



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××-202×

相对法压电式压力传感器校准规范

Calibration Specification of Relative Method Piezoelectric Pressure
Transducer

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

相对法压电式压力传感器 校准规范

Calibration Specification of Relative Method
Piezoelectric Pressure Transducer

JJF XXXX—202X

归口单位：全国压力计量技术委员会

主要起草单位：北京长城计量测试技术研究所

上海市计量测试技术研究院

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	(1)
4 概述	(2)
5 计量性能	(2)
5.1 灵敏度	(2)
5.2 线性	(2)
5.3 绝缘电阻	(2)
6 通用技术要求	(2)
7 计量器具控制	(2)
7.1 校准条件	(3)
7.2 校准项目	(3)
7.3 校准方法	(3)
8. 校准结果表达	(5)
9. 复校时间间隔.....	(5)
附录 A 压电式压力传感器工作直线计算方法.....	(6)
附录 B 压电式压力传感器校准原始记录格式.....	(8)
附录 C 压电式压力传感器校准证书（内页）格式	(9)
附录 D 压电式压力传感器测量不确定度评定示例.....	(10)

引 言

本规范是首次制定的国家计量校准规范。JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1008《压力计量名词术语及定义》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本校准规范参照 JJG（军工）152-2018 压电式压力传感器检定规程进行制定，采用了其中的基本原则和校准方法，对技术指标进行了细化和修改。

相对法压电式压力传感器校准规范

1 范围

本规范适用于对测量范围为（0~800）MPa 压电式压力传感器采用相对法进行灵敏度的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG860 压力传感器（静态）检定规程

JJG（军工）152-2018 压电式压力传感器检定规程

JJF1008-2008 压力计量名词术语及定义

GB/T 15478-1995 压力传感器性能试验方法

GB/T18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡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 压力传感器 pressure transducer

能感受压力信号，并能按照一定的规律将压力信号转换成可用的输出电信号的器件或装置。

3.1.2 压电式压力传感器 piezoelectric pressure transducer

利用压电晶体材料在一定方向上受压力后，在其两个表面上产生符号相反电荷的效应制成的压力传感器。

3.1.3 灵敏度 sensitivity

压力传感器输出的变化除以对应激励变化。

3.1.4 相对法

被校压力传感器和标准压力传感器对称安装在压力发生器上，通过比较两者输出幅值得到被校压力传感器的灵敏度和非线性的方法。

3.2 计量单位

压力传感器使用的法定计量单位为 Pa（帕斯卡），或是它的十进倍数单位：kPa、MPa 等。压力传感器的输出主要有电压（V、mV）、电流（mA）或电荷（pC）等。

4 概述

压力传感器通常由压力敏感元件和信号处理单元组成，压电式压力传感器的主要原理是利用压电材料的压电效应，压电晶体材料在一定方向上受压力后，在其两个表面上产生符号相反电荷，如图1所示。压电式压力传感器按输出类型可分为电荷式输出和电压式输出。

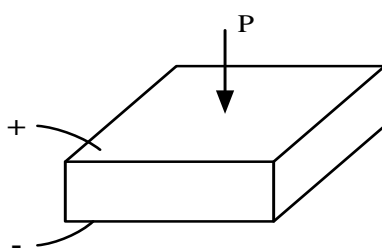


图1 压电式压力传感器原理图

5 计量性能

5.1 灵敏度：

压力传感器输出的变化除以对应激励变化。

5.2 线性

在同一工作条件下，压电式压力传感器校准曲线与拟合直线间最大差值与满量程输出的百分比，拟合直线可用最小二乘法或端点平移法。

5.3 绝缘电阻

压电式压力传感器输出端子与外壳之间的绝缘电阻应不小于 $5M\Omega$ 。

6 通用技术要求

6.1 压电式压力传感器的铭牌应完整、清晰，应具有出厂编号、型号规格、测量范围等信息；

6.2 压电式压力传感器的配套零部件应完好无损，外观不应有影响计量性能的锈蚀或损伤。各部件应装配牢固，不应有松动、脱焊或接触不良等现象。

6.3 压电式压力传感器的电源输入端和信号输出端应有明确标志，在附带的技术文件中应对各端子连线进行完整说明。

7 计量器具控制

7.1 校准条件

7.1.1 校准用设备

校准用设备应经过计量技术机构检定合格，并在有效期内。

表 1 校准用设备

序号	仪器设备名称	技术要求	用途
1	标准压力测量系统	最大允许误差绝对值小于被校压电式压力传感器线性的 1/2； 谐振频率不小于 10kHz。	与被校压电式压力传感器同时测量动态压力信号，作为标准压力值。
2	数据采集系统	采样频率不小于 100kHz； 采样位数不小于 12bit； 电压范围：-10V~+10V。	压力传感器输出信号的采集分析。
3	压力发生装置	脉冲压力信号的脉宽 (2~40)ms。	产生动态压力信号。
4	绝缘电阻测量仪	输出电压：直流 100V~150 V。	测量绝缘电阻。

注：标准压力测量系统通常由标准压力传感器和配套的信号调理仪组成。

7.1.2 环境条件

- a) 环境温度：20℃±5℃；
- b) 相对湿度：不大于 75%；
- c) 环境压力：大气压力；
- d) 所处环境应没有影响压电式压力传感器稳定输出的机械振动和外磁场。

7.2 校准项目

压电式压力传感器校准项目见表 2。

表 2 校准项目

序号	校准项目
1	外观
2	线性
3	灵敏度
4	绝缘电阻

7.3 校准方法

7.3.1 外观检查

目力观测，应符合 6.1 的要求。

在检查过程中，严禁用手触碰压电式压力传感器安装接口，电缆安装接口以及信号调

理仪的安装接口，保证其绝缘电阻符合规定的要求。

7.3.2 校准前准备

校准前，压电式压力传感器应在校准的环境条件下放置 2h 以上，方可进行校准。

7.3.3 校准点选取

应在满量程内至少均匀或合理地选取不少于 6 个校准点（包括零点）。校准首先从测量下限（或选取的校准下限点）开始，逐点地升压至测量上限，依次记录各校准点压电式压力传感器输出值，校准过程中避免出现过载现象。

7.3.4 校准步骤

a) 按图 2 连接仪器，预热 30 分钟；

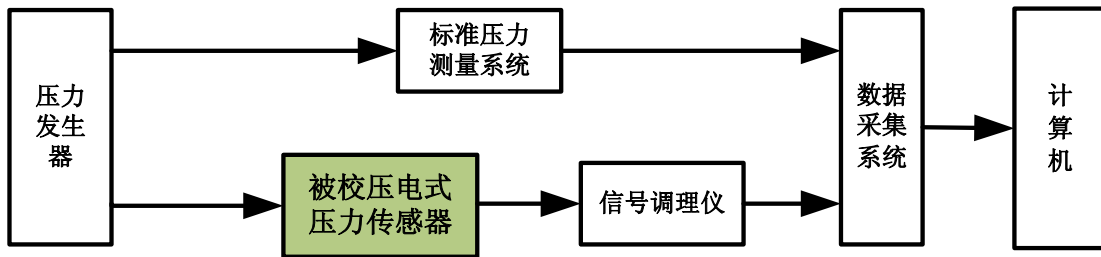


图2 压电式压力传感器校准的连接示意图

b) 将被校压电式压力传感器按要求与标准压力传感器对称安装，对采用液体为传压介质的压力发生装置，安装时应排出发生器及管路中的空气。压力传感器、信号调理仪、数据采集系统等仪器设备按规定方式连接，使其处于正常工作位置和状态。

c) 压力源产生一个动态压力信号，标准压力传感器和被校压电式压力传感器同时感受相同的压力信号，输出电信号被同步采集，获得校准数据后通过最小二乘法或端点平移法拟合得到被校压电式压力传感器的工作直线方程，计算出被校压电式压力传感器的线性和灵敏度。

7.3.5 绝缘电阻校准

被校压电式压力传感器在不施加激励电源的条件下，用输出电压为直流 100V 的绝缘电阻测量仪，测量被校压电式压力传感器输出端子与外壳之间的绝缘电阻，测量时，应稳定 10s 后读数。

7.3.6 压电式压力传感器工作直线的计算

本规范规定可采用端点平移直线或最小二乘直线（优先采用最小二乘直线）作为压力传感器的工作直线，需要在校准证书中予以注明。方法见附录 A

压电式压力传感器工作直线方程为：

压电式压力传感器工作直线采用最小二乘直线的方程为：

$$y_{LS} = a + b(p - p_1) \quad (1)$$

式中：

a ——截距；

b ——压电式压力传感器灵敏度，pC/MPa 或 V/MPa。

7.3.7 线性的计算

计算各校准点示值的算术平均值 \bar{y}_i 与选定工作直线 y_i (y_{SEi} 或 y_{LSi}) 的差值：

$$\Delta y_{Li} = \bar{y}_i - y_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

压电式压力传感器的线性为：

$$L = \frac{|\Delta y_L|_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$|\Delta y_L|_{\max}$ ——差值 Δy_{Li} 中绝对值的最大值，V 或 pC。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映。校准证书或报告应至少包括如下信息：

- a) 标题，“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，若与校准结果的有效性及应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性及应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明

- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 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；
- o) 校准结果仅是对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

经校准的压电式压力传感器出具校准证书，发给校准证书或校准报告，加盖校准印章。

9 复校时间间隔

压电式压力传感器的复校时间间隔建议为 1 年。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，用户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

压电式压力传感器工作直线计算方法

本规范采用端点平移直线或最小二乘直线（优先采用最小二乘直线）作为压力传感器的工作直线。

A.1 端点平移直线计算

端点连线方程用公式 (A.1)表示：

$$y_{EP} = \bar{y}_1 + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{\bar{p}_m - \bar{p}_1} (p - \bar{p}_1) \quad (\text{A.1})$$

式中：

\bar{p}_m ——测量上限压力值，MPa；

\bar{p}_1 ——测量下限压力值，MPa；

\bar{y}_m ——测量上限处校准示值，pC 或 V；

\bar{y}_1 ——测量下限处校准示值，pC 或 V；

p ——压力传感器在其测量范围内的压力值，MPa。

通过公式(A.2)计算各校准点算术平均值与端点连线方程的差值：

$$(\Delta y_{LH})_{Li} = \bar{y}_{Li} - y_{EPi} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{A.2})$$

从公式 (A.2)的数据中，找出最大的正偏差 $\Delta y'_{LH}$ 和最大负偏差 $\Delta y''_{LH}$ ，则端点平移线的截距 a 按公式 (A.3)计算：

$$a = \bar{y}_1 + \frac{1}{2} (|\Delta y'_{LH}| - |\Delta y''_{LH}|) \quad (\text{A.3})$$

端点平移直线的斜率与端点连线的斜率相同：

$$b = \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{\bar{p}_m - \bar{p}_1} \quad (\text{A.4})$$

压电式压力传感器工作直线为端点平移直线的方程为：

$$y_{SE} = a + b(p - \bar{p}_1) = \bar{y}_1 + \frac{1}{2} (|\Delta y'_{LH}| - |\Delta y''_{LH}|) + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{\bar{p}_m - \bar{p}_1} (p - \bar{p}_1) \quad (\text{A.5})$$

A.2 最小二乘直线计算

压电式压力传感器工作直线采用最小二乘直线的方程为：

$$y_{LS} = a' + b'(p - p_1) \quad (\text{A.6})$$

式中截距 a' 、斜率 b' 分别按公式(7)、(8)计算：

$$a' = \frac{\sum_{i=1}^m p_i^2 \sum_{i=1}^m \bar{y}_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m \bar{y}_i p_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - (\sum_{i=1}^m p_i)^2} \quad (\text{A.7})$$

$$b' = \frac{m \sum_{i=1}^m \bar{y}_i p_i - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{i=1}^m \bar{y}_i}{m \sum_{i=1}^m p_i^2 - (\sum_{i=1}^m p_i)^2} \quad (\text{A.8})$$

A.3 线性的计算

计算各校准点示值的算术平均值 \bar{y}_i 与选定工作直线 y_i (y_{SEi} 或 y_{LSi}) 的差值：

$$\Delta y_{Li} = \bar{y}_i - y_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{A.9})$$

压电式压力传感器的线性为：

$$L = \frac{|\Delta y_L|_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (\text{A.10})$$

式中：

$|\Delta y_L|_{\max}$ —— 差值 Δy_{Li} 中绝对值的最大值。

附录 B

相对法压电式压力传感器校准记录格式

送校单位				校准日期			
仪器信息	压电式压力传感器			标准器			
仪表名称							
型号规格							
制造单位							
仪器编号							
测量范围							
证书编号							
依据文件				有效期			
环境温度		相对湿度		检定员		核验员	
外观检查				绝缘电阻			
标准压力值 ()				实际输出值 ()			
灵敏度	$b =$			满量程输出值	$y_{FS} =$		
工作直线方程							
线性							

附录 C

相对法压电式压力传感器校准证书（内页）格式

测量范围：

环境温度： °C 相对湿度： %

证书编号 ××××××—××××

校准结果

- 一、 外观：
- 二、 绝缘电阻：
- 三、 线性： %
- 四、 灵敏度 $b =$
- 五、 满量程输出值： $y_{FS} =$
- 六、 工作直线方程：
 1. 端点平移直线：
 2. 最小二乘直线：

附录 D

相对法压电式压力传感器校准不确定度评定示例

D.1 概述

D.1.1 测量依据：JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》

D.1.2 评定对象：压电式压力传感器，型号：6213BK，瑞士 KISTLER 公司

D.1.3 评定方法：采用相对法校准压电式压力传感器

将被校压电式压力传感器按要求与标准压力传感器对称安装，并按规定的安装力矩将压力传感器拧紧，安装时排出压力发生器及管路中的空气。压力传感器、信号调理仪、数据采集系统等仪器设备按规定方式连接，使其处于正常工作位置和状态。压力源完成一次工作循环，产生一个变化的压力信号，标准压力传感器和被校压电式压力传感器同时感受相同的压力信号，输出电信号被同步采集，获得校准数据后通过最小二乘法拟合得到被校压电式压力传感器工作直线方程，计算被校压电式压力传感器线性和灵敏度。

D.2 测量模型

压电式压力传感器的幅值灵敏度测量模型为：

$$K = \frac{U}{P} \quad (\text{D.1})$$

式中， U —压力传感器输出电压幅值，单位 V；

P —施加在压力传感器上的压力幅值，单位 MPa。

D.3 不确定度传播率

被校压电式压力传感器输出电压和标准压力值互不相关，根据不确定度传播定律，压力传感器幅值灵敏度的标准不确定度为：

$$u(K) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i)^2 u(x_i)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{P}\right)^2 u(U)^2 + \left(-\frac{U}{P^2}\right)^2 u(P)^2} \quad (\text{D.2})$$

压力传感器幅值灵敏度的相对标准不确定度为：

$$u_{rel}(K) = \frac{u(K)}{K} = \sqrt{\left(\frac{1}{U}\right)^2 u^2(U) + \left(-\frac{1}{P}\right)^2 u^2(P)} = \sqrt{(C_1)^2 u_{rel}^2(U) + (C_2)^2 u_{rel}^2(P)} \quad (D.3)$$

式中，传播系数： $C_1=1$ ， $C_2=-1$ 。

D.4 标准不确定度评定

D.4.1 不确定度的 A 类评定

重复测量引入标准不确定度 $u_{A,rel}(K)$

通过对压电式压力传感器 n 次测量，分别得到 P_0 、 P_1 …… P_i …… P_n ，采用贝塞尔公式计算不确定度的 A 类评定如下：

$$u_{A,rel}(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n(n-1)}} \quad (D.4)$$

表 D.1 测量重复性导致的不确定度分量

压力 (MPa)	第 1 次 (V/MPa)	第 2 次 (V/MPa)	第 3 次 (V/MPa)	第 4 次 (V/MPa)	第 5 次 (V/MPa)	第 6 次 (V/MPa)	相对标准 不确定度 (%)
10	0.1012	0.1008	0.1002	0.1010	0.1006	0.1009	0.0330
50	0.1000	0.0997	0.1000	0.0994	0.1000	0.0998	0.0234
100	0.0952	0.0951	0.0947	0.0952	0.0948	0.0951	0.0213
200	0.1007	0.1008	0.1001	0.1008	0.1002	0.1004	0.0310
300	0.1019	0.1001	0.1017	0.1014	0.1016	0.1030	0.0932
400	0.1023	0.1038	0.1028	0.1019	0.1029	0.1032	0.0668
500	0.1029	0.1017	0.1022	0.1068	0.1018	0.1076	0.2653

最大值在 500MPa， $u_{A,rel}(K) = 0.27\%$

D.4.2 不确定度的 B 类评定

D.4.2.1 标准压力传感器压力幅值测量不确定度分量 $u_{rel}(P)$

标准压力传感器压力幅值通过在活塞压力计、激波管动态压力标准装置及正弦动态压力标准装置上测量得到：其压力幅值扩展不确定度为 $U_{rel}=1\%$ ， $k=2$ 。

$$u_{rel}(P) = 0.01/2 = 0.5\%$$

D.4.2.2 电荷放大器引入的电压幅值测量不确定度 $u_{rel1}(U)$

由电荷放大器检定证书，电荷放大器测量范围内增益相对误差为 0.2%，服从均匀分布，其标准测量不确定度为：

$$u_{rel1} = 0.002 / \sqrt{3} = 0.12\%$$

D. 4. 2. 3 安装不对称引入的不确定度分量 $u_{rel2}(U)$

脉冲发生器装置最大距离为 10cm，安装带来的幅值误差最大为 1%，服从均匀分布，其标准测量不确定度为：

$$u_{rel2} = 0.01 / \sqrt{3} = 0.58\%$$

D. 4. 2. 4 数据采集系统电压幅值测量不确定度 $u_{rel3}(U)$

由数据采集系统证书，在（1~50000）Hz 范围内，电压幅值测量最大允许误差为 0.2%，服从均匀分布，其标准测量不确定度为：

$$u_{rel3} = 0.002 / \sqrt{3} = 0.12\%$$

D. 4. 3 合成相对标准不确定度

表 D. 2 合成标准不确定度汇总表

符号	来源	类型	概率分布	包含因子
$u_{A,rel}(K)$	测量重复性	A	正态分布	1
$u_{rel}(P)$	上级标准	B	正态分布	2
$u_{rel1}(U)$	信号调理仪	B	均匀分布	$\sqrt{3}$
$u_{rel2}(U)$	安装不对称	B	均匀分布	$\sqrt{3}$
$u_{rel3}(U)$	数据采集系统	B	均匀分布	$\sqrt{3}$

合成相对标准不确定度计算

以上各项标准不确定度分量是互不相关的，所以合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_{rel}^2(P) + u_{rel1}^2(U) + u_{rel2}^2(U) + u_{rel3}^2(U) + u_{A,rel}^2(K)}$$

D. 4. 4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度 $U_{rel} = 2 \times u_c = 1.7\%$