

# 基于棱镜模型多次折射法的海水盐度检测系统

陈世哲 刘世萱 范秀涛 赵力 王晓燕 李民

(山东省科学院海洋仪器仪表研究所 海洋环境监测技术重点实验室, 山东 青岛 266001)

**摘要** 为了提高光学折射法海水盐度检测精度, 综合分析现有检测方法, 认为其海水盐度检测精度低的主要原因是其检测光路为平行平板模型。由此, 提出了棱镜模型多次折射法检测方案。利用棱镜模型而不是平行平板模型, 提高了光线的偏折角; 通过设置多个棱镜模块, 进一步扩大偏折角, 从而大大提高系统的分辨力。设计了光路并进行仿真分析, 研制了样机并进行了海上实验。结果表明, 盐度检测的分辨力达  $0.0012\%$ , 重复性不大于  $\pm 0.016\%$ 。由海上与 ALEC 温盐传感器比测实验表明, 与 ALEC 传感器一致性好, 稳定性好, 比测误差在  $\pm 0.1\%$  以内。

**关键词** 海洋光学; 盐度; 棱镜模型; 折射

**中图分类号** P71 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0701003

## Seawater Salinity Measurement System Based on Prism Model Multi-Refraction

Chen Shizhe Liu Shixuan Fan Xiutao Zhao Li Wang Xiaoyan Li Min

(Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology,

Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266001, China)

**Abstract** A seawater salinity measurement system based on prism model multi-refraction is presented in order to improve the salinity measurement precision using optics refraction. The beam angle of refraction is expanded by using prism model other than parallel model, and is enlarged by setting multiple-prism-units further. So the measurement precision is improved greatly. The measurement system is developed after design and simulation. After laboratory experiments and sea experiments with ALEC sensor, it is indicated that the developed system is effective with a measurement resolution of  $0.0012\%$ , repeatability error less than  $\pm 0.016\%$ , and measurement error less than  $\pm 0.1\%$  compared with ALEC sensor.

**Key words** oceanic optics; salinity; prism model; refraction

**OCIS codes** 010.0010; 010.4450; 040.0040; 040.5160

## 1 引言

盐度是海洋动力学以及海洋与大气相互作用中起关键作用的重要参数。精确检测海水盐度对于海洋学和海洋环境研究以及气候的监测及预测等领域具有十分重要的实用意义和社会、经济效益。海水盐度检测方法除了电导率法外, 主要还有光学折射法。目前, 已有多种针对海水盐度的光电检测方法。Minato 等<sup>[1]</sup>提出的用半导体激光做光源, 用光纤来传送光信号的透射式盐度传感器; 赵勇等<sup>[2]</sup>提出用于海水温度和盐度同时实时探测的光纤传感器系统

及基于位置敏感器件的盐度检测实验<sup>[3,4]</sup>, 分辨力可达  $0.012\%$ ; 陈世哲等<sup>[5]</sup>试制了基于位置敏感探测器(PSD)的光电法海水盐度检测探头, 分辨力达到  $1.67\%$ ; 李田泽等<sup>[6]</sup>提出一种采用双隔离窗的光透射型液体浓度检测装置, 相对误差大约是  $8\%$ 。另外还有 Diaz-Herrera 等<sup>[7,8]</sup>提出的基于表面等离子共振技术和马泳等<sup>[9]</sup>提出的基于布里渊后向散射技术的盐度检测方法。孙仲秋等<sup>[10]</sup>还进行了利用偏振光技术进行海水密度检测的初步研究。上述方法大多处于实验室研究阶段, 检测精度较低。在综

收稿日期: 2011-01-28; 收到修改稿日期: 2011-04-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA09Z102)资助课题。

作者简介: 陈世哲(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电检测技术和海洋环境监测等方面的研究。

E-mail: chenshizhe1975@163.com

合分析上述检测方法的基础上,本文提出基于棱镜模型多次折射法的海水盐度检测系统,不仅大大提高了检测精度,而且缩小了仪器体积。

## 2 测量原理及样机研制

### 2.1 光路设计及仿真

光学折射法检测盐度是根据光线在不同折射率液体当中会发生折射的基本原理来进行检测的<sup>[11]</sup>。现有折射法盐度检测方案可概括为:方案 A,平行平板模型单次折射法<sup>[3]</sup>,如图 1(a)所示;方案 B,平行平板模型两次折射法<sup>[6]</sup>,如图 1(b)所示;其中的光学镜片是为了隔离两侧的参考液和测量液。由图 1(a)易知,光路展开后,前后两块光学镜片之间

的测量液相对其两侧的参考液,可认为是平行平板,故称其为平行平板模型。入射光线由参考液进入测量液时的偏折角由参考液与测量液两者的折射率决定,到达 PSD 上的偏移量由偏折角及前后光学镜片之间的距离决定,光线在参考液中都是平行光,并不会提高系统的偏移量。该模型仅折射一次,即使在系统中设置多块平行光学玻璃,如方案 B,模型仍然为平行平板,并不能有效提高偏折角;在仪器体积相同的情况下,设置多块平行光学玻璃,还会缩短折射的有效光程,反而使 PSD 上的偏移量减小。为提高分辨力,必须增加光程,这必然使仪器体积庞大,同时增加光程又对系统的稳定性造成不利影响,可见该方法检测分辨力和准确度较难提高。

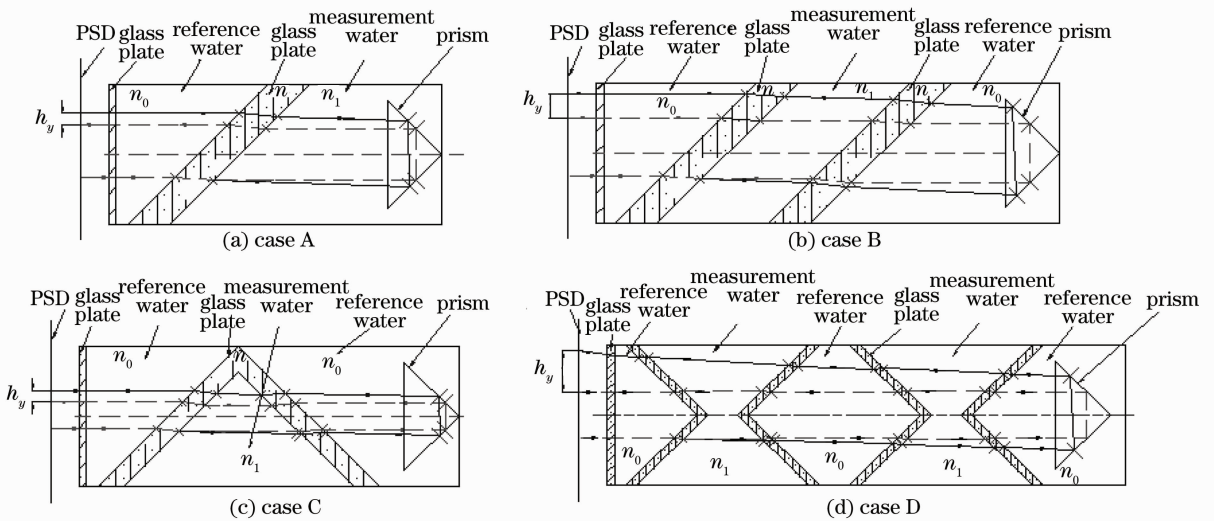


图 1 几种光学折射法盐度检测方案

Fig. 1 Some salinity measurement plans using optics refraction

由此,设计了方案 C,棱镜模型单次折射法及方案 D,棱镜模型多次折射法。设计的棱镜模型单次折射法如图 1(c)所示,两块镜片成棱形,其形成的腔内是测量液(海水),两侧腔内为参考液(蒸馏水),海水密度大,又是棱型形状,故称之为棱镜模型。显然,它对光线的偏折能力要远大于平行平板模型。不过,该方案光线经过直角棱镜反射后再次经过棱镜模型时,偏折角的方向与首次经过该棱镜模型时是相反的,即减小了光点在 PSD 上的偏移量。由此,设计了棱镜模型多次折射法方案,如图 1(d)所示,光线每经过一次棱镜模型,都是向增大偏折角方向偏折,即都使得光点在 PSD 上偏移量增大。图 2 是在仪器外形尺寸相同的情况下,4 种方案光点偏移量与盐度的关系图。4 种方案光点的最大偏移量列于表 1 中,可见方案 D 是方案 A 的 5.4 倍,大大

提高了光点的偏移量,即提高了系统的分辨力。

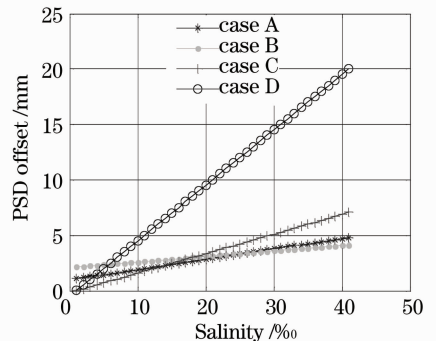


图 2 几种光学折射法盐度检测方案盐度与 PSD 偏移量曲线

Fig. 2 Curves of PSD offset varying with salinity of some plans

表 1 几种方案 PSD 最大偏移量

Table 1 Maximum PSD offsets of some plans

	Case A	Case B	Case C	Case D
Offset /mm	3.7253	2.0008	7.0501	20.0088

### 2.2 光学玻璃倾斜角的选择

光学玻璃倾斜角是系统设计的重要参数。在测量液盐度最大时,对其和 PSD 上的偏移量进行仿真,结果如图 3 所示。可见,倾斜角  $\theta$  基本同偏移量成反比。考虑到 PSD 的长度、光学镜片的长度和实际加工等问题,此处选择  $45^\circ$ 。

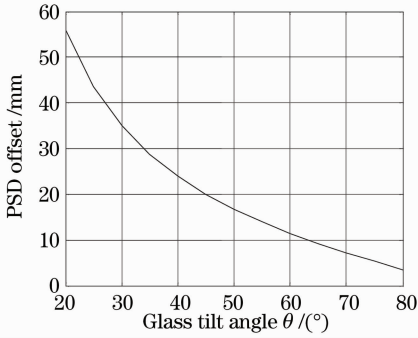


图 3 光学玻璃倾斜角与 PSD 偏移量关系

Fig. 3 PSD offset varying with glass tilt angle

### 2.3 样机的研制

由上所述,研制了系统样机。如图 4 所示,系统由信号处理腔和上、中、下参考腔组成。信号处理腔由激光器、PSD 及信号采集处理模块组成。最上边三块光学玻璃及外壳组成上参考腔,中间 4 块光学玻璃及外壳组成中间参考腔,下边两块光学玻璃、直角棱镜及外壳组成下参考腔。三个参考腔内均注满参考液(蒸馏水)。三个参考腔各自中间间隔部分及防护网组成上、下测量腔。测量液(海水)通过防护网进入该两测量腔内。防护网不仅能有效防止海水杂物进入测量腔,而且能有效克服系统受外界杂散光的影响,提高了系统的环境适应能力。图中实线和虚线分别对应测量腔为参考液和测量液时的光路图。光线每经过一个棱镜模型单元,偏折角都扩大一次。因此,该系统扩大了光线的偏折角,从而提高了系统的分辨力,有效地克服了平行平板模型的不足。

PSD 选择日本滨松 S8543 一维 PSD,其光敏面尺寸为  $0.7\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ ,分辨力为  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,系统分辨力为  $\delta = S / (D / \delta_{\text{psd}}) = 0.0012$ 。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 重复性实验

相同实验条件下,用样机对几种不同盐度的测

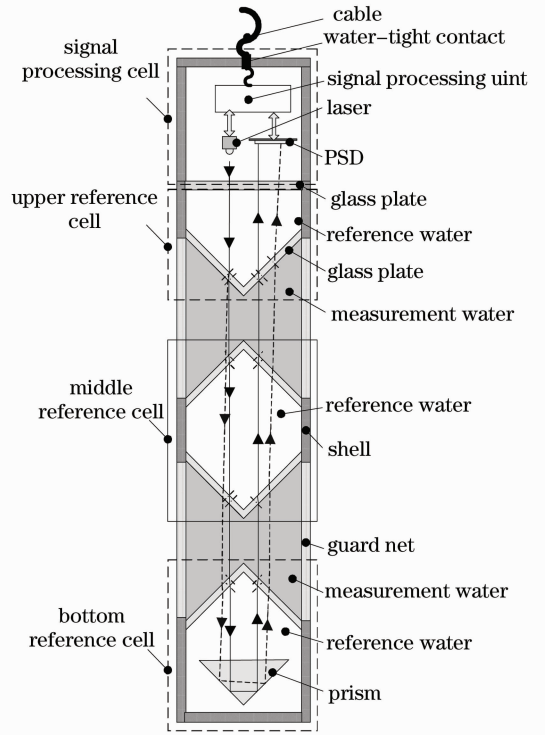


图 4 检测系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of measurement system

量液进行重复性实验,结果如表 2 所示。采样间隔约 400 ms,每种测量液重复采集点数约 500 点,测量过程 3~5 min。由表 2 可知,盐度测量的重复性不大于  $\pm 0.016\%$ 。

表 2 样机重复性实验数据

Table 2 Repeatability measurement data

Sample	PSD /mm		Salinity /‰	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
1#	1.04897	0.00491	18.809	0.0073
2#	-4.02281	0.00189	26.842	0.0034
3#	-5.07463	0.00363	29.588	0.0071
4#	-5.62305	0.00405	30.654	0.0078
5#	-7.15039	0.00226	32.652	0.0044
6#	-8.42107	0.00195	35.332	0.0038

### 3.2 样机与 SYC2-2 实验室比测试验

为检测样机性能,将样机与实验室盐度计 SYC2-2 进行比测实验。将过滤后的海水作为基本样,通过稀释或加盐后配制盐度值约为 10, 20, 30, 35 和 40 的海水水样,编号为 1#~5#。用样机和实验室盐度计同步测量上述水样,分别读取样机的 PSD 输出值和 SYC2-2 的测量值,进行系统校准实验。测量数据如表 3 所示,由此绘制的盐度标定曲线如图 5 所示,可见该标定曲线的  $R^2$  达到 0.9999,线性很好。

表 3 盐度标定数据

Table 3 Salinity calibration data

Sample	SYC2-2 /‰	PSD /mm
1#	10.35	5.0629
2#	19.99	0.0504
3#	30.13	-5.2765
4#	35.62	-8.0969
5#	40.32	-10.3570

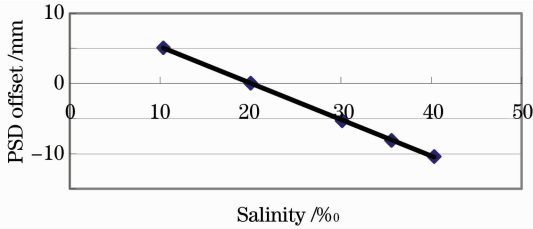


图 5 盐度标定曲线

Fig. 5 Salinity calibration curve

随后进行了盐度测量试验,测量液配置及测量同上,检测数据列于表 4,由表 4 可见盐度检测误差在  $\pm 0.1\%$  以内。

表 4 盐度测量数据

Table 4 Salinity measurement data

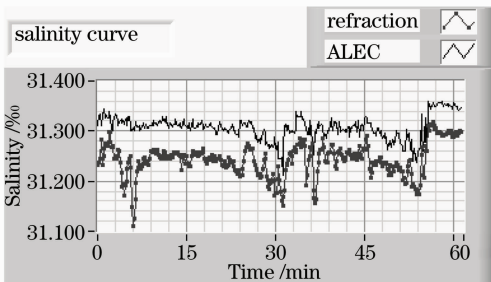
Sample	SYC2-2 /‰	Salinity /‰	Error /‰
1#	15.45	15.44	-0.01
2#	24.51	24.45	-0.06
3#	27.26	27.16	-0.10
4#	28.07	28.09	0.02
5#	31.65	31.62	-0.03

### 3.3 海上实验

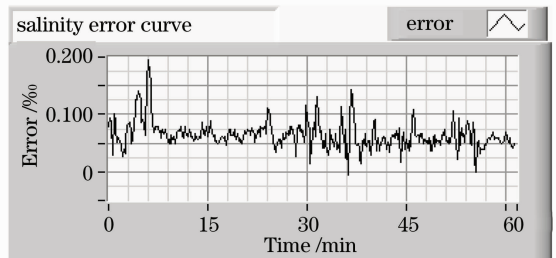
在山东省科学院海洋仪器仪表所海上实验站,将样机与日本 ALEC ACTW-CAR 直读式温盐传感器(其温度分辨力为  $0.001\text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为  $\pm 0.02\text{ }^\circ\text{C}$ ,盐度分辨力为  $0.001\text{ ‰}$ ,精度为  $\pm 0.02\text{ ‰}$ )进行了比测实验。图 6,7 分别为水深约 1 m 和 3 m 的比测实验曲线,(a),(b),(c)分别为盐度比测曲线、盐度比测误差曲线、温度变化曲线。结果表明,样机与 ALEC 传感器变化趋势一致性很好;特别是如图 7 所示,实验 35 min 后,突然出现由水团盐度变化导致的突变的情况,持续时间近 5 min,水温波动范围为  $13.44\text{ }^\circ\text{C} \sim 13.52\text{ }^\circ\text{C}$ ,ALEC 盐度波动范围为  $31.38\text{ ‰} \sim 31.32\text{ ‰}$ ,样机同时观测到这一突变,盐度变化范围为  $31.30\text{ ‰} \sim 31.22\text{ ‰}$ ,更加验证了样机的灵敏度和准确度。由盐度比测误差曲线可知,样机与 ALEC 传感器海上比测误差基本在  $\pm 0.1\text{ ‰}$  以内,具有较高的灵敏度和准确度。

### 3.4 系统误差分析

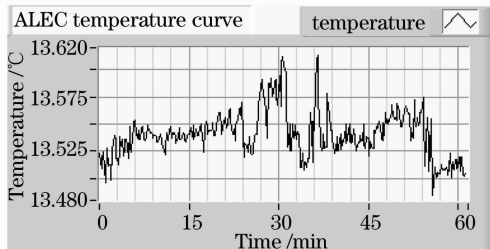
分析造成样机误差的主要原因如下:1)光学玻璃及蒸馏水的折射率由查表得到,与实际值有偏差;2)机械加工及装调误差,理论上要求光路在垂直于光学镜片的平面内,但由于加工误差,光学镜片难免出现偏斜;3)光源波长变化的影响;4)PSD 的非线性、杂散光、光点偏移方向与 PSD 轴线不平行等的影响。



(a) salinity measurement curve



(b) salinity measurement error curve



(c) ALEC temperature measurement curve

图 6 样机与 ALEC 传感器在水深 1 m 处的比测实验

Fig. 6 Contrast measurement between prototype instrument and ALEC sensor in 1 m deep water

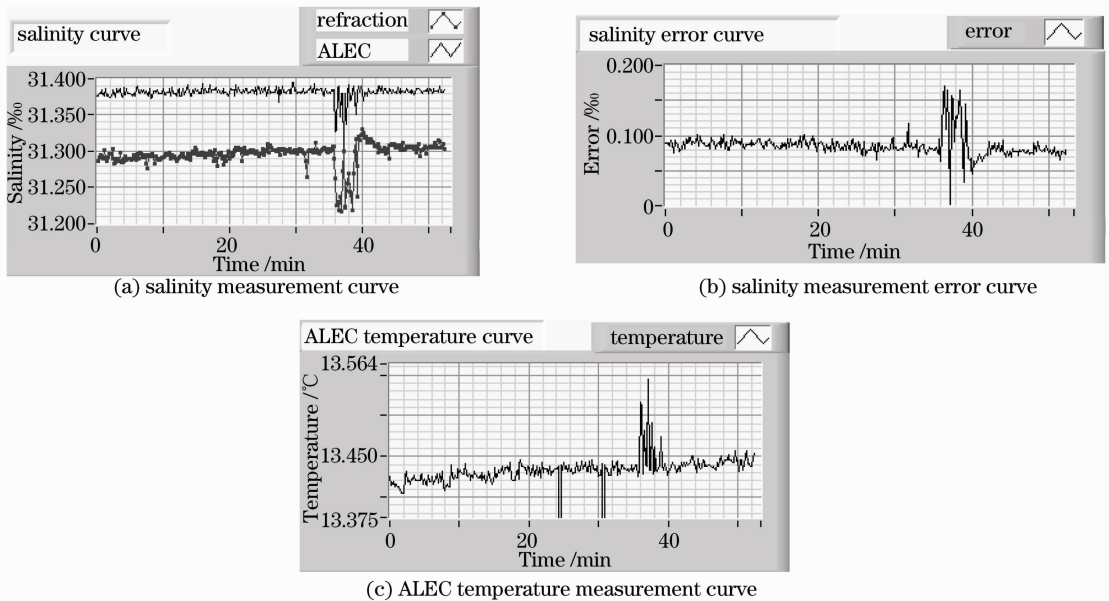


图7 样机与ALEC传感器在水深3m处的比测实验

Fig. 7 Contrast measurement between prototype instrument and ALEC sensor in 3 m deep water

## 4 结 论

综合分析现有光学折射法海水盐度检测精度低的原因后,提出棱镜模型多次折射法检测方案,利用棱镜模型而不是平行平板模型,提高了光线的偏折角,通过设置多个棱镜模块,进一步扩大偏折角,从而大大提高系统的分辨力。设计了光路并进行仿真,研制了样机并进行了海上实验。结果表明,盐度检测的分辨力达 $0.0012\%$ ,重复性不大于 $\pm 0.016\%$ ,比测误差在 $\pm 0.1\%$ 以内。由海上与ALEC温盐传感器比测实验表明,样机与ALEC传感器一致性好,稳定性好,具有较高的灵敏度和准确度。

## 参 考 文 献

- 1 H. Minato, Y. Kakui, A. Nishimoto. Remote refractive index diffractive meter for salinity sensor [J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 1989, **38**(2): 608~612
- 2 Zhao Yong, Liao Yanbiao. Novel optical fiber sensor for simultaneous undersea temperature and salinity measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1241~1244  
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
- 3 Yong Zhao, Yanbiao Liao, Bo Zhang *et al.*. Monitoring technology of salinity in water with optical fiber sensor[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1334~1338
- 4 Zhao Yong, Zhang Bo, Liao Yanbiao *et al.*. Salinity measurement based on position sensitive detector and optical technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1379~1382

- 赵勇, 张博, 廖延彪等. 基于位置敏感器件的光学法盐度检测技术研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1379~1382
- 5 Chen Shizhe, Cao Naifeng, Zhao Yong *et al.*. Research on seawater salinometer based on photoelectric sensor technology [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(12): 1622~1625  
陈世哲, 曹乃锋, 赵勇等. 基于光电传感技术的海水盐度计研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(12): 1622~1625
- 6 Li Tianze, Hu Zhixin, Gu Xiaochen. Optical probe beam deflection measurement method using low noise position sensitive detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 937~940  
李田泽, 胡志新, 顾晓晨. 一种新型液体浓度检测系统研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 937~940
- 7 N. Diaz-Herrera, O. Esteban, M. C. Navarrete. Fiber-optic salinity probe [C]. *SPIE*, 2004, **5502**: 455~458
- 8 Wu Yingcai, Yuan Yifang. Research of a novel principle on seawater salinity measurement based on refractive index change [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 199~202  
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
- 9 Ma Yong, Liang Kun, Lin Hong *et al.*. Study on simultaneous measurement of temperature and salinity based on Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1508~1512  
马泳, 梁琨, 林宏等. 基于布里渊后向散射的海水温度与盐度同步测量研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1508~1512
- 10 Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian *et al.*. Further study on calculating the density of seawater with polarized light technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2452~2457  
孙仲秋, 赵云升, 阎国倩等. 利用偏振光技术计算海水密度的深入研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2452~2457
- 11 Zhao Yong, Hu Kaibo, Chen Shizhe *et al.*. Recent development of the seawater salinity measurement technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(11): 38~44  
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