

文章编号 1004-924X(2011)06-1221-07

基于散射光功率比值测量的抗扰浊度探测器

刘瑞鹏, 刘 桥, 祁志美*

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:针对水下长期在线浊度探测需考虑器件不稳定以及出光窗口污染对探测精度的影响等问题,提出了一种使用双散射光功率比值表征浊度的探测方法。该方法使用一束平行光照射待测环境,并沿光路同时探测两点的 90° 散射光功率;然后,对获得的两个散射光功率值进行比值处理,以此得到待测环境的浊度。使用该方法设计了一种新的浊度探测结构,该结构满足严格的 90° 散射探测。理论推导和结构分析表明,该浊度探测器能有效降低光源漂移和窗口污染造成的扰动。实验结果显示,该方法表征的浊度系数与光衰减度线性良好,对于峰值变化30%的光源扰动,浊度系数最大变化仅为5%,显示该方法对光源漂移或出光窗口污染不敏感,适宜于水下在线探测浊度。

关键词:浊度探测器;散射光功率比值;浊度系数;水下探测

中图分类号:TP212.14;X832 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1221

Interference-resistant turbidity detector based on measurement of scattered light power ratio

LIU Rui-peng, LIU Qiao, QI Zhi-mei*

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author; E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

Abstract: In consideration of the effects of the device instability induced by environmental fluctuation and the pollution of light-transmitting window on the on-line turbidity detection in line measurement, a new method to determine the turbidity in water is proposed based on the scattered-light power ratio measurement. This method uses two photodetectors to simultaneously detect the 90° scattered light power at different positions along the propagation path of a collimated light beam in the water environment. The turbidity of the water environment can be determined by calculating the logarithm of the scattered-light power ratio. The turbidity detector prepared based on this method detects 90° scattered light. The theoretical analysis indicates that this detector can in principle eliminate the influence of both the light source drifting and the window pollution on the measured turbidity. Experimental indicate the relationship between the two results measured with the turbidity detector and conventional transmission method. Furthermore, when the peak value of the light source fluctuates 30%, the turbidity coefficient changes only 5%, which indicates the detector is insensitive to the light drifting and win-

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2011-01-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978042);国家973重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB320300);集成光电子国家联合重点实验室开放课题资助项目(No. 2010KFB003)

dow pollution. In conclusion, the detector is suitable for underwater detection of turbidity.

Key words: turbidity detector; scattered-light power ratio; turbidity coefficient; underwater detection

1 引言

水体含有的泥土、细砂、有机物、无机物、浮游生物和微生物等悬浮物质,对进入水中的光产生散射或吸收,从而使水体呈现浑浊。这些物质对光线透过水体时所发生的阻碍程度称为浊度。浊度是水质测评的重要参数,浊度越高,表明水体清洁程度越低。对于我国具体的水环境而言,形势较为严峻。根据最新的中国环境公报显示,26 个国家控重点湖(库)中处于 V 类和劣 V 类严重污染的有 14 个,且存在监测点较少,没有形成综合传感网络等问题,水环境的有效在线监测已成为必需。对于湖泊等领域的在线浊度探测,需要传感器的高抗扰设计。为了多点探测完成传感器网络的构建,需要传感器价格低廉,易于实现且方便系统集成。水质监测一般同时关注多项参数,这就需要单个浊度探头小型化且功率消耗低。

浊度探测方法已有多种。透射法通过测定水体的吸光度反映浊度,该方法易受到水体色度的干扰^[1]。散射法在低浊度下具有良好的线性和可重复性,且可以运用于精度要求更高的粒子计数装置,但测量范围较透射法低且对扰动缺乏抵抗^[2-3]。在散射和透射基础上发展起来的散射/透射比值法^[4],四光束法^[5]等测量方法能同时测定散射光和透射光,具有更高的精度和抗干扰能力。但这些方法光路结构复杂,传感结构实现困难且价格昂贵^[6-8]。

在传统的抽样检测或者表层探测领域,单独使用散射法或透射法一般都能满足测量要求。在饮用水等低浊度探测领域,则要求传感器具有更高的灵敏度和更低的检测下限。与这些应用不同,对于水下长期在线检测领域,由于水体光学探测的特殊性^[9-10],器件的稳定性和探测窗口的清洁度极易受到影响,因此经确保探测数据的有效和延长人工维护周期为最重要的考虑因素。

考虑水体在线测量的特殊性,本文提出了一种抗扰动的浊度表征方法。该方法探测光路中两个位置的 90° 散射光功率,通过对探测值的比值处理,得到待测环境的浊度。利用这一方法设计了一种新的探测器结构。该结构满足严格的 90° 散射探测。理论计算和结构分析表明,传感器对光源漂移和窗口污染具有抵抗力,能有效延长浊度探头的人工清洁维护周期,满足长期在线浊度测量的需要。

2 散射光功率比值法测量浊度的原理

如图 1 所示,当功率为 P_0 的平行光束通过厚度为 x 的水样后,其功率可表示为:

$$P(x) = P_0 \exp[-(k+h)x]$$

这里 h 表示样品的吸收系数, k 表示其散射系数。

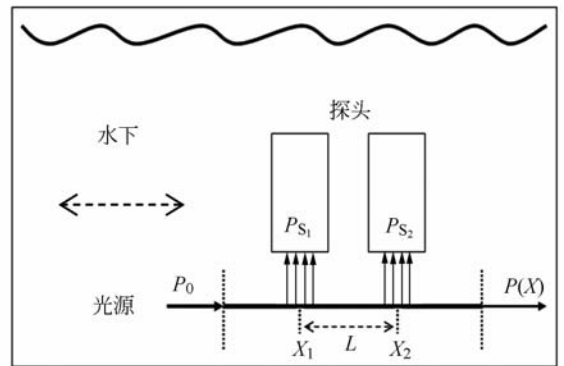


图 1 散射光功率比值法基本测量原理

Fig. 1 Principle of scattered-light power ratio measurement

对于低吸收的液体($h \cdot x$ 趋近于 0),对上式求导,可得功率为 $P(x)$ 的平行光束通过厚度为 dx 的样品的散射光功率。这一散射光功率 (P_s) 可由方程 2 得出:

$$P_s(x) = -\frac{dP(x)}{dx} \approx k \cdot P_0 \exp[-(k+h)x] = k \cdot P(x). \quad (2)$$

对于两探头探测区间 $S_1(x_1, x_1+l)$, $S_2(x_2, x_2+l)$, 将上式积分可得 90° 散射光功率

$$P_{S_1} = \alpha \frac{k}{k+h} P_0 \exp[-(k+h) \cdot x_1] \cdot (1 - \exp[-(k+h) \cdot l]), \quad (3)$$

$$P_{S_2} = \alpha \frac{k}{k+h} P_0 \exp[-(k+h) \cdot x_2] \cdot (1 - \exp[-(k+h) \cdot l]), \quad (4)$$

其中 α 为总散射光功率在 90° 上的比例, l 为探头感光区间的长度。 P_{S_1} 和 P_{S_2} 为两组探头测量的实际功率值。

$$\frac{P_{S_1}}{P_{S_2}} = \exp[(k+h)(x_1 - x_2)] = \exp[(k+h) \cdot L], \quad (5)$$

其中 L 为两探头的中心距离。若定义 $\tau = k + h$ 为浊度系数,可得

$$\tau = L^{-1} \cdot \ln \frac{P_{S_1}}{P_{S_2}}, \quad (6)$$

即两组 90° 散射光功率值不仅分别对应浊度,其比值的对数也和浊度成正比。

设光源随时间变化的影响为 $P_0(t)$, 窗口洁净度的影响为 $\beta(t)$, 则

$$P(t) = P_0(t) \beta(t) \exp(-\tau x), \quad (7)$$

$$P_s(t) = \frac{k}{k+h} P(t) \beta(t) (1 - \exp(-\tau l)). \quad (8)$$

对于单点探测,探测的透射光 $P(t)$ 和散射光功率 $P_s(t)$ 均受到光源以及出光窗口洁净度的影响。若使用比值法,当两探测窗口接近时,可认为窗口污染程度相当,都为 $\beta(t)$, 则:

$$\tau' = L^{-1} \left(\ln \frac{P_{S_1}'}{P_{S_2}'} \right) = L^{-1} \left(\ln \frac{P_{S_1} P(t) \beta(t)}{P_{S_2} P(t) \beta(t)} \right) = L^{-1} \left(\ln \frac{P_{S_1}}{P_{S_2}} \right) = \tau. \quad (9)$$

上式说明了散射光功率比值表征的浊度系数能有效消除因光源不稳定性带来的扰动,同时对窗口污染也有一定的抵抗能力。

若定义单位距离的光衰减度为

$$A = -10 \log \left(\frac{P_0}{P_x} \right) \cdot x^{-1} = -10 \log e^{-\tau x} \cdot x^{-1}, \quad (10)$$

可得

$$\tau = 0.2303 \cdot A. \quad (11)$$

3 浊度探测器的设计与制作

基于双散射光功率比值法的水下浊度探测器

主要由光学部分和电路部分构成。光学部分主要包含光路以及基于光路的探头结构设计;电路部分主要包含器件的选择,信号的采集和处理,串口通信及各模块的控制。

3.1 探测器结构设计

散射浊度探测法按被接收的散射光与入射光的夹角不同分为直角散射 (90°), 前向散射 ($< 90^\circ$) 和后向散射 ($> 90^\circ$) 3 种。使用 90° 散射法能减小散射颗粒大小对散射光空间分布的影响,具有最好的数据重复性,同时能最大程度地避免杂散光的干扰。入射光方向与试样表面的夹角又可分为垂直入射和倾斜入射。使用垂直入射能降低因窗口面反射造成的光功率损失。

为了实施双散射光功率比值法,本文设计了一种新的散射光路结构,如图 2 所示。该结构中光源和两光敏探头位于同一平面,器件结构紧凑。利用棱镜使光束发生 90° 的偏转,光敏探头探测的即为 90° 散射光。与传统的单点散射式光学探头相比,这种新的探头结构能保证严格的 90° 散射探测,且出射光和入射光相对于待测的水体环境都为垂直入射,从而有效地降低了光功率损失。

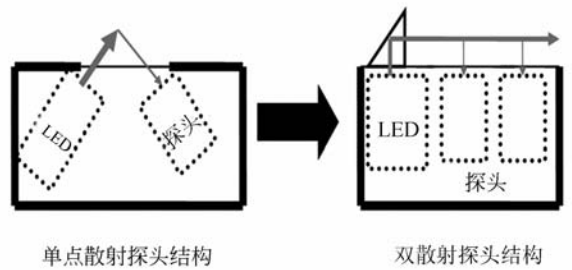


图 2 单点散射探头与双散射探头结构示意图
Fig. 2 Structures of single scattered-light detector and detector based on double scattered-light power ratio

在长期水下在线浊度探测中,传统的单点探测其探测结果将受到光源或者出光窗口洁净度的影响。而采用双散射光功率比值法,由式(9)可知有效数据的获得需要满足窗口污染程度的要求,在具体实施中,设计的探头结构两出光窗口位于同一平面,且中心距离为 8 mm,因而出光窗口的污染程度相近。而其他抗干扰的浊度探测结构都与此不同,如散射/透射比值法和四光束法都需要同时测定散射光和透射光,而散射光探测窗口与透射光探测窗口位于不同平面,因此窗口污染程

度不同,故基于这些方法的探测器在长期水体测量中难以消除窗口污染的干扰。同时,为了消除背景光和杂散光的干扰,设计的传感器使用了滤光片和光阑结构。最终的设计为光敏探测器探测端上由内向外各顺序覆有滤光片、光阑、密封的出光窗口,如图 3 所示。

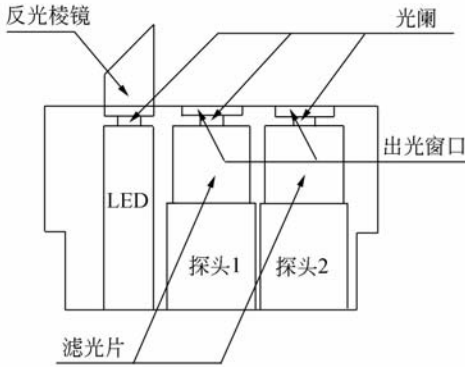


图 3 浊度探测器结构图

Fig. 3 Structure of turbidity detector

为保护棱镜和探测窗口,同时维持探头表面清洁,在传感器的实际制作中还加入了步进电机控制的清洁模块。该模块在探头进行浊度探测时由步进电机驱动橡胶块转动,露出棱镜出光面和探测窗口。探测完毕后模块恢复原位,遮蔽棱镜出光面和探测窗口。在探头的水下实际使用中能有效延长人工清洁维护周期。

3.2 信号处理与通信电路设计

控制和信号处理使用基于 MSP430 的电路板完成信号的采集、运算放大、模数转换、信号处理和串口通讯,框图如图 4 所示。使用 MSP430 作为微控制器,同时进行整个系统的低功耗控制。

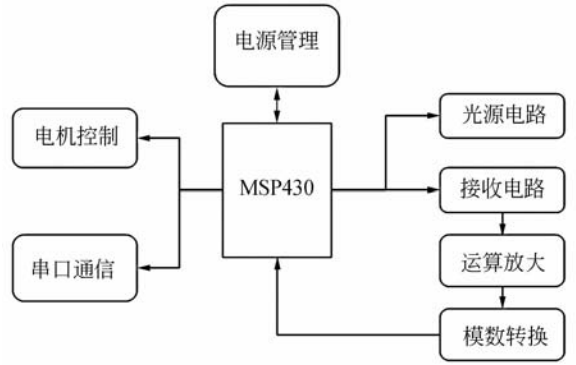


图 4 浊度探测系统原理图

Fig. 4 Block diagram of turbidity measuring system

发光电路选用 epitex 公司制造的发光二极管(LED)^[11]L870UP-06 作光源,峰值为 870 nm,材料为 AlGaAs,发散角仅为 7°,这里使用发光峰值位于近红外的光源能有效降低水体色度的影响^[12-13]。接收电路使用的硅光电探测器为 Burr-Brown 公司生产的 OPT301,其接收光谱在 LED 峰值处有较大增益。该器件集成了低噪声前端放大电路,可有效提高测量精度并简化后端电路设计。电源管理模块主要将外部提供的 7~12 V 电源转化为各个模块的使用电压。程控增益放大使用德州仪器的 PGA112,微控制器使用德州仪器的 MSP430,模数转换模块集成于微控制器内。步进电机使用 ZMR 公司的 PG15S-020 四相微型步进电机,电机驱动电压 5 V,采用 ST 公司的 L293D 四通道驱动芯片。串口通信使用 MAX3221 来完成 RS232 电平转换。

传感器的壳体由质轻且坚固的硬铝制成,表面进行氧化发黑处理。传感器内部使用聚氨基树脂浇注固定电路板^[14],封装完成的浊度探头如图 5 所示。

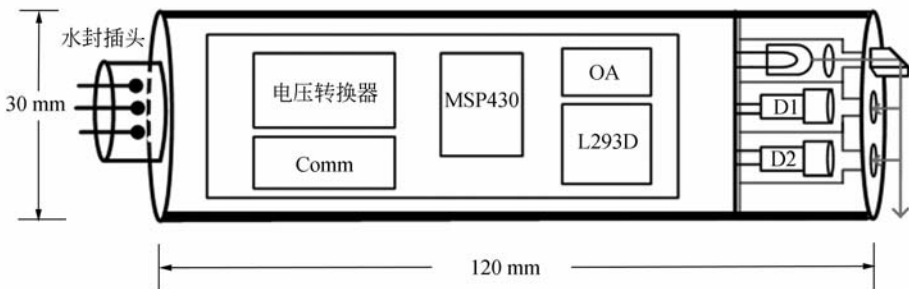


图 5 浊度传感器的结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of turbidity detector based on scattered-light power ratio measurement

4 实验结果和数据分析

在室温(20 ℃)下,采用静态方式对研制的传感器进行了实验,测试溶液为按照 ISO7027-1999 标准配置的福尔马肼浊度标准液。浊度探头的探测数据通过 RS232 端口与 PC 机串口连接,将双探头探测的结果通过比值法转化为浊度系数,得到的数据如图 6 所示。

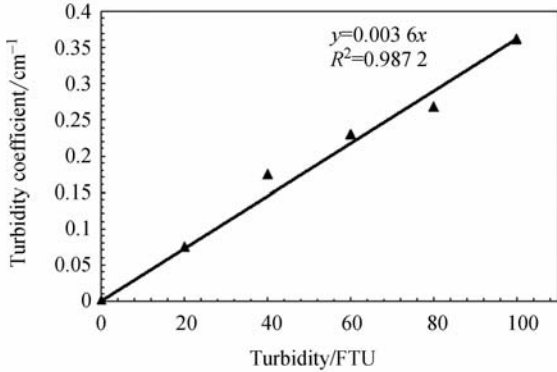


图 6 比值法表征的浊度系数与标准浊度值的关系曲线
Fig. 6 Relationship between the standard turbidity values and the turbidity coefficients determined by Eq. (6).

为了验证式(11)推导得到的单位衰减度与浊度系数的关系,使用垂直透射法测定了一系列浊液样品的光衰减度。在同样条件下使用散射光功率比值法测定相同衰减度的浊液样品,两个光敏探头读数如图 7 所示。探头初始读数为器件的静态工作电压。

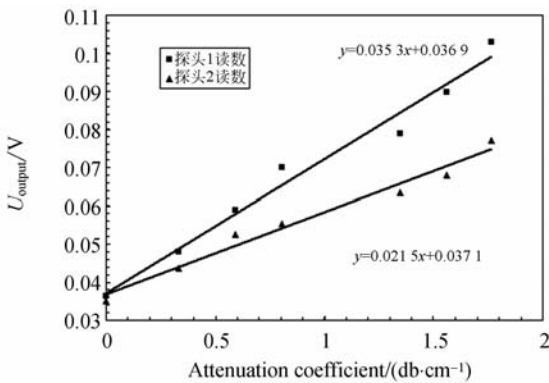


图 7 双探头测定的输出电压与浊度液衰减度的关系曲线
Fig. 7 Relationship between the signal of each photodetector of turbidity detector and the attenuation coefficients of standard turbidity solution

将图 7 两光敏探头读数做比值处理转换为浊度系数,得到的数据如图 8 所示。图中的点是双探头电压比值表征的浊度系数,实线是由式(11)根据 A-τ 关系做出的理论曲线。测试结果获得的数据线性良好,实测数据与理论计算具有良好的—致性。

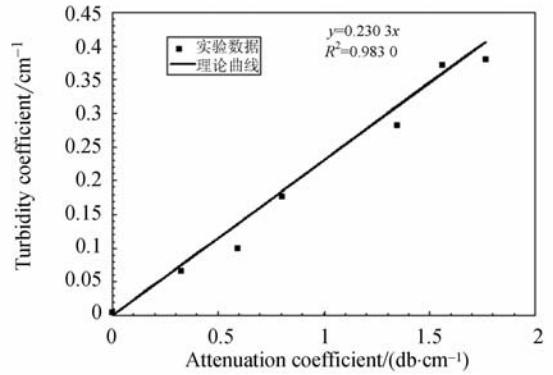


图 8 比值法表征的浊度系数与浊度样品衰减度的关系曲线
Fig. 8 Relationship between the attenuation coefficient of standard turbidity solution and the turbidity coefficients obtained by Eq. (6).

通过调节光源功率模拟光源不稳定及出光窗口受到的污染。为方便实验的开展,休眠探头内部的光发射模块,使用另一同型号 LED 作为外部光源。外部 LED 发出的光线与探头内部的 LED 发出的经棱镜反射的光线平行,且与两探测窗口的中心线垂直相交。用偏振片周期性改变外部光源的输出光功率,可以观察到两个探头测定的信号都随光功率发生相应改变,但使用散射光功率比值法表征的浊度只有很小的波动,如图 9 所示。

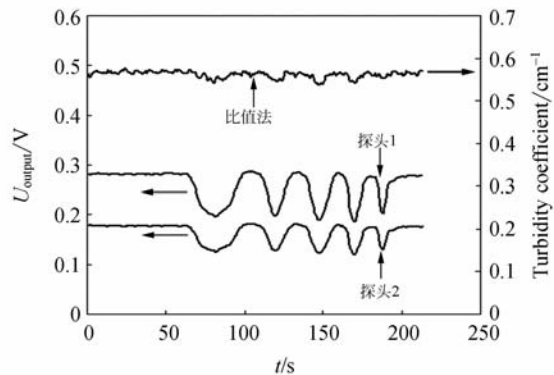


图 9 双探头输出电压及浊度系数随光源波动的变化曲线
Fig. 9 Light source fluctuation induced by changes in signal of each photodetector of turbidity detector and turbidity coefficient determined by Eq. (6).

随着输出光功率的变化,探头 1 和探头 2 探得电压最大变化为 30%。探头输出电压和浊度成正比,表明此时以单探头表征的浊度读数发生了 30%的变化,而散射光功率比值法表示的浊度系数最大变化仅为 5%。该系数和浊度也成正比,表明此方法表征的浊度系数对光源波动或出光窗口污染带来的影响较不敏感。

5 结 论

针对水下长期在线浊度的探测会受器件不稳

定或者出光窗口污染造成的影响,本文提出了一种使用两点 90° 散射光功率比值表征浊度的方法,并基于该方法研制了水下浊度探测装置。该探测器系统结构简单,满足 90° 散射和垂直入射探测,对环境产生的干扰具备抵抗力。实验结果表明,该方法表征的浊度系数与标准浊度值呈良好的线性。在干扰试验中,对于峰值变化 30% 的光源扰动,散射光功率比值表征的浊度系数最大变化仅为 5%,显示该方法对光源漂移或者出光窗口污染等干扰不敏感,能有效延长人工清洁维护周期,适宜于水下在线领域的浊度测量。

参考文献:

- [1] WANG A, XIE Y, LIANG ZH. Study on the determination of water colority [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2000, 16(2): 37-40.
- [2] 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, 26(8): 252-253.
MENG Q L, SUN G Q, TONG G X. A measuring apparatus for turbidity of liquids [J]. *China Journal of Scientific Instruments*, 2005, 26(8): 252-253. (in Chinese)
- [3] MIZAIKOFF B. Infrared optical sensors for water quality monitoring[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 47(2): 35-42.
- [4] YAMAGUCHI K E D, HOSHIKAWA H, *et al.*. New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbidimeter with two optical systems in series [J]. *Water Research*, 2006, 40: 683-691.
- [5] GARCIA A, GRILLO G J, PEREZ M A, *et al.*. A new design of low cost four-beam turbidimeter by using optical fibers [C]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings of the IEEE*, 2005, 1(16): 592-596.
- [6] LIU X L, WANG W J, REN H R, *et al.*. Quality monitoring of flowing water using colorimetric method based on a semiconductor optical wavelength sensor [J]. *Measurement*, 2009, 42: 51-56.
- [7] ORWIN J F, SMART C C. An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment [J]. *Geomorphology*, 2005, 68: 3-15.
- [8] BAIDEN G, BISSIRI Y, MASOTI A. Paving the way for a future underwater omni-directional wireless optical communication system [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36: 633-640.
- [9] 张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 水下声信号的激光干涉测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 809-815.
ZHANG X L, TANG W Y, SUN H Y. Laser interferometry of underwater acoustic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 809-815. (in Chinese)
- [10] 孙传东, 李驰, 张建华, 等. 水下成像镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 5-11.
SUN CH D, LI CH, ZHANG J H, *et al.*. Optical design of submarine image-formation lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 5-11. (in Chinese)
- [11] 李学彬, 高亦桥, 纪玉峰, 等. LED 光源光学粒子计数器的研制[J]. *光学精密工程*, 2008, 17(3): 406-409.
LI X B, GAO Y Q, JI Y F, *et al.*. Development of optical particle counter of LED lamp-house [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(3): 406-409. (in Chinese)
- [12] HONGVE D, AKESSON G. Comparison of nephelometric turbidity measurements using wavelengths 400 ± 600 and 860 nm [J]. *Water Research*, 1998, 32(10): 3143-3145.
- [13] ISO 7027. The International Organization for Standardization (1990) International Standard. Water Quality: Determination of Turbidity [S].
- [14] DANIEL J F T, FLANAGAN C, LYONS W B, *et al.*. Proximal object and hazard detection for autonomous underwater vehicle with optical fibre sensors [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 53: 214-229.

作者简介:



刘瑞鹏(1970—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事传感器信号处理的研究。E-mail:rocace@163.com



祁志美(1967—),男,内蒙古丰镇人,博士,研究员,主要从事集成光学传感器、纳米敏感材料、MOEMS 技术等方面的研究。E-mail:zhimei-qi@mail.ie.ac.cn



刘 桥(1986—),男,四川江油人,硕士研究生,主要从事光学传感器的研究。E-mail:hvnelqnsb@yahoo.com.cn

●下期预告

高斯光束整形系统的 optical 设计

高瑀含¹,安志勇¹,李娜娜^{1,2},赵伟星³,王劲松¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;2. 中国科学院 光电研究院 北京 100080;

3. 南京光科技有限公司,江苏 南京 210001)

为了简化高斯光束整形系统的 optical 设计,研究了真实光线追迹优化 optical 系统的方法。首先,从理论上对高斯光束整形原理进行了研究,并选择超洛伦兹函数作为平顶光分布函数。在此基础上,根据能量守恒原理,推导了高斯光束整形系统中任意光线在入射面与出射面的坐标变换关系。然后,针对该系统的特点,使用 Zemax 编程语言(ZPL)编写计算坐标变换的 ZPL 宏指令,并优化设计了高斯光束整形系统。最后,利用金刚石单点车削法加工该非球面 optical 系统,并利用光束分析软件对系统的整形效果进行了测试。测试结果表明:利用该方法设计的非球面透镜实现了高斯光束的整形变换,平顶光的均匀度为 87.1%。该方法简单实用,计算量小,具有重要的工程应用价值。