

Fuzzy PID Temperature Control System Based on a Genetic Algorithm

Hao Xuan¹ Chengze Li¹ Peiyuan Yang²

1. Tianjin Intelligent Manufacturing Branch of Offshore Petroleum Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300450, China
2. China Eastern Aviation Technology Co., Ltd. Sichuan Branch, Chengdu, Sichuan, 641400, China

Abstract

In recent years, in the field of industrial control in China, the application of PID control has accounted for more than 90%, especially in the field of temperature control. This paper expounds a fuzzy PID temperature control method based on genetic algorithm, by studying the control theory and method of fuzzy control, finding the most appropriate control factor according to its reasoning rules, and then conducting fuzzy PID control. This by MATLAB to the traditional PID control and PID control based on genetic algorithm and the results of the fuzzy PID control based on genetic algorithm comparison and simulation, can draw the following conclusion: fuzzy PID temperature control system based on genetic algorithm robustness is good, improve response speed, overshoot reduction, the system parameters meet the set requirements, the system is feasible.

Keywords

fuzzy PID control; genetic algorithm; temperature control; Matlab simulation

基于遗传算法的模糊 PID 温度控制系统

轩浩¹ 李成泽¹ 杨培园²

1. 海洋石油工程股份有限公司天津智能制造分公司, 中国·天津 300450
2. 东方航空技术有限公司四川分公司, 中国·四川 成都 641400

摘要

近年来,在中国工业控制领域,PID控制的应用已占到90%以上,尤其是在温度控制方面。论文阐述了一种基于遗传算法的模糊PID温度控制方法,通过研究遗传算法和模糊控制的控制理论和方法,根据其推理规则找到最合适的控制因子,然后进行模糊PID控制。本次通过MATLAB对传统PID控制和基于遗传算法的PID控制以及基于遗传算法的模糊PID控制的结果进行比较和仿真,可以得出以下结论:基于遗传算法的模糊PID温度控制系统鲁棒性较好,响应速度提高,超调减小,各系统参数均满足设定要求,系统可行。

关键词

模糊PID控制;遗传算法;温度控制;Matlab仿真

1 引言

温度控制系统在工业过程控制、家用电器和环境监测等领域中扮演着至关重要的角色。传统的PID控制器由于其简单的结构和良好的鲁棒性,被广泛应用于各类温度控制系统如锅炉水温控制、飞机空速管恒温控制等。然而,随着控制对象的复杂性增加,传统PID控制器在处理大滞后、大惯性和非线性系统时,其性能往往难以满足高精度控制的要求。为了弥补传统PID控制器的不足,模糊控制技术应运而生。模糊控制不依赖精确的数学模型,能够处理系统的不确定性和非线性特性,但其控制规则的设计和参数调整依赖经验,难以实现最优控制。为此,本研究提出了一种基

于遗传算法的模糊PID温度控制系统。遗传算法作为一种全局优化算法,通过模拟自然进化过程,能够有效优化模糊PID控制器的参数设置。论文首先介绍遗传算法和模糊PID控制的基本原理,然后设计了基于遗传算法的模糊PID控制系统,并通过MATLAB进行仿真验证,最后分析了仿真结果,展示了该系统在温度控制中的优越性能。研究表明,基于遗传算法的模糊PID控制系统在提高控制精度、响应速度和系统稳定性方面具有显著优势,为复杂工业温度控制提供了一种有效的解决方案。

2 基于遗传算法的模糊PID控制系统概述

2.1 遗传算法基本理论

遗传算法是基于生物界遗传机制和生物进化理论的一种自适应概率全局优化随机搜索算法。遗传算法是将问题视为种群中的个体或染色体并对其进行编码,模拟达尔文在自

【作者简介】轩浩(1997-),男,中国天津人,硕士,助理工程师,从事自动化研究。

自然界繁殖中的遗传和淘汰机制、生物进化中的交叉和遗传变异现象，根据目标适合度函数对后代进行评价，不断获得更好的种群，重复该过程直到满足设定的收敛性指标。

2.2 遗传算法基本操作步骤

①编码：将问题的解表示为染色体（Chromosome），可以使用二进制编码、实数编码等方式。例如，二进制编码可以表示为： $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ ，其中 $c_i \in \{0,1\}$ 表示第 i 个基因。

②初始化种群：随机生成初始种群 P ，种群大小为 N ， $P = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

③适应度评估：根据目标函数 $f(C)$ 计算每个染色体的适应度值： $F_i = f(C_i)$ ，其中， F_i 表示第 i 个染色体的适应度值。

④选择：根据适应度值选择染色体进行繁殖。常见的方法是轮盘赌选择，选择概率 p_i 为： $p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^N F_j}$ 。

⑤交叉：选择的染色体配对进行交叉操作。

⑥变异：对新生成的染色体进行变异操作，例如，二进制编码中，基因变异概率为 p_m ，基因 c_{ij} 变异为：

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 - c_{ij} & \text{如果 } \text{rand}(0,1) < p_m \\ c_{ij} & \text{其他情况} \end{cases}$$

⑦生成新种群：将新生成的染色体组成新一代种群 $P' = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_n\}$ 。

⑧迭代：重复适应度评估、选择、交叉和变异步骤，直到满足终止条件。终止条件可以是达到最大迭代次数 T_{max} 或适应度值不再显著提升。

⑨输出结果：最终输出适应度最高的染色体 C^* 作为问题的近似最优解， $C^* = \text{argmax} F_i$ ，其中 $C_i \in P$ 。

2.3 模糊 PID 控制基本理论

2.3.1 PID 控制基本理论

PID 控制器是一种经典的反馈控制器，通过比例（P）、积分（I）和微分（D）三个参数来调整控制系统的输出。其控制规律可以表示为：

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中， $u(t)$ 为控制量； $e(t)$ 为误差，即设定值与实际值之差； k_p 为比例系数； k_i 为积分系数； k_d 为微分系数。

PID 控制器通过调整这三个参数来达到控制目标，但在处理复杂系统时，参数的整定较为困难。

2.3.2 模糊控制基本理论

模糊控制是一种基于模糊逻辑的控制方法，通过模拟人类专家的控制策略来实现系统控制。其基本结构包括以下几个部分：

模糊化（Fuzzification）：将输入的精确量（误差和误差变化率）转换为模糊量。

模糊推理（Fuzzy Inference）：根据模糊规则库进行推

理，得到模糊控制量。

解模糊化（Defuzzification）：将模糊控制量转换为精确量，输出给控制系统。

2.3.3 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制器通过引入模糊逻辑来调整 PID 控制器的参数，实现对复杂系统的有效控制。其设计过程如下：

①确定输入输出变量。通常选择误差 $e(t)$ 和误差变化率 $\Delta e(t)$ 作为输入变量，输出变量为控制量 $u(t)$ 。

②定义模糊集合。将输入输出变量模糊化，定义模糊集合（如负大（NB）、负中（NM）、负小（NS）、零（ZO）、正小（PS）、正中（PM）、正大（PB））和隶属函数^[1]。

③构建模糊规则库。根据经验和专家知识，构建模糊控制规则库。例如：

如果 $e(t)$ 是正大（PB）且 $\Delta e(t)$ 是正大（PB），则 $u(t)$ 是负大（NB）。

如果 $e(t)$ 是零（ZO）且 $\Delta e(t)$ 是零（ZO），则 $u(t)$ 是零（ZO）。

④模糊推理。采用模糊推理方法（如 Mamdani 推理法），根据模糊规则库进行推理，得到模糊控制量。

⑤解模糊化。将模糊推理得到的模糊控制量通过解模糊化方法（如重心法）转换为精确控制量，输出给控制系统。

2.3.4 模糊 PID 控制算法

模糊 PID 控制器通过实时调整 PID 参数，实现对系统的精确控制。其控制算法如下：

$$\begin{aligned} k_p(t) &= k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i(t) &= k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d(t) &= k_{d0} + \Delta k_d \end{aligned}$$

其中， k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为初始 PID 参数； Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为模糊控制器输出的调节量。

3 基于遗传算法的温度控制系统模糊 PID 控制仿真

3.1 基于遗传算法的 PID 控制

3.1.1 基于遗传算法的 PID 参数优化

基于遗传算法的参数优化研究的具体方法如下：

①编码。遗传算法主要有实数编码和二进制编码两种编码方式。二进制编码能很好地展现基因的优良特性，但当系统变量连续时，二进制编码往往需要较长的编码长度才能保证其编码精度，而且不稳定，需要反复编码。实数编码可以缩短编码时间，克服二进制编码中的“汉明悬崖”缺陷。

②适应度函数。控制参数优化和遗传算法的关键在于拟合函数，因此它的设计对算法的优劣有着最直接的影响。一般从超调量、调节时间和最大动态偏差等特性指标来衡量最佳调节参数，这些指标可以从某些方面反映出控制器参数的优化调节效果。误差积分性能指标反映了系统调节动态过程的整体效果，通常采用下式作为优化目标函数。

$$J = \int_0^{\infty} (w_1|e(t)| + w_2u^2(t))dt + w_3 \cdot t_u$$

其中, w_1, w_2, w_3 为权重; $e(t)$ 为系统偏差; $u(t)$ 为控制器输出; t_u 为系统上升时间。

在优化控制器参数时, 系统的动态响应可能会出现超调。为了防止超调, 需要通过添加惩罚函数对上式进行改进, 即如果系统的动态特性出现超调, 则以超调量作为最优指标, 改进后的公式如下式所示。

当 $ey(t) < 0$ 时:

$$J = \int_0^{\infty} (w_1|e(t)| + w_2u^2(t) + w_4|e(t)|)dt + w_3 \cdot t_u$$

其中, w_4 为加权值, $w_4 > w_1$, $ey(t) = y(t) - y(t-1)$, $y(t)$ 为被控对象的输出。取 $w_1=0.999, w_2=0.001, w_3=2, w_4=100$, 当使用遗传算法求适度函数的最大值时, 可使用优化目标函数求最小值, 然后根据下式将优化目标函数转换为适度函数^[2]。

$$F = \frac{1}{J}$$

③交叉和变异算法。交叉算子的概率取 $P_c=0.9$, 变异算子的概率取 $P_m=0.033$, 交叉算子的概率取变异算子的概率^[3], 根据上述要求设计遗传算法各算子的概率, 然后控制

器参数进行优化调整。

其他参数:

种群中的个体数量, 取 $M=30$ 。

遗传算子的进化代数, 取 $G=200$ 代。

KP 在 $[0, 20]$ 范围内, KI, KD 在 $[0, 1]$ 范围内。

3.1.2 遗传算法的 PID 仿真

假设受控对象是一个二阶系统, 其传递函数为 $G(s) = \frac{20}{s^2 + 5s}$ 。在 MATLAB 中进行仿真。得出的结果如图 1、图 2 所示。

结果显示, $KP=2.596, KI=0.037, KD=0.041$, 可见遗传算法对二阶被控对象已经有了较好的 PID 控制效果, 但由于遗传算法搜索过程的随机性, 可能会产生不同的 KP、KI、KD, 使得 PID 控制效果较弱。因此, 接下来将引入模糊 PID 控制来减少误差。

3.2 模糊 PID 控制仿真

在 MATLAB 中创建 FIS 编辑器, 添加输入和输出变量, 分别命名为 e、ec、kp、ki、kd, 设置隶属函数 (本次仿真使用三角形隶属函数)、各变量范围、模糊规则。

模糊控制器参数设置见图 3。

通过模糊控制器输出, 得到模糊 PID 各参数为 $e=0.05, ec=1.5, kp=0.229, ki=0.0231, kd=0.229$ 。

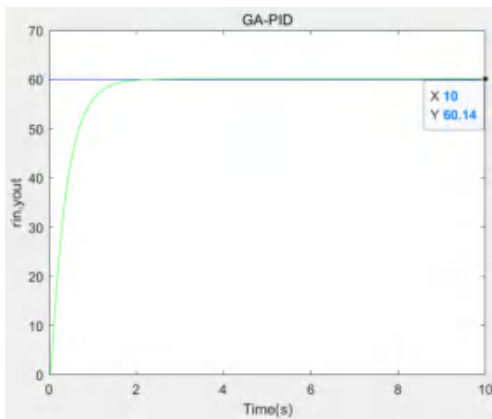


图 1 遗传 PID 系统的功能图像

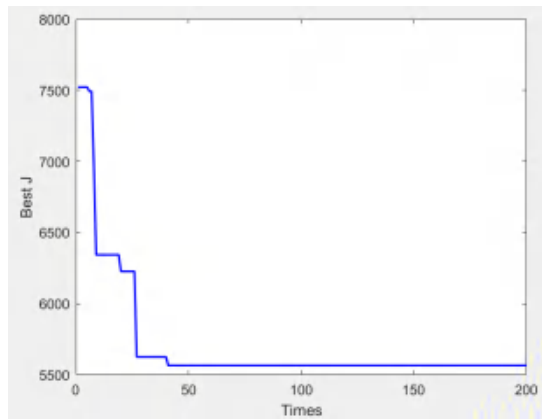


图 2 遗传 PID 系统的 BestJ 图像

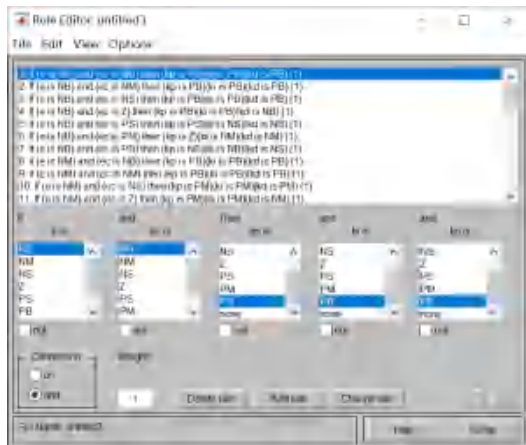
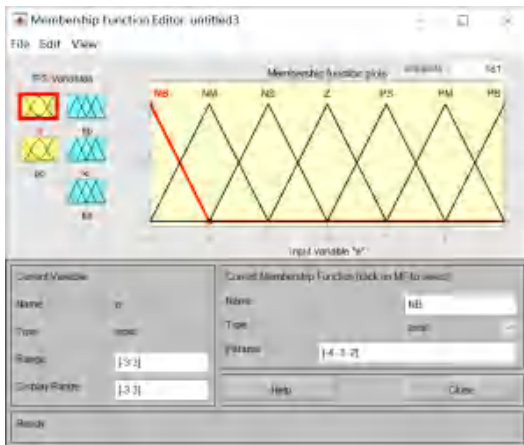


图 3 模糊控制器参数设置

3.3 遗传算法的模糊 PID 控制仿真

模拟示例对象为 $G(s) = \frac{20}{s^2 + 5s}$

模糊 PID 控制中的 KP、KI 和 KD 的初始值由遗传算法计算得出。

Simulink 仿真图形见图 4。

Simulink 仿真中的 PID 控制参数为：KP=6、KI=3、KD=2。

Simulink 仿真中的遗传 PID 控制参数为：KP=2.596，KI=0.037，KD=0.041。

运行仿真结果，如图 5 所示。

通过使用 simulink 中的线性分析工具，我们可以得出结论：

在 PID 控制中，超调为 9.82%，稳定时间为 6.09s。

在遗传 PID 控制中，超调为 1.25%，稳定时间为 8.65s。

在遗传-模糊 PID 控制中，没有超调，稳定时间为 4.04s。

从图中可以看出，遗传 PID 和遗传-模糊 PID 的步长曲线明显优于传统 PID。传统 PID 步长曲线的超调大，振荡明显，进入稳态的时间长。遗传 PID 降低了超调，但进入稳态的时间较长。遗传-模糊 PID 消除了超调，进入稳态的时间较短。从结果来看，遗传-模糊 PID 的性能最佳。

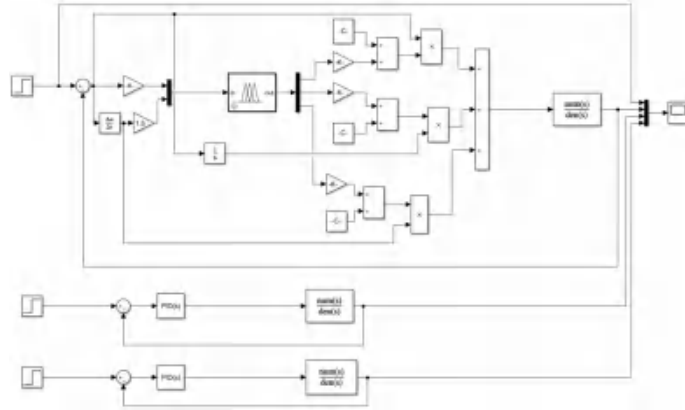


图 4 Simulink 仿真图形

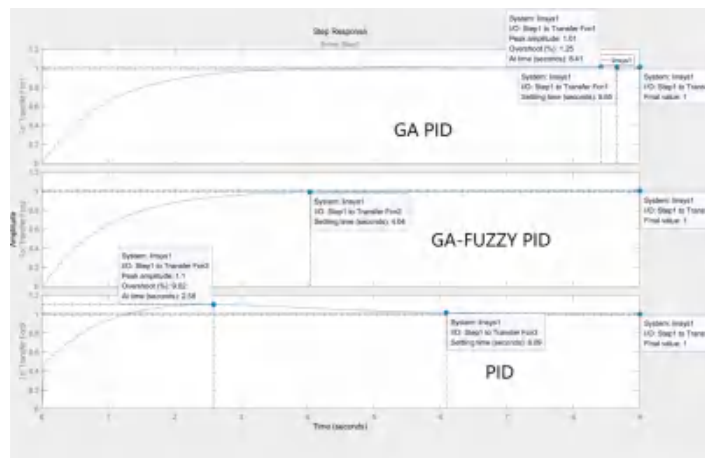


图 5 各 PID 控制数据

4 结语

论文的控制对象是温度控制系统，我们针对传统温度控制系统算法的优缺点，利用模糊控制和遗传算法的优点对其进行改进，设计了一套遗传算法模糊 PID 控制系统，并对其进行了 Matlab 仿真研究，得出以下结论。

温度控制具有变化快、难测量的特点，我们根据其特点分析了传统 PID 控制算法、模糊 PID 控制算法和遗传 PID 控制算法的优缺点，确定采用遗传算法模糊 PID 控制能更好地控制温度。

在仿真软件 Matlab 中，我们使用 Simulink 工具进行了遗传算法模糊 PID 仿真。结果表明，采用我们的遗传算法模糊 PID 控制温度时，系统超调可以有效降低，动态性能非常好。

参考文献

- [1] 张博.基于模糊PID的控制器研究[J].软件导刊,2010(1):2.
- [2] 徐权.基于遗传算法优化的汽车电泳涂装输送用混联机构的分数阶PI-λD-μ控制[D].江苏大学[2024-07-17].
- [3] 李树青.基于遗传算法的PID参数的优化控制策略[J].自动化博览,2013(3):4.