

# 基于 SKALAR 技术的污水多参数在线检测系统优化研究

毛玲玲

福建申远新材料有限公司 福建福州 350500

**【摘要】**为优化基于SKALAR技术的污水多参数在线检测系统的整体性能,本研究就其开展优化相关事宜,厘定恰当的初始参数,实施具有针对性的优化方案,采用科学的数据处理手段,分析系统优化前后在性能上的区别,优化让系统检测限从最开始的1.2mg/L降至0.3mg/L,从 $\pm 5.2\%$ 到 $\pm 1.8\%$ ,准确度的相对误差缩小了。就精密度而言,其相对标准偏差从4.5%减至1.2%,系统检测限、准确度及精密度有显著提升,切实增强检测工作的效率与可靠性,为污水在线检测奉上更精准且高效的技术支持。

**【关键词】**SKALAR技术; 污水多参数在线检测; 系统优化; 检测限; 准确度

Optimization Study of Multi-Parameter Online Sewage Monitoring System Based on SKALAR Technology

Mao Lingling,

Fujian Shenyan New Materials Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350500

**【Abstract】**To enhance the overall performance of the multi-parameter online sewage monitoring system utilizing SKALAR technology, this study conducted systematic optimization measures. We established appropriate initial parameters, implemented targeted optimization strategies, and employed scientific data processing methods to analyze performance differences before and after optimization. The results demonstrated significant improvements: the system's detection limit was reduced from 1.2 mg/L to 0.3 mg/L, with the relative standard deviation of accuracy decreasing from  $\pm 5.2\%$  to  $\pm 1.8\%$ . In terms of precision, the relative standard deviation decreased from 4.5% to 1.2%. These enhancements substantially improved the system's detection limit, accuracy, and precision, effectively boosting operational efficiency and reliability. This study provides more accurate and efficient technical support for online sewage monitoring systems.

**【Key words】**SKALAR technology; multi-parameter online monitoring of wastewater; system optimization; detection limit; accuracy

当前基于 SKALAR 技术的在线检测系统,在检测限、准确度以及精密度等层面仍有改进余地,难以契合日益严苛的环保监测要求,亟需对该系统实施优化举措。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与材料

严格按照国标及行标来配置实验试剂,采用水杨酸-次氯酸盐法——HJ 665-2013,1000mg/L 氯化铵标准溶液由经过三次重结晶的优级纯  $\text{NH}_4\text{Cl}$  配制而成。以电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 实施检测,杂质元素的累计含量 < 0.001%,经配制得到水杨酸-柠檬酸钠溶液后,采用高效液相色谱 (HPLC) 检测,水杨酸纯度达到 99.8%,使用次氯酸钠溶液前,采用碘量法进行标定,测定所得的有效氯浓度与理论值的相对误差在 1.5% 以内。

采用连续流动分析适配的《水质 总磷的测定 连续流动-钼酸铵分光光度法》(HJ 671-2013) 检测总磷,500mg/L 的磷酸二氢钾标准溶液,借助 105℃ 干燥 2h 的优级纯  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

配制得到,以离子色谱法进行核实,磷酸根浓度跟理论值的偏差 < 0.8%。过硫酸钾溶液存于棕色瓶子,按月对分解率开展检测操作,处于室温 25℃ 的环境下,3 个月时间段内,分解率不超 3%,完成钼酸盐溶液的配制后,采用紫外-可见分光光度计进行扫描,其吸光度在 700nm 处的稳定性——RSD 小于 0.5%。

针对 COD 检测,采用《水质化学需氧量的测定重铬酸盐法》(HJ 828-2017),并结合 SKALAR 技术的自动化流动分析特性优化操作参数。用在 120℃ 下干燥达到恒重的基准试剂配制 0.25mol/L 重铬酸钾标准溶液,以电位滴定法对其进行标定,浓度准确度误差在 0.3% 以内,需借助重铬酸钾标准溶液对硫酸亚铁铵标准滴定溶液进行标定,6 次平行标定所得结果的相对标准偏差小于 0.8%。实验里用到的 A 级玻璃器皿均做过容量允差检测,移液管、容量瓶实际容量与标称容量的偏差数值,皆在国标规定范围之内,玻璃器皿先被 5% 硝酸浸泡 24h,而后用超纯水冲洗,借助实施的空白实验验证,针对氨氮、总磷、COD 的检测,空白值贡献都 < 检测限的 10%。

## 1.2 方法

### 1.2.1 优化原理

系统优化依托误差控制和信号增强理论,针对随机误差,借助增多测量次数并运用格拉布斯准则剔除异常值,能让氨氮检测随机误差从 $\pm 0.12\text{mg/L}$ 降到 $\pm 0.05\text{mg/L}$ 。系统误差中,方法误差可通过优化反应条件改进,例如调整氨氮检测的反应温度与显色反应平衡时间,以此提升反应完全度;仪器误差则通过定期校准和更换部件控制,比如对使用一定时间的比色皿进行透光率检测,及时更换透光率偏差超标的比色皿,从而提高检测准确性。

信号处理环节选用16位高分辨率数据采集卡,把信号量化误差压至0.001Abs,自适应滤波算法依据LMS准则,当50Hz电磁干扰存在时,能将氨氮检测信号信噪比从15dB提升到28dB<sup>[1]</sup>。模糊控制算法结合温度、流速、吸光度等12个参数构建 $5 \times 5 \times 5$ 模糊规则库,完成蠕动泵流速动态调节,让不同粘度样品输送稳定性增强20%。

### 1.2.2 优化步骤

#### 1.2.2.1 初始参数设定

系统初始参数预实验确定,蠕动泵流速1.2mL/min时,氨氮、总磷、COD检测的混合效率分别达85%、82%、88%,反应温度35℃下,氨氮显色反应活化能 $E_a$ 为32.5kJ/mol,总磷消解反应活化能 $E_a$ 为45.2kJ/mol。比色检测波长根据光谱扫描结果设定,氨氮在697nm处吸光度值较690nm处高18%,总磷在700nm处吸光度稳定性最优,自动进样器进样体积200 $\mu\text{L}$ 、间隔3min时,样品残留率小于1%,数据采集积分时间0.5s,能有效避免信号重叠,基线漂移率低于0.002Abs/min。

#### 1.2.2.2 优化方案实施

在硬件优化方面,对核心部件进行针对性升级:采用伺服电机驱动系统替代传统蠕动泵,通过高精度驱动控制提升流速稳定性;对反应管道内壁进行纳米涂层处理,减少管道材质对检测组分的吸附作用;升级比色检测单元,引入双光栅单色器,提高波长分辨率并降低杂散光干扰,从硬件层面为检测精度提供基础保障。

软件优化聚焦于数据处理与系统控制效能提升:提高数据采集频率以捕捉更细微的信号变化,采用滑动平均滤波与中值滤波组合算法抑制高频噪音;改进校准曲线拟合方式,以二次多项式拟合替代线性拟合,增强低浓度区间检测的拟合精度;引入遗传算法优化模糊控制规则库,提升系统对复杂检测环境的动态响应能力。

试剂优化通过正交实验确定最佳配比:针对氨氮检测,调整水杨酸-柠檬酸钠与次氯酸钠的浓度,增强显色反应的灵敏度;针对总磷检测,优化钼酸盐与抗坏血酸的浓度比例,加快显色反应速率,确保试剂体系与检测流程的适配性。

## 1.3 数据处理方法

采用Origin 2022与SPSS 26.0开展数据处理,原始数据用 $3\sigma$ 准则剔除异常值后,计算平均值、标准偏差(SD)和相对标准偏差(RSD)。校准曲线拟合使用最小二乘法,经过F检验评估拟合显著性,运用配对样本t检验( $\alpha=0.05$ )对比优化前后数据差异, $P<0.05$ 时认定差异显著。

## 2 结果

### 2.1 初始性能指标

系统初始检测性能如下表1所示,氨氮检测限为1.2mg/L,对10mg/L标准溶液检测的相对误差为-5.2%,RSD为4.5%。总磷检测限0.8mg/L,5mg/L标准溶液检测相对误差-4.8%,RSD4.2%,COD检测限5mg/L,50mg/L标准溶液检测相对误差5.2%,RSD3.8%,校准曲线在各自线性范围内,氨氮 $R^2=0.985$ ,总磷 $R^2=0.982$ ,COD $R^2=0.988$ 。

### 2.2 检测限优化结果

优化后检测限明显降低,氨氮降到0.2mg/L,降幅83.3%;总磷降到0.1mg/L,降幅87.5%;COD降到1.0mg/L,降幅80%。不同浓度标准溶液的最低检测信号-噪声比(S/N)提升情况如下表所示,优化后在最低检测浓度时,氨氮S/N从3.2升到12.5,总磷从3.5升到15.0,COD从4.0升到10.0。结果见表2。

### 2.3 准确度与精密度提升效果

准确度、精密度均显著上扬,氨氮检测10mg/L的标准溶液,相对误差已降至-1.2%,相对标准偏差达1.0%;5mg/L总磷标准溶液检测的相对误差是-1.0%,相对标准偏差为0.8%;针对50mg/L的COD标准溶液检测,相对误差为1.5%,相对标准偏差为0.6个百分点,校准曲线的拟合优度呈现显著提升态势,氨氮相关的 $R^2$ 系数为0.999,总磷分析里 $R^2$ 取值0.998,COD所对应的 $R^2$ 值为0.998,相关数据详见表3。

### 2.4 不同优化参数的影响

不同参数优化对检测性能影响如下表4所示,蠕动泵流速从1.2mL/min调到1.1mL/min时,氨氮检测RSD降低18%;反应温度从35℃降到32℃,总磷检测灵敏度提高22%;氨氮试剂浓度优化让检测限降低35%。经过主成分分析,硬件参数优化对性能提升贡献度为45%,软件参数为30%,试剂参数为25%。

### 2.5 优化前后对比

优化前后系统性能综合对比如下表5所示,检测限平均降低83.6%,准确度相对误差平均缩小79.1%,精密度RSD平均下降77.8%,校准曲线 $R^2$ 平均提高0.011。配对样本t检验表明,氨氮、总磷、COD检测结果优化前后差异均显著( $P<0.01$ )。

表1 系统初始性能指标检测结果

检测参数	检测限 (mg/L)	标准溶液浓度 (mg/L)	平均测定值 (mg/L)	相对误差	RSD	R <sup>2</sup>
氨氮	1.2	10	9.48	-5.2%	4.5%	0.985
总磷	0.8	5	4.76	-4.8%	4.2%	0.982
COD	5	50	52.6	5.2%	3.8%	0.988

表2 优化前后检测限及 S/N 对比结果

检测参数	优化前检测限 (mg/L)	优化后检测限 (mg/L)	降幅	优化前 S/N	优化后 S/N
氨氮	1.2	0.2	83.3%	3.2	12.5
总磷	0.8	0.1	87.5%	3.5	15.0
COD	5	1.0	80%	4.0	10.0

表3 优化前后准确度、精密度及校准曲线拟合优度对比

检测参数	优化前相对误差	优化后相对误差	优化前 RSD	优化后 RSD	优化前 R <sup>2</sup>	优化后 R <sup>2</sup>
氨氮	-5.2%	-1.2%	4.5%	1.0%	0.985	0.999
总磷	-4.8%	-1.0%	4.2%	0.8%	0.982	0.998
COD	5.2%	1.5%	3.8%	0.6%	0.988	0.998

表4 不同优化参数对检测性能的影响

优化参数	参数变化	氨氮检测 RSD 变化	总磷检测灵敏度变化	COD 检测限变化
蠕动泵流速	1.2→1.1mL/min	-18%	/	/
反应温度	35→32℃	/	+22%	/
氨氮试剂浓度	水杨酸-柠檬酸钠 0.5→0.65mol/L	-35%	/	/

表5 系统优化前后性能综合对比

性能指标	优化前平均值	优化后平均值	提升幅度	P 值
检测限 (mg/L)	2.33	0.43	83.6%	< 0.01
准确度相对误差	5.07%	1.06%	79.1%	< 0.01
精密度 RSD	4.17%	0.93%	77.8%	< 0.01

### 3 讨论

硬件的升级、软件的优化与试剂的调整相结合,基于 SKALAR 技术的污水多参数在线检测系统性能实现大幅的提升,检测限大幅下降使系统可监测更低浓度的污染物,诸如氨氮的检测界限降低到了 0.2mg/L,可适配《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 I 类水的监测规范,为水源地下水水质预警增添有效支持。

依据优化原理以及实施的过程分析,多维度优化策略的协同配合起到了关键意义,以伺服电机为驱动力的蠕动泵与纳米涂层反应管道,从流体传输的稳定性与样品损耗把控维度,为精准检测筑牢根基;应用双光栅单色器,极大提升了光谱的分辨率,抑制杂散光产生的干扰现象。增加数据采集

的频率,引入智能算法,达成对微弱信号的高效捕捉与操控,二次多项式拟合的校准曲线,对低浓度区间检测准确性有所增强。

本研究存在一定局限性,复杂实际水样检测时基质干扰问题仍较突出,优化后的系统虽抗干扰能力有所提升,但污水中大量有机物、重金属离子等物质可能影响检测结果。研究虽在实验室条件下优化效果良好,但系统在不同地域、不同季节实际环境中,受温度、湿度、电磁环境等因素影响,稳定性和可靠性需进一步验证。

本研究对基于 SKALAR 技术的污水多参数在线检测系统优化具备重要理论与实践价值,研究成果为该技术在环境监测领域的广泛应用提供有益参考。

### 参考文献

- [1]耿静轩.基于氧化消解时变光谱的城市污水总氮快速在线检测方法[D].中南大学, 2023.
- [2]房梦月, 刘和平, 陈志香, 等.污水水质参数与精神活性物质检测准确度的相关性初探[J].中国司法鉴定, 2022, (05): 57-66.
- [3]尹海龙, 吴玟萱, 胡意扬, 魏卿, 祁海玥.基于光纤测温和小波降噪的污水管道检测方法[J].同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(12): 1947-1954