

基于误差反馈的双缸液压系统同步模糊PID控制系统设计

陈 杰¹, 泮进明²

(1. 盐城工业职业技术学院 信息与安全学院, 江苏 盐城 224005;

2. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029)

摘要: 传统液压机并式同步控制需要更长时间才能达到稳态误差, 不能实现液压机的高精度同步控制。为了提高液压机的工作效率, 开发了一种液压机双缸同步控制液压系统, 并给出活塞杆伸出和缩回两种状态下的控制方案。将同步误差补偿数据传输至液压缸2, 使其更快地完成动态响应, 从而显著减小液压缸2的位移差, 实现同步控制精度的显著提升。通过误差反馈方式实现同步控制, 从而达到对双液压缸同步运行过程的精确控制, 通过遗传算法整定PID参数, 显著提升了双缸液压系统的同步控制精度。误差反馈同步控制方式与并式控制方式相比, 最大误差依低了68.71%; 进入稳态误差所需的时间减少了18.52%, 因此, 可以通过同步控制结构来实现对液压机的精确同步控制。

关键词: 液压机; 双缸液压系统; 同步控制; 模糊PID控制; 误差反馈

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.023

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0142-05

Design on synchronous fuzzy PID control system for double-cylinder hydraulic system based on error feedback

Chen Jie¹, Pan Jinming²

(1. College of Information and Security, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, China;

2. College of Biological Systems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The traditional synchronous control of hydraulic press needs longer time to reach the steady-state error and can not achieve the high precision synchronous control of hydraulic press. In order to improve the working efficiency of hydraulic press, a synchronous control hydraulic system of hydraulic press with double cylinders was developed, and the control schemes of piston rod in two states for extension and retraction were given. The synchronization error compensation data was transmitted to hydraulic cylinder 2 to complete the dynamic response faster, so as to significantly reduce the displacement difference of hydraulic cylinder 2 and achieve a significant improvement in the synchronization control accuracy. Furthermore, the synchronous control was realized by the error feedback method to achieve the precise control of the synchronous operation process of double hydraulic cylinders, and the PID parameters were adjusted by the genetic algorithm to significantly improve the synchronous control precision of double-cylinder hydraulic system. Compared with the parallel control methods, the error feedback synchronous control method reduced the maximum error by 68.71% and reduced the time required to enter the steady state error by 18.52%. Thus, the precise synchronous control of the hydraulic press could be realized by the synchronous control structure.

Key words: hydraulic press; double-cylinder hydraulic system; synchronous control; fuzzy PID control; error feedback

随着工业应用领域对锻造部件尺寸精度的不断提高, 对液压机的精度控制也提出了更严格的标准^[1-2]。现阶段, 大部分液压机都是以双液压缸来提供驱动力, 在实际运行过程中较易发生2个

液压缸无法同步的情况, 从而引起偏载或发生机械部件卡死的情况, 为提升两缸运行过程中的协调性与同步精度, 需设计更加合理的同步控制策略^[3-4]。

为了使双缸获得更高的同步控制精度, 已有许多学者在这方面开展了相关研究工作。例如, 刘佑民等^[5]开发了一种免疫神经网络PID控制器, 使双缸液压机获得了更高的同步控制精度, 采用此控制器可以实现高鲁棒性、同步跟踪误差小的优点。刘忠伟等^[6]开发了一种驱动与同步过程联合控制的模

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31972609, 31772644)

作者简介: 陈 杰 (1978-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: ycchenjie2020@163.com

锻液压机同步控制模型,使液压机达到更高的同步控制精度,通过测试发现,该控制器达到了精确的速度控制。窦海斌^[7]开发了一种交叉耦合同步控制技术,通过对比通道状态发现,可以达到更高的双缸液压系统同步控制精度,同时采用 PID 控制器调控液压泵的驱动电机,通过设定不同的液压泵输出流量来实现调控位移与压力的目的。张兵等^[8]综合运用内力补偿与位置补偿的方式来实现自由度控制,使双液压缸达到了很高的位置同步精度与出力一致性,通过仿真测试发现该控制策略能够满足实际控制需求。李胜永^[9]主要研究了液压机双缸同步系统运行阶段存在的控制精度较差的问题,设计了一种通过误差反馈来实现同步控制的方法,同时采用遗传算法优化了系统的 PID 控制器参数。结果显示,利用误差反馈的同步控制方式能够达到比传统串联或并联方式更优的效果,可以有效适应液压机的同步控制要求。赵晓冬等^[10]设计了一种具有非对称结构的静压支承重载伺服缸,在定压供油状态下进行位置伺服同步控制,同时在 Simulink 中建立了仿真模型。结果显示,受到随机信号的影响后,该控制系统表现出了优异的同步性能,获得了良好的稳定性。根据以上测试结果可以发现,此控制系统具备良好的可靠性和稳定性,能够精确调控油膜的厚度。胡知涛等^[3]为获得更高的液压冗余直驱运动双缸同步控制精度,设计了一种基于扰动观测器的分级控制方法来实现双缸液压的同步控制。通过仿真测试发现,该控制器能够实现高精度同步控制。

根据双缸液压系统同步控制方面的文献报道可知,已有较多学者开展了双液压缸同步控制方面的研究工作,但考虑误差反馈方面的研究则较少。基于以上情况,本文开发了一种液压机双缸液压系统同步控制系统,同时深入研究了系统的双缸液压系统同步控制技术。可以通过误差反馈的方式实现同步控制,从而达到对双液压缸同步运行过程的精确控制,通过遗传算法整定 PID 参数,显著提升了双缸液压系统的同步控制精度。

1 系统设计

从图 1 中可以看到,双缸液压系统同步控制系统的具体工作原理能够满足液压机两液压缸的高精度调整要求^[9]。液压缸的活塞杆和活动横梁相连使其发生垂直运动,完成锻压过程的控制。

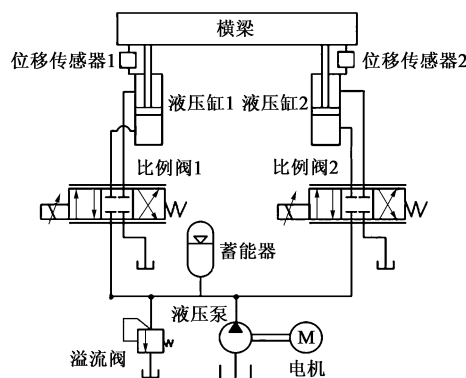


图1 液压机双缸液压系统同步控制系统

Fig. 1 Synchronous control system of double-cylinder hydraulic system for hydraulic press

系统控制过程如下:首先,启动系统,位移传感器 1 和 2 对液压缸 1 和 2 的活塞杆位移进行测试;之后位移信号被反馈至控制器,实现对比例阀 1 和 2 的运动控制;通过补充与降低油液的方式使液压缸 1 和 2 的活塞杆完成位移过程,从而达到同步控制的效果。通过分析控制过程可以发现,控制器的同步控制策略对实际控制精度存在显著影响,最终决定了液压机双缸液压系统的同步控制精度。

根据以上系统工作模式的分析可以发现,为进一步提升双缸液压系统的同步控制精度,需要精确调控系统液压缸的位置。从图 2 中可以看到对液压缸位置进行控制的具体原理。该系统的组成部分主要为伺服阀、比例放大器、位移传感器以及液压缸。

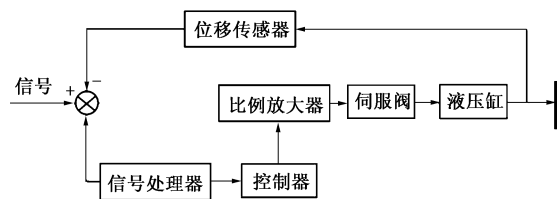


图2 液压缸位置控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of position control for hydraulic cylinder

表 1 给出了技术参数选取结果。活塞杆伸出和缩回状态下的传递函数分别为:

$$G(s) = \frac{722}{s^3 + 14.25s^2 + 1855s} \quad (\text{伸出}) \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{35500}{s^3 + 23.6s^2 + 8550s} \quad (\text{缩回}) \quad (2)$$

式中: $G(s)$ 为传递函数; s 为传递自变量。

表 1 技术参数
Table 1 Technical parameters

参数	数值
活塞杆无杆/有杆侧面积/mm ²	3052/2285
流量系数	0.60
有效体积弹性模量/(N·m ⁻²)	7.5×10 ⁸
放大器放大系数/(A·V ⁻¹)	10 ⁻³
位置反馈增益/(V·m ⁻¹)	110
节流口面积梯度/(W·m ⁻¹)	0.32
伸出/缩回时液压阻尼比	0.28/0.20
伸出/缩回时固有频率/(rad·s ⁻¹)	59.85/200.28
伸出/缩回时比例系数	0.43/0.41

2 控制方案

2.1 原同步控制

现阶段并式同步控制结构被广泛应用于各类同步系统^[5]。图 3 为原同步控制结构示意图，属于并式结构。

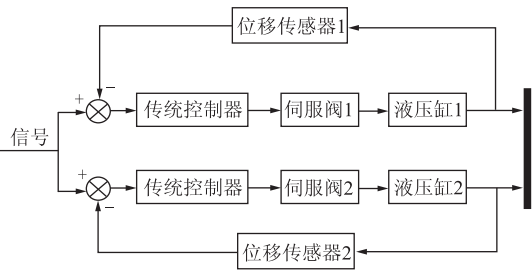


图 3 原同步控制结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of original synchronous control structure

表 2 为在系统设置阶跃信号后在原同步控制结构下得到的仿真数据。根据表 2 可知：当活塞杆伸出时，稳态误差较小，但整定时间超过 1 s；当活塞杆缩回时，整定时间增加不明显，但稳态误差明显很大。

表 2 原同步控制仿真结果

参数	液压缸活塞杆状态	
	伸出	缩回
最大误差/mm	8.56	3.12
稳态误差/mm	0.15	0.42
整定时间/s	1.3125	0.7135

2.2 具有误差反馈的同步控制方案

对上述结果进行分析发现，原同步控制需要更

长时间才能达到稳态误差，控制结构存在一定的缺陷，不能实现液压机的高精度同步控制。

为了获得更高的同步控制精度，设计了如图 4 所示的误差反馈同步控制结构。同时以并联控制结构为基础，对比了液压缸 2 输出位移和液压缸 1 输出位移的差异性，再把同步误差补偿数据传输至液压缸 2，使其更快完成动态响应，从而显著减小了液压缸 2 的位移差，实现同步控制精度的显著提升。

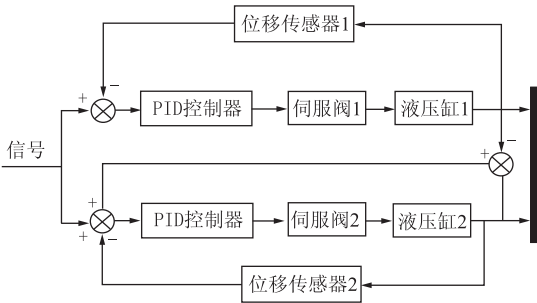


图 4 误差反馈同步控制结构
Fig. 4 Synchronous control structure with error feedback

3 仿真分析

为了测试误差反馈同步控制结构的实际控制效果，利用 Simulink 构建仿真模型，同时选择 PID 控制器进行运动控制。

首先，利用遗传算法整定 PID 参数^[11]。遗传迭代寻优的系统种群规模为 50，变异概率为 0.2，交叉概率为 0.9，最大迭代次数为 500。以综合时间与绝对误差（Integrated Time and Absolute Error, ITAE）进行参数寻优，具体见式（3）^[9]：

$$ITAE(t) = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \tag{3}$$

式中： t 为控制时间； $e(t)$ 为控制误差

总共进化 800 代，得到表 3 所示的液压缸活塞杆在伸出和缩回两种状态下进行参数整定的结果。

表 3 PID 参数整定结果

参数	液压缸活塞杆状态	
	伸出	缩回
比例增益系数 K_p	23.5628	31.3685
比例积分系数 K_i	0.1315	0.9124
比例微分系数 K_d	0.3012	0.2018

为系统设置阶跃信号，得到液压缸阶跃响应曲线与同步误差，图 5 分别为活塞杆伸出和缩回

两种状态下的结果。表 4 给出了活塞杆在伸出和缩回两种状态下双液压缸形成的阶跃响应指标。

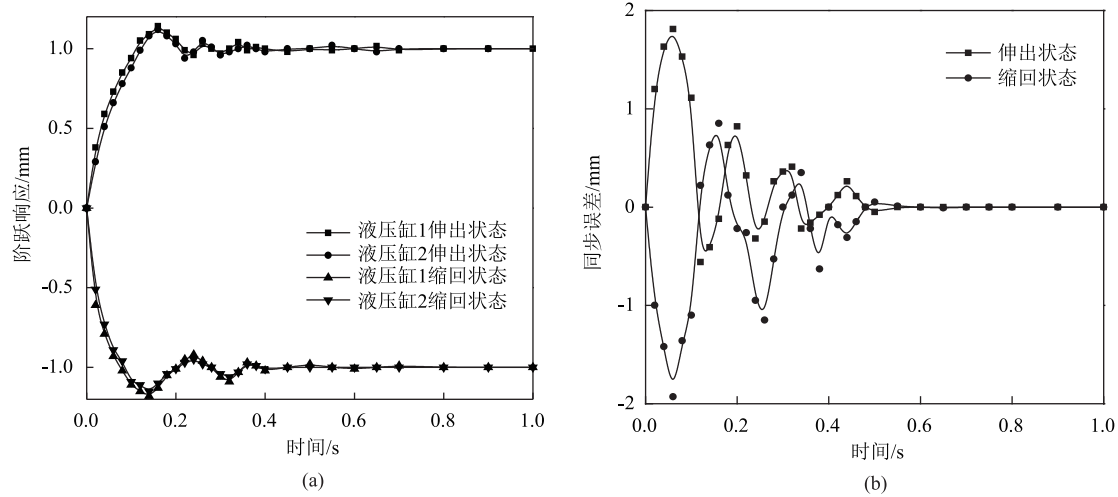


图 5 误差反馈同步控制的阶跃响应曲线 (a) 和同步误差 (b)
Fig. 5 Step response curves (a) and synchronous error (b) of synchronous control with error feedback

表 4 误差反馈同步控制仿真结果		
Table 4 Simulation results of synchronous control with error feedback		
参数	液压缸活塞杆状态	
	伸出	缩回
最大误差/mm	1.72	0.92
稳态误差/mm	0.05	0.03
整定时间/s	0.7965	0.5280

根据表 4 结果可知：当活塞杆伸出时，误差反馈同步控制结构可以获得比并式控制结构更小的同步控制误差，降低了 78.35%，并且到达稳态误差所需的时间减少了 38.26%；当活塞杆进入缩回阶段时，误差反馈同步控制方式与并式控制结构相比，最大误差降低了 68.71%，进入稳态误差所需的时间减少了 18.52%。同时，活塞杆在伸出与缩回状态的稳态误差都接近 0。相比较文献 [3] 所得结果，活塞杆在伸出和缩回状态下，最大误差分别减小了 0.15 和 0.05 mm，整定时间缩小了 0.0165 和 0.0130 s。对比结果可知，可以通过同步控制结构来实现对液压机的精确同步控制。

4 结语

为获得更高的同步控制精度，以并联控制结构为基础，设计了误差反馈同步控制结构，把同步误差补偿数据传输至液压缸 2，使其更快地完成动态响应，从而显著减小了液压缸 2 的位移差，实现了同步控制精度的显著提升。

误差反馈同步控制方式与并式控制方式相比，最大误差降低 68.71%；进入稳态误差所需的时间减少 18.52%，可以通过同步控制结构来实现对液压机的精确同步控制。

参考文献：

[1] 贾超,何浩成,董恩增. 基于扰动观测器的液压机滑模容错动态分配 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49 (8): 33-39.
Jia C, He H C, Dong E Z. Dynamic allocation of sliding mode fault tolerance of hydraulic press based on disturbance observer [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2021, 49 (8): 33-39.

[2] Popov M, Li Q. Multimode active control of friction, dynamic ratchets and actuators [J]. Physical Mesomechanics, 2018, 21 (1): 24-31.

[3] 胡知诤,谢志江,李坤,等. 基于扰动观测器的液压冗余直驱平台同步控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (1): 118-121.
Hu Z W, Xie Z J, Li K, et al. Synchronous control of hydraulic redundant direct drive platform based on disturbance observer [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, (1): 118-121.

[4] 李海军,王雷,康冰冰. 基于灰色预测理论的双液压缸同步控制研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (21): 97-100.
Li H J, Wang L, Kang B B. Research on synchronous control of double hydraulic cylinder based on grey prediction theory [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (21): 97-100.

[5] 刘佑民,王磊,李博. 一种大负载双缸举升智能同步控制系统 [J]. 航天控制, 2020, 38 (1): 17-22.