

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209241

基于模型参数学习的调节阀最优控制策略*

张博 江爱朋 姜家骥 祁雁英 薛立 王浩坤

(杭州电子科技大学自动化学院 杭州 310018)

摘要: 为提高智能气动调节阀的控制性能,本文根据气动执行机构的建模分析,提出一种基于模型参数自学习的调节阀最优控制策略。首先,建立气动执行装置的动力学模型,并对五步开关控制算法进行分析。其次,基于模型设计最优控制所需要的控制参数自学习策略。最后,根据参数自学习获得的控制参数,对五步控制方法进行改进,给出一种优化控制策略及实施步骤。实验结果表明,所提优化控制算法控制过程中无明显超调产生,震荡显著减弱。控制精度明显提高,调节时间显著缩短,其中小行程平均调节时间缩短了38.1%,平均误差减小了61.4%;大行程平均调节时间缩短了38.7%,控制精度提高了39.4%。

关键词: 调节阀;气动;最优控制;参数自学习;机理模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Optimal control strategy of control valve based on model parameter learning

Zhang Bo Jiang Aipeng Jiang Jiayi Qi Yanying Xue Li Wang Haokun

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the control performance of the intelligent pneumatic control valve, this article was based on the modeling analysis of the pneumatic actuator, A optimal control strategy of control valve based on model parameter learning was proposed. Firstly, the dynamic model of the pneumatic actuator was established, and the five-step switch control algorithm was analyzed. Secondly, the control parameter self-learning strategy required for optimal control was designed based on the model. Finally, according to the control parameters obtained by parameter self-learning, the five-step control method was improved to give an optimized control strategy and implementation steps. The experimental results show that there is no obvious overshoot in the control process of the proposed optimal control algorithm, and the oscillation is significantly weakened. The control accuracy is significantly improved, and the adjustment time is shortened. The average adjustment time of small strokes is shortened by 38.1%, and the average error is reduced by 61.4%. The average adjustment time of large stroke is shortened by 38.7%, and the control accuracy is improved by 39.4%.

Keywords: control valve; pneumatic; optimal control; parameter self-learning; mathematical model

0 引言

智能调节阀是流程工业过程控制的终端执行元件。其中智能气动调节阀开关速度快,防火防爆,广泛应用于生产过程的各个领域^[1]。在流量控制过程中,调节阀控制性能受调节阀类型、物理结构磨损、工作环境、被控介质等因素影响。为提高智能气动调节阀的控制精度与快速性,优化控制策略与控制参数自学习显得十分重要^[2-5]。

金献军^[6]采用分段式PID控制,通过建立的数据库在线选择控制参数,实现了PID控制参数根据运行状态的自

适应,但该方法需要大量数据,且数据只能通过数学模型离线整定;马良威^[7]采用内模法的PID控制算法参数整定,有效改善波动和振荡问题,但该算法的快速性与通用性明显不足。由于PID算法存在控制参数调整困难,具有一定的经验性,在非线性系统的应用中,具有一定的局限性^[8-11],因此对PID控制进一步简化为P控制,同时将整个控制过程划分为多个阶段,进而提出五步开关控制算法。由于五步开关算法具有简单易懂、便于实现等特点,被国内外学者广泛应用于各种非线性系统中^[12]。其中,在阀门领域内的发展最为迅速,Siemen公司研发的SIPARTPS2系列智能

收稿日期:2022-03-11

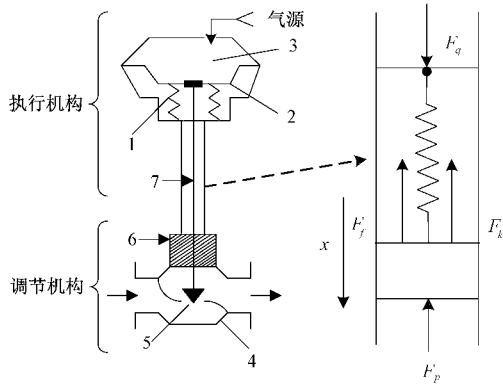
* 基金项目:浙江省自然科学基金一般项目(LY20F030010)、国家自然科学基金面上项目(61973102)资助

阀门定位器均采用五步开关控制算法^[13]。为了提高五步开关控制算法的控制性能,其中,王沁等^[14]提出带有反向 PWM 的五步开关控制算法,使阀位控制平缓的进入死区,避免超量现象发生。刘国平等^[15]针对五步开关控制算法在低阀位出现震荡且调节时间长等问题,提出 PWM 占空比修正的改进算法,有效的缩短了调节时间和减小了超调量。杨庆庆等^[16]提出变 PWM 的五步开关控制算法,通过改变 PWM 的占空比减小调节时间。

以上研究的五步开关控制算法,忽略了算法运用到不同型号阀的差异性,从而导致控制性能下降。针对以上问题,本文对气动执行装置进行建模和分析,进一步深化分析五步开关控制算法,提出一种基于模型参数学习的调节阀优化控制策略,使得调节阀的控制性能和适用性明显提高。

1 执行机构物理模型

直行程气动调节阀将 4~20 mA 控制电信号转换为气动信号,驱动阀杆移动。气动执行器内部结构如图 1 所示,阀杆在运动过程中受到弹簧弹力、气缸内高压气体推力、阀杆与密封填料之间摩擦力、阀体流通介质冲击力等多方面影响,受力分析如图 1 所示。



1. 复位弹簧, 2. 膜片, 3. 膜室上腔, 4. 阀座, 5. 阀芯, 6. 密封填料, 7. 阀杆

图 1 气动执行机构及受力分析

根据牛顿第二定律,执行机构力平衡方程可表示为:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_q + F_k + F_f + F_p \quad (1)$$

式中: m 为阀杆质量, x 为阀杆位移量, F_q 为气源推力, F_k 为弹簧的弹力, F_f 为阀杆摩擦力, F_p 为流体扰动力。

气源推力 F_q 与气源压力与气缸膜片面积有关:

$$F_q(t) = A_g P_1(t) \quad (2)$$

式中: A_g 表示气缸中膜片受力的有效面积, $P_1(t)$ 表示气缸气压。

假设气源为理想气体,则 $P_1(t)$ 满足理想气体状态方程:

$$P_1(t)V = nRT \quad (3)$$

式中: n 为气源的物质的量, R 为普适气体常数 $R =$

8.31 J/(mol·K), T 为绝对温度, V 为可变膜室上腔的气体容积。

气室复位弹簧的合弹力 F_k , K 为弹簧弹性系数, G 为气室中弹簧数量:

$$F_k = GKx \quad (4)$$

阀芯所受流体扰动力 F_p , 如图 2 所示, F_p 与阀芯所受流体压力和接触面积有关^[17-18]:

$$F_p = P_3 S - P_4 \left(S - \frac{\pi}{4} d_s^2 \right) = \Delta P S + \frac{\pi}{4} d_s^2 P_4 \quad (5)$$

式中: d_g 为阀芯直径, d_s 为阀杆直径, 阀芯两侧压差 $\Delta P = P_3 - P_4$ 。

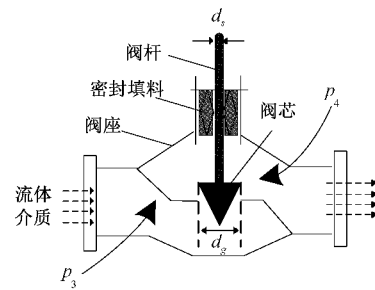


图 2 直通单座阀结构示意图

阀杆所受摩擦力分为静摩擦力与动摩擦力,当阀杆为静止状态时,所受静摩擦力 F_f^0 随气源推力 F_q 的增大而增大,静止状态与运动状态的临界点所受摩擦力为最大静摩擦力 F_{smax} ,当阀杆为运动状态时,所受摩擦力转化为动摩擦力^[19-20]:

$$F_f = \begin{cases} -F_c \operatorname{sgn}(v) - vF_v & v \neq 0 \\ -(F_q + F_k) & v = 0, |F_q + F_k| \leq F_s \\ -F_{smax} \operatorname{sgn}(F_q + F_k) & v = 0, |F_q + F_k| > F_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_c 为库伦摩擦力, F_{smax} 为最大静摩擦力, vF_v 为粘性摩擦项, v 为阀杆速度。

2 五步开关控制策略

五步开关控制策略对调节阀整个控制过程采用分段控制,采用 Bang-Bang 控制和 PWM 控制相结合的控制策略。通过调节阀阀位反馈,形成闭环控制,以调节阀误差值 e 为控制依据,当误差值 e 较大时,采用 Bang-Bang 控制快速调整阀位,缩短调节时间;当误差值 e 较小时,采用 PWM 控制对阀位进行微调,避免超调产生。五步开关控制策略具体实现如图 3 所示。

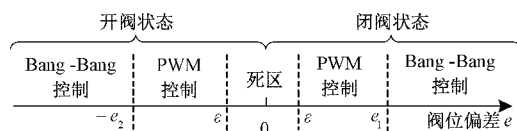


图 3 五步开关控制算法

图3中 e_1, e_2 为PWM控制与Bang-Bang控制的切换点, ϵ 为死区范围。根据 e 大小将控制过程划分为B-B控制区、PWM控制区、死区。 e_1, e_2 常根据经验值设定,取值具有近似性与不确定性,而且调节阀型号种类繁多, e_1, e_2 值差别较大,同一套控制算法应用到不同型号的调节阀中会造成较大的精度损失。

3 控制参数自学习

调节阀控制算法参数受调节阀类型、工艺水平、密封填料,流体流速等因素影响。五步开关控制算法的控制切换点和PWM占空比若设置不佳,则会增大调节时间或产生超调^[21]。针对五步开关控制算法的控制弊端,提出一种基于模型参数学习的调节阀优化控制策略,自主学习控制策略中调节阀的控制参数,使控制算法运行在不同型号的调节阀上,可自主学习各控制阶段所需的控制参数,增强控制算法的通用性和控制精度。

3.1 行程类型

气动调节阀按动作类型分为气开型与气关型,气开型调节阀的膜室上腔为弹簧,膜室下腔为气源膜室,调节阀为常闭状态,气关型与之相反。以单作用气动调节阀为研究对象,调节阀行程类型自整定过程如图4所示,首先控制I/P转换单元为全开状态排气,气缸气体为空时,记录当前阀位;之后控制I/P转换单元为进气状态,驱动阀杆运动,判断调节阀阀位变化。

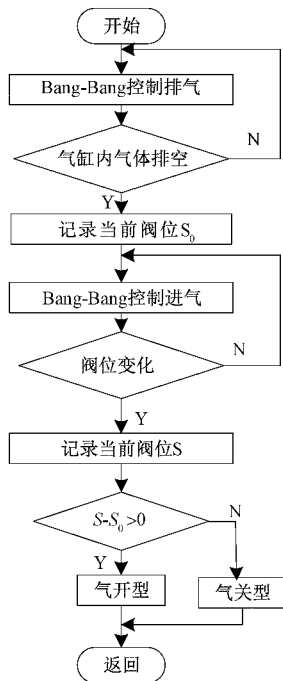


图4 调节阀行程类型自辨识

3.2 最小启动 PWM

由气动执行机构动力学模型可知,阀杆移动前,需克服静态摩擦力使阀杆合力与运动方向相同,因此调节阀启动

时,需要提供一定的气源压力克服静态摩擦力驱动阀杆运动。若启动气源压力过大,则容易产生超调或震荡,尤其对小行程阀位控制精度影响更大;若启动气源压力过小,则导致启动动作过慢,增大调节时间。由于调节阀的类型规格、密封填料各有不同,因此需要获得调节阀的最小启动PWM,避免超调同时满足性能指标 $\text{Min } t_f$ 。最小启动PWM整定过程如图5所示。

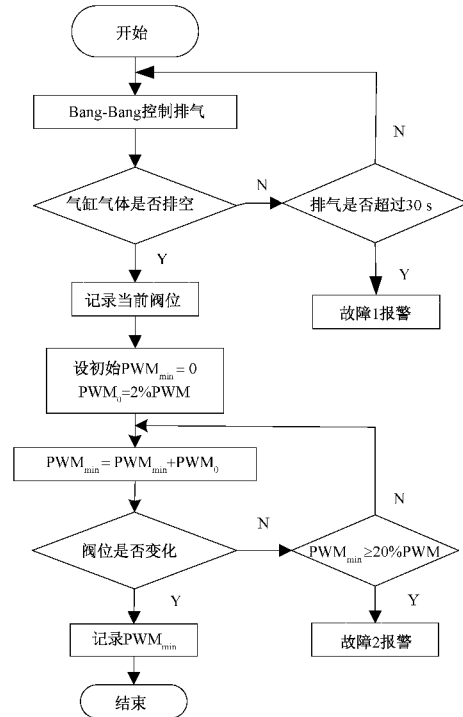


图5 最小启动 PWM 自辨识

3.3 最大速度及其过冲量

在五步开关控制策略中,Bang-Bang控制与PWM控制的切换点对控制精度影响较大,切换点 e 选择过大会导致调节时间增大;反之切换到PWM控制前的速度过大而导致超调或震荡产生。在调节阀的行程范围内,当某一时刻的速度最大时,此刻的过冲量最大,根据惯性原理,选取最大过冲量为Bang-Bang控制与PWM控制的切换点。调节阀最大速度与最大过冲量自整定流程如图6所示。

以气关型气动调节阀为研究对象,在开阀状态时,检测阀杆上升过程中最大运行速度 V_{up} ,并记录此刻阀位为 fb_vel_{up} ,控制I/P转换单元为保持状态,延迟3s并记录当前阀位为 fb_delay_{up} ,则上升过程的最大过冲量 δ_{up} 为:

$$\delta_{up} = |fb_vel_{up} - fb_delay_{up}| \quad (7)$$

在闭阀状态时,检测阀杆下降过程中最大阀位运行速度 V_{down} ,并记录此刻阀位为 fb_vel_{down} ,控制I/P转换单元为保持状态,延迟3s并记录当前阀位为 fb_delay_{down} ,则下降过程中最大过冲量 δ_{down} 为:

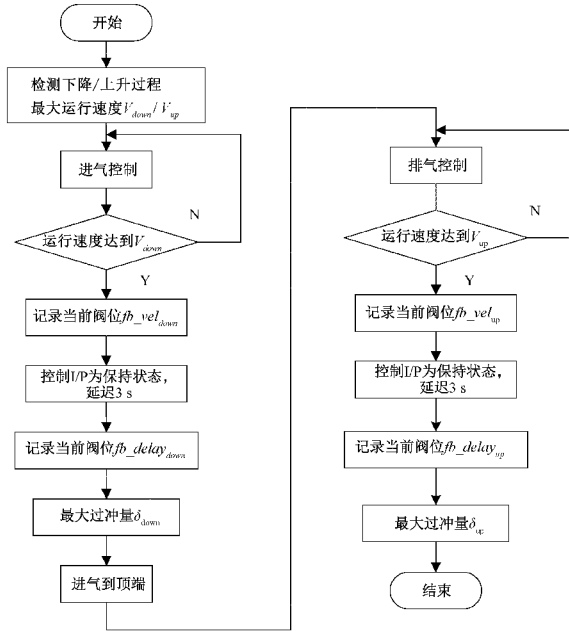


图 6 最大速度及最大过冲量自辨识

$$\delta_{down} = |fb_vel_{down} - fb_delay_{down}| \quad (8)$$

3.4 基准速度和基准速度 PWM

以最大过冲量 δ_{up} 、 δ_{down} 为 Bang-Bang 控制与 PWM 控制的切换点, 此刻以一定的速度 v_0 进入 PWM 控制, 控制阀位逐渐逼近死区。在进入死区前, 若阀杆运行速度较大, 则会导致超调或震荡产生。因此需要整定出阀位运行的基准速度, 保证以该速度逼近死区, 既可以平缓到达死区又不会引起阀位超调, 同时整定出维持该速度运行的 PWM, 设置控制参数:

$$pwm_temp = PWM_{min} \quad (9)$$

$$pos_vel_temp = V_{up} / V_{down} \quad (10)$$

调节阀基准速度与基准速度 PWM 自辨识流程如图 7 所示。首先, 驱动调节阀阀位开度为 50%FSR, 若当前阀位速度小于 pos_vel_temp , 则令 $pwm_n = pwm_temp$, 否则 $pwm_n = 0$, 以 pwm_n 为控制信号控制调节阀到 60%FSR, 判断阀位偏差是否小于死区值, 若小于则当前速度为基准速度, pwm_n 为基准 PWM, 否则减小 pwm_n 进行闭环整定。

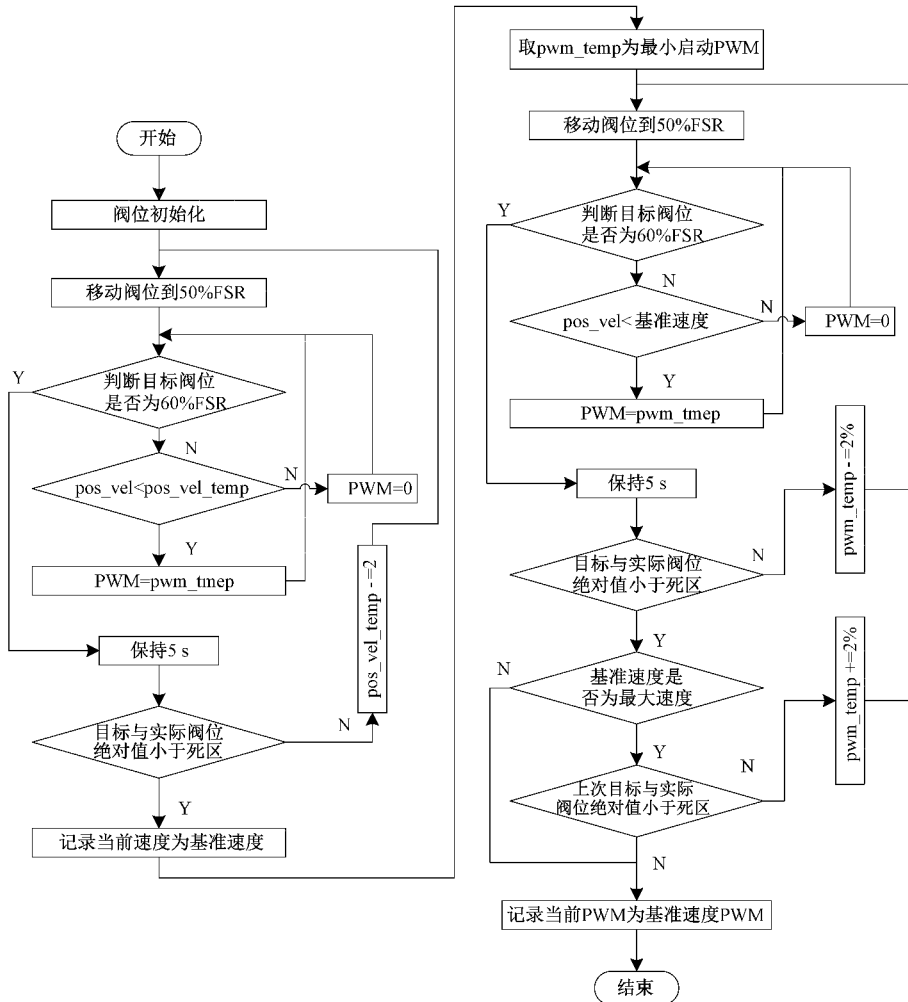


图 7 基准速度和基准速度 PWM 自辨识

4 调节阀优化控制策略

优化控制策略以建立的机理模型和优化控制为指导,将调节阀过程控制划分为 7 个区间,分别为快速区、降速区、微调区和死区,优化控制策略基本思想如图 8 所示。将自主学习得到的控制参数引入到控制策略中,实现基于模型参数自学习的优化控制策略。

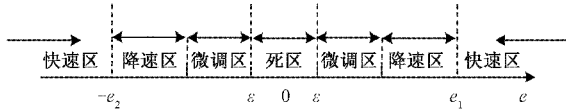


图 8 优化控制策略

在优化控制策略中引入参数自学习的控制参数,其中最大过冲量作为控制过程中快速区与降速区的切换点。基准速度作为控制过程中降速区与微调区的切换点。优化控制策略具体过程如图 9 所示。

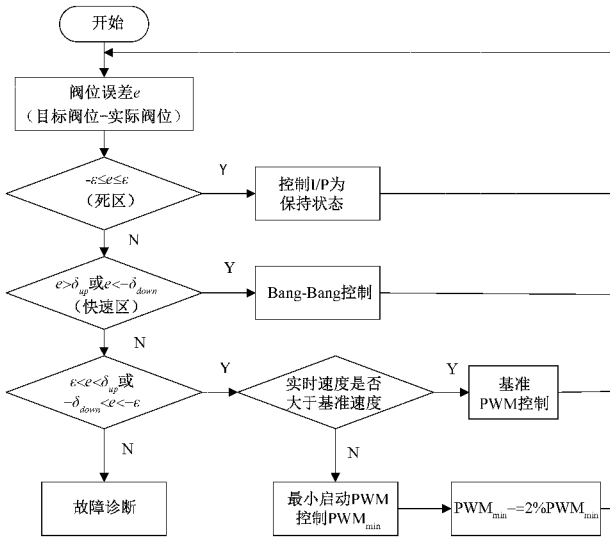


图 9 优化控制策略流程

1) 当阀位偏差 $e > \delta_{up}$ 或 $e < -\delta_{down}$ 时,此阶段为快速区,采用 Bang-Bang 控制,排气/进气的控制信号为最大值,控制 I/P 转换单元为全开状态,气源力迅速增大或减小,提高阀杆速度,快速减小阀位偏差,缩短调节时间。

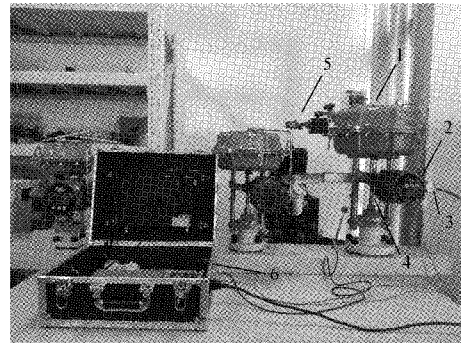
2) 当 $\epsilon < e < \delta_{up}$ 或 $-\delta_{down} < e < -\epsilon$ 时,此控制阶段为降速区,采用基准 PWM 控制,控制 I/P 转换单元为小开度间断式进气/排气,控制阀杆小幅度运动。实时检测阀位速度 $V(t)$,当 $V(t)$ 小于基准速度时,阀位控制进入微调区,采用最小启动 PWM 控制,并以 2% 的幅度减小,控制阀位逐渐逼近死区,避免超调或震荡产生。

3) 当阀位进入死区,即 $-\epsilon \leq e \leq \epsilon$ 时,控制 I/P 转换单元为保持状态,停止进气/排气,保持目标阀位。

5 实验结果对比分析

为验证优化控制策略的控制效果,搭建智能气动调节

阀性能检测平台,如图 10 所示。该系统采用高精激光位移传感器、PLC、计算机及国产某品牌气关型智能气动调节阀组成。其中激光位移传感器选型为松下 HG-C1100,重复精度为 $70 \mu\text{m}$,线性为 $\pm 0.1\% \text{F.S}$; PLC 选型为西门子 PLC1215C-AC/DC/Rly。智能气动调节阀选用行程为 20 mm 的小型阀。实验设计阶跃控制信号下的小行程进气/排气实验、大行程进气/排气实验,对五步开关控制算法与优化控制策略算法进行比较与分析。



1 气关型气室,2 定位器,3 减压阀,4 阀杆,5 位移传感器,6 性能检测箱

图 10 智能气动调节阀

5.1 阀位小行程控制实验

控制信号为 4~20 mA,给定 1 mA 阶跃控制信号,进行阀位小行程控制实验。五步开关控制算法实验结果如图 11 所示,其在控制阶段出现不同程度的控制震荡现象,阀位控制响应出现不同程度的滞后现象,多处出现严重超调现象。如表 1 所示,五步开关控制算法在行程两端控制效果较差,最大调节时间为 2.34 s,最大误差为 5.15%;平均调节时间为 1.39 s;平均误差为 2.64%。

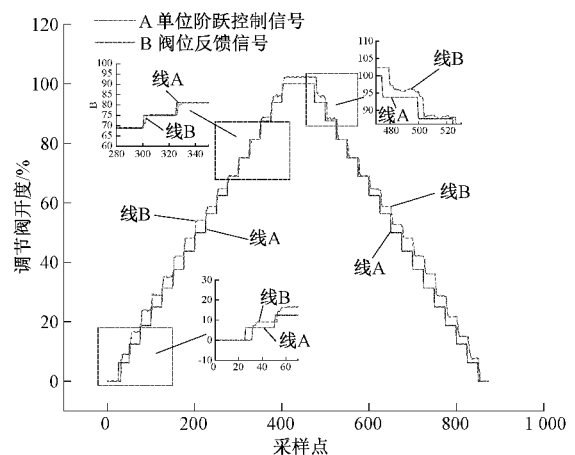


图 11 五步控制策略小行程进气/排气控制响应

所提优化控制算法实验结果如图 12 所示,相比于五步开关控制算法,阀位控制较为平滑,无明显的震荡现象产生,超调现象明显改善,阀位控制精度明显提高,整体控制效果实现对阀位的稳准快控制。如表 1 所示,最大调节

表 1 小行程控制算法性能分析对比

控制信号/ mA	五步开关控制算法		优化控制策略	
	调节时间/s	误差/%	调节时间/s	误差/%
4~5	2.17	4.06	0.95	1.56
5~6	1.11	4.93	0.73	1.74
6~7	1.36	5.15	0.80	1.39
7~8	1.66	4.07	0.66	0.74
8~9	1.75	3.81	0.68	0.64
9~10	2.06	3.58	1.19	1.63
10~11	1.31	2.57	1.51	1.84
11~12	1.65	3.26	0.58	0.72
12~13	0.97	2.28	1.46	0.61
13~14	0.96	1.80	0.68	0.48
14~15	0.72	0.44	0.93	0.56
15~16	0.57	0.22	0.57	1.57
16~17	0.67	0.17	0.56	0.35
17~18	1.73	1.13	0.79	1.63
18~19	2.34	1.98	0.86	0.45
19~20	1.16	2.79	0.72	0.26

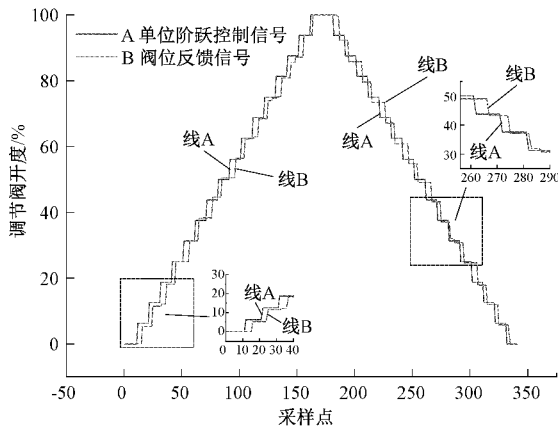


图 12 优化控制策略小行程进气/排气控制响应

时间为 1.51 s,最大误差为 1.84%;平均调节时间为 0.86 s;平均误差为 1.02%。阀位响应速度明显提高,其平均调节时间缩短了 38.1%,同时平均误差减小了 61.4%。

5.2 阀位大行程控制实验

控制信号为 4~20 mA,给定 4 mA 阶跃控制信号,进行阀位大行程控制实验。五步开关控制算法实验结果如图 13 所示,在控制信号 4~8 mA、8~12 mA、20~16 mA 过程中出现明显的控制震荡与超调现象。如表 2 所示,最大调节时间为 3.17 s,最大误差为 3.87%,平均调节时间为 2.53 s,平均误差为 1.57%。

所提优化控制算法实验结果如图 14 所示,相比于五步开关控制算法,优化控制算法在阀位控制各阶段较为平缓,无震荡现象产生,全程无明显超调产生。如表 2 所示,最大调节时间为 1.93 s,最大误差为 1.57%,平均调节时

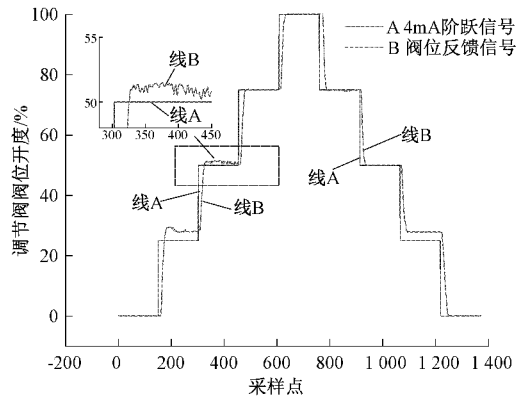


图 13 五步控制策略大行程进气/排气控制响应

间为 1.55 s,平均误差为 0.95%。阀位响应速度明显提高,其平均调节时间缩短了 38.7%,同时控制精度提高了 39.4%

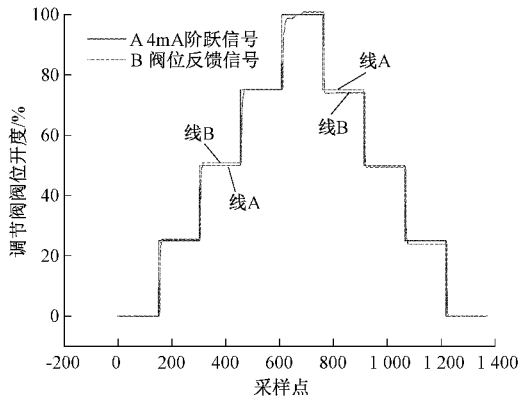


图 14 优化控制策略大行程进气/排气控制响应

表 2 大行程控制算法性能分析对比

控制信号/ mA	五步开关控制算法		优化控制算法	
	调节时间/s	误差/%	调节时间/s	误差/%
4~8	3.17	3.87	1.36	0.69
8~12	2.47	1.63	1.13	1.57
12~16	2.29	0.40	1.75	0.48
16~20	2.20	0.38	1.93	1.04

6 结 论

气动调节阀的控制精度、调节时间等指标很大程度上取决于智能阀门定位的控制算法,调节阀结构参数、加工工艺各异且叠加摩擦力跳变等因素,使得实际过程中气动调节阀的性能控制的挑战性一直很大。针对以上问题,本文提出一种基于模型参数学习的调节阀优化控制方法,自主学习调节阀的行程类型、最小启动 PWM、最大速度及其过冲量、基准速度和基准速度 PWM 等控制参数,依据最优控制思想,将整个控制过程分为七个子区间并给出相应切换点,增强了算法的通用性。通过调节阀智能检测装置对

所提方法与五步开关控制方法进行控制效果对比实验,结果表明,所提优化控制算法控制过程中无明显超调产生,震荡显著减弱,控制精度明显提高,调节时间显著缩短。

参考文献

- [1] 吴浩. 高精度阀门定位器的控制技术研究及应用[D]. 绵阳:西南科技大学,2019.
- [2] FEI L, YOU J F, HUA T Z. The research of a piezoelectric valve positioner control algorithm [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1030 (14): 1565-1569.
- [3] 蒋恩辉. 压电开关式阀门定位器智能调控及分析[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2020.
- [4] 李双文. 电气阀门定位系统建模及性能分析[D]. 宁夏:宁夏大学,2021.
- [5] 胡小玲,徐科军,杨庆庆,等. 压电比例式阀门定位器的控制方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(11):978-984.
- [6] 金献军. 智能电气阀门定位器自整定算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [7] 马良威. 阀门定位控制参数整定与算法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019.
- [8] 张涵,刘铁军,刘波,等. 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(11):215-222.
- [9] 程宗政,施一萍,张金立,等. 基于模糊神经网络 PID 算法的液位控制系统研究[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(9):29-34.
- [10] 崔文庆,王雨桐,谭文. 用 PID 控制近似线性自抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(8):1781-1789.
- [11] PAPADOPOULOS K G, MARGARIS N I. Optimal automatic tuning of active damping PID regulators[J]. *Journal of Process Control*, 2013, 23(6): 905-915.
- [12] HIDALGO M C, GARCIA C, ANGÉLICO B, et al. Embedded sliding mode controller applied to control valves with high friction[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2019, 30(5): 677-687.
- [13] CASAS J, QUETSCH J M. Radiation hardness of the siemens SIPART intelligent valve positioner[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 502(1): 196-201.
- [14] 王沁,徐科军,姜鹏,等. 具有反向 PWM 的阀门定位器控制方法及实现[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9): 2016-2023.
- [15] 刘国平,廖宣亮,胡璐华. 智能阀门定位器控制算法的改进[J]. *化工自动化及仪表*, 2012, 39(4):515-517.
- [16] 杨庆庆,徐科军,任保宏,等. 变 PWM 占空比的压电式阀门定位器控制方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(4):424-433.
- [17] MA W, MA F, GUO R. Experimental research on the dynamic instability characteristic of a pressure relief valve[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(3): 76-88.
- [18] ZONG C, ZHENG F, DEMPSTER W, et al. High-fidelity CFD modelling and analysis of a pressure vessel-pipe-safety valve(PVPSV) system in gas service [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2021, 143(4), DOI:10.1115/1.4049706.
- [19] GARCIA C. Comparison of friction models applied to a control valve [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(10): 1231-1243.
- [20] MOHAMMAD M A, HUANG B. Compensation of control valve stiction through controller tuning [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 22(9): 1800-1819.
- [21] 康家玉,张志鹏. PWM 整流器在旋转导向中的应用研究[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(12):101-104.

作者简介

张博,硕士研究生,主要研究方向为智能调节阀的控制与优化。

E-mail:malzhangbo@163.com

江爱朋(通信作者),教授,博士生导师,主要从事动态优化,调度优化,模拟仿真、智能检测等方向的研究。

E-mail:jiangaipeng@hdu.edu.cn