

基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器

张开玉 赵洪 张伟超 陈俊岐 张印东

哈尔滨理工大学工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 为了实现静电电压表的精确测量,提出了一种基于等应变梁和光纤布拉格光栅(FBG)的静电电压传感器。在一定温度范围内,由双FBG的结构方案实现了传感器的温度自补偿,通过对等应变梁的仿真分析和传感器系统的电场仿真,优化设计和制备了传感器结构系统。利用一对平板电极产生匀强电场,在静电力作用下等应变梁上的导体半球受力致使等应变梁发生变形,使得两个FBG反射光谱的中心波长产生偏移,通过FBG的波长差实现了电压的测量。实验结果表明:该传感器可实现5~24 kV直流(DC)高压和交流(AC)高压有效值的测量,5~12 kV的计算精度为2.1%,12~24 kV的计算精度为0.89%,传感曲线的拟合度为0.99985,基本满足高电压测量系统的稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求。

关键词 光纤光学;静电电压传感器;光学电压测量;光纤布拉格光栅;等应变梁

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0306003

Fiber Bragg Grating Electrostatic Voltage Sensor Based on Uniform Strain Beam

Zhang Kaiyu Zhao Hong Zhang Weichao Chen Junqi Zhang Yindong

Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract In order to achieve high precise measurements of electrostatic voltmeter, an electrostatic voltage sensor of fiber Bragg grating (FBG) based on uniform strain beam is proposed. It can achieve temperature self-compensation of sensor by twin-FBG structure scheme in a special temperature range; the sensor structure system is optimally designed and prepared by simulation analysis of uniform strain beam and simulation on electric field of sensor system. Uniform electric field is produced using a pair of plate electrode, conductor hemisphere is forced under the pull of electrostatic force and the shape of uniform strain beam is deformed, causing central wavelength of twin-FBG reflection spectrum shift, and realizing the voltage measurement by wavelength difference of FBG. The experimental results show that the sensor can measure direct current (DC) and alternating current (AC) root-mean-square voltages from 5 kV to 24 kV. Moreover, the measurement accuracy is 2.1% from 5 kV to 12 kV and 0.89% from 12 kV to 24 kV, and the fitting degree of the sensing curves is 0.99985. The sensor satisfies the requirement of high stability and high reliability, high precision and strong anti-interference ability and so on.

Key words fiber optics; electrostatic voltage sensor; optical voltage measurement; fiber Bragg grating; uniform strain beam

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-11-10

基金项目: 国家973计划(2012CB723308)、黑龙江省科技攻关项目(GZ11A407)

作者简介: 张开玉(1978—),男,副教授,博士研究生,主要从事光纤传感及高压绝缘测试等方面的研究。

E-mail: gotoayu@126.com

导师简介: 赵洪(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事高压绝缘技术方面的研究。E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn (通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

静电电压表在高电压的测量中起着非常重要的作用。传统非接触式静电电压表主要有振动电容式、旋转叶片式、直接感应式等几种,振动电容式存在工艺复杂成本较高,旋转叶片式存在机械磨损影响测量精度,直接感应式存在读数无法直接转换成电量进入自动测试系统的问题,同时基于电信号输出的测试仪器信号传输存在受高压电场干扰的问题。由于传统静电电压表测量方法的诸多缺点,人们一直在寻求新方法来代替传统上静电电压表的高电压测量方法。

国外首先兴起高压静电测量的研究,从结构上突破了传统的静电电压表。较早出现的有应变计式静电电压表^[1],此类静电电压表有较好的测量范围和测量精度,但是应变计式电压表制备困难;近来有人提出现场磨式直流高压静电计^[2],现场磨式静电计有机械旋转部件,因此涉及到寿命和可靠性问题。而光学电压测量的方法具有测量灵敏度高、抗干扰能力强等优点,是非常有潜能的高压测量解决方案。近年来,基于光学方法设计的电压传感器得到了较快发展,文献[3]利用马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪原理设计了电场传感器用于电压测量,此类传感器可获得较高的测量精度,但其结构中需要引入参考臂光纤,结构复杂。文献[4-5]使用压电陶瓷(PZT)设计了电压传感器,此类传感器存在电滞现象。文献[6-8]利用晶体的泡克耳斯(Pockels)效应设计了电压传感器,但此类传感器加工困难,不利于实用化。以上电压的测量方法都是利用光学技术来实现电压信号的测量,但是由于诸多方面原因,电压测量的效果有限。

光纤布拉格光栅(FBG)以其抗电磁干扰能力强、体积小、精度高等优点,已被广泛应用于电压、温度、声波和应变等领域的测量^[9-13]。本文利用静电力原理和弹性力学理论设计与制备了等应变梁的FBG静电电压传感器,通过仿真与分析,优化设计了传感器的结构系统,利用参数一致的双FBG方法实现了传感器的温度自补偿,搭建了静电电压传感器的光学实验系统,实现了高电压信号的静电测量。所设计的静电电压传感器具有结构简单、抗干扰能力强等优点,在高电压领域具有较好的应用前景。

2 传感器结构与相关原理

2.1 传感器结构设计

静电电压传感器的设计结构如图1所示。传感器主体部分由聚酯板所设计的等应变梁构成,等应变梁的上端固定在支架上,下端粘有一个封闭的空心导体半球。利用环氧树脂胶将两支参数一致的FBG分别粘接于应变梁的两个表面,并使光纤光栅轴线保持在同一中心轴线上对称粘贴。设应变梁长度为 L ,固定端宽度为 b ,厚度为 h ,半球的半径为 R 。

如图2所示,将固化封装好的两支FBG等应变梁固定在绝缘装置上,在等应变梁的左右两侧各安装一个电极,电极直径均为130 mm,其中电极1为高压电极,电极2为接地电极。通过电极1的调节螺栓可以调整两电极间的间距 d 。

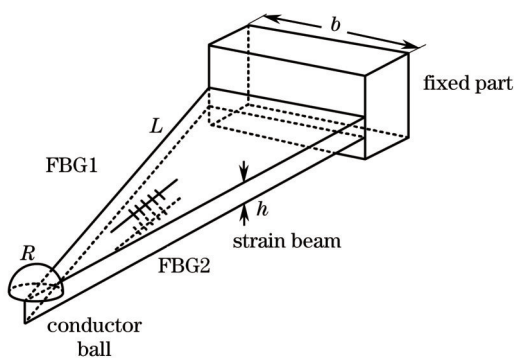


图1 电压传感器结构图

Fig.1 Structure diagram of voltage sensor

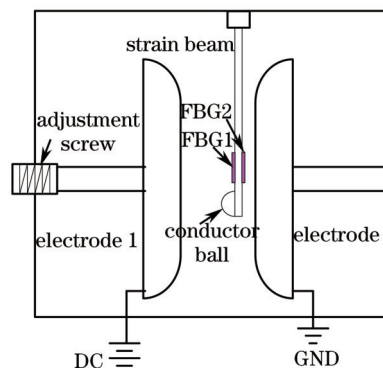


图2 传感器安装示意图

Fig.2 Schematic of sensor installment

2.2 传感器电压测量原理

如图2所示,当两电极分别施加电压和接地后,形成了均匀电场,空心导体半球在静电力的作用下受力

使得等应变梁发生变形。由电动力学理论可得该静电力的大小为^[14]

$$F = \frac{9\pi\epsilon_0}{4} R^2 E_0^2, \quad (1)$$

式中 ϵ_0 为空气的介电常数, R 为空心导体半球的半径, E_0 为均匀电场的强度。当高压电极施加的电压为 U ,电极间距为 d 时,(1)式可记为

$$F = \frac{9\pi\epsilon_0 R^2 U^2}{4d^2}. \quad (2)$$

FBG可视为光纤纤芯内形成的反射镜,对入射到光栅上的部分光波进行反射,其反射的波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3)$$

式中 Λ 为光栅周期, n_{eff} 是光栅波导的有效折射率,二者均是温度和应变的函数。当不考虑FBG的温度与应变耦合作用时,由温度和应变引起的FBG中心波长漂移量为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon, \quad (4)$$

式中等号右边第1项为FBG的温度效应, α 和 ζ 分别为光纤材料的热膨胀系数和热光系数;第2项为FBG的应变系数, P_e 为有效弹光系数,在Si纤介质中, P_e 约为0.22。

设FBG1和FBG2的中心波长分别为 λ_1 和 λ_2 ,当FBG1和FBG2的温度灵敏度系数和应变系数均一致时,不妨设 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B$,同时,等应变梁在变形的过程中,FBG1和FBG2的应变大小相等,方向相反,即有 $\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \epsilon$,从(4)式可得

$$\delta\lambda = \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2\lambda_B(1 - P_e)\epsilon, \quad (5)$$

由于FBG对温度和应变同时敏感,(5)式可消除温度对传感器的影响,实现传感器的温度自补偿。

根据弹性力学原理,等应变梁的自由端导体半球受静电力 F 作用时,其应变系数 ϵ 可记为^[15]

$$\epsilon = \frac{6L}{Ebh^2} F, \quad (6)$$

式中 E 为杨氏模量, L 为应变梁长度, b 为应变梁固定端宽度, h 为应变梁厚度。

将(2)式和(6)式代入(5)式可得到

$$\delta\lambda = \frac{27\pi(1 - P_e)\lambda_B LR^2 \epsilon_0}{Ebh^2 d^2} U^2, \quad (7)$$

由(7)式可得:当FBG1和FBG2的中心波长差值 $\delta\lambda$ 确定时,通过(7)式可求得外施电压 U ,即可实现等应变梁的电压测量。

3 传感器仿真分析

3.1 传感器系统电场仿真

利用电磁场仿真软件CST对所设计的传感器进行三维静电场仿真分析,得到匀强电场中导体半球表面电场的分布情况。利用软件构建了传感器结构系统,传感器有关参数如表1所示。电极边缘设计成圆角,倒

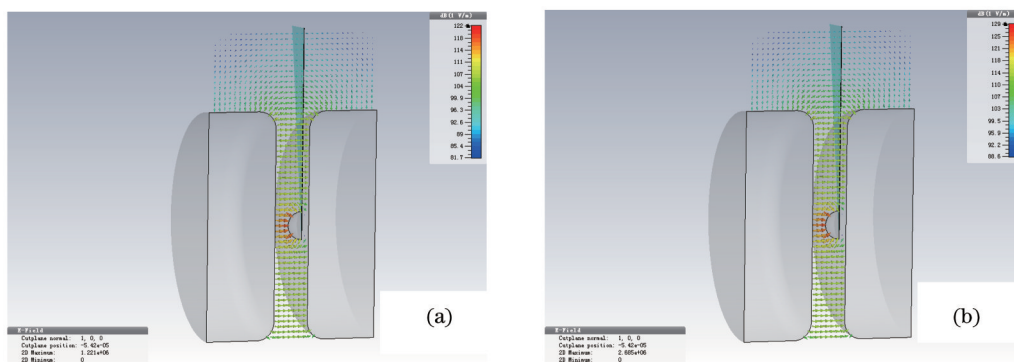


图3 传感器系统(a) 10 kV和(b) 24 kV时电场仿真

Fig.3 Electric field simulation of sensor system with (a) 10 kV and (b) 4 kV load voltages

角半径为 10 mm,使边缘曲率半径不至于过小从而产生电场集中,导致局部放电。仿真实验结果表明:当施加在高压电极上的电压 U 分别为 10 kV 和 24 kV 时,取其中一个对称面,可以得到其电场分布如图 3 所示,匀强电场中的导体半球表面电场强度分别为 1.221×10^6 V/m 和 2.685×10^6 V/m,小于常温常压条件下空气介质的击穿场强 3×10^6 V/m,理论上验证了传感器不会产生局部放电现象。

表 1 传感器相关参数

Table 1 Related parameters of sensor

Parameter	Value
E /GPa	4
L /mm	160
b /mm	36
h /mm	0.2
R /mm	9
d /mm	20

3.2 等应变梁仿真分析

为验证电压传感器在一定电压下受静电力使得等应变梁产生弹性形变,利用有限元分析软件(ANSYS)对所设计的等应变梁进行仿真分析,传感器的相关参数如表 1 所示。设施加在高压电极上的电压 U 分别为 10 kV 和 24 kV,由(2)式可以计算得到静电力大小分别为 1.27×10^{-3} N 和 7.29×10^{-3} N。将计算所得的静电力作为有限元软件模拟施加给应变梁自由端的载荷,通过给定边界条件等一系列处理计算可以得到不同载荷时的传感器变形情况。仿真分析如图 4 所示,从图中可以看出,当等应变梁的一端固定时,自由端的变形量最大,对应载荷条件下的最大变形量分别为(a) 0.428×10^{-3} m 和(b) 0.245×10^{-2} m。

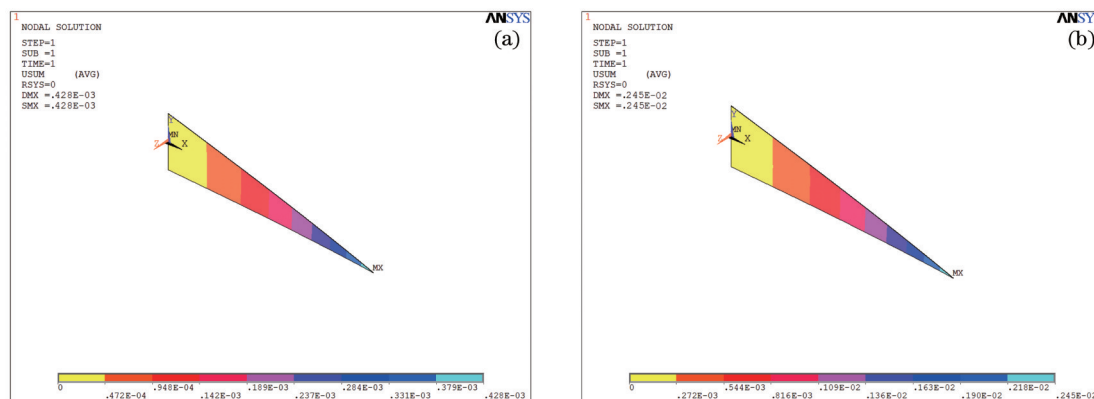


图 4 电压为(a) 10 kV 和(b) 24 kV 时传感器受力仿真

Fig.4 Force simulation of sensor with (a) 10 kV and (b) 24 kV load voltage

4 电压传感器实验与标定

4.1 电压传感器实验系统组成

为了实现传感器的光纤光栅静电电压测量,根据实验仿真分析设计制备了合适的电压传感器,搭建了如图 5 所示的光学静电电压测量系统。系统由三部分构成:高压单元、电压传感器单元和信号处理单元。其中高压单元由调压器、高压直流电源、保护电阻、高精度电压计和分压电阻 R1 和 R2 组成,电压传感器单元包括有调节螺栓、高压电极、等应变梁、导体半球、接地电极(GND)等,信号处理单元由放大自发辐射(ASE)宽带光源、信号隔离器、耦合器和光谱仪(OSA)等组成。同时,将电压传感器单元在绝缘装置中固定安装。

实验前,通过螺栓调节绝缘装置中高压电极与接地电极的电极间距为 20 mm,将实验系统置于空气介质中。调压器输入交流(AC)电压为 AC220V,频率为 50 Hz,通过调压器调节直流高压电源的输出,调压器的调节范围是 0~250。直流(DC)高压电源通过调压器可调节输出 0~60 kV,经保护电阻后接至高压电极。同时,在高压电极的输入端采用精密电阻 R1 和 R2 搭建了直流分压电路,利用高精度电压计实时监测施加在高压

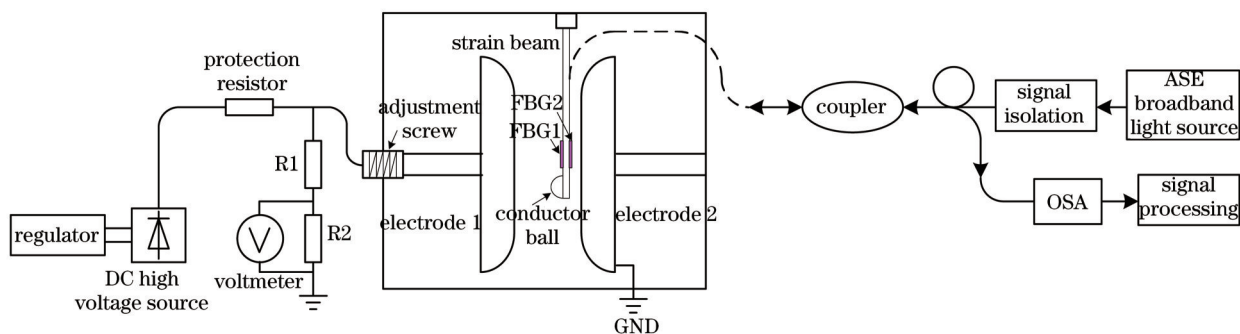


图 5 实验系统结构图

Fig.5 Structure of experimental system

电极的精确电压。

图 6 为等应变梁的光纤光栅静电电压测量系统实物图。

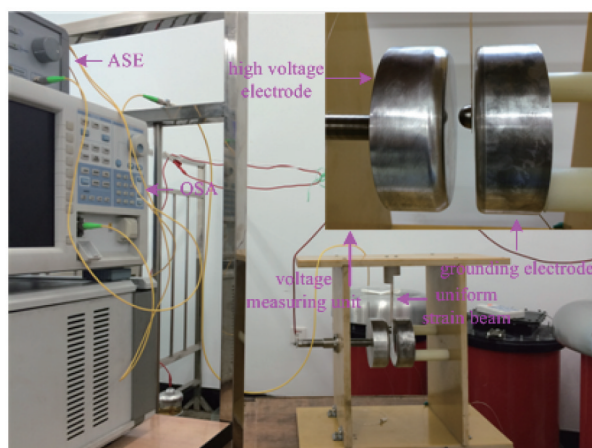


图 6 系统实物图

Fig.6 Photograph of system

4.2 FBG 温度特性实验

为了研究环氧树脂固化对等应变梁上 FBG 的影响,设计了一个针对性实验。电压传感器在室内室温 (20 ℃) 环境下使用,选用两支初始中心波长均为 1549.980 nm 的 FBG,对其进行编号为 FBG1 和 FBG2。将两支 FBG 置于温控箱中,将温控箱温度以 2 ℃ 为间隔,从 10 ℃ 升温至 40 ℃,记录升温过程中的温度值和对应温度下两支 FBG 的中心波长。通过 3 次温升实验,绘制的两支 FBG 温度特性曲线如图 7(a) 所示。对裸 FBG 实验后,利用环氧树脂胶将 FBG1 和 FBG2 对称封装固定在等应变梁的两个面上,FBG 与等应变梁的中心轴线严格一致,室温下固化 24 h。将固化好的传感器置于温控箱中,重复上述温升实验过程,绘制封装后的 FBG

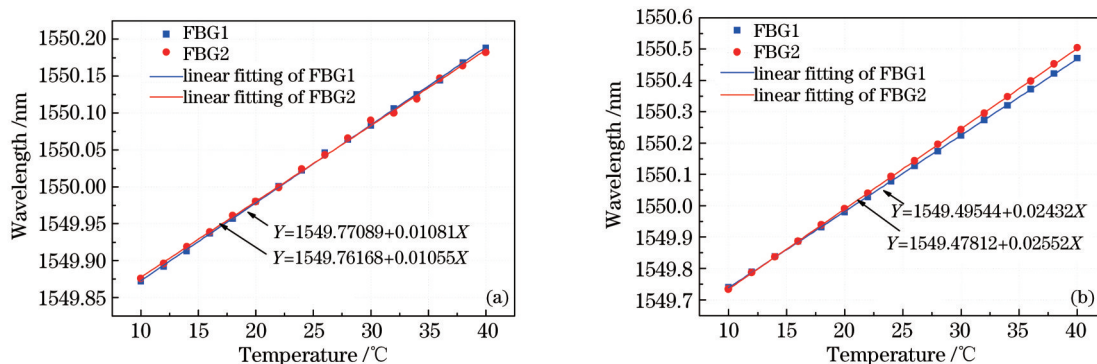


图 7 (a) 裸 FBG 和 (b) 封装 FBG 温度特性曲线

Fig.7 Temperature characteristics of (a) bare FBG and (b) packaged FBG

温度特性曲线如图 7(b)所示。

在 10 ℃~40 ℃内,由图 7(a)可得,封装前的 FBG1 和 FBG2 温度响应曲线具有较好的线性度,其波长温度相关系数分别为 0.99912 和 0.99896;通过线性方程可以得出其温度灵敏度基本一致,分别为 10.81 pm/℃和 10.55 pm/℃。通过图 7(b)分析可知,在测量温度范围内,两支 FBG 的波长温度相关系数分别为 0.99836 和 0.99782,温度灵敏度分别为 24.32 pm/℃和 25.52 pm/℃,分别为封装固化前的 2.25 倍和 2.42 倍。固化后温度灵敏度存在差异主要原因是封装过程中环氧树脂涂覆层厚度不一致。对比实验发现:两支 FBG 通过环氧树脂的固化封装后,其温度灵敏度有一定变化;在 30 ℃变化范围内,其波长最大差值仅为 36 pm。故传感器在 10 ℃~40 ℃温度范围内实现了温度自补偿,能够满足实验测量要求。

4.3 传感器电压测量实验

4.3.1 传感器量程实验

光源发出的光经信号隔离器后由耦合器进入到 FBG,光被反射后经耦合器传至光谱仪,实时监测 FBG 的反射输出中心波长,经信号处理后记录其反射光谱数据。采用精密直流电源作为电压输入装置,利用高精度电压计作为电压监测装置,从 0 开始,通过调节器给高压电极施加直流电压,记录下施加的电压值和对应电压下双 FBG 的输出光谱数据,直至高压电极开始出现放电现象。发现在施加电压为 24.6 kV 时电极间开始放电,传感器将不能实现正常电压测量,从而确立了该电压传感器的最高测量电压 24 kV。根据实验施加的电压和测量的双 FBG 中心波长,可以得到不同电压下双 FBG 的输出光谱图,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着施加电压的增加,FBG1 和 FBG2 的光谱沿着相反的方向发生偏移,其偏移程度随电压的增加而递增。当电压 U 为 0 时,如图 8(a)所示双 FBG 的中心波长为 1549.980 nm,中心波长差值 $\delta\lambda$ 为 8 pm;电压 U 为 10 kV 和 24 kV 时,如图 8(b)所示,10 kV 时中心波长差值 $\delta\lambda$ 为 237 pm,24 kV 时中心波长差值 $\delta\lambda$ 为 1380 pm。

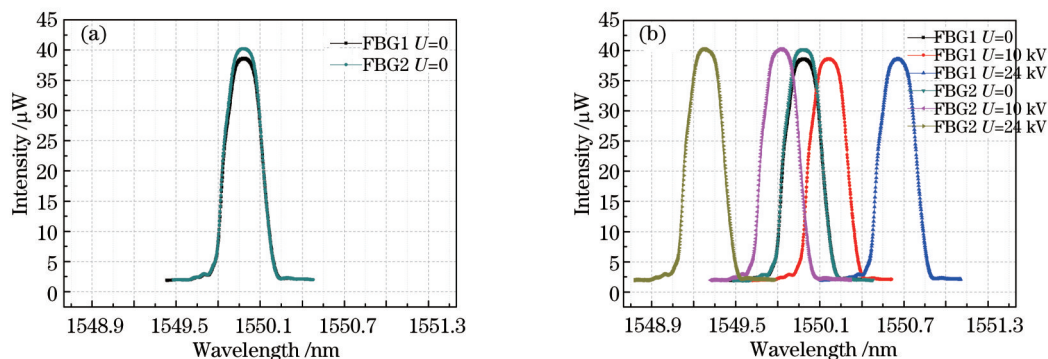


图 8 不同电压下 FBG1 和 FBG2 光谱图

Fig.8 Spectra of FBG1 and FBG2 under different voltages

4.3.2 电压传感器标定

(7)式给出了中心波长差值与外施电压的关系,但实际应用中计算复杂。因此需要对传感器进行标定,以得到中心波长差值与施加电压的解析关系式。选用精度等级为 0.5% 的电压计作为标准器具,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,标定步骤:1)以 600 V 的等间距对全量程 0~24 kV 进行划分;2)根据传感器量程分点情况,由小到大逐渐增加外施电压,同时通过光谱仪记录双 FBG 光谱的中心波长数据和外施电压值;3)将外施电压由大到小逐渐减下来,同时记录对应中心波长数据和外施电压值。对传感器进行多次正、反行程往复循环测试。

实验过程中当环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在传感器所测量的量程范围内,按标定流程对传感器进行多次实验。由(7)式和实验数据可以看出中心波长差值与电压是非线性关系,因此采用非线性二次多项式对数据进行拟合,取标定过程中不同温度下的两组测量数据对其进行非线性拟合,得到中心波长差值 $\delta\lambda$ 与施加电压 U 的关系曲线如图 9 所示。

通过上述过程得到拟合方程为 $\delta\lambda=2.423U^2-0.625U+0.576$,拟合度为 0.99985,这保证了传感器可以拥有较好的测量精度。经多次实验表明,该等应变梁电压传感器实验重复性好,可实现 5~24 kV 的直流高压和交

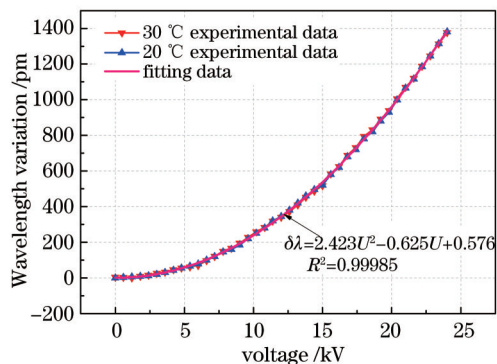


图9 电压传感器实验标定结果

Fig. 9 Results of the voltage sensor experiment

流高压有效值的测量,其计算精度在5~12 kV时为2.1%,12~24 kV时为0.89%。

4.4 电压加载温度影响实验

为了验证电压加载实验过程中双FBG设计的温度补偿效果,当室内温度为5 °C、10 °C、20 °C和30 °C时,分别利用传感器进行电压加载实验,在0~24 kV范围内,每600 V设置一个测量点,每种温度条件下各进行3次实验,取其均值得到双FBG的中心波长差值 $\delta\lambda$ 变化值与施加电压的关系,实验结果如图10所示。由图可知当温度为5 °C~30 °C时,传感器温度补偿效果良好,双FBG的中心波长差值 $\delta\lambda$ 变化范围在 ± 10 pm以内,由于实验中使用的光栅解调仪的误差为 ± 10 pm,因此,该实验误差在较大程度上是由解调仪精度不高和环境温度波动所致。

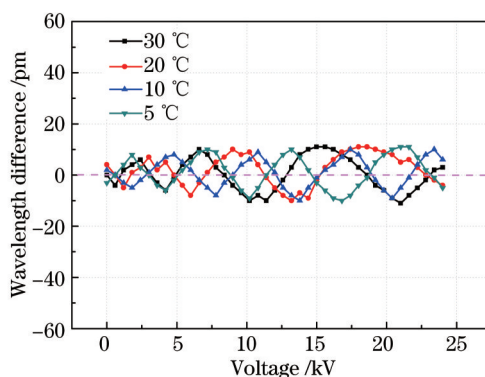


图10 不同温度下的波长差对比变化

Fig.10 Contrast variation of wavelength difference versus temperature

5 结 论

根据静电力原理和弹性力学理论,设计和制备了基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器,可用于高压测量。在一定温度范围内,由双FBG的结构方案实现了传感器的温度自补偿。根据静电力和弹性力学方程获得双FBG的中心波长差值与施加电压的关系,同时通过对等应变梁仿真分析和传感器的电场仿真,优化设计和制备了传感器的结构系统。由高压实验验证了理论结果,实验结果表明该传感器可实现5~24 kV直流高压和交流高压有效值的测量,并在5~12 kV和12~24 kV测量范围内分别获得2.1%和0.89%的计算精度,传感曲线拟合度可以达到0.99985,能够满足高压静电测量的要求,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Koin Kawamura, Saburo Sakamoto, Fumitoshi Noto. Design and development of new electrostatic voltmeter using strain gauge [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1989, 25(3): 563-568.
- 2 Peter Tant, Bruno Bolsens, Tom Sels, *et al.*. Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter [J]. IEEE Transaciton on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(4): 1459-1464.

- 3 Tao Zhu, Zhixiang Ou, Meng Han, *et al.*. Propylene carbonate based compact fiber Mach-Zehnder interferometric electric field sensor [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(10): 1566-1572.
- 4 Regina Célia da Silva Barros Allil, Marcelo Martins Werneck. Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(6): 2118-2125.
- 5 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Optical voltage transducer based on modular interference in highly elliptical-core polarization-maintaining fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29(1): 219-223.
刘 丰, 毕卫红, 郭 璇. 基于椭圆芯保偏光纤模间干涉的光学电压互感器[J]. *光学学报*, 2008, 29(1): 219-223.
- 6 Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1306-1313.
- 7 Hui Li, Liyang Cui, Zhili Lin, *et al.*. Signal detection for optical AC and DC voltage sensors based on pockels effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(6): 2245-2252.
- 8 Li Changsheng. Linear electrooptic and electrogyration intensity modulation using crystalline quartz [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123002.
李长胜. 利用石英晶体的线性电光和电致旋光强度调制[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0123002.
- 9 Ni Kai, Xu Haisong, Dong Xinyong, *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating tilt sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2104-2107.
倪 凯, 徐海松, 董新永, 等. 基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2104-2107.
- 10 Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306004.
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度传感器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306004.
- 11 Zhang Weichao, Zhao Hong, Liu Tong, *et al.*. Acoustic detection technology based on fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer in liquid medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906001.
张伟超, 赵 洪, 刘 通, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的液体介质声波检测技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906001.
- 12 Qu Li, Meng Yu, Zhuo Zhongchang, *et al.*. Study on delay and dispersion characteristics of the fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0806001.
屈 丽, 孟 瑜, 卓仲畅, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗延时腔和色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0806001.
- 13 Liu Xijing, Yang Dewei, Yu Jia, *et al.*. Quasi-reciprocal reflective digital closed-loop optical voltage sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0205002.
刘汐敬, 杨德伟, 于 佳, 等. 准互易反射式数字闭环光波导电压传感器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0205002.
- 14 W R Smythe, Dai Shiqiang. *Static and Dynamic Electricity* [M]. Beijing: Science Press, 1981.
斯迈思, 戴世强. *静电学和电动力学*[M]. 科学出版社, 1981.
- 15 Yong Zhao, Qingyao Meng, Kun Chen. Novel current measurement method based on fiber Bragg grating sensor technology [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 126(1): 112-116.

栏目编辑: 王晓琰