

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206071

压电执行器与应变计复合的电压传感器*

黄子军 卞雷祥

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:将压电陶瓷执行器与悬臂梁式应变传感器通过纵-弯转换机械结构复合,设计了一种“电压-力-应变”转换的新型电压传感器。压电陶瓷执行器与弹性悬臂梁结构“T形”连接构成纵-弯转换结构,将压电执行器在电压作用下产生的纵向应力/应变转换为悬臂梁的弯曲应力/应变,实现应力/应变的纵向-弯曲转换。布置在弹性悬臂梁结构上下两侧的4个电阻应变片组成惠斯通电桥电路,实现对悬臂梁弯曲应力/应变的测量。高电压强电侧和力敏感的弱电侧之间的机械转换设计,保证了高度电气隔离。建立了传感器“电压-力-应变”转换物理模型并通过有限元仿真进行了验证。制备了传感器样机,测试结果表明,量程0~5 000 V,灵敏度为0.01 $\mu\text{V}/\text{V}$,非线性误差1.83%,分辨率30 V。

关键词: 高电压传感器;压电执行器;悬臂梁;电气隔离

中图分类号: TM933.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Piezoelectric actuator and strain gauge composited voltage sensor

Huang Zijun Bian Leixiang

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A voltage-force-strain conversion novel high voltage sensor is designed by combining the piezoelectric ceramic actuator with a cantilever beam strain transducer through a longitudinal-bending conversion mechanical structure. The piezoelectric ceramic actuator is T-connected with the elastic cantilever beam structure to form the longitudinal-bending conversion structure, which converts the longitudinal stress/strain generated by the piezoelectric actuator under the action of voltage into the bending stress/strain of the cantilever beam, and the longitudinal-bending conversion of stress/strain is realized. Four resistive strain gauges are placed on the upper and lower sides of the cantilever beam to form a Wheatstone bridge circuit and the bending stress/strain of cantilever beam is measured. The mechanical conversion design between the strong electricity side of the high voltage and the weak electricity side of the force sensitive ensures a high degree of electrical isolation. The physical model of voltage-force-strain conversion of the sensor is established and verified by finite element simulation. The prototype device is fabricated, and the test results show that the measurement range of the sensor is 0~5 000 V, the sensitivity is 0.01 $\mu\text{V}/\text{V}$, the nonlinearity error is 1.83%, and the resolution is 30 V.

Keywords: high voltage sensor; piezoelectric actuator; cantilever beam; electrical isolation

0 引言

在科学研究实验以及工业技术领域中常需要进行电压测量,如电力电子系统的电机控制^[1]、电源管理^[2],电磁、激光、微波等大功率设备的电参数监测等^[3-5]。传统的高电压测量设备如电磁式电压互感器,电阻、电容或阻

容式分压器等通过将高电压成比例的转换为低电压进行测量,但电磁式电压互感器存在磁芯饱和、铁磁谐振等问题,容易造成设备损害^[6];电阻、电容或阻容分压器由于其分压电阻/电容的阻值/容值易受到温度变化影响而导致分压比不准确,影响测量精度^[7-10],同时其高压侧和低压侧没有进行电气隔离,存在安全隐患^[11]。

近年来,随着先进传感技术和材料技术的发展,出现

收稿日期: 2022-12-01 Received Date: 2022-12-01

* 基金项目: 国家自然科学基金(61973165)、安徽省重点研发计划(202104g01020001)项目资助

了许多基于物理量耦合与转换的新型电压传感器,将电压转换为光学物理量(如光强^[12-15]、相位^[16-17]),力学物理量(如振动^[18-19]、位移^[20])等,通过对转换后的物理量进行测量和反演,实现对电压的测量。其中基于电光晶体 Pockels 效应^[21],压电材料逆压电效应^[22-23]等的光学电压传感器由于体积小、抗电磁干扰能力强、高电压侧与测量电路实现电气隔离等优点,被用于高电压测量中。但是,基于 Pockels 效应的电压传感器需要偏振器、波片、透镜等分立的光学元件,测量系统复杂,长期稳定性难以保证,同时传感器的测量精度受光强波动和温度的影响^[21]。基于逆压电效应的电压传感器常将压电材料与光纤光栅等器件联用^[22-25],将压电材料的形变转化为光栅的形变,导致光栅中心波长变化,并通过附加测量仪器测量光纤光栅中心波长的变化,从而实现对外加电压的测量,但是这类利用光栅检测压电材料应变的方法需要使用 Fabry-Perot 腔^[24]或布拉格计^[25]等较为复杂的光学检测仪器,成本高昂。

本文提出了一种压电执行器与应变计复合的电压传感器,将压电执行器与悬臂梁式应变传感器通过纵-弯转换机械结构复合,实现电压-力-应变转换。机械转换结构保证了高电压强电侧与力敏感弱电侧之间的电气隔离,使传感器具备大量程和高安全性;双压电执行器及双悬臂梁差分敏感结构设计使传感器的灵敏度倍增并抑制共模噪声干扰。该传感器可用于电源或大功率设备的电压监测中。

1 电压传感器原理及结构

1.1 传感器原理及设计

压电执行器与应变计复合的电压传感器结构如图 1 所示,两个反相极化的 PZT-8 压电执行器与悬臂梁弹性结构“T 形”连接构成纵-弯转换结构;在两个压电执行器的端部各有一个尺寸为 30 mm×10.8 mm×3.7 mm 的金属预紧梁与压电执行器连接,给压电陶瓷施加预紧力并将传感器敏感结构固定在绝缘基板上;其中压电预紧梁 1 为电压输入电极,悬臂梁弹性结构为接地电极。悬臂梁弹性结构为双梁结构,每根梁的尺寸为 7.5 mm×10.8 mm×1 mm,在梁的外侧加工有凹槽以减小梁的刚度。在两个梁的内侧表面应变集中处(梁根部)各粘接有 2 个电阻应变片,4 个电阻应变片组成惠斯通全桥电路。在外加输入电压 U 作用下,压电执行器由于逆压电效应沿其纵向产生的应力/应变通过纵-弯转换机械结构转换为悬臂梁的弯曲应力/应变,并导致电阻应变片的电阻发生改变,电阻应变片组成的惠斯通电桥在激励电压 U_{in} 作用下输出电压 U_{out} 也随之改变。通过检测电桥输出电压 U_{out} 的变化,便可以解算出电压 U 的大小。

该结构中,PZT-8 压电执行器为一次电压敏感结构,其尺寸为 40 mm×Ø8 mm,沿长度方向极化。由于压电陶瓷材料的电阻率 $\rho > 10^{10} \Omega\text{m}$,相对介电常数 ϵ_r 为 1 000 左右,可以计算出使用的压电执行器直流电阻大于 7 900 G Ω ,静电容约 11.1 pF,因此该结构具有极高的输入阻抗,在测试过程中对待测电源几乎没有影响。一次强电侧与二次弱电侧通过纵弯转换机械结构耦合,避免了直接电气连接,保证了二次弱电侧在高电压测量中的高安全性。压电执行器与悬臂梁耦合处的球面接触设计保证了电致伸缩力传递的对中性。整个传感器敏感结构具有高度对称性,对称布置的压电执行器可以补偿传感器由于热胀冷缩产生的应力/应变;同时,电阻应变片组成的惠斯通全桥电路形成差分敏感结构,提高传感器的灵敏度并抑制共模噪声干扰。

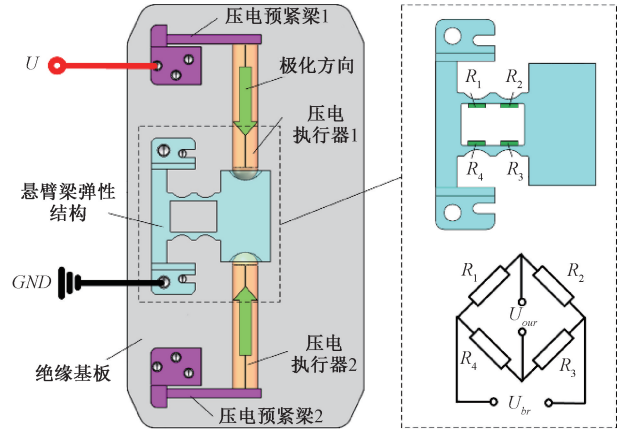


图 1 传感器敏感结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the voltage sensor

1.2 理论计算与仿真

如图 2(a) 所示,为传感器敏感结构在输入电压 U 作用下的变形示意图。当传感器受到电压 U 作用时,压电执行器 1 的伸长量为:

$$\Delta l = L \cdot \left(s_{33}^E T_3 + d_{33} \frac{U}{L} \right) = s_{33}^E T_3 L + d_{33} U \quad (1)$$

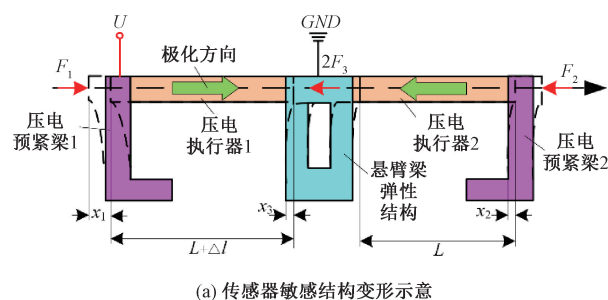
其中, L 为压电执行器 1 初始长度, T_3 为压电执行器受到的应力, s_{33}^E 和 d_{33} 分别为压电陶瓷的弹性柔顺常数和压电应变常数。在压电执行器的驱动下,沿压电陶瓷的轴向,压电预紧梁与悬臂梁之间的变形量有如下关系:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = \Delta l \\ x_2 = x_3 \end{cases} \quad (2)$$

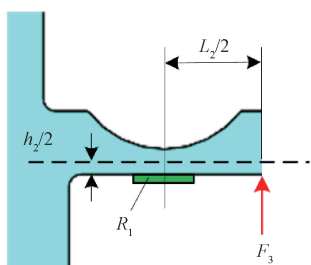
其中, x_1 和 x_2 分别为压电预紧梁 1 和压电预紧梁 2 的最大挠度, x_3 为悬臂梁的最大挠度。根据静力平衡原理,两个压电陶瓷柱受到的外力为 0,此时有:

$$F_1 + F_2 + 2F_3 = 0 \quad (3)$$

其中, F_1 、 F_2 和 F_3 分别代表压电预紧梁 1、压电预紧



(a) 传感器敏感结构变形示意
(a) Schematic diagram of the sensor sensitive structure deformation



(b) 悬臂梁弯曲应力/应变分析
(b) Bending stress/strain analysis of cantilever beam

图 2 电压作用下传感器敏感结构变形及受力分析
Fig. 2 Deformation and force analysis of the sensor sensitive structure under voltage

梁 2 和悬臂梁由于弯曲变形而施加到两个压电陶瓷上的反力,且有:

$$\begin{cases} F_1 = -k_1 x_1 \\ F_2 = k_2 x_2 \\ F_3 = k_3 x_3 \end{cases} \quad (4)$$

由于压电预紧梁和悬臂梁均可视为梁式弹簧,因此, k_1 、 k_2 和 k_3 分别为压电预紧梁 1、压电预紧梁 2 和悬臂梁的劲度系数。于是有:

$$\begin{cases} k_1 = k_2 = \frac{E_a b_1 h_1^3}{4L_1^3} \\ k_3 = \frac{E_b b_2 h_2^3}{4L_2^3} \end{cases} \quad (5)$$

其中, E_a 和 E_b 分别为压电预紧梁和悬臂梁材料的弹性模量, L_1 、 b_1 和 h_1 分别为压电预紧梁的长度、宽度和厚度; L_2 、 b_2 和 h_2 分别为悬臂梁的长度、宽度和厚度。于是,联立式(1)~(5),可以求出悬臂梁的最大挠度为:

$$x_3 = \frac{k_1 d_{33} U}{2k_1 + 2k_3} \quad (6)$$

悬臂梁的弯曲变形为横力弯曲,如图 2(b) 所示,在粘接电阻应变片处悬臂梁的弯曲应变为:

$$\varepsilon = \frac{F_3 L_2}{2E_b I_b} \Delta y = k_3 \cdot \frac{k_1 d_{33} U}{2k_1 + 2k_3} \cdot \frac{L_2}{2E_b I_b} \cdot \Delta y \quad (7)$$

其中, $\Delta y = h_2/2$ 为梁表面到悬臂梁中性层的距离。假设各电阻应变片的应变大小相等,由于采用惠斯通全

桥电路,则电路输出为:

$$U_{out} = U_{br} k \varepsilon = \frac{U_{br} k k_1 k_3 d_{33} L_2 \Delta y}{(2k_1 + 2k_3) 2E_b I_b} U \quad (8)$$

其中, U_{out} 为电桥输出电压, U_{br} 为电桥输入桥压, k 为应变片的灵敏度系数。从式(8)中可以看出,当其他参数不变时,电桥输出电压 U_{out} 是传感器输入电压 U 的一个函数。

压电预紧梁和悬臂梁均使用 6063 铝合金制作,其弹性模量 $E = 68 \text{ GPa}$,悬臂梁表面到中性层距离 $\Delta y = 0.5 \text{ mm}$;压电陶瓷 PZT-8 的压电常数 $d_{33} = 225 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。假设电桥激励电压 $U_{in} = 5 \text{ V}$,将各部分参数代入以上各式中,可以计算出传感器的输入电压 U 与电桥输出电压 U_{out} 之间的灵敏度关系曲线,结果如图 3 所示。从图中可以看出,在 0~5 000 V 的范围内,电桥输出电压变化量约 46 μV ,灵敏度约 0.009 $\mu\text{V/V}$,线性相关系数为 0.999 9,输入输出之间具有良好的线性关系。

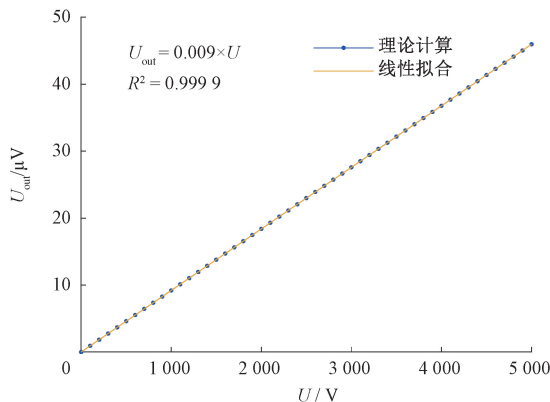


图 3 传感器理论计算灵敏度曲线

Fig. 3 The theoretical calculated sensitivity curve of sensor

使用 COMSOL 多物理场仿真软件对传感器在电压作用下的变形位移进行了有限元仿真,并根据仿真结果计算得到了传感器的灵敏度曲线,结果如图 4 所示。可以看出,在 0~5 000 V 的范围内,电桥输出电压变化量约 60 μV ,灵敏度约 0.012 $\mu\text{V/V}$ 。有限元仿真结果略大于理论计算结果,这可能是由于理论模型忽略了悬臂梁上加工的凹槽对于减小悬臂梁弯曲刚度和增大弯曲应力/应变的作用。

2 传感器的制备与测试

2.1 传感器的制备

图 5 所示为复合电压传感器及其主要敏感元件。压电陶瓷作为传感器中的一次元件,直接敏感高电压,其性能的好坏直接影响传感器的性能。通过比较不同厂家生产的 PZT-8 压电陶瓷性能,优选其中输出位移较大,滞后

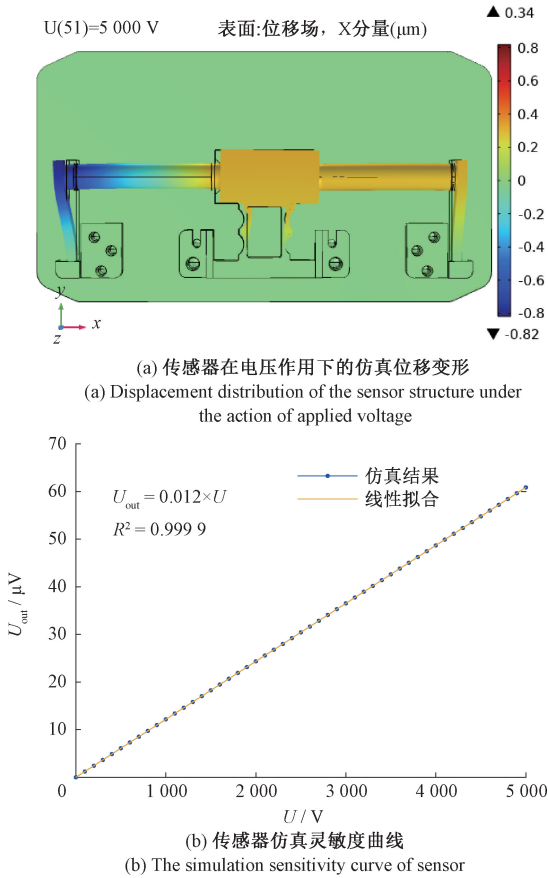


图 4 传感器敏感结构在电压作用下的有限元仿真结果

Fig. 4 The finite element simulation results of the sensor structure under the action of applied voltage

较小的压电陶瓷制作一次敏感结构。如图 5 (a) 所示, PZT-8 压电执行器由 4 个尺寸为 10 mm×Ø8 mm, 沿轴向极化的压电陶瓷串联粘接在一起, 并在压电陶瓷柱的负电极端粘接了一个半径为 4 mm 的金属球冠。如图 5 (b) 所示为悬臂梁式弯曲应力/应变敏感单元, 其整体使用 6063 铝合金加工而成, 并在悬臂梁内侧表面粘接有 4 个标称阻值 350 Ω, 灵敏度系数 $k = 2.1$ 的高精度金属电阻应变片。如图 5 (c) 所示为装配后的复合电压传感器, 其中压电预紧梁采用与悬臂梁相同的 6063 铝合金加工而成, 使用 Al₂O₃ 陶瓷加工传感器固定基板, 整个传感器敏感结构通过高绝缘性的电木外框保护起来。

2.2 实验测试系统

如图 6 所示为复合电压传感器测试系统, 主要包括高精度高压直流电源 (DL30P100, 威思曼, 西安), 电压传感器, 信号放大器 (ZFD201, 卓扬测控, 东莞), 直流供电电源, 24 bit 高精度数据采集卡 (NI 9239, National Instruments, 美国) 以及上位机等。由于电桥直接输出的

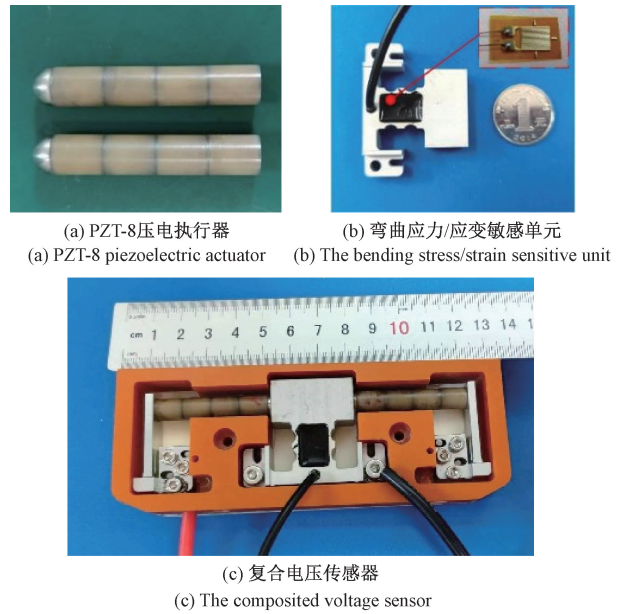


图 5 传感器及其主要敏感元件

Fig. 5 The sensor and main sensitive elements

电压信号为微伏级, 因此使用信号放大器将电桥输出的电压进行放大调理后, 再通过 NI 9239 数据采集卡采集并传输到上位机上, 其中信号放大器的放大倍数为 250 倍。使用直流供电电源给传感器及信号放大器供电, 使用高压直流电源给传感器施加待测电压。整个系统通过基于 LabVIEW 编写的上位机软件实现高压电源输出电压的自动控制以及传感器输出数据的自动采集和存储。整个测试实验均在室温和大气压力环境下进行。

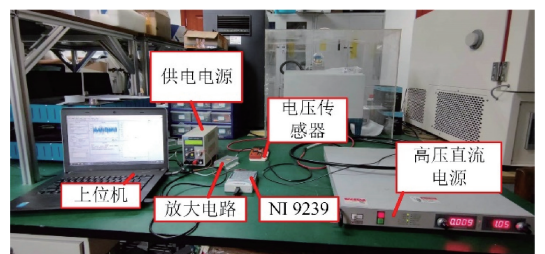
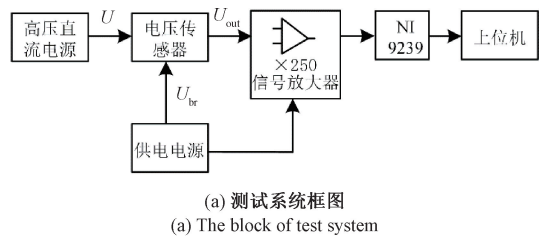


图 6 电压传感器测试系统

Fig. 6 The test system of composited voltage sensor

3 测试结果与分析

采集卡采集到的为经过信号放大器放大后的信号,将该信号根据放大倍数折算后即电桥输出电压信号 U_{out} 。如图 7 所示,为电桥输出电压 U_{out} 随外加电压 U 变化灵敏度曲线。在 0~5 000 V DC 的测试电压范围内,电桥输出电压变化了约 52 μV ,在电压上升及下降过程中的最大滞后约为 1 μV (1.92%)。

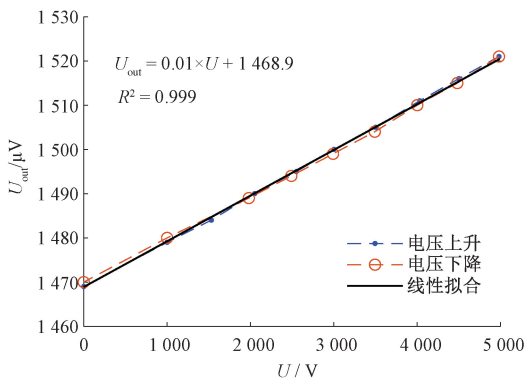


图 7 传感器输出桥压随外加电压变化曲线

Fig. 7 The output of sensor as a function of external DC voltage

对测试数据进行线性拟合,拟合结果表明灵敏度约为 0.01 $\mu\text{V}/\text{V}$,这个结果位于理论计算结果(0.009 $\mu\text{V}/\text{V}$)以及有限元仿真结果(0.012 $\mu\text{V}/\text{V}$)之间。误差可能来源于理论计算及有限元仿真中没有考虑粘接电阻应变片时使用的胶层应力/应变传递的影响;此外,材料的性能参数误差以及传感器加工和装配过程中的尺寸及位置误差也会对传感器的性能造成一定影响。根据线性拟合结果,传感器最大拟合残差为 0.95 μV ,对应非线性误差约为 1.83%。

图 8 显示了传感器对于阶梯变化直流电压的响应,可以看出,传感器能够明显的分辨出 30 V 的电压变化。

测量了传感器在室温下的零点稳定性,结果如图 9 所示,从图中可以看出在 10 h 的测试时间内传感器输出零点变化了约 0.52 μV (1% F.S)。由于传感器工作条件及环境参数如振动、温度等的改变会直接影响到传感器的稳定性,在测试传感器零点稳定性的过程中同步监测了环境温度的变化,如图 9 所示。从图中可以看出传感器零点漂移和温度相关性较大,虽然在传感器结构中考虑了温度补偿及热应力释放,但仍不能完全消除热应力影响。在后续工作中,考虑改进传感器结构,选用热膨胀系数相近的材料进行热匹配设计,减小传感器受到的热应力;同时采用神经网络算法^[26],粒子群优化算法^[27-28]等方法进行零点和温度漂移补偿,进一步提高传感器的稳定性。

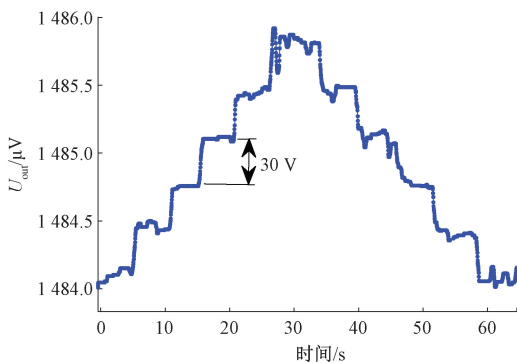


图 8 传感器对阶梯变化直流电压的响应

Fig. 8 Response of the sensor to small step changes of DC voltage

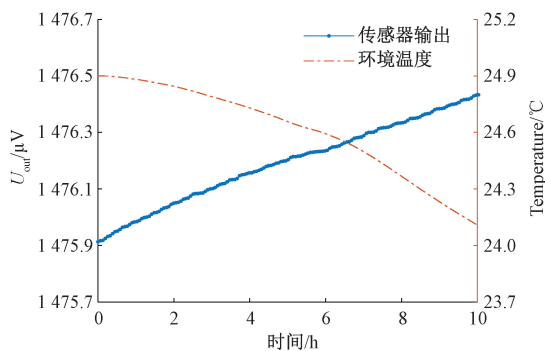


图 9 传感器零偏稳定性曲线

Fig. 9 The zero bias stability of sensor

4 结论

将压电陶瓷与悬臂梁式应变传感器通过纵-弯转换机械结构复合,设计了一种电压传感器。压电材料在电压作用下产生的电致伸缩应力/应变通过悬臂梁传递到电阻应变片上,使电阻应变片的阻值发生变化。通过测量电阻应变片组成的惠斯通电桥输出电压变化,从而实现对外加电压的测量。纵弯转换的机械耦合结构使强电侧和弱电侧相互隔离,保证了传感器的安全性和大量程。制备传感器样机进行了实验测试,测试结果表明该传感器量程 0~5 000 V,灵敏度 0.01 $\mu\text{V}/\text{V}$,最大滞后 1.92%,非线性误差 1.83%,分辨率 30 V。在后续的工作中,考虑对传感器敏感结构及其信号放大电路进行一体式绝缘封装,传感器量程有望提高到 10~15 kV 级,为高电压测量提供了一种新的解决方案。

参考文献

- [1] ONISHI D, KUMADA A, HIDAKA K, et al. Surface potential measurement of stress grading system of high voltage rotating machine coils using Pockels field sensor[C]. 2017 International Symposium on Electrical Insulating

- Materials (ISEIM). IEEE, 2017.
- [2] ARYANFAR A, TARI P H, POURGHOLI M, et al. Maximum power point tracking in small wind turbine with permanent magnet generator using voltage sensor [C]. 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG), 2019.
- [3] 张玉婷. 电磁轨道发射内弹道测速精度与初速高精度控制 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.
ZHANG Y T. Precision analysis of in-bore velocity measurement and high precision control of mazzle velocity for electromagnetic launch [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [4] 朱春燕, 王军, 马富强, 等. 基于炮尾电压的串联增强型电磁轨道炮滑动电接触特性分析 [J]. 兵工学报, 2020, 41(7):1280-1287.
ZHU CH Y, WANG J, MA F Q, et al. Analysis of sliding electric contact characteristics of series-augmented railgun based on breech voltage [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(7):1280-1287.
- [5] 胡亮灯, 赵治华, 孙驰, 等. IGBT 集电极电压高精度测量方法研究 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(6):96-106.
HU L D, ZHAO ZH H, SUN CH, et al. High-precision measurement method of IGBT collector voltage [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(6):96-106.
- [6] GAO H, YANG P W, LIU C H, et al. Analysis and simulation of ferroresonance mechanism of potential transformer based on harmonic balance method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 701(1):012071.
- [7] ZHANG Y, XIAO X, YAN X. Review of research on measurement technologies of dc high voltage [C]. 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). IEEE, 2015: 179-183.
- [8] LIU L X, CHUA S W, ANG C K. Determination of DC voltage ratio of a self-calibrating DC voltage divider [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(2):571-575.
- [9] ZHANG X, QIE J, ZHANG L, et al. High precision measurement of DC voltage ratios from 20 V/10 V to 1 000 V/10 V [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2002, 51(1):59-62.
- [10] 徐雁, 韩世忠, 彭丽, 等. 电阻式电压互感器的研究 [J]. 高电压技术, 2005, 31(12):12-14.
XU Y, HAN SH ZH, PENG L, et al. Study on the resistive voltage transformer [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12):12-14.
- [11] 李长胜, 王伟岐. 基于电致发光效应的光学电压传感器 [J]. 中国光学, 2016, 9(1):30-40.
LI CH SH, WANG W Q. Review of optical voltage sensor based on electroluminescent effect [J]. Chinese Optics, 2016, 9(1):30-40.
- [12] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):8-13.
- [13] ZHANG C, FENG X, LIANG S, et al. Quasi-reciprocal reflective optical voltage sensor based on Pockels effect with digital closed-loop detection technique [J]. Optics Communications, 2010, 283(20):3878-3883.
- [14] KUMADA A, HIDAKA K. Directly high-voltage measuring system based on Pockels effect [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1306-1313.
- [15] KURIBARA M, TAKEDA Y. Liquid-core optical fiber for voltage measurement using Kerr effect [J]. Electronics Letters, 2007, 19(4):133-135.
- [16] KOSTRITSKII S M, KORKISHKO Y N, FEDOROV V A. Optical voltage sensor based on Mach-Zehnder LiNbO3 interferometer and fibre-optical technology [C]. Third Asia Pacific Optical Sensors Conference. SPIE, 2012, 8351:818-823.
- [17] ZENG R, WANG B, YU Z, et al. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1):312-319.
- [18] HUANG Z J, BIAN L X. A differential resonant voltage sensor consisting of piezo bimorph and quartz crystal double-ended tuning fork resonators [J]. Sensors, 2019, 19(22):5031.
- [19] PENG C, YANG P, WEN X, et al. Design of a novel micromachined non-contact resonant voltage sensor for power distribution systems [C]. Sensors, 2014 IEEE. IEEE, 2014: 978-981.
- [20] SU X, XU Q, CHEN H. A new optical voltage sensor for linear measurement [C]. 2017 2nd IEEE International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM). IEEE, 2017.
- [21] LI C, CUI X, YOSHINO T. Optical electric-power sensor by use of one bismuth germanate crystal [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5):1328.
- [22] XU X, TANG J, HE L, et al. Design of a novel optical voltage sensor for ultra high voltage application [C]. Asia pacific Power & Energy Engineering Conference. IEEE, 2009.

- [23] YANG Q, HE Y, SUN S, et al. An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(10):105005.
- [24] RIBEIRO B, WERNECK M, SILVA-NETO D. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4):1259-1264.
- [25] ALLIL R, WERNECK M. Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(6):2118-2125.
- [26] ZHANG Q, TAN Z, GUO L. Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network [C]. 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, 2009.
- [27] 李玉军, 汤晓君, 刘君华. 粒子群优化算法在改善传感器稳定性中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8):1756-1762.
LI Y J, TANG X J, LIU J H. Application of particle swarm optimization algorithm in improving the stability of sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8):1756-1762.
- [28] ZHAO X, LI P, XIAO K, et al. Sensor drift compensation based on the improved LSTM and SVM multi-class ensemble learning models [J]. Sensors,

2019, 19(18):3844.

作者简介



黄子军, 2017 年于东北大学获得学士学位, 2020 年于南京理工大学获得硕士学位, 现为南京理工大学博士研究生, 主要研究方向为谐振式传感器和磁(电流)/电压传感器技术。

E-mail: zijun-huang@qq.com

Huang Zijun received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2017, M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include resonant sensing technology, and magnetic (current) / voltage sensor technology.



卞雷祥(通信作者), 分别在 2004 年和 2009 年于重庆大学获得学士学位和博士学位, 现为南京理工大学教授, 主要研究方向为敏感材料磁传感器、地下目标电磁探测与成像技术。

E-mail: lxbian@163.com

Bian Leixiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Chongqing University in 2004 and 2009, respectively. He is currently a professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include sensitive materials, magnetic sensors and electromagnetic detection/imaging of subsurface exploration.