

红外低硫传感器信噪比改善方法研究

陈新喜, 魏丽君

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 低硫的红外探测是一个非常重要的研究领域, 但由于红外硫的吸收峰在一个特殊的波段, 与人体红外波段重合, 所以国外的先进技术大都对中国封锁, 而国内的低硫传感器存在交叉吸收误差, 检出限不够、检测精度低等缺陷; 文章以煤中硫元素的测试为基础, 研究采用了电调制热释电红外传感器在测量硫元素过程中存在的以上问题, 主要开展了探测器稳定性、恒温测试、气室噪声、滤波等改善传感器信噪比的相关改进设计和实验, 并提出了优化的方案, 优化后经过实验测试, 整个测试系统的信噪比提升近 50%, 检出限从原来的 100 ppm 提升到近 10 ppm; 低硫测量平均值为 0.382%, SD 为 0.006%, RSD 为 1.2%, 瓶内 RSD 为 0.9%; 达到了低硫的高精密测试。

关键词: 热释电红外传感器; 红外吸收峰; 低浓度硫检测; 信噪比改善

Study on Improving Signal-to-noise Ratio of Infrared Low Sulfur Sensor

CHEN Xinxi, WEI Lijun

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

Abstract: Infrared detection of low sulfur is a very important research field. However, because the absorption peak of infrared sulfur is in a special band and coincides with the infrared band of human body, most foreign advanced technologies are blocked from China, while domestic carbon sulfur sensors have the defects of cross absorption error, insufficient detection limit and low detection accuracy. Based on the sulfur measurement in coal, the above problems existing in the sulfur measurement are studied by using electrically modulated pyroelectric infrared sensor, the relevant improvement design and experiment are mainly carried out to improve the signal-to-noise ratio of the sensor, such as detector stability, constant temperature test, gas chamber noise and filtering, and the optimization scheme is proposed. It is tested after the experimental optimization, The signal-to-noise ratio of the test system increases by nearly 50%, and the detection limit increases from 100 ppm to nearly 10 ppm. The average value of low sulfur measurement is 0.382%, SD is 0.006%, RSD is 1.2%, and RSD in bottle is 0.9%. High precision test of low sulfur is achieved.

Keywords: pyroelectric infrared sensor; infrared absorption peak; low concentration sulfur detection; improved signal-to-noise ratio

0 引言

煤在我国的生产生活中起着至关重要的作用, 占到能源总量的 80%^[1-4], 但是煤炭在燃烧的过程中, 不但会释放出引起温室效应的二氧化碳, 更重要的是会产生造成环境污染的二氧化硫, 煤中的硫含量远高于石油和天然气, 煤燃烧产生的二氧化硫排量占到了总二氧化硫排量的 90% 以上^[5-6], 因此, 对煤中硫含量进行精确的测试, 有利于对煤燃烧时进行有效的监控, 保护自然环境, 同时, 硫含量的精确测量是评估煤质量的一项重要指标。

当前煤中硫含量的测量方法主要分 3 种^[7-11]: 艾士卡法、库仑滴定法和红外吸收法。其中, 艾士卡法、库仑滴定法在要求不高的一般工业环境下应用比较广泛, 检测环节多, 操作比较复杂, 检测精度不高^[12-13], 因此, 近年来, 更多的专家学者和企业更多的研究采用红外吸收法测定煤中硫的含量。

红外吸收法主要是采用朗伯-比尔 (Lambert-Beer) 吸收定律^[14-17], 根据二氧化硫的红外吸收特性, 将煤样在高温下充分燃烧, 通过红外池对燃烧后的气体进行有效吸收, 从而达到检测二氧化硫含量的目的, 通过化学转换, 就可以精确得到煤中硫的含量。但是二氧化硫的红外吸收峰波段在一个特殊的敏感区域, 与人体红外的波段重合^[18-22], 因此很多发达国家对于该波段的红外探测器是对中国实施技术封锁的, 因此, 研究高精密的低硫传感器具有更加重要的意义。

1 红外吸收法检测机理

红外吸收法的原理主要是朗伯-比尔 (Lambert-Beer) 吸收定律, 它的工作原理是当红外光平行通过被测样气时, 被测气体分子会对特定波长的红外光产生吸收作用, 每一种气体都存在有特征吸收峰, 具体如图 1 所示。

其具体的转换关系为: 设平行入射光的强度为 I_0 , 出射

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-10-17。

基金项目: 湖南省教育厅科学研究青年项目(19B379); 湖南省教育厅科学研究一般项目(20C1211)。

作者简介: 陈新喜(1969-), 男, 湖南祁阳人, 大学本科, 副教授, 主要从事电子信息技术与嵌入式技术应用方向的研究。

通讯作者: 魏丽君(1983-), 男, 湖南娄底人, 硕士, 副教授, 主要从事电子技术与智能仪器仪表方向的研究。

引用格式: 陈新喜, 魏丽君. 红外低硫传感器信噪比改善方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 272-276.

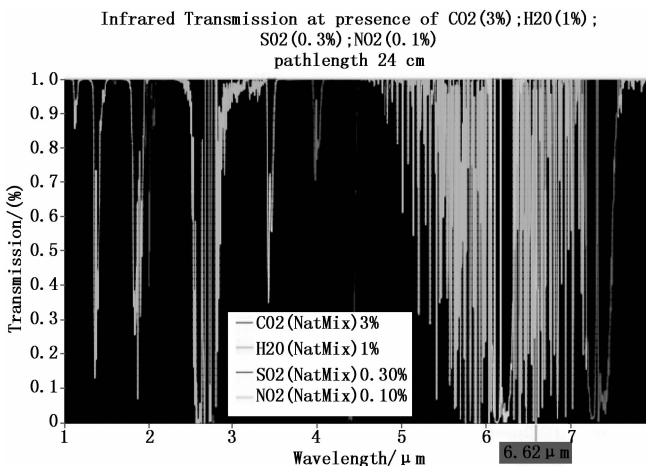


图 1 气体红外吸收谱

光的强度为 I_1 , 气体介质的厚度为 L , 气体的浓度为 c , 气体的吸收系数为 μ , 则其关系表达式为:

$$I_1 = I_0 \exp(-L \sum \mu_i c_i) \quad (1)$$

其中: μ_i 是表示不同气体的吸收系数, c_i 是表示不同气体的浓度。

2 红外低硫传感器的检测误差分析

红外传感系统的红外池如图 2 所示。

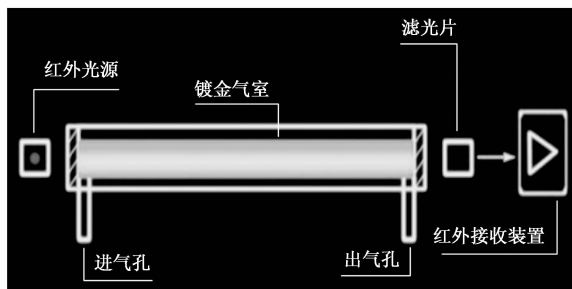


图 2 红外池

从红外池可以看出, 主要分 4 个部分组成, 红外光源、镀金气室、滤光片、红外接收装置, 因此误差的分析从这 4 个方面入手。

光源的稳定性受调制方式的影响, 机械调制的震动更大, 误差会更大, 当前主流的驱动方式是采用电调制方式, 但是调制深度在调制频率达到某一范围阈值后会迅速下降, 但是调制频率太低, 会给系统带来白噪声, 因此, 为了设置合适的调制频率, 需要对光源进行反复测试, 本文设计采用的是脉冲红外光源 IRL715, 该红外光源调制深度与调制频率的关系图如图 3 所示。

镀金气室是整个传感系统的关键, 其内部的光洁程度和温漂对结果起着几乎决定性的作用, 此外由于检测气体中有可能含有腐蚀性, 因此气室内壁采用镀金处理。光洁度直接反应到结果上就是漫反射带来的误差, 此外, 气室的长度也会根据检测气体的需要而进行长度的选择, 因此, 在设计过程中, 务必保证气室的光洁度, 尽可能的减少漫反射带来的

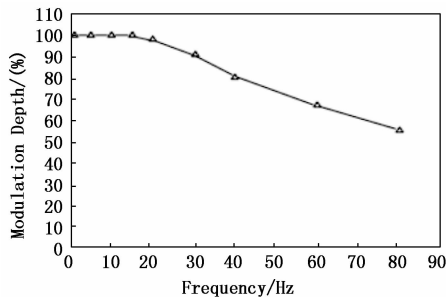


图 3 调制深度与调制频率的关系图

误差。温漂则只能通过设置恒温系统来降低误差值。

在一些系统中, 设计了参比气室, 对固定误差的消除有一定的帮助, 但是增加了成本, 同时, 在结构的设计上, 也会增加一定的难度。

滤光片的选择需要根据待测气体的吸收峰进行选择窄带滤光片, 在要求高精度的场合, 在滤光片之前, 会设计聚光塔, 聚光塔的作用在一定程度上就是减少气室带来的误差的, 能在一定程度上提高信噪比。

红外接收装置的设计采用热释电探测器 LHi814G2/G20。该探测器没有设计前置放大电路, 因此, 在探测器接收前, 对信号进行放大和滤波处理是提升信噪比的有效途径, 并且设计的信号处理电路的必须具有良好的选频特性、高选择性、窄带通, 这在很大程度上决定了微弱信号处理电路设计的成败。

3 信噪比改善方法研究

3.1 设置合适的光源驱动电路和调制频率

根据前面的分析, 结合调制深度与调制频率的关系曲线图, 选择 10 Hz 以下的频率调制下, 调制深度几乎是一条直线, 没有变化, 因此选择 10~20 Hz 的区间范围进行测试, 测试不同频率下信号幅度的变化如表 1 所示。

表 1 不同频率下的信号幅度

频率/Hz	探测器端输出信号的幅值/mV
10	1 052.16
11	1 052.28
12	1 053.00
13	1 052.86
14	1 046.53
15	1 030.28
20	997.45

从测试结果看, 当调制频率在 13 Hz 时, 信号值达到了最大值, 而频率大于 13 Hz 以后, 信号的幅值减小明显, 因此, 根据频率在合理范围内尽可能大的需求, 选择调制频率为 13 Hz。

频率的输出在本设计中也是重要的一环, 如果采用硬件产生, 其一会增加成本, 其二是更多的硬件会引入更多的误差源, 因此本设计采用 CPLD, 通过软件的方式, 产生 13 Hz 的调制信号, 既准确又节约了成本, 但是对开发的难

度提出了更高的要求。

此外，光源驱动电路的设计也同样重要，一般情况下，随着时间的推移，光源存在老化现象，现有的设计很多采用恒流设计，但是在本设计方案中，为了确保设计的水平和门槛，同时更好的保证光源信号的一致性，设计采用恒功率设计。

3.2 恒温控制系统的设计

非分光红外传感器系统的温漂一直是系统测试误差的重要来源，温漂的因素复杂，包括电源电压的波动、器件的温漂、气室的温漂等，在当前的很多设计中，采用了自适应的温度校正函数，将各种温漂的影响因素各自的权重通过单一变量原则进行测量，标定权重，最后得到一个标准化的校正系数，该方法在测试权重系数时同样会存在误差，而且计算和数学建模困难，不能从根本上解决温漂问题；也有学者设计了恒温系统，但是恒温的精度不够，后者设计的恒温温度跟室温的差别不到，很容易收到环境温度的影响，因此，本方案在设计时，设计完成了一款高精度的恒温系统，该温度要高于环境温度，但又不影响元件器工作的合适恒温，经过反复的测试和验证，设置恒温温度为 48 °C。控温精度要求保持 ±0.1 °C，效果能达到的最佳状态，测试结果极大的消除因为温漂带来的温差。

在设计过程中，为了能提高控温的精度，设计采用增量式 PID 算法、阶梯式恒温控制，其控制方法的示意图如图 4 所示，控温系统的测试效果如图 5 所示，比较现有恒温系统的精度，提高了近 10 倍。

3.3 光锥的设计

光锥是一种是聚光元件，可以增加光照度和减小探测器面积，有效减小由于气室漫反射带来的误差。

光锥的设计主要根据根据需要解决光锥的两端半径和确定光锥的长度和锥顶角问题，

半径的选择要根据抛光管的内外径设置，本装置设计时选用的镀金气室抛光管的内径为 7 cm，因此设计的光锥草图如图 6 所示。

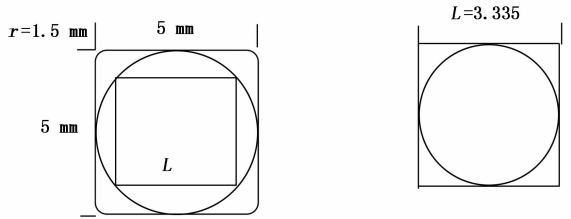


图 6 光锥设计草图

锥顶角根据平行光入射临界光线经过一次反射正好到达的对边底端为标准进行设计。

3.4 后置放大与信号滤波电路设计

根据前年的分析，在设计时如果选择直接带有前置放大电路的探测器，那信号的处理将会存在固有误差，没办法进行处理，因此，设计时主要采用后置放大，在放大的同事要和滤波电路分二级设计，第一次放大倍数较小，第二级放大倍数较大，第一级信号放大电路放大倍数小的原因主要是为了降低对噪声的放大，第二级处理电路经过采用线性平均值与滤波电路对噪声进行滤波处理，为了达到更好的滤波效果，硬件滤波和软件滤波同时使用。

线性平均值滤波电路如图 7 所示，两级电路的选频特性要保持一致，此外，二级电路的品质因素的设计，要满足最佳平坦特性的要求，最大限度的降低噪声，在接入到 MCU 处理器时，也可以在信号的最后面加一级 π 型滤波，能起到更好的效果。

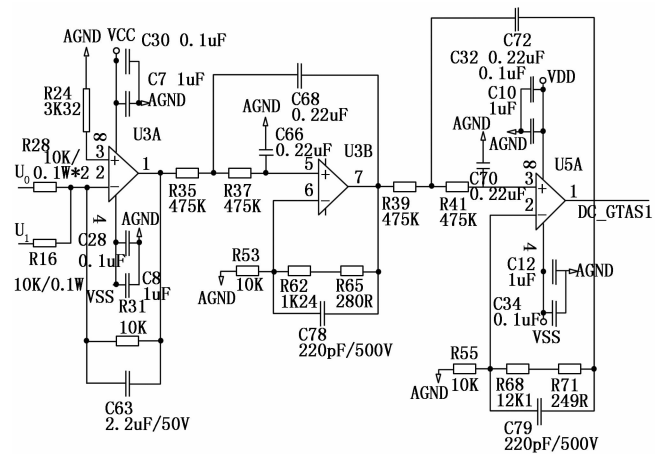


图 7 线性平均值与滤波电路

在此基础上，软件设计上采用平滑滤波，或者冒泡法，对信号进行处理，能更大程度的提升信噪比。

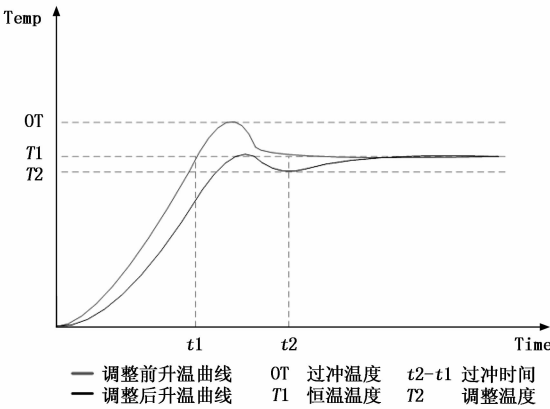


图 4 增量式 PID 阶梯控制方法

Time	Temp	Control Mode	Temp
17:58:10	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:11	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:12	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:13	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:14	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:15	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:16	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:17	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:18	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:19	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:20	48.08°C	控制温度	47.90°C
17:58:21	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:22	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:23	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:24	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:25	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:26	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:27	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:28	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:29	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:30	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:31	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:32	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:33	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:34	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:35	47.98°C	控制温度	47.90°C
17:58:36	47.98°C	控制温度	47.90°C

图 5 控温效果图

在电路的去噪处理上, PCB 板的制作同样至关重要, 碳和硫传感器的信号处理, 在 PCB 制作上, 分成两个完全并行的处理模块, 在信号的处理上, 信号线的周围每隔一定的小距离就设置地线, 分布在信号线的两侧, 这同样会很大程度上屏蔽交叉干扰信号, 提升信噪比。

3.5 红外池测试箱体的设计

整个红外池将放在一个测试箱体中, 整个箱体内为了使得温度不存在差异性, 在加热源的旁边设置了一个小型的风扇, 该风扇的作用是为了加强箱体内的气体的流动, 确保整个恒温箱体中的每一个点的温度都能达到高度的一致性。

在恒温箱体的四周以及上下盖板上, 都设计采用了恒温海绵, 其作用是防止室温与其交换, 其二是为了保温, 降低整个箱体的热容量。

经过以上的分析和改进, 对整个系统进行了完整的优化设计, 一系列的改进后, 对改进之前的改进后的设备进行了对比实验, 实验在同一实验室, 由同一测试员进行测试所得。其测试结果如图 8 和图 9 所示。

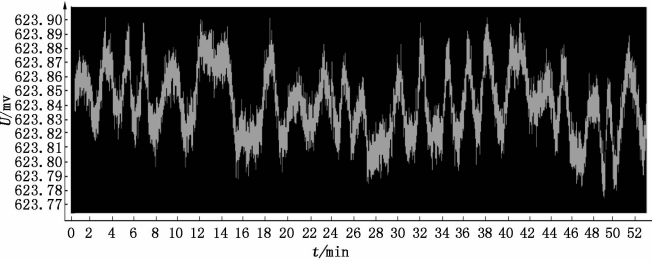


图 8 改善设计前的信号波形

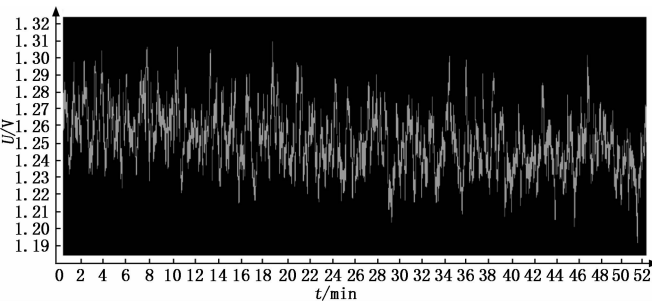


图 9 信噪比改善设计后的信号输出波形图

由测试结果可以看出, 输出信号的幅值得到了信号放大, 波动范围在放大倍数为 5 倍的情况下, 由原来的 130 mV 降到了 40 μ V 左右。信噪比得到比较明显的改善。

4 实验测试

4.1 取样与校准

采用实验用天平称取 1.0 g 的煤样, 在鼓风干燥箱内 105 $^{\circ}$ C 的情况下干燥 1~1.5 小时, 再通过天平测量质量, 可获得煤样水分情况, 然后放在坩埚总重备用。坩埚每次在使用前必须在燃烧管中干燥 5 分钟以上, 并且最多重复使用 3 次, 确保取样的精确性。

校准采用单标多点校准。用煤标准物质每周一次对定硫仪进行单标多点校准。

4.2 实验

1) 启动燃烧管, 待温度稳定到 1 380 $^{\circ}$ C 1 小时后, 开始实验;

2) 实验过程中, 依次采用单点校准, 检测 1 个标准物质校准后, 测量 2 个实验煤样, 然后如此循环。这样测量有利于提高校准的精度, 从而提升煤样的检测精度;

3) 为了煤样中硫的充分释放, 将 wo3 均匀覆盖在待测煤样表面;

4) 正式测试前, 要启动仪器清洗气路, 待平衡后, 将样品坩埚推入测试, 测量时间确定为 3 分钟/次; 随着燃烧过程的进行, 红外吸收信号将会迅速增长, 充分燃烧到达顶点后, 吸收信号会逐渐回落; 3 分钟后, 吸收信号回到测试基线上; 一次测试完成后, 需要等待 8 分钟左右, 再进行下一个煤样的测试, 依此类推;

5) 样品测试全部完成后, 不能立即关机, 而是待控制程序关闭, 燃烧管冷制至少 1 小时后才可关机。

4.3 测试数据与分析

在测试过程中, 分别采用了 2 693 b、CaSO₄ 进行了设备校准, 校准的具体测试数据如表 2 所示。

表 2 设备校准的结果表

样品信息		采用标准物质校准得到的硫含量结果/%	
编号	硫证书值/%	2 693 b	CaSO ₄
101	0.47 \pm 0.04	0.481	0.474
102	1.45 \pm 0.05	1.398	1.387
103	0.39 \pm 0.03	0.391	0.370
104	1.13 \pm 0.03	1.102	1.108
105	1.76 \pm 0.03	1.684	1.630

从表 2 中的测试结果可以看出, 采用 2 693 b 标准物质进行校准时的效果更好, 因此, 校准环节采用 2 693 b。

通过校准后, 进入样品测试, 测试完 2 个样品后, 再进行一次校准, 分别在多点校准和单点校准情况下, 分别对 5 瓶样品进行了 3 次测试, 测试数据如表 3 所示。

表 3 硫含量测试数据表

校准方法	测量次数	硫含量测量结果/%				
		瓶 1	瓶 2	瓶 3	瓶 4	瓶 5
多点校准	1	0.352	0.362	0.349	0.346	0.350
	2	0.323	0.332	0.320	0.322	0.303
	3	0.308	0.313	0.304	0.307	0.309
单点校准	1	0.345	0.343	0.347	0.346	0.344
	2	0.340	0.338	0.341	0.344	0.342
	3	0.348	0.343	0.350	0.347	0.342

测量平均值为 0.382%, SD 为 0.006%, RSD 为 1.2%, 瓶内 RSD 为 0.9%。

5 结束语

本文在分析了当前红外低硫传感器存在的精度不够, 重复性低的问题的基础上, 对探测系统可能存在的噪声源进行了具体的分析, 并提出了改进方案, 主要针对光源的

驱动和调制电路、恒温控制系统的设计、微弱信号处理电路的设计和优化等，完成后对优化前后的系统信号通过标准物质进行了对比测试，红外池的信噪比改善明显，然后采用优化后的探测系统进行了红外低硫的具体测试实验，采用 2 693 b 进行校准，经过实验测试，该红外低硫传感器的检测精度提升了近 10 倍，检出限从原来的 100 ppm 提升至 10 ppm 左右，最后采用低硫探测仪测量了 5 瓶同种烟煤样品的硫含量，测量结果的平均值为 0.382%，SD 为 0.006%，RSD 为 1.2%，瓶内 RSD 为 0.9%。达到了低硫的高精密测试。

参考文献:

[1] 鲁毅, 袁亚文, 吴立军, 等. 高频感应燃烧-红外吸收法测定石墨烯中总硫含量 [J]. 化工进展, 2020, 39 (S2): 234-242.

[2] 李杰阳. 全自动红外吸收光谱法测定硫化铁矿石中全硫量 [J]. 中国无机分析化学, 2021, 11 (2): 40-44.

[3] 翟鹏宇, 陆超, 洪新华, 等. 基于数理统计的煤中红外测硫的方法调整试验评价 [J]. 科技视界, 2019 (6): 9-11.

[4] 马辉平. 解决红外测硫仪异常问题实例分析 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020 (12): 76-79.

[5] 刘佳, 李云龙. 高频红外碳硫分析曲线研究及应用 [J]. 天津冶金, 2018 (2): 60-62.

[6] 李移伦, 魏丽君, 李小霞. 基于 NDIR 的氢浓度测控系统关键技术研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (5): 166-170.

[7] 沈婉. 非分光红外甲烷气体远程检测系统的设计 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.

[8] 王波. 元素仪分析法与库仑滴定法测定煤中全硫的对比研究 [J]. 煤炭技术, 2021, 40 (6): 208-210.

[9] DRINEAS P, MAHONEY M W, CRISTIANINI N. On the Nyström Method for Approximating a Gram Matrix for Improved Kernel-Based Learning [J]. journal of machine learning research, 2005, 6 (12).

[10] RAHIMI A, RECHT B. Random Features for Large-Scale Kernel Machines [C] //NIPS. 2007, 3 (4): 5.

[11] HUANG P S, AVRON H, SAINATH T N, et al. Kernel methods match deep neural networks on timit [C] //2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2014: 205-209.

[12] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors [J]. nature, 1986, 323 (6088): 533-536.

[13] MASCI J, MEIER U, CIREŞAN D, et al. Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction [C] // International conference on artificial neural networks. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 52-59.

[14] 肖娜, 周孟申. 基于卷积自编码神经网络的航空发动机轴承故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (12): 84-88.

[15] SCHÖLKOPF B, WILLIAMSON R C, SMOLA A J, et al.

[9] 郑凤轩, 隋艳. 煤中全硫测定仪控温误差检定及其不确定度评定方法解析 [J]. 煤质技术, 2021, 36 (3): 75-80.

[10] 李杰, 刘欣, 刘宇星, 等. 红外光谱法测定煤炭中全硫的方法改进 [J]. 煤炭技术, 2021, 40 (2): 187-191.

[11] 侯美桃. 探讨煤中全硫测定的准确度提升路径 [J]. 化工管理, 2020 (29): 52-53.

[12] 魏晓云, 黄铭鹏, 李海柱. 非接触式在线元素分析仪测定煤质成分研究 [J]. 山西焦煤科技, 2020, 44 (7): 12-15.

[13] 王建, 殷志源, 吕嘉栋, 等. 采用精密度法评估煤中全硫测定结果不确定度 [J]. 煤质技术, 2020, 35 (3): 68-72.

[14] 王海峰, 逯海, 李佳, 等. 红外吸收法准确测量低硫煤中硫元素含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34 (2): 370-375.

[15] 李世超. 微型化 CO 气体分析仪关键技术研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.

[16] 关静丽, 曹荣敏, 柏森. 基于 MSP430 的空气质量检测仪设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2020 (7): 94-97.

[17] 邱磊, 徐磊, 龚留专, 等. 基于 STC 单片机的六氟化硫检测系统 [J]. 山西电子技术, 2020 (3): 6-8.

[18] 李移伦, 魏丽君, 李小霞. 基于 NDIR 的氢浓度测控系统关键技术研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (5): 166-170.

[19] 李辉, 张鑫, 简家文. 基于非分光红外法的汽车尾气检测装置的设计 [J]. 车辆与动力技术, 2019 (4): 42-48.

[20] 赵勇毅. 基于 NDIR 技术的双组分气体传感系统的设计与实现 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.

[21] 李辉. 基于非分光红外法的汽车尾气测量仪表的设计 [D]. 宁波: 宁波大学, 2019.

[22] 吴晨辉. 非分光红外检测技术在发动机空燃比控制中的应用 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.

[16] Support vector method for novelty detection [C] //NIPS. 1999, 12: 582-588.

[17] WANG S, LIU Q, EN Z, PORIKLI F, et al. Hyperparameter selection of one-class support vector machine by self-adaptive data shifting [J]. Pattern Recognit, 2018 (74): 198-211.

[18] ALI M H, AL MOHAMMED B A D, ISMAIL A, et al. A new intrusion detection system based on fast learning network and particle swarm optimization [J]. IEEE Access, 2018, 6: 20255-20261.

[19] XIA Y, CAO X, WEN F, et al. Learning discriminative reconstructions for unsupervised outlier removal [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1511-1519.

[20] FAN J, ZHANG Q, ZHU J, et al. Robust deep auto-encoding Gaussian process regression for unsupervised anomaly detection [J]. Neurocomputing, 2020, 376: 180-190.

[21] HE K, SUN J. Convolutional neural networks at constrained time cost [C] //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015: 5353-5360.

[22] 冯昌, 廖士中. 随机傅里叶特征空间中高斯核支持向量机模型选择 [J]. 计算机研究与发展, 2016, 53 (9): 1971-1978.