

ENDEVCO 公司 2270 型压电加速度计安装方向对测量结果的影响分析

张洁文 张 强 刘 科

中国工程物理研究院计量测试中心 四川 绵阳 621900

摘要：ENDEVCO 公司的 2270 型压电式加速度计通常被用作标准加速度计开展量传工作，在使用过程中不合理的安装方向会对测量结果产生较大的影响。为了研究其安装方向与测量结果的关系，本文首先介绍了压电加速度计的工作原理，分析了 ENDEVCO 公司的 2270 型压电式加速度计的结构形式，讨论了安装方向以及安装谐振频率对于被校压电加速度计灵敏度的影响，然后开展了试验研究。试验结果表明，在不同的应用场合，合理的安装方向能够保证加速度计有良好的频率响应特性以及幅值线性度。

关键词：压电加速度计；安装方向；谐振频率；灵敏度

中图分类号：TH824

0 引言

压电加速度计通常用来测量振动、冲击加速度，广泛应用于机械制造、航空航天、土木工程、振动监测等领域。根据用途的不同，压电加速度计可以分为工作压电加速度计和标准压电加速度计^[1]。工作压电加速度计的压电元件安装在加速度计的底端，标准压电加速度计的压电元件安装在加速度计的顶端。ENDEVCO 公司生产的 2270 型压电加速度计属于标准压电加速度计，通常用来对工作加速度计开展量值传递工作，也可用于振动台的反馈控制，其主要特性参数为灵敏度。文献[1]至文献[5]讨论了不同安装方式对加速度计灵敏度的影响，得出了螺栓安装、磁座安装、粘合剂安装、绝缘块安装等不同安装对加速度计的安装谐振频率有较大影响，从而影响加速度计的灵敏度的结论，但对于加速度计安装方向并未讨论。根据应用场景的不同，压电加速度计有两种不同的安装方向，本文通过理论分析与试验研究，讨论了其在冲击法校准（比较法校准）以及振动法校准（绝对法校准）下的安装方向对测量结果的影响。

1 压电加速度计的工作原理

压电加速度计主要由质量块、压电敏感元件和基座等部分组成，利用压电敏感元件的正压电效应工作，即：当加速度计被固定在被测振动物体上时，压电元件受到质量块的惯性力作用，产生与所受力成正比的电荷^[1]。理想情况下，当被测振动频率远低于加速度计

振动系统的安装谐振频率时，加速度计敏感元件产生的电荷量同加速度计基座绝对加速度值成正比，因此加速度计输出电荷量的瞬时值与它所受到的机械振动加速度瞬时值成正比。

压电加速度计的力学模型可以用单自由度质量-弹簧系统进行表示，当用正弦振动激励该系统时，压电加速度计的压电敏感元件所受到力的作用，其交变力大小可表示为：

$$F=ma \quad (1)$$

式中， m 表示敏感元件的质量； a 表示正弦振动激励产生的加速度。

由于压电敏感元件正压电效应的作用，压电敏感元件在受力的作用后产生的电荷量与交变力的关系表示为：

$$Q=d_{ij} \times F \quad (2)$$

式中： d_{ij} 为二阶压电张量， Q 为电荷量。

压电加速度计内部敏感元件的二阶压电张量和质量都为常数，敏感元件受到力的作用后产生的电荷量 Q 与加速度 a 成正比关系。在计量检定的日常工作中只需要测量出压电加速度计的输出电荷量 Q ，就可确定正弦振动产生加速度值 a 的大小。

2 ENDEVCO 公司 2270 型压电加速度计的结构及简化模型

ENDEVCO 公司的 2270 型压电加速度计是一种标准加速度计，它在设计上既考虑了作为标准传感器的通

用要求，又考虑了比较校准的使用方便，其内视图如图 1 所示。它采用倒装式中心压缩型结构，压电元件-质量块-弹簧系统装在圆形中心支柱上，支柱与基座连接，这种结构有较高的固有频率。

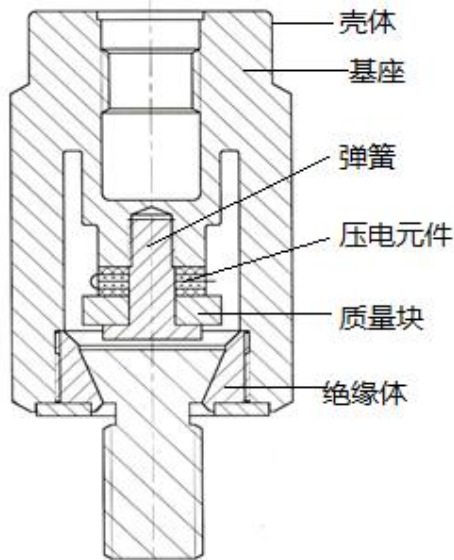


图 1 ENDEVCO 公司 2270 型压电加速度计内视图

为了便于分析，通常可将其简化为二阶弹簧振子模型，如图 2 所示。

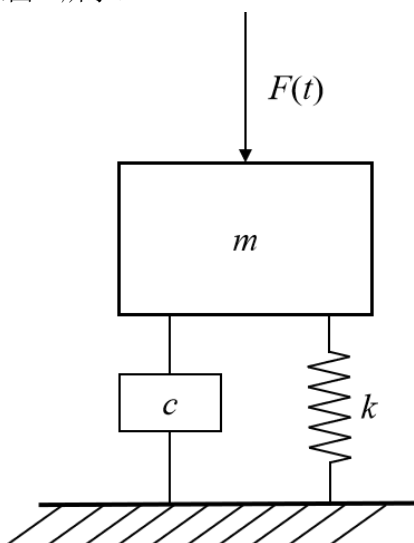


图 2 ENDEVCO 公司 2270 型压电加速度计简化模型

其振动方程可表示为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (3)$$

式中， m 、 c 、 k 、 x 、 $F(t)$ 分别表示压电晶体（加速度计）的质量、阻尼系数、刚度系数、压电晶体的位移以及作用于压电加速度计的外力。

取初始状态为 0，对式（3）进行拉普拉斯变换，可得其传递函数：

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (4)$$

根据式（4），假设安装基座的质量为无穷大，典型的压电加速度计的无阻尼固有频率 f_n 可表示为：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

考虑实际工作情况，当安装基座质量有限时，安装谐振频率 f_B 可表示为：

$$f_B = f_n \sqrt{1 + \frac{m}{B}} \quad (6)$$

式中， B 表示安装基座的质量。

一般情况下，安装基座的质量为被校加速度计质量的 10 倍以上，相比被校加速度计的安装谐振频率，安装基座的谐振频率较高。

3 安装谐振频率对于被校压电加速度计灵敏度的影响分析

根据式（4）建立的传递函数，设置阻尼比为 0.3，安装谐振频率分别为 30kHz 和 100kHz，分别进行仿真分析。图 3 给出了安装谐振频率在 30kHz 以及安装谐振频率在 100kHz 下，开展校准工作时，被校加速度计输出信号与输入加速度之比随输入信号频率变化的曲线。

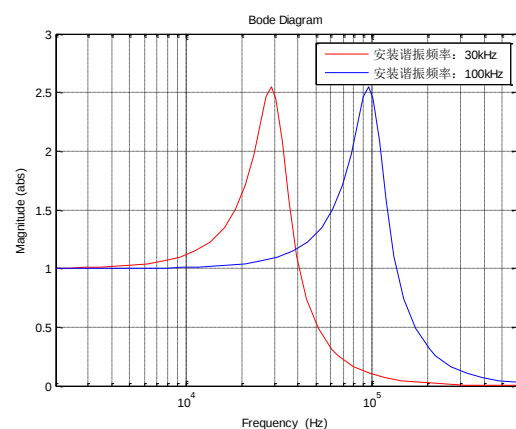


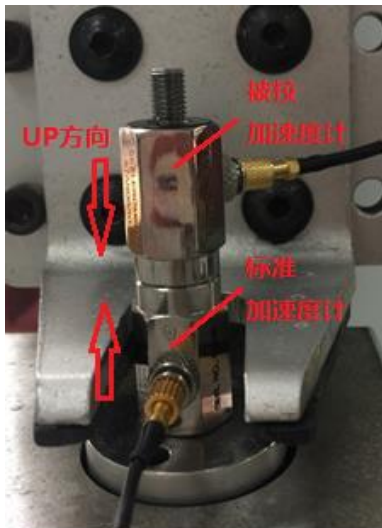
图 3 不同安装谐振频率下被校加速度计输出信号随输入信号变化曲线

理想情况下，加速度计的输出信号与输入加速度之比为 1。图 3 表明，过低安装谐振频率的会导致加速度计的灵敏度频率响应较差，具体表现为输入信号频率较高时，输出信号异常偏大，导致计算出的被校加速度计灵敏度偏大。

4 标准压电加速度计的安装方向对测量结果的影响试验

4.1 冲击法校准试验

本文讨论的冲击法校准为一种比较校准方法。如图 4 (a) 所示, 将 ENDEVCO 公司的被校加速度计 2270 (10382#) 与标准加速度计 2270 (14133#) 标注 UP 方向背靠背用螺栓刚性安装在冲击台 POP 上, 此方向为冲击法背靠背安装; 如图 4 (b) 所示, 将 ENDEVCO 公司的被校加速度计 2270 (10382#) 接触面与参考加速度计 2270 (14133#) 接触面用螺栓刚性安装在冲击台 POP 上, 参考加速度计 2270 (14133#) UP 方向向上, 被测加速度计 2270 (10382#) UP 方向向下倒置, 此方向为冲击法正向安装。两种安装方向的校准数据如表 1 所示。



(a) 冲击法背靠背安装



(b) 冲击法正向安装

图 4 ENDEVCO 加速度计冲击法校准安装方向

表 1 ENDEVCO 加速度计冲击法校准在不同安装方向下的校准结果

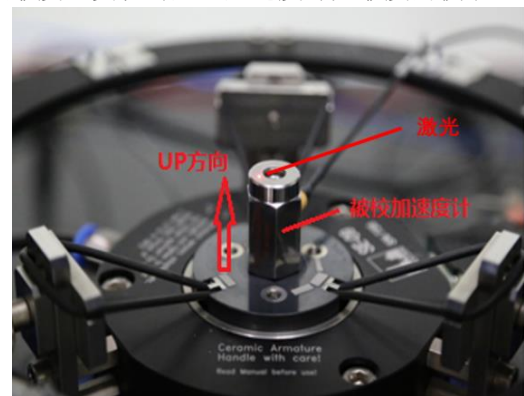
冲击法背靠背安装		冲击法正向安装	
加速度峰值 m/s^2	灵敏度 $\text{pC} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	加速度峰值 m/s^2	灵敏度 $\text{pC} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
16709.6	0.1960	16294.7	0.2042
35322.6	0.1972	31952.0	0.2076
45319.5	0.1996	48128.1	0.2099
55259.5	0.1995	65868.3	0.2122
66719.5	0.2007	78580.7	0.2144
79577.0	0.2024	89510.2	0.2172
95288.3	0.2030	95998.3	0.2211
冲击灵敏度 $\text{pC} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.1998	冲击灵敏度 $\text{pC} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.2124
灵敏度幅值 线性度 %	4.6	灵敏度幅值 线性度 %	9.0

比较表 1 中两种安装方向的校准结果, 相比背靠背安装, 正向安装的灵敏度及灵敏度幅值线性度偏大。其原因在于, 背靠背安装保证了两只传感器的安装谐振频率一致, 两者感受的振动量级相同, 因此, 校准结果合理; 正向安装下, 由于被校加速度计的壳体不是绝对的刚体, 导致被校加速度计的安装谐振频率降低, 两只加速度计感受的振动量级不同, 根据第 4 节的分析, 安装谐振频率降低, 会导致被校加速度计在高频段灵敏度偏大, 且随着加速度变大, 脉宽降低, 脉冲信号中所含的高频信号增多, 被校加速度计甚至会发生谐振, 灵敏度异常。

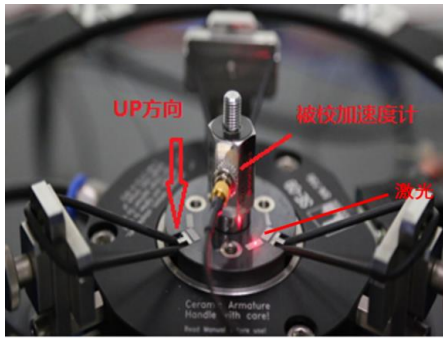
因此, 使用冲击法 (比较法) 校准加速度计时, 应将被校加速度计与标准加速度计背靠背冲击台上。

4.2 振动法校准试验

本文讨论的振动法校准为一种绝对校准方法。其基本原理是利用激光干涉仪测量振动台台面的振动量, 同时通过数据采集系统得到被校加速度计在此振动量下的电荷或电压输出量, 计算被校压电加速度计的灵敏度, 实现对压电加速度计灵敏度的校准。



(a) 振动法正向安装



(b) 振动法倒置安装

图5 ENDEVCO 加速度计振动法校准安装方向

如图5(a)所示,将被校加速度计2270(10382#)下底面与标准振动台台面使用螺纹连接,测量镜贴在被校加速度计上底面上,激光照射在测量镜上,此方向为振动法正向安装;如图5(b)所示,将被校加速度计2270(10382#)上底面与标准振动台台面使用螺纹连接,测量镜贴在标准振动台上,激光照射在测量镜上,此方向为振动法倒置安装。两种安装方向的校准数据如表1所示。

表2 ENDEVCO 加速度计振动法校准在不同安装方向下的校准结果

安装方向		振动法正向安装		振动法倒置安装	
频率 Hz	加速度值 m/s^2	灵敏度 $\text{pC}/(\text{m/s}^2)$	误差 %	灵敏度 $\text{pC}/(\text{m/s}^2)$	误差 %
5	2	0.1909	-0.04	0.1912	0.09
6.3	2	0.1910	0.04	0.1912	0.13
12.5	5	0.1910	0.04	0.1912	0.12
16	5	0.1910	0.02	0.1912	0.08
31.5	10	0.1909	0.00	0.1914	0.19
63	20	0.1909	-0.01	0.1913	0.14
80	50	0.1909	-0.01	0.1913	0.17
160	100	0.1907	参考点	0.191	参考点
315	100	0.1907	-0.03	0.1910	-0.01
630	100	0.1908	-0.10	0.1913	0.15
1250	100	0.1906	-0.05	0.1917	0.38
2000	100	0.1907	-0.04	0.1929	0.99
2500	100	0.191	-0.05	0.1940	1.59
3000	100	0.1912	-0.06	0.1955	2.35
3150	100	0.1913	-0.06	0.1959	2.56
3500	100	0.1915	-0.06	0.1971	3.19
4000	100	0.1917	-0.06	0.1990	4.19
5000	100	0.1925	-0.14	0.2040	6.83
6300	100	0.1935	-0.17	0.2116	10.78
8000	100	0.1955	-0.25	0.2254	18.04
10000	100.3	0.1974	-0.09	0.2508	31.30

参考文献

- [1]董平,丁耀芳.标准压电加速度计的安装方向对其测量结果的影响[J].上海计量测试.2017,5(261):47-49
- [2]周长华,马青量,黄锋.不同安装方式对压电加速度计灵敏度的影响[J].自动化与信息工程.2014,35(2):25-28

比较表2中两种安装方向的校准结果,正向安装时,加速度计所测量的加速度与激光所测的加速度相同,均为加速度计上底面所感受的加速度,未出现由于谐振频率不一致导致的被校加速度计与激光法所测的加速度不一致的现象,因此,校准结果正常。倒置安装的被校加速度计灵敏度频率响应特性较差,在输入信号频率大于5000Hz时,灵敏度相对于160Hz已经有10%以上的正向偏差,其原因在于,被校加速度计并非与标准振动台刚性连接,其安装谐振频率比安装基座的谐振频率低,而此时激光法所测的加速度为安装基座的加速度,因此二者的谐振频率不一致,导致了被校加速度计与激光所测的加速度不同,对于同一振动输入,被校加速度计的测量结果偏大,因此,加速度计的灵敏度会异常偏大,且输入信号频率越高(低于被校加速度计的安装谐振频率),灵敏度越大。

因此,使用振动法(绝对法)校准加速度计时,应将被校加速度计正向安装于标准振动台台面,并将激光照射于被校加速度计的上底面。

5 结论

在标准加速度计的计量校准和应用中,由于不合理的安装方向,会导致测量结果错误,针对这一问题,本文介绍了压电加速度计的工作原理,分析了ENDEVCO公司的2270型压电式加速度计的结构形式,讨论了安装方向以及安装谐振频率对于被校压电加速度计灵敏度的影响,然后开展了试验研究。通过理论分析、试验研究,得出了在对标准加速度计进行冲击(比较法)校准以及振动(绝对法)校准时的正确安装方向,对于开展标准加速度计校准工作有较强的参考意义。

- [3]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
- [4]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,2013,6(238):15-17
- [5]朱丽.振动传感器安装方式对频响的影响[J].中国科技信息,2017,14:56-57