Design of Flexible Optical Fiber Pressure Sensor Based on Semi-Cylinder Pressure Sensitivity Enhancement Structure*

LIU Hongyi^{1,2}, LI Chen^{1,2*}, ZHANG Huixin^{1,2}, WANG Xinglai³, SUI Dandan^{1,2}

(1.National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
2.Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
3.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to enhance the sensitivity of optical fiber pressure sensor, a flexible optical fiber pressure sensor based on semi-cylinder structure is proposed. Polydimethylsiloxane (PDMS) is used as the flexible substrate of the sensor. When external force is exerted, the PDMS will be deformed first, which will cause the optical fiber to be deformed accordingly, and finally the optical fiber will be stretched axially. Optical frequency domain reflectometer (OFDR) is used to measure the axial strain of the fiber, and finite element simulation analysis using ABAQUS and experimental verification of the proposed sensitization structure sensor are carried out. The results show that the sensitivity of the sensor can be improved effectively by taking the structure of semi-cylinder. In the pressure measuring range of $0 \sim 160$ kPa, the sensitivity of the simulated sensor is 2.160 39 $\mu \varepsilon/kPa$, and the sensitivity of the experimental sensor can reach 2.068 06 $\mu \varepsilon/kPa$.

Key words: optical fiber pressure sensor; polydimethylsiloxane(PDMS); sensitivity; abaqus simulation; optical frequency domain reflectometer(OFDR)

EEACC:7320V doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2022.05.008

基于半圆柱增敏结构的柔性光纤压力传感器设计*

刘宏艺^{1,2},李 晨^{1,2*},张会新^{1,2},王星来³,隋丹丹^{1,2} (1.中北大学,电子测试技术国家重点实验室,山西太原 030051; 2.中北大学,仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西太原 030051; 3.北京宇航系统工程研究所,北京 100000)

摘 要:为了进一步增强光纤压力传感器的灵敏度,提出了一种基于半圆柱结构设计的柔性光纤压力传感器。此结构使用 聚二甲硅氧烷(PDMS)作为该传感器柔性基底,传感器外部受力时,首先 PDMS 发生形变,从而使得光纤发生形变,最终光纤 发生轴向拉伸。利用光频域反射计(OFDR)测量光纤的轴向应变,对所提出的增敏结构传感器进行 ABAQUS 有限元仿真分析 和实验验证。结果表明,该半圆柱增敏结构可以有效提高传感器的灵敏度。在 0~160 kPa 的测压范围内,仿真得到的传感器 的灵敏度为 2.160 39 με/kPa,实验测得传感器的灵敏度能够达到 2.068 06 με/kPa。

关键词:光纤压力传感器;聚二甲基硅氧烷(PDMS);灵敏度;Abaqus 仿真;光频域反射计(OFDR)

中图分类号:TP212.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9490(2022)05-1066-05

随着新材料和工艺技术的发展,压力传感器的 应用领域越来越广泛。同时,人们对压力传感器也 提出更高的要求,因此,越来越多的科研人员都开始 了对柔性压力传感器的研究,以实现传感器的柔性、 轻薄、可折叠等特点^[1-2]。

常见的压力传感器有压电式^[3-4]、压阻式^[5-6]、

项目来源:国家自然科学基金杰出青年基金(61525107) 收稿日期:2021-08-21 修改日期:2021-10-29 电容式^[7]以及光学式^[8]等。其中具有抗电磁干扰、 传输距离远、柔韧性好、便于复用、重量轻等优点的 基于光学机理的光纤压力传感器便成为了研究人员 的主要研究方向^[9-11]。根据测试方法的不同,光纤 压力传感器的种类也多种多样。现今光纤测试方法 主要分为光损耗、光时域反射(Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)和光频域反射(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)技术^[12]。其中OFDR与OTDR技术是分布式测量的主流方法,可以检测到大范围传感区域内的信号变化。而且OFDR相比于OTDR技术来说可以很好地解除空间分辨率受到信噪比和动态范围的制约^[13-14]。

根据 OFDR 技术实时测量光纤应变值,从而实现对不同压力的检测。为了进一步提高光纤压力传感的灵敏度,提出了一种基于半圆柱增敏结构,以聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为柔性基底,使用普通单模裸光纤进行传感的光纤压力传感器^[15]。当传感器受到法向压力时,PDMS 既能保护脆弱易断的光纤,又可以利用半圆柱结构使光纤产生轴向拉伸,从而避免光纤的折断^[15-17]。

1 传感器结构设计与原理分析

1.1 传感器的结构设计

如图 1 所示,结合压力传感器的应用,设计了半圆柱结构的光纤压力传感器。在弹性材料中间封装 单模光纤,当柔性基体受力时,伴随着柔性基体的形 变,封装在内部的单模光纤也产生了相应的轴向形 变,通过检测光纤的轴向应变,从而计算出待测的压 力值。



图1 半圆柱增敏结构

1.2 压力传感器的制作

国内外的研究发现聚合物是比较理想的低弹性 模量的增敏材料,可以提高光纤对压力的敏感性,同 时也可以与被测物体很好的贴合。选用美国道康宁 (Dow Corning Corp)生产的 Sylgard184 型由预聚物 和固化剂组成的硅橡胶 PDMS,它属于超弹性材料, 泊松比为0.49,摩擦系数范围为0.25~0.75,弹性模 量与预聚物和固化剂的质量比有关。工艺流程如 图 2 所示。

将 PDMS 的预聚物和固化剂按照质量比 10:1 进行混合,搅拌至奶白色后停止搅拌;然后将混合物 放入真空烘箱中保持 30 min 去除混合物中气泡;为 了便于脱模,在模具内部均匀涂抹一层凡士林,然后 将光纤放入模具中,并对光纤施加一定的预紧力,使 光纤拉直;将制作好的 PDMS 混合液慢慢倒入处理 好的模具中静置 2 h,然后在 60 ℃的加热板上固化 2 h,降至室温后,脱模,最后制得柔性光纤压力传感 器,如图 3 所示。



图 3 压力传感器的实物图

1.3 传感器测量原理分析

利用基于背向瑞利散射原理的 OFDR 系统,对 光纤压力传感器进行检测。传感器的柔性基体受到 外力发生形变,增大了光纤轴向的应变,从而导致光 纤的背向瑞利散射信号频率发生漂移,所以光谱漂 移与光纤的应变成正比。通过对 OFDR 测量仪内部 的参考臂与信号臂的测量信号进行快速傅里叶变换 及相关运算,得到光谱漂移量。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_s \varepsilon \tag{1}$$

式中: λ 和 $\Delta\lambda$ 分别为平均光波长和光的波长漂移 值; ν 和 $\Delta\nu$ 分别为平均光频率和光的频率漂移量; K_s 为应变校准常数,而一般对于锗硅酸盐玻璃纤芯 光纤,应变校准常数为

$$K_s = 0.78$$
 (2)

*K*_s 主要由光纤纤芯的掺杂种类和浓度决定,其 次还受到包层成分与涂覆层成分的影响。

计算出光纤频率的偏移量后,光纤的应变量可 以用式(3)表示^[18]:

$$\varepsilon = -\frac{\lambda}{cK_{\varepsilon}}\Delta\nu \tag{3}$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为扫描的中心波长;c为光速; K_{c} 为应变感 应系数。

因此经过 OFDR 测量仪内部进一步编码,就可

以导出相应的应变值。我们只需要得到应变与压力 的关系,就可以准确测出所受压力的大小。

2 有限元仿真分析

首先对柔性光纤压力传感器进行仿真建模,利 用 ABAQUS 的建模功能建立所设计的半圆柱型压 力传感器的三维有限元模型。为了更加精确模拟压 力传感器受力时的变形,对建模的半圆柱压力传感 器模型按照实际的试验条件进行相应的位移约束, 对模型的上表面依次施加 25 kPa、80 kPa、110 kPa、 以及 160 kPa 均匀分布的载荷,在施加载荷的情况 下,观察半圆柱结构压力传感器模型的变形与应变 情况。

经过仿真计算之后,得到光纤压力传感器的变 形图,当施加 25 kPa 的载荷时,传感器光纤轴向应 变分布云图如图 4 所示。



图 4 传感器模型受力形变图

如图 5 所示为当施加 25 kPa 载荷与其他不同 载荷下应变分布曲线,半圆柱增敏结构的应变主要 集中在半圆柱的顶端。



根据图 4 与图 5 所示的半圆柱结构受力时的应 变情况可以看出,对传感器上表面施加接触力时,传 感光纤的应变将随着载荷的增大而不断增加,每增 加相同量级的载荷,其应变也是线性增加的。光纤 中间位置的应变最大。 因此,取 7.5 mm 处的应变,绘制不同载荷与应变的对应关系及拟合曲线,如图 6 所示,半圆柱增敏结构压力传感器的灵敏度为 2.160 39 $\mu\epsilon/kPa(\mu\epsilon 是应变单位,1 \mu\epsilon=10^{-6}\epsilon),且其拟合系数为 0.999 66,载荷与应变之间呈现出良好的线性关系。$



3 实验测试与分析

3.1 传感器性能测试

将基于半圆柱结构的柔性光纤压力传感器作为 研究对象,对其进行测试。从0N开始,按步长为 0.5N增加,加载到30N。根据压强、力与受力面积之 间的换算,得到施加压力的范围为0~160kPa,加压 的步长为2.5kPa。记录测试结果,可以绘制出基于 半圆柱增敏结构传感器应变与压力之间的关系,如 图7所示。图中横坐标表示施加压力(kPa),纵坐标 表示光纤传感器的应变(με)。图示表明半圆柱增敏 结构下光纤应变和载荷之间基本呈线性关系。



图 7 不同压力下应变分布曲线

根据图 6 和图 7 的拟合曲线可以得出如表 1 所示结果,实际测试的基于半圆柱增敏结构光纤压力 传感器的灵敏度为 2.068 06 με/kPa,拟合的线性相 关系数为 0.998 32;由 ABAQUS 仿真分析出的基于 半圆柱增敏结构光纤压力传感器的灵敏度为 2.160 39 με/kPa,拟合的线性相关系数为 0.999 66, 实验表明,本文设计的传感器基本达到设计要求。 表1 仿真与实际测试灵敏度与拟合方程

结构名称	灵敏度/(με/kPa)	拟合方程
仿真数据	2.160 39	<i>y</i> =2.160 39+6.859 15
实测数据	2.068 06	<i>y</i> =2.068 06+9.160 04

3.2 抗电磁干扰试验

光纤作为传感单元时,采用光信号进行传感信息的传递,因此,具有抗电磁干扰的能力。为了验证这一特性,我们使用磁屏蔽桶与无矩线圈对传感器施加一维磁场,模拟磁场干扰环境。如图 8 所示,将柔性光纤压力传感器放入其中,放上一个 1 kg 的标准砝码进行施压,然后通过调节电流大小,对其施加约 50 000 nT 和 100 000 nT 的弱磁场。测试其在添加磁场前后对应的应变输出变化情况,测试结果如表 2 所示。

表 2 不同磁场下的传感器应变

磁场环境	无磁	50 000 nT	100 000 nT
应变	100.6	98.6	100.2



图 8 磁场干扰模拟实验

可以看出,传感器在电磁场中测得数据基本没 有变化,说明光纤压力传感器具有抗电磁干扰的 能力。

3.3 水下环境测试

水下环境复杂多变,而光纤压力传感器具有抗 干扰和耐腐蚀程度比较强的优点。因此,我们模拟 水下环境,利用柔性光纤压力传感器对水压进行测 试。本文用于液压的密封压力罐外径为218 mm,罐 内腔体直径为47 mm,腔内深度为10 mm。考虑到 实验装置保压的可靠性,在压力罐的盖子上装有三 层密封垫圈,三层密封垫圈内径分别为62 mm、 72 mm、84 mm。整个测试系统包括不锈钢材料的 压力罐、ConST 台式高压泵、高压软管、数显压力表、 密封垫圈、螺栓等,通过高压软管将压力罐与高压泵 相连。当高压泵向压力罐内施加油压时,罐内的压 力处处相等^[19]。 模拟水下环境实验装置的使用方法是:将柔性 光纤压力传感器贴在压力罐内,并连接压力测试统; 实验中使用高压泵向压力罐内施加 0~160 kPa 的 液压,数显压力表可以实时显示罐内的压力值,当压 力表示数稳定时,利用传感器测量系统记录下传感 器的测量数据,同时记录下相应的数显压力表示数; 试验结束后,打开卸压阀进行卸压,让液体回流到油 罐,并对装置进行妥善保存。

根据液体压力计算公式 P=pgh,得到实验模拟的水下环境理论上为水下 16 m。对实验数据进行处理,绘制出模拟水压与光纤应变的关系曲线,如 图 9所示,实验中传感器表现良好的线性度与输出 响应,为柔性光纤压力传感器应用于水下弧形物体 表面的奠定基础。



4 结论

本文提出了一种基于半圆柱增敏结构的柔性光 纤压力传感器,通过仿真、抗电磁干扰、水下环境实 验验证,该结构能够有效地提高光纤压力传感器的 灵敏度,且操作便捷,成本便宜。在 0~160 kPa 的 压力范围内,灵敏度达到 2.160 39 µε/kPa,同时还 具有很好的线性度与重复性。由于传感器在厚度方 面设计不太理想,影响了传感器的柔韧性,所以下一 阶段需要对传感器结构及材料进行优化,以及考虑 阵列问题,实现分布式测量。

参考文献:

- [1] 于江涛.柔性力敏薄膜材料制备及压力传感器阵列的研制 [D].成都:电子科技大学,2019.
- [2] 林智春. MEMS 压力传感器原理及其应用论述[J]. 通讯世界, 2015(6):192.
- [3] 张锦桐,周刚,陈桂婷,等. 电极与介电层褶皱接触对压电式柔性电子皮肤性能的影响[J]. 复合材料学报,2020,37(12): 3194-3200.
- [4] 郭雪培.柔性压电薄膜制备及压力传感特性研究[D].太原:

中北大学,2019.

- [5] 李伊梦,侯晓娟,张辽原,等.石墨烯/PDMS 仿生银杏叶微结 构柔性压阻式压力传感器[J].微纳电子技术,2020,57(3): 198-203.
- [6] 肖立志,郭兰申,张磊. 基于应变片压阻效应的柔性传感器阵列的设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(7):4-6;19.
- [7] 侯玉群.柔性电容式应力传感器及其灵敏度影响因素研究 [D].北京:北京印刷学院,2015.
- [8] 郭庆辉,彭彦昆,李永玉,等. 肉品无损检测光学传感器设计与 试验[J]. 农业机械学报,2020,51(52):484-490.
- [9] Daniel K, Peter T, Ivan T. Locally Pressed Etched Optical Fiber with PDMS Coating for a Sensor Application [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127 (14):5631-5635.
- [10] Yu X K, Li Y F, Yu H Y. Flexible Capacitive Pressure Sensors Fabricated by 3D Printed Mould[J]. Electronics Letters, 2019, 55 (18):999-1000.
- [11] 郭雪培.柔性压电薄膜制备及压力传感特性研究[D].太原:



刘宏艺(1997—),硕士研究生,主要从事 柔性光纤传感技术的研究,1604159687@ qq.com; 中北大学,2019.

- [12] 邓胜强. 光纤光栅传感 OFDR 解调关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学,2015.
- [13] 徐兴贤. 基于 OFDR 系统的分布式应力传感技术的研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [14] 熊竹. 基于 OFDR 的分布式光纤振动传感器研究[D]. 成都: 电子科技大学,2016.
- [15] 刘艳,刘勇,朱震,等. 光纤微弯传感器技术的发展与应用研究[J]. 传感器与微系统,2006,25(8):1-3.
- [16] 刘艳,刘计朋,朱震,等. 基于光纤微弯损耗的压力传感器实验研究[J]. 仪表技术与传感器,2008(1):4-5;37.
- [17] 张启威. 基于光频域反射技术的薄壁结构应力测量研究[D]. 太原:中北大学,2020.
- [18] 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):285-29.
- [19] 陈辉,潘建强,唐佳炜,等.水下非接触爆炸条件下舰船冲击环 境测试相关技术研究[J].计算机测量与控制,2011,19(11):
 2635-2638.



李 晨(1987—),男,汉族,现任中北大 学仪器仪表与电子系副教授。主要研究 方向是极端环境下的动态测试技术和微 纳传感器设备,lichen@nuc.edu.cn。