

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.005

# 基于 CCD 解调的光纤光栅电压传感器\*

王凤钧<sup>1</sup> 罗志会<sup>2</sup> 陈 思<sup>2</sup> 郭丰羽<sup>1</sup> 潘礼庆<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学理学院 宜昌 443002)

**摘要:**电能质量的好坏直接影响用电设备和电力系统能否正常运行,精确测量电压幅值和频率是分析电能质量的关键。提出了一种基于 CCD 解调的光纤光栅(FBG)电压传感器,利用压电陶瓷的逆压电效应改变粘贴在压电陶瓷上的 FBG 波长,采用 CCD 模块实时解调 FBG 波长的变化,提取被测电压的幅值和频率信息。理论分析了加载电压与光栅波长变化的关系,搭建了带温度补偿的传感系统,实验研究了传感器的静态、动态特性。实验结果表明,该传感器的线性拟合度为 0.995,非线性误差为 2.998%,电压灵敏度达到 8.47 pm/V,能较好检测正弦电压的频率以及谐波信息,这在复杂环境评估电能质量提供了参考。

**关键词:** CCD 解调;FBG 传感器;压电陶瓷;电压测量

**中图分类号:** TM933.2;TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Fiber grating voltage sensor based on CCD demodulation

Wang Fengjun<sup>1</sup> Luo Zhihui<sup>2</sup> Chen Si<sup>2</sup> Wu Fengyu<sup>1</sup> Pan Liqing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Science, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The power quality affects the normal operation of electrical equipment and power system directly. Accurate measurement of voltage amplitude and frequency is a prerequisite for the analysis of power quality. In this paper, a fiber Bragg grating(FBG) voltage sensor based on CCD demodulation is proposed. Using the inverse piezoelectric effect of piezoelectric ceramics to change the wavelength of the FBG attached to the piezoelectric ceramic, the purpose of detecting the voltage is achieved. The relationship between the voltage and the wavelength of grating is analyzed theoretically. The experiments show that the non-linear error is 2.998% and loaded voltage sensitivity of the sensor is 8.47 pm/V, which can detect the waveform of the voltage below 50 Hz. This method provides a reference for assessing the power quality in complex environments.

**Keywords:** CCD demodulation; FBG sensor; piezoelectric ceramics; voltage measurement

## 0 引 言

随着电力系统的发展以及特高压为特征的智能电网的建设,电力系统的电压等级不断提高,而传统的电磁式电压传感器,由于其自身存在体积大,实时性差,动态范围小,造价高以及电磁干扰等问题,已经很难满足电力系统对于实时在线监测、高精度故障判断以及电力系统数字化和智能化发展的需求。近年来,基于光纤传感技术

的电压<sup>[1-6]</sup>和电流传感器<sup>[7-8]</sup>相继出现,相比于传统的电压传感器,光纤电压传感器具有重量轻、动态范围大、灵敏度高、电气绝缘性能好以及不受周围磁场干扰等优点<sup>[9]</sup>,成为研究的热点。

现有的光纤电压传感器多采用光纤光栅(FBG)作为载体,将 FBG 粘贴在压电陶瓷上,利用压电陶瓷的逆压电效应<sup>[10]</sup>带动 FBG 的伸缩,通过检测波长漂移量来获取电压,但大多数传感器设计复杂,实用化困难。钟丽娜等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于压电陶瓷的高灵敏度光纤光栅电

压传感器,采用机械式光谱仪检测波长变化,体积大实时性差,不适合现场测试;彭李等人<sup>[12]</sup>设计了一种叠堆型压电陶瓷 FBG 电流传感器,将待测的大电流通过取样电阻转换成电压,再检测压电陶瓷上的低压直流信号来计算电流,但无法采集电流的波形信息;Allil 等人<sup>[13]</sup>设计了一种用于 13.8 kV 级 FBG 高压传感器,研究了电压和 FBG 波长变化的关系,但没有对正弦电压的波形和频率做深入的研究;Ribeiro 等人<sup>[14]</sup>采用光栅调谐法解调传感器上的电压信息,但该方法每次测量前都需要重新运行算法,以获得最佳的解调点。

基于上述检测方法存在的问题,本文提出一种基于电荷耦合器(CCD)解调的 FBG 电压传感器,采用体光栅对 FBG 的反射信号进行色散,CCD 成像后实时提取波长变化,在光路中接入温度补偿光栅,消除环境温度的影响。本文从理论上分析电压检测的可行性,搭建实验系统,同时对多点的电压幅值和波形进行检测和分析,达到评估电能质量的目的。

## 1 工作原理

为了保证压电陶瓷上的形变有效传递给光纤光栅,在压电陶瓷的两端垂直于轴线平行粘贴有机玻璃,并剥掉光栅区附近粘接处的包层,采用环氧树脂胶将裸光纤区固定在矩形压电陶瓷正上面的两端,用 100 N 的力将光纤预拉伸,如图 1 所示,此时,可认为 FBG 的应变与压电陶瓷的应变基本一致的。当压电陶瓷两端的应变变化时,压电陶瓷会产生轴向应变,并有效传递到 FBG 上,改变 FBG 的峰值波长。

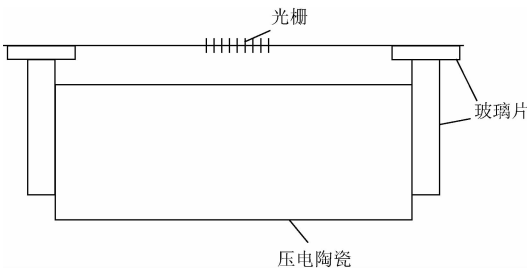


图1 传感探头结构

Fig. 1 Schematic diagram of sensing probe structure

当光纤光栅受外界因素影响时,例如温度和应变,将引起光纤 Bragg 光栅的波长漂移。外界环境中温度和应变引起的波长漂移  $\Delta\lambda_B$  由下式决定:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\varepsilon \quad (1)$$

式中:等号右边第 1 项为温度效应,  $\alpha$  为光纤材料的热膨胀系数,  $\xi$  为光纤的热光系数,  $\Delta T$  为周围环境温度的变化;第 2 项为 FBG 的应变系数,  $P_e$  为有效弹光系数,  $\varepsilon$  为

光纤的轴向应变。

当压电陶瓷上加载电压后,压电陶瓷会发生轴向形变,由压电陶瓷的机电方程<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\Delta L}{L} = d_{ij}E \quad (2)$$

式中:  $\frac{\Delta L}{L}$  是陶瓷元件长度的相对变化量,  $E$  是施加到压电陶瓷电极的电场,  $d_{ij}$  是压电应变常数,  $i$  和  $j$  分别是电场强度和机械位移方向。

压电陶瓷所加载电压的电场强度是:

$$E = \frac{U}{d} \quad (3)$$

式中:  $U$  是输入电压,  $d$  是压电陶瓷的厚度。

在工程应用中,环境温度随时可能发生变化,而 FBG 本身对温度非常敏感,需要采用温度补偿措施来减少或消除温度的影响。传感器设计时,在测量光栅 FBG1 旁串联一个波长相近、制作材料相同的 FBG2 作为参考光栅,使 FBG2 处于非受力状态,只受温度的影响。设测量光栅 FBG1 与参考光栅 FBG2 的波长分别为  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$ , FBG1 同时受到应变和温度的影响, FBG2 只受温度的影响,由式(1)得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = K_T\Delta T + K_e\varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = K_T\Delta T \quad (5)$$

其中,  $K_T = \alpha + \xi$ ,  $K_e = 1 - P_e$ 。

由式(4)和(5)得到应变  $\varepsilon$  为:

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) / K_e \quad (6)$$

当  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$  接近时,由于两个光栅的波长变化较小,令  $\lambda_{B1} \approx \lambda_{B2} = \lambda_B$ , 式(6)可以简化为:

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} \right) / K_e \quad (7)$$

令  $\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}$ , 联立式(2)、(3)和(7)可知,光栅的波长差变化与压电陶瓷两端电压的关系为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)d_{ij}\lambda_B \frac{U}{d} \quad (8)$$

式(8)表明,在压电陶瓷的厚度、应变常数确定的情况下,传感器的电压与两个光栅之间的波长变化量之差具有线性关系,两个光栅的静态布拉格波长越接近,误差越小。

## 2 实验装置及结果分析

实验装置的光源为宽带光源(ASE),连续的自发辐射光经 3 端口光环行器进入 FBG 电压传感器串行阵列,经过多个电压传感器反射后,再进入环形器,到达 CCD

解调模块,完成波长解调和信息处理。其中,ASE 光源工作谱宽在 1 525 ~ 1 565 nm,输出功率 10 mW,光谱起伏度小于 5%。在波分复用(WDM)光纤光栅传感系统中,单个光栅的动态工作带宽约为 2 nm,则系统最大可以满足 20 个光栅的复用。实验装置构建如图 2 所示,FBG 电压传感器 1 由测量光栅 FBG1 和参考光栅 FBG2 组成,在 FBG1 反射后,透射光到达 FBG2,再经过 FBG2 反射,透射光继续入射到下个 FBG 电压传感器中,在光功率预算足够的情况下,可以复用  $n$  个电压传感器。

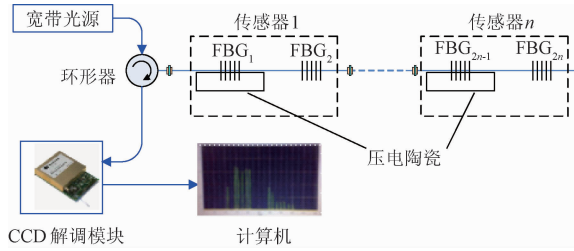


图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

由于 FBG 采用 WDM 复用技术,每个 FBG 的反射光不会产生相互影响,经过环形器进入体光栅衍射分光后,不同的波长打在 CCD 探测器的不同位置,通过可编程阵列(FPGA)采集和处理后,再由 USB 将解调后的波长差信息上传到用户终端。CCD 解调模块的工作频率高达 5 000 Hz,即每秒钟可以解调 5 000 帧 CCD 的波长信息,根据奈奎斯采用定律,该解调仪可以无失真解调 1 kHz 以下波长的变化信息。当压电陶瓷上加载直流电压时,根据检测到的波长差信息,直接计算出电压幅值;而当测量的是交流电压时,除了根据 FBG 波长差的变化计算出峰值电压外,还可以通过对波长差信号进行快速傅里叶变换(FFT),获取电压信号的频率及谐波信息。

鉴于传感器 1 与传感器  $n$  具有完全相同的工作机理,在下面的实验中,重点对单个 FBG 电压传感器进行分析。

### 2.1 直流电压检测分析

实验中使用的叠堆型压电陶瓷由 150 片压电陶瓷叠堆而成,压电应变常数为  $d_{31} \geq 650$  pC/N,尺寸为 30 mm × 10 mm × 10 mm,测量光栅 FBG1 的波长为 1 536.019 nm,传感光栅 FBG2 的波长为 1 534.125 nm,光纤的有效弹光系数为  $P_e = 0.22$ 。由式(8)理论计算得到两个光纤 Bragg 光栅的波长偏移量差与压电陶瓷两端所加电压的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{U} = 11.68 \text{ pm/V}$$

实验过程中,采用直流稳压源给压电陶瓷施加电压,经温度补偿后,CCD 解调仪提取不同电压对应的测量光栅波长值。为了保证压电陶瓷伸长量的有效传递,给测

量光栅 FBG1 施加预拉力。当外加电压为 0 V 时,测得 FBG1 的波长为 1 536.169 nm。在室温条件下,通过直流稳压源控制压电陶瓷上的施加电压在 0 ~ 150 V 变化,电压的增量 10V,测得 FBG 波长差与电压的线性关系曲线如图 3 所示。

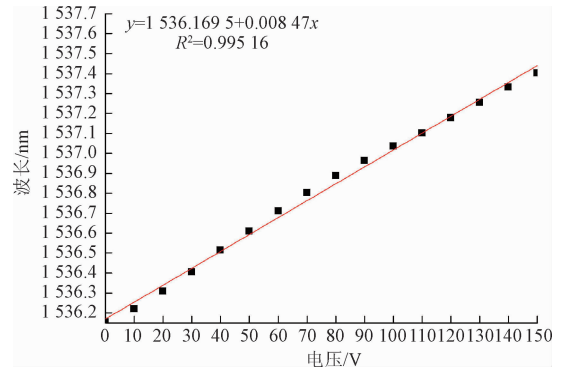


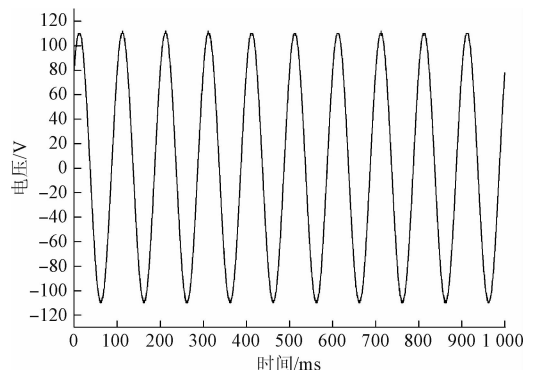
图 3 外加电压与 FBG 波长的关系曲线

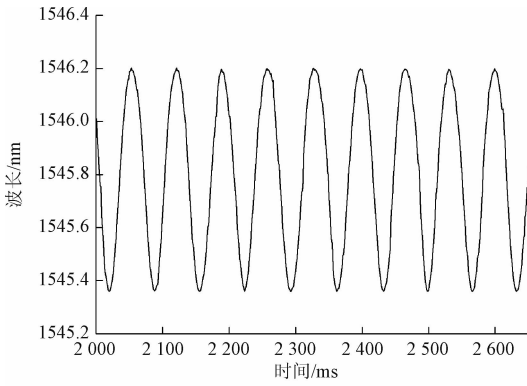
Fig. 3 The curve of the relationship between the loaded voltage and the FBG wavelength

由图 3 可见,外加电压与测得的 FBG 波长差具有线性关系,采用 Origin 软件进行拟合后,FBG 电压传感器的线性拟合度为 0.995,非线性误差为 2.998%,电压灵敏度为 8.47 pm/V。实测值比理论分析的灵敏度略低,主要原因是在粘贴 FBG 时环氧树脂胶的蠕动,以及压电陶瓷堆叠片在受力情况下,位移传导失真所致。

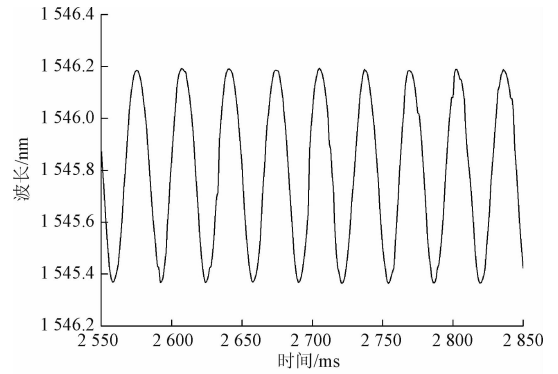
### 2.2 交流电压检测分析

采用压电陶瓷专用的驱动装置产生正弦电压信号,通过示波器观察所施加的正弦波形,同时观察 FBG 电压传感器的波长信息。当施加的正弦电压信号幅值在 110 V 时,改变其工作频率,观察输出的波长信息。图 4 ~ 6 是频率分别在 10、20 以及 50 Hz 情况下分别用示波器观察到所施加的正弦电压信号和 CCD 解调的 FBG 波长输出信号。受压电陶瓷专用的驱动装置频率特性的限制,当电压信号的频率高于 50 Hz 时,激励信号波形发生失真,故未讨论 50 Hz 以上的检测效果。

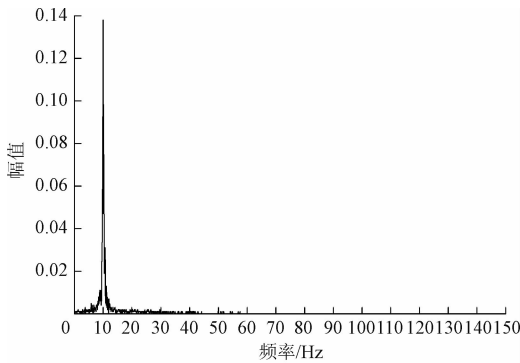
(a) 示波器显示的波形  
(a) The displayed waveform by oscilloscope



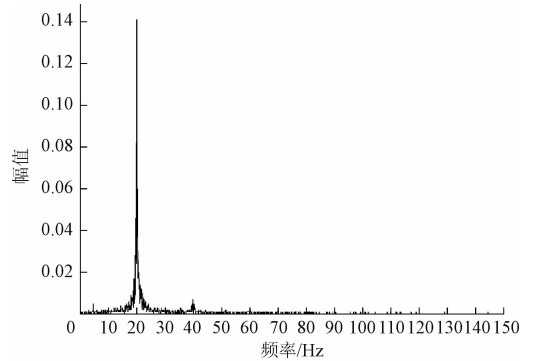
(b) FBG波长信号的波形  
(b) The waveform of FBG wavelength



(b) FBG波长信号的波形  
(b) The waveform of FBG wavelength



(c) FBG波长信号的频域  
(c) The frequency spectrum of FBG wavelength



(c) FBG波长信号的频域  
(c) The frequency spectrum of FBG wavelength

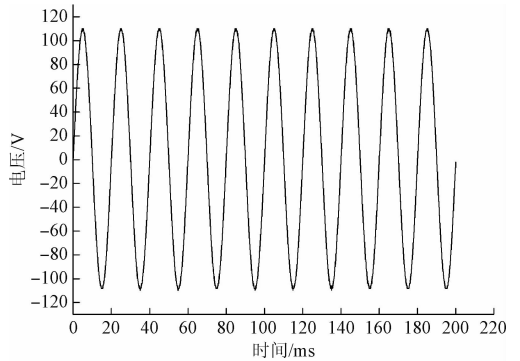
图4 频率为10 Hz的正弦电压

Fig.4 The sinusoidal voltage of frequency 10 Hz

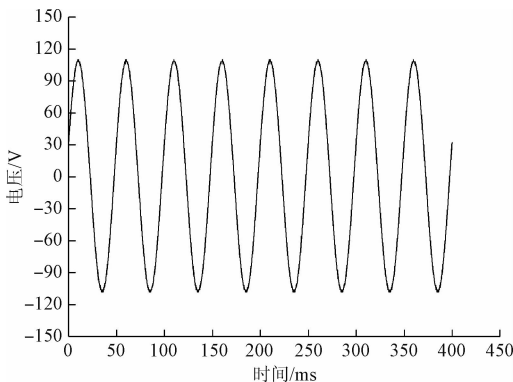
图5 频率为20 Hz的正弦电压

Fig.5 The sinusoidal voltage of frequency 20 Hz

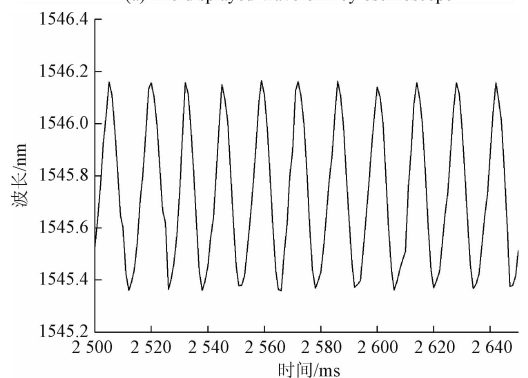
对比分析图4~6可知,激励电压波形周期(采用示波器采集)分别为100,50以及20 ms,对应的频率分别为10,20以及50 Hz,与CCD模块解调FBG波长差的波形频率相吻合。在50 Hz以下的低频段,边谱信号很小,输入电压信号与输出波长信号的相位与频率严格吻合;当待测信号频率接近50 Hz时,由于电源工频干扰的影响,FBG传感器解调输出的谱形中噪声幅度有所增加。



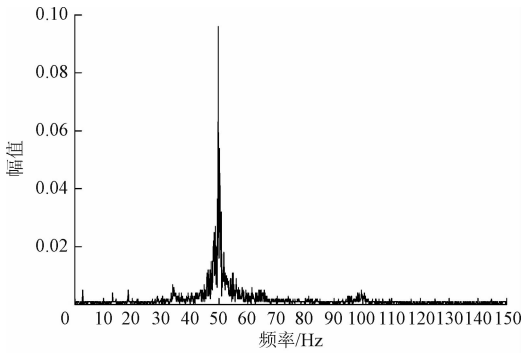
(a) 示波器显示的波形  
(a) The displayed waveform by oscilloscope



(a) 示波器显示的波形  
(a) The displayed waveform by oscilloscope



(b) FBG波长信号的波形  
(b) The waveform of FBG wavelength



(c) FBG波长信号的频域  
(c) The frequency spectrum of FBG wavelength

图 6 频率为 50 Hz 的正弦电压

Fig. 6 The sinusoidal voltage of frequency 50 Hz

鉴于压电陶瓷的耐压值可以达到 1 000 V, 谐振频率点高于 2 kHz, 具备检测 1 000 V、1 kHz 以下电压的能力, 这为检测电压信号中的中低频谐波信息提供了方便, 非常有利于分析复杂环境中的电能质量。

### 3 结 论

本文研究了一种基于 CCD 解调的 FBG 电压传感器, 理论分析了温度补偿型 FBG 传感器的检测原理, 从直流和交流两个方面开展了实验研究。研究发现, 该传感器电压幅值和输出波长具有良好的线性关系, 能精确地测量到正弦电压信号的频率信息, 可以有效分析评估电能的质量, 为开发多功能、小型化的电压传感器仪表提供了可能。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] DANTE A, BACURAU R M, SPENGLER A W, et al. A temperature-independent interrogation technique for FBG sensors using monolithic multilayer piezoelectric actuators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(11): 2476-2484.
- [ 2 ] RIBEIRO B A, WERNECK M M, DE NAZARÉ F B V, et al. A Bragg grating tunable filter based on temperature control system to demodulate a voltage sensor [ C ]. International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24), 2015: 963444-963444-4.
- [ 3 ] FUSIEK G, NIEWCZAS P. Laboratory investigation of an intensimetric dual FBG-based hybrid voltage sensor[C]. International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24), 2015: 96341H-96341H-4.
- [ 4 ] HATTA A M, SEMENOVA Y, RAJAN G, et al. A voltage sensor based on a singlemode-multimode-singlemode fiber structure [ J ]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(8): 1887-1890.
- [ 5 ] 李丹丹, 陈信伟, 贺胜男, 等. 基于迈克耳孙干涉技术的光学电压传感器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015(7):83-87.  
LI D D, CHEN X W, HE SH N, et al. Research on optical voltage sensor based on michelson interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015(7):83-87.
- [ 6 ] CHEN X, HE S, LI D, et al. Optical fiber voltage sensor based on michelson interferometer using phase generated carrier demodulation algorithm [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(2): 349-354.
- [ 7 ] DE NAZARÉ F V B, WERNECK M M. Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 100-109.
- [ 8 ] CREMONEZI A O, FERREIRA E C, DIAS J A S. A fiber Bragg grating RMS current transducer based on the magnetostriction effect using a Terfenol-D toroidal-shaped modulator[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 683-690.
- [ 9 ] WANG P, SEMENOVA Y, WU Q, et al. A fiber-optic voltage sensor based on macrobending structure [ J ]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(5): 922-925.
- [ 10 ] CHENG C H, CHENG K L, LIU W F. A reactive power sensor based on fiber Bragg grating and a piezo - electric transducer [ J ]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(7): 1692-1696.
- [ 11 ] 钟丽娜, 孙洪雷. 基于压电陶瓷的高灵敏度光纤光栅电压传感器[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(1):106-109.  
ZHONG L N, SUN H L. High sensitivity fiber Bragg grating sensor for voltage measurement based on piezoelectric ceramic[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2008, 22(1):106-109.
- [ 12 ] 彭李, 王振, 吴晟, 等. 叠堆型压电陶瓷 FBG 电流传感器[J]. 压电与声光, 2014, 36(2):210-213, 216.  
PENG L, WANG ZH, WU Y, et al. An FBG current sensor based on stack piezoelectric ceramic [ J ]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(2): 210-213, 216.
- [ 13 ] ALLIL R C S B, WERNECK M M. 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.
- [ 14 ] RIBEIRO B DE A, WERNECK M M, DA SILVA-NETO J L. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4): 1259-1264.

- [15] CHENG C H, LAI L H, LIU W F. Noise sensor based on a fiber Bragg grating and a Piezo-electric transducer[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(4): 958-961.

作者简介



王凤钧,1991 年出生,现为三峡大学电气与新能源学院硕士研究生,主要研究方向为光电传感及信号处理。  
E-mail: 382920807@qq.com

**Wang Fengjun** was born in 1991. He is a M. Sc. candidate in College of Electrical

Engineering and New Energy, Three Gorges University. His main research interest is photoelectric sensing and signal processing.



罗志会,1975 年出生,现为三峡大学副教授,研究生导师。主要研究方向为光纤光栅传感技术及应用和磁电传感系统开发。  
E-mail: zhihui\_luo@126.com

**Luo Zhihui** was born in 1975. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor in Three Gorges University. His main research interests include fiber Bragg grating sensing technology and application, and development of magnetoelectric sensing system.