

# 一种基于微型光谱仪的分布式水质监测系统

屈晓虎<sup>1,2</sup>, 董浩<sup>1,2\*</sup>, 孙程<sup>1</sup>, 郭小龙<sup>1</sup>, 王宏杰<sup>1</sup>, 陈锐<sup>3</sup>

(1. 河北先河环保科技股份有限公司, 河北石家庄 050035; 2. 河北省环境监测装备技术创新中心, 河北石家庄 050035; 3. 河北省碳计量中心, 河北石家庄 050035)

**摘要:**针对传统地表水在线监测系统存在的分析周期长、化学试剂消耗多、维护复杂等问题,设计了一种基于微型光谱仪的分布式水质原位监测系统。通过集成微型光谱技术与朗伯-比尔定律,结合主成分分析(PCA)算法,构建了光谱信息的非线性定量解析模型,实现了有机污染物、含氮污染物等 7 种水质参数的实时检测,系统采用模块化设计,具有免试剂、低功耗、实时性强等特点,通过试点应用比对,验证了其在快速响应和污染趋势预判方面的有效性。

**关键词:**紫外可见光谱;水质监测;在线监测;便携式设备;主成分分析

中图分类号:TH832

文章编号:1000-0682(2026)01-0003-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.01.001

## A distributed water quality monitoring system based on a micro-spectrometer

QU Xiaohu<sup>1,2</sup>, DONG Hao<sup>1,2\*</sup>, SUN Cheng<sup>1</sup>, GUO Xiaolong<sup>1</sup>, WANG Hongjie<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>3</sup>

(1. Hebei Xianhe Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hebei Shijiazhuang 050035, China;

2. Hebei Province Environmental Monitoring Equipment Technology Innovation Center, Hebei Shijiazhuang 050035, China;

3. Hebei Province Carbon Metrology Center, Hebei Shijiazhuang 050035, China)

**Abstract:** To address issues in traditional surface water online monitoring systems such as prolonged analysis cycles, high chemical reagent consumption, and complex maintenance requirements, a novel in-situ water quality monitoring system based on micro-spectrometer technology has been developed. By integrating micro-spectroscopy with the Lambert-Beer law and incorporating principal component analysis (PCA) technology, a nonlinear quantitative analysis model for spectral information was established. This system enables real-time detection of seven water quality parameters including organic pollutants and nitrogen-containing contaminants. Featuring a modular design, the system demonstrates reagent-free operation, low-power consumption, and high real-time performance. Comparative field applications have validated its effectiveness in rapid response and pollution trend prediction capabilities.

**Keywords:** ultraviolet-visible spectroscopy; water quality monitoring; online monitoring; portable devices; principal component analysis (PCA)

## 0 引言

地表水资源是人类生存与生产活动的重要物质

收稿日期:2025-04-25

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技合作重点专项(2023YFE0102400) - “内河环境污染事故应急与生态风险管控技术研究”

第一作者:屈晓虎(1986—),河北石家庄人,本科,高级工程师,研究方向为精密仪器仪表的开发与应用。

E-mail:2392372085@qq.com

通信作者:董浩(1986—),河北石家庄人,研究生,研究方向为环境监测仪器的开发与应用,高级工程师。

基础,近年来,伴随我国城镇化进程加速和产业规模扩张,地表水环境面临日趋严重的复合型污染威胁<sup>[1-2]</sup>。当前广泛应用的湿化学法水质在线监测系统(如分光光度法、滴定法)虽可实现常规指标精准检测<sup>[3]</sup>,却面临多重技术瓶颈:冗长的预处理流程导致单样本分析周期普遍超过 30 分钟<sup>[4]</sup>,严重制约监测数据时效性,持续消耗有毒试剂的操作模式不仅产生二次污染风险<sup>[5]</sup>,更与绿色环保理念相悖。复杂的多模块机械结构显著增加系统故障率<sup>[6-7]</sup>,运维成本攀升的同时,整体数据有效率难以突破;而基于单参数检测的技术路线迫使监测站点需配置多套分立设备,造成基建投入与后期维护成本居高不下,严

重制约水质监测网络的规模化部署与可持续发展。

基于紫外-可见光谱的连续分析技术已经成为水质环境监测领域的重要发展方向<sup>[8-9]</sup>。相较于传统化学滴定、电化学传感及色谱分离等离线检测方法,该技术凭借其独特的光谱指纹识别特性,在操作便捷性、检测重现性、测量精度及分析时效性等方面展现出显著优势。目前,通用的主流光谱监测设备具有结构复杂、成本高等诸多缺点,难以大面积推广应用,因此,水质在线监测设备的低成本化与微型化是业界亟待解决的问题<sup>[10]</sup>。

## 1 系统整体设计

### 1.1 整体设计

分布式水质原位监测系统由一体式监测探头、工控机、主控软件、数据库等构成,一体式探头包括脉冲氙灯、光谱仪、主控单片机、辅助单片机、各类控制模块等。

系统在设计时考虑了便携性、实时性和可靠性。微型光谱仪的选择基于其光谱范围、分辨率和灵敏度等参数,确保能够准确捕捉水样的光谱特征。嵌入式处理器采用高性能、低功耗的 ARM 架构,以满足实时数据处理的需求。通信模块支持 4G/5G 和 Wi-Fi 等多种通信方式,确保数据能够可靠地传输到远程服务器。

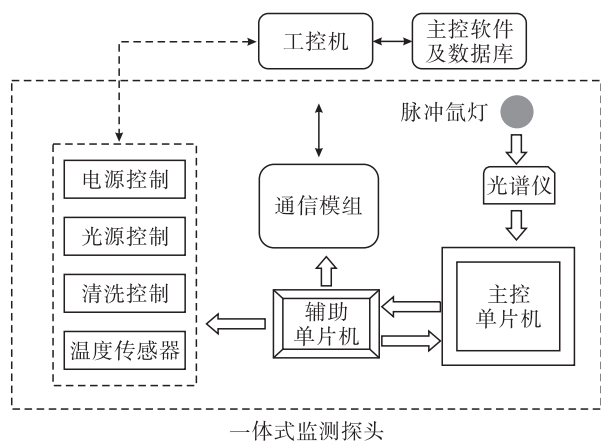


图1 系统整体框架图

系统通过氙灯光源模组发射特定频率调制的宽谱光束,穿透待测水样后产生特征吸收光谱。衰减后的光束经光谱仪接收后,通过信号处理电路进行降噪和放大,随后由高精度工控机进行数据采集。工控机内搭载的分析软件对光谱数据进行特征提取和建模解析,最终通过 4G/5G 专用数传模块将标准化格式的监测数据实时回传至云端服务器,形成完整的水质监测数据链。

### 1.2 光谱仪选型

光谱仪是该系统的核心部件,其性能直接决定了系统能否精准、高效地完成光谱分析任务。因此,对于光谱仪的选型设定了严格标准:要求其具备较宽的光谱范围,以确保能够涵盖各类样本的特征光谱;拥有较高的光学分辨率,从而实现光谱细节的精细分辨;同时,还需兼顾性价比,具备适宜的价格,以满足系统整体的成本控制需求。

经过多轮筛选与评估,最终选定了超微光学股份有限公司生产的 AM2280 型高灵敏度微型光谱仪作为光学探测器件。这款光谱仪优势显著:其光路系统结构设计简洁,有效降低了信号干扰,保障检测的准确性;体积小巧,便于系统集成与携带。在关键性能指标上,它覆盖了 200~900 nm 的宽光谱波长范围,能够满足大多数场景的光谱检测需求;同时光学狭缝宽度支持定制化,可根据不同的特殊检测要求灵活调整;供电方式比较便捷,通过 USB 数据线即可直接驱动,无需额外复杂的电源配置,适用于快速检测场景。

在核心参数方面,AM2280 光谱仪搭载日本滨松 S8398 型 CMOS 线阵图像传感器,具有以下技术优势:宽动态响应(160 V/(lx·s))配合 2048 有效像素阵列,可精确捕捉微弱光谱信号;内置智能时序控制电路,仅需外部提供时钟脉冲即可实现高速信号采集;采用平场凹面全息光栅(刻线密度 230 L/mm,色散率 30 nm/mm),可有效消除畸变。通过 USB3.0 接口实现供电与数据传输一体化,最低积分时间可达 1 ms。

### 1.3 机械设计

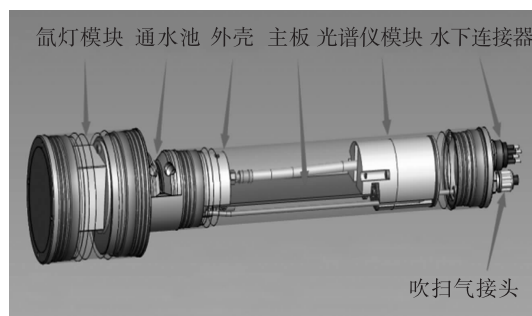


图2 地表水分布式原位监测系统采样探头结构图

地表水分布式原位监测系统需要在野外环境下全天候长期连续工作,野外环境条件复杂,经常会伴有狂风、冰雹、极寒等恶劣天气出现<sup>[11-12]</sup>,同时仪器所处的水下环境也需要考虑水流冲击、水下压力、各种鱼类包括浮游生物等均可能对系统造成影响。因此设计时主要考虑系统的密封性、保温性、可靠性以及稳定性。

一体式采样探头使用高强度不锈钢经整体加工而成,内部集成了氙灯模组、样品池、电控主板、光谱仪以及吹扫机构等关键组件,外壳的密闭性遵循国标外壳防护等级(GB4208—2008/IEC60529:2001)的相关要求,可有效抵御外界水分与杂质的侵入。此外,探头采用双层结构设计,内部填充保温材料,保证监测仪主机能够适应我国绝大多数地区的自然环境,无论是严寒的北方,还是潮湿的南方,系统都能稳定运行。

工控机设置于水面以上,安装在水质监测站点室内。探头与工控机通过信号线及电缆线相连接,确保数据传输与电力供应的稳定可靠。

## 2 控制系统设计

如图 3 所示,控制系统采用嵌入式单片机(STM32F407VET6)作为核心控制器构建测控平台,形成由数据处理系统、单片机控制系统及人机交互系统组成的多层次控制架构。通过内置的 16 位高精度 A/D 数据采集模块,直接解析光强数字信号,实现光谱数据的实时采集与智能分析,依托主控制器与辅助单片机间的双向通信协议,精准调控光源强度和脉冲频率。

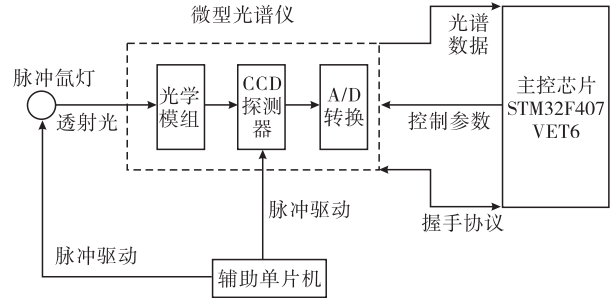


图 3 控制系统结构图

### 2.1 氙灯驱动和放大电路

氙灯驱动电路的核心是高压发生模块和储能单元,供电接口支持 11 ~ 15 V 宽电压输入(典型工作电流  $\leq 1$  A),通过脉冲边沿触发机制实现精确控制,当检测到上升沿有效时,氙灯瞬时产生高强度光脉冲。经多组对照实验验证,在 1 ~ 79 Hz 的可调频率范围内,选定 20 Hz(脉宽 5 ms)作为最优工作频率,在保证光源稳定性的同时满足高速采样需求。

为确保氙灯光源与光谱仪同步驱动,采用单独的 STM32F103C8T6 芯片进行控制。不仅有效减轻了主控单片机的工作负载,还能保证二者在时序上保持高度一致,从而提升整体系统的稳定性和可靠性。氙灯和光谱仪驱动电路图如图 4 所示。

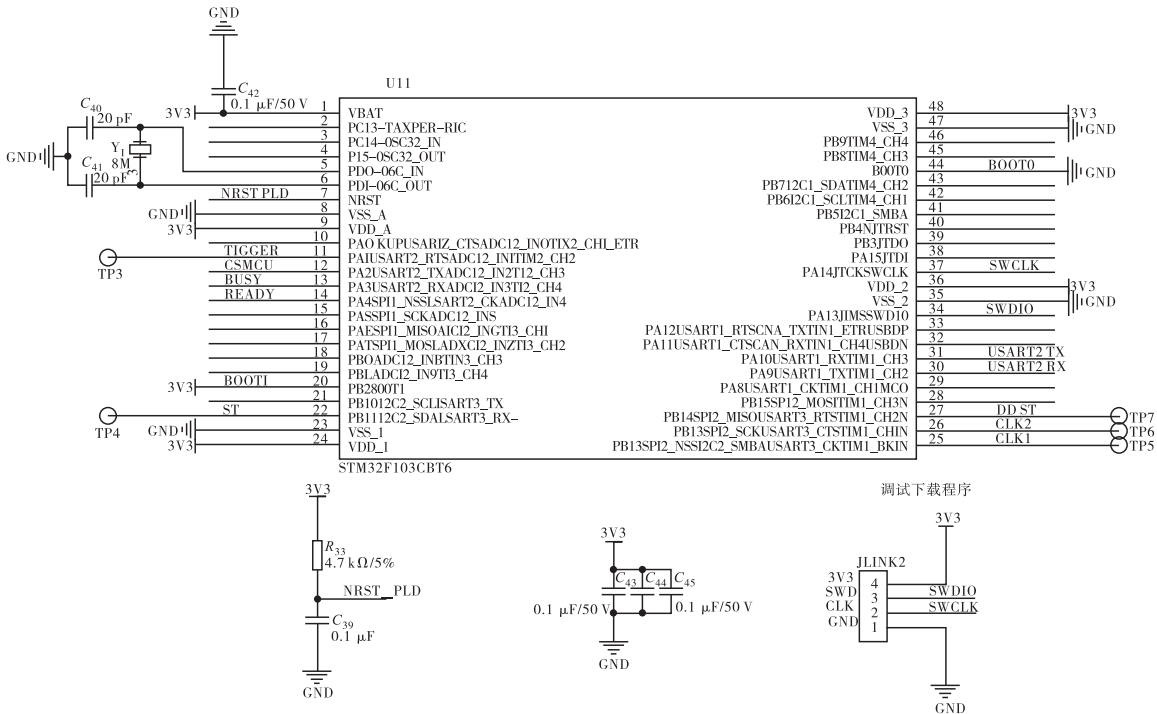


图 4 氙灯和光谱仪驱动电路图

微型光谱仪输出的原始光谱信号为 100  $\mu$ A 级微弱电流模拟信号。针对微弱信号的放大问题,专门开发了基于精密运算放大器的跨阻放大(Transimpedance Amplifier, TIA)电路。如图 5 所示,该

电路依托运算放大器理想化模型的重三重特性<sup>[13]</sup>,理论上具有无限大开环增益、无穷大输入阻抗及趋零输出阻抗,成功实现了微弱光谱信号精确转换与放大。

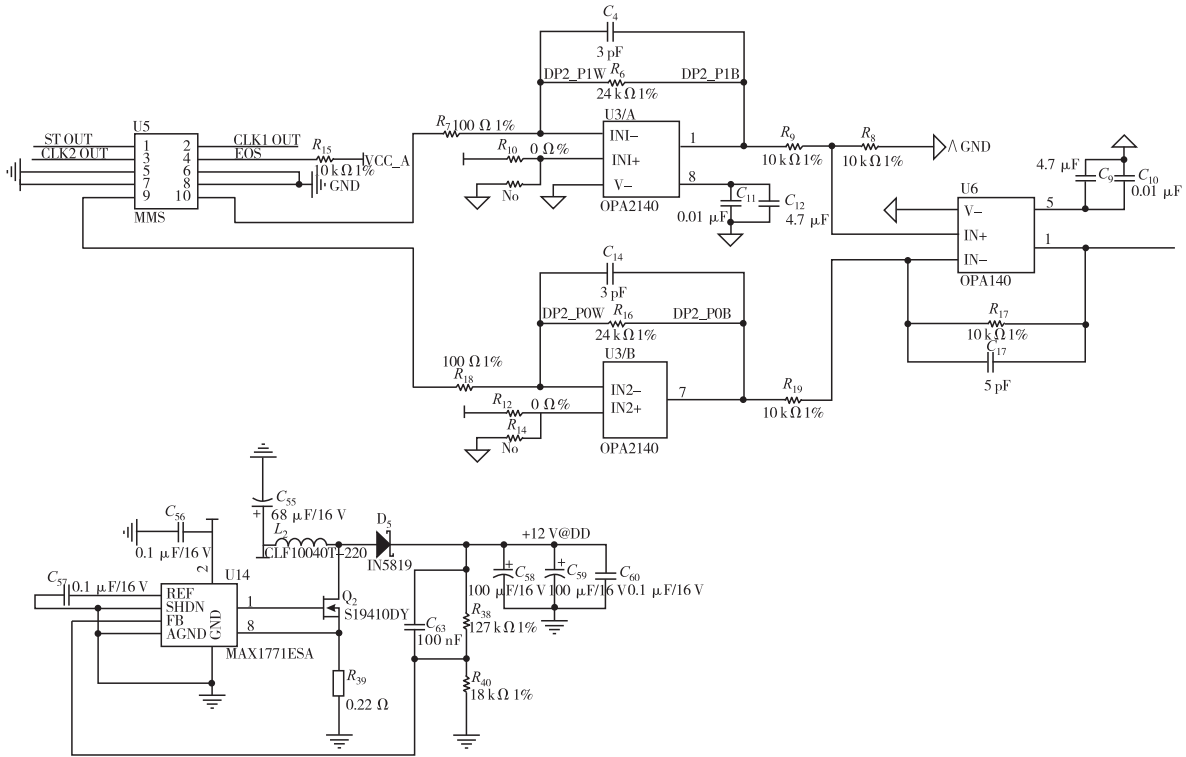


图 5 跨阻放大电路图

在电路设计的具体实现中,采用低噪声运算放大器抑制信号失真、构建精密阻抗匹配网络优化信噪比,以及设计多级增益可调架构拓展动态响应范围。基于跨阻增益公式  $V_{out} = I_{in} \times R_f$  理论原理,通过对反馈电阻  $R_f$  进行多维度参数优化,成功实现了微安级电流信号到毫伏级电压信号的线性转换。经实验验证,系统整体转换误差控制在 2% 以内,不仅保障了单片机模数转换模块的高精量化性能,更全

面满足了光谱分析系统在信号完整性、噪声抑制和动态响应等方面的严格技术要求。

### 2.2 电源设计

探头供电电源由上位机提供的 12 V 直流电源,如图 6 所示,内部电源共分为 3 类,一类为 12 V 供电,包括步进电机和驱动芯片、脉冲氙灯。一类为 5 V 供电,包括 485 通信模块、电压转换模块、微型光谱仪,还有一类为 3.3 V 供电,包括主控单片机、辅助单片机。

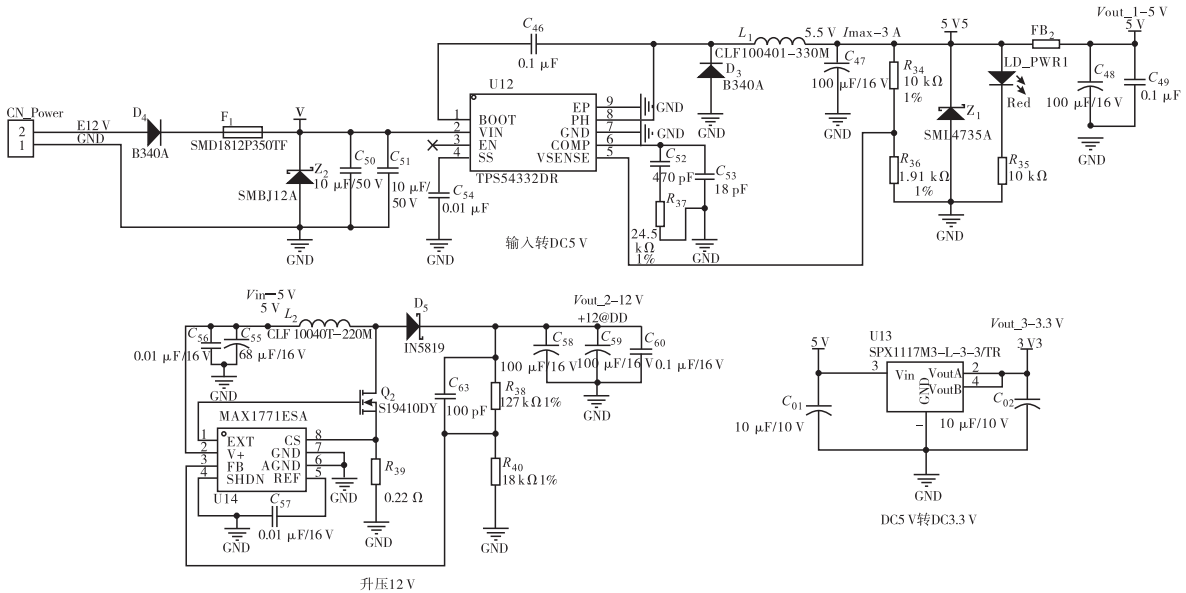


图 6 各模块驱动电路图

监测仪的供电电源由上位机提供的 12 V 直流

电源承担。其内部电源主要分为三类:12 V 供电主

要为步进电机及其驱动芯片、脉冲氙灯供电,5 V 供电负责为 RS485 通信模块、电压转换模块以及微型光谱仪提供电力支持,3.3 V 供电用于为主控单片机和辅助单片机供电。监测仪的主电源使用控制器输出的 12 V 直流电源。该电源进入检测仪主板后,会先经过二极管防反接电路和瞬态保护电路处理,随后为步进电机驱动芯片 DRV8824 提供 12 V 电源。DRV8824 是一款性价比高且性能卓越的步进电机驱动芯片,具备过流保护、热关机、欠压锁定等安全防护功能,细分程度最高可达 64 分步。

考虑到脉冲氙灯对可靠性与稳定性的要求,采用 MAX1771 芯片单独为其供电,以确保供电的可靠性。整个电源系统采用宽电压输入设计,支持 5.5 V ~ 24 V 的宽电压供电。

### 2.3 光谱建模方法

光谱波段的选择是紫外-可见光谱分析仪器的关键步骤,其目的是通过优选特征波长,减少光谱计算波段的工作量<sup>[14]</sup>,进而提高系统的数据处理效率,其主要原理是利用多元回归方法找出光谱信号与待测样品之间的非线性回归关系,常用的多元校正方法有主成分回归(PCR)、偏最小二乘回归(PLS)、最小二乘支持向量机等。

主成分回归分析(Principal Component Regression, PCR)的建模过程包含两个核心阶段:首先基于主成分分析对原始光谱信息进行正交变换,基于协方差矩阵的特征分解提取具有最大方差的互不相关主成分<sup>[15-16]</sup>,从而实现高维数据的有效浓缩,然后基于浓缩后的主成分建立多元线性回归模型。这种分步建模的方式将原始变量空间投影至低维主成分空间,不仅消除了光谱数据固有的共线性问题,更通过剔除冗余噪声维度显著增强了模型的健壮性与可解释性。

主成分回归通过特征空间重构实现了数据降维与信息提纯的双重功能。在具体实施过程中,首先通过正交变换消除光谱变量间的多重共线性,有效抑制噪声干扰;其次,利用方差最大化原则提取主成分,在保留主要光谱特征的同时,显著提升模型的泛化能力。当然,该方法同样有一定的局限性,主成分阈值的设定具有主观性,当特征值较小的成分中隐含关键信息时,可能造成有效信息的非选择性缺失。

## 3 软件设计

根据分布式水质监测系统的结构和检测原理,以及仪器低功耗、微型化、便携化等要求,该系统的上位机软件平台基于 Windows 应用开发平台开发,

在下位机嵌入式平台,编制相应的驱动程序,主要包括图形化用户交互界面,水质参数定量模型、工作流程等界面。

下位机软件设计以 STM32 单片机为核心,包括电源模块、氙灯驱动、上位机通信、吹扫、光谱仪通信等部分的驱动程序,总体设计框图如图 7 所示。上位机软件以 Windows 工控机为核心,设计人机交互界面和相应的数据库、将算法模型封装入动态调用库文件供软件调用。

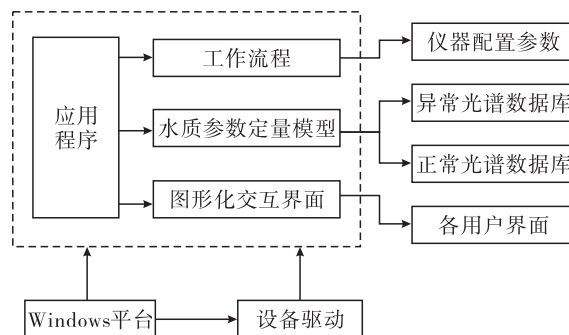


图7 上位机软件总体设计框架图

上位机软件采用模块化界面设计,主界面动态监测模块实时显示 pH 值、溶解氧、电导率等 7 项参数,每个参数单元集成检测值、国际标准单位、数据时间戳(精确到秒)及状态标识(正常/校准/异常),主界面如图 8 所示。



图8 上位机软件主界面

采用交互式面板设计,用户点击任一参数即可进入专属监测界面,呈现 24 小时时序曲线图谱,当数值超过安全阈值时,曲线自动转为红色警示,并触发独立报警窗口,同步显示超标参数、当前数值、持续时长及处置建议。预警分析模块依托大数据分析技术,通过三维趋势预测图、概率分布直方图及历史数据对比表,光谱分析单元同步生成 400 ~ 700 nm 波长范围内的吸光度变化曲线及特征波长数据矩阵,支持曲线图谱与数值列表双模式切换,支持多维度数据可视化与智能告警功能,确保水质监测的实时性和决策支持的有效性。

## 4 测试

为检验系统的性能,参考水环境监测技术规范相关标准要求,对传感器各参数进行校正及充分自测后,委托河北省计量院对系统性能进行了测试,测试结果如表1所示。

表1 性能测试数据

	COD	BOD	TOC	浊度	硝氮	亚硝氮	色度
测量误差	5.8%	11.3%	11.6%	9.8%	8.7%	10.4%	14.4%
重复性	2.3%	2.3%	2.7%	5.8%	5.6%	4.2%	3.2%
零点漂移	2.5%	2.7%	4.4%	4.6%	8.2%	9.5%	2.4%
量程漂移	2.4%	5.5%	6.8%	9.7%	7.6%	2.6%	4.4%
示值误差	-6.2%	6.4%	3.9%	-3.6%	5.3%	8.8%	6.8%

测试结果表明:地表水分布式原位监测系统具有响应迅速、重复性优良及稳定性突出的技术特性,示值误差、重复性、漂移等关键性能参数均符合《HJ 915—2017 地表水自动监测技术规范》中规定的技术要求,能够满足水体环境实时监测与预警的应用需求。

## 5 现场应用

2024年7—12月,在河北保定某国家级水质监测站布进行了水质实时在线测量,得到了超过半年的水质实时在线检测数据,考虑到系统的测量周期为1 min,下面仅以监测期间日均值数据为例进行探讨。具体数据对比如图9~11所示。

试点应用的国家级水质监测站设置有国标法COD分析仪,经过处理后的日均值数据显示,比对测试期间,地表水原位监测系统与国标法COD分析仪的监测数据呈现较强相关性(相关系数 $R^2 = 0.7492$ ),可准确反映COD参数的污染趋势。141天的日均值数据中约80%的数据误差控制在20%以内,验证了该仪器在快速响应、趋势预判和异常溯源方面的技术优势,为地表水污染防治提供了可靠的解决方案。

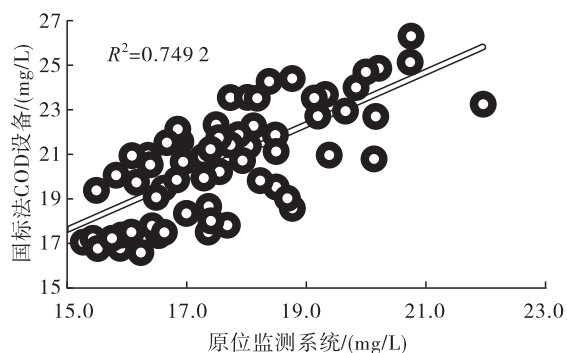


图9 原位监测系统与国标法COD设备数据相关性

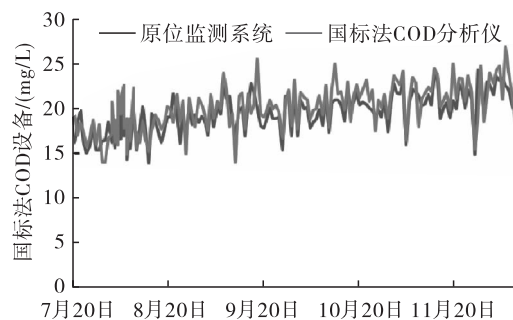


图10 原位监测系统与国标法COD设备日均值数据趋势比对

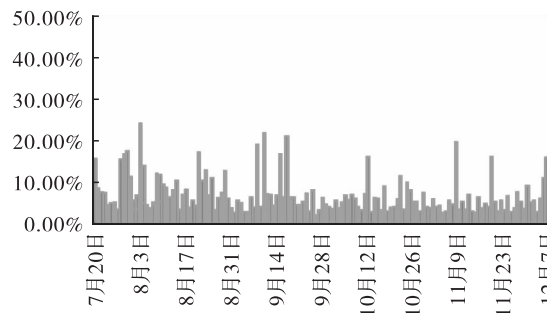


图11 原位监测系统与国标法设备数据误差统计

## 6 结论

新型分布式水质原位监测系统具备微型化、智能化和便捷部署的特点,支持COD、TOC等7种水质指标及污染物的实时监测与溯源。可动态反映COD浓度变化及水质突发污染预警,适用于河湖、水厂、排污口等多场景监测。该设备的推广可促进紫外光谱技术在水利、环保等领域的深度应用,其时空数据分析能力可支撑污染溯源、生态研究等科学决策。尤其适用于野外复杂环境的长期连续监测,不仅为地表水污染防治提供了技术支撑,也为地表水监测设备的微型化、智能化发展提供了重要参考。

### 参考文献:

- [1] Kukulka M, Pem B, Vazdar K, et al. UV Absorption Spectra of TAMRA and TAMRA Labeled Peptides: A Combined Density Functional Theory and Classical Molecular Dynamics Study [J]. Journal of Computational Chemistry, 2025, 46 (8): e70096 - e70096.
- [2] ZHOU W, QIN X, WANG Z, et al. NO - CO Monitoring Technique Using Ultraviolet Absorption Spectroscopy and Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy in High - Temperature and High - Pressure. [J]. Applied spectroscopy, 2025.
- [3] 张新宇. 基于深度学习和紫外吸收光谱的混合气体检测技术研究[D]. 燕山:燕山大学, 2024.

(下转第25页)

在试验准备阶段,必须首先对系统的气密性进行严格检查,以确保试验环境的可靠性。随后,系统将对压力、温度和流量这3项关键信号进行精确采集,并重点检测减压阀压力点是否符合试验标准。信号采集无误后,试验流程将进入控制环节,系统将对减压阀、空气阀、电磁阀进行精确控制,以完成新产品的性能测试试验。试验结束后,系统将自动产生并打印出相关报告。

## 5 总结

该文设计的测控系统通过硬件集成与算法优化,实现了高精度、全自动及安全可靠的工业产品试验控制。系统具有以下3个显著特点:(1)系统的设计遵循自动控制运行模式,同时保留了传统的手动控制的干预机制,确保了使用过程的安全性及便捷性;(2)设计采用16位、16通道、250 kHz采样率、24路数字输入输出(DIO)的数据采集卡,结合高性能信号调理箱,确保了系统的高速运行与高精度控制;(3)系统的软硬件设计中融入了多层次的安全保护机制,有效的保障检测结果的可靠与安全。

该系统已在某产品生产线上得到应用,显著提高了产品试验的工作效率。未来在数据采集精度、控制精度以及自动化水平方面仍有一定提升空间,可持续改进与提升<sup>[13-14]</sup>。

### 参考文献:

[1] 孙益超. 一种提升自动化产线效率的优化方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020:42-61.

- [2] 刘伟,陈志刚. 多通道测控系统兼容性优化研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(5): 45-50.
- [3] 张立军,王昊. 动态压力控制算法误差分析[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(3): 28-33.
- [4] 李敏,赵国强. 工业测控系统扩展性瓶颈与解决方案[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(8): 62-67.
- [5] 肖忠祥. 数据采集原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2003:10-33.
- [6] 马明建,周长城. 数据采集与处理技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004:36-60.
- [7] 王彪,高源辰,房思超,等. 基于STM32H743的TDLAS型CH<sub>4</sub>气体检测数据采集系统设计[J]. 激光杂志, 2024(12):45-48.
- [8] 崔建起,杜巧玲. 基于足底压力采集系统和压力中心的人体稳态判定方法[J]. 吉林大学学报,2024(3):728-733.
- [9] 王华杰,刘继军,张晓娟. 智能多路温度采集系统的研究与设计[J]. 山西电子技术,2023(2):48-51.
- [10] 段帅宁. 基于LabVIEW的电工电子试验台系统研究[D]. 大连:大连交通大学,2023:11-20.
- [11] 汪文蝶. 基于LabVIEW的远程实验数据采集系统设计[J]. 无线互联科技,2024(10):96-98.
- [12] 邹辉. 软件自动化测试与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [13] 伍宗效,李家春,张建明. 某实验设备基于网络化的测控系统设计[J]. 制造业自动化,2022(8):39-43.
- [14] 李建勇. 电子技术在工程测控系统设计中的应用[J]. 电子技术,2025(1):162-163.

(上接第8页)

[4] 朱永健,刘金福,潘晓文,等. 紫外吸收光谱法的水质参数预测模型研究[J]. 科学技术创新, 2024(06): 51-54.

[5] 郑培超,尹义同,王金梅,等. 紫外吸收光谱结合SPA-ELM算法的水体磷酸根离子检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(01): 82-87.

[6] 张伟. 紫外吸收-光谱法在天然气硫化氢含量测定中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2023(14): 56-58.

[7] 沈杨. 水质COD在线监测的紫外吸收光谱方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2023.

[8] 张捷达. 傅里叶分析在双源高次谐波产生及极紫外吸收光谱的应用研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.

[9] 刘婧. 基于深度学习的微型光谱仪信号处理算法设计[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2023.

[10] 秦楷. 基于微型光谱仪的手持式检测仪研发及应用[D]. 杭州:浙江理工大学, 2021.

[11] 郑麒麟,文龙,陈沁. 基于散斑检测的微型计算光谱仪研究进展[J]. 光电工程, 2021, 48(03): 4-18.

[12] 黄龙平,林慧,胡立坤. 微型光谱仪数据采集系统设计与标定[J]. 电测与仪表, 2023, 60(09): 177-182.

[13] 方奇奇. 高分辨率微型光谱仪的研究设计[J]. 科学技术创新, 2019(22): 146-147.

[14] 方奇奇. 高分辨率微型光谱仪的光学系统设计[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.

[15] 王应健. 基于紫外吸收光谱的SO<sub>2</sub>和NO混合气体浓度监测[D]. 重庆:重庆大学, 2016.

[16] 王瑞. 基于FPGA的紫外吸收光谱的矿井水源判别[J]. 煤炭技术, 2015, 34(04): 219-221.