

液电混合直线驱动系统位置控制特性研究

郝云晓 夏连鹏 葛磊 王翔宇 权龙

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室,太原 030024)

摘要:提出了一种采用电-机械直线执行器和液压缸的液电混合直线驱动系统。为消除电-机械直线执行器和液压缸之间的耦合影响,液压泵和比例阀协同控制液压缸输出力和运行方向,满足系统负载力需求,电-机械直线执行器用于运动控制,并补偿液压缸输出力波动和外部干扰力。为实现上述目标,设计了基于扩张状态观测器的电-机械直线执行器自适应滑模控制方法,以估计的负载力调节泵压力和比例阀开度,对液压缸输出力进行调控。比例阀在系统运行中主要用于控制液压缸运动方向,阀开度较大,可显著降低节流损失。通过仿真和试验分析了系统的运行特性和能效特性。结果表明,该系统具有良好的位置控制特性,能量效率高,较传统阀控系统能耗减少51%。

关键词:液电混合驱动;电-机械直线执行器;液压系统;扩张状态观测器

中图分类号: TH137.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)03-0379-07

OSID:



Position Control Performance of Hydraulic Electric Hybrid Linear Drive System

HAO Yunxiao XIA Lianpeng GE Lei WANG Xiangyu QUAN Long

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education/Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The existing hydraulic system uses proportional valve or servo valve to control the position of hydraulic cylinder, resulting in very large throttling loss. In order to improve the hydraulic system energy efficiency, a hydraulic electric hybrid linear drive system adopting electro-mechanical linear actuator and hydraulic cylinder was proposed. In order to suppress the coupling effect between the electro-mechanical linear actuator and hydraulic cylinder, the hydraulic pump and the proportional valve were used to control the output force and operation direction of the hydraulic cylinder to meet the load force requirement of the system. The electro-mechanical linear actuator was used to control the operation position of the load. Meanwhile, in the electric motor current control loop of the electro-mechanical linear actuator, the hydraulic cylinder output force fluctuation and external interference force can be compensated. In order to realize the above target, an adaptive sliding mode control method based on extended state observer was designed for the electro-mechanical linear actuator. Based on the load force estimated by the extended state observer, the hydraulic cylinder output force can be open-loop controlled by adjusting the pressure of the hydraulic pump and the opening of the proportional valve. In the proposed system, the function of the proportional valve was controlling the move direction of the hydraulic cylinder most of the time. Thus, the throttling loss can be greatly reduced. The operation performance and the energy efficiency characteristics of the hydraulic-electric hybrid driving system were analyzed through simulation and test. The results showed that the proposed system had good position control performance and high energy efficiency. Compared with the traditional valve controlled system, the proposed system's energy consumption can be reduced by 51%.

Key words: hydraulic-electric hybrid driving; electro-mechanical linear actuator; hydraulic system; extended state observer

收稿日期: 2019-12-13 修回日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875385)和山西省重点研发计划项目(201803D421040、201803D121003)

作者简介: 郝云晓(1990—),男,博士生,主要从事电液系统研究,E-mail: haoyunxiaosuper@163.com

通信作者: 权龙(1959—),男,教授,主要从事流体传动与控制研究,E-mail: quanlong@tyut.edu.cn

0 引言

液压系统具有功率密度大、动态响应快等优点,广泛应用于机床、注塑机、工程机械、农业机械、航空航天等诸多领域。传统阀控缸系统通常采用定量液压泵供油,溢流阀设定系统压力,伺服阀控制液压缸运动速度与方向。采用非线性控制方法^[1-2],可实现液压执行器速度和位置的精确控制,但溢流和节流损失产生非常大的能耗。相关数据统计表明,现有液压系统的平均能效仅为21%^[3]。

提高阀控系统能效的基本途径是减小溢流和节流损失。TIVAY等^[4]通过同时调整比例溢流阀设定压力与伺服阀开度,降低系统的溢流损失和节流损失。同样,可采用集成压力切断、负载敏感和恒功率控制等功能的变量泵,构成负载敏感系统,在满足负载需求的前提下,减小液压泵的输出流量和压力^[5-10]。文献[11-12]进一步提出通过判断控制阀压差补偿器开口量,无需检测液压泵转速,控制泵摆角的流量匹配原理,较压力匹配型负载敏感系统降低能耗近10%。杨华勇等^[13]研究了电液负载敏感系统,结果表明,系统压力裕度可降低0.6~0.8 MPa,能效可提高8%~10%。针对传统液压阀进出口同时节流、超越负载工况节流损失大的问题,许多研究采用进出口独立控制系统进行改进^[14-15],取得了较好的节能效果^[16-17]。文献[18-20]通过泵阀协调和流量匹配,降低了泵的压力裕度和控制阀阀口压差。文献[21-23]将进出口独立控制系统应用于液压挖掘机,改善了挖掘机运行平稳性,提高了能量效率。然而,进出口独立控制系统需采用多个压力传感器和伺服比例阀,增大了系统复杂性,限制了其应用范围。

采用电-机械直线执行器,通过电能和机械能的直接转换,实现系统能效的提高。但电-机械直线执行器需按照所驱动执行机构的峰值功率进行配置,大幅增加了系统成本和装机功率,仅适用于小功率场合。在前期研究中,文献[24-25]提出一种电-机械直线执行器与液压缸-蓄能器组合的举升系统,通过液压缸-蓄能器平衡举升机构自重,回收利用重力势能,电-机械直线执行器控制举升机构运动。然而,该系统液压缸输出力不可主动调控,仅适用于具有第一和第二象限工况的举升机构。

为解决上述问题,结合电-机械直线执行器与阀控缸系统,提出一种液电混合直线驱动系统,以期实现全负载工况的高能效驱动。

1 工作原理

图1为提出的液电混合直线驱动系统回路原

理。在传统阀控缸系统中,动力源输出恒定压力和恒定流量的油液,液压缸输出力和速度同时由比例阀控制,阀口需保持较大压差,造成的节流损失很大,同时,存在非常大的溢流损失。本文提出的液电混合直线驱动系统,液压缸输出力保证电-机械直线执行器的承载能力;小功率电-机械直线执行器输出力代替比例阀控制负载运动,大幅减小系统节流损失。同时采用恒压泵,实现系统流量匹配,可避免溢流损失。

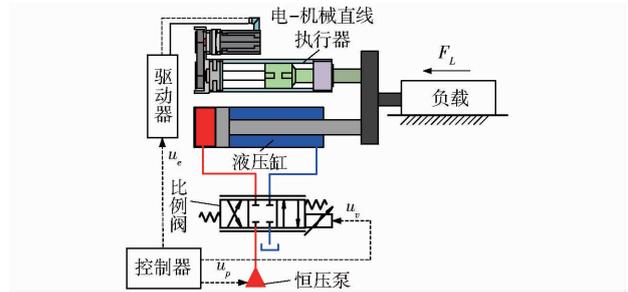


图1 液电混合直线驱动系统回路

Fig. 1 Circuit of hydraulic electric hybrid linear drive system

图2为液电混合直线驱动系统的整体控制系统。电-机械直线执行器闭环控制负载位移 x ,根据期望的液压缸力,通过调节恒压泵压力 p_p 和比例阀开度 x_v ,开环控制液压缸提供的驱动力 F_{HC} 。电-机械直线执行器中电动机为伺服电机,伺服电机控制器内部具有速度环和转矩环,通过转矩环自动补偿力($F_L - F_{HC}$),最终实现负载受力平衡。

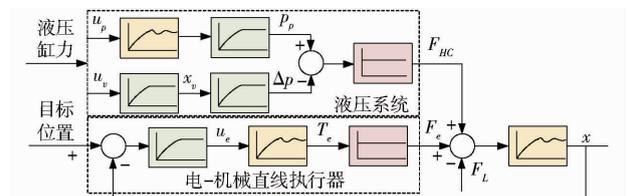


图2 整体控制系统

Fig. 2 Scheme of proposed control system

2 控制方案

所提系统中,液压缸和电-机械直线执行器输出力共同驱动负载,控制的关键在于维持电-机械直线执行器输出力在合适范围内,以保证系统的控制特性。为此,采用扩张状态观测器对电-机械直线执行器的外负载转矩进行估计,并通过检测液压缸压力,确定系统外负载力。然后,根据位置信号与系统受力情况,确定液压缸的理想输出力,从而控制恒压泵压力和比例阀开度,开环控制液压缸输出力。为补偿液压缸输出力波动和系统干扰力,设计了基于扩张状态观测器的电-机械直线执行器滑模控制算法,对估计的电-机械直线执行器外部干扰转矩进行补偿。

2.1 电-机械直线执行器

电-机械直线执行器电动机转矩、转角与输出力和直线位移之间的关系为

$$F_e = k_{ec} T_e \quad (1)$$

$$x = \frac{\theta}{k_{ec}} \quad (2)$$

其中 $k_{ec} = \frac{2\pi k_r}{L_p}$ (3)

$$T_e = k_i u_e \quad (4)$$

式中 F_e ——电-机械直线执行器输出力, N
 T_e ——电-机械直线执行器转矩, N·m
 k_r ——减速器减速比
 L_p ——滚珠丝杠螺距, mm/r
 k_{ec} ——电-机械直线执行器转速与直线速度的比例

u_e ——电动机交轴电流控制信号, A

θ ——电-机械直线执行器电动机转角, rad

k_i ——电动机转矩系数, N·m/A

液电混合驱动系统的动力学平衡方程为

$$p_A A_A - p_B A_B + F_e = m \ddot{x} + B \dot{x} + F_L \quad (5)$$

式中 p_A ——液压缸无杆腔压力, MPa

p_B ——液压缸有杆腔压力, MPa

A_A ——液压缸无杆腔有效面积, mm²

A_B ——液压缸有杆腔有效面积, mm²

m ——负载质量, kg

B ——系统阻尼系数, N·s/m

F_L ——系统外负载力, N

联立式(1)~(5), 将液压缸输出力作为电-机械直线执行器干扰力, 则电动机转矩平衡方程为

$$\ddot{\theta} = \frac{k_i u}{J_n} - \frac{B_n \dot{\theta}}{J_n} + d \quad (6)$$

其中 $d = (J_n - J + B_n - B - T_L)/J_n$ (7)

$$T_L = (p_A A_A - p_B A_B - F_L)/k_{ec} \quad (8)$$

$$k_i = \frac{3p_n \psi_f}{2} \quad (9)$$

式中 J_n ——名义转动惯量, kg·m²

J ——实际转动惯量, kg·m²

u ——电机电流环控制信号

B_n ——名义转动阻尼系数, N·m·s/rad

B ——实际转动阻尼系数, N·m·s/rad

p_n ——电动机极对数

ψ_f ——电动机磁通强度, Wb/m²

令 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, $x_3 = d$, 且 $\dot{x}_3 = D$, 则伺服电机线性化扩张状态观测器方程为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \frac{a_1 e_1}{\varepsilon} \\ \dot{z}_2 = z_3 + \frac{k_i u}{J_n} - \frac{B_n z_2}{J_n} - \frac{a_2 e_1}{\varepsilon^2} \\ \dot{z}_3 = \frac{-a_3 e_1}{\varepsilon^3} \end{cases} \quad (10)$$

式中 z_i —— x_i 的估计值, $i = 1, 2, 3$

e_1 ——扩张状态观测器角度估计误差, rad

ε ——扩张状态观测器增益

a_i ——观测器相关常数, $a_1 = 6, a_2 = 11, a_3 = 6$

定义 $\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^T$, $\eta_1 = e_1/\varepsilon^2$, $\eta_2 = e_2/\varepsilon$, $\eta_3 = D - z_3$, 其中 e_2 表示扩张状态观测器角速度估计误差。则扩张状态观测器的状态误差方程可写为

$$\varepsilon \dot{\eta} = A \eta - \frac{\varepsilon B_n}{J_n} B_1 + \varepsilon B_2 D \quad (11)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -6 & 1 & 0 \\ -11 & 0 & 1 \\ -6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

则对于任意给定的正定矩阵 Q , 存在对称正定矩阵 P , 满足 Lyapunov 方程

$$A^T P + PA + Q = O \quad (12)$$

式中 O ——零矩阵

由上述分析可知, 矩阵 A 为 Hurwitz 矩阵, 可实现当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 估计误差趋近于 0。

电-机械直线执行器采用滑模变结构控制, 定义滑模面 $s = ce + \dot{e}$, 其中滑模面增益 $c > 0$, 角度误差 $e = x_1 - \theta_d$, 角速度误差 $\dot{e} = x_2 - \dot{\theta}_d$ 。滑模趋近律采用指数趋近律, 则基于扩张观测器的滑模控制律为

$$u_e = \frac{J_n}{k_i} \left[-k_1 s - k_a \text{sgn}(s) - c(z_2 - \dot{\theta}_d) - z_3 + \frac{B_n}{J_n} z_2 + \ddot{\theta}_d \right] \quad (13)$$

$$\dot{k}_a = \gamma s \text{sgn}(s)$$

式中 θ_d ——设定角度, rad

k_1 ——滑模控制增益系数, $k_1 > 0$

k_a ——滑模算法自适应增益

γ ——滑模算法自适应增益正常数

设自适应增益误差为 $\tilde{k} = k_a - k^*$, k^* 为切换控制的理想增益。则可定义滑模函数的 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{k}^2 \quad (14)$$

对 Lyapunov 函数两边求导, 则有

$$V = s \dot{s} + (k_a - k^*) \dot{\tilde{k}}/\gamma = s(ce_2 + e_3 - B_n e_2/J_n) - k_1 |s|^2 - k^* |s| \quad (15)$$

式中 e_3 ——扩张状态观测器干扰力估计误差

由上述分析可知,选取足够大的 k_1 和 k^* ,便可保证 $\dot{V} \leq 0$ 。由 Lyapunov 稳定性理论可知,滑模面 s 可在有限时间内收敛于 0。

2.2 液压缸输出力控制

为避免电-机械直线执行器的电动机由于负载转矩过大而响应过慢,并保留一定裕度用于补偿液压缸输出力波动和外部干扰力,设定永磁同步电机转矩 $|T| \leq |T_{er}|$, T_{er} 小于电动机额定转矩,电-机械直线执行器的输出力为 $|F_{eL}| \leq k_{ec} |T_{er}|$ 。

根据扩张状态观测器估计的干扰力矩 $j_n z_3$,通过检测液压缸压力,可得液压缸和电-机械直线执行器的总输出力为

$$F_{TL} = p_A A_A - p_B A_B + k_{ec} (J_n \ddot{\theta} + B_n \dot{\theta} - J_n z_3) \quad (16)$$

为控制液压缸压力,首先需根据式(16)及负载运行方向,判断系统处于阻抗工况还是超越工况,然后针对不同工况设计相应的液压系统控制方法。

当在第一象限和第三象限时,系统处于阻抗负载工况。为减小节流损失,比例阀根据速度控制信号与系统可达到的最大速度之比进行控制,即

$$u_v = \frac{v_{ref}}{v_{max}} \quad (17)$$

式中 v_{ref} ——设定速度,mm/s

v_{max} ——系统可达最大速度,mm/s

u_v ——阀控制信号

当系统外负载力在设定的电-机械直线执行器输出力范围内时,恒压泵维持最低工作压力 $p_{pmin} = 2.5 \text{ MPa}$ 。当系统外负载力超过电-机械直线执行器输出力时,根据式(16)可得液压缸输出力为

$$F_{HC} = F_{TL} - k_{ec} T_{er} \quad (18)$$

液压缸回油压力对液压缸输出力的影响可忽略,液压缸控制腔的压力期望值为

$$p_{CC} = \begin{cases} \frac{F_{HC}}{A_A} & (\dot{x}_{ref} \geq 0) \\ -\frac{F_{HC}}{A_B} & (\dot{x}_{ref} < 0) \end{cases} \quad (19)$$

当液压缸控制腔压力期望值小于液压泵最低工作压力 2.5 MPa 时,液压泵维持最低工作压力,液压缸控制腔压力基本等于液压泵最低工作压力。

当液压缸控制腔压力大于液压泵最低工作压力 2.5 MPa 时,液压泵根据液压缸控制腔压力进行调节,液压泵压力的期望值为

$$p_s = p_{CC} + \Delta p \quad (20)$$

式中 Δp ——管路和阀口的压力损失,MPa

当在第二和第四象限时,系统处于超越负载工况,此时液压泵始终维持在最低工作压力 2.5 MPa。当系统外负载力在电-机械直线执行器输出力范围内时,根据式(17)对比例阀进行控制。当系统外负载力超过设定输出力时,根据式(18)获得的液压缸输出力,可获得液压缸回油腔的压力为

$$p_{CB} = \begin{cases} \frac{-F_{HC}}{A_B} & (\dot{x}_{ref} \geq 0) \\ \frac{F_{HC}}{A_A} & (\dot{x}_{ref} < 0) \end{cases} \quad (21)$$

定义 $k = q_r/x_{rmax}$, q_r 为控制阀额定流量, L/min, x_{rmax} 为最大阀芯位移, mm, 此时,比例阀的控制信号为

$$u_v = \begin{cases} \frac{A_B \dot{x}_{ref}}{k} \sqrt{\frac{\Delta p_r}{p_{CB}}} & (\dot{x}_{ref} \geq 0) \\ \frac{A_A \dot{x}_{ref}}{k} \sqrt{\frac{\Delta p_r}{p_{CB}}} & (\dot{x}_{ref} < 0) \end{cases} \quad (22)$$

式中 Δp_r ——控制阀额定压降,MPa

当速度控制信号为 0,负载处于定位阶段时,液压泵压力根据系统所受负载力方向和大小确定。系统负载力在电-机械直线执行器设定值范围时,液压泵维持最低工作压力;系统负载力大于电-机械直线执行器设定值时,液压泵压力为

$$p_s = \begin{cases} \frac{F_{HC}}{A_B} & (F_{HC} \geq 0) \\ \frac{F_{HC}}{A_A} & (F_{HC} < 0) \end{cases} \quad (23)$$

负载处于定位阶段时,比例阀根据系统受负载力方向进行控制

$$u_v = \begin{cases} u_0 & (F_{HC} + F_e \geq 0) \\ -u_0 & (F_{HC} + F_e < 0) \end{cases} \quad (24)$$

式中 u_0 ——较小正值

3 仿真

为验证所提系统和控制方法的可行性,建立了液电混合驱动系统仿真模型,如图 3 所示。控制阀额定 20 Hz,额定流量 100 L/min,额定压差 3.5 MPa;电-机械直线执行器减速器减速比 1.8,滚珠丝杠螺距 10 mm/r,伺服电机额定转速 2 000 r/min,设定转矩阈值 $T_{er} = 16 \text{ N} \cdot \text{m}$;液压缸活塞和活塞缸直径分别为 40 mm 和 22 mm,负载质量 330 kg。在扩张状态观测器中, $J_n = 0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $B_n = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $\varepsilon = 0.005$;滑模控制算法中, $c = 15$, $k_1 = 10$, $\gamma = 0.01$ 。

仿真过程中,设定最大速度 100 mm/s,最大加速度 200 mm/s²,图 4 为液电混合直线驱动系统处

于阻抗负载工况时的运行特性仿真结果。图4a为位置控制特性曲线,图4b为负载力和电机转矩曲线。由图4a、4b可知,扩张状态观测器可对系统负载力进行准确估计,同时在负载加减速过程中,可估

计负载惯性力。通过滑模算法控制伺服电机,对估计转矩 $j_m z_3$ 进行补偿,由图4a可以看出,液电混合直线驱动系统具有较高的位置控制精度,由负载力突变引起的位置误差最大为1.3 mm。

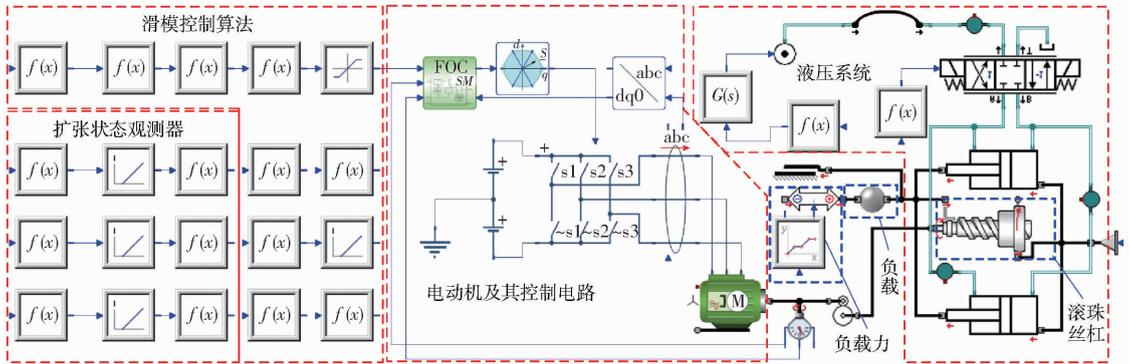


图3 液电混合直线驱动系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of hydraulic electric hybrid linear drive system

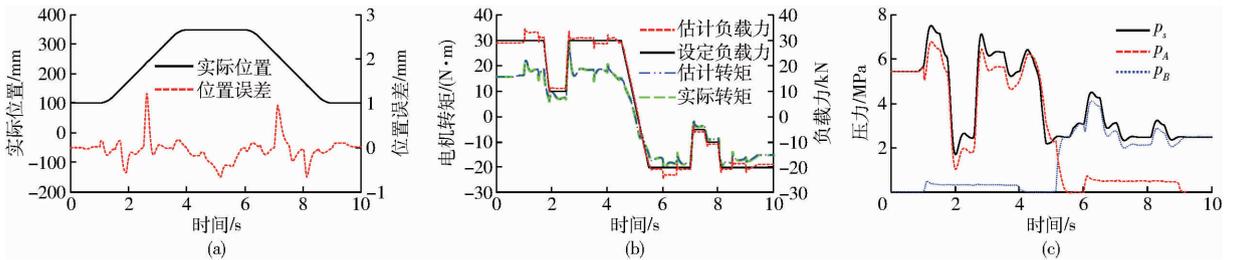


图4 阻抗负载工况系统运行特性仿真结果

Fig. 4 Simulation results of operation characteristics of proposed system under resistance load condition

图4c为液压系统的压力曲线。由于在阻抗负载工况下,比例阀开度很大,由图可知,比例阀进出油口压力损失小,约为0.3 MPa,比例阀起液压缸换向作用。结合图4b可知,当负载力变化时,液压系统压力和电机转矩均作出相应变化。当负载力突变时,液压泵压力响应慢,电动机实际转矩将超过设定转矩,以补偿液压系统压力响应慢对运行特性的影响。

运行特性曲线。图5a为位置控制特性曲线,图5b为比例阀开度和负载力曲线。由图5a、5b可知,在超越负载工况下,根据系统所受负载力调节比例阀开度和液压泵压力,对系统运行特性影响较大,负载突变造成的位置误差较阻抗负载大,最大约为1.8 mm。图5c为液压系统压力和转矩变化曲线。由图5c可知,当负载力变化时,比例阀根据负载力调节液压缸回油腔压力,使电-机械直线执行器转矩维持在设定值附近。

图5为超越负载工况下,液电混合驱动系统的

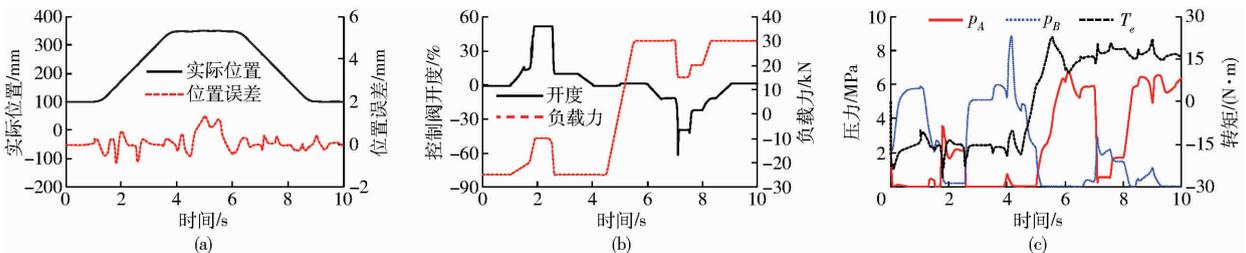


图5 超越负载工况系统运行特性仿真结果

Fig. 5 Simulation results of operation characteristics of proposed system under overrunning load condition

4 试验

为验证所提方案的可行性,建立了图6所示的液电混合驱动系统试验台。控制阀采用Moog-D633型伺服阀(与仿真模型中控制阀参数相同)。

采用力士乐A10VSO45型远程压力控制恒压泵。电-机械直线执行器采用菲士A3031004F型伺服电机,额定转矩32 N·m,设定 T_{er} 为16 N·m,额定转速2000 r/min。试验过程中,采用加载台对系统进行负载力控制,采用功率仪检测电-机械直线执行器电

动机功率, dSPACE MicroLabBox 1202 实时系统用于整个系统控制和数据采集。

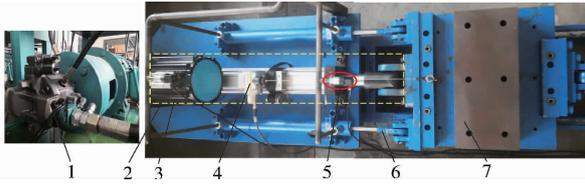


图6 系统试验台实物

Fig. 6 Test rig picture of proposed system

1. 恒压泵 2. 电-机械直线执行器 3. 电动机 4. 拉线式编码器
5. 压力传感器 6. 液压缸 7. 负载

图7为试验获得的液电混合驱动系统位置控制特性曲线。由图7可知,液电混合驱动系统具有良好的位置控制精度,在运行过程中,最大位置误差约为2.25 mm。

采用传统阀控系统作为对比,恒压泵压力设定为12 MPa。图8为在相同工况下,液电混合直线驱动系统和阀控系统的运行特性曲线。由图8a、8b可知,在传统阀控缸系统中,控制阀开度小,压力损失大。液电混合驱动系统中,液压缸和电-机械直线执行器共同驱动执行机构,液压泵和

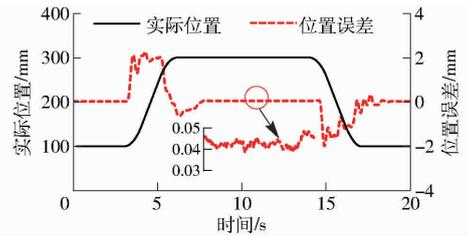


图7 所提系统位置控制特性曲线

Fig. 7 Proposed system position control performance

液压缸压力远小于传统阀控系统的压力,液压泵压力根据负载力进行调控,且比例阀进出口压力损失小。在系统运行过程中,当系统所受负载力超过电-机械直线执行器设定输出力时,电动机实际转矩约为 $17 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图8c为液电混合驱动系统和传统阀控系统能量特性曲线。恒压泵功率根据斜盘摆角及转速计算,由功率仪测得电-机械直线执行器功率。传统阀控系统节流损失达5.6 kJ,液电混合驱动系统约为0.65 kJ。经计算,传统阀控系统消耗的能量约为31.3 kJ,液电混合直线驱动系统消耗的能量包括电-机械直线执行器与液压系统,总能耗为15.3 kJ,能耗减少了51%。

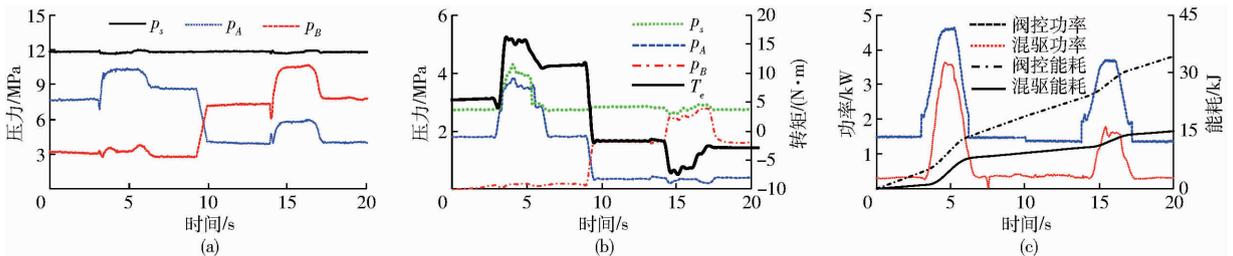


图8 传统阀控系统和所提系统的运行特性和能量特性

Fig. 8 Operation and energy characteristics of traditional valve controlled system and proposed system

5 结论

(1)提出了一种采用液电混合直线驱动系统,电-机械直线执行器控制系统位置,并补偿液压缸输出力波动和干扰力;恒压泵和比例阀开环控制液压缸输出力,使电-机械直线执行器输出力维持在设定值范围内。比例阀主要起液压缸换向作用,降低了

系统运行过程中的节流损失。

(2)设计了扩张状态观测器,对系统的干扰力进行估计,并采用滑模算法控制电-机械直线执行器位置。仿真和试验结果表明,液电混合直线驱动系统具有良好的位置控制特性,位置控制精度高。

(3)与传统阀控缸系统相比,液电混合直线驱动系统大幅降低了节流损失,系统能耗减少达51%。

参考文献

- [1] 高长虹,何彪,曲智勇,等. 液压驱动并联加载机构正弦位置/力幅相控制[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):396-401,363. GAO Changhong, HE Biao, QU Zhiyong, et al. Sinusoidal position/force amplitude and phase control for hydraulically driven parallel loading mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 396-401, 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180749&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.049. (in Chinese)
- [2] 陈庆成,朱世强,蒋瑜,等. 液压外骨骼机器人非线性模糊滑模控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):355-361. CHEN Qingcheng, ZHU Shiqiang, JIANG Yu, et al. Nonlinear fuzzy SMC algorithm for hydraulic-driven exoskeleton robot system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 355-361. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170447&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.047. (in Chinese)
- [3] LOVE L J, LANKE E, ALLES P. Estimating the impact (energy emissions and economics) of U. S. fluid power industry[R].

- Oak Ridge National Laboratory (ORNL): Oak Ridge, USA, 2012.
- [4] TIVAY A, ZAREINEJAD M, REZAEI S, et al. A switched energy saving position controller for variable-pressure electro-hydraulic servo systems [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 1297–1306.
- [5] BACKE W, ZÄHE B. Electrohydraulic load-sensing [J]. *SAE Transactions*, 1991, 100(2): 303–311.
- [6] LETTINI A, HAVERMANN M, GUIDETTI M, et al. Improved functionalities and energy saving potential on mobile machines combining electronics with flow sharing valve and variable displacement pump [C]//7th International Fluid Power Conference, 2010: 103–114.
- [7] 邱清盈, 陆银, 冯培恩, 等. 负载敏感液压挖掘机作业循环时间建模与优化[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 39–44, 73. QIU Qingying, LU Yin, FENG Peien, et al. Modeling and optimization of working cycle time for load sensing hydraulic excavator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10): 39–44, 73. (in Chinese)
- [8] HU Q, ZHANG H, TIAN S, et al. Performances analysis of a novel load-sensing hydraulic system with overriding differential pressure control [J]. *Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(23): 4331–4343.
- [9] AXIN M, ERIKSSON B, KRUS P. Flow versus pressure control of pumps in mobile hydraulic systems [J]. *Proc. IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2014, 228(4): 245–256.
- [10] LOVREC D, KASTREVC M, ULAGA S. Electro-hydraulic load sensing with a speed-controlled hydraulic supply system on forming-machines [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 41(11): 1066–1075.
- [11] DJUROVIC M, HELDUSER S. New control strategies for electro-hydraulic load-sensing [C] // Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control, 2004: 201–210.
- [12] FINZEL R, HELDUSER S, JANG D. Electro-hydraulic dual-circuit system to improve the energy efficiency of mobile machines [C]//7th International Fluid Power Conference, 2010: 151–163.
- [13] 杨华勇, 刘伟, 徐兵, 等. 挖掘机电液流量匹配控制系统特性分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(14): 156–163. YANG Huayong, LIU Wei, XU Bing, et al. Characteristic analysis of electro-hydraulic flow matching control system in hydraulic excavator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14): 156–163. (in Chinese)
- [14] 徐兵, 曾定荣, 葛耀峥, 等. 负载口独立控制负载敏感系统模式切换特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(5): 858–863. XU Bing, ZENG Dingrong, GE Yaozheng, et al. Research on characteristic of mode switch of separate meter in and meter out load sensing control system [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(5): 858–863. (in Chinese)
- [15] ERIKSSON B, PALMBERG J O. Individual metering fluid power systems: challenges and opportunities [J]. *Proc. IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, 225(2): 196–211.
- [16] 刘英杰, 徐兵, 杨华勇, 等. 电液比例负载口独立控制系统压力流量控制策略[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5): 182–187. LIU Yingjie, XU Bing, YANG Huayong, et al. Strategy for flow and pressure control of electro hydraulic proportional separate meter in and separate meter out control system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5): 182–187. (in Chinese)
- [17] 丁孺琦, 徐兵, 张军辉, 等. 负载口独立控制挖掘机机液耦合模型建立与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 309–318. DING Ruqi, XU Bing, ZHANG Junhui, et al. Mechanical-hydraulic coupling modeling of independent metering control excavator and its test verification [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 309–318. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160441&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.041. (in Chinese)
- [18] 师建鹏, 权龙, 张晓刚, 等. 进出口独立复合控制挖掘机的动臂速度位置特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(9): 1797–1807. SHI Jianpeng, QUAN Long, ZHANG Xiaogang, et al. Velocity and position characteristics of excavator's boom by separate meter-in and meter-out compound control [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(9): 1797–1807. (in Chinese)
- [19] SHI Jianpeng, QUAN Long, ZHANG Xiaogang, et al. Electro-hydraulic velocity and position control based on independent metering valve control in mobile construction equipment [J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 73–84.
- [20] XU Bing, DING Ruqi, ZHANG Junhui, et al. Pump/valves coordinate control of the independent metering system for mobile machinery [J]. *Automation in Construction*, 2015, 57: 98–111.
- [21] 黄伟男, 张晓刚, 权龙, 等. 大惯性回转系统速度位置复合控制特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 410–417. HUANG Weinan, ZHANG Xiaogang, QUAN Long, et al. Velocity and position combined control of hydraulic swing system with large inertia [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 410–417. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181048&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.048. (in Chinese)
- [22] 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 Zhixin, HUANG Weinan, GE Lei, et al. Research on the performance of hydraulic excavator with pump and valve combined separate meter in and meter out circuits [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12): 173–180. (in Chinese)
- [23] 杨敬, 张晓刚, 权龙, 等. 基于柴油机万有特性分析的进出口独立控制挖掘机节能研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3): 182–190. YANG Jing, ZHANG Xiaogang, QUAN Long, et al. Energy saving of excavator with separate meter-in and meter-out circuits based on analysis of diesel engine universal characteristic [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3): 182–190. (in Chinese)
- [24] 李泽鹏, 权龙, 葛磊, 等. 电混合驱动液压挖掘机动臂特性及能效研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(20): 213–219. LI Zepeng, QUAN Long, GE Lei, et al. Research on characteristics and energy efficiency of hydraulic-electric combined driving hydraulic excavator boom [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(20): 213–219. (in Chinese)
- [25] 权龙, 夏连鹏, 赵斌, 等. 液压驱动机械臂势能回收利用研究工作进展[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(20): 4–13. QUAN Long, XIA Lianpeng, ZHAO Bin, et al. Innovation progress in research on gravitational potential energy recovery and utilization of hydraulic driven mechanical arm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(20): 4–13. (in Chinese)