

## 电阻应变式位移传感器电路设计与实现\*

葛川 李朋志 徐立松 李佩玥

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所超精密光学工程研究中心 长春 130033)

**摘要:** 超精密平台中使用压电陶瓷驱动器提供位移进给,采用集成应变式位移传感器的驱动器能够减小磁滞与蠕变特性,提高位移控制精度。设计并实现应变式位移传感器位移检测电路,介绍电阻应变式位移传感器位移测量原理;设计位移传感器电路,采用仪表放大器、同相衰减器与低通滤波器电路得到正比于位移变化的电压信号并输出;最后对位移传感器电路进行实验验证。实验结果表明:设计的传感器检测电路的电噪声峰-峰值为 0.390 mV,输出电压分辨率小于 0.6 mV,对应的位移传感器的分辨可达 1 nm,能够有效提高压电陶瓷的精度。

**关键词:** 应变;位移传感器;压电陶瓷

**中图分类号:** TN721.1    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design and implement of resistance strain displacement sensor circuit

Ge Chuan Li Pengzhi Xu Lisong Li Peiyue

(Ultra Precision Optical Engineering Research Center, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Ultra-precision platform uses piezoelectric ceramic drivers to provide displacement feed. Strain gauge displacement sensor integrated drivers can be used to reduce the hysteresis and creep characteristics and improve precision of the displacement control. This paper designs and implements the displacement measuring circuit for the strain displacement sensor. The measurement principle of the resistance strain displacement sensor is introduced. Then, the displacement sensor circuit is designed, using instrumentation amplifier in-phase attenuator and low-pass filter to obtain and output voltage signal that proportional to displacement change. Finally, the experiments of the displacement sensor circuit are carried out. The experiment results indicate that the electronic noise of the sensor circuit is 0.390 mV (peak-to-peak value), and the resolution of the output voltage is less than 0.6 mV, the corresponding displacement resolution is up to 1 nm, which can effectively improve the precision of the piezoelectric ceramic.

**Keywords:** strain; displacement sensor; piezoelectric ceramic

## 1 引言

压电陶瓷驱动器(PZT)具有高分辨率、高响应频率、大推力等优点,被广泛应用于各种超精密平台中<sup>[1-2]</sup>。同时,由于压电陶瓷驱动器具有磁滞和蠕变特性使其无法以开环形式应用于精密位移控制领域如高精度移相等<sup>[3]</sup>。裘进浩等人<sup>[4]</sup>采用改进型的 Maxwell 迟滞模型对压电陶瓷进行建模以对压电陶瓷进行开环控制。郭抗等人<sup>[5]</sup>采用电容传感器与 PZT 构成闭环控制系统,提高轴向调节机构的定位精度。开环控制系统的运动控制精度取决于系统模型建立的准确性,对于复杂系统,系统与模型之间难免存在差异,从而使开环控制系统无法得到较高的控制精度;闭环控制系统虽能够实现高精度,但系统成本极高,而且对于环境需求(如激光干涉仪)

以及安装需求(如电容传感器)极为苛刻。采用电阻应变式位移传感器也称为电阻应变片(SGS)与压电陶瓷构成半闭环控制系统,其系统分辨率可达 1~2 nm。半闭环系统精度虽不如闭环系统但却远高于开环系统,同时其成本、安装需求和使用环境也易于达到。因此半闭环控制器为用户在控制精度和成本控制方面提供了折中的选择。

## 2 电阻应变式位移传感器位移测量原理

电阻应变式传感器是一种利用电阻应变效应将应变转换为电阻变化的传感器<sup>[6]</sup>,通过电阻应变式传感器可以实现如位移、力、温度等的测量。单根金属丝的电阻值  $R = \rho \frac{l}{S}$ , 式中  $\rho$  为金属丝的电阻率,  $l$  为金属丝的长度;  $S$

收稿日期:2015-03

\* 基金项目:国家重大科技专项 02 专题(2009ZX02205)

为金属丝的横截面积。对等式进行对数全微分,并以增量 $\Delta$ 代替微分得到电阻值的相应变化为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}\right) = K \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为金属丝材料的泊松比; $K$ 为金属丝的应变灵敏度系数,对于金属材料,应变灵敏度系数主要由 $(1+2\mu)$ 决定。根据式(1),电阻应变式传感器实现将应变值 $\Delta l/l$ 转换为电阻值 $\Delta R/R$ 的变化。将PZT封装于悬臂结构之内,并将电阻应变片粘贴至悬臂梁的两侧即可实现PZT伸长量即位移的测量<sup>[7]</sup>。

电阻值 $\Delta R/R$ 的变化采用惠斯通直流电桥电路检测,电桥电路如图1所示输出电压 $U_o$ 为:

$$U_o = \frac{R_2 R_1 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (2)$$

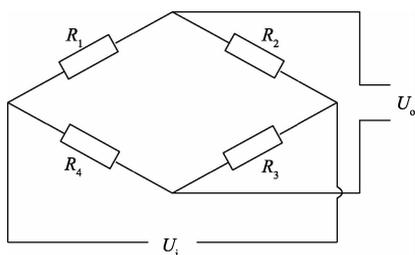


图1 惠斯通直流电桥测量电路

图中 $R_1, R_2, R_3, R_4$ 为桥臂电阻,且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 。当电桥处于平衡时, $U_o = 0$ 。当各传感器感应的应变变量分别为 $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ ,各电阻的变化量为 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ ,利用式(1)和式(2)并略去高阶项,可得输出电压 $U_o$ 为:

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{K U_i}{4} \left( \frac{\Delta l_1}{l_1} - \frac{\Delta l_2}{l_2} + \frac{\Delta l_3}{l_3} - \frac{\Delta l_4}{l_4} \right) \quad (3)$$

通过式(3)将电阻应变变量转换为电压的变化量,通过标定技术可测量输出电压转换为位移量,从而实现电阻应变片位移量的测量。

### 3 位移传感器测量电路设计

堆叠式压电陶瓷驱动器的行程一般为几十微米<sup>[8]</sup>,采

用应变式位移传感器构成闭环系统的全行程分辨率为 $1 \sim 2 \text{ nm}$ ,运动频率一般大于 $100 \text{ Hz}$ 。对应的输出电压的分辨率小于 $1 \text{ mV}$ ,同时测量系统的带宽应超过 $100 \text{ Hz}$ 。测量系统的带宽与噪声特性成反比,因此如何选择合适的系统带宽并在此带宽下以高信噪比提取电压信号成为应变式位移传感器测量电路设计的重点。

#### 3.1 系统整体方案设计

系统的整体方案如图2所示。采用MAX6250与同相比例放大电路产生 $10 \text{ V}$ 电压基准为应变式传感器提供基准直流电压源;应变式传感器的输出差分信号作为仪表放大器AD8221的输入,将 $\text{mV}$ 级弱信号转换为低压直流电压信号,同时AD8221的偏置电压也由 $10 \text{ V}$ 电压基准提供;低压信号经同相衰减器后得到输出为 $0 \sim 10 \text{ V}$ 的电压信号;为得到高输出信号信噪比设计四阶有源巴特沃斯低通滤波器,滤波器的截止频率为 $200 \text{ Hz}$ ,在获取良好的噪声特性的同时也保证了测量系统的动态特性;位移测量系统采用 $\pm 12 \text{ V}$ 直流电压源供电。

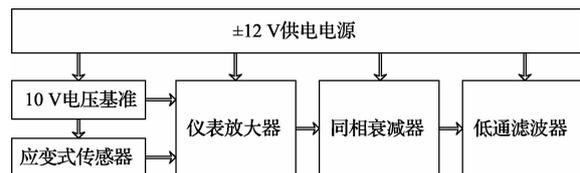


图2 电路系统整体方案

#### 3.2 电压基准设计

惠斯通电桥电路采用直流电压进行供电,设计中采用 $+10 \text{ V}$ 基准。根据式(3),输入电压的电噪声会等比例的耦合至输出端,因此电压基准的设计着重考虑噪声抑制。设计中采用电压基准芯片MAX6250和同相比例放大器产生 $+10 \text{ V}$ 基准电压。MAX6250的输出为 $5 \text{ V}$ ,采用AD8675作为二级输入,将输入电压变换为 $10 \text{ V}$ ,同时降低电压源部分的输出阻抗。电压基准电路设计如图3所示。电源设计中要求滤波芯片尽可能接近电源芯片,以减小布线对电路的影响;同时考虑芯片电源引脚的退耦;增加芯片敷铜设计以保证电源芯片的散热以降低电源芯片热噪声<sup>[9]</sup>。

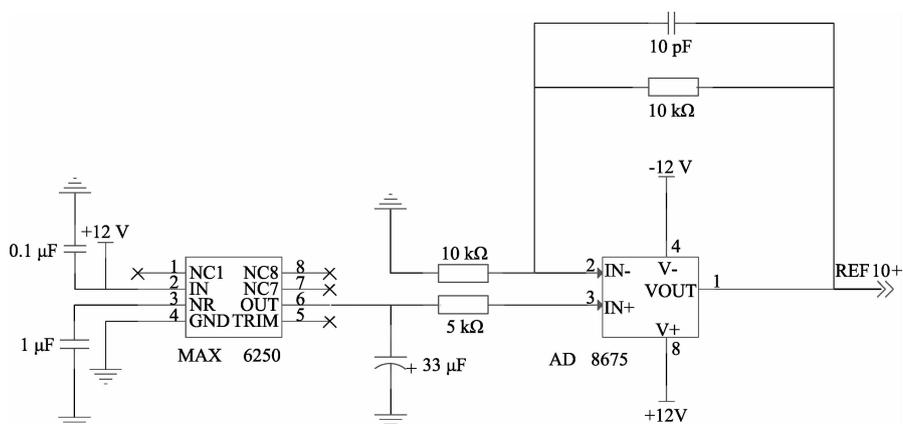


图3 电压基准电路设计

### 3.3 微弱差分信号放大电路设计

惠斯通电桥检测出的全程应变变量对应的电压变化量一般为几十毫伏,单位位移分辨率所对应的电压信号达到 mV 级,因此在电桥电路的输出需要接入专门的放大电路。设计中采用仪表放大器 AD8221。AD8221 是 AD 公司一款高性能低温漂增益范围可调的仪表放大器,输入失调漂移小于  $0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,输入失调电压小于  $25 \mu\text{V}$ ,输入偏置电流小于  $0.4 \text{ nA}$ ,公模抑制比  $90 \text{ dB}$ 。AD8221 电路设计如图 4 所示。

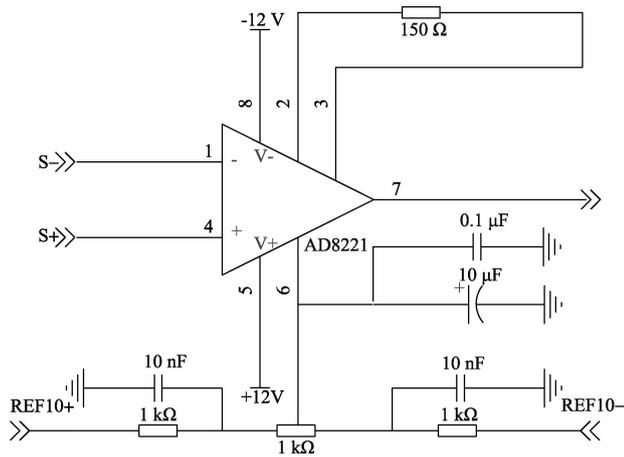


图 4 放大电路设计

如图 4,位移传感器的正负输出端 S+、S- 分别连接至 AD8221 的差分输入端;AD8221 的增益通过增益电阻  $R=150 \Omega$  设定放大倍数为 330,选择精度为 0.1% 的薄膜电阻器作为增益电阻,以保证低温漂系数与电阻约翰逊噪声;通过调节电阻更改仪表放大器的增益偏移,并增加退耦电容去除调节电阻引入的电噪声。

### 3.4 同相衰减器与低通滤波器设计

设计同相衰减器电路,调节电路输出电压范围为  $0 \sim 10 \text{ V}$ 。设计低通滤波器电路,降低电路中的高频干扰。低通滤波器用于过滤带外噪声与干扰带来的混叠误差<sup>[10]</sup>。应变式位移传感器电路对于滤波器设计的需求为通频带内的频率响应曲线最大限度平坦、没有起伏以保证通带内电压信号的完整性;过渡带内频率响应曲线快速衰减以保证噪声信号影响的频带范围小。因此电路设计中采用 6 阶有源巴特沃斯低通滤波器,截止频率 ( $-3 \text{ dB}$ ) 为  $200 \text{ Hz}$ ,  $1\ 200 \text{ Hz}$  滚降为  $-60 \text{ dB}$ 。低通滤波器电路仿真结果如图 5 所示。

## 4 位移传感器测量电路实验测试

为验证本文所设计的应变式位移传感器电路的性能,采用是德科技(原安捷伦科技)公司八位半万用表 3458A

对电路输出电压进行测试。

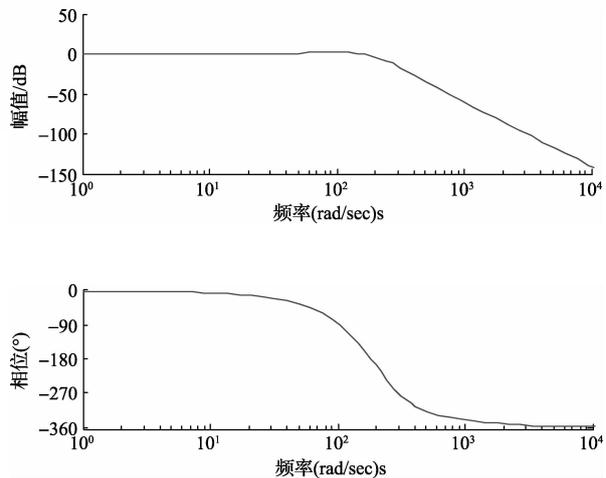


图 5 低通滤波器仿真结果

### 4.1 万用表内部噪声测试

实验中首先测试万用表 3458A 的内部噪声性能,以明确仪器的可用性以及仪器内部噪声水平对于电路测量的影响。将 3458A 的测量模式设置为 DCV 采样、行程设置为  $10 \text{ V}$  档(万用表测量范围越大其噪声越劣,因此实验中对于测量范围的选择是以满足输出电压范围为前提)、积分时间  $100 \mu\text{s}$ 、采样频率  $10 \text{ Hz}$ 。测试中采用万用表表笔短接的方法进行测试,测试结果如图 6 所示。

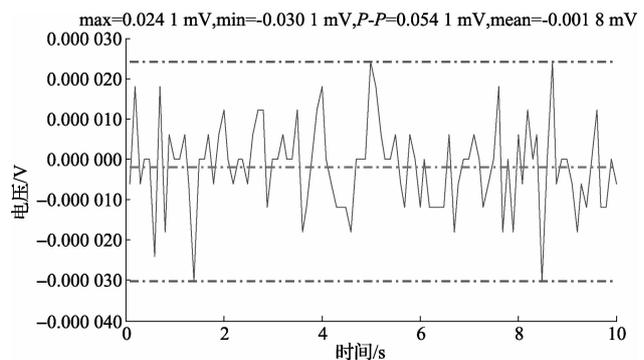


图 6 3458A 内部噪声测试

图 6 显示在  $10 \text{ V}$  测量范围内万用表 3458A 的内部噪声峰-峰值水平为  $0.054 \text{ mV}$ 。根据应变式位移传感器的测量原理,全程分辨率为  $1 \sim 2 \text{ nm}$ ,对应的输出电压的分辨率  $1 \text{ mV}$  水平。测量仪器的精度水平较测量原理所需的噪声水平高一个数量级以上,因此认为万用表 3458A 满足实验测量精度需求。

### 4.2 电压基准测试

MAX6250 产生的直流电压为惠斯通电桥电路提供

电压基准,根据惠斯通电桥测量原理,电压基准的噪声会耦合到输出电压特性中,从而影响位移传感器的测量精度。实验测得 MAX6250 的输出电压峰峰值为 0.134 mV、电压均值为 10.000 V。电压基准测试如图 7 所示。

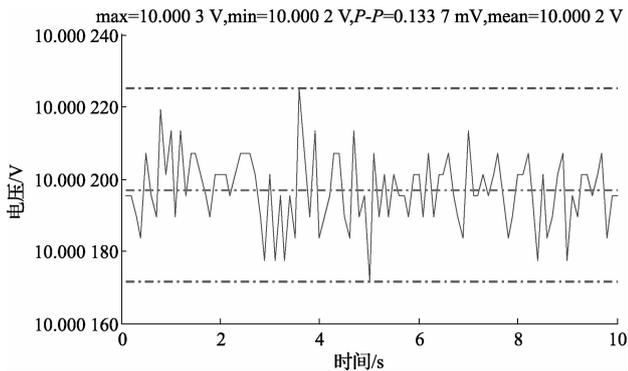


图7 电压基准特性曲线

#### 4.3 输出电压噪声与分辨率测试

经同相衰减器和滤波器输出的直流电压反映应变式位移传感器的当前位移,因此输出电压的噪声水平限制了其位移检测的精度水平。将电压基准作为位移传感器探头的输入,探头的输出作为仪表放大器的差分输入信号,对传感器处理电路输出进行测量得到噪声曲线如图 8 所示。从图 8 中可得,位移传感器电路的输出电压噪声峰峰值为 0.390 mV。

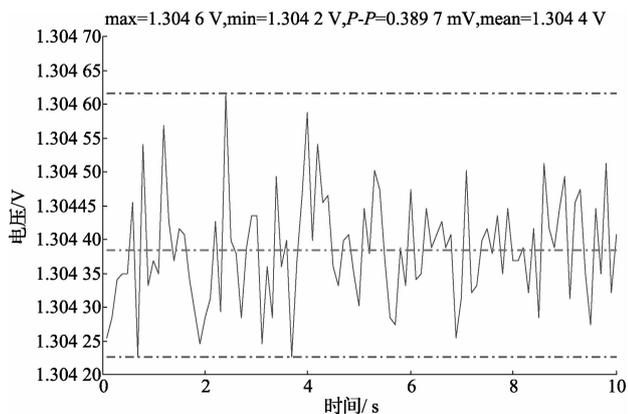


图8 位移传感器电路输出噪声曲线

分辨率反映了位移测量系统对于最小位移变化的检测能力,通常以是否可以明显区分波形变化来度量系统的分辨率特性。实验中采用 D/A 电路产生方波电压信号作为位移传感器电路的输入,定义能够检测出的最小电压信号为位移传感器电路的分辨率。分辨率特性如图 9 所示。从图中可观测,位移传感器电路输出电压分辨率小于 0.6 mV,对应的应变式传感器位移分辨率小于 1 nm,满足设置指标需求。

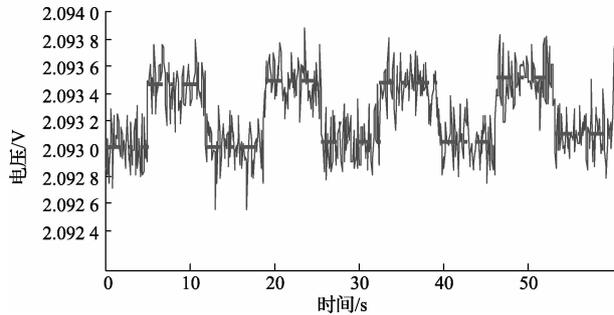


图9 位移传感器电路输出分辨率曲线

## 5 结 论

分析并设计了电阻应变式位移传感器电路,同时进行了实验验证。实验结果表明本文所设计的电路噪声峰峰值为 0.390 mV,输出电压分辨率可达 0.6 mV,能够实现位移传感器 1 nm 的分辨率。同时本文设计的传感器电路同样可适用于基于应变测量原理的压力、温度传感器测量。

### 参 考 文 献

- [1] 赵磊,巩岩.光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J].光学学报,2012,32(9):217-222.
- [2] 齐克奇,向阳.光刻物镜波像差检测球面波发生装置的研制[J].仪器仪表学报,2014,35(7):1518-1523.
- [3] 李朋志,葛川,苏志德,等.基于动态模糊系统模型的压电陶瓷驱动器控制[J].光学精密工程,2013,21(2):394-399.
- [4] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等.压电驱动器的非对称迟滞模型[J].纳米技术与精密工程,2012,10(3):189-197.
- [5] 郭抗,巩岩.6-PSS型光学元件精密轴向调节机构[J].光学精密工程,2013,21(10):2648-2655.
- [6] 王耿,官春林,张小军,等.应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其PID控制[J].光学精密工程,2013,21(3):709-716.
- [7] 程光明,李新辉,张海滨,等.悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其动态特性的影响[J].光学精密工程,2014,22(5):1296-1303.
- [8] 于旭东,龙兴武.机抖激光陀螺压电陶瓷驱动器参数设计[J].仪器仪表学报,2013,34(6):1428-1433.
- [9] 郑楠,王学亮,李佩玥.尺蠖式压电陶瓷驱动电源设计[J].国外电子测量技术,2014,33(8):49-52.
- [10] 张东,姜岩峰,于明.基于带隙基准源电路的噪声分析[J].电子测量与仪器学报,2011,25(12):1036-1040.

### 作 者 简 介

葛川,1985年出生,工学硕士,助理研究员。主要研究方向为微位移检测和精密控制。

E-mail:gechmail@163.com