

变速泵控闭式转向系统复控策略设计及动态特性

吴秋梅¹, 刘会明², 李 强³, 于 艳⁴

(1. 新乡职业技术学院 智能制造学院, 河南 新乡 453000; 2. 漯河技师学院 机械工程系 河南 漯河 462000;

3. 河南理工大学 机械工程学院, 河南 郑州 450000; 4. 航空工业新航豫北转向系统(新乡)有限公司, 河南 新乡 453000)

摘要: 针对变速泵控闭式转向系统工作原理, 开发了一种可以实现对压力-位置参数进行复合控制的方案, 从而达到与液压缸相近的预压紧与运行控制过程。同时, 构建实验平台, 完成了上述原理的验证分析。测试结果表明: 构建的系统与控制方案是可行的, 能够实现类似阀控系统的控制功能, 表现出了优异的运行性能, 并获得了较高的能效利用率。通过压力-位置复控的方式完成了变速泵控闭式转向系统的控制过程, 实现了对压力与位置回路的快速动态响应。总压力只发生了小幅波动, 可以快速恢复到设定参数, 从总体上看, 液压缸表现出了良好的运行特性, 能够满足电液控制系统的实际控制要求。

关键词: 泵控闭式转向系统; 复合控制; 能效; 电液控制; 动态特性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.026

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0159-05

Compound control strategy design and dynamic characteristic on variable speed pump-controlled closed steering system

Wu Qiumei¹, Liu Huiming², Li Qiang³, Yu Yan⁴

(1. Intelligent Manufacturing College, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;

2. Mechanical Engineering Department, Luohe Technician College, Luohe 462000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Zhengzhou 450000, China;

4. Aviation Industry Xinhang Yubei Steering System (Xinxiang) Co., Ltd., Xinxiang 453000, China)

Abstract: Based on the working principle of variable speed pump-controlled closed steering system, a strategy that realized the compound control of pressure-position parameters was proposed, and the preloading and operation control processes similar to that of the hydraulic cylinder were realized. At the same time, the experimental platform was established to complete the verification and analysis of the above principles. The test results show that the constructed system and control strategy are feasible, and the control function similar to the valve control system can be realized, showing excellent running characteristics and obtaining high energy efficiency utilization rate. By means of pressure-position compound control, the control process of the variable speed pump-controlled closed steering system is completed, and the fast dynamic response to the pressure and position circuit is realized. However, the total pressure fluctuates only slightly and can be quickly restored to the setted parameters. Overall, the hydraulic cylinder running characteristics are good and can meet the actual control requirements of the electro-hydraulic control system.

Key words: pump-controlled closed steering system; compound control; energy efficiency; electro-hydraulic control; dynamic characteristics

目前, 液压传动结构已成为液压机的重要组成部分, 液压转向系统对保证液压机对物料的运载以及精确定位具有很好的帮助, 其控制方式主要包括阀控与泵控两种控制形式。由于传统的阀控方式都

是通过多路阀实现液压执行器的运行控制, 只能实现 1 个控制自由度, 并且同时发生进出油口节流时会造成明显的节流损失, 引起系统能量的严重浪费^[1-5]。为克服上述缺陷, 通常选择直接泵控的方法, 实现液压泵对液压执行器的直接控制功能, 显著降低节流损失并减小系统的能量消耗, 但由于液压执行器基本均为采用两腔面积不同的多单出杆液压缸, 无法达到良好的流量匹配性能, 需额外设置补油元件与回路, 导致系统成本明显提高并增加了

收稿日期: 2021-02-05; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划资助项目
(18A460002)

作者简介: 吴秋梅 (1981-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: wqmbblue123@126.com

控制过程的复杂程度^[6-8]。有学者运用动势能回收的方法来实现能量回收过程,实现液压传动系统能效的大幅提升^[9-10]。

针对阀控液压缸开展节能研究能够显著降低回路损失,可以通过直接泵控的方法有效降低节流损失,具体工作过程的控制模式是通过设置不同的泵转速和排量来达到优化泵输出流量和压力的模板^[11]。但因为现阶段大部分液压机械均属于单出杆液压缸,2个腔体并不能达到完全一致的流量,因此,需构建优化回路,以消除腔体面积差异引起的流量变化。国外学者设计了一种由液控单向阀组成的泵控回路,该平衡系统包含了补油蓄能器、双向定量柱塞泵、溢流阀,设置低压腔溢流阀来保持恒定压力^[12-13]。

根据之前文献的研究结果^[13],本文设计了一种通过伺服电机定量液压泵驱动的变速泵控闭式转向系统,之后测试了该系统的运行特性、控制策略与能效情况,采用上述系统对液压机的控制过程进行了测试,结果显示机器能耗发生了大幅降低。

1 系统与控制设计

图1给出了变速泵控闭式转向系统的工作原理,该系统的组成结构包括变速液压泵/马达、液压互锁单向阀、定量补油泵、转向液压缸、溢流阀等。在转向系统中除去了转向阀,同时,利用角度与压力传感器完成装载机转向角与角速度的数据收集,利用控制单元实现了变排量比例泵的排量调节控制过程。转向系统的液压缸直接通过变量泵进行控制,保证转向流量和系统供应流量之间的良好匹配状态^[14-15]。

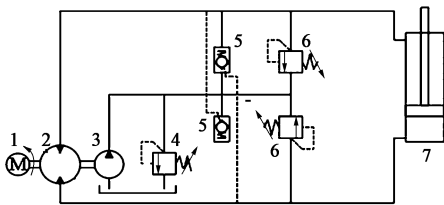


图1 变速泵控闭式转向系统原理图

1. 异步电机 2. 双向定量柱塞泵 3. 单向柱塞泵 4. 溢流阀
5. 单向阀 6. 节流阀 7. 油缸

Fig.1 Principle diagram of variable speed pump-controlled closed steering system

为保证变速泵控闭式转向系统获得与传统阀控系统相近的控制性能,需根据上述系统的运行特性设计合适的控制策略。根据阀控系统控制方式可知,伺服阀采用零位泄漏的方式使液压缸两腔达到平衡

状态,并保持腔体压力,可以高效补偿系统泄漏对流量的偏差。根据以上控制原理,选择压力-位置复控方式控制变速泵控闭式转向系统,该系统的结构与控制原理见图2,其中, p_{set} 为设定系统压力输入信号, x_{set} 为设定液压缸位移输入信号,M为异步电机。

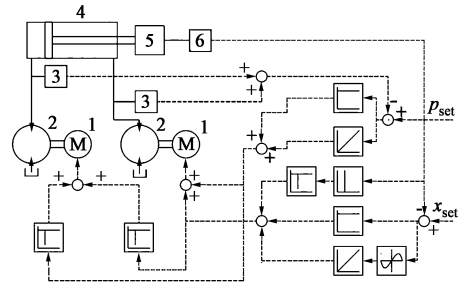


图2 压力-位置复控策略

1. 异步电机 2. 双向定量柱塞泵 3. 压力传感器 4. 油缸
5. 负载 6. 位置传感器

Fig.2 Pressure-position compound control strategy

系统没有运动时,对应的位置参数 $x_{set}=0$,以设定总压力 p_{set} 作为控制信号,完成液压缸的预压紧过程。当液压缸两腔达到总压力后,利用位置控制信号 x_{set} 实现异步电机的运转控制,从而确保变速泵控闭式转向系统获得类似阀控系统的液压缸预压紧与运行控制功能。

2 压力-流量特性分析

结合阀控缸伺服系统的运行性能推导得到变速泵控闭式转向系统形成的压力-流量特征,同时保证系统处于稳定运行状态,利用泵速调节方式达到对输出流量与液压缸速度的直接控制,将系统压力-流量的变化规律表示为负载压力 p_{load} 、液压缸速度 v 与液压泵转速 n 之间的对应关系。

以 v_e 与 v_r 表示液压缸的伸出与缩回速度,其计算式如下:

$$v_e = \left(n_A V_A - \frac{\lambda_A p_{set}}{\alpha + 1} - \frac{\lambda_A p_{load}}{\alpha + 1} \right) \frac{1}{A_1} \quad (1)$$

$$v_r = \left(n_B V_B - \frac{\lambda_B p_{set}}{\alpha + 1} - \frac{\lambda_B p_{load}}{\alpha(\alpha + 1)} \right) \frac{1}{A_2} \quad (2)$$

式中: V_A 和 V_B 分别为液压泵A和液压泵B的排量; n_A 和 n_B 分别为异步电机A和异步电机B的转速; A_1 和 A_2 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的面积; λ_A 和 λ_B 分别为液压泵A和液压泵B的泄漏系数; α 为液压缸无杆腔和有杆腔的面积比, $\alpha=A_1/A_2$ 。

以 n_{Amax} 和 n_{Bmax} 代表液压泵 A 和液压泵 B 转速的最高值，同时根据式 (3) 计算液压缸的最大运行速度 v_{max} ：

$$v_{max} = \min[n_{Amax} V_A/A_1, n_{Bmax} V_B/A_2] \quad (3)$$

根据式 (1)~式 (3) 可以发现，系统液压泵排量控制结果相对转速具有一定的偏差，因此，分别以这 2 个液压泵对液压缸进行单独驱动时将获得不同的最大速度，可以从 2 个最大速度中选择较小的速度作为液压缸的最大运行速度。假定液压缸在运行阶段达到的最大运行速度 v_{max} 如下：

$$v_{max} = n_{Amax} V_A/A_1 \text{ 或 } v_{max} = n_{Bmax} V_B/A_2 \quad (4)$$

依次利用式 (1) 与式 (2) 除以式 (4) 可以得到：

$$\frac{v_e}{v_{max}} = \frac{n_A}{n_{Amax}} - \frac{\lambda_A p_{set}}{(\alpha + 1)n_{Amax} V_A} - \frac{\lambda_A p_{load}}{\alpha(\alpha + 1)n_{Amax} V_A} \quad (5)$$

$$\frac{v_r}{v_{max}} = \frac{n_B}{n_{Bmax}} + \frac{\alpha\lambda_B p_{set}}{(\alpha + 1)n_{Bmax} V_B} - \frac{\lambda_B p_{load}}{\alpha(\alpha + 1)n_{Bmax} V_B} \quad (6)$$

根据式 (6) 可知，液压缸在伸出、缩回阶段的速度 v_e 、 v_r 和负载压力 p_{load} 属于负斜率直线关系，式 (7)~式 (8) 给出斜率计算式：

$$l_1 = -\frac{\lambda_A}{\alpha(\alpha + 1)n_{Amax} V_A} \quad (7)$$

$$l_2 = -\frac{\lambda_B}{\alpha(\alpha + 1)n_{Bmax} V_B} \quad (8)$$

式中： l_1 、 l_2 分别为 v_e 、 v_r 与 p_{load} 的关系斜率。

结合式 (7) 与式 (8) 推导出负载压力 p_{load} 的取值区间为：

$$-p_{set} \leq p_{load} \leq \alpha p_{set} \quad (9)$$

根据式 (7)~式 (9) 可以发现，变速泵控闭式转向系统形成了线性的压力-流量变化特征，形成了一条斜率接近为 0 的直线，对其进行实际工况测试后，也得到相同的速度增益，可以明显看到所有工作点均表现出同样的回路增益状态。结果显示，在不同的系统负载下液压缸只发生了运行速度的小幅波动，获得了优异的静动态特性并达到了很高的动态刚度。

3 构建试验测试平台

3.1 测试系统工作原理

图 3 显示了本文构建的测试系统的组成结构及其工作原理示意图。该系统包含了加载结构、试验

结构、测控结构共 3 个部分。其中，试验结构包括 2 个伺服电机与配套控制器、1 个单出杆液压缸与 2 个双向定量柱塞泵；加载结构包括异步电机、2 个三通比例减压阀、变速液压泵、1 个单出杆液压缸以及质量块。利用三通比例减压阀对缸压力进行调节，分别为液压缸位置、电机转速、腔压力设置了探测器。通过功率仪采集电压和电流参数，再将其存储到数据库中。

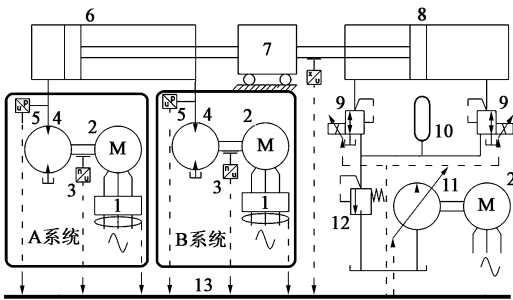


图3 变速泵控闭式转向系统运行控制原理

1. 电机驱动器 2. 异步电机 3. 转速传感器 4. 双向定量柱塞泵
5. 压力传感器 6. 试验缸 7. 负载质量块 8. 加载缸 9. 节流阀
10. 蓄能器 11. 单向柱塞泵 12. 溢流阀 13. 控制板

Fig. 3 Operation control principle of variable speed pump-controlled closed steering system

通过定量液压泵与伺服电机构建电液异步电机，同时根据图 3 所示测试原理建立了变速泵控闭式转向系统测试平台，表 1 给出了该平台各项元件参数。

表 1 元件参数

Table 1 Component parameters

元件	参数	数值
双向定量柱塞泵 A	排量/(mL · r ⁻¹)	42
双向定量柱塞泵 B	排量(mL · r ⁻¹)	26
异步电机 A	最大转速/(r · min ⁻¹)	2000
	功率/kW	15
异步电机 B	最大转速/(r · min ⁻¹)	2000
	功率/kW	8
溢流阀	设定压力/MPa	12
试验缸/加载缸	杆径/mm	Φ45
	缸径/mm	Φ65
	行程/mm	400
负载质量块	质量/kg	100
蓄能器	预充压力/MPa	10
	容积/L	10

3.2 结果分析

3.2.1 压力回路动态性能

在构建得到的试验平台上测试变速泵控闭式转

向系统的控制性能,对系统总压力回路进行动态性能测试,得到图 4 所示的曲线。

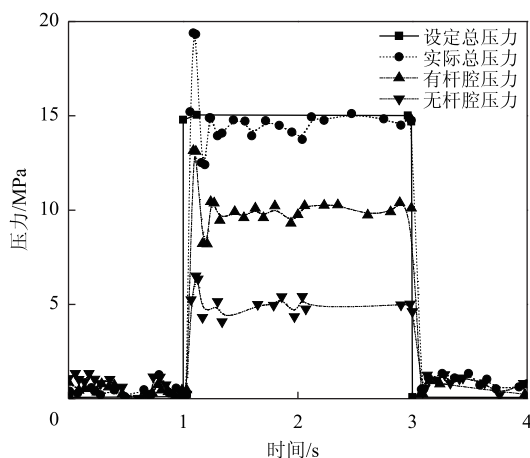


图 4 压力回路阶跃信号动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curves of step signal in pressure loop

对图 4 进行分析可知:设定初始总压力信号为 0 MPa,到 1 s 时形成 15 MPa 阶跃信号,到 3 s 时重新回到 0 MPa 初始阶跃信号。2 个异步电机均在 1 s 时发生正向旋转并达到总压力设定值,其中,压力在初始阶段发生了略微波动;进入稳定状态后,液压缸的无杆腔压力保持 4.83 MPa 的稳定值,有杆腔压力为 10.2 MPa,非常接近设定值,考虑到此时系统会发生一定程度的泄漏,为保持恒定的压力状态,2 个异步电机均保持低转速运行状态,快速完成反向旋转与卸压,接着 2 个异步电机的转速也减小至 $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,能够实现快速动态响应的控制性能。

3.2.2 位置回路动态分析

当系统满足总压力条件时,输出位置控制回路信号,实现液压缸的运动控制功能,再测试位置回路的动态性能,得到图 5 所示的曲线。

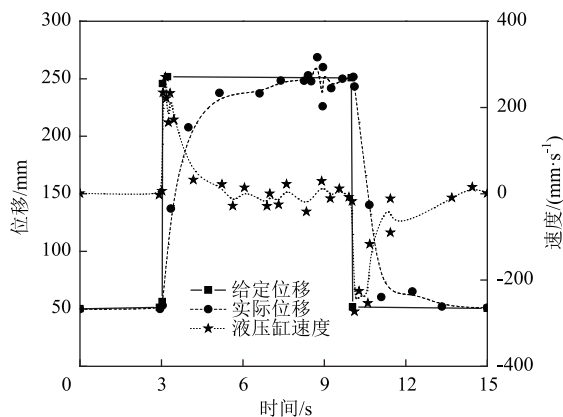


图 5 位置回路的阶跃信号的动态响应曲线

Fig. 5 Dynamic response curves of step signal in position loop

对图 5 进行分析可知:最初液压缸位移为 50 mm,设置的最初给定位置信号为 50 mm,到 3 s 时形成了 200 mm 阶跃信号,到 10 s 时重新变为 50 mm 阶跃信号,之后获得 8 MPa 的系统总压力;0~3 s 之间的异步电机 A 与 B 保持很小的转速状态,使系统达到 1 个恒定总压力;3 s 时,异步电机 A 与 B 分别出现正向与反向旋转,推动液压缸完成伸出动作;到达 9 s 时,异步电机 A 与 B 分别进入反向与正向旋转,液压缸受到驱动力的作用开始发生缩回,液压缸在静止阶段获得了稳定的总压力与两腔压力,运动状态下则发生小幅波动。

上述测试结果表明,变速泵控闭式转向系统通过压力-位置复控的方式进行控制,此时,总压力回路与位置回路均能够实现快速动态响应的过程,可以适应电液控制系统的运行要求。

3.2.3 运行特性

以压力-位置复控的形式控制变速泵控闭式转向系统,结果显示达到了优异的动态控制性能与抗扰动能力。进行测试时,在控制回路中输入 15 MPa 的恒定总压力,每个循环的时间为 20 s,依次测试了液压缸速度为 50 与 $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下的运行状态,得到图 6 所示的曲线。

根据图 6 测试得到的曲线可以发现:实际得到的位移曲线形成了和给定位移曲线相重合的状态,在上述两种速度下实现了位置的精确控制,形成了稳定的速度曲线,未发生明显的冲击作用,获得了很高的系统控制精度,系统总压力均接近 15 MPa,无杆腔压力保持 5 MPa 的稳定值,有杆腔压力保持 10 MPa 的稳定值,波动性很小,而且随着运行速度的减小,压力也越稳定,总体上达到了良好的运行控制特性。

系统总压力达到 12 MPa 的稳定值,曲线表现为小幅波动,对液压缸施加负载后,两腔压力表现为相反的变化规律,同时引起压力发生一定程度的波动。以比例恒压泵与减压阀进行加载时,液压泵响应速度较慢,因此,加载力出现了较大波动,在缸两腔中形成了较大的压力扰动,而总压力的波动性较小,可以快速调整至设定值,表现出了稳定的运行控制性能。

4 结语

本文利用压力-位置复控策略并结合变速泵控闭式转向系统控制特性,分析了总压力回路动态特性、系统抗负载扰动特性、位置回路动态特性、能

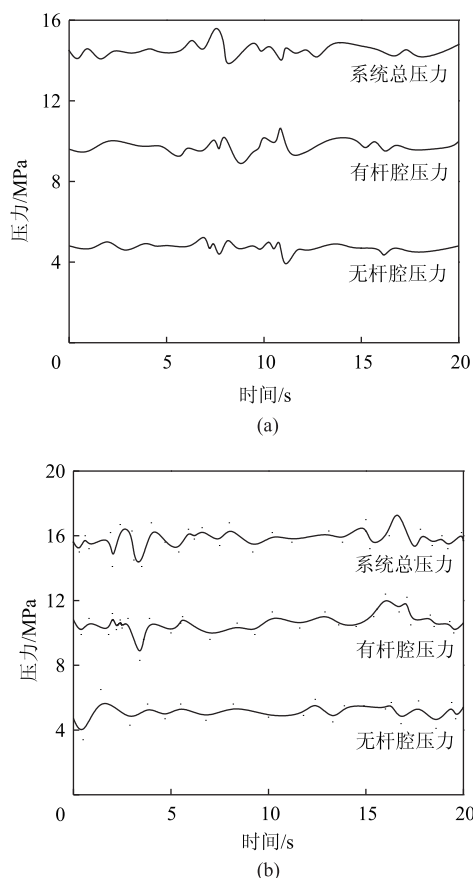


图6 系统运行曲线

(a) 低速 ($v = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) (b) 高速 ($v = 300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 System operation curves

(a) Low speed ($v = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) (b) High speed ($v = 300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

效特性, 同时在测试平台上验证了该系统的控制原理与实际控制效果。结果显示, 本文设计的控制策略是完全可行的, 可以达到稳定的运行特性。

参考文献:

- [1] 董致新, 黄伟男, 葛磊, 等. 泵阀复合进出口独立控制液压挖掘机特性研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (12): 173-180.
Dong Z X, Huang W N, Ge L, et al. Research on the characteristics of pump-valve combined inlet and exit independent control hydraulic excavator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (12): 173-180.
- [2] Xia L, Quan L, Ge L, et al. Energy efficiency analysis of integrated drive and energy recuperation system for hydraulic excavator boom [J]. Energy Conversion & Management, 2018, 156: 680-687.
- [3] Lin T, Chen Q, Ren H, et al. Review of boom potential energy regeneration technology for hydraulic construction machinery [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 358-371.
- [4] 张敬芳, 陈文斌, 仇庚廷, 等. 基于 AMESim-MATLAB 的伺服直驱闭式泵控系统仿真模型 [J]. 机电工程, 2021, 38 (12): 1622-1627.
Zhang J F, Chen W B, Qiu G T, et al. Simulation model of servo direct drive closed pump control system based on AMESim-MATLAB [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (12): 1622-1627.
- [5] He X, Xiao G, Hu B, et al. The applications of energy regeneration and conversion technologies based on hydraulic transmission systems: A review [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 1-21.
- [6] 王汝成, 傅连东, 彭海洋, 等. 基于机械功率回收式液压泵马达试验台的研制 [J]. 机械设计与制造, 2021, (12): 205-209.
Wang R C, Fu L D, Peng H Y, et al. Development of hydraulic pump motor test bench based on mechanical power recovery [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, (12): 205-209.
- [7] Xia L, Quan L, Zhang X, et al. Operating characteristics and energy efficiency of hydraulic-gas combined driving hydraulic excavator boom [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (20): 176-183.
- [8] Leifeld R, Vukovic M, Murrenhoff H. Hydraulic hybrid architecture for excavators [J]. Atzoffhighway Worldwide, 2016, 9 (3): 44-49.
- [9] 任好玲, 林添良, 叶月影, 等. 基于平衡油缸的动臂势能回收系统参数设计与试验 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (2): 153-158.
Ren H L, Lin T L, Ye Y Y, et al. Parameters design and experiment of boom potential energy recovery system based on balance cylinder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (2): 153-158.
- [10] Casoli P, Gambarotta A, Pompini N, et al. Hybridization methodology based on DP algorithm for hydraulic mobile machinery-Application to a middle size excavator [J]. Automation in Construction, 2016, 61: 42-57.
- [11] 张路豪, 贺利乐, 张平. 挖掘机动臂能量回收系统仿真分析与实验 [J]. 机械设计与研究, 2015, 31 (3): 169-173.
Zhang L H, He L L, Zhang P. Simulation analysis and experimental research on excavator boom energy recovery systems [J]. Machine Design & Research, 2015, 31 (3): 169-173.
- [12] Ketelsen S, Padovani D, Andersen T, et al. Classification and review of pump-controlled differential cylinder drives [J]. Energies, 2019, 12: 1-27.
- [13] Hippalgaonkar R, Ivantysynova M. Optimal power management of hydraulic hybrid mobile machines, part I: Theoretical studies, modeling and simulation [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2016, 138 (5): 1-12.
- [14] 陈革新, 刘会龙, 赵鹏辉, 等. 电液伺服闭式泵控系统实验平台的研究 [J]. 机电工程, 2021, 38 (3): 363-367.
Chen G X, Liu H L, Zhao P H, et al. Experimental platform for electro-hydraulic servo closed pump control system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (3): 363-367.
- [15] 杨敬, 王翔宇, 权龙, 等. 一种新型的装载机电驱泵控液压转向系统 [J]. 北京理工大学学报, 2020, 40 (2): 182-188.
Yang J, Wang X Y, Quan L, et al. A novel of pump controlled electric-hydraulic steering system for wheel loaders [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020, 40 (2): 182-188.