

基于光频域反射仪的光纤水听器探头结构形变研究

王宇¹, 肖迪³, 牛洋洋¹, 杨洁¹, 杨鹏希¹, 朱兆昊¹, 尹国路^{1,2*}, 朱涛^{1,2}

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

²重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

³湖南长城海盾光纤科技有限公司, 湖南长沙 410000

摘要 光纤水听器探头在深海静水压力下存在变形, 这会影响其对水下声信号的探测性能, 甚至会使探头失稳而无法在深海环境中继续作业。传统电学传感器因受限于尺寸和电磁干扰等因素, 故难以被用于水听器探头的形变监测中。光纤光栅点式传感器的空间分辨率较低, 故也无法对尺寸小的光纤水听器探头进行全分布式力学监测。为此, 提出了一种基于光频域反射仪的高空间分辨率、高精度的光纤水听器探头形变监测方法。在实验中, 光纤紧密缠绕在水听器探头的表面, 采用自主研发的分布式光纤形状监测分析仪测量了探头形变产生的光纤瑞利散射光谱的波长漂移, 并采用逆向积分的方法实现了探头形状的二维重构。研究结果表明: 随着静水压力的增大, 水听器探头直径逐渐缩小, 并沿周向出现周期性凹陷; 当静压力达到 6 MPa 时, 三个周期性凹陷深度达到 124 μm 。该实验研究结果与基于 ANSYS 的耐压性仿真结果相符。

关键词 传感器; 分布式光纤传感; 光频域反射仪; 光纤水听器; 形状传感

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221551

1 引言

光纤水听器是一类构建于光纤、光电子技术平台上的水下声信息传感器, 它主要利用光相干检测技术将水声信号转换为光信号, 并通过光纤将光信号传至信号处理系统中以获取有用的声数据。由于光纤水听器具有灵敏度高、动态范围宽、耐电磁辐射、结构灵巧、便于大规模成阵且能适用于极端恶劣条件等优点, 故其在巨大的军事战略和民用价值的推动下得到了迅速发展, 成为了现代光传感技术和水声传感技术的重要发展方向^[1-3]。近年来, 随着海上航运和海底开采活动的日益频繁, 对水下目标的探测能力有了更高的要求, 光纤水听器的研究重点也逐渐向阵列复用技术靠拢。然而, 作为水声探测系统的关键技术之一, 水听器单元技术也不容忽视, 其中探头技术显得尤为重要, 探头的设计与制造会直接影响水听探测的灵敏度、响应度和是否适用于成阵, 在诸多探头的设计类型中芯轴式干涉型光纤水听器探头应用较为广泛^[4-7]。无论是哪一种类型的结构, 光纤水听器都需要在满足足够高的声压灵敏度^[8-10]的同时, 保证在静水压环境下的稳定性。

在深海环境中, 静水压力大的情况下探头结构或多或少会发生微小形变, 影响探测性能, 严重时甚至会使探头失稳, 从而使得水听器无法在深海环境中继续作业。为了确保水听器能够稳定有效地工作, 迫切需要一种高精度的形状测量方法为光纤水听器探头结构形变提供一种准确可靠的检测手段。

通常情况下, 检测形变的方法大多是采用热敏电阻或者电阻应变片^[11], 但考虑到尺寸与环境条件, 其在水听器探头形变监测中难以得到应用。相比之下, 光纤传感技术能在恶劣环境中发挥价值, 故更加适用于光纤水听器。光纤形状传感技术是一种能通过获取光纤上局部的应变响应来测量光纤自身或者洞悉与光纤相连的被测物体的三维信息的感知技术, 并利用这些信息来还原与监测待测物的形状变化。近年来, 该技术凭借着光纤自身的诸多优势在医疗、航空航天、土木和能源等场合中已经取得了很大的进展并表现出了极佳的应用潜力。在医疗行业中, 该技术可以在微创外科手术中提供精准的器械导航, 也可以集成到各种成像中以提供清晰的图片, 还可以嵌入到连续体手术机器人中实现运动状态和空间位置的实时感知^[12-13]。在

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-09-16; 录用日期: 2022-09-28; 网络首发日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61975022)、国家杰出青年科学基金(61825501)、重庆市自然科学基金创新研究群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0005)、重庆英才·青年拔尖人才项目(CQYC202005011)

通信作者: *glyin@cqu.edu.cn

航空航天领域中,为了提高飞行器的综合性能,各种飞行器广泛采用大尺度、高强度的柔性金属材料,这种材料在受到气流扰动后极易发生大幅度的形态变化,光纤形状传感技术可提供准确的形态监测以保障飞行器的安全运行^[14-16]。然而,地下基础能源的勘探、挖掘所采用的钻孔技术会引发地表压力的重新分配和周围土壤的沉降,将光纤形状传感与钻孔相结合可全方位地获取土壤位移分布从而确保地表结构的安全^[17]。因此,基于光纤的形状传感方法已经受到了业界的广泛关注,并提供了一种有效取代传统方法的形状测量方法。现阶段较为成熟的光纤形状传感技术主要包括基于光纤布拉格光栅(FBG)的准分布式传感技术和基于光纤散射的分布式光纤传感技术。FBG传感器结合波分复用技术可用于测量光纤多个位置的弯曲应变。1996年,基于FBG的光纤传感结合波分复用技术被首次用于结构件的弯曲形变测量,并根据光纤中的应变实现了对悬臂梁的弯曲形状还原^[18]。2004年,Zhang等^[19]将基于FBG的形状传感技术应用到了内窥镜的检查当中,实现了三维空间形状的测量。2006年,Duncan等^[20]利用光频域反射技术解调多芯光纤中的FBG阵列进行了二维和三维的形状测量,二维形状还原准确性为2.1%,三维形状还原准确性为3.9%。2014年,Roesthuis等^[21]利用FBG阵列技术实现了介入微创手术中的活检针位置检测,二维平面单弯曲和多弯曲形状测量误差分别为0.20和0.51。2018年,张俊康等^[22]利用FBG形状传感系统对机翼弯曲形状进行了监测,对比三维视觉测量的结果误差小于5%。然而,光栅传感器在空间分辨率方面存在明显短板,其空间分辨率受限于光栅长度和光栅间隔。此外,这种点式结构使光栅传感器无法进行全分布式监测,考虑到光纤水听器尺寸小的特点,FBG传感技术无法保证在如此短距离的情况下提供足够高的测量精度,故研究人员只能将目光投向更高空间分辨率的全分布式光纤传感技术。2007年,Duncan等^[23]在Eickhoff等^[24]提出的基于光纤后向瑞利散射的光频域反射仪(OFDR)

的基础上又提出了基于瑞利散射的光纤形状传感技术,并将其与FBG的测量结果进行了对比,发现该方法解决了采样点数量问题并有效地提升了形状还原的精度,误差由原来的83.3 mm缩小至1.4 mm。2019年,Parent等^[25]将基于OFDR的形状传感技术应用于体外血管模型中三维位置的追踪中。同年,Shao等^[26]利用OFDR实现了温度不敏感的形状测量,1 m内的二维形状测量相对误差仅为1%。2022年,尹国路等^[27]利用研制的一款将镍铬形状记忆合金丝和三根光纤束封装的形状传感器完成了二维、三维的形状传感实验,实验中形状末端的平均最大误差为传感器总长度的0.58%和3.45%。

本文针对光纤水听器探头的形变检测特点与测量需求,系统总结了光纤形状传感技术的研究进展,重点介绍了基于OFDR的分布式传感原理,并研制了高精度的传感样机。同时,通过缠绕于探头薄壁圆筒上的光纤环的应变信息,实现了探头受到外界压力时的二维分布式形变测量。

2 基于OFDR的形状传感理论分析

2.1 OFDR传感原理

图1展示了OFDR传感系统和实验室自主研发的监测样机。OFDR传感系统包括扫频激光源(Luna 1200)、主干干涉仪、辅助干涉仪、偏振分集接收装置和数据采集卡。扫频光源所产生的频率线性变化的连续光被1:99的耦合器分成两束,其中约1%的光通过两个50:50的耦合器与延时光纤最终被光电探测器PD1探测到,用以补偿光源的非线性扫频效应。经过耦合器C1的另外99%的光经过1:99耦合器C3后再次被分成两束,1%的光作为参考光,99%的光作为探测光经由环形器进入到待测光纤中。待测光纤中的后向瑞利散射光信号与参考光经过偏振分集接收装置后发生拍频干涉并被PD2和PD3探测到,然后PD2和PD3将其转换为电信号并通过采集卡进行采集。

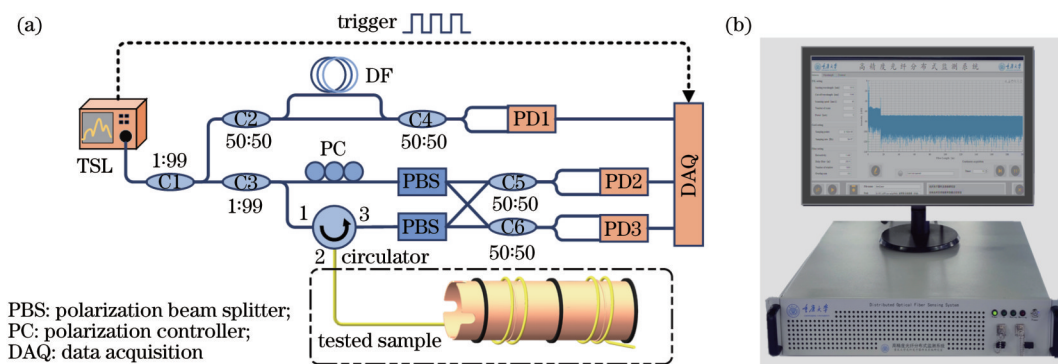


图1 OFDR传感系统和监测样机。(a) OFDR传感系统;(b)监测样机

Fig. 1 OFDR sensing system and monitoring prototype. (a) OFDR sensing system; (b) monitoring prototype

OFDR 系统测量应变主要通过参考组与测量组瑞利散射光谱信号的互相关算法实现^[27],具体步骤:

- 1) 获取应变前后的两组信号,分别作为参考组信号和测量组信号;
- 2) 将两组信号通过快速傅里叶(FFT)由频率域变换到距离域,再在距离域上的相同位置处进行加窗截取;
- 3) 对加窗截取的两组距离域信号分别进行快速傅

里叶逆变换(IFFT)回到频率域,从而获得光纤在该位置处的瑞利散射光谱信号;

4) 对两组瑞利散射光谱信号进行互相关运算,可以获得应变相对应的瑞利散射光谱的波长漂移量。

通过移动距离域上加窗位置的方法,再重复上述步骤,便可获得沿光纤各位置的波长漂移,进而实现分布式传感。OFDR 的信号解调过程如图 2 所示,其中 P 为散射光强度, L 为光纤距离。

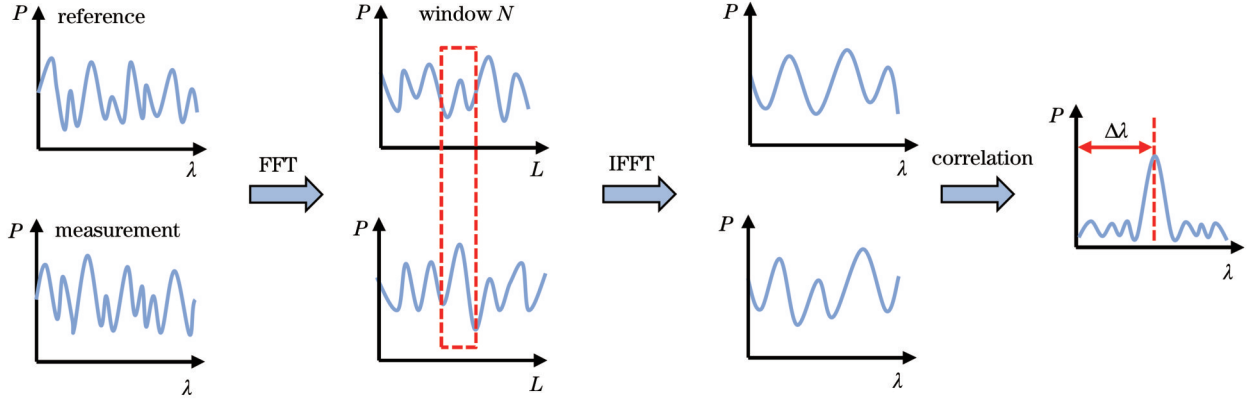


图 2 OFDR 的信号解调过程
Fig. 2 Signal demodulation process of OFDR

OFDR 系统主要通过光纤中的瑞利散射进行传感,系统本身拥有极高的空间分辨率。空间分辨率表示距离域上相邻两个数据点间的距离,通常可以达到数十微米量级,表达式为

$$\Delta Z = \frac{\lambda^2}{2n_g \Delta \lambda}, \quad (1)$$

式中: $\Delta \lambda$ 为波长调谐范围; λ 为扫频光源的中心波长; n_g 为光纤折射率。假设在互相关运算中,距离域移动加窗的点数为 N , 对应的窗长为 ΔL , 其表示系统的传感空间分辨率,表达式为

$$\Delta L = N \Delta Z = N \frac{\lambda^2}{2n_g \Delta \lambda}. \quad (2)$$

此外,根据光弹效应,光纤后向瑞利散射光谱漂移与应变的关系可以表示为

$$\Delta \epsilon = \frac{\delta \lambda}{[(1 - P_e) \cdot \lambda_c]}, \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon$ 为光纤应变变量; $\delta \lambda$ 为瑞利散射光谱的波长漂移量; P_e 为弹光系数; λ_c 为光源扫描的中心波长。

2.2 水听器探头形状测量原理及方法

图 3 为水听器探头形状测量原理示意图,其中 $\Delta r'$ 为形变后传感点的半径改变量, $\Delta L'$ 为发生形变后两个传感点之间的光纤长度。传感光纤缠绕在探头薄壁圆筒外,受外部压力的影响,水听器探头受挤压发生形变将导致缠绕在薄壁圆筒上的光纤向内收缩,使得光纤产生应变。光纤采用紧贴水听器壳体([胶黏层厚度忽略不计]),通常情况下,应变的平均

传递效率仅与胶黏层厚度和胶水的弹性模量有关,此处近似认为水听器壳体发生的应变全部转换为光纤的应变,从而使得光纤中后向瑞利散射光谱发生“蓝移”。因此,水听器探头形状测量的关键是建立瑞利散射光谱波长漂移、应变和探头圆筒半径三者之间的关系。

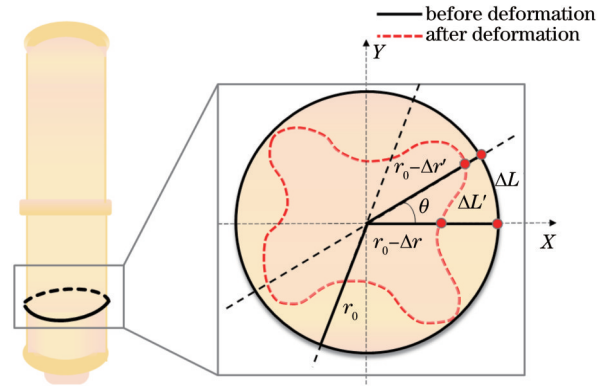


图 3 水听器探头形状测量原理示意图
Fig. 3 Schematic diagram of hydrophone probe shape measurement

当探头在静水压作用下发生挤压形变时,薄壁圆筒的半径会发生改变,其改变量 Δr 与光纤应变 $\Delta \epsilon$ 的关系为

$$\Delta r = \Delta \epsilon \cdot r_0, \quad (4)$$

式中: r_0 为光纤圆环的半径,其近似为探头横截面的半径。在获得探头半径改变量 Δr 之后,各传感点对应的半径 r 可以表示为

$$r = r_0 - \Delta r. \quad (5)$$

两个传感点之间的间隔为传感空间分辨率 ΔL 。考虑静水压下半径改变量 Δr 相较于探头初始半径 r_0 是小量, 两个传感点之间的夹角几乎保持不变, 可以表示为

$$\theta = \frac{\Delta L}{r_0}, \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以在极坐标系下重构光纤水听器探头在静水压下的形变趋势。

3 探头形变测试实验

3.1 测试探头样品及装置

光纤水听器探头形变测试实验装置示意图如图 4

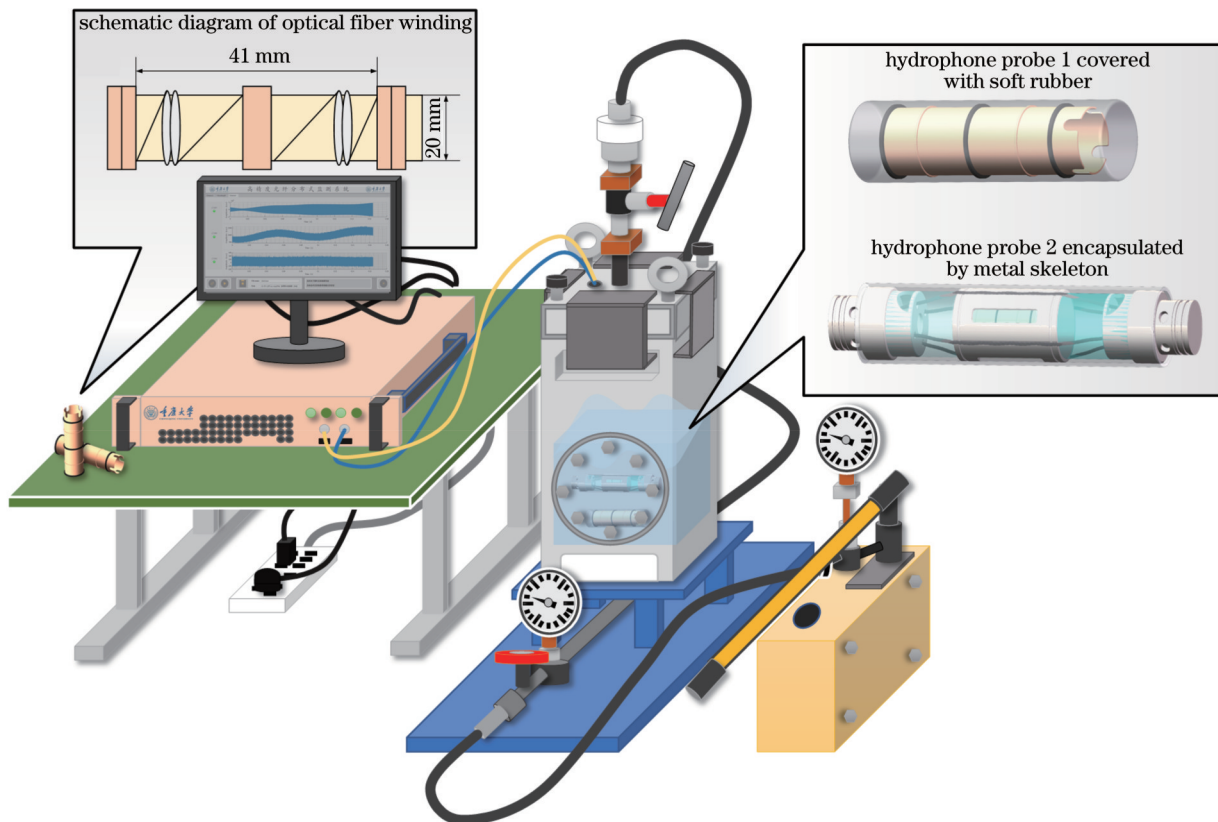


图 4 光纤水听器探头形变测试实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup of fiber optic hydrophone probe deformation testing

3.2 形变测试结果

在对探头进行形变测量之前, 先利用 ANSYS 软件对未施加保护方式的探头结构模型进行耐压分析。考虑到几何材料的非线性和一些结构缺陷, 真实屈曲往往小于特征值屈曲, 这样在分析过程中才能较为准确地捕捉材料失效的范围和发生局部失稳的载荷区间。在仿真分析中, 设置几何模型材料的杨氏模量为 3.2 GPa, 密度为 1270 kg/m³, 泊松比为 0.38 和屈服强度为 110 MPa。采用六面体网格对探头进行网格划分, 网格大小不超过 0.5 mm, 在 10 MPa 的压力参数下对结构底端施加固定约束, 得到图 5 所示的形变仿真结果。图 5 仿真结果较为清晰地展示了探头受压后的形变情况。受静水压作用, 探头横截面上产生了三个

所示。芯轴式干涉型光纤水听器探头通常由内外两个薄壁圆筒形的支撑弹性体构成, 实验中抗弯光纤围绕着探头内圆筒壁首尾各缠绕两圈。作为对照, 采用两种保护方式以提升探头的耐压性, 分别是四周包覆了一层软胶进行保护的探头 1 和先将裸探头用硅油浸没, 再由金属骨架进行封装保护的探头 2。值得注意的是, 依据探头内圆筒结构, 上中下分别有三个部分的厚度较其他部分来说更大, 硬度也更大, 因此在实际情况下受压后所产生的形变会更小。为尽可能使探头受压均匀, 使用了特制的金属压力罐, 罐内可填充水来模拟实际的水压环境。

周期性的凹陷变形区。

在探头形变测试实验中, 通过 OFDR 系统软件界面设置激光器的扫频速度为 60 nm/s, 扫频范围为 1515~1555 nm, 输出功率为 8 mW, 采集卡采样率为 40 MHz, 采样点数为 8192000。最终, 采样时间大约为 0.2048 s, 激光器实际扫频范围约为 12 nm。根据式(1)计算得到理论上距离域的空间分辨率为 63.57 μm , 选取 200 个窗点数, 得到传感分辨率约为 12.714 mm。考虑到探头内圆筒尺寸较小, 为了得到更多的信息以保证测量精度并减小测量误差, 设置相邻窗间重叠率为 80%。最终得到了实际测试中的传感采样分辨率约为 2.5 mm, 满足了对探头形变测量的高精度要求。

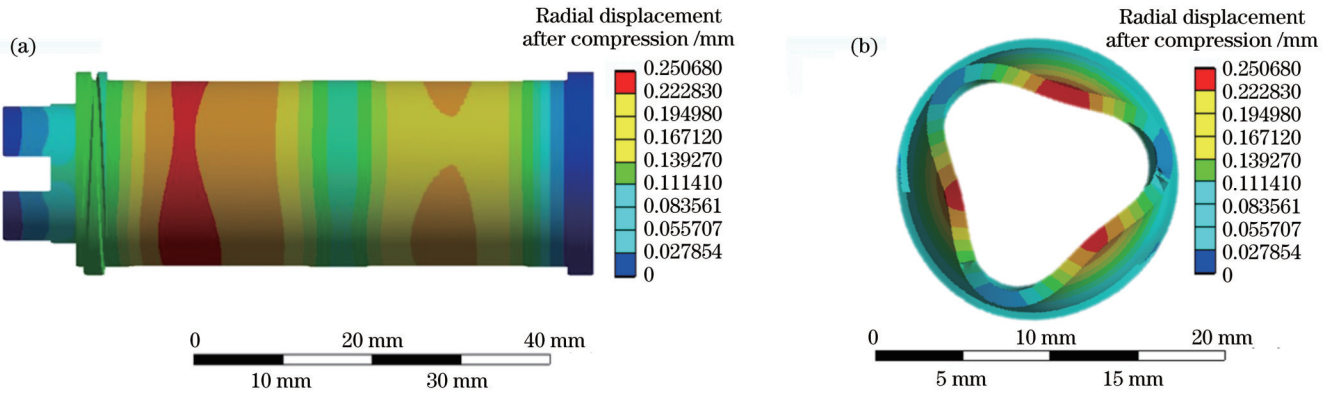


图 5 水听器探头形变的仿真结果。(a)探头外侧;(b)探头横截面

Fig. 5 Simulation results of deformation of fiber optic hydrophone probe. (a) Outside of probe; (b) cross section of probe

在设置系统参数后,分别将两个不同保护方式的水听器探头轻轻置于压力罐中,并固定在同一个位置处。在实验中,逐次增加罐中压强为 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 MPa。测试结果如图 6 所示,展示了两种探头在不同压强下的波长漂移情况。中间位置处的波长漂移量小于其他地方,意味着在该处所受到的压强较微弱,印证了前面所提到的探头中间位置厚度

大、硬度大的结构特点,吻合实际的传感趋势走向,为后续的形状还原提供了良好的基础。

由图 6 可以发现,随着压强的增大,波长不断地发生“蓝移”,且探头上下两部分光纤几乎具有相同的波长漂移。根据式(3)~(5)和波长漂移,可以重构获得探头半径的变化。图 7(a)、(b)表示探头半径和波长漂移与压强之间的关系。随着压强的增大,波长漂移

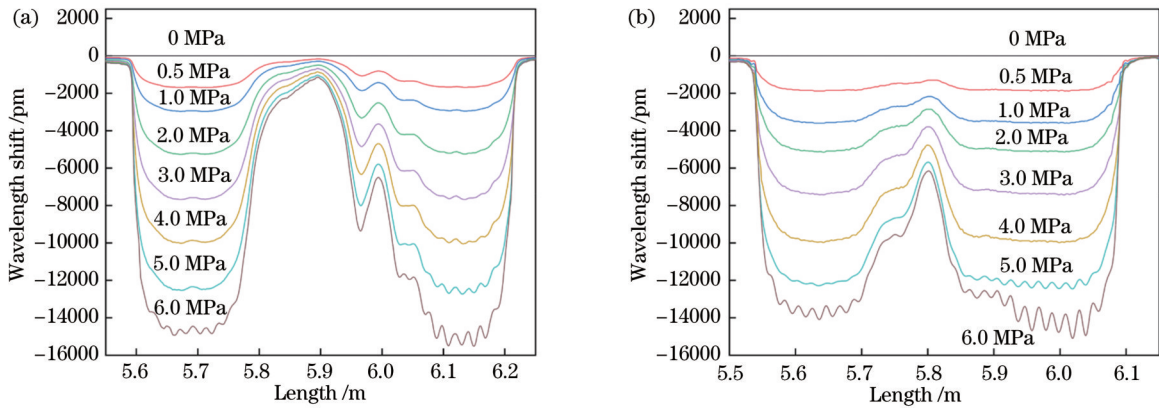


图 6 不同压强下光纤水听器探头发生形变所产生的波长漂移。(a)软胶包覆的水听器探头 1;(b)金属骨架封装的水听器探头 2

Fig. 6 Wavelength shift caused by deformation of fiber optic hydrophone probe under different pressures. (a) Hydrophone probe 1 covered with soft rubber; (b) hydrophone probe 2 encapsulated by metal skeleton

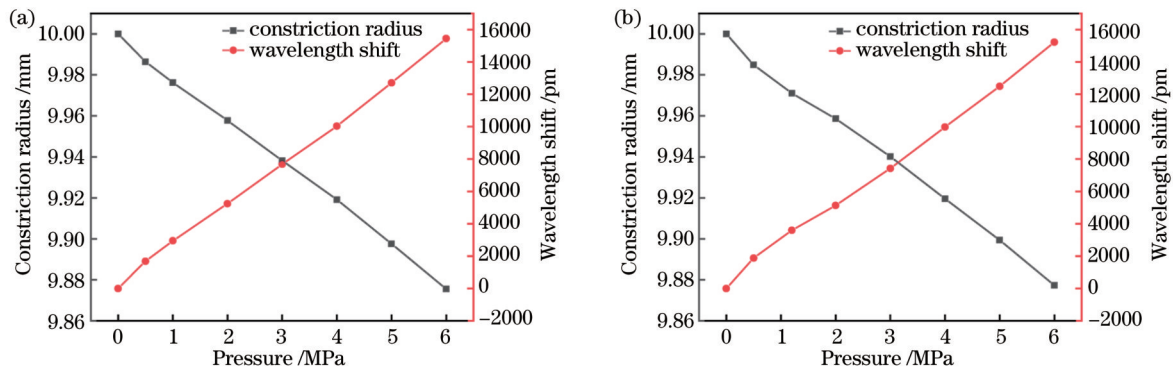


图 7 光纤水听器探头收缩半径和波长漂移与不同压强间的关系。(a)软胶包覆的水听器探头 1;(b)金属骨架封装的水听器探头 2

Fig. 7 Constriction radius of fiber optic hydrophone probe and wavelength shift varying with pressure. (a) Hydrophone probe 1 covered with soft rubber; (b) hydrophone probe 2 encapsulated by metal skeleton

近似线性增加,而探头半径近似线性减小。由于光纤水听器探头是弹性体材料,根据胡克定律,弹性体在发生弹性形变时,其所受到的压力与收缩量成正比,因此压强与探头半径收缩的线性关系符合力学原理。比较图 7(a)、(b)探头半径变化趋势。单从整体上看,两种保护方式下的收缩半径变化量相差无几。因此,忽略微弱的差异,在保护性能上二者近似相同。

除了波长漂移增加、探头直径减小外,从图 6 还发现随着静压强的增大,波长漂移曲线中逐渐出现不断增强的波纹。图 8 展示了探头 1 在 6.0 MPa 下的波长漂移。从纹波的局部放大图可以发现,每三个纹波的间隔距离约为 6.2 cm,很接近缠绕在探头壁上一圈光纤环的长度(6.28 cm)。这预示着在静压下探头圆周方向存在周期性形变。图 9 为某一圈光纤随着不同静压增强的形变重构图。由于形变量十分微小,这里将测试结果的半径变化量放大了 70 倍以便更清晰地观察。随着压强的增加,光纤环逐渐向内收缩,并从 4 MPa 开始出现三个逐渐加深的凹陷,印证了力学仿真的结果。图 10 展示了探头 1 和探头 2 的该圈光纤在 6 MPa 影响下的形变重构对比结果。当压强为 6 MPa 时,凹陷变形最深深度达到约 124 μm ,小于实验中所

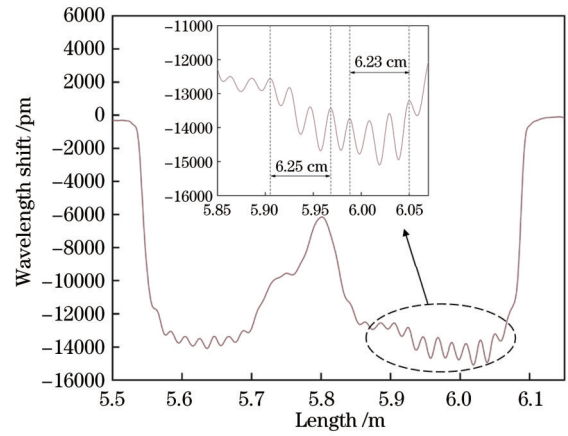


图 8 光纤水听器探头 1 在 6 MPa 下的波长漂移
Fig. 8 Wavelength shift of fiber optic hydrophone probe 1 at pressure of 6 MPa

采用的抗弯光纤的直径(160 μm),是一般方法所不能测量的。通过该对比结果能够发现,探头 1 在出现三个凹陷的同时,整体也在向内收缩。因为金属骨架支撑作用的存在,所以探头 2 整体发生的收缩程度比探头 1 较小。因此,金属骨架封装探头在性能上略优于软胶包覆探头。

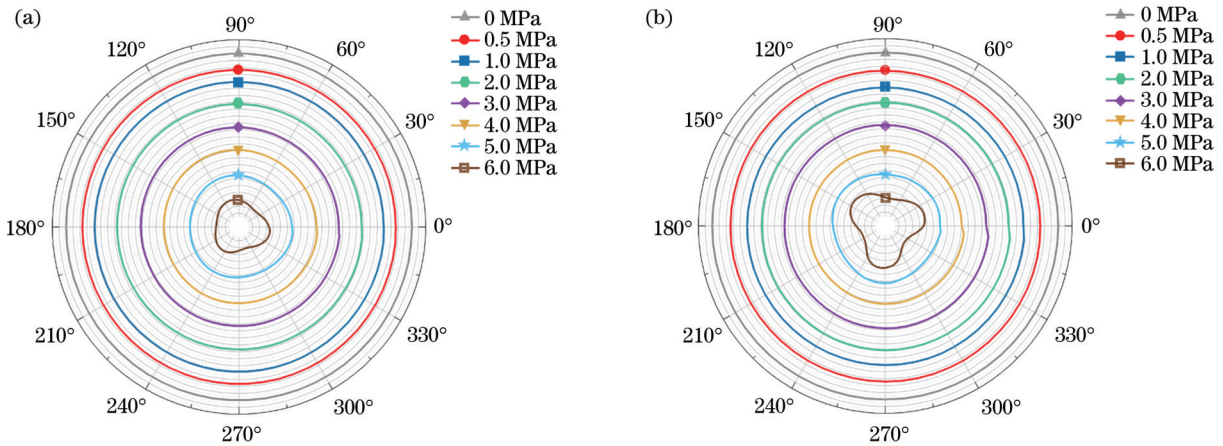


图 9 不同压强下光纤水听器探头横截面形变重建结果。(a)软胶包覆的水听器探头 1;(b)金属骨架封装的水听器探头 2
Fig. 9 Reconstruction results of cross-sectional deformation of fiber optic hydrophone probes under different static pressures.
(a) Hydrophone probe 1 covered with soft rubber; (b) hydrophone probe 2 encapsulated by metal skeleton

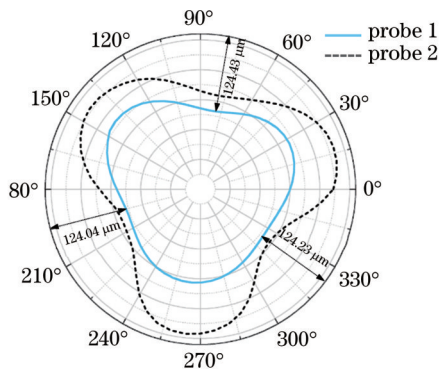


图 10 6 MPa 静压下光纤水听器探头横截面形变重建结果
Fig. 10 Reconstruction result of cross-sectional deformation of fiber optic hydrophone probes under static pressure of 6 MPa

4 结 论

提出了一种基于光频域反射仪的光纤水听器探头形变测量方法。在理论研究方面,建立了基于光纤瑞利散射光谱波长漂移的水听器探头形变重构方法,采用 ANSYS 实现了探头耐压分析,预示探头圆周方向在静压下存在三个周期性凹陷。在实验方面,光纤紧密缠绕在光纤水听器探头表面以感知探头形变产生的应变,采用实验室自主研发的高精度分布式光纤形状测量仪器,测量了光纤瑞利散射光谱随静压力增加的波长漂移情况,并进一步重建了水听器探头在静压下的形变情况。实验研究结果表明,随着静压力的增大,

水听器探头的直径逐渐收缩,并且在圆周方向出现三个周期性凹陷区。当静压力达到 6.0 Mpa 时,水听器探头的周向凹陷深度达到 124 μm 。该项研究结果为研制结构性能优良的水听器探头提供了参考,有助于降低试错成本,缩短水听器探头的研制周期。

参 考 文 献

- [1] 孟洲,陈伟,王建飞,等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [2] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. Journal of Physics D, 2004, 37(18): R197-R216.
- [3] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Pérot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3798-3807.
- [4] 易朗宇,沈燕青,徐红霞,等. 光纤水听器探头结构设计综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 51-59.
Yi L Y, Shen Y Q, Xu H X, et al. Review of optic fiber hydrophones structure designing[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 51-59.
- [5] 倪明,胡永明,孟洲,等. 光纤水听器探头技术研究[J]. 应用声学, 2003, 22(2): 1-7.
Ni M, Hu Y M, Meng Z, et al. Study on fiber optic hydrophone unit[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(2): 1-7.
- [6] 王俊,陈开,唐靖,等. 芯轴式干涉型光纤水听器深海探头的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(4): 14-16, 27.
Wang J, Chen K, Tang J, et al. Development of deep-sea detector of the mandrel interferometric optical fiber hydrophone[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019 (4): 14-16, 27.
- [7] 罗洪,熊水东,胡永明,等. 拖曳线列阵用光纤水听器的研究[J]. 应用声学, 2006, 25(2): 65-68.
Luo H, Xiong S D, Hu Y M, et al. A fiber optic hydrophone to be used in towed line array[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(2): 65-68.
- [8] Li M, Sun Z H, Zhang X L, et al. Development of high sensitivity eight-element multiplexed fiber laser acoustic pressure hydrophone array and interrogation system[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(3): 253-260.
- [9] Zhang F X, Jiang S D, Zhang X L, et al. Ultra-thin fiber laser hydrophone with static pressure equalization and improved response[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(24): 1968-1970.
- [10] 高侃,郭振,张文华,等. 一种新型的光纤水听器声敏结构及其实现方法: CN107367321A[P]. 2017-11-21.
Gao K, Guo Z, Zhang W H, et al. Novel fiber hydrophone sound-sensitive structure and realization method thereof: CN107367321A[P]. 2017-11-21.
- [11] 尹国路,蒋锐,徐州,等. 快速、高空间分辨率分布式光纤传感技术及其在机械形变和温度监测中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 96-104.
Yin G L, Jiang R, Xu Z, et al. Fast and high spatial resolution distributed optical fiber sensing technology and its application in mechanical deformation and temperature monitoring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 96-104.
- [12] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [13] Roesthuis R J, Janssen S, Misra S. On using an array of fiber Bragg grating sensors for closed-loop control of flexible minimally invasive surgical instruments[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2013: 2545-2551.
- [14] Pak C G. Wing shape sensing from measured strain[J]. AIAA Journal, 2016, 54(3): 1064-1073.
- [15] Sun G K, Li H, Dong M L, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for a flexible morphing wing[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9325-9332.
- [16] Nicolas M J, Sullivan R W, Richards W L. Large scale applications using FBG sensors: determination of in-flight loads and shape of a composite aircraft wing[J]. Aerospace, 2016, 3(3): 18.
- [17] 仇唐国,孙阳阳,卢天明,等. 基于 OFDR 技术的深层土体水平位移场监测研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 108-112.
Qiu T G, Sun Y Y, Lu T M, et al. Research on monitoring of horizontal displacement field of deep soil based on OFDR technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 108-112.
- [18] Davis M A, Kersey A D, Sirkis J, et al. Shape and vibration mode sensing using a fiber optic Bragg grating array[J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5(6): 759-765.
- [19] Zhang L W, Qian J W, Shen L Y, et al. FBG sensor devices for spatial shape detection of intelligent colonoscope[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04, April 26-May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 834-840.
- [20] Duncan R G, Raum M T. Characterization of a fiber-optic shape and position sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6167: 616704.
- [21] Roesthuis R J, Kemp M, van den Dobbelen J J, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors [J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(4): 1115-1126.
- [22] 张俊康,孙广开,李红,等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.
Zhang J K, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 66-72.
- [23] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6530: 65301S.
- [24] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber[J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695.
- [25] Parent F, Gérard M, Monet F, et al. Intra-arterial image guidance with optical frequency domain reflectometry shape sensing[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38 (2): 482-492.
- [26] Shao C, Yin G L, Lü L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(8): 082010.
- [27] 尹国路,徐州,蒋锐,等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0106002.
Yin G L, Xu Z, Jiang R, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0106002.

Structural Deformation of Fiber Optic Hydrophone Probe Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

Wang Yu¹, Xiao Di³, Niu Yangyang¹, Yang Jie¹, Yang Pengxi¹, Zhu Zhaohao¹, Yin Guolu^{1,2*},
Zhu Tao^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University,
Chongqing 400044, China;

²State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044,
China;

³Hunan Great Wall Hidden Optical Fiber Technology Company, LTD., Changsha 410000, Hunan, China

Abstract

Objective Fiber optic hydrophones are a kind of underwater acoustic information sensor built on optical fiber and optoelectronic technology platform. They mainly use optical coherence detection technology to convert an underwater acoustic signal into an optical signal and transmit it to the signal processing system through optical fiber so that useful sound data can be obtained. They have the advantages of high sensitivity, wide dynamic range, resistance to electromagnetic dry radiation, flexible structure, being ready to form large-scale arrays, and being suitable for extremely harsh conditions. Thus, since their advent, they have developed rapidly under the impetus of huge military strategy and civilian value and become an important development direction of modern optical sensing technology and underwater acoustic sensing technology. In recent years, with the increase in the frequency of maritime shipping and seabed mining activities, there are higher requirements for the detection ability of underwater targets, and the research focus of fiber optic hydrophones has gradually moved closer to the array multiplexing technology. However, as one of the key technologies of the underwater acoustic detection system, the hydrophone unit technology cannot be ignored, and the probe technology is particularly important. Fiber optic hydrophone probes will be deformed by the hydrostatic pressure in a deep-sea environment, which affects the detection performance of underwater acoustic signals and even makes the probe unstable and cannot continue to operate in the deep-sea environment. For the sake of ensuring that the hydrophones can work stably and effectively, a high-precision shape measurement method is urgently needed to provide an accurate and reliable approach to detecting the structural deformation of the fiber optic hydrophone probe. Traditional electrical sensors are difficult to be used for the deformation monitoring of hydrophone probes due to factors such as size and electromagnetic interference. Fiber Bragg grating cannot perform the fully distributed monitoring of small fiber optic hydrophone probes due to low spatial resolution. In response, this paper proposes a method with high spatial resolution and high precision based on optical frequency domain reflectometry to monitor the deformation of the hydrophone probe.

Methods In the experiment, two protection methods are adopted to improve the pressure resistance of the probe, namely covering probe 1 with soft rubber and encapsulating probe 2 by a metal skeleton. The optical fiber is tightly wound on the surface of the hydrophone probes. To make the probes pressurized as evenly as possible, we use a special metal pressure tank, which can be filled with water to simulate an actual water pressure environment. After setting the system parameters, we gently place the two hydrophone probes protected by different methods in the pressure tank and fix them at the same position. Then, we gradually increase the pressure distribution in the tank to 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, and 6.0 MPa. The self-developed distributed optical fiber shape monitoring analyzer is used to measure the wavelength shift of the optical fiber Rayleigh scattering spectrum due to the deformation of the probes in two different protection modes.

Results and Discussions Affected by external pressure, the deformation of the hydrophone probes by extrusion will cause the optical fiber wound on the thin-walled cylinders of the probes to shrink inward, which induces the optical fiber to strain and results in a "blue shift" of the Rayleigh backscattering spectrum in the optical fiber (Fig. 6). Then, the two-dimensional shape reconstruction of the probes is realized using the relationship of the spectral wavelength shift, strain, and the radius of the probe cylinder by the method of inverse integration (Fig. 9). The results show that the diameters of the hydrophone probes gradually decrease with hydrostatic pressure increasing, and there is an approximately linear relationship (Fig. 7), with periodic depressions appearing in the circumferential direction. When the hydrostatic pressure reaches 6 MPa, the depth of three periodic depressions is up to 124 μm (Fig. 10). It is further verified that the performance of the probe encapsulated by a metal skeleton is slightly better than that of the probe covered with soft rubber. The

experimental results are consistent with the simulation results of pressure resistance based on ANSYS (Fig. 5).

Conclusions In the present study, we propose a method for measuring the deformation of fiber optic hydrophone probes based on optical frequency domain reflectometry. The pressure analysis of the probe with ANSYS indicates that there are three periodic depressions in the circumferential direction of the probes under static pressure. In terms of theoretical research, we establish a hydrophone probe deformation reconstruction method based on the wavelength shift in the optical fiber Rayleigh scattering spectrum. In terms of experiments, the optical fiber is tightly wound on the surface of the fiber optic hydrophone probes to sense the strain generated by the probe deformation. The high-precision distributed optical fiber shape measuring instrument independently developed by the laboratory is used to measure the wavelength shift of the optical fiber Rayleigh scattering spectrum with static pressure, and the deformation of the hydrophone probes under static pressure is further reconstructed. The experimental results show that when the static pressure reaches 6.0 MPa, the circumferential depression depth of the hydrophone probes is up to 124 μm . This research provides powerful support for the development and optimization of the material and structure of fiber optic hydrophone probes, which can thereby reduce the cost and cycle of developing hydrophone probes.

Key words sensors; distributed optical fiber sensing; optical frequency domain reflectometer; fiber optic hydrophones; shape sensing