

应用于船舶与海洋工程结构安全监测的应变传感器技术研究

郑庆新^{1,2}, 汪雪良^{1,2}, 赵晓宇², 杨华伟^{1,2}, 徐春^{1,2}, 蒋镇涛^{1,2}

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458;

2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: **目的** 研制适用于船舶与海洋工程结构安全监测的应变传感器, 并提出标定方法。**方法** 针对海洋环境特点, 考虑传感器封装技术, 通过结构与有限元仿真计算, 研制以弹性体和电阻应变片为主要组成的应变传感器。设计传感器专用标定梁, 并完成标定流程的制定和数据处理方法的研究, 开展标定试验, 获取传感器的标定数据, 得到传感器的转换系数和非线性误差。开展传感器的环境与可靠性试验验证。**结果** 传感器的转换系数具有较高的一致性, 系数最大为 0.342, 最小为 0.335, 偏差为 2.05%, 试验传感器最大非线性误差为 1.3%, 并通过了 9 项环境试验与 2.56 个循环 (共 1 980 h) 的可靠性试验考核。**结论** 提出的标定方法适用, 传感器可承受海洋环境条件中温度、湿度和盐度的长期作用, 满足实船监测需求。

关键词: 船海工程; 结构安全; 应变监测; 弹性体; 标定技术; 环境与可靠性试验

中图分类号: TH82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)01-0083-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.012

Research on Strain Sensor Technology Applied in Structural Safety Monitoring of Ships and Offshore Engineering

ZHENG Qing-xin^{1,2}, WANG Xue-liang^{1,2}, ZHAO Xiao-yu², YANG Hua-wei^{1,2}, XU Chun^{1,2}, JIANG Zhen-tao^{1,2}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China; 2. China Ship Science Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China)

ABSTRACT: The work aims to develop strain sensors suitable for safety monitoring of ships and marine engineering structures and propose calibration methods. In view of the characteristics of the marine environment, considering the sensor packaging technology, a strain sensor with elastomer and resistance strain gauges as the main components was developed through structural design and finite element simulation calculation. A special calibration beam for sensor was designed and the calibration

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-18

Received: 2021-12-25; Revised: 2022-02-18

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0502); 高技术船舶科研项目(工信部装函[2019]357号)

Fund: Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0502); High-tech Ship Scientific Research Project (Ministry of Industry and Information Technology Cover letter [2019] No. 357)

作者简介: 郑庆新(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为结构安全监测与评估技术、结构可靠性优化技术。

Biography: ZHENG Qing-xin (1992-), Male, Master, Engineer, Research focus: structural safety monitoring and evaluation technology, structural reliability optimization technology.

引文格式: 郑庆新, 汪雪良, 赵晓宇, 等. 应用于船舶与海洋工程结构安全监测的应变传感器技术研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 083-089.

ZHENG Qing-xin, WANG Xue-liang, ZHAO Xiao-yu, et al. Research on Strain Sensor Technology Applied in Structural Safety Monitoring of Ships and Offshore Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 083-089.

process and data processing method research were completed. The calibration experiment was carried out to obtain the calibration data of the sensor as well as the conversion coefficient and nonlinear error of the sensor. Environmental and reliability test verification of sensors were carried out. The conversion coefficient of the sensor had a high consistency. The maximum value of the coefficient was 0.342. The minimum was 0.335. The deviation was 2.05%. The maximum nonlinear error of the test sensor was 1.3%. It has passed 9 environmental tests and 2.56 cycles of reliability assessment with a total of 1 980 hours. The calibration method presented is applicable. The sensor can withstand the long-term effects of temperature, humidity and salinity in marine environmental conditions and meet the monitoring needs of real ships.

KEY WORDS: marine engineering; structural safety; strain monitoring; elastomer; calibration technology; environment and reliability test

船舶与海洋工程结构在自身内力和风、浪、流引起的周期性疲劳载荷作用下^[1-3],一些应力集中、高低强度钢交界、大开口等关键部位容易产生裂纹或裂纹扩展^[4-6],若得不到及时抑制,将威胁整体结构安全^[7]。另外,在船舶全海域大型化的趋势下,船舶航行中所遇到的极端波浪海况^[8]需要引起重视,这对船舶总纵强度提出了更高的要求^[9-11]。为保证人员和物品的安全,提高船舶与海洋工程结构预测风险的能力,结构安全监测技术正在快速发展^[12-14]。

在结构安全监测中,应变作为一个关系船舶总纵强度和局部强度非常重要的物理量,是不得不监测的关键参数。电阻应变片因其精度高、测量范围广、线性度好、品种多样化和价格便宜等特点,在应变测量领域得到了广泛的应用^[15-18]。但直接将电阻应变片应用于实船环境下的结构安全监测时,施工环境条件和操作工艺无法得到很好的保证,尤其在长期安全监测过程中,受到海洋环境条件中温度、湿度和盐度的长期作用,应变片片基容易老化,性能发生蠕变,甚至失效,以致传感器的长期可靠性无法得到保证^[19]。

针对船舶与海洋工程结构应变长期可靠性监测,文中设计了一种弹性体,结合电阻式应变片完成了适用于船舶与海洋工程结构安全监测的应变传感器研制,并针对应变传感器开展了标定方法、标定试验研究及环境与可靠性试验验证。

1 应变传感器研制

1.1 弹性体设计

当船舶与海洋工程结构受力发生微小变形时,弹性体敏感区域应同步发生变形。考虑到 $\pm 2\ 000\ \mu\epsilon$ 应变量程和海洋环境条件要求,弹性体选用经调质处理后的不锈钢。为充分利用惠斯通电桥的和差特性,提高电桥的灵敏度,在弹性体内部合适位置开圆形槽与方形槽,并合理减小应变片粘贴位置(①—④)的壁厚,使得弹性体①—④位置的拉压特性与惠斯通电桥的和差特性相对应。设计完成的弹性体包含敏感区域

和安装区域,具体结构如图1所示。



图1 弹性体结构

Fig.1 Elastomer structure

1.2 仿真计算

为获得弹性体在拉压载荷下敏感区域的应变响应特性,基于NX Nastran^[20]进行弹性体有限元仿真,参照弹性体实际安装状态施加边界条件和载荷,受力分析的应力云图如图2所示。根据弹性体受力分析结果可知,当对弹性体两端施加拉伸载荷时,弹性体敏感区域①和④处于拉伸状态,敏感区域②和③处于压缩状态;当对弹性体两端施加压缩载荷时,弹性体敏感区域①和④处于压缩状态,敏感区域②和③处于拉伸状态。

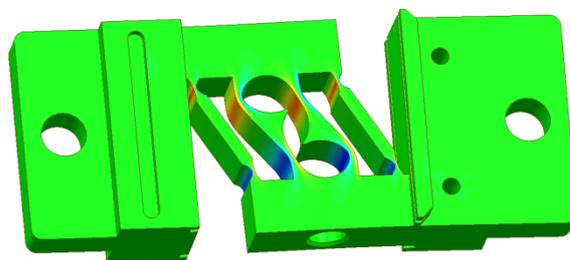


图2 弹性体有限元仿真计算云图

Fig.2 Finite element simulation calculation diagram of elastomers

经过多组弹性体仿真计算,不同载荷下弹性体两端相对位移及各敏感区域的应力水平如图3所示。从曲线可直观看出所设计的弹性体敏感区域各测点具有较好的线性响应。

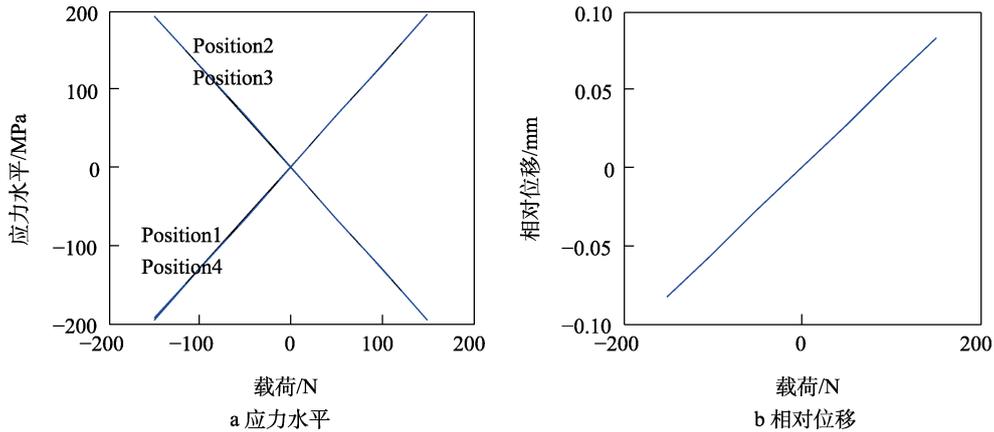


图 3 弹性体仿真计算结果

Fig.3 Simulation calculation results of elastomers: a) stress level; b) relative displacement

1.3 组桥处理

为提高弹性体的应变输出灵敏度, 并消除由温度变化引起的测量误差^[21], 采用 4 个标称阻值为 350 Ω 的电阻应变片粘贴在弹性体敏感区域的相应位置上, 组成等臂全桥。考虑到弹性体在受到拉伸载荷时输出应变值应该为正值, 根据电桥的和差特性, ①和④为相对桥臂, ②和③为相对桥臂, 具体桥路连接方式如图 4 所示, 桥路输出电压见式 (1)。

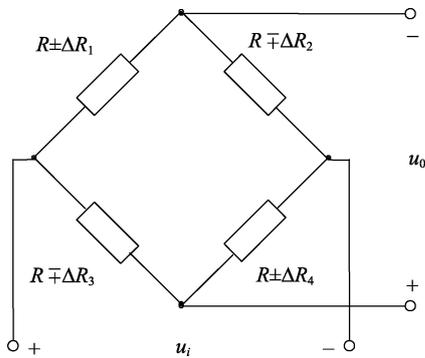


图 4 桥路接线图

Fig.4 Bridge wiring diagram

$$u_o = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_4 - \Delta R_2 - \Delta R_3}{4R} u_i = \tag{1}$$

$$\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{4} S u_i$$

式中: S 为应变片的灵敏系数; u_i 为激励电压; u_o 为输出电压; ε 为传感器各贴片位置的输出应变值。

1.4 传感器封装

考虑到海洋环境条件中温度、湿度和盐度的长期作用, 需要对弹性体进行封装, 封装后的传感器通过基座安装在船体上, 具体封装步骤为: 在弹性体上按位置要求粘贴好电阻应变片后, 采用固化烘烤工艺进行烘烤; 组桥处理; 使弹性体内部充满硅橡胶, 且采用橡胶垫进一步密封; 引出电缆, 并安装传感器盒盖。

2 应变传感器标定方法研究

对传感器作出封装处理后, 传感器输出的应变值并不是测点处的实际应变值, 需要对应变传感器进行标定。标定的目的是获取传感器输出应变与测点应变的转换系数和传感器非线性误差, 以便传感器可以投入实船应用。

2.1 标定梁设计

为获取传感器输出应变与测点应变, 需设计一标定梁作为力加载对象, 传感器安装于标定梁上 (前后均有基座可安装传感器), 另在梁上粘贴参考应变片, 作为测点应变值来源。为满足船体钢变形测量需求, 应变传感器对应的测点应变应满足 $\pm 2\ 000\ \mu\varepsilon$ 量程范围, 考虑 1.5 倍安全系数, 标定梁材料选用高强度不锈钢。采用工字形作为标定梁截面形状, 设计加工完成的标定梁长 740 mm, 梁截面尺寸和外形如图 5 和图 6 所示。

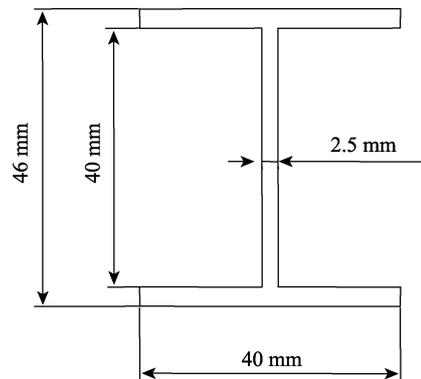


图 5 标定梁截面尺寸

Fig.5 Section size of calibration beam

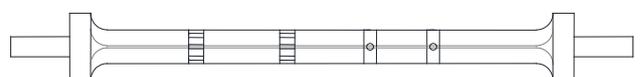


图 6 标定梁外形

Fig.6 Outline drawing of calibration beam

2.2 标定梁应变片布置

根据理论计算, 标定梁相同截面段各位置的轴向应变值应相同, 在标定梁表面粘贴 1 个参考应变片, 即可实现标定梁加载应变输出值的测量。但由于标定梁加工、应变片粘贴等工艺处理均存在由加工设备和人为因素导致的不可消除的系统误差, 因此在标定梁中段位置粘贴 10 个应变片, 在后续数据处理时, 分别计算 10 组标定参数, 进行均值化处理。标定梁应变片布置 (S1—S10) 如图 7 所示。

2.3 标定梁拉压载荷计算及标定流程

在加载标定梁时, 为达到应变传感器的满量程测

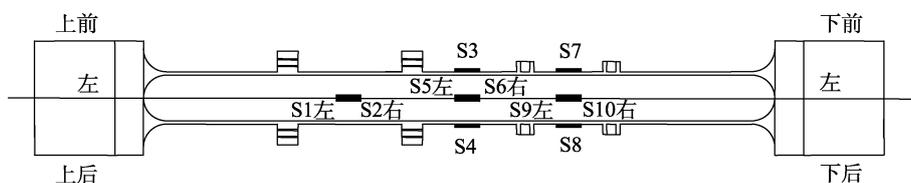


图 7 标定梁应变片布置
Fig.7 Layout of calibration beam strain gauge

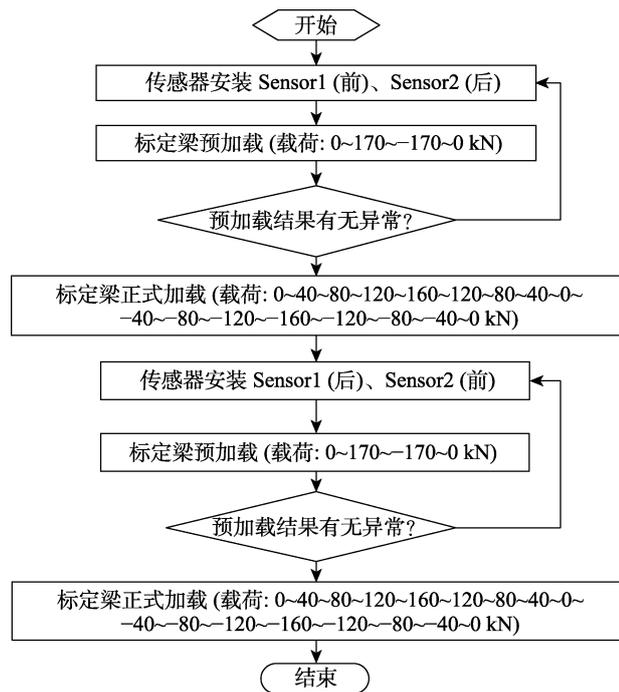


图 8 应变传感器标定流程
Fig.8 Calibration process of strain sensors

2.4 标定数据数理方法

根据应变传感器标定流程可知, 每次正式加载会有 17 次保载阶段。在保载阶段, 各应变片与传感器测量值应趋于小波动下的平稳, 使用各测点保载阶段的输出均值进行传感器标定参数计算具有较高的可信度。因此, 标定数据处理主要包含以下几个步骤: 标定数据保载阶段数据提取; 各测点保载阶段均值计

试, 标定梁测点应变输出至少达到 $\pm 2\ 000\ \mu\epsilon$ 。根据式 (2) 可知, 对标定梁两端施加的载荷应超过 $\pm 140\ 080\ \text{N}$ 。

$$F = E \cdot A \cdot \epsilon \quad (2)$$

式中: E 为材料弹性模量; A 为标定梁贴片处原始截面积; ϵ 为标定梁轴向应变。

根据上述计算结果, 并考虑梁装载过程中的初始应力及梁前后位置存在应变差异的误差影响, 确定如下的应变传感器标定原则: 先进行预加载, 再进行正式加载, 同时考虑前后传感器的位置交换 (加载速度为 $4\ \text{kN/s}$, 每级载荷保载 $20\ \text{s}$), 如图 8 所示。

算; 计算传感器与各应变片的线性系数, 并作均值化计算, 得到传感器转换系数; 传感器非线性误差计算。

经过第二个步骤, 得各应变片的测量值为 X_i (i 为 $1\sim 10$), 单个传感器的测量值为 Y , 假设 $X_i = k_i Y + b_i + \epsilon_i$, 则可将传感器与各应变片线性系数 k_i 和偏移量 b_i 的求解转化为非线性最优化问题的求解^[22-23], 目标函数如式 (3) 所示。

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{10} \left[\sum (k_i Y + b_i - X_i)^2 \right] \quad (3)$$

求解出 k_i (i 为 $1\sim 10$) 后, 取传感器与各应变片线性系数 k_i 的均值作为传感器的转换系数 K , 即:

$$K = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} k_i \quad (4)$$

将传感器原始测量值 Y 与拟合直线 $X_i = k_i Y + b_i$ 的最大线性偏差作为传感器输出的非线性误差 L_{fi} , 即

$$L_{fi} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (5)$$

式中: B 为拟合直线与应变片测量值最大偏差的绝对值; A 为应变片测量值绝对值的最大值。

3 应变传感器标定试验

3.1 传感器标定试验系统搭建

传感器标定试验系统主要包括力加载设备、标定梁装置和数据采集设备等。力加载设备采用 walter+bai LFV 500 HH 疲劳试验机, 数据采集设备采用 DEWESoft SIRIUS 数据采集系统, 搭建完成的传感器标定试验系统如图 9 所示。



图 9 传感器标定试验系统
Fig.9 Calibration test system of sensors

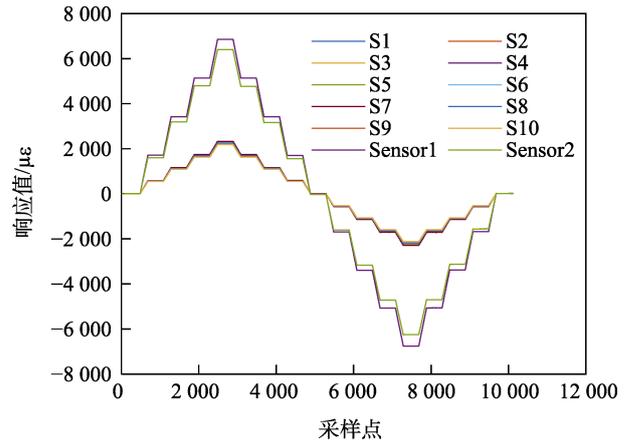


图 10 各组传感器对应的正式加载响应曲线
Fig.10 Formal loading response curve corresponding to each group of sensors

3.2 传感器标定数据处理

按照 2.3 节标定流程,对编号为 Sensor1—Sensor8 共 8 个应变传感器进行了标定,并按照 2.4 节标定数据处理方法对 8 个应变传感器对应的 8 组标定数据组(见表 1)对应的标定数据进行保载阶段数据提取、保载阶段均值计算和标定参数计算等数据处理。

通过对各数据文件进行数据提取处理,得到各组传感器对应的正式加载响应曲线,以第一组为代表,如图 10 所示。

计算 8 组保载阶段测点响应均值数据,进而计算得到的各传感器与各参考应变片的线性系数、各传感器的转换系数和非线性误差最大值,见表 2。

从表 2 中可知,各传感器与各参考应变片的线性系数均值最大为 0.342,最小为 0.335,系数均值最大偏差为 2.05%,各传感器的最大非线性误差为 1.3%。

表 1 传感器标定数据组
Tab.1 Calibration data group of sensors

| 组别 | Group1 | | Group2 | | Group3 | | Group4 | |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 编号 | Sensor1/前 | Sensor2/后 | Sensor2/前 | Sensor1/后 | Sensor3/前 | Sensor4/后 | Sensor4/前 | Sensor3/后 |
| 组别 | Group5 | | Group6 | | Group7 | | Group8 | |
| 编号 | Sensor5/前 | Sensor6/后 | Sensor6/前 | Sensor5/后 | Sensor7/前 | Sensor8/后 | Sensor8/前 | Sensor7/后 |

表 2 传感器转换系数和非线性误差计算结果
Tab.2 Conversion coefficients and non-linear error calculation results of sensors

| 编号 | 位置 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | 系数均值 | 误差最大值/% |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Sensor1 | 前 | 0.324 | 0.321 | 0.332 | 0.327 | 0.329 | 0.325 | 0.339 | 0.327 | 0.317 | 0.316 | 0.335 | 0.56 |
| | 后 | 0.343 | 0.340 | 0.352 | 0.347 | 0.348 | 0.345 | 0.359 | 0.347 | 0.336 | 0.335 | | |
| Sensor2 | 前 | 0.323 | 0.320 | 0.331 | 0.326 | 0.328 | 0.324 | 0.338 | 0.327 | 0.316 | 0.316 | 0.337 | 0.67 |
| | 后 | 0.348 | 0.345 | 0.357 | 0.352 | 0.353 | 0.350 | 0.365 | 0.352 | 0.341 | 0.340 | | |
| Sensor3 | 前 | 0.334 | 0.331 | 0.343 | 0.338 | 0.339 | 0.336 | 0.350 | 0.338 | 0.327 | 0.326 | 0.342 | 0.71 |
| | 后 | 0.347 | 0.344 | 0.356 | 0.351 | 0.352 | 0.349 | 0.363 | 0.351 | 0.340 | 0.339 | | |
| Sensor4 | 前 | 0.324 | 0.321 | 0.332 | 0.328 | 0.329 | 0.326 | 0.340 | 0.328 | 0.317 | 0.317 | 0.335 | 0.59 |
| | 后 | 0.343 | 0.340 | 0.352 | 0.347 | 0.348 | 0.344 | 0.359 | 0.347 | 0.336 | 0.335 | | |
| Sensor5 | 前 | 0.328 | 0.326 | 0.337 | 0.332 | 0.333 | 0.330 | 0.344 | 0.332 | 0.322 | 0.321 | 0.340 | 1.3 |
| | 后 | 0.348 | 0.345 | 0.357 | 0.351 | 0.353 | 0.349 | 0.364 | 0.352 | 0.340 | 0.340 | | |
| Sensor6 | 前 | 0.329 | 0.326 | 0.337 | 0.332 | 0.334 | 0.330 | 0.344 | 0.332 | 0.322 | 0.321 | 0.341 | 1.2 |
| | 后 | 0.350 | 0.347 | 0.359 | 0.354 | 0.355 | 0.351 | 0.366 | 0.354 | 0.343 | 0.342 | | |
| Sensor7 | 前 | 0.325 | 0.322 | 0.333 | 0.329 | 0.330 | 0.327 | 0.341 | 0.329 | 0.318 | 0.318 | 0.337 | 0.96 |
| | 后 | 0.346 | 0.343 | 0.355 | 0.349 | 0.351 | 0.347 | 0.362 | 0.350 | 0.339 | 0.338 | | |
| Sensor8 | 前 | 0.324 | 0.322 | 0.333 | 0.328 | 0.329 | 0.326 | 0.340 | 0.328 | 0.317 | 0.317 | 0.340 | 1.04 |
| | 后 | 0.351 | 0.348 | 0.360 | 0.355 | 0.357 | 0.353 | 0.368 | 0.355 | 0.344 | 0.343 | | |

4 环境与可靠性试验验证

为验证传感器在海洋环境下的适用性,在中国船舶工业电工电子设备环境与可靠性试验检测中心,依据《环境试验大纲》与《可靠性考核试验大纲》开展了环境与可靠性试验验证,受试传感器共20套,如图11所示。环境与可靠性试验工况参数见表3,在2.56个可靠性循环中(包含1个24h冷循环,1.56个48h热循环),单套受试传感器累计有效试验时间为99h,所有受试传感器累计有效试验时间为1980h。



图11 传感器环境与可靠性试验

Fig.11 Environment and reliability test of sensors

环境与可靠性试验期间,传感器功能正常,责任故障数 $r=0$ 。试验结果表明,传感器满足设计指标要求,可承受海洋环境的长期作用。

表3 环境与可靠性试验工况参数

Tab.3 Duty parameters of environmental and reliability test

| 试验项目 | 工况 | 参数 | |
|--------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 环境试验 | 低温工作试验 | -28 °C | |
| | 低温贮存试验 | -40 °C | |
| | 高温工作试验 | 65 °C | |
| | 高温贮存试验 | 70 °C | |
| | 湿热试验 | 30~60 °C、RH95% | |
| | 振动试验 | | 1~16 Hz/位移±1 mm |
| | | | 16~60 Hz/加速度10 m/s ² |
| 冲击试验 | 30g半正弦11 ms/每方向3次 | | |
| 倾斜摇摆试验 | | ±5°~±45° | |
| 可靠性试验 | 盐雾试验 | 35 °C/96 h/5%NaCl pH=6.5~7.2 | |
| | 冷循环 | 22~40~22 °C/24×1 h | |
| | 热循环 | 22~70 °C/RH95%~22 °C/48×1 h | |
| | 热循环 | 22~70 °C/RH95%~22 °C/48×0.56 h | |

5 结论

文中针对船舶与海洋工程结构应变测量需求,研制了适用于海洋环境的应变传感器,并针对所研制的传感器开展了标定方法研究。通过标定试验,得到了多组传感器的标定数据,结论如下:

1)该应变传感器利用了惠斯通电桥的和差特性,消除了温度变化引起的测量误差影响,并增加了传感器的输出灵敏度。

2)采用的传感器标定方法将标定梁加工、应变片粘贴等系统误差影响降到最小,通过标定试验所得到的各传感器转换系数具有较高的一致性,传感器最大非线性误差为1.3%。

3)通过环境适应性和可靠性试验验证,表明传感器可承受海洋环境条件中温度、湿度和盐度的长期作用,满足实船监测需求。

参考文献:

- [1] 韩芸,崔维成,黄小平,等.大型船舶结构的疲劳强度校核方法[J].中国造船,2007,48(2):60-67.
HAN Yun, CUI Wei-cheng, HUANG Xiao-ping, et al. Fatigue Strength Assessment of Large-Scale Ship Structures[J]. Ship Building of China, 2007, 48(2): 60-67.
- [2] 马丽.低周疲劳载荷下含裂纹损伤的船舶结构承载力研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
MA Li. Research on the Bearing Capacity of Ship Structure with Crack Damage under Low Cycle Fatigue Load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [3] 赵仕伦.海洋平台疲劳裂纹扩展评估技术研究[D].广州:华南理工大学,2018.
ZHAO Shi-lun. Research on Fatigue Crack Growth Assessment Technique of Offshore Platforms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [4] 刘汶征,王璞.FPSO甲板开孔板架孔边的应力集中优化[J].船舶与海洋工程,2021,37(4):7-11.
LIU Wen-zheng, WANG Pu. Stress Concentration Optimization for the Opening Edges of FPSO Deck Grillage Frame[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2021, 37(4): 7-11.
- [5] 张博,林雪,田素玲.断裂力学在船舶结构疲劳评估中的应用[J].舰船科学技术,2018,40(4):19-21.
ZHANG Bo, LIN Xue, TIAN Su-ling. Application of Fracture Mechanics to Fatigue Evaluation of Ship Structure[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(4): 19-21.
- [6] 赖蕾,张世联.长甲板室端部应力集中分析及优选设计研究[J].舰船科学技术,2016,38(13):6-10.
LAI Lei, ZHANG Shi-lian. Analysis and Optimum Design on the Stress Concentration of Long Deckhouse End[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(13): 6-10.
- [7] 张涛.基于光纤光栅传感技术的船舶结构长期监测方法[D].北京:中国舰船研究院,2014.
ZHANG Tao. Long-Term Monitoring Method of Fiber Grating Sensing Technology for Ship Structure[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2014.
- [8] 黄维平,刘超.极端海洋环境对海洋平台疲劳寿命的影响[J].海洋工程,2012,30(3):125-130.
HUANG Wei-ping, LIU Chao. Study on the Method of the Fatigue Design of Offshore Platforms Considering

- Extreme Sea States[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(3): 125-130.
- [9] 张增胤, 赵耀. 极端海况下船舶总纵极限强度可靠性计算方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(1): 63-71.
ZHANG Zeng-yin, ZHAO Yao. Reliability Calculation Method of Longitudinal Ultimate Strength of Ships under Extreme Sea Conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(1): 63-71.
- [10] 丁超, 赵耀. 船舶总纵极限强度后剩余承载能力有限元仿真方法研究[J]. 中国造船, 2014, 55(1): 54-65.
DING Chao, ZHAO Yao. Simulation of Ship Residual Carrying Capacity after Longitudinal Ultimate Strength[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(1): 54-65.
- [11] 应荣榕, 王骁, 王菲菲, 等. 舰船大风浪中纵向强度标准应用[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(1): 51-54.
YING Rong-rong, WANG Xiao, WANG Fei-fei, et al. Study on Criteria of Longitudinal Strength for Ships in Rough Sea[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(1): 51-54.
- [12] 贾连徽. 船舶运动与应力实时监测系统的研究与开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
JIA Lian-hui. Research and Development of the Real-Time Monitoring System of Ship's Motions and Stresses[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [13] 杨华伟, 汪雪良, 张涛, 等. 基于结构应变监测的风帆推力测量方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 109-114.
YANG Hua-wei, WANG Xue-liang, ZHANG Tao, et al. Study on the Measurement Method of Sail-Assisted Thrust Based on Structural Strain Monitoring[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 109-114.
- [14] 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 Xue-liang, GU Xue-kang, WEI Na-xin, 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.
- [15] 谢艳, 贾雨龙, 郝红斌, 等. 一种小型应变片电阻自动测量仪设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(20): 52-56.
XIE Yan, JIA Yu-long, HAO Hong-bin, et al. Design of a Small Strain Gage Resistance Automatic Measuring Instrument[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(20): 52-56.
- [16] 余航, 舒安庆, 丁克勤. 电阻应变片敏感栅栅丝尺寸对测量精度影响的研究[J]. 中国仪器仪表, 2021(4): 71-75.
YU Hang, SHU An-qing, DING Ke-qin. Research on the Influence of the Size of Strain Gauge Sensitive Grid Wire on Measurement Accuracy[J]. China Instrumentation, 2021(4): 71-75.
- [17] 王楷焱, 王灵犀, 任晓雪, 等. 一种基于电阻应变片的发动机悬置传递力测试研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2021, 17(2): 79-83.
WANG Kai-yan, WANG Ling-xi, REN Xiao-xue, et al. Research on Test Method of Engine Mount Force Based on Resistance Strain Gauge[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2021, 17(2): 79-83.
- [18] 李盼菲. 电阻应变测量中提高精度的方法研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(12): 62-64.
LI Pan-fei. Research on Method of Improving Accuracy in Resistance Strain Measurement Technique[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(12): 62-64.
- [19] 杨华伟, 黄进浩, 周平, 等. 一种封装集成式应力监测传感器: CN 110530568A[P]. 2019-12-03.
LI Liu-an, AO Jin-ping. Integrated GaN-Based Sensor for Synchronously Monitoring Solution Temperature and pH and Preparation Method Thereof: CN 110530568A[P]. 2019-12-03.
- [20] 李锦, 郑伟, 吴涛. 中文版 UG NX 10.0 技术大全[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
LI Jin, ZHENG Wei, WU Tao. Chinese Version of UG NX 10.0 Technical Encyclopedia[M]. 2nd Edition. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018.
- [21] 蔡共宣, 林富生, 陈兴洲. 工程测试与信号处理[M]. 第3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2017.
CAI Gong-xuan, LIN Fu-sheng, CHEN Xing-zhou. Engineering Test and Signal Processing[M]. 3rd Edition. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2017.
- [22] 郑庆新, 顾晓辉, 张洪铭. 基于SQP和自适应搜索的混沌粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(13): 131-136.
ZHENG Qing-xin, GU Xiao-hui, ZHANG Hong-ming. Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm Based on SQP and Adaptive Search[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(13): 131-136.
- [23] 葛超, 王蕾, 曹秀爽. MATLAB 技术大全[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
GE Chao, WANG Lei, CAO Xiu-shuang. MATLAB Technology Daquan[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.

责任编辑: 刘世忠