

光学学报

基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术

尹国路^{1,2}, 徐州¹, 蒋锐¹, 邓明^{1,2}, 朱涛^{1,2*}

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

²重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

摘要 光纤形状传感技术能够测量姿态、取向、径迹以及位置等三维空间信息,在精准介入医疗、变体飞行器以及连续体机器人等领域具有广泛应用前景。光频域反射仪具有高空间分辨率和分布式测量等特点,相较于光纤光栅的波分复用技术,在提高形状传感空间分辨率、形状重构精度以及传感长度等方面具有明显优势。在阐明光频域反射仪分布式应变传感原理的基础上,建立了弯曲形变与应变以及光纤瑞利散射光谱波长漂移之间的物理关系,同时构建了弯曲大小、弯曲方向以及挠率与空间曲线局部标架三个正交分量的数学关系,最后采用切向分量的线积分实现光纤三维形状重构。实验设计并制备了一种基于镍铬形状记忆合金丝与三根光纤束封装的形状传感器,其二维、三维形状末端的平均最大误差为传感器总长度的 0.58% 和 3.45%。

关键词 光纤传感; 分布式形状传感; 光频域反射仪

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0106002

Optical Fiber Distributed Three-dimensional Shape Sensing Technology Based on Optical Frequency-Domain Reflectometer

Yin Guolu^{1,2}, Xu Zhou¹, Jiang Rui¹, Deng Ming^{1,2}, Zhu Tao^{1,2*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems (Chongqing University), Ministry of Education,

Chongqing 400044, China;

²State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University,

Chongqing 400044, China

Abstract Optical fiber shape sensing technology can measure three-dimensional spatial information such as attitude, orientation, track, and position. It has broad application prospects in precision interventional medicine, variant aircraft, and continuum robots. The optical frequency-domain reflectometer features high spatial resolution and distributed measurement. Compared with the wavelength-division multiplexing technology of fiber gratings, it has distinct advantages in improving the spatial resolution of shape sensing, the accuracy of shape reconstruction, and the sensing length. In this paper, the physical relationships of bending deformation with strain and wavelength shift of the Rayleigh scattering spectra of the optical fibers were established after the principle of distributed strain sensing of the optical frequency-domain reflectometer was expounded. The mathematical relationships of the bending size, bending direction, and torsion with the three orthogonal components of the spatial curve local frame were determined. Finally, the three-dimensional shape reconstruction of the optical fibers was achieved via the line integral of the tangential component. A shape sensor based on the Ni-Cr shape memory alloy wire and encapsulated by three optical fiber bundles was designed and prepared in experiments. The average maximum errors of the two-dimensional and three-dimensional shape ends are 0.58% and 3.45% of the total length of the sensor, respectively.

Key words optical fiber sensing; distributed shape sensing; optical frequency-domain reflectometer

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-07; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61975022)、国家自然科学基金杰出青年基金(61825501)、重庆市自然科学基金创新研究群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0005)、重庆市英才青年拔尖人才基金(CQYC202005011)

通信作者: *zhutao@cqu.edu.cn

1 引言

光纤形状传感技术是一种测量光纤本身或者与之相连带测物体姿态、取向、径迹以及位置等三维空间信息的传感技术。凭借质量轻、体积小、灵敏度高,易集成以及抗电磁干扰性强等优势,光纤形状传感技术在精准介入医疗^[1-2]、变体飞行器^[3-5]以及连续体机器人^[6-8]等领域引起了广泛关注。介入医疗需要一种能够精确呈现介入器械进入人体完整形状轨迹的影像引导方法,使医生能够掌握手术器械在人体内的位置、弯曲、扭曲等三维形状信息,便于操纵手术器械按照预先设计的手术路径到达病灶位置。在未来变体飞行器方面,光纤形状传感技术能够实现柔性蒙皮的变形测量和主动控制,即通过监测翼表的应力分布,实时、充分、安全地提供机翼三维形状信息,并反馈回控制系统,以便实时调整机翼气动外形,从而使飞行器在起飞、巡航和着陆时获得最优的空气动力学性能。连续体机器人嵌入光纤形状传感器,可以连续、实时地获得智能臂的形状姿态和运动状态,以实现先进的控制策略。

光纤形状传感技术的测量基础是获得光纤传输路径上由于变形而产生的应变响应。光纤布拉格光栅(FBG)是一种常用的力学传感单元,结合波分复用技术,多个光栅阵列按照一定空间排布能够构成准分布式形状传感系统。基于光纤光栅的形状传感技术主要考虑三方面因素:首先,光栅传感器的数量和测量范围受限于光源带宽;其次,传感器的空间分辨率受限于光纤光栅的物理空间长度和光栅制备工艺;光纤光栅作为传感器发生较大的弯曲时,其曲率和扭转不断变化,可能会导致光纤光栅在应变分布不均匀情况下产生畸变或裂峰谱。FBG 传感单元数量有限,只能获得较稀疏的离散的应变采样点,更适合于形变变化缓慢(曲率梯度小)的短距离测量场景,通常采用分段插值、多项式拟合等方法估算整个待测物体的弯曲形状。例如,在介入医疗中光纤光栅按照 120°间隔嵌入在材料刚性大、形变单一、长度短的穿刺针或者活检针中,能够在末端单轴偏转实验中获得较好的测量精度。长度 15 cm 的穿刺针针尖发生 ±15 mm 偏转时,其针尖的最高精度可以达到 0.3 mm^[9]。使用不同的针长度和沿光纤不同距离分布的不同数量的 FBG 传感器,可获得 0.74~1.2 mm 的精度^[10-13]。与穿刺针相比,导管、内窥镜和连续体机器人等介入器械主要采用聚合物材料制作,具有更低的刚度和力学传递效率,并且结

构冗长(>100 cm)、形状弯曲更为复杂。美国约翰斯·霍普金斯大学开发了用于术后骨质溶解的连续体手臂^[14-16],并在其内壁间隔 10 mm 安装了三根光纤光栅,研究结果显示:自由弯曲时,末端位置的相对误差从静态测量的 1.1% 急剧上升至动态测量的 10%。遇障碍物时,光栅传感点之间的曲率线性插值不再准确,末端位置误差高达 7.8%。在航空航天领域,多组含有光纤光栅的传感器阵列嵌入到柔性蒙皮中,采用插值算法将离散的空间传感点的曲率拟合合成曲线,实现对不同机翼翼型下的面型重构,其光纤形状传感测量与视觉测量的误差在 -3.13%~4.62% 范围内^[17]。一种基于光纤光栅传感器的机翼后缘形态重构方法被用于可变弯度机翼后缘形态与偏转角度的实时监测方面,其形态重构相对误差约为 6.39%,偏转角度辨识相对误差约为 7.47%^[18]。

1981 年,Eickhoff 等^[19]首次提出了基于光纤后向瑞利散射的光频域反射仪(OFDR)。该技术具有高空间分辨率和分布式测量等特点,相继开展了应变^[20-23]、温度^[24-25]、扭曲^[26]、测斜^[27]、振动^[28-29]、偏振态分析^[30]等测量应用研究。2006 年,美国 Luna 公司率先采用 OFDR 解调多芯光纤中的光纤光栅阵列实现了形状和位置测量,所有光栅具有几乎相同的反射波长和反射率,长度为 0.5 cm,间隔为 1 cm^[31],研究结果表明二维、三维形状的精度分别为光纤长度的 2.1% 和 3.9%。2007 年,Duncan 等^[32]采用 OFDR 技术对比了光纤光栅和分布式后向瑞利散射的形状传感方法,发现基于后向瑞利散射的 OFDR 技术提高了形状测量精度。在卷轴直径测量的实验中,FBG 阵列的测量误差为 1.9 mm,而基于瑞利散射的测量误差降低至 0.3 mm。2012 年,美国国家航空航天局(NASA)采用 Frenet-Serret 标架重建空间三维曲线,在一定程度上削弱了光纤光栅多样条插值和多项式拟合带来的形状重构误差,同时指出末端误差几乎随着光纤长度加长而增加^[33]。例如,0.84 m 和 1.11 m 的光纤末端误差分别达到 5.80 mm 和 70.07 mm,整个长度范围内的均方根误差为 4.77 mm 和 32.58 mm。加拿大蒙特利尔理工学院通过紫外曝光增强了普通单模光纤的瑞利散射强度,提高了 OFDR 测量的信噪比,穿刺针末端平均测量精度提升 47%^[34]。此后,他们在体外血管模型和活体猪内分别进行了导管的三维形状传感,发现长度 20 cm 导管的末端误差分别为 1.2 mm 和 2.8 mm^[35]。2019 年,Chong 等^[36]

采用局部光谱匹配方法,通过匹配瑞利散射光谱中最相似的部分来确定应变诱发的波长变化,从而极大削弱大应变或者大梯度应变在 OFDR 互相关运算中产生的假峰和多峰现象。

本文在综述光纤形状传感技术研究进展的基础上,阐述了基于 OFDR 的分布式形状传感原理和形状重构算法,采用三根光纤束封装的方法,抑制了光纤本身的轴向扭曲效应,实现了高空间分辨率、高精度、三维分布式形状测量。

2 基于光频域反射仪的光纤形状传感技术原理

2.1 光频域反射仪的系统原理

图 1 表示基于 OFDR 的光纤形状传感系统。

扫频激光功率比为 99:1 的光纤耦合器 C1 分为两路。1% 的光经过两个 50:50 的耦合器和延迟光纤构建辅助干涉仪,随后在光电探测器 PD1 处产生拍频信号。该拍频信号用于提取光源的瞬时相位,进而补偿激光光源的非线性扫描效应。C1 耦合器输出的 99% 的光进入主干涉仪光路,经耦合器 C2 后被分为两路进行传输,1% 的光进入参考臂,99% 的光进入测量臂,测量臂的光信号经过环形器和光开关进入形状传感光纤中。形状传感光纤的后向瑞利散射光经环形器 3 端口与参考光共同进入偏振分集接收装置。参考光和测量光的两个垂直偏振态分量分别经过保偏耦合器 C5 和 C6,在光电探测器 PD2 和 PD3 处产生拍频信号。主干干涉仪和辅助干涉仪的拍频信号由四通道采集卡进行采集。

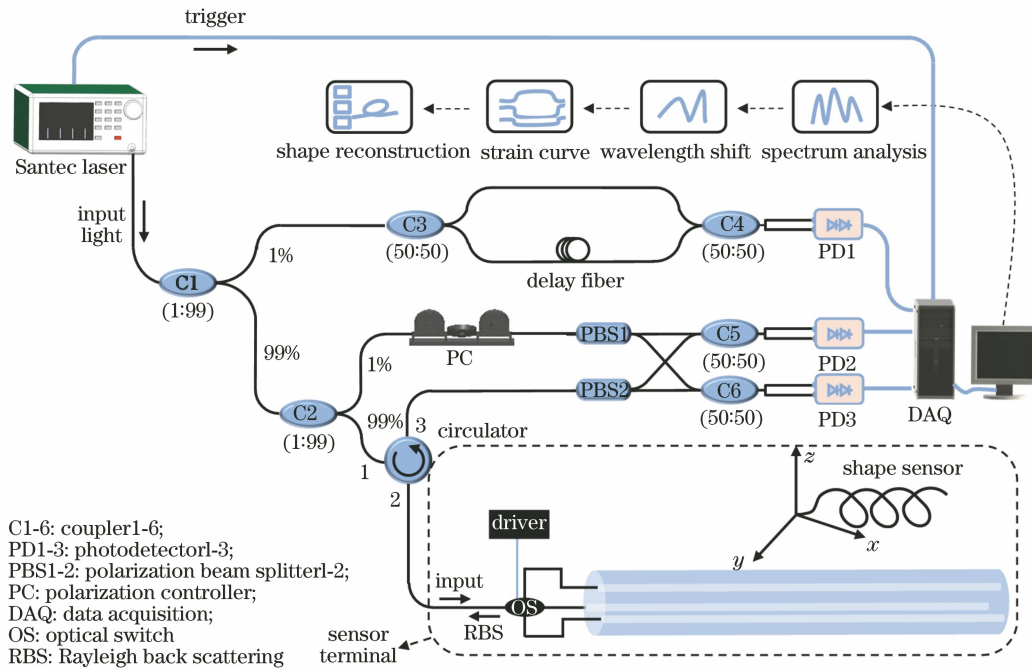


图 1 基于光频域反射仪的分布式形状传感系统图

Fig. 1 Schematic diagram of shape sensing based on the optical frequency domain reflectometer

基于光纤后向瑞利散射的光频域反射技术,将单模光纤中的微元片段作为传感单元,利用后向瑞利散射光与参考光形成拍频干涉信号。如图 2(a) 所示,瑞利散射可等效为大量随机反射点,并与参考信号间形成干涉拍频。沿光纤路径上的拍频率随着距离的增加而不断增大。返回的后向瑞利散射光进行叠加,拍频项的叠加结果可表示为

$$I(t) = \sum_{i=1}^N R_i \cos[2\pi(f_{bi}t + \varphi_{zi})], \quad (1)$$

式中, R_i 表示干涉拍频信号的强度, f_{bi} 为不同距离处的拍频频率, φ_{zi} 为不同距离处的拍频相位且与时

间无关, z 表示待测光纤距离, N 为拍频信号个数。如图 2(b) 所示,光纤上某位置发生应变将引起干涉拍频的相位发生变化。光弹效应下应变导致的相位变化可以表示为^[37]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L (1 - P_e) \Delta\epsilon, \quad (2)$$

式中, λ 表示光源扫描的中心波长, L 表示待测光纤长度, $P_e = n^2 [P_{12} - (P_{11} + P_{12})\nu] / 2$ 为光纤材料的有效弹光系数, P_{11} 、 P_{12} 为光纤的光弹系数, ν 为纤芯材料泊松比, n 为纤芯有效折射率, $\Delta\epsilon$ 为光纤纵向应变变化量。除了应变引入相位变化,波长变

化同样会产生相位变化,对等式 $\varphi = 2\pi L/\lambda$ 两边同时进行微分得到

$$\Delta\varphi' = \frac{2\pi \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2} L, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda$ 表示瑞利散射光谱的波长漂移量。比较 (2) 式和 (3) 式,应变产生的相位改变可以被波长的变化所补偿,即 $\Delta\varphi' = \Delta\varphi$ 。因此,应变引起的瑞利

散射光谱的波长变化可以表示为

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P_e) \cdot \Delta\epsilon. \quad (4)$$

综上所述,OFDR 分布式应变测量的本质是测量应变产生的相位改变,在实际测量中采用相位补偿的思想,建立瑞利散射光谱的波长漂移量与应变之间的关系,并通过参考组和测量组信号的互相关运算获得,从而实现对应变信息的解调。

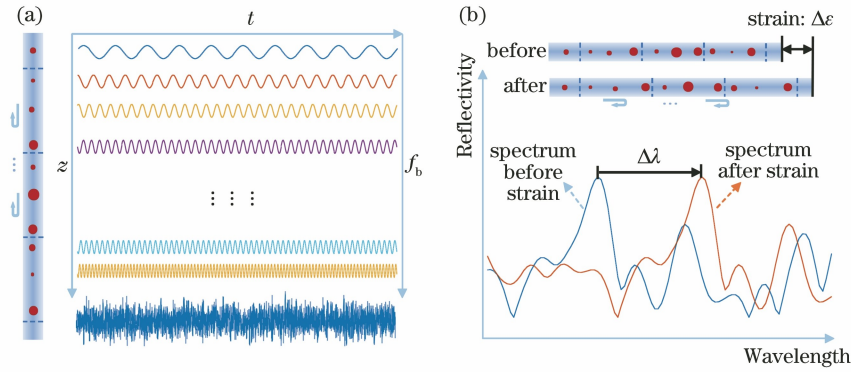


图 2 光频域反射仪的原理示意图。(a)干涉拍频信号的叠加;(b)应变前后拍频干涉的光谱

Fig. 2 Principle diagram of the optical frequency domain reflectometer. (a) Superposition of interference beat signals; (b) spectrum of beat frequency interference before and after strain

2.2 形状传感原理及重构方法

光纤三维形状传感的基本思路是采用沿周向 120° 间隔排布的三个光纤传感单元获取沿传感器轴向各位置处的弯曲大小及弯曲方向,如图 3 所示。 d 表示传感器中心至传感光纤的距离, ρ 为形状传

感器的弯曲半径, $\kappa = 1/\rho$ 为形状传感器的弯曲曲率, $\alpha_i (i=1,2,3)$ 为截面上各根光纤与 x 轴正方向的夹角且两两夹角间相差 120°, θ 为弯曲方向与 x 轴正方向的夹角。

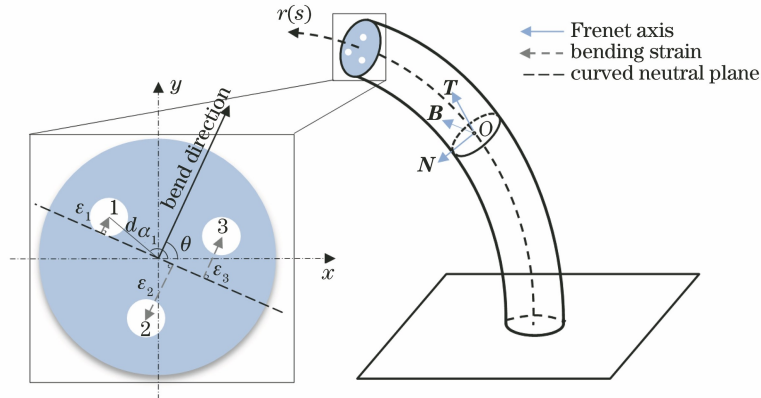


图 3 形状传感器弯曲示意图

Fig. 3 Bending diagram of shape sensor

形状传感器发生弯曲形变产生的应变可以表示为

$$\Delta\epsilon_{\max} = d/\rho, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \cos(\alpha_1 - \theta) \cdot \Delta\epsilon_{\max} \\ \epsilon_2 = \cos(\alpha_2 - \theta) \cdot \Delta\epsilon_{\max} \\ \epsilon_3 = \cos(\alpha_3 - \theta) \cdot \Delta\epsilon_{\max} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $\Delta\epsilon_{\max}$ 表示当光纤与中性面垂直距离为 d 时

的最大应变变化量。 ϵ_i 表示第 i 号传感光纤由于弯曲形变产生的应变值。当光纤与中性面垂直距离为 d 时,将 (5) 式与 (4) 式联立可获得传感光纤的曲率灵敏度系数

$$\kappa = \frac{\Delta\lambda}{\lambda \cdot d \cdot (1 - P_e)} = \frac{\Delta\lambda}{K_\epsilon}, \quad (7)$$

式中,定义 $K_\epsilon = (1 - P_e)\lambda d$ 为曲率灵敏度系数。

由(7)式可知,当光纤与中性面垂直距离为 d 时,传感器的弯曲曲率与波长漂移量呈线性关系。结合(4)~(7)式可知,只要测得了波长漂移曲线便能推导出光纤各点的弯曲曲率、弯曲方向以及绕率等参数,然后结合空间三维曲线的 Frenet-Serret 方程便可以重构光纤的形状。在笛卡尔坐标下,三维空间曲线可以表示为弧长 $s(0 \leq s \leq L, L$ 是光纤总长度)的参数方程 $\mathbf{r}(s) = x(s)\mathbf{i} + y(s)\mathbf{j} + z(s)\mathbf{k}$ 。曲线的局域 Frenet-Serret 标架具有三个单位矢量: \mathbf{T} 为单位切向量,方向与曲线的正向一致; \mathbf{N} 为单位主法线矢量,它指向曲线的凹向; \mathbf{B} 为单位副法线矢量, $\mathbf{B} = \mathbf{T} \times \mathbf{N}$, $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$ 构成右手系。 $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$ 与弯曲、扭曲存在严格的数学关系:单位弧长上切线向量 \mathbf{T} 转动角度即为弯曲曲率 $\kappa(s)$;副法线方向对于弧长的转动率即为绕率。因此, $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$ 存在如下关系

$$\begin{cases} \mathbf{T}'(s) = \kappa(s)\mathbf{N}(s) \\ \mathbf{N}'(s) = -\kappa(s)\mathbf{T}(s) + \tau(s)\mathbf{B}(s) \\ \mathbf{B}'(s) = -\tau(s)\mathbf{N}(s) \\ \mathbf{r}'(s) = \mathbf{T}(s) \end{cases}, \quad (8)$$

$$\kappa(s) = \frac{2\mathbf{K}(s)}{3}, \quad (9)$$

$$\tau(s) = \theta'(s), \quad (10)$$

$$\theta(s) = \arctan \left[\frac{\mathbf{K}_y(s)}{|\mathbf{K}_x(s)|} \right], \quad (11)$$

$$\mathbf{K}(s) = \sum_{i=1}^3 \frac{\epsilon_i(s)}{d_i} \cos \alpha_i \mathbf{x} - \sum_{i=1}^3 \frac{\epsilon_i(s)}{d_i} \sin \alpha_i \mathbf{y}, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{K}(s), \mathbf{K}_x(s)$ 和 $\mathbf{K}_y(s)$ 分别为 s 处总的曲率向量及其对应于 x, y 轴的分量, $\tau(s)$ 为 s 处的绕率, $d_i (i=1, 2, 3)$ 为基材中心至各根光纤的距离。 \mathbf{x}, \mathbf{y} 分别为 x, y 轴的单位向量。根据微积分定义,当变量 s 的步长无限小时, (8) 式可以转化为数值求解。

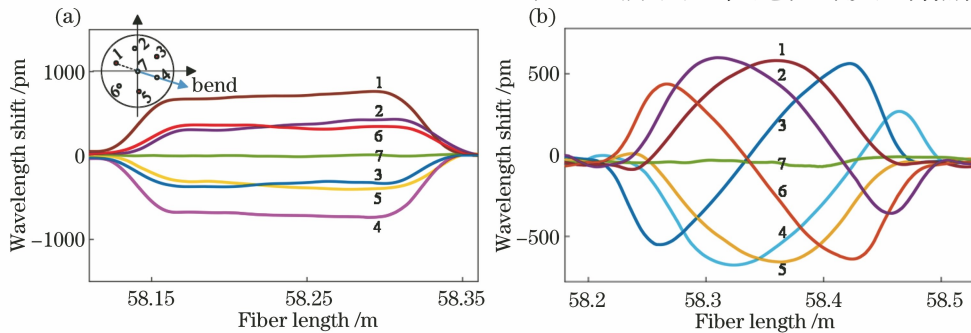


图 4 光频域反射仪测量多芯光纤弯曲半径 10 cm 产生的波长漂移。(a) 不存在扭转;(b) 存在扭转
Fig. 4 The wavelength shift measured by optical frequency domain reflectometer when seven core fiber has a bending radius of 10 cm. (a) Without torsion; (b) with torsion

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{T}(s + \Delta s) - \mathbf{T}(s)}{\Delta s} = \kappa(s)\mathbf{N}(s) \\ \frac{\mathbf{N}(s + \Delta s) - \mathbf{N}(s)}{\Delta s} = \tau(s)\mathbf{B}(s) - \tau(s)\mathbf{T}(s) \\ \frac{\mathbf{B}(s + \Delta s) - \mathbf{B}(s)}{\Delta s} = -\tau(s)\mathbf{N}(s) \\ \frac{\mathbf{r}(s + \Delta s) - \mathbf{r}(s)}{\Delta s} = \mathbf{T}(s) \end{cases}. \quad (13)$$

将边界条件为 $\mathbf{r}(0) = (0, 0, 0), \kappa(0) = (0), \tau(0) = (0), \mathbf{T}(0) = (1, 0, 0), \mathbf{N}(0) = (0, 1, 0), \mathbf{B}(0) = (0, 0, 1)$ 代入(13)式迭代后得到空间曲线上各位置处的单位切向量、单位法向量、单位副法向量及坐标。三维曲线 $\mathbf{r}(s)$ 定义为 $\mathbf{T}(s)$ 的逆向积分从而还原出空间曲线的形状

$$\mathbf{r}(s) = \int_0^s \mathbf{T}(s) ds. \quad (14)$$

3 形状传感器的三维形状感知实验

多芯光纤是一种多个纤芯共用同一包层的圆柱形电介质纤维波导,位于不同空间位置的各个纤芯对环境的感知程度也不相同,便于拓宽传感维度,构建环境参量的空间矢量信息,常被用作形状传感光纤。然而,光纤在发生多自由度弯曲时其本身不可避免地存在轴向扭曲,将导致反演弯曲方向时产生误差,降低形状重构精度^[33]。采用 OFDR 测量了七芯光纤发生半圆弯曲时产生的波长漂移。图 4 对比了多芯光纤存在与不存在轴向扭曲的波长漂移。理论上,当七芯光纤不存在扭转时,半圆形弯曲使得外侧与内侧纤芯分别产生拉伸和挤压应变,瑞利散射光谱分别发生“红移”和“蓝移”,且沿纤芯各位置具有相同弯曲方向,其波长漂移几乎不变,如图 4(a) 所示。当七芯光纤发生自然扭转时,沿纤芯

各位置具有不同的弯曲方向,根据(6)式可知,这将导致外围纤芯的波长漂移表现为不同程度上的波动,如图 4(b)所示。

多芯光纤的自然扭转无疑给传感器标定增加困难,同时增大了形状测量误差。为了抑制光纤的自然扭转效应,研制了一种柔性细径形状传感器,如图 5 所示。该传感器是将直径为 $250\ \mu\text{m}$ 的三根单模光纤按照 120° 间隔粘贴在镍铬形状记忆合金(SMA)丝周围构成。该形状传感器长为 $1\ \text{m}$,

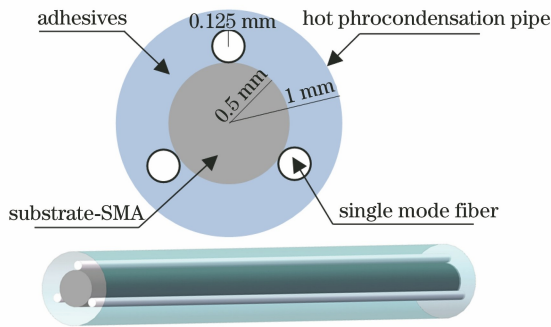


图 5 形状传感器结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of shape sensor

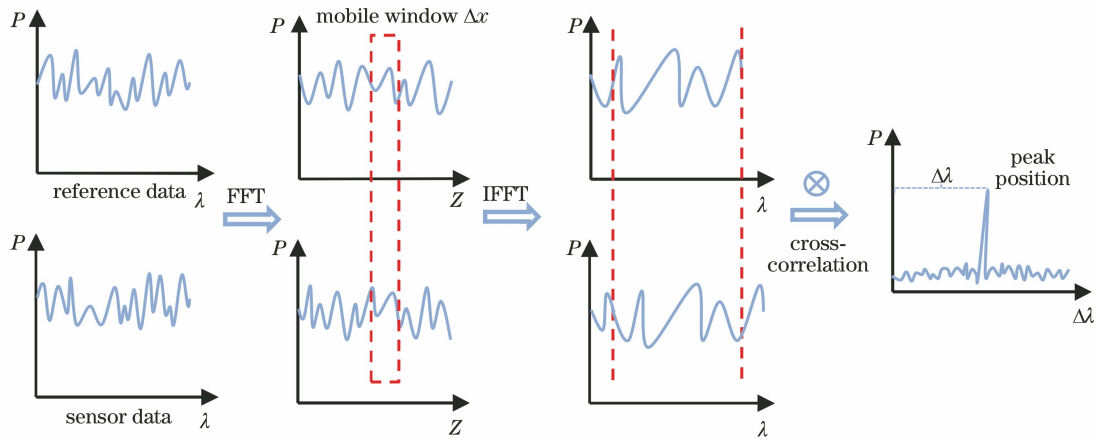


图 6 光频域反射仪的信号解调过程

Fig. 6 Signal demodulation process of the optical frequency domain reflectometer

瑞利散射光谱的波长漂移与弯曲曲率和弯曲方向有关。为了标定形状传感器的曲率灵敏度系数,首先需要校准传感光纤的空间位置。为此,固定亚克力半圆板半径为 $20\ \text{cm}$,如图 7(a)所示。间隔 30° 旋转形状传感器一周,逐步改变三根光纤的空间角度位置,并采用 OFDR 测量三根传感光纤的瑞利散射光谱在不同旋转角度下的波长漂移值。图 7(b)表示不同旋转角度下波长漂移的实际测量值和理论曲线,理论曲线根据(4)~(6)式获得,取 $\rho=20\ \text{cm}$, $d=0.625\ \text{mm}$ 。可见,测量值与理论曲线规律相

直径为 $2\ \text{mm}$,中心 SMA 丝的直径为 $1\ \text{mm}$ 。整个传感器内部被环氧树脂混合胶填充,外部套以热塑管进行保护。该传感器具有轻便、抗光纤自然扭转、易于集成在工程结构中实现分布式形状传感的优势。

3.1 形状传感器的曲率敏感系数标定

在实验中,瑞利散射光谱的波长漂移量可以通过发生形变前后参考组和测量组信号的互相关运算获得,具体解调过程如图 6 所示。

1) 首先,获取形状传感器形变前后的两组拍频信号,分别作为参考组和测量组信号;

2) 参考组和测量组信号经过快速傅里叶变换从频率域转换到距离域,然后在距离域上对两组信号进行加窗截取;

3) 加窗截取的两组距离域信号分别进行傅里叶逆变换获得形状传感光纤在该位置处的瑞利散射光谱信号;

4) 两组瑞利散射光谱信号进行互相关运算,获得形状变化产生应变对应的瑞利散射光谱的波长漂移量。当移动距离域的加窗位置,重复上述步骤,即可获得沿光纤各位置的波长漂移。

符,呈现三角余弦周期性变化规律,并且三根光纤的波长漂移曲线的相位差为 120° 。当传感光纤位置与传感器弯曲方向间的夹角为 180° 时,传感光纤受到拉伸应变,其波长漂移达到正向最大值。

在标定形状传感器的曲率灵敏度系数时,将三根传感光纤逐一旋转至与传感器弯曲方向夹角为 180° 的位置,改变亚克力半圆板的半径分别为 $20, 25, 30, 33, 36\ \text{cm}$ 。图 8(a)表示形状传感器其中一根传感光纤在不同弯曲半径时的波长漂移情况。在同一弯曲半径下,传感光纤沿半圆板圆周具有近似

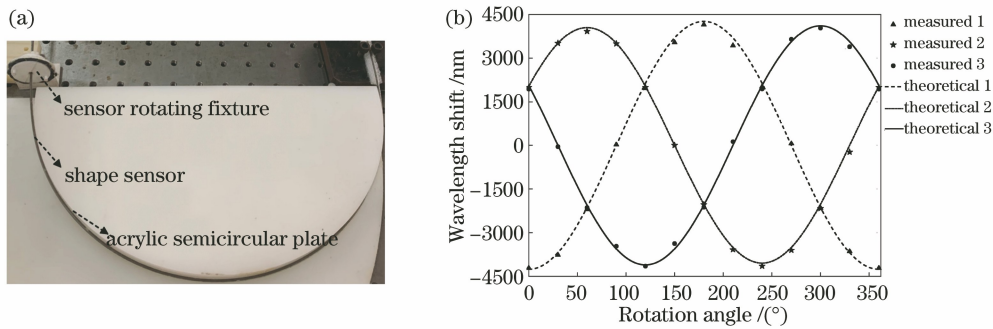


图 7 形状传感器标定实验。(a)实验装置图;(b)在相同弯曲大小、不同弯曲方向下的波长漂移曲线
Fig. 7 Calibration experiment of shape sensor. (a) Experimental setup; (b) wavelength shift curves of three fibers with the same bending radius and different bending direction

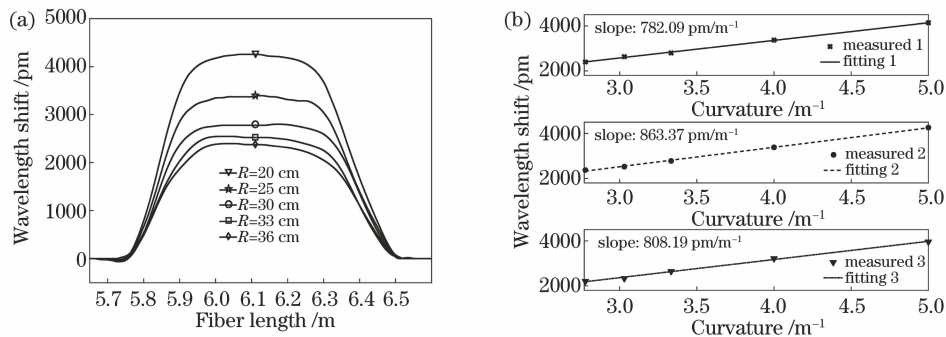


图 8 形状传感器的弯曲灵敏度标定实验结果。(a)光纤 #1 不同弯曲曲率下的波长漂移曲线;
(b)光纤 #1、#2 和 #3 的波长漂移随弯曲曲率的变化关系

Fig. 8 Experimental results of bending sensitivity calibration. (a) Wavelength shift along the sensing fiber #1 under different curvatures; (b) variation of wavelength shift of optical fibers #1, #2 and #3 with curvature

相同的波长漂移,且随着弯曲半径的变小波长漂移逐渐增加。图 8(b)表示三根传感光纤的波长漂移与弯曲曲率的关系。当传感器中光纤的角度位置相同时,瑞利散射光谱的波长漂移随着弯曲曲率的增加而线性增加。线性拟合结果表明三根光纤的弯曲灵敏度分别为 782, 863, 808 pm/m, 而理论弯曲灵敏度 K_e 为 775.58 pm/m。理论计算和实验测量的弯曲灵敏度之间的误差主要是由于封装装置加工误差和传感器空间角度的标定误差产生的。根据(7)式,利用拟合得到的弯曲灵敏度可推导出三根传感光纤与传感器截面几何中心的实际距离为 $d_1 = 0.647$ mm, $d_2 = 0.714$ mm, $d_3 = 0.668$ mm, 基本接近传感器的理论中心距 $d = 0.625$ mm。在后续形状测量时,代入实际测量的中心距对传感器形状进行重构。

3.2 二维和三维形状传感实验

在二维和三维形状传感实验中,激光器扫描速度设置为 40 nm/s,采集卡采样率设置为 20 MHz,采样时间为 0.4096 s,因此,激光器实际扫描波长范围为 16.384 nm,对应光频域反射仪距离域的空间

分辨率为 47.684 μ m。在进行应变测量时,选择了含有 200 个数据点的汉明窗对距离域信号进行加窗,对应的传感分辨率为 9.537 mm。为了获得更多的传感采样点并减少光谱泄漏,设置相邻窗之间的重叠率为 80%,因此,系统采样分辨率达到 1.907 mm,这很好地保障后续二维及三维形状测量中的传感精度要求。

在二维形状传感实验中,采用塑料吸盘对形状传感器的二维形状进行约束和固定,并采用坐标纸(最小刻度为 1 mm)来记录传感器各个位置的真实坐标,如图 9(a)所示。由于塑料吸盘具有一定尺寸,采用游标卡尺测量吸盘的中心点坐标。实验中共测量了四组不同的平面二维形状,OFDR 对每一组平面形状共进行 10 次测量,取 10 组测量的平均值作为测量形状,并与实际记录的传感器坐标位置对比,如图 9(b)所示。实验结果表明二维形状得到了较高精度的还原,还原的形状与真实的形状都保持同一平面上,并得到 1 m 形状传感器的尖端还原误差分别为传感器长度的 0.44%, 0.58%, 0.31% 和 0.21%。

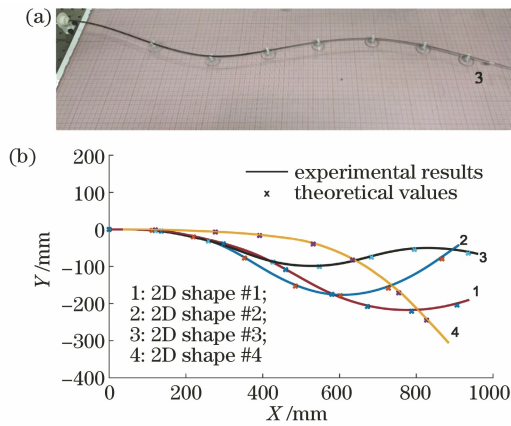


图 9 二维形状传感实验。(a)实验装置图；
(b)二维形状测量结果

Fig. 9 Experiment of two dimensional shape sensing.
(a) Experimental setup; (b) measured 2D shape

在三维形状传感实验中,采用不同的螺旋线形状对形状传感器的三维形状进行标定,实验装置如图 10(a)所示。采用 3D 打印的方法制备出一个壁

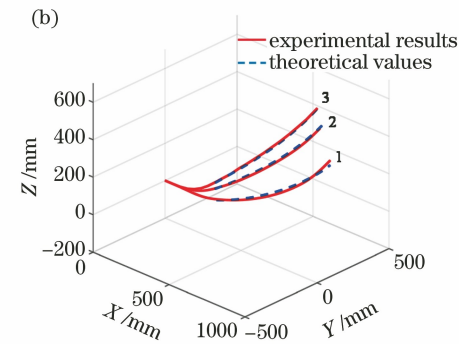
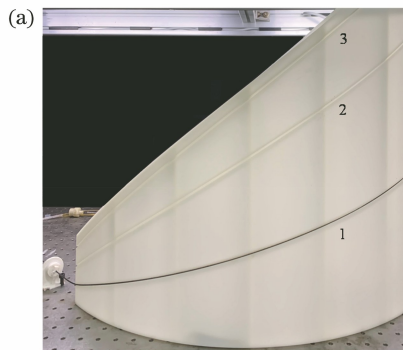


图 10 三维形状传感实验。(a)实验装置图;(b)三维形状测量结果

Fig. 10 Experiment of 3D shape sensing. (a) Experimental setup; (b) measured 3D shape

光纤形状传感技术主要包括基于 FBG 的波分复用技术、基于全同弱光栅的 OFDR 技术、基于光纤瑞利散射的 OFDR 技术以及基于布里渊时域分析仪的形状传感技术。其中,布里渊时域分析仪一般采用在传感光纤两端分别注入泵浦光和探测光的结构,能够获得厘米及以上的传感分辨率,数十千米的传感距离,更适合于对精度要求低但传感距离长的形状测量需求^[38]。表 1 将基于 FBG 的波分复用技术、基于全同弱光栅的 OFDR 技术与本文的研究结果进行对比。FBG 能够在短传感距离、末端小偏转下获得较好的形状测量精度^[9]。紫外激光曝光单模光纤增强瑞利散射之后结合 OFDR 技术能够提高传感系统的信噪比^[34],在穿

厚 3 mm、底面半径为 401.25 mm 的 1/4 圆桶模具,模具外表面设计有三条螺旋线形凹槽(深 2.5 mm、宽 2.5 mm),三条螺旋线形凹槽的螺距分别为 0.8, 1.6, 2 m, 对应凹槽长度分别为 659.4, 744.8, 803.0 mm。形状传感器先后嵌入在螺旋线凹槽中,并用透明胶带固定。螺旋线形凹槽的实际空间曲线可以通过螺旋线公式计算得到。

图 10(b)表示采用 OFDR 测量获得的三维螺旋线形状。与二维形状测量一样,对每一组三维形状进行 10 次测量,取其平均测量值与已知的螺旋线进行对比。实验结果表明重构出的形状与真实的形状符合得较好。考虑到整个系统存在微小的轴向封装误差以及固有的算法误差,空间三维形状的弯曲方向变化较快,进行多弯曲测量时随着积分误差逐渐累积,传感器尖端处的还原误差会比二维形状的尖端还原误差稍大。最终,1 m 形状传感器在三维形状传感实验中,其尖端平均误差分别为传感器长度的 2.56%, 3.45%, 1.10%。

刺针的偏转测量中获得了与 FBG 相近的传感结果。本文采用三根标准单模光纤(SMF)的瑞利散射和 OFDR 构成分布式形状传感系统,其二维形状末端的最大测量误差为 0.58%, 优于多芯光纤中刻写弱反射 FBG 阵列的 2.1%^[31]。在三维形状方面,两者具有相近的测量误差。两者比较而言,采用光纤瑞利散射具有更高的传感分辨率和更多的应变采样点。此外,多芯光纤中刻写全同 FBG 仍然面临光纤自聚焦和芯芯之间遮挡等技术难题^[39]。未来,将采用紫外激光^[40]或飞秒激光^[41]曝光光纤,增强光纤的瑞利散射强度,提高系统信噪比和应变测量精度,达到进一步提升传感器形状测量精度的目的。

表 1 典型光纤形状传感技术的对比

Table 1 Comparison of typical optical fiber shape sensing technologies

Reference	Technical solutions	Sensor structure	Sensor length /cm	Root mean square (RMS) error
Ref. [9]	FBG + wavelength division multiplexing	Three SMFs, each with two gratings	15	RMS error of the tip: 0.38 mm (Tip deflection is ± 15 mm)
Ref. [34]	OFDR	Three SMFs with enhanced Rayleigh scattering after UV light exposure	15	RMS error of the tip: (0.6 ± 0.2) mm (Tip deflection is ± 15 mm)
Ref. [31]	OFDR	Three-core fiber gratings	110	Maximum error at the end: 2.1% (2D shape); Maximum error at the end: 3.9% (3D shape)
Ref. [33]	OFDR	Three-core fiber gratings	111	Maximum error at the end: 70.07 mm (3D shape)
This article	OFDR	Three single-mode fibers	100	Maximum error at the end: 0.58% (2D shape); Maximum error at the end: 3.45% (3D shape)

4 结 论

本文提出了一种基于 OFDR 和光纤束的分布式三维形状传感系统。阐明 OFDR 分布式应变测量的基本原理是通过波长漂移补偿应变所产生的光学相位,并采用应变前后参考组和测量组瑞利散射光谱的互相关运算获得与之对应的波长漂移。建立弯曲形变与应变以及波长漂移的物理关系。采用以弧长(传感单元长度)的参数方程描述三维形状曲线,进而建立弯曲大小、弯曲方向以及挠率与空间曲线局域 Frenet-Serret 标架三个正交分量的数学关系,最后采用切向分量的线积分实现光纤三维形状重构。为了抑制光纤本身扭转产生的形状测量误差,设计并制备了一种基于镍铬形状记忆合金丝与三根光纤束封装的形状传感器,形状传感的实验结果表明,二维形状尖端的平均最大重构误差为传感器总长度的 0.58%,空间螺旋线型三维形状尖端的平均最大重构误差为传感器总长度的 3.45%。

参 考 文 献

- [1] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [2] Roesthuis R J, Janssen S, Misra S. On using an array of fiber Bragg grating sensors for closed-loop control of flexible minimally invasive surgical instruments [C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2013: 2545-2551.
- [3] Zhang J K, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 66-72.
张俊康, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.
- [4] Sun G K, Li H, Dong M L, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for a flexible morphing wing [J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9325-9332.
- [5] Nicolas M, Sullivan R, Richards W. Large scale applications using FBG sensors: determination of in-flight loads and shape of a composite aircraft wing [J]. Aerospace, 2016, 3(3): 18.
- [6] Zhuang W, Sun G K, Li H, et al. FBG based shape sensing of a silicone octopus tentacle model for soft robotics [J]. Optik, 2018, 165: 7-15.
- [7] Kim B, Ha J, Park F C, et al. Optimizing curvature sensor placement for fast, accurate shape sensing of continuum robots [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31 - June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 5374-5379.
- [8] Schmitz A, Thompson A J, Berthet-Rayne P, et al. Shape sensing of miniature snake-like robots using optical fibers [C] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 24-28, 2017, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2017: 947-952.
- [9] 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 Transactions on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-

- 915.
- [10] van der Heiden M S, Henken K R, Chen L K, et al. Accurate and efficient fiber optical shape sensor for MRI compatible minimally invasive instruments[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8550: 180-193.
- [11] Roesthuis R J, Kemp M, van den Dobbelsteen J J, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(4): 1115-1126.
- [12] Mandal K K, Parent F, Martel S, et al. Calibration of a needle tracking device with fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9415: 230-237.
- [13] Henken K, van Gerwen D, Dankelman J, et al. Accuracy of needle position measurements using fiber Bragg gratings[J]. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 2012, 21(6): 408-414.
- [14] Ryu S C, Dupont P E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 3531-3537.
- [15] Liu H, Farvardin A, Grupp R, et al. Shape tracking of a dexterous continuum manipulator utilizing two large deflection shape sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5494-5503.
- [16] Sefati S, Alambeigi F, Iordachita I, et al. On the effect of vibration on shape sensing of continuum manipulators using fiber Bragg gratings [C] // 2018 International Symposium on Medical Robotics (ISMR), March 1-3, 2018, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [17] Zhang X X, Song Y M, Meng F Y, et al. Flexible composite skin embedded optical fiber shape sensing for variant aircraft [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 0622003.
张雄雄, 宋言明, 孟凡勇, 等. 变体飞行器柔性复合蒙皮植入式光纤形状传感[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0622003.
- [18] Yu H Y, Li H F, Zeng J, et al. Monitoring technique for shape reconstruction of variable camber trailing edge based on optical fiber sensors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 220-227.
于惠勇, 李华峰, 曾捷, 等. 可变弯度机翼后缘形态重构光纤监测技术[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 220-227.
- [19] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fiber [J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695.
- [20] Wang C H, Liu K, Ding Z Y, et al. High sensitivity distributed static strain sensing based on differential relative phase in optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(20): 5825-5836.
- [21] Luo M M, Liu J F, Tang C J, et al. 0.5 mm spatial resolution distributed fiber temperature and strain sensor with position-deviation compensation based on OFDR[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35823-35829.
- [22] Zhao S Y, Cui J W, Suo L J, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3721-3727.
- [23] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
- [24] Li H, Liu Q W, Chen D, et al. Centimeter spatial resolution distributed temperature sensor based on polarization-sensitive optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2594-2602.
- [25] Zhu P Y, Wang Y T, Wang S B, et al. Measuring the two-dimensional temperature profile of carbon fiber reinforced polymers during drilling using distributed fiber sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4687-4696.
- [26] Yin G L, Lu L, Zhou L, et al. Distributed directional torsion sensing based on an optical frequency domain reflectometer and a helical multicore fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16140-16150.
- [27] Qiu T G, Sun Y Y, Lu T M, et al. Research on monitoring of horizontal displacement field of deep soil based on OFDR technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 108-112.
仇唐国, 孙阳阳, 卢天鸣, 等. 基于 OFDR 技术的深层土体水平位移场监测研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 108-112.
- [28] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [29] Arbel D, Eyal A. Dynamic optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 8823-8830.
- [30] Palmieri L, Geisler T, Galtarossa A. Distributed characterization of bending-induced birefringence in

- spun fibers by means of P-OFDR[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 21-25, 2010, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2010: OWS2.
- [31] Duncan R G, Raum M T. Characterization of a fiber-optic shape and position sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6167: 26-36.
- [32] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6530: 65301S.
- [33] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [34] Parent F, Loranger S, Mandal K K, et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers [J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(4): 2210-2221.
- [35] Parent F, Gérard M, Monet F, et al. Intra-arterial image guidance with optical frequency domain reflectometry shape sensing [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(2): 482-492.
- [36] Shao C, Yin G L, Lü L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(8): 082010.
- [37] Bertholds A, Dandliker R. Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(1): 17-20.
- [38] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [39] Lindley E, Min S S, Leon-Saval S, et al. Demonstration of uniform multicore fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31575-31581.
- [40] Yan A D, Huang S, Li S, et al. Distributed optical fiber sensors with ultrafast laser enhanced Rayleigh backscattering profiles for real-time monitoring of solid oxide fuel cell operations [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 9360.
- [41] Loranger S, Gagné M, Lambin-Iezzi V, et al. Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11177.