

引用格式:魏彬,唐凤轩,梁畅,等.基于变论域模糊 PID 的航空转台控制系统研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(2):107-115.

WEI Bin, TANG FengXuan, LIANG Chang, et al. An aviation turntable control system based on a variable universe fuzzy proportion integral differential (PID)[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(2):107-115.

基于变论域模糊 PID 的航空转台控制系统研究

魏彬^{1,2} 唐凤轩^{1,2} 梁畅² 张爱军^{2*}

(北京化工大学 1. 有机无机复合材料国家重点实验室;2. 机电工程学院, 北京 100029)

摘要:航空转台是进行地面仿真的关键设备,其控制系统的随动性对地面仿真结果有很大影响。围绕航空转台的控制结构和算法策略,提出使用粒子群优化算法迭代寻优以保证论域最佳的变论域模糊比例积分微分(proportion integral differential, PID)控制策略。以 MATLAB 作为仿真环境,分析本文所提算法策略的优化效果,仿真结果表明该控制策略相较于常规 PID 的时间乘绝对误差积分准则(ITAE)指标有显著提升。搭建以可编程多轴运动控制卡(programmable multi-axes controller, PMAC)控制器为核心的航空转台实物测试系统进行算法验证,实验结果表明,基于变论域模糊 PID 的航空转台控制系统可使航空转台的控制精度得以显著提升,超调量更小,调节时间更短,同时具备实用性,极大地提高了航空转台控制系统的随动性。

关键词:航空转台; 粒子群优化; 模糊比例积分微分(PID)控制; 可编程多轴运动控制卡(PMAC)

中图分类号: Q231.1 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.02.013

引 言

航空转台可模拟飞行器在空中的姿态角,实现半实物模拟仿真分析,从而快速、安全和有效地对制导和控制系统及相关器件的安全性和可靠性进行评估,并根据仿真结果作出相应的改进以达到飞行器总体设计的性能指标^[1],因此广泛应用于飞机试飞、导弹制导等特殊环境的试验测试中。国防工业的进步对航空转台的控制精度提出了更高的要求,针对航空转台控制系统进行研究对于促进我国国防工业的发展具有重要意义。

目前在世界范围内,美国 Auctronic 公司一直是航空转台业内翘楚,其研发的转台产品 HD7736 的控制精度可达 0.001",定位误差小于 0.005"^[2];国内在航空转台领域的研究起步较晚,北京航空精密机械研究所研制的 SGT-550 测试转台是最具代

表性的产品,其精度可达 1",位置分辨率优于 0.00001°^[3]。控制方法是航空转台控制系统研究的核心,控制方法的选择对转台控制系统的性能有巨大影响。当前广泛用于工业控制系统的控制算法主要有传统的比例-积分-微分(proportion integral differential, PID)控制算法、复合控制算法以及 Smith 预估控制策略。Boldbaatar 等^[4]将自学习模糊滑模控制首次应用于水温控制,取得了良好的控制效果。自 McCulloch 和 Pitts^[5]提出神经元模型后,经过半个多世纪的发展,神经网络模型已经从简单的模型向深层神经网络模型发展,其非线性逼近能力更优。Hu 等^[6]第一次使用近端策略优化强化学习算法优化随机控制策略来控制无模型四旋翼飞行器速度,大大提高了模型速度跟踪的准确性和鲁棒性。Xu 等^[7]使用分数阶微积分理论的分数阶 PID 控制器控制转向油缸的运动,在瞬态响应、跟踪能力和鲁棒性方面均取得良好的效果。

模糊 PID 是在模糊控制论诞生后发展起来的一种控制策略,在工程上有广泛应用。聂放^[8]利用遗传算法对模糊 PID 控制进行优化,将遗传算法的模糊 PID 控制器和标准模糊 PID 控制器进行比较的结果表明,前者性能明显优于后者;Oliveira 等^[9]提出

收稿日期:2021-08-15

基金项目:北京市自然科学基金(3192024)

第一作者:男,1983年生,副教授

*通信联系人

E-mail: e.zaj@163.com

一种新的线性规划方法,用于设计两输入两输出(TITO)系统的对角模糊 PID 控制器,并提出基于补偿特征轨迹的设计方法,实验结果表明线性规划方法提高了对角模糊 PID 的控制效率;谢少华等^[10]将模糊控制与直流电机调速结合起来,验证了基于模糊 PID 的直流电机调速系统的可靠性;胡国良等^[11]提出利用遗传算法设计模糊车辆半主动悬架磁流变阻尼器的 PID 控制系统,仿真结果表明该控制系统具有优越的减振性。

国内转台厂商大多采用传统 PID 加高阶前馈网络校正的方法补偿误差,这种方式对工况质量的要求较高,且依赖于技术人员的现场调试,无法实现控制参数的在线整定。为解决这一问题,本文设计了一套航空转台随动控制系统,相较于传统控制策略转台,其具有较好的工况适应性,对人员调试水平的依赖度更低,且将粒子群优化模糊 PID 控制策略与集成化控制卡相结合,有利于转台领域应用模糊控制策略的小成本迁移。对基于粒子群优化的变论域模糊 PID 进行研究,在 MATLAB 环境下完成仿真验证,选取航空转台测试平台硬件,利用 Labwindows/cvi 和可编程多轴运动控制卡(PMAC)脚本语言作为控制软件编写环境,完成航空转台测试平台的整体设计,并使用航空转台测试平台对本文所述方法

进行了验证。

1 系统硬件设计

航空转台测试平台由台体和控制系统组成。为了达到高精度的定位性能,需要选取合理的电气元件,同时采用可靠的控制策略,从而完成转台的实时控制并显著提升其定位精度。

转台台体由运动控制器、力矩电机以及配套的驱动器和编码器组成;控制系统则是由形成位置闭环、完成控制策略的 PMAC 下位机和运行图形用户界面(graphical user interface, GUI)的工控上位机组成。转台控制系统的整体结构如图 1 所示。

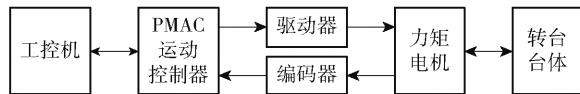


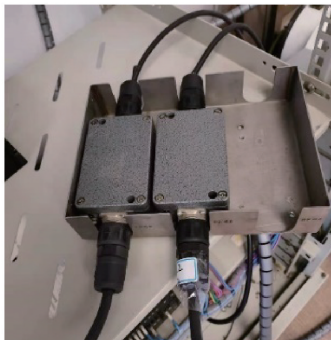
图 1 转台控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of turntable control system

该系统的工作原理如下:编码器实时采集转子位置,通过 60 孔扁平线缆发送给运动控制器,控制器接受上位机命令,将目标位置与反馈位置的偏差输入到 PID 控制器中,改变驱动器端电压从而实现电机的定位。系统实物如图 2 所示。



(a) 台体



(b) 编码器细分盒



(c) 驱动器

图 2 系统实物图

Fig. 2 Views of the system

采用工控机作为除运动控制之外的数据流传递工具,完成运动管理、通讯及数据收集与处理。工控机选用 SIMATIC IPC847D 工控机(德国西门子公司),运动控制模块选用经典 PMAC 运动控制卡(美国 Delta Tau 公司),该控制卡的速度、分辨率、带宽等性能指标优越,契合转台控制场景^[12]。选用 KEB COMBIVERT F5-MULTI 型驱动器(德国科比传动技术有限公司),反馈元件采用 RON786 增量式编码器

(德国 HEIDENHAIN 公司),电机选用 160LYX35 型力矩电机(包头长安永磁电机有限公司)。电机参数如表 1 所示。

2 模糊 PID 控制策略

提出一种使用粒子群迭代寻优策略以得到最优调节参数的方法。通过变论域模糊 PID 控制保证控制系统的动态抗干扰能力,使用粒子群优化算法

表 1 电机参数

Table 1 Motor parameters

参数	数值
最高空载转速 $n_0/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	135
峰值堵转电流 I_n/A	4.3
峰值堵转转矩 $T_n/(\text{N}\cdot\text{m})$	15
电枢电阻 R/Ω	1.66
力矩系数 $K_t/(\text{Nm}\cdot\text{A}^{-1})$	1.7
最高供电电压 U/V	24
连续堵转转矩 $T_a/(\text{N}\cdot\text{m})$	7
连续堵转电压 U_a/V	7.5
连续堵转电流 I_a/A	9
电枢电感 L/mH	2.11
转动惯量 $J_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.0067
反电势系数 K_e	0.18

优化 PID 参数和变论域伸缩因子,增加初始设置的模糊规则利用度,在 MATLAB/simulink 环境下进行仿真。

2.1 粒子群优化策略

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是一种用来求解问题最佳解决方案的寻优算法^[13],可以获得一定范围内待求解问题的最优解。在控制领域,可以将 PSO 算法与 PID 控制器结合使用,实现参数的动态调整^[14]。粒子群优化算法基于由群体智能建立的简化模型,个体可获得群体运动,使问题的解决有序化,从而获得最佳解决方案^[15]。图 3 所示为本文应用的粒子群优化算法流程图。首先进行优化参数的初始设定,初始化粒子后计算个体与群体的位置及适应度,判断是否满足终止条件,若满足则输出结果,不满足则更新粒子,形成迭代。

为了判断各个粒子值与理论解的接近程度,应当确定一个合理的评价指标,并适配力矩电机的模型特点。本文选取误差积分准则中的时间乘绝对误差积分准则 (ITAE) 指标作为评价粒子值与理论解接近程度 (粒子群适应值) 的函数^[16],ITAE 指标的表达式为

$$\text{ITAE}; s = \int_0^\infty t |e(t)| dt \tag{1}$$

式中, $e(t)$ 为实际值与设定值之间的偏差; t 为优化时间。

从表达式 (1) 可以看出, ITAE 指标可以作为超调量、调节时间、上升时间等变量的表征参数。本文将 ITAE 指标作为衡量控制过程控制性能的综合评

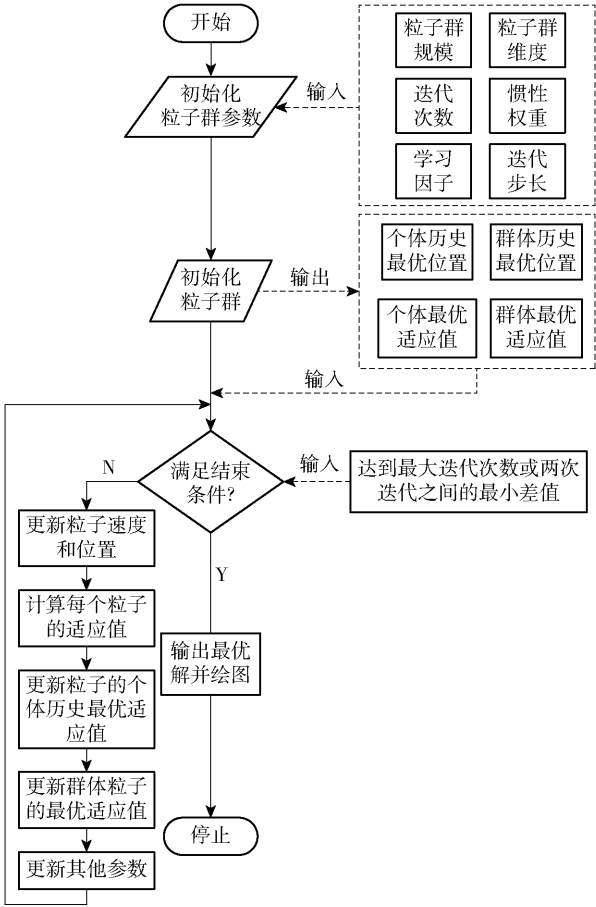


图 3 粒子群优化流程

Fig. 3 Particle swarm optimization process

价因素,即粒子群适应值反映了超调量、调节时间、上升时间等综合参数的情况。

2.2 模糊 PID 控制器设计

模糊控制器本质上是基于误差 e 、误差变化率 e_c 的 PID 参数自调整型控制器,同时利用 e 和 e_c 的变化率来动态调整输入变量的伸缩因子 $\alpha(e)$ 、 $\alpha(e_c)$ 和输出变量动态整定值 $L_{K(m)} (m = p, i, d)$,以此实现论域因子的自动整定^[17]。模糊 PID 控制器的变论域结构如图 4 所示。

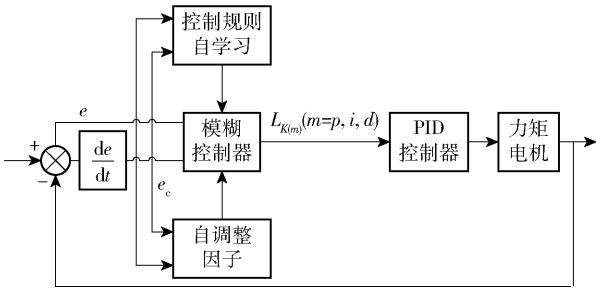


图 4 模糊 PID 控制器变论域结构

Fig. 4 Fuzzy PID variable domain structure

依据 Mamdani 等^[18]提出的 min-max 推理准则,加权平均解模糊处理后的输出为

$$\Delta K_m = \frac{C_i \sum_i \mu_{C_1}(\Delta K_{i(m)})}{\sum_i \mu_{C_1}(\Delta K_{i(m)})} \quad (2)$$

PID 参数整定公式为

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

式中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 均为 PID 参数的初始设定值; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 均为模糊控制 PID 解算出的动态整定值。

根据工程整定经验, e 、 e_c 和 PID 的自调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 在函数形式上均为三角函数分布。建立 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的控制规则,以 ΔK_p 为例,如表 2 所示,其中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,是表征输入和输出变量模糊化后的模糊语句。

表 2 ΔK_p 模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rule for ΔK_p

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

则系统的实际输出值为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^k e(i) + K_d e_c(k) \quad (4)$$

为了最大程度地提高模糊规则的利用度,更好地优化控制指标,可通过伸缩因子和比例因子动态调整模糊 PID 控制器的输入和输出。对于输入变量的量化因子,考虑对模糊规则的最大利用,采用量化因子与输入变量正相关的原则,从多种描述方式中选择在电机控制领域有广泛应用的形式^[17]: $\alpha = 1 - \lambda_1 e^{-kx^2}$;对于输出变量的比例因子,结合 PID 各个参数对控制性能的影响,采用 K_p 和 K_d 的比例因子与误差单调一致,而 K_i 的比例因子又与误差具有单调反向性的原则,来得出比例因子的经验公式。本文总结的伸缩因子和比例因子的经验公式如式(5)所示。

$$\alpha(e) = 1 - \lambda_1 e^{-k_1 x^2}$$

$$\alpha(e_c) = 1 - \lambda_2 e^{-k_2 x^2}$$

$$\beta(u_p) = \lambda_3 |e| \quad (5)$$

$$\beta(u_i) = \frac{1}{|e| + \lambda_4}$$

$$\beta(u_d) = \lambda_5 |e|$$

通过粒子群优化算法完成式(5)中各个参数的求取。利用 2.1 节的粒子群优化算法,设定惯性因子为 0.6,加速常数为 2,本文研究的调整函数中量化因子与比例因子的伸缩因子公式中共有 7 个参数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 、 k_1 、 k_2 ,再加上 PID 的 3 个初始参数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} ,设定维数为 10,粒子群规模为 30,最大迭代次数为 30,最小适应值设置为 0,最大迭代次数和最小适应值可作为算法的终止条件,速度最大值和最小值分别为 2 和 -2,10 个优化参数解向量的上区间为 [5 2 000 0.01 1 1 1 1 1 3 3],下区间为 [1 1 000 0.001 0 0 0 0 0 0 0]。粒子群初始化后代入 ITAE 指标求解,保存个体与群体的历史位置和适应度,进行终止判断,如未满足终止条件则重新设定参数进行下一轮求解,以此形成迭代,直到达成寻优终止条件。

迭代过程中的适应值变化如图 5 所示。

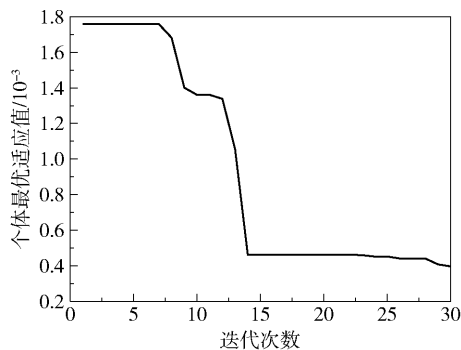


图 5 个体最优适应值变化

Fig. 5 Optimal individual fitness change

计算出参数最优解为 $[K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, k_1, k_2] = [2.246, 1.533, 861, 0.0035, 1, 1, 1, 1, 0, 0.384, 0]$ 。通过粒子群算法迭代寻优,设定迭代次数为 30。由图 5 可以看出,当迭代次数在 0~7 时,种群位置更新较慢,个体最优适应值保持稳定;当迭代次数在 7~14 时,适应值随迭代次数的增加而大幅下降;当迭代次数大于 14 时,个体最优适应值继续保持稳定状态,系统适应度函数指标已经趋于稳定;迭代次数大于 24 之后有小幅下降。在实际应用中可根据实验精度要求设定迭代次数,次数

越多,精度越高。

2.3 系统建模与分析

仿真系统由力矩电机近似仿真模型、定义粒子群优化的 MATLAB 脚本程序以及调用 simulink 模型的 MATLAB 函数组成。其中脚本的粒子群优化算法通过引用适应度函数模型得到适应值,根据适应值在线优化参数,将优化过程参数储存在

工作空间中,与近似仿真模型实现数据交互,在定义粒子群优化的 MATLAB 脚本程序中实现迭代寻优。

在模糊控制器的设计中,利用 MATLAB 中的模糊控制工具 Fuzzy 工具箱可以快速便捷地进行输入以及输出变量的定义,因此本文使用 Fuzzy 工具箱进行模糊控制变量的相关设计,如图 6 所示。

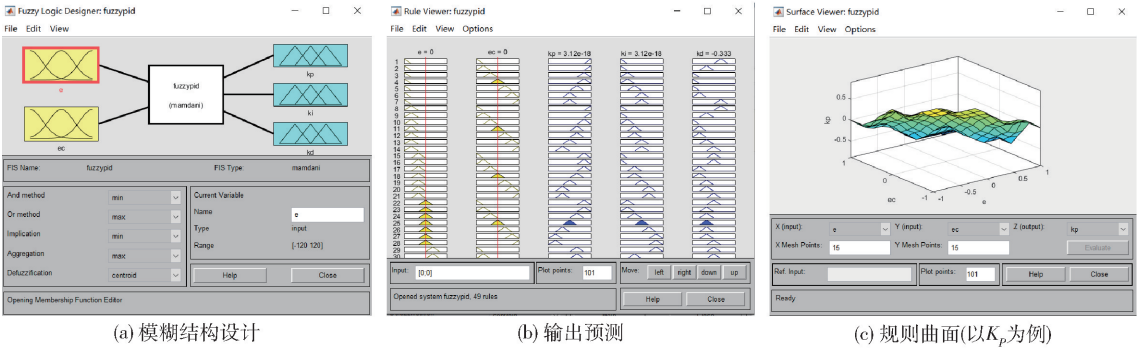


图 6 模糊控制变量设计

Fig. 6 Fuzzy control variable design

给定初始转速(1 000 r/min)后,计算输入量 e 和 e_c ,之后输入变论域模糊 PID 控制器,经过变论域调整环节和矩阵运算,输出 PID 参数调整变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,再累加至 K_p 、 K_i 、 K_d 。依据 ITAE 指标,将

仿真得到的适应度函数输入到粒子群算法程序中进行下一步优化,得到参数的最优解,进而得到模糊 PID 的最优化模型,如图 7 所示。

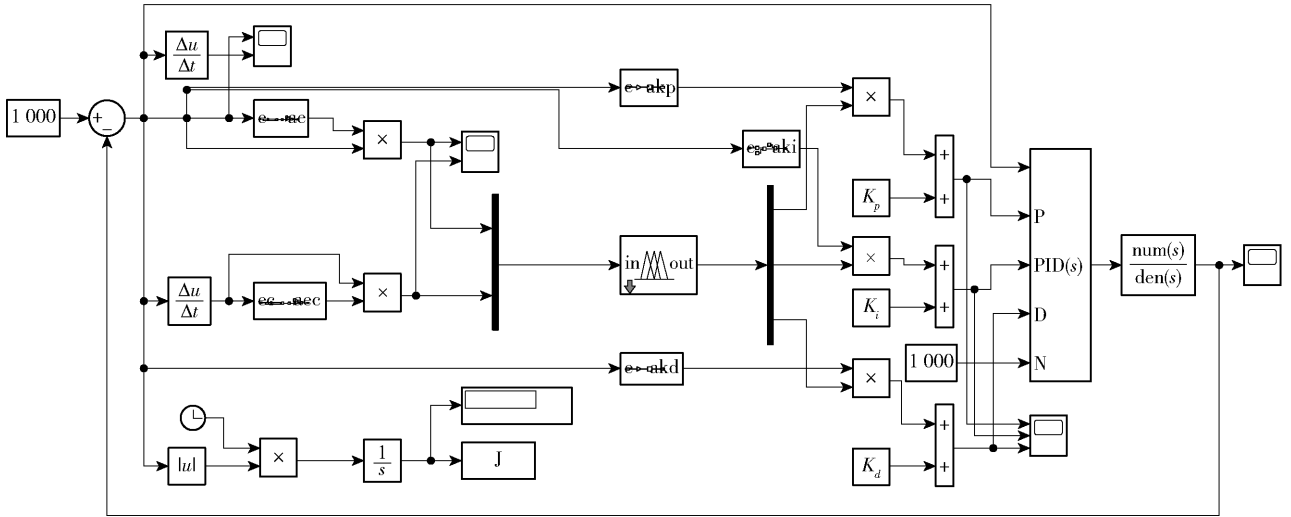


图 7 模糊 PID 的 simulink 模型

Fig. 7 Simulink model of fuzzy PID

将通过优化算法获得的最优解代入变论域模糊 PID 控制系统模型中,即 $[K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, k_1, k_2] = [2.246, 1.533, 861, 0.0035, 1, 1, 1, 1, 0, 0.384, 0]$,设置电机模型启动的期望转速为 1 000 r/min,启动负载为 10 N·m。当 $t = 0.05$ s 时,外部负载突增至 20 N·m。粒子群优化的模糊 PID 控制

策略、未优化的模糊 PID 控制策略和常规 PID 控制策略的转速和转矩阶跃响应如图 8 所示。

从图 8(a)可以看出,常规 PID 控制的转速上升最慢且存在较大超调,未优化的模糊 PID 控制的转速表现相较于常规 PID 有所提升;而相较于未优化的模糊 PID 控制,粒子群优化的变论域模糊 PID 控

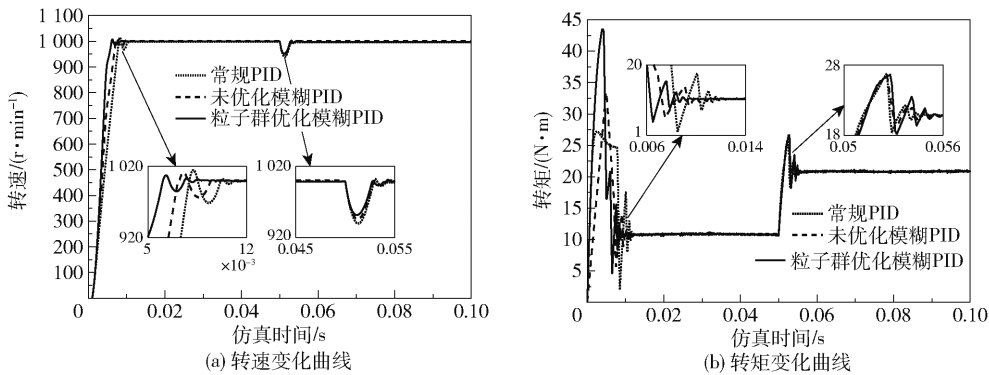


图 8 转速与转矩的阶跃响应

Fig. 8 Step response of speed and torque

制的转速上升更快且超调量更小。在对系统施加负载扰动后,三者均有动态扰动响应,而优化的变论域模糊 PID 控制的超调量更小,稳定性更好,说明其具有更好的抗干扰能力和鲁棒性。从图 8(b)可以看出,变论域自适应模糊 PID 控制能使电机转矩更快地达到稳定,波动较小,抗干扰能力强。如图 8 所示,当负载在 0.05 s 发生变化,优化过的模糊 PID 控制相较于其他控制策略在转速方面超调更小,转矩响应更快速,可及时跟踪负载的变化情况。

综上可得出:粒子群优化的论域可变模糊 PID 控制的超调量更小、调节时间更短,对于负载扰动有更好的调节适应效果,使得系统的跟随特性好、稳定性和抗干扰能力强。

3 系统软件设计

控制系统由上位机和下位机组成,上位机完成粒子群迭代和模糊 PID 的运算后,通过外设部件互连标准(peripheral component interconnect, PCI)总线与下位机通信,物理上采用 60 孔扁平线缆,在运动控制器的可编程逻辑控制器(programmable logic

controller, PLC)中定义双口随机读取存储器(random access memory, RAM),控制程序中写入双口 RAM 地址,进而实现打开控制器、发送运动命令、收集位置信息等后续流程,控制算法对位置误差进行有效补偿,提高控制精度^[19]。转台控制系统软件结构如图 9 所示。

使用 Labwindows/cvi 作为开发环境,编写可视化操作界面,通过操作界面完成对转台的指令下发与转台状态的实时监测,操作界面如图 10 所示。

航空转台实验平台控制通过上位机可视化界面采集运行数据,如输入信号类型、幅值、周期和相位等,在上位机中完成集成 PSO 优化的变论域模糊 PID 算法运算。PMAC 运动控制器中定义了双口 RAM 地址,上位机通过 PCI 总线将运行通讯输入到 PMAC 运动控制器中,运动控制器在双口 RAM 地址中采集运行数据。应用位置式数字 PID 控制算法完成转台的实物控制,观察具体的控制性能曲线,判断其控制性能。

在转台空载运行时,输入幅值为 1°、频率为 1 Hz 的正弦信号。在传统 PID 下,即上位机不经过调用软件定时

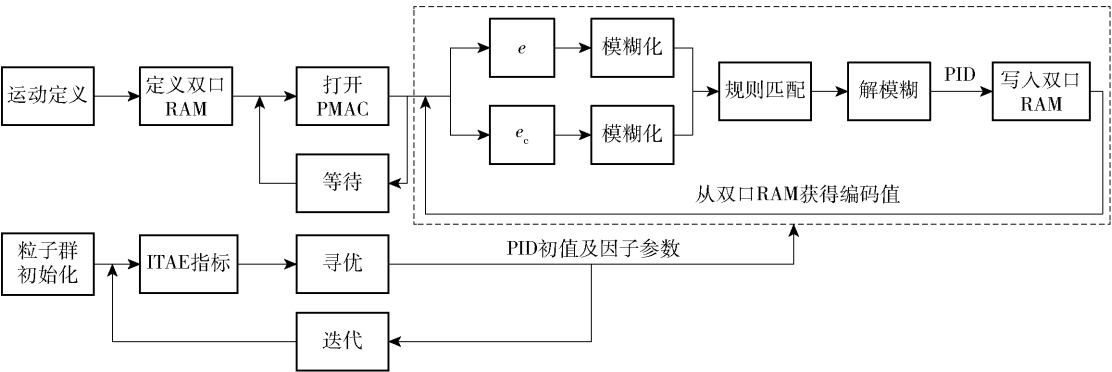


图 9 软件结构

Fig. 9 Software structure

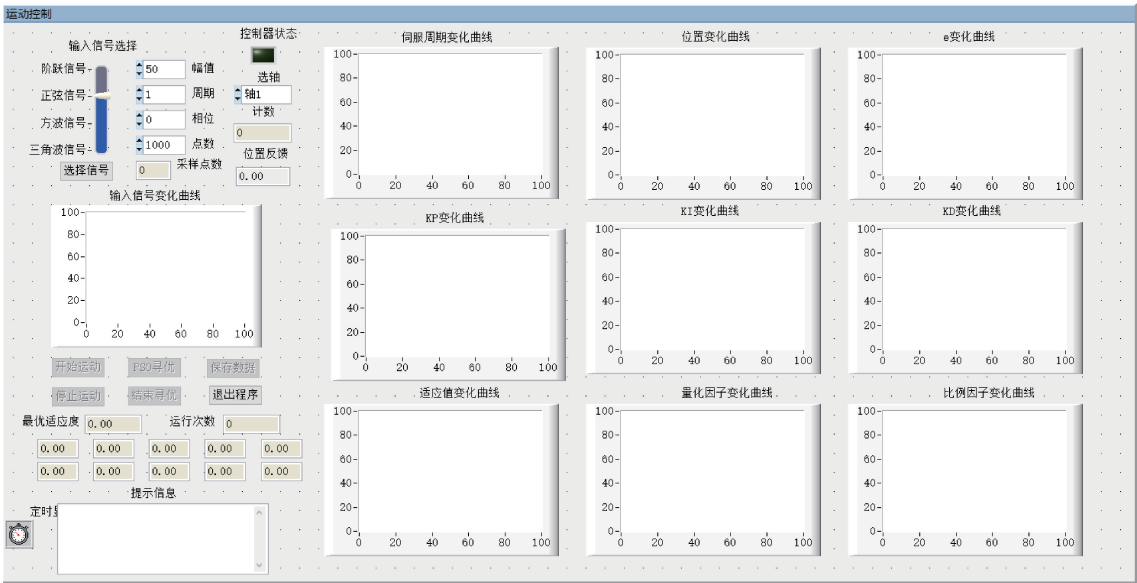


图 10 上位机运行界面

Fig. 10 Host computer running interface

模糊 PID 动态整定运算,直接将恒定 PID 参数传递给 PMAC 运动控制器,在输入信号激励下,实验平台正弦响应及输入输出信号相减得到的误差如图 11 所示。

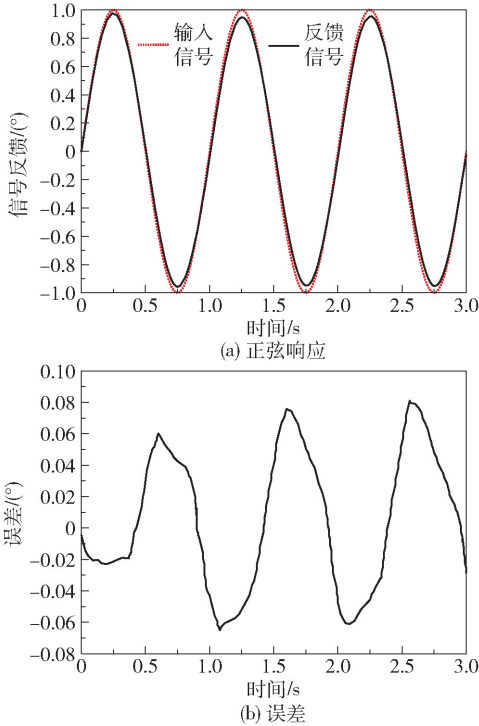


图 11 常规 PID 的正弦响应和误差

Fig. 11 Sine response and error of conventional PID

打开上位机模糊 PID 自整定系统,设定粒子群优化算法惯性因子为 0.6,加速常数为 2,维数为

10,粒子群规模为 30,最大迭代次数为 30,最小适应值为 0,速度最大值和最小值分别为 2 和 -2。经过粒子群优化后,在幅值为 1°、频率为 1Hz 的输入信号激励下,实验平台正弦响应及输入输出信号相减得到的误差如图 12 所示。

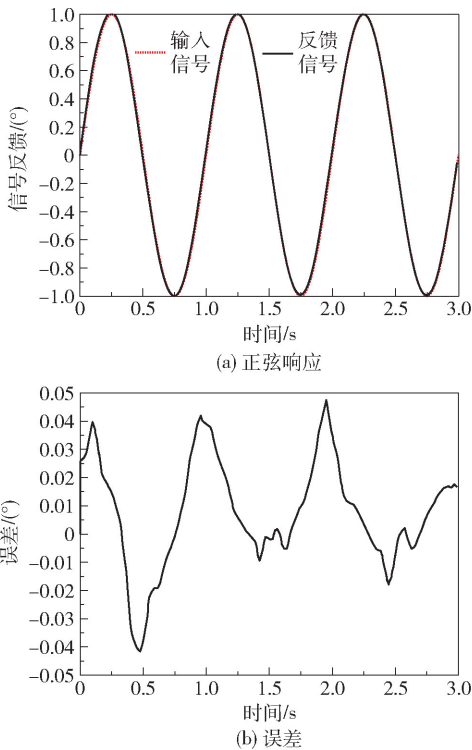


图 12 模糊 PID 的正弦响应和误差

Fig. 12 Sine response and error of fuzzy PID

通过上述正弦信号跟踪仿真曲线的对比可以看出,应用了模糊控制器的航空转台可将正弦跟踪误差从 0.1° 降至 0.05° 以内。转台能够精确地到达指令位置值处,并且误差保持在有效要求范围内,取得了更好的位置随动效果。

4 结论

以粒子群优化求解最优参数的变论域模糊 PID 结构方法为控制策略,设计了航空转台控制系统。在 MATLAB/simulink 中搭建航空转台控制系统仿真模型,与常规 PID 和未经粒子群优化的模糊 PID 相比,所提控制策略的转速响应超调量更低,调节时间更短,转矩响应更快达到稳定且波动较小,抗干扰能力较强。选取以 PMAC 运动控制器为核心的航空转台测试平台硬件,使用 Labwindows/cvi 编写测试平台控制软件上位机部分、PMAC 脚本语言编写下位机部分,搭建航空转台测试平台并进行算法验证,实验结果显示,应用了变论域模糊 PID 的航空转台测试平台将正弦跟踪误差从 0.1° 降至 0.05° 以内。综合仿真和实验结果,基于变论域模糊 PID 的控制系统使航空转台的控制精度得以显著提升,超调量更小,调节时间更短,抗干扰能力强,同时具备实用性,极大地提高了航空转台的控制系统的随动性。

参考文献:

- [1] 聂媛. 横滚模拟仿真转台设计及性能分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
- [2] NIE Y. Design and dynamic research of the roll-movement simulator turntable [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2011. (in Chinese)
- [3] WARDEN M A, HAUSER R, HOFSTETTER P, et al. Keeping up with dynamics of next generation missiles[C]//Proceedings of SPIE, Volume 6942, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XIII. Orlando, 2008: 694203.
- [4] 佚名. SGT-550 型三轴测试转台通过成果鉴定评审[J]. 航空精密制造技术, 2013(6): 63.
- [5] ANON. SGT-550 three-axis test turntable passed the appraisal and evaluation of results [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013(6): 63. (in Chinese)
- [6] LIN C M, BOLDBAATAR E A. Fault accommodation control for a biped robot using a recurrent wavelet Elman neural network [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(4): 2882 – 2893.
- [7] MCCULLOCH W S, PITTS W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. Bulletin of Mathematical Biology, 1943, 5: 115 – 133.
- [8] HU H, WANG Q L. Proximal policy optimization with an integral compensator for quadrotor control [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(5): 777 – 795.
- [9] XU F X, LIU X H, CHEN W, et al. Fractional order PID control for steer-by-wire system of emergency rescue vehicle based on genetic algorithm[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(9): 2340 – 2353.
- [10] 聂放. 模糊 PID 优化控制在组合式干燥实验设备中的应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [11] NIE F. The application research of fuzzy PID optimization control in combined-type drying experimental equipment [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [12] OLIVEIRA E J, HONORIO L M, ANZAI A H, et al. Linear programming for optimum PID controller tuning [J]. Applied Mathematics, 2014, 5: 886 – 897.
- [13] 谢少华, 瞿遂春. 基于 Matlab 的无刷直流电机控制系统仿真研究[J]. 新型工业化, 2015, 5(3): 28 – 34.
- [14] XIE S H, QU S C. Simulation study on control system of brushless DC motor based on Matlab [J]. The Journal of New Industrialization, 2015, 5(3): 28 – 34. (in Chinese)
- [15] 胡国良, 刘前结, 李刚. 车辆磁流变半主动悬架混合阻尼模糊电流控制研究[J]. 现代制造工程, 2018(10): 94 – 101.
- [16] HU G L, LIU Q J, LI G. Hybrid damping fuzzy current control of semi-active vehicle suspension with magnetorheological damper[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(10): 94 – 101. (in Chinese)
- [17] 姚舜. 工业机器人控制器实时多任务软件设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [18] YAO S. Design and implementation of real-time multi-task software industrial robot controller [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [19] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95—International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995.
- [20] FENG H, MA W, YIN C B, et al. Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO – PID controller [J]. Automation in Construction, 2021, 127: 103722.
- [21] MA S Y, SONG S D, YANG L Y, et al. Dependent tasks offloading based on particle swarm optimization algo-

- rithm in multi-access edge computing[J]. Applied Soft Computing, 2021, 112: 107790.
- [16] 陈晓云, 李洋, 姜锋. 基于改进混合差分进化算法的水轮机调速系统空载 PID 参数优化[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 142 – 145, 120.
CHEN X Y, LI Y, JIANG F. No-load PID parameters optimization of turbine governing system based on improved hybrid differential evolution algorithm [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 142 – 145, 120. (in Chinese)
- [17] 蒋鹏程. 火电厂超临界机组燃烧控制系统的建模与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
JIANG P C. Modeling and control of supercritical unit combustion control system in thermal power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- [18] MAMDANI E H, ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1999, 51(2): 135 – 147.
- [19] 龚定伟. 三自由度绳牵引并联机器人的主动柔顺控制[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
GONG D W. Active compliance control of the three-degree of freedom cable-driven parallel robot [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

An aviation turntable control system based on a variable universe fuzzy proportion integral differential (PID)

WEI Bin^{1, 2} TANG FengXuan^{1, 2} LIANG Chang² ZHANG AiJun^{2*}

(1. State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composite Materials;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aviation turntables are a key component in ground simulation and their control system follow-up has a significant influence on the ground simulation results. By focusing on the control structure and algorithm strategy for aviation turntables, a variable universe fuzzy proportion integral differential (PID) control strategy using particle swarm optimization algorithm iterative optimization has been proposed in an effort to ensure the best universe. Using MATLAB as the simulation environment to analyze the optimization effect of the algorithm strategy, the simulation results show that the control strategy is significantly improved compared to the ITAE index (time multiplied by absolute error integral criterion) of conventional PID. An aeronautical turntable physical test system with a programmable multi-axes controller (PMAC) motion controller as the core was built to verify the algorithm. The experimental results show that the aerospace turntable control system based on variable universe fuzzy PID significantly improves the control accuracy of the aeronautical turntable. The overshoot is smaller, the adjustment time is shorter, and it is practical, which greatly improves the followability of the control system of the aviation turntable.

Key words: aviation turntable; particle swarm optimization; fuzzy proportion integral differential (PID) control; programmable multi-axes controller (PMAC)

(责任编辑: 吴万玲)