

基于模糊 PID 的真空蝶阀压力控制算法研究

乔健¹ 罗磊¹ 托乎提努尔^{2*} 杨振怀²

(1. 佛山大学 机电工程与自动化学院 佛山 528225; 2. 季华实验室 佛山 528251)

Pressure Control Algorithm of Vacuum Butterfly Valve Based on Fuzzy PID

QIAO Jian¹, LUO Lei¹, TUOHUTI Nuer^{2*}, YANG Zhenhuai²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China;

2. Jihua Laboratory, Foshan 528251, China)

Abstract Vacuum butterfly valves are widely used for pressure control in medium and low vacuum environments. Due to the strong nonlinearity and time-delay characteristics of the butterfly valve pressure control system, conventional proportional-integral-derivative (PID) control algorithms fail to meet the high-precision pressure control requirements. To enhance the pressure control performance of vacuum butterfly valves, this paper designs an improved fuzzy PID control algorithm with a correction function. Experimental results show that the new controller, utilizing fuzzy PID control, significantly outperforms traditional PID controllers in terms of overshoot and adjustment time. Additionally, with the aid of the correction function, the new controller effectively mitigates the nonlinear effects of the system, improving response speed and control accuracy. The optimized fuzzy PID controller demonstrates superior dynamic performance, reduced control error, and faster target tracking compared to conventional methods, significantly enhancing the pressure control performance of vacuum butterfly valves.

Keywords Vacuum butterfly valves, Fuzzy PID, Pressure control, Control algorithms

摘要 真空蝶阀广泛应用于中、低真空环境下的压力控制,由于蝶阀压力控制系统具有强非线性和时滞性,使得常规比例积分微分(PID)控制算法无法满足真空蝶阀对高精度压力控制的需求。为了提高真空蝶阀的压力控制性能,文章设计了一种带校正函数的改进模糊PID控制算法。实验结果表明,由于采用了模糊PID控制,新控制器在超调量和调节时间上远好于传统PID控制器;并且借助校正函数,新控制器可以明显改善系统的非线性影响,提高系统的响应速度以及控制精度。优化后的模糊PID控制器在动态性能、控制误差和目标跟踪速度上均优于传统方法,显著提升了真空蝶阀的压力控制性能。

关键词 真空蝶阀 模糊PID 压力控制 控制算法

中图分类号: TB754.1

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202407015

真空蝶阀因为其结构简单紧凑,具有良好的流通控制特性等优点被广泛应用于半导体、新能源、核工业和真空镀膜等领域。蝶阀作为真空设备的重要组成部分,可对腔内气体的压力及流量进行控制,具有节流、调压等多种功能。压力控制性能作为真空蝶阀最重要的技术指标,其直接影响真空设备运行时的工作性能。随着现代工业的发展,使得真空设备的复杂度、集成度不断提高,同时也对蝶阀的压力控制性能提出了更高的要求^[1]。

目前,传统PID控制算法由于其易于实现且通用性强而被广泛应用于工业控制领域中,对于一般的线性定常系统,PID控制器通过调整控制参数后通常能实现较好的控制效果^[2]。但由于蝶阀压力控制系统中的参数具有时变性以及真空设备内部构造的复杂性,所以难以对控制系统建立精确的数学模型,无法得到准确的PID参数,所以仅依靠PID控制很难满足蝶阀压力控制系统对于高动态性、低稳态误差的控制要求。模糊PID控制技术结合了

模糊控制和 PID 控制,是一种不依赖精确被控对象数学模型的智能控制方法,其通过模糊控制能够对 PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行在线自适应调整,从而提高系统的控制效果^[3]。但由于蝶阀压力控制系统将模糊 PID 控制算法运算后的结果作为控制器输出作用于系统的执行器,而蝶阀控制器的输出与真空设备的压力之间具有强非线性,所以常规模糊 PID 控制算法在蝶阀压力控制系统中的应用存在局限性。针对以上问题,本文基于蝶阀的控压特性设计了校正函数,并提出了一种结合模糊 PID 控制和补偿校正的蝶阀压力控制算法,用于改善蝶阀的压力控制性能。

1 蝶阀压力控制系统

真空设备通过控制气体的流入量和流出量,来调节腔体内的气体分子数量,从而控制腔体内部压力。真空蝶阀压力控制系统的结构示意图如图 1 所示,其中,气体流量控制器用于控制真空设备的进气量,气体供应系统通过气体流量控制器向腔体内引入气体,从而增加腔体内的气体分子数量和提升腔内压力。真空泵则用于真空腔体的气体排出,降低腔体内部压力。薄膜真空计作为控制系统的压力传感器用于向蝶阀控制器实时反馈腔内压力。

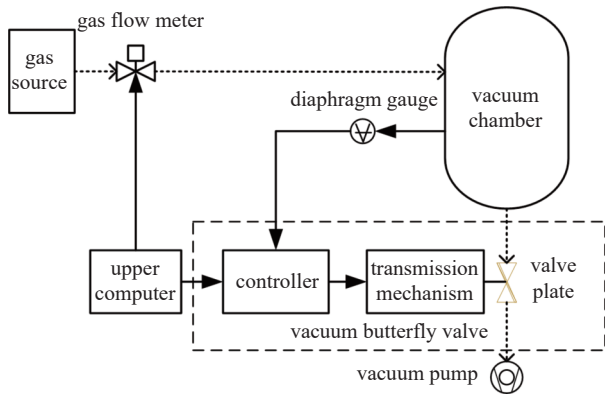


图1 蝶阀压力控制系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the butterfly valve pressure control system

真空蝶阀常用于真空设备压力控制的下游工艺,被安装在真空腔体与真空泵之间,控制流出腔体的气体流量。在真空设备进行调压时,真空腔体的进气量通常保持恒定,蝶阀控制器根据压力传感器实时检测的设备内部压力与给定的目标压力之间的压力误差,计算阀板的开合角度,通过执行机构改变蝶阀的气体流通面积 S :

$$S = \pi \cdot r^2 \cdot (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

式中, r 表示真空蝶阀阀板的半径; θ 表示阀板的开合角度。

蝶阀的流通面积的变化使得蝶阀的气体流量发生改变,腔内气体通过蝶阀的流出量 Q_{out} 可通过式(2)计算获得:

$$Q_{out} = C_v \cdot S \sqrt{\frac{p_q \cdot \Delta p}{R \cdot T}} \quad (2)$$

式中, R 为气体常数, T 为阀前温度, p_q 为阀门前压力, C_v 为蝶阀流量系数, Δp 为蝶阀两侧压力之差,蝶阀压差 Δp 的计算公式(3)如下:

$$\Delta p = p_q - p_b \quad (3)$$

式中, p_b 为阀门后压力,在实际应用中,由于真空泵高效的抽气能力,阀门后压力 p_b 远低于阀门前压力 p_q ,因此 Q_{out} 在计算时可以转换为:

$$Q_{out} = C_v \cdot S \cdot \frac{p_q}{\sqrt{R \cdot T}} \quad (4)$$

真空设备的压力是由腔内的气体分子数决定,如果气体流入量与气体流出量不能达到平衡,则引起腔内压力产生变化,腔内压力变化率 $\dot{p}$ 的计算公式(5)如下:

$$\dot{p} = \frac{R \cdot T}{M \cdot V} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (5)$$

式中, Q_{in} 为气体流入量, V 为真空腔体容积, M 为流过蝶阀的气体摩尔质量。

由式(4)和式(5)可知,真空蝶阀在进行控压工作时,在气体流入量 Q_{in} 、阀前温度 T 保持不变的情况下,通过调节蝶阀的阀板开合角度,可改变真空腔体气体流出量以及内部压力。由于蝶阀的流通特性以及气流管路其它部件阻力特性的影响,真空腔体内的压力变化与蝶阀的开度之间并非成线性关系,而是按图 2 的规律变化。图 2 是在进气量为 6 L/min、真空腔体内部容积为 21 L 的测试环境下,通过采集腔内压力稳定时的各个压力点及对应的阀门开度测定,其表征了蝶阀压力控制系统的工作特性。进行拟合后,得到工作特性的拟合曲线,其拟合公式如下:

$$f(x) = 29.49(10x)^{-0.82459} + 0.06462 \ln(10x) \quad (6)$$

拟合公式的拟合优度 R^2 为 0.9984。

2 压力控制算法设计

本文研究设计的模糊 PID 控制器,通过模糊控制在在线调整 PID 控制器参数,从而提高控制系统的

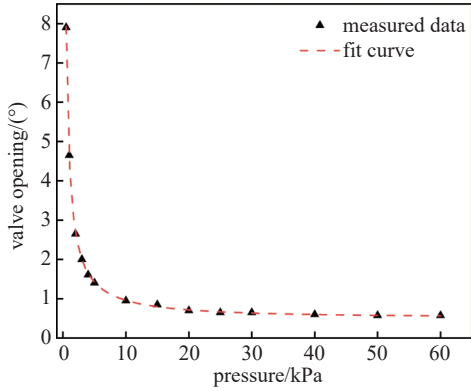


图2 蝶阀开度与腔体压力的关系变化图

Fig. 2 Diagram of the relationship between butterfly valve opening and chamber pressure

动态性能;并设计了校正函数,可根据上位机输入目标压力实时修正模糊控制器输出值,提高模糊 PID 控制算法在蝶阀压力控制系统中的适用性。

基于模糊 PID 的真空蝶阀压力控制系统结构图如图 3 所示,系统的控制器由 PID 控制器、模糊控制器以及校正函数组成。其中 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为模糊控制器输出的 PID 参数调整量, K_p 、 K_i 、 K_d 为经过校正函数修正后的 PID 控制参数, p_{in} 为上位机给定的目标压力, $u(t)$ 为蝶阀控制器的输出信号, p_{out} 为系统实际输出值, $e(t)$ 为控制系统的当前时刻偏差量, $e(t)$ 的计算公式如下:

$$e(t) = p_{in} - p_{out} \quad (7)$$

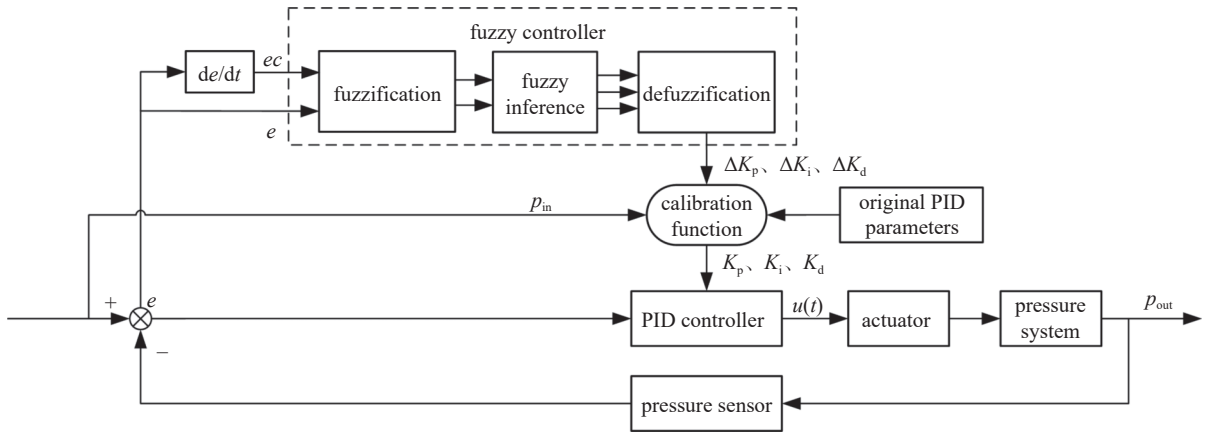


图3 基于模糊 PID 的真空蝶阀压力控制系统结构图

Fig. 3 Structural diagram of vacuum butterfly valve pressure control system based on fuzzy PID

2.1 PID 控制算法

经典 PID 控制器是通过比例、积分、微分三个部分,对反馈的实际输出量与设定的目标值的偏差进行计算。但由于蝶阀的微处理器在运算时不能对连续的模拟信号进行计算,需要输入信号进行离散化,同时为了消除调压时积分饱和带来的影响,所以采用增量型 PID 控制算法^[4],其表达式如下:

$$\Delta u(t) = K_p[e(t) - e(t-1)] + K_i \cdot e(t) + K_d[e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (8)$$

式中, $\Delta u(t)$ 为控制器输出量; $u(t)$ 的变化量。

对于增量式 PID 控制算法,在设置合适的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 后, PID 控制器的比例、积分、微分三个环节根据控制误差实时调节被控对象,从而使系统稳定和减小控制误差。但经典 PID 控制算法因为其 PID 参数在工作时固定,不能随环境的变化而变化^[5],导致蝶阀压力控制系统控压时超调量大、调节

时间长,其在动态性能和稳态精度上无法满足真空蝶阀高精度控压需求。

2.2 模糊 PID 控制算法

模糊 PID 控制器主要由模糊控制器和 PID 控制器两部分组成,控制系统的输入经过模糊控制器的三个环节:模糊化、模糊推理、清晰化后,实现 PID 控制器参数的在线自适应整定,从而使 PID 控制器获得更好的控制性能^[6]。

本文设计的自适应模糊 PID 控制器采用二输入三输出的 Mamdani 型模糊控制器,如图 3 所示,模糊控制器以真空蝶阀压力控制系统的压力误差 e 和压力误差变化率 ec 作为输入,经过模糊运算后输出 PID 控制器三个参数的调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

2.2.1 输入量模糊化及隶属函数

模糊控制器通过模糊化,将物理论域中的压力误差 e 和压力误差变化率 ec 转化为模糊论域中的

模糊值 E 和 EC 。根据真空蝶阀的实际工作压力范围,定义误差 e 的物理论域为 $[-30,30]$ 、模糊论域为 $[-3,3]$,其对应的量化因子设置为 0.01;定义变化率 ec 的物理论域为 $[-1.5,1.5]$ 、模糊论域为 $[-1,1]$,其对应的量化因子设置为 0.66。定义输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊论域均为 $[-1,1]$,对应的比例因子分别为: 1、0.23、0.05。

因为三角隶属函数具有运算简单、工作时内存消耗小等优点^[7],故选择其作为输入量和输出量的隶属函数。将输入量和输出量的模糊子集均设为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,对应的模糊数为 $\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$,其中: NB 代表负大, NM 代表负中, NS 代表负小, ZO 代表零, PS 代表正小, PM 代表正中, PB 代表正大^[8-11]。输入量 e 、 ec 和输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 对应隶属函数以及模糊子集分布如图 4 所示。

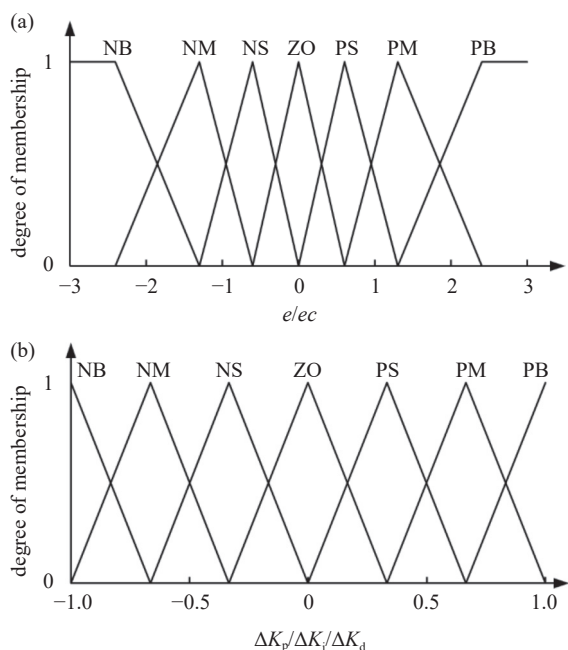


图4 模糊子集分布及其隶属函数曲线图。(a)输入量 e 和 ec 隶属函数, (b)输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 隶属函数

Fig. 4 Plot of fuzzy subset distribution and membership function. (a) Membership function of the input variables, (b) membership function of the output variables

2.2.2 模糊控制推理规则

根据真空蝶阀压力控制系统的工程经验,分析压力误差 e 、压力误差变化率 ec 与 PID 控制器的三个参数之间的关系,制定以下模糊控制规则表,分别如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 ΔK_p 模糊规则表

Tab. 1 ΔK_p fuzzy rule table

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PS	PS	PS	ZO	ZO	NS	NS
ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	ZO	NS	NS	NB
PM	ZO	ZO	NS	NS	NS	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NM	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则表

Tab. 2 ΔK_i fuzzy rule table

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
NM	NB	NM	NS	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	ZO	PS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM	PB

表 3 ΔK_d 模糊规则表

Tab. 3 ΔK_d fuzzy rule table

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	PS	NS	NS	NM	NS	PS
NM	PS	NS	NM	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	ZO	NS	ZO	NS	ZO
ZO	NS	NS	PS	ZO	PS	ZO	NS
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	ZO
PM	PS	NS	PS	PS	PS	PS	PM
PB	PS	PS	PM	PM	PS	PM	PB

模糊规则表中 PID 参数的调整原则为: 当压力误差的绝对值 $|e|$ 较大, 但压力误差变化率 ec 较小时, 为加快压力控制系统的响应速度, 应增大 K_p 和 K_d , 同时为了避免出现超调, 应减少 K_i ; 当压力误差绝对值 $|e|$ 处于中等大小, 但压力误差变化率较大时, 应该减小压力上升或者下降速度, 则 K_p 不应太大, 同时适当增大 K_i ; 当压力误差的绝对值 $|e|$ 较小时, 为了使控制系统具有良好的稳态性能, 应取较大的 K_p 和 K_i , 如果此时压力误差变化率依然较大, 则为了避免震荡, 应适当减小 K_d 。

2.2.3 输出量清晰化

为了使模糊控制器的输出更加平滑, 文章采用目前较为常用的重心法分别对模糊推理后各输出量的模糊集合进行清晰化^[12]。其在离散域的表达式如下:

$$U_o = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (9)$$

式中, U_o 是输出量的精确值, F_i 是模糊量化值, M_i 是模糊量化值对应的隶属度值。

2.3 校正函数

通过对图 2 分析可知, 当真空设备内部处于不同压力点时, 相同阀门开度变化量, 引起压力变化及压力变化速率相差较大, 真空设备内部压力越高, 腔内压力对蝶阀的阀门开度变化越敏感。因此, 真空设备内部压力与蝶阀的阀门开度之间具有强非线性。为了补偿这种强非线性的压力变化, 本文基于蝶阀的压力控制特性引入了校正函数, 用于对模糊控制器调整后的 PID 参数进行在线校正, 校正后的 PID 三个参数如下:

$$\begin{cases} K_p = G_k \cdot (K_{p0} + \Delta K_p) \\ K_i = G_k \cdot (K_{i0} + \Delta K_i) \\ K_d = G_k \cdot (K_{d0} + \Delta K_d) \end{cases} \quad (10)$$

式中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 分别为 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的初始值。 G_k 为校正函数产生的校正因子, 校正因子由校正函数根据输入的目标压力计算而来, 校正函数的公式如下:

$$f(x) = \frac{29.49(10x)^{-0.82459} + 0.06462 \ln(10x)}{0.585} \quad (11)$$

式中, x 为压力控制系统的目标压力, 0.585 是真空设备内部压力稳定在 30 kPa 时蝶阀的阀门开度值。由于蝶阀的控压范围主要在 [0.01, 30] kPa 之间, 所以本文以蝶阀作业时的最高压力点作为校正函数的基准点, 校正函数曲线如图 5 所示。从图 5 中可看出校正因子与目标压力的关系同样具有强非线性, 在压力较低时校正因子的取值较大, 因此可放大低压区时控制器的输出信号, 提高控制系统在低压区的敏感度和响应速度, 从而改善低压时强非线性对压力控制系统造成的影响。

3 实验结果分析

为了验证优化后的模糊 PID 控制算法在压力

在蝶阀压力控制系统中的控制性能, 搭建真空蝶阀压力控制系统测试平台, 如图 6 所示。

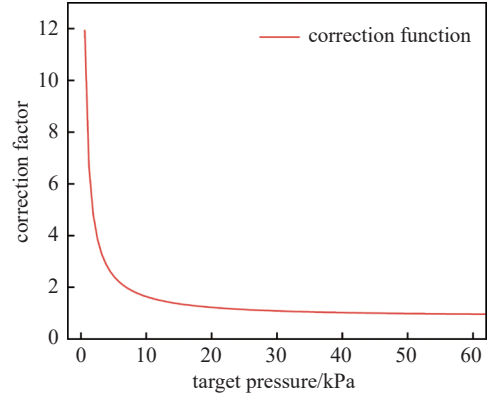


图5 校正函数曲线

Fig. 5 Graph of the correction function

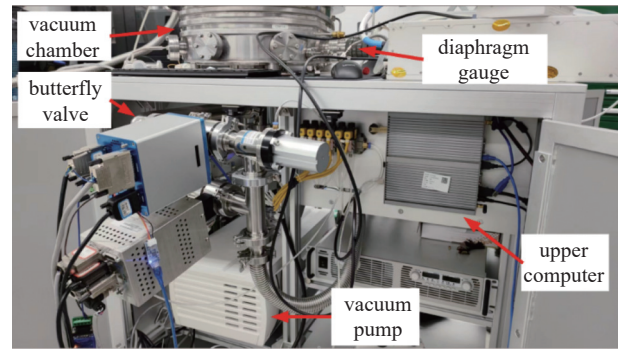


图6 压力控制系统测试平台

Fig. 6 Pressure control system test platform

在进行算法的控制性能测试时, 三种控制算法的 PID 控制器参数的预设值均设置为: $K_{p0} = 1.0$ 、 $K_{i0} = 0.23$ 、 $K_{d0} = 0.05$ 。控制系统测试平台的部分参数为: 薄膜真空计量程为 0.1~100 kPa, 真空计的输出电压为 0~10 V; 真空腔体容积为 21 L; 真空泵为干式泵, 极限压强为 3×10^{-2} mbar; 真空腔体内部温度为 20℃, 通入气体为高纯度氮气, 进气量设置为 6 L/min。图 7 为 3 种控制算法的实验结果, 传统 PID 控制、模糊 PID 控制以及优化后的模糊 PID 控制算法在目标压力分别设置为 30 kPa、20 kPa、10 kPa 和 5 kPa 时的阶跃响应曲线, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 由于模糊控制器是以 30 kPa 时的控压工程经验作为设计模糊规则的先验知识, 所以在从 20 kPa 到 30 kPa 的调压过程中, 模糊 PID 控制算法在超调量和调节时间等性能指标上远好于常规 PID 算法, 具有较好的控制性能。但随着目标压力逐渐降低, 由于控制系统强非线性带来的影

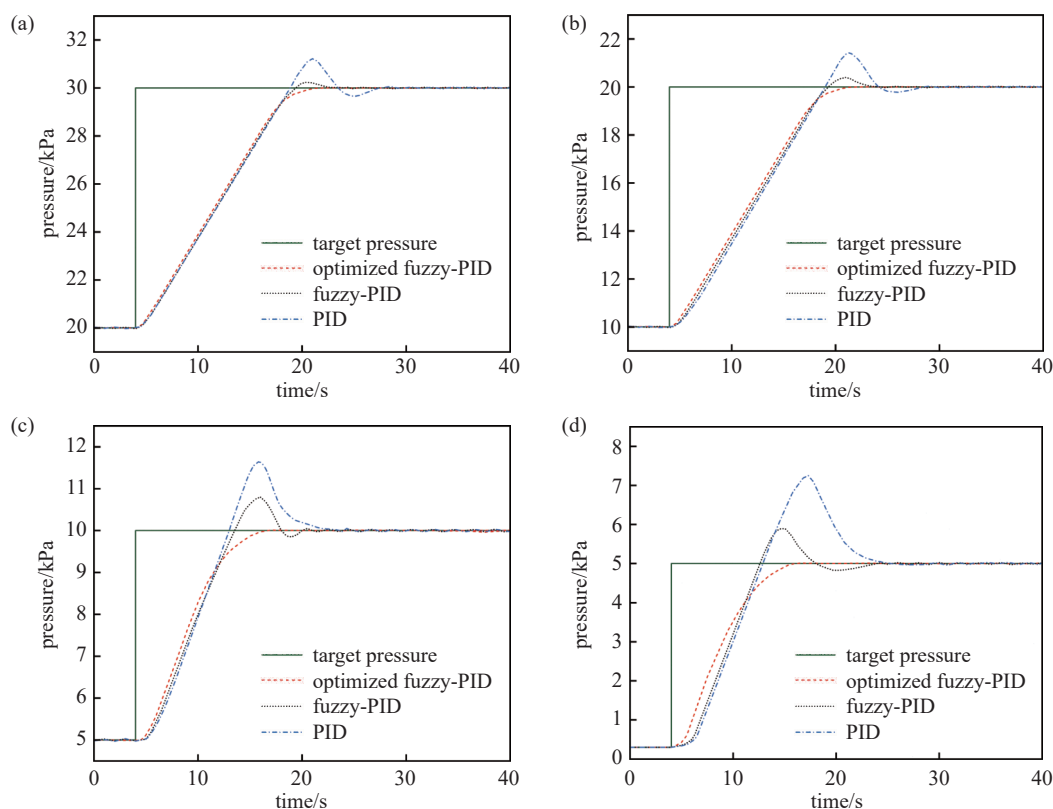


图7 控制系统压力阶跃响应曲线。(a)30 kPa, (b)20 kPa, (c)10 kPa, (d)5 kPa

Fig. 7 Control system pressure step response curves. (a) 30 kPa, (b) 20 kPa, (c) 10 kPa, (d) 5 kPa

响,使得模糊 PID 算法不仅在动态性能上出现超调量变大、调节时间变长的问题,而且控制精度也逐渐降低。而带校正函数的模糊 PID 控制算法受到目标压力变化的影响较小。

在不同目标压力下 3 种控制算法具体的控制性能指标如表 4 所示,其中 T_s 为控制系统的调节时间, σ 为调压过程中的超调量, SSE 为压力稳定后控制系统的稳态压力误差。由表 4 可看出:在目标压力较高时,优化后的模糊 PID 控制算法对比常规

模糊 PID 控制和传统 PID 算法在调节时间上分别降低了 11.8% 和 29.8%,稳态误差分别降低了 43.3% 和 58.5%。随着目标压力逐渐降低,传统 PID 和模糊 PID 的控制性能逐渐变差。在目标压力降低到 5 kPa 时,优化后的模糊 PID 控制算法相较于其它两种控制算法,在调节时间上分别降低 35.4% 和 41.9%,在稳态误差上分别降低 60% 和 66.6%,其依旧能够保持良好的动态响应特性和控制精度。

表 4 不同算法的控制性能指标

Tab. 4 Control performance metrics for different algorithms

控制方式	5 kPa			10 kPa			20 kPa			30 kPa		
	T_s/s	$\sigma/\%$	SSE/kPa	T_s/s	$\sigma/\%$	SSE/kPa	T_s/s	$\sigma/\%$	SSE/kPa	T_s/s	$\sigma/\%$	SSE/kPa
PID	19.8	45	0.03	18.3	16.3	0.035	24.5	7.1	0.04	23	4	0.041
模糊 PID	17.8	18	0.025	15.8	8	0.028	19.5	2	0.03	18.4	1	0.03
本文算法	11.5	0	0.01	12.3	0	0.01	17.2	0	0.013	17	0	0.017

同时本文也验证了优化后的模糊 PID 控制器在低压时的控制性能,压力控制系统在 2 kPa 的低真空环境下进行了压力跟踪测试。测试结果如图 8 所示,在较低的压力环境下,模糊 PID 控制器由于

受到系统的非线性影响,其控制性能大幅下降。带校正函数的模糊 PID 算法控制的压力系统在超调量以及调节时间上的表现要明显好于其它两种控制算法,其能够在无超调的情况下快速跟踪目标压力。

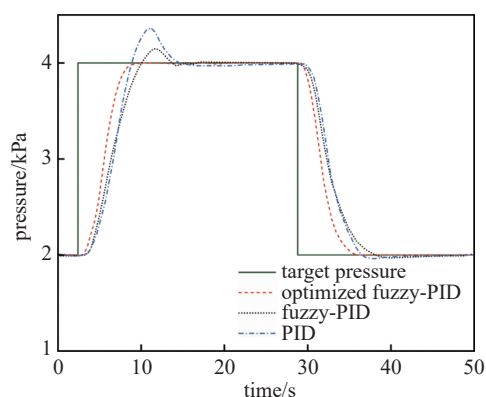


图8 压力跟踪测试曲线

Fig. 8 Pressure trace test curves

4 结论

为了实现真空蝶阀压力控制系统的高精度压力控制,本文分析了真空蝶阀的控压特性,设计了模糊 PID 控制算法,并针对压力控制系统的强非线性设计了校正函数用于优化系统的模糊 PID 控制算法。实际测试结果表明,与常规的 PID 控制和模糊 PID 控制相比,使用校正函数优化后的模糊 PID 控制算法不仅大大减少了控制系统的调节时间和稳态误差,并且有效抑制了系统非线性带来的影响,使蝶阀在整个工作压力范围内都能保持良好的控制效果。因此,本文提出的模糊 PID 控制与校正函数相结合的控制算法可以用于蝶阀控压系统的压力控制,能够改善蝶阀的压力控制性能,在动态性能和控制精度等方面基本能够满足真空蝶阀控压作业的性能要求。

参 考 文 献

- [1] Liu J Y. Intelligent status quo and development trend of electric valve[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018, 38(10): 90–91 (刘嘉益. 电动阀门的智能化现状及其发展趋势 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(10): 90–91 (in Chinese))
- [2] Tajjudin M, Rahiman M H F, Ishak N, et al. Comparison between optimally-tuned PID with self-tuning PID for steam temperature regulation[C]//2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012). IEEE, 2012, 2: 551–556
- [3] Zhu M, Yang C, Li W. Autotuning algorithm of particle swarm PID parameter based on D-Tent chaotic model[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2013, 24(5): 828–837
- [4] Fu R, Zheng Z H. Optimal control method of air brake based on phase synchronous incremental PID[J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(3): 206–209 (付锐, 郑宗华. 基于相位同步增量式 PID 的气压制动器优化控制方法 [J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(3): 206–209 (in Chinese))
- [5] Zhou J L, Ao Y P, Hou J L, et al. Pressure self-regulation technology based on fuzzy-adaptive PID controller[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2017, 30(3): 53–56 (周家林, 敖永平, 侯俊林, 等. 基于模糊自适应 PID 控制器的自动调压技术 [J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2017, 30(3): 53–56 (in Chinese))
- [6] Kumar V, Nakra B C, Mittal A P. A review on classical and fuzzy PID controllers[J]. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2011, 16(3): 170–181
- [7] 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 (in Chinese))
- [8] Liang H, Zou J, Zuo K, et al. An improved genetic algorithm optimization fuzzy controller applied to the well-head back pressure control system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106708
- [9] Acharya D, Das D K. Design of a fuzzy-based proportional integral derivative controller with optimal membership function scaling for respiratory ventilation system[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, 78: 103938
- [10] Zhang J, Zhang S, Dan Z, et al. "Variable universe fuzzy PID control for Multi-level gas tank pressure." 2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering, Chengdu, China, 2014, pp. 1900–1904
- [11] Chen W, Xing M X, Fang K L. "A PLC-based fuzzy PID controller for pressure control in Coke-oven." Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, 2012, 4754–4758
- [12] Yang Q H, Feng Y, Yong C J, et al. Data optimization algorithm of capacitance diaphragm gauge based on fuzzy control theory[J]. *Vacuum Science and Technology China*, 2024, 44(1): 28–34 (杨骐豪, 冯焱, 成永军, 等. 基于模糊控制原理的电容薄膜真空计数据优化算法研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2024, 44(1): 28–34 (in Chinese))