

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.01.011

电动静液作动器双惯性建模 与高精度位置响应研究*

张晓娜¹, 胡孟谦^{2*}, 田姗姗¹

(1. 河北工业职业技术大学 智能制造学院, 河北 石家庄 050091;
2. 河北工业职业技术大学 工业基础教学部, 河北 石家庄 050091)

摘要: 非线性的摩擦会使电动静液作动器产生严重的谐振问题, 为此, 在对电动静液作动器进行双惯性系统建模的基础上, 提出了一种电动静液作动器的谐振比控制方法。首先, 分析了电动静液作动器的工作原理, 并通过采用由一个低刚度轴连接的两个高刚度惯性体, 对电动静液作动器进行了双惯性系统建模; 然后, 通过采用反馈调制器对作动器静摩擦进行了补偿, 并在参数辨识的基础上设计了一种包含反馈控制器和干扰观测器的谐振比控制方法, 有效抑制了作动器的振动; 最后, 在单连杆机械臂实验装置上进行了频率响应和位置响应测试。研究结果表明: 电动静液作动器频率响应曲线中观测到的双谐振现象验证了双惯性系统建模的可行性; 相比于其他两种常规的比例积分控制方法, 该谐振比控制方法的最大超调量仅为 0.035 rad, 平均响应误差仅为 0.005 rad, 具有更高精度的位置响应控制性能, 在液压传动研究领域中具有较好的参考价值和应用前景。

关键词: 电动静液作动器; 谐振抑制; 双惯性建模; 反馈调制器; 摩擦补偿

中图分类号: TH137 文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)01-0071-06

Double inertia modeling and high precision position response of electro-hydrostatic actuator

ZHANG Xiao-na¹, HU Meng-qian², TIAN Shan-shan¹

(1. Intelligent Manufacturing Institute, Hebei Vocational University of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China; 2. Industrial Foundation Teaching Department, Hebei Vocational University of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: Aiming at the serious resonance problem of the electro-hydrostatic actuator caused by nonlinear friction, the electro-hydrostatic actuator was modeled as a dual inertial system and a resonance ratio control method was designed. Firstly, the working principle of the electro-hydrostatic actuator was studied, and the electro-hydrostatic actuator was modeled as a dual inertial system by using two high-stiffness inertial bodies connected by a low-stiffness shaft. Then, a feedback modulator was used to compensate the static friction of the actuator, and a resonance ratio control method including a feedback controller and an interference observer was designed based on parameter identification, which effectively suppressed the vibration of the actuator. Finally, the frequency response and position response were tested on a single-link manipulator experimental device. The results show that the double resonance phenomenon observed in the frequency response curve of electro-hydrostatic actuator verifies the feasibility of the proposed dual inertial system modeling. In addition, compared with the other two conventional proportional-integral control methods, the maximum overshoot of the proposed resonant ratio control method is only 0.035 rad, and the average response error is only 0.005 rad, thus obtaining high-precision position response control performance, which having good reference value and application prospect in the research field of hydraulic transmission.

Key words: electric hydrostatic actuator (EHA); resonance suppression; dual inertial modeling; feedback modulator; friction compensation

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 河北省高等学校科学研究计划项目(Z2018225, ZD2020331)

作者简介: 张晓娜(1979-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 副教授, 主要从事机械制造、测试技术方面的研究。E-mail: ky9306@163.com

通信联系人: 胡孟谦, 男, 硕士, 副教授。E-mail: ky5330@163.com

0 引 言

近年来,机电一体化领域对高功率重量比作动器的需求不断增加,这一趋势不仅延伸到建筑和重型设备领域,而且还延伸到人类援助和医护领域^[1,4]。

相比于其他类型的作动器,液压作动器具有较高的功率重量比。然而,使用液压作动器的系统也有几个缺点,例如动力效率很低、系统体积大、伺服阀价格昂贵等。目前,研究人员已开始采用电动静液作动器(EHA)来尝试解决上述问题^[5,6]。

由于伺服电机和泵的转动惯量的原因,EHA 的控制性能较差。NOH D K 等人^[7]对 EHA 的动力学和参数识别方法进行了研究,并提出了 EHA 的建模方法;但是,该 EHA 模型没有考虑系统中存在的非线性问题,如液压马达内部的摩擦和漏油等。

与电动或者气动作动器相比,EHA 存在较大的摩擦,因此,YUE F 等人^[8]采用抖动信号和脉宽调制控制方法,来对 EHA 进行摩擦补偿;然而这些方法并不适用于 EHA,因为它们依赖于伺服阀的响应性能。

此外,为了进一步抑制 EHA 的谐振影响,OBOE R 等人^[9]提出了一种使用负载侧传感器来抑制谐振的方法,其常规控制器的状态方程用驱动侧位置、速度和负载侧位置、速度来进行描述;但是其位置跟踪的精度不够理想。近期,JUNG H 等人^[10]将具有内、外部控制回路的伺服系统,统一建立为一个受振动影响的双惯性系统模型;并提出了一种迭代反馈控制方法,有效抑制了其伺服系统的谐振影响。

在上述研究的基础上,笔者提出对 EHA 进行双惯性系统建模,并设计一种谐振比控制方法;将双惯性系统引入到 EHA 系统建模中;在利用反馈调制器(feedback modulator, FM)进行摩擦补偿的基础上,设计一种谐振比控制方法来抑制 EHA 谐振,该方法采用反馈控制器和干扰观测器(disturbance observer, DOB)^[11]来有效提高 EHA 的位置跟踪精度。

1 EHA 双惯性系统建模

EHA 的工作示意图如图 1 所示。

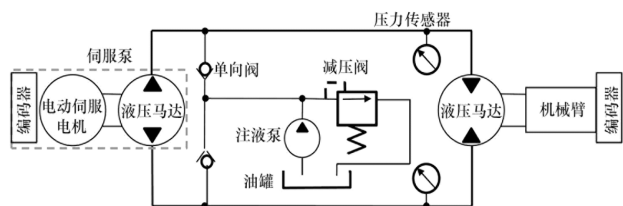


图 1 EHA 的工作示意图

在图 1 中,一般情况下,EHA 采用伺服泵作为驱动,伺服泵包含彼此相连的伺服电机和液压马达,并通过阀门将油排放到负载侧,负载侧采用液压马达。

因此,如果阀内的压力油由于其可压缩性而具有弹簧的特性,则 EHA 可被认为是 2 个刚性物体通过低刚性轴而相互连接的系统。根据 JUNG H 等人的研究成果,如果低刚性轴的扭转发生谐振,那么该伺服系统就可以被描述为 2 个惯性系统。

由此可见,EHA 可以建模为双惯性系统,即两个高刚度惯性体通过一个低刚度轴相互连接。

此处假设液压油的泄漏和粘性摩擦力可以忽略;且图 1 中所示的伺服泵被称为电机侧,机械臂被称为负载侧。

EHA 的模型如图 2 所示。

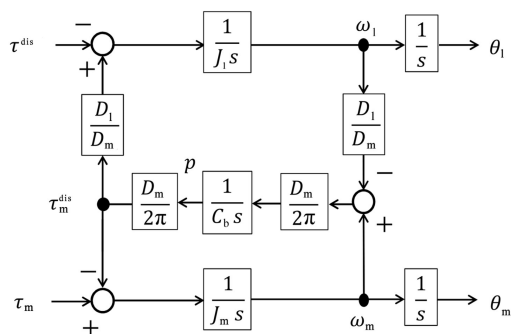


图 2 EHA 模型

带有下标 l 的变量表示负载侧的变量;下标为 m 的变量代表电机侧的变量

根据图 2 可知,EHA 可以数学建模为双惯性系统^[12,13],每个变量可由对象模型比较给出。

双惯性系统框图如图 3 所示。

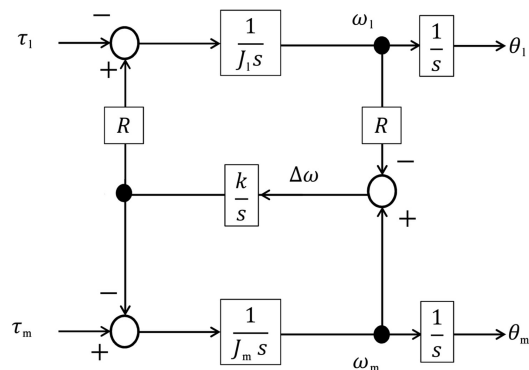


图 3 双惯性系统框图

由图 2 和图 3 可知,EHA 与双惯性系统的关系可以表示如下:

$$R = \frac{D_l}{D_m} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{C_b} \left(\frac{D_m}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

式中: R —液压马达和油泵的排量容积比; k —等效弹簧系数; D_m —电机侧排量; D_l —负载侧排量; C_b —压缩系数; θ_l —负载侧旋转角度。

该模型描述了一个具有转动惯量 J_m 的伺服泵,通过一个具有等效弹簧系数 k 的弹簧,连接到一个具有转动惯量 J_l 的负载。

其输入扭矩与电机输出角度的关系如下:

$$\frac{\theta_{me}(s)}{\tau_m(s)} = \frac{1}{J_m s^2} \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \omega_p^2} \quad (3)$$

$$\frac{\theta_l(s)}{\tau_m(s)} = \frac{1}{J_m s^2} \frac{\omega_z^2}{s^2 + \omega_p^2} \quad (4)$$

式中: ω_p —谐振频率; ω_z —反谐振频率; θ_m —电机侧旋转角度; θ_{me} —相对电机侧角值, $\theta_{me} = \theta_m/R$ 。

式(3,4)表明,反谐振只发生在电机侧。因此,当频率等于或高于谐振频率时,负载侧的相位会有 180° 的延迟。这个问题会影响反馈控制的带宽^[14-16]。

谐振频率和反谐振频率可由实验数据确定。因此,电机的惯性值计算方法如下:

$$\omega_p = \sqrt{k \left(\frac{1}{J_m} + \frac{R^2}{J_l} \right)} \quad (5)$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{kR^2}{J_l}} \quad (6)$$

2 谐振比控制方法

2.1 反馈调制器

由于静摩擦的存在,液压作动器在低速区域会表现出死区。当液压马达在低速域驱动时,无法测量实验装置的频率特性。伺服电机的输入扭矩必须大于液压马达的最大静摩擦力,才能在死区驱动作动器。有研究人员采用对输入扭矩进行量化的方法,试图来解决这一问题。然而采用这种方法又会造成量化误差的产生。

基于以上的分析,笔者采用 FM 来对低速域出现的量化误差进行补偿。由于 FM 是一种结构简单的动态量化器,它不需要系统模型。

FM 的框图如图 4 所示。



图 4 FM 的框图

由图 4 可知,FM 由低通滤波器 $Q(s)$ 给出。时间常数 T 由 $T = aT_s$ ($a > 1$) 给出(其中: a —时间常数比;

T_s —采样周期)。

量化后的扭矩在低速区域没有静摩擦。量化后的扭矩可表示为:

$$\tau_q(s) = \tau(s) + (1 - Q(s))e(s) \quad (7)$$

式中: τ_q —量化扭矩; τ —输入扭矩; e —量化误差。

2.2 控制器

为了对双惯性系统的振动进行有效抑制,笔者提出了一种谐振比控制方法,即采用反馈控制器和 DOB 来对其振动进行稳定的抑振。

此处所用的 DOB 是通过匹配谐振频率设计的。当液压马达由于较大的静摩擦力而不旋转时,DOB 会过度累积响应误差,需要停止更新 DOB。

因此,笔者所提出的控制器包含一个存储器,它可以在作动器停止于死区时,存储更新前的干扰扭矩,以避免对摩擦力进行过度补偿现象的发生。

谐振比控制的框图如图 5 所示。

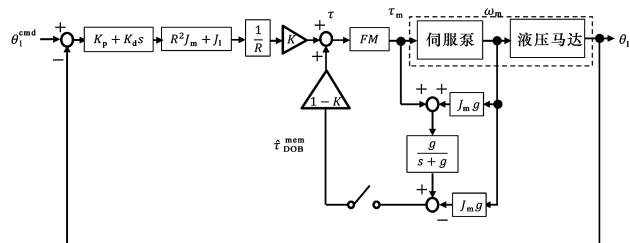


图 5 谐振比控制器

图 5 中,当 DOB 未更新时, $\hat{\tau}_{DOB}^{mem}$ 保存 DOB 的值, θ^{cmd} 为输入的指令角度值。

3 实验与结果分析

3.1 实验装置

此处使用的实验装置如图 6 所示。

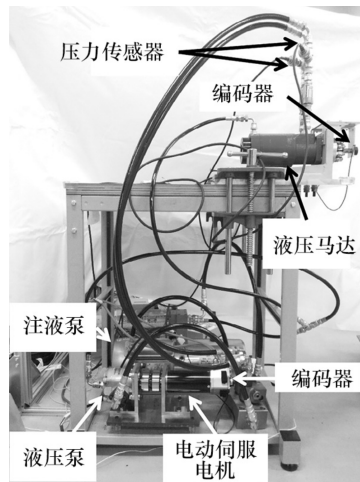


图 6 实验装置

图 6 中,系统中的电动伺服电机型号为 Maxon E-60,液压马达型号为 Eaton S-380,两者的位置响应均由 17 bit 分辨率的光学编码器测量得到;液压泵的型号为 Eaton MA-03。

3.2 参数识别

从输入扭矩到负载侧角度的 EHA 频率响应如图 7 所示。

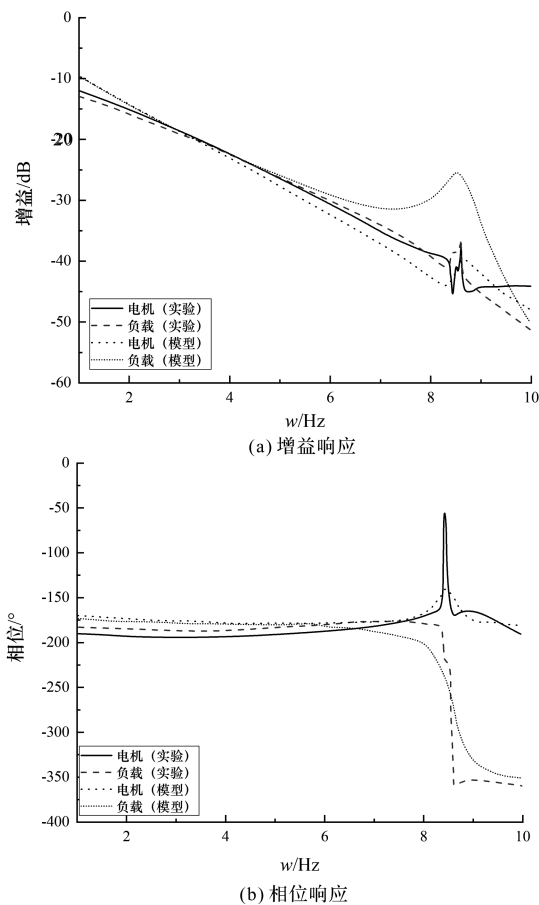


图 7 EHA 频率响应

图 7 中,当频率逐渐增加到 8.7 Hz 时,EHA 实验系统的电机侧和负载侧开始发生共振现象,直接导致负载(模型)的增益响应曲线产生了突变,从而直接影响了 EHA 控制性能;

负载的实验结果与模型结果一致,从这一点可以说明 EHA 确实具有双惯性谐振特性,也验证了双惯性建模的可行性。

笔者在 1 自由度的机械臂上加了一个重物,以识别 EHA 负载侧的惯性。由于负载侧惯性的变化,谐振频率和反谐振频率都发生了变化。

新的反谐振频率与惯性之间的关系如下:

$$\omega'_z = \sqrt{\frac{kR^2}{J_l + \Delta J}} \quad (8)$$

式中: ΔJ —重量的惯量。

带重物的 EHA 频率响应如图 8 所示。

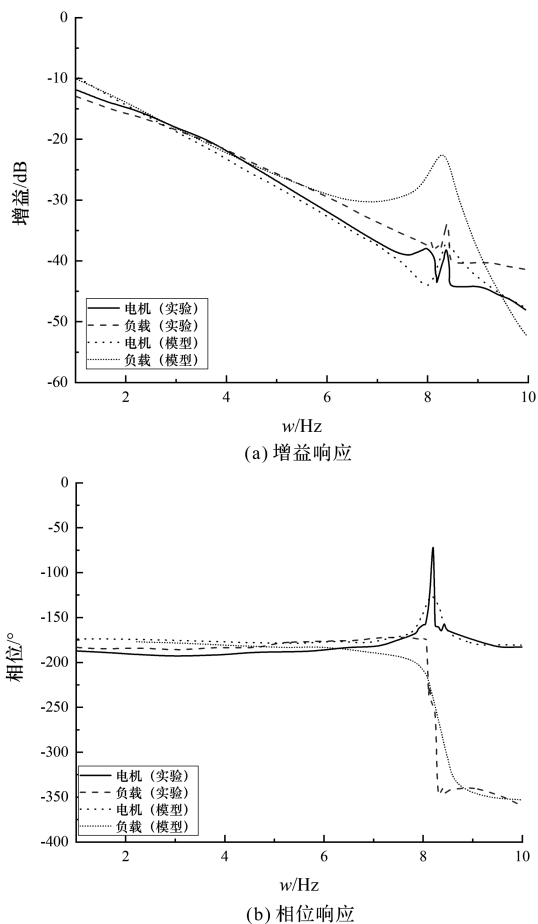


图 8 带重物的 EHA 频率响应

图 8 中,带重物时谐振频率为 8.1 Hz,反谐振频率为 7.8 Hz,与图 7 的结果分析一致。

笔者利用式(5,6,8),从有重物和无重物时 EHA 的谐振特性中辨识参数,辨识结果表明,EHA 可以看作是一个双惯性谐振系统,即笔者所建立的双惯性系统控制方法是可行的。

辨识出的参数如表 1 所示。

表 1 辨识出的参数

参数	无重物	有重物
谐振频率/Hz	8.50	8.10
反谐振频率/Hz	8.20	7.80
电机侧惯量 J_m/kgm^2	0.000 633	0.000 564
负载侧惯性 J_l/kgm^2	0.841	0.951
重量的惯量 $\Delta J/\text{kgm}^2$		0.110
等效弹簧系数 $k/\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$	0.091 5	0.091 5

3.3 位置响应性能

接下来,笔者将通过实验的方法,对所提方法的有效性进行验证,并将其与目前双惯性系统中常用控制方法,即比例-积分-微分(PID)控制器^[17]和比例-比例-积分(P-PI)控制器^[18]进行比较。

为避免积分控制引起的稳态剩余振荡,此处只有当液压马达的角速度低于条件值 0.01 rad/s 时,输入扭矩才被量化。

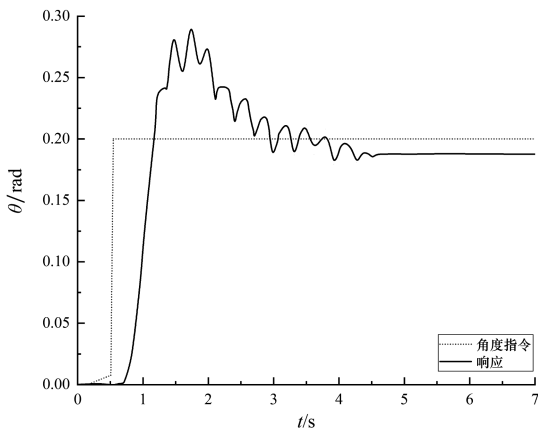
实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

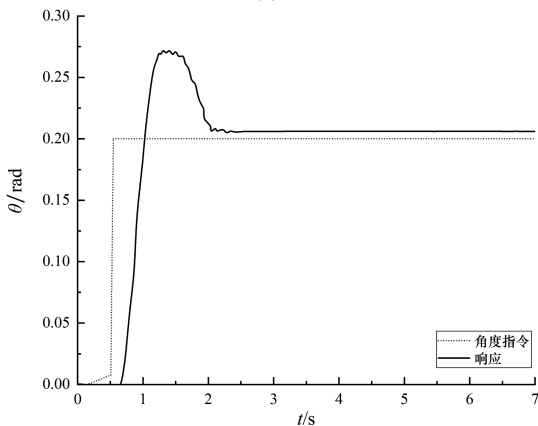
参数	数值
电机侧排量 $D_m/\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$	3.08
负载侧排量 $D_l/\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$	393
排量容积比 R	127.6
谐振频率 $\omega_p/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	43.9
反谐振频率 $\omega_z/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	42.1
轴扭矩反馈增益 K	1.60
比例增益 K_p	30.0
微分增益 K_d	20.0
DOB 截止频率 $g/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	40.0
时间常数比 a	1.05
采样周期 T_s/s	0.001

笔者通过反复试验,获得适当的该谐振比控制器的轴扭矩反馈增益 K 。DOB 的反馈乘以 $(1 - K)$,电机侧的惯性在谐振频率附近乘以 $1/K$,从而可以达到抑制振动的目的。

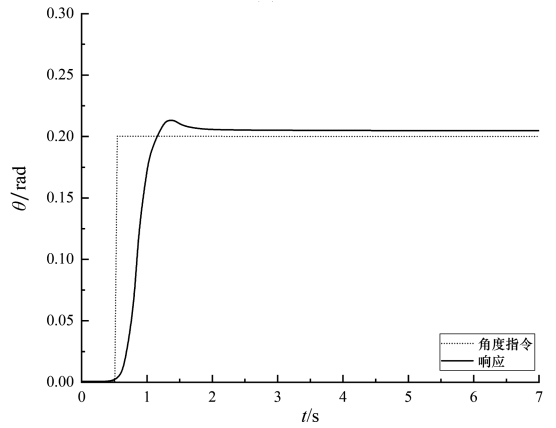
两种常规控制器与所提方法的位置响应对比结果,如图 9 所示。



(a) PID控制



(b) P-PI控制



(c) 谐振比控制

图 9 阶跃指令的位置响应

图 9(a)中,从 PID 控制器中可观察到较大幅度的超调,最大超调量约为 0.1 rad ,且位置响应的波动性较大。这是因为积分控制在大静摩擦力作用下会产生残余振荡,平均响应误差约为 0.02 rad ;

图 9(b)中,在采用 P-PI 控制器的情况下,由于其利用了电机和负载侧信息,其最大超调量有所降低(约为 0.07 rad),但是 P-PI 不能有效地抑制双惯性系统的谐振,导致其位置响应的波动仍较大,平均响应误差约为 0.01 rad ;

图 9(c)中,与两种传统方法不同,笔者所提谐振比控制方法在抑制相位滞后的同时,也抑制了稳态误差,最大超调量仅为 0.035 rad ;相比于 PID 和 P-PI 控制器,最大超调量分别降低了约 3 倍和 2 倍;平均响应误差仅为 0.005 rad ,相比 PID 和 P-PI 控制器,平均响应误差分别提高了 4 倍和 2 倍,获得了高精度的位置响应结果。

综上所述,在上述这些控制器中,笔者所提出的方法具有最好的控制性能。

4 结束语

为了使 EHA 能够获得高精度的位置响应控制效果,笔者提出了一种应用双惯性模型来抑制 EHA 的谐振,并设计了一种谐振比控制方法;采用单连杆机械臂 EHA 实验装置,对所提模型和控制方法的有效性进行了验证。

本研究得出如下结论:

- (1) 频率特性测量结果表明,通过 EHA 系统可以观察到谐振现象,验证了双惯性系统可用于参数辨识;
- (2) 位置响应测量结果表明,相比于 PID 和 P-PI 控制器,所提谐振比控制器能够有效补偿静摩擦,最大超调量分别降低了约 3 倍和 2 倍;同时,其平均响应误

差分别提高了 4 倍和 2 倍,验证了所提控制器在抑制 EHA 谐振方面的有效性,获得了较高的位置响应精度。

由于在当前的研究中,未考虑液压马达漏油对结果的影响。在后续的研究中,笔者将尝试对该非线性因素进行进一步的补偿,以提高整个系统控制的精度。

参考文献 (References) :

- [1] ZHANG J, CHAO Q, BING X U. Analysis of the cylinder block tilting inertia moment and its effect on the performance of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps of aircraft [J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2018, 31 (1) : 174-182.
- [2] YANG K, YANG W, WANG C. Inverse dynamic analysis and position error evaluation of the heavy-duty industrial robot with elastic joints: an efficient approach based on Lie group[J]. **Nonlinear Dynamics**, 2018, 93(4) :1-18.
- [3] YOO S, LEE W, CHUNG W K. Impedance control of hydraulic actuation systems with inherent backdrivability[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2019, 24 (5) :1921-1930.
- [4] KO T, KAMINAGA H, NAKAMURA Y. Current-pressure-position triple-loop feedback control of electro-hydrostatic actuators for humanoid robots[J]. **Advanced Robotics**, 2018, 32(24) :1-16.
- [5] 付永领,赵子宁,韩旭,等.基于 AMESim 的电动静液作动器(EHA)系统级设计[J]. **机床与液压**, 2019, 47(2) : 54-57.
- [6] YU S, HUANG T H, WANG D, et al. Design and control of a high-torque and highly backdrivable hybrid soft exoskeleton for knee injury prevention during squatting[J]. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2019, 4 (4) : 4579-4586.
- [7] NOH D K, YOON Y W, KIM D H, et al. Development and application of thermal hydraulic simulation model for aircraft-eha (electro-hydrostatic actuator) [J]. **Circulation Journal Official Journal of the Japanese Circulation Society**, 2014, 23(2) :17-24.
- [8] YUE F, LI X. Adaptive sliding mode control based on friction compensation for opto-electronic tracking system using neural network approximations [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2019, 96(1) :1-12.
- [9] OBOE R, PILASTRO D. Use of Load-side MEMS Accelerometers in Servo Positioning of Two-mass-spring Systems [C]//Proceedings of Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics. Japan: [s. n.], 2016:4603-4608.
- [10] JUNG H, JEON K, KANG J G, et al. Iterative feedback tuning of cascade control of two-inertia system [J]. **IEEE Control Systems Letters**, 2020, 5(3) :785-790.
- [11] OOMIPALAGAN K, KWON O M, Park M, et al. Composite synchronization control for delayed coupling complex dynamical networks via a disturbance observer-based method [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2020, 99(2) :1601-1619.
- [12] WANG L P, WANG D, WU J. Dynamic performance analysis of parallel manipulators based on two-inertia-system [J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2019(137) :237-253.
- [13] CHOY I, KIM D, BACK J. Load speed control of two-inertia system by load speed/torque estimation and torsion torque compensation [J]. **Journal of Institute of Control**, 2018, 24(5) :393-399.
- [14] 于波,吴帅,尚耀星,等.电静液作动器多目标优化设计[J]. **液压与气动**, 2018(5) :26-31.
- [15] 段成红,高庆东,刘观日,等.基于 Workbench 的隧道管结构优化设计[J]. **压力容器**, 2019, 36(10) :32-37, 61.
- [16] BIDIKLI B, BAYRAK A. A self-tuning robust full-state feedback control design for the magnetic levitation system [J]. **Control Engineering Practice**, 2018, 78 (9) : 175-185.
- [17] 冯洪高,张赤斌.电动静液作动器的高精度力反馈估计研究[J]. **机电工程**, 2021, 38(4) :458-463.
- [18] 冷同同,闫鹏.一种基于数字控制的一阶时滞不稳定系统 P 和 PI 控制器设计方法[J]. **中国科学技术大学学报**, 2014, 44(10) :804-810, 817.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张晓娜,胡孟谦,田姗姗.电动静液作动器双惯性建模与高精度位置响应研究[J]. **机电工程**, 2022, 39(1) :71-76.

ZHANG Xiao-na, HU Meng-qian, TIAN Shan-shan. Double inertia modeling and high precision position response of electro-hydrostatic actuator [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2022, 39(1) :71-76.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>