

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0096-05

位置敏感探测器测量电路噪声分析

江孝国, 李 洪, 杨兴林, 文 龙, 石金水, 张开志, 王 远

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 位置敏感探测器(PSD)的特点是位置测量分辨力高, 测量装置建立简单, 测量结果比较直观。对 PSD 测量电路等效噪声进行测试分析, 获得一系列模拟结果, 明确了电路噪声是影响位置测量分辨力的重要因素。以一维 PSD 器件 S3932 为例, 按照建立的模拟模型, 得出要获得 $1 \mu\text{m}$ 的位置分辨力, 器件的工作光电流应大于 $7 \mu\text{A}$, 该模拟结果可以作为 PSD 测量电路设计的一个重要参考。

关键词: 位置敏感探测器件; 位置分辨力; 电路噪声

中图分类号: TN15

文献标识码: A

Noise analysis of the measurement circuit for position sensitive detector

JIANG Xiao-guo, LI Hong, YANG Xing-lin, WEN Long, SHI Jin-shui, ZHANG Kai-zhi, WANG Yuan
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract : Position Sensitive Detector(PSD) features high position resolution and the setup of position displacement measurement system is simplified. The performance of measurement circuit is the key factor for the application of PSD. Some results are obtained by the way of analyzing the equivalent noise of measurement circuit. The circuit noise is one of the most important factors which will lower the position resolution. For one-dimensional PSD device S3932, the position resolution of $1 \mu\text{m}$ can be achieved if the photocurrent of the device is above $7 \mu\text{A}$.

Key words : Position Sensitive Detector ; position resolution ; circuit noise

位置敏感探测器(PSD)是一种基于横向光电效应的、用于对入射光斑位置的连续变化进行测量的探测器, 具有较高的灵敏度和宽的光谱响应范围, 位置分辨力高, 瞬态响应性能好, 结构紧凑, PSD 在精密尺寸测量、对接、震动测量、转角测量甚至三维形貌测量、机器人传感等领域都有广泛应用^[1-3]。PSD 虽然具有很好的性能, 但对光源、环境温度、外部测量电路性能均有较高的要求, 只有在一定的使用条件下, 才能充分发挥其性能。本文针对 PSD 的这种要求, 设计了相应的位置测量运算电路, 建立了对应测量电路的等效模型, 对其噪声相关性性能进行模拟。

1 PSD 的位置测量原理

对于一维 PSD, 其位置探测原理如图 1 所示。当入射光斑照射在 PSD 表面上离中心 x 处时, 在 PSD 的输出电极 x_1, x_2 上会有相应的光电流 I_{x1}, I_{x2} 输出, 该光电流与光斑在 PSD 表面上的位置 x 有对应关系。光斑离 PSD 中心的位置 x 可由式(1)计算^[4]:

$$I_{x1} = \frac{Lx/2 - x}{Lx} I_0; I_{x2} = \frac{Lx/2 + x}{Lx} I_0; \frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} = \frac{2x}{Lx} \quad (1)$$

$$x = \frac{Lx(I_{x2} - I_{x1})}{2(I_{x1} + I_{x2})} \quad (2)$$

式中: I_{x1}, I_{x2} 为从输出电极上流出的电流; $I_0 = I_{x1} + I_{x2}$, 称为全光电流; Lx 为 PSD 的有效电长度。

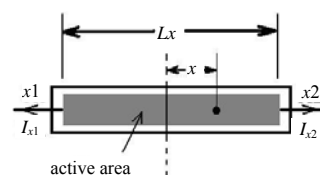


Fig.1 One-dimensional PSD detect principle
图 1 一维 PSD 位置探测原理示意图

2 典型的测量电路原理

根据式(1)，可以设计出相关的测量电路，如图 2 所示。

图中 U1,U2 完成电流到电压的转换，U3 完成减法的运算，而 U4 则完成加法的运算，AD734 完成除法运算，其中的系数可以用 AD734 的乘法功能实现，这样可以获得对应位置的输出电压，直观地进行显示。根据图中电路，可知：

$$\begin{cases} V1 = -I_{x1}R_{f1} \\ V2 = -I_{x2}R_{f2} \\ V_{sub} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)(V1 - V2) \\ V_{sum} = -\left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)(V1 + V2) \end{cases} \quad (3)$$

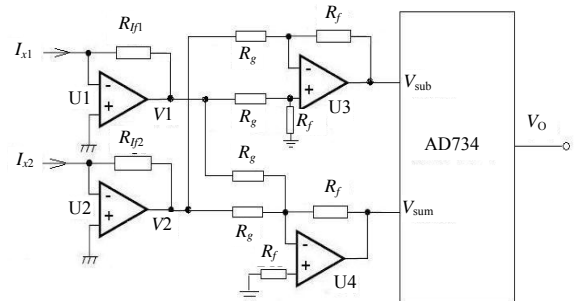


Fig.2 One-dimensional PSD detect circuit
图 2 一维 PSD 测量电路

式中： $V1, V2, V_{sub}, V_{sum}$ 为电路中相应节点处的电压； R_f, R_{f1}, R_{f2}, R_g 为运放反馈电阻。

在电阻匹配 ($R_{f1} = R_{f2} = R_f$ ，目前达到万分之二以内还是比较容易的)及运算放大器性能完全一致的情况下，式(2)变为：

$$x = \frac{Lx}{2} \frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} = \frac{Lx}{2} \frac{(V1 - V2) / R_f}{-(V1 + V2) / R_f} = -\frac{Lx}{2} \frac{V1 - V2}{(V1 + V2)} = \frac{Lx}{2} \frac{V_{sub}}{V_{sum}} \quad (4)$$

很明显，电阻的不匹配、电路的噪声、未消除的偏置、温度漂移等都会给测量电路的精度带来很大影响，这是需要在电路设计及实际调试中注意的主要问题。

3 PSD 位置分辨力及影响因素分析

PSD 的位置分辨力是其重要性能之一，它是指当入射光点在 PSD 表面移动时，系统可以测量出来的最小位移量。

为了比较详细地了解位置分辨力受到的影响，从式(1)开始。假设入射光移动 Δx 距离，则在输出电极上的电流信号也将发生微小变化，假设变化为 ΔI ，则式(5)成立：

$$\begin{cases} I_{x1} - \Delta I = \frac{Lx - (x + \Delta x)}{Lx} I_o \\ \Delta x = \frac{\Delta I}{I_o} Lx \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知，在仅考虑测量电路性能的情况下，PSD 的位置分辨力由测量电路的信噪比决定，电路噪声越低，光电流越大，则位置分辨力越高。实际上由式(4)也可得到同样结论。为了评估测量电路的影响，建立 PSD 测量电路的等效噪声模型，如图 3 所示。

图中 PSD 被作为电流源进行等效，其中的 I_o 为 PSD 输出的总光电流， I_D 是 PSD 的暗电流， r_i 是 PSD 的等效内电极电阻， C_j 是 PSD 的等效结电容， R_f 为电流 - 电压转换电路的反馈电阻， C_f 是反馈电容或 R_f 的等效分布电容； e_n 是运放 OP 的等效噪声输入电压， i_n 是运放 OP 的等效噪声输入电流。那么，在运算放大器 OP 输出端反映出来的噪声电压均方根值为：

$$V_n = \sqrt{V_s^2 + V_j^2 + V_{e_n}^2 + V_{i_n}^2 + V_{r_f}^2} \quad (6)$$

式中： $V_s = R_f \sqrt{2q(I_o + I_D)B}$ ，为光电流和暗电流的散粒噪声， q 为电子电荷量 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， B 为电路带宽；

$V_j = R_f \sqrt{4kTB/r_i}$ ，为 PSD 等效内电阻的热噪声， k 为玻尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $V_{e_n} = (1 + R_f/r_i)e_n \sqrt{B}$ ，为运

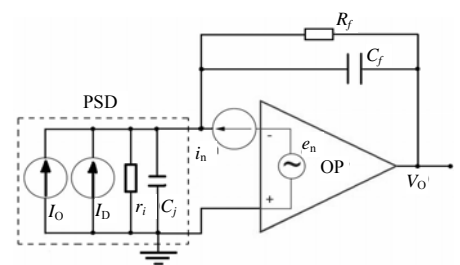


Fig.3 Equivalent noises model for PSD
图 3 PSD 测量电路的等效噪声模型

算放大器等效输入电压噪声在输出端的值； $V_{in} = R_f i_n \sqrt{B}$ ，为运算放大器等效输入电流噪声在输出端的值； $V_{rf} = R_{ff} \sqrt{4kTB/R_{ff}}$ ，为反馈电阻的热噪声。针对几种常用的典型低噪声运算放大器^[5](见表 1)，对 PSD 使用 S3932 的各种测量条件下的电路噪声进行了模拟。从表 1 可以知道，如果将运放的温漂看作噪声干扰，则温度的变化对测量电路的影响可能超过电路噪声本身，将在一定程度上影响 PSD 位置分辨力，这是应该注意的一个方面。

S3932 的峰值响应波长为 960 nm，内电阻典型值为 50 kΩ，饱和光电流为 100 μA，暗电流为 0.2 nA~20 nA，暗电流的温度系数为每摄氏度 1.15 倍，结电容为 80 pF。

表 1 运算放大器的性能

Table1 Typical performance of several OP

OP type	AD823	AD704	OP07	OP37	OP177	OP1177
i_n current noise density/(pA/Hz ^{1/2})	0.001	0.05	0.34	1	3	0.2
e_n voltage noise density/(nV/Hz ^{1/2})	16	15	10	3	118	7.9
offset voltage drift/(μV/)	2	1	0.3	0.2	0.1	0.3

首先在没有光电流和暗电流的情况下对测量电路的噪声进行模拟，反馈电阻分为 3 种：5 kΩ,50 kΩ,100 kΩ，结果见图 4。反馈电阻值在 5 kΩ~100 kΩ 时，采用 AD823,AD704,OP07 和 OP1177 的测量电路均具有较好的综合性能，测量电路的总体噪声电压在 0.4 μV 以下，但由于运放封装数量的原因，可以根据电路的规模进行选择；如对于一维 PSD 的测量可以选择双封装的 AD823 或四封装的 AD704。在相同的反馈电阻下，电路的热噪声对测量电路总的噪声的贡献是不可忽视的，因此在允许的情况下尽可能地降低电阻值。总体上，OP1177 具有最好的综合性能，在使用单运放的情况下可以考虑。因此应采用低噪声运放。

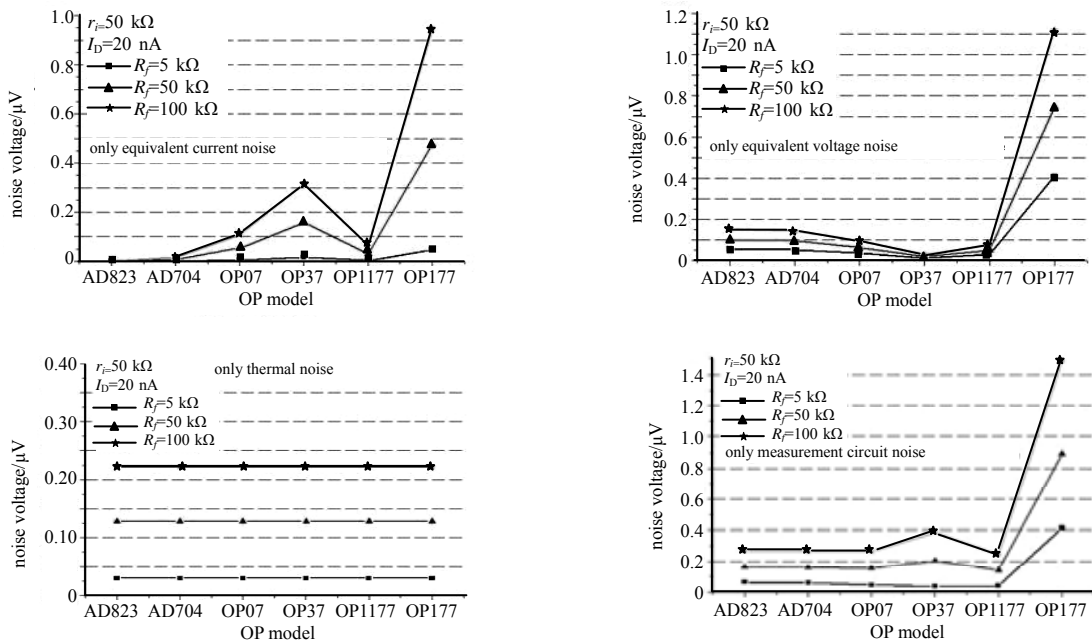


Fig.4 Equivalent noises simulation results for measurement circuit
图 4 测量电路自身等效噪声模拟结果

在不考虑电路影响的情况下，对光电流或暗电流的散粒噪声影响进行模拟，结果如图 5 所示。无论光电流或暗电流，其影响规律是一样的；反馈电阻 R_f 是该项噪声产生作用的主要推动因素，因此，在尽可能的情况下降低反馈电阻值。

在不同反馈电阻、不同光电流的情况下计算电路的等效噪声，PSD 的暗电流采用最大值 20 nA，结果见图 6。明显地，当反馈电阻较小时，只有 OP37 的综合性能最好，但当反馈电阻增加到 50 kΩ 时，OP1177 的综合性能最好，而 AD823,AD704 和 OP07 的综合性能相差不多，OP37 的性能却最差。实际上，总体噪声相差不多。当光电

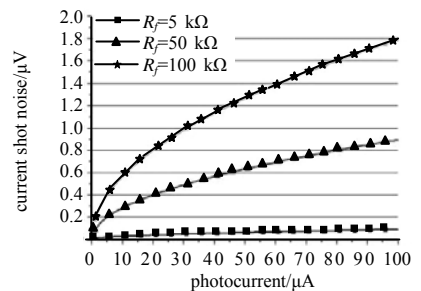


Fig.5 Current shot noises
图 5 电流散粒噪声

流增加到 20 μA 以上时, 综合性能均差不多; 并且, 光电流增大时, 其散粒噪声对总噪声的贡献将占据主导地位从而使电路本身的噪声影响下降。在上述各种情况下, 总噪声在 1 μV ~2 μV 左右。从图中来看, 当反馈电阻采用 50 $\text{k}\Omega$ 时, 光电流从 1 μA 增大到 100 μA 时, 噪声电压从 200 nV (相当于电路本身的噪声水平) 增加到 900 nV , 光电流对噪声贡献约为 0.7 μV ; 但理论上信噪比却从 $2.5 \times 10^5:1$ 提高到 $5.6 \times 10^6:1$ 。通过模拟计算发现, 在上述条件下, PSD 的暗电流在可能的变化范围内对噪声的贡献都不大, 几乎没有影响, 这是由于暗电流远小于光电流的缘故; 在暗电流与光电流可比时(比如存在强的背景光照明时, 将背景光产生的信号的作用视为暗电流), 其影响则加剧。

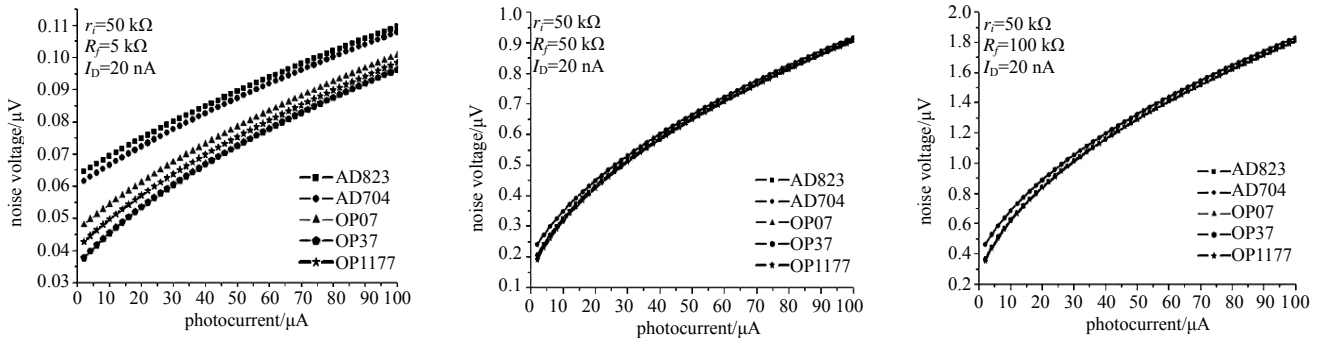


Fig.6 Equivalent noises simulation results for measurement circuit under different photocurrent
图 6 不同光电流下测量电路等效噪声模拟结果

图 7 是采用 AD704 测量电路的信噪比随光电流变化的曲线图。

4 合适光电流的选择

从上述模拟结果可以了解到, 在相应条件下, 光电流值对测量电路的信噪比有很大的影响而暗电流的影响却较小。对于同样的测量电路, 在不同的光电流下, 得到的信噪比是不一样的, 因此会影响 PSD 最终的位置分辨力。就上例而言, 当光电流为 1 μA 时, 信噪比为 2.7×10^5 , 对于 S3932, 按照式(5), 其位置分辨力实际上只达到约 44 μm , 要达到 1 μm 的位置分辨力, 信噪比应达到 $1.2 \times 10^6:1$, 对应的光电流约为 7 μA ; 当光电流值选择大于上述值时, 就可以满足位置分辨力达到 1 μm 的要求。这充分说明 PSD 的位置分辨力与照射光的强度的关系。

虽然光电流较小时, 总噪声也较小, 但如果小的程度超过了其它因素(如外部噪声)的影响程度, 实际上也是没有意义的, 它将完全被淹没在其它噪声中。而如果花费很大功夫将电路本身噪声也做得很低, 而光电流又较大时, 也没有意义, 因为此时主要由光电流的散粒噪声产生影响。所以, PSD 的工作条件需要根据实际情况进行选择, 以获得最好的综合效果。

5 结论

通过对测量电路的噪声模型进行分析, 认为电路噪声是影响 PSD 位置分辨力的一个重要因素, 同时入射光的散粒噪声在一定条件下也是影响 PSD 位置分辨力的一个重要因素。在入射光斑强度较低时, 测量电路的噪声对 PSD 位置分辨力影响占据主要位置, 但当入射光斑强度提高后, 虽然散粒噪声将占据噪声的主要部分, 但此时由于信噪比的提高程度大于噪声的影响, 使 PSD 位置分辨力反而得到提高。通过本文的模拟工作, 获得了 PSD 测量电路的设计和评估方法, 可以利用不同 PSD 器件的性能参数(如内电阻、暗电流、最大光电流等)进行设计以满足相应的位置分辨力要求。由于 PSD 的应用不仅受到测量电路(噪声、偏置、温度漂移)的影响, 实际还受到其它多个方面的影响, 如照射光源、背景光、环境温度^[6-8], 故真正要获得 PSD 的良好性能, 应该在其使用条件的各个方面进行综合设计和改进。

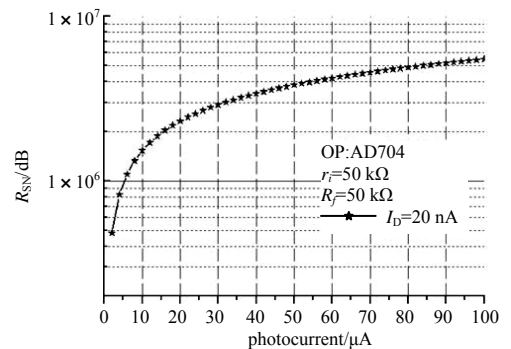


Fig.7 Typical SNR curve
图 7 典型的信噪比曲线

参考文献：

- [1] DUAN Jie,SUN Xiang-yang,CAI Jing-hai,etal. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007,36:281-284.
- [2] LI Zhong-ke,ZHAO Jing,MA Ji. Shaft Alignment Measuring Technique Based on LD/PSD/Prism Structure[J]. Computer Measurement & Control, 2005,13(11):1195-1196.
- [3] CHEN Yang,WANG Mu-kun. Research of Optical Non-contact Thickness-displacement Meter[J]. JOURNAL HARBIN UNIV.SCI.&TECH., 2003,8(3):86-89.
- [4] SHANG Hong-yan,ZHANG Guang-jun. Position Characteristic Research of One-dimensional PSD Continuously Scanned by Light Source[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005,16(1):40-44.
- [5] AD Inc. 2007 Designers' Reference Manual[Z]. 2007.
- [6] LV Ai-min,YUAN Hong-xing,HE An-zhi,et al. Research of the Effects of Measuring Conditions on PSD Localization[J]. Journal of Transducer Technology, 1999,18(4):43-44.
- [7] LV Ai-min,YUAN Hong-xing,HE An-zhi. Experimental study of the effect of light source on position precision of PSD[J]. LASER TECHNOLOGY, 2000,24(3):192-195.
- [8] SHANG Hong-yan,ZHANG Guang-jun. Relative study of position response characteristic of PSD with illuminating modes of light source[J]. OPTICAL TECHNIQUE, 2005,31(3):445-448.

作者简介：



江孝国(1968-),男,四川省泸州市人,研究员,主要研究方向为 CCD 测量系统及数据采集系统设计、图像处理、超高速图像捕获系统及其时间分辨测量系统 .email:j_xg_caep@sina.com.

文 龙(1969-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为精密机械设计.

张开志(1970-),男,四川省广汉市人,研究员,主要研究方向为核技术及应用.

李 洪(1969-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为精密机械设计.

杨兴林(1969-),男,四川省北川县人,高级工程师,从事加速器测控技术研究.

石金水(1964-),男,安徽省安庆市人,研究员,主要研究方向为核技术及应用.

王 远(1965-),男,江苏省无锡市人,高级工程师,主要从事加速器束参数测量及测控技术研究.