



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

(征求意见稿)

20 × × - × × - × × 发布

20 × × - × × - × × 实施

国家市场监督管理总局 发布

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

JJF XX-XXXX

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：

本规范委托全国压力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参 加 起 草 人：

目 录

引 言..... II

1 范围..... 1

2 引用文件..... 1

3 术语和计量单位..... 1

3.1 术语..... 1

3.2 计量单位..... 2

4 概述..... 2

5 计量特性..... 3

6 校准条件..... 3

6.1 环境条件..... 3

6.2 测量标准及其他设备..... 3

7 校准项目和校准方法..... 4

7.1 校准项目..... 4

7.2 校准方法..... 4

8 校准结果表达..... 10

9 复校时间间隔..... 11

附录 A 岩土工程用振弦式压力计校准原始记录（推荐样式） 12

附录 B 校准证书内页（推荐样式） 13

附录 C 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..... 14

引言

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》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1008《压力计量名词术语及定义》共同构成本规范制定的基础性系列文件。

本校准规范主要参考 GB/T 13606-2007《土工试验仪器 岩土工程仪器 振弦式传感器通用技术条件》、GB/T 23872.1-2009《岩土工程仪器 土压力计 第 1 部分：振弦式土压力计》、GB/T 3411.1-2009《大坝监测仪器 孔隙水压力计 第 1 部分：振弦式孔隙水压力计》、JJG 875-2019《数字压力计》、JJG 860-2015《压力传感器（静态）》和 JJF 1401-2013《振弦式频率读数仪》进行制定，采用了其中的基本原则，对具体方法和技术指标进行了细化。

本规范是首次制定的国家计量校准规范。

岩土工程用振弦式压力计校准规范

1 范围

本规范适用于测量上限不超过 10MPa 的岩土工程用振弦式压力计的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1008-2008 压力计量名词术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1401-2013 振弦式频率读数仪

JJG 860-2015 压力传感器（静态）

JJG 875-2019 数字压力计

GB/T 3411.1-2009 大坝监测仪器 孔隙水压力计 第 1 部分：振弦式孔隙水压力计

GB/T 13606-2007 土工试验仪器 岩土工程仪器 振弦式传感器通用技术条件

GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法

GB/T 23872.1-2009 岩土工程仪器 土压力计 第 1 部分：振弦式土压力计

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 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 振弦式压力计 vibrating wire pressure gauges

利用弦的固有频率变化进行压力测量的压力计。

3.1.2 频率模数 frequency modulus

振弦式压力计输出频率 f (Hz) 的平方除以 1000 获得的值，用英文字母 F 表示。

[JJF1401-2013 3.5]

3.1.3 频率模数的变化量 frequency modulus variation

压力计校准点与零点输出频率模数之差，用英文字母 N 表示。

3.1.4 满量程输出 full scale output

测量上限输出频率的平方和测量下限输出频率的平方代数差的绝对值。

注：以频率模数为输出量的压力计，其满量程输出可表示为：测量上限输出模数和测量下限输出模数代数差的绝对值。[GB/T 13606-2007 3.7]

3.1.5 重复性 repeatability

在重复性测量条件下，对同一或类似被测对象重复测量所得示值或测得值间的一致程度。[JJF1001-2011 5.10、5.13]

3.1.6 迟滞 hysteresis

对于同一输入量，正、反行程输出量的最大偏差。[GB/T 13606-2007 3.10]

3.1.7 线性度 linearity

正、反行程平均校准曲线相对于工作直线的最大偏差。[GB/T 18459-2001 2.3.5]

3.1.8 综合误差 combined error

正行程平均校准曲线和反行程平均校准曲线二者与工作直线的最大偏差。[GB/T 13606-2007 3.14]

3.1.9 参考温度 reference temperature

校准试验中压力计的工作温度。

3.1.10 温度影响系数 temperature influence coefficient

温度变化对压力计输出的影响程度。

3.1.11 振弦式频率读数仪 vibrating wire frequency readout

具有为振弦式压力计提供激励信号、测量压力计输出频率、显示频率或频率模数等、并具备数据存储、通讯等功能的专用仪表。[JJF1401-2013 3.3]

3.2 计量单位

压力的计量单位是帕斯卡（Pa），或是它的十进倍数单位：kPa、MPa 等。

岩土工程用振弦式压力计的输出主要为频率（Hz）。

4 概述

岩土工程用振弦式压力计是岩土工程领域，用于静土压力和渗透水压力测量的计量器具。用于静土压力测量的一般称为：振弦式土压力计（盒）；用于渗透水压力测量的一般称为：振弦式孔隙水压力计或者渗压计；以上两种压力计量器具因测量原理基本相同，统称为岩土工程用振弦式压力计，以下简称压力计。

压力计工作原理是：作用于压力计上的压力导致感压膜片产生形变，安装于膜片上的振弦固有振动频率产生变化，输出频率的平方差和承受的压力保持线性关系，压力计的工作原理如图 1 所示。

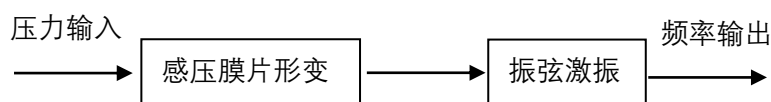


图 1 岩土工程用振弦式压力计工作原理示意图

5 计量特性

压力计的主要计量特性有：零位漂移、重复性、迟滞、线性度、综合误差、温度补偿系数。均应满足表 1 的要求：

表 1 计量特性要求一览表

序号	技术指标	技术要求
1	零位漂移	$\leq 0.5\%FS$
2	重复性	$\leq 0.5\%FS$
3	迟滞	$\leq 1.5\%FS$
4	线性度	$\leq 1.5\%FS$
5	综合误差	$\leq 2.5\%FS$
6	温度影响系数	$\pm 0.04\%FS/^{\circ}C$

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（20±5）℃，波动度不大于±1℃/h。

6.1.2 相对湿度：（40~80）%。

6.1.3 校准设备周围应无热源、强电磁场（除地磁场外）等外界干扰，周围不应有明显的振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 测量标准

校准用的测量标准设备见表 2。

表 2 测量标准

序号	名称	技术要求	用途
1	活塞式压力计	0.05 级及以上	提供标准压力
2	自动标准压力发生器	0.05 级及以上（年稳定性合格）	
3	数字压力计	0.05 级及以上（年稳定性合格）	
4	频率读数仪	测量范围：（300~4000）Hz、（600~3000）Hz、（750~4500）Hz，（450~6000）Hz； 允许误差：±0.5Hz；分辨率：不低于 0.1Hz	频率信号测量

5	高低温试验箱	测量范围覆盖(0~40) °C，温度波动度不大于±0.5°C，均匀性不大于 1.0°C。	温度影响系数测量
6	温度计	高低温试验箱配套用温度计：测量范围覆盖(0~40) °C，温度误差不超过±0.2°C	

选用的压力标准器和频率读数仪的测量范围应能覆盖被校压力计的压力测量范围和频率输出范围；也可选用其他压力标准器，校准装置的扩展不确定度 U_{95} 应不大于被校压力计综合误差允许值的 1/3。

6.2.2 其他设备

压力源：选用数字压力计作为压力标准器时，提供压力。

温度计：用于测量环境温度，温度误差不超过±0.2°C。

校准用配套设备：将压力计与标准器连接，如压力容器等，其密封性应满足校准过程中压力计能获得稳定的输出。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

- a) 零位漂移
- b) 重复性
- c) 迟滞
- d) 线性度
- e) 综合误差
- f) 温度影响系数

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

校准前准备：被校压力计应在恒温条件下放置2h以上，然后通过配套工具与校准装置进行连接安装，造压介质应使用无腐蚀性液体或者气体，当造压介质使用无腐蚀性液体时，压力计安装时应排空所有连接管道中的气体。

连接示意图如图2所示。

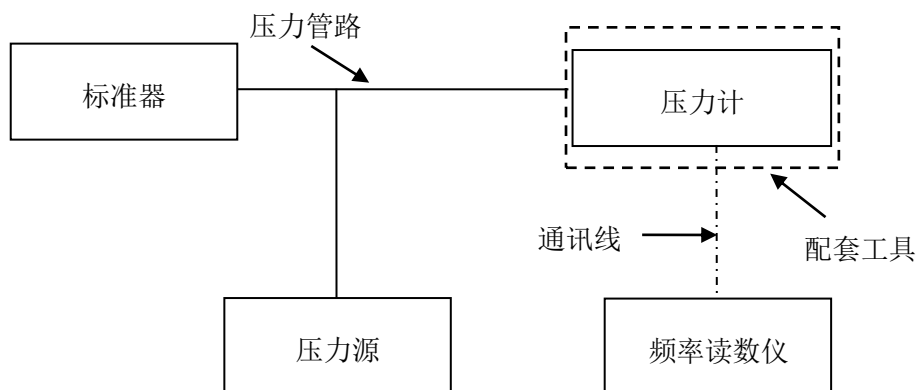


图2 压力计校准连接示意图

7.2.2 通电预热

被校压力计安装好后，应进行通电预热，预热时间不少于30min。

7.2.3 预压和密封性检查

将压力计加压至测量上限压力，保压3min，目测被校压力计的输出值显示是否稳定，然后再降压到零位。预压应进行3次。

7.2.4 数据预处理

输入压力和输出频率的平方成线性关系，为便于计算，统一将输出频率值转化为频率模数，即：

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

式中：

F_i ——校准点的输出频率模数， Hz^2 ；

f_i ——校准点的输出频率， Hz ；

压力计每个校准点预处理后的输出值记为：

$$N_i = \lambda(F_i - F_0) \quad (2)$$

式中：

N_i ——频率模数的变化量，校准点与零点的输出频率模数之差， Hz^2 ；

λ ——频率模数的系数，土压力计 $\lambda = 1$ ，孔隙水压力计 $\lambda = -1$ ；

F_0 ——零点的输出频率模数， Hz^2 ；

数据预处理后，使用频率模数的变化量 N_i 代表校准点的输出值，按 0.1Hz^2 的修约间隔进行数据修约。

7.2.5 零位漂移

预加压后静置 5min，记录零压力下被校压力计输出值，如果被校压力计具有清零功能，应先进行清零操作，待示值稳定后再记录零压力的输出值；然后每隔 15min 记录 1 次零压力的输出值，持续记录 1h，根据公式（3）计算被校压力计的零位漂移。

$$d_z = \frac{N_{0,\max} - N_0}{N_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

d_z —— 压力计的零位漂移；

$N_{0,\max}$ —— 压力计最大漂移处的零点输出值， Hz^2 ；

N_0 —— 压力计的初始零点示值， Hz^2 ；

N_{FS} —— 压力计满量程输出值， Hz^2 ；

7.2.6 输出值校准

在测量范围内，均匀选取 m 个校准点（ $m \geq 5$ ），首先进行正行程校准，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校准，每个校准点示值稳定后读取压力计输出值。正反行程为 1 个校准循环，压力计应进行 n 个循环的校准（ $n \geq 3$ ）。记录校准过程中的参考温度 T_0 ，压力计内置温度传感器的，参考温度为修正后的压力计温度值；否则参考温度为环境温度。

7.2.7 校准曲线的确定

根据以上试验步骤，有 m 个校准点，共进行 n 次重复测量，按公式(4)和公式(5)进行计算，可得正行程算术平均值：

$$\bar{N}_{\text{I}i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_{\text{I}ij} \quad (4)$$

式中： $N_{\text{I}ij}$ —— 正行程第 i 个校准点，第 j 次校准输出值， Hz^2 ；（ $i = 1, 2, \dots, m$ ）（ $j = 1, 2, \dots, n$ ）。

反行程算术平均值：

$$\bar{N}_{\text{D}i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_{\text{D}ij} \quad (5)$$

式中： $N_{\text{D}ij}$ —— 反行程第 i 个校准点，第 j 次校准输出值， Hz^2 ；（ $i = 1, 2, \dots, m$ ）（ $j = 1, 2, \dots, n$ ）。

分别由 $\bar{N}_{Li}$ 和 $\bar{N}_{Di}$ 连接的曲线，称为正行程校准曲线和反行程校准曲线；各校准点的正行程和反行程校准输出值的算术平均值，按公式(6)计算：

$$\bar{N}_i = \frac{1}{2}(\bar{N}_{Li} + \bar{N}_{Di}) \quad (6)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, m$ 。

由 $\bar{N}_i$ 连接的线称为压力计的平均校准曲线。

7.2.8 工作直线的确定

根据以上试验步骤获得的数据，用最小二乘法进行线性拟合，工作直线（拟合直线）的表达式为：

$$N_{LSi} = a + bp_i \quad (7)$$

公式(7)中截距 a 、斜率 b 分别按公式(8)和(9)进行计算：

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m p_i^2 \sum_{i=1}^m \bar{N}_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m p_i \bar{N}_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m p_i \right)^2} \quad (8)$$

$$b = \frac{m \sum_{i=1}^m \bar{N}_i p_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m \bar{N}_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m p_i \right)^2} \quad (9)$$

式中：

N_{LSi} ——最小二乘直线预测输出值，Hz²；

a ——最小二乘法拟合直线的截距，Hz²；

b ——最小二乘法拟合直线的斜率，Hz²/MPa 或 Hz²/kPa。

7.2.9 满量程输出值

按公式(10)计算：

$$N_{FS} = b(p_{\max} - p_{\min}) \quad (10)$$

式中：

$p_{\max}$ ——测量范围上限压力值，kPa 或 MPa；

$p_{\min}$ ——测量范围下限压力值，kPa 或 MPa。

7.2.10 重复性 ε_R

根据 n 个循环的输出值校准数据, 同一校准点在升、降压行程共有 $2n$ 个输出值, 各校准点测量结果的实验标准偏差为该校准点的重复性, 压力计各校准点的实验标准偏差用公式(11) 进行计算:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (N_{ij} - \bar{N}_i)^2}{n-1}} \quad (11)$$

压力计的重复性按公式(12)计算:

$$\varepsilon_R = \frac{s_{i\max}}{N_{FS}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $s_{i\max}$ —— s_i 中的最大值。

7.2.11 迟滞 ε_H

同一校准点正行程输出值的算术平均值和反行程输出值的算术平均值之差的绝对值, 按公式(13)计算:

$$\Delta N_{Hi} = |\bar{N}_{Li} - \bar{N}_{Di}| \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$ 。

压力计迟滞按公式(14)计算:

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta N_{H\max}}{N_{FS}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $\Delta N_{H\max}$ —— ΔN_{Hi} 中的最大值。

7.2.12 线性度 ε_L

计算各校准点输出值的算术平均值 $\bar{N}_i$ 与工作直线 N_{LSi} 的差值, 按公式 (15)进行计算。

$$\Delta N_{Li} = |\bar{N}_i - N_{LSi}| \quad (15)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$ 。

压力计的线性度按公式(16)计算:

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta N_{L\max}}{N_{FS}} \times 100\% \quad (16)$$

式中：

$\Delta N_{L\max}$ ——输出值算术平均值与工作直线偏差的最大值。

7.2.13 综合误差 ε_C

各校准点正行程输出值的算术平均值与工作直线 N_{LSi} 之间的差值，按公式(17)计算：

$$(\Delta N_C)_{Li} = |\bar{N}_{Li} - N_{LSi}| \quad (17)$$

式中： $i=1,2,\dots,m$ 。

各校准点反行程输出值的算术平均值与工作直线 N_{LSi} 之间的差值，按公式(18)计算：

$$(\Delta N_C)_{Di} = |\bar{N}_{Di} - N_{LSi}| \quad (18)$$

式中： $i=1,2,\dots,m$ 。

压力计的综合误差，按公式(19)计算：

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta N_{C\max}}{N_{FS}} \times 100\% \quad (19)$$

式中：

$\Delta N_{C\max}$ ——正、反行程输出值算术平均值与工作直线偏差的最大值。

7.2.14 温度影响系数 τ

将压力计放入高低温试验箱中，降温至 $T_{t\min}$ 保温 2h，压力计零点示值稳定后读取低温输出值；然后升温至 $T_{t\max}$ 保温 2h，压力计零点示值稳定后读取高温输出值，按公式（20）计算温度影响系数：

$$\tau = \frac{N'_{t\max} - N'_{t\min}}{(T_{t\max} - T_{t\min}) \times N_{FS}} \times 100\% \quad (20)$$

式中：

τ ——温度影响系数， FS/℃。

$T_{t\max}$ ——压力计最高正常工作温度，℃；

$T_{t\min}$ ——压力计最低正常工作温度，℃；

$N'_{t\max}$ ——压力计在 $T_{t\max}$ 的输出值，Hz²；

$N'_{t\min}$ ——压力计在 $T_{t\min}$ 的输出值，Hz²。

注：压力计的使用说明书明确最高正常工作温度低于 40℃ 时， $T_{t\max}$ 取说明书明确的最高工作温度，否则 $T_{t\max}$ 取 40℃；压力计的说明书明确最低正常工作温度高于 0℃ 时， $T_{t\min}$ 取说明书明确的最低工作温度，否则 $T_{t\min}$ 取 0℃；

7.2.15 温度影响系数修正的工作直线方程

将温度影响系数作为附加修正值代入公式(7)，可得温度影响系数修正的工作直线方程，表达式为：

$$N_{LSi} = a + bp_i + \tau N_{FS} (T_i - T_0) \quad (21)$$

式中：

T_i -压力计的工作温度，℃；

T_0 -压力计的参考温度，℃；

8 校准结果表达

经校准的压力计出具校准证书。推荐的校准原始记录格式见附录 A，推荐的校准证书格式，见附录 B。

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 送校单位的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；
- 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- 对校准规范的偏离的说明；
- 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- 校准环境的描述；
- 校准结果及测量不确定度的说明；

- m. 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- n. 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o. 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

压力计的复校时间间隔，根据使用情况、仪器本身质量由用户自行确定，建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A

岩土工程用振弦式压力计校准原始记录（推荐样式）

委托单位					
器具名称		型号/规格			
制造厂		出厂编号			
所用标准 器及主要 配套设备	名 称	型号/规格		编号/等级	
校准依据					
校准地点		环境温度：		相对湿度：	
零位漂移	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min
输出值（ ）					
标准压力 值（ ）	压力计输出值 N_i (Hz ²)， $f_0 =$ ，参考温度 T_0 ：				
	第一次		第二次		第三次
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程 反行程
压力计低温（℃）输出值：			压力计高温（℃）输出值：		
满量程输出值：			温度影响系数：		
零位漂移：			重复性：		
迟滞：			线性度：		
综合误差：			备注： $\lambda =$		
温度影响系数修正的工作直线方程：					

最小二乘直线拟合预测输出值扩展不确定度：

序号	校准点（ ）	预测输出值 N_{LSi} (Hz ²)	U （ ）， $k=2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

校准员：

核验员：

校准日期：

附录 B

校准证书内页（推荐样式）

校准结果						
1. 校准结果				参考温度 T_0 :		
标准压力 值 ()	压力计输出值 N_i (Hz ²)					
	第一次		第二次		第三次	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
零位漂移:				满量程输出值:		
重复性:				迟滞:		
线性度:				综合误差:		
温度影响系数:				$f_0 =$, $\lambda =$		
温度影响系数修正的工作直线方程:						
2. 最小二乘直线拟合预测输出值扩展不确定度						
序号	校准点 ()		预测输出值 N_{LSi} (Hz ²)		U (), $k=2$	
1						
2						
3						
4						
5						
6						

附录 C

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 $< \pm 0.5^\circ\text{C}$

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 ；

$N_{\text{LS}i}$ ——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 $\pm 0.05\%$ 。标准器在不同测量压力 p_i 下的最大允许误差 $\pm 0.05\% \cdot p_i$ MPa，则半宽为 $0.05\% \cdot p_i$ 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 ± 0.5 Hz；则半宽为 0.5 Hz，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便可以求出，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