

全国物理化学计量技术委员会（MTC17）

湿度传感器动态响应测试规范
不确定度评定报告

2026 年 09 月

本规范拟评定湿度传感器动态响应时间常数测量结果的不确定度。

一、湿度传感器动态响应时间常数测量结果不确定度评定的示例

1.1 测量过程简述

1.1.1 测试条件

实验室环境条件如表 1 所示。

表 1 实验室环境条件

环境参数	要求
温度	15℃~30℃，测试期间应保持稳定
相对湿度	≤80%RH
大气压力	86kPa~106kPa
其他	无影响测试结果的明显振动、气流扰动和强电磁干扰；供电条件满足被测传感器要求

1.1.2 测试用设备

湿度发生阶跃装置及高速采集设备共同构成湿度动态响应测量标准，各设备均须经计量校准，且校准证书在有效期内，以确保测量参数的准确性和量值溯源性。所有计量标准详见表 2。

表 2 测试标准

序号	测量标准	数量	功能
1	湿度发生阶跃装置	1 套	为被测湿度传感器提供稳定温湿度环境与测试区，同时可夹持被测湿度传感器并在两个湿度环境之间快速转移，实现湿度阶跃
2	高速采集设备	1 套	同步采集被测湿度传感器输出及其时间序列，记录触发和响应过程

测试标准的技术要求详见表 3。

表 3 测试标准的技术要求

序号	测试标准	技术要求		用途
1	湿度发生阶跃装置	湿度范围	湿度范围可覆盖湿度阶跃的上、下限点，如无特殊要求，相对湿度应覆盖 20%~80%（20℃）	为被测湿度传感器提供温度稳定的测试区，同时建立两个稳定湿度环境，实现湿度阶跃
		温度范围	可覆盖所选测试点，若无特殊要求，应包含 20℃	
		湿度阶跃量	湿度范围应覆盖所选测试点。无特殊要求时，湿度范围应覆盖 20℃ 下的 20%RH ~ 80%RH。建议低湿环境为 20%RH、高湿环境为 80%RH，湿度阶跃量不小于 40%RH；也可按被测传感器用途选择其他工况	
		湿度波动度	测试位置 10 min 内的湿度波动应优于湿	

			度阶跃量的 $\pm 1\%$ 。	
		气路与测试区	气路与测试区不应产生水汽冷凝、明显泄漏或妨碍传感器充分接触标准湿气的死区	
		弹射机构阶跃运行时间	应小于被测湿度传感器预计响应时间的10%	
		弹射机构夹持与重复定位	应可靠夹持并重复定位被测传感器；移动不应损伤传感器或引入影响输出的拉扯、冲击和接触不良	
2	高速采集设备	信号测量	测量范围、输入形式、分辨力和最大允许误差应与被测传感器的电压、电流、频率或数字输出相匹配	湿度传感器动态信号采集
		采样间隔	应小于被测湿度传感器预计响应时间的10%	
		采集时长	单次采集时长应覆盖完整响应过程，宜不小于时间常数实际测量值的10倍	

其他设备及技术要求详见表 4。

表 4 其他设备及其技术要求

序号	设备或仪器	测量范围	技术要求	用途
1	温湿度计	温度测量范围覆盖15℃～25℃，湿度测量范围覆盖0%RH～80%RH	温度最大允许误差：±0.5℃；湿度最大允许误差：±3%RH	测量和记录实验室环境温度、湿度
2	大气压力计	86kPa～106kPa	压力最大允许误差：±100Pa	测量和记录实验室大气压力
3	供电及接口设备	与被测湿度传感器匹配	电压、电流、通信和接地条件满足制造商要求，不得显著影响传感器输出	为被测传感器供电并完成信号连接

1.1.3 测试方法

- （1）开启并设定湿度发生阶跃装置高湿区和低湿区的湿度值，使其产生的相对湿度稳定；
- （2）将被测湿度传感器可靠安装在湿度发生阶跃装置的弹射机构上，使敏感部位在两端位置均处于湿度发生阶跃装置内部的测试区；
- （3）设置湿度发生阶跃装置内部弹射装置的位移距离和速度，实测并记录阶跃系统运行时间，确认其小于被测湿度传感器预计响应时间的10%；
- （4）设置高速采集设备的量程、采样间隔和采集时长，确认采样间隔小于预计响应时间的10%，采集总时长覆盖完整响应过程；

(5) 将被测传感器置于湿度发生阶跃装置低湿测试区直至输出稳定，触发湿度发生阶跃装置的弹射机构，使被测湿度传感器迅速进入湿度发生阶跃装置的高湿测试区内，同时记录触发时刻和位移时间；

(6) 持续采集至传感器输出达到阶跃后的稳定状态，记录阶跃前、后的湿度、温度及必要工况。每个试验工况重复测量3次。

1.2 测量模型和不确定度计算公式

1.2.1 概述

本示例以20℃下从低湿环境向高湿环境进行正阶跃测试为例，时间常数由动态响应曲线达到阶跃量63.2%处的时刻确定。

1.2.2 测量模型

时间常数 τ 为规定湿度正阶跃方向和测试工况下，被测湿度传感器输出从阶跃起点 A 到达阶跃量 63.2%对应点 B 的时间间隔的多次测量平均值。按作图法，单次时间常数为：

$$\tau = \tau_B - \tau_A \quad (1)$$

式中：

τ —单次测量的时间常数，s

τ_A —为阶跃起点 A 对应的时刻，s；

τ_B —为动态响应曲线到达阶跃量 63.2%（B 点）对应的时刻，s。

每一测试工况重复测量 3 次，以 3 次时间常数的算术平均值作为测试结果：

$$\bar{\tau} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) / 3 \quad (2)$$

式中：

$\bar{\tau}$ —为时间常数测试结果，s；

τ_1 、 τ_2 、 τ_3 —为 3 次单次测量值，s。

1.2.3 不确定度分量来源

湿度传感器动态响应的测量不确定度分量如下：

- (1) 被测湿度传感器重复性引入的标准不确定度 u_1 ；
- (2) 被测湿度传感器的测量误差引入的标准不确定度 u_2
- (3) 阶跃起点选取引入的标准不确定度 u_3 ；

(4) 湿度发生阶跃装置的波动度引入的标准不确定度 u_4 ;

(5) 高速采集设备幅值误差引入的标准不确定度 u_5 。

1.3 标准不确定度的评定

1.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

采用极差法估计单次测量的实验标准偏差。已知 3 次时间常数分别为 10.40s、11.15s 和 11.80s，当 $n=3$ 时，极差系数 $d_n=1.693$ ：

$$s(\tau) = (\tau_{\max} - \tau_{\min})d_n = (11.80 - 10.40)/1.693 = 0.827s \quad (3)$$

式中：

$s(\tau)$ ——为单次时间常数的实验标准偏差估计值，s；

$\tau_{\max}$ ——为 3 次结果的最大值；

$\tau_{\min}$ ——为 3 次结果的最小值。

$$u_1 = s(\tau)/\sqrt{3} = 0.478s \quad (4)$$

1.3.2 被测湿度传感器的测量误差引入的标准不确定度 u_2

为保守评定湿度传感器测量误差引入的标准不确定度，采用该传感器最大允许误差开展评定。被测湿度传感器最大允许误差为 $\pm 3\%RH$ ；针对阶跃量 63.2% 目标测量点测量误差影响，取误差区间半宽 a_s 为 3%RH，按均匀分布进行处理。

$$u(H_s) = a_s/\sqrt{3} = 1.732\%RH \quad (5)$$

式中：

a_s ——为被测湿度传感器最大允许误差的半宽，%RH；

$u(H_s)$ ——为被测湿度传感器湿度标准不确定度，%RH。

阶跃量 63.2% 处斜率 S_B 为湿度传感器动态响应曲线在阶跃目标点 B 处的湿度变化速率，根据一阶响应曲线在时间常数位置的斜率计算公式可得：

$$S_B = \Delta H/e\tau = 60/(2.718 \times 11.15) = 1.989\%RH/s \quad (6)$$

则目标点 B 处湿度换算为时间的灵敏系数为：

$$c_H = 1/S_B = 0.505s/\%RH \quad (7)$$

式中：

c_H —为 H_B 处湿度变化换算为时间变化的灵敏系数, s/%RH;

S_B —为响应曲线在 H_B 处的斜率, %RH/s。

得到目标点 B 处湿度换算为时间的灵敏系数 c_H 后, 被测湿度传感器的测量误差引入的标准不确定度为:

$$u_2 = c_H u(H_s) = 0.875s \quad (8)$$

1.3.3 阶跃起点选取引入的标准不确定度 u_3

高速采集设备采样间隔为 0.10s, 阶跃起点选取误差限的半宽取采样间隔的一半, 取阶跃起点选取误差限的半宽为 $a_A=0.05s$, 按均匀分布处理:

$$u_3 = c_H u(H_s) = 0.029s \quad (9)$$

1.3.4 湿度发生阶跃装置的波动度引入的标准不确定度 u_4

湿度发生阶跃装置测试位置 10min 内的湿度波动限应优于湿度阶跃量的 $\pm 1\%$ 。已知湿度阶跃量 $\Delta H=60\%RH$, 因此湿度波动度为 0.6%RH, 取半宽为 0.3%RH。目标点斜率 $S_B=1.989\%RH/s$, 目标点湿度换算为时间的灵敏系数 c_H 为 0.505s/%RH。

将湿度波动限按均匀分布处理, 通过目标点处的曲线斜率可换算为弹射机构有限位移时间引入的标准不确定度:

$$u_4 = c_H \times 0.3 / \sqrt{3} = 0.087s \quad (10)$$

1.3.5 高速采集设备测量误差引入的标准不确定度 u_5

设高速采集设备直接采集的输出量为 Y , 其示值误差限半宽为 a_Y ; 被测湿度传感器的湿度输出关系为 $H=g(Y)$ 。高速采集设备的示值误差换算为等效湿度误差限半宽为:

$$a_{daq,H} = |\partial H / \partial Y| \cdot a_Y \quad (11)$$

式中:

$a_{daq,H}$ —为高速采集设备示值误差换算的等效湿度误差限半宽, %RH;

Y —为高速采集设备直接采集的电压、电流、电阻或频率等输出量;

a_Y —为该输出量的示值误差限半宽;

$|\partial H / \partial Y|$ —为被测传感器输出量换算为湿度量的灵敏系数。

根据高速采集设备的技术指标, 计算可得 $a_{daq,H}=0.05\%RH$, 按均匀分布处理, 可得高速采集设备幅值误差引入的标准不确定度:

$$u_5 = c_H \cdot a_{daq,H} / \sqrt{3} = 0.015s$$

(12)

1.4 合成标准不确定度

主要的不确定度分量如表 5 所示。

表 5 不确定度分量汇总

序号	不确定度来源	标准不确定 度分量代号	评定方法	分布 类型	置信 因子 k	不确定度分 量 u_i/s
1	测量重复性引入的标准不确定度	u_1	A	—	/	0.478
2	被测湿度传感器的测量误差引入的标准不确定度	u_2	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.875
3	阶跃起点选取引入的标准不确定度	u_3	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029
4	湿度发生阶跃装置的波动度引入的标准不确定度	u_4	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.087
5	高速采集设备幅值误差引入的标准不确定度	u_5	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.015

以上不确定度分量互相独立,被测湿度传感器动态响应测试结果的合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 1.01s$$

(13)

1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则湿度传感器动态响应时间常数测量结果的扩展不确定度如下:

$$U=2\times u_c=2.02s$$

(14)
