

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1918—2021

电容式加速度传感器校准规范

Calibration Specification for Capacitance Accelerometers

2021-07-28 发布

2022-01-28 实施

国家市场监督管理总局 发布

电容式加速度传感器校准规范

Calibration Specification for

Capacitance Accelerometers

JJF 1918—2021

归口单位：全国振动冲击转速计量技术委员会

主要起草单位：吉林省计量科学研究院

中国计量科学研究院

工业和信息化部电子第五研究所

参加起草单位：湖南省计量检测研究院

北京凌信致远科技有限公司

本规范委托全国振动冲击转速计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

闫有余（吉林省计量科学研究院）

房法成（吉林省计量科学研究院）

左爱斌（中国计量科学研究院）

郑术力（工业和信息化部电子第五研究所）

参加起草人：

刘 云（吉林省计量科学研究院）

陈红江（湖南省计量检测研究院）

刘冀飞（北京凌信致远科技有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(1)
4.1 静态特性	(1)
4.2 动态特性	(1)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 测量标准及其他设备	(2)
6 校准项目和校准方法	(2)
6.1 校准项目	(2)
6.2 校准方法	(2)
7 校准结果表达	(7)
7.1 校准记录	(7)
7.2 校准证书	(7)
8 复校时间间隔	(7)
附录 A 当地重力加速度的确定	(8)
附录 B 校准原始记录推荐格式	(9)
附录 C 校准证书内容及内页格式	(11)
附录 D 电容式加速度计静态灵敏度测量不确定度评定示例	(13)

引 言

本规范按照 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制。JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

电容式加速度传感器校准规范

1 范围

本规范适用于电容式加速度传感器（以下简称加速度计）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 2054—2015 振动计量器具检定系统表

JJF 1156—2006 振动 冲击 转速计量术语及定义

GB/T 20485.11—2006 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 20485.16—2018 振动与冲击传感器校准方法 第 16 部分：地球重力法校准

GB/T 20485.21—2007 振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分：振动比较法校准

IEC 60747-14-4:2011 半导体器件 分立器件 第 14-4 部分：半导体感应器(Semiconductor devices—Discrete devices—Part 14-4;Semiconductor accelerometers)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 概述

电容式加速度传感器广泛用于振动冲击测量。

电容式加速度传感器的结构一般采用弹簧质量系统，由固定质量块和敏感质量块组成，形成平板电容。质量块受惯性力作用运动改变平板电容值。通过检测电容变化的大小，测量出敏感轴加速度的大小和方向。

4 计量特性

4.1 静态特性

静态灵敏度。

4.2 动态特性

- a) 参考灵敏度；
- b) 灵敏度频率响应；
- c) 灵敏度幅值线性度。

5 校准条件

5.1 环境条件

环境温度：采用绝对法校准时为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ ；采用比较法校准时为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

相对湿度：不大于 75%。

电源电压波动量不应超过额定值的 $\pm 10\%$ 。

实验室及周围环境应无强振源，无强电磁场的干扰。

5.2 测量标准及其他设备

5.2.1 分度头

角度测量范围： $0^\circ \sim 360^\circ$ ；

角度最大允许误差： $\pm 0.1^\circ$ ；

水平零位误差： $\pm 0.05^\circ$ 。

5.2.2 振动标准装置

绝对法振动标准装置或比较法振动标准装置。

振动标准装置的测量不确定度见表 1。

表 1 振动标准装置的测量不确定度

名称	频率范围	测量不确定度 ($k=2$)	
		U_{rel}	U_φ
绝对法振动标准装置	$0.005 \text{ Hz} \leq f < 0.1 \text{ Hz}$	3%	2°
	$0.1 \text{ Hz} \leq f \leq 5 \text{ kHz}$	1%	1°
比较法振动标准装置	$0.1 \text{ Hz} \leq f < 20 \text{ Hz}$	5%	3°
	$20 \text{ Hz} \leq f < 2 \text{ kHz}$	2%	2°
	$2 \text{ kHz} \leq f \leq 5 \text{ kHz}$	3%	3°

5.2.3 直流电压表

直流电压的最大允许误差： $\pm 0.05\% \times \text{读数}$ 。

5.2.4 适调放大器

放大器的激励电压最大允许误差： $\pm 0.5\%$ ；

频率响应不超过 $\pm 0.5\%$ ；

非线性误差不超过 $\pm 0.1\%$ 。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见第 5 章。

6.2 校准方法

6.2.1 外观要求及其他技术指标

加速度计上应标有清晰的型号、出厂编号和商标，以及振动灵敏轴方向。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，加速度计安装表面应平整光滑。

加速度计制造厂应给出其量程范围、工作温度范围、冲击极限和供电电压等技术指标。

6.2.2 静态特性

6.2.2.1 校准前的准备

将加速度计安装于台面中心，使加速度计安装面和安装平台台面保持平行并完全贴合固定，连接适调放大器和直流电压表。校准原理框图如图 1 所示。

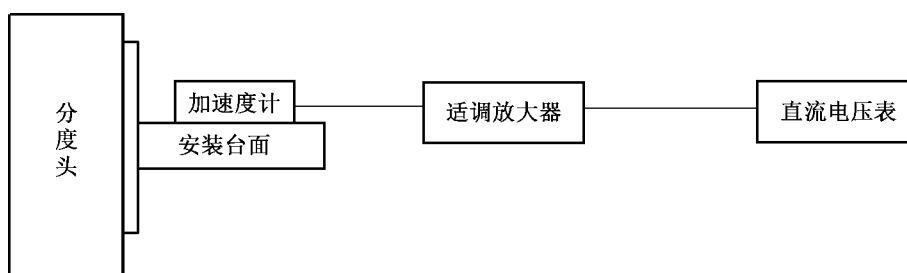


图 1 静态特性校准原理框图

6.2.2.2 用重力加速度 ($\pm 1g$) 校准

加速度计敏感轴轴线与重力加速度方向重合时的静态灵敏度的校准。

安装台面置于水平零位，将加速度计刚性安装于台面中心，使加速度计的敏感轴轴线与重力加速度矢量方向的夹角为 0° (如图 2 所示)，用直流电压表测量加速度计的输出直流电压 V_0 ；调整安装台面至 180° (如图 3 所示)，用直流电压表测量加速度计的输

出直流电压 V_{180} 。

按公式 (1) 计算加速度计的静态灵敏度 S_g ：

$$S_g = \frac{V_0 - V_{180}}{2 \cdot g} \quad (1)$$

式中：

S_g ——加速度计的静态灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$

V_0 ——安装平台置于水平零位时测量的加速度计的输出直流电压值，V；

V_{180} ——安装平台置于 180° 时测量的加速度计的输出直流电压值，V；

g ——实验室选用的重力加速度值 (g_n 或 g_1)， m/s^2 ，见附录 A。

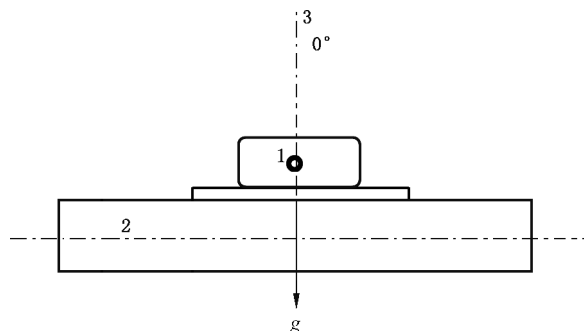


图 2 0° 测量位置的加速度计安装示意图

1—加速度计；2—安装平台台面；3—重力加速度矢量和加速度计灵敏度敏感轴轴线之间的夹角

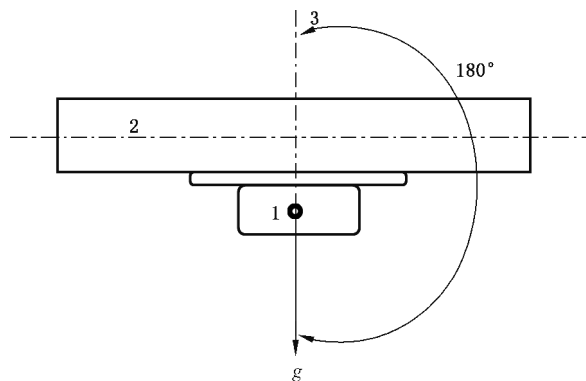


图3 180°测量位置的加速度计安装示意图

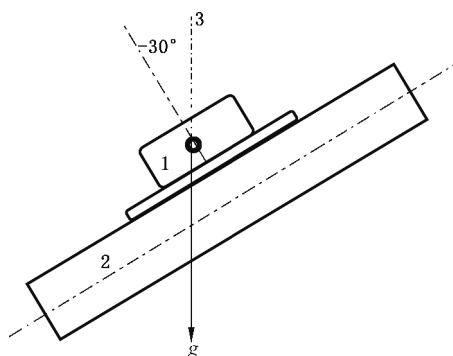
1—加速度计；2—安装平台；3—重力加速度矢量和加速度计灵敏度敏感轴轴线之间的夹角

注：大于 $1g$ 的加速度计的静态特性校准，可参照 JJF 1116 《线加速度计的精密离心机校准规范》。

6.2.2.3 用重力加速度分量 ($0g \sim 1g$) 校准

加速度计敏感轴轴线与重力加速度方向不重合时，在不同角度的重力分量上的静态灵敏度的校准。

把安装平台置于水平零位，加速度计刚性安装于台面中心，调整安装平台至夹角 $+\alpha$ 和 $-\alpha$ （如图4所示），重力加速度矢量和加速度计灵敏度敏感轴轴线之间的夹角首选角度见表2。测量加速度计的输出直流电压 $V_{+\alpha}$ 和 $V_{-\alpha}$ ，调整安装平台至 $180^\circ + \alpha$ 和 $180^\circ - \alpha$ ，测量加速度计的输出电压 $V_{180+\alpha}$ 和 $V_{180-\alpha}$ 。

图4 -30° 测量位置的加速度计安装结构示意图

1—加速度计；2—安装平台；3—重力加速度矢量和加速度计灵敏度敏感轴轴线之间的夹角

表2 首选夹角对应的加速度幅值

夹角 α	重力产生的加速度幅值
-30° 和 $+30^\circ$ $+150^\circ$ 和 $+210^\circ$	$0.8660g_1$
-45° 和 $+45^\circ$ $+135^\circ$ 和 $+225^\circ$	$0.7071g_1$
$\pm 60^\circ$ $+120^\circ$ 和 $+240^\circ$	$0.5000g_1$

按公式 (2) 计算加速度计的静态灵敏度 $S_{g\alpha}$ ：

$$S_{g\alpha} = \frac{V_{+\alpha} + V_{-\alpha} - V_{180+\alpha} - V_{180-\alpha}}{4 \cdot g \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

式中：

$S_{g\alpha}$ ——加速度计的静态灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

$V_{+\alpha}$ ——安装平台置于 $+\alpha$ 处的加速度计输出直流电压值，V；

$V_{-\alpha}$ ——安装平台置于 $-\alpha$ 处的加速度计输出直流电压值，V；

$V_{180+\alpha}$ ——安装平台置于 $180^\circ + \alpha$ 处的加速度计输出直流电压值，V；

$V_{180-\alpha}$ ——安装平台置于 $180^\circ - \alpha$ 处的加速度计输出直流电压值，V；

g ——校准时使用的重力加速度值， m/s^2 ，见附录 A；

α ——安装平台倾斜角度， $(^\circ)$ 。

注：本方法仅限于横向灵敏度小于 5% 的电容式加速度传感器的校准。

6.2.3 动态校准

6.2.3.1 参考灵敏度

6.2.3.1.1 比较法

将被检加速度计与参考加速度计背靠背刚性安装在振动台中心位置，或将与振动台内装加速度计同轴安装，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。

在参考条件下确定被校加速度计的参考灵敏度幅值和相移。

被校加速度计的输出电压与所承受的加速度之比即为参考灵敏度幅值。

相移按公式 (3) 计算：

$$\varphi_2 = \varphi_{2,1} + \varphi_1 \quad (3)$$

式中：

φ_2 ——被测加速度计输出值的相移， $(^\circ)$ ；

φ_1 ——参考加速度计输出值的相移， $(^\circ)$ ；

$\varphi_{2,1}$ ——参考加速度计与被测加速度计输出值之间的相移， $(^\circ)$ 。

注：

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，…

6.2.3.1.2 绝对法

采用条纹计数法（仅限幅值校准）或正弦逼近法对加速度计参考灵敏度进行校准。

6.2.3.2 灵敏度频率响应

在工作频率范围内，以 1/3 倍频程序列选取 8~11 个频率点，按 6.2.3.1 的方法测出不同频率下的灵敏度幅值和相移。

灵敏度的幅频响应按公式 (4) 计算如下：

$$\delta = \frac{S_f - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

δ ——被测加速度计的幅频响应，%；

S_f ——被测加速度计在不同频率点的灵敏度幅值， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

S_0 ——被测加速度计在参考点的灵敏度幅值， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

灵敏度的相频响应按公式（5）计算如下：

$$\Delta = \varphi_f - \varphi_0 \quad (5)$$

式中：

Δ ——被测加速度计的相频响应， $(^\circ)$ ；

φ_f ——被测加速度计在不同频率点的相移， $(^\circ)$ ；

φ_0 ——被测加速度计在参考点的相移， $(^\circ)$ 。

6.2.3.3 灵敏度幅值线性度

采用振动或冲击方法，在加速度幅值范围内选取 5~10 个点（包括最大加速度和最小加速度），进行灵敏度幅值线性度的校准。

采用振动法校准时，按 6.2.3.1 的方法测出不同加速度幅值下的灵敏度幅值，灵敏度幅值线性度按公式（6）计算：

$$\gamma = \frac{S_a - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

γ ——被测加速度计的幅值线性度，%；

S_a ——被测加速度计在不同加速度下的灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

S_0 ——被测加速度计的参考灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

采用冲击法校准时，用最小二乘法计算灵敏度幅值线性度。用 n 次校准的加速度 a_i 和灵敏度 S_i ，求出回归直线：

$$S = S_0 + K \cdot a \quad (7)$$

式中：

K ——斜率：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i S_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i} \quad (8)$$

S_0 ——截距：

$$S_0 = \bar{S} - K\bar{a} \quad (9)$$

$\bar{a}$ ——加速度平均值：

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (10)$$

$\bar{S}$ ——灵敏度平均值：

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (11)$$

加速度幅值线性度为：

$$\gamma = \frac{Ka_{\max}}{S_0} \times 100\% \mid a_{\max} \quad (12)$$

公式（12）表示最大加速度处的幅值线性度。

7 校准结果表达

7.1 校准记录

推荐的校准记录的格式见附录 B。

7.2 校准证书

经校准的仪器出具校准证书。校准证书应包括的信息及推荐的校准证书的格式见附录 C。

8 复校时间间隔

电容式加速度传感器的复校时间间隔建议为 1 年。复校时间间隔受仪器使用情况、使用者和仪器本身属性等诸多因素的制约，送校单位可根据实际情况确定复校时间间隔。

附录 A

当地重力加速度的确定

当地重力加速度可通过以下三种方法得到：

- 1) 可直接测量当地重力加速度，并给出测量不确定度。
- 2) 可通过使用大地公式计算得到：

$$g_1(\Phi, H) = 9.780\,318\,4[1 + 0.005\,302\,4\sin^2\Phi - 0.000\,005\,9\sin^2(2\Phi)] - 0.000\,003\,086H \quad (\text{A.1})$$

式中：

$g_1(\Phi, H)$ ——给定的纬度和海拔处的重力加速度值， m/s^2 ；

Φ ——给定的纬度， rad ；

H ——给定的海拔， m 。

按公式 (A.1) 获得的 g 的不确定度为 0.02% ($k=2$)。

- 3) 如果当地的重力加速度值未知时，使用标准重力加速度 g_n （忽略纬度和海拔的影响）：

$$g_n = 9.806\,65 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A.2})$$

注：所用重力加速度值应至少保留四位有效数字；采用以上不同方法确定的重力加速度值，所得到的静态灵敏度的测量不确定度不同。

附录 B

校准原始记录推荐格式

第 1 页 共 2 页

证书编号：_____ 记录编号：_____
 客户名称：_____ 客户地址：_____
 型号规格：_____ 出厂编号：_____
 制造厂名：_____ 校准依据：_____
 环境条件：温度：_____℃ 相对湿度：_____％ 重力加速度：_____
 校准地点：_____
 标准器型号：_____ 标准器编号：_____
 标准器溯源证书号：_____ 标准器证书有效期：_____年_____月_____日
 标准器测量范围：_____ 最大允许衰减/测量不确定度：_____
 校准依据：_____
 校准员：_____ 校验员：_____

校 准 结 果

一、外观检查：

二、静态特性

1. 用重力加速度 ($\pm 1g$) 校准静态灵敏度

敏感轴轴线相对于重力加速度 矢量方向的角度/ (°)		
输出直流电压值/V		
静态灵敏度/[mV/(m·s ⁻²)]		

2. 用重力加速度分量 ($0g \sim 1g$) 校准静态灵敏度

敏感轴轴线相对于重力加速度 矢量方向的角度/ (°)				
输出直流电压值/V				
静态灵敏度/[mV/(m·s ⁻²)]				
敏感轴轴线相对于重力加速度 矢量方向的角度/ (°)				
输出直流电压值/V				
静态灵敏度/[mV/(m·s ⁻²)]				
敏感轴轴线相对于重力加速度 矢量方向的角度/ (°)				
输出直流电压值/V				
静态灵敏度/[mV/(m·s ⁻²)]				

本次校准结果的不确定度为：_____

证书编号：_____

第 2 页 共 2 页

三、动态特性

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

灵敏度相移：_____。

本次校准结果的不确定度为：_____

2. 灵敏度频率响应

频率/Hz							
加速度/ (m/s^2)							
灵敏度/[$\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$]							
相移/ ($^\circ$)							
幅频响应/ %							
相频响应/ ($^\circ$)							

本次校准结果的不确定度为：_____

3. 灵敏度幅值线性度：校准频率：_____ Hz

加速度/ (m/s^2)							
灵敏度/[$\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$]							
幅值线性度/ %							

本次校准结果的不确定度为：_____

附录 C

校准证书内容及内页格式

C.1 校准证书至少包含以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 证书的编号、页码和总页数；
- c) 校准实验室的名称和地址；
- d) 进行校准的日期；
- e) 进行校准的地点（如果不在实验室内进行校准）；
- f) 客户的名称和地址；
- g) 被校电容式加速度传感器的型号、规格和出厂编号；
- h) 本技术规范的名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准溯源性和有效性的说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以签发日期；
- m) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- n) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

C.2 推荐的电容式加速度传感器校准证书内页格式

一、外观检查：

二、静态特性

1. 用重力加速度 ($\pm 1g$) 校准：_____。2. 用重力加速度分量 ($0g \sim 1g$) 校准：_____。

本次校准结果的不确定度为：_____。

三、动态特性

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

灵敏度相移：_____。

本次校准结果的不确定度为：_____。

2. 灵敏度频率响应

频率/Hz							
加速度/ (m/s^2)							
灵敏度/[$mV/(m \cdot s^{-2})$]							
相移/ ($^\circ$)							
幅频响应/ %							
相频响应/ ($^\circ$)							

本次校准结果的不确定度为：_____。

3. 灵敏度幅值线性度：_____。

本次校准结果的不确定度为：_____。

附录 D

电容式加速度计静态灵敏度测量不确定度评定示例

D.1 测量原理

在加速度计灵敏度的敏感轴轴线相对于重力加速度矢量方向的角度为 0° ，以及加速度计灵敏度的敏感轴轴线位置相对于重力加速度矢量方向的角度为 180° 时，通过测量加速度计的输出直流电压，来计算加速度计敏感轴轴线和重力加速度矢量方向重合时的静态灵敏度。

D.2 测量模型

加速度计的静态灵敏度表示为：

$$S_{g0} = \frac{V_0 - V_{180}}{2 \cdot g} \quad (\text{D. 1})$$

式中：

S_{g0} ——加速度计的静态灵敏度， $\text{V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

V_0 ——安装平台置于水平零位时测量的加速度计的输出直流电压值， V ；

V_{180} ——安装平台置于 180° 时测量的加速度计的输出直流电压值， V ；

g ——实验室使用的重力加速度值 (g_n 或 g_1)， m/s^2 。

D.3 不确定度传播律

$$u^2(s_{g0}) = c_1^2 u_{V0}^2 + 2r(V_0, V_{180}) c_1 u_{V0} c_2 u_{V180} + c_2^2 u_{V180}^2 + c_3^2 u_g^2 \quad (\text{D. 2})$$

其中 V_0 与 V_{180} 强正相关，有 $V_0 = V_{180} + \Delta V$ ，按 $r(V_0, V_{180}) = 1$ 处理，得：

$$u^2(s_{g0}) = (c_1 u_{V0} + c_2 u_{V180})^2 + c_3^2 u_g^2 \quad (\text{D. 3})$$

则合成标准不确定度为：

$$u(s_{g0}) = \sqrt{(c_1 u_{V0} + c_2 u_{V180})^2 + c_3^2 u_g^2}$$

灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial S_{g0}}{\partial V_0} = \frac{1}{2g} \quad c_2 = \frac{\partial S_{g0}}{\partial V_{180}} = -\frac{1}{2g} \quad c_3 = \frac{\partial S_{g0}}{\partial g} = \frac{V_0 - V_{180}}{2g^2}$$

则：

$$u(s_{g0}) = \sqrt{\frac{(u_{V0} - u_{V180})^2}{4g^2} + \frac{(V_0 - V_{180})^2}{4g^4} u_g^2} \quad (\text{D. 4})$$

D.4 标准不确定度分量来源一览表

各标准不确定度分量来源见表 D.1。

表 D.1 标准不确定度分量来源一览表

不确定度分量	不确定度来源
u_A	静态灵敏度测量重复性
u_{V0}	安装平台置于水平零位时，直流电压表测量误差等因素对电压测量产生的影响
u_{V180}	安装平台置于 180° 时，直流电压表测量误差等因素对电压测量产生的影响
$u_{V0,1}, u_{V180,1}$	直流电压表测量误差
$u_{V0,2}, u_{V180,2}$	直流电压表分辨力
$u_{V0,3}, u_{V180,3}$	安装参数等
$u_{V0,4}, u_{V180,4}$	安装平台角度误差
$u_{V0,5}, u_{V180,5}$	加速度计横向灵敏度
u_g	当地重力加速度测量

D.5 标准不确定度分量

选用型号为 MSA1000A-10、编号为 1409-003 的加速度计进行评定。

D.5.1 静态灵敏度测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A

静态灵敏度测量重复性引入的标准不确定度见表 D.2。

表 D.2 算术平均值的实验标准偏差

mV/(m·s⁻²)

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
灵敏度值	26.31	26.22	26.32	26.22	26.34	26.26	26.32	26.21	26.33	26.35
算术平均值	26.288									
标准偏差	0.054 7									

因此：

$$u_A = 0.054\ 7\ \text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$$

D.5.2 安装平台置于水平零位时，直流电压表测量误差等因素对电压测量产生影响而引入的标准不确定度分量 u_{V0}

安装台面置于水平零位，将加速度计刚性安装于台面中心，使加速度计的敏感轴轴线与重力加速度矢量方向的夹角为 0°。

D.5.2.1 直流电压表测量误差引入的不确定度分量 $u_{V0,1}$

用直流电压表测量加速度计的输出直流电压，读数为 3.307 V，校准用直流电压表输出在实际测量量程内最大允许误差为 $\pm 0.05\% \times \text{读数}$ ，按均匀分布：

$$u_{V0,1} = (3.307\ \text{V} \times 0.05\%) / \sqrt{3} = 0.000\ 955\ \text{V}$$

D.5.2.2 直流电压表分辨力引入的不确定度分量 $u_{V0,2}$

校准用直流电压表输出的分辨力为 0.000 1 V，因此分辨力引入的最大允许误差为 $\pm 0.000\ 05\ \text{V}$ ，按均匀分布：

$$u_{V0,2} = 0.000\ 05\ \text{V} / \sqrt{3} = 0.000\ 029\ \text{V}$$

D.5.2.3 安装参数等对电压输出值的影响引入的标准不确定度分量 $u_{V0,3}$

估计安装扭力、电缆固定等对直流电压输出的影响小于 0.05%，按均匀分布：

$$u_{V0,3} = (3.307 \text{ V} \times 0.05\%) / \sqrt{3} = 0.000 955 \text{ V}$$

D.5.2.4 安装平台角度误差对电压输出值的影响引入的标准不确定度分量 $u_{V0,4}$

安装平台角度误差会直流电压输出产生影响小于 0.02%，按均匀分布：

$$u_{V0,4} = (3.307 \text{ V} \times 0.02\%) / \sqrt{3} = 0.000 382 \text{ V}$$

D.5.2.5 加速度计横向灵敏度引入的标准不确定度分量 $u_{V0,5}$

加速度计横向灵敏度最大值为 2%，其为特殊分布：

$$u_{V0,5} = 0.004 0 \text{ V}$$

因此： $u_{V0} = \sqrt{u_{V0,1}^2 + u_{V0,2}^2 + u_{V0,3}^2 + u_{V0,4}^2 + u_{V0,5}^2} = 0.001 566 \text{ V}$

D.5.3 安装平台置于 180°测量时，直流电压表测量误差等因素对电压测量产生影响而引入的不确定度分量 u_{V180}

评定方法同 D.5.2，则：

$$u_{V180} = \sqrt{u_{V180,1}^2 + u_{V180,2}^2 + u_{V180,3}^2 + u_{V180,4}^2 + u_{V180,5}^2} = 0.001 321 \text{ V}$$

D.5.4 当地重力加速度测量引入的不确定度分量 u_g

校准时采用重力加速度的估计值 9.806 65 m/s²，其最大允许误差为 ±0.026 m/s²，按均匀分布：

$$u_g = (0.026 \text{ m/s}^2) / \sqrt{3} = 0.015 01 \text{ m/s}^2$$

将 u_{V0} ， u_{V180} ， u_g 代入公式 (D.4)，得：

$$u(S_{g0}) = 0.000 042 2 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

D.6 加速度计静态灵敏度幅值的相对合成标准不确定度 $u_{c,rel}(S_{g0})$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u^2(S_{g0})} = 0.054 7 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

则相对合成标准不确定度为：

$$u_{c,rel} = u_c / [26.288 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})] = 0.21\%$$

D.7 加速度计静态灵敏度幅值相对扩展不确定度 U_{rel}

取包含因子 $k=2$ ，加速度计敏感轴轴线和重力加速度矢量方向重合时，静态灵敏度幅值相对扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \times u_{c,rel} = 2 \times 0.21\% \approx 0.5\%$$