

文章编号: 1001-3806(2013)02-0247-04

温度传感器校准系统中红外信号检测电路设计

王锐 郝晓剑* 周汉昌 王淑娟

(中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了提高红外探测器检测红外微弱信号的精度,采用晶体管恒流偏置电路,使用低噪声高速运算放大器构成了前置放大电路。运用电路理论建立放大电路的噪声等效模型,采用叠加法计算1级放大输出端的噪声电压。通过中温黑体炉红外辐射实验,测试电路性能,取得了500℃~700℃时的电压波形,计算得出信噪比为 7.25×10^3 。结果表明,红外探测器前置放大电路达到高信噪比、响应速率快、抗干扰强的应用要求,可以对红外微弱信号检测放大。

关键词: 测量与计量; 温度传感器校准系统; 红外探测; 热电偶; 低噪声

中图分类号: TN722.7; TP212.1+1 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.027

Design of infrared signal detection circuit in a temperature calibration system

WANG Rui, HAO Xiao-jian, ZHOU Han-chang, WANG Shu-juan

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of infrared detectors to detect the infrared weak signal, a preamplifier circuit was built with a constant current bias circuit and a low-noise high-speed operational amplifier. The equivalent noisy model was deduced based on the circuit theory. The output voltage noise of the 1st amplification circuit was calculated with the superposition method. In temperature blackbody furnace experiment, the circuit performance was tested, the voltage waveform at 500℃~700℃ was obtained, and signal-to-noise ratio of 7.25×10^3 was obtained. The results show that the preamplifier circuit of infrared detection achieves the application goal of high signal-to-noise ratio, response speed and strong anti-jamming performance, it can be used to amplify the weak infrared signal.

Key words: measurement and metrology; calibration system of temperature sensor; infrared detect; thermocouple; low-noise

引言

随着瞬态温度测试需求的与日俱增,温度传感器动态特性已成为研究人员关注的焦点。在兵器领域中,瞬态温度随时间的变化快,常在微秒量级,温度传感器存在的热惯性和有限热传导,使得所测温度与实际温度存在动态响应误差^[1]。为了减少这类误差,需对温度传感器进行动态校准,对其存在的动态误差进行补偿。HgCdTe光导红外探测器是可溯源动态校准系统的关键组成部分,其峰值探测率不小于 $5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,响应速率为 $1 \mu\text{s}$,快于被校温度传感器,可作为真值校准被校传感器。而探测器接收到被校传感器辐射的红外信号往往低达微伏或纳伏量级,

微弱信号几乎被噪声和电磁干扰淹没,因此设计低噪声放大电路,保证信号的准确性,以提高动态误差补偿的精度。

1 低噪声恒流偏置放大器设计方案

1.1 电路设计原则及噪声分析

前置放大电路的设计原则是先考虑噪声特性并满足其要求,其次才是增益、带宽、阻抗。在满足噪声指标的基础上,采用负反馈或增减放大器的级数来进行调节,使之符合要求。

前置放大电路一般存在热噪声、 $1/f$ 噪声、产生复合噪声、散粒噪声、过剩噪声、探测器的温度噪声、放大器噪声、元器件的噪声和电源纹波等^[2-4]。此外在多元HgCdTe探测器的应用中,由探测元间的接地电阻引起的电子学串音,其与接地电阻成正比,与偏置电阻成反比^[3]。

1.2 HgCdTe光导红外探测器的工作原理

测试系统使用的红外探测器为光导型电阻器件,响应波长为 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$,当有与其响应波段对应的红

基金项目: 山西省高等学校留学回国人员科研基金资助项目

作者简介: 王锐(1989-),男,硕士研究生,现主要从事温度传感器动态校准技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: haoxiaojian@nuc.edu.cn

收稿日期: 2012-07-04; 收到修改稿日期: 2012-08-22

外光辐射在光敏面上时,其电导发生变化,加载的偏置电路将其电导的变化转换成电压的变化,因此,该器件工作时必须加偏流。

1.3 偏置电路设计

电子串音可以提高偏置电阻来消除。红外探测器的输出信号和噪声会随偏流大小而改变,它存在一个

最佳偏置范围,使得输出信噪比达最大值,系统中红外探测器的最佳偏置电流为 2mA ~ 4mA。本文中设计一种晶体管恒流偏置电路,如图 1 所示,该电路利用晶体管在线性区工作时集-射等效交流电阻很大,近似恒流源的特性来实现恒流偏置^[5],其适用于晶体管集-射等效交流电阻远大于探测器电阻的情况。

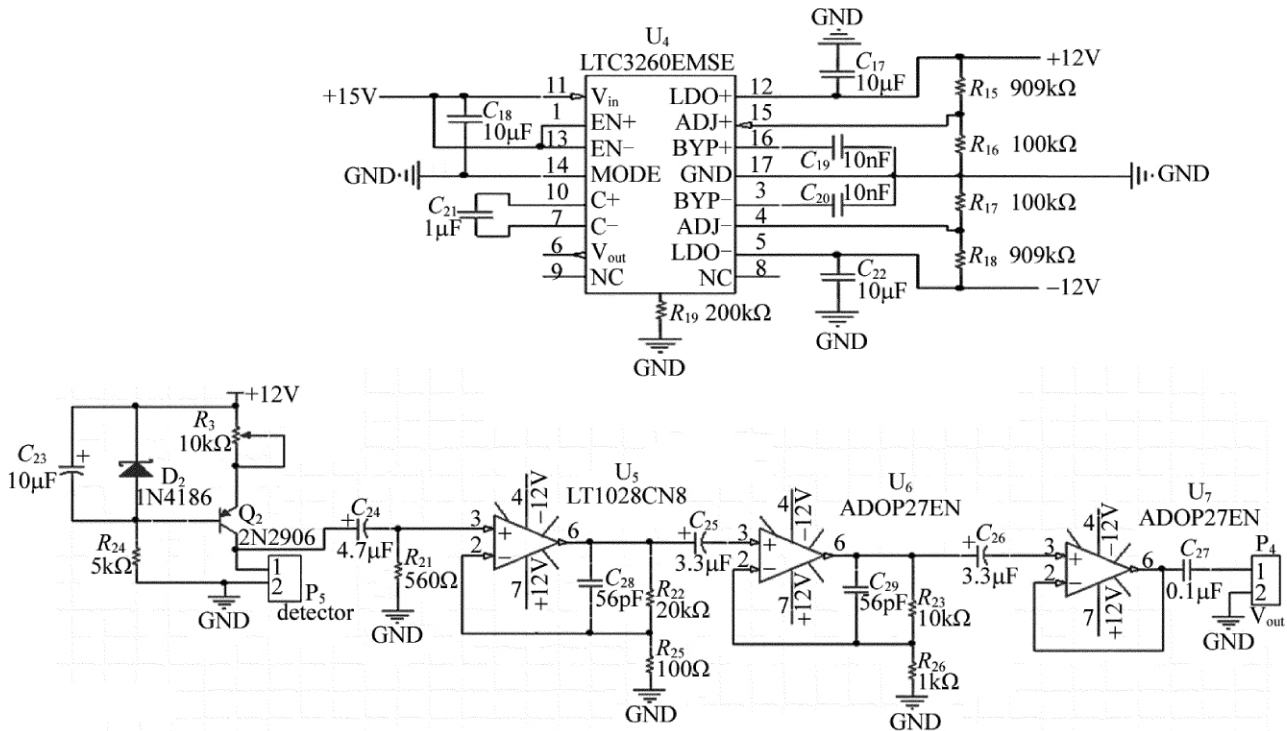


Fig. 1 Pre-amplifier

C_{23} 是滤波电容,稳压管 D_2 使晶体管 Q_2 的基极被稳压,所以基极总电流的散粒噪声 I_b 和集电极电流的散粒噪声 I_c 是近似恒定的,即红外探测器达到恒流偏置。偏流大小通过改变 R_3 来实现。

1.4 电源供电

在前置放大电路中,直流电源会产生杂波和纹波以及可能耦合到电源中去的共模电压,这些脉动噪声为微伏量级,会影响有用信号^[6-7]。如图 1 所示,本文中采用 DC-DC 转换芯片, LTC3260 可将 +15V 电压转换成 ±12V,为放大器供电。

1.5 低噪声放大器

放大器的增益带宽应满足所测动态信号的带宽要求。考虑到前置电路给探测器系统带来的噪声应尽可能的小^[8-10]。电路第 1 级放大 201 倍,使电路总的噪声系数近似等于第 1 级的噪声系数,且削弱第 2 级噪声的影响。第 2 级、第 3 级选用 OP27,第 3 级为电压跟随器,防止后续信号调理电路干扰。

根据所测热电偶的型号和时间常数的不同调节第 2 级放大倍数,使其增益带宽满足测试指标。此时放大倍数为 2200,用于校准普通 K 型热电偶。

2 电路噪声分析

电路输入噪声主要由探测器、偏置电路和放大电路产生。分析噪声时,先考虑恒流偏置部分,求解其电路噪声的诺顿等效电路,代入放大电路,再求解整个电路的等效输入噪声^[5]。电阻的热噪声可用电压或电流模型表征。

2.1 偏置电路噪声分析

偏置电路等效噪声模型如图 2 所示。晶体管输出的短路电流 i_o 即为偏置电流源的输出噪声。 r_b , $(1+B)r_e$, $r_c/(1+B)$ 和 BI_b 为晶体管的混合 h 参量等效电路, B 是直流电流放大系数, E_b 是基极扩展电阻的热噪声, I_f 为晶体管的 $1/f$ 噪声, E_c 是电阻 R_c 的热噪声, E_{24} 是电阻 R_{24} 的热噪声, R_Z 和 I_Z 分别是齐纳二极管的

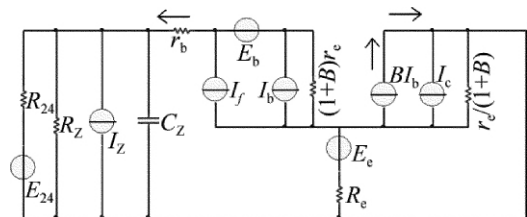


Fig. 2 Equivalent noise model of the bias circuit

等效电阻和噪声电流^[5]。

电路在探测器位置产生的单位带宽噪声电压为：

$$E_p = R \sqrt{\frac{E_n}{R_3} + I_n^2 + \frac{4KT}{R_3}} \quad (1)$$

式中 E_n 和 I_n 分别为晶体管 Q_2 单位带宽内的等效电压噪声和等效电流噪声的有效值 K 为玻尔兹曼常数, T 为电阻 R_3 所处的绝对温度。

2.2 放大电路噪声分析

检测电路中运算放大器可等效为一个理想无噪声运放的同相端串联一个噪声电压源,同相、反相输入端分别串联一个噪声电流源,等效 1 级放大电路噪声模型如图 3 所示。

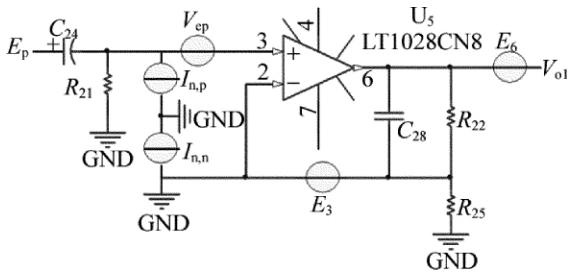


Fig. 3 Equivalent noise model of the 1st amplifier

等效噪声电压源产生噪声 $E_{n,p}$,等效噪声电流源产生噪声 $E_{n,n}$, U_5 的输出噪声电压有效值:

$$E_{5,n} = \sqrt{E_{n,p}^2 + E_{n,n}^2} \quad (2)$$

电阻 R_{21} , R_{22} , R_{25} 产生热噪声电压为 E_{21}^2 , E_{22}^2 , E_{25}^2 。输出端总的电阻热噪声为:

$$E_{R,n}^2 = E_{21}^2 + E_{22}^2 + E_{25}^2 \quad (3)$$

综上所述,电路输出端的均方根噪声电压为:

$$E_1 = \sqrt{E_{R,n}^2 + E_{5,n}^2} = [4KT\Delta f(R_{21} + R_{22} + R_{25}) + I_w^2 R_{22}^2 (f_{inc} \ln \Delta f + \Delta f) + E_w^2 (f_{enc} \ln \Delta f + \Delta f)]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 f_{inc} 和 f_{enc} 分别为电流噪声功率和电压噪声功率的拐点频率, I_w 为电流白噪声, E_w 为电压白噪声, Δf 为电路测量时的带宽。

第 1 级放大选用超低噪声高速放大器 LT1028,当频率为 1kHz 时,其等效噪声电压 $E_n = 0.86\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,等效噪声电流 $I_n = 1\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。将 $f_{inc} = f_{enc} = 1\text{kHz}$, $\Delta f = 50\text{kHz}$ 及电阻值代入 (2) 式、(4) 式中,得出红外信号检测电路的总噪声电压:

$$E_{IR} = \sqrt{E_1^2 + E_p^2} = 4.78\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (5)$$

3 电路性能测试

红外探测器电路性能测试采用以色列 CI 公司 SR20-32 中温黑体炉,其性能指标如下:空腔直径为 1.0";温度范围为 50℃ ~ 1000℃;轮种类为 B 类,孔直径分别为 1.6mm,3.2mm,6.4mm,9.5mm,12.7mm,

15.9mm 和 22.2mm;平均稳定状态功率为 800W;空腔孔为 11°;发射率 0.99 ± 0.01 ;SR60 斩光器频率范围为 1Hz ~ 2000Hz。

图 4 为电路性能测试系统框图。中温黑体炉可对红外探测器提供一个红外辐射信号^[11]。斩光器将连续的红外光调制成脉冲红外信号。调节光学支架使红外探测器的光敏面与黑体炉出光口在同一直线上。

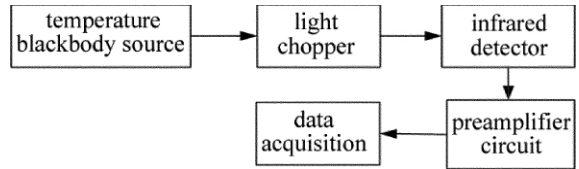


Fig. 4 Test of circuit performance

设置斩光器的转速频率为 1kHz,测试距离 20cm,出光孔径为 3.2mm。中温黑体炉温度依次升高,分别为 500℃,600℃ 和 700℃,得到红外探测器的电压波形如图 5 所示。

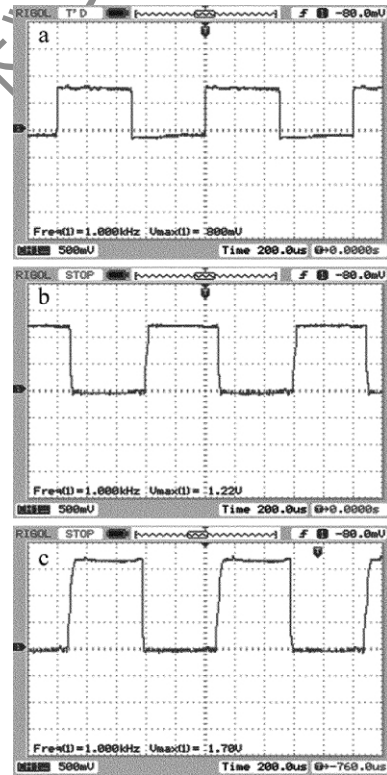


Fig. 5 Voltage waveform at different temperatures a—500℃ b—600℃ c—700℃

表 1 中给出了电路测试指标。红外探测器测试电阻为 1740Ω,实验中偏置电流为 2.3mA,信噪比为 7.25×10^3 。

Table 1 Circuit test specification

chip resistors	bias current	signal-to-noise ratio	detectivity D_{bb}^*
1740Ω	2.3mA	7.25×10^3	8.31×10^8

从输出波形看出,红外探测电路能达到低噪声的要

求,可放大微弱信号,具有较高的灵敏度和稳定性。电路对 1kHz 的脉冲红外信号有较好的频率响应,可用于时间常数为毫秒量级的温度传感器动态校准系统中。

4 结束语

介绍了红外探测器检测电路的设计方案,建立了偏置电路和 1 级放大电路的噪声模型,计算了放大电路的噪声电压。通过中温黑体炉红外辐射实验,检测电路实现了对红外微变信号的放大,电路稳定,有良好的信噪比。本研究对设计红外探测器放大器有一定借鉴作用,为后续温度传感器动态校准做好准备工作。

参 考 文 献

- [1] CHEN W L, ZHOU H Ch, HAO X J, *et al.* Test analysis of the laser's response time in the transient dynamic calibration system of high-temperature transducer [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2005, 32(7): 16-17 (in Chinese).
- [2] MOTCHENBACHER C D, FITCHEN F C. Design of low-noise electronic [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979: 299-304 (in Chinese).
- [3] LI D Y, DUAN X H, WEI H D. Study on electrical crosstalk of multi-element infrared photoconductive detectors [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 952-955 (in Chinese).
- [4] GUO D Zh. Infrared electronic technology [M]. Beijing: National Defen Industry Press, 1986: 25-29 (in Chinese).
- [5] LI D Y, DAI Z X, WEI H D. Design of a low noise preamplifier with constant current bias circuit for HgCdTe photoconductive detector [J]. *Infrared*, 2010, 30(3): 6-10 (in Chinese).
- [6] FATIHA MEKRI F, MACHMOUM M, AÏT-AHMED N, *et al.* A comparative study of voltage controllers for series active power filter [J]. *Electric Power System Research*, 2010, 80(6): 615-626.
- [7] HOROWITZ P, HILL W. Electronics [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2005: 299-304.
- [8] WEI C Y, HU B L, SHAO X J. Research on low noise design of HgCdTe infrared detector amplifying circuit based on ORCAD [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2009, 32(2): 324-328 (in Chinese).
- [9] LEFEBVRE A, LANZETTA F, LIPINSKI P, *et al.* Measurement of grinding temperatures using a foil/workpiece thermocouple [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 58(6): 1-10.
- [10] JIANG L Y, HAO X J, ZHOU H Ch. The application of off-axis parabolic mirror in the sensor calibration system [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 42-44 (in Chinese).
- [11] HAO X J, LI K J, LIU J. Dynamic calibration of temperature sensor based on CO₂ laser [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 156-159 (in Chinese).

版权所有 ©

《激光技术》编辑部