



Genetic Optimization Fuzzy PID Control of Pneumatic Servo System of Electric Proportional Valve

Weina Han, Kuan Ren, Jinhong Chen and Xiangjie Zhao

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 18, 2022

电气比例阀气压伺服系统的遗传优化模糊PID控制

韩伟娜, 任宽, 陈锦宏, 赵翔杰

(北华航天工业学院 机电工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 针对气压伺服系统模糊PID控制器模糊因子的选取依赖专家经验的问题, 利用遗传算法的全局优化能力, 提出一种基于遗传算法优化模糊控制器模糊因子的模糊PID控制器。对电气比例阀进行数学建模, 并对气体流量的数学分析, 构建了相应的传递函数。经过simulink仿真, 可知优化后的模糊PID控制器具有更快的响应速度, 更小的超调量。通过搭建半实物实验平台, 进一步验证优化后的模糊PID控制器具有更好的稳态性能。

关键词: 气压伺服系统; 模糊PID; 遗传优化; 模糊因子

中图分类号: TH138

Genetic Optimization Fuzzy PID Control of Pneumatic Servo System of Electric Proportional Valve

HAN Wei-na, REN Kuan, CHEN Jin-hong, ZHAO Xiang-jie

(College of mechanical and electrical engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, Hebei, 065000)

Abstract: Aiming at the problem that the selection of quantization factor and scale factor in fuzzy PID control of pneumatic servo system depends on experience, a fuzzy PID controller using genetic algorithm to optimize the fuzzy factor of fuzzy controller is proposed by using the global optimization ability of genetic algorithm. Through the mathematical modeling of the electrical proportional valve, as well as the mathematical analysis of the gas flow, the relevant transfer function is built. Through Simulink simulation, the fuzzy PID controller optimized by genetic algorithm has faster response speed and smaller overshoot compared with the fuzzy PID controller. By building a hardware in the loop experimental platform, it is further verified that the optimized fuzzy PID controller has better steady-state performance.

Key words: Pneumatic servo system; Fuzzy PID; Genetic optimization; The fuzzy factor

0 引言

气压传动具有低成本、节能、无污染、结构简单的特点, 而伺服控制系统可以精确复现某个过程, 气压伺服系统以压缩空气为工作介质, 具备了两者的特点, 实现对系统的精准控制。因此, 其在工业自动化中的应用越来越广泛。由于气体具有压缩性、黏性及电气比例阀阀口处非线性的流动和摩擦力的影响等, 气压伺服系统是一个复杂的非线性系统, 因此传统固定参数PID控制不能满足系统的高精度控制^{[1]-[2]}。北京理工大学的史玲玲等人利用可变增益的滑模控制器对空间机器人轨迹的控制实现了更高的运动精度控制和更快的误差收敛速度^[3]。长春理工大学的徐祥将分数阶PD控制器与自抗扰的线性扩张状态观测器相结合, 实现了对无人机姿态的抗干扰能力强、调节速度快等控制效果^[4]。广州理工学院的陈婵媛等人利用遗传算法改进神经网络实现对合间隙串联机器人的误差控制^[5]。航空工业飞机强度研究所的周挺结合遗传算法和BP神经网络算法, 实现了对气压伺服系统的系统辨识^[6]。模糊控制可以根据系统的响应情况进行控制器参数的实时调节, 不需要对系统进行准确的数学建模, 因此对复杂系统具有很好的适应能力。

由于模糊控制的模糊因子选取, 主要依赖于经验, 主观性明显, 而遗传算法具有强大的全局优化能力^{[7]-[8]}。因此本

文应用遗传算法对模糊因子进行优化, 设计一种基于遗传算法优化的模糊PID控制器, 该控制器可以满足电气比例阀气压伺服系统的精确控制要求。

1 气压伺服系统模型的建立

搭建的气压伺服系统的结构如图1所示。系统的工作原理为: 通过气源产生的压缩空气为系统提供所需的工作压力; 气动三联件可以干燥气源产生的压缩空气, 并维持气压的稳定; 电气比例阀在接收到控制系统的指令后, 调节输出压力; 控制系统根据压力传感器采集的压力, 计算额定压力与反馈压力之差, 根据采用的算法策略对电气比例阀输出控制信号, 实时调节比例阀的动作, 实现对给定气压的控制。

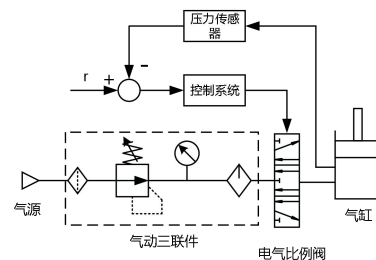


图1 气压伺服系统结构图

Fig.1 Structure diagram of pneumatic servo system

1.1 电气比例阀力学建模

电气比例阀是通过控制电压改变线圈电流的大小，从而控制洛伦磁力带动阀芯移动，改变阀口面积的大小，从而控制出口气压和流量。根据牛顿第二定律，电气比例阀力学平衡方程：

$$m\ddot{x} = kU - Ap - k_s(x + x') - b\dot{x} - F \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

- m -阀芯质量
- x -弹簧压缩量
- k -比例阀电压-力转换系数
- U -比例阀控制电压
- A -阀芯有效面积
- p -比例阀出口压力
- k_s -液动力与反馈弹簧的等效刚度
- x' -比例阀的初始压缩量
- b -阀芯与套筒间的粘性阻尼系数
- F -滑动摩擦力

对式 1 进行拉氏变换，可得传递函数为

$$\frac{X}{U} = \frac{ks}{ms^3 + k_s s^2 + bs + Ap + F \operatorname{sgn}(\dot{x}) + k_s x'} \quad (2)$$

带入本系统的电气比例阀参数，传递函数为

$$\frac{X}{U} = \frac{2.78s}{0.1s^3 + 0.12s^2 + 14s + 11.37} \quad (3)$$

1.2 电气比例阀流量建模

由 Sanville 流量公式^[9]可知，电气比例阀的气体流量 G 为：

$$G = \begin{cases} c_q w x P_s \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{k}{k-1} \left(\left(\frac{P}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} & (0.528 \leq \frac{P}{P_s} \leq 1) \\ c_q w x P_s \sqrt{\frac{2}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{k}{k+1}} & (0 \leq \frac{P}{P_s} \leq 0.528) \end{cases} \quad (4)$$

- c_q -流量系数
- w -比例阀开口面积梯度
- x -阀芯位置
- P_s -阀芯入口处压力
- P -阀芯出口处压力
- T -气体温度
- R -气体常数
- k -气体绝热系数

对于本系统，气腔内压强大约 4bar，带入相应的参数后，阀门流量模型为：

$$G = 0.00002xP_s \quad (5)$$

1.3 气密腔建模

假设所用的压缩气体为理想气体，忽略机械衔接处的气体泄露，假定气密腔内的温度和压力是均匀的，在任意时刻，腔内各点的状态是一样的。根据理想气体状态方程 $pV = mRT$,

对其平衡位置进行求导：

$$\dot{p}V_0 + p_0\dot{V} = \dot{m}RT_0 + m_0R\dot{T} \quad (6)$$

式中： p, V, m, T 分别为气密腔内部气体的压力、体积、质量和温度， p_0, V_0, m_0, T_0 分别为气密腔内部初始时刻气体的压力、体积、质量和温度。

根据文献^[9]的研究，可知，气密腔的实际模型可表示为：

$$\dot{p} = \frac{nRT_0}{V_0} \dot{m} - \frac{np_0}{V_0} \dot{V} \quad (7)$$

其中， $1 \leq n \leq k$ 。

本系统为压力试验台，为工件成品进行加压动作，既气密腔的体积不变，因此有：

$$\dot{p} = \frac{nRT_0}{V_0} \dot{m} \quad (8)$$

带入相关参数并进行拉氏变换后，本系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{3.132}{s + 3.132 \times 10^{-4}} \quad (9)$$

2 遗传算法优化模糊 PID 控制器的设计

模糊 PID 控制器 (FPID) 可以实现 PID 参数的自整定功能。FPID 可以对 PID 参数进行在线调节，使系统具有较好的稳定性、鲁棒性以及动态性。而模糊 PID 控制器的量化因子与比例因子的选取主要依靠专家经验，缺乏客观性，因此设计了一种基于遗传算法优化的模糊 PID 控制器 (GFPID)^{[10]-[12]}，通过遗传算法全局寻优能力对 GFPID 的量化因子和比例因子进行优化，其结构如图 2 所示。

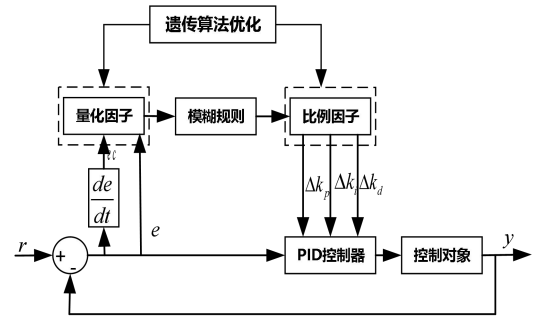


图 2 GFPID 控制器结构图

Fig.2 Structure diagram of gfpid controller

将目标参数 r 输入 GFPID 控制器，遗传算法对模糊控制器的模糊因子进行优化后，经过 GFPID 控制器的调控后，输出实际参数 y 。以系统的误差 e 及误差变化率 ec 为模糊控制器的输入，以 PID 参数的增益量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 为输出，PID 控制器的各参数为：

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (10)$$

其中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 GFPID 控制器的比例、积分、微分系数。 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 分别为 GFPID 控制器的比例、积分、微分环节的初始系数。

2.1 模糊控制器的设计

模糊控制器以系统误差 e 、误差变化率 ec 为输入量, 以

PID 参数增量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为输出量, 设输入量与输出量的模糊论域均为 $[-6, 6]$, 以 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 表示输入量与输出量的模糊子集, 隶属度函数选取三角形隶属度函数。

考虑系统的动态响应与稳态误差要求, 制定相应的模糊控制规则。规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy Rules

$\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB/ZO/PS	PB/ZO/NS	PM/ZO/NB	PM/ZO/NB	PS/ZO/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
	NM	PB/ZO/PS	PB/ZO/NS	PM/ZO/NB	PS/PS/NM	PS/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
	NS	PM/ZO/ZO	PM/ZO/NS	PM/PS/NM	PS/PM/NM	ZO/PS/NS	NS/ZO/NS	NS/ZO/ZO
	ZO	PM/ZO/ZO	PM/ZO/NS	PS/PS/NS	ZO/PB/NS	NS/PS/NS	NM/ZO/NS	NM/ZO/ZO
	PS	PS/ZO/ZO	PS/ZO/ZO	ZO/PS/ZO	NS/PM/ZO	NS/PS/ZO	NM/ZO/ZO	NM/ZO/ZO
	PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/PS	NM/PS/PS	NM/ZO/PS	NM/ZO/PS	NB/ZO/PB
	PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/ZO/PM	NM/ZO/PM	NM/ZO/PM	NB/ZO/PS	NB/ZO/PB

2.2 遗传算法的优化

遗传算法可以全方位的搜索参数变量空间, 在遗传算子的作用下, 可以对参数变量空间的不同方位同时进行采样计算。通过交叉算子, 遗传算法可以实现期望值最高的空间内进行采样计算, 而变异算子可以避免遗传算法陷入局部最优。因此遗传算法广泛应用于各种控制器的参数优化问题中。针对模糊控制器中模糊因子的确定无依据的问题, 本文提出通过遗传算法对模糊因子进行在线整定, 直至得到符合要求的模糊因子。

遗传算法流程如图 3 所示, 将所研究的问题的解集定义为种群, 首先通过编码对种群进行初始化, 通过适应度函数评估当前种群的个体优劣, 然后利用选择算子选取当前种群中适应度较高的个体进入下一代进行计算。然后通过交叉和变异产生新的种群, 对新种群进行初始化和适应度评估, 如果新种群内存在符合要求的个体, 算法结束, 否则重新重复上述过程。

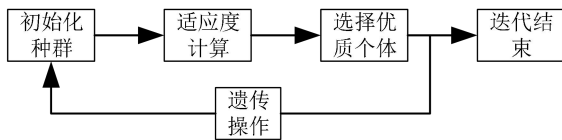


图 3 遗传算法流程图

Fig.3 Genetic algorithm flow chart

本文所设计到的模糊因子有模糊控制器的输入量系统的偏差 e 、系统偏差变化率 ec , 以及模糊控制器的输出量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的量化因子。所设计到的模糊因子的上下限如表 2 所示。

表 2 优化参数的上、下限值

Tab.2 Upper and lower limits of optimization parameters

模糊因子	下限	上限
e	0	3
ec	0	3
k_p	0	3
k_i	0	3
k_d	0	3

(1) 个体初始化

根据模糊因子的上下限生成一个 1×5 的矩阵, 以该矩阵表示一个个体, 其内元素分别表示 e 、 ec 、 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊因子。整个遗传算法过程内, 种群规模设定为固定的 100。

(2) 适应度函数的选择

适应度函数的值表示生成的个体对于当前所需解决问题的合适程度, 因此适应度函数值高的个体说明控制效果良好, 具有更高的概率遗传到下一代。为了得到适合本系统的参数最优值, 且考虑到系统的响应速度及稳态性能, 因此以积分时间绝对误差为目标函数, 从而本系统采取的适应度函数为:

$$F = 1 - \int_0^T t |e(t)| dt \quad (11)$$

其中 $e(t)$ 为 t 时刻的系统偏差。

(3) 遗传算子的操作

选择算子选择最佳个体保存法, 将当前种群具有高适应度的个体保存到下一代, 以确保遗传算法终止后群体里有历代高适应度的个体。具体操作如下:

(a) 计算初始种群个体的适应度值, 并按从大到小的顺序对个体进行排列;

(b) 对下一代种群个体进行适应度计算，并按从大到小的顺序进行排序；

(c) 将第二代 $m/2$ 个个体替换为第一代前 $m/2$ 个个体，并重新进行排序；

(d) 选择算子的操作重复上面步骤。

交叉算子采取适用于实数编码的算术交叉中线性交叉的方法。即两个个体为 $A(n)$ 与 $B(n)$ 的父代进行算术交叉产生的两个子代新个体为：

$$\begin{cases} A(n+1) = \alpha A(n) + (1-\alpha)B(n) \\ B(n+1) = \alpha B(n) + (1-\alpha)A(n) \end{cases} \quad (12)$$

其中 $A(n)$ 与 $B(n)$ 为从当代种群中选择的用于交叉操作的父代， $A(n+1)$ 与 $B(n+1)$ 为通过交叉生成的两个子体， α 为 $[0, 1]$ 内产生的随机数。

变异算子采用均匀变异操作，用适合本系统的某一范围内均匀分布的随机数，以一定概率替换相应基因位点上的原有值，生成下一代个体。当选择变异的父代为 $x(n)$ ： $[x_1, \dots, x_k, \dots, x_n]$ ，当其内元素 x_k 进行变异时，则产生的子体为 $x(n+1)$ ： $[x_1, \dots, x_k + \beta, \dots, x_n]$ 。其中：

$$x_{k \min} \leq x_k + \beta \leq x_{k \max}$$

$x_{k \min}$ 为所对应变量的下限值， $x_{k \max}$ 为所对应变量的上限值。

(4) 终止条件

遗传算法可以以最大迭代次数与适应度函数值的判别分别来作为算法终止条件，经过综合考虑，本系统以最大迭代次数作为算法的终止条件。当算法运行到最大迭代次数时，本系统终止优化，并输出历代所产生的最优个体。

综上，本系统的种群规模为 100，交叉率为 0.8，变异率为 0.01，最大迭代次数为 100。

遗传优化模糊 PID 控制系统的具体流程图如图 4 所示。通过对模糊因子的编码，运行控制系统得到相应的适应度值后，根据终止条件判断是否继续进行优化，当不满足条件时，对个体进行遗传操作，生成新的种群，并继续上述操作，直至满足要求。终止条件为迭代 100 次。

模糊 PID 的模糊因子经过遗传算法优化后的，其进化后结果如图 5 所示。由图 5 可知，当前函数值是不断下降的，说明迭代结果越来越优越。

3 仿真及实验分析

3.1 仿真分析

在 MATLAB 中搭建 simulink 仿真模型，分别以阶跃信号、正弦信号对 FPID 系统、GFPID 系统进行激励，结果如图 6、7 所示。

由图 6 可知，在阶跃信号的激励下，GFPID 控制下的系统的上升时间较 FPID 控制下的系统更短，具有更好的响应速度，稳态时间提前了约 0.5s，既 GFPID 控制系统的响应更快。由图 7 可知，在正弦信号的激励下，控制系统的超调均发生于

控制信号的峰值时刻，FPID 控制系统的超调量约为 0.15，GFPID 控制系统约为 0.1。在正弦信号的激励下，GFPID 控制系统的超调量。

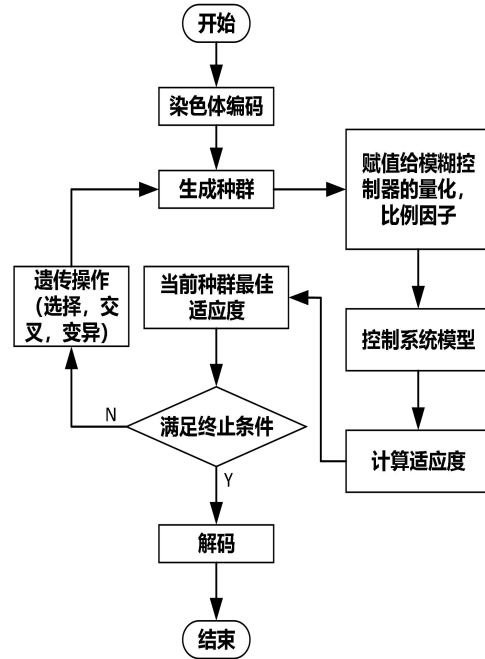


图 4 遗传算法优化模糊控制器流程图

Fig. 4 Flow chart of genetic algorithm optimization fuzzy controller

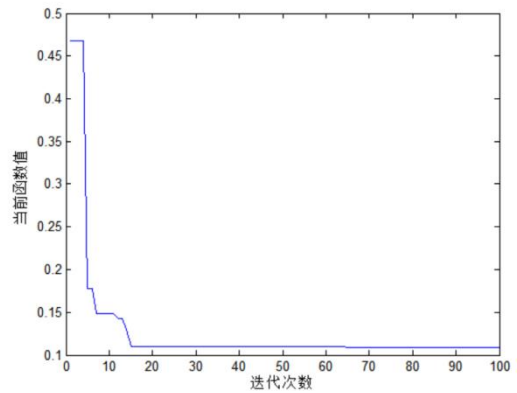


图 5 遗传算法优化结果

Fig. 5 Optimization results of genetic algorithm

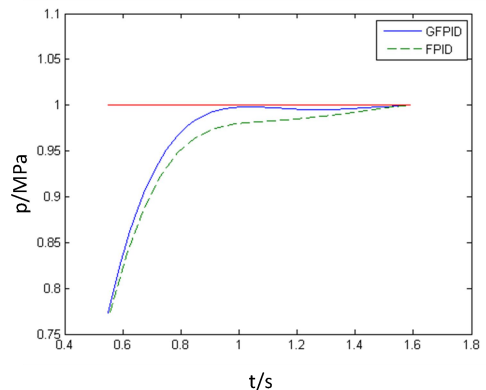


图 6 GFPID 与 FPID 对阶跃信号的响应

Fig. 6 Response of GFPID and FPID to step signal

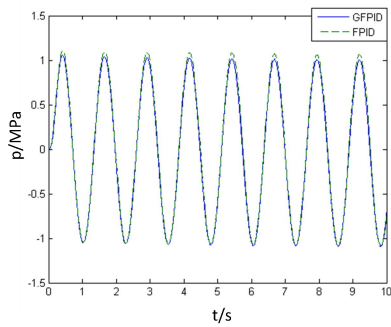


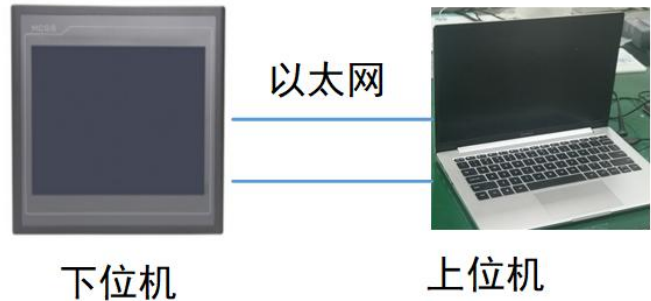
图7 GFPID 与 FPID 对正弦信号的响应

Fig.7 Response of GFPID and FPID to sinusoidal signal



图8 电器比例阀气压伺服系统半实物测量平台

Fig.8 Hardware in the loop measurement platform of pneumatic servo system of electric proportional val



4 总结

由于电气比例阀气压伺服系统的模糊 PID 控制器的比例因子和量化因子的选取取决于专家经验，为摆脱这一限制，本文提出一种基于遗传算法优化的模糊 PID 控制器。通过对电气比例阀气压伺服系统搭建 simuLink 仿真模型，初步验证了 GFPID 控制系统的稳态性能，并结合某压力实验台及气压伺服系统的工作原理搭建了半实物实验平台，进一步验证了 GFPID 控制器的稳态性能。

比较仿真结果与半实物实验平台的结果，系统的超调量有明显的改进，说明通过遗传算法优化模糊 PID 参数的方法是可行的。

参考文献：

[1] 吴昌文, 朱玉川, 高强. 高速开关阀控气动位置伺服系统的模糊自适应 PID 控制[J]. 液压与气动, 2021, 45(03): 47-53.

(Wu Changwen, Zhu Yuchuan, Gao Qiang. Fuzzy adaptive PID control of high speed on-off valve controlled pneumatic position servo system [J]. Chinese Hydraulic & pneumatic, 2021, 45 (03): 47-53.)

[2] Ren Hai-Peng, Jiao Shan-Shan, Li Jie, Deng Yi. Adaptive neural

在初始参数相同的情况下，分别采集 GFPID 控制系统与 FPID 控制系统对幅值为 0.5MPa 的阶跃信号的响应数据，得到的响应曲线图如图 9 所示。

通过对阶跃信号的响应实验结果分析可知，在初始参数相同的情况下，相对于 FPID 控制系统，GFPID 控制系统具有较小的超调量，两类控制系统的稳态误差无明显变化。

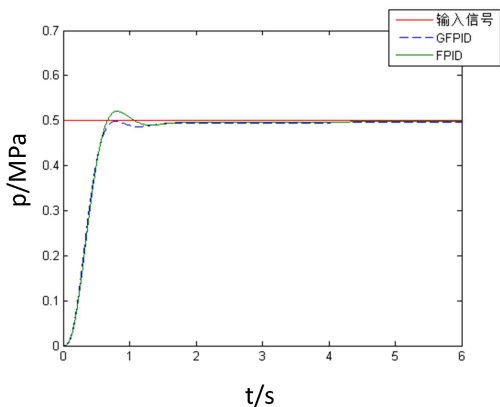


图9 阶跃实验曲线

Fig.9 Step test curve

network control of pneumatic servo system considering state constraints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162.

[3] 史玲玲, 姚鹤, 金鑫, 李朝将. 空间机器人的可变增益滑模控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(07): 99-107+115.

(Shi Lingling, Yao he, Jin Xin, Li Chaojiang. Variable gain sliding mode control method for space robot [J]. Journal of Harbin Institute of technology, 2021, 53 (07): 99-107 + 115.)

[4] 徐祥. 基于分数阶自抗扰的无人机姿态控制方法研究[D]. 长春理工大学, 2018.

(Xu Xiang. Research on UAV attitude control method based on fractional active disturbance rejection [D]. Changchun University of technology, 2018.)

[5] 陈婵媛, 杨丽新, 张德福, 肖桂英. 基于神经网络的含间隙串联机器人误差控制仿真研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(09): 34-40+50.

(Chen Chanyuan, Yang Lixin, Zhang Defu, Xiao Guiying. Simulation Research on error control of series robot with clearance based on neural network [J]. Machine Tool&Hydraulic, 2021, 49 (09): 34-40 + 50.)

[6] 周挺, 程华, 张今朝. 基于 GA-BP 神经网络的气压伺服系统辨识研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(06): 42-46.

(Zhou Ting, Cheng Hua, Zhang Jinchao. Identification of pneumatic servo system based on GA-BP neural network [J]. Machine tool and hydraulic, 2021, 49 (06): 42-46.)

[7] Ti Yan, Wang Rong, Song Tinglun, Zhao Wanzhong. WITHDRAWN - Administrative Duplicate Publication: The study of a unified driver model controller based on fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and internal model control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2021, 235(7).

[8] 李珊珊, 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(03): 162-167.

(Li Cuicui, Yi Wenjun, Guan Jun, Yin Hongqiao. Fuzzy PID control of electric actuator system based on genetic algorithm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42 (03): 162-167.)

[9] 于洋. 气浮台垂向控制系统与上平台调节系统设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.

(Yu Yang. Design of vertical control system and upper platform regulation system of air flotation platform [D]. Harbin University of technology, 2020.)

[10] 王婷婷, 王宏志, 刘清雪, 胡黄水, 王出航. 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(06): 1421-1428.

(Wang Tingting, Wang Hongzhi, Liu Qingxue, Hu Huangshui, Wang chuhang. Design of fuzzy PID controller for brushless DC motor

optimized by genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University (SCIENCE EDITION), 2020, 58 (06): 1421-1428.)

[11] 王美刚, 白建云. 基于遗传算法优化的双回路模糊控制倒立摆系统[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 92-97.

(Wang Meigang, Bai Jianyun. Double loop fuzzy control inverted pendulum system based on genetic algorithm optimization [J]. Science, technology and engineering, 2018, 18 (13): 92-97.)

[12] 张磊. 基于遗传算法优化的水下机器人路径跟踪模糊控制技术研究[D]. 浙江大学, 2017.

(Zhang Lei. Research on fuzzy control technology of underwater vehicle path tracking based on genetic algorithm optimization [D]. Zhejiang University, 2017.)

[13] 黄康文, 秦训鹏, 詹军, 余勇, 吴峰, 苗地, 杨世明. 重载 AGV 液压转向模糊 PID 控制[J]. 液压与气动, 2021, 45(07): 108-115.

(Huang Kangwen, Qin Xunpeng, Zhan Jun, she Yong, Wu Feng, Miao Di, Yang Shiming. Fuzzy PID control of heavy load AGV hydraulic steering [J]. Chinese Hydraulic & Pneumatic, 2021, 45 (07): 108-115)

[14] 陈志高, 胡仕成, 黎新齐. 基于模糊 PID 的变幅液压控制系统[J]. 液压与气动, 2021, 45(06): 156-162.

(Chen Zhigao, Hu Shicheng, Li Xinqi. Variable amplitude hydraulic control system based on Fuzzy PID [J]. Chinese Hydraulic & Pneumatic, 2021, 45 (06): 156-162)

项目基金: 国家自然科学基金面上项目 (51874012)

通讯作者

姓名: 韩伟娜

性别: 女

职称: 教授

所属单位: 北华航天工业学院

通信地址: 河北省廊坊市爱民东道 133 号

邮编: 065000

联系电话: 13833658884

E-mail: hanvenus@163.com