

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.01.07

应用于激光闪光法测量热扩散率装置的微弱信号放大调理技术研究

金振涛, 蔡静, 杨新圆, 周杨

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对激光闪光法热扩散率测量装置中光伏型探测器输出信号微弱、易受干扰的问题, 设计了微弱信号放大调理电路。应用输入保护环技术增强抗干扰能力, 精选电子元器件提高测量准确度, 应用开尔文开关技术实现自动切换功能避免导通电阻的干扰。经实验证明, 本文研制的微弱信号放大调理电路具有较好的重复性、较小的波动度和长期稳定性, 为激光闪光法热扩散率测量装置的应用提供了重要技术保障。

关键词: 热扩散率; 微弱信号; 高准确度放大; 开尔文开关; 输入保护

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)01-0037-05

Research on Weak Signal Amplification and Processing Technology Applied to Laser Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity

JIN Zhentao, CAI Jing, YANG Xinyuan, ZHOU Yang

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the weak output signal of photovoltaic detector in the laser flash thermal diffusivity measurement device, a weak signal amplification and conditioning circuit is designed. The input protection ring technology is used to enhance the anti-interference ability, and the electronic components are selected to improve the measurement accuracy. The Kelvin switch technology is used to realize the automatic switching function to eliminate the interference of the resistance. The experimental results show that the circuit has good repeatability, small fluctuation and long-term stability, which provides an important technical guarantee for the application of laser flash thermal diffusivity measurement device.

Key words: thermal diffusivity; weak signal; high-accuracy amplification; Kelvin switching; input protection

0 引言

由 Parker 和 Jenkins 等人^[1]提出的闪光法热扩散率测量方式具有重要意义, 在该方法基础上发展并完善的激光脉冲法极大地扩展了材料热扩散率测量实验中的测试温度范围及可测试材料种类。航空工业 304 所在高超音速飞行器热障材料热扩散率标准装置研制项目中, 应用非接触式红外测温法对材料温度变化和时间关系进行了测量, 提升了测温范围和测量时间的准确性^[2-3]。

非接触式红外测温法测量热障材料温度变化时, 使用单次激光脉冲信号给予样品激励, 并采用光电探测器接收温度变化信号^[4-8]。在此过程中, 样品温升小, 温度变化速度快, 光电探测器输出的信号微弱, 频率响应快, 且易受到干扰。为了得到可靠的信号, 开展微弱信号放大调理电路设计研究, 使其能够测量

毫安、微安, 甚至纳安级快速变化的电流信号, 为热扩散率的准确测量提供重要技术支撑^[9-11]。

1 样品温升信号红外测温原理

脉冲激光器发出的激光分为两路: 一路用于加热样品使样品产生温升, 另一路用于产生触发信号。使用的标准样品尺寸直径为 10 mm, 热量辐射面积为 78.5 mm²。针对不同材料、不同厚度的样品, 可通过适当调整激光脉冲能量来控制温度升高幅度。样品的辐射力 M 根据普朗克公式计算, 即

$$dM_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda \quad (1)$$

式中: c_1 为 $3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}$; c_2 为 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; λ 为波长, m; T 为样品的热力学温度, K。

假设样品的表面积为 $s = 78.5 \text{ mm}^2$, 而样品的发射率为 ε , Q 为被试样表面吸收的激光脉冲的辐照能量

(J/m²), 则样品的辐射功率为

$$P_0 = Qs\varepsilon \quad (2)$$

探测器接收的能量为

$$P = P_0 K \eta_1 \eta_2 \quad (3)$$

式中: K 为探测器镜头有效接收面积比率; η_1 为真空窗口透过率; η_2 为镜头透镜透过率。

由此可以计算出不同温度下的发射功率及探测器接收功率, 进而可以得到探测器输出信号值^[12-13]。采用 S-025 型硅探测器作为触发信号接收源, 采用 FH-IS-020 型 InSb 型探测器作为温升信号接收源。在脉冲激光激励下, 样品接收到的激光脉冲能量为 0~20 J, 样品的温度段为室温至 2000 K, 样品辐射功率范围为 3.89~2.94×10⁵ W, 结合探测器的参数和式(3), 计算得到探测器接收能量功率为 2×10⁻⁶~2.35×10⁻² W, 再根据探测器的分辨力优于 2×10⁻¹⁰ W, 计算得出探测器的信号接收和输出参数, 设计信号放大器放大倍数范围为 10²~10⁶, 响应频率大于 10 kHz。

2 信号放大调理电路设计

利用标准温度传感器测量温度, 并利用电测仪表进行信号转换。光伏型探测器输出电流信号, 一般应用互阻放大电路对小信号进行放大^[14-15], 其原理如图 1 所示。针对热扩散率测量过程中光伏型探测器输出信号微弱的问题, 需设计高准确度、高稳定性且具有一定带宽的微弱信号放大器, 因此还需要深入分析各项参数。

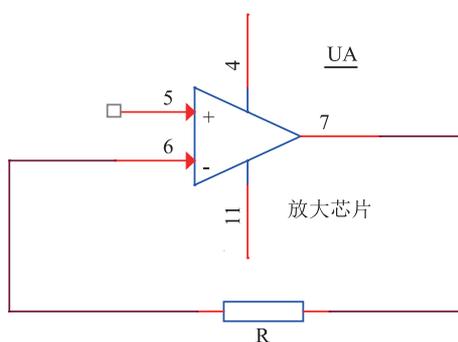


图 1 互阻放大器原理

2.1 放大器噪声分析及元器件选择

根据直流误差分析, 在低温阶段, 光能量较小, 所以需要更大的反馈电阻; 在高温阶段, 光能量较大, 故应选择小一些的反馈电阻。反相偏置电流与光电二极管电流直接相加, 由此得到折合到输入端(RTI)的误差 I_i 。此电流流经反馈电阻, 由此产生到输出端

(RTO)的误差为

$$V_{\text{RTO}} = I_i \times R_f \quad (4)$$

式中: R_f 为反馈电阻。

光电二极管接口电路中, 放大器失调电压 V_{os} 是主要的误差源之一, V_{os} 引起的输出端(RTO)误差为

$$V_{\text{os_RTO}} = V_{\text{os}} \times \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \quad (5)$$

式中: R_s 为探测器等效内阻。

由式(4)和式(5)可知, 放大器偏置电流引起的噪声误差的大小主要由偏置电流和反馈电阻的乘积决定, 放大器偏置电压引起的噪声大小为反馈电阻和内阻之比与偏置电压的乘积。

如果简单应用原理图进行放大会造成不稳定性问题, 而且运放输入端的电容越大, 运放越是趋于不稳定。因为光电探测器等效电容很大, 如果没有反馈电容, 电路的输出会很不稳定, 容易发生振铃现象。保证光电探测器电路稳定性的关键是增加反馈电容 C_f , 在反馈系数中增加一个零点。反馈电容的大小由光电探测器、反馈电阻和频率共同决定。

$$C_f = \sqrt{\frac{C_j}{2\pi \cdot R_s \cdot f}} \quad (6)$$

式中: C_j 为探测器等效结电容; f 为信号频率。

在频率较低时, 电阻变化产生的噪声增益 NG_1 由反馈电阻与分流电阻(探测器内阻)之比决定。

$$NG_1 = 1 + \frac{R_c}{R_i} \quad (7)$$

当频率较高时, 电容变化引起的噪声增益 NG_2 由探测器等效结电容和反馈电容之比决定。

$$NG_2 = 1 + \frac{C_j}{C_f} \quad (8)$$

探测器输出的电流信号为 10 nA 至 100 nA, 单靠一个放大倍数是无法覆盖整个量程的。因此将整个电流信号放大范围分为三个量程: 量程 1 为 nA 级, 使用反馈电阻 1 M Ω ; 量程 2 为 μ A 级, 使用反馈电阻 1 k Ω ; 量程 3 为 mA 级, 使用反馈电阻 100 Ω 。为了保证放大输出的准确性, 降低噪声的干扰, 电路选择使用表面贴封装的 Panasonic 系列电阻, 分别为: 准确度 0.05%、温漂为 10×10⁻⁶ 的 100 Ω 精密电阻, 反馈电容选择 33 pF; 准确度为 0.1%、温漂为 25×10⁻⁶ 的 1 k Ω 精密电阻, 反馈电容选择 10 pF; 准确度为 0.1%、温漂为 50×10⁻⁶ 的 1 M Ω 精密电阻, 反馈电容选择 1 pF。上述选择方式全面覆盖了探测器的输出信号范围, 准确度和温漂带来的噪声影响几乎可以忽略

不计,且带宽能够达到最大,满足频率大于 10 kHz 的要求。

2.2 量程切换及电路设计

根据实际应用需求,各量程之间需要自动切换,一般情况下是使用 DSP 控制多路模拟开关或利用继电器切换不同的反馈电阻,但是这些方法会引起多种误差,造成电路不稳定甚至错误,例如模拟开关会产生和温度相关的增益误差,漏电流会引起失调误差。为了避免上述问题,本设计应用了开尔文开关技术,方法是在各增益选择环路中引入两个开关,一个用于将跨阻/运放输出连接到反馈网络,另一个用于将反馈网络输出连接到下游元件,其工作原理如图 2 所示。

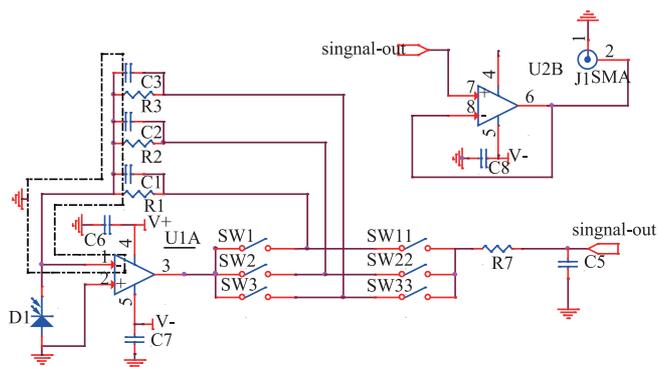


图 2 开尔文开关选择增益

则有

$$V_{out} = -I_p \times (R_f + R_{sw}) \quad (9)$$

$$V_1 = V_{out} \times R_f / (R_f + R_{sw}) \quad (10)$$

式中: V_{out} 为第一放大器输出; I_p 为光电探测器输出电流; R_{sw} 为开关电阻; V_1 为节点中心节点电压。

将式(9)代入式(10)可得

$$V_1 = -I_p \times R_f \quad (11)$$

通过公式推导发现,虽然这种方法需要使用的开关数量加倍,但中心节点的电压不再与开关相关,而是取决于通过所选电阻的电流。开关(SW1 和 SW2)之间仅有很小的输出阻抗,如果放大器驱动高阻抗负载,则其误差贡献可忽略不计,能达到很好的放大效果。电流信号在被反馈电路放大之后,经过低通滤波减少了高频噪声,再应用电压跟随器隔离放大器和数采部分,有效提高了 AD 采集的驱动能力。

2.3 输入保护

输入微弱电流信号很容易受到来自电路板上的漏电流和电磁干扰。为了防止输入信号受到干扰,在输入端子和输入走线外围用保护环将其保护起来,达到

防止漏电流干扰的目的。输入保护示意图如图 3 所示,其中, A 点是探测器电流输入端,在整个电流输入的回路中,用 0.8 mm 宽的裸露的铜皮将输入端及走线包围起来,裸露的铜线和地相连,这种设计工艺能将电路板上的漏电流隔离,避免信号干扰。

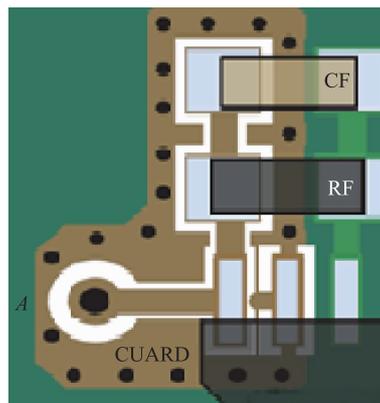


图 3 输入保护示意图

选用的放大芯片具有很低的偏置电流,以及较高的电源抑制比。但由于是微弱信号放大,为了防止电源噪声串扰到电路中,尤其抑制开关电源的噪声,使用了低压差稳压器(LDO)芯片 ADP7118 和 ADP7182,可以有效衰减供电电源中的开关杂散,令杂散降低至 -120 dB 的噪声水平。同时在 LDO 稳压芯片附件中进行了滤波处理,使用铁氧磁珠隔离高频电磁干扰信号。电源模块使用了 HUIZHONG 的 18 ~ 36 V 宽范围输入, ±6 V 输出,波纹在 5% 以内。

3 试验验证

3.1 电路试验验证

首先使用标准信号源对微弱信号放大电路准确性和稳定性进行验证,使用 KEITHLEY6221 分别提供标准信号 100 nA, 500 nA, 1 μA, 100 μA 和 1 mA, 对 100 nA, 500 nA 和 1 μA 放大 10^6 倍,而 100 μA 和 1 mA 则分别放大 10^3 和 10^2 倍,使用 Agilent2901A 数表对其进行了 4 h 的连续监测,监测数据如表 1 所示

放大 10^6 倍,输入为 0 nA 时,放大电路的输出为 0.3 mV,经 0 输入补偿后,在同一放大倍数下,100 nA, 500 nA 和 1 μA 的放大倍数相对误差在 0.3% 以内,证明该放大电路具有很高的准确性。

将 1 μA 放大 10^6 倍,监测放大电压值随时间的变化,如图 4 所示。在 4 h 的测试中,波动为 0.1%,证明该放大电路稳定性非常好。

表 1 标准信号测试不同放大倍数

标准信号	测量结果/V	
	最大值	最小值
100 nA	0.0996	0.0997
500 nA	0.4971	0.4981
1 μA	0.9968	0.9967
100 μA	0.0995	0.0995
1 mA	0.0994	0.0993

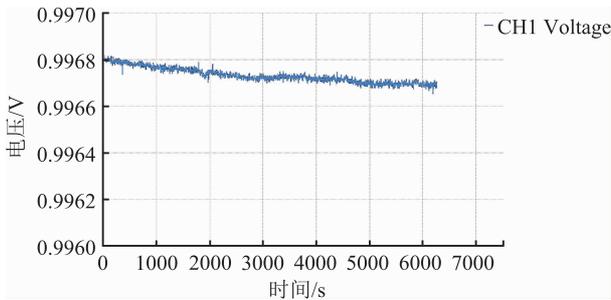


图 4 标准信号放大效果

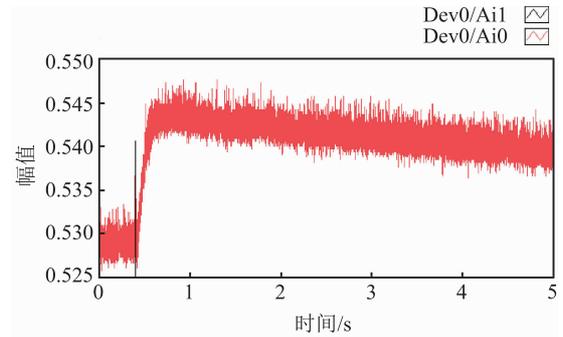
在半年时间内，设置放大倍数为 10^6 ，在 500 nA 时，对放大电路效果进行长期稳定性测量，数据如表 2 所示。根据测量结果可以看出该信号放大调理电路具有较小的波动性，短期重复性好，长期稳定性佳，能够满足微小信号放大调理要求。

表 2 长期稳定性测量数据

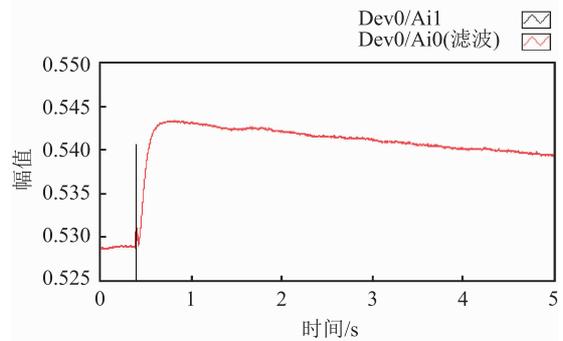
时间/月	测量结果/V	
	最大值	最小值
2	0.0996	0.0997
3	0.0997	0.0998
4	0.0995	0.0997
5	0.0996	0.0998
8	0.0996	0.0998

3.2 热扩散率试验验证

将模拟放大电路安装在激光闪光法测量热扩散率装置中，测试样品为不锈钢，直径为 10 mm，厚度为 1.1 mm，在 600 °C 时，给予样品脉冲信号激励，测量得到的温度扩散和时间关系如图 5 所示



(a) 原始温升信号



(b) 滤波后温升信号

图 5 温升信号和时间的关系测量图

计算得到应用本文研制的微弱信号放大调理电路后，激光闪光法热扩散率测量装置所测得的样品不锈钢热扩散率为 $0.0495 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ，与 PTB 参考数据 $0.04996 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 比较，偏差在 0.9% 内。

4 结论

针对激光闪光法热扩散率测量装置中光伏型探测器及其输出信号的特点，研制微弱信号放大调理电路，使其能够测量毫安、微安，甚至纳安级的微弱电流信号。利用开尔文开关技术，避免了普通切换开关由于导通电阻带来影响的问题；对信号进行滤波并转换为差分信号，减小了共模信号的干扰；采用输入保护环技术，增强了电路的抗干扰能力。该放大调理电路能够根据不同的探测器调整输入参数，减少由于探测器内部参数不同而带来的非线性影响，同时能够根据探测器输出信号切换不同的放大倍数。经实验证明，本文研制的微弱信号放大调理电路具有较好的重复性、较小的波动度和较好的长期稳定性，为激光闪光法热扩散率测量装置的研制起到了重要技术支撑作用。

参 考 文 献

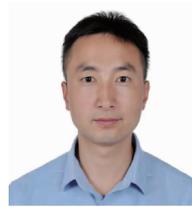
[1] Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, et al. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal

- Conductivity[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(9): 1679-1684.
- [2] 杨新圆, 吕国义, 刘彦军, 等. 基于激光闪光法的立式热扩散率测量装置研究[J]. 计测技术, 2019, 39(2): 25-28.
- [3] 唐大伟, 荒木信幸. 应用激光闪光法测量薄膜材料的热扩散率[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 1-7.
- [4] 刘建庆, 孙建平. 热扩散率测量中激光非均匀加热的研究[J]. 计量技术, 2011, 11(2): 3-5.
- [5] 邱萍. 激光闪光法测量材料热扩散率标准装置的研制[J]. 计量学报, 2007, 28(s1): 82-85.
- [6] 孙建平, 刘建庆, 邱萍, 等. 激光闪光法测量材料热扩散率的漏热修正[J]. 计量技术, 2008(1): 23-25.
- [7] 陈跃飞, 张金涛, 于帆, 等. 激光闪光法测量材料热扩散率国际比对的实验研究与分析[J]. 计量技术, 2008(12): 29-32.
- [8] 张克, 孙建平, 邓建兵. 激光闪光法热扩散率测量仪温度测量系统抗干扰措施研究[J]. 计量学报, 2011, 32(S1): 70-73.
- [9] 施柏煊, 殷浩, 王聪和, 等. 横向激光光热偏转相位法测量金刚石薄片的热扩散率[J]. 光子学报, 2000, 29(5): 474-477.
- [10] 方健文, 陈赵江, 杨朝霞, 等. 光热反射技术测量材料热扩散率的一种新方法[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2007, 30(1): 6-10.
- [11] 高椿明, 毕艳芳, 孙启明, 等. 压电技术测量热扩散率的精度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 426-429.
- [12] 何燕, 崔琪, 马连湘. 热扩散系数测量的新方法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2005(6): 50-52.
- [13] 周杨, 吕国义, 杨新圆, 等. 固态材料热扩散率测量系统研究[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 60-64.
- [14] Dusen M S V. Temperature, its measurement and control in science and industry. Reinhold Publishing Corporation [J]. 2010, 31(3): 96-97.
- [15] 郭治元. 负反馈放大电路的稳定性分析[J]. 甘肃广播电视大学学报, 2019, 29(3): 74-78.

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2015205A003)

作者简介



金振涛(1987-), 男, 陕西汉中, 工程师, 硕士研究生, 主要从事精密仪器电路设计工作, 曾参与多项电路信号调理、精密电路设计研究。已申报并授权实用新型专利1项、发明专利1项。