

水质混浊度测试仪硬件系统研究

李哲¹ 邓雨² 陈娟¹

(1.北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029;2.北京化工大学理学院 北京 100029)

摘要: 浊度仪是用于评估水质浑浊度指标的重要仪器,通过对实验室型浊度测试仪检测原理的研究,作者及其团队对浊度仪光路及硬件电路系统进行了完整设计,并制作了实验室型浊度测试仪。仪器电路系统以 ATmega128 单片机为核心,具有 LED 驱动器、模数转换器、电流电压转换器、隔离器等模块。使用 400NTU 的浊度标准物质和超纯水在 0~400 NTU 范围内,等间距配制了 17 个实验样本,对散射光和透射光强度与浊度值的关系进行了实验。实验证明,散射光和透射光特性与理论公式较为一致,且测试结果具有较好的线性,达到了预期效果。

关键词: 浊度;散射光;透射光;电路系统设计

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Study of the high accuracy benchtop turbidimeter

Li Zhe¹ Deng Yu² Chen Juan¹

(1. Department of Physics and Electronics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Department of Physics and Electronics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Turbidity meter is a crucial instrument to evaluate the physical property of water. The authors and their team work on studying the measuring principle of turbidity, designing the optics and electronic structure, and finally fabrication a real instrument. This instrument based on the ATmega128 microcontroller, and also have several other modules: LED driver, analog-digital converter, current voltage converter, isolator and etc. Mixed with turbidity standard substance and ultrapure water, 17 samples were made uniformly-spaced from 0 NTU to 400 NTU. The experimental result shows that scattered light intensity and transmission light intensity is highly consistent with the equation, the linearity of the curve is very good and the experiments meet with the anticipated goal.

Keywords: turbidity; scattered light; transmitted light; circuit system design

0 引言

根据浊度测量国际标准 ISO7027,浊度是指水样中固体悬浮微粒和杂质对光的散射引起水样透明度下降,是水样的一种光学性质^[1]。浊度高意味着水中存在大量的细菌、病原体,或是某些颗粒物。这些颗粒物可保护有害微生物,使其在消毒工艺中不被去除^[2]。无论在工业用水、废水处理、生活用水以及自然水体中,浊度都是必须测量的重要参数之一,和 PH(或 ORP)、氨氮、溶解氧等为水环境监测的几大指标^[3]。因此提高浊度检测设备的灵敏度及检测效率成为当今水质检测领域的关注热点。

20 世纪 90 年代后,许多国外仪器仪表公司推出了技术先进、性能优良的浊度仪。最具有代表性的品种有美国哈希(HACH)公司的 2100P 型便携式浊度仪,采用专利 Ratio 光学设计,具有很高的精确度、灵敏度和可靠性,且操

作简单,适用于测试环境较差的野外。与国外相比,国内浊度仪技术仍有一定差距,主要是 WGZ 系列浊度仪以及散射式智能浊度仪等,但得到的数据随机性和离散性较大^[4]。因此,80%企业都依赖与进口仪器。在这样的背景下,开发出我们自己的高质量浊度仪具有非常高的现实意义。

根据国内市场浊度仪的现状,本文采用透射-散射比对比法,结合嵌入式系统技术、单片机技术和自动化仪器仪表,对浊度检测仪进行硬件和软件的设计,实现了一种更符合生产、生活需求的新型浊度仪。该仪器使用发光二极管作为光源,光电二极管作为接收器,有受溶液色度影响小、测量准确、响应速度快、稳定性好的特点,可长期可靠工作。

1 浊度测量基本原理

浊度是一个与光学特性相关的概念,利用光的吸收、散射等方法,通过测量投射于水样光束的透射光和散射光强

度,按其与浊度的关系测定其浊度大小。入射的光束在水中传播时,不仅受到介质吸收作用的影响。发生散射后,在原传播方向上的光强也要衰减。所以,当入射光到达某一点时,所受到的衰减包括吸收衰减和散射衰减两个方面。为取得测量结果与浊度之间较好的线性关系,在 90°方向进行散射光测量^[5]。浊度仪光学系统如图 1 所示。

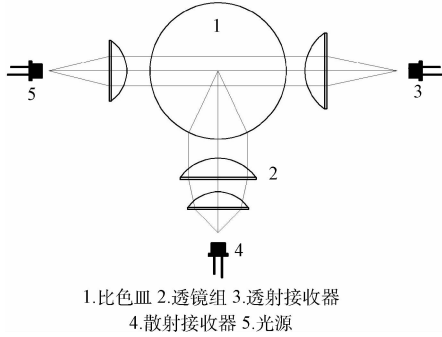


图 1 浊度仪光学结构

从光源发出的平行光束射入水样,水样中的浊度物质会吸收光并使光的强度衰减,透射光与入射光二者之间的关系满足下列关系式:

$$I_l = I_0 e^{-kTl} \quad (1)$$

式中: I_0 为原来的光强; I_l 为经过长为 l 的路程后的透射光光强; T 为浊度值。对上式进行对数处理,得

$$\ln I_l = \ln I_0 - kTl \quad (2)$$

而散射光是入射光经透射、传播衰减、散射、二次散射等得到的,但二次散射的光强相对于直接入射的散射光光强是很微弱的,这里排除了二次散射的影响。经整理后得到散射光强:

$$I_{ss} = \frac{K_s K_0}{K_1} I_0 e^{-K_s T y} (e^{-K_s T X_1} - e^{-K_s T X_2}) \quad (3)$$

式中: K_0 为光从空气入射到溶液中的透射系数, K_1 即衰减系数, K_s 为散射系数, X_1 和 X_2 为入射光方向位置, y 为在 x 处发生散射,在其 90°方向检测到的散射光位置, T 即为待测的浊度。

测定时,透射光和散射光的光程相同,水样色度和光源变化对浊度测定影响可忽略不计。从式(3)可以看到,散射光与浊度关系并非是严格的线性关系。因此,在一定误差范围内,对其线性化,将式(3)变形后得:

$$I_{ss} = \frac{K_s K_0}{K_1} I_0 e^{-K_s T(y+X_1)} (1 - e^{-K_s T \Delta X}) = \frac{K_s K_0}{K_1} I_0 C_1 C_2 \quad (4)$$

式中: $\Delta X = X_1 + X_2$, $C_1 = e^{-K_s T(y+X_1)}$, $C_2 = 1 - e^{-K_s T \Delta X}$ 。 $C_1 C_2$ 两项之积是一条先上升,后下降的曲线,其峰值时的浊度 T_{max} 可通过 dI_{ss}/dT 求得:

$$T_{max} = \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta X}{X_1 + y}\right)}{K_1 \Delta X} \quad (5)$$

T_{max} 即为浊度测量的上限值。将式(4)进行泰勒级数

展开,略去二阶小量,误差小于 2%,得到线性公式:

$$I_{ss} = K_s K_0 I_0 T \Delta X \quad (6)$$

所以,根据推导公式可以看出透射光强和散射光强均可有效测量浊度值,透射光强随浊度呈指数增长,而透射光强的对数 $\ln I_l$ 与浊度 T 呈线性关系,散射光强 I_{ss} 也与浊度呈线性。

2 二次仪表的研究设计

低浊度下散射光极其微弱,易受温度、振动等参数变化的影响,需要对其输出信号进行进一步的变换和处理,最终获得准确的散射光光强值。

2.1 光源驱动电路设计

水样中的有机物、色度会对特定波长的光产生干扰和吸收,从而影响浊度的测量。而使用近红外光可以将这种影响减至最小,因此在这里选用了波长峰值为 880 nm 的红外发光二极管作为光源。同时,为了确保光源稳定,发光二极管需要恒流驱动^[6],将电路设计如图 2 所示。

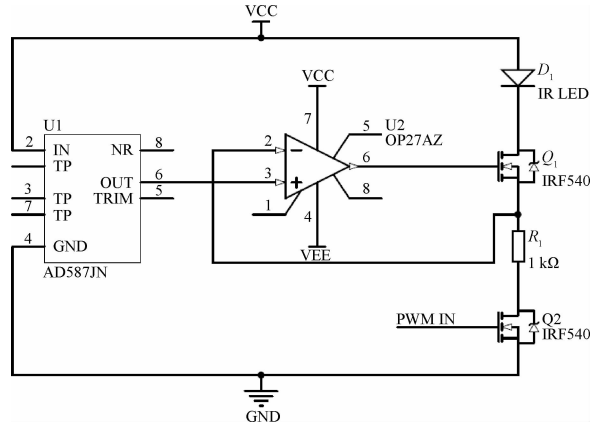


图 2 极化电压电路设计

在图 2 中,由 AD587 芯片产生的 10 V 基准电压输入到运放的同相输入端^[7],与 Q_1 、 R_1 共同组成恒流源。通过发光二极管的最大电流由电阻 R_1 和基准电压 V_{ref} 共同决定,即 $I_{D1} = V_{ref}/R_1$ 。LED 的发光功率不宜过高,以避免发光二极管长时间工作产生较大温升,造成波长漂移或亮度衰减。场效应管 Q_2 的栅极连接至处理器,通过调整输入信号的占空比,调整发光二极管的发光功率^[8]。

2.2 仪表的信号采集电路设计

在进行低浊度溶液的测试时,散射光强度很低,因此光电二极管接收到的散射光信号往往是 nA 级别的弱电流信号,很容易受外界环境干扰^[9]。用于与接收光电池连接的是一个偏置电流为 pA 级的运放,经过老化和筛选,取其中偏置电流和电压较小的器件。第一级跨接 1G 欧姆的检流电阻,以获取较好的噪声特性,减少误差累积。经过电阻后,电流信号被转换为电压信号,输出电压 $V_{out} = R_2 \times I_{D1}$ 。

高阻电阻很难做到精确,因此微电流的检测,也存在一

定的误差^[10]。高阻除了温度系数大、老化快以外,还有湿度系数大,电压系数大,响应速度慢等特点,在选型上,必须多加留意。仪器选用的 RI1 型电阻,温度系数为 500 ppm/°C。为了减小温度对测量的影响,电阻被安装在铝制恒温槽中,恒温温度为 45 °C,并安装防风罩。同时在 PCB 上安装特氟龙端子,提高绝缘电阻并减少漏电。

本仪器电路中,光电二极管工作方式为零偏置(零偏置)。入射光使光电二极管产生的电流从负极流至正极,如图 3 中所示。由于放大器反相输入端的输入阻抗非常高,二极管产生的电流认为全部流过电阻 R_2 。输出电压 $V_{out} = R_2 \times I_{D1}$ 。

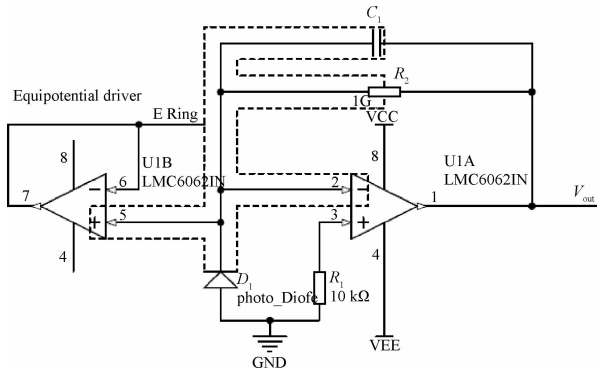


图 3 电流-电压转换电路

为了减少 PCB 产生的漏电现象,对光电二极管 D_1 的阴极的走线需使用等电势屏蔽环绕^[11],如图 3 中虚线所示。在 PCB 制作过程中,该走线需镀锡并裸露。

在电流-电压转换电路和量程切换放大电路之间,设计有一个自动零电路,如图 4 所示。

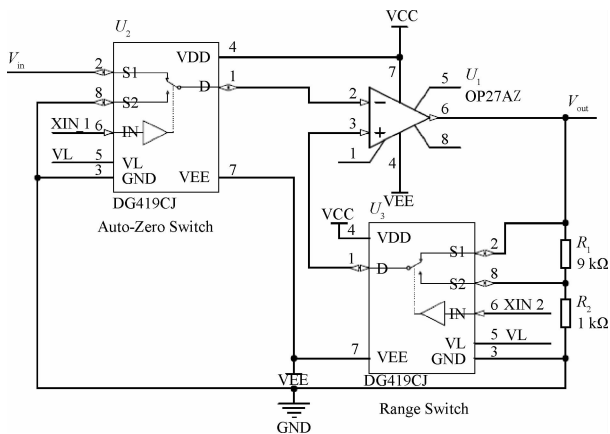


图 4 自动零与量程切换电路

通过单片机控制模拟开关 U_2 的开启和关闭,A/D 模块交替输入零电压和被测电压^[12]。使用被测电压减去零电压,得出第一级放大电路的真实输出值,消除后续电路产生的零点误差,并可降低后续电路对模拟器件精度的要求,降低系统成本。

U_1 、 U_3 等器件组成 T 型放大器,通过单片机控制模拟开关 U_3 的开启和关闭,电路的放大倍数分别为 1 倍和 10 倍,作为量程切换电路使用。当前级电路输出电压小于 1.2 V 时,此电路应受控处于 10 倍放大模式下,确保弱光检测精度。

2.3 模数转换电路设计

积分型 ADC 包含双斜率或多斜率 ADC,它具有分辨率高、线性好、抗干扰能力强等特点^[13]。基础的双积分型 ADC 至少含有 1 个带有输入切换开关的模拟积分器、1 个比较器及 1 个计数器。分别对被测电压和基准电压进行积分和反向积分,将电压转换为可进行计时的时间片,计算其比例,实现 A/D 转换,其电压值可表示为:

$$V_{in} = -V_{ref} \times t_1 / t_2$$

式中: V_{in} 为待测电压, V_{ref} 为基准电压, t_1 和 t_2 分别代表积分和反向积分时间。

本仪器电路中,使用了分立元件制作的积分型 ADC,如图 5 所示。使用单片机协助模数转换电路完成计时和模拟开关控制工作,计时器频率 500 kHz,清零时间 50 ms,正向积分时间 200 ms,反向积分时间最长 200 ms。故该模数转换器最小分辨电压为 $V_{ref}/100\ 000$ 。 U_1 、 U_2 等元件构成负基准源电路,用于生成 -10 V 基准电压。因此,本模数转换器的最小分辨电压为 0.1 mV,采样速度 2.2 sps。

2.4 系统结构

浊度仪主要由各个模拟模块和数字模块组成,两者之间使用隔离模块隔离,且独立供电,以减少相互干扰。仪表工作框如图 6 所示。

单片机模块采用 ATMEL 公司的嵌入式单片机 ATmega128,用于控制显示模块并对按键操作进行响应。模拟模块单片机为 ATmega16,用于控制各个模拟开关和模数转换器工作。主单片机和模拟电路控制单片机之间使用两线制串行通信,并使用光耦进行隔离^[14]。

3 实验与讨论

3.1 实验方法

实验使用由中国计量科学研究院提供的 GBW12001 水质浊度标准物质作为母液^[15],与超纯水(由 Milli-Q Advantage A10 提供)按照不同比例混合,配置不同浊度的测量试剂。在 0~100 NTU 范围内,以每 10 NTU 为间隔配置一种试剂。在 100~400 NTU 范围内,以每 50 NTU 配置一种试剂。所有的实验均是在室温(25 °C)下进行的。

3.2 散射光测试

将配置好的浊度试剂依次放入浊度仪中进行测试,记录散射光电路输出电压,如图 7 所示,横坐标为散射光传感器电流值被电路线性放大得到的电压值。由图可见,浊度值与散射光光强才呈线性关系,经计算,其线性相关系数为 0.998 68(共 17 点)。该测试值符合式(6)所得结论。

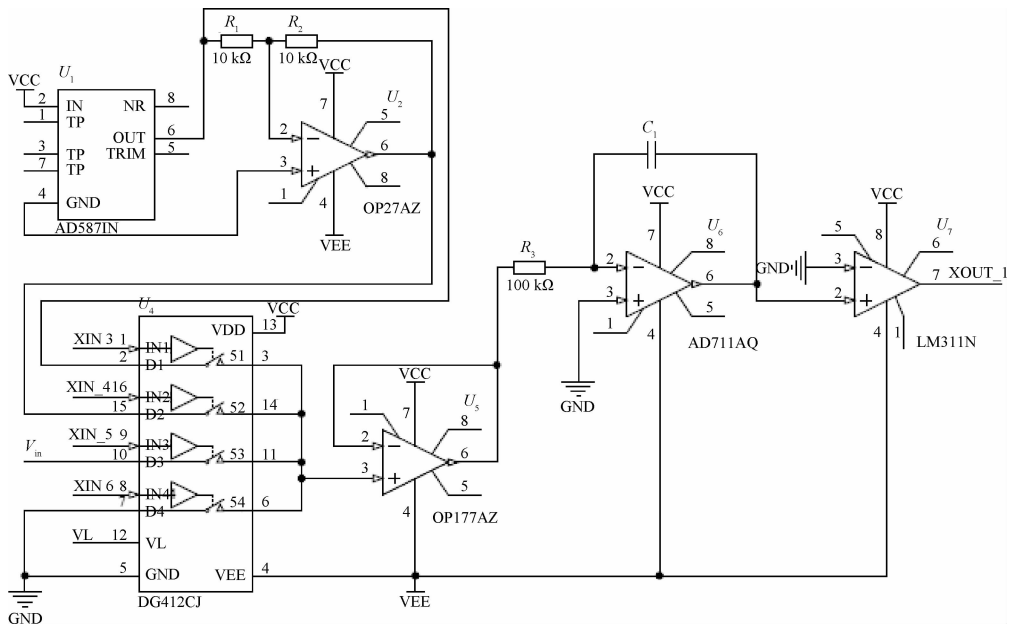


图 5 模数转换电路

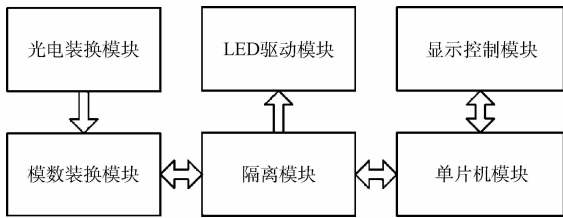


图 6 仪表工作框图

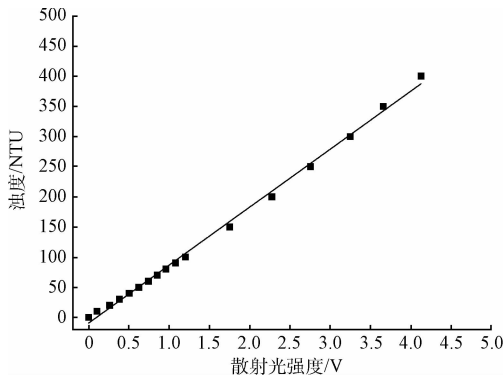


图 7 散射光强度与浊度对应关系

3.3 透射光测试

将配置好的浊度试剂依次放入浊度仪中进行测试,记录透射光电路输出电压,如图 8 所示,横坐标为透射光传感器电流值被电路线性放大得到的电压值。由图可见,透射光光强随浊度下降而逐渐上升,但两者之间不存在线性关系。

由式(1)可知,透射光光强和入射光光强存在 e 指数倍

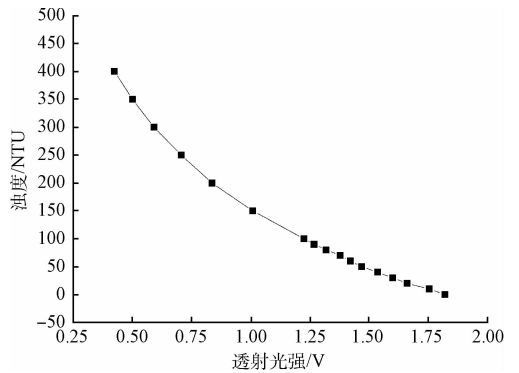


图 8 透射光强度与浊度对应关系

关系,故对透射光电压进行以 e 为底数的指数变换,其与浊度的关系如图 9 所示。

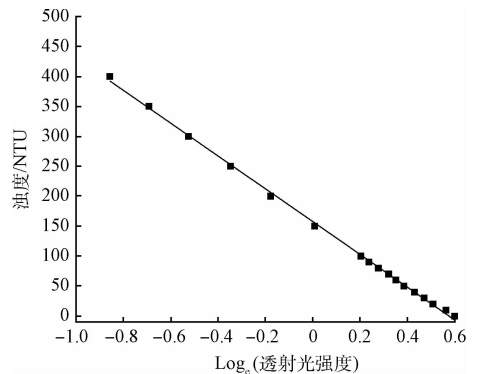


图 9 对数变换后透射光强度与浊度对应关系

由图可知,变换后的透射光强度与浊度存在较好的线

性关系,其线性相关系数为 0.998 91(共 17 点)。该测试值符合式(2)所得结论。

4 结 论

本文基于散射光与透射光测量浊度的原理,设计了两级信号放大电路,将微弱电流信号转换为 A/D 可以处理的电压信号。具有自动零功能,受环境影响较小。实验证明,仪器对 0~400 NTU 范围内,浊度测量具有良好线性,通过散射光和透射光对浊度进行测量,具有高度一致性,均能达到较为理想的测试效果,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 尹亮,李哲,祁欣. 透射光补偿浊度测量方法的研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2013(3): 89-92.
- [2] 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(5):77-79,83.
- [3] 赵超,戴坤成,王贵评,等. 基于 AWLS-SVM 的污水处理过程软测量建模[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(8):1792-1800.
- [4] 王丽. 散射式水下浊度测量方法的研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(9):27-30.
- [5] 兰羽,张顺星. 一种直射式光电浊度计的设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(1):53-55.
- [6] 陶亮,曾以成,武世明. 一种具有新型过温保护功能的 LED 恒流驱动电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2015(4):659-664.
- [7] 陈卓,陈柏金. 基于 ARM 和 CPLD 的嵌入式卷板机数控系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(7): 45-49.
- [8] 何素梅,傅锦良,吴海彬. LED 隧道照明自动调光系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(4):

622-629.

- [9] 惠德彬,赵志文. 时间相关光子计数探测器电路的设计与实现[J]. 电子测量技术,2016, 39(11): 135-139.
- [10] 贾波,祁欣. 便携式氯离子检测仪的设计[J]. 电子测量技术,2016,39(10):158-161,170.
- [11] 朵先林. 电位差计的等电位屏蔽及其应用[J]. 黑龙江科技信息,2012(8):60,228.
- [12] 陈卓,陈柏金. 基于 ARM 和 CPLD 的嵌入式卷板机数控系统设计[J]. 电子测量技术,2015, 38(7): 45-49.
- [13] 韩继国. 模/数转换器 ADC 技术分析(上)[J]. 集成电路应用,2014(5):18-22.
- [14] 杜帅,秦伟,张柯,朱雷. 基于 ZigBee 技术的绿地智能喷灌系统设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(3): 71-74,79
- [15] 李德林,胡启亮,温晓东,等. 多量程浊度计检定及示值误差测量不确定度评定[J]. 工业计量,2016(5): 26-27,36.

作者简介

李哲,1988 年出生,博士研究生,主要研究方向为水质分析仪器的研制。

E-mail: originpoints@hotmail.com

邓雨,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为基于巴克豪森信号的应力检测仪研究。

E-mail: dengyusit@163.com

陈娟(通讯作者),工学博士,教授,主要研究方向为控制理论及先进控制方法、系统辨识与建模、智能检测技术与智能控制等方面。

E-mail: jchen@mail. buct. edu. cn

(上接第 220 页)

- [3] 袁刚,李世栋,王代华. 一种压电陶瓷叠堆执行器刚度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(3):568-573.
- [4] 王慧,宫赤坤,王宏峰. 基于 PA95 的新型压电陶瓷驱动电源[J]. 微计算机信息,2011(12):58-59.
- [5] 陈俊,徐志伟,陈杰. 压电驱动器驱动电源设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(4):48-53.
- [6] 王帅,吴庆林,张斌,等. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(7): 6-10.
- [7] 周德海. 基于线性光耦实现精密程控高压源[J]. 电子测量技术,2013,36(6):29-34.
- [8] 郑楠,王学亮,李佩玥. 尺蠖式压电陶瓷驱动电源

设计[J]. 国外电子测量技术,2014, 33(8):49-52.

- [9] 赵轩毅,马力辉. 大功率压电陶瓷驱动电源的研究与设计[J]. 电子测试,2015(1):62-63,47.

- [10] 钟文斌,刘晓军,卢文龙,等. 一种误差放大式压电陶瓷驱动电源的研制[J]. 压电与声光,2014(2): 311-313.

作者简介

段源鸿,1993 年出生,上海理工大学光学工程在读硕士研究生,主要研究方向为光电精密测量、电子测量仪器、数字化干涉仪。

E-mail: duanyh722@hotmail.com