

投弃式温度剖面仪校准规范

(不确定度评定报告)

主要起草单位：国家海洋局南海标准计量中心

参加起草单位：国家海洋局东海标准计量中心

国家海洋标准计量中心

国家海洋局北海标准计量中心

中山大学

二零二四年八月

投弃式温度剖面仪校准结果的不确定度评定报告

1 温度示值误差校准结果的不确定度评定

以 20°C 时的温度示值误差校准结果为例。

1.1 数学模型

$$\Delta T = T - T_s \quad (1)$$

式中：

ΔT ——温度传感器在校准点的温度示值误差，°C；

T ——温度传感器在校准点的仪器温度示值，°C；

T_s ——温度传感器在校准点的标准温度值，°C。

对式（1）求偏导，得灵敏度系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta T}{\partial T} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta T}{\partial T_s} = -1$$

1.2 测量不确定度来源分析

温度示值误差校准结果的测量不确定度主要由以下分量组成：

- （1）被校仪器测量重复性引入的不确定度；
- （2）标准温度计引入的不确定度；
- （3）测温比较电阻引入的不确定度；
- （4）恒温水槽温场均匀性和波动性引入的不确定度。

1.3 不确定度评定

1.3.1 被校投弃式温度剖面仪温度测量重复性引入的不确定度分量 $u_1(T_p)$

测量重复性引入的不确定度分量 $u(T_p)$ ，可以通过在连续条件下测量一组数据列，用不确定度的 A 类评定方法获得。恒温水槽稳定在 20.00°C，待恒温水槽温度稳定后开始测量，连续记录 10 组数据，取连续测量的平均值作为最佳估计值，表 1 给出了仪器测量重复性数据，以贝塞尔公式计算实验标准差，则重复性引入的不确定度为：

$$u(T_p) = s/\sqrt{10} = 0.013 \text{ °C}$$

表 1 投弃式温度剖面仪重复性测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (°C)	20.13	20.09	20.13	20.15	20.11	20.10	20.18	20.14	20.19	20.08

1.3.2 仪器示值分辨力引入的不确定度分量 $u_2(T_p)$

用不确定度的 B 类评定方法获得。仪器示值分辨力为 0.001°C ，则不确定度半宽区间为 0.0005°C ，一般服从均匀分布，因此取 $k = \sqrt{3}$ ，示值分辨力引入的不确定度为：

$$u_2(T_p) = 2.9 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$$

重复性引入的不确定度分量 $u_1(T_p)$ ，大于仪器示值分辨力引入的不确定度分量 $u_2(T_p)$ ，故在合成标准不确定度的计算中，只需引入重复性引入的不确定度分量 $u_1(T_p)$ ，不需引入仪器示值分辨力引入的不确定度分量 $u_2(T_p)$ 。

1.3.3 标准温度计引入的不确定度分量 $u(T_1)$

用不确定度的 B 类评定方法获得。标准温度计的最大允许误差为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ，则其误差可能值区间的半宽度为 0.005°C ，按均匀分布计算，取置信因子 $k = \sqrt{3}$ ，其标准不确定度为：

$$u(T_1) = 0.005/\sqrt{3} = 0.003 \text{ }^\circ\text{C}$$

1.3.4 恒温水槽温场均匀性引入的不确定度分量 $u(T_2)$

用不确定度的 B 类评定方法获得。恒温水槽均匀性为 0.02°C ，则温场均匀性引入的误差可能值区间半宽为 0.01°C ，在此区间服从反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，其标准不确定度为：

$$u(T_2) = 0.01/\sqrt{2} = 0.007 \text{ }^\circ\text{C}$$

1.3.5 恒温水槽温场波动性引入的不确定度分量 $u(T_3)$

用不确定度的 B 类评定方法获得。恒温水槽波动性为 0.02°C ，则温场波动性引入的误差可能值区间半宽为 0.01°C ，在此区间服从反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，其标准不确定度为：

$$u(T_3) = 0.01/\sqrt{3} = 0.006 \text{ }^\circ\text{C}$$

1.4 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总见表 2。

表 2 标准不确定度汇总表

标准不确定度分量	符号	标准不确定度 (°C)
测量重复性引入的不确定度分量	$u(T_p)$	0.013
标准温度计引入的不确定度分量	$u(T_1)$	0.003
恒温水槽温场均匀性引入的不确定度分量	$u(T_2)$	0.007
恒温水槽温场波动性引入的不确定度分量	$u(T_3)$	0.006

各分量相互独立，仪器温度示值误差校准结果的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(T_p) + u^2(T_1) + u^2(T_2) + u^2(T_3)} = 0.016 \text{ °C}$$

1.5 扩展不确定度

包含因子取 $k = 2$ ，则投弃式温度剖面仪温度示值误差校准结果的扩展标准不确定度为：

$$U = ku_c = 0.032 \text{ °C}$$

1.6 测量不确定度评定报告

投弃式温度剖面仪在 20.00°C 校准点上，温度示值误差校准结果的扩展不确定度为：

$$U = 0.03 \text{ °C}, k = 2$$

2 动态响应特性校准结果的不确定度评定

以时间常数 τ 的校准结果的不确定度评定为例。

2.1 数学模型

$$\tau = t_\tau - t_0 \tag{2}$$

式中：

τ ——投弃式温度剖面仪温度响应时间常数，s；

t_τ ——投弃式温度剖面仪温度示值达到 τ 时的时间，s；

t_0 ——时间起始点，s。

对式 (2) 求偏导，得灵敏度系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \tau}{\partial t_\tau} = 1, c_2 = \frac{\partial \tau}{\partial t_0} = -1$$

投弃式温度剖面仪温度与采集的电阻信号，其函数关系为：

$$R = A \times T + B \tag{3}$$

式中：

A、B 为常数；

R——数字多用表采集到的电阻值， $k\Omega$ 。

t_τ 时刻投弃式温度剖面仪的温度为 T_τ ，相应的数字多用表采集到的电阻值为 R_τ ，可以认为，在 $[t_\tau - \Delta t, t_\tau + \Delta t]$ 的微小区间内， R_τ 与 t_τ 呈线性关系：

$$R_\tau = C \times t_\tau + D \quad (4)$$

式中：C、D 为常数。

则根据 τ 的定义：

$$R_\tau = R_0 + 0.632 \times (R_1 - R_0) = 0.368 \times R_0 + 0.632 \times R_1 \quad (5)$$

式中：

R_0 ——环境温度 T_0 对应的电阻值（初始电阻值）；

R_1 ——恒温水槽温度 T_1 对应的电阻值（终止电阻值）。

根据式（2）、（3）、（4）和（5），可得 τ 的数学模型为：

$$\tau = \frac{0.368 \times A \times T_0 + 0.632 \times A \times T_1 + B - D}{C} - t_0 \quad (6)$$

式中， $\left(\frac{0.368 \times A \times T_0 + 0.632 \times A \times T_1 + B - D}{C}\right)$ 部分即为 t_τ ，仅带入终止时刻 t_τ 的不确定度分量的过程计算，不确定度仍按式（2）的模型评定。

2.2 测量不确定度来源分析

时间常数 τ 的校准结果的测量不确定度主要由以下分量组成：

- （1）起始时刻 t_0 的不确定度分量；
- （2）终止时刻 t_τ 的不确定度分量。

影响因素包括：

- （1）数字多用表的时间分辨力；
- （2）数字多用表电阻值测量的误差；
- （3）投弃式温度剖面仪的最大允许误差；
- （4）恒温水槽温度的波动；
- （5）环境温度的波动；
- （6）投弃式温度剖面仪运动速度对热传导过程的影响。

2.3 常数值的确定

- （1）A、B 值计算

常数 A、B 的值通过投弃式温度剖面仪的标定结果拟合计算得出。测量中，环境温度为 25.0℃，恒温水槽温度为 10.0℃，投弃式温度剖面仪的标定结果分别为 15.40 kΩ、20.20 kΩ，按式（3）拟合后可得：

$$R = -0.32 \times T + 23.4$$

(2) C、D 值计算

常数 C、D 的值通过对 t_τ 的重复测量结果拟合计算得出，取 $\Delta t = 0.003s$ ，重复测量结果见表 3。

表 3 重复测量结果

t_τ	R_τ (kΩ)	$R_\tau(t_\tau - \Delta t)$ (kΩ)	$R_\tau(t_\tau + \Delta t)$ (kΩ)
0.268	18.64	18.61	18.67
0.269	18.64	18.61	18.67
0.274	18.64	18.61	18.67

带入重复测量的平均值，按式 (C.4) 拟合后可得：

$$R_\tau = 10 \times t_\tau + 15.94$$

2.4 不确定度评定

2.4.1 起始时刻 t_0 的不确定度分量 $u(t_0)$

投弃式温度剖面仪传感器入水后，会产生非常明显的阶跃变化，其不确定度主要由数字多用表采集数据的时间分辨力组成，当前数字多用表采样率为 1000 Hz，则其采集数据的时间分辨力为 $1 \times 10^{-3}s$ ，则不确定度半宽区间为 $5 \times 10^{-4}s$ ，一般服从均匀分布，取置信因子 $k = \sqrt{3}$ ，则时间分辨力引入的不确定度为：

$$u(t_0) = u_p = 2.9 \times 10^{-4} s$$

2.4.2 τ 的终止时刻 t_τ 的不确定度分量 $u(t_\tau)$

t_τ 的不确定度主要来源为 R_τ 的不确定度和数字多用表采集数据的时间分辨力，结合式 (C.4)，根据不确定度的传播规律可得：

$$u(t_\tau) = \sqrt{u_p^2 + (u(R_\tau)/C)^2} \quad (7)$$

(1) R_τ 的标准不确定度 $u(R_\tau)$

由式 (5) 可知， R_τ 的不确定度主要来源为 R_0 和 R_1 的不确定度以及数字多用表读取 R_τ 的分辨力，故：

$$u(R_\tau) = \sqrt{u_p^2(R) + 0.368^2 \times u^2(R_0) + 0.632u^2(R_1)} \quad (8)$$

式中：

$u_p(R)$ ——数字多用表读取电阻值的分辨力，为 0.01Ω ，在计算中使用的数量级均为 $0.01 k\Omega$ ，故数字多用表读取电阻值的分辨力可以忽略。

(2) R_0 的标准不确定度 $u(R_0)$

R_0 的不确定度主要来源为数字多用表读取电阻值的分辨力、环境温度的波动、投弃式温度剖面仪的最大允许误差，结合式(3)可得：

$$u(R_0) = \sqrt{u_p^2(R) + A^2 \times u_s^2(T_0) + A^2 \times u_e^2(T_0) + u_e^2(R)} \quad (9)$$

式中： u_s 表示波动引入的不确定度分量、 u_e 表示仪器最大允许误差引入的不确定度分量。

环境温度波动为 0.12°C ，由标准温度计重复测得，标准温度计及配套设备测量的最大允许误差为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ，则由波动引入的标准不确定度分量 $u_s(T_0)$ 为 0.04°C 。

投弃式温度剖面仪的最大允许误差为 $\pm 0.20^\circ\text{C}$ ，则半宽区间为 0.10°C ，在此区间服从反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，则由投弃式温度剖面仪的最大允许误差引入的标准不确定度分量 $u_e(T_0)$ 为 0.07°C 。

数字多用表电阻值在测量档位的最大允许误差为 $\pm 0.01 \text{ k}\Omega$ ，则半宽区间为 $0.005 \text{ k}\Omega$ ，在此区间服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则数字多用表电阻值在测量档位的最大允许误差引入的标准不确定度分量 $u_e(R)$ 为 $0.003 \text{ k}\Omega$ 。

将 $u_s(T_0)$ 和 $u_e(T_0)$ 带入式(9)，可得：

$$u(R_0) = 0.026 \text{ k}\Omega$$

(3) R_1 的标准不确定度 $u(R_1)$

R_1 的不确定度主要来源为数字多用表读取电阻值的分辨力、恒温水槽温度的波动、投弃式温度剖面仪的最大允许误差，结合式(3)可得：

$$u(R_1) = \sqrt{u_p^2 + A^2 \times u_s^2(T_1) + A^2 \times u_e^2(T_1) + u_e^2(R)} \quad (10)$$

恒温水槽的波动度为 0.02°C ，均匀度为 0.02°C ，标准温度计及配套设备测量的最大允许误差为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ，则由波动引入的标准不确定度分量 $u_s(T_1)$ 为 0.01°C 。

将 $u_s(T_0)$ 带入式(10)，可得：

$$u(R_1) = 0.023 \text{ k}\Omega$$

将 $u(R_0)$ 、 $u(R_1)$ 代入式(C.8)，可得：

$$u(R_\tau) = 0.035 \text{ k}\Omega$$

则 τ 的终止时刻 t_τ 的不确定度分量 $u(t_\tau)$ 为：

$$u(t_\tau) = \sqrt{(2.9 \times 10^{-4})^2 + (0.035/10)^2} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ s}$$

因投弃式温度剖面仪运动速度对热传导过程的影响，体现在投弃式温度剖面

仪传感器输出值的变化率上，即 C 值，故不再重复引入。

2.5 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总见表 4。

表 4 标准不确定度汇总表

标准不确定度分量	符号	标准不确定度 (s)
起始时刻 t_0 的不确定度分量	$u(t_0)$	2.9×10^{-4}
τ 的终止时刻 t_τ 的不确定度分量	$u(t_\tau)$	3.5×10^{-3}

各分量相互独立，仪器温度示值误差校准结果的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(t_0) + u^2(t_\tau)} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ s}$$

2.6 扩展不确定度

包含因子取 $k = 2$ ，则投弃式温度剖面仪时间常数 τ 的校准结果的扩展标准不确定度为：

$$U = ku_c = 0.007 \text{ s}$$

2.7 不确定度评定报告

投弃式温度剖面仪在传感器运动速度 0.2 m/s，温度阶跃 15.0°C时，时间常数 τ 的校准结果的扩展不确定度为：

$$U = 0.007 \text{ s}, k = 2$$