

# 应变解耦增敏式 FBG 温度传感器的设计与应用<sup>\*</sup>

李五一<sup>1</sup>, 闫楚良<sup>2</sup>, 刘力宏<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院 南京, 210016) (2. 中国机械工业集团有限公司 北京, 100083)

**摘要** 为了实现飞机载荷谱飞行实测中对温度参数的精确测量,设计了一种应变解耦增敏式光纤光栅(fiber Bragg grating,简称 FBG)温度传感器。通过力学建模分析设计新的传感器结构,对传感器的光纤光栅进行增敏处理,选取铝 7075-T6 为基底进行全覆盖式封装,提出光纤光栅封装位置与结构件之间无直接接触方式,排除结构形变对温度传感器带来的影响。经标定测试传感器温度灵敏速度为 40.4 pm/°C,是普通光纤光栅的 4 倍。搭建实验系统进行其性能探究以及在拉伸试验机上进行解耦特性验证,拉伸实验件的变形对该温度传感器没有影响,与理论分析相符,最终将传感器贴于飞机座舱中进行实际工程应用。实验表明,传感器测得的温度差最大不超过±1 °C,表明设计的传感器可以用于实际温度测量中,满足在飞机载荷谱飞行实测中温度参数精确测量的需求。

**关键词** 飞行实测; 应变解耦; 增敏; 光纤光栅; 温度传感器

**中图分类号** TH702

## 引言

飞机载荷谱飞行实测是将飞机在使用过程中的状态参数、载荷参数等进行信息采集和记录,为飞机全机实验、结构可靠性设计以及结构健康状态监控提供实验数据与科学依据<sup>[1-2]</sup>。温度参数的高精度测量有利于对飞机结构健康状态进行更高精度的监控。

2006 年,朱春玲<sup>[3]</sup>提出,合适的座舱温度控制是保证舱内乘员舒适性和电子设备正常运行的关键,因此对座舱温度进行高精度测量并进行负反馈控制尤其重要。2007 年,张福泽等<sup>[4]</sup>进行了在不同温度下 3 种航空材料的裂纹扩展品质的研究,证明不同温度下同样材料在同一载荷谱作用下,低温环境下的裂纹扩展寿命要高于常温环境下的裂纹扩展寿命。2010 年,邸祥发等<sup>[5]</sup>提出飞机座舱盖载荷谱编制应注意的几个问题,其中提出飞机在高速飞行中,座舱盖温度最大值可达到 114.45 °C。2012 年,Tejedor 等<sup>[6]</sup>通过负压抽取环氧树脂的方式,在某型号飞机机翼上封装光纤光栅传感器,对机翼结构及温度进行监控。Zakaria 等<sup>[7]</sup>研究了不同温度对载荷谱的影响,证明在不同的温度下,结构疲劳老化

的程度有着很大的差异。2016 年,邓伟林等<sup>[8]</sup>在对飞机轮轴承受重符合冲击实验中,通过对温度的监控,实现与应变参数的解耦,得到更准确的实验效果。

现有的光纤光栅温度增敏传感器有粘合法和表面镀膜法。粘合法操作简单,易获得较高温度灵敏度,但是粘接剂经高温、酸碱腐蚀后易老化脱落,甚至导致光纤啾啾。笔者设计了一种新型结构可达到应变解耦增敏的效果,同时能够减缓粘接剂的老化、脱落等效果。鉴于光纤光栅质量轻、易于组网和抗电磁干扰等优点,人们不断尝试使用光纤光栅替代电阻应变片进行飞机载荷谱的测试<sup>[9]</sup>。在组网的过程中对温度的测量,实现温度与应变的解耦,准确计算飞机结构件实际载荷值,对飞机状态的监测以及解决结构定寿延寿问题,有着重要的意义。

## 1 光纤光栅温度传感原理

光纤光栅的反射波长与光栅的周期及模态的有效折射率有关,目前已有的基于光纤光栅的各种传感器其工作原理都可以归结为对光栅中心波长的测量,即通过对由外界扰动引起的中心波长变化量的测量。被测参数中心波长与光纤纤芯有效折射率、

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50135010)

收稿日期:2018-09-21;修回日期:2018-11-21

光纤光栅长度周期相关<sup>[10]</sup>,公式如下

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

其中: $\lambda_B$ 为中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯有效折射率; $\Lambda$ 为光纤光栅长度周期。

当外界温度变化时,可得

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2)$$

将其展开变形可得

$$\Delta\lambda_{\text{Br}} = 2 \left[ \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \Delta a \right] \Lambda + 2n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

其中: $\partial n_{\text{eff}}/\partial T$ 为折射率温度系数,可用 $\xi$ 表示; $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 为热膨胀引起的弹光效应; $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 代表由于膨胀导致光纤纤芯直径发生变化而产生的波导效应; $\partial \Lambda/\partial T$ 为光纤的线性热膨胀系数,可用 $a$ 表示; $\Delta T$ 为温度的变化量。

当光纤光栅感受到外界环境温度发生变化时,不仅会引起光栅周期的变化,而且还会引起有效折射率 $\Delta n_{\text{eff}}$ 变化,从而引起反射光波长的偏移,这就是光纤光栅传感的基本原理。则可将式(3)改写为

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{Br}}}{\lambda_B \Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[ \xi + \frac{(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}}{\Delta T} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \frac{\Delta T}{\Delta a} \right] + a \quad (4)$$

根据各向同性胡克定律一般形式可知,光纤光栅各方向应变为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu \frac{P}{E} \\ \nu \frac{P}{E} \\ -\frac{P}{E} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比。

由温度引起的应变状态为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\Delta T \\ a\Delta T \\ a\Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到光纤光栅温度灵敏度系数表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{Br}}}{\lambda_B \Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[ \xi - \frac{n_{\text{eff}}^3}{2} (P_{11} + 2P_{12}) a + k_{\text{wg}} a \right] + a \quad (7)$$

其中: $k_{\text{wg}} = \partial n_{\text{eff}}/\partial a$ ,为波导效应引起的布拉格波长漂移系数。

根据分析可知,光纤光栅的温度灵敏系数是一个与光纤本身材料相关的定值,光纤光栅在作为温度传感器使用时会有较好的线性度输出。

## 2 传感器的结构设计及其有限元分析

### 2.1 传感器的设计

该光纤光栅传感器设计的目的:①对光纤光栅测温进行增敏处理,得到更精确的实时温度值;②尽量减小结构应变带来的影响。结合设计目的,选取热胀冷缩系数( $23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ )较大的铝7075-T6为基底材料,通过对光纤光栅的栅区施加预紧力,并且全覆盖式封装,以实现增敏的目的。结合力学建模分析,设计新的传感器结构,如图1所示。

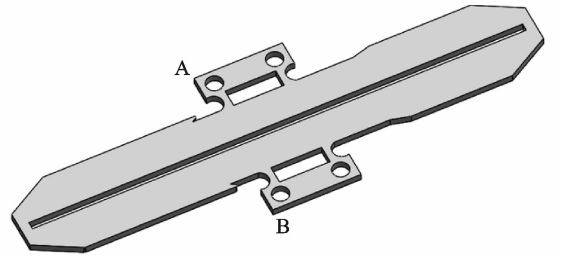


图1 增敏光纤光栅温度传感器设计图

Fig. 1 Design of sensitive FBG temperature sensor

为了避免结构的形变对光纤光栅进行温度参数测量时带来因基底形变导致的其他影响,提出光纤光栅封装位置与结构件之间无直接接触,通过结构设计,将粘接点转移,如图1中A,B位置指的是耳片结构,这样能够达到应变解耦目的,将基片主体部分与耳片连接部分进行减薄,以达到应变仅转移到连接部分,无法过度到传感器主体部分,则应变无法传递到光纤光栅上。

在封装过程中,先将基片在超声波清洗槽将基底充分清理,清洗时间为30 min;在加热平台上使用光纤夹具给予光纤光栅施加一定预紧力,通过光纤光栅解调仪系统的实时观测,使光纤光栅中心波长至少增大2 nm;调整基底放置在加热平台上的位置,使栅区处于基底预留的浅槽中;为减少传感器后期的蠕变以及提高传感器传递效率,使用353ND高温胶<sup>[11]</sup>将栅区全覆盖封装,80 °C条件下加热1 h后自然冷却;在两端尾纤上套光纤保护套管并固定。完整封装增敏光纤光栅温度传感器如图2所示。

### 2.2 传感器基底的有限元分析

采用SolidWorks中的simulation插件进行分

析<sup>[12]</sup>,在对传感器进行拉力模拟测试时,根据实际的受力情况,确定模拟的加载方式。首先进行网格化划分,如图3所示。

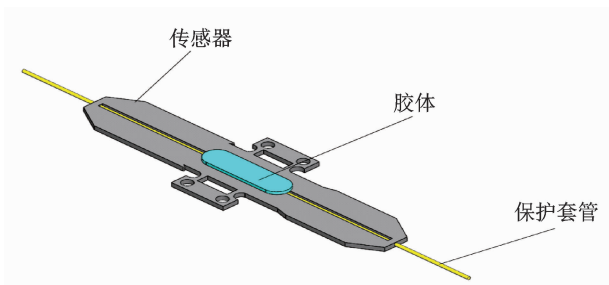


图2 增敏光纤光栅温度传感器

Fig.2 Sensitive FBG temperature sensor

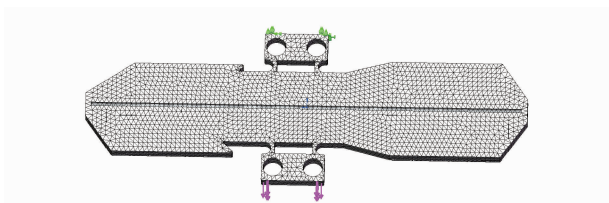


图3 有限元分析网格化划分示意图

Fig.3 Gridding diagram of finite element analysis

模拟加载过程采取 A,B 两位置一侧固定,另一侧施加不同方向拉力情况,以此模拟基片粘附于被测物表面后,被测件发生变形时基片的受力情况,规定基片坐标系如图4所示。在不同角度施加载荷进行有限元分析,如图5所示。其中(a)~(d)依次表示 A,B 两位置进行加载发生  $x^+, x^-, y^+, y^-$  4种方向相对位移时基片受力模拟情况。

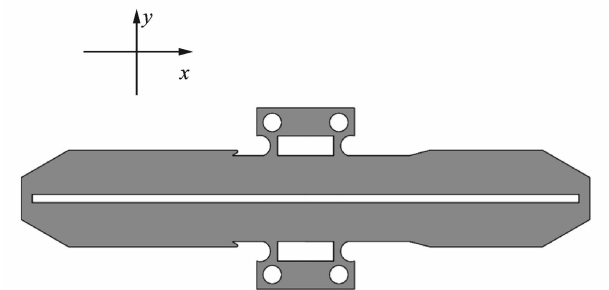


图4 有限元分析相对坐标方向

Fig.4 The relative coordinate direction of finite element analysis

根据受力云图可以得出基片固定点之间任意方向的相对位移,即被测件发生任何方向的形变,产生的应力均不会对封装光纤光栅的区域造成影响。

接下来,将光纤光栅以及胶体和传感器基底进行封装,并整体受力分析(如图6所示),位置B固

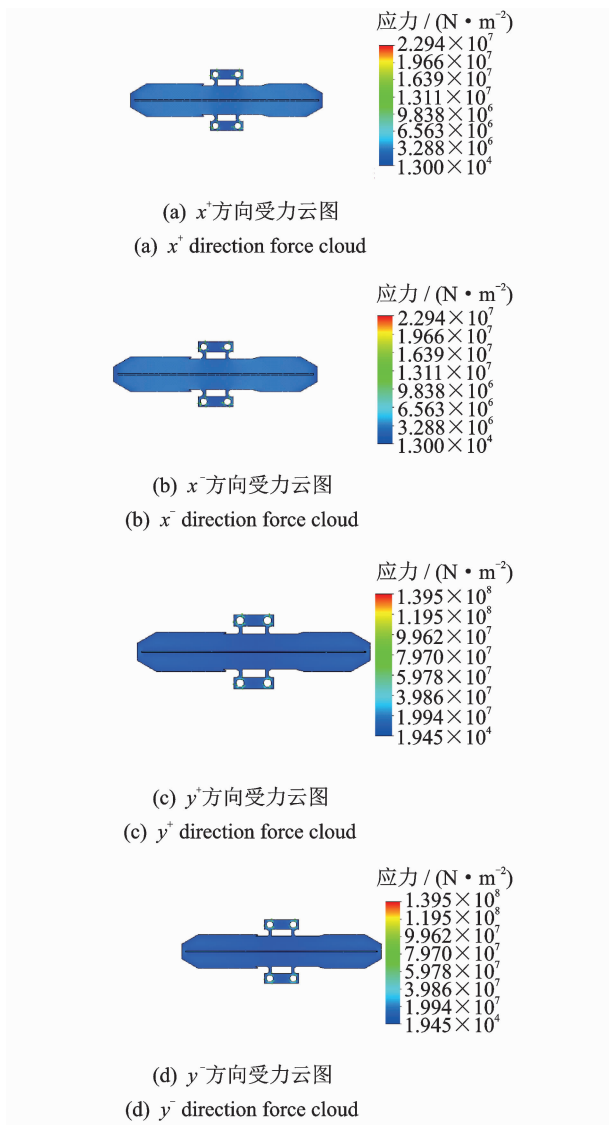


图5 有限元分析受力云图

Fig.5 Force cloud of finite element analysis

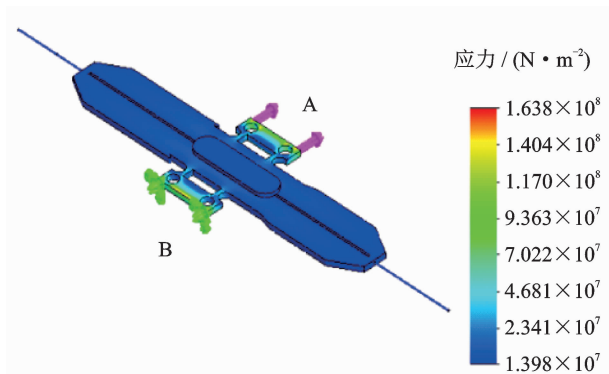


图6 光纤光栅温度传感器受力云图

Fig.6 Force cloud of FBG temperature sensor

定,对位置 A 施加力,经过有限元分析计算应变变化,从图中可以看出,光纤部分基本无应力传递到。因此,可以从受力分析的角度认为该增敏光纤光栅

温度传感器对应变的解耦性能良好。

### 3 传感器温度标定实验及结果分析

为了对制备完成的增敏光纤光栅温度传感器进行性能探究,搭建实验系统,实验装置如图 7 所示。

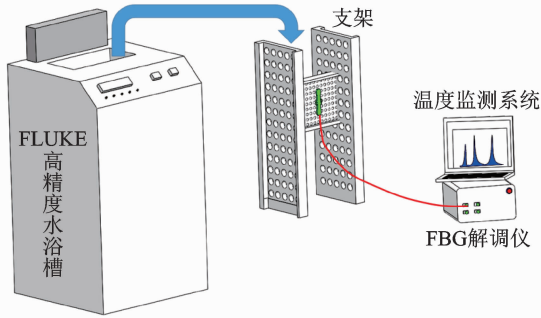


图 7 温度传感器标定实验

Fig. 7 Experiment of temperature sensor calibration

实验采用准分子刻写光纤光栅,常温状态中心波长为 1 526 nm,为了探究增敏效果,取 1 544 nm 中心波长未封装参考光纤光栅与之串接。选取:① FLUKE7381(温度精度 0.001 °C)高精度恒温水浴槽为温度标准,水浴槽测温采用 pt1000 热电偶,精度 0.01 °C;② Ibsen 解调仪系统,放大自发辐射宽带光源,带宽范围 1 525~1 570 nm,平坦度 2 dB,对光纤光栅中心波长解调精度 0.5 pm;③为进一步减少解调仪误差,在系统中接入高稳定性窄带激光器光源,通过光开关与实验系统相连接,通过解调仪对窄带激光的解调,去除解调仪的解调过程中带来的误差。

光源发出的宽谱光经过 3 dB 耦合器(插入损耗)入射到 FBG,FBG 受温度变化产生线性热胀冷缩,Ibsen 解调仪(波长分辨率 0.5 pm)对反射谱解调寻峰,通过上位机软件将中心波长值解调为 FBG 传感器的应变。

温度标定实验采用温度循环测量的方法,采用对水浴槽程控的方式,在 10~60 °C 范围内,以 10 °C 为一个步进,各温度点稳定 30 min,选择持续循环。这一过程在于验证温度传感器线性度以及重复性,对数据进行分别记录处理。图 8 为实验所采集传感器以及图 9 为参考光栅两个温度循环中心波长与采集相对次数关系示意图。设定解调仪采集频率为 100 Hz,光开关切换速度为 50 ms。

为了验证传感器的增敏特性,线性度以及重复性,对采集实验数据进行线性拟合,以及以第 1 次循

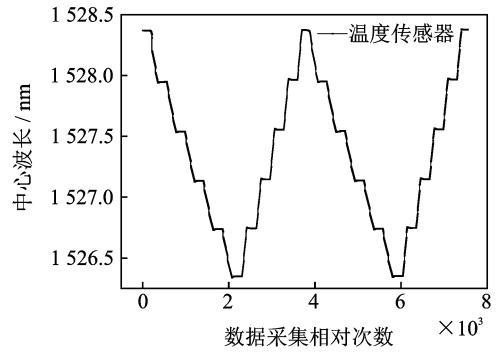


图 8 温度传感器中心波长与采集相对次数的关系曲线  
Fig. 8 The relationship curve of Temperature sensor center wavelength and collect relative time

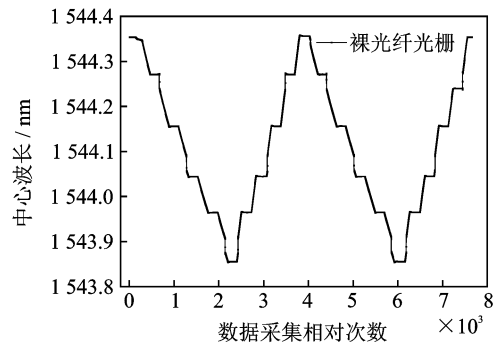


图 9 参考光栅中心波长与采集相对次数关系曲线  
Fig. 9 The relationship curve of reference FBG center wavelength and collect relative time

环作为基准,计算连续循环中温度传感器以及参考光栅的重复性误差。

分别对温度传感器以及参考光纤光栅所采集温度与中心波长数据使用 Origin 9.0 数据处理软件进行线性拟合,如图 10 和图 11 所示。图 10(a)~(d) 分别代表温度传感器 4 次循环标定实验拟合曲线,图 11(a)~(d) 分别代表参考光纤光栅 4 次拟合曲线。式(8)和式(9)分别为温度传感器及参考光栅 4 次循环拟合函数及线性度。图 12 为传感器重复性偏差拟合曲线。

$$\begin{cases} \lambda_1 = 40.36 \times 10^{-3} T + 1525.935 & (R^2 = 0.998) \\ \lambda_2 = 40.44 \times 10^{-3} T + 1525.939 & (R^2 = 0.999) \\ \lambda_3 = 40.37 \times 10^{-3} T + 1525.938 & (R^2 = 0.999) \\ \lambda_4 = 40.04 \times 10^{-3} T + 1525.941 & (R^2 = 0.999) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = 10.05 \times 10^{-3} T + 1543.755 & (R^2 = 0.997) \\ \lambda_2 = 10.08 \times 10^{-3} T + 1543.757 & (R^2 = 0.997) \\ \lambda_3 = 10.07 \times 10^{-3} T + 1543.756 & (R^2 = 0.997) \\ \lambda_4 = 10.10 \times 10^{-3} T + 1543.761 & (R^2 = 0.997) \end{cases} \quad (9)$$

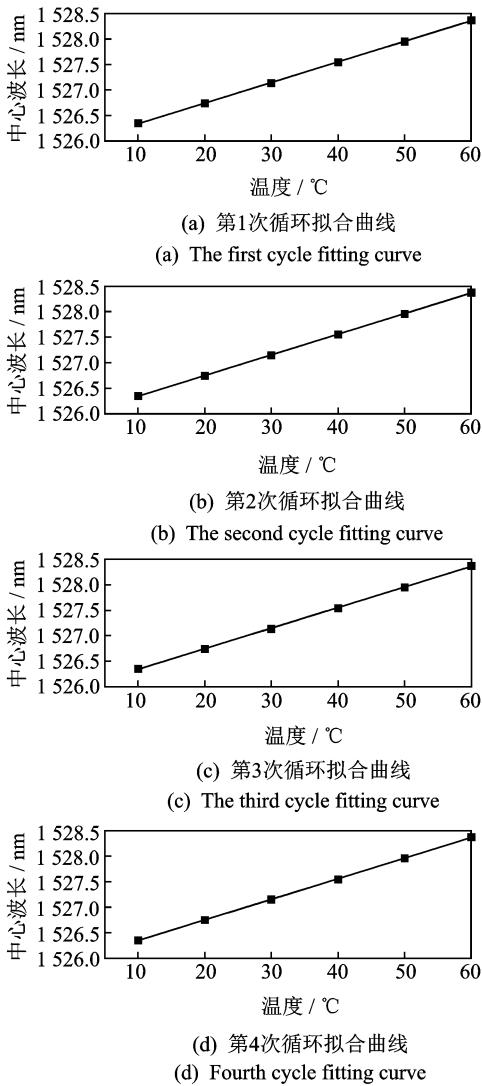


图10 温度传感器波长与温度关系曲线

Fig. 10 The relationship curve of temperature sensor wavelength and temperature

根据标定数据,得出参考光栅温度灵敏系数为  $10.07 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,封装温度传感器温度灵敏度系数为  $40.40 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,可以认为这种封装方式对光纤光栅的温度灵敏系数增敏效果显著,增敏倍数为 4.01 倍。重复性偏差不超过  $11 \text{ pm}$ ,重复性良好。

#### 4 应求解耦测试

为了验证温度传感器在使用过程中不会受到应变带来的影响,实验将温度传感器粘贴在 45 # 钢金属拉伸件表面,粘贴方式为使用 DP420 胶粘贴如图 1 所示 A, B 位置<sup>[13]</sup>。取两支封装好的传感器分别按照水平和垂直方向,室温中心波长分别为  $1526.5$  以及  $1540.2 \text{ nm}$ ,以验证应力对其无影响并验证有

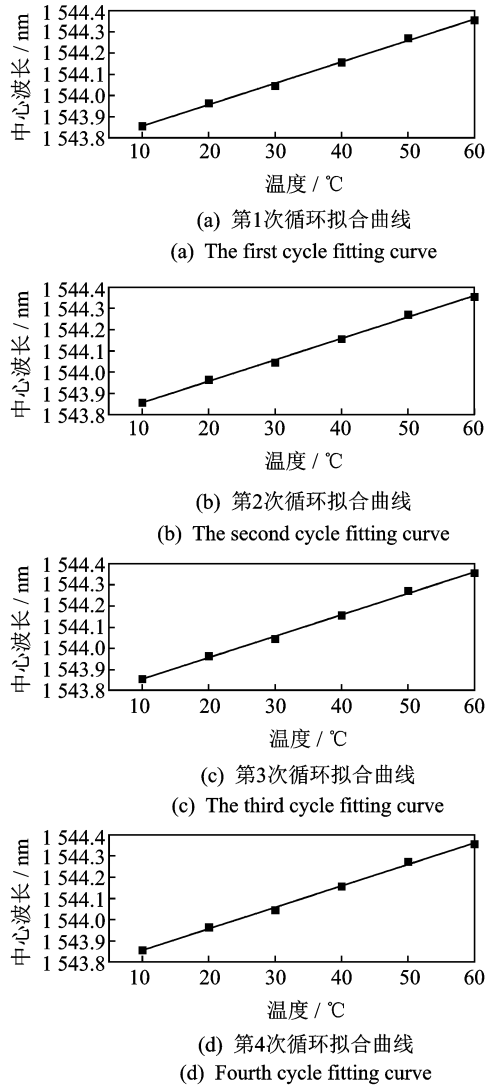


图11 参考光栅波长与温度关系曲线

Fig. 11 The relationship curve of reference grating wavelength and temperature

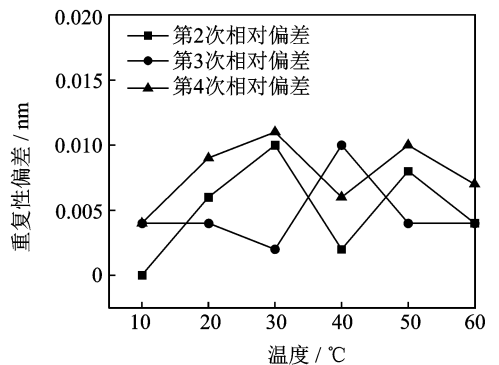


图12 传感器重复性偏差曲线

Fig. 12 Repetitive deviation curve of the sensor

限元分析应求解耦效果结果,实验如图 13 所示。实验过程施加  $0 \sim 40 \text{ kN}$  的拉力,以  $5 \text{ kN}$  为步进,通过拉伸件背面电阻应变片的读数,得到实验件最大



应变为  $945 \mu\epsilon$ 。实验中为了排除环境温度变化带来的干扰,串联室温中心波长为  $1\ 544\ \text{nm}$  裸光纤光栅,检测温度的变化。

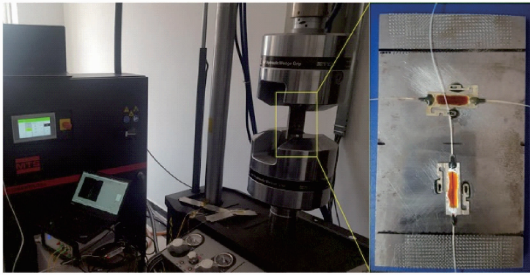


图 13 MTS 拉伸实验机拉伸实验  
Fig. 13 Tensile experiment of MTS

在排除温度对光纤光栅中心波长的影响后,采集两支光纤光栅温度传感器中心波长的变化量,如图 14 所示,处理数据的方法为在稳定时间段连续采集求取平均值。

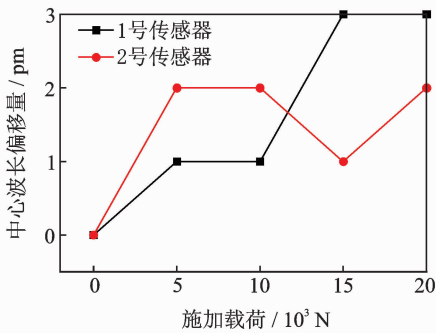


图 14 拉伸实验传感器中心波长偏移曲线  
Fig. 14 Central wavelength shift curve of sensor in tensile experiment

实验结果显示,参考光纤光栅中心波长的飘动可认为实验环境温度的变化,排除环境温度的影响,所选温度传感器中心波长恒稳定在  $1\ 526.526 \pm 0.005\ \text{nm}$  以及  $1\ 540.213 \pm 0.005\ \text{nm}$  范围内,可认为在误差允许范围内,该温度传感器不受被测结构形变带来的应变影响。

### 5 工程应用

将 8 个封装并完成标定的温度传感器串联,并使用绝缘胶进行保护,以对称方式贴于飞机座舱内,粘贴示意图如图 15 所示。

按照如图 15 的方式在某歼型机舱内部布置粘贴温度传感器,如图 16 所示。

在座舱处搭建温度控制系统,对座舱内进行升

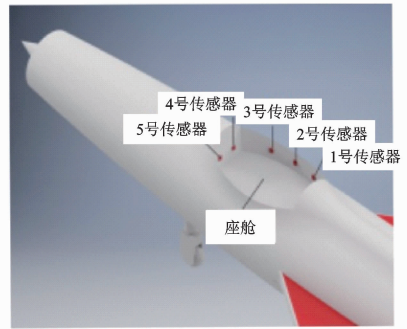


图 15 传感器粘贴示意图  
Fig. 15 Sensor paste diagram

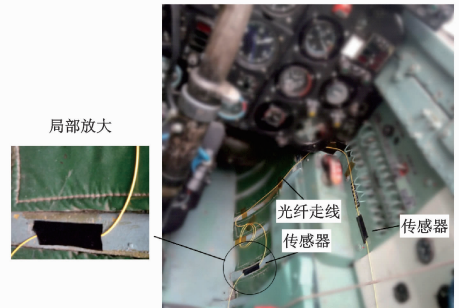


图 16 现场实验  
Fig. 16 Field experiment diagram

温,进行温度监测实验,实验温度范围为  $30 \sim 70\ ^\circ\text{C}$ 。将采集到的光纤光栅中心波长换算成温度,可以得到 8 支传感器的实测温度曲线,如图 17 所示。

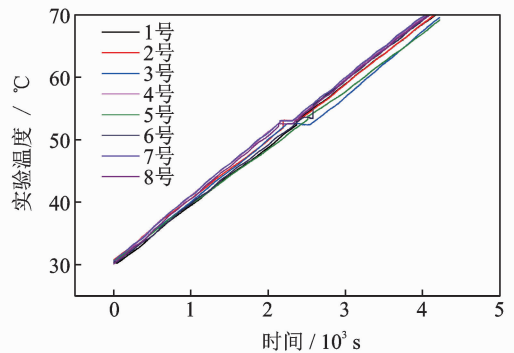


图 17 现场温度实验曲线  
Fig. 17 Field temperature test curve

图 17 为机舱内部 8 支传感器分别在每一个温度条件下持续时间内所测量到的机舱温度曲线,分析图 17 可知,在  $30 \sim 70\ ^\circ\text{C}$  的实验温度下,传感器测得数据较为准确。由于每支传感器装贴位置不同,所测得的温度数据有一定的偏差,最大偏差不超过  $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ ,满足项目需求。因此可以认为,设计的应变解耦光纤光栅增敏温度传感器可以用于实际温度测量工程中。

## 6 结束语

笔者设计了一种应用在飞机载荷谱飞行实测过程中应变不灵敏的增敏光纤光栅温度传感器,采用全覆盖式封装工艺,通过特殊的结构设计,充分排除被测件形变带来的应变影响。通过温度循环实验以及拉力循环实验,考察了传感器对温度的线性度、增敏效果、重复性以及应变参量的解耦性能。

温度循环测试结果表明,传感器线性度以及重复性良好,灵敏度系数为  $40.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,相对参考光纤光栅增敏系数为 4.01 倍,且线性度达到 0.998 以上。通过拉伸实验机对传感器应了解耦性能的测试,传感器的耳片受外载荷产生  $945 \mu\epsilon$  时,光纤光栅中心波长最大漂移 3 pm,相当于  $0.07^\circ\text{C}$  的误差,验证了该传感器良好的应了解耦能力。

将传感器粘贴于某型号战斗机座舱内,对实际工程应用进行测试。测试结果表明,设计的传感器实际测得的温度与实验温度温差不超过  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。本实验系统中使用的光纤光栅解调仪精度为  $\pm 0.5 \text{ pm}$ ,认为该温度传感器能分辨  $0.02^\circ\text{C}$  的温度变化。本研究对于飞机飞行实测的温度参数精确测量有着指导性意义。

### 参 考 文 献

- [1] 闫楚良. 飞机载荷谱实测技术与编制原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 5-6.
- [2] 闫楚良, 刘克格. 飞机结构经济寿命可靠性设计与评定[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 355-363.  
YAN Chuliang, LIU Kege. Theory of economic life design and reliability evaluation of aircraft structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 355-363. (in Chinese)
- [3] 朱春玲. 飞行器环境控制与安全救生[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 322-332.
- [4] 张福泽, 叶序彬, 宋钧, 等. 在  $25^\circ\text{C}$  和  $-40^\circ\text{C}$  环境下的三种航空材料的裂纹扩展品质研究[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 593-595.  
ZHANG Fuze, YE Xubin, SONG Jun, et al. Study on crack growth behaviors of three kinds of aeronautical materials at  $25^\circ\text{C}$  and  $-40^\circ\text{C}$ [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 593-595. (in Chinese)
- [5] 邸祥发, 梁瑞胜, 于金苓, 等. 飞机座舱盖载荷谱编制应注意的几个问题[J]. 飞机设计, 2010, 30(6): 26-30.  
DI Xiangfa, LIANG Ruisheng, YU Jinling, et al. Some problems of compiling canopy loading spectrum[J]. Aircraft Design, 2010, 30(6): 26-30. (in Chinese)
- [6] TEJEDOR S, DAVIS C. High strain FBG sensors for structural fatigue testing of military aircraft[C]//Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering. Sydney, Australia: [s. n.], 2012: 57.
- [7] ZAKARIA K A, ABDULLAH S, GHAZALI M J, et al. Influence of spectrum loading sequences on fatigue life in a high-temperature environment[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 30: 111-123.
- [8] 邓伟林, 张炜, 马晓军, 等. 一种飞机机轮轴承重负荷冲击试验机设计[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(4): 20-23, 35.  
DENG Weilin, ZHANG Wei, MA Xiaojun, et al. A design of aircraft wheel bearing heavy load impact testing machine [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(4): 20-23, 35. (in Chinese)
- [9] PANOPOULOU A, LOUTAS T, ROULIAS D, et al. Dynamic fiber bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures[J]. Acta Astronautica, 2011, 69(7/8): 445-457.
- [10] 郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 326-330.  
GUO Mingjin, JIANG Desheng, YUAN Hongcai. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. Optics & Precision Engineering, 2007, 15(3): 326-330. (in Chinese)
- [11] BASUMALLICK N, BISWAS P, DASGUPTA K, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 194: 31-39.
- [12] 凌明祥, 刘谦, 曹军义, 等. 压电位移放大机构的力学解析模型及有限元分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 812-818.  
LING Mingxiang, LIU Qian, CAO Junyi, et al. Analytical model and finite element analysis of piezoelectric displacement amplification mechanism [J]. Optics & Precision Engineering, 2016, 24(4): 812-818. (in Chinese)
- [13] TORRES B, PAYÁ-ZAFORTEZA I, CALDERÓN P A, et al. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring[J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 539-548.



第一作者简介: 李五一, 女, 1982年5月生, 博士、高级工程师。主要研究方向为飞机结构健康监测与诊断。曾发表《基于VC++的飞机载荷谱数据可视化技术》(《振动、测试与诊断》2012年第32卷第3期)等论文。  
E-mail: 112162315@qq.com

