



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230125

## 基于模糊 PID 的阀门电液伺服开度控制

高 杰, 杨世凤, 高 喆

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

**摘要:** 针对电液伺服开度控制系统存在的非线性、负载扰动、时变性问题,以蝶阀的阀门电液伺服开度控制系统为研究对象,使用 AMESim 软件搭建该系统的物理模型,使用 MATLAB 软件搭建控制模型,将二者进行联合仿真,并对常规 PID 控制(proportional-integral-derivative control)和自整定模糊 PID 控制两种算法的控制性能进行对比。实验结果表明:与常规 PID 控制相比,采用自整定模糊 PID 控制方式的电液伺服开度控制系统超调量更小,调节时间更短,准确性有很大提升,且对扰动也有很好的鲁棒性。

**关键词:** 电液伺服系统; AMESim-MATLAB 联合仿真; 模糊 PID 控制

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2024)02-0065-06

## Valve Electro-Hydraulic Servo Opening Control Based on Fuzzy PID Control

GAO Jie, YANG Shifeng, GAO Zhe

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In view of the problems existing in the electro-hydraulic servo opening control system, such as nonlinearity, load disturbance and time variability, in our present study the electro-hydraulic servo opening control system of butterfly valve was taken as the research subject, AMESim software was used to build the physical model of the system, MATLAB software was used to build the control model, and the two were jointly simulated. Furthermore, the control performance of conventional proportional-integral-derivative control (PID control) and self-tuning fuzzy PID control was compared. The experimental results show that compared with the conventional PID control, the electro-hydraulic servo opening control system with self-tuning fuzzy PID control mode had smaller overshoot, shorter adjustment time, greatly improved accuracy, and also had good robustness to disturbance.

**Key words:** electro-hydraulic servo system; AMESim-MATLAB joint simulation; fuzzy PID control

### 引文格式:

高杰,杨世凤,高喆. 基于模糊 PID 的阀门电液伺服开度控制[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(2): 65-70.

GAO J, YANG S F, GAO Z. Valve electro-hydraulic servo opening control based on fuzzy PID control[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(2): 65-70.

电液伺服控制系统具有响应快、负载大、控制精度高优点,广泛用于阀门的开度控制<sup>[1]</sup>。同时,电液伺服控制系统受参数非线性、负载扰动、环境干扰和交叉耦合影响。若采用常规 PID 控制(proportional-integral-derivative control),控制器参数较难整定,且开度控制存在超调量大、调节时间长和鲁棒性差的缺

点,单靠 PID 控制已经不能满足系统的控制性能指标。在常规 PID 控制中引入模糊控制算法,利用模糊控制算法实时调节 PID 参数,这样处理可结合常规 PID 控制和模糊控制算法的优点,具有鲁棒性强、动态控制品质好和适应参数变化能力强的特点<sup>[2]</sup>。本文以蝶阀的阀门电液伺服开度控制系统为研究对象,进

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-08-23

作者简介: 高 杰(1996—),男,山东人,硕士研究生;通信作者: 杨世凤,教授, yangsf@tust.edu.cn

行基于 AMESim 软件和 MATLAB 软件的联合仿真研究,将常规 PID 控制理论与模糊控制算法相结合,避免只使用 PID 控制时,控制器中的 3 个 PID 参数只能为定值的缺点,使阀门电液伺服开度控制系统有更好的轨迹跟踪品质和鲁棒性。

### 1 阀门电液伺服开度控制系统工作原理

电液伺服开度控制系统原理如图 1 所示。控制器根据上位机的给定开度和角度传感器的反馈值之差,通过伺服放大器控制电液伺服阀阀口开度,从而改变单出杆液压缸位移,将载荷施加至负载<sup>[3]</sup>,完成蝶阀开度的闭环控制。

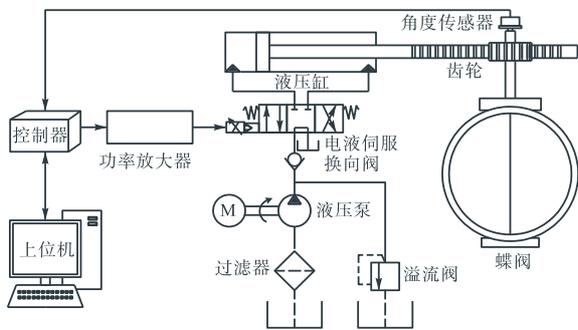


图 1 电液伺服开度控制系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electro-hydraulic servo opening control system

### 2 阀门电液伺服开度控制系统的数学模型

阀门电液伺服开度控制系统将上位机的给定开度与角度传感器反馈的偏差信号作为系统输入,经过可编程控制器计算后,输出电压控制信号到功率放大器;经功率放大器放大为电流控制信号,再将该控制信号输入电液伺服换向阀<sup>[4]</sup>,以此控制电液伺服换向阀的阀芯位移,从而控制伺服换向阀中压力油的方向和流量;压力油进入单出杆液压缸,通过齿轮齿条传动机构转换成蝶阀开度<sup>[5]</sup>。同时,角度传感器将蝶阀开度反馈到系统控制器输入端,以此实现闭环控制。

#### 2.1 功率放大器的数学模型

因功率放大器的放大性能曲线呈线性,且功率放大器转折频率高于系统的频宽<sup>[6]</sup>,因此功率放大器可以简化为比例环节,其数学模型为

$$G_a(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = K_a \quad (1)$$

式中:  $I(s)$  为功率放大器的输出电流拉氏变换,  $U(s)$

为功率放大器的输入电压拉氏变换,  $K_a$  为比例增益。

#### 2.2 电液伺服换向阀的数学模型

对电液伺服换向阀的动态特性进行分析,需要考虑电液伺服换向阀的线圈回路电压方程、衔铁输出推力方程、衔铁力平衡方程,在忽略电液伺服换向阀死区特性的前提下,可将其视为一个二阶振荡环节,其数学模型为

$$G_v(s) = \frac{x_v(s)}{I(s)} = \frac{K_v}{\omega_v^2 + \frac{2\xi_v}{\omega_v}s + 1} \quad (2)$$

式中:  $x_v(s)$  为伺服换向阀的阀芯位移拉氏变换,  $K_v$  为伺服换向阀的增益系数,  $\omega_v$  为伺服换向阀的固有频率,  $\xi_v$  为伺服换向阀的阻尼比。

#### 2.3 单出杆液压缸的数学模型

分析三位四通电液伺服换向阀控制液压缸的工作原理,可以列出电液伺服换向阀的负载流量方程、液压缸的流量连续性方程和受力方程<sup>[7]</sup>。只考虑液压缸活塞杆位移为系统的输出量时,单出杆液压缸数学模型为

$$G_p(s) = \frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1 \right)} \quad (3)$$

式中:  $x_p(s)$  为液压缸的活塞杆位移拉氏变换,  $K_q$  为伺服换向阀的流量增益,  $A_p$  为液压缸活塞的等效作用面积,  $\omega_h$  为液压缸固有频率,  $\xi_h$  为液压缸-负载质量系统的阻尼比。

#### 2.4 传动机构数学模型

液压缸活塞杆的直线运动通过齿轮齿条传动机构配合转变为蝶阀阀杆的旋转运动。由于阀杆的旋转角度直接反映蝶阀的开度,所以角度传感器固定在阀杆上可直接检测蝶阀的开度。

液压缸活塞杆的位移和蝶阀开度可认为是线性关系<sup>[8]</sup>,蝶阀开度与液压缸位移的数学模型为

$$G_R(s) = \frac{\theta(s)}{x_p(s)} = \frac{1}{R} \quad (4)$$

式中:  $\theta(s)$  为蝶阀开度拉氏变换,  $R$  为蝶阀阀杆半径。

#### 2.5 角度传感器数学模型

角度传感器的输出电压信号与实际测量开度信号呈线性关系,其数学模型为

$$G_f(s) = \frac{U_f(s)}{\theta(s)} = K_f \quad (5)$$

式中:  $U_f(s)$  为角度反馈电压信号拉氏变换,  $K_f$  为角

度传感器的转换系数。

最终可得蝶阀开度控制系统的开环传递函数为

$$G(s) = G_a(s)G_v(s)G_p(s)G_R(s)G_f(s) \quad (6)$$

设定蝶阀开度控制系统的各项控制参数: 液压缸活塞等效作用面积  $A_p = 3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , 伺服换向阀增益系数  $K_v = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m/A}$ , 伺服换向阀阻尼比  $\xi_v = 0.7$ , 伺服换向阀固有频率  $\omega_v = 840 \text{ rad/s}$ , 伺服换向阀流量增益  $K_q = 0.7 \text{ m}^2/\text{s}$ , 液压缸固有频率  $\omega_h = 1377 \text{ rad/s}$ , 液压缸-负载质量系统阻尼比  $\xi_h = 816.2581$ 。将上述参数代入式(6), 计算可得控制系统开环传递函数的表达式为

$$G(s) = 0.97 / (7.38 \times 10^{-13} s^5 + 1.66 \times 10^{-6} s^4 + 1.98 \times 10^{-3} s^3 + 1.19 s^2 + s) \quad (7)$$

绘制控制系统的开环伯德图, 如图2所示。由该传递函数的幅频特性可知: 系统的穿越角频率为  $0.7 \text{ rad/s}$ , 相位裕度  $P_m = 55.0^\circ$ ; 在角频率为  $22.3 \text{ rad/s}$  处, 增益裕度  $G_h = 55.6 \text{ dB}$ 。相位裕度和增益裕度均在合理范围, 根据稳定性判据可知所设计的控制系统是稳定的。

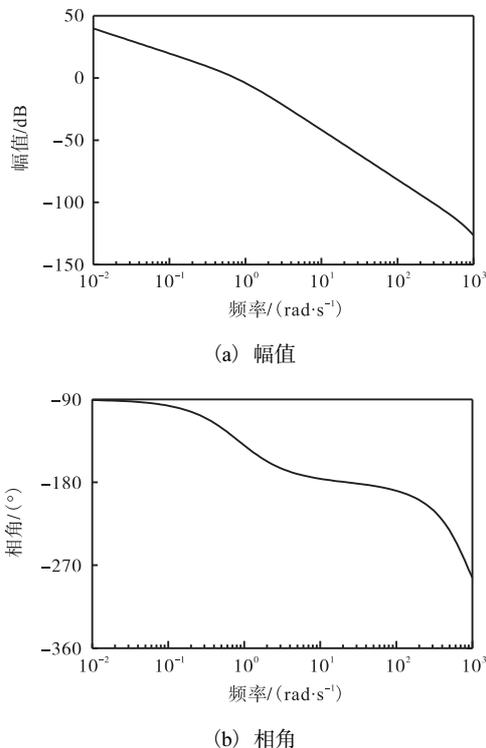


图2 控制系统开环伯德图

Fig. 2 Open loop Bode diagram of control system

### 3 自整定模糊PID控制器

电液伺服开度控制系统上位机的给定阀门开

度与电液伺服控制系统的角度传感器反馈的实际阀门开度的偏差  $e$  和偏差的变化率  $c$  作为模糊控制器的输入量<sup>[9]</sup>, 模糊PID控制器通过实时采样不断地检测  $e$  和  $c$ , 并利用模糊控制理论输出PID的3个参数的修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。模糊PID控制的校正算法为

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \cdot K_p^* \\ K_i = K'_i + \Delta K_i \cdot K_i^* \\ K_d = K'_d + \Delta K_d \cdot K_d^* \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为修正后参数,  $K'_p$ 、 $K'_i$ 、 $K'_d$  为PID控制初始参数,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为PID控制修正量,  $K_p^*$ 、 $K_i^*$ 、 $K_d^*$  为修正量系数。

#### 3.1 输入量、输出量模糊化处理及其隶属函数

本文中模糊PID控制器为两输入三输出系统, 将输入量和输出量的模糊论域划分为7个模糊集语言变量:  $e$ 、 $c$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d = [\text{PB}(\text{正大})$ 、 $\text{PM}(\text{正中})$ 、 $\text{PS}(\text{正小})$ 、 $\text{ZO}(\text{零})$ 、 $\text{NS}(\text{负小})$ 、 $\text{NM}(\text{负中})$ 、 $\text{NB}(\text{负大})]$ <sup>[10]</sup>, 其中  $e$  的论域为  $[-6, 6]$ ,  $c$  的论域为  $[-6, 6]$ ,  $\Delta K_p$  的论域为  $[-1, 1]$ ,  $\Delta K_i$  的论域为  $[-1, 1]$ ,  $\Delta K_d$  的论域为  $[-2, 2]$ 。输入输出的隶属度函数采用三角形隶属函数和高斯型隶属函数, 但是隶属度函数的两侧曲线分别用Z形隶属函数和S状隶属函数, 其隶属度函数曲线如图3所示。

#### 3.2 模糊控制规则设计

(1) 当  $e \cdot c > 0$  且  $e > 0$ 、 $c > 0$  时,  $K_p$  应减小,  $K_i$  应增大, 因此  $\Delta K_p$  为负,  $\Delta K_i$  为正,  $\Delta K_d$  为适中; 当  $e \cdot c > 0$  且  $e < 0$ 、 $c < 0$  时,  $K_p$  应增大, 因此  $\Delta K_p$  为正,  $\Delta K_i$  适中,  $\Delta K_d$  较小。

(2) 当  $e \cdot c < 0$  时, 说明系统误差在减小, 要尽量保持原来的输入  $K_p$ 、 $K_i$ , 因此  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  也保持较小的变化量。

(3) 当  $e \cdot c = 0$  且  $e = 0$  时, 如果  $c = 0$ , 则表示系统达到目标开度且稳定, 保持原来的输入  $K_p$ 、 $K_i$ ; 如果  $c \neq 0$ , 则表示系统仅短时间达到目标开度, 很可能还在振荡环节, 因此  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为较小值。

(4) 当  $e \cdot c = 0$  且  $e \neq 0$  时, 表示系统控制过程已经进入稳态, 但是存在一定的稳态误差, 因此  $\Delta K_p$  较大,  $\Delta K_i$  适中。

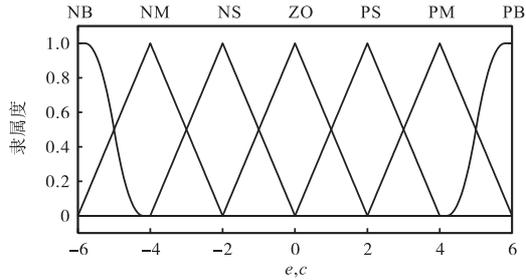
#### 3.3 反模糊化处理

模糊规则的输出是一个模糊量, 模糊量不能直接控制伺服换向阀, 因此需要通过模糊判决将其转换为一个精确量。常用的反模糊化算法有最大隶属度法、

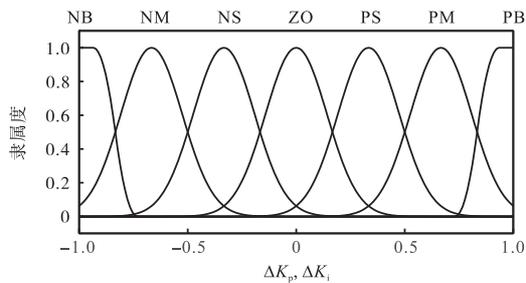
重心法和加权平均法<sup>[11]</sup>。为了输出比较准确的控制量,本文应用重心法,其计算公式为

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n u_j A(u_j)}{\sum_{j=1}^n A(u_j)} \quad (9)$$

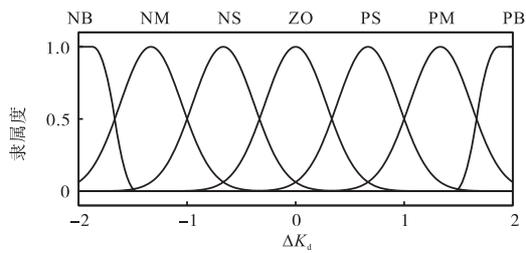
式中:  $u$  为输出清晰量,  $u_j$  为  $A(u_j)$  的横坐标,  $A(u_j)$  为隶属度函数。



(a) 偏差  $e$ 、偏差变化率  $c$



(b)  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$

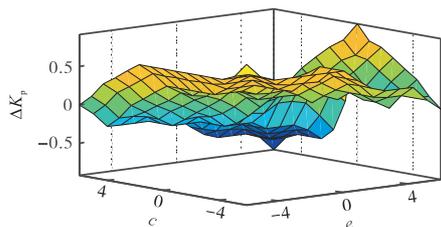


(c)  $\Delta K_d$

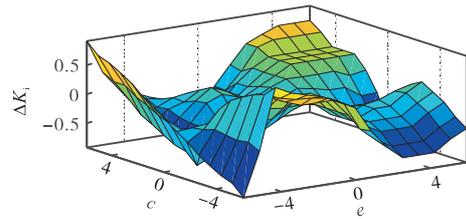
图3 隶属度曲线

Fig. 3 Membership curve

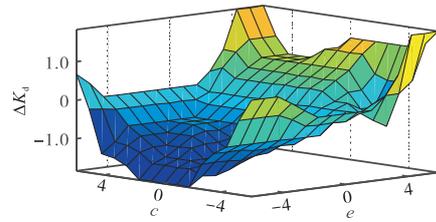
根据以上方法,结合阀门电液伺服开度控制系统的控制要求,制定模糊控制规则如图4所示。



(a)  $\Delta K_p$



(b)  $\Delta K_i$



(c)  $\Delta K_d$

图4 模糊控制规则

Fig. 4 Fuzzy control rules

## 4 系统建模与仿真分析

### 4.1 物理模型搭建与参数设置

在 AMESim 软件中搭建阀门电液伺服开度控制系统的物理模型,并根据实际要求设置其参数,接口模块用于实现 AMESim 软件和 MATLAB 软件之间的数据交换<sup>[12]</sup>。阀门电液伺服开度控制系统 AMESim 物理模型如图5所示。

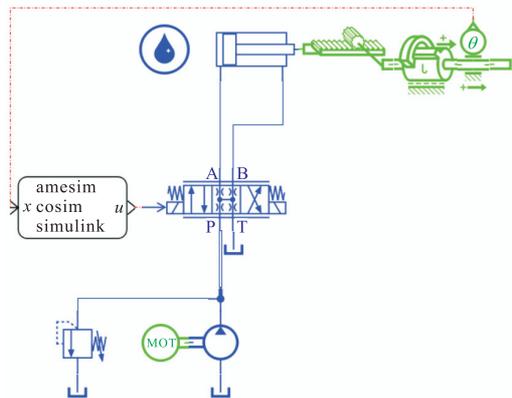


图5 阀门电液伺服开度控制系统 AMESim 物理模型

Fig. 5 AMESim physical model of valve electro-hydraulic servo opening control system

系统的主要参数设置如下:电机转速为 1500 r/min;压力泵的转速为 1500 r/min,排量为 35 mL/r;溢流阀安全压力设定为 20 MPa;电液伺服阀额定电流为 1 A,其所有通路在最大开度下的流量为 35 L/min,压降为 1 MPa;单作用液压缸缸径为 55 mm,活塞杆直径为 39 mm,液压缸行程为 1.2 m;

传动机构中小齿轮半径为 20 mm; 蝶阀阀杆旋转负荷转动惯量为 100 kg·m<sup>2</sup>, 角位移上极限为 110°, 角位移下极限为 -110°; 角度传感器的增益为 1。

### 4.2 MATLAB 仿真模型搭建与参数设置

针对阀门电液伺服开度控制系统, 利用 MATLAB

软件的 Simulink 工具进行常规 PID 控制器和自整定模糊 PID 控制器的对比建模仿真, 其控制器的控制规律通过 S-Function 编写实现<sup>[13]</sup>。通过 Switch 转换开关选择不同的控制信号, 阀门电液伺服开度控制系统仿真模型如图 6 所示。

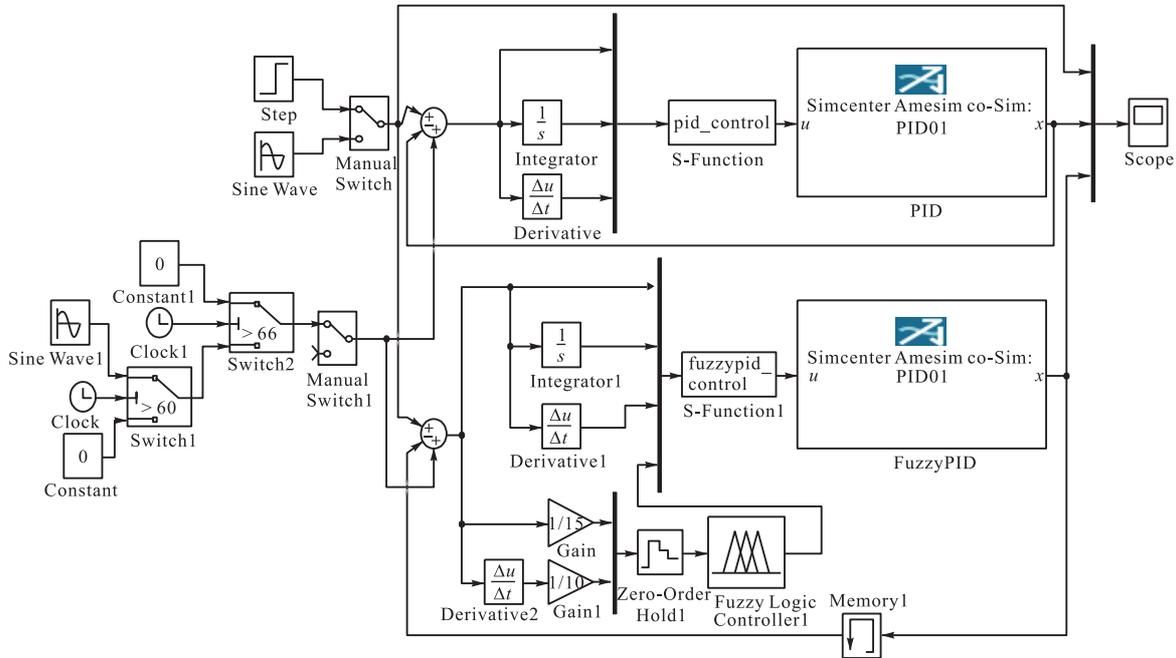


图 6 阀门电液伺服开度控制系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of valve electro-hydraulic servo opening control system

### 4.3 系统仿真与实验分析

通过临界比例度法可得 PID 控制初始参数  $K'_p = 0.30$ 、 $K'_i = 0.10$ 、 $K'_d = 0.01$ , 修正量系数取  $K_p^* = 0.40$ 、 $K_i^* = 0.15$ 、 $K_d^* = 0.02$ , 量化因子  $K_c$  取 1/15,  $K_c$  取 1/10。

#### 4.3.1 跟踪性控制分析

给定系统阶跃信号和正弦信号两种输入信号, 分别观察阀门电液伺服控制的阀门开度输出特性。分别设置阶跃信号的起始时间为 1 s, 其目标开度为 50%, 阶跃信号的幅值为 20, 偏置为 50。运行 AMESim 软件和 MATLAB 软件进行联合仿真, 可得系统在常规 PID 控制和自整定模糊 PID 控制下的阶跃输入和正弦输入阀门开度跟踪响应曲线, 分别如图 7 和图 8 所示。在阶跃输入下, 常规 PID 控制器超调量为 17.27%、调节时间(取 2%误差带)为 19.8 s, 自整定模糊 PID 控制器超调量为 7.63%、调节时间(取 2%误差带)为 16.1 s; 在正弦输入下, 常规 PID 控制器蝶阀开度最大误差值 10.3%, 自整定模糊 PID 控制器蝶阀开度最大误差值 7.9%。

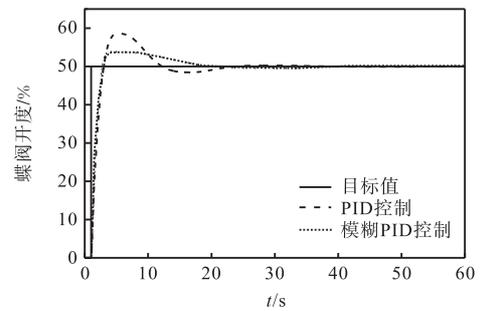


图 7 阶跃输入阀门开度跟踪响应曲线

Fig. 7 Step input valve opening tracking response curve

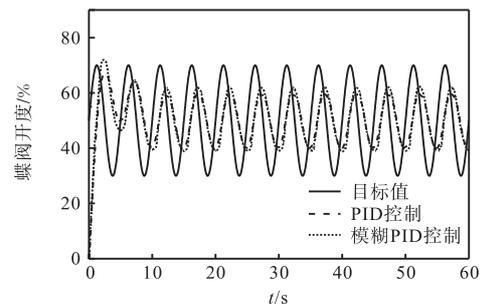


图 8 正弦输入阀门开度跟踪响应曲线

Fig. 8 Sine input valve opening tracking response curve

因此,自整定模糊 PID 控制比常规 PID 控制调节时间更短、超调量更小,有更好的跟踪特性,加快了阀门开度的响应速度,提高了阀门的稳定性和工作效率。

#### 4.3.2 鲁棒性控制分析

在阶跃输入信号仿真过程中,在 60 s 时加入一个开度增加 20%持续 6 s 的扰动信号,从而得到在扰动信号下阀门开度跟踪响应曲线,如图 9 所示。

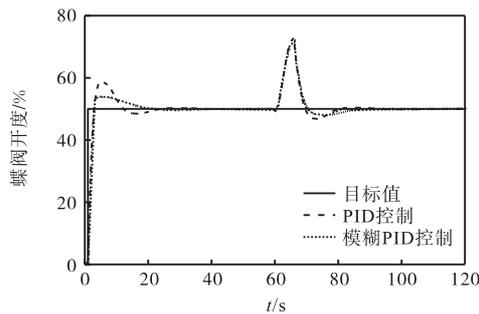


图9 扰动信号下阀门开度跟踪响应曲线

Fig. 9 Valve opening tracking response curve under disturbed signal

系统受到扰动后,常规 PID 控制器蝶阀开度波动值为 22.9%,自整定模糊 PID 控制器蝶阀开度波动值为 21.5%。因此,自整定模糊 PID 控制比常规 PID 控制超调量更小,改善了对扰动的抑制性,提高了阀门对外界扰动的鲁棒性。

## 5 结 论

基于模糊 PID 的电液伺服控制系统对阀门开度进行控制,通过 AMESim 和 MATLAB 加入常规 PID 控制器和自整定模糊 PID 控制器进行联合仿真。结果表明:采用自整定模糊 PID 控制方式,电液伺服开度控制系统的稳定性、准确性相比常规 PID 控制都有很大提升,且对扰动也有很好的鲁棒性。自整定模糊 PID 控制为阀门电液伺服开度控制系统的应用提供了一种有效的控制方法。

## 参考文献:

- [1] 田素玲,沙宇. 基于智能切换控制策略的电液位置伺服系统高精度控制研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(19): 48-52.
- [2] 张佳. 基于 PLC 的模糊控制器设计及 Simulink 仿真[J]. 电子制作, 2021(3): 64-66.
- [3] 周挺,程华. 电液力伺服系统参数自整定模糊 PID 控制器设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(17): 135-139.
- [4] 龙亚文,谢振宇,徐欣. 磁悬浮轴承 H<sub>∞</sub>鲁棒控制策略研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(23): 115-120.
- [5] 乐贵菊,朱小明,许仰曾,等. 大型防爆蝶阀电液伺服比例控制快关调节装置的研制与应用[J]. 阀门, 2009(3): 26-28.
- [6] 王晓虎. 基于位移流量反馈原理的电液比例控制阀特性研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- [7] 乔丽霞,王丽娟,刘清涛,等. 基于 CMAC 控制器的可变幅电液伺服系统优化及验证[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(2): 156-160.
- [8] 夏俊芳,李栋,刘国阳,等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 386-395.
- [9] LIU Y J, XIE Y D, WANG H. Fuzzy PID control for valve-controlled cylinder hydraulic system[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 212: 1244-1248.
- [10] 余长顺,袁锐波. 基于 AMESim-Simulink 的电液位置伺服系统的自适应模糊 PID 控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(8): 158-161.
- [11] 李海涛,李伟,胡春艳,等. 基于模糊 PID 信号补偿的电液伺服系统容错控制方法研究[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(2): 15-22.
- [12] 张敬芳,陈文斌,仇庚廷,等. 基于 AMESim-MATLAB 的伺服直驱闭式泵控系统仿真模型[J]. 机电工程, 2021, 38(12): 1622-1627.
- [13] 麻玉川. 基于 MATLAB-AMESim 的液压缸位置伺服系统辨识方法研究[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(2): 10-14.

责任编辑:周建军