

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.07.013

基于粒子群模糊 PID 控制的风机 盘车液压缸同步控制系统*

赵立柱, 苏东海*, 左 伟, 邹浩通
(沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:某新型液压式风机盘车驱动缸组同步控制精度较低,为了解决这一问题,对缸组在负载力扰动作用下的同步控制策略进行了研究,提出了一种基于粒子群模糊 PID 控制器。首先,建立了单个驱动缸的数学模型和缸组的同步控制系统模型;其次,采用粒子群算法对模糊控制器的量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_u 进行了迭代优化处理,并对 PID 控制器的 3 个控制参数进行了整定;然后,将两只液压缸输出位移的差值作为反馈信号,并引入误差补偿器,形成了状态差值反馈;最后,在阶跃激励信号和恒定负载扰动信号共同作用下,应用 Simulink 对驱动缸组的同步控制进行了仿真,并将其结果与传统 PID 控制器和模糊 PID 控制器的控制效果进行了对比分析。研究表明:相较于传统 PID 控制器与模糊 PID 控制器,在粒子群模糊复合 PID 控制下,同步系统运行稳定,无超调现象,仅存在微弱振荡;同时,系统的调节时间短,在阶跃形式扰动力影响下同步精度高,驱动缸组能够精确运动,具有很强的自适应能力。

关键词: 液压缸; 液压同步控制; 风机盘车; 模糊 PID 控制; 粒子群优化算法; 驱动缸组; 状态差值反馈

中图分类号: TH137.3; TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)07-0961-06

Synchronous control system of hydraulic cylinder of fan coil car controlled by particle swarm fuzzy PID

ZHAO Li-zhu, SU Dong-hai, ZUO Wei, ZOU Hao-tong

(College of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problem that the synchronous control accuracy of a new hydraulic fan coil car drive cylinder group was low, the synchronous control strategy of hydraulic cylinder group under load force disturbance was studied. A fuzzy PID controller based on particle swarm was proposed. Firstly, the mathematical model of single driving cylinder and the synchronous control system model of cylinder group were established. Secondly, particle swarm optimization(PSO) algorithm was used to optimize the quantization factor K_e , K_{ec} and scale factor K_u of fuzzy controller iteratively, and then three control parameters of PID controller were adjusted. Then, the output displacement difference of two hydraulic cylinders was used as feedback signal, and the error compensator was introduced to form the state difference feedback. Finally, under the joint action of step excitation signal and constant load disturbance signal, the synchronous control of the drive cylinder group was simulated by Simulink, and the results were compared with traditional PID controller and fuzzy PID controller. The results show that compared with traditional PID controller and fuzzy PID controller, the synchronous system under PSO-fuzzy PID controller control runs stably, without overshoot, with only weak oscillation and short adjustment time, and the synchronization accuracy is high under the influence of step disturbance force. The driving cylinder group can move accurately, and it has strong adaptive ability.

Key words: hydraulic cylinder; hydraulic synchronous control; fan coil car; fuzzy PID control; particle swarm optimization(PSO) algorithm; drive cylinder group; state difference feedback

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775354)

作者简介: 赵立柱(1996-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事流体传动与控制方面的研究。E-mail: 321989601@qq.com

通信联系人: 苏东海, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: sqydb_01@163.com

0 引 言

风机盘车是海上大型风电机组单叶片水平式安装的专用设备,其驱动缸组的同步运动精度将直接影响叶片的安装精度。要实现这种大型工程设备的高精度控制,液压同步控制是其关键技术之一。

实现液压缸同步控制的策略主要有 3 种方式,即主从同步、同等同步和交叉耦合同步^[1]。

为了提高同步控制精度,相关学者在智能控制算法与同步控制策略结合使用方面做了大量研究。周围等人^[2]针对送杆机构的同步控制,提出了一种模糊 PID 结合同等同步的控制策略,完成了对不同信号的精确追踪;但该研究并未解决系统前期的振荡问题。赵秉鑫等人^[3]采用模糊 PID 控制器,解决了升降层门运动精度低、响应慢的问题,但未完全消除控制过程中非线性因素的影响。李洪龙等人^[4]设计了一种分数阶 PID 控制器,以提高液压机的抗干扰能力和控制精度;但该分数阶 PID 控制器无法实现对液压机的实时调控。为解决双缸锻造液压机控制精度低的问题,徐晓丹等人^[5]提出了一种模糊神经网络同步控制算法,使系统的控制精度及控制时间均得到提升;但该同步控制算法的优化过程复杂。周玉伟等人^[6]基于位移模糊,提出了多点主从同步控制方式,提高了同步顶升系统的控制精度;但该研究并未明确指出影响同步误差的因素,并对其进行具体的分析。陶翠霞等人^[7]提出了一种变结构滑膜控制器,以减小多缸压机的同步误差;但该研究未完全解决滑膜带来的抖振问题。谢苗等人^[8]提出了一种交叉耦合模糊双缸同步控制策略,提升了巷道支护装备的同步控制性能;但该同步控制策略的建模过程过于复杂。张静等人^[9]将均值耦合和模糊 PID 结合,提出了一种控制策略,以提高多缸平台系统的同步精度;但采用该策略仅降低了平台的整体误差,相邻缸之间的误差仍然较大。

针对上述研究中的不足,笔者在模糊控制器基础上,设计粒子群优化算法改进的模糊 PID 控制器,并结合状态差值反同步策略和误差补偿器,实现对盘车驱动缸组的高精度同步控制。

1 风机盘车结构及其原理

风机盘车的结构图如图 1 所示。

风机盘车的工作过程为:

首先由两侧驱动缸推动托架在刹车盘上滑动,当托架运动到指定位置时,4 只锁紧缸会插进刹车盘的

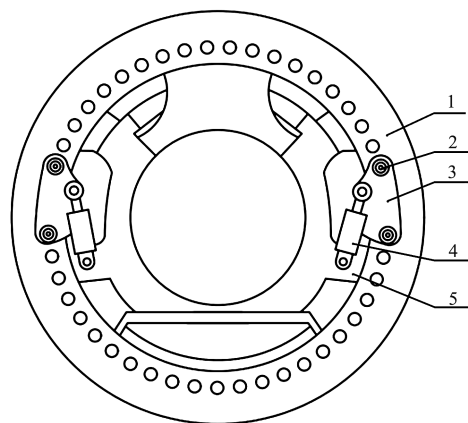


图 1 风机盘车结构图

1—风机刹车盘;2—锁紧缸;3—盘车托架;4—驱动缸;5—风机转子

销孔之中,同时打开风机自身的转子锁,然后再由驱动缸驱动转子转动,使得轮毂上的叶片安装孔位转到水平位置。

2 盘车驱动缸组同步系统建模

2.1 液压元件数学模型

(1) 伺服放大器

笔者将伺服放大器等效为比例环节,可得到其数学模型为:

$$K_a = \frac{I}{U} \quad (1)$$

式中: K_a —伺服放大器增益, A/V; I —伺服放大器输出电流, A; U —伺服放大器输入电压, V。

(2) 位移传感器模型

位移传感器的数学模型,即其传感方程可以表示为:

$$K_f = \frac{U_f}{X} \quad (2)$$

式中: K_f —传感器增益, V/m; U_f —传感器输出电压, V; X —液压缸活塞位移, m。

(3) 电液伺服阀模型

笔者选择的伺服阀频率是液压动力元件固有频率 5 倍以上,因此此处用比例环节近似代替,即可得到电液伺服阀数学模型为:

$$\frac{Q_0}{I} = K_{sv} \quad (3)$$

式中: Q_0 —伺服阀输出流量, m^3/s ; K_{sv} —伺服阀输出流量增益, $m^2/s \cdot A$ 。

2.2 阀控非对称缸模型

四通阀控制的非对称缸模型示意图,如图 2 所示。

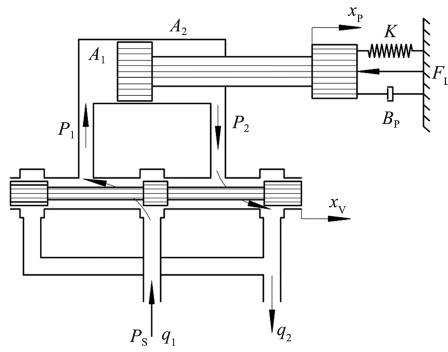


图 2 阀控非对称缸模型示意图

2.2.1 滑阀线性化流量方程

滑阀的线性化流量方程为^[10]：

$$q_L = K_q x_v - K_c P_L \quad (4)$$

式中： P_L —负载压力，Pa； K_q —伺服阀的流量增益， m^3/s ； K_c —流量压力系数， $m^3/(s \cdot N)$ ； x_v —阀芯位移，m。

2.2.2 液压缸流量连续性方程

因为驱动缸在结构上具有非对称性，所以此处引入系数 μ ，有^[11]：

$$q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{tp} P_L + \frac{\mu V_{0t} dP_L}{4\beta_e} \quad (5)$$

其中：

$$\mu = \frac{(1+n^4)(1+n)}{(1+n^3)(1+n^2)} \quad (6)$$

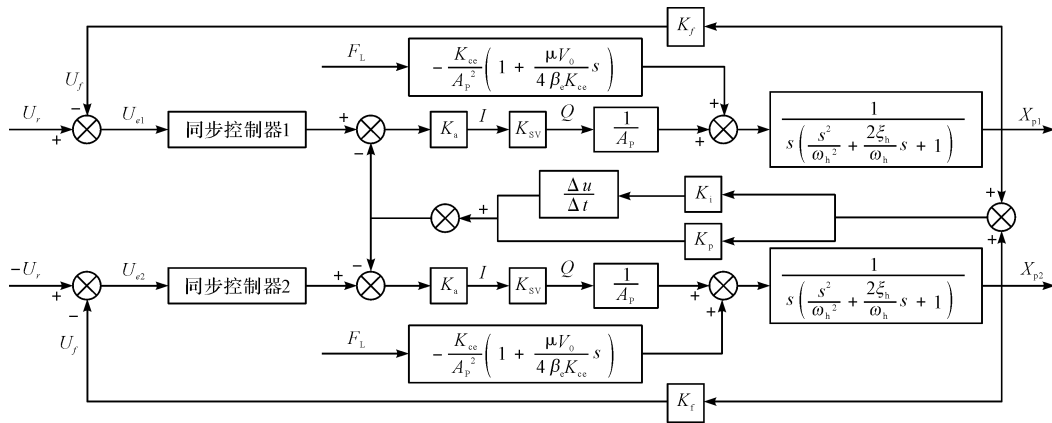


图 3 驱动缸组同步控制框图

由图 3 可知，将 2 只液压缸输出位移的差值，即两缸之间的同步误差作为反馈信号，反馈至各自伺服放大器的前端，以形成状态差值反馈；并引入误差补偿器，用于对同步误差进行预测和补偿，其形式为比例微分校正网络，即：

$$G_c = k_p + k_i s \quad (9)$$

3 粒子群模糊复合 PID 控制器设计

3.1 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器是以误差 e 和误差变化率 ec 为

2.2.3 液压缸力平衡方程

液压缸的力平衡方程表达式为：

$$P_L A_p = m_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (7)$$

式中： m_t —活塞及负载折算到活塞上的总质量，kg； B_p —活塞及负载的粘性阻尼系数； K —负载弹簧刚度，N/m； F_L —外负载力，N。

2.2.4 阀控非对称缸模型

笔者将式(4~6)进行拉普拉斯变换，再对其联立并化简，可得阀芯位移 X_v 和外负载力 F_L 共同作用下液压缸活塞的总输出位移 X_p 的传递函数^[12]，即阀控非对称缸的数学模型为：

$$X_p = \frac{\frac{K_q X_v}{A_p} - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{\mu V_{0t}}{4\beta_e K_{ce}} s\right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (8)$$

式中： K_q —总流量增益， m^3/s ； K_{ce} —总流量压力系数， $m^3/(s \cdot N)$ ； ω_h —液压固有频率，rad/s； ζ_h —液压阻尼比。

2.3 驱动缸组同步控制模型

根据式(1~3,8)，并结合状态差值反馈，即可建立驱动缸组同步控制模，如图 3 所示。

输入，输出 PID 参数的变化量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d ，去修正 PID 参数^[13]。

基于 PID 参数初始值及各增量的变化范围，笔者设定 e 和 ec 的基本论域为 $[-12, 12]$ ， Δk_p 基本论域为 $[-0.1, 0.1]$ ， Δk_i 基本论域为 $[-0.01, 0.01]$ ， Δk_d 基本论域为 $[-0.005, 0.005]$ ；使用高斯型和三角形隶属度函数；解模糊选用重心法。

模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

e/ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS/PS/PB	NS/PS/ZO	NB/NM/PS	NB/NM/PS	PB/ZO/PS	PM/PM/NM	PM/PM/PB
NM	NS/PS/PB	NS/PS/ZO	NB/NM/NM	PB/ZO/NM	PB/ZO/ZO	PM/PM/ZO	ZO/PM/PM
NS	NB/PS/PM	NB/NM/ZO	NB/ZO/NM	PB/ZO/NM	PM/PM/ZO	ZO/PB/ZO	ZO/PB/PM
ZO	NB/NM/PM	NB/NM/ZO	PB/ZO/ZO	PMPM/ZO	ZO/PB/ZO	NM/NB/ZO	NM/NB/PB
PS	PM/PM/NS	PM/PM/NB	NM/PB/NB	NM/NB/NB	NM/NB/PB	PS/NS/PB	PS/NS/NS
PM	PB/NM/PM	PB/ZO/PM	PM/PM/PM	ZO/PB/PM	ZO/PB/PM	NM/NB/PM	NM/NS/PM
PB	PB/PM/NS	PM/PM/NB	ZO/PB/NB	PB/PB/NB	NM/NB/PB	NM/NS/PB	PS/NS/NS

3.2 粒子群模糊复合 PID 控制器

3.2.1 粒子群优化算法

该算法是模拟鸟类飞行觅食的行为,将每一只鸟视为一个“粒子”,粒子具有位置和速度两方面的信息,通过对粒子的速度和位置不断进行更新迭代,依靠粒子种群的相互协作机制,以此来通过搜索得到全局最优解^[14,15]。

标准粒子群算法公式为^[16]:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (10)$$

$$v_i(t+1) = c_1 r_1 (pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest_i(t) - x_i(t)) + \omega v_i(t) \quad (11)$$

式中: v_i —粒子速度; x_i —粒子位置; ω —惯性权重; c_1, c_2 —学习因子; t —当前迭代次数; r_1, r_2 — $[0, 1]$ 之间的随机数; $pbest_i$ —个体最优解; $gbest_i$ —全局最优解。

笔者采用 ITAE 评价指标作为适应度函数,以综合评价控制系统的动态和静态性能,其表达式为^[17]:

$$J = ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (12)$$

3.2.2 控制器设计

粒子群模糊 PID 控制器工作过程为:

首先,通过粒子群算法,对量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_u 进行迭代寻优,使用式(10,11)对 K_e 、 K_{ec} 、 K_u 的位置和速度进行迭代更新,并在每次迭代后,通过式(12)判断是否已经达到系统所需要的最优值,是否需要再次进行迭代寻优处理;随后,输入量 E 、 EC 经优化好的量化因子进入模糊控制器,输出的模糊控制量,再经过优化后的比例因子转化为实际的 PID 参数的调节增量。

粒子群模糊 PID 控制器原理如图 4 所示。

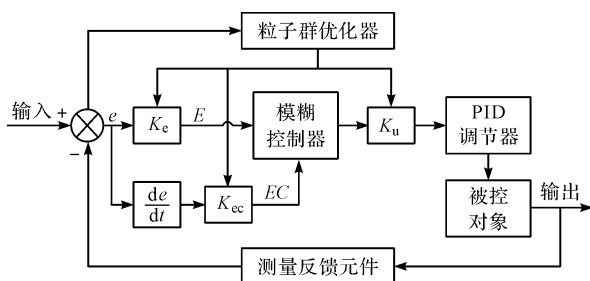


图 4 粒子群模糊 PID 控制器原理结构框图

图 4 中,共有 5 个参量需要优化。故笔者设置单个粒子群模糊 PID 控制器的搜索空间为 5 维。种群数量 $m = 10$,速度限幅 $[v_{min}, v_{max}] = [-1, 1]$,位置限幅 $[x_{min}, x_{max}] = [-10, 10]$;通常选取惯性权重 $\omega = 1.5$,学习因子 $c_1 = 1.5, c_2 = 1.5$,可以明显减少算法陷入局部最优位置的概率,提高算法的全局寻优能力;并且经过多次仿真验证,迭代 8 次左右即可找到最优解,因此最大迭代次取为 10 次,最小适应度值为 0.01。

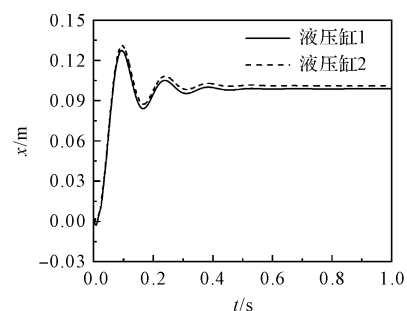
4 驱动缸组同步控制仿真及分析

根据图 3 的驱动缸组同步控制模型框图,笔者应用 Simulink,对驱动缸组的同步控制进行仿真分析。

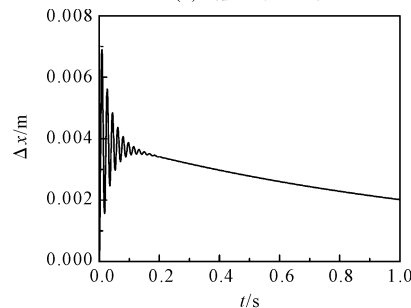
笔者设置单位阶跃信号为激励信号;因盘车所受外负载力形式接近于阶跃信号,所以设定 1×10^6 N 恒定信号作为负载力扰动信号。

4.1 无同步控制器

在无同步控制器的情况下,系统的同步运动曲线及同步误差曲线如图 5 所示。



(a) 同步运动曲线



(b) 同步误差曲线

图 5 无同步控制器的系统同步曲线

由图 5 可知:系统超调量很大,运动曲线振荡严重,稳定时间较长,两个驱动缸之间存在较大的同步误差。

4.2 PID 控制

在有 PID 控制的情况下,系统的同步运动曲线及同步误差曲线如图 6 所示。

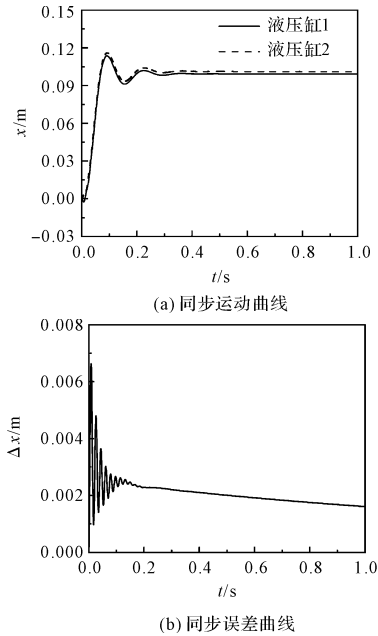


图 6 PID 控制下的系统同步曲线

由图 6 可知:在施加 PID 控制后,系统的稳定时间缩短,但响应曲线依旧存在超调和振荡;同步误差有所降低,但仍然较大。

4.3 模糊 PID 控制

在模糊 PID 控制的情况下,系统同步运动曲线及同步误差曲线如图 7 所示。

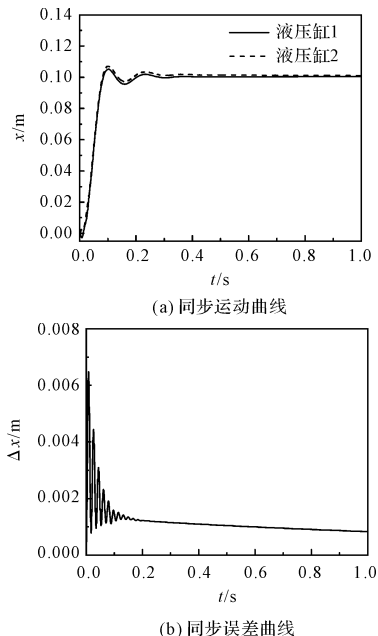


图 7 模糊 PID 控制下系统同步曲线

由图 7 可知:对比传统 PID,采用模糊 PID 控制器后,同步误差继续下降,但误差峰值基本没有得到改善。

4.4 粒子群模糊 PID 控制

在粒子群模糊 PID 控制的情况下,系统同步运动曲线及同步误差曲线如图 8 所示。

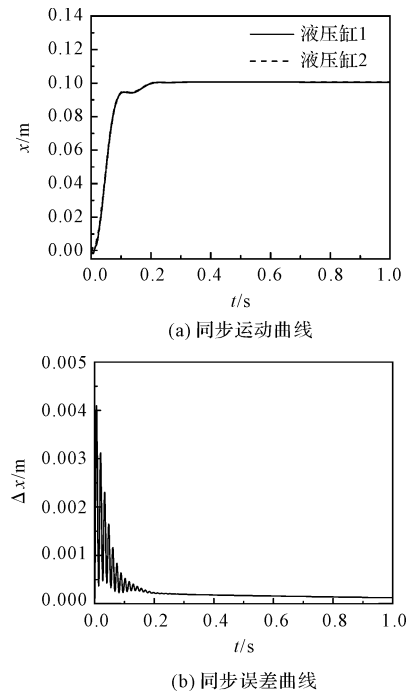


图 8 粒子群模糊 PID 控制下系统同步曲线

由图 8 可知:(1)相比于模糊 PID 控制,在粒子群模糊 PID 控制下的同步系统很好地改善了系统前期的同步运动性能,两缸的同步运动曲线非常一致;(2)曲线已经消除超调现象,且振荡较为微弱;(3)同步误差峰值和稳定值均大幅度下降^[18]。

4.5 控制器动态响应效果比较

笔者将传统 PID 控制、模糊 PID 控制和粒子群模糊 PID 控制下,风机盘车驱动缸组的同步控制系统的动态响应效果进行了对比。

3 种控制器动态响应效果对比结果,如表 2 所示。

表 2 3 种控制器动态响应效果对比

控制器	稳定时间/s	超调量/%	振荡情况
传统 PID	0.45	10.6	剧烈
模糊 PID	0.35	5.3	一般
粒子群模糊 PID	0.22	0	微弱

由表 2 可以看出:相比于模糊 PID 控制器,粒子群模糊 PID 控制器将系统稳定时间从 0.35 s 降低至 0.22 s,消除了系统的超调量,并改善了其振荡状况。

综上所述,在改善系统动态响应性能和提高同步控制性能两个方面,相比于传统 PID 控制器、模糊 PID

控制器,粒子群模糊 PID 控制器均有着优异的控制效果。

5 结束语

由于某液压式风机盘车驱动缸组存在同步控制精度较低的问题,笔者对缸组在负载力扰动作用下的同步控制策略进行了研究,提出了一种基于粒子群模糊 PID 控制器。

首先,笔者以新型液压式风机盘车为研究对象,简述了驱动缸组的工作原理,给出了驱动缸组的数学模型,并基于状态差值反馈同步策略,建立了驱动缸组的同步控制模型;

其次,在传统 PID 和模糊 PID 控制器的基础上,设计了粒子群模糊 PID 控制器,并通过 Simulink 仿真,对比分析了 3 种控制器的控制性能,结果表明,粒子群模糊 PID 控制器的控制性能要明显优于前两种控制器。

相较于模糊 PID,粒子群模糊 PID 控制器虽然在设计上更为复杂,但却易于编程实现,而且粒子群算法本身也非常适用于优化液压系统,因而具有一定的研究意义。

笔者下一步的工作将针对粒子群算法的权重系数进行研究,分析变权重系数对同步系统性能优化的影响情况。

参考文献 (References):

- [1] 贾鑫龙. 16000 t 海上浮托安装平台液压系统同步控制方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2020.
- [2] 周 围,李群明,高志伟,等. 基于模糊 PID 的送杆机构同步控制建模与仿真研究[J]. 机电工程,2020,37(9):1006-1012.
- [3] 赵秉鑫,卢 宁,鹿开旭,等. 基于模糊 PID 的升降机层门联动装置建模与仿真研究[J]. 机电工程,2021,38(8):1038-1044.
- [4] LI Hong-long, PANG Bo. Research on synchronization control system of double hydraulic cylinder four-column hydraulic press[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(2): 82-85.
- [5] XU Xiao-dan, BAI Zhi-feng. Synchronization control algorithm of double-cylinder forging hydraulic press based on fuzzy neural network[J]. *Algorithms*, 2019, 12(3): 63-67.
- [6] ZHOU Yu-wei, ZHANG Qing, SHI Yu-fei. Simulation and verification of hydraulic control systems for continuous lifting [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(16): 1936-1942.
- [7] 陶翠霞,赵 鹏,孙 波. 多缸液压机的滑模变结构智能同步控制[J]. 锻压技术,2021,46(6):142-149.
- [8] XIE Miao, LIU Zhi-xiang, XIE Chun-xue, et al. Double cylinder synchronous control method of advanced support of roadway support [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(4): 404-409.
- [9] 张 静,张超勇,张思涵,等. 基于均值耦合的多液压缸位置同步控制[J]. 液压与气动,2021(2):50-55.
- [10] GU Zheng-zhao. The design of universal model of asymmetrical hydraulic cylinder controlled by servo-valve and its simulation analysis [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2016, 44(24): 75-79.
- [11] 叶小华,岑豫皖,赵 韩,等. 基于液压弹簧刚度的阀控非对称缸系统建模与仿真[J]. 中国机械工程,2011(1):22-27.
- [12] 彭 京,牛慧峰,李振宝,等. 阀控非对称缸全液压转向系统建模与动态性能分析[J]. 机床与液压,2019,47(20):138-143,191.
- [13] 韦 巍. 智能控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [14] BAI Q. Analysis of particle swarm optimization algorithm [J]. *Computer and Information Science*, 2010, 3(1): 180-184.
- [15] 王 纯,韩加好,吉 庆. 基于改进粒子群算法的齿轮传动优化设计研究[J]. 机电工程,2021,38(2):239-244.
- [16] 范昌勇,车芳芳. 一种风力发电液压制动系统的研究[J]. 液压气动与密封,2020(10):4-8.
- [17] JAGATHEESAN K, ANAND B, DEY N, et al. Performance evaluation of objective functions in automatic generation control of thermal power system using ant colony optimization technique-designed proportional-integral-derivative controller [J]. *Electrical Engineering*, 2018, 100(2): 895-911.
- [18] 孙 灿,李立威. 多点液压同步提升自动化控制系统设计与实现[J]. 机电工程技术,2021,50(7):79-82,190.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

赵立柱,苏东海,左 伟,等. 基于粒子群模糊 PID 控制的风机盘车液压缸同步控制系统[J]. 机电工程,2022,39(7):961-966.

ZHAO Li-zhu, SU Dong-hai, ZUO Wei, et al. Synchronous control system of hydraulic cylinder of fan coil car controlled by particle swarm fuzzy PID[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(7): 961-966.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>