

Design of Water Pressure Sensor Based on Prague Grating

Yilin Liu^{1,2}, Lin Xu^{1,2}, Yanhua Ma^{1,2}, Qian Liu^{1,2}, Lijun Li^{1,2}

¹College of Electronic Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Provincial Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Qingdao Shandong

Email: 1033199391@qq.com

Received: May 17th, 2017; accepted: Jun. 1st, 2017; published: Jun. 5th, 2017

Abstract

In this paper, a kind of water pressure sensor based on metal diaphragm and FBG fiber grating (FBG) is proposed with a tube shape of sensitive increasing package structure. Its working process is that the water pressure can be gotten from the FBG central wavelength drift, which coming from the deformation of the diaphragm connecting with the FBG. A series of the diaphragm deformation processes in this sensor structure is simulated by finite element analysis method. The sensor structure model is obtained and the sensor design parameters are gotten. This kind of water pressure sensor has the advantages of small size, simple structure and easy networking. It can be applied in coal mine water pressure monitoring, dam body seepage and water level monitoring, etc.

Keywords

Bragg Fiber Grating, Fiber Optic Sensor, Finite Element Analysis, Water Pressure Sensor, Tubular Film Package

一种基于布拉格光栅的水压传感器设计

刘仪琳^{1,2}, 徐琳^{1,2}, 马彦华^{1,2}, 刘倩^{1,2}, 李丽君^{1,2}

¹山东科技大学电子通信与物理学院, 山东 青岛

²矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛

Email: 1033199391@qq.com

收稿日期: 2017年5月17日; 录用日期: 2017年6月1日; 发布日期: 2017年6月5日

摘要

本文提出了一种基于金属膜片与布拉格光纤光栅(FBG, Fiber Bragg Grating)相结合的水压检测装置, 该

传感器采用管体增敏封装结构,工作过程为水压推动膜片带动推动光纤光栅,使光栅产生形变,引起FBG的中心波长产生漂移,通过解调光栅波长就可以实现对水压的感知。通过对传感器结构中膜片受力过程有限元分析,获得了该传感器结构模型,并给出传感器设计参数。此传感器具有体积小、结构简单和易于组网等优点,可以应用于煤矿水压监测、坝体渗水及水位监测等。

关键词

布拉格光纤光栅, 光纤传感器, 有限元分析, 水压传感器, 管式膜片封装

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤布拉格光栅(FBG)水压传感器与半导体类压电式水压传感器、静电容类水压力传感器相比较,具有精度高、量程大、体积小、现场不带电和易于组网等独特优势[1]。目前存在的FBG水压力传感器就起传感结构可以划分为悬臂梁式、膜片式和薄壁圆筒式。悬臂梁式水压传感器主要结构包括一个悬臂梁,梁的一端固定,水压加载到悬臂梁自由端,FBG被粘贴于梁上,水压通过力传递装置推动悬臂梁弯曲,从而获得水压信息的装置[2][3]。弹性膜片式FBG水压传感器,一般是将FBG粘贴于压力敏感薄膜片内表面,水压可以使膜片产生纵向形变,而带动FBG发生轴向形变实现水压传感的装置[4][5][6]。薄壁圆筒式FBG水压传感器,一般是将流体注入管体,通过流体对管体产生的微形变来改变缠绕在管体外部的光纤光栅的中心波长漂移,而实现对水压检测的装置[7][8][9][10]。在具体应用环境中,以上各类光纤光栅水压传感器各具优势,然而,目前存在的各类传感器还存在很多问题,如悬臂梁式FBG水压传感器,由于采用了悬臂梁结构,使得传感器整体体积比较大,不适合孔隙水压及小尺寸事件检测需要。弹性膜片式FBG水压传感器,光纤直接与受力膜片内表面粘贴,虽然传感器体积可以有效降低,但光栅比较容易损坏,影响工程长期检测。薄壁圆筒式FBG水压传感器,由于筒壁厚度等因素,灵敏度与稳定性受到限制,另外,为了减小传感器体积,给光栅安装带来困难,同时还会带来很大的传输损耗,影响网络容量等。

本文提出一种新型FBG水压传感器装置,该传感器采用增敏管体封装结构,工作过程为:水压施加给受力膜片,膜片带动FBG,与普通膜片式水压传感器不同,FBG不是直接粘贴在膜片内部,而是采用将膜片中心与FBG一端连接的方式,通过膜片最大形变部位将轴向形变直接传递给FBG的方法,实现一种高精度的传感过程。通过有限元分析的方法对传感器膜片受力云图和光纤光栅轴向受力进行了优化设计,ANSYS仿真了膜片受力的形变位移量与压力间关系,该设计为该类传感器敏感膜材料选取提供依据,通过加载水压光栅及膜片受力云图,可以获得光栅安装位置参数,最后,理论模拟了该传感器输入输出关系曲线,可见该结构传感器的输出特性具有很好的线性度。

2. 设计原理

2.1. 传感器结构

在水压传感器设计过程中,需要同时兼顾以下问题,第一,传感器要能够满足被测量量程与精度的要求;第二,传感器要尽可能地做到与环境相适应并且减小不必要的误差;第三,光栅波长的变化最好

能够与物理量有明显的近似线性的关系,方便数据的进一步处理[11]。我们提出了一种金属管封装,膜片压力传递传感器结构,该结构如图1所示,图中外壳采用不锈钢管体结构,目的保证传感器的机械性能和抗压力干扰,金属壁厚度可根据工程需要进行适当改变。进水口为金属结构,内附泥沙过滤网,可以有效滤出泥沙杂质。水压直接加载到一个金属膜片上,金属膜片采用弹簧钢材料,硅胶密封环密封膜片与管体间隙,光纤光栅与金属膜片中心连接,通过膜片形变即可将水压信号传递为光栅轴向形变,从而实现水压的传感,光栅另一端固定于不锈钢管体上,与一出线口相连,出线为铠装光缆,用于信号解调。

2.2. 设计原理

光纤布拉格光栅是利用光纤材料的光折变效应,将紫外线从侧面射入光纤纤芯内,形成折射率周期变化的光栅结构,如果被传感物理量能有引起光纤的有效折射率或光栅周期变化,也就是被测量可通过以上过程来实现对光纤光栅输出波长的调制,通过对波长的测量就可以感知被测量的变化情况,这就是光纤光栅的基本传感过程,FBG中心波长与有效折射率及光栅周期之间的关系式为[12]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

其中, λ_B 表示光栅中心波长, n_{eff} 表示有效折射率, Λ 表示光栅周期。

在本传感器结构中,光栅轴向会受到水压而发生形变,光纤光栅的有效折射率及光栅周期都会因此而发生形变,从而引起布拉格波长的漂移,关系式为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \Delta\Lambda/\Lambda + \Delta n/n \quad (2)$$

式中 Δn 是折射率变化量, $\Delta\Lambda$ 是折射率调制周期变化量。

折射率与应变的关系为[13]

$$\Delta n/n = -\frac{1}{2}n^2 \left[(1-\mu_p)P_{12} - \mu_p P_{11} \right] \varepsilon = P_e \varepsilon \quad (3)$$

其中

$$P_e = -\frac{1}{2}n^2 \left[(1-\mu_p)P_{12} - \mu_p P_{11} \right] \quad (4)$$

式中 ε 是轴向应变, μ_p 是泊松比,而 P_{11}, P_{12} 是光纤的两个弹光常量。

对于典型的石英光纤: $P_e = 0.22$, 轴向应变可表示为

$$\varepsilon = \Delta\lambda_B/\lambda_B (1 - P_e) \quad (5)$$

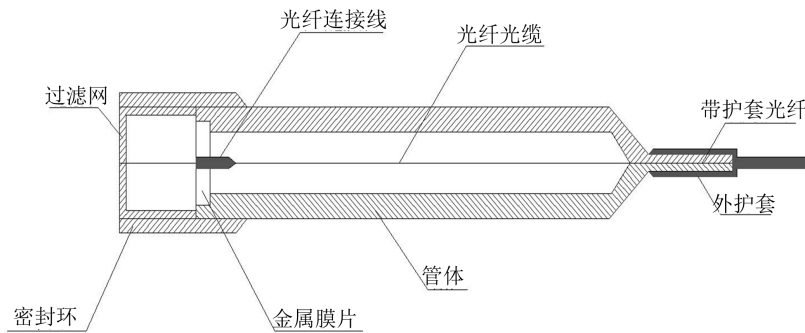


Figure 1. Water pressure sensor tube design

图1. 水压传感器管体设计

2.3. 金属薄膜的参数计算

压力加载过程中光纤长为 l ，光纤的弹性模量为 E_f ，截面积为 S ；薄片弹性模量为 E_p ，泊松比为 μ_p ，半径为 a ，厚度为 h 。

由弹性力学可知，圆形薄板的抗弯刚度为[14]

$$D = E_p h^3 / 12 (1 - \mu_p^2) \quad (6)$$

固定边界条件下均布载荷 q 的薄板中心扰度(中心形变位移)为

$$\omega_0 = \frac{qa^4}{64D} \quad (7)$$

因此，以为光栅初始长度，不受压力载荷作用时，传感薄片受 FBG 预张力的中心扰度(中心形变位移)为

$$\omega_0 = E_f Sa^4 (l - l_0) / (16\pi D l_0) \quad (8)$$

当受到均布横向载荷 q 作用时，传感薄片中心的扰度为

$$\omega = \frac{E_f Sa^2 (l - l_0)}{16\pi D l_0} + \frac{qa^4}{64D} \quad (9)$$

考虑弹光效应，设光纤的中心波长为 λ_B ，得到静态压力灵敏度为

$$M_\omega = \Delta\lambda_B / q = (1 - P_e) \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) \lambda_B / q = \frac{(1 - P_e) \pi \lambda_B a^4}{64\pi D l_0 + 4E_f Sa^4} \quad (10)$$

3. 模拟仿真

不要使用空格、制表符设置段落缩进，不要通过连续的回车符(换行符)调整段间距。

3.1. 金属薄膜的有限元分析

利用 ANSYS 软件对膜片受应力形变与受力关系进行分析，模拟过程中选取膜片 1 mm 以及 0.1 mm 的膜片进行仿真，形变云图如图 2 所示。

从图 2 可见，由于膜片周围管体固定，因而在压力下膜片中心处向受力相反方向的传感器金属管内部凹陷，越靠近膜片中心，凹陷越明显，位移量就越大。在 1000 Pa 压强下最大位移可达 0.858×10^{-5} mm。

图 3 为在其余条件不变而厚度增大的膜片在相同压力的作用下的位移情况的受力云图，可以看出，在受相同力大小的作用下，薄膜片的位移变，在光纤预拉伸的前提下，测量范围更小，但是更加敏感。0.1 mm 的膜片的最大位移为 0.836×10^{-2} mm。

如图 4 为厚度 1 mm 的膜片的受力分析情况。由图我们可以看出，膜片边缘位置承受了最大的压力，而此处是管体与膜片结合的位置，长期使用可能会造成不同程度的损坏。所以，可以在传感器的生产加工过程中进行加固，或者根据情况对管体设计做出改进。

图 5 描述了厚度为 0.1 mm 膜片的受力分布情况，它的受力情况与 1 mm 时的情况大致相同，在受相同作用压力的情况下，膜片边缘所能承受的水压更小，因而能够测量的水压范围就小于较厚膜片。

3.2. 传感器输出特性模拟

图 6 是膜片厚度为 1 mm 时水中压强与光纤光栅中心漂移量的关系，可以看到，灵敏度可达 0.33 nm/MPa，传感器量程可达 0~5 MPa，线性关系良好。经计算与模拟仿真，传感器输出特性曲线呈良好线性。

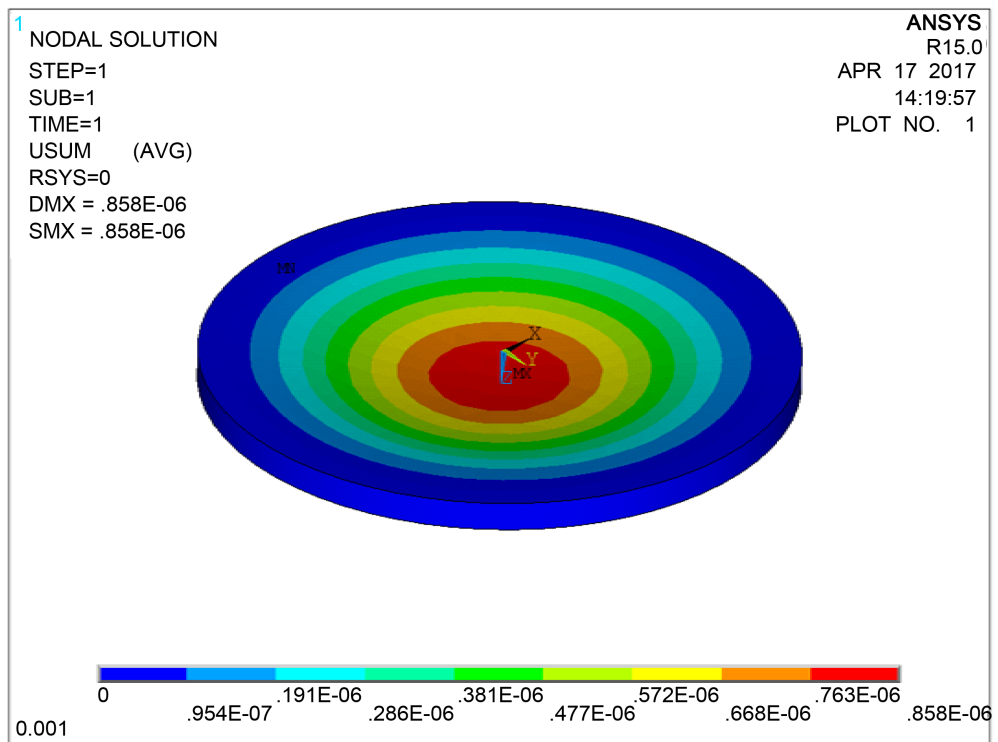


Figure 2. Diaphragm thickness of 1 mm displacement map
图 2. 厚度 1 mm 膜片位移云图

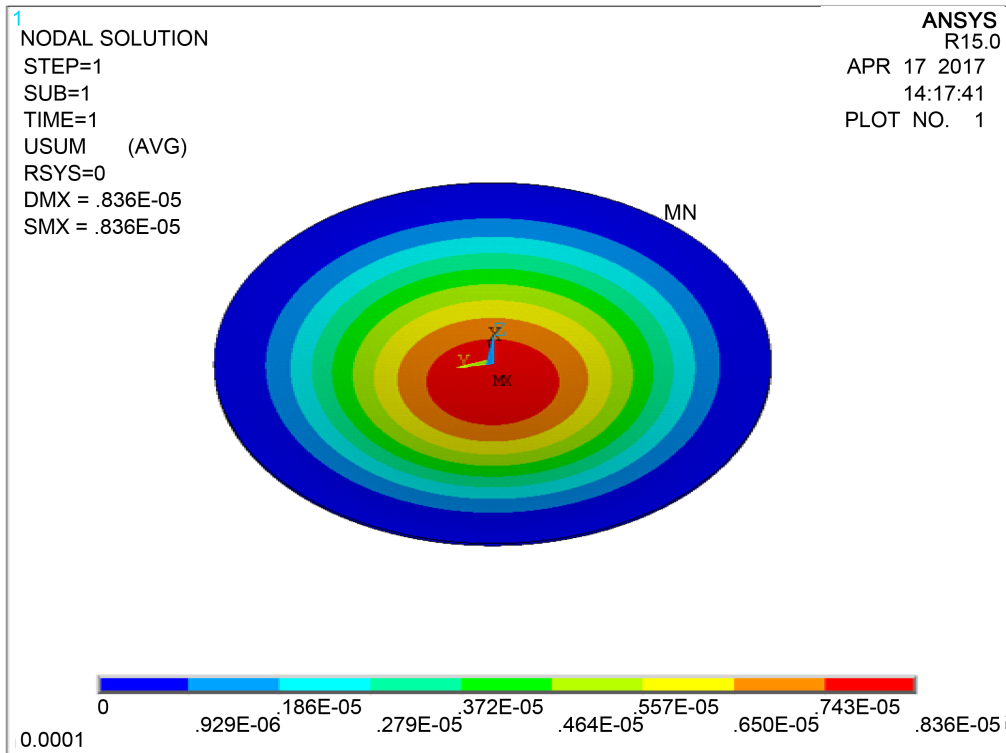


Figure 3. Diaphragm thickness of 0.1 mm displacement map
图 3. 厚度 0.1 mm 膜片位移云图

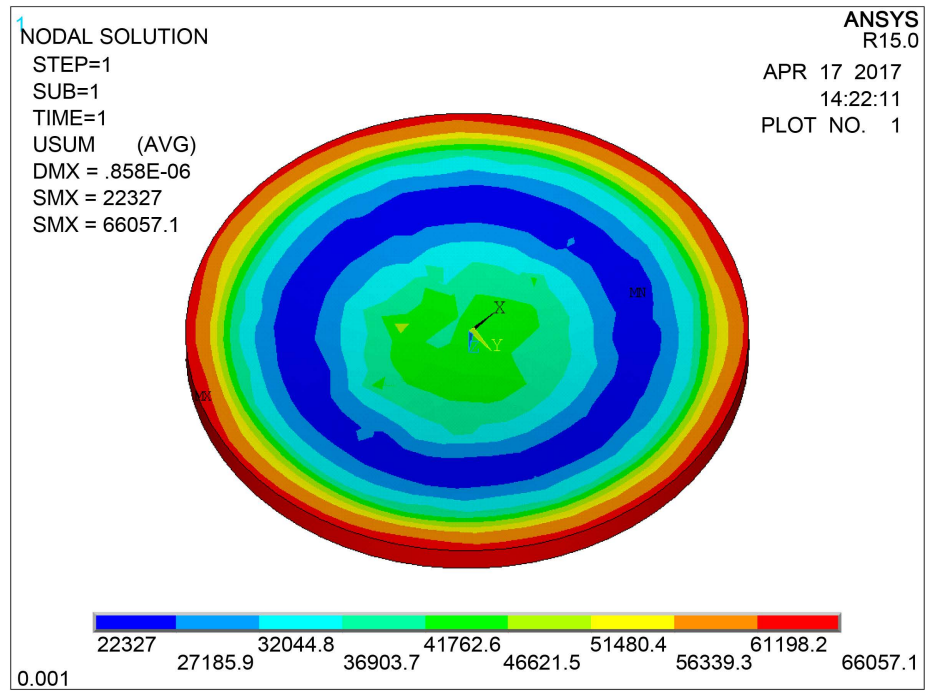


Figure 4. Thickness 1 mm diaphragm stress distribution
图 4. 厚度 1 mm 膜片受力分布图

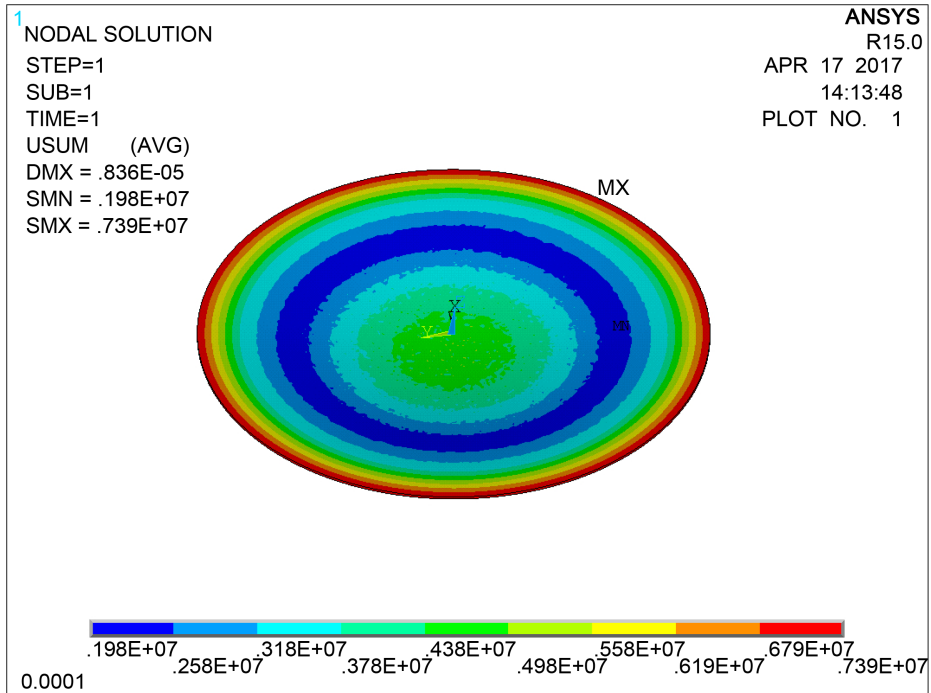


Figure 5. Thickness 0.1 mm diaphragm stress distribution
图 5. 厚度 0.1 mm 膜片受力分布图

图 7 是膜片厚度为 0.1 mm 时水中压强与光纤光栅中心漂移量的关系，灵敏度为 0.48 nm/MPa 可以看出，厚度较薄的膜片中心波长的偏移量更大，更加敏感，更适用于量程小精度大的工作环境。

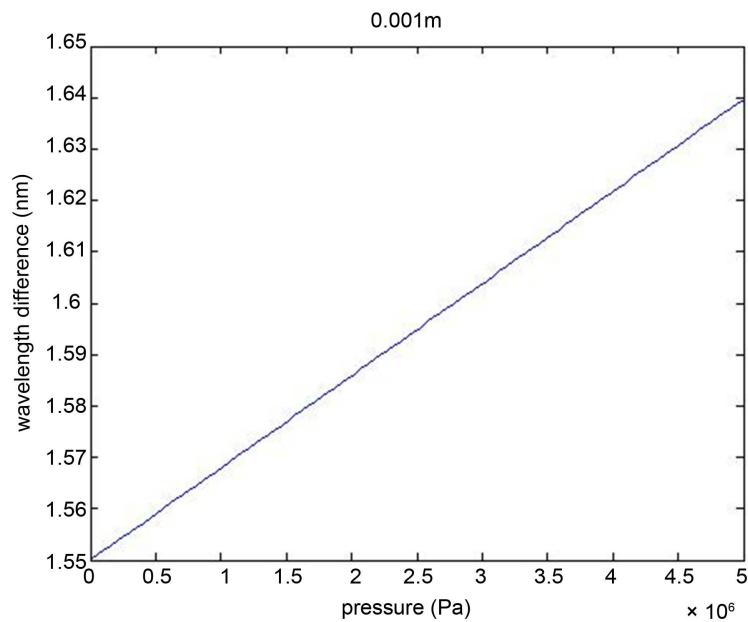


Figure 6. Linear relationship of the thickness of 1 mm diaphragm

图 6. 厚度 1 mm 膜片的线性关系图

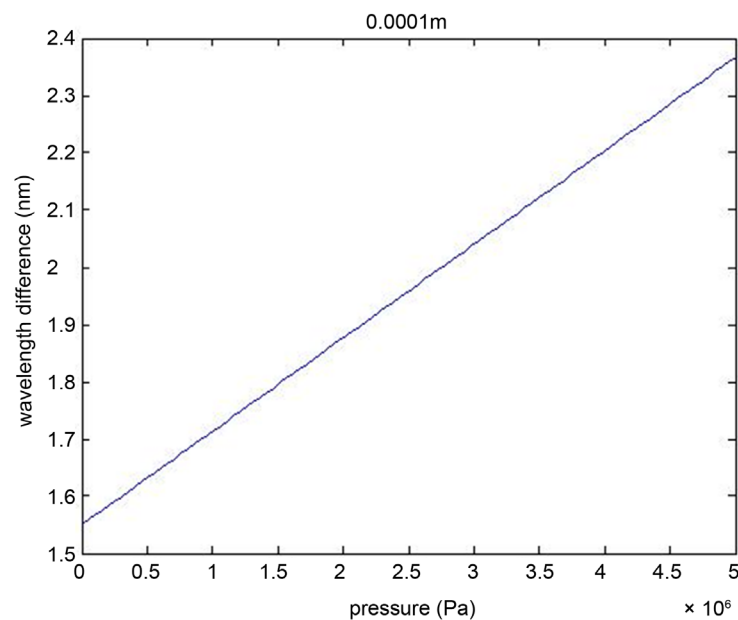


Figure 7. Linear relationship of the thickness of 0.1 mm diaphragm

图 7. 厚度 0.1 mm 膜片的线性关系图

4. 结论

通过上述理论模拟以及公式计算可以得出，我们能够通过设计硬件封装制作一个可以在工业中使用的水压传感器，通过膜片被水压推动产生的形变来改变光纤光栅的间隔，从而产生波长的偏移，找到规律制成水压传感器。

通过理论模拟我们可以看出，1 mm 的膜片能够承受更大的水压，测量更大的范围，而 0.1 mm 的膜

片测量范围相对较小却更加灵敏。产品生产的优势在于, 利用一个管体结构, 我们可以对膜片进行变换更替, 从而达到满足各种测量需求, 使得传感器更加具有适应性, 更加能够节约成本, 节省人力物力, 还能够达到良好的效果, 与已有水压传感器比较, 由于体积小该传感器尤其适合孔隙水压检测需要, 也就是该传感器是一种同时兼顾大量程、高精度和小体积的水压测量装置。

参考文献 (References)

- [1] 马茜, 李丽君, 等. 一种大量程光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光通信研究, 2016, 196(4): 49-66.
- [2] 王坤. 一种 V 型悬臂梁结构的光纤 F-P 加速度传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [3] 邵军, 刘君华, 等. 基于弹簧管悬臂梁的 FBG 压力传感的研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(7): 807-809.
- [4] 高侃, 周赢武, 林峰, 等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 997-1000.
- [5] 刘优平, 张鸿, 黎剑华. 高速公路软基孔隙水压光纤光栅监测技术[J]. 南昌工程学院学报, 2015, 34(3): 61-63.
- [6] 蒋泽民. 沥青路面孔隙水压力传感测量与路面结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] 宋广东, 孟祥军, 宫志杰, 等. 基于薄壁圆筒结构的光纤光栅瓦斯压力传感器[J]. 光纤与光子传感技术, 2015, 28(1): 51-55.
- [8] 李洪利. 光纤光栅传感器在海床超孔压监测中的适用性研究[J]. 山东: 中国海洋大学, 2015.
- [9] 吕栋, 胡小弟, 周永莲, 等. 基于五维光纤传感器的沥青路面动水压力测量的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(3), 268-272.
- [10] Rodriguez-Cobo, L., Cobo, A. and Lopez-Higuera, J.-M. (2015) Embedded Compaction Pressure Sensor Based on Fiber Bragg Gratings. *Measurement*, **68**, 257-261.
- [11] 李国华. 光纤光栅点式水压传感器的研制[J]. 现代仪器, 2012, 18(1): 38-43.
- [12] 梁磊, 左军, 南秋明, 等. 新型光纤光栅渗压传感器及其在土木工程中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 58-60.
- [13] 刘小会, 王昌, 刘统玉, 等. 矿井下用光纤光栅水压传感器及系统[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 112-114.
- [14] 殷小峰, 姜暖, 杨华勇, 等. 基于弹性薄片封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 5(22): 682-684.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org