

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2021.02.008

基于均值耦合的多液压缸位置同步控制

张 静, 张超勇, 张思涵, 胡忠全

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 针对多液压缸位置同步控制系统存在的耦合作用及偏载问题, 提出一种基于均值耦合的同步控制策略, 其控制思想为: 控制器不仅要考虑自身的跟随误差, 还要考虑与其余 $n-1$ 个液压缸的同步误差, 然后将得到的耦合误差通过模糊 PID 控制算法对回路进行在线调整, 实现 4 液压缸升降平台的同步控制。最后, 通过 AMESim/Simulink 联合仿真验证了与相邻交叉耦合控制策略相比, 均值耦合控制策略能更好的解决液压缸的耦合作用及偏载问题, 而且同步误差小, 调节速度快, 系统稳定性高。

关键词: 同步控制; 均值耦合; 偏载; 模糊 PID; 同步误差

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2021)02-0050-06

Multi-cylinder Position Synchronization Control Based on Mean Coupling

ZHANG Jing, ZHANG Chao-yong, ZHANG Si-han, HU Zhong-quan

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050)

Abstract: Aiming at the coupling effect and eccentric load problems of the multi-cylinder position synchronization control system, a synchronization control strategy based on mean coupling is proposed. The control idea is: the controller not only has to consider its own following error, but also consider the other $n-1$ synchronization error of a hydraulic cylinder, and then the obtained coupling error is adjusted online through the fuzzy PID control algorithm to realize the synchronization control of the four hydraulic cylinder lifting platform. Finally, through the AMESim/Simulink co-simulation, it is verified that compared with the adjacent cross-coupling control strategy, the mean value coupling control strategy can better solve the coupling effect and eccentric load problems of the hydraulic cylinder, and the synchronization error is small, the adjustment speed is fast, and the system is stable.

Key words: synchronous control, partial load, mean coupling, fuzzy PID, synchronization error

引言

多液压缸同步控制系统广泛应用于冶金、军事、航空航天、工程机械等重型负载提升和推拉场合, 对系统运动的稳定性和同步精度都有着严格要求^[1-3]。然而, 多液压缸同步控制系统结构复杂, 具有很强的耦合作用, 很难实现高精度同步控制, 因此, 研究满足实际需求的高精度同步控制系统, 具有重要的理论意义和实践指导价值^[4]。

对于多液压缸同步控制问题, 国内外学者进行了大量研究。文献[5]针对同步过程中油缸的受力不均问题, 提出负载不均情况下, 必须对每个油缸单独控制; 文献[6]提出基于相邻交叉耦合的多液压缸同步控制策略, 并利用模糊 PID 算法对耦合系数进行求解,

仿真验证了相邻交叉耦合控制策略能快速消除误差, 同步精度高, 且系统加减速时稳定性好; 文献[7]针对锻造液压机双缸同步系统控制精度不足的问题, 提出采用误差反馈的同步控制结构, 并结合遗传算法, 对系统中 PID 控制器参数进行优化分析, 满足锻造液压机对同步控制性能要求; 文献[8]针对海洋工程大型结构物模块的三维重载对接要求, 设计了一种新型的重载对接装置, 并提出一种结合模糊 PID 算法的多缸

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51466008)

作者简介: 张静(1971—), 女, 甘肃玉门人, 副教授, 博士, 主要从事液压元件与系统的研究和教学工作。

耦合同步控制方法,解决了主从控制产生的位移滞后问题,而且有效避免了系统加减速时产生的波动;文献[9]针对某大型航天装备运输过程中的同步问题展开研究,提出采用位置同步控制和力跟踪控制方法设计了一个电液伺服系统,实现4个油缸的同步控制。

本研究以4液压缸同步升降平台为研究对象,针对系统运行过程中存在的耦合作用及偏载问题,提出一种均值耦合控制策略,再结合模糊PID控制算法实现升降平台的同步控制。最后,通过AMESim/Simulink搭建液压系统及控制算法模型,仿真验证了均值耦合控制策略在系统偏载运行时的有效性。

1 数学模型

如图1所示,升降平台由4条独立的液压回路控制,包括液压泵、单向阀、溢流阀、4个电液伺服、4个差动液压缸和位移传感器等^[10]。假定液压缸缸体固定在底座上,活塞杆末端与平台铰接,且平台只有3个方向的自由度(即:z轴方向的垂直升降,绕r轴和p轴的偏转),并将调平系统的初始位置记为 $o(z=0, \theta_r=0, \theta_p=0)$ 。

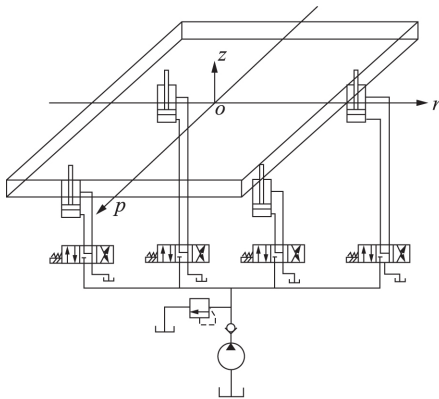


图1 升降平台的基本组成

由图1可得,单通道液压回路是典型的阀控缸闭环控制系统,其开环传递函数可表示为^[11]:

$$G(s) = \frac{K}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (1)$$

式中, $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_1^2}{mV_0}}$ 为液压缸固有频率, Hz; $\xi_h = \frac{K_{ce}}{A_1} \times \sqrt{\frac{\beta_e m}{V_0} + \frac{B_p}{4A_1} \sqrt{\frac{V_0}{\beta_e m}}}$ 为液压阻尼比; β_e 为油液的体积弹性模量, MPa; A_1 为无杆腔有效作用面积, m^2 ; m 为活塞及负载折算到活塞上的总质量; V_0 为液压缸总压缩容积; $K_{ce} = K_c + C_{ip}$ 为总流量-压力系数; B_p 为黏性阻尼系数。

2 控制器设计

2.1 均值耦合控制器设计

如图2所示,当系统偏载运行时,平台绕r轴和p轴方向偏转,很难实现升降平台的高精度同步运行,因此,必须选择合适的控制策略对液压回路进行在线调整。

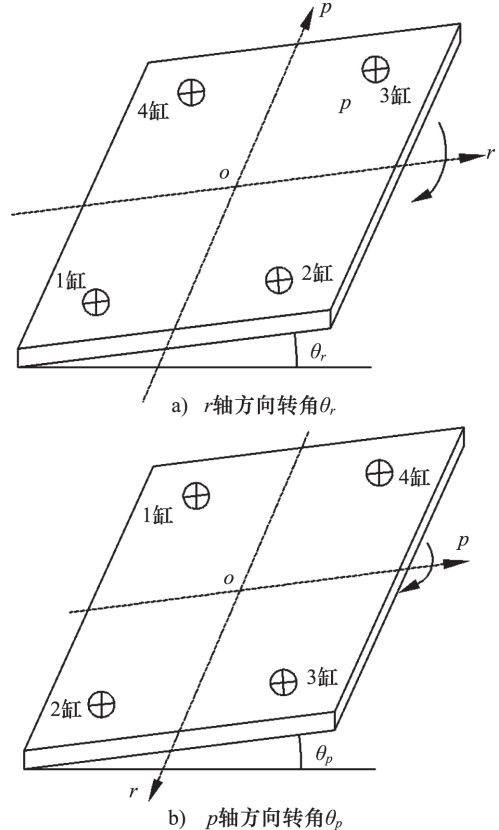


图2 系统偏载运行

均值耦合控制策略结合了偏差耦合的全局补偿性与相邻交叉耦合的低运算性,实现系统的全局补偿,而且每次只需计算一次,运算量远小于偏差耦合控制策略^[11]。如图3所示,对于n液压缸同步控制系统,不

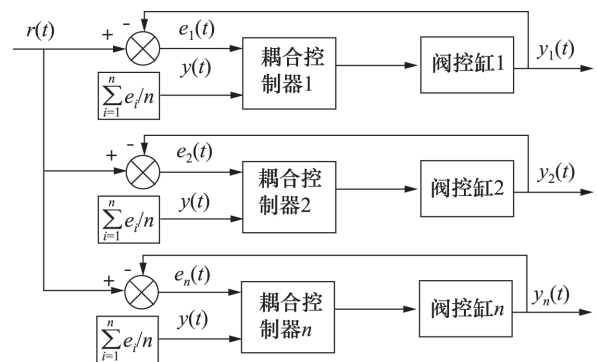


图3 多液压缸同步控制系统结构框图

仅要考虑液压缸自身的跟踪误差,还要考虑与其余 $n - 1$ 个液压缸的同步误差。

将系统的输入信号记为 $r(t)$, 某一液压缸 i 的输出位移记为 $y_i(t)$, 则系统的均值误差可表示为 $y(t) = [e_1(t) + e_2(t) + \dots + e_n(t)] / n$, 液压缸 i 的跟踪误差可表示为 $e_i(t) = r(t) - y_i(t)$ 。综上,可得到液压缸的同步耦合误差 $\beta(t) = e_i(t) + y(t)$ 。

为保证升降平台在运行过程中始终保持高精度同步运行,需要控制器对同步耦合误差 $\beta(t)$ 进行实时补偿,使液压缸的跟踪误差 $e_i(t)$ 满足 $\lim_{t \rightarrow 0} e_i(t) = 0$, 均值误差满足 $y(t) = 0$, 同步耦合误差满足 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$ 。

由于液压系统是典型的非线性系统,所以将均值耦合控制策略与模糊 PID 控制算法结合,实现系统控制,控制器结构如图 4 所示。将液压缸的同步耦合误差 $L_i(t)$ 及误差变化率 $dL_i(t) / dt$ 转化为模糊量,然后按照预定的模糊规则进行模糊推理,实现 PID 控制参数 K_p, K_i, K_d 的在线调整。

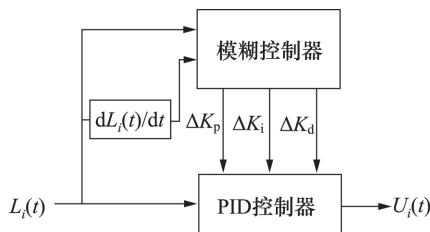


图 4 模糊 PID 控制器结构图

2.2 模糊控制器规则设计

将同步耦合误差 $L_i(t)$ 及误差变化率 $dL_i(t) / dt$ 的模糊子集划分为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} 7 个子区间。其中 K_p, K_i, K_d 模糊规则如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 K_p 的模糊规则表

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

表 2 K_i 模糊规则表

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

表 3 K_d 模糊规则表

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

3 搭建系统模型与仿真分析

3.1 仿真模型

本研究以 4 液压缸升降平台为研究对象,建立液压系统的 AMESim 模型如图 5 所示,系统的 Simulink 控制模型如图 6 所示,某一回路的模糊 PID 控制器内部结构如图 7 所示。其中,液压缸的活塞直径、活塞杆直径、活塞杆行程分别为 250, 180, 600 mm, 电液伺服阀开启电流为 1.17 A, 其他相关参数如表 4 所示。

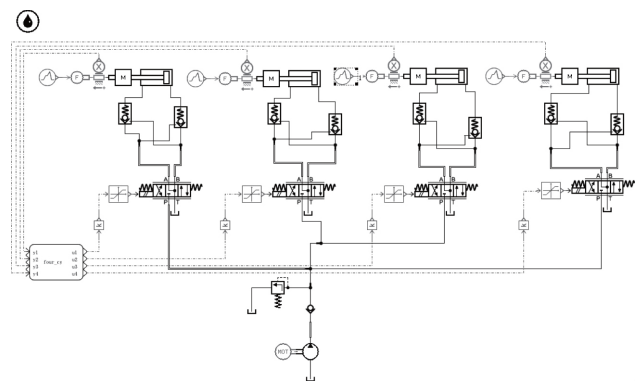


图 5 AMESim 仿真模型

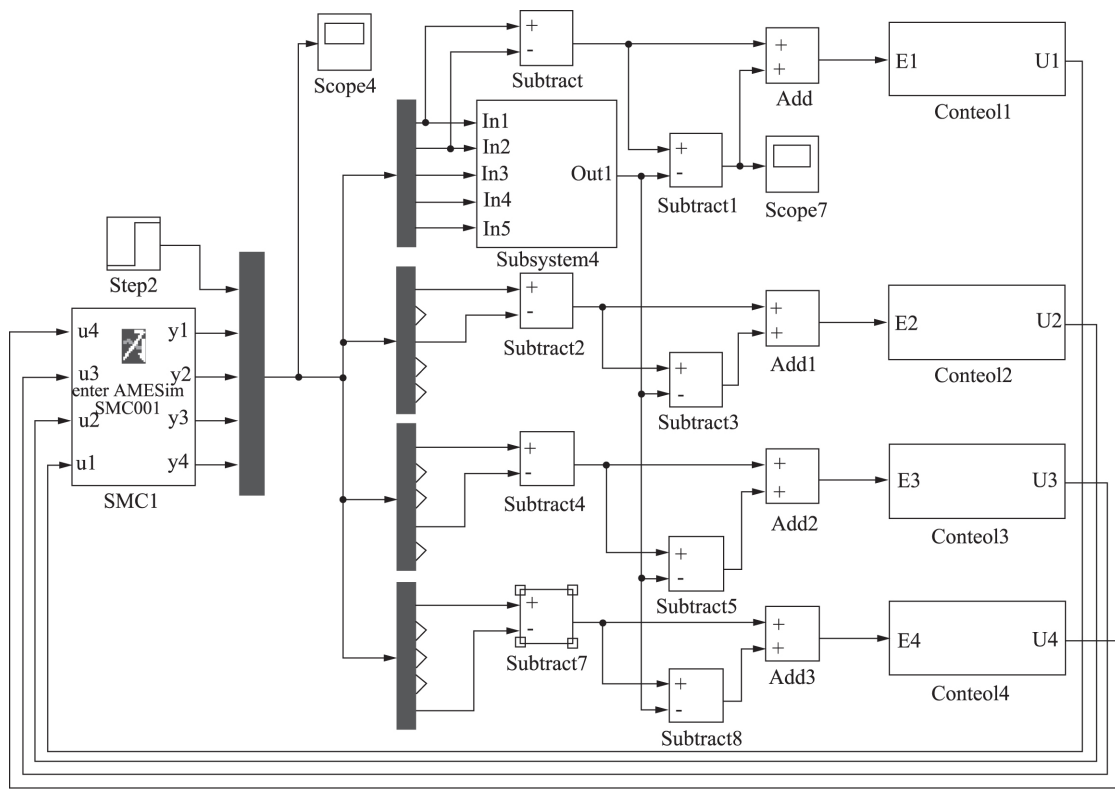


图 6 Simulink 仿真模型

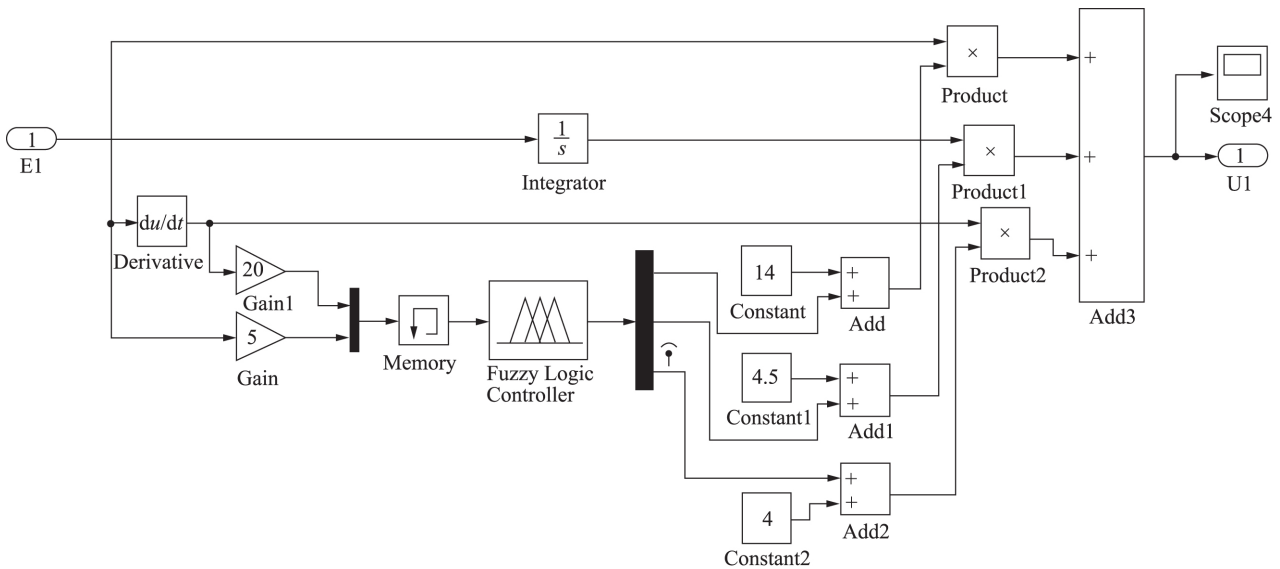


图 7 模糊 PID 控制器

3.2 仿真分析

考虑液压缸的同步精度受偏载及液压缸耦合作用的影响,以液压缸 2 为主要研究对象,搭建均值耦合控制策略与相邻交叉耦合控制策略仿真模块进行对比分析。

如图 8 所示,液压缸的负载压力依次设置为 80 ,

85 , 75 , 80 kN 时,系统整个运行过程中始终保持固定偏载。对比 2 种控制策略的仿真结果可以看出:固定偏载条件下,液压缸运行过程中始终存在一定的位移误差,均值耦合控制策略的最大同步误差为 2.38 mm,相邻交叉耦合控制策略的最大同步误差为 5.8 mm,且最大同步误差出现在负载压力相差最大的液压缸 2 和

液压缸3。

表4 仿真参数设置

系统参数	值
平台质量 m/kg	1600
油液密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	850
油液体积弹性模量 β_e/MPa	800
电液比例阀阻尼比 ε	0.6
液压缸有杆腔有效工作面积 A_1/cm^2	254.3
液压缸无杆腔有效工作面积 A_2/cm^2	490.6

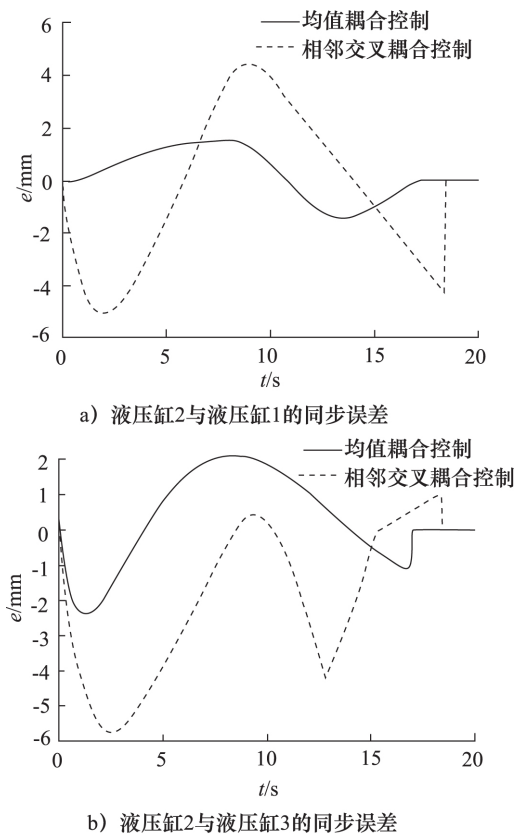


图8 定偏载同步位移误差

如图9所示,为进一步验证均值耦合控制策略的有效性,给液压缸2施加动态负载,压力范围设为75~85 kN,其余液压缸的负载压力均设定为80 kN,从仿真结果可以看出:当液压缸2承受动态负载时,曲线1的最大同步误差为1.55 mm,曲线2的最大同步误差为2.33 mm,且曲线2存在明显的调节滞后,说明

系统的某一个液压缸受到干扰时,均值耦合控制策略能更快做出调整,且将系统的同步耦合误差控制在更小范围内。

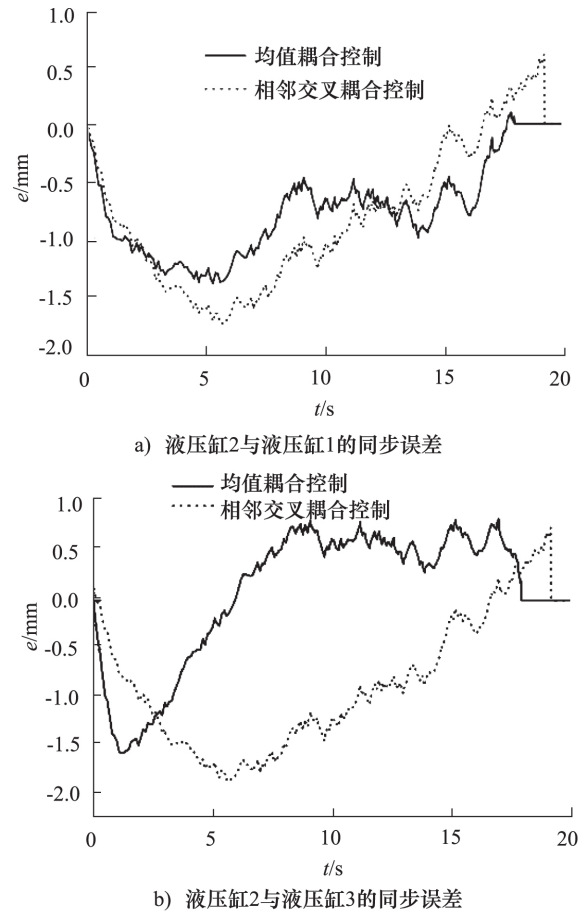


图9 动偏载同步位移误差

4 结论

(1) 以4液压缸同步升降平台为研究对象,针对系统存在的偏载及液压缸耦合问题,在建立了系统的数学模型的基础上,提出了一种均值耦合控制策略,其控制思想为:液压缸不仅需要考虑自身的跟踪误差,同时还要考虑与其余 $n-1$ 个液压缸的同步误差。

(2) 对比均值耦合控制策略与相邻交叉耦合控制策略在固定偏载和动态偏载的仿真结果,可以看出:与相邻交叉耦合控制策略相比,均值耦合控制策略具有同步误差小,响应速度快,稳定性高等优点,对系统偏载及耦合作用有更好的抑制作用。此外,系统在整个动态调节过程中始终存在一定的同步误差,且偏载力越大,偏载液压缸数量越多,系统的同步误差越大,越难实现平台的同步控制。

参考文献:

- [1] 窦海斌. 两非对称液压缸同步举升系统的自适应跟踪控制[J]. 液压与气动, 2017 (12): 82-89.
DOU Haibin. Adaptive Tracking Control for Synchronization Motion of Lift System with Two Asymmetric Hydraulic Cylinders [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017, (12): 82-89.
- [2] 倪敬, 王宏亮, 蒙臻, 等. 多液压缸同步驱动系统 DCAT-NDI 控制研究[J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2015 35(1): 14-22.
NI Jing, WANG Hongliang, MENG Zhen, et al. DCAT-NDI Control on Synchro-motion System with Multi-cylinder [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University: Natural Science Edition, 2015 35(1): 14-22.
- [3] 倪敬, 项占琴, 潘晓宏, 等. 多缸同步提升电液系统建模和控制[J]. 机械工程学报, 2006 (11): 81-87.
NI Jing, XIANG Zhanqin, PAN Xiaohong, et al. Motion Synchronization Modeling and Control for Multi-cylinder Electro Hydraulic Elevating System [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006 (11): 81-87.
- [4] 翟富刚, 李瑞阳, 袁龙, 等. 双锻造操作机大车行走系统控制方法探析[J]. 液压与气动, 2019 (11): 1-8.
ZHAI Fugang, LI Ruiyang, YUAN Long, et al. Analysis on Control Method of Walking System of Dual Forging Manipulators [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019 (11): 1-8.
- [5] HOGAN P, BURROWS C R. Synchronizing Unevenly-loaded Hydraulic Cylinders [C]//Proceedings of the ASME Fluid Power and Systems Technology Division, US: ASME, 1994: 75-80.
- [6] 刘芮葭, 陈凯. 多缸调平系统模糊相邻耦合同步控制研究[J]. 中国机械工程, 2016 27(17): 2316-2321.
LIU Ruijia, CHEN Kai. Research on Fuzzy Adjacent Coupling Synchronization Control in Multi-cylinder Leveling System [J]. China Mechanical Engineering, 2016 27(17): 2316-2321.
- [7] 李胜永. 锻造液压机双缸同步控制系统研究[J]. 液压与气动, 2020 (7): 99-105.
LI Shengyong. Research on the Synchronous Control System of Two Cylinders for Forging Hydraulic Press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020 (7): 99-105.
- [8] 成思铭, 章青. 大型结构物模块对接新型装置及多缸同步控制[J]. 中国机械工程, 2018 29(10): 1214-1219.
CHENG Siming, ZHANG Qing. New Device for Large Structure Block Docking and Multi-cylinder Synchronization Control Method [J]. China Mechanical Engineering, 2018 29(10): 1214-1219.
- [9] 李长春, 孟亚东, 刘晓东, 等. 电液伺服系统的同步控制[J]. 兵工学报, 2007 28(6): 765-768.
LI Changchun, MENG Yadong, LIU Xiaodong, et al. Synchronous Control of Electro-hydraulic Servo System [J]. Acta Armamentarii, 2007 28(6): 765-768.
- [10] 徐瑞亮, 陈奎生, 刘洋, 等. 基于模糊 PID 算法的车载液压调平动态特性联合仿真研究[J]. 液压与气动, 2017 (8): 112-117.
XU Ruiliang, CHEN Kuisheng, LIU Yang, et al. Co-simulation Based on Fuzzy PID Algorithm for Dynamic Characteristic of Vehicle Hydraulic Leveling [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017 (8): 112-117.
- [11] 王春行. 液压控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
WANG Chunxing. Hydraulic Control System [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] 陆晟波. 基于滑模控制的多永磁同步电机同步控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
LU Shengbo. Research on Synchronous Control of Multiple Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Sliding Mode Control [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.

引用本文:

- 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.
ZHANG Jing, ZHANG Chaoyong, ZHANG Sihan, et al. Multi-cylinder Position Synchronization Control Based on Mean Coupling [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021 (2): 50-55.