引用格式:田树炜,石峰伟,王懿,等. 乙二醇气体传感器恒温控制系统设计与实现[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):128-133. [TIAN S W, SHI F W, WANG Y, et al. Design and implementation of temperature control system for ethylene glycol gas sensor[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):128-133.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.250116

乙二醇气体传感器恒温控制系统设计与实现

田树炜[1],石峰伟[1],王　懿[1],邵婷婷[1,2*]

(1. 延安大学 物理与电子信息学院;2. 陕西省能源大数据智能处理省市共建重点实验室,陕西 延安 716000)

摘　要:为减小工作温度对乙二醇气体传感器检测精度的影响,设计了一款以STM32为核心的恒温控制系统。该系统以自制乙二醇气体传感器为气体信号采集模块,采用K型热电偶结合MAX31855实时采集传感器加热丝工作温度,并基于PID控制算法动态调节PWM输出,借助场效应管控制加热功率,实现对传感器工作温度的闭环控制。样机测试表明,将乙二醇传感器最佳工作温度100 ℃设为目标温度时,启用温控系统后传感器实际工作温度稳定在99.8 ℃(波动范围±3 ℃),温度控制相对误差为0.2%,明显优于未启用温控系统的情况。在稳定的工作温度下,10~20 μL/L乙二醇气体的测量相对误差由8.3%~31.1%减小至2.5%~15.6%,表明该系统能够有效抑制温度波动对传感器性能的影响,显著提升乙二醇气体检测精度。

关键词:恒温控制;STM32;PID算法;K型热电偶;乙二醇气体传感器

中图分类号:TP273　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0128-06

随着乙二醇在各行业中日益广泛地应用,其挥发性蒸汽对人体健康构成潜在威胁[1,2]。当前乙二醇检测常用化学分析法、光谱法和气相色谱法[3],这些检测手段普遍存在设备要求高、成本高、操作复杂等不足,而金属氧化物半导体(MOS)气体传感器凭借体积小、成本低、功耗低等优势,成为乙二醇检测的理想选择[4-6]。然而,MOS气体传感器的检测性能受工作温度影响显著[7],温度过高或过低均会降低其灵敏度,导致气体检测精度下降,此外实际应用中常用的直流电压控制加热丝方式,易受电压波动和环境变化等因素干扰,难以维持稳定的工作温度,进一步加剧了气体浓度检测的偏差[8],成为制约MOS传感器在乙二醇检测应用中的瓶颈。针对气体传感器温度控制问题,孙陆洋[9]以STM32微处理器为核心,引入模糊PID算法构建实验室气敏传感器测试系统,进行温度闭环控制与数据采集,结果表明,在该系统控制下,商用MQ-3气敏传感器的工作温度仍在设定温度±10 ℃范围内波动,较大的工作温度波动限制了检测精度的进一步提升;裴昱[10]采用硬件补偿与模块化架构,结合积分分离PID算法抑制温度干扰,搭建红外CO_2气体传感器系统,该系统针对0~2 003 μL/L浓度范围的CO_2气体,选取304 μL/L、487 μL/L、708 μL/L、896 μL/L、1 100 μL/L、1 516 μL/L、2 003 μL/L浓度气体进行测试,在复杂温湿度环境下将检测误差控制在±105 μL/L以内,缺乏小浓度检测结果。鉴于现有研究在乙二醇小浓度检测场景中存在温度控制精度低的问题,本文针对自制小浓度乙二醇气体传感器,设计了一套恒温控制系统,将传感器加热丝的最佳工作温度控制在100 ℃左右,并对10~20 μL/L乙二醇气体进行测量,验证最佳工作温度对乙二醇气体传感器测量精度的影响,为相关场景安全监测提供技术支撑。

收稿日期:2025-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(62564014)

作者简介:田树炜(2001—),女,硕士研究生,主要从事半导体传感器的设计与实现研究。

*通信作者　E-mail:shaotingting@yau.edu.cn

1　系统总体设计

本文研究的乙二醇气体传感器是自制MOS气体传感器，通过乙二醇气体分子在传感材料表面的吸附与电子转移，改变其电导率，进而实现对目标气体浓度的检测。构建传感器时，先将传感材料均匀地涂在氧化铝陶瓷管表面，再将Ni-Cr加热线圈穿入陶瓷管内部形成6个引脚，最后将引脚锡焊于绝缘底座，通过给加热丝提供不同直流加热电压，使其温度稳定在传感器相应的最佳工作温度附近。

工作温度是评估传感器性能的关键指标。一般情况下，传感器响应值随工作温度升高呈现先增后减的趋势，故传感器的最佳工作温度定义为其对目标气体响应值达到峰值时的温度，该温度过高会限制应用场景并增加能耗。当前现有乙二醇传感器的最佳工作温度普遍较高（≥200 ℃），而本文构建的玉米秸秆NiO-ZnO异质结乙二醇传感器，最佳工作温度为100 ℃。因MOS传感器气敏性能对工作温度存在强依赖性，温度偏离最佳工作温度区间会显著降低响应并增大误差，故本文针对自制乙二醇气体传感器，设计其工作温度的恒温控制系统以保障最佳工作温度的稳定。

本系统以STM32微处理器为核心，设有未启用温控系统（模式0）和启用温控系统（模式1）两种工作模式。系统主要由气体信号采集模块、温度信号采集模块、核心控制模块、温度控制模块和信息显示模块组成，各模块协同实现传感器恒温控制与乙二醇气体浓度检测。系统框图如图1所示。

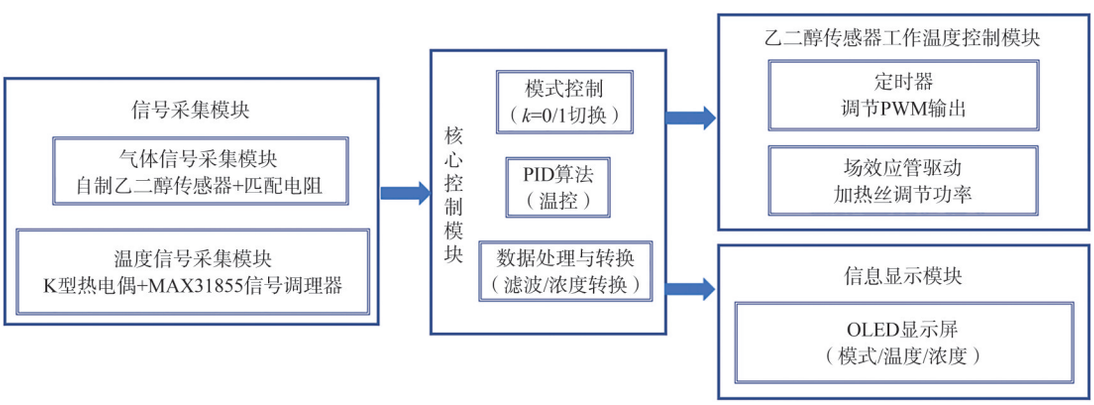


图1　系统框图

2　系统硬件设计

本系统以STM32F103C8T6微处理器为核心控制单元，采用自制乙二醇气体传感器为气体信号采集模块核心，搭配470 kΩ匹配电阻构建气体信号采集电路；采用K型热电偶结合MAX31855构成传感器工作温度信号采集单元；采用场效应管为驱动核心，配合加热丝构建温度调节电路，基于PID算法动态输出PWM信号，通过GPIO引脚控制场效应管的导通与断开，以控制加热丝的温度；采用OLED显示屏实时显示系统的工作模式、传感器的工作温度和气体检测浓度。其总体电路原理图如图2所示。

2.1　控制模块

控制模块的核心采用STM32F103C8T6微处理器，该芯片以ARM Cortex-M3为内核，工作频率最高可达72 MHz，配备64 KB FLASH和20 KB RAM，集成12位精度ADC，同时提供USART、SPI、I^2C、USB等多种外设接口和51个通用GPIO引脚，支持多种通信协议，可灵活连接温度传感器、显示模块等外部设备[11]，完全满足本系统设计需求，单片机最小系统电路如图2A所示。

2.2　信号采集模块

2.2.1　乙二醇气体浓度采集模块

本系统以自制乙二醇气体传感器为核心检测元件，该传感器的制备流程如下：以玉米秸秆为生物模板，将其引入NiO-ZnO异质结中合成纳米传感材料；采用刷涂法将该材料均匀涂覆于陶瓷管外表面形成传感薄膜[12]，经老化台静置老化[13]数日后完成传感器的制作。通过WS-30B[14]气敏测试系统对其进行气敏性能测试，结果表明该传感器的最佳工作温度为100 ℃，且对乙二醇气体具有良好的选择性。

结合传感器在气敏测试系统中测得的电阻值，选择470 kΩ电阻作为电路的匹配电阻，与传感器串联构成信号输出电路，如图2B右侧电路所示。匹配电阻的模拟电压U_{out}接入STM32的PA1引脚进行模

数转换(ADC)处理。当乙二醇气体与传感器敏感材料发生氧化还原反应时,材料电阻随之变化,进而使U_{out}发生改变。传感器的工作温度由加热丝的供电电压提供,未加温控系统时(模式0),依据WS-30B测试系统参数,100 ℃对应加热电压2.2 V;加温控系统时(模式1),供电电压设为5 V。故本系统加热丝供电电压由可调电压源分别根据不同模式提供2.2 V和5 V。

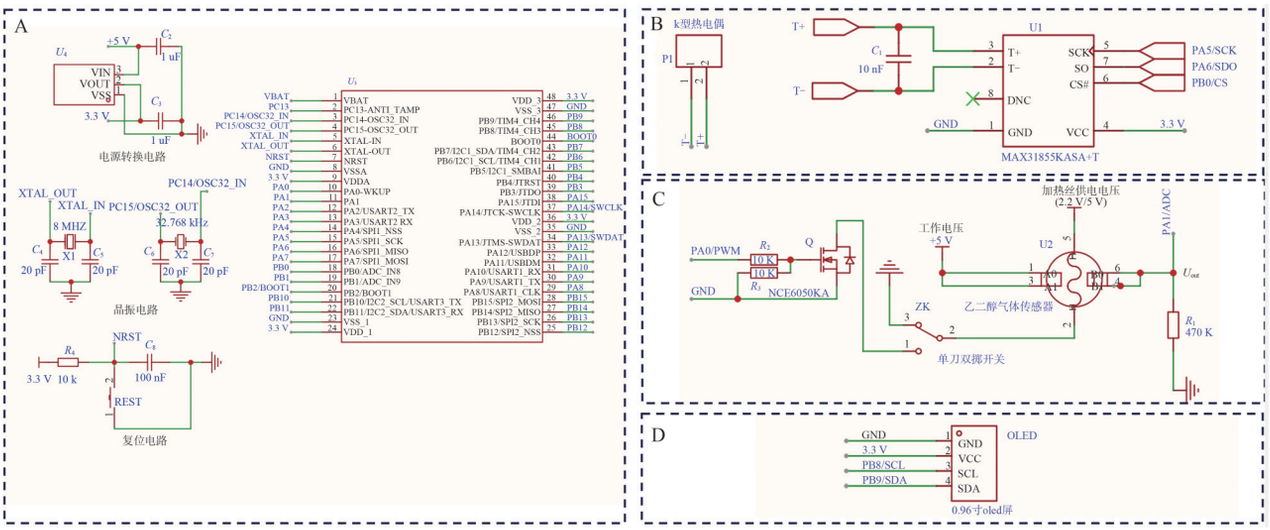


图2 乙二醇浓度测量及传感器恒温控制系统电路原理图

注:A. 单片机最小系统电路图;B. 乙二醇传感器及其工作温度控制电路原理图;C. 温度采集模块原理图;D. 信息显示模块原理图。

2.2.2 温度采集模块

温度采集模块采用K型热电偶结合MAX31855构成。K型热电偶具有灵敏度高、线性好和测温范围宽等特点,可精准实时采集传感器的工作温度[15],其输出的电压信号能直接送入MAX31855进行处理。MAX31855作为专用热电偶信号处理芯片,集成了信号放大、冷端补偿及模数转换功能[16],可将热电偶输出信号转换为数字量,并通过SPI通讯传输至STM32。采用SPI通信方式可有效降低干扰,提高温度采集的稳定性与可靠性,其电路如图2C所示。

2.3 乙二醇传感器工作温度控制模块

本系统以场效应管为驱动核心,搭配传感器加热丝构成温度控制电路。传感器加热丝通过引脚连接PWM信号输出端,PWM信号经2个10 kΩ电阻分压后接入场效应管栅极,以此控制其导通状态;漏极经单刀双掷开关接传感器加热丝供电电压,源极接地。单刀双掷开关用于实现模式切换,当开关拨至3时,为未启用温控系统(模式0),加热丝供电电压为2.2 V;当开关拨至1时,为启用温控系统(模式1),加热丝供电电压为5 V,此时加热丝实际功率P与PWM占空比D($0\leqslant D\leqslant 1$)及最大加热功率P_{max}满足式(1)所示的对应关系。

$$P = P_{max} \times D。 \quad (1)$$

通过调节PWM占空比可调控加热功率,进而实现对传感器工作温度的控制,电路如图2B所示。

2.4 显示模块

显示模块选用0.96寸OLED屏构建硬件电路。OLED屏[17]凭借高分辨率点阵,能够清晰呈现系统工作模式、传感器工作温度和乙二醇气体检测浓度数据。该模块的GND引脚接地,为电路提供稳定的电位基准;VCC引脚接入3.3V电源,为模块运行提供工作电压;SCL引脚作为I^2C通信的时钟线,用于同步数据传输的时序;SDA引脚作为I^2C通信的数据线,承担数据的串行传输任务。SCL与SDA引脚共同构成模块和主控芯片之间的通信链路,从而实现数据的双向交互与传输,电路连接如图2D所示。

3 系统软件设计

本系统采用的开发环境为Keil MDK,该平台支持基于ARM架构的嵌入式程序开发,可通过J-Link实现程序的调试与烧录,采用C语言进行程序编写。

乙二醇浓度测量及恒温控制系统的总体程序设计流程为:1)初始化配置STM32芯片;2)利用K型热电偶结合MAX31855采集传感器工作温度,同时通过ADC采集匹配电阻的电压,对该电压信号进行均值滤波处理后,基于测试系统WS-30B所测得的数据,得到该传感器匹配电阻电压-浓度的函数

关系式，根据测量的匹配电阻电压，测得乙二醇气体的浓度值；3）在温控模式下，PID控制器依据传感器目标工作温度与实际工作温度偏差调节定时器2的PWM占空比来控制加热功率；4）通过OLED屏实时显示系统工作模式、传感器温度、气体检测浓度信息，借助串口输出数据进行调试，循环末尾以10 ms延时来保障系统稳定运行，系统程序流程图如图3所示。

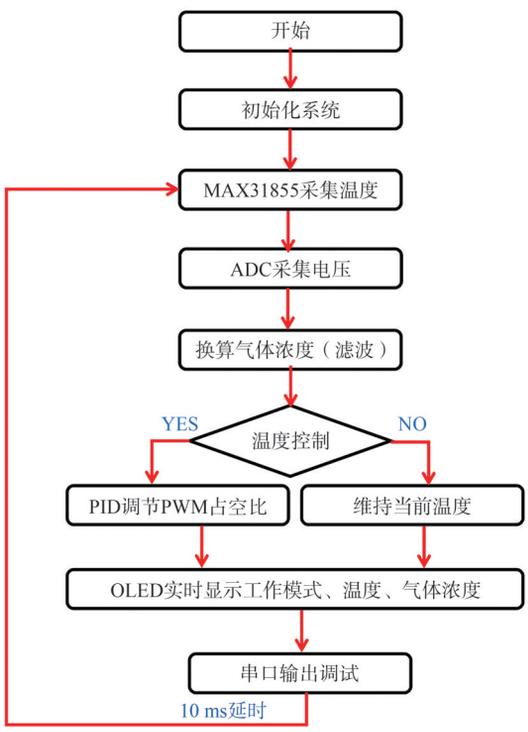


图3　温控系统软件流程图

PID算法作为现代控制系统中应用广泛的控制方法，其工作机制如下：首先对比计算被控对象的期望值与实际反馈值之间的偏差，将该偏差信号输入控制器后，经比例、积分、微分3个环节的协同运算，生成实际控制输出量[18]。在此基础上，通过多次反馈循环持续修正偏差，使误差逐步收敛减小，进而提升系统的整体稳定性。这种控制机制既考虑了当前偏差的即时影响，又兼顾了偏差变化趋势及累积效应。通过合理配置参数，可实现对被控对象精准控制，满足系统对精度的需求。

本系统采用积分分离型PID算法实现恒温控制，其以设定温度目标值与实际温度值之间的偏差$e(t)$作为输入信号，此信号经控制器的比例、积分、微分3个环节线性组合后形成控制输出量$u(t)$，其数学表达式[19]为

$$u(t)=k_p\left[e(t)+\frac{1}{k_i}\delta\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau+k_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right],\quad(2)$$

其中，k_p为比例系数，k_i为积分时间参数，k_d为微分时间常数，t为控制过程中的时间变量，δ为积分分离系数。

系统在初始化阶段完成PID控制器参数配置（k_p=0.5，k_i=0.1，k_d=0）及输出范围限定（0~100%），同时在首次进入温控模式时预设20%的PWM占空比，避免因PID输出未初始化导致的加热异常。主循环中，系统每10 ms通过MAX31855采集实际温度并计算与目标温度的偏差：当偏差较大时，将积分分离参数δ设为0，以防止系统超调量过大引发振荡；当偏差缩小至特定阈值时，将积分分离参数δ恢复为1，以清除系统的静态误差，从而提高恒温精度。随后通过调用PID_Update函数生成控制量，将其转换为PWM占空比实现对加热元件的调节。此外，系统通过OLED显示屏实时呈现工作模式、传感器工作温度及浓度数据，并借助串口输出调试信息，为控制过程的监测与优化提供支持。

4　系统测试

MCU上电并完成IO口初始化后，系统会将温控系统启用前后的温度上传至OLED屏进行实时显示，测试结果如表1所示。未启用温控系统（模式0）时，传感器工作温度漂移显著，工作温度波动范围为±6 ℃，待状态稳定后对20组温度数据取均值，得实际工作温度为94.2 ℃，与理论值（100 ℃）相比，绝对误差为5.8 ℃，相对误差达5.8%；启用温控系统（模式1）后，系统通过PID算法调节PWM输出控制加热丝功率，传感器工作温度波动范围缩小至±3 ℃，同样待状态稳定后对20组温度数据取均值，得到工作温度为99.8 ℃，此时绝对误差缩小至0.2 ℃，相对误差同步降至0.2%。基于积分分离型PID算法的温控系统可显著提升传感器工作温度的稳定性与准确性，大幅减小温度波动及误差，充分验证了该方案的有效性。

表1　温控系统启用前后传感器数据对比表

测量模式	测量参数			
	实际温度值/℃	理论温度值/℃	绝对误差/℃	相对误差/%
未启用温控系统	94.2	100.0	5.8	5.8
启用温控系统	99.8	100.0	0.2	0.2

为验证最佳工作温度对乙二醇气体传感器测量精度的影响，实验在室温25 ℃、相对湿度30%的

环境中,对10~20 μL/L浓度的乙二醇气体进行测量。设定传感器最佳工作温度100 ℃为温控目标值,选用10 μL/L、12 μL/L、14 μL/L、16 μL/L、18 μL/L、20 μL/L的标准气态乙二醇(通过测试仪配套的恒温加热板加热液态乙二醇至沸点蒸发制得)作为样本,以实际注入浓度为基准,通过采集稳定后的20个数据取平均,作为该次测量的乙二醇浓度。对比两种工作模式下的测量精度(见表2和3):在未启用温控系统(模式0)时,传感器受温度漂移影响,浓度测量绝对误差范围为0.9~5.6 μL/L,相对误差范围达8.3%~31.1%;而启用温控系统(模式1)后,传感器工作温度稳定在100 ℃附近(波动范围±3 ℃),精度显著提升,绝对误差为0.3~2.8 μL/L,相对误差减小到2.5%~15.6%,样机显示如图4所示。上述结果表明,传感器工作温度对乙二醇气体浓度检测精度具有重要影响,本研究设计的恒温控制系统可有效抑制温度漂移干扰,提升检测准确性。

尽管启用温控系统后传感器测量精度得到提升,但仍存在一定测量误差,这与环境湿度有关,因为水分子在传感材料表面的吸附会改变表面载流子浓度及气体反应过程,从而引起传感器输出偏移。

表2 未启用温控系统时传感器浓度测量数据及误差分析

实际浓度值/(μL/L)	未加温控浓度值/(μL/L)	绝对误差/(μL/L)	相对误差/%
10.0	10.9	0.9	9.0
12.0	11.0	1.0	8.3
14.0	11.7	2.3	16.4
16.0	12.1	3.9	24.4
18.0	12.4	5.6	31.1
20.0	14.5	5.5	27.5

表3 启用温控系统后传感器浓度测量数据及误差分析

实际浓度值/(μL/L)	加入温控浓度值/(μL/L)	绝对误差/(μL/L)	相对误差/%
10.0	10.3	0.3	3.0
12.0	11.7	0.3	2.5
14.0	13.5	0.5	3.6
16.0	14.6	1.4	8.8
18.0	15.2	2.8	15.6
20.0	17.3	2.7	13.5



图4 10~20 μL/L乙二醇气体浓度下样机工作界面图:A.未启用温控系统(模式0);B.启用温控系统(模式1)

5 结束语

本文以STM32微处理器为核心,构建了一套恒温控制系统,实现了乙二醇气体传感器工作温度的恒温调控与气体浓度检测。系统采用K型热电偶与MAX31855实时采集温度信号,并基于PID算法调节PWM输出控制加热功率,使传感器工作温度稳定在最佳检测区间内。实验结果表明,该系统能够降低温度波动对检测结果的影响,有效改善了乙二醇气体浓度的检测精度,但在较高浓度区间仍存在一定误差。后续研究将基于实验数据构建湿度补偿模型,对传感器输出进一步修正,以优化系统整体检测性能。

参考文献:

[1]SU C, ZHANG L, HAN Y, et al. Controllable synthesis of heterostructured CuO-NiO nanotubes and their synergistic effect for glycol gas sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 304: 127347.

[2]GENG W, LUAN T, CHEN X, et al. High responsive ethylene glycol gas sensor based on CuO@Ga_2O_3 p-n heterojunctions materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1038: 182693.

[3]WANG X, ZHANG Y, YANG B, et al. Highly open skeleton In_2O_3/ZnO as a high-performance formaldehyde sensing material for gas sensors[J]. Materiala today Communications, 2025, 42: 111495.

[4]WANG X, ZHANG W, WANG X, et al. Heterostructure engineering of NiO foam /In_2S_3 film for high-performance ethylene glycol gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 392: 134110.

[5]LEE J, KIM Y, LEE W. Synergetic crystal phases of SnO_2/

NiO heterostructure in an interconnected morphology for chemiresistive formaldehyde sensors[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2024,404:135257.
[6]LI S, ZHANG W, WANG C, et al. Au nanoparticles decorated $ZnIn_2S_4/WO_3$ core-shell heterostructures as highly sensitive and selective ethylene glycol gas sensors [J]. Journal of Alloys and Compounds,2024,998:175027.
[7]HAN L,MA S,XU X,et al. Rough $SmFeO_3$ nanofibers as an optimization ethylene glycol gas sensor prepared by electrospinning[J]. Materials Letters,2020,268:127575.
[8]LI Y,YUAN Z,ZHU H,et al. Study on the impact of minor ambient temperature variations on the gas sensing performance of zinc cobaltate semiconductor metal oxide sensor for toluene detection[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2025,433:137570.
[9]孙陆洋. 实验室气敏传感器测试系统的研制[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2023.
[10]裴昱. 带恒温低湿控制功能的红外CO_2气体传感器系统研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2021.
[11]程雪敏. 基于STM32F103C8T6的恒温智能控制系统设计[J]. 电子制作,2023,31(19):26-29.
[12]王佳伟,邵婷婷,董军堂. 乙二醇气体传感器的设计和应用[J]. 造纸科学与技术,2025,44(4):32-36.
[13]ZHOU Y T,JIA X H,QIAO L,et al. Highly sensitive and moisture resistance ethanol gas sensor based on ZIF-8 derived ZnO@C-ZIF composite[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2025,444:138481.
[14]寇会蓉. 基于MOF衍生的In_2O_3基气体传感器的构建与传感性能研究[D]. 延安:延安大学,2024.
[15]陈宇燕,老盛林,钟国谋. 一种K型热电偶温度控制系统的研究[J]. 大众科技,2022,24(4):22-26.
[16]魏元,吴璋,徐岱. K型热电偶冷端补偿研究[J]. 计测技术,2011,31(6):43-44+58.
[17]徐思燕,冉彬. 基于窄带物联网的湖水水质监测系统设计[J]. 物联网技术,2025,15(11):13-17.
[18]康日晖. 基于改进PSO-PID算法的四轴飞行器飞控系统研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.
[19]李海,罗佳. 基于改进PID算法的恒温控制系统设计[J]. 制造业自动化,2022,44(4):66-69.

[责任编辑　毕　伟]

Design and implementation of temperature control system for ethylene glycol gas sensor

TIAN Shuwei[1], SHI Fengwei[1], WANG Yi[1], SHAO Tingting[1,2*]

(1. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University; 2. Key Laboratory Jointly Built by Shanxi Provinces and Cities of Intelligent Processing of Big Energy Data, Yan'an 716000, China)

Abstract: To mitigate the influence of operating temperature on the detection accuracy of the ethylene glycol gas sensor, a thermostatic control system based on STM32 microcontroller was developed. The system employs a self-fabricated ethylene glycol gas sensor as the gas signal acquisition unit, while real-time monitoring of the sensor's temperature is achieved using a Type K thermocouple combined with a MAX31855. A PID algorithm is implemented to dynamically adjust the PWM output, which drives a field-effect transistor to regulate the heating power, thereby achieving precise closed-loop temperature control. Experimental results demonstrate that when the target temperature is set to the sensor's optimal operating temperature of 100 ℃, with the temperature control system activated, the temperature stabilizes at 99.8 ℃ with fluctuations of ±3 ℃, resulting in a temperature control relative error of only 0.2%. At the stable working temperature, the relative measurement error of 10~20 μL/L ethylene glycol gas is reduced from 8.3%~31.1% to 2.5%~15.6%. These results demonstrate that the system can effectively suppress the influence of temperature fluctuations on sensor performance and significantly improve the accuracy of ethylene glycol gas detection.

Key words: constant temperature control; STM32; PID algorithm; type K thermocouple; ethylene glycol gas sensor