

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.05.019

基于改进 PSO 的起重机双马达 同步模糊 PID 控制研究*

李楠^{1,2}

- (1. 长春汽车工业高等专科学校 汽车运用学院, 吉林 长春 130013;
2. 第一汽车集团 教育培训中心, 吉林 长春 130013)

摘要: 重型起重机液压起升系统在吊装过程中存在双马达同步误差问题, 为保证吊装作业安全, 对起重机液压起升系统的双马达同步控制策略进行了研究。首先, 分析了起重机起升系统主要元件的动态特性, 确定了起升系统控制参数指标; 然后, 通过引入存储向量的方法, 对粒子群算法的更新策略进行了改进, 解决了其“过早熟”的问题, 再利用得到的改进粒子群算法优化了模糊 PID 控制器的参数, 解决了 PID 参数无法在线整定的问题; 最后, 为了提高起升系统的同步控制精度, 在交叉耦合控制的基础上, 将所提出的控制策略用于起重机双马达起升过程, 并以吊钩倾角、马达出口压力为控制指标进行了仿真和试验。研究结果表明: 改进粒子群模糊 PID 控制策略能有效控制双马达的同步精度, 抗干扰能力强; 与采用的其它算法相比, 采用改进粒子群算法策略的控制精度提高了 60% 左右; 该研究为提高双马达同步控制精度提出了新方法, 也为起重机控制系统设计提供了理论参考。

关键词: 重型起重机; 液压起升系统; 改进粒子群优化算法; 模糊 PID; 控制策略; 双马达同步控制

中图分类号: TH213

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)05-0700-06

Synchronous fuzzy PID control of crane double-motors based on improved PSO

LI Nan^{1,2}

- (1. School of Automobile Application, Changchun Automobile Industry Institute, Changchun 130013, China;
2. Education and Training Center, China First Automobile Group Corporation, Changchun 130013, China)

Abstract: Aiming at the problem of double motor synchronization error in the hoisting process of hydraulic lifting system of heavy crane, the double motor synchronization control strategy was investigated to ensure operation safety. The dynamic characteristics of the main components of the lifting system were analyzed to determine the control parameters. And the update strategy of particle swarm optimization algorithm was improved by introducing the method of storage vector to solve the problem of "too premature". After that, the improved particle swarm optimization algorithm was used to optimize the parameters of fuzzy PID controller. It was helpful to solve the problem that PID parameters could not be adjusted online. Based on the cross-coupling control, the proposed control strategy was applied to the lifting process of crane double motors for improving the accuracy of synchronous control. In following, the simulation and experiments were carried out with the hook inclination and motor outlet pressure as the control indexes. The results show that the improved particle swarm fuzzy PID control strategy can effectively control the synchronization accuracy of dual motors and have strong anti-interference ability. Comparing with other algorithms, the control accuracy was improved by about 60%. This study can not only put forward a new method to improve the accuracy of dual motor synchronous control, but also provide a theoretical reference for the design of crane control system.

Key words: heavy crane; hydraulic lifting system; improved particle swarm optimization(PSO) algorithm; fuzzy PID; control strategy; dual motor synchronization control

收稿日期: 2021-12-22

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(20191006016HJ, 20180805062HJ)

作者简介: 李楠(1985-), 女, 辽宁大石桥人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电气自动化方面的研究。E-mail: linannan111@126.com

0 引言

重型起重机由于起重吨位大,通常采用主、副两个液压马来共同提升吊重,以确保起吊过程中的安全性和可靠性。而在该过程中,两个马达的同步精度是影响起重机性能的重要指标^[1]。

由于存在液压波动、元件泄漏等问题,两个马达的转速会出现偏差,从而导致吊重倾斜,产生安全隐患,甚至引发事故,也会使起升系统的工作性能大打折扣^[2-4]。因此,需要寻找一种有效的控制策略,使两个马达保持较高的同步精度,以提高起重机的工作效率。

起重机起升系统是一个多变量、时变性的复杂系统,传统的 PID 控制由于无法实时调节参数,且其控制精度较低,不能满足双马达的同步控制要求^[5]。

为此,学者们对算法进行了改进,使起升系统的同步控制精度得到明显提高。杨前明等人^[6]基于等同控制策略,提出了一种双马达模糊神经网络控制算法。HUSSIEN M 等人^[7]提出了一种泵控马达系统的模糊 PID 控制策略,使起升系统的控制精度有所提高。杨皓琦等人^[8]基于交叉耦合的方式,设计了一种模糊滑模控制器,实现了对双路阀控液压马达系统的同步控制。郑宇等人^[9]建立了双马达电液伺服转台动力学模型,并在综合考虑了机械耦合、惯量扰动等因素的基础上,提出了一种变惯量自适应鲁棒同步控制方法。李向鑫^[10]以阀控液压马达位置同步系统为研究对象,根据电液伺服阀特点,分别基于自适应模糊 PID 控制、自抗扰控制与滑模变结构控制策略,对变位机系统进行了联合仿真。

由于等同控制方式无法形成有效的反馈机制,会使同步精度受到一定影响;而模糊规则的制定依赖专家经验,且效率较低;另外,目前多数测试都在试验台上进行,且多数采用了阀控液压马达结构,不适合重型起重机的大载荷工况要求。

总之,目前针对起重机双泵-双马达同步控制的研究还较少,且所用方法尚存在一定缺陷。

因此,笔者在参考现有研究成果的基础上,针对液压传动非线性、时变性的特点,为进一步提高重型起重机双马达同步控制精度,对关键元件的动态特性进行分析;提出一种基于改进粒子群优化(IPSO)的双马达模糊 PID 控制策略,实现 PID 控制参数的动态校正;同时,基于交叉耦合控制方式对双马达同步控制效果进行仿真和试验研究,并与其他算法进行对比分析,以期验证所用方法的有效性。

1 起升系统原理与动态特性分析

1.1 起升系统结构及原理

笔者所研究的起重机液压起升系统由两组结构相同的排量调节机构、变量泵、定量马达、减速器以及滑轮机构等组成,如图 1 所示^[11]。

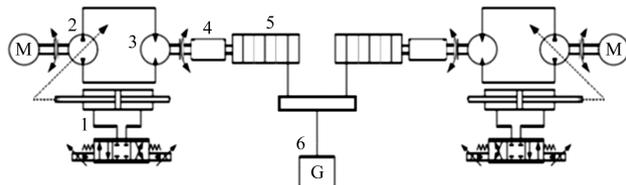


图1 起重机双马达起升系统结构

1—排量调节机构;2—变量泵;3—定量马达;4—减速器;5—滑轮机构;6—吊钩

由图 1 可见:液压起升系统是由两组相互独立的泵控马达单元组成,在同步控制器的作用下,共同完成起吊工作;在其进行吊装作业时,液压油经过变量泵 2 流入定量马达 3,经过滑轮机构 5 驱动吊钩 6 完成起降工作;变量泵通过排量控制机构 1 调节斜盘的倾角,能够改变泵的排量,从而改变进入马达的流量,实现对卷扬速度的控制。

1.2 动态特性分析

为了分析起升系统的动态特性,需要对影响同步控制精度的参数变量进行研究,从而确定同步控制器的控制指标,这里只对其中的主要元件进行分析。

1.2.1 液压缸动态特性

变量泵的排量由控制叶片的斜盘倾角决定,而控制斜盘的机构是一种阀控液压缸系统,如图 2 所示。

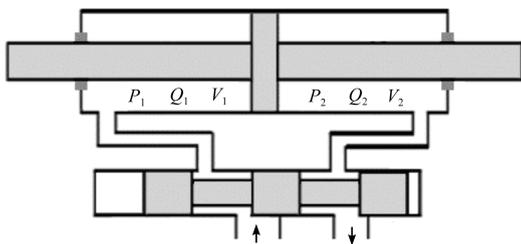


图2 阀控液压缸结构

图 2 中,当电磁控制阀阀芯向右移动时,液压油进入液压油缸的左腔,推动活塞向右运动,并带动变量泵的斜盘向逆时针方向旋转,使变量泵的排量变小,输出流量也随之减少;同时,进入马达的流量也减少,从而使马达的转速减小,重物起升速度下降。

此时液压缸的流量连续性方程为^[12]:

$$C_{hi}P_{h2} - (C_{hi} + C_{he})P_{h1} + Q_{h1} = A \frac{dV_{h1}}{dt} + \frac{V_{h1}}{\beta_e} \cdot \frac{dP_{h1}}{dt} \quad (1)$$

$$C_{hi}P_{h1} - (C_{hi} + C_{he})P_{h2} - Q_{h2} = A \frac{dV_{h2}}{dt} + \frac{V_{h2}}{\beta_e} \cdot \frac{dP_{h2}}{dt} \quad (2)$$

式中: Q_{h1}, Q_{h2} —进、出液压缸的流量; V_{h1}, V_{h2} —液压缸进油腔和回油腔的容积; P_{h1}, P_{h2} —液压缸进、回油腔的压力; C_{hi}, C_{he} —液压缸内、外泄漏系数; A —活塞的有效工作面积; β_e —流体体积弹性模量。

液压缸活塞力平衡方程为:

$$A(P_{h1} - P_{h2}) = m_{hf} \frac{d^2 x_h}{dt^2} + \xi \frac{dx_h}{dt} + K_h x_h + F \quad (3)$$

式中: m_{hf} —活塞与负载质量和; K_h —对中弹簧的刚度; ξ —流体黏性阻尼系数; x_h —活塞水平方向的位移; F —活塞受到的外负载力。

1.2.2 液压控制阀动态特性

阀芯力平衡方程为:

$$m_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} + \mu \frac{dx_v}{dt} = \lambda_i i - \lambda_d x_v - K_v x_v \quad (4)$$

式中: m_v —阀芯质量; x_v —阀芯位移; μ —阻尼系数; λ_i —电流量增益; K_v —控制弹簧的刚度; i —控制电流; λ_d —位移力增益。

1.2.3 变量泵动态特性分析

变量泵排量方程为^[13]:

$$D_p = k_p \theta \quad (5)$$

式中: D_p —变量泵的排量; k_p —变量泵排量系数; θ —变量泵斜盘的倾角。

变量泵的流量连续性方程为:

$$Q_p = k_p \theta \omega_p - C_{pi}(P_{p1} - P_{p2}) - C_{pe} P_{p1} \quad (6)$$

式中: ω_p —变量泵转速; C_{pi}, C_{pe} —变量泵内、外泄漏系数; P_{p1}, P_{p2} —变量泵进、回油压力。

1.2.4 液压马达动态特性

液压马达流量连续性方程为:

$$Q_m = D_m \frac{d\theta_m}{dt} + C_{mi} P_L + \frac{V_m}{4\beta_e} \frac{dP_L}{dt} \quad (7)$$

式中: D_m —马达排量; θ_m —马达转角; C_{mi} —马达总泄漏系数; V_m —马达容积; P_L —马达负载口压力。

2 控制策略研究

2.1 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是基于鸟群捕食活动而深化出的优化算法。在其寻优计算中,通过不断跟踪最优解,实现对粒子速度和位置的更新。

若将粒子看作是一个 N 维空间的解向量,设 x 和 v 代表粒子 i 的空间位置和速度,则在 t 时刻,粒子的更新策略可以表示为^[14,15]:

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 [p_{id}(t) - x_{id}(t)] +$$

$$c_2 r_2 [p_{gd}(t) - x_{id}(t)] \quad (8)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t) \quad (9)$$

式中: $p_{id}(t), p_{gd}(t)$ — t 时刻个体最优解和全局最优解; d —当前粒子的维数,且 $d = 1, 2 \dots N$; ω —粒子的惯性权重; c_1, c_2 —粒子更新时的学习因子; r_1, r_2 — $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数。

2.2 改进粒子群算法

在运算过程中,PSO 算法易陷入“过早熟”现象,使粒子位置和速度的精度受到影响,因此需要对其进行改进。

设变量 θ 为存储向量,对于粒子群中的粒子 i ,任意选择另外一个粒子 j ,则有:

$$\theta = p_{id} - x_j \quad (10)$$

式中: x_j —粒子 j 在相同时刻的位置。

将存储向量加入粒子寻址过程,对于粒子的更新策略进行改进,扩大粒子的搜索范围,解决“过早熟”问题,即:

$$v_{id}(t+1) = \begin{cases} \omega [v_{id}(t) + c_1 r_1 \theta + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t))] \\ \omega [v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t))] \end{cases} \quad (11)$$

2.3 基于 IPSO 的模糊 PID 控制

传统 PID 控制结构简单、易于实现,但是参数不能在线调整,所以应用范围受到一定限制。将模糊推理技术用于 PID 参数的实时整定,可以弥补系统因参数动态变化而产生的同步误差,能够有效提高控制精度。但是,模糊规则的制定往往受专家主观经验影响,且响应速度较低。

采用 IPSO 对其隶属函数进行优化,可以大幅提高系统收敛速度,解决模糊 PID 运行效率问题,其优化步骤如下^[16-18]:

(1) 初始化参数。包括确定适应度函数、学习因子、迭代次数、粒子的初始位置和速度等参数;

(2) 计算并更新适应度数值。通过学习训练样本,把得到的训练误差作为新的适应度值,对原有数值进行更新;

(3) 计算惯性权重,利用式(8~11)更新粒子参数;

(4) 更新完成后,利用粒子的各项指标对模糊控制器的隶属度函数进行优化,使控制器参数能够实时反映工况变化;

(5) 判断终止条件,满足条件输出最优解,否则继续更新粒子参数。

笔者将主、副马达的输出压力差 e 和偏差变化率 ec 为控制器的输入变量(k_p, k_i, k_d 为输出变量),并定义输入、输出变量的模糊子集;利用模糊规则建立,系统输

入、输出与 PID 参数逻辑关系,同时将误差结果作为 IP-SO 的评价函数,计算粒子适应度,调整模糊论域的取值范围,实现对模糊 PID 参数的优化,以期提高系统精度。

IPSO 模糊 PID 控制器原理如图 3 所示。

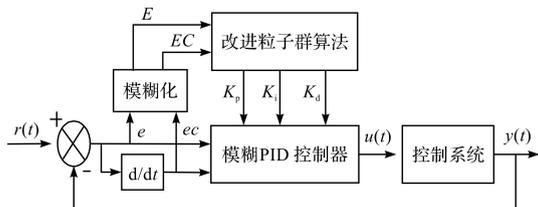


图3 IPSO 模糊 PID 控制器原理

3 仿真分析

3.1 控制方式及参数

在多液压马达同步的控制方式中,目前比较流行的跟随方式主要包括主从控制和交叉耦合控制两种。前者是以主卷马达的输出信号作为副卷马达控制器输入的控制方式;后者则是指在同一信号输入的基础上,将主、副马达输出信号的差值也作为附加输入的控制方式,从而达到同步控制的目的。

交叉耦合控制方式响应速度快,并能精确地反映出每个负载的变化情况。因此,笔者以交叉耦合作为跟随方式,将改进粒子群优化的模糊 PID 控制策略应用于起重机双马达同步控制系统,如图 4 所示。

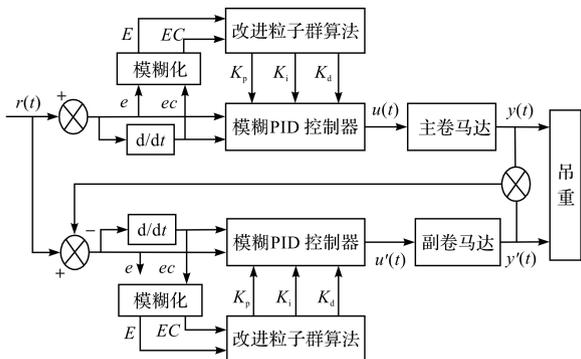


图4 交叉耦合同步控制原理框图

为了验证控制策略的有效性,假设两组起重系统的结构和参数相同,笔者采用 S-function 函数编写粒子群算法,在 MATLAB/Simulink 模块中对液压起重系统的数学模型进行仿真,其具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数/单位	取值	参数/单位	取值
发动机最高转速 / (r · min ⁻¹)	1 200	采样频率/Hz	50
马达排量 / (mL · r ⁻¹)	160	迭代次数	100
液压泵最大排量 / (mL · r ⁻¹)	135	粒子数量	15
起重机起吊重量/t	120	优化范围	0—1 000

3.2 单位阶跃仿真

笔者以单位阶跃信号作为系统输入得到仿真结果,并将其与采用 PID 算法、Fuzzy PID 算法得到的结果进行对比,如图 5 所示。

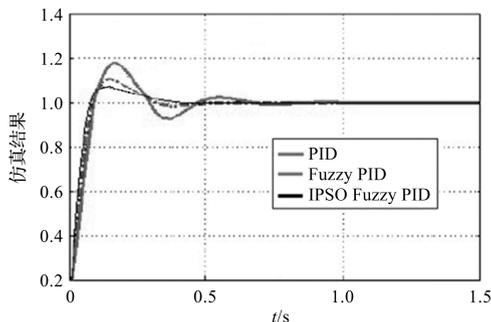


图5 单位阶跃信号仿真结果

从图 5 可以看出:在 3 种控制算法中,IPSO 优化模糊 PID 控制算法响应速度快、超调量小,鲁棒性强,可有效满足双马达同步控制要求。

3.3 吊钩倾角仿真

控制马达同步的实质是使各马达的转速一致。因此,在仿真过程中假设各组滑轮机构的效率相同,则可以将吊钩平台的水平倾角作为指标进行分析。

为了便于分析,笔者设两根钢丝绳初始长度不一致,即吊钩固定平台与水平面存在一定的角度。设 $\alpha = 5^\circ$,仿真时间为 8 s,分别采用模糊 PID 控制和 IPSO 模糊 PID 控制进行仿真对比,结果如图 6 所示。

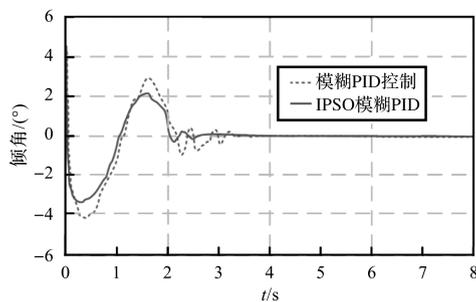


图6 吊钩倾角仿真结果

由图 6 可知:当开始同步控制后,吊钩倾角逐渐减小,直至达到平衡。调节过程中,倾角起初出现振荡现象,这是由于液压系统存在冲击波动和惯性,但总体呈现衰减趋势。

两种控制方法都能有效实现同步控制,但模糊 PID 控制算法在 3.8 s 达到平衡,而 IPSO 模糊 PID 控制算法则在 2.6 s 达到平衡,且振荡幅度更小。

可见,IPSO 模糊 PID 控制策略具有很好的控制效果,同步精度大幅提高。

4 试验研究

为了验证该控制方法的可靠性,笔者对起重机的液

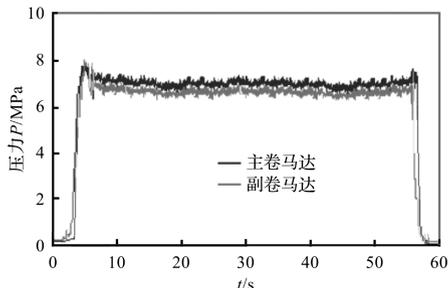
压起升系统进行试验研究。

当双马达出现同步误差时,会使吊钩产生一定的倾角,引起吊重倾斜,进而导致反馈到两组起升系统中的液体压力不一致。由于吊钩倾角在试验中不易采集,因此,在试验中,笔者将马达的出口压力作为指标进行研究,利用偏差信号控制控制阀的开度,改进变量泵排量,进而调节使两个马达的转速一致。

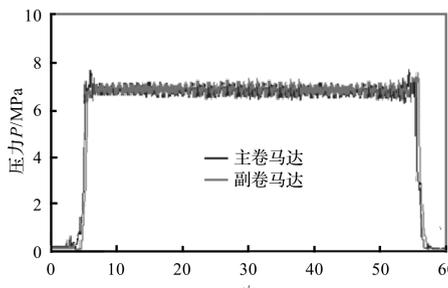
试验在 3 200 t 履带起重机上进行,利用 MATLAB 对原有模糊同步控制器算法进行改进,利用改进粒子群算法优化模糊论域;并定义模糊子集和制定模糊规则,从而动态调整 PID 参数;

笔者采用 16 通道采集器进行数据采集,在主、副马达的出口处分别安装量程为 35 MPa 的压力传感器。分别在空载和吊重 180 t 两种工况下进行测试,并将结果与采用模糊 PID 控制策略获得的结果进行对比。

空载工况下的试验结果如图 7 所示。



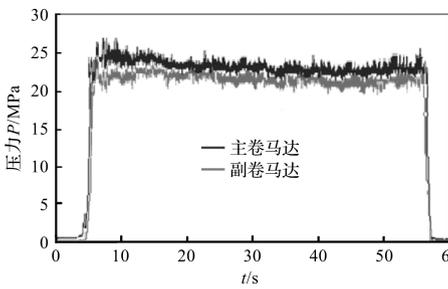
(a) Fuzzy PID 控制



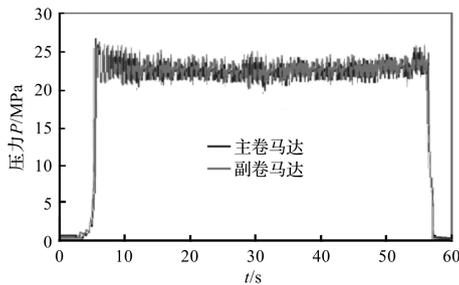
(b) IPSO Fuzzy PID 控制

图 7 空载工况下的试验结果

吊重 180 t 工况下的试验结果如图 8 所示。



(a) Fuzzy PID 控制



(b) IPSO Fuzzy PID 控制

图 8 吊重 180 t 工况下的试验结果

上述结果表明:

在不同工况下,两种控制策略都能使主、副马达保持较好的同步精度;但与模糊 PID 控制相比,IPSO 模糊 PID 控制策略主、副马达之间的跟随性更好,二者的平均压力偏差在空载时仅为 0.31 MPa,控制精度提高了 57.6%;而当负载为 180 t 时的平均压力偏差仅为 0.79 MPa,控制精度提高了 62.5%。

该试验结果表明,该控制策略是有效的,具有鲁棒性好、控制精度高的优势。

5 结束语

笔者针对液压起升系统非线性、时变性以及结构独立的特点,以提高同步控制精度为目标,对起重机液压起升系统双马达同步问题进行了研究,分析了起升系统动态特性,以确定控制指标参数;对粒子群算法进行了改进,提出了一种基于 IPSO 的模糊 PID 控制算法,并将其用于起重机双马达同步系统中;以吊钩倾角和马达出口压力为控制指标,同时基于交叉耦合控制方式进行了仿真分析和试验研究。可得出以下研究结论:

- (1) 粒子的更新过程经过优化后,能够扩大搜索范围,避免其发生“过早熟”的缺陷;
- (2) 仿真结果表明:IPSO 控制策略具有较强的稳态特性,响应速度快、抗干扰能力强;
- (3) 试验充分验证了仿真结果的正确性,马达出口压力偏差可真实反映马达的转速偏差。

笔者所用策略控制精度高、同步效果好,相比现有方法,其精度提高了 60% 左右,达到了设计预期,为双马达同步控制问题提供了新方案。

在试验中,因吊钩倾角不易采集而仅采用马达出口压力作为控制指标,忽略了减速器、滑轮机构的误差以及钢丝绳的弹性变形,可能使起重机起升系统的控制精度受到一定影响。

(下转第 712 页)

本文引用格式:

李楠. 基于改进 PSO 的起重机双马达同步模糊 PID 控制研究[J]. 机电工程, 2022, 39(5): 700-704, 712.

LI Nan. Synchronous fuzzy PID control of crane double-motors based on improved PSO[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(5): 700-704, 712.

- [10] CHEN Hong-sheng, NIE Hui-hui, WANG Wen-xian, et al. A novel neutron shielding AA6061/B4C laminar composite fabricated by powder metallurgy: "SPS-HER" [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 806: 1445-1452.
- [11] 李亚锋, 姚新改, 梁 星, 等. 小径不锈钢管内壁磁性珩磨磨具研发及试验研究[J]. *制造技术与机床*, 2019, 683(5): 108-112.
- [12] 庞鸿飞. 磁力珩磨系统磨具研发及实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [13] 庞鸿飞, 李 斌, 李雪红, 等. 磁性珩磨磨座 CBN 珩磨条研发[J]. *机械设计与制造*, 2016, 300(2): 81-83.
- [14] 郑津洋, 李雅娴, 徐 平, 等. 应变强化用奥氏体不锈钢力学性能影响因素[J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2011, 12(5): 512-519.
- [15] 倪 健, 吴世友. 珩磨技术及其在机械加工中的应用[J]. *装备制造技术*, 2012, (1): 158-159.
- [16] 李颂华, 韩 涛, 孙 健, 等. HIPSIN 陶瓷干/湿磨情况下表面珩磨质量研究[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2019, 183(6): 165-172.
- [17] 苑东杰, 朱大敏. 湿磨和干磨及其选用[J]. *化工装备技术*, 2002, 23(3): 12-15.
- [18] 付东成, 尤凤青. 发动机气缸珩磨质量微观结构测评研究[J]. *机械制造*, 2020, 58(4): 2.
- [19] 吴洪武, 邝欲光, 杨 溢. 一种用于焊缝打磨的多功能小型挫机头设计[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(8): 240-242.

[编辑: 雷 敏]

本文引用格式:

燕昭锃, 姚新改, 郭瑞鹏, 等. 长小径不锈钢管内表面的磁性珩磨工艺[J]. *机电工程*, 2022, 39(5): 705-712.

YAN Zhao-kun, YAO Xin-gai, GUO Rui-peng, et al. Process of magnetic honing for long and small diameter stainless steel tube surface[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(5): 705-712.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 704 页)

因此, 在后续的研究中, 笔者将会综合考虑减速器、滑轮机构的误差以及钢丝绳的弹性变形因素, 以提高起升系统的控制精度。

参考文献 (References):

- [1] 张振明. 基于 CMAC 滑模控制的双马达同步技术研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(14): 163-166.
- [2] DONG L, ZHU C. Distributed control strategy for large-scale hydraulic synchronous lifting systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2018, 232(3): 213-222.
- [3] 姚 君. 大型履带起重机双卷扬系统动态特性与同步控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [4] GOHARRIZIA Y, SEPEHRI N, WU Y. A wavelet-based approach for diagnosis of internal leakage in hydraulic actuators using on-line measurements[J]. *Fluid Power Net International*, 2010, 11(1): 61-69.
- [5] CE M, WU Q X, JIANG C S. Disturbance observer based robust synchronization control of uncertain chaotic systems[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 70(4): 2421-2432.
- [6] 杨前明, 洪广元, 胡开文, 等. 双马达模糊神经网络速度同步控制实现方法研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(11): 1229-1234.
- [7] HUSSIEN M, HAMIDIA J. Speed control of hydraulic motor system with swash plate DC-controlled pump[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 403: 4828-4840.
- [8] 杨皓琦, 苏东海, 胡懿宸, 等. 基于模糊滑模控制的双路阀控液压马达同步控制研究[J]. *机械工程师*, 2021(11): 58-60.
- [9] 郑 宇, 张志龙, 施卫科, 等. 基于自适应鲁棒的电液伺服转台双马达同步控制[J]. *液压与气动*, 2020(7): 163-168.
- [10] 李向鑫. 变位机翻转工作台液压马达同步控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [11] LONG Ming, HU Ai-min, GAO Zhi-gang, et al. Velocity and load characteristics analysis of pump-control-motor hydraulic drive system[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 139(141): 947-951.
- [12] 王 岩. 变量泵控制变量马达系统建模及控制[J]. *控制工程与应用*, 2012, 29(1): 41-46.
- [13] 李 琴, 庞学慧, 梁军华. 基于 AMESim 的大吨位起重机起升系统建模及优化设计[J]. *煤矿机械*, 2015, 36(6): 214-216.
- [14] 张继荣, 张 天. 基于改进粒子群算法的 PID 控制参数优化[J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(4): 1035-1040.
- [15] 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.
- [16] 岳丽敏, 文晓娟. 立式食品包装机袋材恒速供送控制系统研究[J]. *包装与食品机械*, 2021(3): 78-84.
- [17] 索小娟, 卫前伟. 改进模糊 PID 的称重式包装机智能控制[J]. *包装与食品机械*, 2020(1): 55-60.
- [18] 王华荣, 谢海智. 基于 IPSO 的桥式起重机吊重防摆系统模糊 PID 控制研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(5): 623-627.

[编辑: 雷 敏]