

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.225

液阻全桥网络负载口独立电液系统节能控制策略仿真

刘国平¹, 熊剑峰¹, 陆振宇¹, 纵怀志², 张军辉², 曹塘茂¹, 吴健鹏¹

(1. 南昌大学先进制造学院, 南昌 330031; 2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 230027)

摘要:针对传统电液控制系统节流损失大、能耗高、效率低的问题,采用液阻全桥网络搭建了具有负载口独立控制特性的新型电液控制系统,详细研究了该系统在典型四象限负载下的节能控制策略。液阻全桥网络电液系统由 5 个二位二通比例阀组成,根据其具有的负载口独立控制特性,将系统归纳为传统三位四通、负载口独立和负载敏感 3 种控制模式。传统三位四通下,两负载口开度控制模拟三位四通进出口耦合形式;负载口独立模式下,采用一腔控制流量另一腔阀口全开的控制策略;负载敏感模式下,控制泵出口压力比进油腔压力高一个定值,从而实现负载敏感功能。在超越负载下,3 种模式都使用流量再生回路进行节能控制。AMESim+Matlab 联合仿真结果表明,与传统的三位四通模式相比,三位四通流量再生、负载口独立、负载口独立流量再生、负载敏感模式分别节能 43.38%、65.27%、77.91%、83.58%。

关键词:负载口独立;节能;流量再生;位置控制;负载敏感

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)05-013-11

Simulation of energy-saving control strategy for independent metering electro-hydraulic system based on hydraulic-resistance full-bridge network

LIU Guoping¹, XIONG Jianfeng¹, LU Zhenyu¹, ZONG Huaizhi², ZHANG Junhui²,
CAO Tangmao¹, WU Jianpeng¹

(1. Advanced Manufacturing School, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 230027, P. R. China)

Abstract: To address issues such as high throttle loss, high energy consumption, and low efficiency in traditional electro-hydraulic control systems, a novel electro-hydraulic control system characterized by independent metering is introduced in this study. This system incorporates a full-bridge hydraulic resistance network, and its energy-saving control strategy is extensively investigated under typical four-quadrant load. Comprising five two-position two-way proportional valves, the hydraulic-resistance full-bridge electro-hydraulic system is categorized into three control modes: a traditional three-position four-way control mode, an independent metering control mode,

收稿日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175050); 国家优秀青年科学基金资助项目(51922093); 浙江省教育厅科研资助项目(Y202148352)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52175050), Outstanding Youth Science Foundation (51922093), and Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department(Y202148352).

作者简介: 刘国平(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事智能机器人与视觉、机电智能控制系统研究, (E-mail) liuguoping@ncu.edu.cn。

通信作者: 陆振宇, 男, 博士, (E-mail) luzhenyu@ncu.edu.cn。

and a load sensitive control mode. In the traditional mode, the opening control of the two load ports mimics three-position and four-way inlet and outlet coupling. In the independent metering mode, one cavity regulates the flow, while the other cavity controls the full opening of the valve port. The load-sensitive mode ensures a fixed pump outlet pressure higher than the intake cavity pressure, achieving load-sensitive functionality. Additionally, a flow regeneration circuit is used for energy-saving control across all three modes. Results of combined simulation using AMESim+MAT2 show that compared with the traditional three-position four-way valve mode, the three-position four-way flow regeneration mode, the independent metering flow regeneration mode, and the load sensitive mode can achieve energy savings of 43.38%, 65.27%, 77.91% and 83.58%, respectively.

Keywords: independent metering control; energy-saving; flow regeneration; position control; load sensitive

液压驱动方式有功率密度比大、频宽高、液压油自润滑、自冷却、易获得直线运动和可靠性高等优点,特别适用于中大型四足机器人^[1-3]、重载机器臂^[4]等的驱动方案。传统三位四通阀具有结构简单、控制方便、鲁棒性强等优点^[5-6],通过一根阀芯同时控制进出阀口,阀口的开度调节存在硬件上的结构耦合。阀控结构耦合使得控制进油腔阀口开到指定大小,就无法控制出油腔的阀口尽可能地开到最大,导致背腔压力增大,增加了出口节流损失,增加了系统能耗。

文献[7-8]报道了负载口独立调节方法,利用多个阀组成了进出口阀组,对液压缸两腔的阀口开度进行单独控制,打破了进出口结构耦合,提高了控制自由度;文献[9-11]中利用自适应鲁棒算法解决了液压系统参数不确定性问题,同时对负载口独立控制系统进行了完全的解耦,在实现精确的位置跟踪的同时具有良好的节能效果;文献[12]中采用了泵阀协调控制的负载口独立控制方法,对阀口进行解耦的同时实现了节能的目标。

为了进一步提高系统效率,降低阀口的节流损失,文献[13]报道了一种使泵的出口压力适应负载压力的方法,也就是负载敏感系统。文献[14-15]中采用负载敏感泵为泵源,利用机液反馈的控制方式改变泵的排量,进而改变泵的压力,从而实现负载敏感的功能;文献[16]报道了带阀后压力补偿的电液负载敏感系统方法,解决了超越工况下阀口全开系统速度特性受阀口阻尼降低的影响而引发执行器超速下坠的问题,在降低比例阀阀口损失的同时保证执行器速度控制性能;但是负载敏感只能减小进口压力损失,出口节流损失无法控制。文献[17]在负载敏感的基础上通过改变液压回路的连接方式,实现了流量再生的功能;同时设计了多模式切换控制方法,系统可以随工况在线切换至高效回路模式,节能效果显著。

笔者根据系统的结构特点设计了3种控制模式:三位四通、负载口独立和负载敏感模式。为了提高系统能效,针对不同模式的不同工况提出了相应的阀控方式,同时在超越负载下设计了2种流量再生液压回路。为量化节能效果,通过压力-流量坐标图对以上3种工作模式的能耗进行了分析,最后用仿真加以验证,结果显示节能策略效果显著。

1 系统描述

1.1 液阻全桥网络负载口独立系统组成

本研究的液压系统如图1所示,由无刷直流电机 M_{ps} ,定量泵,比例溢流阀 V_{ps} ,5个二位二通电液比例阀 V_{PA} 、 V_{PB} 、 V_{TA} 、 V_{TB} 、 V_{AB} ,以及液压缸组成。4个压传感器能够直接测量供油、回油和液压缸2个工作油口的压力 P_s 、 P_T 、 P_A 、 P_B ;位移传感器和力传感器可以直接测量液压缸的伸出长度 x_p 和负载力 F_L 。 A_p 表示液压缸无杆腔面积, α 表示有杆腔与无杆腔面积比, v_p 表示液压缸速度, q_A 表示流入A腔的流量, q_B 表示流出B腔的流量, m_p 表示液压缸活塞缸质量, q_{AB} 、 q_{TA} 、 q_{TB} 、 q_{PA} 和 q_{PB} 分别表示通过相应阀的流量, q_p 表示泵出口流量, q_r 表示通过溢流阀 V_{ps} 的流量。

本系统具有与传统三位四通阀相同的供油、回油和液压缸的2个工作油口P、T、A、B;同时,5个二位二通阀能够独立比例控制液压缸容腔负载口A和B的供油液阻、回油液阻,具有负载口独立控制的功能;通过调节旁通液阻能实现流量再生,具有节能潜力。

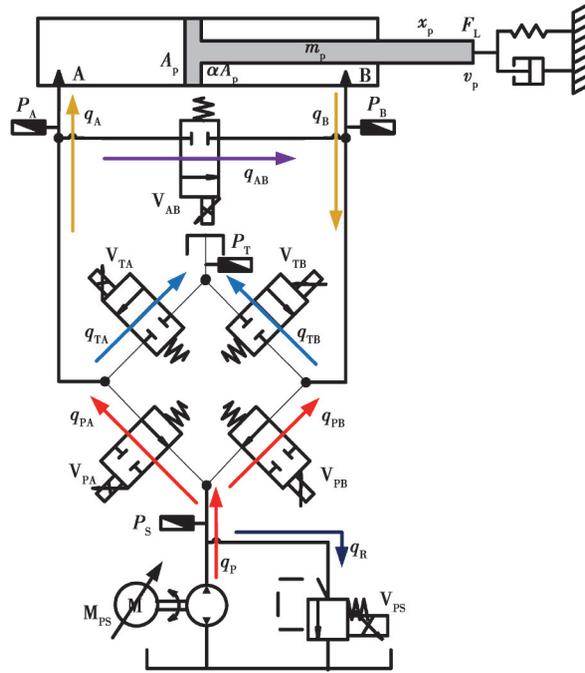


图 1 负载口独立系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the independent metering system

1.2 液压系统总体能耗分析

以泵源输入为起点,建立主要元件和机构能量的传递模型,为能耗特性的实验分析提供理论基础。忽略泵的机械损失,泵的能量损失 E_p 的计算公式为^[16]

$$E_s = \int_{t_0}^{t_1} P_s q_s dt, \tag{1}$$

$$\eta_v = 1 - \frac{C_p P_s}{n D_p}, \tag{2}$$

$$E_p = E_s (1 - \eta_v). \tag{3}$$

式中: E_s 为泵向系统提供的能量; P_s 为泵的出口压力; q_s 为泵的输出流量; η_v 为泵的容积效率; C_p 为泵的泄露系数; n 为泵的转速; D_p 为定量泵的排量; t_0 为系统工作开始时间; t_1 为系统工作结束时间。

阀口的节流损失 E 可表示为

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \Delta P q dt, \tag{4}$$

式中: ΔP 为阀两端的压降; q 为通过阀口的流量。用 5 个比例阀将泵的出口流量输送到液压缸时,比例阀的阀口存在节流损失,分别为 $E_{V_{PA}}$ 、 $E_{V_{PB}}$ 、 $E_{V_{TA}}$ 、 $E_{V_{TB}}$ 、 $E_{V_{VAB}}$;系统通过溢流阀调节泵的出口压力,为保持系统压力稳定,溢流阀需存在一定的溢流量,溢流阀的溢流损失为 E_R 。

液压缸经过克服负载做功、油液压缩、摩擦和泄露消耗的能量 E_L 可表示为

$$E_L = \int_{t_0}^{t_1} |P_A q_A - P_B q_B| dt. \tag{5}$$

液压缸克服负载力所做的功 E_{load} 可表示为

$$E_{load} = \int_{t_0}^{t_1} F_L v_p dt. \tag{6}$$

液压系统的能量来源包括 2 个部分:泵提供的能量和超越工况下外负载协助液压缸做功产生的能量。液压系统的总能量 E_{Total} 可表示为

$$E_{Total} = E_s + E_{over}, \tag{7}$$

式中,超越工况下 $E_{over} = E_{load}$, 阻抗工况下 $E_{over} = 0$ 。

根据上述分析可知,液压系统的能量效率 η 可表示为

$$\eta = 1 - \frac{E_{VPA} + E_{VPB} + E_{VTA} + E_{VTB} + E_{VAB} + E_L + E_R + E_P}{E_{Total} + E_P} \quad (8)$$

2 液阻全桥网络电液系统多工作模式及其节能控制策略

2.1 液阻全桥网络多工作模式

根据5个比例阀的开关状态不同,液压系统可以组成不同的控制模式。系统的控制模式主要有:三位四通模式(three-position four-way, TF)和负载口独立模式(independent metering, IM)。出于节能的需要,在负载口独立模式的基础上提出负载敏感模式(load sensing, LS)。负载特性直接决定工作模式的选择,定义液压缸伸出方向为速度 v_p 的正方向,阻止液压缸伸出方向为负载力 F_L 的正方向。负载力与速度方向相反时,定义为阻抗负载;负载力与速度方向相同时,定义为超越负载。根据速度与负载力方向的不同,将液压缸工况分为:阻抗伸出、超越缩回、阻抗缩回、超越伸出^[16],下面是3种控制模式的简要分析。

1)三位四通阀具有控制简单、鲁棒性强^[5-6]的特点,结合本系统的结构特点设计了三位四通模式(图2)。在此模式下,液压缸两腔的进出口阀进行联动且开度相同,即 $x_{VPA}=x_{VTB}$ 、 $x_{VPB}=x_{VTA}$,可以实现三位四通阀方向、流量的控制功能。

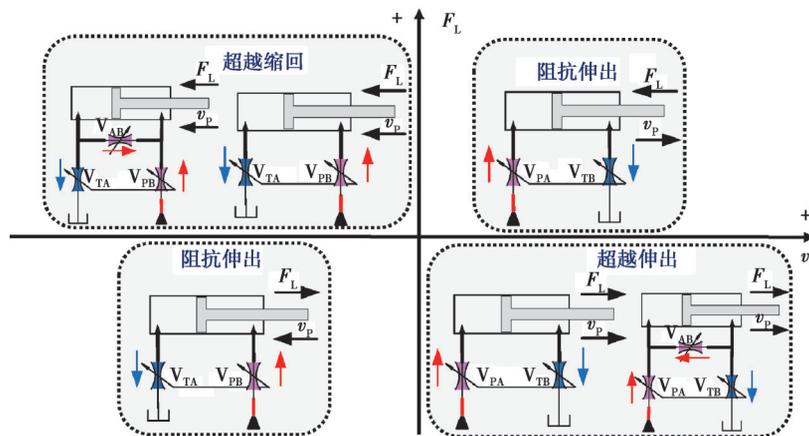


图2 三位四通模式四象限工况

Fig. 2 Three-position four-way mode of the four-quadrant working condition

2)传统三位四通阀的进出口节流面积通过一根阀芯运动来进行耦合调节,而上述的三位四通模式的进出口阀口开度通过同一信号来控制,两者阀口的节流损失较大。根据本系统的特点设计了负载口独立模式(图3),此模式下可以对液压缸进出口阀口进行单独控制,从而控制液压缸两腔的流量和压力。

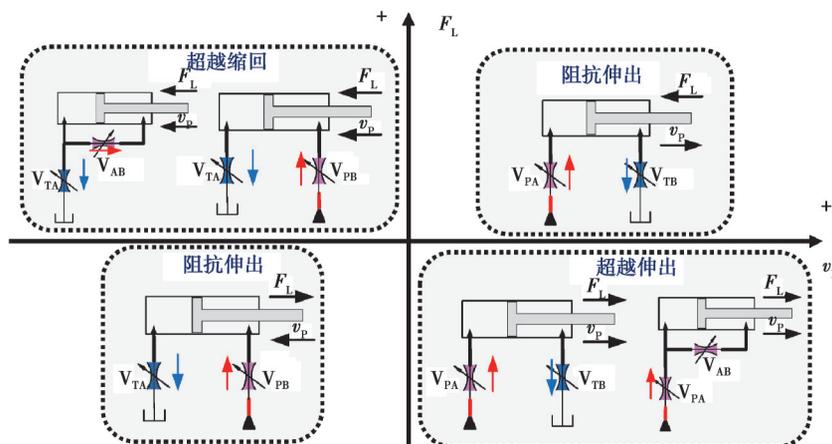


图3 负载口独立模式四象限工况

Fig. 3 Independent metering mode of the four-quadrant working condition

3)在三位四通和负载口独立模式的工作过程中,泵的出口压力和转速都不变,系统效率依然低下。为了进一步提高系统效率,设计了基于负载口独立的负载敏感模式,使泵源向系统提供负载所需的压力,降低阀

的节流损失,减少系统能量消耗。

2.2 四象限负载工况下节能控制策略

根据上述对四象限工况的定义,除系统本身所具有的4种普通工况(normal,Nor)外,本文针对超越负载的特点设计了2种流量再生模式:超越缩回流量再生(low side regeneration retraction,LSRR)和超越伸出流量再生(low side regeneration extension,LSRE)。2种模式的相同之处在于:部分回油腔排出的流量通过 V_{AB} 流入进油腔,从而实现部分流量的再生利用。不同之处在于:超越缩回模式中无杆腔流量再生进入有杆腔,无杆腔的面积比有杆腔面积大,泵无需向执行器供油。而超越伸出模式中有杆腔流量进入无杆腔,应向执行器无杆腔供应少量油液。下面对3种模式的节能控制策略作具体分析。

2.2.1 三位四通模式

液压缸位置控制主要通过位置反馈调节阀口开度的方式实现。位置控制器通过位置传感器,测得实际位置信号以实现位置闭环。三位四通模式下阻抗伸出控制原理如图4(a)所示,进出油阀采用相同的控制信号。阻抗缩回工况的控制原理如图4(b)所示,进出油阀采用相同的控制信号共同实现液压缸位置控制。图4中, u_v 表示阀口开度控制信号, x_d 表示期望位置信号。三位四通模式下其余工况的控制原理与这2种类似。

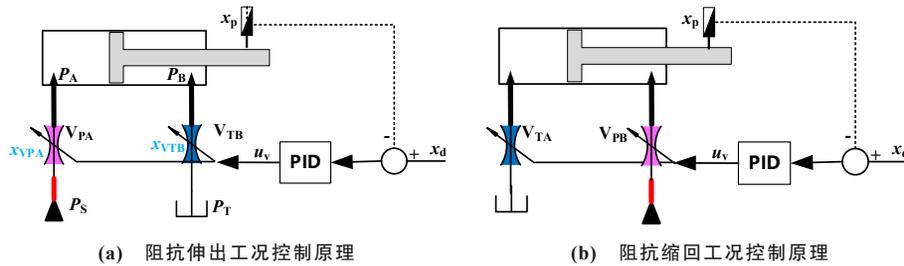


图 4 三位四通模式控制原理

Fig. 4 Control principle of the three-position four-way mode

在阻抗负载下三位四通模式与传统三位四通阀相同,负载力阻碍液压缸移动,液压系统的能量全部由泵提供。在超越负载下系统通过控制旁通阀可以实现流量再生功能,降低能耗。流量再生和普通模式的比较分析如表1所示。

表 1 三位四通模式超越负载控制策略对比

Table 1 Comparison of overriding load control strategies in the three-position four-way mode

液压缸	模式		说明
工况	普通模式(Nor)	流量再生模式(FR)	
超越 缩回			LSRR 模式下将旁通阀 V_{AB} 打开,实现了部分流量的再生利用,此时不需要泵提供油液。系统所消耗的能量完全由负载力提供,可以大幅提高系统效率
超越 伸出			LSRE 模式下打开旁通液阻实现流量再生,泵只需要提供一定的流量起到补油的作用即可实现液压缸位控制。泵的转速可以大幅降低,实现节能目标

2.2.2 负载口独立模式

此模式下系统可以对液压缸两腔进行独立控制,一腔通过液压缸位置反馈采用PID控制算法调节阀口

开度进行液压缸位置跟踪;为了降低节流损耗,另一腔采用阀口全开的方式,如图 5 所示。

在本研究中负载口独立的一般控制方式为进口阀采取位置反馈调节,出口阀阀口全开。但是在超越负载下,采取一般的控制策略会由于液压缸速度或负载力过大引起进油腔吸空导致系统失稳,所以超越负载下的阀控策略调整为进油腔阀口全开,对出油腔进行位置反馈控制。负载口独立普通模式和流量再生的具体分析如表 2 所示。

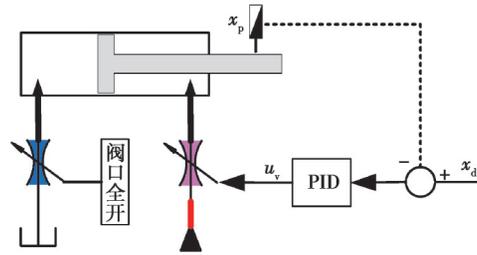


图 5 负载口独立模式控制原理

Fig. 5 Control principle of the independent metering mode

表 2 负载口独立模式四象限工况控制策略

Table 2 Control strategies of the independent metering of the four-quadrant mode

液压缸 工况	模式		说明
	普通模式	流量再生模式	
阻抗伸出			进口阀 V_{PA} 采取流量控制方式,对液压缸位移进行调节; V_{TB} 采取阀口全开方式,降低背腔压力,减小出油口节流损失
超越缩回			LSRR 模式下控制 V_{TA} 和 V_{AB} 即可实现流量再生,泵不需要提供流量
阻抗缩回			进口阀流量控制,实现位置跟踪;出口阀阀口全开,降低出口压力
超越伸出			LSRE 模式下将 V_{AB} 打开进行流量再生,同时 V_{PA} 阀口全开提供少量油液避免 A 腔吸空

2.2.3 负载敏感模式

上述模式在阻抗负载下泵的转速和压力不变,效率低下。为提高效率,设计负载敏感模式。如图 6 所示,由电机、定量泵、溢流阀组成的泵控系统控制泵出口压力比进油腔压力高一个定值实现负载敏感功能,减少进口节流损失;由 5 个比例阀组成的阀控系统用于实现液压缸位置控制。图 6 中, u_{ps} 表示溢流阀控制信号。负载敏感功能按如下步骤实现:1)系统首先根据液压缸的工况选择相应的工作模式,根据工作模式选择

进油腔的压力信号;2)与设定的压差值相加得到泵控子系统的压力指令;3)通过调节溢流阀的压力实现压力裕度闭环。阀控子系统沿用2.2.2小节提出的负载口独立流量再生控制策略,实现执行器位置闭环。

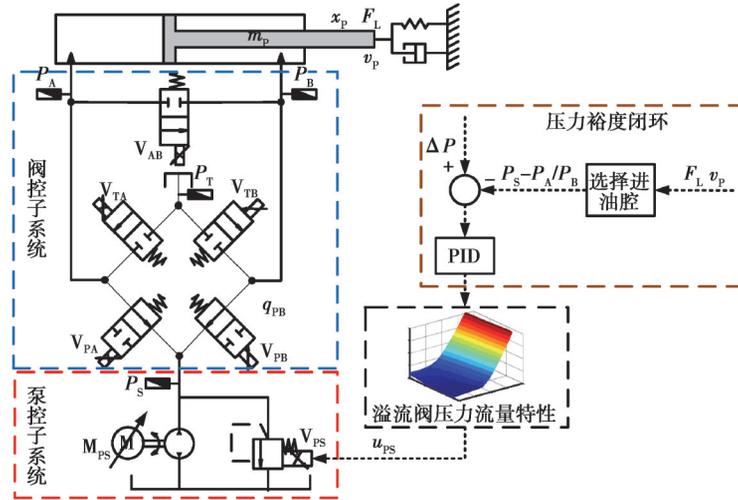


图 6 负载敏感模式控制原理

Fig. 6 Control principle of the load sensitive mode

2.2.4 能耗情况对比分析

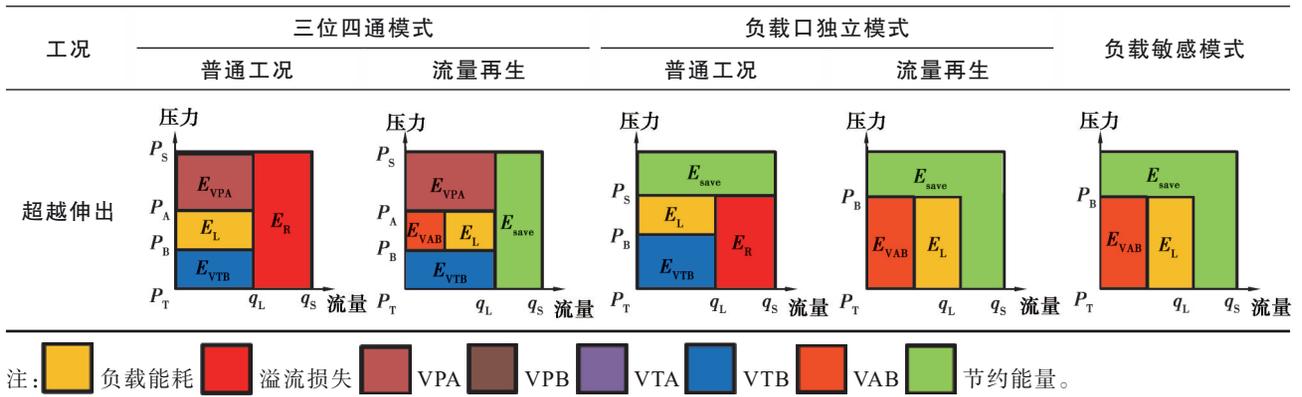
以三位四通模式为参照,分析三位四通流量再生、负载口独立和负载敏感模式在不同工况下的节能特性,其能耗对比如表3所示。表3中, E_{save} 表示节省的能量, q_L 表示负载流量。

表 3 多种工作模式能耗对比

Table 3 Comparison of energy consumption in various operating modes

工况	三位四通模式		负载口独立模式		负载敏感模式
	普通工况	流量再生	普通工况	流量再生	
阻抗伸出					
超越缩回					
阻抗缩回					

续表 3



由公式(1)可得 2 种减小能耗的途径:一是减少泵的输出流量;二是降低泵的出口压力。如表 3 所示,在三位四通普通模式下,泵的转速和压力是不变的,所以阻抗负载和超越负载下的能量消耗是相同的。在超越负载下利用流量再生,通过减小泵的流量可以降低能耗。在负载口独立模式下,系统在控制液压缸一腔的阀口进行位置跟踪的同时将另一腔的阀口全开,有效降低了系统压力和阀的节流损失。在超越负载下使用流量再生,可以进一步降低系统能耗。在负载敏感模式下,负载口独立模式通过降低泵的出口压力来降低阻抗负载下的能耗,进一步提高了系统效率。

3 仿真结果分析

利用 AMESim 和 Matlab/Simulink 仿真平台进行联合仿真。在 AMESim 中利用液压元件设计库 (hydraulic component design, HCD) 搭建了如图 7 所示液压模型,并且利用 AMESim 的 SimuCosim 联仿接口实现了与 Matlab 之间的通信;在 Simulink 中实现了上述几种控制策略,同时将 Simulink 的求解器设置为变步长求解,并将最大步长定为 0.001 s。在系统能耗和控制性能方面,对上述 3 种模式的仿真结果进行了对比分析,模拟存在外部负载力的情况下液压缸左右伸缩的动作。位置参考轨迹 $x_d=2.7\sin 2\pi t$ cm;负载力的变化曲线为 $F_L=\sin 2\pi t$ kN。由参考轨迹和负载力曲线可以看出,在 1 s 周期内,液压缸工况恰好对应四象限工况。液压系统具体仿真参数如表 4 所示。

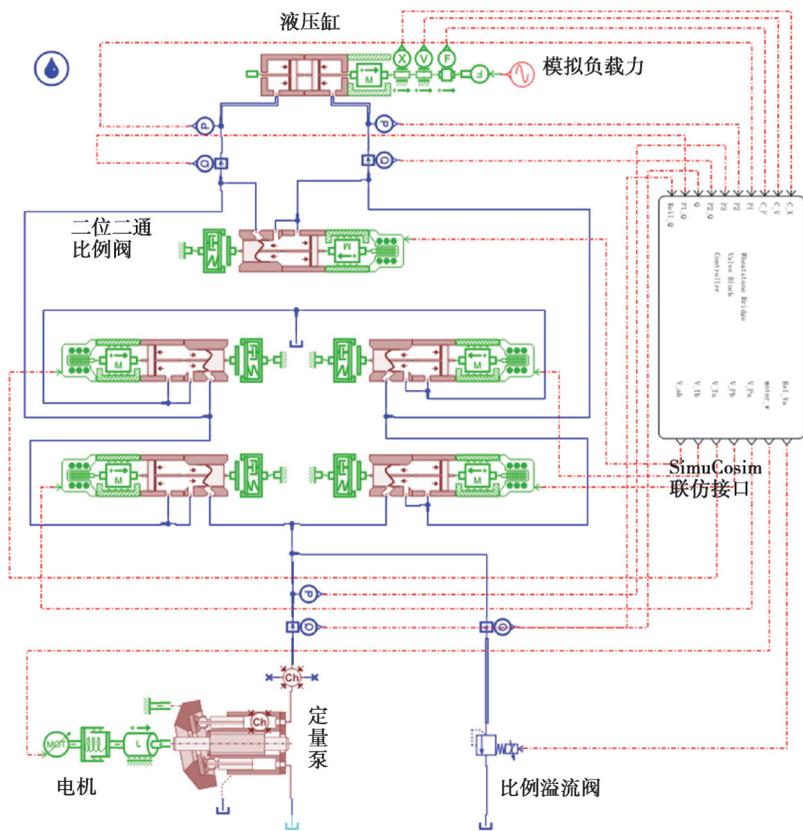


图 7 AMESim 液压仿真模型

Fig. 7 AMESim hydraulic simulation model

表4 液压系统主要参数

Table 4 Main parameters of the hydraulic system

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	液压缸行程/cm	6	5	比例阀额定流量/(L·min ⁻¹)	9.8
2	液压缸无杆腔面积 A_p /cm ²	4.909	6	定量泵排量 D_p /(mL·r ⁻¹)	1.1
3	有杆腔与无杆腔面积比 α	0.769 6	7	负载敏感压差 ΔP /MPa	3
4	比例阀额定压力/MPa	35	8	油液密度 ρ /(kg·m ⁻³)	850

3.1 跟踪性能分析

图8是三位四通模式(TF)、三位四通流量再生模式(TFFR)、负载口独立模式(IM)、负载口独立流量再生模式(IMFR)和负载敏感模式(LS)5种工作模式的位置跟踪情况对比。在各模式下实际位置曲线与参考轨迹基本相同,均得到很好的运动跟踪性能。上述几种模式的跟踪误差在±5%以内,由此可知,与三位四通模式相比,所提出的节能控制策略不会降低控制性能。

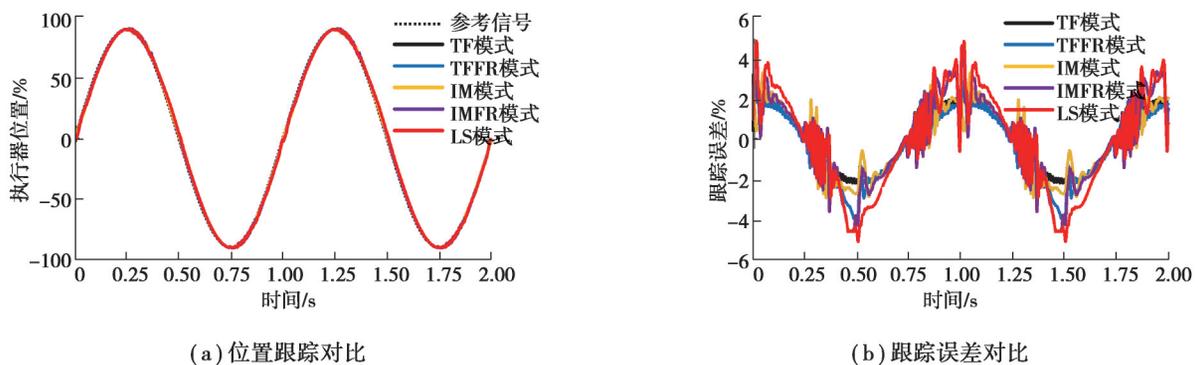


图8 不同模式下跟踪效果对比

Fig. 8 Comparison of tracking results in different modes

3.2 系统能耗分析

图9(a)~(d)为各模式四象限工况下阀 V_{PA} 、 V_{PB} 、 V_{TA} 、 V_{TB} 两端的压差变化情况。IM、IMFR和LS模式采用了负载口独立控制,对其进行分析可知:1)在超越伸出阶段, V_{PA} 阀口全开,两端压降接近于0。2)在超越缩回阶段, V_{PB} 阀口全开,图9(b)显示压差曲线快速下降至0 MPa左右。3)在阻抗缩回阶段,液压缸背腔压力应该减小以节能,此时背压腔阀口接通油箱。从图9(c)可知, V_{TA} 压力很小。4)在阻抗伸出阶段,如图9(d)所示, V_{TB} 接通油箱阀口全开,使得背压腔压力降低。

从上述的分析可以得出,与三位四通模式相比,负载口独立的控制方式可以降低阀两端的压差,从而降低阀的节流损失。图9所示的仿真结果与2.2节设计的阀控策略一致。

图10为各模式下泵的出口压力和输出功率的变化情况。

1)如图10(a)所示,无论是泵的出口压力还是各阀两端的压差,负载口独立模式下的压力都比三位四通模式低,IM、IMFR模式下泵出口压力比TF模式降低30%以上。表明使用负载口独立控制将背压腔阀口全开,可以降低执行器背压腔的压力,从而降低泵的出口压力。

2)从图10(b)可以看出相对于TF、IM模式,TFFR、IMFR模式在超越负载下泵提供的功率大幅降低,表明流量再生策略节能效果显著。

3)在LS模式下,由于超越负载下采用了流量再生减小了流量,在阻抗负载下通过负载敏感减小了泵出口压力,所以泵输出的功率最低,图10(b)显示结果与分析一致,反映出负载敏感策略的有效性。

不同模式四象限工况下能耗结果如表5所示。在4个象限组成的一个周期内,三位四通模式流量再生模式、负载口独立模式、负载口独立流量再生模式和负载敏感模式比三位四通普通工况分别节能43.38%、65.27%、77.91%、83.58%。由此可知,所提出的节能控制策略效果显著。

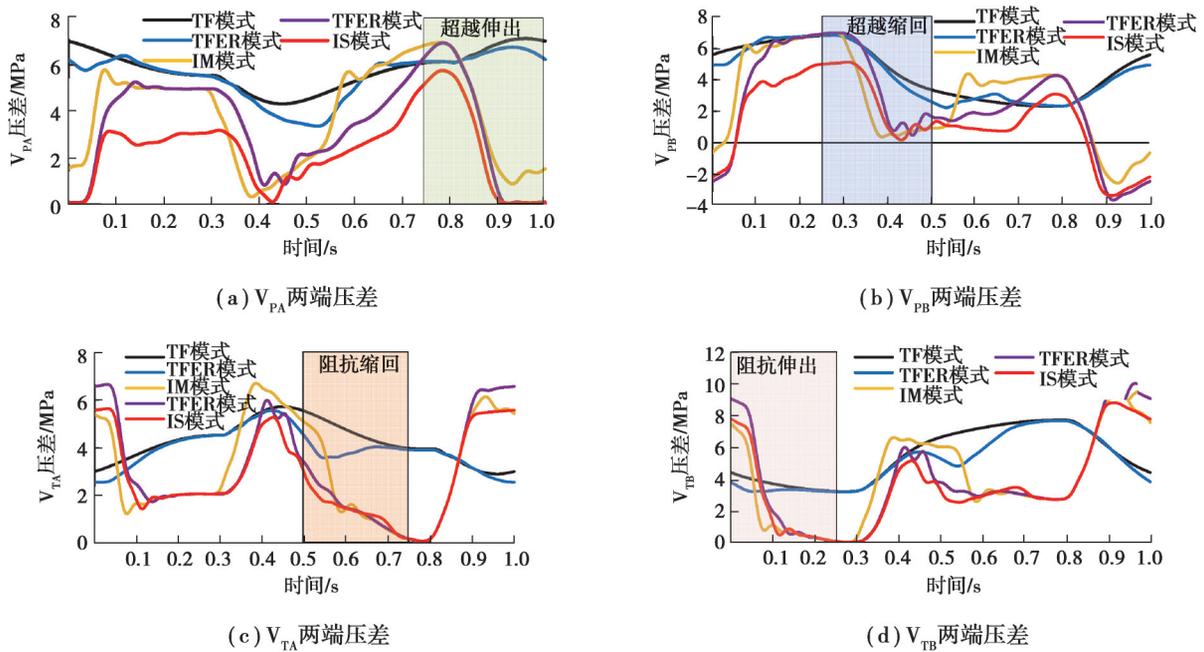


图9 不同模式下系统压力分析

Fig. 9 System pressure analysis in different modes

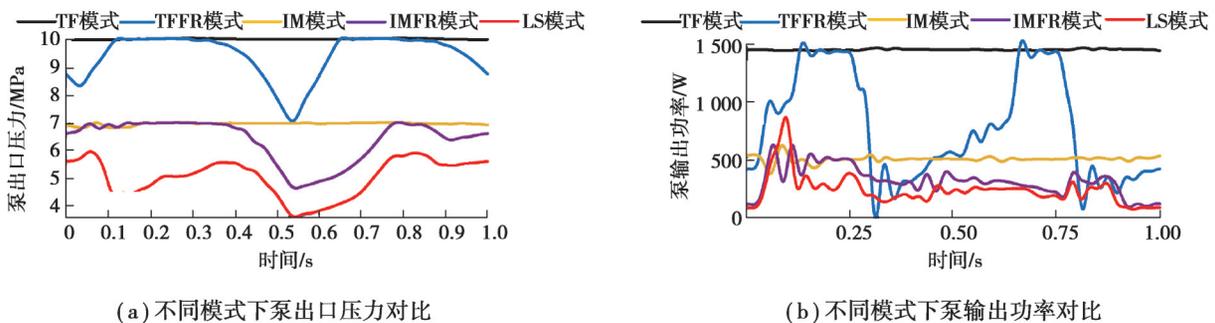


图10 不同模式下系统功率分析

Fig. 10 System power analysis in different modes

表5 仿真结果节能对比分析

Table 5 Comparative analysis of simulation results for energy efficiency

模式	阻抗伸出能耗	超越缩回能耗	阻抗缩回能耗	超越伸出能耗	合计
三位四通普通模式	362.70	364.62	363.17	364.65	1 455.14
三位四通流量再生	344.90	106.11	278.89	94.07	823.97
负载口独立普通模式	123.10	127.19	126.26	128.84	505.39
负载口独立流量再生	118.85	78.52	70.21	53.80	321.38
负载敏感模式	94.64	48.94	56.29	39.12	238.99

4 结束语

基于5个阀组成的液阻全桥网络负载口独立系统的结构特点,系统性介绍了三位四通、负载口独立和负载敏感3种控制模式。在三位四通模式下通过控制旁通阀 V_{AB} 实现了流量再生的节能控制;在负载口独立模式设计了背压腔阀口全开和流量再生的控制策略;负载敏感模式在阻抗负载下采用负载敏感压力调节的方法控制泵出口压力,适应负载压力以减小进口节流损失,在超越负载下使用流量再生减小泵的流量。仿真实验结果表明,在保证跟踪性能的前提下,在4个象限组成的一个周期内,三位四通模式流量再生模式、负载口独立模式、负载口独立流量再生模式和负载敏感模式比三位四通普通工况分别节能43.38%、65.27%、

77.91%、83.58%。

参考文献

- [1] Semini C, Barasuol V, Goldsmith J, et al. Design of the hydraulically actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2Max[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 635-646.
- [2] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [3] 柴汇, 荣学文, 唐兴鹏, 等. 基于能量规划的崎岖地面四足机器人平面跳跃控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(2): 557-566.
Chai H, Rong X W, Tang X P, et al. Gait based planar hopping control of quadruped robot on uneven terrain with energy planning[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 557-566.(in Chinese)
- [4] Li L P, Xie L, Luo X, et al. Compliance control using hydraulic heavy-duty manipulator[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(2): 1193-1201.
- [5] Ding R Q, Zhang J H, Xu B, et al. Programmable hydraulic control technique in construction machinery: status, challenges and countermeasures[J]. Automation in Construction, 2018, 95: 172-192.
- [6] 赵蕾, 陈青, 权龙. 阀芯运动状态滑阀内部流场的可视化分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 142-145, 155.
Zhao L, Chen Q, Quan L. Visualization analysis of the flow field in a moving spool valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 142-145, 155.(in Chinese)
- [7] Jansson A, Palmberg J O. Separate controls of meter-in and meter-out orifices in mobile hydraulic systems[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1990: 377-383.
- [8] Yao B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes[C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, USA. IEEE, 1997: 2489-2494.
- [9] Yao B, DeBoer C. Energy-saving adaptive robust motion control of single-rod hydraulic cylinders with programmable valves[C]//Proceedings of the 2002 American Control Conference. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2002: 4819-4824.
- [10] Bobo H L, Chen Z, Yao B. Precision motion control of a servomotor-pump direct-drive electrohydraulic system with a nonlinear pump flow mapping[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8638-8648.
- [11] Lyu L T, Chen Z, Yao B. Energy saving motion control of independent metering valves and pump combined hydraulic system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 1909-1920.
- [12] 徐兵, 丁孺琦, 张军辉. 基于泵阀联合控制的负载口独立系统试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(1): 93-101.
Xu B, Ding R Q, Zhang J H. Experiment research on individual metering systems of mobile machinery based on coordinate control of pump and valves[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(1): 93-101.(in Chinese)
- [13] 程敏, 于今, 丁孺琦, 等. 基于流量前馈与压力反馈复合控制的电液负载敏感系统[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 262-270.
Cheng M, Yu J, Ding R Q, et al. Electrohydraulic load sensing system via compound control of flow feedforward and pressure feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 262-270.(in Chinese)
- [14] 黄泽平, 娄贺, 王纪森. 基于负载敏感技术的新型EHA设计与仿真分析[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(7): 31-33.
Huang Z P, Lou H, Wang J S. Design and simulation analysis of a new type EHA based on load-sensing technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(7): 31-33.(in Chinese)
- [15] 袁士豪, 殷晨波, 刘世豪. 机械负载敏感定量泵系统性能分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 38-45.
Yuan S H, Yin C B, Liu S H. Performance analysis of machinery load sensitive quantitative pump system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 38-45.(in Chinese)
- [16] 孙博林, 程敏, 丁孺琦. 带流量前馈与工作腔压力反馈的电液负载敏感系统节能方法[J]. 液压与气动, 2021, 45(10): 1-7.
Sun B L, Cheng M, Ding R Q. Energy saving method for electro-hydraulic load-sensing systems with flow feed-forward and working chamber pressure feedback[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(10): 1-7.(in Chinese)
- [17] 丁孺琦, 江来, 李刚, 等. 电液负载敏感负载口独立多模式切换控制能效研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 433-442.
Ding R Q, Jiang L, Li G, et al. Energy efficiency of electro-hydraulic load sensing independent metering multi-mode switching control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 433-442.(in Chinese)

(编辑 吕建斌)