

# 压电加速度计在不同安装方式下的响应分析

吕萍, 崔巍, 刘晓晨, 陈坚, 顾振辉

(上海航天动力技术研究所, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 在固体火箭发动机力学试验中, 不同的安装方式会对压电加速度计的响应产生影响, 从而会影响最终的实验结果; 通过建立力学理论模型, 分析得出压电加速度计的安装谐振频率与加速度计和试件间的连接刚度成正比关系; 通过设立多组对比实验, 比较不同安装方式下的压电加速度计灵敏度幅值、相对偏差随频率和加速度的变化关系, 得出不同安装方式下压电加速度计的适用范围; 502 胶水的安装方式可以同时满足精度要求很高、试验时间较长、试验频率范围广的要求, 而胶木座、磁座、磁座+502、双面胶的安装方式均有不同的使用限制; 同时, 通过对比 180°同轴安装和直接安装时的压电加速度计安装传递系数随频率的变化关系, 进一步验证直接安装可以避免多级传递带来的偏差。

**关键词:** 压电加速度计; 安装方式; 灵敏度幅值; 传递系数

## Response Analysis of Piezoelectric Accelerometer under Different Installation Methods

Lü Ping, Cui Wei, Liu Xiaochen, Chen Jian, Gu Zhenye

(Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** In the mechanical test of solid rocket motor, different installation methods will affect the response of piezoelectric accelerometer, which will affect the final experimental results. Through the establishment of the mechanical theoretical model, it is found that the resonant frequency of the piezoelectric accelerometer installation is directly proportional to the connection stiffness between the accelerometer and the test piece. Compare the sensitivity amplitudes and relative deviation of piezoelectric accelerometer under different installation methods by setting up multiple groups of comparative experiments. The installation method of 502 glue can meet the requirements of high precision, long test time and wide test frequency range at the same time, while the installation methods of bakelite base, magnetic base, magnetic base + 502 and double-sided glue have different use restrictions. And the applicable range of piezoelectric accelerometer under different installation methods is obtained. At the same time, by comparing the transmission coefficient of piezoelectric accelerometers installed in 180° coaxial installation and direct installation with the change of frequency, it is further verified that direct installation can avoid the deviation caused by multi-level transmission.

**Keywords:** piezoelectric accelerometer; installation methods; sensitivity amplitude; transmission coefficient

## 0 引言

在固体火箭发动机力学试验中, 除了设计合理的试验夹具<sup>[1]</sup>外, 还需要选择合适的加速度计。在固体火箭发动机力学试验领域, 目前普遍采用压电加速度计进行试验数据的测量。压电加速度计具有体积小、受外界干扰小、测试距离远、使用方便等优点, 符合固体火箭发动机力学试验对试验设备仪器的要求。

随着固体火箭发动机力学试验技术的不断提升和发展, 对压电加速度计的响应准确度的要求也越来越高。加速度计的响应信号不仅是产品结构设计和材料性能改进的重要依据, 其测试结果更直接决定了产品的最终形态<sup>[2]</sup>。影响压电加速度计响应准确度的因素有很多, 包括湿度、温度、安装方式等。本文针对不同的安装方式对压电加速度计的

响应准确度进行分析探讨。

## 1 压电加速度计工作原理

压电加速度计(又称压电加速度传感器)由预压弹簧、压电元件、螺栓、基座、输出端、质量块和外壳组成, 它是基于压电晶体的压电效应工作的<sup>[3]</sup>, 压电加速度计的结构如图 1 所示。压电元件一般是两块石英或陶瓷晶体, 按照极性相反的方向叠在一起<sup>[4]</sup>, 再经压电元件上的银层引出导线至输出端。质量块放置在压电元件上, 通过预压弹簧和螺栓预紧, 将整个组件安装在一个厚基座的金属壳体中<sup>[5]</sup>。

测量时, 压电加速度计安装于试件表面, 其基座和试件刚性固定。预紧弹簧刚度相对较大, 而质量块的质量相对很小, 可以认为质量块的惯性非常小。当试件的振动频率远远小于传感器的固有频率时, 传感器的输出电荷(或电压)就与作用力成正比关系, 也就是与试件的加速度成正比关系。经电压放大器或电荷放大器放大后就可以测出试件的加速度<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-12。

作者简介: 吕萍(1992-), 女, 浙江湖州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事固体火箭发动机力学环境试验技术方向的研究。

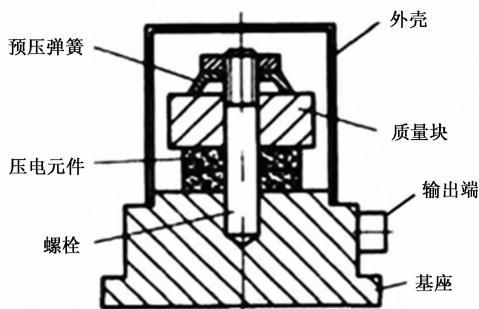


图 1 压电加速度计结构示意图

图 2 为压电加速度计安装于试件时的力学模型，是一个二阶弹簧质量阻尼系统<sup>[8-9]</sup>，其中，质量块与基座之间的阻尼  $C_1$  以及基座与试件间的阻尼  $C_2$  很小，可以忽略，从而可以得到简化后的自由振动力学方程组为：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_2 - x_3) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中： $m_1$  为质量块质量； $x_1$  为质量块位移； $k_1$  为压电元件的等效弹性系数； $x_2$  为基座位移； $m_2$  为基座质量； $k_2$  为加速度计与试件的连接刚度； $x_3$  为试件位移。

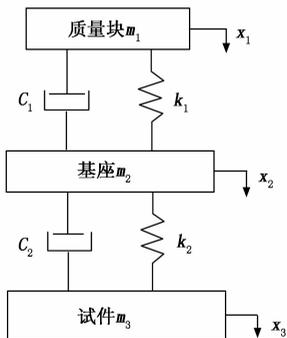


图 2 压电加速度计安装于试件时的力学模型

从而可以求得该系统的谐振频率为：

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_2} \pm \sqrt{\left( \frac{k_1}{m_2} + \frac{k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right)^2 + \frac{4k_1^2}{m_1 m_2}} \right) \quad (2)$$

在一般情况下，试验中的  $m_1$ 、 $k_1$ 、 $m_2$  都已经确定，而  $k_2$  则根据安装方式的不同而不同， $k_2$  的值越小，安装谐振频率也就越小，该安装方式的适用频率范围也越小，即压电加速度计出现较大相对偏差时对应的频率也越低。

## 2 压电加速度计安装方式

目前，压电加速度计的安装方法有很多，例如螺纹连接、胶水、磁座等。其中，一般生产厂家给出的幅频特性图中，其峰值所对应的的横坐标值为该加速度计的共振频率，加速度计是在刚性连接的固定情况下得到这个幅频曲线和共振频率的<sup>[10]</sup>。采用其他的安装方式会影响加速度计

的共振频率和使用上限频率。

但是，在固体火箭发动机力学试验中，由于发动机本身的特殊性，如果在发动机壳体上任意加工螺纹孔，会影响发动机的稳定性，产生不可估量的危险，因此无法在加速度计与发动机壳体间采用螺纹连接的方式进行固定。一般情况下，在固体火箭发动机的力学试验中，可采用以下几种安装方式：502 胶水，胶木座，磁座，磁座 + 502，双面胶。

## 3 实验方案及过程

为了研究不同安装方式对压电加速度计响应特性的影响，以及校准形式和使用形式下获得的响应对比，需要制定合理的实验方案。

在固体火箭发动机的力学试验中，主要通过设置加速度值和频率值来控制试验曲线。因此，针对这两个研究目的，本次研究分别以频率为自变量和以加速度为自变量进行重复性实验。同时，对校准和使用两种形式下压电加速度计的响应进行对比。

实验采用安装传递系数  $A$ 、灵敏度幅值  $S_2$  和灵敏度频率响应相对偏差  $\delta$  作为结果分析对象。

安装传递系数为：

$$A = \frac{X_2}{X_1} \quad (3)$$

式中， $X_2$  为输出值，在本实验中即为被测加速度计的数值 ( $g$ )， $X_1$  为输入值，在本实验中即为参考加速度计的数值 ( $g$ )。

被测加速度计的灵敏度幅值为：

$$S_2 = A \cdot S_1 \quad (4)$$

式中， $S_1$  为参考加速度计的灵敏度幅值 ( $mV/g$ )。

灵敏度频率响应相对偏差<sup>[11]</sup>为：

$$\delta = \frac{S_2 - S_{2标}}{S_{2标}} \times 100\% \quad (5)$$

式中， $S_{2标}$  为被测加速度计校准说明书上的灵敏度幅值 ( $mV/g$ )。

### 3.1 实验原理示意图

本次实验的测试系统如图 3 所示，从计算机输入实验参数，通过控制器使振动台（作为输入）达到所需的量级，并将被测压电加速度计（作为输出）的数据通过信号线传输到计算机中。

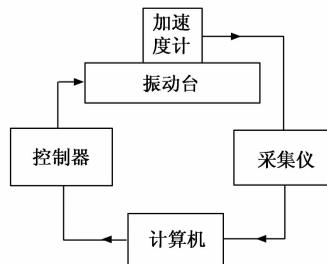


图 3 测试系统示意图

### 3.2 实验设置

#### 3.2.1 以频率为自变量时的实验设置

在固体火箭发动机力学试验中, 常见的频率范围一般都低于 2 000 Hz。同时结合《JJG 233—2008 压电加速度计检定规程》在检定参数设置的选择上的规定, 共设置了频率为 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 80 Hz, 160 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 1 500 Hz, 2 000 Hz 的正弦实验点, 实验的加速度控制在 10 g。

#### 3.2.2 以加速度为自变量时的实验设置

在不同加速度下, 即使在同一频率时, 不同的安装方式也可能对测得的响应产生影响。

在常见的固体火箭发动机力学试验中, 加速度一般不超过 30 g, 因此, 本文设置了加速度为 1 g, 5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g, 30 g 的实验点, 实验的频率控制在 160 Hz。

#### 3.2.3 采用校准时的形式

在压电加速度计校准时, 一般采用被测加速度计与参考加速度计 180°同轴的形式, 如图 4 所示。参考加速度计位于下方, 与振动台面连接, 被测加速度计位于上方, 两者之间采用不同的安装方式进行连接。这种安装形式是为了在校准时保证被测加速度计与参考加速度计的振动方向保持同轴。

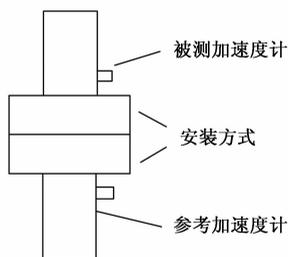


图 4 校准时的 180°同轴安装形式

#### 3.2.4 采用使用时的形式

压电加速度计在实际使用的过程中, 180°同轴的形式显然不适合测试, 一般通过某一安装方式后直接安装于试件表面。压电加速度计在使用时的直接安装形式如图 5 所示。

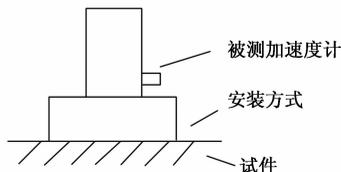


图 5 使用时的直接安装形式

### 3.3 试验流程

#### 3.3.1 不同安装方式对压电加速度计灵敏度幅值的影响实验

为了研究固体火箭发动机力学试验中不同安装方式对压电加速度计灵敏度的影响, 将 5 组试验时常用的安装方

式 (502 胶水, 胶木座, 磁座, 磁座 + 502, 双面胶) 的传感器 180°同轴连接, 并直接安装于振动台表面, 按照 3.2 实验设置中的表述, 分别以频率和加速度为自变量进行实验。

在该实验中, 以位于上方的压电加速度计为输出值 (被测加速度计), 位于下方的压电加速度计为输入值 (参考加速度计), 再结合被测加速度计校准说明书上的灵敏度幅值 (160 Hz, 10 g 时的标准灵敏度幅值), 分别计算各组中位于上方加速度计的灵敏度幅值及相对偏差, 进行分析和对比。

#### 3.3.2 校准形式和使用形式下获得的响应对比实验

为了获得校准形式和使用形式下的响应对比, 需要将压电加速度计直接安装于试件表面。由于振动台面非磁性材料 (无法直接使用磁座), 故采用材料为 Q235A 的平板工装作为试件。该试件与振动台面的连接方式为刚性螺栓连接。实验时, 在试件上设立控制点, 同时选定固定的实验点。在该实验点的位置上分别以 180°同轴形式和直接安装形式进行实验。

在该实验中, 以控制点处的加速度计为输入值, 180°同轴上方加速度计、下方加速度计、直接安装的加速度计三者为输出值, 分别计算这三者的安装传递系数, 并进行对比。

#### 3.3.3 实验内容汇总

综合以上信息, 实验内容汇总如表 1 所示。

表 1 实验内容汇总

安装方式 自变量	502 胶水	胶木座	磁座	磁座 + 502	双面胶
频率/Hz	180°同轴、 直接	180°同轴、 直接	180°同轴、 直接	180°同轴、 直接	180°同 轴、直接
加速度/g	180°同轴	180°同轴	180°同轴	180°同轴	180°同轴

## 4 实验结果及分析

按照上述实验思路及流程, 展开实验后获得以下实验结果。

### 4.1 不同安装方式对灵敏度频率响应相对偏差的影响

#### 4.1.1 随频率的变化

5 组不同安装方式下压电加速度计灵敏度幅值相对偏差随着频率的变化情况如图 6 所示。该相对偏差以各组安装方式下, 位于下方的加速度计为参考加速度计, 经计算后得到上方加速度计的灵敏度幅值。

从图 6 中可以看出, 磁座在频率达到 1 000 Hz 以后, 引起的灵敏度幅值相对偏差很大, 在 2 000 Hz 时甚至达到 400% 以上。由此可以得出, 磁座只适用于固体火箭发动机的低频力学试验, 当涉及到高频时需采用别的安装方式。

磁座在 1 000 Hz 以上时引起的相对偏差很大, 导致其他 4 种方式的对比曲线难以在同一图像中进行直观对比。于是, 剔除磁座安装方式下 1 000 Hz 以上时的数据, 得到

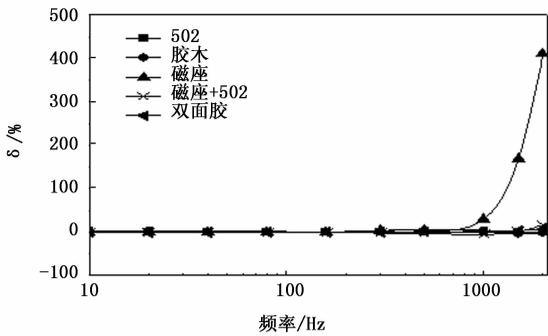


图 6 频率对灵敏度幅值相对偏差的影响

如图 7 所示的曲线图。

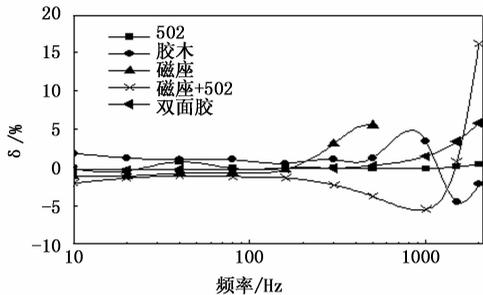


图 7 剔除较大数据后频率对灵敏度幅值相对偏差的影响

采用 502 胶水得到的相对偏差在 10~2 000 Hz 均在 2% 以内，可以真实反映压电加速度计的响应特性，响应效果较真实。

胶木方式在频率为 1 000 Hz 时，灵敏度幅值的相对偏差已经大于 2%，可能是因为胶木具有一定的质量，导致加速度计的谐振频率降低。

采用磁座+502 的方式后，高频段的相对偏差较仅采用磁座方式得到明显改善，例如 2 000 Hz 时相对偏差已减至 16%。但是从 300 Hz 开始，相对偏差还是达到了 2% 以上，超出了允许范围。因此，即使使用了 502 胶水对整体的连接刚度进行改进，但还是不能明显拓宽磁座方式的频率适用范围。

双面胶方式在 1 000 Hz 以内时，响应效果接近于 502，相对偏差均在 2% 以内，并且曲线较平稳。但是超过 1 000 Hz 后，相对偏差较大，在 2 000 Hz 时达到 5% 以上。因此，双面胶方式仅可用于低频试验。同时，在实验时发现，双面胶方式的时间保持性较差，在使用较短时间后就会出现松动现象，不适用于持续时间较长的试验。

综合以上可以发现，当采用胶木、磁座等具有较大质量的安装底座时，会造成加速度计在高频范围内信号失真，灵敏度幅值相对偏差超出允许范围，从而减小了压电加速度计的频率适用范围。

#### 4.1.2 随加速度的变化

将实验频率保持在 160 Hz，以加速度为自变量时得到

如图 8 所示的曲线。

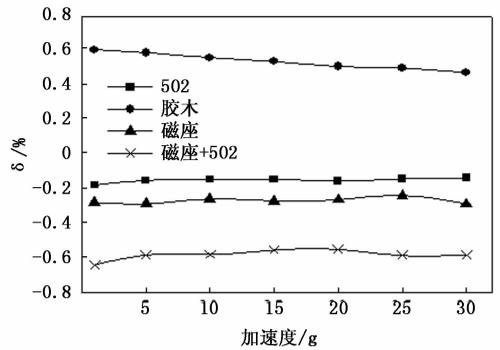


图 8 加速度对灵敏度幅值相对偏差的影响

由于实验加速度量级较大时，双面胶方式经常松动，晃动很大，得到的数据没有较大的对比价值，所以图 8 中仅为 4 种安装方式的对比曲线。在 160 Hz 时，每种安装方式下的相对偏差均在允许的范围 2% 以内，并且曲线变化随加速度变化较平稳。其中，胶木方式和磁座+502 方式的相对偏差较大，但是均在允许范围内。因此，在固体火箭发动机力学试验的常规加速度范围内，除双面胶安装方式不稳定外，其余方式均可以根据试验情况选取。

#### 4.2 校准与使用形式对安装传递系数的影响

图 9~图 12 为使用平板工装，分别采用校准安装形式和使用安装形式后，压电加速度计的安装传递系数 A 随频率的变化情况。图中的“上方”是指校准形式下位于上方的加速度计，“下方”指校准形式下位于下方的加速度计，“直接”是指使用形式下直接安装在工装表面的加速度计。

如图 9 所示，采用 502 胶水时，安装传递系数均大于 1，均属于放大。而在 10~500 Hz 范围中均在 1~1.02 之间，数据差别不大。但在 1 500 Hz 时，安装传递系数突然升高。这可能与工装有关。工装具有一定的共振频率，并且在工装上得到的加速度与振动台上的加速度也存在传递系数。同时，控制点与测量点由于实验需要，不能处于同一轴心，这也会引起一定的加速度差异。

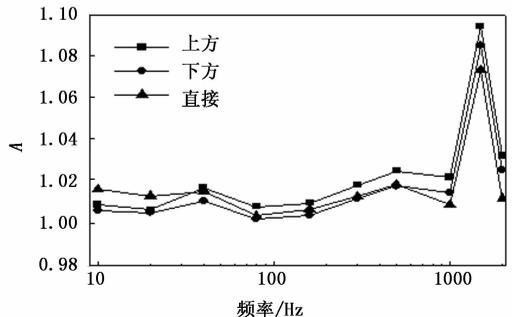


图 9 采用 502

如图 10 所示，采用胶木时，安装传递系数有小于 1 的情况出现，且在高频时的传递系数明显比 502 时大。同时，在高频时，180°同轴安装的两个加速度计安装传递系数比直

接安装时大 7.5% 以上。

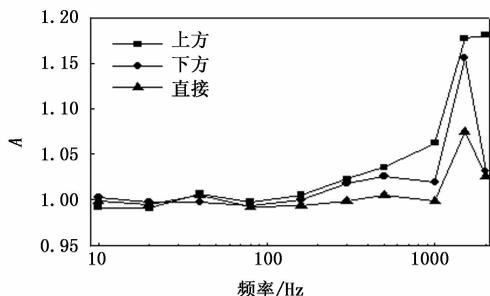


图 10 采用胶木

如图 11 所示, 采用磁座时, 三者的安装传递系数具有很大的差别。在低频时, 安装传递系数均小于 1, 这一现象与 502 和胶木的结果完全不同。这可能是因为磁座在低频时, 由于磁力作用, 会削弱加速度的传递效果。在频率较高时, 上方加速度计安装传递系数可达到 5, 而直接安装加速度计时则只有 1.4 左右。

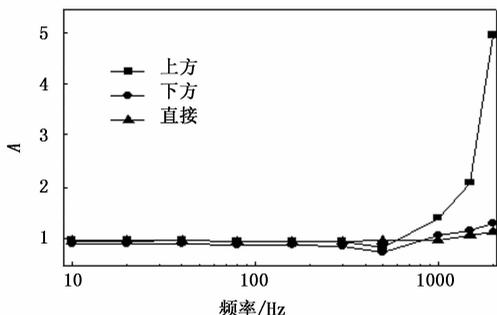


图 11 采用磁座

如图 12 所示, 采用磁座 + 502 时, 三者的安装传递系数在低频时, 仍小于 1。在高频时, 上方加速度计安装传递系数相较于仅采用磁座时有所降低, 而下方和直接安装加速度计则无明显变化。这一现象说明加入 502 胶水以后, 可以让上方加速度计更接近真实频率响应。

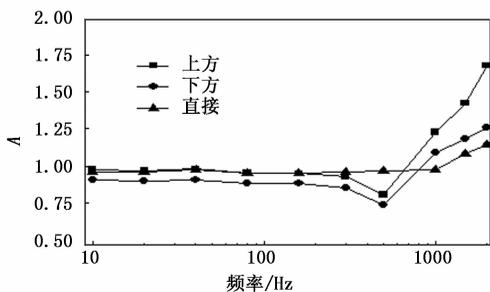


图 12 采用磁座 + 502

在低频范围内, 四种安装方式的传递系数没有较大差别。在频率较高范围内, 上方加速度计的安装传递系数最

大。一般情况下, 直接安装的形式得到的安装传递系数最接近 1。因此, 在试验中, 很少采用 180° 同轴的形式安装加速度计。

在固体火箭发动机力学试验中, 加速度计的安装传递系数越接近 1, 则加速度计的频率响应越真实, 测得的加速度更接近试件该位置的实际加速度值。位于上方的加速度计与工装表面隔着下方加速度计, 所以测得的数据与实际相比会存在多一级的传递偏差。

### 5 结论

压电加速度计不同安装方式对频率响应有很大的影响, 针对不同的使用环境及条件, 应该选用合适的安装方式。

在固体火箭发动机力学试验中, 在精度要求很高、试验时间较长、试验频率范围广的情况下, 可以直接选用 502 胶水的安装方式, 但是该方式拆卸繁琐, 经常拆装可能会损坏加速度计; 在保证试验精度的情况下, 当试验时间较短时, 可以采用拆装更方便的双面胶方式; 当试验频率范围较低 (小于 300 Hz) 而试验时间较长时, 可以选用磁座或胶木的方式。

同时, 在试验中, 应使加速度计尽量通过某一安装方式直接安装于试件表面, 避免加速度在多级传递过程中带来的额外偏差。

### 参考文献:

- [1] 王世辉, 张 昱, 陈欣欣, 等. 固体火箭发动机振动试验夹具优化分析与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 25 (1): 221 - 223.
- [2] 郑 星, 黄海莹. 加速度传感器安装方式的理论建模与响应分析 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35 (11): 61 - 63.
- [3] 周长华, 马青亮, 黄 锋. 不同安装方式对压电加速度计灵敏度的影响 [J]. 应用技术, 2014, 35 (2): 25 - 28.
- [4] 李 立, 徐燕申, 孙荣照. 加速度计安装方式对振动测量的影响 [J]. 机械设计, 1989 (1): 30 - 34.
- [5] 《振动与冲击手册》编辑委员会. 振动与冲击手册. 第二卷. 振动与冲击测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [6] 李亚丰. PZT 基压电陶瓷的制备及在加速度传感器中的应用 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [7] 李照华. 压电加速度传感器前置变换电路的研究及设计 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [8] 潘良明, 刘立群. 压电加速度计校准时不同安装方式的比较 [J]. 上海计量测试, 2013, 238 (6): 15 - 17.
- [9] 刘 刚, 穆文军, 张 勇, 等. 磁座对压电式加速度传感器安装传递系数的影响 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (4): 40 - 45.
- [10] 杨爱东. 影响压电加速度传感器检定数据的主要因素 [J]. 上海计量测试, 2012 (1): 22 - 25.
- [11] 于雪莲. 加速度传感器安装方式对灵敏度的影响 [J]. 中国计量, 2017 (2): 114 - 116.