

# 光学学报

## 基于偏振分析的分布式横向压力光纤传感

冯亭<sup>1,2\*</sup>, 李芳<sup>1,2</sup>, 郭纪琛<sup>1,2</sup>, 路子億<sup>1,2</sup>, 何宗将<sup>1,2</sup>, 郝鹏<sup>1,2</sup>, 姚晓天<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北保定 071002;

<sup>2</sup>河北省光学感知技术创新中心, 河北保定 071002

**摘要** 随着应变、温度、振动等分布式光纤传感技术的不断深入发展和产品化程度的不断推进,人们越发意识到分布式横向压力光纤传感的重要性,尤其是准分布式光纤光栅等压力传感器在某些重要应用领域的不足越发凸显,对分布式横向压力光纤传感的研究更加迫在眉睫。与其他参量的分布式光纤传感技术相比,分布式横向压力光纤传感基础技术不足、存在机理瓶颈,参量转换的间接测量方法存在复杂度高、准确性差、难以实用化等显著问题。本文在综述前人开展的分布式压力光纤传感技术原理和存在问题的基础上,重点讨论近些年本课题组在基于偏振分析的分布式横向压力光纤传感方面率先开展的工作和取得的研究成果,主要集中在基于保偏光纤偏振串扰分析和单模光纤分布式全 Mueller 矩阵偏振分析的分布式横向压力光纤传感涉及的测量与解调系统、传感介质、系统性能及典型应用等方面,也对分布式横向压力光纤传感未来的发展方向与前景进行了展望。

**关键词** 分布式光纤传感; 横向压力; 偏振分析; 保偏光纤; 单模光纤

中图分类号 TN2536

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231315

### 1 引言

压力测量一直是工业和环境结构、医疗、国防建筑等领域所关注的重点,尤其是在油气井下及管道、岩土工程、配水及污水处理设施检测等方面需求强烈,通常以高精度、强鲁棒性和密集空间覆盖为特征<sup>[1-7]</sup>。诸多类型传感器已被开发来满足以上应用需求。传统的电子传感器,如载荷传感器、压强计和电容传感器,既不适合远程监测、对电磁干扰敏感,也不容易在大型传感器网络中复用<sup>[3]</sup>。单点光纤传感器技术作为压力传感的解决方案已被提出多年,光纤光栅、干涉仪等光纤单点压力传感器<sup>[8-10]</sup>具有侵入性弱、可远程供电和解调、多路复用能力强等优点,已被成功商品化。然而,即使将众多单点传感器密集复用构成准分布式光纤传感系统,也不能提供像分布式光纤传感那样丰富的信息量,因此准分布式传感系统的空间分辨率在众多应用领域无法满足需求<sup>[11-13]</sup>。虽然横向压力(TF/pressure)是研究者们最早关注的分布式光纤传感参量之一,但是相比于分布式应变和温度传感,分布式横向压力光纤传感的发展明显不足,至今仅有为数不多的研究报道。

由于分布式应变光纤传感的基础技术已经较为成熟,包括布里渊光时域反射(BOTDR)和布里渊光时

域分析(BOTDA)<sup>[14-17]</sup>、瑞利散射光频域反射(OFDR)<sup>[18-22]</sup>,部分研究者基于横向压力向轴向应变的转换,开展了分布式横向压力光纤传感的研究工作。基于商用 1550 nm 波段的 BOTDR 系统, Méndez 等<sup>[23]</sup>使用尼龙和硅树脂层材料相结合涂覆的石英光纤作为传感介质,实现了不锈钢容器中静水压力的测量,其传感灵敏度为普通单模光纤(SMF)的 10 倍、无涂覆层 SMF 的 5 倍。基于同样的技术, Le Floch 等<sup>[24]</sup>、Gu 等<sup>[25]</sup>分别对基于压力诱导普通 SMF 应变引起的布里渊频移特性进行了研究,得到了相近的传感灵敏度。使用全氟化渐变折射率聚合物光纤作为 BOTDR 传感介质, Mizuno 等<sup>[26]</sup>开展了静水压力的传感测量,由于此类光纤材料的软度高,横向压力诱导轴向应变量大,其传感灵敏度约为普通 SMF 的 6 倍。为了进一步增加压力传感灵敏度, Schenato 等<sup>[1]</sup>提出一种 SMF 特殊装配机构,将 SMF 以蛇形排布固定在两条拱形橡胶对压的中间部分,可有效将施加于拱形橡胶垂直方向的横向压力转换为光纤的轴向拉伸量,基于 OFDR 系统实现了高空间分辨率、高灵敏度的分布式横向压力传感。然而,特殊涂覆层 SMF 的压力诱导应变变量较小,传感灵敏度整体偏低;聚合物光纤损耗大而无法实现长距离传感,且 BOTDR 技术的空间分辨率较低;特殊

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-08-17; 录用日期: 2023-08-28; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(61975049)、河北省自然科学基金杰出青年科学基金(F2023201024)、河北省高等学校科学研究重点项目(ZD2022138)、河北大学多学科交叉项目(DXK202201)

通信作者: \*wlxyft@hbu.edu.cn

光纤装配系统的结构复杂且体积庞大,实用性差。

横向压力会引起保偏光纤(PMF)的双折射发生变化,测量沿光纤分布的双折射变化引起的两正交偏振光传输特性的差异性,为分布式横向压力传感提供了另一种思路。1980年,Rogers<sup>[27-28]</sup>提出了偏振光时域反射(POTDR)技术,利用高双折射边孔光纤(SHF)作为传感介质<sup>[29]</sup>,开展了压力诱导双折射变化的分布式测量,空间分辨率为1 m,测量长度为75 m。基于OFDR的光纤后向瑞利散射高分辨率分布式测量性能,Dai等<sup>[30]</sup>利用PMF受到横向压力后产生的慢轴传输光的瑞利散射偏振模耦合损耗进行分布式横向压力传感,测量空间分辨率为5 cm,测量动态范围可达70 dB。基于OFDR应变测量解调原理,Chen等<sup>[31]</sup>分别开展了保偏光子晶体光纤(PM-PCF)和SHF的分布式横向压力传感研究,可以建立施加压力后光纤两个正交偏振态的局部瑞利散射谱频移之差与压力大小的关系,测量空间分辨率为10 mm,测量长度为2 m。基于类似解调原理,引入正交偏振模式的自相关运算,Gerosa等<sup>[32]</sup>将毛细玻璃管中嵌入掺锗芯的嵌芯光纤(ECF)作为横向压力传感介质,实现了空间分辨率为10 mm的分布式测量,但实验光纤长度仅为77 cm。此外,通过在PMF两偏振主轴中分别激发受激布里渊散射并探测布里渊动态光栅反射光频率,结合BOTDA解调技术,Teng等<sup>[33]</sup>在细径PM-PCF中实现了分布式压力诱导双折射测量,进而实现了静水压力的传感,空间分辨率为20 cm,测量长度为4 m。可见,引入偏振相关分析可以建立横向压力与光纤传输信号的特异性关系,但SHF、PM-PCF、ECF等特种光纤制作困难、成本高,不太适合长距离分布式光纤传感应用,且POTDR技术的测量空间分辨率不够高。后来,相继有人研究了偏振相关OFDR(POFDR)技术,

实现了高双折射旋转光纤(SF)主轴旋转剖面<sup>[34]</sup>和压力对双折射影响的测量<sup>[35]</sup>,还实现了SMF弯曲对双折射的影响<sup>[36]</sup>和SMF弯曲诱导应力的测量<sup>[37]</sup>,为基于偏振测量的SMF分布式横向压力传感提供了思路。

另一种可实现分布式横向压力光纤传感的方案是基于PMF的分布式偏振串扰(耦合)分析(DPXA),主要通过建立横向压力与PMF沿线快、慢轴之间光能量的串扰/耦合比或偏振消光比的关系实现传感。1988年,Tsubokawa等<sup>[38]</sup>首次提出可以实现PMF分布式偏振模耦合测量的白光干涉仪方案,并对功率耦合系数随光纤横向压力和受力角度的变化进行了研究。陈信伟等<sup>[4]</sup>基于PMF DPXA的应力传感系统,实验检测的光纤长度可以大于1000 m,空间分辨率为98 mm,但没有考虑光纤受力角度对测量灵敏度的影响。Song等<sup>[39]</sup>研究了PMF因受到多个施力而出现二阶串扰所引起的“鬼峰”对测量结果的影响,也给出了“鬼峰”的有效检测方法,但没有提出消除或避免其出现的方法。随后几年,由于无法消除“鬼峰”的影响且没有PMF受力角度可控的相关技术,基于DPXA的分布式横向压力传感基本没有进展。

对已有研究结果进行总结,如表1所示。可见,已开展的分布式横向压力光纤传感研究主要分为偏振无关和偏振相关两大类。基于压力向应变转换的偏振无关间接测量方法存在转换机制/结构复杂、成本高、效率低、准确性差等缺陷,实用化前景一般。对比而言,基于压力诱导双折射或偏振串扰的直接分布式横向压力光纤传感可使用常规的PMF或SMF,有望实现简单、低成本、高分辨率、高准确性测量,具有更好的发展前景。然而,基于PMF的DPXA技术在解调系统和传感光纤施力方法等方面还存在技术瓶颈,基于SMF的分布式偏振分析(DPA)技术性能还有待提升,SMF

表1 已提出的分布式横向压力光纤传感技术

Table 1 Distributed TF/pressure fiber-optic sensing techniques proposed by previous researchers

Interrogation technique	Sensing medium	Measurement method	Sensitivity	Spatial resolution	Fiber length	Ref.
BOTDR	Nylon/silicone coated SMF		0.023 MHz/psi	—	—	[23]
	SMF	Pressure to strain conversion	-0.752 MHz/MPa	—	70 m	[25]
	Polymer optical fiber		4.3 MHz/MPa	—	3 m	[26]
OFDR	SMF in an engineered cable	Pressure to strain conversion	-30 GHz/kPa	8.5 cm	1 m	[1]
POTDR	SHF	Pressure induced birefringence	300 N/m <sup>2</sup>	1 m	75 m	[29]
OFDR	Common PMF	Polarization mode coupling loss	-80 dBm	5 cm	200 m	[30]
	PM-PCF		0.038 pm/psi	10 mm	—	[31]
	SHF	Pressure-induced birefringence	0.135 pm/psi	10 mm	—	[31]
	ECF		—	10 mm	77 cm	[32]
BOTDA	PM-PCF	Pressure-induced birefringence	199 MHz/MPa	20 cm	4 m	[33]
DPXA	Common PMF	Polarization crosstalk	-85 dB	98 mm	1050 m	[4]
POFDR	Bending insensitive SMF	Bending induced birefringence	10 kpsi	0.5 mm	800 m	[37]

Note: 1 psi=6.895 kPa.

分布式横向压力光纤传感尚未被验证。针对以上问题,本课题组近年来在基于偏振分析的分布式横向压力光纤传感方向开展了大量研究工作,突破了较多关键技术瓶颈。

本文旨在全面分析与讨论分布式横向压力光纤传感技术研究与发展现状及本课题组最新的研究成果。首先,回顾了在本课题组主要工作开展之前的已有研究成果,讨论了相关基本技术原理及测量性能。其次,总结了本课题组在基于 PMF DPXA 的分布式横向压力光纤传感方面开展的相关工作,包括无“鬼峰”PMF 白光迈克耳孙干涉仪 DPXA 系统构建、PMF 定轴布纤传感基带制作系统研制、PMF 分布式横向压力传感验证、基于扭转 PMF 和 SF 的受力角度无关传感机制研究等。然后,讨论基于 SMF DPA 的分布式横向压力光纤传感关键技术与最新研究成果,包括基于 OFDR 的 DPA 系统构建及性能验证、基于 SMF 的分布式横向压力光纤传感性能表征、基于 DPA 的内嵌 SMF 复合材料形变检测应用探索及 V 槽夹持固定光纤零附加双折射关键问题研究等。最后,对分布式横向压力光纤传感未来的发展方向与前景进行了展望。

## 2 基于 PMF DPXA 的分布式横向压力光纤传感

基于 PMF 的 DPXA 技术进行分布式横向压力光纤传感具有原理简单、无温度交叉干扰等优势<sup>[40-41]</sup>,其关键问题是分布式多点测量时存在的二阶串扰引起的“鬼峰”影响和受力角度无法定量控制造成的传感系统难以有效标定等。因此,DXPA 近些年主要被应用于光纤陀螺用 PMF 环原材料和绕制质量检测等方面<sup>[42-45]</sup>。下面将主要讨论本课题组在基于 PMF DPXA 的分布式横向压力光纤传感研究方面所开展的工作和最新研究成果。

### 2.1 横向压力诱导 PMF 偏振串扰原理

PMF 中产生偏振串扰的基本原理是局部产生偏振主轴错位,而横向压力可以直接引起偏振主轴旋转而导致错位。如图 1(a)所示,当外加横向压力  $F_{ex}$  以与快轴  $f$  方向成  $\alpha$  角施加到一段熊猫 PMF 上时,  $F_{ex}$  将与 PMF 中应力区导致的内力  $F_{in}$  形成合力  $F_c$ ,且  $F_c$  的方向与慢轴  $s$  方向成  $\theta$  角。根据光弹效应,合力  $F_c$  可诱导 PMF 产生新的慢轴方向,新慢轴方向与原方向成  $\theta$  角。也就是说,被施加横向压力  $F_{ex}$  的 PMF 段出现局部偏振主轴旋转,如图 1(b)所示。图 1(c)给出了与图 1(b)等价的情况,即 PMF 中间受力光纤段的偏振主轴与两边光纤段的偏振主轴错位。再如图 1(d)所示,受力光纤段长度为  $l$ ,PMF 拍长为  $L_{b0}$ 。由于受力光纤段产生偏振主轴错位,当光沿慢轴  $s$  方向入射到 PMF 中后,将在中间受力光纤段处产生耦合,部分光从慢轴耦合到快轴中,再在受力光纤段后的 PMF 产生慢轴到快轴的偏振串扰,串扰比<sup>[46]</sup>可表示为

$$h_{s \rightarrow f} = \left\{ \sin \theta \cos \theta \left[ 1 - \exp \left( - \frac{i2\pi l}{L_{b0}} \right) \right] \right\}^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( \frac{\pi l}{L_{b0}} \right). \quad (1)$$

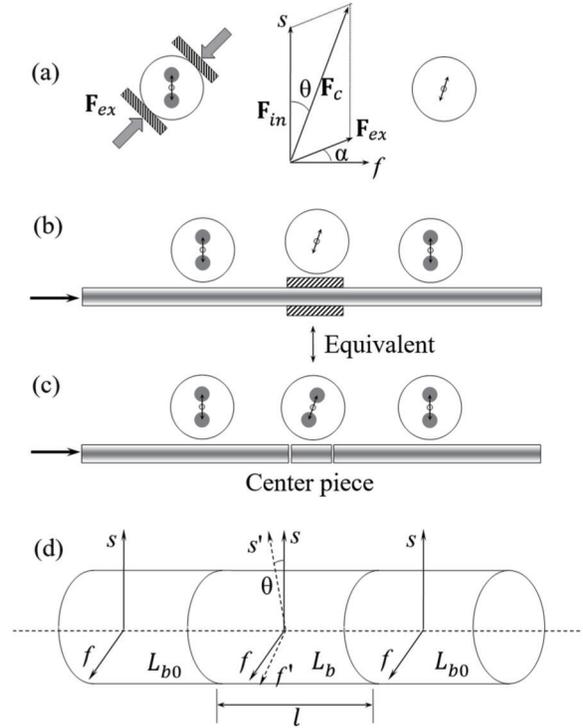


图 1 横向压力诱导 PMF 偏振主轴旋转原理<sup>[47]</sup>。(a) 横向压力与内力的合力导致新的慢轴方向;(b) 横向压力导致局部偏振主轴旋转;(c) 等效局部 PMF 段偏振主轴与两边光纤失配;(d) 局部偏振主轴旋转示意

Fig. 1 Principle of TF induced principal-axis rotation of PMF<sup>[47]</sup>. (a) Combined stress formed by TF and internal stress resulting in new slow axis direction; (b) TF applied on a fiber segment to cause a polarization principal-axis rotation; (c) equivalent of (b) with the principal-axis of a fiber segment misaligned with respect to those of two fiber segments on each side; (d) diagram showing the principal-axis rotation of a center fiber segment

由于错位角  $\theta$  同时和施加横向压力的方向和大小有关,通常由横向压力引起的偏振串扰  $h$  可以由耦合到快轴上的光功率和初始慢轴上的光功率之比表示,即

$$h = F^2 \sin^2(2\alpha) \left\{ \frac{\sin \left[ \pi \sqrt{1 + 2F \cos(2\alpha) + F^2} \left( \frac{l}{L_{b0}} \right) \right]}{\sqrt{1 + 2F \cos(2\alpha) + F^2}} \right\}^2, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为横向压力与 PMF 慢轴的夹角;  $F$  为归一化

应力。

$$F = \frac{2n_f^3 L_{b0} f_{TF} (1 + \mu) (\rho_{12} - \rho_{11})}{\pi r \lambda E}, \quad (3)$$

式中： $r$ 为 PMF 的半径； $n_f$ 为光纤快轴的有效折射率； $f_{TF} = F_{ex}/l$ 为单位受力长度的横向压力大小； $\mu$ 为泊松比； $\rho_{12}$ 与  $\rho_{11}$ 为弹光系数； $E$ 为杨氏模量； $\lambda$ 为入射光波长。对于熔融石英，以上参数的具体数值可参考已有文献<sup>[48-49]</sup>。

根据式(2)和式(3)，使用典型熊猫 PMF 的参数进行仿真，结果如图 2 所示，其中  $n_f=1.46$ 、 $\Delta n=6.68 \times$

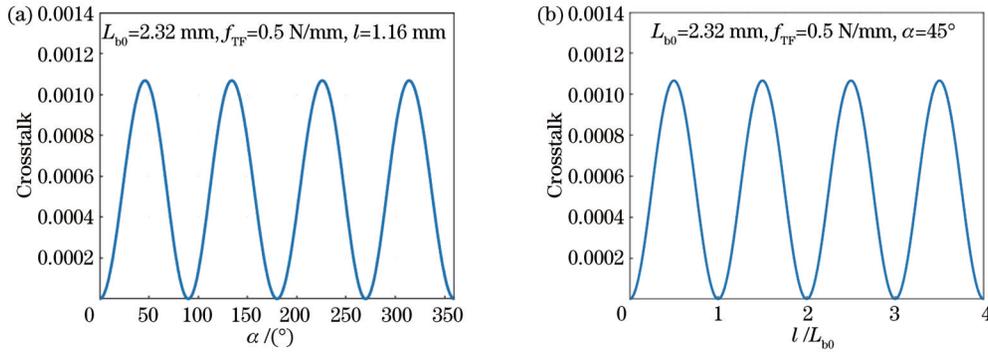


图 2 偏振串扰与受力角度、受力长度的关系。(a)受力角度；(b)受力长度

Fig. 2 Polarization crosstalk changed with TF applying angle and applying length. (a) Force-applying angle; (b) force-applying length

## 2.2 无“鬼峰”DPXA 系统及其测量原理

本文构建的 DPXA 系统基于白光迈克耳孙干涉仪，如图 3 所示。超辐射发光二极管 (SLED) 作为光源，中心波长为 1550 nm、光谱宽度为 30 nm、相干长度为 25  $\mu\text{m}$ ，发出的光经过起偏振器 (P1) 后，沿慢轴入射到待测 PMF (PMF-UT)。假设光从 A 点进入并沿着 PMF-UT 慢轴向前传输 (见 Inset 1)，在 B 点受到横向压力，沿着慢轴传输的光会有一部分功率耦合到正交的快轴上，并沿着快轴向前传输。由于光分量在快、慢轴上的传播常数不同，快、慢轴上的光分量传输长度  $Z$  并抵达尾端 C 点后，二者产生光程差  $\Delta Z$ <sup>[50-51]</sup>，有

$$\Delta Z = \Delta n \times Z. \quad (4)$$

当 PMF-UT 仅有一个受力点时，快、慢轴上的光分量传输至光纤尾端后，经一个 45° 检偏器 (P2) 等强度地投影至同一偏振态，然后由耦合器 (Coupler) 等分入射到迈克耳孙干涉仪。干涉仪一臂中设置有可变延迟线 (VDL)，对快、慢轴传输的光分量的光程差进行补偿，经两臂尾端的法拉第旋转镜 (FRM1 和 FRM2) 反射后，再次回到 Coupler 时快、慢光分量发生干涉，经由光电探测器 (PD) 转为电信号，被数据采集卡 (DAQ) 进行模数转换并采集数据，最后由上位机 (PC) 进行信号处理。系统根据 VDL 所补偿的光程差  $\Delta Z$  和已知的双折射  $\Delta n$  可以计算出偏振串扰点 B 的具体位置，而根据干涉振幅可以计算出偏振串扰强度。

当 PMF-UT 出现多个应力点时，耦合到快轴上的

$10^{-4}$ 、 $L_{b0}=2.32$  mm，受力大小  $f_{TF}=0.5$  N/mm，光源中心波长  $\lambda=1550$  nm。图 2(a) 所示为受力长度  $l=1.16$  mm 时偏振串扰与受力角度的关系，可以看到，偏振串扰随受力角度呈现周期性变化，且在 45° 及其周期变化后的角度下偏振串扰最大。图 2(b) 所示为受力角度  $\alpha=45^\circ$  时偏振串扰与受力长度的关系，偏振串扰随受力长度也呈现周期性变化，且在受力长度是拍长  $L_{b0}$  的 1/2 及其周期变化后的长度下偏振串扰最大。因此，为了得到最大的横向压力传感灵敏度及简单的传感标定系统，需要发展能够定轴布纤制作传感基带的技术。

光分量会在随后的应力点处耦合回慢轴，从而出现二阶干涉峰，称为“鬼峰”<sup>[51]</sup>。如图 4(a) 所示，假设光纤沿线有 3 个压力诱导耦合点  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ，在每一个耦合点处除了慢轴向快轴的耦合，同时存在快轴到慢轴的耦合，则在 PMF-UT 输出端由多点耦合导致的快、慢轴上的光波序列如图 4(b) 所示。其中，慢轴上包含 4 个光波——没有耦合的  $S_0$  和二阶耦合光波  $S_{12}$ 、 $S_{23}$ 、 $S_{13}$ ，快轴上包含 3 个光波—— $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ，分别在 3 个耦合点处直接由慢轴一阶耦合得到。如图 4(c) 所示，当经过 45° 检偏器后，快、慢轴上的光波序列被投影到线偏振器的同一主轴方向上。当混合后的光进入基本的白光干涉仪<sup>[52-53]</sup>并移动扫描干涉仪一臂延迟线时，可以得到一系列干涉峰，其中的二阶干涉峰将成为“鬼峰”。当“鬼峰”幅值较高时，可能无法准确解调串扰点的位置。为了消除“鬼峰”，包括本课题组成员在内的研究者在 PMF-UT 输出端和 45° 检偏器 P2 之间加入一个差分群时延装置 (DGDD)<sup>[51, 54]</sup>，目的是使快、慢轴光分量之间附加一个较大的延迟差  $L$ ，且满足真空中的延迟差  $L$  大于光程差  $\Delta Z$  且延迟差  $L$  被附加在慢轴的光波序列上。因此，由图 4(d) 可知，在经过 45° 检偏器后，快、慢轴上的光波序列在时空上被分开，当在干涉仪两臂上预设同样的延迟差并限制 VDL 的可调范围时，不希望产生的零阶干涉峰 ( $S_0$  和  $S_0$ 、 $S_{ij}$  和  $S_{ij} f_i$  和  $f_i$ ) 以及二阶干涉“鬼峰” ( $S_0$  和  $S_{ij} f_i$  和  $f_j$ ) 均不会产生，而只有一阶干涉峰 ( $S_0$  和  $f_i$ ) 以及微弱的三阶干涉峰出现 (可忽略)<sup>[51, 54]</sup>。

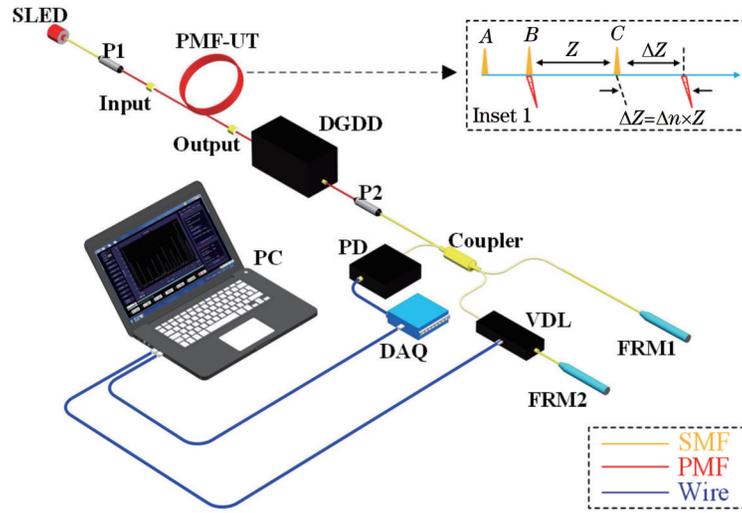


图 3 无“鬼峰”DPXA 系统及测量原理图

Fig. 3 Diagram of ghost-peak free distributed polarization crosstalk analysis system and measurement principle

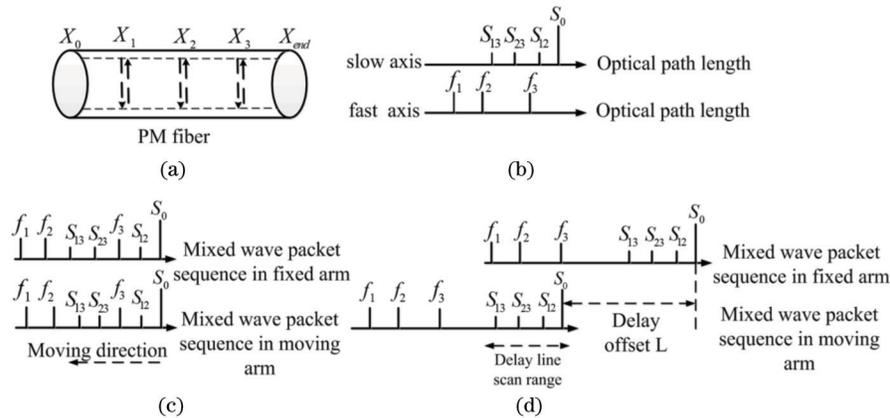


图 4 偏振串扰高阶“鬼峰”消除原理示意图<sup>[51, 54]</sup>。(a) PMF-UT 多点偏振串扰；(b) PMF-UT 尾端快、慢轴上的光波序列；(c) 经过 45° 检偏器后干涉仪两臂中的光波序列；(d) 插入 DGDD 后干涉仪两臂中的光波序列

Fig. 4 Illustration of polarization crosstalk high-order ghost-peak elimination<sup>[51, 54]</sup>. (a) Multi-points polarization crosstalk in PMF-UT (or PM fiber in the figure); (b) wave packet sequences polarized along the slow and fast axes at output of PMF-UT; (c) wave packets in the two interferometer arms after light passing through 45° oriented analyzer; (d) wave packets in the two arms after the DGDD is inserted into DPXA system

构建的 DPXA 系统可以实现 3.5 km 左右光纤长度、空间分辨率约为 4 cm 的测量。图 5 所示为测量的典型 PMF 偏振串扰曲线，横轴为 MDL 的延迟长度。输入与输出处的两峰是由 PMF-UT 两端的连接器偏振主轴错位引起的。4 个熔接点处的峰是由 PMF 熔接时偏振主轴错位引起的，1~6 号峰则由不同质量的砝码在 PMF-UT 不同位置压光纤引起。可以看出，测量的偏振串扰曲线中没有出现明显的“鬼峰”。

### 2.3 PMF 横向压力响应特性

本课题组研究了不同类型 PMF 的偏振串扰对于横向压力的响应特性，设计了图 6(a) 所示的横向压力定量施加装置，在固定长度 (2.45 cm) 玻璃片上放置一定质量的砝码施加横向压力，两边的光纤旋转器 (角度最小分辨率为 2°) 可以控制横向压力对光纤偏振主轴的施加角度，以便在最高灵敏度受力角度下开展研究，

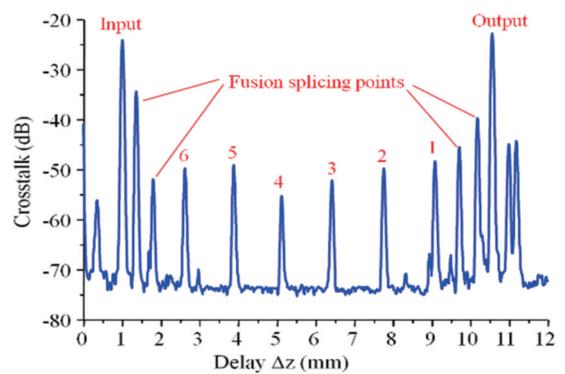


图 5 无“鬼峰”DPXA 系统测量的典型偏振串扰曲线<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Typical polarization crosstalk curve measured with the ghost-peak free DPXA system<sup>[47]</sup>

具体为：使用同一砝码施加压力，旋转光纤的同时测量偏振串扰强度，直到找到最大串扰强度后固定两台旋

转器。图 6(b)、(c)所示分别为来自不同厂家的两种熊猫 PMF(PMF1 和 PMF2)在有涂覆和剥除涂覆情况下测得的偏振串扰强度(线性坐标)随施加砝码质量的变化关系,涂覆层材料均为聚丙烯酸酯(Polyacrylate),同时给出了金色聚酰亚胺(Polyimide)材料涂覆的领结 PMF 在同样条件下的测量结果。其中,两种熊猫 PMF 的涂覆层外径均为 250  $\mu\text{m}$ ,金色领结 PMF 的涂覆层外径为 160  $\mu\text{m}$ 。可以看出,在实验的施力范围内,偏振串扰与横向压力呈现较好的线性

关系(均为线性拟合),且两种熊猫 PMF 在无涂覆时的测量灵敏度(拟合直线斜率)均远大于有涂覆时的测量结果。另外,金色聚酰亚胺涂覆 PMF 的测量灵敏度比常规聚丙烯酸酯涂覆 PMF 要高得多,更适合横向压力传感。然而,从图 6(d)可以看出,金色聚酰亚胺涂覆 PMF 引入的偏振串扰基底要比聚丙烯酸酯涂覆 PMF 高很多,其会降低横向压力传感动态范围,因此需要不断优化光纤制作工艺。

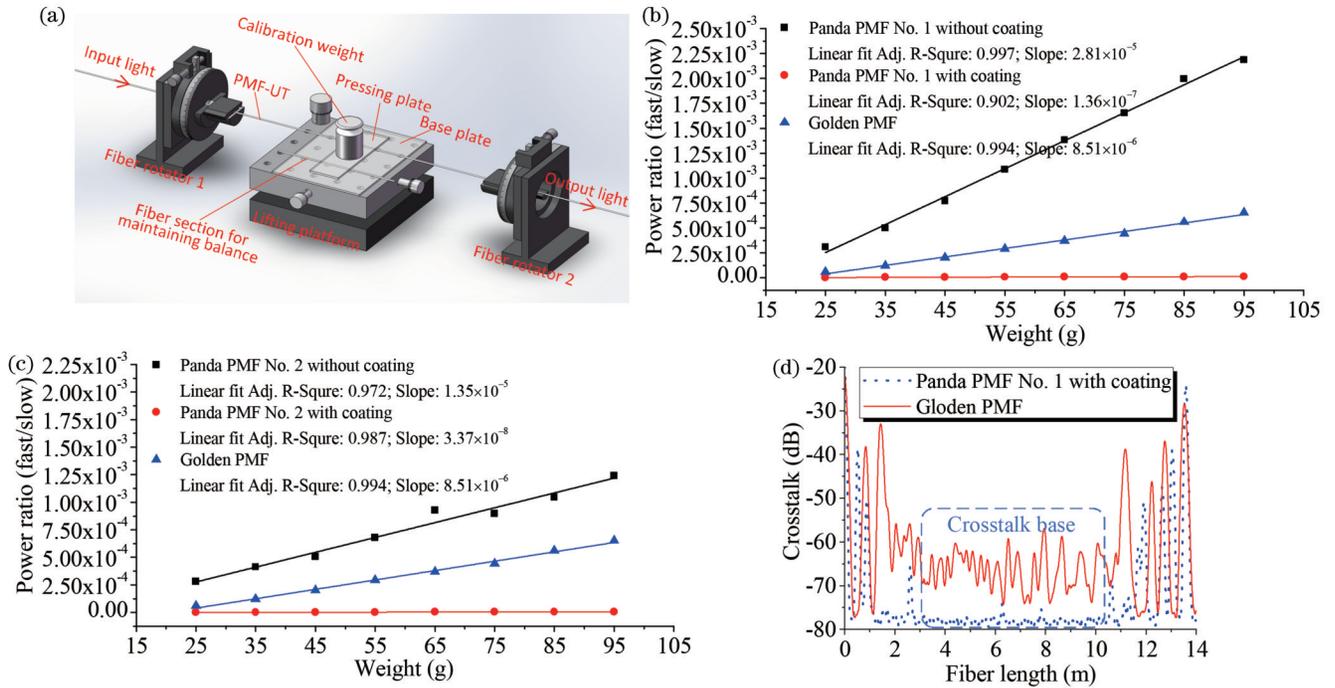


图 6 不同类型 PMF 横向压力诱导偏振串扰(线性)灵敏度测量<sup>[55]</sup>。(a)横向压力定量施加装置;(b)熊猫 PMF1 有、无涂覆层与聚酰亚胺涂覆 PMF 测量结果对比;(c)熊猫 PMF2 有、无涂覆层与聚酰亚胺涂覆 PMF 测量结果对比;(d)有涂覆熊猫 PMF1 与聚酰亚胺涂覆 PMF 偏振串扰基底对比

Fig. 6 TF induced polarization crosstalk (linear scale) sensitivity measurement for different types of PMFs<sup>[55]</sup>. (a) TF loading apparatus; measurement results of polarization crosstalk for (b) panda PMF1 and (c) panda PMF2 with and without coating respectively as functions of applied weight, and similar results measured for golden polyimide coated PMF also plotted correspondingly for comparison; (d) comparison of crosstalk bases between panda PMF1 with coating and polyimide coated PMF

研究了不同类型 PMF 对于横向压力加载和卸载的偏振串扰响应时间,图 7(a)~(e)所示分别为 PMF1 和 PMF2(有涂覆和无涂覆)、金色 PMF 在施加 200 g 砝码压力时测得的压力加载和卸载的偏振串扰响应时间曲线。可以看出:在压力加载时,各种情况下偏振串扰响应都是瞬时的,即 DPXA 系统不能测到响应时间;在压力加载约 12 h 后将砝码取下(即卸载压力),发现聚丙烯酸酯涂覆的两种 PMF 均需要一定的时间恢复到压力加载前的串扰基底水平,但聚酰亚胺涂覆的 PMF 的串扰值瞬间恢复到初始基底水平,再一次证明了聚酰亚胺涂覆 PMF 更有利于分布式横向压力光纤传感。

#### 2.4 PMF 定轴布纤系统及传感基带制作

由图 2(a)可知,PMF 横向压力传感最灵敏的施力

角度为外力与光纤快轴方向成 45°角,最实用的办法是将 PMF 的偏振主轴以与水平面成 45°角的方式排布并固定在一个基带(窄条宽的薄金属或合成材料)上,制成 PMF 分布式横向压力传感基带,便于缠绕和运输。应用时,将传感基带固定在垂直于待测横向压力的平面上,可保证横向压力与 PMF 的偏振主轴成 45°角,得到最佳的测量灵敏度。为了制作 PMF 分布式横向压力传感基带,基于透镜效应示踪的偏振观测(POL)原理<sup>[56]</sup>,本课题组研发了专门的布纤技术与设备,如图 8 所示。

图 8(a)给出了系统的组成及工作原理示意图,系统装配有两个同步步进转轮,分别用于运送 PMF 和基带(PET 透明薄膜,宽度为 10 mm、厚度为 0.3 mm),PMF 运送转轮固定在一个光纤轴旋转装置上,可以来

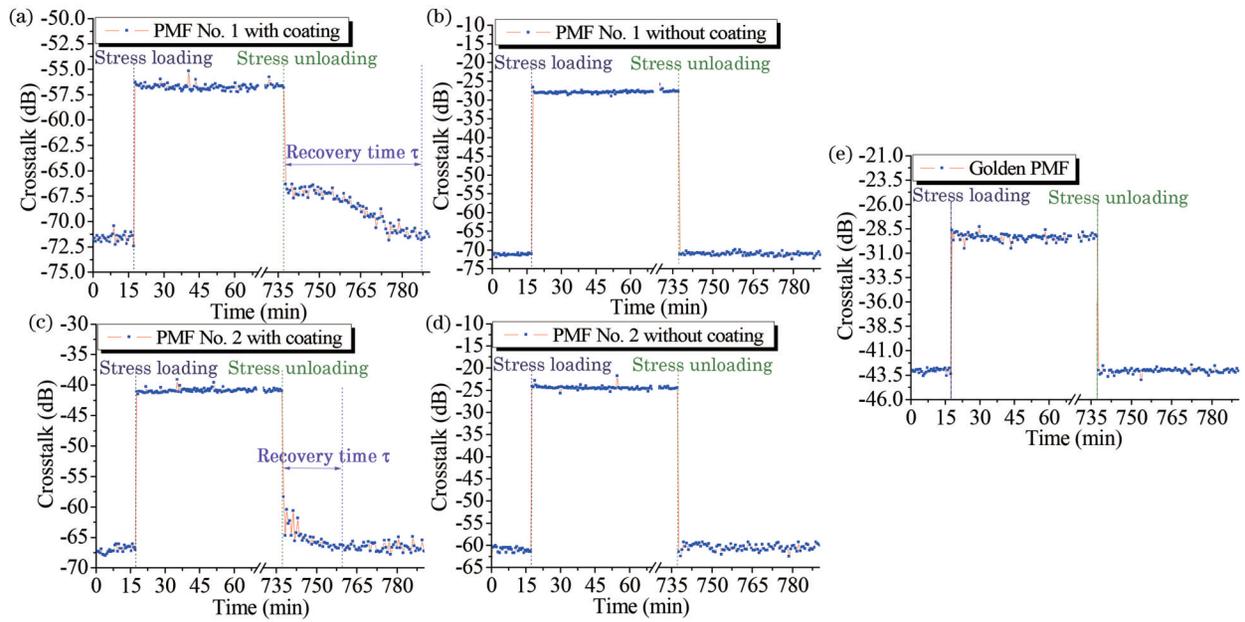


图 7 不同类型 PMF 横向压力诱导偏振串扰响应时间测量<sup>[55]</sup>。(a)有涂覆 PMF1; (b)无涂覆 PMF1; (c)有涂覆 PMF2; (d)无涂覆 PMF2; (e)聚酰亚胺涂覆 PMF

Fig. 7 Response time measurement of TF induced polarization crosstalk for different types of PMFs<sup>[55]</sup>. (a) PMF1 with coating; (b) PMF1 without coating; (c) PMF2 with coating; (d) PMF2 without coating; (e) golden polyimide coated PMF

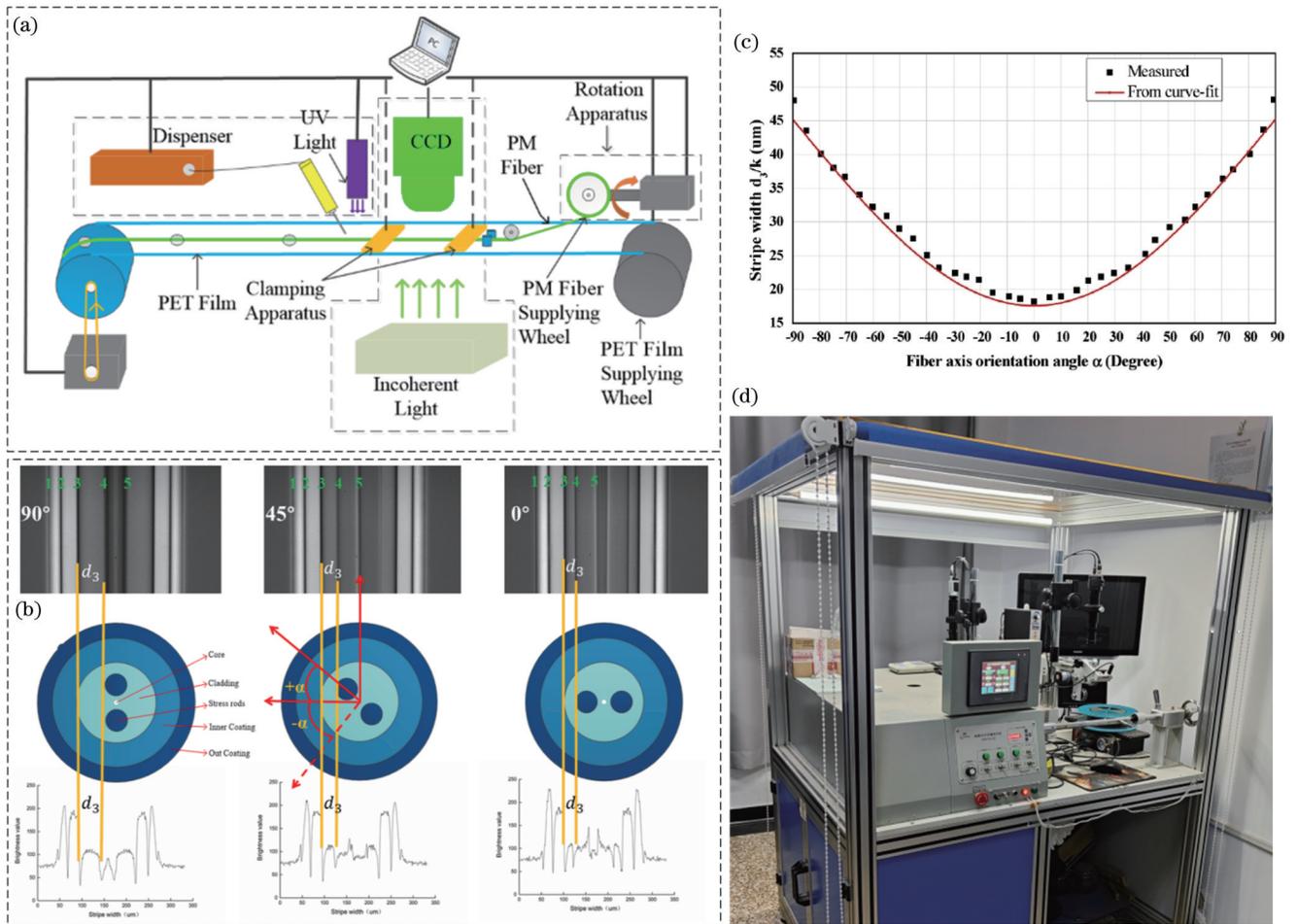


图 8 PMF 自动定轴布纤横向压力传感基带制作系统<sup>[57]</sup>。(a)系统原理图; (b)图像分析原理; (c)光纤角度标定; (d)原型机  
Fig. 8 PMF-based sensing tape fabricating system with automated polarization axis alignment for distributed TF sensing<sup>[57]</sup>.  
(a) Schematic of system; (b) image analysis principle; (c) fiber axis orientation angle calibration; (d) prototype

回径向旋转 PMF 以调整其偏振主轴相对于基带表面的角度。PMF (上层) 和 PET 基带 (下层) 被同步运送到一套由非相干光源、成像透镜、CCD 相机组成的机器视觉系统, PMF 浸入放置在透镜下方的透明平台上的折射率匹配液中。光源发出的光穿过 PET 基带和 PMF 后由 CCD 接收, 由于 PMF 的涂覆层、包层、应力区、纤芯的折射率存在差异, 透射光的光强分布携带有 PMF 应力轴方位角和各层边界信息, 经 CCD 采集后转换为灰度图, 如图 8(b) 所示, 再经过一定的算法处理, 可以获得偏振主轴的实时角度。机器视觉系统获得光纤角度后实时反馈给光纤轴旋转装置, 若光纤角度满足要求, PMF 和 PET 基带运送转轮持续行进, 而一旦光纤角度不满足要求, 两个运送转轮停止行进, 光纤轴旋转装置调整干预, 直至光纤角度再次满足预设条件。完成角度确认后, PMF 和 PET 基带贴合行进, 并在贴合处点注少许 UV 胶后经 UV 灯照射固化。最后, 定轴固定后的传感基带被缠绕在绕纤轮上, 完成 PMF 分布式横向压

力传感基带制作。

根据测得光纤外径和任意采集的一幅 CCD 图像, 可以得到 PMF 各层比例, 从而计算得到各层的直径。如图 8(b) 所示, 设图像中 PMF 由外而内的第三层的厚度为  $d_3$ , 其与 PMF 偏振主轴角度有关。当成像系统的放大倍率为  $k$  时, 经过简单几何运算, 可以得到第三层实际厚度  $d_3/k$  与光纤主轴角度  $\alpha$  的标定关系, 图 8(c) 所示为使用典型熊猫 PMF 得到的标定实验数据和拟合曲线, 可用于任意角度的 PMF 自动定轴布纤传感基带制作。图 8(d) 所示为研制的原型机。

使用以上系统制作了 70 m 长的 45° 定轴布纤光纤传感基带, 局部实物如图 9(a) 所示。为了验证定轴的准确性, 在传感基带上非焦点位置任意选择 20 个点, 应用 POL 方法测试了 PMT 偏振主轴与 PET 基带的角度, 如图 9(b) 所示。结果表明, 每个点处多次测量角度的重复性误差小于  $\pm 0.6^\circ$ , 每个点多次测量求平均值, 得到 20 个点的测量角度在  $42^\circ \sim 48^\circ$  范围内变化, 即  $45^\circ$  角定轴布纤的准确性为  $\pm 3^\circ$ 。

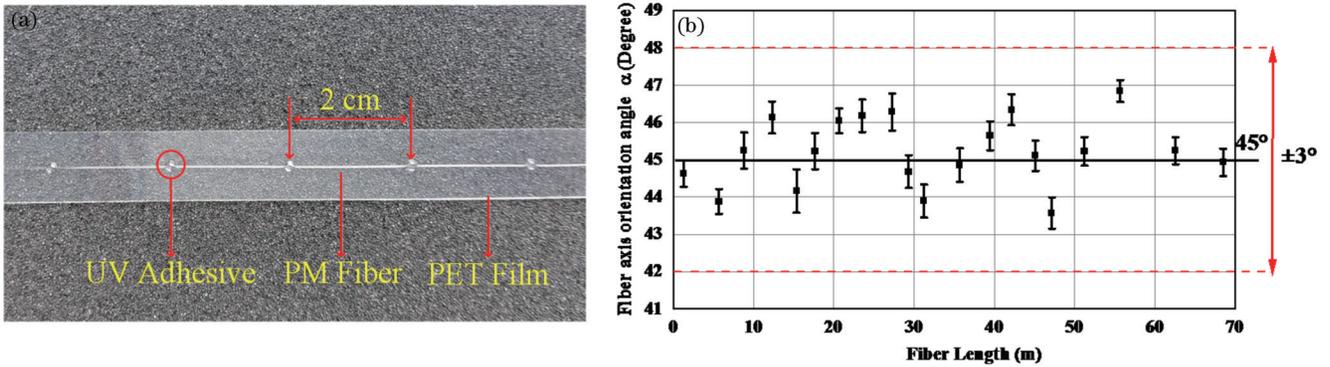


图 9 45° 定轴布纤 PMF 传感基带与测量结果<sup>[57]</sup>。(a) 基带实物图; (b) 定轴角度测量结果

Fig. 9 PMF based sensing tape with 45° polarization axis alignment and measurement results<sup>[57]</sup>. (a) Photo of PMF sensing tape; (b) polarization axis angle measurement results

### 2.5 PMF 分布式横向压力传感验证

基于制作的 70 m 长传感基带来验证横向压力传感的一致性, 横向压力施加方法如图 10 所示, 制作了施力基片, 其底部粘有 3 个小销钉 (直径为 1.5 mm), 较长的一个销钉用于压 PMF, 较短的销钉上再粘贴 4 段废 PMF 以保持平衡, PMF 的受力长度约为

0.1 mm。使用 14 个施力基片, 分别在传感基带上随机寻找 14 个施力点, 在每个施力基片上各放置一个 100 g 砝码 (3 个支撑点各分担 1/3 的力, PMF 受力约为 3.3 N/mm), 测量偏振串扰曲线, 大范围和小范围的测量结果分别如图 11(a)、(b) 所示。为了对比, 图 11 中也给出了施加压力前测得的传感基带残余偏振

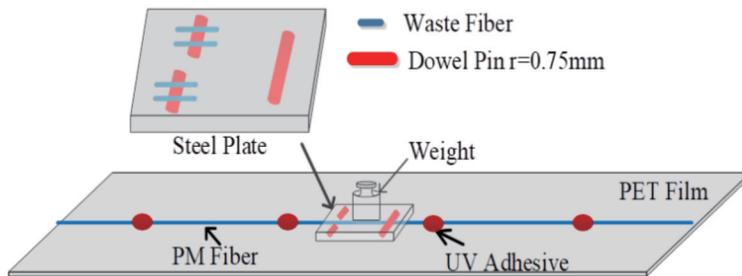


图 10 PMF 传感基带施加横向压力的方法<sup>[57]</sup>

Fig. 10 TF applying method on PMF-based sensing tape<sup>[57]</sup>

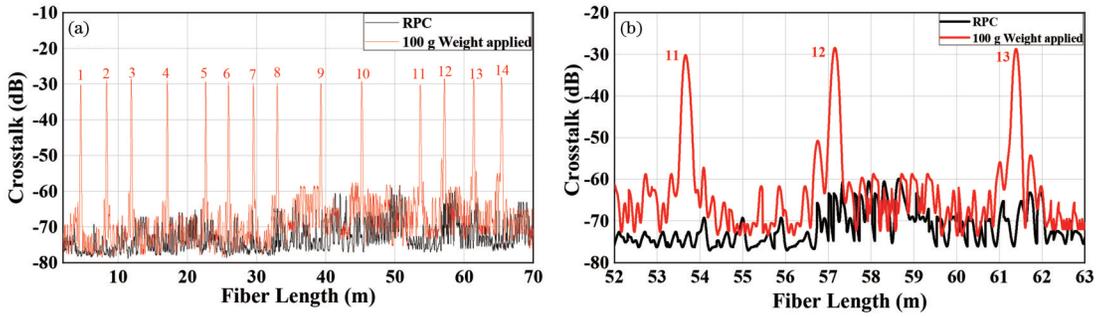


图 11 传感基带制作一致性测量结果<sup>[57]</sup>。(a)长距离测量;(b)小范围测量

Fig. 11 Sensing tape uniformity measurement results<sup>[57]</sup>. (a) Large distance measurement; (b) small range measurement

串扰基底(RPC)。可以看出,施加同样的横向压力,14个施力点处测得的偏振串扰值具有较好的一致性,最大偏差为2.11 dB、标准偏差为0.62 dB。

使用此光纤传感基带进行了分布式横向压力传感验证,使用7个施力基片随机压在传感基带7个位置处,使用的砝码质量从10 g(0.33 N/mm)增加到200 g(6.67 N/mm),结果如图12(a)所示。可以看出,传感系统可以清晰分辨0.33 N/mm(10 g)的压力变化。此外,在任意5个位置处分别进行了串扰-横向压力标定曲线的绘制,如图12(b)所示,每个位置点施加的压力都采用相同的变化方式从0.33 N/mm增加到6.67 N/mm,5条标定曲线具有

高度一致性,通过非线性拟合后,可以作为传感系统的标定曲线用于分布式光纤传感解调。然而,标定曲线和理论曲线[基于式(2)绘制]具有较大的差别(尤其是在施力较小时),主要由PMF涂覆层的缓冲所致。这也表明,开展PMF分布式横向压力传感需要重点考虑涂覆层的设计,可以达到更高的传感灵敏度。另外,由图2(b)可知,当受力长度为PMF拍长的 $(2n-1)/2$ 时,传感系统具有最高的灵敏度。因此,对于不同的横向压力测量范围,可以通过适当地调整受力长度而控制传感灵敏度,以实现最佳的传感系统性能。已实现的PMF分布式横向压力传感性能指标如表2所示。

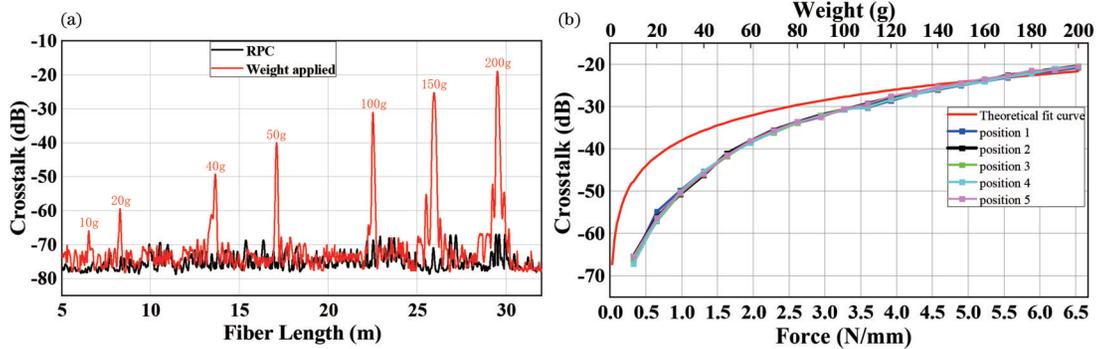


图 12 PMF 分布式横向压力传感验证<sup>[57]</sup>。(a)多应力点分布式测量结果;(b)传感标定曲线测量

Fig. 12 PMF-based distributed TF sensing validation<sup>[57]</sup>. (a) Distributed measurement with multi-force applying points; (b) measurement of sensing calibration curves

表 2 PMF 分布式横向压力光纤传感技术性能

Table 2 Performance of PMF-based distributed TF fiber-optic sensing

Interrogation technique	Sensing medium	Measurement resolution	Standard deviation	Spatial resolution	Fiber tape length	Dynamic range
DPXA	45° axis orientated PMF tape	0.33 N/mm	0.62 dB	~4 cm	70 m	~3.5 km

## 2.6 受力角度无关 PMF 分布式横向压力传感方法

虽然通过 PMF 定轴布纤制作分布式横向压力传感基带可以得到良好的传感性能,但是光纤传感基带的制作过程比较复杂、需要专业的设备完成,且单位长度传感信息获取的成本较高。2002年,Hotate等<sup>[58]</sup>提出一种使 PMF 按照  $T_p = 2L_{b0}n$  ( $n$  为奇数) 周期扭转 [图 13(a)] 的横向压力传感设计方法,使用周期为

$P_p = L_{b0}n/4$  的四齿夹具 [图 13(b)] 对光纤施加横向压力,则偏振串扰强度与光纤受力角度无关,即无需定轴制作 PMF 传感基带,这无疑是一种更有效的方法。然而,该研究只是进行了简单的原理和实验分析。

根据以上设计,光纤的扭转周期是夹具齿周期的 8 倍,即夹具的两齿之间光纤受力角度变化 45°。设 A 齿处 PMF 受力角度为  $\alpha$ ,则 B、C、D 齿处的 PMF 受力

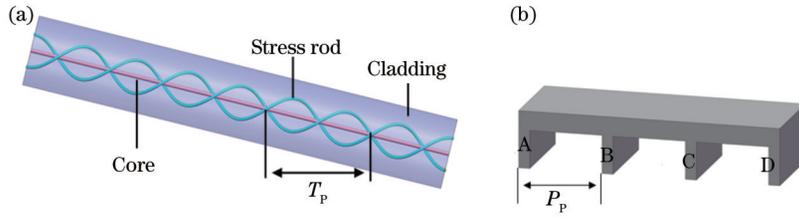


图 13 受力角度无关的横向压力传感设计方法。(a) 光纤扭转方法; (b) 施力夹具设计方法

Fig. 13 Designing method of TF sensing using PMF independent of direction of applied force. (a) Fiber twisting method; (b) force-applying clamp designing method

角度依次增加  $45^\circ$ 。设  $h'_1, h'_2, h'_3$  和  $h'_4$  分别为夹具的 A、B、C、D 齿诱导的偏振串扰强度, 则施力夹具引起的总的偏振串扰可表示为

$$h' = h'_1 + h'_2 + h'_3 + h'_4 \quad (5)$$

结合式 (2) 和 (5) 进行仿真, 设置受力长度为  $1/2$  拍长 (即  $l = 1.16 \text{ mm}$ ),  $f_{TF} = 0.42 \text{ N/mm}$ , 结果如图 14 所示。可以看出, 偏振串扰强度在任何角度  $\alpha$  下基本保持不变, 理论上证明了该方法的可行性。

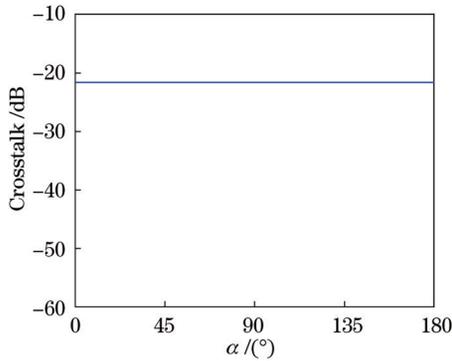


图 14 四齿夹具施加压力于扭转 PMF 的偏振串扰强度与受力角度的关系

Fig. 14 Polarization crosstalk versus force-applying angle using twisted PMF with force-applying based on four-jaw clamp

基于理论研究结果, 取奇数  $n = 15$ , 设计了图 15 (a) 所示的四齿夹具, 齿间距为  $8.70 \text{ mm}$ , 对应的 PMF 扭转周期为  $69.60 \text{ mm}$ , 使用 8200Pro 树脂加工制作, 尺寸最大误差为  $0.1 \text{ mm}$ 。同时, 为了获得较高的横向压力传感灵敏度, 夹具的齿宽都设定为 PMF 拍长的一半, 即  $1.16 \text{ mm}$ 。图 15 (b) 所示为 PMF 扭转和横向压力传感实验装置, 两边均为光纤旋转器, 中间为表面平整的大理石台, 支撑光纤和传感光纤保持四齿夹具平衡, 并在四齿夹具上放置  $200 \text{ g}$  砝码。首先, 开展无扭转 PMF 的压力传感实验: 将 PMF 放松并拉直固定在两个光纤旋转器上, 记为受力角度  $0^\circ$ , 并选择任意位置施加横向压力, 记为测试位置  $0 \text{ mm}$ , 测量偏振串扰值; 依次向右移动四齿夹具  $1 \text{ mm}$ , 重复以上测量; 完成 20 个位置点测量后, 同时旋转 2 个光纤旋转器  $10^\circ$ , 重复以上测量; 直到 PMF 被旋转到  $90^\circ$  并完成测量; 每个位置处测量 3 次偏振串扰值取平均, 以消除测量不准确性。无扭转 PMF 在不同受力角度下不同光纤位置

的偏振串扰如图 15 (c) 所示, 可以看出, 在同一受力角度下, 不同位置处的偏振串扰值波动较小, 但在不同受力角度下, 偏振串扰值变化最高达  $26 \text{ dB}$ 。然后, 进行扭转 PMF 的压力传感实验, 与无扭转 PMF 实验不同的是, 先对 PMF 进行了周期为  $69.60 \text{ mm}$  的扭转, 具体方法为放松并拉直固定 PMF 后, 根据两个光纤旋转器之间的光纤长度计算光纤首尾端径向相差角度, 并保持左旋转器不动、右旋转器旋转相应的角度。光纤扭转完成后, 再重复无扭转 PMF 的压力传感实验全过程, 结果如图 15 (d) 所示, 可见整体偏振串扰值仅落在  $4 \text{ dB}$  变化范围内, 相对于无扭转时的  $26 \text{ dB}$  显著降低。虽然夹具设计误差、扭转光纤准确性和沿光纤的均匀性不能完全保证等因素导致了  $4 \text{ dB}$  以内的串扰变化, 但是实验仍然验证了角度无关 PMF 分布式横向压力传感实施的可行性。

以上研究表明, PMF 扭转形成的应力区旋转可以显著减小横向传感对于光纤受力角度的敏感性, 相比于 PMF 定轴布纤的方法具有优越性, 但光纤扭转的方法仍然较为复杂, 实际应用时仍然需要制作传感基带。其实, PMF 扭转的结果与面向电流传感器应用的保圆高双折射旋转光纤 (SF) 制作方法类似<sup>[59-61]</sup>, 只是 SF 在预制棒拉丝过程就进行扭转, 得到的光纤即为应力区按照一定的周期沿光纤轴向旋转, 从而实现圆偏振保持的目的。使用 SF 有望直接实现基于 DPXA 的受力角度无关分布式横向压力传感。于是, 本课题组定制了一种领结型 SF, 其应力轴旋转周期为  $40 \text{ mm}$ , 拍长为  $2.84 \text{ mm}$ , 纤芯和包层直径与普通 PMF 一致。根据四齿夹具设计方法, 奇数  $n = 7$ , 齿间距为  $4.97 \text{ mm}$ , 齿宽度为  $1.42 \text{ mm}$ , 如图 16 (a) 所示。直接将 SF 放置在大理石台面上, 两端分别连接 DPXA 的输入与输出端口。使用与图 15 (d) 相同的测量方法, 但不旋转 SF, 任意选择一个 SF 位置作为长度  $0 \text{ mm}$  点, 使用  $200 \text{ g}$  砝码施加横向压力, 测量偏振串扰随长度的变化, 结果如图 16 (b) 所示。可以看出, 偏振串扰值的最大变化量仅为  $2 \text{ dB}$ , 验证了基于 SF 的分布式横向压力传感的可行性。  $2 \text{ dB}$  的串扰变化主要是由夹具设计误差、砝码放置偏差等因素导致的。

综上所述, 使用扭转 PMF 或者 SF 均可以实现受力角度无关/不敏感分布式横向压力光纤传感, 但 SF

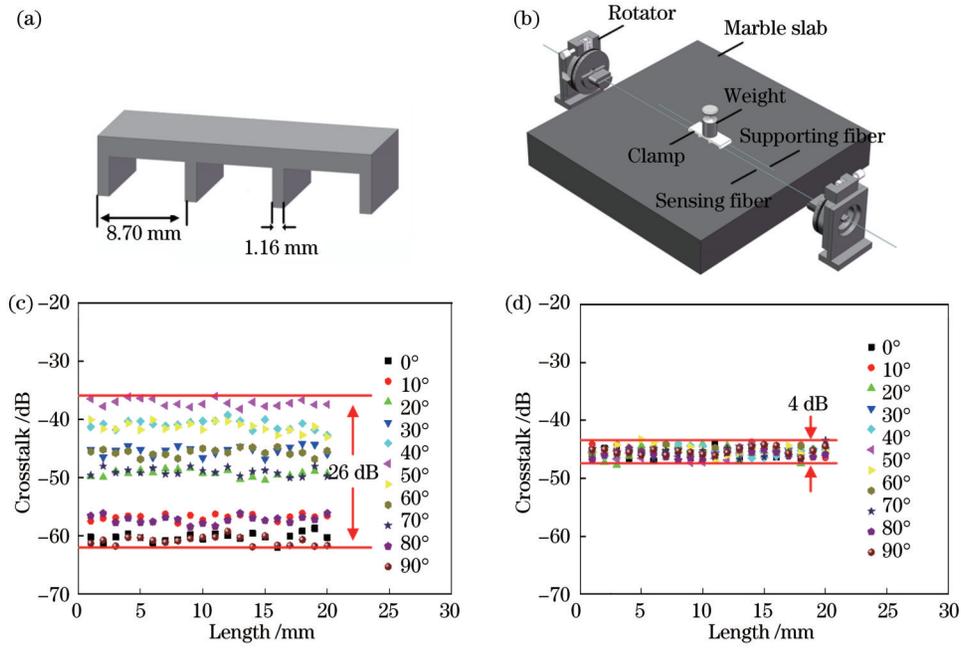


图 15 扭转 PMF 受力角度无关分布式横向压力传感实验验证。(a) 四齿夹具设计; (b) PMF 扭转实验装置; (c) 无扭转 PMF 在不同受力角度下不同光纤位置的偏振串扰; (d) 扭转 PMF 在不同受力角度下不同光纤位置的偏振串扰

Fig. 15 Validation of distributed TF sensing using twisted PMF independent of direction of applied force. (a) Four-jaw clamp design; (b) PMF twisting and TF sensing experimental apparatus; (c) polarization crosstalk versus fiber length under different force-applying angles for untwisted PMF; (d) polarization crosstalk versus fiber length under different force-applying angles for twisted PMF

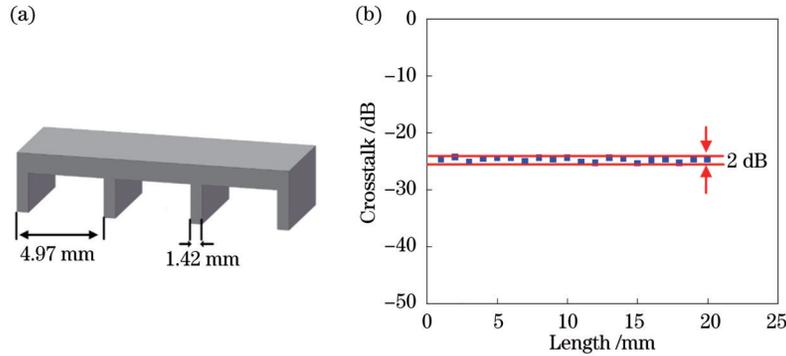


图 16 SF 受力角度无关分布式横向压力传感实验验证。(a) 四齿夹具设计; (b) SF 在不同光纤位置的偏振串扰

Fig. 16 Validation of distributed TF sensing using SF independent of direction of applied force. (a) Four-jaw clamp design; (b) polarization crosstalk versus fiber length

更具有实用化前景。

### 3 基于 SMF DPA 的分布式横向压力光纤传感

虽然基于 PMF 的分布式横向压力传感具有很好的实用化前景,但是对于长距离传感需求,无论是 PMF 和 SF,还是定轴布纤基带制作、扭转光纤基带制作等,均会明显增加传感系统的成本。基于 SMF 的偏振相关测量为分布式横向压力光纤传感提供了新的思路<sup>[35-37]</sup>,发展基于 SMF 的 DPA 技术有望实现低成本、直接 SMF 分布式横向压力传感。然而,已提出的基于光时域反射 (OTDR) 和 OFDR 的分布式双折射表征

技术均存在显著的不足之处,如基于 OTDR 的技术分辨率低 (m 量级)<sup>[62-67]</sup>、基于 OFDR 的技术仅具有部分偏振分析能力<sup>[34-36]</sup>,且均没有直接验证分布式横向压力光纤传感的可行性。下面主要讨论本课题组在基于 SMF DPA 的分布式横向压力光纤传感研究方面开展的工作和取得的最新研究结果。

#### 3.1 SMF 分布式 Mueller 矩阵全偏振分析技术

2010 年,包括本课题组成员在内的研究者们发明了基于二进制磁光晶体偏振旋转器制作的偏振态发生器 (PSG) 和偏振态分析仪 (PSA),并研制了全 Mueller 矩阵偏振计系统,不仅可以实现待测器件及光纤的 Stokes 参数测量,而且可以得到待测光路的 Mueller 矩

阵全部元素,从而实现超高精度偏振态(SOP)、偏振度(DOP)、线双折射和圆双折射、偏振相关损耗(PDL)和偏振消光比(PER)的测量<sup>[21,59]</sup>。然而,该技术属于非分布式偏振分析(NDPA),只能实现整个器件或整条光纤的累计偏振测量<sup>[59]</sup>。在此基础上,本课题组将 PSG 和 PSA 引入到基于光纤后向瑞利散射光测量的 OFDR 系统中,结合 OFDR 超高空间分辨率、超高灵敏度性能及超长距离测量潜能,可以实现 SMF 距离相关全偏振测量。以上系统被称为基于 OFDR 的 DPA 系统或偏振分析 OFDR(PA-OFDR)系统。

OFDR 来源于调频连续波技术<sup>[68]</sup>,基本结构与工作原理如图 17 所示,基于基本的马赫-曾德尔(M-Z)光纤干涉仪结构[图 17(a)],线性扫描可调谐激光器(TLS)发出的光被分为两路,一路作为参考光,另一路作为测试光到达待测光纤(FUT),FUT 的后向瑞利散射光和端面反射光与参考光再次会聚,从而产生拍频干涉。假设 FUT 的某一个散射/反射点位置为  $z$ ,返回

的光信号与参考光信号的时延差设为  $\tau$ ,则有  $\tau=2zn_g/c$ ,其中  $n_g$  为光纤纤芯的有效折射率, $c$  为真空中的光速。设 TLS 的扫频速度为  $\gamma$ ,则参考光和  $z$  处散射/反射光信号的拍频大小为  $f_b = \gamma\tau$ 。如图 17(b)所示,由于激光频率是随时间线性变化的(扫频范围为  $\Delta F = \gamma T$ ,  $T$  为测试时间),两条线分别表示参考光和  $z$  处散射/反射光对应的激光频率变化,但二者之差始终是固定的,因此 FUT 不同位置散射/反射点分别对应不同的拍频信号,即测量拍频信号可实现光纤位置相关分布式检测。OFDR 的最大测量距离为激光在光纤中的相干长度  $L_c$  的一半,而  $L_c$  由激光线宽  $\Delta\nu$  决定<sup>[69]</sup>:

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu n_g} \quad (6)$$

OFDR 的测量空间分辨率  $\delta_z$  由激光扫频范围  $\Delta F$  决定<sup>[69]</sup>:

$$\delta_z = \frac{c}{2n_g \Delta F} \quad (7)$$

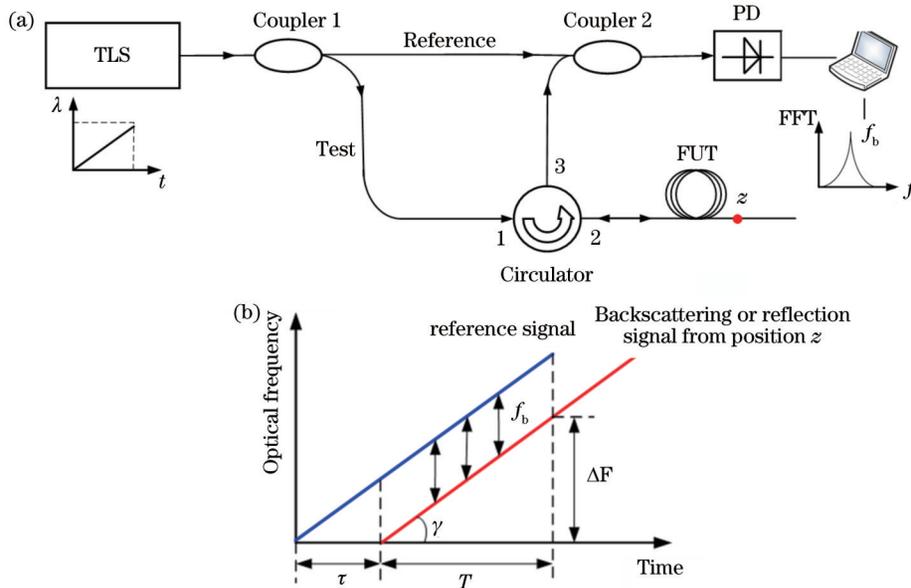


图 17 OFDR 基本结构与工作原理。(a)系统结构;(b)拍频干涉原理

Fig. 17 Basic structure and working principle of OFDR. (a) System structure; (b) frequency-beating interference principle

图 18 所示为 DPA 系统(PA-OFDR)原理图,该系统主要由主干涉仪和辅助干涉仪组成<sup>[21]</sup>。主干涉仪结构和图 17(a)基本相同,区别是引入了 PSG 和 PSA 模块,且除环形器及待测 SMF 外,均为 PMF 连接,以消除偏振衰落。辅助干涉仪是 SMF 迈克耳孙干涉仪,在两臂中引入法拉第旋转镜(FRM)以消除偏振衰落,其干涉信号作为主干涉仪的触发信号(K-clock),以补偿激光频率扫描非线性,实现主干涉仪的等频率间隔采样。主干涉仪干涉信号经傅里叶变换和降噪算法处理后得到 SMF-UT 距离域瑞利散射分布信息。

PSG 和 PSA 的结构如图 18 插图所示,均由 1 个起偏器、4 个二进制磁光晶体和 1 个  $\lambda/4$  波片组成。当驱动电路对二进制磁光晶体施加高于饱和水平的正磁场

时,磁光晶体能够使输入偏振光的 SOP 精确旋转  $+22.5^\circ$ ;当施加高于饱和水平的负磁场时,SOP 精确旋转  $-22.5^\circ$ 。光经过 PSG 时,通过改变施加在磁光晶体的磁场方向可以生成 5 种非简并 SOP:水平线偏振、 $+45^\circ$  线偏振、 $-45^\circ$  线偏振、右旋圆偏振、左旋圆偏振。对于 PSG 生成的每一种 SOP,SMF-UT 每一点散射/反射光的 SOP 均可以被 PSA 精确测量。在 DPA 的实际应用中,PSG 只需产生 4 个独立的 SOP,PSA 使用 4 个独立的逻辑态测量 FUT 散射/反射光,可得到对应的全 Mueller 矩阵(16 个元素)<sup>[21]</sup>。假设 SMF-UT 由长度为  $\Delta z$  的无数光纤段组成,且位置  $z$  和  $z + \Delta z$  处对应的 Mueller 矩阵分别为  $M(z)$  和  $M(z +$

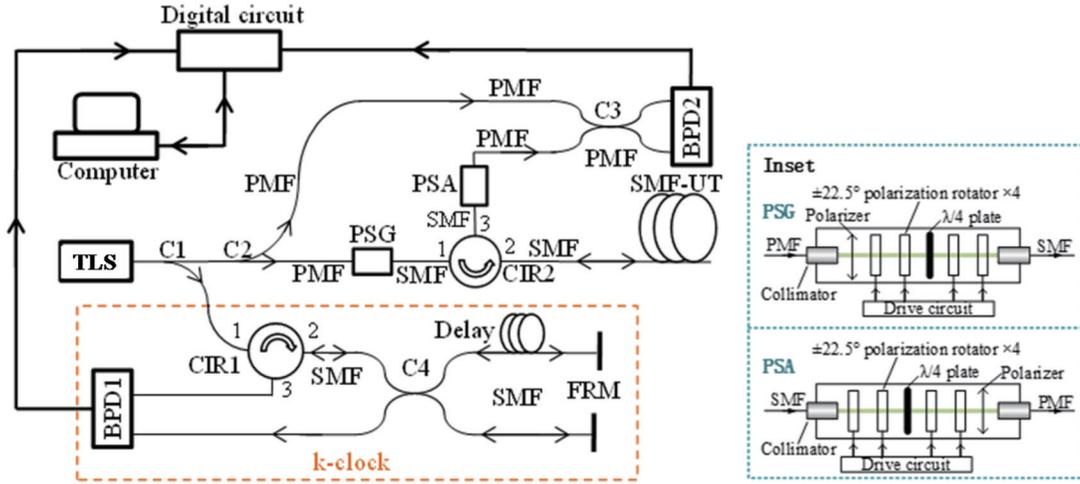


图 18 DPA 系统 (PA-OFDR) 原理图<sup>[21]</sup>

Fig. 18 Schematic of DPA system (PA-OFDR)<sup>[21]</sup>

$\Delta z$ ), 则光纤段  $\Delta z$  对应的 Mueller 矩阵<sup>[21]</sup>  $M(\Delta z)$  可表示为

$$M(\Delta z) = M(z + \Delta z)M^{-1}(z). \quad (8)$$

PSA 可测得  $M(z)$  和  $M(z + \Delta z)$  的全部元素, 故位置相关全 Mueller 矩阵  $M(\Delta z)$  可计算得出。进一步计算延迟角<sup>[21]</sup>  $\theta(z)$ :

$$\theta(z) = \arccos \left\{ \frac{\text{Tr}[M(\Delta z)] - 1}{2} \right\} = \frac{2 \times 2\pi\Delta n(z)\Delta z}{\lambda}. \quad (9)$$

因此, SMF-UT 位置  $z$  处双折射  $\Delta n(z)$  为

$$\Delta n(z) = \frac{\theta(z)\lambda}{4\pi\Delta z}. \quad (10)$$

综上所述, DPA 系统可以实现分布式全偏振测量, 且可以实现 SMF 分布式双折射测量。

### 3.2 DPA 系统性能测试

使用 Yenista TUNICS T100S-HP 作为 TLS, 其线宽约为 500 kHz, 扫描速度和扫描范围分别为 20 nm/s 和 80 nm (1510~1590 nm), 输出功率为 2 dBm。初步测量瑞利散射分布, 系统空间分辨率最高可达 12.5  $\mu\text{m}$ , 可测量范围约 100 m (由激光源线宽决定)、散射灵敏度可达 -130 dB<sup>[21]</sup>。SMF 弯曲诱导双折射  $\Delta n$  与弯曲半径  $R$  的关系<sup>[70]</sup> 可以表示为

$$\Delta n = k \left( \frac{1}{R} \right)^2, \quad (11)$$

式中:  $k$  为弯曲诱导双折射系数 (BBC), 可以表示为

$$k = \frac{n^3 r^2}{4} (p_{12} - p_{11})(1 + \sigma). \quad (12)$$

对于熔融石英材料, 以上参量分别为  $p_{12} - p_{11} = 0.15$ 、 $\sigma = 0.17$ 、 $n = 1.46$ 、 $r = 62.5 \mu\text{m}$ <sup>[21]</sup>。计算可得, SMF 的理论 BBC 约为  $5.334 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ , 该结果忽略了纤芯、包层及涂覆层的影响。

实验中, 沿 SMF-UT 的不同位置设置 12 个光纤圈 (单圈), 半径从 3.75 cm (1 号) 以 0.25 cm 为步长逐渐减小到 1.00 cm (12 号), 在不同的双折射分辨率 (BSR)  $\Delta z$  设定下, 测量结果如图 19 所示, 每条曲线均为 20 次重复实验的平均结果。在图 19(a) 中, 在 6 种不同的 BSR 设定下计算双折射沿光纤的分布。通常 BSR 应该比散射空间分辨率大很多, 根据式 (9), 在 BSR 长度内必须积累足够的 SOP 变化才能高于系统的噪声水平, 意味着局部双折射越小, BSR 越大。但是, BSR 不应大于事件光纤段 (光纤圈周长) 本身长度。从图 19(a) 可以看出, 在所有 BSR 下, 随着弯曲半径的减小, 双折射均逐渐变大, 但不适当选择 BSR 会引起不同的测量误差。图 19(b) 所示为 10 号光纤圈附近的测量结果, 可见除 100 mm 和 20 mm 的 BSR 外, 其余的 BSR 均能实现准确的测量。但整体来看, 0.25 mm 的 BSR 可以在所有弯曲半径下实现准确测量。值得注意的是, 对于完美的光纤圈, 在周长范围内双折射应该一致, 而类高斯形状的测量结果主要是因为算法中使用了低通滤波、多次测量求平均、光纤圈形状不完美等。

提取图 19(a) 中 0.25 mm BSR 测量曲线对应的每个光线圈的双折射测量峰值, 绘制弯曲诱导双折射与弯曲半径的关系, 并用式 (11) 进行拟合, 结果如图 20(a) 所示, 得到拟合系数  $k$  为  $6.601 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ , 与理论计算结果接近。为进一步验证测量的准确性, 使用准确性标定过的 NDPA 测量系统 (PSGA)<sup>[71]</sup> 测量了弯曲半径与双折射的关系, 具体方法为: 在 SMF-UT 上每次只盘绕一个光纤圈并测量双折射, 一共完成 12 次不同半径光纤圈的测量<sup>[21]</sup>, 结果如图 20(b) 所示, 拟合得到的系数  $k$  为  $6.490 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。可见, DPA 和 NDPA 的测量结果具有高度一致性, 系数相对误差仅有 1.68%, 可以验证 DPA 系统测量的准确性。另外, 通过测量光纤的残余双折射 (RB) 水平, 得到 DPA 的测量分辨率优于  $2 \times 10^{-7}$ <sup>[21]</sup>。

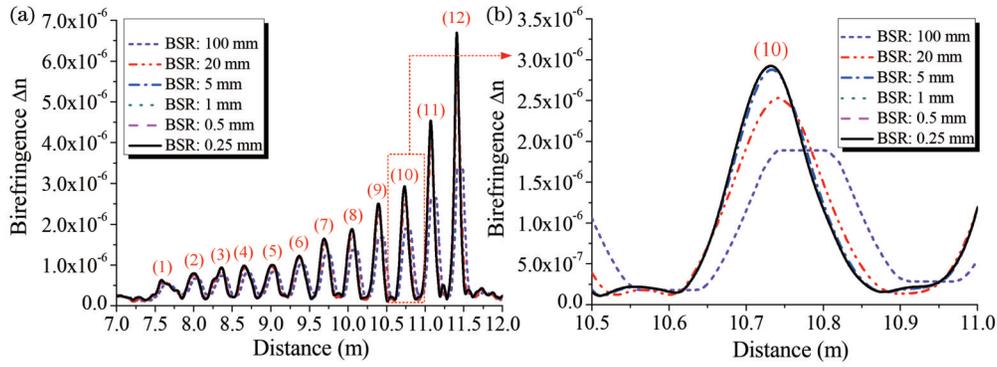


图 19 测量的 SMF-UT 沿线双折射分布<sup>[21]</sup>。(a)1~12 号光纤圈分布式双折射测量; (b)10 号光纤圈附近分布式双折射测量  
Fig. 19 Birefringence distribution measurement results along the SMF-UT<sup>[21]</sup>. (a) Distributed birefringence measurement results from fiber loop No. 1 to No. 12; (b) distributed birefringence measurement around fiber loop No. 10

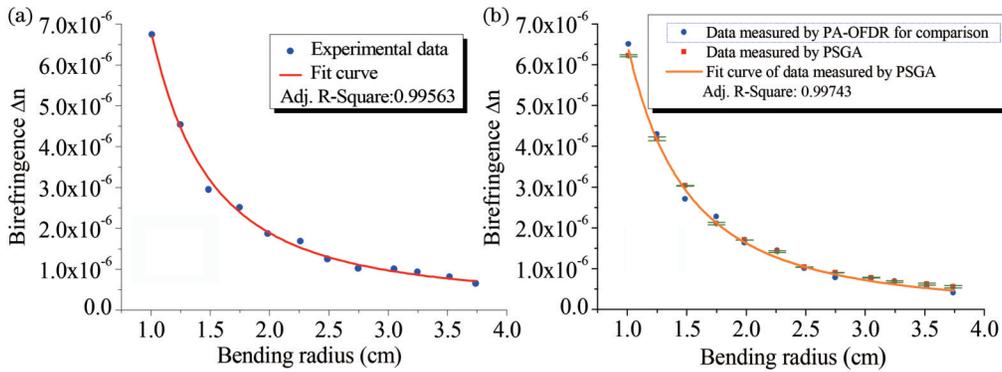


图 20 SMF-UT 弯曲诱导双折射与弯曲半径的关系<sup>[21]</sup>。(a)DPA 测量结果; (b)NDPA 测量结果  
Fig. 20 Bending-induced birefringence versus bending radius for SMF-UT<sup>[21]</sup>. (a) Measurement result using DPA system; (b) measurement result using NDPA system

### 3.3 SMF 横向压力传感系数标定

通过建立横向压力与双折射的特异性关系,有望实现基于 DPA 系统的高性能 SMF 分布式横向压力传感。当一段 SMF 受一横向压力  $f$  时,根据光弹效应,压力诱导双折射<sup>[72]</sup>可以表示为

$$\Delta n = \frac{4n^3}{\pi E} (1 + \sigma) (p_{12} - p_{11}) \left( \frac{1}{d} \right) f = \zeta f, \quad (13)$$

式中:  $\zeta$  被定义为压力诱导双折射系数; 杨氏模量  $E = 6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}$ ; 光纤包层直径  $d = 125 \mu\text{m}$ 。于是,理论计算得到  $\zeta = 8.559 \times 10^{-8} \text{ RIU}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ ,但是计算过程中认为光纤是由各向同性、无纤芯/包层结构的熔融石英制作的。从式(13)可以看出,横向压力与 SMF 双折射呈线性关系,容易实现传感标定。

图 21 所示为基于 DPA (PA-OFDR) 的 SMF 分布式横向压力传感实验系统,该系统使用长约 18 m 的 SMF 作为传感介质,将其固定在隔振光学平台上,且要尽量避免外力和弯曲的引入。随机选择 10 个光纤段(间隔约为 0.5 m),即图 21 中的①~⑩,剥掉相应位置处的涂覆层用于施加横向压力。压力施加方法为:将 1 个或多个砝码堆叠后放置在一个玻璃片上压住光纤,为保持玻璃片平衡,使用一段同样的已剥除涂覆的

SMF 作为支撑,传感光纤和支撑光纤各分担一半的压力。所用的玻璃片宽度都相同(2.5 cm),但为了实验需求,定制了不同的长度。为了准确计算横向压力,需要考虑砝码和玻璃片的总质量,玻璃片的长度为光纤的受力长度。

为了开展横向压力光纤传感实验,需要准确标定不同批次 SMF 的横向压力向双折射转化的系数  $\zeta$ ,即横向压力测量灵敏度系数。由于施加砝码质量和光纤受力长度均能改变横向压力,因此本课题组设计了以下实验:1)在①~⑩光纤段使用相同砝码质量(200 g)但不同受力长度(8, 9, ..., 17 cm)测量双折射分布,绘制双折射随横向压力的变化关系,并拟合得到系数;10 个光纤段均使用 300、400、500、600 g 砝码压住时,分别重复以上测量,均得到拟合系数。2)在①~⑩光纤段使用相同受力长度(8 cm)但不同砝码质量(200, 250, ..., 650 g),重复以上测量,得到拟合系数;10 个光纤段使用其余受力长度(10, 12, ..., 16 cm)时,分别重复以上测量,并得到拟合系数。每个独立组实验均进行 10 次双折射分布曲线测量并求平均值,以降低实验误差。图 22 给出其中一组典型实验的结果,对应的是①~⑩光纤段使用 12 cm 施压玻璃片但不同砝码质量。可以看出,随着横向压力的增加,光纤双折射不断增大,且

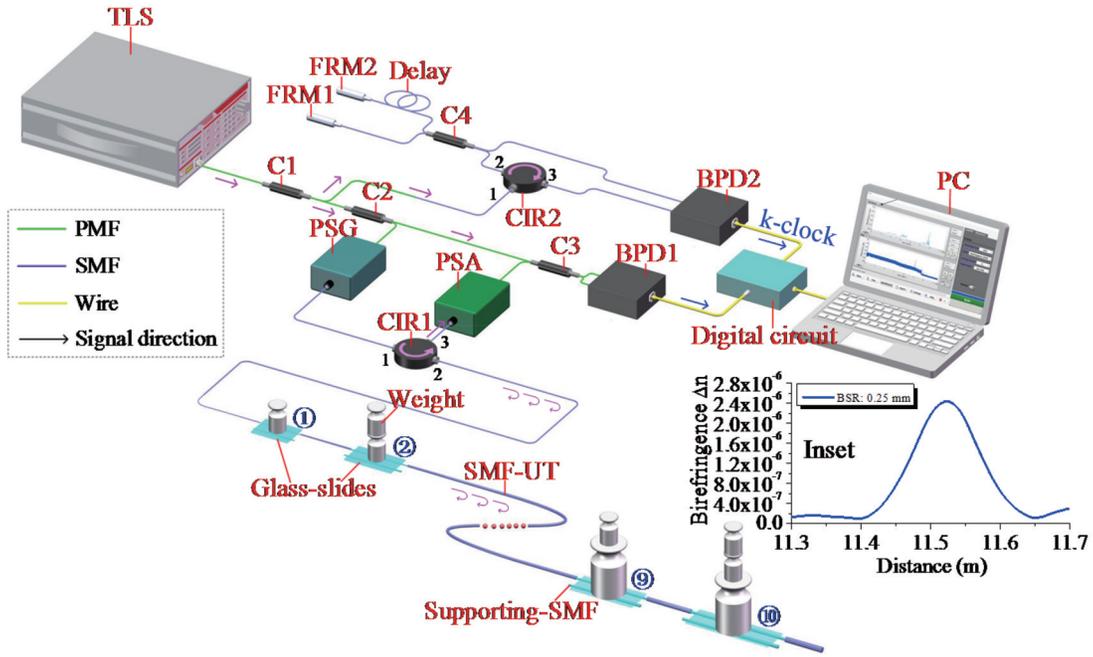


图 21 SMF 分布式横向压力传感系统示意图<sup>[48]</sup>

Fig. 21 Schematic of experimental setup for SMF-based distributed TF sensing<sup>[48]</sup>

表现出很好的线性关系,与理论预期一致。将以上所有独立组实验得到的拟合系数进行平均<sup>[48]</sup>,得到标定的横向压力传感灵敏度系数为  $9.223 \times 10^{-8}$

RIU/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ),与理论估算值接近,且得到的平均 RB 为  $1.325 \times 10^{-7}$ 。

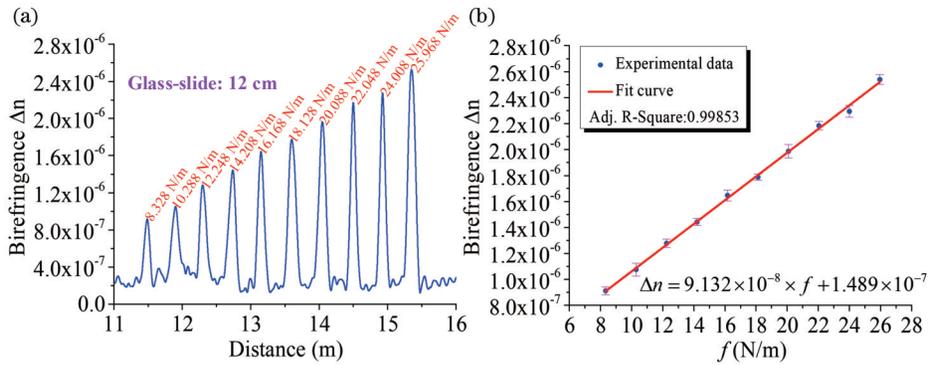


图 22 横向压力测量灵敏度系数标定实验结果<sup>[48]</sup>。(a)分布式双折射;(b)双折射与横向压力的关系

Fig. 22 Experiment results of TF measurement sensitivity calibration<sup>[48]</sup>. (a) Distributed birefringence; (b) birefringence versus TF

根据标定的传感灵敏度系数和式(13)可得到横向压力传感方程:

$$f = \frac{\Delta n}{\zeta} = 1.084 \times 10^7 \times \Delta n. \quad (14)$$

需要注意的是,得到的平均 RB 不能直接叠加在式(14)中用于横向压力  $f$  的计算,这是因为压力诱导双折射和 RB 均为矢量,只有二者方向确定了,才能将 RB 通过矢量运算叠加于式(14)。因此,目前 RB 只能作为传感时的背景噪声,直接用式(14)实现横向压力传感计算。

### 3.4 SMF 分布式横向压力传感验证及性能参数表征

#### 3.4.1 SMF 分布式横向压力传感验证

本课题组开展了两组验证实验(Exp. I 和 Exp.

II)。Exp. I 中①~⑩光纤段均施加约 20.1 N/m 的横向压力,但不同光纤段可能使用不同的砝码质量和受力长度,以验证压力测量准确性和受力长度无关<sup>[48]</sup>。Exp. II 中 10 个光纤段均施加约 98.5 N/m 的横向压力,施力方法同 Exp. I。两组实验结果如图 23 所示,实验涉及的数据及施加压力与测得压力的对比数据如表 3 所示,同时给出了测量相对误差。可以看出,使用较小横向压力的 Exp. I 的各个光纤段测量相对误差要比使用较大横向压力的 Exp. II 的相应光纤段测量相对误差大,这主要是由光纤的 RB 引起的。从图 23 中 8~11 m 光纤段测量数据可以看出,两组实验中,最大 RB 等价横向压力( $\text{RBF}_{\max}$ )为 4.280 N/m,最小 RB 等价横向压力( $\text{RBF}_{\min}$ )为 0.543 N/m, RB 在待测横向压

力较小时影响更加显著。另外,系统噪声、玻璃片施力长度的不准确性等也会导致测量误差。

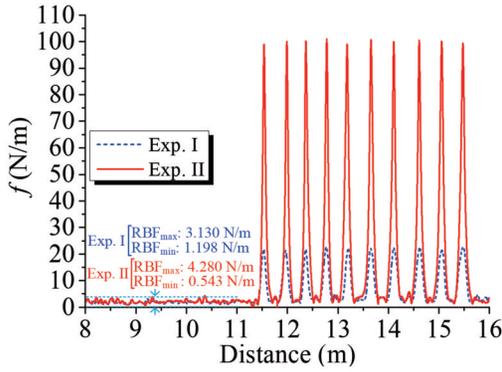


图 23 SMF 分布式横向压力传感验证实验<sup>[48]</sup>

Fig. 23 Experiments of SMF-based distributed TF sensing demonstration<sup>[48]</sup>

### 3.4.2 最大可测量横向压力

最大可测量横向压力是分布式横向压力传感的重要参数。在一个 BSR 长度 ( $d_{BSR}$ ) 内,累积的横向压力诱导相位延迟不能超过  $\pi$ ,否则会出现相位缠绕问题<sup>[48]</sup>,因此要满足:

$$\Delta n \times d_{BSR} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (15)$$

对于 DPA 系统,BSR 为 0.25 mm,由式(15)可以

计算得到在 1550 nm 工作波长处压力诱导双折射最大值为  $\Delta n_{max} = 1.55 \times 10^{-3}$  RIU,再由式(14)得到最大可测量横向压力  $f_{max}$  为  $1.68 \times 10^4$  N/m (16.8 N/mm)。

### 3.4.3 最小可测量横向压力

定义最小可测量横向压力  $f_{min}$  为施加该横向压力时诱导的光纤双折射比 RB 高 2 倍 (3 dB),据此开展了实验,结果如图 24 所示。选择 SMF-UT 上 RB 比较低的一段作为实验光纤,在长度为 7.5 cm 的施力玻璃片上,从 5 g 不断增加砝码质量到 65 g,同时拟合实验数据得到很好的直线拟合效果,每个数据点都是 6 次重复测量的平均值。结合图 24 的插图曲线和数据可以看出,最小可探测横向压力为 0.634 N/m。同时,在其他的受力长度 (1, 2, ..., 7 cm) 下分别进行了同样的实验<sup>[48]</sup>,测得的最小可探测横向压力在 0.576~0.790 N/m 范围内,其平均值可作为系统的最小可测量横向压力,即  $f_{min}$  为 0.661 N/m ( $6.61 \times 10^{-4}$  N/mm),意味着如果受力长度为 5 mm,系统可以感知小至 0.68 g 的质量。另外,根据前文得到的最大可测量横向压力  $f_{max} = 16.8$  N/mm,得到系统的横向压力传感动态范围达 44 dB。

### 3.4.4 空间分辨率和最大传感距离

空间分辨率和最大传感距离是分布式横向压力传感另外两个重要的参数。为了表征系统的空间分辨率,使用一个数显推力计 (Sundoo Instrument, SH-50) 为 SMF-UT 引入可控的单个横向压力。光纤两端用

表 3 两组验证实验数据<sup>[48]</sup>

Table 3 Data of two demonstration experiments<sup>[48]</sup>

Experiment	No. of fiber segment	Force-applying length /cm	Applied TF /( $N \cdot m^{-1}$ )	Measured TF /( $N \cdot m^{-1}$ )	Relative error /%
Experiment I (Exp. I)	①	8	20.182	21.799	8.012
	②	8	20.182	21.326	5.668
	③	9	20.168	21.810	8.142
	④	9	20.168	22.432	11.226
	⑤	10	20.157	22.093	9.605
	⑥	10	20.157	22.037	9.327
	⑦	11	20.119	22.350	11.089
	⑧	11	20.119	22.406	11.367
	⑨	12	20.088	21.590	7.477
	⑩	12	20.088	22.653	12.769
Experiment II (Exp. II)	①	8	98.582	98.851	0.273
	②	8	98.582	99.957	1.395
	③	9	98.568	100.130	1.585
	④	9	98.568	100.965	2.432
	⑤	10	98.557	98.894	0.342
	⑥	10	98.557	100.693	2.167
	⑦	11	98.519	99.902	1.404
	⑧	11	98.519	100.553	2.065
	⑨	12	98.488	100.076	1.612
	⑩	12	98.488	99.328	0.853

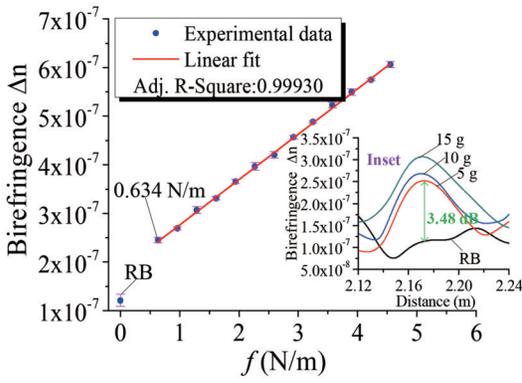


图 24 最小可测量横向压力表征<sup>[48]</sup>

Fig. 24 Characterization of minimum detectable TF<sup>[48]</sup>

带千分尺的夹具固定并保持水平,同时调节两边千分尺同样的刻度可以整体平移光纤,平移最小刻度为 50 μm,光纤固定后用推力计的施力头压紧光纤,接触长度(受力长度)为 1.0 mm,受力光纤段剥掉涂覆层。具体实验方法为:在推力计上设定一个固定的推力,测量横向压力沿光纤的分布,如图 25(a)的 Test-1 曲线所示;以 0.1 mm 为步进间隔平移光纤,每次移动光纤后,推力计给予光纤同样的推力并测量横向压力分布,结果如图 25(b)的 Test-2 曲线所示。引入 Sparrow 判

据<sup>[73]</sup>确定测量空间分辨率,即两次测量曲线的叠加曲线中间凹陷恰巧不能被分辨时,两次测量的光纤受力点间隔即为空间分辨率。如图 25(a)所示,该传感系统的空间分辨率为 3.7 mm。

由于 TLS 的线宽约为 500 kHz,根据式(6),光纤中的相干长度约为 400 m。根据 Nyquist 采样定理,辅助干涉仪的延迟长度应为主干涉仪待测光纤长度的 2 倍以上。由于辅助干涉仪为迈克耳孙干涉仪,其延迟光纤长度应不大于 200 m。在实验中发现,当辅助干涉仪光纤长度为 250 m 时,仍然可以得到较好的测量结果。采用图 25(a)同样的施力方法,先使用一段约 6.3 m 的 SMF-UT,在 5.652 m 处施加一个固定横向压力,测量结果如图 25(b)的 Peak-1 曲线所示。然后,在此 6.3 m 长光纤前端熔接一段约 97.2 m 长的 SMF,即总的 SMF-UT 长度变为 103.5 m,而在此过程中受力光纤段和施力计始终保持不动,重新测量结果如图 25(b)中 Peak-2 曲线所示,横向压力峰移动到 102.865 m 处。以上两次测量结果均为 10 次重复测量数据的平均值。另外,Peak-1 和 Peak-2 的横向压力测量值分别为 21.179 N/mm 和 21.685 N/mm,具有很好的一致性,说明在整个 103.5 m 长度范围内均能得到准确的横向压力测量结果。

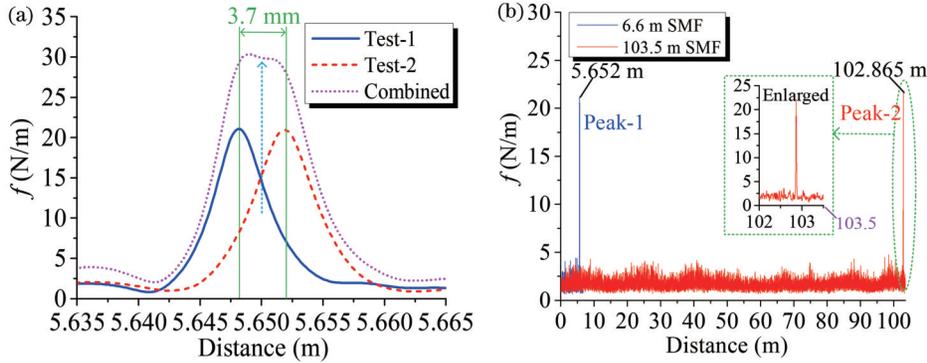


图 25 传感空间分辨率和最大传感距离表征实验<sup>[48]</sup>。(a)空间分辨率;(b)传感距离

Fig. 25 Characterization of sensing spatial resolution and maximum sensing distance<sup>[48]</sup>. (a) Spatial resolution; (b) sensing distance

值得注意的是,虽然激光源线宽是传感长度的决定因素,使用更窄线宽的 TLS 是增加测量长度的前提。然而,测量长度增加后需要采集和处理的数据量将显著增加,而且会引入更多的扰动噪声,对于光源的

扫描速度和算法的处理速度也会有更高的要求,这一切都会增加整个光纤传感系统的成本。已实现的 SMF 分布式横向压力传感技术的性能指标如表 4 所示。

表 4 SMF 分布式横向压力光纤传感技术性能

Table 4 Performance of SMF based distributed TF fiber-optic sensing

Interrogation technique	Sensing medium	Sensitivity	Maximum detectable TF	Minimum detectable TF	Spatial resolution	Fiber length
DPA (PA-OFDR)	Common SMF	$9.223 \times 10^{-4}$ RIU/(N·m <sup>-1</sup> )	16.8 N/mm	$6.61 \times 10^{-4}$ N/mm	3.7 mm	103.5 m

### 3.4.5 光纤涂覆层对横向压力传感的影响

光通信用标准 SMF 通常使用厚度为 62.5 μm 的聚丙烯酸酯材料涂覆层,目的是保护和缓冲,从而明显

降低横向压力的传感敏感性,因此上述研究中施加压力的光纤段均为剥除涂覆层,但是实际应用时必须对光纤进行涂覆保护。图 26(a)给出了有、无涂覆层

SMF 传感敏感性实验结果,其实验方法和图 23 实验相同,可见带涂覆 SMF 对于约 98.5 N/m 的横向压力没有响应。图 26(a)中也给出了定制金色聚酰亚胺涂覆 SMF 的测量结果,可见光纤具有较高的 RB,对于约 98.5 N/m 的横向压力也无法准确测量。于是,从 100 N/m 不断增大横向压力,对聚丙烯酸酯和聚酰亚胺涂覆的 SMF 分别开展实验,结果如图 26(b)、(c)所示;分别提取双折射随横向压力的变化关系,结果如图 26(d)、(e)所示。聚丙烯酸酯涂覆 SMF 和聚酰亚胺涂覆 SMF 的最小可探测横向压力分别为 200.000 N/m 和 146.667 N/m,说明聚酰亚胺涂覆具有更好的压力

传递能力,与 2.3 节由 PMF 得到的结论一致;曲线拟合得到的传感灵敏度分别为  $5.839 \times 10^{-8}$  RIU/(N·m<sup>-1</sup>) 和  $8.707 \times 10^{-8}$  RIU/(N·m<sup>-1</sup>),后者更接近无涂覆层 SMF 的系数  $9.223 \times 10^{-8}$  RIU/(N·m<sup>-1</sup>)。另外,实验也证明聚酰亚胺涂覆 SMF 具有更短的响应时间<sup>[48]</sup>。以上结果说明,聚酰亚胺涂覆 SMF 对于分布式横向压力传感在灵敏度和响应时间上具有优势,但高 RB 限制了最小可探测横向压力和动态测量范围,因此对于 SMF 分布式横向压力传感还需要发展更好的涂覆工艺或探索更好的涂覆材料。

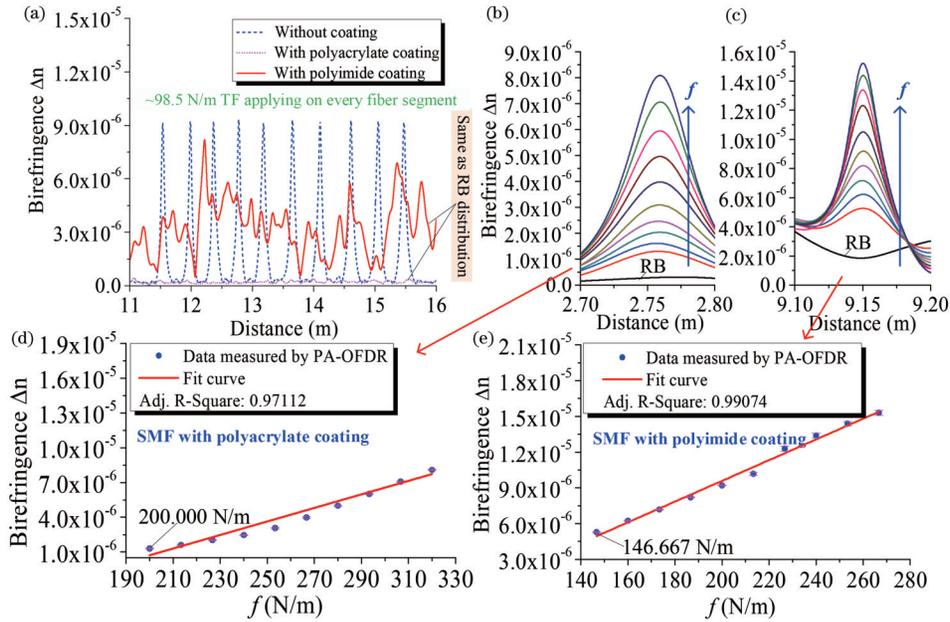


图 26 光纤涂覆层对于横向压力传感的影响<sup>[48]</sup>。(a)不同涂覆层 SMF 压力传感敏感性;(b)聚丙烯酸酯涂覆 SMF 压力诱导双折射;(c)聚酰亚胺涂覆 SMF 压力诱导双折射;(d)聚丙烯酸酯涂覆 SMF 双折射与横向压力的关系;(e)聚酰亚胺涂覆 SMF 双折射与横向压力的关系

Fig. 26 Fiber coating influence to TF sensing<sup>[48]</sup>. (a) TF sensitivities of SMFs with different coatings; (b) TF-induced birefringence property of polyacrylate coated SMF; (c) TF-induced birefringence property of polyimide coated SMF; (d) birefringence versus TF for polyacrylate coated SMF; (e) birefringence versus TF for polyimide coated SMF

### 3.5 分布式横向压力传感典型应用

#### 3.5.1 复合材料形变检测探索

复合材料(碳纤维、玻璃纤维等)已在大飞机、运载火箭、超级跑车等领域得到广泛应用,弯曲形变的分布式监测对其安全应用具有重要的意义。基于分布式横向压力传感技术,本文对 SMF 内嵌碳纤维复合材料的形变监测开展了初步探索。图 27 给出了 SMF 内嵌双层碳纤维复合材料制作样品的示意图和实物照片,包括将 SMF 上 1 段(样品 1, Sample-1)和 4 段(样品 2, Sample-2)嵌入复合材料的样品,制作方法采用抽真空结合高温加压;同时给出了施加弯曲形变的模具,设置有不同弯曲半径的沟槽,可将复合材料置于其中,引入固定弯曲半径的形变。此处引入的最小弯曲半径为 6 cm,以保证由光纤自身弯曲诱导的双折射大小可以忽略不计<sup>[21]</sup>,而只有横向压力诱导双折射产生。

图 28 所示分别为使用 DPA 系统对样品 1 和样品 2 复合材料的测量结果。从图 28(a)、(c)可以看出,样品 1 只有 1 个双折射峰,而样品 2 有 4 个双折射峰,且双折射均随着复合材料弯曲半径的减小而增大;图 28(b)、(d)给出了内嵌 SMF 的双折射随复合材料弯曲半径的变化关系,其均呈现良好的单调递减趋势,且样品 2 中 4 个光纤段的双折射变化规律具有较好的一致性。良好的单调性为复合材料的分布式形变监测提供了简单且准确标定的前提,多段 SMF 嵌入复合材料为大面积二维监测提供了可能,实验验证了复合材料形变监测的可行性。

#### 3.5.2 V 槽夹持固定光纤附加双折射特性

在传感光纤固定、光纤尾端与微光器件或光子集成芯片耦合对接、光纤阵列制作过程中,经常用到 V 槽器件固定光纤<sup>[74-76]</sup>,但是在光纤固定过程中不希望引入

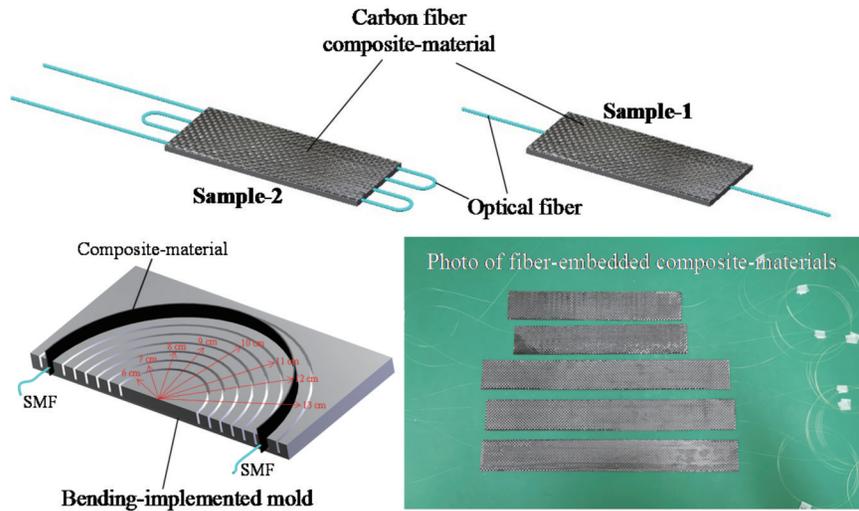


图 27 SMF 内嵌碳纤维复合材料制作及弯曲形变施加模具

Fig. 27 Fabrication of SMF-embedded carbon fiber composite-material and bending-implemented mold

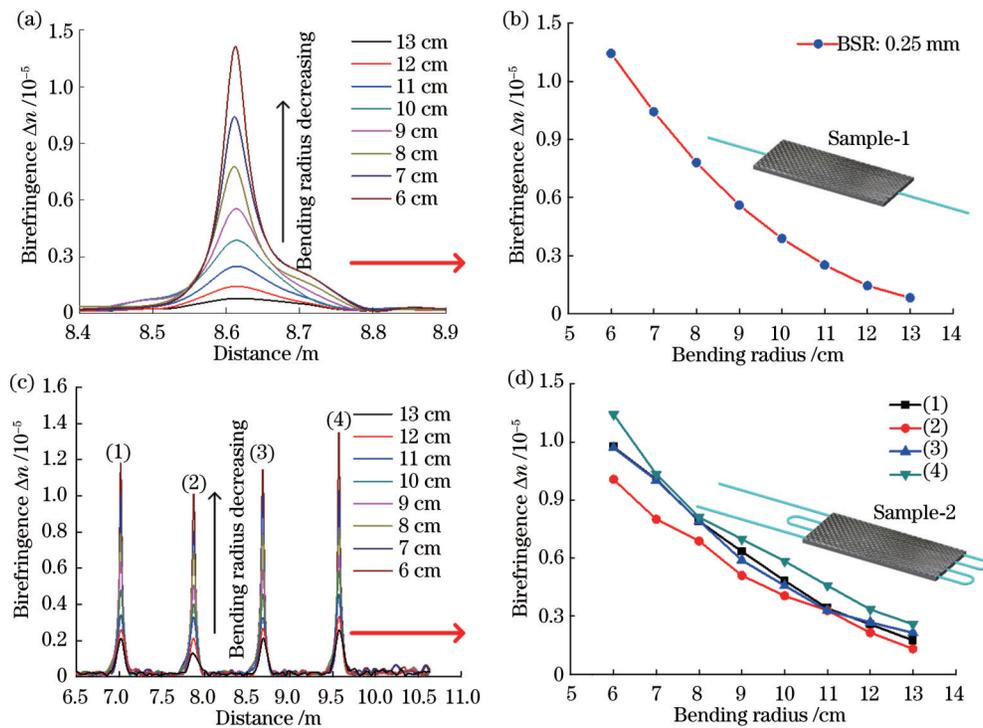


图 28 复合材料内嵌 SMF 的双折射分布式测量结果及双折射与弯曲半径的关系。(a)(b)样品 1;(c)(d)样品 2

Fig. 28 Distributed birefringence measurement results of SMF embedded in composite-material and relationship between birefringence and bending radius. (a) (b) Sample-1; (c) (d) Sample-2

附加双折射。常用的光纤夹持固定方法有两种：平压光纤入 V 槽和两相同 V 槽对压光纤。在 1981 年和 1987 年,仅有的两个相关研究报道<sup>[77]</sup>要么认为零附加双折射槽角不存在,要么认为零附加双折射槽角约为 55°,主要是考虑光纤与 V 槽槽壁的摩擦力影响。然而,他们研究用的 V 槽材料和形式与如今普遍应用的石英玻璃 V 槽完全不同。而且,也没有人研究过 V 槽对压方法固定光纤的附加双折射特性。因此,研究者和生产者长期困惑于使用 V 槽夹持固定光纤时无法考虑夹持力引起的附加双折射影响,且无法针对性地研制零附加双

折射 V 槽器件。针对这个问题,本课题组基于 DPA 系统开展了相关研究<sup>[74]</sup>,首先理论研究了两种夹持方式下附加双折射与 V 槽槽角的关系,然后针对两种光纤夹持固定方法定制了两种 V 槽,分别为 Type-1 型和 Type-2 型,如图 29(a)、(b)所示,且分别定制了一系列不同槽角的 V 槽,槽角以 10°为间隔从 40°增大到 160°。

本课题组首先理论研究了典型槽角下 V 槽夹持固定光纤时附加双折射与施加横向压力的关系,初步确定了两种夹持固定方式分别在 V 槽槽角为 60°和 90°时附加双折射为 0。然后,开展了图 29(a)、(b)所示的分

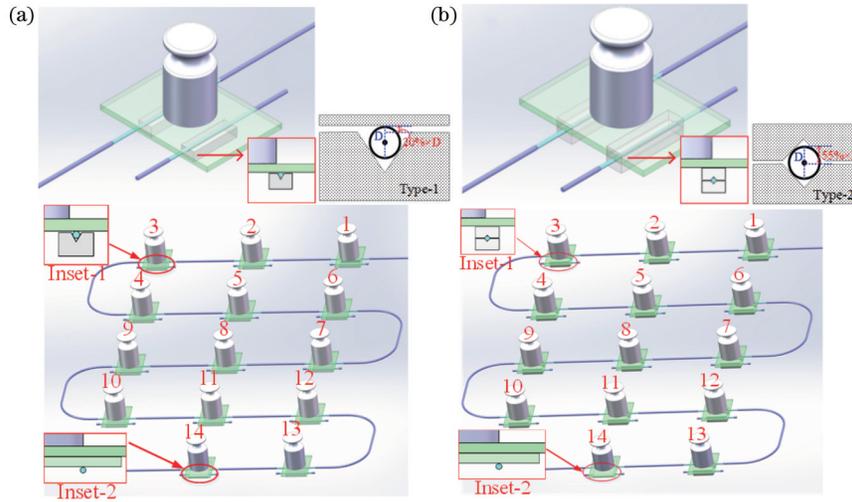


图 29 光纤夹持固定及压力施加方法和不同槽角夹持固定光纤的分布式测量实验<sup>[74]</sup>。(a)平压光纤入 V 槽;(b)两相同 V 槽对压光纤  
Fig. 29 Methods of fiber clamping and TF-applying and distributed measurement experiments for fiber clamping with different V-groove angles along the fibers<sup>[74]</sup>. (a) Fiber clamped in V-grooves by flat-lids; (b) fiber clamped by two identical V-grooves

布式测量实验,在光纤沿线设置 13 个光纤段并剥除涂覆层,分别使用两种定制的 V 槽按槽角从小到大夹持光纤,并使用 245.0 N/m (500 g 砝码)通过玻璃片施加压力。为方便对比,同时设置第 14 个光纤段,直接压光纤在平面上,相当于 180° V 槽。这两种固定方式的测量结果分别如图 30(a)、(b)所示,可以看出,随着 V

槽角度的增大,SMF 双折射先变小后变大,且均存在最小值。通过与两种光纤夹持固定方式的理论公式拟合,得到了和理论研究相同的结论,即两种光纤夹持方式对应的零附加双折射槽角分别为 60°和 90°,且光纤和 V 槽之间的摩擦力可以忽略不计。本研究结果为 V 槽研究者和使用者指明了方向。

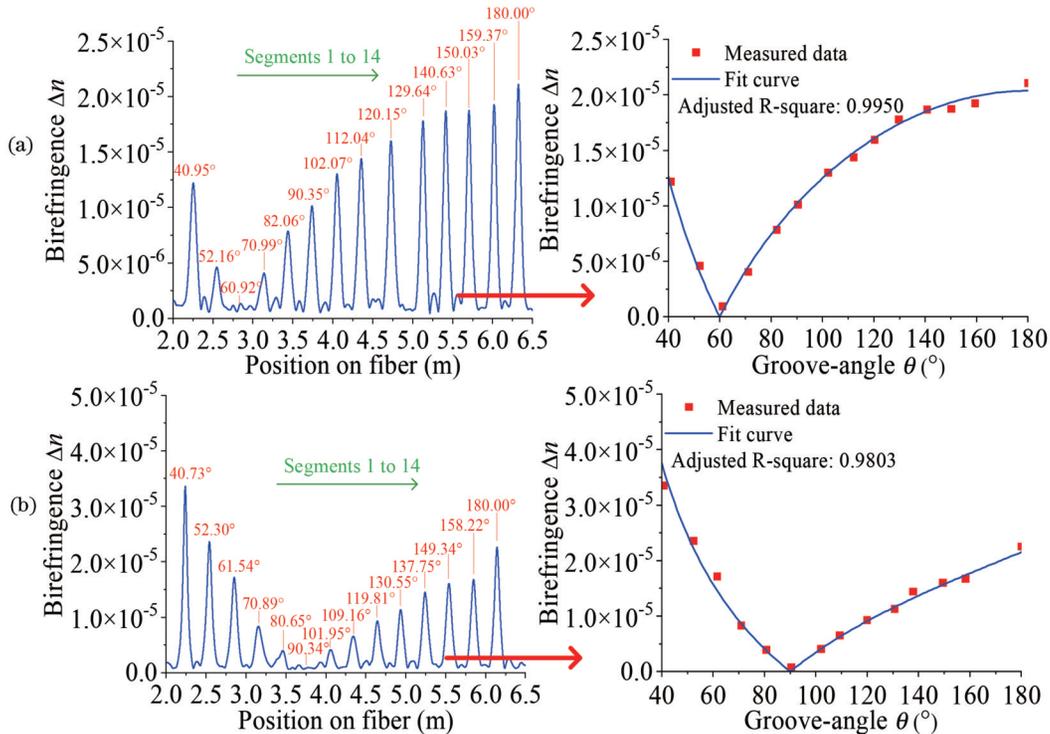


图 30 光纤夹持固定附加双折射与 V 槽槽角的关系<sup>[74]</sup>。(a)平压光纤入 V 槽;(b)两相同 V 槽对压光纤  
Fig. 30 Relationship between additional birefringence of SMF clamped in V-grooves and groove angles<sup>[74]</sup>. (a) Fiber clamped in V-grooves by flat-lids; (b) fiber clamped by two identical V-grooves

## 4 总结与展望

应变、温度、振动等分布式光纤传感技术的理论基

础和系统构建均已相对成熟,却难以向分布式横向压力传感直接拓展。偏振相关测量为分布式横向压力光纤传感提供了可能,本课题组在前人研究的基础上,聚

焦于基于偏振分析的分布式横向压力光纤传感研究, 分别在 PMF 和 SMF 分布式横向压力测量与解调系统、传感介质、系统性能及典型应用等方面取得了突破, 包括: 构建了无“鬼峰”DPXA 系统, 研究了 PMF 的偏振串扰响应特性及涂覆层的影响, 研发了 PMF 定轴布纤及传感基带制作设备, 验证了 PMF 分布式横向压力光纤传感性能, 探索了扭转 PMF 和 SF 作为受力角度无关横向压力传感介质的可行性; 发明并构建了高性能全 Mueller 矩阵 DPA 系统, 率先实现了 SMF 直接分布式横向压力传感并获得优秀的传感性能, 验证了基于横向压力测量的 SMF 内嵌复合材料形变监测的可行性, 解决了 V 槽夹持固定 SMF 零附加双折射角度等关键问题。以上研究成果为分布式横向压力光纤传感提供了基础测量与解调技术, 也为其不断向实际应用的推广储备了良好的整体传感技术。今后的发展将主要面向传感解调系统的小型化、集成化, PMF 及 SF 的低成本量产化, 针对横向压力传感敏感性提升的光纤涂覆工艺优化或新型涂覆材料的研发、分布式横向压力光纤传感在线实际应用及新方向拓展等。另外, DPA 技术在 SMF 内嵌复合材料形变监测和光纤器件与设备内部双折射特性表征与优化等方面表现出潜在优势, 也是今后重点发展的方向, 研究价值未来可期。

## 参 考 文 献

- [1] Schenato L, Pasuto A, Galtarossa A, et al. An optical fiber distributed pressure sensing cable with Pa-sensitivity and enhanced spatial resolution[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 5900-5908.
- [2] Sikarwar S, Satyendra, Singh S, et al. Review on pressure sensors for structural health monitoring[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(4): 294-304.
- [3] Post V E A, von Asmuth J R. Review: hydraulic head measurements: new technologies, classic pitfalls[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(4): 737-750.
- [4] 陈信伟, 张红霞, 贾大功, 等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1467-1472.  
Chen X W, Zhang H X, Jia D G, et al. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1467-1472.
- [5] Maier R R J, MacPherson W N, Barton J S, et al. Distributed sensing using Rayleigh scatter in polarization-maintaining fibres for transverse load sensing[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094019.
- [6] He Z Y, Hotate K. Distributed fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(9): 1715-1723.
- [7] Saida T, Hotate K. Distributed fiber-optic stress sensor by synthesis of the optical coherence function[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(4): 484-486.
- [8] Schenato L, Rong Q Z, Shao Z H, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on a 3D-printed transducer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4784-4790.
- [9] Liu L H, Zhang H, Zhao Q D, et al. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity[J]. Optical Fiber Technology, 2007, 13(1): 78-80.
- [10] Abeyasinghe D C, Dasgupta S, Boyd J T, et al. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 993-995.
- [11] 王花平. 分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0206004.  
Wang H P. Influence of interfacial effect between distributed optical fiber sensors and monitored structures[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0206004.
- [12] 何俊, 徐锡镇, 贺佳, 等. 蓝宝石光纤光栅高温传感器研究进展与发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20220700.  
He J, Xu X Z, He J, et al. Research progress and development trend of sapphire fiber grating high temperature sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 20220700.
- [13] 殷礼鑫, 刘智超, 刘春辉. 基于 FBG 阵列的曲面结构状态感知系统[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2406001.  
Yin L X, Liu Z C, Liu C H. Surface structure state perception system based on FBG array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2406001.
- [14] Yang G Y, Fan X Y, Wang B, et al. Enhancing strain dynamic range of slope-assisted BOTDA by manipulating Brillouin gain spectrum shape[J]. Optics Express, 2018, 26(25): 32599-32607.
- [15] Fu G W, Cao J Q, Li W L, et al. A novel positioning and temperature measurement method based on optical domain demodulation in the BOTDR system[J]. Optics Communications, 2021, 480: 126490.
- [16] Muanenda Y S, Taki M, Nannipieri T, et al. Advanced coding techniques for long-range raman/BOTDA distributed strain and temperature measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 342-350.
- [17] Wang F, Zhang X P, Wang X C, et al. Distributed fiber strain and vibration sensor based on Brillouin optical time-domain reflectometry and polarization optical time-domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2437-2439.
- [18] 王宇, 肖迪, 牛洋洋, 等. 基于光频域反射仪的光纤水听器探头结构形变研究[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0528001.  
Wang Y, Xiao D, Niu Y Y, et al. Structural deformation of fiber optic hydrophone probe based on optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0528001.
- [19] 付彩玲, 彭振威, 李朋飞, 等. OFDR 分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 1106007.
- [20] Fu C L, Peng Z W, Li P F, et al. Research on distributed fiber temperature/strain/shape sensing based on OFDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 1106007.
- [21] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.
- [22] Feng T, Shang Y L, Wang X C, et al. Distributed polarization analysis with binary polarization rotators for the accurate measurement of distance-resolved birefringence along a single-mode fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 25989-26002.
- [23] Oberson P, Huttner B, Guinnard O, et al. Optical frequency domain reflectometry with a narrow linewidth fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 867-869.
- [24] Méndez A, Diatzikis E. Fiber optic distributed pressure sensor based on Brillouin scattering[C]//Optical Fiber Sensors, October 23-27, 2006, Cancún, Mexico. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2006: ThE46.
- [25] Le Floch S, Cambon P. Study of Brillouin gain spectrum in standard single-mode optical fiber at low temperatures (1.4-370 K) and high hydrostatic pressures (1-250 bars)[J]. Optics Communications, 2003, 219(1/2/3/4/5/6): 395-410.
- [26] Gu H D, Dong H J, Zhang G Y, et al. Dependence of Brillouin frequency shift on radial and axial strain in silica optical fibers[J]. Applied Optics, 2012, 51(32): 7864-7868.
- [27] Mizuno Y, Lee H, Hayashi N, et al. Hydrostatic pressure dependence of Brillouin frequency shift in polymer optical fibers[J]. Applied Physics Express, 2018, 11(1): 012502.
- [28] Rogers A J. Polarisation optical time domain reflectometry[J].

- Electronics Letters, 1980, 16(13): 489-490.
- [28] Rogers A J. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions[J]. Applied Optics, 1981, 20(6): 1060-1074.
- [29] Rogers A J, Shatalin S V, Kanellopoulos S E. Distributed measurement of fluid pressure via optical-fibre backscatter polarimetry[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 230-233.
- [30] Dai Z Y, Zhang X X, Peng Z S, et al. Distributed fiber optic stress sensor system based on P-OFDR[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7659: 765914.
- [31] Chen T, Wang Q Q, Chen R Z, et al. Distributed high-temperature pressure sensing using air-hole microstructural fibers [J]. Optics Letters, 2012, 37(6): 1064-1066.
- [32] Gerosa R M, Osório J H, Lopez-Cortes D, et al. Embedded-core optical fiber for distributed pressure measurement using an autocorrelation OFDR technique[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: SF3L.2.
- [33] Teng L, Zhang H Y, Dong Y K, et al. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [34] Galtarossa A, Grosso D, Palmieri L, et al. Spin-profile characterization in randomly birefringent spun fibers by means of frequency-domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 1078-1080.
- [35] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed measurements of external force induced local birefringence in spun highly birefringent optical fibers using polarimetric OFDR[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 951-964.
- [36] Palmieri L, Galtarossa A, Geisler T. Distributed characterization of bending effects on the birefringence of single-mode optical fibers[J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2481-2483.
- [37] Wei C J, Chen H X, Chen X J, et al. Distributed transverse stress measurement along an optic fiber using polarimetric OFDR [J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2819-2822.
- [38] Tsubokawa M, Higashi T, Negishi Y. Mode couplings due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber: an evaluation[J]. Applied Optics, 1988, 27(1): 166-173.
- [39] Song D Y, Wang Z Y, Chen X W, et al. Influence of ghost coupling points on distributed polarization crosstalk measurements in high birefringence fiber and its solution[J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 1918-1925.
- [40] Zhang Z H, Feng T, Zhou J N, et al. Demonstration of a polarization maintaining fiber tape for simultaneous transverse-force and temperature sensing based on distributed polarization crosstalk analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11554: 1155411.
- [41] Su H X, Zhao Z W, Feng T, et al. Demonstration of distributed fiber-optic temperature sensing with PM fiber using polarization crosstalk analysis technique[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10025: 100251F.
- [42] Yu Z J, Yang J, Lin C F, et al. Distributed polarization measurement for fiber sensing coils: a review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3699-3710.
- [43] Yang J, Yu Z J, Yuan L B. Characterization of distributed polarization-mode coupling for fiber coils[M]//Peng G D. Handbook of optical fibers. Singapore: Springer, 2018: 1-40.
- [44] 李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206001. Li Z Z, Li Z H, Yao X T, et al. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206001.
- [45] 丁振扬, 姚晓天, 刘铁根, 等. 采用分布式偏振串扰检测保偏光纤环质量的研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(3): 430-434. Ding Z Y, Yao X T, Liu T G, et al. Improving the quality of polarization-maintaining fiber coils using distributed polarization crosstalk testing[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(3): 430-434.
- [46] Xu T H, Tang F, Jing W C, et al. Distributed measurement of mode coupling in birefringent fibers with random polarization modes[J]. Optica Applicata, 2009, 39(1): 77-90.
- [47] Yao X S, Chen X J. Distributed polarization analysis and its applications[M]//Polarization measurement and control in optical fiber communication and sensor systems. Singapore: John Wiley & Sons, Inc. 2022: 409-479.
- [48] Feng T, Zhou J N, Shang Y L, et al. Distributed transverse-force sensing along a single-mode fiber using polarization-analyzing OFDR[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31253-31271.
- [49] 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.
- [50] Feng T, Ding D L, Li Z H, et al. First quantitative determination of birefringence variations induced by axial-strain in polarization maintaining fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(22): 4937-4942.
- [51] Li Z H, Yao X S, Chen X J, et al. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(2): 372-380.
- [52] Tang F, Wang X Z, Zhang Y M, et al. Characterization of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers by use of white-light interferometry[J]. Applied Optics, 2007, 46(19): 4073-4080.
- [53] Tang F, Wang X Z, Zhang Y M, et al. Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3411-3413.
- [54] Chen X J, Yao X S. Measuring distributed polarization crosstalk in polarization maintaining fiber and optical birefringent material: US8599385[P]. 2013-12-03.
- [55] Zhang Z H, Feng T, Li Z H, et al. Experimental study of transversal-stress-induced polarization crosstalk behaviors in polarization maintaining fibers[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11191: 111910W.
- [56] Yan J T, Miao L J, Huang T C, et al. Development of method for polarization alignment of PANDA polarization maintaining fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 101999.
- [57] Hao P, Yu C, Feng T, et al. PM fiber based sensing tapes with automated 45° birefringence axis alignment for distributed force/pressure sensing[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 18829-18842.
- [58] Hotate K, Leng S O S. Transversal force sensor using polarization-maintaining fiber independent of direction of applied force: proposal and experiment[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No. 02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 363-366.
- [59] Xu Z X, Yao X S, Ding Z Y, et al. Accurate measurements of circular and residual linear birefringences of spun fibers using binary polarization rotators[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30780-30792.
- [60] Peng N, Huang Y, Wang S B, et al. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(17): 1668-1671.
- [61] Dong X P, Chu B C B, Kong K H, et al. Phase drift compensation for electric current sensor employing a twisted fiber or a spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(5): 803-809.
- [62] Costa L, Magalhães R, Palmieri L, et al. Fast and direct measurement of the linear birefringence profile in standard single-mode optical fibers[J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 623-626.
- [63] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, et al. Single-

- shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13121-13133.
- [64] Soto M A, Lu X, Martins H F, et al. Distributed phase birefringence measurements based on polarization correlation in phase-sensitive optical time-domain reflectometers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24923-24936.
- [65] Lu Y G, Bao X Y, Chen L, et al. Distributed birefringence measurement with beat period detection of homodyne Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 3936-3938.
- [66] Galtarossa A, Palmieri L. Spatially resolved PMD measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(4): 1103-1115.
- [67] Ross J N. Birefringence measurement in optical fibers by polarization-optical time-domain reflectometry[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(19): 3489-3495.
- [68] Wang L T, Iiyama K, Tsukada F, et al. Loss measurement in optical waveguide devices by coherent frequency-modulated continuous-wave reflectometry[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1095-1097.
- [69] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [70] Ulrich R, Rashleigh S C, Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(6): 273-275.
- [71] Yao X S, Chen X J, Liu T G. High accuracy polarization measurements using binary polarization rotators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6667-6685.
- [72] Smith A M. Single-mode fibre pressure sensitivity[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(20): 773-774.
- [73] Sparrow C M. On spectroscopic resolving power[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1916, 44: 76-86.
- [74] Feng T, Miao T T, Lu Z Y, et al. Clamping-force induced birefringence in a single-mode fiber in commercial V-grooves investigated with distributed polarization analysis[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5347-5359.
- [75] Suzuki K, Konoike R, Hasegawa J, et al. Low-insertion-loss and power-efficient 32×32 silicon photonics switch with extremely high- $\Delta$  silica PLC connector[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 37(1): 116-122.
- [76] Son G, Han S, Park J, et al. High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(12): 1845-1864.
- [77] Kumar A, Ulrich R. Birefringence of optical fiber pressed into a V groove[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(12): 644-646.

## Distributed Transverse Force/Pressure Fiber Sensing Based on Polarization Analysis

Feng Ting<sup>1,2\*</sup>, Li Fang<sup>1,2</sup>, Guo Jichen<sup>1,2</sup>, Lu Ziyi<sup>1,2</sup>, He Zongjiang<sup>1,2</sup>, Hao Peng<sup>1,2</sup>, Yao Xiaotian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;*

<sup>2</sup>*Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China*

### Abstract

**Significance** Force/pressure measurement has always been a focus of attention in many industrial and environmental structures, medical fields, and defense architectures. It is particularly in high demand in areas such as oil and gas wells and pipelines, geotechnical engineering, water distribution, and wastewater treatment facilities. Traditional electronic sensors are not suitable for remote monitoring, and they are sensitive to electromagnetic interference and not easily multiplexed in large-scale sensor networks. The single-point fiber optic sensor has been successfully commercialized, but in many important application areas, even dense multiplexed quasi-distributed fiber optic sensing systems cannot meet measurement requirements. Therefore, there is a strong demand for research on distributed transverse force (TF)/pressure fiber sensing. However, compared with distributed fiber sensing techniques that can measure parameters such as strain, temperature, and vibration, the basic technology for distributed TF sensing is lacking. Some indirect measurement methods using special mechanical structures to convert TF into other parameters face significant issues such as high complexity, low accuracy, and difficulty in practical application. The development of a direct distributed TF fiber sensing technology is highly desired. Previous researchers have proposed measurement techniques based on specialty fibers and single-mode fibers (SMFs) for distributed polarization properties, providing a new idea for distributed TF fiber sensing. However, due to technical limitations or performance deficiencies in the measurement systems, there have been few studies on distributed TF fiber sensing based on polarization analysis.

**Progress** Based on a thorough analysis and study of previous research on distributed TF fiber sensing and potential key technologies, the authors have taken the lead in conducting research on distributed transverse pressure fiber sensing based on polarization analysis. The breakthroughs have been made in polarization-maintaining fibers (PMFs) and SMFs-based

distributed TF measurement and demodulation systems, sensing medium, system performance, and typical applications. We have constructed a constructed polarization crosstalk analysis (DPXA) system without "ghost peaks", which effectively eliminates the influence of second-order crosstalk peaks on measurement accuracy (Fig. 3 and Fig. 4). We have also studied the polarization crosstalk response characteristics of PMFs and the influence of fiber coatings, demonstrating that polyimide-coated PMF is more favorable for distributed TF fiber sensing (Fig. 6 and Fig. 7). Furthermore, we have developed the equipment for PMF's axis alignment and sensing tape fabrication (Fig. 8), which enables automated 45° birefringence axis alignment for fiber sensing tape production (Fig. 9). We have verified the feasibility of distributed TF fiber sensing using the PMF and achieved high measurement resolution and repeatability (Fig. 12). We explored the feasibility of using twisted PMF and high-birefringence spun fiber (SF) as TF sensing media without dependence on the force-applying angle. By utilizing the SF, force-applying-angle-insensitive distributed polarization crosstalk measurement within 2 dB was achieved (Fig. 16). We have invented and built a high-performance distributed polarization analysis (DPA) system with full Mueller matrix measurement capability (Fig. 18). This system enables distributed birefringence measurement in a SMF with high spatial and measurement resolution (Fig. 19 and Fig. 20). We were the first to achieve direct distributed TF sensing in a SMF (Fig. 21) and obtained excellent sensing performance (Table 1, Fig. 24, and Fig. 25). We validated the feasibility of TF measurement-based monitoring deformations in SMF-embedded composite materials (Fig. 28) and determined the groove-angles for zero clamping-induced birefringence when fixing the SMF in two types of V-grooves (Fig. 30).

**Conclusions and Prospects** The above research findings provide a foundation for the measurement and demodulation techniques of distributed TF fiber sensing and provide a good overall technical reserve for its continuous promotion to practical applications. In the future, the development will mainly focus on miniaturization and integration of sensing demodulation systems, low-cost mass production of PMF and SF, optimization of fiber coating processes, or development of new coating materials to enhance the sensitivity of TF sensing, practical online applications of distributed TF fiber sensing, and exploration of new directions. Additionally, the DPA technology has also shown a potential advantage in monitoring the deformation of SMF-embedded composite materials and characterizing and optimizing birefringence properties within optical fiber devices and optical equipment. It is also a key direction for future development.

**Key words** distributed fiber sensing; transverse pressure; polarization analysis; polarization-maintaining fiber; single-mode fiber