

# AFM检测模块中PSD信号处理电路设计\*

刘小进<sup>1,2</sup> 石振刚<sup>1</sup> 田孝军<sup>2</sup> 王栋<sup>2</sup> 周磊<sup>2</sup>

(1 沈阳理工大学 沈阳 110016; 2 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

**摘要:** 为提高AFM对基底的扫描速度和成像分辨率,选用了一种新型的位置敏感器件,设计了一套基于高速差分放大器的PSD信号采集模块,该模块具有体积小、结构合理、受地面噪声干扰小等优点。为便于分析,实验中,用数字源表提供单路电流,将PSD信号采集模块的差分输出与单端输出结果进行比较,同时对实验数据做频谱分析与线性度分析,实验证明:基于高速差分放大器的差分输出电路满足AFM对PSD模块在带宽、噪声、线性度等设计方面的要求。

**关键词:** AFM 位置敏感器件 高速差分放大器 差分输出 单端输出

## PSD signal processing circuit design in AFM detection module

Liu Xiaojin<sup>1,2</sup> Shi Zhengang<sup>1</sup> Tian Xiao Jun<sup>2</sup> Wang Dong<sup>2</sup> Zhou Lei<sup>2</sup>

(1 Shenyang Ligong University, Shenyang 110016, China;

2 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** A novel position detector is chosen to improve the scanning speed and resolution of AFM to basement. An optical signal acquisition module based on high speed differential amplifier for PSD differential output signal is designed. Our Module has such advantages as smaller size, more reasonable structure and less ground power interference. The one-channel current is supplied by source meter, and the differential outputs of PSD and single-ended outputs are compared. Then spectrum analysis and linearity analysis of the results are carried on. Experiment results show that our design can meet the requirements of PSD detector module in AFM in terms of bandwidth, noise, linearity etc.

**Key words:** AFM; Optical position detector High speed differential amplifier Differential output Single-ended outputs

## 1 引言

光电位置敏感器件(Position Sensitive Detector,简称 PSD)是一种可直接对其光敏面上光斑位置进行检测的器件,具有光谱响应、时间响应和位置敏感等特性<sup>[1-3]</sup>,随着非接触检测技术发展,近年来PSD在自动化控制、激光定位、仪器仪表等方面的应用愈加广泛<sup>[4]</sup>。自1985年发明以来,原子力显微镜(Atomic Force Microscope,简称AFM)迅速成为纳米科技的主要观测与表征手段之一,为提高其扫描速度和成像分辨率,国内外众多机构(如德国的Bruker公司、浙江大学、中国科技大学、天津大学等)进行了大量的研究。由于PSD检测模块(如图1所示)是AFM性能主要影响因素之一,因此基于二

维PSD器件的光电信号采集电路就成为AFM设计中的一个重要部分。传统的PSD光电信号采集模块一般采用单端输出模式,输出结果受运算放大器的放大精度与地面噪声干扰影响大,为此本文提出了一套基于高速差分放大器的差分输出光电信号检测模块,形成了一种高带宽、高速度、低噪声的新型位置检测模块。该模块具有体积小、结构合理、受地面噪声干扰小等优点。实验表明该电路模块在带宽、噪声、线性度等方面都优于传统的单端输出模式。

## 2 典型信号处理电路分析

对PSD的原理及典型信号电路进行了如下分析:

\*基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005230)

2.1 二维 PSD 原理

二维PSD器件是由四个参数高度一致的光电探测器组成的圆形接触平面<sup>[5]</sup>，由A, B, C, D, G, NC六根引脚与PSD信号处理模块输入接口相连接（如图2所示）。光电探测器是一种对光点敏感的PIN型光电二极管，它是基于P-N结或SBD结的横向光电效应的器件<sup>[6]</sup>。当激光照射到PSD的光电敏感接触面时，它将接受到的光能转换为电能，以电流的形式输出，电流 $I_o$ 随着光斑位置的变化而变化<sup>[7]</sup>，光电探测器的等效电路图如图3所示。

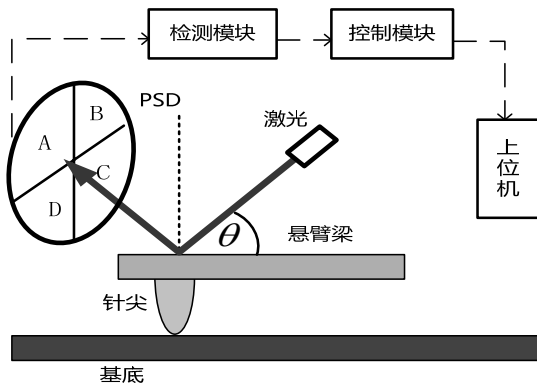


图1 PSD在AFM中的结构

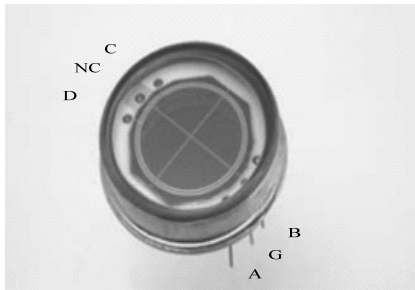


图 2 PSD 器件实物图

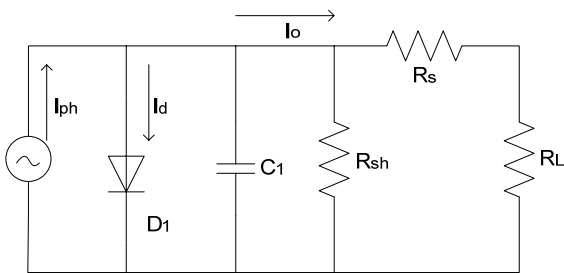


图 3 光电探测器等效电路图

2.2 典型 PSD 信号处理电路

典型PSD信号处理电路（如图4所示）<sup>[5]</sup>，由流压转换电路和直流放大电路组成。

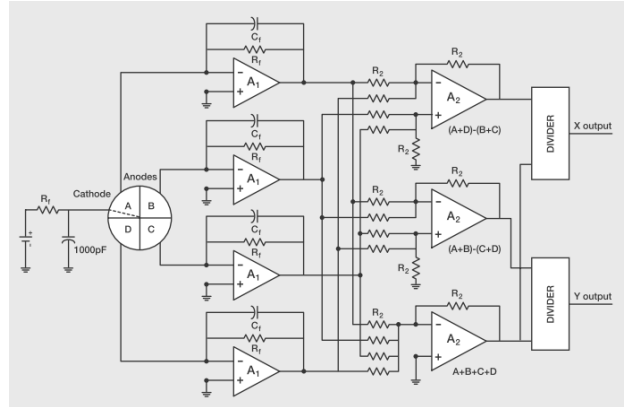


图 4 典型 PSD 信号处理电路

由图 4 可以得到典型电路的输出结果如下：

$$X_{out} = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D}$$

$$Y_{out} = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D}$$

(1)

式中 A、B、C、D 为流压转换后得到的电压值。

用数字源表给电路输入  $80\mu A$  电流时，所得  $X_{out}$  的输出结果如图 5 所示，为了获得其噪声频率，利用 2010 版 MATLAB 软件对所得的实验数据进行了频谱分析，所得  $X_{OUT}$  信号频谱图如图 6 所示。由输出  $X_{OUT}$  频谱图可见，该电路存在一定电路耦合噪声。

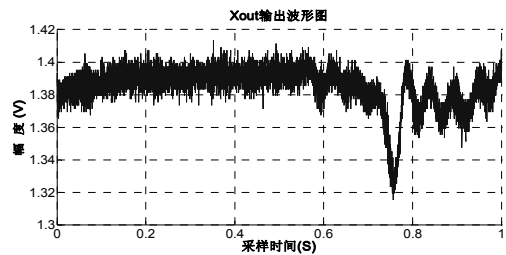


图 5 Xout 输出结果

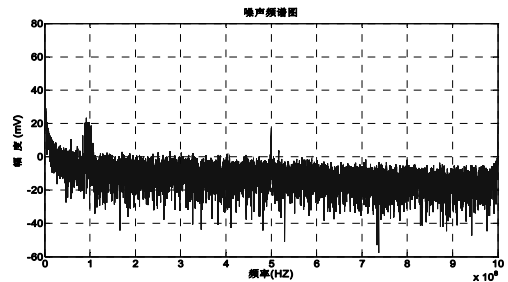


图 6 单端输出 A 的噪声频谱图

### 3 改进电路设计

为了实现对微弱光电信号的精确测量，满足AFM设计中PSD信号检测模块在带宽、噪声、非线性等方面的要求，对PSD信号检测模块输出进行了新的设计，设计采用差分电路对典型PSD处理电路存在的耦合噪声进行去除。

#### 3.1 差分电路特点

差分电路中，差分信号都有自己的基准地线，受电源地和器件的噪声影响较小，共模噪声由于被差分线间的耦合效应完全耦合，辐射到外界的电磁场能量减少，有效的抑制了电磁干扰，从而减小了噪声影响。

#### 3.2 PSD 信号处理电路设计

在高精度数据采集模块中，PSD将光电信号转换为 $\mu\text{A}$ 级的电流信号，为便于实现对电流信号的放大，在模块前端设计了由AMP1、AMP2组成的流压转换电路，将电流信号转换为电压信号。为不影响设备的整体性能，AMP1、AMP2都选用速度高、精度高、信噪比高的运算放大器，AMP3为高速差分放大器。差分放大器主要由放大电路和共模反馈环路组成，放大电路提供放大增益，共模反馈环路控制放大增益。基于高速差分放大器的PSD信号处理电路流程如图7所示：

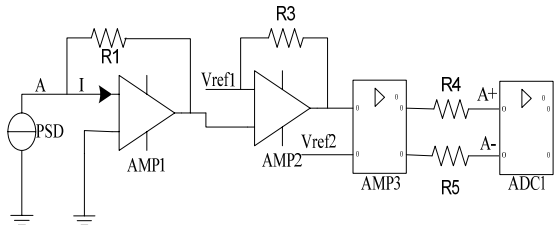


图 7 基于高速差分放大器设计的 PSD 信号处理电路

与单端PSD信号处理电路（如图4所示）相比较，基于高速差分放大器设计的PSD信号处理电路在设计中对前端流压转换部分增加了参考电压Vref1,将流压转换后的电压进行了升压，同时将高速差分放大器的电压参考端接为Vref2,对比单端输出电压值-0.5~2.5V,其ADC1转换后的ADC1数字范围是0-7FFF。差分后电压输出范围在1-4V之间，ADC1转换后的数字量的范围是0-FFFF,实现了ADC1的满量程输出，提高了ADC的使用率、测量结果的分辨率。

### 4 实验验证

#### 4.1 实验平台搭建

基于以上的分析，在 Cadence 平台上完成了原理

图与 PCB 的设计。加工制作的实验电路板如图 8 所示，该模块具有体积小、结构合理、受地面噪声干扰小等优点。

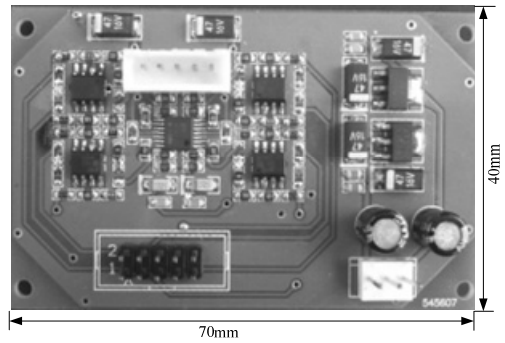


图 8 基于高速差分放大器设计的 PSD 信号处理电路板

实验中用激光器为 SPOT4D 型 PSD 器件提供光能，测量得单路电流输出范围在 40-110 $\mu\text{A}$  之间。为了测试该差分输出模块在带宽、噪声、线性度等方面的性能，本实验采用美国 KEITHLEY 公司生产的数字源表模拟二维 PSD 器件在激光照射下产生的电流，美国 LeCory 公司的 WaveRunner HRO 6Zi 型示波器观察波形、采集数据。PSD 信号处理实验平台如图 9 所示：



图 9 PSD 信号处理实验平台

数字源表为 PSD 的 A 端口提供 40-110 $\mu\text{A}$  电流，从 40 $\mu\text{A}$  起，电流每增加 10 $\mu\text{A}$  采集一次数据，采样频率为 50MHZ。

#### 4.2 噪声分析

为了说明本文所设计的 PSD 光电信号采集电路相对于单端输出电路具有更高的信噪比，用数字源表向改进型电路提供 80 $\mu\text{A}$  电流，所得结果如图 10 所示，利用 MATLAB 软件对采集的实验数据进行了频谱分析，分析结果如下图 11、12 所示。

如图 5 所示，单端输出信号的频谱图稳定性较差，在 100MHZ 附近时尤为明显；通过图 11、12 可以看出，本文所设计的基于高速差分放大器的 PSD 光电信号采集电路的抗噪声能力有明显的提

高。

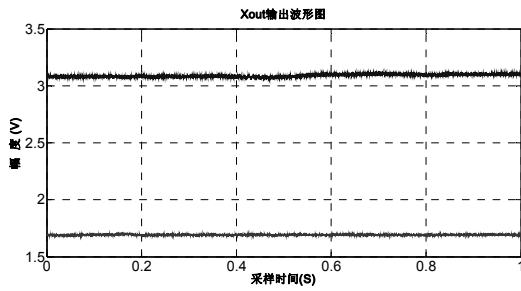


图 10 差分输出结果

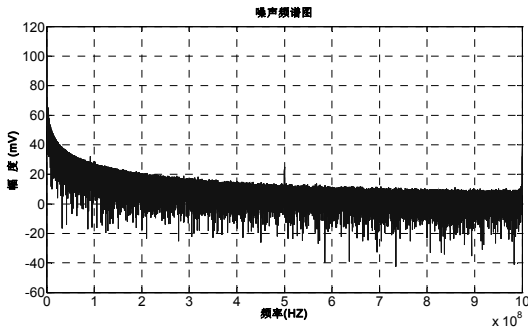


图 11 差分输出 A+的噪声频谱图

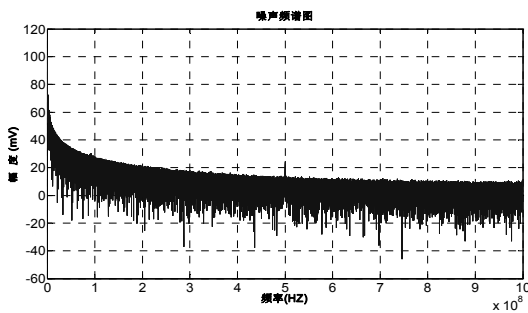


图 12 差分输出 A-的噪声频谱图

### 4.3 线性度分析

为了对比单端输出与差分输出的线性度，数字源表提供 40--100 $\mu$ A 的电流，并进行多次试验，对实验结果（实验结果如表 1 所示）中“单端 A”、“ $\Delta$ A”作线性度比较，如图 13 所示。

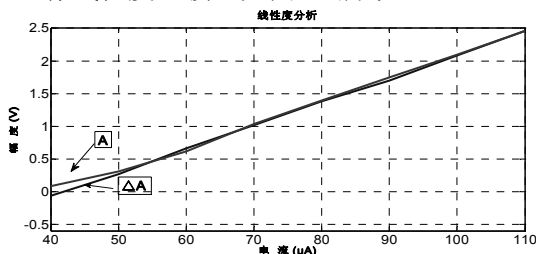


图 13 单端与差分线性度比较

图 12 中，“A”、“ $\Delta$ A”分别表示在不同的输入电流下单端电路输出电压和差分电路输出电压的平均值，由图可以看出差分输出的线性度更好。

表 1 单路 A 输出结果

输出值V 电流值 $\mu$ A	差分A+	差分A-	单端A	$\Delta$ A
40	2,3710	2,4541	0,0620	0,0831
50	2,5760	2,2731	0,2784	0,3029
60	2,7244	2,1098	0,6410	0,6186
70	2,9233	1,8866	1,0166	1,0367
80	3,0891	1,6917	1,3851	1,3974
90	3,2855	1,5378	1,7220	1,7477
100	3,4547	1,3598	2,0840	2,0949
110	3,5193	1,1567	2,4591	2,4624

表中“差分 A+”、“差分 A-”、“单端 A”均为输出电压的平均值，“ $\Delta$ A”为差分输出的差值。

## 5 结论

本文从理论上分析了 PSD 器件的工作原理和差分电路的优点，设计了体积小、结构合理、受地面噪声干扰的 PSD 光电信号采集模块。差分输出电压值实现了 ADC1 的满量程转换。实验结果表明基于高速差分放大器设计的 PSD 光电信号采集电路在频率、噪声、线性度等方面都优于单端电路，对提高 AFM 对基底的扫描速度和成像的分辨率具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] 张冬仙, 章海军. PSD233 型位置敏感元件的特性及其在 AFM 中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 384-388.
- [2] ALEXANDER KHMALADZE. Design and imaging properties of a laser scanning microscope with a position-sensitive detector [J]. Journal of Modern Optics, 2008, 17(55): 2785-2796.
- [3] 唐九耀, 黄梅珍. 二维 PSD 的结构和性能分析 [J]. 功能材料与器件学报, 2000, 6(3): 301-304.
- [4] 段洁, 孙向阳. PSD 在激光位置检测系统中的应用研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, 6(36): 281-284.
- [5] 鲁鹏, 周磊. 周期性背景光对四象限光电探测器的影响及解决方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 208-211.
- [6] 苏少华. PSD 信号处理电路的研究[J]. 华北工学测试技术学报, 2001, 15(2): 83-85.
- [7] 莫长涛. 光电位置敏感器件物理性能分析及其在激光准直测量中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005, 4-5,21-25.