

加速度传感器低频特性及校准方法

温仲元 林劲 富常怡

美国压电有限公司

摘要：本文主要介绍加速度传感器的低频特性及校准方法。在很多工程应用领域中，对加速度传感器的低频特性要求很高。并且为了保证得到准确而有效的数据，对加速度传感器低频特性进行正确有效的校准也是十分必要的。本文介绍了几种加速度传感器低频特性校准的方法，希望能供相关行业工程师参考借鉴。

关键词：ICP®加速度传感器；低频响应；低频特性；低频校准；低频振动台

Low Frequency Characteristics and Calibration Method of Accelerometer

Simon Wen Lin Jing Fu Changyi

PCB Piezotronics, Inc.

Abstract: This paper mainly discusses the low frequency response characteristics and the calibration method of accelerometer. Many engineering application field highly require for low frequency response. And to ensure get the accurate and valid data, the necessity of correctly calibration of accelerometer for low frequency characteristics is very essential. This paper describes several ways of calibration the low frequency response of accelerometer. Hope this can provide a reference to engineers in related industries.

Key words: ICP® accelerometer; low frequency response; low frequency characteristics; low frequency calibration; low frequency shaker;

0 引言

在各种工程应用领域中，冲击和振动测试是非常重要的。加速度传感器因为具有测量准确度高、频率响应范围宽、体积小、重量轻、易于安装等优点而被广泛应用。在一些特殊的应用领域中，对加速度传感器的低频特性要求更高。只有选择了合适的加速度传感器、电缆、信号适调仪及数据采集系统才能得到更准确的测试数据。

然而，使用者是否选择了合适的传感器，传感器是否达到标称的低频响应指标，唯一的检测方法就是利用有效的手段对加速度传感器的低频特性进行校准。

为了能够更准确的检测加速度传感器的低频性能，选择正确有效的校准方法是至关重要的。但目前多数用户并不具备检测传感器低频性能的有效手段，而是更多的依赖传感器制造

商提供的技术资料。

基于以上情况，本文从理论及实际应用方面介绍了加速度传感器的低频特性，低频特性与放电时间常数的关系，以及如何选择低频传感器。同时介绍了几种实用的传感器低频校准方法，包括结构重力法、重力翻转法，长冲程低频振动台校准法。

1 加速度传感器

传感器是把被测量的物理量（如给定方向的加速度），转换成可方便测量或记录的量的装置，它一般由敏感元件和转换元件组成。加速度传感器所测量的物理量是加速度信号，并按一定规律将其转换为电量。

目前，加速度传感器的种类主要有：压电式加速度传感器（电荷输出型和 ICP[®]型），电容式加速度传感器，压阻式加速度传感器。其中，电容式和压阻式的加速度传感器具有零频响应的特点，即低频响应可达 0Hz。用于低频地震监测的 ICP[®]型加速度传感器低频响应（±5%）可到 0.02Hz 左右，而一般用途的 ICP[®]型加速度传感器低频响应（±5%）可到 0.5Hz 左右。ICP[®]型加速度传感器由于其低阻抗输出、性价比高、适合于工程现场使用等特点而被广泛应用。

2 加速度传感器的低频特性

加速度传感器有很多特性指标，如灵敏度、量程、分辨率、非线性度、幅频响应和相频响应等。其中，幅频响应是指在输入的加速度幅值不变的情况下，传感器输出电量的幅值随频率的变化。不同的幅值变化误差，如±5%、±10%、±3dB 对应不同的频率响应范围，如图 1 所示。

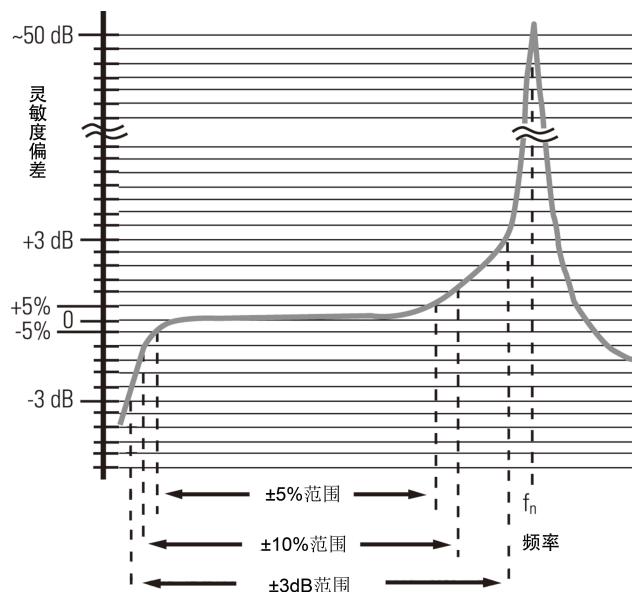


图 1 ICP[®] 加速度传感器的频响特性曲线

传感器的低频响应决定可测量的最低振动信号频率。

在选择低频特性好的加速度传感器时，一定要根据应用选择合适的高灵敏度加速度传感

器。因为对于被测的振动物体，振动频率越低，其产生的加速度就越小；如果传感器的灵敏度不够高，那么输出的信号很微小，则后端系统就很难准确测量到信号。

另外，对于整个实际的测试系统而言，要测量低频低 g 值的信号，不仅需要加速度传感器的指标能够符合要求，而且后端所匹配的电缆噪声也要低，信号适调仪和数据采集记录仪的背景噪声、带宽等指标也要达到要求。同时被测信号至少要 3 倍于噪声水平，这样才能保证整个系统测量到尽可能准确的数据。图 2、图 3 为 ICP® 加速度传感器典型测量系统示意图，图 4 为电荷型加速度传感器典型测量系统示意图。

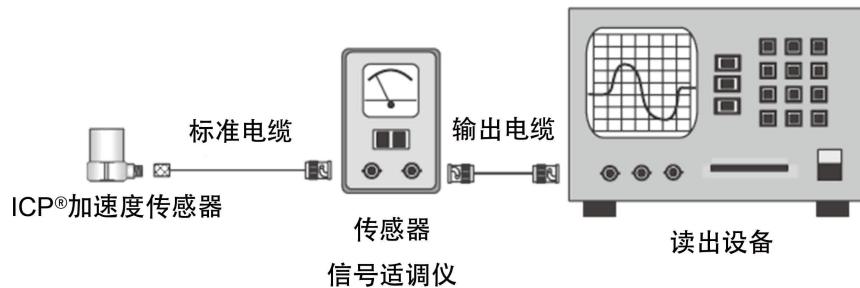


图 2 ICP® 加速度传感器典型测量系统

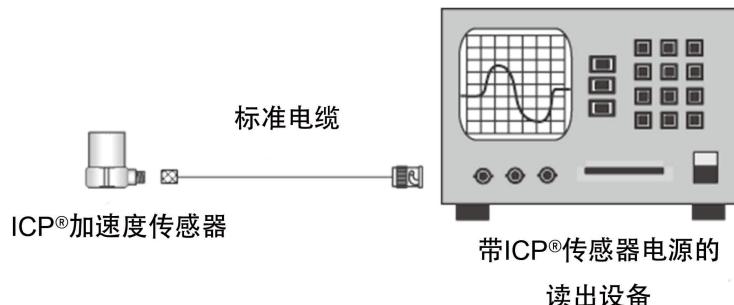


图 3 ICP® 加速度传感器典型测量系统

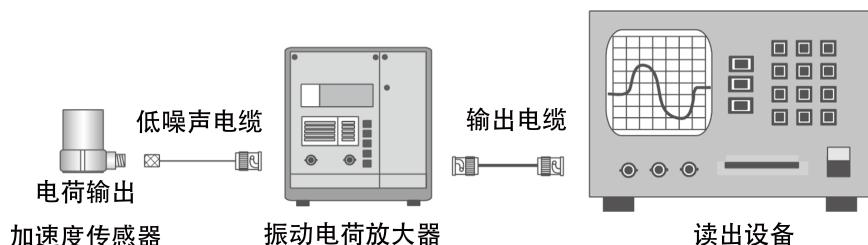


图 4 电荷型加速度传感器典型测量系统

3 低频响应与放电时间常数的关系

压电式加速度传感器的低频响应主要取决于其放电时间常数 (DTC , Discharge Time Constant)，因此有必要了解两者之间的关系，对加速度传感器的低频校准有重要意义。

3.1 放电时间常数由加速度传感器本身和信号适调仪间的电阻及电容决定

对于电荷输出型加速度传感器，没有内装放大器，必须外接电荷放大器一起使用。通常电荷输出型加速度传感器绝缘电阻(包括接插头) 非常高，所以其放电时间常数由外接的电荷放大器的放电时间常数决定，即：

$$DTC = R_f \times C_f \quad (1)$$

其中， R_f 代表电荷放大器的反馈电阻， C_f 代表电荷放大器的反馈电容。

对于 ICP®型加速度传感器，具有内装放大器，无需外接电荷放大器使用，只需与直流供电适调仪连接使用。所以放电时间常数是：

$$DTC = R \times C \quad (2)$$

其中， R 代表内装阻抗变换器的输入阻抗， C 代表传感器的电容值。

3.2 加速度传感器的低频响应与放电时间常数的关系

对于压电加速度传感器，低频响应与放电时间常数的关系如下：

$$DTC = \frac{1}{2\pi f_c} \approx \frac{1}{3f_{10}} \approx \frac{1}{2f_5} \quad (3)$$

则：

$$f_c = 0.16 / DTC$$

$$f_{10} = 0.34 / DTC$$

$$f_5 = 0.50 / DTC$$

其中， f_c 表示低频响应为-3 dB 处的频率， f_{10} 表示低频响应为-10%处的频率，

f_5 表示低频响应为-5%处的频率。

如表 1 所示，传感器的放电时间常数（DTC）越长，频率响应越低。

DTC (sec)	低频响应 (Hz)		
	-5%	-10%	-3dB
.1	5	3.4	1.6
.5	1	.68	.32
1	.5	.34	.16
5	.1	.07	.03
10	.05	.03	.016

表 1

4 校准方法

下文主要介绍三种准确有效的加速度传感器低频特性校准方法，即结构重力法，重力翻转法和长冲程低频振动台校准法。

4.1 结构重力法

结构重力法是一种绝对校准法，是通过测量计算出传感器的放电时间常数，从而得到加速度传感器的低频截止频率，即低频响应指标。图 5 为测量加速度传感器放电时间常数的“结

构重力法”装置。

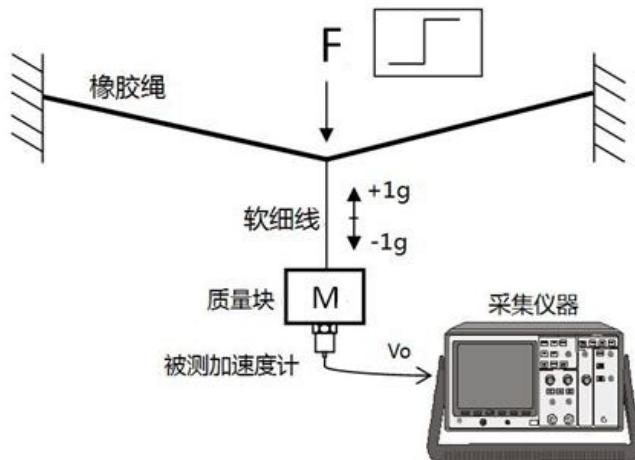


图 5 结构重力法示意图

测试步骤如下：

- 1) 将被测加速度传感器安装在一个圆柱形质量块 M 上 (约 300 至 500 克);
- 2) 将安装有被测加速度传感器的质量块 M , 用软细线连接并悬挂在一根橡胶绳中间;
- 3) 将此橡胶绳两端各固定在一个支架上;
- 4) 将被测加速度传感器的输出线连接到测量记录仪器 (如数据采集记录仪等, 需直流耦合);
- 5) 在整个系统稳定后, 用手突然向橡胶绳中间施加一个向下的冲击力 F , 则质量块和加速度传感器失去了软细线向上的拉力作用, 以 $1g$ 的加速度自由跌落;

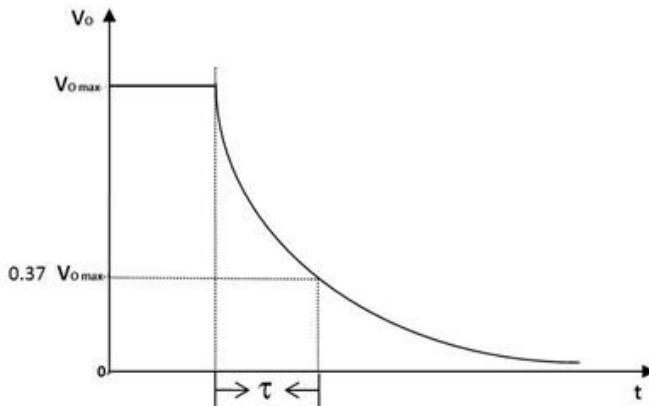


图 6 放电波形示意图

如图 6 所示, 数据采集记录仪记录了加速度传感器放电波形, 横坐标为时间 t , 纵坐标为加速度传感器的输出电压 V_o 。图中所示 τ 的值就是放电时间常数。放电时间常数是从下降的一瞬间开始计算, 此时加速度传感器受到最大加速度 $1g$, 输出为最大值 $V_{o,max}$; 一直到 V_o 下降至 $0.37V_{o,max}$ 所经过的时间 τ , 即 $DTC = \tau$ 。从记录的数据中可以读出 τ 的值, 再根据公式 3 可计算出加速度传感器在不同误差范围 (-3dB、-10%、-5%) 对应的低频响应频率值。

此结构重力法的优点是测试装置简单, 容易实现, 适合在实验室和试验现场使用。

4.2 重力翻转法

重力翻转法也是一种绝对校准法，通过测量计算出传感器的放电时间常数，得到加速度传感器低频响应指标。相对于结构重力法的优点是更加可靠，易实现，操作简单方便。此方法是上下翻转 180° ，产生 $-1g \sim +1g$ 的加速度来对传感器进行校准。

如图 7 和图 8 是重力翻转法检测加速度传感器低频特性的系统示意图。其中，图 7 中系统用的读出设备是示波器，图 8 中系统用的读出设备是数据采集卡；无论使用哪种设备，读出设备和信号适调仪都必须是 DC 耦合的。

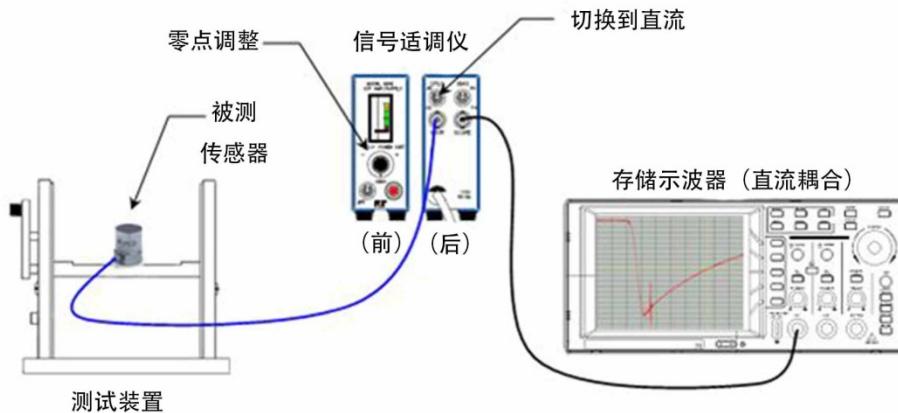


图 7 重力翻转法示意图

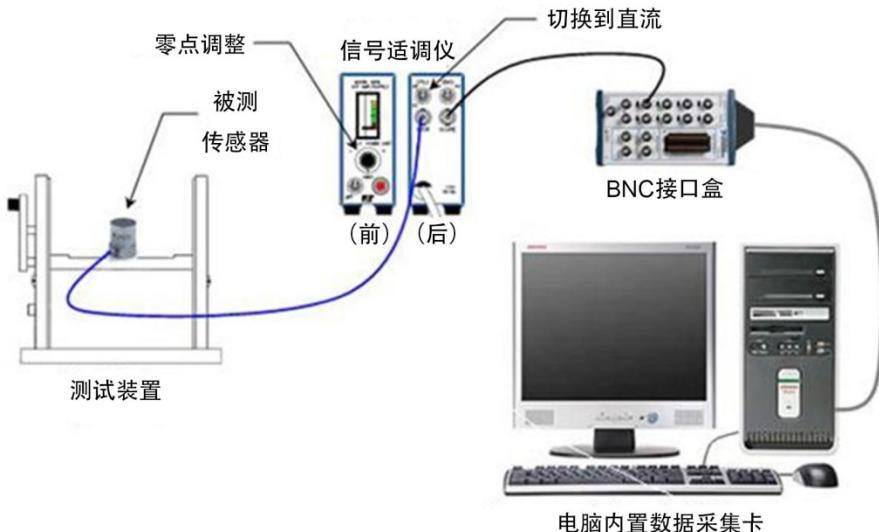


图 8 重力翻转法示意图

传感器安装在重力旋转台装置中间，通过手柄控制传感器翻转；传感器的输出信号经具有 DC 耦合功能的信号适调仪后，被后端仪器采集记录。如图 9 为采集记录的加速度传感器放电波形，横坐标为时间 t ，纵坐标为加速度传感器的输出电压 V_o 。图中所示 τ 的值就是放电时间常数。放电时间常数是从加速度传感器感受到 $2g$ 的加速度幅值变化时开始计算，输出的电压幅值变化为 ΔV_o ；一直到 V_o 下降了 $63\% \Delta V_o$ 所经过的时间 τ ，即 $DTC = \tau$ 。再根据公式 3 可计算出加速度传感器在不同误差范围 (-3dB、-10%、-5%) 对应的低频响应频率值。

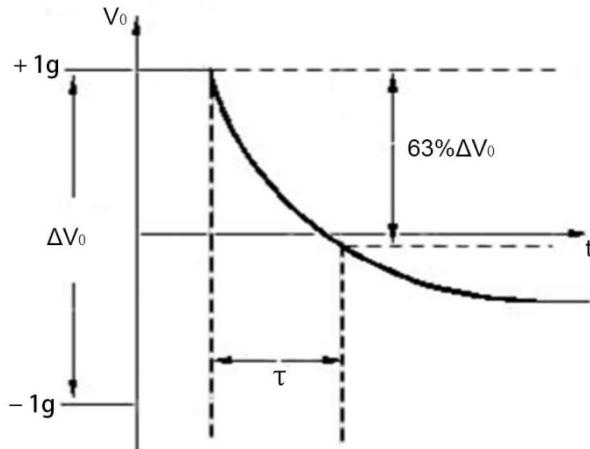


图 9 放电波形示意图

4.3 长冲程低频振动台校准法

长冲程低频振动台校准方法可直接测量振幅和频率。PCB®集团下属 TMS 公司的 9155D 加速度传感器校准系统中的 779 选项就包括一款长冲程空气轴承低频振动台 2129E025，其利用光学参考位移传感器可达到 0.1Hz 的低频准确校准性能。如图 10 所示为此振动台，可水平和垂直放置，其最大位移(峰-峰值)达到 25cm；频率范围覆盖 0.1~500 Hz；空载时最大加速度达 2g。如表 2 为振动台 2129E025 在不同频率范围对应的最大加速度峰值。9155D 系统完全符合 ISO16063 标准相关要求，非常适合计量校准机构使用。

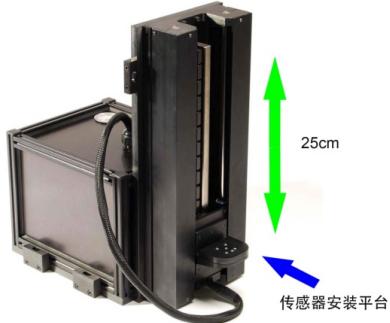


图 10 振动台

频率范围 (单位 Hz)	最大加速度峰值 (单位 g)
0.1~0.25	0.005~0.032
0.25~0.5	0.032~0.128
0.5~1.0	0.128~0.51
1.0~10	0.51~2

表 2

4.4 校准方法比较

在核准频率低于 0.5Hz 时，如要求不确定度 < 2%，则不适合在低频振动台上用比较法来校准灵敏度较低的加速度传感器。因为低频振动台在低频时产生的加速度 g 值很微小，则被校准的灵敏度较低的加速度传感器输出信号也会很微小，就会很难被后端的读出设备准确的测量到。下面就用灵敏度为 100mV/g 的被校加速度传感器(以下简称 SUT, Sensor Under Test)举例说明。

如表 3 所示，根据下面公式 4^[2]和公式 5 可以得出，即使振动台的最大峰峰值位移是 25cm，在 0.5Hz 时加速度才 0.128g。在 0.25 Hz 时加速度仅 0.032g，那么 SUT 输出约 3.2mV 的信号，则后端系统很难准确测量这么微小的信号。同样在 0.1 Hz 时加速度仅 0.005g，那么 SUT 只能输出约 0.5mV 的信号，则后端系统就更难准确测量这么微小的信号了。因此校准不确定度会变大，所以低频振动台不适合校准灵敏度较低的加速度传感器。

然而，结构重力法和重力翻转法利用重力场在低频下产生 $1g$ 的加速度，那么 SUT 能输出约 $100mV$ 的信号，则后端系统就能够很准确的测量了。根据加速度传感器低频响应与放电时间常数的关系，利用测量记录的数据，就能计算出加速度传感器的低频响应频率指标。

$$a = d \times (2 \times \pi \times f)^2 \quad (4)$$

其中， a 代表加速度， d 代表峰值位移， f 代表频率。

$$V_o = s \times a \quad (5)$$

其中， V_o 代表加速度传感器的输出， s 代表灵敏度， a 代表加速度。

低频频率点(单位 Hz)	最大加速度峰值(单位 g)	SUT 输出电压(单位 mV)
0.5	0.128	12.8
0.25	0.032	3.2
0.1	0.005	0.5

表 3

5 结论

在选择低频特性好的加速度传感器时，一定要根据应用需求选择合适的高灵敏度，同时传感器灵敏度越高、频率响应越低，体积就越大。同样也要选择合适的校准方法对加速度传感器进行校准。长冲程低频振动台校准方法，适合于计量检测实验室使用，可直接测量振幅和频率进行校准。而结构重力法和重力翻转法，操作简单方便，性价比高，非常适合实验室及试验现场使用。

注释：

- [1] 本文所有公式中物理量的单位均为国际单位制。
- [2] 公式 (4) 仅适用于正弦振动。

参考文献：

- [1] 《测量与测试产品手册》 PCB Piezotronics, Inc. 美国压电有限公司。
- [2] GB/T 20485.1-2008/ISO 16063-1:1998 《振动与冲击传感器校准方法 第 1 部分：基本概念》。
- [3] JJG 233-2008 《压电加速度计检定规程》。