

船载拖曳式光纤温度剖面测量系统研究

张登攀¹, 冯盼^{1,2}, 王永杰², 张旭², 任强³, 魏传杰³

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;

3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:针对海洋温度剖面高时空分辨率、实时连续测量的要求,提出了船载拖曳与全光纤温度链相结合的新型测量系统。通过对光纤光栅的特殊封装和标定测试,FBG温度传感器的灵敏度和响应时间分别达到28.5 pm/°C和214.8 ms,满足浅表层海域的测试要求。设计并制备200 m长的温度拖曳阵,配合甲板单元的解调设备和绞车系统,于黄海部分海域完成水深70 m的拖曳试验。分析温度剖面测试结果,温度传感器与SBE56(标准传感器,美国海鸟生产)具有高度一致性,同时测量精度优于0.1 °C,具有较高的实用价值。

关键词:光纤光栅;光纤传感器;船载拖曳式;海洋温度剖面;海上试验

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.018

Research on shipborne towed fiber temperature profile measurement system

ZHANG Deng-pan¹, FENG Pan^{1,2}, WANG Yong-jie², ZHANG Xu², REN Qiang³, WEI Chuan-jie³

(1. School of Mechanical & Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Aiming at the requirement of high temporal-spatial resolution and real time continuous measurement of ocean temperature profile, a new measurement system of shipborne towed and all fiber temperature chain is presented. The sensitivity and response time of FBG temperature sensor reach 28.5 pm/°C and 214.8 ms respectively through special encapsulation and calibration tests of fiber Bragg grating, which meet the test requirements of shallow surface at sea area. 200 m temperature towed array was designed and prepared, and the experiments were performed with demodulation equipment and winch system of deck units in parts of yellow sea whose depth is 70 m. The test results of temperature profile show that the temperature sensors are highly consistent with the SBE56 (standard sensors produced by the United States Seabirds) and the measurement accuracy is better than 0.1 °C. This measurement system has high practical value.

Key words: fiber Bragg grating; fiber sensor; shipborne towed; ocean temperature profile; sea test

1 引言

海水的温度是海水最基本也是非常重要的物理参量,对摸清海洋的动力环境和气候,发展渔业捕捞,开展海军军事训练等有着重要的指导意义。传

统的测量海水温度传感器的敏感元件都是利用铂电阻或热敏电阻,优点是稳定可靠、精度高,但也存在非线性较大、易受海水腐蚀以及水下安全性不足等问题^[1-2]。作为一种新型的光纤传感器,光纤布拉

基金项目:国家自然科学基金(No. 41276094);中国科学院战略性先导科技专项 A(No. XDA110-40201)资助。

作者简介:张登攀(1975-),男,副教授,博士,主要从事精密测量技术及仪器的研究。

通讯作者:王永杰(1979-),男,副研究员,博士,主要从事光纤传感技术与应用研究。E-mail:wyj@semi.ac.cn

收稿日期:2016-01-25; **修订日期:**2016-03-05

格光栅 (FBG) 传感器可以使这些问题迎刃而解。光纤传感自身具备高灵敏度、抗电磁干扰、本征绝缘和便于规模组阵以便对海水进行分布式测量等优点^[3-4]。

为了使传感器方便快速地测量海水温度剖面,需要在船舶上拥有相应的搭载设备和系统。目前,可在船舶上进行海水温度剖面测量的设备有定点 CTD、XCTD、MVP 和 UCTD 等^[5-10]。由调研得知,定点 CTD 剖面仪必须停船使用,浪费船时,效率低下;XCTD 即船用投弃式温盐深测量仪,虽可在船只航行中使用,但一次只能获得一个测点的温度剖面,且测量完毕后被遗弃在海洋中,不仅浪费成本而且污染海洋环境;MVP 和 UCTD 为走航式海洋多参数剖面测量系统,是近几年发展起来的新型海洋调查设备,其共同优点是传感探头可回收再利用,并且在船舶走航运行时,不妨碍船上其他测量设备的运行使用,有良好的应用前景,然而它们也存在一些缺点,如前者系统复杂、体积庞大、维护成本高,后者自动化程度较低且不能实时读取数据。

基于光纤传感技术本征绝缘、易于组网、综合成本低等优势特点,结合 UCTD 等走航式测量系统,研制出一种车载拖曳式海洋温度剖面连续测量系统,该系统搭载光纤温度传感器阵列,可随船舶运动实现海面至水下几百米温度垂直剖面的高密度、实时、连续测量,从而获取较高时空分辨率的海洋温度数据资料。试验设计了 200 m 长的 FBG 温度传感器阵列,搭配绞车和解调单元,首次对我国黄海部分海域的海水温度进行了分布式测量,并对测量结果进行分析总结,得出系统具有实际应用价值的结论。

2 系统构成

车载拖曳式海洋温度剖面连续测量系统主要由干、湿端两大部分组成,第一部分为湿端的水下传感器链路,第二部分由船舶甲板面的解调终端和绞车系统组成干端。水下的传感器链路由 40 支 FBG 温度传感器链和 200 m 长的钢缆集成,其中温度传感器链通过波分、空分复用相结合的方式等间隔串联组合,链路末端挂载 120 kg 铅鱼以降低缆深比;解调终端通过波长解调的方式实时读取温度数据,具体包含光源模块、波长解调模块、光开关及驱动电路、工控机及附属元器件等部分;绞车主要由卷筒、机架、排缆装置、变频控制柜和电机组成,以实现传感器链可调速地收放功能。测量系统组成结构如图 1 所示。

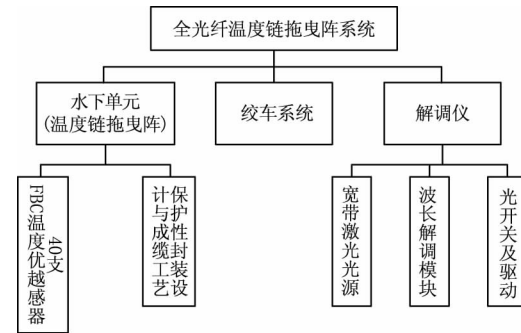


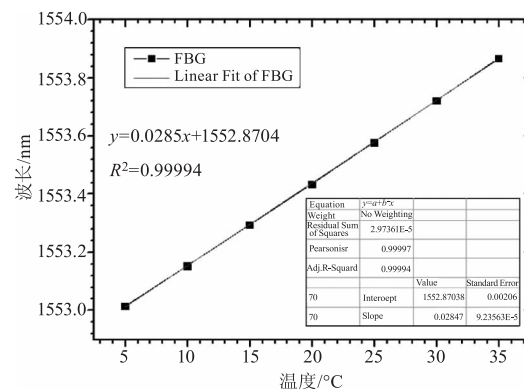
图 1 系统示意框图

Fig. 1 The schematic diagram of system

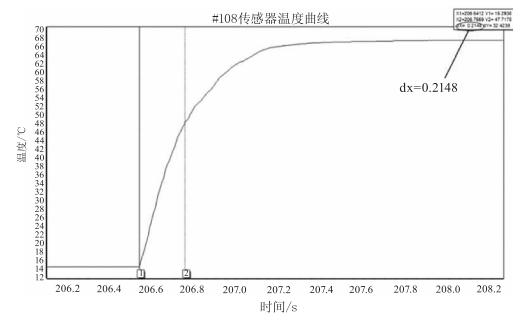
3 光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感器是系统测试的前端,为了对海水温度剖面进行高精度、高质量的数据采集,必须通过有效封装来提高传感器的灵敏度、响应时间以及解决温度和压力的交叉敏感问题^[11-13]。

封装致温度增敏的方法多种多样^[11],本试验采用高热膨胀系数的聚合物胶增敏的方式,通过聚合物受热膨胀加大光纤光栅波长偏移量来达到增敏目的,另外,通过采取特殊的封装固化工艺,不仅有效地防止光栅啁啾,还消除了压力的影响。经标定测试,传感器的灵敏度达到 $28.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,响应时间达到 214.8 ms ,符合拖曳应用需求。灵敏度和响应时间的测试结果如图 2 所示。



(a) 灵敏度测试结果



(b) 响应时间测试结果

图 2 灵敏度和响应时间的测试结果图

Fig. 2 The test results of sensitivity and response time

温度标定测试依据 GB/T 23246 - 2009 进行,其中参考传感器选用 SBE56。测试过程中,光纤温度传感器和 SBE56 一起放进恒温水槽中对 2 ℃ 到 35 ℃ 区间上的 8 个温度点进行测量,且为了提高测

量精度,要求在每个温度点上的稳定时间均不少于 1 h,待完全稳定后列出传感器的各个温度点在单位时间(1 min)内的平均波长值,从而得出温度和波长变化的对应关系,数据如表 1 所示。

表 1 光纤光栅中心波长与温度关系表

Tab. 1 Wavelength under different temperature of fiber Bragg grating (nm)

	2 ℃	5 ℃	10 ℃	15 ℃	20 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃
1	1553.0403	1553.1158	1553.2441	1553.3739	1553.5046	1553.6356	1553.7677	1553.9000
2	1553.0403	1553.1158	1553.2440	1553.3740	1553.5045	1553.6355	1553.7678	1553.8998
3	1553.0402	1553.1158	1553.2441	1553.3741	1553.5045	1553.6356	1553.7675	1553.8999
4	1553.0402	1553.1160	1553.2441	1553.3742	1553.5045	1553.6357	1553.7677	1553.8999
.....								
.....								
57	1553.0402	1553.1158	1553.2439	1553.3739	1553.5044	1553.6355	1553.7676	1553.8999
58	1553.0403	1553.1157	1553.2441	1553.3740	1553.5047	1553.6357	1553.7676	1553.9000
59	1553.0403	1553.1157	1553.2442	1553.3740	1553.5046	1553.6356	1553.7675	1553.9000
60	1553.0402	1553.1157	1553.2441	1553.3740	1553.5044	1553.6355	1553.7676	1553.9000
平均值	1553.0402	1553.1158	1553.2441	1553.3740	1553.5045	1553.6356	1553.7677	1553.8999

通过对数据进行二次曲线拟合,得出传感器中心波长和温度的线性关系曲线,如图 3 所示,另外为了确定波长与温度的对应关系式,需要建立二次函数模型 $y = B_2x^2 + B_1x + \text{Intercept}$,其中 x 表示中心波长, y 表示温度, B_2 、 B_1 和 Intercept 分别表示二次项系数、一次项系数和常数项,通过 Levenberg-Marquardt 算法可以求出这些待定参数,其取值如下:

$$\begin{cases} B_2 = -0.94142 \\ B_1 = 2963.12041 \\ \text{Intercept} = -2331210 \end{cases}$$

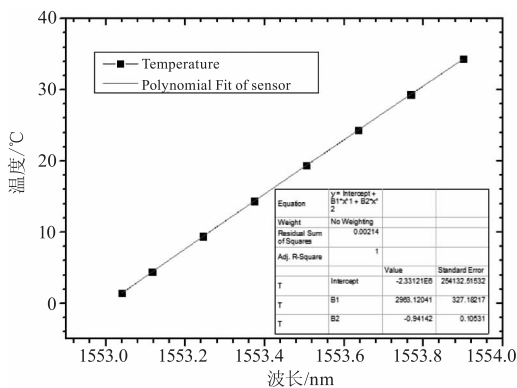


图 3 波长与温度拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve between wavelength and temperature

按照此方法,其他温度传感器均可以求得各自的二次项等系数,将这三个系数带入解调系统的配置文件中,就可以根据解调出来的中心波长实时读取温度值,然后通过传感器测量的温度与标准传感器(SBE56)所测温度差值的比对,剔除误差相对较大的传感器,最后将那些误差小、稳定性好的传感器挑选出来串接成阵列,用于温度剖面测量试验。

4 解调终端

作为甲板单元,绞车和解调终端是系统不可或缺的两个部分。其中绞车主要实现对传感器链的下海布放和回收功能,而解调部分作为整个测量系统的终端^[14],通过对传感器波长的解调,将得到的海水温度数据实时显示并存储起来。

整个解调终端分为硬件和软件两部分。硬件部分的光源模块采用 ASE 宽带光源,光开关选用 8 通道,解调模块作为核心器件,其工作在波段 C + L 波段,波长分辨率达到 0.1 pm,波长精度达到 1 pm,采样速率为 1 Hz;软件部分则主要实现光谱扫描、波长/温度的在线监测和历史数据导出这三个功能,其主要界面如图 4 所示。

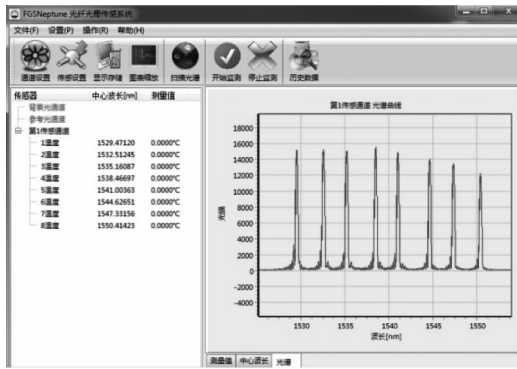


图 4 解调系统软件显示界面

Fig. 4 The software interface of demodulation system

5 海上试验与数据分析

经过实验室标定,挑选出稳定性良好的 40 支温度传感器(优于 GB/T 23246 - 2009 二级标准),分别将其以等间隔的形式串接成分布式光纤光栅传感器阵列,总长为 200m。最后和钢丝绳一起编织成链缠绕在绞盘上,如图 5 所示。

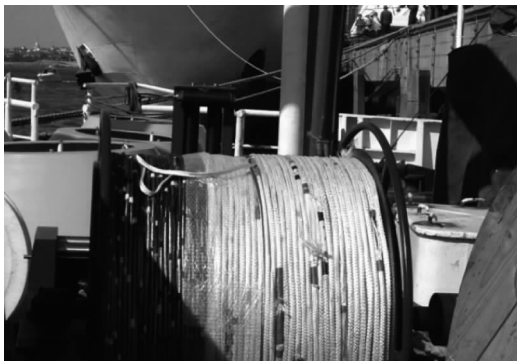


图 5 编织完成后的传感器链

Fig. 5 The woven sensor chain

海上拖曳试验于 2015 年 10 月在中国黄海部分海域(水深约为 70 m)进行。通过绞车和滑轮装置将 200 m 长的传感器阵列用铅鱼缓慢下放入海水中,特别注意的是,为验证光纤温度传感器的精度,于拖曳链的前端每间隔 10 m 处的光纤温度传感器上固定一个 SBE56,用于比对测试。温度传感器与 SBE56 捆绑图如图 6 所示。



图 6 温度传感器与 SBE56 捆绑图

Fig. 6 The bundled figure of temperature sensor and SBE56

当传感器链布放结束后,开始传感器链的拖曳试验。试验船速为 3 节到 10 节,并保证在每个航速上稳定足够的时间。在拖曳的过程中,传感器链通过跳线连接解调终端,通过解调软件在线实时监测每个传感器的波长/温度数据的变化情况并对历史数据进行存储。

拖曳结束后,将每个传感器的历史温度数值与捆绑的 SBE 温度数值相比较,如表 2 所示,如果进

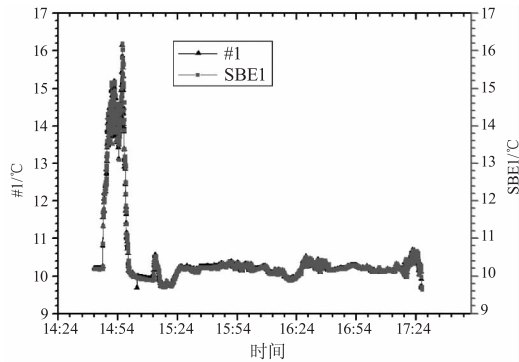
表 2 SBE 与温度传感器的部分比测数据

Tab. 2 Parts of the comparative data between SBE and temperature sensor

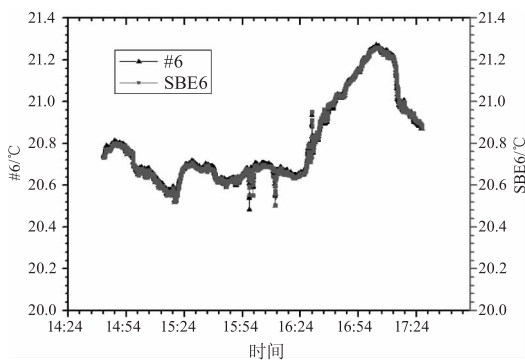
#1	SBE1	#1 - SBE1	#5	SBE5	#5 - SBE5	#6	SBE6	#6 - SBE6
9. 97822	9. 9639	0. 01432	19. 54796	19. 5312	0. 01676	20. 94108	20. 957	-0. 01592
9. 97996	9. 9573	0. 02266	19. 5542	19. 5383	0. 0159	20. 93178	20. 9546	-0. 02282
9. 98067	9. 9629	0. 01777	19. 56355	19. 5216	0. 04195	20. 92442	20. 9515	-0. 02708
9. 99246	9. 9726	0. 01986	19. 56148	19. 5099	0. 05158	20. 92768	20. 9432	-0. 01552
9. 98074	9. 9717	0. 00904	19. 54397	19. 5307	0. 01327	20. 92429	20. 9472	-0. 02291
9. 9809	9. 9494	0. 0315	19. 55537	19. 532	0. 02337	20. 90931	20. 9452	-0. 03589
9. 97427	9. 9579	0. 01637	19. 56205	19. 535	0. 02705	20. 90629	20. 9284	-0. 02211
9. 975	9. 9554	0. 0196	19. 56448	19. 5376	0. 02688	20. 89759	20. 9174	-0. 01981
9. 9752	9. 9522	0. 023	19. 5672	19. 5349	0. 0323	20. 89971	20. 9126	-0. 01289
9. 97202	9. 9516	0. 02042	19. 56692	19. 5137	0. 05322	20. 8932	20. 9126	-0. 0194

行曲线拟合,也可以得到传感器和 SBE 随时间推移的分布曲线以及测量误差曲线,如图 7 和图 8 所示。

通过观察温度传感器与 SBE 标准传感器的比测数据表以及它们的测量误差曲线图,不难看出温度传感器与 SBE 之间的测量误差小于 0.1 °C;而温度传感器和 SBE 的比测曲线也显示二者具有较高的测温一致性。



(a)



(b)

图 7 温度传感器与 SBE 的比测曲线

Fig. 7 The comparative figures of temperature sensor and SBE

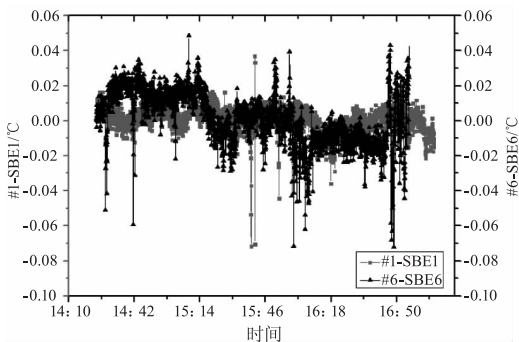


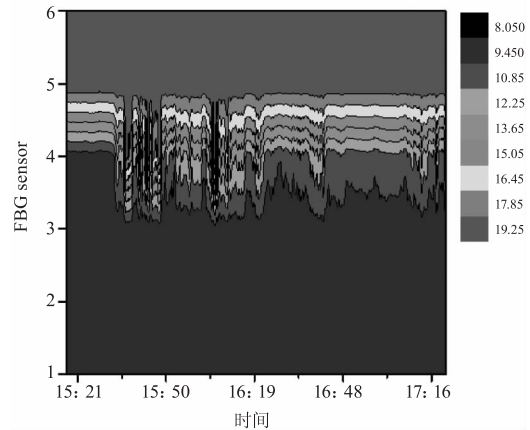
图 8 温度传感器与 SBE 的测量误差

Fig. 8 The measurement errors of temperature sensor and SBE

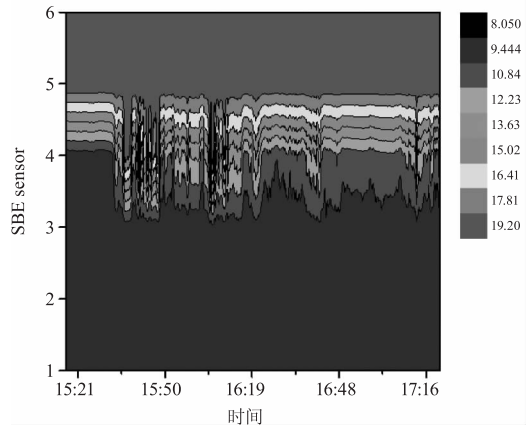
由于拖曳所在海域水深(约 70 m)条件的限制,当船速大于 5 节时会导致拖曳链上浮,从而影响温度剖面的测量深度。文中选取 3 节和 5 节船速下的

测量数据,对比分析其中六支传感器(左)及其对应 SBE56(右)所测量的温度剖面。其温度剖面如图 9 和图 10 所示。

图 9 和图 10 所示的温度剖面图,横轴代表时间,纵轴分别代表 1~6 支 FBG 温度传感器和 SBE56 标准传感器,它们在海水中分布由深及浅。从图中可以看出 5 节船速下的温度剖面高温区域明



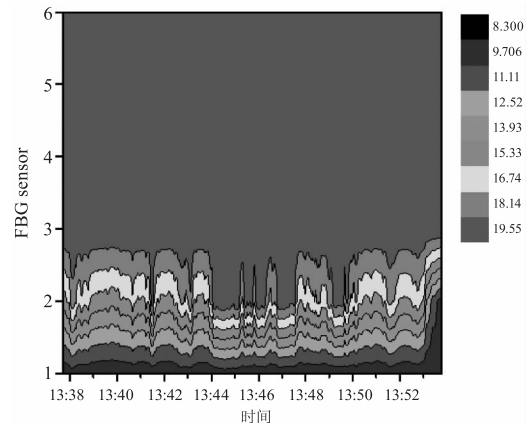
(a)



(b)

图 9 3 节船速下的温度剖面

Fig. 9 The temperature profile under a speed of three knots



(a)

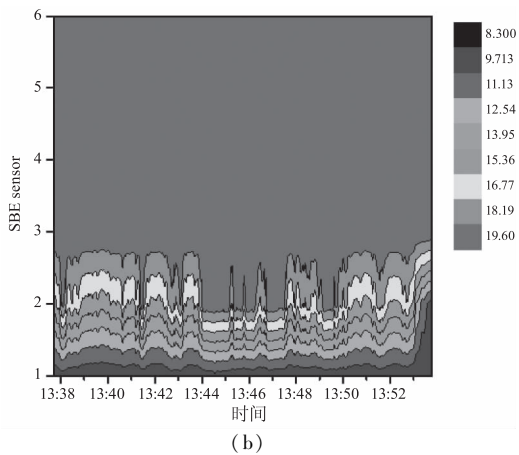


图10 5节船速下的温度剖面

Fig. 10 The temperature profile under a speed of five knots

显较多,这正是高船速导致拖曳链上浮的结果;6支传感器分别代表不同深度,可以看出同一时刻不同深度下温度分布有所不同,这是受到温盐跃层的影响,即在垂直方向上温度和盐度等参数随深度的变化而变化;另外,在同一深度不同时刻(船只所处不同海域)的情况下,温度分布变化较大,经分析,认为是海洋冷、热水团相互交叠汇聚的结果;从FBG温度传感器和SBE56的温度剖面对比图来看,这两个传感器一致性非常好,测量误差小,并且都能够将温度跃层准确测量,从而验证了FBG温度传感器满足测量要求,以及船载拖曳式温度剖面测量系统的稳定可靠性。

6 结 论

基于光纤传感,针对传统温度剖面测量设备效率低下等缺点,提出一种新型的船载拖曳式温度剖面测量系统,该系统搭载光纤光栅分布式传感阵列,配合甲板单元的绞车系统和解调终端,随船舶运动实现海面至水下温度垂直剖面的高时空分辨率、实时连续观测。研制了200 m的全光纤温度链,并进行海上试验,较好地实现了温度剖面的测量。与现有的海洋测量仪器相比较,本文所研究的测量系统不仅节约成本、效率提高,而且测量精度优于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,在海洋温盐深测量方面具有较高的实用价值。

参考文献:

[1] WANG Jing, WANG Xiangnan. Optical fiber sensor for measuring temperature and pressure of sea water [J]. Ocean Technology, 2006, 25(2): 21-22. (in Chinese)

- 王晶,王项南.用于测量海水温度和压力光纤传感器[J].海洋技术,2006,25(2):21-22.
- [2] CHEN Shizhe, LV Jingsheng, WANG Xiaoyan, et al. Study on ocean temperature and depth measurement system based on fiber Bragg grating [J]. Laser Technology, 2010, 34(5): 581-583. (in Chinese)
陈世哲,吕京生,王晓燕,等.光纤布拉格光栅海水温度深度检测系统研究[J].激光技术,2010,34(5):581-583.
- [3] Wang Yongjie, Dai Xin, Zhao Qiang, et al. Based on fiber grating the high sensitivity all optical fiber CTD [C]. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012.
- [4] ZHAO Qiang. Study on marine CTD detecting technique based on optical fiber grating [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
赵强.基于光纤光栅的海洋温盐深探测技术研究[D].长春:长春理工大学,2013.
- [5] ZHANG Zhaoying, WANG Yunquan, WU Mingyu, et al. Application of high accuracy CTD profiler [J]. Ocean Technology, 2002, 21(2): 1-7. (in Chinese)
张兆英,王云泉,吴明钰,等.高精度CTD剖面仪应用研究[J].海洋技术,2002,21(2):1-7.
- [6] Shoichi Kizu, Hiroji Onishi, Toshio Suga, et al. Evaluation of the fall rates of the present and developmental XCTDs [J]. Deep-Sea Research, 2008, 55(4): 571-586.
- [7] REN Qiang. Research on the application of Moving Vessel Profile (MVP) in yellow sea cold water mass [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
任强.黄海冷水团海域走航式剖面测量系统(MVP)的应用研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [8] Daniel L Rudnick, Jochen Klinke. The underway conductivity-temperature-depth instrument [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 24(11): 1910-1923.
- [9] Song Xiangzhou, Li Hui, Lin Xiaopei, et al. Sea experiments of the underway conductivity-temperature-depth prototype made in China [J]. Oceanic and Coastal Sea Research, 2009, 8(4): 409-415.
- [10] REN Wei, LI Hui, LI Yongqi, et al. Introduction of UCTD and its key technologies [J]. Ocean Technology, 2008, 27

- (1);8-10. (in Chinese)
任炜,李晖,李永奇,等. UCTD 系统及其关键技术介绍[J]. 海洋技术,2008,27(1);8-10.
- [11] LI Yulong, WEN Changjin, ZHAO Cheng. Research status of the sensitivity enhancing and encapsulation technologies & devices of the fiber Bragg grating[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(11):1203-1211. (in Chinese)
李玉龙,温昌金,赵诚. 光纤光栅增敏封装工艺及装置研究现状[J]. 激光与红外, 2013, 43(11):1203-1211.
- [12] Dengpan Zhang, Jin Wang, Yongjie Wang, et al. A fast response temperature sensor based on fiber Bragg grating[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(7):1-4.
- [13] WANG Wenzhen, LIU Yueming. Research on temperature cross sensitivity compensation technology of FBG strain sensor[J]. Electro-optic Technology Application, 2014, 29(2):51-56. (in Chinese)
王雯珍,刘月明. FBG 应变传感器温度交叉敏感补偿技术研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2):51-56.
- [14] ZHANG Dengpan, WANG Jin, WANG Yongjie. Real-time calibration technique of fiber Bragg grating demodulation system based on FBGA[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7):825-829. (in Chinese)
张登攀,王璿,王永杰. 基于 FBGA 光纤光栅解调系统的实时校准方法[J]. 激光与红外, 2015, 45(7):825-829.