

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514076

基于游标效应的高灵敏度光纤 Fabry-Perot 热式流速传感技术研究*

李太文^{1,2}, 刘志远^{2,3}, 韩 博^{1,2,3}, 廖祖浩^{1,2}, 张俊哲^{1,2}

(1. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004; 2. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室
秦皇岛 066004; 3. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘 要:针对传统光纤热式流速传感器在高流速区域灵敏度低、流速测量上限低的问题,一种基于游标效应和热敏材料的高灵敏度光纤热式流速传感方法被提出,该方法所采用的光纤传感器由 SMF 与末端填充热敏材料的 HCF 熔接而成,传感器利用热敏材料的高温度敏感特性实现了对传感器灵敏度的第 1 级增敏,同时,SMF 和热敏材料端面构建的级联 FPI 结构形成了游标效应,利用游标效应的增敏特性实现了对传感器灵敏度的第 2 级增敏,通过灵敏度的两级增敏机制,传感器在高流速区域的流速传感灵敏度被提高,同时,传感器的流速测量上限也被提升。采用 PDMS 为热敏材料,对所提出的高灵敏度光纤热式流速传感方法的传感性能进行了理论分析,同时对传感器制备工艺进行了研究,制备了传感器实物,并对传感器的灵敏度、最大流速测量值、重复性等传感性能进行了试验分析。试验结果表明,传感器具备 $1.399 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度特性,传感器的最大流速测量值达到 25 m/s ,范围为 $17 \sim 25 \text{ m/s}$,传感器响应曲线具有良好的线性度($R^2=0.99$),流速传感灵敏度达到 $1.45 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,灵敏度的重复性偏差仅为 1.24% ,具有良好的一致性。基于高灵敏度和高流速测量上限的优势,以及体积微型化的特点,该流速传感方法在工业应用领域具有良好的应用潜力。

关键词: 光纤流速传感器;流速测量;游标效应;法布里-珀罗腔;PDMS

中图分类号: TH815 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Research on high-sensitivity fiber-optical Fabry-Perot thermal flow velocity sensing technology based on the vernier effect

Li Taiwen^{1,2}, Liu Zhiyuan^{2,3}, Han Bo^{1,2,3}, Liao Zuhao^{1,2}, Zhang Junzhe^{1,2}

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

2. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China;

3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To address the issues of low sensitivity in high-velocity regions and limited upper measurement range in traditional fiber-optic thermal flow sensors, a high-sensitivity fiber-optic Fabry-Perot thermal flow velocity sensing method based on the Vernier effect and thermosensitive materials is proposed. The fiber-optic sensor employed in this method is fabricated by splicing a single-mode fiber (SMF) with a hollow-core fiber (HCF) filled with thermosensitive material at its end. The sensor achieves the first-stage sensitivity enhancement by utilizing the high temperature sensitivity of the thermosensitive material. Simultaneously, the cascaded Fabry-Perot interferometer (FPI) structure formed between the SMF and the thermosensitive material end-face creates the Vernier effect, which enables the second-stage sensitivity enhancement through the amplification characteristics of the Vernier effect. Through this two-stage enhancement mechanism, the sensor achieves improved flow velocity sensitivity in high-velocity regions and an extended measurement range. The sensing performance of the proposed high-sensitivity fiber-optic Fabry-Perot thermal flow velocity sensing method was theoretically analyzed using PDMS as the thermosensitive material. Concurrently, the sensor fabrication process was investigated, resulting in the successful fabrication of a physical sensor prototype. Experimental analysis was conducted to evaluate key sensing

收稿日期: 2025-05-23 Received Date: 2025-05-23

* 基金项目: 国家自然科学基金(62375045)、中央高校基本科研业务费国家项目培育基金(N2423022)、河北省自然科学基金(F2023501004)项目资助

performance metrics, including sensitivity, maximum measurable flow velocity, and repeatability. The experimental results demonstrate that the sensor exhibits a temperature sensitivity of $1.399 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ and achieves a maximum measurable flow velocity of 25 m/s . Within the range of $17 \sim 25 \text{ m/s}$, the sensor's response curve shows excellent linearity ($R^2 = 0.99$), with a flow velocity sensitivity of $1.45 \text{ nm}/(\text{m/s})$. The repeatability deviation of sensitivity is only 1.24% , indicating excellent consistency. Owing to its high sensitivity, extended velocity measurement range, and compact form factor, this sensing method shows strong potential for industrial applications.

Keywords: fiber anemometer; flow velocity measurement; vernier effect; Fabry Perot cavity; PDMS

0 引言

流速传感技术是现代工业生产领域重要的技术手段,不仅在航空航天、气象监测、环境保护等领域的流体动态测试中发挥重要作用,同时为石油化工、能源计量领域安全监测和贸易计量提供技术支撑^[1-6]。随着光纤传感技术的迅猛发展,光纤流速传感器因结构灵活、体积微小、耐电磁辐射、耐酸碱腐蚀等特点而成为流速传感领域的重点研究方向^[7-13]。

光纤热式流速传感器作为光纤流速传感器中重要的组成部分,其工作原理是将加热状态下的光纤传感器放置于被测流体中,利用光纤传感器的热平衡温度与流体流速间的单调关系实现流速传感^[14-16]。因其特殊的工作过程和优良的响应特征而受到国内外学者的广泛关注,通过将导热材料与光纤传感器相结合实现了不同的光纤热式流速传感结构^[17-19],例如:Wang 等^[20]利用银膜加热光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的方式实现了 $0 \sim 13.7 \text{ m/s}$ 的流速传感;Liu 等^[21]将碳纳米管涂敷在长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)表面,利用碳纳米管激光致热方式加热 LPFG 实现了 $0 \sim 2 \text{ m/s}$ 的流速传感;Liu 等^[22]利用 4 段掺锗光纤加热 FBG 的方式实现了 $0 \sim 1 \text{ m/s}$ 的流速传感;Lee 等^[23]在单模光纤(single mode fiber, SMF)端面构建一定厚度的 UV 胶形成法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI),通过加热 UV 胶的方式实现了 $0 \sim 10 \text{ m/s}$ 的流速传感。虽然,传统光纤热式流速传感器在低流速区域表现出了良好的响应特性^[24-25],但是,由于光纤热式流速传感器存在灵敏度随流速增大而降低的缺陷,在高流速区域流速传感灵敏度变得非常低,甚至当达到一定流速后,因光纤传感器热平衡温度随流速变化量过小,超过传感器的分辨能力,导致“流速传感死区”的存在^[26-27],致使流速测量范围受限,目前相关研究得到最大流速测量值不超过 17.5 m/s ^[28-30],无法覆盖工业流速测量需求范围,例如天然气管道内平均流速已超过 20 m/s ,甚至达到 30 m/s ^[31-32]。

针对上述问题,提出一种基于游标效应和热敏材料的高灵敏度光纤热式流速传感方法,传感器由 SMF 与末端填充适当厚度热敏材料的空芯光纤(hollow-core fiber, HCF)构成,光信号在热敏材料和 SMF 端面间形成游标

效应,通过激光器加热热敏材料使传感器与被测流体间形成热式流速传感所需要的换热机制,利用热敏材料的高温敏感特性和游标效应的增敏特性提高传感器在高流速区域的灵敏度,进而提高最大流速测量值。以聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)作为热敏材料,对上述方案进行了理论分析和试验研究,所制备传感器具备 $1.399 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度特性,最大流速测量值达到 25 m/s ,在 $17 \sim 25 \text{ m/s}$ 传感器响应曲线具有良好的线性度($R^2 = 0.99$),灵敏度达到 $1.45 \text{ nm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,灵敏度重复性偏差仅为 1.24% ,具有良好的一致性。

1 传感结构与理论分析

1.1 传感系统结构与原理

本研究提出的流速测量系统结构如图 1 所示,宽带光源和激光器的光信号由 3 dB 耦合器耦合后输入到光纤环形器的 1 号端口,其中宽带光源为传感器提供传感用宽谱光信号,激光器为传感器的热敏材料提供加热光能量(采用 130 mW)。光信号由环形器的 2 号端口到达传感器,传感器垂直安装在被测流场中,传感器因热敏材料吸收光能量而升温,并通过与流体间的对流换热作用达到热平衡温度,热平衡温度随流速的变化使传感器的游标光谱产生移动。传感器的热平衡温度 T_w 与流速 v 间关系^[33]可表示为:

$$T_w = \frac{H}{A + Bv^k} + T_0 \quad (1)$$

其中, H 表示加热功率; A, B, k 为表征流体对流换热特性的相关系数; T_0 为流体的温度。传感器产生的反射

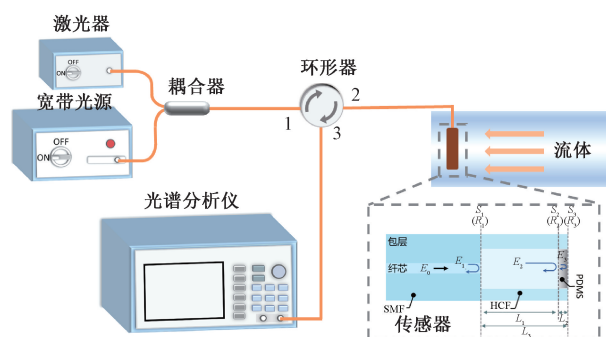


图1 流速传感实验系统结构

Fig. 1 The flow sensing experimental system

光信号进入环形器 2 号端口,并通过环形器的 3 号端口进入光谱仪中,通过对反射光信号中游标包络波谷的波长位置进行分析,得到被测流体的流速值。

光纤传感器结构如图 1 中插图所示,传感器是由 SMF、HCF 和热敏材料组成。其中,以 PDMS 作为热敏材料开展具体研究。SMF 与 PDMS 形成了 3 个反射面,分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 。 S_1 和 S_2 构成基于空气腔的 FPI1,腔长为 L_1 ; S_2 和 S_3 构成基于 PDMS 的 FPI2,腔长为 L_2 ; S_1 和 S_3 构成基于混合腔的 FPI3,腔长为 L_3 。3 个 FPI 的光谱相互叠加形成游标效应,构成传感器的输出光谱,其表达式为:

$$I_r = R_1 + A^2 + B^2 + 2\sqrt{R_1}A\cos(2\phi_1) + 2AB\cos(2\phi_2) + 2\sqrt{R_1}B\cos(2\phi_1 + 2\phi_2) \quad (2)$$

其中, $B = (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)\sqrt{R_3}$, $A = (1 - R_1)(1 - \alpha_1)\sqrt{R_2}$, R_1 和 R_2 分别为空气和 PDMS 的反射率; α_1 和 α_2 为光传输损耗因子,取决于 PDMS 结构的表面曲率和 FPI 的腔长; $\phi_1 = 4\pi n_0 L_1 / \lambda$ 为空气腔引入的光相位, n_0 表示空腔内空气的折射率, ϕ_1 影响小周期光谱信号周期 T_1 , T_1 随 L_1 降低而增加; $\phi_2 = 4\pi n_2 L_2 / \lambda$ 为 PDMS 引入的光相位, n_2 表示 PDMS 的折射率, ϕ_2 影响游标效应的包络光谱周期 T_2 , T_2 随 L_2 降低而增加,由于游标效应的增敏原理在于通过包络光谱将光谱间微小差异叠加放大,因此游标效应的增敏机制随包络周期的增加而增强。

根据式(2)可知,传感器光谱移动依赖于 n_2 随温度的变化特性,因此采用高热敏材料可有效提高传感器的灵敏度。传感器中的 PDMS 是一种高热敏性材料,其热膨胀系数约 $9.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,其折射率随温度的变化特性^[34-35]为:

$$n_{\text{PDMS}} = 1.4204 + \gamma(T - 22) \quad (3)$$

其中, $\gamma = -4.66 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 为 PDMS 折射率的热系数。当被测流体变化引起传感器热平衡温度变化时,PDMS 的折射率和几何结构随之产生变化,进而引起传感器产生的游标光谱移动,根据游标光谱波谷的波长位置即可分析得到流速值。由于 PDMS 在 1 500~1 600 nm 波长范围内的色散系数仅为 10^{-6} nm^{-1} 量级^[36-37],其引起 PDMS 折射率的变化程度不足温度引起 PDMS 折射率变化程度的 1%,因此,在理论分析中忽略了 PDMS 的色散。

1.2 传感特性理论及仿真分析

为了从理论上验证方法的可行性并为后续试验提供理论指导,对所设计光纤流速传感器的光谱特性及传感特性进行了理论分析。根据前文,降低 PDMS 厚度可以提高的灵敏度,但随之导致游标包络周期变长,易混叠于光谱中的低频噪声中,使得所形成游标包络无法识别,同时,为突出传感器微型化特点,空腔长度应尽量短,但缩短空腔长度会增加小周期光谱信号的周期长度,降低游标包络中的小周期信号数量,小周期光谱信号作为游标

包络拟合的基础采样信号,数量降低会影响包络识别精度。经综合考虑,设定传感器的空腔长为 553.4 μm , PDMS 厚度为 86.7 μm ,根据式(2)和(3)得到在该结构参数下传感器的输出光谱如图 2 所示,光谱中形成了明显的游标包络,证明所采用传感结构具备游标效应的激发条件,在 100 nm 光谱范围内形成约 9 个游标包络,每个包络中包含约 6 个小周期光谱信号。

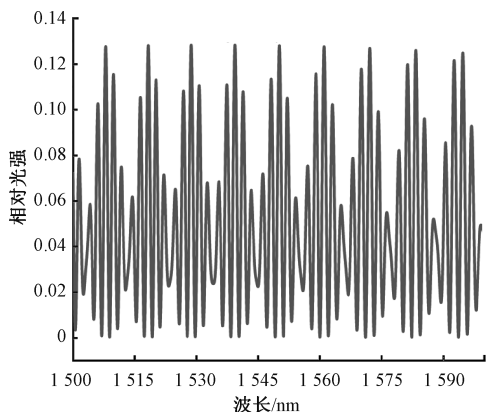
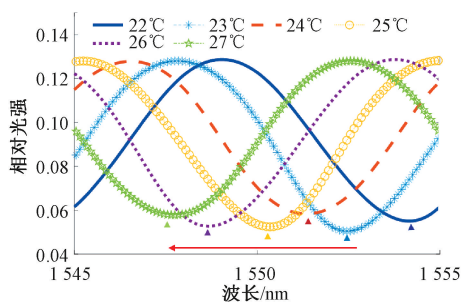


图 2 光纤流速传感器仿真原始光谱

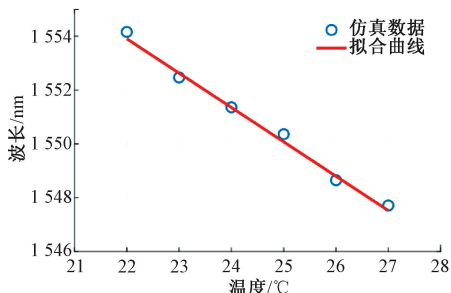
Fig. 2 Simulated original spectrum of the fiber-optic anemometer

根据前文所述 PDMS 的温度特性,仿真得到传感器在不同温度下的输出游标光谱如图 3(a) 所示,随着温度的增加,游标光谱向短波长方向移动。



(a) 游标包络随温度的变化趋势

(a) The variation trend of vernier envelope with temperature



(b) 特征波长与温度关系曲线

(b) Relationship curve between characteristic wavelength and temperature

图 3 温度传感特性仿真结果

Fig. 3 Simulation results of temperature sensing characteristics

通过分析各温度下游标光谱特征波长的位置,得到游标光谱的温度特性如图 3(b)所示,特征波长随温度移动的灵敏度为 $1.277 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

为了进一步分析传感器的流速传感特性,利用有限元分析方法建立了传感器在流体中对流换热特性的分析模型,如图 4(a)所示,传感器垂直插入被测流体,流体从左向右流经传感器,传感器横截面中心为 PDMS,PDMS 设置为恒功率型热源。如图 4(b)所示为模型分析得到的传感器周围流速场,其中清晰地展示出流体的流场受传感器的扰动作用。如图 4(c)所示为模型分析得到的传感器周围温度场,图中展示出传感器的热量散失到了流体中,传感器由中心向周围形成了温度梯度,证明所建立模型还原了传感器与流体间的对流换热物理过程,并且,模型分析得到了 PDMS 在对流换热中的热平衡温度。

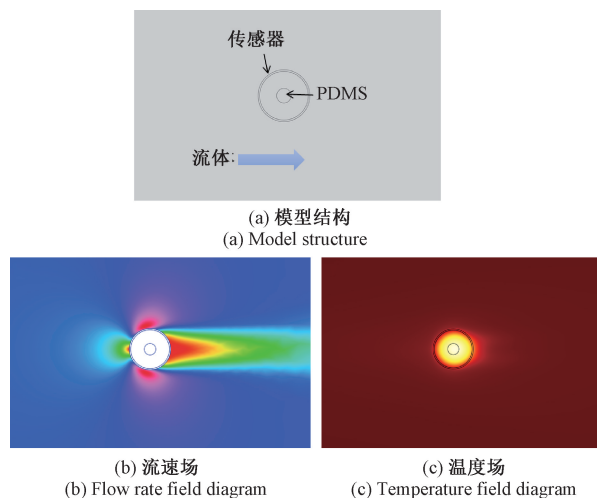


图 4 对流换热物理场模型及仿真结果

Fig. 4 Simulation results of convection heat transfer physical field

通过分析不同流速下的对流换热物理场,得到各流速下 PDMS 的热平衡温度,如图 5(a)所示。可以发现 PDMS 的热平衡温度随流速的升高而降低,在低流速区,热平衡温度随流速变化速率非常高,而在高流速区域,热平衡温度随流速变化速率非常低,图 5(a)中插图所示为流速在 $17 \sim 25 \text{ m/s}$ 的温度变化特性,此时,热平衡温度随流速变化速率仅为 $0.7625^{\circ}\text{C}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。传统光纤热式流速传感器最大流速测得值受限的原因就在于无法分辨高流速区域的热平衡温度变化。

此外,热平衡温度与流速间的关系曲线会受被测流体的温度影响产生变化,如图 5(b)所示为各流体温度情况下,PDMS 的热平衡温度与流速间关系曲线。随着流体温度的升高,各流速下的 PDMS 的热平衡温度随之等幅度升高,PDMS 的热平衡温度与流速间关系曲线向上平移,但热平衡温度随流速变化的速率并未受流体温度的影响,在

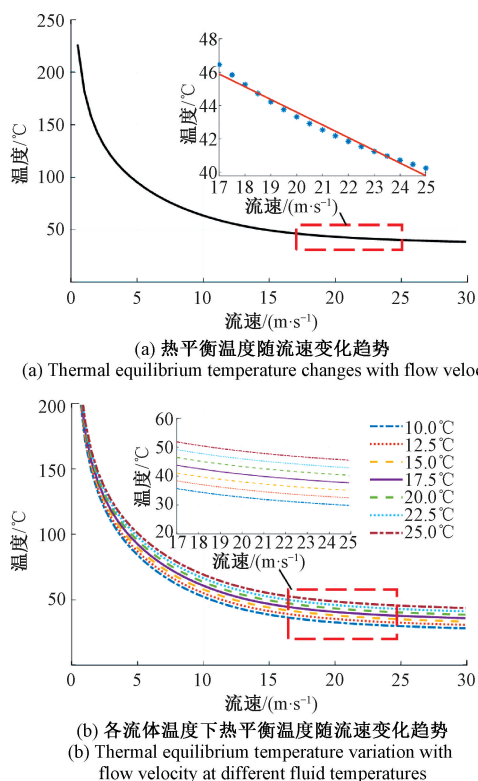


图 5 热平衡温度随流速变化曲线

Fig. 5 The curve of thermal equilibrium temperature as a function of flow velocity

$17 \sim 25 \text{ m/s}$ 流速范围内,热平衡温度随流速变化速率依旧为 $0.7625^{\circ}\text{C}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。根据式(1)所示,流体温度作为传感器热平衡温度的共模信号,仅影响热平衡温度特性曲线的位置,而不影响曲线斜率,在工业应用中,均配有测量流体温度的传感设备,根据测得的流体温度可有效修正流体温度引入的共模干扰,不影响流速传感的准确性。

根据图 5(a)中 PDMS 在各流速下的温度值,求得得到 PDMS 在各流速下的折射率值,并利用式(1)分析得到所提出传感器在各流速下的游标光谱,通过提取光谱中的游标包络,得到各流速下的游标包络光谱,如图 6 所示。根据图 6(a)可以发现,传感器包络随流速增大产生明显红移。根据图 6(b)所示特征波长与流速间关系拟合曲线,在 $17 \sim 25 \text{ m/s}$ 高流速区间,特征波长随流速变化灵敏度达到 $1.01 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,传感器可测得最大流量不低于 25 m/s ,验证了所设计传感结构在高流速区间实现高灵敏流速传感、提高最大可测得流速值的可行性。

2 系统搭建与试验分析

2.1 系统搭建

为了进一步验证所提出传感方法在提高流速传感灵敏度和最大流速测量值的可行性,对传感器进行了制备,

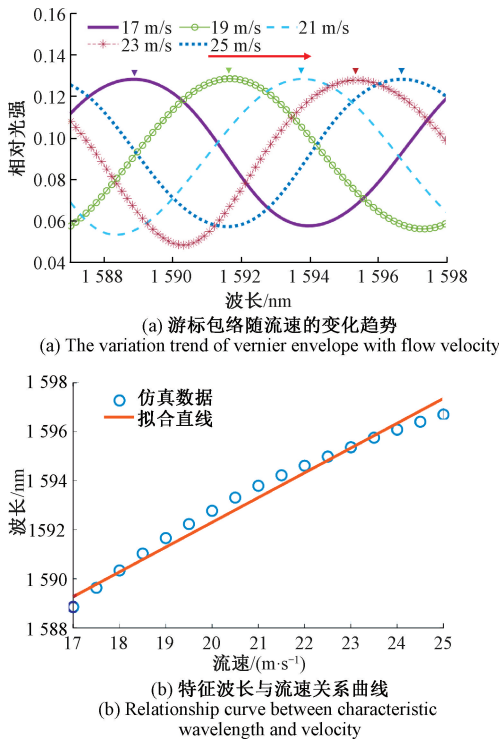
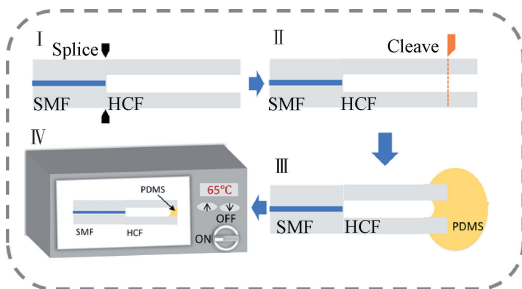


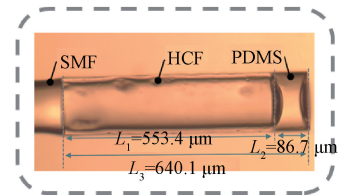
图6 流速传感特性仿真结果

Fig. 6 Simulation results of velocity sensing characteristics

并搭建了传感系统。在传感器制备方面,制备工序包括熔接、切割、填充和固化,制备过程如图7(a)所示。在熔接环节(过程I),将位移分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤切割刀和微位移装置固定在高精度光纤切割平台轨道,将一段SMF(康宁SMF28)放入切割系统中切割,然后进行SMF和HCF的熔接。为避免SMF和HCF(孔/包层直径为 $80/125\text{ }\mu\text{m}$)在融合点发生熔接坍塌,将光纤熔接机放电时间设置为 400 ms ,放电强度设置为 100 unit ,第1次推进 $8\text{ }\mu\text{m}$,第2次拉伸 $3\text{ }\mu\text{m}$,SMF与HCF的端面间距为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。在切割环节(过程II),熔接后的SMF-HCF段被放回光纤切割平台的相同位置,光纤两端固定在微位移平台上,利用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)监控光纤放置位置,利用微位移平台对光纤进行精确平移,利用切刀切除HCF多余部分,得到所需的HCF长度。



(a) 熔接、切割、填充、固化过程
(a) Welding, cutting, filling and curing processes



(b) 传感器的光学显微镜图像
(b) Optical microscope image of the sensor

图7 光纤流速传感器的制备

Fig. 7 Fabrication of the fiber-optic thermal flow sensor

在PDMS填充环节(过程III),将 10 ml 的PDMS、 1 ml 的固化剂和 1 ml 的溶解剂在试管中混合并搅拌均匀,制备完成粘度($1\text{ }500\text{ mPa}\cdot\text{s}$)的PDMS,然后通过滴管将PDMS溶液滴在SMF-HCF末端,利用PDMS溶液的流动性和HCF的毛细作用,PDMS缓慢地填充到HCF的底端。根据文献[38]所述,填充时间 t 是控制PDMS厚度 L_2 的重要因素, L_2 随 t 的增加而变厚。参照文献[38]中 L_2 与 t 间关系,并考虑到空芯光纤的纤芯尺寸、PDMS粘稠度、环境等因素对 L_2 与 t 间关系的影响,经过多次试验,确定在室温 25°C 环境下填充时间为 15 min 时,可得到厚度为 $86.7\text{ }\mu\text{m}$ 的PDMS填充结构。在最后的固化环节(过程IV),将PDMS放置在温度箱中在 65°C 下加热 45 min 直到完全固化。制备成的光纤传感器在光学显微镜下的观测结果如图7(b)所示。SMF和HCF熔接点无明显熔接塌缩,PDMS的端面比较平滑,保证了传感器的制作质量。此外,为避免流体动压使光纤流速传感器产生形变和机械损坏,由定制的金属毛细管作为传感器外部封装,同时,在金属毛细管内部和底部用环氧树脂进行填充,进一步增加传感器整体的机械抗性。

在流速场的构建方面,所需流速试验环境由型号为X5604的气体流速标准装置产生。该装置可产生流速范围为 $0\sim 30\text{ m/s}$ 、均匀场直径为 20 cm 的圆形均匀流速场,装置内部通过整流装置使流场稳定性达到 1% ,可有效降低流场抖动对传感器流速测试的影响。

基于气体流速标准装置和制备的传感器,对流速传感系统进行了搭建,如图8所示,传感器通过金属支管插入到气体流速标准装置的试验管道的中心位置处,试验管道中的气体流速可通过控制器进行调控,型号为KG-ASE-C-20-SM-FA的ASE宽谱光源1为传感器提供传感信号,型号为KG-ASE-CL-20-SM-FA的ASE宽谱光源2和型号为KG-EDFA-B-27-D-SM-FA的掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)构成激光器,为传感器提供加热光能量,传感器输出光信号通过型号为AQ6370D的光谱分析仪进行光谱分析。

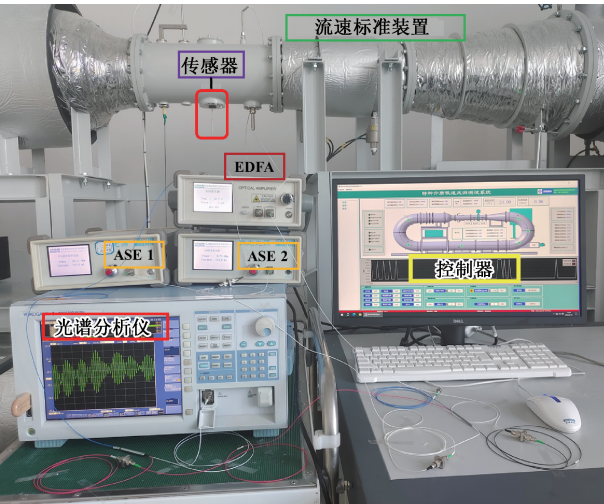
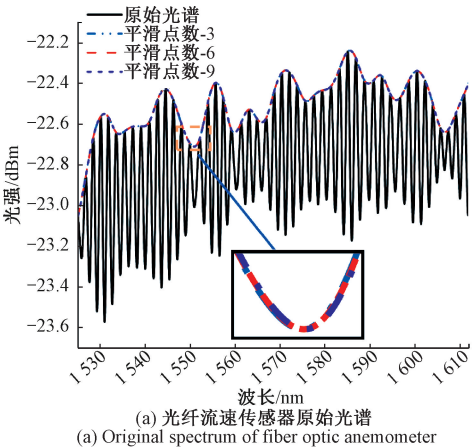


图 8 流速传感系统

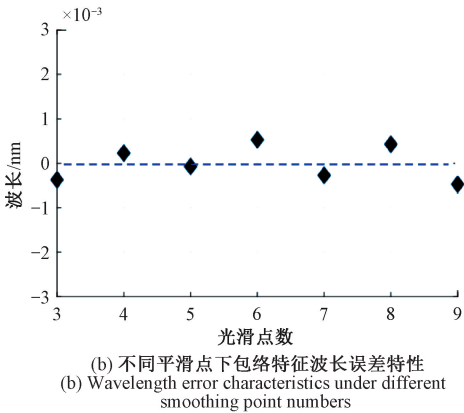
Fig. 8 Diagram of the gas flow rate standard system

2.2 试验分析

为了观察传感器产生的游标效果, 首先将未加热光的光纤传感器放置在室温条件下, 观测到的传感器的原始光谱如图 9(a) 所示, 传感器所产生游标效应的周期与仿真分析结果基本相同, 理论与试验具有一定的一致性。但是由于传感器加工误差及传感器内多次反射信号的干扰, 游标效应光谱中存在一定的噪声信号。为了分析在有噪声干扰下的包络提取可靠性, 分别对包络拟合运算中平滑点数为 3~9 时的包络特征波长提取离散型进行统计分析, 图 9(a) 所示为不同平滑点数时包络波谷的图形, 图 9(b) 所示为在各平滑点数下所提取包络波谷波长值与波长平均值间的差值图。在不同平滑点数下, 包络的特征波长识别差异仅在 0.0001 nm 量级, 并且当平滑点数为 5 时的特征波长识别结果偏离程度最低 ($-0.714\times 10^{-4}\text{ nm}$), 证明当前包络和小周期光谱配置可以在一定程度上克服高频和低频噪声光谱影响, 同时后续试验中设置平滑点数为 5, 以最大程度提高包络提取准确性。



(a) 光纤流速传感器原始光谱
(a) Original spectrum of fiber optic anemometer

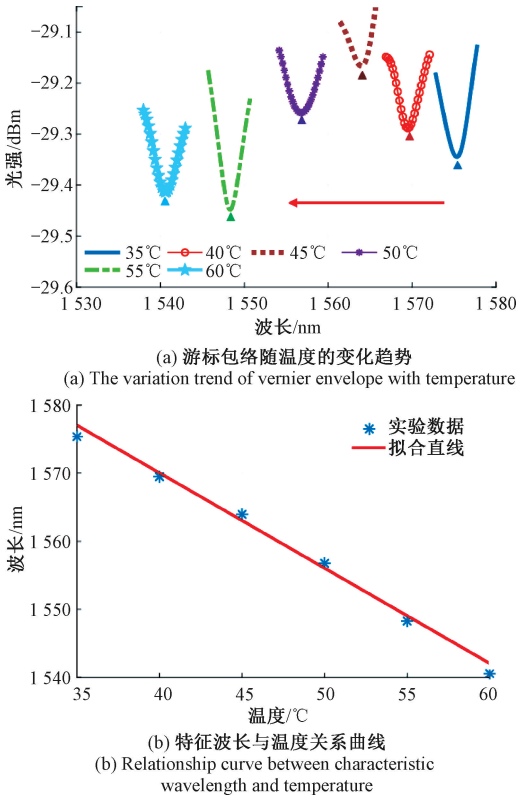


(b) 不同平滑点下包络特征波长误差特性
(b) Wavelength error characteristics under different smoothing point numbers

图 9 光纤流速传感器原始光谱和不同平滑点下包络特征波长误差特性

Fig. 9 Original spectrum of fiber optic anemometer and the wavelength errors in different smooth points number

为了测试传感器的温度特性, 将传感器放置在型号为 WHTH-225 的恒温箱中, 测试传感器范围在 $35^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的响应特性。图 10 所示为传感器在不同温度下游标光谱以及特征波长与温度间关系曲线。可以发现, 随着温度的增加, 游标光谱向短波长方向移动, 特征波长随温度变化灵敏度为 $1.399\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 与理论分析结果相近。



(a) 游标包络随温度的变化趋势
(a) The variation trend of vernier envelope with temperature
(b) 特征波长与温度关系曲线
(b) Relationship curve between characteristic wavelength and temperature

图 10 温度传感特性试验结果

Fig. 10 Experiment results of temperature sensing characteristics

将光纤传感器放置于气体流速标准装置中,为其通入加热激光,调节装置内气体流速,对传感器的各流速传感性能进行测试:

1) 稳定性

为了验证传感系统的稳定性,将传感器放置于 8 m/s 的流速下,每 1 min 记录一次传感器输出光谱,提取光谱中游标包络的特征波长,并根据贝塞尔公式分析特征波长的标准偏差 u 表征特征波长在时间维度的离散性,进而用于分析传感器在时间维度上的稳定性。其中,贝塞尔公式表达式为:

$$u = \sqrt{\sum_i^N (\lambda - \bar{\lambda})^2 / (N - 1)}$$

(4)

其中, $\bar{\lambda}$ 表示特征波长的平均值, N 表示特征波长数量。表 1 所示为不同时刻下提取的传感器输出光谱的特征波长值,各特征波长相对于 $\bar{\lambda}$ 的偏差特性如图 11 所示,传感器的特征波长在试验过程中存在小幅度震荡,其原因在于气体流速标准装置所产生的气体流场呈现周期性波动导致存在稳定性偏差,同时流场中夹杂湍流,导致试验中存在干扰,受机械震荡和热震荡的影响。根据式(4)计算得到试验过程中特征波长的标准偏差为 0.014 nm,与光谱仪的分辨力(0.02 nm)的不确定度量级相当,并且由于其呈现周期性特点,通过在时间维度取平均值的方式可有效降低流场震荡对试验结果的影响。

表 1 不同时刻提取的特征波长值

Table 1 Characteristic wavelength values extracted at different times

时间/min	波长/nm
1	1 549. 237
2	1 549. 248
3	1 549. 225
4	1 549. 213
5	1 549. 242

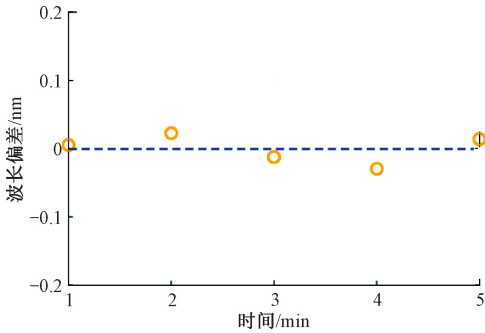


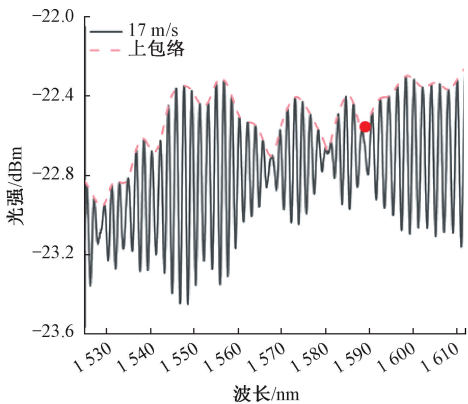
图 11 不同时刻下特征波长的误差曲线

Fig. 11 Error curve of characteristic wavelength at different times

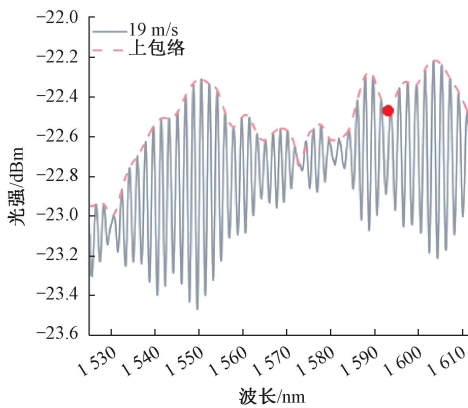
2) 最大流速测量值

为了测试传感器的最大流速测量值,逐渐增加流场流速值,观察传感器输出光谱是否随流速变化产生移动。如图 12 所示为流速在 17 ~25 m/s 范围内传感器的输出光谱情况,传感器输出光谱随流速产生了明显红移,证明传感器在该区间内具备流速分辨能力。

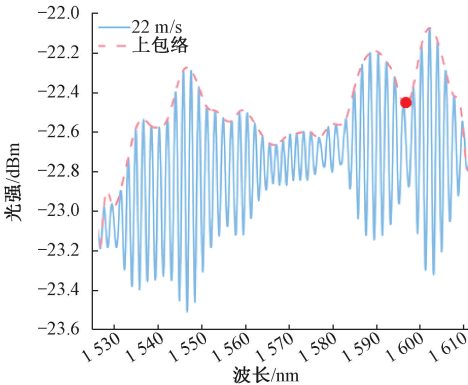
试验测得最大可测得流速值达到 25 m/s,通过与相关研究成果相对比,如表 2 所示,证明了所提出方法有效提高了光纤热式流速传感器的流速测量范围。



(a) 17 m/s流速下光谱
(a) Output spectra at 17 m/s



(b) 19 m/s流速下光谱
(b) Output spectra at 19 m/s



(c) 22 m/s流速下光谱
(c) Output spectra at 22 m/s

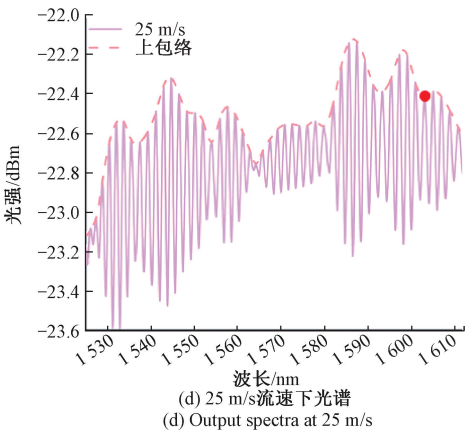


图 12 流速测试过程监测结果

Fig. 12 Monitoring results during the flow velocity testing process

表 2 不同光纤热式流速传感器的性能比较

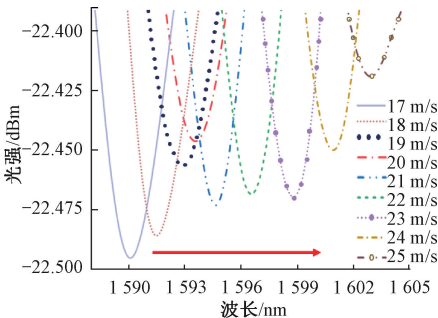
Table 2 Performance comparison of different optical fiber thermal flow rate sensors

参考文献	传感结构	最大流速测量值/(m·s ⁻¹)
[20]	FBG+银膜	17.3
[21]	LPFG+碳纳米管	2.0
[22]	FBG+钴离子	1.0
[23]	FP+UV 胶	10.0
本研究	FP+PDMS	25.0

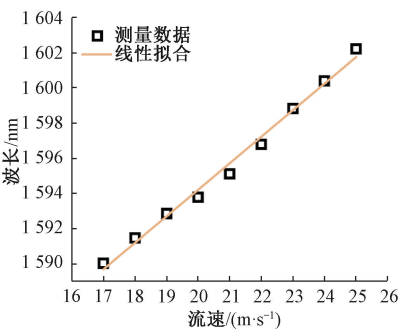
3) 灵敏度

为了进一步分析传感器的灵敏度特性,对特征波谷随流速变化的定量关系进行分析,如图 13 所示。

图 13(a)直观的展现了包络波谷随流速的移动趋势。通过进一步提取各流速下的特征波长,得到传感器特征波长与流速关系拟合结果,如图 13(b)所示,传感器在 17~25 m/s 的高流速范围表现出了较高的灵敏度特性,灵敏度 S 达到 $1.45 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,根据流速分辨力计算公式: $\Delta\lambda_2 = \Delta\lambda_1/S$,以及光谱仪的波长分辨力 $\Delta\lambda_1 = 0.02 \text{ nm}$,



(a) 上游标包络谷随不同流速的变化趋势
(a) The variation trend of upper vernier envelope valley with different flow rates



(b) 特征波长随不同流速的响应
(b) Response of characteristic wavelength with different flow velocities

图 13 流速测试结果

Fig. 13 Wind speed test results

计算得到流速分辨力为 0.014 m/s 。此外,通过分析,试验数据与拟合曲线间标准偏差约 0.11 m/s ,线性度达到 $R^2=0.99$,响应曲线具备良好的线性。综上,所制备传感器实现了高灵敏度的光纤热式流速传感。

4) 重复性

为了验证灵敏度在重复试验下的一致性,对传感器的灵敏度特性进行了重复性试验,采用与第 1 次试验相同的试验方式,获得特征波长随流速的移动结果,测试结果如图 14 所示。

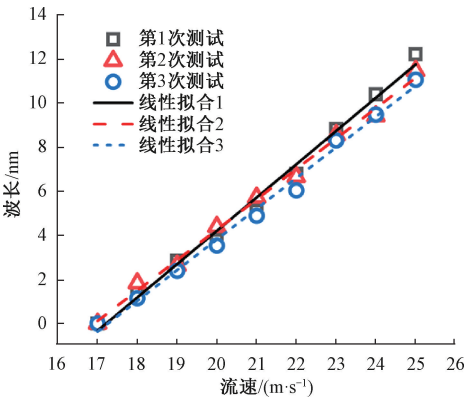


图 14 3 次测试下波长偏移随流速的变化趋势对比

Fig. 14 Comparison of the variation trend of wavelength migration with velocity under three tests

其中第 2 次试验测得灵敏度为 $1.42 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。第 3 次试验测得灵敏度为 $1.43 \text{ nm}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,2 次试验数据与拟合曲线间的标准偏差为 0.10 m/s ,线性度达到 $R^2=0.99$,响应曲线具备良好的线性。为了分析 3 次测试下灵敏度的一致性,采用极差法对灵敏度的重复性相对标准偏差 u_{rel} 进行了计算,即:

$$u_{\text{rel}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{\overline{SC}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, $S_{\max}$ 为灵敏度最大值; $S_{\min}$ 为灵敏度最小值; $\bar{S}$ 为灵敏度平均值; C 为极差系数, 当样本数量为 3 时, $C=1.69$ 。根据式(4) 计算得到灵敏度的重复性相对标准偏差仅为 1.24%, 进一步证明传感器的灵敏度具有良好的一致性。

3 结 论

本研究提出了一种基于游标效应的光纤热式流速传感器, 以解决光纤热式流速传感器在高流速范围内灵敏度较低的问题。传感器由 SMF 与 HCF 熔接, 并在 HCF 的末端填充适当厚度热敏材料制备而成, 光信号在 SMF 和热敏材料端面间形成游标效应, 通过激光器加热热敏材料使传感器与被测流体间形成对流换热机制, 利用热敏材料的高温度敏感特性和游标效应的增敏特性提高传感器在高流速区域的灵敏度, 进而提高最大流速测量值。根据理论分析和试验测试, 以 PDMS 作为热敏材料制备传感结构, 传感器具备 $1.399 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度特性, 最大流速测得值提高到 25 m/s , 在 $17 \sim 25 \text{ m/s}$ 的流速范围内具有良好的线性度 ($R^2 = 0.99$), 灵敏度提高到 $1.45 \text{ nm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 灵敏度的重复性相对偏差仅为 1.24%, 具有良好的一致性。本研究所提出的传感方法不仅提高了光纤热式流速传感器的灵敏度和流速测量范围, 还具备结构精简的优势, 推动了光纤热式流速传感器在石化、核电等工业领域的产业应用。并且, 通过选用热敏特性优于 PDMS 的热敏材料, 可进一步提升传感器的灵敏度, 传感器在传感性能提升方面具备潜力。

参考文献

- [1] LI Y, YAN G F, ZHANG L, et al. Microfluidic flowmeter based on micro “hot-wire” sandwiched Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9483-9493.
- [2] SHAN B H, KONG L X, WU K J, et al. High sensitivity and ultra compact fiber-optic microtip SPR thermometer coated with Ag/PDMS bilayer film[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102619.
- [3] ZHANG J R, TANG Y H, XU P B, et al. Intensity-interrogated hot-wire anemometer based on chirp effect of a fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2022, 30(20): 37124-37130.
- [4] WANG F, DUAN Y F, LU M D, et al. Fiber-optic hot-wire anemometer with directional response based on symmetry-breaking induced heat transfer mechanism[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3919-3925.
- [5] XIONG H, TAN SH J, WU P, et al. All-optical airflow sensor enables simultaneous speed and direction measurement[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20734-20744.
- [6] 贾惠芹, 王成云, 党瑞荣. 流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 1-8.
JIA H Q, WANG CH Y, DANG R R. Influence of fluid velocity on ultrasonic wave flowrate measurement accuracy and its calibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 1-8.
- [7] 夏凤, 杨乃凡, 林倩如, 等. 基于微纳光纤谐振环的温度传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 224-232.
XIA F, YANG N F, LIN Q R, et al. Research on the temperature sensor based on microfiber resonator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 224-232.
- [8] ZHANG X J, CAI SH SH, LIU F, et al. In-situ determination of the complex permittivity of ultrathin H2-infused palladium coatings for plasmonic fiber optic sensors in the near infrared[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(19): 5161-5170.
- [9] WANG CH, ZHANG X ZH, JIANG J F, et al. Fiber optical temperature compensated anemometer based on dual Fabry-Perot sensors with sealed cavity[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18157-18168.
- [10] ZHANG J B, FANG H B, WANG P, et al. Optical microfiber or nanofiber: A miniature fiber-optic platform for nanophotonics[J]. Photonics Insights, 2024, 3(1): R02.
- [11] 蔡忆, 姜天雨, 张静, 等. 基于碳点的小型自校正比率荧光光纤铬(VI)传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 261-270.
CAI Y, JIANG T Y, ZHANG J, et al. The miniature self-correcting ratiometric fluorescence optical fiber sensor based on carbon dots for chromium(VI) detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 261-270.
- [12] KLUG A, PETERS C, FORBES A. Robust structured light in atmospheric turbulence[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(1): 016006.
- [13] 赵勇, 赵健, 吕日清, 等. 基于无芯光纤与光栅级联的反射式大量程高分辨率海水温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 178-185.

- ZHAO Y, ZHAO J, LYU R Q, et al. Reflective large-range high-resolution seawater temperature sensor based on no-core fiber combined with fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 178-185.
- [14] ZHAO Y, GU Y F, LYU R Q, et al. A small probe-type flowmeter based on the differential fiber Bragg grating measurement method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(3): 502-507.
- [15] GUPTA H, ARUMURU V, JHA R. Industrial fluid flow measurement using optical fiber sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7130-7144.
- [16] HOU L T, LI Y, LIU Y, et al. High sensitivity flow velocity sensor based on all-fiber target-type structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 4174-4178.
- [17] BORUAH B S, BISWAS R. An optical fiber based surface plasmon resonance technique for sensing of lead ions: A toxic water pollutant[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 152-156.
- [18] CALDAS P, JORGE P A S, REGO G, et al. Fiber optic hot-wire flowmeter based on a metallic coated hybrid long period grating/fiber Bragg grating structure[J]. Applied Optics, 2011, 50(17): 2738-2743.
- [19] ZHOU B, JIANG H H, LU CH T, et al. Hot cavity optical fiber Fabry-Perot interferometer as a flow sensor with temperature self-calibrated[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 5044-5048.
- [20] WANG X H, DONG X Y, ZHOU Y, et al. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 214: 230-233.
- [21] LIU Z G, WANG F, ZHANG Y, et al. Low-power-consumption fiber-optic anemometer based on long-period grating with SWCNT coating[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2592-2597.
- [22] LIU ZH Y, HTEIN L, CHENG L K, et al. Highly sensitive miniature fluidic flowmeter based on an FBG heated by Co^{2+} -doped fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4393-4402.
- [23] LEE C L, LIU K W, LUO SH H, et al. A hot-polymer fiber fabry-perot interferometer anemometer for sensing airflow[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2015.
- [24] GAO R, LU D F. Temperature compensated fiber optic anemometer based on graphene-coated elliptical core micro-fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34011-34021.
- [25] KIM Y C, CRAMER J, BATTAGLIA T, et al. Investigation of in situ surface plasmon resonance spectroscopy for environmental monitoring in and around deep-sea hydrothermal vents[J]. Analytical Letters, 2013, 46(10): 1607-1617.
- [26] ZHOU B, JIANG H H, LU CH T, et al. Hot cavity optical fiber Fabry-Perot interferometer as a flow sensor with temperature self-calibrated[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 5044-5048.
- [27] BYRNE G D, JAMES S W, TATAM R P. A Bragg grating based fibre optic reference beam laser Doppler anemometer[J]. Measurement Science And Technology, 2001, 12(7): 909-913.
- [28] CAUCHETEUR C, GUO T, LIU F, et al. Ultrasensitive plasmonic sensing in air using optical fibre spectral combs[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 13371.
- [29] ZHAO Y, WANG P, LYU R Q, et al. Highly sensitive airflow sensor based on Fabry-Perot interferometer and vernier effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(23): 5351-5356.
- [30] SOHN K R. Fiber Bragg grating-tuned feedback laser flow sensor system[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2012, 179: 1-4.
- [31] 陈志刚, 马瑾, 康国强, 等. 国产超声波流量计在天然气贸易计量中的应用[J]. 石油工程建设, 2025, 51(1): 68-71.
- CHEN ZH G, MA J, KANG G Q, et al. Application of Chinese ultrasonic flowmeter in natural gas trade measurement[J]. Petroleum Engineering Construction, 2025, 51(1): 68-71.
- [32] 全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355). 天然气计量系统技术要求: GB/T 18603—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- National Technical Committee for Petroleum and Natural Gas Standardization of China (SAC/TC 355). Technical requirements for natural gas metering systems: GB/T 18603—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [33] TAKAGI S. A hot-wire anemometer compensated for ambient temperature variations[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986, 19: 739-743.

[34] WANG F, LI H, WANG X, et al. Temperature and curvature measurement based on low cavity loss FLRD technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3): 2221-2228.

[35] HERNÁNDEZ-ROMNAO I, CRUZ-GARCIA M A, MORENO-HERNÁNDEZ C, et al. Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5654-5661.

[36] ZIMMERMANN C A, AMOUZOU K N, UNG B. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications [J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(1): 2401975.

[37] ZHANG X N, QIU J, LI X C, et al. Complex refractive indices measurements of polymers in visible and near-infrared bands [J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2337-2344.

[38] CHEN M Q, ZHAO Y, XIA F, et al. High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 275: 60-66.

作者简介



李太文,2023 年于青岛大学获得学士学位,现为东北大学秦皇岛分校硕士研究生,主要研究方向为光纤热式流速传感技术。
E-mail:ltw18254730319@163.com

Li Taiwen received his B.Sc. degree from Qingdao University in 2023. Now he is a

M.Sc. candidate at Northeastern University, Qinhuangdao. His main research interest includes optic fiber thermal flow velocity sensing technology.



刘志远,2021 年于郑州科技学院获得学士学位,2024 年于河南师范大学获得硕士学位,现为东北大学博士研究生,主要研究方向为光纤流速传感技术。
E-mail:liuzhiyuan517@163.com

Liu Zhiyuan received his B.Sc. degree from Zhengzhou University of Science and Technology in 2021, received his M.Sc. degree from Henan Normal University in 2024. He is currently a Ph.D. candidate at Northeastern University. His main research interest includes optical fiber flow velocity sensing technology.



韩博(通信作者),2011 年于东北大学获得学士学位,2013 年于东北大学获得硕士学位,2021 年于东北大学获得博士学位,现为东北大学秦皇岛分校控制工程学院副教授,主要研究方向为光纤流体多参数检测技术与流体多参数计量测试技术。

E-mail:hanbo@neuq.edu.cn

Han Bo(Corresponding author) received his B.Sc. , M.Sc. , and Ph.D. degrees all from Northeastern University in 2011, 2013 and 2021, respectively. He is currently an associate professor at the College of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao. His main research interests include optical fiber-based fluid multi-parameter fluid detection technology and multi-parameter fluid metrology technology.