



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210134

一种基于折射率法检测海水盐度的装置设计

蔡元学¹, 马天², 秦月婷¹, 洪腾宇², 周寰宇², 李志成²

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 针对光纤传感技术中盐度检测分辨率低的问题, 提出了一种基于折射率法检测海水盐度的方案. 根据折射光线在不同盐度溶液中产生偏移的原理, 采用折射率差动测量和激光扩束器, 设计了盐度检测装置系统. 理论分析和实验结果表明: 通过改变透镜焦距或增大平面凹透镜与楔形水槽倾斜玻璃面的间距可提高系统分辨率. 装置经过结构创新, 为光纤传感技术在海水盐度监测领域的应用提供了一种新途径.

关键词: 盐度检测; 光纤传感器; 光折射; 折射率; 激光

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2022)01-0064-06

Design of a Device for Measuring Seawater Salinity Based on Refractive Index Method

CAI Yuanxue¹, MA Tian², QIN Yueting¹, HONG Tengyu², ZHOU Huanyu², LI Zhicheng²

(1. College of Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Aiming at the problem of low resolution of salinity detection in fiber optic sensing technology, a method of salinity detection based on refractive index method is proposed in this study. According to the principle that refracted light produces deviation in different salinity solutions, the salinity detection system was designed by using refractive index differential measurement and laser beam expander. Theoretical analysis and experimental results show that the resolution of the system can be improved by changing the focal length of the lens or increasing the distance between the plane-concave lens and the tilted glass surface of the wedge flume. Through structural innovation, the device provides a new way for the application of optical fiber sensing technology in the field of seawater salinity monitoring.

Key words: salinity detection; optical fiber sensing; refraction; refractive index; laser

海水盐度是衡量海水含盐量的一个标度, 而海水含盐量是研究海水物理和化学性质的基本参数. 对海洋中盐度及其分布的精确检测, 在海洋学研究、海洋环境和气候的监测及预测^[1]、海洋军事^[2]、沿海采油、海洋渔业^[3]等领域具有十分重要的实用价值.

目前国内外最常用的水体盐度探测方法多基于接触式或表面探测. 如基于高精度电导率法的船载温盐深(CTD)仪^[4-5]的盐度检测, 该方法测量精度高, 适用于现场连续检测, 但是存在电导率、温度、深度 3 个参数检测不同步, 电极易受水质污染和电磁干

扰进而影响测量精度的问题; 基于微波遥感技术^[6-7]进行的航天观测可以大范围快速检测海水盐度, 但是微波辐射穿透海水的能力较弱, 所以只能检测海洋表面的盐度.

本文设计了一种基于折射率法检测海水盐度的装置. 此装置可通过检测折射光线在不同盐度溶液中产生的偏移量, 进而计算出海水盐度. 盐度传感探头采用折射率差动测量和激光扩束的结构设计, 在消除温度和深度对盐度检测影响的同时可进一步放大接收端的光线偏移量, 提高系统分辨率, 适合远海及

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-10-30

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2017KJ028); 大学生创新创业训练计划项目(202010057198)

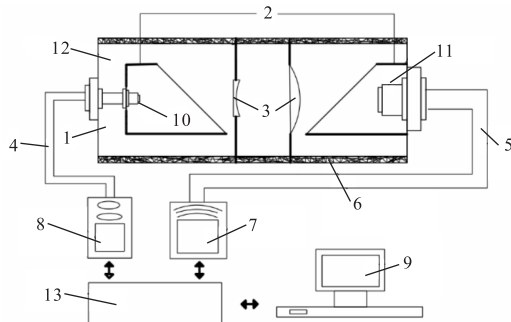
作者简介: 蔡元学(1982—), 男, 黑龙江海林人, 副教授, yuanxue_cai@tust.edu.cn

深海定点式测量。

1 盐度检测系统设计

1.1 系统装置

光在不同盐度的液体中会发生折射,液体盐度的变化会引起液体折射率的变化^[8],导致光线产生偏移。基于上述原理设计的盐度检测系统如图 1 所示。激光发射器发出的激光通过低损耗、低噪声和具有较高耐腐蚀性的光纤光缆传输到盐度传感探头测量单元,检测折射光线在不同盐度海水中与盐度几乎成正比的偏移量 d ,由 CCD 摄像器件通过多模光纤接收光信号的偏移量,通过信号处理电路将光信号转化为电信号传输到终端进行数据的分析和处理,最终得到待测海水的盐度。



1. 盐度传感探头; 2. 楔形水槽; 3. 激光扩束单元; 4. 单模光纤; 5. 多模光纤; 6. 过滤单元; 7. 电荷耦合元件(CCD)摄像单元; 8. 激光发射器; 9. 终端显示器; 10. 自聚焦透镜; 11. 多模光纤阵列; 12. 待测液体槽; 13. 信号处理电路

图 1 盐度检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of salinity detection system

1.2 盐度传感探头的特点

运用 SolidWorks 制作的传感探头三维仿真模型如图 2 所示。

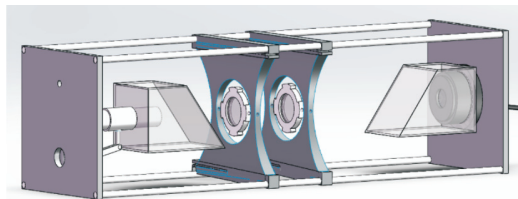


图 2 传感探头三维仿真模型

Fig. 2 Three-dimensional simulation model of sensor probe

传感探头主要分为两部分,一部分是封装有蒸馏水参考液的楔形水槽和待测液体槽,另一部分是激光扩束单元,由平凹透镜和平凸透镜构成。待测海水经过外侧由丙纶短纤维滤布和活性炭吸附膜构成的过滤单元进入外围的水槽中。

文献研究^[9-11]表明温度对海水折射率有一定影响,因此探头的结构引入了参考液的设计,在同温、同压下同时检测激光在蒸馏水和待测液体中光线偏移量的差值,形成折射率差动测量^[12-13],可以有效消除温度和深度对测量结果的影响。激光扩束单元这一结构的设计,一方面可以使光源与探测装置分布在两侧,减少光路因反射造成的光衰减;另一方面光线通过透镜后可以进一步放大出射光线的偏移量,提高系统的分辨率。

传感探头的结构设计与 CTD 仪和微波遥感技术相比可以有效消除温度和深度对盐度检测结果的影响,且检测环境具有普适性;此装置体积小、耐腐蚀、易拆卸,适合远距离深海定点式盐度的检测。

1.3 检测系统参数的设定

海水对光的吸收系数与波长有关,对于可见光而言,黄色物质对光的吸收占海水光吸收总量的 65% 以上,海水吸收系数的极小值在波长 550 nm 左右;而在大洋表层水,极小值在波长 510 nm 左右;在透明的深水中,极小值在波长 470 ~ 490 nm 处,其吸收系数为 $0.02 \sim 0.05 \text{ m}^{-1}$ ^[14]。基于以上经验数据和结论,传感器光源选用中心波长 532 nm 的半导体激光器泵浦的固态激光器,并带有单模的尾纤输出。在单模光纤的端面耦合一个自聚焦透镜,对光线进行准直,以改善光线质量,提高测量的分辨率。

楔形水槽装满蒸馏水参考液并密封,顶面长宽均为 35 mm,底面长宽分别为 70 mm 和 35 mm,楔形水槽高度为 35 mm,非倾斜部分壁厚 2.5 mm,倾斜部分壁厚 2 mm,倾斜部分与水平方向呈 45°。透镜可选用焦距为 2 cm 的平凹透镜和焦距为 10 cm 的平凸透镜。在满足系统盐度检测范围(0 ~ 42)可以捕获光偏移量信号的前提下,若待检测液体盐度偏小,可选用小焦距平凹透镜和大焦距平凸透镜组合,反之,选用大焦距平凹透镜和小焦距平凸透镜组合,调整光在接收端的偏移量,以改善测量的准确度。

传感器的过滤单元选用 300 目的钛网作为骨架,丙纶短纤维滤布和活性炭吸附材料附着在网面,其作用是为了过滤海水中的泥沙,吸附有机物大分子,减小测量环境等客观因素对盐度检测结果的影响。

2 盐度检测系统的理论基础

盐度传感探头光路图如图 3 所示。光线在盐度传感探头中以水平方向入射,通过折射率为 n_0 的蒸

馏水参考液后以 α 角度入射到折射率为 n_g 的楔形水槽斜玻璃面,折射后以 β 角度进入折射率为 n 的待测液体,再依次经过平凹透镜和平凸透镜,最后由 CCD 测得当被测液体分别是海水(光线 1)和蒸馏水(光线 2)时光线总偏移量 d . L 为光线 1 经过平凹透镜折射光线的反向延长线在焦平面的交点与主光轴的距离; L_1 和 L_2 分别为光线 1 在被测液体为海水时进入平凹透镜和平凸透镜前的偏移量; f_1 和 f_2 分别为平凹透镜和平凸透镜的焦距; α_0 为楔形水槽斜玻璃面倾斜角度,设计为 45° ; s_1 为楔形水槽倾斜玻璃面距平凹透镜的距离; s_2 为两透镜光心之间的距离,即为两透镜焦距之和; ω 为入射光线与楔形水槽倾斜玻璃面法线的夹角; φ 、 θ 均为折射光线与楔形水槽倾斜玻璃面法线的夹角.光线总垂直偏移量 d 的推导过程如下:

由折射定律可知

$$n_0 \sin \alpha = n \sin \beta \quad (1)$$

令过平凹透镜折射光线与水平方向的夹角为 γ

$$\gamma = \arctan((L + L_1) / f_1) \quad (2)$$

由图 3 几何关系可知

$$\begin{cases} L = f_1 \tan(\alpha - \beta) \\ L_1 = s_1 \tan(\alpha - \beta) \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)—式(3)整理得

$$\gamma = \arctan\left(\frac{f_1 + s_1}{f_1} \tan\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{n_0 \sin \alpha}{n}\right)\right)\right) \quad (4)$$

令待测液体是海水时光线在进入楔形水槽斜玻璃面之前的偏移量为 d_1 ,由图 3 可知

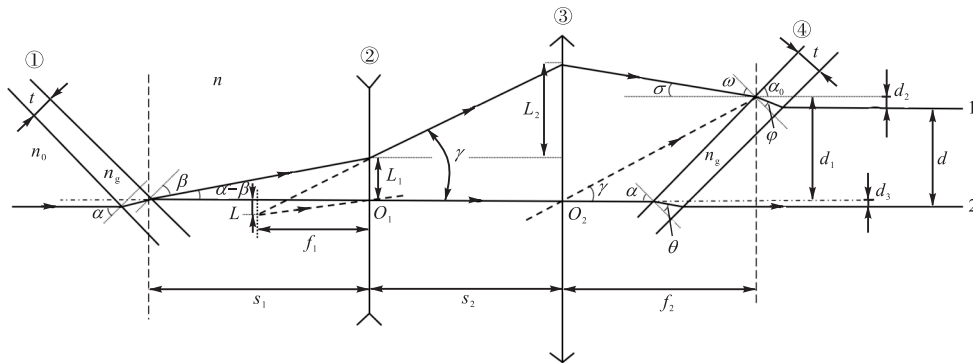
$$d_1 = f_2 \tan\left(\arctan\left(\frac{f_1 + s_1}{f_1} \tan\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{n_0 \sin \alpha}{n}\right)\right)\right)\right) \quad (5)$$

令折射光线与水平方向的夹角为 σ

$$\sigma = \arctan\frac{L_1 + L_2 - d_1}{f_2} \quad (6)$$

由图 3 几何关系可知

$$\begin{cases} L_1 = s_1 \tan(\alpha - \beta) \\ L_2 = s_2 \tan \gamma = (f_1 + f_2) \tan \gamma \end{cases} \quad (7)$$



图中过光心 O_1 和 O_2 的光线为辅助光线;①和④为楔形水槽斜玻璃面;②为平凹透镜;③为平凸透镜

图 3 盐度传感探头光路图

Fig. 3 Optical path diagram of salinity sensor probe

由式(5)—式(7)整理并化简得

$$\sigma = \arctan\left(\frac{1}{f_2} \left(s_1 \tan\left(\alpha - \arctan\left(\frac{n_0 \sin \alpha}{n}\right)\right) - f_1 \tan\left(\frac{f_2(f_1 + s_1)}{f_1} \cot\left(\alpha + \arccos\left(\frac{n_0 \sin \alpha}{n}\right)\right)\right) \right)\right) \quad (8)$$

为便于分析待测液体是海水时光线 1 通过楔形水槽斜玻璃面的偏移量 d_2 ,将楔形水槽斜玻璃面上半部分的光路放大,并做辅助线,如图 4 所示.

由折射定律可知

$$n \sin \omega = n_g \sin \varphi \quad (9)$$

令待测液体为海水时光线 1 通过楔形水槽斜玻璃面的偏移量 d_2 为

$$d_2 = AC \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right) \quad (10)$$

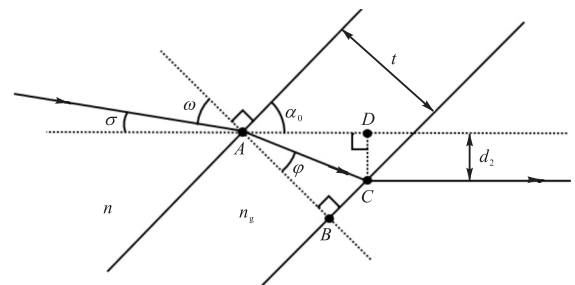


图 4 光线 1 入射至楔形水槽斜玻璃面光路放大图

Fig. 4 Enlarged view of the light path of light 1 incident on oblique glass surface of wedge flume

图 4 中, t 为楔形水槽斜玻璃面的厚度, 令 $AB = t$, 运用余弦定理可得

$$AB/AC = t/AC = \cos \varphi \quad (11)$$

由式(9)—式(11)整理并化简得

$$d_2 = \frac{t \sin \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{n}{n_g} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \sigma \right) \right) \right)}{\cos \left(\arcsin \left(\frac{n}{n_g} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \sigma \right) \right) \right)} \quad (12)$$

为便于分析待测液体是蒸馏水时光线 2 通过楔形水槽斜玻璃面的偏移量 d_3 , 将楔形水槽斜玻璃面下半部分的光路放大, 并做辅助线, 如图 5 所示。

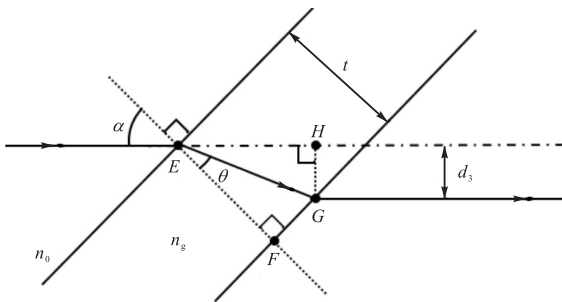


图 5 光线 2 入射至楔形水槽斜玻璃面光路放大图

Fig. 5 Enlarged view of the light path of light 2 incident on oblique glass surface of wedge flume

由折射定律可知

$$n_0 \sin \alpha = n_g \sin \theta \quad (13)$$

令待测液体为蒸馏水时光线 2 通过楔形水槽斜玻璃面的偏移量 d_3 为

$$d_3 = EG \sin(\alpha - \theta) \quad (14)$$

图 5 中, t 为楔形水槽斜玻璃面的厚度, 令 $EF = t$, 运用余弦定理得

$$EF/EG = t/EG = \cos \theta \quad (15)$$

由式(13)—式(15)整理并化简得

$$d_3 = \frac{t \sin \left(\alpha - \arcsin \left(n_0 \sin \alpha / n_g \right) \right)}{\cos \left(\arcsin \left(n_0 \sin \alpha / n_g \right) \right)} \quad (16)$$

$$d = 50 \tan \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{0.9426}{n} \right) \right) + 0.0272 - \frac{3 \sin \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{2}{3} n \sin \left(\frac{\pi}{4} - \arctan \left(\frac{9}{5} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{0.9426}{n} \right) \right) \right) \right) \right) \right)}{5 \sqrt{9 - 4n^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \arctan \left(\frac{9}{5} \tan \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{0.9426}{n} \right) \right) \right) \right)^2}} \quad (18)$$

由文献[15]可知, 在 36 °C 时, 盐度为 30 ~ 38 的模拟海水的折射率与盐度的经验公式为

$$n = 1.34443 + 0.0002S \quad (19)$$

将式(19)代入式(18), 通过 MATLAB 化简计算, 在盐度 S 的取值为 30 ~ 38 时得出光线偏移量 d

综上可得总偏移量 d 为

$$d = d_1 - d_2 + d_3 \quad (17)$$

计算 d 过程中涉及的 n_0 、 n_g 、 t 、 α 、 f_1 、 f_2 均为系统设计参数. 此设计中具体参数值为: 蒸馏水参考液的折射率 $n_0 = 1.333$; 楔形水槽斜玻璃面的折射率 $n_g = 1.5$, 玻璃厚度 $t = 2$ mm; 激光入射光线在蒸馏水参考液中与楔形斜面法线夹角 $\alpha = 45^\circ$. 选用焦距 $f_1 = 2$ cm 的平凹透镜和焦距 $f_2 = 10$ cm 的平凸透镜. 将以上系统设计参数代入式(17)中, 通过 MATLAB 化简计算, 在海水折射率 n 为 1.333 ~ 1.380 范围内得出楔形水槽倾斜玻璃面距平凹透镜的距离 s_1 分别为 5、8、10、12 cm 时光线偏移量 d 与海水折射率 n 之间的关系, 如图 6 所示。

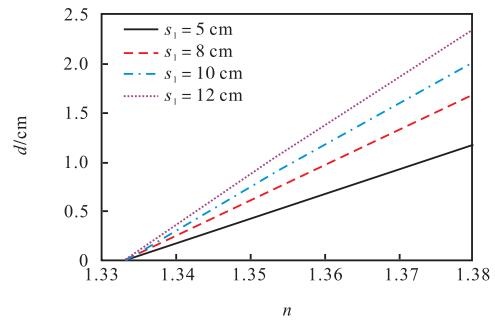


图 6 光线偏移量与海水折射率之间的关系

Fig. 6 Relation between the light offset and the refractive index of seawater

图 6 表明: 在海水折射率相同时, 随着楔形水槽倾斜玻璃面距平凹透镜距离 s_1 的增大, 光线偏移量 d 也增大. 当海水折射率为 1.333 ~ 1.380 时, 在盐度检测系统能够接收到光信号的前提下, 可以通过调节楔形水槽倾斜玻璃面距平凹透镜的距离 s_1 , 增大接收端的光线偏移量 d , 提高系统的分辨率。

当 $s_1 = 8$ cm 时, 光线偏移量 d 与海水折射率 n 之间的关系为

与盐度 S 的关系, 如图 7 所示. 结果表明光线偏移量 d 与盐度 S 的相关系数为 0.999, 所设计的海水盐度检测装置可以通过检测光线在不同盐度海水中的偏移量计算海水盐度。

式(18)和式(19)表明: 在经验公式已知的前提

下,可推导出盐度 S 与光线偏移量 d 两者间的定量关系. 但在多数经验公式未知的情况下,测量系统设计参数确定后,待测液体盐度 S 仅与光线偏移量 d 成定量关系,其定量关系需要实际测得. 盐度测量范围和测量灵敏度取决于传感探头各个部件的选用参数.

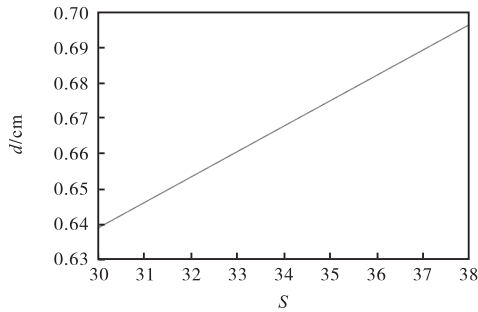


图7 光线偏移量与盐度之间的关系

Fig. 7 Relation between the light offset and salinity

在实际测量中,因为不同海区海水盐度与光线偏移量有不同的线性关系,根据文中的实验原理,需要实地采集不同盐度的海水进行盐度标定,获取观测海域海水盐度与光线偏移量的关系,对检测系统相关参数进行修正. 结合实地盐度标定曲线和盐度检测系统测得的光线偏移量计算得出待测海水的盐度.

3 检测系统的盐度标定实验

由于实验条件限制,实验室以氯化钠、无水碳酸钠、无水氯化钙、六水合氯化镁、无水硫酸钠、氯化钾(以上物质均为海水的主要成分)为溶质自制了盐度为 14~42 的海水模拟液,将海水模拟液放入待测液体槽内代替海水进行检测系统的盐度标定实验. 实验装置如图 8 所示.

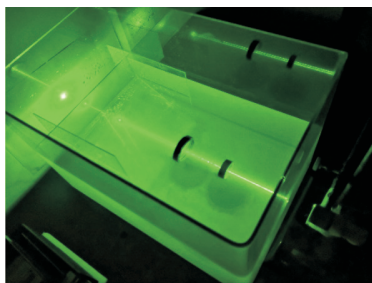
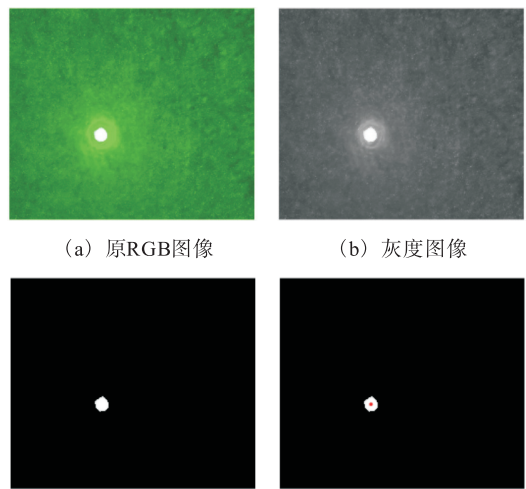


图8 实验装置图

Fig. 8 Diagram of experimental apparatus

检测系统中的 CCD 摄像器件将光信号转换成电脉冲信号,每个脉冲信号反映一个光敏元的受光情况,脉冲幅度的高低反映该光敏元受光的强弱,输出脉冲的顺序可以反映光敏元的位置.

光线偏移量的测量采用两种方法. 第一种方法是利用 MATLAB 灰度重心法,其步骤为:(1)在暗室中利用光屏承接光斑,光屏后放置像元尺寸为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 摄像器件将光线偏移量图像传输至电脑终端;(2)MATLAB 读取图像(m 像素 \times n 像素)生成 $m \times n \times 3$ 的数值矩阵;(3)将 RGB 图像转化为灰度图像(m 像素 \times n 像素);(4)设定灰度阈值为 190,其目的是降低背景信息对目标的干扰;(5)利用灰度重心法计算光斑中心坐标,如图 9 所示;(6)根据欧氏距离公式计算两点间距离,即为光线偏移量,测量值见表 1. 第二种方法是采用游标卡尺测量偏移量,其测量值见表 1.



(c) 设置阈值的灰度图像 (d) 灰度重心法检测光斑中心

图9 灰度重心法确定光斑中心

Fig. 9 Gray center method determining spot center

表1 盐度的标定实验结果

Tab. 1 Salinity calibration experiment results

盐度	偏移量/mm	
	方法 1	方法 2
14.1	2.281 3	2.28
15.0	2.449 9	2.44
17.2	2.796 6	2.80
19.7	3.213 3	3.22
22.3	3.646 6	3.64
25.2	4.129 9	4.14
26.1	4.279 9	4.28
27.9	4.579 9	4.58
28.9	4.746 6	4.76
29.8	4.899 6	4.90
32.0	5.263 2	5.26
33.1	5.446 5	5.44
34.2	5.629 9	5.62
35.9	5.913 2	5.90
37.8	6.229 9	6.23
39.8	6.563 2	6.56
41.1	6.779 9	6.77
42.0	6.929 9	6.92

在海水模拟液盐度为 14~42 的范围内选取 18 个观测点,每个观测点采样 3 次取平均值作为偏移量结果.由表 1 数据对比可知,利用 MATLAB 灰度重心法与游标卡尺所测得光线偏移量的平均差值小于 0.01 mm,说明实验中可以采用游标卡尺测量光线偏移量的方式,且此方法操作简单.对模拟海水盐度与灰度重心法所测定的光线偏移量进行线性拟合,结果如图 10 所示.

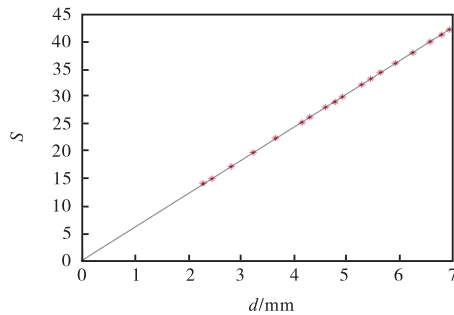


图 10 盐度标定曲线

Fig. 10 Salinity calibration curve

所得光线偏移量 $d(\text{mm})$ 与其对应盐度 S 的线性拟合方程为

$$S = 6.0451d - 0.1997 \quad (20)$$

光线偏移量与盐度的相关系数为 0.999 8.此结果说明两者有很好的线性关系.依此,检测得到待测液体的光线偏移量后,其盐度可以由式(20)计算得出.

4 结 语

本文基于光电传感技术的优点,设计了一种基于折射率法检测海水盐度的装置.此装置通过结构创新,在盐度传感探头上采用了折射率差动测量和激光扩束单元的设计,可以有效消除温度和深度对盐度检测结果的影响.理论分析和实验结果表明:折射光线偏移量 d 和海水盐度 S 之间存在定量关系,通过改变透镜焦距或增大平凹透镜与楔形水槽倾斜玻璃面的间距可提高系统装置的分辨率.检测系统具有体积小、适应性强、成本低的特点,有望在远海及深海定点式盐度检测方面发挥作用.

参考文献:

- [1] 杜岩,张玉红,施建成.海洋表面盐度与海洋环流和气候变化的关系[J].中国科学:地球科学,2019,49(5):765-777.
- [2] 方书甲.海洋环境对海军装备性能的影响分析[J].舰船科学技术,2004,26(2):5-10.
- [3] 林靖.海上环境突发事件对渔业养殖的影响[J].化工设计通讯,2018,44(3):183-185.
- [4] 赵勇,胡开博,陈世哲,等.海水盐度检测技术的最新进展[J].光电工程,2008,35(11):38-44.
- [5] FOFONOFF N P, HAYES S P, MILLARD R C. W. H. O. I. /Brown CTD 微结构测定仪的校准方法与数据处理[J].王金龙,译.海洋技术,1978(2):63-87.
- [6] 王永红,HERON M L, RIDD P.航空微波遥感观测海水表层盐度的研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(1):139-145.
- [7] 李青侠,张靖,郭伟,等.微波辐射计遥感海洋盐度的研究进展[J].海洋技术,2007,26(3):58-63.
- [8] 魏家祺,陈永华,丁霞.利用阿贝折射仪测定不同盐度海水的折射率[J].科技经济导刊,2016(36):127-128.
- [9] MIYAKE Y. Chemical studies of the Western Pacific Ocean. IV. The refractive index of sea water[J]. Bulletin of the chemical society of Japan, 1939, 14(6):239-242.
- [10] RUSBY J S M. Measurements of the refractive index of sea water relative to Copenhagen standard sea water[J]. Deep sea research and oceanographic abstracts, 1967, 14(4):427-439.
- [11] 吴英才,袁一方.基于折射率变化的一种新型盐度测量原理研究[J].光学学报,2005,25(2):199-202.
- [12] 曹乃锋.基于光电传感技术的海水盐度计研制[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [13] 赵勇,廖延彪.海水盐度和温度实时检测的新型光纤传感器研究[J].光学学报,2002,22(10):1241-1244.
- [14] 徐启阳,杨坤涛,王新兵,等.蓝绿激光雷达海洋探测[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [15] 赵鲁梅,何仲,黄槐仁,等.海水折射率与温度、盐度关系的实验研究[J].中国现代教育装备,2019(17):49-51.

责任编辑:周建军