

文章编号:1001-5078(2018)09-1128-05

· 光纤及光通讯技术 ·

海洋 FBG 压力及温补传感器温度响应一致性研究

张登攀¹, 秦 钢^{1,2}, 王永杰², 王 力²

(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传感技术联合国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要:为满足船载拖曳式全光纤海洋温深剖面连续测量的要求,测量海水深度的光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器利用 FBG 温度传感器作为其温补传感器。由于二者对温度同时敏感且对海水温度的响应时间存在不一致性,导致在拖曳测试海水压力时有所偏差。针对这一问题,本文对传感器的温度响应一致性进行分析研究。通过对 FBG 温度传感器的外管加装绝热材料,使其与 FBG 压力传感器的温度响应时间接近一致。通过海试验证,FBG 压力传感器与标准传感器 ALEC(亚力克)具有较高的测量相关性。

关键词:FBG 传感器;温度响应时间;一致性;海上试验

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.012

Research on temperature response consistency of ocean FBG pressure sensor and temperature compensating sensor

ZHANG Deng-pan¹, QIN GANG^{1,2}, WANG Yong-jie², WANG Li²

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

2. State Key Laboratory of Sensing Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy
of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to meet the requirements of continuous measurement of ship-borne towed fully fiber optic marine temperature-depth profile, FBG pressure sensor measuring seawater depth uses FBG temperature sensor as its temperature compensation sensor. Because both of them are sensitive to temperature and have different respond time to seawater temperature, there are some deviations in testing seawater pressure. Aiming at this problem, the temperature response consistency of sensors is analyzed. Through installing thermal insulation material for outer tube of FBG temperature sensor, thus, the temperature response time of FBG temperature sensor and pressure sensor is almost consistent. Finally, through the sea trial verification, FBG pressure sensor and standard sensor ALEC have higher measurement consistency.

Key words: FBG Sensor; temperature response time; consistency; sea trial

1 引 言

海水温深是海洋环境监测中重要的参数^[1],海水温深参数的获取存在环境因素上存在特殊性变

化,要想获得海水中各种冷水团及中尺度旋涡的温深剖面信息^[2],相比投弃式测量仪器 XBT,船载拖曳式有着连续测量和多传感分布式测量的优

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41276094);中国科学院战略性先导科技专项 A 项目(No. XDA11040201)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。E-mail:alvert_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研究。E-mail:wyj@semi.ac.cn

收稿日期:2018-01-09

势^[3-5],能准确、细致刻画冷水团及中尺度旋涡的温深剖面信息。

2016年7月,课题组在北黄海区域进行了200 m温深拖曳链的试验研究,并完成了FBG压力传感器和标准传感器的比对测试。通过对动态拖曳过程中的比测数据进行拟合处理,结果发现:当温度突然发生变化时,FBG压力传感器与标准压力传感器ALEC的测量偏差会立即增大,而当温度变化不明显时,却无上述现象,如图1所示。分析原因是由于FBG压力传感器和FBG温度传感器对温度的响应时间不同步,导致FBG压力传感器测深误差的产生^[6]。

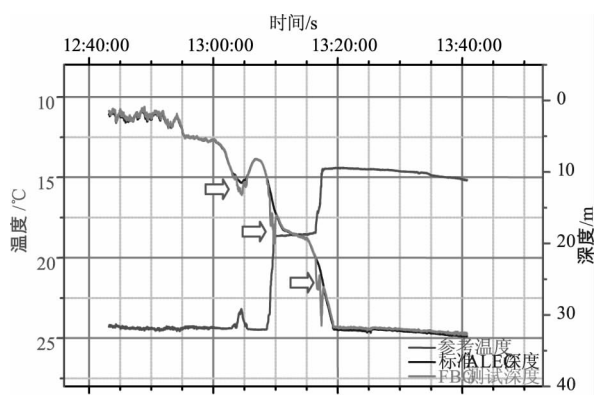


图1 拖曳测试压力数据比测图

Fig. 1 The pressure data comparison of the towing test

基于上述发现,针对温度响应不同步而导致的FBG压力传感器的测量误差这一问题,本文主要从以下三个方面展开研究工作。

第一:对封装好的FBG压力传感器及其温补传感器进行灵敏度的标定测试,经过理论分析和实验测试,FBG压力及温补传感器的温度响应时间存在较大的差异。

第二:在FBG温补传感器上加装绝热性好的聚合物材料以修正其响应时间。通过测试发现其响应时间基本和FBG压力传感器接近一致。

第三:经过海试验证,FBG压力传感器与标准压力传感器ALEC的测量误差减小,他们之间的相关性增强,这表明改进后的温补传感器能为FBG压力传感器进行及时准确的温度补偿。

2 传感器封装工艺

为了满足高灵敏度、快响应和耐水压等相关要求,FBG压力传感器采用膜片式的结构增敏技术。弹簧管式、聚合物式、薄壁圆筒式等传统封装方法存在稳定性欠佳、不适合动态测量、高温容易老化及不易串接等缺点^[7-8],而膜片式封装在大量程和高灵

敏度实现上有良好效果,可以用于动态拖曳过程中的测量。FBG压力传感器上采用金属化处理后的光纤光栅,利用激光焊接将压力增敏膜片和其他部件焊接一起,避免海水腐蚀。对传感器进行高低温循环处理,以释放其内部应力,消除后续蠕变的可能,从而提高传感器的稳定性。

FBG温度传感器作为FBG压力传感器的温补传感器,采用管结构结合聚合物增敏的封装技术。其中金属管封装有着结构紧凑、体积小、强度高、导热快、布设方便等优点,同时能够适应于动态流线型的拖曳测试环境,其实物图如图2所示。



图2 FBG压力及其温补传感器实物图

Fig. 2 The physical map of FBG pressure and its temperature compensating sensor

3 理论计算

假设不破坏其中热平衡,单层圆筒封装的传感器其管壁的温度分布均匀,温度对时间的微分方程为^[9]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Gamma A (T_f - T)}{V c_p \rho} \quad (5)$$

其中, T_f 为环境温度; T 为金属管壁温度; Γ 为水与金属表面的换热系数; A 为金属膜片管的表面积; ρ, c_p, V 分别为金属外壳管的密度、比热容和体积。

金属管内加入填充物,可以看作是双层圆柱筒结构^[10-11]。

$$\frac{T_f - T_2}{T_f - T_1} = \exp \left[- \frac{\Gamma (2d + 2a + r)}{\rho c_p (d + 2a + r) d} t \right] \quad (6)$$

$$t = - \frac{\rho c_p (d + 2a + r) d \ln \left(\frac{T_f - T_2}{T_f - T_1} \right)}{\Gamma (2d + 2a + r)} \quad (7)$$

其中, a 为光栅和管壁之间距离; d 为金属管壁厚; r 为光栅直径; T_2 为金属管壁温度; Γ 为水与金属表面的换热系数。在这种封装形式中,可以看作是一种双层圆柱筒封装。响应时间计算值如表1所示。

表 1 响应时间有关参数

Tab. 1 Parameters of response time

参数	FBG 压力传感器	FBG 温补传感器
d/mm	3	0.8
L/mm	14	12
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8.3×10^3	8.8×10^3
$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	380	503
a/mm	5	1.35
r/mm	0.125	0.125
$\Gamma/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.5×10^4	1.5×10^4
t/s	3.82	0.21

4 实验测试

4.1 FBG 温度灵敏度标定

如图 3 所示是温度标定的实验装置示意图,为确定 FBG 压力及其温补传感器对温度的敏感程度,需要对封装好的传感器需要进行温度灵敏度标定。标定是在恒温水浴槽内进行,并选用美国海鸟系列 SBE56 作为参考温度传感器。在 2°C 到 35°C 区间上选择 8 个温度点进行标定,每个温度点上的稳定时间为 1 h,分别取各个稳定温度点内 2 min 平均数,从而得出温度和波长变化的对应关系,用 origin 数据处理软件通过二次拟合得到图 4 和图 5,其 FBG 压力传感器及温补传感器的温度灵敏度分别为 $28.81 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $26.54 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,拟合线性度 R^2 均为 0.99999。

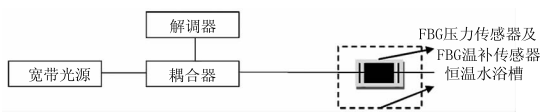


图 3 压力传感器温度标定装置

Fig. 3 Temperature experimental setup for FBG pressure sensor

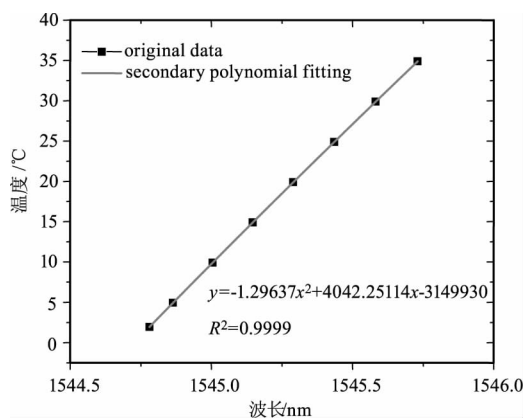


图 4 FBG 压力传感器波长-温度二次拟合曲线

Fig. 4 The quadratic fitting curve of wavelength-temperature of FBG pressure sensor

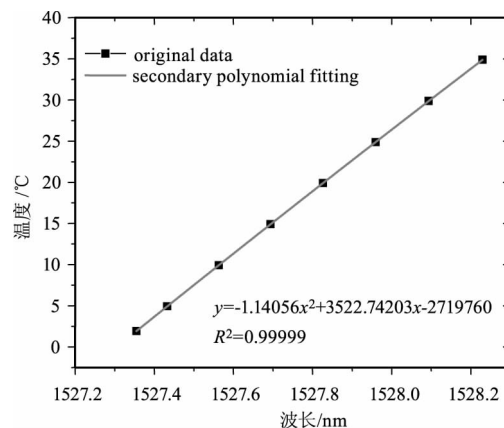


图 5 FBG 温补传感器波长-温度二次拟合曲线

Fig. 5 The quadratic fitting curve of wavelength-temperature of FBG temperature compensating sensor

一般用于海洋拖曳测试的 FBG 压力传感器,其压力灵敏度为 $500 \sim 800 \text{ pm}/\text{MPa}$ (1 MPa 对应海水深度大约为 100 m)。当 FBG 压力传感器没有进行温度补偿时,其环境温度每变化 1°C ,其自身波长漂移量为 28.81 pm ,假定 FBG 压力传感器灵敏度为 $600 \text{ pm}/\text{MPa}$,相应压力变化为 0.048 MPa ,深度误差可达到 4.8 m 。因此,在拖曳测试过程中,为减小测量误差,对 FBG 压力传感器进行实时准确温度补偿是及其必要的,而解决二者响应时间不一致问题则是本文的主要研究方向。

4.2 FBG 温度响应时间测试

将 FBG 压力及其温补传感器从冷水槽迅速移至高温水浴槽,同时温度解调仪则实时监测其温度变化量。根据温度传感器动态响应校准的方法,响应时间即达到稳定温度所需时间的 63.2%。如图 6 和图 7 所示。

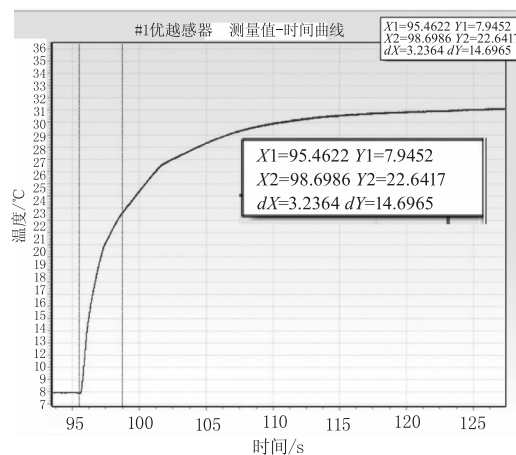


图 6 FBG 压力传感器的温度响应时间曲线

Fig. 6 The temperature response curve of FBG pressure sensor

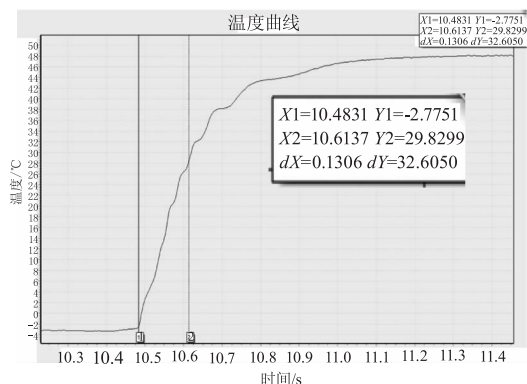


图7 FBG 温补传感器的温度响应时间曲线

Fig. 7 The temperature response curve of FBG temperature-compensation sensor

FBG 压力传感器的温度响应时间为 3.23 s, FBG 温补传感器响应时间为 0.13 s, 理论计算比测试结果偏大。产生原因^[11]: 理论计算是将导热过程分成两个独立单元, 热量是先通过水浴槽到达金属管, 后经内部填充物把热量传递到最内部的光栅, 而实际环境是整个传感器一直处于高温水状态而进行热量的传递, 因此理论计算势必会延长传递所需时间。

4.3 改进后 FBG 温度响应时间测试

经过理论分析和实验测试, FBG 压力传感器的温度响应时间相比温补传感器的响应时间长。由于压力传感器体积较大, 又通过金属材料封装, 缩小响应时间相比增加响应时间更困难, 因此在增加 FBG 温补传感器的温度响应时间这一方向进行研究。通过在 FBG 温补传感器的金属外管加装绝热性好的聚合物材料(长 10 mm, 厚度为 1.25 mm)来进行测试, 如图 8 所示, 其响应时间 3.39 s, 基本和 FBG 压力传感器的温度响应时间接近一致。

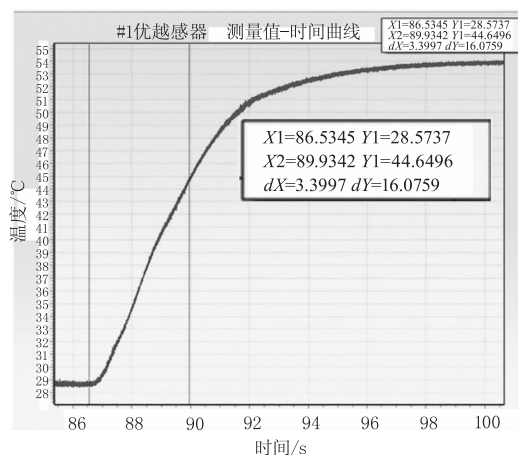


图8 改进后的 FBG 温补传感器的温度响应时间曲线

Fig. 8 The temperature response curve of the improved FBG temperature compensating sensor

5 海试验证

为验证改进后的 FBG 温补传感器在拖曳过程中, 当温度突然发生变化, 是否能及时准确为 FBG 压力传感器进行温度补偿。2017 年 10 月 14 日, 在黄海海域进行拖曳试验, 图 9 是拖曳测试现场。



图9 拖曳测试现场

Fig. 9 The towing test site

拖曳测试后, 通过 original 数据处理软件得到图 10, 相比图 1 能够看出, 没有改进的 FBG 温补传感器, 在拖曳测试时, 由于温度突然变化而不能及时准确为 FBG 压力传感器的进行的温度补偿, 相比标准压力传感器的偏差会突然增加。而加装绝热性好的聚合物材料后, 由于其二者响应时间一致, 在温度突然变化情况下, 也能实时准确为 FBG 压力传感器进行温度补偿, 不仅压力传感器与标准压力传感器的测量误差大大缩小, 其相关性也显著增强。

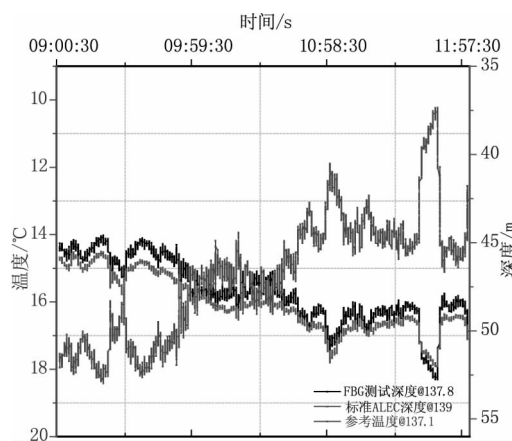


图10 拖曳测试压力数据对比

Fig. 10 The pressure data comparison of the towing test

从图 11 可以看出, FBG 压力及其温补传感器的响应不一致带来误差影响已经基本消除, 但由于 FBG 压力传感器自身和标准压力传感器 ALEC 在拖曳链空间上距离 1.2 m, 而二者之间的测量差集中

在 1.1 m, 测量误差减小到 0.1 m, 而它们之间相关性系数增加到 0.9906。

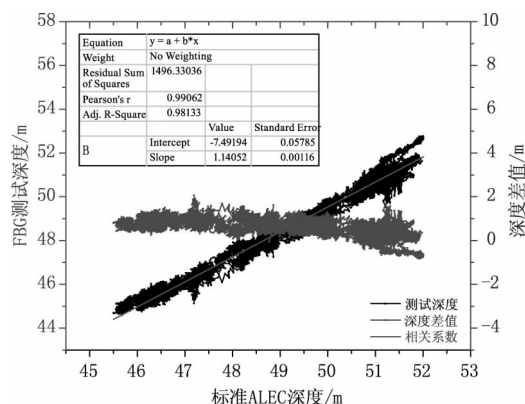


图 11 测量深度相关系数及差值

Fig. 11 The correlation coefficient and measurement difference of measurement depth

6 结 论

本文针对 FBG 压力传感器及其温补传感器对温度的响应不一致问题进行了研究。通过对 FBG 温度传感器的外管加装绝热材料,使其与 FBG 压力传感器的温度响应时间接近一致。经过理论分析和实验室测试,FBG 压力传感器及其温补传感器的温度响应时间分别为 3.23 s 和 3.39 s。通过海试验证,FBG 压力传感器与标准传感器压力克的相关系数高达 0.9906,其测量误差低于 0.1 m,满足海洋温深剖面连续测量的要求,对于海洋环境的研究有着重要意义。

参考文献:

- [1] WANG Yanfeng, ZHANG Jie, YI Xingfu, et al. Towed system design for marine ecological power monitoring [J]. Hig - Tec Communications, 2006, 16(9): 975 - 980. (in Chinese)
王岩峰, 张杰, 易杏甫, 等. 用于海洋生态动力监测的拖曳系统设计 [J]. 高技术通讯, 2006, 16(9): 975 - 980.
- [2] 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.
- [3] TIAN Yu, WANG Xin, LI Jianguo. Research on data acquisition technology of SZC15 - 2 CTD [J]. Ocean Technology, 2008, 27(1): 14 - 18. (in Chinese)
田雨, 王欣, 李建国. SZC15-2 型 CTD 数据采集技术研究 [J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 14 - 18.
- [4] SUN Guixin, SHI Feng. SBE25 CTD profiler and its using method [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2010, (3): 18 - 19, 24. (in Chinese)
孙贵新, 史峰. SBE25 CTD 剖面仪及其使用方法 [J]. 气象水文海洋仪器, 2010, (3): 18 - 19, 24.
- [5] GUO Binbin, LI Qi, XIAO Bo, et al. SBE 917 plus CTD profiler and its self-contained operation [J]. Ocean Information, 2015, (1): 42 - 45. (in Chinese)
郭斌斌, 李琦, 肖波, 等. SBE 917 plus CTD 剖面仪及其自容式作业 [J]. 海洋信息, 2015, (1): 42 - 45.
- [6] ZHANG Dengpan, FENG Pan, WANG Yongjie, et al. Experimental research on continuous measurement of all fiber optic ocean temperature-depth profile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 108 - 113. (in Chinese)
张登攀, 冯盼, 王永杰, 等. 全光纤海洋温深剖面连续测量试验研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 108 - 113.
- [7] 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)
殷小峰, 姜暖, 杨华勇, 等. 基于弹性薄片封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器 [J]. 光电子 · 激光, 2011, 22(5): 681 - 684.
- [8] 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)
罗裴. 膜片式光纤光栅压力传感器的灵敏度分析 [J]. 机电工程技术, 2011, 40(5): 65 - 66, 78.
- [9] WANG Buxuan. Heat and mass transfer of Engineering [M]. Beijing: Science Press, 1998: 139 - 148. (in Chinese)
王补宣. 工程传热传质学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 139 - 148.
- [10] YU Youlong. Experimental study on the characteristics of fiber Bragg grating temperature sensor packaged with a metal tube [J]. Journal of natural science of Heilongjiang University, 2011, 28(5): 737 - 740. (in Chinese)
余有龙. 金属管封装光纤光栅温度传感器特性的实验研究 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(5): 737 - 740.
- [11] ZHANG Dengpan, WANG Jin, WANG Yongjie. Fast response properties of ocean temperature sensors based on fiber bragg grating [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(3): 7 - 12. (in Chinese)
张登攀, 王瑾, 王永杰. 光纤光栅海洋温度传感器的快速响应特性 [J]. 光电工程, 2015, 42(3): 7 - 12.