聚合物封装的纵向微结构光纤分布式压力传感系统

孙琪真,汪静逸,张 威,向 阳,艾 凡,刘德明

(华中科技大学 光学与电子信息学院 下一代互联网接入系统国家工程实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:提出了一种基于纵向微结构光纤的分布式压力传感方案,该方案同时采用波长编码与频率编码技术,实现了单根光纤上的准分布式压力测量,具有实现大容量复用、高空间分辨率和高精度测量的潜力。采用硫化硅橡胶聚合物材料对光纤进行封装,使纵向微结构光纤的压力灵敏度提升至 1.032×10^{-3} 相对波长变化/MPa,是裸光纤光栅压力灵敏度的 500 多倍。构建了包含 6 个光纤微结构的单纤传感系统,并进行了分布式压力测试实验,实验结果显示出很好的线性度和较高的测量精度。该传感方案具有长距离、高分辨率测压(HRM)的潜力,可广泛运用于土木结构健康监测、管道泄漏监控、人体体内压力分布式传感等工程领域中。

关键词:纵向微结构光纤; 复用; 聚合物; 高分辨率测压

中图分类号:TN25 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0802003

Polymer packaged longitudinal microstructured fiber based distributed pressure sensing system

Sun Qizhen, Wang Jingyi, Zhang Wei, Xiang Yang, Ai Fan, Liu Deming

(School of Optical and Electronic Information, National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A longitudinal microstructured fiber based sensing scheme was proposed, the sensing capacity of which was greatly expanded by using frequency and wavelength encode simultaneously. Quasi-distributed pressure measurement along a single fiber was achieved, showing potential of high capacity multiplexing, high spatial resolution and high accurate detection. The silicone rubber package of sensing fiber made the pressure sensitivity increased to 1.032×10^{-3} relative wavelength shift/MPa, which is 500 times higher than bare FBG. Experimental results of the prototype system including 6 fiber microstructures exhibited good linearity and relatively high measurement accuracy. High Resolution Manometry(HRM) in long distance based on this scheme is promising, which can be widely used in civil structural health monitoring, pipeline leakage detecting and distributed pressure sensing for in-vivo.

Key words: longitudinal microstructured fiber; multiplexing; polymer; high resolution manometry

收稿日期:2015-12-13; **修订日期**:2016-01-20

基金项目:华中科技大学创新交叉重点创新团队项目(2015ZDTD013)

作者简介:孙琪真(1982-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤传感方面的研究。Email:qzsun@mail.hust.edu.cn

0 引 言

光纤压力传感器与传统传感器相比具有测量精度高、体积小、耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰等优势，十分适用于在特殊环境中进行参数测量，因而被广泛运用于各工程领域中。最典型的是其在桥梁隧道、水库大坝、矿山油井的结构健康监测方面的应用[1]，另外近些年光纤压力传感器在人体内的压力监测也是一个研究热点[2]。

目前热门的光纤压力传感实现方案主要有三种：FP 干涉型压力传感器、DBR 光纤激光压力传感器以及光纤光栅压力传感器。

FP 干涉型压力传感器是将光纤一端加工为感压头，压力会导致感压头形变从而改变腔长，FP 腔腔长与反射光的强度、相位间均有唯一确定的关系，故可解调出压力大小。有研究将 MEMS 技术运用于光纤 FP 压力传感器[3]，实现了 0~400 kPa 范围内的压力测量，灵敏度达 1.764 nm/kPa。探测精度高是其突出优势，因而特别适用于单点压力测量，但测量多点压力时须搭建的传输线路很复杂，实现分布式测量难度较大、更难以提升空间分辨率。

DBR 光纤激光压力传感器由掺铒光纤(EDF)与一对波长匹配的光栅构成，分别充当增益腔及腔镜，当 DBR 受到横向压力作用时产生横向光弹效应，产生两正交偏振模频率差变化，通过探测拍频差计算压力。这种方案的巨大优势在于可以用低成本的电解调方式探测拍频变化[4]，从而知晓压力变化，且带宽窄、测量精度高，甚至可以探测出横向压力的具体施力方向[5]。但这种传感器多使用频率编码，在提升其复用容量、实现分布式测量上有一定难度，目前相关的分布式传感应用很少。

光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器是目前应用很广泛的一种压力传感器。施加在光栅上的压力会导致有效折射率与光栅周期的变化，而利用压力与布拉格波长漂移之间的线性关系可实现对压力的绝对测量，构成准分布式压力传感器。目前 FBG 分布式压力传感器多使用波分复用的方式[6-7]，用于人体结肠动力检测[8]的 FBG 压力传感器空间分辨率达到 1 cm。但这种方案的传感容量受限于单个光栅的反射谱 3 dB 带宽以及光源的光谱带宽，故波长编码的方式复用容量仍然是有限的，需要对此进行改进以扩大传感容量，实现长距离、高分辨率的分布式压力传感。另外裸露的光纤光栅对横向压力的灵敏度过低[9]，在压力变化范围不大且对精度要求很高的测压场合中并不适用，如人体内环境压力测量。同时裸露的光纤光栅结构脆弱，急需可靠的增敏封装来提升其强度和灵敏度。

综上，高灵敏度、大容量、易解调、可实现分布式测量的光纤压力传感器将是未来的发展趋势。文中提出一种纵向微结构光纤压力传感器，这种微结构是由两全同弱反射光栅构成的 FP 干涉腔，作用于微结构的压力会使干涉谱线性漂移。利用 FBG 中心反射波长的不同以及所构成 FP 腔腔长的不同分别实现波分复用与频分复用。在单根光纤上高密度地刻写中心反射波长不同、FP 腔长不同的多个微结构，形成纵向微结构光纤传感器，从而实现大容量的分布式压力传感。

1 微结构压力传感原理

微结构可以被看作是由两个相距很近的全同 FBG 组成的 FP 干涉仪，如图 1 所示。在此基础上，缩

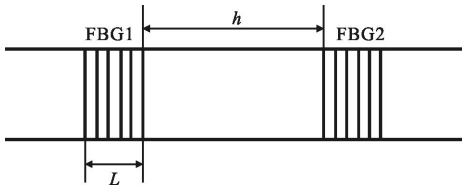


图 1 光纤微结构示意图

Fig.1 Schematic of fiber microstructure

短栅区长度，制成反射率小于1%的弱反射光栅，有效降低了微结构的反射率，从而降低系统的插入损耗，能使大量传感单元以级联方式分布在单光纤上正常工作。单个弱光栅的反射率为[10]：

$$R_G=\frac{\sinh^2(\sqrt{k^2-\hat{\sigma}^2}\,L)}{\cosh^2(\sqrt{k^2-\hat{\sigma}^2}\,L)-\dfrac{\hat{\sigma}^2}{k^2}} \tag{1}$$

$$k=k^*=\frac{\pi}{\lambda}v\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}} \tag{2}$$

$$\hat{\sigma}=2\pi n_{\mathrm{eff}}\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_D}\right)+\frac{2\pi}{\lambda}\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}} \tag{3}$$

式中：n_{eff} 为有效折射率；v 为条纹可见度；L 为弱光

栅的栅区长度。对于弱反射光栅,FP 腔内相当于进行双光束干涉。微结构的反射率近似为:

$$R_S=2R_G[1+\cos 4\pi n_{\text{eff}}L_C/\lambda)] \tag{4}$$

式中:R_G 为超短 FBG 的反射率;n_{eff} 为有效折射率;L_C 为等效 FP 腔的腔长。图 2 为 L_C=3.4 mm 的微结构反射光谱,其包络与单个弱光栅的反射光谱相似,而内部条纹为 FP 腔干涉谱线。

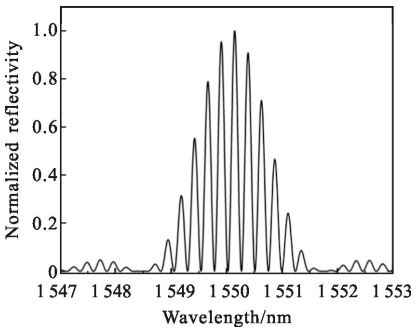


图 2 微结构反射光谱

Fig.2 Reflection spectrum of microstructure

当光栅受到外界压力影响时,其有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 均会随之改变,从而导致布拉格波长 $\lambda_B=2n_{\text{eff}}\Lambda$ 的变化[11]。中心反射波长的相对变化为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}+\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \tag{5}$$

光栅受到的横向压力 P 对光栅周期与有效折射率的影响为:

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}=-\frac{(1-2v)P}{E} \tag{6}$$

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}=\frac{n_{\text{eff}}^2}{2E}(1-2v)(2P_{12}+P_{11})P \tag{7}$$

式中:v 为泊松比;P_{12} 与 P_{11} 为弹光常数。

而微结构的等效腔长 L_C 在压力作用下也会成比例变长,需要综合分析腔长变化和光栅周期变化对干涉光谱的影响。微结构干涉谱在中心波长处相位初始值为:

$$\Phi(\lambda_B)=\frac{2\pi}{\lambda_B}n_{\text{eff}}h+\Phi_r(\lambda_B) \tag{8}$$

压力值改变时,中心反射波长处相位相对变化为:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi}=\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}+\frac{\Delta h}{h}-\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{9}$$

基于材料特性,光栅间距 h 与光栅周期 Λ 的变化率是相同的,结合公式(5)得:

$$\Delta\Phi(\lambda_B)\equiv 0 \tag{10}$$

这说明施加压力不会导致中心反射波长处干涉条纹的相位变化。接下来考虑距中心波长最近的两谐振峰位置变化情况。该腔的 FSR 即相邻干涉峰之间的波长间隔为:

$$\delta\lambda\approx\frac{\lambda_B^2}{2n_{\text{eff}}L_C} \tag{11}$$

$$\frac{\Delta(\delta\lambda)}{\delta\lambda}=\frac{2\Delta\lambda_B}{\lambda_B}-\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}-\frac{\Delta L_C}{L_C}=\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{12}$$

由于压力导致的波长漂移量很微小,文中结构每施加 1 MPa 压力导致的波长漂移仅 1.6 nm 左右,故压力导致的等效腔长变化对 FSR 的影响也很微小。可以计算出在测量范围内 FSR 的变化量 $\Delta(\delta\lambda)<1$ pm,实验解调所用的光栅解调仪分辨率 5 pm,即使是更精密的波长分辨率为 1 pm 的解调设备也无法分辨这种变化,故距离中心反射波长最近的两干涉峰相对位置和幅值均近似不变,干涉谱线仅仅随着反射谱包络的移动发生整体平移。图 3 是微结构受 1 MPa 压力作用时反射谱变化情况。这一特征为计

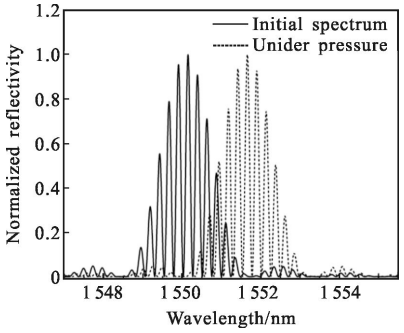


图 3 加压前后微结构反射光谱

Fig.3 Reflection spectrum of microstructure before and after pressurizing

算波长漂移提供便利,仅需追踪加压前后干涉谱中极值位置对应的波长漂移即可。联立公式(4)~(7),压力变化值与微结构反射峰值波长相对变化值之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\left[-\frac{(1-2v)}{E}+\frac{n_{\text{eff}}^2}{2E}(1-2v)(2P_{12}+P_{11})\right]P \tag{13}$$

由公式(13)知,波长的相对变化值与施加的横向压力大小之间呈线性关系,且二者一一对应。定义纵向微结构光纤压力灵敏度 K:

$$K=\frac{\Delta\lambda}{\lambda\cdot P}(\text{相对波长变化/MPa}) \tag{14}$$

压力灵敏度 K 的物理意义即微结构每受到

1 MPa 压力时，其反射谱某一固定位置对应的波长相对变化值。通过测量反射谱峰值位置对应的波长漂移值即可计算出其所受压力的大小。

2 传感方案设计

由图 2 及公式(4)看出，微结构的反射率呈余弦规律波动，等效 FP 腔腔长决定着波动的周期，对光谱进行傅里叶变换，不同腔长将在频谱中显示出不同频谱峰，腔长越大，频率越高，对频谱进行滤波即可有效解调出单个光谱。纵向微结构光纤压力传感器同时使用波分复用与频分复用技术：利用不同相位掩膜板刻写出中心反射波长不同的弱光栅，实现波分复用；利用相邻弱光栅刻写间距的不同，构成腔长不同的 FP 微腔，实现频率复用。WDM 与 FDM 技术的结合极大程度提升了传感容量。

系统还提升了压力传感的空间分辨率。准分布式传感器的空间分辨率主要由传感点的密集程度决定，传感点足够密集意味着每个微结构之间的间距足够小。

传感容量及空间分辨率是分布式压力传感的两个重要指标，下面讨论这两点指标的理论值。

传感容量综合取决于频率复用容量与波长复用容量的大小，两者复用容量取决于腔长/波长取值范围和取值最小间隔。假设构成微结构的两个 FBG 栅长为 300 μm，微结构的最小间距(即空间分辨率)为 1 cm。

频率复用容量首先与 FP 腔等效腔长 L_C 取值范围有关。弱反射光栅构成的 FP 腔等效腔长为[12]：

$$L_C=h+L \tag{15}$$

首先，L_C 的值应当小于微结构间距 d 并留有一定余量，取值范围设计在 2~8 mm 之间。其次，不同微结构的腔长在设计时应考虑最小腔长间隔的问题，为保证不同腔长的微结构在频谱中的频谱信号不发生重叠，最小腔长间隔必须大于等于弱光栅栅区长度 L[13] 。最小腔长间隔取 300 μm，理论频率复用容量达到 20。

已知光栅解调仪的光谱范围在 1 510~1 590 nm，波长复用容量应考虑最小波长间隔问题，它是由微结构的反射光谱 3 dB 带宽决定的。由公式(4)仿真知栅长为 300 μm 的微结构反射谱 3 dB 带宽约为 4 nm，由于实际光栅刻写质量也会影响反射谱带宽，使其展宽，故设置最小波长间隔为 5 nm，理论波长复用容量达到 16。在空间分辨率为 1 cm 的前提条件下，系统总传感容量为频率复用容量与波长复用容量的乘积，达到 320。

空间分辨率在本传感方案中则是一个相对灵活的指标。空间分辨率越高，对压力的定位精度会提升，但相应的 FP 腔长取值范围变小，会导致频率复用容量降低，空间分辨率与传感复用容量存在相互制约的关系。空间分辨率可依据实际应用场合与需求的不同来灵活设定，在传感容量(传感距离)与定位精度上做取舍。

基于以上考虑，制作了一段长 54 cm 的纵向微结构光纤，拟对传感方案进行验证。单模光纤上刻写有 6 个微结构 a~f，栅长 L=1 mm。复用两种频率(两种腔长)和三种波长：a(λ_B=1 550 nm，d=3.4 mm)、b(λ_B=1 555 nm，d=6.6 mm)、c(λ_B=1 560 nm，d=3.4 mm)、d(λ_B=1 550 nm，d=6.6 mm)、e(λ_B=1 555 nm，d=3.4 mm)、f(λ_B=1 560 nm，d=6.6 mm)。微结构 a、b、c 的间距为 1 cm，微结构 d、e、f 的间距为 5.7 cm。

3 增敏结构设计

裸露的光栅压力灵敏度不高，尤其是对横向压力十分不敏感，在同等应力条件下，光栅轴向压力灵敏度比横向高几十倍[14]。

有研究用裸露的 FBG 做高压传感实验[15]，施加了高达 70 MPa 的压力，波长偏移量仅 0.22 nm，压力灵敏度-2.02×10^{-6}/MPa。刘云启[16]等人提出使用聚合物增敏法，成功将光栅横向压力灵敏度增至-6.28×10^{-5}/MPa。使用聚合物对纵向微结构光纤进行封装，一方面可以增加灵敏度，另一方面可以保护光栅。不考虑温度变化且光纤光栅只受轴向应变 ε_z 作用时，其中心反射波长的变化为：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=(1-p_e)\varepsilon_z \tag{16}$$

用聚合物封装光纤光栅后，由外界横向压力引起的各向同性应力在光纤中产生的应变量为：

$$\varepsilon_z=-P(1-2v_p)/E_p \tag{17}$$

式中：v_p 为聚合物的泊松比；E_p 为杨氏模量；P 为压力大小。光纤光栅中心反射波长相对变化为：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=-(1-p_e)(1-2v_p)P/E_p \tag{18}$$

由上式知灵敏度由材料特性参数 v_p、E_p 决定。选用杨氏模量相较石英光纤降低若干数量级的封装材料，能大幅提升压力增敏度。文中采用双组分室温硫

化硅橡胶材料,这种聚合物固化后呈透明状态,弹性好,符合要求。封装好的纵向微结构光纤如图 4 所示。

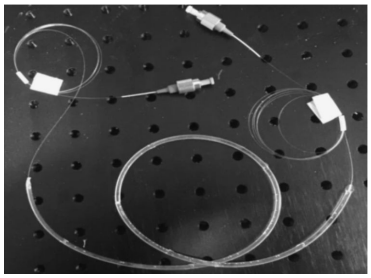


图 4 增敏封装后的纵向微结构光纤

Fig.4 Packaged longitudinal microstructured fiber

4 分布式压力传感实验

传感系统结构如图 5 所示，使用的解调设备为 Micron Optics 公司的 SM-125 光栅解调仪，可记录下纵向微结构光纤反射光谱的数据。纵向微结构光纤传感器的一端接到光栅解调仪的 1 通道，对另一端的光纤端面做斜切处理减小端面反射。SM-125 光栅解调仪与计算机相连,使用 MATLAB 程序绘制谱线,解调数据。

实验中使用砝码对纵向微结构光纤进行分布式静态加压,同步对六个微结构进行压力测试。为保证加压的平衡，将一根等长普通光纤按照相同的步骤封装，用两载玻片对称放置在封装好的纵向微结构光纤和普通光纤上，四组载玻片分别放置在微结构 a-b-c 组合、微结构 d、微结构 e、微结构 f 的对应位置上，如图 5 所示。载玻片上依次负载重量为 20、50、70、100、140、160、200、240 g 的标准砝码,对微结构施加压力。每改变一次重量,光栅解调仪记录下一组反射谱数据,重复上述过程三次。实验用于验证聚合物增敏法的增敏效果、复用方案的可行性以及分布式测压的精度。a、b、c 三个微结构间距 1 cm,而 d、e、f 三个微结构间距 5.7 cm,不同间距微结构的灵敏度测试结果可用来分析高分辨率测压的效果是否理想。

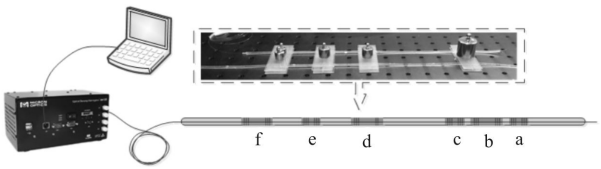
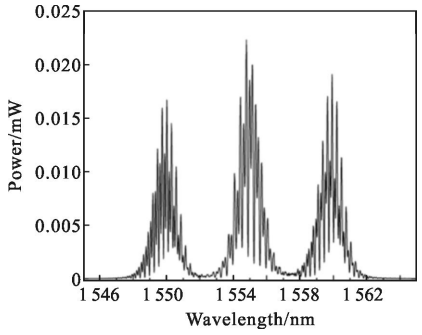


图 5 分布式压力传感系统

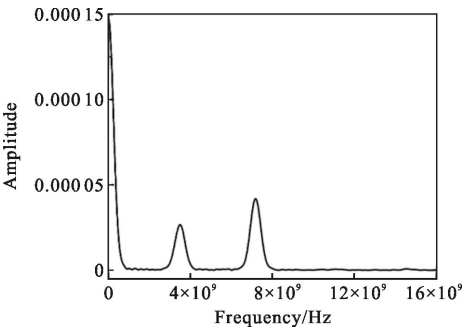
Fig.5 Diagram of distributed pressure sensing system

测试数据导入计算机解调出波长漂移信息。波长的解调已通过光栅解调仪实现,图 6(a)是纵向微结构光纤的原始光谱，可以看出 3 个中心波长不同的反射谱包络。每个包络中含有两个腔长不同的微结构的干涉谱,利用傅里叶变换可以在频谱中进行



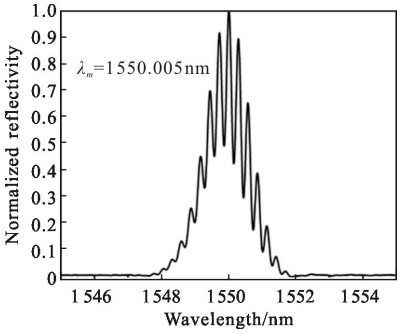
(a) 传感系统初始反射光谱

(a) Initial reflection spectrum of the sensor system



(b) 快速博里叶变换(FFT)频谱图

(b) Fast Fourier Transformation(FFT) spectrum



(c) 微结构 a 反射谱

(c) Reflection spectrum of microstructure "a"

图 6 解调过程

Fig.6 Demodulation process

解调。截取某一中心波长附近的反射谱包络,并对这段光谱进行 FFT,可以得到频谱图,图 6(b)是中心反

射波长 1 550 nm 附近反射光谱的傅里叶频谱。对频谱信号滤波处理得到某一个频谱峰信号，并对它进行快速傅里叶反变换 (IFFT)，逆变换将得到反映单个微结构光谱信息的曲线图,图 6(c)是中心反射波长 1 550 nm、腔长为 3.4 mm 的微结构 a 的归一化反射谱，其包络与干涉条纹数目等特征均与理论谱线基本相符,峰值处对应的波长值已标出,可直接计算加压前后峰值波长的漂移量。

传感器与玻片的接触面积为 20 mm^2，由此计算施加的实际压力大小。对实验数据进行线性拟合,根据灵敏度公式计算各传感单元的压力灵敏度，记录在表 1 中。分别绘制出六个传感微结构压力值与波长漂移量的关系曲线,如图 7 所示。 微结构的平均压力灵敏度为 1.032×10^{-3}/MPa。这一灵敏度是裸 FBG 灵敏度 2.02×10^{-6}/MPa 的 500 多倍。更重要的是,无论是间距较大或是间距很小的传感微结构,都具有很好的线性度，每个微结构压力灵敏度都大致相同,传感方案可行。

表 1 微结构 a~f 的压力灵敏度与拟合线性度

Tab.1 Pressure sensitivity and linearity of the microstructures a−f

Microstructure	a	b	c	d	e	f
Absolute wavelength shift/nm·MPa^{-1}	1.665	1.608	1.614	1.541	1.464	1.739
Sensitivity 10^{-3}/MPa	1.074	1.034	1.034	0.994	0.941	1.114
Adjust R−square	0.996	0.997 3	0.999 1	0.998 2	0.996 9	0.989

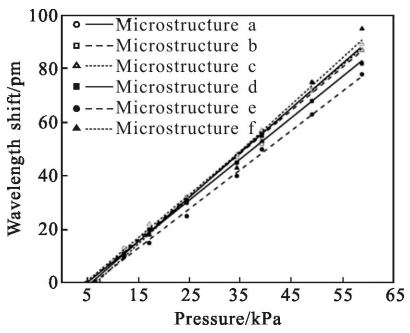


图 7 微结构 a~f 的压力传感灵敏度拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of the pressure sensitivity for the microstructures a−f

然而不同微结构灵敏度仍存在略微不同，为实际测量带来不确定因素。分析原因主要是聚合物材料的封装有一定不均匀性，增敏效果本身有一定差异；而且在加压过程中柱体结构的传感器可能发生轻度的滚动,引入测量误差。在后期的改进过程中,我们将制作整体性更好、加工精度更高的封装模具,使增敏效果尽可能一致，同时设计凹槽轨道放置传感器,防止传感器滚动,保证加压的稳定性。实际测量中，提前对每个传感单元进行多次加压实验标定灵敏度,可保证测量值的真实可靠。

需要说明的是，封装过程中聚合物材料刚固化时弹性最好,须对其老化处理,即静置一周时间后再进行压力测试实验，这时聚合物达到相对稳定的弹性状态。但文中还未解决橡胶材料经长期使用后的老化问题,这也将是后续研究的方向。另外,光纤光栅存在应力与温度的交叉敏感问题，须在此传感方案的基础上，针对不同的应用场合采取不同解决措施。若在人体内部等相对恒温的环境下进行压力测量,温度微小变化产生的波长漂移可以忽略;若在油井,桥梁等室外工程中进行压力测试,需要额外设置温度补偿微结构来保证压力测试准确性。

上述实验验证了波长/频率同时编码复用的可行性,以及 1 cm 空间分辨率下微结构对压力响应的独立性。基于纵向微结构光纤的分布式压力传感方案具有巨大潜力,空间分辨率为 1 cm 时,理论单纤微结构数量可达 320。

5 结 论

基于纵向微结构光纤的分布式压力传感方案通过微结构设计、多维编码和增敏封装等关键技术对压力传感系统的单元复用容量、探测灵敏度和空间分辨率实现了综合提升。制作的包含 6 个微结构的分布式光纤压力传感系统压力灵敏度达 1.032/MPa，是裸 FBG 灵敏度的 500 多倍,分布式定位的空间分辨率最小可达 1 cm,且各微结构单元压力传感具有良好的独立性和线性度,技术指标达到国内领先水平。

这种纵向微结构光纤分布式压力传感器集众多微结构传感单元于单根光纤，并具有体积小、耐腐蚀、抗干扰等特点,在实际工程应用中有良好前景。基于此方案对传感系统的长度和传感容量进行提升即可应用于长距离的桥梁隧道等土木结构健康监

测、输送腐蚀性液体的管道压力监测以及内环境特殊且空间狭小的人体体内压力测量之中。

参考文献：

[1] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. ***Materials and Structures***, 2015, 48(4): 871-906.

[2] Poeggel S, Tosi D, Duraibabu D B, et al. Optical fibre pressure sensors in medical applications [J]. ***Sensors***, 2015, 15(7): 17115-17148.

[3] Jiang Xiaofeng, Lin Chun, Xie Haihe, et al. MEMS FP interferometry pressure sensor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(7): 2257-2262. (in Chinese)
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. MEMS FP 干涉型压力传感器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2257-2262.

[4] Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on Distributed-Bragg-Reflector fiber laser [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2009, 29(3): 629-631. (in Chinese)
兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 629-631.

[5] Lyu C, Guo X, Gao J, et al. Design evaluation of DBR fiber laser sensor for directional lateral force monitoring [J]. ***Photonics Technology Letters, IEEE***, 2015, 27(14): 1515-1518.

[6] Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, et al. FBG sensing technology application in detection of bastion safety [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(3): 492-496. (in Chinese)
张志利, 付祝林, 赵兵, 等. 光纤光栅传感技术在阵地安全监测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 492-496.

[7] Nieuwland R, Cheng L, Harmsma P, et al. A fiber Bragg based semi distributed pressure sensor system for in-vivo vascular applications [C]//Optical Sensors, Optical Society of America, 2014: SeW1C. 1.

[8] Arkwright J W, Underhill I D, Maunder S A, et al. Design of a high-sensor count fibre optic manometry catheter for in-vivo colonic diagnostics [J]. ***Optics Express***, 2009, 17(25): 22423-22431.

[9] Sheng H J, Fu M Y, Chen T C, et al. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating [J]. ***Photonics Technology Letters, IEEE***, 2004, 16(4): 1146-1148.

[10] Li X, Sun Q, Liu D, et al. Simultaneous wavelength and frequency encoded microstructure based quasi-distributed temperature sensor[J]. ***Optics Express***, 2012, 20(11): 12076-12084.

[11] Song J, Jiang Q, Huang Y, et al. Research on pressure tactile sensing technology based on fiber Bragg grating array [J]. ***Photonic Sensors***, 2015, 5(3): 263-272.

[12] Wang K, Wang B, Yan B, et al. Simultaneous measurement of absolute strain and differential strain based on fiber Bragg grating Fabry-Perot sensor [J]. ***Optics Communications***, 2013, 307: 101-105.

[13] Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Perot sensors[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2007, 27(7): 1173-1177. (in Chinese)
沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1173-1177.

[14] Ngoi B K A, Paul J, Zhao L P, et al. Enhanced lateral pressure tuning of fiber Bragg gratings by polymer packaging [J]. ***Optics Communications***, 2004, 242: 425-430.

[15] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. ***Electronics Letters***, 1993, 29(4): 398-399.

[16] Liu Yunqi, Zheng Jiancheng. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket. [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2000, 27(3): 211-214. (in Chinese)
刘云启, 郑建成. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2000, 27(3): 211-214.