

# 智能光纤浊度传感器设计与试验

位耀光<sup>1,2</sup> 张力彩<sup>1,2</sup> 李道亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 浊度是指水体中悬浮颗粒的含量,在水产养殖中,悬浮颗粒由大量的细菌、病原体组成,颗粒物浓度过大,易危害水生动物的生存。传统的浊度检测技术易受环境光、色度、温度等因素的影响,稳定性差、精度低。为此设计了基于 IEEE1451.2 的智能光纤浊度传感器,该传感器由光学检测模块、信号变送模块、智能处理模块组成。光学检测模块采用 880 nm 红外发光二极管作为光源,采用 90° 散射光检测法,有效降低了色度对浊度检测的影响。信号变送模块采用正向比例积分电路、I/V 转换、滤波、检波电路对采集到的散射光电流信号进行处理,得到一个线性关系良好的直流浊度电压信号。为了提高传感器的精确度,设计了基于 IEEE1451.2 的智能处理模块,构建了温度补偿算法,采用校正 TEDS 参数完成对浊度的温度补偿,提高了浊度测量的准确度。对传感器性能进行测试试验,结果表明传感器准确度误差在  $\pm 1.5\%$  以内,稳定性误差在  $\pm 1.0\%$  以内,满足水产养殖对光纤浊度传感器的需求,具有较高的可靠性。

**关键词:** 水产养殖; 浊度; 光纤; 智能传感器

**中图分类号:** S959; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0199-06

## Research and Experiment of Intelligent Optical Fiber Turbidity Sensor

WEI Yaoguang<sup>1,2</sup> ZHANG Licai<sup>1,2</sup> LI Daoliang<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Technology Research Center of Internet of Things in Agriculture, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Turbidity of water refers to the content of suspended particles which are composed by large number of bacteria and pathogens. In aquaculture, the aquatic animals are influenced by the particulate matter concentration. It is necessary to monitor the turbidity. The measurement results of traditional turbidity detectors are easily influenced by environmental light, chromaticity, temperature factors. In order to solve the problems mentioned above, the intelligent optical fiber turbidity sensor was designed and developed based on IEEE1451.2 communication protocol. The sensor was composed of photoelectric detection module, signal transmission module and intelligent processing module. In the photoelectric detection module, a 880 nm infrared light emitting diode was applied as the light source, and the scattered light was measured at vertical direction which could effectively reduce the influence of chroma. In the signal transmission module, the collected scattered light current signal was processed to obtain a linear DC voltage signal with a linear relationship by the proportional circuit, I/V conversion, filtering and detecting circuit. In order to reduce the temperature influence and improve the detecting accuracy of the sensor, an intelligent processing module was designed based on IEEE1451.2 communication protocol. The temperature compensation algorithm was proposed and the TEDS parameter was calibrated to conduct the temperature compensation of the turbidity sensor. The performance of the sensor was tested. The experimental results showed that the accuracy of the sensor was within  $\pm 1.5\%$ , the stability error was within  $\pm 1.0\%$ , which satisfied the requirement of aquaculture turbidity measurement.

**Key words:** aquaculture; turbidity; fiber; intelligent sensor

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA00090)、国家重点研发计划项目(2017YFD0701702)和山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX07102)

作者简介: 位耀光(1976—),男,副教授,博士,主要从事农业先进传感技术和农业生产智能控制技术研究,E-mail: wyg@cau.edu.cn

## 引言

浊度是水的透明程度的量度<sup>[1]</sup>,水中所含有的悬浮颗粒及胶状微粒,导致纯净无色的水透明程度的下降,即浑浊现象,浊度是衡量水体浑浊度的单位<sup>[2-3]</sup>。水中存有大量的病菌和悬浮颗粒物(如细小的泥沙、尘土)难以在消毒工艺中清除,这些颗粒物有利于有害生物的生存,严重危害水生动物的生存环境<sup>[4]</sup>,进而影响人类的身体健康。浊度可以有有效的反映水体中悬浮颗粒的含量,利于人们及时了解水质情况,尽快解决水质污染问题,保护水生动物的生活环境。因此在工业、农业领域以及产品加工过程中,浊度都是一个非常重要的性能指标。浊度可以及时反映出水中有害悬浮颗粒的含量,对了解水生动物的生活状况具有十分重要的意义,因此浊度是水产养殖中的重要水质指标<sup>[4]</sup>。对水产养殖水域进行浊度检测,能够判断水产养殖水域中各种非溶性物质含量是否达标从而保护水产养殖水域水质的安全。

传统的浊度检测方法有:基于透射光的检测法<sup>[5]</sup>、基于散射光的检测法<sup>[6]</sup>和基于透射-散射比的检测法<sup>[7]</sup>,上述方法都是光学测量法。传统的光学传感器受水中的色度影响,测量系统的杂散光、悬浮颗粒粒径的影响较大,测量精度低;由于光源波长的选择对测量结果影响很大,因而对光源有很高的要求,抗干扰能力差,不易清洗;另外,因为光源发

出的光信号是发散的,会导致入射光强在水中传播时发生损耗,降低了测量结果的准确性,需要透镜将发散光准直为平行光线。随着新型光源的出现,例如LED或激光发出的光具有高指向性、高平行度的特点,大大降低了准直透镜在传感器中的使用,从而有利于光路系统的简化<sup>[8]</sup>,传感器的成本有所降低。

本文针对传统浊度检测方法存在的问题,设计了基于IEEE51的智能浊度传感器<sup>[9]</sup>,采用光纤进行光信号传输,光信号不会与其他的电磁波发生作用,不容易受到电噪声的影响,促使传感器具有较高的抗电磁干扰能力。

## 1 智能光纤浊度传感器设计

### 1.1 智能光线传感器总体架构

设计的智能光纤浊度传感器硬件电路结构如图1所示,包括光学测量模块、信号调理模块、智能处理模块等。光学测量模块主要是实现水体浊度信号的采集,包括光发射器、光电接收器和光电接收器窗口玻璃,光电接收器与传感器线路板连接。信号调理模块包括电流转换放大电路,用于对浊度信号转换为电压信号,并对转换后的电压信号进行处理生成浊度电压信号。智能处理模块包括微处理器和总线接口,微控制器与光学测量模块连接,用于对浊度信号进行处理,根据校准补偿参数对处理后的浊度信号进行计算处理生成浊度值。

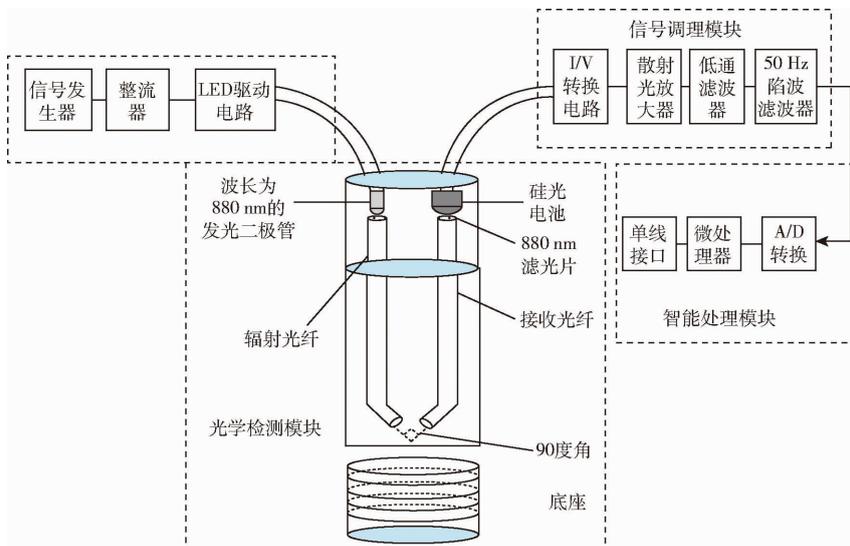


图1 硬件电路结构图

Fig.1 Diagram of hardware circuit

### 1.2 光学检测模块的设计

当特定波长的入射光透过被测溶液时,由于被测溶液中悬浮颗粒会使光产生散射现象,散射光强度与被测溶液的浊度成正比,因此测定与入射光传

播方向垂直的散射光强度,便可测得被测溶液的浊度<sup>[10-11]</sup>。采用90°散射光检测法测量被测溶液的浊度能够尽量避免或减弱气泡和色度对传感器的影响。90°散射法对低浊度检测具有较高的精度,同时

该方法对传感器的电路和光源等的要求较低,传感器的设计简单。

基于散射光检测溶液浊度的原理如图2所示,当入射光透过待测溶液时,90°方向的散射光强度 $I_R$ 为

$$I_R = \frac{KNV^2}{\lambda^4} I_0 \quad (1)$$

式中  $I_0$ ——入射光的强度

$N$ ——单位体积溶液中所含的悬浮颗粒数

$V$ ——悬浮颗粒的体积

$\lambda$ ——入射光的波长

$K$ ——系数

在理想条件下, $\lambda$ 和 $V$ 为常数,则由式(1)可知

$\frac{KNV^2}{\lambda^4}$ 和被测溶液的浊度成正比。由此可得当入射光强 $I_0$ 不变时,90°方向的散射光强度 $I_R$ 与被测溶液的浊度呈正相关,被测溶液的浊度检测便可以直接转化为对散射光强度的测量<sup>[12]</sup>。

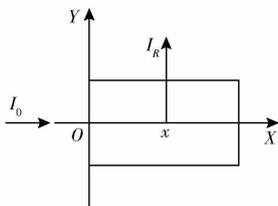


图2 散射式检测原理图

Fig.2 Detection principle of scattering method

本文设计了90°散射光检测结构,克服了水中溶解的有机物和被测溶液的色度易对浊度测量结果造成干扰的问题。为消除测量误差,选用波长为880 nm的红外发光二极管作为发射光源,选用硅光电池作为光电接收器,将所接收到的光电信号与信号调理电路相连接,实现浊度光电信号快速检测。

### 1.3 信号变送模块的设计

信号变送模块结构如图3所示。光学测量模块采集的浊度信号是经溶液中的悬浮颗粒散射形成的散射光信号,由于LED红外发光二极管是通过脉冲方式触发的,因而硅光电池所采集的散射光信号中含有交流、直流信号。其中直流信号是由恒定的背景光信号产生的,交流信号主要由散射光交流信号、工频信号以及其它高频噪声组成。这种信号不适合微处理器处理,需要先经过信号变送模块进行处理得到一个稳定的直流浊度电压信号,并将该信号发送至微处理器。信号变送模块包含6部分电路:正向比例积分电路、电流转换电路、信号放大电路、50 Hz陷波滤波器、带通滤波器和检波电路,同时还含有一个可以检测水体温度的温度测量电路。其中,正向比例积分电路是将硅光电池输出的微弱信

号进行初级放大,同时滤除其包含的大部分直流信号和频率较高的交流信号,电流电压转换电路将经初步处理的散射光电流信号转换为散射光电压信号以易于微处理器处理,而后经信号放大电路将获得的电压信号进一步放大,此时得到的交流电压信号中混有工频噪声,需要一个50 Hz陷波滤波器滤除硅光电池输出信号中的工频信号,便可以得到一个类方波的交流电压信号,经过一个带通滤波器处理成一个光滑的正弦波信号,再通过一个检波电路将上述正弦交流信号转化成幅值相等的直流浊度电压信号,传输给微处理器。

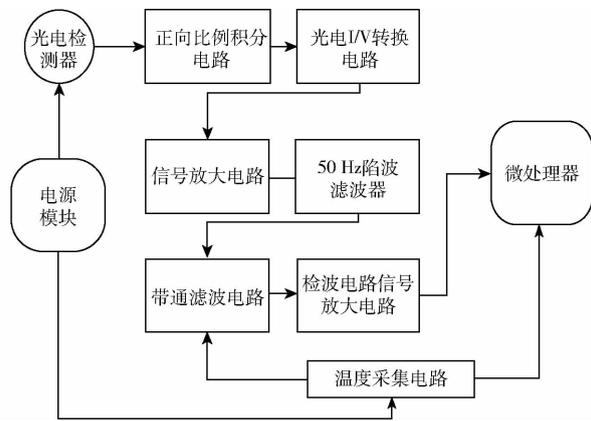


图3 信号变送模块结构图

Fig.3 Structure diagram of signal transmission module

### 1.4 基于IEE1451的光纤浊度传感器智能化模块设计

为了实现光纤浊度传感器的智能化,将IEEE1451.2标准引入到传感器的设计中<sup>[13-14]</sup>,IEEE1451.2标准的引入使检测不同参数的传感器之间的通信和分布式水质参数监测系统的设计成为可能<sup>[15]</sup>。无论是对传感器进行温度模型的校正还是标定校正,都需要在铁电存储器中留有一个特殊的寄存器,用于存储不同传感器的通道值和应用程序通道值。当传感器被赋予了新的值时,这些值也被转换成应用程序所需要的合适的值。校准为

$$Y = \sum_{i_1=0}^{D(1)} \sum_{i_2=0}^{D(2)} \cdots \sum_{i_n=0}^{D(n)} C_{i_1, i_2, \dots, i_n} (X_1 - H_1)^{i_1} (X_2 - H_2)^{i_2} \cdots (X_n - H_n)^{i_n} \quad (2)$$

$X_n$ 表示对应于校准机制的输入变量,也就是说,从传感器来的原始值或将赋予执行器的应用程序处理得到的值。 $H_n$ 表示输入变量的偏移量, $D(n)$ 表示输入 $X_n$ 的次数,也就是项 $(X_n - H_n)$ 在多项式中的最高次幂, $C_{i_1, i_2, \dots, i_n}$ 代表了每一项的校准系数。 $D(n)$ 、 $H_n$ 和 $C_{i_1, i_2, \dots, i_n}$ 都是来自TEDS的数据。除此之外,还包括数据类型、单位、传感器或执行器以及其它的对于配置校准机制必要的相关信息<sup>[16-17]</sup>。

由于水中悬浮物浓度(即浊度)受温度的影

响<sup>[18]</sup>,要想实现对浊度的精确测量需要在对浊度测量的同时测量水溶液的温度,然后通过软件方法实现对浊度因温度变化而产生的漂移进行补偿<sup>[19]</sup>。设计了一种对光纤浊度传感器测量值进行软件温度补偿的方法。这种软件补偿方法能够实现对浊度测量值的快速、准确的温度补偿<sup>[20]</sup>。在此,以使用福尔马胂溶液在温度为25℃时测量的浊度为基准,实现温度补偿主要是通过微处理器中的数据处理子程序,具体步骤包括:

(1)读取温度探头输出温度信号转换后生成的温度数字信号 $Z$ ,同时,读取光电检测器输出浊度信号进行转换后生成的浊度数字信号 $Y$ ;分别读取3次,得到3组温度和浊度数字信号: $\{Z_1, Y_1, Z_2, Y_2, Z_3, Y_3\}$ 。

(2)构建温度-浊度关系方程组

$$\begin{cases} Y_1 = \alpha Z_1^2 + \beta Z_1 + \gamma \\ Y_2 = \alpha Z_2^2 + \beta Z_2 + \gamma \\ Y_3 = \alpha Z_3^2 + \beta Z_3 + \gamma \end{cases} \quad (3)$$

得到校准参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 和浊度随温度变化的数字信号计算公式

$$Y = \alpha Z^2 + \beta Z + \gamma \quad (4)$$

(3)根据温度电压信号和温度的对应曲线得到25℃时的温度数字信号 $Z_{25}$ ,将温度数字信号 $Z_{25}$ 代入计算公式

$$Y = \alpha Z^2 + \beta Z + \gamma \quad (5)$$

计算可得被测溶液温度在25℃时的浊度数字信号 $Y_{25}$ 。

(4)根据温度在25℃时的浊度值和浊度数字信号 $Y_{25}$ 的对应曲线,对浊度数字信号进行计算得出25℃时水体的浊度。

## 2 传感器性能测试

### 2.1 准确度与误差分析

在室温25℃下,用零浊度的纯净水将福尔马胂标准溶液配置成7.40、20.40、29.80、56.60、75.03、102.40 NTU的浊度溶液,将传感器完全浸入被测溶液中,分别对这6个浊度不同的被测溶液测量8次,准确度测量结果如表1所示。数据分析结果表明传感器的准确度很好,所有样品溶液的相对误差都在±1%以内。

表1 准确度测量结果

Tab.1 Results of accuracy measurement

样品浊度/ NTU	浊度测量值/NTU								平均值/ NTU	相对 误差/%
	1	2	3	4	5	6	7	8		
7.4	7.39	7.42	7.41	7.28	7.46	7.43	7.35	7.32	7.38	0.27
20.4	19.86	20.32	20.28	20.13	20.35	19.97	20.42	20.51	20.23	0.83
29.8	30.13	29.76	29.83	29.82	30.23	30.15	30.10	29.73	29.97	0.54
56.6	56.23	56.45	55.98	56.73	56.36	56.85	56.39	56.73	56.46	0.23
75.03	74.25	74.73	75.03	74.98	75.34	75.61	74.38	75.37	74.96	0.09
102.4	101.65	102.34	101.86	102.23	103.15	104.27	101.32	104.13	102.62	0.21

### 2.2 线性度测量

浊度传感器的线性度测量在室温下进行,用零浊度水将福尔马胂标准溶液稀释至0~100 NTU,待悬浮物与零浊度水充分混合后,取10个样品溶液分别测量20次,测量间隔为5 s,测量结果如表2所示。采用最小二乘法对测量的结果进行处理得到浊度传感器标定曲线,曲线方程为 $y = 0.0938x +$

$1.9958, R^2 = 0.9885$ 。数据分析结果显示:该传感器线性度很好。

### 2.3 重复性测试

用零浊度的纯净水将福尔马胂标准溶液分别稀释成浊度为7.60、9.80、20.40、56.60 NTU的溶液,将光纤浊度传感器浸入被测溶液中,重复测量8次,测量周期为2 min。4个样品的测量结果如图4所示。试验结果表明,传感器重复性很好。

### 2.4 传感器温度特性分析

用零浊度的纯净水将福尔马胂标准溶液稀释成67、80、410、420 NTU,并将样品溶液置于冰箱内冷藏,冷却到5℃时,再将传感器放入样品溶液中,传感器和样品溶液一起置于磁力搅拌器内,慢慢升高的待测水域温度至40℃,每隔10 s记录一次光纤浊度传感器的测量值。同时用玻璃棒慢慢搅动样品溶液,将加热引起的气泡去除,以免对浊度检测的测量

表2 福尔马胂标准溶液测量结果

Tab.2 Measurement results by formazine standard solution

样品值/NTU	测量值/mV	样品值/NTU	测量值/mV
0.3	3.13	43	461.17
9.8	97.6	59.6	560.39
11.7	130.74	74.3	780.26
20.4	193.11	87.3	970.79
36.5	297.07	102.4	1040.32

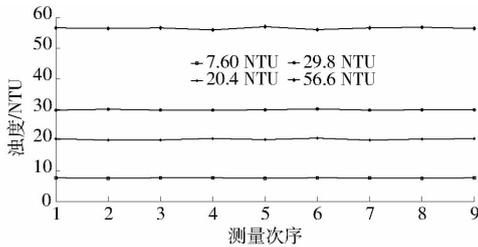


图4 重复性测量结果

Fig. 4 Repeatability measurement results

结果造成影响(图5)。测量结果如表3所示,对测量数据进行深入分析表明:当被测溶液的温度偏离25℃时,如果未对传感器进行温度补偿校正,则传感器的测量结果会产生很大的误差。温度对低浊度溶液(小于90 NTU)的影响较高浊度水(大于400 NTU)的影响更显著,呈现先增加后降低的趋势(类抛物线)。



图5 浊度传感器与测试试验装置

Fig. 5 Turbidity sensor and experiment device

从上述测量结果可知,当温度偏离25℃越多,产生的误差越大,对传感器测量结果的影响就越大,因此,对智能光纤浊度传感器进行一定的温度补偿是必要的。本文采用式(2)所示补偿矫正模型对智能光纤浊度传感器进行温度补偿,试验结果表明:

表3 不同温度时的溶液浊度测量结果

Tab. 3 Turbidity solution measured results with different temperature

样品值/ NTU	温度/℃							
	5	10	15	20	25	30	35	40
67	64.89	66.22	67.21	68.01	66.99	65.63	63.54	61.86
80	78.31	79.54	80.34	80.88	79.96	78.71	76.73	75.67
410	412.32	411.80	411.39	410.54	409.54	408.41	407.07	405.57
420	422.98	421.85	421.25	420.76	419.87	418.68	417.13	415.38

采用式(2)所示方法进行温度补偿后,测量误差降低到 $\pm 1.0\%$ 以内,能够较好解决由温度波动对测量造成的影响。

### 3 结论

(1)设计了浊度光学测量模块,选用基于散射的浊度检测方法,并设计了光纤结构,选定880 nm红外发光二极管作为光源信号,有效降低了色度对浊度检测的影响,提高了光纤浊度传感器的抗电磁干扰、耐高温高压的能力。

(2)构建了浊度信号变送电路,采用正向比例积分电路、I/V转换、滤波、检波电路对采集到的散射光电流信号进行处理,得到一个线性关系良好的直流浊度电压信号。

(3)设计了基于IEEE1451的智能补偿模块,通过试验得出不同浊度溶液的温度补偿系数,采用校正TEDS参数完成对浊度的温度补偿,试验结果表明,所设计的智能光纤传感器具有测量精度高、稳定性好、可靠性好、抗温度干扰能力强的特点。

### 参 考 文 献

- 谢世红,吴欣荣,谢世涛,等. 渔业水质分析和监测在水产养殖中的作用[J]. 江西水产科技,2005(4):6-9.  
XIE Shihong, WU Xinrong, XIE Shitao, et al. The role of fisheries water quality analysis and monitoring in aquaculture [J]. Jiangxi Aquatic Science and Technology, 2005(4): 6-9. (in Chinese)
- 张琴,郑立华,李民赞,等. 基于近红外光谱技术的便携式水体浊度检测仪研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):236-240,235. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s244&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s244&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.044.  
ZHANG Qin, ZHENG Lihua, LI Minzan, et al. Portable water turbidimeter based on NIR spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp. 2):236-240,235. (in Chinese)
- 卞贺明,夏善红. 用于水质检测的微传感器及微系统[J]. 微纳电子技术,2009,46(6):350-357.  
BIAN Heming, XIA Shanhong. Micro-sensors and micro-systems which used in water quality detection [J]. Micro-nano Electronic Technology, 2009,46(6): 350-357. (in Chinese)
- BHATNAGAR A, DEVI P. Water quality guidelines for the management of pond fish culture [J]. International Journal of Environmental Sciences, 2013,3(6):1980-2009.
- 柴小丽,沈博,王青玲. 水质监测中的快速传感技术[J]. 环境科学与技术,2006,29(5):36-37.  
CHAI Xiaoli, SHEN Bo, WANG Qingling. Fast sensing technology for water quality monitoring [J]. Environmental Science and Technology, 2006,29(5): 36-37. (in Chinese)
- 杜玉红,魏坤鹏,史屹君,等. 水质浊度红外光检测及聚类灰色融合预测模型[J]. 红外与激光工程,2016,45(10):272-278.  
DU Yuhong, WEI Kunpeng, SHI Yijun, et al. Water turbidity detection based on infrared light and prediction model by clustering gray fusion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(10): 272-278. (in Chinese)

- 7 MURPHY K, HERRY B, SULLIVAN T, et al. A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring[J]. *Talanta*, 2015, 132:520 - 527.
- 8 纪莹蕾. 智能浊度传感器的研究与设计[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.  
JI Yinglei. Research and design of intelligent turbidity sensor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- 9 陈超. 面向鱼塘浊度检测的 WSN 节点关键技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.  
CHEN Chao. Key technologies of WSN node for fishpond turbidity detection [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- 10 JOHN F O, SMART C C. An inexpensive turbid meter for monitoring suspended sediment[J]. *Geomorphology*, 2005, 68(1 - 2):3 - 15.
- 11 GREGORY J. Monitoring particle aggregation processes[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009,147 - 148:109 - 123.
- 12 吴刚,刘月明. 光纤水质传感器的研究现状和发展趋势[J]. *传感器与微系统*, 2013(12):3 - 8.  
WU Gang, LIU Yueming. Research status and development trend of optical fiber water sensors[J]. *Sensors and Microsystems*, 2013(12):3 - 8. (in Chinese)
- 13 KUMAR A, SRIVASTAVA V, SINGH M K, et al. Current status of the IEEE 1451 standard-based sensor applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(5):2505 - 2513.
- 14 张瑞周,邵雪,鹿训练. 循环水浊度的控制方法[J]. *山东化工*,2016,45(13):199 - 200.  
ZHANG Ruizhou, SHAO Xue, LU Xunlian. Turbidity control method in circulating water[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2016,45(13):199 - 200. (in Chinese)
- 15 杨春曦,胡中功. 光纤传感器的应用及发展[J]. *武汉化工学院学报*, 2004(2):26 - 31.  
YANG Chunxi, HU Zhonggong. Application and development of optical fiber sensor [J]. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 2004(2):26 - 31. (in Chinese)
- 16 DIAS PEREIAL M, POSTOLACHE O, SILVA GIRAO P, et al. SDI - 12 based turbidity measurement system with field calibration capability[C]//CCECE, Niagara Falls, 2004:1975 - 1979.
- 17 OCTAVIAN P, DIDAS PEREIRA J M, SILVA GIRAO P, et al. Smart flexible turbidity sensing based on embedded neural network[C]//IEEE SENSORS 2006, October 22 - 25:658 - 660.
- 18 OCTAVIAN P, SILVA GIRAO P, DIDAS PEREIRA J M, et al. Multibeamoptical system and neural processing for turbidity measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*,2007,7(5):677 - 684.
- 19 ANTONIO G, MIGUEL A P, GUSTANO J G O, et al. A new design of low-cost four-beam turbidimete by using optical fibers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(3):907 - 911.
- 20 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.  
YU Ming, TANG Yunjian. Study on calibration method of turbidity sensor [J]. *Automation and Instrumentation*, 2016(2):20 - 21. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 210 页)

- 15 LI Baojian, CHENG Chuntian. Monthly discharge forecasting using wavelet neural networks with extreme learning machine[J]. *Science China (Technological Sciences)*,2014,57(12):2441 - 2452.
- 16 成云,成孝刚,谈苗苗,等. 基于 ARIMA 和小波神经网络组合模型的交通流预测[J]. *计算机技术与发展*,2017, 27(1):169 - 172.  
CHEN Yun, CHEN Xiaogang, TAN Miaomiao, et al. Traffic flow prediction based on hybrid model of ARIMA and WNN [J]. *Computer Technology and Development*,2017, 27(1):169 - 172. (in Chinese)
- 17 JIA J. Financial time series prediction based on BP neural net-work[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2014,631 - 632:31 - 34.
- 18 毛海颖,冯仲科,巩垠熙,等. 多光谱遥感技术结合遗传算法对永定河土壤归一化水体指数的研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2014, 34(6):1649 - 1655.  
MAO Haiying, FENG Zhongke, GONG Yinxi, et al. Researches of soil normalized difference water index (NDWI) of Yongding river based on multispectral remote sensing technology combined with genetic algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* [J],2014, 34(6):1649 - 1655. (in Chinese)
- 19 胡瑾,何东健,任静,等. 基于遗传算法的番茄幼苗光合作用优化调控模型[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17):220 - 227.  
HU Jin, HE Dongjian, REN Jing, et al. Optimal regulation model of tomato seedlings' photosynthesis based on genetic algorithm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(17):220 - 227. (in Chinese)
- 20 KONG Haipeng, LI Ni, SHEN Yuzhong. Adaptive double chain quantum genetic algorithm for constrained optimization problems [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*,2015,28(1):214 - 228.
- 21 HUA Haiyan, LIN Shuwen. New knowledge-based genetic algorithm for excavator boom structural optimization[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2014,27(2):392 - 401.