

文章编号:1671-251X(2021)09-0038-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021030086

改进遗传算法优化的矿井局部通风机 模糊 PID 控制器设计

胡业林, 邓想, 郑晓亮

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)



扫码移动阅读

摘要:目前局部通风机控制主要采用传统 PID 控制器,控制器的参数固定且多依据经验选取,很难实现隶属度函数和模糊规则的最优组合,使得控制器难以满足局部通风机自适应的控制要求。针对该问题,设计了一种改进遗传算法优化的矿井局部通风机模糊 PID 控制器。在改进遗传算法中引入欧氏距离提高种群的多样性,同时引入自适应交叉和变异概率来提高算法的收敛性。在编码过程中采用比例分数间接实现对隶属度函数的优化,使得改进遗传算法能够同时优化隶属度函数和模糊规则。将优化得到的隶属度函数和模糊规则导入模糊 PID 控制器中,控制器能够根据局部通风机的不同工作状态,通过变频器自适应调整局部通风机的风量,实现对局部通风机的动态调节。仿真结果表明,相较于传统模糊 PID 控制器,改进模糊 PID 控制器可基本实现无超调,且上升时间缩短了 56.25%,稳定时间缩短了 47.06%,能够更好地满足矿井局部通风机的控制要求。

关键词:矿井局部通风机;风量控制;模糊 PID 控制器;遗传算法;隶属度函数;模糊规则

中图分类号:TD635 文献标志码:A

Design of fuzzy PID controller for mine local ventilator optimized by improved genetic algorithm

HU Yelin, DENG Xiang, ZHENG Xiaoliang

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: At present, the local ventilator control mainly uses traditional PID controllers. The parameters of the controller are fixed and selected based on experience. It is difficult to achieve the optimal combination of membership functions and fuzzy rules, which makes it difficult for the controller to meet the adaptive control requirements of local ventilator. In order to solve this problem, a fuzzy PID controller for mine local ventilator optimized by improved genetic algorithm is designed. In the improved genetic algorithm, the Euclidean distance is introduced to increase the diversity of the population, and the adaptive crossover and mutation probability are introduced to improve the convergence of the algorithm. In the encoding process, the proportional fraction is used to indirectly optimize the membership functions, which enables the improved genetic algorithm to optimize both the membership functions and fuzzy rules. The optimized membership functions and fuzzy rules are imported into the fuzzy PID controller. The controller can adaptively adjust the air volume of the local ventilator through the inverter according to the different

收稿日期:2021-03-26;修回日期:2021-08-25;责任编辑:张强。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0808000)。

作者简介:胡业林(1962—),男,安徽淮南人,教授,博士,主要研究方向为自动控制、计算机控制与检测技术,E-mail:2439498035@qq.com。

通信作者:邓想(1989—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为智能控制,E-mail:dengx76@163.com。

引用格式:胡业林,邓想,郑晓亮.改进遗传算法优化的矿井局部通风机模糊 PID 控制器设计[J].工矿自动化,2021,47(9):38-44.

HU Yelin, DENG Xiang, ZHENG Xiaoliang. Design of fuzzy PID controller for mine local ventilator optimized by improved genetic algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 38-44.

working status of the local ventilator so as to realize the dynamic adjustment of the local ventilator. The simulation results show that compared with the traditional fuzzy PID controller, the improved fuzzy PID controller can basically achieve no overshoot, the rise time is shortened by 56.25%, and the stabilization time is shortened by 47.06%, which can better meet the control requirements of mine local ventilator.

Key words: mine local ventilator; air volume control; fuzzy PID controller; genetic algorithm; membership functions; fuzzy rules

0 引言

煤矿用局部通风机是煤矿井下通风必不可少的安全设备,为了保证井下作业人员需氧量和瓦斯浓度不超限,局部通风机功率一般偏大且始终处于恒速运行状态,造成大量电能浪费^[1]。随着变频技术的发展,局部通风机变频调速系统应运而生^[2]。局部通风机变频调速系统需要根据瓦斯涌出量和工作面人员数量等因素确定供风量,而瓦斯涌出量具有随机性,使得局部通风机变频调速系统具有非线性、时变性、多干扰的特点。传统局部通风机变频调速系统多采用固定参数的PID控制器,无法满足时变通风机调速系统的控制要求,因此,多种智能算法被用于优化PID控制器。文献[3]针对PID控制参数调整困难的问题,提出了一种粒子群优化PID控制算法,相比于传统PID控制器,经过粒子群算法优化后的控制器对局部通风机转速控制输出性能改善明显。文献[4]针对矿井通风机控制系统的时变性,设计了模糊PID自适应控制系统,利用模糊算法对PID参数进行实时调整,实现了通风机转速的自适应控制。文献[5]针对模糊PID控制器中模糊规则的设定需要依赖人工经验的问题,提出利用遗传算法对模糊规则进行优化,提高了模糊PID控制器的控制效果。文献[6]针对传统模糊PID控制的许多参数需要结合实际情况进行调整、人为试错确定的问题,提出采用遗传算法对控制器的量化因子和比例因子进行优化,提高了控制器的精度和速度。文献[7]分析了隶属度函数与比例因子和量化因子的关系,并针对模糊PID控制存在人为确定隶属度函数的问题,提出采用改进遗传算法对隶属度函数进行优化,结果表明优化后的控制器性能更优。但是上述控制器的隶属度函数和模糊规则未能同时优化,剩余参数仍需根据经验选取,很难实现隶属度函数和模糊规则的最优组合。针对该问题,本文设计了一种改进遗传算法优化的矿井局部通风机模糊PID控制器(以下简称改进模糊PID控制器),该控制器在模糊PID控制器的基础上,利用改进遗传算法同时优化隶属度函数和模糊规则,从而实现局部通风机的最优风量控制。

1 改进模糊PID控制器设计

改进模糊PID控制器包括运算模块、模糊PID控制器和基于改进遗传算法的控制器优化部分,其结构如图1所示。利用改进的遗传算法同时优化模糊控制器的隶属度函数和模糊规则,可有效避免模糊PID控制器参数设置的主观性。利用传感器实时采集的数据计算需风量的设定值 r ,实现 r 的自适应调整。将 r 和当前实际风量值 q 进行比较,计算得到两者之间的偏差 e 和偏差变化率 ec ,将 e 和 ec 传送至优化后的模糊PID控制器,控制器输出控制电压 u ,用以控制矿用隔爆变频器,变频器调节异步电动机转速并经过风速转换,最终实现风量的自适应调节。

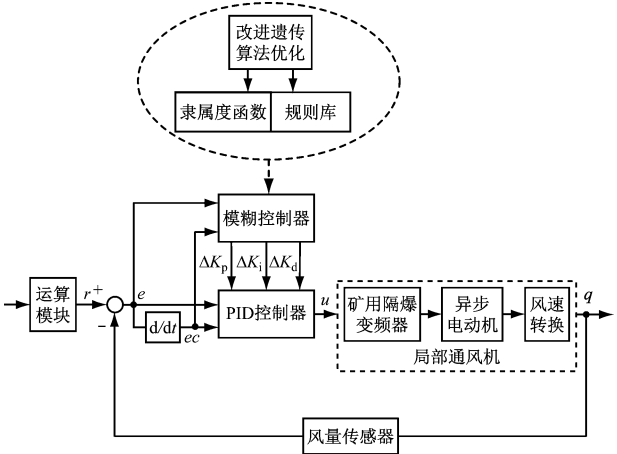


图1 改进模糊PID控制器结构

Fig. 1 Structure of improved fuzzy PID controller

1.1 运算模块

运算环节由可编程逻辑控制器 PLC 内部的运算模块实现,运算模块根据传感器采集到的工作面瓦斯涌出量 w 得到按瓦斯涌出量计算的需风量 q_w , q_w 和 w 成正比例关系。根据工作面人数 g 得到按工作面人数计算的需风量 q_g 。比较 q_w 和 q_g 的大小,取两者的较大值作为运算模块的输出。

$$q_w = w\kappa/\nu \tag{1}$$

式中: κ 为瓦斯涌出不均衡系数; ν 为回风流中瓦斯的允许浓度。

$$q_g = q_{\min}g \tag{2}$$

式中 $q_{\min}$ 为每个工作面人员的最小供风量。

通过输出 q_w 和 q_g 中的较大值作为需风量的设定值,运算模块能够在保证工作面人员最小供风量的前提下,根据瓦斯涌出量自适应地调整需风量的设定值。利用优化后的模糊 PID 控制器良好的跟随性能控制局部通风机,使实际风量跟随需风量设定值的变化而变化,最终实现依据工作面瓦斯涌出量和人员数量自适应调整工作面风量的目的。

1.2 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器包含 1 个模糊控制器和 1 个 PID 控制器。模糊控制器采用两输入、三输出的 Mamdani 控制器,将实际值和目标值之间的偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入,PID 参数的变化值 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为模糊控制器的输出。将 K_p, K_i, K_d 参数输入 PID 控制器,控制信号为 u 。在运行中通过不断检测 e 和 ec ,利用模糊控制器对 PID 控制器的 3 个参数进行实时修改,以满足不同的 e 和 ec 对控制参数的要求。模糊 PID 控制器具有良好的鲁棒性和动静态性能,但在传统情况下,控制器的参数均由人为主观设定,极大限制了控制器的控制性能。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

式中 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为 PID 的初始参数。

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

1.3 基于改进遗传算法的控制器优化

在遗传算法中,种群表示所有可能解的集合,种群中包含许多个体,每个个体表示一种可能解,个体中又包含多个基因,基因表示这个可能解的具体信息。将遗传算法应用到模糊 PID 控制器参数优化中,首先需要根据隶属度函数和模糊规则的特点,利用特殊的编码方式,将二者的具体信息编码成个体中的基因;然后利用改进遗传操作对个体进行迭代寻优,迭代结束后输出种群中适应度最高的个体;最后将该个体的基因通过解码即可得到隶属度函数和模糊规则的最优组合。改进遗传算法优化隶属度函数和模糊规则的流程如图 2 所示。

1.3.1 初始化种群

在进行遗传操作前,需要先设置初始种群。为了实现全局搜索,本文选用随机方式产生初始种群。为了便于后续的编码操作,种群中的基因变化范围设置为 $[1, 5]$ 。

1.3.2 隶属度函数和模糊规则的编码与解码

常用的编码方式有二进制编码和实数编码,其

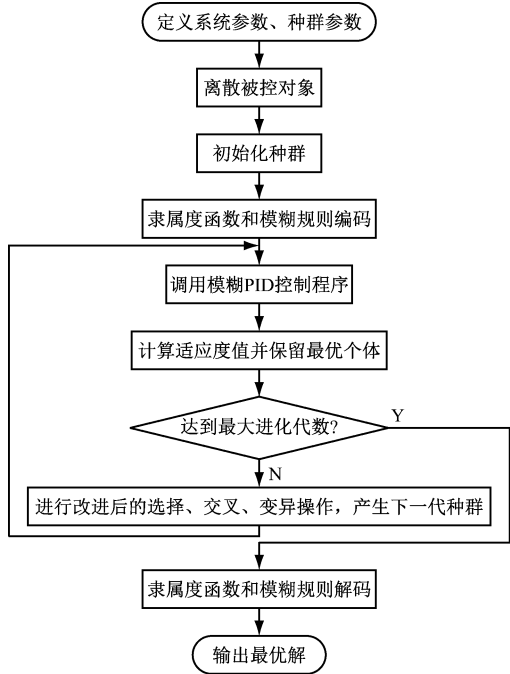


图 2 改进遗传算法优化模糊 PID 控制器流程
Fig. 2 Flow of fuzzy PID controller optimized by improved genetic algorithm

中实数编码过程简单且不易陷入局部极值^[8]。因此,本文选用实数编码形式对模糊规则和隶属度函数进行编码。对模糊规则进行编码时,设模糊子集为{负大,负小,零,正小,正大},即{NB, NS, Z, PS, PB},使用{1 2 3 4 5}表示。对隶属度函数进行编码时,基本论域设置为 $[-1, 1]$ 。模糊子集 NS、Z、PS 选用三角形隶属度函数,NB 选用 Z 形隶属度函数,PB 选用 S 形隶属度函数。为了便于编码,设隶属度函数的顶点和两侧隶属度函数交点的横坐标一致^[9]。因此,只需确定隶属度函数的顶点坐标就可以确定整个隶属度函数的形状。由于隶属度函数的顶点坐标要求在一定范围内且顺序排列,若直接对其进行编码,经过遗传操作后可能无法满足上述要求,会出现许多无效编码。本文采用的方法是对隶属度函数顶点的横坐标在基本论域上的比例分数进行编码,比例分数无需满足范围内顺序排列的要求,可以与模糊规则的编码一起进行遗传操作。

由于 4 个基因可以确定 1 个变量的隶属度函数,模糊控制器一共有 5 个变量,即需要 20 个基因可以确定全部的隶属度函数。而每个模糊控制器的输出需要 25 条模糊规则,一共有 3 个输出,即需要 75 个基因可以确定全部的模糊规则。因此,每个个体应包含 95 个基因。个体的编码示例如图 3 所示,前 20 位基因表示隶属度函数编码,后 75 位基因表示模糊规则编码。

经过遗传操作,最优个体后 75 位基因利用对应关系即可解码成相应的模糊规则,而前 20 个基因需

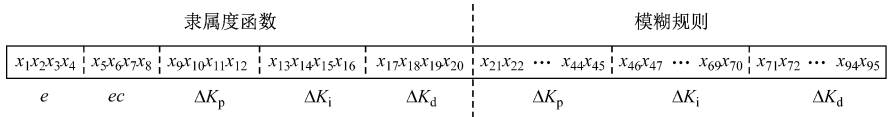


图3 个体编码示例

Fig. 3 Example of individual coding

要将比例分数转换成隶属度函数顶点的位置坐标后才能解码出相应的隶属度函数。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{x_\alpha}{5} \\ \beta = \alpha + \frac{x_\beta}{5}(1 - \alpha) \end{cases} \tag{5}$$

式中： α, β 为正半轴的隶属度函数顶点的横坐标值； x_α, x_β 为 α, β 对应的比例分数。

以误差 e 的隶属度函数为例具体说明转换过程,误差 e 的隶属度函数如图 4 所示, a, b, c, d 为隶属度函数的 4 个顶点横坐标值,且 $0 \leq a \leq b \leq 1, -1 \leq d \leq c \leq 0$ 。 x_1, x_2, x_3, x_4 为误差 e 的隶属度函数的比例分数。将 x_1, x_2 代入式(5)得到隶属度函数的顶点横坐标值 a, b ,将 x_3, x_4 代入式(5)计算得到的结果添加负号,即可得到隶属度函数的顶点横坐标值 c, d ,得到 4 个顶点横坐标值后,即可解码出误差 e 的隶属度函数。

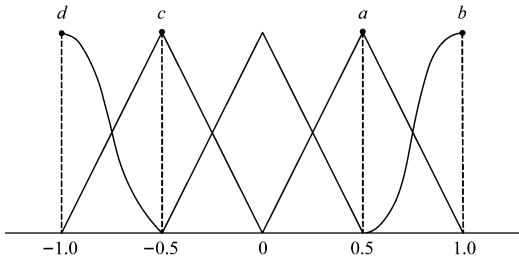


图4 误差 e 的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of error e

1.3.3 适应度函数选择

个体适应度是遗传操作的基础,直接影响到算法的效果。本文采用设定值和实际值的误差 $e(t)$ 的绝对值的积分作为目标函数。

$$J = \int_0^\infty |e(t)| dt \tag{6}$$

由于误差绝对值的积分值越小表示适应度越好,所以,适应度函数描述为

$$F = \frac{1}{J} \times 1\,000 \tag{7}$$

为减少浮点数运算,将适应度值放大1 000倍。

1.3.4 改进的遗传操作

为了提高种群的适应度和多样性,对选择操作进行改进,引入欧氏距离^[10]:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \theta_i)^2} \tag{8}$$

式中： η_i 为个体 η 的第 i 个基因； θ_i 为个体 θ 的第 i 个

基因； n 为基因个数。

欧氏距离越大表示个体 η 和个体 θ 的相似度越小。选择操作步骤如下：

(1) 计算种群中每个个体的适应度值和种群平均适应度值,记录最高适应度值及其个体。

(2) 逐个判断种群中个体的适应度值是否小于平均适应度值,若是,转到步骤(3),否则保存个体,直至判断完整个种群。

(3) 随机产生 m 个个体,分别计算这 m 个个体的适应度值与原种群中最高适应度值个体之间的欧氏距离,选择适应度值与欧氏距离之和最大的个体作为新的个体,取代种群中原有的个体。

交叉操作采用自适应交叉概率,根据当代种群中的平均适应度值 F_{avr} 和最大适应度值 F_{max} 对交叉概率 p_1 进行自适应调整^[11]。

$$p_1 = \begin{cases} \frac{k_1(F_{max} - F_j)}{F_{max} - F_{avr}} & F_j \geq F_{avr} \\ k_1 & F_j < F_{avr} \end{cases} \tag{9}$$

式中： k_1 为交叉概率设定值； F_j 为个体 j 的适应度值。

确定交叉概率 p_1 后,按照交叉概率在种群中选择个体进行交叉运算。由于本文使用的是实数编码,所以使用算术交叉算子进行交叉运算^[12]。

$$\begin{cases} C_{\eta+1} = \epsilon C_\eta + C_\theta(1 - \epsilon) \\ C_{\theta+1} = C_\eta(1 - \epsilon) + \epsilon C_\theta \end{cases} \tag{10}$$

式中： C_η, C_θ 为从种群中选择的 2 个父代个体； $C_{\eta+1}, C_{\theta+1}$ 为经过交叉操作后产生的新的子代个体； ϵ 为(0,1)内随机产生的系数。

变异操作采用自适应的变异概率 p_2 ,其形式和式(9)一致。同时由于是利用实数编码,采用算术变异算子进行变异运算。如对个体的第 i 个基因进行变异^[13],其公式如下：

$$I'_i = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} + (I_{max} - I_{min})(\lambda - 0.5) \tag{11}$$

式中： I'_i 为变异产生的新基因； I_{max} 和 I_{min} 分别为全部个体在第 i 个基因上的最大值和最小值； λ 为[0,1]的随机数。

2 仿真分析

2.1 局部通风机控制模型建立

在进行仿真分析之前,需要先建立局部通风机

的控制模型。在局部通风机控制系统中,通过控制变频器输入电压实现电动机转速调节,再经过电动机转速和风速的转换,最终实现局部通风机风速的调节。因此,可以使用变频器和异步电动机来近似等效局部通风机的结构。

变频器输入电压和输出频率之间的数学模型可以近似等效为一阶惯性环节,其传递函数为^[14]

$$G_{UF}(s) = \frac{K_{UF}}{T_{UF}s + 1}$$

(12)

式中: K_{UF} 为变频器的输出频率和输入电压的比值; T_{UF} 为变频器时间常数,一般取变频器加速时间的 60%; s 代表复频域。

异步电动机输入频率和输出转速之间的数学模型可以近似等效为一阶惯性环节,其传递函数为^[14]

$$G_{MA}(s) = \frac{K_{MA}}{T_{MA}s + 1}$$

(13)

式中: K_{MA} 为异步电动机额定转速与工频的比值; T_{MA} 为异步电动机时间常数,一般取电动机启动时间的 25%。

以 FBD-No7.1 型矿用隔爆型对旋轴流局部通风机为研究对象,通风机参数见表 1。取变频器最大输入电压为 5 V,输出频率为 20~50 Hz,加速时间为 0.3 s。异步电动机启动时间为 2.4 s。由式(12)、式(13)可得到变频器数学模型和异步电动机数学模型分别为

$$G_{UF}(s) = \frac{10}{0.18s + 1}$$

(14)

$$G_{MA}(s) = \frac{59}{0.6s + 1}$$

(15)

表 1 FBD-No7.1 局部通风机参数

Table 1 Parameters of FBD-No7.1 local ventilator

额定功率/kW	额定电压/V	额定频率/Hz	额定转速/(r·min ⁻¹)	设计吸风量/(m ³ ·min ⁻¹)
2×45	660	50	2 950	550~800

由式(14)、式(15)得到局部通风机转速控制数学模型为

$$G(s) = G_{UF}(s)G_{MA}(s) = \frac{590}{0.108s^2 + 0.78s + 1}$$

(16)

建立局部通风机转速控制的数学模型后,要实现局部通风机风量的调节,还需要进行转速和风量的转换。根据通风机的特性可知,转速和风量之间满足正比例关系^[15]。依据局部通风机参数,通风机的转速和风量转换关系式为

$$q = \frac{q_e}{z_e} z_v = \frac{550}{2\,950} z_v$$

(17)

式中: q 为通风机风量; q_e 为通风机额定风量; z_e 为

通风机额定转速; z_v 为通风机转速。

2.2 仿真分析

为验证改进模糊 PID 控制器的控制性能,选用矿井局部通风机的数学模型作为控制对象,分别采用 PID、模糊 PID 和改进遗传算法优化后的模糊 PID 三种控制方式,对比三者的单位阶跃响应曲线,分析 3 种控制器的控制性能。

设遗传代数为 100,种群大小为 20,交叉概率系数 k_c 为 1,变异概率系数 k_m 为 0.5,传递函数的采样时间为 0.1 s。遗传进化过程目标函数 J 的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可看出,标准遗传算法 SGA(Standard Genetic Algorithm)在 67 代达到收敛。而由于提高了种群的多样性和算法的收敛性,改进遗传算法 IGA(Improved Genetic Algorithm)在第 10 代就达到收敛且收敛数值要小于 SGA 的收敛数值,IGA 收敛速度更快并且寻优结果更好。

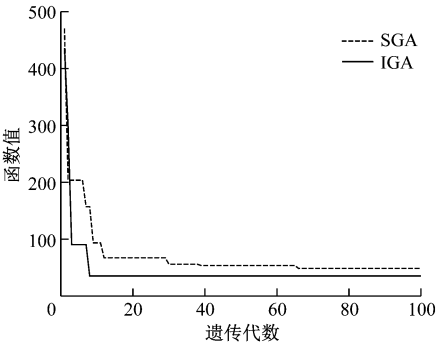


图 5 目标函数 J 的变化曲线

Fig. 5 Change curves of objective function J

经过 IGA 优化后,获得最优个体为 {3443, 2423, 4322, 4232, 2233, 54322, 53223, 43432, 23323, 21213, 43432, 54334, 14332, 41323, 22322, 41333, 22454, 34433, 34333, 22333}。经过解码可以得到优化后的模糊控制器模糊规则库(表 2)和隶属度函数(图 6)。

表 2 改进遗传算法优化后的 $\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ 的模糊规则库

Table 2 Fuzzy rule base of $\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ optimized by improved genetic algorithm

ec	e				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB/PS/PS	PS/Z/NB	Z/PS/Z	NS/Z/Z	NS/NS/Z
NS	PB/PB/NS	Z/PS/NS	NS/Z/PS	NS/Z/PB	Z/PS/PS
Z	PS/NB/Z	Z/PS/PS	PS/Z/PS	Z/Z/Z	NS/NS/Z
PS	NS/PS/Z	Z/NB/PS	Z/Z/Z	NS/NS/Z	Z/Z/Z
PB	NS/NS/NS	NB/NS/NS	NS/Z/Z	NB/NS/Z	Z/NS/Z

将得到的隶属度函数和模糊规则库代入到模糊 PID 控制器中。利用 Z-N 法整定 PID 控制器的参数, $K_p=0.16$, $K_i=0.2$, $K_d=0.022$ 。设模糊 PID

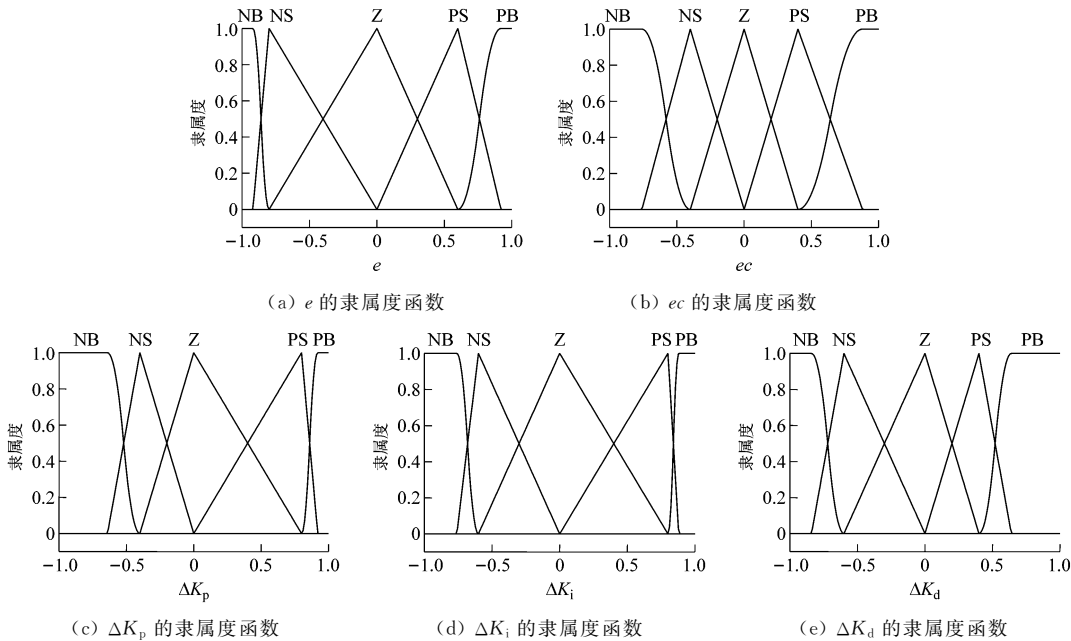


图 6 改进遗传算法优化后的隶属度函数

Fig. 6 Membership function optimized by improved genetic algorithm

控制器和改进模糊 PID 控制器的初始参数 $K_{p0}=0.2, K_{i0}=0.25, K_{d0}=0.03$ 。同时为对比抗干扰能力,在 0.2 s 处加入幅值为 0.2 的扰动信号。3 种控制器的单位阶跃响应曲线如图 7 所示,输出结果比较见表 3。

糊 PID 控制器受到干扰后,最大扰动幅值适中且恢复时间最短。说明改进模糊 PID 控制器的控制效果最佳,抗干扰能力最强。

由表 3 可看出,PID 控制器由于参数固定不变,虽然可以实现较短的上升和稳定时间,但却有明显的超调。模糊 PID 控制器能够根据不同的控制要求自适应调整控制器的参数,基本没有超调量,但由于控制器的隶属度函数和模糊规则是根据经验设置的,具有较大的主观性,限制了模糊 PID 控制器的控制效果,使得模糊 PID 控制器的上升和稳定时间较长。改进模糊 PID 控制器利用改进遗传算法的寻优能力,实现了控制器中隶属度函数和模糊规则最优组合,使得其在没有超调的情况下,较模糊 PID 控制器上升时间缩短了 56.25%,稳定时间缩短了 47.06%。

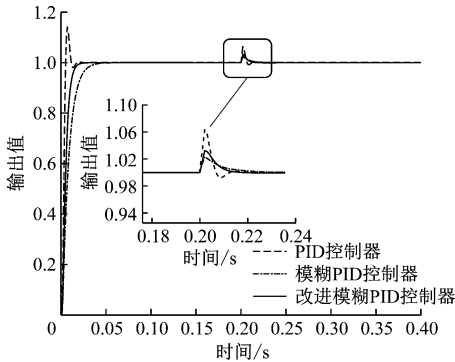


图 7 3 种控制器的单位阶跃响应曲线

Fig. 7 Unit step response curves of three kinds of controller

表 3 3 种控制器的输出结果比较

Table 3 Comparison of output results of three kinds of controller			
控制器	上升时间/s	稳定时间/s	超调量/%
PID 控制器	0.003	0.024	14.1
模糊 PID 控制器	0.016	0.051	0
改进模糊 PID 控制器	0.007	0.027	0

由图 7 可看出,在 0.2 s 加入幅值为 0.2 的干扰信号后,PID 控制器在 0.219 s 恢复稳定,最大扰动幅值为 1.064;模糊 PID 控制器在 0.229 s 恢复稳定,最大扰动幅值为 1.023;改进模糊 PID 控制器在 0.216 s 恢复稳定,最大扰动幅值为 1.032。改进模

3 结论

(1) 由于矿井局部通风机具有时变、非线性的特点,固定参数的 PID 控制器很难达到良好的控制效果。为了更好地满足矿井局部通风机的控制要求,设计了一种基于改进遗传算法优化的模糊 PID 控制器。同时对于传统遗传算法容易出现局部最优解和早熟的问题,在改进遗传算法中引入欧氏距离来提高算法中种群的多样性,同时引入自适应交叉和变异概率来提高算法的收敛性。在编码过程中采用比例分数间接实现对隶属度函数的优化,使得改进遗传算法能够同时优化隶属度函数和模糊规则。将优化得到的隶属度函数和模糊规则导入模糊 PID 控制器中,通过不断检测误差 e 和误差变化率 ec ,根

据模糊规则实时调整 PID 的 3 个参数,实现控制器对矿井局部通风机的自适应控制。

(2) 以矿井局部通风机的数学模型作为控制对象,测试 PID 控制器、模糊 PID 控制器、改进模糊 PID 控制器的单位阶跃响应曲线。对比结果显示,PID 控制器有较大的超调量,模糊 PID 控制器和改进模糊 PID 控制器基本没有超调,同时改进模糊 PID 控制器相较模糊 PID 控制器上升时间缩短了 56.25%,稳定时间缩短了 47.06%。在受到信号干扰后,改进模糊 PID 控制器最大扰动幅值适中且恢复时间最短。改进模糊 PID 控制器能够更好地满足矿井局部通风机的控制要求,对矿井局部通风机的变频控制系统优化具有一定意义。

参考文献(References):

- [1] 张庆华,姚亚虎,赵吉玉.我国矿井通风技术现状及智能化发展展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):97-103.
ZHANG Qinghua,YAO Yahu,ZHAO Jiyu. Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development [J]. Coal Science and Technology,2020,48(2):97-103.
- [2] 李惠平.矿井主通风机变频调速节能技术的应用[J].煤炭工程,2012,44(7):56-58.
LI Huiping. Application of energy saving technology of frequency conversion speed regulation for mine main fan[J]. Coal Engineering,2012,44(7):56-58.
- [3] 杜岗,马小平,张萍.煤矿局部通风机转速控制算法研究[J].工矿自动化,2020,46(9):69-73.
DU Gang,MA Xiaoping,ZHANG Ping. Research on speed control algorithm of coal mine local ventilator [J]. Industry and Mine Automation,2020,46(9):69-73.
- [4] 何戮.模糊 PID 控制在矿用主要通风机中的应用[J].矿业安全与环保,2012,39(3):47-49.
HE Tao. Application of fuzzy PID control in mine main fan [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2012,39(3):47-49.
- [5] 王威,薛彦冰,宋玉玲,等.基于 GA 优化控制规则的汽车主动悬架模糊 PID 控制[J].振动与冲击,2012,31(22):157-162.
WANG Wei,XUE Yanbing,SONG Yuling,et al. Fuzzy PID control strategy for an active suspension based on optimal control laws with genetic algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(22):157-162.
- [6] 杨雪花,刘磊.矿井主通风机风量调节智能控制算法研究[J].煤矿机械,2020,41(1):31-33.
YANG Xuehua,LIU Lei. Research on intelligent control algorithms for air volume regulation of mine main fan [J]. Coal Mine Machinery,2020,41(1):31-33.
- [7] 李绍铭,徐龙淞,杨帆.基于遗传模糊 PID 的液压 AGC 控制系统研究[J].机床与液压,2015,43(10):127-131.
LI Shaoming,XU Longsong,YANG Fan. Research on hydraulic AGC system based on GA fuzzy PID algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics,2015,43(10):127-131.
- [8] SUNDARABALAN C K,SELVI K. Real coded GA optimized fuzzy logic controlled PEMFC based dynamic voltage restorer for reparation of voltage disturbances in distribution system [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017,42:603-613.
- [9] MESSAI A,MELLIT A,GUESSOUM A,et al. Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation [J]. Solar Energy,2011,85(2):265-277.
- [10] LI Shaoming,YANG Peng,YANG Fan,et al. On lime kiln temperature system based on GA fuzzy PID algorithm and optimal control [C]//IEEE Control & Decision Conference,Nanjing,2014:4545-4550.
- [11] HU Yanpeng,YANG Yanping,LI Shu,et al. Fuzzy controller design of micro-unmanned helicopter relying on improved genetic optimization algorithm [EB/OL]. [2021-03-15]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963819316256>.
- [12] 王婷婷,王宏志,刘清雪,等.遗传算法优化的无刷直流电机模糊 PID 控制器设计[J].吉林大学学报(理学版),2020,58(6):1421-1428.
WANG Tingting,WANG Hongzhi,LIU Qingxue,et al. Design of fuzzy PID controller for brushless DC motor optimized by DA [J]. Journal of Jilin University (Science Edition),2020,58(6):1421-1428.
- [13] 王春晨,吴太虎,徐新喜,等.基于改进遗传算法的气体混合控制系统的设计与仿真[J].液压与气动,2017,41(11):81-86.
WANG Chunchen,WU Taihu,XU Xinxi,et al. Design and simulation based on improved genetic algorithm for gas mixture control system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2017,41(11):81-86.
- [14] 欧阳名三,吴国芳.改进型自抗扰控制在局部通风机风速调节中的应用研究[J].工矿自动化,2019,45(7):73-79.
OUYANG Mingsan,WU Guofang. Application research on improved active disturbance rejection control in air speed regulation of local ventilator [J]. Industry and Mine Automation,2019,45(7):73-79.
- [15] 宋国庆,王书满,杨旭东.基于 T-S 模型的局部通风机风量模糊预测控制算法[J].南京理工大学学报,2017,41(5):591-595.
SONG Guoqing,WANG Shuman,YANG Xudong. Fuzzy predictive control algorithm of partial ventilator based on T-S model [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2017,41(5):591-596.