



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 233—2008

压电加速度计

Piezoelectric Accelerometer

2008-09-27 发布

2009-03-27 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

压电加速度计检定规程

Verification Regulation for
Piezoelectric Accelerometer

JJG 233—2008
代替 JJG 233—1996

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2008 年 9 月 27 日批准，并自 2009 年 3 月 27 日起施行。

归口单位：全国振动冲击转速计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

中国航天科技集团公司第一计量测试技术研究所

本规程委托全国振动冲击转速计量技术委员会负责解释

本规程起草人：

于 梅（中国计量科学研究院）

杨晓伟（中国航天科技集团公司第一计量测试技术研究所）

左爱斌（中国计量科学研究院）

朱 刚（中国航天科技集团公司第一计量测试技术研究所）

目 录

| | | |
|------|--------------------|------|
| 1 | 范围 | (1) |
| 2 | 引用文献 | (1) |
| 3 | 概述 | (1) |
| 4 | 计量性能要求 | (1) |
| 4.1 | 灵敏度幅值和相移测量的不确定度 | (1) |
| 4.2 | 灵敏度频率响应 | (2) |
| 4.3 | 灵敏度幅值线性度 | (2) |
| 4.4 | 参考灵敏度的年稳定度 | (2) |
| 4.5 | 其他性能 | (2) |
| 5 | 通用技术要求 | (3) |
| 5.1 | 外观要求 | (3) |
| 5.2 | 其他技术要求 | (3) |
| 6 | 计量器具控制 | (3) |
| 6.1 | 检定条件 | (3) |
| 6.2 | 检定项目 | (6) |
| 6.3 | 检定方法 | (6) |
| 6.4 | 检定结果的处理 | (8) |
| 6.5 | 检定周期 | (8) |
| 附录 A | 采用激光绝对法检定的方法和数据处理 | (9) |
| 附录 B | 加速度计其他性能的检测方法和数据处理 | (12) |
| 附录 C | 压电加速度计检定证书内页格式 | (15) |
| 附录 D | 压电加速度计检定结果通知书内页格式 | (16) |

压电加速度计检定规程

1 范围

本规程适用于压电加速度计（以下简称加速度计）的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 引用文献

本规程引用下列文献：

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》

GB/T 20485.11—2006/ISO 16063—11：1999《振动与冲击传感器校准方法 第11部分 激光干涉法振动绝对校准》

GB/T 20485.21—2007/ISO 16063—21：2003《振动与冲击传感器校准方法 第21部分 比较法振动校准》

GB/T 20485.13—2007/ISO 16063—13：2001《振动与冲击传感器校准方法 第13部分 激光干涉法冲击绝对校准》

GB/T 20485.22—2008/ISO 16063—22：2005《振动与冲击传感器校准方法 第22部分 比较法冲击校准》

使用本规程时应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

加速度计（包括带内置放大电路、电荷—电压转换器等）通常与适调仪（如电荷放大器）配用，用于振动与冲击加速度测量。它主要由质量块、压电敏感元件和基座等组成，其中压电敏感元件可以是石英晶体或压电陶瓷等。

加速度计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，该电荷与质量块的加速度成正比。当被测振动频率远低于加速度计振动系统的固有频率时，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量的瞬时值与它感受到的机械振动加速度瞬时值成正比。

参考加速度计必须经过绝对法检定，作为比较法检定工作加速度计的传递标准。

4 计量性能要求

4.1 灵敏度幅值和相移测量的不确定度

频率范围为0.4 Hz~10 kHz、加速度幅值范围为(0.1~1000) m/s²的加速度计灵敏度幅值和相移测量不确定度的要求见表1。

表 1 灵敏度幅值和相移测量的不确定度 ($k=2$)

| 传感器类型 | 灵敏度幅值 $U_{rel}(S)/(\%)$ | | 灵敏度相移 $U(\Delta\varphi)/(^{\circ})$ | |
|--------|-------------------------|--|-------------------------------------|-----|
| | 参考条件 ¹⁾ | 其他 | 参考条件 ¹⁾ | 其他 |
| 参考加速度计 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 |
| 工作加速度计 | 1.0 | 2.0(0.4 Hz $\leq f \leq$ 2 Hz) 1.0(2 Hz $< f \leq$ 1 kHz) 2.0(1 kHz $< f \leq$ 2 kHz) 3.0(2 kHz $< f \leq$ 10kHz) | / | / |

注 1: ¹⁾参考条件指:
——频率 (Hz): ..., 160, 80, 40, 16, 8, ...;
——加速度 (m/s^2): ..., 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1, ...。

注 2: 在频率的高端 (>10 kHz) 和低端 (<0.4 Hz), 允许有较大的测量不确定度。

4.2 灵敏度频率响应

灵敏度频率响应分为灵敏度幅值频率响应和灵敏度相移频率响应。应按表 2 分段给出灵敏度频率响应的工作频率范围。

表 2 灵敏度频率响应

| 传感器类型 | 灵敏度频率响应 | |
|--------|--------------------|----------------|
| | 幅值/ $\%$ | 相移/ $^{\circ}$ |
| 参考加速度计 | ± 2 | ± 2 |
| 工作加速度计 | ± 5 或 ± 10 | / |

4.3 灵敏度幅值线性度

根据实际使用的加速度幅值范围, 可选用振动或冲击方法检定加速度计的灵敏度幅值线性度, 并按表 3 分段给出灵敏度幅值线性度的工作加速度范围。

表 3 灵敏度幅值线性度

| 传感器类型 | 灵敏度幅值线性度/ $\%$ | |
|--------|----------------|--------------------|
| | 振动检定 | 冲击检定 |
| 参考加速度计 | ± 1 | ± 3 |
| 工作加速度计 | ± 3 | ± 5 或 ± 10 |

4.4 参考灵敏度的年稳定度

参考加速度计参考灵敏度幅值的年稳定度应小于 0.5%; 工作加速度计参考灵敏度幅值年稳定度应小于 2%。

4.5 其他性能

加速度计的其他性能 (包括安装谐振频率、声灵敏度、磁灵敏度、基座应变灵敏度、安装力矩灵敏度、瞬变温度灵敏度、温度响应、横向振动灵敏度比), 应满足生产厂家的出厂指标。

5 通用技术要求

5.1 外观要求

5.1.1 加速度计上应标出型号、出厂编号、商标, 以及振动灵敏轴方向(↑)和横向灵敏度最小的方位(红点)等。

5.1.2 加速度计壳体应无明显的机械损伤, 安装表面应无毛刺及其他瑕疵。加速度计安装基面应平整光滑。其表面粗糙度 R_a 应小于 $1 \mu\text{m}$, 平面度应小于 $5 \mu\text{m}$, 安装螺孔(或螺杆)的垂直度应小于 $10 \mu\text{m}$ 。

5.2 其他技术要求

加速度计制造厂应给出其量程范围、工作温度范围、冲击极限、绝缘电阻、电容、配接电缆电容、推荐安装力矩、极性、质量、壳体材料、安装方式、外形尺寸和结构形式。

6 计量器具控制

计量器具控制包括: 首次检定、后续检定和使用中检验。

6.1 检定条件

6.1.1 检定环境条件

6.1.1.1 温度: 采用绝对法为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$, 采用比较法为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$; 相对湿度: 不大于 75% 。

6.1.1.2 实验室及其周围环境应无振动和冲击源, 无强电场、强磁场、强声场的干扰。

6.1.2 检定用仪器的技术要求

6.1.2.1 参考加速度计套组(参考加速度计和适调仪)

应在选定的参考加速度和频率下, 采用绝对法进行检定, 其灵敏度幅值和相移测量的不确定度应满足表 1 的要求。

6.1.2.2 振动激励系统(振动台、功率放大器和函数发生器)

振动激励系统的要求见表 4。

表 4 振动激励系统

| 技术指标项目 | 绝对法检定装置 | 比较法检定装置 |
|--------------------|--|---|
| 频率的最大允许误差 | $\pm 0.05\%$ | $\pm 0.1\%$ |
| 频率稳定性(测量周期内读数的) | $\pm 0.05\%$ | $\pm 0.1\%$ |
| 加速度幅值稳定性(测量周期内读数的) | $\pm 0.05\%$ | $\pm 0.1\%$ |
| 总谐波失真度 | $\leq 2\%$ | $\leq 5\%$ ($f > 20 \text{ Hz}$) $\leq 10\%$ (全频率范围内) |
| 横向振动比 | $\leq 1\%$ ($f: 1 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$) $\leq 10\%$ ($f: 10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$) $\leq 20\%$ ($f: > 1 \text{ kHz}$) | $\leq 10\%$ ($f \leq 1 \text{ kHz}$) $\leq 30\%$ ($f > 1 \text{ kHz}$) |
| 信噪比 | $\geq 70 \text{ dB}$ | $\geq 50 \text{ dB}$ ($f \geq 10 \text{ Hz}$) $\geq 20 \text{ dB}$ ($f < 10 \text{ Hz}$) |

6.1.2.3 真有效值电压表

真有效值电压表的要求见表 5。

表 5 真有效值电压表

| 技术指标 | 绝对法检定装置 | 比较法检定装置 |
|--------|--------------|--------------|
| 频率范围 | 20 Hz~10 kHz | 20 Hz~10 kHz |
| 最大允许误差 | ±0.1% | ±0.2% |

注：20 Hz 以下可参考电压表说明书。

6.1.2.4 失真度仪（选用）

失真度仪的要求见表 6。

表 6 失真度仪

| 技术指标 | 绝对法检定装置 | 比较法检定装置 |
|--------|------------------------|-------------|
| 频率范围 | 1 Hz~50 kHz | 1 Hz~10 kHz |
| 测量能力 | 远小于 1%~5% | 1%~10% |
| 最大允许误差 | 读数的±10%（失真度范围在0.5%~5%） | 读数的±10% |

6.1.2.5 激光干涉仪

应使用 0.63281 μm 的氦氖或其他波长的稳定单频激光器。

激光干涉仪光电接收器频率响应的最大带宽 f_{\max} ，可由速度幅值 v_{\max} 和激光波长 λ 得到：
$$f_{\max} = \frac{2}{\lambda} \times v_{\max}。$$

在激光绝对法中，条纹计数法和贝塞尔（Bessel）函数法采用具有单个光电接收器的普通迈克尔逊（Michelson）干涉仪。正弦逼近法则采用具有正交信号输出、并带有两个光电接收器的改进型迈克尔逊干涉仪。

对于改进的迈克尔逊干涉仪，在位移小于 2 μm 时，要求其两路输出幅值的偏移量应不超过±5%，相对幅值偏差应不超过±5%，与 90°名义角度的偏差应不超过±5°。当位移较大时，允许增大这些允差的要求。

注：改进的迈克尔逊干涉仪可用其他适当的两光束干涉仪代替，如改进的马赫-泽德（Mach-Zehnder）干涉仪。

6.1.2.6 频比计数器（用于条纹计数法）

频率范围：1Hz 到最大所需频率（使用的典型值为 20 MHz）；

最大允许误差：读数的±0.01%。

6.1.2.7 可调谐的带通滤波器或谱分析仪（用于贝塞尔函数法）

频率范围：800 Hz~10 kHz；

带宽：小于中心频率的 12%；

滤波器斜率：大于 24 dB/oct；

信噪比：最大信号时，大于 70 dB；

动态范围：大于 60 dB。

6.1.2.8 零值检测仪（用于贝塞尔函数法）

在 800 Hz~10 kHz 频率范围内，应满足检测带通滤波器输出噪声的要求。系统如有频谱分析仪，可以不用。

6.1.2.9 示波器

选用下限频率不大于 1 Hz、上限频率不小于 20 MHz 的示波器，确定干涉仪的最佳特性，以及观察干涉仪和传感器输出信号的波形。

6.1.2.10 数据采集系统（用于正弦逼近法）

数据采集系统或波形记录仪的幅值分辨力、采样率及存储量应满足需要。通常，用于加速度计输出幅值的分辨力应不小于 10 位；用于干涉仪正交输出信号的分辨力应不小于 8 位。加速度计输出电压的模-数转换可以采用与干涉仪输出信号模-数转换相同或较低的采样速率。三路信号的采样应同时开始，同时结束，至少应保证两路干涉仪输出信号用同一系统时钟进行同步采样。其技术指标应该使测量的不确定度符合 4.1 的规定。

6.1.2.11 冲击标准装置（选用）

主要用于加速度计幅值线性度的检定。可根据被检加速度计的冲击加速度范围，采用产生合适脉冲持续时间和峰值脉冲的冲击绝对法或比较法检定装置。冲击脉冲应是一个近似正弦、半正弦正矢或高斯的加速度波形。

6.1.2.12 其他性能检测设备（选用）

对其他性能检测设备的要求，见附录 B 和国家标准 GB/T 20485 “振动与冲击传感器校准方法”系列中的相关标准。

6.1.3 检定参数设置的选择

应优先选用下列频率和加速度值：

a) 加速度值（除贝塞尔函数法外）， m/s^2 ：

…，0.1，0.2，0.5，1，2，5，10，20，50，100，200，500，1000，…；

b) 频率，Hz：

按标准 1/3 倍频程频率（…，20，31.5，40，50，63，80，100，125，160，200，…）（或 $\omega=1000 \text{ rad/s}$ 推算的角频率）序列选取。

采用比较法检定时，最好选取与参考加速度计检定条件相同的加速度和频率值。

6.1.4 其他要求

(1) 为获得所要求的测量不确定度，最好将加速度计和配用的适调仪作为一个整体同时进行检定。否则应在所有测量频率点对适调仪进行检定，确定其增益和灵敏度幅值的频率响应（必要时，还应包括相移）。

(2) 采用比较法检定时，被检加速度计与参考加速度计应背靠背安装，也可采用被检加速度计与固定装置内装参考加速度计同轴安装的方式。建议不使用加速度计肩并肩的安装方式。

(3) 绝对法检定双端参考加速度计灵敏度幅值和相位时，应加装一个模拟质量块。其质量应约等于比较法检定时被检加速度计的质量。通常用 20g 的质量块作为模拟质量

块。激光可以射在模拟质量块的上表面，或者通过模拟质量块上的通孔射在参考加速度计的上表面。对于第一种情况，模拟质量块的上表面应抛光，并且激光的光点位置应靠近该表面的几何中心。

(4) 应尽可能减小电缆抖动和基座应变对测量结果的影响，特别是在低频段更应注意。

(5) 用螺钉安装加速度计时，应在加速度计与振动台安装表面之间均匀涂抹蜂蜡或硅脂薄膜，以增加接触刚度。

(6) 如果受振动台和测量能力的限制，不能在一套装置上完成被检加速度计全频段的检定，则允许在多套装置上检定，以覆盖所需的频率测量范围。

6.2 检定项目

6.2.1 常规检定项目

常规检定项目见表7。

表7 常规检定项目表

| 序号 | 检定项目 | 参考加速度计 | | | 工作加速度计 | | |
|----|------------|--------|------|-------|--------|------|-------|
| | | 首次检定 | 后续检定 | 使用中检验 | 首次检定 | 后续检定 | 使用中检验 |
| 1 | 外观检查 | + | + | + | + | | + |
| 2 | 参考灵敏度 | 幅值 | + | + | + | + | + |
| | | 相移 | + | | | - | |
| 3 | 灵敏度频率响应 | 幅值 | + | + | + | + | + |
| | | 相移 | + | | | - | |
| 4 | 灵敏度幅值线性度 | + | + | + | + | | - |
| 5 | 灵敏度幅值的年稳定度 | - | + | - | - | | - |

注：表中“+”表示需要检定的项目；“-”表示不需要检定的项目。

6.2.2 加速度计其他性能检测项目

根据用户的要求，可选择性地对被检加速度计进行安装谐振频率、声灵敏度、磁灵敏度、基座应变灵敏度、安装力矩灵敏度、瞬变温度灵敏度、温度响应、横向振动灵敏度比其他性能的检测。

6.3 检定方法

6.3.1 外观等一般性检查

通用技术要求的检查应满足第5条的要求。

6.3.2 参考灵敏度幅值和相移的检定

6.3.2.1 比较法

使用制造商推荐的扭矩值，将被检加速度计与参考加速度计背靠背刚性地安装在振动台台面中心位置，或将其与振动台内装传感器同轴安装，或与装在振动台台面上附加固定装置内的参考加速度计同轴安装。检定频率小于5 kHz时，可采用附加固定装置

的安装方式；检定频率大于 5 kHz 时，则应采用背靠背或振动台内装参考加速度计的安装方式。

在参考频率和参考加速度条件下确定被检加速度计的灵敏度。被检加速度计的输出与所承受的加速度值之比即为参考灵敏度幅值。需要时应测量两只加速度计的输出比。

被检加速度计灵敏度幅值 S_2 按下式计算：

$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} S_1 \quad (1)$$

式中 S_1 ——参考加速度计灵敏度幅值，mV/（m·s⁻²）或 pC/（m·s⁻²）；

X_1 ——参考加速度计输出值，mV 或 pC；

X_2 ——被检加速度计输出值，mV 或 pC。

检定结果应满足 4.1 的要求。

6.3.2.2 绝对法

激光绝对测量方法包括条纹计数法、贝塞尔函数法和正弦逼近法等。条纹计数法适用于频率范围 1 Hz~2 kHz 的加速度计参考灵敏度幅值检定；贝塞尔函数法适用于频率范围为 800 Hz~50 kHz 的加速度计参考灵敏度幅值检定；正弦逼近法适用于频率范围为 0.4 Hz~10 kHz 的加速度计参考灵敏度幅值和相移的检定。采用激光绝对法检定的方法和数据处理见附录 A。检定结果应满足 4.1 的要求。

6.3.3 灵敏度幅频和相频响应的检定

可采用振动连续扫描法、逐点法或随机激励法。在工作频率范围内，以 1/3 倍频程频率序列选取 7~12 个频率点。用 6.3.2 方法测出不同频率下的灵敏度幅值和相移。灵敏度幅频响应以参考灵敏度幅值的相对偏差表示；灵敏度相频响应以参考灵敏度相移的绝对偏差表示。检定结果应满足 4.2 的要求。

6.3.4 灵敏度幅值线性度的检定

可根据用户要求采用振动或冲击方法，在实际使用的加速度幅值范围内选取 5~10 个点（包括最大和最小加速度），进行灵敏度幅值线性度的检定。

对加速度幅值范围不大的情况，进行 6.3.2 的相关振动检定。灵敏度的幅值线性度用检定点的灵敏度幅值相对于参考灵敏度幅值的相对偏差表示。检定结果应满足 4.3 的要求。

对加速度幅值范围较大的情况，用冲击法检定，并用最小二乘法计算灵敏度幅值线性度。由 n 次检定的加速度 a_i 和灵敏度 S_i ，求出回归直线：

$$S = S_0 + K \cdot a \quad (2)$$

$$\text{式中：斜率：} K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i S_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i}$$

$$\text{截距：} S_0 = \bar{S} - K \bar{a} \quad (3)$$

$$\text{加速度平均值：} \bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

$$\text{灵敏度平均值: } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$$

加速度幅值线性度为:

$$\gamma = \frac{Ka_{\max}}{S_0} \times 100\% \Big|_{a_{\max}} \text{ 或 } \gamma = \frac{K \cdot 10000}{S_0} \times 100\% \Big|_{10000 \text{ m/s}^2} \quad (4)$$

式(4)中前式表示最大加速度处的幅值线性度,后式表示每10000 m/s²幅值线性变化百分数。检定结果应满足4.3的要求。

6.3.5 参考灵敏度幅值年稳定度的检定

通常用灵敏度的年稳定度评价加速度计的稳定性。即:在相同参考频率、参考加速度和适调仪设置的检定条件下,加速度计灵敏度幅值逐年的变化量。

$$w_s = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中 w_s ——灵敏度幅值的年稳定度, %;

S_2 ——当年检定的灵敏度幅值, mV/(m·s⁻²) 或 pC/(m·s⁻²);

S_1 ——上一年检定的灵敏度幅值, mV/(m·s⁻²) 或 pC/(m·s⁻²)。

检定结果应满足4.4的要求。

6.3.6 其他性能(根据用户需求)

加速度计的其他性能(包括安装谐振频率、横向振动灵敏度比、温度响应、瞬变温度灵敏度、声灵敏度、磁灵敏度、基座应变灵敏度、安装力矩灵敏度)的检测方法和数据处理见附录B,结果应满足生产厂家的出厂指标。

6.4 检定结果的处理

经检定符合本规程要求的加速度计发给检定证书,检定证书内页格式见附录C;经检定不符合本规程要求的发给检定结果通知书,并应注明不合格项,检定结果通知书内页格式见附录D。

6.5 检定周期

压电加速度计的检定周期为1年。

附录 A

采用激光绝对法检定的方法和数据处理

A.1 条纹计数法

调整激光干涉仪到最佳状态, 选择参考频率和参考加速度, 调整好调仪增益等设置, 使用频比计数器测量干涉条纹频率和振动频率比值, 或使用计数器测量干涉条纹频率, 并从电压表读取被检加速度计的输出电压, 按照下列方法确定参考加速度灵敏度幅值。

$$\text{振动位移: } A = \frac{1}{8} \lambda \times N \quad (\text{A.1})$$

式中 A ——正弦振动位移单峰值, m;

λ ——激光波长, m;

N ——1个振动周期的干涉条纹数。

(1) 使用频比计数器, 由下式计算加速度幅值 a ;

用振动信号作为闸门信号 (输出接通道 b), 读取的通道 a 信号周期数即为条纹数 N , $N = R_f = f_f / f$ 。

$$a = (2\pi f)^2 A = \frac{1}{2} \pi^2 \lambda f^2 R_f \quad (\text{A.2})$$

式中 a ——振动加速度幅值 (单幅值), m/s^2 ;

f ——振动台振动频率, Hz;

R_f ——干涉条纹频率 f_f 与振动频率 f 的比值。

(2) 使用频率计, 由下式计算加速度幅值 a ;

$$a = (2\pi f)^2 A = \frac{1}{2} \pi^2 \lambda f f_f \quad (\text{A.3})$$

式中 f_f ——干涉条纹频率, 即干涉条纹数除以时间间隔, Hz。

采用条纹计数法测量振动位移时, 从频比计数器 (或频率计) 连续读取 10 次频比数 (或条纹数), 同时从电压表读取 10 次被检加速度计输出电压值, 计算算术平均值, 并用下式计算加速度计灵敏度:

$$S = \frac{u}{a} \text{ 或 } S = \frac{Q}{a} \quad (\text{A.4})$$

式中 S ——加速度计灵敏度, $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$;

u ——加速度计输出电压 (单幅值), mV;

Q ——加速度计输出电荷 (单幅值), pC。

A.2 贝塞尔函数一类一阶法 (最小点法)

设置校准频率, 光电接收器输出接频率分析仪, 调节中心频率到振动台振动频率。开启振动台并逐渐增大振幅, 使滤波后的光电信号在达到第一个最大值 (位移 $0.0927 \mu\text{m}$)

后返回到一个最小值（第1个最小点），该点对应的振幅为 $0.1930 \mu\text{m}$ 。重复 10 次测量取其平均值。

用中心频率等于振动台频率的带通滤波器，对光电接收器输出信号进行滤波。滤波后得到的信号包含一系列加速度计位移幅值的最小值点，见表 A.1。

表 A.1 最小点对应的位移幅值 ($\lambda=0.63281 \mu\text{m}$)

| 最小点 No. | 位移幅值 $A/\mu\text{m}$ | 最小点 No. | 位移幅值 $A/\mu\text{m}$ |
|---------|----------------------|---------|----------------------|
| 0 | 0 | 16 | 2.5704 |
| 1 | 0.1930 | 17 | 2.7286 |
| 2 | 0.3589 | 18 | 2.8868 |
| 3 | 0.5123 | 19 | 3.0450 |
| 4 | 0.6709 | 20 | 3.2033 |
| 5 | 0.8294 | 21 | 3.3615 |
| 6 | 0.9878 | 22 | 3.5197 |
| 7 | 1.1461 | 23 | 3.6779 |
| 8 | 1.3044 | 24 | 3.8361 |
| 9 | 1.4627 | 25 | 3.9943 |
| 10 | 1.6210 | 26 | 4.1525 |
| 11 | 1.7792 | 27 | 4.3107 |
| 12 | 1.9375 | 28 | 4.4689 |
| 13 | 2.0957 | 29 | 4.6271 |
| 14 | 2.2539 | 30 | 4.7853 |
| 15 | 2.4122 | | |

$$\text{加速度幅值: } a = (2\pi f) A \quad (\text{A.5})$$

将 (A.5) 式计算得到的加速度幅值代入 (A.4) 式得出加速度计灵敏度。式中 A 为对应于附录 B 中各最小点的位移幅值。

注：也可使用一类零阶法。

A.3 正弦逼近法

调整干涉仪到最佳工作状态，使其正交输出信号的幅值 u_1 和 u_2 满足 6.1.2.5 的规定。选择参考频率和参考加速度，调整好适调仪的设置。

在 $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ 测量周期内（注： T_{Meas} 为测量持续时间），对激光信号进行等间隔采样，获得 $\{u_1(t_i)\}$ 和 $\{u_2(t_i)\}$ 测量值序列，采样间隔 $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ 为常数。加速度计输出值的采样序列为 $\{u(t_i)\}$ 。

按照下列步骤计算加速度计灵敏度幅值和相移：

(1) 利用干涉仪输出的 $\{u_1(t_i)\}$ 和 $\{u_2(t_i)\}$ ，计算调相值序列 $\varphi_{\text{Mod}}(t_i)$ ：

$$\varphi_{\text{Mod}}(t_i) = \arctan \frac{u_2(t_i)}{u_1(t_i)} + n\pi \quad (\text{A. 6})$$

式中: $n = 0, 1, 2, \dots$ 。为使 $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$ 连续, n 取整数。

(2) 用最小二乘法, 通过解算下列 $N+1$ 个方程组, 求调相值序列 $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$:

$$\varphi_{\text{Mod}}(t_i) = A \cos \omega t_i - B \sin \omega t_i + C \quad (\text{A. 7})$$

式中 $i = 0, 1, 2, \dots, N$;

$$A = \hat{\varphi}_M \cos \varphi_s;$$

$$B = \hat{\varphi}_M \sin \varphi_s;$$

C ——常数, 在正弦逼近法求解中不用;

ω ——振动角频率, $\omega = 2\pi f$;

φ_s ——位移初相位;

$N+1$ ——在测量周期内, 同步采样得到的采样点数。

(3) 计算相位调制项幅值 $\hat{\varphi}_M$ 和位移初相位 φ_s :

$$\hat{\varphi}_M = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \varphi_s = \arctan \frac{B}{A} \quad (\text{A. 8})$$

(4) 计算加速度幅值 a 和加速度初相位角 φ_a :

$$\hat{a} = \pi \lambda f^2 \hat{\varphi}_M \quad \varphi_a = \varphi_s + \pi \quad (\text{A. 9})$$

(5) 同上, 将加速度计输出采样序列 $\{u(t_i)\}$ 代入 (A. 7) 式改写, 对下列 $N+1$ 个方程组求解:

$$u(t_i) = A_u \cos \omega t_i - B_u \sin \omega t_i + C_u \quad (\text{A. 10})$$

式中 $A_u = \hat{a} \cos \varphi_u$;

$$B_u = \hat{a} \sin \varphi_u;$$

C_u ——常数;

\hat{a} ——加速度计输出的幅值;

φ_u ——加速度计输出的初相位。

(6) 计算加速度计输出信号的幅值 \hat{a} 和初相位角 φ_u :

$$\hat{a} = \sqrt{A_u^2 + B_u^2} \quad \varphi_u = \arctan \frac{B_u}{A_u} \quad (\text{A. 11})$$

(7) 由求得的 \hat{a} 、 φ_u 、 a 和 φ_a 的值, 计算加速度计复灵敏度幅值 \hat{S} 和相移 $\Delta\varphi$:

$$\hat{S} = \frac{\hat{a}}{a} \quad \Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_a \quad (\text{A. 12})$$

附录 B

加速度计其他性能的检测方法和数据处理

B.1 安装谐振频率

(1) 连续扫描法

用自动扫描装置,使被检加速度计承受恒定加速度,变频扫描并记录其输出随频率变化的曲线,确定出安装谐振频率。

(2) 冲击法

按规定的安装力矩将被检加速度计安装在钢砧上,并将其悬挂。用力锤敲击钢砧,通过传递函数的方法获得加速度计的安装谐振频率。

B.2 横向振动灵敏度比

将被检加速度计刚性安装在横向校准装置台面中心,校准装置在校准频率点的横向振动比应 $\leq 1\%$ 。在某个参考幅值和频率下激振并测出加速度计灵敏轴方向的灵敏度,在相同的幅值和频率下沿垂直于灵敏轴方向起振,并使被检加速度计绕其自身灵敏度轴转动,或使横向振动方向绕被检加速度计的灵敏度轴转动(在 360° 范围内以 45° 或小于 45° 为增量逐次旋转),找出横向振动灵敏度最大值的方向,并作下标记。

横向振动灵敏度比计算公式为:

$$\text{TSR} = \frac{S_{T_{\max}}}{S_z} \times 100\% \quad (\text{B.1})$$

式中 TSR——横向振动灵敏度比,%;

$S_{T_{\max}}$ ——被检加速度计的最大横向灵敏度值, $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$;

S_z ——被检加速度计的轴向灵敏度值, $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

B.3 温度响应

通常采用比较法进行温度响应校准。通过隔热的试验夹具,将被检传感器与参考传感器同轴刚性地安装到振动台上。被检加速度计放在温度箱内,参考加速度计放在温度箱外。测试时,调节恒温箱内的温度到选定温度值,为使被检传感器温度达到稳定,对于质量小于 100 g 的传感器各温度测点至少恒温 15 min ,质量大于 100 g 小于 500 g 的传感器至少恒温 30 min 。为了抑制温度变化的影响,应对参考加速度计进行保护,以使其在整个校准过程中,由周围温度影响造成的灵敏度变化保持在 2% 以内。

振动激励系统仅适用于横向振动小于轴向振动 25% 的已知频率点上的检定。在振动激励系统的选择和夹具的设计中,应考虑在检定的频率点上使被检加速度计与参考加速度计之间的相对运动小到可以忽略不计。

另一种方法是将参考加速度计与被检加速度计一同安装在温度箱内的夹具上。这种方法仅限于已知参考加速度计温度响应的温度范围。

在被检加速度计和适调仪一起使用的情况下,应进行系统校准。

优先选用的温度为:

$-196, -150, -120, -100, -70, -65, -55, -50, -40, -25, -10, 0, +20, +40,$

+70, +100, +155, +200, +250, +400, +600℃;

优先选用的频率为:

20, 40, 80, 160, 320, 640, 1000, 1500, 2000, 5000, 8000, 10000 Hz。

对某一频率下的温度响应曲线, 温度响应偏差用测试温度下的灵敏度与室温(23℃)下的灵敏度之差相对于室温灵敏度的百分数给出。在期望使用的温度范围内, 所选择加速度计的温度响应偏差不超过 15%。

对某一温度下的频响曲线, 灵敏度频响偏差用频率 160 Hz 时的灵敏度与其他频率下灵敏度的偏差相对于它的百分数给出。

B.4 瞬变温度灵敏度

将被检加速度计安装在一个质量约为加速度计质量 10 倍的铝块上。连接好记录仪, 迅速地将加速度计和铝块沿灵敏轴方向浸入一个冰水槽, 或与室温相差 20℃±1℃的其他适当的液体中(迅速的程度以不引起冲击加速度信号输出为准)。测出加速度计最大输出的幅度和由零到达该幅度所需的时间。

加速度计应与配套的适调仪一起进行试验, 并将适调仪的下限频率设置在最低档。

将最大输出的等效加速度值除以容器中液温与室温之差得到瞬变温度灵敏度值, 即:

$$S_{tr} = \frac{a_{tr}}{\Delta T} \quad (\text{B.2})$$

式中 S_{tr} ——瞬变温度灵敏度, (m·s⁻²)/℃;

a_{tr} ——最大输出的等效加速度值, m/s²;

ΔT ——浸入液体前后的温度差, ℃。

B.5 声灵敏度

在接近自由场的消声室或 75m³ 房间的几何中心附近, 用一无阻尼固有频率低于 20 Hz 的悬挂系统将加速度计悬挂起来, 用随机噪声发生器、放大器和扬声器等产生(130±5)dB 随机噪声自由场。转动加速度计并测出其最大电压输出值。

试验的声谱: 125 Hz 时为(115±6)dB;

(200~2000) Hz 时为(115±5)dB;

4000 Hz 时为(115±6)dB;

8000 Hz 时为(105±10)dB。

如果被检加速度计出现共振而随机噪声谱型无误时, 则应设法消除共振; 或用另一只加速度计来测量共振量, 以便扣除; 或者用刚性杆、刚性重底座支撑加速度计。当用这些方法时, 应指明测试状况与结果。

根据加速度计的参考灵敏度, 将最大输出值换算成等效加速度的有效值, 同时应给出此时的声压级。

B.6 磁灵敏度

把被检加速度计安装在一个 50 Hz 或 60 Hz 的已知磁场内。先用特斯拉计在安装加速度计的位置测出磁场强度 B , 然后旋转加速度计, 找出加速度计输出的最大值, 或旋转磁场方向, 找出加速度计输出的最大值。实验过程应注意剔除感应的机械振动和寄生

的电噪声。

根据加速度计的参考灵敏度，将最大输出值换算成等效加速度，再除以磁场磁感应强度，即：

$$S_B = \frac{a_{B \max}}{B} \quad (\text{B. 3})$$

式中 S_B ——磁灵敏度， $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{T}$ ；

$a_{B \max}$ ——输出最大值的等效加速度， m/s^2 ；

B ——检定时交变磁场的磁感应强度， T 。

检定结果应给出试验条件。

B.7 基座应变灵敏度

将被检加速度计安装在可产生 25 m 曲率半径和 250×10^{-6} 应变的简易悬臂梁上。梁的宽度 76 mm，厚度 12.5 mm，自由长度 1 450 mm。把悬臂梁夹紧于一个刚性支架上。悬臂梁的固有频率接近 5 Hz。在梁上粘有一个应变片以测量应变值，其安装位置靠近被检加速度计，距离固定端大约 40 mm。安装位置处的运动用一个参考加速度计测量，安装参考加速度计时应采用附加的隔离方法以避免其基座弯曲。

使梁作自由振动，观察应变值，在应变值为 250×10^{-6} 时，记下参考加速度计的輸出和被检加速度计的輸出。

由被检加速度计输出最大值减去参考加速度计的輸出，折算成等效加速度 $a_{\epsilon \max}$ (m/s^2)，再除以所施加的应变值（参考值为 250×10^{-6} ），即：

$$S_\epsilon = \frac{a_{\epsilon \max}}{\epsilon} \quad (\text{B. 4})$$

式中 S_ϵ ——基座应变灵敏度， $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ ；

$a_{\epsilon \max}$ ——输出最大值的等效加速度， m/s^2 ；

ϵ ——测试施加的应变值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

B.8 安装力矩灵敏度

可采用比较法和绝对法，分别测量被检加速度计在 1/2 或 2 倍规定安装力矩时的灵敏度值。

测试时应注意：安装加速度计的试验表面必须为钢制，且应平整、光滑、没有毛刺和损伤；表面粗糙度 R_a 应优于 $1 \mu\text{m}$ ，平面度应优于 $5 \mu\text{m}$ 。安装螺纹孔应与安装面垂直，其垂直度应优于 $10 \mu\text{m}$ 。对接触面应进行润滑，并给出所用润滑剂。如采用一个以上的螺钉时，每个螺钉都应进行安装力矩的试验。力矩测量仪的最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ 。

安装力矩灵敏度计算公式：

$$S_T = \frac{S_x - S}{S} \times 100\% \quad (\text{B. 5})$$

式中 S_T ——安装力矩灵敏度， $\%$ ；

S_x ——在 1/2 或 2 倍规定安装力矩的灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

S ——在规定安装力矩时的参考灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

附录 C

压电加速度计检定证书内页格式

1. 参考灵敏度 (参考条件: _____ Hz; _____ m/s^2)
 灵敏度幅值 _____ $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
 灵敏度相移 _____。

2. 灵敏度幅频和相频响应

| 频率/Hz | 加速度/ (m/s^2) | 灵敏度幅频和相频响应 | |
|-------|------------------------------|------------|----------------|
| | | 幅频/% | 相频/ $(^\circ)$ |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

3. 灵敏度幅值线性度 _____ %
 4. 参考灵敏度幅值年稳定度 _____ %
 5. 检定条件
 (应注明适调仪、模拟质量块、安装条件和激光反射方式等信息)

附录 D

压电加速度计检定结果通知书内页格式

1. 检定结果

| 序号 | 不合格项目 | 实际检定结果 |
|----|-------|--------|
| | | |
| : | | |
| | | |
| | | |

2. 检定条件

(应注明适调仪、模拟质量块、安装条件和激光反射方式等信息)