

红外碳硫传感器信噪比改善方法研究

章若冰, 魏丽君

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 应用于钢铁、矿物等检测的红外碳硫仪的研制在国内的研究还存在诸多问题, 由于其在红外检测中位于一个非常敏感的区域, 国内高精度红外碳硫传感器的研究迫切需要迈上新台阶; 其检出限和检测精度要达到国际先进水平还存在传感器的气室工艺不够、探测器与光源的资源限制、信号的调制方式落后等问题; 当然也存在信号的前期滤波、信号后期处理方面的原因; 文章针对当前红外碳硫传感器的研究现状, 对改善信噪比的方法进行探究和分析, 并提出了相应的解决措施和具体思路。

关键词: 红外碳硫传感器; 气体分析仪; 调制噪声; 信噪比

SNR Improvement of Infrared Carbon and Sulfur Sensor Method

Zhang Ruobing, Wei Lijun

(Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In domestic research of infrared carbon and sulfur analyzer are still many problems, because it is located in a very sensitive area in the infrared detector, the researchers domestic high-precision infrared carbon and sulfur sensor is an urgent need to a new level. The detection limit and detection accuracy to reach the international advanced level there is not enough of the sensor chamber technology, resource constraints detector and light source modulation signal behind other issues. Pre-filtered reason, the signal post-processing of the signals, of course, also exist. In this paper, current research status of infrared carbon and sulfur sensors, improving the signal to noise ratio method to explore and analyzed, and the corresponding solutions and concrete ideas.

Keywords: infrared carbon and sulfur sensor; gas analyzer; modulation noise; noise ratio

0 引言

应用于钢铁、矿物等检测的红外碳硫仪目前可粗略地以国产和进口设备进行区分, 国产设备主要应用于燃料、矿物原料、辅料等检测, 较有代表性的生产厂家有上海德凯公司; 进口设备主要应用于钢铁半成品、成品检测, 以 CS200、CS600 等产品为典范。总体来说, 进口设备比国产设备的技术指标高。

红外碳硫仪的研制在国内的研究还存在诸多问题, 由于其在红外检测中位于一个非常敏感的区域, 国内高精度红外碳硫传感器的研究迫切需要迈上新台阶。其检出限和检测精度要达到国际先进水平还存在传感器的气室工艺不够、探测器与光源的资源限制、信号的调制方式落后等问题。当然也存在信号的前期滤波、信号后期处理方面的原因^[1-3]。本文针对当前红外碳硫传感器的研究现状, 对改善信噪比的方法进行探究和分析, 并提出了相应的解决措施和具体思路。

1 技术指标分析

以当前我国红外定硫仪上使用的低硫传感器为例进行技术指标分析, 一般低硫传感器的标定下限为 10 ppm (采用标气标定), 16 位 AD 值变化量为 39, 信号噪声在 16 位 AD 值 20

左右, 应用到红外定硫仪系统后, 分析范围下限为 0.06%, 即 10 ppm 为低硫传感器的检出限。而红外碳硫传感器要求的检出限为 0.01 ppm, 分析范围下限为 0.6 ppm。

2 红外碳硫传感器研究的主要问题

2.1 镀金气室

镀金气室的质量对输出信号幅度产生了巨大的影响, 反应在技术指标上, 主要是镀金气室的反射率、热稳定性等, 合适的镀金气室将对红外传感器信噪比优化起到决定性的作用^[3-4]。

2.2 探测器和红外光源的资源限制

在探测器和红外光源的器件选择上, 国产器件目前不能考虑, 进口器件由于在一个敏感的科学领域, 硫的红外吸收峰与人体红外线的波长范围正好重叠, 器件没有太多的选择, 如果采用美国 JUDSON 的砷化硫、砷化硒等光电探测器, 需自配滤光片、聚光塔、甚至需要考虑采用电热制冷的光电器件和激光光源等, 设备的研发和生产成本将大幅增加, 电路部分的设计也存在比较大困难。而且还存在不确定性。

2.3 信号调制频率及稳定性

目前的红外传感器大都采用电压源, 光源点调制方式, 调制频率一般比较低 (10 Hz), 光源发光体为特殊材料, 但外在表现就是一个电阻, 典型值一般为 50 Ω , 阻值会随温度变化, 因此存在两个问题:

1) 低的调制频率 (10 Hz) 给精密整流的后续电路设计带来了较大困难, 一般情况下电路可采用 24 dB/oct 巴特沃茨滤波器, 虽然响应速度快, 但由于容性器件的不稳定性^[5], 在低

收稿日期: 2015-09-03; 修回日期: 2015-10-01。

作者简介: 章若冰 (1984-), 女, 湖南株洲人, 本科, 讲师, 主要从事应用电子技术、电子信息方向的研究。

通讯作者: 魏丽君 (1983-) 男, 湖南娄底人, 硕士, 讲师, 主要从事嵌入式系统开发, 智能仪器与仪表方向的研究。

频整流过程中带来不确定的直流损耗, 在输出信号上产生随机噪声。

2) 光源阻值变化的不确定性导致发射光强不稳定, 直接影响探测器输出信号的稳定性, 目前的红外传感器存在较大改善空间^[6-7]。是提高信噪比的关键之一。

2.4 系统设计的合理性

红外碳硫传感器作为红外碳硫仪的一个子系统, 虽然是系统的核心部件, 但也是影响系统技术指标的关键因素之一, 在高灵敏度的传感器应用系统中, 气路设计的科学性^[6,8,9], 实验流程的合理性、环境条件的一致性等都会对系统最终的技术指标产生不可忽视、甚至是决定性的影响。

3 红外碳硫传感器信噪比改善方法探究

红外碳硫传感器信噪比的改善主要针对上面所提到的主要问题, 针对问题进行优化设计。

3.1 镀金气室的改进设计

前面已经提到, 镀金气室的质量直接影响红外传感器的信号输出幅度, 假设镀金气室不产生热噪声(实际上不可能), 信号输出的噪声不变, 信号输出幅度下降导致信噪比下降, 因此, 必须设计采用高精度的内壁抛光电管, 严格控制镀金工艺及镀金纯度(注: 内壁光洁度影响探测器端光入射角的一致性, 满反射产生随机热噪声, 镀金纯度影响反射率)。

3.2 光源调制的改进设计

红外光源调试的优化可以从以下几个方面着手:

1) 提高红外光源供电的稳定性: 目前的红外传感器光源供电电路设计中, 光源调制一般采用恒压, 低阻值 MOS 管通断控制的方式实现, 弊端在于光源内部初始值发生变化时, 输出功率随之变化, 从而使探测器输出信号幅度产生波动, 在优化设计过程中, 可以考虑采用恒功率输出调制方式, 设计超高精度恒功率输出电源电路, 确保红外光源供电的稳定性。

2) 提高调制频率: 目前的红外传感器一般采用较低的调制频率(10 Hz), 提高调制频率有利于提高信噪比调理的直流稳定性, 因为 10 Hz 接近于一般运放器件的转角频率, 不利于 1/f 噪声的抑制, 当然提高调制频率过程也应该考虑光源输出光谱特性, 调制频率太高会影响光源的输出功率。

3) 采用机械调制方式: 机械调制方式的光源供电电路设计成恒功率输出电源, 利用电机带动切光片进行调制, 机械调制的优点在于可以大幅提高调制频率而不受光源限制, 光源输出功率可以设计得更高, 信号输出幅度得到提高, 缺点是对电机稳定性能要求高, 震动敏感、热噪声大, 如果采用大功率电源, 还需要考虑合理的光源散热方式, 以免引入其他影响信噪比的元素。

3.3 信号调理电路的改进设计

目前红外传感器信号调理电路的设计一般采用理想二极管精密整流电路和 24 dB/oct 巴特沃茨滤波器组成, 存在以下问题: 二极管漏电流会产生噪声信号; 由于交流信号频率低, 滤波器中心频率设计得很低, 大容量器件产生一定的直流损耗, 该部分电路优化可分两步进行:

1) 优化滤波器: 24 dB/oct 巴特沃茨滤波器在频率域上具有最佳平坦特性, 但在信号频率很低的情况下, 直流损耗也不小(大容量负载), 可设计采用切比雪夫滤波器或者 $Q=1$ 的

RC 有源滤波器进行改进, 在运放选型时必须考虑输入阻抗的问题, 尽量选用 FET 运放, 尽量减小直流损耗。

2) 优化整流电路: 由于光源调制到探测信号输出存在相位差, 因此在考虑解调电路是, 必须考虑相位跟踪的问题, 在信号噪声不是很大的情况下, 采用比较器做过零点检测即可, 但要注意零点去抖动的问题, 得到相位信号后, 可采用差动同步检波或者极性转换式同步检波电路, 都具有很高的直流稳定性。

3.4 信号处理的改进设计

信号处理主要包括 A/D 转换和信号采集处理, 目前大部分的红外传感器传感器设计过程中, 为了确定系统对传感器噪声的影响, 一般会选择不做任何处理即上传, 返回真实的传感信号, 这样设计可在结构设计或系统整体布局过程中存在一定优势, 但就信号处理而言, 可分两步进行优化:

1) 增加数字滤波: 鉴于当前传感系统结构及布局在信号输出过程中的影响程度, 一般传感器输出信号不作任何滤波处理, 在碳硫传感器设计中, 可先在测定结构及布局对传感器信号影响程度的基础上, 考虑采用高速 A/D 做简单的 16 次以下的均值滤波, 能有效抑制白噪声对有效信号的影响, 提高信号输出的稳定性, 这是提高信噪比的最简单有效的途径。

2) 改进 A/D 电路设计: 目前的红外传感器设计过程中, 考虑到成本问题, 一般都采用较高精度 4 通道 A/D 芯片, 当采样频率提高后, 有效位数会随之下降, 因此设计碳硫传感器可以考虑采用单通道高精度 A/D 芯片, 可有效保证在采样频率提高的情况下, 有效位不变, 通过可以采用 CPLD 实现串行接口读取 A/D 芯片, 确保采样速率。

3.5 结构的优化设计

在前面的分析中提到, 红外传感器设计过程, 结构设计的合理性对传感器性能影响是不可忽视的, 结构设计的优化主要可从以下几个方面入手:

1) 气室长度的调整: 红外碳硫传感器比较现有的红外传感器量程小很多, 因此气室长度必须进行调整, 但仪器设计的整体结构尺寸决定了太长的气室没有实际意义, 因此具体调整长度不能按公式进行计算, 在设计过程中, 可以采用逐步逼近的方式, 寻找最佳长度。

2) 探测器感光屏蔽罩优化: 目前探测器感光屏蔽罩一般采用铜质材料, 反射面进行比较粗糙的抛光处理, 优化设计过程中, 可采用镀金处理。在高精密的测量中, 还应该考虑聚光塔的设计, 探测器的感光部分在封装后的滤光片正中央位置($2 \times 2 \text{ mm}^2$), 因此可以采用漏斗型聚光塔的设计方式, 但应仔细计算最佳入射角度, 设计合理的聚光塔能有效提高感光强度, 提升信噪比, 还有一种更好的方法, 探测器用裸片, 滤光片贴在聚光塔入射口, 但制作工艺非常复杂, 成本也会大大增加, 考虑到产品的市场生命力, 一般不建议采用。

3) 光源散热罩优化: 如果采用较大功率的光源实现机械调制方式, 光源的散热问题会成为焦点问题之一, 必须设计与光源外壳紧密接触的良好散热方式, 设置良好的散热罩。

3.6 恒温系统的优化设计

红外探测器本身就是热敏器件, 因此红外传感器的环境要求是比较严格的, 特别是当敏感度要求提高后, 恒温环境的热

噪声会直接影响输出信号的信噪比,对气室较长的传感器,气室两端存在温度差,始终处于热交换状态,在产生随机热噪声的同时,还会产生较大的超低频热噪声,这在信号调理环节是没有太多办法处理的,特别是红外碳硫仪这种实时系统,要求信号响应速度快,因此也不能做太多的软件处理,因此,必须抑制环境热噪声的影响,在目前的研究水平上,可做如下的优化:

1) 增加屏蔽:目前的研究水平下,红外传感器恒温箱一般采用挡板隔离,环形热风循环,热风直接对传感器进行吹扫,控温系统的采温点置于传感器侧热风口,或者仅仅在采温点增加了回环,控温精度可达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,但热风温度必然是始终变化的,因此,考虑在传感器上增加一个海绵罩,打乱热风的流向,同时避免热风对传感器的定向直接吹扫,有利于抑制热噪声,如果考虑电磁屏蔽,也可以采用全封闭金属屏蔽罩进行测试。

2) 改善恒温环境的均温性:这是一个复杂而抽象的问题,在设计过程中,根据不同的需求,可能设计的方案会各有偏差,不可能给非常明确的一致方案,大量工作需要测试、改造过程中进行,但有一点,拉开加热片和传感器之间的距离,尽量避免加热片对传感器的直接辐射,肯定能对传感器性能有所改善。

3.7 装配条件

如果考虑水汽、干扰气体等对测量的影响,探测器和红外光源的装配应该在干燥的惰性气体环境中进行。

4 设计创新探究

以下均为基于理论的探讨,目前为止,没有类似的热释电探测器应用实例,如果能达到预期目标,将在 NDIR 领域打破传统的禁锢,开辟新的设计思路。

4.1 设计瓶颈

1) 调制噪声的困扰:众所周知,当红外光源需要进行调制时,不管是电调制还是机械调制,由于光源和探测器的不稳定性,都会带来不同程度的调制噪声,如果调制频率远高于数据刷新率,消除噪声有多种方法,并且比较容易得到有效抑制,但是,如果调制频率接近甚至低于数据刷新率的时刻,深度滤波必将影响信号的真实性和实时性。

2) 热释电探测器的特性:(1)当入射光强稳定时,输出信号值为 0 ($I_p = P * A_s * \Delta T_p / dt$);

(2)当接收光强发生改变时,输出信号随之改变,输出信号的幅度与光强变化率有关,与光强强度无关。

(3)当接收光强稳定在一个新的水平后,输出信号再次返回零点。

4.2 设计构思

1) 采用不调制的光源,只要保证了光源和光源供电的稳定性,信号输出将得到一个理想零点,避免了调制噪声的困扰,同时因为没有调制,光源可以适当加大功率,而不受到探测器输出饱和的限制。

2) 对探测器输出信号交流耦合后,进行相对较高频率的

调制放大(如 1 kHz),然后解调,避免期间的直流干扰,大幅提高检测灵敏度。

3) 当被测气体通过气室时,由于气体成分发生改变,探测器的入射光强发生变化,探测器输出信号幅度随之改变,将采集的信号导入到合适的数学模型,换算出相应的气体浓度。从而达到设计的目标。

4.3 设计的问题与难点

1) 该设计思路在热电堆探测器上是很好实现的,但目前了解到的热电堆探测器最佳探测的灵敏度在 20~50 PPm,在钢铁、矿物等检测的红外碳硫仪上不能满足系统要求。

2) 探测器输出信号的幅度与光强变化率有关,与光强强度无关,因此在积分方式下,物质燃烧特性是否会产生不可预测的影响有待进一步研究。

3) 气体成分发生改变,探测器的入射光强发生变化,探测器输出信号幅度随之改变,将采集的信号导入到合适的数学模型,此数学模型建模复杂,同时也是最关键的问题之一,同时还存在不确定性。

5 技术指标的验证

红外碳硫传感器应用于碳硫仪和当前的红外定硫仪工作过程和标定方式基本类似,因此红外碳硫传感器原理上也可以采用标气进行检测和一次标定,但从现在的标气供应厂商了解到,10 ppm 以下的标气,不确定度在 10% 左右,1 ppm 以下的标气厂家不承诺提供,原因是国产气瓶的吸附性和渗透性不理想,进口气瓶价格昂贵,而且使用时管路等各种因素的影响,10 ppm 以下的标气基本上只能用于定型测试,如果要进行定量测试,气路要进行非常严格的设计和测试,同时需要定期维护,因此需要特定的测试条件来进行检测。

参考文献:

- [1] 龚江涛. 电调制 NDIR 传感器信噪比改善方法研究 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (08): 34-36.
- [2] 张军辉, 董永贵, 王东升. 非调制型 NDIR 传感器及其信号处理方法的改进 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 02 (48): 189-192.
- [3] 黄有为, 童敏明, 任子晖. 采用热导传感器检测气体浓度的新方法研究 [J]. 传感技术学报, 2006, 19 (04): 973-975.
- [4] 刘勇, 张维. 红外碳硫分析仪器的维护对分析结果的影响 [J]. 天津冶金, 2014, (02): 124-126.
- [5] 谢永超. 高精度恒温系统在 NDIR 气体分析仪中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (11): 156-158.
- [6] 魏丽君, 唐冬梅, 肖辽亮. 基于热释电红外传感器微弱信号处理电路的设计与分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2013 (07): 89-91.
- [7] 谯黎, 张万里. 热释电 BST 薄膜红外探测器噪声分析及前置放大电路设计 [J]. 电讯技术, 2007 (02): 154-157.
- [8] 夏念平, 曹红霞, 闻向东, 等. 钢铁中超低碳分析技术研究 [J]. 武钢技术, 2014, 52 (05): 34-36.
- [9] 王小强, 梁松, 杨慧玲, 等. 红外碳硫仪测定低含量石墨矿石中固定碳的探讨 [J]. 河南科学, 2014, 32 (08): 1411-1414.