

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311979

基于正交相敏解调的浊度传感器设计及性能研究*

阮嘉明¹, 唐波^{1,2}, 陈伟²

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 宁波水表(集团)股份有限公司 宁波 315000)

摘要:针对传统非调制浊度检测技术在低浊度检测中存在最低检出性能较差和精度较低的问题,提出一种基于正交相敏解调的浊度检测技术。基于浊度检测原理,分析水体中散射光的传播机理,建立了浊度与散射光强的响应特性关系;为实现微弱光电信号提取,采用一种由双通道模拟开关构成的正交相敏解调电路,详细推导正交相敏解调原理的选频鉴相特性,通过信号频谱选定和相位偏差影响修正,实现了非同频非同相噪声抑制,进而提高该系统的信噪比;研制一款浊度传感器,搭建了相应的测试装置,并对该传感器性能进行评估。实验结果表明,在0~5 NTU测量范围内,该浊度传感器具有良好的线性度、准确性和稳定性,最低检出限可达0.004 9 NTU。该方法大大提高了最低检出性能和测量精度,并且从方法上避免了在低信噪比时直流漂移噪声和宽带噪声对浊度测量的影响。

关键词: 浊度传感器; 散射法; 微弱信号检测; 正交相敏解调; 噪声抑制

中图分类号: TH741 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and performance research of the turbidity sensor based on orthogonal phase-sensitive demodulation

Ruan Jiaming¹, Tang Bo^{1,2}, Chen Wei²

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Ningbo Water Meter (Group) Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: To address the poor minimum detection performance and low precision of traditional non-modulated turbidity detection technology in low turbidity measurements, a turbidity detection technology based on orthogonal phase-sensitive demodulation is proposed. Based on the principle of turbidity detection, the propagation mechanism of scattered light in water is analyzed, and the response characteristic relationship between turbidity and scattered light intensity is established. To extract weak photoelectric signals, an orthogonal phase-sensitive demodulation circuit consisting of dual-channel analog switches is used. The characteristics of frequency selection and phase identification of the orthogonal phase-sensitive demodulation principle are derived in detail. By selecting the signal spectrum and correcting phase deviation influences, the suppression of noise that is neither same-frequency nor same-phase is achieved. Therefore, the signal-to-noise ratio of the system is enhanced. A turbidity sensor is developed, the corresponding test apparatus is constructed, and the performance is evaluated. Experimental results show that, within a 0~5 NTU measurement range, the turbidity sensor has good linearity, accuracy, and stability. The limit of detection can reach as low as 0.004 9 NTU. This method significantly improves the minimum detection performance and measurement accuracy and methodologically avoids the impact of DC drift noise and broadband noise on turbidity measurements at low signal-to-noise ratios.

Keywords: turbidity sensor; scattering method; weak signal detection; orthogonal phase-sensitive demodulation; noise suppression

收稿日期: 2023-09-27 Received Date: 2023-09-27

* 基金项目: 宁波市重点研发计划(2022Z092)项目资助

0 引言

浊度作为能够表征颗粒物特性的参数^[1],在环境保护、中医药提取、生物分子检测和海洋原位检测等领域均广泛涉及和应用^[2-6]。如何准确、高效的检测浊度是目前浊度检测技术发展的方向。因此优化浊度检测性能,提高测量精度,对各领域浊度检测技术的发展具有非常重要的实际意义。

随着光学与电子学的发展,光电检测法因成本低、灵敏度高、响应速度快等优点被应用到浊度检测当中^[7-9]。虽然一些新技术也有应用到浊度检测中^[10-13],但受限于高成本和技术不成熟而无法普及,因此浊度检测技术还是以光电检测法为主。

目前已有不少学者对光电检测法的浊度检测技术展开了深入研究。传统非调制浊度检测技术因原理简单、成本低的特点成为主要的浊度检测方法。许金等^[14]通过恒流驱动模块控制光源,以光强传感器作为探测器来实现浊度测量;张锂等^[15]采用柱积方式对散射光进行光电转换,以接收 360° 范围的全部散射光来测量浊度;Trevathan 等^[16]设计了一种能长时间连续检测的低成本浊度传感器。但上述方法在低浊度检测中存在最低检出性能较差、精度较低的问题。Yang 等^[17]则采用高灵敏度的单光子探测技术(single photon detection techniques, SPDT)与 90° 散射法相结合,使用盖格模式下的雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)进行光子计数,以此提高浊度测量精度;Wang 等^[18]采用单光子探测与光纤技术结合测量浊度,分辨力优于 0.01 NTU;Sanchez 等^[19]采用调制四光束浊度传感器来消除环境误差,提高测量精度;He 等^[20]将伪随机序列(pseudo-random sequence, PRS)调制技术应用于散射光强的测量,以提高浊度传感器的检测灵敏度;Zang 等^[21]基于方波激励法(square excitation method, SEM)可以从时域和频域获得丰富的浊度信息,提出了一种将光谱分量提取(spectral component extraction, SCE)与透射和散射光信号及其比值相结合的测量方法。

本文针对传统非调制浊度检测技术在低浊度检测中存在最低检出性能较差、精度较低的问题,提出一种基于正交相敏解调的浊度检测技术,对其性能进行评估。首先分析水体中散射光的传播机理,建立浊度与散射光强的响应特性关系,设计并优化传感器的光路结构;然后对浊度检测系统主要构成部分进行分析与讨论,如跨阻放大电路和正交相敏解调电路;最后对本文所提出的浊度传感器的线性度、准确性、最低检出限等性能进行评估。

1 浊度检测原理

1.1 浊度散射理论

基于光散射理论,根据粒径与入射光波长的关系,可分为瑞利散射理论和米氏散射理论^[22]。

当粒径大小远小于入射光波长时,瑞利散射理论成立。假设入射光强为 I_0 ,对于单个粒子任意方向的散射光强 I_s 可表示为:

$$I_s = \frac{9\pi^2 V^2}{2d^2 \lambda^4} \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{m_2^2 + 2m_1^2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) I_0 \quad (1)$$

式中: d 为探测器到粒子的距离; λ 为入射光波长; θ 为散射角; m_2 为外部介质折射率; m_1 为分散相折射率; V 为粒子体积。

由于粒子个数与浊度正相关,由上述单个粒子的求解可知,假设入射光前进方向存在复数粒子,可得出总散射光强为:

$$I_s = T \times \frac{9\pi^2 V^2}{2d^2 \lambda^4} \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{m_2^2 + 2m_1^2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) I_0 \quad (2)$$

式中: T 为浊度。

当粒径大小近似于入射光波长时,米氏散射理论成立。对于单个粒子任意方向的散射光强可表示为:

$$I_s(\theta) = \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 d^2} \times [i_1(\lambda, r, m, \theta) \times \sin^2 \varphi + i_2(\lambda, r, m, \theta) \times \cos^2 \varphi] \quad (3)$$

式中: i_1, i_2 分别为通过入射光和散射光传播方向平行于平面振动传播的光强,与入射光波长 λ 、粒径 r 、粒子相对折射率 m 和散射角 θ 有关; φ 为极化角。

由于粒子个数与浊度正相关,由上述单个粒子的求解可知,假设入射光前进方向存在复数粒子,可得出总散射光强为:

$$I_s(\theta) = T \times \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 d^2} \times [i_1(\lambda, r, m, \theta) \times \sin^2 \varphi + i_2(\lambda, r, m, \theta) \times \cos^2 \varphi] \quad (4)$$

为了方便计算,两种散射理论公式均可简化为:

$$I_s = K_s T I_0 \quad (5)$$

式中: K_s 为散射系数,与入射光强、入射光波长、散射角度、光程距离和粒子粒径有关。

1.2 光路结构

研究表明 90° 角度下的散射光强受到粒径影响最小且最稳定^[23],为此该浊度传感器的发光二极管(light emitting diode, LED)与光电二极管(photodiode, PD)的夹角控制在 90°,本文采用的光路结构示意图如图 1 所示。根据国际标准 ISO 7027 中规定的孔径角,考虑空气、窗口片和水样之间折射率不同,基于斯涅尔定律,最

终可计算出 LED 与 PD 之间的散射光强接收光程在 7.39~11.91 mm 之间。

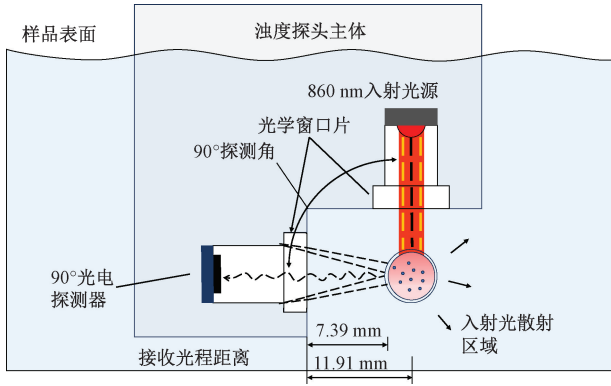


图 1 光路结构

Fig. 1 Optical path structure

2 浊度检测系统构建

浊度检测系统由光源控制模块、探测器检测模块和数据处理模块 3 部分构成,具体如图 2 所示。选用 860 nm 近红外 LED (SFH4550, OSRAM, Germany) 作为光源,采用交流调制恒流源电路驱动 LED;基于 90° 散射法,PD (SFH213FA, OSRAM, Germany) 与 LED 呈 90° 夹角来检测散射光。而探测器检测模块的实现关键在于信号调理电路中对信号的高信噪比采集,其核心问题是跨阻放大电路噪声分析,以及正交相敏解调的电路构建。数据处理模块实现浊度的计算,并在上位机中显示。

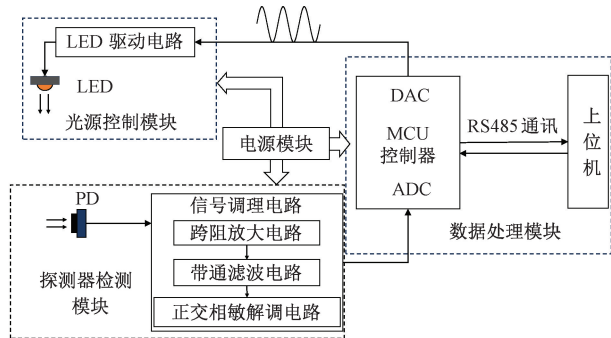


图 2 浊度检测系统框图

Fig. 2 Diagram of the turbidity detection system

2.1 跨阻放大电路噪声分析

在低浊度环境下,PD 检测到的散射光非常微弱,极易受到干扰,因此要想测得准确的浊度值,需要对跨阻放大电路进行噪声分析,跨阻放大电路噪声增益波德图如图 3 所示。

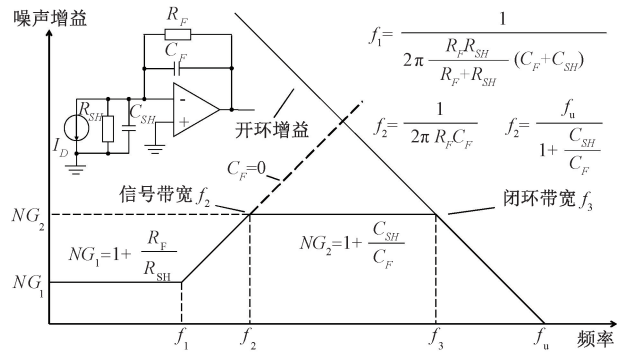


图 3 跨阻放大电路噪声增益波德图

Fig. 3 Noise gain Bode plot of transimpedance amplification circuit

根据图 3 中的跨阻放大电路模型,综合考虑电路稳定性和等效噪声,合理选定 PD (等效为电流源 I_D 、电阻 R_{SH} 和电容 C_{SH} 的并联组合)、反馈电阻 R_F 和相位补偿电容 C_F ,计算出信号带宽 f_2 中的噪声增益 NG_1 和闭环带宽 f_3 中的噪声增益 NG_2 。

通过对电路模型分析可知,跨阻放大电路的噪声源由反馈电阻热噪声、PD 分流电阻热噪声和跨阻放大器负输入端电压电流噪声构成。对这些噪声源进行量化,所得结果如表 1 所示。

表 1 跨阻放大电路噪声源

Table 1 Transimpedance amplification circuit noise source

噪声源	RTO 噪声	噪声带宽	噪声电压有效值/ μV
R_F	$\sqrt{4kT_A R_F}$	$\frac{\pi}{2} \times f_2$	E_{n1}
光电二极管	$\frac{R_F}{R_{SH}} \times \sqrt{4kT_A R_{SH}}$	$\frac{\pi}{2} \times f_2$	E_{n2}
I_N - 运算放大器	$R_F \times I_{N-}$	$\frac{\pi}{2} \times f_2$	E_{n3}
V_N 运算放大器	$V_N \times NG_2$	$\frac{\pi}{2} \times f_3$	E_{n4}

对表 1 所示跨阻放大电路噪声源进行综合等效,可得总噪声电压有效值为:

$$E_{no} = \sqrt{E_{n1}^2 + E_{n2}^2 + E_{n3}^2 + E_{n4}^2} \quad (6)$$

经计算得跨阻放大电路的总噪声电压有效值为 59 μV 。

2.2 正交相敏解调原理

PD 产生的光电流经跨阻放大为电压后与接收光强线性相关,记为:

$$U = aI_s + b \quad (7)$$

式中: a 和 b 为线性系数。

由于未调制信号中包含了 $1/f$ 噪声和运放直流漂移噪声,这会检测结果带来很大的误差。因此,采用正交相敏解调原理对信号进行检测。通过交流调制电路实现信号的第一次频谱迁移,以带通滤波器实现 $1/f$ 噪声和运放直流漂移噪声的抑制;再通过正交相敏解调器实现信号的第二次频谱迁移,以低通滤波器实现高频噪声的抑制,从而提高系统的信噪比。

正交相敏解调原理如图4所示,首先对LED进行调制,设其为 $I_0 = A_m \sin(\omega_0 t)$, 实现信号的第1次频谱迁移。

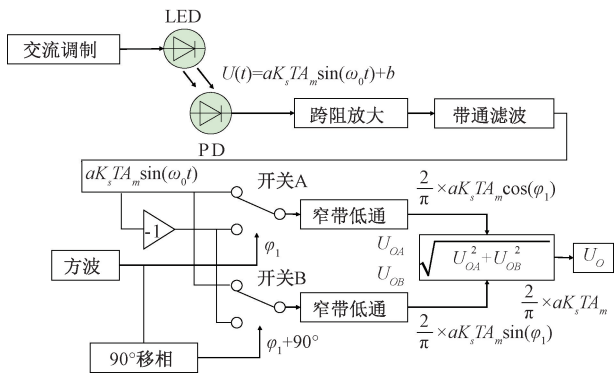


图4 正交相敏解调原理

Fig. 4 Orthogonal phase-sensitive demodulation principle

将式(5)与 I_0 代入式(7)中,可得PD接收到的调制信号为:

$$U(t) = aK_s TA_m \sin(\omega_0 t) + b \quad (8)$$

经过带通滤波器滤除直流偏移噪声,输出值为:

$$U(t) = aK_s TA_m \sin(\omega_0 t) \quad (9)$$

以方波控制的模拟开关作为相敏解调器,将信号 $U(t)$ 与方波 ± 1 相乘实现信号的第二次频谱迁移,此时在 $\omega = 2\omega_0$ 处形成和频分量, $\omega = 0$ 处形成差频分量。随后采用低通滤波器实现半周积分法,滤除和频分量,得到输出信号平均值:

$$U_{OA} = \frac{2}{\pi} \times \int_{\varphi_1}^{\varphi_1 + \pi} aK_s TA_m \sin(\omega_0 t) d\omega_0 t = \frac{2}{\pi} \times aK_s TA_m \cos(\varphi_1) \quad (10)$$

式中: φ_1 为信号 $U(t)$ 与方波的相位差。

从式(10)中可以看出,单路相敏解调器的输出 U_{OA} 正比于 $\cos(\varphi_1)$, 因此 φ_1 的测量误差会直接传递为信号 $U(t)$ 的测量误差。单路相敏解调器一般采用移相电路使参考信号与输入信号相位相同,但移相电路受器件的非理想性因素影响,不可避免存在移相误差,因此采用正交相敏解调来避免这个问题。通过将正交通道中的方波相位设置为 $\varphi_1 + 90^\circ$, 经过低通滤

波后得输出值为:

$$U_{OB} = \frac{2}{\pi} \times \int_{\varphi_1 + \frac{\pi}{2}}^{\varphi_1 + \frac{3\pi}{2}} aK_s TA_m \sin(\omega_0 t) d\omega_0 t = \frac{2}{\pi} \times aK_s TA_m \sin(\varphi_1) \quad (11)$$

最终通过平方和开根号来消除相位偏差引起的测量误差,得到输出信号值:

$$U_o = \sqrt{U_{OA}^2 + U_{OB}^2} = \frac{2}{\pi} \times aK_s TA_m = KT \quad (12)$$

式中: K 为浊度系数。

由式(12)可知,浊度与检测电压呈线性关系。考虑相位、波形和频率对正交相敏解调检测结果的影响,采用电路仿真手段和控制变量法进行分析。

仿真中,以 30° 相位为间隔,分析了在不同频率的正弦波和方波激励下,输入信号与控制同相通道的参考信号不同相位差引起的正交相敏解调检测结果相对误差如图5(a)所示。从图5(a)中可以看出,对于在频率范围为 $500 \sim 1600$ Hz 的正弦波或方波激励时,输入信号与参考信号的相位差从 $0^\circ \sim 330^\circ$ 变化过程中,相对误差在 $-1\% \sim 2.5\%$ 区间内波动。

进一步,为得到最佳的调制波形和频率,不同频率与波形对正交相敏解调检测结果的影响规律如图5(b)所示。从图5(b)中可以看出,在频率为 1000 Hz, 调制波形为正弦波时,相对误差最小。综合考虑选取调制波形为正弦波,频率为 1000 Hz。

为得到输入信号与控制同相通道的参考信号不同相位差对单路和正交相敏解调检测结果的影响程度,在相同调制波形和频率的条件下,分析了不同相位差影响下二者检测结果的相对误差如图5(c)所示。从图5(c)中可以看出,单路相敏解调在 90° 和 270° 相位偏差下相对误差最大且值约为 90% , 而正交相敏解调的检测结果相对误差不随相位差的变化而变化且值接近于 0 。

考虑正交相敏解调时采用模拟开关构成的同相通道与正交通道存在时延,结合器件数据手册规定的开断延迟时间,在 $90^\circ \sim 90.05^\circ$ 范围内,间隔为 0.01° , 同相通道与正交通道不同相位差引起的正交相敏解调检测结果相对误差如图5(d)所示。从图5(d)中可以看出,随着同相通道与正交通道相位差逐渐增大,正交相敏解调检测结果相对误差也逐渐增大,呈非线性关系,相对误差变化量为 0.05% 。

为比较传统非调制检测系统与正交相敏解调检测系统的噪声抗干扰能力,在相同输入理想信号上叠加不同随机噪声,二者的最大波动误差和最大偏移误差结果如表2所示。从表2中可以看出,随着噪声增益的增加,传统非调制检测系统无法很好的将有用信号提取出来,

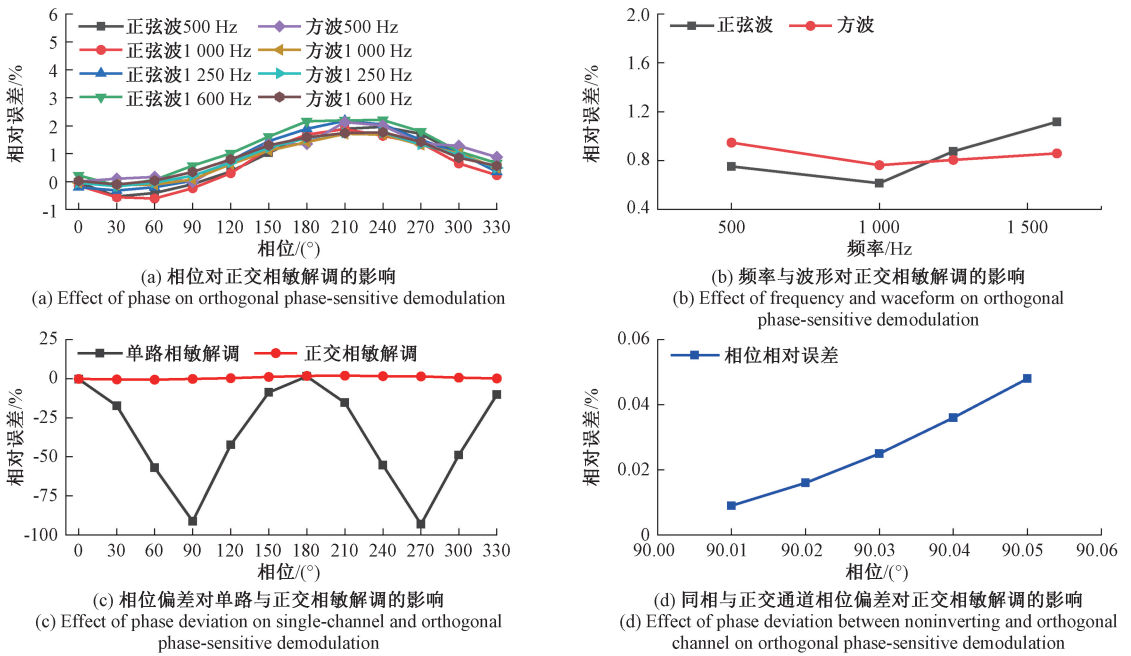


图 5 相位、波形和频率对正交相敏解调影响仿真分析

Fig. 5 Simulation analysis of the influence of phase, waveform and frequency on orthogonal phase sensitivity demodulation

表 2 传统非调制与正交相敏解调系统性能仿真比较

Table 2 Simulation comparison of performance of traditional non-modulated systems and orthogonal phase-sensitive demodulation systems

噪声增益	最大波动误差/%		最大偏移误差/%	
	传统非调制系统	正交相敏解调系统	传统非调制系统	正交相敏解调系统
1	0.78	0.27	0.96	0.28
3	1.55	0.45	2.23	1.48
5	2.65	1.25	1.82	1.45
6	2.73	1.41	2.83	1.63
7	3.26	1.50	5.46	1.75
8	3.07	1.21	8.22	1.71
9	4.02	1.80	8.99	2.90
10	3.79	1.46	9.56	2.84

其最大偏移误差在噪声增益为 10 时达到了 9.56%, 而正交相敏解调检测系统仅为 2.84%; 在最大波动误差和最大偏移误差两项评价指标上, 正交相敏解调检测系统优于传统非调制检测系统。

3 实验验证

根据上述理论推导和仿真分析结果, 提出了一种基于正交相敏解调原理的浊度传感器, 并搭建了相应的浊

度测试装置, 以验证该浊度传感器的线性度、重复性、准确性、最低检出限、分辨力、稳定性等性能。

3.1 实验环境及标准溶液配置

浊度检测实验平台如图 6 所示, 包括流通槽、自研浊度传感器、HACH 2100Q 商用浊度传感器、400 NTU 福尔马胂标准悬浮液和移液枪。所有待测溶液均使用超纯水和 400 NTU 福尔马胂标准悬浮液制备。为了避免配置好的待测溶液长时间放置导致溶液中悬浮物分布不均匀而影响测量, 每次将待测溶液倒入流通槽后, 均会通过磁力搅拌机进行混匀。



图 6 浊度测试装置

Fig. 6 Turbidity test device

3.2 线性度测试

每次线性度测试开始前, 均使用 HACH 2100Q 商用浊度传感器对待测溶液进行检测, 并记录其浊度值。然

后用待测溶液对流通槽和浊度传感器进行3次润洗,随后将待测溶液倒入流通槽中,开启磁力搅拌机,以1 000 rad/min的转速对流通槽内待测溶液进行搅拌,持续2 min,然后停止搅拌,静置30 s,待测溶液稳定后,将浊度传感器完全浸没在待测溶液中开始测试。测试过程中,以15 s的间隔对待测溶液进行测量,总共记录12个测量数据。每次测试时间设置为5 min,并在测试结束后再次使用HACH 2100Q商用浊度传感器对待测溶液进行检测,验证其浊度值是否发生变化。随后对记录的12个测量数据进行处理,考虑浸没传感器时可能会产生气泡导致检测到的数据波动,因此剔除前2个数据点,对后10个数据点进行加权平均得到浊度对应电压值。

考虑在低浊度环境下,尤其是在1 NTU内的准确检测,因此分别在0~1 NTU和1~5 NTU范围内各选取5个点进行线性度测试,图7显示了在0~5 NTU检测范围内浊度值与该浊度传感器测量电压值之间的关系。从图7中可以看出,采用最小二乘法原理对数据进行曲线拟合后,在0~5 NTU测量范围内,由电压与浊度关系式可得二者对应变化值为48.84 mV/NTU。该浊度传感器的相关系数 R^2 可达0.999 92,具有良好的线性度。

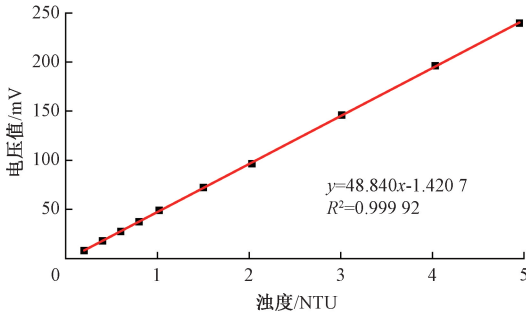


图7 浊度传感器线性度测试

Fig. 7 Linearity test for the turbidity sensor

3.3 重复性测试

制备了5份不同浊度的待测溶液,分别为0.2、0.4、0.6、0.8和1 NTU,进行重复性测试。每次测试时间设置为5 min,测试完成后断电停止工作,时间间隔1 min,随后重新上电开始工作,重复该测量过程8次,得到的浊度传感器重复性如图8所示。从图8中可以看出,每个样本的浊度呈现随检测次数增加而降低的趋势,相对标准偏差呈现随浊度增大而减小的趋势,这是由于悬浮液沉降导致,浊度越低,悬浮液稳定性越差,沉降速度越快。所有样本的相对标准偏差均在1.5%以内,该浊度传感器展现出良好的重复性。

3.4 准确性测试

准确性反映了测量结果与测量真值的接近程度,是以测量误差来衡量的,而测量误差又可分为绝对测量误

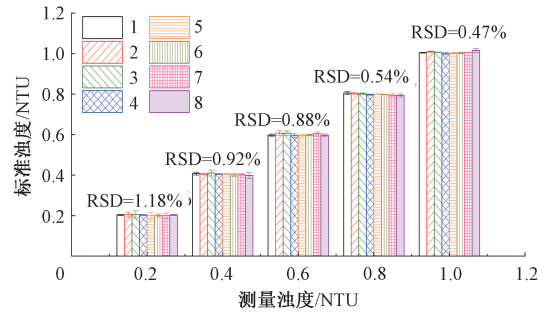


图8 浊度传感器重复性测试

Fig. 8 Repeatability test for the turbidity sensor

差和相对测量误差,误差越小,则表明准确性越高。该浊度传感器对制备好的浊度标准溶液的测试结果如表3所示。从表3中可以看出,在0~1 NTU测量范围内,绝对测量误差变化不大,均小于 ± 0.005 NTU;在1~5 NTU测量范围内,绝对测量误差随浊度增大而有较明显的增大且在5 NTU时达到-0.034 NTU。该浊度传感器的相对测量误差均在 $\pm 1\%$ 以内,具有良好的准确性。

表3 福尔马胂标准溶液测试结果

Table 3 The results of measuring of formazin standard solutions

样本浊度/NTU	测量浊度/NTU	绝对测量误差	相对测量误差/%
0.2	0.201	0.001	0.50
0.4	0.397	-0.003	-0.75
0.6	0.598	-0.002	-0.33
0.8	0.797	-0.003	-0.38
1.0	1.004	0.004	0.40
1.5	1.510	0.010	0.67
2.0	1.981	-0.019	-0.95
3.0	3.020	0.020	0.67
4.0	3.979	-0.021	-0.52
5.0	4.966	-0.034	-0.68

3.5 最低检出限测试

最低检出限表示该传感器测量的理论下限。将该浊度传感器放入黑盒中,在无光照环境,传感器光源停止工作的条件下,对其底噪进行检测,检测时间设置为60 min,共记录250个测量数据,结果如图9所示。

从图9中可以看出,该浊度传感器底噪范围在0.04~0.08 mV之间,由此可计算出该浊度传感器的最低检出限为:

$$\text{LOD} = \frac{0.08 \times 3}{48.84} \times 1 \text{ NTU} = 0.0049 \text{ NTU} \quad (13)$$

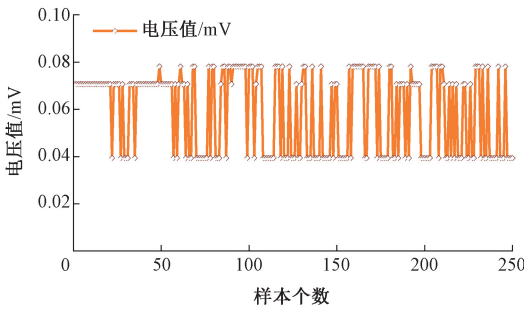


图 9 浊度传感器最低检出限测试

Fig. 9 Limit of detection test for the turbidity sensor

将自研浊度传感器与其他传统非调制浊度检测仪器进行最低检出限比较,结果如表 4 所示。

表 4 浊度最低检出限比较

Table 4 Comparison of limit of detection for turbidity

浊度检测仪器	最低检出限/NTU
GRIN-Lens 散射式红外浊度仪 ^[14]	0.02
分布式智能浊度传感器 ^[24]	0.015
自研浊度传感器	0.004 9

从表 4 中可以看出,传统非调制浊度检测仪器的最低检出限分别为 0.02 和 0.015 NTU,而自研浊度传感器为 0.004 9 NTU,由此可得自研浊度传感器的最低检出性能优于传统非调制浊度检测。

3.6 分辨力测试

为验证该浊度传感器在低浊度量检测时的分辨能力,在 0.15~0.20 NTU 浊度范围内以 0.01 NTU 为一个梯度进行分辨力测试。每次测试时间设置为 5 min,记录 12 个连续测量数据。基于不同浊度的测量数据散点折线图如图 10 所示。从图 10 中可以看出,0.01 NTU 的变化对应电压值约为 0.5 mV,每个梯度的样本波动值最大约为 0.17 mV,由此可得 0.01 NTU 的变化电压值为波动值的 3 倍,可以较好的分辨出 0.01 NTU 的变化。

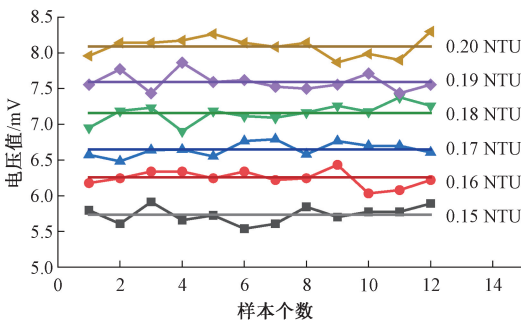


图 10 浊度传感器分辨力测试

Fig. 10 Resolution test for the turbidity sensor

3.7 稳定性测试

制备了 10 份不同浊度的待测溶液,进行稳定性测试。每次测试时间设置为 5 min,并在 1 min 后开始记录,总共记录 15 个测量数据。考虑各点尺度相差过大,样本标准差不适用,遂采用样本变异系数表征样本数据的波动大小,其波动越小,变异系数就越小,稳定性就越好。不同浊度测量的变异系数变化规律如图 11 所示,从图 11 中可以看出,变异系数呈现出随浊度增大而减小的趋势,在 0~1 NTU 范围内其变异系数处于 1%~3% 区间内,1~5 NTU 范围内其变异系数处于 0~1% 区间内。每个样本数据的变异系数均在 3% 以内,具有良好的稳定性。

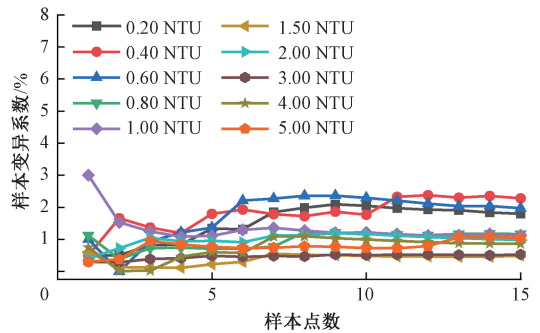


图 11 浊度传感器稳定性测试

Fig. 11 Stability test of the turbidity sensor

4 结 论

为解决传统非调制浊度检测技术在低浊度检测中最低检出性能较差、精度较低的问题,本文提出了一种基于正交相敏解调的低浊度检测技术。基于散射理论和斯涅尔定律设计了浊度传感器的光路结构;采用 860 nm 近红外发光二极管作为光源,以光电二极管、跨阻放大电路和带通滤波器结合正交相敏解调原理构建浊度检测系统,并研制出浊度传感器,验证了该浊度传感器的检测性能。实验结果表明,该浊度传感器在 0~5 NTU 测量范围内线性度表现良好,相关系数 R^2 可达 0.999 9;具有良好的重复性和准确性,所有样本的相对标准偏差均在 1.5% 以内,相对测量误差均在 $\pm 1\%$ 以内;其底噪范围在 0.04~0.08 mV 之间,由此计算出的浊度最低检出限为 0.004 9 NTU,可对 0.01 NTU 变化表现出良好的分辨力;此外,每个样本数据的变异系数均在 3% 以内,表明其具有良好的稳定性。结果表明,该方法大大提高了最低检出性能和测量精度,并且从方法上避免了在低信噪比时直流漂移噪声和宽带噪声对浊度测量的影响。研制的浊度传感器拥有良好的检测性能,可适用于低浊度检测相关领域。

参考文献

- [1] 孟庆磊, 孙国强, 佟国香. 液体浊度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2005(S1): 252-253.
MENG Q L, SUN G Q, TONG G X. A measuring apparatus for turbidity of liquids [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005(S1): 252-253.
- [2] 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.
- [3] 于佳琦, 徐冰, 黄雨妍, 等. 基于在线浊度传感器的中药颗粒剂溶化性评价和分类研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 259-266.
YU J Q, XU B, HUANG Y Y, et al. Evaluation and classification of dissolution behavior and capability of Chinese medicine granules based on an inline turbidity sensor[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(2): 259-266.
- [4] 郭红壮, 宫平, 王哲, 等. 尿白蛋白与尿肌酐比值的检测关键技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 155-161.
GUO H ZH, GONG P, WANG ZH, et al. Research on key techniques for measuring the ratio of urine albumin to urine creatinine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 155-161.
- [5] 郑雪飞, 李春, 范晓彦, 等. 温度和浊度对罗丹明 B 示踪检测的影响及校正[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 242-249.
ZHENG X F, LI CH, FANG X Y, et al. Influence of temperature and turbidity on Rhodamine B tracer detection and correction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 242-249.
- [6] CHU CH H, LIN Y X, LIU CH K, et al. Development of innovative online modularized device for turbidity monitoring [J]. Sensors, 2023, 23(6): 3073.
- [7] 李欣芯, 王义程, 赵王昱斐, 等. 液体样本重金属离子检测微流控传感器与系统[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 86-98.
LI X X, WANG Y CH, ZHAO W Y P, et al. Microfluidic sensors and systems for detecting heavy metal ions in liquid samples [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 86-98.
- [8] TREVATHAN J, READ W, SATTAR A. Implementation and calibration of an IoT light attenuation turbidity sensor [J]. Internet of Things, 2022, 19: 100576.
- [9] DROUJKO J, MOLNAR P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 10341.
- [10] ZHU Y Y, ZHAO W Z, LIU SH, et al. Turbidity analysis using visible and near-infrared light images [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2021, 12(1): 27-35.
- [11] FEIZI H, SATTARI M T, MOSAFERI M, et al. An image-based deep learning model for water turbidity estimation in laboratory conditions [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(1): 149-160.
- [12] 刘凌峰, 陈晓雷, 仇国庆, 等. 多影响因素下混凝土浑浆浓度智能模糊监测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 121-131.
LIU L F, CHEN X L, QIU G Q, et al. Intelligent fuzzy monitoring of concrete slurry concentration under multiple influence factors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 121-131.
- [13] 贾乐成, 陈世利, 曾周末. 超声声场光学检测的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 1-15.
JIA L CH, CHEN SH L, ZENG ZH M. Research progress in optical detection of ultrasound fields: A review [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 1-15.
- [14] 许金, 张晓昶, 叶懋, 等. 基于 GRIN-Lens 散射式红外浊度仪的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(5): 104-107, 112.
XU J, ZHANG X CH, YE M, et al. Design of scattering IR nephelometer based on GRIN-Lens [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(5): 104-107, 112.
- [15] 张锂, 韩国才. 新型柱积分在线智能浊度仪的研究与性能测试[J]. 仪器仪表学报, 2006(8): 916-919.
ZHANG L, HAN G C. Research and function test of a new-type column integrating on-line intelligent turbidimeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(8): 916-919.
- [16] TREVATHAN J, READ W, SCHMIDTKE S. Towards the development of an affordable and practical light attenuation turbidity sensor for remote near real-time aquatic monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1993.
- [17] YANG Y X, WANG H Q, CAO Y Y, et al. The design

- of rapid turbidity measurement system based on single photon detection techniques [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 73: 44-49.
- [18] WANG H Q, HU J T, WAN W, et al. A wide dynamic range and high resolution all-fiber-optic turbidity measurement system based on single photon detection technique [J]. *Measurement*, 2019, 134: 820-824.
- [19] SANCHEZ R, GROG M, VUILLEMIN R, et al. Development of a frugal, in situ sensor implementing a ratiometric method for continuous monitoring of turbidity in natural waters [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 1897.
- [20] HE J, HU Y, YANG H, et al. A highly sensitive deep-sea in-situ turbidity sensor with spectrum optimization modulation-demodulation method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6441-6449.
- [21] ZANG ZH ZH, QIU X B, GUAN Y M, et al. A novel low-cost turbidity sensor for in-situ extraction in TCM using spectral components of transmitted and scattered light [J]. *Measurement*, 2020, 160: 107838.
- [22] BOHREN C F, HUFFMAN D R. *Absorption and scattering of light by small particles* [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [23] KITCHENER B G, WAINWRIGHT J, PARSONS A J. A review of the principles of turbidity measurement [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2017, 41(5): 620-642.

- [24] TAI H J, LI D L, WANG C, et al. Design and characterization of a smart turbidity transducer for distributed measurement system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 175: 1-8.

作者简介



阮嘉明, 2021 年于吉林建筑科技学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表技术。

E-mail: p21020854098@cjl.u.edu.cn

Ruan Jiaming received his B. Sc. degree from Jilin University of Architecture and Technology in 2021. He is currently a master student at China Jiliang University. His main research interest is instrumentation technology.



唐波 (通信作者), 2008 年于浙江理工大学获得学士学位, 2011 年于浙江工业大学获得硕士学位, 2015 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学高级工程师, 主要研究方向为智能传感技术。

E-mail: tangbo@cjl.u.edu.cn

Tang Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2008, received his M. Sc. degree from Zhejiang University of Technology in 2011, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2015. He is currently a senior engineer at China Jiliang University. His main research interest includes smart sensing technology.