

## 基于光电二极管反偏的光电检测电路的噪声分析

周玉蛟, 任侃\*, 钱惟贤, 王飞

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 噪声性能是限制光电检测电路探测能力的重要因素, 针对这个问题, 设计了基于光电二极管反偏的光电检测电路并分析其电路噪声, 分析噪声时, 创新性地从光电检测电路结构出发, 将整个电路等效为光电二极管、晶体三极管、运算放大器三个级联模块, 详尽分析了每个模块的噪声来源及其相关因素, 计算每个模块的输出噪声, 最终得出整个电路的输出噪声电压模型。根据输出噪声电压模型, 确定了电路的各项参数, 预估电路的输出噪声电压, 最后, 搭建实际电路, 测量电路的噪声性能, 验证了输出噪声电压模型的准确性, 实现低噪声光电检测电路的设计。

**关键词:** 光电检测电路; 低噪声; 光电二极管; 输出噪声电压模型; 级联模块

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0117003

## Noise analysis of photoelectric detection circuit based on photodiode reverse bias

Zhou Yujiao, Ren Kan\*, Qian Weixian, Wang Fei

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The noise figure is an very important factor which can limit the detection capability of the photoelectric detection circuit. To solve the problem, a photoelectric detection circuit was designed in the condition of the photodiode reverse bias, and then the circuit noise was analyzed indetail. When analyzing the noise, the structure of the photoelectric detection circuit was focused on. The whole circuit could be equivalent to three cascade module which were the photodiode module, the triode module and the operational amplifier module. Then, the noise source and the associated factors of each module were analyzed, and the output noise voltage of each module was calculated. Finally, the output noise voltage model of the whole circuit could be obtained. At last, the parameters of the whole circuit were determined according to the module, the circuit was built, the noise of circuit was measured, the accuracy of the output voltage model was verified. It realizes the design of photoelectric detection circuit.

**Key words:** photoelectric detection circuit; low noise; photodiode; output noise voltage model; cascade module

收稿日期: 2015-05-07; 修订日期: 2015-06-08

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20130769)

作者简介: 周玉蛟(1991-), 女, 硕士生, 主要从事模拟电路设计等方面的研究。Email: 475413427@qq.com

\* 通讯作者: 任侃(1983-)男, 讲师, 硕士, 主要从事图像与视频处理、内容检索、人机交互界面设计和用户体验方面的研究。

Email: k.ren@njust.edu.cn

## 0 引言

目前,光电检测技术已被应用到许多领域,理想情况下,只要存在光辐射信号的地方,就可以利用光电检测电路将信号检测出来<sup>[1]</sup>。然而当被检测的信号非常微弱时,常常会出现信号淹没在噪声中的情况,因此,对光电检测电路进行噪声分析,具有重要的意义。参考文献[1-2]中,王立刚等人着重分析了光电二极管的噪声,提出了设计低噪声电路的原则和方法;参考文献[3-5]中,相关学者从降低电路噪声的角度,设计出了低噪声的放大器,以供光电检测电路使用;参考文献[6-8]中,相关学者分别从源阻抗匹配、数字滤波等角度研究了降低光电检测电路噪声的相关措施。

然而,现有的对光电检测电路的噪声分析,多是基于光电二极管无偏情况下,不足之处在于无偏条件下,光电二极管光电转换效率低,探测能力较反偏时弱。因此,文中提出一种基于光电二极管反偏的光电检测电路,在进行噪声分析时,将整个电路等效成三个级联模块,计算电路的输出噪声电压,分析影响电路噪声的各项因素,并且搭建了低噪声光电检测电路,进行相关测量,验证了噪声模型的有效性。

## 1 基于光电二极管反偏的光电检测电路设计

光电检测电路中,光电二极管有三种工作状态:正偏、无偏、反偏。处于反偏状态时,反偏偏压会加快光生载流子的运动,相较于无偏和正偏情况,能产生更大的光电流,更利于弱光条件下的检测<sup>[1]</sup>。因此,光电检测电路的设计思路为,光电二极管接反向高压,探测微弱的光信号,将其转换为电流信号,后续用三极管对电信号进行流压转换,再用运算放大器进行电压放大,实现对弱光信号的检测,其电路结构如图 1 所示。

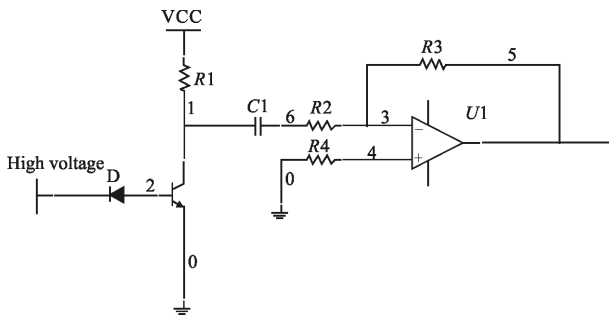


图 1 光电检测电路图

Fig.1 Circuit of photoelectric detection

电路中的每个器件都会产生相应的噪声,影响整个电路的噪声输出,下文将对电路进行详尽的噪声分析,确定电路噪声的影响因素,器件的型号和规格。

## 2 光电检测电路的噪声分析

光电检测电路存在的噪声包括热噪声、散粒噪声、 $1/f$  噪声、产生-复合噪声和温度噪声,分析光电检测电路时主要考虑热噪声、散粒噪声<sup>[2]</sup>,两种噪声的产生机理分别如下。

(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,可表示为:

$$U_{tn}^2 = 4KTR\Delta f \text{ 或 } I_{tn}^2 = 4KT\Delta f/R \quad (1)$$

式中: $K$  为玻耳兹曼常数,其值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T$  为工作温度,为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(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,一般存在 PN 结的地方即存在散粒噪声,可表示为:

$$U_{sn}^2 = 2qIR\Delta f \text{ 或 } I_{sn}^2 = 2qI\Delta f \quad (2)$$

### 2.1 光电二极管的噪声

光电二极管的等效模型如图 2 所示<sup>[1]</sup>。

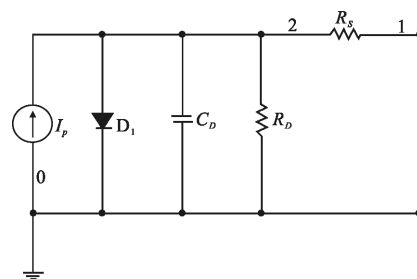


图 2 光电二极管的等效模型

Fig.2 Equivalent model of photodiode

由图可知,光电二极管在有光条件下,可等效为由一个被辐射光激发的电流源  $I_p$ 、普通二极管  $D_1$ 、结电容  $C_D$ 、漏电阻  $R_D$  和体电阻  $R_S$  组成。其内部存在的噪声类型有:电阻产生的热噪声、电荷通过 PN 结产生的散粒噪声,将其噪声等效为噪声电流源和噪声电压源,可画出光电二极管的等效噪声模型,如图 3 所示。

其中  $E_{m1}$  和  $E_{m2}$  分别为电阻  $R_D$  和电阻  $R_S$  产生的热噪声电压源, $I_{sn}$  为光电二极管的散粒噪声电流源。

上述三个噪声源为无关噪声，分别计算其在输出端产生的影响。

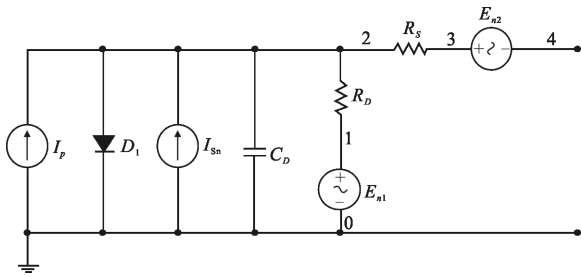


图 3 光电二极管的等效噪声模型

Fig.3 Equivalent noise model of photodiode

(1) 散粒噪声源  $I_{Sn}$  在输出端的影响：

$$I_{n1} = I_{Sn} \quad (3)$$

(2) 热噪声源  $E_{n1}$  在输出端的影响：

$$I_{n2} = \frac{E_{n1}}{R_D + R_S} \quad (4)$$

(3) 热噪声源  $E_{n2}$  在输出端的影响：

$$I_{n3} = \frac{E_{n2}}{R_D + R_S} \quad (5)$$

根据噪声叠加定律<sup>[2]</sup>得，三个噪声源在输出端的综合影响为：

$$I_{no}^2 = I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + I_{n3}^2 = I_{Sn}^2 + \frac{E_{n1}^2 + E_{n2}^2}{(R_D + R_S)^2} = 2qI_p \Delta f + \frac{4KT \Delta f}{R_D + R_S} \quad (6)$$

因此，光电二极管的输出噪声可等效为公式(6)的噪声电流源，其等效模型如图 4 所示。

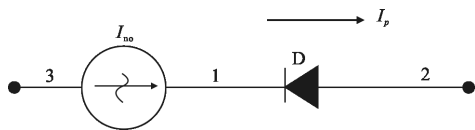


图 4 光电二极管的简易噪声模型

Fig.4 Simple noise model of the photodiode

由公式(6)可知，光电二极管的输出电流噪声与电路通频带  $\Delta f$ 、光电流  $I_p$ 、体电阻  $R_S$ 、漏电阻  $R_D$  有关，实际选用光电二极管时需综合考虑上述参数，选择在无光条件下  $R_S$  和  $R_D$  较大的型号。

### 2.2 三极管的噪声

光电检测电路中探测到的信号可视为小信号，分析三极管时可用小信号等效模型，其小信号等效模型如图 5 所示。

其中  $r_{bb'}$  是基区电阻（约为十几到一二百欧）， $r_{b'e}$  是发射结电阻（与发射极电流  $I_e$  有关，通常大于

$r_{bb'}$ ）， $r_{b'e}$  为集电结电阻（几兆欧以上，分析时一般可视为开路）， $r_{ce}$  为输出电阻（约大于十几千欧）， $c_{b'e}$  为发射结电容（与  $I_e$  有关）， $c_{b'c}$  为集电结电容（计算时常将其视为开路）， $g_m$  为晶体管跨导<sup>[4]</sup>。

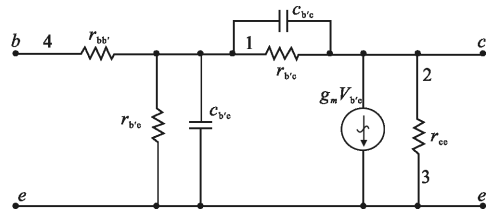


图 5 三极管的小信号模型

Fig.5 Small signal model of the triode

由三极管的等效模型及其工作特性分析可知，三极管中存在的噪声类型有：

(1) 基区电阻  $r_{bb'}$  上产生的热噪声，噪声电压均方值为  $E_b^2 = 4KT r_{bb'} \Delta f$ ；

(2) 射级电流  $I_E$  产生的散粒噪声，可将其作用效果分到基区和集电区，其噪声电流均方值为  $I_c^2 = 2qI_E \Delta f = 2q(I_B + I_C) \Delta f = I_b + I_c$ ；

将上述噪声等效为噪声电压源和电流源，可得出三极管的噪声模型如图 6 所示。

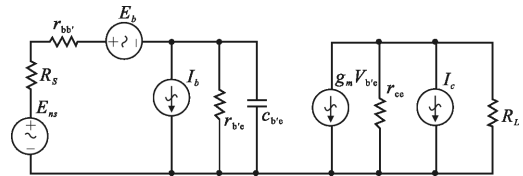


图 6 三极管等效噪声模型

Fig.6 Equivalent model of triode

图中  $E_{ns}$  为源电阻产生的热噪声， $E_b$  为基区电阻  $r_{bb'}$  产生的热噪声， $I_b$  为基区的散粒噪声， $I_c$  为集电区产生的散粒噪声。分别计算各噪声源在输出端产生的影响：

(1) 源电阻热噪声源  $E_{ns}$

$$E_{01} = g_m V_{b'e} (E_{ns}) (R_L // r_{ce}) = g_m E_{ns} \frac{r_{b'e}}{R_S + r_{b'b} + r_{b'e}} (R_L // r_{ce}) \quad (7)$$

(2) 基区电阻热噪声源  $E_b$

$$E_{02} = g_m E_b \frac{r_{b'e}}{R_S + r_{b'b} + r_{b'e}} (R_L // r_{ce}) \quad (8)$$

(3) 散粒噪声源  $I_b$

$$E_{03} = g_m V_{b'e} (I_b) (R_L // r_{ce}) = g_m I_b \frac{(R_S + r_{b'b}) r_{b'e}}{R_S + r_{b'b} + r_{b'e}} (R_L // r_{ce}) \quad (9)$$

(4) 散粒噪声源  $I_c$

$$E_{oi}=I_c(R_L/r_{ce}) \quad (10)$$

根据噪声叠加原理<sup>[2]</sup>,输出总噪声为上述各项噪声源作用的均方和,计算时,一般会认为  $\beta_0=g_m r_{b'e}$ <sup>[3]</sup>,则可得三极管的输出噪声为:

$$E_{no}^2=(4KT\Delta f(R_S+r_{b'b}))\left[\frac{\beta_0}{R_S+r_{b'b}+r_{b'e}}(R_L/r_{ce})\right]^2+2qI_B\Delta f\left[\frac{\beta_0(R_S+r_{b'b})}{R_S+r_{b'b}+r_{b'e}}(R_L/r_{ce})\right]^2+2qI_C\Delta f(R_L/r_{ce})^2 \quad (11)$$

级联运算时,取  $R_S$  为 0。由此,三极管内部的所有噪声在输出端的影响可由一个输出噪声电压源代替,其模型如图 7 所示。

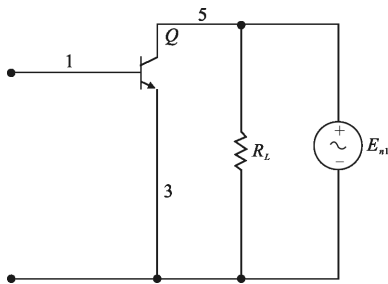


图 7 三极管的简易噪声模型  
Fig.7 Simple model of the triode

图中,  $E_{n1}$  表示三极管内部等效到输出端的总噪声电压输出,由公式(11)可知,三极管的噪声与基区电阻  $r_{b'b}$ 、发射结阻抗、工作电流等参数有关,应用时需选择噪声系数小的三极管,确定负载电阻  $R_L$  的阻值时,要充分考虑三极管的静态放大倍数与噪声之间的关系,实现电路的最优化设计。

### 2.3 运算放大器的噪声

运算放大器是由晶体管、电阻、电容等集成,内部包含大量的晶体管,会产生相应的散粒噪声;有一定数量的电阻,会产生相应的热噪声。分析时,考虑将运算放大器的内部噪声等效到输入端口,表示为一对  $E_n-I_n$  模型<sup>[6]</sup>。由图 1 可知,基于光电二极管反偏的光电检测电路中,运放部分的连接图如 8 所示。

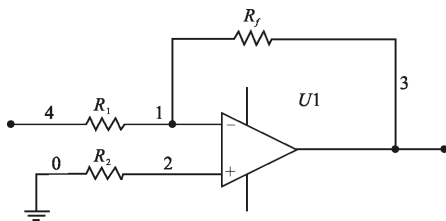


图 8 电路中运放连接部分  
Fig.8 Circuit of the amplifier

分析此部分电路的噪声时,首先根据电路中的元件,得到其等效噪声模型,如图 9 所示。

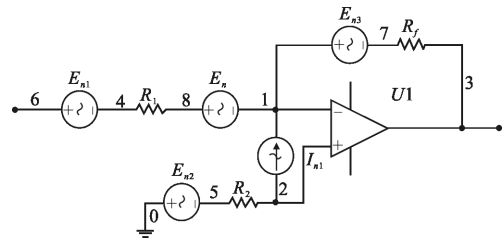


图 9 运算放大器的噪声模型  
Fig.9 Noise model of the amplifier

计算电路,可得,输入为 0 时,输出的噪声电压为:

$$E_{no}=(E_n+E_{n1})\frac{R_f}{R_1}+E_{n2}\frac{R_f}{R_2}+I_nR_f+E_{n3}=(E_n+4KT\Delta fR_1)\frac{R_f}{R_1}+4KT\Delta fR_f+4KT\Delta fR_f+I_nR_f=E_n\frac{R_f}{R_1}+12KT\Delta fR_f+I_nR_f \quad (12)$$

由上式可知,输出噪声电压与反馈电阻  $R_f$ 、运算放大器的带宽、运算放大器的增益、运算放大器的  $E_n-I_n$  模型有关,实际应用中挑选运算放大器时,在满足其它需求的情况下,需挑选  $E_n-I_n$  小的运算放大器,调整电路阻值时,在确定放大倍数后,尽量减小  $R_f$  的阻值,减少电路的噪声。

### 3 光电检测电路的总噪声及低噪声设计原则

根据以上分析,光电检测电路可分为三个模块,光电二极管模块、三极管流压转换模块、运算放大器模块,在分析整个电路的噪声时,把以上三个模块级联进行分析<sup>[8]</sup>,级联框图如图 10 所示。

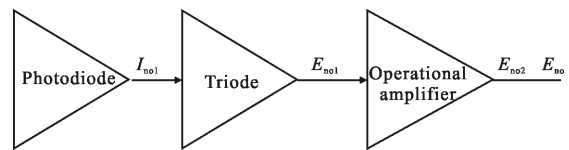


图 10 光电检测系统级联模块框图  
Fig.10 Cascade module frame of the system of photoelectric detection

图中  $I_{no1}$ 、 $E_{no1}$ 、 $E_{no2}$  分别是光电二极管、三极管、运算放大器的输出噪声电流、电压。三部分级联后的总输出噪声电压为<sup>[3]</sup>:

$$E_{no}=I_{no1}K_{n1}R_LK_{v2}+E_{no1}K_{v2}+E_{no2} \quad (13)$$

式中:  $K_{n1}$  为三极管的静态放大倍数,  $K_{n1}=\beta_0$ ;  $K_{v2}$  为运算放大器的放大倍数,  $K_{v2}=R_f/R_1$ 。

根据公式(6)、(11)、(12)可得,整个电路的总输出噪声电压为:

$$E_{no} = \beta_0 R_L \frac{R_f}{R_1} \sqrt{2qI_p \Delta f + \frac{4KT\Delta f}{R_D + R_S}} + \frac{R_f}{R_1} \sqrt{(4KT\Delta f r_{bb'}) \left[ \frac{\beta_0}{r_{b'b} + r_{b'c}} (R_L / r_{ce}) \right]^2 + 2qI_B \Delta f \left[ \frac{\beta_0}{r_{b'b} + r_{b'c}} (R_L / r_{ce}) \right]^2 + 2qI_C (R_L / r_{ce}) + E_n \frac{R_f}{R_1} + I_n R_f + 12KT\Delta f R_f} \quad (14)$$

由上式可知,光电检测电路的输出噪声电压除了与器件本身有关外,还受很多因素的影响:

三极管的静态增益  $\beta_0$  和其负载电阻  $R_L$  与  $r_{ce}$  并联值越小,电路噪声越小。但减小  $R_L$  和  $\beta_0$  的同时输出信号也变小。调节时,尽量先满足  $R_L$  的值,再根据  $R_L$  调节  $\beta_0$ 。

运算放大器增益越小,输出噪声电压越小,设计时需在保证整个电路增益的情况下,尽量减小  $R_f$  和  $R_1$ ,但  $R_1$  太小,会导致运算放大器的工作不稳定,一般选取输入电阻  $R_1$  为  $1k\Omega$ ,再根据  $R_1$ ,确定  $R_2$  的值时。

系统的通频带  $\Delta f$  越小,电路的输出噪声越小,但减小通频带,会影响信号的波形。需综合考虑这两个参数,合理控制电路的通频带。

此外,还需要从级间阻抗匹配的角度减小电路噪声<sup>[9]</sup>,光电二极管的源电阻尽量与三极管的输入  $E_n - I_n$  模型匹配,即  $R_S = E_n - I_n$ ;三极管的负载电阻尽量与运放的输入  $E_{in} - I_{in}$  模型匹配,即  $R_L = E_{in} / I_{in}$ 。

#### 4 基于光电二极管反偏的低噪声放大电路设计

根据以上分析,确定电路中主要的元器件:光电二极管选用 SFH-2030F 型号,三极管选用 2N3904 型的 NPN 管,运算放大器选用 ISL28210 型号,负载电阻  $R_L$  取  $560\Omega$ ,输入电阻  $R_1$  和  $R_2$  取  $1k\Omega$ ,反馈电阻  $R_f$  取  $100k\Omega$ 。并且,在电路相应位置加上旁路电容和反馈电容,使系统更加稳定<sup>[6]</sup>。由此,基于光电二极管反偏的低噪声光电检测电路如图 11 所示。

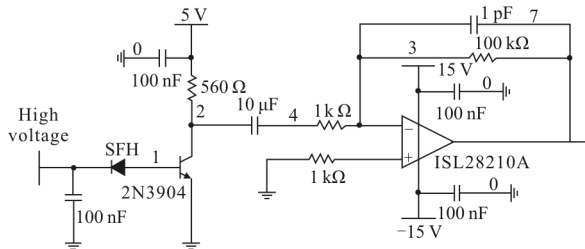


图 11 基于光电二极管反偏的低噪声光电检测电路  
Fig.11 Low noise photoelectric detection circuit based on photoelectric diode reverse bias

根据测量,上述电路中三极管静态  $\beta_0$  约为 50,设定电路通频带  $\Delta f = 50\text{ MHz}$ ,由公式(14)可粗略计算,电路的输出噪声电压为  $10\sim 20\text{ mV}$  之间。

搭建图 12 所示的电路图,用 Tektronix 公司的 MSO4054B 型号示波器测量整个电路的输出噪声电压,测量结果如图 12,13 所示。

##### (1) 无光条件下的噪声输出

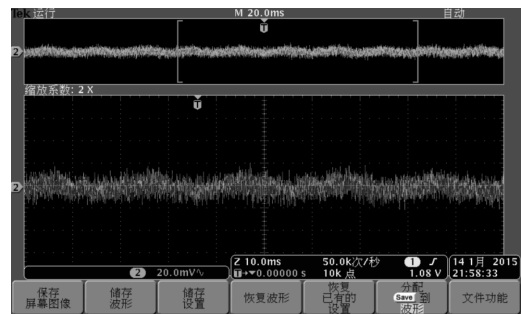


图 12 无光条件下的输出噪声电压

Fig.12 Output voltage of noise under the condition of no light

##### (2) 微弱可见光条件下的输出



图 13 微弱可见光条件下的电路输出

Fig.13 Output voltage of circuit under the condition of the natural light

由图 12 和图 13 可知,输出的噪声电压峰峰值约为  $20\text{ mV}$ ,将输出噪声等效为通频带内的白噪声,则电路的输出噪声功率谱密度约为  $e_n^2 = V_{pp}^2 / \sqrt{\Delta f} = 3\ \mu\text{V} / \sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[7]</sup>;电路对微弱可见光有较强的响应,满足低噪声的条件;且实验结果与所计算的理论值很接近,验证了理论模型的正确性。再有,电路可探测的最小



光电流  $I_{pmin} = \frac{20 \text{ mV}}{A_V R_L \beta_0} = 1.7 \text{ nA}$ ，电路中所选用的光电

二极管光电流与光照度的关系如图 14 所示。

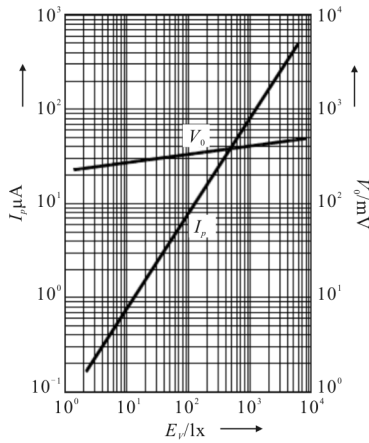


图 14 光电流与光照度关系图

Fig.14 Relation of photocurrent and illuminance

由图 14 可计算,当光电流为 1.7 nA 时,对应的光照度约为 0.02 lx,根据参考文献[10]所述,照度低于 0.1 lx 的光属于微弱光,因此,所设计的电路可用于微弱光探测。

## 5 结论

文中从光电检测电路的结构出发,将电路等效为由光电二极管、三极管、运算放大器三个模块级联组成,对每个模块进行噪声分析,得出其输出噪声电压,最终得出总噪声输出电压的模型,经过实验验证了模型的准确性,充分说明了模块化分析噪声方法的有效性,可将这种分析方法应用到所有级联电路结构中,简化噪声分析的过程。再有,文中根据得出的输出噪声电压模型,提出了降低噪声的一些方法和原则,可为低噪声电路的设计提供一定的参考。为进一步减小光电检测电路的噪声,提高其探测微弱信号的能力,后续工作可围绕设计模拟滤波器在电路相应位置进行滤波、设计温控电路使电路工作在稳定的温度等方面进行展开;另有,在表征整个电路的输出噪声时,可采用更精密的仪器,从时域和频率两个方面分析噪声,力求得到更精确的结果。

## 参考文献:

[1] Wang Ligang, Jian Tiancheng, Mou Haiwei, et al. The noise analysis and circuit design based on the photodiode detection

[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2009, 33(2): 88-92. (in Chinese)

王立刚, 建天成, 牟海微, 等. 基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计[J]. 大庆石油大学学报, 2009, 33(2): 88-92.

[2] Wang Ligang, Zhang Dianyuan. Research and design of photoelectric detection circuit with low noise [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2007, 44(8): 63-66. (in Chinese)

王立刚, 张殿元. 低噪声光电检测电路的研究与设计[J]. 电测与仪表, 2007, 44(8): 63-66.

[3] Hu Y, Solere J L, Lachartre D, et al. Design and performance of a low-noise, low-power consumption CMOS charge amplifier for capacitive detectors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, 45(1): 119-123.

[4] Mark Reisiger. Reduce amplifier noise peaking to improve SNR[J]. *Global Electronics China*, 2013(6): 39-41. (in Chinese)

Mark Resiger. 降低放大器噪声峰化以提高 SNR [J]. 世界电子元器件, 2013(6): 39-41.

[5] Yuan Honghui, Wang Ganquan, Chen Yongping, et al. Low-power low-noise minitype preamplifier working at utmost lower temperature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 432-435. (in Chinese)

袁红辉, 王淦泉, 陈永平, 等. 深低温、低功耗、低噪声微型前置放大器[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 432-435.

[6] Liu Xiaolin, Wang Yongjun. The research of noise analysis and matching based on detecting circuit for weak infrared light signal[J]. *Software*, 2012, 33(10): 38-41. (in Chinese)

刘小林, 王拥军. 微弱红外光信号检测放大电路噪声分析及噪声匹配的研究[J]. 软件, 2012, 33(10): 38-41.

[7] Zheng Qunsheng, Zhang Libing, Mao Jianzhi, et al. The design of weak light signal detection circuit based on PMT [J]. *Electronics World*, 2012(2): 43-45. (in Chinese)

郑群生, 张理兵, 毛建智, 等. 基于光电倍增管的弱光检测电路设计[J]. 电子世界, 2012(2): 43-45.

[8] Yu Hang, Jian Tiancheng, Wang Hongjin. Noise analysis of photoelectric detection circuit and research on error compensation methods [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(2): 195-201. (in Chinese)

于航, 建天成, 王宏瑾. 光电检测电路噪声分析及误差补偿方法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(2): 195-201.

[9] Zhou Shuge, Fu Wenhong, Shuo Ligeng, et al. Analog Electronic Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)

周淑阁, 付文红, 硕力更, 等. 模拟电子技术基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

[10] Lei Yutang. The Photoelectric Detection Technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2009. (in Chinese)

雷玉堂. 光电检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.