材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.014

FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究

张冬伟*，金　靖，朱云鸿，张艺博

（北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 光电工程系，北京 100191）

摘　要： 为提高光纤布拉格光栅(FBG)形状传感器的形状重建精度，减小光栅点的重建位置误差，设计了一种 FBG 传感元件结构。通过建立传感元件应变传递力学模型，推导出平均应变传递率表达式，并结合传感元件有限元仿真模型，分析了相关结构参数对传感元件应变传递率的影响，将有限元仿真与理论计算结果进行对比，验证了理论模型的有效性。进而分析了应变传递率对传感系统形状重建精度的影响，得出当光栅点应变传递率保持在 90％以上时，光栅点的重建位置误差将保持在 0.08 mm 内。该研究表明，通过合理控制影响参数，可有效提高传感元件应变传递效率，减小传感系统形状重建位置误差，从而提高光纤形状传感器的形状重建定位精度。

关键词： 光纤传感；光纤光栅；应变传递；位置误差；形状重建精度

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0833－06

Research on Strain Transmission and Sensing Performance of FBG Shape Sensor

ZHANG Dongwei, JIN Jing, ZHU Yunhong, ZHANG Yibo

(**Dept. of Optoelectronic Engin., School of Instrument Science and Optoelectronic Engin., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, CHN**)

Abstract: In order to improve the shape reconstruction accuracy of fiber Bragg grate (FBG) shape sensor and reduce the reconstruction position error of the grating points, a FBG sensing element structure was designed in this paper. By establishing the strain transfer mechanics model of the sensing element, the expression of the average strain transfer rate was derived. And by combining with the finite element simulation model of the sensing element, the influence of the relevant structural parameters on the strain transfer rate of the sensing element was analyzed. The finite element simulation and theoretical calculation results were compared to verify the validity of the theoretical model. Furthermore, the effect of strain transfer rate on the shape reconstruction accuracy of the sensing system was analyzed, and it was concluded that when the strain transfer rate of the grating points remains above 90％, the reconstruction position error of the grating points will remain within 0.08 mm. The study shows that by reasonably controlling the influencing parameters, the strain transmission efficiency of the sensing element can be effectively improved, and the position error of the shape reconstruction of the sensing system can be reduced, thus the positioning accuracy of the shape reconstruction of the optical fiber shape sensor will be improved.

Key words: optical fiber sensing; fiber grating; strain transfer; position error; shape reconstruction accuracy

收稿日期：2020－10－17.

*通信作者：张冬伟

E-mail: zhangdongwei@buaa.edu.cn

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)因其质量轻、尺寸小、灵敏度高、抗电磁干扰、易于嵌入材料内部、集传感和传输于一体等诸多优点[1],可实现对结构应变、温度等待测物理量的高精度、分布式传感测量[2-3],被认为是复杂环境下结构检测领域最具有前途的传感器之一,在航空航天航海[4]、土木工程[5]、智能医疗[6-7]等领域获得了广泛的应用,具有十分广阔的发展前景。

在将 FBG 应用于三维形状传感测量时,一根单芯光纤光栅只能进行应变的测量,无法检测出待测结构三维形状,只能通过多根光纤光栅组合测量,得到同一个位置的多个应变值,进而重构出三维形状[8-9]。沈林勇等[10]将 4 根 FBG 传感阵列分别安放在基材上相互呈 90°角的位置,每一个空间点由相互垂直的两个方向的 2 根 FBG 阵列测量,实现了光纤形状的传感测量。Park 等[11]通过将 FBG 引入小尺度磁共振成像兼容活检针,实现了手术针体内偏转轮廓的形状显示,可实时追踪探针的轨迹状态,此三维形状传感器由嵌入 120°等距分布的形状记忆合金凹槽的三根 FBG 传感阵列组成。研究发现光栅应变测量的精确性对形状重建结果影响较大。为提高 FBG 形状传感器的形状重建精度,章亚南等[12]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,传感器末端相对定位精度由原来的 3.5%提高到 2.7%。研究表明,在将多根 FBG 传感阵列嵌入基材中构成形状传感器传感元件时,由于 FBG 和基材之间存在粘结层等中间结构,造成 FBG 实测应变与基材应变之间存在传递误差,而粘结剂厚度、弹性模量等对应变传递也存在直接影响[13]。因此明确 FBG 传感元件应变传递效率的影响因素及其对系统形状传感性能的影响,对提高光纤形状传感器的形状重建定位精度具有重要指导意义。

本文将 FBG 传感元件光栅点应变传递率的研究与传感系统形状重建相结合,利用 FBG 测量应变从而实现传感系统的形状重建。通过建立应变传递理论模型分析应变传递率的影响因素,并与有限元仿真结果进行对比,验证理论模型的有效性,进而将应变传递率引入形状重建,实现形状重建定位精度的有效改善。

1 理论分析

1.1 光纤光栅传感特性

FBG 是利用掺有锗等离子的光纤纤芯的光敏性,通过紫外光等照射光纤,在纤芯内部形成折射率周期性变化的空间相位光栅[1]。当宽带光在均匀的 FBG 中传输时,产生模式耦合,其中满足 Bragg 条件的入射光波被反射回来,光栅反射波的中心波长受折射率和光栅周期变化的影响,中心反射波长满足的 Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \tag{1}$$

式中,n_{eff} 为光栅的有效折射率,Λ 为光栅周期。

FBG 作为波长调制型传感器的敏感元件时,任何可以改变光栅有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 的物理量都可以作为被测对象,但最直接的作用量还是应变与温度。假定温度及其他条件不变,FBG 仅受到均匀轴向应变 ε 作用时,光栅发生伸缩并产生弹光效应,两者均会引起 FBG 中心波长 λ_B 的变化,其变化量可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon \tag{2}$$

式中,P_e 为有效弹光系数,约为 0.216,$\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长的变化量。

1.2 光纤光栅与基材之间应变传递理论模型

FBG 形状传感器通过 FBG 测量应变以实现传感元件的形状重建,采用粘结剂将 FBG 粘贴至形状记忆合金丝基材表面,形成基材-粘结层-光纤-粘结层四层复合结构,如图 1 所示,三根 FBG 阵列绕基材 120°分布,通过粘结剂固定在基材凹槽中,粘结剂固化形成粘结层,依靠粘结层实现从基材到光栅之间的应变传递。

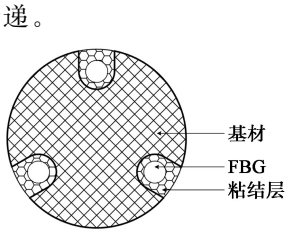


图 1 传感元件结构横截面示意图

从基材到 FBG 的轴向应变传递过程为:基材在外部载荷下产生轴向应变,由于基材和粘结层弹性模量不匹配使得平行于粘结层轴向的平面内产生剪应力,基材应变通过剪应力的作用传递给粘结层,使得粘结层产生应变,粘结层应变又通过剪应力传递给 FBG,最后使 FBG 产生轴向应变。以一个 FBG

测量点为研究对象进行分析，建立图 2 所示受力分析图。

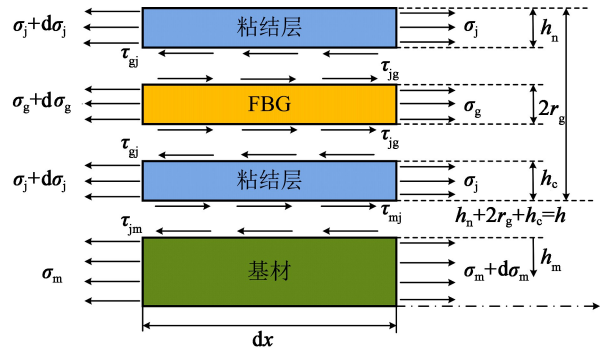


图 2　传感元件轴向应力分析

对栅区轴向上长度为 $\mathrm{d}x$ 的微段进行各层受力分析，建立力平衡方程：

(1)光纤光栅微元段的力平衡微分方程：

$$2\pi r_{\mathrm{g}}\tau_{\mathrm{jg}}\mathrm{d}x+\pi r_{\mathrm{g}}^{2}\sigma_{\mathrm{g}}=\pi r_{\mathrm{g}}^{2}(\sigma_{\mathrm{g}}+\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{g}}) \tag{3}$$

(2)粘结层微元段的力平衡微分方程：

$$\tau_{\mathrm{mj}}L\,\mathrm{d}x+(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})\sigma_{\mathrm{j}}=(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})\cdot(\sigma_{\mathrm{j}}+\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{j}})+2\pi r_{\mathrm{g}}\tau_{\mathrm{gj}}\mathrm{d}x \tag{4}$$

(3)光纤光栅和粘结层轴向应变积分：

$$\int_{h}^{h+h_{\mathrm{m}}}G_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\mathrm{d}y=\int_{h}^{h+h_{\mathrm{m}}}\frac{h+h_{m}-y}{h_{m}}\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}\right]\frac{\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}y \tag{5}$$

$$\int_{h-h_{\mathrm{c}}}^{h}G_{\mathrm{j}}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\mathrm{d}y=\int_{h-h_{\mathrm{c}}}^{h}\left(\frac{\tau_{\mathrm{mj}}-\tau_{\mathrm{gj}}}{h_{\mathrm{c}}}y+\frac{h_{\mathrm{c}}\tau_{\mathrm{mj}}-h\tau_{\mathrm{mj}}+h\tau_{\mathrm{gj}}}{h_{\mathrm{c}}}\right)\mathrm{d}y \tag{6}$$

得到 ε_{m} 与 ε_{j}，ε_{j} 与 ε_{g} 之间的关系：

$$\varepsilon_{\mathrm{m}}=\varepsilon_{\mathrm{j}}+\frac{h_{\mathrm{m}}}{2G_{\mathrm{m}}}\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}\right]\frac{\mathrm{d}^{2}\varepsilon_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}x^{2}} \tag{7}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{j}}=\varepsilon_{\mathrm{g}}+\frac{h_{\mathrm{c}}}{2G_{\mathrm{j}}}\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}+\frac{r_{\mathrm{g}}E_{\mathrm{g}}}{2}\right]\frac{\mathrm{d}^{2}\varepsilon_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}x^{2}} \tag{8}$$

最终得到 ε_{m} 与 ε_{g} 之间的关系：

$$\varepsilon_{\mathrm{m}}-\varepsilon_{\mathrm{g}}=\left\{\frac{h_{\mathrm{c}}}{2G_{\mathrm{j}}}\cdot\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}+\frac{r_{\mathrm{g}}E_{\mathrm{g}}}{2}\right]+\frac{h_{\mathrm{m}}}{2G_{\mathrm{m}}}\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}\right]\right\}\frac{\mathrm{d}^{2}\varepsilon_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}x^{2}} \tag{9}$$

取：

$$\frac{1}{k^{2}}=\left\{\frac{h_{\mathrm{c}}}{2G_{\mathrm{j}}}\cdot\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}+\frac{r_{\mathrm{g}}E_{\mathrm{g}}}{2}\right]+\frac{h_{\mathrm{m}}}{2G_{\mathrm{m}}}\left[\frac{\pi r_{\mathrm{g}}^{2}E_{\mathrm{g}}}{L}+\frac{(S-\pi r_{\mathrm{g}}^{2})E_{\mathrm{j}}}{L}\right]\right\} \tag{10}$$

则有：

$$\varepsilon_{\mathrm{m}}-\varepsilon_{\mathrm{g}}=\frac{1}{k^{2}}\frac{\mathrm{d}^{2}\varepsilon_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}x^{2}} \tag{11}$$

解得：

$$\varepsilon_{\mathrm{g}}(x)=\left[1-\frac{\cosh(kx)}{\cosh(kl)}\right]\varepsilon_{\mathrm{m}} \tag{12}$$

由此得到 FBG 测得应变与基材实际应变的比值，即应变传递率：

$$\alpha(x)=\frac{\varepsilon_{\mathrm{g}}(x)}{\varepsilon_{\mathrm{m}}}=1-\frac{\cosh(kx)}{\cosh(kl)} \tag{13}$$

因此整个粘结段 $2l$ 长度上的平均应变传递率为

$$\alpha_{\mathrm{av}}=\frac{\overline{\varepsilon_{\mathrm{g}}(x)}}{\varepsilon_{\mathrm{m}}}=\frac{1}{2l}\int_{-l}^{l}\alpha(x)\mathrm{d}x=1-\frac{\sinh(kl)}{kl\cosh(kl)} \tag{14}$$

通过式(10)和(14)可以得到传感元件应变传递效率的主要影响因素包括：粘结层弹性模量 E_{j}、粘结层下部厚度 h_{c} 等。

图 2 及以上公式中各参数表示含义见表 1。

表 1　应变传递理论模型参数

基本参数	说明
r_{g}/mm	光纤光栅半径
l/mm	光栅半粘结长度
h_{n}/mm	光栅上部粘结层厚度
h_{c}/mm	光栅下部粘结层厚度
h_{m}/mm	粘结层对基体影响深度
x/mm	传感元件轴向长度
y/mm	传感元件径向深度
E_{g}/GPa	光栅弹性模量
E_{j}/GPa	粘结层弹性模量
E_{m}/GPa	基体弹性模量
σ_{g}/GPa	光栅轴向应力
σ_{j}/GPa	粘结层轴向应力
σ_{m}/GPa	基体轴向应力
τ_{gj}/GPa	光栅与粘结层界面剪应力
τ_{mj}/GPa	粘结层与基体界面剪应力
μ_{j}	粘结层泊松比
μ_{m}	基体泊松比

1.3　光栅中心波长与基体应变关系的光力转换理论方程

光栅应变传感的光-力转换理论方程是指待测基材应变与 FBG 中心反射波长之间的关系，由式(2)与(12)可得该方程为

$$\frac{\Delta\lambda_{\mathrm{B}}}{\lambda_{\mathrm{B}}}=(1-P_{\mathrm{e}})\left[1-\frac{\sinh(kl)}{kl\cosh(kl)}\right]\varepsilon_{\mathrm{m}}=K_{\varepsilon}\alpha_{\mathrm{av}}\varepsilon_{\mathrm{m}}=$$

$$K_{\varepsilon\alpha} \cdot \varepsilon_m \tag{15}$$

其中，$K_{\varepsilon\alpha}=K_\varepsilon \cdot \alpha_{av}$ 为传感元件波长应变灵敏度系数，α_{av} 为平均应变传递率。光-力转换方程的建立为 FBG 形状传感器传感元件的应变传递率对传感性能的影响分析提供了理论依据。

2 结构参数影响作用分析

2.1 粘结层弹性模量和泊松比对平均应变传递率影响分析

当粘结层材料弹性模量 E_j 在 $1\times10^3 \sim 1\times10^{19}$ Pa 之间变化时，分别绘制粘结层泊松比 $\mu_j=[0.15, 0.35, 0.55]$ 条件下的粘结层弹性模量对 FBG 传感元件平均应变传递率 α_{av} 的影响变化曲线，如图 3 所示。

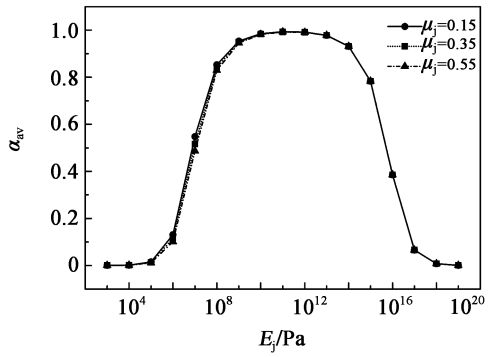


图 3 不同泊松比下粘结层弹性模量对平均应变传递率的影响

可以看出，当粘结层材料泊松比 μ_j 为定值时，平均应变传递率随弹性模量 E_j 的增大先逐渐增大后逐渐减小。当弹性模量 E_j 在 $1\times10^9 \sim 1\times10^{14}$ Pa 之间变化时，平均应变传递率逐渐趋近且稳定保持在 0.97 附近，粘结层泊松比 μ_j 的变化对平均应变传递率的影响较小。因此，在粘结剂选取时应当重点考虑粘结剂的弹性模量是否符合要求。结合以上分析，在传感元件制作过程中考虑选取环氧树脂胶作为粘结剂，其材料弹性模量为 $E_j=3.5\times10^9$ Pa，泊松比 $\mu_j=0.35$，符合设计范围要求。

2.2 粘结层厚度对平均应变传递率影响分析

当光栅上部粘结层厚度 $h_n=[0.01, 0.05, 0.10]$ mm 时，分析光栅下部粘结层厚度 h_c 的变化对平均应变传递率的影响作用，结果如图 4 所示。

可以看出，当光栅上部粘结层厚度 h_n 恒定时，平均应变传递率随光栅下部粘结层厚度 h_c 的逐渐增大而减小，当 h_c 在 0.05 mm 左右时，平均应变传递率下降速率约为 0.257%/0.01 mm。当光栅上部粘结层厚度 $h_n=[0.01, 0.05, 0.10]$ mm 时，平均应变传递率变化趋势较为接近。理论分析表明，光纤下部粘结层厚度越小，应变传递率损耗越小，平均应变传递率越大。但粘结层过薄，无法将光纤牢固粘结在基材表面，这点也需在传感元件制作过程中加以考虑。

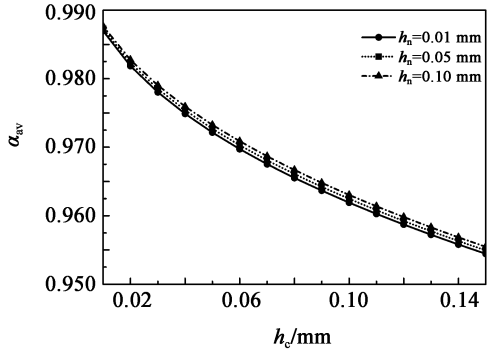


图 4 光栅下部粘结层厚度对平均应变传递率的影响

3 FBG 传感元件有限元仿真分析

3.1 FBG 传感元件有限元分析算例建立

为验证应变传递理论模型的有效性，建立传感元件有限元分析模型。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。在两条路径上分别插入 50 个取值观察点，经过加载计算后，将两条路径的 50 个应变值相比，得到 50 个观察点的应变传递率。并与应变传递模型理论分析结果进行对比，如图 5 所示。

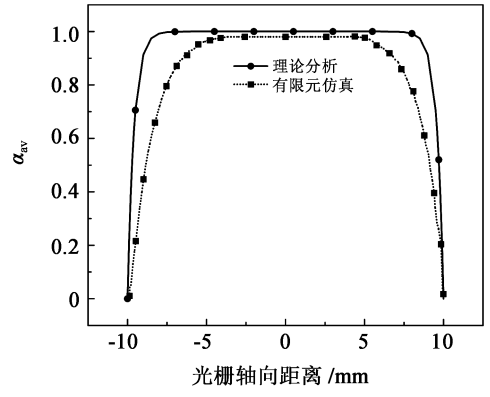


图 5 平均应变传递率随光栅轴向距离变化

由图可知，应变传递理论分析和有限元仿真结果变化趋势一致。在传感元件中部 10 mm 长度内两者得到的应变传递率基本相等；在两端 7.5 mm 附近存在最大 5%的误差，且有限元仿真应变传递率略小于理论分析值。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，只考虑传感元件轴向变形，未考虑其径向变形，而有限元计算中粘结层的末端存在较大的剪应力导致传感元件各层应变在端部存在一定的不均匀，使得应变传递值的理论值与仿真值有所差异。

3.2　结构参数对应变传递率影响分析

3.2.1　粘结层弹性模量对应变传递率影响分析

当粘结层弹性模量 E_j 在 $1\times10^3\sim1\times10^{19}$ Pa 之间变化时，在有限元分析算例中分别提取基材和 FBG 观察点处应力值，计算得到传感元件平均应变传递率，并与理论计算结果进行对比，如图 6 所示。

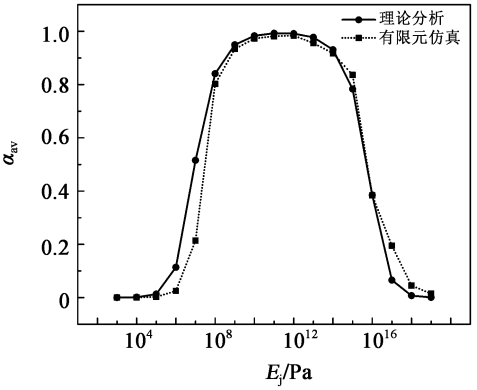


图 6　粘结层弹性模量对平均应变传递率的影响

可以看出，有限元分析结果与理论计算结果变化趋势一致，可以验证传感元件平均应变传递率理论模型的有效性。当粘结层弹性模量 E_j 在 $1\times10^9\sim1\times10^{14}$ Pa 之间变化时，平均应变传递率的有限元分析值和理论计算值均稳定保持在 0.97 附近，其理论计算值略大于有限元分析值，两者相差约 0.03。

3.2.2　粘结层厚度对应变传递率影响分析

当粘结剂弹性模量 $E_j=3.5\times10^9$ Pa 时，分析粘结层厚度对应变传递率的影响效果，如图 7 所示。

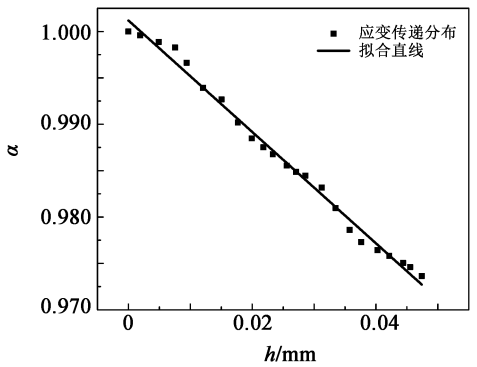


图 7　粘结层厚度对应变传递率的影响

可以看出，粘结层中应变传递率随着粘结层厚度的增大而逐渐减小，变化趋势近似呈直线下降，直线拟合相关性系数 R^2 为 0.992，拟合效果较好。同时得到粘结层应变传递率变化幅度为 −0.6%/0.01 mm，该系数是造成 FBG 与基材之间应变传递误差的直接原因，该分析结果同时也验证了图 4 中在较好的粘结层弹性模量范围内应变传递率的稳定值为 0.97。

4　FBG 传感元件应变传递率对形状传感精度影响分析

4.1　传感元件弯曲形状重建

通过将 FBG 形状传感器传感元件嵌入标准模具中，连接 FBG 解调仪，收集各栅点波长漂移量，根据式(15)计算各光栅点处的应变值，并代入传感系统形状重建算法，最终得到各光栅点的坐标值，重建出传感元件弯曲形状。其中 FBG 传感元件的长度为 210 mm，共 7 个光栅点，每个光栅点间隔 30 mm。如图 8 所示，以初始重建形状为基准，为下文中单个光栅点处应变传递率变化对传感系统形状重建误差的影响分析提供参考标准。

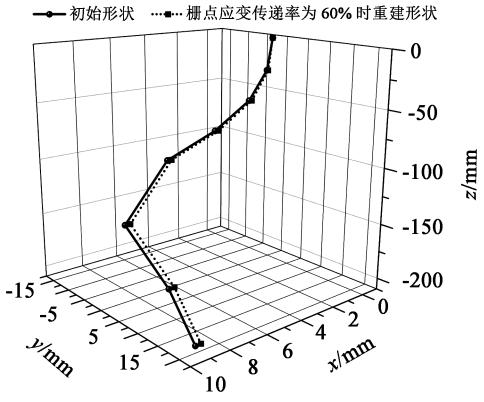


图 8　传感元件弯曲形状重建

4.2　应变传递率对形状传感精度影响分析

当第一位置点光栅 3 处的应变传递率分别为 90%，80%，70%，60%，50%，40% 和 30% 时，分别重建传感元件弯曲形状，并与初始重建形状进行对比，分析应变传递率对形状重建位置误差的影响。图 8 中展示了当应变传递率为 60% 时的传感元件重建形状，可以看出，当光栅点应变传递率为 60% 时，传感元件形状重建位置相对初始形状出现明显偏移，形状重建位置误差明显增大。

设点 (x_{i0},y_{i0},z_{i0}) 为初始重建形状中光栅位置

点的坐标，点(x_i, y_i, z_i)为加入应变传递误差后传感系统重建形状中对应位置点的坐标值，d_i是两点之间的空间距离，$d_{\max}$是各d_i值中的最大值，用来表示形状重建位置的绝对误差，且有下式成立：

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2 + (z_i - z_{i0})^2} \tag{16}$$

$$d_{\max} = \max(d_i) \tag{17}$$

分别计算光栅点处应变传递率在30%～90%之间变化时，传感系统重建形状中光栅点位置的绝对误差值$d_{\max}$。图9所示为光栅点位置绝对误差随应变传递率的变化曲线，可以看出，随着应变传递率的逐渐增大，曲线斜率逐渐逐渐增大，位置绝对误差减小幅度增大。在应变传递率由30%增大至40%的过程中，位置绝对误差减小了0.022 mm；在应变传递率由60%增大至70%的过程中，位置绝对误差减小了0.064 mm；在应变传递率由90%增大至100%过程中，位置绝对误差减小了0.080 mm，即当光栅点应变传递率保持在90%以上时，光栅点的重建位置误差将保持在0.080 mm内。因此，应变传递率越高，每提高一个传递率百分点，光栅点重建位置绝对误差变化越大，形状传感精度提升越明显。

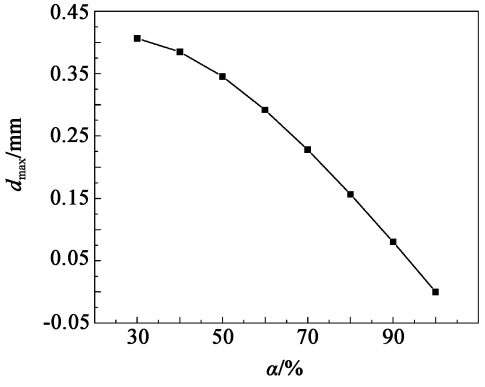


图9 应变传递率对重建位置误差的影响

5 结论

FBG形状传感器传感元件应变传递理论模型分析结果表明：理论计算与有限元仿真结果中应变传递率随光栅轴向距离分布变化趋于一致，光栅中心位置处的应变传递率基本相等；光栅粘结长度越长，平均应变传递率越大；当粘结层材料弹性模量在1×10^9～1×10^{14} Pa之间变化时，理论计算与有限元仿真应变传递率均稳定保持在0.97附近；粘结层厚度对应变传递率的影响约为−0.6%/0.01 mm。在应变传递率对传感系统光栅点重建位置误差的影响规律分析中，得出应变传递率越高，每提高一个应变传递率百分点，光栅点重建位置绝对误差变化量越大，形状传感精度提升越明显；且当光栅点应变传递率保持在90%以上时，光栅点的重建位置误差将保持在0.080 mm内。因此，通过合理控制光栅应变传递率的影响参数，能有效提高传感元件的应变传递率，减小传感系统的形状重建位置误差，达到提升光纤形状传感器形状重建精度的目的。

参考文献：

[1] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. J. of Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1263-1276.

[2] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(20): 2237-2240.

[3] Lun T L T, Wang K, L J D, et al. Real-time surface shape sensing for soft and flexible structures using fiber Bragg gratings[J]. IEEE Robotics and Automation Lett., 2019, 4(2): 1454-1461.

[4] 姜勐栋，张发祥，李淑娟，等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电，2017，38(2)：268-270.
Jiang Shaodong, Zhang Faxiang, Li Shujuan, et al. Application of FBG strain sensing system in ship structure monitoring[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 268-270.

[5] 刘 捷. 光纤传感应变检测理论、方法及其工程应用研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2016.
Liu Jie. Research on theory, method and engineering application of optical fiber sensor strain detection[D]. Wuhan: Wuhan University of Technol., 2016.

[6] Henken K, Van Gerwen D, Van Den Dobbelsteen J, et al. Accuracy of needle position measurements using fiber Bragg gratings [J]. Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies: MITAT: Official J. of the Society for Minimally Invasive Therapy, 2012, 21(5/6): 408-414.

[7] Roesthuis R J, Kemp M, Dobbelsteen J J V D, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2014, 19(4): 1115-1126.

[8] Moon H, Jeong J, Kang S, et al. Fiber-Bragg-grating-based ultrathin shape sensors displaying single-channel sweeping for minimally invasive surgery[J]. Optics and Lasers in Engin., 2014, 59: 50-55.

[9] Ryu S C, Dupont P E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots[C]// Proc. of 2014 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2014.

(下转第844页)

area fiber with circularly distributed cores [J]. Opt. Commun., 2017, 387: 79-83.

[12] Baggett J C, Monro T M, Furusawa K. Understanding bending losses in holey optical fibers[J]. Opt. Commun., 2003, 227(4-6): 317-335.

[13] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2007, 43(10): 899-909.

[14] White T P, Kuhlmey B T, Mcphedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. Ⅰ. Formulation [J]. J. of the Optical Society of America B, 2003, 19(10): 2322-2330.

[15] 王 甫, 江 淮, 易小龙, 等. 光纤光栅温度传感器增敏封装特性研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 73-76.
Wang Fu, Jiang Huai, Yi Xiaolong, et al. Sensitivity enhancement and encapsulation of fiber Bragg grating temperature sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 73-76.

[16] Xu Z, Zhao L. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.

[17] Masoudi A, Newson T P. High spatial resolution distributed optical fiber dynamic strain sensor with enhanced frequency and strain resolution[J]. Opt. Lett., 2017, 42(2):290-293.

[18] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 842-848.
Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 842-848.

[19] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 202-208.
Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic - electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-208.

[20] Zhou Y, Yan L S, He H J, et al. Brillouin optical time domain collider for fast dynamic sensing[J]. Opt. Express, 2020, 28(3):3965-3974.

[21] 张智娟, 郭文翰, 徐志钮, 等. 基于 φ-OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 9-16.
Zhang Zhijuan, Guo Wenhan, Xu Zhiniu, et al. Principle of optical fiber sensing technology based on φ-OTDR and its application status[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 9-16.

[22] 徐福华, 丁凤建, 陈 玲, 等. 高精度纳秒强电磁脉冲集成光学电场传感器性能分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 793-795.
Xu Fuhua, Ding Fengjian, Chen Ling, et al. Performance analysis on integrated optical electric field sensor for high-accuracy nanosecond intense electromagnetic pulse measurement [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 793-795.

[23] Wang E, Cheng P, Li J, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102161.

[24] 梅 甦, 蒋治国, 胡宗福. 谐振式光纤陀螺的误差及噪声分析[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 29-34.
Mei Su, Jiang Zhiguo, Hu Zongfu. Analysis on error and noise of resonant fiber optic gyros[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 29-34.

[25] Yuan L. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 1-5.

作者简介:

赵丽娟(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感与光纤通信;

徐志钮(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。

(上接第 838 页)

[10] 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(12): 2725-2730.
Shen Linyong, Xiao Hai, Qian Jinwu, et al. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2014(12): 2725-2730.

[11] Park Y L, Elayaperumal S, Daniel B, et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-915.

[12] 章亚男, 范 迪, 沈林勇, 等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1481-1491.
Zhang Yanan, Fan Di, Shen Linyong, et al. Strain transmission and accuracy experimenton fiber Bragg grating small-diameter shape sensors[J]. Optics and Precision Engin., 2019, 27(7): 1481-1491.

[13] Abayazid M, Kemp M, Misra S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors [C]// Proc. of 2013 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2013.

作者简介:

张冬伟(1995—),男,河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究方向为先进光学传感与仪器。