

投弃式温度剖面仪校准规范

(实验报告)

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规范

1 校准对象

选择 TSK 公司生产的 T7 型投弃式温度剖面仪（以下简称“XBT”）作为校准对象，其主要技术参数见表 1，样机照片见图 1。

表 1 被校仪器主要技术参数

测量范围	分辨力	准确度
(-2—35)°C	0.001°C	±0.2°C



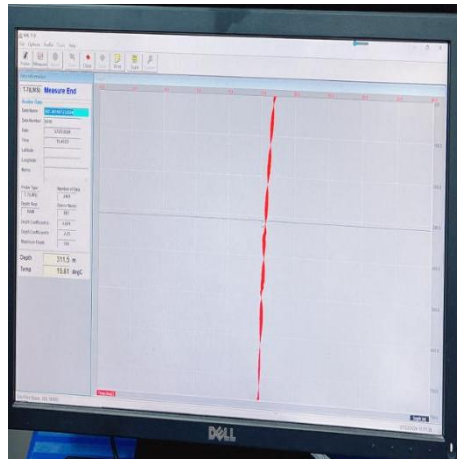
探头



数据采样器



发射枪



计算机读数软件

图 1 投弃式温度剖面仪样机

2 校准项目

校准项目包括 XBT 温度示值误差、温度测量重复性和温度传感器动态响应特性。

3 计量标准

3.1 主要计量标准器具及其配套设备

校准所用主要计量标准器具及其配套设备见表 2。

表 2 主要计量标准器具及其配套设备

名称/编号	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差
标准铂电阻温度计	(-189.3442~419.527)°C	一等
数字测温仪	(0~100)kΩ	MPE: $\pm 2 \times 10^{-6}$
海水恒温槽	(-5~65)°C	波动性 $\leq 0.005^\circ\text{C}/10\text{min}$; 均匀性 $\leq 0.005^\circ\text{C}$
数字多用表	(0 ~ 10M)Ω； 采样频率：(1 ~ 10000)Hz	Ω2W:MPE: $\pm 1 \times 10^{-5}\text{M}\Omega$; Ω4W:MPE: $\pm 1 \times 10^{-3}\text{k}\Omega$

3.2 其他设备

(1) 温度阶跃系统

由恒温水槽和匀速运动控制装置组成，用于动态响应特性校准。温度阶跃系统是为了给被校 XBT 提供一个定量的温度突变，产生温度阶跃所需的时间应小于被校准传感器时间常数或 $\tau_{0.5}$ 的 10%。

匀速运动控制装置应能控制 XBT 探体在恒温水槽中以不小于 0.1 m/s 的速度垂直均匀运动，速度均匀度优于 10%。匀速运动是否满足要求可以通过实际测量确定，也可根据温度传感器动态响应特性校准结果，通过传感器在数个微小区间内的示值一时间变化率计算确定。

XBT 在水槽内匀速运动的时间应大于其热响应时间 $\tau_{0.9}$ 。

本实验中使用匀速电机配合钢索通过吊装方式控制 XBT 探体的匀速运动。

(2) 采集测试控制系统

用于动态响应特性校准。可采用 XBT 配套的数据采集器和软件，或采用数字示波器、配置高速模数转换器的计算机或高速采样数字电压表等。记录仪表自身的响应时间应小于待校准 XBT 温度传感器时间常数的 10%，时间分辨力应优于待校准温度传感器时间常数的 1%；采用输出信号放大器时，输出信号放大器自身响应时间应不超过待校准温度传感器时间常数的 1%，并且放大倍数连续可调。

本实验使用高速采样多用数字表，采集 XBT 温度传感器的电阻值变化获取动态响应特性曲线，配合计算机软件控制多用数字表采集数据并记录。

4 实验方法

4.1 外观检查

目测 XBT 的外观是否完好，连接 XBT 发射枪、探体套筒、数据采集器，连接计算机读数软件，检查安装和信号连接是否正常。

4.2 温度示值误差

(1) 按 35℃、30℃、25℃、20℃、15℃、10℃、5℃、0℃ 的顺序进行温度示值误差的校准。

(2) 将标准温度计固定在恒温水槽中，XBT 探体置于恒温水槽内，标准温度计尽量靠近 XBT 温度传感器位置。

(3) 控制恒温水槽为 35℃，待温度稳定后，标准温度计和 XBT 同时测量不少于 10 组读数，取对应温度读数的算术平均值分别作为该校准点上的标准温度值和 XBT 温度示值。一般将 XBT 实时显示的数据保存为软件整合后的数据记录后，读取温度记录数据作为其温度读数。

(4) 完成 35℃ 的温度示值误差校准后，按相同步骤依次完成余下校准点的温度示值误差校准。

(5) 按下式计算温度示值误差：

$$\Delta T_i = T_i - T_{is}$$

式中：

ΔT_i ——XBT 在第 i 个校准点的温度示值误差，℃；

T_i ——XBT 在第 i 个校准点的温度示值，℃；

T_{is} ——第 i 个校准点的标准温度示值，℃。

取绝对值最大的 ΔT_i 作为 XBT 温度示值误差。

4.3 温度测量重复性

选取 20℃ 校准点，在重复性条件下，重复测量 10 次，计算温度测量重复性。

按下式计算温度测量重复性：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n - 1}}$$

式中：

σ ——温度测量重复性，℃；

T_i ——第 i 次测量的温度示值，℃；

\bar{T} —— n 次测量的算术平均值，℃；

n ——测量次数 ($n = 10$)。

4.4 动态响应特性

完成温度示值误差和温度测量重复性校准后,进行温度传感器动态响应特性校准。

(1) 连接采集测试控制系统

将 XBT 探体套筒与发射枪连接,将发射枪航空插头的正负极接口与数字多用表的欧姆档连接;连接计算机和数字多用表,在软件端输入指令,控制数字多用表的数据采集功能。

(2) 将 XBT 探体从套筒中取出,固定在温度阶跃系统的匀速运动控制装置上。

(3) 控制环境温度和恒温水槽温度稳定后,先进行静态测量,确定温度传感器在阶跃起始温度和终止温度的示值,用以判断动态响应的终点时间,并在不确定度评定中计算温度传感器的温度—电阻值变化曲线。恒温水槽温度控制为 10.0°C ,环境温度控制在 25.0°C ,从而形成 15.0°C 的温度阶跃。

(4) 待 XBT 探体在空气中示值稳定后,启动采集测试控制系统,本实验设置采样频率为 1000Hz ,待 XBT 在空气中示值稳定后,再启动温度阶跃系统,将 XBT 探体以 0.2m/s 匀速投入恒温水槽中,采集并记录 XBT 探体入水后温度与时间的变化关系,测量结束后,将 XBT 探体从水中提出,恢复到初始状态。

(5) 测量 3 次,计算动态响应时间平均值和平均值的偏差。

(6) 由采集的温度与时间的变化关系绘制时间—温度响应曲线,在 matlab 软件中进行数字滤波光滑处理,通过曲线图截取计算动态响应特性的特征参数值。

(7) 按下式计算动态响应特性的特征参数值 τ_n 。

$$\tau_n = t_n - t_0 \quad (3)$$

式中:

τ_n —— $\tau_{0.9}$ 、 $\tau_{0.5}$ 、 $\tau_{0.1}$ 或 τ 。

t_n ——XBT 温度示值达到 $\tau_{0.9}$ 、 $\tau_{0.5}$ 、 $\tau_{0.1}$ 或 τ 时的时间, s。

t_0 ——温度阶跃开始时的时间,既 XBT 探体入水时间, s。

计算结果保留 3 位有效数字。

5 数据处理和分析

5.1 温度示值误差校准结果

温度示值误差校准结果见表 3。

表 3 温度示值误差校准结果

标准温度值/°C	仪器温度示值/°C	示值误差/°C
35.073	35.11	0.04
29.978	30.18	0.20
25.058	25.17	0.11
19.986	20.13	0.14
15.026	15.17	0.14
9.989	10.16	0.17
5.028	5.23	0.20
0.005	0.19	0.18

5.2 温度测量重复性校准结果

温度测量重复性校准结果见表 4。

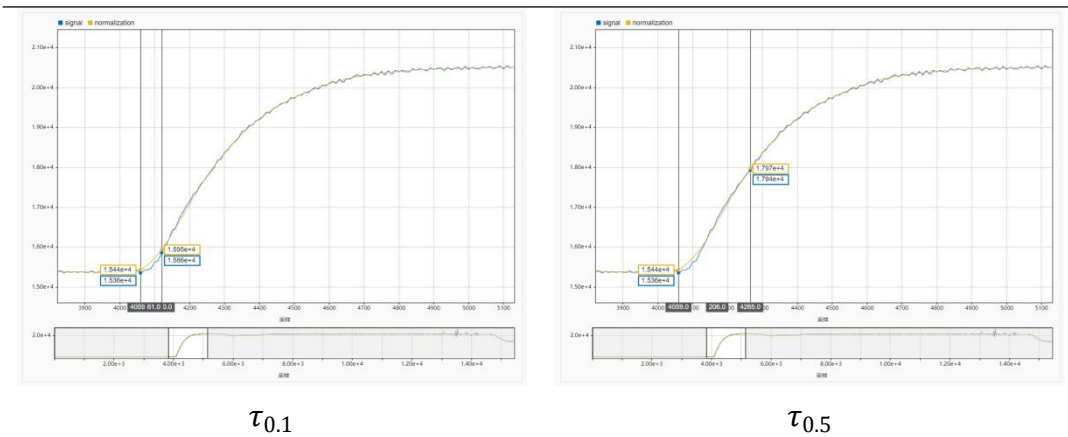
表 4 温度测量重复性校准结果

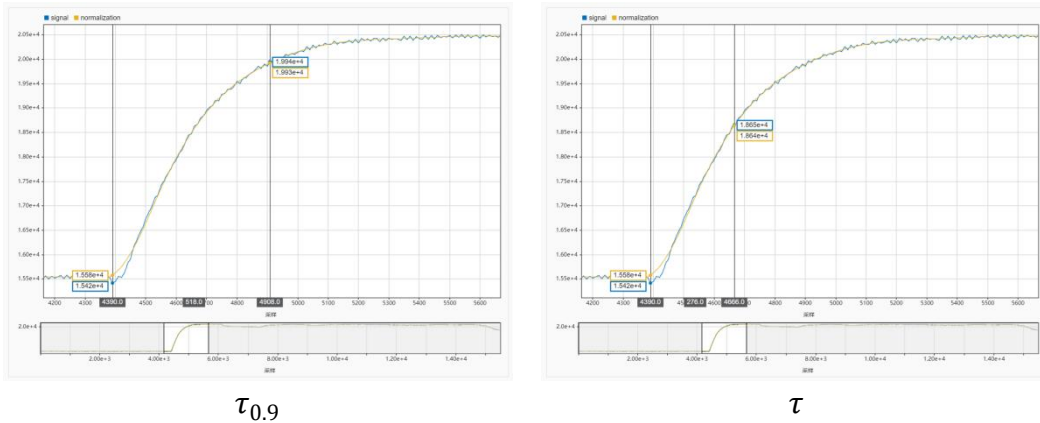
仪器温度示值/°C		重复性/°C
20.13	20.09	0.04
20.13	20.15	
20.11	20.10	
20.18	20.14	
20.19	20.08	

5.3 动态响应特性校准结果

对动态响应特性的特征参数值 $\tau_{0.9}$ 、 $\tau_{0.5}$ 、 $\tau_{0.1}$ 和 τ 进行计算，完成 3 次测量，对采集的数据进行归一化平均，获得曲线图如下：

(1) 第一次测量





动态响应特性校准结果见表 5。

表 5 动态响应特性校准结果

特性点	传感器运动速度 (m/s)	阶跃温度 (°C)	初始值 (kΩ)	终止值 (kΩ)	特性点值 (kΩ)	响应时间 (s)	热响应时间平均值 (s)	相对偏差
$\tau_{0.1}$	0.2	15.0	15.44	20.50	15.95	0.061	0.062	1.6%
			15.51	20.48	16.01	0.062		
			15.58	20.42	16.06	0.063		
$\tau_{0.5}$	0.2	15.0	15.44	20.50	17.97	0.206	0.209	1.4%
			15.51	20.48	17.99	0.210		
			15.58	20.42	18.00	0.212		
$\tau_{0.9}$	0.2	15.0	15.44	20.50	19.99	0.505	0.500	4.2%
			15.51	20.48	19.97	0.477		
			15.58	20.42	19.93	0.518		
τ	0.2	15.0	15.44	20.50	18.64	0.269	0.271	1.6%
			15.51	20.48	18.64	0.268		
			15.58	20.42	18.64	0.276		

5.4 不确定度分析

(1) 温度示值误差校准结果的不确定度

XBT 温度示值误差校准结果的不确定度主要来源于被校仪器测量重复性引入的不确定度、标准温度测量(标准温度计)引入的不确定度和标准温度复现(恒温水槽的温场均匀性和波动性)引入的不确定度。根据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》要求,以 20.00°C 校准点为例,依次分析上述扩展不确定度的来源,评定各标准不确定度分量。因实验使用计量标准器具指标高于实际需要,故为满足校准规范的通用要求,根据计量标准器具实际需要引入标准不确定度,计算合成标准不确定度和扩展不确定度,结果见表 6。

表 6 温度示值误差校准结果的标准不确定度一览表

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

经计算, XBT 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

XBT 动态响应特性校准结果的不确定度主要来源于起始时刻 t_0 引入的不确定度和终止时刻 t_τ 引入的不确定度分量, 影响因素主要包括数字多用表的时间分辨力、数字多用表电阻值测量的误差、XBT 的最大允许误差、恒温水槽温度的波动、环境温度的波动和投弃式温度剖面仪运动速度对热传导过程。根据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》要求, 以时间常数 τ 为例, 依次分析上述扩展不确定度的来源, 评定各标准不确定度分量, 根据计量标准器具实际需要引入标准不确定度, 计算合成标准不确定度和扩展不确定度, 结果见表 7。

表 7 动态响应特性校准结果的标准不确定度一览表

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}

经计算, 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:

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

6 结论

利用《投弃式温度剖面仪校准规范》的方法对 T7 型投弃式温度剖面仪进行校准, 校准数据验证了校准后仪器能满足技术指标要求, 而且保障了测量数据的准确可靠; 同时对校准结果的测量不确定度进行了评估, 温度示值误差校准结果的扩展不确定度为 0.03°C, 动态响应特性校准结果的扩展不确定度为 0.007s ($k=2$)。

综上所述，《投弃式温度剖面仪校准规范》适用于预期的用途，且满足投弃式温度剖面仪的校准需求。

附件

投弃式温度剖面仪校准原始记录

投弃式温度剖面仪校准原始记录

原始记录编号： /

第 1 页，共 3 页

标准器及配套设备							
名称/编号	测量范围	不确定度/准确度等级 /最大允许误差	检定/校准 证书编号	证书 有效期至			
标准铂电阻温度计	(-189.3442~419.527)°C	一等	RGjc2022-20538	2024-11-09			
数字测温仪	(0~100)kΩ	MPE: ±2×10 ⁻⁶	校准字第 202310008658 号	2024-10-22			
海水恒温槽	(-5~65)°C	波动性≤0.005°C/10min 均匀性≤0.005°C	RZD202350456	2024-08-21			
数字多用表	(0~10M)Ω; 采样频率: (1~10000)Hz	Ω2W: MPE: ±1×10 ⁻⁵ MΩ Ω4W: MPE: ±1×10 ⁻³ kΩ	DBS202400664	2025-04-16			
委托单位/地址	/						
仪器名称	投弃式温度剖面仪	仪器编号	自编01	型号规格	T7		
测量范围	(-2~35) °C	生产厂商	TSK	委托日期	/		
校准地点	温深实验室(一)	环境条件	25.0°C, 48%RH				
外观及功能检查	良好	技术依据及代号	JJF xxx-20xx 投弃式温度剖面仪校准规范				
偏离校准规范的说明	无						
温度示值误差							
校准点 (°C)	标准温度值 (°C)			仪器温度示值 (°C)		示值误差 (°C)	
	示值		平均值	示值			平均值
35	35.073	35.073	35.073	35.12	35.11	35.11	0.04
	35.073	35.073		35.10	35.12		
	35.073	35.073		35.12	35.11		
	35.073	35.073		35.11	35.13		
	35.073	35.073		35.11	35.11		
30	29.978	29.978	29.978	30.17	30.16	30.18	0.20
	29.978	29.978		30.17	30.18		
	29.978	29.978		30.18	30.19		
	29.978	29.978		30.18	30.19		
	29.978	29.978		30.17	30.18		
25	25.058	25.058	25.058	25.18	25.17	25.17	0.11
	25.058	25.058		25.14	25.19		
	25.058	25.058		25.21	25.18		
	25.058	25.058		25.21	25.17		
	25.058	25.058		25.15	25.14		
20	19.986	19.986	19.986	20.14	20.13	20.13	0.14
	19.986	19.986		20.14	20.13		
	19.986	19.986		20.16	20.13		
	19.986	19.986		20.14	20.14		
	19.986	19.986		20.12	20.08		

投弃式温度剖面仪校准原始记录

原始记录编号: /

第 2 页, 共 3 页

温度示值误差							
校准点 (°C)	标准温度值 (°C)			仪器温度示值 (°C)			示值误差 (°C)
	示值		平均值	示值		平均值	
15	15.026	15.026	15.026	15.20	15.16	15.17	0.14
	15.026	15.026		15.17	15.20		
	15.026	15.026		15.19	15.18		
	15.026	15.026		15.17	15.13		
	15.026	15.026		15.17	15.14		
10	9.989	9.989	9.989	10.17	10.16	10.16	0.17
	9.989	9.989		10.16	10.15		
	9.989	9.989		10.15	10.17		
	9.989	9.989		10.18	10.17		
	9.989	9.989		10.18	10.15		
5	5.028	5.028	5.028	5.23	5.27	5.23	0.20
	5.028	5.028		5.22	5.19		
	5.028	5.028		5.22	5.25		
	5.028	5.028		5.22	5.23		
	5.028	5.028		5.26	5.25		
0	0.005	0.005	0.005	0.20	0.21	0.19	0.18
	0.005	0.005		0.19	0.17		
	0.005	0.005		0.18	0.17		
	0.005	0.005		0.19	0.18		
	0.005	0.005		0.18	0.18		
测量重复性							
仪器温度值 (°C)			温度平均值 (°C)		重复性 (°C)		
20.13	20.09		20.13		0.04		
20.13	20.15						
20.11	20.10						
20.18	20.14						
20.19	20.08						
扩展不确定度 (°C)			$U=0.03 (k=2)$				
注: 温度示值误差和测量重复性校准时, 数据采集器采样频率50Hz。							

校准员: 

核验员: 

日期: 2024 年 7 月 22 日

投弃式温度剖面仪校准原始记录

原始记录编号： /

第 3 页，共 3 页

外观及功能检查			良好					
校准地点			温深实验室（一）		环境条件		25.0°C, 50%RH	
动态响应特性								
特性点	传感器运动速度 (m/s)	阶跃温度 (°C)	初始值 (kΩ)	终止值 (kΩ)	特性点值 (kΩ)	响应时间 (s)	热响应时间平均值 (s)	相对偏差
$\tau_{0.1}$	0.2	15.0	15.44	20.50	15.95	0.061	0.062	1.6%
			15.51	20.48	16.01	0.062		
			15.58	20.42	16.06	0.063		
$\tau_{0.5}$	0.2	15.0	15.44	20.50	17.97	0.206	0.209	1.4%
			15.51	20.48	17.99	0.210		
			15.58	20.42	18.00	0.212		
$\tau_{0.9}$	0.2	15.0	15.44	20.50	19.99	0.505	0.500	4.2%
			15.51	20.48	19.97	0.477		
			15.58	20.42	19.93	0.518		
τ	0.2	15.0	15.44	20.50	18.64	0.269	0.271	1.6%
			15.51	20.48	18.64	0.268		
			15.58	20.42	18.64	0.276		
扩展不确定度 (s)			$U=0.007 (k=2)$					
注：动态响应时间校准时，数字多用表采样频率 1000Hz。								

校准员：王立志

核验员：钱飞

日期：2024 年 7 月 31 日