

文章编号: 1672-8785(2011)03-0014-05

瞬变光探测系统前置放大电路的设计

占建明^{1,2} 汶德胜¹ 王 宏¹ 王 良^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 光电探测器前置放大电路设计的好坏会直接影响整个检测系统的信噪比。为了提高对微弱光信号的检测精度, 使用低噪声光电二极管和运算放大器, 并选择光电二极管工作在光伏模式, 设计出了光电探测器的低噪声前置放大电路。通过采用超前校正方法对由光电二极管结电容及运算放大器输入电容引起的相移进行补偿, 克服了光电二极管寄生参数引起的转换电路的不稳定性。给出了在设计低噪声光电检测电路时对光电器件及前置放大器等元器件的相关参数进行选择的依据。

关键词: 瞬变光; 光电检测; 光电二极管; 前置运算放大器

中图分类号: TN702 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.03.004

Design of Preamplifier Circuit Used in Transient Optical Detection System

ZHAN Jian-ming^{1,2}, WEN De-sheng¹, WANG Hong¹, WANG Liang^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The preamplifier circuit in a photoelectric detector can directly affect the signal-to-noise ratio (SNR) of a whole detection system. To improve the detection precision of weak photocurrent, a low noise preamplifier circuit for a photoelectric detector based on a photodiode (in photovoltaic mode) and an operational amplifier is designed. The instability in an I/V conversion circuit due to the parasitic parameters of the photodiode is overcome by using a lead correction method to compensate the phase shift caused by the junction capacitance of the photodiode and the input capacitance of the operational amplifier. Finally, the reasons for choosing the relevant parameters of the components such as photoelectric devices and preamplifiers in the design of this low noise photoelectric detection circuit are given.

Key words: transient light; photoelectric detection; photodiode; preamplifier

1 引言

光电检测电路是光信号和电信号之间的桥梁。在军事、工业、农业、宇宙、环境科学、医疗卫生和民用等^[1]诸多领域, 人们常常需要将光的强度信息转换为电信号。例如, 大米色选机、

生物学医学分析仪、火灾探测、辐射计和微分光纤干涉仪等应用^[1-3]都需要从背景噪声中将有用的微弱光电信号提取出来。

光电转换元件一般采用光电二极管。通过检测光电二极管产生的微弱光电流, 可获取光信息或其它信息(如位移、张力、压力、声音和

收稿日期: 2011-01-26

作者简介: 占建明(1982-), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电检测与信号处理。E-mail: zjmelite@126.com

温度等)。另一方面,前置放大器必须具有信号频率范围所需的带宽和高稳定性,以保证输出信号的高信噪比。研究表明^[4,5],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的影响比较大。运算放大器的引入将会对检测系统的输出信噪比产生影响。因为放大器不仅会放大有用信号,同样也会放大输入噪声,而且其本身还会引入新的噪声。由于噪声主要在前置环节引入,光电检测放大电路是提高信号检测的灵敏度和信噪比的关键。

针对光电检测系统的上述特点,基于目标信号特性和系统的要求,本文采用 S2386 硅光电二极管和 AD645 低噪声运算放大器构成光电检测前置放大电路。

2 目标信号分析

对于该检测系统而言,背景是地表和云层反射的太阳光,变化缓慢,属于低高斯限带白噪声,可看作一个缓变直流信号。其频率为 0Hz ~ 2.1kHz,且能量主要集中在 0Hz ~ 300Hz 范围内。由分析可知,尽管阳光的本底强度大,但阳光信号的频谱特征近似直流,而光辐射信号的频率相对较高,基本为 7Hz ~ 8kHz,这样就可以用滤波电路隔去这一缓慢变化且近似直流的本底,从而提取出目标信号。

2.1 电路的噪声来源

光电检测电路存在许多噪声,它们可分为系统的外部噪声和固有噪声两种。外部噪声是光电系统受到的外界干扰,包括光辐射源的随机波动和附加的光调制、背景起伏、杂散光的入射以及检测系统所受到的电磁干扰等。固有噪声是由光电系统本身产生的噪声,包括光电器件、运算放大器和电阻等器件的固有噪声。只要电路开始工作,这种噪声就会存在,并且是无法消除的。但人们可以通过选择适当的电路元件、降低环境温度以及合理设计电路来减小固有噪声。一般光电器件的主要内部噪声是热噪声和散粒噪声。

3 元件选型

光电检测前置放大电路主要包括光电器件、输入电路和前置放大器三个基本部分。输入电路是由电源、电阻和电容等元件组成的,它为光电器件和运算放大器提供正常的工作条件。在为光电探测器设计前置放大电路时,应选择适当的光电探测器和运算放大器,以满足系统的设计要求。

3.1 光电二极管的选型

光电二极管探测器既可在零偏置下工作(光伏模式),也可在反偏置下工作(光电导模式)。光电导模式可实现较高的切换速度,但会牺牲线性,而且偏压越高,暗电流越大,由此会产生较大的噪声电流。它适合于检测高速光脉冲和高速光束调制的场合。零偏置模式由于不存在内部暗电流,其探测器输出噪声基本上是由分流电阻产生的热噪声,而且电路可充分利用器件的线性,从而实现最精确的线性工作。它适合于比较精确的测量检测和仪器仪表方面的场合。根据目标信号的特点和系统的要求,本设计采用零偏置工作模式。

选择光电二极管时需要考虑的参数包括暗电流、光电流、光谱响应特性、光响应度、响应时间和结电容等。为了减小电路的噪声,需要选择内阻大、结电容小、暗电流小和灵敏度高的光电二极管。由于系统的目标光谱范围为 400nm ~ 1100nm,我们选择滨松公司的 S2386-8K 硅光电二极管,它具有灵敏度高、动态范围大和响应速度快^[6]等特点。

器件的性能参数如表 1 所示。选用的光电二极管的暗电流应小于最小输入电流,并留有充足的设计余量。为减小电磁辐射引起感生电流的影响,应采用陶瓷封装的光电二极管,而不宜选用感光面积较大的探测器,因为随着感光面积的增大,光电二极管的暗电流、上升时间、终端电容以及等效噪声系数也都会增加。

3.2 运算放大器的选型

如果考虑测量时的线性,则应该保证负载阻抗为零。基于运算放大器的 I/V 转换电路由于具有低输入输出阻抗、高增益带宽的优点,常用于传感器、仪表等检测电路中。

负反馈运算放大器的等效输入阻抗为

$$R_{in} = R_f / (1 + A_{OL}) \quad (1)$$

式中, A_{OL} 为运算放大器的开环增益, R_f 为放大器的反馈电阻。一般说来, 若运算放大器的开环增益 $A_{OL} \approx 10^6$, 则运放的输入阻抗 $R_{in} \approx 0$ 。这样一方面可提高光电二极管的线性, 另一方面可使光电二极管工作区域接近短路状态, 从而使电路获得最小的噪声系数 [7]。

表 1 光电二极管探测器的主要特性参数

主要特性	
有效感光面积	5.8mm×5.8mm
光谱响应范围	320nm ~ 1100nm
峰值响应及峰值灵敏度	960nm, 0.58A/W
暗电流	50pA (Max)
上升速率 ($R_L = 1000\Omega$ 时)	10 μ s
电容	4300pF
等效电阻 R_{sh}	10G Ω

运算放大器选用低偏流精密 BiFET 工艺的 AD645 实现 I/V 转换。BiFET 器件由于在晶片级进行过激光微调, 可以减小失调电压和温漂。作为光电检测系统的前级 I/V 转换电路, 其具体技术指标如表 2 所示 [8]。良好的输入电流噪声密度指标和各频段输入电压噪声指标, 使得 AD645 常被用作光电转换的前置放大器。图 1 所示为光电二极管和放大器的噪声等效模型。其中, 实际的光电二极管等效为理想的光电二极管并联等效电阻 R_d 和等效结电容 C_i 。运算放大器的噪声可以用三个等效噪声源来表征: 一个频谱密度为 e_{ni} 的电压噪声源, 两个频谱密度为 i_{np} 和 i_{nn} 的电流源。这三个噪声源基本上是相互独立的。

表 2 AD645 的主要技术指标

主要技术指标	
失调电压	25 °C 时, 250 μ V (max)
失调电压漂移	1 μ V/°C (max)
输入偏置电流	25 °C 时, 1.5pA(max)
电流噪声	0.1Hz ~ 10Hz 时, 11fA _{p-p}
电压噪声	0.1Hz ~ 10Hz 时, 2 μ V _{p-p} (max)

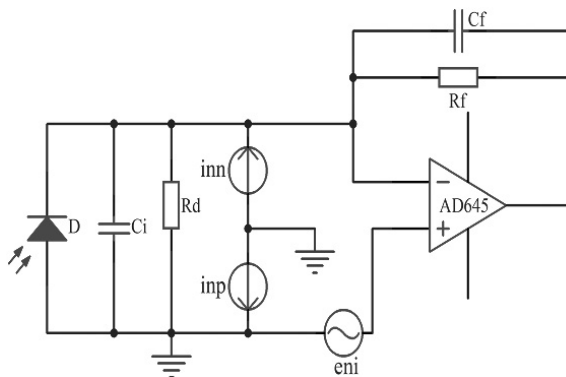


图 1 光电二极管和放大器噪声等效模型

4 电路分析与计算

在相同的输入电流下, 反馈电阻越大, 其输出信噪比越大, 因此提高 R_f 会增加输出信噪比, 同时也会增加信号的增益。故反馈电阻的选择非常关键, 必须选用紧容差的低温漂型金属膜电阻。由于光电二极管接收到的光能量范围达几个数量级, 目标和背景信号产生的光生电流范围约为 10nA ~ 80 μ A。为了保证弱信号可被检测到, 同时使强信号不发生饱和, 经过估算, 选择了 R_f 为 100k Ω 的金属膜电阻。图 2 所示为通过 Pspice 软件仿真的结果。从图中可以看出, 运算放大器在输入电流为 0 μ A ~ 90 μ A 时保持线性, 在输入电流大于 100 μ A 时进入饱和状态。

用于光电检测的前置放大器通常要求信噪比高、被测信号无频率失真或在可容许的失真范围内以及信号传输电压量最大, 因此在设计时应综合考虑噪声水平和放大器的增益及带宽。放大器带宽过大虽然可提高响应速度, 但同样会使系统引入的噪声增大; 而带宽过窄虽然可使进入的噪声变小, 但将会使输出信号失真到不能接受的程度。另外, 由于电路中存在探测器内部结电容、杂散电容和放大器输入端寄生电容等输入电容, 而且负载电容会导致相位滞后, 因此相位余量减小, 就容易产生振荡。要解决这个问题, 需要进行相位补偿, 其方法是在反馈电阻上并联一个反馈电容 C_f , 通过相位超前补偿 [9] 增加相位余量。但这样做是以牺牲带宽为代价的, 故选择 C_f 时应该加以综合考虑。当电路

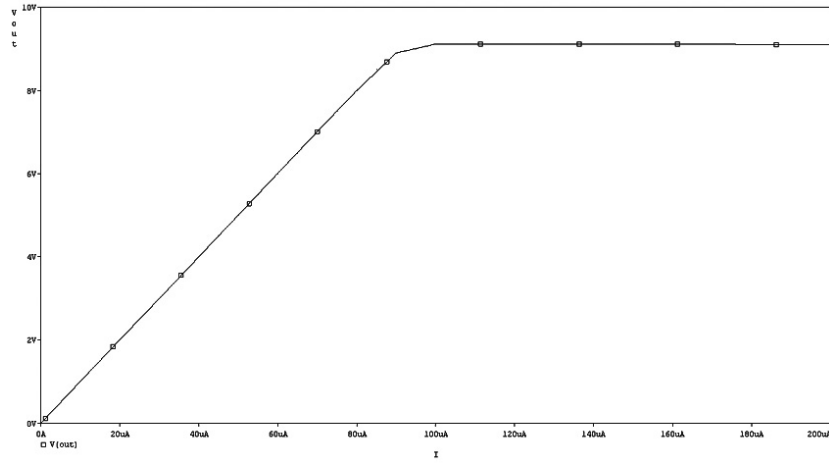


图 2 运算放大器的输出电压

的相位余量为 45° 时, C_f 值可由式 (2)^[10] 得到:

$$C_f = \sqrt{\frac{C_i}{2\pi R_f f_u}} \quad (2)$$

式中, C_f 为反馈电容, C_i 为光电二极管的结电容、杂散电容和运放输入端寄生电容的总和, R_f 为运算放大器的反馈电阻, f_u 为运算放大器的单位增益带宽积。由于光电二极管的结电容远大于杂散电容和运放输入端寄生电容之和, 可以只考虑光电二极管的结电容。取 $C_i = 4300\text{pF}$, $R_f = 100\text{k}\Omega$, $f_u = 2\text{MHz}$, 通过计算可得 $C_f = 58.5\text{pF}$ 。考虑到常用的电容值以及设计余量等因素, 本设计取 $C_f = 68\text{pF}$ 。当 C_f 值增大 1 倍时, 相位余量增至 65° 。

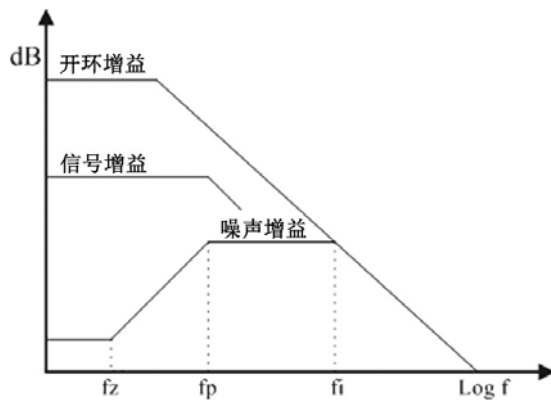


图 3 电流放大电路的幅频特性曲线

图 3 所示为在反馈电阻上并联一个反馈电容 C_f 后电流放大电路的幅频特性曲线。其中,

f_z 为零点处频率, f_p 为极点处频率, f_i 为该前置放大电路的闭环带宽。

$$f_z = \frac{R_d + R_f}{2\pi R_d R_f (C_i + C_f)} \quad (3)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (4)$$

$$f_i = \frac{f_u}{1 + C_i/C_f} \quad (5)$$

电路的噪声放大倍数为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta} &= \left(1 + \frac{R_f}{R_d}\right) \frac{1 + j\omega \left(\frac{R_d R_f}{R_d + R_f}\right) (C_i + C_f)}{1 + j\omega C_f R_f} \\ &= \left(1 + \frac{R_f}{R_d}\right) \frac{1 + jf/f_z}{1 + jf/f_p} \end{aligned} \quad (6)$$

随着频率的增加, 信号的放大倍数开始下降 (转折频率为 f_p)。而噪声和信号的幅频特性完全不同。在直流或低频时, 噪声电压的放大倍数为 $\frac{1}{\beta_0} = 1 + \frac{R_f}{R_d}$ 。随着频率的增加 (转折频率为 f_z), 噪声增益曲线由于 C_f 的作用开始变大, 直到电容 C_f 的作用失去而停止。在高频段, 噪声增益为 $\frac{1}{\beta_\infty} = 1 + \frac{C_i}{C_f}$ 。通过超前校正向系统引入零点, 在相位上削弱极点引入相移带来的负面影响。通过合理设置反馈电路的零、极点, 可以使系统以 -20dB 斜率穿越, 并在系统的带宽内确保有不低于 45° 的相位余量, 从而使系统处于无条件稳定状态。

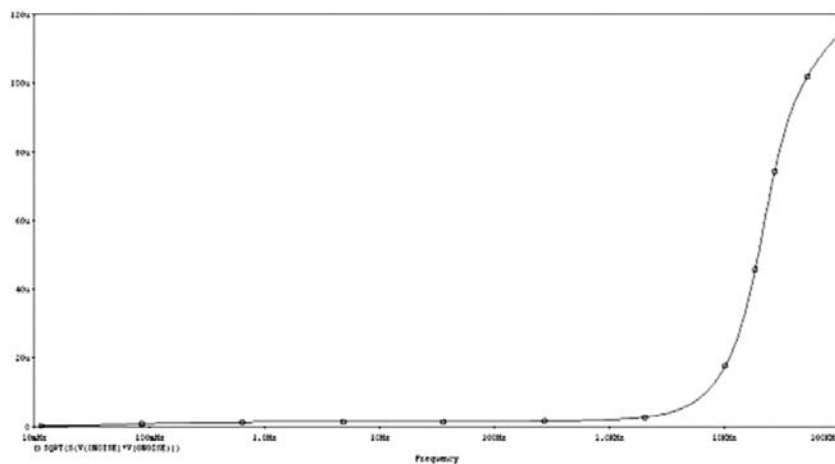


图 4 总的输出电路本底噪声电压

用 Pspice 软件进行的仿真表明, 在没有光输入的情况下, 前置放大电路的本底噪声为 $98\mu\text{V}_{rms}$, 其结果如图 4 所示。在最小输入光生电流 10nA 时, 其输出电压为 1mV 。由于 10nA 产生的散粒噪声比本底噪声低几个数量级, 可以忽略散粒噪声的影响, 其输出信噪比约为 20dB 。由于最小的输入电流产生的输出信噪比最小, 前置放大电路的输出信噪比大于 20dB 。

最后在设计印制电路板时, 为了减小系统的外部噪声, 光电检测电路必须用金属外壳屏蔽外界干扰, 而且外壳须接地。光电探测器输出端到放大器的引线距离要尽量短; 放大器输入输出时应避免交叉布线, 防止耦合; 电源线和地线要尽量宽, 并按照低噪声设计原则走线。如果噪声依然比较大, 则应该考虑在运放的敏感管脚与印制电路板上的大电压梯度区域间用 Guard 隔开来, 以减小寄生漏电流。

5 结论

本文分析了光电二极管实际电路的参数模型和运算放大器的噪声模型, 并用超前校正方法对光电检测前置放大系统进行了相位补偿。本设计方案可以有效放大大动态范围的瞬变微弱光信号, 具有结构简单、噪声低、检测灵敏度高和线性度良好等特点。该前置放大电路对于微

光信号具有通用性, 只需稍作修改就可以用于相似的系统。

参考文献

- [1] 刘卫东, 刘延冰, 刘建国. 检测微弱光信号的 PIN 光电检测电路设计 [J]. 电测与仪表, 1999, 36(4): 28-31.
- [2] 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): 259-262.
- [3] 梁义涛, 汶德胜, 王宏. 瞬态微光探测系统前置传感器低噪声设计 [J]. 半导体光电, 2008, 29(1): 147-150.
- [4] 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.
- [5] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [6] S2386 Series for Visible to IR, General-purpose Photometry [Z]. HAMAMATSU Company, 2002.
- [7] 付文羽. 硅光电二极管的线性度及信噪比分析 [J]. 半导体光电, 2003, 24(4): 267-270.
- [8] Low Noise, Low Drift FET Op Amp: AD645 Datasheet [Z]. Analog Devices, Inc., 2000.
- [9] 马鑫, 张东来, 徐殿国. 光电二极管电参数模型及 I-V 转换稳定性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 89-93.
- [10] Jung W 著. 张乐峰, 张鼎, 等译. 运算放大器应用技术手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.