

表层水温计的校准及不确定度评定

张玉婷¹, 刘阳¹, 张翼翔¹, 安文霞¹, 张涛¹

(1. 湖北省计量测试技术研究 武汉 430000)

Email: zhangyuting0904@126.com

摘要: 水体表层温度是水文循环和气候系统中的重要参数之一, 它对水体生物学、水文过程、气候变化以及生态系统的结构和功能都有深远影响。表层水温计是测量水体表面温度应用最为便捷与广泛的工具, 对表层水温计进行准确的校准和不确定度分析是确保测量数据可靠性和准确性的关键步骤, 目前表层水温计依据检定规程 JJG289-2019 开展计量工作, 但该计量技术规范缺乏相应的不确定度评价体系, 亟需根据相应的校准方法进行补充和完善, 满足国内表层水温表的实际校准工作需求。本文对表层水温表示值误差不确定度进行了详细分析, 给出了相应的评定实例, 对表层水温表的计量溯源的有效评价方法提供了参考。

关键词: 表层水温计; 水文气候; 计量; 不确定度

1、引言

水体表层温度的变化受到太阳辐射、风力、水体流动、季节变化等多种因素的影响, 其表层水温数据不仅在科学研究中用于理解水体的动态特性, 在工程项目中用于设计和规划, 还在气象预报和自然灾害预警中用于预测和决策。因此准确测量水体表层温度对于理解海洋循环、监测气候变化、预测天气以及评估水生态系统的健康状况至关重要^[1-2]。

表层水温的检测方法多种多样, 常见的包括水下温度传感器、红外线热像仪、遥感技术、潜水测温器和自动气象站。这些方法各有特点, 适用于不同的应用场景和需求, 在选择合适的检测方法时需要考虑测量精度、范围、环境条件以及设备可用性和成本等因素^[3-4]。但其中表层水温计的使用最为便捷, 常被用于测量海洋、湖泊、河流、水库和水文地质表层(通常为水面下几厘米至数十厘米深度)的温度。随着对水体研究的深入和对环境监测的需求增加, 表层水温计的研究和应用得到了广泛关注。但由于水体环境的复杂性和表层水温计本身的特性, 其测量结果往往受到多种因素的影响, 因此, 对表层水温计进行准确的校准和不确定度分析是确保测量数据可靠性和准确性的关键步骤^[5-6]。目前表层水温计依据检定规程 JJG289-2019 开展计量工作, 但该计量技术规范缺乏相应的不确定度评价体系, 亟需根据相应的校准方法进行补充和完善, 满足国内表层水温表实际检定校准的需求。通过对表层水温计的计量溯源给出有效的评价方法, 可以提高水文学、海洋学和环境科学研究的可信度, 为相关领域的决策和管理提供科学依据。

2、研究内容

2.1 外观与结构

表层水温计由金属外壳和全浸式温度计组成。金属外壳由提环、表管和储水筒等构成。温度计由内标式玻璃水银温度计和铜制端帽组成。温度计测量范围为 $(-5 \sim 40)^\circ\text{C}$ 、分度值为 0.2°C [7]。

2.2 测量方法

采用比较法对表层水温计进行校准，以标准铂电阻温度计及配套电测设备，或其他满足要求的测量系统作为标准器，将标准温度计和被检水温计垂直插入恒温槽中，待恒温槽的温度达到预定的温度，稳定5min后开始读数，读取标准器与被检水温计的温度示值，计算可得到该温度条件下的示值误差，并进行不确定度评定。

2.3 示值误差的不确定度评定

以一个温度范围为 $(-5 \sim 40)^\circ\text{C}$ 、分度值为 0.2°C 的表层水温计为例，在温度为 20°C 的实验条件下进行校准，经计算可得到该水温计在不同温度条件下的示值误差，并进行不确定度评定。本次试验采用标准棒式温度计作为标准器。

2.3.1 评定依据

JJG289-2019 《表层水温表》

JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

2.3.2 测量模型

$$\Delta T = T_0 + \Delta T_0 - T_i$$

式中： ΔT ----- 被检设备的温度修正值， $^\circ\text{C}$ ；

T_0 ----- 标准棒式温度计的温度显示值， $^\circ\text{C}$ ；

ΔT_0 ----- 标准棒式温度计的温度修正值， $^\circ\text{C}$ ；

T_i ----- 被检水温计的温度示值， $^\circ\text{C}$ ；

2.3.3 输入量 T_0 引入的标准不确定度分量 $u(T_0)$

(1) 标准棒式温度计的读数分辨力标准棒式温度计温度显示值的分辨力为 0.001°C ，在此区间，服从均匀分布，由其引入的标准不确定度区间半宽为分辨力的 $1/2$ ，即

$$u_{1(T_0)} = 0.0005 / \sqrt{3} = 0.00029^\circ\text{C}$$

(2) 恒温槽的均匀度

校准时将标准器与被校水温计置于恒温槽的中心位置，有效工作区域内任一点与中心的温度差小于 0.005°C ，其引入的标准不确定度区间半宽为最大温度差的 $1/2$ ，按均匀分布处理，即

$$u_{2(T_0)} = 0.0025 / \sqrt{3} = 0.00144^\circ\text{C}$$

(3) 恒温槽的波动度

据溯源证书确认，恒温槽在整个校准过程中温度最大波动性为 0.014°C ，其引入的标准不确定度区间半宽为波动量的 $1/2$ ，按均匀分布处理，即 $u_{3(T_0)}=0.007/\sqrt{3}=0.00404^{\circ}\text{C}$

以上 3 个不确定度分量来源独立互不相关，则有标准棒式温度计温度显示值 T_0 的标准不确定度为 $u_{(T_0)} = \sqrt{u_{1(T_0)}^2 + u_{2(T_0)}^2 + u_{3(T_0)}^2} = 0.0043^{\circ}\text{C}$

2.3.4 输入量 ΔT_0 引入的标准不确定度分量 $u(\Delta T_0)$

根据溯源证书可知，标准棒式温度计温度测量结果的扩展不确定度为 $U=0.050^{\circ}\text{C}$ ，在此区间，服从正态分布，取 $k=2$ ，则 $u_{(\Delta T_0)}=0.050/2=0.025^{\circ}\text{C}$

2.3.5 输入量 T_i 引入的标准不确定度分量 $u(T_i)$

(1) 被检表层水温计的示值估读

在校准读数时，要估读到被检设备分度值的 $1/10$ ，但由于读数时存在视差，对分度值为 0.2°C 的温度计可能产生 0.02°C 的影响，均匀分布，即 $u_{1(T_i)}=0.02/\sqrt{3}=0.00115^{\circ}\text{C}$

(2) 视线与被检表层水温计不垂直

读数时，应调整读数装置保持水平，并保证被检水温计垂直插入恒温槽中，读数时视线与被检不垂直可引入 0.02°C 的偏差，服从均匀分布，即 $u_{2(T_i)}=0.02/\sqrt{3}=0.00115^{\circ}\text{C}$

(3) 被检表层水温表的测量重复性

将被校水温计在 0°C 、 20°C 、 40°C 的温度条件下各重复测量 10 次。当恒温槽稳定在 20.0°C 时，试验测得测量值（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）分别为：20.12、20.14、20.12、20.10、20.12、20.10、20.08、20.10、20.12、20.10。

$$u_{3(T_i)}=s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} = 0.017^{\circ}\text{C}$$

以上 3 个不确定度分量来源独立互不相关，则有表层水温计温度示值 T_i 的标准不确定度为

$$u_{(T_i)} = \sqrt{u_{1(T_i)}^2 + u_{2(T_i)}^2 + u_{3(T_i)}^2} = 0.0171^{\circ}\text{C}$$

2.3.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{(T_0)}^2 + u_{(\Delta T_0)}^2 + u_{(T_i)}^2} = 0.0306^{\circ}\text{C}$$

2.3.7 扩展不确定度

测量结果按 t 分布估计，置信概率 $P=95\%$ ， $k=2.03$ ，则有 $U=ku_c=0.062^{\circ}\text{C}$ ($k=2$)。

被校表层水温计在 20°C 时最大允许误差 MPE 为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ，则 $U/MPEV=0.062/0.4=0.155 < 1/3$ ，符合要求。

3、结论

对表层水温计的校准和不确定度分析是当前水文学、海洋学和环境科学研究中的重要课题，不仅关系到科学研究的准确性和可靠性，也直接影响相关领域的决策制定和管理实践。本次试验采用标准棒式温度计、制冷恒温槽对表层水温计的不确定度进行评定，测量结果具有较小的不确

定度，满足了表层水温计的校准需求。

随着科学技术的发展，未来表层水温计将朝着智能化、多参数测量、高精度和高分辨率以及耐久性和可靠性改进等方向前进，以满足水文学、海洋学和环境科学研究的日益增长需求。对于表层水温计的校准能力也将持续提升，通过测量设备升级和校准方法改进等方式进一步减小测量结果的不确定度。

参考文献

- [1] 张龙,叶松,周树道,等.海水温盐深剖面测量技术综述[J].海洋通报,2017,36(5):481-489.
- [2] 李明钊.海洋计量测试工作的回顾与展望[J].海洋技术.2000,19(4),75-78.
- [3] 蔡泽浩,谢强华.海水温度测量的技术及发展[J].科技前沿,2015,18(018):19.
- [4] 李冰.海水表面温度红外测量方法的研究[D].天津理工大学,2010
- [5] 黄亚飞,巨龙,钱飞.表层水温表测量结果不确定度评定[J].海洋开发与管理,2019,5:48-50.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement, 北京: 标准出版社, 2012
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJG289-2019 表层水温表 Bucket Thermometers. 北京: 标准出版社, 2019