DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0022-06

基于遗传算法在反应釜模糊PID控制中的优化

任 明，汪志锋，徐 洁，王 跃

（上海第二工业大学 智能制造与控制工程学院，上海 201209）

摘 要：针对传统比例积分微分（proportional-integral-derivative，PID）温度控制系统不能够满足高精度温控系统的需求，搭建模糊PID控制系统。在对模糊PID控制器的设计中，由于从专家经验中获取到的隶属度函数与模糊规则会影响到控制系统的动静态稳定性，缺乏客观的一致性评价并且控制系统的调试过程也相对繁琐。针对上述问题，结合遗传算法对模糊PID控制器进行优化，首先通过离线遗传算法搜索最优的PID初值，将获取的PID控制参数添加到模糊PID控制器中，再根据在线遗传算法优化隶属度函数及模糊规则，通过仿真对比实验结果表明，该优化算法能够有效地提高模糊控制器输出参数增量与当前温控系统的适配度，使温控系统具有良好的鲁棒性、响应速度及抗干扰能力。

关键词：反应釜；遗传算法；模糊PID；温度控制

中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)06-0022-06

Genetic Algorithm Based Optimization in Reaction Kettle Fuzzy PID Control

REN Ming, WANG Zhi-feng, XU Jie, WANG Yue

(School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: For the traditional PID temperature control system can not meet the needs of high precision temperature control system, this paper builds a fuzzy-PID control system. In the design of fuzzy-PID controllers, the affiliation function and fuzzy rules obtained from expert experience affect the dynamic and static stability of the control system and lack objective consistency evaluation and the debugging process of the control system is relatively tedious. To address the above problems, this paper combines genetic algorithm to optimize the fuzzy PID controller. Firstly, the offline genetic algorithm searches for the optimal PID initial value, adding the obtained PID control parameters into the fuzzy-PID controller. Then optimizing the affiliation function and fuzzy rules according to the online genetic algorithm. The simulation and comparison experimental results show that the optimization algorithm can effectively improve the adaptability of the fuzzy controller output parameter increments to the current temperature control system. So that the temperature control system has good robustness, response speed and anti-interference ability.

Keywords: reaction kettle; genetic algorithm; fuzzy-proportional-integral-derivative; temperature control

0 引言

反应釜被广泛应用在化工生产、生产制造、医药、环保等多领域[1]，随着科学技术的快速发展，对反应釜温控系统的快速性和稳定性要求也越高。在工业检测中，温度传感器的校验需要在反应釜恒温系统中进行检测，反应釜的控温效果也会直接影响到产品质量[2]。

传统PID温度控制参数是固定的[3]，PID控制参数的选择往往通过经验获得，当目标温度发生变化时，同一参数无法控制被控物体稳定在不同的温度梯度，另外，温度控制系统容易受到控温环境的影响，会严重影响到温控系统的控温精度和速度[4-5]，对于有高精度要求的温控系统，传统的PID温度控制无法满足高精度温度控制的需求。

模糊PID温度控制具有较强的抗干扰性，通常模糊规则是根据专家经验获得的，依靠简洁、灵活、快速的参数整定，对PID控制参数实时调整[6]，从而满足智能化的控制目标。文献[7]针对传统PID控制效果不佳，设计了在线自适应模糊PID控制系统，但控制器参数依据经验并无有效的选取方法。文献[8]针对传统PID不能满足控制精度要求高的系统，设计了粒子群算法来寻优PID参数初值，但模糊控制器设计参数较多且主观性太强，难以实现最优控制。文献[9]针对模糊PID控制器中存在依赖专家经验的不足，设计了粒子群算法优化模糊控制器中量化因子和比例因子的方法，但隶属度函数与模糊规则仍从经验中获取。为了避免PID初值、模糊隶属度函数与模糊规则的获取依靠经验且参数确定烦琐的问题，能够寻找到适应当前系统的隶属函数及模糊规则显得尤为重要。研究发现，遗传算法是一种高效、全局搜索最优的启发式算法[10]。本文将遗传算法离线优化PID初值，将得

收稿日期：2023-09-20

到的PID初值赋值到系统后，采用改进遗传算法在线优化隶属度函数及模糊规则的方式，结合控制系统的仿真表明了该方法的有效性，较同类型研究具有更快的收敛速度，较好的鲁棒性且调节参数较少，可应用于实际工程中温度控制系统的PID参数整定。

1 反应釜系统模型分析

查阅文献可知，温度传感器的测量及实验数据的传递具有滞后性，反应釜的数学模型[11]可以用一阶惯性加纯滞后环节来描述，其系统传递函数表示为

$$G(s)=\frac{K}{Ts+1}e^{-\tau s} \tag{1}$$

式中，K为控制系统的开环增益，T为控制系统的时间常数，τ为系统的延迟时间常数，s为复变量。根据文献[12]给出的反应釜温控数学模型作为本控制系统的被控对象，传递函数为

$$G(S)=\frac{1}{49.89S+1}e^{-6.055} \tag{2}$$

2 遗传算法优化模糊PID控制器设计

2.1 反应釜模糊PID控制器

模糊PID控制器根据设计的模糊规则对PID参数实时调整，解决了传统PID无法调整固定值的不足，模糊控制模块由3部分组成，即模糊化、模糊推理、清晰化[13]。在该模糊PID控制器中，反应釜内的温度偏差e与温度偏差变化率ec被作为输入变量，PID参数增量ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d被作为输出变量。

2.1.1 输入输出变量的模糊化

选择语言变量{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}为模糊PID控制器中所有输入与输出变量的模糊集合[14]，为了简化模糊控制器的中的量化论域从而便于控制器的设置，将输入输出变量的量化论域取值都设置为[−3，3]，分析温控箱的温度的变化特点，输入变量e的基本论域取值为[−3，3]，则量化因子为Ke=1，相同方法可以得出其余输入输出变量的量化因子。

表1 模糊控制器输入输出变量量化因子表

输入输出变量	e	ec	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
基本论域	[-3,3]	[-1,1]	[-6,6]	[-0.15,0.15]	[-3,3]
量化论域	[-3,3]	[-3,3]	[-3,3]	[-3,3]	[-3,3]
量化因子	1	3	2	0.05	1

2.1.2 模糊推理

首先根据输入变量量化值在量化论域集合中找到两侧的子集，再根据模糊规则表，找到两子集对应输出变量的子集，通过线性或非线性隶属度函数来计算各输入子集的隶属度，进而可以推算出输出变量各个子集的隶属度。

模糊集合中的NM、NS、Z、PS、PM子集采用三角形隶属度函数，NB子集采用Z形隶属度函数，PB子集采用S形隶属度函数[15]。

2.1.3 模糊PID控制器的清晰化

清晰化是将模糊推理与具体输出量相对应，根据隶属度函数得到隶属度值，与模糊规则表查表得到的模糊量化值进行算法合成计算，得到K_p、K_i、K_d的增量[16]，与PID初始值累加输出PID控制的3个基本参数，如下表达式：

$$K_p=K_{p0}+K_{\Delta p}\Delta K_p \tag{3}$$

$$K_i=K_{i0}+K_{\Delta i}\Delta K_i \tag{4}$$

$$K_d=K_{d0}+K_{\Delta d}\Delta K_d \tag{5}$$

式中，K_p、K_i、K_d为控制器的实时控制参数，K_{p0}、K_{i0}、K_{d0}为PID初值，$K_{\Delta p}$、$K_{\Delta i}$、$K_{\Delta d}$为量化因子，ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d为模糊控制器的输出补偿增量。

2.2 遗传算法优化模糊PID控制方法

目前在模糊PID控制优化领域已经迭代出较多智能算法，其中遗传算法可以在没有初始信息的情况下寻找全局最优解，遗传算法优化的基本思路是对需要优化的参数进行编码，为了保证能够实现全局搜索，首先根据编码规则随机生成初始化种群，每条染色体通过适应度函数得到对应的适应度值，把适应度值中较大的作为优良的染色体基因，仿照自然遗传学规律，通过交叉与突变生成新的染色体基因，连续进化，经过多代遗传就可以得到全局最优的染色体基因，最终解码获得最优的参数。

首先该控制系统采用了遗传算法离线方式获取最优PID初值，再将最优PID初值赋值在线方式遗传算法系统中。本温度控制系统的整体结构图如图1所示。

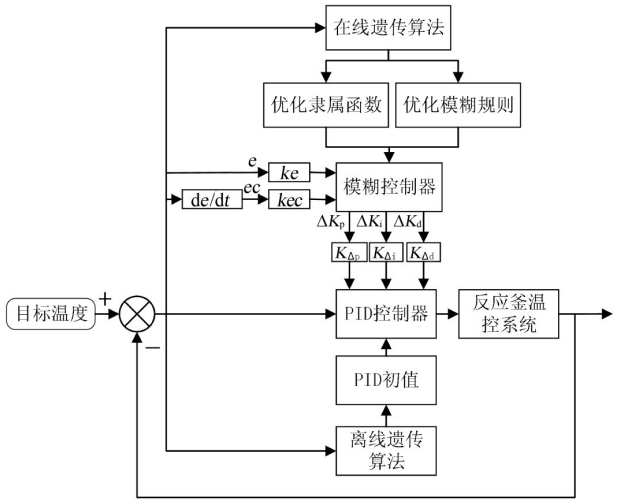


图1 温度控制系统的整体结构图

离线遗传算法是获取最优PID初值，PID初值的确定直接会影响到系统稳定性，即使模糊控制器不断进行PID修正，系统也很难快速稳定，从而导致系统的调节时间过

长、动静态特性较差。当进入到在线模式整定参数前，先采用遗传算法寻找系统在阶跃响应下的最优PID初值，将最优PID初值赋值到在线系统中，模糊PID在参数补偿中就会减少模糊PID控制器在论域范围内的调整时间，从而在更大程度上提高系统的控制性能。

在模糊PID控制系统中，使用在线遗传算法，迭代寻优隶属函数与模糊规则，通过基因种群中的每条染色体基因解码得到隶属函数及模糊规则，多代遗传最终就能够获取到全局最优的隶属函数与模糊规则表。图2为在线遗传算法优化的流程。

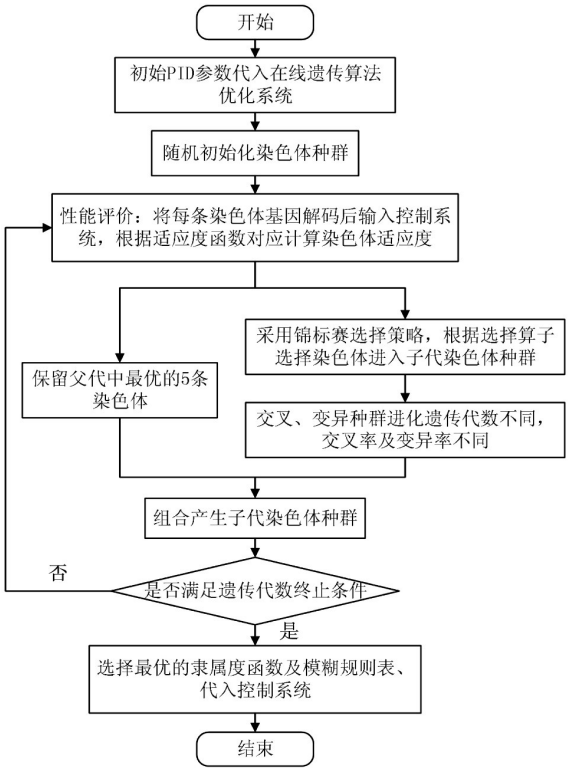


图2 在线遗传算法优化的流程

2.2.1 适应度函数及运行参数选取

遗传算法的实现关键是能够计算出各染色体适应度，染色体的选择直接受到适应度函数的选取的影响，本控制系统设计的目标是能够有较好的稳定性，并且要求调节时间短、超调小、抗干扰能力强，因此将ITAE指标作为适应度函数中的一个指标，在目标函数中也加入了调节时间，超调量作为评价系统的动静态指标，选用的目标函数表达式如下：

$$J = w_1 \int_0^t t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t + w_2 t_s + w_3\left|\sigma(t)\right| \tag{6}$$

式中，$e(t)$为系统误差，t_s为系统调节时间，$\sigma(t)$为超调量，w_1、w_2、w_3为权值，w_1=0.5，w_2=0.2，w_3=0.3，根据式(6)可以得出目标函数计算值越小，系统控制效果越优。遗传算法优化的方向是适应度增加的方向，因此将目标函数的倒数设置为适应度函数，在系统运行时发现适应度数值较小，不能明显反映适应度的变化情况，故进行线性变换，即：

$$F = \frac{1}{J} \times 100 \tag{7}$$

在控制系统运行的主要参数中，选取种群规模n=50、遗传代数$Maxgen$=100、初始交叉概率P_c=0.9、初始变异概率P_m=0.05。

2.2.2 染色体编码与解码

(1) 离线遗传算法编码与解码

编码：采用二进制符号集{0,1}进行二进制编码，通过Simulink搭建PID模型，根据临界比例法计算得到PID参数，预估参数取值为[0,10]，要求PID精度为10^{-3}，需要将参数范围划分成10×10^3等长区间，$2^{13}<10\times10^3<2^{14}$，故一个参数编码位数至少需要15位，3个参数编码需要42位二进制数进行表示，PID参数编码如图3所示。

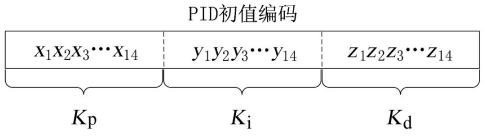


图3 PID参数二进制编码

解码：将每条染色体二进制数转换为十进制数，在Matlab中利用bin2dec()函数进行转换，将转换后的十进制数通过公式进行数据还原，即可得到PID参数，转换公式如下表示：

$$x' = \sum_{i=0}^{l-1} s_i \times 2^i \tag{8}$$

$$x = a + \frac{x'(b-a)}{2^l - 1} \tag{9}$$

式中，s_i为每位的二进制数，l为基因编码长度，a为参数范围最小值，b为参数范围最大值，x'为染色体十进制数，x

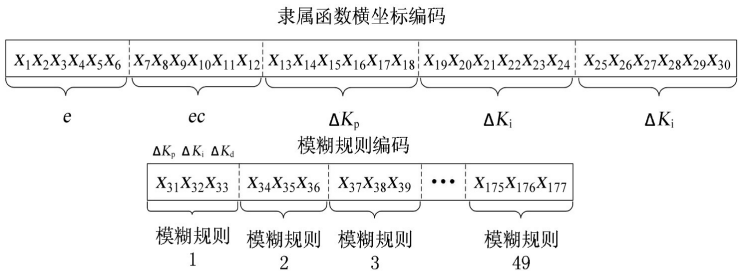


图4 在线遗传算法染色个体编码

为计算的参数值。

(2) 在线遗传算法优化编码与解码

在遗传算法中将隶属度函数与模糊规则对应编码拼接成一条染色体，其中前30位基因排列隶属度函数编码、后147位基因排列模糊规则编码，染色体个体编码表示如图4所示。

隶属函数横坐标编码：分别取NM、NS、PS、PM三角形函数的顶点横坐标为B、C、D、E，取NB左端点坐标为A，取PB右端点坐标为B，输入输出隶属度函数如图5所示。为了同模糊规则采用相同的编码方式，形成一条染色体，同样采用[1,7]整数进行编码。

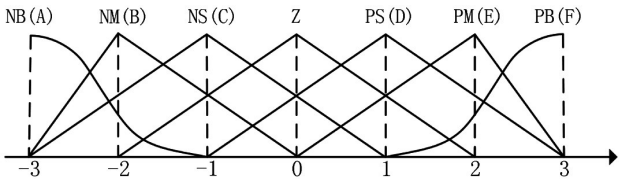


图5 输入输出隶属度函数

隶属度函数横坐标解码：需要将染色体基因的整数编码转换成输入输出基本论域[−3,3]中的坐标位置。列举隶属度函数为例，转换公式如下表示：

$$C=\frac{3}{7}x_3 \tag{10}$$

$$B=C+\frac{3}{7}x_2\left(1-\frac{1}{3}C\right) \tag{11}$$

$$A=B+\frac{3}{7}x_1\left(1-\frac{1}{3}B\right) \tag{12}$$

$$D=\frac{3}{7}x_4 \tag{13}$$

$$E=D+\frac{3}{7}x_5\left(1-\frac{1}{3}D\right) \tag{14}$$

$$F=E+\frac{3}{7}x_6\left(1-\frac{1}{3}E\right) \tag{15}$$

式中，x_1、x_2、x_3、x_4、x_5、x_6为误差e隶属函数对应的基因编码值，A、B、C、D、E、F为模糊子集NB、NM、NS、PS、PM、PB基本论域中横坐标位置，A、B、C点在坐标轴左侧，坐标位置取计算结果的负值。

模糊规则编码：模糊控制器有7个模糊子集，有49条规则，3个输出，模糊规则的编码长度为$49\times3=147$，将需要优化的49条模糊规则按照顺序进行编码，这样一条147个基因编码就代表一个染色个体。采用整数编码的方式，模糊集合{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}使用整数{1,2,3,4,5,6,7}进行对应编码，种群的基因变化范围设置为$K_{p_}$,$K_{i_}$,$K_{d_}$取值为[1,7]的整数，就可以对应模糊子集的隶属度值。

模糊规则解码：将染色个体中的后147个基因按照顺序排列成49行3列矩阵，每一行基因对应一条模糊规则，通过MATLAB中addrule( )函数向FIS结构添加模糊规则。

2.2.3 选择算子

基于锦标赛选择的方法作为选择算子，每组从父代种群中随机选取两条染色个体，计算各自对应的适应度数值，新种群在每组中选取适应度较高的染色个体，重复操作，直至新种群数目与父代基因数相同。

另外，采用了精英染色体保存策略，若父代全部基因参与到交叉变异中，随着遗传交叉变异，最优质的基因可能会被破坏，导致子代染色个体最优适应度值比父代低，进化没有朝着更高适应度值的方向发展，导致遗传代数增长，因此在选择进入到新种群时，保留父代中最优5条染色个体复制到新种群中，不进行染色体进化中的交叉和变异。

2.2.4 交叉及变异

交叉率、变异率若恒定不变，将导致寻优遗传代数增加，优质的染色个体存在被破坏的可能，进而导致进化速度缓慢。在不同的遗传代数中，为防止出现交叉导致优良基因不能够保留，随着遗传代数的增加交叉率与变异率进行动态调整，进化早期阶段，较大的交叉率与较小的变异率能够使基因进化速度加快，进化后期阶段，较小的交叉率与较大的变异率能够防止进入早熟[17]。本系统能够根据遗传代数进行实时调整交叉率及变异率，调整公式如下表示：

$$Pc^{(gen)}=Pc^{(0)}-\frac{0.4gen}{Maxgen} \tag{16}$$

$$Pm^{(gen)}=Pm^{(0)}+\frac{0.1gen}{Maxgen} \tag{17}$$

式中，gen为当前种群遗传次数，$Maxgen$为种群遗传代数。

交叉算子采用算术交叉方式，极大程度增加基因种群的多样性，从而保证基因种群能够进行全局搜索。随机且不重复从选择后的新基因种群中选出两条染色体，两条染色体进行乘子算术求和得出新种群。染色体交叉算子公式如下表示：

$$X_A^{t+1}=\lambda\cdot X_B^t+(1-\lambda)X_A^t \tag{18}$$

$$X_B^{t+1}=\lambda\cdot X_A^t+(1-\lambda)X_B^t \tag{19}$$

式中，λ为0−1之间的随机概率乘子。

变异算子使用的随机位置突变方式，在基因长度范围内随机生成变异位置，通过随机概率判断变异位置基因增加或者减小，概率与基因编码算术运算得到突变基因。染色体变异算子公式如下表示：

$$x^{t+1}=\begin{cases}\left\lceil 7-x^t\lambda\right\rceil, 1>\lambda\geq0.5\\ \left\lfloor 1+x^t\lambda\right\rfloor, 0<\lambda<0.5\end{cases} \tag{20}$$

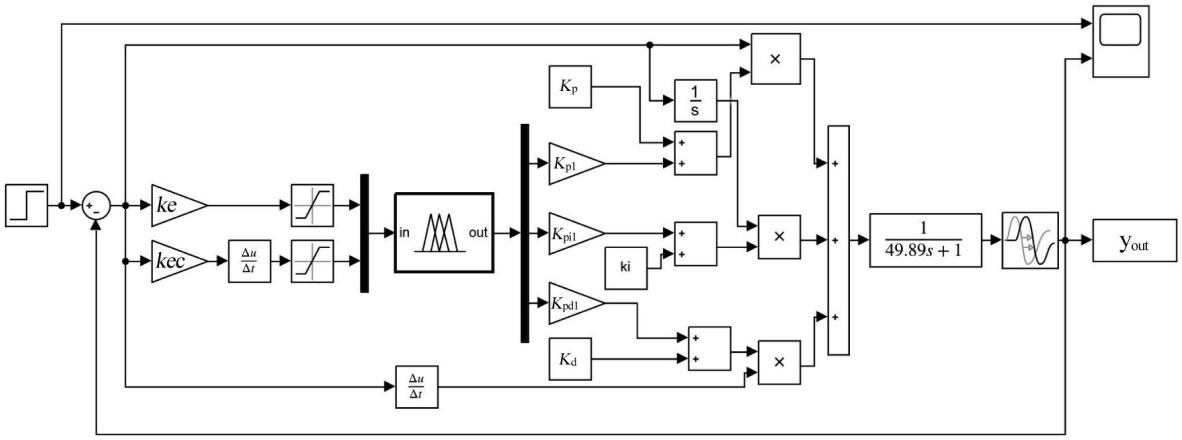


图6 温度控制系统仿真模型框图

式中，x为基因编码值。

3 遗传算法优化模糊PID控制仿真

3.1 基于Simulink的仿真系统搭建

控制系统的仿真模型由Simulink建立，用于优化算法的效果验证，并使用了一台示波器同时观测多种控制方式的数据，方便对优化算法控制效果进行比较。系统的控制仿真模型如图6所示。

3.2 温度控制系统仿真实验与分析

经过遗传算法优化解码得到2输入3输出模糊控制器的模糊规则表如表2所示。

表2 遗传优化后模糊控制器模糊规则表

	ec						
	4/5/4	3/4/3	3/4/4	4/4/4	5/4/5	4/5/3	5/5/5
	4/5/4	4/5/3	2/5/7	5/6/5	3/4/2	5/5/6	4/3/3
	5/5/4	4/4/4	6/4/3	5/4/3	4/5/3	5/6/3	4/4/4
e	4/3/6	3/5/6	5/3/1	3/6/4	5/7/4	4/5/4	4/4/4
	4/4/4	3/3/4	4/4/3	4/4/4	4/5/4	5/4/4	5/4/4
	4/3/4	4/4/4	4/4/4	4/5/4	4/5/4	4/5/5	4/5/4
	2/4/6	5/4/4	3/4/5	4/5/5	5/4/4	3/3/5	3/4/5

染色体解码后得到输入输出5种隶属度函数形状，以误差e为例的隶属度函数如图7所示，能够看出模糊子集中的“小”“中”“大”的顶点坐标顺序排列，满足模糊隶属函数顶点坐标的排列要求。

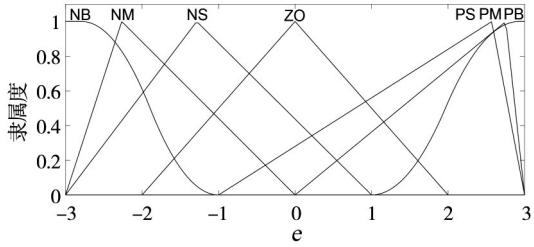


图7 误差e的隶属度函数

从图8中可以看出，随着遗传代数的增加，适应度函数呈上升趋势，且进化速度较快，在61代达到收敛，最优适应度值迭代过程中没有出现下降现象，也验证了上述选择算子中的精英染色体保存策略，证明该选择策略的有效性。

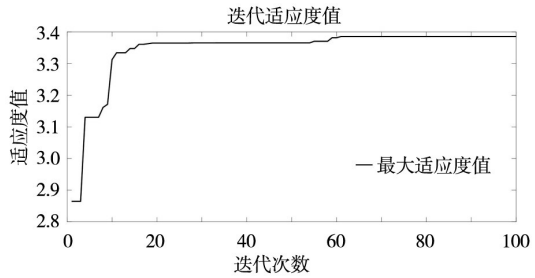


图8 适应度值变化曲线

经过离线遗传算法得到的PID最优初值，k_p=4.306，k_i=0.078，k_d=5.067通过给定系统单位阶跃输入，对比GA−Fuzzy−PID、Fuzzy−PID、GA−PID控制效果，从图9中可以看出GA−Fuzzy−PID快速性及稳定性明显优于Fuzzy−PID、GA−PID，调节时间分别为16.3 s、19.3 s、21.5 s，GA−Fuzzy−PID存在超调，超调量较小为1.2%，在可控范围内。

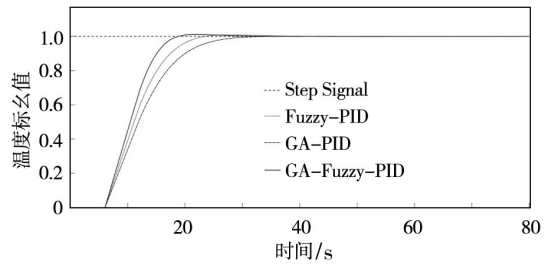


图9 阶跃输入控制效果对比

当系统运行到60 s稳定后，改变目标输入信号，如图10所示，待系统再次恢复稳定，不同控制系统的调节时间分别17.1 s、30.9 s、31.6 s，其中GA−Fuzzy−PID在改变目标输入后系统的跟随时间最短，能够看出GA−Fuzzy−PID有更优的快速性且基本无超调。

经过图9与图10的仿真结果比较，GA−Fuzzy−PID控制系统响应速度快、调节时间短、超调量小，具有较好的鲁棒性。

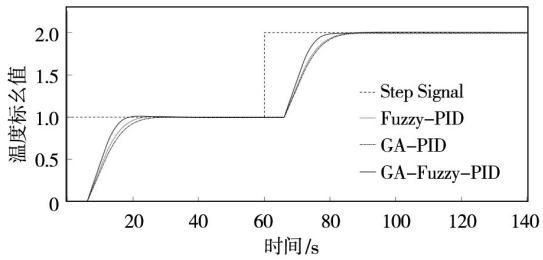


图10 改变输入控制效果对比

4 结束语

模糊PID控制器的输入变量采用误差与误差变化率，用于实时调节PID控制参数，并结合Simulink仿真对比，实验结果表明本研究遗传算法优化模糊PID控制系统在反应釜控制系统中具有卓越的动静态性能，控制效果显著提高。在系统运行稳定改变目标输入，系统输出无超调且在最短的时间达到稳态，与传统PID、模糊PID控制相比具有更好的快速性与稳定性。离线遗传算法简化PID初始参数整定过程，在线遗传算法通过全局搜索的方式，找到与系统匹配度最高的隶属度函数及模糊规则，故本文提出的优化方法有效地解决了模糊PID控制系统中初值、隶属度函数与模糊规则表难以确定的问题。

参考文献：

[1] 魏小宇，郑晟．运用灰色预测与模糊加权PID的反应釜温度控制[J]．重庆理工大学学报(自然科学)，2019，33(2)：82−86．

[2] 高晴，张莉，高田田，等．基于PCS7的反应釜炉温控制系统PID参数整定仿真与分析[J]．计算机与数字工程，2017，45(8)：1607−1610，1624．

[3] 彭梦迪，郑晟．高精度恒温箱温度控制系统的实现[J]．现代电子技术，2021，44(2)：9−12．

[4] Yuan Shuo，Zhao Cheng，Guo Lei．Uncoupled PID Control of Coupled Multiagent Nonlinear Uncertain Systems[J]．Journal of Systems Science&Complexity，2018，31(1)：4−21．

[5] 王彦勇．基于GA−FNN的模糊PID反应釜温度控制研究[J]．太原学院学报(自然科学版)，2022，40(2)：81−86．

[6] 刘桂杉，李明，王璐．基于模糊PID的麦冬干燥箱温度控制系统设计[J]．农机使用与维修，2022(8)：7−12．

[7] 王俊美．自适应模糊PID在反应釜温度控制中的应用[J]．工业控制计算机，2017，30(10)：47−48，50．

[8] 张峰，王强．基于模糊粒子群PID算法的温控系统研究[J]．电子测量技术，2022，45(13)：109−114．

[9] 周艳平，庄岩．一种粒子群模糊PID控制算法在温室中的应用[J]．计算机测量与控制，2020，28(8)：116−119．

[10] 乔林，刘颖，胡畔，等．基于遗传算法与模糊PID复合控制的电机调速研究[J]．微电机，2021，54(7)：92−98．

[11] 宋璐，卫亚博，冯艳平．基于模糊PID的温度控制系统的设计与仿真[J]．电子设计工程，2020，28(21)：51−55．

[12] 龚育林．基于模糊PID自适应整定参数的反应釜温度控制系统[J]．东莞理工学院学报，2021，28(1)：102−106．

[13] Coban M，Fidan M．Fuzzy Logic Based Tempera−Ture Control[C]//2019 3rd International Symposium on Multi−disciplinary Studies and Innovative Technologies(ISMSIT)．IEEE，2019：1−4．

[14] 汤伟，王帅，刘文波．基于模糊免疫算法的PID参数自整定及其应用[C]//2018中国自动化大会(CAC2018)论文集，2018：355−360．

[15] 张堂玉，龙祖强，许岳兵，等．基于限幅函数的永磁同步电机模糊PID调速控制系统[J]．衡阳师范学院学报，2021，42(3)：45−49．

[16] Xu J，Xiao L，Lin M．Application Of Fuzzy Pid Pos−ition Control Algorithm In Motion Control System Design of Palletizing Robot[J]．Security and Communication Networks，2022：1−11．

[17] 冯磊华，杨锋．基于改进遗传算法优化的气动盾形闸门模糊PID控制研究[J]．水利规划与设计，2017(12)：98−101．

作者简介：任明(1997—)，男，硕士研究生，研究方向：工业自动化控制、过程控制与仿真等。

通信作者：汪志锋(1970—)，男，博士，教授，研究方向：工业过程控制、过程监控与故障诊断等。