

用于滑动轴承油膜温度压力检测的光纤EFPI-FBG复合传感器

赵向荣^{1,2},李瑞亚^{1,2*},韩乐强^{1,2},谭跃刚^{1,2}

(1.高性能材料特种零部件制造技术教育部重点实验室,武汉 430070;2.武汉理工大学 机电工程学院,武汉 430070)

摘要:为了测量滑动轴承油膜温度和压力,设计了一种集成光纤非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)和光纤布喇格光栅(FBG)的复合传感器。该传感器由FBG和微泡型FP腔构成,微泡型FP腔由多模光纤腐蚀后电击制成,并对微泡型FP腔进行金属镍化学镀膜。采用温度和压力标定装置分别对复合传感器进行了温度和压力标定实验。实验结果表明:该复合传感器在0~10 MPa的压力量程范围内FBG中心波长和FP腔长的压力灵敏度分别为-3.24 pm/MPa和-7.23 nm/MPa,二者线性相关系数均达到0.99以上。同时,在-40~120 °C的温度量程范围内,FBG中心波长和FP腔长的温度灵敏度分别为10.35 pm/°C和0.294 1 nm/°C,温度补偿效果显著。

关键词:滑动轴承;油膜;温度;压力;光纤光栅;光纤法布里-珀罗腔

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)03-0071-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.012

Optical fiber EFPI-FBG hybrid sensor for oil film temperature and pressure detection in sliding bearings

ZHAO Xiangrong^{1,2}, LI Ruiya^{1,2*}, HAN Leqiang^{1,2}, TAN Yuegang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for High Performance Parts, Ministry of Education, Wuhan 430070, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To measure the oil film temperature and pressure in a sliding bearing, a hybrid sensor integrating an optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) and a fiber Bragg grating (FBG) is designed. The sensor consists of an FBG and a microbubble-based FP cavity. The microbubble FP cavity is fabricated by etching a multimode optical fiber followed by electric arc discharge, and then coated with nickel via electroless plating. Temperature and pressure calibration setups are used to conduct calibration experiments on the hybrid sensor. The experimental results show that within the pressure range of 0~10 MPa, the pressure sensitivities of the FBG center wavelength and the FP cavity length are -3.24 pm/MPa and -7.23 nm/MPa, respectively, with both linear correlation coefficients exceeding 0.99. Meanwhile, within the temperature range of -40~120 °C, the temperature sensitivities of the FBG center wavelength and the FP cavity length are 10.35 pm/°C and 0.2941 nm/°C, demonstrating a significant temperature compensation effect.

Key words: sliding bearing, oil film, temperature, pressure, fiber grating, fiber Fabry-Perot cavity

0 引言

滑动轴承由于其强大的承载能力、稳定的运行性能、较低的噪音水平以及适应高转速操作的特点,在

当今工业设备中占据了重要的位置,并被视为设备未来实现长寿命、可循环使用及成本效益优势的关键支撑技术之一^[1]。确保滑动轴承正常运作的核心在于维持内部油膜的完整性^[2]。在高速度和重负荷条件下工作时,如果滑动轴承内的润滑油膜发生破损,则可能导致接触面间产生边界摩擦乃至完全失去润滑作用,进而影响设备的正常运行,严重情况下会引发机械故障。鉴于此,对于滑动轴承内油膜状况的持续监控显得尤为关键。其中,油膜的压力和温度是最基本也是最重要的参数,通过对2项指标的实时监测,可以有效地评估油膜的状态。

收稿日期:2024-12-22。

基金项目:国家自然科学基金项目(51475343)资助。

作者简介:赵向荣(1999—),男,硕士研究生,现就读于武汉理工大学机电工程学院机械工程专业,主要研究方向为光纤压力、温度传感器的研制和机械装备状态监测等。

*通信作者:李瑞亚(1988—)男,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术、机械装备状态监测与故障诊断技术。



目前,主要采用压阻式^[3-6]、电容式^[7]、膜片式^[8-9]传感器测量油膜压力;通过预埋热电偶传感器^[10]的方法来测定油膜温度。2006年,Yang S H等人^[4]通过在轴颈中平面安装一个压阻式压力传感器测量油膜压力的连续分布,研究了载荷作用于瓦块(LOP)型六瓦可倾瓦滑动轴承中上空载瓦在供油流量、轴转速和轴承载荷变化时的颤振特性。同年,Ikeda K等人^[5]在轴承中心轴颈表面沿轴向埋设一个小型压电压力传感器,得到了轴颈旋转时油膜压力沿周向的分布。在静态试验中,测量了不同油流量下油膜压力和轴承损耗的分布,平均轴承压力最高可达2.9 MPa。2014年,Ahmad M A等人^[6]在轴颈轴承圆周上以30°的间隔固定12个压阻式压力传感器,测量轴承圆周内表面上直径为0.5 mm的测压孔内的流体压力,以确定油槽位置对流体动压径向轴承压力的影响。2005年,Cabrera D L等人^[7]使用安装在试验轴上的超小型电容式压力传感器测量轴承内的压力。放大的压力信号通过滑环单元传输,可以在多个轴向位置测量轴承中的油膜压力。2015年,Binu K G等人^[8]在嵌入式膜片压力传感器和数据采集板之间连接了一个串联放大器,用于放大传感器的输出信号。传感器的导线通过电气连接器连接到放大器,以获得动水压力分布。2017年,Mansoor Y等人^[9]使用10个Gems 3100系列紧凑型高压传感器测量油膜压力,量程为0~250 bar,满量程精度为 $\pm 0.25\%$ 。然而,传统的电类传感器通常通过轴颈轴承表面钻的孔连接,由于其尺寸一般较大,会对轴承工作时的油膜形态产生影响,导致明显测量误差。

光纤材料具备耐腐蚀性、耐高温性以及强大的环境适应能力,并且其体积小、重量轻,可以方便地嵌入各种材料中而不影响其机械属性^[11]。因此,相较于传统的电类传感器,光纤传感技术展现出独特的优势。这些优势使其成为解决滑动轴承结构健康监测过程中复杂问题的有效手段。2014年,Kapulainen M等人^[12]将一种基于光强调制的光纤传感器应用于油膜压力的测量,较好地解决了轴承油膜压力测量时传感器的耐高温和抗电磁干扰问题。2018年,Mu Boxin等人^[13]首次展示了基于光纤布喇格光栅(FBG)的油膜压力测量。该团队提出嵌入式压力传感器和插入式压力传感器2种基于FBG的油膜压力传感器,在0~10 kPa实验中,2种传感器的FBG压力灵敏度分别为38 pm/bar和2.6 pm/bar,但该研究未展示传感器的温度补偿效果。2019年,武汉理工大学Liu Hu等人^[14]将FBG温度传感器运用到测量轴瓦的温度场分布上,实现了轴瓦

温度场的分布式测量。实验结果表明,FBG温度传感器测量滑动轴承轴瓦温度分布具有良好的准确性、稳定性和一致性,其温度响应迅速,与热电偶测量结果相比,FBG温度传感器测量误差小于2℃,但存在压力温度双参数交叉影响的问题。为解决以上问题,本文集成光纤非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)与FBG,设计一种用于滑动轴承油膜温度压力检测的光纤EFPI-FBG复合传感器。

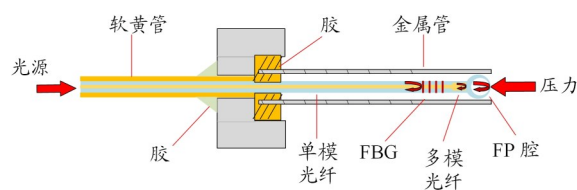
1 光纤EFPI-FBG复合传感器的结构及原理

1.1 光纤EFPI-FBG复合传感结构

针对滑动轴承油膜压力温度测量环境,本文所设计的传感器实物图和结构示意图如图1所示,其核心部分由FBG与多模光纤组成,两者通过光纤熔接机连接。在多模光纤的一端,首先使用氢氟酸溶液进行蚀刻以形成一个凹陷区域;随后,在该凹陷处采用放电技术制造出含空气腔体的微泡型EFPI(下文简称FP腔)。为了提供额外的保护,整个装置的光纤尾端被封装于软黄管内,前端的FBG与FP腔测试元件被封装在金属管内,其中金属管为空心结构。在测量油膜压力时,润滑油会进入到金属管内,金属管内的FBG和FP腔会感知到油膜压力与温度的变化。



(a) 实物图



(b) 结构示意图

图1 光纤EFPI-FBG复合传感器的实物图和结构示意图

径向滑动轴承结构示意图如图2(a)所示。针对滑动轴承油膜压力跟温度测量,在考虑密封和可拆卸的情况下,设计与滑动轴承轴瓦相配的传感器封装结构,结构主视图和剖视图分别如图2(b)、图2(c)所示。首先,在单个轴瓦上布置分布式测量点,之后在轴瓦

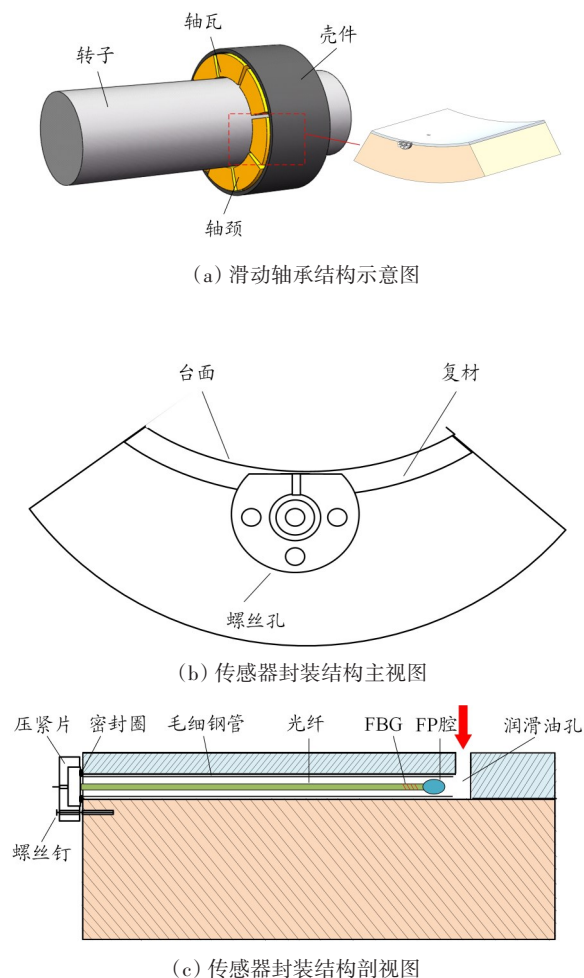


图2 传感器滑动轴承结构示意图、传感器封装结构主视图及剖视图

的侧面开孔,目的是使设计的传感器可以从侧面插入,使前端的FBG与FP腔到达测量点的位置。然后在瓦面径向方向向上开一个直径1~2 mm的小孔,使得传感器可以测得润滑油压力动态参数。最后设计与轴瓦侧面相匹配的金属压紧片,通过螺丝与密封圈将传感器与轴瓦侧面压紧,确保不会漏油泄压。

1.2 光纤EFPI-FBG复合传感原理

当宽带入射光照射至传感器时,首先进入FBG单元,在此过程中,入射光被分离成具有特定波长的反射光和透射光。随后,透射光线沿着光纤路径前进直至抵达右侧端面,在这里,部分光线返回光纤内部,而另一些则穿透端面继续向微泡内壁移动。到达微泡内壁后,光线再次分为2路:一路反弹回光纤,另一路穿越微泡内壁达到其外壁。在微泡外壁处,又有一部分光线反射回光纤中,与前2次反射回来的光线共同作用形成干涉现象。鉴于光纤-空气界面反射率仅为0.04,因此可以忽略从微泡外表面返回或穿过该表面的光线贡献。利用FP腔长与干涉谱之间的关联以及

FP腔长对外部压力变化的响应特性,能够基于观察到的光谱特征解算出施加于微泡上的外部压力值。

根据白光干涉原理,当宽带光入射到光纤中时,FP腔的反射光谱^[15]可以表示为

$$I(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda} + \pi\right) \quad (1)$$

式中: $a(\lambda)$ 为背景光源的光谱轮廓, $b(\lambda)$ 为干涉条纹对比度, λ 和 L 分别为FP腔的扫描波长和腔长。

$\varphi = \frac{4\pi L}{\lambda}$ 是干涉谱的相位,与 L 的关系可以表示为

$$\Delta\varphi(\lambda) = \varphi(\lambda_2) - \varphi(\lambda_1) = \frac{4\pi L(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (2)$$

采用相位解调法,波长在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内扫描,根据产生干涉条纹的相位变化 $\Delta\varphi$ 就可以确定FP腔长为

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

式中:波长 λ_1 和 λ_2 的相位相差 2π 。

当压力和温度耦合作用在所设计的传感器上时,会使FP腔的腔长发生变化,因此FP腔位移可以表示为

$$\Delta L = \Delta L_p + \Delta L_T = k_{p1} \Delta P + k_{T1} \Delta T \quad (4)$$

式中: k_{p1} 和 k_{T1} 分别是FP腔长关于压力 P 和温度 T 的灵敏度, ΔP 和 ΔT 分别是传感器所处环境的压力和温度变化。

FBG的中心波长偏移 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与压力和温度的变化呈线性相关,三者之间的关系可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}} = \Delta\lambda_p + \Delta\lambda_T = k_{p2} \Delta P + k_{T2} \Delta T \quad (5)$$

式中: k_{p2} 和 k_{T2} 分别是FBG的中心波长偏移量关于压力 P 和温度 T 的灵敏度。

结合式(4)和式(5),可以确定所设计的传感器输入和输出之间的二阶映射矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p2} & k_{T2} \\ k_{p1} & k_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,压力测量不仅可以与温度解耦,还可以检测温度。

2 光纤EFPI-FBG传感器制备与封装

2.1 光纤EFPI-FBG复合结构制备

传感器微泡的制作工艺包含5个主要步骤,如图3所示。

1)移除FBG一端多余的单模光纤,保留部分长度为8~10 mm,利用光纤剥线工具清除其表面的涂覆层及其他杂质。接着,采用光纤切割刀具(日本藤仓公司,CT50)对单模光纤末端进行切平处理,仅保留

赵向荣, 李瑞亚, 韩乐强, 等: 用于滑动轴承油膜温度压力检测的光纤 EFPI-FBG 复合传感器

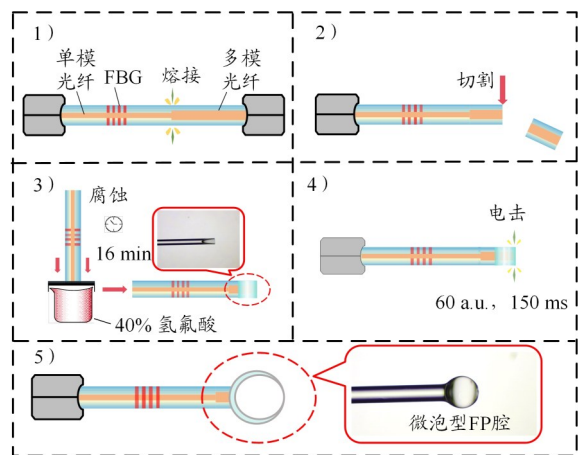


图3 传感器制作流程图

1~2 mm 长度, 之后将该 FBG 放置于光纤熔接设备 (Fitel185ldf, Furukawa 古河公司, 日本) 的一侧。随后, 选取一段多模光纤, 同样通过光纤剥线钳去除其上的涂覆层, 并用无尘纸清洁残留物。再使用相同的切割工具处理多模光纤末端, 使之平整后置于上述熔接机的另一侧。最后, 在调整好适当的放电强度及时间参数后, 使这 2 段光纤在熔接机中融合为一体。

2) 采用光纤切割刀对初步处理过的多模光纤末端进行精确裁剪至指定长度, 此步骤对于后续构建 FP 腔体至关重要。

3) 将经过切平处理的多模光纤末端浸入氢氟酸溶液 (天津市天力化学试剂有限公司, 氢氟酸含量 40%) 中, 浸泡时间为 16 min。由于氢氟酸对光纤内部不同材料的作用速度存在差异, 具体表现为纤芯被侵蚀的速度快于包层, 因此, 在这一化学处理过程中, 多模光纤的纤芯区域会形成明显的凹槽。

4) 首先需将已处理过的 FBG-多模光纤组件置于光纤熔接设备内, 首次设置放电参数时, 设置强度为 60 a.u., 放电时间为 150 ms, 此条件下形成的微泡具有 2~5 μm 的壁厚。通过调节放电条件至 20 a.u. 强度并维持 150 ms 进行第二次放电操作, 观察到微泡尺寸增大。

5) 通过光学显微镜 (SwiftEduSW380T, 美国) 和高清数码相机 (SwiftCAM SC1603, 美国) 对放电后形成的微泡型 FP 腔进行观察与尺寸测量。经由显微镜下精确测定可知, 所制备的微泡型 FP 腔的外径为 79.8 μm , 壁厚为 4 μm 。

2.2 传感器的金属化

考虑到前端的 FBG 及 FP 腔结构在进行传感器设

计时均需去除光纤的保护涂层, 这使得它们在滑油热流冲击恶劣环境中变得尤为脆弱。为了提升传感器的可靠性, 有必要为 FP 腔表面涂覆一层材料, 有效保护光纤免受损害。金属化处理后的光纤能有效抵御环境中水分对石英材质的应力腐蚀作用, 并显著提高光纤的抗疲劳性能。金属层的引入还有助于增强光纤宏弯损耗与外界被测物理量之间的关联性, 进一步提升了传感器的响应特性。同时, 金属层提供的物理防护可以有效支撑微泡结构, 使其在承受较大压力的情况下不易受损。

传感器的化学镀膜流程^[6]包含以下 4 个步骤。

1) 将传感器置于酒精溶液中, 通过超声波清洗 3 min, 随后再用去离子水进行同样时长的超声清洗。这一系列操作旨在去除在传感器制造过程中可能残留的氢氟酸及其腐蚀产物, 从而确保后续镀层工艺的质量。

2) 敏化处理。首先, 在烧杯中加入 0.2 g 氯化亚锡, 随后添加 0.8 ml 浓度为 20% 的盐酸促进溶解。接着, 继续向烧杯内加去离子水直至总体积达到 20 ml, 从而制备出均匀的敏化液。将此溶液转移至试管, 并通过摇晃使其充分混合。之后, 把传感器浸入该敏化液中, 并将装有液体的试管置于设定温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅内保持 20 min。最后, 需将传感器取出并放入去离子水中, 利用超声波清洗 3 min。这一系列操作旨在使传感器表面形成一层能够还原贵金属离子的还原剂。

3) 活化处理。首先, 制备活化液: 取 0.1 ml 盐酸置于试管内, 随后加入去离子水直至总体积达到 20 ml; 接着, 向其中添加 0.01 g 氯化钯, 并通过摇晃使固体完全溶解。将传感器浸入所配制的活化液中, 并将试管放置于设定温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅中保持 25 min。完成此过程后, 需将传感器置于去离子水中, 利用超声波清洗 1 min。整个活化处理旨在使传感器表面形成一层金属钯微粒, 以此作为后续化学镀膜过程中的催化剂。

4) 化学镀膜。取 0.4 g 硼酸置于试管内, 添加 5~10 ml 去离子水。另取一个烧杯, 依次将 0.5 g 硫酸镍、0.4 ml 乳酸及 0.4 g 次亚磷酸钠溶解于少量去离子水中。然后, 将 2 种溶液混合, 再通过滴加氨水调节混合液的 pH 值至大约 4.5。接着, 向混合液中补充去离子水直至总体积达到 20 ml, 制备成所需的化学镀液。把准备好的传感器浸入此镀液中, 并将装有该镀液的试

管放置于设定为 86 °C 的水浴锅内保持恒温 10 min。最后,将传感器从镀液中取出,放入去离子水中超声清洗 1 min。

3 实验测试与结果分析

3.1 压力标定实验

为了研究该传感器的压力传感特性,本文在静态环境下进行了标定实验。实验装置由光发射源(ASE, Agilent 83438A, 美国)、光谱分析仪(OSA, Yokogawa AQ6370C, 日本)、光循环器(OC)和手动液压泵(HP-100, 中国)等关键仪器组成,输出压力范围为 0 ~100 MPa,精度为 0.014 %FS。制造的传感器被安全地插入橡胶管中,然后连接到液压泵的输出端口。实验装置图如图 4 所示。

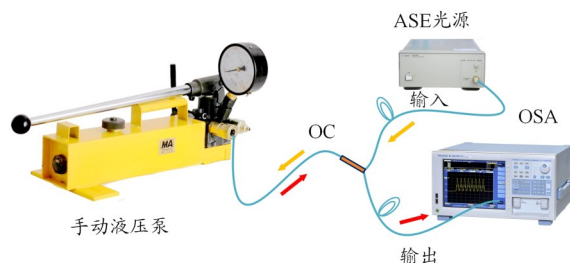


图4 压力标定实验装置图

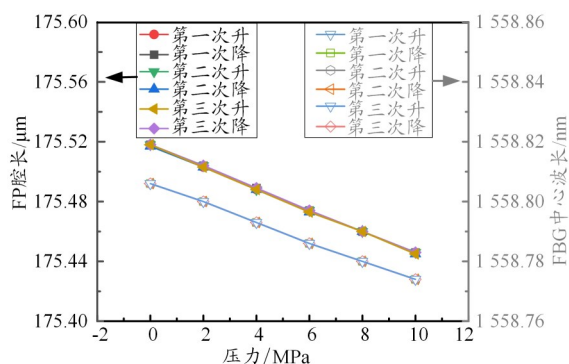
通过手动液压泵对所设计的传感器施加压力,压力变化范围为 0~10 MPa,步长为 2 MPa。ASE 发射的宽带光被注入到传感器,随后通过光环行器路由到 OSA。实验时,在每个测试点压力均保持 5 min,待各压力段下压力及传感器稳定后,用 OSA 记录传感器的反射光谱。因为测试的持续时间短暂,所以室温保持不变。为了证明所设计传感器的可重复性,实验进行了 3 次(增加后降低压力),得到的标定数据如图 5(a) 所示。对标定数据进行线性拟合,拟合曲线的压力系数即为压力灵敏度,拟合图如图 5(b) 所示。可以看出,在 0~10 MPa 的压力范围内,本文设计的传感器的 FP 腔长和 FBG 波峰均随压力呈线性变化。FBG 中心波长 λ_{FBG} 的压力拟合曲线为

$$\lambda_{\text{FBG}} = -3.24 \times 10^{-3} P + 1558.806 \quad (7)$$

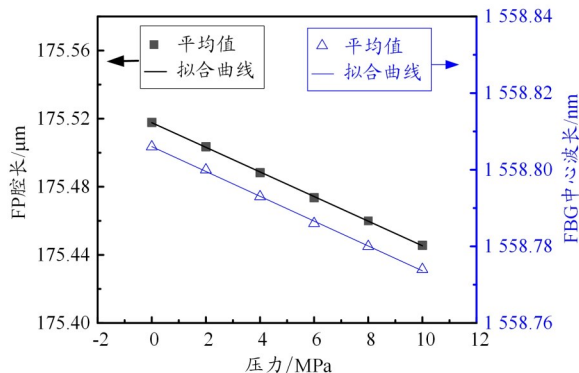
该拟合曲线的线性相关系数为 0.999 04,压力系数为 -3.24 pm/MPa。FP 腔长的压力拟合曲线为

$$L = -7.23 \times 10^{-3} P + 175.518 \quad (8)$$

该拟合曲线的线性相关系数为 0.999 78,压力系数为 -7.23 nm/MPa。



(a) 压力标定数据图



(b) 压力标定数据线性拟合图

图5 压力标定实验数据图

3.2 温度标定实验

为了研究该传感器的温度传感特性,本文构建了一个温度校准实验装置,如图 6 所示。该装置包括 ASE、OSA、OC 器件(与图 5 使用相同),以及 1 个精密温控箱(H/GDWJS-408L,上海沪升仪器设备有限公司),该温控箱能在 -70~150 °C 内工作。此外,采用高精度热电偶温度传感器(HT-9815,中国)作为实际温度参照,实验时热电偶和制造的传感器在温度控

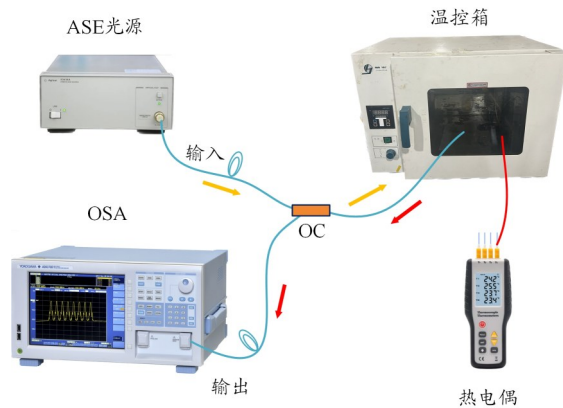


图6 温度标定实验装置

赵向荣,李瑞亚,韩乐强,等:用于滑动轴承油膜温度压力检测的光纤EFPI-FBG复合传感器

制器内的位置相同。

传感器周围的温度以20℃的步长从-40℃逐渐升高到120℃。每种温度段保持15 min,直到热电偶的温度读数及传感器稳定后,通过OSA记录所设计传感器在各温度阶跃下的反射光谱,如图7(a)所示。经过光谱处理,绘制出FBG中心波长和FP腔长随温度变化的线性拟合曲线,拟合曲线的温度系数即为温度灵敏度,拟合图分别如图7(b)和图7(c)所示。

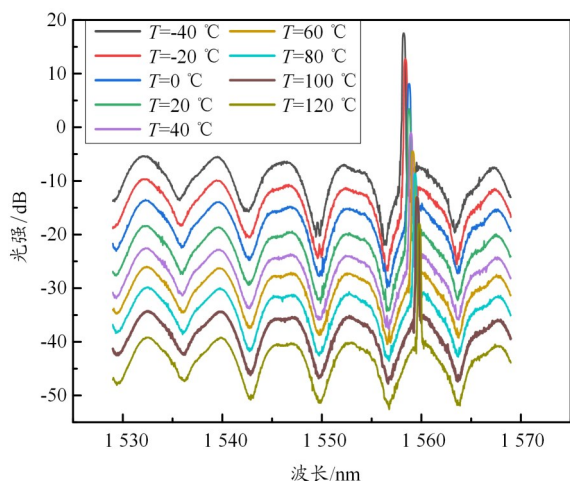
实验结果表明,在-40~120℃,本文所设计的光纤传感器的FP腔长和FBG波峰均随温度呈线性变化。

FBG中心波长的温度拟合曲线为

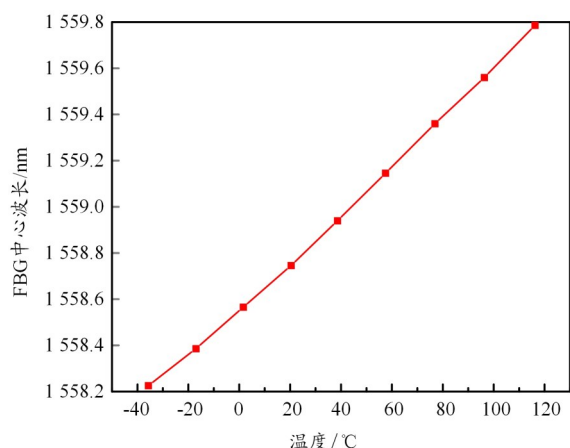
$$\lambda_{\text{FBG}} = 10.35 \times 10^{-3}T + 1558.56 \quad (9)$$

该拟合曲线的线性相关系数为0.998 68,温度系数为10.35 pm/℃。FP腔长的温度拟合曲线为

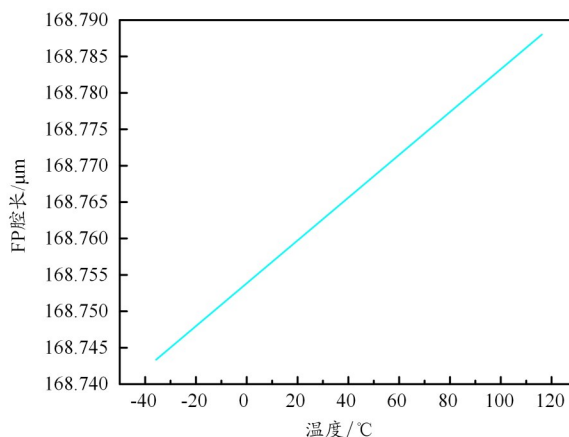
$$L = 2.941 \times 10^{-4}T + 168.754 \quad (10)$$



(a) 不同温度下的光谱



(b) FBG中心波长随温度变化的线性拟合曲线



(c) 腔长随温度变化的线性拟合曲线

图7 温度标定实验数据图

该拟合曲线的线性相关系数为0.984 19,温度系数为0.294 1 nm/℃。

结合压力、温度标定实验结果和式(6),光纤EFPI-FBG复合传感器与外界环境参量之间的实际关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.24 & 10.35 \\ -7.23 & 0.2941 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (11)$$

4 结束语

针对滑动轴承油膜压力温度测量,本文设计了一种光纤EFPI-FBG的复合传感器,制定了复合传感器的制备流程和封装方法,并建立了温度与压力的解耦矩阵。通过实验研究,验证了所设计的复合传感器可同时测量滑动轴承油膜的温度和压力2种物理量。从实验结果可知,在0~10 MPa的压力量程范围内,光纤EFPI-FBG复合传感器的FBG中心波长和FP腔长都随压力呈线性变化,压力灵敏度分别为-3.24 pm/MPa和-7.23 nm/MPa;同时,在-40~120℃的温度量程内,FBG中心波长和FP腔长也随温度呈线性变化,温度灵敏度分别为10.35 pm/℃和0.294 1 nm/℃。

本文所设计的传感器体积小、测量精度高、抗电磁干扰能力强。此外,该传感器还展现了极高的稳定性和一致性,无论是短期还是长期监测都可以确保数据的可靠性。未来,该传感器的性能还有一定的提升空间,例如可通过选择更耐高压的FP腔结构,进一步提升油膜压力的测量范围;通过温度与压力的大数据模型,进一步优化灵敏度准确性。综上所述,此款传感器有望为滑动轴承油膜状态监测提供新的技术途径和解决策略。

参考文献:

- [1] 代菁洲,田凌,韩天霖.滑动轴承磨损智能诊断与寿命预测方法研究[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(12):2092-2104.
- [2] 崔淑慧.重载高速径向滑动轴承启停涂层磨损与滑移热特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [3] Wang Nan, Meng Qingfeng, Wang Pengpeng, et al. Experimental research on film pressure distribution of water-lubricated rubber bearing with multiaxial grooves[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(8): 084501.
- [4] Yang S H, Kim C, Lee Y B. Experimental study on the characteristics of pad fluttering in a tilting pad journal bearing[J]. Tribology International, 2006, 39(7): 686-694.
- [5] Ikeda K, Hirano T, Yamashita T, et al. An experimental study of static and dynamic characteristics of a 580 mm (22.8 in.) diameter direct lubrication tilting pad journal bearing[J]. Journal of Tribology, 2006, 128(1): 146-154.
- [6] Ahmad M A, Kasolang S, Dwyer-Joyce S R. Experimental study on the effects of oil groove location on temperature and pressure profiles in journal bearing lubrication[J]. Tribology International, 2014, 74: 79-86.
- [7] Cabrera D L, Woolley N H, Allanson D R, et al. Film pressure distribution in water-lubricated rubber journal bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2005, 219(2): 125-132.
- [8] Binu K, Yathish K, Mallya R, et al. Experimental study of hydrodynamic pressure distribution in oil lubricated two-axial groove journal bearing[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 3453-3462.
- [9] Mansoor Y, Shayler P. The effect of oil feed pressure on the friction torque of plain bearings under light, steady loads[J]. Tribology International, 2018, 119: 316-328.
- [10] Glavatskih S B. A method of temperature monitoring in fluid film bearings[J]. Tribology International, 2004, 37(2): 143-148.
- [11] Lawson N J, Correia R, James S W, et al. Development and application of optical fibre strain and pressure sensors for in-flight measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(10): 104001.
- [12] Kapulainen M, Ronkainen H, Hokkanen A, et al. Fibre optic sensors for long-term monitoring of oil film pressure in diesel engine main bearing[J]. Tribology Letters, 2014, 56(1): 47-54.
- [13] Mu Boxin, Qu Ruixuan, Tan Tao, et al. Fiber bragg grating-based oil-film pressure measurement in journal bearings[J]. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1575-1581.
- [14] Liu Hu, Yu Qiang, Tan Yuegang, et al. Feasibility study on temperature distribution measurement method of thrust sliding bearing bush based on FBG quasi-distributed sensing[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3245.
- [15] Jiang Yi. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic fabry-pérot interferometric sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [16] 彭星玲. 金属化单模光纤宏弯损耗特性研究[D].南昌:南昌大学, 2015.