

变泄漏容腔内气体的高精度恒压控制

浦晨玮, 罗辉, 吴洁, 刘磊, 钱鹏飞*

(江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要:在精密测试与控制场合,常需要稳定压力的供气。然而,采用压力调节阀精度低、响应慢,无法满足高精度供气需求,且难以应对泄漏工况。采用高频响的比例阀,为小体积容腔设计了一个基于模糊比例-积分的高精度恒压控制系统。为验证系统在泄漏工况下的有效性,容腔还连接了一个额外的比例阀,从而开展密闭、恒泄漏、变泄漏三种情况下的系列试验研究。结果表明,所设计的恒压控制系统可适应多种恶劣工况。在大幅变泄漏工况下,10 L、20 L和30 L容腔压力控制的最大稳态误差分别约为610 Pa、550 Pa和490 Pa,所实现的压力控制精度已接近压力传感器自身精度,远大于传统精密减压阀所调控的精度,且响应更快。此外,试验结果也表明所设计的控制器对10~30 L的容腔有较好的适应性。

关键词:泄漏容腔;压力控制;模糊PI;高精度

中图分类号:TH138.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)05-110-11



论
文
拓
展

High-precision constant pressure control of gas in variable leakage chamber

PU Chenwei, LUO Hui, WU Jie, LIU Lei, QIAN Pengfei*

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In precise testing and control occasions, a stable air pressure supply is often required. However, the use of pressure regulating valves has low accuracy and slow response, which cannot meet the requirements of high-precision air supply and is difficult to deal with leakage situations. A high-precision constant pressure control system based on Fuzzy PI was designed for small volume chambers by using a proportional valve with high frequency response. In order to verify the effectiveness of the system under leakage conditions, an additional proportional valve was connected to the chamber to carry out a series of experimental studies under three conditions of confinement, constant leakage, and variable leakage. The results showed that the designed constant pressure control system can adapt to a variety of harsh operating conditions. The maximum steady-state errors of the pressure control for the 10 L, 20 L and 30 L chambers were around 610 Pa, 550 Pa and 490 Pa under the condition of greatly varying leakage, respectively. The pressure control precision achieved was close to the precision of the pressure sensor itself, much higher than the precision regulated by the traditional precision pressure reducing valve, and much faster in response. In addition, the test results also showed that the designed controller has good adaptability to the chambers with a volume range of 10 L to 30 L.

Keywords: leakage chamber; pressure control; fuzzy PI; high accuracy

随着科技的发展,流体传动与控制技术呈现蓬勃发展的新局面。气动技术凭借其成本低廉、清洁无污染、可循环利用等优点在制造、医药、生物工程和航空航天等领域得到了越来越广泛的应用^[1-3]。国内外气动领域的研究主要集中在气动元件开发与测试、气动系统建模与辨识以及气动伺服控制(位置、输出力和压力)等^[4-7]。其中,

压力控制方向的研究是气动伺服控制的重要部分,相关研究^[8-10]已经证实在位置伺服控制中融合高精度的压力控制,可以有效地提高气动位置伺服控制精度。气动出力伺服控制考察的是气缸的摩擦特性和腔内气体压力控制两方面。对于无摩擦气缸^[11-12]来说,气缸输出力的伺服控制可等效为两腔气体的压力控制。因此,腔内压力控

收稿日期:2022-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075223);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX24_3927);江苏省大学生创新创业训练基金资助项目(202210299039Z);江苏大学人工智能与智能制造学院大学生创新实践基金资助项目(ZXJG2023028)

第一作者:浦晨玮(1998—),男,江苏盐城人,博士研究生,E-mail:704125453@qq.com

*通信作者:钱鹏飞(1987—),男,江苏无锡人,教授,博士,博士生导师,E-mail:pengfei.qian@zju.edu.cn

引用格式:浦晨玮,罗辉,吴洁,等.变泄漏容腔内气体的高精度恒压控制[J].国防科技大学学报,2024,46(5):110-120.

Citation:PU C W, LUO H, WU J, et al. High-precision constant pressure control of gas in variable leakage chamber[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(5): 110-120.

制的研究具有重要的意义。

部分学者对气体压力控制系统进行仿真研究,为压力控制系统参数选择和控制器设计提供一定理论指导^[13-15]。陈志毅等^[13]分析了密闭容腔的充放气过程,对比了比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制和模糊控制的优缺点, MATLAB/Simulink 仿真表明采用的自适应模糊 PID 控制算法能够实现较高的压力控制精度。何文凯等^[14]设计了高压气动压力伺服控制系统,通过仿真研究容腔容积、气源压力等参数对压力控制性能的影响规律。路波等^[15]为气缸容腔高精度压力控制系统建立了完整的数学模型,并通过仿真分析了气源压力、气源温度、储气罐容积、连接管路长度和直径等关键参数对系统动态性能和控制性能的影响。也有学者采用多种控制手段对压力控制系统进行研究,为后人进行压力控制时采用何种控制方法提供指导^[16-24]。李宝仁等^[16-17]设计了模糊比例-积分(proportional-integral, PI)控制器,采用流量伺服阀和 0.05% 精度的压力传感器对 2 L 密闭容腔进行高精度压力伺服控制,稳态控制误差不大于 20 Pa。刁爱民等^[18]采用模糊 PID 算法分别与模糊算法和 PID 算法进行对比研究,证明了模糊 PID 算法的优越性。Liu 等^[19]针对 PID 控制器不能鲁棒地应对参数变化但能准确地控制稳态压力以及模糊控制具有上升时间短和超调量小的特点,设计了一个混合模糊 PID 控制器,其对 0.5 L 密闭容腔压力控制的稳态误差为 1 000 Pa。Lin 等^[20]提出了一种新型混合控制方案,该方案在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)上通过时间交错调制的快速开关电磁阀对 0.16 L 封闭容器进行实时压力跟踪控制,其稳态控制误差在 0.5% 精度的压力传感器下约为 2 000 Pa。路波等^[21-22]先后为零重力模拟气动悬挂系统(0.01% 精度的压力传感器和 500 L 的容腔)设计了模糊 PID 控制器和模糊滑模变结构控制器,它们的稳压控制精度分别为 30 Pa 和 26 Pa,但系统容腔很大、响应较慢。朱晓^[23]为高精度气动负载系统(0.01% 精度的压力传感器和 500 L 的容腔)设计了带稳态输出预测的模糊 PID 控制算法,其系统稳态压力波动小于 50 Pa,也具有响应慢的缺点。刘昱等^[24-25]先后采用自抗扰控制和自适应控制实现高精度的压力控制以进行高精度动态重力补偿。宋玉宝等^[26]在气动系统压力控制研究过程中设计了改进的大脑情感学习算法,其对 30 L 容腔稳压控制的稳态误差为

400 ~ 500 Pa。

综上所述,压力控制精度与压力传感器精度和容腔体积有关,千分位精度的压力传感器不如万分位精度压力传感器的控制精度高,容腔体积越大压力控制精度也越高,但响应会变慢;较多研究者推崇将模糊算法与 PI 算法或 PID 算法相结合,用于容腔高精度的压力控制。此外,上述研究主要是对密封容腔的压力控制,未涉及恒泄漏、变泄漏等工况。因此,本文拟采用模糊 PI 控制算法设计一种较为经济(采用千分位精度压力传感器)、体积小便于移动、适用于密闭和泄漏不同工况下的高精度恒压控制系统。

1 模糊 PI 控制器设计

考虑到具有强非线性的气动压力控制系统模型难以被建立,选用不基于模型的控制算法有利于简化控制器的设计。模糊 PI 控制器作为典型的无模型控制,是通过人工经验制定模糊规则表实现 PI 参数的在线自整定,能够克服传统 PI 控制参数无法实时调整的缺点。对于气动压力控制系统,选择压力误差 e 及其变化率 e_c 作为模糊控制器的输入变量, ΔK_p 和 ΔK_i 为模糊控制器的输出变量。图 1 为用于高精度压力控制系统的模糊 PI 控制器原理图。其中,模糊控制器的工作原理是先对输入变量进行模糊化处理,并基于模糊规则库进行模糊推理,得到模糊结果。然后,对模糊结果进行解模糊处理,得到准确的输出变量 ΔK_p 和 ΔK_i 。最后,通过模糊控制器的输出在线调整 PI 控制器的比例系数 K_p 和积分系数 K_i 。对于模糊规则来说,其数量影响着控制精度与计算量,综合考量设计了一种具有 7 × 7 条规则的模糊 PI 控制器,用于进行高精度的压力控制。控制器的比例系数和积分系数可表示为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, K_{p0} 和 K_{i0} 分别是比例系数 K_p 和积分系数 K_i 的初始值,这两个参数是通过齐格勒-尼科尔斯(Ziegler-Nichols, Z-N)整定法获得。

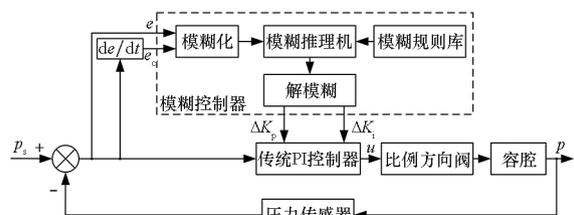


图1 模糊 PI 控制器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fuzzy PI controller

将模糊控制器的输入变量 e 和 e_c 以及输出变量 ΔK_p 和 ΔK_i 的语言模糊子集均设为: {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 将其简写为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。为方便隶属度函数的构建, 将输入、输出变量的论域都设为 $[-3, 3]$, 再利用输入变量的量化因子 Q_e, Q_{ec} 与输出变量的比例因子 P_{Kp}, P_{Ki} 将其转换为基本论域, 并根据经验采用三角形函数构建隶属度函数, 得到图 2 所示的输入、输出变量隶属度函数图。

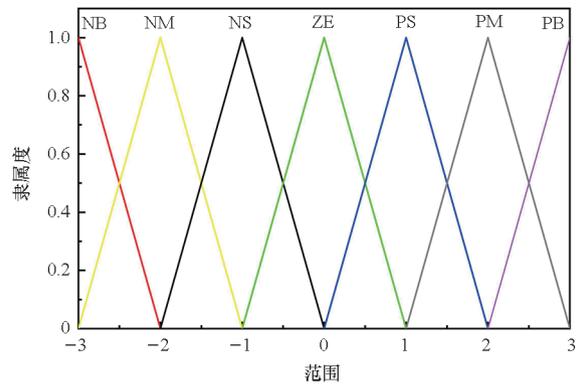


图 2 输入、输出变量隶属度函数

Fig. 2 Input and output variable membership function

鉴于模糊规则是模糊 PI 控制器的核心, 基于理论分析、参数整定经验和多次尝试, 仔细设置了如表 1 所示的模糊 PI 控制器的模糊规则。在完成上述模糊推理后, 首先根据经验选用重心法^[27]进行解模糊得到 ΔK_p 和 ΔK_i , 然后根据式 (1) 更新 K_p 和 K_i , 最终完成模糊 PI 控制器的参数整定。

此后, 采用所设计的模糊 PI 控制器对三种不同容积的容腔进行密封、恒泄漏、变泄漏等多种工况下的高精度压力控制研究。

表 1 模糊 PI 控制器的模糊规则

Tab. 1 Fuzzy rules of fuzzy PI controller

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB NB	PB NB	PM NM	PM NM	PS NS	ZE ZE	ZE ZE
NM	PB NB	PB NB	PM NM	PS NS	PS NS	ZE ZE	NS ZE
NS	PM NB	PM NM	PM NS	PS NS	ZE ZE	NS PS	NS PS
ZE	PM NM	PM NM	PS NS	ZE ZE	NS PS	NM PM	NM PM
PS	PS NM	PS NS	ZE ZE	NS PS	NS PS	NM PM	NM PM
PM	PS ZE	ZE ZE	NS PS	NM PS	NM PM	NM PB	NB PB
PB	ZE ZE	ZE ZE	NM PS	NM PM	NM PM	NB PB	NB PB

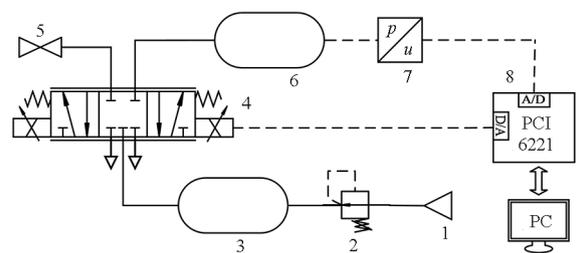
2 实验研究

搭建气动压力伺服系统实验平台, 采用所设计的模糊 PI 控制器对实验室常用的 10 L、20 L 及 30 L 这三种不同容积的容腔进行不同目标压力和不同泄漏条件下的压力控制, 实验中得到的所有数据均未经滤波处理。

2.1 无泄漏情况下容腔压力控制

密闭容腔高精度压力控制系统原理如图 3 所示, 该系统由数据采集卡、气源、精密减压阀、比例阀、压力传感器以及两个容腔等环节组成。其中, 比例阀 A 来自 FESTO 公司, 型号为 MPYE-5-1/8-HF-010, 用于控制容腔 A 的压力; 考虑到经济性, 选用 HUBA 公司型号为 511.930002741 的压力传感器用于检测受控容腔内的压力, 其精度为 0.3% FS, 量程为 0~1 MPa; 采集卡为 NI 公司型号为 PCI-6221 的数据采集卡。此外, 气源

压力经精密减压阀作用, 保证稳压容腔 B 中的压力始终稳定在 0.6 MPa 左右。



1—气源; 2—精密减压阀; 3—容腔 B; 4—比例阀 A; 5—截止阀; 6—容腔 A; 7—压力传感器; 8—数据采集卡。

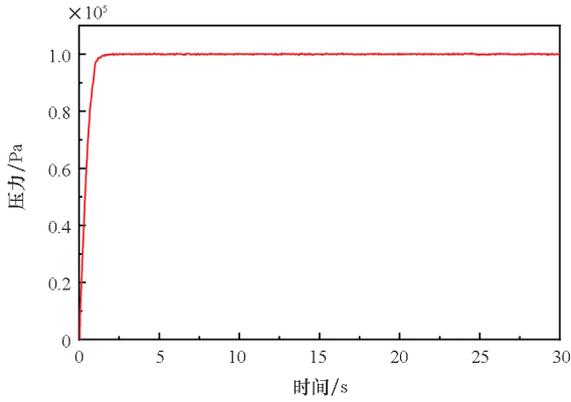
图 3 密闭容腔高精度压力控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of high-precision pressure control system for closed chamber

实验过程分为以下三个阶段:

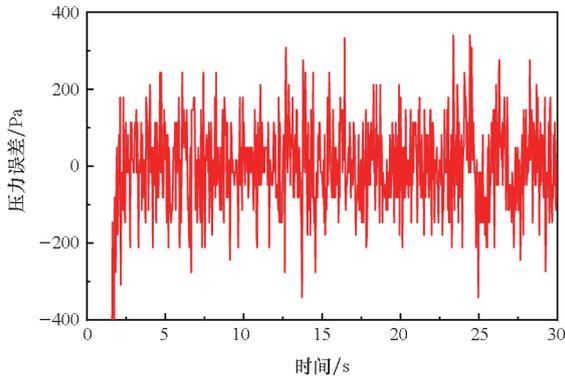
第一阶段采用上述设计的模糊 PI 控制器对 10 L 的容腔进行压力控制。首先通过 Z-N 整定

法得出 PI 控制器参数 K_{p0} 和 K_{i0} , 再进行调整模糊控制器的比例因子与量化因子直至取得较优的控制精度。图 4 为 10 L 容腔在 0.1 MPa 目标压力下的控制结果, 经参数调整压力响应曲线已实现快速收敛, 系统最大稳态误差约为 340 Pa (为削弱偶然误差对结果分析的影响, 取稳态过程中第二大稳态误差为系统最大稳态误差, 且此后的压力控制误差图中都给出了对应的系统最大稳态误差), 相关控制参数如表 2 所示。



(a) 压力响应曲线

(a) Pressure response curve



(b) 压力控制误差

(b) Pressure control error

图 4 10 L 容腔在 0.1 MPa 下的压力控制

Fig. 4 Pressure control of 10 L chamber at 0.1 MPa

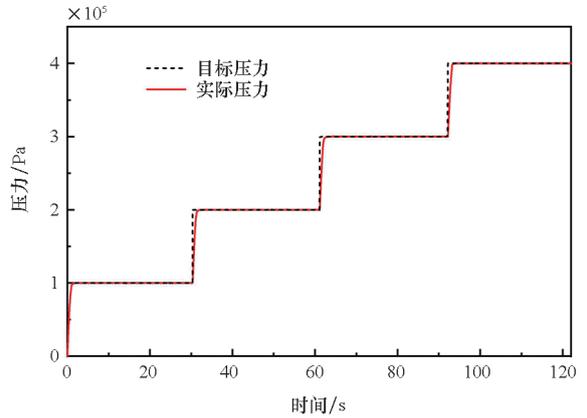
表 2 模糊 PI 控制器的控制参数

Tab. 2 Control parameters of fuzzy PI controller

K_{p0}	K_{i0}	Q_e	Q_{ec}	P_{kp}	P_{ki}
100	0.006	0.3	100	2	0.002

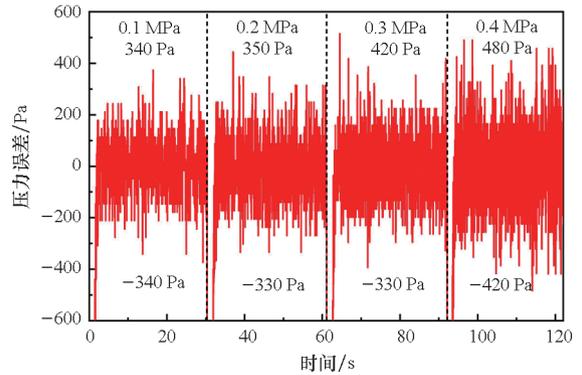
第二阶段为对 10 L 的容腔进行连续阶跃压力控制, 控制参数同第一阶段。根据图 5 所示的压力控制结果可知, 当目标压力为 0.1 MPa 时, 系统最大稳态误差约为 340 Pa。此外, 当目标压力由 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa 到 0.4 MPa 逐步增

大时, 对应的系统最大稳态误差明显增大。因此, 对于 10 L 的容腔在控制参数不变的条件下, 随着目标压力的增大, 压力控制精度呈现变差的趋势。



(a) 压力响应曲线

(a) Pressure response curve



(b) 压力控制误差

(b) Pressure control error

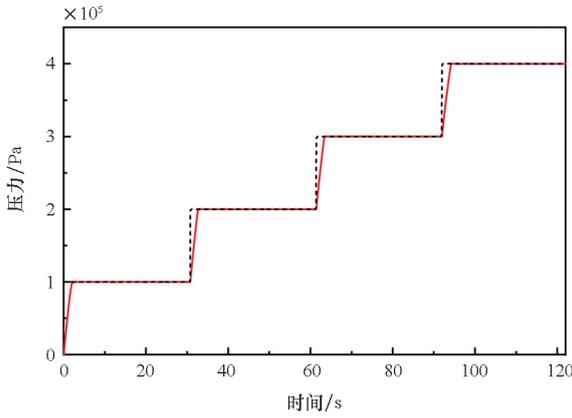
图 5 10 L 容腔连续阶跃压力控制

Fig. 5 Continuous step pressure control of 10 L chamber

第三阶段选用容积不同的容腔进行连续阶跃控制, 控制参数保持不变, 得到如图 6、图 7 所示的压力控制结果。对比图 5 可知, 相比于 10 L 的容腔, 在对 20 L 与 30 L 的密闭容腔进行压力控制时, 系统最大稳态误差受目标压力变化的影响并不明显。初步认为容腔容积增大使得外界条件改变造成的影响变小, 此后实验将进一步验证。此外, 对于三组连续阶跃控制过程, 容腔容积为 10 L、20 L 和 30 L 的系统最大稳态误差呈下降趋势。这说明容腔容积越大, 系统最大稳态误差越小。观察图 5~7 的压力控制图可知, 随着容腔容积的增大, 充气时长会有所增加。因此, 增大容腔容积可在一定程度上提高系统稳态控制精度, 但会增大响应时间。

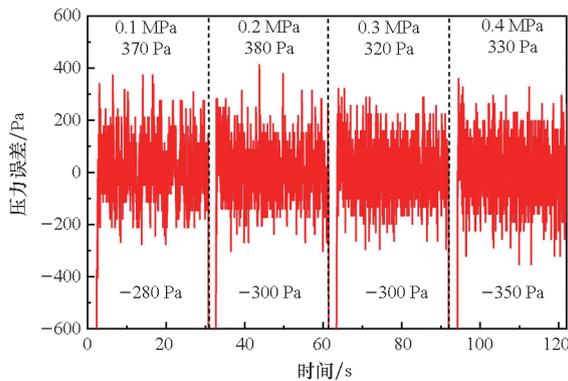
2.2 泄漏情况下容腔压力控制

为了满足泄漏工况下的高精度压力控制要



(a) 压力响应曲线

(a) Pressure response curve



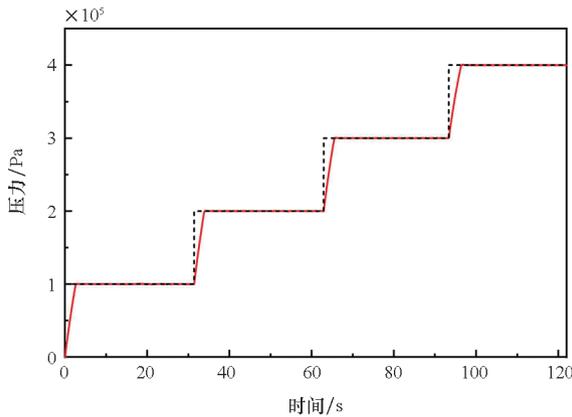
(b) 压力控制误差

(b) Pressure control error

图 6 20 L 容腔连续阶跃压力控制

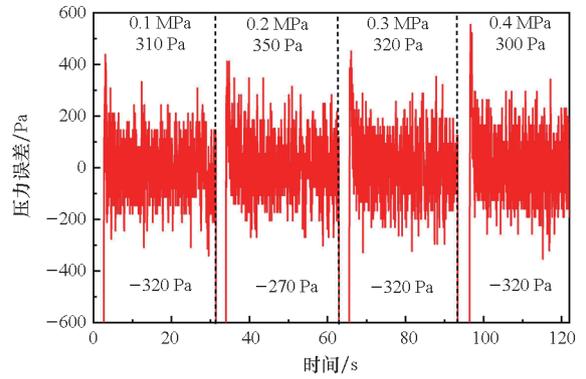
Fig. 6 Continuous step pressure control of 20 L chamber

求,建立了带泄漏的容腔恒压控制系统,并开展了不同泄漏条件下的压力控制实验。图 8 为泄漏容腔高精度压力控制系统原理图,相对于密闭容腔的压力控制系统增加了一个 FESTO 型号为 MPYE-5-1/8-LF-010 的比例阀 B 来模拟泄漏情况,通过调节比例阀 B 的电压来控制阀口开度以实现改变泄漏条件的目的。



(a) 压力响应曲线

(a) Pressure response curve

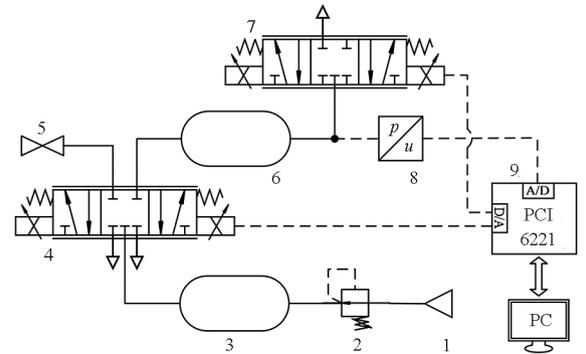


(b) 压力控制误差

(b) Pressure control error

图 7 30 L 容腔连续阶跃压力控制

Fig. 7 Continuous step pressure control of 30 L chamber



- 1—气源;2—精密减压阀;3—容腔 B;
- 4—比例阀 A;5—截止阀;6—容腔 A;
- 7—比例阀 B;8—压力传感器;9—数据采集卡。

图 8 泄漏容腔高精度压力控制系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of high-precision pressure control system for leakage chamber

现以 0.2 MPa 为目标压力对三种容积的容腔进行长时间恒压控制。恒压控制过程中按图 9 所示顺序给比例阀 B 相应的控制电压信号以模拟多种泄漏情况,得到图 10 所示压力控制结果,且系统最大稳态误差均在图 10 中给出。由图 10 可知,在泄漏开启瞬间,10 L、20 L 和 30 L 的容腔的稳态误差都有明显突变,对应的突变最大误差随容积的增大明显减小,且在稳定后上述三个容腔的系统最大稳态误差也随容积增大有所减小,进一步说明了容腔容积的增大会使所受的外界干扰的影响变小。对于恒泄漏之后进行的一系列频率变化的小幅变泄漏,三个容腔的系统最大稳态误差都随其频率的增大而略有增大的趋势,总体不明显;而对于频率变化的大幅变泄漏,在其频率为 0.125 Hz、0.25 Hz、0.5 Hz 与 1 Hz 下,三个容腔对应的系统最大稳态误差总体呈现随泄漏变化频率增大

而增大, 随容腔容积增大而减小的趋势。

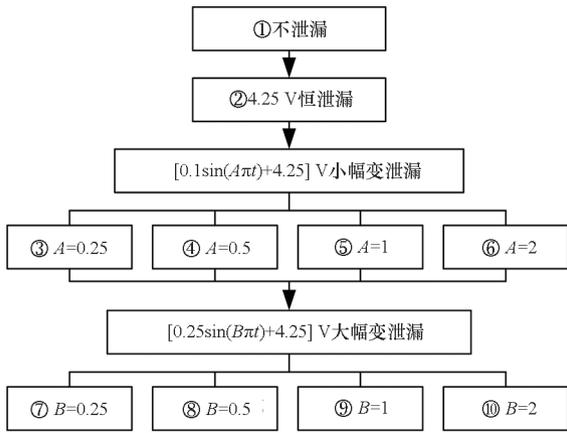
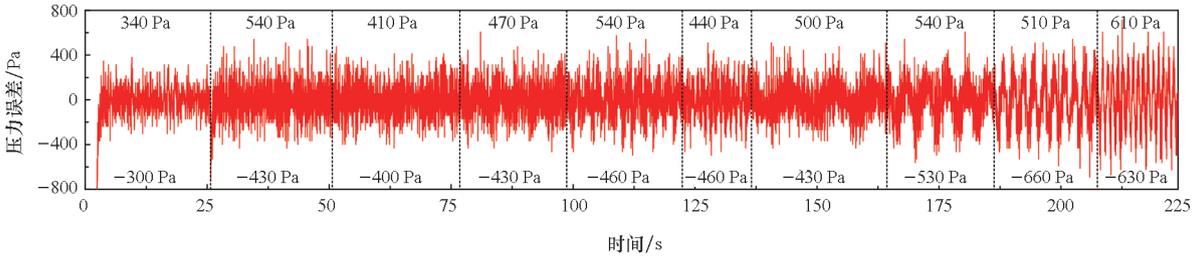


图 9 恒压控制过程中比例方向阀 B 的控制电压
Fig. 9 Control voltage of proportional direction valve B during constant pressure control

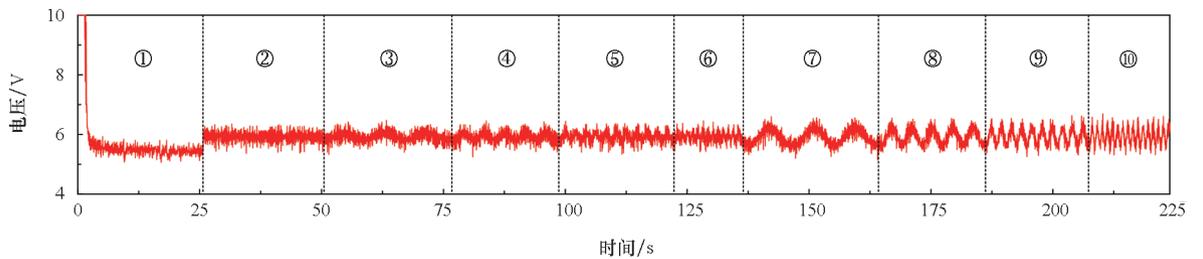
综上所述, 在小幅变泄漏工况下, 随其频率的增大, 稳态误差略微增大, 总体不明显, 影响不大; 而在大幅变泄漏工况下, 随其频率的增大, 稳态误差增大较多, 影响较大。此外, 对于 10 L、20 L 与 30 L 容腔的长时间变泄漏恒压控制, 随着泄漏情

况的改变, 系统最大稳态误差变化趋势相近; 而稳态误差的大小却不同, 在变泄漏恒压控制全过程中系统最大稳态误差随容腔容积的增大而明显减少。上述现象除了说明容腔容积与泄漏变化频率对稳态误差造成的影响, 还证明了所设计算法的鲁棒性, 在越来越恶劣的泄漏条件下, 该算法仍能保证一定的控制精度。

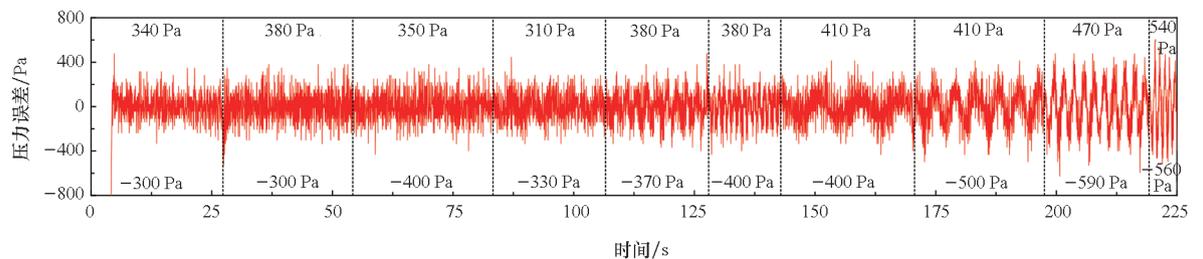
观察图 10 中各泄漏条件下的压力控制情况, 选出在泄漏情况逐渐恶劣但控制效果良好的几种泄漏条件进行连续阶跃压力控制, 以此研究在泄漏情况下, 不同目标压力对各容腔控制精度的影响。综合考虑, 选择②、③和⑦的泄漏情况进行 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa 及 0.4 MPa 的连续阶跃响应得到图 11 ~ 13 所示的压力控制结果。为更明确地显示泄漏条件、容腔容积及目标压力对压力控制系统稳态误差的影响, 除了从系统最大稳态误差角度, 还从均方根误差的角度进行分析, 得到表 3 所示的各泄漏条件下对容腔进行连续阶跃压力控制的均方根误差。观察图 11 ~ 13 及表 3 可知, 随着目标压力的增大, 各容腔压力控制



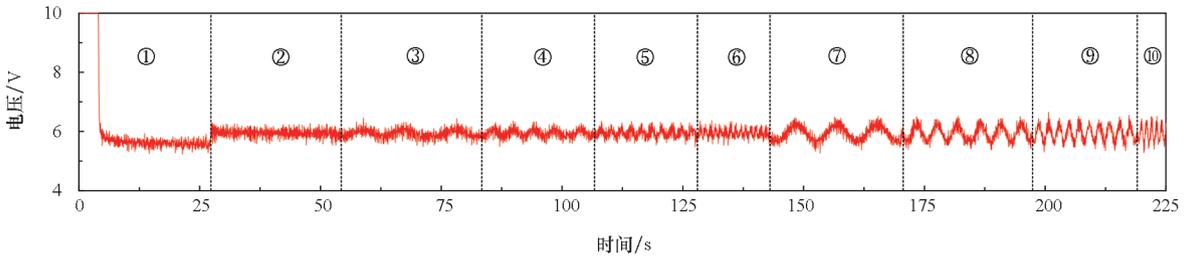
(a) 10 L 容腔压力控制误差
(a) Pressure control error of 10 L chamber



(b) 10 L 容腔压力控制的比例阀电压
(b) Proportional valve voltage of pressure control of 10 L chamber

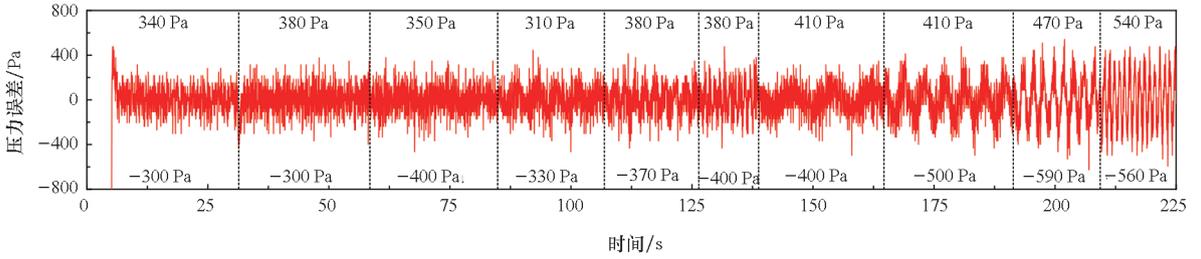


(c) 20 L 容腔压力控制误差
(c) Pressure control error of 20 L chamber



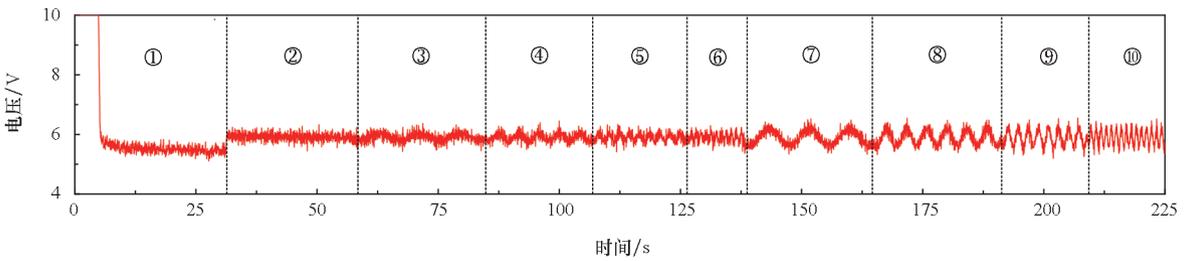
(d) 20 L 容腔压力控制的比例阀电压

(d) Proportional valve voltage of pressure control of 20 L chamber



(e) 30 L 容腔压力控制误差

(e) Pressure control error of 30 L chamber

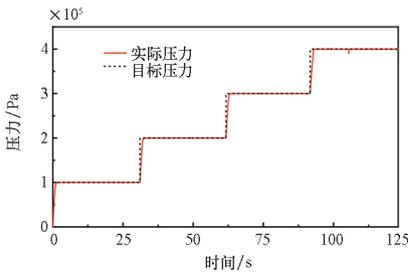


(f) 30 L 容腔压力控制的比例阀电压

(f) Proportional valve voltage of pressure control of 30 L chamber

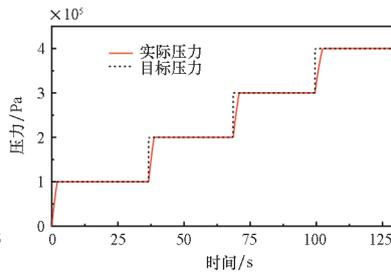
图 10 不同泄漏条件下容腔的长时间恒压控制

Fig. 10 Long time constant pressure control of chamber under different leakage conditions



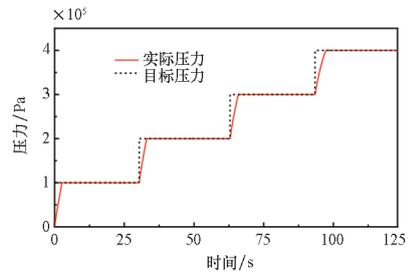
(a) 10 L 容腔压力响应曲线

(a) Pressure response curve of 10 L chamber



(b) 20 L 容腔压力响应曲线

(b) Pressure response curve of 20 L chamber



(c) 30 L 容腔压力响应曲线

(c) Pressure response curve of 30 L chamber

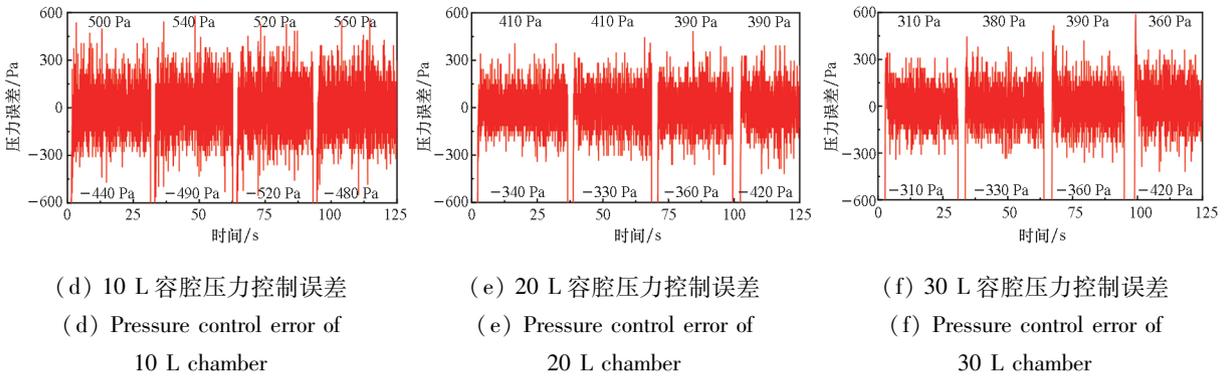


图 11 比例阀 B 在 4.25 V 下模拟恒泄漏的容腔连续阶跃压力控制

Fig. 11 Continuous step pressure control of chamber with proportional valve B simulating constant leakage at 4.25 V

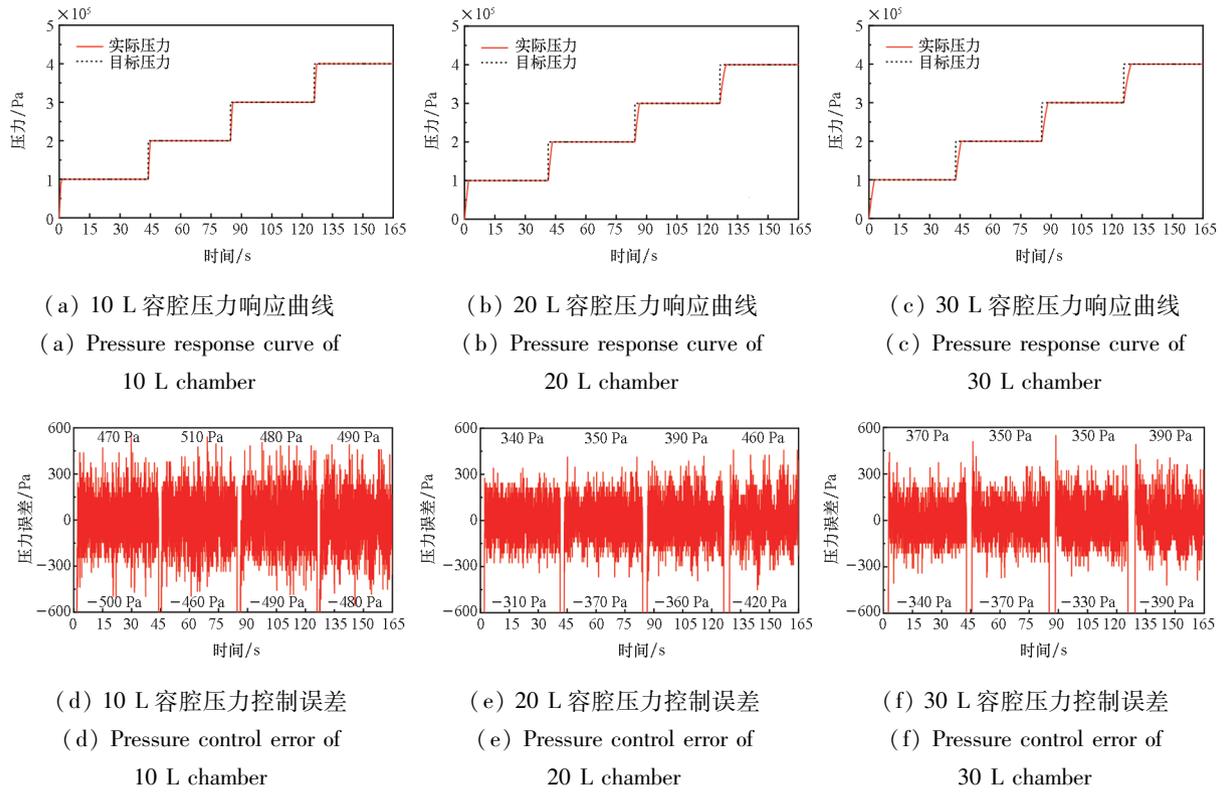
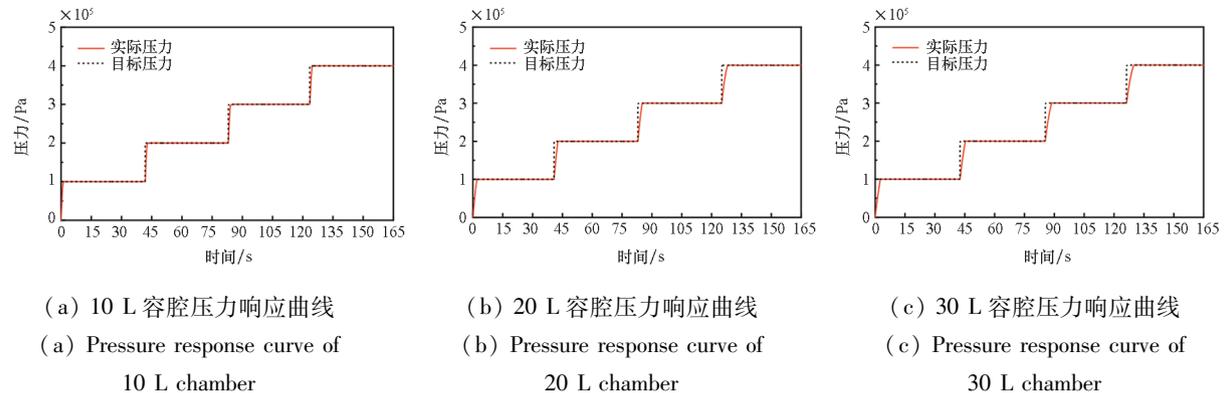
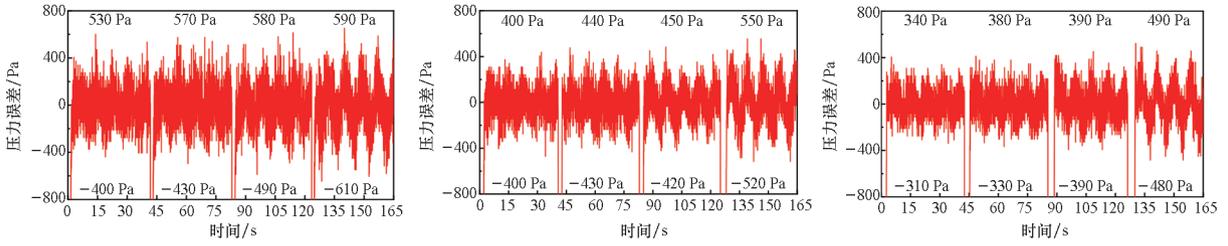


图 12 比例阀 B 在 $[0.1\sin(0.25\pi t) + 4.25]$ V 下模拟小幅变泄漏的容腔连续阶跃压力控制

Fig. 12 Continuous step pressure control of chamber with proportional valve B simulating small amplitude varying leakage at $[0.1\sin(0.25\pi t) + 4.25]$ V





(d) 10 L 容腔压力控制误差 (e) 20 L 容腔压力控制误差 (f) 30 L 容腔压力控制误差
 (d) Pressure control error of 10 L chamber (e) Pressure control error of 20 L chamber (f) Pressure control error of 30 L chamber

图 13 比例阀 B 在 $[0.25\sin(0.25\pi t) + 4.25]$ V 下模拟大幅变泄漏的容腔连续阶跃压力控制
 Fig. 13 Continuous step pressure control of chamber with proportional valve B simulating large amplitude varying leakage at $[0.25\sin(0.25\pi t) + 4.25]$ V

表 3 各泄漏条件下对容腔进行连续阶跃压力控制的均方根误差

Tab. 3 Root mean square error of continuous step pressure control of chamber under various leakage conditions

比例方向阀 B 电压/V	容腔 容积/L	均方根误差/Pa			
		0.1 MPa 目标压力	0.2 MPa 目标压力	0.3 MPa 目标压力	0.4 MPa 目标压力
4.25	10	153.8	165.9	170.6	170.0
	20	119.8	129.7	131.4	132.9
	30	116.8	122.7	127.2	133.1
$0.1\sin(0.25\pi t) + 4.25$	10	153.9	164.7	165.3	173.8
	20	121.2	121.7	131.7	137.6
	30	114.6	114.8	128.1	135.3
$0.25\sin(0.25\pi t) + 4.25$	10	157.0	174.3	175.4	204.3
	20	134.8	145.9	146.4	187.1
	30	118.2	128.2	144.6	168.0

的稳态误差都有增大的趋势,且此趋势随着泄漏条件的逐渐恶劣显现得越为明显。此现象是因为对于泄漏的容腔,其压力的增大会导致泄漏量也增大,且泄漏条件恶劣会进一步增大泄漏量,所以稳态误差才会有增大的趋势。此外,不论是目标压力增大还是泄漏条件更恶劣,容腔压力控制的稳态误差都会随着容腔容积的增大而减小。因此,进一步说明了容腔容积越大,恒压控制过程稳态误差越小,受外界干扰影响也越小。

3 结论

本文采用模糊 PI 控制算法设计了一种较经济的高精度恒压控制系统,进行了密闭、恒泄漏和变泄漏等多种工况下的一系列试验研究,得出了如下结论:

1) 所设计的高精度恒压控制系统具有更高的精度,且能适应恒泄漏和变泄漏等多种工况。

具体与文献[24](使用 0.25% 精度的压力传感器)中对 30 L 容腔进行 0.1 MPa 恒压控制的稳态误差相比,本文(使用 0.3% 精度的压力传感器)在此条件下的稳态误差小 25% 左右,仅为 310 Pa。

2) 被控容腔容积增大,响应时间增大,系统的稳态误差总体上变小,且系统对受外界突变扰动的影响减小、适应性提高。

3) 小幅变泄漏工况下,随着泄漏变化频率的增大,稳态误差略微增大,总体不明显,影响不大。大幅变泄漏工况下,随着泄漏变化频率的增大,稳态误差增大较多,影响较大。

参考文献 (References)

[1] GU S M, YAN C, LIU X, et al. Prescribed performance control for a pneumatic cylinder with strong friction via nonlinear extended state observer[J]. International Journal of Hydromechanics, 2023, 6(4): 359 - 379.

- [2] YAN Q Z, HU Z X. Neuroadaptive control for pneumatic cylinder servo systems with input saturation and time-varying constraints[J]. *International Journal of Hydromechanics*, 2024, 7(2): 132–154.
- [3] QIAN P F, LIU L, PU C W, et al. Methods to improve motion servo control accuracy of pneumatic cylinders-review and prospect[J]. *International Journal of Hydromechanics*, 2023, 6(3): 274–310.
- [4] 钱鹏飞, 浦晨玮, 刘磊, 等. 新型高频纵振减摩气缸的滑模运动轨迹跟踪控制[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(10): 22–30.
QIAN P F, PU C W, LIU L, et al. Sliding mode motion trajectory tracking control of a novel high-frequency longitudinal vibration friction-reducing pneumatic cylinder[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(10): 22–30. (in Chinese)
- [5] SARAVANAKUMAR D, MOHAN B, MUTHURAMALINGAM T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 481–492.
- [6] AZAHAR M I P, IRAWAN A, ISMAIL R M T R. Self-tuning hybrid fuzzy sliding surface control for pneumatic servo system positioning [J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 113: 104838.
- [7] TSAI Y C, HUANG A C. FAT-based adaptive control for pneumatic servo systems with mismatched uncertainties[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(6): 1263–1273.
- [8] LAI J Y, MENQ C H, SINGH R. Accurate position control of a pneumatic actuator [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1990, 112(4): 734–739.
- [9] NORITSUGU T, TAKAIWA M. Positioning control of pneumatic servo system with pressure control loop using disturbance observer [J]. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 1995, 31(12): 1970–1977.
- [10] MOHORCIC J, DONG L L. Extended state observer-based pressure control for pneumatic actuator servo systems [J]. *Control Theory and Technology*, 2021, 19(2): 64–79.
- [11] 钱鹏飞, 罗辉, 单位银, 等. 新型双作用气浮气缸优化设计及其工况分析[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 12–21.
QIAN P F, LUO H, SHAN W Y, et al. Optimal design and working condition analysis of a novel double-acting air-floating pneumatic cylinder[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 12–21. (in Chinese)
- [12] GUO M H, TIAN Z X, FENG X L, et al. CFD-based method for hydrostatic bearings performance: static characteristics with various recess shapes [J]. *International Journal of Hydromechanics*, 2024, 7(2): 176–192.
- [13] 陈志毅, 颜冰, 闫晓伟. 密闭容腔气体压力的自适应模糊PID控制[J]. *探测与控制学报*, 2009, 31(增刊1): 90–92, 96.
CHEN Z Y, YAN B, YAN X W. Self-adapted fuzzy PID control of air-pressure in a closed-vessel [J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(Suppl 1): 90–92, 96. (in Chinese)
- [14] 何文凯, 陈紫轩, 张轶, 等. 高压气动系统负载容腔压力伺服控制仿真研究[J]. *液压与气动*, 2019(12): 22–27.
HE W K, CHEN Z X, ZHANG Y, et al. Simulation of load-vessel pressure control for high pressure pneumatic system[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2019(12): 22–27. (in Chinese)
- [15] 路波, 吕杰, 惠伟安, 等. 气动高精度压力控制系统的建模及特性分析[J]. *机床与液压*, 2012, 40(5): 18–21, 58.
LU B, LYU J, HUI W A, et al. Modeling and characteristics analysis for high precision pneumatic pressure control system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(5): 18–21, 58. (in Chinese)
- [16] 李宝仁, 张庆先, 杜经民. 高精度压力伺服控制系统研究[J]. *液压气动与密封*, 2000(2): 10–11, 52.
LI B R, ZHANG Q X, DU J M. A high accuracy pressure servo system[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2000(2): 10–11, 52. (in Chinese)
- [17] 李宝仁, 刘浩, 傅晓云. 密闭容腔压力伺服控制系统理论与实验研究[J]. *液压与气动*, 2004(7): 1–3.
LI B R, LIU H, FU X Y. Theoretical and experimental research on pressure servo control system of closed chamber[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2004(7): 1–3. (in Chinese)
- [18] 刁爱民, 鲜麟波, 李宝仁. 高精度气压源的Fuzzy-PID控制研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2006, 18(4): 105–108.
DIAO A M, XIAN L B, LI B R. Fuzzy-PID controller of high precise air pressure source[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(4): 105–108. (in Chinese)
- [19] LIU H, LEE J C, LI B R. High precision pressure control of a pneumatic chamber using a hybrid fuzzy PID controller[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2007, 8(3): 8–13.
- [20] LIN Z L, ZHANG T H, XIE Q. Intelligent real-time pressure tracking system using a novel hybrid control scheme [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, 40(13): 3744–3759.
- [21] 路波, 陶国良, 刘昊. 零重力模拟气动悬挂系统的开发及关键技术 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(5): 890–896.
LU B, TAO G L, LIU H. Development and key technologies of pneumatic suspension system for zero-gravity simulation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(5): 890–896. (in Chinese)
- [22] 路波, 陶国良, 刘昊, 等. 零重力模拟气动悬挂系统的建模及恒压控制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(2): 379–385.
LU B, TAO G L, LIU H, et al. Modeling and constant pressure control of pneumatic suspension system for zero-gravity simulation [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(2): 379–385. (in Chinese)

- [23] 朱晓. 无摩擦气缸及高精度气动负载系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHU X. Study on non-friction cylinder and high precision pneumatic load system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [24] 刘昱, 王涛, 赵国新, 等. 气动重力补偿系统的压力控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 212-219.
LIU Y, WANG T, ZHAO G X, et al. Pressure control of pneumatic gravity compensation system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 212-219. (in Chinese)
- [25] LIU Y, PENG F, HUA Z, et al. Improved model-free adaptive control of pneumatic gravity compensation system[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2020, 24(3): 357-365.
- [26] 宋玉宝, 赵国新, 刘昌龙, 等. 气动伺服系统的 BELC 压力控制[J]. 机械设计与制造, 2020(7): 111-114.
SONG Y B, ZHAO G X, LIU C L, et al. Pressure control of pneumatic servo system based on brain emotional learning controller[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(7): 111-114. (in Chinese)
- [27] QIAN P F, PU C W, LIU L, et al. Development of a new high-precision friction test platform and experimental study of friction characteristics for pneumatic cylinders [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(6): 065001.