

基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究

张旭辉^{1,2} 王陆唐^{1,2*} 方 捻^{1,2}

¹上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

²上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要 为了解工频电磁环境和优化高压电气设备,提出一种基于布拉格光栅的全光纤电场传感器。该传感器探头是一个刻有光栅的光纤悬臂梁,并在光纤表面涂覆多层聚酰亚胺树脂。由于聚酰亚胺的介电特性,在工频电场的感应下传感器会产生动态极化现象。在时变电场力的作用下,光纤悬臂梁发生周期性摆动,从而调制光纤光栅的布拉格波长。光栅布拉格波长的最大变化量与电场强度的大小成正比。将激光器波长设定在光栅反射谱边沿上,通过测量光栅反射光功率的大小实现对工频电场强度的测量。传感器特性的实验评估与实际工频电场的测量证明,该传感器具有很高的灵敏度,能在1~4 kV电压范围内高精度地检测出高压工频电场强度,验证了该工频电场测量方法的可行性。

关键词 光纤光学; 工频电场; 布拉格光栅; 聚酰亚胺树脂

中图分类号 TN29;TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020603

Study on Power Frequency Electric-Field Measurements Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology

Zhang Xuhui^{1,2} Wang Lutang^{1,2} Fang Nian^{1,2}

¹School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Measurements of power frequency electric field are necessary to understand electromagnetic environments and optimize the high voltage electrical equipment. For this purpose, a novel fiber Bragg grating (FBG) based on the all-fiber power-frequency electric-field sensor is proposed. The sensor head actually is an optical fiber cantilever beam with a FBG, on which the polyimide resin as the electric field induction medium is multiple-layer coated. When the fiber cantilever beam is put into the electric field, the polyimide coating will produce the dynamic polarization effect under the induction of power frequency electric field because of the dielectric properties of polyimide coating materials, which, in turn, induces the fiber cantilever beam to vibrate periodically through the action of the time-varying electric field force. As a result, the Bragg wavelength of FBG also is modulated. The maximum shift of the Bragg wavelength is proportional to the applied electric-field strength. For demodulation of the detection signal, a laser source is used and its operating wavelength at the edge of the FBG reflective spectrum is selected. Through this operation, the change of optical power reflected from the FBG can be monitored and the power-frequency electric field strength can be measured. The experimental investigations prove that the proposed sensing method for power frequency electric field measurements is feasible and the prototype of the sensor had very high detection sensitivity and good measurement accuracy in the 1~4 kV voltage range.

Key words fiber optics; power frequency electric field; fiber Bragg grating; polyimide resin

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 350.2770

1 引言

电场测量在诸多科学研究和工程技术领域具有重要意义,特别是在电力系统、电磁兼容及微波技术等领域具有广泛应用。在电力工业,工频电场测量可用于电力系统状态监测、电气设备内外电场分布测量、高

收稿日期: 2015-06-08; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61377082)、上海市重点学科资助课题(S30108)

作者简介: 张旭辉(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhangxuhui2014@163.com

导师简介: 方 捻(1972—),女,博士,教授,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: nfang@shu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: ltwang@mail.shu.edu.cn

电压试验及电晕放电现象研究等^[1];在电磁兼容领域研究中,工频电场测量可用于检测电气、电子设备的对外电磁辐射以及研究电磁环境对人体健康的影响^[2]。

与电压传感器不同,电场传感器通常应能同时测量二维或三维电场矢量的大小和方向,且传感元件对被测电场的扰动应尽量小;对于瞬态或脉冲电场的测量还要求传感器响应频带宽和动态范围大,以使传感信号尽可能不失真。早期对电场测量方法的研究主要集中于基于电学原理的测量方法,且这方面的研究仍在继续,例如文献[2]报道了一种基于电荷感应原理的小型电子式三维电场传感器,可用于测量空间电场。

集成光学技术、半导体激光器技术和光探测技术的迅速发展为电场光学测量技术的发展提供了有力的支持^[3-6]。光纤材料符合电场测量要求,对所测电场分布不产生扰动影响。另外,光纤传感器还具有绝缘性能好,响应速度快,体积小,重量轻等优点,是电场测量的理想传感器选择。

光纤光栅传感器体积小,其布拉格波长与外界物理量(如温度、应力等)成比例变化,常用于对温度、应力和压力等物理参数的测量。本文基于光纤光栅传感技术以及光纤外层的聚酰亚胺树脂涂层对电场的介电极化效应,提出一种用于工频电场测量的光纤光栅高压工频电场传感器。首先对传感器的基本结构和工作原理进行介绍,然后通过实验结果对传感器的各种传感性能进行评估,验证该传感器对工频电场测量的可行性。

2 光纤光栅高压工频电场传感器的结构与检测原理

2.1 电介质的动态极化

采用聚酰亚胺材料涂覆在光纤光栅上,并由此光纤光栅构成一个光纤悬臂梁振动传感器。聚酰亚胺为电介质材料,在静电场中由于电介质物体表面的感应电荷极性与电极的电荷极性相反,因此始终会受到静电场的拉力。当光纤悬臂梁位于交变电场中时,由于电介质材料的极化弛豫效应(在外界电场突然改变方向时,电偶极子要延迟一段时间之后才会完成其极化方向的转换)。在弛豫延迟时间内,电介质物体表层感应电荷的极性会与电场电荷极性一致,这会导致电介质物体短期内受到电场力的推动作用。随后,电场推力逐渐消失,而光纤本身的弹性力会使光纤悬臂梁恢复到原来状态。因此,在交变电场中,光纤悬臂梁会产生微小的振动。电场强度越强,光纤悬臂梁所受到的交变电场力就越大,其振动幅值也就越大。

2.2 传感器结构与电场检测原理

如图1所示,光纤光栅工频电场传感器探头是一个光纤振动传感器,由一个光纤悬臂梁所构成。在光纤悬臂梁固定点附近,光纤内刻有一段布拉格光纤光栅。同时,整个光纤悬臂梁涂覆有多层聚酰亚胺树脂(polyimide resin)。根据光纤光栅的弹光效应,当光纤光栅纵向受到应变时会引起布拉格波长变化,并满足关系^[7]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon, \quad (1)$$

式中 P_e 为光纤光栅的有效弹光系数; ε 为光栅在轴向方向上的应变; λ_B 为光纤光栅的布拉格波长; $\Delta\lambda_B$ 为布拉格波长的变化量。(1)式为光纤光栅应变传感的基本公式。在传感器设计上,利用悬臂梁摆动所产生的沿光纤轴向方向的拉力,把振动量转化为光纤内的纵向应变变量,从而改变布拉格波长。通过测量布拉格波长的变化量即可测出振动量的大小,也即间接地获得所测工频电场的强度。在传感器的设计方面,将光纤悬臂梁振动传感器的自然(共振)频率设计在工频范围附近,通过光纤悬臂梁在工频范围处的谐振,将交变电场力所导致的微小振动进行机械放大,以提高检测灵敏度。

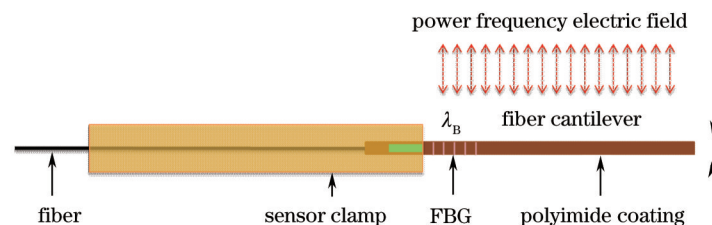


图1 光纤传感探头的结构示意图

Fig.1 Structure of fiber optic sensing probe

2.3 布拉格波长偏移量的检测方法

在光纤光栅传感器的布拉格波长偏移量检测方面,有许多方法可以利用。例如,采用宽带光源和光谱仪解调出测量信号。不足之处是使用设备复杂解调时间长,所以采用光纤光栅反射谱的下降沿或上升沿的线性特性,适当地选择激光器波长,将其位于光纤光栅反射谱的下降沿或上升沿较为线性的部位。图2(a)为激光器波长选择在光纤光栅反射谱下降沿中点部分的情况。

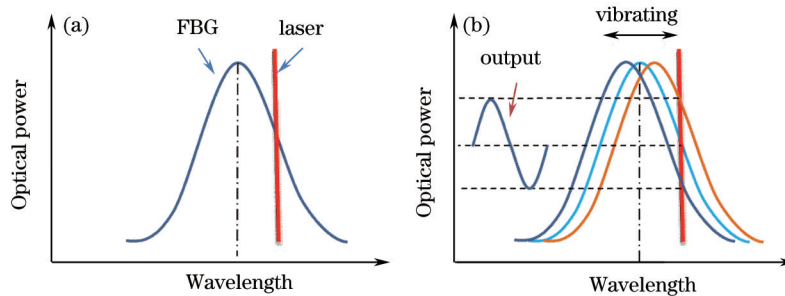


图2 (a) 激光器波长选择; (b) 放入工频电场中反射光功率随光纤振动而变化

Fig.2 (a) Choice of laser wavelength; (b) change of reflected light power when the sensor is placed into a power-frequency electric field

当光纤光栅受到外力产生应变时,光纤光栅布拉格波长将发生偏移,而激光器的波长未发生变化,这样导致从光纤光栅反射回来的激光功率发生变化。由图2(b)可以看出,当光纤悬臂梁在工频电场力作用下发生周期振动时,光纤光栅的布拉格波长也发生周期性地变化,通过检测光强的变化即可获知光纤光栅布拉格波长的偏移量,进而测量出工频电场强度的大小。

3 实验结果

实验系统结构如图3所示。该系统由一个可调波长激光器、光环行器和一个光纤悬臂梁传感探头、光电探测器和一个示波器所组成。激光器发出的激光经过光环行器进入光纤悬臂梁内,并通过其中的光纤光栅的反射,再次经过光环行器,由光电探测器转换为电信号并由示波器进行波形显示和测量。实验系统所采用的可调波长激光器的输出光功率为5 mW,探测器的响应度为0.85,布拉格光栅的反射率为95.66%,布拉

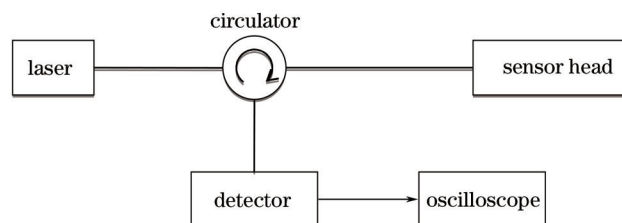


图3 实验系统结构图

Fig.3 Structure of the experimental system

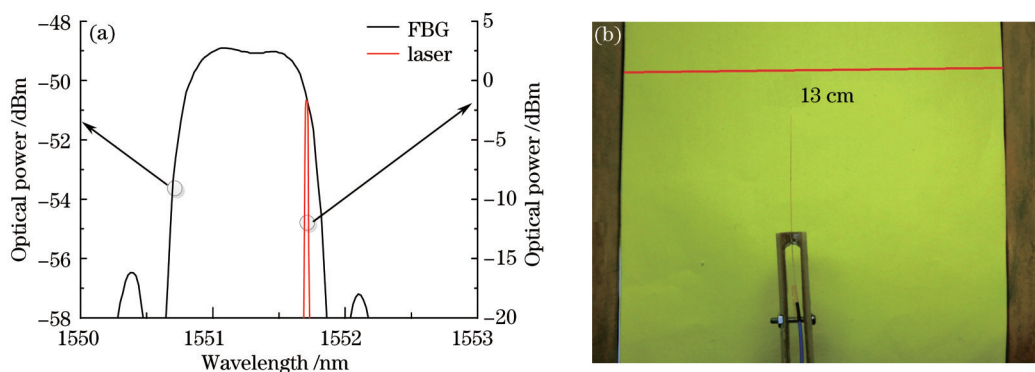


图4 (a) 实际激光器的波长选择; (b) 两电极板之间的距离为13 cm

Fig.4 (a) Practical selection of laser wavelength; (b) the distance is 13 cm between the two separation electrode plates

格波长为 1551.1 nm。因此,如图 4(a)所示,实验中设定激光器波长为 1551.82 nm,大致位于光纤光栅反射谱的下降沿部分。所构成的光纤悬臂梁长度约为 4 cm。通过在两块面积相同的电极板(20 cm×20 cm)上施加工频高压交流电产生被测工频电场。图 4(b)中两电极板相距 13 cm,且分别与交流高压发生器相连接。在此实验环境下,两电极板内的电场可视为均匀电场,其大小表示为 $E=V/D$,其中 V 表示两电极间的电压差, D 为两电极相距间隔。实验中对所提出的高压工频电场传感器的各项传感性能进行了测试和评估,内容包括灵敏度、测量范围、线性度和方向性。

3.1 传感器性能评估

实验时光纤悬臂梁放置在两电极板中间,并且与两电极板相平行。交流高压发生器输出电压变化范围为 0~4 kV。图 5 是在不同的工频高电压条件下传感器检测到的电压信号波形图。波形为正弦波,其频率与交流电的频率都为 50 Hz。输入电压值分别为 0、2、4 kV。随着输入交流电压值的增加,检测信号的电压振幅也增加,这与前述理论分析结果相一致。

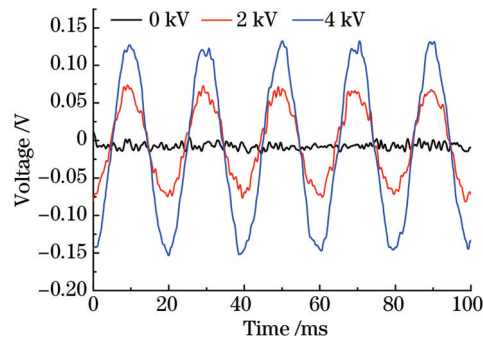


图 5 在不同输入交流电压下检测信号的时间波形

Fig.5 Testing signal waveform at different inputting AC voltages

通过测量检测信号电压的有效值来分析传感器的各项性能。具体实验操作步骤分为:1)以 500 V 电压对 0~4 kV 的量程进行等间隔划分,确定各个测量点;2)由小到大逐渐增加交流电压,同时记录光电探测器输出电压的有效值和此时所施加在电极上的高电压值;3)将施加电压由大到小逐渐减小,同样记录光电探测器输出电压的有效值和此时的高电压值。依据上述操作步骤,对传感器进行反复多次循环测试,其实验结果如图 6 所示。

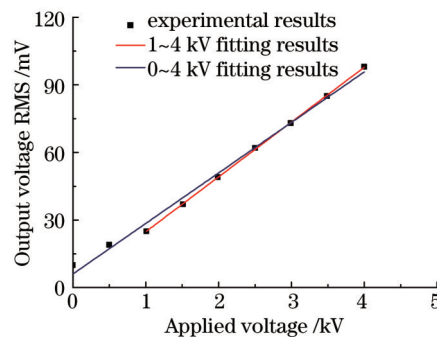


图 6 实验数据以及线性拟合结果

Fig.6 Results of experimental data and linear fitting

实验数据表明,施加电压和检测信号电压的有效值呈线性关系。因此采用多项式线性拟合方法对测量数据进行标定拟合,两组数据的拟合结果如图 6 所示。一组是对 0~4 kV 范围内的数据进行拟合;另一组是对 1~4 kV 内的数据进行拟合。1~4 kV 范围的拟合度比 0~4 kV 范围的拟合度要高一些,其拟合函数为

$$y = 0.48 + 24.34x ; x \in 1 \sim 4, \quad (2)$$

式中 y 是输出电压有效值, x 是施加在两电极板上交流电压的有效值。由(2)式可知拟合度为 0.99977。电压测量范围为 1~4 kV(最大可测电压受限于高压发电器的输出范围),测量误差为 0.61%,斜率为 24.34×10^{-6} 。这表明传感器可以有效地测量工频电场强度。实验中发现传感器存在阈值,其大小约为 1 kV,这表明测量范围设定在 1~4 kV 时,所获结果比较准确。另外,通过对多次往复测试结果的分析表明,传感器不存在明显

的回滞现象。

3.2 方向性测试

由于电场是一个矢量场,具有方向性,而光纤悬臂梁是一个二维的振动传感器。因此当传感器位于电场中时,其悬臂梁与电场矢量间的角度不同会产生不同的测量结果,形成测量误差。故需要通过实验调查光纤悬臂梁与电场方向之间角度的关系。如图7(a)所示,实验中把光纤悬臂梁相对一个电极呈不同的角度安置,分别测量传感器输出信号电压。当悬臂梁与电极板相垂直时,认定此时为 0° 。当悬臂梁和电极板平行时,则为 -90° 或 90° 。保持电极板上施加的电压不变,改变光纤悬臂梁与电极板的角,从 -90° 到 90° ,每隔 15° 测量一次传感器的输出电压,结果如图7(b)所示。当悬臂梁与电场方向相垂直时(-90° 或 90°),检测信号电压幅度达到最大,此时悬臂梁振动最为剧烈。而当悬臂梁与电场方向相平行时(0°),传感器输出电压幅度达到最小。实验结果表明,当悬臂梁与电场方向相垂直时,传感器检测灵敏度最高。通常,通过旋转传感器的角度来寻找最大输出值的方法来确定电场方向。当找到最大输出值时,就可以根据输出值的大小确定电场强度大小,根据传感器摆放的位置确定电场的方向。上述测量电场强度大小的实验均在输出值最大的条件下进行。

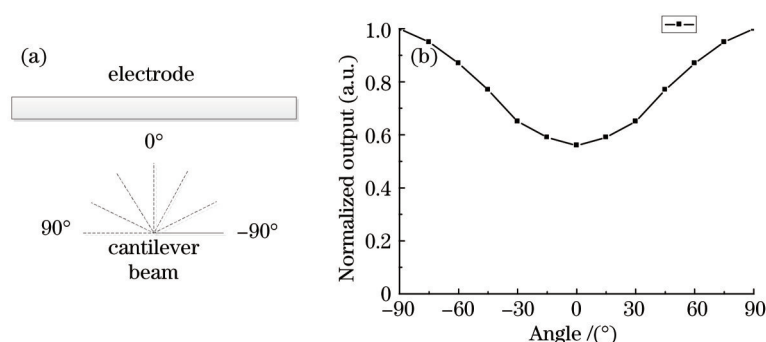


图7 方向性测试实验: (a) 实验装置示意图; (b) 实测结果

Fig.7 Directional test experiment. (a) Schematic diagram of experimental set-up; (b) testing results

4 结 论

提出了一种新颖的基于光纤光栅传感技术、采用光纤悬臂梁结构的光纤工频电场传感器。搭建基于光纤光栅的工频电场检测系统,对传感器的性能进行多方面的实验调研,也对实际的高压工频电场进行测量。实验结果证明该传感器系统具有很高的灵敏度,能在 $1 \sim 4$ kV电压范围内高精度地检测出高压工频电场强度的大小。它可以满足电力工业对高压工频电场测量的需求,并且具有体积小,结构简单等优点,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 A Ferrero. Measuring electric power quality: problems and perspectives[J]. Measurement, 2008, 41(2): 121-129.
- 2 Zhang Xing, Bai Qiang, Xia Shanhong, *et al.*. Miniaturized 3-D electric field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1433-1436.
张 星, 白 强, 夏善红, 等. 一种小型三维电场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1433-1436.
- 3 Qu Xin, Bai Yiming, Wang Bo, *et al.*. Polymer dipole antenna-based fiber optic electric field sensors[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(2): 163-165.
曲 欣, 白一鸣, 王 博, 等. 聚合物偶极子天线型光纤电场传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22(2): 163-165.
- 4 Zhang Kaiyu, Zhao Hong, Yang Yuqiang, *et al.*. High voltage electrostatic sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106002.
张开玉, 赵 洪, 杨玉强, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的高压静电传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106002.
- 5 K Bohnert, P Gabus, J Kostovic, *et al.*. Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. Opt Laser Eng, 2005, 43(3-5): 511-526.
- 6 V M N Passaro, F Dell'Olio, F D Leonardis. Electromagnetic field photonic sensors[J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(2-3): 45-73.

7 Gong Xianfeng, Yi Honggang, Zhou Xiaomin, *et al.*. Low frequency fiber Bragg grating acceleration sensors[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(1): 75-77.

巩宪锋, 衣红钢, 周晓敏, 等. 低频光纤光栅加速度传感器[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1): 75-77.

栏目编辑: 刘丰瑞