

变压器参数对电容式位移传感器影响的研究^{*}

刘 鑫, 汪龙祺, 于 涛, 隋延林, 陈泳锟, 陈禹竺
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 在已有传感电桥电路的数学模型和噪声模型的基础上, 针对变压器参数对应用于空间引力波探测的电容式位移传感器的影响进行研究。仿真分析表明, 采用品质因数为 197、电感值为 4.4 mH 的变压器 1 和品质因数为 395、电感值为 4.37 mH 的变压器 2 时, 电桥等效输出阻抗相差约 0.5 倍, 输出电压噪声相差约 1.4 倍。在此基础上, 使用 2 种变压器进行实验。在 0.1 Hz 频点处对电路输出电压噪声和电容传感噪声进行了测量, 电路输出电压噪声分别约为 29, 24.7 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 电容传感噪声分别约为 1.1, 0.95 aF/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。电感值相近时, 采用品质因数较高的变压器 2 时, 电路输出电压噪声更低, 电容传感噪声更低。该测试结果为后续实验中提升传感器系统性能提供研究方向。

关键词: 传感器; 变压器; 低频测量; 噪声分析; 调谐

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2023)05-0049-04

Study on influence of transformer parameters on capacitive displacement sensor^{*}

LIU Xin, WANG Longqi, YU Tao, SUI Yanlin, CHEN Yongkun, CHEN Yuzhu
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: On the basis of mathematical model and noise model of the existing bridge circuit, the influence of transformer parameters on capacitive displacement sensor used for space gravitational wave detection is studied. The simulation analysis shows that when transformer 1 with quality factor of 197 and inductance value of 4.4 mH and transformer 2 with quality factor of 395 and inductance value of 4.37 mH are used, the difference of equivalent output impedance of the bridge is about 0.5 times, and the difference of output voltage noise is 1.4 times. On this basis, two transformers are used for the experiment. The output voltage noise and capacitive sensing noise of the circuit are measured at the frequency point of 0.1 Hz, the circuit output noise is 29 and 24.7 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, and the capacitive sensing noise is 1.1 and 0.95 aF/ $\sqrt{\text{Hz}}$. When the inductance value is similar, transformer 2 with higher quality factor is used, the circuit output voltage noise is lower, and the capacitive sensing noise is lower. The test results provide a research direction for improving the performance of sensor system in subsequent experiments.

Keywords: sensor; transformer; low frequency measurement; noise analysis; tuning

0 引 言

传感电桥电路是电容式位移传感器的关键组成部分, 传感器应用在微位移检测电路中, 将微小位移变化转换为电容变化, 并进行精确测量^[1,2]。杨超等人^[1]选用高精度、高分辨率电容式位移传感器作为扭摆角位移传感装置。陈炳贤等人^[2]针对加速度计前端差动电容检测的需求, 给出了一种基于电容桥的差动电容检测方法。曹志广等人^[3]研究了一种基于微分运算原理测量微小电容式传感器的电路系统。贺晓霞等人^[4]设计了基于差动电容的位移检测

电路, 建立了电容检测电路的数学模型, 并对电路误差源进行了系统分析。黄昱等人^[5]为了估计差分电容测量电路中的噪声影响, 建立了电路的噪声模型, 得出了电路的等效加速度噪声公式。任臣等人^[6]为提高电容式传感器专用集成电路的检测精度, 设计了一种三级运算放大器电路, 噪声水平为 0.21 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。高诗梦等人^[7]提出电容检测电路的噪声水平直接影响加速度计的分辨率, 变压器桥路输出阻抗越大, 电容检测电路输出噪声越小。Hu M 等人^[8]分析谐振频率和激励信号频率对输出电压噪声的影响, 并提

收稿日期: 2023-03-21

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC2200604); 中国科学院对外合作重点项目 (181722KYSB20190040)

上式中的因子 $\sqrt{2}$ 是由于差分跨阻放大电路引入的。

前端电路总输出电压噪声 V_n 如下

$$V_n = \sqrt{e_{TIA}^2 + e_{BR}^2}$$

(7)

2 变压器参数影响分析

变压器参数影响电路谐振频率、电桥电路的等效输出阻抗及输出电压噪声。变压器和其对应的电桥参数如表 1 所示。

表 1 变压器和其对应的电桥参数

参数名称	变压器 1	变压器 2
电感/mH	4.4	4.37
品质因数	197	395
耦合系数	0.97	0.97
调谐电容/pF	304.68	306.85
等效电容/pF	611.56	615.9

除表 1 中所描述参数外,标称电容 C_0 为 1.1 pF,驱动电容为 10 nF,解耦电容为 22 nF,TIA 反馈电容 3.3 pF,TIA 反馈电阻为 10 MΩ,输出电压噪声密度 e_n 为 14 nV/√Hz,输入电流噪声密度 i_n 为 1.8 fA/√Hz,激励信号频率 f 为 100 kHz,激励信号幅值 V_p 为 0.6 V_p, k_B 为 $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K, T 为 298.15 K。

谐振频率会影响输出电压噪声,因此在比较两变压器对电路的影响时,需要先调节调谐电容,将电路调整至谐振频率 100 kHz 处,以降低电路输出电压噪声^[15]。影响谐振频率的因素,除调谐电容外,还包括变压器电感值,针对不同电感值变压器,需要调节谐振电容大小,以保证谐振频率在目标频率处,降低输出电压噪声。

实际变压器桥输出阻抗实部表达式如下^[9]

$$R_{Z_{BR}} = \frac{R_L}{1 - \omega^2 K L H (2 - \omega^2 K L H (1 + (R_L / \omega L)^2))}$$

(8)

从式(8)中可见,变压器电感值和品质因数均会影响输出阻抗大小。

对参数不同的 2 种变压器,变压器 1 和变压器 2 对应的电桥电路等效输出阻抗进行仿真分析,变压器桥输出阻抗随频率变化曲线如图 4 所示。在 100 kHz 频率处,两变压器的电桥等效阻抗均达到最大值,分别为 544.6 kΩ 和 1085 kΩ,相差较大。偏离 100 kHz 频率时,阻抗会迅速下降。

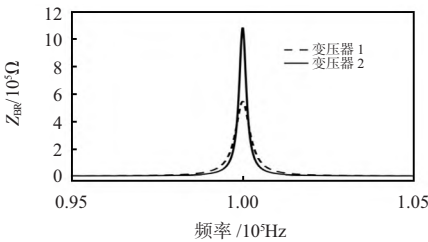


图 4 不同变压器电桥输出阻抗

TIA 反馈阻抗实部热噪声和 TIA 电压噪声中均包含

Z_{BR} 项,即二者均受变压器参数影响。因此采用不同参数变压器时,会对电路输出电压噪声产生影响。使用变压器 1 和变压器 2 时,电桥和 TIA 模块输出电压噪声大小如图 5 所示。在 100 kHz 频率处,变压器 1 的输出电压噪声为 179.8 nV/√Hz;变压器 2 的输出电压噪声为 129.2 nV/√Hz。变压器 2 的输出电压噪声更低。且噪声曲线形状有差别,变化相同频率,变压器 1 噪声变化量大于变压器 2 噪声变化量。

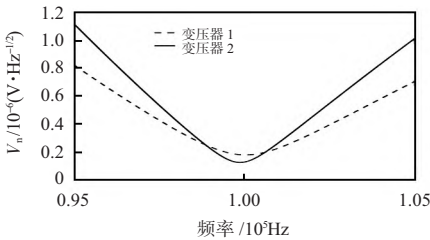


图 5 不同变压器对应的输出噪声

3 实验结果

更换不同变压器,分别在无激励信号条件下和施加 0.6 V_p,100 kHz 激励信号条件下,测试使用不同参数变压器时,电路输出电压噪声及电容传感噪声。

1) 使用变压器 1 时:无激励信号条件下,电路输出电压噪声和电容传感噪声结果如图 6(a) 和图 6(b) 所示,在 0.1 Hz 频点处,噪声约 27 μV/√Hz,电容传感噪声约 1 aF/√Hz;正弦激励信号条件下,在 0.1 Hz 频点处,噪声约 29 μV/√Hz,电容传感噪声约 1.1 aF/√Hz。

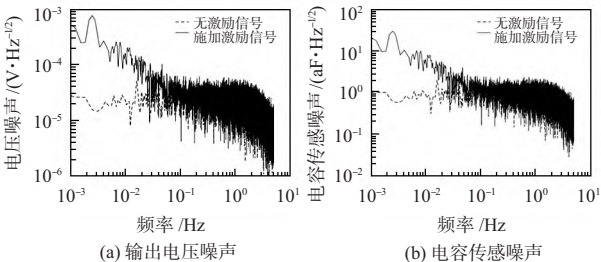


图 6 变压器 1 电路的输出电压噪声和电容传感噪声

2) 使用变压器 2 时:无激励信号条件下,电路输出电压噪声和电容传感噪声结果如图 7(a)、图 7(b) 所示,在 0.1 Hz 频点处,噪声约 20 μV/√Hz,电容传感噪声约 0.8 aF/√Hz;正弦激励信号条件下,在 0.1 Hz 频点处,电压噪声约 24.7 μV/√Hz,电容传感噪声约 0.95 aF/√Hz。

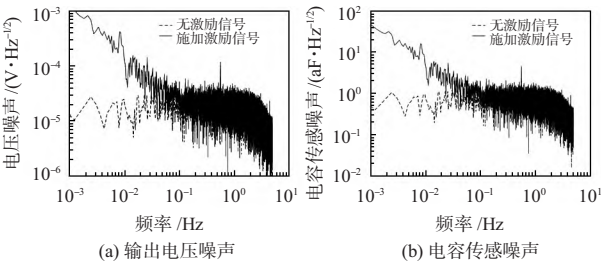


图 7 变压器 2 电路的输出电压噪声和电容传感噪声

4 结 论

对于同一变压器,施加激励信号后与无激励信号相比,0.1 Hz 以下频段,输出电压噪声升高,电容传感噪声升高。对于不同变压器,施加激励信号时,使用变压器 1 时,电路输出噪声约 $29 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$,电容输出噪声约 $1.1 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$,使用变压器 2 时,电路输出噪声约 $24.7 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$,电容传感噪声约 $0.95 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。使用变压器 2 时,噪声更低,电路性能更好。

参考文献:

- [1] 杨超,贺建武,康琦,等.亚微牛级推力测量系统设计与实验研究[J].中国光学,2019,12(3):526-534.
YANG Chao, HE Jianwu, KANG Qi, et al. Design and experimental study of sub-micro-scale thrust measurement systems[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 526-534.
- [2] 陈炳贤,宋来亮,张春熹.基于电容桥的差动电容检测方法[J].传感器与微系统,2019,38(12):116-119.
CHEN Bingxian, SONG Lailiang, ZHANG Chunxi. Differential capacitance detection method based on capacitance bridge[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(12): 116-119.
- [3] 曹志广,李冬梅,代雁冰,等.微小电容式传感器测量系统设计[J].计量与测试技术,2020,47(6):1-4,8.
CAO Zhiguang, LI Dongmei, DAI Yanbing, et al. Design of measurement circuit system for micro-capacitance sensor[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(6): 1-4, 8.
- [4] 贺晓霞,郑嵘嵘,韩丰田,等.地面静电加速度计的位移检测电路设计[J].导航与控制,2020,19(3):40-50,77.
HE Xiaoxia, ZHENG Zhengrong, HAN Fengtian, et al. Design of displacement detection circuit for electrostatically suspended accelerometer in full earth gravity[J]. Navigation and Control, 2020, 19(3): 40-50, 77.
- [5] 黄昱,王绥亮,刘强,等.加速度计充放电式差分电容测量电路噪声模型[J].传感器与微系统,2019,38(6):53-55,58.
HUANG Yu, WANG Suiliang, LIU Qiang, et al. Noise model for accelerometer charging/discharging differential capacitance measurement circuit[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(6): 53-55, 58.
- [6] 任臣,杨拥军.一种用于高精度电容传感器电路的三级运算放大器[J].半导体技术,2022,47(4):325-331.
REN Chen, YANG Yongjun. A Three-stage operational amplifier for high precision capacitance sensor circuit[J]. Semiconductor

Technology, 2022, 47(4): 325-331.

- [7] 高诗梦,王鹞,李云鹏.静电悬浮加速度计电容检测电路变压器桥路设计[J].真空与低温,2017,23(5):297-300.
GAO Shimeng, WANG Yi, LI Yunpeng. The design of transformer bridge on capacitance detection circuit of electrostatic levitation accelerometer[J]. Vacuum and Cryogenics, 2017, 23(5): 297-300.
- [8] HU M, BAI Y Z, ZHOU Z B, et al. Resonant frequency detection and adjustment method for a capacitive transducer with differential transformer bridge[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5): 055001.
- [9] MANCE D. Development of electronic system for sensing and actuation of test mass of the inertial sensor LISA[D]. Fakultet Elektrotehnike, Strojarstva i Brodogradnje, Sveučilište u Splitu, 2012.
- [10] XIE Y, FAN J, ZHAO C, et al. Modeling and analysis of the noise performance of the capacitive sensing circuit with a differential transformer[J]. Micromachines, 2019, 10(5): 325-335.
- [11] GAN L, MANCE D, ZWEIFEL P. Actuation to sensing crosstalk investigation in the inertial sensor front-end electronics of the laser interferometer space antenna pathfinder satellite[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 167(2): 574-580.
- [12] GAN L, MANCE D, ZWEIFEL P. LTP is FEE sensing channel: Front-end modeling and symmetry adjustment method[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12(5): 1071-1077.
- [13] LI Z, ZHANG X, ZOU S, et al. Design of a carrier wave for capacitive transducer with large dynamic range[J]. Sensors, 2020, 20(4): 992-1001.
- [14] BAI Y, ZHOU Z, TU H, et al. Capacitive position measurement for high-precision space inertial sensor[J]. Frontiers of Physics in China, 2009, 4(2): 205-208.
- [15] MANCE D, MARASOVIĆ J. EMC in electronic system developed to support measurements in space environment[C]//Proc of 20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2012, IEEE, 2012: 1-5.

作者简介:

刘 鑫(1997-),男,硕士,研究实习员,主要从事空间引力波探测惯性传感器方面的研究工作。

汪龙祺(1978-),男,博士,研究员,主要从事空天遥感,光电探测及微弱信号检测方面的研究工作。

(上接第48页)

- [11] VEZOCNIK M, KAMNIK R, JURIC M B. Inertial sensor-based step length estimation model by means of principal component analysis[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(10): 3527.
- [12] 潘献飞,穆华,胡小平.单兵自主导航技术发展综述[J].导航

定位与授时,2018,5(1):1-11.

作者简介:

刘 杰(1998-),男,硕士研究生,研究方向为行人导航与定位技术。

赵 辉(1992-),男,通讯作者,博士,主要研究方向为高动态导航与控制。