

引用格式: BO Tengfei, LI Yafei, LI Baolin, et al. Temperature Control System of Non-dispersive Infrared Gas Detector in Low Temperature Environment[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3):0352125

薄腾飞, 李亚飞, 李保霖, 等. 低温环境非色散红外气体检测仪温控系统[J]. 光子学报, 2023, 52(3):0352125

低温环境非色散红外气体检测仪温控系统

薄腾飞^{1,2}, 李亚飞^{1,2}, 李保霖^{1,2}, 马卓^{1,2}, 郑传涛^{1,2}, 王一丁^{1,2}

(1 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 长春 130012)

摘要: 由于红外热释电探测器在低温环境下易发生温度漂移, 导致非分散红外(NDIR)二氧化碳(CO₂)农业火灾检测仪受低温影响较大。针对上述问题, 本文设计了一种应用于-40℃低温环境的探测器温度控制系统。给出了NDIR农业火灾检测仪的原理, 探究了热释电探测器温度漂移现象, 在此基础上, 设计了以STM32F103为核心的温度控制系统。将温度控制系统集成于火灾检测仪中, 在-40℃环境温度下, 将探测器温度从20℃起始温度控温, 稳定在21℃的响应时间为16 s, 温度波动的1σ值为0.012 6℃, 响应时间和稳定性均满足低温环境下的控温需求。在控温条件下, 对传感器进行了标定, 将气体标定实验得到的吸收通道与参考通道电压信号的一次谐波幅值比和标准气体浓度值进行指数拟合, 拟合优度达到了99.852%。利用纯氮气(N₂)样品, 对检测仪进行了25 min的稳定性测试, 测得的浓度波动范围为-28.128 76×10⁻⁶~27.240 5×10⁻⁶。引入Allan方差进行评估, 当积分时间为0.25 s时, 检测下限为1.213 01×10⁻⁶; 当积分时间为114.75 s时, 理论上系统的检测下限可达到4.822 5×10⁻⁷。实验结果表明, 该温度控制系统可以保证火灾检测仪在低温环境下的正常工作。

关键词: 火灾检测; 气体吸收; 温度控制; BUCK 电路; 牛顿迭代法; 增量式PID

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20235203.0352125

0 引言

在农业收获作业中, 由于风干物燥, 烟头、电线火花、机器摩擦产生的高温都会诱发农业火灾。农业火灾蔓延速度快、受灾面积广、扑救难度大, 给农业生产和生命财产安全带来巨大威胁, 所以对于农业火灾的精准监测势在必行^[1-3]。传统的火灾检测仪大多数都是基于温度变化和烟雾识别来判别火灾发生的。然而在火灾发生初期, 环境温度变化极小, 且并非所有火灾均能产生烟雾气溶胶, 因此传统火灾检测仪无法有效地进行火灾检测。在火灾的不同阶段, 都会产生不同气体, 所以在火灾检测领域中气体传感器得到迅速发展。当发生农业火灾时, 农作物燃烧会产生大量的一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂), 导致空气中CO、CO₂浓度迅速升高, 因此通过实时监测CO、CO₂的浓度变化可以预警火灾^[4]。但在某些农机作业现场(如我国新疆采棉区、东北地区冬季作业), 环境温度低, 对传感器系统的可靠运行带来了很大挑战。以我国新疆地区的棉花收获作业为例, 新疆地区秋冬季夜间温度低, 冬季夜间气温甚至能达到-30℃以下, 并且空气干燥。在棉箱装载棉花的过程中, 如果棉花内混入了小火星造成棉花阴燃, 极易引发重大火灾。在棉箱内装载CO₂检测仪, 实时监测棉箱内气体浓度, 可及时发现火情以避免重大火灾发生。在其他应用场景中, 例如在我国北方的一些古建筑、停车场、仓库等, 火灾探测器有可能运行在-20℃以下的寒冷环境中。在这些应用中, 火灾检测仪能否与常温状态下具备同样的火灾监测能力, 是用户、制造商和研究人员都非常关注的问题。

基金项目: 国家重点研发计划(No. 20213201903), 国家自然科学基金(Nos. 61960206004, 62175087), 吉林省科技发展计划(No. 20200401059GX), 吉林省教育厅科技发展规划项目(No. JJKH20211088KJ), 长春市重点研发项目(No. 21ZGN24), 吉林大学科技创新团队项目(Nos. JLUSTIRT, 2021TD-39)

第一作者: 薄腾飞, baotf20@mails.jlu.edu.cn

通讯作者: 郑传涛, zhengchuantao@jlu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-17; **录用日期:** 2023-02-07

<http://www.photon.ac.cn>

相比于电化学传感器、感温探测器、气相色谱传感器,基于红外吸收的气体传感器具有响应快、精度高、寿命长、选择性好、非直接接触、可在线分析、抗干扰性强等诸多优点,得到了广泛应用^[5]。近年来,人们在红外火灾气体探测技术方面开展了广泛研究。2019年席廷宇等^[6-7]研发了基于可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术的CO火灾探测系统,根据Froude模型制作火灾实验箱,利用真空泵将火灾试验箱中气体吸入多光程池,激光器产生的激光经透镜聚焦,再经过多光程池的多次反射作用到达光电探测器,对探测器输出信号进行处理得到浓度信息,从而实现火灾探测。2014年WANG J等^[8]研制了一种基于近红外可调谐光纤激光器与光纤放大器相结合的光声气体传感器,通过检测H₂O、C₂H₂、CO和CO₂浓度实现火灾探测,适用于长期在线监测。2016年JIANG Yalong等^[9]基于光声光谱原理,设计了一种用于检测烟雾颗粒和CO的高灵敏复合火灾报警系统,通过集成谐波检测技术将检测频率移动到较低噪声的高频,从而实现光声信号的测量。

依赖于激光器的红外气体传感器体积较大,不适合现场部署,而且这些传感器系统价格昂贵,不利于推广应用,基于非分散红外(Non-dispersive Infrared, NDIR)的气体传感器具有集成度高、成本低的优点,有利于小型化,便于商业化推广应用,关于NDIR气体传感器的研究层出不穷。2013年,REN Lijun等^[10]研制了一种新型中红外发光二极管光源和光电二极管检测气组合的二氧化碳NDIR传感器,功耗仅有3.5 mW。2015年,唐力程等^[11]采用双椭球面内壁镀金反射式光学气室设计了一款多组分NDIR气体传感器,实现了对CH₄、CO和CO₂的检测。2020年,熊涛等^[12]利用ZEMAX对光室结构进行了优化模拟,设计了复合抛物面聚光器光室监测系统,并集成到NDIR传感器中,达到快速响应的目的。在商用NDIR传感器中,国外VAISALA公司的GMP252系列传感器是一种测量CO₂的新型智能传感器,在0~3 000×10⁻⁶的CO₂浓度范围内其精度为±40×10⁻⁶。该传感器适用于恶劣、低温、潮湿、稳定性要求高的环境中,最低可在-40℃的温度下工作。然而,国内已报道的NDIR传感器仅在室温条件下表现出良好的性能,在低温环境下往往表现不佳,从而不能在实际农业生产中应用。主要原因是红外热释电探测器受温度影响较大,低温条件下难以正常工作。为了使传感器能够在低温环境正常工作,本文设计了一种红外热释电探测器的温度控制系统,并应用于NDIR二氧化碳检测仪中,使探测器能够在-40℃低温环境中维持21℃的工作温度,最终使传感器在低温环境下正常工作。

1 用于农业火灾探测的红外二氧化碳检测仪

1.1 检测原理

红外气体传感器是基于待测气体对红外波段的光具有特定选择性吸收的原理,即利用红外辐射与气体分子的相互作用。当某一波长的红外光经过待测气体,且此气体分子在此波长下存在吸收,此时光强便发生了衰减,吸收前后的光强变化满足朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律^[13-14]。光强的衰减程度随气体浓度增加而增大,因此可根据光强的变化反推得到待测气体的浓度为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)CL] \quad (1)$$

式中, $I_0(\lambda)$ 为初始光强, $I(\lambda)$ 为波长为 λ 的光经过气体吸收后的光强, $\alpha(\lambda)$ 为气体对波长为 λ 的光的吸收系数, C 为气体浓度, L 为光程。本系统采用双光路结构检测CO₂的吸收,红外探测器在波长 λ_1 (对应气体吸收)和 λ_2 (气体无吸收,即 $\alpha(\lambda_2)=0$)处的初始光强分别为 $I_0(\lambda_1)$ 和 $I_0(\lambda_2)$,光电转换系数分别为 $R(\lambda_1)$ 和 $R(\lambda_2)$,两通道输出的电压信号之比可表示为

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R(\lambda_1)I_0(\lambda_1)}{R(\lambda_2)I_0(\lambda_2)} \exp[-\alpha(\lambda_1)CL] \quad (2)$$

对探测器输出信号进行调理,将探测器输出电压信号线性映射到AD转换器可采集的模拟电压范围。 $I_0(\lambda_1)$ 和 $I_0(\lambda_2)$ 受光源影响变化趋势一致,可抑制光源波动产生的探测误差。在实际应用中,需要先通过标准气体进行系统标定,而后根据拟合公式确定一次谐波信号幅值比和体积分数的关系。

1.2 农业火灾气体检测仪

用于低温环境的农业火灾检测系统主要由电学模块、光学模块、上位机监测模块以及探测器温度控制模块组成。系统的整体结构如图1所示。

光学模块主要由反射镜、凸透镜以及分光镜组成,热光源(型号:IR55, Hawkeye Technology)在电流源

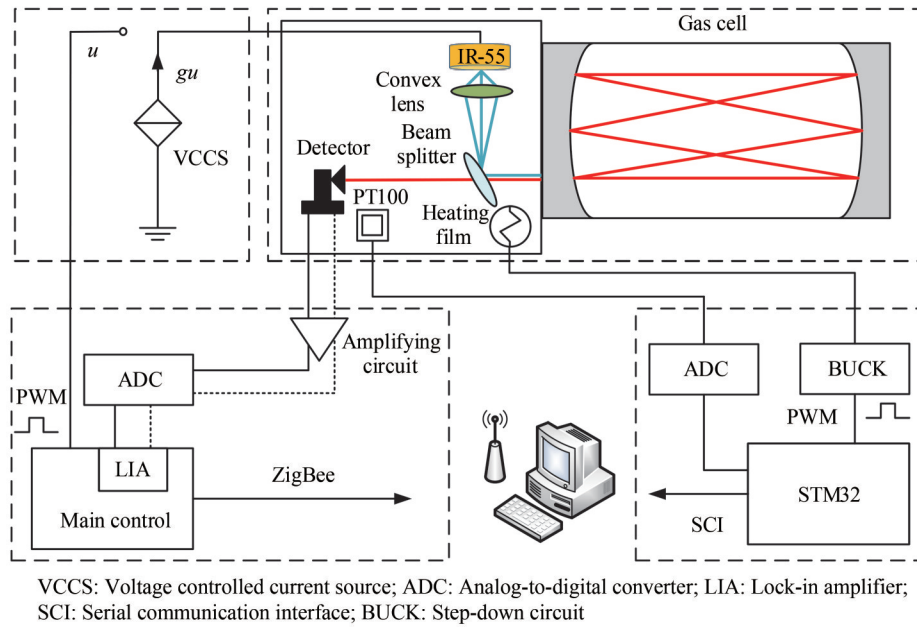
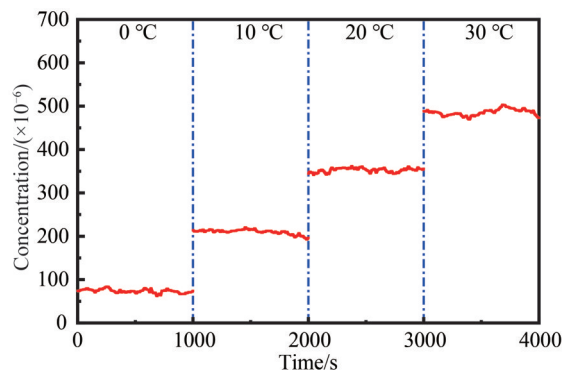


图1 基于NDIR的农业火灾检测仪框图

Fig. 1 System block diagram of agricultural fire detector based on NDIR Technology

驱动下发射的红外光经过凸透镜会聚后,通过分光镜反射进入气室,在气室内经过5次反射后从入射口出射,光程1.8 m,出射光由双通道热释电探测器采集并转换为电压信号。电学模块包括放大电路、模数转换(Analog to Digital Conversion, ADC)电路、DSP(Digital Signal Processor, DSP,型号:TMS320F28335, Texas Instrument)主控电路以及光源驱动电路。放大电路将探测器输出的电压信号进行线性转换,然后经模数转换器(型号:AD7903, Analog Devices)将模拟电压信号转换为数字信号,由主控电路进行锁相放大处理,提取出与浓度相关的电压幅值。主控电路通过ZigBee无线通信模块与上位机通信,通过计算获得气体浓度信息。另外,主控电路通过脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)定时器输出频率为4 Hz的方波,经过光耦(型号:IS181, ISOCOM)隔离后,利用压控电流源驱动热光源,产生强度调制的红外光。

采用的探测器为热释电探测器,其对红外辐射变化敏感。热释电芯片是热释电探测器的核心,由特殊晶体材料制成,晶体内部晶格离子按照一定的顺序进行排列。由于内部许多晶体正负电荷中心不重合而产生极化,其极化强度随温度变化而变化。热释电探测器是温度敏感器件,环境温度的变化直接影响测试信号和工作点^[14]。当环境温度变化时,热释电探测器的工作状态会发生变化,输出的电压值也发生改变,导致测量结果出现严重偏差。在室温 T_0 下得到的拟合方程为 $f(C, T_0)$,当环境温度变化为 T_1 时,拟合函数变为 $f(C, T_1)$,拟合参数发生变化,则利用同一电压比反演得到的浓度值也会发生变化。根据25℃进行标定实验得到的拟合方程进行大气浓度检测,当环境温度分别为0℃、10℃、20℃、30℃时,检测得到的大气二氧化碳体积分数如图2所示。

图2 0℃~40℃温度范围内测得的大气CO₂体积分数曲线Fig. 2 The measured volume fraction curve of atmospheric CO₂ concentration level within 0℃~40℃

可以看出,温度变化导致测量结果发生严重偏移,因此修正温度对探测器的影响势在必行。

2 温度控制硬件

温度控制系统包括5部分:基于STM32F103的主控模块、温度信号采集模块、加热膜驱动模块、加热膜及保温壳体、供电模块,结构如图3所示。

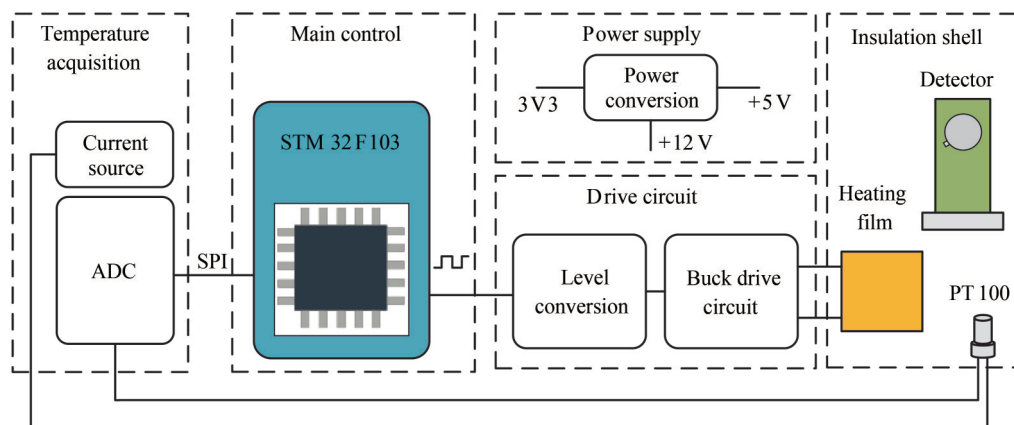


图3 红外热释电探测器的温度控制系统结构框图

Fig. 3 Structure block diagram of temperature control system of the infrared pyroelectric detector

为了保证传感器系统能够在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下正常工作,需要对探测器进行合理的保温及密封处理,一方面保证壳体内部温度不会发生较大变化,另一方面可以防止外界环境对探测器的较大影响。整体控温过程如下:STM32F103主控芯片通过AD转换芯片采集热电阻两端的电压值,通过电压值得到热电阻阻值,进而转化为温度值;然后将目标温度值与实际温度值相减得到偏差,对此偏差值进行PID(Proportional Integral Derivative)运算得到相应的调节量,据此调节PWM的占空比,控制加热膜驱动电压,进而控制加热功率,经过闭环控制,使探测器工作温度维持在目标温度附近。

2.1 主控电路

本控制系统主要通过调节PWM的占空比来控制温度,因此选择的主控芯片型号为STM32F103VET6,该处理器基于ARM内核架构,最大时钟频率为72 MHz,内部定时器除TIM6和TIM7外,其他的定时器都可以用来输出PWM波,其中TIM1和TIM8可同时输出7路PWM信号,通用定时器可同时输出4路PWM信号,满足温控控制系统的硬件及频率需求。

2.2 温度信号采集电路

根据系统的控制精度和控温范围要求,需要监测的温度范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此选择PT100热电阻作为测温传感器。采用AD7793采集电压信号,其内置两个匹配良好的可编程激励电流源,可选择 $10\text{ }\mu\text{A}$ 、 $210\text{ }\mu\text{A}$ 、 1 mA 的稳定电流来驱动PT100^[15]。使用三线制PT100与AD7793进行连接,PT100单极端接电流源1和差分输入正相端,同极端1分别接电流源2和差分输入负相端,同极端2接基准输入正相端,电路如图4所示。

输入模拟电压信号和基准电压分别由式(3)和(4)得到。

$$v_{in} = (R_{L1} + R_{PT100})I_1 - R_{L2}I_2 \quad (3)$$

$$v_{ref} = R_{ref}(I_1 + I_2) \quad (4)$$

式中, R_{L1} 和 R_{L2} 为PT100两根导线的电阻值, I_1 和 I_2 为

AD7793内置恒流源的电流值,可以使用软件进行配置, R_{PT100} 为PT100的理论电阻值, R_{ref} 为基准电阻值,决

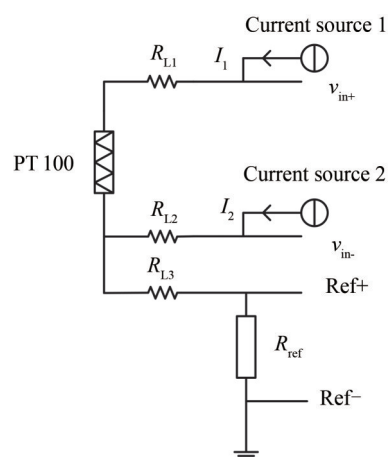


图4 PT100接线图

Fig. 4 PT100 wiring diagram

定了基准电压值及测量准确度。这种连接方式可以消除PT100导线电阻引起的测量误差,使最终计算PT100电阻值的理论公式中不会出现导线电阻项 R_{L1} 和 R_{L2} ,PT100导线长度相等且材料相同,所以 R_{L1} 和 R_{L2} 相等,使用相匹配恒流源驱动,即 $I_1=I_2$,根据模数转换公式 $v_{in}=\frac{Dv_{ref}}{2^N G}$ 可以得到PT100电阻值与数字量的关系为

$$R_{PT100}=\frac{v_{in}-R_{L1}I_1+R_{L2}I_2}{I_1}=\frac{\frac{DR_{ref}(I_1+I_2)}{2^N G}-R_{L1}I_1+R_{L2}I_2}{I_1}=\frac{DR_{ref}(I_1+I_2)}{2^N GI_1}=\frac{DR_{ref}}{2^{N-1}G} \quad (5)$$

式中, D 为AD7793输出的数字量, G 为AD7793初始化电压增益, $N=24$ 为AD7793数字分辨率。式(3)中导线电阻项被消除,所以使用图4接法可以有效消除导线电阻误差,从式(5)可知,测量误差主要来源于基准电阻的误差,所以需选取高精度的基准电阻。

2.3 加热膜驱动电路

在温度控制系统中,采用控制加热膜两端电压的方式控制加热功率,加热膜的功率由保温壳体体积和壳体内外最大温差决定,本文选取的加热膜最大加热功率为48 W,驱动电压由BUCK降压电路提供,通过控制PWM信号的占空比控制负载两端的电压。

BUCK降压电路作为驱动模块的核心,负载电阻 R 、电感 L 、PWM信号频率 f (周期 T)需满足特定的关系,使得负载电压 v 可根据PWM占空比近似线性可调,采用滤波电容 C 降低输出电压纹波。实验表明,BUCK降压电路的输出电压质量主要与电感有关,可将BUCK电路简化为LR模型。BUCK电路的LRC模型及LR模型如图5所示。

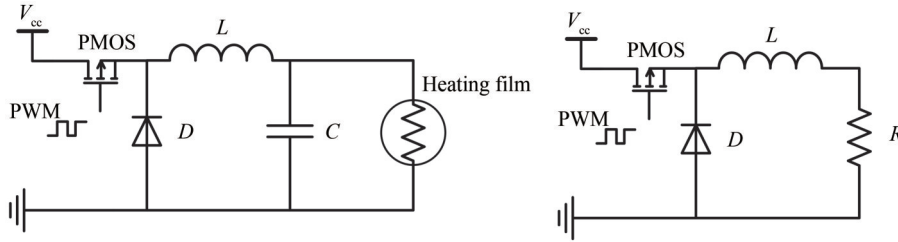


图5 BUCK电路原理图

Fig. 5 Buck circuit schematic diagram

电源电压为 V_{cc} , $u(t)$ 为阶跃函数,根据LR模型具体参数可得

$$V_{cc} \sum_{k=0}^n u(t-kT) - u(t-kT-\alpha T) = L \frac{di}{dt} + Ri, \quad t \geq 0, \quad k \in N \quad (6)$$

假定时刻 t 的负载电压为 v ,且流经电感的电流不能突变,则由式(6)得到递推式(7)有

$$\begin{cases} v_{(k-1+\alpha)T} = [v_{(k-1)T} - V_{cc}] \exp\left(-\frac{\alpha RT}{L}\right) + V_{cc}, \quad k \in N^* \\ v_{kT} = v_{(k-1+\alpha)T} \exp\left[-\frac{(1-\alpha)RT}{L}\right], \quad k \in N^* \end{cases} \quad (7)$$

进而得到每个周期末时刻 v_{kT} 之间的递推关系

$$v_{kT} = \left\{ v_{(k-1)T} + V_{cc} \left[\exp\left(\frac{\alpha RT}{L}\right) - 1 \right] \right\} \exp\left(-\frac{RT}{L}\right), \quad k \in N^* \quad (8)$$

求解以上递推关系,进而求得所有周期末时刻负载电压 v_{kT} 的值,如式(9)所示为

$$v_{kT} = v_0 \exp\left(-\frac{kRT}{L}\right) + \frac{V_{cc} \left[\exp\left(\frac{\alpha RT}{L}\right) - 1 \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{kRT}{L}\right) \right]}{\exp\left(\frac{RT}{L}\right) - 1}, \quad k \in N \quad (9)$$

式中, v_0 为负载电压初值,当运行时间远大于PWM周期的情况下电路的输出可达到稳定状态,将 $T=1/f$ 代入稳态电路可得稳态电压 v_R 为

$$v_R = \frac{V_{cc} \left[\exp\left(\frac{\alpha R}{L_f}\right) - 1 \right]}{\exp\left(\frac{R}{L_f}\right) - 1} \quad (10)$$

根据式(10),当负载加热膜的阻值基本不变时,输出电压值与PWM占空比 α 呈非线性关系,当 $\alpha=0$ 时,输出电压为0;当 $\alpha=1$ 时,输出电压为 V_{cc} 。为达到近似线性的控制关系,使 R/L_f 趋近于0,控制关系可表示为线性函数: $v_R \approx \alpha V_{cc}$ 。

当加热膜电阻不太大、PWM频率足够高、电感值不太小的情况下,输出电压和PWM占空比可以近似为线性调节关系,加热膜两端的电压不能突变,电容 C 在加热膜驱动电路中起的主要作用为滤除高频纹波,防止电压波动幅度过大影响输出电压的稳定性,进而影响温控系统的稳定性。

3 温度控制算法与软件

3.1 温度数据处理

利用AD7793采集温度,采用温度平均值防止采样数据不准确性对PID调节过程的影响。确定温度-电压转换关系,将采样电压信号转换为温度值,并进行十进制转换,进行数字显示。采用滑动平均减小温度波动,但若使滑动数组的长度过大,会增大系统的滞后性,因此滑动数组不宜过长。温度 T 和PT100的电阻值 R_T 满足

$$R_T = \begin{cases} R_0(1 + AT + BT^2), & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C} \\ R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3], & -200^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $A=3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $B=-5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$, $C=-4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$, R_0 为PT100在 0°C 下的阻值 100Ω ^[16]。

当外界环境温度达到 -40°C 时,需要将探测器温度控制在常温附近。为了解决动态温度变化问题并对探测器温度进行实时监测,需要在温度采集程序中以 $R_T=100 \Omega$ 为分界点对非负温度和负温度两种温度情况分别进行讨论:在 $0^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 范围内,热电阻阻值 R_T 是关于温度 T 的二次函数,可根据模数转换电路采集的电压值求得热电阻的电阻值 R_T ,在已知 R_T 的情况下可直接根据二次方程求根公式得到温度值;在 $-40^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 范围内,热电阻阻值 R_T 是关于温度 T 的四次函数,可采用二次函数拟合的方法进行求解,也可根据 R_T 与 T 的函数关系利用牛顿迭代法求解负温度温度的温度值。二次函数拟合法计算误差较大,因此本文选取牛顿迭代法求解负温度值。

在 $0^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 温度下,PT100电阻值是关于温度的二次函数,可直接利用求根公式进行求解,进而得到正温度条件下,温度与电阻的关系为

$$T = \frac{\sqrt{A^2 + 4B\left(\frac{R_T}{R_0} - 1\right)} - A}{2B}, \quad R_T \geq 100 \Omega \quad (12)$$

在 $-40^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 温度下,温度与电阻值的关系相当于在零上温度的二次项关系基础上进行了三次及四次补偿。使用牛顿迭代法进行负温度求解,此时 $R_T < 100 \Omega$ 。首先设置迭代初值 T_0 和精度 δ ,迭代初值 T_0 由式(12)给出,可以尽可能减少迭代次数,精度设置为 0.001°C ,随后将求解方程转化为式(13),并得到一阶导数,见式(14)。

$$f(T) = T^4 - 100T^3 + \frac{B}{C}T^2 + \frac{A}{C}T + \frac{1}{C}\left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right), \quad R_T < 100 \Omega \quad (13)$$

$$f'(T) = 4T^3 - 300T^2 + \frac{2B}{C}T + \frac{A}{C}, \quad R_T < 100 \Omega \quad (14)$$

根据公式 $T_1 = T_0 - \frac{f(T_0)}{f'(T_0)}$ 进行迭代,若 $|T_1 - T_0| < \delta$,则得到满足精度的计算结果 T_1 ,若 $|T_1 - T_0| \geq \delta$,则将 T_1 赋值给 T_0 ,继续进行迭代,直至输出满足精度要求的结果。

3.2 PID算法

探测器温控系统软件的核心是数字PID控制算法,PID是一种采用反馈控制回路机制的控制器,可根据

设定的目标温度值 $r(t)$ 以及实际值 $y(t)$ 相减得到的偏差值 $e(t)$, 进行比例、积分、微分运算得到相应的调节量 $u(t)$, 进而对 PWM 的占空比进行调节^[17]。

将模拟 PID 算法离散化可得到位置式 PID 控制算法, 位置式 PID 控制的输出是通过过去所有状态的求和及差分运算得到的, 在此过程中各个环节具有一定的误差, 误差被累积, 因此由于累加和误差, 位置式 PID 控制的相对精度不高, 具体形式如式(15)所示

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (15)$$

式中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数。在位置式 PID 算法的基础上, 对式(15)进行改进, 可扩展为增量式 PID 控制^[18]。从式(15)可扩展得到调节量 $u(k-1)$, 将二式相减, 得到增量式 PID 控制的基本公式

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (16)$$

在该检测系统中探测器固定于铝制支架上, 铝的导热性良好, 将 PT100 固定于铝支架上, 并且位于探测器附近, PT100 测到的温度能够代表探测器所处的环境温度, 加热膜贴在保温壳体内壁, 加热膜与 PT100 有一定的空间距离, 通过式(16)可对 PWM 的占空比进行调节, 这种空间结构使温控系统面临滞后控制和超调问题, 软件部分通过改进控制方式进行解决, 硬件部分通过保温和密封进行辅助。

首先, 改进加热膜的调节方式, 此系统中控制的加热膜为功率器件, 整个 PID 控制过程是对保温壳内空气加热功率的控制, 而加热膜两端的电压 v_R 正比于 PWM 的占空比 α , 若将调节量 u 直接作为 PWM 的占空比进行输出, 得到加热功率 P 与调节量 u 的关系: $P = \frac{u^2 V_{cc}^2}{R}$ 。 R 为加热膜电阻, 对加热膜进行加热测试, 整个过程中输出电压与电流比值基本不变, P 为加热功率, V_{cc} 为电源电压。可以看出, 加热功率 P 与调节量 u 的平方成正比, 不满足调节量与加热功率的线性关系, 若由于偏差 e 稍大而导致 u 变化稍大, 则会导致加热功率骤升, 极有可能出现超调现象。为了消除调节量与加热效果不匹配的影响, 可以通过将调节量开方 \sqrt{u} 作为 PWM 占空比, 即存在关系式(17)和(18)

$$\alpha = \sqrt{u} \quad (17)$$

$$P = \frac{v_R^2}{R} = \frac{u V_{cc}^2}{R} \quad (18)$$

这样便可以保证加热功率与调节量直接线性相关, 避免了由于输出电压过大引起的瞬时调节功率骤升现象。

另外, 在对探测器进行良好的保温和密封处理的基础上, 采用分段限幅 PID 调节。设置控温的目标温度为 T_{set} , 设置分段温度点 $T_{break} = T_{set} - \sigma$, 其中 σ 为目标与分段点的温差, 设置 $\sigma = 1^\circ\text{C}$, 那么设置在测量温度低于 T_{break} 温度下加热膜两端可调电压范围为 $0 \sim 10\text{ V}$ (占空比 $0 \sim 83.33\%$), 在测量温度高于 T_{break} 时, 将加热膜两端可调电压范围调整为 $0 \sim 4\text{ V}$ (占空比 $0 \sim 33.33\%$), 减小可调电压范围, 减缓加热速度, 也在一定程度上抑制了超调作用, 但加热速度过慢, 可能会导致散热过快, 所以需要提供良好的保温和密封环境, 抑制外部环境的影响, 保证内部系统稳定。

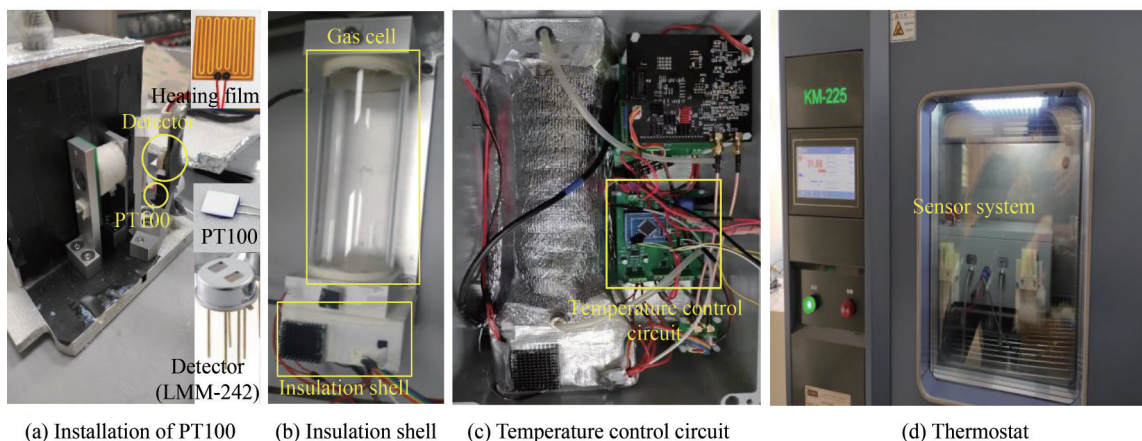
采用临界比例度法整定 PID 三参数: 首先确定比例系数 K_p , 将 K_i 调到最大, 令 $K_d = 0$, 使 PID 为纯比例调节, 输入设定为系统允许的最大值的 $60\% \sim 70\%$, 由 0 逐渐加大比例增益 K_p , 直至系统出现振荡, 然后将比例增益 K_p 逐渐减小, 直至系统振荡消失, 记录此时的比例增益 K_p , 设定 PID 的比例增益为当前值的 $60\% \sim 70\%$; 然后确定积分系数 K_i , 设定一个较小的 K_i 初值, 增大 K_i 直至系统出现振荡, 随后逐渐减小 K_i 直至系统振荡消失, 记录此时的 K_i , 设定 PID 的积分系数常数 K_i 为当前值的 $56\% \sim 66\%$; 最后确定微分系数 K_d , 设定一个较小 K_d 初值, 增大 K_d 直至系统出现振荡, 随后减小 K_d 直至振荡消失, 设定微分系数 K_d 为当前值的 30% , 最后进行微调, 至此, 参数整定完成。

4 低温环境传感器实验与结果

4.1 温度控制性能测试

将研制的温度控制系统集成于农业火灾检测仪中, 其中将 PT100 固定在红外探测器附近, 如图 6(a) 所

示。探测器周围用保温壳体包裹,壳体与气室之间密封,保温壳体内壁贴有加热膜,如图6(b)所示,其中探测器正常工作温度范围为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,最佳工作温度区间为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,选取控温的目标温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将温控系统的电路部分集成到NDIR传感器中,如图6(c)所示。并将火灾检测仪置于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中进行测试,如图6(d)所示。



(a) Installation of PT100 (b) Insulation shell (c) Temperature control circuit (d) Thermostat

图6 温度控制系统实物以及恒温箱模拟环境温度

Fig. 6 The real object of the temperature control system and the thermostat simulates the ambient temperature

配置AD7793寄存器为 1 Hz 采样率,系统上电后实时监测探测器的温度值,首先需要测量温度控制系统的响应时间,将系统目标温度设定为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,当目标温度稳定在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时记录数据,在第 28 s 改变目标温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过 16 s 温度稳定在 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,响应曲线如图7(a)所示。

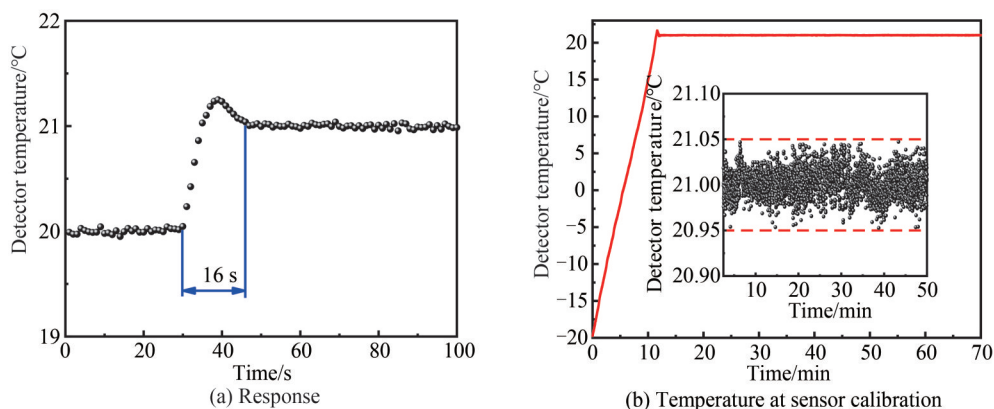


图7 温度控制系统的响应时间与实验过程中记录的探测器温度

Fig.7 Response time of the temperature control system and the recorded detector temperature during experiment

在实际气体检测中,若探测器温度出现波动,会导致探测器光电转换系数发生变化,影响探测器输出电压,从而影响气体标定结果,因此需要验证温控系统在长时间工作下的温度稳定性。将恒温箱的温度设置为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,将目标温度设定为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,对系统进行上电,实验过程中实时监测探测器的温度,待系统稳定后,记录实验过程中的探测器温度数据,进行 50 min 的控温稳定性测试,测试结果如图7(b)所示。由图7(b)可以看出,系统温度从 12 min 达到稳定,在 50 min 的测试时间内,探测器温度波动范围为 $20.95\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 21.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定性(1σ)为 $0.0126\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验证明,此系统能够稳定工作于低温环境,并有较快的响应时间。

4.2 低温环境传感器标定实验

使用本文所研制的温度控制系统对热释电探测器进行温度控制,将探测器的工作温度设置为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,使用EnviroNics气体混合系统配制体积分数分别为 0 (纯氮气)、 300×10^{-6} 、 600×10^{-6} 、 900×10^{-6} 、 $1\ 200\times 10^{-6}$ 、 $1\ 500\times 10^{-6}$ 、 $1\ 800\times 10^{-6}$ 的7组 CO_2 气体样品,并将这7组气体分别通入气室中,利用正交锁相技术提取吸收通道和参考通道的电压信号一次谐波幅值,记录二者谐波幅值比值,其中模数转换器的采样率为 4 Hz ,每

组气体样品测试 5 min, 采样到的电压信号通过卡尔曼滤波降低噪声干扰, 提高气体检测精度, 采集到的幅值比随时间的变化曲线如图 8(a), 以 300×10^{-6} 为梯度, 当通入体积分数为 $0 \sim 1800 \times 10^{-6}$ 的 CO_2 气体时, 一次谐波幅值比信号仍然可清晰分辨。

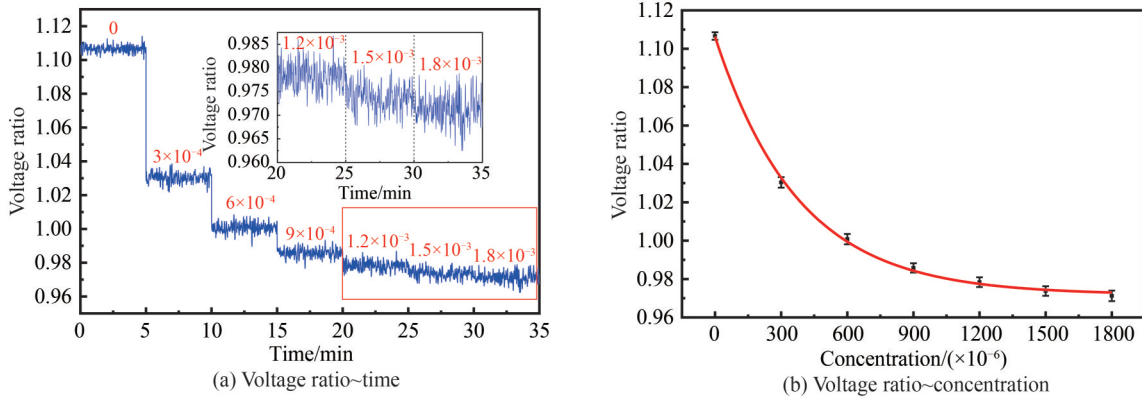


图 8 传感器系统标定
Fig.8 Sensor system calibration

通过对不同浓度的幅值比进行平均处理, 拟合出幅值比信号与浓度的关系曲线, 如图 8(b) 所示, 拟合方程为

$$\frac{V_1}{V_2} = 0.13452 \times \exp\left(-\frac{C}{397.14676}\right) + 0.97181 \quad (19)$$

拟合曲线呈现出良好的指数线型关系, 拟合优度为 99.852 %。

4.3 低温环境的系统稳定性及检测下限

CO_2 气体标定实验中的拟合方程反映了浓度和谐波幅值比的关系, 通过幅值比可根据该方程计算得到 CO_2 浓度。为确定该系统在温度控制系统的控温作用下长时间内正常工作的能力, 将标定后的火灾检测仪进行稳定性测试。将火灾检测仪置于温度为 -40°C 的环境中, 将温度控制系统的目标温度设置为 21°C , 向气室内通入纯 N_2 , 连续测量 25 min, 记录测得的浓度值, 如图 9(a) 所示。

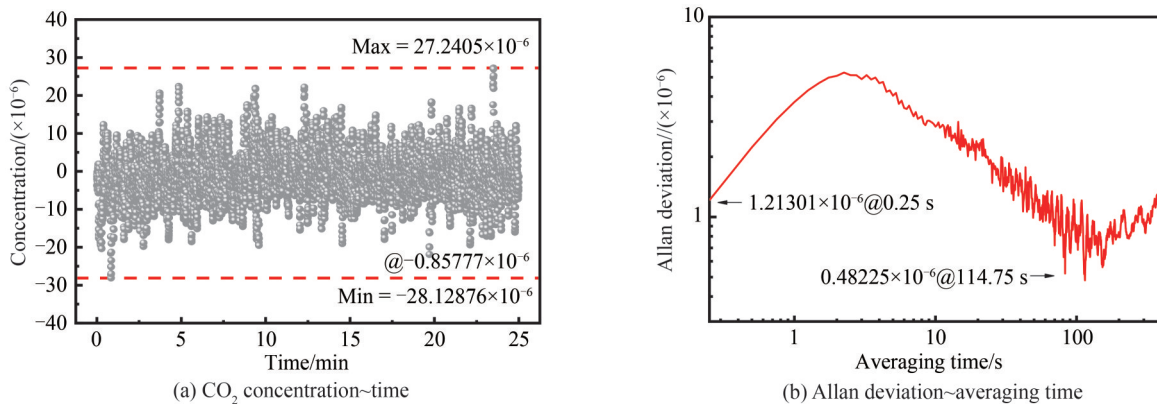


图 9 环境温度 -40°C 、探测器 21°C 条件下 CO_2 体积分数为 0×10^{-6} 的稳定性测试及 Allan 标准差曲线
Fig.9 CO_2 volume fraction is 0 at ambient temperature -40°C and detector 21°C stability test and Allan standard deviation curve

从图 9(a) 中可以看出, 当气室中通入纯氮气时所测得的 CO_2 范围为 $-28.12876 \times 10^{-6} \sim 27.2405 \times 10^{-6}$, 平均体积分数(按照拟合曲线得到的理论值)为 -0.85777×10^{-6} 。引入 Allan 方差来评估系统的检测下限, 由于采用了卡尔曼算法进行滤波, Allan 标准差曲线呈先上升的趋势, 如图 9(b) 所示, 当积分时间为 0.25 s 时, 系统检测下限为 1.21301×10^{-6} ; 当积分时间达到 114.75 s 时, 理论上系统检测下限可以达到 4.8225×10^{-7} 。实验证明, 使用温度控制系统可以使火灾检测仪正常工作于低温环境中, 有效防止探测器发生温度漂移, 保证探测器正常工作, 进而保证火灾检测仪的检测稳定性, 在低温环境下具有应用价值。

4.4 高温环境下的温度补偿

气体检测仪通过早期检测 CO_2 浓度变化实现火灾预警功能。由于火灾发生初期,在检测仪所处位置气体浓度变化先于温度变化,所以在气体浓度变化阶段报警即可有效遏止火灾的发生。此过程中探测器温度一般不会超过探测器正常工作的最高温度 $85\text{ }^\circ\text{C}$,在 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim 21\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内对系统采用温度控制的方法使探测器温度稳定在 $21\text{ }^\circ\text{C}$,在 $21\text{ }^\circ\text{C}\sim 85\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内则需要使用气体检测仪软件自带的温度补偿公式修正温差的影响。

在恒温箱中进行高温气体实验,通入体积分数为 0 的 CO_2 气体(纯氮气),将恒温箱的温度设置为 $85\text{ }^\circ\text{C}$,记录测得的气体浓度数据和探测器温度,在高温下测得的浓度数据进行温度补偿得到实际浓度值,实际 CO_2 浓度值和探测器温度值如图 10 所示。

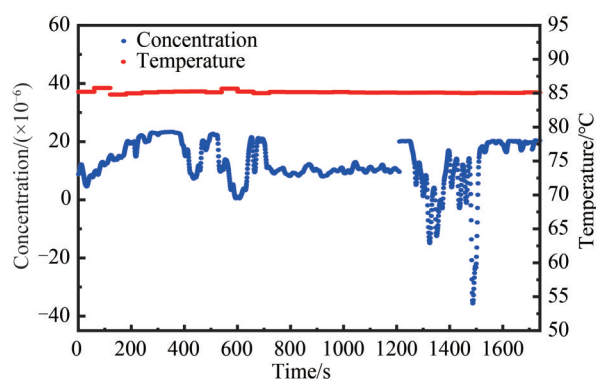


图 10 高温下测得的 CO_2 浓度和探测器温度

Fig.10 CO_2 concentration and detector temperature measured at high temperature

从图 10 中可以看出,在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温环境下探测器仍然可以正常运行,进行温度补偿后测得的 CO_2 体积分数范围为 $-37.658\times 10^{-6}\sim 24.4506\times 10^{-6}$,检测仪在误差允许范围内正常运行,由此可见检测仪在一定的范围的高温环境下仍然可以正常工作。

5 结论

根据 CO_2 农业火灾检测仪的大范围温度工作环境需求,设计了应用于探测器的温度控制系统,使用 BUCK 电路驱动加热膜,使用牛顿迭代法对负温度进行求解,并将设计的温度控制系统集成在火灾检测仪中,对探测器的温度进行实时控制。在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下对温度控制系统进行响应时间测试和稳定性测试,响应时间为 16 s ,将目标温度设置为 $21\text{ }^\circ\text{C}$,控温后温度波动范围为 $20.95\text{ }^\circ\text{C}\sim 21.05\text{ }^\circ\text{C}$,稳定性(1σ)为 $0.0126\text{ }^\circ\text{C}$ 。开展了气体标定实验,曲线的拟合优度达到 0.99852 。通过实验测试集成温度控制电路后传感器的稳定性,并引入艾伦方差进行评估。当积分时间为 0.25 s 时,系统检测下限为 1.21301×10^{-6} ;当积分时间增加至 114.75 s 时,理论上系统检测下限可以达到 4.8225×10^{-7} 。本文结果表明,集成温度控制电路的火灾检测仪可以工作于低温环境,为火灾检测仪在低温环境下的可靠工作提供了重要保障,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] LI Chendong, HAN Xiuling. The research of fire detection algorithm of agricultural greenhouse [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(13): 32-35.
李晨东,韩秀玲. 农业温室大棚的火灾检测算法研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(13): 32-35.
- [2] SEEBAMRUNGSAT J, PRAISING S, RIYAMONGKOL P. Fire detection in the buildings using image processing[C]. Student Project Conference, IEEE, 2014, 3: 95-98.
- [3] QIAO Yuanxiu, CHENG Pengle. Forest fire smoke detection based on the motion path angle [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 212-217.
乔元秀,程朋乐. 基于运动路径角的林火烟雾图像检测探究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 212-217.
- [4] WANG Junbo, MA Zhuo, LI Yafei, et al. Influence of mechanical vibration on optical fire alarm system and its improvement measures [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 379-386.
王俊博,马卓,李亚飞,等. 机械振动对光学火灾预警系统的影响与改进措施[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58

- (23): 379-386.
- [5] LI Yafei, LIU Zhiwei, ZHANG Tianyu, et al. Development and application of near infrared laser carbon dioxide sensing system[J]. *Optical Journal*, 2020, 40(5): 0514003.
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0514003.
- [6] XI Tingyu, QIU Xuanbing, SUN Dongyuan, et al. Fast fire flame recognition algorithm based on multi-feature logarithmic regression[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(7): 1989-1993.
席廷宇, 邱选兵, 孙东远, 等. 多特征量对数回归的火焰快速识别算法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(7): 1989-1993.
- [7] WU Aiguo, DU Chunyan, LI Ming, et al. Smoke detection method based on mixed Gaussian model and wavelet transformation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, (8): 1622-1626.
吴爱国, 杜春燕, 李明, 等. 基于混合高斯模型与小波变换的火灾烟雾探测[J]. *仪器仪表学报*, 2008, (8): 1622-1626.
- [8] WANG J, WANG H. Tunable fiber laser based photoacoustic gas sensor for early fire detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 7(65): 1-4.
- [9] JIANG Yalong, GAI Li, WANG Jinjun. Photoacoustic compound fire alarm system for detecting particles and carbon monoxide in smoke[J]. *Fire Technology*, 2016, 52: 1255-1269.
- [10] REN Lijun, MA Bin, LIU Guohong, et al. Research progress of non-dispersive infrared sensor for gas detection[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(7): 922-928.
任丽君, 马斌, 刘国宏, 等. 气体非色散红外传感器研究进展[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(7): 922-928.
- [11] TANG Licheng, TAN Qiulin, MAO Haiyang, et al. Design of infrared multi-gas sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(2): 65-66.
唐力程, 谭秋林, 毛海央, 等. 红外多气体传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(2): 65-66.
- [12] XIONG Tao, GAO Ming. Mainstream NDIR breathing CO₂ monitoring system based on new light chamber structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 248-256.
熊涛, 高明. 新型光室结构的主流式NDIR呼吸CO₂监测系统[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 248-256.
- [13] MA Zhuo, LI Yafei, LU Yang, et al. Infrared carbon monoxide sensor system for early fire detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(5): 0530003.
马卓, 李亚飞, 卢洋, 等. 用于早期火灾探测的红外一氧化碳传感系统[J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0530003.
- [14] ZHAO Jing, ZHU Rongfeng, ZHANG Mengyuan, et al. Dual-channel pyroelectric infrared gas detector based on PMN-PT single crystals[J]. *Infrared*, 2021, 42(6): 7-11.
赵静, 朱荣峰, 张梦圆, 等. 基于PMN-PT单晶的双通道热释电红外气体探测器[J]. *红外*, 2021, 42(6): 7-11.
- [15] ZHOU Xinyu, DONG Yang, WANG Kunyang, et al. Design of high-precision temperature and pressure control system for spectral measuring instrument[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(3): 266-272.
周心禹, 董洋, 王坤阳, 等. 用于光谱测量仪器的高精度温压控制系统设计[J]. *量子电子学报*, 2020, 37(3): 266-272.
- [16] LUO Weiping, ZHOU Bo, CHEN Jun, et al. PT100-based temperature measurement system for low temperature vacuum freeze dryer[J]. *Modern Electronics Technique*, 2021, 44(18): 27-32.
罗维平, 周博, 陈军, 等. 基于Pt100的低温真空冷冻干燥机温度测量系统[J]. *现代电子技术*, 2021, 44(18): 27-32.
- [17] YAN Wanhong, ZHOU Yanwen, YU Di, et al. Temperature control system of semiconductor device and application for infrared gas detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0312002.
闫万红, 周言文, 余迪, 等. 面向红外气体检测的半导体器件温控系统及应用[J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 0312002.
- [18] WANG Mingtao, ZHOU Hua. Design of temperature control system combining model function and improved PID[J]. *Microprocessors*, 2022, 43(2): 51-55.
王明涛, 周骅. 模型函数结合改进PID的温控系统设计[J]. *微处理机*, 2022, 43(2): 51-55.

Temperature Control System of Non-dispersive Infrared Gas Detector in Low Temperature Environment

BO Tengfei^{1,2}, LI Yafei^{1,2}, LI Baolin^{1,2}, MA Zhuo^{1,2}, ZHENG Chuantao^{1,2}, WANG Yiding^{1,2}
(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)
(2 Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun 130012, China)

Abstract: In agricultural harvesting operations, agricultural fires can be induced due to various human or natural factors. Agricultural fires pose a great threat to agricultural production and the safety of life and

property, so it is imperative to accurately monitor agricultural fires. At every stage of fire, gas can be produced. So gas sensors have been developed rapidly in the field of fire detection. In case of a fire, the burning of crops will produce a large amount of carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂), which will lead to a rapid increase in the concentration of CO and CO₂ in the air. Real time monitoring of changes in the concentration of CO and CO₂ can give an alarm. A gas sensor based on Non-Dispersive Infrared (NDIR) has the advantages of high integration and low cost, which is conducive to miniaturization design, on-site detection and commercial promotion. Therefore, many studies on NDIR gas sensors have emerged. However, the reported NDIR sensors only show good performance under laboratory conditions, but often do not perform well in low temperature environments. The main reason is that the internal infrared thermoelectric detector is prone to temperature drift in low temperature environments, and it is difficult to work normally under low temperature conditions. In view of this phenomenon, a small temperature control system is designed for the infrared detector, and is applied to a NDIR CO₂ detector. Then the detector can be maintained at 21 °C in a low temperature environment at -40 °C. Finally the purpose of making the sensor work normally under low temperature environment is achieved.

Firstly, the detection principle of the infrared gas detector is introduced, and the relationship between harmonic signal and gas volume fraction is determined according to Lambert-Beer law. The system structure of the detector is analyzed, which is mainly composed of an electrical module, an optical module, an upper computer monitoring module and a detector temperature control module. Under a low temperature environment below -20 °C, the output signal from the detector has serious drift, which may even cause irreversible failure to the sensor. Then, the hardware circuit and software program of the temperature control system are designed according to the structure of the detector and the light source. The temperature signal collected by PT100 is converted into a digital signal through an analog-to-digital converter and is collected by the master controller. The sampling temperature is calculated to obtain the adjustment value, and then a heating film drive circuit is used to control the detector temperature. In the hardware part, the influence of the wire resistance on the temperature acquisition is eliminated, and a BUCK driver circuit is modeled. In the software program, both positive temperature and negative temperature are solved by different formulas, and the PID algorithm is improved. Finally, the temperature control system is integrated into the fire detector. Under the ambient temperature of -40 °C, the temperature is controlled from an initial temperature of 20 °C, and the response time to stabilize the detector temperature at 21 °C is 16 s. The stability of the temperature is 0.012 6 °C (1 σ). The response time and stability meet the temperature control requirements in low temperature environments. Under the condition of temperature control, the sensor is calibrated, and the first harmonic amplitude ratio of the voltage signals from the absorption channel and the reference channel obtained from the gas calibration experiment and the concentration of the standard gas are exponentially fitted to obtain an exponential fitting curve, with a goodness of fit of 99.852%. The stability of the detector is tested for 25 min using pure nitrogen (N₂) sample, and the measured concentration fluctuation range is $-28.128\ 76 \times 10^{-6} \sim 27.240\ 5 \times 10^{-6}$. Allan variance is introduced for sensor performance evaluation. When the averaging time is 0.25 s, the lower detection limit is $1.213\ 01 \times 10^{-6}$; when the averaging time is 114.75 s, the theoretical lower limit of detection can reach $4.822\ 5 \times 10^{-7}$. The experimental results show that the temperature control system can ensure the normal work of the fire detector in a low temperature environment, and has practical application value.

Key words: Fire detection; Gas absorption; Temperature control; Buck circuit; Newton iteration method; Incremental PID

OCIS Codes: 280.1740; 300.6340; 070.2590; 070.4790

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 20213201903), National Natural Science Foundation of China (Nos. 61960206004, 62175087), Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (No. 20200401059GX), Science and Technology Research Program of Department of Education, Jilin Province, China (No. JJKH20211088KJ), Key Research and Development Program of Changchun (No. 21ZGN24), Program for JLU Science and Technology Innovative Research Team (Nos. JLUSTIRT, 2021TD-39)