

**《振弦式位移计校准规范》
测量结果不确定度评定**

振弦式位移计校准规范编写组

2025 年 4 月

振弦式位移计测量结果不确定度评定示例

1. 校准方法概述

将振弦式位移计固定在校准台上，按照振弦式位移计量程的20%分档，从测量范围下限，逐级增加到测量范围上限，然后从测量范围上限逐级减少至测量范围下限，在每一测试点稳定30 s后，用振弦式读数仪读取输出频率模数，重复循环3次。

2. 测量模型

$$D = k(F_i - F_0) \quad (6)$$

式中：

D ——振弦式位移计的位移值，mm；

k ——振弦式位移计的灵敏度系数，mm/Hz²；

F_0 ——振弦式位移计初始状态频率模数，Hz²；

F_i ——振弦式位移计在第*i*档测试点频率模数，Hz²。

3. 校准数据

3.1 校准样品

名称：振弦式位移计，型号：SXF-50（量程：0~50 mm）编号：22XF50057

振弦式位移计灵敏度系数： $k=0.007$ mm/Hz²

3.2 校准计量标准器

3.2.1 数显标尺

测量范围：（0~300 mm），分辨力：0.01mm，

校准证书编号：L2025-0003611，示值误差：MPE≤±0.04mm。

3.2.2 振弦式读数仪

测量范围：（400~5000）Hz，分辨力0.1 Hz

校准证书编号：E2025-0003565，校准结果的扩展不确定度： $U=0.2$ Hz（ $k=2$ ）

3.3 校准数据

振弦式位移计的校准数据见表 1。

表 1 校准数据

| 测试点 (mm) | 频率模数 (F) | | | | | |
|-------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 进程 1 | 回程 1 | 进程 2 | 回程 2 | 进程 3 | 回程 3 |
| 0.0 | 1148.0 | 1149.6 | 1149.6 | 1143.8 | 1143.8 | 1144.5 |
| 10.0 | 2621.2 | 2617.1 | 2620.3 | 2612.8 | 2619.9 | 2614.1 |
| 20.0 | 4066.9 | 4054.8 | 4064.4 | 4053.9 | 4060.0 | 4052.2 |
| 30.0 | 5504.1 | 5496.5 | 5501.6 | 5497.3 | 5499.8 | 5494.6 |
| 40.0 | 6924.3 | 6918.8 | 6921.5 | 6918.2 | 6920.5 | 6915.7 |
| 50.0 | 8343.7 | 8343.7 | 8343.6 | 8343.6 | 8341.4 | 8341.4 |

4.灵敏系数计算

对各输入量的偏导数计算如下：

4.1.测量值频率模数 F_i

$$c_{F_i} = \frac{\partial D}{\partial F_i} = k$$

由于 $k=0.007 \text{ mm/Hz}^2$ ，则 $c_{F_i} = 0.007\text{mm}$

4.2.初始频率模数 F_0

$$c_{F_0} = \frac{\partial D}{\partial F_0} = -k$$

由于 $k=0.007 \text{ mm/Hz}^2$ ，则 $c_{F_i} = -0.007\text{mm}$

4.3.校准台示值误差 h

位移测值直接由校准台数显标尺直接测量，灵敏系数为

$$c_h=1$$

由校准证书可知垂线坐标仪校准结果的扩展不确定度：

$$U = 0.008 \text{ mm} \quad (k=2)$$

则 $u_h = 0.004 \text{ mm}$

5. 输入量的测量不确定度

5.1 频率模数测量误差 F_i :

读数仪扩展不确定度 $U_F = 0.2 \text{ Hz}$ ($k=2$)

标准不确定度: $u(F_i) = 0.1 \text{ Hz}$

转换为频率模数: $u(F_i) = \frac{2f}{1000} \cdot u(f) = \frac{2 \times 1070.8}{1000} \times 0.1 = 0.21 \text{ Hz}^2$

5.2 分辨力引入的不确定度 δ_v :

分辨力半宽: 0.05 Hz^2

标准不确定度: $u(\delta_v) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ Hz}^2$

5.3 校准台示值误差 δ_w :

校准证书给出 $U(h) = 0.008 \text{ mm}$ ($k=2$)

标准不确定度 $u(\delta_w) = 0.008/2 = 0.004 \text{ mm}$

5.4. 重复性引入的不确定度 u_r :

表 2 重复性测量数据表

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 测量值(F) | 8343.7 | 8343.7 | 8343.6 | 8343.6 | 8341.4 | 8341.4 | 8341.3 | 8341.3 | 8343.6 | 8343.6 |

用贝塞尔公式计算标准偏差 $s=1.18 \text{ Hz}^2$

因为每个测试点进行 3 次循环测量, 则重复性不确定度为:

$$u(r) = \frac{1.18}{\sqrt{3}} = 0.68 \text{ Hz}^2$$

6. 各标准不确定度分量汇总

各标准不确定度分量汇总见表 3。

表 3 测量不确定度分量汇总表

| 符号 | 不确定度来源 | 标准不确定度分量的值 | 灵敏系数 c_i | 包含因子 |
|----------|----------|---------------------|---------------------|-------|
| $u(F_i)$ | 频率模数测量误差 | 0.21 Hz^2 | 0.007 mm | $k=2$ |
| $u(F_0)$ | 初始频率模数误差 | 0.21 Hz^2 | -0.007 mm | $k=2$ |

| | | | | |
|---------------|----------|----------------------|--------------------|----------------|
| $u(\delta_v)$ | 读数仪分辨力误差 | 0.029 Hz^2 | 0.007 mm | $k = \sqrt{3}$ |
| $u(\delta_w)$ | 校准台示值误差 | 0.004 mm | 1 | $k = \sqrt{3}$ |
| $u(r)$ | 测量重复性 | 0.68 Hz^2 | 0.007 mm | $k=2$ |

7. 合成标准不确定度

$$u_c(D) = \sqrt{(c_{F_1} \cdot u(F_1))^2 + (c_{F_0} \cdot u(F_0))^2 + (c_{\delta_v} \cdot u(\delta_v))^2 + (c_{\delta_w} \cdot u(\delta_w))^2 + (c_r \cdot u(r))^2}$$

代入数据：

$$u_c(D) = 0.007 \text{ mm}$$

8. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为： $U=ku_c(D)=2 \times 0.007=0.014 \text{ mm}$

9. 结论

振弦式位移计在 50 mm 量程点的扩展不确定度为：

$$U=0.014 \text{ mm}(k=2)$$

注：温度影响及安装误差因实验室控制措施完善，其贡献可忽略。

本示例数据基于实际校准结果，具体应用时需根据实际设备参数调整。