响应信号； $h(t)$  为传感器的单位冲激响应信号。

### 2.3 基于汉宁窗和三次样条插值的窄脉冲信号处理方法

在频率域研究传感器动态特性，需要将激励信号和响应信号需要变换到频域，通常利用 FFT（快速傅里叶变换）实现，但是直接对信号运用 FFT 会因为时域截断引起频谱泄漏，影响传感器频响特性的测量精确度。因此需要对加速度传感器的输入和输出信号进行加窗和插值的数据处理，降低由时域截断引起的频谱泄漏和频率离散引起的栅栏效应对校准系统精度的影响。三次样条插值是为了降低离散数据对频响解算的精度影响，提高频域上的分辨率。参考文献 [10] 对矩形窗、汉宁窗、布莱克曼窗、凯撒窗四种窗函数对于频响函数精度的影响进行了研究，经过理论分析和实验验证得出结论：对加速度传感器信号加汉宁窗后的插值 FFT 效果最佳，降低频谱泄漏的同时还具有和真实频谱良好的吻合度。表 1 为几种窗函数的时域表达式。汉宁窗可以看成是一种特殊的升余弦窗，可以看作是 3 个矩形窗的叠加，或者说是 3 个  $\text{sinc}(t)$  型函数之和，三个矩形窗在频率轴上前后错开了  $\pi/T$ ，使信号旁瓣相互抵消，降低

高频干扰和能量泄漏，适用于处理窄脉冲信号。

表 1 几种窗函数的时域表达式

窗函数名称	时域表达式
矩形窗	$w(k) = R_N(k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$
汉宁窗	$w(k) = 0.5 \left[ 1 - \cos\left(2\pi \frac{k}{N+1}\right) \right]$
布莱克曼窗	$w(k) = 0.42 - 0.5\cos\left(2\pi \frac{k-1}{N-1}\right) + 0.08\cos\left(4\pi \frac{k-1}{N-1}\right)$
凯撒窗	$w(k) = \frac{I_0 \left[ \beta - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2k}{N-1}\right)^2} \right]}{I_0(\beta)}$ $I_0(\beta)$ 为零阶贝塞尔函数, $\beta$ 为窗函数调整系数

### 2.4 频响函数解算方法

式 (2) 两边取傅里叶变换，从时域变换到频域，可求出传感器的频响函数<sup>[11]</sup>：

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (3)$$

其中： $F(j\omega)$  为激励信号的傅里叶变换； $Y(j\omega)$  为响应信号的傅里叶变换。

两组信号快速傅里叶变换由式 (4)、(5) 计算：

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(nT_s) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5)$$

式中， $N$  为 FFT 点数； $k = 0, 2, \dots, N/2$ ； $T_s$  为采样周期。

传感器的幅频特性可表示为：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} \right| \quad (6)$$

由高冲击加速度传感器的幅频特性函数绘制幅频特性曲线，标定传感器的工作频带。

## 3 频响校准软件程序设计与实验测试

### 3.1 窄脉冲校准软件程序设计

基于 Hopkinson 杆的校准系统获取的实验数据，需要对测试信号处理和解算，为快速、准确、直观地解算出高冲击加速度传感器的动态特性，设计了一种高冲击加速度传感器频响校准软件系统，主要由参数设置、数据输入、数据处理、频响解算、波形显示、数据输出等模块构成。算法主要在 Matlab 平台下编程实现，软件界面和波形显示利用 LabVIEW 实现。

参数设置和数据读取界面主要用于读取存储于采集装置的传感器输出信号数据和激光多普勒测速仪窄脉冲信号数据，分别输入两个数据的存储路径，读取两个表格形式的数据，根据数据绘制信号波形。提取两组数据的采样率  $f_{sf}$  和  $f_{sv}$ 、采样点数  $N_f$  和  $N_v$ ，信号记录时长  $T_{f0}$  和  $T_{v0}$ 。在实

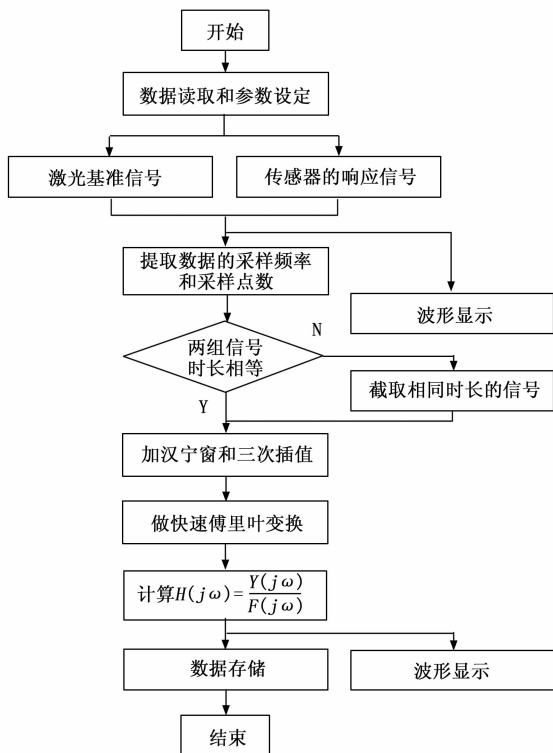


图 6 软件设计思路

际测试过程中, 需要截取两组信号的有效波形部分, 为了保证后续解算传感器频响的正确性, 以记录时长较短的信号为基准, 截取时长为  $T = \min(T_{f0}, T_{y0})$  的信号, 截取后的两组数据的数据点数分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。

调用 Matlab 函数 hann 对两组信号分别加汉宁窗; 再调用 Matlab 函数 spline 对数据做三次样条插值处理, 将点数分别为  $N_1$  和  $N_2$  的两组数据插值为点数为  $N$  的两组数据, 其中,  $N \geq \max(N_1, N_2)$  且  $N = 2^k$ , ( $k$  为正整数),  $N$  取 2 的整数次幂是为了提高 FFT 的性能, 加快运算速度的同时降低因为补零带来的误差。

经过数据处理后的两组信号为点数为  $N$  的时域数据, 窄脉冲激励信号为  $f(t)$ , 传感器输出响应信号为  $y(t)$ 。

将处理后的高冲击加速度传感器响应信号和窄脉冲激励信号进行快速傅里叶变换, 得到  $Y(j\omega)$  和  $F(j\omega)$  两组频域数据, 传感器的频响  $H(j\omega)$  为  $Y(j\omega)$  和  $F(j\omega)$  的比值:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{FFT(y(t))}{FFT(f(t))} \quad (7)$$

为了便于数据的查看与分析, 本软件系统设置了高冲击加速度传感器频响波形显示模块, 以图形化的形式显示解算出的  $H(j\omega)$  数据, 根据高冲击加速度传感器幅频特性曲线进一步分析传感器的频响。同时, 软件界面上设置了数据存储路径选择控件, 将传感器的幅频特性  $|H(j\omega)|$  以电子表格的形式存储到计算机的指定路径, 便于后续研究中的调用和分析。

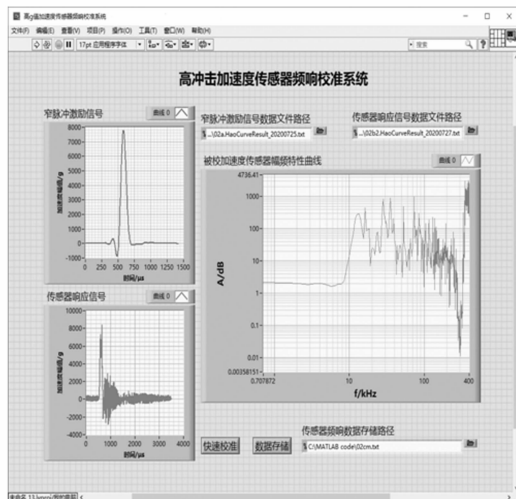


图 7 高冲击加速度传感器频响校准系统软件界面

### 3.2 传感器幅频特性校准实验验证

以两支传感器为例验证本软件算法的可行性, 分析其频响特性。参照文献 [12] 中的实验参数, 设置程序参数, 使用频响校准软件程序对传感器进行标定测试。

1 号传感器的出厂工作频带为 23 kHz, 谐振频率为 28 kHz。选择窄脉冲激励信号数据和传感器响应信号的数据存储路径, 读取数据并将波形显示在软件系统主界面上。图 8 (a) 为激光多普勒测速仪测得的加速度窄脉冲激励脉冲信号, 纵坐标为加速度值, 横坐标为时间轴, 该信号的峰值为 37 910 g, 脉宽为 67  $\mu$ s; 图 8 (b) 为相对应的传感器响应信号, 响应信号中存在一定的谐振现象。

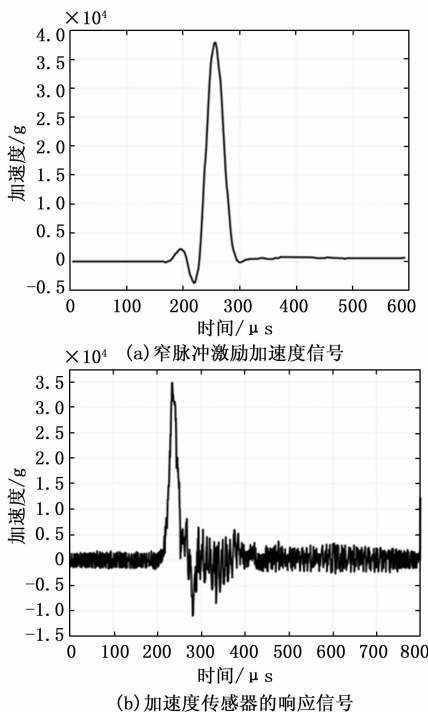


图 8 输入的激励信号和传感器的输出响应信号

点击校准系统软件界面的“快速校准”按钮，程序自动调用数据处理和频响解算 Matlab 程序，并将解算得到的加速度传感器频响特性数据返回到主程序，在主界面显示解算出的幅频特性曲线，并将响数据文件存储到选定的存储路径下。

图 9 为被校传感器的幅频特性曲线，可以观察到该波形图像有明显的平直段和谐振，说明该频响校准系统能够激励起被校传感器的谐振频率；由幅频特性曲线可得出，传感器的工作频带为 25.1 kHz，谐振频率在 30.9 kHz 附近。

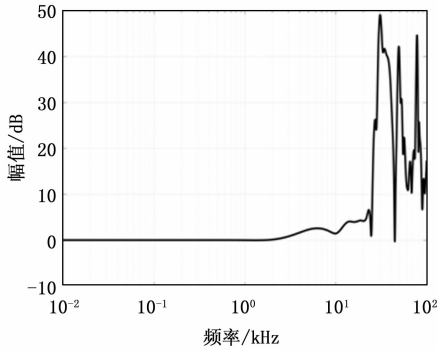
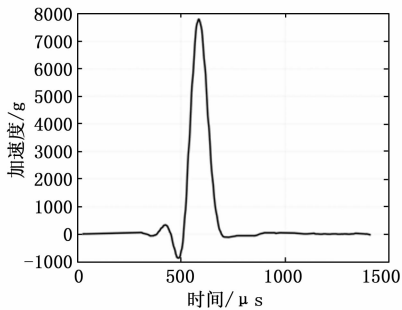
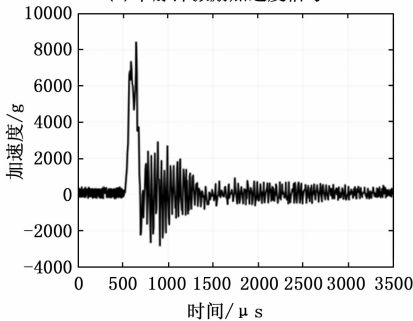


图 9 被校 1 号传感器的幅频特性曲线

对 2 号传感器的频响进行标定测试，2 号传感器的设计工作频带为 8 kHz，谐振频率为 12 kHz。图 10 (a) 为输入 2 号传感器的加速度窄脉冲激励脉冲信号，该信号的峰值为 7 808 g，脉宽为 171  $\mu$ s；图 10 (b) 为 2 号传感器响应信号。



(a) 窄脉冲激励加速度信号



(b) 加速度传感器的响应信号

图 10 输入的激励信号和传感器的输出响应信号

再次将激励信号和传感器响应信号导入标定测试软件进行频响解算，点击“快速校准”按钮后，得到图 10 加速度传感器幅频特性曲线，并将数据文件存储到选定的存储路径下。图 10 为 2 号被校传感器的幅频特性曲线，由传感器的幅频特性数据可得出，传感器的工作频带为 8.8 kHz，谐振频率为 12.7 kHz 左右。

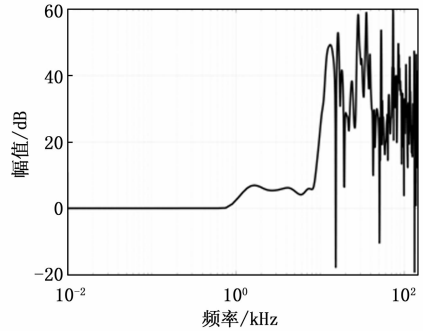


图 11 被校 2 号传感器的幅频特性曲线

### 3.3 实验结果与分析

表 2 为对两支传感器的频响标定测试数据汇总，包括激励信号峰值加速度数据、激励信号脉宽数据、传感器的参考频响和传感器频响实际解算频响。

表 2 被校传感器频响性能数据汇总表格

传感器编号	1	2
窄脉冲激励信号峰值/g	37 910	7 808
脉宽/ $\mu$ s	67	171
参考工作频带/kHz	23	8
实测工作频带/kHz	25.1	8.8
参考谐振频率/kHz	28	12
实测谐振频率/kHz	30.9	12.7

通过测试结果对比可以表明，本文中所设计的高冲击加速度传感器频响校准系统能够有效的获得被测传感器的频响特性，加窗插值的数据处理方法也保证了计算加速度传感器频响的精度，可以对不同频响性能的传感器进行标定测试。

### 4 结束语

本文研究了一种基于 Hopkinson 杆的高冲击加速度传感器频响窄脉冲标定测试技术。以钢珠碰撞 Hopkinson 杆产生窄脉冲激励，激光多普勒测速仪测量激励信号，并设计了一个集成了数据处理、频响解算、结果输出等模块的频响校准软件系统，通过加窗和三次插值等数据处理方法提高了对传感器频响的估计精度，避免了之前只能针对特定信号选择特定数据处理方法的局限性，提高了高冲击加速度传感器频响校准的测试效率，能够快速精确地获得传感器的幅频特性曲线和工作频带。该系统对高冲击加速度传感器的动态特性研究和实际应用有一定的意义。