

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.046

# 水体叶绿素 a 光学传感器信号调理电路设计与测试\*

李鑫星<sup>1</sup> 王聪<sup>1,2</sup> 李振波<sup>1,2</sup> 陈英义<sup>1,2</sup> 傅泽田<sup>1,3</sup> 张领先<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;  
3. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了将水体叶绿素 a 光学传感器光通路微弱的荧光信号转换为能够满足模数转换器件输入要求的稳定电信号, 在前期光通路部分设计的基础上, 设计了水体叶绿素 a 光学智能传感器的信号调理电路部分。该电路包括激发光源驱动模块、光电 I/V 转换与放大模块、滤波模块、检波模块 4 部分: 对于激发光源驱动模块, 采用偏置匹配度高、偏置偏移极小、压差更低的集成驱动芯片, 同时驱动多组 LED, 比传统的限流电阻方案更加稳定、高效, 驱动电流也更加一致; 设计的光电 I/V 转换与放大模块, 经过 I/V 转换电路和同相比例放大电路进行了两级放大, 相比传统滤波放大电路具有放大交流、抑制直流的特点; 在滤波模块, 采用单片集成有源滤波器, 无需外接电容, 与传统的高阶低通滤波器相比, 不仅受杂散电容的影响小, 而且可以有效减小电路体积; 在检波模块, 使用了一款具有增量累计转换方式的集成转换器芯片, 较之传统的峰值检波电路具有更宽的输出幅度、轨对轨输出、更快的转换速度和更高的转换精度(高达 99.75%), 而且具有输出直流稳定、温度漂移更小等特点。

**关键词:** 水体叶绿素 a 光学传感器 信号调理电路

**中图分类号:** S2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0314-05

## Signal Conditioning Circuit Design and Test of Chlorophyll a Optical Sensor of Water

Li Xinxing<sup>1</sup> Wang Cong<sup>1,2</sup> Li Zhenbo<sup>1,2</sup> Chen Yingyi<sup>1,2</sup> Fu Zetian<sup>1,3</sup> Zhang Lingxian<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

3. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to convert the weak fluorescence signals in the optical path of water optical sensor for chlorophyll a to stable electrical signals and meet the input requirements of analog-to-digital conversion device, based on the early research on designing the optical path, this paper designed a signal processing circuit in optical intelligent sensor for the chlorophyll a of water. This circuit has four parts, including the excitation light source driver module, the photoelectric I/V switching and amplifier module, the filtration module and the demodulation module. For excitation light source driver module, we used the integrated driver chip which has the advantages of high bias compatibility, minimum bias and migration and lower dropout voltage to drive multiple LED at the same time. Compared with the traditional current limiting resistor project, the proposed project was more stable, highly effective and more consistent with the driven current. The photoelectric I/V switching and amplifier module which was passed through two-stage amplifier called I/V conversion circuit and the same proportion amplifier circuit respectively, could amplify AC and inhibit DC compared with the traditional filter and amplification circuit. In filtration module, we used the monolithic integrated active filter without external capacitance. Compared with the

收稿日期: 2015-01-09 修回日期: 2015-03-17

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD35B07)

作者简介: 李鑫星, 讲师, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: lxxcau@cau.edu.cn

通讯作者: 张领先, 副教授, 博士, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: zlx131@163.com

traditional high-order low-pass filter, the stray capacitance's influence was small, and the circuit size can be effectively reduced. In demodulation module, we used an integrated converter chip with incremental accumulating conversion method. Compared with the traditional peak detection circuit, the output amplitude of rail-rail output was wider, the conversion speed was faster and the conversion accuracy was higher (99.75%). It also had more stable output direct current and smaller temperature drift.

**Key words:** Chlorophyll a of water Optical sensor Signal conditioning circuit

## 引言

研制出精度高、功耗低、具有实时性和连续性的国产叶绿素 a 传感器,对于海洋生态监测、赤潮预警预报等具有重要意义<sup>[1]</sup>。本文前期<sup>[2]</sup>基于荧光分析法已经设计了水体叶绿素 a 光学智能传感器的光通路部分,可以将叶绿素的荧光信号经过光电转换成电路可以调理的弱电压信号<sup>[3-9]</sup>,但由于传感器所要测量的荧光信号非常弱,且还会受到各种外界及自身干扰信号的影响,为保证传感器测量数据的稳定性,还需要从噪声中提取有用信号,并使得信号电压能够满足模数转换器件对输入信号的要求,这就需要设计出信号调理电路,从而对荧光信号进行放大及滤波,即相应的降噪处理。

本文在前期光通路部分设计基础上,设计水体叶绿素 a 光学智能传感器的信号调理电路。采用交流调制荧光信号的方法进行叶绿素相对荧光强度的采集<sup>[10-15]</sup>,与直流检测叶绿素荧光信号的传统方法相比,具有高灵敏度、低噪声、低功耗的特点。

## 1 传感器信号调理电路设计

### 1.1 激发光源驱动模块

激发光源选用日本 Epitex 公司生产的 Super Bright Blue LED,其发光波长为 425 ~ 430 nm,正向激发电流为 100 mA,具有体积小、耐压性强、质量轻、单色好、响应速度快、发光效率高、能量消耗低、使用寿命长、绿色环保等优点。激发光源的驱动方案采用 Maxim 公司的恒流 LED 驱动芯片 MAX1916 进行控制,每个 LED 的驱动电流最高达 100 mA,电流匹配精度达 0.3%,与传统的通过串联电阻的电压驱动 LED 法相比,现在采用的 LED 驱动方案亮度更加稳定,效率更高,结合 LED 本身的低功耗特性,该光源可具备低功耗、高效、高稳定等特性。LED 驱动电路如图 1 所示。

### 1.2 光电 I/V 转换与放大模块

叶绿素荧光信号在光电二极管 (PD) 完成光电转换后,电流信号将经过 I/V 转换模块 (电流/电压转换器),I/V 转换电路如图 2 所示。

此电路对交流信号和直流信号具有不同的放大倍数,即:

$$\text{直流放大} \quad V_{dc} = I_{in} (R_{17} + R_{18}) \quad (1)$$

$$\text{交流放大} \quad V_{ac} = I_{in} R_{17} (1 + R_{18}/R_{19}) \quad (2)$$

由式(1)、(2)可以看出,只要选用阻值较大的  $R_{18}$  和阻值较小的  $R_{19}$ ,就能实现大倍数交流放大和小倍数直流放大的效果。因此叶绿素 a 荧光作为交流调制信号将被高倍放大。而环境光可视作直流信号,为了避免电路输出达到饱和,放大倍数将被设置得很小,而在后级直流信号将被高通隔直电路滤除。本电路既可保证系统的最小检测精度,又可以消除环境光对叶绿素 a 荧光检测的影响。

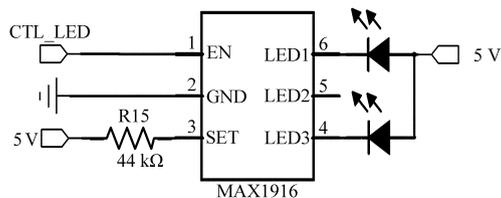


图1 LED驱动电路

Fig. 1 LED drive circuit

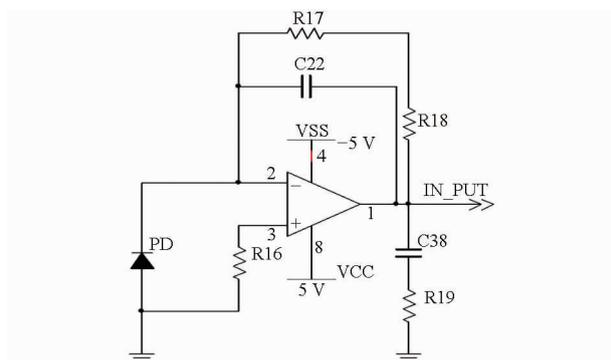


图2 光电转换和 I/V 转换电路原理图

Fig. 2 Schematic of PD conversion and I/V conversion circuit

如图 3 所示,本文放大电路选用的是 AD 公司的 AD822 芯片,该芯片具有高精度、低噪声、低偏置电压的特点。放大电路选用同相放大电路,可放大 61 倍。在同相放大的同时,此电路还具有一阶高通滤波和一阶低通滤波的功能,有效信号将被放大,而无效信号将被抑制。

如图 4 所示,I/V 转换和同相放大后的输出波

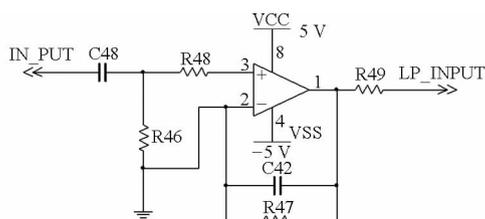


图3 同相放大电路原理图

Fig. 3 Schematic of noninverting amplifier circuit

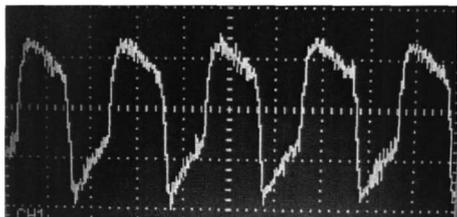


图4 L/V转换和信号放大后信号波形

Fig. 4 Signal waveform after L/V conversion and signal amplification

形仍然是一个类方波的信号。同时可以看出,交流调制可以有效地提高仪器对环境光的适应能力,设计的仪器可以在自然环境光干扰条件下正常工作,工作稳定性和抗干扰能力得到了大幅度提高。

### 1.3 滤波模块

为了提高测量的准确性,本文滤波电路选用MAXIM公司的MAX7490芯片,该芯片可以通过改变外接电阻的接法来设定滤波方式,通过改变外接电阻阻值来设定滤波的截止频率。电阻接法和阻值设定如图5所示,该电路具有1.7~2.3 kHz的带通滤波功能。经过滤波后(图6),信号的低频和低频成分都已被滤除,剩下的信号(2 kHz)为一个比较光滑的正弦信号。

### 1.4 检波模块

检波模块是为了将交流信号转换为直流信号,输出的直流信号幅值与输入的交流信号幅值呈正相

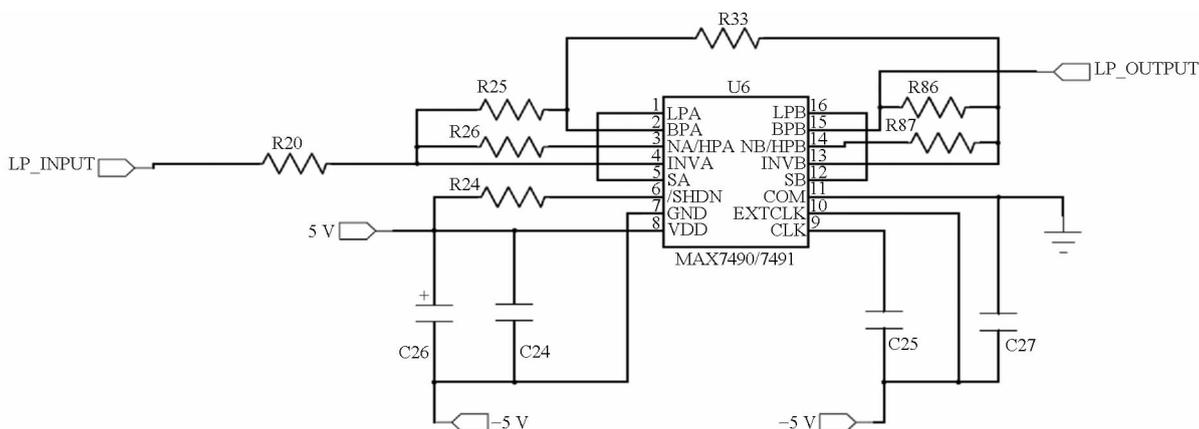


图5 带通滤波电路原理图

Fig. 5 Band pass filter circuit

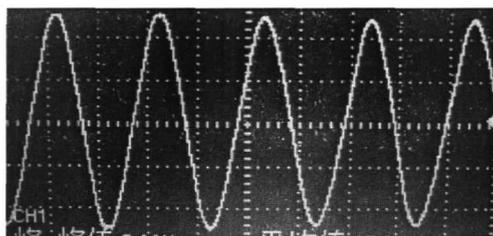


图6 带通滤波后的输出波形

Fig. 6 Output waveform after band pass filter

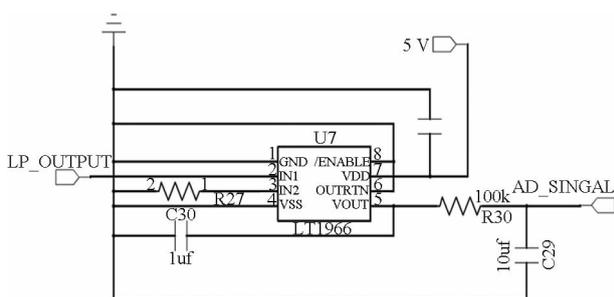


图7 检波电路原理图

Fig. 7 Schematic of detection circuit

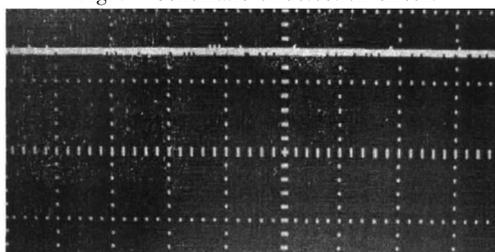


图8 检波电路的输出波形

Fig. 8 Output waveform of detection circuit

关。输出的直流信号最后被送入单片机AD输入端口,进行采样和后续处理。如图7所示,检波模块采用了Linear公司的LTC1966芯片,该芯片是高精度、低功耗、以增量累计转换方式( $\Delta\Sigma$ RMS)实现交流信号转换为直流信号的转换器。它的整体误差只有0.25%,通过该芯片,能够很好地实现叶绿素a浓度微量差异的检测。如图8所示,检波后输出信号为一个直流信号,这个直流信号的幅度与输入检波电路的正弦波幅度呈正相关。

基于前期光通路和本文信号调理电路部分的设计,本文已完成了水体叶绿素 a 光学传感器 2 个最核心硬件的设计工作,对于铁电存储、RS485 通信接口、电源模块、PCB 板等常规硬件,也采用传统方法设计完成,从而最终完成水体叶绿素 a 光学传感器的设计。对于常规硬件的设计方法,本文不再赘述。

## 2 传感器性能测试

### 2.1 叶绿素质量浓度梯度样品的测量及仪器标定

取 6 个 500 mL 的烧杯,分别用质量分数 96% 的无水乙醇对其进行清洗,清洗干净后,用 200 mL 的定容瓶对 96% 的无水乙醇进行定容 6 次,定容后的乙醇溶液分别倾倒在上述烧杯中,至此,对 6 组烧杯进行编号,分别为 1、2、3、4、5、6,然后用精准移液管从保存好的叶绿素乙醇浓溶液中依次取 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5 mL 注入到编号为 2、3、4、5、6 烧杯,用干净的玻璃棒对所有烧杯中的溶液进行搅拌至均匀。从分光光度计配套试管中,选择 6 组内径 10 mm 的消解瓶,用吸管从 1~6 号烧杯中取液,依次注入到对应编号的消解瓶中,注入深度到达白色标签处即可。至此,6 种叶绿素质量浓度梯度样品制作完成。

测量时,1 号消解瓶溶液做空白处理,实验选用哈希 DR2800 型紫外可见分光光度计多波长工作模式,通过选择 665 nm 和 649 nm 的工作波长和设置吸光度浓度公式,即

$$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649}$$

式中  $A_{665}$ ——样品在波长 665 nm 下的吸光度

$A_{649}$ ——样品在波长 649 nm 下的吸光度

来准确测量叶绿素乙醇溶液质量浓度,叶绿素质量浓度计算结果单位采用 mg/L。表 1 为采用 DR2800 分光光度计测量叶绿素乙醇溶液的测量结果。

分光光度计在测量叶绿素乙醇溶液的浓度时,需要先对机器预热 3 min,测量开始时使用光栅罩遮挡样品池,等待样品稳定下来读数,通常对同一种溶

表 1 DR2800 分光光度计测量结果

Tab. 1 DR2800 spectrophotometer measurement results

样品编号	$A_{665}$	$A_{649}$	$C_a / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	0	0	0
2	0.002	0.001	0.021
3	0.005	0.002	0.056
4	0.011	0.005	0.119
5	0.019	0.010	0.196
6	0.032	0.018	0.323

液测量 5 次求平均值作为最终的吸光度。

传感器分别测量 6 组梯度样品的荧光强度(电压),采用折线标定的方法对传感器进行定标。

传感器检测精度定义为信噪比(S/N)为 3:1 时的叶绿素浓度,传感器的数字信号输出代表叶绿素 a 的相对荧光强度。仪器在纯净水中测得的系统噪声是 90(相对荧光强度),对应的相对荧光强度为 270,此时叶绿素 a 真实浓度,即仪器的浓度检测精度为 0.83  $\mu\text{g/L}$ 。

### 2.2 传感器重复性实验

衡量传感器稳定性的一个重要指标是这个传感器的重复性情况。在做传感器的重复性测试时,每次都要把传感器拿出放到空气中再重新放置到溶液里,同时使用 Unilog 软件记录传感器连续采集的数据。

图 9 显示的是传感器在质量浓度为 21  $\mu\text{g/L}$  和 56  $\mu\text{g/L}$  的叶绿素乙醇溶液中的测量数据,Unilog 数据读取软件平均每 5 s 采样一次,由图可知,传感器的重复性误差小于  $\pm 4\%$ (准确读数)。

### 2.3 传感器功耗分析

传感器在进行原位检测时,需要靠电池独立供电工作,因此系统的功耗管理设计对仪器的续航能力起着重要作用。叶绿素 a 传感器使用的是 7.2 V、3 700 mA·h 的镍氢电池,大部分时间系统都处于待机状态以减少功耗。当系统进入检测状态时,每次检测持续 10 s,整体平均电流消耗为 45 mA。在海

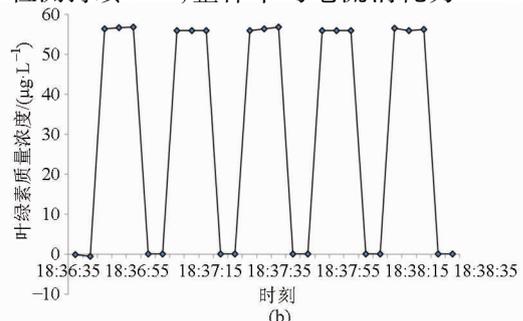
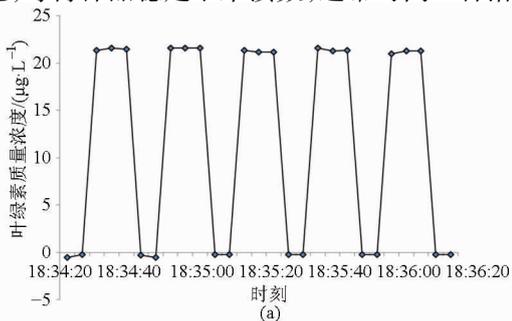


图 9 系统重复性测试结果

Fig. 9 System repeatability test

(a) 样品 1, 质量浓度为 21  $\mu\text{g/L}$  (b) 样品 2, 质量浓度为 56  $\mu\text{g/L}$

洋湖泊叶绿素 a 检测应用中,只要设定每 30 min 检测一次即可,那么每个月平均消耗电流为  $180 \text{ mA} \cdot \text{h}$ 。如果将电池每个月自然损耗 5% 的电量也考虑在内,传感器仍足以在水下持续工作 6 个月以上。

### 3 结束语

笔者前期设计出水体叶绿素 a 传感器的光通路部分,可以将叶绿素的荧光信号转换为电信号。但

此时信号非常弱,为实现水体叶绿素 a 传感信号的稳定测量,设计出水体叶绿素 a 光学智能传感器的信号调理电路。与传统的滤波放大、峰值检波等典型电路相比,具有高灵敏度、低噪声、低功耗等特点。通过对传感器性能测试结果进行分析,传感器的响应时间小于 5 s,重复性较好;而传感器的每个月平均消耗的电流为  $180 \text{ mA} \cdot \text{h}$ ,功耗完全可以满足水体叶绿素 a 的测量要求。

### 参 考 文 献

- 1 蒋永国. 面向传感网的海洋观测数据集成关键技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- 2 李鑫星,王聪,陈英义,等. 基于荧光分析法的水体叶绿素 a 传感器光通路设计[J]. 农业机械学报, 2015,46(5):300-305.  
Li Xinxing, Wang Cong, Chen Yingyi, et al. Optical path design of chlorophyll a sensor of water based on fluorimetry method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):300-305. (in Chinese)
- 3 林理忠,宋敏. 微弱信号检测学导论[M]. 1版. 北京:中国计量出版社,1996:33.
- 4 张涛. 海洋原位溶解氧检测仪设计与开发[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- 5 周乐川. 水下有机物阵列式荧光原位高精度检测系统的研制[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- 6 赵友全,魏红艳,李丹,等. 叶绿素荧光检测技术及仪器的研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1342-1346.  
Zhao Youquan, Wei Hongyan, Li Dan, et al. Research on the technique and instrument of chlorophyll fluorescence measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(6):1342-1346. (in Chinese)
- 7 潘轶. 基于伪随机序列调制的海洋原位叶绿素荧光检测系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- 8 郭鑫,张立. 便携式叶绿素含量光电检测仪设计[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(4):92-96.  
Guo Xin, Zhang Li. Design of portable chlorophyll photoelectric detection instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2009,23(4):92-96. (in Chinese)
- 9 董大圣,程群,陈世哲,等. 原位叶绿素 a 和浊度传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2012(10):15-16,23.  
Dong Dasheng, Cheng Qun, Chen Shizhe, et al. Design of chlorophyll a and turbidity sensor[J]. Instrument Technique and Sensor,2012(10):15-16,23. (in Chinese)
- 10 Turner Designs. User Manual of Cyclops-7 Submersible Sensor[Z]. <http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/manuals/998-2100.pdf> 2014.
- 11 Seapoint Sensor. User Manual of Seapoint Chlorophyll Fluorometer[Z]. [http://www.seapoint.com/pdf/stm\\_um.pdf](http://www.seapoint.com/pdf/stm_um.pdf). 2014.
- 12 Wetlabs Inc. Eco Fluorometer[Z]. <http://www.wetlabs.com/eco-fl>. 2014.
- 13 Seapoint Sensor. Seapoint Ultraviolet Fluorometer[Z]. <http://www.seapoint.com/suvf.htm>. 2014.
- 14 Turner Designs. 10Au field and laboratory fluorometer[Z]. <http://www.turnerdesigns.com/products/laboratory-fluorometer/10au-laboratory-fluorometer>. 2014.
- 15 Kate Maxwell, Giles N Johnson. Chlorophyll fluorescence-a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany,2000,51(345):659-668.