

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006016

船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究*

江舒¹, 李涛², 林杰俊², 叶志斌¹

(1. 衢州学院电气与信息工程学院 衢州 324000; 2. 上海船舶设备研究所 上海 200031)

摘要:为了保证船舶结构健康监测系统中应变变量值的准确可靠,设计并开发了一种可校准的船用光纤光栅应变传感器。该应变传感器结构经过优化具有较高的精度,且具有可反复安装使用和可校准的特点。设计了光纤光栅应变传感器专用校准装置,其量值可溯源至国家长度基准。通过加载实验验证了该应变传感器的性能,实验结果表明该应变传感器的最大非线性误差为 $3.4\ \mu\epsilon$,重复性为 $3.1\ \mu\epsilon$,证明了该传感器具有良好的测量精度。在此基础上,设计船体结构模型,对传感器进行了静态加载实验,传感器测量数据与理论计算结果符合较好,在实验水池中通过模拟实际风浪环境进行了波浪载荷测试,结果表明研制的船用光纤光栅应变传感器具有较好的可靠性。所研究为工作为船舶结构在线健康监测中的应变测量技术的研究与应用提供了有效的技术手段。

关键词: 光纤光栅;应变传感器;船舶结构健康监测;校准

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Development and application of the FBG strain sensor for ship

Jiang Shu¹, Li Tao², Lin Jiejun², Ye Zhibin¹

(1. School of electrical and Information Engineering, Quzhou College, Quzhou 324000, China;
2. Shanghai Marine Equipment Research Institute (SMERI), Shanghai 200031, China)

Abstract: For the ship health monitoring, it needs to ensure the accuracy and reliability of the strain sensing. To achieve this objective, a fiber Bragg grating (FBG) based on the traceable strain sensor is designed in this study. The strain sensor is optimized with high precision, and it can be repeatedly installed and calibrated. A special calibration device for FBG strain sensor is designed. Its measurement value can be traced back to the national length standard. The performance of the traceable strain sensor is evaluated by loading experiments. Results show that the maximum nonlinear error of the strain sensor is $3.4\ \mu\epsilon$, and the repeatability is $3.1\ \mu\epsilon$. These results prove the high accuracy of the proposed strain sensor. In addition, the wave load tests are also implemented in the standard pool simulating, which includes the actual wind and wave environment by installing the proposed traceable strain sensor on the ship structure model. It proves the reliability of the proposed strain sensor. The static loading experiment of the sensor is carried out, and the measured data of the sensor are in agreement with the theoretical calculation results. Therefore, this study provides an effective tool for strain sensing, especially for the ship on-line health monitoring system.

Keywords: fiber Bragg grating; strain sensor; ship health monitoring; calibration

0 引言

近年来,随着船舶结构的大型化、航行速度的快速化^[1],水弹性现象对船体结构的影响更加明显,首尾砰击和甲板上浪现象等概率增大,因此波浪载荷的非线性现

象将更趋显著。传统的船体结构设计流程已不足以预计非线性波浪载荷引起的相关结构强度要求,可能导致结构设计的过安全并造成成本增加或存在安全隐患。据统计资料表明,造成船舶严重损坏的原因中,约1/3是由于船舶结构损坏而造成的^[2-3]。因此,开展船舶结构在线健康监测并及时给驾船人员提供客观可靠的信息使船舶在

收稿日期:2020-01-11 Received Date:2020-01-11

* 基金项目:国防科工局技术基础科研项目(JSJL2017207B003)、衢州学院博士科研启动经费项目(004218017)资助

航行中抵抗各种风险具有重要的意义。

当前,船舶结构健康监测系统的研究和应用已经受到广泛关注并成为趋势^[4-9]。我国船舶结构在线健康监测系统的开发研究相对国外较晚,相关研究开展在国内起步于20世纪末。2000年前后,大连新船重工承担建设的30万吨级大型油船上首次安装了船体结构应力监测系统^[10]。中国船舶科学研究中心采用微电机系统(micro-electro mechanical system, MEMS)传感器等技术,开发研制了船体长期监测系统,该系统已小批量安装于实船,并逐步推向海洋工程装备市场^[11]。

应变传感器是船舶结构在线健康监测系统的核心,是保证系统量值准确可靠的关键。由于船上环境复杂,影响因素多,普通传感器达不到所需精度,且易受外界因素的干扰。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器具有灵敏度高、电绝缘性能好、抗电磁干扰能力强、可挠性以及不带电等独特优点,在船体监测等领域具有极好的应用前景^[12-16]。国外光纤光栅传感技术在船舶领域应用日趋成熟^[17-19],国内尚处于起步阶段。越来越多的国内科研机构与院校投入到了光纤光栅传感技术的研究中,例如:天津大学梁文斌^[20]对光纤光栅传感器封装结构进行了分析,设计出了表面粘贴式的光纤光栅应变传感器,并针对船体受力特点,提出利用遗传算法对四边筒支板进行光纤光栅传感器优化配置,利用较少的传感器建立测量网络。武汉理工大学何进飞^[21]在一艘大型海上浮吊吊臂桁架结构上粘贴光纤光栅传感器进行实时监测,采用低通滤波温度补偿法提高了监测精度。江南大学朱星盈等^[22]设计了一种双环减敏式结构的光纤光栅应变传感器,应变测量范围可达到 $\pm 5\ 000\ \mu\epsilon$ 。

目前,光纤光栅应用于船舶结构的长期测量还存在一些不足,主要是:1)光纤光栅温度补偿方法不恰当,导致测量数据受温度变化影响较大;2)封装工艺(如胶水粘贴等)性能不稳定等因素,导致传感器灵敏度系数离散性较大;3)传感器长期工作在恶劣环境下(例如经过海水浸泡和太阳曝晒),测量误差会增大,甚至发生脱落。

针对上述光纤光栅应变传感器灵敏度系数离散性和长期稳定性的问题,本文设计了一种可校准的船用光纤光栅应变传感器,该应变传感器具备一次性安装和可校准的优点,在安装前和工作期间均可以对其灵敏度系数进行校正,如发生损坏,也可以方便地进行更换;同时本文还设计了该传感器的专用校准装置,其量值可溯源至国家长度基准,不确定度在 $1\ \mu\epsilon$ 以内。为了验证本文提出的应变传感器的性能指标,在 $10\sim 2\ 000\ \mu\epsilon$ 范围内进行了应变加载测试,实验结果表明该应变传感器的最大非线性误差为 $3.4\ \mu\epsilon$,重复性为 $3.1\ \mu\epsilon$,证明了该应变传感器具有良好的测量精度。在此基础上,设计船体结构模型,在标准水池中通过模拟实际风浪环境进行了波

浪载荷测试,结果表明研制的应变传感器在船舶结构在线健康监测系统中具有较好的可靠性。本文的工作为保证船舶结构在线健康监测系统中应变量值的准确可靠测量提供了有效的技术手段,也为提高船舶在大风浪航行时的抗损能力提供了有力的技术支持。

1 船用光纤光栅应变传感器结构设计

光纤光栅传感原理的为:

$$\Delta\lambda_B = k_T\Delta T + k_\epsilon\epsilon \quad (1)$$

式中: k_T 为光纤光栅的温度灵敏度; k_ϵ 为光纤光栅的应变灵敏度。容易看出温度变化对于光纤光栅的测量具有明显的影响,在实际现场测量中可以使用专用温度补偿传感器对温度变化带来的误差进行补偿。本文仅针对应变进行研究,假设在测试过程中温度效应已补偿,则式(1)可以化简为:

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon\epsilon \quad (2)$$

本文设计的可校准船用光纤光栅应变传感器通常用于船体复杂结构位置的应力测量。传感器的工作原理如图1所示,刻有光纤光栅结构的光纤固定在封装基底(变形体)上,构成应变传感器的主体部分,被测结构表面的变形通过焊接在表面上的两个底座传递到封装基底,再通过封装基底传递到光纤光栅,焊接底座和封装基底之间采用螺钉紧固,引起反射光中心波长 λ_B 的变化量 $\Delta\lambda_B$,该波长信息经过解调装置解调后传输到上位计算机,经计算得到被测结构表面的应变。这种安装方式一方面可以应对不允许打孔攻丝的船体结构表面,另一方面,在安装前和工作期间均可以对其灵敏度系数进行校正,如发生损坏,也可以方便地进行更换。

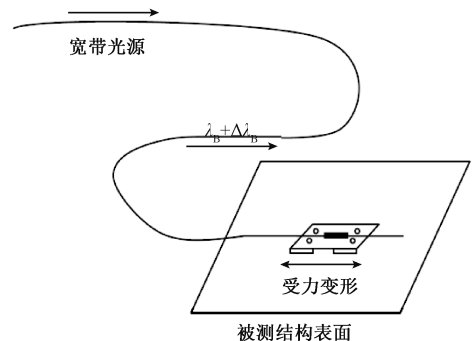


图1 可校准船用光纤光栅应变传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of the traceable FBG strain sensor

传感器变形体采用了常见的双环形结构设计,如图2所示,光纤光栅放置在中间的槽内,经过预拉后两端用环氧树脂固定,两端光纤固定点之间距离为100 mm,

这个距离就是传感器的有效应变长度。这种设计的变形体刚度远低于螺钉紧固和底座焊接处,能够将结构表面形变如实传递给封装在其上的光纤光栅。经过如图 3 所示的有限元分析可知,本文设计的传感器变形体在 $2\,000\ \mu\epsilon$ 以内,测得的变形量和实际变形量几乎一致。图 4 所示为加工完成的传感器变形体实物。

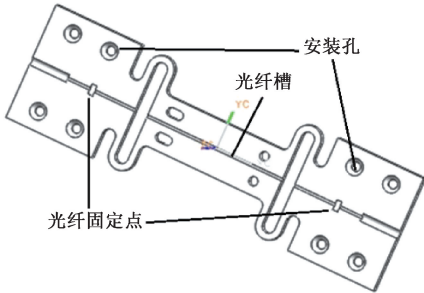


图 2 光纤光栅应变传感器变形体
Fig. 2 FBG strain sensor substrate

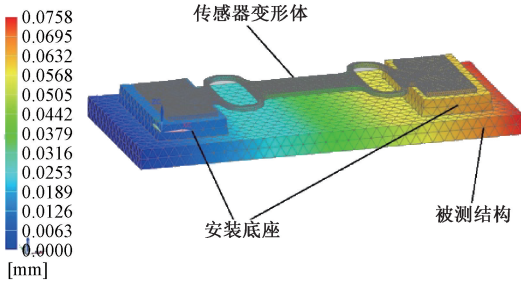


图 3 船用光纤光栅应变传感器中变形体有限元分析云图
Fig. 3 Cloud chart of finite element analysis of FBG strain sensor substrate

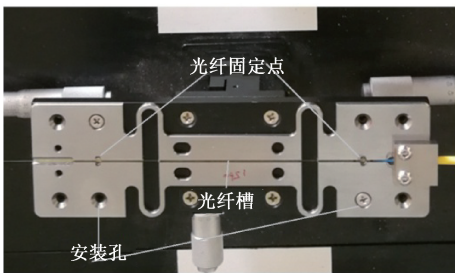


图 4 封装中的传感器变形体
Fig. 4 FBG strain sensor substrate being encapsulated

2 船用光纤光栅应变传感器的校准

2.1 光纤光栅应变传感器校准装置设计

本文针对上述船用光纤光栅应变传感器,设计了专

用的校准装置。如图 5 所示,传感器两端分别安装在固定台和滑台上,电机驱动精密滚珠丝杆旋转,从而带动滑台发生位移 Δl ,该位移变化量可用位移传感器测量得到,而传感器的有效应变长度 l 是确定的,因此相当于对传感器施加标准应变信号 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 。有效应变长度 l 和位移变化量 Δl 都可以溯源到长度基准,有效应变长度用游标卡尺即可测量,位移变化量非常微小,使用海德汉 MT1281 长度计进行测量,经过上海市计量测试技术研究院校准,这款长度计标准测量不确定度为 $0.05\ \mu\text{m}$,对文中的应变传感器有效应变长度 $100\ \text{mm}$,其应变不确定度即为 $0.5\ \mu\epsilon$ 。

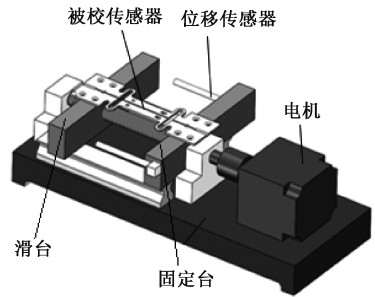


图 5 应变传感器校准装置
Fig. 5 Strain sensor calibration device

由于滑台与丝杆、导轨等部件之间存在微小间隙,滑台将相对固定台倾斜造成位移测量误差 $\Delta l'$ (即阿贝误差),如图 6 所示,在丝杆两侧对称安装位移传感器,则这两个位置的位移变化量误差大小相等,方向相反,即两个位移传感器的读数分别为 $\Delta l_1 = \Delta l + \Delta l'$ 和 $\Delta l_2 = \Delta l - \Delta l'$,因此两个传感器的读数取平均值 $\frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2} = \Delta l$,即可消除滑台倾斜产生的位移测量误差。

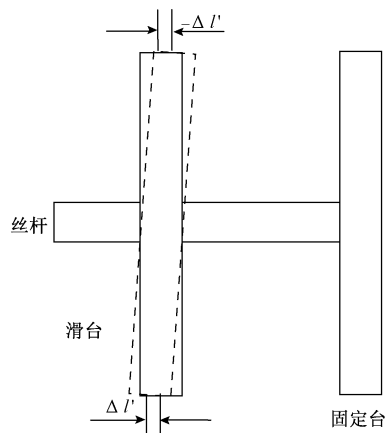


图 6 滑台倾斜造成的位移误差
Fig. 6 Displacement error caused by slide tilt

2.2 传感器校准实验方法

传感器输出的波长变化量为 $\Delta\lambda$, 则传感器对应的灵敏度 k_ε 为:

$$k_\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\varepsilon} \quad (3)$$

将传感器安装于校准装置, 按额定应变值进行预载, 预载荷保持 30 s, 再卸载至零, 每次预载荷卸去后, 经 30 s 记录显示仪表的读数。此过程重复 3 次。

根据金属粘贴式应变计国家标准 (GB/T 13992-2010), 应变灵敏度系数按传感器在 1 000 $\mu\varepsilon$ 测量点处的数值计算。加载至 $\varepsilon_c = 1\ 000\ \mu\varepsilon$, 记录传感器仪表显示的中心波长变化量 $\Delta\lambda$, 再卸载至零应变, 此过程重复 3 次, 取 3 次测量 $\Delta\lambda$ 的平均值, 按式(3) 计算应变传感器应变灵敏度。

在 10~2 000 $\mu\varepsilon$ 范围内分 12 点对传感器依次施加标准应变变量, 记录应变传感器的读数, 再卸载到零, 此过程重复 5 次, 如表 2 所示并计算最大非线性误差和重复性。平均应变值 $\bar{\varepsilon}$ 按式(4) 计算, 其中, j 为测量次数, ε_j 为进程中第 j 次测量每一校准点上传感器器的读数 (单位为 $\mu\varepsilon$), $\varepsilon_{j,0}$ 为第 j 次测量加载前传感器器的零点读数。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (\varepsilon_j - \varepsilon_{j,0}) \quad (4)$$

传感器的非线性误差 I_p 由式(5) 计算, 其中, ε_a 为标准应变值, 单位为 $\mu\varepsilon$ 。

$$I_p = \bar{\varepsilon} - \varepsilon_a \quad (5)$$

应变传感器的重复性按式(6) 进行计算, 其中, R_T 为应变重复性, 单位为 $\mu\varepsilon$; ε_{\max} 为 5 次测量值的最大值, 单位为 $\mu\varepsilon$; ε_{\min} 为 5 次测量值的最小值, 单位为 $\mu\varepsilon$ 。

$$R_T = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min} \quad (6)$$

2.3 校准实验结果

在如图 7 所示的校准装置上对传感器的灵敏度系数进行校准, 3 次测量的数据如表 1 所示, 得到船用光纤光栅应变传感器的应变灵敏度系数为 1.277 $\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。

表 1 传感器应变灵敏度系数校准数据

Table 1 Calibration data of strain sensitivity coefficient of the sensor

第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	平均值	灵敏度
/nm	/nm	/nm	/nm	$/(\text{pm} \cdot \mu\varepsilon^{-1})$
1.275	1.277	1.278	1.277	1.277

对船用光纤光栅应变传感器进行测量范围内的加载测试, 实验数据如图 8 所示, 可以看到 5 次加载的数据几乎完全重合, 根据式(5) 和(6) 计算得到应变传感器的最

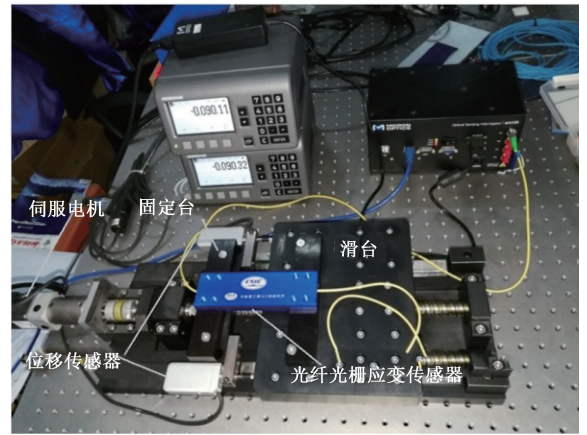


图 7 光纤光栅应变传感器校准装置

Fig. 7 Calibration device of the FBG strain sensor

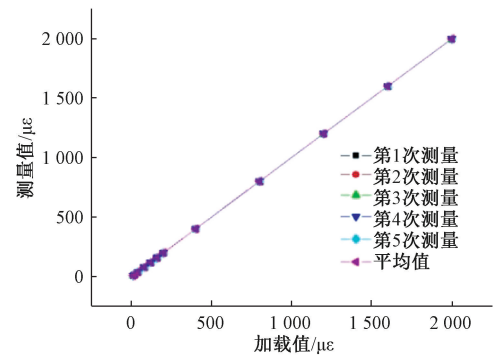


图 8 船用光纤光栅应变传感器加载实验数据

Fig. 8 Loading experimental data of the FBG strain sensor

大非线性误差为 3.4 $\mu\varepsilon$, 重复性为 3.1 $\mu\varepsilon$, 证明应变传感器具有良好的线性和重复性, 且应变传感器在整个测量范围内尤其是低端 (10~200 $\mu\varepsilon$) 均能够保证较高的测量精度。

3 船体结构模型波浪载荷模拟实验

3.1 船体结构模型设计

为了检验船用光纤光栅应变传感器在船舶结构健康监测中的性能, 尤其是验证在风浪环境中船体载荷测量的可靠性, 本文采用分段型结构设计了船体结构模型, 如图 9 所示。该模型采用钢材, 长 2 400 mm, 宽 400 mm, 深 200 mm, 排水量 89 kg, 重量约 89 kg, 船首尾分段, 中间间隔约 10 mm。测量波浪弯矩的变形梁采用 #45 钢材, 尺寸为 100 mm×6 mm×300 mm。图 10 所示为放置在试验水池中的船体结构模型。

3.2 静态加载实验

将船用光纤光栅应变传感器安装在弯矩梁上, 将船

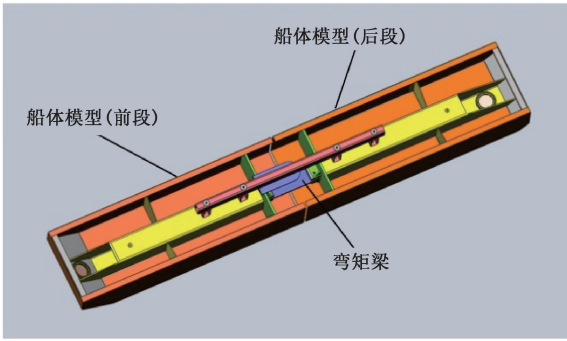


图 9 船体结构模型
Fig. 9 The hull structure model

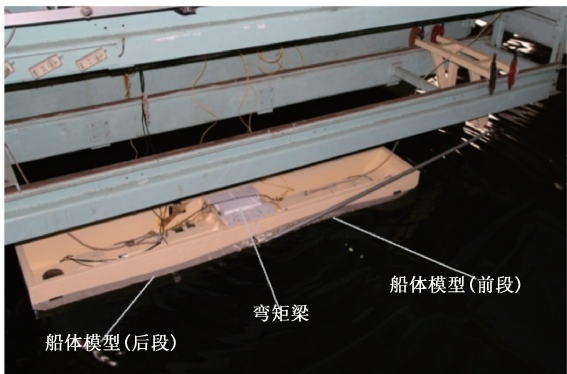


图 10 放置在试验水池中的船体结构模型
Fig. 10 Hull structure model placed in test tank



图 11 安装在弯矩梁上的船用光纤光栅应变传感器
Fig. 11 Fiber Bragg grating strain sensor for ship mounted on bending moment beam

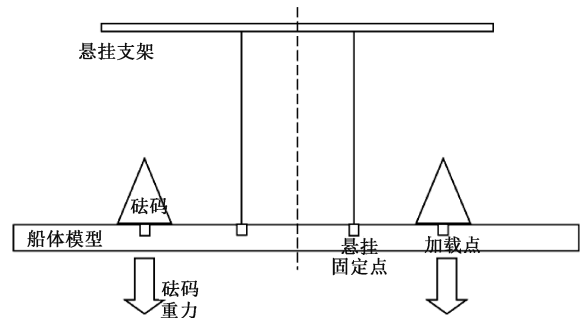


图 12 船体模型静态加载
Fig. 12 Static loading diagram of the hull model

体模型放入平静的水池中,如图 11 所示,此时变形梁上变形为零,按图 12 所示的方法对模型进行静态加载实验,在变形梁两侧的吊装孔位置悬挂钢丝绳,在模型两端加载砝码,即可对弯矩梁施加弯矩。

弯矩梁表面的应力 σ 为:

$$\sigma = \frac{Mh}{2I_z} = E\varepsilon \tag{7}$$

式中: M 为弯矩梁受到的弯矩; h 为弯矩梁的厚度; I_z 为惯性矩,对于矩形截面, $I_z = \frac{bh^3}{12}$, 其中 b 为截面的宽度; E 为材料的杨氏模量,对于 #45 钢, $E = 200 \text{ GPa}$ 。当弯矩梁上加载 $60 \text{ N}\cdot\text{m}$ 弯矩时,其表面应变 $\varepsilon = 500 \mu\varepsilon$ 。

在船体模型上按顺序施加弯矩 $0、20、40、60 \text{ N}\cdot\text{m}$,弯矩梁上光纤光栅应变传感器的测量数据如图 13 所示,可见随着弯矩增加,光纤光栅应变传感器的测量结果呈现良好的线性,在 $60 \text{ N}\cdot\text{m}$ 弯矩时,传感器测量结果为 $478 \mu\varepsilon$,与理论计算的结果吻合较好。

3.3 水池模拟实验

本文制造了 2 组共 10 种不同参数的波浪,参数如表 2 所示,其中第 1 组波浪波长为 2.44 m ,波高为 $5 \sim$

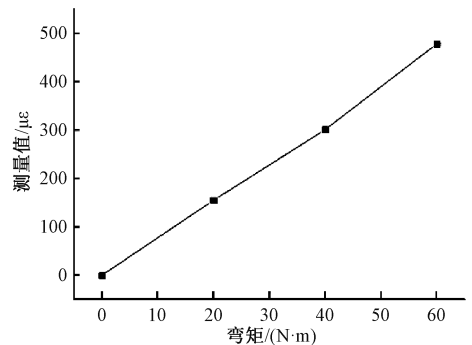


图 13 静态加载实验数据
Fig. 13 Static loading experimental data

15 cm,第 2 组波长为 2.8 m ,波长和第 1 组相同。采集弯矩梁上安装了两种不同的应变传感器,分别为船用光纤光栅应变传感器和电阻应变片,其中电阻应变片经过防水处理,可以短时间用于水池实验。将船用光纤光栅应变传感器的测量数据和传统的电阻应变片进行对比,结果如图 14 所示,可以看到在 2 组波浪下,随波浪高度增加,船用光纤光栅应变传感器和电阻应变片测量数值接

近,且均呈现良好的线性,其中在第1组波浪下,光纤光栅应变传感器的线性甚至略优于电阻应变片。实验结果证明船用光纤光栅应变传感器具有与电阻应变片同等的测量精度。

表2 船体模型波浪载荷实验参数

Table 2 Experimental parameters of wave load on the ship model

波高/cm	波长/cm
5	2.40
5	2.88
7.5	2.40
7.5	2.88
10	2.40
10	2.88
12.5	2.40
12.5	2.88
15	2.40
15	2.88

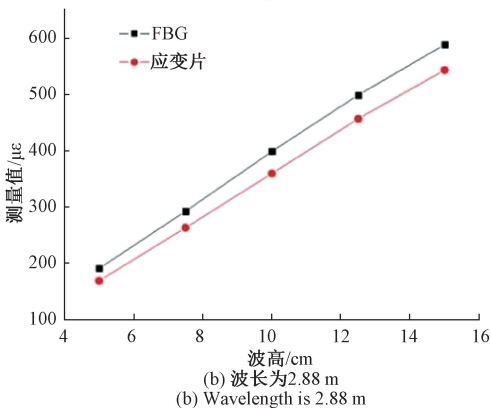
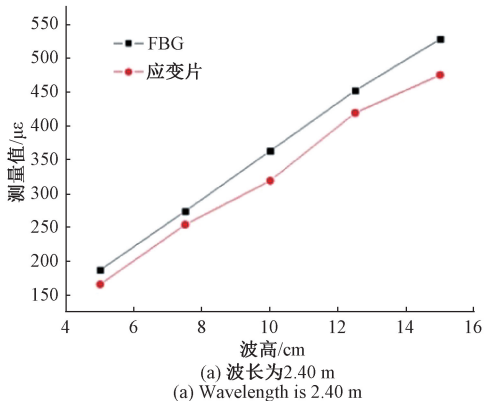


图14 船体模型波浪载荷测量数据

Fig. 14 Wave load measurement data of hull model

4 结 论

本文设计并实现了一种可校准船用光纤光栅应变传感器,该应变传感器结构具备可反复安装使用和可校准的优点,在安装前和使用一段时间后均可进行校准,并方便及时更换,为该传感器设计了专用的校准装置,其量值可以溯源到国家基准,装置不确定度在 $1 \mu\epsilon$ 以内。对应应变传感器施加 $10 \sim 2\,000 \mu\epsilon$ 的标准应变,实验数据显示该应变传感器最大非线性误差为 $3.4 \mu\epsilon$,重复性为 $3.1 \mu\epsilon$,传感器在整个测量范围内尤其是低端 ($10 \sim 200 \mu\epsilon$) 表现良好,证明了其具有较高的准确度和稳定性。本文还设计了船体结构模型,对船用光纤光栅应变传感器进行了静态弯矩加载实验和水池模拟实验,在接近实船的工况下对该应变传感器进行了测试,并和电阻应变片的测量结果进行了对比,实验结果表明本文提出的船用光纤光栅应变传感器测量结果和理论计算结果吻合较好,在测量精度方面能够取代传统的电类传感器,且由于光纤光栅本身的环境适应性强和组网便捷等优势,本文的工作为保证船舶结构健康监测系统的量值准确可靠提供了重要的技术手段,对提升大型船舶在航行过程中的抗损能力具有重要的意义。

参考文献

- [1] KARIANNE P, GREGG J, JENSEN A E, et al. Instrumentation of a high-speed surface effect ship for structural response characterization during sea trials[C]. Proceeding of SPIE, 2000, 3986:372-379
- [2] 杨华伟, 万正权. CAN总线在船舶结构安全监测系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 553-559.
YANG H W, WAN ZH Q. Application of CAN bus in ship structure safety monitoring system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(5): 553-559.
- [3] 汪雪良, 顾学康, 魏纳新, 等. 航行船舶在波浪中响应长期监测技术[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(2): 59-62.
WANG X L, GU X K, WEI N X, et al. Application research of long term monitoring technique for responses of ship traveling at sea [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(2): 59-62.
- [4] 金永兴, 胡雄, 施朝健. 集装箱船舶结构状态监测与评估系统[J]. 上海海事大学学报, 2008, 29(3): 1-4.
JIN Y X, HU X, SHI CH J. Supervision and evaluation system of container vessel hull structure [J]. Journal of

- Shanghai Maritime University, 2008, 29(3):1-4.
- [5] HJELME D R, BJERKAN L, NEEGARD S, et al. Application of Bragg grating sensors in the characterization of scaled marine vehicle modes [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1):328-336.
- [6] KEFAL A, OTERKUS E. Displacement and stress monitoring of a chemical tanker based on inverse finite element method [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 112(15):33-46.
- [7] DECO A, DAN M F. Real-time risk of ship structures integrating structural health monitoring data: Application to multi-objective optimal ship routing [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 96(3):312-329.
- [8] STULL C J, EARLS C J, KOUTSOURELAKIS P S. Model-based structural health monitoring of naval ship hulls[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(9): 1137-1149.
- [9] 李志锋. 基于 FBG 传感器的船舶强度状态监测[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
- LI ZH F. Ship strength monitoring based on FBG sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [10] 赵耕贤, 詹志鹄. 船体结构损坏事故案例分析[J]. *上海造船*, 2010(3): 63-66.
- ZHAO G X, ZHAN ZH H. Case study on damage accident of hull structure [J]. *Shanghai Shipbuilding*, 2010(3): 63-66.
- [11] 陈伟, 魏纳新, 张斌珍. 船体长期监测系统的应用现状及发展趋势[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(2):1-6.
- CHEN W, WEI N X, ZHANG B ZH. Application situation and development trend of ships hull long term monitor system[J]. *Ship Scienceand Technology*, 2016, 38(2):1-6.
- [12] 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):77-78.
- 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 Scienceand Technology*, 2012, 34(2):77-78.
- [13] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- [14] 马洒洒, 王彬, 李川, 等. 基于 FBG 应变传感器的隧道安全实时监测算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 304-311.
- MA S S, WANG B, LI CH, et al. Research on real-time monitoring algorithm for tunnel safety status based on fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 304-311.
- [15] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感器在舰船结构健康监测中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(10):50-54.
- WU J, WU H P, HUANG J B, et al. Studying the application of fiber Bragg grating sensor onship structures health monitoring [J]. *Ship Scienceand Technology*, 2014, 36(10):50-54.
- [16] 段成丽, 蒋亚东, 魏鸿雁, 等. 光栅式大应变传感器结构与特性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(6): 504-508.
- DUAN CH L, JIANG Y D, WEI H Y, et al. Design and characteristics investigation of grating large-scale strain sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2013, 27(6): 504-508.
- [17] LEWIS G, MAY R A, STORY D. The application of hull monitoring and ISIT technology to ship safety operation [C]. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers and the Ship Structure Committee*, 1996:1-11.
- [18] OKASHA N M, FRANGOPOL D M, DECO A. Integration of structural health monitoring in life-cycle performance assessment of ship structures under uncertainty [J]. *Marine Structures*, 2010, 23(3): 303-321.
- [19] 冒如权. 光纤布拉格光栅结构应变监测系统在船体上的应用[J]. *船舶*, 2017, 28(6):74-78.
- MAO R Q. Application of fiber bragg grating structural strain monitoring system on ship hull[J]. *Ship and Boat*, 2017, 28(6):74-78.
- [20] 梁文斌. 基于光纤光栅的船舶结构健康监测技术研究 [D]. 天津:天津大学, 2011.
- LIANG W B. Study on ship hull structural health monitoring technology based on fiber Bragg grating[D]. Tianjin:Tianjin University, 2011.
- [21] 何进飞. 大型浮吊臂架光纤光栅实时监测系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010.

HE J F. Research on the real-time monitoring system of large floating crane arm structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.

- [22] 朱星盈, 刘化利, 倪屹, 等. 新型双环减敏式光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3):168-172.

ZHU X Y, LIU H L, NI Q, et al. New Double-loop desensitization FBG strain sensor [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018, 55(3):168-172.

作者简介



江舒, 分别在 2006 年和 2013 年于南京理工大学获得学士学位和博士学位, 现为衢州学院副教授, 主要研究方向为光纤传感技术及应用、船舶结构健康监测以及计量校准。

E-mail: retcheywcs@aliyun.com

Jiang Shu received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Nanjing University of Science and Technology in 2006 and 2013, respectively. He is currently an associate professor at Quzhou College. His main research interests include fiber optic sensing technology and its application, ship structure health monitoring and measurement.



李涛, 1992 年于上海工业大学获得学士学位, 现为上海船舶设备研究所研究员, 主要研究方向为精密测量技术。

E-mail: litao117@sina.cn

Li Tao received his B. Sc. degree from Shanghai University of Technology in 1992. He is currently a researcher at Shanghai Institute of marine equipment. His main research interests is precision measurement technology.