

引文格式: 李天梁, 温宇航, 张奥, 等. 一种基于“8”型弹簧结构的高温大应变光纤传感器[J]. 航空制造技术, 2025, 68(17): 34-41.

LI Tianliang, WEN Yuhang, ZHANG Ao, et al. A high-temperature large-strain optical fiber sensor based on “8” shaped spring structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(17): 34-41.

一种基于“8”型弹簧结构的高温大应变光纤传感器*

李天梁, 温宇航, 张奥, 王念

(武汉理工大学, 武汉 430070)

[摘要] 集成金属3D打印技术、光纤金属化与激光焊接制备-封装工艺,设计了一款低刚度、大量程的高温大应变光纤传感器,以解决航空发动机涡轮叶片热力参量难监测的问题。所设计的传感器采用光纤光栅(FBG)波长-光强混合解调方式,实现对温度与应变的精准测量。通过对带有凹槽的“8”型弹簧衬底进行理论建模、有限元仿真与结构优化,将传感器对待测结构的反作用力降低至167 N/ε。试验表明,该传感器可实现37520 με大量程应变测量,在室温~500℃范围内温度线性度达0.9878,同时温度与应变成解耦性能良好,最大误差小于8%。这些优异特性证明了所设计的传感器在航空发动机涡轮叶片高温-应变监测方面具有良好的应用前景。

关键词: 涡轮叶片; 温度-应变测量; 光纤光栅; 金属3D打印; 波长-光强混合解调

中图分类号: V232; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.17.034



李天梁

教授, 博士生导师, 研究方向为先进光纤传感技术、机械装备动态监测、手术机器人。

航空发动机作为现代工业技术集成的尖端装备,被誉为飞行器的“心脏”。其涡轮叶片作为现代动力系统的核心热端部件,长期承受高温、复杂气动载荷及高周疲劳等多场耦合作用^[1]。相关研究表明,涡轮叶片在高温蠕变与热机械疲劳共同作用下产生的微裂纹和塑性形变,将会导致发动机推重比衰减、热效率下降,甚至飞行事故^[2-5]。因此,对航空发动机涡轮叶片温度、应力-应变等参数的实时监测提出了迫切需求^[6-7]。

传统的电磁类传感器广泛应用于航空发动机的结构健康监测,按测量物理量可分为温度^[8]、应变^[9]、振动^[10]、转速^[11]、湿度^[12]等类型。但在复杂工况下存在布线复杂、抗电磁干扰能力弱等缺陷。相比之下,光纤

传感器凭借安全性高、尺寸小、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、易于复用组网等独特优势,展现出广阔的应用前景^[13-14]。东南大学刘长媛团队设计的双状态光纤光栅应变传感器可实现聚合物板件18923 με应变量程的测量,但存在量程饱和后无法测量小应变、封装复杂耗时等问题^[15];大连理工大学Wang等^[16]采用双蛇形弹簧结构与光纤串联的方式,将待测结构大应变转换到光纤光栅的小应变,以此实现10000 με测量,但传感器300 mm以上的长度难以满足叶片表面安装的空间约束,且影响结构测量精度。可见现有方案普遍存在衬底尺寸大、制备封装复杂等显著问题,并且忽略了衬底刚度对待测结构应变感知的影响^[17],难以适配航空发

* 基金项目: 国家自然科学基金(52275541); 湖北省重点研发计划(2024BCB056)。

动机涡轮叶片的应变监测需求。

此外,光纤-衬底连接可靠性是涡轮叶片温度监测的关键挑战。当光纤传感器贴在涡轮叶片表面进行实时温度监测时,其与衬底的连接可靠性也对温度感知性能有着重要影响。例如,武汉理工大学 Li 等^[18]采用环氧树脂胶粘合光纤的封装方式设计了一种双光纤温度-应变传感器,因胶黏剂自身的耐热性有限,只能在 70 °C 范围内正常工作。为了提高传感器温度测量上限,大连理工大学 Shen 等^[19]通过锡焊工艺将镀锡 FBG 与金属基板紧密连接,使温度量程提高至 280 °C,但锡焊连接的操作受人为操作影响,可重复性较差。上述两类方案暴露出传统连接方式的热稳定性不足与工艺可控性差的缺陷。因此,发展耐高温、易操作、可重复的光纤-衬底连接技术成为突破温度测量可靠性的关键。

针对上述传感器封装工艺复杂、衬底刚度高及光纤-衬底连接耐热性差等问题,本研究开发了一款“8”型高温大应变光纤传感器。衬底采用“8”型结构设计,具有刚度低、量程大的优势;衬底采用金属 3D 打印加工以提高制造效率,并结合光纤金属化与激光焊接工艺,实现了光纤与衬底的刚性连接,克服了传统胶粘和锡焊连接方式所带来的耐热性差、可操作性差等问题。通过对所设计的传感器进行温度-应变的静态特性、动态响应、交叉耦合及耐高温等测试,证明了该传感器能够为涡轮叶片的结构健康监测提供可靠的温度-应变测试手段,具有重要的应用前景和实际价值。

1 “8”型传感器设计

1.1 传感器温度-应变测量原理

为了准确映射传感器光强与应变的关系,本研究提出双 FBG 串联结构,如图 1 (a) 所示。FBG1 光强变化源于光源功率波动及传输光纤

的弯曲扰动,而 FBG2 光强波动耦合了 FBG1 光强变化与两 FBG 间的光纤弯曲导致的光强变化,两者光强差可有效测量应变。根据 Marcuse 原理^[20],光纤弯曲损耗系数 α 可表示为

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}U^2}{e_v W^2 \sqrt{dV^2} K_{v-1}(W) K_{v+1}(W)} \times \sqrt{\frac{1}{R} e^{-\frac{2W^2 R}{3d^3 \beta^2}}} \quad (1)$$

式中, R 为光纤弯曲半径; K_v 为 Bessel 函数; 在单模光纤的弯曲损耗计算中, e_v 作为 Bessel 函数的系数,常被取值为 2; d 为纤芯直径; β 为光纤基模的传播常数,值为 $d \cdot \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$; W 是归一化径向常数,值为 $d \cdot \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}$; V 是归一化频率,值为 $d \cdot k \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$,其中 n_1 、 n_2 分别为纤芯折射率和包层折射率, k 为真空中的波数。

假设传感器初始状态下的 FBG1 和 FBG2 的反射光强分别为 I_1 和 I_2 ,

传感器内的光纤在未嵌入衬底且无弯曲时反射光强为 I_{01} 和 I_{02} 。两个 FBG 的光强与传感器在不受外力作用时的弯曲损耗关系可表示为

$$I_{02} - I_2 = \phi \cdot 2\pi r \cdot \alpha_r + (I_{01} - I_1) \quad (2)$$

式中, ϕ 为弯曲光纤段长度所占整个圆弧周长的比例; α_r 为传感器初始状态下光纤弯曲半径为 r 时的弯曲损耗系数。

当传感器被拉伸 ΔL 时,设此时光纤弯曲半径为 R , 光强损耗系数为 α_R , 此时 FBG1 和 FBG2 的峰值光强分别为 I_{1x} 和 I_{2x} , 结合式 (1) 和 (2), 可得光强损耗 ΔI 与弯曲半径 R 的关系为

$$\Delta I = (I_{2x} - I_2) + (I_1 - I_{1x}) = \phi \cdot 2\pi r \cdot \alpha_r - \phi \cdot 2\pi R \cdot \alpha_R \quad (3)$$

根据上述光强弯曲损耗理论,提出一种“8”型弹簧衬底传感器,如图 1 (b) 所示。依据变形协调方程,可得 1/4 圆环弯曲光纤端 x 方向的伸长量 ΔL_1 和直段光纤 x 方向的伸长量 ΔL_2 , 分别表达为

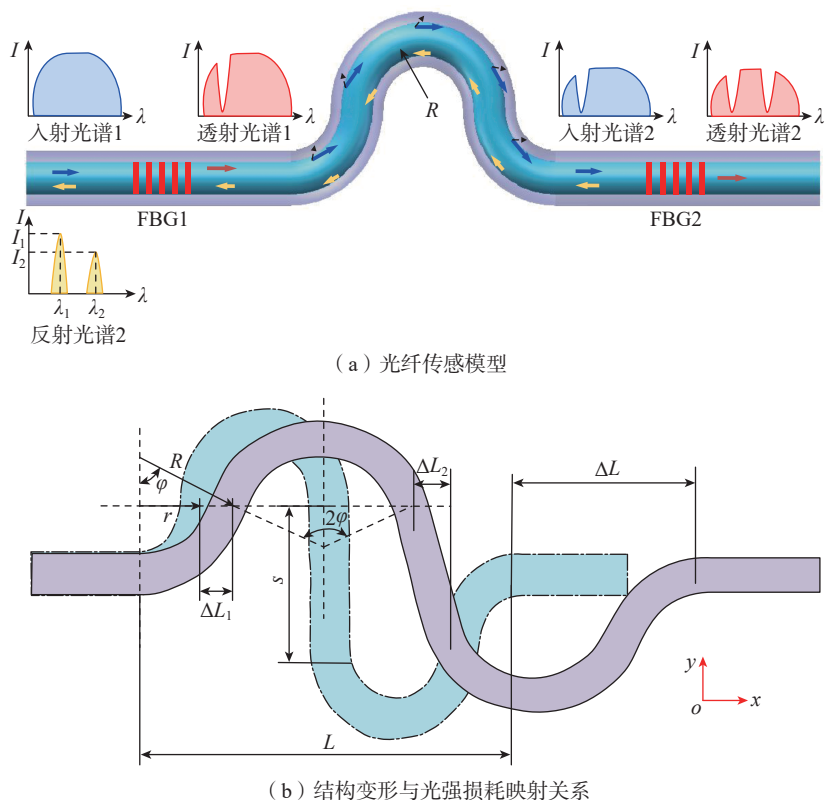


图 1 “8”型弹簧结构的光纤温度-应变传感原理

Fig.1 Principle of temperature-strain sensing of “8” shaped structure

$$\begin{cases} \Delta L_1 = R \sin \varphi - r \\ \Delta L_2 = 2R \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中, s 为直段衬底长度 $2r$; φ 为弯曲后 1/4 圆环夹角, 计算公式为 $\varphi = \frac{\pi r}{2R}$ 。

根据衬底结构几何关系, 衬底应变与弯曲半径关系式可表示为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{6R \sin \frac{\pi r}{2R} - 6r + 2R \cdot \cos \frac{\pi r}{2R}}{L} \quad (5)$$

式中, L 和 ΔL 分别为传感器传感区域 x 方向总长度与总长度变化量。

结合式 (1)、(3) 和 (4), 可得

$$\Delta I = \frac{3\pi r \sqrt{\pi} U^2}{e_v W^2 \sqrt{dV^2} K_{v-1}(W) K_{v+1}(W)} \times \left(\sqrt{\frac{1}{r} e^{-\frac{2W^3 r}{3d^3 \beta^2}}} - \sqrt{\frac{1}{R} e^{-\frac{2W^3 R}{3d^3 \beta^2}}} \right) \quad (6)$$

式 (5) 和 (6) 都是关于弯曲半径 R 的函数, 由此求解应变 ε 与光强损耗 ΔI 的映射关系。

此外, FBG 中心波长与温度变化量成正比关系, 采用两串联 FBG1 和 FBG2 中心波长均值感知环境温度值, 可表示为

$$\begin{cases} \Delta \lambda_1 = \lambda_1 (\zeta_f + \alpha_f) \Delta T \\ \Delta \lambda_2 = \lambda_2 (\zeta_f + \alpha_f) \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

式中, ζ_f 为热膨胀系数; α_f 为热光系数; λ_1 、 λ_2 分别表示 FBG1 和 FBG2 中心波长; $\Delta \lambda_1$ 和 $\Delta \lambda_2$ 分别为 FBG1 和 FBG2 的中心波长漂移量。

综合式 (5)~(7) 可知, 温度-应变与波长-光强的映射关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_T \\ K_\varepsilon & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (\Delta \lambda_1 + \Delta \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \\ \Delta I_1 - \Delta I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, K_ε 为传感器应变灵敏度系数; K_T 为传感器温度灵敏度系数。

1.2 衬底结构设计与优化

当金属衬底安装在被测结构表面时, 衬底的刚度会引入约束反力来影响被测结构变形。为了降低并量化该影响, 定义影响因子为 q , 建立 x 方向外载荷 F 与影响因子 q 之间的

映射关系, 其中 $q = F/\varepsilon$ 。如图 2 (a) 所示, 基于材料力学能量法原理, 首先通过单位载荷法分析求解各梁单元的内力分布, 继而运用莫尔积分

$$\Delta L = \int_0^\pi \frac{F_n(\theta) \bar{F}_n(\theta)}{EA} R d\theta + \int_0^\pi \frac{M(\theta) \bar{M}(\theta)}{EI} R d\theta, \text{ 可知结构在 } x \text{ 方向的总变形为}$$

$$\Delta L = \frac{FR}{EA} \left(\frac{3\pi}{4} + \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) + \frac{FR^3}{EI} \times \left(\frac{7\pi}{4} + 4 + \frac{1}{3\cos \theta} \right) \quad (9)$$

式中, A 为横截面, 值为 bh ; I 为惯性矩, 值为 $\frac{h^3 b}{12}$ 。

衬底传感段总长 L 可表示为

$$L = 6R - 2R \tan \theta \quad (10)$$

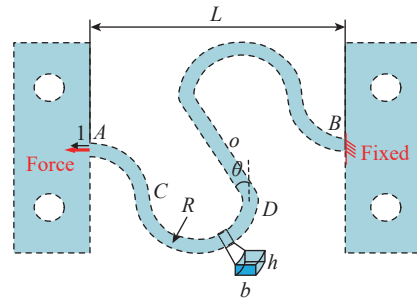
结合式 (9) 和 (10), 可得出影响因子 q 为

$$q = \frac{FL}{\Delta L} = \frac{6 - 2 \tan \theta}{\frac{1}{Ehb} \left(\frac{3\pi}{4} + \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) + \frac{R^2}{E} \left(\frac{7\pi}{4} + 4 + \frac{1}{3\cos \theta} \right)} \quad (11)$$

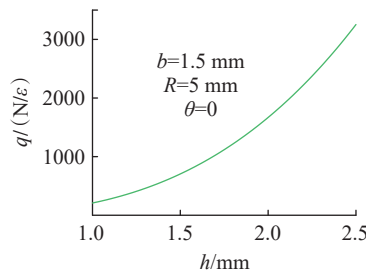
在传感器衬底结构优化设计中, 根据实际需求设置多目标约束条件

$$\begin{cases} \theta \in [0, \pi/4] \\ b, h \in [1, 2.5] \\ R \in [5, 6] \end{cases}$$

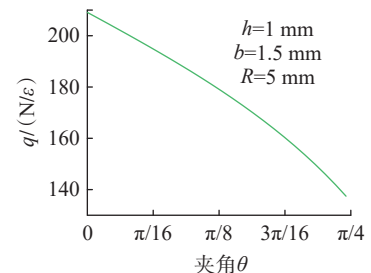
分析各个尺寸对影响因子 q 的影响以实现最优尺寸组合。基于表 1 的衬底尺寸初始值, 结合图 2 (b)~(e) 单约束分析可知, 随着衬底高度 h 和衬底横截面宽度 b 的增大, 传感器的影响因子 q 会增大; 而随着夹角 θ 和衬底弯曲半径 R 的增大, 影响因子 q 则会减小。这表明衬底刚度调节需要多参数协同优化。将衬底



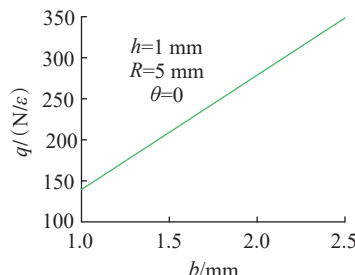
(a) 衬底构型图



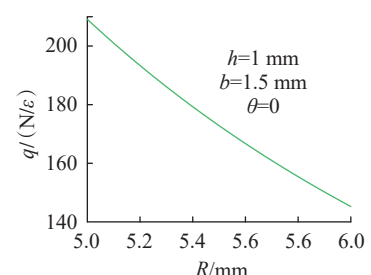
(b) 衬底高度



(c) 衬底夹角



(d) 衬底横截面宽度



(e) 衬底弯曲半径

图 2 “8”型弹簧衬底 q 值分析与优化

Fig.2 Analysis and optimization of q value for the “8” shaped spring substrate

高度设定为 1.1 mm；同时，为了后续更好地嵌入金属化光纤，并确保光纤在弯曲时不易折断，将衬底夹角设定为 $\pi/6$ ，衬底半径设定为 5.5 mm，衬底横截面宽度设定为 1.5 mm。

1.3 铝合金材料性能测试

本研究采用金属粉末成型的 3D 打印设备 HBD-350T (广东汉邦激光科技有限公司)，采用铝合金 (AlSi10Mg) 粉末制备传感器衬底结构。该方法有利于快速制备成形，但由于材料的成形方式不同导致其致密性和残余应变数值存在差异，材料性能需要重新标定以修正传统机械加工下铝合金材料的理论参数。因此，采用万能试验机 DNS100 (长春机械院) 对金属 3D 打印加工的标准拉伸试样进行拉伸测试，以获取衬底材料准确的弹性模量、屈服强度等材料属性。如图 3 (a) 所示，对同一试样进行 3 次拉伸测试与对 3 个不

同试样进行拉断测试，并以 10 Hz 采样率记录拉伸过程中力与拉伸距离数据，通过标准拉伸件的尺寸参数换算为应力-应变关系曲线。测试结果如图 3 (b) 和 (c) 所示，可知，材料平均弹性模量为 68.57 GPa，材料的屈服强度与抗拉强度分别为 225 MPa、350 MPa。

1.4 衬底有限元仿真分析

根据上述优化分析所得传感器衬底参数及拉伸试验获取的材料力学性能数据，在 SOLIDWORKS 三维建模平台中构建了衬底结构的实体模型，如图 4 (a) 所示。在 ANSYS Workbench 环境中开展有限元仿真模拟时，采用 0.25 mm 精度的四面体单元对衬底结构进行网格离散化处理，并在两侧加载孔分别设置固定约束边界条件和 5.5 N 轴向载荷，如图 4 (b) 所示。有限元仿真结果图 4 (c) 和 (d) 显示，衬底横向应变

为 34446.52 $\mu\epsilon$ ，对应结构影响因子 q 值约为 167 N/ ϵ ，证明了该衬底结构具有优异的低刚度特性^[17]；同时衬底结构最大等效应力峰值为 214.52 MPa，相较于材料屈服强度有 4.88% 的安全裕度，满足强度需求。

2 “8”型传感器封装

基于两段抗弯布拉格光纤光栅与 60 mm 非抗弯单模光纤的级联熔接结构，构建了抗传输段光纤弯曲扰动的传感单元，如图 5 (a) 所示。通过涂敷层、活化、敏化、化学镀和电镀等工序实现光纤表面金属化处理。图 5 (b) 和 (c) 分别展示了化学镀和电镀后的金属化光纤表面质量和镀层直径。金属化光纤弯曲嵌入“8”型衬底后，再使用激光点焊机将金属化光纤刚性连接在衬底上，得到图 5 (d) 所示的传感器实物。该传感器嵌入前后光谱如图 5 (e) 和 (f) 所示，光纤传感器在弯曲嵌入前的初始光谱呈现为两个 FBG 光谱的叠加状态，但左峰光强弯曲损耗大，致使其被右峰底噪所掩盖。针对衬底嵌入引发的光谱畸变问题，采用光纤两端均接入同一解调仪的策略，使传感器光谱从 I 转变为 II，呈现出反射谱与透射谱叠加的“一峰一谷”特征。进一步优化波长-光强混合解调方式，温度和应变分别采取峰值对应的中心波长、峰值到底噪高度

表 1 “8”型衬底结构优化前后尺寸

Table 1 Dimensions of “8” shaped substrate structure before and after optimization

尺寸名称	初始	优化后
衬底夹角 θ	0	$\pi/6$
衬底弯曲半径 R/mm	5	5.5
衬底高度 h/mm	1	1.1
衬底横截面宽度 b/mm	1	1.5
传感部分长度 L/mm	30	26.65

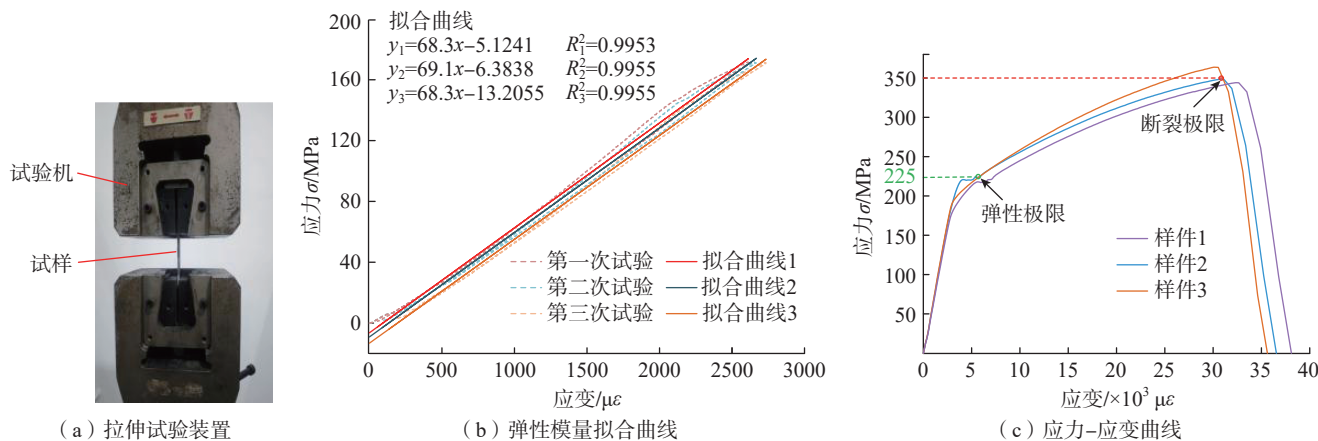


图 3 铝合金材料机械性能测试

Fig.3 Mechanical property testing of aluminum alloy materials

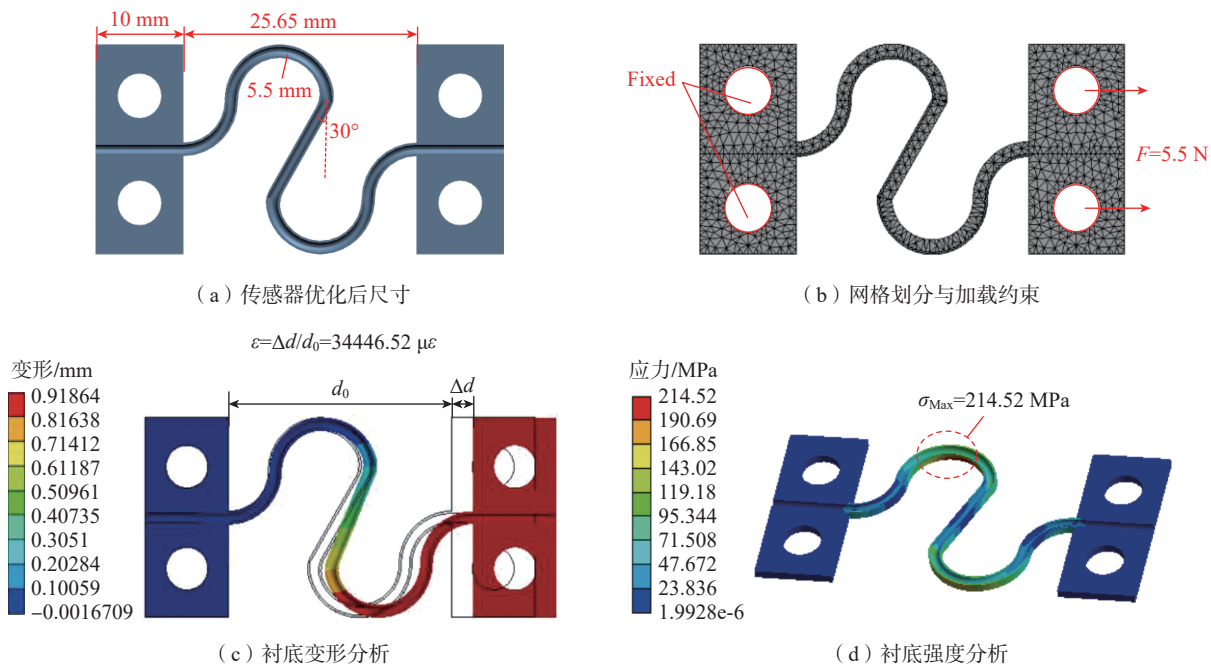


图4 “8”型传感器衬底有限元仿真分析
Fig.4 Finite element simulation analysis of “8” shaped substrate

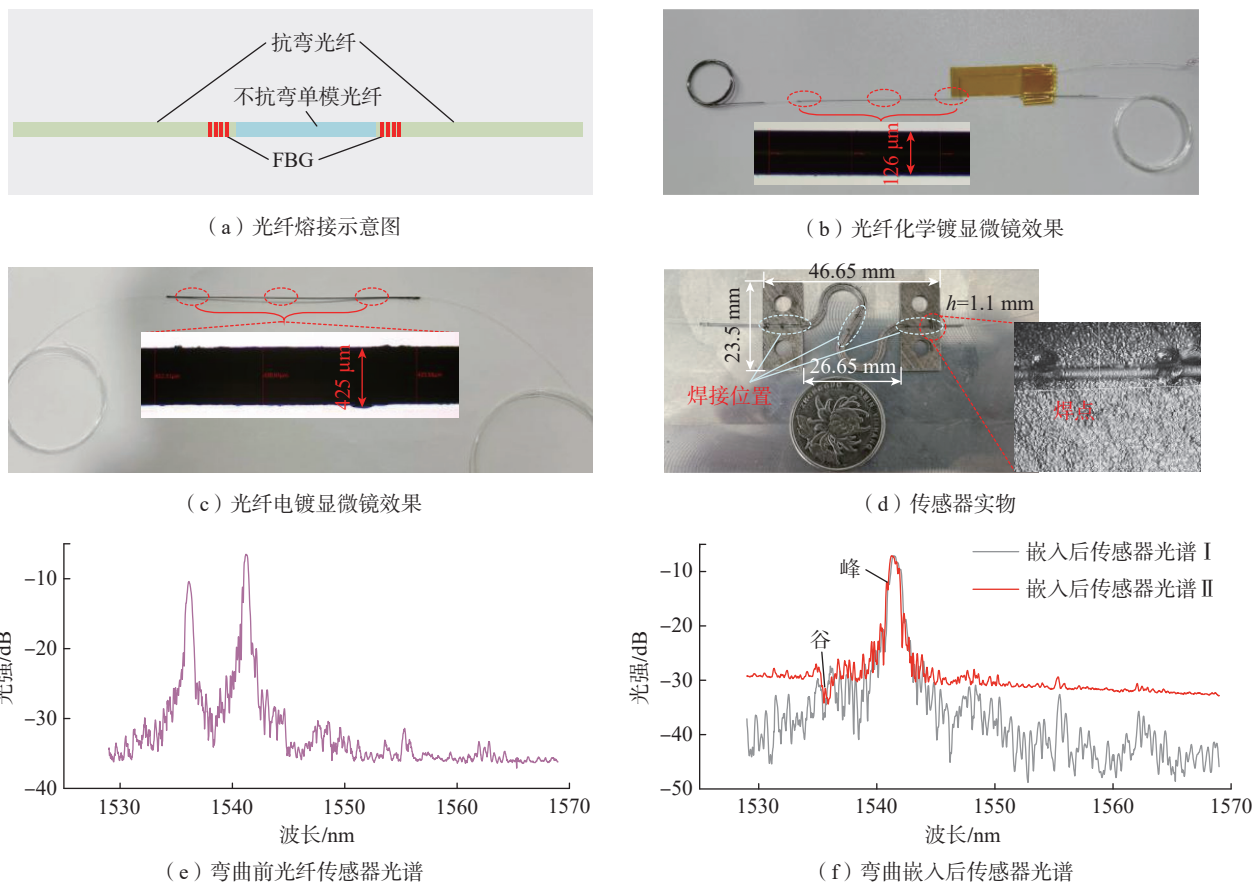


图5 “8”型传感器封装流程
Fig.5 Fabrication process of “8” shaped sensor

来分离解调。

3 “8”型传感器的性能测试试验

3.1 温度-应变试验平台构建

为了评估“8”型传感器性能,本研究搭建了温度-应变复合试验平台,具体试验装置如图6所示。将研制好的“8”型传感器通过金属夹具与衬底安装孔相连,并以螺纹连接至步进电机加载孔上,以实现紧密装配;将管式炉 OTF-1200X-S 的加热部分移动至传感器的正上方;在传感器附近放置热电偶 TA612(特安斯公司),作为试验过程中的温度参考;同时,将位移传感器的探测点 LK-H008(基恩士公司)置于步进电机右侧,将分析计算电机加载端的位移作为应变参考;采用解调仪 OPM-T1620(武汉高思光电科技有限公司)采集“8”型传感器的光谱数据。

3.2 温度-应变试验结果与分析

3.2.1 应变标定与动态响应分析

如图7所示,控制步进电机在0~1 mm (37520 $\mu\epsilon$) 范围内,以0.1 mm (3752 $\mu\epsilon$) 的增量施加应变,并在每个应变点保持10 s,随后以相同的步骤逐步卸载至0。往复进行3次试验,采集每步的光谱与参考位移数据绘制了图7(a)所示的应变静态标定曲线。可以看出,传感器在0~37520 $\mu\epsilon$ 的应变量程范围内,线性度为0.9954,重复度与迟滞性误差分别为0.77%和7.47%,证明了该传感器具有良好的线性度与重复度。如图7(b)所示,调整步进电机程序,使传感器在0~37520 $\mu\epsilon$ 范围内往复受载,并与参考位移传感器实时对比,以验证其在室温下应变动态响应特性。试验结果表明,所设计的传感器在满量程下的最大误差为7.41%。

3.2.2 温度标定与动态响应分析

为了验证所设计传感器的温度响应特性,确保其测量准确性和可靠性,以50 $^{\circ}\text{C}$ 为间隔,进行了3次从室

温(25 $^{\circ}\text{C}$)~200 $^{\circ}\text{C}$ 的温度标定试验,如图8(a)所示,获得了光纤光栅的中心波长随温度变化曲线。可知,光栅中心波长与温度呈良好的线性关系,相关系数为0.9983,计算得到其温度灵敏度为13.85 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,重复度

误差为7.75%。如图8(b)所示,调整管式炉程序,控制温度在室温(25 $^{\circ}\text{C}$)~200 $^{\circ}\text{C}$ 内进行动态测试,并与参考热电偶实时对比。试验结果表明,所设计的传感器在满量程下的最大误差为5.92%,证明了该传感器良好



图6 “8”型传感器温度-应变试验平台

Fig.6 Temperature-strain experimental platform of the “8” shaped sensor

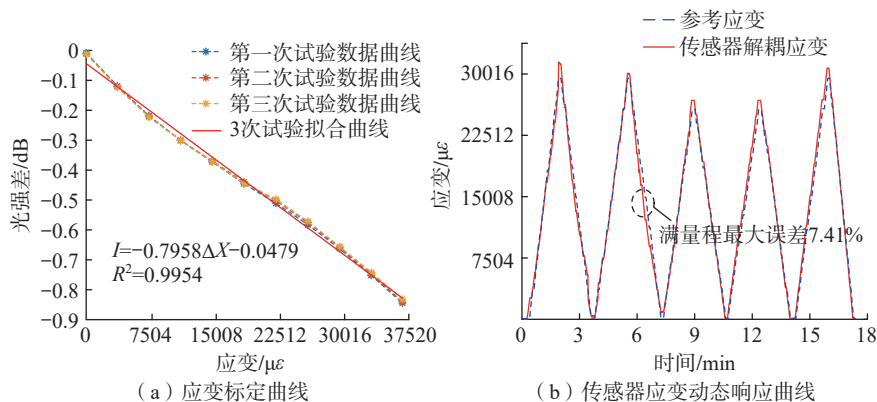


图7 “8”型传感器应变静态标定与动态响应结果

Fig.7 Strain static calibration and dynamic response results of the “8” shaped sensor

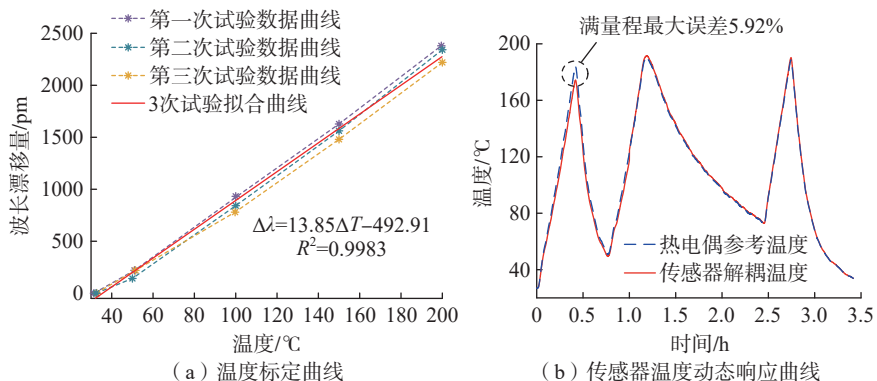


图8 “8”型传感器温度标定与动态响应结果

Fig.8 Temperature calibration and dynamic response results of “8” shaped sensor

的温度动态响应特性。

3.2.3 温度-应变耦合试验分析

为了验证所设计传感器的实际温度-应变解耦测量能力,在变温环境下对传感器往返施加载荷,同时采集热电偶、位移传感器及解调仪数据。采用极限学习机模型对所采集的数据划分为8:2的训练集与测试集进行训练,设置极限学习机隐藏层节点数为500,激活函数选用具有计算效率高、泛化能力强等优势的ReLU。从图9可知,该传感器解耦温度应变效果良好,温度与应变最大误差分别为7.97%和7.99%。

3.2.4 传感器耐热性分析

耐热性能优劣是衡量应用于航空领域传感器的重要指标,本研究结合激光焊和光纤镀膜技术,可将传感器连接处耐热温度提高至1455℃^[21]。然而铝合金衬底强度在535℃以上时受温度影响较大^[22],因此验证传感器在室温~500℃的耐热性能。从图10可以看出,该传感器可耐受500℃高温,其室温~500℃高温的加载拟合曲线的拟合度为0.9878,具有较好

的线性度。此外,最大偏差为3.88%,出现在250℃。

4 结论

(1)在结构设计与优化方面,本文综合运用材料力学理论建模、ANSYS Workbench有限元仿真以及MATLAB结构优化等手段,研制出一种低刚度、尺寸紧凑的“8”型弹簧衬底。该衬底结构尺寸优化至46.65 mm×23.5 mm×1.1 mm,影响因子 q 值降低至167 N/ ϵ ,显著降低了金属衬底对被测结构形变的影响。

(2)在传感器制备-封装工艺方面,采用金属3D打印技术制备带嵌纤凹槽的铝合金衬底,结合光纤金属化与激光焊接工艺,实现了光纤传感器的无胶刚性封装。耐热性测试表明,该传感器可在室温~500℃范围内正常工作,最大偏差为3.88%,线性拟合度高达0.9878,为解决航空发动机涡轮叶片等热力承载部件的健康监测提供了有效手段。

(3)在信号解调机制方面,采用双FBG波长-光强混合解调方式求

解温度与应变。通过构建光强损耗与应变测量模型,将应变测量量程扩展37520 $\mu\epsilon$,并且FBG波长可精确映射环境温度。

(4)在温度-应变解耦方面,基于计算效率高、泛化能力强的极限学习机构建温度-应变解耦模型,并在变温环境下对所设计的传感器加载多种波形载荷测试,结果表明,温度和应变最大解耦误差分别为7.97%和7.99%。

参考文献

[1] 邵飞,杨宁,孙维,等.基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J].航天器工程,2018,27(2):95-103.
SHAO Fei, YANG Ning, SUN Wei, et al. Research on spacecraft structural health monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(2): 95-103.
[2] ZHANG S L, ZHANG Z Y, WANG Y, et al. Design and performance verification of thermal protection structure of high temperature probe in aeroengine[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123745.
[3] HAN F, WANG L Y, ZHANG S H, et al. Experimental investigations on the heat transfer characteristic of impingement/swirl cooling structures inside turbine blade leading edge[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 150: 107197.
[4] YAO K. Integrated optical fiber sensor for simultaneous monitoring of temperature, vibration, and strain in high temperature environment[D]. Sydney: University of New South Wales, 2022.
[5] 吴学岗.航空发动机涡轮叶片动应力测量技术研究[D].成都:电子科技大学,2018.
WU Xuegang. Research on dynamic stress measurement technology of aero engine turbine

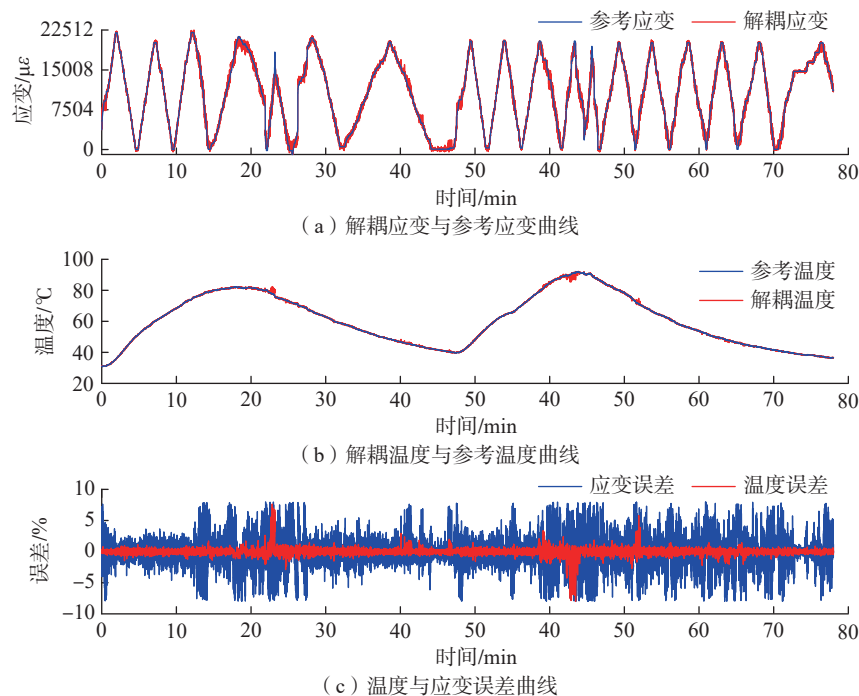


图9 “8”型传感器解耦效果

Fig.9 Decoupling effect of “8” shaped sensor

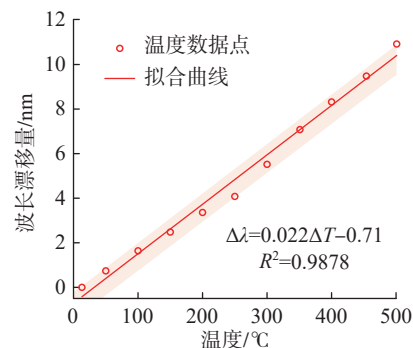


图10 “8”型传感器耐热性测试

Fig.10 Heat resistance test of “8” shaped sensor

blade[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

[6] BEREXA E K, FELLS J A J, IRELAND P T. Viability of fiber optic temperature sensors embedded within engine-scale turbine blades[C]//Volume 4: Controls, Diagnostics, and Instrumentation. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2023: V004T05A008.

[7] CUI Y, QIU K X, GAO S, et al. Advances in the application of non-contact temperature measurement technology for aero-engine blade[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(8): 081502.

[8] EL-AHMAR S, JANKOWSKI J, CZAJA P, et al. Magnetic field sensor operating from cryogenics to elevated temperatures[J]. IEEE Sensors Letters, 2023, 7(8): 2501904.

[9] ZHAO Y C, LI Y H, WU Y J, et al. High-temperature PdCr thin-film strain gauge with high gauge factor based on cavity structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(7): 9573–9584.

[10] ZHAO H F, SHU M R, AI Z H, et al. A highly sensitive triboelectric vibration sensor for machinery condition monitoring[J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(37): 2201132.

[11] LI C, FENG Q Y, JIA M G, et al. Accurate real-time temperature measurement method in ultra-high temperature rotational environments for aero engines/turbines[J]. IEEE

Sensors Journal, 2022, 22(7): 6482–6490.

[12] TRIPATHY A, SHARMA P, PRAMANIK S, et al. Armalcolite nanocomposite: A new paradigm for flexible capacitive humidity sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(13): 14685–14692.

[13] ROVERA A, TANCAU A, BOETTI N, et al. Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2512.

[14] NOSSEIR A E S, SLEJKO E A, CERVONE A, et al. Composite structures with embedded fiber optic sensors: A smart propellant tank for future spacecraft applications[J]. Acta Astronautica, 2024, 223: 144–158.

[15] LIU C Y, WANG X, CHANG X Q, et al. Innovative design and sensing performance of a novel large-strain sensor for prestressed FRP plates[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 20: 100567.

[16] WANG G, WANG J J, MENG J, et al. Design, calibration, and application of a wide-range fiber Bragg grating strain sensor[J]. Sensors, 2025, 25(4): 1192.

[17] YAO K, LIN Q J, JIANG Z D, et al. Design and analysis of a combined FBG sensor for the measurement of three parameters[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7003010.

[18] LI R Y, TAN Y G, CHEN Y Y, et al. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 199–206.

[19] SHEN R S, TENG R, LI X P, et al. Electroless nickel plating and electroplating on FBG temperature sensor[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2008, 24(5): 635–639.

[20] MARCUSE D. Microdeformation losses of single-mode fibers[J]. Applied Optics, 1984, 23(7): 1082–1091.

[21] HAVERMANN D, MACPHERSON W N, MAIER R R, et al. Embedding optical fibers into stainless steel using laser additive manufacturing[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Orlando: Laser Institute of America, 2013: 381–385.

[22] 付颖, 杨坪川, 陈根发, 等. SLM成形 AISi10Mg 铝合金组织性能研究[J/OL]. 机械科学与技术, 2025: 1–10. (2025-02–27). <https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250001>.

FU Ying, YANG Pingchuan, CHEN Genfa, et al. Study on microstructure and properties of AISi10Mg aluminum alloy formed by SLM[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025: 1–10. (2025-02–27). <https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250001>.

A High-Temperature Large-Strain Optical Fiber Sensor Based on “8” Shaped Spring Structure

LI Tianliang, WEN Yuhang, ZHANG Ao, WANG Nian

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

[ABSTRACT] This study integrates metal 3D printing technology, optical fiber metallization, and laser welding preparation–encapsulation processes to design a high-temperature, large-strain optical fiber sensor with low stiffness and a wide measurement range. The aim is to address the challenge of monitoring thermal and mechanical parameters in aero-engine turbine blades. The designed sensor employs a hybrid demodulation method based on fiber Bragg grating (FBG) wavelength and light intensity, enabling precise measurement of temperature and strain. Through theoretical modeling, finite element simulation, and structural optimization of a grooved “8”-shaped spring substrate, the sensor’s reaction force on the measured structure is reduced to 167 N/e. Experimental results demonstrate that the sensor can achieve a large-range strain measurement of 37520 $\mu\epsilon$, with a temperature linearity of 0.9878 within the range of room temperature to 500 °C. Additionally, the sensor exhibits excellent temperature-strain decoupling performance, with a maximum decoupling error of less than 8%. These outstanding characteristics indicate that the designed sensor has promising application prospects for high-temperature strain monitoring in aero-engine turbine blades.

Keywords: Turbine blades; Temperature-strain measurement; Fiber Bragg grating; Metal 3D printing; Wavelength–intensity mixed demodulation

(责编 阳光)