

文章编号 1004-924X(2014)02-0311-07

用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器

吴晶^{1,2,3}, 吴晗平^{1,2*}, 黄俊斌¹, 顾宏灿¹

(1. 海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉430033; 2. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北武汉430205; 3. 海军工程大学管理工程系, 湖北武汉430033)

摘要: 平板结构的贴片式光纤光栅传感器应变测量范围较小, 难以满足船舶结构健康监测中的应变测量要求。本文采用不锈钢材质, 设计了一种采用环形平面弹簧和平板复合结构的贴片式传感器, 通过环形平面弹簧结构将复合结构的大应变转化为光栅的小应变, 降低被测物体与光栅之间的应变耦合系数, 实现了大应变测量。理论分析了复合结构的传感原理, 通过有限元方法仿真了该结构的应力分布, 结果证明了该结构能够实现大应变测量。将传感器胶粘在特种钢试件上进行了载荷试验, 试验结果表明: 该复合结构传感器的量程大于 20 000 $\mu\epsilon$, 且线性度较好, 相关系数大于 0.99。另外, 设计的传感器体积较小, 便于安装, 能较好地解决船舶结构健康监测中的大应变测量问题。

关键词: 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 应变传感器; 健康监测; 船舶结构; 复合结构; 有限元法

中图分类号: TN253; U661.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0311

Large range FBG sensor for ship structure health monitoring

WU Jing^{1,2,3}, WU Han-pin^{1,2*}, HUANG Jun-bin¹, GU Hong-can¹

(1. Department of Weaponry, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

3. Department of Management Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

* Corresponding author, E-mail: wuhanping601@sina.com

Abstract: Fiber Bragg Grating(FBG) sensor with a stickup plane structure can not test the strain precisely in ship structure health monitoring due to its small measuring range. For overcoming this problem, this paper designs a composite structure stickup FBG sensor composed of an annular plane spring and a slab on the basis of stainless steel. This kind of stickup FBG sensor can convert the large strain of composite structure into a small strain of FBG by the annular plane spring. By decreasing the strain coupling coefficient between FBG and tested structure, large-scale strain test is implemented. The sensing principle of the composite structure is analyzed and the stress and strain distribution of the stickup FBG sensor are simulated through finite element method. The simulation result demonstrates the feasibility of this structure in a large strain test. Finally, a loading experiment are performed on a special steel sample. The experiment result shows that this structure has a measuring range more than 20 000 $\mu\epsilon$ and good linearity. In addition, the correlation coefficient is up to 0.99. As a conclusion,

收稿日期: 2013-05-28; 修订日期: 2013-06-26.

基金项目: 国家总装备部十二五预研资金资助项目(No. 51327030202)

the sensor is convenient for setting up because of the small volume, and can resolve the problem of large strain test in ship structure health monitoring with good performance.

Key words: fiber sensor; Fiber Bragg Grating (FBG); strain sensor; health monitoring; ship structure; composite structure; finite element method

1 引言

船舶结构健康监测系统主要通过船舶结构的关键部位布设传感器来监测结构的应力应变状态及载荷响应,以评估结构的健康状态。一套完整的结构健康监测系统通常包括 4 个部分^[1-2]:传感子系统;数据采集与处理子系统;损伤识别、模型修正、安全评估和安全预警子系统;数据管理子系统。其中,传感子系统是结构健康监测系统的基础,其主要功能是通过传感器感知结构的载荷和效应信息,以不同的物理量形式输出。常用的传感器有电阻应变片、压电陶瓷 PZT 和光纤光栅传感器。光纤光栅传感器作为一种新型的传感器,具有质量轻、体积小、灵敏度和分辨率高、耐腐蚀、耐高、低温性、抗电磁干扰、能组建大规模准分布式传感网络等特点,是目前结构健康监测领域应用最为广泛的传感器。

船舶长期服役在恶劣的海洋环境中,不仅受到各种载荷的交互作用,其结构本身还要受到环境腐蚀等影响,因此船舶的建造材料通常选用特种钢材,如 45 # 钢。根据材料手册,45 # 钢的最大应变可以达到 $12\ 000\ \mu\epsilon$ ^[3]。而采用通信光纤材料制作的 Bragg 光栅短期允许的应变为 $10\ 000\ \mu\epsilon$,长期允许的应变为 $3\ 000\ \mu\epsilon$ ^[4]。显然,普通的光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 应变传感器不能满足实际测量的要求。因此,研究人员做了大量的工作来研究如何使用 FBG 应变传感器实现船舶结构的大应变测量。GOH 和 SHEN 等人设计了梁式结构传感器^[5-6],将整体结构的大应变转换为梁上光栅的小应变,可实现大于 10% 的应变测量,但该传感器的相容性不理想,实用性不强。还有研究人员提出了一种串联式复合结构的 FBG 传感器^[7-10],将整体结构的大应变转化为大弹性模量材料上的小应变,从而实现结构的大应变测量。金秀梅等人提出了螺旋倾斜光栅传感元的复合技术^[11],可有效降低光栅的拉应力水平,解决预应力筋的大应变测量

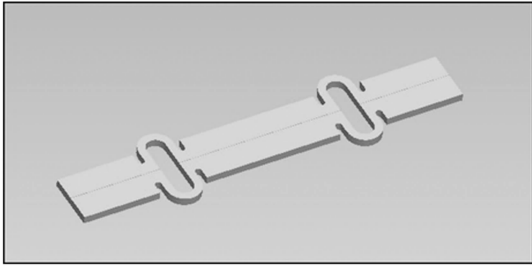
问题,并可确保监测的长期安全可靠。贾相飞等人采用单模塑料光纤实现大应变测量,应变可达 8% 以上,灵敏度高、重复性好,但其使用受到光纤制作技术的限制^[12]。在船舶结构健康监测系统中,应变传感器设计要考虑大应变测量,便于复用以实现准分布式测量,制作容易、便于固定和安装,不对船舶结构产生损伤,且满足水密性要求等因素。因此,本文针对船舶结构健康监测中应变测量的特点,兼顾 FBG 传感器设计的相容性准则和实际工程要求^[13],基于串联式复合结构,在不改变基片结构的条件下改变光栅的封装方式,将传感光栅胶黏于中间平板结构的轴线上,改变传感器的工作机理。通过环形平面弹簧结构将复合结构的大应变转化为平板结构和光栅的小应变,从而使整体结构的应变范围远大于 FBG 的应变范围,较文献^[10]中的量程范围有了较大提高,能满足船舶结构健康监测中大应变测量的要求。

2 传感器结构和原理

2.1 传感器结构

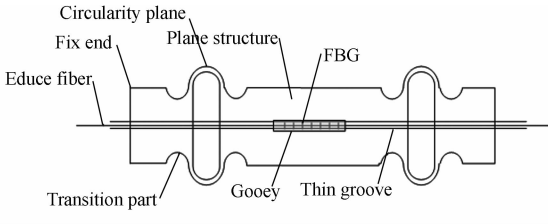
考虑传感器封装、安装和成本因素,传感器采用贴片式的结构设计,基底材料采用不锈钢材质。因此,传感器的量程要满足两个方面的要求:即光纤光栅和基底不锈钢材质均须满足大应变测量的要求。可是光纤材料制成的 FBG 长期允许的应变为 $3\ 000\ \mu\epsilon$,不能满足要求。另外,由材料手册可知,不锈钢材料的屈服点为 200 MPa,弹性模量为 $21.6 \times 10^{10}\ \text{Pa}$,因此根据材料的应力应变关系可计算出不锈钢贴片允许的最大应变为 $930\ \mu\epsilon$ 。本文兼顾以上两方面的测量要求,所设计的传感器结构如图 1 所示。

如图 1(b) 所示,传感器主要由固定端、环形平面弹簧结构、弧形过渡段、平板结构、胶黏处、FBG、细槽组成。FBG 作为传感单元用环氧树脂胶固定在平板结构的中间,两端的自由光纤放入细槽中。环形平面弹簧结构承担整个结构的大部分应变,对光栅和平板结构进行减敏,即可实现大



(a) 三维图

(a) Three-dimensional diagram



(b) 平面图

(b) Plane diagram

图 1 大应变传感器结构示意图

Fig. 1 Architecture diagram of large strain sensor

应变测量。这里当传感器通过两固定端固定于待测物体上工作时,待测物的应变通过固定端传递到环形平面弹簧上,再传递到平板结构,使平板结构产生应变,带动胶黏在平板结构上的光栅发生应变,从而使 FBG 的中心波长产生漂移,实现对应变的测量。传感器的量程由平面弹簧结构和传感器的长度比例关系决定。

2.2 传感原理

由传感器的结构设计可知,整体结构的大部分应变主要由环形平面弹簧来承担,将结构的大应变转化为中间平板和光栅的小应变,即可实现大应变测量。这里首先对传感器的结构应变 ϵ 与 FBG 的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 的关系及灵敏度系数进行推导。

如图 2 所示,假设中间不锈钢材质的平板结构长度为 L_1 ,刚度为 K_1 ,弹性模量为 E_1 ,横截面积为 A_1 ,宽度为 d ,应变为 ϵ_1 ,承受应力为 F_1 ,长度变化量为 ΔL_1 ;两端的不锈钢圆弧部分长度为 L_2 ,刚度为 K_2 ,弹性模量为 E_2 ,应变为 ϵ_2 ,承受应力为 F_2 ,长度变化量为 ΔL_2 。由此得出,结构的总长度 $L = L_1 + 2L_2$,长度总变化量 $\Delta L =$

$\Delta L_1 + 2\Delta L_2$,传感光栅的应变为 ϵ_{FBG} 。

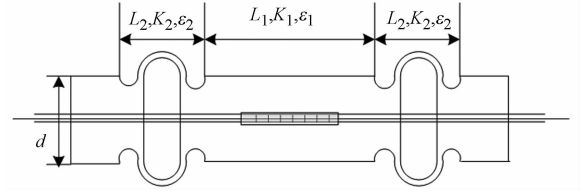


图 2 传感原理图

Fig. 2 Principle of sensor

假设 FBG 与材质之间的应变为刚性传递,则有平板结构的应变等于 FBG 的应变,即 $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{FBG}}$ 。根据静力学模型得:

$$\begin{cases} F_1 = k_1 \Delta L_1 = \frac{A_1 E_1 \Delta L_1}{L_1} = A_1 E_1 \epsilon_1 = A_1 E_1 \epsilon_{\text{FBG}} \\ F_2 = K_2 \Delta L_2 \end{cases} \quad (1)$$

由于复合结构中各部分的载荷相等,即 $F_1 = F_2$,由式(1)可得:

$$A_1 E_1 \epsilon_{\text{FBG}} = K_2 \Delta L_2 \Rightarrow \Delta L_2 = \frac{A_1 E_1 \epsilon_{\text{FBG}}}{K_2} \quad (2)$$

因为:

$$\Delta L_1 = L_1 \epsilon_1 = L_1 \epsilon_{\text{FBG}} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \Delta L_1 + 2\Delta L_2 = L_1 \epsilon_{\text{FBG}} + \frac{2A_1 E_1 \epsilon_{\text{FBG}}}{K_2} = \\ & \left(L_1 + \frac{2A_1 E_1}{K_2} \right) \epsilon_{\text{FBG}} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(2)、(3)、(4)可得:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\left(L_1 + \frac{2A_1 E_1}{K_2} \right) \epsilon_{\text{FBG}}}{L} = \left(\frac{L_1}{L} + \frac{2A_1 E_1}{K_2 L} \right) \epsilon_{\text{FBG}} \quad (5)$$

环形弹簧结构的刚度为:

$$K_2 = \frac{2E_2 I_2}{\pi r^3} \quad (6)$$

其中: I_2 为环形弹簧结构中环的截面惯性矩, r 为环形的半径。因为传感器各部分的材料相同,所以 $E_1 = E_2$ 。

由式(5)、(6)可得:

$$\epsilon = \left(\frac{L_1}{L} + \frac{\pi r^3 A_1}{I_2 L} \right) \epsilon_{\text{FBG}} \quad (7)$$

令 $\alpha = \frac{L_1}{L} + \frac{\pi r^3 A_1}{I_2 L}$,则有:

$$\epsilon = \alpha \epsilon_{\text{FBG}} \quad (8)$$

对于一个复合结构确定的传感器, $L_1, L, r,$

A_1, I_2 为常量,所以 α 也为常量,式(8)表明复合结构的总应变 ϵ 与光栅的应变 ϵ_{FBG} 具有严格的线性关系。

在不考虑温度对光栅的作用下,光栅中心波长变化量与光栅的应变具有线性关系,即:

$$\Delta\lambda_B = K_e \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (9)$$

其中: $\Delta\lambda_B, K_e$ 分别为光栅的中心波长漂移量和应变传感系数。

由式(8)、(9)可得:

$$\Delta\lambda_B = \frac{K_e}{\alpha} \epsilon. \quad (10)$$

由式(10)可以看出,复合结构的总应变与光栅中心波长的变化量是线性关系。

另外,由式(1)、(3)、(5)可得该复合结构的应变传感灵敏度 K 为:

$$K = \frac{\epsilon_{\text{FBG}}}{\epsilon} = \frac{\frac{\Delta L_1}{L_1}}{\frac{\Delta L_1 + 2\Delta L_2}{L_1 + 2L_2}} = \frac{\frac{\Delta L_1}{L_1}}{\frac{\Delta L_1(1 + \frac{2K_1}{K_2})}{L_1 + 2L_2}} = \frac{L_1 + 2L_2}{L_1 + \frac{2K_1 L_1}{K_2}} = \frac{L_1 + 2L_2}{L_2 + \frac{2K_1}{K_2} \cdot \frac{L_1}{L_2}}. \quad (11)$$

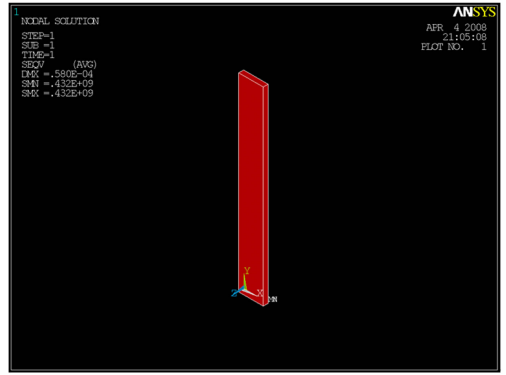
令 $M=L_1/L_2, N=K_1/K_2$, 则式(11)可写为:

$$K = \frac{M+2}{M+2MN}. \quad (12)$$

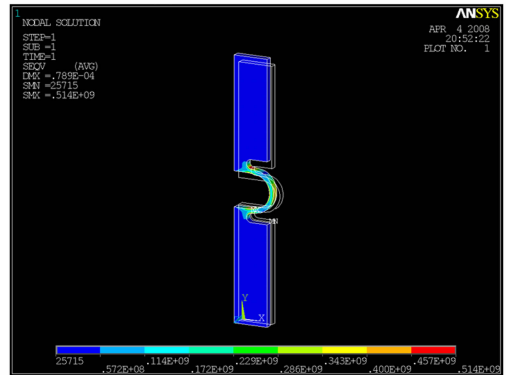
通过测试可知,环形弹簧结构的刚度 K_2 要明显小于平板结构的刚度 K_1 ,即在 $L_1=L_2$,复合结构的应变传感灵敏度 $K < 1$ 时,可实现大应变测量。因此,通过合理设计环形弹簧结构和平板结构的尺寸比例可以调整传感器的应变测量范围。

3 有限元仿真分析

为进一步验证该复合结构具有大应变测量的能力,本文采用有限元软件 ANSYS 对同样尺寸、同样材料(不锈钢材料)的复合结构和平板结构进行受力分析。由于两种结构都是关于 XZ 平面和 YZ 平面对称,因此建模分析可选取 1/4 模型。结构的一端固定,另一端施加沿轴向方向上的位移量,这样就可以在产生同样应变的条件下,分析出不同结构材料所承受的应力大小,其应力应变云图如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。



(a) 平板结构
(a) Slab structure



(b) 复合结构
(b) Composite structure

图 3 两种结构的应变云图

Fig. 3 Haul nephograms of two structures

由图 3(a)可知,平板结构在施加 $2\,000\ \mu\epsilon$ 的拉伸作用下,各部分产生的应力比较均匀,应变片均匀拉伸,此时产生的应力为 432 MPa,显然超过了不锈钢材质的屈服点 200 MPa,不符合要求。由图 3(b)可知,在同等的拉伸作用下,复合结构各部分产生的应力不相等,且产生的大应力主要分布在环形弹簧处,产生的最大应力为 145 MPa,没有超过不锈钢材质的最大屈服点。由此可知,在满足不锈钢材质的屈服极限下,给两种结构施加同等大小的拉伸力,复合结构产生的应变要明显大于平板结构产生的应变。因此,复合结构具有更大范围的应变测量能力。

4 载荷试验

对复合结构传感器进行加载试验,以验证复

合结构的应变和光栅波长的漂移量成线性关系(式(10))及大应变测量能力。复合结构传感器样品如图 4 所示,基底材料采用不锈钢,FBG 位于平板结构的中轴线,利用固化胶粘贴于设计位置,两端用塑料套管保护。测试试件如图 5 所示,试件是一特种钢材质的钢条,传感器用 496 胶黏剂粘贴在钢条的中间位置,以保证传感器受力均匀。

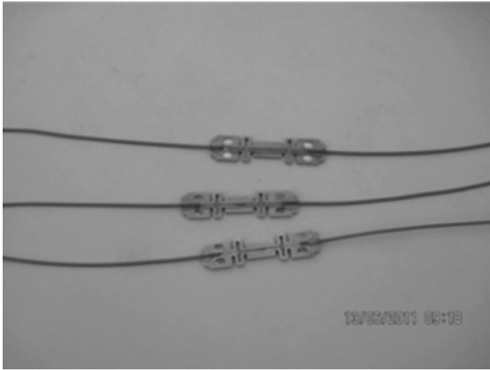


图 4 复合结构传感器样品

Fig. 4 Sample of composite structure sensor



图 5 测试试件

Fig. 5 Test sample

试验系统如图 6 所示。装有复合结构传感器的试件固定在 SANS 电子万能拉伸机上,同时装上引伸计,记录试件的应变。传感器的引出光纤接入光纤光栅波长解调仪,解调仪输出的波长数据通过网线发送给上位机进行显示和存储。试验设备如图 7 所示。试验采用的解调仪是自主研发的基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅波长解调仪,扫描频率为 100 Hz,分辨率为 -0.4 pm 。

试验时,选用中心波长分别为 1 556,1 559,

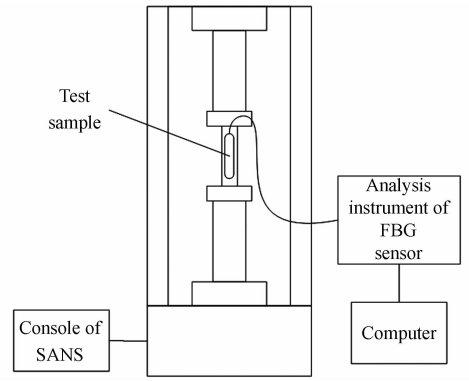


图 6 载荷试验系统

Fig. 6 System of load experiment

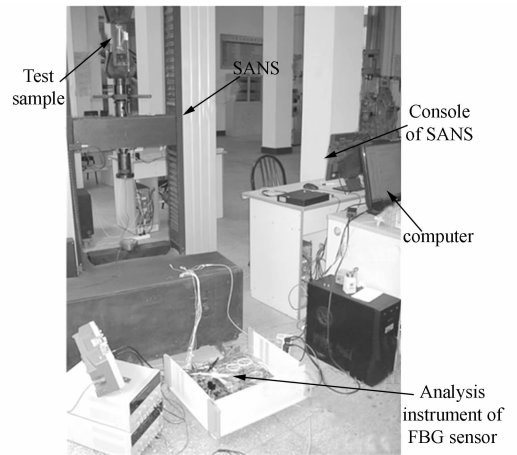


图 7 载荷试验设备

Fig. 7 Experiment set-up

1 528 nm 的传感器进行测试,分别对应图 5 中的 2~4 号试件。其中,2 号试件中光栅应变计是将光栅两端与基片的两个固定端胶黏,3 号和 4 号试件中光栅应变计是将光栅与基片的中间平板结构胶黏。传感器尺寸为: $L_1 = 8.84 \text{ mm}$, $L_2 = 4.61 \text{ mm}$, $r = 0.55 \text{ mm}$, $d = 5.04 \text{ mm}$,厚度为 1 mm。试验在空调房间进行,室温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。每次加载都从 0 N 连续加载到 70 000 N,同时按照一定的频率记录波长和应变数据,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,采用两端胶黏的封装方式(试件 2)的应变传感器的应变灵敏度较高,为 $1.4794 \text{ pm}/\mu\epsilon$,与文献[10]给出的应变灵敏度($-1.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$)相近,此法即为文献[10]采用的方法。而采用中间胶黏封装方式(试件 3,4)的应变传感器

的应变灵敏度较低,分别为 $0.0536 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $0.0374 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。其原因是:采用两端胶黏的封装

方式只是通过复合结构改变了基片的应变动态范围,光栅的应变和基片整体结构应变相同,并不能

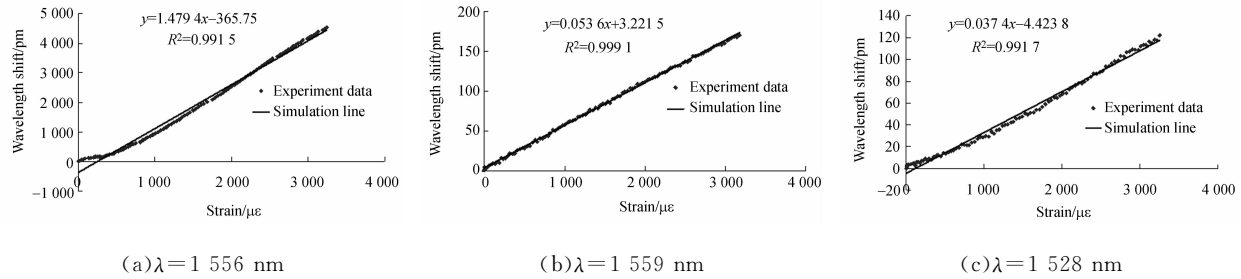


图 8 应变量与波长变化关系图

Fig. 8 Relationship between structure strain and wavelength shift

将基片的大应变转化为光栅的小应变;而采用中间胶黏的封装方式,不仅改变了基片的应变动态范围,而且通过环形平面弹簧结构将基片整体结构的大应变转化为中间平板结构的小应变,光栅粘贴在中间平板结构上感受小应变,从而将整体结构的大应变转化为光栅的小应变,因而应变灵敏度相对较小。

另外,根据传感原理可知,复合结构传感器的应变要同时满足光栅允许的最大应变和不锈钢平板允许的最大应变。中间胶黏封装方式的复合结构中,光栅的应变等于中间平板结构的应变。根据不锈钢材质的应变极限可知光栅允许的最大应变为 $930 \mu\epsilon$,按照普通光栅的应变灵敏度 1.2

$\text{pm}/\mu\epsilon$,可计算出光栅允许的最大波长漂移为 1116 pm ;再根据实验测得的复合结构应变灵敏度可计算出该结构的理论应变最大值,如表 1 所示。同时还可计算出这两个样品的中间平板结构和复合结构的应变比例系数,分别为 0.04467 和 0.03117 。

两端胶黏封装方式的复合结构中,光栅的应变等于复合结构的整体应变,假设光栅的应变极限($10000 \mu\epsilon$)为该结构的理论应变最大值,按照上述的应变比例系数可计算出该条件下中间不锈钢平板的应变分别为 $446.7, 311.7 \mu\epsilon$,都小于不锈钢的应变极限 $930 \mu\epsilon$,因此可认为两端胶黏封装方式复合结构的理论最大应变值为 $10000 \mu\epsilon$ 。

表 1 试验数据

Tab. 1 Result of experiment data

中心波长/nm	封装方式	应力/N	应变/ $\mu\epsilon$	波长漂移/pm	应变灵敏度/ $\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$	最大理论应变/ $\mu\epsilon$
1556	两端胶黏	69257	3244	4526.1	1.4794	10000
1559	中间胶黏	69869	3180	170.8	0.0536	20820.90
1528	中间胶黏	70379	3253	122.2	0.0374	29839.57

由表 1 中的数据可知,采用中间胶黏封装方式的复合结构传感器可实现大于 $20000 \mu\epsilon$ 的测量。但这种封装方式的两个样品的实测应变灵敏度不同,其原因有:(1)采用固化胶将传感器胶黏在试件上时,由于人为操作精度不高造成两固定点之间的距离不相等,从而导致环形平板弹簧结构长度与两固定点之间长度的比例关系不相等,因此引起应变灵敏度不同;(2)由于传感器本身体积很小,而加工工艺水平有限,造成环形平板弹簧结构长度与复合结构整体长度的比例关系不同,

从而导致应变灵敏度不同;(3)实验虽然在空调房间进行,但温度仍存在较小范围的波动,不同实验时刻的温度稍有差异,且没有进行温度补偿,因而由温度引起的光栅的中心波长漂移也存在一定的差异,从而导致应变灵敏度不同;(4)由于拉力机和解调仪本身就存在一定的误差,这也会导致应变灵敏度不同。因此,采用中间黏胶封装方式的复合结构光栅应变传感器进行实际测量时,不仅要先标定好应变灵敏度,还要进行有效的温度补偿处理。

5 结 论

本文根据船舶结构健康监测中应变测量的特点,研制了一种具有环形平面弹簧和平板复合结构的FBG传感器,该传感器可以将复合结构的大应变转化为中间平板结构和光栅的小应变来实现大应变测量。本文给出了理论模型,并通过有限

元法对其进行受力分析,验证了该传感器实现大应变测量的可行性。试验结果表明,复合结构传感器的理论量程大于 $20\ 000\ \mu\epsilon$,且线性度较好,相关系数大于0.99。另外,传感器采用不锈钢材质作为基底,且体积小,因此成本较低,便于安装;而且贴片式结构和船舶结构外形相容性较好,利于水密性封装。该型FBG传感器在船舶结构健康监测中具有较大的应用前景。

参考文献:

- [1] 李惠,周文松,欧进萍,等.大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J].土木工程学报,2006,39(2):46-52.
LI H, ZHOU W S, OU J P, *et al.*. A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(2):46-52. (in Chinese)
- [2] 李硕,黄俊斌,顾宏灿,等.基于光纤光栅应变传感器的潜艇结构监测系统[J].舰船科学技术,2012,34(2):77-80.
LI SH, HUANG J B, GU H C, *et al.*. Research on a monitor system based on FBG strain sensor for submarine's structure[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(2):77-80. (in Chinese)
- [3] 张春胜,黄德彬.金属材料手册[M].北京:化学工业出版社,2004:56-58.
ZHANG CH SH, HUANG D B. *The Enchiridion of Metal Material*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:56-58. (in Chinese)
- [4] ITU Study Group 15-Contributions. *Proposed Revision of Recommendations G. 652 and G. 655* [S]. 2000.
- [5] GOH C, SET S, KIKUCHI K, *et al.*. Greater than 90 nm continuously wavelength-tunable fibre Bragg gratings[C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003: 643-644.
- [6] SHEN X Y, LIN Y C. A large-scale strain sensor based on fiber Bragg grating[J]. *SPIE*, 2011, 8191: 81911Z.
- [7] ZHOU Z, LAN C G, OU J P. New kind of FBG-based crack (large strain) sensor [J]. *SPIE*, 2006, 6167:616714.
- [8] 何俊,周智,懂惠娟,等.灵敏度系数可调布拉格应

变传感器设计[J].光学精密工程,2010,18(11):2339-2345.

HE J, ZHOU ZH, DONG H J, *et al.*. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2339-2345. (in Chinese)

- [9] 吴翌,李川,李英娜,等.大应变光纤Bragg光栅传感器的研究[J].传感技术学报,2011,24(8):1141-1145.
WU K, LI CH, LI Y N, *et al.*. Research of fiber Bragg grating sensor with large strain[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(8): 1141-1145. (in Chinese)
- [10] MOI 光纤传感系列产品资料[Z/OL]. <http://www.moiag.com>.
The fiber sensing product information of MOI[Z/OL]. <http://www.moiag.com>.
- [11] 金秀梅,杜彦良.预应力筋长期大应变测量的光栅传感技术研究[J].压电与声光,2010,32(4):547-550.
JIN X M, DU Y L. Research on the FBG sensing technology for long-term measuring of the large strain of prestressed reinforcement[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, 32(4): 547-550. (in Chinese)
- [12] 贾相飞,林玉池,黄银国,等.基于塑料光纤的大应变测量研究[J].传感器与微系统,2010,29(12):22-24.
JIA X F, LIN Y CH, HUANG Y G, *et al.*. Research on large strain measurement based on plastic optical fiber [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(12):22-24. (in Chinese)
- [13] 孙丽.光纤光栅传感应用问题解析[M].北京:科学出版社,2012:10-11.
SUN L. *Analysis of the Application Problem in Fiber Bragg Grating Sensing* [M]. Beijing: Science Press, 2012:10-11. (in Chinese)

作者简介:



吴晶(1982-),男,湖北武汉人,博士研究生,讲师,2004年,2007年于大连舰艇学院分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤光栅传感技术和结构健康监测方面的研究。E-mail: wj82116@126.com

导师简介:



吴哈平(1964-),男,湖南澧县人,博士,教授,博士生导师,2005年于华中科技大学获得博士学位,主要从事光电子系统总体技术及设计的研究。E-mail: wuhanping601@sina.com