

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104036

# 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用

张 涵<sup>1</sup> 刘铁军<sup>1</sup> 刘 波<sup>2</sup> 谢代梁<sup>1</sup> 徐 雅<sup>1</sup> 黄震威<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学 杭州 310018; 2. 浙江嘉松科技有限公司 温州 325105)

**摘要:** 电气阀门定位器调节阀开度的 PID 控制过程容易出现较大的超调, 通过自然泄气或增加反作用回调阀位, 会对系统的鲁棒性和控制效率产生较大影响。提出一种遗传优化的 PID 整定算法, 基于继电器反馈法获得系统 PID 参数的大致范围, 并利用改进遗传算法进行 PID 参数寻优, 使系统接近无超调控制, 提高控制精度, 缩短调节时间。系统获得 PID 参数用于控制气动调节阀, 超调量可控制在 0.6%, 调节时间相比于传统 PID 算法缩短 66%。仿真和实验结果表明, 该整定算法能够实现稳、准、快的控制方式, 为优化电气阀门定位器的控制策略提供了一种新的思路。

**关键词:** 电气阀门定位器; PID 控制; 继电器反馈法; 改进遗传算法; 超调量

**中图分类号:** TP273; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Application of PID tuning algorithm based on genetic optimization in valve positioner

Zhang Han<sup>1</sup> Liu Tiejun<sup>1</sup> Liu Bo<sup>2</sup> Xie Dailiang<sup>1</sup> Xu Ya<sup>1</sup> Huang Zhenwei<sup>1</sup>

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Jiasong Technology Co., Ltd, Wenzhou 325105, China)

**Abstract:** When electric-pneumatic valve positioner regulates the valve opening, large overshoot will be generated in the PID process. Natural deflating or adding anti-reaction will be adopted to adjust the valve position, but the system robustness and control efficiency will be greatly affected. A genetic optimization PID tuning algorithm is proposed in this paper, based on the relay feedback method to estimate the system PID parameters roughly, then the improved genetic algorithm is used to optimize the PID parameters. The proposed methods enable the system to realize control without overshoot, improve the control accuracy, and shorten the adjustment time. In the process of controlling the pneumatic regulating valve with PID parameters obtained by this system, the overshoot can be controlled under 0.6%, and the adjusting time can be shortened by 66% compared with the traditional PID algorithm. Simulation and experiment results show that the proposed algorithm can realize stable, accurate and fast control mode, and this idea is proposed to optimize the control strategy of electric-pneumatic valve positioner.

**Keywords:** electric-pneumatic valve positioner; PID control; relay feedback method; improved genetic algorithm; overshoot

## 0 引言

电气阀门定位器是电气控制系统中的关键部件, 是必不可少的终端调控元件, 用于控制阀门开度从而控制流量大小<sup>[1-2]</sup>。气动调节阀具有结构简单、性能稳定、防爆性好等特点, 广泛应用于石油、化工等行业工业生产过程<sup>[3]</sup>。电气阀门定位器是气动调节阀的核心, 可实现气动调节阀稳、准、快的调节过程<sup>[4]</sup>。

在流量控制过程中, 受环境温度湿度影响、流体成分变

化、阀门机构磨损等因素影响, 系统的传递函数会发生改变。因此对于电气阀门定位器而言, 在线系统辨识与 PID 自整定是有必要的。传统的阀门定位器控制过程中通常伴随有超调量, 使系统响应时间变长、系统鲁棒性降低, 最终导致系统控制效果不尽人意。

王亮等<sup>[5]</sup>设计基于 MSP430F149 为微处理器的阀门定位器, 采用 Bang-bang 结合模糊 PID 算法, 满足系统的快速性要求和具有较高的控制精度。刘娜等<sup>[6]</sup>设计了一款基于预估自适应 PID 算法的阀门定位器, 其阶跃响应中超调量得以控制, 调节时间也有一定的改进, 提高了系

统适应性,降低了系统能耗。

PID 算法常被运用于调节阀控制过程中,汪凯斌<sup>[1]</sup>提出基于神经网络的双闭环系统 PID 参数整定算法,该算法可用于调节阀控制系统,在与 SVP300 系列智能阀门定位器进行对比测试时,体现了该算法具有有效性和适用性。思皓天<sup>[7]</sup>针对阀门定位器在使用过程中易出现“喘振”现象,设计了基于模糊 PID 控制的阀门定位器,具有较短的过渡时间。传统 PID 算法大多具有明显超调量、调节时间也比较久,利用智能算法对 PID 整定参数优化,可以有效地解决此类问题。将智能算法与 PID 整定结合是实现调节阀精确定位和稳定控制的新途径。

以往的电气阀门定位器算法设计过程中,对 PID 参数优化改进较少,提出运用的智能算法种类也较单一。在阀门定位器的 PID 参数优化过程中,往往增加超调量从而进一步缩短系统调节时间,这样的改进会增加系统的不稳定性。为进一步提高电气阀门定位器 PID 整定参数的质量,提高系统的鲁棒性,本文提出了一种适合于电气阀门定位器的 PID 整定策略,利用继电器反馈法和改进遗传算法优化 PID 整定参数。本系统在严格控制阀门定位器超调量的同时,缩短调节时间,提高了调节阀控制的稳定性和高效性。

### 1 电气式阀门定位器

电气式阀门定位器工作原理如图 1 所示,单片机将设定值(4~20 mA 的电信号)和当前反馈值进行比较,阀杆行程作为被控量,位置传感器获取当前反馈信号传递给单片机,利用气压控制阀杆的进给量来调整阀芯的位置,进而调节生产过程中的介质流量<sup>[8]</sup>。

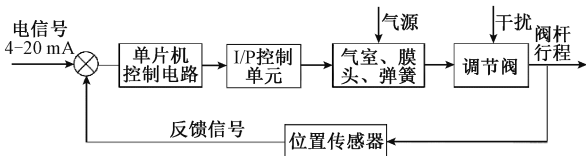


图 1 电气阀门定位器的工作原理

Fig. 1 Working principle of electric-pneumatic valve positioner

气动阀门定位器在工作的过程中,需要控制超调量。对于单向作用的阀门定位器而言,气体在气缸中的自然卸气量很小,气压回调的速度慢,使得系统的调节时间久。而双作用阀门定位器一旦产生较大超调,反向调节速度虽快,但会降低调节阀的稳定性。

在气动调节阀的控制过程中,实现无超调控制可以提高阀门的调节速度和系统稳定性,刘玉贞<sup>[9]</sup>以 Z-N 经验公式为基础,构造了一种无超调的 PID 整定公式,通过仿真验证其合理性。本文针对气动式阀门定位器,先用

继电器反馈法获得 PID 参数范围,再利用改进遗传算法进行优化,借助遗传算法的独特性和优势,尽可能消除系统带来的超调量,最终获得无超调 PID 参数。

### 2 继电器反馈法 PID 整定

继电器反馈法 PID 参数整定法是由瑞典著名学者 Astrom 和 Hagglund 两人共同提出的<sup>[10]</sup>。Astrom 等提出系统带有继电器环节,若能够产生临界等幅振荡,则可以通过被控过程的临界增益和振荡周期计算 PID 整定参数。

继电器反馈法 PID 整定包括继电器特性的反馈回路和 PID 控制部分。由于反馈回路中存在继电器,该器件具有非线性环节,其输入输出相角相差 $-2\pi$ 。当继电器环节为理想环节时,其描述函数为<sup>[11-12]</sup>:

$$N(A) = \frac{4d}{\pi A} \tag{1}$$

式中: $d$ 为继电器的输出幅值; $A$ 为极限环幅值。由此可以得到临界频率,即穿越频率 $\omega_c$ 的增益:

$$K_u = N(A) = \frac{4d}{\pi A} \tag{2}$$

系统的振荡周期 $T_c$ 可以从系统临界振荡曲线中读取。通过表 1 的 Z-N 临界比例度整定公式,可以计算系统 PID 整定参数。 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 为 PID 控制过程的 3 个参数,其中 $K_p$ 为比例系数, $K_i$ 为积分系数, $K_d$ 为微分系数。

表 1 Z-N 临界比例度整定公式<sup>[11]</sup>

Table 1 Setting formula of Z-N critical scale method

PID 控制器	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P 型	$0.5K_u$		
PI 型	$0.4K_u$	$0.8T_c$	
PID 型	$0.6K_u$	$0.5T_c$	$0.12T_d$

### 3 PID 整定的改进遗传优化算法

遗传算法(genetic algorithms, GA)是基于生物界遗传机制和生物进化理论的一种全局优化性随机搜索算法<sup>[13]</sup>。遗传算法根据给定的适应度函数,模拟自然界对种群算子进行选择、交叉和变异,若干代之后新的个体陆续诞生,适应度低的个体将被淘汰,适应度高的个体将被保留<sup>[14-15]</sup>,种群能够进化到接近或者包含最优解的状态。

PID 控制通过对偏差值进行比例、积分、微分运算对被控对象进行控制<sup>[16]</sup>。遗传算法在 PID 参数整定的过程中,主要以适应度函数为基准,对 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 3 个参数进行迭代优化,最终使系统输出响应满足设计要求。

#### 3.1 编码方式

遗传算法对 PID 参数寻优,需要对其进行编码。本

文选择无符号的二进制数进行编码,每一个 PID 参数对应 10 位二进制数,共 30 位,依次为  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 。

### 3.2 参数范围

如果在实际 PID 整定过程中,直接使用遗传算法寻优,寻优参数范围过大会增加系统的随机误差,降低 PID 参数的精度。为提高 PID 整定的准确性,本系统首先通过继电反馈法获得一组 PID 参数,为遗传算法提供一个参数寻优范围,从而可以减小遗传算法的计算量,减少计算过程中的不确定因素。

### 3.3 适应度函数

为了使系统达到无超调控制,缩短调节时间和响应时间,构造以下适应度函数(3)。由于本系统需要控制过程缩短调节时间,并且严格控制超调量,在适应度函数的设计中设置了惩罚机制<sup>[17]</sup>,当系统出现超调,即当  $e(k) < 0$  时,在原适应度函数基础上多加上一项,即式(4)。适应度值的变化通常与偏差成正相关,从而起到改进适应度函数的功能。

$$J_1 = \sum_{k=1}^{\infty} [\omega_1 |e(k)| + \omega_2 u^2(k) + \omega_3 t_u] \quad (3)$$

$$J_2 = \sum_{k=1}^{\infty} [\omega_1 |e(k)| + \omega_2 u^2(k) + \omega_4 |e(k)|] + \omega_3 t_u \quad (4)$$

式中: $u(k)$  为 PID 的控制量; $t_u$  为系统的响应时间; $e(k)$  为  $k$  时刻误差,即设定值与当前值的偏差; $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$  为权重系数。为了快速消除超调量, $\omega_4$  需要远大于  $\omega_1$ ,实际整定过程中,可根据实际需求调整  $\omega_4$  的值。

### 3.4 自适应交叉、变异概率

遗传算法寻优的过程容易陷入局部最优,为寻找全局最优解,获得更高质量的遗传后代,需要对遗传算法进行改进<sup>[18-19]</sup>。

由于传统遗传算法交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  给了定值,容易出现遗传算法陷入局部最优解的情况<sup>[20]</sup>,即早熟现象。本文为此引入“早熟指标”,建立交叉概率和变异概率函数如下:

$$\begin{cases} Z = Ftmax/genmost \\ P_c = -k_1 Z^2 + 1 \\ P_m = k_2 Z^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z$  为早熟指标,表征种群趋同的程度, $Z$  越大表明种群中个体的相似度高,趋于一致, $Z$  越小表明种群中个体差异性大,趋于发散; $genmost$  为本代种群中适应度最优个体; $Ftmax$  为大于本代平均适应度个体的平均适应度; $k_1$  和  $k_2$  都大于 0。其中  $Z$  的范围是  $[0, 1]$ ,交叉概率  $P_c$  的范围是  $[1-k_1, 1]$ ,变异概率  $P_m$  的范围是  $[0, k_2]$ 。式(5)建立了  $P_c$  和  $P_m$  自适应概率函数,此方法是对传统固定  $P_c$  和  $P_m$  的遗传优化算法做了改进,采用两个抛

物线跟随“早熟指标”动态变化,此算法既能提高种群多样性,又可以保留下更多适应度高的个体。

式(5)中取  $k_1 = 0.5$ 、 $k_2 = 0.09$  时的自适应曲线如图 2 所示,虚线为交叉概率自适应曲线,实线为变异概率自适应曲线, $P_c$  的范围是  $0.5 \sim 1.0$ , $P_m$  的范围是  $0 \sim 0.09$ 。当种群趋于收敛时,早熟指标  $Z$  变大,此时需要较大的变异概率,较小的交叉概率,提高种群随机搜索的能力,增加种群的多样性,增加优质个体出现的概率;当系统还未收敛时,早熟指标  $Z$  变小,此时需要较小的变异概率,较大的交叉概率,让种群保留下优质的后代。改进遗传算法中动态变化的交叉和变异概率,能够更好地适应遗传算法中局部收敛现象,使系统产生和保留更多优质个体,并且更大程度地抑制早熟现象。

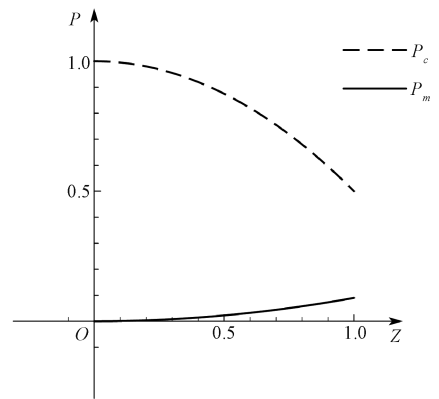


图 2 交叉和变异概率自适应曲线

Fig. 2 Crossover and mutation probability adaptive curves

## 4 电气阀门定位器设计

### 4.1 电气阀门定位器硬件实现

电气阀门定位器以 STM32L152 为核心控制单元。HART 通信可实时监测阀位,控制气动行程机构,可以在智能仪表上实现双向通信。虚线框为电气阀门定位器硬件设计部分,电气阀门定位器的控制信号为  $4 \sim 20$  mA 电流信号,经过 L/V 转换和 A/D 转换后,可以由电流信号转换为阀门开度信号。阀位反馈磁条固定在气动调节阀的阀杆处,跟随阀杆移动,位置传感器读取磁条位置信号,进而转化为阀门的实时开度。STM32L152 读取阀门开度信号后,计算偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$ ,比较两者大小并通过 PID 算法计算出控制量。其控制量可转化为不同宽度的 PWM 波传输给喷嘴挡板模块,实现电信号到气压信号的转换,最终由继动放大模块实现气压的放大,使气体间断性地输入到气动阀的薄膜气室中,最终逐渐推动阀芯移动到设定值处。

### 4.2 电气阀门定位器软件实现

下位机 STM32 程序设计分为主程序、通信程序、系

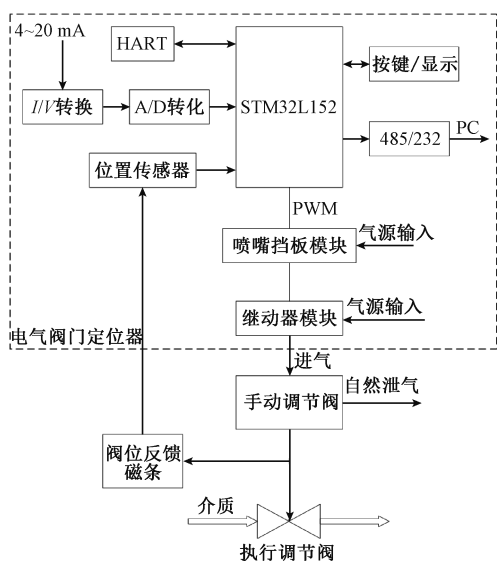


图 3 气动定位系统硬件设计

Fig. 3 Pneumatic valve positioning system hardware design drawing

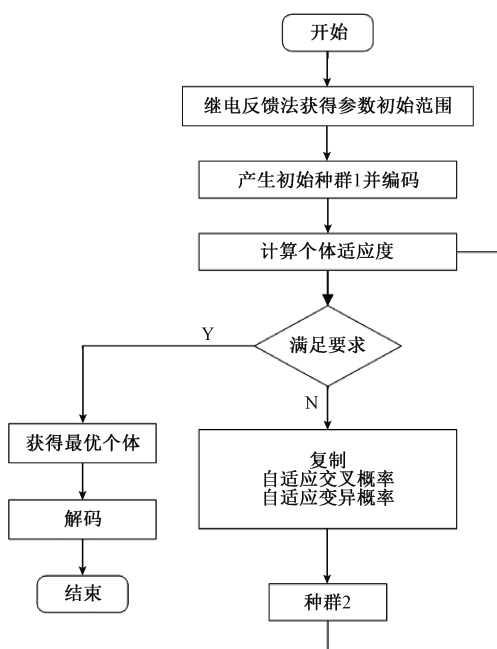


图 4 PID 算法流程

Fig. 4 PID algorithm flow diagram

统辨识程序和 PID 算法程序。主程序实现各部分的初始化以及维持程序循环运行的功能。通信程序包括对 HART 上信号的编码和解码,单片机与上位机之间的串口通信等。系统辨识程序利用阶跃辨识法,实现电气式阀门定位器的传递函数辨识,具体方法为给系统输入阶跃信号,通过系统阶跃响应曲线特征计算系统传递函数。系统传递函数用于系统仿真和实体阀实验中的 PID 参数整定。

PID 算法程序包括两部分,由于遗传算法对 PID 参数寻优范围太大会降低精度,首先,由继电器反馈法获得系统的 PID 参数,作为遗传寻优的范围;其次遗传算法对 PID 参数进行优化,优化方式如图 4 所示,再由式(6)计算出 PID 控制量,最终转化为 PWM 波,控制气动调节阀开度。

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (6)$$

## 5 MATLAB 仿真实验

### 5.1 系统传递函数

对阀门定位器进行建模和系统辨识,为仿真实验确定电气阀门定位器的传递函数如下:

$$G(s) = \frac{1.2}{2.43s + 1} e^{-s} \quad (7)$$

### 5.2 目标函数优化曲线

常规遗传算法最优目标函数值的变化曲线如图 5 所

示,图 6 所示为改进遗传算法最优目标函数值的变化曲线,图中横坐标  $gen$  表示遗传代数,纵坐标  $genstj$  表示最优目标函数值。通过收敛曲线可知,常规遗传算法目标函数逐代收敛速度较慢,迭代了 32 次后得到最优解,在进化的初期出现局部收敛现象,即本文提到的早熟现象。改进后的遗传算法借助自适应的交叉、变异算子,使系统具有更好的适应性,在经历了 13 次迭代后即可获得最优解,并且收敛速度快于改进前,局部收敛现象得以缓解。综上所述,本文利用改进遗传算法优化 PID 参数,改善了系统“早熟”问题,加快了目标函数的收敛速度,提高了系统的稳态和动态性能。

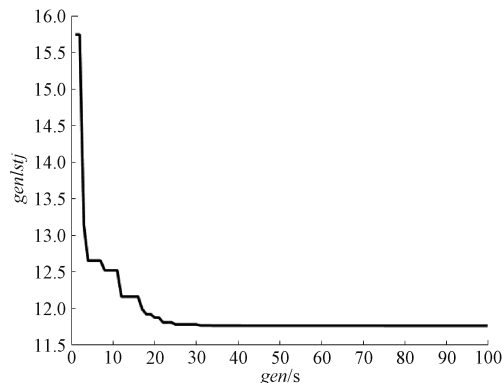


图 5 常规遗传算法最优目标函数值的变化曲线  
Fig. 5 Convergence curve of optimal objective function value based on conventional genetic algorithm

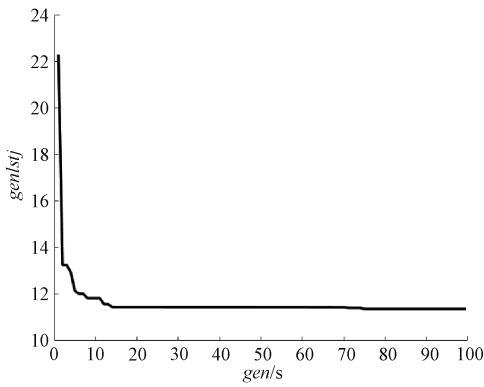


图 6 改进遗传算法最优目标函数值的变化曲线

Fig. 6 Convergence curve of optimal objective function value based on improved genetic algorithm

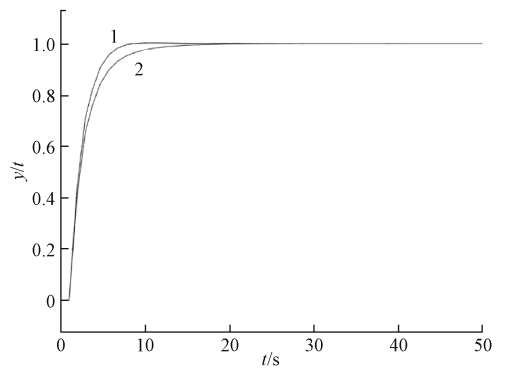


图 8 改进与常规遗传优化 PID 整定算法的阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response of PID tuning optimized by improved genetic algorithm and conventional genetic algorithm

### 5.3 PID 参数的阶跃响应

#### 1) 继电器反馈法

系统通过理想继电器反馈产生临界振荡曲线。由 MATLAB 进行计算得到此非线性环节的振荡周期  $T_u = 12.5386$ ，临界增益  $K_u = 1.7519$ 。最后根据临界比例度法求得参数为  $K_p = 1.0511$ 、 $K_i = 0.1677$ 、 $K_d = 1.6474$ 。其阶跃响应如图 7 所示。

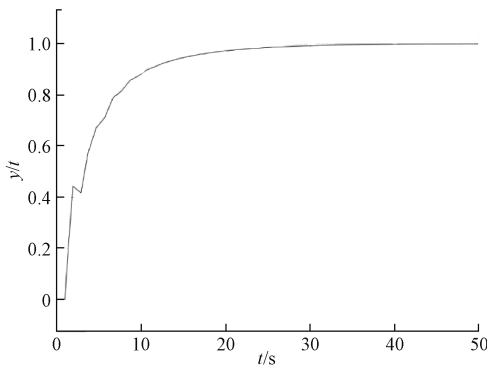


图 7 继电器反馈 PID 整定算法的阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response set by relay feedback PID method

#### 2) 常规遗传算法和改进遗传算法的 PID 参数优化

遗传算法设置遗传代数为 100 代，种群数量为 50，代沟 0.9。

依据式 (5) 的交叉概率、变异概率函数（取  $k_1 = 0.5$ 、 $k_2 = 0.09$ ），利用遗传算法寻优获得的 PID 参数为  $K_p = 0.9725$ 、 $K_i = 0.3272$ 、 $K_d = 0.3617$ ，此时的系统阶跃响应如图 8 所示（曲线 1）。

图 8 中曲线 2 为给定交叉概率  $P_c = 0.6$ 、变异概率  $P_m = 0.01$  的系统阶跃响应，根据遗传算法寻优获得的 PID 参数为  $K_p = 0.9198$ 、 $K_i = 0.2721$ 、 $K_d = 0.3478$ 。

#### 3) 系统阶跃响应仿真结果分析

仿真实验通过 MATLAB 运算和 SIMULINK 仿真得到

3 种 PID 参数的阶跃响应。由图 7 可知，继电器反馈法在本系统中无明显超调量，但是调节时间长，直到 30 s 处趋于收敛。由图 8 可知，给定交叉、变异参数的遗传优化 PID 整定算法，与本文改进遗传算法相比，无明显超调。

常规遗传优化 PID 整定算法的阶跃响应，调节时间减小到 15 s，比继电器反馈法快 15 s；而改进遗传算法优化 PID 参数后，系统阶跃响应的调节时间减小到 9 s，比继电器反馈法快 21 s。显然相对于常规 PID 算法，遗传算法优化 PID 参数后，系统阶跃响应的调节时间和上升时间都大幅缩短，而改进后的遗传算法对 PID 参数的优化效果更佳，其调节时间相比于常规遗传算法进一步缩短。

本文改进遗传算法后，考虑了“早熟”指标，增加动态变化的交叉、变异函数，系统调节时间和上升时间都缩短，且超调量并无明显增加，系统的控制过程得以优化，本文提出的 PID 参数整定策略很大程度上提高了电气阀门定位器的控制性能。

### 5.4 系统抗扰动性分析

针对继电器反馈法和遗传算法得到的 PID 整定参数，进行系统抗扰动性分析，比较应用两种算法时的系统的鲁棒性。利用 SIMULINK 搭建仿真系统，根据上文获得的 PID 参数，利用幅值为 1.0 的阶跃响应模型，在 30 s 时加上一个幅值为 0.3 的阶跃扰动，图 9 中曲线 1 为继电器反馈法抗扰动响应，曲线 2 为本文改进遗传算法抗扰动响应。曲线 1 在受到阶跃扰动后，经过 20 s 左右才逐渐收敛，调节时间久，表明常规 PID 参数对系统扰动的自主修复能力差；曲线 2 在受到阶跃扰动后，只需 7 s 即可收敛，表明改进遗传算法优化的 PID 参数能使系统具有更好的抗干扰性，系统内外的扰动对系统本身的影响小。

由系统抗扰动性仿真实验结果可知，PID 参数经过改进遗传算法优化后，系统具有较好的调控性能，且对外加的干扰处理及时，对控制系统的鲁棒性和稳定性有较

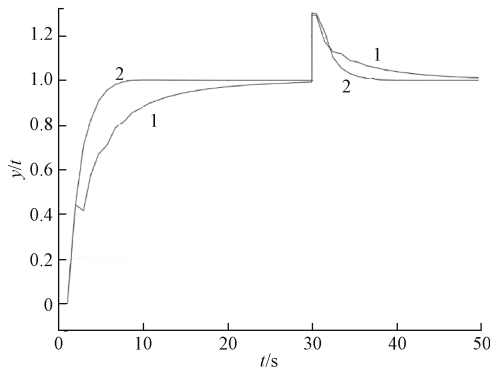


图 9 两种 PID 整定算法的抗扰动响应曲线

Fig. 9 Anti-disturbance response curves of two PID tuning algorithms

大的提升。

## 6 实验验证

为验证本文所提出的 PID 参数优化方法,本课题自主设计电气式阀门定位器的硬件电路和软件程序,将阀门定位器连接气泵和气动调节阀进行实验。在进行 PID 整定时,系统首先通过阶跃辨识法获得系统传递函数,通过 MATLAB 进行 PID 参数寻优,最后将 PID 参数传输至系统,进而控制阀门开度。

利用本文的 3 种方法获得的 PID 参数,控制阀门从 0% 开度达到 90% 开度,记录上升时间(稳态 10%~90% 的时间)、超调量、调节时间(误差范围 $\pm 5\%$ )。实验结果分析如表 2 所示。改进遗传算法相比于常规遗传算法,上升时间快 1.1 s,调节时间快 5.2 s,表明改进后的遗传算法获得的控制参数可以使系统对控制指令作出更为迅速的反应,使阀芯更快地移动到指定位置。3 组 PID 参数最大超调量控制在 0.6%,在实体阀实验中并无出现较大超调,此超调量在允许范围内。

表 2 PID 控制策略的电气阀门定位器实验验证

Table 2 Experimental verification of electric-pneumatic valve positioner of PID control strategy

	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s
继电反馈法	9.4	0.2	23.8
常规遗传优化	4.8	0.5	13.2
改进遗传优化	3.7	0.6	8.0

实验数据拟合曲线如图 10 所示,在该实验中 3 种整定算法无明显超调,而且改进的遗传优化 PID 整定算法,相比于传统的 PID 整定算法以及常规遗传优化 PID 整定算法调节时间明显缩短,且响应更快,适应性更好,实现电气阀门定位器稳、准、快的控制目标。

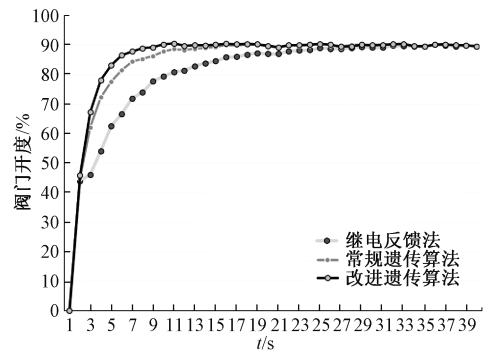


图 10 实验数据拟合曲线

Fig. 10 The curve of experimental data fitting

## 7 结论

本文将继电反馈法和改进遗传算法结合,利用改进遗传算法优化 PID 参数,既解决了常规电气阀门定位器超调量大、调节时间长的问题,又改善了遗传算法中局部收敛的问题。相比于常规 PID 算法,本文提出的 PID 参数优化方法可以获得更高的控制精度、更快的响应速度并且严格控制系统的超调量。MATLAB 仿真实验和现场实验都显示,基于遗传优化的 PID 整定算法在阀门定位器中具有更好的动静态性能。在电气阀门定位器的控制策略中,该方法能使系统具有更短的调节时间和更好的鲁棒性,为电气阀门定位器的高效精准控制提供了一种新的思路。

## 参考文献

- [1] 汪凯斌. 智能电气阀门定位器控制算法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2018.  
WANG K B. Research on control algorithm of intelligent electric valve positioner [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [2] 吴凤民. 阀门定位器及其特性研究与建模[D]. 银川:宁夏大学,2017.  
WU F M. Characteristics research and modeling of valve positioner [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.
- [3] 刘洋. 气动调节阀的建模与控制方法研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2015.  
LIU Y. Research on modeling and control method of pneumatic control valve [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [4] 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.  
WANG Q, XU K J, JIANG P, et al. Control method and implementation of piezoelectric valve positioner with

- backward PWM [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(09) : 2016-2023.
- [ 5 ] 王亮,冯卫星,樊泽明. 智能电气阀门定位器的设计与自适应控制 [ J ]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11) : 2514-2516, 2526.
- WANG L, FENG W X, FAN Z M. Design of intelligent electrical-pneumatic valve positioner and adaptive control [ J ]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(11) : 2514-2516, 2526.
- [ 6 ] 刘娜,何永勃,苏兴国. 基于预估模糊自适应 PID 控制的智能电气阀门定位器的应用研究 [ J ]. 自动化与仪器仪表, 2010(4) : 66-67, 71.
- LIU N, HE Y B, SU X G. Application research of intelligent electric valve positioner based on predictive fuzzy adaptive PID control [ J ]. Automation & instrumentation, 2010(4) : 66-67, 71.
- [ 7 ] 思皓天. 智能阀门定位器控制设计 [ D ]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- SI H T. Intelligent valve Positioner Control Design [ D ]. Xi'an : Xi'an Shiyou University, 2019.
- [ 8 ] 王志刚,俞利明,胡孟杰,等. 智能电气阀门定位器的研制 [ J ]. 化工自动化及仪表, 2020, 47(2) : 127-130.
- WANG ZH G, YU L M, HU M J, et al. Research on intelligent electro-pneumatic valve positioner [ J ]. Automation & Instrumentation, 2020, 47(2) : 127-130.
- [ 9 ] 刘玉贞. 无超调 PID 控制器的设计 [ D ]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
- LIU Y ZH. Design of PID controller without overshoot [ D ]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011.
- [ 10 ] 李国林. PID 控制器参数整定技术与优化设计 [ D ]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- LI G L. PID controller parameter tuning and optimization technology [ D ]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [ 11 ] 王健. 继电器反馈 PID 控制器参数自整定及其应用 [ D ]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
- WANG J. Relay feedback auto-tuning of PID controllers and its application [ D ]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016.
- [ 12 ] 王豪,郑恩让,张金果. 基于继电器反馈自整定 PID 控制器研究及应用 [ J ]. 计算机仿真, 2011, 28(2) : 192-195, 203.
- WANG H, ZHEN EN R, ZHANG J G. A relay feedback based auto tuning PID controller and its application [ J ]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 28(2) : 192-195, 203.
- [ 13 ] 王延年,张豪,耿琅环,等. 遗传算法优化模糊 PID 控制器在智能液压伺服控制系统中的应用 [ J ]. 国外电
- 子测量技术, 2018, 37(12) : 125-128.
- WANG Y N, ZHANG H, GENG L H, et al. Application of fuzzy PID control based on genetic algorithm in intelligent hydraulic servo controller [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(12) : 125-128.
- [ 14 ] 贺坤,李星野. 基于经验模态分解和遗传算法改进的神经网络模型的风速时间序列预测 [ J ]. 电子测量技术, 2018, 41(8) : 146-149.
- HE K, LI X Y. Wind speed forecasting based on EEMD-GA-BP [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(8) : 146-149.
- [ 15 ] 罗志远,丰硕,刘小峰,等. 一种基于分步遗传算法的多无人清洁车区域覆盖路径规划方法 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(08) : 43-50.
- LUO ZH Y, FENG SH, LIU X F, et al. Method of area coverage path planning of multi-unmanned cleaning vehicles based on step by step genetic algorithm [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8) : 43-50.
- [ 16 ] 崔玉国,刘尔春,杨依领,等. 基于改进 PID 的压电微定位平台反馈控制 [ J ]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6) : 215-223.
- CUI Y G, LIU ER CH, YANG Y L, et al. Feedback control of a piezoelectric micro-positioning stage based on the improved PID controller [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6) : 215-223.
- [ 17 ] ABID A, HAQ Z U, KHAN M T. Fault detection using negative selection and genetic algorithms [ J ]. Instrumentation, 2019, 6(3) : 39-51.
- [ 18 ] 刘国亮,冉懿,葛翔,等. 基于改进遗传算法的电力计量中心生产调度检定预测的研究 [ J ]. 国外电子测量技术, 2018, 37(1) : 6-10.
- LIU G L, RAN Y, GE X, et al. Study on the prediction of production scheduling verification based on improved Genetic algorithm [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(1) : 6-10.
- [ 19 ] 郭业才,陆璐,李晨. 基于新型 DNA 遗传萤火虫优化的二维图像盲恢复算法研究 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11) : 1796-1801.
- GUO Y C, LU L, LI CH. Research of 2D image blind restoration algorithm based on novel DNA genetic glowworm swarm optimization [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11) : 1796-1801.
- [ 20 ] 刘辉,曾鹏飞,巫乔顺,等. 基于改进遗传算法的转炉炼钢过程数据特征选择 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12) : 185-195.

LIU H, ZENG P F, WU Q SH, et al. Feature selection of converter steelmaking process based on the improved genetic algorithm [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40( 12 ): 185-195.

作者简介



张涵, 2019 年于中国计量大学现代科技学院获得学士学位, 现为中国计量大学研究生, 主要研究方向为仪器仪表技术研究。

E-mail: 791120530@ qq. com

**Zhang Han** received his B. Sc. degree in 2019 from China Jiliang University College of Modern Science and Technology. Now he is a M. Sc. candidate at

China Jiliang University. His main research interest includes instrumentation technology research.



刘铁军(通信作者), 分别在 1989 年和 1992 年于天津大学获得学士学位和硕士学位, 2006 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学讲师, 主要研究方向为仪器仪表技术研究。

E-mail: 1970521755@ qq. com

**Liu Tiejun** ( Corresponding author ) received his B. Sc. degree in 1989 and M. Sc. degree in 1992 from Tianjin University and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2006. Now he is a lecturer at China Jiliang University. His main research interest includes instrumentation technology research.