

容积伺服电液作动器位置控制研究

闫桂山^{1,2}, 金振林^{1,2}

(1. 燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛;
2. 河北省重型智能制造装备技术创新中心, 066004, 河北秦皇岛)

摘要: 针对容积伺服电液作动器位置高精度控制问题,建立电液作动器位置控制数学模型,提出三状态反馈与三状态顺馈控制策略。该控制策略通过三状态反馈补偿系统固有频率和阻尼比,并利用三状态顺馈实现极点配置,进而对控制器进行参数优化设计,有效提高系统的动态特性。搭建容积伺服电液作动器实验平台,针对所提出的控制方法进行实验验证。研究表明:所提出的容积伺服电液作动器位置控制方法具有较好的控制效果,可实现电液作动器的高精度控制,控制精度达±0.01 mm,将为电液作动器的工程推广与应用奠定良好的基础。

关键词: 容积伺服;电液作动器;位置控制;三状态反馈;三状态顺馈

中图分类号: TH137;TK83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202101012 **文章编号:** 0253-987X(2021)01-0094-07



OSID 码

Position Control of the Volume Servo Electro-Hydrostatic Actuators

YAN Guishan^{1,2}, JIN Zhenlin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 2. Heavy-Duty Intelligent Manufacturing Equipment Innovation Center of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Aiming at the problem of high-precision position control for the volume servo electro-hydrostatic actuators, the mathematical models of electro-hydraulic actuator position control were established, and the three-state feedback and three-state feed-forward control strategy was proposed. This control strategy adjusts the natural frequency and damping ratio of the system through the three-state feedback, and uses the three-state forward feed to achieve pole configuration, and then optimizes parametric design for the controller, improving the dynamic characteristics of the system effectively. A test platform for volume servo electro-hydraulic actuators was built, and experimental verification was performed for the proposed control method. The results show that the proposed position control method of volume servo electro-hydraulic actuator has good control effect, and can achieve high-precision control of the electro-hydraulic actuator with the control accuracy of ±0.01 mm. This study may provide a foundation for the engineering promotion and application of electro-hydraulic actuators.

Keywords: volume servo; electro-hydrostatic actuator; position control; three-state feedback; three-state forward-feed

电液伺服技术作为工业装备制造领域的核心技术之一,在冶金、锻压、注塑、轨道交通等工业领域均

有极其广泛的应用^[1-2]。实现电液伺服技术与绿色发展、智能转型的有机结合,将极大推动我国工业的

收稿日期: 2020-05-21。 作者简介: 闫桂山(1988—),男,博士生;金振林(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51927809);河北省重点研发项目(20314402D);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2020166)。
网络出版时间: 2020-09-25 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200924.1859.004.html>

智能化进程^[3-4]。以此为背景,越来越多的专家、学者致力于电液伺服技术与绿色智能理念的融合,电液伺服泵控技术便是其中一个重要研究热点^[5-6]。容积伺服电液作动器是电液伺服泵控技术的典型应用,该电液作动器省去了庞大的液压站、复杂的管路系统以及昂贵的伺服阀,有效地克服了电液伺服阀控技术抗污染能力差、集成度低、能源浪费严重等技术缺陷,具有高效节能、高功重比和环境友好等技术优点^[7-9]。

容积伺服电液作动器是一个多变量、强耦合、非线性和变参数的复杂系统,其中位置控制是其关键技术问题之一,在车辆悬架控制^[10-11]、机器人关节驱动^[12]和风力发电传动比调控^[13]等工程领域均有重要应用。近年来,国内外学者对电液作动器的高精度位置控制问题做了相关研究。

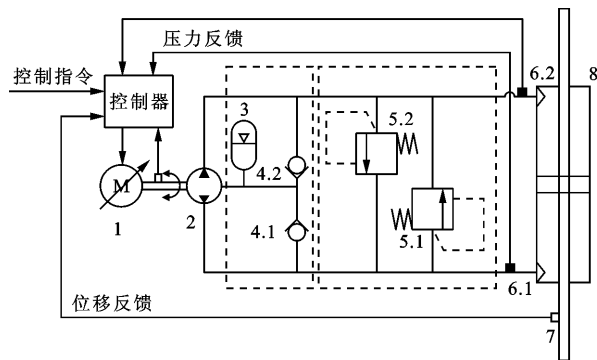
国外 Buchun 等针对电液作动器动态变化的非线性问题,提出了自适应滑模控制方案,有效地解决了电液作动器的鲁棒性控制问题^[14];Haris 等针对电液作动器死区非线性问题,提出了一种鲁棒模型预测控制器,克服了测量扰动和非测量高斯扰动问题,提高了系统位置控制精度、鲁棒性和响应速度等^[15];Chong 等针对电液作动器轨迹跟踪问题,采用粒子群模糊逻辑控制器对系统进行位置控制优化,实现了在一定的范围内参考轨迹的准确跟踪^[16]。

国内 Li 等针对电液作动器位置控制动态特性问题,采用提高电机输出扭矩、降低电机泵组转动惯量,以及采用双电机泵组结构等措施用以改善系统动态特性^[17-18];Yang 等提出一种新型滑模控制方法,具体包含降阶模型、扰动滑模观测器和自适应定律等,有效地改善了位置控制过程中的瞬态性能、稳态精度和鲁棒性^[19-20];姜继海等针对电液作动器死区和非线性特征,采用基于趋近率的离散滑模控制算法,显著提高了系统位置跟踪特性^[21]。

上述研究工作大多从电液作动器位置控制的非线性、死区、转动惯量等角度出发,随着控制精度指标要求的提高,从系统固有频率、阻尼比等动力学参数本质角度实现电液作动器位置控制有待进一步研究。本文针对电液作动器高精度位置控制问题,建立电液伺服作动器数学模型,提出三状态反馈与三状态顺馈控制策略,通过三状态反馈补偿系统固有频率和阻尼比,并利用三状态顺馈实现极点配置,进而对控制器进行参数优化设计,有效改善了系统的动态特性与控制精度。

1 电液作动器简介

容积伺服电液作动器主要包括伺服电机、定量泵、液压阀、蓄能器、液压缸和控制器等,其工作原理如图 1 所示。



1—伺服电机;2—定量泵;3—蓄能器;4.1—A 腔单向阀;4.2—B 腔单向阀;5.1—A 腔溢流阀;5.2—B 腔溢流阀;6.1—A 腔压力传感器;6.2—B 腔压力传感器;7—位移传感器;8—液压缸。

图 1 电液作动器工作原理图

电液作动器采用伺服电机-定量泵-液压缸容积控制方案,定量泵吸排油口直接连接液压缸两负载油口 A、B 两腔;蓄能器配合单向阀实现系统补油功能;溢流阀实现系统压力过载保护;控制器采集系统压力、位移等状态信息,并输出控制指令,进而通过伺服电机实现电液作动器的闭环伺服控制。

2 数学模型

针对电液作动器核心元件伺服电机、液压泵和液压缸进行建模分析,以此为基础对电液作动器位置伺服控制系统进行研究。

2.1 伺服电机数学模型

电液作动器在进行位置控制过程中,伺服电机作为控制算法的执行终端,是位置控制的关键部件,其具体数学模型如下。

电机定子磁链方程

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

电机定子电压方程

$$\left. \begin{aligned} U_d &= R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \\ U_q &= R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

电机电磁转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

电机运动方程

$$T_e - T_L = J_L \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m \quad (4)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链的 d - q 轴分量; L_d 、 L_q 为定子电感的 d - q 轴等效电感; i_d 、 i_q 为定子电流的 d - q 轴分量; ψ_f 为永磁体磁链; U_d 、 U_q 为定子电压的 d - q 轴分量; R_s 为定子电阻; ω_e 为电机转子角速度; T_e 为电机电磁转矩; p_n 为电机极对数; T_L 为电机负载转矩; J_L 为转子轴等效折算转动惯量; ω_m 为电机的机械角速度; D 为电动机阻尼系数。

2.2 液压泵数学模型

液压泵为电液作动器的动力元件, 为液压缸运动提供液压动力输入。

液压泵流量输出方程为

$$Q_p = D_p \omega_p - C_p P_L \quad (5)$$

式中: ω_p 为液压泵角速度; D_p 为液压泵额定排量; Q_p 为液压泵输出流量; C_p 为液压泵泄漏系数; P_L 为负载压力。

2.3 液压缸数学模型

液压缸为电液作动器的执行元件, 是电液作动器与负载作用的执行终端, 其数学模型描述如下。

液压缸的流量连续性方程为

$$Q_L = A_p s X_p + C_l P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \quad (6)$$

液压缸和负载的力平衡方程为

$$A_p P_L = m_t s^2 X_p + B_p s X_p + K X_p + F_L \quad (7)$$

式中: A_p 为液压缸有效作用面积; Q_L 为液压缸负载流量; C_l 为液压缸总泄漏量; V_t 为系统总压缩容积; β_e 为油液有效体积弹性模量; m_t 为活塞及负载折算到活塞上的总质量; B_p 为活塞及负载的黏性阻尼系数; K 为负载弹簧刚度; X_p 为液压缸输出位移; F_L 为作用在活塞上的任意外负载力。

2.4 位置控制系统模型分析

由式(5)~(7)建立电液作动器位置控制的框图如图2所示。由图2可推导得到电液作动器位置伺服开环传递函数为

$$X_p = [D_p \omega_p / A_p - (K_{ce} / A_p^2) (1 + V_t s / 4\beta_e K_{ce}) F_L] /$$

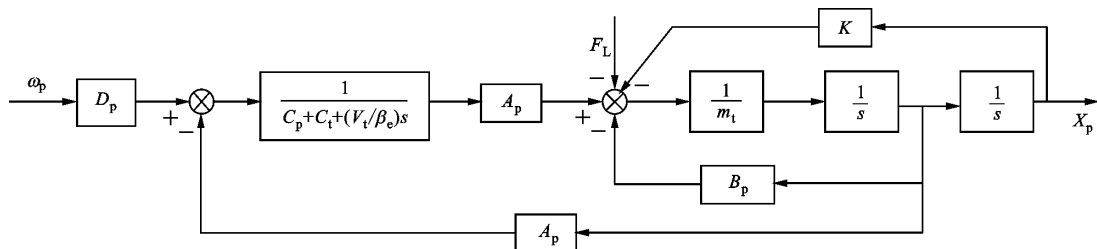


图2 电液作动器位置控制框图

$$[m_t V_t s^3 / 4\beta_e A_p^2 + (m_t K_{ce} / A_p^2 + B_p V_t / 4\beta_e A_p^2) s^2 + (1 + B_p K_{ce} / A_p^2 + K V_t / 4\beta_e A_p^2) s + K_{ce} K / A_p^2] \quad (8)$$

式中: K_{ce} 为总流量-压力系数, $K_{ce} = C_l + C_p$ 。

忽略黏性阻尼和负载的弹性, 即 $B_p = 0$, $K = 0$, 将式(8)的三阶特征方程分解为一阶和二阶两个因子, 可得

$$X_p = \frac{D_p \omega_p / A_p - (K_{ce} / A_p^2) (1 + V_t s / 4\beta_e K_{ce}) F_L}{s(s^2 / \omega_h^2 + 2\xi_h s / \omega_h + 1)} \quad (9)$$

式中: ω_h 为电液作动器液压固有频率; ξ_h 为电液作动器液压阻尼比。

进一步, ω_h 、 ξ_h 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \omega_h &= \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t m_t}} \\ \xi_h &= \frac{K_{ce}}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_t}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3 控制方法研究

本文拟通过状态反馈与状态顺馈的方式, 选取系统位置、速度和加速度 3 个物理状态, 形成三状态反馈与三状态顺馈控制策略。通过补偿电液作动器固有频率与阻尼比, 并配置闭环极点, 进而提高系统的控制性能指标。

3.1 三状态反馈控制

电液作动器液压固有频率较低、阻尼比较小、系统稳定裕量低, 无法快速精确跟随控制输入指令。为此, 采用三状态反馈方法来补偿系统的固有频率和阻尼比, 改善系统的控制品质。

三状态反馈控制的具体思想为: 通过反馈矩阵 $E(s)$ 对电液作动器位置伺服系统进行极点配置, 规划传递函数 $G(s)$ 的极点到期望位置, 进而补偿系统固有频率和阻尼比, 解决系统静态精度不高与动态性能受限问题, 最终提高系统控制性能, 控制原理如图3所示。

由式(9)可知, 电液作动器位置控制传递函数可简化为

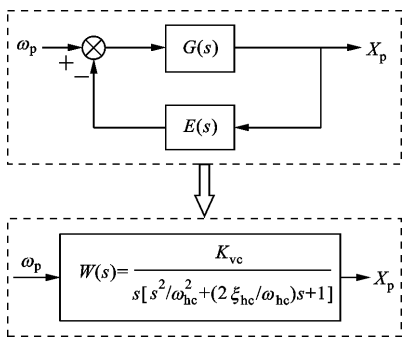


图3 三状态反馈控制原理图

$$G(s) = \frac{K_v}{s(s^2/\omega_h^2 + 2\xi_h s/\omega_h + 1)} \quad (11)$$

其中 K_v 为开环增益,可表示为

$$K_v = \frac{D_p}{A_p} \quad (12)$$

设三状态反馈控制后,系统期望的闭环传递函数为

$$W(s) = \frac{K_{vc}}{s(s^2/\omega_{hc}^2 + 2\xi_{hc} s/\omega_{hc} + 1) + K_{vc}} \quad (13)$$

系统期望的闭环传递函数中 ω_{hc} 和 ξ_{hc} 直接影响系统的控制特性,电液作动器控制指标从时域角度通常用超调量 M_p 和峰值时间 t_p 进行约束,其中 $M_p \leq 5\%$, $t_p \leq 3$ s,以此为边界条件,对期望的闭环传递函数中固有频率和阻尼比进行约束,可得

$$\left. \begin{aligned} M_p &= e^{-\xi_{hc}/\sqrt{1-\xi_{hc}^2}} \leq 5\% \\ t_p &= \frac{\pi}{\omega_{hc} \sqrt{1-\xi_{hc}^2}} \leq 3 \text{ s} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

进一步,三状态反馈控制系统如图4所示。

由图4可知,三状态反馈控制后,对应的系统期望的闭环传递函数可表示为

$$W(s) = K_v K_{sf} \left[\frac{s^3/\omega_h^2 + (2\xi_h/\omega_h + K_v K_{af})s^2 + (1 + K_v K_{vf})s + K_v K_{sf}}{s^2/\omega_h^2 + 2\xi_h s/\omega_h + 1} \right] \quad (15)$$

式(13)和(15)化为状态方程后,相应系数项相等,计算可解得

$$\left. \begin{aligned} K_{vc} &= \frac{\omega_h^2 K_v K_{sf}}{\omega_{hc}^2} \\ K_{af} &= \frac{2\xi_h}{\omega_h} \left(\frac{K_{sf}}{K_{vc}} - \frac{1}{K_v} \right) \\ K_{vf} &= \frac{\omega_{hc}^2 - \omega_h^2}{K_v \omega_h^2} \\ K_{sf} &= \frac{K_{vc}}{K_v} + \frac{K_v K_{af} \omega_{hc}}{2\xi_{hc}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3.2 三状态顺馈控制

三状态反馈可使系统固有频率和阻尼比得到补

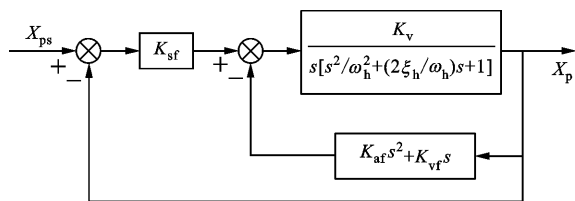


图4 三状态反馈控制系统框图

偿优化,并将系统的主要极点控制到所希望的区域。在三状态反馈控制的基础上引入三状态顺馈控制策略,实现极点配置,可拓展系统频宽,进一步优化系统控制性能。

三状态顺馈控制的具体思想为:通过引入 $F(s)$ 环节,在电液作动器位置闭环传递函数中,对消距离虚轴较近的主导极点,控制原理如图5所示。

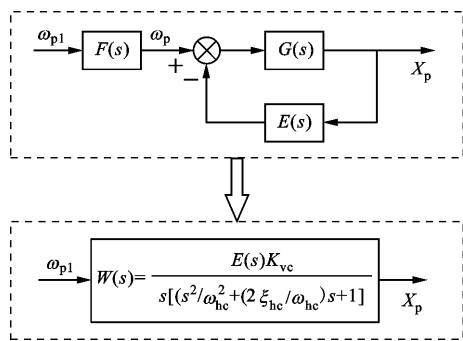


图5 三状态顺馈控制原理图

设 $F(s)$ 有如下形式

$$F(s) = K_{sv} + K_{vv}s + K_{av}s^2 \quad (17)$$

进一步,用 $F(s)$ 对消系统 ω_{hc} 处极点,即令

$$F(s) = \frac{s^2}{\omega_{hc}^2} + \frac{2\xi_{hc}}{\omega_{hc}}s + 1 \quad (18)$$

式(17)和(18)联立,解得

$$\left. \begin{aligned} K_{sv} &= 1 \\ K_{vv} &= \frac{2\xi_{hc}}{\omega_{hc}} \\ K_{av} &= \frac{1}{\omega_{hc}^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

4 实验研究

实验平台由伺服电机、液压泵、控制阀块、伺服缸和采集与控制系统组成,其中驱动器控制伺服电机实现液压泵的转速伺服控制,组成电动伺服泵单元,是电液作动器的核心部分,其组成构架如图6所示。

进一步,电动伺服泵单元安装在功能阀块上,并通过液压管路与执行机构液压缸相连接。电液作动器实验台如图7所示。

在 Simulink 中编译三状态反馈与三状态顺馈

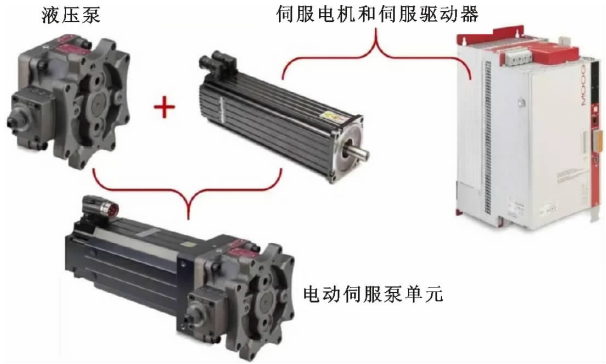


图 6 电动伺服泵单元构架图

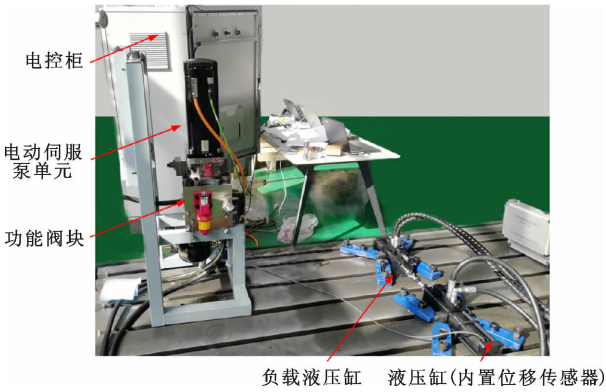


图 7 实验台实物图

控制算法,并将控制算法下载到轴控制器中,轴控制输出控制指令 U_{ref} ,进而实现实验平台的实时控制。电液作动器实验台电气控制部分如图 8 所示。

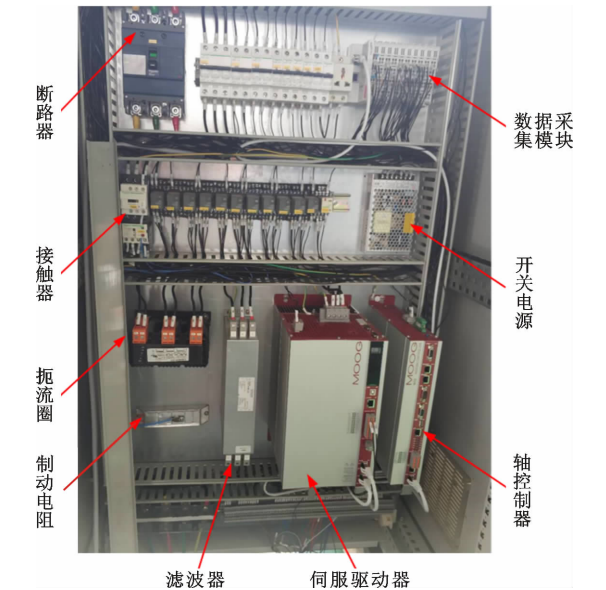


图 8 实验台电气控制部分实物图

电液作动器实验平台工作参数如表 1 所示,电液作动器实验平台关键传感器技术规格如表 2 所示。

表 1 实验平台工作参数

参数	数值
伺服电机额定扭矩/(N·m)	22
伺服电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
液压泵排量/(mL·r ⁻¹)	8
液压泵最大转速/(r·min ⁻¹)	4 500
系统最大工作压力/MPa	35
液压缸规格参数/mm	Φ50/Φ30-300

表 2 关键传感器技术规格

名称	型号	技术参数
位移传感器	BTL7-S567	行程:0~300 mm 精度:0.001 mm
压力传感器	SPE511-942	量程:0~16 MPa 精度:≤±0.3%

给定电液作动器从 240 mm 运动到 40 mm,得到实验曲线如图 9 所示。

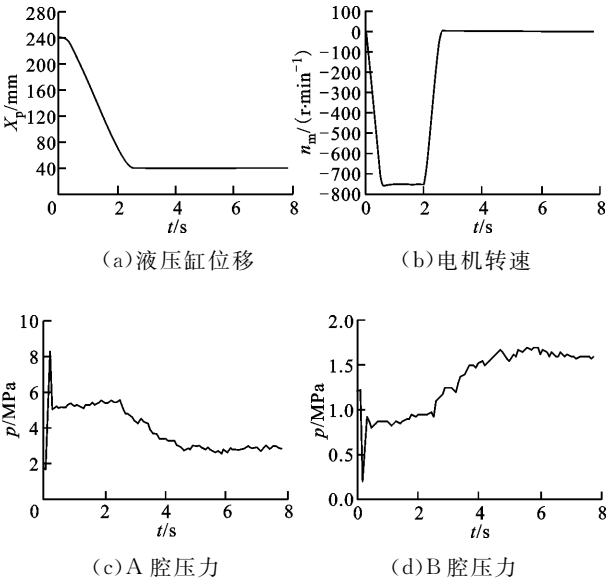


图 9 电液作动器位移减小响应曲线

由图 9 可知,采用三状态反馈与顺馈控制策略,给定位移减小 200 mm 指令后,伺服电机转速和系统压力快速响应,电机转速峰值可达 750 r/min,系统压力峰值高达 8 MPa,液压缸位置在 2.2 s 内达到稳态位置,稳态精度为±0.01 mm。

给定电液作动器位移从 40 mm 运动到 240 mm,得到实验曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,采用三状态反馈与顺馈控制策略,给定位移增加 200 mm 指令后,伺服电机转速和系统压力快速响应,电机转速峰值可达 752 r/min,

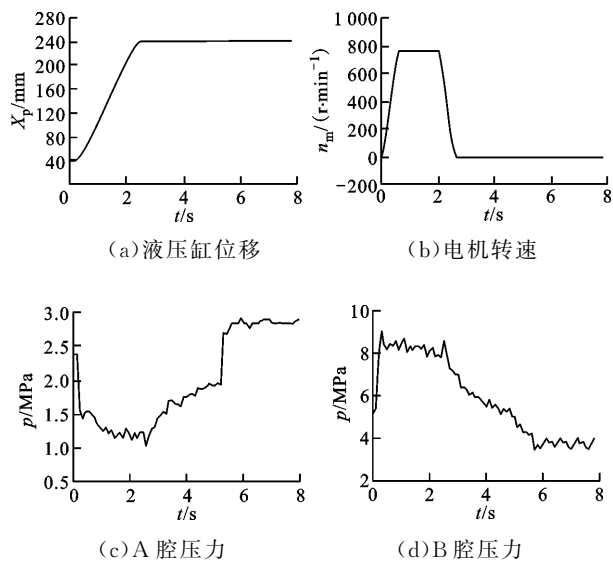


图 10 电液作动器位移增加响应曲线

系统压力峰值高达 9 MPa,液压缸位置在 2.2 s 内达到稳态位置,稳态精度为 ± 0.01 mm。

为进一步验证所提出控制算法的动态特性,给定电液作动器位置指令幅值 5 mm、频率 2 Hz,所得实验结果如图 11 所示。

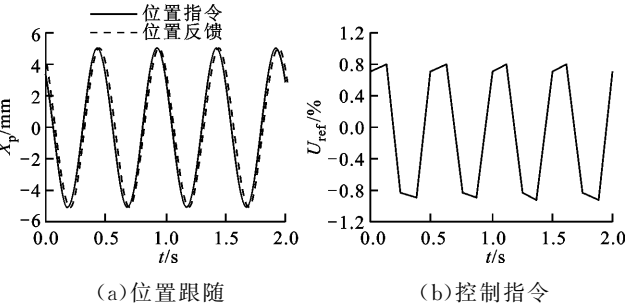


图 11 电液作动器位置动态跟踪曲线

由图 11 可知,电液作动器液压缸位移可快速跟随位置指令,幅值偏差控制在 ± 0.01 mm 范围内,相位偏差控制在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内,具有良好的动态跟踪特性。

5 结 论

针对电液作动器位置高精度问题,通过数学模型和实验分析,提出了一种三状态反馈与三状态顺馈控制策略,得到主要结论如下。

(1)建立了电液作动器位置伺服控制系统数学模型。

(2)提出了三状态反馈与顺馈控制策略,通过补偿电液作动器固有频率与阻尼比,并配置闭环极点对控制器参数进行设计,用于电液作动器位置输出高精度控制。

(3)实验分析表明,所提出的控制方法具有良好的控制效果,为电液作动器位置输出高精度控制奠定了一定的基础。

参考文献:

[1] 付永领,韩旭,杨荣荣,等. 电动静液作动器设计方法综述 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 1939-1952.
FU Yongling, HAN Xu, YANG Rongrong, et al. Review on design method of electro-hydrostatic actuator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 1939-1952.

[2] KANG Shuo, NAGAMUNE Ryoza, YAN Hao. Almost disturbance decoupling force control for the electro-hydraulic load simulator with mechanical backlash [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135(1): 1-29.

[3] 余卓平,韩伟,徐松云,等. 电子液压制动系统液压力控制发展现状综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 1-15.
YU Zhuoping, HAN Wei, XU Songyun, et al. Review on hydraulic pressure control of electro-hydraulic brake system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 1-15.

[4] ZHANG Chao, WANG Shaoping. A novel indicator for mechanical failure and life prediction based on debris monitoring [J]. IEEE Trans Reliability, 2017, 66(1): 161-169.

[5] 熊志林,陶建峰,张峰榕,等. 采用状态估计的泵控非对称液压缸模型预测控制 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 109-115.
XIONG Zhilin, TAO Jianfeng, ZHANG Fengrong, et al. A model predictive control strategy of pump-controlled asymmetric cylinders using state estimation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 109-115.

[6] WANG Shaoping. Fault severity recognition of aviation piston pump based on feature extraction of EEMD paving and optimized support vector regression model [J]. Aerospace Science & Technology, 2017, 67(1): 105-117.

[7] ZHANG Junhui, LI Ying, XU Bing, et al. Churning losses analysis on the thermal-hydraulic model of a high-speed electro-hydrostatic actuator pump [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(1): 1023-1030.

[8] SHI Cun, WANG Shaoping, WANG Xingjian, et al. Variable load failure mechanism for high-speed load

- sensing electro-hydrostatic actuator pump of aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 949-964.
- [9] LEE S R, HONG Y S. A dual EHA system for the improvement of position control performance via active load compensation [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(7): 937-944.
- [10] KOU Farong, DU Jiafeng, WANG Zhe, et al. Non-linear modeling and coordinate optimization of a semi-active energy regenerative suspension with an electro-hydraulic actuator [J]. Algorithms, 2018, 11(12): 1-17.
- [11] 寇发荣, 杜嘉峰, 王哲, 等. 电液半主动馈能悬架非线性建模与协调性优化 [J]. 中国机械工程, 2017, 28(14): 1701-1707.
- KOU Farong, DU Jiafeng, WANG Zhe, et al. Non-linear-modeling and coordinate optimization of semi-active energy regenerative suspensions with electro-hydraulic actuators [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(14): 1701-1707.
- [12] ZHONG Haoran, LI Peigen, GAO Liang, et al. Low-delay admittance control of hydraulic series elastic actuator for safe human-robot collaboration [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 147-153.
- [13] MINH T N, TRI D D, KYOUNG K A. Application of electro-hydraulic actuator system to control continuously variable transmission in wind energy converter [J]. Energies, 2019, 12(13): 1-19.
- [14] BUCHUN S, DONGYOUNG L, SANG Y P, et al. Design and performance of nonlinear control for an electro-hydraulic actuator considering a wearable robot [J]. Processes, 2019, 7(6): 1-16.
- [15] HARIS S Z, ABASIN U, ADIL Z. Robust model predictive position control of direct drive electro-hydraulic servo system [C]// IEEE International Conference on Intelligent Systems Engineering. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 100-104.
- [16] CHONG C S, ROZAIMI G, HAZRIQ I J, et al. Sliding mode controller design with optimized pid sliding surface using particle swarm algorithm [J]. Procedia Computer Science, 2017, 105(6): 235-239.
- [17] LI Zhihui, SHANG Yaoxing, JIAO Zongxia, et al. Analysis of the dynamic performance of an electro-hydrostatic actuator and improvement methods [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(12): 2312-2320.
- [18] LI Zhihui, SHANG Yaoxing, JIAO Zongxia, et al. Surplus torque elimination control of electro-hydraulic load simulator based on actuator velocity input feedforward compensating method [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2018, 38(1): 58-64.
- [19] YANG Rongrong, FU Yongling, ZHANG Ling, et al. A novel sliding mode control framework for electrohydrostatic position actuation system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(11): 1-22.
- [20] 杨荣荣, 付永领, 王岩, 等. 电液伺服泵的分阶无抖阵滑模控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1649-1658.
- YANG Rongrong, FU Yongling, WANG Yan, et al. Free-chattering fractional order sliding mode control of integrated electro-hydraulic servo pump [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1649-1658.
- [21] 姜继海, 葛泽华, 杨晨, 等. 基于微分器的直驱电液伺服系统离散滑模控制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(5): 1492-1499.
- JIANG Jihai, GE Zehua, YANG Chen, et al. Differentiator-based discrete variable structure controller for direct drive electro-hydraulic servo system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(5): 1492-1499.

(编辑 荆树蓉)