

# 光声光谱仪微弱信号检测电路的低噪声设计

赵彦东,方勇华,刘家祥,王安静

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所,通用光学定标与表征技术重点实验室,安徽 合肥 230031)

**摘 要:**光声光谱技术在变电站  $\text{SF}_6$  气体分解产物,医疗诊断等场合的微量气体检测方面有着高灵敏度的特点。根据低噪声电子设计理论,设计了基于光声光谱探测技术的低噪声检测电路;从整个系统的角度出发,通过噪声模型对系统噪声和信噪比进行计算,对电路进行分析并使用集成运算放大器设计前置放大电路和信号调理电路。实验测试结果表明,该检测电路可稳定的将光谱仪的光声信号转换为电信号,电路信噪比高,可靠性高且稳定性高。

**关键词:**光声光谱;微弱信号;前置放大;低噪声;噪声模型

**中图分类号:**TN722.3

**文献标识码:**A

## Low Noise Design of Weak Signal Detecting Circuit for Photo-acoustic Spectrometer

ZHAO Yandong, FANG Yonghua, LIU Jiaxiang, WANG Anjing

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Key Lab. of Optical Calibration and Characterization, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Photo-acoustic spectroscopy technology is increasingly used for its high sensitivity characteristics in the detection of  $\text{SF}_6$  decomposition in substations and medical diagnosis. A kind of low noise design of weak signal detecting circuit is designed. According to the model of noise analysis, the system total noise and SNR are calculated based on the theory of low noise design. Then the pre-amplify circuit and signal conditioning circuit are designed based on the analysis of the operation amplifiers. The experimental results show the detection circuit can translate the photo-acoustic signal to the electric signal steadily, which has the high SNR, high reliability and high stability.

**Key words:** photo-acoustic spectroscopy; weak signal; pre-amplify circuit; low noise design; noise model

### 0 引言

光声光谱技术在测量微量气体场合有着其特有的优势,即灵敏度高,可靠性好。常应用于变电站故障气体检测,医疗诊断和环境污染检测等。其具有线性度好、检测快速、结构紧凑和抗干扰能力强等优点。

在光声光谱检测技术中如何避免电路的噪声对测量精度的影响是检测中关键的部分。检测电路中的噪声对结果有着决定性的影响,噪声过大会将信号淹没,使得无法将有用信号和噪声区分开来。本文主要针对以下技术难题情况展开研究,即抗干扰

能力,增益稳定,运算放大器的选型,元器件的噪声和数模混合印刷电路板(PCB)设计对噪声的影响。

### 1 光声光谱仪的原理

光声光谱仪的检测原理如图1所示。将聚焦、调制和滤光后的红外光束入射到光声池,光声池中充满了被测气体,被测气体的分子吸收红外光源的能量,将吸收的光子能量通过无辐射跃迁回到低能态释放能量并转化为周期性微弱声波信号。该声波信号的强弱与光声池中微量气体分子的含量成对应关系,因此利用微音器检测该声波信号将其转换为电信号即可测量微量气体的含量。

收稿日期:2014-03-18

作者简介:赵彦东(1990-),男,山西朔州人,硕士生,主要从事红外微弱信号的检测、采集方法及软硬件实现方面的研究。E-mail: ydz2007274067@126.com。方勇华(1966-),男,博士,研究员,主要从事遥感光谱与图像分析及目标探测识别技术研究,主持多项科研项目,研究内容涉及红外遥感,大气辐射校正,数字信号处理(软硬件),图像分析,模式识别等领域。E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn。

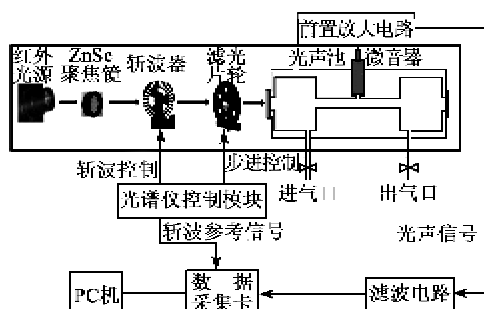


图1 光声光谱仪原理图

## 2 光声光谱检测电路设计

微弱信号放大调理的目的是保证探测器输出信号不失真的同时,通过有效地抑制噪声来增大微弱信号的幅度,提高信噪比,进而提取出有用信号<sup>[1]</sup>。运放同相与反相放大的选择,噪声匹配,外围电阻选择,负反馈对噪声性能的影响及合理的布线布局成为红外信号检测电路设计的若干技术问题<sup>[2-4]</sup>。本文检测系统使用的探测器为丹麦某公司的一款微音器。其灵敏度为 50 mV/Pa,等效电容为 17 pF。噪声 14.5 dB re 20  $\mu$ Pa。根据光声光谱理论计算,光声池在工作状态下,微音器需分辨的信号电压值约在 200 nV,所以其信号完全被噪声淹没。因此,采用超精密高速低噪声的运算放大器 LT1028 对其进行放大和稳定,后级滤波放大采用内部补偿双重音频低噪声运算放大器 NE5532。

前置放大电路采用两级放大和失调补偿电路,增益为 60 dB。滤波器采用塞林更(KRC)结构。前置放大电路和滤波电路间采用阻容耦合,从而使各个静态工作点互不影响,并在减少信号传输损耗和温漂方面有优势。

硬件结构如图 2 所示。

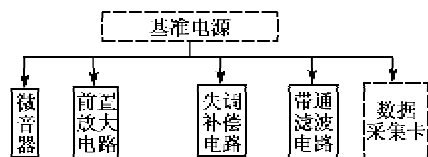


图2 硬件电路结构图

### 2.1 前置放大电路及噪声分析

前置放大电路用于将信号低噪声放大,是整个模拟信号链的重要部分。其对探测器性能的最大发挥起关键性的作用。在对其进行设计时,要考虑噪声、增益、阻抗及稳定性等,一般要仔细选择有源和无源元件来满足噪声抑制指标的要求<sup>[5]</sup>。前置放大器信号增益设计为 120 dB,查阅 LT1028 的数据手

册得到其在 30 Hz 下的增益为 112 dB。故使用两个放大器进行前置放大,每级的增益为 30 dB。其实现电路如图 3 所示。

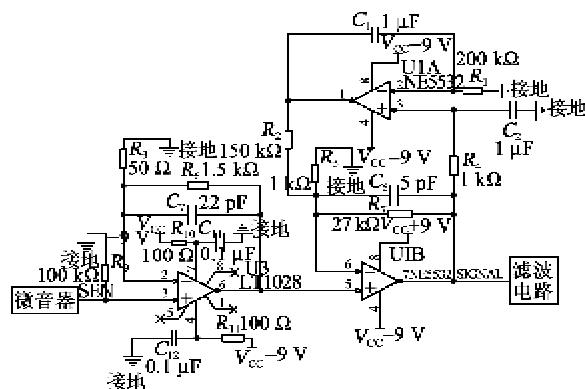


图3 前置放大电路

运算放大器的噪声分析有多种模型可以采用,其中较经典的是噪声等效电压电流(EN-IN)模型<sup>[1,6]</sup>,下面使用此模型进行噪声分析。EN-IN 噪声模型如图 4 所示。

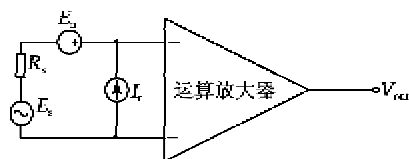


图4 运放噪声模型

图中,  $E_s$  为电阻的热噪声等效形成的电压源,  $E_n$  为和  $I_n$  为放大器等效到输入端的噪声电压和噪声电流,  $R_s$  为信号源的输出电阻。

第一级放大器的噪声只要分析运放输入电压噪声,电阻热噪声和噪声输入电流流过电阻产生的噪声。查阅 LT1028 的数据手册可知电压输入噪声密度在 30 Hz 下约为  $0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。因此,  $R_s$  产生的热噪声不能远大于这个值,但  $R$  值太小会引起运放输出电流增大,从而增加运放自身的热噪声。故这里选择  $50 \Omega$ ,电阻产生的热噪声密度为

$$V_{nr} = \sqrt{4kTBR} = \sqrt{4kTBR_3} =$$

$$0.88(\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \quad (1)$$

式中:  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $B$  为噪声带宽;  $V_{nr}$  为电阻热噪声等效电压。

第一级放大电路噪声输入电流流过电阻产生的噪声密度:

$$V_{ni} = I_{ni} \times R_i \parallel R_s = 0.23(\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \quad (2)$$

第一级放大电路产生的总噪声:

$$V_{n1} = \sqrt{V_{ne}^2 + V_{nr}^2 + V_{ni}^2} \cdot G \cdot \sqrt{BW} =$$

$$1.28 \times 30 \times \sqrt{30} = 210 (\text{nV}) \quad (3)$$

式中:  $V_{ne}$  为固有噪声电压;  $V_{ni}$  为电流热噪声等效电压;  $G$  为增益。

第二级放大电路产生的噪声要求没有前一级严格, 查阅 NE5532 的数据手册得知其电压输入噪声密度为  $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

第二级放大电路电阻产生的热噪声密度为

$$V_{nr} = \sqrt{4kTBR} = \sqrt{4kTBR_5} = 3.95 (\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \quad (4)$$

第二级放大电路噪声输入电流流过电阻产生的噪声密度:

$$V_{ni} = I_{ni} \times R_5 \parallel R_7 = 0.47 (\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \quad (5)$$

第二级放大电路产生的总噪声:

$$V_{n2} = \sqrt{V_{nr}^2 + V_{ni}^2 + V_{ne}^2} \cdot G \cdot \sqrt{BW} = 6.39 \times 27 \times \sqrt{30} = 942.3 (\text{nV}) \quad (6)$$

前置放大电路总的电路产生的噪声:

$$V_n = \sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2} = 965.4 (\text{nV}) \quad (7)$$

总体信号调理电路的信噪比:

$$\text{SNR} = 20 \log(V_o/V_n) = 35.38 (\text{dB}) \quad (8)$$

经过噪声分析得出在输入微弱信号的情况下, 此前置放大电路满足光声光谱仪后期数据处理要求的信噪比。

放大器的直流偏置和失调是很重要的干扰。而在运放选型中, 失调和噪声是一对矛盾, 如具有自稳零功能的运放虽然失调很小, 但往往使用斩波技术实现低失调, 使其噪声性能变差; 而对于噪声性能较好的运放, 其失调又不如自稳零运放低<sup>[7]</sup>。本文设计的伺服电路的设计目的是消除放大器的失调偏移。放大器对 U1B 的输出进行充分的积分, 故其作用为检出放大器的直流成分, 将其反馈给 U1B。如果在 U1B 放大器上输出产生正的直流成分, 积分器输出端正的直流成分被放大而加到反相输入端, 直流失调就被补偿了。

前置放大的低频截止频率在  $30 \text{ Hz}$  以下, 要求积分常数较大。考虑到积分电阻为几千欧, 所以漏电流必须小, 所以选择  $1 \mu\text{F}$  的电容。

电路在低频  $-3 \text{ dB}$  的截止频率为

$$f_d = \frac{1}{2\pi R_4 C_2} \cdot \frac{R_5 \parallel R_6}{R_2 + R_5 \parallel R_6} \cdot$$

$$\frac{R_7 + R_5 \parallel R_2}{R_5 \parallel R_2} = 28.648 (\text{Hz}) \quad (9)$$

## 2.2 滤波电路

模拟带通滤波器的主要作用是对高斯分布的广谱噪声进行限带滤波, 同时为后级的模数转换提供抗混叠滤波, 电路实现如图 5 所示, 通过对电阻  $R_6$ 、 $R_3$ , 电容  $C_1$ 、 $C_3$  的设置可实现截止频率的选择。根据前面的光声技术理论计算, 信号频率为  $30 \text{ Hz}$ , 带宽为  $20 \text{ Hz}$ , 所以设计带通滤波器的截止频率为  $20 \text{ Hz}$  和  $40 \text{ Hz}$ 。为了尽可能压缩噪声带宽, 需带通滤波器的衰减陡度较大, 为了尽可能减小信号失真, 需要滤波器通带较平坦<sup>[8]</sup>, 这里选用两个二阶的巴特沃斯滤波器。 $-3 \text{ dB}$  截止频率设置为  $20 \text{ Hz}$  和  $40 \text{ Hz}$ 。为了调整各个滤光片的透光率不同引起的增益不同, 给滤波电路提供  $2 \sim 3$  倍的增益。

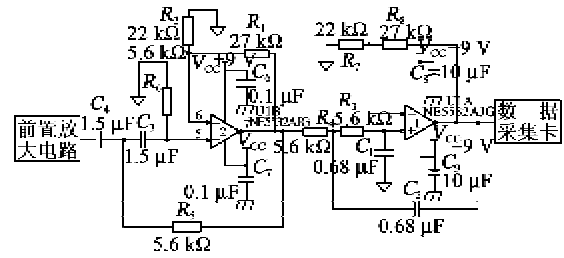


图 5 滤波电路

滤波器的高频  $-3 \text{ dB}$  的截止频率

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times R_6 \times C_3} = 41.795 (\text{Hz}) \quad (10)$$

滤波器的低频  $-3 \text{ dB}$  的截止频率

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times R_3 \times C_1} = 18.974 (\text{Hz}) \quad (11)$$

## 3 前置放大电路接地和电源去耦等噪声抑制

设计不当的接地可能降低简单放大器的性能。放大器后面一般都接有负载, 而负载的电流来自电源, 由放大器在放大输入端信号的同时加以控制。而此电流必须顺着某一回路流回到电源, 所以电源接地点也需要慎重考虑。

图 6 为前面的前置放大电路的第一部分。A 点和 B 点都可和电源地连接, 如果使用 B 点接地, 负载电流与输入信号共用一段线。该信号会和同向输入发生串联, 可能导致严重的误差。在负载电流较大且闭环增益较大的放大场合下, 电路将会引起振荡等严重失真。所以将电源的接地点尽量靠近负载输出端。



- 2008.
- [2] 周胜海,郭淑红.基于低噪声运放的传感器前置放大器设计[J].仪表技术与传感器,2006(9):38-40.  
ZHOU Shenghai, GUO Shuhong. Design of pre-amplifiers for sensors based on low-noise operational amplifiers[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006(9): 38-40.
- [3] 高振斌,刘晓哲,郑娜. Duffing 混沌振子微弱信号检测方法研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2013, 25(4):440-444.  
GAO Zhenbin, LIU Xiaozhe, ZHENG Na. Study on the method of chaotic oscillator in weak signal detection [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, Natural Science Edition, 2013, 25(4):440-444.
- [4] 龚涵,陈浩宇.微弱光信号检测电路的设计与实现[J]. 科技信息, 2007(27):85-87.  
GONG Han, CHEN Hao yu. The design and realization of an optic-electric detecting circuit for weak signal[J]. Science & Technology Information, 2007(27):85-87.
- [5] 李大宇,代作晓,魏焕东. HgCdTe 光导探测器的一种恒流偏置低噪声放大电路的设计[J]. 红外, 2010, 31(3):6-10.  
LI Dayu, DAI Zuoxiao, WEI Huandong. Design of a low noise preamplifier with constant current bias circuit for hgcdte photoconductive detector[J]. Infrared, 2010, 31(3):6-10.
- [6] 远坂俊昭,著. 测量电子电路设计——滤波器篇[M]. 彭军,译. 北京:科学出版社, 2006:40-51.
- [7] 戴逸松. 检测仪器输入电路的低噪声设计[J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(2):137-142.  
DAI Yisong. Low noise design of input circuit for detecting instruments[J]. Chinese Journal of Instrument, 1982, 3(2):137-142.
- [8] 塞尔吉欧洲·佛朗哥,著. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 刘树棠,译. 西安:西安交通大学出版社, 2009:206-207.
- [9] 郭迪忠. 红外电子技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1986:10-14.
- [10] CHOI S H, SOMASEKHAR D, ROY K. Dynamic noise model and its application to high speed circuit design[J]. Microelectronics Journal, 2002, 33(10): 835-846.
- [11] 徐晗,卢启鹏,朴仁官. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. 电子设计, 2009, 25(8/2):233-235.  
XU Han, LU Qipeng, PIAO Renguan. Research of near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. Electronic Design, 2009, 25(8/2):233-235.

(上接第148页)

由图4可知,带内波动和带外抑制测试能满足WLP、CSP等封装工艺的要求,实现相位一致性的检测。

#### 4 结束语

本文通过设计和加工微探针的方式,解决探针与芯片接触触点少导致接地信号采集不完整,影响芯片测试时带内波动、芯片测试与成品测试结果差异大的难题,满足WLP、CSP等封装工艺的要求,实现相位一致性的检测。

#### 参考文献:

- [1] 米佳,李辉. 声表面波器件小型化技术发展概述[J]. 压电与声光, 2012, 34(1):4-6.  
MI Jia, LI Hui. Overview of the development of saw miniaturization technology[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(1):4-6.
- [2] 张华. 时域分析在SAW滤波器芯片测试中的应用[J]. 压电与声光, 2003, 25(1):5-8.  
ZHANG Hua. Time domain analysis applied in wafer probing of SAW filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25(1):5-8.
- [3] 张革平,蔡军. 探针卡设计与技术改进[J]. 微电子技术, 1995, 23(2):51-53.