

采用 Ziegler-Nichols-PID 算法的激光红外多通池 压强控制系统研制

许绘香*, 孔国利

(郑州工程技术学院 信息工程学院, 河南 郑州 450044)

摘要: 为了实现 CO₂ 气体同位素的高性能检测, 研制了高精度、高稳定性的激光红外多通池压强控制系统。硬件方面, 采用压强传感器连接于多通池前、后端, 检测多通池内部气压, 主控制器通过 PWM 信号, 调控多通池前、后端比例阀导通状态, 从而实现压强的闭环控制。软件方面, 采用 Ziegler-Nichols 工程整定方法, 完成对 P 、 I 、 D 3 个参数的确定。结果表明: 多通池压强为 60 Torr (1 Torr=133.322 Pa) 时, 控制精度为 ± 0.04 Torr。试验中, 利用研制的多通池压强控制系统对 ¹³CO₂、¹²CO₂ 气体分子在 4.3 μm 吸收光谱进行测量。随着气体压强从 0.026~0.066 atm (1 atm= 101 325 Pa), ¹³CO₂ 和 ¹²CO₂ 气体分子吸收光谱的峰值随着压强增大而增大, 吸收光谱宽度也随着压强的增大而增大。同时, 利用红外气体检测系统对 CO₂ 同位素丰度进行长达 2 h 的测量。CO₂ 同位素丰度均值为 -9.081‰, 测量值在 -8.351‰~-9.736‰ 之间波动, 最大偏差值为 0.73‰。可以证明: 该系统为红外 CO₂ 气体同位素的高性能检测提供可靠保障。

关键词: 红外气体检测; CO₂ 同位素; 多通池压强控制; Ziegler-Nichols 工程整定方法; PID 控制
中图分类号: TM921.51 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190551

Development of pressure control system for laser infrared multipass cell using Ziegler-Nichols-PID algorithm

Xu Huixiang*, Kong Guoli

(School of Information Engineering, Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: In order to realize the high performance detection of CO₂ gas isotope, a multi-pass gas cell pressure control system with high precision and stability was developed in this paper. In terms of hardware, the pressure sensor was connected to the front and back end of the multi-pass gas cell to measure the inside pressure of multi-pass gas cell. The main controller regulated the proportional valves that were at the front and back end of the multi-pass gas cell via PWM signal, so as to realize the closed loop of pressure control. In terms of software, Ziegler-Nichols engineering setting method was adopted to determine three parameters P , I and D . The results show that the control accuracy is ± 0.04 Torr (1 Torr=133.322 Pa) when the pressure of the multi-pass gas cell is 60 Torr. In experiment, the developed pressure control system of multi-pass cell was used to measure the absorption spectra of ¹³CO₂ and ¹²CO₂ gas molecules at 4.3 μm . With the increase of gas pressure from 0.026-0.066 atm

收稿日期: 2019-12-03; 修订日期: 2019-12-28

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (20B520036); 河南省科技攻关项目 (182102210150); 郑州工程技术学院青年创新基金项目 (QNCXJJ2019K5)

作者简介: 孔国利 (1973-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事激光检测技术与智能控制方面的研究。Email: kguoli73@126.com

通讯作者: 许绘香 (1980-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事智能控制与数据处理方面的研究。Email: xuhx80@126.com

(1 atm= 101 325 Pa), the peaks of the absorption spectra of ¹³CO₂ and ¹²CO₂ gas molecular increased with the increase of pressure, the width of the absorption spectra also increased with the increase of pressure. Meanwhile, an infrared gas measuring system was used to measure the CO₂ isotope abundance during two hours. The average isotope abundance of CO₂ is -9.081 ‰, and the fluctuation of measured values is between -8.351 ‰ and -9.736‰, with the maximum deviation of 0.73‰. It can be proved that the system provides reliable guarantee for high performance detection of infrared CO₂ gas isotope.

Key words: infrared gas detection; CO₂ isotope; pressure control of multi-pass gas cell; Ziegler-Nichols engineering setting method; PID control

0 引 言

可实现气体同位素探测的技术有质谱法^[1]、色谱法^[2]、火焰电离技术^[3]等,它们均不能实现在线检测。由于基于气体红外吸收光谱检测的仪器,就有体积小、便携性等优点,可实现在线检测。但是被测气体红外吸收谱线强度随着环境压强等因素变化而变化,从而影响气体同位素检测精度和稳定性。因此在气体检测过程中,对多通池内部被测气体的压强进行高精度调控是必须得的。

近些年,国外相继研制出多种类型的多通气体吸收池压强控制系统。英国德鲁克公司生产的高精度压强控制器 DPI515,能够实现快速、高精度的压强调控,控制精度可达到±0.01% F.S.。国内产品有 YWK-50-C 系列的压强控制器,控制精度较差。以上压强控制器均存在调节时长,超调严重等问题。

基于国内外的研究现状,针对 CO₂ 同位素检测中压强影响参数,研制了采用 Ziegler-Nichols-PID 算法的激光红外多通池压强控制系统。

1 多通池压强控制系统设计

1.1 系统总体概述

用于红外气体检测的多通池压强控制系统如图 1 所示。

多通池压强控制系统包含两个比例阀,一个压强传感器以及一个真空低压泵^[4-8]。首先关闭多通池入气端的比例阀,开启多通池出气端的比例阀和真空低压泵,将多通池内部气体尽量抽净。然后,关闭多通池出气端的比例阀和真空低压泵,开启多通池入气端的比例阀,让气源缓缓冲入多通池内。此时,压强传感器能够实时测量多通池内部气压,主控制器

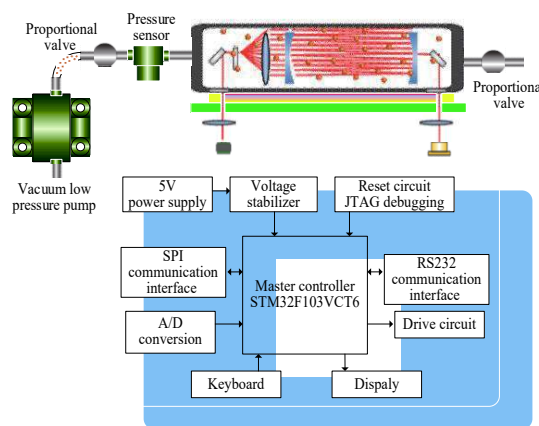


图 1 多通池压强控制系统

Fig.1 Pressure control system for multi-pass gas cell

STM32 控制 AD 转换器将压强传感器输出的模拟信号转换为数字信号。主控制器 STM32 将此数字信号与设定目标压强相比较,然后通过输出 PWM 信号驱动,调控多通池入气端的比例阀,从而实现压强的闭环控制^[9]。

1.2 多通池压强控制系统设计

多通池压强控制系统包含两个比例阀,一个压强传感器以及一个真空低压泵。多通池压强控制系统工作流程已在前文进行介绍,此处不再赘述。在压强控制器中,比例阀是极为重要的原件。该系统采用 PWM 驱动方式,实现对比例阀的调控,电路如图 2 所示。

比例阀控制电路由两部分组成,光耦隔离器和驱动变换电路。主控制器 STM32 输出 PWM 信号,通过光耦隔离器,然后通过 SN75423 进行电压变换,从而达到驱动比例阀的电压要求。

其中,压强传感器选取方面,采用世界知名压强传感器公司美国 MEAS 的产品,型号为 U5200。该

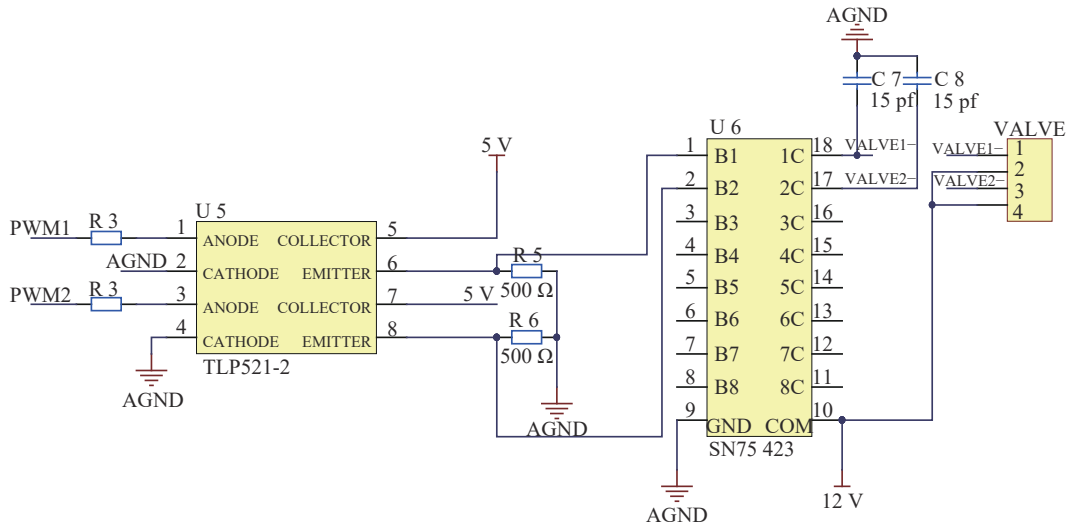


图 2 比例阀控制电路

Fig.2 Proportional valve control circuit

压强传感器采用模块化设计理念,既可为科研提供灵活的操控需要,也可满足严苛环境下的特殊应用需求。由于 U5200 外壳采用 304 特质不锈钢,具有很好的密封作用,也可以放沙尘和液体腐蚀。其压强检测量程为 0~106 Torr,对应输出电压幅值范围为 0~5 V,检测精确为 $\pm 0.5\%$,绝对误差为 0.53 Torr。比例阀选取方面,采用世界知名阀门公司美国 Clippard 的 EVP 系列微型比例阀。其可以通过输入参数电压的调节来控制其输出流量大小,进而能够对多通池内部压强进行调节。EVP 系列微型比例阀体积小,为圆柱形(直径 2.2 cm,高度 3.7 cm),允许输入电压幅值最大为 12 V。

2 Ziegler-Nichols-PID 算法

实际中,针对不同被控对象,PID 控制算法参数也不一致^[10-12]。由于复杂被控对象的理论模型难以建立,这样就会带来 PID 控制参数不能确定的问题。所以文中采用 Ziegler-Nichols 工程整定方法,确定 PID 控制 3 个参数,该方法如表 1 所示。

Ziegler-Nichols 工程整定方法运行过程如下:

(1)首先是 PID 控制算法中积分项 I 、微分项 D 项为零,只存在比例项 P 。

(2)然后逐渐调大比例项 P ,检测多通池压强,当多通池压强发生等幅震荡时,此时比例项系数 P 记

表 1 Ziegler-Nichols 工程整定方法

Tab.1 Ziegler-Nichols engineering tuning method

Parameter	T_P	T_I	T_D
P	$2 \cdot \delta_{PR}$		
PD	$1.25\delta_{PR}$		$0.12T_{PR}$
PI	$2.2\delta_{PR}$	$0.85T_P$	
PID	$1.67\delta_{PR}$	$0.5T_{PR}$	$0.125T_P$

为 δ_{PR} ,震荡周期记为 T_{PR} 。

(3)根据表 1 中 Ziegler-Nichols 工程整定方法,得到比例项系数 K_P ,积分项系数 K_I ,微分项系数 K_D 。

试验中,然后逐渐调大比例项 P ,当多通池压强达到 60 Torr 时,出现压强等幅震荡,结果图 3 所示,记录此时比例项系数 δ_{PR} 为 1.8。

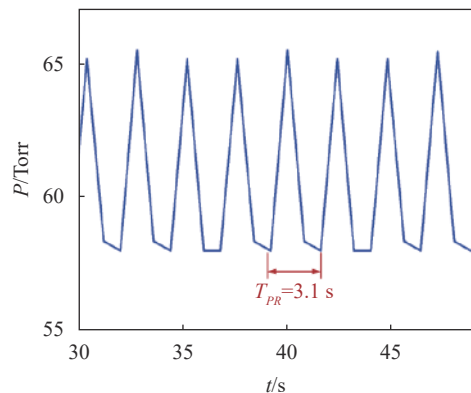


图 3 多通池压强等幅震荡

Fig.3 Equal-amplitude oscillation of pressure of multi pass cell

由多通池压强等幅震荡结果可知,等幅震荡周期 T_{PR} 为 3.1 s, 所以 $\delta_{PR}=1/K_{PR}=0.556$ 。根据表 1 可知: PID 控制参数 $T_P=1.67\delta_{PR}=0.93$, $T_I=0.5T_{PR}=1.55$, $T_D=0.125T_{PR}=0.39$ 。

3 系统硬件调试

根据以上多通池压强控制系统各部分模块设计后,绘制各部分模块原理图,然后制成印刷电路板,最后进行各电子器件的焊接。激光红外多通池压强控制系统如图 4 所示。

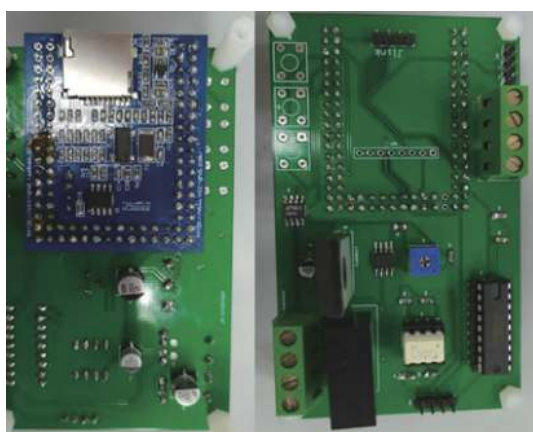


图 4 压强控制系统

Fig.4 Pressure control system

在硬件系统焊接调试过程中,切不可将所有电子元器件全部焊接后再进行调试,需采用由前到后依次对各部分模块进行焊接调试,可避免因某一模块的损坏对整体硬件系统造成损伤。

4 多通池压强控制性能试验

4.1 多通池压强控制性能试验

对多通池内部气体压强开展试验,得到的压强数据如图 5 所示。

首先将多通池内部气体用真空泵抽至 17 Torr,由于多通池连接气路密闭性不够好,最低只能抽到此气压。然后启动压强控制系统,经过 6 s 后,多通池内部压强无超调地控制到目标压强 60 Torr。此后,压强控制系统进行稳定工作,多通池内部气压存在少许波动,如图 6 所示。

在 150~200 s 时间内,多通池内部气压均值为 60 Torr,压强在 59.96~60.04 Torr 之间波动,最大偏差

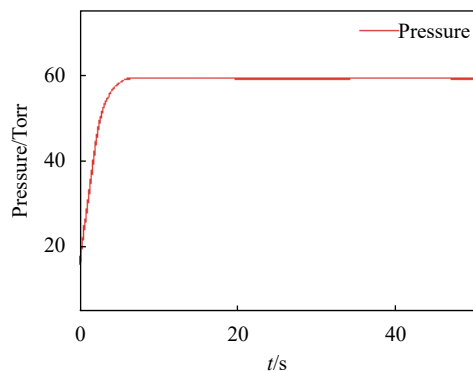


图 5 压强控制曲线

Fig.5 Pressure control curve

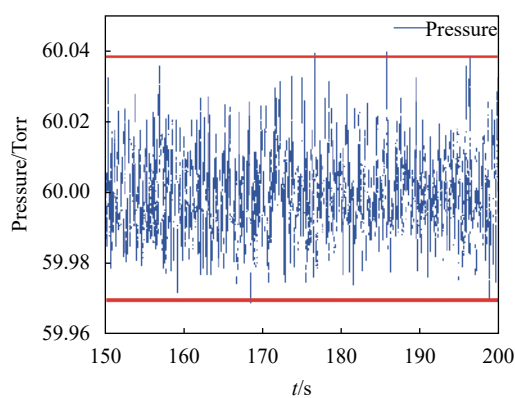


图 6 压强控制数据 (60 Torr)

Fig.6 Pressure control data (60 Torr)

值为 0.04 Torr。由于大气压强为 760 Torr,多通池内部压强为 60 Torr,存在 700 Torr 的压强差,所以,不可避免因多通池和连接气路的少许漏气而产生的压强波动。

4.2 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$ 吸收光谱试验

试验中,利用研制的多通池压强控制系统对 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$ 气体分子在 4.3 μm 吸收光谱进行测量。 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$ 气体分子在 4.3 μm 波段吸收光谱与压强的关系如图 7 和图 8 所示。

如图 7 和 8 所示, $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 气体分子吸收光谱随着气体压强从 0.026 atm 到 0.046 atm,最后增至 0.066 atm,其吸收光谱的峰值随着压强增大而增大,吸收光谱宽度也随着压强的增大而增大。

同时,笔者对 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 分子的吸收谱线 (2315.36 cm^{-1} 和 2315.19 cm^{-1}) 在不同压强下的形貌进行测量。其中,二者在压强为 0.26 atm 时,结果如图 9 所示。

$^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 分子的吸收谱线 (2315.36 cm^{-1} 和

2315.19 cm^{-1}) 间距为 0.17 cm^{-1} , 小谱线间距能够保证二者基态能级差小, 在压强控制精度一定的条件下, 可以实现更高碳同位素检测精度。当多通池压强增大到 0.26 atm 时, 二者吸收谱线存在重叠现象。

为了避免此现象发生, 则需要将待测气体控制在一个低压条件下, 以防止 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 气体分子的吸收谱线重叠, 达到更佳的光谱分辨率, 实现碳同位素丰度的高精度探测。

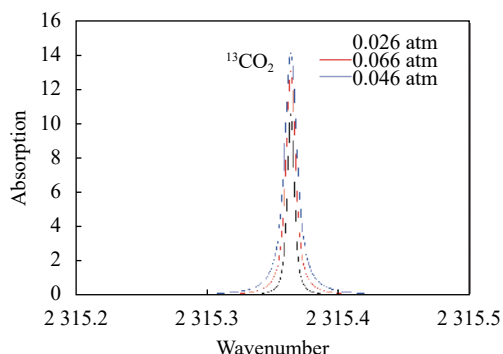


图 7 $^{13}\text{CO}_2$ 吸收光谱与压强的关系

Fig.7 Relation between $^{13}\text{CO}_2$ absorption spectrum and pressure

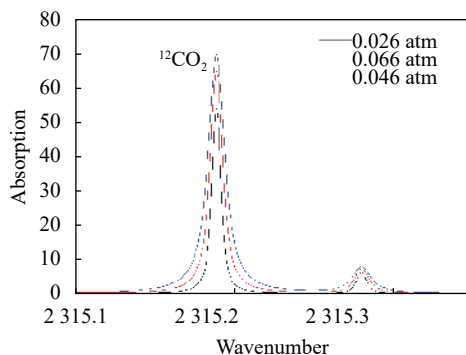


图 8 $^{12}\text{CO}_2$ 吸收光谱与压强的关系

Fig.8 Relation between $^{12}\text{CO}_2$ absorption spectrum and pressure

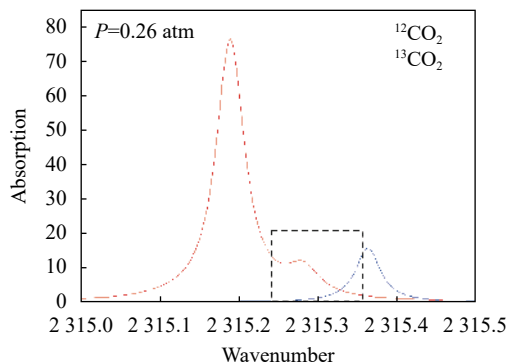


图 9 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 在 0.26 atm 压强下的吸收谱线

Fig.9 Absorption lines of $^{13}\text{CO}_2$ and $^{12}\text{CO}_2$ at pressure of 0.26 atm

4.3 CO_2 同位素丰度检测试验

将被测 CO_2 通入多通池内部, 采用研制的多通池压强控制系统温度控制系统将多通池压强控制到 60 Torr。然后利用红外气体检测系统对 CO_2 同位素丰度进行长达两个小时的测量, 结果如图 10 所示。

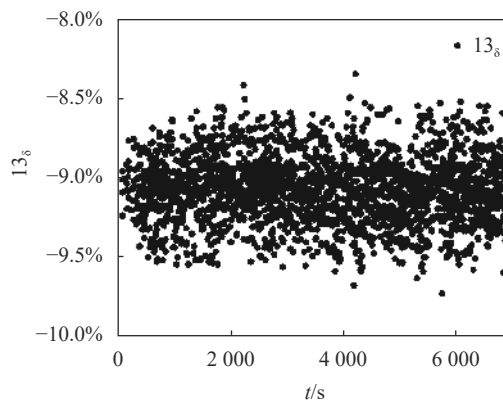


图 10 CO_2 同位素丰度测量数据

Fig.10 CO_2 isotope abundance measurement data

在长达 2 h 的测量时间内, CO_2 同位素丰度均值为 -9.081% , 测量值在 -8.351% 和 -9.736% 之间波动, 最大偏差值为 0.73% 。该 CO_2 同位素丰度测量值波动较大, 主要由于气源 CO_2 波动问题 (周围环境中人的呼吸, 气瓶中标准气体分层) 或红外气体检测系统工作漂移所导致的。

多通池体积约为 250 mL 的圆柱体 (截面直径约为 5 cm), 试验中其内部气体不可避免存在气体分层问题, 这样就会使 CO_2 同位素丰度测量带来误差, 降低测量准确度。而且随着测量时间增加, 尤其测量气体组分很多的情况下, 因为每种气体分子量不同, 在地球重力场条件下, 会造成更明显的气体分层, 会使气体浓度检测准确度下降。后续工作将对多通池内部气体分层进行有限元分析, 然后采用气体分层补偿的方法提升 CO_2 同位素丰度测量准确度。

5 结束语

文中研制了用于红外气体检测的多通池压强控制系统, 采用 Ziegler-Nichols-PID 算法, 实现了对多通池压强的高精度和高稳定性的控制。结果表明, 通池压强为 60 Torr 时, 控制精度为 ± 0.04 Torr。同时, 利用该系统对 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}_2$ 吸收光谱和 CO_2 同位素丰度进行了测量实验, 可以证明: 该系统可以为红外 CO_2 气体

同位素的高性能检测提供可靠保障。

为了进一步提升 CO₂ 同位素丰度测量精度, 笔者从以下方面着手进行研究。(1) 吸收线选取方面。选取 ¹³CO₂ 和 ¹²CO₂ 两条吸收谱线更近, 使得二者基态能级差更小, 提升同位素丰度测量精度。(2) 为了减少气体因自身重力, 导致其在多通池内部分层而带来测量精度下降的问题。笔者将采用动态测量方式, 提升同位素丰度测量精度。

参考文献:

- [1] Taylor S R. Stable isotope geochemistry [J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 17(4): 839-850.
- [2] Li Chunguang. Research and development of gas detection system based on mid-infrared semiconductor lasers[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
李春光. 基于中红外半导体激光器的气体检测系统的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [3] Mckellar A R W, Watson J K G, Howard B J. The NO dimer: ¹⁵N isotopic infrared spectra, line-widths, and force field [J]. *Molecular Physics*, 1995, 86(2): 273-286.
- [4] Chen Kai, Mei Maofei. Detection of gas concentrations based on wireless sensor and laser technology [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(7): 50-54. (in Chinese)
陈凯, 梅茂飞. 基于激光传感器的气体浓度检测研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(7): 50-54.
- [5] Yun Yuxin, Lv Tianguang, Han Hong, et al. Effects of pressure and temperature on gaseous infrared absorption properties [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 992-996. (in Chinese)
云玉新, 吕天光, 韩洪, 等. 气体红外吸收特性受压强与温度的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 992-996.
- [6] Toth R A, Miller C E, Devi V M, et al. Air-broadened halfwidth and pressure shift coefficients of ¹²C¹⁶O₂ bands: 4750-7000 cm⁻¹ [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2007, 246(2): 133-157.
- [7] Guochen H E, Xingming D. Study and application of gas chromatography electron flow/pressure control module [J]. *Optical Instruments*, 2011, 33(4): 23-27.
- [8] Jia Liangquan, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Effects of temperature and pressure changes on the second harmonic inversion results [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1215004. (in Chinese)
贾良权, 刘文清, 刘建国, 等. 温度和压强变化对二次谐波反演结果的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1215004.
- [9] Wang Zheng, Chang Weiguo, Luo Xin. Gas pressure self-adjusting system [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2010, 27(4): 101-104. (in Chinese)
王征, 常卫国, 栾鑫. 气体压力自调节系统的设计与实现[J]. *气象水文海洋仪器*, 2010, 27(4): 101-104.
- [10] Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei, et al. Application of digital frequency Locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1008002. (in Chinese)
王贵师, 蔡廷栋, 汪磊, 等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008002.
- [11] Zhan Juntong, Fu Qiang, Duan Jin, et al. Stability improvement of DFB laser driving power using digital position PID algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1757-1761.
战俊彤, 付强, 段锦, 等. 利用位置式数字 PID 算法提高 DFB 激光器驱动电源稳定性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1757-1761.
- [12] Mu Ye, Hu Tianli, Chen Chen, et al. Development of temperature control system of DFB laser using analog PID control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0405001. (in Chinese)
穆叶, 胡天立, 陈晨, 等. 采用模拟PID控制的DFB激光器温度控制系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0405001.