

The Design and Validation of PSD Tiny Displacement Measuring System

WANG Tao^{*}, TANG Qingqing, LIU Jiang, WANG Yuhan

(Physics College of Chongqing University, Shapingba District of Chongqing, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to improve the stability and precision of position sensitive device (PSD) output feeble current signal, this paper discusses the design of PSD drive and op-amp circuit. Main considerations include the selection of two levels precision op-amp, the design of power filtering module, digital analog anti-interference design in PCB, handling of power supply and ground, anti-interference of ambient light, the PSD and the op-amp integrated circuits, and the design of multi-channel magnification to adapt the different diffuse nature of the object to be tested, etc. In the end, different from traditional measurement scheme, this paper adopts a new method based on calibration measurement. By measuring the vibration waveform of tuning fork and fixed-point distance, it verifies that the stability and precision of the PSD tiny displacement measuring system is very good, and the measuring range is 20 mm, the displacement relative accuracy is up to 1.01%.

Key words: PSD; op-amp circuit; calibration measurement; stability; precision

EEACC: B4110; B4150

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.04.010

PSD 微位移测量系统的设计与验证

汪涛^{*}, 唐清清, 刘江, 汪雨寒

(重庆大学物理学院, 重庆 401331)

摘要: 以提高 PSD 输出微弱电流信号的稳定性和精度为目的, 讨论了 PSD 驱动、运放电路的设计。主要考虑因素包括: 两级精密运放选择, 电源滤波模块设计, PCB 设计中数模抗干扰, 电源和地的处理, 抗环境光干扰, PSD 及其运放电路集成化, 以及适应不同漫反射性质的被测物体的多路放大倍数设计等。最后, 区别于传统的测量方案, 采用一种基于标定测量的方法。通过音叉振动波形和定点距离测量实验, 验证了 PSD 微位移测量系统的稳定性和精度都较好, 测量范围 20 mm, 位移测量相对精度达到 1.01%。

关键词: PSD; 运放电路; 标定测量; 稳定性; 精度

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)04-0472-05

随着现代测量技术的发展, 非接触测量逐渐代替了接触式测量^[1], 其主要分为声学法, 光学法和电磁学法。激光三角法作为光学法的优秀代表, 具有分辨率高, 体积小, 响应速度快, 适用范围广等优点得到了广泛应用, 包括钢板厚度的测量^[6], 物体三维形貌的重建, 微振动测量, 家具的雕刻, 医疗, 军事及航空等。光电器件 PSD 相对于 CCD 有分辨率高, 响应速度快, 后续信号处理简单等优点^[2], 被广泛应用于激光三角法测量技术中。由于 PSD 输出为微安级的电流信号^[7], 所以其驱动、运放电路^[12]的设计尤其重要。

本文介绍了一维 PSD 器件的工作原理, PSD 微位移测量原理, 对 PSD 的驱动、运放电路进行了精心的设计, 考虑因素如摘要中所述。最后通过标定测量的方法, 对音叉振动波形以及定点距离进行测

量, 得到了 PSD 微位移测量系统的稳定性和精确度较好的结论。

1 一维 PSD 器件的工作原理

本文采用的一维 PSD 是 BOS-PSD0018, 有效光敏面为 1 mm×8 mm, 最小分辨率 0.3 μm, 响应时间 0.2 μs, 光谱响应范围 380 nm ~ 1 100 nm。

一维 PSD 是基于横向光电效应^[9]的工作原理, 其结构简图和等效电路图分别如图 1、图 2 所示。

光斑照在一维 PSD 光敏面上, 经光电转换后的电流大小与入射光斑重心位置到电极的距离成反比。理论上 PSD 光敏面电阻率均匀, 由结构图 1 以及等效电路图 2 (各参数意义如图标注), 两电极输出电流大小分别为 I_1, I_2 , 再推出 X_A , 可知由 PSD 两级的输出电流, 可以计算出光斑在 PSD 上的位置。

推导如下:

$$I_1 = \frac{L - X_B}{L} \times I \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{X_B}{L} \times I \quad (2)$$

$$X_A = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \times \frac{L}{2} \quad (3)$$

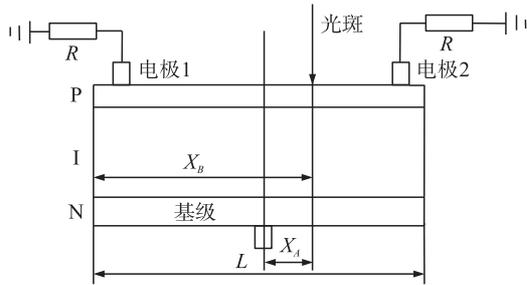


图1 一维 PSD 结构

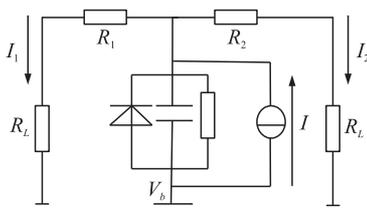


图2 一维 PSD 等效电路

2 PSD 微位移测量原理

PSD 微位移测量系统如图 3 所示,是基于直射式激光三角测距原理。激光通过汇聚透镜,照射到被测物体的表面,被测物体表面发出漫反射光,通过接收透镜成像于 PSD 上^[10],当被测物体表面发生位移改变 ΔY ,对应 PSD 成像光点位置移动 Δx 。其中, a 为参考物点成像对应的物距, b 为像距, θ 是激光束与接收透镜光轴之间的夹角, β 为 PSD 光敏面与成像光轴之间的夹角。由系统满足的几何关系可推出式(4)

$$\Delta Y = \frac{a \Delta x \sin \beta}{b \sin \theta - \Delta x \cos(\theta + \beta)} \quad (4)$$

由于 PSD 光敏面长度最长只有 8 mm,式(4)分母中第 2 项可以忽略,得到 ΔY 与 Δx 近似为线性关

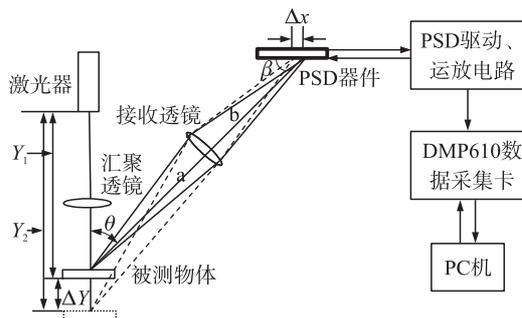


图3 PSD 微位移测量系统^[13]

系^[13],由式(3)可知 Δx 与 $\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$ 成正比,所以 ΔY 与

$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$ 成正比^[14]。

式(4)中角度等参数的测定容易产生误差,区别于传统的测量方法,本文使用了一种标定测量的方法,即预先将 ΔY 和 $\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}$ (I_1, I_2 经过运放电路的 I/V 转换和后级放大后变成了 V_1, V_2) 两个变量进行拟合,得其函数关系式,采集被测物点对应的 PSD 两级输出运放信号,得 $\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}$,将其代进前面的拟合方程式,即可求得物点发生的位移 ΔY 。

3 PSD 驱动、运放电路的设计

PSD 驱动、运放电路的设计,考虑因素有:两级精密运放选择,电源滤波模块设计,数模抗干扰、电源和地的处理,抗环境光干扰^[8], PSD 及其运放电路集成化及放大倍数可调等。

3.1 核心器件的选型

PSD 驱动、运放电路设计主要围绕前级 I/V 转换和后级精密放大电路进行。PSD 输出两路微弱的电流信号,一般在零点几到几个 μA ,所以前级 I/V 转换的运算放大器要求偏置电流小(最好是在 pA 级),噪声低,温漂小以及单位增益带宽大等。

前级 I/V 转换后的两路电压信号仍然较小^[16],还需经过后级进一步精密放大,才适用于数据采集卡 DMP610 的量程范围,以较大程度的利用采集卡的转换精度。要实现精密放大,后级运放要求输入失调电压小,低噪声,低温漂和高精度等。为进一步适应漫反射性质强弱不同的被测物体,电路设计针对每一路 PSD 信号通过四路拨码开关实现了放大倍数可调,分别实现 3、3.6、4.3、5.1 倍放大。

常见运放各参数如表 1,由上述对两级运放的要求,最后选择 AD795 作为系统前级 I/V 转换运放,其偏置电流只有 1 pA,噪声 $9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,温漂 $3 \mu\text{V}/\text{C}$,单位增益带宽为 1.6 MHz。选择 OP27 作为系统后级精密运放,其失调电压只有 $10 \mu\text{V}$,噪声 $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,温漂 $0.2 \mu\text{V}/\text{C}$,单位增益带宽为 8 MHz。此外 OP27 和 OP37 同为精密运放,都具有失调电压小,噪声低和高精度的特性,它们的性能参数基本上一样,主要区别仅在于 OP37 用于增益小于 5 的放大电路中会有自激振荡,不稳定的问题,结合本系统的实际放大倍数的需要,最后选择了 OP27。

表1 几种参考运放参数

运放型号	偏置电流 /pA	失调电压/ μV	噪声 /($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)	温漂 /($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	单位增益带宽/MHz
LM358	50/nA	5/mV	5	7	1
AD795	1	100	9	3	1.6
AD820	2	800	13	1	1.9
AD823	25	800	16	2	1.6
OPA131	5	750	15	2	4
OP27	10/nA	10	3	0.2	8
OP37	15/nA	10	3	0.2	63
LM324	45/nA	2.9/mV	6	7	1

3.2 电源滤波模块设计

PSD 驱动、运放电路需要用到正负 12 V 和 5 V 电压供电,结合系统的紧凑性和设计的复杂度考虑,采用现有的成品功能器件,正负 12 V 和正负 5 V 的 4 路电压输出的开关电源 Q-60B。开关电源有体积小,电能利用率高和轻便等优点,但其输出纹波噪声^[3]较大,这无疑会对本系统的微弱信号检测带来极大的影响。对常见几款开关电源的纹波参数进行测量分析,纹波幅值在几十到上百 mV 量级,频率几十 kHz 范围,如 Q-60B 开关电源,纹波周期 26.9 μs ,+5 V 电压输出的纹波幅值 47.5 mV,+12 V 对应 54.4 mV,-12 V 对应是 77.5 mV,图 4 所示为-12 V 电源纹波参数。

根据上述开关电源纹波频率范围,结合各类电容的频率和阻抗特性,最后选用谐振频率较大的钽电容和陶瓷电容^[5]来设计电源滤波电路,根据经验公式 $C=1/F$ ^[4],其中,C 为滤波电容值,F 为滤波截止频率。最后选择 22 μF 的钽电容和 0.1 μF 的陶瓷电容

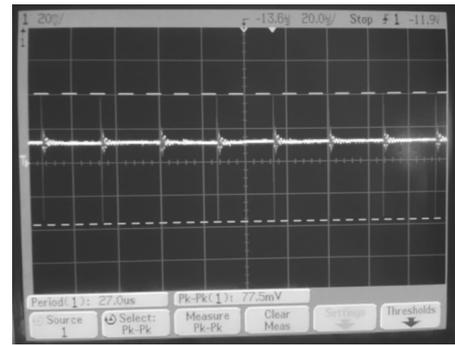


图4 -12 V 电源纹波参数

并联,作为电源的电容滤波电路。用示波器测试上述 Q-60B 开关电源经过滤波电路后的纹波参数,发现纹波幅值有明显的衰减,5 V 档减小为 10.5 mV,+12 V 档对应为 8.9 mV,-12 V 档减小为 15.9 mV。

3.3 PSD 驱动、运放电路设计的其他因素考虑

电路设计中模拟微弱信号传输抗干扰问题,PSD 及其驱动、运放电路集成问题,环境光对 PSD 输出信号稳定性的影响问题,电源和地的处理问题等,都是必需要考虑的因素。

对于 PSD 输出的微弱模拟电信号,开关电源纹波可以看作其数字噪声干扰源,PCB 设计中的共地,使得干扰问题凸显严重,因为电源纹波最容易通过共地耦合到信号端。所以,电路设计将电源端和信号端隔开布局、分开走线,把信号地和电源地分开,用一个 0 Ω 电阻单点连接,最后区域化的分割电源地和信号地,分别敷铜,这样可以最小化开关电源纹波噪声对模拟信号传输的干扰。图 5、图 6 分别为本设计的 PSD 驱动电路的原理图和实物图。

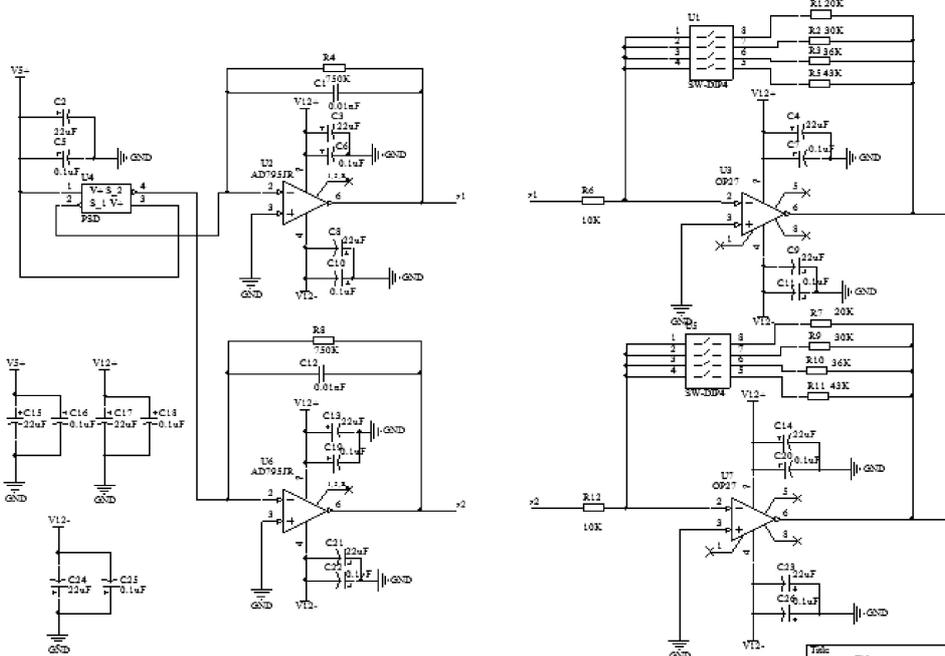


图5 PSD 驱动电路原理图

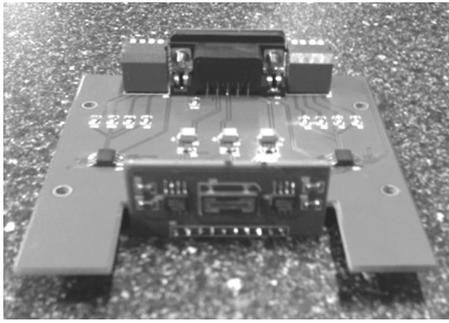


图6 PSD驱动电路实物图

PSD输出信号传输距离越长,可能受到的干扰就越大,所以电路设计将PSD及其驱动、运放电路集成在一块PCB板上以最小化PSD信号走线距离。再将整个驱动、运放电路板置于一个设计好的黑色暗盒中,暗盒前面针对PSD光敏面留大小适宜的透光孔,再在透光孔前加一片同激光透过波长相近的滤光片,这样就解决了环境光干扰问题。

4 微位移测量系统稳定性和精度验证

4.1 音叉振动波形验证稳定性

为了验证PSD微位移测量系统的稳定性,将该系统用于音叉的微振动测量,经过光路的搭建、系统的标定和最后的实际测量,最后得到音叉振动波形图如图7、图8,其中横坐标为测量所取的点数,纵坐标为音叉振幅(单位为mm)。

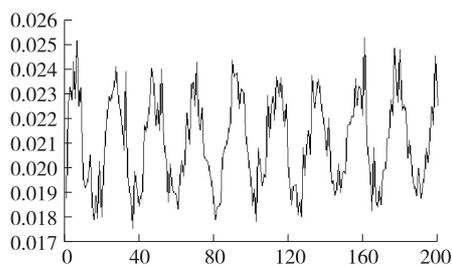


图7 音叉振动信号波形1

图7为改进前的驱动、运放电路(前级I/V转换和后级放大采用集成运放LM324^[15],没有考虑电源滤波,数模信号干扰和电源、地的处理等问题)所测得的音叉振动波形,其毛刺较多,即PSD信号输出不稳定,受到干扰较大。

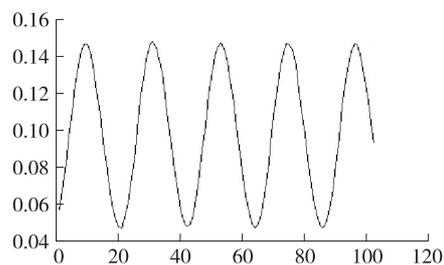


图8 音叉振动信号波形2

图8为改进后(基于上述驱动、运放电路设计的各种考虑因素)的电路所测得的音叉振动波形,其对应PSD输出信号比较稳定,受到的干扰较小,信噪比明显提高。

4.2 定点距离测试验证测量精度

由上述PSD微位移测量原理^[11]可知,由于 a 、 b 、 θ 、 Δx 等参数的测量容易引起误差,本系统采用一种标定测量的方法,即预先对物体移动距离 ΔY 和PSD输出两路运放信号的计算值 $\frac{V_1-V_2}{V_1+V_2}$ 两个变量进行拟合,得其函数关系式。其中 ΔY 的变化采用带滑轨的匀速57步进电机带动被标定物移动得到,同时DMP610采集卡以一定的采样频率采集PSD输出的两路运放信号,将得到的两组变量数据在MATLAB环境下拟合,得两变量函数关系式。最后测量实际物点对应的PSD两级输出运放信号,得 $\frac{V_1-V_2}{V_1+V_2}$,将其带进前面的拟合方程式,最终求得物点位移 ΔY 。

用上述方法对两组变量进行函数拟合,经过多次反复试验,对于定点距离的测量,得出结论:四阶拟合函数最符合系统实际情况。其对应的函数方程式为 $Y = -35.4344x^4 - 46.7238x^3 - 18.7098x^2 + 14.4346x + 9.3272$, (其中 x 对应PSD两级输出运放信号的计算值即 $\frac{V_1-V_2}{V_1+V_2}$, Y 对应物点位移),标定曲线如图9所示。

对被测物体处于不同的5个位置对应的位移值进行实际测量,5个不同位置的移动都由匀速步进电机控制,对应理论计算位移值依次为 $d_1 = 3.04$ mm, $d_2 = 4.755$ mm, $d_3 = 6.245$ mm, $d_4 = 7.915$ mm, $d_5 = 9.56$ mm,实际测得距离值依次为 $d'_1 = 3.0386$ mm, $d'_2 = 4.8030$ mm, $d'_3 = 6.1792$ mm, $d'_4 = 7.9477$ mm, $d'_5 = 9.5533$ mm,距离测量相对误差最大为1.01%,最小为0.046%。实验表明改进后的PSD微位移测量系统测量精度较高。

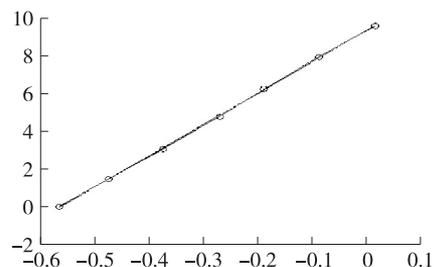


图9 PSD微位移测量系统标定曲线

5 结束语

本文对一维PSD微位移测量系统进行了设计与

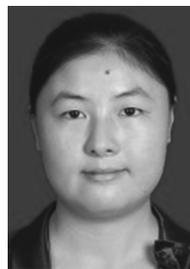
验证,介绍了一维 PSD 工作原理,PSD 微位移测量原理,重点介绍了 PSD 驱动、运放电路的设计及其设计过程中的主要考虑因素,包括:两级精密运放选择,电源滤波模块设计,PCB 设计中数模抗干扰,电源和地的处理,抗环境光干扰,PSD 及其运放电路集成化及适应不同漫反射性质被测物体的放大倍数可调等。最后基于一种区别于传统测量方案的标定测量法,通过音叉振动波形和定点距离测量两个实验,验证了本文所设计的 PSD 微位移测量系统稳定度较好,测量精度较高,距离测量相对误差达到了 1.01%。

参考文献:

- [1] 阳鑫. 基于 PSD 的钢板测厚系统研究[D]. 天津:天津大学,2009.
- [2] 莫伟. 基于 PSD 的高速激光距离传感器的信号检测与处理[D]. 华中科技大学,2008.
- [3] 姚晓平. 电源纹波的产生、测量和抑制[J]. 电源世界,2009(11):40-43.
- [4] 吴灏. 小功率直流开关电源的纹波和噪声研究[J]. 工业技术,2012(5):70.
- [5] 任炳旭. 开关电源输出滤波电容器的选用[J]. 探测与定位,2011(1):44-47.
- [6] 蒋鹏,汪宁,方善华,等. 激光测厚仪在宝钢 300t 钢包上的应用[J]. 物理测试,2008,26(3):37-40.
- [7] 王广志,丁海曙,丁辉,等. 位置敏感器件(PSD)的杂光干扰研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1997,37(1):61-64.
- [8] 吕爱民,袁红星,贺安之,等. 位置指示光源对 PSD 定位精度影响的实验研究[J]. 激光技术,2000(3):192-95.
- [9] 蔡明知,宋洪侠,曹铁泽,等. 基于 PSD 的高精度激光位移传感器设计与分析[J]. 机电产品开发与创新,2007,20(5): - .
- [10] 董桦. 基于 PSD 的激光位移检测中位移信号处理系统的研究[D]. 长春:长春理工大学,2010.
- [11] 任树梅,蒋圣平,郝晓剑,等. 用位置敏感传感器进行位移测试的技术研究[J]. 测试技术学报,2002,16(2):49-53.
- [12] 张华. 基于 PSD 的测距系统研究[D]. 浙江大学,2005.
- [13] 吴剑锋,王文,陈子辰,等. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. 机电工程,2003,20(5):89-91.
- [14] 秦岚,刘志辉. PSD 相位法测量技术研究[J]. 传感技术学报,2009,22(5):760-763.
- [15] 马永利,王培勇. 基于二维 PSD 的单目标靶模拟射击训练系统[J]. 传感技术学报,2004(3):498-500.
- [16] Cai Mingzhi, Song Hongxia. Design and Analysis of High Precision Laser Displacement Sensor Based on Position Sensitive Detector (PSD) [J]. Development and Innovation of Machinery and Electrical Products,2007,20(5):65-68.



汪涛(1972-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向包括光电检测技术,光学仪器开发,ARM 嵌入式开发,FPGA 嵌入式开发等,wangtao@cqu.edu.cn;



唐清清(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术,FPGA 嵌入式开发研究等,emmatqq@163.com。