

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513845

# 基于石墨烯-硅胶复合封装的 FBG 触觉感知单元设计\*

孙世政, 陈盛康, 何江, 董绍江

(重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074)

**摘要:** 机器手的精细化操作水平取决于其指尖触觉感知性能。为提升基于 FBG 的机器手指尖触觉感知性能, 针对 FBG 柔性感知单元存在导热性能较差及接触力-接触温度交叉敏感的问题, 设计了一种石墨烯-硅胶复合材料柔性封装的对角十字型 FBG 触觉感知单元, 提出了一种基于鱼鹰优化算法优化卷积神经网络(OOA-CNN)的解耦方法。首先, 利用仿真分析对比石墨烯-硅胶复合材料封装和纯硅胶封装中的 FBG 的温度响应和应变响应。然后, 通过对比实验分析石墨烯质量分数为 1%、1.5%、2%、2.5%、3% 时对复合材料导热性能的影响, 并结合三指机器手对 FBG 触觉感知单元进行指尖感知实验, 检测其接触力灵敏度和接触温度灵敏度。最后, 对接触力和接触温度复合感知信号进行耦合分析, 通过解耦实验对比 CNN 模型和 OOA-CNN 模型, 验证 OOA-CNN 的解耦效果。仿真和实验结果表明, 通过在硅胶基体中添加质量分数为 1.5% 的石墨烯作为导热填料, 能够在有效保证 FBG 的触觉感知性能的基础上, 增强硅胶基体的导热性能; FBG 触觉感知单元的接触力灵敏度为 31.281 pm/N, 接触温度灵敏度为 10.787 pm/°C; OOA-CNN 解耦模型相较于最小二乘法 and CNN 解耦模型, 具有较好的解耦效果, 接触温度平均绝对误差减小了 40.73%, 接触力平均绝对误差减小了 41.33%。

**关键词:** FBG; 机器手指尖; 触觉; OOA-CNN 解耦模型

**中图分类号:** TH741 TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## Design of FBG tactile sensing unit based on graphene-silicone composite packaging

Sun Shizheng, Chen Shengkang, He Jiang, Dong Shaojiang

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The level of refined operation of a robotic hand depends on its fingertip tactile perception performance. To enhance the tactile perception performance of FBG-based robotic fingertips, a diagonal cross-shaped FBG tactile perception unit was developed, featuring a flexible packaging structure composed of a graphene-silicone composite material. This design addressed key challenges such as poor thermal conductivity and the cross-sensitivity between contact force and contact temperature commonly observed in conventional FBG soft perception units. To resolve the coupling issue between force and temperature, a decoupling method based on an Osprey optimization algorithm optimized convolutional neural network (OOA-CNN) was proposed. First, simulation analyses were conducted to compare the temperature response and strain response of FBG sensors embedded in graphene-silica gel composite packaging versus pure silica gel packaging. Then, experimental analyses were performed to investigate the impact of different graphene mass fractions (1%, 1.5%, 2%, 2.5%, and 3%) on the thermal conductivity of composite materials. Using a three-fingered robotic hand, fingertip perception experiments were carried out to evaluate the sensitivity of the FBG tactile perception unit to both contact force and contact temperature. Finally, coupled analysis was performed on the composite perception data of contact force and temperature. The decoupling performance of the proposed OOA-CNN model was validated through comparative experiments against a standard CNN model and a least squares method. Simulation and experimental results show that incorporating 1.5% mass fraction graphene as a thermally conductive filler in the silicone matrix significantly enhances its thermal conductivity while preserving the FBG's tactile sensing performance. The FBG tactile unit exhibited a sensitivity of 31.281 pm/N to contact force and 10.787 pm/°C to contact temperature. Furthermore, the OOA-CNN

收稿日期: 2025-03-21 Received Date: 2025-03-21

\* 基金项目: 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目 (CSTB2023NSCQ-LZX0081)、重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJZD-K202200705)、重庆市技术创新与应用发展专项重大项目 (CSTB2023TIAD-STX0016) 资助

decoupling model has a better decoupling effect compared to the least squares method and the CNN decoupling model, with an average absolute error reduction of 40.73% for contact temperature and 41.33% for contact force.

**Keywords:** FBG; machine fingertips; tactile sensing; OOA-CNN decoupling model

## 0 引言

机器人是模仿人类手部功能的机械装置,能够代替人类完成搬运、装配、加工等任务,广泛应用于工业自动化和医疗服务等领域<sup>[1]</sup>。机器人指尖感知<sup>[2]</sup>作为机器人触觉感知最为敏感的部分,其感知性能决定了机器人的精细化操作水平。

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)凭借其抗电磁干扰能力强、响应速度快、尺寸小等优点,已经广泛应用于工业设备检测、生物医学精密传感和航空航天等领域<sup>[3-8]</sup>。在机器人指尖触觉感知方面的研究也取得了一定进展。Lu等<sup>[9]</sup>提出一种采用聚二甲基硅氧烷封装的FBG方孔型触觉传感器进行手指力反馈,基于机器人手指的加载灵敏度为27.3 pm/N,分辨率为0.2 N;Jin等<sup>[10]</sup>提出了一种采用硅橡胶封装的基于光纤光栅法向力/剪切力检测的指尖柔性触觉传感器,在25℃~185℃范围内的线性温度灵敏度为10.17 pm/℃,在0~2 N范围内的接触力线性灵敏度为-14.18 pm/N;本团队<sup>[11-12]</sup>经过多年研究,设计了采用硅胶封装的特征分离式双层“十字”型FBG指尖触觉感知单元,接触温度灵敏度为11.255 pm/℃,抓握力灵敏度为17.342 nm/MPa。虽然基于FBG的机器人指尖触觉感知取得了一定的研究进展,但由于传统的柔性封装材料(硅橡胶、聚二甲基硅氧烷、环氧树脂等)的低热导率,导致感知单元导热性能较差,对温度变化的响应较为迟缓,进而产生温度感知灵敏度误差。

针对FBG感知过程中的多信息交叉敏感问题,研究者提出了一些解耦方法。钱昱名等<sup>[13]</sup>提出了一种采用级联FBG的法布里-珀罗(FBG-Fabry-Perot, FBG-FP)传感器,级联FBG阵列由氙离子紫外激光器基于相位掩模板方法制作,其形成的FP干涉峰和光栅反射谱包络可以实现温度与应变的解耦;Deng等<sup>[14]</sup>提出了一种基于深度学习的光谱分割模型(adaptive dilated pyramid net, ADPNet)进行温度和应变解耦,应变解耦均方根误差(RMSE)为141.755 με,解耦时间为0.54 ms;Du等<sup>[15]</sup>提出了一种基于灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)的非线性解耦算法,对简单递归神经网络(simple recurrent neural network, Simple RNN)的非线性解耦算法进行了改进,最大误差分别减小了72.0%和81.3%,平均误差分别减小了74.4%和79.4%。

综上所述,现阶段基于FBG的机器人指尖触觉感知取得了一定的研究进展,但仍然存在感知单元导热性能

较差和温度接触力交叉敏感的问题,针对上述问题设计了一种石墨烯-硅胶复合材料柔性封装的对角十字型FBG触觉感知单元,提升感知单元的导热性能;其次,进行接触温度、接触力感知实验研究;最后,对接触温度和接触力复合感知信号进行耦合分析,提出了一种基于鱼鹰优化算法优化卷积神经网络(osprey optimization algorithm-convolutional neural network, OOA-CNN)的解耦方法对实验数据进行解耦。

## 1 传感原理与结构设计

### 1.1 FBG 传感原理

FBG传感的基本原理是利用光纤光栅的有效折射率和光栅周期对外界参量的敏感特性,将待测参量的变化转化为光栅中心波长漂移量<sup>[16]</sup>,原理如图1所示。

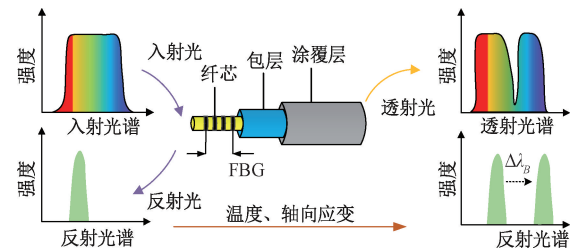


图1 FBG 传感原理

Fig. 1 Schematic diagram of the FBG sensing

FBG的反射光中心波长 $\lambda_B$ 为:

$$\lambda_B = 2n_{eff}A \quad (1)$$

式中: $n_{eff}$ 为纤芯有效折射率; $A$ 为光纤光栅的相位光栅周期。

由式(1)可知,FBG的中心波长受纤芯有效折射率 $n_{eff}$ 和相位光栅周期 $A$ 两个因素影响,FBG在稳定状态下 $n_{eff}$ 和 $A$ 始终保持不变,而温度和轴向应变都会影响光栅的有效折射率和周期,使得FBG中心波长产生漂移,可表示为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon_z\lambda_B + (\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长漂移量; $\varepsilon_z$ 为光纤光栅轴向应变; $\Delta T$ 为光纤光栅温度变化量; $P_e$ 为有效弹光系数(常见光纤介质中弹光系数 $P_e \approx 0.22$ ); $\alpha$ 为光纤材料的膨胀系数; $\xi$ 为光纤材料的热光系数。

### 1.2 传感器结构设计

为解决感知单元导热性能较差和温度接触力交叉敏感的问题,设计了一种对角十字型FBG触觉感知单元,如图2所示。封装基体采用20 mm×20 mm×3 mm的长方

体,上下2根FBG空间间隔0.75 mm,在减小感知单元封装厚度的同时避免了2根FBG之间出现交叉干扰、信号重叠和干涉效应等问题。由于硅胶是一种导热散热界面材料,其整体的导热性依然具有局限性,需通过添加高导热填料来进一步提升FBG感知单元的导热性能。传统的金属/陶瓷填料(铝、氧化铝等)虽具备高热传导特性,但其高添加比例易导致材料密度上升,难以满足感知单元轻量化的设计要求。石墨烯作为新型的导热填料<sup>[17]</sup>,凭借其单层蜂窝晶格结构和 $sp^2$ 杂化强共价键,形成了 $5\,000\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 的超高热导率,同时兼具质量密度低的优势。作为导热填料添加至硅胶基体中,石墨烯因其大纵横比优势形成三维导热网络,与传统导热填料相比,同等填充量下显著提升复合材料导热性,完美契合FBG感知单元对导热性能提升和轻量化的双重需求,故该结构采用石墨烯-硅胶复合封装。

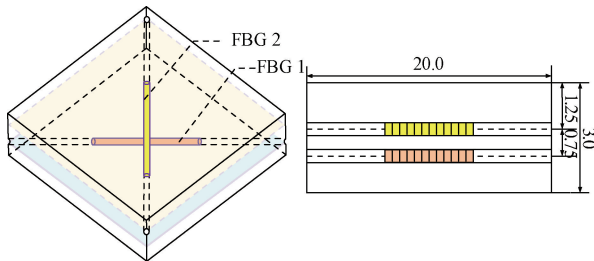


图2 对角十字型FBG传感结构

Fig. 2 Diagonally cross-shaped FBG sensing structure

其中,FBG1和FBG2的中心波长漂移量可表示为:

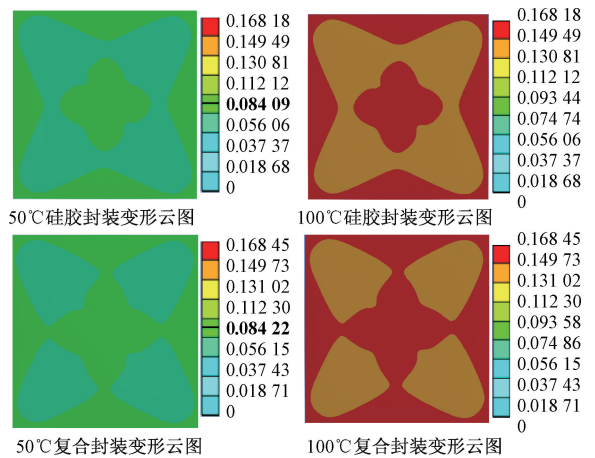
$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{e1}\varepsilon_z\lambda_1 + K_{T1}\Delta T\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 = K_{e2}\varepsilon_z\lambda_2 + K_{T2}\Delta T\lambda_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_{e1}$ 和 $K_{e2}$ 为FBG1和FBG2的应变灵敏系数; $K_{T1}$ 和 $K_{T2}$ 为FBG1和FBG2的温度灵敏度系数。由于FBG刻写完成后, $K_{e1}$ 、 $K_{e2}$ 、 $K_{T1}$ 、 $K_{T2}$ 固定不变,因此,在不受到其他外部因素干扰的情况下,2根FBG的中心波长漂移量应该与应变、温度变化呈现线性关系。

## 2 有限元仿真分析

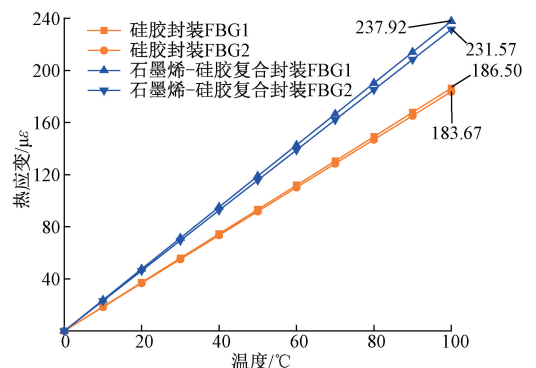
### 2.1 温度仿真

为探究石墨烯的添加是否会影响FBG感知单元的感知性能,建立FBG感知单元模型,设置模型尺寸长度为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ ,其中,封装基体分别采用纯硅胶和添加石墨烯的硅胶复合材料进行对比仿真分析。通过对稳态热分析模块设置温度 $0^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ ,步长 $10^\circ\text{C}$ ,环境温度设置为 $0^\circ\text{C}$ ,得到感知单元的热变形云图如图3(a)所示,硅胶封装和复合封装中FBG所受的温度与热应变关系如图3(b)所示。



(a) 热变形云图

(a) Thermal deformation nephogram



(b) 温度与热应变映射关系

(b) Temperature-thermal strain mapping relationship

图3 温度仿真分析

Fig. 3 Thermal simulation analysis

从仿真结果可知,相同温度下,相比于硅胶封装的FBG,石墨烯-硅胶复合封装的FBG受到的热应变更大,复合封装的FBG1受到的热应变为硅胶封装的1.27倍左右,复合封装的FBG2受到的热应变为硅胶封装的1.26倍左右。

### 2.2 接触力仿真

由于添加石墨烯会导致硅胶基体的弹性产生变化,需要进一步对比两种材料在接触力影响下的应变。在有限元仿真中,通过在感知单元上表面垂直加载 $0\sim 10\text{ N}$ 的接触力,另一面受位移约束,得到FBG应变云图以及FBG所受接触力与应变关系如图4(a)和(b)所示。从仿真结果可知,两种封装材料中的FBG在相同接触力作用下的应变差距较小,FBG1最大微应变差为 $0.207\ \mu\varepsilon$ ,FBG2最大微应变差为 $0.842\ \mu\varepsilon$ 。

综上所述,石墨烯的添加并不会减弱FBG的应变响应特性。相反,能够显著提升FBG在温度变化下产生的热应变效应。所以,将石墨烯作为导热填料应用于感知单元中,能够增强导热性能的同时,保证FBG的感知性能,从而实现温度-力双参量的协同感知。

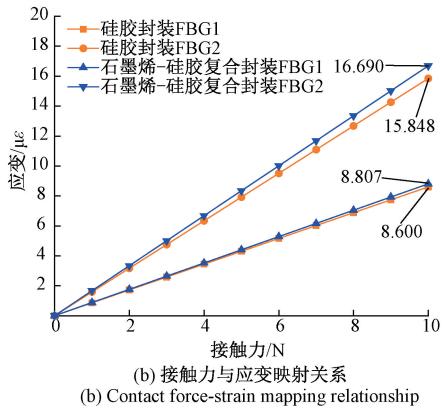
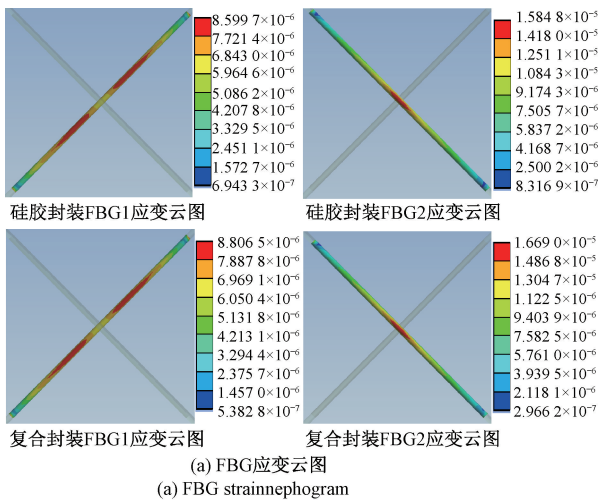


图 4 接触力仿真分析

Fig. 4 Contact force simulation analysis

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 石墨烯含量对比实验

为研究石墨烯含量对封装基体导热性能的影响, 采用对比实验制备含不同质量百分比石墨烯的硅胶复合材料, 由于过量的石墨烯会导致硅胶溶液无法固化, 最终选用石墨烯质量百分比为 1、1.5、2、2.5、3 wt% 的 5 组实验组进行对比实验。按照上述的 5 种质量百分比分别制备 20 mm×20 mm×3 mm 的复合材料, 采用 2 个 PT100 型号的铂热电阻作为温度传感器, 连接 MAX31865 至数字输出转换器、STM32 单片机, 并通过蓝牙模块连接手机, 实现对温度进行实时监测和精确测量, 温度计 1 粘附于水杯底部, 检测水杯温度, 温度计 2 粘附于复合材料底部。在水杯中装满水, 通过加热棒将水温加热至 70℃, 通过自然降温至 66℃ 后, 将水杯放置于复合材料上方, 静置 3 min 后, 记录复合材料底部的温度传感器的温度, 来判断材料的导热性能。制备的复合材料和实验器械如图 5 所示, 温度计 3 min 内的温度差值如表 1 所示。

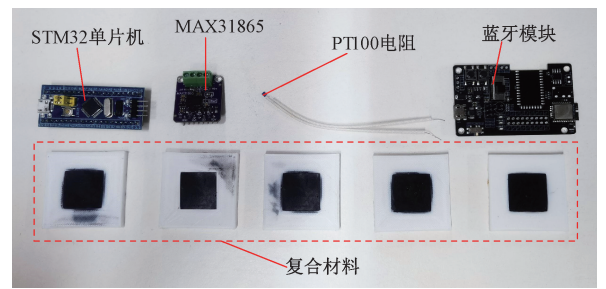


图 5 石墨烯含量对比实验器械

Fig. 5 Instruments for graphene content comparison experiments

表 1 对比实验的结果

Table 1 Compare the results of the experiment

温度计	石墨烯质量百分比				
	1 wt%	1.5 wt%	2 wt%	2.5 wt%	3 wt%
1	8.348	6.727	6.422	5.813	6.212
2	18.784	23.810	24.361	26.093	24.722

由表 1 中的温度计 2 可知, 石墨烯质量百分比为 1、1.5、2、2.5、3 wt% 的复合材料 3 min 前后的温度差分别为 18.784℃、23.810℃、24.361℃、26.093℃、24.722℃, 石墨烯质量百分比为 2.5 wt% 时温度计 2 温差最大, 同时 2.5 wt% 时温度计 1 的温差最小, 总体表明, 当石墨烯质量百分比为 2.5 wt% 时, 复合材料的导热性能最佳。但在实际制备过程中, 当石墨烯质量百分比达到 2.5 wt% 时, 复合材料过于柔软, 出现弹性降低的情况, 这可能是石墨烯团聚现象加剧以及界面结合力减弱导致的。由于质量百分比为 1.5 与 2 wt% 的温差较小, 因此, 综合考虑复合材料的导热性能和弹性性能, 最终选用 1.5 wt% 含量的石墨烯制备柔性感知单元。

#### 3.2 感知单元标定实验

利用添加 1.5 wt% 石墨烯的硅胶复合材料进行封装, 制备了对角十字型的 FBG 触觉感知单元, 并搭建标定实验平台如图 6 所示, 对感知单元进行温度和接触力的标定实验。

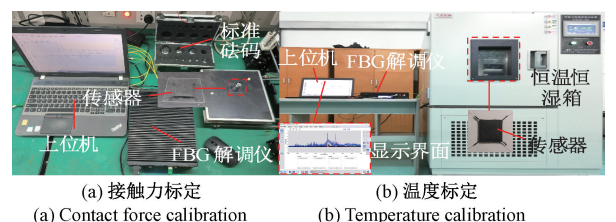


图 6 标定实验平台

Fig. 6 Calibrate the experimental platform

1) 接触力标定实验

利用砝码进行接触力标定,接触力施加范围为 0~1 000 g(即 0~0.245 MPa),施加步长为 100 g,施加载荷稳定 30 s 后记录数据,采样时间设定为 30 s,重复 3 次标定实验,载荷与波长漂移量关系如图 7。

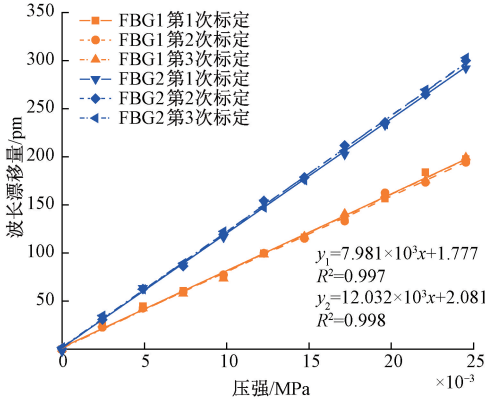


图7 载荷与波长漂移量关系

Fig. 7 Load-wavelength drift correlation

由图 7 可知,FBG1 的平均接触力灵敏度为 7.981 nm/MPa(即 19.843 pm/N),FBG2 的平均接触力灵敏度为 12.032 nm/MPa(即 30.099 pm/N)。

2) 温度标定实验

将环境温度 25℃ 下的 FBG 的中心波长作为初始值。将感知单元放置于恒温恒湿实验箱,将温度设置为 0℃,温度标定施加范围为 0℃~100℃,施加步长为 5℃,升温至 100℃ 后,以 -5℃ 为步长进行降温至 0℃,实验过程中温度稳定 60 s 后记录数据,记录时间为 30 s,重复 3 次标定实验,温度与波长漂移量关系如图 8。

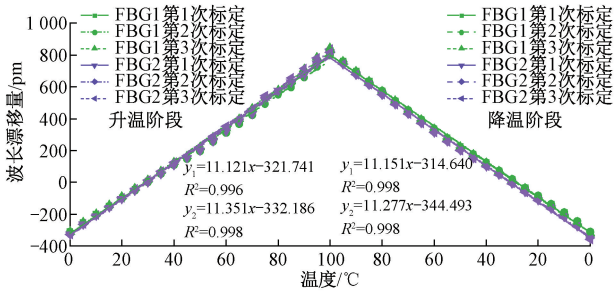


图8 温度与波长漂移量关系

Fig. 8 Temperature-wavelength drift correlation

由图 8 可知,升温阶段,FBG1 平均温度灵敏度为 11.121 pm/℃,FBG2 平均温度灵敏度为 11.351 pm/℃,降温阶段,FBG1 平均温度灵敏度为 11.151 pm/℃,FBG2 平均温度灵敏度为 11.277 pm/℃。

3.3 指尖感知实验

为了验证 FBG 感知单元在机器手指尖的感知性能,通过纳米双面胶和硅胶背胶处理剂将 FBG 感知单元粘附在三指机器手指尖上。搭建指尖感知实验平台如图 9(a)和(b)所示。



(a) 接触力感知  
(a) Contact force sensing



(b) 接触温度感知  
(b) Contact temperature sensing

图9 指尖感知实验平台

Fig. 9 Fingertip perception experiment platform

1) 接触力感知实验

以空水杯作为接触力感知对象,将三指机器手调整到初始姿态,将水杯杯壁与 FBG 感知单元正向接触,通过将三指机器手设置为力控制模式,利用机器手指尖内嵌的力传感器进行接触力大小控制,接触力控制范围为 1~10 N,步长设置为 1 N,接触力稳定 30 s 后进行采集,为确保数据可靠性,重复 3 次实验。接触力感知实验结果如图 10 所示,FBG1 平均接触力灵敏度为 19.931 pm/N,FBG2 平均接触力灵敏度为 28.107 pm/N。

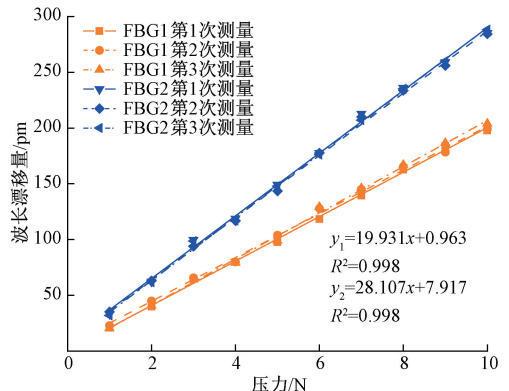


图10 接触力响应曲线

Fig. 10 Contact force response curve

2) 接触温度感知实验

以热水作为温度变化源,采用2个温度传感器对接触温度进行实时监测和精确测量,其中一个温度传感器放置于FBG感知单元对应位置的水杯内壁,另一个温度传感器采用锡箔纸包装粘附于FBG感知单元旁,为防止外界温度干扰,整个水杯采用锡箔纸包裹进行隔热保温处理。图9(b)中,为方便展示实验平台,没有包裹锡箔纸。室温下记录的FBG中心波长作为初始值,将初始水温降低至0℃~3℃,通过加热棒调节温度,升温测量范围设置为0℃~70℃,以5℃为步长,水温升高超过70℃后,进行降温实验,降温实验温度范围为10℃~65℃,以-5℃为步长,降温过程中,通过自然降温至室温后,采用加冰块的方式进行进一步降温,直至温度达到5℃~8℃,为确保实验精度,冰块放置时需远离温度传感器和FBG感知单元,避免局部温度变化过快导致的实验误差。实验过程中,当温度达到目标温度的±0.1℃范围内,开始采集波长数据,平均采集时间10~15s,为确保数据可靠性,重复3次实验。接触温度感知实验的结果如图11所示,升温实验和降温实验中,FBG1的平均温度灵敏度分别为9.732 pm/℃、10.285 pm/℃,FBG2的平均温度灵敏度分别为11.186 pm/℃、11.053 pm/℃。

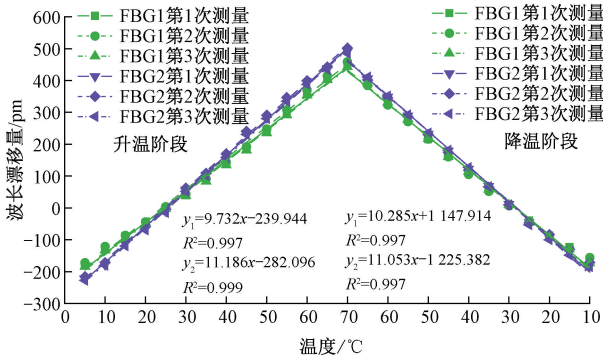


图11 接触温度响应曲线

Fig. 11 Contact temperature response curve

3) 接触力-接触温度复合感知实验

为了检测FBG感知单元在机器手指尖的复合感知性能,加热水杯温度至70℃后,进行降温,温度采集范围为10℃~60℃,以-5℃为步长,同时利用机器指尖内嵌的力传感器进行接触力大小控制,接触力控制范围为0~8N,以1N为步长,当接触力稳定且温度达到目标温度的±0.1℃范围内时采集波长数据,平均采集时间30s。FBG中心波长在不同接触力和接触温度下的关系如图12所示。为了更直观的观察波长漂移量和接触力、接触温度的关系,分别采用接触力和接触温度作为X轴来绘图。

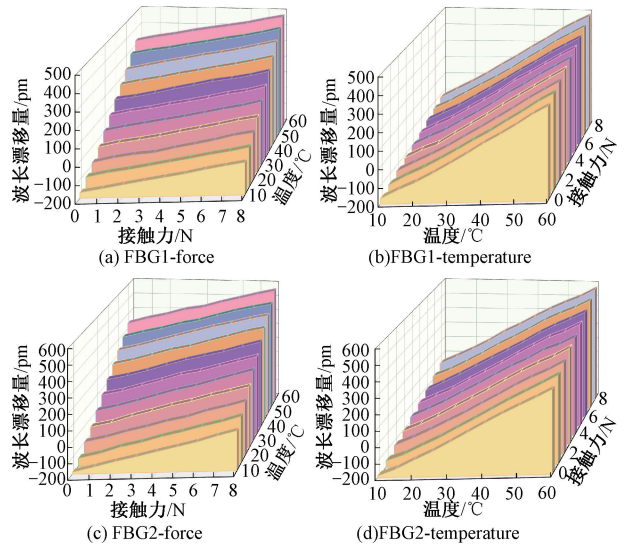


图12 FBG波长漂移量与接触力和温度的关系

Fig. 12 FBG wavelength drift versus contact force and temperature

由图12(a)和(c)可知,在接触力递增过程中,各接触温度下的拟合直线近似平行;由图12(b)和(d)可知,不同接触力随着接触温度升高的拟合直线也近似平行,这验证了FBG波长漂移量与接触力和接触温度均存在稳定的线性响应特性。根据实验结果,FBG1的平均接触力灵敏度和平均接触温度灵敏度分别为20.411 pm/N、10.242 pm/℃;FBG2的平均接触力灵敏度和平均接触温度灵敏度分别为31.281 pm/N、10.787 pm/℃。

4 信号解耦实验与分析

4.1 耦合分析

FBG的中心波长会随着接触力和接触温度的变化而产生漂移,在接触力-接触温度复合感知过程中,感知信号存在耦合现象,由于2根FBG都同时受到温度和接触力的影响,所以需要通过对计算解算出温度和接触力的值。本文采用最小二乘法进行解算,根据式(2),将波长漂移量写为:

$$\Delta\lambda = aT + bF + d \tag{4}$$

式中:  $T$  和  $F$  是自变量(温度和接触力);  $a$ 、 $b$  是自变量  $T$  和  $F$  的系数;  $d$  是常数项。将其写为矩阵形式,即:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \tag{5}$$

式中:  $\mathbf{Y}$  是波长漂移量的列向量;  $\mathbf{X}$  是设计矩阵,包含所有自变量的值以及常数项;  $\boldsymbol{\beta}$  是待求解的系数向量,包含待求解的系数  $a$ 、 $b$  和  $d$ ; 通过最小二乘法计算:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Y} \tag{6}$$

将接触力-接触温度复合感知实验所得的实验数据

代入上述公式进行计算,根据计算出的值和真实值求解平均绝对误差和均方误差,结果表明,接触力的平均绝对误差和均方误差分别为 0.551 2、1.310 8;接触温度的平均绝对误差和均方误差分别为 1.240 4、2.027 4。由此可见,通过最小二乘法计算所得的接触力和接触温度误差较大,需要采用解耦方法来解决温度和接触力交叉敏感的问题。

#### 4.2 卷积神经网络

卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)<sup>[18]</sup>是由输入层、卷积层、池化层和全连接层组成的深度学习模型,通过卷积操作来提取数据特征,并利用池化层降低特征图的维度,这使其拥有了强大的特征学习和表达能力,以处理数据局部相关性。CNN 常用于回归、预测和分类等任务。然后,CNN 在执行任务时也存在缺点:一是对大规模数据需求高、二是训练过程计算量大。

#### 4.3 鱼鹰优化算法

鱼鹰优化算法(osprey optimization algorithm, OOA)<sup>[19-20]</sup>是受到鱼鹰俯冲入水中捕食水下鱼类的过程启发,从而提出的智能优化算法。其捕食过程具体包括目标定位、俯冲捕猎以及调整位置等动作。OOA 通过模拟鱼鹰基于猎物动态调整飞行轨迹与下潜路径的捕猎策略,从而精准锁定目标,利用捕猎阶段的探索与开发机制,实现全局优化与局部搜索的平衡。

##### 1) 位置识别和捕食

搜索空间中,每只鱼鹰都将拥有更好目标函数值的其他鱼鹰的位置视为猎物,对这些猎物进行捕捉,用公式表示为:

$$FP_i = \{ \mathbf{X}_k | k \in \{1, 2, \dots, N\} \wedge F_k < F_i \} \cup \{ \mathbf{X}_{best} \} \quad (7)$$

式中:  $FP_i$  为第  $i$  只鱼鹰的位置集合;  $\mathbf{X}_k$  为第  $k$  个鱼鹰的位置向量;  $\mathbf{X}_{best}$  为最佳鱼鹰的位置;  $F_k$  和  $F_i$  分别为第  $k$  和第  $i$  个鱼鹰对应函数值;  $N$  为鱼鹰种群数量。鱼鹰随机检测其中一条鱼的位置并攻击它。通过模拟鱼鹰捕食过程中的调整动作,调整后的位置通过下面的式子进行计算,对比调整前后的位置的目标函数,选择目标函数更好的作为当前位置。

$$x_{i,j}^{p1} = x_{i,j} + r_{i,j} \times (SF_{i,j} - I_{i,j} \times x_{i,j}) \quad (8)$$

$$x_{i,j}^{p1} = \begin{cases} x_{i,j}^{p1}, & lb_j \leq x_{i,j}^{p1} \leq ub_j \\ lb_j, & x_{i,j}^{p1} < lb_j \\ ub_j, & x_{i,j}^{p1} > ub_j \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_i = \begin{cases} \mathbf{X}_i^{p1}, & F_i^{p1} < F_i \\ \mathbf{X}_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, m; \mathbf{X}_i$  为当前位置向量;  $\mathbf{X}_i^{p1}$  为全局勘探阶段第  $i$  只鱼鹰的新位置向量;  $x_{i,j}^{p1}$  为  $\mathbf{X}_i^{p1}$

第  $j$  维的值;  $m$  为求解问题的维度;  $F_i^{p1}$  和  $F_i$  为候选位置和当前位置对应的目标函数值;  $ub_j$  和  $lb_j$  为第  $j$  维优化向量的上下限;  $SF_{i,j}$  为  $SF_i$  在第  $j$  维的值;  $r_{i,j}$  为  $(0, 1)$  范围内的随机数;  $I_{i,j}$  为  $\{1, 2\}$  中的随机数。

##### 2) 将鱼带到合适的位置

捕猎成功后,鱼鹰会将捕获的猎物带到安全位置食用,OOA 通过模拟鱼鹰这种更新位置的策略,增强了 OOA 的局部开采能力,使发现的解决方案收敛到最佳解决方案。如式(11)~(13)所示,如果目标位置的函数值得到改善,则替换原先的位置。

$$x_{i,j}^{p2} = x_{i,j} + \frac{lb_j + r_{i,j} \times (ub_j - lb_j)}{t} \quad (11)$$

$$x_{i,j}^{p2} = \begin{cases} x_{i,j}^{p2}, & lb_j \leq x_{i,j}^{p2} \leq ub_j \\ lb_j, & x_{i,j}^{p2} < lb_j \\ ub_j, & x_{i,j}^{p2} > ub_j \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_i = \begin{cases} \mathbf{X}_i^{p2}, & F_i^{p2} < F_i \\ \mathbf{X}_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $t=1, 2, \dots, T; \mathbf{X}_i^{p2}$  为第  $i$  只鱼鹰在局部开采阶段的新位置向量;  $x_{i,j}^{p2}$  为向量  $\mathbf{X}_i^{p2}$  在第  $j$  维的值;  $F_i^{p2}$  为局部开采阶段对应的函数值;  $t$  为当前迭代次数;  $T$  为最大迭代次数。

#### 4.4 基于 OOA-CNN 的解耦方法

CNN 的解耦精度与超参数密切相关,超参数包括学习率、卷积核大小、正则化等,采用 OOA 优化 CNN,通过定义 CNN 的学习率和卷积核大小的上下限,搜索 CNN 的最佳学习率和卷积核大小,避免模型出现无法收敛和计算时间过长的问题,提升 CNN 的解耦精度,最终减小解耦数据与真实数据之间的误差。

算法实现过程为:

1) 将实验数据按一定比例随机划分为训练集和测试集,并对数据进行归一化处理;

2) 对变量区间、目标函数进行设置,并设置总迭代次数和种群大小,最后初始化鱼鹰种群,将初始鱼鹰数和迭代次数设置为 1;

3) 更新第  $i$  只鱼鹰的位置集合;

4) 由第  $i$  只鱼鹰确定鱼类,计算第  $i$  只鱼鹰的新位置向量,并更新当前的位置向量;

5) 计算局部开采阶段第  $i$  只鱼鹰的新位置向量,并对当前位置向量进行更新;

6) 判断鱼鹰数是否满足鱼鹰种群数量,若满足则保存目前的最佳学习率和卷积核大小;反之,鱼鹰数目加 1,然后返回执行 3);

7) 判断目前最佳解决方案的迭代次数是否达到最大迭代次数,若达到则输出 CNN 的最佳学习率和卷积核大小;反之,鱼鹰次数加 1、迭代次数加 1,然后返回 3);

8) 利用 7) 输出的最佳学习率和卷积核大小对测试集进行预测, 获得预测的感知温度和力。

### 4.5 信号解耦实验

以接触力-接触温度复合感知实验的采集数据为基础构建样本集, 并按照 4 : 1 的比例随机划分训练集和测试集, 采用 CNN 模型、OOA-CNN 模型分别进行接触温度和接触力的解耦。接触温度的解耦值和实测值如图 13(a) 所示, 接触力的解耦值与实测值如图 13(b) 所示。OOA-CNN 模型和 CNN 模型的接触温度和接触力的解耦误差对比如图 14(a) 和 (b) 所示。

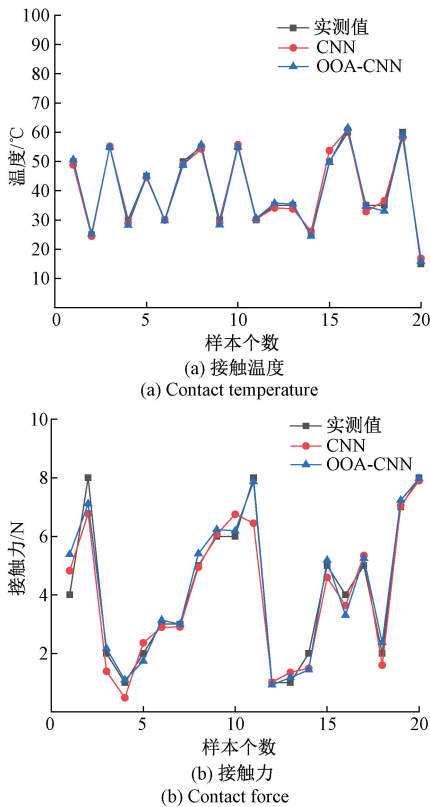
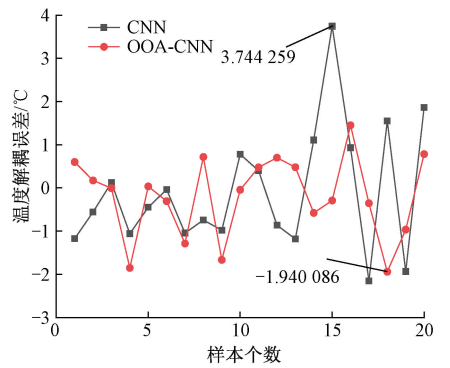


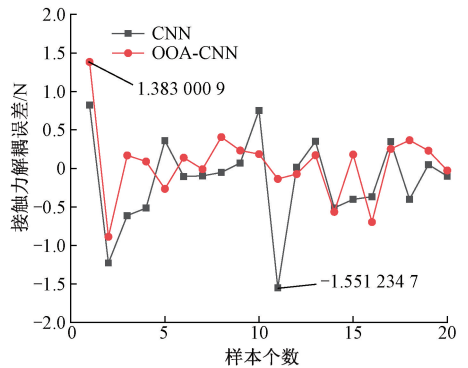
图 13 解耦值与实测值

Fig. 13 Decoupling values and measured values

根据图 13 和 14 分析, CNN 与 OOA-CNN 两种模型均展现出较为良好的解耦性能, 其预测值与实测值基本吻合。具体而言, 接触温度解耦误差主要分布在  $[-2, 2]$  区间内, 其中 CNN 和 OOA-CNN 模型的最大温度解耦误差分别为  $3.74\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-1.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 接触力解耦误差则主要分布于  $[-1.5, 1]$  区间内, CNN 和 OOA-CNN 模型的最大接触力解耦误差分别为  $-1.55$  和  $1.38\text{ N}$ ; 由此可见, 采用 OOA 优化能够进一步提升 CNN 模型的解耦能力。为了更全面的对比两种模型的解耦精确度, 选取平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方误差 (mean squared error, MSE)、均方根误差 (root mean squared error,



(a) 接触温度误差  
(a) Contact temperature error



(b) 接触力误差  
(b) Contact force error

图 14 不同模型解耦误差对比

Fig. 14 Comparison of decoupling error of different models

RMSE) 和平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 4 项指标进行多方面对比, 如表 2 和 3 所示。

表 2 不同模型接触温度解耦效果对比

Table 2 Comparison of contact temperature decoupling effect predicted by different models

模型	MAE	MSE	RMSE	MAPE
最小二乘法	1.240 4	2.027 4	1.423 9	0.044 3
CNN	1.133 6	1.944 6	1.394 5	0.032 2
OOA-CNN	0.735 2	0.888 0	0.942 3	0.021 2

表 3 不同模型接触力解耦效果对比

Table 3 Comparison of contact force decoupling effect predicted by different models

模型	MAE	MSE	RMSE	MAPE
最小二乘法	0.551 2	1.310 8	1.144 9	0.176 5
CNN	0.419 3	0.375 1	0.612 5	0.115 8
OOA-CNN	0.323 4	0.211 2	0.459 6	0.099 4



通过表2和3对比可知,OOA-CNN解耦的MAE、MSE、RMSE、MAPE这4项指标均小于最小二乘法和CNN解耦,与采用最小二乘法解算相比较,采用OOA-CNN解耦模型使得接触温度平均绝对误差减小了40.73%,接触力平均绝对误差减小了41.33%。所以采用OOA-CNN方法,能够较好的实现FBG接触温度和接触力的解耦,解决温度和接触力交叉敏感的问题。

## 5 结 论

本研究针对FBG柔性感知单元导热性能较差和温度接触力交叉敏感的问题,设计了一种石墨烯-硅胶复合材料柔性封装的对角十字型FBG触觉感知单元,提出了基于OOA-CNN的解耦方法,开展了有限元仿真分析和感知单元实验研究。结果表明,通过添加石墨烯作为导热填料,增强了硅胶基体的导热性能。FBG1平均接触力灵敏度和平均接触温度灵敏度分别为20.411 pm/N、10.242 pm/°C;FBG2平均接触力灵敏度和平均接触温度灵敏度分别为31.281 pm/N、10.787 pm/°C,降低了温度感知误差,实现了接触温度和接触力感知信号的解耦。本文提升了FBG柔性感知单元的导热性能,但忽略了FBG封装深度对FBG温度灵敏度的影响,接下来将研究FBG封装深度与FBG温度灵敏度的关系,优化感知单元结构,进一步提高机器手指尖触觉感知水平。

## 参考文献

- [1] ABDELMAKSOU D S I, AL-MOLA M H, ABRO G E M, et al. In-depth review of advanced control strategies and cutting-edge trends in robot manipulators: Analyzing the latest developments and techniques [J]. IEEE Access, 2024, 12:47672-47701.
- [2] SEO M J, YOO J C. Dynamic focusing (DF) cone-based omnidirectional fingertip pressure sensor with high sensitivity in a wide pressure range [J]. Sensors, 2023, 23(20): 8450.
- [3] XU S Y, LI X ZH, WANG T Y, et al. Fiber Bragg grating pressure sensors: A review [J]. Optical Engineering, 2023, 62(1): 010902.
- [4] ZHANG X D, LIU H CH, WANG Y CH, et al. FBG-based three-dimensional micro-force sensor with axial force sensitivity-enhancing and temperature compensation for micro-forceps [J]. Optics Express, 2023, 31(24): 40538-40556.
- [5] GAO AN ZH, LIU N, ZHANG H J, et al. Spiral FBG sensors-based contact detection for confocal laser endomicroscopy [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 170: 112653.
- [6] 张俊, 陈光辉, 倪国新, 等. FBG传感技术在飞机机翼动态形变监测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 252-260.  
ZHANG J, CHEN G H, NI G X, et al. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 252-260.
- [7] 姚建南, 刘志成, 钟年丙, 等. 液位-液压-温度同时检测光纤隔膜传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 146-153.  
YAO J N, LIU ZH CH, ZHONG N B, et al. Fiber-optic diaphragm sensor for simultaneous detection of liquid-level-hydraulic-temperature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 146-153.
- [8] 于昌新, 何彦霖, 祝连庆, 等. 光纤传感微创手术探针末端三维力测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 38-45.  
YU CH X, HE Y L, ZHU L Q, et al. Three-dimensional end-force measurement method of optic fiber sensing minimally invasive surgical probe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 38-45.
- [9] LU G, FU SH W, ZHU T Y, et al. Research on finger pressure tactile sensor with square hole structure based on fiber Bragg grating [J]. Sensors, 2023, 23(15): 6897.
- [10] JIN K ZH, LI Z R, NAN P Y, et al. Fiber Bragg grating-based fingertip tactile sensors for normal/shear forces and temperature detection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 357: 114368.
- [11] 孙世政, 何江, 秦鸿宇, 等. 基于应变增敏的双层十字型FBG触觉感知单元 [J]. 光学精密工程, 2024, 32(17): 2718-2731.  
SUN SH ZH, HE J, QIN H Y, et al. Double-layer cross-type FBG tactile sensing unit based on strain sensitization [J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(17): 2718-2731.
- [12] 孙世政, 何江, 秦鸿宇, 等. 基于FBG的机器手指尖触觉感知研究 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 72-81.  
SUN SH ZH, HE J, QIN H Y, et al. Research on tactile perception of machine fingertip based on FBG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 72-81.
- [13] 钱昱名, 张钰民, 孙亚丽, 等. FBG-FP的应变与温度解耦方法研究 [J]. 激光与红外, 2023, 53(3): 424-

- 430.
- QIAN Y M, ZHANG Y M, SUN Y L, et al. Decoupling method of strain and temperature based on cascaded FBG-FP[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(3): 424-430.
- [14] DENG CH F, YU M X, ZHU L Q, et al. A deep learning algorithm ADPNet for strain and temperature decoupling of fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 79: 103356.
- [15] DU J W, ZHAO Y, LAN B H, et al. GWO-elman based composite detection of transformer oil flow temperature[J]. *Optical Fiber Technology*, 2025, 89: 104052.
- [16] LI X J, ZHENG M, HOU D, et al. Advantageous strain sensing performances of FBG strain sensors equipped with planar UV-curable resin [J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2811.
- [17] ZHU Q Q, WANG ZH H, ZENG H, et al. Effects of graphene on various properties and applications of silicone rubber and silicone resin [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 142: 106240.
- [18] 闫宇楠, 刘智康, 徐佳文, 等. 基于CBAM-CNN和压电悬臂梁的温度解耦质量感知方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(4): 113-126.
- YAN Y N, LIU ZH K, XU J W, et al. Temperature decoupled mass sensing based on CBAM-CNN and piezoelectric cantilever beam [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 113-126.
- [19] DEHGhani M, TROJOVSKY P. Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems [J]. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2023, 8: 1126450.
- [20] LEI W L, HAN J P, WU X H. Improved osprey optimization algorithm with multi-strategy fusion [J]. *Biomimetics*, 2024, 9(11): 670.

### 作者简介



孙世政(通信作者),2015年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆交通大学教授、硕士生导师,主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。

E-mail:ssz091011@163.com

**Sun Shizheng** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2015. He is currently a professor and a master advisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include precision instruments and machinery, and smart sensor technology.