

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210451

# 基于粒子群优化模糊PID控制的多足式真空吸附机器人控制方案设计

艾福强<sup>1,2</sup> 包建东<sup>1</sup> 刘正权<sup>2</sup>

(1.南京理工大学自动化学院 南京 210094; 2.南京中科特检机器人有限公司 南京 211215)

**摘要:**为解决高层建筑玻璃幕墙的清洗与检测问题,探索一种多足式真空吸附爬壁机器人,为实现爬壁机器人平稳运行,主要是提高电机转速的控制精度,采用模糊PID算法进行控制并在此基础上利用粒子群算法进一步迭代优化。通过粒子群算法的迭代寻优能力,实时确定模糊PID控制中PID三个参数的比例因子,得到一个性能较好的控制系统。结果表明,当比例因子 $Ckp$ 、 $Cki$ 、 $Ckd$ 的值分别为0.1、8.23、0时系统稳定达到最优。相比于模糊PID控制,采用粒子群算法进一步优化后的系统,响应速度提升了0.024 s且同样无超调产生,能够满足系统要求。

**关键词:**爬壁机器人;运动控制;粒子群算法;模糊PID

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of multi legged vacuum adsorption robot control scheme based on PSO-fuzzy PID control

Ai Fuqiang<sup>1,2</sup> Bao Jiandong<sup>1</sup> Liu Zhengquan<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Sinotest Robotics Co., Ltd., Nanjing 211215, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of cleaning and testing the glass curtain wall of high-rise buildings, a multi legged vacuum adsorption wall climbing robot is explored. In order to realize the smooth operation of the wall climbing robot, the main thing is to improve the control accuracy of the motor speed. The fuzzy PID algorithm is used for control, and on this basis, the particle swarm algorithm is used for further iterative optimization. Through the iterative optimization ability of particle swarm optimization algorithm, the scale factors of three PID parameters in fuzzy PID control are determined in real time, and a control system with good performance is obtained. The results show that when the scale factors CKP, CKI and CKD are 0.1, 8.23 and 0 respectively, the stability of the system reaches the optimum. Compared with fuzzy PID control, the response speed of the system further optimized by particle swarm optimization algorithm is improved by 0.024 s, and there is also no overshoot, which can meet the requirements of the system.

**Keywords:** climbing robot; motion control; PSO; fuzzy PID

## 0 引言

爬壁机器人属于特种机器人范畴,能够工作在竖直壁面并且具有一定负载能力,可以代替人工完成特殊场合的作业,具有自动化程度高的特点,获得了专家学者的关注<sup>[1]</sup>。对于爬壁机器人的研究大都在结构设计方向<sup>[2-4]</sup>,而爬壁机器人能够实现其功能的重要一环就是机器人的运动控制系统,它直接决定了机器人的性能和稳定性。爬壁机器人运动主要是依靠无刷直流电机来完成,对其运动控制

的研究主要就是对无刷直流电机控制的研究。目前对于无刷直流电机的控制方法有很多,常用的为PID控制,由于机器人运动时受到重力、壁面支撑力和吸附力的影响,使得其为时变非线性系统,传统的PID控制不能很好的控制非线性被控对象,很难获得其最佳的参数<sup>[5]</sup>。模糊PID算法可以通过设置其模糊规则和对应的模糊逻辑语言来实时的优化 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三个参数,克服了传统PID的 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三个参数不能实时调整的缺点<sup>[5-7]</sup>。但是模糊PID也有其缺点,首先模糊控制规则的选取目前并没有标准的普遍适

用的方法,都是凭借经验选取的,其隶属度函数的选取同样如此<sup>[5-7]</sup>。为了克服这个缺点,考虑引进粒子群算法,在模糊控制的基础上使用粒子群算法对 PID 的三个参数进行参数迭代进一步优化,得到一个性能较好的模糊控制器,并利用 Matlab 搭建模型进行仿真试验对比,验证了优化后的控制系统性能。

### 1 传统 PID 控制的建模与仿真

在控制系统中,最早发展起来并被广泛使用的就是 PID 控制算法,其算法简单并且具有良好的适用性和稳定的可靠性。PID 控制适合应用于线性、非动态场合,输入  $yd(t)$  是人为设定的方便 PID 控制器实现的控制量,经过比例、积分、微分环节,再由反馈环节得到反馈值  $y(t)$ ,使得控制量无线接近于我们设定的目标量,然后通过偏差信号  $e(t)$  控制被控量。其数学表达为<sup>[7]</sup>:

$$e(t) = yd(t) - y(t) \tag{1}$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{2}$$

式中:  $u(t)$  为 PID 控制器的输出值;  $k_p$  为比例系数;  $k_i$  为积分系数;  $k_d$  为微分系数。

本文给定输入信号为转速 3 000 r/min,选取 PID 参数为  $K_p = 0.05, K_i = 25, K_d = 0$ ,建立 PID 控制的仿真模型如图 1 所示,仿真结果如图 2 所示。

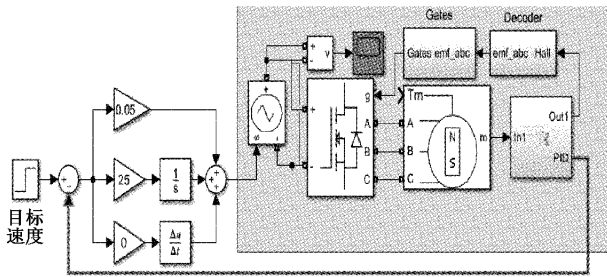


图 1 PID 控制仿真模型

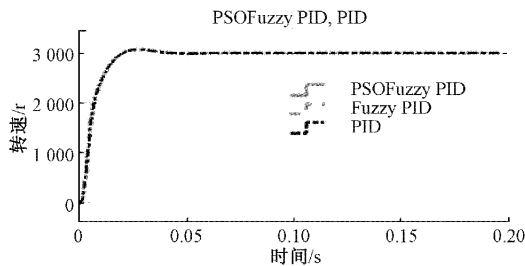


图 2 PID 控制仿真结果

由图 2 可以看出,单纯的 PID 控制调节时间为 0.06 s,且存在超调,超调量为 1.67%。其控制效果并不理想。PID 控制在进行参数整定时,不能使  $k_p, k_i$  和  $k_d$  三个参数取为固定的值,应根据不同时刻偏差值进行调整,利用偏差纠正偏差。模糊 PID 控制算法是通过模糊控制策略对 PID 参数进行实时整定,该方法有效的克服了传统 PID 控制器

不能实现参数的在线整定的不足。

### 2 模糊 PID 控制原理与仿真

模糊 PID 是一种高级控制算法,其原理基于模糊数学,能够有效的弥补上述 PID 控制的不足<sup>[5-9]</sup>。模糊控制能够根据系统误差的变化,实时对控制变量进行整定<sup>[9-11]</sup>,其原理如图 3 所示。能够实时对 PID 参数进行更新整定,能够在一定程度上加强系统的控制精度使系统具有较好的鲁棒性。

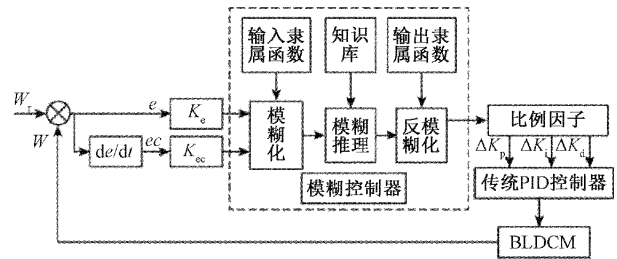


图 3 模糊控制器结构框图

本文模糊控制器为两输入,分别为输入误差  $E$  和误差的变化量  $E_c$ ,经过模糊推理输出 PID 的修正值  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ ,在线对 3 个参数值进行修正。

模糊控制器的控制规律由程序实现,实现一步模糊控制算法流程为:清晰量模糊化-推理决策-去模糊化得精确量<sup>[5-11]</sup>。

在模糊控制器的设计中,为了方便,论域的上限以及下限值一般选为有限整数<sup>[5-9]</sup>。例如本文中  $E$  的论域定义为  $\{-3, 3\}$ ;  $E_c$  的论域定义为  $\{-6, 6\}$ ;  $\Delta K_p$  的论域为  $\{-3, 3\}$ ;  $\Delta K_i$  的论域为  $\{-6, 6\}$ ,  $\Delta K_d$  的论域为  $\{-3, 3\}$ 。实际论域到模糊论域的转换通过对应的比例关系,引入量化因子和比例因子来完成。

量化因子与比例因子的选取由模糊论域和变量的实际值决定,假设在实际中,误差  $e$  的连续取值范围为  $[e_l, e_h]$ ,  $ec$  取值范围为  $[ec_l, ec_h]$ ,  $U$  取值范围为  $[U_l, U_h]$ 。则:

$$K_e = \frac{2m}{e_h - e_l} \tag{3}$$

$$K_{ec} = \frac{2n}{ec_h - ec_l} \tag{4}$$

$$K_u = \frac{u_h - u_l}{2l} \tag{5}$$

式中:  $e_l, ec_l, u_l$  分别表示论域的下限值。  $e_h, ec_h, u_h$  分别表示论域的上限值。  $m, n, l$  分别表示变量实际值上限值。

根据上式本文中量化因子与比例因子的选取为  $K_e = 0.001, K_{ec} = 0.001, K_p = 0.05, K_i = 25, K_d = 0$ 。

各变量的基本论域相对应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。输入、输出的隶属度函选择三角型。通过查询得到的专家经验并根据实际优化情况调整得到模糊控制规则如表 1~3 所示。

表1  $\Delta K_p$  模糊控制规则表

$\Delta K_p$	E						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NS
PN	NB	NM	NM	NM	NS	ZS	Z
PS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
EC	ZO	NM	NM	NS	Z	PM	PS
NS	NM	NS	Z	PS	PM	PM	PM
NM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
NB	Z	PS	NB	PM	PM	PB	PB

表2  $\Delta K_i$  糊控制规则表

$\Delta K_i$	E						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PS	NS	Z
PN	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
PS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS
EC	ZO	PM	PS	PM	Z	NS	NS
NS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
NM	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB
NB	Z	Z	PS	NM	NB	NB	NB

表3  $\Delta K_d$  糊控制规则表

$\Delta K_d$	E						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	Z	Z	Z	Z	S
PN	PS	PS	Z	NS	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NB
EC	ZO	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
NM	PM	NS	Z	NS	NS	NS	NS
NB	PB	PB	Z	Z	Z	PS	PS

设置好控制规则后,输出值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  在将会在设置的论域范围内,跟随输入  $E$ 、 $EC$  的变化而不断的调整,根据表1在Matlab中设置好控制规则,可以通过软件观察变化的效果图,如图4所示。

设置好模糊控制器,建立仿真模型如图5所示,仿真结果如图6所示。

由图6可以看出,模糊PID控制的调节时间约为0.04s,无超调。因此模糊PID控制能够很好的弥补传统PID无法实时调整参数的缺点,并且获得的控制效果相较于传统PID更优。由模糊控制原理可以知道,影响控制性能好坏的因素除了模糊控制规则外,量化因子和比例因子的选取也是重要的影响因素,但模糊控制器的量化因子以及模糊因子在模糊控制器设置好后是固定不变的。还可以对模糊

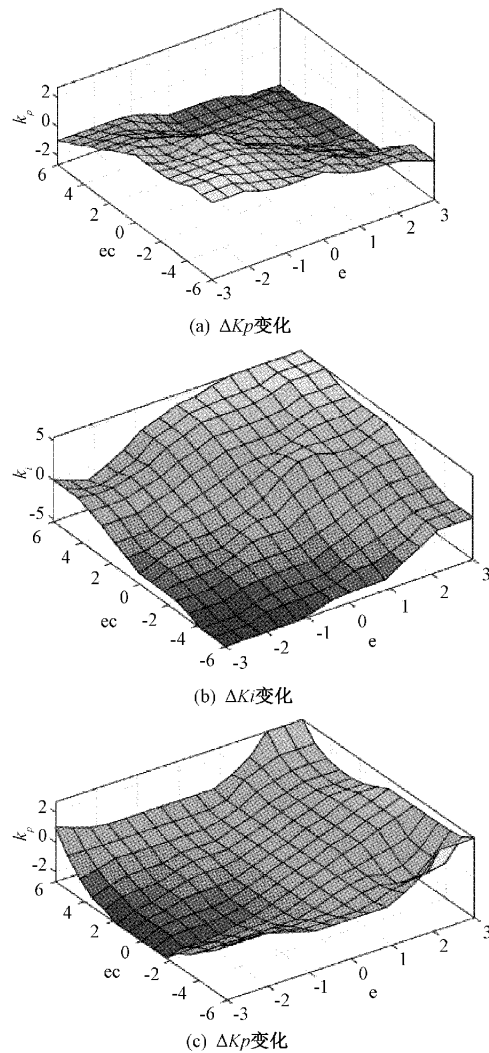


图4 通过软件观察变化的效果图

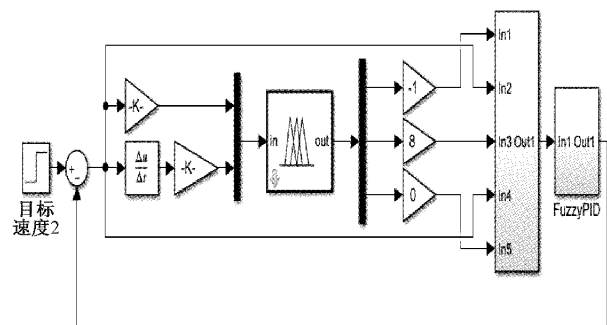


图5 模糊PID控制仿真模型

PID控制进一步优化。

### 3 基于粒子群优化的模糊PID控制

由上所述,模糊控制能较好地针对环境变化实时调整PID参数<sup>[11-13]</sup>,但初始PID参数以及模糊控制的量化、比例因子也不能实时调整,还可以进一步优化<sup>[11]</sup>。查阅国内外

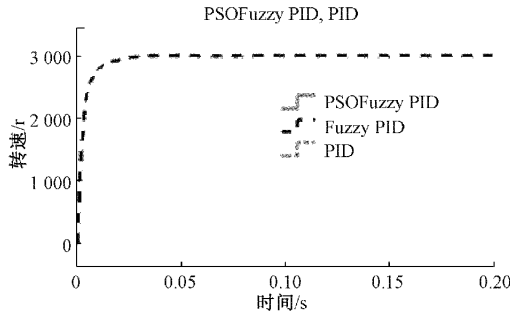


图 6 模糊 PID 控制仿真结果

有关模糊 PID 控制优化的相关文献发现,对模糊 PID 控制进一步优化方法有很多,比如神经网络、遗传算法等<sup>[14-16]</sup>,通过粒子群算法对模糊 PID 控制进行优化的研究同样有很多<sup>[17-21]</sup>,但是应用于无刷直流电机控制方向上的却很少,只在国外文献中找到一篇<sup>[21]</sup>,因此,本文利用粒子群算法对上述参数进行迭代寻优,已验证该方法在无刷直流电机控制中的效果。基于粒子群算法优化的模糊控制器,控制功能框图如图 7 所示。

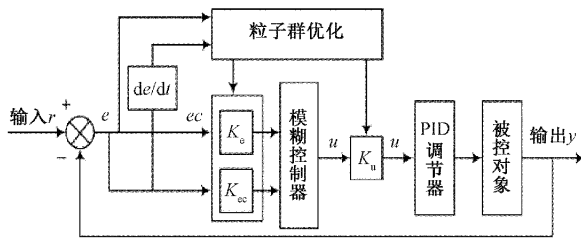


图 7 粒子群算法优化的模糊 PID 控制框图

### 3.1 粒子群优化算法

粒子群算法属于多主体优化系统,可以同时多个参数进行寻优操作。粒子群算法中,粒子的特征可以用 3 个参数位置、速度以及适应度值来表示,其中每个粒子都可以用来表示一个潜在的最优解<sup>[12-15]</sup>。先初始化为一群随机的粒子,对这些粒子进行迭代找到他们中的最优解,每进行一次迭代,粒子都通过跟踪两个“极值”来更新自己,更新公式如下<sup>[13-20]</sup>:

速度更新公式:

$$V_{in}^{k+1} = c_1 V_{in}^k + c_2 r_1 (P_{in}^k - X_{in}^k) + c_3 r_2 (P_{gn}^k - X_{in}^k) \quad (6)$$

位置更新公式:

$$X_{in}^{k+1} = X_{in}^k + V_{in}^k \quad (7)$$

式中:  $c_1$  为惯性权重;  $c_2, c_3$  为加速度常数;  $r_1$  和  $r_2$  为两个随机数取值在  $[0, 1]$  之间;  $X_{in}^{k+1}$  为第  $i$  次更新的位置;  $V_{in}^{k+1}$  为第  $i$  次更新的速度;  $P_{in}^k$  为第  $i$  次的最优位置。

### 3.2 确定决策参数和评价标准

通过粒子群优化算法,能够将模糊控制中需要实时调整的参数进行寻优处理,得到可使输出性能更好的参数,具

体步骤为<sup>[12-20]</sup>:

第一步:设置初始种群粒子数以及需要的参数。设置粒子群初始的粒子个数为 50、迭代上限次数 20,维数  $n = 3$ ,加速常数  $c_1 = c_2 = 2$ ,惯性因子为  $\omega = 0.6$ 。

第二步:计算粒子适应度值。本文采用 ITAE 准则完成对粒子的适应度值计算,按此准则设计的控制系统,瞬态响应的振荡性小,且对参数具有良好的选择性。系统的整定归结为计算控制系统中的待定参数,使上述各类积分数值最小。

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (8)$$

第三步:更新粒子状态,程序将会在达到最大迭代次数或得出最佳适应度时停止,否则跳到第二步重复执行。最后通过 assignin 函数,将经过粒子群优化的参数赋值到所设计的模糊控制器中,将 M 文件与仿真模型相联系。

仿真模型如图 8 所示,仿真结果如图 9 所示。

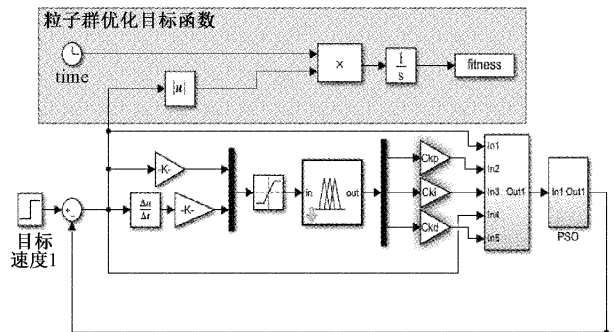
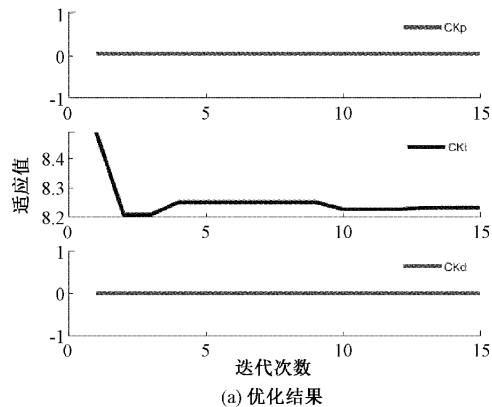


图 8 粒子群优化的模糊 PID 控制仿真模型

由图 9(a)可以看出,粒子群算法主要对积分系数进行了优化,得到最优的积分系数为 8.2 左右,由图 9(b)可以看出经过 10 次迭代后得到最优适应值为 0.062。图 9(c)为经过粒子群优化的模糊 PID 控制仿真结果,由图得调节时间约为 0.016 s,无超调,相比于模糊 PID 控制调节时间进一步减小,控制效果更优完全满足所需。



(a) 优化结果



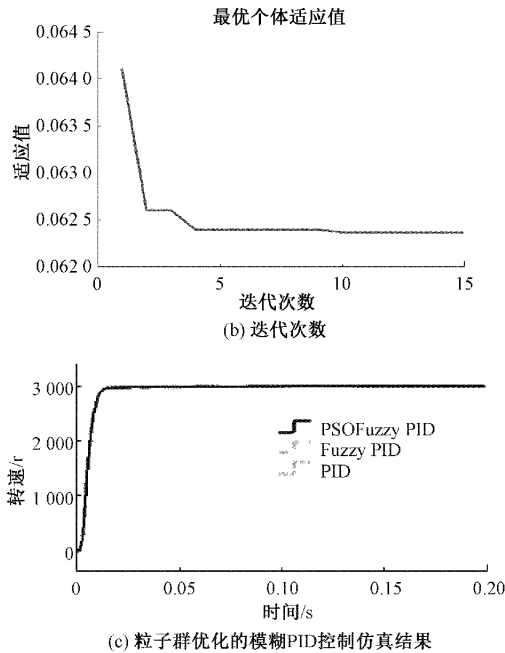


图9 仿真结果

#### 4 电机整体仿真模型与仿真结果

电机总体模块如图10所示,由3部分组成:粒子群优化模块如图10的第一部分,模糊PID控制器模块如图10第二部分,PID控制如图10的第三部分。主要依据无刷直流电机的数学模型和基本工作原理以及各控制算法的基本原理搭建而来。

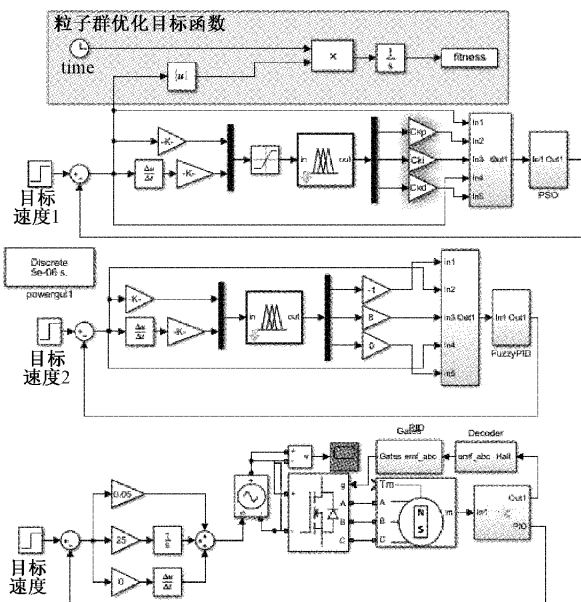


图10 无刷直流电机整体仿真模型

#### 5 仿真结果

为了更直观的比较三种控制算法的控制效果,将三种

控制的仿真结果放在同一张图中对比。给定输入信号为转速3000 r/min,选取PID参数为 $K_p=0.05, K_i=25, K_d=0$ ,仿真结果如图11所示,图中虚线为传统PID控制结果,点划线为模糊PID控制,实线为粒子群优化的模糊PID控制。由仿真结果可以看出模糊PID控制系统和传统PID控制系统相比响应速度快,几乎无超调量,而经过粒子群算法优化的模糊PID控制,同样无超调并且其响应速度获得了进一步的提升。

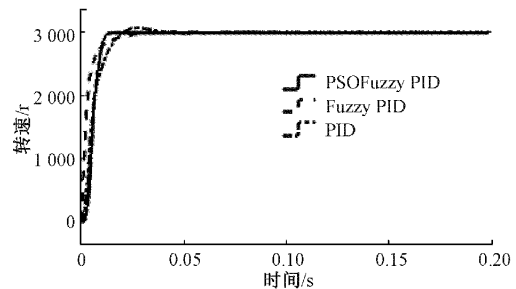


图11 结果对比图

#### 6 结论

本文对基于粒子群优化模糊PID控制的多足式真空吸附机器人控制方案进行设计。设计了基于模糊自适应PID控制的运动系统,为了获得更好地控制结果使用粒子群算法对PID的三个参数进一步优化,对系统模型进行建模,并且通过MATLAB进行仿真实验。仿真结果表明,采用粒子群算法进一步优化后的系统,响应速度与稳定性都获得了显著的提升,满足对机器人较高的控制精度的要求,具有很高的实用性。

#### 参考文献

- [1] 聂佩玲,张雅婷,陈勇. 爬壁机器人发展与关键技术综述[J]. 机床与液压,2022,50(4):155-161.
- [2] 刘兴宇. 基于SolidWorks的振动吸附式四足爬壁机器人设计[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(1):134-137.
- [3] 谢晓轩,李自胜,留沧海,等. 六足式幕墙清洗爬壁机器人设计与控制[J]. 自动化与仪表,2021,36(5):41-46.
- [4] 何炜华,王馨悦,邓彦松. 吸盘负压式四足爬壁机器人设计与仿真[J]. 机器人技术与应用,2017(3):43-45.
- [5] 顾祖成,耿小江,王永娟,等. 模糊自适应PID控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(1):39-41.
- [6] 杨昕红,刘长文. 基于MATLAB的直流无刷电机模糊PID控制设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(11):105-108.
- [7] XU J, XIAO L, LIN M, et al. Application of fuzzy PID position control algorithm in motion control system design of palletizing robot [J]. Security and

- Communication Networks, 2022, DOI: 0.1155/2022/8720960.
- [8] JUMIYATUN, MUSTOFA. Controlling DC-DC buck converter using fuzzy-PID with DC motor load[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 156(1), DOI: 10.1088/1755-1315/156/1/012013.
- [9] 陈涛, 李智, 胡聪. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊 PID 控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(2): 50-53.
- [10] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11): 21-25.
- [11] 远世明, 杨明发. 基于改进型粒子群算法的无刷直流电机速度控制研究[J]. 电气开关, 2021, 59(1): 34-38.
- [12] 沈跃杰, 行鸿彦, 王水璋. 基于粒子群优化的串级模糊 PID 无人机飞行控制系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 96-103.
- [13] 王琳, 王文博, 钱爱文. 神经网络模糊 PID 控制半主动悬架系统[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2022, 32(2): 65-72.
- [14] 汪谦松, 夏铤, 韩江. 改进人群搜索算法优化的直线电机模糊 PID 控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(4): 458-463, 474.
- [15] 孙嘉梁, 符晓. 遗传算法优化的移相全桥变换器模糊 PID 控制[J]. 测控技术, 2022, 41(5): 113-118.
- [16] 杨友良, 马强, 张怡. 粒子群优化模糊 PID 算法的充电策略研究[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 101-104.
- [17] 任晓琳, 杨奕, 高龙, 等. 改进的粒子群优化液压伺服模糊控制系统研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(5): 65-67.
- [18] FENG H, MA W, YIN C. Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller[J]. Automation in Construction, 2021, 127.
- [19] TAGHAVIFAR H, LI B. PSO-fuzzy gain scheduling of PID controllers for a nonlinear half-vehicle suspension system[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2018, 12(1), DOI: 10.4271/06-12-01-0001.
- [20] DEVENDRA S, MAHESH B, GAURAV K, et al. Comparison of fuzzy-PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW[J]. Procedia Computer Science, 2019, 152, DOI: 10.1016/j.procs.2019.05.019.

#### 作者简介

艾福强, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为电子信息技术、爬壁机器人运动控制。

E-mail: qiangqiang4601@126.com

包建东(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为智能仪器、测试技术、水下导航、探测、辨识技术。

E-mail: 13913876328@163.com