第 20 卷 第 5 期
2025 年 9 月

大 气 与 环 境 光 学 学 报
JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND ENVIRONMENTAL OPTICS

Vol.20 No.5
Sep. 2025

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.010
CSTR: 32220.14.gk202505010

一种高精度气体压力控制算法设计与实现

张 敬[1]， 张天舒[2]， 钱广程[1]， 史宇辰[3]， 董云升[2*]

(1 安徽大学物质科学与信息技术研究院，安徽 合肥 230601;
2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽精密机械研究所，安徽 合肥 230031;
3 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院，安徽 合肥 230026)

摘 要: 非甲烷总烃 (NMHC) 长期以来一直是危害较大的一类空气污染物，常使用非甲烷总烃分析仪进行监测。该类分析仪的工作原理决定了其对气体流量的响应速度和控制精度均有较高要求。为满足分析仪的相关要求，同时考虑到实际气体流量变化的瞬时性特点，本文以位置式PID算法为基础，以模糊控制算法为辅助调节手段，提出了一种模糊控制PID算法，从而通过调整气体压力来实现对气体流量的高精度控制，并设计开展了不同性能验证实验。实验结果表明，与传统PID算法相比，本文所提出的模糊控制PID算法响应速度快、超调量小、调节精度高，可根据压力控制设定值与实际值的误差来计算比例阀开合大小，以达到高效控制气体流量的设计目标，最终实现空气污染区域非甲烷总烃浓度的精确测量。利用该控制算法，可以将各路气体控制压力误差控制在 ±0.1 kPa 以内。该算法稳定性高，实现较为简单，且易应用于嵌入式系统，为非甲烷总烃分析仪在环境监测方面的应用提供了参考。

关 键 词: 非甲烷总烃; PID 算法; 气体压力控制; 模糊控制

中 图 分 类 号 : X851; TP301.6　　**文 献 标 识 码 :** A　　**文章编号:** 1673-6141(2025)05-676-011

Design and implementation of high precision gas pressure control algorithm

ZHANG Jing[1], *ZHANG Tianshu*[2], *QIAN Guangcheng*[1], *SHI Yuchen*[3], *DONG Yunsheng*[2*]

(1 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3 School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Non-methane total hydrocarbon (NMHC) has long been a class of the most harmful air pollutants, which are often monitored using NMHC analyzer. The working principle of NMHC analyzer determines its high requirements for response speed and control precision to the gas flow. In order to meet the requirements of NMHC analyzer and the instantaneous characteristics of actual gas flow, a high precision gas pressure control algorithm is proposed in this work taking the position PID algorithm as a

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3705503)
作者简介: 张 敬 (1998-), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事大气监测仪器自动控制系统设计与研究。E-mail: jzhang@aiofm.ac.cn
导师简介: 董云升 (1983-), 安徽阜阳人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事大气环境探测技术、激光技术及其应用等方面的研究。
E-mail: ysdong@aiofm.ac.cn
收稿日期: 2022-07-20; **修改日期:** 2025-09-01
*通信作者。

base and the fuzzy control algorithm as an auxiliary adjustment means. The algorithm can achieve high precision control of gas flow by adjusting the gas pressure, and different experiments are designed to verify the performance of the algorithm. Experimental results show that compared with traditional PID algorithms, the proposed fuzzy control PID algorithm has faster response speed, smaller overshoot and higher regulation precision. It can calculate the opening and closing size of proportional valve according to the error between the set value and the actual value of pressure control, thus achieving the design goal of efficient control of gas flow and realizing the accurate measurement of NMHC concentration in air pollution areas. By using this control algorithm, the error of each gas control pressure can be controlled within ±0.1 kpa. The proposed algorithm has high stability and simple implementation, and is easy to be applied to embedded systems. It provides a reference for the application of NMHC analyzer in environmental monitoring.

Key words: non-methane total hydrocarbon; PID algorithm; gas pressure control; fuzzy control

0　引　言

根据国标 (HJ 604-2017)，非甲烷总烃 (NMHC) 定义为从总烃测定结果中扣除甲烷后的剩余值，而总烃是指在规定条件下在气相色谱氢火焰离子化检测器上产生响应的气态有机物总和[1]。人为排放的NMHC主要来源于油类燃烧、有机物焚烧、溶剂蒸发等。NMHC具有较大的光反应活性，在日照下达到一定条件易产生光化学烟雾，会对人体健康和环境造成很大危害[2]。随着我国现代化工业的发展，NMHC的实时监测和管理势在必行。常见的NMHC分析仪体积较大，携带和测量不便，便携式非甲烷分析仪体积小、易携带，可以满足单人随时随地测量。气相色谱法是国内外用于检测有机化合物较为成熟的方法，色谱柱分离待测样气，并将有机气体送入氢火焰离子化检测器 (FID) 进行高温电离，释放出自由离子和电子。仪器测量原理决定了系统对氢气、空气和载气的流量有严格要求，仪器内压力传感器通过反馈控制比例阀开合大小，从而调节气体流量，流量过大易造成采集时间不足和燃烧不充分，过小则无法保证测量时长；当压力误差控制在 ±0.1 kpa 以内时，仪器能够稳定运行。进样和采样模式切换时，气路发生改变，气体流量发生瞬时波动，要求系统迅速响应使流量恢复至设定值，所以对气体流量控制的精度和响应速度尤为重要。

传统比例、积分、微分 (PID) 控制算法无法兼顾超调量与调节时长，若保证调节时间短，则会有较大的超调量；若保证超调量小，则会使调节时长增加。在传统PID调节的基础上加入模糊控制，根据系统状态动态调节PID参数，兼具了调节时长短和超调量小的优点[3,4]。本文以位置式PID算法为基础，以模糊控制[5,6]算法为辅助调节手段提出了一种高精度气体压力控制算法，并设计了传统PID与模糊控制PID仿真对比实验、实时动态响应对比测试实验及实际运行误差实验，实验结果表明该算法执行效率高，不仅提高了气体流量控制响应速度、保证了控制精度，而且易于在便携式非甲烷总烃分析仪上实现。

1　工作原理

1.1　仪器工作原理

非甲烷总烃分析仪大致分为温控单元、采样单元、进样和色谱分离单元、阀控和数据处理单元以及显示

与监控单元，结构如图1所示。其中，气体流量控制是采样单元以及进样和色谱分离单元的核心环节。

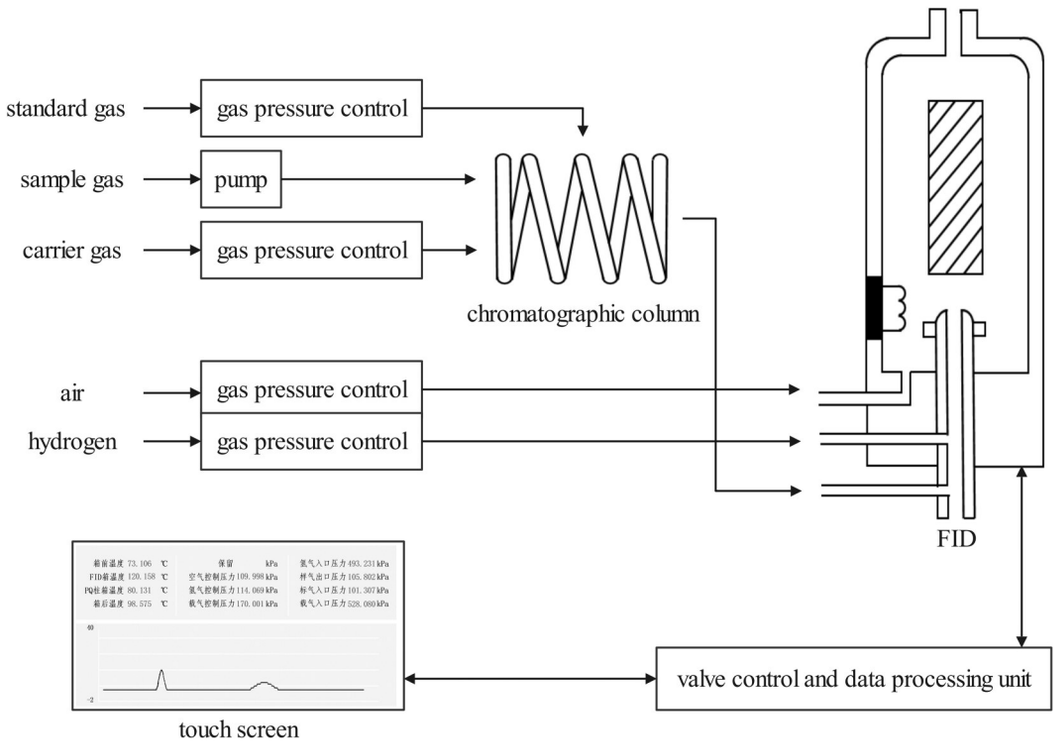

图 1 非甲烷总烃分析仪结构图

Fig. 1 Schematic diagram of non-methane total hydrocarbon analyzer

采样单元使用载气进行气路清洗，并通过气泵抽取空气进入FID为燃烧做准备。当设备温度、空气及载气的控制压力达到设定值后将氢气通入，气体压力控制装置 (EPC) 调节氢气流量，达到设定范围通入FID点火。随后气泵将样气抽入总烃定量环和甲烷定量环，进入进样和色谱分离单元。随后一路载气携带总烃定量环中的样气经过总烃色谱柱流入FID，另一路载气携带甲烷定量环中的样气由甲烷色谱柱流入FID。由于甲烷柱阻力比总烃柱大，FID先对总烃柱中流出的气体进行燃烧，再对甲烷柱中流出的甲烷进行燃烧，从而分别得到非甲烷总烃的质量浓度和甲烷的质量浓度，这两个数值之差即为所求的非甲烷总烃质量浓度。

最终呈现的色谱曲线即样气燃烧产生的电荷量，单次测量过程中色谱曲线显示3个峰值，分别为总烃峰 (总烃柱产生的氧峰和总烃峰叠加)、甲烷柱氧峰及甲烷峰[1,7]。气体流量大小决定了样气到达FID的时间，流量过大会使3峰较近甚至重叠，峰高且窄，采集时间过短从而导致较大误差；流量过小会使测量时间延长，超过标准规定的测量时长[1]。为了满足各路气体控制压力误差在 ±0.1 kPa 以内、测量时长不大于 2 min，设计了以下控制算法。

1.2 PID算法原理

在实际控制系统中，设定值与实际输出值有一定偏差，将偏差按比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，其控制规律为[8,9]

$$\mu(t)=K_P e(t)+K_I\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+K_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}, \tag{1}$$

式中$\mu(t)$为PID控制器的输出信号，$e(t)$为偏差信号，K_P、K_I、K_D分别为比例、积分、微分系数。

PID控制算法通常分为增量式PID控制算法和位置式PID控制算法。

1.2.1　位置式PID算法

位置式PID控制算法用求和代替积分，用差分代替微分来进行离散化[10]，可以表示为

$$P_n=k_c\left[e_n+\frac{T_s}{T_i}\sum_{i=0}^{n}e_i+\frac{T_d}{T_s}(e_n-e_{n-1})\right], \tag{2}$$

式中P_n为第n次采样时计算机输出值，e_n为第n次采样时的偏差值，k_c、T_i、T_d和T_s为比例增益、积分时间常数、微分时间常数和调节周期。

1.2.2　增量式PID算法

由式 (2) 可得第n-1次表达式为[11]

$$P_{n-1}=k_c\left[e_{n-1}+\frac{T_s}{T_i}\sum_{i=0}^{n-1}e_i+\frac{T_d}{T_s}(e_{n-1}-e_{n-2})\right]. \tag{3}$$

则增量式PID算法可以表示为

$$\Delta P=P_n-P_{n-1}=k_c(e_n-e_{n-1})+\frac{k_cT_s}{T_i}e_n+\frac{k_cT_d}{T_s}(e_n-2e_{n-1}+e_{n-2}). \tag{4}$$

相比较而言，增量式PID算法数字控制器输出的只是控制量的增量，计算时不需要累加；位置式PID算法为全量输出，每次的输出状态均与过去有关，用到了误差的累加值，相对来说计算量更大。但气体流量调控有瞬时性的特点，对响应速度及精确度有较高的要求，位置式PID算法能更好体现整体的变化趋势，满足气体流量调控的需求。

1.3　模糊控制原理

模糊控制系统是一种不依赖于精确数学模型的控制系统，其基本原理是利用计算机来实现人的控制经验，从而实现模仿人的思维方式，系统原理如图2所示。模糊控制实质上是一种非线性控制，优点在于既具有系统化的理论，又有着大量实际应用背景。

图中，S为设定值，e为系统误差，$\dot{e}$为误差变化率，E和EC分别为反应系统误差与误差变化的语言变量模糊集，U为模糊控制器输出的控制作用，Y为系统输出[12]。输入模糊化、模糊推理及去模糊化是实施模糊控制的3个基本环节，首先将输入量进行模糊，根据分类安排成不同的隶属度，然后根据过程生成控制规则，即建立对应的规则库，最后将模糊量转化为精确量输出。

依据模糊PID和传统PID的控制规律，并且兼顾系统精度，将输入误差e和误差变化率e_c进行划分，得到模糊集{NB(负大)，NM(负中)，NS(负小)，ZO(零)，PS(正小)，PM(正中)，PB(正大)}。将输入输出变量模糊化，设e、e_c和ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D的论域为[−3,3]，即把变化分为7个等级：{−3，−2，−1，0，1，2，3}。隶属度函数选取便于计算、占用内存小的三角形隶属度函数。通过隶属度函数求得模糊关系R，并按照“最大隶属度法”解模糊求取模糊规则。对于氢气、空气、载气共获得3张模糊规则表，其中一张氢气模糊规则表如表1所示，空气和载气的模糊规则表同理。

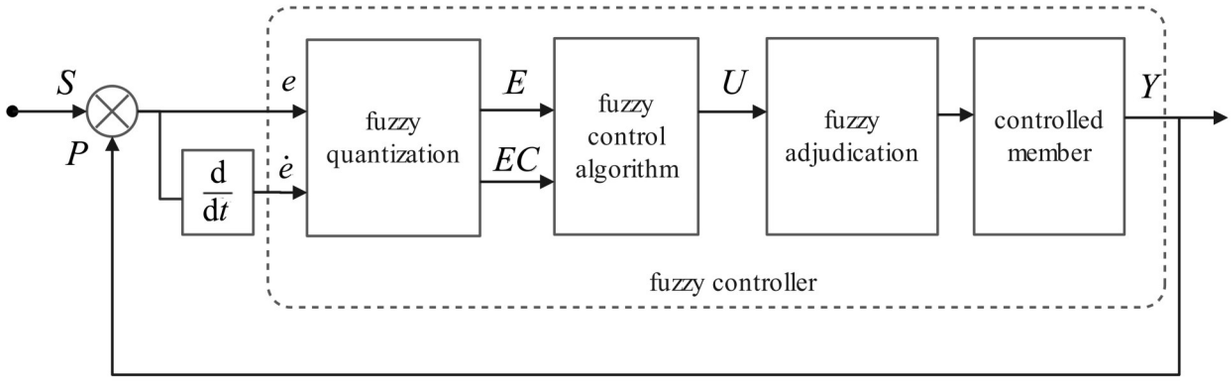

图 2 模糊控制系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy control system

表 1 氢气模糊规则表

Table 1 Fuzzy rule table of hydrogen

集合等级	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO/NB/NS	ZO/NB/NS	ZO/NM/NS	ZO/ZO/NS	PS/NM/NS	PS/NM/PS	PS/ZO/PS
NM	ZO/NB/NS	ZO/NB/NS	ZO/NM/NS	ZO/NS/NS	PS/NS/NS	PS/ZO/NS	PS/ZO/PM
NS	PS/NB/NS	PS/NM/NS	PS/ZO/NS	PS/ZO/ZO	PS/ZO/ZO	PM/PS/PS	PM/ZO/PM
ZO	PS/NM/NS	PS/NM/NS	PS/NS/NS	PS/ZO/ZO	PS/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/P, /PM
PS	PM/ZO/NS	PM/NS/NS	PM/ZO/ZO	PM/PS/ZO	PM/ZS/ZO	PB/PM/PS	PB/PB/PM
PM	PM/ZO/NS	PM/ZO/NS	PM/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PB
PB	PM/ZO/NS	PM/ZO/NS	PM/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PM

2 压力控制算法设计

非甲烷总烃分析仪的采集原理和结构特征决定了其气体压力控制精度要求高、调节速度快的特点。如果仅采用传统PID控制，很难满足系统快速响应的需求，而仅用模糊控制又无法保证结果的精度。所以在传统PID算法的基础上加入模糊控制，在运行中不断检测E和EC，对PID的3个参数进行实时整定。在PID算法的选择上：虽然增量式PID算法无需对误差进行累加，相对来说计算机工作量较小，但也意味着失去了对整体趋势的预判效果，无法满足气体压力控制的瞬时性和准确性；而位置式PID算法则弥补了这个缺陷，且位置式PID算法与模糊控制采用并联的结合形式[11]能避免算法切换时产生的高频毛刺，虽然实现过程较串联略为复杂，却能更好地选取PID控制参数，利于PID参数的动态整定。

综合考虑下，模糊控制算法与位置式PID算法并行能够更高效、准确地对气体进行压力控制，因此作为本系统选择的方法。该气体压力控制算法如图3所示。

图中，SV为控制压力设定值；PV为压力传感器实时检测到的实际控制压力值；设定值与实际值之间的误差$E=SV-PV$；Δk为模糊控制器提供给PID参数的校正量，算法表达式可以表示为

$$U=U_1+U_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}\mu_i k_i}{\sum_{i=1}^{n}k_i}+k_c\left[e_n+\frac{T_s}{T_i}\sum_{i=0}^{n}e_i+\frac{T_d}{T_s}(e_n-e_{n-1})\right]. \tag{5}$$

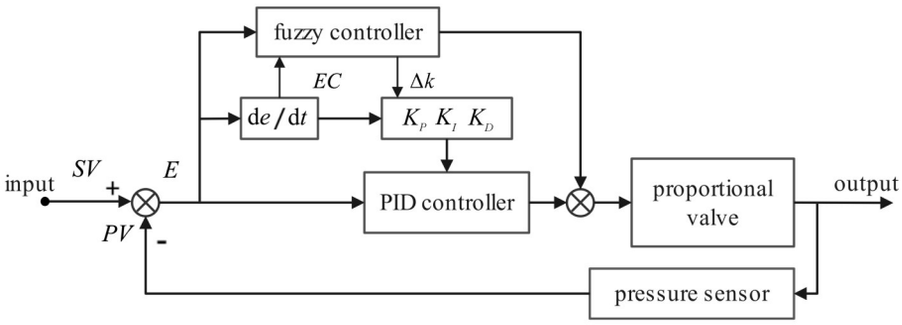

图 3　算法控制过程框图

Fig. 3　Block diagram of algorithm control process

令 $K_P=k_c$，$K_I=k_c\frac{T_s}{T_i}$，$K_D=k_c\frac{T_d}{T_s}$，则有

$$U=\frac{\sum_{i=1}^{n}\mu_i k_i}{\sum_{i=1}^{n}k_i}+K_P e_n+K_I\sum_{i=0}^{n}e_i+K_D(e_n-e_{n-1}),\tag{6}$$

式中 U_1 为模糊控制器输出量，U_2 为PID控制输出量，U 为控制电压，k_i 为加权系数，K_P、K_I、K_D 分别为比例、积分及微分系数。

气体压力控制算法流程图如图4所示。

电磁比例阀使用日本KOFLOG公司所生产的3000系列，节约成本同时满足系统工作需求。由于载气、氢气和空气流量比例约为1∶1∶10，因此载气与氢气压力控制采用小流量比例阀，空气一路采用大流量比例阀。比例阀为执行单元，压力传感器为反馈单元，压力控制模块由电流源驱动。当气体流量发生改变，通过程序控制脉冲宽度调制 (PWM) 占空比，进而控制比例阀开合大小，压力传感器上的数值随之变化，通过压力控制实现了气体流量的精准控制。主控板采用STM32F407Z连接比例阀及触摸屏，触摸屏实物显示界面如图5所示，在仪器工作过程中触摸屏可以实时监控各路气体控制压力，支持随时更改气体控制压力设定值。

3　实验结果

3.1　仿真结果对比

为了比较模糊控制PID和传统PID的调节性能，分别取各气体连续5000组控制压力实时值为系统输出，控制压力设定值为系统输入，利用Matlab系统辨识工具分析出氢气、空气和载气3路气体的传递函数分别为

$$T(s)_{\text{hydrogen}}=\frac{40.64s^2+1710s+18090}{s^4+25.07s^3+347.7s^2+2567s+18100},\tag{7}$$

$$T(s)_{\text{air}}=\frac{23.36s^2+0.7255s+0.09304}{s^4+8.663s^3+32.48s^2+0.5864s+0.0934},\tag{8}$$

$$T(s)_{\text{nitrogen}}=\frac{-1.149s+16.35}{s^2+0.7823s+16.35}.\tag{9}$$

将模糊PID与传统PID模型分别应用于系统，Simulink仿真结果如图6，横坐标为时间，纵坐标为响应

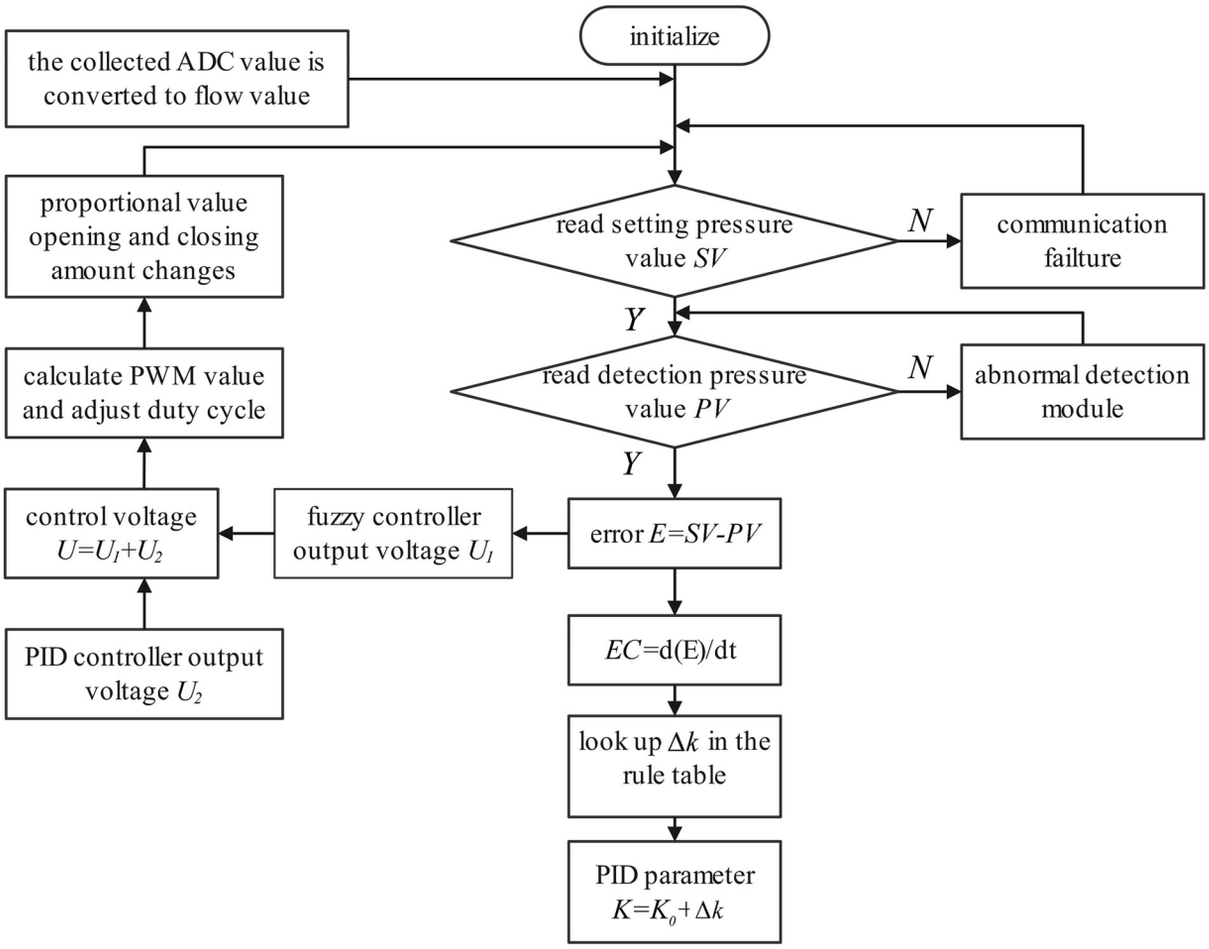

图 4 压力控制算法流程图

Fig. 4 Flow chart of pressure control algorithm

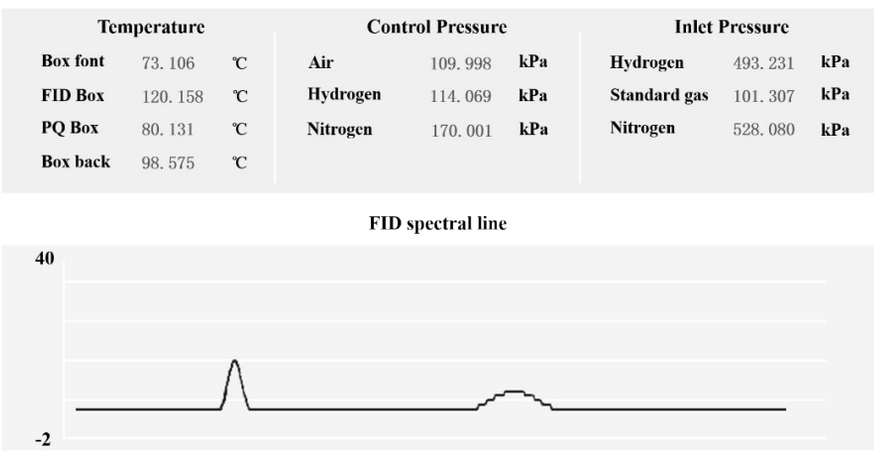

图 5 触摸屏显示界面

Fig. 5 Display interface of the touch panel

量。图 6(a)、(b) 和图 6(c) 分别为氢气、空气和载气 3 路气体模糊控制 PID 与传统 PID 在 Simulink 中的仿真对比，其中虚线为传统 PID 调节仿真结果，实线为本文提出的模糊 PID 调节仿真结果。图 6(a) 表明，氢气压力

控制实验中，传统PID算法响应速度大约为1.8 s，而使用新的模糊控制PID算法，响应速度提高至1 s，其超调量下降至传统PID调节的28.6%；图6(b) 中，空气压力控制实验中，传统PID算法响应速度大约为2 s，模糊控制PID算法响应速度提高至1 s，超调量下降至传统PID调节的62.5%；图6(c) 表明，载气压力控制的响应速度大约为3.5 s，模糊控制PID算法响应速度提高至2 s，超调量下降至传统PID调节的17.1%。该仿真结果表明，模糊控制PID算法在响应速度及超调量均优于传统PID算法。

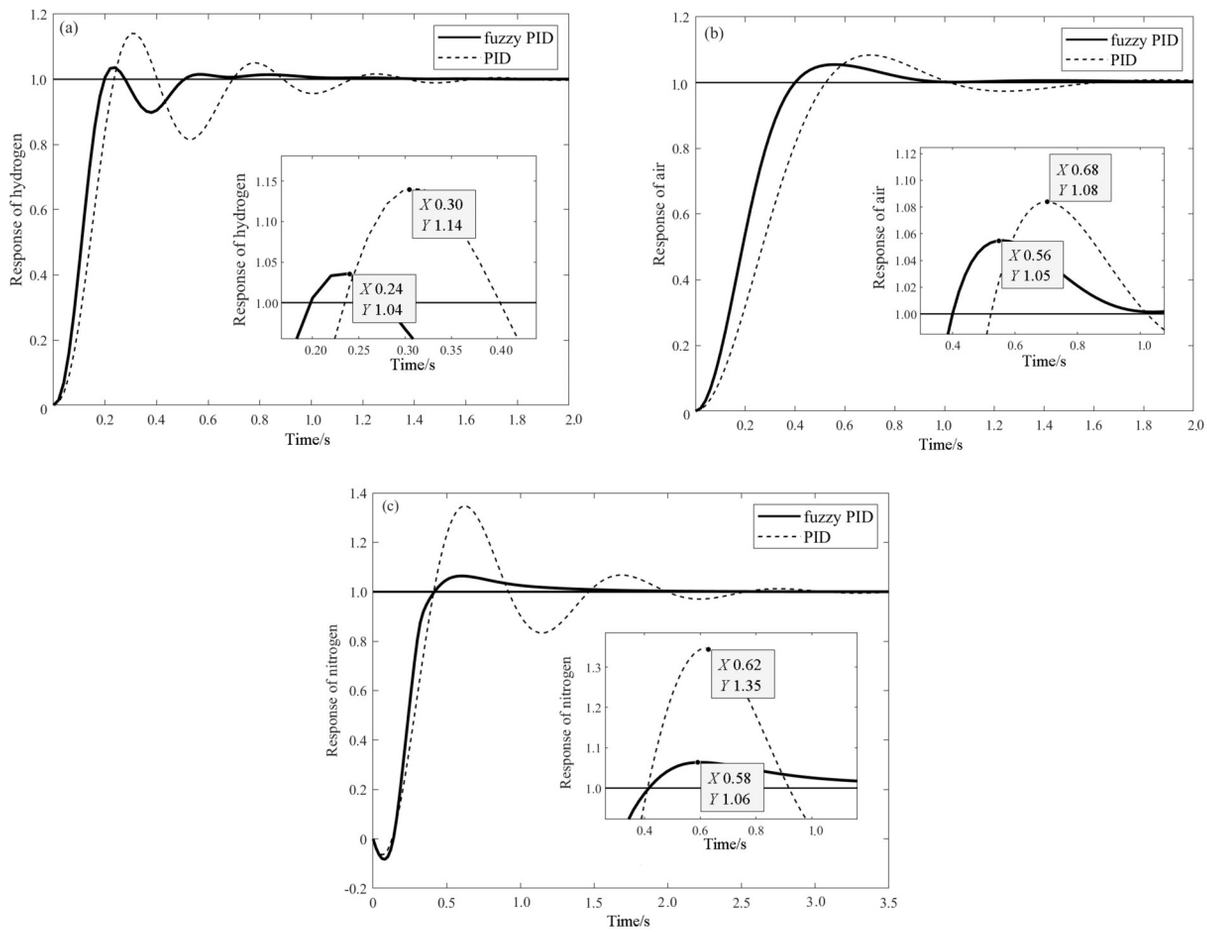

图 6　氢气 (a)、空气 (b) 与载气 (c) 压力控制PID与模糊控制PID在Simulink中的仿真对比图中放大部分为曲线峰值处X、Y轴数值

Fig. 6　Simulation comparison of hydrogen (a), air (b) and nitrogen (c) pressure control between fuzzy PID and PID in Simulink

3.2　实时动态响应对比测试 (添加不同压力下对比测试实验)

为了验证模糊PID算法在气体控制压力改变时的适应能力，以仪器气路最佳控制压力 (氢气控制压力114 kPa、空气控制压力110 kPa、载气控制压力170 kPa) 为基准，将控制压力分别调整 ±5 kPa，对比不同控制压力下模糊PID算法和传统PID算法在3路气体的实时响应曲线。

实验结果 (图7) 表明：氢气控制压力实时动态响应 (114 kPa→109 kPa→114 kPa→119 kPa) 对比中，传统PID控制算法最大超调量为5.57%，达到稳态时间最长为6.64 s，模糊PID控制算法超调量为3.45%，达到稳态时间最长为5.84 s；空气控制压力实时动态响应 (110 kPa→105 kPa→110 kPa→115 kPa) 对比中，传统PID

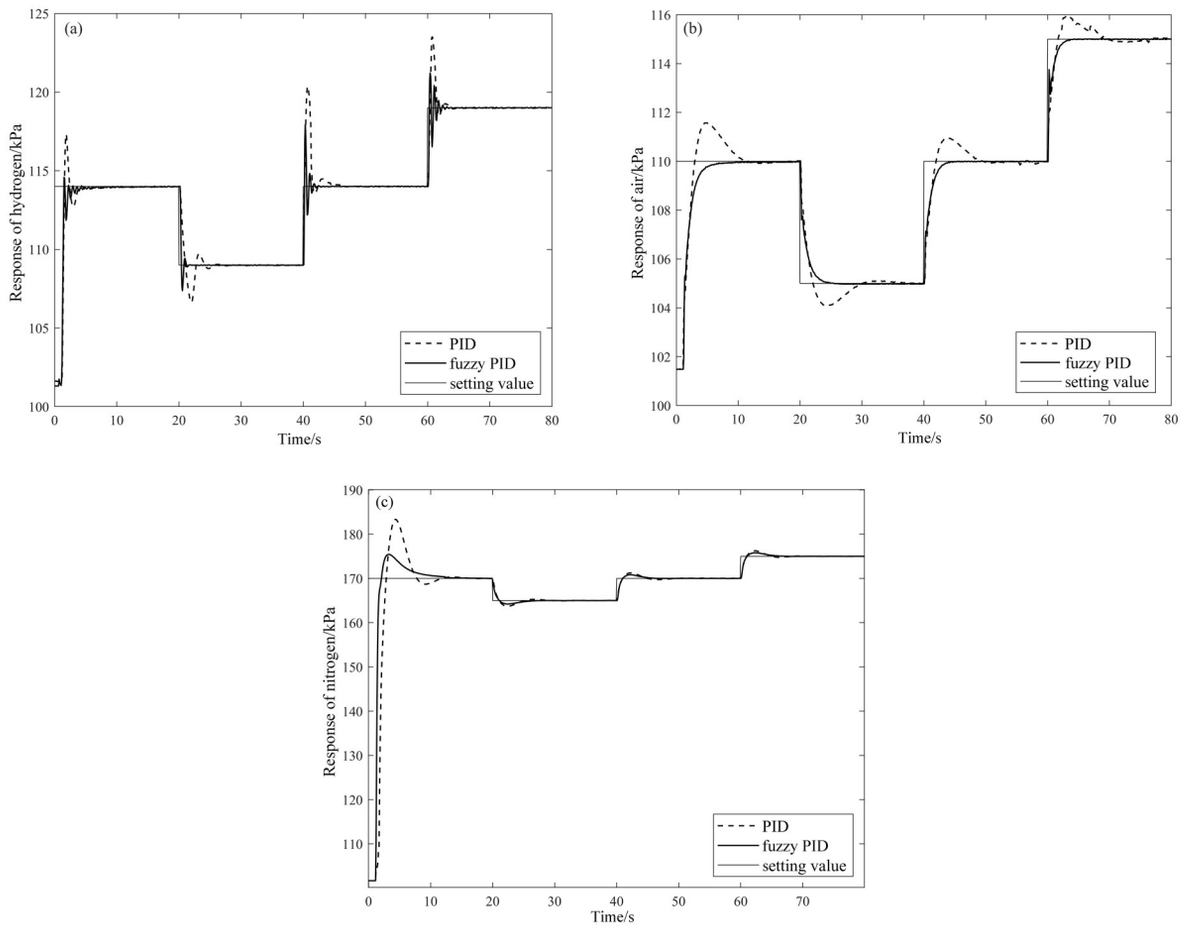

图7 氢气(a)、空气(b)、载气(c)压力控制PID与模糊控制PID实时响应曲线对比

Fig. 7 Real-time response curve comparison of hydrogen (a), air (b) and nitrogen (c) pressure control between fuzzy PID and PID

控制算法最大超调量为1.42%，达到稳态时间最长为17.44 s，模糊PID控制算法超调量为0，达到稳态时间最长为6.48 s；载气控制压力实时动态响应(170 kPa→165 kPa→170 kPa→175 kPa)对比中，传统PID控制算法最大超调量为7.85%，达到稳态时间最长为15.76 s，模糊PID控制算法超调量为3.2%，达到稳态时间最长为14.96 s。由此看出，在高、中、低压下，与传统PID相比，使用模糊PID调节下的3路气体压力控制均具有超调量小、响应快的优势。

3.3 设定值与实际值误差

为验证模糊控制PID在仪器上的实际控制精度，将氢气、空气和载气分别通入非甲烷总烃分析仪，根据设备要求将氢气、空气及载气控制压力分别设定为114 kPa、110 kPa及170 kPa。待各路气体控制压力稳定后，选取1000个连续采样点，使用外接RS232串口打印一段时间内三路气体各自的气体控制压力实际值，并绘制对应的控制压力设定值与实际值误差曲线，绘制结果如图8所示。

在该压力控制算法下，各路气体压力值稳定后，控制压力的设定值与实际测量值的误差如图8所示，氢气和载气压力控制精度均小于±0.1 kPa，空气压力控制精度小于±0.05 kPa，测试结果符合压力误差在±0.1 kpa的设计要求。

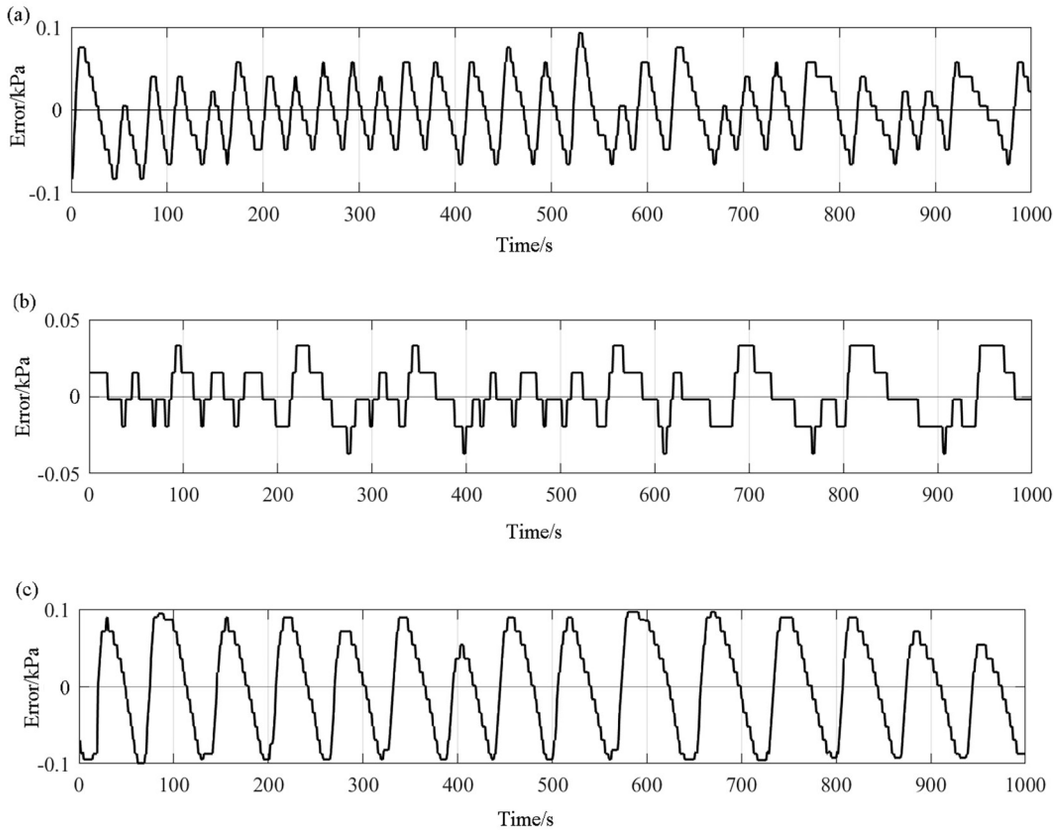

图 8　氢气 (a)、空气 (b)、载气 (c) 压力的设定值与实际控制值误差曲线图

Fig. 8　Error between control pressure and actual value of hydrogen (a), air (b) and nitrogen (c)

4　结　论

本文以位置式PID算法为基础，以模糊控制算法为调节辅助手段，提出了一种用于便携式非甲烷总烃分析仪的高精度气体压力控制算法，实现了对仪器气体压力的精确、稳定控制。通过设立多个对比实验，验证了该算法在响应速度、超调量、不同压力下的适应性、控制精度方面均优于传统PID算法，且该算法稳定高效、实现简单、易于移植到嵌入式系统中，为非甲烷总烃分析仪在环境监测方面的应用提供了参考。

参考文献:

[1] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ambient air. Determination of total hydrocarbons, methane and nonmethane hydrocarbons. Direct injection/Gas chromatography: HJ 604-2017 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.

环境保护部. 环境空气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 直接进样-气相色谱法: HJ 604-2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.

[2] Pan J F, Zhao Y X, Zhang D N. Determination of non-methane total hydrocarbons in atmosphere and waste gas by gas chromatography [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 1999, 19(3): 155-159.
潘金芳, 赵一先, 张大年. 气相色谱法测定大气和废气中非甲烷总烃 [J]. 化工环保, 1999, 19(3): 155-159.

[3] Wang S Y, Shi Y, Feng Z X. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(1): 166-172.
王述彦, 师 宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.

[4] Wang X Y, Fang X, Li T. Chopping frequency control method in lidar system based on Kalman fuzzy adaptive PID [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(5): 608-617.
王贤宇, 方 欣, 李 陶. 基于卡尔曼模糊自适应PID的激光雷达斩光频率控制方法 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(5): 608-617.

[5] Hu Y, Xu L, Liu J G. *et al*. Research on dynamic calibration of fixed mirror of FTIR based on fuzzy control [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(3): 218-225.
胡 洋, 徐 亮, 刘建国, 等. 基于模糊控制的傅里叶变换红外光谱仪定镜动态校正研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(3): 218-225.

[6] Pan Z Q, Zhang J T, Ren G B. *et al*. Determination of total hydrocarbon methane and non-methane total hydrocarbon in ambient air by gas chromatography [J]. *Analytical Instrumentation*, 2021, 4(4): 66-69.
潘志强, 张建涛, 任广宝, 等. 气相色谱法测定环境空气中总烃、甲烷和非甲烷总烃 [J]. 分析仪器, 2021, 4(4): 66-69.

[7] Bo W P, Gu J L, Wu Y G, *et al*. Discussion on the determination of non-methane hydrocarbons in ambient air by using gas chromatograply [J]. *Pollution Control Technology*, 2015, 28(3): 64-66.
薄维平, 顾军玲, 吴谊国, 等. 气相色谱法测定环境空气中非甲烷总烃的探讨 [J]. 污染防治技术, 2015, 28(3): 64-66.

[8] Wang X C. *Temperature Control System Based on PID Parameter-adaptive Fuzzy Control* [D]. Changsha: Central South University, 2007.
王晓冲. 模糊参数自整定PID温控系统的设计与研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.

[9] Shang L L. *Study of Advanced PID Algorithm and Their Application in the Temperature Control System of Open Cup Flash Point Apparatus* [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2010.
商亮亮. 先进PID算法研究及其在开口闪点仪温控系统中的应用 [D]. 济南: 山东科技大学, 2010.

[10] Liu X L. *The Research on PID Parameters Tuning Method and Its' Application* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
刘西林. PID参数整定方法及其应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.

[11] Lyu Z K, Qi J, Li Y, *et al*. Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry-Perot etalon of spaceborne lidar [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 130-134.
吕祚坤, 戚 俊, 李 燕, 等. 星载激光雷达F-P标准具高效温控算法的设计与实现 [J]. 应用光学, 2018, 39(1): 130-134.

[12] Zhang L D. *Intelligent Traffic Dectection and Control Based on Fuzzy Control Principle* [D]. Jinan: Shandong University, 2005.
张立东. 基于模糊控制原理的智能交通检测与控制 [D]. 济南: 山东大学, 2005.