引用本文:方子怡,薄夫森,宋业帅,等. 基于神经网络的FBG传感器目标类型识别研究[J]. 光通信技术,2026,50(5):15-22.

基于神经网络的FBG传感器目标类型识别研究

方子怡,薄夫森,宋业帅,窦新宇,付博玮,潘 登,李寒阳*
(哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院,哈尔滨 150001)

摘要:为实现流场环境下对多种目标振动信号的准确测量,设计并制备了一种高灵敏度的光纤布拉格光栅(FBG)传感器,并开展了基于神经网络的FBG传感器目标类型识别研究。该传感器采用硅橡胶一体成型浇注封装,引入氧化石墨烯纳米涂层增强应变传递,并通过流体力学仿真分析流速与角度响应;在1~2000 Hz范围内测试动态响应和低流速分辨率,采用4种卷积神经网络对潜航器、推进器、2种球形振动源信号进行分类。结果表明:传感器对不同流速及角度下流体力的响应具备各向同性,可分辨约0.5~0.6 cm/s的流速阶梯变化;4种网络识别准确率为90.95%~99.57%,视觉几何组(VGG)-13最优达99.57%,验证了该传感器用于水下振动目标类型识别的有效性。

关键词:光纤传感;光纤布拉格光栅;神经网络;应变传感;目标类型识别
中图分类号:TN253　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0015-08
DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.015

Research on target type recognition of FBG sensors based on neural network

FANG Ziyi, BO Fushen, SONG Yeshuai, DOU Xinyu, FU Bowei, PAN Deng, LI Hanyang*
(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To achieve accurate measurement of vibration signals from multiple targets in a flow-field environment, a highly sensitive fiber Bragg grating (FBG) sensor was designed and fabricated, and a neural-network-based target type recognition study using the FBG sensor was conducted. The sensor was encapsulated by one-piece casting with silicone rubber, and a graphene oxide (GO) nanocoating was introduced to enhance strain transfer. Fluid dynamics simulations were performed to analyze the sensor response under different flow velocities and angles. Its dynamic response and low-flow-velocity resolution were tested in the range of 1~2000 Hz, and four convolutional neural network models were used to classify signals from a submersible, a thruster, and two spherical vibration sources. The results show that the sensor exhibits an isotropic response to fluid forces at different flow velocities and angles and can resolve stepped flow velocity changes of approximately 0.5~0.6 cm/s. The recognition accuracies of the four networks range from 90.95% to 99.57%, with visual geometry group (VGG)-13 achieving the best performance of 99.57%, validating the effectiveness of the proposed sensor for underwater vibration target type recognition.

Key words: optical fiber sensing, fiber Bragg grating, neural network, strain sensing, target type recognition

0 引言

在复杂流场环境中实现多源振动信号的精准测量对重大装备安全监测与流体动力学研究具有重要价值。光纤布拉格光栅(FBG)作为一种光学传感器,具备灵敏度高、抗电磁干扰、体积小等优势[1-4],广泛应用于温度[5-6]、应变[7]、振动[8]等物理量的检测中,逐渐成为振动监测领域的研究热点。在国内外研究中,FBG传感器技术已取得显著进展。Fernandez A等人[9]利用FBG的多路复用特性,将串联有8段不同中心波长光栅的布置结构应用于十字梁的上下表面,通过测量中心波长变化差值,实现了多维力的高精度测量。Dewynter-Marty V等人[10]研制了一种基于光纤光栅的便携式变形仪,用于混凝土的应变与裂缝监测。该装置核心结

收稿日期:2025-09-24。
基金项目:国家自然科学基金项目(52271344)资助。



作者简介:方子怡(2001—),女,硕士研究生,现就读于哈尔滨工程大学物理与光电工程学院光学工程专业,主要研究方向为光纤光栅传感器、智能光子器件的设计与应用等,参与了国家自然科学基金项目,负责光纤光栅传感器的应用等工作。
***通信作者:**李寒阳(1982—),男,工学博士,副教授,主要从事光学人工智能算法、微结构光量子动力学、微结构光学传感、微纳米光纤光学等方面的研究工作。

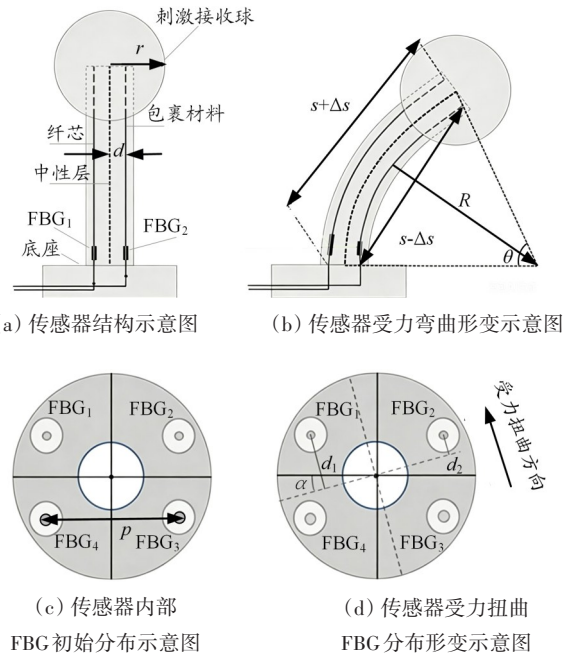
构为一段中心金属传感棒,光纤光栅固定于其上,整体长度约10~20 cm,通过将传感棒固定于建筑物表面,可实现便捷的现场测量。张博轩等人[11]针对海洋信道中声信号易畸变导致算法性能下降的问题,提出了一种对抗残差网络模型,该模型在ResNet基础上引入梯度反向层,采用双标签对抗训练策略,有效提升了模型在跨海况环境下的鲁棒性。此外,喻骁芒[12]设计了一种基于马赫-曾德尔干涉原理的分布式光纤周界安防系统,其信号识别模块基于神经网络理论,能够准确识别入侵目标的类型与位置,在多种入侵场景下识别率均超过96%。上述研究表明,光纤光栅传感技术与神经网络算法的结合,为解决复杂环境下的信号感知与识别问题提供了有效途径。

尽管已有研究取得了一定成果,但在复杂流场环境下,振动信号的准确感知与稳定识别仍然面临诸多挑战。例如,传统识别方法受限于识别阈值,难以实现微小振动变化的高灵敏度检测;多源信号在复杂信道中易发生畸变,导致模型性能下降;同时,现有方法在跨工况、多目标场景下的适应性与泛化能力仍有待提高。针对上述问题,本文设计并制备一种高灵敏度FBG传感器,并基于神经网络开展目标类型识别研究。

1 FBG传感器的设计原理

基于FBG的悬臂梁式流量传感技术目前已较为成熟,广泛应用于各类研究中,能够有效监测稳态流量与流量扰动,并对管道内钝体结构所引发的流场变化做出响应。本文设计的FBG传感器同样采用悬臂梁结构,以继承该设计在灵敏性与环境鲁棒性方面的显著优点,其结构示意图如图1(a)所示。该传感器采用球头圆柱体式,在传感器中,FBG将外界力学刺激转换为相应信号,通过解调悬臂梁姿态反推流速信息。光栅本身可直接测量应变与温度,再通过将应变进一步转化为曲率、位移或加速度等参数,可实现对多种物理量的间接测量。因此,可以通过建立波长漂移量与目标物理量之间的映射关系,完成参数感知与信号解调。

本文将FBG传感器简化为悬臂梁力学模型。基于材料力学理论,其被测体可被视为纯弯曲模型,如图1(b)所示,在发生弯曲变形的微单元中,其上表面处于拉伸状态,对应弯曲外层;下表面则处于压缩状态,对应弯曲内层。截面中心位置为中性层,该处在弯曲前后长度保持不变,既不承受拉伸也不承受压缩应力。传感器内部FBG初始分布示意图如图1(c)所示,4个FBG初始对称分布,形成轴对称敏感结构。传感器受力扭曲FBG分布形变示意图如图1(d)所示,可以看出,传感器受力扭曲时4个FBG的偏移状态。



(a) 传感器结构示意图　(b) 传感器受力弯曲形变示意图

(c) 传感器内部FBG初始分布示意图　(d) 传感器受力扭曲FBG分布形变示意图

图1 FBG传感器结构示意图及受力形变示意图

设定微单元弧长为s,截面上2个位置的弧长分别表示为$s+\Delta s$和$s-\Delta s$,2个位置点之间的距离为d,θ是微单元弯曲时的圆心角,R是弯曲时的半径,则2个弧长公式分别为

$$s+\Delta s=(R+\frac{d}{2})\theta \tag{1}$$

$$s-\Delta s=(R-\frac{d}{2})\theta \tag{2}$$

应变ε与柱体弯曲曲率k以及光纤与中性面的距离d的关系式为

$$\varepsilon=\frac{kd}{2} \tag{3}$$

由于球头圆柱体与内部4根FBG紧密粘连,因此二者的曲率变化保持一致。FBG的中心波长λ_B及其漂移量$\Delta\lambda_{BS}$可反映其自身应变ε的大小,表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_{BS}}{\Delta\lambda_B}=(1-p_e)\varepsilon \tag{4}$$

式中:p_e是光纤的有效弹光系数式,将式(3)与式(4)联立可得曲率k的表达式为

$$k=\frac{2\Delta\lambda_{BS}}{(1-p_e)d\lambda_B} \tag{5}$$

通过检测传感器输出的波长漂移信号,可反演其结构形变状态,进而实现对作用于传感器上的流场应

力强度的测量,最终实现对流场流速的有效感知。

图1(d)中,当传感器绕其轴线相对正方形点阵偏转一个角度α时,各光纤纤芯到弯曲轴的个体距离d_1、d_2会发生变化。然而,由于它们构成了一个直角三角形的三条边,这些距离的平方和仅由正方形点阵的固有间距p决定,不依赖于偏转角α。因此,支撑结构的弯曲刚度呈现机械圆对称性,不存在任何优先的弯曲方向。因为传感器结构具有轴对称性,所以在计算光纤受外力偏转时,仅需分析FBG_1和FBG_2,FBG_3和FBG_4的波长偏移强度可依据该轴对称关系直接推导得出。在尖端确定刚度K为

$$K = \frac{3\pi}{4h^3}[E_s r_s^4 + 4(E_c - E_s)(r_c^2 p^2 + r_c^4)] \tag{6}$$

式中:r_s和r_c表示支撑和包层半径,E_s和E_c是它们各自的杨氏模量,h表示传感器柱体的有效长度。

本文设计的FBG传感器的关键几何参数如表1所示。该传感器采用硅橡胶材料通过一体成型浇注工艺制成,为增强光纤与软体基材之间的应变传递效率,在光纤表面引入了氧化石墨烯(GO)纳米涂层,有效提升了传感器的应变响应灵敏度。针对细径柱体(直径2 mm)制备困难的问题,专门设计了配套灌胶装置,实现了光纤与柱体材料的高质量一体成型封装,确保了传感器的结构完整性与可靠性。

表1 传感器几何结构参数

参数名称	参数值/mm
球头直径	37
传感器总长	135
底座高	40
圆柱体直径	2

本文进一步从结构形式、材料体系与封装工艺等方面,将所设计的传感器与现有典型FBG振动传感器进行了系统对比,如表2所示,以凸显本设计的创新性与差异性。

表2 本文传感器与典型传感器方案的对比

对比	现有典型传感器	本文传感器	本文传感器的优势
结构形式	多为悬臂梁、十字梁等刚性结构	球头圆柱体软体结构	采用流线型软体设计,更适于流场集成,可降低涡激振动,提高对各向流体的响应一致性
材料体系	常用金属、环氧树脂等刚性材料	硅橡胶基软材料,结合GO纳米增敏涂层	采用硅橡胶和GO纳米涂层,具有良好的顺应性与耐腐蚀性,并可提高应变传递效率和灵敏度
封装工艺	多采用胶粘、点焊或预埋式局部封装	一体成型浇注封装,全光纤对称嵌入	采用一体成型浇注和光纤对称嵌入工艺,可减少应力集中,提高结构一致性与长期稳定性
应用特点	主要用于结构健康监测、静态力或高频振动检测	面向流致振动与水下目标识别	面向流致振动检测与水下目标识别,拓展了FBG传感器在复杂流场中的应用

2 流体力学仿真

为研究FBG传感器在不同流场条件下的响应特性,本文通过仿真分析了以不同雷诺数(Re)界定的层流与湍流状态下,流速大小与角度对FBG传感器受力分布的影响。

在流体仿真中,Re是一个无量纲数,它主要的作用是为了展现流体的流动状态,即判断流体的流动是层流状态还是湍流状态。Re定义为流体的惯性力与黏性力的比值,其定量的计算公式为

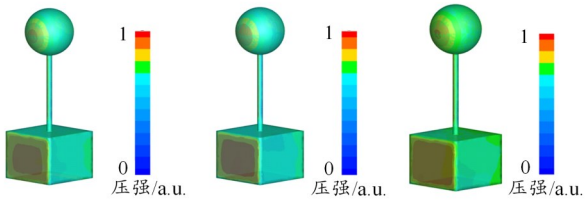
$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{7}$$

式中:ρ是流体密度,v是流体速度,L是特征长度,μ是流体动力黏度。

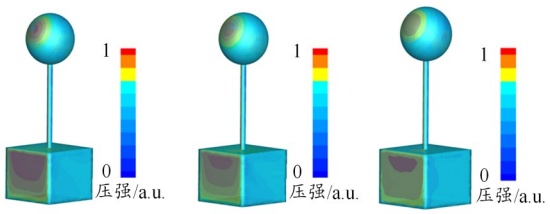
本文对实验所用的FBG传感器进行了多工况仿真分析,包括不同流速、流动方向及流体模型。流速设定为2、4、6、10、20、30 m/s,其中低流速范围(2~6 m/s)采用层流模型,高流速范围(10~30 m/s)采用标准k-epsilon湍流模型[13]。流动方向分为正向(0°)冲击和倾斜30°冲击。

正向放置时,流速为2、4、6 m/s条件下流场中FBG传感器的流体压强分布情况分别如图2(a)~图2(c)所示。FBG传感器底座通过柱体与流体力接收器连接,在流体冲击作用下发生响应。可以看出,FBG传感器在不同流速条件下所承受的流体压强主要分布于流体力接收器与底座。

流场相对于水平面旋转30°后,流速为2、4、6 m/s条件下流场中FBG传感器的流体压强分布情况分别如图2(d)~图2(f)所示。可以看出,在流速为2 m/s时,迎面流体压力自前向后逐渐增大,在传感器处达到最大,随后逐渐减小;当流速增至4 m/s时,压力分布形态与流速为2 m/s时相似,但压力梯度显著增大,尤其在传感器底座与流体力接收器处更为明显。当流速提高至6 m/s时,传感器表面的压力分布的非均匀性进一

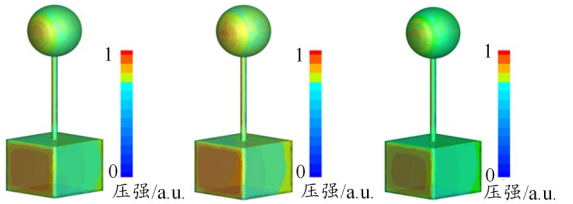


(a) 正向放置,流速为2 m/s　(b) 正向放置,流速为4 m/s　(c) 正向放置,流速为6 m/s

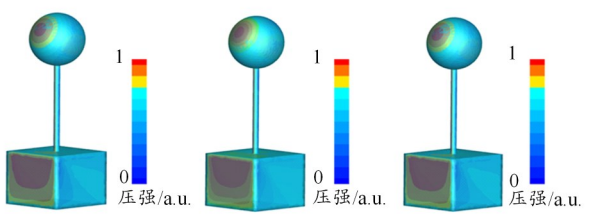


(d) 倾斜30°,流速为2 m/s　(e) 倾斜30°,流速为4 m/s　(f) 倾斜30°,流速为6 m/s

图2 流速为2、4、6 m/s条件下层流场中FBG传感器的流体压力分布仿真结果



(a) 正向放置,流速为10 m/s　(b) 正向放置,流速为20 m/s　(c) 正向放置,流速为30 m/s



(d) 倾斜30°,流速为10 m/s　(e) 倾斜30°,流速为20 m/s　(f) 倾斜30°,流速为30 m/s

图3 流速为10、20、30 m/s条件下湍流场中FBG传感器的流体压力分布仿真结果

步增强,高压区范围扩大,低压区相应收缩,流体分离现象也更为明显。由此可知,随流速增加,压力分布形态基本一致,但压力梯度变化更为剧烈。

正向放置时,流速为10、20、30 m/s条件下湍流场中FBG传感器流体压力分布情况分别如图3(a)~图3(c)所示。可以看出,随着流速增加,传感器表面及周围区域的压力分布呈现出更复杂的变化趋势:在较低流速时,压力分布相对较为均匀,同时压力过渡较为平缓;随着流速增加,特别是在较高流速下,压力变化更为剧烈。以上结果显示出压力在传感器不同位置时存在明显的梯度差异,这种差异反映了流体对传感器的作用力在强度和分布上的变化,直接影响了FBG传感器的应变情况,从而影响其传感性能和测量结果。

湍流场相对于水平面旋转30°后,流速为10、20、30 m/s条件下湍流场中FBG传感器的流体压强分布情况分别如图3(d)~图3(f)所示。可以看出,随着流速增加,压力分布范围更广泛,高压力区域在流体力接收器表面的覆盖范围更大,且FBG传感器底座附近的压力也显著增加。这表明随着流速的提升,外流场对传感器的作用力进一步增强。

3 传感器的性能测试

3.1 信号接收特性分析

实验过程中,将传感器固定于实验平台,并将声源(扬声器或超声波振动头)置于传感器一侧,使其正对传感器球头部位。通过信号发生器控制声源发射不同频率的声波信号,FBG传感器接收声压振动信号并将其转化为波长偏移。该信号经由光纤光栅解调仪进行实时采集与解调,进而分析不同频率下传感器的动态响应特性,具体实验步骤及结果如下:

首先,扬声器施加均匀刺激,音频为1 Hz,间隔为1 000 ms,信号正向振幅约为0.02 nm,此时FBG传感器中心波长的响应曲线如图4(a)所示。可以看出,传感器输出信号呈现周期为1 s的周期性单峰波形,与外部激励信号一致。然后,使用扬声器播放200 Hz音频,此时FBG传感器中心波长的响应曲线如图4(b)所示。可以看出,传感器响应曲线显示每个刺激间隔为5 ms,符合周期规律。之后,使用扬声器播放1 000 Hz音频,并将解调仪由TV1600更换为DM8120,扫描频率设置为2 000 Hz(即每0.5 ms采集1个数据点),此时FBG传感器中心波长的响应曲线如图4(c)所示。可以看出,传感器响应曲线显示每个刺激间隔为1 ms,波形一致性较高。最后,将DM8120解调仪的扫描频率进一步提高至4 000 Hz(采样间隔0.25 ms),并施加2 000 Hz音频激励,此时FBG传感器中心波长的响应曲线如图4(d)所示。可以看出,传感器输出信号保持稳定,刺激间隔为0.25 ms,振幅约为0.003 nm。以上实验结果表明,在低频下传感器中心波长响应曲线的波形清楚、周期稳定,传感器能完全跟随低频振动;在高频下,响应曲线均呈现规则的周期性振荡,说明传感器在高频段仍能稳定响应,具备良好的动态跟随性。

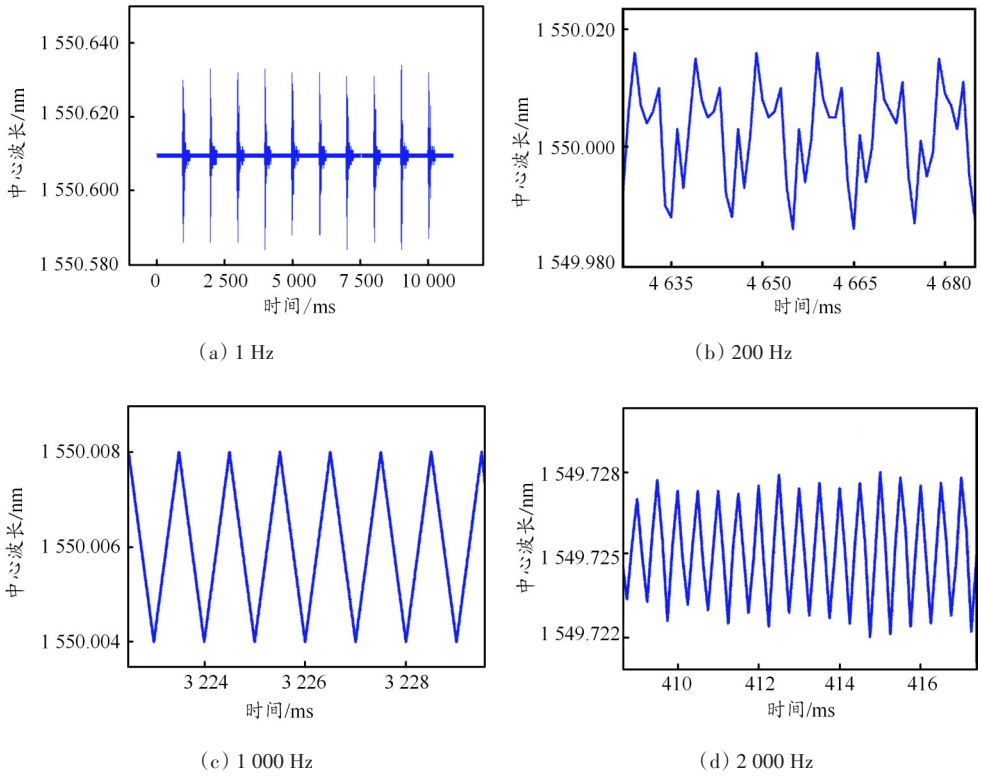


图4 1、200、1 000、2 000 Hz音频下FBG传感器中心波长的响应曲线

3.2 流速分辨率测量

为了验证FBG传感器在流场低流速状态下的性能,本文通过控制流体流速来测试传感器是否能够对流速变化做出准确响应。实验使用装置如图5所示,该装置由解调系统、FBG传感器、恒流水槽装置(流场测试环境)以及流速仪等部分组成。本文通过该实验装置来研究传感器流速测量分辨率,即传感器能分辨的最小流速。

将传感器放置于恒流水槽中,保持运行状态,然后使用循环水泵控制水流量,使水槽中液体从静止产生流速,再使用流速仪测量水体的流速,最后观察解调系统获取到的FBG反射峰的位移情况。调节水泵的档位,每档的流速变化为0.5~0.6 cm/s,变化范围为2.1~10.1 cm/s,整个过程共15个不同的流速,得到流速阶梯上升时FBG传感器中心波长的变化如图6所示。

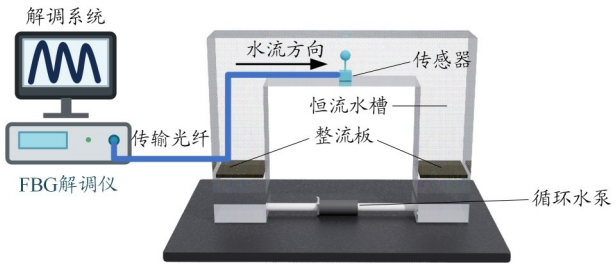


图5 传感器流场测试装置示意图

可以看出,随着水槽中液体流速从2.1 cm/s逐渐增加到10.1 cm/s,FBG传感器的中心波长呈现阶梯式递增趋势。这表明流速的增大使FBG传感器受到的应力或环境影响发生变化,进而导致其反射峰波长发生漂移,说明该FBG传感器能够对流速变化做出响应。另外,在每个流速档位下,FBG传感器的中心波长保持相对稳定,这体现了FBG传感器在该实验条件下具有较好的稳定性,能够在特定流速下持续、可靠地输出信号。

4 神经网络训练

本文构建一套水下振动目标识别系统以验证所设计的FBG传感器的有效性,使用长度为38 cm,宽度为25 cm的潜航器模型来模拟真实水下目标或船舶所产生的振动运动信号,潜航器模型实物图如图7(a)所示。为进一步完善实验数据,在识别系统中引入了2种不同尺寸的球形振动源,其实物图如图7(b)所示。这2种球形振动源的直径分别为15 cm和12 cm,能够产生特征明确的振动信号。通过将潜航器信号与如图7(c)所示的推进器产生的振动信号进行对比分析,可以有效扩充振动目标识别样本数据库,提升数据的多样性和可靠性。将本文构建的水下振动目标识别系统放置于实验水池中,如图7(d)所示,振动源被固定于高为1.2 m、宽为1.2 m的支架上,如图7(e)所示。

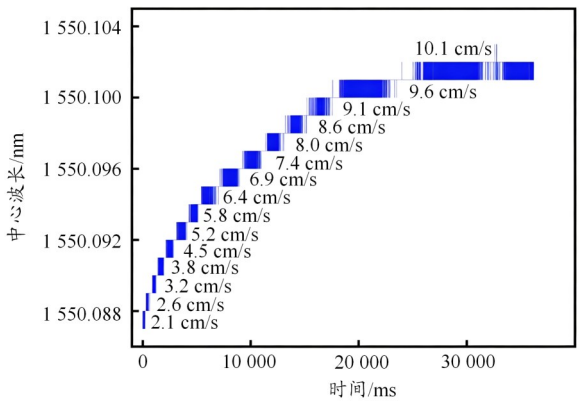
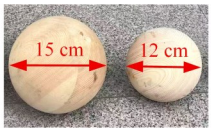


图6 流速阶梯上升时FBG传感器中心波长变化



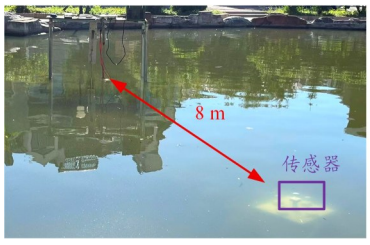
(a) 潜航器模型



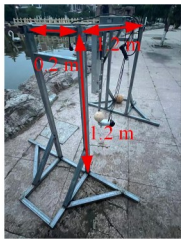
(b) 球形振动源



(c) 推进器



(d) 传感器阵列实拍图



(e) 振源固定伸缩

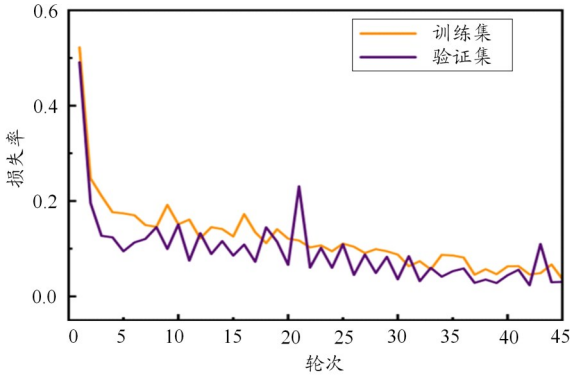
图7 实验系统实物图

本文选用增强的视觉几何组(VGG)模型、VGG-13模型[14]、ResNet18模型以及ResNet34模型[15]4种经过改进优化的卷积神经网络模型用来处理FBG传感器所得的目标振动信号。在训练过程中,引入若干代码组件以实时监控模型的性能,主要依据损失函数值与分类准确率这2项指标综合评价模型表现,训练过程中2项指标的变化趋势能够直观展示模型的收敛情况与最终训练结果。训练集与验证集上的损失率及准确率均按训练轮次进行记录,得到的训练损失曲线和准确率曲线分别如图8与图9所示。其中,训练集用于模型参数学习和更新,验证集不参与参数更新,仅用于评估模型的泛化能力及监测过拟合情况。图8中,曲线呈现锯齿状的下降趋势,这表明随着训练轮次的增加,模型性能不断提升;在训练末期,所有模型的训练损失率均降至较低水平,说明各模型均实现了良好收敛,并达到了较优的拟合效果。图9中,准确率曲线均呈现锯齿状的上升趋势,这说明模型在训练过程中,模型的识别准确率不断优化,最终得到了一个较好的结果。

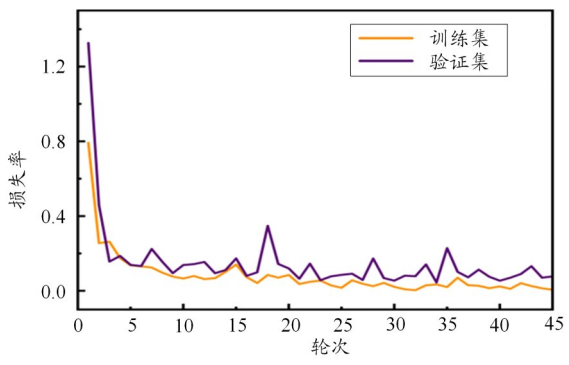
另外,在经过多轮的充分训练后,验证集的损失率收敛在较低水平,而准确率收敛在较高水平,这说明所有模型的训练结果都表现良好。

在最终的模型评估与优化阶段,本文采用准确率、精确率、召回率以及F1值这4个指标对卷积神经网络模型的综合性能进行量化评估,评估结果如表3所示。

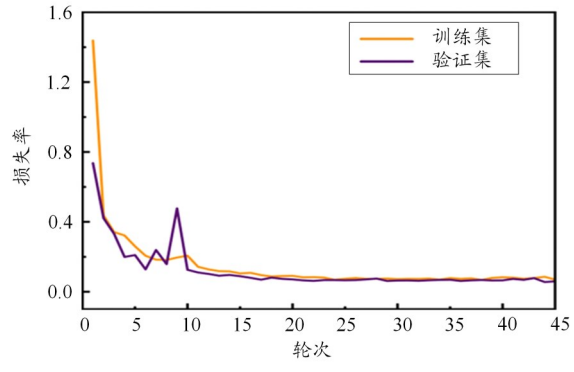
从表3可以看出,经过优化改进的4种卷积神经网络模型对目标类型的识别准确率较高,最低为90.95%,最高可达99.57%,说明模型能有效实现对目标振动源的分类。进一步分析精确率、召回率和F1值可知,各模型在这3项指标上的表现与准确率一致。



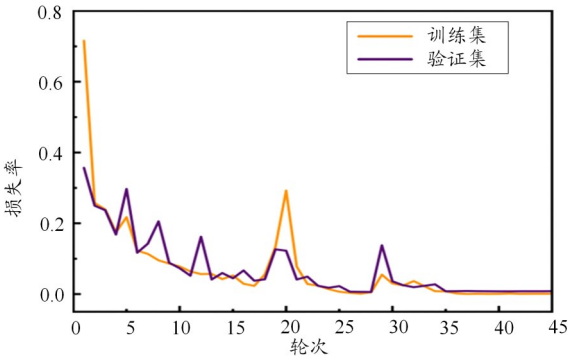
(a) ResNet18模型



(b) ResNet34模型

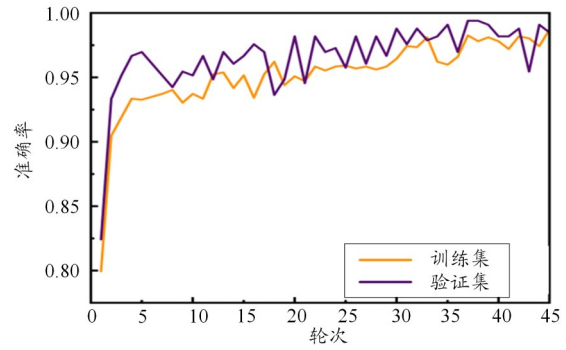


(c) VGG模型

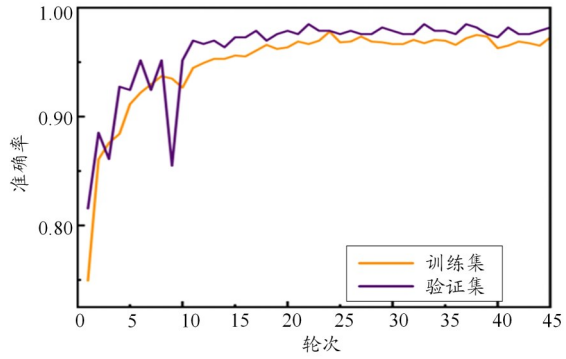


(d)VGG-13模型

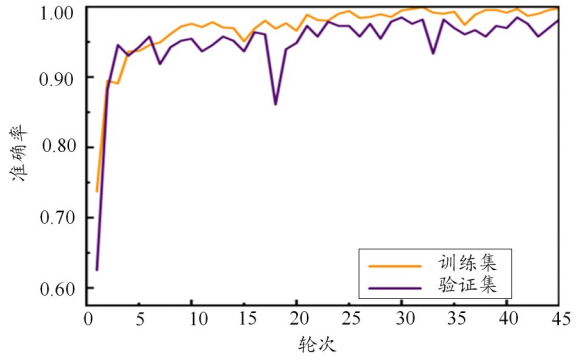
图8 处理目标振动信号的损失率曲线



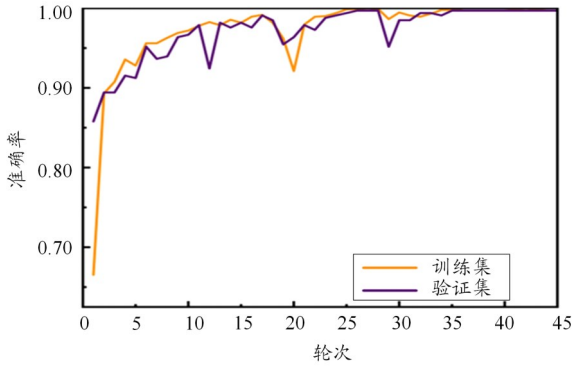
(a) ResNet18模型



(b) ResNet34模型



(c) VGG模型



(d)VGG-13模型

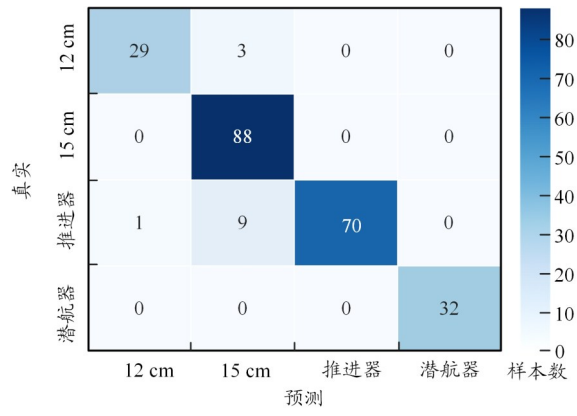
图9 处理目标振动信号的准确率曲线

表3 神经网络性能的评估结果

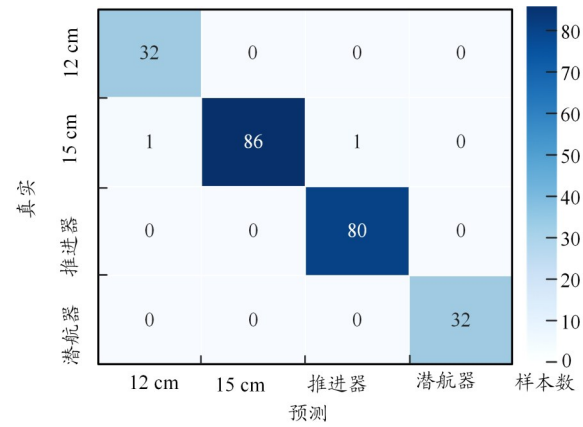
模型	准确率/%	精确率/%	召回率/%	F1值/%
ResNet18	94.40	94.99	94.40	94.39
ResNet34	99.14	99.16	99.14	99.14
VGG	90.95	90.96	90.95	90.85
VGG-13	99.57	99.57	99.57	99.57

其中,VGG-13模型的3项指标均达到99.57%,表明该模型在正负样本识别上无偏差,分类稳定性最佳;ResNet34模型的3项指标均不低于99.14%,表现接近VGG-13;ResNet18模型的精确率(94.99%)略高于召回率(94.40%)和F1值(94.39%),说明其在预测为正例的样本中可靠性较高,但存在少量漏检;VGG模型的3项指标均在90.85%~90.96%,虽略低于其他模型,但仍保持了良好的均衡性。综合来看,所有模型在精确率、召回率和F1值上均验证了其稳健的分类能力。

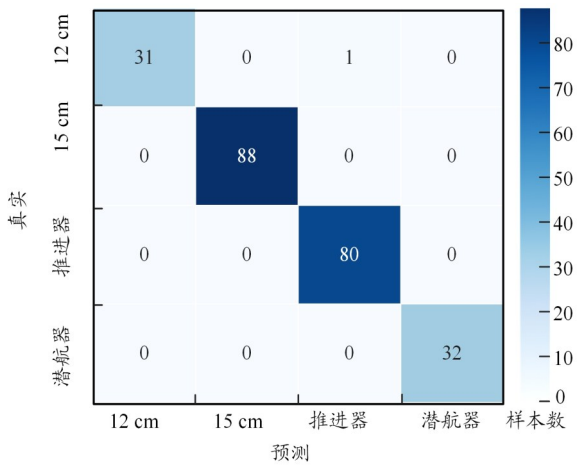
4种卷积神经网络模型相应的混淆矩阵如图10所示。图中15 cm、12 cm分别表示15 cm球形振动源和12 cm球形振动源。可以看出,4种神经网络模型对振动目标信号的整体识别效果良好,实际应用表现可



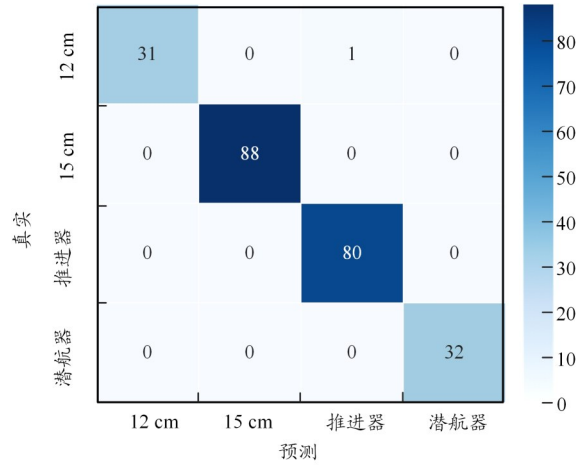
(a) ResNet18模型



(b) ResNet34模型



(c) VGG模型



(d)VGG-13模型

图10 模型的混淆矩阵

靠。在推进器、潜航器、15 cm球形振动源和12 cm球形振动源4类目标识别中,推进器识别准确率相对较高,偶发误判,这得益于其独特稳定的特征模式;15 cm球形振动源识别效果很好,样本均能被正确识别;12 cm球形振动源识别准确率较低,部分样本易误判为其他类型,表明其特征与其他目标存在重叠。

综上所述,4种卷积神经网络模型在FBG传感器目标识别任务中效果良好,为后续精度提升和应用扩展奠定了基础。

5 结束语

本文提出了一种基于神经网络的FBG传感器振动目标识别方法,并初步验证了该方法的可行性与有效性。实验结果表明,所制备的传感器具有良好的动态响应特性,能够稳定感知流速变化;结合神经网络后,4种模型的目标识别准确率均超过90%,其中VGG-13模型最高,达到99.57%,表明所设计的FBG传感器能够实现对水下振动目标的高效、准确检测。基于神经网络的FBG传感器振动目标识别方法是当前的研究热点,未来研究可从以下技术路线进一步深入:1)开发轻量化网络模型,实现在嵌入式设备或边缘节点上的实时部署与低功耗运行;2)探索多传感器信息融合机制,结合声学、压力等多模态数据,提升复杂场景下的识别鲁棒性;3)研究小样本与跨工况条件下的自适应学习算法,增强系统在数据稀缺或环境变化时的泛化能力;4)引入注意力机制、Transformer等先进架构,以更有效地捕捉振动信号中的长程依赖与关键特征,进一步提升识别精度与系统智能水平。

参考文献:

[1] Ma Shaowei, Wu Haoyu, Gao Shuxian, et al. Temperature-independent sensor of the magnetic field based on FBG and Terfenol-D[J]. Nanomaterials, 2023, 13(14): 2109.
[2] Ma Jun, Lu Boyang, Shi Yonggang, et al. Corrosion monitoring and evaluation of steel strand for transmission line based on fiber Bragg grating (FBG)[C]//Smart Structures and NDE for Industry 4.0, Smart Cities, and Energy Systems. Anaheim: SPIE, 2020, 11382: 132-137.
[3] 尚秋峰,巩彪. 光纤周界系统振动信号识别算法研究进展[J]. 光通信技术,2021,45(5):16-20.
[4] 姜永祥. 基于FBG的变电站入侵事件识别方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2024.
[5] Mamidi V R, Kamineni S, Ravinuthala L N S P, et al. Characterization of encapsulating materials for fiber Bragg grating-based temperature sensors[J]. Fiber & Integrated Optics, 2014, 33(4): 325-335.
[6] Zaynetdinov M, See E M, Geist B, et al. A fiber Bragg grating temperature sensor for 2~400 K[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1908-1912.
[7] Zhou Qian, Ning Tigang, Pei Li, et al. Temperature-insensitive fiber Bragg grating strain sensor[J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(6): 414-417.
[8] Zhang Xiaolei, Zhang Faxiang, Li Shujuan, et al. A high-performance compact vibration sensor based on fiber Bragg grating[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(s1): s10608.
[9] Fernandez A, Berghmans F, Brichard B, et al. Multi-component force sensor based on multiplexed fiber Bragg grating strain sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 810-813.
[10] Dewynter-Marty V. Concrete strain measurements and crack detection with surface-mounted and embedded bragg grating extensometer[C]. Proc of the Optical Fiber Sensors Conf (OFS-12). Williamsburg: Optical Society of America, 1997.
[11] 张博轩,王少博,赵天白,等. 基于对抗残差网络的复杂海况舰船目标类型识别技术研究[J]. 无线电工程,2024,54(10):2355-2361.
[12] 喻骁芒. 分布式光纤传感器周界安防入侵信号的多目标识别[D]. 湘潭:湘潭大学,2014.
[13] 程攀龙,赵明,徐妍妍. 基于Fluent的高速重型机床静压转台流场特性仿真[J]. 机械工程师,2025(3):73-77.
[14] Sengupta A, Ye Yuting, Wang R. Going deeper in spiking neural networks: VGG and residual architectures[J]. Frontiers in Neuroscience, 2019, 13: 95.
[15] Wu Zifeng, Shen Chunhua, Van D H A. Wider or deeper: Revisiting the resnet model for visual recognition[J]. Pattern Recognition, 2019, 90: 119-133.