

基于位置敏感器件的光学法盐度检测技术研究

赵 勇 张 博 廖延彪 赖淑蓉

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 盐水浓度的变化会引起其对光的折射率的变化,对于固定的倾斜入射光线,折射率的变化会导致出射光线发生偏移,利用位置敏感器件(PSD)检测光线偏移量的大小,便可以得到待测盐水的浓度。基于差动折射率测量原理,引入了一个装有蒸馏水的参考水槽,从而有效地减小了温度漂移对盐度测量带来的影响。初步的实验结果表明了方法的正确性,盐度测量的分辨力可达 0.012‰,重复性精度好于±0.3‰。对测量数据做了详细的论述,并对影响测量精度的一些主要因素进行了细致的分析。结果表明,该方法的温度漂移和光源强度变化对测量结果的影响很小。

关键词: 光学测量; 液体浓度; 折射率; 差动测量; 位置敏感器件; 蒸馏水

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

盐度测量在海洋环境监测、季节气候预测、海水养殖、港口贸易中的水尺计重及国防建设等诸多领域,有着十分广泛的应用。尤其对环境保护、水质资源的监测等方面,具有重要的研究背景和科学意义。

盐度的测量是一个复杂的问题,传统的测量方法是比重法,近年来国内外提出过一些新的方法。如 1998 年巴西的 Adamowski^[1]等通过测量超声波在有机玻璃棒和液体界面处的反射率和渡越时间来求得液体的盐度,测量误差小于 1.5%,非常适合于对管线中流体的测量。西安交通大学的金援越等人^[2]利用一个简单的 U 型的多模塑料光纤探头,基于光在不同折射率介质中的传播特性不同的原理,来测量太阳池的盐水密度,系统结构简单,但只进行了一些实验研究,而且没有给出在海洋中盐度密度测量方面的可行性分析;由于裸露的光纤纤芯直接接触被测液体,在光纤与待测液体的界面容易形成沉淀物而直接影响测量的可靠性。作者^[3]曾提出一种盐度与温度同时检测的光纤传感器系统,适合于海上远距离信号在线检测,但成本较高,不适于实验室中对盐水浓度的检测和分析。本文提出了一种结构简单的光学盐度检测实验装置,并进行了大量的实验,实验结果表明系统性能可靠、实用性较强。

2 测量原理及实验装置

盐度测量的基本原理如图 1 所示,被测盐水浓度的改变,会引起入射光线折射角的变化,通过测量的光线折射角度变化(这一变化几乎与盐度成正比),经过分析计算可以求得海水的盐度。

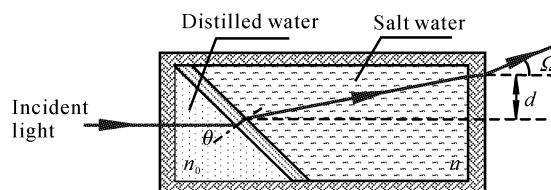


Fig. 1 Salinity measurement principle based on optical refraction method

测量水槽分为两部分,一部分装有参考液体(蒸馏水),另一部分就是待测的盐水,中间用一块倾斜放置的光学透射窗隔开;这样,光线的折射角度就会随两部分液体折射率差值的变化而不同。当光线如图 1 所示的情况入射,那么两种液体折射率之差 Δn 与光线偏移量 d (相对于参考液体和被测液体都是蒸馏水的情况)之间存在下列关系^[4]:

$$\Delta n = n - n_0 = \Omega \cotan \theta + \frac{\Omega^2}{2n} \approx kd, \quad (1)$$

其中, Ω 为光线出射角, θ 为光线入射角, k 为与结构有关的常量。基于上面的原理,提出了一种新颖的盐度检测实验装置,如图 2 所示。

综合考虑水的吸收及散射引起对光的衰减作

E-mail: zhaoyong@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2002-09-09; 收到修改稿日期: 2002-11-11

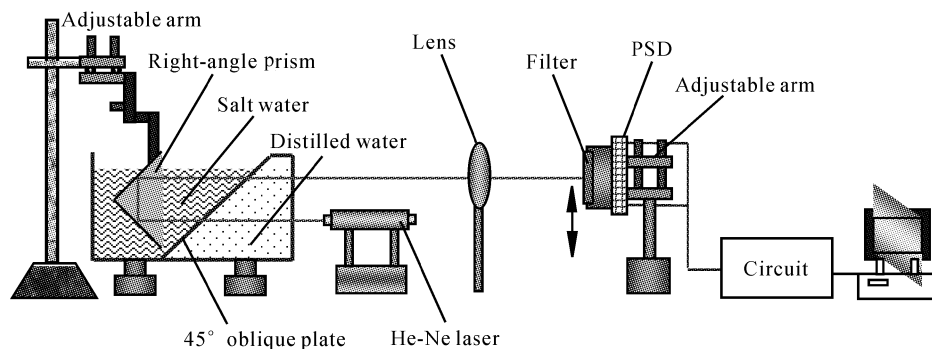


Fig. 2 Salinity measurement setup

用,选择波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为系统的光源。此外,系统还包括装有蒸馏水的参考水槽,装有待测盐水的测量水槽,两水槽之间通过倾斜放置的光学透射窗隔开,这个光学透射窗同时对水平入射的光线在进入待测盐水区域时产生一个入射角 θ (图 1)。在测量水槽装有一个直角反射棱镜,光线经过棱镜的反射后,通过窄带滤光片透射在位置敏感器件的光敏面上,当盐度发生变化,透射到位置敏感器件光敏面上的光斑位置也会发生变化,位置敏感器件的输出就会线性地对应这一变化,从而实现盐度的测量。加入滤光片的目的是为了滤除大部分环境杂散光对测量的影响。直角反射棱镜和位置敏感器件分别装在五维调节架上,在测量之前需要对光路进行调整,以使出射光线刚好透射到位置敏感器件的光敏面的中心位置上,并且在盐度变化时光线的偏移方向沿着位置敏感器件的轴线方向。水槽是用有机玻璃材料做成的。

位置敏感器件的光敏面的尺寸为 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,分辨极限为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,经测量得到的暗电流为几十纳安,由于位置敏感器件的输出只与光点打在位置敏感器件光敏面上的位置有关,而与光强无关,因此基本上避免了光源功率波动对测量的影响,同时由于位置敏感器件检测的是光斑的移动量,因此光斑的大小对实验的结果几乎没有影响。

3 实验结果

3.1 稳定性测量

在保持室内温度、环境杂散光强度不变的条件下,间隔 10‰(质量比,下同)盐度,对 10‰到 40‰盐水测量的稳定性进行了监测,图 3 是 40‰盐度下监测三个小时得到的系统稳定性曲线。

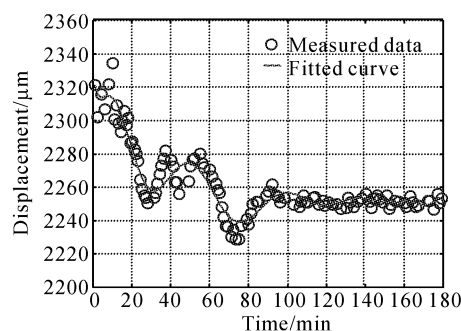


Fig. 3 40‰ salinity measured stable curve

由图上容易看出,由于每次增加盐度时,是向低浓度盐水中加入一定量的高浓度盐水,因此初始时并不稳定,处于一种振荡并逐渐趋于稳定的过程。这种现象主要是由于以下两种情况引起的:其一由于盐水刚刚倒入水槽时,水槽中的液体会出现振荡波动的现象,从而引起光线的抖动,导致透射到位置敏感器件光敏面上的光点上下波动;其二是高浓度的盐水倒入低浓度盐水中后存在扩散现象,也会由于粒子的运动引起光线无规则的向各个方向散射,导致位置敏感器件光敏面上的光点上下波动。经过一段时间以后(大约 100 分钟),液面开始平稳,盐度的扩散过程也达到了平衡,系统开始稳定。大量实验表明,系统平衡后,稳定性均优于 0.9%。

3.2 盐度检测特性标定实验

从 0 到 50‰之间,每隔 5‰的盐度进行一次系统特性的标定测量,每次都是等待大约 2 个小时系统稳定后,取 30 组测量数据的平均值作为测量结果,得到该盐度下光线偏移量(在位置敏感器件光敏面上光点位置的变化量 x),重复上述过程,就可以得到光点位移值和盐度的关系曲线。

大量的实验表明,光点的位移和盐度的变化值之间存在很好的线性关系,图 4 给出了其中一组测量结果。这样,在位置敏感器件的分辨极限 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的条

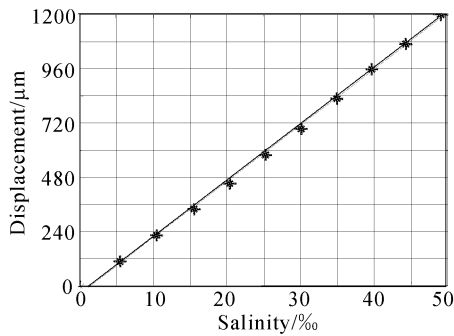


Fig. 4 Light-spot position changed with salinity

件下,系统盐度测量的分辨力可望达到 0.012‰。

3.3 重复性测量实验

在相同的实验条件下,在不同的被测盐度值时对系统检测性能进行了多次(#1, #2, ..., #10)重复的测量,测量数据如表 1 所示。从表中,我们可以看出,测量的重复性均优于±0.3‰,从下节的误差分析我们可以考到,这一不确定的因素主要来自于标准盐度的称量过程由于天平的测量误差所造成的。

Table 1 Repeatability measurement data unit: ‰

Salinity	Measurement No.										±2σ
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	
10.101	9.920	10.083	10.205	9.881	10.179	10.233	9.978	10.056	10.127	10.119	±0.24
20.000	19.807	20.207	19.822	19.940	20.098	20.124	19.945	20.101	20.066	20.112	±0.27
29.703	30.037	29.777	29.606	29.759	29.552	29.692	29.538	29.699	29.756	29.728	±0.28
39.216	38.984	39.025	39.125	39.289	39.321	39.221	39.251	39.198	39.210	39.219	±0.22

4 系统误差分析

4.1 光源光强波动的影响

本实验系统采用的是氦氖激光器作为光源,这是因为除了综合考虑了盐水对光的吸收和散射特性以外,还考虑到红光的可视性比较好,易于实验光路的调节。但是氦氖激光器的输出光功率不稳定,理论上,光源光强的波动对于位置敏感器件光斑位置检测系统来说是不会带来影响的,但实验发现,光源光强波动时,对系统的输出还是有一定的影响。

图 5 就是在 10‰盐度下,位置敏感器件的输出随着光强的变化曲线,实验中,光源光强由 1000 μW 调节到 1500 μW,变化了 500 μW,从图中可以看出,整个系统的测量结果还是和光强有关系的,随着光强的增大,位置敏感器件的输出是逐渐减小的。在光强变化 500μW 的范围内,位置敏感器件输出的位移值变化了大约 13 μm。实际中,当 He-Ne 激光器的输出光功率在打开一个小时后,其出光功率变化很小,在 50 μW 之内,因此,在该盐度下,由于这个光强变化引起的盐度测量误差在 0.05‰之内。

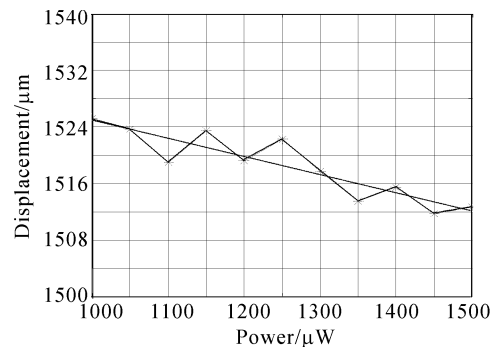


Fig. 5 Light power effect

4.2 位置敏感器件的影响

4.2.1 位置敏感器件暗电流和环境杂散光的影响

位置敏感器件作为一种半导体光敏器件,其本身的暗电流会对测量带来影响,另外,尽管我们用暗盒和窄带滤光片封装在位置敏感器件的光敏面上,环境杂散光中还会有小部分光透过滤光片。假设这两者给位置敏感器件输出带来的误差信号为 ΔL,根据位置敏感器件的工作原理,通过两路信号的差和比运算得到的带有误差信号的位移与理想位移有一定的差别,其相对值可表示为

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{x' - x}{x} = \left[\frac{(I_2 + \Delta I) - (I_1 + \Delta I)}{(I_2 + \Delta I) + (I_1 + \Delta I)} - \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right] / \left(\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) \approx \frac{2\Delta I}{I_2 + I_1}$$

大量的实验监测表明,在位置敏感器件上加上暗盒和滤光片的情况下,测得位置敏感器件的输出电流大约为 50 nA,而两路信号的强度分别大约为

10 μA 左右,代入上式,可以得到暗电流和环境杂散光对位置敏感器件测量结果的影响约为输出值的 0.5%。

可以看出,尽管在位置敏感器件前加了暗盒及滤光片,暗电流及环境杂散光对测量还会带来一定的影响。

4.2.2 光线偏移量方向与位置敏感器件轴线不平行的影响

当盐度发生变化的时候,光点会发生上下的移动,在实验之间,需要将光线偏移量方向沿着位置敏感器件的光敏面轴线方向移动,由于目测结果很难实现光点的位移方向严格地与位置敏感器件轴线方向完全重合,如图 6 所示,两者的偏差会给测量带来误差。位置敏感器件光敏面的尺寸为 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,设光斑位置与位置敏感器件轴线最大偏移量为 $2b=1\text{ mm}$,则实际的位移值 d 和检测到的轴向位移 x 的最大差别 Δx ,其引起的相对误差表示为

$$\frac{\Delta x}{d} = \frac{d-x}{d} = \frac{d-d\cos\varphi}{d} = 1 - \cos\varphi = 1 - \frac{L/2}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}}$$

将具体的实验参量代入,可得这一相对误差的大小约为 0.12% ,并同样可以通对系统的标定来消除这个原因造成的误差。

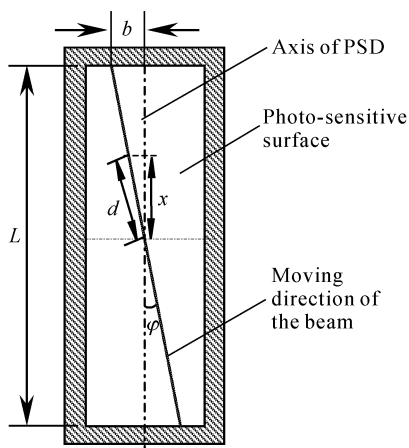


Fig. 6 Beam positions on PSD

4.3 温度对测量的影响

实验中采用了参考水槽,目的是为了消除由于温度变化引起折射率变化给测量带来的误差。为了验证这个方法的有效性,当室内温度在 $24\sim 26.5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围变化的时候,对固定盐度的被测盐水,进行了长时间(10 h)的监测,系统输出结果的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出,随着温度的升高,系统的输出基本没有太大的变化,只是有些波动,分析表明这一波动主要是系统的不稳定性造成的。另外需要指出

的是,还有一个原因会导致图中盐度值随着时间和温度增加略微变大,就是由于被测的盐水并没有被密封在水槽中,因此在一天(10 h)的时间里,待测盐水中的溶剂蒸馏水会有部分蒸发。据资料报导^[5],如果不采用差动测量技术,温度变化 $2.5\text{ }^\circ\text{C}$,会给带来 3% 左右的影响,因此说,加入参考蒸馏水槽,通过差动式的检测方法,能够有效地抑制温度漂移给测量带来的影响。

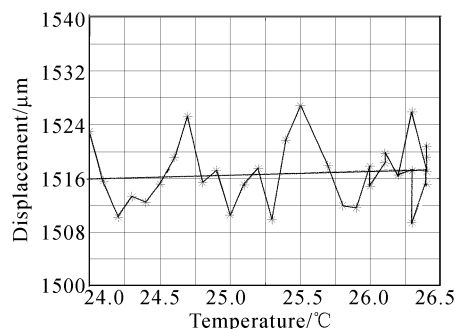


Fig. 7 Temperature effect

结论 本文提出了一种基于位置敏感器件和光学检测技术的盐度测量装置,利用折射率的光学差动测量原理和位置敏感器件输出信号的电学差动处理技术,实现了盐度的检测。该双差动检测技术的特点是

- 1) 系统结构简单、成本低、实用性强;
- 2) 盐度检测的分辨力可达到 0.012% ;
- 3) 降低了光强变化对测量的影响;
- 4) 降低了温度变化对测量的影响。

参 考 文 献

- 1 Adamowski J C, Sigelmann R A. Ultrasonic measurement of density of liquids flowing in tubes. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.*, 1998, **45**(1):48~55
- 2 Jin Yuanyue, Chen Zhongqi, Wang Qijie. Laser optic-fiber technology for measuring the salinity of a solar pond. *Acta Energetica Solaris Sinica* (太阳能学报), 1994, **15**(2):198~200 (in Chinese)
- 3 Zhao Yong, Liao Yanbiao. Novel fiber optic sensor for simultaneous undersea temperature and salinity measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1241~1244 (in Chinese)
- 4 Brice B A, Hawler M. A differential refractometer. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, **41**(6):1033~1037
- 5 Stanley E M. The refractive index of seawater as a function of temperature, pressure and two wavelength. *Deep Sea Research*, 1971, **18**(11):833~840

Salinity Measurement Based on Position Sensitive Detector and Optical Technology

Zhao Yong Zhang Bo Liao Yanbiao Lai Shurong

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 9 September 2002; revised 11 November 2002)

Abstract: The developed salinity measurement setup exploits beam deviation caused by refraction due to the salinity of measured water at the receiving end face of a measurement cell. Based on a differential refractometry, a reference water cell filled with distilled water to reduce influence of temperature drift effectively is partitioned by an oblique optical-transmission plate from a horizontal rectangular water tank, which, as a measurement element, is filled with measured salt water. Beam deviation caused by salinity change is detected by a position sensitive detector. Experimental results indicate the feasibility of the developed system with a measurement resolution of 0.012‰ and repeatability error less than $\pm 0.3\%$. Errors which will affect the measurement performance are discussed and analyzed in detail. The results indicate that temperature and light power drifts have little influence on the measurement accuracy.

Key words: optical measurement; liquid concentration; refractive index; differential method; position sensitive detector (PSD); distilled water

第 8 届国际光电子和光通信学术会议 (OECC '2003) 在上海召开

由中国科学院上海光学精密机械研究所、上海交通大学、上海市通信学会、上海市激光学会和上海市通信制造行业协会共同组织的第 8 届国际光电子和光通信学术会议(简称 OECC'2003)于 2003 年 10 月 13~16 日在上海国际贵都大酒店隆重举行,来自日本、韩国、澳大利亚、新加坡、马来西亚、印度、欧美以及国内各大院校、科研机构及光通信和光电子产业系统共 23 个国家和地区近 400 名海内外代表参加了会议。大会主席给来自中国、日本、韩国、印度和法国的六位优秀论文的作者代表颁发了奖。

国际光电子和光通信会议是亚太地区光电子和光通信领域最重要、最具影响力的国际学术会议之一。会议宗旨是为世界各国光电子和光通信领域的专家学者提供一个交流新思想、新成果的学术平台。国际光电子和光通信会议自 1996 年开始轮流在日本和亚太地区其他国家召开。本届国际会议规模大,专业范围广,是一次高水平的大型国际学术盛会。

本届会议议题包括:光纤、光缆和测量;无源器件和组件;有源器件和组件;光学传输系统和子系统;光学网络和管理;生物医学光子学、光纤传感器以及其他应用。本届会议共邀请国内外著名专家学者作大会报告、特邀报告和辅导报告 75 篇、口头报告 244 篇和张贴报告 117 篇。

会议分 6 个分会场进行专题交流和讨论,并对以下议题表示了特别的关注:光纤到家技术、城域和企业光网络技术、光接入网技术、光波导技术、光子晶体技术、智能光网络技术等等。

会议期间还举办了光电子产品展示会,共有 9 家从事相关产品研发和生产的公司和厂商参加了现场展示会。为期 4 天的国际光电子和光通信会议取得了圆满成功。

国际光电子和光通信会议国际顾问委员会对本届会议总体评价很好,认为论文质量非常高。收录了会议 436 篇论文的《第 8 届国际光电子和光通信学术会议论文集》(Proceedings of the 8th Optoelectronics and Communication Conference,全英文)已由《光学学报》以 2003 年增刊形式出版。

(莎 燕)