

基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计

王立刚, 建天成, 牟海维, 刘 强, 付天舒

(大庆石油学院 电子科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 利用噪声和信噪比的理论公式及等效电路模型, 分析光电二极管检测电路噪声产生的原因. 给出低噪声光电检测电路的设计原则, 并设计基于光电二极管低噪声前置放大电路. 结果表明: 光电二极管的噪声主要是光转换器件内部电阻及 PN 结中载流子随机涨落引起的热噪声和散粒噪声, 该噪声与光电二极管结构、材料、温度、工作电压及外部环境的干扰有关; 前置放大电路的噪声主要与前置放大器的噪声电压、噪声电流、温度变化及反馈电阻有关.

关 键 词: 光电检测; 噪声分析; 电路设计; 微弱信号

中图分类号: TN722.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1891(2009)02-0088-05

经光电二极管转换的电信号通常都比较微弱, 检测微弱光电信号很容易受噪声的干扰. 在设计光电检测电路时, 要尽量减小噪声, 提高系统的信噪比和检测分辨率. 前人^[1-3]研究表明, 在光电检测电路中, 光电转换器件和前置放大电路的噪声对系统影响比较大, 但对噪声源的分析及设计低噪声光电检测电路的论述^[4-7]并不全面. 笔者分析了基于光电二极管光电检测电路中噪声产生的原因、特点, 提出低噪声光电二极管检测电路设计原则与设计方法.

1 光电二极管的噪声

微弱光电信号检测的光电流一般为 nA 至 μA 级. 探测器 SPICE 模型^[1] 见图 1. 由图 1 可见, 该模型由一个被辐射光激发的电流源、二极管、结电容和寄生的串联及并联电阻组成. 结电容 C_{po} 是由光电二极管的 P 型和 N 型材料之间的耗尽层宽度产生的, 耗尽层窄, 结电容的值大; 相反, 较宽的耗尽层表现出较宽的频谱响应; 硅二极管结电容的数值范围为 3 pF 到几千 pF. 漏电阻 R_D 与光电二极管零偏或正偏有关, 在室温下, 该电阻可超过 100 M Ω , 是主要的噪声源, 即图 1 中的 e_{po} ; R_D 产生的噪声称为热噪声和散粒噪声电流; I_P 为光电流; I_S 为散粒噪声电流, 与光电流、暗电流和背景电流有关; R_s 为体电阻, 为 10 ~ 1 000 Ω , 此电阻很小, 仅对电路的频率有影响. 光电二极管的主要噪声是热噪声和散粒噪声.

1.1 热噪声

由导电材料中载流子不规则热运动在材料两端产生随机涨落的电压或电流称热噪声^[2], 热噪声电压均方值 U_T^2 取决于材料的温度、电阻及噪声等效带宽, 其一般关系式为

$$U_T^2 = 4KT \int_{f_1}^{f_2} R(f) df, \quad (1)$$

式中: K 为波尔兹曼常数; T 为材料的绝对温度; $R(f)$ 为光电检测电路中的总电阻随频率 f 的变化关系, 纯电阻时, $R(f)$ 与频率无关, 则

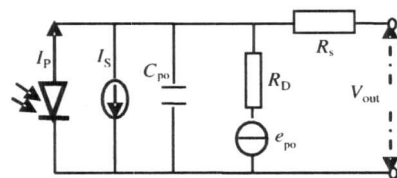


图 1 光电二极管 SPICE 模型

收稿日期: 2009-02-02; 审稿人: 曹 文; 编辑: 王文礼

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目资助(11521012)

作者简介: 王立刚(1959—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测与测量、模式识别与人工智能等方面的研究.

$$U_T^2 = 4KTR\Delta f. \quad (2)$$

当 $T=300\text{ K}$ 时, $K T=4.14\times 10^{-21}\text{ J}$, 电阻的热噪声电压 U_T 和热噪声电流 I_T 的均方值^[6] 分别为

$$U_T = \sqrt{4KTR\Delta f} = 1.29\times 10^{-10} \sqrt{R\Delta f}, \quad (3)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{4KT\Delta f}{R}} = 1.29\times 10^{-10} \sqrt{\Delta f/R}, \quad (4)$$

式中: Δf 为噪声等效带宽. 由式(3)和式(4)可以看出, U_T 和 I_T 与 R , T 及 Δf 有关, 电阻 R 是主要的热噪声源, 在 R 不变时, 减少 Δf 和 T 的值可有效减少热噪声. 如在室温下, 对于 $30\text{ k}\Omega$ 的电阻, 如果电路的放大倍数为 1, 则输出的热噪声电压有效值在电路通频带 $\Delta f=5\text{ MHz}$ 时, $U_T=50\text{ }\mu\text{V}$; $I_T=0.37\text{ nA}$. 在这种状态下, 进行 nW (或 pW) 级测量将很困难.

1.2 散粒噪声

由光生载流子形成和流动密度的涨落造成的噪声称为散粒噪声, 散粒噪声^[2] 电压均方值 U_s^2 和电流均方值 I_s^2 分别为

$$U_s^2 = RI_s^2 = 2RqI\Delta f, I_s^2 = 2qI\Delta f, \quad (5)$$

式中: q 为电子电荷量; I 为通过光电二极管的光电流 I_P 、暗电流 I_D 及背景光电流的平均值. 若只考虑光电流, 令 I_D 为 $0.15\text{ }\mu\text{A}$, $\Delta f=5\text{ MHz}$, 则散粒噪声电流 I_s 为 0.387 nA , 电压为 $11.6\text{ }\mu\text{V}$.

由式(3)和式(4)可知, 散粒噪声电流和电压的均方值与 Δf 及 I 成正比, 减少 Δf 和 I 可有效降低散粒噪声.

1.3 总噪声电流

热噪声电流和散粒噪声电流是相互独立的, 则总的噪声电流 I_N 的均方值 I_N^2 为

$$I_N^2 = I_T^2 + I_s^2. \quad (6)$$

即 $I_N = \frac{1}{R} \sqrt{U_T^2 + U_s^2} = 0.54\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{A}$.

$R_f=2\text{ M}\Omega$ 时, 经前置放大后的噪声电压 V_N 为

$$V_N = I_N R_f = 1.08\text{ mV}. \quad (7)$$

若直流光电流约为 $0.15\text{ }\mu\text{A}$, 则光电转换信噪比 SNR 为

$$\text{SNR} = \frac{I_P}{I_N} = \frac{0.15}{0.54\times 10^{-3}} = 278. \quad (8)$$

2 前置放大器的噪声

如果光强变化属于缓变过程, 可忽略硅光电二极管结电容的影响^[3]. 为分析放大电路对检测系统的噪声影响, 先画出放大电路噪声等效模型, 见图 2, 其中 $\overline{e_n^2}$ 和 $\overline{i_n^2}$ 分别为运算放大器的均方根输入噪声电压和电流, $\overline{e_{nRf}^2}$ 为运算放大器反馈电阻产生的热噪声电压, $\overline{e_n^2}$ 和 $\overline{i_n^2}$ 分别为

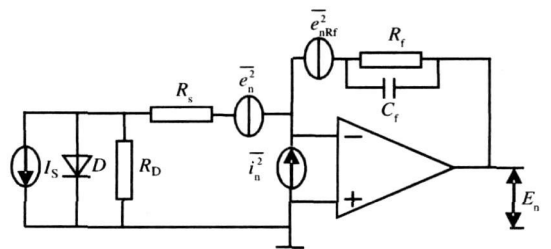


图 2 放大电路噪声等效模型

$$\overline{e_n^2} = \int_0^{\Delta f} e_n^2 df = e_n^2 \Delta f, \quad (9)$$

$$\overline{i_n^2} = \int_0^{\Delta f} i_n^2 df = i_n^2 \Delta f, \quad (10)$$

式中: e_n^2 为运算放大器的输入噪声电压密度; i_n^2 为运算放大器的输入噪声电流密度.

运算放大器的噪声电压和噪声电流对组合电路的影响, 可视为图 2 中运算放大器输入噪声电压源和噪声电流源的作用, 它们对于组合电路输出端噪声电压的贡献 E_{n1} , E_{n2} 分别为

$$E_{n1} = (\overline{i_n^2 R_f^2})^{\frac{1}{2}} = (i_n^2 \Delta f R_f^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{i_n}{2} \sqrt{R_f / C_f}, \quad (11)$$

$$E_{n2} = (e_n^2 \Delta f R_f^2 / R_D^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{e_n}{2R_D} \sqrt{R_f / C_f}. \quad (12)$$

运算放大器存在失调电压和失调电流,其值随温度漂移,虽然在电路调整时能加以补偿,但是温漂的影响将在电路的输出端产生噪声.失调电压和失调电流的温漂对放大电路输出的贡献 E_{TV} 、 E_{TI} 分别为

$$E_{TV} = \frac{\alpha_U \Delta t R_f}{R_D}, \quad (13)$$

$$E_{TI} = \alpha_i \Delta t R_f, \quad (14)$$

式中: α_U 为输入失调电压的温漂系数; α_i 为输入失调电流的温漂系数; Δt 为温度变化. 反馈电阻 R_f 对输出端噪声的影响 E_{nR_f} 为

$$E_{nR_f} = \left[4K T R_f \Delta f \left(\frac{R_f}{R_D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{R_f}{R_D} \sqrt{KT / C_f}. \quad (15)$$

各种噪声源对光电二极管与运算放大器组合电路总的影响导致电路输出噪声加大,限制了对微弱光强信号的探测.由于各噪声互不相关,其综合影响为单独存在时的均方根值:

$$E_n = \sqrt{E_{nRf}^2 + E_{n1}^2 + E_{n2}^2 + E_{nD1}^2 + E_{nD2}^2 + E_{TI}^2 + E_{TV}^2}, \quad (16)$$

式中: $E_{nD1} = (2eI_P \Delta f R_f^2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{eSPR_f}{2C_f} \right)^{\frac{1}{2}}$, S 为光电二极管的灵敏度; P 为入射的光功率; $E_{nD2} = \left(\frac{4K T \Delta f R_f^2}{R_D} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{K T R_f}{R_D C_f} \right)^{\frac{1}{2}}$. 光电二极管信号电流经运算放大器后的输出 E_o 为

$$E_o = I_P R_f = SPR_f. \quad (17)$$

故电路组合的信噪比^[4]为

$$\text{SNR} = \frac{E_o}{E_n} = \frac{SPR_f}{\sqrt{E_{nRf}^2 + E_{n1}^2 + E_{n2}^2 + E_{nD1}^2 + E_{nD2}^2 + E_{TI}^2 + E_{TV}^2}}. \quad (18)$$

计算出光电检测电路的信噪比,修改光电检测电路的器件参数,以满足设计要求.

3 外部噪声

光电检测电路外部噪声包括辐射源的随机波动和附加的光调制、光路传输介质的湍流、背景起伏、杂散光的入射、振动、电源的波动及检测电路所受到的电磁干扰等.这些噪声扰动可以通过稳定辐射光源、遮断杂光、选择偏振面或滤波片、电气屏蔽、滤波及提高电源的稳定度等措施加以改善或消除.

4 低噪声光电检测电路的设计

4.1 基本原则

(1)光电检测电路采用电流放大型,光电二极管采取无偏压的工作方式,这样可减小光电二极管的暗电流,提高检测精度.

(2)电路的反馈电阻 R_f 在满足通频带宽度和输出信号范围的情况下不能太大,否则将产生较大的噪声.

(3)尽量减小电路的通频带 ($\Delta f = \frac{1}{2\pi R_f \cdot C_1}$),增大输出信噪比,在 R_f 两端并联电容 C_1 构成滤波电路,减小输出噪声和自激现象.

(4)在选用元器件时^[5],要使用低噪声器件.

(5)光电二极管的内阻尽可能大,结电容尽可能小,以增大输出信噪比.

- (6) 电路的环境温度 T 越小, 输出信噪比越大, 要尽可能使检测电路在较低的温度环境下工作. 温度越低, 光电二极管的内阻越大.
- (7) 为了减小系统的外部噪声, 光电检测电路必须用金属外壳来屏蔽外界电磁干扰, 同时外壳接地. 要防止电路板上电源线对反馈回路和输入端漏电, 产生噪声或漂移. 输入端引线应采用高绝缘导线, 如果需要, 可以将放大器装配在绝缘子上. 要严格连接, 避免电缆振动, 并尽可能缩短输入连接线路. 反馈电阻不能太大, 避免干扰. 线路板上的布线要合理, 必要时可将光电二极管和反馈电阻悬浮, 与运放直接相连, 以减小泄漏电流, 提高检测的灵敏度^[9]. 光电二极管输出端到放大器的引线距离要尽量短, 并且引线尽量对称, 保证阻抗基本匹配. 放大器输入输出应避免交叉布线, 防止相互耦合.
- (8) 根据测量光信号的大小、特点等综合因素, 合理选择光电器件的结构、电阻、电容、前置放大电路和后继放大电路的形式.
- (9) 光电器件源电阻的大小是选择前级放大元器的重要依据^[6], 对光电二极管可选用运算放大器做前级放大元器.
- (10) 无偏压下, 光电二极管的暗电流最小.

4.2 电路设计

依据低噪声光电检测电路设计的基本原则, 设计的低噪声光电二极管探测器前置放大电路^[7]见图 3. 其中: 硅光电二极管选用 UV-040B 型, 结面积为 0.81 nm^2 , $R_D = 500 \text{ M}\Omega$, 噪声电流为 $5.8 \times 10^{-15} \text{ A}$, $\text{NEP} = 89 \times 10^{-15} \text{ W}$; 运算放大器采用 OPA725 型, 它具有优良的低偏置电流, 低漂移特性, 非常低噪声; 反馈金属电阻选择 $2 \text{ M}\Omega$, 可得到约为 4 V 的输出电压; 根据检测光信号频率, 选云母电容 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 ; 放大器供电电路电源稳定性为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$, 其滤波电容选 $0.2 \text{ }\mu\text{F}$; 运算放大器的调零电阻为 $10 \text{ k}\Omega$, 2 个容量为 $(0.1 \sim 0.2) \text{ }\mu\text{F}$ 的电容连接在运算放大器的正负电源和地之间, 用于滤除电源的波动.

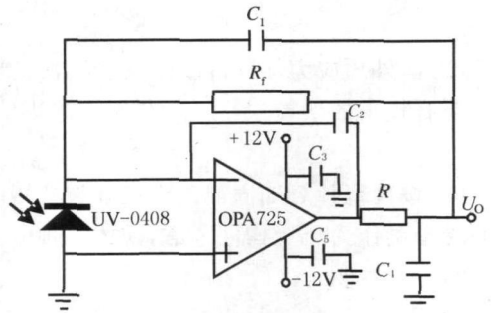


图 3 低噪声光电二极管探测器前置放大电路

已知温度变化 Δt 为 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, T 为 300 K , $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $U_o = -IR_f = -R_f P$. 当入射光功率 P 为 $1 \text{ }\mu\text{W}$ 时, 可算出输出信号电压为 0.54 V , 等效输出噪声电压约为 3 mV , 信噪比为 90. 光电二极管工作于零偏压, 光电二极管和运算放大器的 2 个输入端同极性相连, 运算放大器 2 输入端之间的输入阻抗 Z_{in} 为光电二极管的负载电阻, $Z_{in} = R_f / (A + 1)$, 其中 A 为放大器的开环放大倍数, 当 $A = 10^{11}$, $R_f = 2 \text{ M}\Omega$ 时, Z_{in} 很小, 可以认为光电二极管处于短路工作状态, 能测量出近于理想的短路电流. 处于电流放大状态的运算放大器的输出电压 U_o 与输入短路光电流成比例, 并有 $U_o = I_{sc} R_f = R_f S P$, 输出信号与输入光功率成正比.

图 3 中低噪声光电二极管探测器前置放大电路因输入阻抗低而响应速度较高, 并且放大器噪声较低, 信噪比提高. 这些优点使其可广泛应用于弱光信号的检测中, 经适当的参数调整, 可检测 nA 级的弱光信号.

5 结束语

光电二极管的噪声主要是光转换器件内部电阻及 PN 结中载流子随机涨落引起的热噪声和散粒噪声, 该噪声与光电二极管结构、材料、温度及工作电压及外部环境的干扰有关. 前置放大电路的噪声主要与前置放大器的噪声电压、噪声电流、温度变化及反馈电阻有关, 还要使其阻抗匹配, 供电电源稳定度高, 环境温度恒定等. 文中设计的低噪声光电二极管检测电路仅从光电二极管、放大器及阻抗匹配方面去降低噪声. 在实际电路设计时, 不但选择相应的电元件, 还要考虑光信号的特点, 才能设计出符合要求的低噪声光电检测电路.

参考文献:

- [1] 何俄章. 线性测量系统中光电探测电路的设计[J]. 达县师范高等专科学校学报:自然科学版, 2000, 10(2): 109—111.
- [2] 王林涛, 李开成, 张健梅. 低噪声光电检测电路的设计和噪声估算[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(3): 70—71.
- [3] 刘正岐, 付文羽. 影响光电检测电路信噪比的因素[J]. 延安大学学报:自然科学版, 2003, 22(4): 41—43.
- [4] 刘彬, 张秋婵. 光电检测前置放大电路的设计[J]. 燕山大学学报, 2003, 27(3): 193—196.
- [5] 李晓坤. 精密光电检测电路设计方案[J]. 电子产品世界, 2003(23): 37—39.
- [6] 雷玉堂, 王庆友, 何加铭, 等. 光电检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004: 71, 156—162.
- [7] 霍成文, 李伟, 李进, 等. 光电探测微弱信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报, 2005, 22(3): 160—162.

(上接第83页)

3 结论

(1)采用体外预应力加固后的混凝土梁在外荷载作用下, 开裂前, 只通过增加预应力筋的预拉力不能显著提高构件开裂前的抗弯刚度; 开裂后, 体外预应力筋的张拉力越大, 梁体裂缝的闭合性能越好, 所抵消的外荷载弯矩越大, 梁体刚度也会相对增大, 而在非预应力筋屈服前, 梁体的挠度越大, 荷载提升比例随之增加.

(2)体外预应力加固混凝土梁受二次效应的影响, 利用体内无粘预应力筋刚度和挠度按规范计算与实测结果有较大的误差. 考虑二次效应的影响后, 利用修正过的公式计算与实测结果比较接近, 误差缩小30%~40%.

(3)按规范计算加固混凝土梁开裂弯矩时, 考虑混凝土强度影响的截面塑性的降低, 将体外预应力加固混凝土梁作为压弯构件考虑, 视体外预应力为偏心压力, 计算在正常使用荷载状态下的最大裂缝宽度与实测结果基本吻合.

参考文献:

- [1] 楼铁炯, 秦从律, 郭乙木, 等. 体外预应力混凝土梁的分析方法研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1272—1276.
- [2] 张耀庭, 邱继生, 黄恒卫. 体外预应力混凝土梁的研究现状综述[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2002, 19(4): 86—92.
- [3] Arıyaw arden a N D. Design of pre-cast pre-stressed concrete members using external pre-stressing[J]. PCI Journal, 2002, 47(2): 84.
- [4] 吴小涵, 吕西林. 体外张预应力钢筋混凝土结构非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5): 1—4.
- [5] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [6] 熊学玉, 王寿生. 体外预应力混凝土梁挠度分析[J]. 工业建筑, 2004, 34(7): 12—15.
- [7] 熊学玉. 体外预应力结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 93—95.
- [8] 贾宏强. 体外预应力加固梁的实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.

Optimization of the large cone angle parameters of downhole oil/water separation hydrocyclone/2009, 33(2): 78—80WANG Zuo-ce¹, YU Ling-ling¹, XU Yan¹, WANG Jia-xin², YUAN Jing-wu³(1. *Mechanical Science and Engineering College, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China*; 2. *Shenyang Oil Recovery Plant, Liaohe Oilfield, Xinmin, Liaoning 110316, China*; 3. *Great Wall Drilling Corp. Ltd., Panjin, Liaoning 124010, China*)

Abstract The numerical simulation of the downhole oil/water separation hydrocyclone was carried out, and the distribution rules of axial velocity and tangential velocity of the flow inside hydrocyclone were obtained on different large cone angle. Moreover, focusing on the mixed medium of volume fraction 2% and oil drop let particle size 40 μm , the volume fraction distribution of oily-water was analyzed. When the large cone angle was 26, the biggest oil phase volume fraction locates at the center of the hydrocyclone, which contains the volume fraction as high as 95.0%; while the volume fraction is very small near the wall surface, which indicates that the separation effect of the hydrocyclone is satisfied. The numerical simulation can provide a foundation for further study of structural optimization design of hydrocyclones.

Key words: large conical section; hydrocyclone; downhole oil/water separation; Fluent software; numerical simulation

Investigation of the external pre-stressed reinforced concrete beams performance/2009, 33(2): 81—83LU Zhao-hong¹, YU Wei-gang², YANG Dong-cai³, ZHANG Yun-feng¹, LI Wen¹(1. *Civil Engineering School, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China*; 2. *Jiawei Construction Design Corp. Ltd., Qiqihar, Heilongjiang 161000, China*; 3. *Jianxing (Daqing) Construction Engineering Corp. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163117, China*)

Abstract Researches have been carried out in external pre-stressed reinforced concrete beams by the test method to find out the stiffness and cracking performance, the test results were compared with the theoretical calculation analysis. By testing eccentricity different sizes and different pre-compressive stress on the beams, the effects of second eccentric moments on the reinforced concrete beams stiffness were gained, and the calculation formula were amended according to analysis results. Besides, considering the concrete impact of the lower section of plastic, the crack-resistant of reinforced concrete beams was studied. The results indicated that the short-term value calculated by the modified formula is closer to actual value, and the irregularities reduced by 30% ~ 40%. Considering the concrete impact of the lower section of plastic to get the cracking moment, viewing the stressed value as eccentric pressure to calculate the reinforced concrete beam width of the largest crack, the result is closer to the actual value, and the result can give basis for theoretical analysis and engineering design of extern.

Key words: external pre-stressed force; reinforced beams; short term stiffness; crack-resistant; second-order effect

Numerical simulation of heat transfer to insulating glass in multiple coupled fields/2009, 33(2): 84—87WU Guo-zhong¹, QU Na¹, GU Xiao-dong², LV Yan³, LI Dong¹(1. *Civil Engineering College, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China*; 2. *Bureau of Land and Resources of Longjiang County, Qiqihaer, Heilongjiang 161100, China*; 3. *Information Technology Center, Daqing Petrochemical Complex, Daqing, Heilongjiang 163714, China*)

Abstract According to computational fluid dynamics and heat transfer theory, the mathematics and physical model of heat transfer of insulating glass in multiple coupled fields (heat conduction, natural convection and radiation) were established. Though CFD simulation, the air flow characteristics of hollow glass was simulated. Considering three different cases of heat transfer process, the impaction on the heat transfer coefficient of hollow glass with heat conduction, natural convection, radiation and coupling heat transfer were compared. The results show that compared to only considering heat conduction traditionally, the radiation of air in insulating glass has more impaction on its heat transfer coefficient in considering insulating glass intracavity radiation and natural convection.

Key words: insulating glass; multi-coupled fields; heat transfer coefficient; numerical simulation

Noise analysis and circuit design of detection circuit based on photodiode/2009, 33(2): 88—92

WANG Li-gang, JIAN Tian-cheng, MU Hai-wei, LIU Qiang, FU Tian-shu

(*College of Electronic science, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China*)

Abstract This paper analyzes why photoelectric detection circuit makes a noise according to theoretical formula and the equivalent circuit model of noise and SNR. Noises of Photodiode are mainly thermal noises and shot noises which are caused by internal resistor of Optical conversion device and the random fluctuation of PN junction carrier. These noises have some connection with structures of photodiode, materials, temperature, operating voltage and the external environmental interference. The noise of the pre-amplifier circuit has more to do with noise voltage of the pre-amplifier circuit, noise current, temperature variation and feedback resistance. This paper designs the pre-amplifier circuit with low noise based on the photodiode and gives the principle of designing the photoelectric detection circuit with low noise according to analytical result.

Key words: photoelectric detection; noise analysis; circuit design; weak signal