

# 基于遗传算法的压缩空气调压系统变论域模糊PID控制

透明智

上海理工大学, 光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月28日; 录用日期: 2024年11月21日; 发布日期: 2024年11月27日

## 摘要

面对压缩空气这样复杂的系统, 使用传统的PID控制难以满足控制要求, 模糊控制作为一种智能控制方式, 将其与PID控制相结合可以提高控制的鲁棒性。本文采用变论域的方法对模糊控制进行改进, 在模糊控制规则不变的情况下, 根据偏差的变化改变基本论域的大小, 从而提高控制的精度。由于模糊PID控制中的模糊控制规则的建立过于依赖经验, 具有较强的不确定性, 利用遗传算法对模糊控制规则进行优化, 通过增加区域筛选操作对算法进行了改进, 进而避免算法陷入局部最优而无法获得全局最优解。引入欧几里得距离对模糊控制规则进行分区, 通过对区域筛选找出最优解区域。本文选择误差绝对值时间积分性能指标作为目标函数, 利用MATLAB建立压缩空气调压系统模型, 通过对控制系统进行仿真验证控制方式的可行性。仿真结果表明: 与传统PID控制和模糊PID控制相比, 基于遗传算法的变论域模糊PID控制对系统的跟随性能指标和抗扰性能指标都有所改善。

## 关键词

变论域模糊PID控制, 模糊控制规则, 遗传算法, 欧几里得距离, 压缩空气调压系统

## Variable Domain Fuzzy PID Control for Compressed Air Pressure Regulating System Based on Genetic Algorithm

Mingzhi Die

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 透明智. 基于遗传算法的压缩空气调压系统变论域模糊PID控制[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6446-6456.  
DOI: 10.12677/mos.2024.136589

## Abstract

For the complicated system like compressed air regulating system, it is difficult to satisfy the control requirements by using traditional PID control. Fuzzy control as an intelligent control method can be combined with PID control to improve the robustness of the control. This paper adopts the method of variable domain to improve fuzzy control, which can improve the accuracy of control by changing the size of the basic domain according to the change of error while the fuzzy control rules remain unchanged. Since the establishment of fuzzy control rules in fuzzy PID control relies too much on experience and has strong uncertainty, the genetic algorithm is used to optimize the fuzzy control rules. In order to avoid the algorithm falling into the local optimum and failing to obtain the global optimum solution, we add the region screening operation to improve the algorithm by introducing Euclidean distance to partition the fuzzy control rules by screening the region to find the region where the optimum solution is located. In this paper, the absolute value of the error time integral performance index is selected as the objective function, and the compressed air regulating system is modeled by MATLAB, and the feasibility of the control method is verified by simulation of the control system. The simulation results show that compared with the traditional PID control and fuzzy PID control, the variable domain fuzzy PID control based on genetic algorithm has improved the following performance index and the anti-disturbance performance index of the system.

## Keywords

Variable Domain Fuzzy PID Control, Fuzzy Control Rules, Genetic Algorithm, Euclidean Distance, Compressed Air Pressure Regulating System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

压缩空气作为仅次于电力的第二大动力能源，其应用范围遍及各个行业和部门。压缩空气的质量会极大地影响生产制造的效率甚至安全，提高压缩空气压力的稳定性不仅会降低生产过程的风险，为企业带来巨大的经济收益，还有利于解决目前国内在压缩空气系统中存在的资源严重浪费的问题[1]。压缩空气管网末端作为连接储气罐和用气端的一个重要部分，能够通过调节阀来调节压力确保用气端的压力需求，输出的压力是否满足用气端的需求，控制方式的选择尤为关键。

随着被控对象越来越复杂，从被控系统获得的信息相对变少，建立系统精准数学模型的难度也相对变大[2]。结构简单、容易实现的 PID 控制有着广泛的应用，虽然它能够起到一定的控制作用，但效果并不稳定，尤其是面对复杂的系统，很难保证调节效果一成不变[3]。模糊控制可以增强控制系统的适应能力，具有较强的鲁棒性，尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统[4]，因此可以采用模糊控制来改善 PID 控制器的控制效果。对于模糊控制而言，一个合理的控制规则对控制效果能够产生极大的影响，而模糊控制规则的设计比较依赖经验，具有较强的不确定性，相同的控制规则无法很好地适应不同的控制系统，难以达到理想的控制效果。遗传算法作为一种简单通用的优化方法，在自动控制领域能够用于求解复杂系统的优化问题[5]，因此本文利用遗传算法对模糊控制规则进行优化，并通过 MATLAB 进行仿真验证控制方法的有效性。

对于模糊控制和遗传算法的研究国内外已经取得了很多的成果，两者的结合也在很多方面有了一定的应用。李瑾瑾使用遗传算法对模糊控制 PID 控制器的量化因子和比例因子进行了优化，并将其应用在电动舵机系统中[6]；夏长高在除草机械臂模糊 PID 控制研究中利用遗传算法对模糊控制规则和隶属函数进行了优化[7]。为了提高模糊控制的精度，可以通过变论域的方法对模糊控制进行改进，变论域模糊控制可以在模糊控制规则不变的情况下，根据系统误差的变化实时地对论域的范围进行改变[8]。变论域的关键是输入和输出的伸缩因子的设计，邱光繁提出了一种函数型的伸缩因子[9]；张卫东通过对伸缩因子进行改进，增强了因子的自适应性，避免了调整参数过多带来的麻烦[10]，为本文伸缩因子的设计提供了参考。在遗传算法前期如果出现了适应值特别大的个体，在对种群中的个体进行选择时，该个体很容易被大量复制占据种群的绝大部分，从而使算法陷入局部最优。本文在遗传算法中增加区域筛选操作，引入欧几里得距离对模糊控制规则进行分区，然后对区域进行筛选找出最优解所在的区域。

## 2. 变论域模糊 PID 控制器设计

压缩空气压力的稳定是生产过程正常运行的重要因素，要实现这一要求，需要选择合适的控制方式对末端压力系统进行控制。由于 PID 控制面对复杂的系统，很难保证调节效果一成不变，因此采用模糊控制来改善 PID 控制器的控制效果。为了进一步提高模糊控制的精度，通过设计伸缩因子对论域进行调整，实现变论域模糊控制。

### 2.1. 模糊 PID 控制器设计

由于二维模糊控制器对输出的动态特性反映更精确，因此选择二维模糊控制器实现模糊控制。图 1 为模糊 PID 控制系统结构图，将偏差  $e$  和偏差变化  $ec$  作为模糊控制器的输入量，PID 控制器的校正值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  作为输出量，构成两输入三输出的模糊控制器。

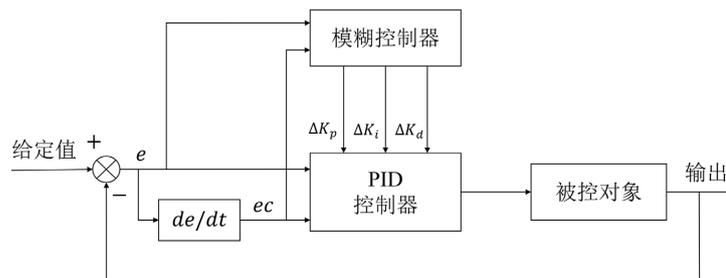


Figure 1. Diagram of the fuzzy PID control system  
图 1. 模糊 PID 控制系统结构图

本文的输入和输出变量的模糊论域均取  $[-12, +12]$ ，模糊子集均为  $NB, NM, NS, O, PS, PM, PB$ ，偏差  $e$  和偏差变化  $ec$  量化因子分别为  $K_e = 1$ 、 $K_{ec} = 1.5$ ，校正值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的比例因子分别为  $K_1 = 0.05$ 、 $K_2 = 0.008$ 、 $K_3 = 0.1$ ，隶属度函数均选择三角形函数，选择重心法解模糊。

### 2.2. 变论域设计

当系统的偏差较小时，模糊量只能由少量的语言值来表示，大量的语言值对应的隶属度为零，无法准确地反映偏差发生的变化。通过对论域进行放大，使其能够由更多的语言值进行表示，实现更精细的控制。同理，当系统的偏差较大时，可以对论域进行收缩。

常见的伸缩因子含有参数需要进行调整，参数的选择往往会花费大量的时间，带来极大的不便，本文选择了一种不含可调参数的缩放因子。输入伸缩因子由式(1)和式(2)所示：

$$\alpha(e, ec) = \left( \frac{|e| + \varepsilon}{E} \right)^{\left( \frac{|e| + |ec|}{|e| + \varepsilon} \right)^\delta} + \varepsilon \tag{1}$$

$$\beta(e, ec) = \left( \frac{|e| + \varepsilon}{E} \right)^{\left( \frac{|e| + |ec|}{|e| + \varepsilon} \right)^\tau} + \varepsilon \tag{2}$$

其中,  $\delta = \frac{EC}{|ec| + \varepsilon}$ ,  $\tau = \frac{E}{|e| + \varepsilon}$ ;  $E$ 、 $EC$  分别为偏差、偏差变化基本论域的最大值;  $\varepsilon$  为充分小的正数;  $\alpha$  为偏差  $e$  的缩放因子;  $\beta$  为偏差变化  $ec$  的缩放因子。

输出缩放因子由式(3)所示:

$$\gamma(e, ec) = \begin{cases} \left( \frac{e}{E} + \left| \frac{ec}{EC} \right| \right)^{1/3} e^{\left( \frac{|e|}{|e| + |ec|} \right)} + \alpha(e, ec) \int (|e| + |ec|) dt, & \forall e \cdot ec < 0 \text{ and } |e| > k \\ \left( \frac{e}{E} + \left| \frac{ec}{EC} \right| \right)^{1/3} e^{\left( \frac{|e|}{|e| + |ec|} \right)} + \beta(e, ec) \times \int (|e| + |ec|) dt, & \forall e \cdot ec > 0 \text{ and } |e| > k \\ \left( \frac{e}{E} + \left| \frac{ec}{EC} \right| \right)^{1/3} e^{\left( \frac{|e|}{|e| + |ec|} \right)}, & \forall e \cdot ec > 0 \text{ and } |e| < k \\ \left( \frac{e}{E} + \left| \frac{ec}{EC} \right| \right)^{1/3} e^{\left( \frac{|e|}{|e| + |ec|} \right)}, & \forall e \cdot ec < 0 \text{ and } |e| < k \end{cases} \tag{3}$$

本文选择量化因子除以输入的伸缩因子, 比例因子乘以输出的伸缩因子的方式来实现变论域模糊控制。

### 3. 遗传算法设计

由于模糊控制中对于模糊控制规则的设计比较依赖经验, 为了设计出适合本系统的模糊控制规则, 决定通过遗传算法对其进行优化。由于生成的初始种群是随机的, 可能会出现某些个体的适应值远大于其他个体的情况, 种群的多样性就会有所下降, 算法在后续的迭代可能会陷入局部最优。为了确保最终获得全局最优解, 增加区域筛选操作对算法进行改进, 引入欧几里得距离对模糊控制规则进行分区, 确定每个个体所在的区域, 比较种群中个体与当前最优个体适应值的大小, 若个体的适应值小于当前最优个体, 那么该个体所在的区域数值加 1, 当区域的数值达到设置的阈值时, 则认为最优解不在此区域, 经过筛选找出最优解所在的区域。这样, 算法的搜索过程不再仅依据个体的适应度, 还受个体的欧几里得距离和区域筛选设置的阈值影响。

#### 3.1. 编码

本文采用十进制的方式对模糊控制规则进行编码, 数字 1~7 分别对应  $NB$ 、 $NM$ 、 $NS$ 、 $O$ 、 $PS$ 、 $PM$ 、 $PB$ , 模糊控制规则表用  $49 \times 3$  的矩阵进行表示, 因此染色体的长度为 147。

#### 3.2. 适应度函数

适应度函数作为遗传算法对个体进行优胜劣汰的依据, 选择合适的适应度函数不但可以提高算法的收敛速度, 而且还能够确保问题存在最优解。通常为了减少计算的时间, 适应度函数的设计应尽量简单, 因此选择适应度函数  $f = 1/J$ 。

为了获得良好的动态性能，目标函数选用误差绝对值时间积分性能指标，并添加控制量的平方项来防止控制作用过大[11]，还加入了上升时间来提高系统的快速性。最优指标：

$$J = \int_0^{t_r} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 t_r \quad (4)$$

其中， $u(t)$  为控制器输出； $e(t)$  为压力偏差； $t_r$  为上升时间； $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  为权值。

为了减小超调，采取惩罚功能，即当超调产生时，超调量加入到最优指标中，此时最优指标为：

$$\text{if } ey(t) < 0 \quad J = \int_0^{t_r} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |ey(t)|) dt + w_3 t_r \quad (5)$$

其中， $ey(t) = y(t) - y(t-1)$ ， $y(t)$  为被控对象输出； $w_4$  为权值，且  $w_4 \gg w_1$ 。

### 3.3. 选择、交叉、变异

选择是根据父代个体的适应值来生成子代个体，通过保留优秀个体的方式使得算法不断逼近最优解。本文采用适应值比例法对个体进行选择，具体操作如下：

通过式(6)来计算每个个体适应值的比重，即被选择的可能性：

$$P_f = N \cdot \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (6)$$

其中， $N$  为种群的个数； $f_i$  为个体的适应值。

个体的选择次数由其  $P_f$  的整数部分和小数部分组成。首先针对整数部分进行选择，就整数部分而言，1.24 对应的个体复制次数为 1；0.73 对应的个体复制次数为 0。然后对每个的小数部分进行排序，由数值大的个体开始选择，直到到达种群大小为止。

为了防止发生优秀个体与较差个体交叉时，优秀个体被破坏，首先将个体按照适应值由小到大进行排序，在两个相邻个体之间进行交叉操作，然后对每条模糊控制规则进行判断，满足交叉条件后，进行交叉操作，由式(7)产生新的控制规则。

$$\begin{cases} X_{t+1} = \alpha Y_t + (1-\alpha) X_t \\ Y_{t+1} = \alpha X_t + (1-\alpha) Y_t \end{cases} \quad (7)$$

其中， $X_t$  和  $Y_t$  为父代模糊控制规则； $X_{t+1}$  和  $Y_{t+1}$  为产生的新的模糊控制规则。

由于变异很容易导致模糊规则函数发生较大的变化，对控制效果可能会产生不利影响，为了保护优秀个体，那么每代的最优个体不参与变异操作。满足变异条件后，随机产生新的语言值，即：

$$X_{t+1} = \text{rand}\{1 \sim 7\} \quad (8)$$

### 3.4. 区域筛选

算法将选择操作置后，个体先进行交叉、变异，再对个体进行选择。为了提高算法的效率，先在算法前期获得一个优秀个体，后期加入区域筛选操作寻找最优解所在的区域。本文将模糊控制规则划分为 6 个区域，每个区域的范围为：[0, 12, 24, 36, 48, 60, 73]，当个体的欧几里得距离大于 0 小于 12 时，该个体在区域 1。

首先计算每个个体的欧几里得距离并判断所在的区域，如式(9)所示：

$$DIST = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

其中， $n$  为个体的染色体长度； $x$  为要计算的个体； $y$  为染色体数值最小的个体。

当种群中个体的适应值小于当前最优个体的适应值时，其个体所在的区域加 1，并对个体进行更新产生新个体，更新原则：先选择新个体所在的区域，然后选择新个体的欧几里得距离。当种群中出现适应值大于当前最优个体的适应值时，则说明最优个体与当前最优个体不在同一区域，令当前最优个体所在的区域的数值等于设置的阈值，并在新个体所在的区域寻优。

遗传算法流程如图 2 所示。本文以迭代次数为终止条件，当迭代次数达到 50 时，输出最优解。

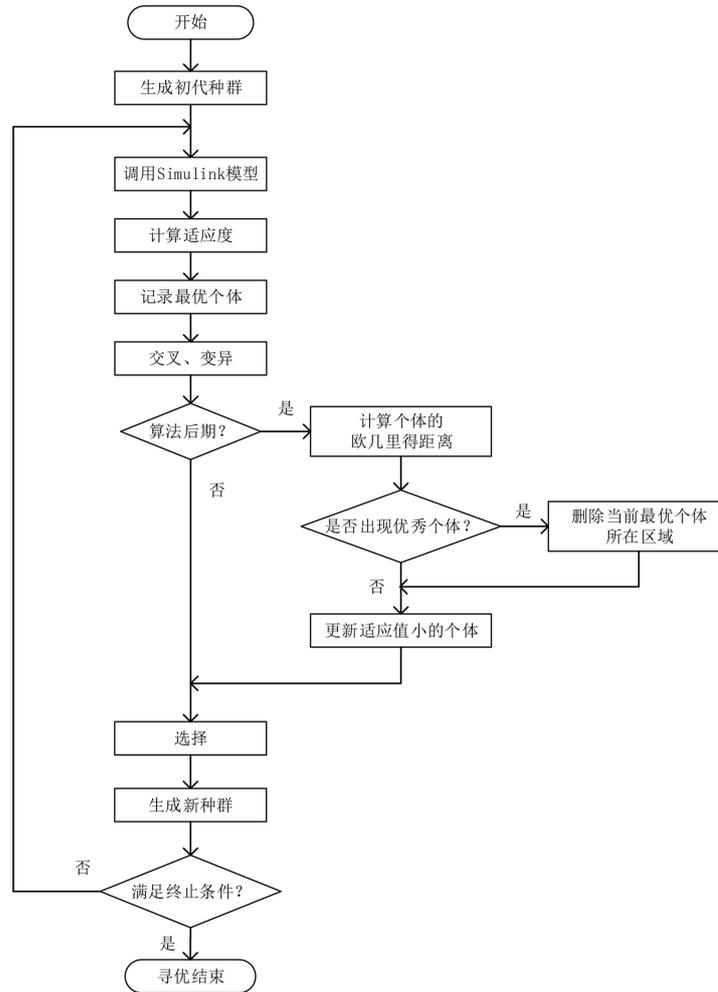


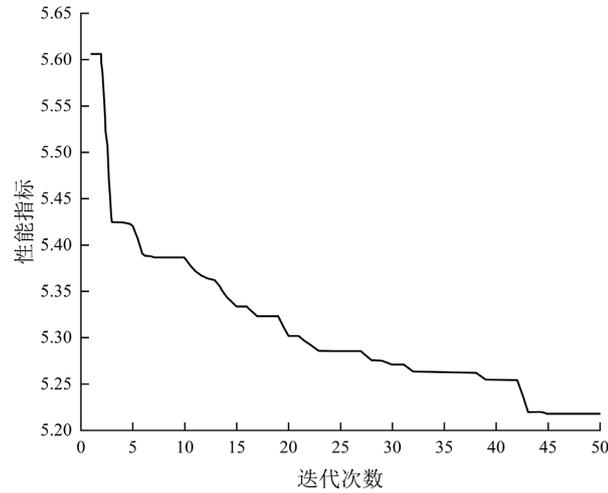
Figure 2. Flowchart of the genetic algorithm  
图 2. 遗传算法流程图

#### 4. 压缩空气调压系统仿真

本文以压缩空气调压系统为例，验证控制器的可行性。压缩空气调压系统主要由管道流通能力、气动薄膜调节阀以及末端压力 - 流量特性三部分组成，通过机理分析可以利用 Matlab 搭建图 3 仿真模型，其中“Subsystem1”模块为封装后被控对象模型，“Converter”为数据转换模块，用来将控制器 0~1000 的输出数值转换为控制调节阀所需的 4~20 mA 的电流信号，“elastic factor”为伸缩因子模块，如图 4 所示。

通过遗传算法优化后，得到的每代的性能指标如图 5 所示。可以看到：在第 45 代左右系统的性能指标最小，对应的适应度值约为 0.1999。





**Figure 5.** Curve of the performance index  
**图 5.** 性能指标曲线

优化得到的  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊控制规则如表 1~3 所示。

**Table 1.** Fuzzy control rules table for  $\Delta K_p$

**表 1.**  $\Delta K_p$  模糊控制规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NS	NS	PB	NB	PM	PM	PM
NM	PM	O	NM	NM	PB	PS	PB
NS	NB	NB	PS	O	PS	O	NM
O	NS	PB	O	PB	PS	NM	NB
PS	NS	NM	NB	O	O	PB	NB
PM	NB	PS	PB	PM	NB	PB	PM
PB	PM	O	O	O	PM	NM	PS

**Table 2.** Fuzzy control rules table for  $\Delta K_i$

**表 2.**  $\Delta K_i$  模糊控制规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	O	NM	PS	NM	PS	NM
NM	NB	NB	NS	PB	NM	NB	PS
NS	NB	PB	O	NB	NS	O	PB
O	O	PS	NM	PM	NM	PM	PB
PS	PM	NM	PB	PM	NB	NS	NB
PM	NB	NM	PS	NS	NB	NM	PM
PB	NB	PB	NM	NB	PB	NB	NS

**Table 3.** Fuzzy control rules table for  $\Delta K_d$

**表 3.**  $\Delta K_d$  模糊控制规则表

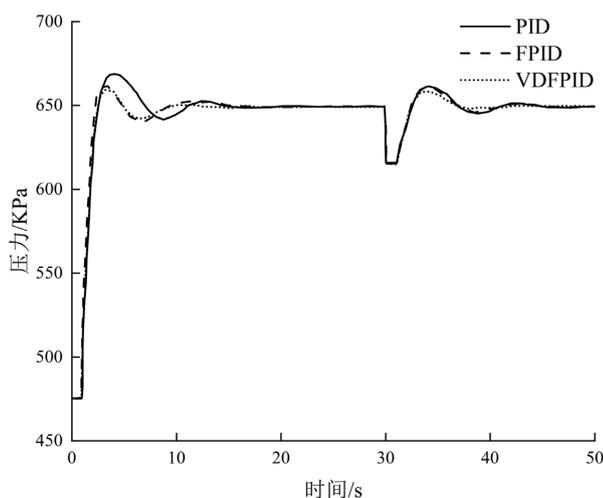
$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	PS	O	NS	O	O	NM
NM	PM	PS	NB	PB	PB	PS	PM
NS	PS	NM	O	O	PS	NM	PM
O	PS	PS	NS	NB	O	PM	PM
PS	PM	NS	PS	NS	NS	PS	NB
PM	NS	PM	NS	PB	PS	PB	NM
PB	NM	NB	PM	NB	NB	NB	O

### 5. 仿真结果分析

将传统 PID 控制、基于遗传算法优化后的模糊 PID 控制以及变论域模糊 PID 控制三种控制方式进行仿真对比。压缩空气压力设置为 650 kPa，在时间  $t = 30$  s 时给系统施加扰动：储气罐压力上升 20 kPa。仿真结果图如图 6 所示，为了更直观地看出三种控制方式的优劣，对一些关键的时间段进行了局部放大，如图 7 和图 8 所示。

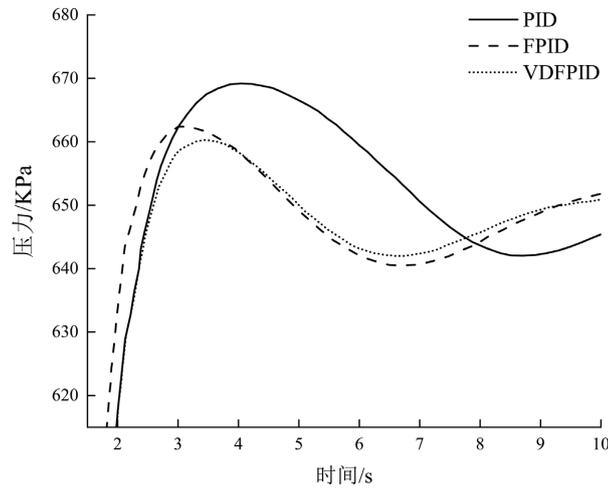
由图 7 可以看出，在施加扰动之前，与传统 PID 控制相比，利用遗传算法对模糊控制规则进行优化后，模糊 PID 控制的超调量和上升时间都有所改善，而变论域模糊 PID 控制的上升时间无明显变化，但拥有更小的超调量。在实际的应用中，我们希望压缩空气的压力波动尽可能的小，而且模糊 PID 控制的上升时间仅比变论域模糊 PID 控制的上升时间少 0.3 s，可以忽略不计，因此认为变论域模糊 PID 控制具有更好的跟随性能指标。

由图 8 可以看出，在施加扰动之后，变论域模糊 PID 控制的波动最小，能够更快地恢复到给定压力，具有更短的恢复时间，三者的动态降落相同。综上所述，基于遗传算法的变论域模糊 PID 控制对系统的跟随性能指标和抗扰性能指标都有所改善。

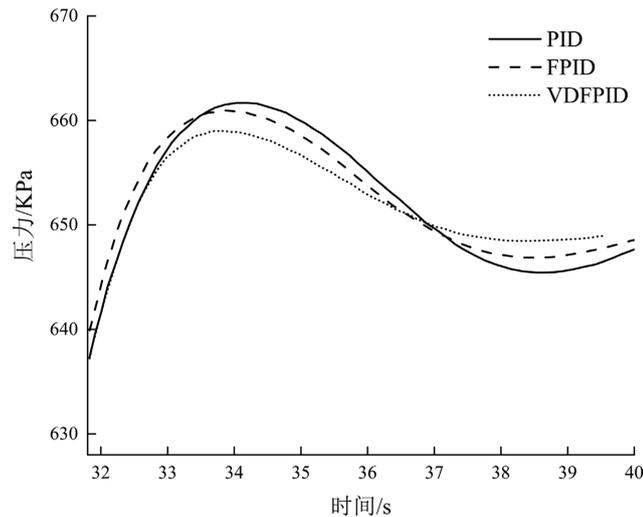


**Figure 6.** Simulation result of the compressed air pressure regulating system

**图 6.** 压缩空气调压系统仿真结果



**Figure 7.** Partial view of the simulation result (a)  
**图 7.** 仿真结果局部图(a)



**Figure 8.** Partial view of the simulation result (b)  
**图 8.** 仿真结果局部图(b)

另外，可以发现曲线不是从 0 开始的，这是由于对调节阀阻力系数  $R$  与开度的函数关系所拟合的曲线，在开度为 0 时， $1/R$  等于 0.00528 而不是 0，因此调节阀阀后压力是从 476.15 kPa 开始。

## 6. 结论

本文通过对压缩空气调压系统进行仿真，设计了一种基于遗传算法的变论域模糊 PID 控制器。利用遗传算法对模糊控制规则进行优化，寻找适合本系统的控制规则，为了提高算法的寻优能力，设计了区域筛选操作，在最优解所在的区域进行搜索，避免局部最优解对结果的不良影响。当系统的偏差过大或过小时，模糊 PID 控制器的控制精度会有所下降，通过设计的伸缩因子对输入和输出的基本论域进行伸缩，进一步提高了控制器的控制能力。总之，本文提出的控制方法不仅提高了遗传算法寻找最优解的能力，而且能够在控制系统的不同阶段都提供可靠的控制能力。通过对传统 PID 控制、基于遗传算法优化的模糊 PID 控制以及变论域模糊 PID 控制三种控制方式进行仿真对比，基于遗传算法优化的变论域模糊 PID 控制具有更好的控制能力，系统的跟随性能指标和抗扰性能指标都得到了改善。

## 参考文献

- [1] 徐宁. 压缩空气节能安定系统的控制与优化[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [2] 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.
- [3] 葛锁良, 方唐利, 岳胜. 采用免疫 BP 算法的模糊神经网络 PID 控制器[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(5): 679-682, 704.
- [4] 王延年, 黄俊龙. 液压伺服系统时间最优模糊 PID 控制算法研究[J]. 微处理机, 2016, 37(5): 48-51, 55.
- [5] 王乐. 基于遗传算法的混合型模糊 PID 控制研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [6] 李璀璨, 易文俊, 管军, 尹洪桥. 基于遗传算法的电动舵机系统模糊 PID 控制[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 162-167.
- [7] 夏长高, 杨鹏程, 韩江义, 孙陈曦, 冒志恒. 基于遗传算法优化的除草机械臂模糊 PID 控制研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 15-21.
- [8] 徐奔腾, 林勇, 温阳东. 锅炉汽包水位的变论域模糊 PID 控制[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(5): 467-470.
- [9] 邱光繁, 徐进钊, 邱炯智, 张京玲, 聂湛然, 胡永刚. 基于函数型伸缩因子的桥式吊车变论域模糊 PID 控制器设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(2): 156-160.
- [10] 张卫东. 变论域模糊控制器改进设计及其仿真[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 223-228.