

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209174

# 光纤光栅柔性触觉传感器的材质识别功能研究\*

钱牧云, 张姣姣, 魏新园

(安徽工业大学电气与信息工程学院 马鞍山 243032)

**摘要:**针对目前应用于电子皮肤的触觉传感器不能兼具柔韧性和多模态信息感知等问题,对封装于同一柔性聚合物传感单元中的两根光纤光栅触觉传感器的材质识别功能进行了有限元仿真和实验研究。首先,推导了光纤光栅触觉传感原理和基于热传递的接触物体材质识别机理;然后,对封装材料和接触物体进行了热力学仿真分析;最后,搭建了实验系统平台,对光纤光栅柔性触觉传感器进行了材质识别实验研究。仿真和实验结果表明,当接触物体为70℃的铝、铁、塑料等材质时,由于热传递引起的光纤光栅温度传感器中心波长漂移最大值分别为: $\Delta\lambda_{B1}=0.5889\text{ nm}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}=0.2773\text{ nm}$ 和 $\Delta\lambda_{B3}=0.1692\text{ nm}$ ,且在接触的前10 s内中心波长漂移随时间变化率分别为 $k_1=31\text{ pm/s}$ 、 $k_2=19\text{ pm/s}$ 和 $k_3=6\text{ pm/s}$ 。扩展光纤光栅触觉传感器的接触物体材质识别功能,可实现电子皮肤更多模态信息的感知,具有一定的应用价值。

**关键词:** 光纤光栅; 材质识别; 柔性; 触觉; 导热系数

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

## Research on material recognition function of fiber Bragg grating flexible tactile sensor

Qian MUYUN, Zhang JIAOJIAO, Wei XINYUAN

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

**Abstract:** In view of the problems that the current tactile sensors applied to electronic skin cannot have flexibility and multi-modal information perception, a finite element simulation and experimental study of the material recognition function of two fiber Bragg grating (FBG) tactile sensors encapsulated in the same polymer sensing unit is carried out. Firstly, the principle of the FBG tactile sensor and the mechanism of material recognition of the contact object based on thermal transfer are derived; then, the thermodynamic simulation analytical experiments of the encapsulated material with different contact objects are carried out; finally, the experimental system platform is built and the material recognition of FBG flexible tactile sensor is investigated experimentally. The simulation and experimental results show that when the contact object is aluminum, iron and plastic at 70℃ respectively, the maximum values of the central wavelength shift of the FBG temperature sensor due to thermal transfer are:  $\Delta\lambda_{B1}=0.5889\text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_{B2}=0.2773\text{ nm}$  and  $\Delta\lambda_{B3}=0.1692\text{ nm}$ , and the rate of change of the central wavelength shift with time in the first 10 seconds of exposure are  $k_1=31\text{ pm/s}$ ,  $k_2=19\text{ pm/s}$  and  $k_3=6\text{ pm/s}$ . Expanding the recognition function of the contact object material of the FBG tactile sensor can realize the perception of more modal information of the electronic skin, which has certain application value.

**Keywords:** fiber Bragg grating; material recognition; flexible; tactile; thermal conductivity

## 0 引 言

测取目标物体的特性、状态、工作环境等参数,使机器人具有触滑觉、热觉等感知功能,是机器人智能化的基础<sup>[1]</sup>。柔性触滑觉传感器及构成的电子皮肤(E-skin)是实现机器人智能化的关键技术之一。通过对触滑觉传感

器输出信号的分析处理,得到接触物体大小、温度以及是否滑动等信息<sup>[2-3]</sup>,更进一步,对物体的材质进行有效识别,可以实现并扩展触觉传感器的多模态信息感知功能。

应用于电子皮肤的触滑觉感知、材质识别等功能的传感器主要有压阻式<sup>[4]</sup>、压电式<sup>[5]</sup>、电容式<sup>[6-7]</sup>和光电式<sup>[8-9]</sup>等。其中,以电学传感器为传感元件的触觉传感器虽有着动态压力灵敏度高、反应快、功耗低等优点,但是

收稿日期:2022-01-11 Received Date: 2022-01-11

\* 基金项目:安徽省自然科学基金(1908085QF294)项目资助

大多数不能兼具柔韧性,且存在着例如易受电磁干扰、多模态信息感知困难等应用问题<sup>[10]</sup>。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器作为光纤传感器的一种,除了具有抗电磁干扰的特点,还具有尺寸小、几何形状可塑、测量范围广等优点<sup>[11-12]</sup>,近年来作为柔性触觉传感元件已经成为研究的新热点。

目前,对光纤光栅触觉传感器的研究大多集中在提升单个传感器或由多个传感器构成的传感单元结构设计和三维力、滑觉等检测性能等方面<sup>[13-14]</sup>。Sun等<sup>[15]</sup>提出了一种具有良好线性度和响应速度的双层“十字型”分布式光纤光栅柔性触觉传感阵列单元,其温度灵敏度为13 pm/°C,压力灵敏度为7.289 nm/MPa,  $x$ 轴正向和负向剪切力灵敏度分别为0.060 2 nm/N和0.063 6 nm/N。Li等<sup>[16]</sup>提出了一种应用于微创手术中组织定位的FBG触觉传感器,该传感器由5个独立的触觉传感单元构成,其分辨率高达0.93 mN,且在0~5 N的测量范围内最大相对误差小于8.22%。

而对FBG柔性触觉传感器材质识别功能的研究很少,大多以电学传感器为传感元实现接触物体的材质识别。郭晓辉等<sup>[17]</sup>提出一种由同面双电极接近感知单元和炭黑填充硅橡胶力敏传感单元构成的电容-电阻双模式材质识别传感器,通过与建立的有限种类目标物体材质识别库匹配,实现双模式材质识别功能。李德胜等<sup>[18]</sup>提出了一种材质识别多功能触觉传感器,当它作为电感线圈时,可以识别金属和半导体等材料,当它作为平面电容时,可以识别绝缘材料。

本文利用有限元仿真软件对埋置于柔性封装材料中的FBG触觉传感器进行了热力学仿真,得到了相同大小且接触面相同、不同材质接触物体情况下,接触物体与封装材料两者之间的温度传递。同时,基于热传递原理,对柔性FBG触觉传感器的材质识别功能进行了有限种类接触物体的实验研究,并分析了接触物体材质识别的效果。

## 1 理论分析

### 1.1 光纤光栅触觉传感原理

光纤光栅是一种光纤导波介质中物理结构成周期性分布,用于波长选择的起带阻滤波器作用的光子器件<sup>[19]</sup>。光纤光栅传感器采用波长编码,应变、温度、压力等物理量的变化都能引起其中心波长发生漂移。如果上述3个物理量同时作用于FBG传感器,则中心波长总漂移量可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon_x + (\alpha + \xi)\Delta T + \left[ -\frac{1 - 2\mu}{E} + \frac{n_{eff}^2}{2E}(1 - 2\mu)(2P_{12} + P_{11}) \right] \Delta P \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_x$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta P$ 分别为FBG传感器受到的应变、温度和压力变化量; $P_e$ 为有效弹光系数(硅纤介质中 $P_e = 0.22$ ); $\alpha$ 为光纤材料的膨胀系数; $\xi$ 为热光系数; $E$ 为光纤材料的杨氏模量; $n_{eff}$ 为有效折射率; $E$ 为杨氏模量; $\mu$ 为泊松比; $P_{ij}(j=1, 2)$ 为Pockel系数。

埋置于柔性封装材料中的FBG触觉传感单元传感原理如图1所示。触觉传感单元由两根埋置于封装材料中的FBG传感器构成,其中一根为同时对应变和温度敏感的FBG压力传感器,另一根为毛细钢管封装的FBG温度传感器。当不同材质、不同温度的物体与封装材料接触时,FBG传感器受到应力和温度的作用,其反射的中心波长 $\lambda_{B1}$ 和 $\lambda_{B2}$ 分别漂移至 $\lambda'_{B1}$ 和 $\lambda'_{B2}$ 。

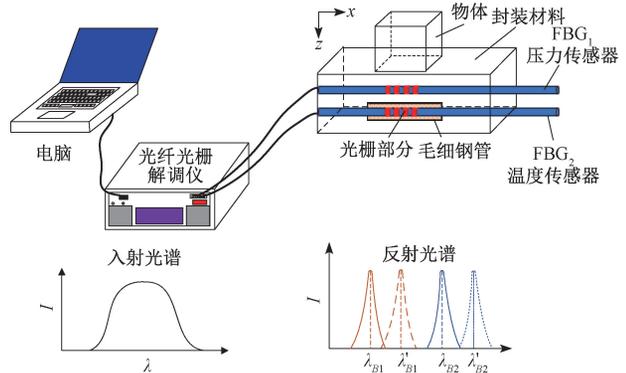


图1 FBG传感器触觉传感原理

Fig. 1 Tactile sensing principle of FBG sensor

### 1.2 基于热传递的材质识别原理

根据热传导理论<sup>[20]</sup>,当两物体接触时,忽略接触热阻,热传导主要发生在接触方向上。热传导遵循傅里叶定律:

$$q^* = -K_{nn} \frac{dT}{dn} \quad (2)$$

式中: $q^*$ 为热流密度,单位为:W/m<sup>2</sup>;  $K_{nn}$ 为热导率,单位为:W/(m·°C);负号表示热量流向温度低的方向。

若接触面具有连续的边界条件,具有相同的温度和热流密度,在接触方向上温度是呈连续分布的。两物体接触后接触面的最终温度 $T_{end}$ 可由下式决定<sup>[21]</sup>:

$$T_{end} = \frac{T_{s0}\sqrt{(\lambda\rho c)_s} + T_{M0}\sqrt{(\lambda\rho c)_M}}{\sqrt{(\lambda\rho c)_s} + \sqrt{(\lambda\rho c)_M}} \quad (3)$$

$$\beta_i = \sqrt{(\lambda\rho c)_i} \quad (4)$$

式中: $T_{s0}$ 、 $T_{M0}$ 分别为两接触物体的初始温度, $\beta_i$ 为物体 $i$ 的吸热系数,是材质识别的特征。从式(3)可以得到:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_M} = \frac{T_{s0} - T_{end}}{T_{end} - T_{M0}} = \frac{\beta_M}{\beta_S} \quad (5)$$

式中: $\Delta T_s$ 、 $\Delta T_M$ 分别为两接触物体接触面的温度变化差, $\beta_S$ 、 $\beta_M$ 分别为两物体的吸热系数。由式(5)可以得出,两物体接触面温度差的比值与接触物体和传感器的

初始温度无关。

## 2 仿真分析与传感器结构设计

FBG 传感器对压力不敏感,在  $1.55 \mu\text{m}$  时对比温度引起 FBG 中心波长漂移典型值  $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 压力响应典型值仅为  $3.11 \text{ pm}/\text{Mpa}$ 。因此在测量压力时,需要借助一定的封装方法提高其压力灵敏度。本文利用硅橡胶对 FBG 传感器进行柔性封装,达到保护光栅、压力增敏等目的。

### 2.1 FBG 封装有限元分析

本文对 FBG 柔性触觉传感器进行材质识别功能研究,首先需要对柔性传感器进行力学仿真确定 FBG 传感器的长度、在封装材料中的埋置位置等参数以获得传感器对触觉的最高灵敏度。本文前期研究成果在文献 [22] 中表明,若要使 FBG 传感器感受到最大的轴向拉伸,FBG 传感器应埋置于长方体封装材料的中心轴线上。

在力学仿真基础上确定触觉传感单元的结构后,对触觉传感单元进行热力学仿真,得到基于热传递原理的封装材料与接触物体之间的温度传递。本文的温度传递模型为典型的二维接触。与实验中接触物体大小相一致,设置接触物体分别为铝和铁,尺寸均为  $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,导热系数分别为  $230$  和  $48 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ,上表面初始温度为  $70^\circ\text{C}$ ;以硅橡胶为封装材料的尺寸为  $60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,初始温度为  $20^\circ\text{C}$ ,导热系数为  $13 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ;接触物体位于封装材料表面正中间;设置物体封装材料和环境温度均为  $20^\circ\text{C}$ 。仿真后,得到封装材料分别与铝、铁两种物体接触后温度场分布云图如图 2(a)、(b) 所示。

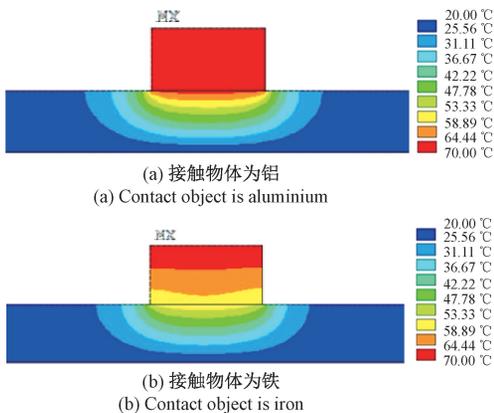


图2 有限元仿真温度场分布云图

Fig. 2 Temperature distribution cloud map of finite element simulation

对比图 2(a) 和 (b) 可见,由于铝和铁的导热系数不同,在相同接触时间内由热传递引起的封装材料温度变化速度不同,导热系数大的物体,温度从接触物体上表面

向封装材料内部传递速度越快。温度变化引起埋置于封装材料内 FBG 传感器中心波长发生漂移,通过对其输出信号的检测和处理,即可实现 FBG 触觉传感器对相同大小和温度、不同接触物体材质识别功能。

### 2.2 传感单元结构设计

与物体接触时,FBG 传感器中心波长的漂移同时受到应变和温度的影响。针对 FBG 传感器的温度补偿问题,目前大多数解决方法为简单且可靠的不受力光栅温度补偿法<sup>[23]</sup>,即在应变传感器同一温度场中布设一根只对温度敏感的管式封装 FBG 传感器。本文使用的 FBG 温度传感器封装结构如图 3 所示。封装时,毛细钢管里的 FBG 传感器处于自由状态,避免外界应力使其中心波长发生漂移。

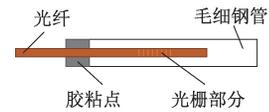


图3 FBG 温度传感器封装结构

Fig. 3 FBG temperature sensor package

将两根长度均约为  $6 \text{ mm}$  的 FBG 传感器埋置于封装材料 ( $60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) 中心轴线的位上构成传感单元,其截面示意图如图 4 所示。

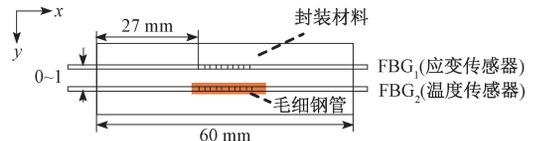


图4 FBG 触觉传感器截面图

Fig. 4 Sectional view of FBG tactile sensor

图 4 中,  $\text{FBG}_1$  为同时对应变和温度敏感的应变传感器,用于感知接触物体大小、形状、压力等多模态信息;  $\text{FBG}_2$  为与  $\text{FBG}_1$  同一温度场用于触觉的温度补偿的温度传感器。同时,通过对  $\text{FBG}_2$  温度传感器输出信号处理和分析,结合温度补偿后的  $\text{FBG}_1$  压力传感器输出信号,在不增加传感器个数、不提高触觉传感系统成本和复杂程度前提下,可以实现基于热传递原理的触觉传感器材质识别功能。

## 3 实验与结果分析

基于 FBG 触觉传感器的接触物体材质识别实验系统原理如下:宽带光源发出的光经过隔离器和耦合器后传输至 FBG 传感器,根据 FBG 传感器的传感原理,满足 FBG 布拉格中心波长的光返回至耦合器再进入 FBG 解调仪并显示在与解调仪连接的计算机上。实验所用 FBG

解调仪为 MOI SI155,精度为 1 pm,分辨率为 3 pm,最大可配置 4 通道,每通道 160 nm 带宽。

本文在实现 FBG 触觉传感器接触物体材质识别功能时,将 FBG<sub>1</sub> 应变传感器和毛细钢管封装的 FBG<sub>2</sub> 温度传感器埋置于柔性封装材料中心轴线上且处于同一温度场中,两根 FBG 传感器埋置位置参数如图 4 所示。封装体为 60×30×5 mm<sup>3</sup> 长方体硅橡胶,两根 FBG 传感器中心波长分别为 λ<sub>B1</sub> = 1 557.977 nm 和 λ<sub>B2</sub> = 1 563.483 nm;反射率分别为 63% 和 68%;带宽分别为 0.741 和 0.693 nm。

### 3.1 FBG 传感单元温度标定实验

使用水浴法对传感单元中两根 FBG 传感器进行温度标定。在温度范围为 30℃~80℃,以 5℃ 为间隔,两根 FBG 传感器中心波长漂移与温度的响应曲线如图 5 所示。由图 5 可知,两根 FBG 传感器中心波长漂移随温度变化都呈良好的线性关系,灵敏度系数分别为 k<sub>T1</sub> = 0.022 1 nm/℃、k<sub>T2</sub> = 0.019 9 nm/℃。

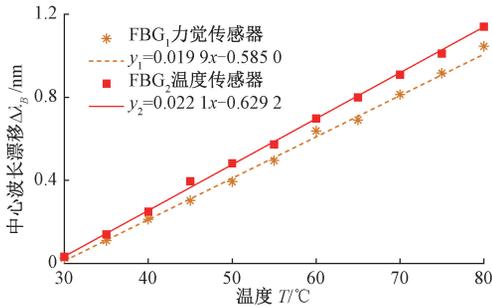


图 5 FBG 传感器温度响应曲线

Fig. 5 Temperature response curve of FBG sensors

### 3.2 FBG 传感单元压力标定实验

在 FBG 传感器正上方的封装材料表面施加底面半径为 6 mm,大小为 0~3.691 9×10<sup>3</sup> Pa 的正向压力范围内,得到传感单元内两根 FBG 传感器中心波长漂移与正向压力大小之间的关系,如图 6 所示。

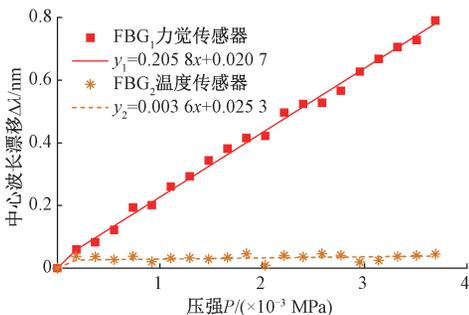


图 6 FBG 传感器压力响应曲线

Fig. 6 Pressure response curve of FBG sensors

从图 6 可以看出,在封装材料表面施加正向压力时,埋置于其中的 FBG<sub>1</sub> 力觉传感器中心波长漂移与压力大小呈线性正比关系,灵敏度为 k<sub>p1</sub> = 0.203 pm/Pa,而 FBG<sub>2</sub> 温度传感器的中心波长随着压力的增大几乎没有变化,即 k<sub>p2</sub> = 0.003 6 pm/Pa。

### 3.3 FBG 传感单元材质识别实验

本文对 FBG 触觉传感器材质识别功能的实现是基于热传导原理的。相同大小、温度但不同材质的物体与另一种物体接触,在两者存在温差且接触面完全相同的前提下,热传导系数大的材料在同等时间内传导的热量更多。因此,对传感单元进行接触物体材质识别验证实验时,根据传感器对应变的最小灵敏度、封装材料尺寸等参数,选用大小相同均为 50 mm×20 mm×10 mm,材质分别为铁、铝和塑料 3 种物体与埋置有 FBG 触觉传感器的封装材料接触,接触物体参数如表 1 所示。

表 1 不同材料的参数

Table 1 Parameters for different materials

材料	铝块	铁块	塑料块
导热系数/(W/m·℃)	230	48	0.48
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.9	6.74	0.91~0.96

由于温度变化是较为缓慢的过程,实验中选择 FBG 解调仪采集频率为 300 ms/次。将 3 种不同物体以 50 mm×20 mm 为接触面放置于 FBG 传感器正上方的封装材料表面,并以相同初始温度 70℃ 与封装材料接触,触觉传感器中的 FBG<sub>2</sub> 温度传感器中心波长漂移与时间的关系如图 7 所示。

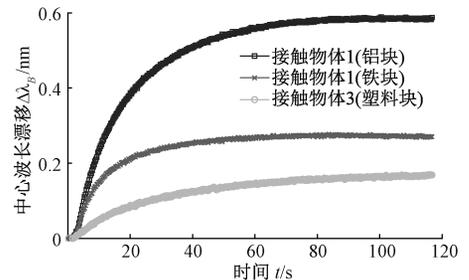


图 7 不同材质物体接触时 FBG<sub>2</sub> 中心波长漂移值

Fig. 7 Wavelength shift with different materials of FBG<sub>2</sub>

由于硅橡胶导热系数为 0.27 W/m·℃,导热性较差,从图 7 可得,FBG<sub>2</sub> 的中心波长在大约 2 s 短暂时后迅速增大,且接触物体导热系数越大,中心波长漂移越快且越大。其中,对于实验中铝、铁和塑料 3 种不同材质的接触物体,由热传递引起的 FBG<sub>2</sub> 中心波长漂移最大值分别为:Δλ<sub>B21</sub>、Δλ<sub>B22</sub> 和 Δλ<sub>B23</sub> 分别为 0.588 9、0.277 3 和 0.169 2 nm。

取上述3组触觉信号中每组的2~10 s数据,得到3种不同材质物体与封装材料接触后FBG<sub>2</sub>中心波长漂移与时间的关系近似线性,如图8所示。对照表1中3种材质物体导热系数可以看出,在尺寸、接触面大小、温度相同的前提下,物体导热系数越大,FBG<sub>2</sub>中心波长漂移的斜率越大。其中,接触物体分别为铝、铁和塑料时FBG<sub>2</sub>中心波长漂移随时间变化的斜率 $k_{21}$ 、 $k_{22}$ 和 $k_{23}$ 分别为31、19和6 pm/s。

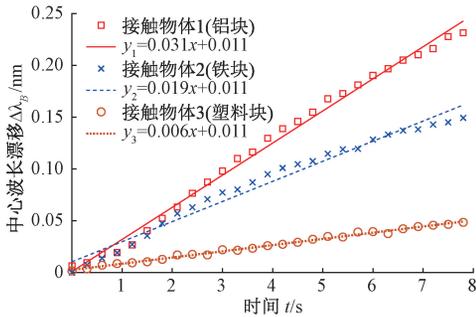


图8 第3~10 s内FBG<sub>2</sub>中心波长漂移值

Fig. 8 Wavelength shift of FBG<sub>2</sub> within 3~10 s

当带有温差的物体与封装材料接触时,FBG应变传感器同时受到应力和温度的作用,其输出信号与时间关系如图9中实线所示。这个输出信号可以分解为一组接触信号和一组热觉信号,如图9中虚线所示。其中,传感器在 $t_1$ 时刻出现一个峰值,该峰值为物体加载到封装材料表面接触后产生的压力响应。随后,传感器的输出随着温度升高而增大。可见,对于应变和温度交叉敏感的应变传感器,须排除接触物体与封装材料之间温差对压力检测结果的扰动,即温度补偿。

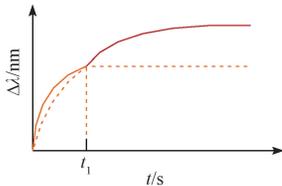


图9 力觉和热觉混合信号

Fig. 9 Composite signals of force and thermal

当3种不同物体以相同的初始温度70℃与触觉传感器接触,传感单元中FBG<sub>1</sub>应变传感器中心波长漂移与时间的关系如图10所示。

由图10可见,当物体与封装材料接触时,FBG<sub>1</sub>受到物体接触与放置物体时外界人为应力的作用,其中心波长产生一个正向的阶跃漂移。随着时间推移,FBG<sub>1</sub>同时受到温度的作用,其中心波长产生更大的正向漂移。其中,对于实验中铝、铁和塑料3种不同接触物体,压力和

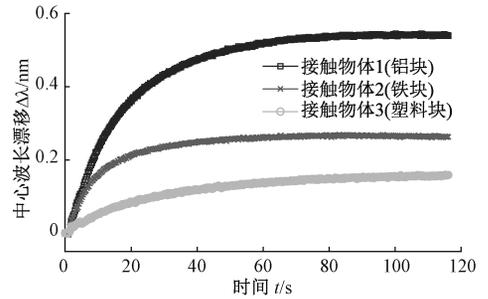


图10 不同材质物体接触时FBG<sub>1</sub>中心波长漂移值

Fig. 10 Wavelength shift with different materials of FBG<sub>1</sub>

温度同时引起的FBG<sub>1</sub>中心波长漂移最大值 $\Delta\lambda_{B11}$ 、 $\Delta\lambda_{B12}$ 和 $\Delta\lambda_{B13}$ 分别为0.544 8、0.269 2和0.159 1 nm。

取上述3组触觉信号中每组的1~5 s数据,得到3种物体与封装材料接触后FBG<sub>1</sub>中心波长漂移与时间的关系如图11所示。由于物体接触的应力作用,FBG<sub>1</sub>的中心波长在0.9 s时产生一个阶跃漂移,接着由于物体导热系数不同,FBG<sub>1</sub>中心波长按照不同的变化速度向正向漂移。取0.9~3.9 s的数据,得到接触物体分别为铝、铁和塑料时,由热传递引起的FBG<sub>1</sub>中心波长漂移随时间变化的斜率 $k_{11}$ 、 $k_{12}$ 和 $k_{13}$ 分别为27、20和4.7 pm/s。

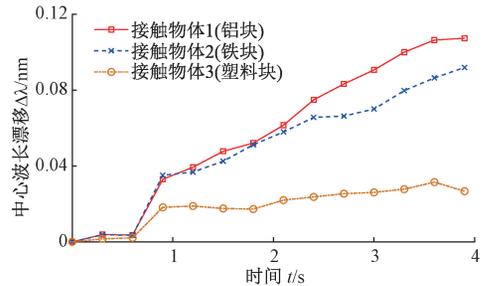


图11 0~4 s内FBG<sub>1</sub>中心波长漂移值

Fig. 11 Wavelength shift of FBG<sub>1</sub> within 0~4 s

## 4 结 论

本文在FBG触觉传感理论基础上,提出了一种基于热传递原理的FBG柔性触觉传感器材质识别功能实现的方法。仿真和实验结果表明,通过对埋置于柔性封装材料中FBG<sub>2</sub>温度传感器中心波长漂移值的检测和处理,可以实现FBG触觉传感器有限种类接触物体材质识别功能。在大小且接触面相同的前提下,3种不同物体(铝、铁和塑料)以相同初始温度70℃与触觉传感单元接触时,由热传递引起FBG<sub>2</sub>温度传感器中心波长漂移最大值分别为 $\Delta\lambda_{B21}$ 、 $\Delta\lambda_{B22}$ 和 $\Delta\lambda_{B23}$ 分别为0.588 9、0.277 3和0.169 2 nm。3种物体与封装材料接触,由热

传递引起的  $FBG_2$  随时间变化的斜率  $k_{21}$ 、 $k_{22}$  和  $k_{23}$  分别为 31、19、和 6 pm/s。

相同接触物体基于热传递原理导致触觉传感器中  $FBG_1$  应变传感器与  $FBG_2$  温度传感器中心波长漂移斜率不同,分析误差可能出现的原因有:埋置于封装材料中的两根  $FBG$  传感器位置不严格平行且不在同一平面;环境温度对接触物体温度的影响等。

本文的研究结果为应用于柔性电子皮肤或可穿戴设备的  $FBG$  触觉传感器材质识别功能的实现提供了一种有效的技术手段。更进一步,提高封装水平、根据实际情况构建  $FBG$  触觉传感阵列并使用先进的智能算法例如神经网络、模糊逻辑等对传感阵列信号进行解耦及处理,建立可以更精确描述阵列输出信号与接触物体大小、温度、材质等多模态信息的数学模型等,有望满足应用于电子皮肤或可穿戴设备的触觉传感器兼具柔弹性、高精度、多功能等要求。

## 参考文献

- [ 1 ] GAO W, OTA H, KIRIYA D, et al. Flexible electronics toward wearable sensing [ J ]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(3): 523-533.
- [ 2 ] QIU Z, WAN Y, ZHOU W, et al. Ionic skin with biomimetic dielectric layer templated from calathea zebrina leaf [ J ]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(37): 1-9.
- [ 3 ] 姚建涛, 陈俊涛, 陈新博, 等. 可嵌入式多维柔性力/位传感器 [ J ]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 184-192.  
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embeddable multidimensional flexible force/position sensors [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 184-192.
- [ 4 ] CHOU T L, CHU C H, LIN C T, et al. Sensitivity analysis of packaging effect of silicon-based piezoresistive pressure sensor [ J ]. Sensor and Actuators: A Physical, 2009, 152(1): 29-38.
- [ 5 ] 张艳芳, 刘玉荣, 许章斌. 基于 PVDF 三维力传感器设计 [ J ]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 66-72.  
ZHANG Y F, LIU Y R, XU ZH CH. Design of a three-dimensional force sensor based on PVDF [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 66-72.
- [ 6 ] ZHU P, WANG Y, WANG Y, et al. Flexible 3D architected piezo/thermoelectric bimodal tactile sensor array for E-skin application [ J ]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(39): 2001945.
- [ 7 ] 易艺, 宋爱国, 李会军, 等. 电容式触觉传感器微电
- 容检测电路设计 [ J ]. 仪表技术与传感器, 2020, 448(5): 10-14.
- YI Y, SONG AI G, LI H J, et al. Design of micro-capacitive detection circuits for capacitive haptic sensors [ J ]. Instrumentation Technology and Sensors, 2020, 448(5): 10-14.
- [ 8 ] 任乃奎, 余有龙, 李玉杰, 等. 基于光纤光栅的摩擦因数测量 [ J ]. 中国激光, 2019, 46(12): 228-232.  
REN N K, YU Y L, LI Y J, et al. Friction factor measurement based on fiber grating [ J ]. China Laser, 2019, 46(12): 228-232.
- [ 9 ] 钱牧云, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的机械手指触滑觉传感研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 730-736.  
QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Research on tactile sensing of mechanical fingers based on optical fiber grating [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 730-736.
- [ 10 ] 赵海文, 王曼菲, 刘吉晓, 等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 25-32.  
ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Mechanistic study of flexible tactile sensors based on double-layer capacitance [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 25-32.
- [ 11 ] YAO K, LIN Q, JIANG Z, et al. Joint-peaks demodulation method based on multireflection peaks of a few-mode fiber Bragg grating for reducing sensing error [ J ]. Optics Express, 2021, 29(3): 4422-4430.
- [ 12 ] 向洋, 孙世政, 党晓圆, 等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 15-22.  
XIANG Y, SUN SH ZH, DANG X Y, et al. Research on flow and temperature composite sensing based on fiber Bragg grating [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 15-22.
- [ 13 ] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 93-98.  
WANG Y, QIN N, LIU J H, et al. Performance testing of flexible temperature and pressure sensing based on optical fiber grating [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 93-98.
- [ 14 ] QIAN M, YU Y, REN N, et al. Sliding sensor using fiber Bragg grating for mechanical fingers [ J ]. Optics Express, 2018, 26(1): 254.

- [15] SUN S, HE S, HAN Y, et al. Soft bionic skin with touch-slip and thermal perception using double-layer distributed FBG sensing array [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4096-4105.
- [16] LI T, SHI C, REN H. A high-sensitivity tactile sensor array based on fiber Bragg grating sensing for tissue palpation in minimally invasive surgery[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2306-2315.
- [17] 郭小辉, 黄英, 刘彩霞, 等. 电容-电阻双模式材质识别传感器设计与实验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 220-223.
- GUO X H, HUANG Y, LIU C X, et al. Design and experiment of capacitive-resistive dual-mode material recognition sensor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 220-223.
- [18] 李德胜, 魏国, 张世平, 等. 材质识别多功能触觉传感器[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 42-45.
- LI D SH, WEI G, ZHANG SH P, et al. Multifunctional tactile sensors for material recognition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 42-45.
- [19] PRASAD A, SEBASTIAN S, ASOKAN S. FBG tactile sensor surface thickness and shape measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10695-10702.
- [20] 陈从颜, 王延夺, 王伟. 基于复合帕尔贴模块热触觉再现装置研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2521-2527.
- CHEN C Y, WANG Y D, WANG W. Thermal tactile sensation display device based on double Peltier module and its thermal icon recognition experiment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2521-2527.
- [21] 周连杰, 李建清, 吴剑锋, 等. 温度触觉传感器的材质识别仿真研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(2): 11-13.
- ZHOU L J, LI J Q, WU J F, et al. Simulation study on material recognition of temperature-tactile sensors [J]. Sensors and Microsystems, 2011, 30(2): 11-13.
- [22] 钱牧云, 余有龙. 基于 BP 神经网络的光纤光栅触觉传感研究[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 223-229.
- QIAN M Y, YU Y L. Research on optical fiber grating tactile sensing based on BP neural network [J]. China Laser, 2017, 44(8): 223-229.
- [23] 任越, 张钰民, 钟国舜, 等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 598-601.
- REN Y, ZHANG Y M, ZHONG G SH, et al. Steel capillary packaging and high temperature characteristics of fiber grating sensor [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 598-601.

## 作者简介



钱牧云(通信作者),2007年于安徽工业大学获得学士学位,2010年于安徽工业大学获得硕士学位,2018年于合肥工业大学获得博士学位,现为安徽工业大学讲师,主要研究方向为光纤光栅传感技术、机器人触觉传感技术等。

E-mail:nemo\_my@163.com

**Qian Mu Yun** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2007 from Anhui University of Technology, received her M. Sc. degree in 2010 from Anhui University of Technology, received her Ph. D. degree in 2018 from Hefei University of Technology, now she is a lecturer in Anhui University of Technology. Her main research interests include fiber Bragg grating sensing technology, tactile and sliding sensing technology of robot.