

地震水温观测仪器现场检测方法及其对观测数据连续性影响的实验

明晓冉, 李文一*, 王忠彪, 田兴宇, 朱传东, 唐荣

中国地震局第一监测中心, 天津 300180

摘要 地震水温观测仪器(简称测温仪)在地震短临预报中发挥了关键作用。但长期以来, 其缺少具有量值溯源性的现场检测方法, 即移动标校方法。提出了2种测温仪移动标校方法, 分别为原位比较法和恒温槽比较法, 并通过现场实验初步验证了方法对观测数据连续性的影响。结果表明: 在实验井孔条件下, 移动标校前后被测仪器观测数据的标准差接近, 最大差值为 -0.0002°C ; 示值变化量差值的最大值为 -0.0053°C ; 干扰度(ID)计算结果均 $<50\%$ 。移动标校方法对仪器数据连续性的影响在可接受范围内。

关键词 地震水温观测仪器; 现场检测; 移动标校; 数据连续性; 量值溯源

自1966年邢台市地震以来, 地下流体观测逐渐成为重要的地震监测和预报手段^[1-2], 并为辽宁海城、云南龙陵和四川松潘地震的成功预测作出了贡献^[3]。地下流体, 尤其是水, 作为地壳中最活跃的介质, 直接参与地震孕育和发生过程中的动力作用^[4-5]。这赋予地下水观测方法高灵敏性的特点, 使其在短临预报工作中发挥决定性作用^[4-7]。目前, 中国已建成了世界范围内罕见的, 用于地震观测的庞大地下流体温度监测网络^[8-9], 纳入国家地下流体台网管理的井水温观测点450余个, 分布

在全国30个省、市和自治区^[10-11]。

定期对地震监测仪器进行现场检测是保障台站运行仪器产出数据可靠性、准确性的主要方法^[1]。在本研究中, 将具有量值溯源性的现场检测称为移动标校。目前, 测氦仪、测汞仪和水位仪等地下流体观测仪器已有可行的移动标校手段, 但作为主力地球物理类测项监测设备的地震水温观测仪器(简称测温仪)却缺少有效的现场量值溯源方法。这导致无法对由仪器零漂^[12-13]等现象引起的仪器长期稳定性、示值误差等计量特性的变化程度进行量化

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2024-06-18

基金项目: 天津市计量科技项目(2024TJMT012, 2024TJMT050); 中国地震局重大政策理论与实践问题研究课题(CEAZY2024JZ04); 中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH22017YA, XH21051Y)

作者简介: 明晓冉, 工程师, 研究方向为地震地下流体观测仪器计量测试技术, 电子信箱: mingy1@163.com; 李文一(通信作者), 高级工程师, 研究方向为地震计量测试技术, 电子信箱: lwyxxn@126.com

引用格式: 明晓冉, 李文一, 王忠彪, 等. 地震水温观测仪器现场检测方法及其对观测数据连续性影响的实验[J]. 科技导报, 2024, 42(24): 106-114; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.01516

判定^[12]。前人研究发现,内蒙古赤峰市克什克腾井仪器零漂成因水温下降速率为 $0.08^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ^[14]。另外,全国井水温数据抽查结果也显示,仪器零漂导致的趋势变化速率的中值为 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ^[12]。显然,台站运行测温仪的示值误差可能在若干年内超过 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 的最大允许误差。因此,开展测温仪移动标校,对其示值误差和长期稳定性等计量特性进行定期监控是十分必要的。

测温仪移动标校技术的难点之一为参考标准探头投放引起的水温平衡破坏可能导致标校前后观测数据差异,无法在短时间内判断被测仪器是否正常^[1]。为了解决台站运行测温仪关键计量特性(如示值误差)的量值溯源问题,本研究提出2种可能的移动标校方法,并基于现场实验研究方法对仪器数据连续性的影响情况,对其应用前景和局限性进行讨论。

1 移动标校方法

比较法是主要的温度量值传递和溯源技术之

一^[15],在工业现场温度测量领域广泛应用,基本原理为通过被测仪器与参考标准比较,实现温度校准^[16]。在地震领域,测温仪的实验室计量检测也是通过比较法实现的^[17]。基于以上理论基础,提出2种测温仪潜在移动标校方法,即原位比较法(图1(a)~(e))和恒温槽比较法(图1(f)和(g))。

原位比较法所用计量标准器和配套设备为参考测温仪和水下电视。前者作为参考标准在井下原位对被测仪器进行示值误差等计量指标校准,后者用于参考测温仪和被测仪器探头的井下定位。具体方法为:(1)利用水下电视确定井下被测仪器探头的位置(图1(b));(2)投放参考测温仪探头,并将其传感器位置与被测传感器对齐(图1(c));(3)取出水下电视探头,待仪器示值稳定后,开始测量(图1(d));(4)测量结束后,取出参考测温仪探头,恢复正常监测活动(图1(e))。

恒温槽比较法所用计量标准器为一等标准铂电阻温度计,配套设备为便携式恒温槽和电测设备。具体方法为:将被测仪器探头从井中取出后,在台站现场利用便携式恒温槽等设备参照相关计

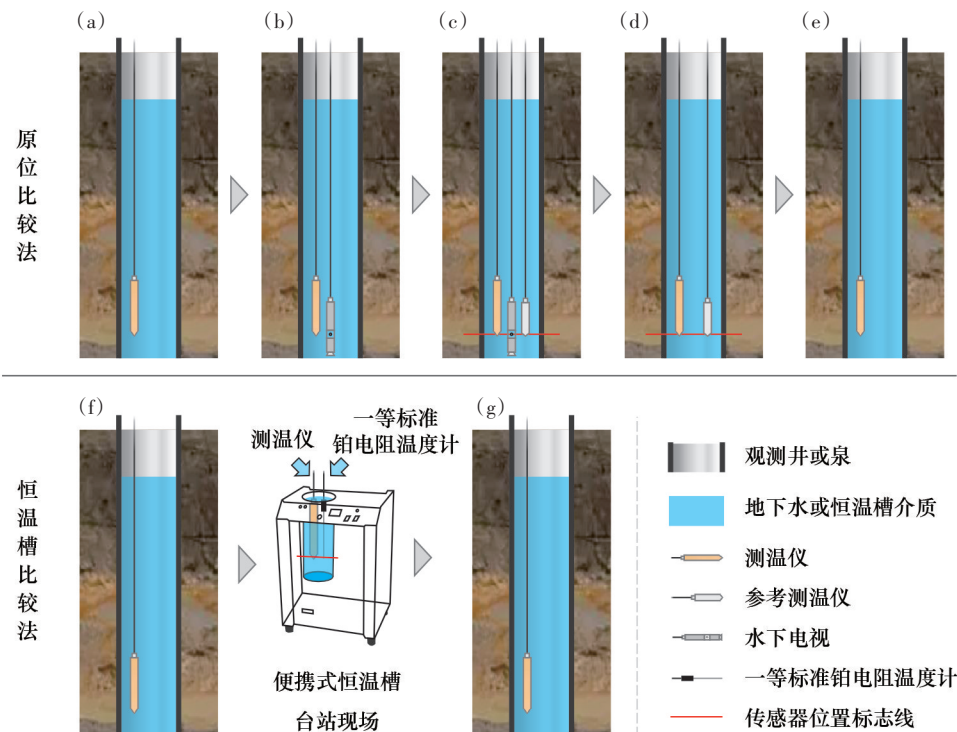


图1 移动标校方法示意

量技术规范,在规定温度点对其进行示值误差等计量指标校准,随后重新投放至原深度,恢复正常监测活动(图1(f)和(g))。

2 实验仪器、井孔和方法

2.1 实验仪器

实验仪器包括被测仪器 and 辅助仪器。被测仪器为4种常用测温仪,型号为SZW-II、DSC-II、DLZ-1和ZKGD3000-N。仪器探头均呈圆柱状,外径为29~38 mm,长度为230~590 mm。被测仪器计量特性相同:(1)测量范围为0~100℃;(2)最大允

许误差为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$;(3)分辨力为 0.0001°C ;(4)采样率为1次/min。辅助仪器为KYKJ-19-2A型水下电视和参考测温仪(定制)。水下电视探头外径为50 mm,长度为873 mm;参考测温仪探头外径为40 mm,长度为240 mm。

2.2 实验井孔

实验在天津市青光地震台SY-1井和张道口地震台SY-2井完成,青光地震台位于北辰区青光镇,在潘庄北断裂附近(图2)。周围地貌属滨海平原,上覆河沼相和部分海相沉积物^[18]。SY-1井位于青光地震台西北侧,井口直径为28.5 cm,现存井深约135 m,水位埋深约33 m。

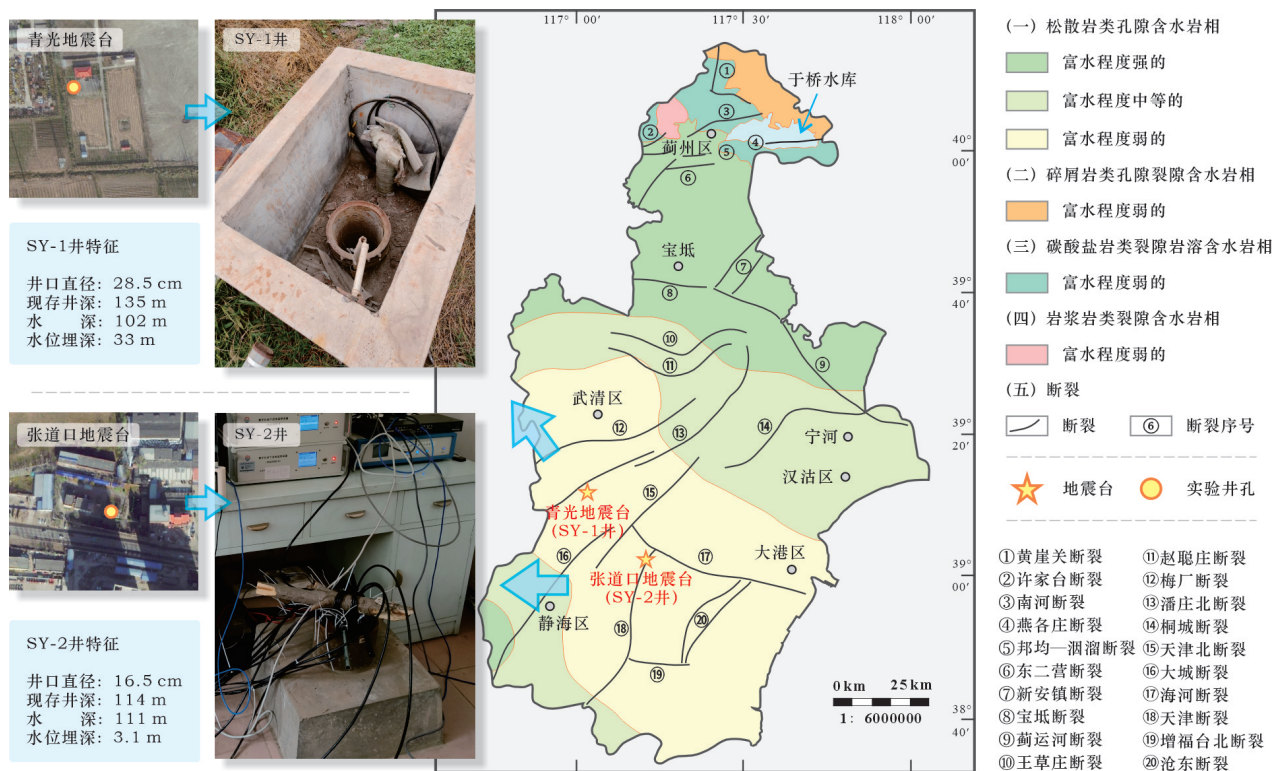


图2 实验井孔附近地质构造和水文地质特征

张道口地震台位于西青区大寺镇门道口村,为国家地下流体基本台^[19-21]。毗邻天津断裂带^[22](图2),地处沧县隆起西南侧双窑凸起与白塘口凹陷交界的白塘口西断裂上盘^[19-20,23-25]。SY-2井位于张道口地震台东侧,井口直径为16.5 cm,现存井深约114 m,水位埋深约3.1 m。

实验井孔均位于弱含水松散岩类孔隙含水岩

相区,主要钻遇新生代含水组。井孔内无其他观测仪器或干扰物。

2.3 实验方法

按照移动标校方法,根据标校过程中可能出现的干扰因素,进行3项数据连续性影响验证实验:原位比较法验证实验(实验1)、恒温槽比较法验证实验(实验2)、线缆扰动验证实验(实验3)。地震

水温观测仪器探头的投放水深常在 50~200 m^[13,26]。结合所用井孔情况,验证实验在 72~78 m 水深范围内进行。

实验 1 在 SY-1 井完成,所用被测仪器为 SZW-II、DSC-II、DLZ-1 型测温仪,辅助仪器为水下电视和参考测温仪。分别对被测仪器开展实验,其中, SZW-II 型仪器探头投放水深为 78 m, DSC-II 和 DLZ-1 型仪器探头投放水深均为 72 m。实验方法参照原位比较法标校过程。

实验 2 在 SY-1 井完成,所用被测仪器为 SZW-II 型测温仪。实验方法参照恒温槽比较法标校中的探头取出和放回过程,未利用恒温槽进行校准。仪器探头投放水深为 78 m。

实验 3 在 SY-2 井完成,所用被测仪器为 3 台 ZKGD3000-N 型测温仪。具体方法为:将 3 支探头的传感器位置对齐后捆绑,投放至 75 m 水深处。在 60 min 内,以 10 cm 为幅度,分别提拉和晃动测温仪线缆 5 次,每次间隔 6 min。

各项实验前,需确保被测仪器示值与井水温度达到动态平衡状态。数据处理过程中,首先计算实验水深处的水温背景噪声,即稳定时间段内观测数据经去趋势化处理后的标准差^[11]。

3 实验结果

3.1 背景噪声

实验水深处的水温背景噪声如表 1 所示,计算所用数据为稳定时间内 0:00~23:59 时段的水温分

表 1 水温背景噪声计算结果

被测仪器	实验水深/m	背景噪声/℃	
		SY-1 井	SY-2 井
SZW-II	78	0.0001	—
DSC-II	72	0.0002	—
DLZ-1	72	0.0007	—
ZKGD3000-N	75	—	0.0052 0.0055 0.0051

钟值。在 SY-1 井 78 m 水深处, SZW-II 型仪器的水温背景噪声计算结果为 0.0001℃;在 72 m 水深处, DSC-II 和 DLZ-1 型仪器的计算结果分别为 0.0002℃和 0.0007℃。

在 SY-2 井 75 m 水深处, 3 台 ZKGD3000-N 型仪器的水温背景噪声计算结果分别为 0.0051℃、0.0052℃和 0.0055℃, 平均为 0.0053℃。

3.2 原位比较法验证实验

实验 1 结果的数据特征值如表 2 所示,计算所用数据为稳定时间内 0:00~11:59 时段水温分钟值。实验前后, SZW-II 型仪器的示值变化量差值和标准差差值均为 -0.0001℃; DSC-II 型仪器的示值变化量差值和标准差差值分别为 0.0002℃和 0.0001℃; DLZ-1 型仪器的示值变化量差值相对较大,为 -0.0053℃,标准差差值为 -0.0002℃。

数据特征曲线(图 3)显示, SZW-II、DSC-II 和 DLZ-1 型仪器示值在参考测温仪探头投放后均表现出先下降、后显著上升的变化特征,上升幅度分别为 0.0922℃、0.1059℃和 0.0443℃。其中, DSC-II

表 2 原位比较法验证实验数据特征值(℃)

被测仪器	特征值	实验前	实验中	实验后	前后差值
SZW-II	示值范围	15.3527~15.3542	15.3535~15.3549	15.3533~15.3549	—
	变化量	0.0015	0.0014	0.0016	-0.0001
	标准差	0.0002	0.0002	0.0003	-0.0001
DSC-II	示值范围	15.2743~15.2788	15.2836~15.2878	15.2789~15.2746	—
	变化量	0.0045	0.0042	0.0043	0.0002
	标准差	0.0008	0.0008	0.0007	0.0001
DLZ-1	示值范围	15.2012~15.2077	15.1988~15.2061	15.1971~15.2089	—
	变化量	0.0065	0.0073	0.0118	-0.0053
	标准差	0.0012	0.0012	0.0014	-0.0002

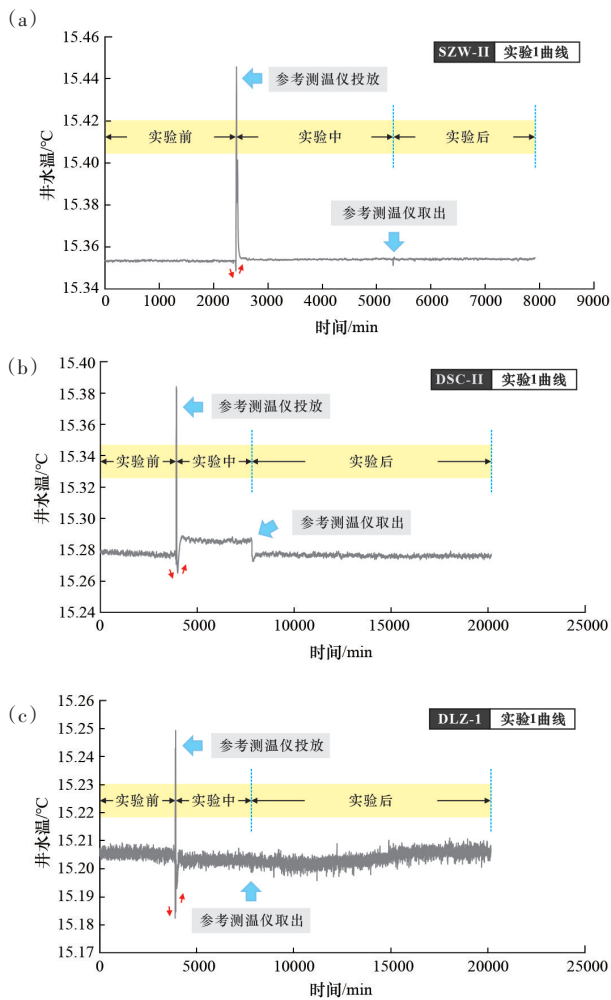


图3 原位比较法验证实验数据特征曲线

表3 恒温槽比较法验证实验数据特征值(°C)

被测仪器	特征值	实验前	实验后	前后差值
SZW-II	示值范围	15.3533~15.3549	15.3527~15.3545	—
	变化量	0.0016	0.0018	-0.0002
	标准差	0.0003	0.0003	0

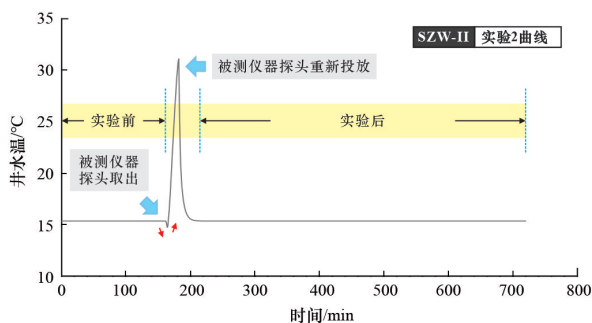


图4 恒温槽比较法验证实验数据特征曲线

型仪器示值在“实验中”阶段出现上升台阶(图3(b)),但与“实验前”阶段相比,其示值变化量仅为0.0092°C。

在参考测温仪取出阶段,SZW-II型仪器示值略微下降后恢复(图3(a)),降幅约为0.0029°C;DSC-II型仪器的示值下降,并恢复至实验前水平(图3(b)),降幅约为0.0131°C;DLZ-1型仪器示值未表现出明显变化(图3(c))。

3.3 恒温槽比较法验证实验

实验2结果的数据特征值如表3所示,计算所用数据为稳定时间内0:00~11:59时段水温分钟值。实验前后,SZW-II型仪器的示值变化量差值为-0.0002°C,标准差差值为0°C。

数据特征曲线(图4)显示,在被测仪器探头取出过程中,仪器示值表现出先略微下降,后快速上升至井外环境温度的特征。重新投放后,示值恢复至实验前水平。

3.4 线缆扰动验证实验

实验3结果的数据特征值如表4所示,计算所用数据为稳定时间内0:00~5:59时段水温分钟值。实验前后,3台被测仪器示值的变化量差值分别为0.0069°C、0.0035°C和0.0040°C;标准差接近,前后差值分别为0.0006°C、0.0001°C和0.0007°C。

由数据特征曲线(图5)可知,线缆扰动过程使被测仪器示值下降,随后在较短时间内恢复。下降幅度分别约为0.0359°C、0.0346°C、0.0393°C。

4 讨论

4.1 数据连续性

以实验过程中被测仪器数据的干扰度(ID)和统计学特征值为依据,分析移动标校方法对观测数

表 4 线缆扰动验证实验数据特征值(°C)

被测仪器	编号	特征值	实验前	实验后	前后差值
ZKGD3000-N	1	示值范围	18.7186~18.7611	18.7269~18.7625	—
		变化量	0.0425	0.0356	0.0069
		标准差	0.0068	0.0062	0.0006
	2	示值范围	18.7479~18.7894	18.7499~18.7879	—
		变化量	0.0415	0.038	0.0035
		标准差	0.0068	0.0067	0.0001
	3	示值范围	18.7222~18.7666	18.7249~18.7653	—
		变化量	0.0444	0.0404	0.0040
		标准差	0.0071	0.0064	0.0007

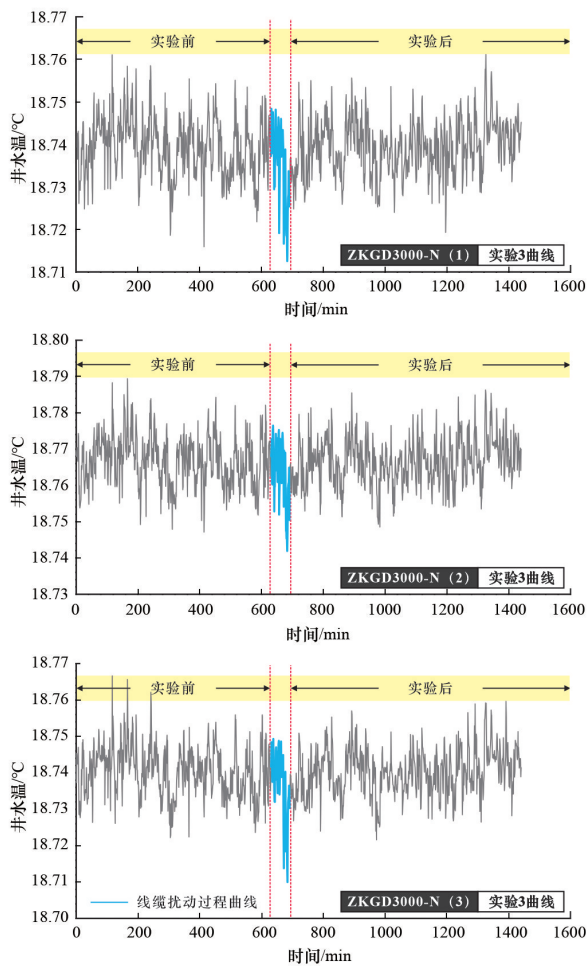


图 5 线缆扰动验证实验数据特征曲线

据连续性的影响。

ID 是环境干扰对地震地下流体观测影响程度的判别指标,为各类干扰引起的异常变化幅度与正常时段最大变化幅度的相对百分比^[6]。计算方法如式(1)所示,其中 I_{max} 为异常时段干扰引起的数据

最大值; N_{max} 为正常时段数据最大值; ND_{max} 为正常时段数据最大变化量。

$$ID = \frac{|I_{max} - N_{max}|}{ND_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

对于井水温, $ID > 50\%$ 表示出现异常,即不允许^[6]。前人使用 ID 指标对井水温异常进行了识别。例如,石小磊等^[27]通过 ID 指标判断,蚌埠监测中心井水温数据存在 10 次异常变化;金小溪等^[28]认为内蒙古通辽市库伦 CK3 井 2018 年 1 个月内的水温数据超出允许 ID 范围。

以 ID 为判据,查明实验前、后水温观测数据是否出现异常。例如,在“实验前—实验后”表述中,认为前者为正常时段,后者为可能的异常时段,通过计算实验前后 ID 值的方法,判断移动标校过程是否导致观测数据异常。 ID 值超差且特征值具有明显差异,表示标校过程导致数据不连续,反之,则证明标校过程并未对观测数据的连续性造成显著影响。

在实验井孔条件下,2 种移动标校方法对测温仪数据连续性的影响均在允许范围内。 ID 使用各实验阶段(图 3、图 4)被测仪器稳定时间内的 0:00~11:59 时段水温分钟值计算。在原位比较法验证实验中, SZW-II、DSC-II 和 DLZ-1 型仪器“实验前—实验后”(图 3)观测数据的 ID 值分别为 46.67%、2.22% 和 18.46%,数据变化量和标准差接近(表 2),实验水深处的背景噪声最大值仅为 0.0007°C(表 1)。另外,通过特征曲线(图 3)可知,被测仪器在实验前后仅记录由辅助仪器投放和取

出引起的水温变化。这些证据表明,原位比较法验证实验未引起“不允许”的数据变化。DSC-II型仪器数据在“实验中”阶段存在幅度为 0.0092°C 的温度上升变化,温度台阶现象的出现可能与井水对流引起的短暂温度异常有关。

在恒温槽比较法验证实验中,SZW-II型仪器“实验前—实验后”观测数据的ID值为25%,前后数据变化量和标准差一致(表3),并且数据特征曲线未见异常(图4)。显然,在实验井孔条件下,该实验对测温仪观测数据的影响是可接受的。

线缆扰动对测温仪数据连续性的影响甚微。利用3台ZKGD3000-N型仪器观测数据计算的线缆扰动前后ID平均值仅为3.28%。另外,实验前后时段的数据变化量和标准差接近(表3),3台被测仪器测得的背景噪声最大值仅为 0.0055°C (表1),且数据曲线未出现突跳或台阶(图4)。这表明,线缆扰动验证试验未导致观测数据连续性异常。

4.2 方法应用前景

仪器稳定性是测温仪的重要计量指标,数据漂移可视为长期稳定性的外在表现^[12]。按成因,数据漂移可分为大地热流值微变型、孔隙水上升变型和仪器零漂型^[29-30]。仪器零漂主要与器件老化引起的参数变化有关^[31],该现象普遍存在。例如,车用太等^[12]的研究结果表明,在全国范围内抽查发现的部分井水温趋势性变化与仪器零漂有关;马玉川等^[13]通过对中国大陆井水温数字化观测数据的统计研究认为,存在长期趋势性水温变化的观测点占比约24%,其中部分受仪器零漂因素影响;2000—2010年,宁波地震台ZK03井水温趋势上升变化被证实为仪器零漂所致^[32]。仪器零漂可能使水温异常识别更加困难^[13,33],并影响地震中长期监测和预测的效能^[12]。

目前,地震系统的台站运行测温仪数量已超500台/套。通常采用分析多套仪器同层水温数据的方法,即平行观测法,判断测温仪可靠性、稳定性或查找异常原因^[34-39]。丁风和等^[40]也提出,应定期对测温仪进行定标,以解决其长期动态漂移问题。本质上,平行观测法和定标法均以相同准确度仪器

作为参考仪器,不具有量值溯源性。本文提出的原位比较法和恒温槽比较法分别以更高精度的参考测温仪和一等标准铂电阻温度计为计量标准器,可以形成由国家温度计量基准向台站运行测温仪延伸的量值传递链,满足地震系统对温度量值溯源的需求。这意味着,上述方法可在仪器零漂验证、示值误差校准等方面发挥计量标准作用,为台站运行测温仪关键计量指标量值溯源问题提供潜在的解决方案,保障地下流体温度观测数据质量。

4.3 方法局限性

原位比较法和恒温槽比较法的适用范围受制于观测井的结构特征、井内仪器探头的数量、水下观测环境等因素。另外,前者仅在观测深度“点温”处对测温仪进行测试,无法实现全量程校准;后者的操作过程相对复杂,且需取出测温仪探头,增加不确定性。

实验用水下电视探头和参考测温仪探头的外径分别为50 mm和40 mm。根据地震行业标准,水温观测井的内径一般为100~200 mm^[41]。显然,受空间限制,原位比较法无法应用于架设在小内径观测井中测温仪的标校。另外,地震地下流体通常采取同孔多套仪器的观测方式,即在不同深度架设多套测温仪^[1,9,13],或水温和水位测项同井观测^[2,9]。在特殊情况下,观测井内探头和线缆数量较多。上述事实无疑增加被测仪器探头、参考标准和水下电视探头的取放难度,或直接导致移动标校方法无法实施。观测井水质和能见度等条件可能对探头定位造成影响。

针对以上方法的局限性,可对参考测温仪探头进行小型化和可视化升级,以扩大其适用范围。在实际应用中,需根据观测井和架设仪器的实际情况酌情开展测温仪移动标校工作。目前,作者所在计量创新团队已与中国计量大学合作研制第一代参考测温仪样机,并在中国计量科学研究院开展实验室测试(图6),结果表明其测量不确定度满足测温仪示值误差检测需求。团队将在不影响地震地下流体温度观测的情况下,逐步开展移动标校方法试点应用。

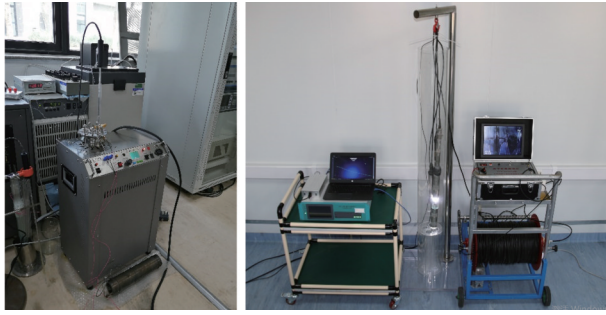


图6 参考测温仪样机实验室测试

5 结论

测温仪是重要的地震地下流体观测仪器之一,在地震预测、预报中发挥关键作用。本研究提出了2种具有量值溯源性的现场检测方法(即移动标校方法),分别为原位比较法和恒温槽比较法。基于现场实验数据,利用统计学分析方法,初步查明了移动标校过程对台站运行仪器数据连续性的影响,分析了方法的应用前景和局限性。具体方法如下。

1) 在实验井孔条件下,利用2种移动标校过程前后观测数据计算的 ID 均 $<50\%$,最大值为 46.67% ,并且前后标准差差值和示值变化量差值均较小,两者最大变化量的绝对值分别为 0.0002°C 和 0.0053°C 。这表明移动标校方法对仪器数据连续性的影响程度在可接受范围内。

2) 移动标校方法受观测井结构特征、井内仪器探头数量、水下观测环境等条件制约,存在适用范围局限性。但其可通过参考测温仪和一等标准铂电阻温度计,将测温仪的温度量值溯源至国家基准,满足地震系统对保障观测数据质量的需求。因此,本研究移动标校方法仍不失为解决台站运行测温仪量值溯源问题的潜在方案。

参考文献(References)

- [1] 刘春国, 晏锐, 樊春燕, 等. 我国地震地下流体监测现状分析及展望[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 161-172.
- [2] 陈其峰, 车用太, 刘允, 等. 传感器放置深度对水温动态特征的影响及其机理分析[J]. 地震, 2022, 42(1): 169-180.
- [3] 王广才, 车用太, 刘成龙, 等. 我国地震地下流体观测的现状和趋势[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(6): 89-96.
- [4] 刘耀炜. 我国地震地下流体科学40年探索历程回顾[J]. 中国地震, 2006, 22(3): 222-235.
- [5] 付子忠. 地壳构造与地壳应力文集[G]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [6] 车用太, 刘成龙, 鱼金子. 地下流体观测环境的评估指标: 干扰度[J]. 地震, 2005, 25(3): 63-68.
- [7] 汪集暘. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [8] Asteriadis G, Livieratos E. Pre-seismic responses of underground water level and temperature concerning a 4.8 magnitude earthquake in Greece on October 20, 1988[J]. Tectonophysics, 1989, 170(1/2): 165-169.
- [9] 王军, 何案华, 赵刚, 等. 汶川地震前井水温度异常信息的识别及其特征[J]. 中国地震, 2018, 34(3): 465-472.
- [10] 陶志刚. 地震地下流体井水位、水温观测数据集[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(3): 128-133.
- [11] 陶志刚, 刘春国. 地下流体井水温数据质量评价指标探讨[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 340-344.
- [12] 车用太, 鱼金子. 井水温度观测中有待解决的若干基本问题[J]. 中国地震, 2013, 29(3): 306-315.
- [13] 马玉川, 黄辅琼, 薛艳, 等. 泉水和井水温度长期观测资料的初步统计[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(2): 367-377.
- [14] 齐彬彬, 黄瑞滨, 郭延杰, 等. 克什克腾井水温微动态特征及其机理[J]. 华北地震科学, 2022, 40(3): 87-92.
- [15] 曾凡超, 曾兵, 孙建平, 等. 基于微型Ga-Sn共晶点的精密铂电阻温度计现场标定研究[J]. 计量学报, 2015, 36(6A): 28-31.
- [16] 任建平, 孙建平, 李婷, 等. 标准铂电阻温度计自热效应对测量结果的影响[J]. 计量学报, 2021, 42(5): 589-594.
- [17] 中国地震局. 地震观测仪器进网技术要求 地下流体观测仪 第2部分: 测温仪: DB/T 32.2—2008[S]. 北京: 地震出版社, 2008.
- [18] 胡惠民, 金祖彬, 匡绍君, 等. 地下水位变化引起的地面形变[J]. 地震学报, 1981, 3(3): 276-282.
- [19] 吴博洋, 李赫, 姚蕾, 等. 天津张道口地震台规划思考[J]. 地震科学进展, 2020, 50(8): 14-19.
- [20] 吴博洋, 李赫, 姚蕾, 等. 张道口地震台水物理测项干扰分析[J]. 四川地震, 2020(2): 25-29.
- [21] 李颖楠, 龚永俭, 徐诚, 等. 水位校测对同井孔水温的影响及机理探讨[J]. 内陆地震, 2017, 31(1): 64-70.
- [22] 天津市北辰区地方志编修委员会. 北辰区志[M]. 天津: 天津古籍出版社, 2000.
- [23] 马君钊, 张磊, 王建国, 等. 天津地区井水位固体潮观测的加卸载响应比变化与附近地震关系的研究[J]. 地

- 震地磁观测与研究, 2010, 31(2): 25-30.
- [24] 王建国, 刘春国, 陈华静, 等. 影响张道口-1井数字化水位观测内在质量的因素[J]. 内陆地震, 2007, 21(2): 155-159.
- [25] 张有昌, 李一兵, 邓守琴, 等. 张道口台热水井地热最佳观测层选择的研究[J]. 华北地震科学, 2000, 18(1): 72-77.
- [26] 马文娟, 赵刚, 李芳芳, 等. 水温前兆台网观测井条件研究[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 178-182.
- [27] 石小磊, 李良辉. 蚌埠监测中心井水位、水温干扰度评估[J]. 国际地震动态, 2017, 47(9): 18-22.
- [28] 金小溪, 吴哲, 李泽胤. 内蒙古通辽市库伦CK3井水位、水温数据异常特征研究[J]. 防灾减灾学报, 2018, 34(4): 81-87.
- [29] 车用太, 刘喜兰, 姚宝树, 等. 首都圈地区井水温度的动态类型及其成因分析[J]. 地震地质, 2003, 25(3): 403-420.
- [30] 李仲巍, 梁国经, 郑双凤, 等. 抚松井水温动态特征分析[J]. 防灾减灾学报, 2012, 28(1): 75-79.
- [31] 何案华, 邓卫平, 李国佑. 青海地热台网温度漂移问题初步分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(10): 1083-1086.
- [32] 邱永平. 宁波地震台ZK03井水温平行观测资料的对比分析[J]. 中国地震, 2011, 27(4): 431-437.
- [33] 杨振鹏, 孙素梅, 张丽, 等. 辽阳灯塔5.1级地震前后辽宁地区前兆资料研究[J]. 防灾减灾学报, 2015, 31(4): 25-30.
- [34] 何案华, 赵刚, 薛娜, 等. 沙河地震台地热对比观测分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 51-54.
- [35] 杨明波, 郑轶文, 邢成起, 等. 水温传感器放置深度研究现状[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(3): 83-89.
- [36] 王海涛, 贾秀玲, 张彦吉, 等. 通河地震台同井同层不同水温设备平行观测分析[J]. 防灾减灾学报, 2016, 32(4): 56-60.
- [37] 李滔, 王永刚, 李国佑. 青海省井孔水温观测结果分析: 以德令哈等5个观测井为例[J]. 防灾科技学院学报, 2016, 18(3): 74-80.
- [38] 陈健, 仇中阳, 刘江斌, 等. 苏06井不同深度水温变化特征与地震活动关系对比分析[J]. 高原地震, 2018, 30(2): 8-15.
- [39] 刘迁, 栗宁, 胡发瑞, 等. 钟祥马岭井水温观测数据“V”型异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(2): 123-130.
- [40] 丁风和, 韩晓雷, 哈里白, 等. 通辽井水位和水温动态变化影响因素分析[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 49-53.
- [41] 中国地震局. 地震台站建设规范 地下流体台站 第1部分: 水位和水温台站: DB/T 20.1—2006[S]. 北京: 地震出版社, 2006.

Experimental study on the field detection methods of seismic water temperature observation instrument and its influence on the continuity of observation data

MING Xiaoran, LI Wenyi*, WANG Zhongbiao, TIAN Xingyu, ZHU Chuandong, TANG Rong

The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract Seismic water temperature observation instruments (abbreviated as thermometer) plays a key role in short and imminent earthquake prediction. However, for a long time, there has been a lack of field detection method with quantitative traceability, which is, mobile calibration method. In this paper, two kinds of mobile calibration methods of thermometers, namely in situ comparison method and constant temperature chamber comparison method, are proposed, and the influence of these methods on the continuity of observation data is preliminarily verified by field experiments. The results show that under the conditions of the experimental well, the standard deviations of the observation data of the measured instrument before and after mobile calibration are close, with the maximum difference of -0.0002°C , the maximum difference of the variation amplitude of the indication value of -0.0053°C , and the calculated results of interference degree (*ID*) of all $<50\%$. The influence of mobile calibration method on instrument data continuity is in the acceptable range. Although the method has some limitations in the scope of application, it is still a potential scheme to realize the traceability of station operating thermometers.

Keywords seismic water temperature observation instrument; field detection; mobile calibration; data continuity; traceability ●



(责任编辑 赵庆圆)