

水质监测黑灯实验室应用初探

曹 阳¹, 罗 进², 王若男³, 张璐涛³, 蒋雪梅³, 李 群⁴, 倪 斌^{1*}

(1. 四川省广安生态环境监测中心站, 四川 广安 638000; 2. 四川省分析测试服务中心, 四川 成都 610066;
3. 四川省生态环境监测总站, 四川 成都 610091; 4. 睿科集团(厦门)股份有限公司, 福建 厦门 361000)

摘 要: 该文针对传统环境监测实验室和现有流水线式黑灯实验室的不足, 采用柔性架构构建水质监测黑灯实验室, 按照实验工序分类选取7项典型水质无机物指标开展应用验证。结果表明, 该实验室可实现检测全流程闭环自动化, 各项性能均符合现行标准要求。柔性架构黑灯实验室通过模仿人工实验工序将硬件系统拆解为标准化功能单元, 构建起统一管控、柔性连接、多系统协同的软硬件体系, 通过对功能单元的动态调整与机时调度, 有效突破了检测指标与物理空间的双重约束, 具有系统灵活性强、资源利用率高、扩展性优良的技术优势。虽然其规模化应用仍受前处理设备数字化程度不足、检测仪器测控软件封闭等因素制约, 但仪器操控智能体的研发与跨领域资源共享模式的构建, 将成为该技术的破局关键与发展方向。

关键词: 黑灯实验室; 环境监测; 柔性架构; AI智能体

中图分类号: O657 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)10-2300-15

Preliminary Study on the Application of the Lights-out Laboratories in Water Quality Monitoring

CAO Yang¹, LUO Jin², WANG Ruo-nan³, ZHANG Lu-tao³, JIANG Xue-mei³, LI Qun⁴, NI Bin^{1*}

(1. Guang'an Central Station of Ecological and Environmental Monitoring, Sichuan Province, Guang'an 638000, China; 2. Sichuan Analysis and Testing Service Center, Chengdu 610066, China; 3. Sichuan Provincial General Station of Ecological and Environmental Monitoring, Chengdu 610091, China; 4. RayKol Group (Xiamen) Corp., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: The sample analysis work of traditional environmental monitoring laboratories mainly relies on manual operation. This mode has such prominent problems as long analysis cycle, low efficiency, significant influence by the operators, and high susceptibility to accidental errors, making it difficult to meet the demand for high-throughput and high-precision analysis in modern environmental monitoring. Existing assembly-line lights-out laboratories have achieved automation, yet are constrained by fixed workflows, resulting in shortcomings such as insufficient system flexibility, low resource utilization, and limited functional scalability. Lights-out laboratories based on a flexible architecture are highly compatible with standard classical monitoring methods. By imitating manual experimental procedures, the hardware system is decomposed into standardized functional units, forming a software and hardware system featuring unified management, flexible interconnection, and multi-system coordination. Through dynamic adjustment of functional units and scheduling of machine time, such laboratories effectively break through the dual constraints of testing indicators and physical space, with the technical advantages of strong system flexibility, high resource utilization, and excellent scalability. A water-quality lights-out laboratory was constructed using the flexible architecture, and verification was performed on seven typical inorganic water-quality indicators selected according to experimental procedures. The results show that the laboratory achieves closed-loop automation of the entire testing process, with all performance indicators complying with current standards. The large-scale application of flexible-architecture lights-out laboratories is still restricted by factors including insufficient digitalization of pretreatment equipment and closed measurement and control software of testing instruments. The development of intelligent agents for instrument operation and the establishment of cross-domain resource-sharing models will become the key breakthroughs

收稿日期: 2026-01-20; 修回日期: 2026-04-24

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2023YFG0183)

* 通讯作者: 倪 斌, 环境监测工程师, 研究方向: 环境监测, E-mail: luxian0717@live.cn

网络首发日期: 2026-07-03

and development directions for this technology.

Key words: lights-out laboratories; environmental monitoring; flexible architecture; AI agents

在环境监测领域,针对水质无机物指标的传统实验室检测,一般通过手工检测或者借助“手工+具备自动功能的设备”的方式来完成。这一过程要求技术人员具备一定的专业素养,且技术人员在长时间、高强度、高重复性的操作中极易出现人为差错。这不仅导致样品检测能力存在瓶颈,还不可避免地存在较大数据质量风险,难以持续保障样品检测的时效性与数据质量^[1]。随着大数据与人工智能等新兴技术深度赋能生态环境保护领域,监测数据智能研判、治理决策智慧辅助等数智化应用日趋成熟。相比之下,传统环境监测实验室高度依赖人工操作,数据供给能力已难以匹配生态环境保护工作的需求。

实验室自动化可有效提高检测的精密度、准确性和可重复性,同时降低人为误差,提高检测效率^[2]。2020年,生态环境部发布的《“十四五”生态环境监测规划》明确提出“强化全自动实验室等设备技术验证工作,推动监测技术与业务实现革命性创新”^[3];《2024年深化全国生态环境智慧监测创新应用工作要点》将水质监测实验室全自动检测技术纳入网络高效感知专题^[4],旨在解决人工检测效率与质量欠佳、人为干扰因素较多且监测成本较高、监测指标与频次不足以及检测过程缺乏溯源性等问题。而黑灯实验室(又称无人实验室)是一种无需人工现场值守、可实现7×24小时高效运行的全面自动化实验室^[5-8],在环境监测领域应用前景非常广阔。

1 黑灯实验室发展现状

实验室自动化的发展进程始于高端检测设备的自动进样装置以及自动化前处理设备,随后逐步向全实验室自动化方向演进。目前实验室的自动化检测已形成多元技术,涵盖连续流动分析、流动注射分析、微流控系统(芯片实验室)/微型全分析系统、微孔板兼容系统、离心式分析仪、卡盒式分析仪、自动进样器、多轴机器人及全实验室自动化等技术类型^[9]。

当前,主流的自动化实验室多采用流水线自动化模式,即借助轨道与机械臂将多个功能模块(例如样本前处理、检测、存储模块)相互连接,实现样本在各模块间的自动流转。此类自动化系统已在生命科学、诊断实验、工业与分析化学等领域得到不同程度的应用,其中在临床检验和药物筛选领域的应用较为深入且成熟^[10-12]。目前,环境监测领域的全流程自动化实验室处于起步摸索阶段,国内已建成的自动化实验室聚焦于水质监测领域,且主要为通过轨道类物流组件串联针对特定检测指标特异性开发的功能模组,并以此构建适应相应指标检测能力的流水线自动化实验室。因可实现无人工现场值守与7×24小时连续高效运行,该类实验室亦被归为黑灯实验室范畴(图1)^[13-15]。



图1 典型流水线式黑灯实验室示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical assembly-line-based lights-out laboratory

此类流水线式环境监测黑灯实验室的功能模组设计以检测指标为核心导向,其设计理念、模组配置及叠加方式延续了水质自动监测站功能模组集成的技术路径,仅适用于检测指标单一、样品批量大、

数量稳定且检测流程简单固定的应用场景。

实际环境监测工作中,存在不同指标的样品数量变化大、有效期差异大、前处理耗时长等特点,流水线式黑灯实验室在应用中存在系统灵活性差、资源利用率低、系统扩展困难等缺陷:

首先,流水线自动化模式工作流程为树状结构,在面对多个指标、大量样品时,其主干流水线容易出现淤堵现象;各个分叉的检测功能模组采用全实验工序集成化设计,既不能实现各模组内置前处理组件和检测器组件的跨指标调度共享,也难以进行各模组间的指标功能协调,因此建成后无法实现样品处理和样品检测通量的动态调整。

其二,环境监测工作的实际样品数量存在显著不确定性,流水线式黑灯实验室需为监测指标配置冗余功能模组,当某指标样品量减少时,模组闲置问题凸显;同时系统中大量采用非经典检测方法标准原理的功能模块,无法兼容现有实验设备与技术体系,且需重新开展检测方法与计量规范的开发、验证及标准化工作,大幅增加技术应用与推广成本。

其三,流水线式黑灯实验室采用二维开放空间布局,对实验室场地面积与空间形态要求严苛;且不同指标样品的处理与检测对环境条件要求存在差异,为避免样品交叉污染需设置专属物理隔离措施,导致实验室的设计、建设、改造及环境条件监控成本居高不下,且易受现有实验室场地条件的限制。同时,为保障各功能模组的兼容性,供应商倾向于上游设备研发、中游软件开发、下游应用落地全环节自主布局,产业链各环节无法实现有效的行业分工与协同发展,易于形成高度封闭的开发环境;实验室建成后易与单一供应商形成深度技术绑定,应用单位无法根据自身需求灵活整合资源,系统优化升级与功能扩展受供应商技术发展水平制约,进而陷入“环境封闭→应用受限→迭代缓慢”的发展困境。

其四,流水线式黑灯实验室的各功能模组高度耦合,极大限制了跨领域扩展应用能力;气相色谱-质谱联用仪、液相色谱三重四极杆质谱仪、电感耦合等离子体质谱仪等大型检测设备难以融入现有系统,即便实现集成适配,也无法完成模块解耦,设备的空闲机时难以用于食品安全、产品质量检测等其他领域的样品测试,造成仪器设备资源浪费。

其五,针对高盐度、高浊度、含大量有机物的工业废水等复杂基质样品,系统缺乏样品基质特性的预检环节与灵活增设预处理流程的适配能力,无法根据样品实际基质情况采取针对性处理步骤,降低或消除基质对检测结果的干扰,易导致复杂基质样品的检测准确性下降,难以满足实际环境监测中复杂水样的检测需求。

2 柔性架构水质黑灯实验室的构建

水质黑灯实验室的架构体系整体划分为感知层、网络层、数据层与应用层4个核心层级,各层级协同联动、层层递进,可实现实验信息采集、传输、处理与应用的全流程闭环管理。其中,感知层通过部署各类传感器、智能识别单元及智能前处理与检测单元,实时采集实验环境参数、仪器设备运行状态及样品前处理与检测结果等多维度信息,为系统运行提供基础数据支撑;网络层依托5G、Wi-Fi、工业以太网等通信技术,构建低延迟、高带宽的专用通信网络,实现感知层终端设备与数据中心的无缝互联及数据的高效、稳定传输;数据层基于云计算平台、分布式数据库及区块链技术,完成对全流程数据的整合、计算、存储与安全管理,借助区块链技术的不可篡改特性,保障实验数据的可溯源性与可信度,满足环境监测数据的审计规范与科研数据的管理要求,同时依托大数据分析算法对海量监测数据进行深度挖掘,提炼数据内在规律,为环境污染治理决策与监测方法优化提供科学依据;应用层结合环境监测的实际业务需求,提供样品自主检测、实验环境智能调控、仪器设备智能化管理、实验过程远程监控与协同操作等多元智能服务,实现系统功能的落地应用。

针对现有流水线式黑灯实验室灵活性不足、资源利用率偏低、系统扩展能力有限等技术缺陷,本研究构建的柔性架构黑灯实验室(Lights-out laboratories with flexible architecture)严格遵循国家标准方法规定的测试原理与实验步骤,依据环境样品检测的工序特征,将感知层、网络层、数据层、应用层拆解为标准化、模块化的具体功能单元,通过中控系统的统一调度与集中管控,实现各功能单元的内部功能动态调整与设备机时共享,且可在无人值守的工况下自主完成实验流程的解析、编程与自动化执

行, 最终形成一套突破检测指标限制与实验室物理空间边界, 可适配多样化检测指标与弹性化样品检测需求的智能化数据生产线。

2.1 软件系统

本研究构建的水质黑灯实验室, 其软件系统由方法数据库、自动导引车(AGV)任务管理系统及信息处理系统(IPS)三部分构成, 各子系统协同运作, 实现实验流程的智能化调度与检测全流程的信息管控, 系统架构见图2。

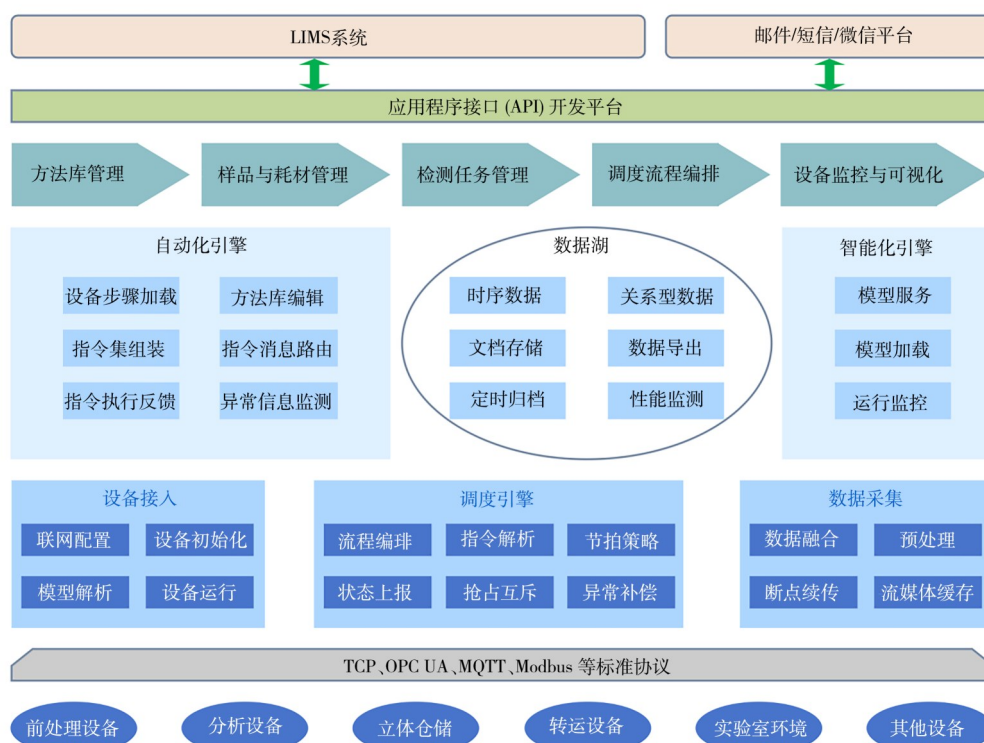


图2 黑灯实验室控制系统软件构架

Fig. 2 Software architecture of the control system for lights-out laboratories

2.1.1 方法数据库 以中控系统搭建的标准化方法模板为基础, 依据各检测指标对应的检测标准与技术规范完成数据库的构建与命名。该数据库针对各类检测标准开展测试程序的结构化解构, 系统梳理标准实验节点的功能需求、工序匹配规则、管材与试剂选型要求、功能岛适配规范及数据报表格式等关键信息, 并实现与仓储管理系统(WMS)、物联网样品处理与检测系统(IOT)的无缝对接。数据库支持基于测试程序相似性的检测指标快速拓展, 可实现方法资源的标准化管理与检测需求的柔性适配。

2.1.2 AGV任务管理系统 用户向中控系统提交检测工作需求后, 系统自动调取方法数据库相关信息, 综合评估样品检测进度、功能岛资源占用状态及AGV实时运行情况, 动态分配并灵活调整任务执行与样品转运指令, 同时规划最优转运路径, 向WMS仓储系统与AGV物流系统下发协同操作指令。该系统可实现样品自动仓储、提取、分样、标定/校准、加标, 以及耗材与试剂的精准调取、样品跨功能岛的处理与转运等全流程的智能化调度。

2.1.3 IPS信息处理系统 中控系统下达的任务指令经IOT样品处理与检测系统, 精准分发至各功能岛的可编程逻辑控制器(PLC), 各功能岛PLC依据方法数据库预设的检测序列, 执行样品检测与流转操作。实验执行过程中产生的检测数据、设备模块运行状态等信息, 由IOT样品处理与检测系统同步采集、实时处理, 并回传至中控系统完成数据拟合与可视化展示, 同时将全量数据传输至实验室信息管理系统(LIMS), 自动生成标准化检测报告。由此形成“指令下发—执行反馈—数据归集—结果输出”的全链路信息管控体系, 确保检测过程与数据信息的全程可管控、可追溯。

2.2 硬件系统

本研究构建的水质黑灯实验室，其硬件系统由 WMS、IOT、AGV3 部分组成，通过中控软件实现控制系统与 3 大硬件系统的互联互通，构建形成一体化的硬件操控体系。本实验室硬件系统架构见图 3，核心组成单元见图 4。

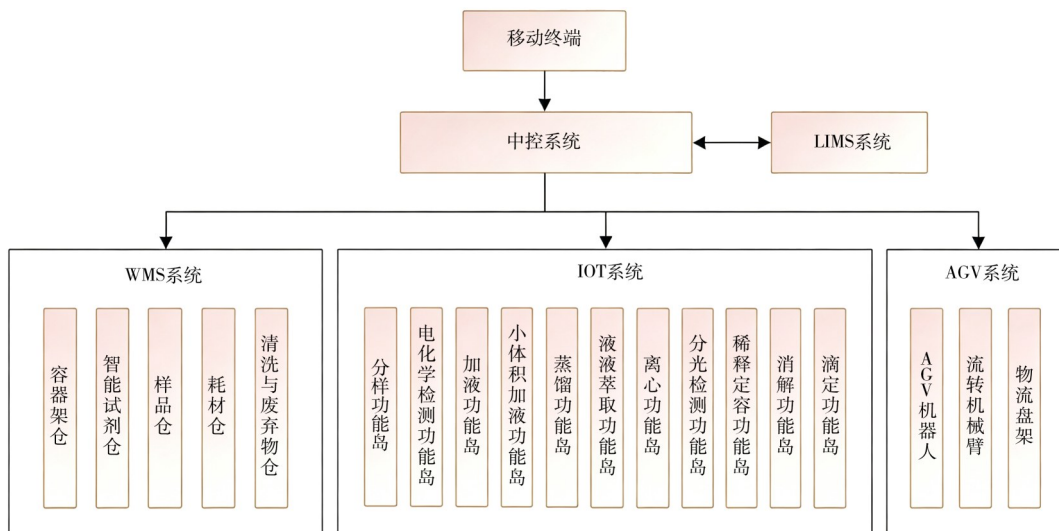


图 3 黑灯实验室控制系统硬件构架

Fig. 3 Hardware architecture of the control system for lights-out laboratories

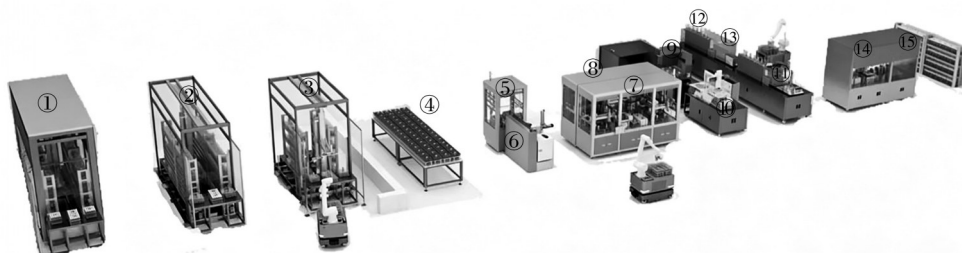


图 4 黑灯实验室主要组成部分

Fig. 4 Main components of lights-out laboratories

①样品仓；②耗材仓；③智能试剂仓；④容器架仓；⑤电化检测功能岛；⑥离心功能岛；⑦分样功能岛；⑧加液功能岛；⑨滴定功能岛；⑩消解功能岛；⑪液液萃取功能岛；⑫蒸馏功能岛；⑬稀释定容功能岛；⑭分光检测功能岛；⑮小体积加液功能岛

该硬件系统的各功能模块无严格空间布局约束，加液、蒸馏、离心、消解等前处理功能岛与电化、分光等检测功能岛，均可直接适配或通过更换配件耗材快速调整功能配置，实现各功能岛的跨检测指标共享，大幅提升硬件设备的利用率与适配性。对于容易发生交叉污染的挥发酚和氨氮指标，本实验室通过将液液萃取功能岛与加液功能岛进行物理分隔的方式避免样品处理过程的交叉污染，使用专用独立比色池通道避免测试过程的交叉污染。对于易受浊度影响的氨氮等指标，自动根据检测标准规定，采取絮凝沉淀和离心分离，消除相应干扰。

2.3 运行流程

本研究构建的水质黑灯实验室，全程采用与人工检测一致的国家现行有效检测方法标准，其自动化运行流程严格遵循待测指标方法标准规定的测试原理与实验操作步骤，保障检测方法的规范性与结果的可比性。样品送入实验室后，首先置于智能样品仓完成分类存储，并根据样品属性匹配对应的标准化保存条件；随后将样品转运至分样功能岛，自动完成样品分装、试液添加与提取等前处理基础操作；继而以 AGV 自动导引车为转载体，依据预设实验工序，在与方法标准实验要求相匹配的各功能岛间完成样品的自动化流转、专项前处理与指标检测测试，同时同步开展检测数据的实时采集、反馈与整理；检测任务完成后，系统将自主完成实验废弃物的分类收储、管路与实验器皿的自动化清洗，随后自动恢复至样品接收整备状态，实现实验流程的闭环运行。实验室自动化运行流程详见图 5。

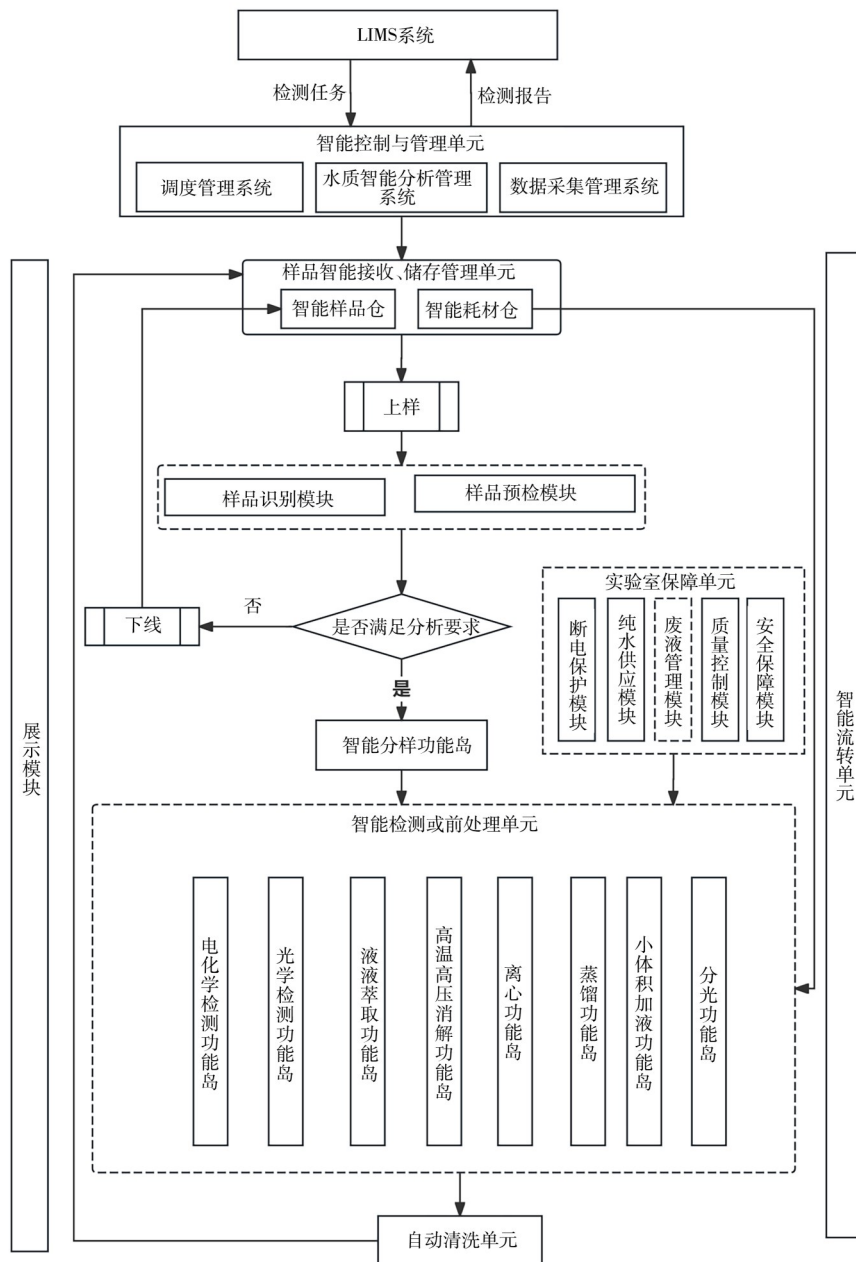


图5 自主检测流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of self-driving analysis

2.4 性能验证

本研究基于不同的检测流程，选取高锰酸盐指数、总氮、氨氮、硝酸盐氮、六价铬、氰化物、阴离子表面活性剂(根据其代表性物质直链烷基苯磺酸钠，简称LAS)7个指标作为研究对象，对所构建的水质黑灯实验室的性能与监测标准的符合性进行验证。其中，高锰酸盐指数的前处理采用恒温催化方法，总氮的前处理采用高压消解方法，氰化物的前处理采用蒸馏方法，阴离子表面活性剂的前处理采用萃取方法，其他指标不涉及复杂前处理。

2.4.1 检测方法 构建的柔性架构黑灯实验室采用的监测标准如下：高锰酸盐指数，《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892-89)^[20]；总氮，《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636-2012)^[21]；氨氮，《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009)^[22]；硝酸盐氮《水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行)》(HJ/T 346-2007)^[23]；六价铬，《水质 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法》(GB 7467-87)^[24]；氰化物，《水质 氰化物的测定 容量法和分光光度法》(HJ 484-2009，

异烟酸-吡唑啉酮分光光度法)^[25]; 阴离子表面活性剂,《水质 阴离子表面活性剂的测定 亚甲蓝分光光度法》(GB 7494-87)^[26]。具体检测流程详见图6。

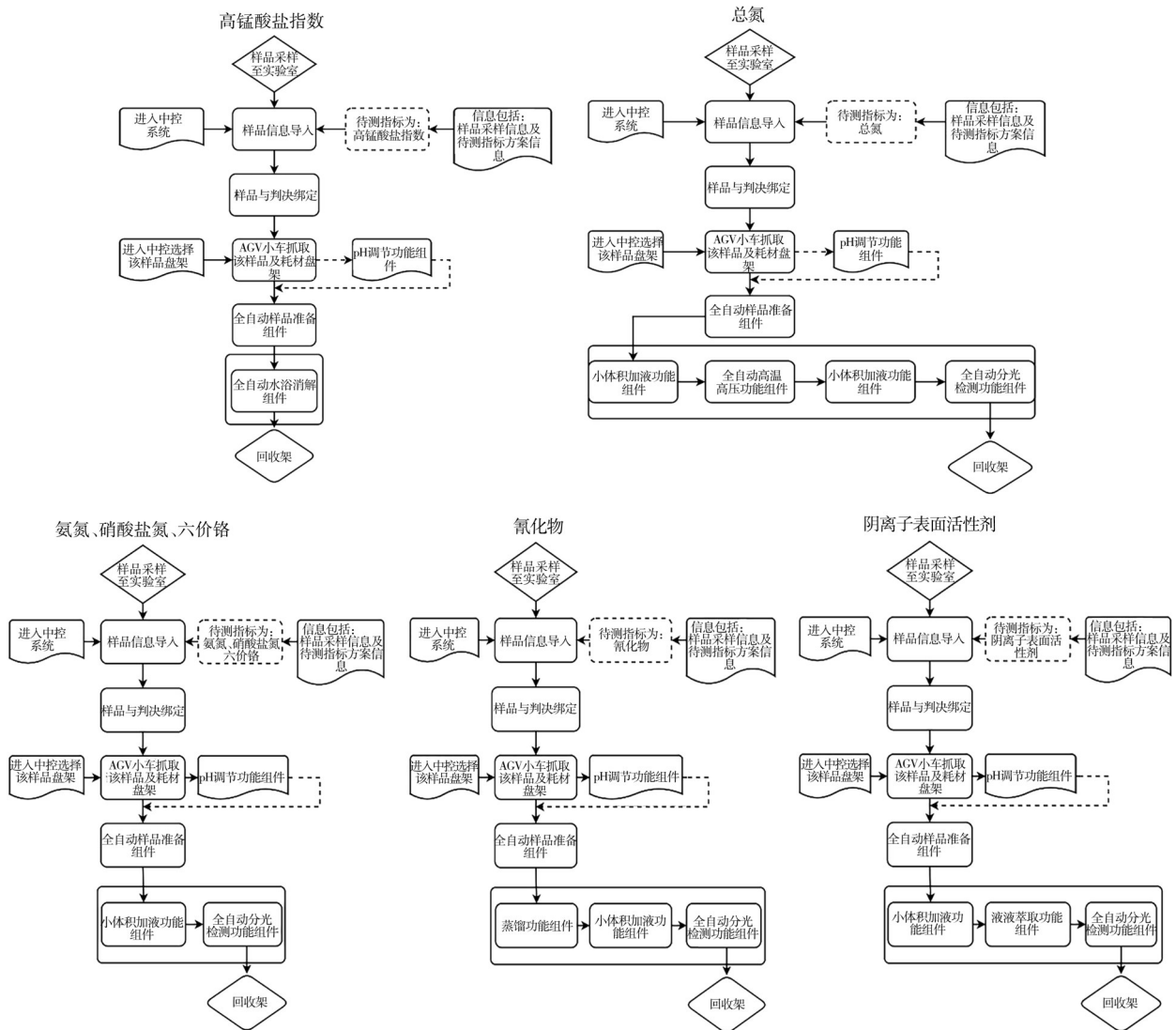


图6 黑灯实验室自动检测流程分类

Fig. 6 Classification of automatic analysis processes for lights-out laboratories

2.4.2 试剂与材料 实验所用全部标准物质、试剂及耗材均严格遵循监测标准要求,实验用水均为新制备电阻率 $18\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的去离子水。

2.4.3 校准曲线 黑灯实验室自动完成氨氮、硝酸盐氮、总氮、六价铬、氰化物、阴离子表面活性剂校准曲线的绘制,高锰酸盐指数采用滴定法测定,无需绘制校准曲线。黑灯实验室的整体检测流程完全模拟手工操作流程,通过计算两种操作标准曲线的相关系数评价标准曲线是否符合对应标准要求,通过比较两者曲线的斜率判断黑灯实验室与手工检测灵敏度的一致性。选取某一时间段(非连续,间隔数天)内黑灯实验室与手工检测所得的5条校准曲线进行对比,具体结果见表1。

表1 黑灯实验室校准曲线与手工校准曲线对比

Table 1 Comparison between calibration of lights-out laboratories and manual operations

Calibration		Lights-out laboratories			Manual operation		
		Slope	Intercept	Correlation coefficient	Slope	Intercept	Correlation coefficient
氨氮	曲线1	0.007 02	-0.002 3	0.999 9	0.007 12	0.002 5	0.999 9
	曲线2	0.006 47	0.001 9	0.999 4	0.007 04	-0.000 1	0.999 8
	曲线3	0.006 67	-0.003 6	0.999 9	0.007 23	0.003 6	0.999 9
	曲线4	0.007 08	-0.008 5	0.999 7	0.006 50	0.001 2	0.999 9
	曲线5	0.007 09	-0.003 4	0.999 8	0.006 31	-0.005 1	0.999 8

(续表1)

Calibration		Lights-out laboratories			Manual operation		
		Slope	Intercept	Correlation coefficient	Slope	Intercept	Correlation coefficient
硝酸盐氮	平均值	0. 006 87	-0. 003 2	—	0. 006 84	0. 000 4	—
	相对标准偏差	4. 1%	—	—	6. 0%	—	—
	斜率均值偏差	0. 3%	—	—	—	—	—
	曲线 1	0. 227 5	-0. 000 1	0. 999 9	0. 225 1	-0. 002 0	0. 999 2
	曲线 2	0. 216 3	0. 001 0	0. 999 8	0. 227 1	-0. 004 2	0. 999 1
	曲线 3	0. 227 7	-0. 000 2	0. 999 9	0. 220 0	0. 011 2	0. 999 2
	曲线 4	0. 228 8	0. 004 3	0. 999 3	0. 228 1	-0. 004 6	0. 998 4
	曲线 5	0. 211 1	-0. 001 2	0. 999 9	0. 234 6	-0. 030 6	0. 998 9
	平均值	0. 222 0	0. 000 8	—	0. 227 0	-0. 006 0	—
	相对标准偏差	3. 6%	—	—	2. 3%	—	—
总氮	斜率均值偏差	1. 2%	—	—	—	—	—
	曲线 1	0. 010 7	0. 012 7	0. 999 4	0. 010 5	-0. 000 4	0. 999 9
	曲线 2	0. 010 2	0. 004 4	0. 999 8	0. 010 7	0. 000 8	0. 999 9
	曲线 3	0. 010 8	0. 003 1	0. 999 9	0. 011 0	0. 000 8	0. 999 8
	曲线 4	0. 009 9	0. 002 5	0. 999 5	0. 010 8	0. 001 3	0. 999 9
	曲线 5	0. 011 0	0. 005 6	0. 999 8	0. 010 8	0. 000 2	0. 999 8
	平均值	0. 010 5	0. 005 7	—	0. 010 8	0. 000 5	—
	相对标准偏差	4. 3%	—	—	1. 7%	—	—
	斜率均值偏差	1. 5%	—	—	—	—	—
	曲线 1	0. 043 5	-0. 002 3	0. 999 7	0. 046 5	0. 000 3	0. 999 8
六价铬	曲线 2	0. 042 4	-0. 000 6	0. 999 9	0. 044 1	-0. 005 2	0. 999 8
	曲线 3	0. 044 1	-0. 003 1	0. 999 9	0. 046 8	0. 007 7	0. 999 9
	曲线 4	0. 044 8	-0. 003 1	0. 999 9	0. 045 2	0. 003 8	0. 999 9
	曲线 5	0. 043 4	-0. 002 5	0. 999 9	0. 048 3	0. 001 8	0. 999 9
	平均值	0. 043 6	-0. 002 3	—	0. 046 2	0. 001 7	—
	相对标准偏差	2. 0%	—	—	3. 5%	—	—
	斜率均值偏差	2. 9%	—	—	—	—	—
	曲线 1	0. 125	-0. 000 2	0. 999 9	0. 147	0. 006 2	0. 999 8
	曲线 2	0. 139	-0. 000 8	0. 999 9	0. 147	0. 005 4	0. 999 8
	曲线 3	0. 135	0. 000 9	0. 999 6	0. 147	0. 006 3	0. 999 8
氰化物	曲线 4	0. 132	0. 001 1	0. 999 9	0. 149	0. 007 4	0. 999 8
	曲线 5	0. 138	-0. 004 1	0. 999 6	0. 152	0. 003 5	0. 999 9
	平均值	0. 134	-0. 000 6	—	0. 148	0. 005 8	—
	相对标准偏差	4. 2%	—	—	1. 5%	—	—
	斜率均值偏差	5. 0%	—	—	—	—	—
	曲线 1	0. 005 01	-0. 003 4	0. 999 7	0. 004 48	0. 001 3	0. 999 8
	曲线 2	0. 004 99	-0. 002 6	0. 999 4	0. 004 54	0. 000 4	0. 999 7
	曲线 3	0. 005 28	0. 004 2	0. 999 7	0. 004 09	-0. 005 5	0. 999 2
	曲线 4	0. 005 30	-0. 007 3	0. 999 5	0. 004 54	0. 000 2	0. 999 5
	曲线 5	0. 005 04	-0. 006 6	0. 999 2	0. 004 58	-0. 004 9	0. 999 3
LAS	平均值	0. 005 12	-0. 003 1	—	0. 004 45	-0. 001 7	—
	相对标准偏差	3. 0%	—	—	4. 5%	—	—
	斜率均值偏差	7. 1%	—	—	—	—	—

由表1可知，黑灯实验室氨氮、硝酸盐氮、总氮、六价铬、氰化物、阴离子表面活性剂校准曲线的相关系数介于0.999 0~0.999 9之间，符合标准方法对校准曲线的要求。黑灯实验室曲线斜率均值与手工检测曲线斜率均值的相对偏差为0.3%~7.1%，表明两者具有基本相同的灵敏度。

2.4.4 检出限与测定下限 阴离子表面活性剂、高锰酸盐指数空白试验样品(纯水)可检出，故均以空白试验样品为被测样品，按照检测方法连续测定7次并计算检出限；氨氮、硝酸盐氮、总氮、六价铬、氰化物空白试验样品无检出，分别对浓度值为方法检出限3~5倍的样品进行7次平行测定并计算检出限^[16-18]。以4倍的样品检出限作为测定下限。检出限具体计算方法见公式1。

$$MDL=t_{(n-1,0.99)}\times S$$

(1)

式中：MDL为方法检出限；*n*为样品的平行测定次数；*t*为自由度为*n*-1、置信度为99%时的*t*分布(单侧)；*S*为*n*次平行测定的标准偏差。测样次数为7次，置信度为99%时的*t*值为3.143。

黑灯实验室的检出限、测定下限测试结果详见表2。

表2 检出限和测定下限验证结果

Table 2 Validation results of detection limit and determination limit

Blank sample ID	NH ₃ -N(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	TN(mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)	CN ⁻ (mg/L)	LAS(mg/L)	I _{Mn} (mg/L)
1	0.112	0.33	0.22	0.016	0.010 7	0.091	0.330
2	0.106	0.33	0.20	0.016	0.010 4	0.087	0.364
3	0.100	0.32	0.19	0.016	0.010 0	0.087	0.278
4	0.093	0.32	0.18	0.016	0.010 0	0.095	0.287
5	0.106	0.31	0.20	0.016	0.010 0	0.089	0.286
6	0.106	0.32	0.20	0.017	0.010 0	0.091	0.274
7	0.100	0.33	0.21	0.017	0.007 4	0.085	0.302
平均值	0.103	0.32	0.20	0.016	0.010 0	0.090	0.303
标准偏差	0.006 1	0.008	0.013	0.000 5	0.001 1	0.003	0.033
检出限	0.019 2	0.026	0.041	0.001 6	0.003 5	0.009	0.104
测定下限	0.076 8	0.104	0.164	0.006 4	0.014 0	0.036	0.416
标准方法检出限	0.025	0.08	0.05	0.004	0.004	0.05	测定范围 0.5~4.5
标准方法测定下限	0.100	0.32	—	—	0.016	—	—

由表2可知,黑灯实验室对氨氮、硝酸盐氮、总氮、六价铬、氰化物及阴离子表面活性剂等指标的检出限均低于对应标准方法规定的检出限;高锰酸盐指数的测定下限低于标准方法给定测定范围的下限。上述无机指标的检出限水平均满足相应标准方法的技术要求。

2.4.5 精密度 对一定浓度的有证标准物质进行6次重复测定,计算测试结果的相对标准偏差,对系统精密度进行评价^[17-19]。结果表明,在测试相近含量水平的样品时,黑灯实验室测试结果的相对标准偏差均低于检测方法标准给出的参考值,测试结果的精密度均优于检测方法标准要求。具体测试结果见表3。

表3 精密度和正确度验证结果

Table 3 Results of precision and trueness verification

Parameter	NH ₃ -N		NO ₃ ⁻ -N		TN		Cr ⁶⁺	CN ⁻	LAS		I _{Mn}	
	2005196	B23120267	203108	203299	203375	202282	质控样品	B24110180	2831148	201142		
测定结果	1	0.504	0.59	1.95	3.69	0.151	0.065	0.445	2.23	2.25	3.42	
(mg/L)	2	0.507	0.62	1.95	3.61	0.150	0.066	0.455	2.28	2.13	3.43	
	3	0.501	0.59	1.90	3.74	0.151	0.062	0.441	2.21	2.21	3.58	
	4	0.504	0.59	1.85	3.76	0.151	0.066	0.455	2.28	2.20	3.56	
	5	0.498	0.60	1.91	3.59	0.151	0.067	0.449	2.25	2.19	3.38	
	6	0.498	0.60	1.88	3.76	0.149	0.065	0.451	2.26	2.19	3.50	
相对标准偏差(%)	0.8	1.7	2.1	2.2	0.7	3.1	1.3	1.3	1.8	2.3		
监测标准中实验室内相对标准偏差(%) [*]	—	2.6(1.80)	0.6~4.3 (1.52)	0.8~3.4 (4.78)	4.9 (0.122)	7.4 (0.032)	2.3 (0.305)	—	—	—	4.2(4.0)	
测试结果	0.498	0.59	1.85	3.59	0.149	0.062		2.21	2.13	3.38		
最小值(mg/L)												
测试结果	0.507	0.62	1.95	3.76	0.151	0.067		2.28	2.25	3.58		
最大值(mg/L)												
有证标准物质	0.518±	0.612±0.042	1.86±0.13	3.66±0.22	0.150±	0.065 5±	—	2.13	2.16	3.32		
标准值(mg/L)	0.028				0.005	4.28×10 ⁻³		±0.20	±0.30	±0.28		
测试结果	-0.020~	-0.02~0.01	-0.01~0.09	-0.07~0.10	-0.001~	-3.5×10 ⁻³ ~		0.08~0.15	-0.03~	0.06~		
绝对误差(mg/L)	-0.011				0.001	1.5×10 ⁻³			0.09	0.26		
测试结果	-3.9~	-3.3~1.6	-0.5~4.8	-1.9~2.7	-0.7~0.7	-5.3~2.3		3.8~7.0	-1.4~	1.8~7.8		
相对误差(%)	-2.1									4.2		

* represents the intra-laboratory relative deviation obtained when testing samples with the concentration (mg/L) specified in parentheses in the standard methods; reference values for intra-laboratory relative standard deviation are not provided in the standard method documents for CN⁻ and NH₃-N(*表示标准方法中,测定括号内浓度(mg/L)的样品时获得的实验室内相对偏差;在氰化物、氨氮的方法标准文本中,未提供实验室内相对标准偏差的参考值)

2.4.6 正确度 对一定浓度的有证标准物质进行6次重复测定,计算测定结果平均值与有证标准物质标示浓度的相对误差,对系统正确度进行评价^[17-19];其中对于高浓度水平的有证标准物质,黑灯实验室依据初次测定结果自动完成稀释并重新测定。7项无机物指标的单次测定值及其平均值均落在标准值的扩展不确定度区间内,相对误差介于-5.3%~7.8%之间(表3)。结果表明,黑灯实验室检测各项指

标的正确度均符合相关监测标准要求。

2.4.7 实际样品比对 在通过方法验证证明黑灯实验室满足监测标准规定测试性能要求的基础上，还需通过实际样品比对证明其与手工检测的等效性和一致性，方能在水质环境监测工作中广泛应用。选择日常水质监测工作中常涉及的地下水、地表水、生活污水以及工业废水 4 类样品，以及硝酸盐氮、六价铬、总氮、氨氮、氰化物、阴离子表面活性剂 6 个监测指标开展实际样品比对试验。

受实验室条件限制，手工检测测试由另一取得相应检验检测资质的实验室完成，与黑灯实验室在样品运输、保存时长、标准物质、化学试剂、实验用水、环境条件、人员操作等多项因素方面存在差异，而环境样品会随样品运输保存条件和保存时间变化而变化，难以从统计上评价比对测试结果的一致性。针对这一情况，环境监测领域一般按照《环境水质监测质量保证手册（第二版）》^[19]，通过计算检测实验室间的相对偏差判定实验室间精密度是否符合要求，并间接判断两种方式测试结果的一致性。

表 4 实际样品比对测试相对偏差分布统计
Table4 Statistical distribution of relative deviations in actual sample comparison tests

Monitoring items and sample types		Surface water and groundwater	Domestic waste- water	Industrial waste- water	Total
氨氮	样品数量*(个)	20/20	3/3	6/6	29/29
	相对偏差(%)	0.5~12.2	7.7~9.2	4.2~6.9	0.8~12.2
	样品浓度(mg/L)	0.268~1.08	1.67~2.08	36.9~43.7	—
	室间相对偏差要求*(≥0.1%)	≤20.0	≤20.0	≤20.0	≤20.0
	合格率(%)	100.0	100.0	100.0	100.0
总氮	样品数量*(个)	27/31	3/3	6/6	40/40
	相对偏差(%)	0~6.4	3.5~5.6	1.9~4.9	0~6.4
	样品浓度(mg/L)	1.32~11.4	9.61~11.1	39.9~47.8	—
	室间相对偏差要求(≥1.0%)	≤10.0	≤10.0	≤10.0	≤10.0
	合格率(%)	100.0	100.0	100.0	100.0
六价铬	样品数量(个)	23/23	—	—	23/23
	样品浓度(mg/L)	0.029~0.100	—	—	—
	相对偏差(%)	0.0~9.10	—	—	0.0~9.10
	室间相对偏差要求(0.01%~1.0%)	≤15.0	—	—	≤15.0
	合格率(%)	100.0	—	—	100.0
氰化物	样品数量(个)	20/20	—	—	20/20
	样品浓度(mg/L)	0.054~0.166	—	—	—
	相对偏差(%)	0.4~6.7	—	—	0.4~6.7
	室间相对偏差要求(0.05%~5.0%)	≤20.0	—	—	≤20.0
	合格率(%)	100.0	—	—	100.0
硝酸盐氮	样品数量(个)	22/22	—	—	22/22
	样品浓度(mg/L)	0.97~2.03	—	—	—
	相对偏差(%)	0.6~8.5	—	—	0.6~8.5
	室间相对偏差要求(0.5%~4.0%)	≤25.0	—	—	≤25.0
	合格率(%)	100.0	—	—	100.0
阴离子表面活性剂	样品数量(个)	10/10	—	—	10/10
	样品浓度(mg/L)	0.16~0.53	—	—	—
	相对偏差(%)	1.7~6.3	—	—	1.7~6.3
	室间相对偏差要求(0.2%~5.0%)	≤25.0	—	—	≤25.0
	合格率(%)	100.0	—	—	100.0

*The sample quantity refers to “the number of samples with qualified inter-laboratory relative deviation” / “total number of samples included in statistics”; **The requirements for inter-laboratory relative deviation in the table correspond to the concentration ranges in parentheses, with the unit of concentration ranges being “mg/L” (*样品数量为“室间相对偏差合格样品数量/参与统计样品总量”; **表中室间相对偏差要求对应括号中的浓度范围，浓度范围单位为 mg/L)

由表 4 和图 7 可知，按照《环境水质监测质量保证手册（第二版）》^[19]对实验室间相对偏差的规定，黑灯实验室和手工检测测定硝酸盐氮、六价铬、总氮、氨氮、氰化物、阴离子表面活性剂的实验室间相对偏差不仅合格率达到 100%，且绝大部分低于实验室间相对偏差规定限值的 3/4。上述结果证实，黑灯实验室测定结果与传统手工检测方法具有良好的等效性和一致性。

综上，本研究构建的柔性架构黑灯实验室整体性能满足相关监测标准及技术规范要求。

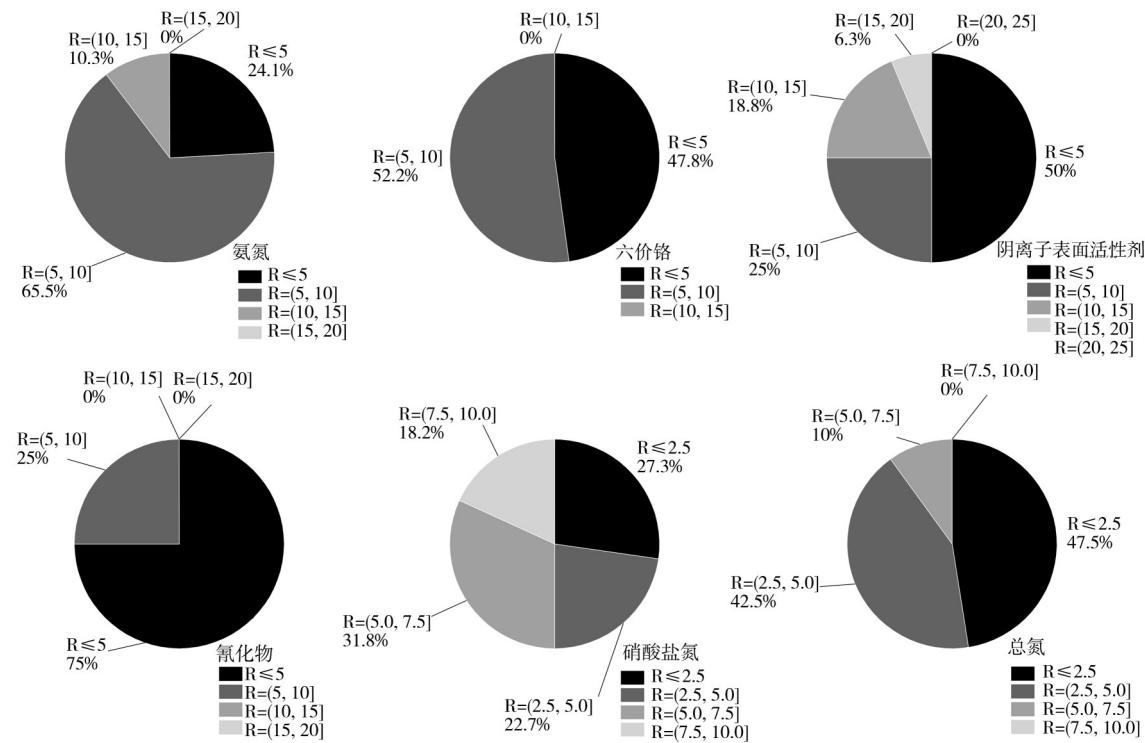


图 7 实际样品比对测试相对偏差区间的频次占比分布

Fig. 7 Distribution proportion of relative deviation in comparative tests of actual samples

2.5 扩展性验证

柔性架构黑灯实验室采用按工序模块化划分的设计思路，具有良好的能力扩展性。本研究通过在中控系统增加相应方法文件，在加液功能岛补充相应试剂溶液，由系统自行调度控制各功能单元，仅使用前述 7 项监测指标相应硬件，即采用《水质 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法》(HJ 601-2011)^[27]、《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893-89)^[28]、《水质 游离氯和总氯的测定 N, N-二乙基-1, 4-苯二胺分光光度法》(HJ 586-2010)^[29]、《水质 胍和甲基胍的测定 对二甲氨基苯甲醛分光光度法(第一部分胍的测定)》(HJ 674-2013)^[30]、《水质 挥发酚的测定 4-氨基安替比林分光光度法》(HJ 503-2009, 方法 1 萃取分光光度法)^[31]、《水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB 7493-87)^[32]等经典手工分析方法，实现了水质甲醛、总磷、总氯、游离氯、水合胍、挥发酚、亚硝酸盐氮等监测指标的扩展；通过仅增加酸化吹气模块，即采用《水质 硫化物的测定 亚甲基蓝分光光度法》(HJ 1226-2021)^[33]完成了水质硫化物的检测能力扩展。经与手工检测实验室采用相同方法标准进行实际水样、模拟水样和标准样品的比对测试，对照《环境水质监测质量保证手册(第二版)》^[19]对实验室间相对偏差或方法标准的精密度规定，证实黑灯实验室新扩展项目与手工测试结果具有良好的等效性和一致性。比对数据详见表 5。

表 5 扩展指标比对测试
Table 5 Comparison test results for the extended indicators

检测指标	26S0116001			26S0116002			26S0116003			标准值	CRM			最大 相对 偏差 /%	标准 规定 限值*
	黑 灯	手 工	相对	黑 灯	手 工	相对	黑 灯	手 工	相对		黑 灯	手 工	相对		
	实验室	分析	偏差	实验室	分析	偏差	实验室	分析	偏差		实验室	分析	偏差		
	mg/L	mg/L	%	mg/L	mg/L	%	mg/L	mg/L	%	mg/L	mg/L	mg/L	%	%	%
甲醛	0.20	0.20	0.0	1.20	1.12	3.4	2.77	2.73	0.7	1.22±0.05	1.20	1.24	1.6	3.4	20
总磷	0.12	0.13	4.0	0.71	0.74	2.1	1.05	1.10	2.3	0.924±0.033	0.90	0.931	1.7	4.0	10
总氯	0.021	0.022	2.3	0.082	0.081	0.6	0.197	0.198	0.0	—	—	—	—	2.3	—
游离氯	0.019	0.022	7.3	0.081	0.081	0.0	0.199	0.197	0.5	—	—	—	—	7.3	—
硫化物	0.016	0.018	5.9	0.049	0.056	6.7	0.097	0.097	0.0	1.76±0.21	1.63	1.71	2.4	6.7	30
挥发酚	0.0019	0.0019	1.3	0.0042	0.0044	2.7	0.0304	0.0309	0.8	0.101±0.006	0.0996	0.104	2.1	2.7	30
水合胍	0.013	0.013	0.0	0.040	0.041	1.2	0.079	0.078	0.6	—	—	—	—	1.2	10
亚硝酸盐氮	0.043	0.040	3.6	0.121	0.122	0.4	0.159	0.159	0.0	41.1±1.8×10 ⁻³	41×10 ⁻³	42×10 ⁻³	0.7	3.6	20

*No specified inter-laboratory relative deviation values are available for formaldehyde and sulfide; their limit values shall adopt the intra-laboratory parallel measurement relative deviation limits stipulated in the quality control and quality assurance requirements of the corresponding analytical method standards(*甲醛、硫化物无实验室间相对偏差规定，其限值取其方法标准中质量控制和质量保证要求所规定实验室内平行测定相对偏差限值)

3 柔性架构黑灯实验室的优势、局限及发展方向

3.1 优势

采用柔性架构的黑灯实验室突破了传统检测指标约束与实验室物理空间边界，不仅继承了流水线式黑灯实验室的固有优势，还可适配多类型检测指标与弹性化样品检测需求，具备系统灵活性强、资源利用率高、扩展性优异等技术特点。

首先，该黑灯实验室将传统流水线式黑灯实验室的树状工作流程重构为网状协同架构。前处理单元与检测单元可依据样品紧急程度、有效期及样品量等实际工况，通过动态调度检测次序、调整单元功能等方式，无需配置大量冗余功能模块，即可灵活应对样品量波动及应急样品优先检测等应用场景，有效提升了系统运行弹性，并降低建设与运维成本。

其次，柔性架构黑灯实验室采用按工序模块化划分的设计思路，可采用与人工检测一致的测试原理、实验步骤及设备组件，更易于工程化落地，并可在规模化应用中形成“应用—反馈—优化—推广”的正向迭代机制。在量值溯源层面，与检测结果直接相关的计量功能模块与现有手工检测仪器无本质差异，可遵循现有计量技术规范开展检定与校准，保障测试结果的计量溯源性。在方法应用层面，通过中控系统对现有前处理与检测单元进行灵活组合，保证了测试流程与手工检测标准适用范围的一致性，规避了因方法原理和实验流程改变引发的系统误差，且无需重新开展监测标准开发和适用性验证。由于硬件系统具备较高的通用性，通过调整软件参数及功能单元配件，即可快速优化样品处理程序、提升样品通量并拓展监测指标，既能充分利用现有检测技术和方法标准资源，也可快速适配同类实验室与传统手工实验室不断更新的新型检测技术和方法标准资源；针对复杂基质样品（如高盐度、高浊度、含大量有机物的工业废水）及其中可能存在的干扰，也可依据现行检测方法标准中的相关结论，直接执行标准规定的样品处理规定。

第三，在硬件部署层面，各功能模块通过 AGV 物流系统实现柔性互联，无需采用固定二维平面布局，可灵活配置和扩展系统硬件。在设计在建设阶段，柔性架构可最大限度利用现有实验室空间结构，不易受实验室场地条件约束；功能单元开发应用可借鉴智能驾驶领域的成熟发展经验，构建高端软硬件深度融合、中低端提供架构设计服务与核心部件供给的多元化产业生态，进而推动黑灯实验室技术与产业高质量发展。另一方面，针对环境质量、食品安全、产品质量等不同领域样品，以及各领域中易发生交叉污染的样品处理与检测环节，可通过调整模块布局，对样品前处理等易产生交叉污染的环节实施物理隔离，对试样检测等不易发生交叉污染环节的功能单元实现共享共用，大幅提升高价值大型设备机时利用率，推动黑灯实验室在多领域实现集约化、高效化应用。此外，可根据设备工作条件要求及使用频率差异，针对性优化空间布局并差异化控制环境条件，从而显著降低运行能耗。

3.2 局限

现阶段构建的柔性架构黑灯实验室，虽能在现有功能单元适用范畴内，通过在方法数据库增加标准测试工序文件扩展检测指标，但受限于前处理设备数字化程度不足、检测仪器测控软件封闭及人工智能技术成熟度等因素，对存量及市售仪器设备的兼容性仍有待提升，产业链在上游硬件、中游软件及下游应用的协同分工机制尚未完全形成。

当前，大部分市售及存量前处理设备与简单检测仪器缺乏标准化的测控数据接口及通信协议，尽管此类设备可自主按照预设程序完成模块内的样品处理与检测操作，但难以实现中控系统对其进行数据采集、状态监控及自动控制的功能；在现有模式下，需依赖黑灯实验室开发商定制开发专属测控软件模块，才能实现设备与控制系统、数据平台之间的闭环联动。对于复杂检测仪器而言，其测控软件多为厂商私有封闭系统，接口协议不开放等问题导致其难以与实验室信息管理系统、数据平台及第三方控制软件实现兼容，远程控制、数据导出等功能受到显著限制，无法满足黑灯实验室统一调度、集中管控的实际需求。在现有黑灯实验室内，AI 智能应用仅能调度使用黑灯实验室系统内的仪器设备，对第三方仪器设备进行精确控制高度依赖仪器厂商和黑灯实验室开发商的协同开发，难以适配黑灯实验室运行不断扩展功能应用的需求。

其中，前处理设备与简单检测仪器的数智化不足问题相对易于解决。鉴于现有黑灯实验室中控系

统在指令执行、状态监控及结果解析等核心控制技术方面已趋于成熟,通过为相关设备增设网络模块、明确各类前处理设备与检测仪器的测控指令规范,可沿用大语言模型与 AI 智能体技术在程序编写领域的成熟范式,实现中控系统驱动 AI 模块,根据新接入的样品处理设备与检测仪器,利用 PyVISA^[34]等仪器控制编程语言自主生成控制模块,并交付中控系统执行后续操作。该方案可摆脱对黑灯实验室开发商的依赖,实现对实验室存量及市售前处理设备和简单检测仪器的广泛兼容。

对于有机质谱、无机质谱等各类复杂检测仪器而言,其测控软件包含大量复杂的硬件控制、数据采集及结果解析等核心技术细节与基础数据,要求设备厂商开放相关接口及协议的难度较大。因此,在复杂检测仪器测控软件与黑灯实验室中控系统之间,构建自然语言任务指令与测控软件工作指令、操作控制之间的转换中间层,成为突破该技术瓶颈的主要可行路径。随着大语言模型与 AI 智能体技术的快速发展,OpenClaw 和 MaxClaw 等现有智能体应用已具备一定的任务指令理解能力,可通过模拟用户操作行为实现自主规划、自主完成各类软件应用的操作、程序编码、文件处理、表格填报及信息查询等任务^[35-37]。基于此,通过向智能体输入仪器操作手册、模拟仪器软件实际操作行为并进行人工检查调优等方式,黑灯实验室用户可以摆脱对仪器厂商和黑灯实验室开发商的依赖,自主完成新接入检测仪器的操控智能体生成和训练,通过构建完整的流程闭环,实现广泛兼容:中控系统基于自然语言下达任务指令,仪器操控智能体调用大语言模型解析该工作指令,随后操控仪器测控软件完成样品信息录入、检测参数设置及检测启动等操作;仪器测控软件驱动检测仪器完成检测并输出结果后,仪器操控智能体读取检测结果并提交至中控系统,由中控系统完成数据处理与分析。

3.3 发展方向

仪器操控智能体基于大语言模型理解自然语言指令,通过模拟人工操作的方式实现仪器控制,无需依赖设备厂商开放底层通信接口,也无需黑灯实验室开发商针对不同品牌仪器定制专用测控软件,可有效突破仪器厂商软件架构封闭带来的功能扩展瓶颈。因此,基于柔性架构开展黑灯实验室工程化运行,积累真实工况数据并助力仪器操控智能体开发范式的迭代优化,将成为黑灯实验室技术突破的重要方向。

4 结 论

本研究针对流水线式监测黑灯实验室灵活性差、资源利用率低、扩展困难等痛点,构建了基于实验工序模块化的柔性架构黑灯实验室,并通过实机验证其符合标准曲线、灵敏度、检出限、测定下限、精密度、准确度和实际样品比对等环境监测标准及相关规范的各项要求。

柔性架构黑灯实验室突破了流水线式黑灯实验室检测指标与物理空间的双重约束,通过将树状工作流程重构为网状协同架构,实现了前处理单元与检测单元的跨指标共享与动态调度,有效规避了冗余功能模组配置问题,显著降低了实验室建设与运维成本。依托 AGV 物流系统实现了各功能模块的柔性互联,大量采用与手工检测基本一致的检测功能单元,可遵循现有计量技术规范进行检定或校准;软硬件系统灵活组合高度契合手工检测,既可充分利用现有设备技术、检测技术和标准规范,也可与同类实验室和手工检测实验室协同发展新型检测技术和检测标准,为黑灯实验室在多领域实现集约化、高效化应用创造了条件。虽然现阶段受前处理设备数字化水平、仪器测控软件封闭性及人工智能技术发展的限制,对存量仪器设备的兼容性仍有待提升,但基于大语言模型与 AI 智能体技术的发展趋势,研发专用于仪器设备控制的智能体突破设备兼容瓶颈已具备技术可行性。

本研究聚焦黑灯实验室在环境监测领域的落地应用,不仅探索了该技术在行业内的全新发展路径,更为水质监测黑灯实验室的柔性化设计与工程化推广提供了技术参考与实践依据。后续研究可进一步完善实际样品比对试验设计,消除样品运输、保存等外部因素带来的偏差,增加不同类型、不同浓度梯度的水样比对数量,验证实验室的适用性与可靠性;进一步丰富功能模块和方法工序数据,持续扩大监测指标覆盖范围,纳入更多水质无机物及有机物指标。依托实验室运行积累的实际工况数据,开展仪器设备控制智能体的研发与应用,突破存量和市售仪器设备操控瓶颈,推动黑灯实验室在环境监测领域的更广泛应用。

参考文献:

- [1] Olawade D B, Wada O Z, Ige A O, Egbewole B I, Olojo A, Oladapo B I. Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions. [2026-04-21]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773049224000278>.
- [2] Assunção A D, De Jesus D M, Terra T R, Rocha R G, Costa J A M G, Da Silva L A J, Fernandes G L, Dias A G C, Muñoz R A A, Silva S G, Richter E M. 3D-printed Liquid Handling Robot for the Development of Automated Analytical Methods. [2026-04-21]. https://jbc.sbc.org.br/audiencia_pdf.asp?aid=12971&nomeArquivo=2025-0136FP.pdf.
- [3] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for Ecological and Environmental Monitoring(中华人民共和国生态环境部.“十四五”生态环境监测规划).[2026-04-21]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202201/t20220121_967927.html.
- [4] China National Environmental Monitoring Centre. Notice on Issuing the Key Points for Innovative Application of Smart Ecological and Environmental Monitoring Nationwide in 2024(中国环境监测总站.关于印发《2024年深化全国生态环境智慧监测创新应用工作要点》的通知).[2026-04-21]. https://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202403/t20240329_1069652.shtml.
- [5] Xiong X Y, Jiang B Y, Huang J H, Sa R L, Pan X F, Sun P, Su X Y, Han W J, Liu D H. *Environ. Monit. China*(熊向隰, 蒋冰艳, 黄俊华, 萨如拉, 潘晓峰, 孙萍, 苏晓煜, 韩文娟, 刘达华. 中国环境监测), **2025**, 41(1): 163-172.
- [6] MECHO. Lights-out Lab.[2026-04-21]. <https://globalmecho.com/lights-out-lab/>.
- [7] Heydlauf M, Edwards M. Dark Labs: Illuminating the Future of Fully Automated Diagnostic Laboratories.[2026-04-21]. <https://www.mlo-online.com/information-technology/automation/article/53099651/dark-labs-illuminating-the-future-of-fully-automated-diagnostic-laboratories>.
- [8] Thorsten T. The “Dark Lab” Approaches.[2026-04-21]. <https://www.theanalyticalscientist.com/issues/2025/articles/august/the-dark-lab-approaches/>.
- [9] Gurpur R D, Prabhu L, Urban P L. *Trends Anal. Chem.*, **2017**, 88: 41-52.
- [10] Liao Y Q. *Chin. J. Clin. Pathol.*(廖远泉.实用检验医师杂志), **2020**, 12(3): 129-134.
- [11] Yang D, Liu M F, Huang P J. *Chin. Med. Equip.*(杨东, 刘妙芳, 黄平坚.中国医学装备), **2005**, 2(1): 14-18.
- [12] Qian N, Liu L J, Liu J, Zhang Q Y. *Chin. J. Clin. Lab. Sci.*(钱娜, 刘琳娟, 刘娟, 张青云.临床检验杂志), **2011**, 29(7): 499.
- [13] Huang Y Z, Pu Z C, Chen C Y, Li R. *Yunnan Chem. Technol.*(黄友志, 普镇才, 陈春燕, 李芮.云南化工), **2023**, 50(5): 148-150.
- [14] Jiangsu Ecology and Environment. Pollution Control Campaign | Suzhou: New Members Added to “Dark-Lab”, Water Quality Testing Moves Toward Intelligent Unmanned Operation(江苏生态环境.治污攻坚|苏州:“黑灯实验室”再添新成员,水质检测迈向智能无人化).[2026-04-21]. https://www.sohu.com/a/960709773_121106832.
- [15] Phoenix Net Shandong. The First Fully Automatic Intelligent Laboratory of the Provincial Ecological and Environmental Monitoring System Has Been Built(凤凰网山东.全省生态环境监测系统首个全自动智能实验室建成).[2026-04-21]. <https://ishare.ifeng.com/c/s/v002OdMvJrl5RIZ7vjLZYDdrlpiLbrDPVv8BNEroBHIX7o>.
- [16] HJ 168-2020. Technical Guideline for the Development of Environmental Monitoring Analytical Method Standards. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(环境监测分析方法标准制订技术导则.中华人民共和国国家生态环境标准).
- [17] China National Environmental Monitoring Centre. General Technical Guidelines for Method Verification in Qualification Accreditation of Ecological and Environmental Monitoring Institutions(中国环境监测总站.生态环境监测机构资质认定方法验证通用技术指南).[2026-04-21]. https://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202401/t20240124_1064576.shtml.
- [18] China National Environmental Monitoring Centre. Technical Specifications for Chemical Monitoring Method Verification in Qualification Accreditation of Ecological and Environmental Monitoring Institutions(中国环境监测总站.生态环境监测机构资质认定化学监测方法验证技术规定).[2026-04-21]. https://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202401/t20240124_1064576.shtml.
- [19] China National Environmental Monitoring Centre. Quality Assurance Manual for Environmental Water Quality Monitoring. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press(中国环境监测总站.环境水质监测质量保证手册.2版.北京:化学工业出版社), **1994**: 439-443.
- [20] GB 11892-89. Water Quality—Determination of Permanganate Index. National Standards of People's Republic of China(水质 高锰酸盐指数的测定.中华人民共和国国家标准).
- [21] HJ 636-2012. Water Quality—Determination of Total Nitrogen—Alkaline Potassium persulfate Digestion UV Spectrophotometric method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法.中华人民共和国国家生态环境标准).
- [22] HJ 535-2009. Water Quality—Determination of Ammonia Nitrogen—Nessler's Reagent Spectrophotometry. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法.中华人民共和国国家生态环境标准).

- [23] HJ/T 346-2007. Water Quality—Determination of Nitrate-Nitrogen—Ultraviolet Spectrophotometry. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行). 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [24] GB 7467-87. Water Quality—Determination of Chromium(VI)—1, 5-Diphenylcarbohydrazide Spectrophotometric Method. National Standards of People's Republic of China(水质 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法. 中华人民共和国国家标准).
- [25] HJ 484-2009. Water Quality—Determination of Cyanide—Volumetric and Spectrophotometry Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 氰化物的测定 容量法和分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [26] GB 7494-87. Water Quality—Determination of Anionic Surfactants—Methylene Blue Spectrophotometric Method. National Standards of People's Republic of China(水质 阴离子表面活性剂的测定 亚甲蓝分光光度法. 中华人民共和国国家标准).
- [27] HJ 601-2011. Water Quality—Determination of Formaldehyde—Acetylacetone Spectrophotometric Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [28] GB 11893-89. Water Quality—Determination of Total Phosphorus—Ammonium Molybdate Spectrophotometric Method. National Standards of People's Republic of China(水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法. 中华人民共和国国家标准).
- [29] HJ 586-2010. Water Quality—Determination of Free Chlorine and Total Chlorine—Spectrophotometric Method Using N, N-Diethyl-1, 4-phenylenediamine. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 游离氯和总氯的测定 N, N-二乙基-1, 4-苯二胺分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [30] HJ 674-2013. Water Quality—Determination of Hydrazine and Monomethyl Hydrazine by *p*-Dimethylaminobenzaldehyde Spectrophotometric Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 肼和甲基肼的测定 对二甲氨基苯甲醛分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [31] HJ 503-2009. Water Quality—Determination of Volatile Phenolic Compounds —4-AAP Spectrophotometric Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 挥发酚的测定 4-氨基安替比林分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [32] GB 7493-87. Water Quality—Determination of Nitrogen (nitrite) —Spectrophotometric Method. National Standards of People's Republic of China(水质 亚硝酸盐氮的测定 纳氏试剂分光光度法. 中华人民共和国国家标准).
- [33] HJ 1226-2021. Water Quality—Determination of Sulfide —Methylene Blue Spectrophotometric Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(水质 硫化物的测定 亚甲基蓝分光光度法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [34] PyVISA. PyVISA: Control Your Instruments with Python. [2026-04-21]. PyVISA: Control your instruments with Python—PyVISA 1.16.2.dev5+g2c7692b18 documentation.
- [35] Tan W H, Zhang W T, Xu X R, Xia H C, Ding Z L, Li B Y, Zhou B H, Yue J P, Jiang J C, Li Y W, An R Y, Qin M L, Zong C Q, Zheng L T, Wu Y J, Chai X Q, Bi Y F, Xie T B, Gu P J, Li X Y, Zhang C Y, Tian L, Wang C J, Wang X R, Karlsson B F, An B, Yan S C, Lu Z Q. Cradle: Empowering Foundation Agents Towards General Computer Control. [2026-04-21]. <https://arxiv.org/abs/2403.03186>.
- [36] Nelle J, Robbins A. Cursor Agents Can Now Control Their Own Computers. [2026-04-21]. <https://cursor.com/cn/blog/agent-computer-use>.
- [37] Niu R L. ScreenAgent: A Vision Language Model-driven Computer Control Agent. [2026-04-21]. <https://www.ijcai.org/proceedings/2024/711>.

(责任编辑: 盛文彦)