

气体差分检测中光电检测系统的设计

钟春兰 董小鹏 李钧均 齐洁 厦门大学光波技术研究所 361005

摘要:基于差分检测原理,设计了用于气体传感中微弱信号测量的增益可调的便携式双光路光电检测和采集系统。系统采用以 AD795 为核心的低噪声、高灵敏度前置放大器,通过有效的抗干扰措施,实现了微弱信号的高精度低噪声检测,并配以具有极强抗噪性能的 24bits $\Sigma-\Delta$ 模数转换芯片 AD7794,完成高分辨率的数据采集。通过 AVR 单片机控制实现电路增益的自动调节,解决了差分检测中存在的小信号放大,大信号饱和的问题。

关键词:气体传感;光电检测;微弱信号测量;可调增益;数据采集。

1 引言

气体浓度和组分的检测已成为当今传感器技术发展领域的一个重要前沿课题,而光谱吸收型光纤气体传感因其固有的优点而备受人们的青睐[1-3]。

每一种气体都有其固有的吸收光谱,根据 BeerLambert 定律,当一束平行光通过有特定气体气室时,输出光强 I_t 与输入光强 I_0 和气体的体积分数 C 之间的关系为:

$$I_t = I_0 \exp[-\alpha_v CL] \quad (1)$$

式中 α_v 为气体吸收系数;L 为吸收路径的长度。

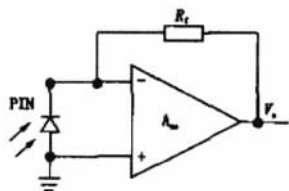
由(1)式可知输出光强与气体浓度呈负指数关系,因此随着浓度的变化,光强变化是及其微弱的。要良好的检测这些微弱信号,必须设计低噪声高精度的微弱信号检测系统。为了探测微弱的光电流信号,前置放大的增益必须足够高。而在实际的测量应用中,通常采用差分检测[4-5],即引入一参考信号以消除光源和光路等系统噪声的影响,该参考信号不被气体吸收,因此较高的增益又容易使参考信号饱和而失去参考价值。本文通过 AVR 单片机控制实现增益的自动调节,即根据信号大小选择相应的增益,从而使小信号最大程度的放大而参考信号不饱和,有效的扩大了电路的测量动态范围。

同时本系统采用双光路,通过 24bits $\Sigma-\Delta$ 模数转换芯片 AD7794 在硬件上实现实时除法运算,有效的克服了由光源抖动带来的测量误差。

2 系统设计和分析

2.1 光电检测原理

光电检测电路的核心为跨导互阻放大器,如图(1)所示。图中,PIN 管将光信号转换为电流信号,该电流流经 R_f 从而完成了 I-V 变换。值得注意的是,由于负反馈作用的存在,运算放大器的反相端电位几乎等于同相端电位,即 PIN 管两端的电压差几乎为零。从 PIN 的 I-V 曲线可知其在 0 伏附近具有良好的线性关系,但同时由于在反偏压为零时 PIN 管的等效体电容相对较大,所以此时电路的时间常数较大,甚至可能使电路产生振荡,因此必须进行相位补偿,方法是在 R_f 两端并联一个容值在几十 pF 左右的电容[6]。



图(1)光电检测基本原理

设光生电流为 I_p , 假定运放为理想运放,其输入电阻和放

大倍数都为无穷大,则输出电压为:

$$V_0 = -I_p * R_f \quad (2)$$

2.2 放大电路设计[7]

在实际应用中,没有完全理想的运放。由于受失调电压 V_{os} , 偏置电流 I_b 的影响,输出电压误差为:

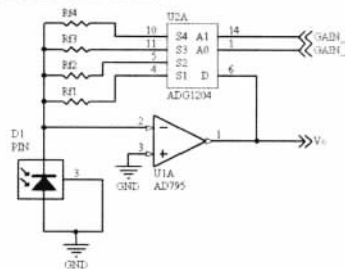
$$V_e = V(1 + R_f/R_d) + I_b R_f \quad (3)$$

其中 R_d 为 PIN 的结电阻。由式(3)可知,只有当放大器的失调电压和偏置电阻都很小时,电压误差才能减小。因此,在设计中,我们选择了失调电压和偏置电阻都很小的 AD795 作为前置放大器。在 25°C 条件下,其失调电压最大为 250uV,失调电压漂移最大为 3 uV/°C,输入偏置电流最大为 1pA,这样,可以检测到数 pA 的弱电流流量。同时 AD795 具有极低的噪声特性,满足设计的需要。

由公式(2)可知,为检测微弱信号,要求反馈电阻的阻值足够大。然而过大的反馈电阻将引入很强的电阻热噪声,同时反馈电阻过大,要求运放的输入电阻更大,否则会产生分流,从而增大了整体输入偏置电流,造成测量误差。我们通过采用 Π 型网络解决这个问题,如图 2 所示,此时电路输出电压如(4)式所示:

$$V = I(R_1 + R_f + R_1 R_f / R_2) \quad (4)$$

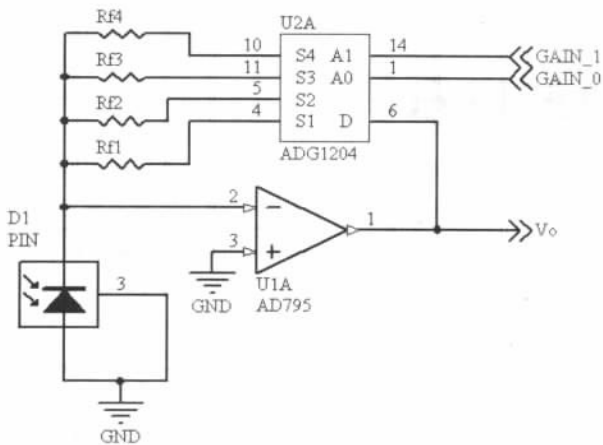
可见只要合理的选择 R_1 、 R_2 的比值,不必选用很大的 R_f 也能取得较高的检测灵敏度。



图(2)前级放大电路

2.3 自动增益控制电路设计

为了解决入射光强相对较强而造成的前置放大器容易饱和问题以及为了扩大前置放大器的动态范围,我们采用了类似于 AGC 控制原理的程控增益可调电路,如图 3 所示。该电路采用漏电极小 (<1nA) 的四选一模拟开关 ADG1204,实现了 4 档(1k, 10k, 100k, 1M)增益。每次采集,单片机都将根据预设的算法自动确定该选用哪档增益,并通过控制 A1, A0 选通相应的电阻 R_f 。



图(3) 增益自动控制电路

2.4 高精度数据采集

气体的吸收光信号经 PIN 转换成光电流,经过放大、滤波后,从放大器输出的是一个携带了气体吸收信息的模拟电压信号,必须通过模数转换(A/D)将信号转换成数字量以输入到单片机进行数据处理,完成测量结果的输出显示。

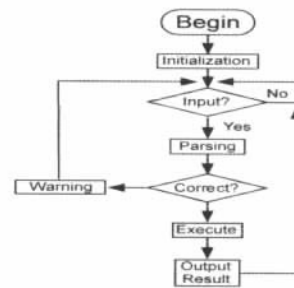
设计中我们采用 AD 公司生产的低功耗 24 位 $\Sigma-\Delta$ 模数转换器 AD7794,该芯片能直接将传感器测量到的多路微弱信号进行 A/D 转换。 $\Sigma-\Delta$ 采样技术是利用高于输入信号频率的采样时钟实现超采样,从而在输入信号混入噪声的情况下能够还原出有用信号的大小,大大提高了系统的信噪比(SNR)[8]。系统采用的 ADC(AD7794)具有极强的抑制 50Hz 工频噪声的能力(-100dB),很好的消除了电网带来的干扰。另外,该器件还具有高分辨率(24bit)、宽动态范围、自校准、低电压低功耗等特点,其各项指标均能有效满足微弱信号检测的要求。同时该器件具有通用的 SPI 总线接口,能和单片机方便的进行数据传输。

为消除光源自身功率抖动而带来的测量误差,系统采用双光路差分检测,在电路上,把通过待测气体后变换得到的电压信号送入 AD7794 的一路模拟输入端,把参考电压信号送入 AD7794 的参考电压输入端。由于 AD 转换器实质上是一个除法器(其结果为输入信号与参考信号的比值),这样做在硬件上实现了待测光路和参考光路的实时除法运算,有效的克服了由光源抖动带来的测量误差,并大大节省了单片机的运算时间。

2.5 程序编制

本系统采用 C 语言在 GCC 环境下进行编程,所有的开发工具都是开源免费的,大大降低了开发成本。另外,由于 AVR 特定的指令结构,使得其在运行 C 语言程序时具有很高的效率,例如,定义了函数指针(void *)fun(void),在该指针被赋值并且执行时,对应的汇编代码仅仅为一条 icall 指令就能执行函数指针所指向的函数[9]。

该系统采用串口作为人机接口,即用 Windows 超级终端程序作为系统的输入和输出界面,像输入 DOS 命令一样,每条指令都是文本格式的并可以带参数。一条指令输入完成,系统会在指令字符串中提取指令字符,参数字符和指令结束标志,并进行相应的解析和处理。处理的结果将返回送至 PC 显示。以下是程序框图:



图(4) 单片机程序框图

2.6 抗干扰措施[10]

由于是微弱光电流检测,漏电对系统的采样精度有很大影响。为了达到低的漏电电流指标,我们采取了以下措施:1)采用了输入偏置电流只有 1pA 的 MOS 运算放大器;2)采用了“Guard Ring”技术[11],即用一个保护环将对漏电特别敏感的信号线“圈”起来,该保护环的电位与所保护的信号线电位相等,但它是低阻抗的,所以不易受外界干扰。采用这一技术大幅度降低了由于 PCB 的绝缘电阻不够而带来的漏电;3)采用绝缘电阻大的具有 FR-4 标准的 PCB。

另外,为了抑制噪声,采取了以下措施:1)为抑制工频干扰,把整个电路的前置放大电路放入屏蔽盒,屏蔽盒外壳接地;2)采用由开关电容和 PLL 芯片构成的工频噪声陷波器(Notch Filter),对工频噪声的抑制达到了 45dB 而通带只有 0.2Hz。由于采用了 PLL 技术,陷波器的中心频率始终和电网的频率保持一致,从而更有效的消除了由于电网频率波动而使陷波器性能降低的影响。

3 测试结果

为验证输出结果与气体浓度的关系,我们在单波长条件下对甲烷气体进行吸收实验。波长为 1637.795nm 的单色光经过气体腔,用氮气吹洗气室,依次注入甲烷气体,待气体混合均匀后读取数据,实验数据如表 1 所示。从表 1 可以看出,系统输出值 K 符合甲烷的体积分数和输出光强的关系。

表 1 不同甲烷浓度情况下系统输出值 K

| 表 1 不同甲烷浓度情况下系统输出值 K | | | | | |
|----------------------|------|---------|----|------|---------|
| 序号 | 气体浓度 | 系统输出值 K | 序号 | 气体浓度 | 系统输出值 K |
| 1 | 0% | 0.4533 | 5 | 5% | 0.3264 |
| 2 | 1% | 0.4081 | 6 | 10% | 0.2403 |
| 3 | 2% | 0.3854 | 7 | 20% | 0.1361 |
| 4 | 3% | 0.3672 | 8 | 30% | 0.0907 |

4 结论

本文根据气体差分测量的具体应用,针对微弱信号检测中的稳定性和噪声问题设计了一种极微弱光电流信号检测电路;采用程控增益可调电路,有效的检测气体吸收信号的同时很好的解决了参考信号易饱和的问题;系统采用 AVR 单片机作为控制器,整个光电检测、采集形成一个便携式系统;理论分析和试验表明,该系统具有很高的精度和稳定性,能有效的满足气体差分检测的要求。

参考文献

[1]. 喻洪波, 廖延彪, 靳伟等. 光纤化的气体传感技术[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 193-196.
 [2]. 喻洪波. 多点光纤气体传感技术的研究. [清华大学工学博士学位论文]. 2001.
 [3]. 叶险峰, 汤伟中. CH4 气体光纤传感器的研究. 半导体光电, 2000, (3): 218-220.
 [4]. 王玉田, 郭增军, 王莉田. 差分吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. 光电子激光, 2001, 12(7): 675-678.
 [5]. 王艳菊等. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究. [燕山大学测试计量技术及仪器博士学位论文], 2006.