

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1904—2021

差分式加速度传感器放大器校准规范

Calibration Specification for Differential Accelerometer Amplifiers

2021-02-23 发布

2021-08-23 实施

国家市场监督管理总局 发布

差分式加速度传感器

放大器校准规范

Calibration Specification for

Differential Accelerometer Amplifiers

JJF 1904—2021

归口单位：全国振动冲击与转速计量技术委员会

主要起草单位：工业和信息化部电子第五研究所

参加起草单位：中国工程物理研究院

吉林省计量科学研究院

北京凌信致远科技有限公司

本规范委托全国振动冲击与转速计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

郑术力（工业和信息化部电子第五研究所）

阚 飞（工业和信息化部电子第五研究所）

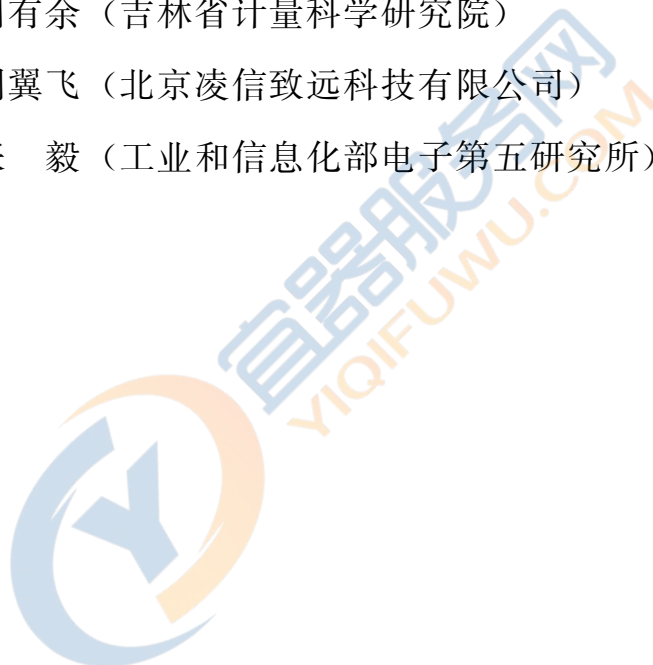
参加起草人：

何 斌（中国工程物理研究院）

闫有余（吉林省计量科学研究院）

刘翼飞（北京凌信致远科技有限公司）

张 毅（工业和信息化部电子第五研究所）



目 录

引言	(III)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
3.1 传输系数	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 归一化误差	(2)
5.2 增益误差	(2)
5.3 非线性	(2)
5.4 幅频特性	(2)
5.5 相频特性	(2)
5.6 低通滤波器特性	(2)
5.7 本底噪声	(2)
5.8 激励电压	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 校准用标准或其他设备	(2)
6.2.1 信号发生器	(2)
6.2.2 数字电压表	(2)
6.2.3 动态信号分析仪	(2)
7 校准项目和校准方法	(2)
7.1 校准项目	(2)
7.2 校准方法	(2)
7.2.1 外观及工作正常性检查	(2)
7.2.2 归一化误差	(3)
7.2.3 增益误差	(3)
7.2.4 非线性	(4)
7.2.5 幅频特性	(4)
7.2.6 相频特性	(5)
7.2.7 低通滤波器特性	(5)
7.2.8 本底噪声	(6)
7.2.9 激励电压	(6)
8 校准结果表达	(6)
8.1 校准记录	(6)

8.2 校准证书·····	(6)
9 复校时间间隔·····	(6)
附录 A 一种差分式加速度传感器模拟器 ·····	(7)
附录 B 校准原始记录推荐格式 ·····	(8)
附录 C 校准证书的内容 ·····	(11)
附录 D 不确定度评定示例 ·····	(15)



引 言

本规范以 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》为基础性系列规范进行制定。

本规范的制定参考了 JJG 233—2008《压电加速度计》、JJG 338—2013《电荷放大器》、JJF 1156《振动 冲击 转速计量术语及定义》以及 JJF 1269—2010《压电集成电路传感器（IEPE）放大器校准规范》等技术法规。

本规范为首次发布。



差分式加速度传感器放大器校准规范

1 范围

本规范适用于直流激励差分式加速度传感器放大器（以下简称放大器）的校准。

2 引用文件

JJG 338 电荷放大器

JJF 1156 振动 冲击 转速计量术语及定义

JJF 1269 压电集成电路传感器（IEPE）放大器校准规范

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 术语

3.1 传输系数 transmission coefficient

放大器输出电压和输入电压的比值。

4 概述

放大器广泛应用于压阻式、应变式等差分式加速度传感器的信号适调。放大器对加速度传感器的输出信号进行放大和调理。它一般由恒压直流激励电源、伺服反馈单元、差分转换级、低通滤波器、放大单元等组成。图 1 为典型的放大器对传感器信号调理框图。

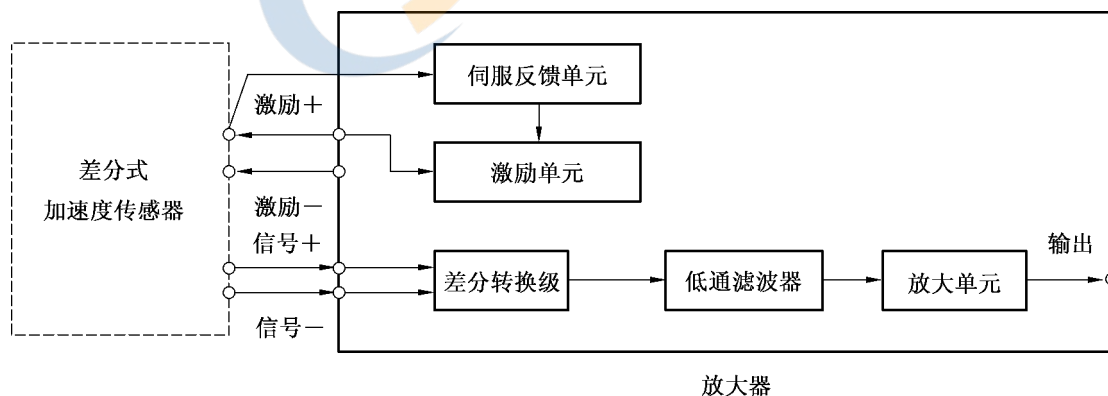


图 1 放大器对传感器信号调理框图

5 计量特性

- 5.1 归一化误差
- 5.2 增益误差
- 5.3 非线性
- 5.4 幅频特性
- 5.5 相频特性
- 5.6 低通滤波器特性
- 5.7 本底噪声
- 5.8 激励电压

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：18℃～28℃；

相对湿度：≤80%；

电源电压的变化不超过额定电压的±10%；

室内应无影响校准结果的强电磁场干扰和腐蚀性气体。

6.2 校准用标准或其他设备

6.2.1 信号发生器

频率范围不小于DC～200 kHz，失真度不大于0.3%，频率稳定性优于0.05%，频率准确度优于 1×10^{-5} ，幅值稳定性优于1%。

6.2.2 数字电压表

在使用频率范围内，交流电压的测量最大允许误差为±0.1%，直流电压测量最大允许误差为±0.01%。

6.2.3 动态信号分析仪

频率分辨率优于0.01%，频谱幅值示值最大允许误差为±0.5%，通道一致性相位差最大允许值为±0.5°，幅值一致性最大允许值为±0.2%。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见第5章。

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

放大器上的文字、标识应清晰可辨。放大器应无影响正常工作的机械损伤，各功能开关定位准确、灵活可靠。输入和输出插座应无松动。接通电源后，放大器能正常工作，显示清晰完整。

外观检查后，给放大器通电，充分预热。

7.2.2 归一化误差

按图 2 连接仪器，调节信号发生器输出交流差分信号，频率调至 160 Hz。一般差分信号可由两路相位相差 180°的信号获得，也可以参考附录 A 的方式获得。放大器归一化挡置于“1”，放大器滤波设置为全通状态。调节信号发生器的输出电压和放大器增益挡，平衡清零，使放大器的输出电压 e_o 达到最大额定输出值 E_o 。保持信号发生器的输出电压和放大器增益挡不变，依次改变归一化挡位，用数字电压表或动态信号分析仪测量每个状态时放大器的输出电压 e_{oj} 。每个状态的归一化误差由式 (1) 计算。

$$\delta_j = \frac{e_{oj} - \frac{e_o}{G_j}}{\frac{e_o}{G_j}} \times 100\% \quad (j=2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中：

δ_j ——归一化挡为“ G_j ”时放大器的归一化误差，%；

e_o ——归一化挡为“1”时放大器的输出电压，mV；

e_{oj} ——归一化挡为“ G_j ”时放大器的输出电压，mV；

G_j ——某归一化挡。

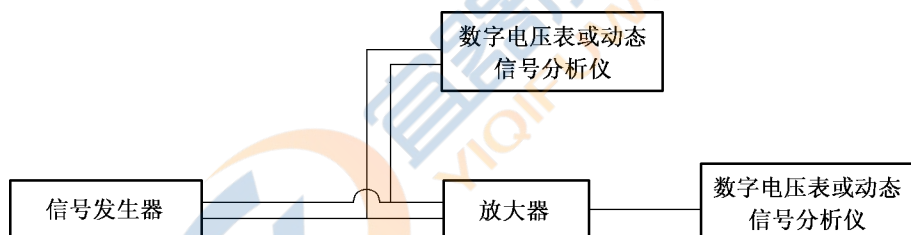


图 2 放大器增益误差校准框图

根据放大器的技术指标从低至高选取不同的归一化挡位，平衡清零，重复上述步骤进行测量，取其中绝对值最大的误差作为该放大器的归一化误差校准结果。

7.2.3 增益误差

放大器校准框图如图 2 所示。调节信号发生器输出交流差分信号，频率调至 160 Hz。放大器归一化挡置于“1”，平衡清零，放大器滤波设置为全通状态。调节信号发生器的输出电压，使放大器的输出电压 e_o 达到最大额定输出值 E_o ，用数字电压表或动态信号分析仪分别读取放大器输入电压 e_i 和放大器输出电压 e_o 。被校放大器的增益误差按式 (2) 计算。

$$\delta_n = \left(\frac{e_o}{ke_i} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

δ_n ——放大器某增益挡位的增益误差；

e_o ——放大器的输出电压，mV；

e_i ——放大器的输入电压，mV；

k ——放大器的增益挡。

根据放大器的技术指标从低至高选取不同的增益挡位，平衡清零，重复上述步骤进行测量，取其中绝对值最大的误差作为该放大器的增益误差校准结果。

7.2.4 非线性

按图 2 连接仪器，调节信号发生器输出交流差分信号，频率调至 160 Hz。放大器归一化挡置于“1”，放大器滤波设置为全通状态。调节放大器增益挡，平衡清零，使放大器的输出电压 e_o 与输入电压 e_i 近似相等。调节信号发生器的输出电压，使放大器输出电压 e_o 达到额定输出电压 E_o 。在放大器输出范围内均匀选取 7~10 个幅值，调节信号发生器使放大器的输出电压分别为所选的电压幅值，用数字电压表或动态信号分析仪测量放大器的输出电压 e_{oj} ($j=1, 2, \dots, n$) 和输入电压 e_{ij} ($j=1, 2, \dots, n$)。按式 (3) 计算非线性，取绝对值最大者为放大器非线性 ϵ 校准结果。

$$\epsilon_j = \frac{e_{oj} - (a_0 + a_1 e_{ij})}{E_o} \times 100\% \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{oj} \sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \sum_{j=1}^n e_{ij} e_{oj}}{\sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - n \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right)^2}$$

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^n e_{ij} e_{oj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \sum_{j=1}^n e_{oj}}{\sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - n \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right)^2}$$

式中：

a_0 ——拟合直线的截距，mV；

a_1 ——拟合直线的斜率；

e_{ij} ——放大器的输入电压，mV；

e_{oj} ——放大器的输出电压，mV；

E_o ——放大器的额定输出电压，mV。

7.2.5 幅频特性

按图 2 连接仪器，调节信号发生器输出交流差分信号，频率调至 160 Hz。放大器归一化挡置于“1”，放大器滤波设置为全通状态，平衡清零。测量 160 Hz 处放大器的传输系数作为参考点。调节信号发生器的输出电压和放大器的增益挡，使放大器的输出电压略低于其额定输出电压 E_o 。用数字电压表或动态信号分析仪分别读取放大器的输入电压 e_i 和输出电压 e_o 。按公式 (4) 计算放大器于测量频率点处的传输系数。

$$T = \frac{e_o}{e_i} \quad (4)$$

式中：

T ——放大器的传输系数；

e_o ——放大器的输出电压，mV；

e_i ——放大器的输入电压，mV。

测量频率选取应根据放大器的技术指标从低频至高频选取不少于 10 个频率点或按倍频程选取。调节信号发生器频率至选取的测量频率，得到放大器在该频率下的传输系数。以频率为横坐标，各测量频率与参考频率的传输系数比为纵坐标，传输系数比变化曲线即为放大器的幅频特性。

7.2.6 相频特性

按图 3 连接仪器，放大器归一化挡置于“1”，放大器滤波设置为全通状态。调节信号发生器输出交流差分信号，设置信号发生器频率至选取定的测量频率，调节信号发生器输出电压和放大器的增益挡，平衡清零，使放大器的输出电压 e_o 略低于其额定输出电压 E_o 。用动态信号分析仪测量得到 CH1 相位 φ_1 或 CH2 相位 φ_2 与 CH3 的相位 φ_3 之差，按式 (5) 计算放大器在此频率下的相移。

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_1 \text{ 或 } \Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_2 \quad (5)$$

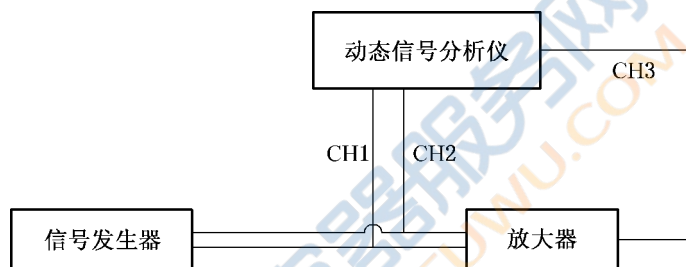


图 3 相频特性校准框图

测量频率选取应根据放大器的技术指标从低频至高频选取不少于 10 个频率点或按倍频程选取，得到各频率点相移的变化曲线即为放大器的相频特性。

7.2.7 低通滤波器特性

按图 2 连接仪器，放大器归一化挡置于“1”，低通滤波器置于所要校的挡位。信号发生器频率调至 160 Hz，作为参考频率。调整信号发生器输出电压和放大器增益挡，平衡清零，使放大器的输出电压 e_o 达到说明书规定的最大额定输出电压 E_o 。用数字电压表或动态信号分析仪分别读取放大器的输入电压 e_{i0} 和输出电压 e_{o0} 。

调整信号发生器频率分别为低通滤波器截止频率和 2 倍截止频率，并得到在此频率下放大器的输入电压 e_{i1} 和输出电压 e_{o1} ，用式 (6) 计算放大器低通滤波器截止频率和 2 倍截止频率处的衰减。

$$S = 20 \lg \frac{T_0}{T_1} \quad (6)$$

式中：

S ——衰减量；

$T_0 = \frac{e_{o0}}{e_{i0}}$ ——放大器在参考频率点 160 Hz 处的传输系数；

$T_1 = \frac{e_{o1}}{e_{i1}}$ ——放大器在测量频率点处的传输系数。

低通滤波器在 2 倍截止频率处和截止频率处的衰减量之差即为其高频衰减斜率。对放大器的所有低通滤波器进行测量，得到各个滤波器的特性。

7.2.8 本底噪声

按图 4 连接仪器，放大器输入端对地短接，放大器滤波设置为全通状态，归一化挡置于“1”，平衡清零，调节放大器的增益挡置于最高挡。用数字电压表或动态信号分析仪测量放大器输出端的电噪声交流电压有效值 e_o ，按式 (7) 计算输入端等效噪声电压。

$$e_n = \frac{e_o}{k} \quad (7)$$

式中：

e_n ——输出端折算到输入端等效噪声电压，mV；

e_o ——输出端噪声电压，mV；

k ——放大器的增益挡。

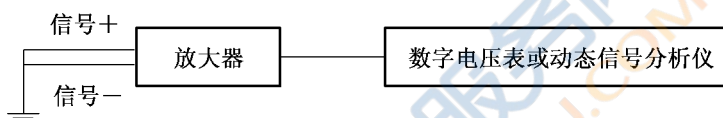


图 4 本底噪声校准框图

7.2.9 激励电压

按图 5 连接仪器，用数字电压表测量放大器的直流输出电压，即为放大器的激励电压。激励电压有多挡功能的放大器，应逐挡进行测量。

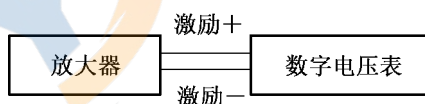


图 5 激励电压校准框图

8 校准结果表达

8.1 校准记录

推荐的校准记录的格式见附录 B。

8.2 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内页格式见附录 C。

9 复校时间间隔

放大器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

一种差分式加速度传感器模拟器

差分式加速度传感器模拟器（以下简称模拟器）是与放大器适配，把单端正弦信号转化为差分信号的电路装置。如图 A.1 所示，模拟器主要由乘法单元、分压单元功能模块构成。模拟器的输出与其激励电压成正比，且具有与传感器相同的输出阻抗。

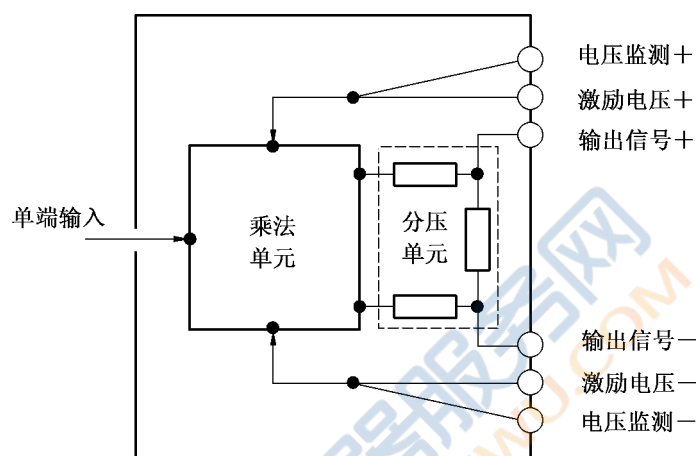


图 A.1 模拟器原理框图

附录 B

校准原始记录推荐格式

差分式加速度传感器放大器校准记录

第 页 共 页
年 月 日

送校单位_____制造厂_____

型号_____出厂编号_____校准证书号_____

标准器名称_____标准器型号_____标准器编号_____

标准器证书号_____标准器证书有效期____年____月____日

环境温度_____℃，相对湿度_____%，依据的技术文件_____

1 外观_____

2 归一化误差

归一化挡					
输出 e_o /mV					
输入 e_i /mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
归一化挡					
输出 e_o /mV					
输入 e_i /mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					

3 增益误差

增益挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
增益挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					

4 非线性

增益挡					
输入 e_i/mV					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
输出 e_o/mV					
a_0					
a_1					
$\epsilon/\%$					
不确定度 ($k=2$)					

5 幅频特性

频率/Hz					
输出 e_o /mV					
输入 e_i /mV					
传输系数 $\frac{e_o}{e_i}$					
频响/%					
不确定度 ($k=2$)					

6 相频特性

频率/Hz					
相移/ (°)					
不确定度 ($k=2$)					
频率/Hz					
相移/ (°)					
不确定度 ($k=2$)					

7 低通滤波器

滤波器挡位/kHz		输入 e_i /mV	输出 e_o /mV	衰减/dB	不确定度 ($k=2$)
	参考频率				
	截止频率				
	2 倍截止频率				

8 本底噪声

增益挡置____, 归一化挡置____时, 输入端等效噪声交流电压为____ mV (RMS), 不确定度为____ ($k=2$)。

9 激励电压

激励电压/mV				
输出电压/mV				
不确定度 ($k=2$)				

附录 C

校准证书的内容

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) 被校放大器的型号、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，以及签发日期；
- 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 推荐的差分式加速度传感器放大器校准证书内页格式见表 C.1。

表 C.1 校准证书内页推荐格式

校 准 结 果					第 页 共 页
1 外观					
2 归一化误差					
归一化挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
归一化挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
该仪器归一化误差绝对值最大者为 ____%。					
3 增益误差					
增益挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
增益挡					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
误差/%					
不确定度 ($k=2$)					
所有各挡增益误差绝对值最大者为 ____%。					

表 C.1 (续)

校 准 结 果					第 页 共 页
4 非线性					
增益挡					
输入 e_i/mV					
输出 e_o/mV					
输入 e_i/mV					
输出 e_o/mV					
a_0					
a_1					
$\varepsilon/\%$					
不确定度 ($k=2$)					
当输出电压为 ____ V (峰值) 时, 仪器传输系数为满输出的偏差最大, 为 ____ %。					
5 幅频特性					
频率/Hz					
幅频/%					
不确定度 ($k=2$)					
频率/Hz					
幅频/%					
不确定度 ($k=2$)					
6 相频特性					
频率/Hz					
相移/ (°)					
不确定度 ($k=2$)					
频率/Hz					
相移/ (°)					
不确定度 ($k=2$)					

表 C.1 (续)

校 准 结 果				第 页 共 页	
7 低通滤波器					
滤波器挡位/kHz		输入 e_i /mV	输出 e_o /mV	衰减/dB	不确定度 ($k=2$)
	参考频率				
	截止频率				
	2 倍截止频率				
8 本底噪声					
增益挡置____，归一化挡置____时，输入端等效噪声交流电压为____ mV (RMS)，不确定度为____ ($k=2$)。					
9 激励电压					
激励电压/mV					
输出电压/mV					
不确定度 ($k=2$)					

附录 D

不确定度评定示例

D.1 概述

本附录以增益误差校准项目的测量不确定度评定为例，说明差分式加速度传感器放大器校准项目的测量不确定度评定的步骤。

D.2 增益误差校准结果的测量不确定度评定

D.2.1 测量方法

见 7.2.3。

D.2.2 测量模型

差分式加速度传感器放大器增益误差是放大器在某增益挡的输出与输入电压之间的相对误差，按式 (D.1) 计算：

$$\delta_n = \left(\frac{e_o}{ke_i} - 1 \right) \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

式中：

e_o ——放大器输出电压，mV；

e_i ——放大器输入电压，mV；

k ——放大器的增益挡。

D.2.3 标准不确定度分量来源及评定

D.2.3.1 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u_{1,\text{rel}}$

测量重复性引入的不确定度分量按 A 类方法评定。在相同测量条件下，对某型号差分式加速度传感器放大器的增益挡 $k=10$ 重复测量 10 次，得到测量结果如表 D.1 所示。

表 D.1 10 次独立重复测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
$x = e_o/e_i$	9.962	9.964	9.965	9.964	9.962
测量次数	6	7	8	9	10
$x = e_o/e_i$	9.965	9.964	9.962	9.965	9.962

由测量数据计算其算术平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_j = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{e_{oj}}{e_{ij}} \right) = 9.963\ 5$$

实验标准偏差为：

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{j=1}^{10} (x_j - \bar{x})^2} = 0.001\ 285$$

则相对标准不确定度为：

$$u_{1,\text{rel}}(x) = \frac{s(x)}{x} = 0.013\%$$

D.2.3.2 电压比测量误差引入的标准不确定度分量 $u_{2,\text{rel}}$

电压比测量误差引入的标准不确定度分量 $u_{2,\text{rel}}$ 按 B 类方法评定。根据上级机构数字电压表的校准证书，电压比不确定度为 0.03% ($k=2$)，按正态分布，则：

$$u_{2,\text{rel}}(x) = \frac{0.03\%}{2} = 0.015\%$$

D.2.4 测量结果的合成标准不确定度

各不确定度分量间不相关，则：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_{i,\text{rel}}^2} = 0.02\%$$

D.2.5 测量结果 δ_n 的扩展不确定度

取 $k=2$ ，则：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.02\% = 0.04\%$$