

DOI: 10.19364/j.1674-9405.2024.06.012

# 悬锤式水位计零值误差检定方法研究与应用

史占红<sup>1,2</sup>, 戚珊珊<sup>1</sup>, 胡勇飞<sup>1</sup>, 陈欣刚<sup>1</sup>, 周川辰<sup>1</sup>

(1. 水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心, 江苏 南京 210012; 2. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 地下水水位自动监测仪器需要定期通过人工测量地下水水位埋深的方法进行比测校准, 悬锤式水位计是最常用的人工测量仪器, 可用于比测校准, 故悬锤式水位计测量准确性会直接影响自动监测仪器测量数据的准确性。通过研究悬锤式水位计的结构组成与工作原理, 分析导致测量误差的影响因素, 提出1种基于稳定测量液面的悬锤式水位计零值误差检定方法, 并对基于该方法研制的检定装置进行试验验证。试验结果表明: 本检定方法相较于用游标卡尺检定更符合悬锤式水位计的实际应用场景, 装置的测量结果不确定度满足悬锤式水位计零值误差的检定校准要求, 将有效提升悬锤式水位计零值误差检定校准的适用性和准确性, 为悬锤式水位计零值误差的检定和校准提供较新的方法与手段, 具有很好的实用性。

**关键词:** 悬锤式水位计; 零值误差; 示值误差; 检定装置; 不确定度

中图分类号: P332

文献标识码: A

文章编号: 1674-9405(2024)06-0071-04

## 0 引言

地下水监测是对地下水水位、水温、水量和水质等动态要素进行监测的过程, 是地下水管理和开发利用不可或缺的基础工作和重要技术支撑<sup>[1]</sup>。地下水水位也是工程地质分析评价和地质灾害防护治理中1个极其重要的监测指标。目前地下水水位监测的常用仪器包括压力式<sup>[2]</sup>、悬锤式<sup>[3]</sup>、浮子式<sup>[4]</sup>和跟踪式<sup>[5]</sup>等水位计, 其中悬锤式水位计因具有仪器结构简单直观、操作灵活方便、测量精度较高等优点, 被广泛应用于地下水水位及大坝渗流的人工观测<sup>[6]</sup>等领域。

GB/T 51040—2023《地下水监测工程技术标准》要求地下水水位自动监测仪器应定期进行人工比测, 依据6.2.4条的规定, 不同的埋深条件下, 比测误差绝对值要分别满足不应大于2~5 cm的要求<sup>[7]</sup>。

悬锤式水位计测量准确性相对较高, 测量精度可达到±1 cm/100 m。测尺的长度最大可为500 m, 可用于测量不同地区地下水水位埋深与变幅<sup>[8]</sup>。在安装地下水水位自动测量仪器时, 通常使用标准钢尺或悬锤式水位计测量地下水初始埋深值, 并对自动测量值进行订正。悬锤式水位计的现场比测也可作为地下水水位自动测量仪器运行期间定期校准的常用方法<sup>[9]</sup>。因

此当悬锤式水位计测量值作为标准量值时, 本身的测量准确性至关重要。为此, 本研究通过对比研究现行标准规范对悬锤式水位计零值误差的检定方法, 提出1种基于稳定测量液面的悬锤式水位计零值误差检定方法, 并对基于该方法研制的检定装置进行试验验证。

## 1 悬锤式水位计误差分析

悬锤式水位计一般由悬锤、尺带、接触水面指示装置等组成, 结构示意图如图1所示。悬锤式水位计采用柔性、伸缩率极小的特殊材料作为悬索尺带, 下面挂有带触点的重力锤, 悬索上带有导线, 用于连接触点和接触水面指示装置。当悬锤上的触点接触水面时, 发出音响或指针指示, 从尺带上读取测量值, 即可换算为地下水水位。悬锤式水位计根据工作方式分为手动式和自动跟踪式2种水位计<sup>[10]</sup>。

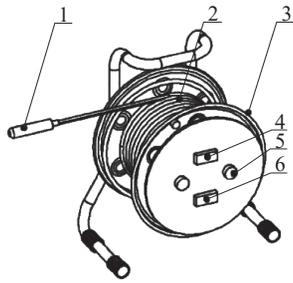
GB/T 11828.3—2012《水位测量仪器第3部分: 地下水水位计》中, 地下水水位计包含多种类型, 但各水位计准确度等级要求的最大允许误差没有按不同类型的水位计分别进行定义, 具体准确度等级允许误差如表1所示<sup>[11]</sup>。

JJG(交通) 168—2020《水位计检定规程》(仅针对悬锤式水位计)中, 规定了悬锤式水位计示值误差

收稿日期: 2024-03-18

基金项目: 南京水利科学研究院基本科研业务费项目(Y524012)

作者简介: 史占红(1978—), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 主要从事水文计量及水利信息化方面的研究工作。E-mail: szh\_watic@163.com



1—悬锤；2—尺带；3—绕线盘；  
4—峰值指示器；5—蜂鸣器；6—电池槽

图1 悬锤式水位计结构示意图

表1 GB/T 11828.3—2012 规定的地下水水位计  
准确度等级允许误差

准确度等级	允许误差	
	水位变幅小于等于 10 m	水位变幅大于 10 m
1	$\leq \pm 1 \text{ cm}$	$\leq \text{全量程的} \pm 0.1\%$
2	$\leq \pm 2 \text{ cm}$	$\leq \text{全量程的} \pm 0.2\%$
3	$\leq \pm 3 \text{ cm}$	$\leq \text{全量程的} \pm 0.3\%$

的要求为  $\pm (1 \text{ mm} + 2 \times 10^{-4} L)$  ( $L$  为水位计的标称长度, 单位为 m)<sup>[12]</sup>。

测深钢卷尺与悬锤式水位计工作原理类似, 主要由尺带和测深尺砣组合而成, 结构示意图如图 2 所示。JJG (交通) 168—2020《水位计检定规程》与本研究提出的检定方法均与 JJG 4—2015《钢卷尺检定规程》相同, 将悬锤式水位计的示值误差分为尺带示值与零值 2 种误差, 其中测深钢卷尺的零值误差要求尺砣零点基准面到尺带 500 mm 线纹处的最大允许误差为  $\pm 0.5 \text{ mm}$ , 尺带示值误差要求如表 2 所示<sup>[13]</sup>。



图2 测深钢卷尺结构示意图

表2 测深钢卷尺示值最大允许误差

标称长度 $L/\text{m}$	最大允许误差/mm	
	首次检定	后续检定
$0 < L \leq 30$	$\pm 1.50$	$\pm 2.0$
$30 < L \leq 60$	$\pm 2.25$	$\pm 3.0$
$60 < L \leq 90$	$\pm 3.00$	$\pm 4.0$

对造成悬锤式水位计测量误差的影响因素进行分析可知, 悬锤式水位计尺带示值误差一般由温度变化引起的热胀冷缩及尺带受力变形导致, 零值误差一

般由悬锤上的水位电触点有变形、脏污、信号传输, 或者悬锤与尺带连接处有松动或变形导致。

## 2 悬锤式水位计示值误差检定方法及存在问题

针对悬锤式水位计示值误差的检定方法在相关标准规范中都有提到。GB/T 11828.3—2012《水位测量仪器第 3 部分: 地下水水位计》中, 地下水水位计测量误差的试验设备为 10 m 水位试验台, 该标准没有对不同工作原理的水位计试验方法进行描述, 只是规定在 10 m 水位变化范围内, 将地下水水位计测量值与标准水位值进行多点比较。因 10 m 水位试验台的水位变化是一个相对量, 无法通过该方法测量出悬锤式水位计测量示值的绝对误差值。

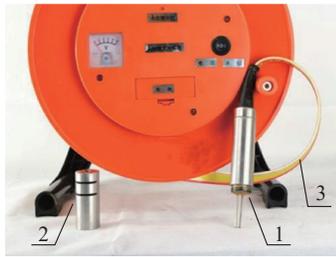
JJG 4—2015《钢卷尺检定规程》中, 明确了测深钢卷尺尺带示值与零值误差的检定方法。与普通钢卷尺一样, 测深钢卷尺在卷尺检定台上和标准钢卷尺进行比较, 从而得到尺带示值误差。测深钢卷尺的零值误差是测量测深尺砣顶端零点基准面到尺带 500 mm 线纹处的长度, 而测深尺砣是一金属实体, 物理顶端即为零点基准面, 不存在电信号处理等要求, 因此该规程中零值误差检定方法仅满足测深钢卷尺的检定要求, 无法适用于悬锤式水位计零值误差的检定校准。

JJG (交通) 168—2020《水位计检定规程》中, 虽然只对水位计的示值误差提出指标要求, 但在检定方法中将示值误差的检定分为以下 2 个步骤: 1) 使用游标卡尺测量悬锤式水位计测头接触点至尺带 0.2 m 刻线处的长度, 计算该受检段的示值误差; 2) 在检定台上通过与标准钢卷尺比较, 分段检定尺带的示值误差。第 1 个步骤即是对悬锤式水位计的零值误差进行检定。

悬锤式水位计的悬锤不是金属实体, 在金属保护外壳内部有 2 个电极触点, 零值位置通过 2 个电极触点接触水面后发出的电信号确定, 水位计探头结构示意图如图 3 所示。JJG (交通) 168—2020《水位计检定规程》中通过游标卡尺对电极端点至 0.2 m 刻线进行测量较难操作。由于 2 个电极触点不一定在同一平面, 且在实际测量过程中, 电极端点触水信号并非为最强信号点, 可能需要电极入水一定深度后才能产生较强的测量电信号, 因此检定时认定的零值位置与实际测量过程中的零值位置可能不一致。

## 3 悬锤式水位计零值误差检定装置及方法

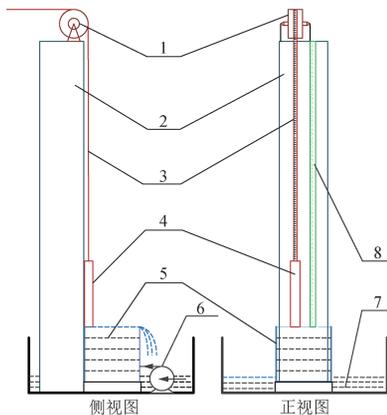
为解决悬锤式水位计零值误差检定中存在的问题, 提出 1 种能够模拟实际测量过程零位液面的检定装置及方法, 用于检定悬锤式水位计的零值误差。



1—电极触点; 2—触点保护盖; 3—尺带

图3 悬锤式水位计探头结构示意图

悬锤式水位计零值误差检定装置主要由 500 mm 长度的标准钢直尺、滑轮、检定支架、溢流水泵、标准零位液面容器、水箱等组成,结构示意图如图 4 所示。



1—滑轮; 2—检定支架; 3—尺带; 4—悬锤; 5—标准零位液面容器;  
6—溢流水泵; 7—水箱; 8—标准钢尺

图4 检定装置结构示意图

标准零位液面容器中的水平面与作为标准器的钢尺零刻度线保持一致。检定校准过程中,由于悬锤进入和提出水体时导致液面变化,因此,加设 1 套微型溢流补水装置,使检定用容器的水平面产生恒定溢流,从而保证在检定校准过程中标准零位液面容器中的水平面保持不变。检定校准时,标准零位液面容器中盛满水,打开水箱中的溢流水泵向标准零位液面容器补水,使标准零位液面容器在检定校准过程中始终处于满水溢流的状态,钢直尺安装于基座上,钢直尺垂直于水面且零刻度线与水面对齐。

检定零值误差时,将悬锤式水位计的尺带贴合悬挂于滑轮上,悬锤自然垂落于盛水容器上方,悬锤式水位计重锤缓慢滑入水中,尺带与钢直尺平行,当水位计的指示器发出音响或指针偏转指示时,上下微调悬锤位置,在指示器声音洪亮或指针偏转稳定时,读取悬锤式水位计的尺带在钢直尺 500 或 200 mm 刻线对齐处的数值,该数值与 500 或 200 mm 相减即得到悬锤式水位计的零值误差。

悬锤式水位计零值误差检定装置的主要技术指

标如下: 检定装置有效测量范围为 0~500 mm,最大允许误差不超过  $\pm 1$  mm,适用环境温度为 15~25  $^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4 悬锤式水位计零值误差测量结果不确定度评定

经过分析,引起悬锤式水位计零值误差测量结果不确定度的分量主要有钢直尺示值误差、标准零位液面与钢直尺 0 mm 刻线之间误差引入的不确定度分量。钢直尺(标称长度为 500 mm)的最大允许误差为  $\pm 0.15$  mm。液位与钢直尺 0 mm 刻线之间的误差,主要是因水体与钢直尺接触时的吸附张力产生的误差,可控制在  $\pm 0.5$  mm 以内。

500 mm 钢直尺的最大允许误差为  $\pm 0.15$  mm,则区间半宽为 0.15 mm,按均匀分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ ,则由钢直尺引入的标准不确定度分量  $u_1 = 0.15 / \sqrt{3} = 0.087$  mm。标准零位液面的最大允许误差为  $\pm 0.5$  mm,则区间半宽为 0.5 mm,按均匀分布, $k = \sqrt{3}$ ,则标准零位液面引起的标准不确定度分量  $u_2 = 0.5 / \sqrt{3} = 0.29$  mm。零值误差检定装置的合成标准不确定度  $u_{c\text{零值}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.3$  mm,扩展不确定度  $U = k \cdot u_{c\text{零值}} = 0.6$  mm ( $k = 2$ )。

零值误差测量结果的扩展不确定度满足最大允许误差不超过  $\pm 1$  mm 的技术指标要求,因此本装置可用于悬锤式水位计的零值误差检定校准。

#### 5 悬锤式水位计零值误差检定装置的应用

选取国产悬锤式水位计,在某一天温度为 22  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度为 65%RH 的环境下,分别采用零值误差检定装置与游标卡尺进行检定测试。零值误差检定装置使用钢直尺作为标准示值的检定数据如表 3 所示。

表3 零值误差检定数据(零值误差检定装置) mm

测次	标准示值	尺带示值	测量误差	误差平均值
1		500.8	0.8	
2		500.6	0.6	
3		500.8	0.8	
4	500.0	500.8	0.8	0.8
5		500.8	0.8	
6		500.8	0.8	

依据 JJG(交通) 168—2020《水位计检定规程》,在同一天、同样的测试环境下,使用游标卡尺作为标准示值对悬锤式水位计的零值误差进行 6 次重复测量,得到零值误差的平均值为 0.30 mm。

以上 2 种方法测得的零值误差结果相差 0.50 mm,使用游标卡尺作为标准示值的零值误差偏小。2 种

方式测得的零值误差差异主要是探针接触水面的深度差异导致的,是悬锤式水位计在实际使用过程中,探针入水导通电路后,蜂鸣器发出声响时才进行读数,动作有滞后所致。本检定装置检定方法更能体现现场的实际应用情况。

## 6 结语

通过对悬锤式水位计零值误差形成原因及现有检定方法的研究和分析,提出了1种新的适用于悬锤式水位计零值误差的检定装置和方法。检定装置通过保持标准零位液面容器满水溢流状态,得到准确稳定的水位零点位置,经与标准钢尺比测,获得悬锤式水位计的零值误差。通过对零值误差测量结果不确定度的评定,本装置的测量不确定度满足最大允许误差不超过 $\pm 1\text{ mm}$ 的技术指标要求,可用于悬锤式水位计的零值误差校准。对本装置和方法与游标卡尺检定方法进行对比试验,试验数据表明本检定装置和方法使用简单、方便,更能反映仪器实际使用的测量准确性问题,可有效解决悬锤式水位计原有零值误差检定校准方法与实际应用不一致的问题,提升零值误差检定校准的准确性,为悬锤式水位计零值误差的检定校准提供新的方法与手段。

## 参考文献:

[1] 杨建青,章树安,陈喜,等.国内外地下水监测技术与管理比较研究[J].水文,2013,33(3): 18-24.

[2] 王绍东,欧俊辰.压力式水位计在长江数字航道水位监测中的应用案例[J].中国水运,2023(增刊2): 34-37.

[3] 焦连喜.悬锤式水位观测仪[J].水利水电自动化,1993(4): 50-51.

[4] 陈杰中,吴宁声.便携式浮子式水位计检验测试装置设计[J].江苏水利,2022(1): 23-28.

[5] 董万钧,刘婕,董波,等.跟踪式细管径水位计的设计[J].水利信息化,2016(1): 44-47,59.

[6] 王爱平,杨建青,杨桂莲,等.我国地下水监测现状分析与展望[J].水文,2010,30(6): 53-56.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地下水监测工程技术标准:GB/T 51040—2023[S].北京:中国计划出版社,2023: 34.

[8] 姚永熙.地下水监测方法和仪器概述[J].水利水电自动化,2010(1): 6-13.

[9] 杨春生,英爱文.国家地下水监测工程自动监测仪器的质量控制和运行维护[J].地下水,2020,42(6): 51-53.

[10] 姚永熙.水文仪器与水利水电自动化[M].南京:河海大学出版社,2001: 43.

[11] 中华人民共和国水利部.水位测量仪器 第3部分:地下水水位计:GB/T 11828.3—2012[S].北京:中国标准出版社,2012: 2.

[12] 中华人民共和国交通运输部.水位计检定规程:JJG(交通)168—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020: 3.

[13] 国家质量监督检验检疫总局.钢卷尺检定规程:JJG 4—2015[S].北京:中国标准出版社,2015: 3.

## Research and application of zero-value error calibration method for plumb bob type water level meters

SHI Zhanhong<sup>1,2</sup>, QI Shanshan<sup>1</sup>, HU Yongfei<sup>1</sup>, CHEN Xingang<sup>1</sup>, ZHOU Chuanchen<sup>1</sup>

(1. *Inspecting and Testing Center for Hydrological & Geotechnical Instrument's Quality, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*; 2. *Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*)

**Abstract:** Automated groundwater level monitoring instruments require periodic calibration by manual measurement of the groundwater depth. The plumb bob type water level meter, a commonly used manual measuring device, is frequently employed for calibration purposes. Therefore, the accuracy of the plumb bob type water level meter directly affects the measurement data from automated monitoring instruments. By studying the structure and working principles of the plumb bob type water level meter and analyzing the factors contributing to measurement errors, this paper proposes a new method for calibrating the zero-value error of the plumb bob type water level meter, based on a stable water surface. A testing device developed based on this method was experimentally validated. The results show that this calibration method is more suited to the practical application of the plumb bob type water level meter compared to using a vernier caliper. The uncertainty of the device's measurement results meets the calibration requirements for zero-value errors in plumb bob type water level meters. This method significantly enhances the applicability and accuracy of zero-value error calibration, offering a novel approach for the calibration of zero-value errors in plumb bob type water level meters with strong practicality.

**Key words:** plumb bob type water level meter; zero-value error; indication error; calibration device; uncertainty

(责任编辑:陆燕)