

基于 NDIR 的氢浓度测控系统关键技术研究*

李移伦 魏丽君 李小霞

(湖南铁道职业技术学院 株洲 412001)

摘要:当前低浓度氢气检测方法中气相色谱技术可以定量分析,甚至实现痕量检测,但是测试系统复杂,价格昂贵;氢气电极检测技术可以实现连续在体检测,但测试范围较大,精度不高;氧化滴定技术容易受检测氧气等还原性物质的影响,误差大。针对这些问题,采用非分光红外(NDIR)技术,对影响氢气浓度检测精密测量的关键因素进行了分析,并针对性的进行了优化设计,完成了一款高精密氢浓度测控系统。经过实验,测试了标准浓度为2.54%、6.35%、8.00%、11.25%、20.00%样气,检测的绝对误差控制在0.1%以下,实现了低浓度氢气的高精度检测,实验设备经过长期的运行监控,稳定性良好,验证了改进设计的正确性和有效性。

关键词:非分光红外技术;氢气浓度检测;微弱信号检测;线性误差

中图分类号: TN791 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on the key technology of hydrogen concentration
measurement and control system based on NDIR

Li Yilun Wei Lijun Li Xiaoxia

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

Abstract: Low concentration gas detection is a hot issue in gas detection. Hydrogen, as a combustible gas and diatomic molecule, has always been the focus of gas detection research. However, in the current detection methods, gas chromatography technology can be used for quantitative analysis or even trace detection, but the test system is complex and expensive; hydrogen electrode detection technology can be used for continuous in-situ detection, but the test range is large and the accuracy is not high; oxidation titration technology is easy to be detected the effect of reducing substances, such as oxygen, has a large error. In order to solve these problems, this paper uses NDIR technology to analyze the key factors that affect the precision measurement of hydrogen concentration detection, and optimizes the design. A high-precision hydrogen concentration measurement and control system is completed. Through experiments, the standard concentration of 2.54%, 6.35%, 8.00%, 11.25%, 20.00% sample gas is tested, and the absolute error of detection is controlled at 0.1%. In the following, the high-precision detection of low concentration hydrogen is realized. After long-term operation monitoring, the experimental equipment has good stability, which verifies the correctness and effectiveness of the improved design.

Keywords: NDIR; hydrogen concentration detection; weak signal detection; linear error

0 引言

气体浓度检测主要分为定性检测和定量测量,定性检测主要用于阈值报警;如矿业、室内空气质量检测、汽车尾气检测等方面;定量测量检测主要是指精密浓度检测;如医疗应用中用作“电子鼻”、电池问题中的氢气检测、煤炭质量检测中元素检测等^[1-2];当前高精密氢气测控系统主要采用气相色谱检测技术、氢气电极检测技术或者氧化滴定技术^[3-4]。气相色谱技术可以定量分析甚至实现痕量

检测,但是测试系统复杂、价格昂贵;氢气电极检测技术最重要的优势是可以实现连续在体检测,但测试范围较大、精度有待提高;氧化滴定技术容易受检测氧气等还原性物质的影响^[5-12]。而且这些方法都是采用直接测量的方式进行。

在工业分析领域,特别是煤炭企业,为了检测煤炭中含氢量,一般是将煤样进行充分燃烧,然后通过非分光红外(NDIR)传感器,制作特定的检测气室,根据气体的红外吸收峰对气体进行吸收,从而达到检测气体浓度的目的^[13-16],

收稿日期:2020-12-28

* 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)资助

本设计拟采用非分光红外传感器技术,针对测氨浓度系统中的关键技术进行改进研究,从而达到准确测量氨含量的目的。其主要方面包括红外光源的驱动、参比气室的设计、恒温控制系统的设计、微弱信号的处理等^[17-18]。

1 非分光红外气体检测原理

当红外光通过待测气体时,气体分子对特定波长的红

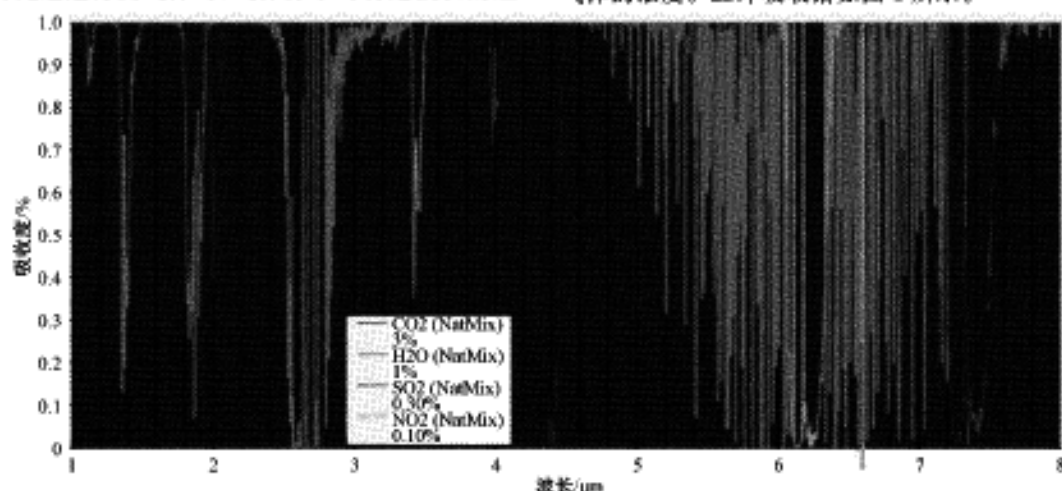


图1 比尔(Lambert-Beer)吸收定律红外吸收谱

从图1可以看出,吸收谱存在交叉吸收,当为多种混合气体时,为了分析特定的气体组分,需要在传感器或者红外光源前安装一个适合分析气体吸收波长的窄带滤光片,并且要保证待测气体充分的混合均匀,使传感器的信号变化仅准确反映被测气体的浓度变化。

该系统设计完成后,主要用于测量煤中含C和H的含量,检测过程中首先需要将煤样燃烧,在煤样燃烧的开始阶段,由于含C和H量高,会有爆燃的现象,因此在初始阶段,需要通入大量的氧气,以保证煤样充分燃烧,然后慢慢减少氧气的通入量,故在检测的时刻,首先是通过集气瓶收集燃烧煤样生成的气体,混合均匀以后,再集中通过传感器检测。

2 氨气浓度检测系统整体方案设计

此氨气浓度检测系统主要由单片机信号处理模块、红外池光源模块、光源驱动模块、微弱信号处理模块等。红外池主要包含红外光源和红外探测器,其中探测器前增加窄带滤光片,红外光源产生的平行光(在进入气室前可以设计光锥,尽可能产生完全的平行光,减少已经漫反射造成的误差),进行气室吸收后,探测器检测到光强的信号转换为对应测量气体的浓度,该信号非常微弱,而且还容易引入干扰,所以信号检测到后,要通过单片机AD转换后,进行滤波和放大处理,对信号形成误差的来源主要有以下几个方面:1)是光源的不稳定性及老化;2)是镀金气室中的漫反射;3)是环境温度对测量结果的影响;4)是信号的

外光有吸收作用,其吸收关系服从朗伯-比尔(Lambert-Beer)吸收定律。设平行入射光的强度为 I_0 ,出射光的强度为 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。红外吸收谱如图1所示。

放大和滤波处理。整体的设计原理如图2所示。

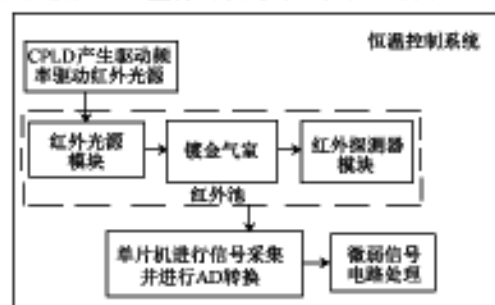


图2 测试系统硬件原理

3 检测系统关键技术分析与改进研究

1) 红外光源的驱动

红外光源的驱动分两个部分,其一是驱动频率,为了防止震动给系统带来的误差,设计采用电调制驱动方式,调制深度与调制频率有关,其调制深度和频率的关系如图3所示。该系统采用的红外光源采用调制频率为10 Hz,频率太低会引入低频噪声,频率太高,调制深度会迅速下降。此外,光源采用导电不定型碳多层镀膜技术,热容量很低,升降温很快,因此在光源驱动时,应设计稳定的激励源,提高准确度。本设计改进采用恒流源驱动电路进行驱动,确保在整个过程中将温度影响降至最低。原理如图4所示,运放作为比较器输出VT的门电压,三极管相当于开关管作用,当电压达到VT的输出电压后就导通,附

制了电压的大小,在负载一定的情况下,从而实现了恒流控制。

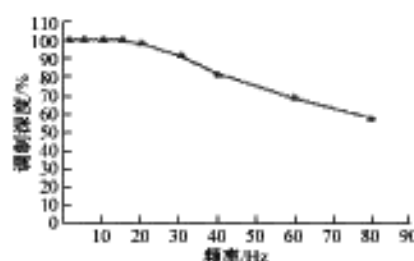


图3 调制深度与调制频率的关系

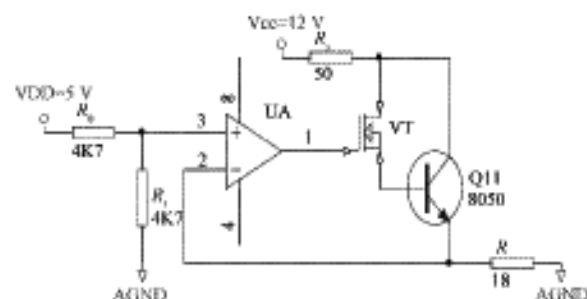


图4 恒流源驱动电路

2) 恒温控制系统的设计

氢气浓度检测传感系统会受到温度的影响,所以在系统设计时,需要对其进行有效的补偿或者采用高精度的恒温控制系统。此外温度漂移对镀金气室和红外光源都会

产生较大的影响,所以恒温控制系统可以有效提高信噪比,减小误差,为了降低室温波动,恒温控制系统设计恒温温度为 48℃。其恒温控制采用 PID 控制,控温后腔体中温度的变化保持在 ±0.1℃。控温效果如图 5 所示。

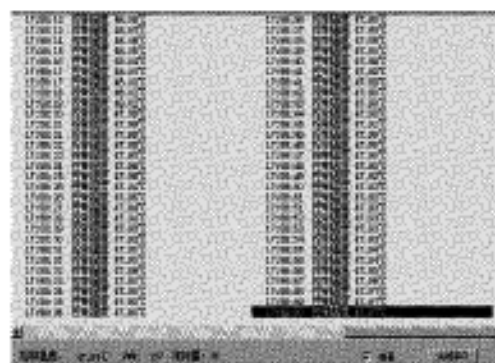


图5 控温效果

3) 微弱信号处理

微弱信号处理电路采用线性平均值滤波电路进行处理,通过二级二阶压控电压源滤波电路进行信号处理,二级滤波电路的选频特征频率保持一致,通带的放大倍数可根据设计要求进行调整,为了电路能够稳定工作,防止自激振荡,确保其放大倍数小于通带的放大倍数 3。同时第 1 级放大电路的放大倍数应小于后一级的放大电路的放大倍数,这样能更好地实现滤波效果。其电路原理如图 6 所示。

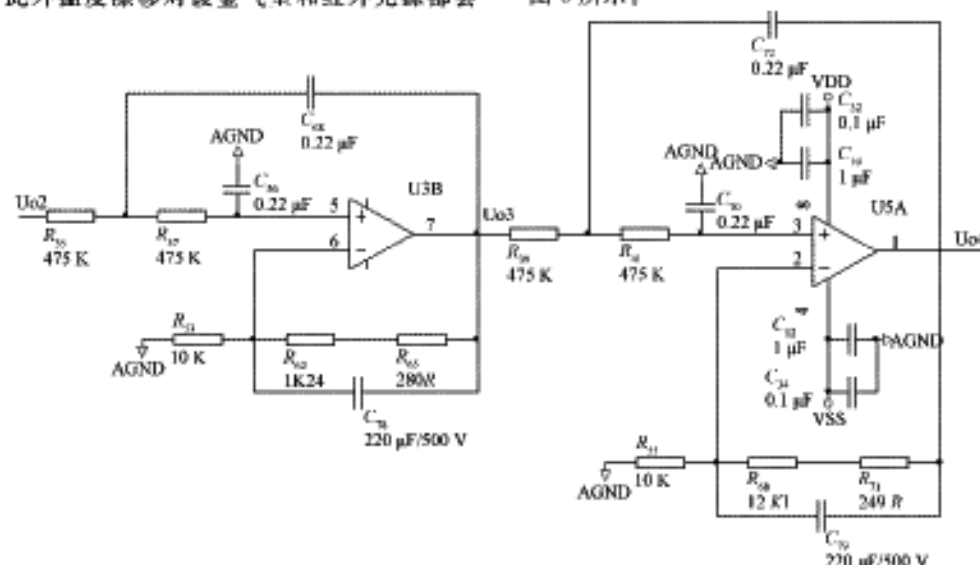


图6 二级二阶压控电压源滤波电路

第 1 级滤波电路的特征频率和第 2 级滤波电路的特征频率相同,经计算可得:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 475 \times 10^3 \times 0.22 \times 10^{-6}} \approx 1.52 \text{ Hz} \quad (2)$$

该电路第 1 级的通带放大倍数计为 A_{vp} ,第 2 级的通

带放大倍数计为 A'_{vp} ,根据电路原理可求得:

$$A_{vp} = 1 + \frac{R_{42} + R_{45}}{R_{32}} = 1.152$$

$$A'_{vp} = 1 + \frac{R_{52} + R_{71}}{R_{55}} = 2.235 \quad (3)$$

根据通带放大倍数,可以求得两级滤波电路的品质因

数,分别用 Q 和 Q' 表示:

$$Q = \frac{1}{3 - A_{\text{op}}} = \frac{1}{3 - 1.152} = 0.54$$

$$Q' = \frac{1}{3 - A'_{\text{op}}} = \frac{1}{3 - 2.235} = 1.31 \quad (4)$$

根据两级滤波电路的品质因数,可以求得该电路整体的品质因数为: $Q'' = Q \cdot Q' = 0.54 \times 1.31 = 0.707$,因此,该电路具有最佳的平坦特性。

4 测试与分析

经过了系统的改进设计,对整个系统改进前后的信号进行了测试,同时为了检测更准确,测试分3个步骤进行。第1步是测试没有进行控温而且不接光源(去除光源影响)的情况下,不经过软件滤波和硬件滤波电路对信号进行处理,直接测试输出信号。此时的信号处于纯电路噪声状态,后续在处理信号时可以软件滤波处理时,作为参考值进行修正,能得到更好的信噪比。经过测试,此时的信号幅值平均为1.33 mV左右,如图7所示。

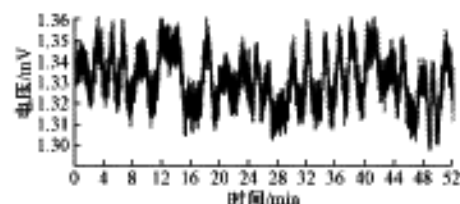


图7 常温放箱体(无光源)时测试信号

第2步在测试室温下进行,加入了红外光源和硬件滤波电路。探测器端测得的信号如图8所示,横坐标表示起止时间,纵坐标表示电压幅值,单位为mV。此时主要的噪声包含了纯电路噪声、温度对噪声的影响(包含对光源的影响、气室的影响等),在测试过程中,根据第1步的测试,在软件处理部分,对纯电路的噪声信号进行了修正处理,此时测得的信号的中心幅值约为623 mV,波动约为120 μ V左右。

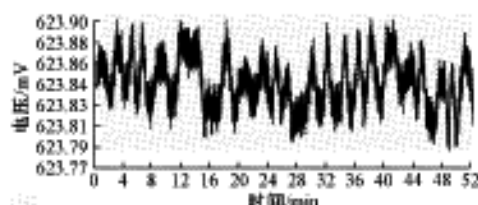


图8 常温下探测器下的信号波形

第3步在恒温控制下进行测试,同时在软件滤波上进行了校正以及把硬件滤波电路加入,在探测器端测得的信号如图9所示,横坐标表示起止时间,纵坐标表示电压幅值,单位为mV。此时测得的信号幅值升高了,中心幅值达到了628 mV左右,而且此时的信号波动大约为40 μ V,对比之前的测试,信噪比得到了显著的提高。

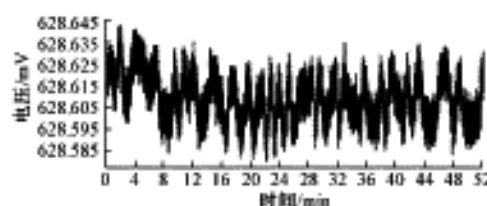


图9 恒温处理后的信号波形

经过对整个系统的调试,对系统进行了标定,然后选取了5种标准气体,在标准检测实验室中进行测试,测试结果如表1所示。检测的绝对误差最大为0.07%,最小误差为0.01%,测试精度远高于国标精度,由此可见,经过改进,系统的测试精度得到了提升,改进有效。

表1 测试数据与测试结果

序号	标准气体 浓度/%	测试结果/ %	绝对误差/ %	备注
1	2.54	2.58	0.04	
2	6.35	6.36	0.01	测试环境
3	8.00	7.93	0.07	为标准检
4	11.25	11.26	0.04	测实验室
5	20.00	20.06	0.06	

5 结论

本文采用非分光红外(NDIR)技术,在分析非分光红外气体检测原理的基础上,对高精密度氢气检测系统的影响因素进行了分析,主要包括光源的稳定驱动、恒温系统的设计以及微弱信号的处理电路的设计,通过对比和实验,通过改进设计后的气体检测装置精度明显提高,最后采用标准气体,对实验装置进行了检测实验,分别测试了标准浓度为2.54%、6.35%、8.00%、11.25%、20.00%样气,检测的绝对误差控制在0.1%以下,实现了低浓度氢气的高精度检测,实验设备经过长期的运行监控,稳定性良好,验证了改进设计的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 万福,杨曼琳,贺鹏,等.变压器油中气体拉曼光谱检测及信号处理方法[J].仪器仪表学报,2016,37(11):2482-2488.
- [2] 熊佳慧,卜雄洙,杨昊青,等.TDLAS气体浓度检测中DFB激光器驱动及温控电路设计[J].电子测量技术,2020,43(9):161-165.
- [3] 谭光娟,张文文,王磊.气体传感器阵列混合气体检测算法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(7):95-102.
- [4] 彭敏,马宁,王少军,等.基于可见光图像的工业过程气体泄漏检测研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(6):1-8.

- [5] 王迪,李玉爽,濮御,等.气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究[J].应用光学,2020,41(2):348-353.
- [6] 洪涛,梁晓瑜.基于STM32和CC1101的受限空间关键气体浓度检测系统[J].仪表技术与传感器,2020(3):67-72.
- [7] 马玉林,李尚松,张红霞,等.电化学气体传感器综合实验设计[J].实验技术与管理,2019,36(7):47-49,61.
- [8] 封文轩,杨道重.基于融合传感器的气固两相流参数检测系统设计[J].仪表技术与传感器,2020(3):95-99.
- [9] 耿彦红,蒋晓慧,王瑞,等.气体检测仪型式试验自动检测装置[J].计量与测试技术,2019,46(10):8-10.
- [10] 曾成.氮氧传感器控制系统研究与设计[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [11] 陈影. ZrO_2 基 NO 传感器制备工艺及湿度特性研究[D].武汉:武汉科技大学,2019.
- [12] 叶龙伟,何小刚.一种氧化锆氧传感器测氧系统的设计[J].仪表技术与传感器,2019(3):15-18,22.
- [13] 莫中堂,董佩云.合成氨气体中水汽浓度检测方法的对比[J].仪器仪表与分析监测,2020(1):40-42.
- [14] 曹榕,康信文,傅鸣,等.基于TDLAS技术气体浓度测量的快速拟合方法[J].传感技术学报,2020,33(2):232-237.
- [15] 戴峰,常建华,房久龙,等.差频产生中红外光源及甲烷气体光谱检测[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9):1447-1452.
- [16] 王瑞,耿彦红,董亮华.半导体式气体检测仪湿度补偿校准装置研究[J].工业计量,2020,30(1):27-29.
- [17] 周泉,徐智.基于光声光谱技术的气体浓度检测系统设计[J].仪表技术与传感器,2019(12):73-76,81.
- [18] 胡佳琳,蒋书波,王凡.基于光声光谱气体浓度检测系统的设计[J].仪表技术与传感器,2016(5):73-75,83.

作者简介

李穆伦,副教授,高级工程师,主要研究方向为工业电气控制、传感器技术。

E-mail:274698807@qq.com

魏丽君(通信作者),副教授,主要研究方向为电子技术、传感器技术。

E-mail:weilijun2000@126.com