

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2004935

高分辨 NH_3 光谱检测的气压控制系统设计*李梦琪^{1,2,3} 张玉钧^{1,2} 何莹^{1,2} 尤坤^{1,2} 王立明^{1,2}(1.中国科学院环境光学与技术重点实验室 合肥 230031; 2.中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031;
3.中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要: 基于伯努利原理设计了被测氨气气压闭环反馈控制系统,研究了低压条件下 NH_3 高分辨光谱特性。系统以被测氨气吸收池压力为控制对象,采用 CDG800 压力传感器测量吸收池气压,1 路 VT317 电磁阀控制高压标准浓度氨气源增大吸收池中的气压,1 路 VT317 电磁阀控制真空泵抽取吸收池的气体降低气压,构成了 NH_3 光谱检测的低压气路;并设计以 Arduino UNO 单片机为核心的压力测量、电磁阀和真空泵闭环反馈控制电路。实验结果显示,设计的气压控制系统可维持稳定时间达 72 h 以上,气压波动在 1 torr 以内;压力为 3.2 torr 时获得了 NH_3 中红外波段 $1\,103.4\text{ cm}^{-1}$ 的 6 条单根吸收光谱信号,计算得到的线强与 HITRAN 数据库中线强数据偏差约在 2.71%~4.71% 之间,实现了重叠谱线完全分离,为后续的高分辨光谱研究提供了宝贵经验。

关键词: 氨气; 低压控制; 线强; 重叠光谱

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Design of air pressure control system for high resolution
 NH_3 spectrum detectionLi Mengqi^{1,2,3} Zhang Yujun^{1,2} He Ying^{1,2} You Kun^{1,2} Wang Liming^{1,2}

(1.Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2.Hefei Institute of Material Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3.University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In this paper, a closed-loop feedback control system for the measured ammonia gas pressure is designed based on Bernoulli's principle, and the high-resolution spectral characteristics of NH_3 under low pressure conditions are studied. The system takes the measured ammonia absorption tank pressure as the control object, uses CDG800 pressure sensor to measure the absorption tank air pressure, one of the VT317 solenoid valve controls the high pressure standard concentration ammonia source to increase the air pressure in the absorption tank, and the other VT317 solenoid valve controls the vacuum pump extraction. The gas in the absorption cell reduces the pressure to form a low-pressure gas circuit for NH_3 spectrum detection, and a closed-loop feedback control circuit for pressure measurement, solenoid valve and vacuum pump with Arduino UNO microcontroller as the core is designed. The experimental results show that the designed air pressure control system can maintain a stable time for more than 72 h, and the air pressure fluctuates within 1 torr. When the pressure is 3.2 torr, six single absorption spectrum signal in the NH_3 mid-infrared band $1\,103.4\text{ cm}^{-1}$ is obtained, and the deviation between the calculated line intensity and the line intensity data in the HITRAN database is between 2.71% and 4.71%, which achieves complete separation of overlapping spectral lines, which provides valuable experience for subsequent high resolution spectrum research.

Keywords: ammonia; low pressure control; line strength; overlapping spectrum

0 引言

NH_3 作为大气含量丰富的唯一一种碱性气体,在空气

质量、生态氮循环、环境污染等方面有举足轻重的作用。因此,准确测量 NH_3 浓度对环境问题有极其重要的意义^[1-5]。

光学法具有灵敏度高、检测速度快、维护量小等优点,是大

收稿日期:2020-08-14

*基金项目:国家自然科学基金青年项目(41805124)、安徽省重点研究和开发计划(201904a07020093)、中科院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190051)资助

• 36 •

气和污染源氨气浓度测量的研究热点。基于光谱法测量 NH₃ 的首要前提是吸收光谱信号的线强及积分吸光度。NH₃ 在中红外波段谱线吸收最强,常被用来作为气体检测的依据。通常情况下被扫描的气体吸收线应是单根独立的,即不会与其他吸收谱线发生重叠形成难以分离的吸收带^[6]。由于 NH₃ 在中红外波段的吸收谱线之间相距极小,极易造成谱线重叠(如 1 103.4 cm⁻¹波数附近就存在 6 条重叠的吸收线),形成吸收带,常温常压下无法获取一条独立的气体吸收谱线,故而会影响测量结果的准确性。针对谱线重叠效应,Hinkley 和 Reid 提出在低压下进行相关的实验测量分析,可以缩小吸收线宽超过一个数量级,提高选择性。通过这种方法获得的吸收线不会随压力变化而加宽,同时不显著降低峰值吸收或灵敏度,具有非常好的实用价值。目前的大多数文献^[7-9]都采用了手动降压的方式来分离 NH₃ 在中红外波段上的重叠谱线。使用此方法时,操作人员需通过监测终端压力,对气路调节阀的进行手动控制,最终达到终端压力调节的功能。这种方法的终端压力的滞后性较大,且对于技术操作人员的技术操作和经验要求高,具有很强的人工依赖性,不具有稳定性和复现性,并不能很好的模拟实际工况。此外,部分实验采用先进等离子体技术获得低压气体光谱,如周广旭^[10]使用 2.45 GHz 微波激励产生低压氢等离子体,通过光纤光谱仪探测其发射光谱,获得特征谱线分布及谱线强度随压强、功率的变化情况。这种方法对实验条件要求高,操作复杂,不具有推广性。因此,制作实用性强的气体压力控制系统,实现 NH₃ 气体分子吸收光谱谱线测量过程中的稳定的低压控制,获得高分辨率的 NH₃ 气体分子吸收光谱,从而更准确地进行 NH₃ 气体分子浓度的反演,对大气环境质量监控具有极其重要的意义。

为了获得稳定压力下的高分辨 NH₃ 光谱谱线,本文采用降低压强的方法分离在常压下重叠的吸收线,设计了气压闭环反馈控制系统。整个控制系统的电气控制部分以 ATmega328P 为核心,可对多个电磁阀进行开关量控制;气路控制部分以样气池为中心,搭建进气路、抽气路以及信号路,可实时测量并修正气池内压力值。利用设计的气压控制系统检测常温低压条件下 NH₃ 的吸收光谱信号及线强参数,为后续的氨气测量精度的提高奠定基础。

1 原 理

1.1 基于低气压的高分辨光谱测量

目前,国内外常采用光学吸收光谱法来检测气体分子,常见的主要方法有差分吸收激光雷达技术(DIAL)^[11],腔衰荡光谱技术(CRDS)^[12],非分散红外光谱技术(NDIR)^[13],傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)^[14],差分吸收光谱技术(DOAS)^[15],可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)^[16]等。相比于其他几种测量技术,TDLAS 技术的灵敏度高(10⁻⁹量级)、光谱分辨高(MHz 量级)、响应时

间快(ms 量级)、实时性好、抗干扰能力强且造价更低,十分适合于长期、稳定的户外实地测量。同时,TDLAS 技术具有通用性,可测量几乎所有的红外分子吸收光谱,且仪器组装统一,当改变被测量气体组分时,只需改变激光器和气源,使之与被测气体相匹配即可。目前该技术已被广泛应用于气体特征光谱基本参数研究、大气痕量气体检测、机动车尾气检测、工业流程控制、燃烧流场诊断、医疗诊断等各个方面^[17]。

直接吸收光谱技术是 TDLAS 技术测量气体浓度的基本方法,其检测原理如图 1 所示。通过改变量子级联激光器(QCL)的注入电流和温度,对 QCL 的输出激光波长进行调谐,调谐好的出射激光通过充有待测气体的吸收池中心被探测器检测到,经过信号放大到示波器得到吸收光谱,根据实际测得的吸收光谱,可以得到透过率函数 $T(\nu)$ 和吸光度函数 $A(\nu)$,进而反演出浓度结果。这种技术简单可行,可靠性高。

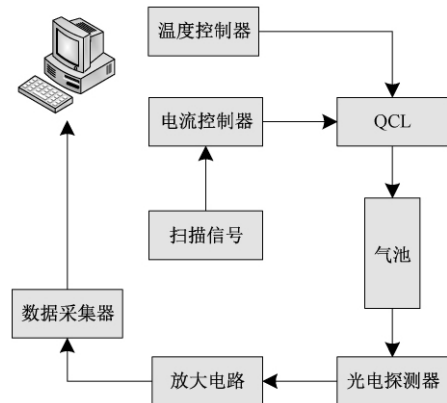


图 1 TDLAS 光谱检测原理

由分子动力学理论可知,密闭容腔内的气体分子做大量无规则运动导致频繁碰撞容腔内壁,从而产生气体压强,通常,100 kPa(760 torr)以下的气压视作低压。低压条件下,缓慢降压时气体可视作理想状态气体,满足理想状态方程 $PV = nRT$,显然,气体的压力与气体体积、气体温度、气体分子数量相关。通常,采用改变气体体积、温度、分子数量的方式来对气体的压力进行改变。由于本文选用定容气池进行实验分析,其体积不变,且温度变化微小,难以检测,故采用改变气体分子数量的方式改变气体压力值。由于本文需要对 NH₃ 在中红外波段的重叠光谱进行降压分离(常温下从一个标准大气压到真空),因此,拟设计的气压控制系统的压力范围应在 0~760 torr,且至少能维持压力在一天内保持在 ± 1 torr 范围内不变(保证单次实验测量的准确性)。

1.2 气压控制模型

从自动控制理论的角度来分析,控制系统一般可分为以下 5 个环节:比较环节,控制器,执行环节,被控对象,检测环节,如图 2 所示。

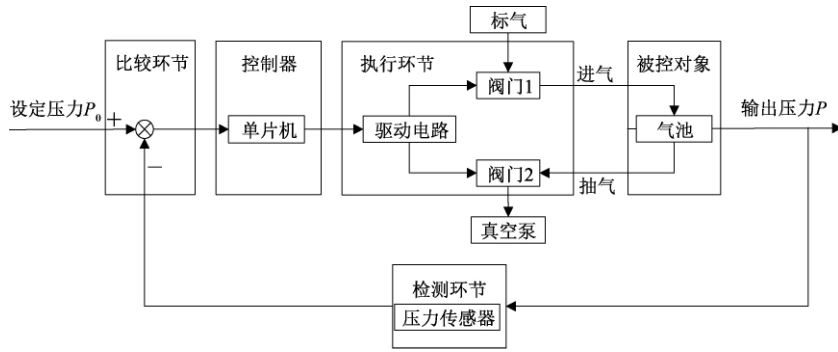


图 2 气体压力控制部分原理

输入压力信号 P_0 和测量压力信号 P 经计算产生压力差信号 ΔP ：

$$\Delta P = P_0 - P \quad (1)$$

又样气体积流量等于采样管的截面积与气体平均流速的乘积，故由伯努利方程得：

$$Q = A \cdot v = A \sqrt{2|\Delta P|/\rho} \cdot \frac{\Delta P}{|\Delta P|} \quad (2)$$

式中： Q 是所需的样气体积流量 ($Q > 0$ 时充气, $Q < 0$ 时抽气); A 是气路管道截面积。结合克拉伯龙方程可求出进/出气体的理论体积流量计算公式为：

$$Q = A \sqrt{2|\Delta P| \cdot \frac{RT}{PM}} \cdot \frac{\Delta P}{|\Delta P|} \quad (3)$$

式中： R 为气体常量； T 为气体的温度； M 为气体的摩尔质量。实验中采用 100×10^{-6} 浓度的 NH_3 标气，其气体摩尔质量 $M = 17 \text{ g/mol}$ 。个体气体常量 $R = R_0/M$ ，其中 R_0 表示理想气体常数，一般取值为 8314 J/K/mol ，故 $R = 287.1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。实验在常温下进行， $T = 298 \text{ K}$ ，只要测得气体的压强 P ，管道截面积 A 即可求得气体流量。

基于式(3)对气压控制系统进行数学建模，可得式(4)如下：

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} \frac{Q}{V} \left[S_1 p_{\text{atm}} d_1 \sqrt{1 - \left(\frac{p - p_{\text{atm}}}{1 - \sigma} \right)^2} - S_2 p d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{p_t - p}{1 - \sigma} \right)^2} \right], & \frac{p}{p_{\text{atm}}} > 0.26, \frac{p_t}{p} > 0.26 \\ \frac{Q}{V} \left[S_1 p_{\text{atm}} d_1 \sqrt{1 - \left(\frac{p - p_{\text{atm}}}{1 - \sigma} \right)^2} - S_2 p d_2 \right], & \frac{p}{p_{\text{atm}}} > 0.26, \frac{p_t}{p} \leq 0.26 \\ \frac{Q}{V} \left[S_1 p_{\text{atm}} d_1 - S_2 p d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{p_t - p}{1 - \sigma} \right)^2} \right], & \frac{p}{p_{\text{atm}}} \leq 0.26, \frac{p_t}{p} > 0.26 \\ \frac{Q}{V} \left[S_1 p_{\text{atm}} d_1 - S_2 p d_2 \right], & \frac{p}{p_{\text{atm}}} \leq 0.26, \frac{p_t}{p} \leq 0.26 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中各参数物理意义如表 1 所示。

表 1 数学模型参数表

参数	物理意义
p_t	真空泵与管道接口处的气体压力
S_v	真空泵的抽速
p_v	真空泵极限压力值
σ	临界压力比, 0.26
S_1	充气阀口通流面积的总和
S_2	抽气阀口通流面积的总和
d_1	充气电磁阀的开启时间
d_2	抽气电磁阀的开启时间
k	绝热系数, 1.4
V	容腔体积, 260 mm^3

2 系统设计

2.1 气路设计

气压控制如图 3 所示，主要由进气气路、抽气气路、信号路 3 部分组成。进气路主要包括标气、流量计、高速开关电磁阀(阀 1)、气池，负责向气池内鼓气；抽气路包括气池、单向阀(阀 4)、真空泵和高速开关电磁阀(阀 2)，缓慢抽去气池内气体；信号路主要负责输送压力控制信号控制另外两路上电磁阀的通断。气路管道为定制 316 防腐蚀不锈钢管，内径 2 mm，外径 4 mm，管道流通截面积为 $4\pi \text{ mm}^2$ 。气路的前端接到气瓶上，后端通过一个三通阀(阀 3)分别接入压力传感器和真空泵。为保证气路的严密性，实验中所有气管接头均采用 Swagelok 公司生产的标准卡套管接头。

进气时样气经过气池从左至右排出，当进气速度不变时，气池内压力在一定范围内保持稳定，压力传感器接在静态气池的出气口处实时地检测待测气体的压强，并转换成压力信号 P_1 输入到单片机中，与设置的压力信号 P_0 作对比，产生的误差压力信号 $\Delta P = P_0 - P_1$ 作为控制信号输出到电磁阀的驱动电路，通过控制电磁阀开启和闭合的时

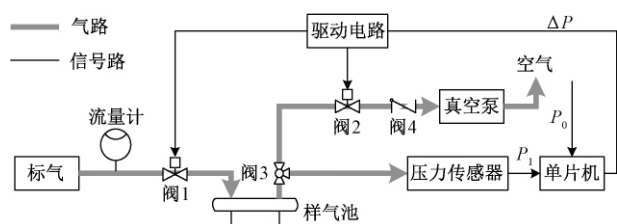


图 3 气压控制系统

间控制气池内进气和抽气的流量,从而进一步地控制气池内气体压力。

2.2 控制系统设计

测量电路采用 ARDUINO 单片机作为控制核心,通过压力传感器将采集到的模拟信号经过功放滤波电路处理后,输入到单片机中进行计算,从而控制特定电磁阀的开启闭合时间,进一步控制气路中的进气或抽气流量,其硬件电路如图 4 所示。



图 4 硬件电路

1) 压力计

选用 CDG800 陶瓷薄膜真空压力传感器来检测气池内部的气体压力,该压力传感器采用工作电压为 18~

30 VDC,功率 1.4 W,输出电压 5 或 10 V,工作温度为 -40 °C ~ 65 °C,量程为 0 ~ 1 333 hPa,精确度可达 ±0.15% (约 ±1.14 torr),输出电流 0~3 mA。该压力计采用陶瓷膜片增加抗腐蚀能力,适合对 NH₃ 等腐蚀性气体进行测量。

CDG800 是一种小型、低成本的真空压力计,它可通过以下多种方式来显示真空压力。

- (1)通过自带的数码管直接显示压力值;
- (2)通过直接输出模拟量线性电压(0~10 V);
- (3)通过 RS485 串口将压力值传给外部单片机;

本文在实际的低压系统实验中,采用方式(1),利用气压计中的单片机采集到的电压信号结合 CDG800 的压力与电压转换公式:

$$P = (U/10) \cdot P(F.S) \tag{5}$$

式中:U 为电压信号;P(F.S)为常数:1 000 torr;P 为输出的压力值,从而可以在数码管上实时显示气池当前的压力值。例如当电压信号 U = 5 V 时,显示当前压力值 P = 500.0 torr。

同时,本文采用方式(3),通过 RS485 串口将压力数据传给主机进行处理,其串口通信指令格式如表 2 所示。

表 2 PC→规管压力值读取指令

ASCII 码	:	ADH	ADL	D	CHKH	CHKL	CR
16 进制码		3A	3*	3*	44	**	** 0D

其中,CHKH 和 CHKL 为校正位,其值由 ADH、ADL 和 D 值的异或结果决定。设置串口通讯速率为 9 600 bit/s,通信地址为 00,在上位机上读取压力值内容,上述指令 16 进制码可写作“3A 30 30 44 34 34 0D”。上位机显示的串口数据格式如表 3 所示。

表 3 规管→PC 压力值读取指令

ASCII 码	:	ADH	ADL	D	*	*	*	*	*	CHKH	CHKL	CR
16 进制码		3A	3*	3*	44	**	**	**	**	**	**	0D

其中,CHKH 和 CHKL 为校正位,其值由 ADH、ADL、D 以及所有显示值的异或结果决定。当压力信号为 P = 500.0 torr 时,其显示值为“:00D500.06F”。RS485 串口数据传输过程在 2.3 中叙述。

2) 高速开关电磁阀及驱动电路

为提高压力控制系统的控制效果,其控制回路的核心元件一般采用昂贵的体积较大的比例阀,提高成本,且增加操作难度。在实际中,往往可以使用价格低廉且体积较小的高速开关电磁阀作为控制回路的核心元件以降低系统成本。

高速开关电磁阀是一种常见的数字式电路转换元件,其使用简单、体积小巧、价格低廉,是常用的电路转换元件,

可以用于管道中的流量调节或者压力调节。高速开关阀可以直接连接到控制器,不需数模/模数转换电路,且只有打开、闭合两种状态,可以通过数字脉宽调制(PWM)技术对其进行比例控制,提高控制精度。其使用寿命长,安全系数高,拥有出色的控制性能和抗干扰能力,本文采用 SMC 公司生产的 VT317 系列高速开关电磁阀,适用压力范围 0~0.9 MPa,流量 100 L/min,重复精度好。工作电压 12 V,功率 6 W,单片机可数字输出 40 mA 的 5 V 电压信号,不足以直接驱动电磁阀工作,因此需要增加驱动电路。

3) 气压源

正气压源采用 100×10⁻⁶ 的 NH₃ 标气,压力为一个标准大气压:

$$P_{\text{atm}} = 101.325 \text{ kPa} = 760 \text{ torr} \quad (6)$$

由式 (3) 可计算得, 充气时间为 $d_1 = 27 \times 10^{-6} / \sqrt{|760 - P|}$, 单位为 min。

负气压源采用型号为 2XZ-2B 旋片式真空泵, 其抽速为 2 L/s, 管径为 $\phi 30$, 极限真空压力为 0.06 Pa (约 0.00045 torr), 逼近真空。

由真空泵的抽速公式:

$$S = 2.303 \cdot V/d \cdot \log(P_1/P_2) \quad (7)$$

可知, 抽气时间 $d_2 = 6 \times 10^{-7} \cdot \log(P_0/P)$, 单位为 min。

4) 系统电路

Arduino UNO 是以 ATmega328P 为控制器的开发板。ATmega328P 的核心处理器为 AVR, 其闪存容量为 32 kB。工作电压为 1.8~5.5 V。工作频率为 0~20 MHz。拥有 8 路 10 位 ADC, 可编程的串行 USART。

本系统中是将开发板作为主机通信模块, 与压力传感器 CDG800 进行串口通信。同时 ATmega328P 对接收到的压力信号与压力设定值进行作差处理, 从而控制后续电磁阀 1 与阀 2 的开闭状态, 保证气池内的压力始终稳定可控, 其电路如图 5 所示。

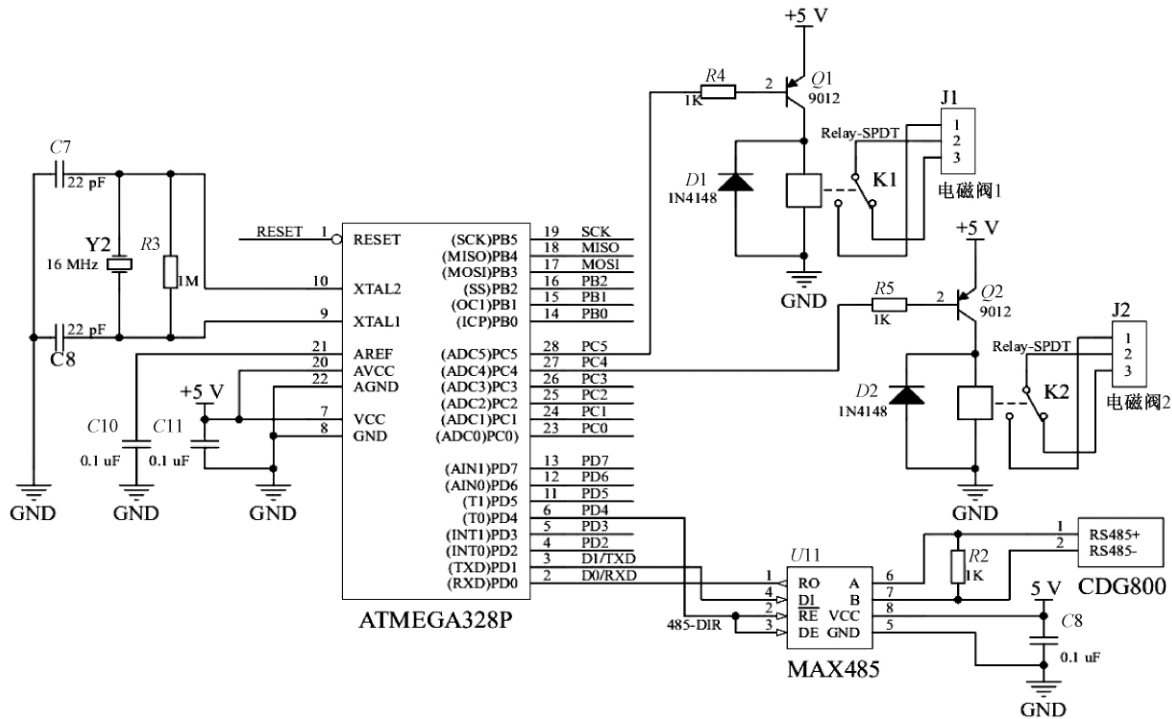


图 5 气压控制系统电路

单片机主芯片 ATmega 328P 通过 MAX485 与压力传感器 CDG800 进行串口通讯接收气池中的实时压力, 经计算后产生相应的 PWM 波控制电磁阀的开启与闭合。以电磁阀 1 为例, 当光耦没有 PWM 信号输入时, 光耦发光二极管截止, 光耦的光电晶体管截止, Q2 截止, 电磁阀不工作; 当光耦有 PWM 信号输入时, 光耦发光二极管导通, 触发光电晶体管也导通。24 V 电源经 5.1 k 的电阻, 光电晶体管的 CE 极, 电阻 R3 分压使 NMOS IRF540N 的栅极为高电平, 触发 MOS 管导通, 电磁阀触发动作。其中, 二极管 D1 为电磁阀的泄放二极管, 防止 NMOS 被高压损坏。电容 C1 起滤波作用。

2.3 测控流程

1) 气压测量

气压测量主要通过压力传感器 CDG800 的 RS485 接口将串口数据传输到单片机 ATmega328P 中, 这个传输过程本质上为气压计中的单片机与开发板中的单片机通过

485 总线进行通信的过程。压力传感器中的单片机将所得的数字量乘以说明书中的公式, 即为当前压力值, 送入 RS485 串口。此时开发板中的单片机作为主机, 压力传感器中的单片机作为从机, 采用的为 2 线制, 半双工通信设置。即主机与从机采用问答形式进行通信, 首先主机发出请求获取当前压力数据, 然后从机通过串口将压力数据传给主机。具体过程如图 6 所示。

2) 气压控制

气压控制流程如图 7 所示。当 $|\Delta P| < 1 \text{ torr}$ 时, 可近似认为气池内压力达到目标值, 气路中所有阀门均关闭, 气池密封稳定。否则, 当 $\Delta P < 0$ 时, 气池内部压力高于设定压力值, 此时进气路电磁阀关闭, 出气路电磁阀打开, 真空泵从气池内抽气; 当 $\Delta P > 0$ 时, 气池内部压力低于设定压力值, 此时, 进气路电磁阀打开, 出气路电磁阀关闭, 标气向气池内鼓气。

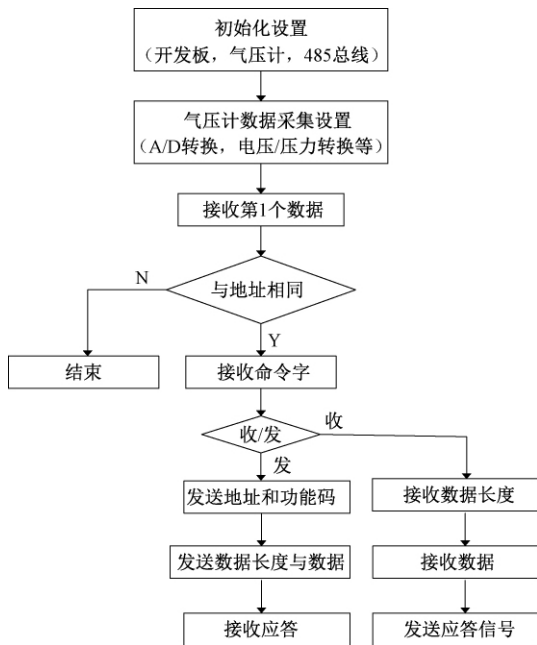


图 6 RS485 通信过程

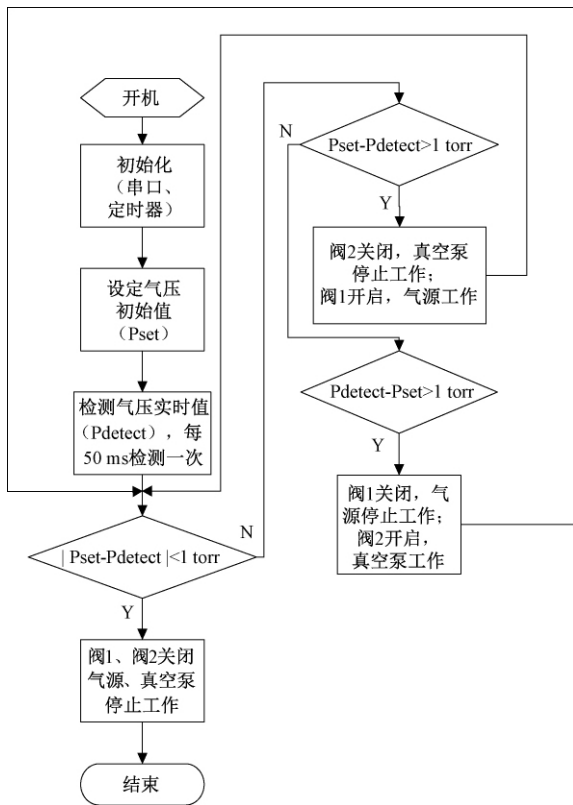


图 7 气压控制流程

3 实验结果

根据设计的低压控制气路搭建实验平台,如图 8 所

示。首先,验证平台性能。对设计的气压控制系统进行气压稳定度测量:采用 100×10^{-6} 的 NH₃ 标气进行实验测试,设定压力值为 2 torr,观测压力值的变化,如图 9 所示。

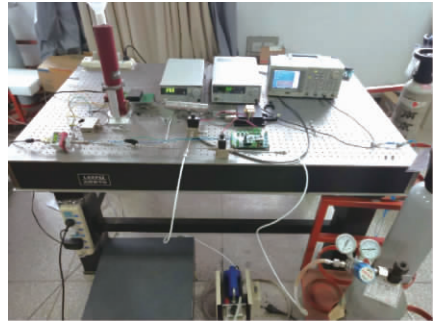


图 8 NH₃ 光谱测量实验平台

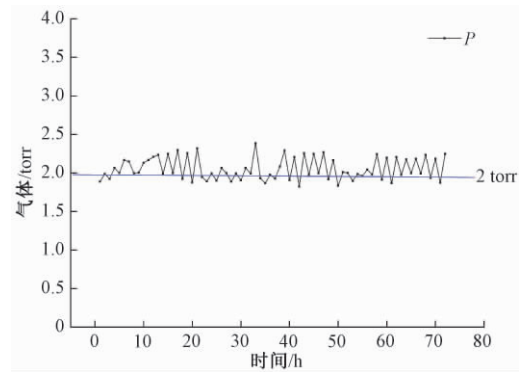


图 9 气压控制系统稳定时间

由图 9 可知,设计的气压控制系统能维持压力在 72 h 以上,气压波动范围 < 0.6 torr,满足设计要求。

其次,对低压条件下 NH₃ 的气体吸收光谱谱线进行测量。外加锯齿波扫描信号(频率 1 kHz,峰峰值 0.060 V,占空比 9 : 1),调谐激光器工作温度为 33.8 °C,工作电流 400 mA,使其出射波长通过气池中心,发现当气池压强降低到 $P = 3.2$ torr 时,NH₃ 气体在中红外波段的重叠光谱可实现完全分离。对采集到的 NH₃ 吸收光谱信号进行背景扣除、时域-频域转换、Voigt 线型拟合,得到其吸收区域的线型拟合曲线如图 10 所示。

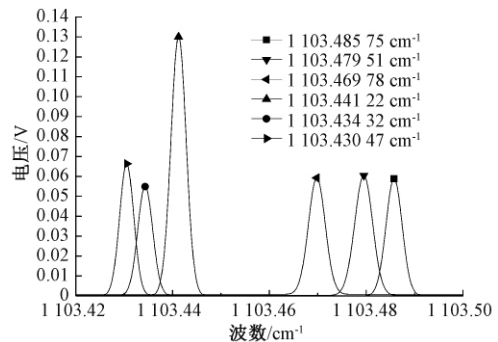


图 10 吸收光谱 Voigt 线型拟合

根据图 10 和朗伯比尔定律变形公式,可计算得到谱线的线宽、线强等参数如表 4 所示。

表 4 吸收光谱部分参数表

波数/cm ⁻¹	线强 S/(cm ⁻² ·atm ⁻¹)	线宽 $\Delta\nu_L$ /(cm ⁻¹)	半宽之和/(cm ⁻¹)	中心距离 Δx /(cm ⁻¹)
1 103. 430 47	1. 704 39	0. 003 4		
1 103. 434 32	1. 463 62	0. 004 0	0. 003 70	0. 003 85
1 103. 441 22	3. 690 10	0. 002 0	0. 003 00	0. 006 90
1 103. 469 78	1. 878 25	0. 002 4	0. 002 20	0. 028 56
1 103. 479 51	1. 970 89	0. 004 4	0. 003 40	0. 009 73
1 103. 485 75	1. 883 83	0. 003 9	0. 004 15	0. 006 24

由表 4 清晰可见,压力为 3.2 torr 时,相邻谱线的半宽之和小于其中心距离,重叠谱线完全分离,该气压控制系统可靠。将低压实验所测得的线强数据与 HITRAN 数据库中线强数据进行比较,可得两者偏差约在 2.71%~4.71%,符合 HITRAN 数据库数据的偏差要求。

4 结 论

本文设计了用于测量 NH₃ 的闭环反馈控制气压自动控制系统,该测量气路根据压力计所测得的压力计算实时压差,采用单片机控制电磁阀的通断,从而控制气池内的气压值。现场实验结果表明,该控制气路系统能够准确测得气池内气压(精度<1 torr/d),并维持稳定时间高达 72 h 以上。该气压自动控制系统可测得清晰的单根光谱信号,改善了手动操作带来的种种不足,为后续低压条件下 NH₃ 气体浓度的测量提供了有力的硬件支撑。

参考文献

- [1] 何莹. 基于激光吸收光谱的主要人为氨排放源在线检测技术与应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [2] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [3] FOWLER D, PYLE J A, RAVEN J A, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century: Introduction [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2013, 368(1621): 20130165, DOI:10.1098/rstb.2013.0165.
- [4] VITOUSEK P M, MENGE D N L, REED S C, et al. Biological nitrogen fixation: Rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2013, 368(1621):20130119.
- [5] BHATTACHARYYA P, ROY K S, NEOGI S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in

tropical flooded soil planted with rice [J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124:119-130.

- [6] 高强. 甲烷气体监测的可调谐多模二极管激光光谱技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] 陈坤,李永华. 基于 TDLAS 原理的多光程高精度微量气体检测系统[J]. 应用激光, 2018, 38(6): 993-999.
- [8] KROK P, PETERS O, WITTMANN S,等. 太赫兹时域光谱仪在陶瓷涂层及低压气体检测中的应用[J]. 红外, 2020, 41(2): 39-45.
- [9] 陈奕航,鞠昱,韩立. 光声光谱与 TDLAS 技术在不同气压下的特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1):27-31.
- [10] 周广旭. 低压氢等离子体发光光谱[J]. 原子与分子物理学报, 2019, 36(1):73-81.
- [11] 范广强,张天舒,付毅宾. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 241-248.
- [12] 胡仁志,王丹,谢品华. 二极管激光腔衰荡光谱技术测量大气 NO₂[J]. 光学学报, 2016, 36(2):312-319.
- [13] 常敏,陈征. 基于非分散红外技术的水面 CO₂ 浓度检测系统设计[J]. 电子科技, 2017, 30(9):53-55,59.
- [14] 王薇,刘文清,张天舒. 利用傅里叶变换红外光谱技术连续测量环境大气中水汽的稳定同位素[J]. 光学学报, 2014, 34(1):292-298.
- [15] 梁玉洁. 基于光纤收发一体的差分吸收光谱空气监测系统研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [16] 张立芳,王飞,俞李斌,等. 基于可调谐激光吸收光谱技术的脱硝过程中微量逃逸氨气检测实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015(6):185-188.
- [17] 范凤英,王立军,李钦蕾. 应用可调谐外腔半导体激光器测量锂同位素比率[C]. 北京核学会,第八届(2012年)北京核学会核应用技术学术交流会论文集,2012: 47-50.

作者简介

李梦琪,硕士研究生,主要研究方向为信号采集与数据处理。

E-mail:kd2017@mail.ustc.edu.cn