

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF××—××××

岩土工程用振弦式压力计校准规范

Calibration Specification for Vibrating Wire Pressure Gauges for

Geotechnical Engineering

(不确定度评定报告)

归口单位：全国压力计量技术委员会

主要起草单位：

参加起草单位：

岩土工程用振弦式压力计最小二乘直线拟合预测输出值

测量不确定度评定示例

C.1.概述

C.1.1 评定依据:

JJF1059.1-2012 测量不确定评定和表示。

C.1.2 测量方法:

在测量范围内,均匀选取 m 个校准点($m \geq 5$),首先进行正行程测量,从零点逐点加压至满量程压力值;然后泄压逐点进行反行程测量,每个校准点示值稳定后读取压力计输出值。压力计的校准循环重复 n 次($n \geq 3$)。

C.1.3 测量条件

环境温度:(19.8~20.2) °C,温度波动度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$

环境湿度:(45~60)%RH

C.1.4. 计量标准

计量标准器:测量范围为(0.04~0.6) MPa 活塞式压力计,最大允许误差为 $\pm 0.05\%$

C.1.5 测量对象

测量范围为(0~0.6) MPa 的岩土工程用振弦式土压力计,简称压力计。

C.2.测量模型:

压力计校准的主要目的是获得工作直线方程,因此评定最小二乘拟合直线的预测输出值扩展不确定度具有实际的意义,最小二乘直线是利用最小二乘法、以残差平方和最小(即压力计特性曲线与拟合直线相应点之差的平方和最小)为原则来确定的。对被校传感器取 m 个测量点,进行 n 个循环测量,则每个测量点有 $2n$ 个数据,设定 $2n$ 个数据的平均值为 \bar{N}_i ,根据 m 组数据可拟合出压力计的工作直线方程:

$$N_i = (f_i^2 - f_0^2) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$N_{LSi} = a + bp_i \quad (2)$$

根据残差平方和 $\sum_{i=1}^m [N_i - (a + bp_i)]^2$ 最小原则,得出截距 a 和斜率 b 的计算公式如下:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m p_i^2 \sum_{i=1}^m \bar{N}_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m p_i \bar{N}_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m p_i \right)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{m \sum_{i=1}^m \bar{N}_i p_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m \bar{N}_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m p_i \right)^2} \quad (4)$$

式中：

N_i ——频率模数的变化量，校准点的输出频率模数与零点的输出频率模数之差，默认为压力计的输出值， Hz^2

f_i ——校准点的输出频率， Hz ；

f_0 ——零点的输出频率， Hz ；

N_{LSi} ——最小二乘直线预测输出值， Hz^2 ；

a ——最小二乘法拟合直线的截距， Hz^2 ；

b ——最小二乘法拟合直线的斜率， Hz^2/MPa 或 Hz^2/kPa 。

灵敏系数：对公式(1)各误差来源求偏导可得：

$$c(a) = 1, \quad c(b) = p, \quad c(p_i) = b \quad (5)$$

C.3.标准不确定度的评定示例

C.3.1 截距 a 和斜率 b 引入的标准不确定度

压力计输出值直线拟合的不确定度由截距 a 和斜率 b 引入的两不确定度分量合成。

截距 a 和斜率 b 引入的不确定度分量为：

$$u(a) = s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m p_i^2}{m \sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2}} \quad (6)$$

$$u(b) = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2}} \quad (7)$$

式中 s 为残余标准差，其计算公式为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{N}_i - N_{LSi})^2}{m-2}} \quad (8)$$

式中： \bar{p} ——所有校准点压力值的算术平均值

\bar{N}_i ——各校准点输出值的算术平均值

N_{LSi} ——最小二乘直线计算出的输出值

残余标准差 s 可用于评价测量过程中所有随机因素对被校输出值 N 的单次观测的平均差的大小，残余标准差越小，回归效果越好，最小二乘直线的准确度越好。因此 $u(a)$ ， $u(b)$ 的计算与残余标准差有关。 $u(a)$ ， $u(b)$ 两个分量的相关系数 ρ_{ab} 计算公式为：

$$\rho_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})(\bar{N}_i - \bar{N})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (\bar{N}_i - \bar{N})^2}} \quad (9)$$

式中： \bar{N} 为所有校准点输出值的算术平均值。

C.3.2 标准活塞式压力计输入的压力值 p_i 引入的标准不确定度

标准器使用的是 0.05 级活塞式压力计，测量范围(0.04~0.6)MPa，最大允许误差为±0.05%。标准器在不同测量压力 p_i 下的最大允许误差±0.05%* p_i MPa，则半宽为 0.05%* p_i MPa，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，所以 $u(p_i) = \frac{0.05\% \times p_i}{\sqrt{3}}$ MPa。

C.3.3 被校压力计输出 N_i 引入的标准不确定度

主要由频率读数仪的读数误差引入，最大允许误差为±0.5Hz；则半宽为 0.5Hz，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，所以 $u(N_i) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29$ Hz。

6 合成不确定度 u_c 的评定

根据不确定度传播定律，合成标准不确定度可表示为：

$$u_c(N_{LSi}) = \sqrt{c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b) + 2c(a)c(b)\rho_{ab}u(a)u(b) + c^2(p_i)u^2(p_i) + u^2(N_i)} \quad (10)$$

将公式(3)灵敏系数的值代入公式(10)中：

$$u_c(N_{LSi}) = \sqrt{u^2(a) + p_i^2 u^2(b) + 2p_i \rho_{ab} u(a)u(b) + b^2 u^2(p_i) + u^2(N_i)} \quad (11)$$

公式(11)中 p_i 为校准点标准压力值，其他的参数在确定最小二乘直线后可以求出，此时合成不确定度只与压力值 p_i 相关，最后根据 $U = ku_c$ 求出扩展不确定度。压力计的校准数据见表 1：

表 1：压力计校准数据（编号：214316）

标准压力值 p/MPa	输出值 (N_i) /Hz ² , $f_0=1771.3\text{Hz}$					
	第一次校准		第二次校准		第三次校准	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
0.100	248.7	252.6	248.7	252.6	248.4	253.4
0.200	501.4	507.9	502.5	507.9	501.4	508.6
0.300	755.9	763.0	756.3	763.3	755.9	763.3
0.400	1010.2	1015.4	1011.5	1016.2	1009.1	1016.7
0.500	1263.8	1267.5	1265.1	1267.9	1263.8	1267.5
0.600	1517.2	1517.2	1517.9	1517.9	1518.5	1518.5
工作直线方程：		$N_{LSi} = -0.9 + 2532.8p_i$		满量程输出值：	1519.7	
重复性：		0.26%		迟滞：	0.47%	
线性度：		0.11%		综合误差：	0.28%	

通过表 1 可计算得到如下数据：

表 2：通过表 1 计算得到的相关参数值

序号	参数	数值（计量单位为前文默认）
1	a	-0.9
2	b	2532.8
3	s	1.160
4	$u(a)$	0.790
5	$u(b)$	2.191
6	ρ_{ab}	0.999998

将表 2 的值代入公式(11)中，可得压力计的合成不确定度和扩展不确定度。

7 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，结合以上计算结果，则压力计各校准点预测输出值的扩展不确定度见表 3:

表 3 压力计各校准点预测输出值的扩展不确定度

序号	校准点/MPa	预测输出值 (N_{LSi}) /Hz ²	U /Hz ²
1	0.000	-0.9	0.8
2	0.100	252.4	1.1
3	0.200	505.6	1.3
4	0.300	758.9	1.5
5	0.400	1012.2	1.7
6	0.500	1265.5	1.9
7	0.600	1518.8	2.1