

用于红外气体检测的多通池温度、压强控制系统研制

侯 月, 黄克谨*

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 为了实现 CO₂ 气体同位素的高性能检测, 研制了高精度、高稳定性的多通池温度、压强控制系统。采用柔性 PCB 作为加热片包覆圆柱形多通池。考虑到温度控制系统的加热速率, 外层包覆保温棉作为隔热装置, 使得整个温度控制系统能实现快速加热, 且能够保持温度的长时间稳定。采用铂电阻 PT1000 温度传感器对多通池温度进行精确采集, 主控制器通过 PWM 信号, 调控柔性 PCB 加热膜的发热功率, 从而实现温度的闭环控制。压强控制系统方面, 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。结果表明, 温度控制范围为 18.48~42 °C, 温度控制精度为 ±0.08 °C。多通池压强为 60 Torr (1 Torr ≈ 133.322 Pa) 时, 控制精度为 ±0.04 Torr。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; 多通池温度; 压强控制; 加热膜; 比例阀

中图分类号: TM921.51 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190525

Development on temperature and pressure control system for multi-pass gas cell utilized in infrared gas detection

Hou Yue, Huang Kejin*

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to realize the high performance detection of CO₂ gas isotope, a multi-pass gas cell temperature and pressure control system with high precision and stability was developed in this paper. Flexible PCB was used as heating sheet to cover the cylindrical multi-pass cell. Considering the heating rate of the temperature control system, the outer coating of thermal insulation cotton served as the heat insulation device, which enabled the whole temperature control system to achieve rapid heating and keep the temperature stable for a long time. Platinum resistance PT1000 temperature sensor was utilized to accurately collect the multi-pass gas cell temperature. The main controller regulated the heating power of the flexible PCB heating film through PWM signal, so as to realize the closed loop of temperature control. In terms of pressure control system, 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. The results show that the temperature control range is from 18.48 °C to 42 °C, and the temperature control precision is ±0.08 °C. When the pressure of the multi-pass gas cell is 60 Torr (1 Torr ≈ 133.322 Pa), the control accuracy is ±0.04 Torr. The

收稿日期: 2019-12-13; 修订日期: 2020-01-20

基金项目: 国家自然科学基金 (21878011)

作者简介: 侯月 (1980-), 男, 硕士生, 研究方向为红外激光气体检测技术及应用。Email: houyue@mail.buct.edu.cn

通讯作者: 黄克谨 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂化工过程系统工程。Email: huangkj@mail.buct.edu.cn

system provides reliable guarantee for the high performance measurement of infrared CO₂ gas isotope.

Key words: infrared gas detection; CO₂ isotope; temperature of multi-pass gas cell; pressure control; heating film; proportional valve;

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温度、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温度、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温控系统。2001年, Mantz 等人研制的多通池温度控制系统,采用碰撞冷却技术,能够稳定地控制多通池内部温度。但是装置体积庞大,无法实现在线检测^[4]。2012年,高伟等人研制的低温多通池温度控制系统,控制精度优于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]。2014年,马宏亮等人对上述多通池温度控制系统进行了改进,温度控制精度优于 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统存在问题是温度调控时间过长,且超调量较大^[6]。在压强控制系统方面,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 $\pm 0.01\%$ F.S.。国内产品有 YWK-50-C 系列的压强控制器,但控制精度较差。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 同位素检测中温度、压强的影响参数,研制了用于光学多通池的温度、压强控制系统,可用于检测红外 CO₂ 同位素的精确度和稳定性。

1 多通池温度、压强控制系统设计

用于红外气体检测的多通池温度、压强控制系统组成框图如图 1 所示,主要包括多通池温度控制系统和多通池压强控制系统。

将 PT1000 测温铂电阻放置于多通池的玻璃外壁表面与加热片之间,将另一片 PT1000 测温铂电阻安装在多通池内部,采集多通池内部气体温度,由温度改变而带来的阻值变化通过惠更斯电桥输出电压值,

然后经过信号调理电路和运算放大电路将惠更斯电桥输出的微小电压信号转换成大信号,主控制器 STM32 控制 AD 转换器将大信号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温度相比较,然后通过输出 PWM 信号驱动,调控柔性 PCB 加热膜的发热功率,从而实现温度的闭环控制。考虑到温度控制系统加热速率,外层包覆保温棉作为隔热装置,使得整个温度控制系统能够实现快速加热,且能够保持温度的长时间稳定^[7-8]。

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。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 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]。

1.1 多通池温度控制系统设计

1.1.1 加热膜驱动电路

温度控制系统采用柔性 PCB 将圆柱形多通池环绕包覆。为了提升多通池加热效率,采用大阻值材料制作 PCB,而且需要大功率驱动电流,这就对加热膜驱动电路提出了要求。加热膜驱动电路如图 2 所示。

加热膜驱动电路分为三级,隔离级、转换级以及驱动输出级。主控制器 STM32 输出信号通过光耦隔离后,通过电平转换芯片 IR2117,转换为驱动 MOS 管的大功率信号,使管 D2810 产生大电流信号,驱动柔性 PCB 加热膜。当主控制器 STM32 输出高电平时,光耦隔离器输出低电平,柔性 PCB 加热膜停止加热。当主控制 STM32 输出低电平时,光耦隔离器输出高电平,驱动柔性 PCB 加热膜,对多通池进行加热。实际中,主控制器 STM32 通过输出 PWM 信号,

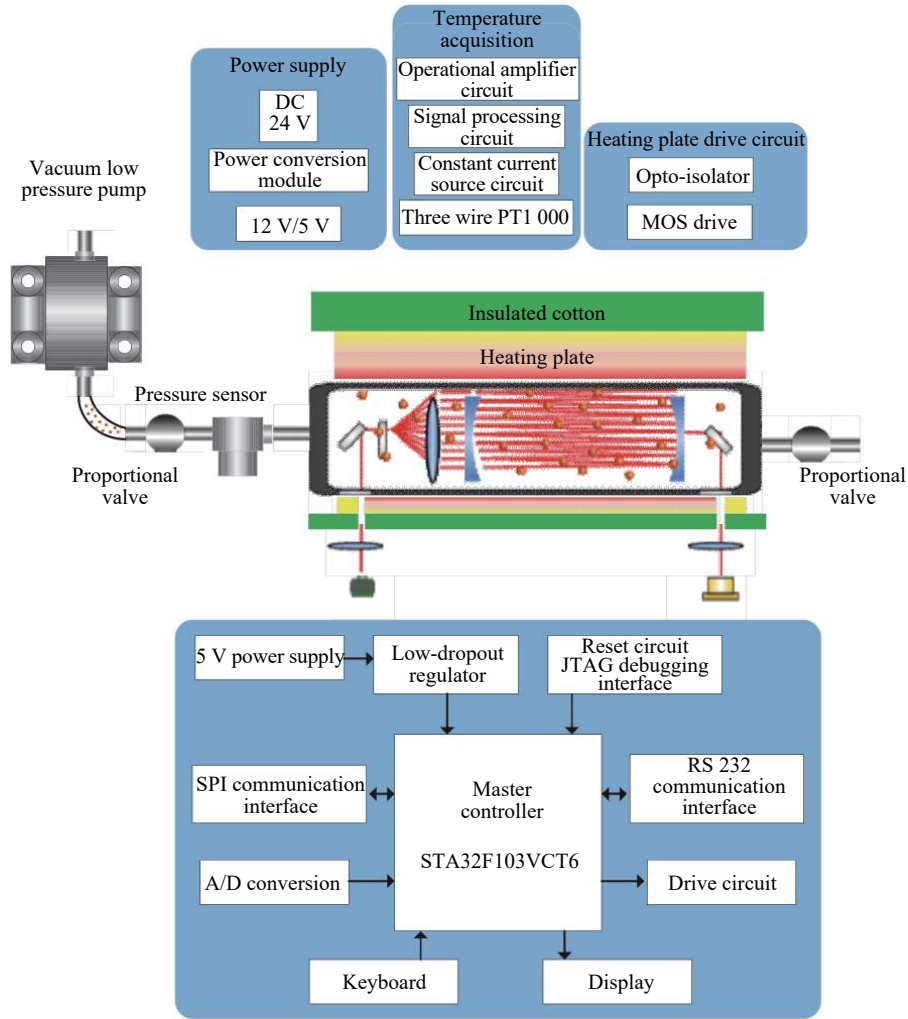


图 1 多通池温度、压强控制系统框图

Fig.1 Diagram of temperature and pressure control system for multi-pass gas cell

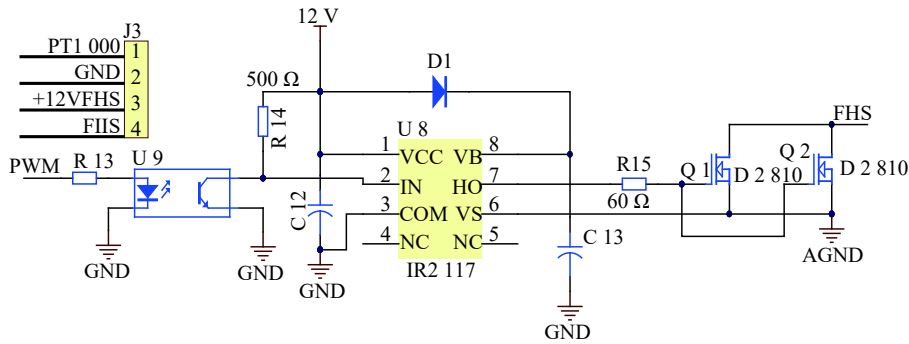


图 2 加热膜驱动电路

Fig.2 Heating film drive circuit

调整柔性 PCB 加热膜功率, 从而控制加热能量。

1.1.2 PT1000 温度采集电路

PT1000 温度采集电路包括惠更斯电桥、仪表放大电路以及 AD 转换电路, 如图 3 所示。

惠更斯电桥由四个电阻组成两个桥臂, 分别为 R1、R2、R3 和 PT100。由温度改变而带来的阻值变化通过惠更斯电桥输出微小电压值。然后通过仪表放大器 AD620, 在压制噪声的同时, 采用差分结构将微小

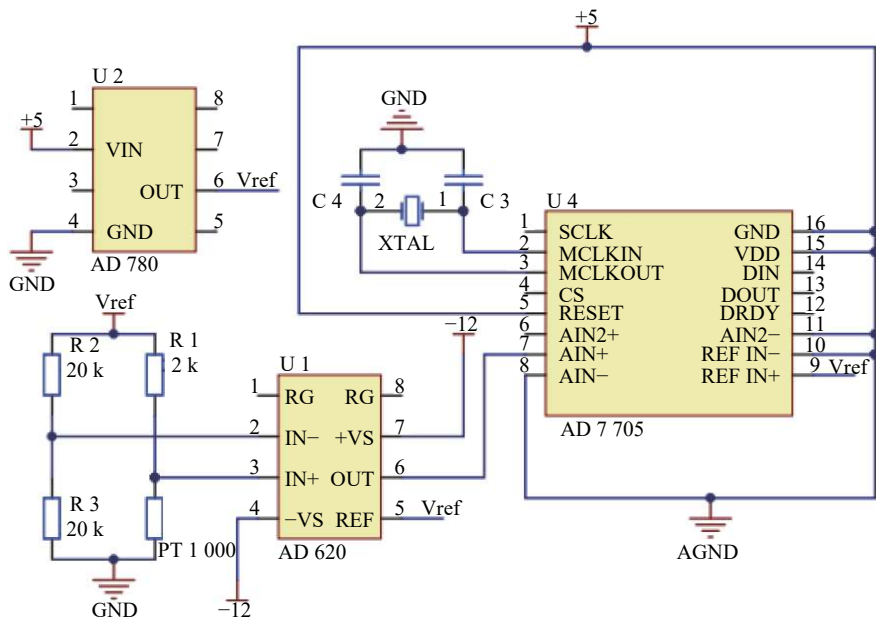


图 3 PT1000 温度采集电路

Fig.3 PT1000 temperature collection circuit

电压值放大变换成大信号, 供 AD 转换器转换。AD 转换器 AD7705 将模拟大信号转换为数字信号量, 主控制器 STM32 将此数字信号与设定目标温度相比较, 然后通过输出 PWM 信号驱动, 调控柔性 PCB 加热膜的发热功率, 从而实现温度的闭环控制。为了实现高精度、高稳定性的温度采集, 惠更斯电桥导线越短越好, 选择温度漂移系数一致的精密电阻作为桥臂电阻。同时选择低噪声、低漂移的仪表放大器, 来抑制温度采集电路的噪声。最后, 选用 Δ - Σ 型 AD 转换

器, 在抑制噪声的同时, 还能具备低功耗的优点。

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。文中系统采用 PMW 驱动方式, 实现对比例阀的调控, 电路如图 4 所示。

比例阀控制电路由两部分组成, 光耦隔离器和驱

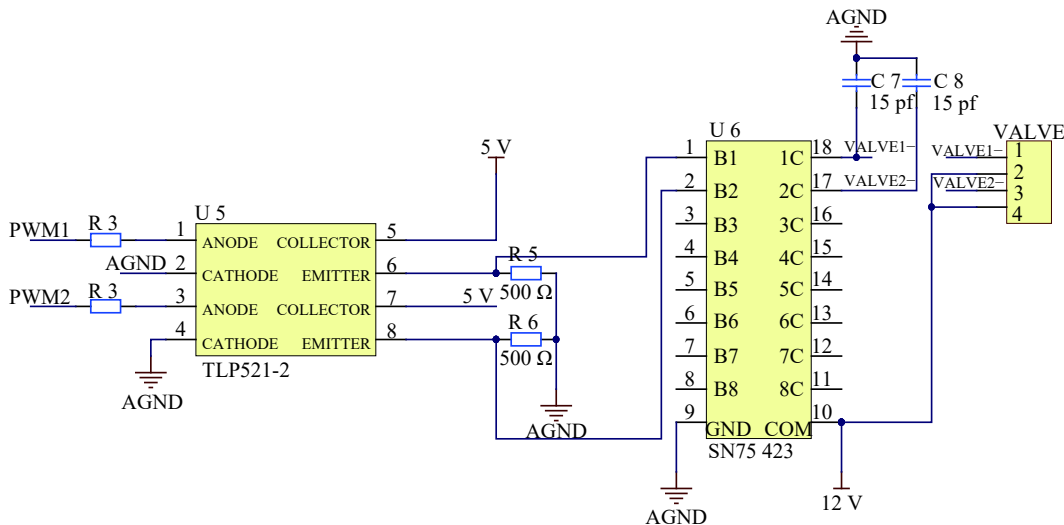


图 4 比例阀控制电路

Fig.4 Proportional valve control circuit

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。

2 改进型 PID 控制算法

多通池温度控制系统采用柔性 PCB 作为加热片,包覆圆柱形多通池。考虑到温度控制系统加热速率,外层包覆保温棉作为隔热装置,使得整个温度控制系统能够实现快速加热,且能够保持温度的长时间稳定。但是一旦加热超调,就很难在短时间内降回到目标温度。同理,多通池压强控制系统也存在这样的问题。所以传统 PID 控制算法^[10]不适用与文中系统,为了做到无超调控制,笔者做了如下改进。

为了解决上述问题,文中系统将对传统 PID 控制算法进行改进,采用积分分离 PID 控制算法^[11]。设定 $|e(k)|$ 为系统响应值,并且根据实际经验设定阈值 ε 。将系统响应值 $|e(k)|$ 与值 ε 进行比较,当 $|e(k)| > \varepsilon$, 系统采用 PD 控制算法,加速系统响应速度,减少控制时间,使系统响应能够快速达到阈值。当 $|e(k)| < \varepsilon$, 将系统切换为 PI 控制算法,使系统能够在较快速的时间,调控到设定目标值,而且没有超调现象的发生。具体实现步骤如下^[12]:

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \alpha \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + \beta \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (1)$$

设置阈值 ε ,

当系统响应值 $|e(k)| > \varepsilon$ 时,系统采用 PD 控制算法,则令 $\alpha = 0, \beta = 1$ 。

当系统响应值 $|e(k)| < \varepsilon$ 时,系统采用 PI 控制算法,则令 $\alpha = 1, \beta = 0$ 。

3 多通池温度、压强控制性能试验

3.1 多通池温度控制性能试验

3.1.1 多通池温度控制下限试验

根据实际工程经验,确定比例、积分和微分 (P, I, D) 三个参数之后,将温度阈值设定为目标温度的 75%, 然后进行多通池温度控制下限试验。在实验室环境温度 $16.48\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行试验,测试结果如图 5 所示。

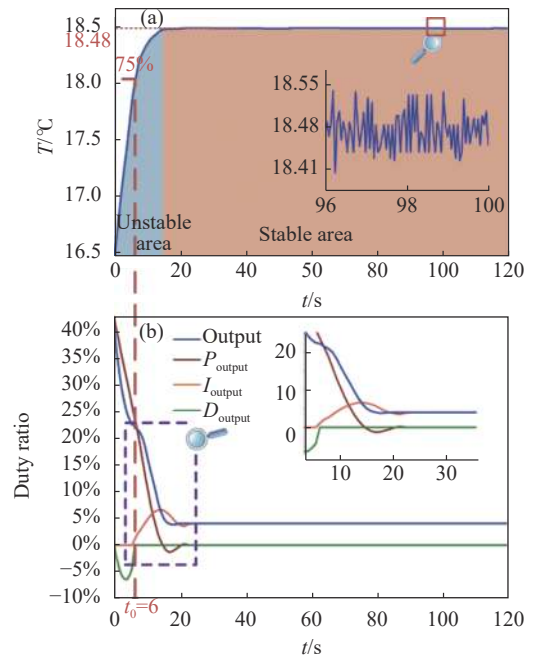


图 5 温度下限控制曲线

Fig.5 Temperature lower limit control curve

3.1.2 多通池温度控制上限试验

由于多通池与外界环境存在热交换,所以研制多通池温度控制系统存在温度控制上限。课题组在实验室环境下进行该试验,结果如图 6 所示。

由图 6 看出,多通池温度从实验室环境温度开始

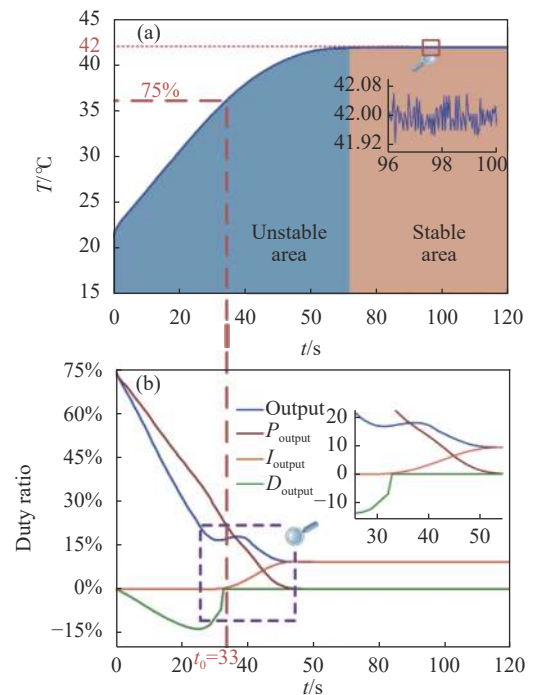


图 6 温度上限控制曲线

Fig.6 Temperature upper limit control curve

上升,当加热时间达到 33 s 时,达到阈值温度,然后温度控制系统从 PD 控制转为 PI 控制。控制时间达到 72 s 时,多通池温度达到温度上限 42 ℃,温度控制精度为±0.07 ℃。

3.2 多通池压强控制性能试验

对多通池内部气体压强开展控制试验,得到的压强数据如图 7 所示。

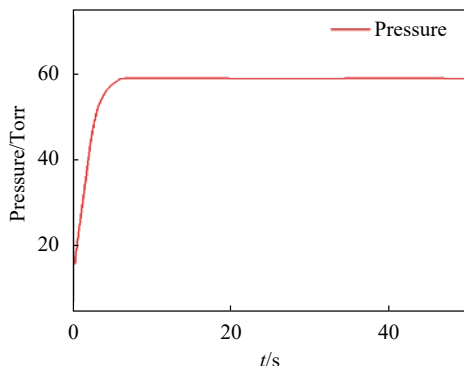


图 7 压强控制曲线

Fig.7 Pressure control curve

首先将多通池内部气体用真空泵抽至 17 Torr (1 Torr ≈133.322 Pa), 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 8 所示。

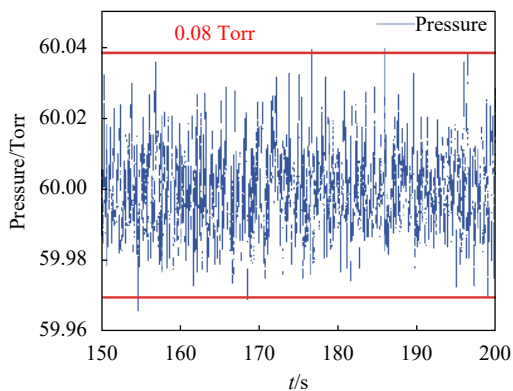


图 8 压强控制数据 (60 Torr)

Fig.8 Pressure control data (60 Torr)

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,最大偏差值为 0.04 Torr。由于大气压强为 760 Torr,多通池内部压强 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压强波动。

3.3 CO₂ 同位素丰度检测试验

将被测 CO₂ 通入多通池内部,采用研制的多通池温度、压强控制系统系统,将多通池温度控制到 18.48 ℃,压强控制到 60 Torr。然后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,结果如图 9 所示。

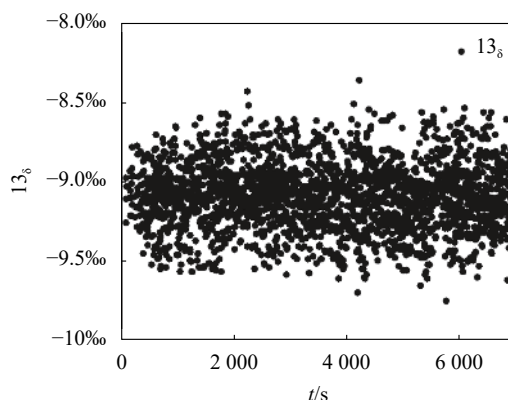


图 9 CO₂ 同位素丰度测量数据

Fig.9 CO₂ isotope abundance measurement data

在长达 2 h 的测量时间内,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‰。该 CO₂ 同位素丰度测量值波动较大,主要由于气源 CO₂ 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地存在温度梯度问题,这样就会使 CO₂ 同位素丰度测量带来误差,降低测量准确度。后续工作将对多通池内部气体温度进行有限元分析,然后采用温度补偿的方法提升 CO₂ 同位素丰度测量准确度。

4 结束语

文中研制了用于红外气体检测的多通池温度、压强控制系统,采用积分分离 PID 控制算法,现实对多通池温度、压强的高精度和高稳定性的控制。结果表明,温度控制范围为 18.48~42 ℃,温度控制精度为±0.08 ℃。多通池压强为 60 Torr 时,控制精度为±0.04 Torr。同时,利用该系统对 CO₂ 同位素丰度进行了测量试验,试验结果表明,系统可以为红外 CO₂

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 两条接近的吸收谱线,使得二者基态能极差更小,提升同位素丰度测量精度。(2) 采用热电制冷器和风扇组成类似于空调的方式,使多通池温度控制波动更小,提升同位素丰度测量精度。(3) 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]. Jilin: Jilin University, 2016: 13-16. (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]. 吉林: 吉林大学, 2016: 13-16.
- [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] Mantz A W, Henry A, Valentin A. Stabilized tunable diode laser measurements of the P(2) line in the ¹³CO fundamental band broadened by helium at temperatures between 11.5 and 298.6 K [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2001, 207(1): 113.
- [5] Gao Wei, Cao Zhensong, Yuan Yiqian, et al. Design of a controllable low temperature cell and application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3): 858-861. (in Chinese)
高伟, 曹振松, 袁恽谦, 等. 可连续控温低温吸收池的研制及其应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(3): 858-861.
- [6] Ma Hongliang, Sun Mingguo, Cao Zhensong, et al. Cryogenic cell for low-temperature spectral experiments of atmospheric molecules [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2617-2621. (in Chinese)
马宏亮, 孙明国, 曹振松, 等. 适用于大气分子低温光谱实验的低温吸收池[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2617-2621.
- [7] Li Qiang, Chen Liheng. Thermal design of infrared detector components in complex heat flux [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0904002. (in Chinese)
李强, 陈立恒. 复杂外热流条件下红外探测器组件热设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0904002.
- [8] 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.
- [9] Wang Zheng, Chang Weiguo, Luan 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 Yanzhang, Qin Jianan, Zhang Xue, et al. Non-magnetism heating system for atomic gas cell used in SERF atomic magnetometer [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(2): 686-692. (in Chinese)
王言章, 秦佳男, 张雪, 等. 用于SERF原子磁力仪的原子气室无磁加热系统[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(2): 686-692.
- [11] Bao Meng. Laser temperature control system based on fuzzy theory and neural network [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(10): 123-126. (in Chinese)
鲍梦. 模糊理论和神经网络的激光器温控系统[J]. *激光杂志*, 2017, 38(10): 123-126.
- [12] Liu Xin, Lv Tieliang, Liu Jianxiang, et al. DFB laser's high-precision and high-stability feed for-ward PID temperature control [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(9): 23-27. (in Chinese)
刘欣, 吕铁良, 刘建翔, 等. DFB激光器的高精度高稳定性前馈PID温控设计[J]. *激光杂志*, 2017, 38(9): 23-27.