

佟恹维, 沈仰平, 何冰, 等. 水量和浑浊度同步监测新型电磁水表的设计与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 159-166.

Tong Y W, Shen Y P, He B, et al. Design and application of a novel electromagnetic water meter in synchronized monitoring of water quantity and turbidity[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 159-166.

水量和浑浊度同步监测新型电磁水表的设计与应用

佟恹维^{1,*}, 沈仰平², 何冰², 崔岩¹

(1. 北京市自来水集团有限责任公司管网管理分公司, 北京 100089; 2. 上海肯特仪表股份有限公司, 上海 200000)

摘要 【目的】近年来,北京市自来水始终秉承“水质是生命”的质量观,努力让供水品质更加可靠,以“管网水质安全”为工作目标,在多水源供水格局下尝试通过多种技术手段做好水质管理工作。但面对水质问题的突发性、复杂性,如何将问题前置,由“被动处置”转变为“未诉先动”,是当前水质安全管理面临的重要问题,因此水质实时监测、检测的时效性及覆盖度显得尤为重要。【方法】浑浊度作为一项重要的水质监测指标,在大多数水厂中被列为出厂水必须监测的指标,结合现阶段小区分区计量(DMA)建设的基础,在小区进水口的流量计量装置增加浑浊度监测参数,一方面可以监测小区庭院管网的物理漏失,另一方面可以实现管网末端的水质监测,保障居民用水安全。【结果】为此研发兼具浑浊度监测功能的电磁水表,实现水质异常的实时感知。选择2个DMA小区开展测试工作,结合北京市供水管网特点,深入分析技术的适用性及效果,利用便携式浊度仪比对表端浑浊度数据,便携式浊度仪测量结果为0.09 NTU,表端测量结果为0.17 NTU,比对数据误差小于0.1 NTU,符合预期。【结论】水质安全是管网管理的重中之重,DMA是管网漏损管理的有效技术手段,将二者融合可实现水质管理与漏损控制一手抓,进一步提升管网管理水平,为智慧管网提供坚实数据基础。小区进水口安装带有浑浊度监测功能的电磁水表,全面实现管网末端水质常态化监测,为水质安全增加一道屏障。

关键词 浑浊度 分区计量(DMA) 水质监测 漏损管理 电磁水表

中图分类号: P747 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)04-0159-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.018

Design and Application of a Novel Electromagnetic Water Meter in Synchronized Monitoring of Water Quantity and Turbidity

Tong Yiwei^{1,*}, Shen Yangping², He Bing², Cui Yan¹

(1. Pipeline Management Sub-Company, Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2. Shanghai Kent Instrument Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract [Objective] In recent years, Tap water in Beijing City has always adhered to the quality concept that "water quality is life", striving to make water supply more reliable. With the goal of "enhancing the safety of pipe network water quality," it has attempted to monitor and address water quality issues in the pipeline network through various means under a multi-source water supply framework. However, given the suddenness and complexity of water quality issues, a critical challenge in current water quality safety management is how to shift from a "reactive approach" to "proactive intervention" before complaints arise. Therefore, the timeliness and coverage of real-time water quality monitoring and testing have become particularly important. [Methods] Turbidity, as a key water quality monitoring indicator, is listed as a mandatory indicator for finished water in most water treatment plants. Building on the current foundation of district metering area (DMA) construction in residential communities, adding a turbidity monitoring parameter to the flow measurement device at the community inlet could serve two purposes: monitoring physical losses in the community's pipeline network and enabling real-time water quality monitoring at the end of the pipeline network to ensure residents' water safety. [Results] To this end, an electromagnetic water meter with turbidity monitoring functionality had been developed to enable real-time detection of water quality anomalies. Tests were conducted in two DMA communities. Based on the characteristics of water supply network in Beijing City, the applicability and effectiveness of the technology were thoroughly analyzed. Portable turbidimeters were

[收稿日期] 2025-12-19

[通信作者] 佟恹维(1989—),男,高级工程师,主要从事供水管网运行管理等工作,E-mail:tongyiweihot@163.com。

used to compare turbidity data from the meter. The portable turbidimeters measured 0.09 NTU, while the meter reading was 0.17 NTU. The error between the compared data was less than 0.1 NTU, meeting expectations. [**Conclusion**] Water quality safety is a top priority in pipeline network management, and DMA is an effective means of managing pipeline leakage. Integrating the two can enhance the management level of pipeline networks and represents an important step toward achieving smart pipeline networks. Installing electromagnetic water meters with turbidity monitoring functionality at community inlets enables comprehensive and regular monitoring of water quality at the end of the pipeline network, adding an extra layer of protection for water quality safety.

Keywords turbidity district metering area(DMA) water quality monitoring leakage control electromagnetic water meter

目前,针对河流、地下水等水源的水质研究较为广泛^[1-2],供水管网的水质监测多采用定期取水监测或在特定点位建立监测点的方式,对于管网末梢很难实现覆盖式的实时监测,如2025年7月余杭区发生自来水发黄事件,居民用水水质的实时监测对于保障供水安全,提升供水服务质量具有重要意义。近年来,国家已将管网漏损控制提升到战略高度,《“十四五”节水型社会建设规划》明确提出:到2025年,全国城市公共供水管网漏损率要力争控制在9%以内。管网漏损会破坏水力平衡,导致远端或高层用户水压不足。同时,漏点可能吸入污染物,破损的管道内壁容易滋生细菌、产生锈蚀,影响水质。控制漏损是保障“从水厂到龙头”全过程水质安全的基础。北京市自来水集团在全市范围内已累计建设完成4 000余处分区计量(DMA),小区考核表的广泛覆盖为市政管网最末端的水质监测提供了新的思路。部分地区的供水公司通过二次供水泵房监测小区的水质情况,但北京市的二次供水泵房尚处于产权与管理权分离的格局,无法全面掌控二次泵房的水质状态,且二次供水泵房仅能监测二次供水相关楼层的水质情况,对于采用市政直供的低楼层无法实现全面监管。

现阶段对于小区庭院管网的漏损管理和水质监测需要采用2个体系:一方面,安装小区考核表监测夜间最小流量;另一方面,通过二次供水泵房监测水质,建设与运维成本高且无法实现漏损数据与水质数据的有效关联。若将小区DMA与水质监测相结合,将具有以下几个优点。第一,可以有效节省建设成本,仅安装一个设备可以实现2个重要参数的监测;第二,便于管理,相关人员仅需关注一个设备的监测数据和运行状态,减少现场巡检与运维工作量;第三,解决水质监测覆盖较少的问题,利用小区DMA建设可实现水质监测点的普遍覆盖,全面掌握管网末梢的水质状态;第四,节约用水成本,常规在

线浊度仪需进行取水检测,预计每台设备每年测试饮用水近300 m³,管网内水质实时监测可有效节约制水成本及人工水质检测成本。集成水质监测功能的考核表可实现一表两用,漏损和水质双向管理,可有效降低成本,保障管网末梢的水质安全。

浑浊度是水体透明度的量度,反映光在水体中受阻的程度,表现为一种光学效应^[3],是衡量水质良好程度的核心指标之一。水体浑浊度反映水体中悬浮颗粒物、胶体、浮游生物和微生物等物质的特征与数量,欧美等国家都将水体浑浊度作为饮用水卫生标准和水质安全检测重要参数^[4]。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将龙头水的浑浊度最高限值定为1 NTU。实际上,许多水厂的出厂水内控标准更为严格,常控制在0.3 NTU,北京市更是低至0.1 NTU。水的浑浊度不但是感官指标,也是间接的微生物指标,反映水体中病原微生物的含量,直接关系到居民用户的用水安全。

针对浑浊度测试方法的研究^[5-8]已比较广泛,采用美国国家环境保护局(EPA)和国际标准化组织(ISO)等机构规定的标准方法90°散射光法的浑浊度传感器已较为成熟,电磁水表作为纯电子式水表可为浑浊度传感器提供电源和数据传输通道,故可基于浑浊度研发一款两用电磁水表。集成浑浊度测量传感器于电磁水表,并保持水表的国标尺寸,方便在实际应用中安装使用。为验证其在实际环境中应用的数据准确性和稳定性,选择2个DMA小区开展实践探究,为后期的广泛应用提供数据支持。

1 浑浊度光源的选择

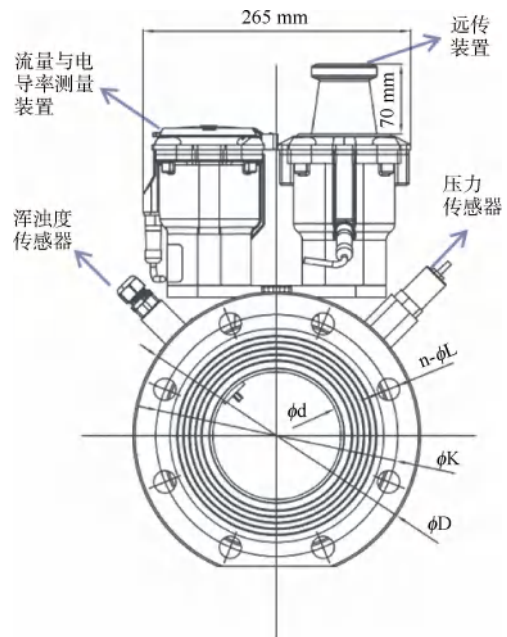
在国际领域广泛应用2个浑浊度测量标准,《水中浊度的散射光测定标准方法》(EPA 180.1)采用峰值波长为400~600 nm的卤素钨灯为浑浊度光源,而*Water Quality—Determination of Turbidity—Part 1: Quantitative Methods*(ISO 7027-1:2016)标准采用的峰值波长为860 nm左右的红外发光二极管

(LED)^[9],标准规定浑浊度测定基于 90°光散射原理。研究表明,选择 LED 作为光源,具有效率高、发热小、寿命高、维护简单等优点^[10]。根据低浊的光谱敏感特性及标准的测量方式,本文选用低浊敏感度最高的 LED 光源,波长 400~600 nm 的白光光源作为检测光,功耗更低,光源可实现 3 000 h 无衰减,可满足锂电池供电条件下的长期应用。

2 表体结构设计

目前,在小区进水口广泛应用的计量装置主要分为机械水表和电子式水表,其表体长度主要依据《冷水水表》(GB/T 778—1996)^[11]和《封闭满管道中水流量的测量 饮用水冷水水表和热水水表》(GB/T 778—2007)^[12],为减少设备在安装和更换过程中的成本,本文设备在不改变常规电磁水表表体长度的基础上增加浑浊度传感器,一旦有突发水质异常情况,可有效减少处置时间,更好地保障居民用水安全。

本文设计的带有浑浊度测量功能的电磁水表^[13](以下简称“新设备”)结构如图 1 所示,表体主要由电磁水表传感器、转换器、压力传感器、浑浊度传感器、远传装置 5 个主要部分构成。其中电磁水表传感器和转换器可实现管道流量的监测,压力传感器监测管道的压力变动情况,浑浊度传感器监测管道自来水的的水质情况。浑浊度测量采用插入式传感器,其结构如图 2 所示,由光源、感光元件、清洁



注: n —法兰孔数量; D —法兰外径; d —导流管内径; K —法兰螺栓孔心距; L —法兰孔径。

图 1 带有浑浊度测量功能电磁水表的结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of an Electromagnetic Water Meter Equipped with Turbidity Measurement Function

刷和电极组成,浑浊度测量时自动触发清洁刷清理光源和感光元件表面,以保证测量时不被杂质干扰。新设备的各项数据通过远传装置上传到数据管理平台进行分析应用,同时表端设置“逢变则报”功能,当流量、压力或浑浊度数据超过阈值,表端自动触发

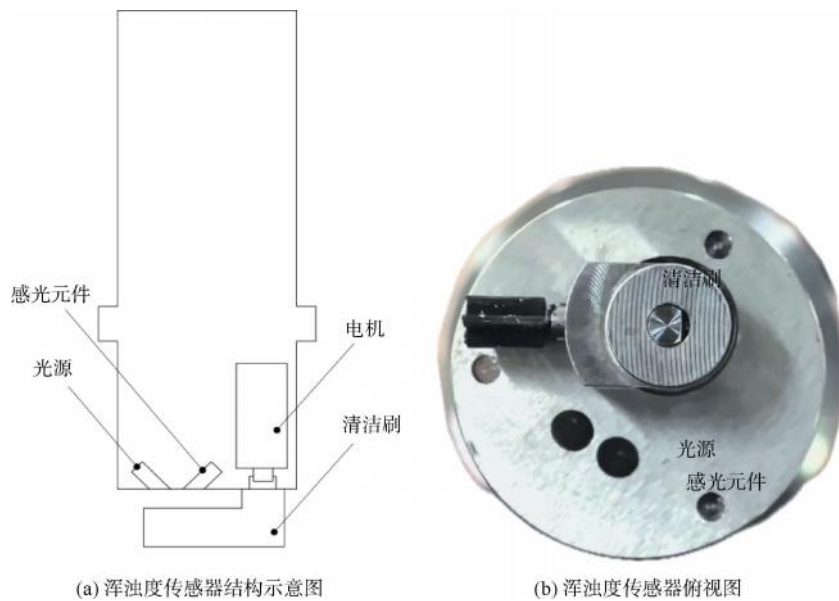


图 2 浑浊度传感器结构图

Fig. 2 Diagram of Turbidity Sensor Structure

异常数据报警,实现管网末梢状态的动态实时监测,提高突发状况的处置效率。

3 试验测试

为验证新设备的浑浊度测量准确性能否满足低浑浊度状态下的浑浊度测量要求,在实验室采用串联比对的方式对新设备进行评测,选择精度和重复性优于1%的高精度低量程在线浊度仪作为测量标准。以1 min 1个浑浊度数据的频率连续测试20 d,新设备与在线浊度计的浑浊度测量结果如图3所示,两者的数据趋势呈现良好的一致性和重复性,测试误差平均值约为0.07 NTU,符合预期试验要求,可实现低浑浊度状态的水质监测。

在实际应用过程中,新设备不仅需要实现浑浊度的实时监测,当突发浑浊度变化时需具备及时预警的功能。测试新设备“逢变则报”功能,向测试水箱倒入一定量高浑浊度的液体,新设备报警阈值设定为0.6 NTU。当管道内浑浊度超过阈值时,自动触发信息上报,在平台端呈现预警(图4),可实现突发事件的及时响应。

4 DMA 实践应用

通过试验测试和模拟数据分析,新设备满足测量准确性和稳定性的要求,为进一步验证其在实际工况条件下的应用性能,分析不同水厂管网末端的水质情况,选择2个不同行政区域的小区展开实践应用测试,安装带有浑浊度监测功能的电磁水表作为小区考核表,依据监测数据分析管网末端的水质

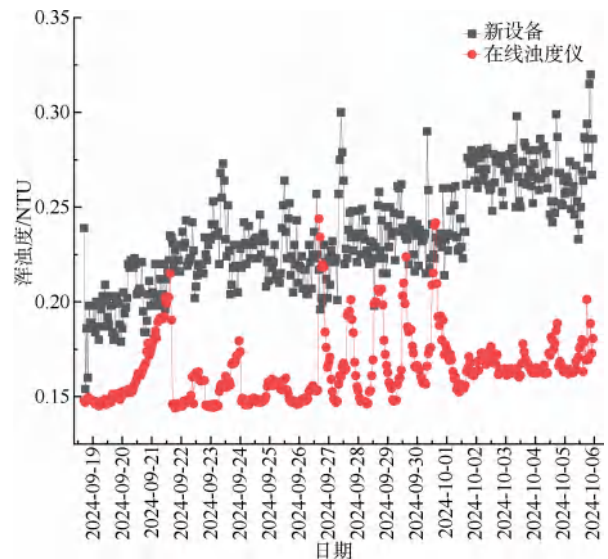


图3 新设备与在线浊度仪测试比对数据

Fig. 3 Comparison Data of New Equipment and Online Turbidity Meter Test

及庭院管网的漏损情况。

4.1 小区概况

第一处DMA小区位于北京市丰台区(以下简称“DMA1”),为2020年新建小区,其小区管线总长为1.4 km,材质为球墨铸铁,小区内居民用户为1704户,非居民用户为58户,夜间均不营业,是较为典型的居民小区。第二处DMA小区位于北京市海淀区(以下简称“DMA2”),为2000年改造的老旧小区,其小区管线总长为713 m,材质为球墨铸铁,房屋总数为417户。2个小区均只有一个进水口,

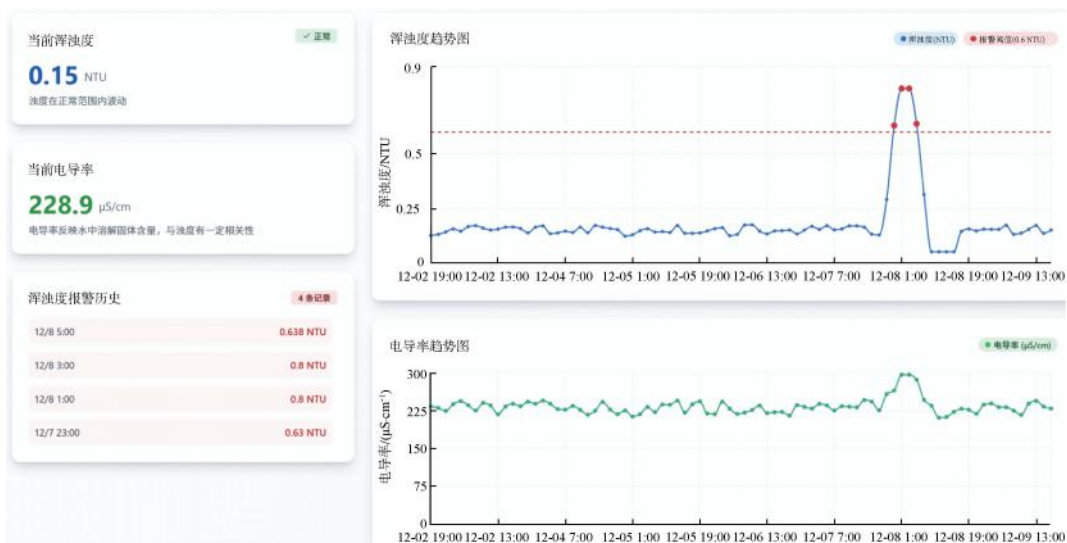


图4 新设备浑浊度突变预警

Fig. 4 Alert of New Equipment Turbidity Sudden Change

可通过安装一台新设备建立单进口 DMA^[14], 新设备小区现场安装情况如图 5 所示。



图 5 安装现场

Fig. 5 Installation Site

4.2 流量监测数据分析

4.2.1 DMA1 流量数据分析

DMA1 的瞬时流量曲线(图 6)显示,连续 3 d 的用水规律呈现典型的“双峰”特征,即每日出现早、晚 2 个用水高峰,分别对应居民早晨起床后与晚间归家后的集中用水时段,与居民生活作息高度吻合。3 d 夜间最小流量持续为 0.2 m³/h 左右,表明在用水低谷时段,管网背景漏失接近零,初步判断小区庭院管网密封性良好,未出现明显的物理漏失问题,从水力层面反映出管网运行状态健康。

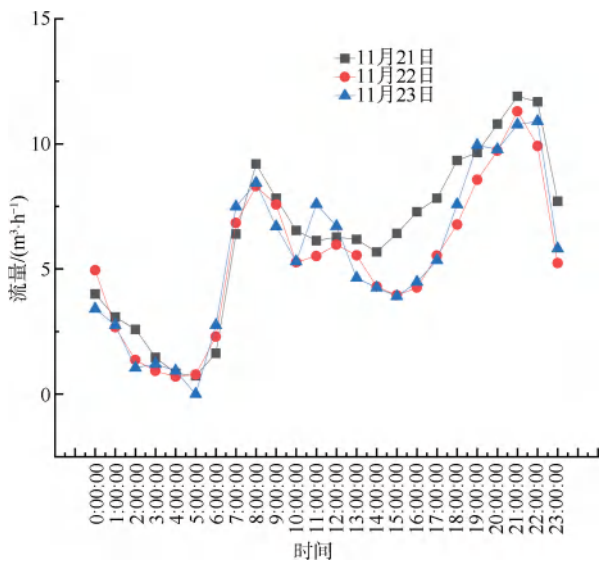


图 6 DMA1 瞬时流量数据曲线

Fig. 6 Curve of DMA1 Instantaneous Flow Data

3 条流量曲线在形态、峰值出现时间及数值范围上均表现出高度一致性,数据重复性良好。这种稳定的再现性不仅说明区域用水模式规律性强,也验证了新设备在连续监测过程中保持了优异的测量稳定性与可靠性,能够为后续长期流量监测与数据分析提供准确、一致的设备保障。

4.2.2 DMA2 流量数据分析

DMA2 的瞬时流量曲线(图 7)显示,该区域连续 3 d 的用水模式呈现出高度规律的双峰特征。每日用水高峰时间明确出现在 7:00 与 22:00 左右,夜间最小流量持续稳定于 4:00 左右,数值约为 1 m³/h。为科学评估此流量是否属于正常用水,研究参考夜间合法用水量估算方法^[15],该方法是识别管网漏损的有效依据。结合该小区的管网规模、住户数量及可能存在的夜间零星用水(如小型加压设备、未关闭的滴水等),计算得出其理论夜间合理用水量约为 1.04 m³/h。现场实测的最小流量与该估算值高度吻合,差异在可接受的测量与估算误差范围内。因此,可初步判定当前夜间最小流量主要由合理的夜间用水构成,未发现明显的物理漏失(即管网破损导致的持续泄漏)迹象。连续 3 d 的流量曲线在峰谷形态、时序及数值上均展现出良好的一致性,重复性高。一方面,反映了该区域用水规律的稳定性;另一方面,从实践层面证明新设备加装浊度传感器等模块后,其核心的流量计量功能未受任何干扰,保持了优异的测量稳定性和准确性。

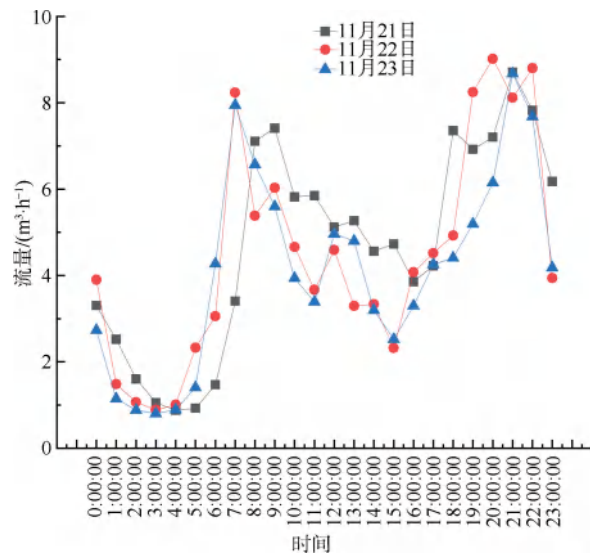


图 7 DMA2 瞬时流量数据曲线

Fig. 7 Curve of DMA2 Instantaneous Flow Data

综合而言, DMA2 的监测数据既描绘了清晰的用水画像,也完成了对设备性能的交叉验证,经 2 个试点的工程实践,新设备的 DMA 流量监测功能可行有效。建议可将当前约 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 的夜间最小流量值确立为该区域的基准水平,纳入长期监控体系。未来若该值出现持续性或阶梯性异常升高,则可作为预警信号,提示可能存在新增漏点或用水异常,从而实现管网漏损的早期、精准发现。

4.3 浑浊度监测数据分析

4.3.1 DMA1 浑浊度数据分析

为评估新设备在真实管网环境下的浑浊度测量性能,采用行业认可的哈希(HACH)TB350型插入式浊度仪作为基准,对同一管段的供水进行了同步对比测试(表1)。结果显示,新设备的测量值与哈希仪器的读数误差稳定小于 0.1 NTU ,验证了其在现场工况下具备优异的测量精度与可靠性,满足技术规范与试验预期。

表1 DMA1 现场测试数据

Tab.1 Field Test Data for DMA1

指标名称	内容
时间	2024-11-19
地点	DMA1
新设备浑浊度/NTU	0.17
便携浊度仪/NTU	0.08
误差/NTU	0.09

通过对 DMA1 持续 20 d 的浑浊度监测(图8),发现该区域管网自来水浑浊度始终维持在 $0.15 \sim 0.18 \text{ NTU}$ 的极低水平,波动微小,水质性状高度稳定。该数值远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中规定的 1 NTU 限值^[16],表明管网末梢的物理水质状况优良,未出现因管网腐蚀、沉积或生物膜活动导致的浑浊度异常升高现象。新设备连续、稳定的浑浊度监测数据表明,其能够有效保障数据的准确性与可靠性,为全面评估管网水质状态与稳定性提供了有力的数据支撑。

4.3.2 DMA2 浑浊度数据分析

DMA2 小区的浑浊度测量准确性验证同样采用哈希(HACH)TB350型插入式浊度仪作为基准进行现场比对(表2)。结果显示,新设备与基准仪器的测量偏差持续小于 0.1 NTU ,这进一步交叉验证了新设备浑浊度模块在不同管网环境下的测量精度与可靠性,完全满足技术规范与试验预期。

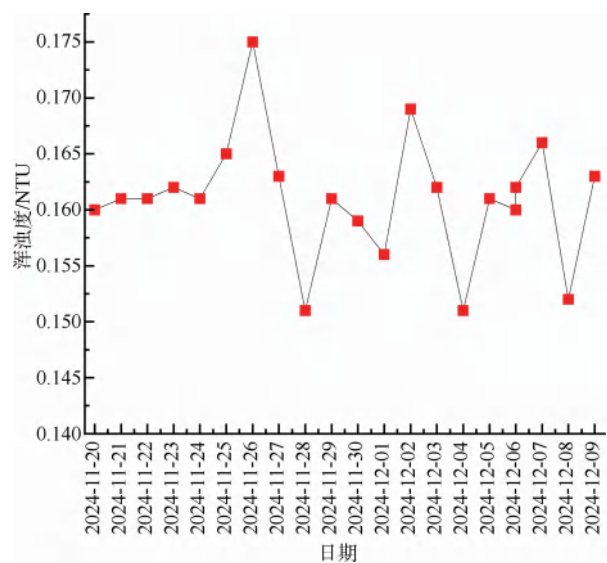


图8 DMA1 浑浊度监测数据

Fig.8 Monitoring Data of DMA1 Turbidity

表2 DMA2 现场测试数据

Tab.2 Field Test Data for DMA2

指标名称	内容
时间	2024-11-19
地点	DMA2
新设备浑浊度/NTU	0.17
便携浊度仪/NTU	0.09
误差/NTU	0.08

连续监测 DMA2 的水质数据(图9),该区域管网水的浑浊度稳定维持在 $0.12 \sim 0.17 \text{ NTU}$,显示出优异的物理水质稳定性。该数值显著优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,说明在输送末梢,水体依然保持了很高的清澈度,管内沉积或扰动风险较低。

综合对比 DMA1 与 DMA2 的浑浊度数据(图8、图9),2 个小区的浑浊度水平均极低且基本相当,从侧面印证了其水厂拥有较高的水处理工艺水准,能够确保出厂水在经由不同路径的管网输送后,于末梢仍能保持卓越的物理水质,管网自身对浑浊度的影响较小。通过 2 个试验小区的对比分析揭示了不同供水区域在“水质稳定性”上的共性,为分区精细化水质管理提供了直接的数据依据。

4.4 成本分析

二次供水泵房若单独安装传统水质监测设备,初期投入成本通常约需上万元,且涉及额外的安装、布线及维护费用。相比之下,集成浑浊度监测功能

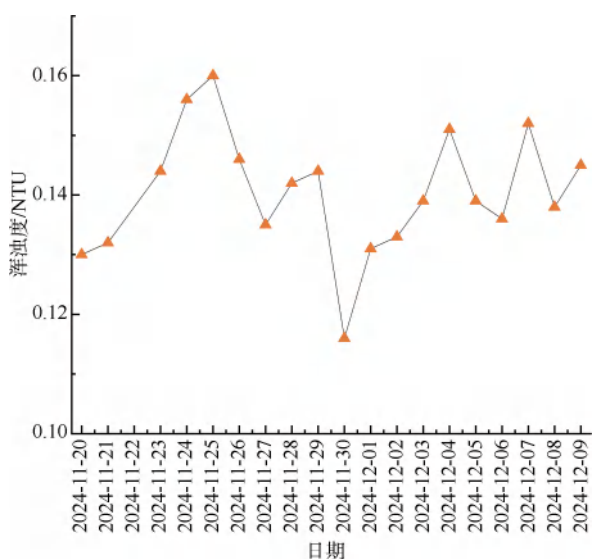


图9 DMA2 浑浊度监测数据

Fig. 9 Monitoring Data of DMA2 Turbidity

的新型电磁水表,在实现流量计量与浑浊度等关键水质指标同步监测的同时,价格仅比常规电磁水表高出约30%。采用此类一体化设备对管网末梢进行水质监测,无需重复布设独立传感器与数据采集系统,可显著降低系统建设与集成成本。同时,简化了设备管理与维护流程,可远程实时监控表具运行状态,有助于提升供水系统的精细化管理水平和运营效率。

5 结论

(1)在DMA1与DMA2的现场试验测试中,新设备的浑浊度数据呈现了良好的稳定性,且与基准仪器的计量偏差小于0.1 NTU,符合实验预期。新设备实现了在流动水流状态下对浑浊度的在线监测,将管网末梢水质监管从“定期人工采样”的被动模式,转向“连续自动感知、实时风险预警”的主动模式。

(2)试验测试新设备的浑浊度预警功能,当测试介质中的浑浊度发生变化时,新设备实现“逢变则报”的功能特性。通过捕捉浑浊度的异常突变,设备将作为供水系统“哨兵”,为及时发现因管网破损、交叉污染等导致的水质安全问题提供直接技术手段,可有效提升供水系统的应急响应能力和风险管控水平。

(3)利用DMA1与DMA2现场测试新设备的基础流量性能,其流量数据稳定采集且呈现良好的重复性。对于现阶段尚未能利用二次供水系统监测水

质的地区,或小区内部同时具备市政供水和二次供水的区域,可通过小区进水口安装考核表的方式进行庭院管网漏损管理,以新设备作为考核总表可实现水质和流量数据的实时监测。以单一投资综合解决漏损控制与水质监控2大核心需求,实现“一表多能、一表多用”,具有显著的经济效益与管理效益。

(4)设备在设计上充分考虑工程现实的约束条件,与常规电磁水表保持一致的尺寸与接口,无需改造现有表井空间,安装流程与传统水表无异。“无缝替换”的特性,降低了技术推广的准入门槛和改造成本,使其在存量管网中的大规模、快速部署成为可能,为构建全覆盖、高密度的末梢监测网络提供了极具可行性的技术路径。

(5)设备不应仅是数据采集器,基于采集数据的智能诊断与预测性维护功能需要进一步开发升级。通过内置算法模型,可以分析流量、压力、水质数据的耦合关系,实现管网漏损预警、水质异常溯源、设备自身健康状态评估(如电池寿命、传感器性能衰退)等高级功能。未来将进一步研发内置参考标准或远程校准技术,使设备能在不拆卸的情况下进行精度验证和修正,以降低水务公司的运维成本并保障数据的持续可靠。

本文研发的集成多参数水质监测功能的电磁水表,并非传统水表的简单功能叠加,而是通过高度集成化、智能化的设计,打造一个“管网综合状态监测微站”,更是面向未来智慧水务和供水安全战略需求的技术创新。

参考文献

- [1] 杨尚,赵微,王然,等. 松花江佳木斯段水质评价及时空变化趋势分析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(10): 159-162.
Yang S, Zhao W, Wang R, et al. Water quality evaluation and spatio-temporal trend analysis of Songhua River in Jiamusi[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2025, 53(10): 159-162.
- [2] 周金林,许威,曾刚,等 广东某水源地水化学特征及水质评价[J]. 四川地质学报, 2025, 45(s2): 58-60, 65.
Zhou J L, Xu W, Zeng G, et al. Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment of a Water Source in Guangdong Province[J]. Acta Geologica Sichuan, 2025, 45(s2): 58-60, 65.
- [3] Zhou Q, Wang J R, Tian L Q, et al. Remotely sensed water

- turbidity dynamics and its potential driving factors in Wuhan, an urbanizing city of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125893. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125893.
- [4] 李红, 鲍玉海, 贺秀斌. 水体浊度不同测量原理的对比分析[J]. *中国水土保持科学*, 2023, 21(5): 1-8.
Li H, Bao Y H, He X B. Comparative analysis of different measurement principles of water turbidity[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(5): 1-8.
- [5] 林晓明. 浊度传感器的设计与浊度预测方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
Lin X M. Design of a turbidity sensor and research on a turbidity prediction method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [6] Knöbl Y J, Nakhli I, del Mar Darder M, et al. Luminescence lifetime-based sensing of water turbidity [J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(5): 3763-3773.
- [7] Jantarakasem C, Sioné L, Templeton M R. Estimating drinking water turbidity using images collected by a smartphone camera [J]. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2024, 73(6): 1277-1284.
- [8] Rocher J, Jimenez J M, Tomas J, et al. Low-cost turbidity sensor to determine eutrophication in water bodies[J]. *Sensors*, 2023, 23(8): 3913. DOI: 10.3390/s23083913.
- [9] ISO 7027-1:2016 Water quality—Determination of turbidity—Part 1: Quantitative methods[S].
- [10] 吴玉笛, 刘建国, 陆钊, 等. 基于LED光源的积分浊度仪的系统设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(5): 370-375.
Wu Y D, Liu J G, Lu F, et al. System design for integrating nephelometer based on LED light source [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(5): 370-375.
- [11] GB/T 778.1—1996 冷水水表 第1部分: 规范[S].
GB/T 778.1—1996 Measurement of water flow in closed conduits—Meter for cold potable water—Part 1: Specifications [S].
- [12] GB/T 778.1—2007 封闭满管道中水流量的测量饮用冷水水表和热水水表 第1部分: 规范[S].
GB/T 778.1—2007 Measurement of water flow in fully charged closed conduits—Meters for cold potable water and hot water—Part 1: Specifications[S].
- [13] 齐轶昆, 佟恽维, 祝旭, 等. 一种带浊度测量功能的电磁水表: 202423095530.7[P]. 2025-10-28.
Qi Y K, Tong Y W, Zhu X, et al. An electromagnetic water meter with turbidity measurement function; 202423095530.7 [P]. 2025-10-28.
- [14] 谷洋. 基于节点高程差的城市供水管网DMA分区研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
Gu Y. Research on district metered areas of urban water supply network based on nodes elevation difference [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [15] 李岚, 吴珊, 寇晓霞, 等. 基于独立计量区的夜间最小流量的研究进展[J]. *给水排水*, 2018, 44(6): 135-141.
Li L, Wu S, Kou X X, et al. Research progress of minimum night flow based on district metering area [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(6): 135-141.
- [16] GB 5749—2022 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749—2022 Standards for drinking water quality[S].