



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406945

引用格式:李伟,呼文佳,张伟明,等.基于光纤传感技术的海洋结构冰力传感器研发及应用[J].科学技术与工程,2025,25(20):8571-8582.

Li Wei, Hu Wenjia, Zhang Weiming, et al. Development and application of ice force sensors for marine structures based on fiber optic sensing technology[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8571-8582.

基于光纤传感技术的海洋结构冰力传感器 研发及应用

李伟¹, 呼文佳¹, 张伟明¹, 贾帅², 王欣², 张大勇²

(1. 中海油研究总院有限责任公司工程研究设计院, 北京 100010; 2. 大连理工大学化工海洋与生命学院, 盘锦 124000)

摘要 因传统的冰力测量方法存在稳定性和可靠性的局限,而光纤传感技术具有高灵敏度和抗干扰能力,研发了一种基于光纤传感技术的冰力传感器,并评估其在海洋结构现场应用中的有效性。基于光纤传感技术的基本原理和冰力传感器的设计要求,详细描述了传感器的研究、设计与安装过程,包括弹性元件的设计计算、光纤传感器的选择与布置、以及数据采集系统的构建,以确保满足冰力测量的精度要求,并在渤海北部海域的观测站进行一个冬季现场冰力测量。成功收集并分析现场冰力数据,评估了传感器的实际监测效果。实验结果表明:该系统在实际应用中表现出良好的稳定性和可靠性,所研发的光纤冰力传感器为海洋工程现场的冰力测量提供了新的可靠技术手段,为进一步的结构健康监测研究奠定了基础。

关键词 光纤传感技术; 冰力传感器; 现场冰力测量; 极值静冰力

中图分类号 TP212.1; **文献标志码** A

Development and Application of Ice Force Sensors for Marine Structures Based on Fiber Optic Sensing Technology

LI Wei¹, HU Wen-jia¹, ZHANG Wei-ming¹, JIA Shuai², WANG Xin², ZHANG Da-yong²

(1. Engineering Research and Design Institute, Research Institute of China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China;

2. School of Chemical Engineering, Ocean and Life Sciences, Dalian University of Technology, Panjin 124000, China)

[Abstract] Due to the limitations of traditional ice force measurement methods in terms of stability and reliability, and the high sensitivity and anti-interference capabilities of fiber optic sensing technology was given, a fiber optic ice force sensor was developed. The effectiveness of this sensor was evaluated in the context of its application in marine structures. Based on the fundamental principles of fiber optic sensing technology and the design requirements of the ice force sensor, the research, design, and installation processes of the sensor were described in detail, including the design calculations of the elastic element, the selection and arrangement of the fiber optic sensors, and the construction of the data acquisition system to ensure that the precision requirements for ice force measurement were met. A winter field measurement of ice force was conducted at an observation station in the northern Bohai Sea. Field ice force data were successfully collected and analyzed, and the actual monitoring performance of the sensor was evaluated. The experimental results indicate that the system exhibits good stability and reliability in practical applications. The developed fiber optic ice force sensor provides a new reliable technical means for ice force measurement in marine engineering and lays a foundation for further research in structural health monitoring.

[Keywords] fiber optic sensing technology; ice force sensor; on-site ice force monitoring; extreme static ice forces

数值模拟与试验室试验可以揭示冰破碎过程及冰荷载变化的规律^[1-3]。但由于理论模型存在诸多理论假设,模型试验与真实结构存在尺度效应问题,两者均难以准确模拟真实海冰,因此理论分析和试验室试验结果均具有一定的局限性^[4],现场冰力实测是获得冰荷载最直接方式,也是冰力研究的重要手段^[5]。对海洋结构上的冰荷载测量研究^[6],

主要有直接法和间接法两种:直接法是在冰与结构之间安置测力装置,如各种压力盒、测力计等;间接法是通过结构响应对冰荷载进行反演^[7]。而在原型结构上进行的现场冰力测量是最具有说服力的数据^[8]。

传统的冰力测量方法通常依赖于应变片等接触式传感器^[9],但这些方法在恶劣海洋环境中的稳

收稿日期:2024-09-16; 修订日期:2025-04-25

基金项目:国家自然科学基金(52071055);中国海洋石油有限公司科技项目(KJZH-2023-2402)

第一作者:李伟(1988—),男,汉族,河北张家口人,博士,高级工程师。研究方向:海上油气平台及新能源结构设计。E-mail:liweil72@cno-oc.com.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

定性和可靠性存在局限^[10]。如接触式传感器可能受到环境影响而导致不稳定或损坏;如2004—2005冬季锦州9-3MDP平台压力盒部分数据通道缺失,未能测到完整冰力数据^[11];安装接触式传感器需要在结构物表面或冰面上进行固定,这在海洋环境中可能面临困难,且传感器需要密封处理,长期在海冰环境中存活周期较短^[12],而谐振式压力传感器在极端温度下表现出的温度漂移特性需要通过优化结构和材料加以补偿。李光贤等^[13]研究表明,当使用Si-SiO₂复合谐振梁才可以有效降低谐振器的灵敏度温度漂移。近年来,光纤传感技术因其高灵敏度、抗电磁干扰能力强、适应性广等优点,在结构健康监测领域应用广泛^[14],涵盖裂缝监测^[15]、力学加载测试^[16]、位移测量以及疲劳试验等方面的研究,光纤传感器能够高效、精准地捕捉结构受力及变形规律,并与有限元计算结果高度吻合^[17]。在冰力测量中,光纤传感器被安装在结构物表面,实时监测结构在冰载荷作用下的微小变形,从而评估冰力的大小和分布,因其高灵敏度和抗干扰能力,在恶劣环境中的表现优异,特别是对于复杂温度变化下的传感器性能优化问题,已有研究表明,柔性基体的热膨胀是影响光纤传感器应变传递率的重要因素。这一研究对于海洋结构在低温环境中的冰力测量具有重要的参考意义^[18]。

鉴于此,基于冰力传感器的设计要求,详细阐述冰力传感器的研究、设计与安装过程,包括弹性元件的设计计算、光纤传感器的选择和布置,以及数据采集系统的构建。通过试验室标定试验,验证传感器的性能和精度。在渤海北部海域观测站进行一个冬季现场冰力测量,收集冰力数据并进行分析,评估传感器的实际监测效果,初步验证了该冰力测量系统可靠性。

1 冰力传感器设计原理

1.1 冰力传感器研究过程

为了设计分布式冰力传感器并充分发挥传感器的优势,有必要了解海冰与直立海洋结构相互作用的破坏形式。其常见破坏形式包括劈裂破坏、屈曲破坏、弯曲破坏等^[19],劈裂破坏发生的机理是当冰与桩腿结构表面发生挤压时,冰板内径向裂纹受到拉力作用,裂纹迅速扩展,直到贯穿整个冰板;弯曲破坏是前端不规则的冰与结构接触,局部形成挤压破碎,挤压破碎逐渐扩展;屈曲破坏通常发生在冰厚较薄,冰结构不均匀的情况,如图1^[10]所示。而直接冰力测量能够提供关键的实时数据,可以更好的了解海洋结构受到的冰荷载情况^[20],其关键技

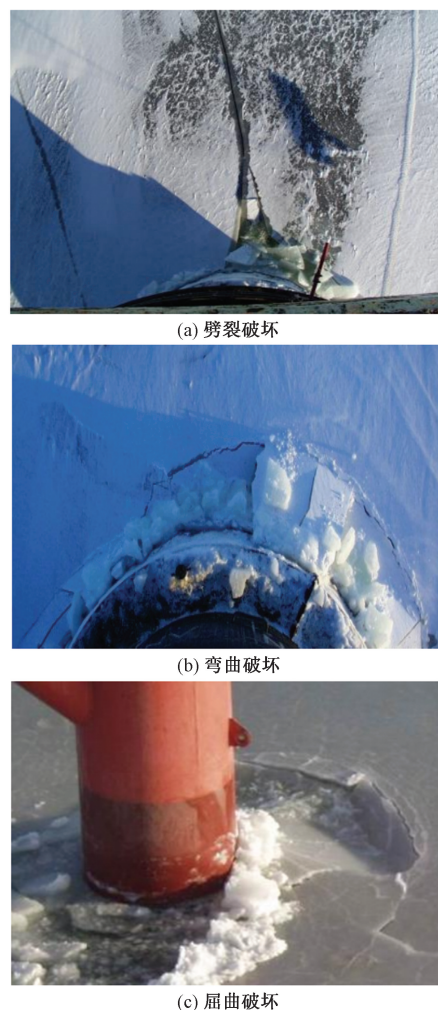


图1 冰与直立结构作用形式^[10]

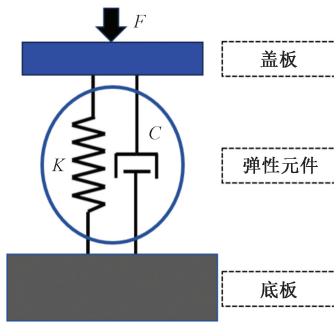
Fig. 1 Forms of interaction between ice and vertical structures^[10]

术及难点主要在于冰力传感器的设计和现场安装^[21-22]。所设计的分布式冰力传感器采用光纤传感技术,具有以下特点:①分布式传感器设计:采用光纤传感技术,具有高灵敏度和抗干扰能力,能够精确测量冰荷载;②现场安装:采用螺栓连接方式,简化了安装过程,并且损坏时易于更换,避免了焊接等复杂方式带来的困难。

冰力传感器的物理模型通常由底板、弹性元件和盖板组成,如图2所示。底板作为支撑物连接到平台的桩腿,弹性元件是传感器的核心部件,用于测量冰力引起的传感器响应。冰力直接作用于盖板上,盖板将冰力传递给弹性单元,如果盖板的刚性不足,会因为冰力作用产生弯曲降低测量精度。

冰力传感器的设计需考虑以下因素。

(1)传感器面积。为提高对局部冰力的准确度,传感器面积应尽可能小,以增加对微小冰力变化的敏感度。



F 为冰力,即海冰作用于传感器的力; K 为弹性元件的刚度;
 C 为弹性元件的阻尼系数

图2 冰力传感器的物理模型

Fig. 2 Physical model of ice force sensor

(2)覆盖区域大小和位置选择。选择覆盖区域时需考虑整体和局部冰力的需求,覆盖主要受冰力影响的区域。

(3)传感器表面形状和特性一致性。为确保测量准确性,传感器表面形状和特性应与结构一致。

(4)弹性单元设计。弹性单元作为核心组成部分,需考虑冰力方向和侧向力影响,保证传感器稳定性和可靠性。

1.2 冰力传感器弹性元件设计

冰力传感器的弹性元件是关键组成部分,其主要功能是将冰力转换为可测量的信号,以实现冰力传感器的监测功能^[23]。常见的弹性元件包括等强度梁、两端固支梁、矩形膜片、空心圆柱等。

等强度梁在集中力 F 作用在自由端时,距力的作用点任何距离的截面上的应力都相同,贴光纤位置不受影响,但考虑其外部冰力较大,若使用等强度梁设计时具有较大厚度,故采用两端固支梁来减小厚度,其受力原理如图3所示。

在集中力 F 作用下跨中应力及应变的计算公式分别为

$$\varepsilon = \frac{3lF}{4Ebh^2} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3Fl}{4bh^2} \quad (2)$$

式中: E 为材料弹性模量; F 为海冰作用于两端固支梁的集中力,根据历年数据估算不同海域海冰力大小; l 为梁长度; b 为宽度; h 为厚度; ε 为光纤可测应

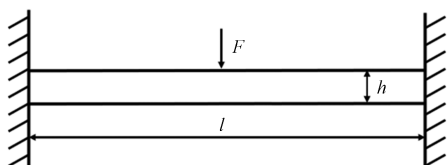


图3 两端固支梁及受力图

Fig. 3 Simply supported beam with force diagram

变; σ 为许用应力。

外力与结构应变为线性关系,可以使用测应变的方式测量外荷载,首先根据不同桩腿直径、考虑成本条件来确定合适的单个弹性元件尺寸长度 l 和宽度 b ,再根据式(1)和式(2)设计应变与外荷载之间关系来确定梁的合理厚度 h 。

两端固支梁跨中最大挠度为

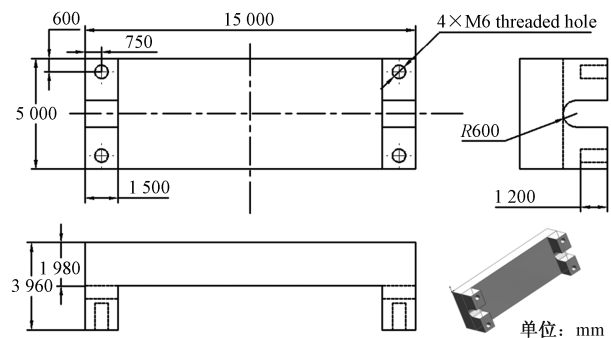
$$y = \frac{l^3 F}{192EJ} \quad (3)$$

跨中最大挠度值加上梁本身厚度,得到弹性元件的整体高度。最低自振频率远大于结构固有频率。最低自振频率的表达式为

$$f_0 = \frac{22.37}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{A\rho}} \quad (4)$$

式(4)中: ρ 为材料密度; J 为惯性矩; A 为截面面积。

根据式(1)~式(4),设计的弹性元件尺寸如图4所示,采用两端固支梁的形式,结合光纤传感技术可以将冰力转换为可测量的信号,即光纤的应变,来实现对冰力的实时监测与测量。测量灵敏度可以根据实际冰力大小通过改变元件尺寸进行调整。



R 为圆孔半径;M6 表示公称直径为 6 mm 的普通螺纹;
threaded hole 为螺纹孔

图4 弹性元件设计示意图

Fig. 4 Elastic element design schematic

1.3 冰力传感器整体设计

通过在弹性元件结构表面布设光纤传感器,监测结构在冰载荷作用下的微小变形,从而实现了对冰力的实时监测与测量,整体结构各部分都可以根据实际冰力情况设计其尺寸大小,来适应不同情况。

由于光纤的实际可测量长度短于弹性元件长度,直接对整个弹性元件施加载荷会增加模型的复杂性,故考虑将外部冰力转化为集中力的形式作用于跨中,可以简化模型并减少计算的复杂性,便于冰力测量。根据冰力传感器设计原理,增加底板和盖板的设计,综合考虑,设计传感器如图5所示。

在设计的冰力传感器结构中,每个冰力传感器由4个测力单元组成,每个测力单元的上表面为迎

冰面,迎冰面的长度为 200 mm,宽度为 120 mm,主要用于承受冰力作用。

这些测力单元将外部冰力转化为集中力,作用于两端固支梁(弹性元件),使其产生变形。通过光纤传感器测得固支梁的应变,可以获取表面冰力。4个测力单元通过底板进行连接固定,以确保传感器的稳定性和准确性。

1.4 非均布载荷作用的影响

冰力作用在冰力传感器的不同位置时,测量结果可能会有所不同,由于潮位变化,冰会在不同的高度和位置对结构产生作用,这使得冰荷载并非均匀地作用到传感器结构上。因此,非均匀载荷对结

构的影响需要特别关注。

为了确保传感器设计的有效性,李光贤等^[13]使用有限元仿真软件 COMSOL 对传感器进行仿真验证,结果证明了设计的可行性和优越性。采用有限元仿真对冰力传感器的结构和性能进行模拟,确保其在实际应用中的可靠^[24]。使用有限元分析软件 ANSYS APDL 对测力单元进行静力分析,其中单元类型为 Solid185,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,底部施加固定约束。在分析过程中,考虑不同加载条件下的位移相对变化量,并进行比较,其中均布载荷与集中荷载两种情况下(载荷作用方向为 z 方向,竖直向下) x 方向位移云图如图 6 所示。

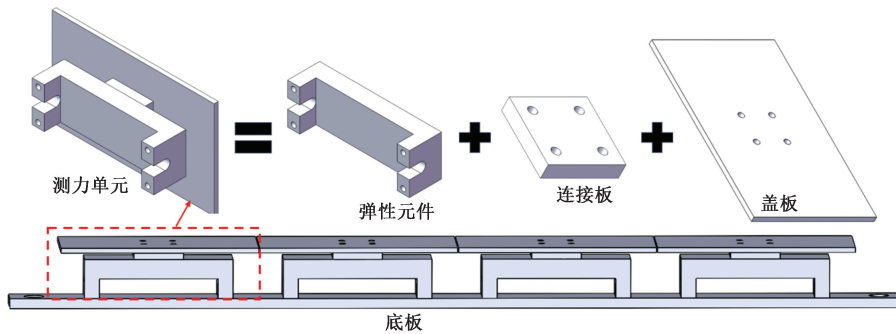


图 5 冰力传感器整体结构图

Fig. 5 Overall structure diagram of ice force sensor

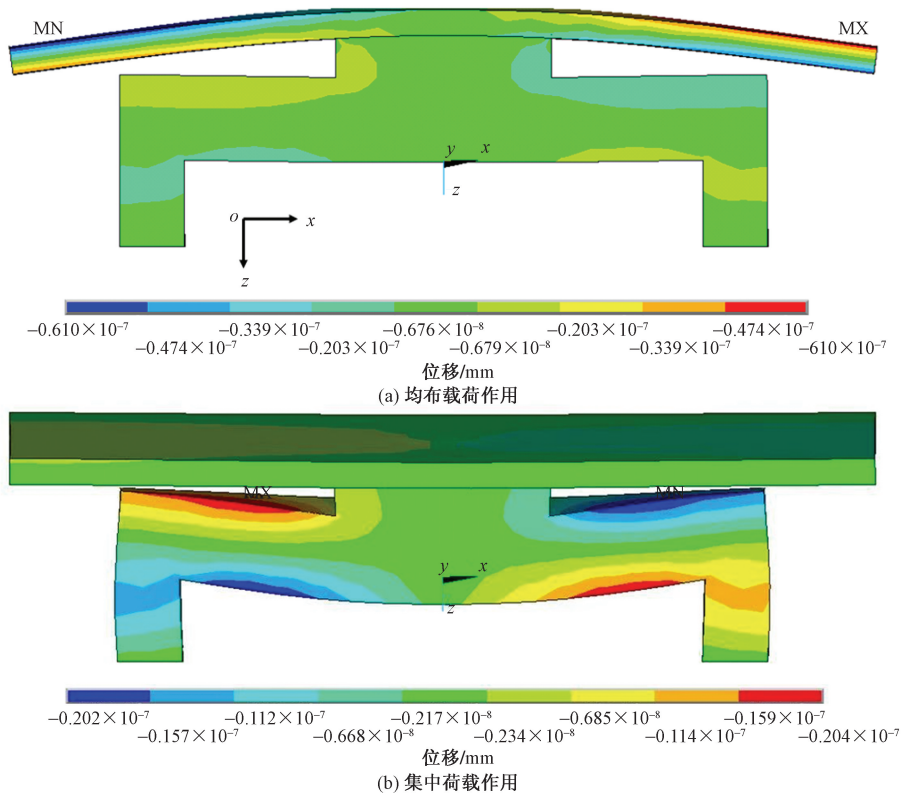


图 6 有限元模型 x 方向位移云图

Fig. 6 Finite element model x -direction displacement cloud diagram

分析结果显示,在均布载荷作用下,结构表面的位移分布相对均匀,位移变化较为渐进。在集中载荷作用下,局部区域出现较高的位移,表明出现了应力集中。相对于均布载荷,集中载荷可能导致局部结构变形和应力集中。实际冰力作用情况复杂,考虑潮位变化以及冰力作用位置的影响,模拟在 x 方向和 y 方向不同面积下的非均匀荷载变化。两种工况如图 7 所示。

为了更清晰地描述加载过程,将受力面划分为不同区域,并在这些区域内施加不同的载荷。假设冰在某一特定位置的荷载是其他位置的 2 倍,根据渤海平台历年所受冰力情况,施加总荷载为 50 kN,以此模拟现场实际情况。通过对不同工况的静力分析,得到了传感器两固定点 x 方向相对位移变化量,具体如表 1 所示。共进行 4 组非均匀加载试验,

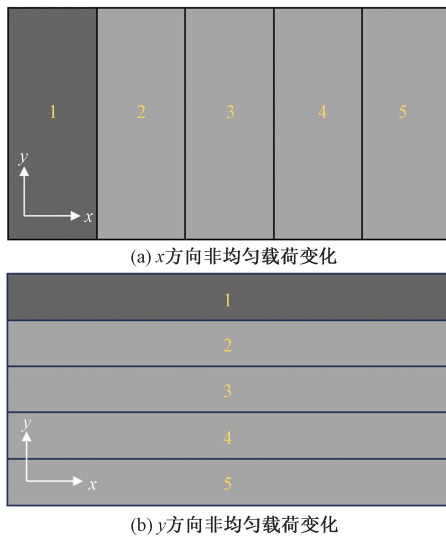


图 7(a)1~5 表示将受力面沿 x 方向等分为 5 个区域, x 正方向依次标记为 1、2、3、4、5;图 7(b)1~5 表示将受力面沿 y 方向等分为 5 个区域, y 正方向依次标记为 1、2、3、4、5

图 7 不同条件下非均匀荷载变化

Fig. 7 Variation of non-uniform load under different conditions

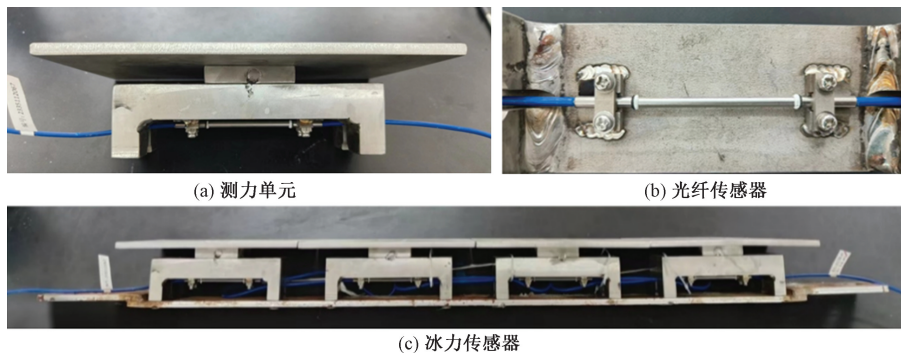


图 8 安装完成后的结构图

Fig. 8 Structure diagram after installation completion

表 1 不同条件下位移相对变化量

Table 1 Relative displacement variation under different conditions

方向	位移相对变化量/mm			
	组 1	组 2	组 3	组 4
x	2.22×10^{-8}	2.24×10^{-8}	2.30×10^{-8}	2.35×10^{-8}
y	2.42×10^{-8}	2.41×10^{-8}	2.39×10^{-8}	2.38×10^{-8}

其中组别 1, x 方向[图 7(a)]表示:将受力面沿 x 方向分为 5 等分区域(x 正方向依次为 1、2、3、4、5),并在第 1 区域(图 7 中标记为 1)施加载荷值为后 4 区域(图 7 中标记为 2、3、4、5)的两倍荷载,两部分区域荷载总值为 50 kN。组别 2 为前两部分区域(图 7 中标记为 1、2)施加载荷值为后 3 区域(图 7 中标记为 3、4、5)的两倍荷载,其他情况依此类推。

分析结果表明,不同加载条件下的最大相对误差为 8.28%,考虑到实际工程中的不确定性和复杂性,这个误差范围是可以接受的,并且能够满足现场冰力测量的要求。

2 传感器封装标定及组装

2.1 传感器标定试验及结果分析

将设计好的冰力传感器进行加工,安装完成后的传感器如图 8 所示,由于安装了盖板和连接件,其整体灵敏度需要由试验机进行标定。

在标定试验过程中,通过施加已知大小的力,并记录传感器输出的波长变化信号,然后与已知的力进行计算及线性拟合,分析确定其精度。其波长变化量随外力加载曲线如图 9 所示。

在图 9 中,每个标定点记录了光纤传感器波长变化(纵坐标 y)与施加力(横坐标 x)的对应关系。拟合曲线的斜率即为灵敏度系数 k (外荷载与光纤波长变化量之间转换系数)

通过线性拟合系数 R^2 检查拟合曲线与实际数据的吻合程度,其数值都接近 0.999,表明传感器在

设计范围内具有良好的线性和重复性,为传感器的准确性和可靠性提供了有力的支持。实验对传

感器进行标定,传感器性能参数如表 2 所示。对传感器的重复性进行评估。在与标定 1 相同冰力负载条件下,进行 3 次测量。采用 RSD 即相对标准偏差评估测量结果的重复性和精密度,RSD 越小,表明多次测量数据越集中,离散程度低,传感器在相同条件下测量结果稳定、重复性好。RSD 通过标准偏差与平均值的比值来计算,计算公式如式(5)所示。3 次测量的相对标准偏差 RSD 分别为 1.1%、1.6%、1.7%,表明传感器具有良好的重复性。

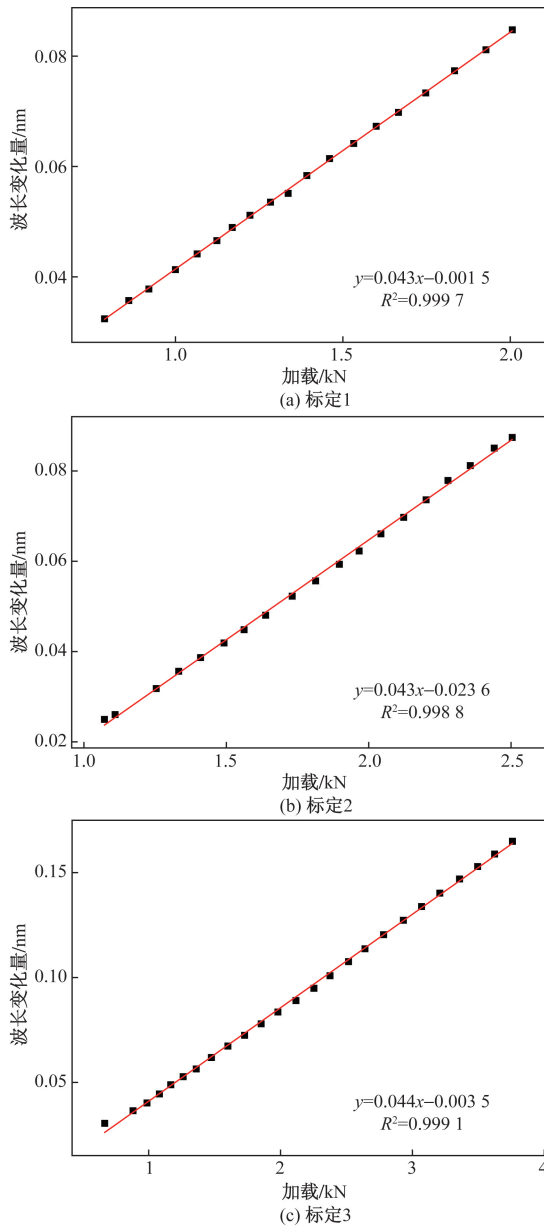


图 9 冰力传感器标定结果

Fig. 9 Calibration results of the ice force sensor

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}}{\bar{y}} \quad (5)$$

式(5)中: y_i 为第 i 个测量值; \bar{y} 为所有测量值的平均值; n 为测量的总次数。

表 2 传感器性能参数

Table 2 Sensor performance parameters

单个单元 量程范围/ kN	整体装置 量程范围/ kN	分辨 率/N	波长范 围/nm	精度 (F. S.)/%	安装方式
50	200	50	1 510 ~ 1 590	0.2	螺栓固定 或焊接

2.2 冰力传感器整体组装

研究表明,深海环境的复杂性极易导致传感器疲劳失效或稳定性降低^[25],为了测量直立结构的冰力,采用分布式组装方法,具体如下。

(1)确定直立结构的直径,将圆箍安装于直立桩腿的上侧和下侧,采用 4 个半圆箍,每两个圆箍为一组,通过螺栓牢固地连接在直立桩腿的上侧和下侧。在单个半圆箍上焊接多个螺栓用来固定冰力传感器。

(2)为了覆盖一定角度范围,沿水平方向设置多个冰力传感器。每个冰力传感器的上端和下端通过上下两个螺栓固定在圆箍上,冰力传感器的安装如图 8 所示。每两个螺栓可以固定一个冰力传感器,具体如图 10 所示。

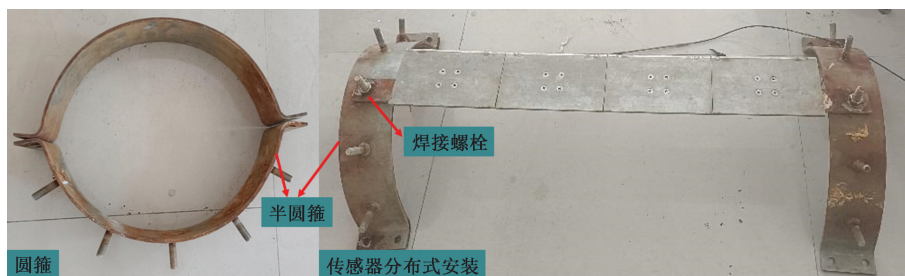


图 10 冰力传感器的整体组装方式

Fig. 10 Overall assembly method of the ice force sensor

遵循这些步骤可以有效地实现对直立结构冰力的分布式测量。另外,采用螺栓联接方式,方便进行传感器的安装与更换。

3 室内加载试验

3.1 试验装置

在大连理工大学低温试验室进行冰加载试验,试验室制冷系统主要设备包括压缩机组、冷风机,均压送风顶棚对低温试验室进行降温,可精确控制制冷量、温降速度和室内风速,可使试验中的制冰温度在 0 ~ -25 ℃ 范围。模型冰冻在冰槽中,冰槽底部安装了沿导轨滑动的滚轮,导轨用支架固定在地面上,确保冰的单向移动。冰撞击过程和试验装置如图 11 所示。

作动器的最大加载力为 50 kN,控制速度范围为 0.1 ~ 0.2 mm/s。模型冰的尺寸为 1 m(长) × 0.5 m(宽) × 0.03 m(高)。加工后的冰力传感器用螺栓固定在缩尺模型桩腿上。由于模型桩腿直径较小,为 200 mm,在其表面安装 3 个力测量单元,以覆盖冰力作用范围。共设 4 组工况(冰速 1、5、10、15 mm/s),每组工况重复 3 次试验,传感器及模型冰位置固定,未考虑非均匀加载的情况。

3.2 冰力幅值的验证

为验证传感器的准确性,设置 4 种不同模型冰的加载速度,分别为 1、5、10、15 mm/s,对 3 个测力单元进行加载测试。传感器的采样频率设定为 100 Hz。如图 12 所示,展现了单个传感器在 1 mm/s 和 5 mm/s 下采集的冰速时程曲线。

试验结果表明传感器有效记录并捕捉到了冰力冲击过程,说明该光纤传感器在冰力测量中的可用性。为了进一步验证冰力传感器的准确性,对执行器记录的载荷大小与 3 个力测量单元测得的整体冰力峰值进行统计分析。如图 13、表 3 所示,比较在 4 种不同条件下冰力峰值。

观察不同冰速下传感器与作动器的数值(表 3),



图 11 室内试验装置

Fig. 11 Indoor test device

可以看出,在大多数情况下相对误差均小于 10%,部分误差在 10% 以上,相邻测量值之间的差异不显著,这表明设计的传感器具有测量准确性,多次实验结果误差相对稳定,说明传感器具有一定的稳定性和重复性。

4 冰荷载现场监测

4.1 辽东湾北部海域监测站现场安装

为了验证测量系统在复杂海冰环境中的可靠性和准确性,在辽东湾北部海域监测站进行一个冬季现场冰力实测。

现场监测系统主要包括冰力传感器及数据采

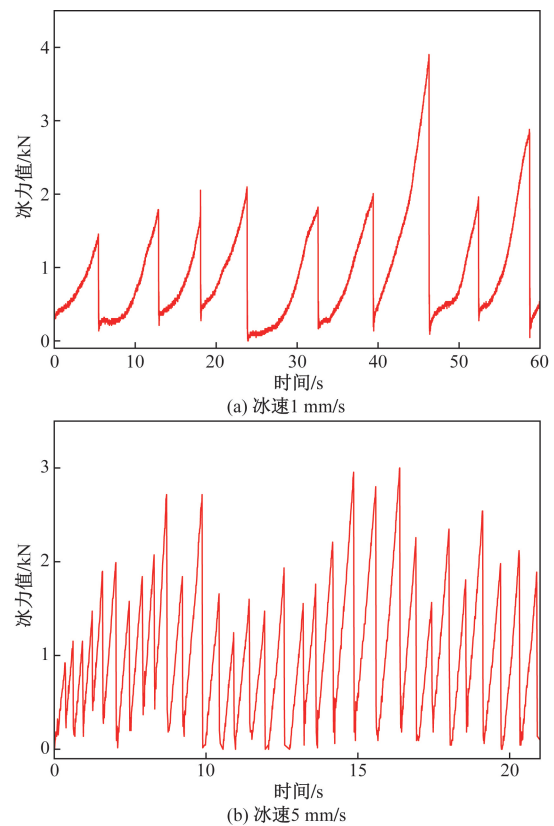


图 12 传感器记录冰力时程曲线

Fig. 12 Sensor-recorded ice force time history curve

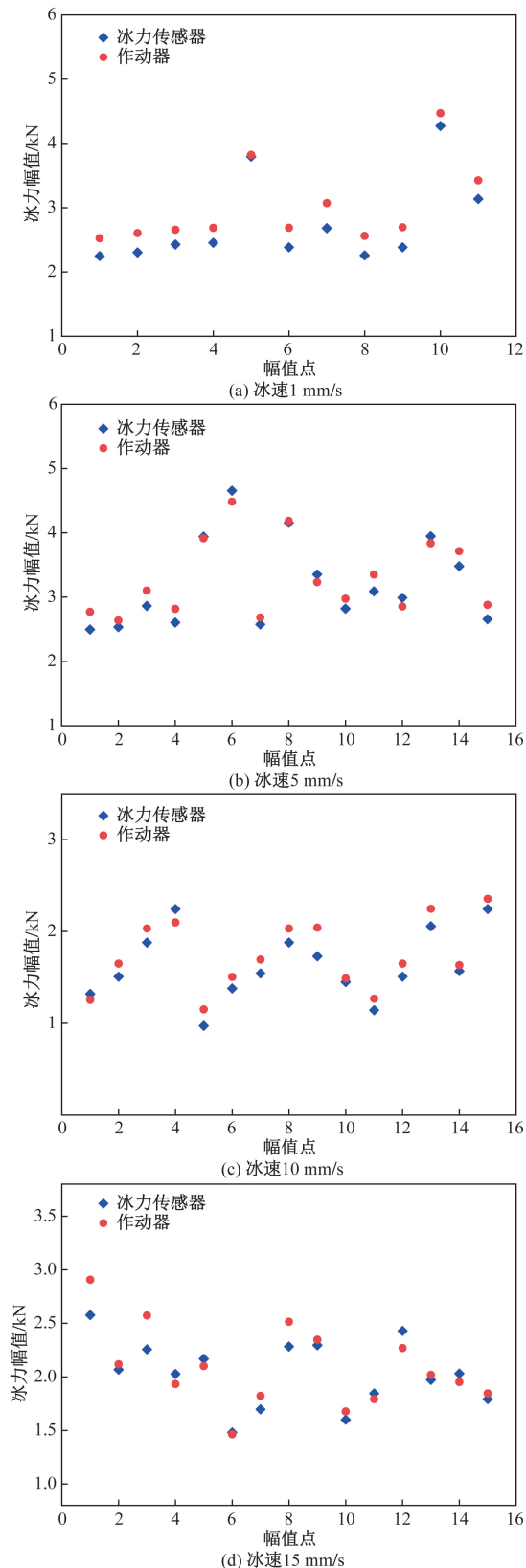


图13 不同冰速下冰力幅值统计

Fig. 13 Statistics of ice force amplitudes under different ice velocities

集系统、摄像头监测海冰情况以及顶部摄像头进行整体监测,具体如图14所示。安装冰力传感器的直

立结构桩腿直径为400 mm,冰力传感器设计安装为5列,总共20个测力单元,现场采用螺栓连接的方式将其固定于桩腿上。

冰力传感器直接连接光纤解调仪进行数据实时采集,在室内布置远程监测系统用以远程实时监测结果。包括以下组件。

(1) 供电系统。采用监测站顶部太阳能充电并连接蓄电池引入室内供电。

(2) 远程监测系统。使用4G路由器和工控机,利用光纤解调仪进行连接采集传感器数据。

除了安装冰力传感器外,还采用摄像头对冰作用于桩腿的过程进行了监测与录像。这种综合的监测方法能够提供更加全面和直观的数据。

4.2 传感器测试

在设备安装完成后,为确保安装过程中未对传感器造成损坏,对冰力传感器单元进行逐个敲击测试,并记录20个传感器相关数据,如图15所示。

通过这种方法可以消除安装过程中产生的装配应力。如敲击测试前后稳定读数的差异表明安装存在残余应力,敲击可以稳定传感器读数,确保在监测过程中准确反映实际情况。

4.3 冰力监测数据分析

通过对监测站现场采集的冰力数据结合摄像头监测到海冰运动的情况开展分析,由于监测站位于岸边,正向冰力的作用相对较少,主要的冰力作用为由涨潮和落潮引起的海冰和结构侧向、垂向作用,现场监测海冰与结构作用主要有两种。

4.3.1 大块冰堆积

大块冰堆积下摄像头监测情况及两种典型冰力时程如图16所示。其中,落潮期间冰力变化如图16(c)所示,对应摄像头监测时间前后分别如图16(a)、图16(b)所示。由摄像头监测情况可以看出,海流的变化导致大块冰发生运动,进而与传感器产生相互作用。相似地,涨潮期间的冰力会波动下降变化,如图16(d)所示。

4.3.2 碎冰堆积

碎冰堆积下摄像头监测情况及两种典型冰力时程如图17所示,其中涨潮期间冰力变化如图17(c)所示,对应摄像头监测时间前后分别如图17(a)、图17(b)所示。随着碎冰堆积厚度的增加,结构物所受的冰力呈线性下降。在碎冰堆积条件下,光纤传感器能够准确监测结构表面的应变变化,验证了其高灵敏度和可靠性。相似地,落潮期间的冰力会稳定上升,如图17(d)所示。

除潮汐周期和外部碎冰作用外。可能引起冰力测量数据变化的因素还包括海流的速度和方向

表 3 不同冰速下冰力幅值统计
Table 3 Ice force amplitude statistics under different ice velocities

幅值点	1 mm/s 冰速			5 mm/s 冰速			10 mm/s 冰速			15 mm/s 冰速		
	冰力幅值/kN		误差/%	冰力幅值/kN		误差/%	冰力幅值/kN		误差/%	冰力幅值/kN		误差/%
	传感器	作动器		传感器	作动器		传感器	作动器		传感器	作动器	
1	2.247	2.525	11.03	2.497	2.771	9.89	1.320	1.255	5.18	2.577	2.907	11.36
2	2.304	2.605	11.56	2.534	2.637	3.91	1.507	1.649	8.61	2.068	2.118	2.36
3	2.427	2.658	8.70	2.863	3.102	7.70	1.879	2.032	7.53	2.257	2.573	12.28
4	2.454	2.686	8.64	2.604	2.817	7.56	2.243	2.098	6.91	2.027	1.934	4.81
5	3.795	3.822	0.71	3.940	3.914	0.66	0.972	1.152	15.63	2.168	2.101	3.24
6	2.384	2.688	11.31	4.656	4.484	3.84	1.379	1.504	8.31	1.481	1.464	1.16
7	2.681	3.071	12.73	2.575	2.683	3.65	1.543	1.693	8.86	1.697	1.823	6.86
8	2.259	2.562	11.83	4.156	4.185	0.69	1.879	2.032	7.53	2.283	2.515	9.22
9	2.384	2.695	11.54	3.352	3.233	3.68	1.729	2.041	15.29	2.296	2.347	2.17
10	4.271	4.471	4.47	2.820	2.975	5.21	1.450	1.488	2.55	1.600	1.677	4.59

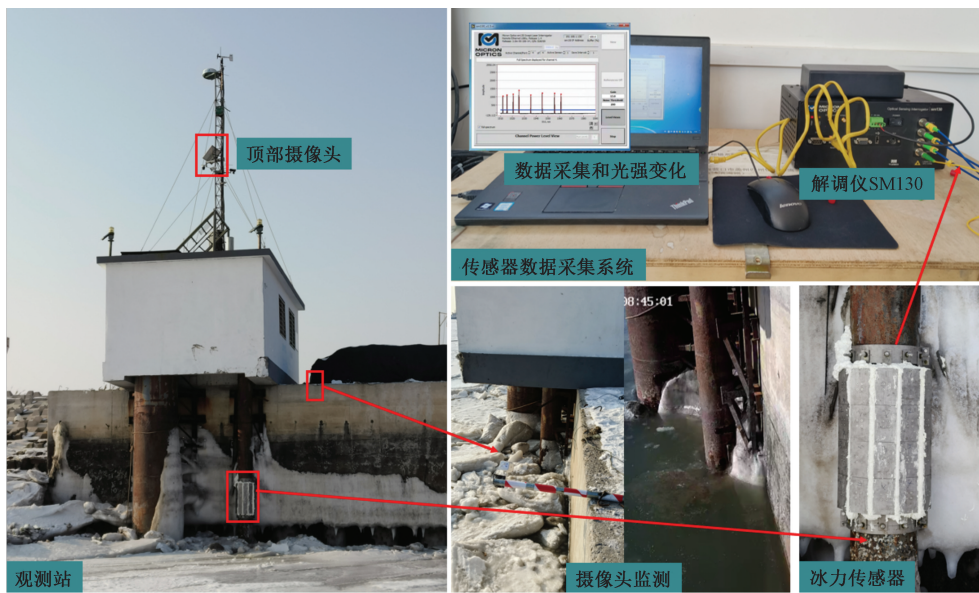


图 14 监测站现场布置
Fig. 14 On-site layout of the monitoring station

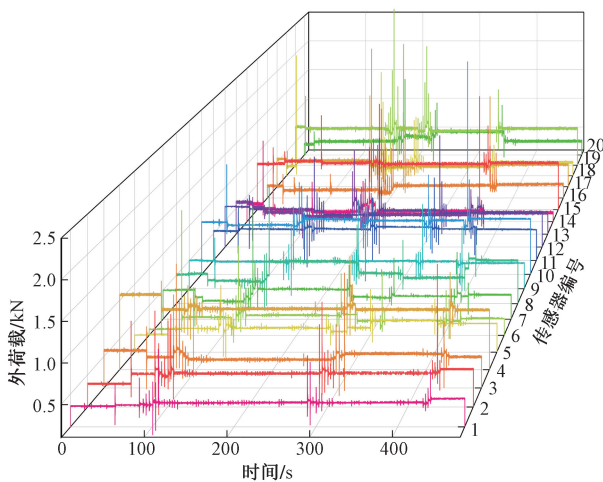


图 15 传感器敲击测试
Fig. 15 Sensor tapping test

变化、风力的变化、水温和气温的波动等引起的对碎冰和结构相互作用。这些因素的变化导致冰力时程曲线出现更加复杂的波动特征。

5 结论

设计并验证一种基于光纤传感技术的冰力传感器,通过室内加载试验和现场的测试,证明了传感器具有良好的准确性、灵敏度和可靠性。得出如下结论。

(1) 实验室标定试验显示,传感器的线性系数 R^2 接近 0.999,与设计灵敏度高度吻合,表明传感器具备优异的灵敏度和线性度。非均匀载荷条件下模拟分析显示传感器的最大相对误差为 8.28%,可满足实际工程监测需求。



(a) 落潮时间段(前)



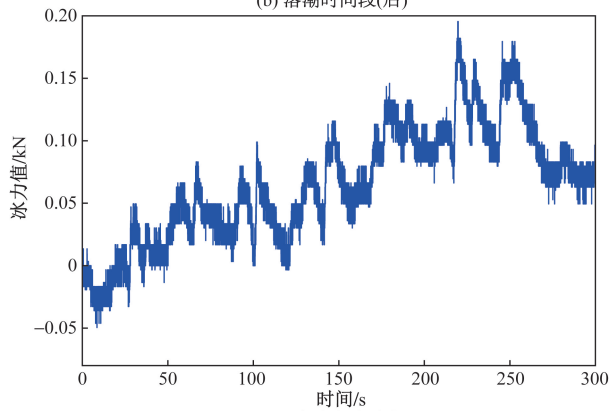
(a) 涨潮时间段(前)



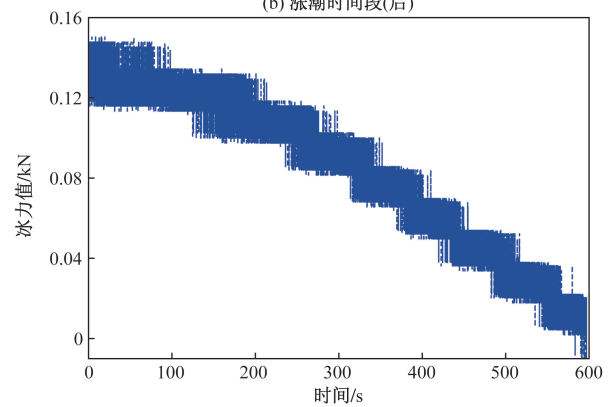
(b) 落潮时间段(后)



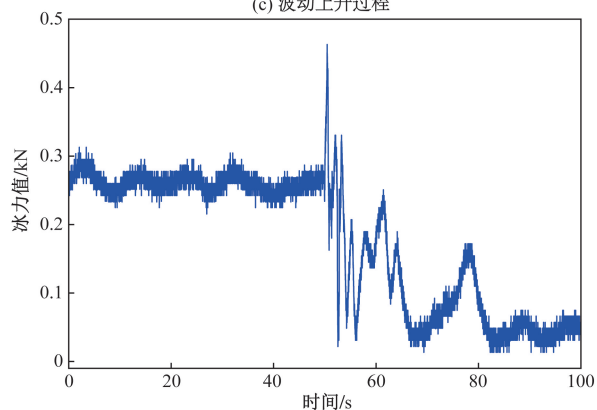
(b) 涨潮时间段(后)



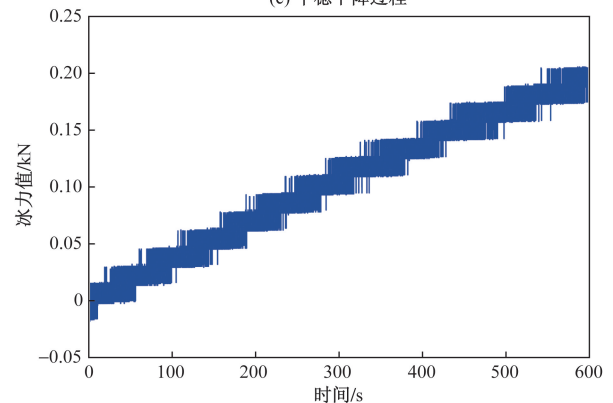
(c) 波动上升过程



(c) 平稳下降过程



(d) 波动下降过程



(d) 平稳上升过程

图 16 大块冰堆积及冰力时程

Fig. 16 Large ice accumulation and ice force time history

图 17 碎冰堆积及冰力时程

Fig. 17 Broken ice accumulation and ice force time history

(2)在室内加载试验中,传感器能够准确记录不同冰速下的冰力冲击过程。典型工况数据试验相对误差小于10%,验证了冰力测量的准确性和可靠性。

(3)基于所研制冰力传感器构建冰力监测系统,应用于辽东湾北部海域冬季现场冰力实测。监测系统采集了整个冬季海冰对于直立结构的冰力作用情况,证明其在复杂海冰环境中的适用性和长期稳定性。此外,该传感器具备快速安装、调整和拆卸的特点,在实际监测应用中具有潜在优势。

参 考 文 献

- [1] 贾栋,张纪刚. 极端冰载荷作用下自复位导管架式海洋平台有限元分析[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(3): 13-18.
Jia Dong, Zhang Jigang. Finite element analysis of self-centering jacket-type offshore platform under extreme ice load[J]. China Offshore Platform, 2021, 36(3): 13-18.
- [2] 李忠龙,葛思佳,刘鸿娇,等. 寒区冰激桥墩动力模型试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(9): 96-106.
Li Zhonglong, Ge Sijia, Liu Hongjiao, et al. Dynamic model test study of bridge piers impacted by ice in cold regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(9): 96-106.
- [3] Li W, Yin H J, Sun J Q, et al. A tentative ice force formula for vertical piles in Bohai Sea based on model tests[J]. Ocean Engineering, 2025, 322: 120522.
- [4] 付仰华,王国军,黄亚婷,等. 海冰与直立结构相互作用的破坏模式研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(3): 27-36.
Fu Yanghua, Wang Guojun, Huang Yating, et al. Study on failure modes of interaction between sea ice and vertical structures[J]. Ocean Engineering, 2023, 41(3): 27-36.
- [5] 许宁,岳前进,王延林. 基于水下光纤应变监测的导管架结构总冰力测量方法[J]. 海洋工程, 2014, 32(5): 9-14.
Xu Ning, Yue Qianjin, Wang Yanlin. Total ice force measurement method for jacket structures based on underwater optical fiber strain monitoring[J]. Ocean Engineering, 2014, 32(5): 9-14.
- [6] 岳前进,王国军,董睿,等. 我国海冰工程研究回顾[J]. 船舶, 2023, 34(1): 51-60.
Yue Qianjin, Wang Guojun, Dong Rui, et al. Review of sea ice engineering research in China[J]. Shipbuilding, 2023, 34(1): 51-60.
- [7] 文振辉,万立伟. 光纤光栅传感器在冰力测量中的应用[J]. 工业建筑, 2012, 42(S1): 650-653.
Wen Zhenhui, Wan Liwei. Application of fiber bragg grating sensors in ice force measurement[J]. Industrial Construction, 2012, 42(S1): 650-653.
- [8] 王延林. 抗冰结构的原型测量与分析评价技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
Wang Yanlin. Research on prototype measurement and analysis evaluation technology of ice-resistant structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [9] 王延林,孙珊珊,张大勇,等. 原型结构冰荷载测量方法研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(10): 1315-1324.
Wang Yanlin, Sun Shanshan, Zhang Dayong, et al. Study on ice load measurement method for prototype structures[J]. Ship Mechanics, 2020, 24(10): 1315-1324.
- [10] 路国闯,李新梅,商利,等. 不同覆冰状态下导线风致振动响应仿真[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4677-4685.
Lu Guochuang, Li Xinmei, Shang Li, et al. Simulation of wind-induced vibration response of conductors under different icing conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4677-4685.
- [11] 屈衍. 基于现场实验的海洋结构随机冰荷载分析[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
Qu Yan. Analysis of random ice loads on offshore structures based on field experiments[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [12] 王译鹤,岳前进,毕祥军. 基于原型测量的渤海导管架平台抗冰保障系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(6): 831-835.
Wang Yihe, Yue Qianjin, Bi Xiangjun. Ice-resistant protection system for Bohai jacket platforms based on prototype measurements[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(6): 831-835.
- [13] 李光贤,黄晶,袁宇鹏,等. 低温度敏感度谐振式压力传感器设计与仿真[J]. 压电与声光, 2024, 46(2): 202-206.
Li Guangxian, Huang Jing, Yuan Yupeng, et al. Design and simulation of a low-temperature sensitive resonant pressure sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2024, 46(2): 202-206.
- [14] 覃荷瑛,姜致豪,周文龙. 光纤光栅传感器对预应力锚索的受力监测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 731-739.
Qin Heying, Jiang Zhihao, Zhou Wenlong. Force monitoring of prestressed anchor cables using fiber bragg grating sensors[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 731-739.
- [15] Jia Z, Ma G, Su X, et al. Development of a novel adaptive range strain sensor for structural crack monitoring[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10: 1710-1721.
- [16] Dai T, Jia Z, Ren L, et al. Design and experimental study on FBG-based crack extension monitoring sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 71: 102946.
- [17] 秦仕伟,高磊,韦兵兵,等. 基于光纤技术和有限元计算的灌注桩承载特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5685-5692.
Qin Shiwei, Gao Lei, Wei Bingbing, et al. Bearing characteristics of cast-in-place piles based on optical fiber technology and finite element analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5685-5692.
- [18] 杨博凯,刘小艳,叶汉青. 不同温度下光纤传感技术用于柔性基体变形监测理论研究[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(11): 45-54.
Yang Bokai, Liu Xiaoyan, Ye Hanqing. Theoretical research on optical fiber sensing technology for deformation monitoring of flexible substrates under different temperatures[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2023, 43(11): 45-54.
- [19] 李伟,高扬,孙诗语,等. 基于模型试验的八桩腿导管架平台冰力掩蔽效应研究[J]. 中国造船, 2024, 65(5): 37-52.
Li Wei, Gao Yang, Sun Shiyu, et al. Research on the ice force masking effect of an eight-leg jacket platform based on model tests[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(5): 37-52.

- [20] 李伟, 尹汉军, 付殿福, 等. 中国海洋平台结构抗冰设计关键问题及研究建议[J]. 中国海上油气, 2024, 36(4): 199-211.
Li Wei, Yin Hanjun, Fu Dianfu, et al. Key issues and research recommendations for ice-resistant design of offshore platform structures in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(4): 199-211.
- [21] 王帅飞, 张大勇, 吴宝双. 海上风电基础锥体结构的抗冰效果分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(9): 87-91.
Wang Shuaifei, Zhang Dayong, Wu Baoshuang. Analysis of ice-resistant effect of offshore wind power foundation conical structures [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(9): 87-91.
- [22] 金浩, 王利丹, 康健, 等. 深远海恶劣海洋环境下溢油回收作业的风险评估方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 3115-3121.
Jin Hao, Wang Lidan, Kang Jian, et al. Risk assessment method for oil spill recovery operations in harsh deep-sea environments [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 3115-3121.
- [23] Wang Y Z, Gao F, Li P F. Research on monitoring point layout of health monitoring system of the icebreaker [C]//ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME, 2017; DOI: 10.1115/OMAE2017-62491.
- [24] 郭力, 赵新豪, 李自强, 等. 水下结构物与海床相互作用研究进展综述[J]. 船舶工程, 2023, 45(12): 6-23.
Guo Li, Zhao Xinhao, Li Ziqiang, et al. Review on the research progress of interaction between underwater structures and seabed [J]. Ship Engineering, 2023, 45(12): 6-23.
- [25] 杨永亮, 张羽, 李雪佳, 等. 一种改进型光纤压力传感器设计[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 12-17.
Yang Yongliang, Zhang Yu, Li Xuejia, et al. Design of an improved fiber optic pressure sensor[J]. Industry and Mining Automation, 2023, 49(12): 12-17.