

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802405

粒子群优化模糊PID的电动负载模拟器研究*

于振中 周枫

(江南大学物联网工程学院 无锡 214122)

摘要:为了解决多余力矩对电动负载模拟器强干扰,影响加载指令跟踪精度的问题,将基于粒子群优化的模糊PID控制方法用于加载电机控制器的设计。首先在分析加载电机结构以及工作原理的基础上建立了电动加载系统的数学模型,并利用结构不变性原理进行前馈补偿推导;其次针对常规PID控制器无法通过变参数来应对复杂的非线性环境,以及模糊PID量化因子、比例因子难以依靠经验调整问题,提出了一种基于模糊PID和粒子群优化算法的复合控制策略;最后通过仿真验证了该控制策略在对多余力矩消除上要优于常规的模糊PID控制。

关键词:多余力矩;电动负载模拟器;模糊PID;粒子群优化算法

中图分类号: TM301.2; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Study on electric load simulator based on particle swarm optimization fuzzy PID controller

Yu Zhenzhong Zhou Feng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to solve the problem that the surplus torque's strong interference to the electric load simulator and affects the tracking accuracy, the fuzzy PID control method based on particle swarm optimization is applied to the design of motor controller. Firstly, the mathematical model of the electric loading system is established based on the analysis of the structure and working principle of the loading motor, and feedforward compensation is deduced by the principle of structural invariability; Secondly, because of conventional PID controller cannot deal with the complex nonlinear environment by changing parameters, and the fuzzy PID quantization factor scale factor is difficult to adjust by experience, a compound control strategy based on fuzzy PID and particle swarm optimization algorithm is proposed. Finally, the simulation result shows that the proposed control strategy is superior to the conventional fuzzy PID controller.

Keywords: surplus torque; electric load simulator; fuzzy PID controller; particle swarm optimization

0 引言

电动负载模拟器是一种被动式力伺服系统^[1],可以模拟出臂形机器人关节减速器在实际运动中所承受的负载扭矩,广泛应用于减速器的效率检测、寿命检测等方面。当加载电机的加载指令为零且不采取补偿或控制措施时,舵机的主动运动会在轴上产生多余转矩,多余转矩对电动负载模拟器的控制精度影响很大,因此如何抑制和进一步消除多余转矩,并在此基础上提高系统的跟踪精度是当前需要解决的关键问题^[2]。

为降低多余力矩的影响,国内外诸多学者在这方面做了深入研究。现有多余力矩消除方法主要从以下2个方面

入手:1)在结构设计方面,减小电动负载模拟器引入的转动惯量,或者改变轴系统刚度。文献[3]在结构中加入弹簧杆,在一定程度上减少了多余力矩产生,但存在抑制效果不佳,不够灵活等缺点。2)在控制策略方面,利用算法对多余力矩进行补偿消除,这也是目前主流的减小多余力矩方案。文献[4]利用前馈补偿方法对位置扰动进行抑制,其缺点是对于较大差异的非线性位置扰动,其比例积分微分(proportion integral differential, PID)值是固定的,无法自动调节;文献[5]提出了一种基于小脑模型关节控制器(cerebellar model articulation controller, CMAC)和比例微分(proportion differential, PD)的复合控制结构,但是在CMAC网络中存在占用内存大、学习过度、映射复杂等问

收稿日期:2018-11

* 基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20130159)资助

题。文献[6]提出了一种模糊自适应整定PID控制方法,但是其过于依赖专家经验而无法在特殊条件下的抗干扰能力。

本文在模糊PID控制器的基础上加入粒子群优化算法,通过对模糊控制器量化因子 K_e 、 K_{ec} ,比例因子 K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 进行寻优,使得模糊系统的权系数可调,在一定程度上解决了模糊控制器过于依赖专家经验的问题。最后通过Matlab仿真,来比较基于粒子群优化算法的模糊PID控制器与常规模糊PID控制器在多余力矩抑制上的效果。

1 基于前馈补偿的电动加载系统数学模型

本文的电动负载模拟器系统结构图如图1所示。多余力矩由舵机系统产生,而对其抑制消除则需通过加载系统控制器完成。因此建立加载系统的数学模型,并在此基础上进行抑制策略研究,是十分有必要的。

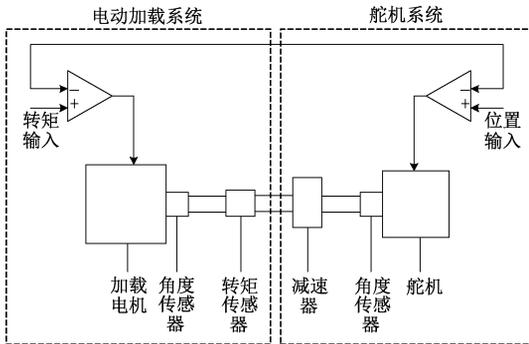


图1 电动负载模拟器系统结构

1.1 加载电机数学模型

本文选用直流电动机作为加载电机,根据机理法建立电机的数学模型^[7],其动态方程为:

$$\begin{cases} u_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + E_m \\ E_m = K_E \dot{\theta}_m \\ T_m = K_T i_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_m 为电枢电压; R_m 为电枢电阻; i_m 为电枢电流; E_m 为电枢反电动势; K_E 为反电动势系数; θ_m 为电机角位移; T_m 为电磁力矩; J_m 为电机转动惯量; B_m 为电机阻尼系数; T_f 为电机输出力矩。

转矩传感器两端分别连着加载电机输出端以及减速器端,用来测量系统的实际输出力矩。转矩传感器测得的力矩与位移之间的关系为:

$$T_f = K_f (\theta_m - \theta_r) \quad (2)$$

式中: K_f 为转矩传感器的扭转刚度; θ_r 为舵机经减速器后的输出角位移。

将式(1)、(2)经拉氏变换,并整理后可得加载系统的数学模型表达式为:

$$T_f(s) = G_1(s)U_m(s) - G_2(s)\theta_r(s) \quad (3)$$

$$\text{式中: } G_1(s) = \frac{A_1}{A_2}; G_2(s) = \frac{A_3}{A_2}; A_1 = K_f K_T; A_2 = L_m J_m s^3 + (L_m B_m + R_m J_m) s^2 + (R_m B_m + K_f L_m + K_T K_E) s + R_m K_f; A_3 = K_f s [L_m J_m s^2 + (L_m B_m + R_m J_m) s + R_m B_m + K_T K_E]$$

电动加载系统是高精度被动式伺服系统,在结构中引入微分负反馈和低通滤波器可有效改善系统的闭环稳定性。加载系统的输出力矩主要由2部分组成:1)控制输入项,由电枢电压 $U_m(s)$ 决定;2)力矩干扰项,此部分由舵机输出端经减速器传递过来,即所谓的“多余力矩”,它与舵机的角速度及角加速度均有关系,当舵机剧烈运动时会对加载系统造成强烈干扰,因此必须采取有效措施抑制系统的多余力矩。

1.2 前馈补偿环节

针对多余力矩的干扰问题,本文采用前馈补偿对其进行抑制。在扭转刚度系数 K_f 较大且给定指令的频率较低时,有如下2个假设:1)近似认为加载系统的角速度与舵机的角速度相等;2)多余力矩只与舵机角速度有关。根据以上假设,画出的前馈补偿框图如图2所示。其中 $G_w(s)$ 为前馈补偿环节。在框图中,引入了PID控制器来提高系统的动态特性。

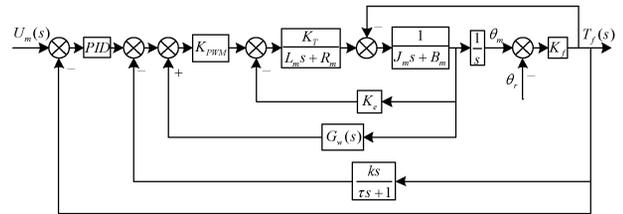


图2 增加前馈补偿和PID控制的系统

根据结构不变性原理^[8],将 $G_w(s)$ 分为 $G_{w1}(s)$ 和 $G_{w2}(s)$ 两个部分:

$$G_w(s) = G_{w1}(s) + G_{w2}(s) \quad (4)$$

$$K_{PWM} G_{w1}(s) \theta_m = K_e \theta_m \quad (5)$$

$$K_{PWM} G_{w2}(s) \frac{K_T}{L_m s + R_m} \theta_m = (J_m s + B_m) \theta_m \quad (6)$$

由式(4)、(5)、(6)可得:

$$G_w(s) = \frac{K_e K_T + (L_m s + R_m)(J_m s + B_m)}{K_{PWM} K_T} \quad (7)$$

电动加载系统是高精度且参数时变的被动式力矩伺服系统,常规PID控制器由于存在参数不能在线调整问题,导致无法很好的适应系统变化^[9]。针对以上问题,本文采用模糊PID控制方法,来对PID的3个参数进行在线调整,使其能够适应系统的变化。

2 模糊PID控制器设计

模糊PID控制是将模糊理论与PID控制相结合的一种方法^[10],本文的模糊PID控制器采用的是二维输入结

构,其原理框图如图 3 所示。

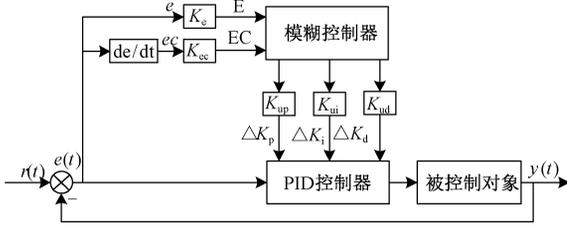


图 3 模糊 PID 原理

其中 e 、 ec 分别为电动加载系统的转矩跟踪误差和误差变化率,二者的值经过量化因子 K_e 、 K_{ec} 调整(模糊化过程),调整为 E 、 EC ,输入到模糊控制器中。模糊控制器依据输入参数的隶属度函数,通过查表来确定相应的模糊量输出。最后再通过解模糊以及比例因子 K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 的调整转化为实际输出,作用于 PID 控制器。

为了利于在工程上的实现,通常将控制器的输入输出量离散化,同时离散数量的多少将决定求解的精度。按照文献[11]做法,本文将输入输出量分为 7 个等级。根据电动加载系统的运动控制特性,将两个输入量 E 、 EC 对应的论域设为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$,输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 对应的论域设为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, ΔK_d 对应的论域设为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ 。所有输入输出量的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。Matlab 提供的模糊控制工具箱可用来建立隶属度函数。本文的 NB 选择 zmf 类型, PB 选择 smf 类型,其余选择 trimf 类型。

当电动加载系统的转矩跟踪误差 $|e|$ 较大时,模糊控制器应以消除误差为主;当 $|e|$ 较小时,为了防止超调量过大,应以系统的稳定性为主^[12]。基于以上原则,建立 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 对应的模糊控制规则表如表 1 所示。

在 Matlab/Simulink 中建立的模糊控制器仿真模型如图 4 所示:

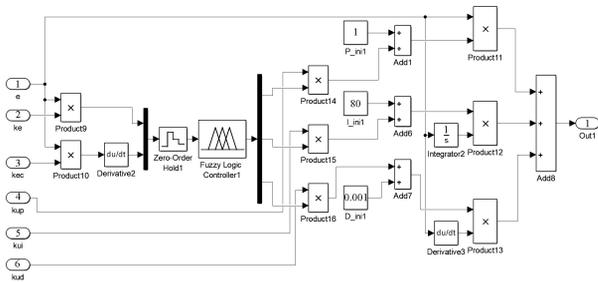


图 4 模糊控制器仿真模型

模糊控制的量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 的取值将影响模糊 PID 控制器的稳定性和控制精度。而单纯依靠经验来调整量化因子和比例因子则比较困难。因此本文采用粒子群算法对模糊控制系统的量化因子和比

表 1 模糊控制规则表

EC \ E	E							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	
	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO	
	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB	
	PM	PM	PM	PM	PM	ZO	ZO	
	NM	NM	NM	NB	NB	NS	ZO	ZO
	NB	NB	NB	NS	NS	ZO	NS	PM
	PM	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	
	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	
	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	
	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB	
	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	
ZO	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	
	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB	
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	
PM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	
	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	
	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB	
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	
	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	
	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	
	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB	

例因子进行在线优化。

3 基于粒子群算法的模糊控制器优化

3.1 粒子群算法

粒子群算法是受鸟类觅食行为特征的启发,用于求解优化问题的一种方法^[13],具有规则简单、搜索速度快等优点^[14]。在求解问题时,需要在空间中初始化一组粒子,每个粒子代表优化问题的潜在最优解。用位置、速度和适应度值来表示粒子的特性。通过适应度函数计算适应度值,来表示粒子的优缺点。在每次迭代中,粒子通过个体极值和组极值更新其速度和位置,相应的速度和位置更新公式分别为:

$$V_{id}^{k+1} = \omega(k)V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (8)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (9)$$

$\omega(k)$ 是粒子的惯性权重,反映了粒子有维持自己先前速度的一种趋势,其满足如下公式:

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end})(T_{max} - k)/T_{max} \quad (10)$$

式中: ω_{start} 是初始权重; ω_{end} 是最后一次迭代的权重; k 是迭代次数; T_{max} 是最大迭代次数; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是 0 到 1 之间的随机数。在优化的过程中,粒子位置和速度的阈值分别为 X_{max} 和 V_{max} ,从而保证粒子迭代优化的

效率。

3.2 适应度函数的确定

适应度函数作为评价粒子好坏的唯一指标,其选择将影响粒子群算法的收敛速度、准确度等。ITAE 准则,即系统的积分性能指标具有快速、平稳、超调量小等特点^[15],被广泛应用于实际工程问题中。因此本文选择 ITAE 作为适应度函数,其表达式为:

$$f_{ITAE} = \int_0^{t_k} t |e(t)| dt \quad (11)$$

式中: t_k 是当前仿真的时间; $e(t)$ 为给定力矩与转矩传感器测得的实际力矩之间的差值。

3.3 模糊PID控制器参数的优化

利用粒子群算法优化模糊PID控制器的步骤如下:

1) 初始化粒子群。对粒子的群体规模,以及每个粒子的速度和位置进行设置,同时还要对待优化的模糊控制器的量化因子和比例因子设置范围。

2) 利用式(11)计算每个粒子的适应度值。

3) 计算每个粒子的个体最优值。对于每个粒子 k , 将它的适应度值与个体极值 $p_{best}(k)$ 相比较,如果适应度值大于个体极值,则用当前适应度值替换该个体极值。

4) 计算整个群体的全局最优值。对于每个粒子 k , 将它的适应度值与全局极值 g_{best} 相比较,如果适应度值大于全局极值,则用当前适应度值替换全局极值。

5) 利用式(8)和(9)来更新粒子的速度和位置。

6) 如果达到最大迭代次数,或者相邻两次优化差值小于预设的精度值,则可认为收敛,结束迭代。否则将从步骤2)开始继续往下执行。

7) 最后得到的 g_{best} 即为最优的量化因子和比例因子。

在 Matlab 中利用 S-Function 的 m 函数对算法进行编写。算法的参数设置为:种群规模为 50,最大迭代次数为 30,精度为 0.001,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 。建立的模型如图 5 所示:

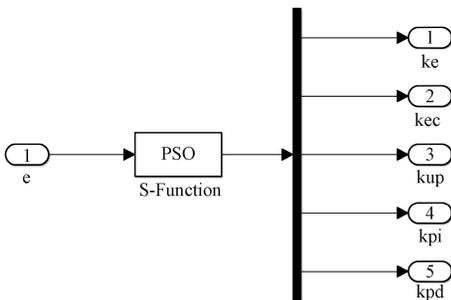


图5 粒子群算法优化器仿真模型

4 仿真与结果分析

为了检验本文方法在多余力矩抑制方面的有效性,将从舵机角速度的幅值及频率 2 个方面进行仿真试验,同时与常规模糊PID控制进行对比。

4.1 舵机角速度幅值变化的试验

根据多余力矩定义,本文在系统给定力矩为 0 的情况下,选取舵机角速度分别为 $\sin(2\pi t)$ 、 $10\sin(2\pi t)$ 、 $100\sin(2\pi t)$ rad/s,即舵机角频率均为 1 Hz,而幅值分别为 1、10、100 rad/s。得到的多余力矩波形如图 6、7、8 所示。

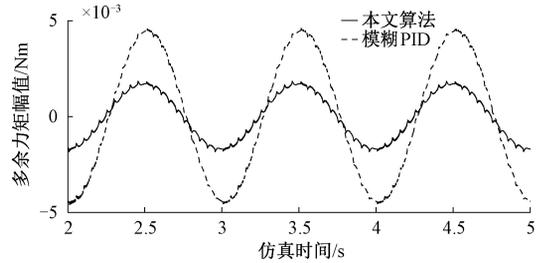


图6 幅值为 1 rad/s 时多余力矩波形

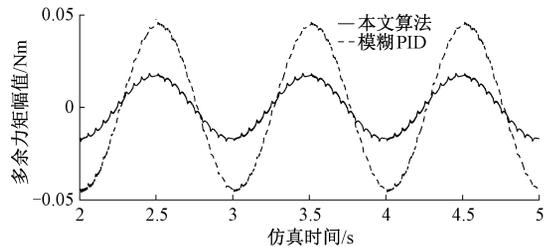


图7 幅值为 10 rad/s 时多余力矩波形

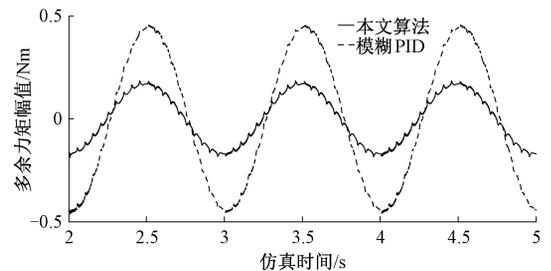


图8 幅值为 100 rad/s 时多余力矩波形

为了定量研究角速度幅值对算法结果的影响,将 2 种控制方法产生的最大多余力矩列出,如表 2 所示。

表 2 两种算法产生最大多余力矩对比表

控制器	角速度幅值/rad/s	最大多余力矩/Nm
模糊PID	1	4.28×10^{-3}
	10	4.3×10^{-2}
	100	0.434
本文算法	1	2×10^{-3}
	10	2.04×10^{-2}
	100	0.198

从表中可以看出,在同样试验条件下,本文算法产生的最大多余力矩约为模糊PID的46%,优化效果相对较好。

观察本文算法的 3 组数据,相邻两个角速度幅值相差 10 倍,对应的最大多余力矩也近似相差 10 倍,因此系统最大多余力矩与角速度幅值之间满足线性关系,即呈现简单的正比规律。

4.2 舵机角速度频率变化的试验

在舵机角速度幅值不变的情况下,改变角速度频率进行试验。本文选取的舵机角速度为 $100\sin(2\pi t)$ rad/s、 $100\sin(4\pi t)$ rad/s、 $100\sin(8\pi t)$ rad/s、 $100\sin(16\pi t)$ rad/s,即角速度频率分别为 1、2、4、8 Hz。在这四种情况下,分别进行本文算法和模糊 PID 的仿真实验,得到的多余力矩波形如图 9—12 所示。

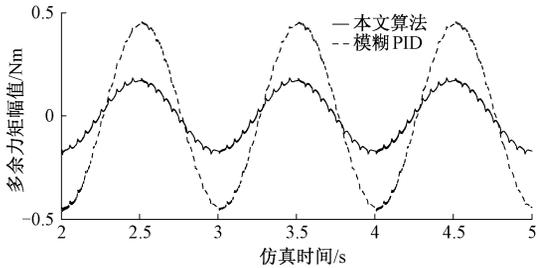


图 9 频率为 1 Hz 时多余力矩波形

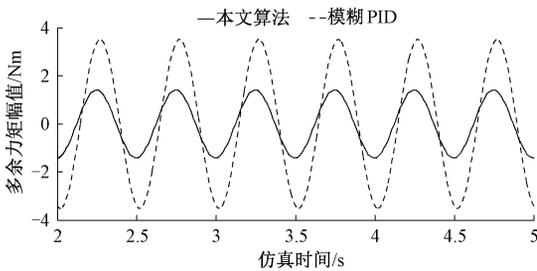


图 10 频率为 2 Hz 时多余力矩波形

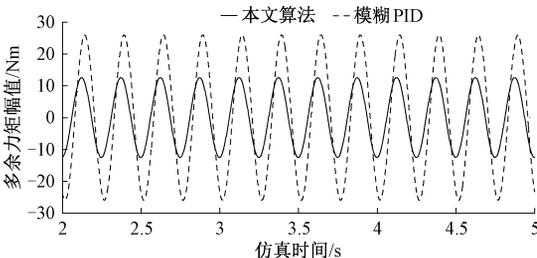


图 11 频率为 4 Hz 时多余力矩波形

将试验结果绘制成表 3。可以看出,随着舵机角频率的增加,两种方法产生的多余力矩均呈现增长趋势,这是由于加载系统存在惯性和滞后环节,控制电压无法实时跟随,且频率越高,表现的越明显。但相对的,本文算法在 4 个不同频率下产生的多余力矩均较小,因此本文算法要优于常规模糊 PID 控制器。另外观察本文算法的 4 组数据,相邻频率的增长倍数为 2 倍,而对应最大多余力矩的增长倍数

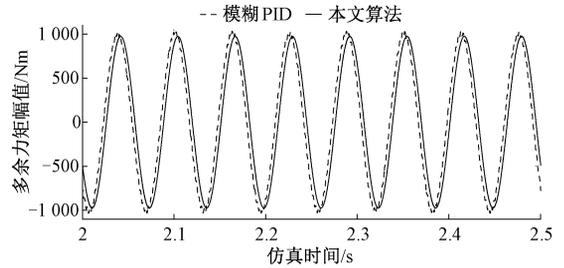


图 12 频率为 8 Hz 时多余力矩波形

分别为 6.803、9.224、78.687,多余力矩的增长倍数远大于频率的倍数,呈现出某种指数关系。

表 3 2 种算法产生最大多余力矩对比表

控制器	角速度频率/Hz	最大多余力矩/Nm
模糊 PID	1	0.434
	2	3.512
	4	26.063
	8	1 043.251
本文算法	1	0.198
	2	1.347
	4	12.425
	8	977.689

5 结 论

本文首先介绍了基于前馈补偿的电动加载系统数学模型,针对 PID 控制器无法在线调整参数问题,采用模糊 PID 进行替代。其次由于模糊 PID 的比例因子、量化因子难以准确取值,进一步提出了一种粒子群优化算法和模糊 PID 复合控制策略。最后在 MATLAB 中搭建仿真模型,并通过仿真试验得到如下结论:本文算法对多余力矩的抑制效果要优于常规模糊 PID 控制器;舵机角速度频率对多余力矩的影响要远大于幅值的影响。为保证算法的有效性,在实际应用过程中,尽量控制舵机角速度频率不应过高,否则加载系统表现出明显的惯性和滞后特征,抑制效果欠佳。因此如何在高频时减小系统的惯性和滞后,并进一步提高算法对多余力矩的抑制能力,是以后研究工作的重点。

参考文献

[1] 李阁强, 顾永升, 李健, 等. 被动式电液力伺服系统的自适应反步滑模控制[J]. 兵工学报, 2017, 38(3): 616-624.

[2] 杨瑞峰, 付梦瑶, 郭晨霞, 等. 基于小波神经网络的电动负载模拟器的复合控制[J]. 液压与气动, 2016(3): 14-18.

[3] 王鑫, 冯冬竹. 引入弹簧杆的电动负载模拟器实验研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(9): 91-94.

- [4] 李成功, 靳红涛, 焦宗夏. 电动负载模拟器多余力矩产生机理及抑制[J]. 北京航空航天大学学报, 2006(2): 204-208.
- [5] YANG B, HAN H T. A CMAC-PD compound torque controller with fast learning capacity and improved output smoothness for electric load simulator [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12(4):805-812.
- [6] 徐志伟, 范元勋, 雷建杰, 等. 被动式力伺服系统的多余力抑制方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(6): 89-92.
- [7] 孟凡亮, 王志胜. 基于CMAC的电动负载模拟器的研究[J]. 机械与电子, 2018, 36(5): 23-26+32.
- [8] 赵子豪, 赵永嘉. 电动式操纵负荷系统多余力抑制技术研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 81-85.
- [9] 杨芳, 刘春阳, 郝岩研, 等. 基于复合控制的多余力抑制[J]. 机床与液压, 2015, 43(19): 82-85+90.
- [10] 张兰春, 刘森, 汪伟, 等. 基于PSO优化Fuzzy-PID的全电调节无级变速器速比控制研究[J]. 机械传动, 2016, 40(12): 27-31.
- [11] TIAN Z D, REN Y, WANG G. Fuzzy-PID controller based on variable universe for main steam temperature system [J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2018, 15: 21-28.
- [12] 黎君, 阎世梁. 一级倒立摆模糊PID控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4): 50-52.
- [13] 王秋生, 杨浩, 袁海文. 基于粒子群优化的数字多频陷波滤波器设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1661-1667.
- [14] 柴钰, 王乔. 粒子群优化模糊PID的履带机器人运动控制研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(18): 49-53.
- [15] 应明峰, 王海祥, 翟力欣. 一种云自适应粒子群优化的模糊PID控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(12): 3278-3280, 3305.

作者简介

于振中, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为电机控制技术、机电一体化技术等。

E-mail: yzzrobot@126.com