

文章编号: 1001-3806(2010)05-0581-03

## 光纤布喇格光栅海水温度深度检测系统研究

陈世哲<sup>1</sup>, 吕京生<sup>2</sup>, 王晓燕<sup>1</sup>, 赵力<sup>1</sup>, 赵维杰<sup>3</sup>

(1. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 青岛 266001; 2. 山东省科学院激光研究所, 济南 250014; 3. 山东青岛变压器集团有限公司, 青岛 266000)

**摘要:** 海水的温度、深度是其重要的物理参量, 为了更安全、准确地监测海水的温度和深度, 针对目前海洋温度和深度检测大都采用电信号检测, 探头在水中安全性欠佳的不足, 利用光纤光栅传感探头为全光学器件、水中安全可靠、易于组成传感器网络进行剖面检测的优点, 提出一种基于光纤光栅的海水温度、深度检测系统, 阐述了其检测原理, 进行了系统及传感探头的设计和研制。结果表明, 传感器温度和深度检测的线性度很好, 达到 0.9999, 为海水温度深度检测提供了一种新途径。

**关键词:** 测量与计量; 温度; 深度; 光纤布喇格光栅

**中图分类号:** TP212.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.002

### Study on ocean temperature and depth measurement system based on fiber Bragg grating

CHEN Shi-zhe<sup>1</sup>, LÜ Jing-sheng<sup>2</sup>, WANG Xiao-yan<sup>1</sup>, ZHAO Li<sup>1</sup>, ZHAO Wei-jie<sup>3</sup>

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China; 2. Institute of Laser Research, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China; 3. Shandong Qingdao Transformer Group Co. Ltd, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Ocean temperature and depth are important parameters. At present ocean temperature and depth measurement almost depend on electric signal inspection, so the sensor is not safety in the water. In order to overcome this shortage and improve measurement veracity and safety, a new ocean temperature and depth inspection system was presented based on fiber Bragg grating sensor with its advantages of all optic sensors, underwater safety and feasibility of sensor network, etc. Its measurement principle was described; its system and sensor structure was designed and manufactured. The experiments proved that sensor's linearity was very good and its value was up to 0.9999. It provides a new way to detect ocean temperature and depth.

**Key words:** measurement and metrology; temperature; depth; fiber Bragg grating

### 引言

海水的温度、深度是其重要的物理参量, 对研究海洋学、海洋环境和气候及军事、渔业等具有十分重要的意义。传统温度、深度检测中, 敏感元件大多都采用铂电阻、热敏电阻, 以其高精度、长期连续检测的特点, 被广泛应用, 但其检测信号都是电信号, 置于水下有一定的危险性。近年来, 光纤光栅在传感方面的研究越来越受到人们的重视。由于光纤光栅传感是对光的波长进行检测, 光强起伏对传感量(波长)没有影响, 抗干扰能力强, 灵敏度高, 体积小, 易组成传感网络。本文

中利用光纤光栅的特性, 提出一种基于光纤光栅的海水温度、深度测量系统, 水下测量传感器均为全光学器件, 不受电磁干扰, 安全可靠, 而且易于组成剖面检测系统, 为海洋温度、深度检测及剖面检测提供了新途径。

### 1 光纤光栅温度、深度检测原理

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性, 在纤芯内形成空间相位光栅, 其作用实质是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜。其基本原理见图 1<sup>[1-2]</sup>, 宽谱光源入射光纤后, 经过光纤布喇格光栅

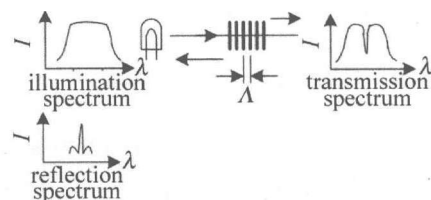


Fig. 1 Sketch map of fiber gratings sensor

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2007AA09Z102)

作者简介: 陈世哲 (1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋环境检测技术及仪器的研究。

E-mail: chenshizhe1975@163.com

收稿日期: 2009-11-10; 收到修改稿日期: 2009-11-19

会有波长  $\lambda_B$  的光返回,其它的光将透射。由耦合波理论,当满足相位匹配条件时,光栅的布喇格波长为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, $\lambda_B$  为布喇格波长; $n_{\text{eff}}$  为光纤传播模式的有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。

外界的被测量引起光纤光栅温度变化  $\Delta T$ 、应力变化  $\Delta \varepsilon$  时都会导致反射的中心波长的变化  $\Delta \lambda_B$ ,接收端解调出受调制的波长变化就可以检测到被测量,其中心波长的变化关系见下式:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_{\text{eff}})\Delta \varepsilon \quad (2)$$

式中, $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ ,  $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ ,  $P_{\text{eff}} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\varepsilon}$  分别为光纤的热膨胀系数、热光系数和有效弹光系数。

### 1.1 光纤光栅温度传感

由(1)式,当不受外界应力影响,温度变化引起的反射波长移动可表示为:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T \quad (3)$$

可见, $\Delta \lambda_B$  与  $\Delta T$  之间呈线性关系。由于光纤光栅的温度系数较小,为提高灵敏度,可将光纤光栅粘贴于热膨胀系数  $\alpha_{\text{sub}}$  较大的基底材料上,并满足  $\alpha_{\text{sub}} \gg \alpha_f$ ,则粘贴后光纤光栅反射波长随温度的变化关系:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = [\xi + (1 - P_{\text{eff}})\alpha_{\text{sub}}]\Delta T \quad (4)$$

较常见的粘贴基底材料是聚四氟乙烯,2001年日本学者 MIZUNAMI 等人提出单面基底结构和两面夹板式基底结构的温度传感器,温度灵敏度分别为 90.74pm/K 和 99.06pm/K,约是裸光纤光栅的 15 倍<sup>[3]</sup>。2005年 ZHAN 等人提出铝槽封装结构,使温度传感器封装更加牢固可靠,且便于安装<sup>[4]</sup>。2007年 WEI 等人提出一种聚酰亚胺绝缘材料封装的电力光纤光栅温度传感系统,实现实时、快速、准分布式测温并定位,测温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,分辨率为  $0.1^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>。

### 1.2 光纤光栅深度传感

深度检测是由压力检测通过一定的关系转换过来的。温度不变时,光纤光栅只受轴向应变作用,中心反射波长相对变化为:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_{\text{eff}})\Delta \varepsilon \quad (5)$$

式中, $P_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]/2$  为光纤的有效弹光系数; $\mu$  为纤芯材料的泊松比; $P_{11}$  和  $P_{12}$  为弹光系数; $n_{\text{eff}}$  为光纤传播模式的有效折射率。对普通的石英光纤,  $P_e \approx 0.22$ ,假定  $\lambda_B = 1550\text{nm}$ ,则应变  $\varepsilon$  每变化

$1\mu\varepsilon$ , Bragg 波长漂移约为  $1.21\text{pm}$ 。

光纤光栅直接用于压力测量灵敏度很低,需要进行增敏设计。1996年, XU 将光纤光栅固定于中空的玻璃球结构中,压力灵敏度提高一个数量级<sup>[6]</sup>。2002年 ZHANG 等人设计了一种增敏罐封装方法。将光纤光栅准直置于厚壁金属圆筒轴线上,并用增敏有机聚合物固化,只容许开口方向的压力作用,使光纤光栅压力灵敏度较裸光纤提高了 1722 倍<sup>[7]</sup>。中国台湾的 SHENG 等人设计了类似活塞的结构<sup>[8]</sup>。2005年 WANG 等人设计了一种组合式光纤光栅压力传感器<sup>[9]</sup>。2004年 HU 等人采用活塞原理设计了密封容器式光纤光栅传感器,将测量灵敏度提高到  $0.0011\text{nm}/\text{Pa}$ ,但测量范围偏小<sup>[10]</sup>。2006年 WANG 等人采用正弦机构力放大原理,设计研究了一种基于平面圆形薄板结构的新型高灵敏度光纤光栅压力传感器,压力灵敏度可高达  $0.04711\text{pm}/\text{Pa}$ ,并且适合光纤布喇格光栅进行多路复用,组成传感器阵列<sup>[11]</sup>。

## 2 光纤光栅温度深度检测系统设计

综上,本课题中温度、压力检测都采用的传感原理,检测系统原理框图见图 2,主要有传感探头、宽谱

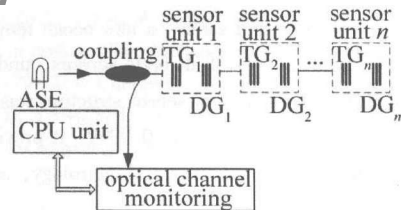


Fig. 2 Principle map of temperature and depth measurement system

光源、光纤光栅解调仪等组成。光源发出的光,经温度、压力传感光栅后,外界温度、压力的变化使得光栅返回光的中心波长发生变化,由光谱分析模块解调后,经微处理器计算即可得到温度、压力的测量值。

设计的光纤光栅温度、压力传感器探头结构图如图 3 所示,由不受外力应变的温度光纤光栅、固定在压

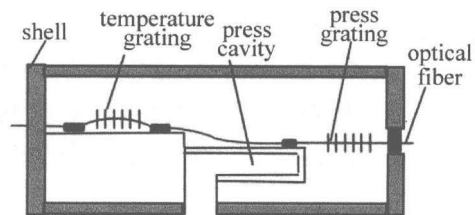


Fig. 3 Sketch map of temperature and depth sensor

力腔上的压力光纤光栅组成,整个传感探头两端都有光纤引出,便于串接,考虑到传感器需完全浸入海水中,传感器实际加工时采用不锈钢全密封的结构,光缆都用不锈钢管铠装保护。图 4 所示为研制的温度、压力传感器实物。

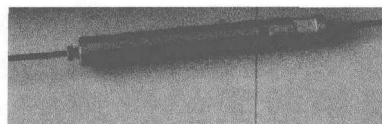


Fig. 4 Picture of temperature and depth sensor

### 3 光纤光栅温度压力传感器标定实验

传感器本身是无源的,在使用时必须与解调仪相连。解调仪与传感器之间是通过光信号通讯,解调仪只能获得传感器的光纤光栅的波长,无法直接得到温度和压力,要实现温度和压力的测试,必须先对传感器进行系数标定,获得每个传感器的温度/压力与波长/腔长的关系。

#### 3.1 传感器压力系数标定

在标定压力时,用标准的活塞式压力计对传感器加标准压力。加压方法为,用 $\varnothing 6.35\text{mm}$ 的不锈钢毛细管将活塞式压力计中的液压导入到传感器侧壁的进压孔中。

传感器的引出光纤连接解调仪,解调仪解调出传感器的压力传感光纤光栅的波长,见图5。选几个压

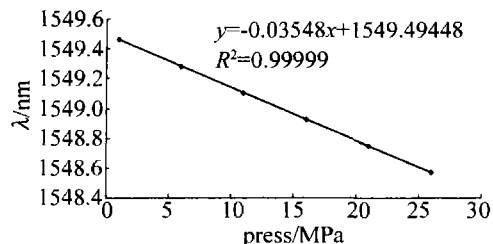


Fig. 5 Curve of temperature calibration

力值,用活塞式压力计加压,记录每个压力值对应的光栅波长。将压力值与光栅波长值进行拟合,便可得传感器的压力系数。从传感器的压力标定曲线可以看出,传感器在常温下的压力响应线性度很好,线性度的均方值达到0.9999以上,表明传感器的线性度好。

#### 3.2 传感器温度系数标定

压力传感光栅和温度传感光栅都受温度影响,所以,不仅需要对温度传感光栅进行温度标定,而且要对压力传感光栅进行温度标定,以实现温度补偿功能,如图6、图7所示,在温度不超过 $100^\circ\text{C}$ 条件下,研究设

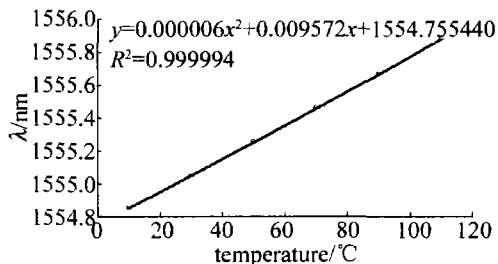


Fig. 6 Temperature calibration curve of temperature FBG

计的传感器的温度系数具有较好的线性关系,均方值达到0.9999,使得测温的精度得以提高,同时,温度补

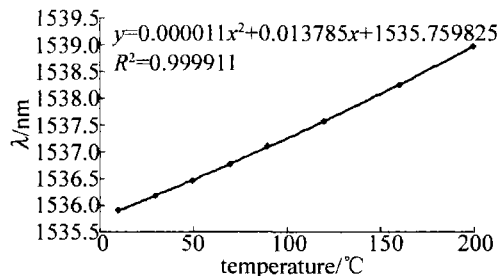


Fig. 7 Temperature calibration curve of depth FBG

偿也更准确。

### 4 结论

针对目前海洋温度和深度检测采用电信号方式,探头在水中安全性欠佳的不足,提出一种基于光纤光栅的海水温度、深度检测系统,它具有利用光纤光栅传感探头为全光学器件、水中安全可靠、易于组成传感器网络进行剖面检测等优点。在阐述了其检测原理的基础上,进行了系统设计,实验表明传感器温度和深度检测的线性度很好,达到0.9999,为海水温度深度检测提供了一种新途径。

#### 参考文献

- [1] ZHAO Y. Optical fiber gratings and sensing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:24-28 (in Chinese).
- [2] FU H W, FU J M, QIAO X G, et al. Study about the stress sensitivity enhancement of fiber Bragg gratings[J]. Laser Technology, 2005, 29(2):159-161 (in Chinese).
- [3] MIZUNAMI T, TATEHATA H, HAWASHIMA H. High-sensitivity cryogenic fibre-Bragg-grating temperature sensors using teflon substrates [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7):914-917.
- [4] ZHAN Y G, CAI H W, XIANG Sh Q, et al. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1):83-86 (in Chinese).
- [5] WEI Y B, HOU P H, LIU T Y, et al. Application of the new fibre-optical grating temperature sensing system in electric power system [J]. China Instrumentation, 2007(12):57-60 (in Chinese).
- [6] XU M, GEIGER H, DAKIN J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing [J]. Electron Lett, 1996, 32(2):128-129.
- [7] ZHANG Y, LIU Zh G, GUO Zh Y, et al. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1):89-90 (in Chinese).
- [8] SHENG H J, FU M Y, CHEN T Ch, et al. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4):1146-1148.
- [9] WANG H L, QIAO X G, FU H W, et al. Studies on pressure sensing characteristics of a compounding-fiber grating sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(3):259-262 (in Chinese).
- [10] HU Sh Y, HE Sh Y, ZHAO Q D, et al. A novel high-sensitivity fiber grating pressure sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(4):410-412 (in Chinese).
- [11] WANG J J, JIANG D Sh, XIE G M, et al. High sensitivity fiber grating pressure sensor based on force amplifying principle of sine mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(7):783-786 (in Chinese).