

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202505008

新型电静液作动器启动特性及稳压控制方法

韩小霞, 李 良*, 冯永保, 陈 珊, 马长林, 何祯鑫, 黄 镇

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘 要: 为缩短电静液作动器 (electro-hydrostatic actuator, EHA) 的空载启动时间, 提出一种在液压缸活塞侧增设“蓄能器+高速开关阀组”回路的新型 EHA。在启动阶段, 蓄能器充当辅助动力源, 将空载下的活塞杆伸出到给定位置后, 在液压泵的驱动下继续推动外负载运动; 同时, 为提高“蓄能器+高速开关阀组”液压回路快速启动过程中压力的稳定性, 提出一种通过调节高速开关阀组占空比大小来使蓄能器出口通流面积自适应出口压力变化的控制方法, 使蓄能器在外负载突然施加或变化时, 能够以最佳状态吸收系统的压力和流量脉动; 最后, 采用 AMESim 软件仿真验证了所提 EHA 新构型和稳压控制方法的可行性和有效性。结果表明: 在相同仿真参数设置下, 采用常规结构的 EHA 启动时间为 38.2 s, 而新型 EHA 的启动时间为 3.7 s, 启动时间缩短了约 90.31%; 在 1 000 N 的外载荷作用下, 采用稳压控制方法的新型 EHA 系统位移波动幅值降低约 29%。

关键词: 电静液作动器; 快速启动; 高速开关阀组; 稳压控制

中图分类号: TH137

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)05-0084-10



听语音
与作者互动
聊科研

Starting Characteristics and Pressure Stabilization Control of a Novel Electro-Hydrostatic Actuator

HAN Xiaoxia, LI Liang*, FENG Yongbao, CHEN Shan,

MA Changlin, HE Zhenxin, HUANG Zhen

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: A novel electro-hydrostatic actuator (EHA) incorporating an “accumulator+high-speed switch valve group” circuit on the piston side of the hydraulic cylinder was proposed to shorten the no-load starting time. During the starting phase, the accumulator served as an auxiliary power source. After extending to a given position, the unloaded piston rod continued to drive the external load under the action of the hydraulic pump. To enhance the stability of the pressure during the quick start of the hydraulic circuit of the “accumulator+high-speed switch valve group”, a control method was developed to adjust the duty cycle of the high-speed switch valve

收稿日期: 2024-12-24

修回日期: 2025-07-10

录用日期: 2025-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (52505076)

第一作者: 韩小霞 (1990—), 女, 讲师, 主要从事电液控制技术研究。E-mail: lyl-hanxiaoxia@163.com

***通信作者:** 李良 (1984—), 男, 讲师, 主要从事电液控制技术研究。E-mail: xzj-921@163.com

引用格式: 韩小霞, 李良, 冯永保, 等. 新型电静液作动器启动特性及稳压控制方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (5): 84-93. HAN Xiaoxia, LI Liang, FENG Yongbao, et al. Starting characteristics and pressure stabilization control of a novel electro-hydrostatic actuator[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (5): 84-93.

group, thereby adaptively adjusting the outlet flow area of the accumulator in response to the outlet pressure changes. This strategy allowed the accumulator to optimally absorb pressure and flow pulsation of the system when an external load was suddenly applied or changed. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed EHA structure and pressure stabilization control method were verified by simulation analysis using AMESim software. The simulation results show that under identical parameters, the starting time of a conventional EHA is 38.2 s, whereas the starting time of the proposed EHA is 3.7 s, representing a reduction of approximately 90.3%. Additionally, under an external load of 1 000 N, the displacement fluctuation amplitude of the new EHA system is reduced by approximately 29% after adopting the the pressure stabilization control method.

KEYWORDS: electro-hydrostatic actuator; quick start; high-speed switch valve group; pressure stabilization control

电静液作动器 (electro-hydrostatic actuator, EHA) 是集成电机、液压泵、阀和执行器 (液压缸或液压马达) 于一体的闭式液压系统, 比传统的集中供油式液压系统更加高效、可靠且方便, 减少了液压管路的布置, 从而使整个系统的质量大大减轻, 易于更换及维护, 有利于现代设备的小型化和智能化, 被广泛应用于飞机、火箭、舰艇和机器人等领域^[1-6]。目前, EHA 的应用已从航空航天领域逐渐向大型机械设备发展, 如基于 EHA 的液压调平系统^[7]。

目前, 国内外已有大量关于 EHA 的建模和控制方法的研究成果。例如, 夏立群等^[8]以飞机主舵面伺服控制系统为研究对象, 构建了 EHA 的位置、速度和电流三环闭环控制系统的数学模型, 并在 AMESim 仿真平台中对其进行了分析。在此基础上, 为提高 EHA 的建模精度和控制准确度, 葛曜文等^[9]建立了考虑伺服电机和液压泵的非线性精细化模型。EHA 系统作为独立闭式控制系统, 其控制特性一直是工程应用中关注的重点, 学者们围绕 EHA 的位置、速度和力控制等进行了大量的研究工作, 提出鲁棒控制^[10]、神经网络控制^[11]、预测控制^[12]、滑模控制^[13-14]、非线性自适应控制^[15]和自抗扰控制^[16-17]等。另外, 由于 EHA 的高度集成使得自身散热能力变差, 因而有部分学者研究了 EHA 的热特性和散热方法^[18-21]。然而, 其中大部分文献并没有考虑 EHA 在空载启动阶段下的快速响应能力, 当 EHA 被垂直安装时, 其应能承受垂直向下的负载并迅速着地。尽管基于 EHA 的液压调平系统比传统的集中供油液压系统的响应速度更快, 但由于电机转速不能突变, 故活塞杆伸出时间仍较长。另外, 电机启动后的转速从零逐渐增至最大, 系统流量也会随电机转

速增加, 在越过系统流量死区之前无流量输出^[22]。因此, 仅依靠控制策略很难满足特定应用中对 EHA 快速启动的要求。

针对泵控缸系统, 实现其快速启动的思路一般有以下 3 种: 一是采用变量泵实现初始状态下的快速启动^[23]; 二是从液压缸结构本身出发, 对其进行特殊设计^[24]; 三是采用蓄能器提供辅助动力^[25]。受以上 3 种方法的启发, 本文设计了一种在液压缸活塞侧管路上增加“蓄能器+高速开关阀组”回路的新型 EHA, 以实现其快速启动的目的, 并提出一种新的蓄能器出口压力自适应控制方法来提高系统运行的平稳性。

1 新型 EHA 结构组成及工作原理

1.1 结构组成

图 1 为增加“蓄能器+高速开关阀组”回路的新型 EHA 系统的液压原理示意图。该系统主要由控制器、电机驱动器、伺服电机、双向齿轮泵、油箱、单向阀、双向液压锁、安全阀、非对称液压缸、蓄能器、两位两通电液比例节流阀、高速开关阀组、压力传感器和位移传感器等构成。

1.2 工作原理

当控制器接收到上位机发送的液压缸活塞杆伸出指令信号时, 伺服驱动器得电, 高速开关阀 1 和 2 接收脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号后打开, 阀 3 和阀 4 不接收 PWM 控制信号, 处于关闭状态。同时, 比例电磁阀 1 不接收电信号, 处于关闭状态, 比例电磁阀 2 得电, 处于全开状态。伺服电机带动齿轮泵工作, 泵出口压力逐渐升高。蓄能器瞬间将高压油通过高速开关阀 1 和 2 释放到液压缸活塞侧, 使得液压缸活塞

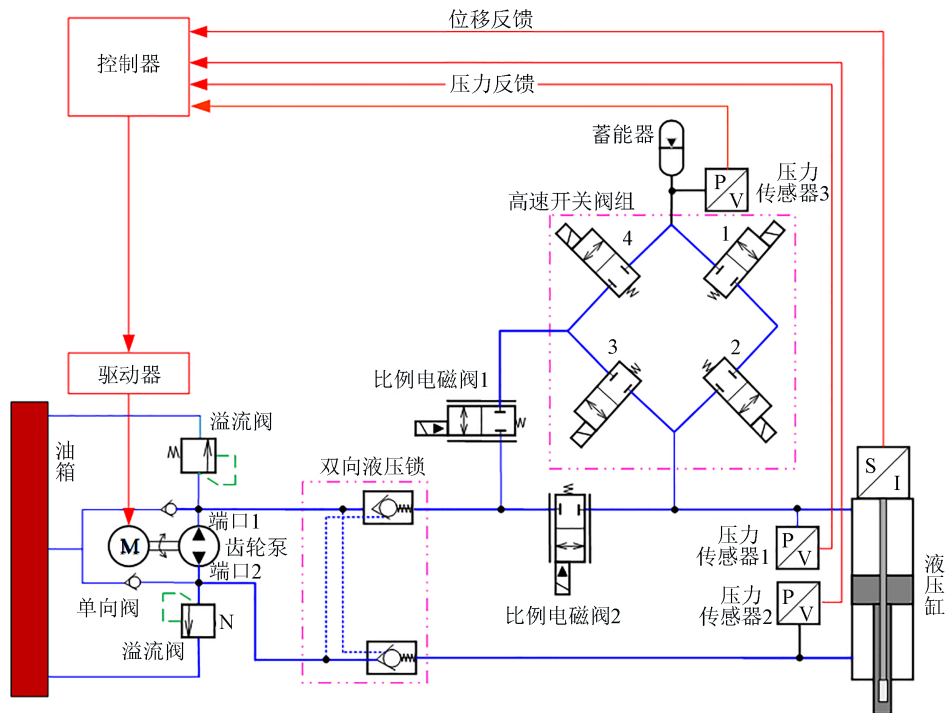


图1 新型EHA的液压系统原理

Fig. 1 Principle of the hydraulic system of the noval EHA

两侧产生压力差。活塞杆在高压油液的作用下迅速伸出至给定位置后，高速开关阀1和2断开，齿轮泵继续工作，泵出口处的液压油经过双向液压锁，流至液压缸无杆腔，持续推动液压缸缸体运动，直至完成特定工况后停止。活塞杆上的位移传感器将位置信息传递给控制器，双向液压锁将活塞杆锁定至工作位置。系统压力不超过溢流阀设定值时，2个溢流阀不开启，2个压力传感器将液压缸两侧腔内压力实时反馈至控制器。蓄能器的有效容积和出口压力决定了空载下活塞杆伸出的速度和时间。

蓄能器补液分为以下2种情况：1) 液压缸活塞杆缩回。当控制器接收到液压缸活塞杆缩回的指令时，伺服驱动器为伺服电机输出一个负电压信号，使伺服电机反转，齿轮泵高低压口交换，齿轮泵端口2处的高压油液经过双向液压锁流至液压缸有杆腔，推动活塞杆缩回。同时，高速开关阀3和4接收PWM控制信号，根据给定占空比打开相应开口，阀1和阀2不接收PWM控制信号，处于关闭状态，比例电磁阀2不接收电信号，处于关闭状态。从液压缸无杆腔流出的油液经过高速开关阀3和阀4补充至蓄能器，压力传感器3将蓄能器出口压力实时反馈至控制器，直至蓄能器进口压力达到设定值。然后，比例电磁阀2通电打

开，液压缸无杆腔油液流经比例电磁阀2和双向液压锁流至齿轮泵吸油口。2) 初始状态下蓄能器出口压力不足。当蓄能器出口压力低于期望值时，控制器给出一个正电压信号至伺服驱动器，同时，比例电磁阀1接收到正电压信号后打开，高速开关阀组阀4接收PWM控制信号后打开，比例电磁阀2断电。伺服电机正转，带动齿轮泵端口1输出压力油，经过比例电磁阀1和高速开关阀4补充至蓄能器。新型EHA的位置控制方案如图2所示。

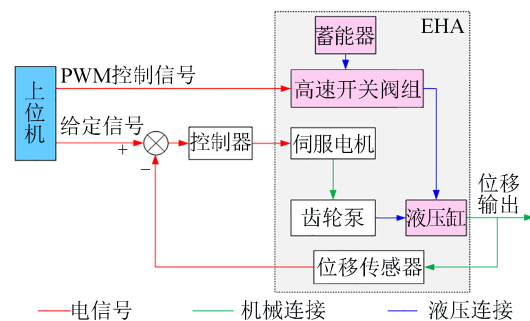


图2 新型EHA的位置控制方案

Fig. 2 Location control scheme of the new EHA

从图2可以看出，蓄能器和齿轮泵是2个独立的控制回路。在蓄能器-液压缸回路中，上位机发送PWM控制信号至高速开关阀组，进而控制油液从蓄能器流至液压缸无杆腔的流量，其主要用于EHA的空载启动阶段。齿轮泵-液压缸回路为

位置闭环控制, 上位机将给定位置信号发送至控制器, 控制器将控制信号输出至伺服驱动器, 进而控制伺服电机转动, 齿轮泵在伺服电机的带动下输出液压油, 油液经过比例电磁阀 2 流至液压缸无杆腔, 活塞杆的位移通过位移传感器实时反馈至输入端。

EHA 在空载启动阶段, 蓄能器为主要的动力源, 负责将活塞杆迅速推至给定位置。在工作阶段, 蓄能器不仅充当辅助动力源, 还可以在外界载荷发生变化时, 吸收系统中的压力和流量脉动。因此, 在实际应用中, 蓄能器的选择对于保证系统稳定启动至关重要。当蓄能器的容积较大时, 体积会相应增加, 若蓄能器出口压力较大时则会加剧 EHA 在工作阶段受扰动时的压力脉动, 所以蓄能器的体积和出口压力都不应过大, 否则不利于系统集成和平稳运行。本文采用气囊式蓄能器, 由气囊、充气阀、耐压外壳、蘑菇形阀、节流孔、放气塞和油路接头等组成, 具有惯性小、响应速度快、油气分离、安装方便等优点^[26]。

假设活塞杆行程为 x_i , 外负载力为 F_L , 活塞直径为 D , 活塞杆直径为 d 。将活塞杆完全伸出所需的油液容积为

$$V = \pi x_i D^2 / 4 \quad (1)$$

实际应用中, 油液在蓄能器出口处以及压缩过程中均会存在损失。因此, 蓄能器的有效油液容积可表示为

$$V_a = \alpha V \quad (2)$$

式中: α 为安全系数, $\alpha \geq 1$ 。由于蓄能器的体积不宜过大, 本文取 $\alpha = 1.01$ 。

气囊式蓄能器内的气体一般为惰性气体, 其性质接近理想气体, 因此其变化规律可表示为

$$p_0 V_0^n = p_{a1} V_{a1}^n = p_{a2} V_{a2}^n \quad (3)$$

式中: p_0 为初始压力; V_0 为初始气体体积; p_{a1} 和 p_{a2} 分别为蓄能器最小和最大工作压力; V_{a1} 和 V_{a2} 分别为蓄能器在最小和最大工作压力下的气体体积; n 为多变指数, 等温过程中 $n = 1$, 绝热过程中 $n = 1.4$ 。油液的有效储存容积 $V_a = V_{a1} - V_{a2}$ 。因此, 蓄能器的初始气体体积 V_0 可表示为

$$V_0 = V_a / [(p_0/p_{a1})^{1/n} - (p_0/p_{a2})^{1/n}] \quad (4)$$

蓄能器是辅助动力源, 启动后瞬间释放高压油液。因此, 该过程被假定为等温过程, 多变指数 n 取 1。蓄能器的最大工作压力直接决定了活塞杆伸出的速度。在合理的范围内, 较大的 p_{a2} 值会有效缩短活塞杆伸出的时间。

本文提出的新型 EHA 通过对高速开关阀的高频精准控制与蓄能器瞬时能量释放特性, 针对性地解决了传统 EHA 空载启动滞后的问题, 大大提升了 EHA 的能量利用率。高速开关阀利用“通/断”二元控制逻辑, 相较于传统伺服阀/比例阀抗污染能力高, 且无复杂的比例控制环节, 降低了电子元件故障风险, 显著增强了新型 EHA 的运行稳定性。值得注意的是, 由于高速开关阀价格高昂, 使得新型 EHA 成本较高, 且质量和体积较大。此外, 高速开关阀通过高频开/关来实现流量控制, 在这个过程中会产生热量, 导致其能耗显著增加。

2 蓄能器出口压力稳定控制方法

文献[27]提出一种可变增益控制器来调整蓄能器出口比例阀开口度大小, 从而保证其吸收脉动的最佳频率能够随泵出口压力脉动进行自适应调整。基于此, 本文设计了一种通过调节高速开关阀控制信号占空比大小使蓄能器出口通流面积自适应调整的控制方法。其中, 参数自适应控制器能够根据液压缸无杆腔的压力脉动情况自动调整输出, 进而促使高速开关阀接收到的 PWM 控制信号随之发生变化, 最终实现蓄能器出口压力自适应调整, 控制方法如图 3 所示。

图 3 中, u_v 为施加到高速开关阀的控制信号; K_u 为比例常数; $f(u_v)$ 为比例阀阀芯的位移; K_a 为自适应系数; $\text{Sig}(t)$ 为关于时间的分段函数, 数学表达式为

$$\text{Sig}(t) = \begin{cases} 1, & t < t_0; \\ \frac{1}{\lambda_1 u_v}, & t_0 \leq t < (t_1 - 0.1); \\ \frac{1}{\lambda_2 u_v}, & (t_1 - 0.1) \leq t \leq t_2; \\ 0, & t > t_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_0 为活塞杆位移达到规定位置的时间; t_1 为施加外力的时刻; t_2 为活塞杆在受到外负载力扰动后恢复到扰动前状态的时刻; λ_1 和 λ_2 为不同工作阶段的自适应系数。

蓄能器-液压缸回路的固有频率推导过程详见文献[27], 该回路吸收压力脉动的最佳频率 f_a 可以表示为

$$f_a = \sqrt{\frac{KS_a p_{s0}}{\rho l V_a}} \quad (6)$$

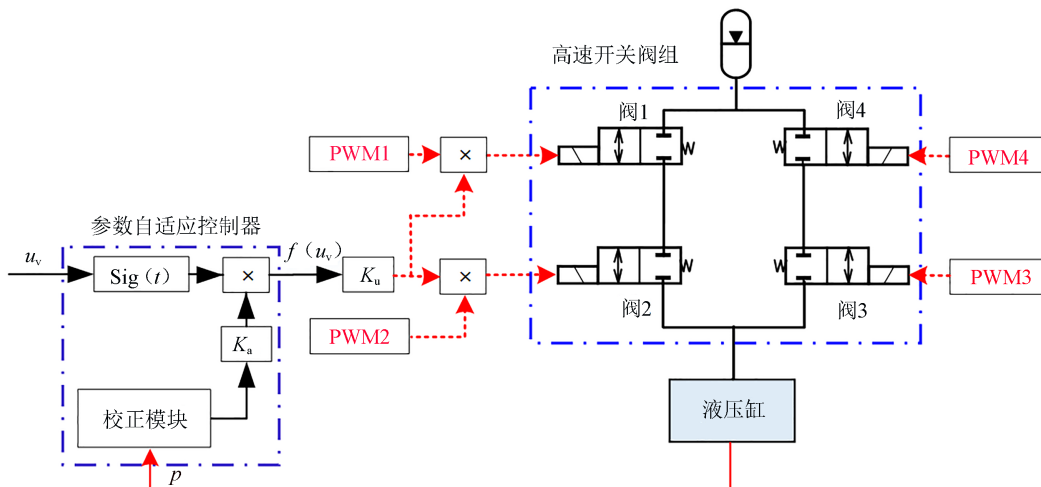


图 3 蓄能器出口压力自适应控制方法

Fig. 3 Adaptive control method for the outlet pressure of the accumulator

式中: p_{s0} 为蓄能器-液压缸回路的稳态压力值; K 为蓄能器的绝热系数; S_a 为蓄能器入口流通面积; l 为蓄能器入口管的长度; ρ 为油液密度。

当蓄能器-液压缸回路的压力发生波动时, 假设脉动压力为 p , 则蓄能器吸收脉动的频率 f_{a1} 为

$$f_{a1} = \sqrt{\frac{KS_{a1}p}{\rho l V_a}} \quad (7)$$

式中: S_{a1} 为脉动压力为 p 时的蓄能器入口流通面积。为使蓄能器工作在最佳吸收频率, 联立方程 (6) 和 (7), 有

$$K_a = p_{s0}/p, \quad t_0 \leq t \leq t_2 \quad (8)$$

因此, 稳压控制算法的输出为

$$f(u_v) = \begin{cases} u_v, & t < t_0; \\ K_a/\lambda_1, & t_0 \leq t < (t_1 - 0.1); \\ K_a/\lambda_2, & (t_1 - 0.1) \leq t \leq t_2; \\ 0, & t > t_2. \end{cases} \quad (9)$$

一般来说, 建议 $\lambda_1 = 20$ 和 $2 \leq \lambda_2 \leq 20$ 。

3 仿真分析

AMESim 软件以多领域统一建模为基础, 便于实现电液控制系统的仿真分析^[28]。因此, 本文选择在 AMESim 软件中搭建新型 EHA 液压系统的仿真模型, 其主要参数如表 1 所示。其中, 液压缸和液压泵的结构参数是在外负载力为 150 kN、定位精度要求为 0.25 mm 时计算得到的。高速开关阀组的仿真模型如图 4 所示, 其中“SC_1”为稳压控制器模型。

3.1 新型 EHA 启动特性分析

在表 1 所示的模型参数下, 设置液压缸活塞杆

的期望位移为 0.3 m, 在 70 s 时施加一个大小为 10 kN 的外力干扰, 高速开关阀 1 和 2 的 PWM 控制信号占空比均设置为 0.7, 设置稳压控制算法自适应参数 $\lambda_1 = 10$, $\lambda_2 = 20$ 。首先仿真分析了常规 EHA 和新型 EHA 在空载下的启动时间, 结果如图 5 所示, 常规 EHA 的组成可参见文献[13]。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

符号	名称	取值	单位
s	活塞杆总行程	300	mm
D	活塞直径	125	mm
d	活塞杆直径	80	mm
n_m	电机转速	3 000	r·min ⁻¹
V_0	蓄能器初始体积	5.4	L
p_0	蓄能器初始压力	0.8	bar
p_{a1}	蓄能器最小工作压力	0.2	bar
p_{a2}	蓄能器最大工作压力	6	bar
n	多变指数	1	/
β_e	体积弹性模量	1.7×10^3	MPa
C_{ip}	液压缸内泄漏系数	6.52×10^{-12}	m ³ /(s·Pa)
m	活塞质量	30	kg
b	有效粘性阻尼系数	150	Nm·s ⁻¹
P_{pipe}	管路压力	0	bar
D_p	泵排量	1.2	mL·r ⁻¹

从图 5 可以看出, 在相同参数下, 常规 EHA 的活塞杆到达给定位置的时间为 38.2 s, 而新型 EHA 的空载启动时间仅为 3.7 s, 表明采用“蓄能器+高速开关阀组”回路实现 EHA 在空载下的快速启动是可行的。

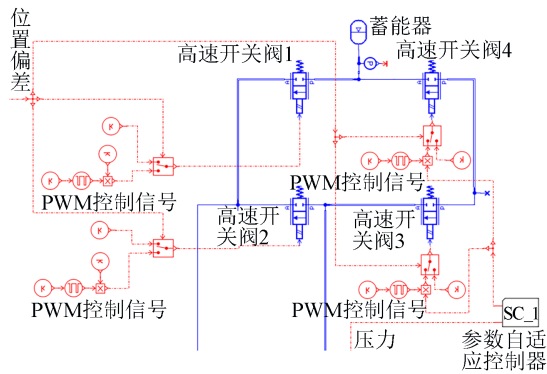


图 4 高速开关阀组的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the high-speed switch valve group

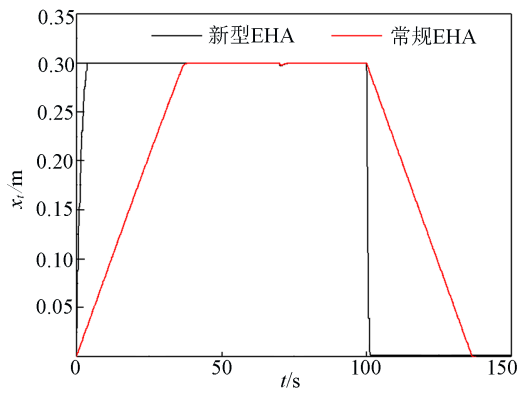


图 5 常规EHA和新型EHA的位置响应对比

Fig. 5 Comparison of position response between the conventional and new EHAs

继续保持高速开关阀1的PWM控制信号占空比为0.7, 图6和图7分别为高速开关阀2在不同PWM控制信号占空比下新型EHA的活塞杆位移变化和保位能力曲线。由图6可知, 随着信号占空比的增加, 新型EHA的活塞杆到给定位置的时间变短, 即空载启动时间变短; 由图7可知, 高速开关阀的PWM控制信号占空比从0.4增加至0.9时, 新型EHA在系统内外扰动下的保位能力变差。

3.2 稳压控制方法有效性仿真分析

为验证本文所提稳压控制算法的有效性, 在70 s时施加一个大小为1 000 N的外负载力, 对比分析了有无稳压控制方法时新型EHA的位置响应性能, 结果如图8所示。可以看出, 无稳压控制方法时, 新型EHA系统在突加外负载时位移波动幅值约为31.3%, 而采用本文所提稳压控制方法后, 新型EHA在70 s时的位移波动幅值约为2%, 表明采用本文所提稳压控制方法后新型EHA的抗负载冲击能力大大提升。

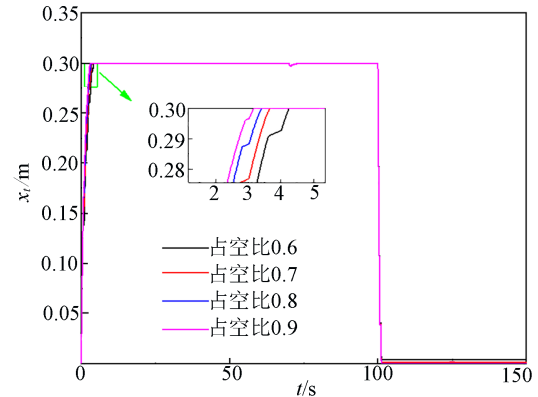


图 6 高速开关阀2不同控制信号占空比下新型EHA的活塞杆位移曲线

Fig. 6 Displacement curves of the piston rod of the new EHA under different PWM signal duty cycles of high-speed switch valve 2

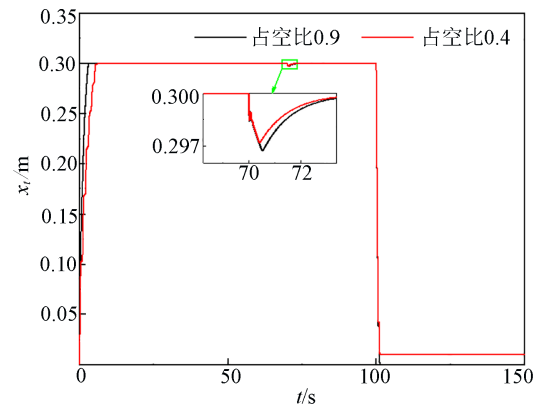
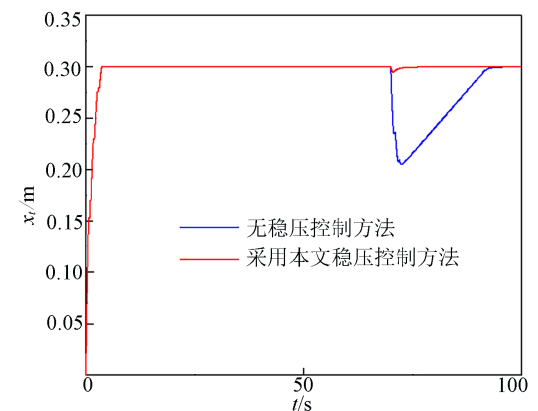


图 7 高速开关阀2不同控制信号占空比下新型EHA的活塞杆保位能力

Fig. 7 Retention capability of the piston rod of the new EHA under different PWM signal duty cycles of high-speed switch valve 2

图 8 有无稳压控制算法时新型EHA的活塞杆位移曲线
Fig. 8 Displacement curves of the piston rod of the new EHA with or without the pressure stabilization control algorithm

继续保持高速开关阀 1 和 2 的 PWM 控制信号占空比为 0.7, 仿真得到不同外负载力扰动下新型 EHA 的液压缸活塞杆位移 x_i 、蓄能器出口压力 p_1 、高速开关阀 1 的流量 Q 以及 PWM 控制信号电流幅值 φ , 结果如图 9 所示。从图 9 (a) 中可以看到, 外负载力为 1 000 N 时, 液压缸活塞杆位移曲线波动幅值最大约为 0.005 9 m; 外负载为 15 000 N 时, 液压缸活塞杆位移曲线波动幅值约为 0.003 m。结果表明: 随着在某一时刻施加的外负载力的增大, 液压缸活塞杆位移曲线波动逐渐减小, 这是由于负载增大使得闭环系统的阻尼比增大、固有频率降低, 进而使得系统位置闭环曲线的振荡幅度和振荡频率均减小, 系统稳定性提高。由图 9 (b) 可知, 当高速开关阀 1 和 2 的 PWM 控制信号占空比相同时, 空载下蓄能器的出口压力变化趋势相同, 在 70 s 时突加负载后蓄能器出口压力会随着负载的增大而减小。从图 9 (c) 可以看出, 高速开关阀 1 的流量随着外负载力的增大而减小, 在液压缸活塞杆换向时, 高速开关阀 1 的流量会发生小幅度波动。图 9 (d) 为不同外负载力下高速开关阀 1 的 PWM 控制信号电流变化曲线, 表

明本文所提稳压控制方法能够根据系统压力变化及时调整高速开关阀的控制信号大小, 可以有效提高突加外负载力时系统的稳定性。

3.3 高速开关阀组 PWM 控制信号占空比对系统性能的影响

为了研究高速开关阀开口大小对系统性能的影响, 设置高速开关阀 1 的 PWM 控制信号占空比为 0.7, 并分别设置高速开关阀 2 的 PWM 控制信号占空比为 0.2、0.4、0.6 和 0.8, 仿真结果如图 10 所示。其中, 图 10 (b) 的纵坐标 v 表示液压缸活塞杆速度, 图 10 (c) 的纵坐标 p_2 表示液压缸无杆腔压力。从图 10 (a) 和 (b) 可以看出, 当高速开关阀 2 的 PWM 控制信号占空比为 0.2 时, 活塞杆的初始启动速度较慢, 到达指定位置的时间相较于占空比为 0.8 时延长了 5.7 s, 但在第 70 s 突加外负载时, 占空比越小则新型 EHA 的保位能力越好。由图 10 (c) 和 (d) 可知, 随着高速开关阀 2 的 PWM 控制信号占空比增大, 液压缸无杆腔压力和蓄能器出口压力波动幅值随之减小, 表明可以通过合理调节高速开关阀组中每个阀的 PWM 控制信号来提高系统运行的稳定性。在对保位性

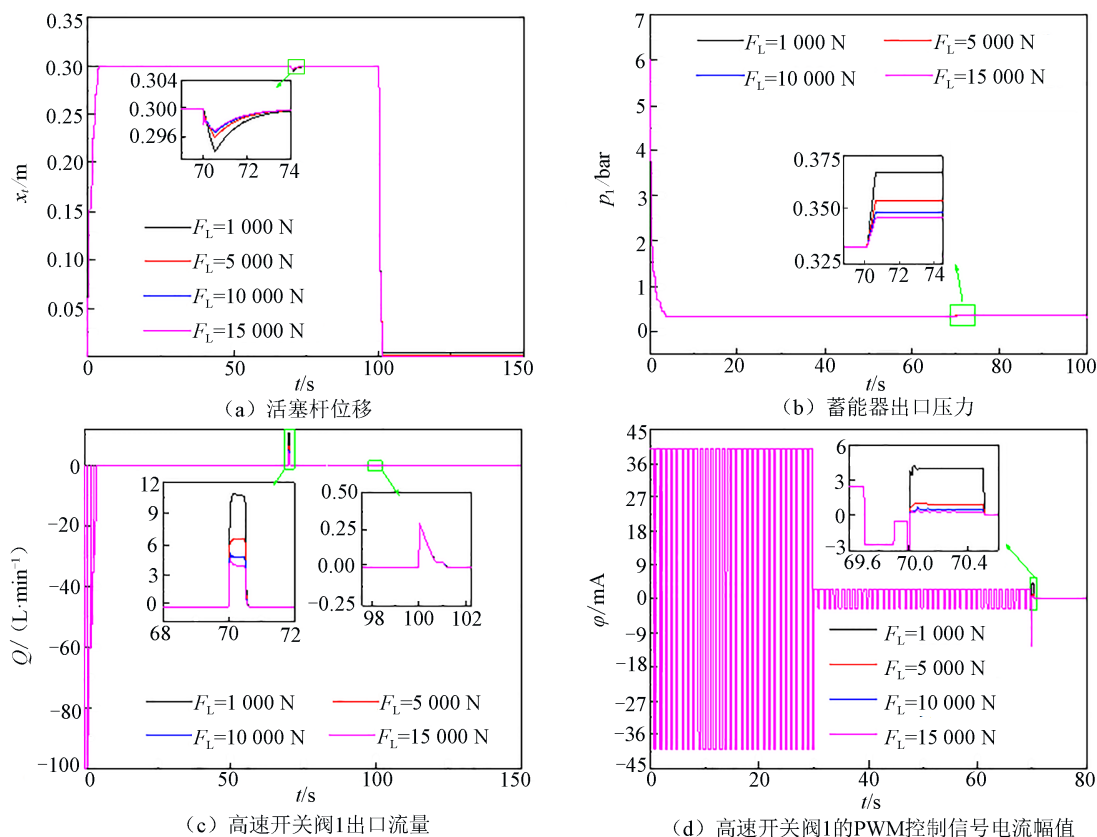


图 9 不同外负载力下新型 EHA 的性能变化曲线

Fig. 9 Performance change curves of the new EHA under different external load forces

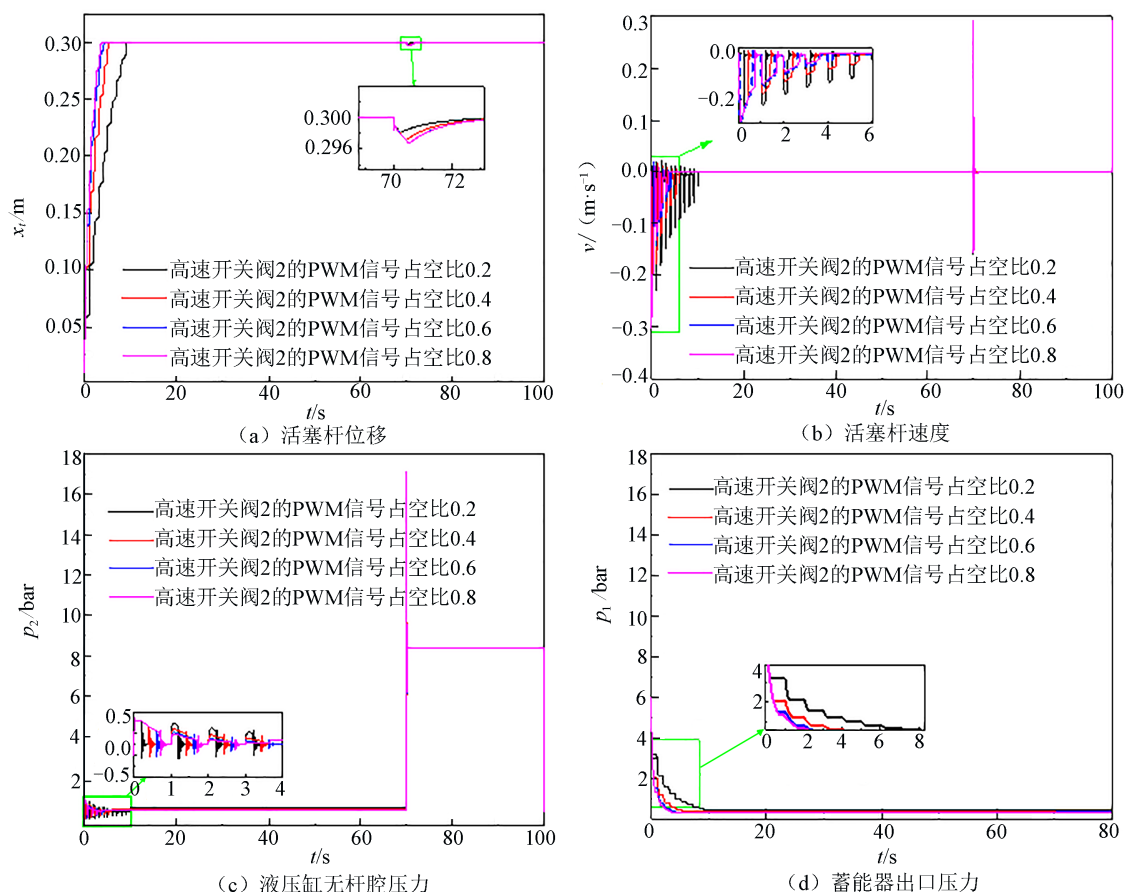


图 10 高速开关阀 2 不同控制信号占空比下新型 EHA 性能变化曲线

Fig. 10 Performance change curves of the new EHA under different PWM signal duty cycles of high-speed switch valve 2

能要求较高的使用场合, 可适当将每个高速开关阀的 PWM 控制信号幅值适当设置为较大值。

综上所述, 本文所提新型 EHA 系统在空载下可以实现快速启动, 所提稳压控制方法可以有效提高系统的平稳运行能力。

4 结论

为实现 EHA 在空载下的快速启动, 本文设计了一种基于“蓄能器+高速开关阀组”回路的新 EHA。同时, 为提高外负载扰动时系统的运行平稳性, 提出一种蓄能器出口压力稳定控制方法, 得到以下结论。

1) 本文所提新型 EHA 系统在空载下可以实现快速启动。在相同仿真参数下, 常规 EHA 系统的启动时间为 38.2 s, 而新型 EHA 的启动时间为 3.7 s, 启动时间缩短了约 90.31%。

2) 本文所提稳压控制方法可以有效提高新型 EHA 系统的运行平稳性。在 1 000 N 的外载荷作用下, 采用稳压控制方法的新 EHA 系统位移波

动幅值降低约 29%。

3) 在工程应用中, 可以根据具体应用工况确定“蓄能器+高速开关阀组”回路中高速开关阀的使用个数和每个高速开关阀的 PWM 控制信号占空比。

本文从工作原理和仿真分析层面对所提的新型 EHA 和稳压控制方法的有效性进行了分析与仿真验证, 但由于不具备实验条件, 对研究结论的适用范围无法清晰界定。在未来的工作中, 可进行硬件验证工作, 从实验层面验证所提新型 EHA 及稳压控制方法的可行性, 进一步优化新型 EHA 的方案设计。

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 Y L, HAN X, YANG R R, 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] 张军辉, 倪小昊, 纵怀志, 等. 机器人用电静液作动器研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2025, 61(4): 273-289.
ZHANG J H, NI X H, ZONG H Z, et al. Research status and development trend of electro-hydrostatic actuators for robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(4): 273-289.
- [3] 夏泽斌. 飞机 EMA/EHA 作动器的多学科协同设计优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 41-53.
XIA Z B. Multidisciplinary collaborative design optimization of aircraft EMA/EHA actuator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 41-53.
- [4] 李宇阳. 面向变体飞行器应用的双压电叠堆驱动电静液作动器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 1-15.
LI Y Y. Research on electro-hydrostatic actuator driven by dual piezoelectric stacks for morphing aircraft applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 1-15.
- [5] 符晓刚, 邱伟, 杨开. 新能源汽车电静液制动系统抗饱和反演控制[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(1): 71-75, 80.
FU X G, QIU W, YANG K. Adaptive backstepping control for anti-windup design of electro-hydrostatic braking actuator with input saturation[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(1): 71-75, 80.
- [6] 唐兵, 司国雷, 刘宇辉, 等. 基于高速开关阀的电静液作动器非线性仿真研究[J]. 液压与气动, 2020(7): 184-189.
TANG B, SI G L, LIU Y H, et al. Nonlinear simulation of electro-hydrostatic actuator based on high speed on/off valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(7): 184-189.
- [7] 成克云. 直驱式电静液作动器(EHA)车载调平系统控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020: 1-40.
CHENG K Y. Research on control strategy of direct drive electrostatic hydrostatic actuator (EHA) vehicle leveling system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020: 1-40.
- [8] 夏立群, 朱明君, 胡逸雪, 等. EHA 作动器建模与仿真分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(10): 136-142.
XIA L Q, ZHU M J, HU Y X, et al. Modeling and simulation of electro-hydrostatic actuator[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(10): 136-142.
- [9] 葛曜文, 朱威霖, 刘家辉, 等. 电静液作动器精细化建模和特性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 66-73.
GE Y W, ZHU W L, LIU J H, et al. Refined modeling and characteristic analysis of electro-hydrostatic actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(24): 66-73.
- [10] LIN Y, SHI Y, BURTON R. Modeling and robust discrete-time sliding-mode control design for a fluid power electro hydraulic actuator (EHA) system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 1-10.
- [11] 葛曜文, 杨晓伟, 邓文翔, 等. 基于流量脉动补偿的电静液作动器神经网络控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61(4): 355-364.
GE Y W, YANG X W, DENG W X, et al. Neural network control of electro hydrostatic actuator based on flow pulsation compensation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(4): 355-364.
- [12] 孙继苏. 电静液作动器位置跟踪模型预测控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024: 1-23.
SUN J S. Research on position tracking of electro-hydrostatic actuator using model[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024: 1-23.
- [13] WANG M K, WANG Y, YANG R R, et al. A sliding mode control strategy for an electro hydrostatic actuator with damping variable sliding surface[J]. Actuators, 2021, 10(1): 3.
- [14] NIE Y, LAO Z H, LIU J J, et al. Disturbance observer-based sliding mode controller for underwater electro-hydrostatic actuator affected by seawater pressure[J]. Machines, 2022, 10(12): 1115.
- [15] KIM W, WON D. Nonlinear position control with nonlinear coordinate transformation using only position measurement for single-rod electro-hydrostatic actuator[J]. Mathematics, 2020, 8(8): 1273.
- [16] 韩小霞, 谢建, 冯永保, 等. 基于模型信息的电静液作动器降阶线性自抗扰控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 681-689.
HAN X X, XIE J, FENG Y B, et al. Reduced order linear active disturbance rejection control based on model information of electro-hydrostatic actuator[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 681-689.
- [17] HAN X X, CHEN Z X, FENG Y B, et al. Cascade active disturbance rejection control of single-rod electro hydrostatic actuator[J]. Asian Journal of Control, 2023, 25(3): 1888-1904.
- [18] 项浩圆. 基于数字孪生的电静液作动器热特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 1-10.

- XIANG H Y. Research on thermal characteristics of electro hydrostatic actuator based on digital twin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023: 1-10.
- [19] 顾单婷. 基于多物理场建模的电静液作动器热特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 1-4.
- GU S T. Thermal characteristics analysis of electro-hydrostatic actuator based on multi-physical field modeling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2021: 1-4.
- [20] 白亮亮, 韩涛, 申月. 电静液作动器(EHA)热设计方法研究[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(10): 61-66.
- BAI L L, HAN T, SHEN Y. Research of thermal design method of electro hydrostatic actuator (EHA)[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(10): 61-66.
- [21] 高春伦, 段富海, 关文卿, 等. 基于集总参数的电静液作动器液压系统热分析[J]. 液压气动与密封, 2020, 40 (6): 47-50, 54.
- GAO C L, DUAN F H, GUAN W Q, et al. Thermal analysis of electro-hydrostatic actuator hydraulic system based on lumped parameters[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(6): 47-50, 54.
- [22] 韩小霞, 冯永保, 谢建, 等. 考虑油液黏温特性的电静液作动器流量死区动态逆补偿方法[J]. 兵工学报, 2022, 43 (2): 316-327.
- HAN X X, FENG Y B, XIE J, et al. Dynamic inverse compensation method of flow rate dead-zone of electro-hydrostatic actuator considering viscosity-temperature characteristics of oil[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43 (2): 316-327.
- [23] 戴炼. 一种应用于海洋起重机的新型负载敏感控制系统[J]. 机械工程师, 2015(12): 195-197.
- DAI L. A new load sensitive control system for marine crane[J]. Mechanical Engineer, 2015(12): 195-197.
- [24] 宝山钢铁股份有限公司, 高速油缸的快速启动与制动装置: 200620039594.8[P]. 2007-03-07.
- [25] 孙阳阳, 王纪文, 刘康. 储能蓄能器状态对重载液压加载系统能量回收率的影响[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59 (4): 51-53.
- SUN Y Y, WANG J W, LIU K. Influence of state of energy storage accumulator on energy recovery of heavy-duty hydraulic loading system[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2024, 59 (4): 51-53.
- [26] 李鄂民. 液压传动技术[M]. 兰州: 甘肃工业出版社, 1999: 100-105.
- [27] 张振. 自适应蓄能器在泵阀联合EHA压力脉动抑制中的应用[J]. 机床与液压, 2017, 45(4): 106-109.
- ZHANG Z. Application of self-adaption accumulator in pump and valve combined EHA pressure pulsation restrain[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(4): 106-109.
- [28] 罗伟蓬, 袁晓静, 张泽, 等. 基于AMESim的工程机械臂架液压系统稳定性分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(6): 52-57.
- LUO W P, YUAN X J, ZHANG Z, et al. Stability analysis of hydraulic system of construction machinery boom based on AMESim[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38 (6): 52-57.

(编辑: 刘建民)