

· 电路与控制 ·

光电探测器前置放大电路设计与研究

胡 涛, 司汉英

(光电系统信息控制技术国家级重点实验室, 河北 三河 065201)

摘 要: 光电探测器前置放大电路设计的好坏直接影响到整个系统的探测精度. 介绍了光电探测器前置放大电路的设计与研究, 主要阐述了光电转换电路、放大电路带宽、放大电路噪声、放大电路稳定性以及其他一些需要注意的问题, 并设计了一种能够有效降低噪声和温飘, 具有大的动态输入范围的放大电路.

关键词: 光电探测器; 前置放大; 光电转换; 带宽; 噪声; 稳定性

中图分类号: TN215; TN721

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0052-04

Design and Research of Pre-amplifier Circuit from a Photoelectric Detector

HU Tao, SI Han-ying

(National Laboratory of Electro-Optics System Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: The design of the pre-amplifier circuit of photoelectric detector systems can directly affect the detecting precision of the whole systems. The design of pre-amplifier circuit from a photoelectric detector was introduced. The photoelectric conversion circuit, amplifier circuit bandwidth, amplifier circuit noise, amplifier circuit stabilization and other questions were mainly discussed, and an amplifier circuit capable of effectively decreasing the noise, the temperature drift and with a large dynamic range was designed.

Key words: photoelectric detector; pre-amplifier; electro-optic conversion; bandwidth; noise; stabilization

前置放大电路是把接收到的光信号转换成电信号, 并对电信号进行放大, 再与后面的信号处理系统对接. 前置放大电路在整个光电探测系统中是非常重要的, 它的性能好坏直接决定了整个系统的性能好坏. 在前置放大电路中, 光信号和电信号要受到很多噪声的干扰. 由于接收的光信号和转换后的电信号通常都比较微弱, 很容易淹没在各种噪声中, 所以在设计前置放大电路时, 要尽量减小噪声, 提高系统的信噪比, 但是提高信噪比将会使频率特性变差, 所以在设计电路时, 要二者兼顾考虑.

运算放大器 (operational amplifier) 是将模拟信号放大的器件, 它的应用范围极广, 包括 DC 放大、音频放大、视频放大、有源滤波器、模拟运算、信号变换等^[1], 可以说它是整个电路设计的基础. 在为光

电探测器设计前置放大器电路时, 必须知道如何选定适当的运算放大器技术规格, 来满足探测系统的设计要求.

1 前置放大电路设计

1.1 光电转换电路

PIN 光电二极管的 PN 结中间设置了一层掺杂浓度很低的本征半导体, 形成 P-I-N 结构, 本征层的引入加大了耗尽层区的厚度, 并形成强电场区. 由于入射光子只能在本征层内被吸收, 光生载流子在强电场作用下加速运动至 N 层, 因此载流子渡越时间非常短, 同时, 耗尽层的加宽使结电容明显减

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 光电系统信息控制技术国家级重点实验室基金(9140C150101090C1502)

作者简介: 胡涛(1979-), 男, 工程师, 主要研究方向为模拟信号检测、数字信号处理.

小,提高了响应速度^[2].图 1 是一个标准的电流—电压转换电路,输出电压 $V_{out} = I_s \times R$. 此电路的 -3 dB 频带宽度 f_c 可表示为

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot C_s \cdot R} \quad (1)$$

式中, C_s 为 PIN 管极间分布电容和电阻 R 的分布电容以及导线分布电容之和.

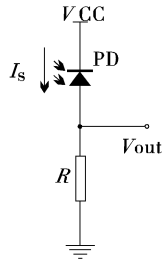


图 1 电流—电压转换电路

假如 $R = 50 \Omega$, $C_s = 5 \text{ pF}$, 就得到 $f_c = 640 \text{ MHz}$,但这个数值仅适合于信号电流比较大的时候,一旦信号电流变小,例如 $I = 10 \mu\text{A}$ 时,仅有 $V_{out} = 500 \mu\text{V}$ 的信号输出,这时如果仍然期望高的信噪比将难以实现.因此,要想改善信噪比,必须加大电阻 R 的值.如果增大 R 到 $100 \text{ k}\Omega$,则 $V_{out} = 1 \text{ V}$,信噪比肯定提高,作为交换条件,频带宽度 f_c 变成了 320 kHz ,频率特性变差.所以,合理地选择 PIN 管和电阻 R 的阻值对于系统设计是非常重要的.

1.2 放大电路的带宽

光电探测器不仅要提高信噪比,还要保持激光脉冲信号的波形,因此要考虑通过信号的高频分量,要求带宽更宽.激光脉冲为高斯脉冲,是类矩形脉冲,放大器对类矩形脉冲的响应与放大器带宽有关.图 2 中, Δf 为放大器的 -3 dB 带宽, τ 为光电转换电路的上升时间.可以发现,脉冲宽度越窄,要求放大器的带宽越宽,否则矩形脉冲将被展宽,幅值也会下降.同时由于输出功率与噪声功率均线性增加,存在一个最佳带宽,使得信噪比最大.对于矩形脉冲若满足 $\Delta f\tau = 0.5$ 的条件,输出的脉冲峰值功率和噪声功率比最大,可以获得最大的信噪比^[3].

电路带宽选择的目的是保持信号频谱中绝大部分能量通过,而牺牲能量较低的高频分量.设定光电转换电路的上升时间为 5 ns ,同时考虑光电转换电路的时域特性,可以得出放大器 -3 dB 带宽应该在 100 MHz ,这样才能与探测器的性能合理匹配.

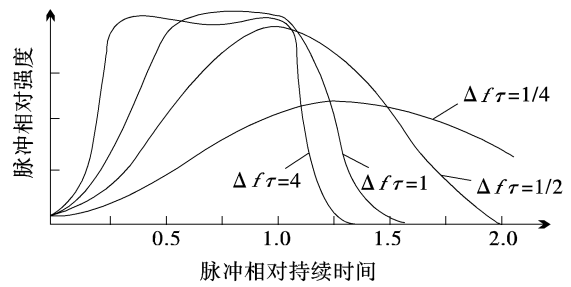


图 2 矩形脉冲通过给定带宽网络后的波形

但运算放大器数据表中提供的 -3 dB 带宽是指当输出电压比较小,约为 0.1 VRMS 时测定的带宽,通常运算放大器很少只在输出振幅为小信号的范围内使用,一旦信号很大的时候,将对压摆率影响很大.如果考虑最大输出时的频率,就需要用到最大功率带宽

$$f_{FP} = \frac{SR}{\pi V_{p-p}} \quad (2)$$

式中, SR 为压摆率; V_{p-p} 为输出振幅峰峰值.

例如:AD8001 的压摆率 $SR = 1200 \text{ V}/\mu\text{s}$,输出 $V_{p-p} = 2 \text{ V}$ 时,最大功率带宽为 190 MHz ,而 AD8001 的小信号时的 -3 dB 带宽 $f_{-3\text{dB}} = 880 \text{ MHz}$,可以看出 $f_{-3\text{dB}}$ 和 f_{FP} 差别很大.高频电路需要数伏电压的输出和数百兆赫兹频率的输出是非常困难的,所以,在设计高速电路时最好不要使振幅过大.

对于电压反馈型的运算放大电路,另一个需要考虑的参数是增益带宽积 GBW .开环电压增益的倾斜以 -6 dB/oct 衰减时,测得的电压增益为 A_f 倍,该点的频率与电压增益 A_f 两者相乘的结果为定值增益频宽积 GBW ,可表示为

$$GBW = A_f \times f \quad (3)$$

式中, A_f 为电压增益; f 为频率.

虽然 GBW 值越大越好,不过 GBW 值较大的运算放大器其他功能普遍偏弱.在满足带宽要求的前提下,高输入阻抗、高共模抑制比、低输入偏置、低噪声是主要的设计选型因素.

1.3 放大电路的噪声

放大电路的噪声主要由光电探测器噪声和放大器器件噪声两部分组成.

(1) 光电探测器噪声

光电探测器中存在的噪声主要有热噪声、散粒噪声、复合噪声、温度噪声和 $1/f$ 噪声等,一般光电器件中主要的内部噪声是热噪声和散粒噪声.

① 热噪声:它是由自由电子在导体中随机运动产生的,由于频谱密度图较平坦,热噪声有时也称作宽带噪声,其值为

$$V_n = \sqrt{4kTR_d \Delta f} \quad (4)$$

式中, k 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; R_d 为光电二极管的并联电阻。

可以看出,温度越高,电子热运动越激烈,噪声电压就越大,同时噪声电压的均方根值与工作带宽 Δf 和电阻值 R_d 成正比。

② 散粒噪声:它是由 PN 结中随机电流所产生的,即由 PN 结载流子运动的随机变化所引起的噪声,它同频率无关,属于“白噪声”。当使用负偏压,并且硅光电二极管反向漏电严重的情况下,可以造成较大的散粒噪声。

选择光电二极管时需要考虑的参数有:暗电流、光电流、光谱响应特性、光响应度、探测响应时间、节电容、 $V-A$ 特性等等。为了减小放大电路的噪声,就要选择内阻大,节电容小,暗电流小,灵敏度高的光电二极管。需要特别注意的是它的暗电流, Si-PIN 管的暗电流可以小于 1 nA, Ge-PIN 管的暗电流在几十到几百纳安之间。

(2) 放大器件噪声

运算放大器的噪声分析是根据运放数据表上的数据计算出运放电路的峰峰值输出噪声,而要计算出峰峰值输出噪声,首先要计算出总输出噪声 (RTO)

$$\text{总输出噪声 (RTO)} = \text{总输入噪声 (RTI)} \times \text{运放噪声增益}$$

其中,总输入噪声 (RTI) 包含运放电压源的噪声、运放电流源的噪声以及电阻噪声等。

计算过程为:①计算噪声增益以及带宽;②计算 $1/f$ 噪声和带宽噪声;③将电流噪声转换为电压噪声;④计算电阻噪声;⑤计算 RMS 总输入噪声;⑥计算 RMS 总输出噪声以及峰峰值输出噪声。

OPA847 运放的输入电压噪声为 $0.85 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 输入电流噪声为 $2.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 经过计算,运放的总输出噪声为 1.317 mV , 峰峰值输出噪声为 7.9 mV 。

1.4 放大电路的稳定性

运算放大电路产生震荡是因为输入电容和负载电容(还包括耦合电容和旁路电容)会导致相位滞后,一旦相位滞后到 180° , 负反馈电路变成了正反

馈电路,这时震荡就发生了。如果仅仅是运算放大器电路本身,它是稳定的,但是有了输入电容和负载电容,相位裕度变小,就容易产生震荡。

要消除震荡,需要用相位补偿,就是使电路的相位裕度保持在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围内。通常采用超前补偿的方式,将超前补偿电容加在反馈回路,如图 3 所示。

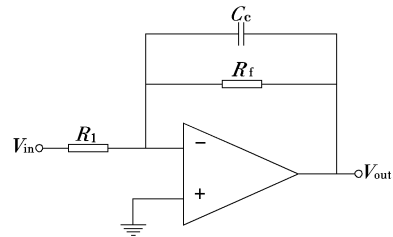


图 3 运放超前相位补偿电路

电容 C_c 抵消了输入电容和负载电容的级点,产生了新的零点 f_1 和级点 f_2

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot C_c \cdot R_f}, f_2 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \times f_1 \quad (5)$$

电容 C_c 的取值可以参考如下的计算方法。

对于使用高增益和大反馈电阻的放大电路,使用下面的等式

$$C_c = \sqrt{\frac{C_{in}}{GBW \times R_f}} \quad (6)$$

式中, C_{in} 为输入电容; GBW 为增益带宽积。

而在满足下式的低增益或者低阻抗的情形下

$$\left(1 + \frac{R_f}{R_{in}}\right) \leq 2 \sqrt{GBW \times R_f \times C_{in}} \quad (7)$$

使用下面的等式^[4]

$$C_c = \frac{C_{in}}{\left(2 + \frac{2R_f}{R_{in}}\right)} \quad (8)$$

除了使用相位补偿的方法以外,还需要采取以下预防措施来避免运算放大电路产生震荡:①把 R_f 和 R_1 与反相输入端相连的管脚尽量缩短,减小输入杂散电容;②在电源和运算放大器附近使用电源旁路电容;③避免不必要的容性负载,它们会导致附加相移。

1.5 需要考虑的其他因素

(1) 同相放大器与反相放大器

同相放大器的增益为

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) V_{in} \quad (9)$$

反相放大器的增益为

$$V_{\text{out}} = -\frac{R_f}{R_1} V_{\text{in}} \quad (10)$$

从输入阻抗的角度来考虑运算放大器的话,同相放大器的输入阻抗非常高,适合于用电压源驱动,而反相放大器的输入阻抗大小取决于输入电阻 R_1 ,如果电阻 R_1 的阻值很小的话,就适合于用电流源驱动。

(2) 对温度漂移的控制

运算放大器和探测器器件对于温度的变化是非常敏感的,如果想要将其性能发挥到极致,就需要对器件进行冷却,只有这样才能体现出最优异的性能.使用由珀尔贴微型组件构成的电子冷却器是非常方便的,只要连接上电源,就可以使用。

(3) 运放的负载电阻

使用运算放大器时,一般将晶体管、集成电路、电阻等作为负载接入输出端.如果电阻值太小会使输出电流增大,从而形成超负载状态,但电阻值太大又会形成轻负载状态.适度的负载电阻值为 $2 \sim 10 \text{ k}\Omega$ 。

2 低噪声低温漂大动态范围放大电路设计

放大电路采用压缩信号动态范围和差分放大方式.2个完全相同的PIN光电二极管连接到运放A1和A2的反相输入端,再连接到差分放大器A3的同相输入端和反相输入端上.连接运放A2的PIN管不接收光信号,由于2个PIN管的型号及参数是完全相同的,所以它们产生的噪声也是相关的,通过差放A3之后,探测电路产生的噪声会被滤除,从而增大了系统的信噪比。

如果探测器受到外界环境的影响,而产生干扰信号的话,这2个运放所产生的将会是振幅相同、相位相同、时间同步的共模信号,在差分放大器的输入端接收到共模信号后,会将共模信号滤除,从而达到消除外界环境对探测电路影响的目的。

反馈端采用的是双极型晶体管,输出和输入之间为对数函数关系,使得输入信号具有很大的动态范围.双极型晶体管对温度变化敏感,但采用基准电流和片内温度补偿能够显著降低这种敏感性.放大

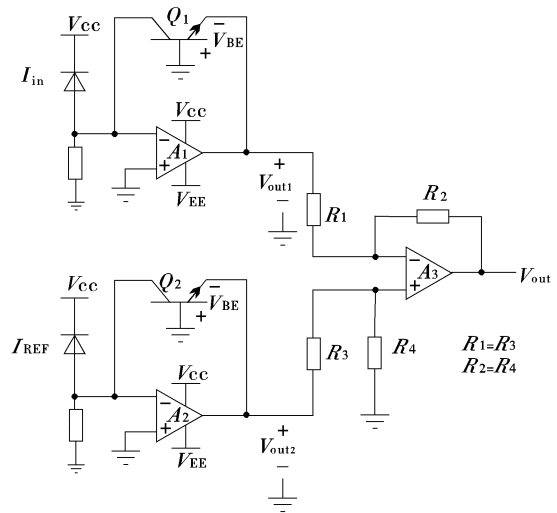


图 4 低噪声低温漂大动态范围放大电路
电路的输出电压为

$$V_{\text{out}} = A \log_{10} \left(\frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{REF}}} \right) \quad (11)$$

其中, A 是差分放大器的增益,由于采用 \log_{10} 运算的比例, $I_{\text{in}}/I_{\text{REF}}$ 确定了 I_{in} 大于或小于 I_{REF} 的 10 倍程数量, 乘上 A 之后将产生所需的电压。

3 结 束 语

研究了光电探测器前置放大电路的设计,阐述了放大电路设计过程中需要考虑的几个方面,对问题的阐述深入浅出,并配合例证加以说明,同时设计了一种低噪声低温漂大动态范围放大电路,对放大电路的系统设计是很有帮助的。

参考文献

- [1] 松井邦彦(日). OP 放大器应用技巧 100 例[M]. 邓学. 北京:科学出版社,2005:1.
- [2] 陈永甫. 红外辐射红外器件与典型应用[M]. 北京:电子工业出版社,2004:200.
- [3] 伯广宇, 戚俊, 李季, 等. 一种基于宽带低噪声 THS4012 运放的激光测高仪前置放大电路设计与实现[J]. 大气与环境光学学报,2007,2(4):316-320.
- [4] Robert A Pease(美). 模拟电路故障诊断[M]. 王希勤. 北京:人民邮电出版社,2007:106.
- [5] Multisim2001 教程 20 1.1[OB/DL]. www.csdn.net, 2008-09-08.