

## 全光纤海洋温深剖面连续测量试验研究

张登攀<sup>1</sup>, 冯盼<sup>1,2</sup>, 王永杰<sup>2</sup>

(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)

**摘要:** 为了实现对海洋温度剖面进行高时空分辨率且连续测量的目的, 研制出一种将船载拖曳应用与光纤传感技术相结合的新型测量系统。该系统首次将光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器集成到温度拖曳链中, 从而获得深度信息并判断拖曳链姿态。文中主要讨论了该拖曳温深链系统的研制及海试情况, 包含系统装备, 压力传感器的实验室标定, 压力传感器的海上静态和动态比测试验。通过分析试验数据, 压力传感器与 ALEC Compact-TD 的相关系数达到 0.999 837, 测量误差小于 0.1 m, 进一步验证了拖曳温深链系统已初步具备实用性。

**关键词:** FBG 压力传感器; 拖曳系统; 海上试验; 比测

**中图分类号:** TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0712002

## Experimental research on continuous measurement of all fiber optic ocean temperature–depth profile

Zhang Dengpan<sup>1</sup>, Feng Pan<sup>1,2</sup>, Wang Yongjie<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** In order to accomplish the high temporal–spatial resolution and continuous measurement of the ocean temperature–depth profile, a new measurement system of combining ship towing application and optical fiber sensing technology was developed. The fiber Bragg grating (FBG) pressure sensors were integrated into the temperature drag chain for the first time, so as to obtain the depth information and judge the drag chain attitude. The development of the towing temperature–depth chain system and the situation of the sea trial were introduced, including the system equipment and the laboratory calibration results of pressure sensor before sea trial and static and dynamic test of pressure sensor at sea. The correlation coefficient of pressure sensor and ALEC Compact–TD reaches 0.999 837 and the measurement error was less than 0.1 m by analyzing the test data, which further verifies that the towing temperature–depth chain system has been initially available.

**Key words:** FBG pressure sensor; towed system; sea experiments; comparative tests

收稿日期: 2016–11–10; 修订日期: 2016–12–20

基金项目: 国家自然科学基金(41276094); 中国科学院战略性先导科技专项 A(XDA110–40201)

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方面的研究。Email: albert\_12@126.com

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方面的研究。Email: wyj@semi.ac.cn

## 0 引言

海水的温度和深度是海洋最基本的物理参数,通过观测海水温度随深度的变化来获取温深剖面数据是海洋调查研究的重要手段<sup>[1-3]</sup>。然而,依靠投弃式剖面仪<sup>[4-5]</sup>等传统的测量方法,仅能获取低时空分辨率的海洋动力环境参数,这对开展大洋中尺度涡旋、锋面及内波的研究来说是远远不够的。

该课题研究的船载拖曳式光纤温深剖面连续测量系统能够很好地解决上述问题。该系统依托光纤传感自身的本征绝缘、便于组阵、分布式测量以及综合成本低等优点<sup>[6]</sup>,通过将若干支温度传感器和压力传感器集成在流线型的拖曳缆中,再配合甲板单元的解调设备和绞车系统,随船舶运动实现海面至水下几百米温度垂直剖面的高时空分辨率、实时连续观测。

在中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA110-40201)的支持下,该系统经过多次改进,突破相关技术壁垒,完成了 2015 年秋季的规范化海上试验(依托“科学三号”海洋综合调查船),完成了温度传感器的比对测试,验证了温度传感器准确的测量性能<sup>[1-2]</sup>。在过往试验的基础上,课题组完成了 200 m 温深拖曳链的制备,参加了 2016 年夏季航次的海上试验,目的是检验压力传感器的测量性能,并进一步验证整个系统的软硬件运行可靠性和适用性。

## 1 试验装备

船载拖曳式光纤温深剖面测量系统由甲板面的解调终端设备、绞车和水下的传感器链路三部分组成。如图 1 所示,其中水下传感链部分由 FBG 温度传感器、FBG 压力传感器以及传输光缆、抗拉钢丝绳索、配重铅鱼等部分组成。

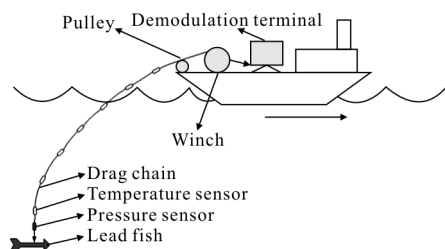


图 1 系统工作示意图

Fig.1 Schematic diagram of system work

整个系统的作业过程如下:首先在传感链末端绑上配重铅鱼,达到对传感链进行沉载和稳定投放的目的,并在船艏处安装导向滑轮,使传感链绕过滑轮,避免拖曳过程中与船体发生剧烈摩擦损坏拖曳链。然后启动绞车,释放传感链,根据所在海域的水深情况确定放缆的距离,同步观察深度传感器以避免触底。接着让船舶以 3、5、7 节的速度航行,在线监测采集的数据,判断传感器的运行情况,并记录好温度场发生变化的各个时间节点。最后,当整个数据采集过程结束后,断开传感链与解调终端的连接,并启动绞车对传感链进行回收。传感链、绞车和滑轮等设备实物如图 2 所示。



图 2 船载拖曳系统的海上试验现场

Fig.2 Offshore test site of the ship towing system

## 2 光纤光栅压力传感器

### 2.1 基本原理

光纤 Bragg 光栅(FBG)压力传感器是系统测试的前端,其作用是实时测量海水深度,进而达到精确定位温度传感器和判断拖曳链水下姿态的目的。然而,裸光纤光栅的压力灵敏度较低(约为 0.003 pm/MPa),若要对海水深度高分辨率测量的目标,必须对光纤光栅进行压力增敏封装。

文中采用结构增敏技术<sup>[7-10]</sup>,研制了一种基于弹性膜片封装的光纤光栅压力传感器,通过封装结构设计、抗水流和震动设计,达到直径小(约 10 mm)、体积小、高灵敏度、一致性高等要求。FBG 压力传感器利用 FBG 的谐振波长对应变敏感的原理,通过弹性膜片,将水压变化量转化为 FBG 轴向应变,通过检测相应的波长变化,还原海水压强信号的信息。FBG 谐振波长的改变量  $\Delta\lambda$  与光纤轴向应变  $\varepsilon_f$  的关系为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta\lambda=(1-p_e)\Delta\lambda_B\varepsilon_f$$

式中: $\lambda_B$  为谐振波长; $p_e$  为光纤的弹光系数。

如图 3 所示,当处于海水中的压力传感器受到水压  $P$  作用时,弹性膜片将发生变形体现在光纤轴向应变上并引起 FBG 中心反射波长的偏移,通过波长解调得到海水压强的大小,压强与中心反射波长的偏移量为线性关系。最后根据压强与水深的关系式换算出传感器在水下的深度值。光纤光栅压力传感器实物如图 4 所示。

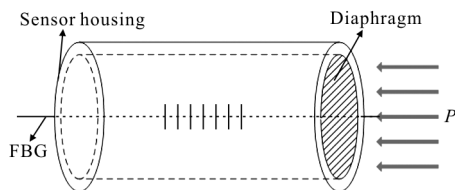


图 3 光纤光栅压力传感器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the FBG pressure sensor structure

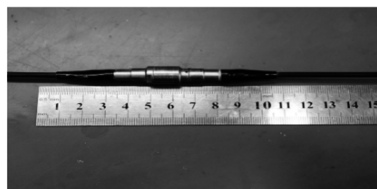


图 4 光纤光栅压力传感器实物图

Fig.4 Physical diagram of FBG pressure sensor

### 2.2 实验室标定

为了确定压力传感器灵敏度,获取其所测压力值与光纤光栅中心波长的对应关系,在实验室进行标定测试则是一项必不可少的环节。压力传感器的标定是在压力罐中进行的,共选取 11 个压力点分别进行加压和减压测试,打压范围为 0~3 MPa,步长为 0.3 MPa。用 Origin 数据处理软件拟合得到图 5 所示结果,计算表明灵敏度达到 552 pm/MPa,是裸光纤光栅压力灵敏度的 184 倍,其线性拟合度  $R^2$  也高达 0.999 96,重复性较好。

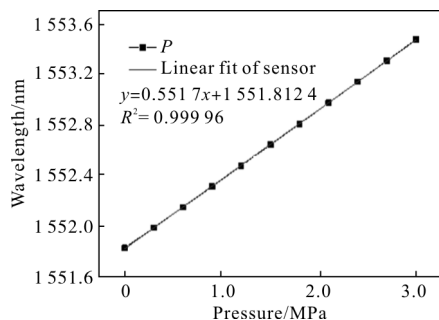


图 5 压力传感器的灵敏度测试结果

Fig.5 Sensitivity test results of pressure sensor

## 3 海上试验与数据分析

此次海上的拖曳试验安排在北黄海的计划站点进行,主要包括压力传感器的静水比测和走航拖曳的比测试验。静水比测试验的目的是通过与 ALEC Compact-TD(测深精度为  $\pm 0.3\%$  FS)比测,检验在 0~5 m 的下降过程中压力传感器测量深度数据的准确性。走航拖曳试验的目的是检验在船速不等的情况下,压力传感器与标准传感器的测深一致性,以及与其温补传感器的响应一致性,并进一步检验温度传感器的测温稳定性和整个系统设备在海上的运行情况。

### 3.1 静水比测试验

静水比测试验是在船舶停靠站位后,首先将光纤光栅压力传感器(编号为 13#)与 ALEC 标准传感器捆绑一起手动下放至水下 5 m 的位置,稳定一段时间后,然后再手动提拉传感器至表层水位置,以比测两者之间的误差(图 6 右纵坐标)。

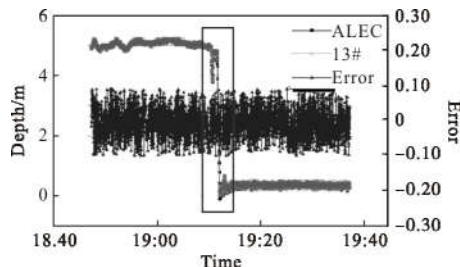


图 6 手动提拉比测实验

Fig.6 Comparative test of manual lifting

将上图中从水下 5 m 到水表层的变化部分的数据进行截取(表 1),经数据分析软件处理后得到图 7。

由表 1 和图 7 可以看出,ALEC 和光纤光栅压力传感器(图 7 左纵坐标)的测深曲线基本吻合,通过 Excel 中 CORREL 函数可以计算出两者的相关系数为 0.999 837,具有较高的相关一致性。从海水表面到水下 5 m 的深度,比较压力传感器与 ALEC 的测量数据,两者的测量误差小于 0.1 m(图 7 中右纵坐标)。试验表明光纤光栅压力传感器的静水测量性能较好,测量数据能够准确的反映海水深度的变化情况。

表 1 ALEC 与压力传感器的部分比测数据

Tab.1 Partial comparative test data of ALEC and pressure sensor

Time	ALEC/m	13#/m	Error
19:10:00	4.91	4.975 897	-0.065 9
19:10:01	4.9	4.970 568	-0.070 57
19:10:02	4.88	4.948 371	-0.068 37
19:10:03	4.89	4.971 843	-0.081 84
.....			
.....			
19:12:57	0.44	0.427 539	0.012 461
19:12:58	0.44	0.363 106	0.076 894
19:12:59	0.31	0.367 635	-0.057 64
19:13:00	0.47	0.438 279	0.031 721

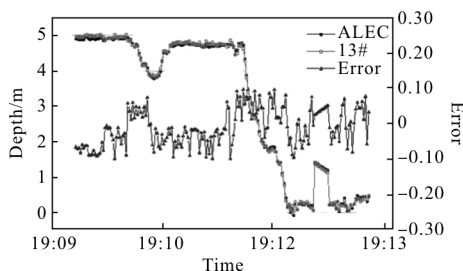


图 7 静水比测结果的局部放大

Fig.7 Local enlarged drawing of hydrostatic test result

3.2 走航拖曳试验

由于试验海域水深(约 40 m)条件的限制,且测试水域渔网密布,为了安全起见,总长 200 m 的拖曳链仅下方 40 m 左右能够下水工作,其中温度传感器 8 支,压力传感器 1 支。试验中设定船舶拖曳速度为 7 节、5 节和 3 节,整个拖曳过程持续一小时左右。为了确定拖曳过程中压力传感器(编号为 13#)的测量可靠性,在其附近绑上 ALEC Compact-TD 作为参照比对。试验中,采用编号为 51# 的光纤光栅温度传感器作为压力传感器的温补传感器,以解决其对温度的交叉敏感问题<sup>[11-12]</sup>。

由图 8 和表 2 可知,光纤光栅压力传感器在拖曳过程中深度测量准确,与标准传感器 ALEC 测得的深度数值一致性较强(图 8 左纵坐标),除了在温度锋面部分,由于压力传感器(13#)同参考温度传感器(51#)的响应时间不一致造成短暂的压力误差偏

大,其他部分均低于 0.1 m(表 2),给拖曳过程中的在线监测给予了准确的触底预警。误差的其它原因还可能在于压力传感器和温度传感器不是在同一空间位置,特别在冷水团锋面,温度梯度大;再一个是传感器在拖曳过程中,流体流过压力传感器的开口会有一些的影响,这在今后都需要进一步分析优化。

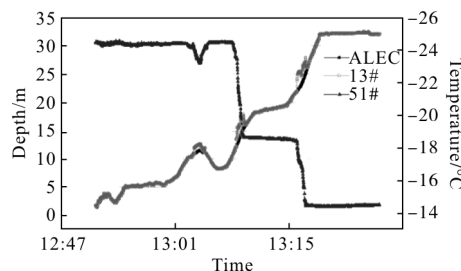


图 8 添加温度数值后的压力传感器比测

Fig.8 Comparative test of pressure sensors after adding temperature value

表 2 拖曳试验的部分比测数据

Tab.2 Partial comparative test data of towing test

Time	ALEC/m	13#/m	Error	51#/°C
12:51:40	1.75	1.721 3	-0.028 7	24.431 17
12:51:41	1.75	1.780 79	0.030 79	24.424 12
12:51:42	1.77	1.744 08	-0.025 92	24.481 66
12:51:43	1.76	1.756 91	-0.003 09	24.520 23
.....				
.....				
13:26:33	32.06	32.031 8	-0.028 2	14.531 01
13:26:34	32.02	32.057 23	0.037 23	14.527 86
13:26:35	32.05	32.027 22	-0.022 78	14.526 89
13:26:36	32.1	32.017 02	-0.082 98	14.526 38

图 8 中温度传感器(右纵坐标)和压力传感器(左纵坐标)测量数据所表现出来的负相关性和阶段性是与航速的改变相一致的:当航速较高时,拖曳链姿态上浮,压力传感器和温度传感器接近海水表层,因此,在测量数值上,压力传感器表现为深度较低,而温度传感器表现为温度较高;当航速降低时,拖曳链受阻减小,姿态下沉,深度增大,温度降低,这与压力传感器和温度传感器测得的数值变化是

相一致的。

### 3.3 解调终端与温度剖面

本次拖曳海试中,终端的解调系统运行良好,其软件采用实时绘图的方式展示所有传感器的温度场分布,方便科考队员与甲板操作人员实时观察系统工作情况。如图 9 所示,左侧是传感器列表显示传感器的信息,包含波长、物理量测量值、空间位置等,右侧为彩色的温度场分布图,将链路上所有传感器的实时测量结果以图形化的方式展示出来,便于现场应用。

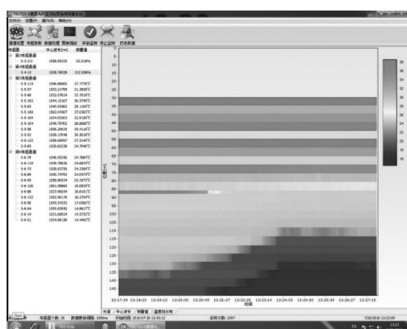


图 9 软件界面

Fig.9 Software interface

下水的温度传感器虽然只有 8 支,但均能正常工作,对海水温度剖面进行了准确地测量,如图 10 所示,上部温度较高的原因是由于尚在绞车上的温度传感器受到阳光直射;下部的低温区域属于海洋中的冷水团,这一现象的出现再次验证了温度传感器具有很好的测温稳定性。

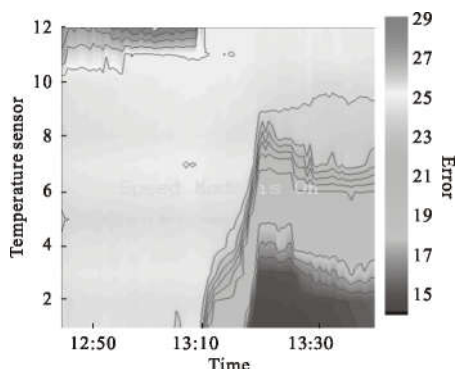


图 10 温度剖面

Fig.10 Temperature profile

### 3.4 存在的问题

在此次海上试验中,暴露出来 3 方面的问题:

(1) 船载的沉降铅鱼工作深度较浅,其下降的深度受船速影响非常大,如入水约 40 m 的拖曳链,在船速 7 节时,最末端的压力传感器受铅鱼拖带最深仅达 1.5 m,当增加 50 kg 的铅块后,压力传感器下沉深度有所增加,达到 7.4 m;

(2) 入水的 8 支温度传感器中仅有最底端的一支能够获得相应的深度信息,其它传感器仅能通过进一步链路姿态的分析后估算其相对位置,暂无法获得高空间分辨率的温度剖面;

(3) 拖曳试验所在海域深度较浅,200 m 的拖曳温深链入水长度有限,传感器采集数据有限,从而影响温度剖面的有效测量,待进一步抵达深水域、无拖挂渔网的风险后,可以高速运行并全部释放。

因此,需要从以下方面进行完善:

(1) 分析铅鱼水动力特性,优化其结构设计,使其能够在水下进行有效的沉降;

(2) 制备更多的压力传感器,使得每一个温度传感器都能获得相对应的深度信息;

(3) 进一步制备 500 m 长的拖曳温深链,选择西太平洋或者南海等深海域进行海上验证试验。

## 4 结论

通过此次海上试验,主要对船载拖曳式光纤温深剖面系统中的压力传感器进行了比测分析,无论是静水比测,还是拖曳过程中的动态比测,光纤光栅压力传感器与标准的 ALEC 传感器均达到了较高的测深一致性,而且测量精度优于 0.1 m,这为下一步深海验证试验打下了坚实的基础。

### 参考文献:

[1] Zhang Dengpan, Feng Pan, Wang Yongjie, et al. Research on shipborne towed fiber temperature profile measurement system [J]. *Laser and Infrared*, 2016, 46(10): 1261-1267. (in Chinese)

[2] Zhang Xu, Wang Yongjie, Wei Chuanjie, et al. Direct-reading temperature profile measuring system with towed fiber bragg Grating sensor [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(1): 41-45. (in Chinese)

[3] Wang Wenhua, Feng Yujun, Shi Wenqing, et al. Application and research progress of optical fiber sensor in ocean science [J]. *Optical Fiber and Electric Cable*, 2010 (5): 5-8. (in Chinese)

- Chinese)
- [4] 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.
- [5] Daniel L R, Jochen K. The underway conductivity - temperature-depth instrument [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(11): 1910-1923.
- [6] 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, 8421: 842148.
- [7] Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, et al. High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822002. (in Chinese)
- [8] Sun Qizhen, Wang Jingyi, Zhang Wei, et al. Polymer packaged longitudinal microstructured fiber based distributed pressure sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0802003. (in Chinese)
- [9] Yin Xiaofeng, Jiang Nuan, Yang Huayong, et al. A novel fiber grating pressure sensor with high sensitivity based on elastic sheet packaging [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(5): 681-684. (in Chinese)
- [10] Luo Pei. Sensitivity analysis of diaphragm type fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2011, 40(5): 65-66, 78. (in Chinese)
- [11] Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, et al. Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1020-1023. (in Chinese)
- [12] Liu Chaoming, Lou Shuqin. Application of the genetic algorithm in the demodulation of the FBG cross-sensitivity characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1859-1864. (in Chinese)