

引用格式: LIU Xu, SUN Peng-shuai, YANG Xi, *et al.* High Precision Temperature Control Design for TDLAS Gas Detection System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1230002

刘旭,孙鹏帅,杨曦,等.用于 TDLAS 气体检测系统的高精度温控设计[J].光子学报,2020,49(12):1230002

用于 TDLAS 气体检测系统的高精度温控设计

刘旭^{1,2,5},孙鹏帅^{1,3},杨曦^{1,2},庞涛^{1,3},夏滑^{1,3},吴边^{1,3},张志荣^{1,2,3,4},
舒志峰⁶,徐启铭⁷

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

(3 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院环境光学与技术重点实验室,合肥 230031)

(4 先进激光技术安徽省实验室,合肥 230037)

(5 蚌埠学院 电子与电气工程学院,安徽 蚌埠 233030)

(6 合肥师范学院 物理与材料工程学院,合肥 230601)

(7 云林科技大学 环境安全工程系,台湾 云林 64002)

摘 要:针对气体腔体的结构和光学部件性质,设计了恒温稳定控制箱体的电路精确控制方法,实现了箱体内部多温度状态的高精度稳定控制.该温度控制系统可用于研究气体温度变化与气体吸收谱线参数变化的规律,提高气体浓度检测精度.设计了高精度恒流源、两路温度采样模块及调理电路、A/D 模数转换电路和半导体致冷器控制模块等在内的硬件电路系统,开发相应的系统软件,保证光腔通光部分温度的均匀性.同时根据实际控温箱体参数,以比例积分微分控制算法为核心,精密控制光腔内部的温度变化,实现了温控箱内部温度变化控制波动最优为 $\pm 0.009\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且标准差低于 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$,并采用浓度为 2.00% 的 CO_2 标准气体分别进行了 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 七个温度状态下的温度控制实验,测量结果验证了温控系统的稳定性.

关键词:可调谐二极管激光吸收光谱;温度控制;恒流源;浓度测量;PT100

中图分类号:O433.1;TH212.9

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1230002

High Precision Temperature Control Design for TDLAS Gas Detection System

LIU Xu^{1,2,5}, SUN Peng-shuai^{1,3}, YANG Xi^{1,2}, PANG Tao^{1,3}, XIA Hua^{1,3}, WU Bian^{1,3},
ZHANG Zhi-rong^{1,2,3,4}, SHU Zhi-feng⁶, SHU Chi-min⁷

(1 Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Material, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(4 Advanced Laserer Tenonology Laboratory of Anhui Province, Heifei 230037, China)

基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFC0805004),国家自然科学基金(Nos. 11874364,41877311,41775128, 41773100),中国科学院对外合作重点项目(No. GJHZ1726),安徽省重点研究与开发计划项目(Nos. 201904c03020005,1804a09020097),安徽省科技重大专项(No.18030901054),安徽省高校自然科学研究重大项目(No. KJ2017ZD56),安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(Nos. gxyqZD2018072, gxyq2020061),中国科学院合肥物质研究院院长基金(No. YZJJ2020QN8)

第一作者:刘旭(1983—),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为光电测控和嵌入式开发. Email:liuxu100@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):张志荣(1981—),男,副研究员,博士,主要研究方向为环境光学检测技术、光纤传感技术、激光诱导击穿光谱技术.

Email:zhangzr@aiofm.ac.cn

收稿日期:2020-05-25;录用日期:2020-09-08

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

(5 School of Electronic and Electrical Engineering, Bengbu University, Bengbu, Anhui 233030, China)

(6 School of Physics and Materials Engineering, Heifei Normal University, Heifei 230601, China)

(7 Department of Safety Health and Environmental Engineering, Yunlin University of Science and Technology, Yunlin, Taiwan 64002, China)

Abstract: According to the structure of gas cavity and the properties of optical components, an accurate circuit control method of constant temperature and stability control box is designed, and the high-precision stability control of multi-temperature state inside the box is realized. The temperature control system can be used to study the variation of gas temperature and gas absorption spectrum parameters, and improve the detection accuracy of gas concentration. The hardware circuit system including high-precision constant-current source, two-channel temperature sampling module and conditioning circuit, A/D analog-digital conversion circuit and semiconductor refrigerator control module is designed. The corresponding system software is developed to ensure the uniformity of the temperature of the optical cavity. According to the actual temperature control box parameters, with the proportional integral differential control algorithm as the core, the temperature change inside the optical cavity is precisely controlled, realizing the optimal temperature change control fluctuation inside the temperature control box is ± 0.009 °C and the standard deviation is lower than 0.006 °C. Temperature control experiments are carried out under seven temperature states of 16 °C, 20 °C, 24 °C, 28 °C, 32 °C, 36 °C and 40 °C respectively using CO₂ standard gas with a concentration of 2.00%. The stability of the temperature control system is verified through the measurement results.

Key words: Tunable diode laser absorption spectroscopy; Temperature control; Current source; Concentration measurement; Temperature sensor

OCIS Codes: 300.1030; 140.3600; 120.6780; 130.6010

0 引言

随着我国经济和工业迅速发展,环境监测显得越来越重要,对气体监测也有了更广泛的需求^[1-3].气体检测技术在大气环境、汽车尾气、工业排放气体、智慧城市监控等多个领域得到了广泛的应用,同时对气体的在线检测技术也提出更高的要求^[4-6].可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术具有高灵敏度(ppbv级)、高响应(ms级)、高光谱分辨率、非接触式等特性,成为最具有代表性的痕量气体检测方法^[7-9].基于TDLAS技术的气体检测系统通常是信号源和驱动电路驱动分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser,DFB)产生调制信号,然后通过气体吸收后解调出的信号谱线峰值来反演待测气体浓度,根据气体状态方程可以看到当其他参数不变时,反演浓度直接受气体温度的影响^[10-13].但在实际测试和国家标准中,往往标注的都是常温常压的值,而忽略了气体温度这个变量的重要参数.比如CO₂气体,通过HITRAN数据库查询,在1579.57 nm处的吸收谱线,如果温度由296 K增加1 °C变化到297 K,吸收谱线强度变化幅度将是0.58%.而且根据朗伯比尔定律可知,透射光强除了与气体浓度有关外,也是气体温度的函数;除此之外,在测试系统中,光学腔是一个光学与机械的精密结合的结构,温度的变化同样会引起光学腔发生微弱形变,进而影响光路,对测量结果引进不确定因素,因此稳定的温度检测环境,是气体浓度高灵敏度检测的必要前提.

在气体温度对浓度反演结果的影响及修正方面,已有科研人员进行了相关研究.张志荣等^[14]通过实验证实了温度变化对最终的浓度测量有较大影响,并通过经验修正公式和理论修正公式对检测时的温度影响进行了修正.束小文等^[15]研究了温度对HCl浓度测量的影响并对温度补偿方法做了探索得到一个经验公式,其合理性得到实验验证.赵燕杰等^[16]以CH₄为例简单说明了多个温度设定状态下浓度的变化,未涉及处理及修正过程.曹珂等^[17]在衰荡光腔温度控制方面开展了一些研究,并通过实验在31 °C时实现了0.05 °C的波动控制,温度变化标准差不超过0.01 °C,能有效提高测量装置的稳定性.以上研究结果一方面说明了气体检测中温度控制的重要性,另一方面也看出了经验修正的局限性:对于不同应用领域、不同实验环境所采用的数学模型和经验公式都要反复实验推导论证,且不能从根源上解决温度变化引起的测量误差.

本文从腔体的光机结构出发,基于STM32单片机设计了一套用于TDLAS系统中吸收池的光学和机械结构的高精度温度恒定控制系统.系统设计了1 mA的稳定恒流源用于双路传感器采集光机结构的环境温

度变化,并设计了信号调理电路将温度的模拟信号转换为数字信号传送给控制系统,通过比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)算法对执行单元的温度控制模块进行精确控制,实现了温控箱内部温度变化波动最优达到 $\pm 0.009\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准偏差在各温度段均低于 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$.为了测试温控箱体系统的稳定度,分别在 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 七个温度状态对浓度为 2.00% 的 CO_2 标准气体的温度依赖性进行实验,验证高精度的温控系统可以从根本上解决气体检测中温度对浓度测量的影响.

1 方案设计

高精度温度控制系统主要由最小系统、传感器采集、对象控制、人机交互、电源管理、通信接口六个单元构成,系统的总体结构如图1所示.最小系统单元采用STM32F407最小系统作为主控.传感器采集单元是分布式安装在光腔上的两个高精度温度传感器,通过它们可以采集到光机结构的环境温度模拟量,然后再通过处理和信号调理电路以及数模转换器最终输出一个数字信号.对象控制单元中输出的温度数字信号被送入嵌入式系统,依靠程序中改进的数字比例积分微分控制算法,比较温度传感器的实时反馈电压值与设定值之间的差值,利用该反馈差值进行动态调整,并通过对象控制单元完成对执行机构的控制.对象控制单元的执行机构主要包括半导体致冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)和扰流风扇,TEC是一种半导体热能转换装置,依靠对象控制单元输出脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号驱动TEC,来改变它电流的方向和大小,对光机结构所在的箱体内部环境进行加热和冷却,直到达到一种相对稳定的动态平衡状态,从而保证光机结构的稳定性,同时实现腔体内部气体的温度稳定性,避免气体浓度测量的温度依赖性.人机交互单元包含LED指示灯、按键和OLED显示部分,LED指示灯用以显示执行单元TEC的加热或制冷状态,按键用以设置系统相关参数,显示部分直观反映系统工作情况.通信接口采用CH340芯片利用RS232串行通信与上位机Labview软件进行数据通讯.

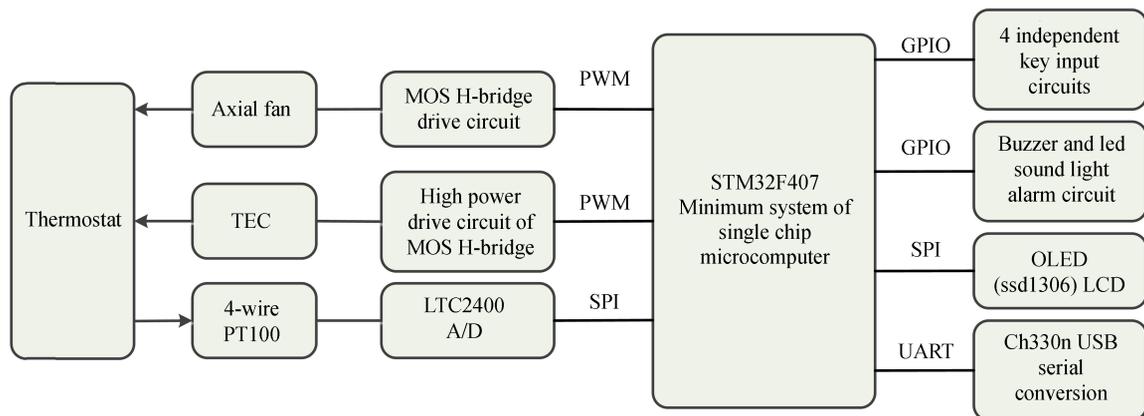


图1 系统设计方案

Fig.1 System design scheme

2 系统设计

2.1 控制器硬件电路设计

2.1.1 恒流源驱动

为实现对温度的准确测量和保证系统的精度及稳定度,恒流源的设计至关重要.通过恒流源提供的稳定电流与传感器采集到的代表温度变化的模拟量阻值就可以转化为反馈电压差值,方便后期的处理和对控制量的反馈.本文采用Texas Instruments公司的LMP7704MT,它具有很低的输入偏置电流、输入电流噪声和输入电压噪声,是传感器应用电路的理想选择.如图2所示,利用两个运算放大器就可以构建一个自举电流源,精度可达飞秒级的 $1\text{ mA}(I=V_{\text{ref}}/R_{67})$ 电流源.

图2中 V_{ref} 基准电压由Analog Devices公司的AD780提供,AD780是一种超高精度带隙基准电压源,设计中选择型号为AD780BN,提供精度为 $2.5\text{ V}\pm 1\text{ mV}$ 的输出,它具有低初始误差、低温度漂移和低输出噪

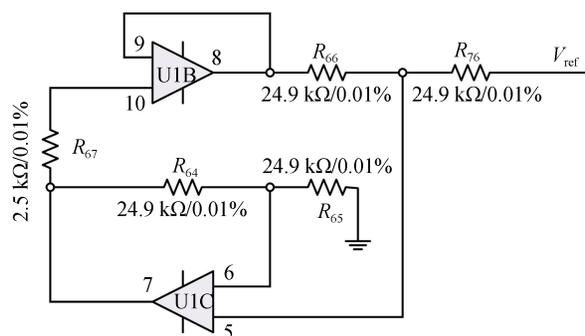


图2 自举电流源

Fig.2 Bootstrap current source

声特性,最大温漂为 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,完全可以满足系统要求.因为设计的是恒流源,所以输出值肯定会随负载的变化而变化,这就会影响恒流源本身的稳定性.为了保证恒流源输出值的稳定,同时为了提高系统精度,5个电阻 R_{64} 、 R_{65} 、 R_{66} 、 R_{67} 、 R_{76} 要尽量选择失配小且方向一致的电阻,这里选择精度为0.01%且温漂小的同批次高精度低温漂电阻.

2.1.2 温度采集及调理电路

作为温度为反馈量的闭环系统设计,温度传感器的选择至关重要.设计选用了稳定度、测量精度都很高的铂电阻,理论上可以达到稳定度0.1%的要求.ITS-90国际温标也采用了铂电阻作为基准测试仪器.本设计中选用的是A级铂热电阻PT100,它的阻值会随着温度上升而近似匀速地增长,在 0°C 时阻值为 $100\ \Omega$,在 100°C 时阻值为 $138.5\ \Omega$.如图3所示,它们之间的特性曲线并不是一条直线,而是由两条多项式构成的曲线,可用式(1)分段表示为

$$R_t = \begin{cases} R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] & -200 < t < 0^{\circ}\text{C} \\ R_0 (1 + At + Bt^2) & 0 \leq t < 850^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_t 为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值, R_0 为 0°C 时的阻值.其中 A 、 B 系数通过选用3个分别 0°C 、 100°C 、 200°C 对应的万分之一低温漂高精度电阻整机调试时实验测定.

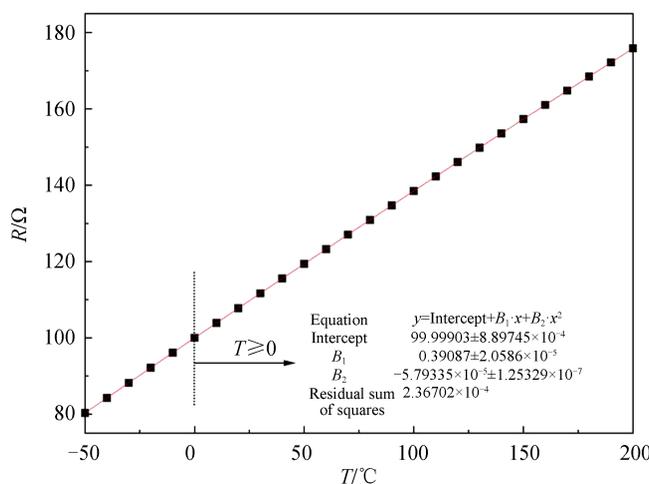


图3 PT100电阻-温度特性曲线

Fig.3 PT100 Resistance-temperature characteristic curve

PT100有两线制、三线制和四线制三种引线连接方式.本方案采用如图4所示改进式的两路PT100四线制接线方式,在PT100的两侧分别接两根补偿线,是一种高精度的测温方法.其中铂电阻一端的导线连接1 mA的恒流源将温度变化时铂电阻的变化转变成电信号再传送到下一级.这种连接方式可以将引线电阻的影响基本消减,可用于本方案的高精度测温和控制.另外在实验中发现恒流源的输出电流选择也很重要,

太大会导致铂电阻过热而给测量带来误差;太小又会使产生的微弱信号值太低后期不容易处理,最终选择 1 mA 作为恒流源的输出值.图 4 中对通过恒流源经过 PT100 采集到的微弱信号经过 RC 滤波,去除高频干扰后通过第一级运放采集到 100~138 mV 的电压信号,再通过第二级运放放大 10 倍获得 1~1.5 V 的电压信号送到由 LTC2400 构成的 A/D 采集电路完成模数转换.

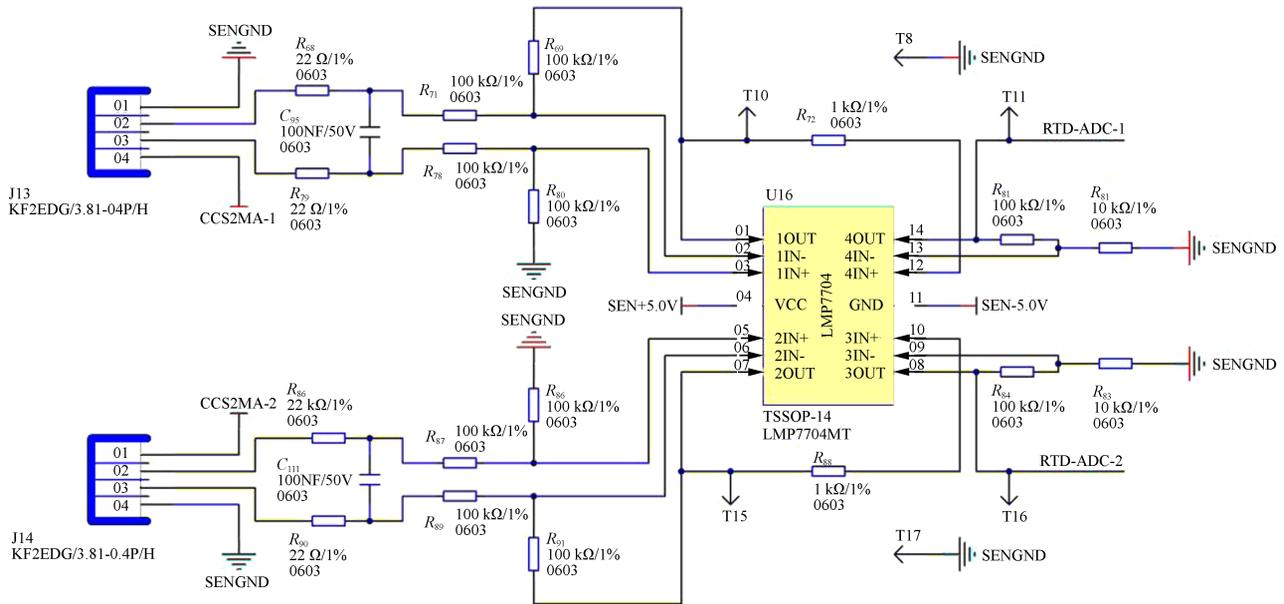


图 4 双通道温度采集及调理电路

Fig.4 Dual channel temperature acquisition and conditioning circuit

2.1.3 TEC 驱动电路

TEC 的工作原理是基于珀尔帖效应,其主要构成是经过特殊处理的 P-N 结.选择 TEC 作为执行机构来调整温度,主要是因为可以通过改变电流方向方便地实现加热和制冷功能,使 TEC 成为热源或者热泵,并且它是真正的实现了加热和制冷的双向控制,没有死区.图 5 是一种典型的 TEC 的温控系统结构.

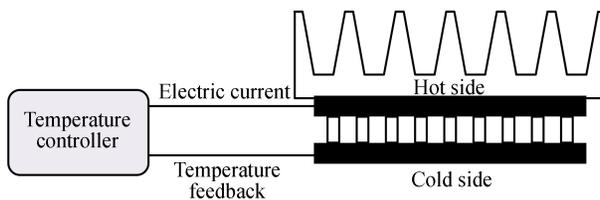


图 5 TEC 温控系统

Fig.5 TEC temperature control system

图 5 中控制电路部分采用了两路 H 桥电路驱动两片大功率 TEC, H 桥是一种常见的直流控制电路,可控制电流正反向输出,用来驱动 TEC,可达到切换加热和制冷功能的作用.设计中选用的 MOS 管为 IRLR3636,但由于嵌入式最小系统的 I/O 口电路输出电压达不到 MOS 管的驱动电压,需要更强大的驱动器件,这里每一路采用两片 International Rectifier 公司的 IR2104 来进行驱动,它的驱动能力达到了 10~20 V,并且通断时间也在 ns 级,符合设计需求.同时为了解决 TEC 驱动电路电压波动较大,而嵌入式系统输出的 PWM 波信号较弱的问题,选用的 IR 公司的光耦隔离芯片 HCPL0630 先对 PWM 波信号进行光耦隔离再输入 IR2104 用来驱动 MOS 管,这样整个驱动电路就达到了均衡和稳定的目标要求.

2.2 控制器软件设计

2.2.1 系统软件

温度控制系统的软件开发采用 IAR 软件,通过模块化程序设计方式,模块主要有初始化模块、温度采集

及转换模块、数字PID控制模块、PWM波输出模块和数据传输模块。程序流程如图6所示,系统上电后,嵌入式系统自动复位,程序运行到主函数开始处,然后进行芯片内部资源初始化、外部设备芯片初始化以及工程参数功能初始化,下一步进行两路PT100数据采集和实际温度数据滤波处理,然后判定设定温度与采集温度偏差值,通过偏差值进行PID运算得到控制接口进而控制TEC执行单元工作,同时控制轴流风扇工作,差速控制场流循环,经过上述模块后最终程序是在一个while语句的循环中一直运行。

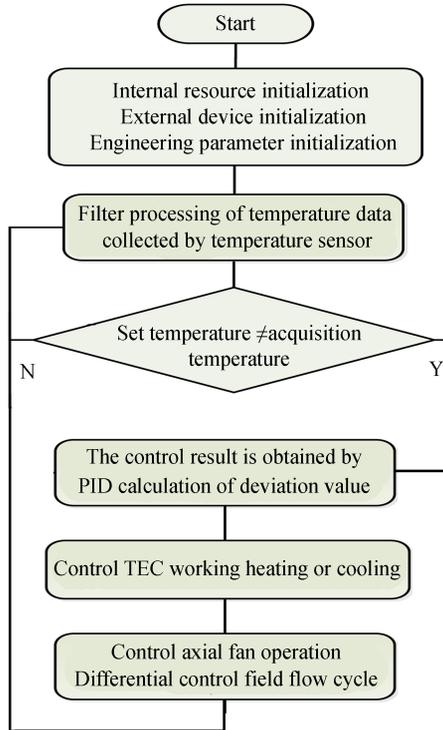


图6 系统软件框图
Fig.6 System software diagram

2.2.2 PID 算法

温度控制系统的核心就是数字PID控制部分。PID是三种控制成分Proportion、Integration、Differentiation线性相加反馈调节的一种调节器,其控制框图如图7。可根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成的控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$ 来对 $u(t)$ 构成的线性组合进行控制。

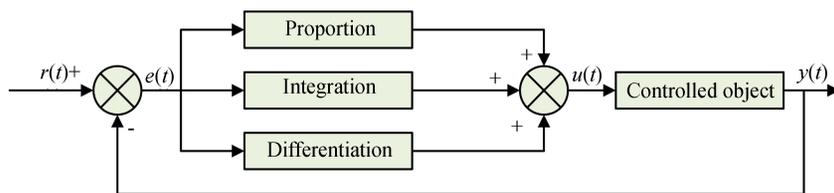


图7 PID控制框图
Fig.7 PID control diagram

PID控制的数学模型可表示为

$$U = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

其传输函数可表示为

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

式中, K_p 是比例系数, T_i 是积分常数, T_d 是微分常数. 通过式(2)和(3)可以看出比例(Proportional)部分减少稳态误差但不能完全消除, 积分(Integral)部分消除系统的稳态误差但会产生超调, 微分(Differentiation)部分反映变化趋势但会引入高频干扰, 三部分相互结合才能达到对系统的平衡调节. 本方案中温度控制采用分段式 PID 增量式控制, 在设计过程中, 使用试凑法设定了一个温度范围来确定温度控制器的两组比例、积分和微分参数, 第一组温度偏差大于 3°C 时为 $K_p=5.0$ 、 $K_i=80.2$ 、 $K_d=100.05$, 第二组温度偏差小于 3°C 时为 $K_p=2.20$ 、 $K_i=30.00$ 、 $K_d=15.00$, 偏差较大时参数设置较高, 使 PID 输出在短时间内迅速增长; 当偏差较小时, 将参数适当调低, 让 PID 输出减速来抑制超调.

2.3 温控箱体的设计

温控系统结构如图 8 所示, 其大小体积根据所用的气体吸收池及测控系统来决定. 箱体结构主体分为三部分: 内箱采用不锈钢材质制作, 热传导性能较好, 用来放置气体吸收池等光机结构, 并通过安装在内部的温控系统执行机构实现良好的环境和稳定的温度场; 外箱为规则的长方体, 采用铝材制作, 主要起固定作用; 内箱的箱体内外之间加入导热系数极小的纳米气凝胶毡材料用于隔热保温. 在装配实验箱体的时候首先将吸收池悬空固定在内箱合适的位置, 密封内箱后使用纳米气凝胶毡填充在内外箱之间使得内外箱之间充实无空隙, 然后再用自粘高亮铝箔纸密封尽量减少热交换的产生. 内箱的温度控制部分主要是执行器件包括半导体致冷器、双向散热器等. 温控箱的设计要求光机结构的环境温度稳定均匀, 且达到稳定的时间越短越好, 因此在内箱的箱体设计时采用了“凸”字型的样式, 有利于气流扩散加快传热并减少温度死角.

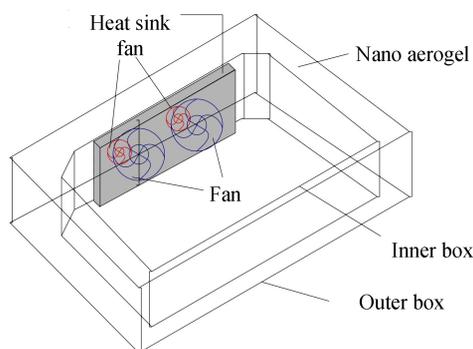


图 8 温控箱内部结构示意图

Fig.8 Schematic of internal structure of temperature control box

3 实验部分

3.1 实验方法

为了验证上述温度控制箱体的温度稳定性对测量结果的影响, 搭建了如图 9 所示的基于 TDLAS 技术的气体检测实验系统, 系统由光源模块、温控系统和采集处理模块三大部分构成. 信号发生器产生锯齿扫描信号和正弦调制信号, 通过课题组研制的低功耗激光器控制器驱动 DFB 激光器, 激光通过光纤耦合进入放置于温控系统(内置两路 PT100)中的光程为 20 m 气体吸收池(内部集成封装光电探测器)内, 其中光电探测器接收光信号转化为电信号, 经过放大后连同信号发生器产生的参考信号一同送入锁相电路进行解调得到二次谐波信号, 然后通过高速数据采集卡采集数据并反演出 CO_2 气体浓度. 温控系统用来控制吸收池所处环境的温度, 两路 PT100 采集到温度的模拟信号通过控制电路对 TEC 和风扇执行单元进行控制, 为吸收池等光机结构提供一个温度均匀稳定的环境, 借助温控系统可以开展不同温度下气体浓度的测量情况的研究. 本实验以浓度为 2.0% 的 CO_2 标准气体为实验用气, 光源使用中心波长为 1580 nm 的 DFB 激光器, 通过在 HITRAN 数据库上查询 1580 nm 附近的吸收谱线, 考虑无其它气体干扰且 CO_2 吸收谱线强度较强, 选取波长在 1580.0395 nm 的吸收谱线. 在 $16\sim 40^{\circ}\text{C}$ (步进 4°C) 的温度变化下, 研究温度对 CO_2 浓度测量的影响.

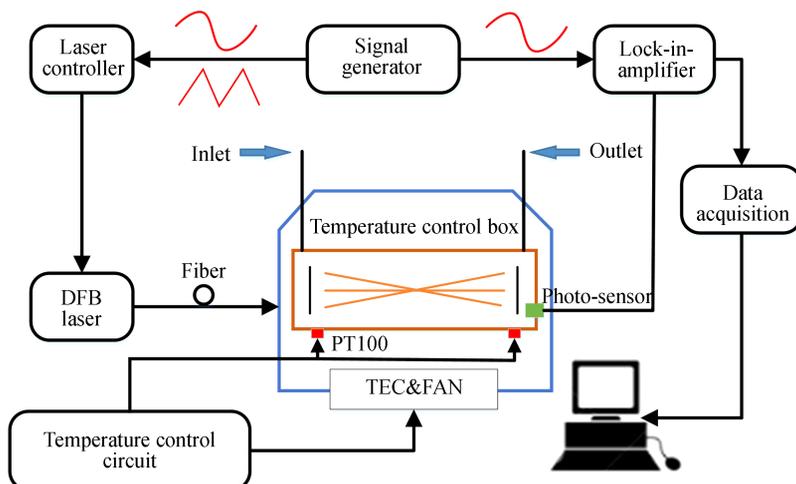
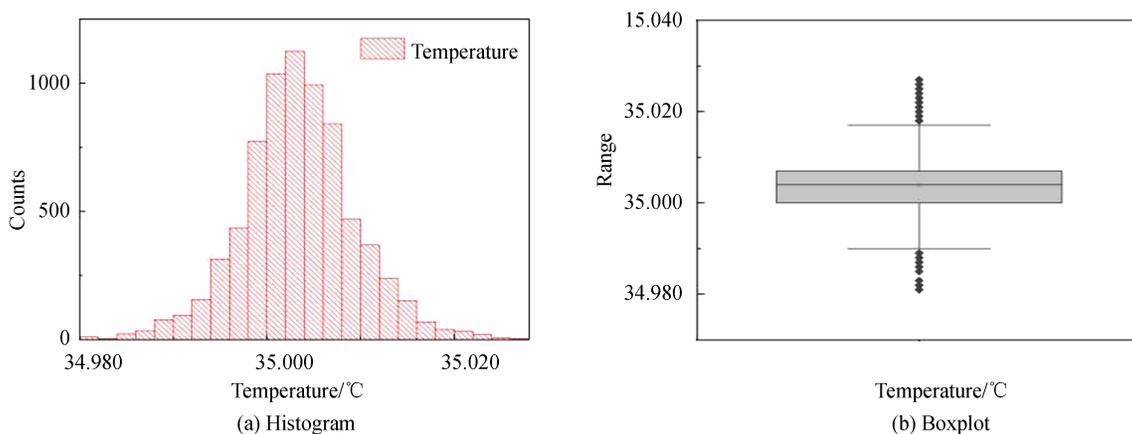


图9 温控实验系统

Fig.9 Temperature control experimental system

3.2 实验过程及分析

为验证该温控系统的精度和可行性,使用五位半万用表对通过PT100采集放大后的电压变化进行测量,该电压值的变化可以间接地反应相应的温度变化.五位半万用表可测到电压值小数点后4位变化,理论上对应的测温精度为 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$.为了评估实验的效果和可靠性,首先将温度设定在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并连续工作 1 h ,来测试温控的稳定性和精度,图10为其直方图和箱体图.经过 1 h 稳定性实验,均值为 $35.003\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动为 $\pm 0.024\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值为 $35.027\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小值为 $34.981\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数为 $35.003\text{ }^{\circ}\text{C}$.

图10 设定 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温控系统稳定度Fig.10 Stability of temperature control system at $35\text{ }^{\circ}\text{C}$

用同样的方法测试系统在 $16\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温控箱的温度稳定性情况及相应的 CO_2 浓度,用以观察温度对 CO_2 测量的影响.首先,在气体吸收腔体内部充入浓度为 2.00% 的 CO_2 气体,将光电探测器接收到的信号输入锁相放大器,调节合适相位、信号放大倍数、正弦调制、锯齿扫描等参数,以获得波形较好的二次谐波信号.设定温控箱温度从 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 步进 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持每个阶段工作 2 h 进行测量相关参数的变化.每个温度段实验保持 2 h 长时间运行,分别记录吸收峰中心位置、浓度、二次谐波幅值等参数.该过程中实验室环境温度变化幅度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.通过采集卡采集数据至计算机进行处理,每分钟采集 120 个数据.图11为连续测试 15 h 温度与 CO_2 浓度变化曲线.

从图11可知在温度的变化过程中,测量的浓度结果是变化的,每次变化实验进行 2 h 左右,其中前 60 min 内浓度相对变化较大,后 60 min 随着温度稳定时间的增加,温控箱内吸收池趋于稳定,浓度结果相对稳定.因此,在后面分析不同温度下浓度测量结果中,提取每次实验后半小时内稳定后的数据进行分析,提取时间段

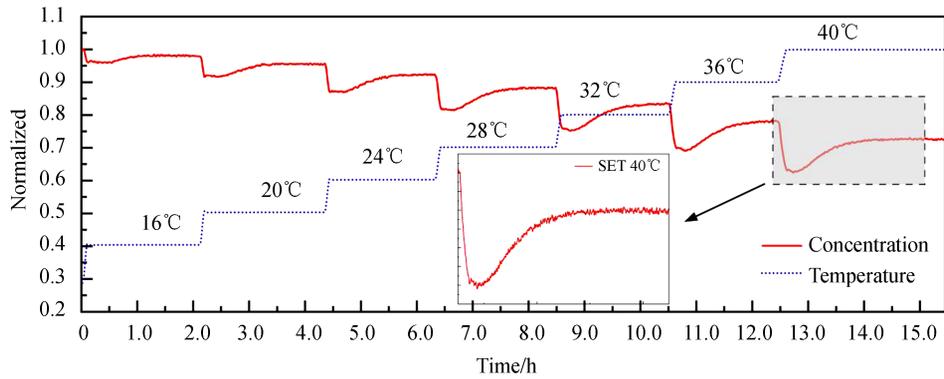


图 11 温度及浓度测量值的变化曲线

Fig. 11 Change curves of measured values of temperature and concentration

和温度分析情况如表 1 所示. 如图 11 所示, 温度上升过程中温度变化对浓度的影响是有一个过程的, 待光机结构稳定后测量到的浓度逐渐稳定. 然后改变温度, 提升到 20°C, 这时的浓度忽然下降然后再上升逐渐稳定, 说明在温度变化过程中光机结构中各部分受温度影响不一致, 待到达一定时间后趋于稳定. 通过分段温度控制实验可以发现在稳定性试验中浓度达到稳定至少需要 60 min 以上, 最终均在 60 min 后达到了相对稳定的浓度测量.

表 1 选取的稳定时段温度参数

Table 1 Selected temperature parameters in the stable period

Time/h	Mean	Range	Minimum	Maximum	Std. deviation	Median absolute deviation
1.0~2.0	15.999	0.020	15.988	16.008	0.003	0.002
3.3~4.3	20.000	0.017	19.991	20.008	0.003	0.002
5.3~6.3	23.999	0.023	23.988	24.011	0.004	0.003
7.5~8.5	27.927	0.024	27.916	27.940	0.004	0.003
9.5~10.5	31.995	0.027	31.981	32.008	0.004	0.003
11.5~12.5	35.917	0.029	35.903	35.932	0.005	0.004
13.5~14.5	39.993	0.035	39.977	40.012	0.006	0.004

从表 1 可知在选取时段内温度控制的波动变化最低在 3.3~4.3 时段可以达到 ± 0.009 °C, 并且标准误差和标准差的值均低于 0.006 °C, 在 13.5~14.5 时间段体现出系统对不同温差设置控制还是有差距的, 这与控制算法中的分段设置有一定关系. 选取表 1 中 16 °C、20 °C、24 °C、28 °C、32 °C、36 °C、40 °C 共 7 个温度段每个时间段 1 h 的温度连续变化数据曲线, 如图 12 系统温度均值分别为 15.999 °C、20.000 °C、23.999 °C、27.927 °C、31.995 °C、35.917 °C、39.993 °C, 温度控制波动分别为 ± 0.011 °C、 ± 0.009 °C、 ± 0.012 °C、 ± 0.013 °C、 ± 0.014 °C、 ± 0.015 °C、 ± 0.019 °C, 标准差在 0.003~0.006 °C 之间, 中值绝对偏差在 0.002~0.004 °C 之间, 总体来说系统的控制稳定性可以满足实验设计要求.

通过以上讨论, 选取表 1 时间段内采集的相对稳定状态下的浓度和二次谐波进行分析. 图 13(a) 为 16 °C、20 °C、24 °C、28 °C、32 °C、36 °C、40 °C 共 7 个温度段的二次谐波波形, 图 13(b) 为所设 7 个温度段的浓度箱线图. 图 13 中选取的时间段是每个温度变化稳定后 60 min, 分别为 1.0~2.0、3.3~4.3、5.3~6.3、7.5~8.5、9.5~10.5、11.5~12.5、13.5~14.5, 箱体图显示浓度在 7 个各自时段内相对稳定, 在整体的 16 h 内显示浓度随温度变化而降低. 而浓度的变化, 主要原因是温度升高所选吸收谱线线强减小, 在浓度反演时没有将线强变化的因素考虑进去. 实验结果表明, 温度对实验系统中光学结构, 机械结构的稳定性影响, 导致温度变化前半部分浓度测量结果的不稳定性, 温度对吸收谱线线强的影响, 导致最终系统温度变化后对浓度测量结果的误差. 因此, 对于该系统在进行浓度实验时, 要保证温度 60 min 以上再进行测量, 以保证测量结果的准确性和稳定性. 箱体内部温度控制的目的是增加光机稳定性和消除测量气样中水汽雾化的影响, 因此只需将温控箱内部的温度控制为恒定值, 而不需进行多温度目标的变化控制, 所以上述温度控制过程在稳定后可

以满足气体测量的要求.

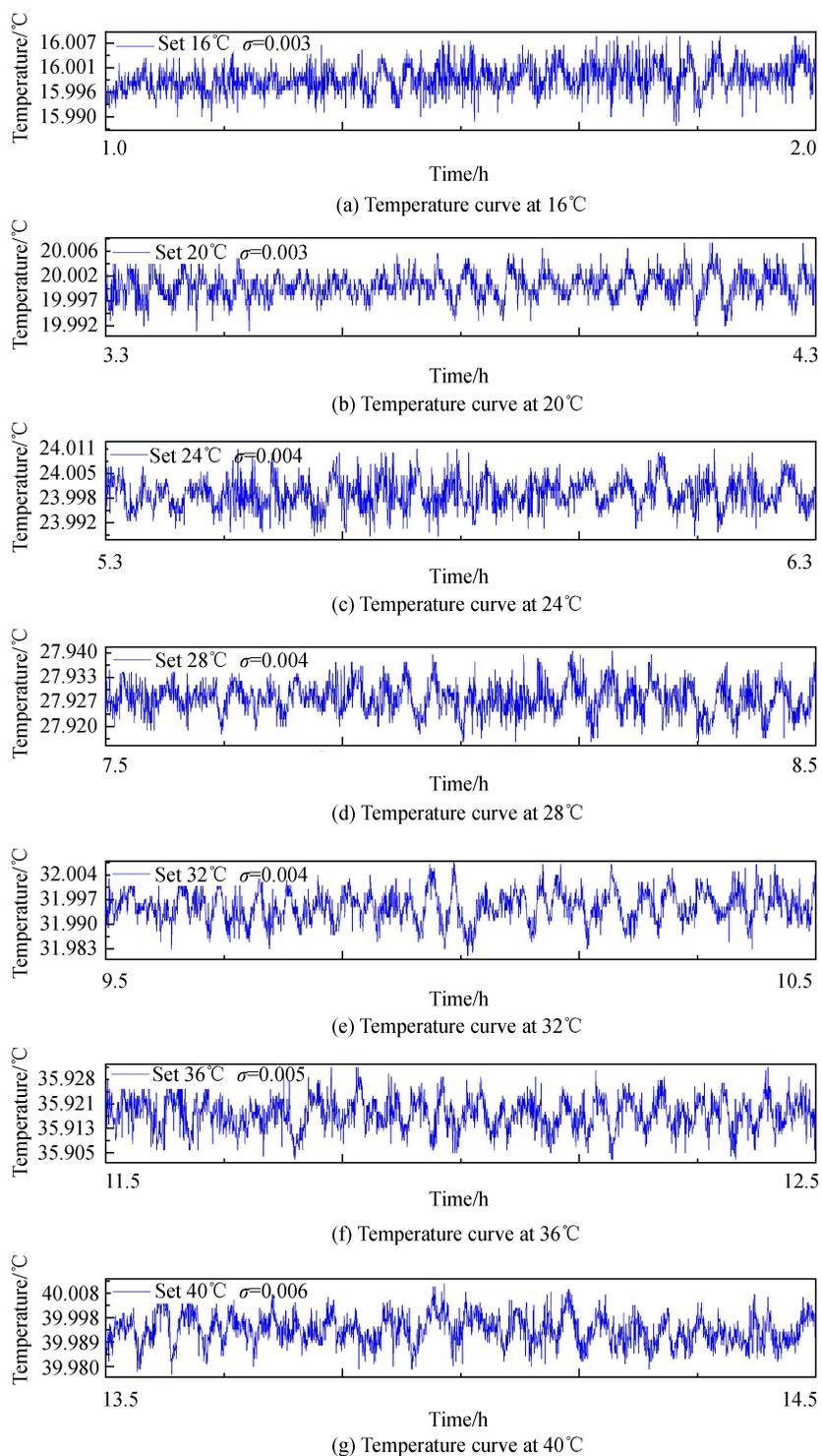


图 12 7 个不同设定温度段 1h 变化曲线

Fig. 12 1-hour variation curves of 7 different temperature sets

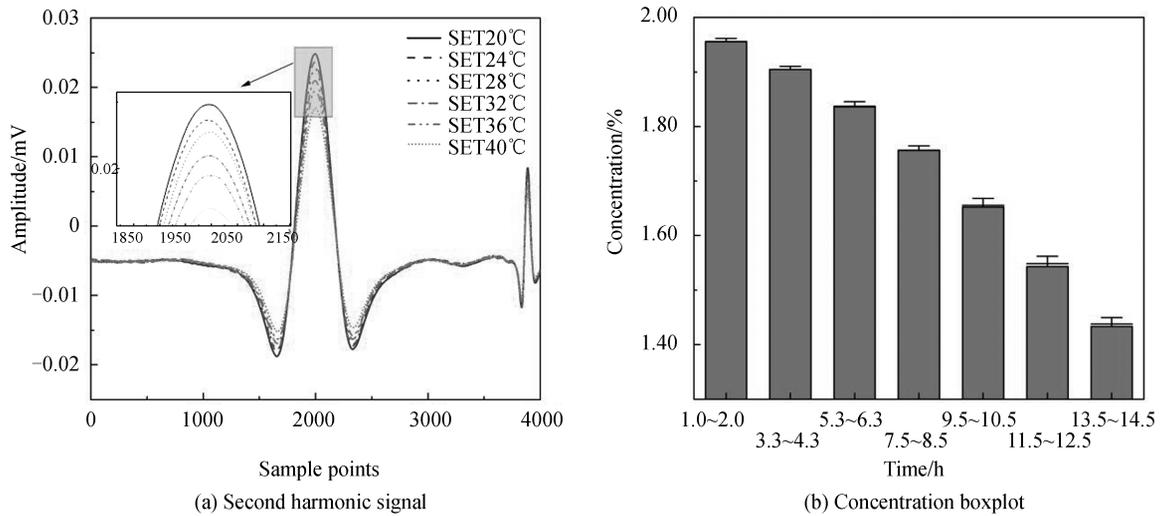


图13 相对稳定状态下的二次谐波和浓度

Fig.13 Concentration and second harmonics at relative steady state

4 结论

本文设计了适用于TDLAS气体检测技术的高精度温度控制系统,并对系统进行了长时间的测试.实验结果表明,该系统的测温精度、控制精度和稳定性均达到了预期的指标要求,对不同温度段的控制波动最优为 $\pm 0.009\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准偏差低于 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$,可用于实际应用.基于TDLAS方法,在 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 七个温度状态下,测量了浓度为 2.00% 的 CO_2 标气,分析了温度变化对浓度测量的影响,进一步说明了高精度温度控制对浓度测量系统的必要性,验证的该温控系统可对多个温度状态进行高精度和高稳定性的控制.同时发现当温度控制系统用于浓度实验时,要保证温度稳定,通常在 60 min 后测量,才能保证测量的准确性和稳定性.箱体内部温度控制的主要目的是构建光机稳定性和消除气样中水汽冷凝的影响,因此只需将温控箱内部的温度控制在一个恒定值,而不需进行多温度目标的变化控制,上述温度控制过程在稳定后可以满足气体测量的要求.

参考文献

- [1] LIU Wen-qing, CHEN Zhen-yi, LIU Jian-guo, *et al.* Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(5): 0500001.
刘文清,陈臻懿,刘建国,等.环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, **40**(5): 0500001.
- [2] DONG Feng-zhong, KAN Rui-feng, LIU Wen-qing, *et al.* Tunable diode laser absorption spectroscopic technology and its application in air quality monitoring[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(3): 315-325.
董凤忠,阚瑞峰,刘文清,等.可调谐二极管激光吸收光谱技术及其在大气质量监测中的应用[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(3): 315-325.
- [3] ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, PANG Tao, *et al.* Application of laser absorption spectroscopy for identification gases in industrial production processes and early safety warning[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(8): 1925-1937.
张志荣,孙鹏帅,庞涛,等.激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2018, **26**(8): 1925-1937.
- [4] ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, PANG Tao, *et al.* Reconstruction of combustion temperature and gas concentration distributions using line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(7): 76107.
- [5] SUN Peng-shuai, ZHANG Zhi-rong, CUI Xiao-juan, *et al.* Multipath real-time measurement of temperature and H_2O concentration for combustion diagnosis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(9): 360-367.
孙鹏帅,张志荣,崔小娟,等.燃烧场内多路径温度与 H_2O 浓度的在线检测[J]. *中国激光*, 2015, **42**(9): 360-367.
- [6] PANG Tao, WANG Yu, XIA Hua, *et al.* Full scale methane sensor based on TDLAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0912003.
庞涛,王煜,夏滑,等.基于TDLAS技术的全量程激光甲烷传感器[J]. *光子学报*, 2016, **45**(9): 0912003.
- [7] LU Yi-bing, LIU Wen-qing, ZHANG YU-jun, *et al.* The design of motor vehicle exhaust carbon monoxide concentration detection system based on tunable diode laser absorption spectroscopy [C]. Chengdu, China: Society of Photo-Optical

- Instrumentation Engineers, 2019.
- [8] ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, LI Zhe, *et al.* Novel coalbed methane (CBM) origin analysis and source apportionment method based on carbon isotope ratio using infrared dual-wavelength laser absorption spectroscopy[J]. *Earth and Space Science*, 2018, **5**(11): 721-735.
- [9] JI Wen-hai, LU Xiao-cui, HU Wen-ze, *et al.* Application of TDLAS technology to multicomponent detection in olefin production process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(8): 1837-1845.
季文海,吕晓翠,胡文泽,等. TDLAS技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(8): 1837-1845.
- [10] ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, XIA Hua, *et al.* Modulation parameters influence and optimal selection of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 41-50.
张志荣,孙鹏帅,夏滑,等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术的调制参量影响及优化选择[J]. 光子学报, 2015, **44**(1): 41-50.
- [11] QI Ru-bin, HE Shu-kai, LI Xin-tian, *et al.* Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(1): 172-177.
齐汝宾,赫树开,李新田,等. 基于HITRAN光谱数据库的TDLAS直接吸收信号仿真研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(1): 172-177.
- [12] SUN Peng-shuai, ZHANG Zhi-rong, LI Zhe, *et al.* A study of two dimensional tomography reconstruction of temperature and gas concentration in a combustion field using TDLAS[J]. *Applied Sciences*, 2017, **7**(10): 990.
- [13] NIE Wei, XU Zhen-yu, KAN Rui-feng, *et al.* Measurement of low water vapor dew-point temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(8): 1862-1869.
聂伟,许振宇,阚瑞峰,等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术测量低温流场水汽露点温度[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(8): 1862-1869.
- [14] ZHANG Zhi-rong, WU Bian, XIA Hua, *et al.* Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(23): 183-189.
张志荣,吴边,夏滑,等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(23): 183-189.
- [15] SHU Xiao-wen, ZHANG Yu-jun, KAN Rui-feng, *et al.* An investigation of temperature compensation of HCl gas online monitoring based on TDLAS method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5): 1352-1356.
束小文,张玉钧,阚瑞峰,等. 基于TDLAS技术的HCl气体在线探测温度补偿方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(5): 1352-1356.
- [16] ZHAO Yan-jie, LI Yang-fang, ZHANG Ting-ting, *et al.* Effect of temperature on methane gas concentration by tunable diode laser absorption spectroscopy[C]. Beijing: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2012.
- [17] CAO Ke, LIANG Chao-qun, GUO Rui-min, *et al.* Study on temperature control for ring-down cavity [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, **39**(3): 431-435.
曹珂,梁超群,郭瑞民,等. 衰荡光腔温度控制研究[J]. 计量学报, 2018, **39**(3): 431-435.

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2017 YFC0805004), National Natural Science Foundation of China (Nos. 11874364, 41877311, 41775128, 41773100), External Cooperation Program of Chinese Academy of Sciences (No. GJHZ1726), Key Research and Development Project of Anhui Province (Nos. 201904c03020005, 1804a09020097), Major Scientific and Technological Projects in Anhui Province (No. 18030901054), Major Projects of Natural Science Research in Universities of Anhui Province (No. KJ2017ZD56), Support Program for Outstanding Young Talents in Colleges and Universities of Anhui Province (Nos. gxyqZD2018072, gxyq2020061), Foundation of President of Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences (No. YZJJ2020QN8)