

文章编号 1004-924X(2019)07-1481-11

FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验

章亚男, 范迪, 沈林勇, 吴仲台, 钱晋武*
(上海大学 机电工程及其自动化学院, 上海 200444)

摘要: 细径形状传感器在医学上有多种潜在的应用, 如乳腺肿瘤胸部穿刺针的定位、肠道内窥镜的形状显示、心脏血管导管的定位等, 其形状重建和末端定位精度一直是研究者关心的主要问题之一。为了提高光纤光栅形状传感器的形状重建精度, 本文研究了沿基材母线等间隔分布的 FBG 形状传感器的应变传递规律并对其进行实验验证。此形状传感器利用环氧树脂胶将 FBG 封装至镍钛合金丝表面, 形成 FBG 形状传感器的基材-黏结层-光纤-黏结层的四层复合材料结构。根据光纤光栅传感器应变传递力学简化模型, 推导出相应的平均应变传递率公式; 分别研究光纤至基材中心距、黏结层长度、厚度和弹性模量对光纤光栅传感器平均应变传递率的影响。实验结果表明, 封装后的光纤光栅传感器平均应变传递率在有效范围内随着基材长度的增加而增加, 黏结层外径的增加对其影响不大, 验证了理论模型的可用性。将应变传递率引入形状重建中, 改进了 FBG 形状传感器的形状重建算法, 末端相对定位精度由原来的 3.5% 提高到 2.7%。

关键词: 光纤传感; 光纤光栅; 应变传递; 形状重建

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192707.1481

Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors

ZHANG Ya-nan, FAN Di, SHEN Lin-yong, WU Zhong-tai, QIAN Jin-wu*

(School of Mechatronics Engineering and Automation,
Shanghai University, Shanghai 200444, China)

* Corresponding author, E-mail: jwqian@shu.edu.cn

Abstract: Small-diameter shape sensors have a variety of potential applications in medicine such as the positioning of breast tumor chest needles, shape display of intestinal endoscopes, and positioning of cardiac vascular catheters. The shape-reconstruction and end-positioning accuracies of shape sensors have always been major concerns of researchers. To improve the shape-reconstruction accuracy of a fiber Bragg grating (FBG) shape sensor, the strain transfer law of an FBG shape sensor with 90° distribution of fiber around the center of the substrate was studied and verified experimentally. Epoxy resin glues the FBG to the surface of the nickel-titanium alloy wire to form a four-layer structure of the substrate-bonding layer-fiber-bonding layer of the FBG shape sensor. Based on a simplified model of strain transmission mechanics of the FBG sensor, the corresponding average strain transfer rate formula was derived. The effects of the fiber-to-substrate center distance, bond layer length, thickness,

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275282); 上海市科委重大基础项目 (No. 18JC1410402)

and elastic modulus on the average strain transfer rate of FBG sensors were also analyzed and experimentally verified. Experimental results show that the average strain transmission rate of the packaged FBG sensor increases with increasing substrate length in the effective range, whereas an increase in the outer diameter of the bond layer has little effect on the average strain transmission rate, thus verifying the applicability of the theoretical model. The strain transfer rate is introduced into the shape reconstruction, and the shape-reconstruction accuracy of the FBG shape sensor is reduced from 3.5% to 2.7%.

Key words: fiber sensing; fiber Bragg grating; strain transmission; shape reconstruction

1 引言

在无创微创医疗领域,探针、导管、内窥镜是常用的手术(检查)工具。在很多应用场合如对活检穿刺针的定位^[1-2]、心脏主动脉瓣植入等手术中输送导管的定位^[3]、软性内窥镜的形状检测^[4]等,需要确定手术(检查)工具末端的位置或细长柔杆体的形状。现有的解决方案是采用核磁共振显形(MRI)、超声、X光显形或其他电磁定位显形技术,然而这些技术不仅容易受到环境电磁干扰,有的还存在辐射影响。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)形状传感器由于不受电磁干扰、结构紧凑、适合进行分布传感等特点,可利用测量应变来完成形状重建显示手术工具的三维弯曲形状,有成为研究热点的趋势。

FBG应变传感器一般分为嵌入式与表贴式,无论是哪种封装形式,光纤光栅和基材之间通常利用黏结剂连接。在应变传递过程中,由于光纤光栅、黏结剂和基材的弹性模量差异,会造成应变传递损耗,使光纤光栅所测得的应变与基体实际应变不一致。因此,研究光纤光栅的应变传递机理是光纤光栅应变传感精度提高的基础。

嵌入式传感器一般是将光纤光栅用金属或其他材料封装成传感器后,将它预埋入待测物体中进行应变测量,其应变传递研究一般基于埋入的待测物体,如基于混凝土蠕变本构模型^[5]、基于模拟的地下岩层^[6]、基于玄武岩纤维^[7]等,大多关注于不同传感器封装的材料及其封装参数如弹性模量等对应变传递率的影响。Zhou Z等^[5]以玻璃纤维增强塑料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)封装FBG传感器,得到传感器的平均应变传递率会随着混凝土基体的蠕变发展而降低,

蠕变的影响不可忽略,需进行误差修正的结论;而赵斌等人^[6]则是用碳纤维层积复合材料制成的凹槽对传感器进行封装。Zhenglin Zhang等^[7]则采用玄武岩纤维对传感器进行封装。

表面粘贴式传感器是将光纤利用胶水等粘在待测物体表面进行应变测量。目前,表面粘贴式FBG传感器的研究主要关注于应变传递率的提高。Li H等^[8]采用焊锡作为接合材料而不是传统的胶黏剂,对于粘贴式传感器可以得到更好的应变传递效果,其应变传递率高达99.2%,可以得到更好的传感性能。黄肖迪等^[9]对比了有涂覆层和无涂覆层的两种FBG粘贴式传感器,发现其平均应变传递率都随粘贴长度的增大而增大,而无涂覆层的应变传递率更高,可达99%。

针对薄板的应变传递规律^[10],吴入军等提供了一种高精度检测低模量薄板应变的方案;针对低弹性模量被测物体的应变监测,他们又对表贴式传感器的双向耦合机理进行研究^[11],建立待测物体与FBG双向耦合的应变传递理论并将理论解、有限元解和实验数据进行对比,以验证该理论的正确性;针对结构健康监测采用的基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术(BOTDR)与FBG的融合传感系统,孙宝臣等研究了FBG与布里渊信号间的耦合特性,得到光栅类型、FBG特性参数以及BOTDR测试空间分辨率对受激布里渊信号功率谱和频谱的影响规律^[12]。

现有的FBG传感器的应变传递研究大多仅关注测量应变,而并未将它与形状重建关联起来。形状传感器要实现大变形,在封装时往往选用弹性模量相对较小、柔韧度高的胶水。但这样做容易产生更大的蠕变,这将影响应变传递率的大小,从而影响重建精度。

上述两种传感器的应变传递规律是不适用于本论文的光纤光栅形状传感器的。其原因如下:

首先,光纤光栅形状传感器通过光纤光栅测量应变以实现基材的形状重建,它利用黏结剂将 FBG 封装至镍钛合金丝表面,形成基材-黏结层-光纤-黏结层的四层复合材料结构,具有基材细长、涂覆层薄、变形大等特点。而表面粘贴式传感器的结构一般是光纤-涂覆层-黏接层-基体的四层结构,嵌入式传感器的结构一般是以光纤为中心的光纤-涂覆层-黏接层-基体的同心圆。两种传感器的结构与光纤光栅形状传感器不同,因此其传递方程也不同,应变传递规律也不相同。其次,表贴式与嵌入式传感器主要用于检测应变,而并没有涉及应变传递规律对形状重建的影响情况的相关研究。因此,有必要对光纤光栅形状传感器的应变传递规律进行研究,以便掌握主要参数对传感器应变传递的影响,并进一步研究应变传递规律对形状重建精度的影响。

本文将应变传递率的研究与形状重建相结合,利用 FBG 测量应变以完成形状重建,针对细径 FBG 形状传感器,建立应变传递理论模型得到影响应变传递率的因素,并通过有限元仿真和实验验证了理论模型的可用性。将应变传递率引入形状重建中,可以改善 FBG 形状传感器的形状重建精度。

2 应变传递数学模型建立和分析

2.1 FBG 传感原理

光纤光栅通过纤芯在外界纵向应力或者温度变化的作用下,折射率将发生可逆改变,从而产生 Bragg 波长(λ_B)偏移 $\Delta\lambda_B$ 。通过测量反射光波长的变化,就可以获得待测物理量的变化,从而获得应变、温度等待测物理量的变量。

根据耦合模理论,当宽带光在光纤光栅中传输时,满足 Bragg 波长条件的光被反射,反射光的中心波长为^[13]:

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

式中: λ_B 为 Bragg 波长; n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率,即折射率调制幅度的平均值; Λ 为光纤光栅的周期或间距。可见,光纤光栅的反射波长取决于有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ ,当光纤光栅所处环境的温度、应力或其他物理量发生变化时,光纤光栅的周期 Λ 或有效折射率 n_{eff} 也随之改变,从而使反射光波长发生变化。

在不考虑温度影响的情况下,当光纤光栅受到纵向应变(ϵ)影响时,Bragg 波长(λ_B)的变化量可以表示为^[13]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \epsilon, \quad (2)$$

其中: P_e 是有效光弹系数,约为 0.216; $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长变化量。

2.2 形状重建原理

不考虑温度时,在纯弯曲条件下,如图 1 截取一段纵截面,轴向应变与曲率之间有以下关系^[4]:

$$\epsilon = \frac{d}{\rho} = d \cdot k, \quad (3)$$

其中: k 为所求的微段曲率, d 为光纤光栅距中性面的距离。因此在给定 d 与 k 的情况下,可以求出光纤光栅的应变。由式(2)和式(3)可得 $\Delta\lambda_B$ 与曲率 k 之间的关系:

$$k = \frac{2\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_e)d}, \quad (4)$$

所以有:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B(1 - P_e)d}{2} \cdot k = K \cdot k. \quad (5)$$

从式中可以看出曲率 k 和波长变化 $\Delta\lambda_B$ 呈线性关系, K 为曲率灵敏度系数。由式(5)可知,通过读取光纤光栅的波长信息可以得到该点的曲率信息。

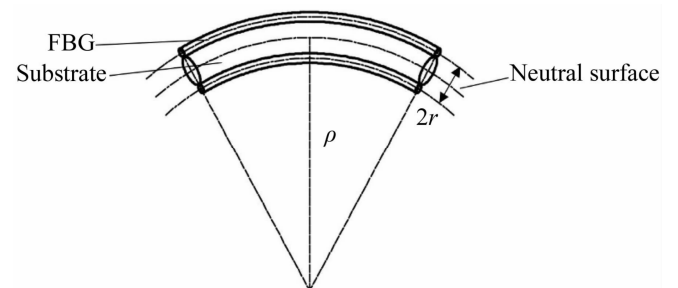


图 1 FBG 传感器纯弯曲示意图

Fig. 1 Pure bending diagram of proposed FBG sensor

根据采样得到的是有限的离散点曲率信息,可以通过对已知的离散曲率进行插值等方式拟合出整条曲线的形状。

2.3 建立应变传递模型

具有基材细长、涂覆层薄等特点的 FBG 形状传感器结构为:光纤绕基材成 90° 分布,通过黏结剂粘于基材表面,黏结剂固化后形成黏结层,依靠黏结层的内层进行应变传递,其横截面如图 2 所示。

从基材到光纤的轴向应变传递过程为:基材在外部载荷作用下产生轴向应变,根据剪滞理论,基材和黏结层弹性模量不匹配使得平行于黏结层轴向的平面内产生剪应力,基材应变通过剪切力的作用传递给黏结层,使得黏结层产生应变,黏结层应变又通过剪切力传递给光纤,最后使光纤光栅产生轴向应变。

基于光纤光栅传感器的结构与基材到光纤的应变传递过程的整体考虑,理论分析时采用以下基本假定:

(1)材料均为线弹性的,基体仅沿光纤轴向承受均匀应变,然后通过粘贴部分使光纤产生应变,光纤不直接受力;

(2)由于光栅是在光纤纤芯上进行光刻形成的,光纤纤芯和包层的材料属性和机械特性相近,因此,在分析时都当作玻璃纤维处理;

(3)光纤与黏结层、黏结层与基体的交界面结合紧密,没有相对滑移。

中间层会对基体有反作用,会降低基体应变,其对基体的影响深度用 r_m 表示。

不考虑温度和湿度等环境因素对黏结层的影响。以光纤光栅形状传感器的一个测量点为研究对象,其受力图如图 3 所示。

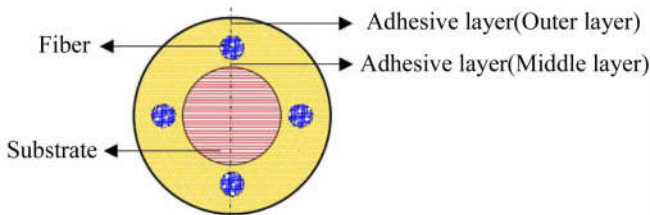


图 2 光纤光栅形状传感器横截面图

Fig. 2 Cross section of FBG shape sensor

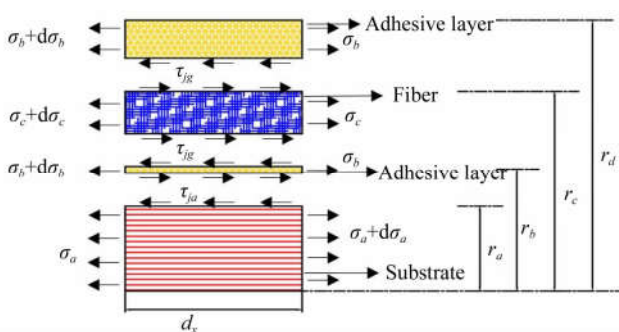


图 3 光纤光栅形状传感器的轴向应力分析

Fig. 3 Axial stress analysis of FBG shape sensor

根据如图 3 所示的受力模型,对栅区封装的轴向上长度为 dx 的微段进行各层的受力分析,建立长度为 dx 的力平衡方程。各参数含义如表 1 所示。

光纤光栅的力平衡方程式:

$$r_f d\sigma_g = 2dx \cdot \tau_{jg}. \quad (6)$$

黏结层的力平衡方程式:

$$(r_d^2 - r_a^2 - 4r_g^2) d\sigma_j + 8r_g \cdot \tau_{jg} dx + 2r_a \cdot \tau_{ja} dx = 0. \quad (7)$$

因为光纤和黏结层是同步变形,近似认为二者具有相同的应变梯度,即:

$$\frac{d\epsilon_g}{dx} = \frac{d\epsilon_j}{dx}. \quad (8)$$

结合式(6)~式(8),故有:

$$\tau_{jg} = \frac{r_g \cdot d\sigma_g}{2dx}, \quad (9)$$

$$\tau_{ja} = -\frac{1}{2} \left(\frac{r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2}{r_a} \cdot \frac{d\sigma_j}{dx} + \frac{2r_g}{r_a} \cdot \frac{d\sigma_g}{dx} \right). \quad (10)$$

假定各层的剪应力是线性变化的,则基体层的剪应力的表达式为:

$$\tau_a = -\frac{\tau_{ja} r}{r_m} + \frac{\tau_{ja}}{r_m} (r_m + r_p). \quad (11)$$

联立(10)、式(11)和 $\tau_a = G_a \frac{du}{dr}$ 两边对 r 积分后,再对 x 求导得基体层的应变:

$$\epsilon_a = \epsilon_j - \frac{E_j r_m (r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2) + 4r_g \cdot E_g}{4r_a G_a} \frac{d^2 \epsilon}{dx^2}. \quad (12)$$

同理得到黏结层与光纤层的应变差为:

$$\epsilon_j - \epsilon_g = -\frac{r_b - r_a}{2G_j} \left[\frac{3(r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2)}{2r_a} \cdot E_j + \left(\frac{4r_g}{r_a} - \frac{r_g}{4} \right) E_g \right] \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2}. \quad (13)$$

联立式(12)和式(13),得:

$$\epsilon_a - \epsilon_g = -\frac{r_m}{G_a} \left[\frac{(r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2) E_j + 4r_g E_g}{4r_a} \right] - \frac{r_b - r_a}{2G_j} \left[\frac{3(r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2) E_j}{2r_a} + \left(\frac{4r_g}{r_a} - \frac{r_g}{4} \right) E_g \right] \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2}. \quad (14)$$

化简式(14)得:

$$-k^2 \epsilon_a = \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} - k^2 \epsilon_g, \quad (15)$$

其中 k^2 为:

$$\frac{1}{k^2} = \frac{r_m}{G_a} \left[\frac{(r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2)E_j + 4r_g E_g}{4r_a} \right] + \frac{r_b - r_a}{2G_j} \left[\frac{3(r_d^2 - 4r_g^2 - r_a^2)E_j}{2r_a} + \left(\frac{4r_g}{r_a} - \frac{r_g}{4} \right) E_g \right]. \quad (16)$$

由于两端为自由端面,没有应力传递,有边界条件为 $\epsilon_g(L) = \epsilon_g(-L) = 0$,由此条件求解微分方程得:

$$\epsilon_g(x) = \epsilon_a(x) \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]. \quad (17)$$

表 1 FBG 传感器理论模型的基本参数

Tab.1 Basic parameters of theoretical model of proposed FBG sensor

基本参数	说明	基本参数	说明
τ	剪应力	$2L$	黏结体长度
τ_{ja}	基材与黏结层之间的剪应力	r_a	基材半径
τ_{jk}	黏结层与光纤光栅之间的剪应力	r_c	基材中心到光纤上表面距离
σ	正应力	r_g	光纤半径
σ_a	基材微段左侧所受正应力	r_d	传感器半径
σ_j	黏结层微段右侧所受正应力	X	传感器的轴向
$\sigma_j + d\sigma_j$	黏结层微段左侧所受正应力	R	传感器的径向
σ_g	光纤微段右侧所受正应力	E_j	黏结层的弹性模量
$\sigma_g + d\sigma_g$	光纤微段左侧所受正应力	E_g	光纤的弹性模量
E_a	基材的弹性模量	r_b	基材中心到光纤下表面距离
r_f	光纤光栅半径	r	基材-光纤中心距

则在 $2L$ 长度上传感器的平均应变传递系数为:

$$\alpha = \frac{\epsilon_g(x)}{\epsilon_a(x)} = 1 - \frac{\sinh(kx)}{kL \cosh(kL)}. \quad (18)$$

通过上述理论分析,式(16)和式(18)可以得到影响光纤光栅应变传递效率的主要因素有光纤光栅与记忆合金丝基材之间的距离 r 、黏结层的厚度 r_d 、封装长度 L 以及黏结剂的弹性模量 E_b 。

3 有限元分析

3.1 模型的建立与分析

为进一步验证该应变传递函数的正确性,利用有限元软件 Ansys 中计算光纤中心处的应变值,将计算结果与根据函数计算出的结果进行对比验证。在 Ansys 中建立形状传感器的有限元模型,将光纤光栅和记忆合金丝基材均视为理想的圆柱体结构,黏结层外表面视为光滑的圆柱面,且各种材料都为各向同性的线弹性材料,不考虑其塑性变形。设置模型的基本参数如表 2 所示。

表 2 FBG 传感器仿真模型的基本参数

Tab.2 Basic parameters of simulation model of FBG sensor

模型组成部分	几何尺寸 /mm	弹性模量 /Pa	泊松比
基材(SMA)	直径 1.0 长 100	8.5×10^{10}	0.34
光纤光栅	直径 0.3 长 40	7.2×10^{10}	0.17
黏结剂	外径 2.0	3.5×10^9	0.35
基材-光纤中心距	0.7	—	—
封装长度	30	—	—

在模型上设置两条路径,一条沿基材中心轴向,一条沿光纤中心轴向。将基材一端固接,另一端施加 5 mm 的位移荷载。在两条路径分别插入 50 个取值观察点,经过应变计算后,将两条路径的 50 个应变值相比,可以得到 50 个应变传递率。将通过 Ansys 有限元分析得到的应变传递率和

上一节中通过理论应变传递公式(18)得到的理论值输入 MATLAB 中,得到比较结果图如图 4 所示。由图 4 可知,理论公式推导和 Ansys 有限元分析得到的结果相近,且趋势一致。理论应变传递率为 0.876 ± 0.119 ,仿真的应变传递率为

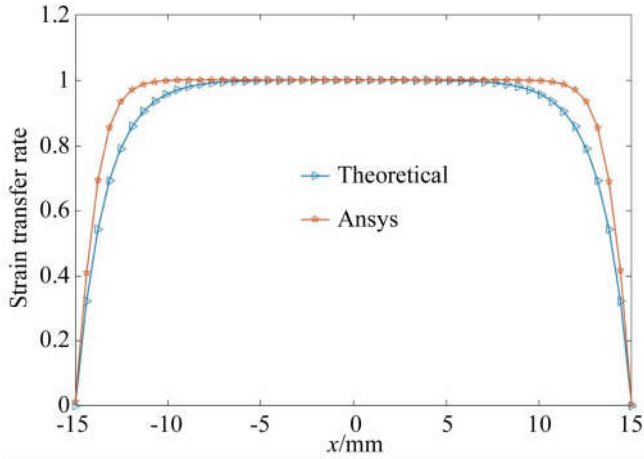


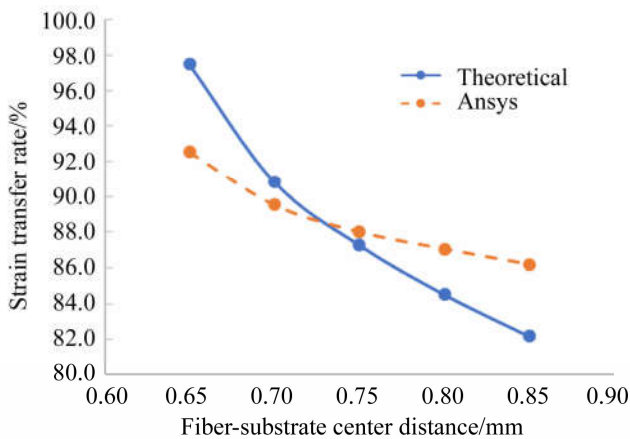
图 4 Ansys 和理论传递率

Fig. 4 Ansys and theoretical transfer rates

0.914 ± 0.114 。在封装中心的一段长度内两者得到的应变传递率基本相等,在封装两端的地方存在最大 12% 的误差,且是理论得到的应变传递率略小于通过 Ansys 有限元仿真得到的值。由于理论计算过程中假设各层应变分布均匀,各层剪应力呈线性变化,只考虑光纤光栅的轴向变形,没有考虑径向变形,而 Ansys 计算中黏结层的末端存在较大的剪切应力导致光纤光栅传感器各层的应变在封装端部存在一定的不均匀,且 Ansys 计算没有考虑光纤对基材的反作用,使应变传递值的理论值与仿真值有所差异。

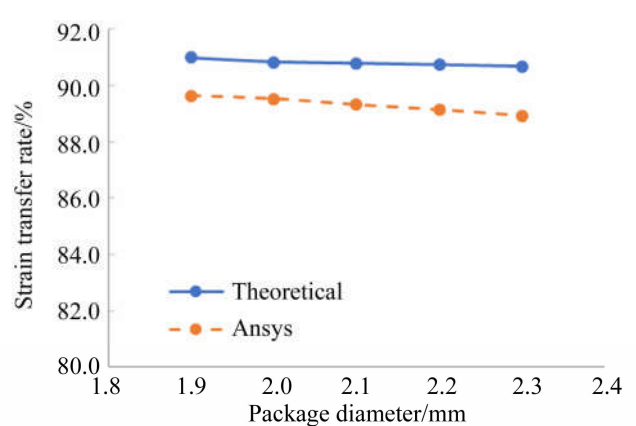
3.2 封装工艺对应变传递的影响分析

由上两节的应变传递理论公式分析可知,影响光纤光栅应变传递效率的主要因素有光纤光栅与记忆合金丝基材之间的距离 r 、黏结层的厚度 r_d 、封装长度 L 以及黏结剂的弹性模量 E_j 等。在 Ansys 中分别改变 r, r_d, L 以及 E_j 的取值,分析各变量对应变传递率的影响。



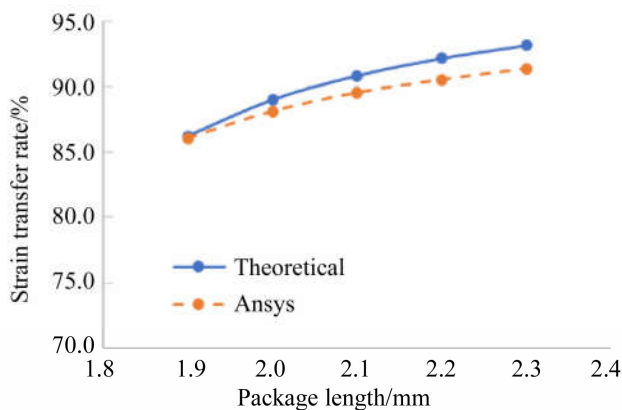
(a) 光纤-基材中心距与应变传递率的关系

(a) Relationship between fiber-substrate center distance and strain transfer rate



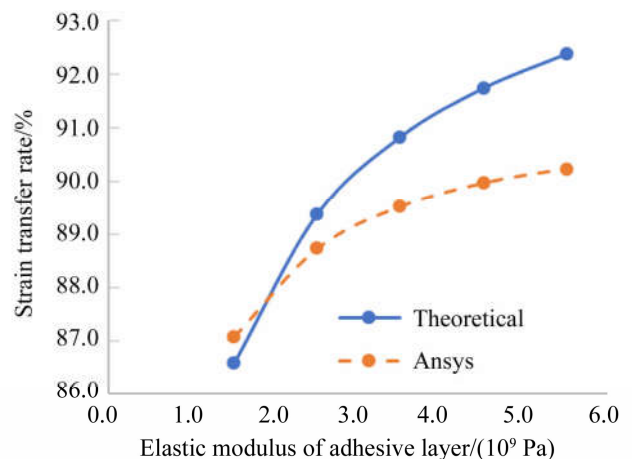
(b) 黏结体直径与应变传递率的关系

(b) Relationship between package diameter and strain transfer rate



(c) 封装长度与应变传递率的关系

(c) Relationship between package length and strain transfer rate



(d) 黏结层弹性模量与应变传递率的关系

(d) Relationship between elastic modulus of adhesive layer and strain transmission rate

图 5 各影响因素与应变传递率的理论与有限元分析结果对比图

Fig. 5 Comparison of theoretical and Ansys analysis results of various influencing factors on strain transmission rates

有限元分析与理论计算所得的应变传递率如图5所示。由图5(a)可以看出,在基材与光纤光栅的距离由0.65 mm至0.85 mm的过程中,理论方程计算得到的平均应变传递率由97.48%下降为82.19%,Ansys软件计算得到的平均应变传递率由92.54%下降为86.2%,两种方法计算得到的平均应变传递率之间的差异在3%左右。随着基材与光纤光栅间距离的增加,平均应变传递率呈下降趋势且趋势较大。

由图5(b)可以看出,在封装直径由1.9 mm至2.3 mm的过程中,理论方程分析得到的平均应变传递率由90.98%下降为90.67%,Ansys仿真计算得到的平均应变传递率由89.63%下降为88.94%,两者相差1.5%左右。随着封装直径的增加,平均应变传递率呈线型下降趋势,但是下降较为平缓,说明封装直径对应变传递率的影响不大。

由图5(c)可以看出,在封装长度由20 mm至40 mm的过程中,理论方程计算得到的平均应变传递率由86.25%增加为93.12%,Ansys仿真计算得到的平均应变传递率由86.10%增加为91.35%,两者相差1.2%。随着封装长度的增加,平均应变传递率呈上升趋势,并且上升趋势逐渐变缓。

由图5(d)可以看出,在黏结层的弹性模量由 1.5×10^9 Pa至 5.5×10^9 Pa的过程中,理论方程分析得到的平均应变传递率由86.6%增加为92.37%,Ansys仿真计算得到的平均应变传递率由87.01%增加为90.24%,两者相差1.16%。随着黏结层弹性模量的增加,平均应变传递率呈上升趋势,并且上升趋势逐渐变缓。因为在传递应变过程中,黏结层的弹性模量与基材和光纤光栅的弹性模量差值越小,其传递损耗就越小。

4 试验及结果分析

4.1 应变传递的验证试验

通过实验验证各影响因素对应变传递率的影响情况是否符合实际,从而验证理论公式的正确性。采用试件拉伸试验以验证封装工艺对光纤光栅传感器应变传递性能的影响。

4.1.1 拉伸试件封装

基材使用具有超弹性和形状恢复能力的镍钛形状记忆合金丝(Shape Memory Alloy, SMA),黏结剂将光纤光栅粘于记忆合金丝表面,采用将黏结剂注入聚四氟乙烯管的方法进行封装。利用如图6所示的封装装置,对栅点进行封装,在聚四氟乙烯管外套玻璃管以保障封装的测量点与基材的同轴度。

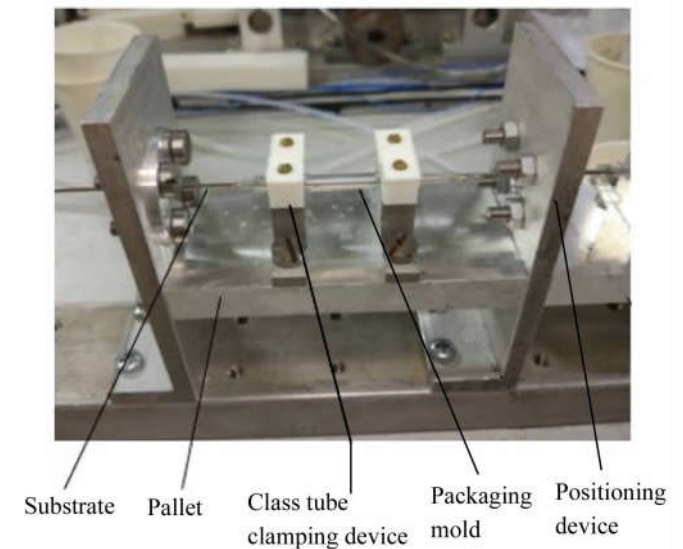


图6 FBG传感器封装装置

Fig. 6 Package device of FBG sensor

4.1.2 试验方法

基材受到拉应力后,所对应的拉应力和应变的关系可表示为:

$$\epsilon_t = \frac{F}{ES} \quad (19)$$

其中: E 为记忆合金丝基材的弹性模量, S 为其截面积, F 为拉力, ϵ_t 为应变。对基材施加拉应力 F ,根据所施加的拉应力可以得到输入的应变 ϵ_t ,而通过光纤光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_B$,可以得到通过黏结层传递至光纤的应变 ϵ_i ,即应变传递率为 ϵ_i / ϵ_t 。

分别封装两组传感器:(a)用弹性模量为2 000~2 500 MPa的黏结剂封装长度为30 mm,直径分别为1.8,2,2.2,2.5 mm的单栅点传感器;(b)用弹性模量为2 000~2 500 MPa的黏结剂封装长度分别为25,30,35,40 mm,直径为2 mm的单栅点传感器。

利用拉力传感器对单栅点FBG传感器进行拉伸,试验装置如图7所示。试验装置由光纤光栅网络解调仪、拉力传感器、拉伸装置和单栅点传

传感器拉伸试件组成。胶黏剂采用 WEICON EAS-Y-MIX Adhesive 环氧树脂胶。

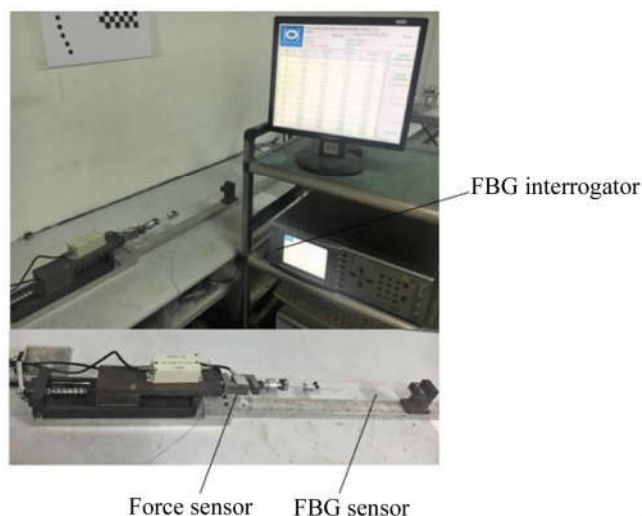


图 7 单栅点 FBG 传感器拉伸实验装置

Fig. 7 Tensile experimental device of single fiber Bragg grating sensor

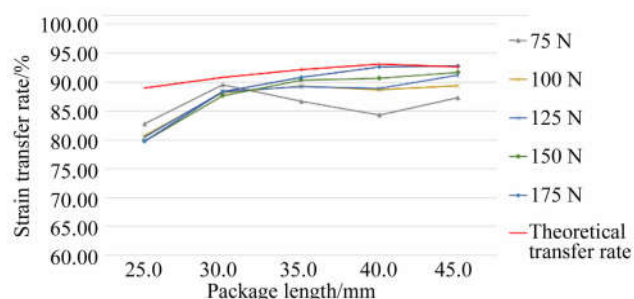
试验过程中,先将传感器进行预拉伸以消除内应力,然后采用逐级加载,加载步长为 25 N,从 75 N 加载到 175 N,记录加载过程光纤光栅波长的变化量,将测得的波长值折算成应变值。测得的应变值与理论应变值(式(19))之比即实际测得的应变传递率。

4.1.3 试验结果

上节所述的试验结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出,封装长度为 25~45 mm 的 FBG 传感器的拉伸实验结果与理论模型建立的曲线趋势基本一致,均为逐渐增大且上升趋势逐渐变缓。封装长度一定时,随着拉力的增大,应变传递率趋于一个稳定值。当长度为 25 mm 时,应变传递率由 82.85% 逐渐减小并趋于 80%,与理论得到的应变传递率的平均相差 9.27%;而长度为 30, 35, 40, 45 mm 时,其应变传递率的稳定值与理论值分别相差 4%, 2.5%, 3% 和 1.5%, 均在 5% 内,与理论结果基本一致。在粘贴长度较短时,由于黏结层的弹性模量小,使光纤与黏结层、黏结层与基体间的界面黏粘不强,应力传递不够充分,使得实验结果与理论值差异较大。

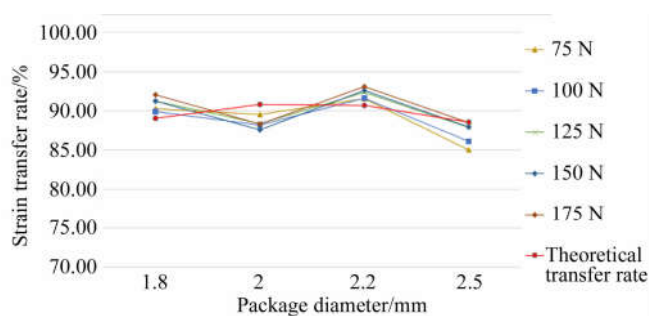
由图 8(b)可以看出,封装直径为 1.8~2.5 mm 时,FBG 传感器的拉伸实验结果与理论模型建立的曲线趋势基本一致,对应变传递率的影响

不大。封装直径一定时,随着拉力的增大,应变传递率趋于一个稳定值。随着直径的增大,应变传递率的稳定值在 91% 上下浮动。当封装直径为 2.5 mm 时,随着拉力的增大,应变传递率由 85.01% 逐渐增大并趋于 88%;而直径为 1.8, 2, 2.2, 2.5 mm 时,其应变传递率的稳定值与理论值分别相差 1.69%, -2.13%, 2.66% 和 -1.68%, 均在 3% 内,与理论结果基本一致。



(a) 黏结长度的应变传递率理论与实验结果对比

(a) Comparison of strain transmission rate theory and experimental results of package length



(b) 黏结体直径的应变传递率理论与实验结果对比

(b) Comparison of theoretical and experimental results of strain transmission rate of package diameter

图 8 各影响因素的应变传递率的理论与实验结果对比图

Fig. 8 Comparison of theoretical and experimental strain transmission rate of various influencing factors

单栅点试件的拉伸实验与理论模型的计算结果较为符合,应变传递率稳定值与理论值的误差均在 5% 以内,说明理论模型较为准确。

4.2 应变传递率对形状重建精度的影响

利用文献[14]中的 FBG 形状传感器,传感器总长 $L=810$ mm,直径为 2.5 mm,4 根 FBG 互成 90° 分布在记忆合金丝为基材的表面。在波分复用的基础上添加光分复用来改进传感网络的布

置,其重建精度为 3.5%。通过实验标定方法获取曲率灵敏度系数是存在误差的,本文通过在标定过程中将应变传递率 α 引入曲率灵敏度系数 K 中,使标定的曲率灵敏度系数更为准确,从而达到改善形状重建精度的目的。

4.2.1 试验原理

首先需要对形状传感器进行标定。FBG 形状传感器的四根 FBG 绕基材母线等间隔分布,当传感器弯曲时,存在中性面与最大拉压面。标定时,使传感器的 4 根光纤中的 2 根承受最大拉、压力即标定的栅点在最大拉压面上,另两根在中性面上,即不受拉压力。

标定过程实际是测量拉压面和中性面在不同曲率的波长漂移量 $\Delta\lambda_B$,从而根据 $\Delta\lambda_B$ 与曲率 k 的关系得到曲率灵敏度系数 K 。因此,将应变传递率 α 引入标定过程中,光纤光栅测得的应变 ϵ_B 与基材所受的应变 ϵ 的关系为:

$$\epsilon_B = \epsilon \cdot \alpha. \quad (20)$$

则在进行形状重建时,曲率 k 可以表示为:

$$k = \frac{2}{(1-P_c)\lambda h} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\alpha} = \frac{\Delta\lambda_B}{K \cdot \alpha}. \quad (21)$$

然而由于 FBG 传感器的基材、黏接剂、光纤光栅组成的复合材料结构,应变从基材传递至 FBG,由于非线性变形,会造成一部分应变损耗,则 FBG 所测得的 $\Delta\lambda_B$ 并不是准确的,期望值应为 $\Delta\lambda_B/\alpha$,为应变传递之前基材所受的应变造成的波长漂移量。

因此,将应变传递率 α 引入曲率灵敏度系数 K 中,令 $K' = K \cdot \alpha$,则曲率修正值为 $k' = \Delta\lambda/K'$ 。根据波长变化量以及标定所得的曲率灵敏度系数 K ,可以得到曲率的大小以完成形状重建。

4.2.2 试验验证与结果

标定装置如图 9 所示,对形状传感器进行标定。标定试验所需设备包括光纤光栅形状传感器、光纤光栅解调仪、标定板和定位销等。标定板上通过钻床在直径为 800,700,600,500,400,300 mm 等标准圆弧和直线上(直径为无穷大)钻若干直径为 4 mm 的销孔,销孔上设有安放传感器的

定位销。通过式(21)计算得所有栅点的拉压面和中性面的曲率灵敏度 K_1, K_2 ,最终得到每个栅点的比例系数 $K = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$ 。

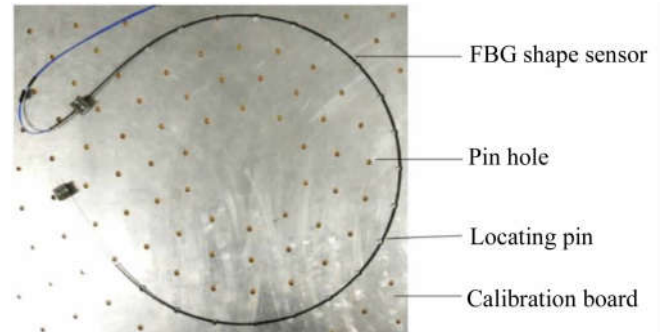


图 9 曲率与波长关系的标定实验

Fig. 9 Calibration of relationship between curvature and wavelength

引入应变传递率 α 之前,将光纤光栅连接至解调仪的测量通道,将光纤光栅形状传感器放在毫米方格纸上记录传感器在二维世界坐标系下的实际值。而后,利用计算机上通过 Visio Studio 2013 编写的 MFC 程序用于与解调仪进行通信,接收波长信息,并且将波长信息转换为曲率信息;建立合适的数学模型,通过得到的重建算法重建出曲线的形状信息并显示在程序界面上,得到重建后曲线的坐标值。

对比实际值与重建值,结果如图 10 所示。引入应变传递率 α 前,传感器在二维世界坐标系的实际坐标值和传感器在重建坐标系的重建坐标值为 X_1, Y_1 和 X_1', Y_1' ;引入应变传递率 α 后,传感器在二维世界坐标系的实际坐标值和传感器在重建坐标系的重建坐标值为 X_2, Y_2 和 X_2', Y_2' 。应变传递率 α 通过式(18)计算得到,各坐标如表 3 所示。

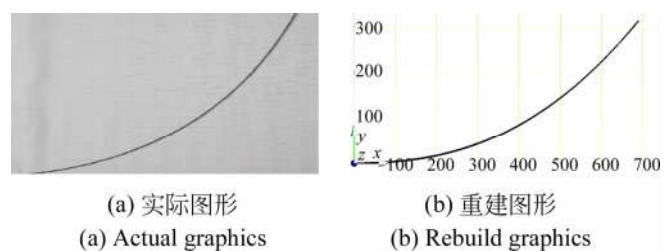


图 10 实际图形与重建图形

Fig. 10 Actual and reconstructed graphics

表 3 引入应变传递率 α 前后的形状重建误差Tab. 3 Shape reconstruction error before and after introduction of strain transfer rate α

栅点/mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1	0	90.0	179.0	265.0	348.0	428.0	502.0	571.0	637.0	702.0
X_1'	0	89.9	179.2	266.8	351.3	432.0	508.2	580.2	648.5	714.2
Y_1	0	9.0	26.0	50.0	84.0	126.0	175.0	229.0	289.0	351.0
Y_1'	0	2.8	13.7	34.3	64.9	104.6	152.3	206.2	264.7	326.1
X_2	0	90.0	159.0	264.0	344.0	420.0	490.0	553.0	611.0	666.0
X_2'	0	90.0	178.6	264.6	345.8	420.4	487.8	548.0	602.6	653.8
Y_2	0	10.0	28.0	57.0	96.0	145.0	200.0	262.0	328.0	399.0
Y_2'	0	4.1	18.5	44.9	83.5	133.4	192.9	259.6	331.0	404.9
引入前(d_1)	0	6.2	12.3	15.8	19.4	21.7	23.6	24.6	26.8	27.8
引入后(d_2)	0	5.9	21.8	12.1	12.6	11.6	7.4	5.6	8.9	13.5

则传感器的误差 d_n 为:

$$d_n = \sqrt{(X_n - X'_n)^2 + (Y_n - Y'_n)^2}. \quad (22)$$

由表 3 可知,引入应变传递率 α 之前, $\Delta d = \max(d_1) = 27.8$ mm, FBG 传感器的重建误差为 $R_1 = \frac{\Delta d_1}{L} \times 100\% = 3.5\%$ 。

引入后, $\Delta d = \max(d_2) = 21.8$ mm, FBG 传感器的重建误差为 $R_2 = \frac{\Delta d_2}{L} \times 100\% = 2.7\%$ 。引入应变传递率 α 后, FBG 传感器的重建精度得到了较大的提高。

5 结 论

本文提出了光纤光栅成 90° 分布的形状传感器的应变传递数学模型,并得到影响其应变传递率的影响因子,分别为光纤光栅与记忆合金丝基材之间的距离、黏结层的厚度、封装长度以及黏结

剂的弹性模量。对 FBG 传感器进行了有限元仿真,并对单光栅点传感器进行拉伸实验以验证应变传递理论模型。实验结果表明,随着拉力的增大,应变传递率趋于一稳定值;随着封装长度的增大,应变传递率逐渐增大且增长趋势逐渐变缓;随着封装直径的增大,应变传递率的稳定值在 91% 上下浮动,直径对应变传递率的影响不大。理论应变传递率与实验结果所得的应变传递率稳定值相差 5% 以内且趋势基本一致,证明了理论应变传递模型的适用性。最后将应变传递率 α 引入形状重建中,末端定位相对精度由引入前的 3.5% 改进至 2.7%。可见将应变传递率引入形状重建中,可提高重建精度,缩小末端误差。

当传感器受到不同曲率的弯曲应变时,其应变传递率也会不同,故下一步将进行不同弯曲曲率下光纤光栅形状传感器的形状重建误差对比与修正。

参考文献:

- [1] 郝伟远,陈玉堂,邵国良. IG4 电磁导航系统辅助 CT 引导下肺结节穿刺活检术的临床应用[J]. 介入放射学杂志, 2016, 25(8): 682-685.
HAO W Y, CHEN Y T, SHAO G L. Clinical application of IG4 electromagnetic navigation system-assisted CT-guided percutaneous needle biopsy of pulmonary nodules[J]. *Journal of Interventional*

Radiology, 2016, 25(8): 682-685. (in Chinese)

- [2] 李清涛,周粟,袁敏,等. 磁共振成像导航系统辅助经皮穿刺活检术的初步应用[J]. 介入放射学杂志, 2017, 26(3): 263-265.
LI Q T, ZHOU S, YUAN M, et al.. Preliminary application of MRI-navigation system in assisting the performance of percutaneous biopsy[J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2017, 26(3): 263-265. (in Chinese)

- [3] LEON M B, SMITH C R, MACK M, *et al.*. Transcatheter aortic-valve implantation for aortic stenosis in patients who cannot undergo surgery [J]. *Survey of Anesthesiology*, 2011, 55(3): 112-113.
- [4] ZHANG L W, QIAN J W, ZHANG Y N, *et al.*. On SDM/WDM FBG sensor net for shape detection of endoscope[C]//*IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, 2005, Niagara Falls, Ont., Canada. New York, USA: IEEE, 2005, 4:1986-1991.
- [5] 周智, 王倩, 郝孝伟, 等. 考虑混凝土基体蠕变的 FBG 传感器应变传递研究[J]. *中国测试*, 2016, 42(5): 1-5, 32.
ZHOU ZH, WANG Q, HAO X W, *et al.*. Strain transfer analysis of the FBG sensor considering the creep of the concrete host[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(5): 1-5, 32. (in Chinese)
- [6] 赵斌, 仲志成, 林君, 等. 基于光纤光栅传感地层应力的监测方法与实验[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s):346-352.
ZHAO B, ZHONG ZH CH, LIN J, *et al.*. Monitoring method and experiment for stratum stress based on fiber Bragg grating sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 24(10s):346-352. (in Chinese)
- [7] ZHANG ZH L, WANG Y, SUN Y Y, *et al.*. Analysis and experimental study on the strain transfer mechanism of an embedded basalt fiber-encapsulated fiber Bragg grating sensor [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 017105.
- [8] LI H, ZHU L Q, DONG M L, *et al.*. Analysis on strain transfer of surface-bonding FBG on Al 7075-T6 alloy host[J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1233-1236.
- [9] 黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(6): 1233-1240.
HUANG X D, WANG Y, SUN Y Y, *et al.*. Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(6): 1233-1240. (in Chinese)
- [10] 吴入军, 付昆昆, 郑百林, 等. 粘贴于薄板表面的光纤布拉格光栅应变传感器误差修正[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 747-755.
WU R J, FU K K, ZHENG B L, *et al.*. Error modification of FBG strain sensors bonded on plates[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 747-755. (in Chinese)
- [11] 吴入军, 郑百林, 陈田, 等. 光纤布拉格光栅传感器应变传递耦合机理分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 49-58.
WU R J, ZHENG B L, CHEN T, *et al.*. Coupled mechanism analysis of strain transfer of fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 49-58. (in Chinese)
- [12] 孙宝臣, 侯跃敏, 李峰, 等. 光纤光栅与受激布里渊信号的耦合特性[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 484-490.
SUN B CH, HOU Y M, LI F, *et al.*. Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 484-490. (in Chinese)
- [13] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [14] 沈林勇, 肖海, 钱晋武, 等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(12): 2725-2730.
SHEN L Y, XIAO H, QIAN J W, *et al.*. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(12): 2725-2730. (in Chinese)

作者简介:



章亚男(1962—),女,浙江绍兴人,博士,教授,1982年于浙江大学获得硕士学位,2011年于上海大学获得博士学位,主要从事精密工程智能机器人等方面的研究。E-mail: ynzhang@mail.shu.edu.cn

通讯作者:



钱晋武(1962—),男,浙江绍兴人,博士,教授,博士生导师,1988年于长春光学精密机械研究所获得硕士学位,1994年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事精密工程与机器人技术等方面的研究。E-mail: jwqian@shu.edu.cn