《电子膨胀阀测试仪测量校准规范》
不确定度评定报告

1 引言

本报告对电子膨胀阀测试仪的三个校准项目直流电压示值误差、流量示值误差、压力示值误差开展测量不确定度评定，系统阐明电子膨胀阀测试仪校准过程中测量不确定度的评定流程和具体方法。

2 直流电压示值误差校准结果不确定度评定示例

2.1 概述

2.1.1 测量环境：温度：20.2 ℃，相对湿度：57%，大气压力：100.9 kPa。

2.1.2 测量方法：采用直接测量法，按照本规范第 7.2.2 条规定的校准方法，典型值为直流电压 3 V。

2.2 测量模型

建立测量模型：

$$\triangle = U_u - U_s \quad (1)$$

式中：

△——直流电压示值误差，V；

U_u——被校测试仪中直流稳定电源电压显示值，V；

U_s——数字多用表的电压测量值，V。

2.3 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial U_u} = 1，\ c_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial U_s} = -1 \quad (2)$$

2.4 不确定度传播公式

由于 U_u、U_s 间的不确定度之间不相关，得到公式（3）：

$$u_c(\triangle) = \sqrt{c_1^2 u^2(U_u) + c_2^2 u^2(U_s)} \quad (3)$$

2.5 标准不确定度分量来源分析与评定

2.5.1 标准不确定度分量 $u(U_1)$ 评定

在校准点直流电压 3 V，重复性条件下进行 10 次测量。测量结果如表 1：

表 1　直流电压示值误差的重复性测量数据

测量序号	1	2	3	4	5
示值误差（V）	0.0010	0.0011	0.0010	0.0012	0.0011

测量序号	6	7	8	9	10
示值误差（V）	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010

由贝塞尔公式计算所得的单次实验标准差为：s = 0.0699 mV。

实际检测时取两次测量的平均值为最后测量结果，则

$$u(U_1)=\frac{s}{\sqrt{2}}=0.049\ \text{mV}$$

2.5.2 标准不确定度分量 $u(U_2)$ 评定

被校测试仪分辨力为 0.0001 V，则其半宽度 a = 0.00005 V，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$，得：

$$u(U_2)=\frac{a}{k}=\frac{0.00005}{\sqrt{3}}=0.029\ \text{mV}$$

2.5.3 标准不确定度分量 $u(U_s)$ 评定

被校测试仪直流电压示值读数重复性引入的标准不确定度分量 $u(U_1)$ 和被校测试仪分辨力引入的标准不确定度分量 $u(U_2)$ 存在相关性，两者取大值，由于 $u(U_1)>u(U_2)$，故取 $u(U_1)$ 作为 $u(U_s)$，故：$u(U_u)=u(U_1)$ = 0.049 mV

2.5.4 标准不确定度分量 $u(U_s)$ 评定

$u(U_S)$ 的不确定度来源主要由标准器的最大允许误差引入。

在 3 V 测量点，标准器读数为 3.0020 V，标准器最大允许误差为±（0.0040%读数+0.0006%量程）=±（3.0020×0.0040%+10×0.0006%）V=±0.13 mV，则其半宽区间为：a =0.13 mV，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$。

$$u(U_s)=\frac{a}{k}=\frac{0.13}{\sqrt{3}}=0.075\ \text{mV}$$

2.6 合成标准不确定度的评定

2.6.1 不确定度分量一览表

不确定度分量	标准不确定度	灵敏系数
$u(U_u)$	0.049 mV	1
$u(U_s)$	0.075 mV	-1

2.6.2 合成标准不确定度的计算

输入量 $u(U_u)$ 与 $u(U_s)$ 彼此独立不相关，所以 $u(\triangle)$ 的标准不确定度为

$$u_C(\triangle)=\sqrt{c_1^2u^2(U_u)+c_2^2u^2(U_s)}=0.090\ \text{mV}$$

2.7 扩展不确定度的评定

取包含因子 k=2，扩展不确定度为：U=ku_c(△)= 2×0.090 mV = 0.18 mV。

3 流量示值误差测量不确定度评定示例

3.1 概述

3.1.1 测量环境：温度：20.2 ℃，相对湿度：57%，大气压力：100.9 kPa。

3.1.2 校准介质:干燥、洁净空气。

3.1.3 测量方法：采用直接测量法，按照本规范第 7.2.3 条规定的校准方法，典型值为 0.5q_{max}，q_{max}为 250 L/min。

3.2 测量模型

建立测量模型：

$$E_{ij} = q_{ij} - (q_s)_{ij} \tag{4}$$

式中：

E_{ij}—第 i 流量点第 j 次校准的流量示值误差；

q_{ij}—第 i 流量点第 j 次被校流量传感器的瞬时体积流量，L/min；

$(q_s)_{ij}$—第 i 流量点第 j 次标准流量计的瞬时体积流量，L/min。

3.3 灵敏系数

$$c_1 = 1，\ c_2 = -1$$

3.4 不确定度传播公式

由于$u(q_{ij})$、$u[(q_s)_{ij}]$间的不确定度之间不相关，得到

$$u_c（E_{ij}） = \sqrt{c_1^2 u^2(q_{ij}) + c_2^2 u^2[(q_s)_{ij}]} \tag{5}$$

3.5 标准不确定度来源分析与评定

3.5.1 标准不确定度来源分析

电子膨胀阀测试仪流量相对误差测量结果的测量不确定度主要来源于：

a）由电子膨胀阀测试仪流量的测量重复性引入的标准不确定度分量$u(q_{ij})$；

b）由标准器的最大允许误差引入的标准不确定度分量$u[(q_s)_{ij}]$。

3.5.2 标准不确定度分量评定

3.5.2.1 标准不确定度分量$u(q_{ij})$评定

为了获得测量重量性引入的标准不确定度，采用规范的测量方法，在 0.5q_{max} 流量下，按重复性条件进行 10 次测量，测量结果如表 2：

表 2　流量示值误差的重复性测量数据

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准值（L/min）	122.78	122.62	122.70	122.70	122.45	122.80	122.55	122.58	122.75	122.65
被校示值（L/min）	122.45	122.38	122.65	122.68	122.38	122.98	122.40	122.55	122.90	122.78
示值误差（L/min）	-0.33	-0.24	-0.05	-0.02	-0.07	0.18	-0.15	-0.03	0.15	0.13

10 次流量示值误差测量结果的平均值为-0.043L/min，$(q_s)_{ij}$的平均值为122.66L/min。由贝塞尔公式计算示值误差的单次实验标准差为：

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}（X_i-\overline{X}）}{n-1}}=0.167\ \text{L/min}$$

实际检测时取三次测量的平均值为最后测量结果，则

$$u(q_{ij})=\frac{s}{\sqrt{3}}=\frac{0.167}{\sqrt{3}}=0.096\ \text{L/min}$$

3.5.2.2 标准器引入的不确定度分量$u[(q_s)_{ij}]$评定

u_2主要由标准器的最大允许误差引入。标准流量计最大允许误差为±（0.8%×读数+0.2%×量程）=±（0.8%×122.66+0.2%×250）= 1.481 L/min，则其半宽区间为：a =1.481 L/min。按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$，则可得：

$$u[(q_s)_{ij}]=\frac{a}{k}=\frac{1.481}{\sqrt{3}}=0.855\ \text{L/min}$$

3.5.2.3 合成标准不确定度的评定

输入量$u(q_{ij})$与$u[(q_s)_{ij}]$彼此独立不相关，所以标准不确定度为：

$$u_c（E_{ij}）=\sqrt{c_1^2u^2(q_{ij})+c_2^2u^2[(q_s)_{ij}]}=0.860\ \text{L/min}$$

3.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$，扩展不确定度为：

$$U=k\times u_c（E_{ij}）=2\times0.860\ \text{L/min}\approx1.8\ \text{L/min}$$

4　压力示值误差测量不确定度评定示例

4.1 概述

4.1.1 测量环境：温度：20.2 ℃，相对湿度：57%，大气压力：100.9 kPa。

4.1.2 校准介质：干燥、洁净空气。

4.1.3 测量方法：采用直接测量法，按照本规范第 7.2.5 条规定的校准方法，典型值为 200 kPa。空气密度较小，标准器与被校测试仪数字压力计取压口高度

差引入的静压差远小于被校仪器最大允许误差，对测量结果影响可忽略，无需进行高度差修正。

4.2 测量模型

建立测量模型：

$$\triangle p = p_R - p_s \quad (6)$$

式中：

$\triangle p$——被校测试仪数字压力计各校准点示值误差，kPa；

p_R——被校测试仪数字压力计各校准点正、反行程示值，kPa；

p_s——压力标准器各校准点示值，kPa。

4.3 灵敏度系数：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial p_R} = 1，\ c_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial p_s} = -1 \quad (7)$$

4.4 标准不确定度来源分析

电子膨胀阀测试仪压力测量结果的测量不确定度主要来源于：

a）输入量 p_R 引入的标准不确定度分量 $u(p_1)$。包括被校测试仪数字压力计示值重复性引入的标准不确定度分量 $u(p_{11})$ 和数字压力表计分辨力引入的标准不确定度分量 $u(p_{12})$，其中 $u(p_{11})$ 和 $u(p_{12})$ 两者取较大值；

b）输入量 p_s 引入的标准不确定度分量 $u(p_2)$。包括压力标准器引入标准不确定度分量 $u(p_{21})$ 和压力标准器与被校测试仪数字压力计取压口高度差引入的标准不确定度分量 $u(p_{22})$。

4.5 各输入量的标准不确定度分量

4.5.1 输入量 p_R 引入的标准不确定度分量 $u(p_1)$ 评定

4.5.1.1 重复测量引入的不确定度分量 $u(p_{11})$

为了获得测量重量性引入的标准不确定度，采用规范 7.2.4 条的测量方法，在 200 kPa，重复性条件下进行 10 次测量，测量结果如表 3：

表 3　压力示值误差的重复性测量数据

序号	1	2	3	4	5
示值误差（kPa）	-1.9	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
序号	6	7	8	9	10
示值误差（kPa）	-2.1	-2.0	-1.9	-2.1	-2.2

由贝塞尔公式计算所得的单次实验标准差为：s = 0.092 kPa

$$u(p_{11}) = s = 0.092 \text{ kPa}$$

4.5.1.2　被校测试仪数字压力计分辨力引入的标准不确定度分量 $u(p_{12})$

被校测试仪数字压力计分辨力为 0.1 kPa，则其半宽度 a = 0.05 kPa，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$，则

$$u(p_{12})=a/k=0.05/\sqrt{3}=0.029 \text{ kPa}$$

4.5.1.3　标准不确定度分量 $u(p_1)$评定

在 $u(p_{11})$和 $u(p_{12})$中取较大值，得到：$u(p_1)=u(p_{11})=0.092$ kPa

4.5.2　输入量 p_s 引入的标准不确定度分量 $u(p_2)$

4.5.2.1 压力标准器引入的标准不确定度分量 $u(p_{21})$

0.05 级、量程 600 kPa 的压力标准器的最大允许误差为±0.3 kPa，则半宽为 a = 0.3 kPa，区间内均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$，所以标准不确定度为：

$$u(p_{21})=a/k=0.3/\sqrt{3}=0.17 \text{ kPa}$$

4.5.2.2　压力标准器与被校测试仪数字压力计取压口高度差引入的标准不确定度分量 $u(p_{22})$

高度差形成的压力差$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$，取校准时高度差 0.3 m，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$，则由高度差引入的标准不确定度为：

$$u(p_{22})=\frac{\Delta p}{k}=\frac{\rho \cdot g \cdot \Delta h}{k}=\frac{1.2\times9.8\times0.3}{\sqrt{3}}=0.002 \text{ kPa}$$，可忽略。

4.5.2.3 标准不确定度分量 $u(p_2)$评定

$$u(p_2)=0.17\text{kPa}$$

4.5.5 合成标准不确定度的评定

输入量 $u(p_1)$与 $u(p_2)$彼此独立不相关，所以 $u_c(\triangle)$的标准不确定度为：

$$u_c(\triangle)=\sqrt{c_1^2u_{p1}^2+c_2^2u_{p2}^2}=\sqrt{0.092^2+0.17^2}=0.19\text{kPa}$$

4.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 k = 2，扩展不确定度为：$U=k\times u_c(\triangle)=2\times0.19\approx 0.4$ kPa