

## 3D 打印光纤压力传感器

胡 珊,郝 峰,周聿安,甘亮羽,王 叶,陈园园

(上海大学 理学院 物理系,上海 200444)

**摘 要:**根据光纤弯曲损耗效应,设计了光纤压力传感器,采用 3D 打印制作主体部件,与光纤、光纤法兰等整合为光纤压力传感器. 该传感器具有可变受力、受力限位、可变灵敏度等功能. 光时域反射方法测试结果表明:该传感器可应用于分布式光纤传感系统.

**关键词:**光纤压力传感器;光时域反射;3D 打印

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-4642(2017)增-0048-04

近年来,3D 打印技术进入快速发展期<sup>[1]</sup>,3D 打印技术极大地提高了工作效率,其独特的快速成型方法便于设计方案的实施和修改,缩短了评估周期,降低了研发成本,3D 打印技术不仅在生产领域引起变革,也在推动教育教学改革和创新<sup>[2]</sup>. 本文采用光机一体化设计思路,研究将光学、光纤和机械柔性结合,开发、制造基于 3D 打印技术的光机模块,快速实现工程应用. 根据光纤弯曲损耗效应,设计光纤压力传感器<sup>[3]</sup>,采用 3D 打印制作主体部件和光纤、光纤法兰等整合为光纤压力传感器,该传感器具有可变受力、受力限位、可变灵敏度等功能. 光时域反射方法测试结果表明:此类传感器亦可应用于分布式光纤传感系统中.

### 1 光纤压力传感器

光纤具有宏弯曲损耗和微弯曲损耗,光纤弯曲损耗是两者共同作用的结果. 理论上,对于单模光纤,弯曲损耗呈指数形式变化<sup>[4]</sup>:

$$\gamma = \frac{A}{\sqrt{R}} e^{-UR}, \quad (1)$$

其中  $R$  是弯曲半径,  $A$  和  $U$  是与光纤模场参量有关的常量. 对于多模光纤,弯曲损耗的变化规律类似,此外根据模式耦合理论,光纤微弯时发生耦合的两模式纵向传播常量  $\beta$  和  $\beta'$  满足

$$\beta - \beta' = \pm \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

模式耦合可以在导模间或导模与辐射模之间进行<sup>[4-5]</sup>,其中,  $\Lambda$  是导致光纤微弯的周期性扰动的变形板的机械长度周期. 当纤芯折射率呈抛物线型变化时,

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{\sqrt{\Delta}}{a} = \frac{NA}{n_0 a \sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

可得

$$\Lambda = \frac{2\sqrt{2}}{NA} \pi a n_0, \quad (4)$$

式中  $NA$  为光纤的数值孔径,  $n_0$  是光纤轴上折射率,  $a$  是纤芯半径. (4) 式表明,微弯损耗是由最高阶导模耦合成为第一辐射模时发生,这时损耗达到最高灵敏度. 工程上,这个扰动可以通过齿形或周期性起伏形状机械和压制物之间的相对位移产生,如图 1 所示.

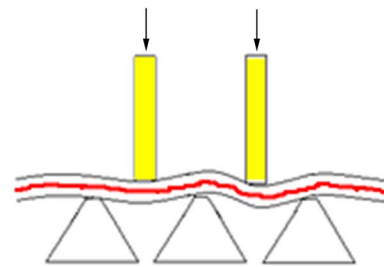


图 1 光纤弯曲(微弯)效应

在起伏周期为(4)式奇数倍的情形,光纤弯曲形变具有余弦谐波分量,亦可获得很高的灵敏度. 对于工程应用,需考虑保护裸纤不易折断,利用光

收稿日期:2017-07-01;修改日期:2017-09-14

资金资助:上海市教委重点课程;上海大学“理科创新平台”基金资助

作者简介:胡珊(1996-),女,贵州遵义人,上海大学理学院物理系 2015 级本科生.

通信作者:王叶(1963-),男,上海人,上海大学理学院物理系高级实验师,学士,研究方向为光电子技术 and 光纤应用技术.



纤的 0.9 mm 直径皮套作为裸纤的自然缓冲层,并在整个装置的设计上加机械限位以限制位移,图 2 为光纤压力传感器设计外形。

如图 2 和图 3 所示,光纤压力传感器包括底座、压板、压片、弹簧、光纤和法兰(图中未装),光纤通过光纤法兰与外部光纤相连。底座与压板之间由弹簧支撑。底座上开有光纤槽和压片槽,光纤安置于光纤槽内,压片安放于压片槽内,光纤槽和压片槽相通。光纤槽底部有多处齿形或起伏形状,在压板与底座扣合时,外力施压于压板,压板施压于压片,压片施压于光纤,光纤不断受压产生微弯形变,导致光纤中光模式耦合,发生光泄漏,使传输强度减弱。

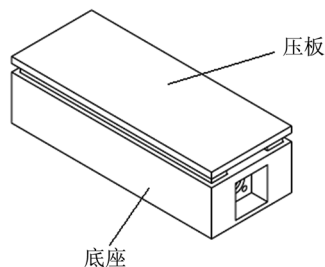


图 2 光纤压力传感器设计外形

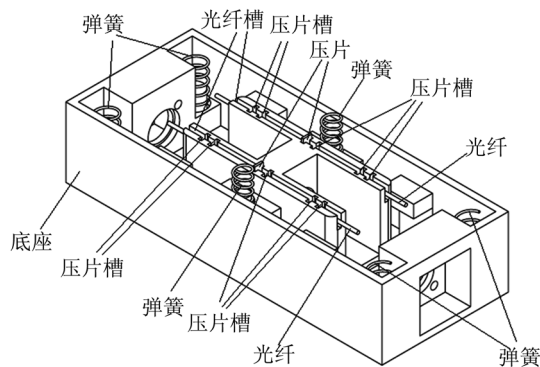


图 3 光纤压力传感器模块底座内部结构图

## 2 3D 打印

光纤压力传感器 3D 打印模块主体分为底座和压板,由通用机械设计软件(如 Solidworks, CAD 或专用 3D 设计软件)设计,在设计过程中应根据嵌入元件(如弹簧、光纤法兰、光纤)的尺寸和 3D 打印材料的热塑性,留出足够的公差,以使各元件和打印体之间能够适配。3D 打印机有速度、温度、打印结构等参数的调整,并且 3D 打印温度控制与室温具有关联性,应做相应试验。打印结

构和打印方向之间也存在优选关系<sup>[6]</sup>。整个过程如图 4 所示。

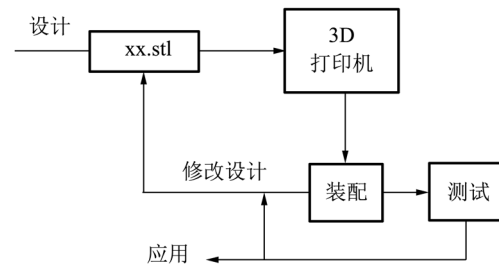


图 4 3D 打印及装配测试流程

主体部件(底座模块和压板模块)使用美国 MAKERBOT 2X 3D 打印机打印,打印材料为 ABS,图 3 前后 2 个方孔为光纤法兰的安装空位,图 5 为装配好的模块实物图。其中,弹簧的种类可变,不同特性的弹簧可以提供不同的外加压力范围,底座和压板的扣合是嵌入式,直到密合即停止相对位移;控制压片的长度可以控制压片进入压片槽的深度,从而控制传感动态特性,压片进入压片槽的深度具有极限值,保证光纤不会受压过度而受损。由于光纤槽及安置光纤的数量、压片槽分布、安放压片的数量以及压片压入深度可以变化,光纤的光强-压力特性可以配置和控制。

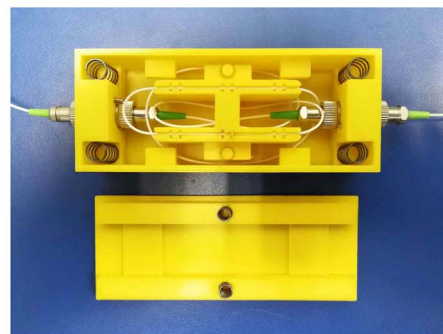


图 5 光纤压力传感器实物

## 3 实验

### 3.1 单传感器传感特性测量

现行传感器中,光纤槽数目为 2,2 段光纤分别安置于 2 个光纤槽内,压片槽的数量为 12,6 个压片槽与 1 个光纤槽交接,另 6 个压片槽与另一光纤槽交接,压片在光纤段内的压片槽位置可以选择。现选择 2 种配置进行测试,即单槽 1 压片压力测试和双槽 2 压片压力测试对比实验,压力与输出光强关系如图 6 所示。

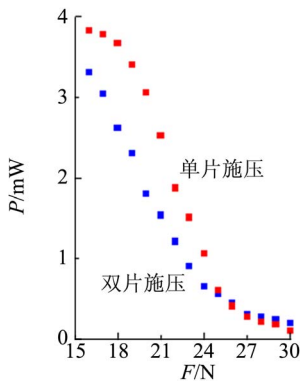


图 6 单片和双片施压时的光强-压力输出特性

光波长为 1 310 nm, 初始功率为 5. 317 mW, 实验结果遵循指数衰减理论. 单、双片施压实验数据表明: 双片施压的光功率衰减程度高于单片施压情形, 随着外界施力的增加, 光纤受力增大, 微弯程度变大, 导致衰减增大, 传输强度减弱, 当施力达到 25 N 以上时, 数据趋于平缓, 单、双片的实验数据几乎重合. 由于此时压板已经与底座密合, 光纤受挤压形变很小或趋于不变, 这部分力由底座外壳承受, 亦即压力位移限位所致.

选择施力为 18~24 N 的数据进行线性拟合, 见图 7, 结果显示: 光强与压力基本呈线性, 且单片施压传感灵敏度略高于双片施压传感灵敏度.

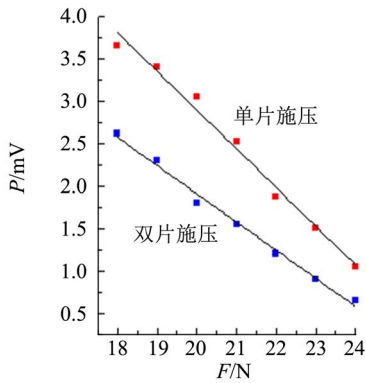


图 7 单片和双片施压实验数据区段对比及线性拟合

### 3.2 分布式光纤传感实验

应用光时域反射仪(OTDR)进行分布式传感测量, 其实验架构如图 8 所示, 绕盘内光纤长度约 5 km, 故 2 个光纤压力传感器相距约 5 km.

图 9 所示为分布式光纤压力传感器系统的 OTDR 接收信号, 事件 4 和事件 5 表征两光纤压力传感器, 由无施压时的传感器内部光纤弯曲损耗所致.

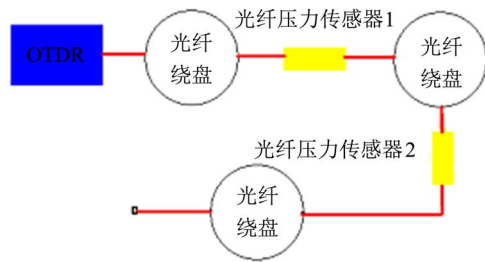


图 8 分布式光纤压力传感器系统



图 9 分布式光纤压力传感器系统 OTDR 原始状态

图 10 为分别测量无施压、传感器 1 双片施压 20 N 及传感器 2 单片施压 30 N 时得到的 OTDR 信号曲线叠加图.

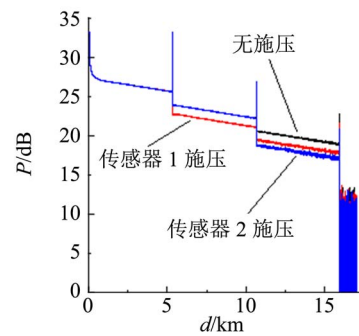


图 10 分布式光纤压力传感器系统无施压和施压时的 OTDR 信号曲线

由图 10 可知, 传感器工作位置点前的区段回波信号是交叠在一起的, 只在传感器施压时的后区段上出现回波信号的分离, 据此本文定义 2 种判据来区分传感器工况.

两点法判据: 对单传感器事件, 定义损耗公式为  $\gamma = P_A - P_B$ . 计算无施压和施压时的 OTDR 信号中同一 AB 区间损耗值判断有无施压, 如图 11 所示传感器 1 事件, 取事件发生区间  $AB = [5.33, 5.37]$ , 无施压时  $\gamma_{AB} = 1.8 \text{ dB}$ , 施压时  $\gamma_{AB} = 2.9 \text{ dB}$ , 损耗明显增加.

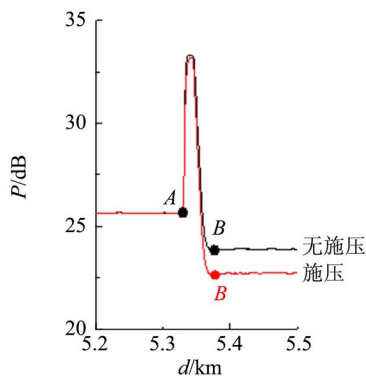


图 11 无施压和施压时传感器 1 的 OTDR 测量

截距法判据:图 12 为传感器无施压和施压时 OTDR 末区段信号(传感器工作点之后光纤段),由同区段回波信号的线性拟合的截距值判断有无施压. 计算截距分别为 24.01, 22.84, 22.25 dB, 对应于无施压、传感器 1 施压时和传感器 2 施压时 3 种工作状态. 斜率都接近  $-0.32$  dB/km, 说明区段单位损耗接近.

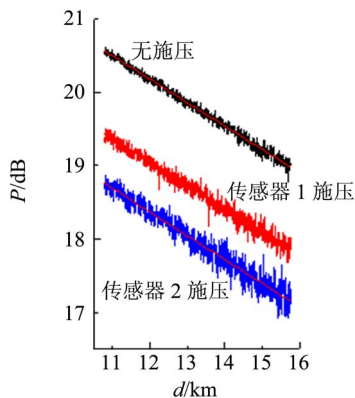


图 12 光纤压力传感器同区段 OTDR 信号

从图 12 可以看出,传感器受压时,光纤弯曲使光纤散射增强,传感器工作点后区段信号的离散性变大.

#### 4 结束语

随着现代科学技术的发展,专业融合趋势明显,从辅助设计(电子、机械等 CAD)向着智能制造(3D 打印)和智能嵌入(智能材料与智能结构)发展,光纤压力传感技术也在材料、结构和制造技术上不断取得进展<sup>[7]</sup>,本文从专业教学出发,以基于 3D 打印技术的光纤弯曲压力传感器为例展示项目式教学过程,旨在建立适合学生训练、开发和创新的“光电子与光纤应用技术”教学体系.

#### 参考文献:

- [1] 李小丽,马剑雄,李萍,等. 3D 打印技术及应用趋势[J]. 自动化仪表,2014,35(1):1-5.
- [2] 谭跃刚,陈章念,张帆,等. 3D 打印创新教学实验室及其应用[J]. 实验室研究与探索,2016,35(9):246-249.
- [3] 刘跃辉,张旭苹,董玉明. 光纤压力传感器[J]. 光电子技术,2005,25(2):124-132.
- [4] 苑立波. 光纤实验技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005:211-213.
- [5] 黎敏,廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008:66.
- [6] Micallef J. Beginning design for 3D printing [EB/OL]. Springer Link,2015.
- [7] 杨双收,魏秀珍,闫平. 光纤压力传感器在称重领域应用的研究进展[J]. 压电与声光,2012,34(5):680-683.

## Optical fiber pressure sensor by 3D printing

HU Shan, HAO Feng, ZHOU Yu-an, GAN Liang-yu, WANG Ye, CHEN Yuan-yuan  
(Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Based on optical fiber bending loss effect, the optical fiber pressure sensor was designed. The main parts were the 3D printing, integrating with the optic fiber and the fiber flange. The sensor had many advantages, such as the varying mechanical stress, the stress limit, the varying sensitivity, and so on. The test with the optical time domain reflection indicated that the sensor could be applied to distributed optical fiber sensing system.

**Key words:** optical fiber pressure sensor; optical time domain reflection; 3D printing

[责任编辑:郭 伟]