

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2167—2024

电阻真空变送器校准规范

Calibration Specification for Pirani Vacuum Transmitters



2024-10-19 发布

2025-04-19 实施

国家市场监督管理总局 发布

电阻真空变送器校准规范

Calibration Specification for
Pirani Vacuum Transmitters

JJF 2167—2024

归口单位：全国压力计量技术委员会
主要起草单位：上海市计量测试技术研究院
参加起草单位：云南省计量测试技术研究院
中国测试技术研究院
成都睿宝电子科技有限公司

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：

许 红（上海市计量测试技术研究院）

刘贝贝（上海市计量测试技术研究院）

冯齐斌（上海市计量测试技术研究院）

参加起草人：

周 莹（云南省计量测试技术研究院）

姚小兵（中国测试技术研究院）

张海锭（中国测试技术研究院）

贺良武（成都睿宝电子科技有限公司）



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)
4.1 原理	(2)
4.2 结构	(2)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(5)
8.1 校准记录	(5)
8.2 校准证书	(5)
8.3 校准结果的不确定度评定	(5)
9 复校时间间隔	(5)
附录 A 校准记录格式	(6)
附录 B 校准证书（内页）格式	(8)
附录 C 电阻真空变送器测量不确定度评定示例	(9)
附录 D 归一化计算方法	(12)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1008—2008《压力计量名词术语及定义》、GB/T 3163—2007《真空技术 术语》共同构成本规范制定的基础性系列规范。

本校准规范参照 JJF 1050—1996《工作用热传导真空计校准规范》、GB/T 30434—2013《电阻真空计通用技术条件》、GB/T 34873—2017《真空计 与标准真空计直接比较校准》(Vacuum gauges—Calibration by direct comparison with a reference gauge)、GB/T 34876—2017《真空技术 真空计 与标准真空计直接比较校准结果的不确定度评定》(Vacuum technology—Vacuum gauges—Evaluation of the uncertainties of results of calibrations by direct comparison with a reference gauge) 和 ISO 19685: 2017 (E)《真空技术 真空计 皮拉尼真空计的规范、校准和测量不确定度》(Vacuum technology—Vacuum gauges—Specifications, calibration and measurement uncertainties for Pirani gauge) 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、补充和修改。

本规范为首次发布。

电阻真空变送器校准规范

1 范围

本规范适用于测量范围在 $(1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^5)$ Pa 及以内的电阻真空变送器的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 3163—2007 真空技术 术语

GB/T 34873—2017 真空计 与标准真空计直接比较校准 (Vacuum gauges—Calibration by direct comparison with a reference gauge) (ISO 3567: 2011 (E), IDT)

ISO 19685: 2017 (E) 真空技术 真空计 皮拉尼真空计的规范、校准和测量不确定度 (Vacuum technology—Vacuum gauges—Specifications, calibration and measurement uncertainties for Pirani gauge)

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 电阻真空变送器 Pirani vacuum transmitter

利用加热元件的热传导性能，通过电桥电路将压力变量转换为可传送的标准化输出信号的仪表，而且其输出信号与压力变量之间有一给定的连续函数关系。

3.1.2 真空系统 vacuum system

由真空容器和产生真空、测试真空、控制真空等元件组成的真空装置。

[来源：GB/T 3163—2007，5.1.1]

3.1.3 校准系统 system of calibration

校准真空计所用的真空系统。

[来源：GB/T 3163—2007，4.6.2]

3.1.4 校准室 calibration chamber

向标准真空计和待校准真空计提供共同真空介质的真空室。

[来源：GB/T 34873—2017，3.9]

3.1.5 本底压力 base pressure

气体进入校准室之前，即开始校准前，校准室内的压力值，或气体进入校准室后关闭进气阀门一定时间后的压力值。

[来源：GB/T 34873—2017，3.17]

3.2 计量单位

电阻真空变送器的计量单位：输入压力的单位为帕斯卡（符号：Pa），或它的十进倍数单位；输出电压的单位为伏特（符号：V）。

4 概述

4.1 原理

在一定的压力范围内，电阻真空变送器（以下简称变送器）内的气体分子将热量从加热的热丝传导到室温下的变送器外壳，分子带走的热量正比于分子密度，从而正比于压力。温度变化导致热丝电阻变化，通过电桥电路测量，经过一定的函数关系式转换，最终间接地测量出压力。

4.2 结构

变送器主要由热丝、电桥电路及变送器正常工作所需的全部电路组成。结构见图 1 [ISO 19685：2017（E），附录 A]。

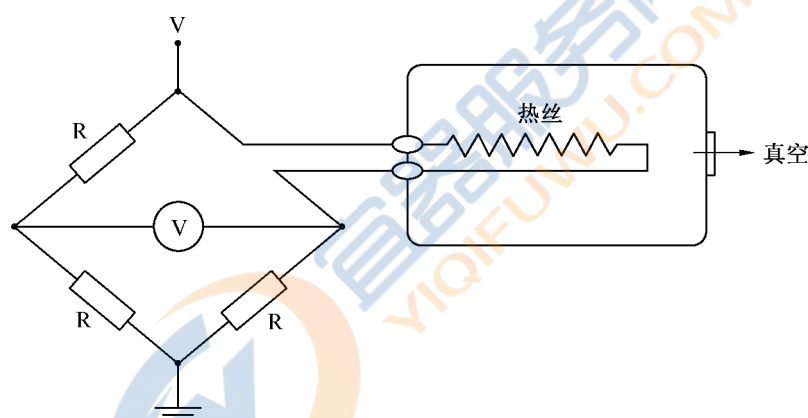


图 1 电阻真空变送器结构示意图

5 计量特性

示值误差。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度为 $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ，校准过程中，环境温度波动不超过 $\pm 1 ^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 环境相对湿度不大于 85%。

6.1.3 校准设备周围应无热源、强电磁场和放射性源等外界干扰，且周围不应有明显的振动和气体流动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 测量标准装置

标准装置用于提供已知的压力量值，通常为动态比较法真空标准装置和静态膨胀法真空标准装置，如表 1 所示。其他压力校准范围和不确定度能够满足客户校准要求的标准装置也适用。

标准装置采用动态比较法的，其校准室内的压力在校准范围内应连续可调，在 1 min 内压力稳定度不超过读数的 $\pm 2\%$ ；标准装置采用静态膨胀法的，校准室在 1 min 中内的升压不应大于被校变送器待校准压力下限的 2% 。

标准装置的相对扩展不确定度应优于客户要求的校准不确定度。

标准真空计推荐为：电容薄膜真空计、数字压力计（绝压）。

表 1 标准装置

序号	装置名称	技术要求
1	动态比较法真空标准装置	测量范围: 0.1 Pa~100 kPa 不确定度: U_{rel} 为 $(5.0\% \sim 1.0\%) (k=2)$ [电容薄膜真空计: MPE 为读数的 $\pm 0.25\%$ 、数字压力计(绝压): 0.01 级]
2	静态膨胀法真空标准装置	测量范围: 0.1 Pa~100 kPa 不确定度: U_{rel} 为 $(3.0\% \sim 0.1\%) (k=2)$
注: 在标准装置中给出的不确定度对应的是测量范围的下限和上限。		

6.2.2 其他设备

其他配套设备见表 2。

表 2 配套设备

序号	仪器设备名称	技术要求	用途
1	电压表(或包含直流电压功能的数字多用表)	测量范围: $(0.1 \sim 10) \text{ V}$ MPE: $\pm 0.01\%$	用于测量输出电压信号
2	电离真空计	测量范围: $(1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}) \text{ Pa}$ 不确定度: $U_{\text{rel}} = 50\% (k=2)$	变送器进行零点调整时测量参考压力
3	直流电源	测量范围: $(0 \sim 30) \text{ V}$	测量用直流供电电源
4	温度记录仪或温度计	测量范围: $(0 \sim 50) ^\circ\text{C}$ 分度值优于 $0.2 ^\circ\text{C}$	用于测量校准室及环境温度
5	氮气源	气体纯度不低于 99.9%	提供校准用气体
注: 根据客户要求也可采用其他气体。			

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

示值误差。

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

目视检查变送器内部的清洁度；变送器铭牌应完整、清晰，并具有型号、编号、电

源电压、制造厂商名称等信息；变送器零部件应完好无损，紧固件不得有松动和损伤现象；表面涂层应光洁、完好、无锈斑和霉斑。

被校准变送器需在实验室放置 2 h 以上才可以进行校准，依据制造商的建议或客户要求的方向（垂直、水平或任意，默认为垂直安装）将被校准变送器安装在如图 2 或图 3 所示的真空标准装置的校准室上，连接被校准变送器的过渡管道应尽量短，按照产品说明书给被校准变送器正确接上直流电源，并在变送器的输出端接上电压表，按照获得真空的操作程序对真空标准装置进行抽气。

除非制造商另有规定，变送器在校准前预热时间不应少于 30 min。

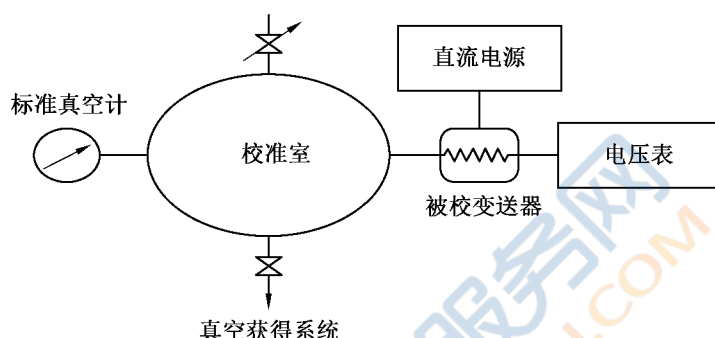


图 2 动态比较法真空标准装置校准示意图

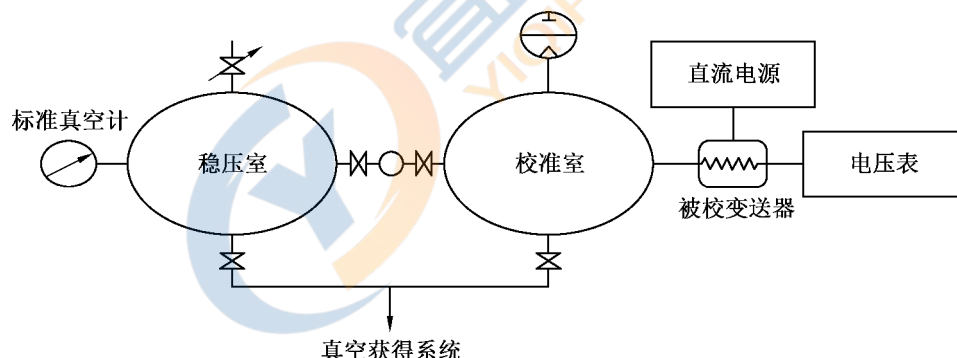


图 3 静态膨胀法真空标准装置校准示意图

7.2.2 示值误差校准

当校准系统本底压力满足变送器零点调整条件后，按照变送器的产品技术要求对变送器进行零点和满量程调整。

当校准系统稳定度或升压符合 6.2.1 要求后，开始校准。标准装置以压力由低到高的顺序逐个建立所需要的校准点，分别记录标准装置的压力值 $p_{\text{ind, std}}$ 和变送器的实际测量电压值 u_d 。校准点应包括变送器测量范围的上限和下限值（或 0.1 Pa），其余各点在变送器被校准测量范围内按对数均匀选取，每个数量级应不少于 3 个校准点；按照上述方法再进行第 2 次和第 3 次的测量，第 2 次和第 3 次测量的校准点应在第 1 次测量的校准点附近取值，两者差值保持在 $\pm 20\%$ 以内；测量点的选取也可与客户协商确定。

变送器第 2 次和第 3 次的测量结果需要根据标准值作归一化处理，归一化计算方法见附录 D，被校准变送器的实际测量值取归一化后 3 次测量值的平均值。

7.2.3 数据处理

7.2.3.1 理论计算值 u_{std} 的计算通式

根据标准真空计的校准证书或膨胀比及所读取的标准装置的压力值 $p_{\text{ind, std}}$ 计算出校准室内的标准压力值 p_{std} ，并依据产品说明书提供的压力与电压的函数关系式计算标准压力值 p_{std} 所对应的理论计算值 u_{std} ，式（1）为被校准变送器理论计算值计算通式：

$$u_{\text{std}} = k \cdot \lg p_{\text{std}} + c \quad (1)$$

式中：

u_{std} ——标准压力值 p_{std} 所对应的被校准变送器校准点的理论计算值，V；

p_{std} ——标准压力值，Pa；

k 、 c ——常数，由变送器制造商提供。

7.2.3.2 被校准变送器 3 次测量平均值 $\overline{u_d}$ 的计算公式：

$$\overline{u_d} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 u_{di} \quad (2)$$

式中：

u_{di} ——被校准变送器第 i 次测量归一化后的测量值，V；

$\overline{u_d}$ ——被校准变送器 3 次测量平均值，V。

7.2.3.3 示值误差 Δu 的计算公式：

$$\Delta u = u_d - u_{\text{std}} \quad (3)$$

式中：

Δu ——被校准变送器的示值误差，V；

u_d ——被校准变送器的实际测量值，V。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

格式见附录 A。

8.2 校准证书

校准完成后，按照本规范出具校准证书。校准证书至少包括以下信息：“校准证书”标题；进行校准的实验室名称和地址；证书唯一性标识（如编号）；客户的名称和地址；被校准变送器的明确标识；校准日期；技术规范名称和代号；测量标准的溯源性和有效性说明；对校准规范偏离的说明（若有）；校准证书签发人的签名、职务或等效标识；校准结果仅对被校准变送器有效的声明；未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明；校准证书内页格式见附录 B。

8.3 校准结果的不确定度评定

校准结果的不确定度评定参照附录 C。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。送校单位也可以根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

数据处理：

标准压力值 p_{std} ()	理论计算值 u_{std} ()	实际测量值 u_{d} ()	实际测量值对应的压力值 p_{d} ()	压力示值相对误差 δ ()	示值误差 Δu ()	示值误差 Δu 的扩展不确定度 U () ($k=2$)

安装方向（垂直、水平、任意）：

电压与压力转换公式： $u=k \cdot \lg p+c$ ， $p=10^{\frac{u-c}{k}}$ 。

常用电压与压力转换公式（式中压力 p 的计量单位为 Pa，电压 u 的计量单位为 V）：

$$u=1.286 \cdot \lg p+3.572, \quad p=10^{\frac{u-3.572}{1.286}};$$
$$u=\lg p+3.5, \quad p=10^{u-3.5};$$

$$u=\lg p+3, \quad p=10^{u-3};$$
$$u=\lg p+4, \quad p=10^{u-4}。$$

压力示值相对误差计算公式： $\delta=\frac{p_{\text{d}}-p_{\text{std}}}{p_{\text{std}}} \times 100 \%$ 。

附录 C

电阻真空变送器测量不确定度评定示例

C.1 测量模型和灵敏系数

C.1.1 电阻真空变送器示值误差的测量模型

$$\Delta u = u_d - u_{\text{std}} = u_d - (k \cdot \lg p_{\text{std}} + c) \quad (\text{C.1})$$

式中：

Δu ——被校准变送器的示值误差，V；

u_d ——被校准变送器的实际测量值，V；

u_{std} ——标准压力值 p_{std} 所对应的被校准变送器校准点的理论计算值，V；

p_{std} ——标准压力值，Pa；

k 、 c ——常数，由变送器制造商提供。

C.1.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta u}{\partial u_d} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta u}{\partial p_{\text{std}}} = -\frac{k}{p_{\text{std}} \cdot \ln 10}$$

C.2 不确定度评定

由公式 (C.1) 推出电阻真空变送器测量结果的合成标准不确定度为 $u_c(\Delta u)$ ，按公式 (C.2) 计算：

$$u_c(\Delta u) = \sqrt{u^2(u_d) + \left(-\frac{k}{p_{\text{std}} \cdot \ln 10}\right)^2 u^2(p_{\text{std}})} \quad (\text{C.2})$$

式中：

$u_c(\Delta u)$ ——被校准变送器示值误差的合成标准不确定度；

$u(u_d)$ ——被校准变送器实际测量值的测量标准不确定度；

$u(p_{\text{std}})$ ——压力标准装置引入的标准不确定度；

k ——常数，由变送器制造商提供。

C.2.1 输入量 u_d 的标准不确定度

u_d 的标准不确定度主要来源于电压表的准确度、测量重复性和电压表小数读取位数。

C.2.1.1 电压表引入的标准不确定度 $u_1(u_d)$

可按 10 V 挡 MPE $\pm 0.01\%$ 均匀分布估计，或按照校准证书引入。

C.2.1.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(u_d)$

对被校准变送器进行三次重复测量，取归一化后的平均值作为测量结果，按 JJF 1059.1—2012 要求，在测量次数较少时采用极差法计算标准不确定度，该项标准不确定度按公式 (C.3) 计算：

$$u_2(u_d) = s(\bar{u}) = \frac{s(u_i)}{\sqrt{3}} = \frac{u_{\text{max}} - u_{\text{min}}}{\sqrt{3} \cdot C} \quad (\text{C.3})$$

式中：

$s(u_i)$ ——被校准变送器单个电压测量值的实验标准偏差，V；

$s(\bar{u})$ ——被校准变送器测量平均值的实验标准偏差，V；

$u_{\max}$ ——重复测量列中的最大值，V；

$u_{\min}$ ——重复测量列中的最小值，V；

C ——极差系数 ($C=1.69$)。

C.2.1.3 电压表读数位数引入的标准不确定度 $u_3(u_d)$

电压表读数一般取两位或三位小数，当实际测量电压值读数取两位小数时，需考虑四舍五入引入的读数误差，按舍取的最大值 0.005 V 均匀分布估计。

C.2.2 输入量 p_{std} 的标准不确定度

p_{std} 的标准不确定度主要来源于压力标准装置，同时需考虑校准室容器内气体的不均匀性、容器几何尺寸等引起的压力波动而引入的不确定度。当以电容薄膜真空计作为标准真空计时，需考虑电容薄膜真空计的年稳定性引入的不确定度。

若校准时压力点的稳定度不能满足要求，按照标准装置 (p_{std1})—待校准变送器—标准装置 (p_{std2}) 的顺序记录读数，则需要按照公式 (C.4) 估算该项不确定度：

$$u(p_{\text{els, std}}) = \frac{1}{2} |p_{\text{std1}} - p_{\text{std2}}| \quad (\text{C.4})$$

注： $u(p_{\text{els, std}})$ 是 $u(p_{\text{std}})$ 中的一项附加分量。

C.2.2.1 压力标准装置的不确定度分量 $u_1(p_{\text{std}})$ 根据装置建标报告引入。

C.2.2.2 因校准室容器内气体的不均匀性、容器几何尺寸等引起的压力波动而引入的不确定度分量 $u_2(p_{\text{std}})$ 按照 $u_r(p_2)=0.5\%$ 估计。

C.2.2.3 当以电容薄膜真空计作为标准真空计时，电容薄膜真空计年稳定性引入的不确定度分量 $u_3(p_{\text{std}})$ 按照 $u_r(p_3)=0.2\%$ 估计。

C.2.3 不确定度评定示例

以比较法真空标准装置为例，在 1.00 Pa 压力点对电阻真空变送器进行校准，不确定度评定如下。

被校准变送器理论计算值计算公式： $u_{\text{std}}=1.286 \times \lg p_{\text{std}}+3.572$ ，测量模型见公式 (C.1)。

依据电容薄膜真空计校准证书，在标准压力 1.00 Pa 处修正因子 $f_c=1.00$ ， $U_r=1.5\%$ ($k=2$)，则

$$u_1(p_{\text{std}}) = \frac{1.5\%}{2} \times 1.00 \text{ Pa} \approx 0.008 \text{ Pa}$$

$$u_2(p_{\text{std}}) = 0.5\% \times 1.00 \text{ Pa} = 0.005 \text{ Pa}$$

$$u_3(p_{\text{std}}) = 0.2\% \times 1.00 \text{ Pa} = 0.002 \text{ Pa}$$

电压表量程 10 V，MPE 为 $\pm 0.01\%$ ，则：

$$u_4(u_d) = \frac{10 \text{ V} \times 0.01}{\sqrt{3} \times 100} \approx 0.0006 \text{ V}$$

压力标准值 1.00 Pa，被校准变送器实际测量值分别为 3.60 V、3.58 V、3.59 V，则：

$$u_2(u_d) = s(\bar{u}) = \frac{s(u_i)}{\sqrt{3}} = \frac{3.60 \text{ V} - 3.58 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 1.69} \approx 0.0069 \text{ V}$$

$$u_3(u_d) = \frac{0.005 \text{ V}}{\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ V}$$

$$c_1 = \frac{\partial \Delta u}{\partial u_d} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta u}{\partial p_{\text{std}}} = -\frac{k}{p_{\text{std}} \cdot \ln 10} = -\frac{1.286}{1.00 \text{ Pa} \times \ln 10} = -0.5585 \text{ V/Pa}$$

C.3 合成标准不确定度的计算

C.3.1 电阻真空变送器的不确定度分量汇总表

输入量的不确定度汇总见表 C.1。

表 C.1 电阻真空变送器的不确定度分量汇总表

不确定度来源	标准不确定度 $u(x_i)$	标准不确定度 $u(x_i)$ 的值	灵敏系数 c_i	不确定度分量 $u_i(\Delta u) = c_i \cdot u(x_i)$
电压表的准确度	$u_1(u_d)$	0.0006 V	1	0.0006 V
重复测量	$u_2(u_d)$	0.0069 V	1	0.0069 V
电压表读数位数	$u_3(u_d)$	0.0029 V	1	0.0029 V
电容薄膜真空计	$u_1(p_{\text{std}})$	0.008 Pa	-0.5585 V/Pa	0.0045 V
压力波动	$u_2(p_{\text{std}})$	0.005 Pa	-0.5585 V/Pa	0.0028 V
电容薄膜真空计年稳定性	$u_3(p_{\text{std}})$	0.002 Pa	-0.5585 V/Pa	0.0011 V

C.3.2 合成标准不确定度

$$\begin{aligned}
 u_c(\Delta u) &= \sqrt{u^2(u_d) + \left(-\frac{k}{p_{\text{std}} \cdot \ln 10}\right)^2 u^2(p_{\text{std}})} \\
 &= \sqrt{u_1^2(u_d) + u_2^2(u_d) + u_3^2(u_d) + \left(-\frac{k}{p_{\text{std}} \cdot \ln 10}\right)^2 [u_1^2(p_{\text{std}}) + u_2^2(p_{\text{std}}) + u_3^2(p_{\text{std}})]} \\
 &= \sqrt{0.0006^2 + 0.0069^2 + 0.0029^2 + 0.0045^2 + 0.0028^2 + 0.0011^2} \text{ V} \\
 &\approx 0.010 \text{ V}
 \end{aligned}$$

C.4 扩展不确定度

$$U(\Delta u) = k u_c(\Delta u) = 2 \times 0.010 \text{ V} = 0.02 \text{ V} (k=2)$$

附录 D

归一化计算方法

D.1 归一化计算方法

对电阻真空变送器进行平均值计算时，第 2 次和第 3 次测量的实际测量结果需要根据第 1 次测量的压力标准值作归一化处理，按公式 (D.1) 分别计算第 2 次和第 3 次测量归一化后的测量值。

$$u'_{di} = k \times \lg \left(\frac{p_{std1}}{p_{stdi}} \times 10^{\frac{u_{di} - c}{k}} \right) + c \quad (D.1)$$

式中：

u'_{di} ——被校准变送器第 i 次测量归一化后的测量值，V；

u_{di} ——被校准变送器第 i 次的实际测量值，V；

p_{std1} ——第 1 次测量的标准压力值，Pa；

p_{stdi} ——第 i 次测量的标准压力值，Pa；

k 、 c ——常数，由变送器制造商提供。

D.2 归一化计算示例

以比较法真空标准装置为例，在 1.00 Pa 压力点对电阻真空变送器进行校准，归一化计算如下。

被校准变送器理论计算值计算公式： $u = 1.286 \times \lg p + 3.572$ ，第 1 次测量的标准压力值： $p_{std1} = 1.00$ Pa，第 2 次测量的标准压力值： $p_{std2} = 1.05$ Pa，实际测量电压值： $u_{d2} = 3.61$ V，按照公式 (D.1) 计算，第 2 次测量归一化后的测量值为：

$$\begin{aligned} u'_{d2} &= k \times \lg \left(\frac{p_{std1}}{p_{std2}} \times 10^{\frac{u_{d2} - c}{k}} \right) + c \\ &= 1.286 \times \lg \left(\frac{1.00}{1.05} \times 10^{\frac{3.61 - 3.572}{1.286}} \right) + 3.572 \\ &= 3.58(\text{V}) \end{aligned}$$