

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.001

基于散射法及透射法的浊度检测系统设计*

綦声波¹,尹保安¹,于敬东²

(1. 中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100;2. 青岛森科特智能仪器有限公司,山东 青岛 266200)

摘要:针对浊度测量方式多样且适应范围不同及浊度检测误差补偿准确度问题,对浊度检测系统的测量方式、光源驱动、量程自动切换、软件标定和温度补偿等方面进行了研究。通过对浊度测量原理的分析,设计了基于散射法及透射法的新型探头及浊度检测电路,利用该新型探头对浊度进行了信息采集,采用分段标定的方式对检测系统进行了软件标定,并对检测系统进行了温度补偿。研究表明:该浊度检测系统能实时检测浊度信号,具有量程自动切换、数据处理、软件标定、温度补偿等功能,该检测系统能够准确测量0~1 000 NTU范围内待测溶液的浊度,且测量精度在±1% FS以内。

关键词:浊度检测;90°散射法;透射法;分段标定;温度补偿

中图分类号:TH832

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0771-06

Turbidity detection system based on scattering and transmission method

QI Sheng-bo¹, YIN Bao-an¹, YU Jing-dong²

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Qingdao Sencott Intelligent Instrument Co., Ltd., Qingdao 266200, China)

Abstract: Aiming at the problems of various turbidity measurement modes, different application ranges and the accuracy of turbidity detection error compensation, the measurement mode, light source driving, automatic range switching, software calibration and temperature compensation of turbidity detection system were researched. A new probe structure and turbidity detection circuit based on scattering method and transmission method were designed based on the principle study of turbidity measurement. The turbidity information was collected by the new type of probe, and the software of the detection system was calibrated by means of sectional calibration, and the temperature compensation of the detection system was carried out. The results indicate that the turbidity detection system can detect the turbidity signal in real time, and has the functions of automatic range switching, data processing, software calibration and temperature compensation. The system can accurately measure the turbidity of the solution to be measured in the range of 0-1 000 NTU. And the measurement accuracy is within ±1% FS.

Key words: turbidity detection; 90 degree scattering method; transmission method; sectional calibration; temperature compensation

0 引言

浊度是水质监测中的一项很重要的物理性指标^[1]。浊度的检测大多基于光电测量原理,常见的基于光学的测量方法有透射法和散射法^[2]。目前,国际上通用的浊度测量方法是90°散射法,这种测量方法

线性度好、测量精度高,但是这种测量方法仅适合低浊度测量。透射法通过测定水体的吸光度反应浊度,在中高浊度范围内线性度好,更适合中高浊度测量。

针对90°散射法的缺点,为扩大浊度的测量范围,并在测量范围内均保持高精度,本研究将提出一种浊度测量的改进方法。

收稿日期:2019-01-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC1400800);国家自然科学基金资助项目(51475197)

作者简介:綦声波(1970-),男,山东平度人,教授,硕士生导师,主要从事嵌入式系统、海洋智能仪器方面的研究。E-mail:qishengbo@ouc.edu.cn

1 测量原理

1.1 浊度测量基本原理

浊度检测系统的测量原理主要依据的是光的吸收定律和光的散射定律,所以通常利用光电探测器检测透射光束或散射光束的大小来确定浊度^[3]。

利用透射法测量浊度时,透射光强的减弱遵循朗博-比尔吸收定律,根据该定律可求得透过液体后的光强度 I_0 :

$$I_0 = MI_i e^{KTL} \quad (1)$$

式中: M —仪器的几何参数; I_i —入射光强度; T —水样浊度; K —系数; L —水样厚度。

假设入射光强度 I_i 不变,对式(1)进行形式转换,可得水样浊度 T 与透射光强度 I_0 的对数的对应关系:

$$\log \frac{I_0}{I_i} = K_1 T \quad (2)$$

式中: T —水样浊度; I_i —入射光强度; K_1 —系数。

由式(2)可知:当入射光强度 I_i 不变时,水样浊度 T 与透射光强度 I_0 的对数成正比,因此,可通过测量透射光强度 I_0 的大小来求得浊度值。

根据入射光束和散射光束所形成的不同角度,散射法可分为前向散射、垂直散射和后向散射。国际标准 ISO7027 - 1984《水质 - 浊度的测定》指定散射法测量浊度的角度为 $90^\circ \pm 2.5^\circ$ 。

利用散射法测量浊度时,根据瑞利散射定律, 90° 方向的散射光强度 I_0 为:

$$I_0 = \frac{K_2 NV^2}{\lambda^4} I_i \quad (3)$$

式中: I_i —入射光强度; V —颗粒体积; λ —入射光波长; N —单位体积颗粒总数; K_2 —系数。

在一定条件下,假设 λ 和 V 为常量,则 I_0 和 I_i 之比与单位颗粒总数 N 成正比,即与待测水样浊度成正比,即:

$$\frac{I_0}{I_i} = K_3 T \quad (4)$$

式中: T —水样浊度; K_3 —系数。

因此,在入射光强度 I_i 一定的前提下,散射光强度 I_0 与待测液浊度 T 成正比,可通过测量散射光强度 I_0 求得浊度大小。

1.2 浊度测量方案

浊度的测量方法可分为散射法和透射法两大类。本文将两种测量方法进行对比,以确定最终的测量方案。

透射光强度 I_0 的自然对数 S 与水样浊度 T 之间的

特性关系如图 1 所示^[4]。

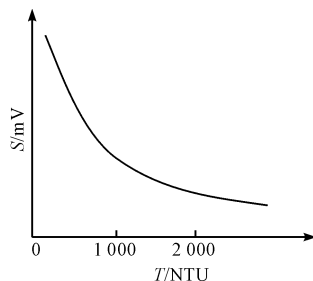


图 1 透射光强度自然对数与水样浊度关系

图 1 显示:

当浊度 $T < 1000$ NTU 时,两者之间线性度较好;当浊度 $T > 1000$ NTU 时,两者之间呈现衰减非线性。透射法测量的范围广,但是在测量低浊度液体时,浊度的微小变化对透射光信号的变化影响较弱,测量精度低。

在电路设计方面,对光电接收器件和放大器件的稳定性和分辨率有较高要求,故透射法不适合低浊度液体测量,更适合中、高浊度的水样测量^[5-6]。

90° 散射法测量时,散射光强度的电信号 V 与水样浊度 T 之间的特性关系如图 2 所示^[7]。

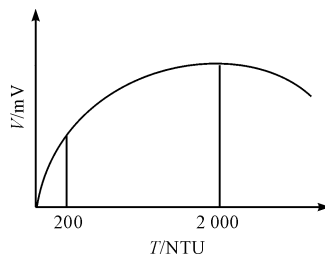


图 2 90° 散射光强与浊度的关系

图 2 显示:

当 $T < 200$ NTU 时,散射光强度与水样浊度之间有较强的线性关系;当 $T > 200$ NTU 时,两者之间呈明显的非线性关系,此时若仍旧使用散射光测量法,须使用软件进行非线性校正,但是这会降低测量精度;当 $T > 2000$ NTU 时,水样的颗粒会对入射光进行多次散射,使得散射光强度大幅度降低。

由此可见,散射法适合低浊度液体的检测,并具有较高的灵敏度及测量精度。

因此,在浊度测量时,可在 $0 \sim 200$ NTU 内采用 90° 散射法, 200 NTU ~ 1000 NTU 内采用透射法。

为提高系统的检测精度,本研究采用分段标定的方式对浊度检测系统进行软件标定,并对系统进行温度补偿,即在扩大系统测量范围的同时,保证了系统在不同温度环境下的测量精度。

2 硬件设计

浊度检测系统包括电源电路、光源驱动电路、信号

采集及处理电路、温度补偿电路等,其框图如图 3 所示。

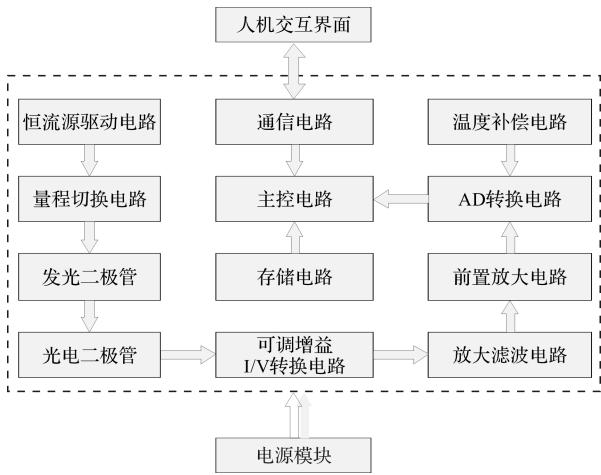


图 3 浊度检测系统框图

图 3 中:

(1) 电源电路负责为检测系统提供稳定电源,保证系统稳定工作;

(2) 光源驱动电路负责驱动发光二极管产生稳定光源;

(3) 信号采集及处理电路负责将浊度信号转化为光电信号,并将微弱的光电信号进行 I/V 转换及放大滤波处理后调整至可与 A/D 相匹配的电压范围内;

(4) 温度补偿电路负责采集待测溶液的温度信息,以便对传感器进行温度补偿;

(5) 主控电路负责任务调度、数据处理及存储,并通过通信电路将浊度数据上传至 PC 端,实现人机交互。

该系统在充分探究检测方案、抗干扰性能的基础上,利用高精度恒流源驱动光源,选用可调增益 I/V 转换、量程切换、温度补偿等关键技术进行信号采集,可在较宽量程内实现浊度的高精度测量。

2.1 检测系统探头设计

为了能够同时测量 90° 散射光及透射光,本研究设计了新型探头结构,该新型探头的 3D 图如图 4 所示。

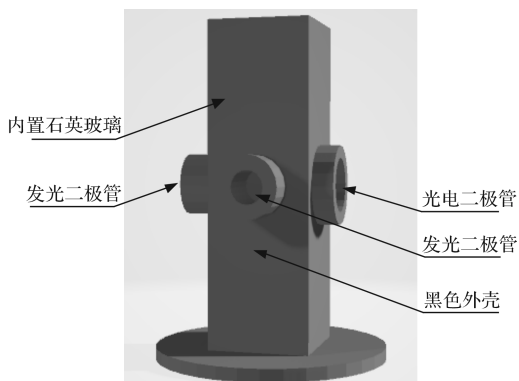


图 4 浊度检测系统探头 3D 图

为了减少外界环境光的干扰,探头外壳选用黑色

材质,选用透红外性能良好的石英玻璃制作液体容器,并将两个发光二极管和光电二极管分别呈 90° 及 180° 安装于对应孔内,石英玻璃、光电二极管、发光二极管等器件及器件与外壳连接处,利用环氧树脂进行防水密封处理。

若需在线实时测量,可直接将探头置于待测液体中进行浊度测量;若离线测量,可将待测溶液直接倒入容器中进行浊度的测量。

2.2 光源设计

为了满足浊度检测系统对光源稳定性、寿命及出射角的要求,本研究光源选用 OSRAM 公司的 LED SFH4851,波长峰值为 850 nm,位于近红外波段,可有效地降低液体色度对浊度的影响。光源采用高精度恒流源电路驱动,为了实现 90° 散射法与透射法的自动切换,笔者利用主控电路控制模拟开关选通发光二极管。

为降低环境温度对光源的影响,本研究设计了温度补偿电路对系统进行了温度补偿,并通过脉冲控制光源的导通和关断来保证光源足够的散热时间,保证光源的发光功率,提高传感器的测量精度。

2.3 可调增益 I/V 转换电路设计

由于光电二极管产生的电信号很微弱,一般在 μA 级,需选择合适的运算放大器实现 I/V 转换。

在进行浊度测量时,由于透射法产生的光强比散射法产生的光强大得多。为了使透射光强与散射光强均得到合理的放大,提高浊度测量精度,本研究设计了可调增益 I/V 转换电路,如图 5 所示。

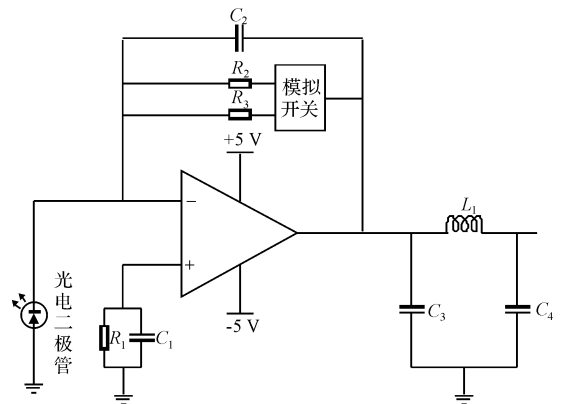


图 5 可调增益 I/V 转换电路

当系统选用 90° 散射法测量时,可通过主控电路控制模拟开关选通高反馈电阻,当系统选用透射法测量时可通过主控电路控制模拟开关选通低反馈电阻;同时为了提高测量精度,光电二极管选用光导模式,并在加强电源滤波的同时选用 $LC\pi$ 型滤波方式对浊度信号进行硬件滤波。

2.4 前置放大电路设计

为了抑制电源电压波动及各种电子元件间的相互干扰,更好地与 A/D 转换电路的电压范围相匹配,对经 I/V 转换之后的电压信号进行二次放大。本研究选用的二级放大芯片为 INA121,能很好地抑制共模干扰,保证检测精度。

2.5 温度补偿电路设计

为保证检测系统在不同温度环境下的测量精度,需对传感器进行温度补偿。该系统使用自制精密恒流源驱动 PT1000 进行了温度检测,而后使用软件对浊度检测系统进行了温度补偿。经测试,该温度传感器线性度良好、灵敏度高,精度达 0.05 °C,满足温度补偿的需求。

3 软件设计

主控单元采用意法半导体的 STM32 单片机。主控单元的主要功能是按照通信协议,接收上位机通过串口下发的指令,解析后执行温度检测及浊度检测,数据处理完毕后经串口回发,完成通信。

3.1 检测控制流程设计

STM32 微控制器使用 IAR 软件进行 C 语言编程,通过检测程序控制浊度采样过程中测量方式切换及增益切换。

检测控制程序流程图如图 6 所示。

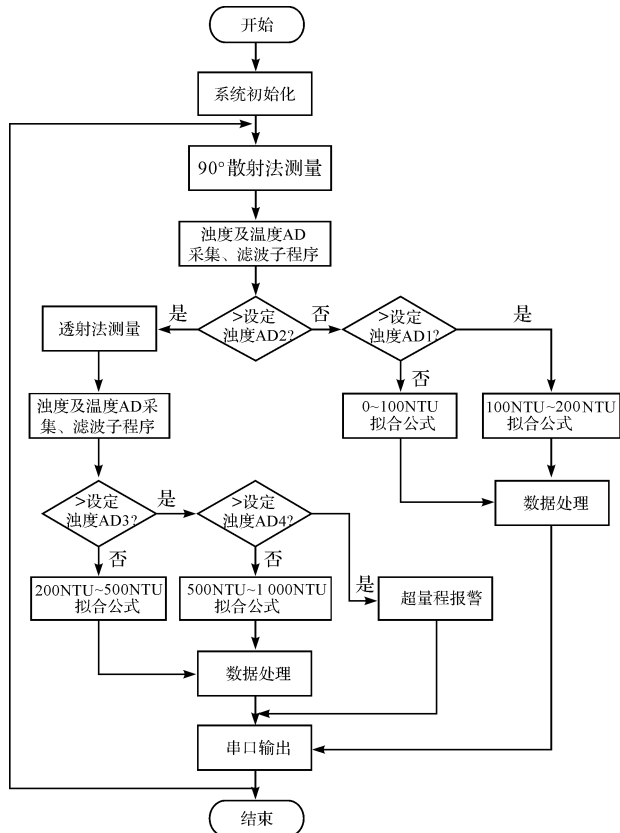


图 6 检测控制程序流程图

系统初始化后,主控单元首先选择 90° 散射法测量方式进行浊度及温度数据采集。若采集的浊度 AD 值大于 200 NTU 对应的 AD 值(AD2),则选择透射法重新进行测量;选择透射法测量时,若采集的浊度 AD 值大于 1 000 NTU 对应的 AD 值(AD4),则通过串口进行超量程报警。

为了提高测量精度,本研究采用分段标定的方式对检测系统进行了标定,建立了多个拟合公式。90° 散射法与透射法均可根据采集的 AD 值自动选择对应的拟合公式进行数据处理,数据处理完毕后,将经温度补偿后的浊度值通过串口发送至上位机。

3.2 数字滤波设计

气泡会导致散射光强发生突变,造成测量误差,因此采用数字滤波方式滤除干扰^[8]。本研究采用中位值滤波算法和加权滤波算法对数据进行滤波。

3.3 数据处理流程

系统中,经检测控制程序采样后,所获数据为包含浊度信息及温度信息的模拟值,故需进行数据处理获取最终检测值。

数据处理主要包含两部分:标定与温度补偿。利用福尔马胂标准溶液对检测系统进行标定,用以确立检测系统输出量和输入量之间的对应关系。由于浊度检测系统测量范围较宽,笔者选用分段标定的方式对检测系统进行标定,利用 Matlab 建立每段对应的标定模型。温度补偿则是消除温度对浊度测量的影响,进行温度补偿时,首先需根据温度与浊度的对应关系建立温度补偿模型,然后利用此温度补偿模型,将不同温度环境下测得的浊度数据转化为 $t = 20\text{ °C}$ 下的浊度数据,保证系统在不同温度环境下依然具有较高精度。

4 实验验证

为实现检测系统的有效测量,笔者特设计标定实验、温度补偿实验和验证分析实验。

4.1 标定实验

在进行标定实验前,根据浊度标准溶液配制公式,配制多种浊度标准溶液,后将浊度检测系统及浊度标准溶液置于恒温箱(20 °C)中进行实验。

选用 90° 散射法时浊度检测系统的测量结果如表 1 所示。

选用透射法时浊度检测系统的测量结果如表 2 所示。

表 1 90° 散射法检测系统测量结果

浊度标准值 /NTU	光电压信号 /mV	浊度标准值 /NTU	光电压信号 /mV
20	190.125	120	1 205.328
40	395.286	140	1 386.897
60	575.331	160	1 552.215
80	781.328	180	1 756.995
100	963.985	200	1 953.112

表 2 透射法检测系统测量结果

浊度标准值 /NTU	光电压信号对数 /mV	浊度标准值 /NTU	光电压信号对数 /mV
200	7.635	700	6.709
300	7.414	800	6.582
400	7.206	900	6.405
500	7.066	1 000	6.230
600	6.884		

由于检测系统的测量范围较宽,本研究选用分段标定的方式对检测系统进行标定。每种测量方式分两段进行标定,在 Matlab 中使用最小二乘法计算出拟合表达式。

在进行 90° 散射法标定时,可根据表 1 数据建立浊度与光电压信号的标定模型,即:

$$\begin{cases} y_1 = 0.103x_1 - 0.084 & 0 \leq T \leq 100 \\ y_1 = 0.107x_1 - 8.162 & 100 < T \leq 200 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_1 —系统测量光电压信号; y_1 —经拟合模型处理后的浊度值; T —浊度值。

在进行透射法标定时,可根据表 2 数据建立浊度与光电压信号自然对数值的标定模型,即:

$$\begin{cases} y_2 = -523.384x_2 + 4 186.551 & 200 < T \leq 500 \\ y_2 = -623.391x_2 + 4 888.755 & 500 < T \leq 1 000 \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_2 —系统测量光电压信号的自然对数值; y_2 —经拟合模型处理后的浊度值; T —浊度值。

4.2 温度补偿实验

本研究选用浊度为 400 NTU 的浊度标准液,对标定完成的检测系统进行测试。将浊度标准液及浊度检测系统置于恒温箱中,改变环境温度,记录系统实测值,利用 Matlab 将浊度实测值与温度值进行数据拟合。

拟合结果可知:在一定温度段内,浊度实测值与温度值近似成线性关系,说明检测系统的确存在温度漂移,须通过温度补偿来消除影响,即将当前温度下的浊度实测值转化为 $t = 20$ °C 时的浊度值。

选取 $t - 20$ °C 为 x ,选取绝对误差(测量值 - 真实值)为 y ,在 Matlab 中使用最小二乘法拟合表达式,即:

$$y = -0.469 9x - 1.184 3 \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),可得 90° 散射法的温度补偿模型:

$$\begin{cases} y_3 = \frac{0.103x_3 + 1.1003}{-1.174 \times 10^{-6}(t - 20) + 1} & 0 \leq T \leq 100 \\ y_3 = \frac{0.107x_3 - 6.319}{-1.174 \times 10^{-6}(t - 20) + 1} & 100 < T \leq 200 \end{cases} \quad (8)$$

式中: y_3 —经温度补偿后的浊度实测值; x_3 —光电压信号; t —待测溶液温度。

同理,将式(7)代入式(6),可得透射法的温度补偿模型:

$$\begin{cases} y_4 = \frac{-523.384x_4 + 4 187.735}{-1.174 \times 10^{-6}(t - 20) + 1} & 200 < T \leq 500 \\ y_4 = \frac{-623.391x_4 + 4 889.939}{-1.174 \times 10^{-6}(t - 20) + 1} & 500 < T \leq 1 000 \end{cases} \quad (9)$$

式中: y_4 —经温度补偿后的浊度实测值; x_4 —光电压信号的自然对数值; t —待测溶液温度。

4.3 验证分析实验及结果

为验证浊度检测系统温度补偿实验的正确性,本研究将浊度为 400 NTU 的浊度标准溶液及浊度检测装置置于恒温箱中,通过改变环境温度进行实验。其中,标准值为浊度标准溶液值,标定值为本文设计的浊度检测系统所得。

不同环境温度下,未经温度补偿处理浊度标准溶液的测量结果如表 3 所示。

表 3 未经温度补偿浊度测量结果 NTU

温度/(°C)	标准值	标定值	绝对误差	精度/(% FS)
5.32	400	409.732	9.732	0.973
15.48	400	406.256	6.256	0.625
25.26	400	392.129	7.871	0.787
35.45	400	387.036	12.964	1.296

不同环境温度下,经温度补偿处理后的测量结果如表 4 所示。

表 4 温度补偿后浊度测量结果 NTU

温度/(°C)	标准值	标定值	绝对误差	精度/(% FS)
5.32	400	403.096	3.096	0.309
15.48	400	402.564	2.564	0.256
25.26	400	397.232	2.768	0.276
35.45	400	395.874	5.126	0.512

由表(3,4)对比可知:温度补偿可有效提高浊度检测系统的测量精度,保证系统在不同温度环境下均有较高精度。

将浊度检测系统进行温度补偿后,在 20 ℃ 下测量不同浊度标准溶液,测量结果如表 5 所示。

表 5 20 ℃ 不同浊度标准溶液测量结果 NTU

标准值	标定值	绝对误差	相对误差/(%)
5	5.319	0.319	0.159
60	61.223	1.223	0.615
100	98.832	1.168	0.584
200	199.756	0.244	0.122
400	404.722	4.722	0.472
600	598.231	1.769	0.176
800	806.226	6.226	0.622
1 000	994.566	5.444	0.544

将浊度检测系统进行温度补偿后,在 30 ℃ 下测量不同浊度标准溶液,测量结果如表 6 所示。

表 6 30 ℃ 不同浊度标准溶液测量结果 NTU

标准值	检测值	绝对误差	精度/(% FS)
5	5.331	0.331	0.165
60	61.215	1.215	0.607
100	98.795	1.205	0.602
200	199.826	0.174	0.087
400	404.543	4.543	0.453
600	598.350	1.65	0.165
800	806.456	6.456	0.645
1 000	994.682	5.318	0.531

将浊度检测系统进行温度补偿后,在 40 ℃ 下测量不同浊度标准溶液,测量结果如表 7 所示。

表 7 40 ℃ 不同浊度标准溶液测量结果 NTU

标准值	检测值	绝对误差	精度/(% FS)
5	5.416	0.416	0.208
60	61.182	1.182	0.591
100	98.975	1.025	0.512
200	201.143	1.143	0.571
400	403.941	3.941	0.394
600	597.931	2.069	0.206
800	805.473	5.473	0.547
1000	995.012	4.988	0.499

由表(5~7)可知:当液体浊度在 0~1 000 NTU 范围内变化时,在不同温度下该检测系统的测量精度均可保持在 1% FS 以内。

5 结束语

为了扩大温度检测系统的范围,并保持测量的高精度,本研究设计了一种基于散射法及透射法的浊度检测系统,设计了新型探头结构、浊度检测电路,给出了系统的分段标定模型和温度补偿模型,最后通过实验验证了分段标定模型及温度补偿模型的正确性。

实验结果表明:经分段标定和温度补偿后的浊度检测系统能够准确测量 0~1 000 NTU 范围内溶液的浊度,且测量精度在 ±1% FS 以内。

参考文献 (References):

[1] 胡晓力,余 名,莫 斌,等.一种超低量程浊度传感器设计与实现[J].传感器与微系统,2014,33(8):116-118.

[2] 王志丹.光学浊度传感器的设计与实现[D].南京:南京信息工程大学电子与信息工程学院,2016.

[3] 汪学明.双散射光式水质浊度测量及非线性补偿方法的研究[J].电子世界,2016(13):123-124.

[4] 王 路.基于近红外光的浊度检测系统设计[D].哈尔滨:黑龙江大学电子工程学院,2017.

[5] 王志丹,常建华,朱成刚,等.新型宽量程浊度传感器设计[J].传感器与微系统,2016,35(5):77-79,83.

[6] 张 悦.多传感器智能调度方案设计[J].轻工机械,2017,35(5):50-54.

[7] 吴建辉.在线式低量程浊度传感器的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学软件学院,2016.

[8] 余 名,唐云建.浊度传感器的标定方法研究[J].自动化与仪器仪表,2016(2):20-21.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

蔡声波,尹保安,于敬东,等.基于散射法及透射法的浊度检测系统设计[J].机电工程,2019,36(8):771-776.

QI Sheng-bo, YIN Bao-an, YU Jing-dong. Turbidity detection system based on scattering and transmission method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):771-776.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>