

基于 TDLAS 技术的一氧化碳检测系统设计

曹 旺^{1,2}, 万 元^{1,2}, 李橙橙^{1,2}

(1.国家电力投资集团水电产业创新中心,湖南 长沙 410004; 2.湖南五凌电力科技有限公司,湖南 长沙 410004)

摘 要:为满足工业生产过程中的一氧化碳检测需要,研制基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术的一氧化碳检测系统。通过分析近红外波段的一氧化碳吸收谱线,选取 1567.3nm 作为激光器的扫描中心波长,设计系统的气路控制、光学检测与声光报警模块,开发基于 FPGA 数字锁相放大器的二次谐波解调算法,并采用最小二乘法建立浓度特征值关系曲线,实现一氧化碳的高精度检测。实验表明:该系统检测速度快,抗干扰能力强,能在恶劣的环境中正常工作,检测下限可至 10 μ L/L,与实际浓度的误差在 2% 左右,具有较高的实用价值。

关键词:一氧化碳;可调谐半导体激光吸收光谱技术;数字锁相放大器;二次谐波

文献标识码:A

文章编号:1674-5124(2023)z1-0215-05

Design of carbon monoxide detection system based on TDLAS

CAO Wang^{1,2}, WAN Yuan^{1,2}, LI Chengcheng^{1,2}

(1.Hydropower Industry Innovation Center of State Power Investment Corporation Limited, Changsha 410004, China;

2.Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: In order to meet the need of carbon monoxide detection in industrial production, a carbon monoxide detection system based on tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) was developed. By analyzing the absorption spectral line of carbon monoxide in the near-infrared band, the 1567.3nm is selected as the scanning center wavelength of the laser, the gas path control, optical detection and acousto-optic alarm modules of the system are designed, the second harmonic demodulation algorithm based on FPGA digital lock-in amplifier is developed, and the concentration characteristic value relationship curve is established using the least square method to achieve high-precision detection of carbon monoxide. The experiment shows that the system has fast detection speed, strong anti-interference ability, and can work normally in harsh environments. The lower limit of detection can reach 10 μ L/L, and the error with the actual concentration is about 2%. It has high practical value.

Keywords: carbon monoxide; tunable diode laser absorption spectroscopy; digital lock-in amplifier; second harmonic

0 引 言

一氧化碳(CO)是一种无色无味的易燃易爆有毒气体。在密闭环境中,CO 极易造成作业人员中

毒,损害人体机能,严重时威胁生命安全。在煤矿开采领域,CO 的泄露更是极有可能导致大规模矿难,造成无法挽回的损失。因此,实现对一氧化碳

收稿日期:2022-11-15;收到修改稿日期:2023-01-15

作者简介:曹 旺(1995-),男,湖南安化县人,工程师,硕士,主要从事水电厂过渡过程控制与变压器实时监测装置研究。

通信作者:李橙橙(1992-),女,湖南岳阳市人,工程师,博士,研究方向为电厂智能化发展研究。

的实时监测是保障工业安全生产的必要手段^[1]。目前,CO检测方法主要有电化学法与气相色谱法。电化学法在恶劣环境中受粉尘、潮湿与电磁辐射的影响,造成测量不精准与误报警现象,并且氢气、烃类等还原性气体对其测量亦有较大干扰。气相色谱法消耗载气,检测周期长,不适宜用做长期监测类设备。

TDLAS利用DFB激光器窄线宽、波长可调节的特性,扫描气体的吸收谱线,实现了响应速度快、高灵敏度的气体测量^[2]。DFB激光器造型小巧,价格实惠,出光稳定,适宜用于研制气体检测装置。文献[1]设计了基于FPGA+MCU架构与Herriot吸收池的CO检测装置,但仅对低浓度CO气体做了测试,并且采用的波长2330nm激光器价格昂贵;文献[3]采用垂直腔面发射激光器代替DFB激光器,实现了误差不大于2%的精准测量,但量程仅为0至1000 μ L/L,无法测量威胁作业人员生命安全的高浓度CO。文献[4]研制了基于中红外CO检测系统,该系统测量范围广、测量下限低,但测量的测量误差较大。文献[5]设计了烟气中的CO测量装置,实现了四次谐波比一次谐波的免标定测量法,但是取样结构复杂。

本文选用波长为1568nm的DFB激光器作为光源,对近红外1567.3nm吸收谱线附近的CO进行测量,实现了CO的实时监测与报警,为工业生产安全提供重要参考。

1 检测原理

气体选择性吸收理论与比尔朗伯定理是TDLAS的基础。气体选择性吸收理论表明气体只对特定的频率的激光产生吸收,而比尔朗伯定理描述了吸收的这一过程。

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

其中: $I_0(v)$ 为入射光强; $I_t(v)$ 为气体吸收后的出射光强; $\alpha(v)$ 为气体吸收系数; C 为气体浓度; L 为光程长度。

在TDLAS检测过程中,背景噪声影响系统测量下限与灵敏度,并且难以消除。背景主要来源于激光光源的光强波动、电子元器件的干扰以及气体吸收池的工艺不到位,主要集中于低频段,强度随着频率的升高而急速衰减。为降低背景噪声对测

量结果的影响,提升信号的信噪比,TDLAS技术通常与波长调制技术(WMS)结合使用。WMS在频率为 ν_0 的激光器扫描信号基础上叠加频率为 f 的高频正弦调制信号,改变激光器的出光瞬时频率,达到抗低频噪声干扰的目的。激光器的瞬时频率为:

$$\nu(t)=\nu_0+a\cos(2\pi ft) \quad (2)$$

其中: a 为调制正弦波幅值,即调制幅度。

对式(2)进行傅里叶级数展开后

$$I(\nu_0,t)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n(\nu_0)\cos(n2\pi ft) \quad (3)$$

谐波分量 A_n 含有浓度信息,可用锁相放大器计算。设 $\theta=2\pi ft$,则 A_n 可表示为

$$A_n(\nu_0)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\pi}I_0(\nu_0+a\cos\theta)\exp[-\alpha(\nu_0+a\cos\theta)CL]\cos n\theta d\theta \quad (4)$$

理论而言,各次谐波中均含有浓度信息,并且与浓度呈线性关系。随着谐波次数的提升,背景噪声的影响越小,但是谐波的幅值也会迅速衰减。所以在确定谐波次数时,谐波次数不能选择太高。在各次谐波中,二次谐波在中心吸收处偶对称,并在中心吸收处幅值最大,最有利于浓度信息的获取^[10]。CO的二次谐波如图1所示。

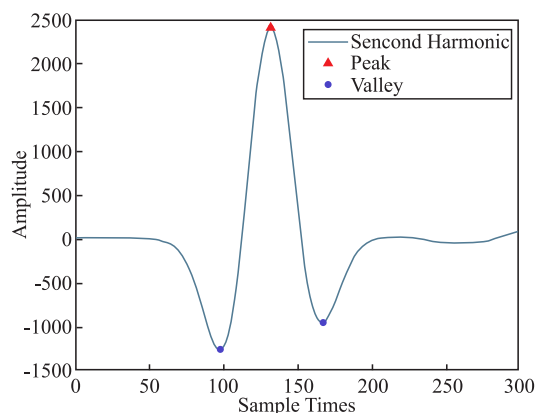


图1 二次谐波

本文使用二次谐波的吸收峰峰值与左右两波谷的差值作为浓度计算依据,防止基线变动对测量结果造成影响。

2 系统总体设计

2.1 吸收谱线选择

在选择吸收谱线时,必须考虑谱线的单一性与谱线的吸收强度。谱线的单一性是指在该谱线或

该谱线附近,非目标气体无明显吸收,不会对目标气体的测量产生干扰。谱线的吸收强度决定系统检测的下限,强度越大,检测下限越低。在近红外波段中,CO 在 1579nm 与 1568nm 附近有较强吸收谱线。在 1579nm 附近,非目标气体二氧化碳(CO₂)的吸收强度与 CO 吸收强度比较接近,并且二者吸收谱线有重合或相邻间隔较小,因此不适于作为高精度 CO 检测设备的吸收波长。而在 1568nm 附近,CO 吸收单一性好,吸收强度高。常见气体在 1568nm 附近吸收波长见图 2。

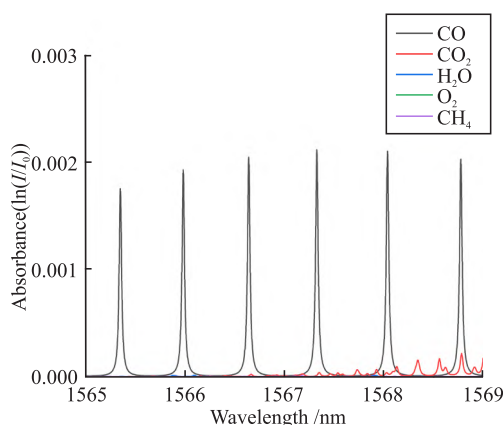


图2 1568nm附近吸收波长

由图 2 可知,空气中常见的干扰气体 CO₂、水(H₂O)、氧气(O₂)、甲烷(CH₄)在 1568nm 附近的吸收强度均远远弱于 CO,其中吸收较强的 CO₂ 也仅为 CO 的 0.006。综合考虑,选用波长 1568nm 的 N 型激光器,扫描 1567.3nm 附近吸收谱线,可避免非目标气体干扰,提升测量准确性。

2.2 锁相放大器设计

锁相放大器是基于待测信号与噪声互不相关性原理的微弱信号提取方法,主要包括乘法器、低通滤波器、正交器三个部分,其结构见图 3。

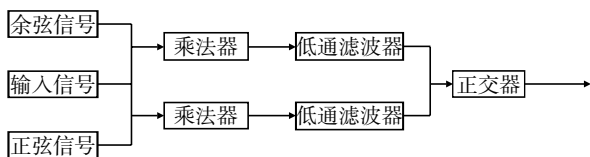


图3 正交锁相放大器结构

输入信号分别与正弦、余弦参考信号乘法运算后,经过低通滤波器滤除高频噪声,而后将两路信号的平方和进行开方运算,得出解调后的谐波。实质上,锁相放大器利用相关原理与低通滤波器,实现了带宽极窄的带通滤波器功能,完成谐波分量提取。

低通滤波器的通带越窄,阻带衰减越强,则相应的带通滤波器的通带越窄,微弱信号的提取能力越强。

由于 FIR 滤波器具有线性相位,滤波器结构中无反馈,实现简单,故本文采用 FIR 滤波器实现低通滤波功能。但 FIR 滤波器在高采样频率下实现窄带低通滤波时,滤波器所需阶数多,运算量大,所以进行 FIR 低通滤波之前需对信号进行降采样,从而完成阶数较少的窄带低通滤波器的设计。在数字信号领域,抽取是降低信号采样频率的有效手段,但是直接抽取会导致频谱混叠。

CIC 滤波器是典型的线性时不变系统,也是特殊的 FIR 滤波器,可用于信号抽取前的抗混叠滤波,其输入与输出关系可表示为:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{R-1} x(n-m) \quad (5)$$

其中 R 为滤波器阶数。由式可知,CIC 滤波器的输出信 y(n) 号为长度为 R 的输入信号累加值。滤波过程为简单的纯加法运算,有利于提升 FPGA 运算效率,从而保证设备测量的实时性。

在数字信号中,基于抽取因子 D 的抽取器原理是每间隔 D-1 个数据,抽取出一个组成信 x_d(n) 号,达到降低采样频率的目的,可表示为

$$x_d(n) = x_d(Dn) \quad (6)$$

设系统原采样频率 f_s,则信号抽取后的采样频率为 f_s/D。在设置抽取因子 D 时,必须满足奈奎斯特采样定理,即信号最高频率必须小于等于 f_s/2D,否则将导致信号畸变。若 CIC 滤波器阶数 R 等于抽取长度 D 时,降采样可描述为长度为 D 的滑动窗口不断向后以 D 为单位进行滑动,滑动一次对长度 D 内的数据累加求和的过程。

降采样之后,数据经过窄带低通滤波器滤除高频噪声,保留信号中的直流部分。整体算法流程如图 4 所示。

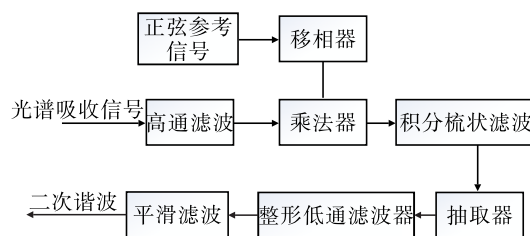


图4 数字锁相算法结构

本文采样频率 f_s=4000000Hz,调制频率 10000Hz, CIC 滤波器阶数与抽取因子设置为 1000。通过降采样后,可设计出通带截止频率 10Hz,阻带频率

350Hz, 通带最大衰减 0.1dB, 阻带最小衰减 60dB 的滤波器, 滤波器阶数仅有 31 阶。

另外, 在光谱吸收信号在进入 FPGA 之前, 进行硬件上的高通滤波, 消除锯齿波对解调的影响, 滤波后波形如图 5 所示。

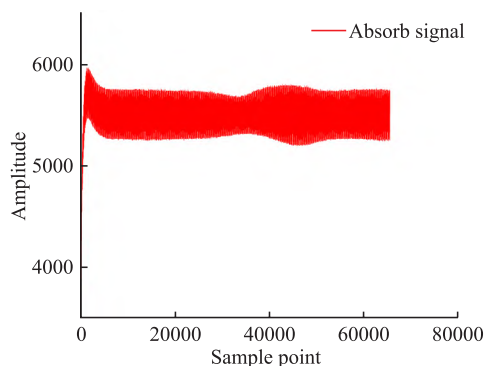


图 5 高通滤波后光谱吸收信号

2.3 总体方案

系统采用模块化设计, 包括气路控制、光学检测与声光报警三大部分, 由 Arm 芯片统一调配工作, 完成气体进气与检测任务, 总体方案如图 6

所示。

气路控制部分主要包括空气过滤器、气泵、进气阀、排气阀、压力表等部件, 在测量时气泵将外界气体吸入怀特池, 而后关闭进气阀, 用气泵将气室内气压抽至 -90kPa 。恒压并且负压条件下测量, 保证装置测量时吸收峰展宽一致, 提升测量稳定性。光学检测部分主要包括激光器控制模块、怀特池、激光器、数字锁相放大器、浓度计算模块等。激光器控制模块采用 Thorlabs 公司生产芯片改变激光器的电流与温度, 控制激光器的扫描范围固定于气体吸收峰附近, 并且提供过载保护。怀特池采用光程大于 12m 的长光程气室, 内置光电转换探头, 将光信号转换为电压形式的光谱吸收信号。锁相放大器在吸收信号中提取出二次谐波, 输入浓度计算模块, 从而得出气体浓度。声光报警包括指示灯与蜂鸣器, 该模块根据测量浓度值与设定告警值, 发出不同提示信息。当测量浓度小于告警值时, 机器绿灯亮起; 而超出告警值时, 红灯亮, 并发出蜂鸣警告, 提醒作业人员注意安全。另外, 系统装有工业空调, 保障系统在高温、潮湿的恶劣环境中可正常工作。

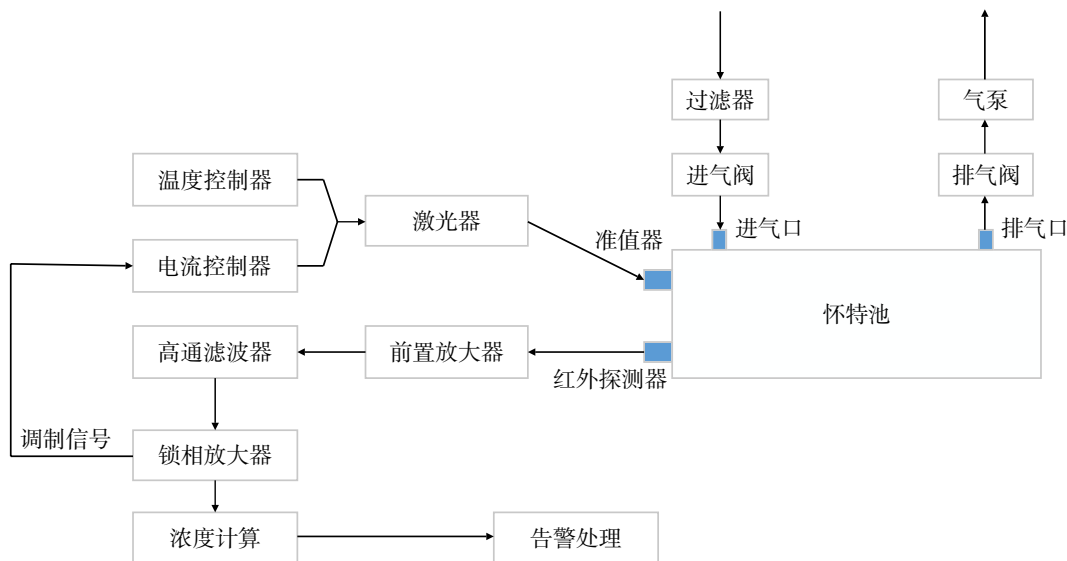


图 6 系统总体方案

3 气体标定与测试

3.1 标定实验

系统标定实验通过高精度配气仪配比浓度 20~30000 $\mu\text{L/L}$ 的 CO 气体, 其中稀释气选用纯氮气 (99.99%), 原料气分别采用浓度为 100 $\mu\text{L/L}$ 、

5000 $\mu\text{L/L}$ 、30000 $\mu\text{L/L}$ 的 CO 气体。不同浓度 CO 的二次谐波如图 7 所示。

依据各浓度的二次谐波的吸收峰特征值, 采用最小二乘法建立浓度与特征值的关系。为避免拟合时高浓度的偏差对低浓度影响, 本文分段进行拟合, 设置高、中、低三套拟合系数, 拟合情况见图 8。

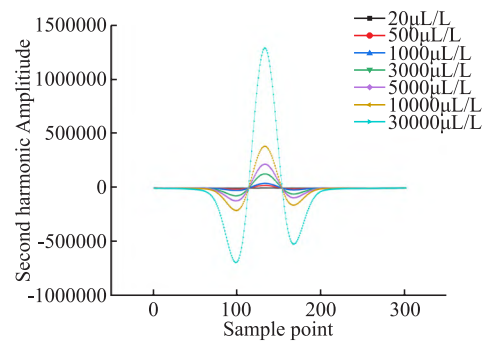
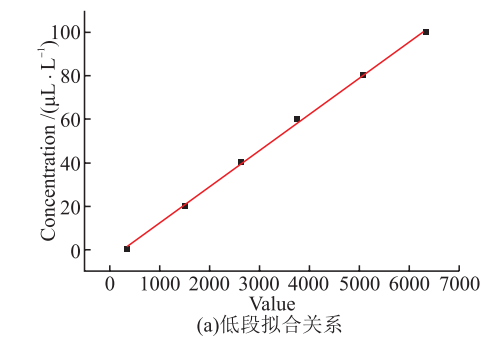
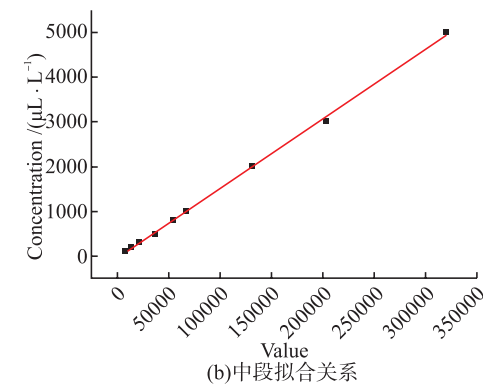


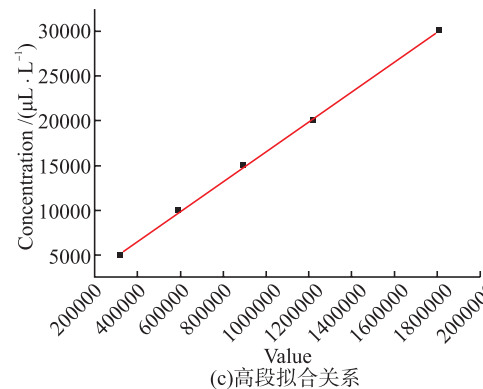
图 7 各浓度二次谐波



(a)低段拟合关系



(b)中段拟合关系



(c)高段拟合关系

图 8 浓度特征值关系

由图 8 可知,二次谐波峰谷值与浓度之间具有良好的线性关系,低段拟合度为 0.9989,中段拟合度为 0.9991,高段拟合度为 0.9993。在实际测量时,将二次谐波峰谷值代入拟合关系中即可反演浓度。

3.2 实验验证

在系统标定调试后,以空气为稀释气,配置不同浓度 CO 进行测试。验证实验的浓度范围覆盖高、中、低三个量程,并且囊括小于最小标定点和高于最高标定点的浓度。实验结果如表 1 所示。

表 1 实验数据

配制气浓度/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	测量浓度/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对偏差
10	8.9	-11%
50	51.4	2.80%
100	101.8	1.80%
600	608.6	1.40%
4000	4016.3	0.40%
7000	7039.9	0.57%
15000	14860.7	-0.93%
25000	25143.2	0.57%
35000	35636.1	1.8%

由数据可知,在浓度 100 $\mu\text{L/L}$ 以内,相对误差较大,但绝对误差控制在 2 $\mu\text{L/L}$ 。在浓度高于 100 $\mu\text{L/L}$ 时,相对误差均控制与 2% 以内。

4 结束语

本文分析了 TDLAS-WMS 气体检测原理,设计了数字锁相放大器用于信号解调,研制了 CO 气体检测系统,并进行了气体浓度标定实验与测试。结果表明:该系统检测结果与实际气体浓度相对偏差约控制在 2% 以内,检测下限可达 10 $\mu\text{L/L}$,上限超过 35000 $\mu\text{L/L}$,并且该系统检测速度快,精度高,不受其他气体的干扰,可为密闭空间作业人员提供重要的安全参考信息,降低事故发生概率。

参考文献

[1] 顾利帅,裴彦军,王立娜,等. TDLAS—氧化碳监测系统[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5): 134–137.

[2] 常岐海. 基于激光吸收光谱的多用途气体检测系统设计[J]. 中国测试, 2013, 39(1): 93–96.

[3] 张立群. 基于TDLAS的矿用激光—氧化碳检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7):61–66.

[4] 李国林,董明,宋楠,等. 基于中红外光谱吸收技术的一氧化碳气体检测系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2839–2844.

[5] 周佩丽,谭文,彭志敏. 基于TDLAS的烟气中CO浓度混合取样式在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 233–240.