

文章编号:1006-1355(2021)02-0255-06

压电加速度传感器 H_n 估计校准方法

金冉, 陈伟, 刘国富, 王春羽, 蒲红

(贵州航天计量测试技术研究所, 贵阳 550009)

摘要:针对压电加速度传感器灵敏度校准过程中噪声对校准结果的影响难以消除的问题,结合 H_n 估计方法,利用其多次求互相关函数并求平均值的特性对系统噪声进行抑制。用“半长法”进行互相关计算,对多组采样信号进行互相关计算后再用FFT法进行功率谱计算,可得到功率谱的无偏估计。实验结果证明,利用该方法可提高压电加速度传感器灵敏度校准结果的准确度。

关键词:振动与波;压电加速度传感器;校准; H_n 估计;互相关函数;功率谱估计

中图分类号:O329

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.043

Calibration Method of Piezoelectric Accelerometers Based on H_n Frequency Response Estimation

JIN Ran, CHEN Wei, LIU Guofu, WANG Chunyu, PU Hong

(Guizhou Aerospace Institute of Metrology and Testing Technology, Guiyang 550009, China)

Abstract: In the process of sensitivity calibration of piezoelectric accelerometers, it is difficult to eliminate the influence of noise on the calibration results. Combining with H_n estimation method, the system noise is suppressed by using the principle of iterative calculation of cross-correlation function to find the average value. The “semi-length method” is used for the cross-correlation calculation. After the cross-correlation calculation of multi-group sampling signals, the power spectrum is calculated by FFT method. The unbiased estimation of power spectrum can be obtained. The experimental results show that this method can improve the accuracy of the calibration results of piezoelectric accelerometers sensitivity.

Key words: vibration and wave; piezoelectric accelerometer; calibration; H_n frequency response function estimation; cross correlation function; power spectrum

加速度传感器是航空航天领域进行结构模态分析和振动环境试验必不可少的设备,压电加速度传感器由于其频响性能优良而被广泛应用。压电加速度传感器的灵敏度频响性能是测量或试验结果准确的关键,故对其灵敏度幅频特性进行校准具有重要的意义。

针对其灵敏度幅频特性的校准,行业内普遍采用的方法为正弦逐点校准,也称“单频校准”^[1-2]。传感器校准过程中,影响校准结果准确度的主要因素包括两方面,一方面是传感器安装不同轴、工装刚度和分析仪通道性能不一致等因素引入的系统误

差;另一方面是激振信号叠加或A/D采样过程混入噪声信号,导致结果引入随机误差^[1-2]。目前,一般采用“替代法”减小系统误差,通过大量实践证明,其效果显著。在降低系统噪声影响方面,硬件上采用信噪比较高的激振器和数据采集仪,软件方面计算过程中一般应用 H_1 估计法或 H_2 估计法进一步抑制噪声,可提高测量结果的准确度^[3-7]。

由于 H_1 估计不能消除输入噪声的影响, H_2 估计不能消除输出噪声的影响,故当系统中的噪声变大时, H_1 估计法或 H_2 估计法的噪声抑制效果不明显。滑广军等提出 H_n 估计^[8-9]方法,可在采样数据等长度情况下,使功率谱估计次数变为 $N(N-1)/2$ 次,可较大程度减小噪声对测量结果的影响,该方法主要应用在结构模态分析方面,但在压电加速度传感器校准方面的应用,尚未见文献报道。

功率谱估计是 H_n 估计法必不可少的步骤,用间接法计算功率谱时,应首先计算相关函数,根据定义

收稿日期:2020-03-28

作者简介:金冉(1989-),男,河南省南阳市人,工程师,主要研究方向为振动冲击信号测量及传感器校准技术。

E-mail: ran_jin13@126.com

对有限长度的采样数据进行计算时,相当于给连续函数加三角窗,最终的结果为有偏估计;若采用式(1)计算相关函数:

$$P(\omega) = \sum_{m=0}^M r(m) e^{-j\omega m}, \quad |m| \ll N-1 \quad (1)$$

即在相关函数初始段截取较少的点进行计算,则造成存储空间的浪费;或者采用式(2)对相关函数进行加权处理,可实现功率谱的无偏估计,但对于固定的 N 值,随着 $|m|$ 的增大,其方差性能变坏^[10]。

$$r(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x_N(n) x_N(n+m) \quad (2)$$

$$0 \leq |m| \leq N-1$$

基于以上分析,本文提出一种改进的压电加速度计校准方法:首先用“替代法”激励传感器并进行信号采集;再基于 H_n 估计原理,对采样信号进行分组,并用半长法对不同组的采样数据进行互相关计算;最后求其互功率谱,计算频响函数,实现对信号中噪声抑制,增加测量结果的准确度。

1 压电加速度传感器校准系统及其频响函数

采用比较法校准加速度传感器时,用“背靠背”方式进行安装,压电加速度传感器校准系统的原理图如图1所示。

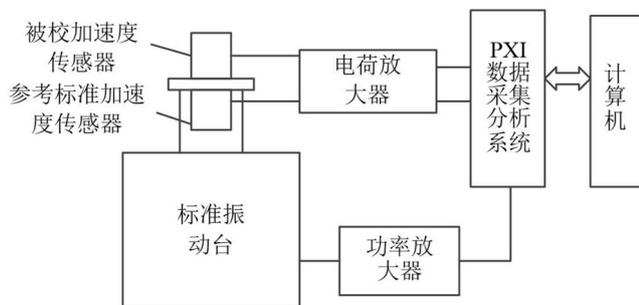


图1 压电加速度传感器校准系统原理图

采用比较法校准时,计算机控制动态信号分析仪(PXI数据采集分析系统)输出对应频率的正弦信号,功率放大器对正弦信号进行放大,驱动标准振动台产生标准振动激励,参考标准加速度传感器与被校加速度传感器的输出信号由电荷放大器进行转换、滤波处理,PXI数据采集系统对输入的传感器信号进行采样并发送到计算机,计算机对离散采样信号进行计算,得到被校加速度传感器的灵敏度。压电加速度传感器校准系统的模型如图2所示。

图2中, $I_1(f)$ 、 $I_2(f)$ 分别为参考标准加速度传感器和被校加速度传感器输出信号的频域表示; $O_1(f)$ 、 $O_2(f)$ 分别为无噪声影响时参考标准加速度传感器

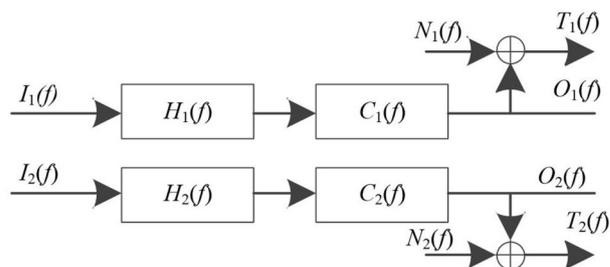


图2 传感器校准系统模型

和被校加速度传感器所采集的并经电荷放大器与PXI数据采集系统处理后得到的信号(以下称“两组测得信号”)的频域表示; $T_1(f)$ 、 $T_2(f)$ 分别为所测得两组信号的频域表示; $N_1(f)$ 、 $N_2(f)$ 分别为这两组信号中引入的噪声信号的频域表示; $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 分别为电荷放大器两通道的频率响应函数; $C_1(f)$ 、 $C_2(f)$ 分别为PXI数据采集分析仪两通道的频率响应函数。

用比较法校准,校准结果同时受到系统误差和随机误差的影响,用替代法校准可减小误差,替代法校准的安装示意图如图3所示。

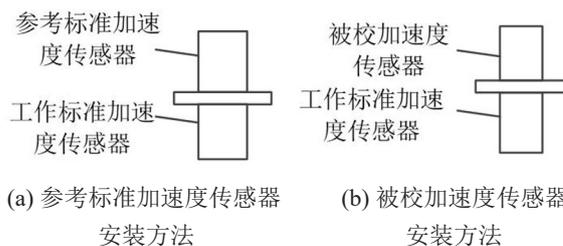


图3 替代法校准安装示意图

参考图3,先用工作标准加速度传感器替代参考标准加速度传感器、参考标准加速度传感器替代被校加速度传感器,测量并存储工作标准加速度传感器和参考标准加速度传感器之间的传递函数 $H_{r/z}(f)$,不考虑噪声的影响:

$$H_{r/z}(f) = \frac{O_{1r}(f)}{O_{2z1}(f)} = \frac{T_{1r}(f) - N_{1r}(f)}{T_{2z1}(f) - N_{2z1}(f)} = \frac{H_1(f)C_1(f)S_r(f)}{H_2(f)C_2(f)S_z(f)} \quad (3)$$

再安装被校加速度传感器,测量并存储被校传感器和工作标准加速度传感器之间的传递函数 $H_{u/z}(f)$,不考虑噪声的影响:

$$H_{u/z}(f) = \frac{O_{1u}(f)}{O_{2z2}(f)} = \frac{T_{1u}(f) - N_{1u}(f)}{T_{2z2}(f) - N_{2z2}(f)} = \frac{H_1(f)C_1(f)S_u(f)}{H_2(f)C_2(f)S_z(f)} \quad (4)$$

将式(1)除以式(2),并进行整理,得:

$$S_u(f) = \frac{H_{u/z}(f)}{H_{r/z}(f)} S_r(f) = \frac{T_{1u}(f) - N_{1u}(f)}{T_{2z}(f) - N_{2z}(f)} \times \frac{T_{2z1}(f) - N_{2z1}(f)}{T_{1r}(f) - N_{1r}(f)} S_r(f) \quad (5)$$

由式(3)至式(5)可知,替代法可消除由通道不一致引起的系统误差,系统噪声成为影响校准结果准确度的主要因素。

2 H_n 估计方法原理

以工作压电加速度传感器的灵敏度计算为例进行说明。同时对含有加性噪声的参考加速度传感器和工作加速度传感器输出信号进行 $N(N \geq 2)$ 次采样, 单次采样时关系式(6)成立。

$$\frac{S_{1i}(f)}{S_2(f)} = \frac{T_{1i}(f)}{T_{2i}(f)} \quad (6)$$

式中: $T_{1i}(f)$ 、 $T_{2i}(f)$ 分别为第 i 组工作加速度传感器和参考加速度传感器输出采样数据的离散傅里叶变换; $S_{1i}(f)$ 为工作加速度传感器的第 i 组灵敏度频响函数, $S_2(f)$ 为参考标准加速度传感器的灵敏度函数。

将分子与分母同时乘以 $T_{2j}(f)$ ($j=i+1, i+2, \dots, N$) 的共轭 $\overline{T_{2j}(f)}$, 再求比值, 得到:

$$\frac{S_{1i}(f)}{S_2(f)} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=j+1}^N \frac{T_{1i}(f) \overline{T_{2j}(f)}}{T_{2i}(f) \overline{T_{2j}(f)}} \quad (7)$$

式中:

$$T_{1i}(f) \overline{T_{2j}(f)} = O_{1i}(f) \overline{O_{2j}(f)} + O_{1i}(f) \overline{Z_{2j}(f)} + Z_{1i}(f) \overline{O_{2j}(f)} + Z_{1i}(f) \overline{Z_{2j}(f)} \quad (8)$$

$$T_{2i}(f) \overline{T_{2j}(f)} = O_{2i}(f) \overline{O_{2j}(f)} + O_{2i}(f) \overline{Z_{2j}(f)} + Z_{2i}(f) \overline{O_{2j}(f)} + Z_{2i}(f) \overline{Z_{2j}(f)} \quad (9)$$

由于噪声信号的各态历经性, 故不同时刻噪声信号的互功率谱、噪声信号与系统输出信号的互功

率谱为零, 故有:

$$\frac{S_{1i}(f)}{S_2(f)} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=j+1}^N \frac{O_{1i}(f) \overline{O_{2j}(f)}}{O_{2i}(f) \overline{O_{2j}(f)}} = \frac{O_1(f)}{O_2(f)} = H_{r/z} \quad (10)$$

即
$$S_{1i}(f) = \frac{S_2(f)}{H_{r/z}} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可见, 应用上述 H_n 估计方法, 可使 $S_{1i}(f)$ 的计算结果不受噪声的影响。同理, 结合式(5), 可计算出 $S_u(f)$, 其计算结果不受噪声的影响。

3 功率谱计算方法

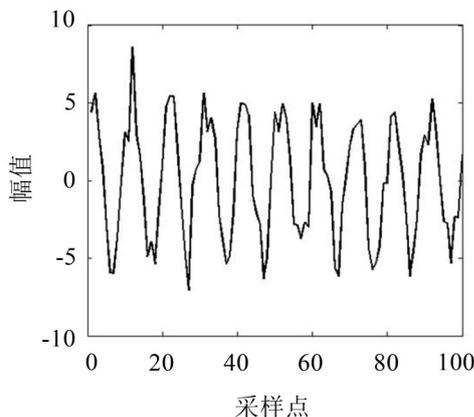
由式(7)至式(10)可知, 互功率谱的计算是整个计算过程中必不可少的环节。根据维纳-辛钦定理, 宽平稳随机信号的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换。本文运用“半长法”计算正弦信号的相关函数, 再运用 FFT 计算其功率谱。采用“半长法”计算互功率谱, 设从同一正弦信号的不同时刻获得的两段离散采样序列为 $x(n)$ 、 $y(n)$, 采样序列的采样频率相同且长度均为 M , 其自相关函数的计算公式为

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M/2} \left(x(n) + x\left(n + \frac{M}{2}\right) \right) y(n+m) \quad (12)$$

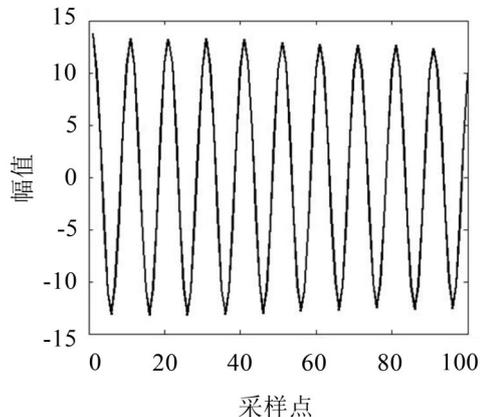
式中: $m=0, 2, \dots, M/2-1$ 。从式(12)可知, 计算相关函数时, 取 $x(n)$ 的一半, 在 $y(n)$ 上做滑动计算, 计算单点 $R_{xy}(m)$ 时所用的乘法次数均为 $M/2$, 加法次数均为 $M/2-1$, 计算结果为无偏估计。

对幅值为 5 的正弦信号, 加信噪比为 10 dB 的高斯白噪声, 将加噪信号进行离散化并截取 10 000 个离散数据, 并将其分为 10 组, 用“半长法”计算其中任意两组离散数据的相关函数, 计算结果的波形如图 4 所示。

从图中可知, 根据“半长法”得到的自相关函数



(a) 加高斯白噪声的正弦信号波形



(b) 采用“半长法”进行自相关计算后的波形

图 4 基于“半长法”计算加噪正弦信号的自相关函数波形

波形平滑且无衰减,达到了抑制噪声的目的,同时保证了波形的完整性,便于对其进行功率谱分析。

用上述10组离散数据计算仿真信号的功率谱密度。方法1:先直接对每组数据进行FFT计算,再对计算结果进行平方运算;方法2:先采用式(2)计算每组数据的自相关函数,再对离散结果进行FFT计算;方法3:先采用“半长法”计算每组信号的自相关函数,再对离散结果进行FFT计算。分别计算根据上述3种方法求得的10组功率谱结果的方差,结果如表1所示。

表1 根据3种方法计算的功率谱的方差

噪声水平/dB	方法1	方法2	方法3
10	0.492 3	0.480 0	0.223 5
20	0.071 7	0.075 3	0.037 2
30	0.006 7	0.007 5	0.003 4

从表1可知,在不同噪声水平下,根据“半长法”计算得到的互功率谱结果的方差较小,约为前两种方法的50%,说明“半长法”抑制平稳信号的噪声效果良好。

4 改进校准方法的实现步骤

H_n 估计利用噪声的互功率谱为零的性质,通过对多组数据求互功率谱,再计算其算术平均值,可有效地抑制噪声对计算结果的影响,提高加速度传感器校准结果的准确度。实现基于 H_n 估计的改进压电加速度传感器校准方法的具体步骤为:

(1) 数据采集并分组。对工作标准压电加速度传感器和参考标准压电加速度传感器的输出信号进行数据采集,并进行分组,保持组数和单组数据长度相同,分别记为 $t_{ri}(m)$ 、 $t_{ui}(m)$ ($i=1, 2, \dots, L; m=1, 2, \dots, M$);

(2) 相关函数计算。对 L 组 $t_{ri}(m)$ 和 $t_{ui}(m)$ 进行互相关计算并求算术平均值,再对 L 组 $t_{ui}(m)$ 求互相关计算并求平均值,计算公式为

$$\begin{cases} R_{ri}(m) = \frac{8}{ML(L+1)} \sum_{i=1}^L \sum_{j=i}^L \sum_{n=1}^{M/2} t_{ri}(n) t_{rj}(n+m) \\ R_{ui}(m) = \frac{8}{ML(L+1)} \sum_{i=1}^L \sum_{j=i}^L \sum_{n=1}^{M/2} t_{ui}(n) t_{uj}(n+m) \end{cases} \quad (13)$$

(3) 功率谱计算。对相关函数进行FFT分析,计算出 $L(L+1)/2$ 组工作标准压电加速度传感器和参考标准压电加速度传感器的输出信号在对应频率点的功率谱密度;

(4) 工作标准加速度传感器灵敏度计算。根据式(6),计算 $L(L+1)/2$ 组工作标准压电加速度传感器的灵敏度,并求算术平均值;

(5) 改变激振频率,重复步骤(1)到步骤(4),并

对工作标准压电加速度传感器在不同频率点处的灵敏度值进行存储;

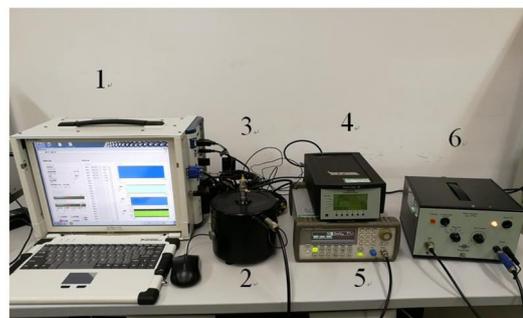
(6) 用被校压电加速度传感器替换参考标准压电加速度传感器,在相同条件下进行激振,并对传感器的输出信号进行处理,数据采集、相关函数计算、功率谱计、被校加速度传感器灵敏度计算等参照步骤(2)到步骤(4)进行。

首次校准时,先执行步骤(1)到步骤(4),用参考标准压电加速度传感器对工作标准压电加速度传感器的灵敏度进行校准并存储,后续校准时,若系统的状态未发生改变,可直接执行步骤(5)到步骤(8),使用测得的工作标准压电加速度传感器的灵敏度对被校压电加速度传感器的灵敏度频响函数进行校准。

5 实验分析

为了验证本文算法的准确性与实用性,设计实验计算被校压电加速度传感器的灵敏度,并计算其标准差。搭建的实验系统中,传感器部分包括两个8305型传感器和一个4368型传感器,配套2692型电荷放大器;振动激励装置包括4809型激振器和2706型功率放大器;信号发生器为33220A型函数发生器,数据采集分析仪由1065型PXIe机箱和4497型高速数据采集板卡组成。由Labview软件产生加有白噪声的正弦离散数据,由控制函数发生器产生激励信号,通过功率放大器驱动激振器产生振动激励。搭建的校准实验系统如图5所示。校准过程中,两个8305型传感器与被校4368型传感器安装方法如图6所示。

以两个8305型压电加速度传感器中的一个作为工作标准压电加速度传感器,另一个作为参考标准压电加速度传感器,以4368型压电加速度传感器作为被校压电加速度传感器,分别以加入信噪比3 dB和10 dB高斯白噪声的正弦信号为激励信号,信号的主频率分别为5 Hz、20 Hz、80 Hz、160 Hz、315



1. 数据采集分析仪 2. 激振器
3. 参考压电加速度传感器与工作压电加速度传感器
4. 函数发生器 5. 电荷放大器 6. 功率放大器

图5 校准实验系统

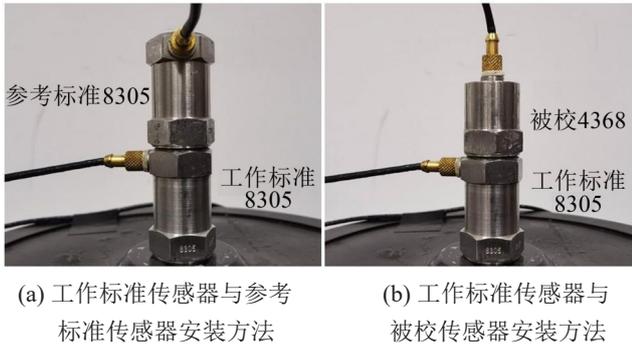


图6 传感器安装图

Hz、630 Hz、1 280 Hz 和 2 000 Hz,在上述8个频率正弦激励条件下,按照替代法的操作步骤,用 H_1 估计法、 H_2 估计法和 H_n 估计法分别测量 4368 型压电加速度传感器的灵敏度,进行 10 次测量并计算平均值,计算结果如表 2 所示。

表 2 中, S 对应的灵敏度值为在中频标准振动系统上测量得到的结果; S_{3dB} 、 S_{3dB} 和 S_{3dB} 分别为 3 dB 信噪比条件下根据 H_1 估计法、 H_2 估计法和 H_n 估计法计算得到的灵敏度值; S_{10dB} 、 S_{10dB} 和 S_{10dB} 分别为 10 dB 信噪比条件下根据 H_1 估计法、 H_2 估计法和 H_n 估计法计算得到的灵敏度值。

以将在标准振动台上测量所得的 10 组数据进行平均得到的结果为真实值,以 3 dB 噪声条件下和 10 dB 噪声条件下根据 H_n 估计法、 H_1 估计法和 H_2 估计法进行 10 次计算所得结果的平均值为实测值,求相对误差,相对误差的绝对值如图 7 所示。

分别计算在 3 dB 噪声条件下和 10 dB 噪声条件下根据 H_n 估计法、 H_1 估计法和 H_2 估计法进行 10 次计算所得结果的标准差,计算结果如图 8 所示。

由图 7 可知,在同一噪声水平下,在对应频率点处,基于 H_n 估计法所得计算结果的相对误差绝对值整体上比基于 H_1 估计法和 H_2 估计法所得结果小;结合图 8 可知,在同一噪声水平下,基于 H_n 估计法计算结果的标准差约为基于 H_1 估计法和 H_2 估计法计算结果的标准差的 1/10,即在单次测量条件下, H_n 估计

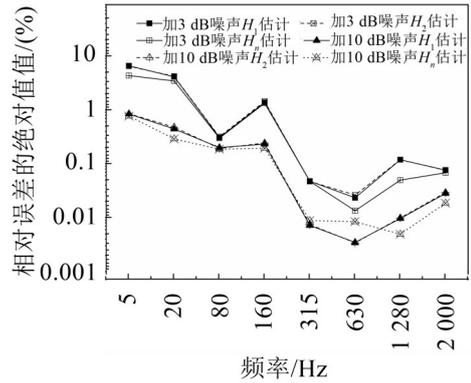


图7 在各噪声条件下根据 H_n 估计、 H_1 估计和 H_2 估计所得结果的相对误差

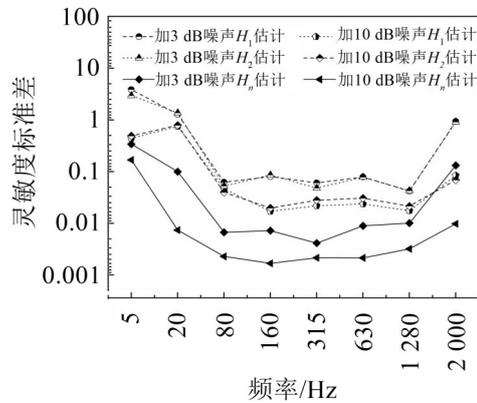


图8 在各噪声条件下根据 H_n 估计、 H_1 估计和 H_2 估计结果所得的标准差

法对噪声的抑制效果较 H_1 估计法和 H_2 估计法好。计算结果证明了本文计算方法的有效性。

6 结语

本文提出了一种压电加速度传感器改进校准方法,并进行了实验验证,结果证明,相较 H_1 估计方法和 H_2 估计方法,噪声对根据该方法所得计算结果的影响更小,它提高了压电加速度传感器校准结果的准确度。在分析替代法校准中噪声对计算结果影响的基础上,介绍了 H_n 估计方法抑制信号噪声的原

表 2 不同噪声水平下被校压电加速度传感器的灵敏度

灵敏度/ ($\mu\text{C}\cdot\text{ms}^{-2}$)	频率/Hz							
	5	20	80	160	315	630	1280	2000
S	5.061	5.553	5.290	5.290	5.184	5.144	5.103	5.043
S_{3dB}	5.370	5.358	5.263	5.214	5.186	5.143	5.096	5.047
S_{3dB}	5.388	5.320	5.273	5.214	5.187	5.143	5.097	5.048
S_{3dB}	5.174	5.147	5.289	5.293	5.217	5.144	5.099	5.050
S_{10dB}	5.104	5.528	5.279	5.278	5.184	5.144	5.103	5.044
S_{10dB}	5.104	5.526	5.280	5.277	5.184	5.144	5.102	5.044
S_{10dB}	5.061	5.553	5.290	5.290	5.184	5.144	5.103	5.043

