

全国物理化学计量技术委员会（MTC17）

高温温湿度传感器校准规范
不确定度评定报告

福建省计量科学研究院

2026 年 08 月

本规范拟评定高温温湿度传感器的温度示值误差、湿度示值误差等校准结果的不确定度。

一、测量过程简述

1.1 测量标准

精密露点仪，露点温度测量范围为 $(-30\sim+99)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差符合一级精密露点仪要求。

高精度数字温度计，测量范围为 $(0\sim100)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

压力计，测量范围为 $(100\sim1200)\text{hPa}$ ，最大允许误差为 $\pm 100\text{Pa}$ 。

温湿度发生器，工作范围：温度为 $(20\sim90)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $(5\sim98)\%$ ；有效工作区域内均匀度：温度 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 0.5\%$ ；有效工作区域内波动度：温度 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ ，相对湿度 $\leq 0.3\%/10\text{min}$ 。

1.2 测量过程

将被校温湿度传感器、精密露点仪的露点探头，以及高精度数字温度计的温度探头置于温湿度发生器的中心位置，被校温湿度传感器和数字温度计的温度探头放在露点探头上风口5cm处。按校准点设定温湿度发生器的温湿度值，当温湿度达到设定值后稳定10min，每隔2min记录精密露点仪的露点温度示值、高精度数字温度计的温度示值和被校温湿度传感器的温度、湿度示值，共记录3组数据，同时记录大气压力值。按式（1）、式（2）计算每个校准点的示值误差。

二、温度示值误差校准结果不确定度评定的示例

2.1 测量模型和不确定度计算公式

2.1.1 测量模型

$$\Delta T = \bar{T} - \bar{T}_s \quad (1)$$

式中：

ΔT ——被校温湿度传感器的温度示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{T}$ ——被校温湿度传感器温度示值的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{T}_s$ ——数字温度计温度示值的平均值， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 不确定度来源

温度标准值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{T}_s)$ ，包括数字温度计测量误差引入的标准不

确定度 u_1 ，温湿度发生器温度波动性引入的标准不确定度 u_2 、温湿度发生器温度均匀性引入的标准不确定度 u_3 ， $u(\bar{T}_s) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$ 。

被校对象温度测量引入的标准不确定度 $u(\bar{T})$ ，包括测量不重复引入的标准不确定度 u_4 和分辨力引入的标准不确定度 u_5 ， u_4 、 u_5 取大者。

2.2.3 不确定度计算公式

$$u(\Delta T) = \sqrt{[c_1 u(\bar{T})]^2 + [c_2 u(\bar{T}_s)]^2}$$

式中：灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial (\Delta T)}{\partial \bar{T}} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial (\Delta T)}{\partial \bar{T}_s} = -1$$

2.2 标准不确定度的评定

2.2.1 数字温度计测量误差引入的标准不确定度 u_1

测量用数字温度计的最大允许误差为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_1 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^\circ\text{C}$ 。

2.2.2 温湿度发生器的温度波动引入的标准不确定度 u_2

测量使用的温湿度发生器，在有效工作区域内温度波动度不大于 0.1°C ，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^\circ\text{C}$ 。

2.2.3 温湿度标准箱的温度不均匀引入的标准不确定度 u_3

测量使用的温湿度发生器，在有效工作区域内温度均匀度不大于 0.1°C ，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_3 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^\circ\text{C}$ 。

2.2.4 测量不重复引入的标准不确定度 u_4

以 65℃时相对湿度 93%测量点为例，在相同条件下对被校温湿度传感器在温度 65℃、相对湿度 93%条件下进行 10 次重复测量，温度示值误差测量结果如下(℃)：+0.02、+0.06、+0.05、+0.06、+0.01、+0.05、+0.06、+0.03、+0.04、+0.04，根据贝塞尔公式计算单次测量的实验标准差 $s = 0.018^{\circ}\text{C}$ ，因测量结果为 3 次测量平均值，则 $u_4 = \frac{0.018}{\sqrt{3}} = 0.010^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.5 被测温湿度传感器温度示值分辨力引入的标准不确定度 u_5

被校温湿度传感器的温度分辨力为 0.01°C ，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_5 = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.6 u_4 与 u_5 取大者。

2.3 合成标准不确定度

2.3.1 标准不确定度分量汇总表

高温温湿度传感器温度示值误差标准不确定度分量汇总表见表 1。

表 1 温度示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度/ $^{\circ}\text{C}$
u_1	数字温度计最大允许误差	0.029
u_2	温湿度发生器的温度波动度	0.029
u_3	温湿度发生器的温度均匀度	0.029
u_4	被校温湿度传感器温度测量重复性	0.010

2.3.2 合成标准不确定度 $u_c(\Delta T)$

因为各分量之间相互彼此独立，且灵敏系数绝对值均为 1，则合成不确定度

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.051^{\circ}\text{C}$$

2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，高温温湿度传感器温度示值误差的扩展不确定度为：

$$U(\Delta T) = k \times u_c(\Delta T) = 0.11^{\circ}\text{C}$$

三、湿度示值误差校准结果不确定度评定的示例

3.1 测量模型和不确定度计算公式

3.1.1 测量模型

$$\Delta U = \bar{U} - \bar{U}_s \quad (2)$$

式中：

ΔU ——被校温湿度传感器的相对湿度示值误差，%；

$\bar{U}$ ——被校温湿度传感器相对湿度示值的平均值，%；

$\bar{U}_s$ ——相对湿度标准值的平均值，%。

3.1.2 不确定度来源

相对湿度标准值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{U}_s)$ ，包括标准器测量误差引入的标准不确定度 u'_1 ，温湿度发生器湿度波动性引入的标准不确定度 u'_2 、温湿度发生器湿度均匀性引入的标准不确定度 u'_3 ， $u(\bar{U}_s) = \sqrt{u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2}$ 。

被校对象湿度测量引入的标准不确定度 $u(\bar{U})$ ，包括测量不重复引入的标准不确定度 u'_4 和分辨力引入的标准不确定度 u'_5 ， u'_4 、 u'_5 取大者。

3.1.3 不确定度计算公式

$$u(\Delta U) = \sqrt{[c'_1 u(\bar{U})]^2 + [c'_2 u(\bar{U}_s)]^2}$$

式中：灵敏系数：

$$c'_1 = \frac{\partial (\Delta U)}{\partial \bar{U}} = 1$$

$$c'_2 = \frac{\partial (\Delta U)}{\partial \bar{U}_s} = -1$$

3.2 标准不确定度的评定

3.2.1 相对湿度标准器测量误差引入的标准不确定度 u'_1

根据相对湿度的定义，露点仪的相对湿度按式（3）计算：

$$U_s = \frac{f(p, T_d) \times e_s(T_d)}{f(p, T_s) \times e_s(T_s)} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

U_s ——相对湿度标准值，%；

f ——被测气体增值系数，为被测气体温度与压力的函数；

p ——被测气体压力，Pa；

T_d ——露点温度标准值，℃；

T_s ——数字温度计示值，℃；

$e_s(T_d)$ ——露点温度 T_d 对应的纯水（冰）平面饱和水蒸气压，Pa；

$e_s(T_s)$ ——温度 T_s 对应的纯水（冰）平面饱和水蒸气压，Pa。

饱和水蒸气压 e_s 和气体增值系数 f 按本规范附录 A 方法计算。

增值系数 f 是用于修正饱和水蒸汽压的，其引入的不确定度分量极小，可以忽略不计，

因此在评定时将其作为常数考虑，因此由式（3）可以得出：

灵敏系数：

$$\frac{\partial U_s}{\partial e_s(T_d)} = \frac{f(p, T_d)}{f(p, T_s) e_s(T_s)} \times 100, \quad \frac{\partial U_s}{\partial e_s(T_s)} = -\frac{f(p, T_d) e_s(T_d)}{f(p, T_s) e_s^2(T_s)} \times 100$$

则：

$$u'_1 = U_s \cdot \sqrt{\left[\frac{u_{e_s(T_d)}}{e_s(T_d)} \right]^2 + \left[\frac{u_{e_s(T_s)}}{e_s(T_s)} \right]^2}$$

令 $g(T) = \ln e_s(T)$ ，则：

$$u'_1 = U_s \cdot \sqrt{\left[\frac{\partial g(T_d)}{\partial T_d} \cdot u(T_d) \right]^2 + \left[\frac{\partial g(T_s)}{\partial T_s} \cdot u(T_s) \right]^2} \quad (4)$$

3.2.1.1 精密露点仪露点温度测量引入的标准不确定度 $u(T_d)$

以 65℃ 时相对湿度 93% 测量点为例，测量用精密露点仪露点温度修正值的扩展不确定

度为 0.13℃（ $k=2$ ），则标准不确定度 $u(T_d)_1 = \frac{0.13}{2} = 0.065^\circ\text{C}$ 。

精密露点仪露点温度的重复性不大于 0.10℃，因测量结果为 3 次测量平均值，则由

此引入的标准不确定度 $u(T_d)_2 = \frac{0.10}{\sqrt{3}} = 0.058^\circ\text{C}$ 。

综上， $u(T_d) = \sqrt{u(T_d)_1^2 + u(T_d)_2^2} = 0.087^\circ\text{C}$ 。

3.2.1.2 环境温度测量误差引入的标准不确定度 $u(T_s)$

测量用数字温度计的最大允许误差为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u(T_s) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.1.3 相对湿度标准器测量误差引入的标准不确定度 u'_1 的计算

将 $u(T_d)$ 、 $u(T_s)$ 代入到式(4)，可得到在温度 65°C 、相对湿度93%条件下， $u'_1 = 0.386\%$ 。

3.2.2 温湿度发生器的湿度波动引入的标准不确定度 u'_2

测量使用的温湿度发生器，在有效工作区域内相对湿度波动度不大于0.3%，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u'_2 = \frac{0.15}{\sqrt{3}} = 0.087\%$ 。

3.2.3 温湿度发生器的湿度不均匀引入的标准不确定度 u'_3

测量使用的温湿度发生器，在有效工作区域内相对湿度均匀度不大于0.5%，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u'_3 = \frac{0.25}{\sqrt{3}} = 0.144\%$ 。

3.2.4 湿度测量不重复引入的标准不确定度 u'_4

以 65°C 时相对湿度93%的测量点为例，在相同条件下对被校温湿度传感器在温度 65°C 、相对湿度93%条件下进行10次重复测量，相对湿度示值误差测量结果如下(%)： $+1.6, +1.6, +1.6, +1.6, +1.7, +1.7, +1.7, +1.6, +1.6, +1.6$ ，根据贝塞尔公式计算单次测量的实验标准差 $s' = 0.048\%$ ，因测量结果为3次测量平均值，则

$$u'_4 = \frac{0.048}{\sqrt{3}} = 0.028\%。$$

3.2.5 被测温湿度传感器湿度示值分辨力引入的标准不确定度 u'_5

被校温湿度传感器的相对湿度分辨力为0.1%，认为服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u'_5 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029\%$ 。

3.2.6 u'_4 与 u'_5 取大者。

3.3 合成标准不确定度

3.3.1 标准不确定度分量汇总表

高温温湿度传感器相对湿度示值误差标准不确定度分量汇总表见表 2。

表 2 相对湿度示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 u_i'	不确定度来源		标准不确定度	
u_1'	标准器测量误差	精密露点仪露点温度修正值	0.386%	0.065℃
		精密露点仪露点温度测量重复性		0.058℃
		数字温度计最大允许误差		0.029℃
u_2'	温湿度发生器的相对湿度波动度		0.087%	
u_3'	温湿度发生器的相对湿度均匀度		0.144%	
u_5'	被校温湿度传感器相对湿度示值分辨力		0.029%	

3.3.2 合成标准不确定度 $u_c(\Delta U)$

因为各分量之间相互彼此独立，且灵敏系数绝对值均为 1，则合成不确定度

$$u_c(\Delta U) = \sqrt{u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2 + u_5'^2} = 0.42\%$$

3.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，温度 65℃、相对湿度 93%时高温温湿度传感器相对湿度示值误差的扩展不确定度为：

$$U(\Delta U) = k \times u_c(\Delta U) = 0.9\%$$