

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.04.009

电动静液作动器的高精度力反馈估计研究*

冯洪高¹, 张赤斌²

(1. 南京铁道职业技术学院 供电与工程学院, 江苏 南京 210031; 2. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 静摩擦、齿隙和漏油会降低电动静液作动器反向驱动的性能, 针对这一问题, 对 EHA 模型进行了研究, 提出了一种基于 3 种控制器组合的高精度力反馈估计方法。首先, 通过使用反馈调制器来补偿静摩擦, 并使用齿隙和漏油补偿器(不需要任何模型)来抑制电机侧和负载侧的相对速度; 然后, 提出了一种由压力传感器和编码器组成的力反馈观测器; 最后, 在由液压作动器和 1 自由度机械臂组成的实验装置上进行了实际测试。研究表明: 相比于传统压力传感器, 所提力反馈观测器获得的反作用扭矩均方根误差可降低 $3.34 \text{ N} \cdot \text{m}$, 可以十分精确地估计力反馈。

关键词: 电动静液作动器; 力反馈估计; 静摩擦补偿; 齿隙补偿; 漏油补偿

中图分类号: TH137; TP242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)04-0458-06

High precision force feedback estimation on electro-hydrostatic actuator

FENG Hong-gao¹, ZHANG Chi-bin²

(1. School of Power Supply and Engineering, Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing 210031, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at the decrease of reverse drive performance caused by static friction, backlash and oil leakage on electro-hydrostatic actuator (EHA), a high-precision force feedback estimation method based on the combination of three controllers was proposed. Firstly, the static friction was compensated by a feedback modulator, and the relative speed between the motor side and the load side was suppressed by using a backlash and oil leakage compensator (without any model). Then, a force feedback observer composed of a pressure sensor and an encoder was proposed. Finally, the actual test was carried out on an experimental device composed of hydraulic actuator and 1-DOF mechanical arm. The research results show that comparing with the traditional pressure sensor, the RMS error of the reaction torque obtained by the force feedback observer of the traditional pressure sensor can be reduced by $3.31 \text{ N} \cdot \text{m}$, and the force feedback can be estimated very accurately.

Key words: electric hydrostatic actuator (EHA); force feedback estimation; static friction compensation; compensation of backlash; oil leakage compensation

0 引言

随着机器人技术的不断进步, 机器人不仅在工业领域得到了大量普及, 在护理和康复领域的应用案例也在逐渐增加^[1-3]。为了保证人类和机器人之间人机交互的安全性, 机器人需要能够准确地检测外力, 并灵活地应对意外的干扰。因此, 反向可驱动性成为了机

器人设计的重要指标^[4]。

由于具有宽输出功率范围和紧凑的驱动系统等优点, 液压作动器十分适合用于机器人^[5]。但液压作动器是通过伺服阀控制流量来驱动的, 因此无法实现反向驱动。相比之下, 静液传动是没有伺服阀的液压闭路, 允许反向驱动^[6,7]。为了利用这两种装置的特性, 人们开发出了电动静液作动器(EHA)。REN G 等人^[8]对电静压致动器的位置控制模型进行了研究。

收稿日期: 2020-09-17

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180413); 江苏省高等教育学会(产教融合专项)资助项目(JGZ180536)

作者简介: 冯洪高(1969-), 男, 江苏兴化人, 硕士, 副教授, 主要从事电子电气、自动控制技术方面的研究。E-mail: vk0306@163.com

然而,液压系统中的摩擦、齿隙、漏油等非线性因素会降低反向驱动性能。这些非线性是由多种因素引起的,因此很难准确地建模^[9],这是因为在建立整个电液位置伺服系统的非线性方程中,液压缸黏性阻尼系数、液压缸总泄漏系数、液压油弹性体积模量会随外负载、工作温度等不同条件发生变化,从而导致模型的准确性受到影响。此外,可以使用压力传感器而不是力传感器来测量力响应^[10]。但是,压力传感器估算的力反馈不准确,会导致力跟踪性能下降。

首先,对于摩擦力补偿来说,与电动、气动等作动器相比,液压回路中的摩擦力,特别是最大静摩擦力占主导地位,导致在低速时可能会出现无运动的死区。传动补偿摩擦方法并不适用于 EHA,因为它们依赖于伺服阀的响应性能。为了克服死区问题,TSUDA K 等人^[11]采用了反馈调制器来控制液压作动器。

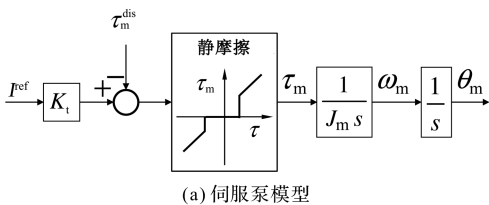
其次,齿隙可能会导致传动损耗。虽然路新惠等人^[12]提出了利用齿轮转矩补偿器进行齿隙补偿的方法,但在液压系统中应用较为困难。这是因为齿轮之间的间隙和漏油,都会导致液压系统的怠速运动。

因此,在利用反馈调制器作为量化器,对静摩擦引起的死区进行补偿时,可以利用一种齿隙和漏油补偿器,来抑制 EHA 电机侧和负载侧之间的相对速度,其优点是可以补偿怠速运动。此外,不需要建立强非线性的模型,使补偿更易于应用。

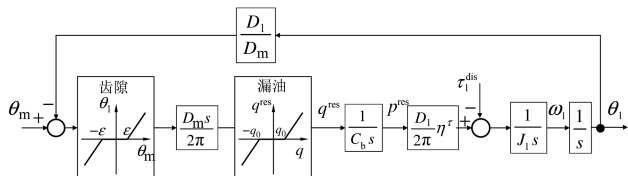
本文利用静摩擦、齿隙和漏油补偿器将干扰特性线性化,并设计一种用于 EHA 的力反馈观测器;然后用 EHA 实验装置进行实验,评估力反馈估计的准确性。

1 EHA 控制建模

为了进行 EHA 的力反馈控制分析,笔者在伺服泵模型的基础上,结合液压作动器和液压泵模型建立了 EHA 的控制模型,如图 1 所示。



(a) 伺服泵模型



(b) 液压作动器和液压泵模型

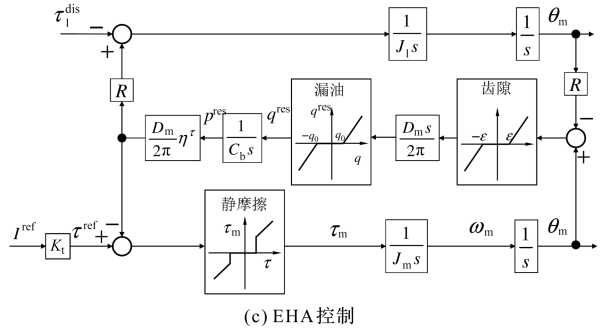


图 1 EHA 的控制模型框图

K_i —转矩常数; τ_1^{dis} —电机侧的干扰转矩; J_m —电机侧伺服执行机构的惯性矩; I^{ref} —参考输入电流; θ_m —液压泵输出角响应

图 1(a) 为伺服泵模型,包括静摩擦模型。

图 1(b) 为液压作动器和液压泵模型,液压容积的压缩比 R 为:

$$R = \frac{D_l}{D_m} \tag{1}$$

式中: D_m, D_l —液压泵和液压作动器的置换容积。

在开发该模型时,笔者考虑了齿隙和漏油的非线性模型。齿隙宽度 $\pm \varepsilon$ 可以通过积分相对角速度 $\Delta\omega$ 来计算,即:

$$\varepsilon = \left| \int (\omega_m - R\omega_l) \right| = \left| \int \Delta\omega \right| \tag{2}$$

式中: ω_m, ω_l —液压泵和液压作动器的角速度。

漏油模型 q^{leak} 如下:

$$q^{\text{leak}} = q - q^{\text{res}} = \frac{D_m}{2\pi}\omega_m - \frac{D_l}{2\pi}\omega_l = \frac{D_m}{2\pi}\Delta\omega \tag{3}$$

式中: q —来自液压泵的供油流量; q^{res} —流向液压作动器的输入油流量; p^{res} —液压作动器输入端口和输出端口之间的压差; τ_l^{dis} —负载侧的干扰转矩; η^τ —转矩效率; C_b —油的压缩系数; J_l —液压作动器的惯性矩。

当伺服执行机构和液压泵组合时,电机侧的干扰转矩为:

$$\tau_m^{\text{dis}} = \frac{D_m}{2\pi}\eta^\tau p^{\text{res}} \tag{4}$$

因此,通过组合图 1(a,b),可以得到完整的 EHA 模型,如图 1(c) 所示。

如上所述,EHA 包括多个非线性模型:静摩擦、齿隙和漏油。但是,本研究中不需要对非线性因素进行严格的建模。

2 力反馈估计方法

假设 EHA 中的惯性和摩擦力足够小,则反作用转矩估计为:

$$\hat{\tau}^{\text{reac}} = \frac{D_l}{2\pi} p^{\text{res}} - J_l \dot{\omega}_l - \tau^f \approx \frac{D_l}{2\pi} p^{\text{res}} \quad (5)$$

式中: τ^f —摩擦扭矩; $\dot{\omega}_l$ —液压作动器的角加速度。

从式(5)可以看出,反作用扭矩可以通过压力值估算,这也是传统方法的主要方式。然而干扰扭矩不能通过压力值来检测。例如,在低速范围内,由于内部漏油引起的静摩擦扭矩,存在一个死区,并且这些特性具有非线性。因此,不可能准确估计反作用扭矩。

力反馈观测器可以在考虑干扰扭矩(内力和摩擦)条件下,通过压力传感器和编码器来估计反作用力。但如果不补偿诸如静摩擦、齿隙和漏油等非线性因素,力反馈观测器就不能在 EHA 中实现。

因此,笔者提出了非线性补偿器,即反馈调制器、齿隙和漏油补偿器;所设计的补偿算法是在微分代数控制系统基础上提出的。

2.1 反馈调制器

与其他作动器相比,EHA 的静摩擦非常大,在低速范围内会出现死区。为了驱动受静摩擦影响的液压泵,输入扭矩必须大于最大静摩擦力。反馈调制器是动态量化器,不需要系统模型,具有很高的鲁棒性。

反馈调制器的框图如图 2 所示。

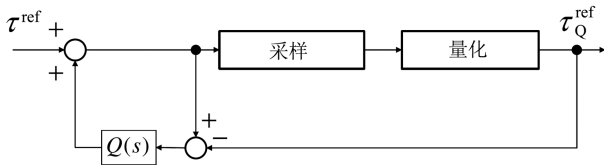


图 2 反馈调制器的框图

参考输入扭矩 τ^{ref} 及其量化值 τ_Q^{ref} 符合以下等式:

$$\tau_Q^{\text{ref}} = \begin{cases} \tau^{\text{ref}} + (1 - Q(s))e, & |\omega_l| < \omega_{\text{th}} \\ \tau^{\text{ref}}, & |\omega_l| \geq \omega_{\text{th}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: e —输入扭矩差值; ω_{th} —角速度阈值。

应该注意的是,使用这种方法,参考扭矩仅在电机速度较低时被量化。

2.2 间隙和漏油补偿器

在怠速运动过程中,由于液压作动器扭矩不会从负载侧传递到电机侧,必须进行补偿。然而,由于液压系统建模的复杂性,很难建立一个基于模型的补偿器^[13]。

观察式(2,3)可以发现,齿隙和漏油可以被视为负载侧和电机侧之间的相对速度 $\Delta\omega$ 。如果相对速度被控制为零,则怠速运动对力控制器的影响最小。

因此,笔者提出了一种间隙和漏油补偿器,如图 3 所示。

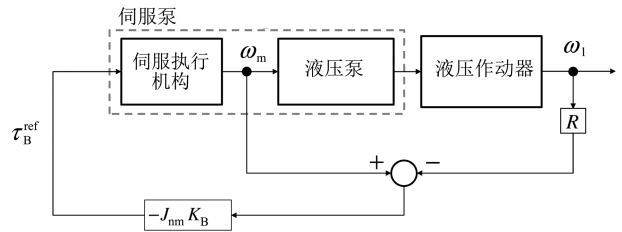


图 3 间隙和漏油补偿器

补偿器的控制输入为:

$$\tau_B^{\text{ref}} = -K_B J_{\text{nm}} \Delta\omega \quad (7)$$

式中: K_B —反馈增益; J_{nm} —伺服泵的惯性矩。

笔者对补偿器在 EHA 中的效果进行了分析。当使用反馈调制器可以忽略静摩擦时,运动方程表示如下:

$$J_m \dot{\omega}_m = -K_B J_{\text{nm}} \Delta\omega - \frac{D_m}{2\pi} \eta \tau p^{\text{res}} \quad (8)$$

$$J_l \dot{\omega}_l = \frac{D_l}{2\pi} \eta \tau p^{\text{res}} - \tau_l^{\text{dis}} \quad (9)$$

由式(8,9)可知,假设没有建模误差($J_{\text{nm}} = J_m$),补偿器的微分方程为:

$$\Delta\dot{\omega} = \dot{\omega}_m - R\dot{\omega}_l = -K_B \Delta\omega + C \quad (10)$$

式中: C —常数项。

考虑干扰项为阶跃函数, C 为常数值。由式(10)可知,该控制器可以通过相对速度的线性微分方程对间隙和漏油进行补偿(速度维上)。此外,由于补偿器是用一阶线性微分方程表示的,可以在不影响 EHA 稳定性的情况下补偿齿隙和漏油。

2.3 力反馈观测器

力反馈观测器是基于干扰观测器的,因此可以将液压执行器 p 中输入和输出端口之间的压差视为输入。

由于反馈调制器、间隙和漏油补偿器分别对静摩擦、间隙和漏油进行了补偿,负载侧的估计干扰扭矩可以用以下方程建模:

$$\hat{\tau}_l^{\text{dis}} = \hat{\tau}^{\text{reac}} + \hat{\tau}^f + \frac{D_l}{2\pi} \Delta\eta \tau p^{\text{res}} \quad (11)$$

式中: $\hat{\tau}^{\text{reac}}$ —反作用扭矩; $\hat{\tau}^f$ —黏性摩擦扭矩; $\Delta\eta \tau p^{\text{res}}$ —扭矩效率变化。

扭矩效率是速度的非线性函数,很难实时估计其变化。因此,假设 $\eta \tau = 1$ 并且没有变化,式(11)可以近似为:

$$\hat{\tau}_l^{\text{dis}} \approx \hat{\tau}^{\text{reac}} + \hat{\tau}^f \quad (12)$$

其中:

$$\hat{\tau}^f = B_l \omega_l \quad (13)$$

式中: B_l —负载侧的黏性系数。

通过结合式(12,13),估算的反作用扭矩计算如下:

$$\hat{\tau}^{reac} = \frac{g}{s + g} \left(\frac{D_1}{2\pi} p^{res} - J_{nl} \dot{\omega}_1 - \hat{\tau}^f \right) \quad (14)$$

式中: g —观测器的截止频率; J_{nl} —液压作动器的标称惯性矩。

如上所述,所提观测器需要压差、角加速度和角速度来估计反作用扭矩,并且这些测量只需要压力传感器和编码器。

所提力反馈观测器的框图如图4所示。

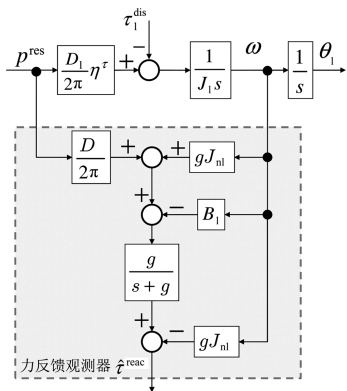


图4 所提力反馈观测器的框图

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

为了验证补偿器和观测器的性能,笔者接下来进行实验测试。实验装置由一个液压作动器和一个1自由度机械臂组成,如图5所示。

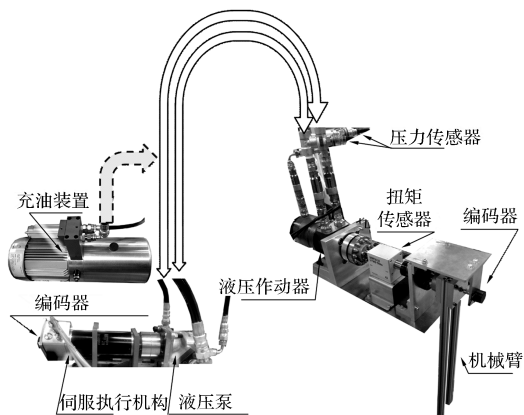


图5 实验装置

图5中,伺服执行机构的旋转角度由一个17 bit分辨率的绝对式编码器测量;伺服执行机构采用(MAXON EC-60)直驱直流无刷电机^[14-16];液压泵采用(EATON MA-03)摆线泵;充油装置由一个油箱、一个安全阀和一个作为液压源的充油泵组成;使用摆线转子(液压)马达(EATON S-380)作为机械臂,将其

用作液压作动器;扭矩传感器(UNIPULSE, UTM-II)被设置在液压作动器的输出轴和机械臂之间。

在本研究中,使用扭矩传感器测量的值仅用于验证,不用于提供任何控制和估计,因此,笔者采用17 bit分辨率绝对式编码器检测液压作动器的旋转角。

EHA综合控制框图如图6所示。

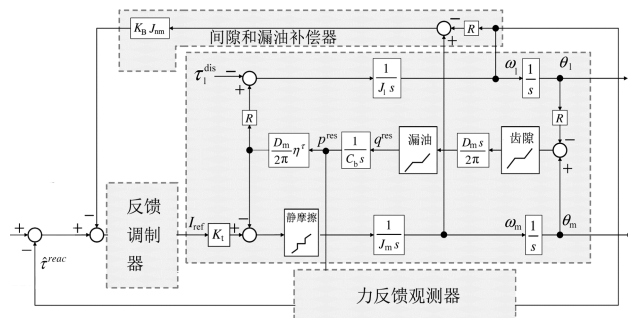


图6 EHA综合控制框图

实验主要参数如表1所示。

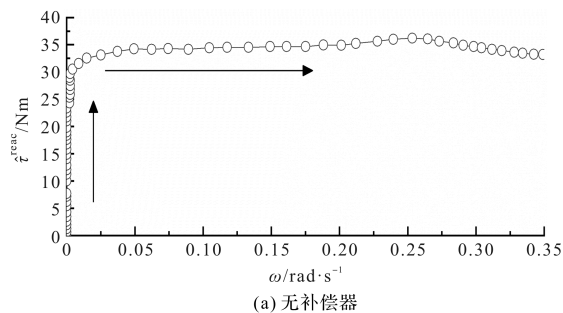
表1 实验主要参数

参数	数值	参数	数值
$J_{nl}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.014 0	$g/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	20.0
$J_{m}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.000 44	$B_f/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	4.56
$D_m/\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$	3.08	$\omega_{th}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	0.200
$D_l/\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$	371	K_B	120

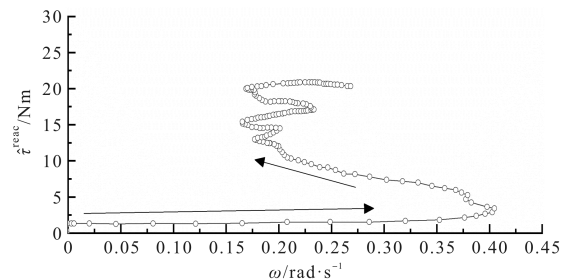
3.2 反馈调制器和补偿器的性能分析

笔者首先验证了反向驱动中电机侧角速度与反作用转矩之间的关系。当机械臂施加外力矩时,测量电机侧的旋转作为输出;使用扭矩传感器测量反作用转矩,并由电机侧编码器测量的角响应计算角速度。

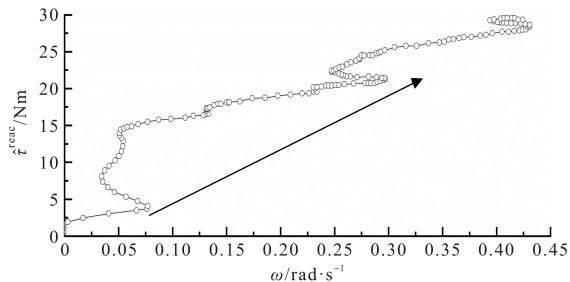
速度-扭矩特性如图7所示。



(a) 无补偿器



(b) 有补偿器



(c) 反馈调制器+补偿器

图 7 速度-扭矩特性

从图 7(a)可以看出:在不进行任何补偿的情况下,反向驱动需要 $33 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的转矩。这是 EHA 的最大静摩擦扭矩;

从图 7(b)可以看出:在加入补偿器后,反向驱动所需扭矩减少到 $1.3 \text{ N} \cdot \text{m}$;

图 7(c)显示了同时使用反馈调制器和补偿器时的结果。由于静摩擦扭矩由反馈调制器补偿,在电机侧角速度和输入转矩之间存在近似的线性关系,类似于由黏性摩擦产生的关系。在速度 - 转矩特性曲线 0.05 rad/s 附近可观察到轻微的非线性。这是因为补偿器可以减少由齿隙和漏油引起的怠速运动,但不可能完全消除机械非线性。此外,这种轻微的非线性对力反馈估计的影响不大。

综上所述,补偿器降低了反驱转矩,反馈调制器将响应线性化,从而将复杂的静摩擦、齿隙和漏油等非线性问题转化为较易处理的扰动(黏性摩擦扭矩)。

3.3 力反馈观测器的性能分析

负载侧的角速度和黏性摩擦扭矩之间的关系如图 8 所示。

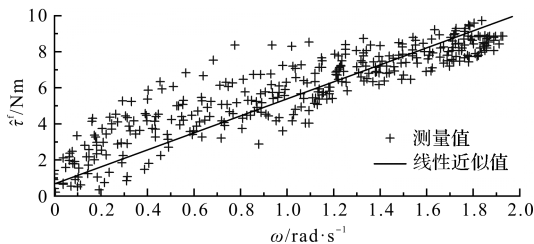


图 8 黏性摩擦系数的估计

图 8 中,线性近似值的斜率为 $4.56 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$,这是黏性摩擦系数 B_1 ,验证了力反馈估计的准确性;在 EHA 中,用得到的黏性摩擦模型可以实现用该力反馈观测器进行黏性摩擦系数的估计。

力反馈估计方法之间的比较结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出:在 $6 \text{ s} \sim 11 \text{ s}$,以及 $14 \text{ s} \sim 18 \text{ s}$ 期间,测试人员通过按压机械臂作为接触运动来施加外

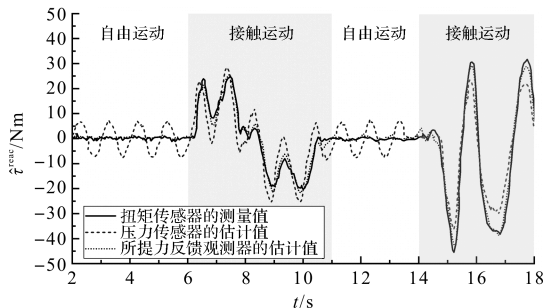


图 9 力反馈估计的实验结果

部扭矩;使用压力传感器的传统方法无法分离输入转矩和反作用转矩,力反馈响应存在较大的误差。

然而,本文方法中没有出现这些误差,并更准确的估计了反作用转矩。一般来说,力反馈观测器受 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右的齿隙影响(14 ms 开始)。然而,在图 8 中,由于对非线性的补偿,即使在这种状态下,也可以精确地估计力反馈。

两种方法的均方根误差(RMSE)如表 2 所示。

表 2 两种方法的均方根误差

估计法	RMSE/N · m
传统压力传感器	5.21
所提力反馈观测器	1.87

由表 2 可知,该结果清楚地验证了所提力反馈观测器具有优越的反作用扭矩估计性能。

4 结束语

本文提出了一种由 3 种控制器相结合组成的高精度 EHA 力反馈估计方法,包括力反馈观测器、反馈调制器、齿隙和漏油补偿器;反馈调制器用于克服静摩擦、齿隙、漏油和静摩擦等非线性因素的影响被线性化,以便实现力反馈观测器。

为了验证补偿器和观测器的性能,笔者进行了实验。实验结果验证了该力反馈观测器的有效性,有助于实现机器人安全灵活操作。

另一方面,笔者所提方法的最大误差发生在最大输入扭矩附近,因此,下一阶段笔者将对这些误差产生的原因进行细致的分析。

参考文献(References):

[1] TOJO T, ONO O, NOH N B, et al. Interactive tutor robot for collaborative e-learning system [J]. **Electrical Engineering in Japan**, 2018, 203(3):22-29.

[2] SCIUTTI A, MARA M, TAGLIASCO V, et al. Humanizing human-robot interaction: on the importance of mutual understanding [J]. **IEEE Technology and Society Magazine**, 2018, 37(1):22-29.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] KO T, KAMINAGA H, NAKAMURA Y. Key design parameters of a few types of electro-hydrostatic actuators for humanoid robots[J]. **Advanced Robotics**, 2018, 32(23):1-12.
- [8] REN G, ESFANDIARI M, SONG J, et al. Position control of an electrohydrostatic actuator with tolerance to internal leakage [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2016, 24(6):2224-2232.
- [9] 李旭, 芮光超, 殷士才, 等. 力干扰下的电液位置系统自适应鲁棒控制[J]. **液压与气动**, 2019, 330(2):39-45.
- [10] ZHANG J, CHEN Y, BING X U, et al. Effects of splined shaft bending rigidity on cylinder tilt behaviour for high-speed electrohydrostatic actuator pumps [J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2019, 32(2):499-512.
- [11] TSUDA K, SAKUMA T, UMEDA K, et al. Resonance-suppression control for electro-hydrostatic actuator as two-inertia system [J]. **Ieej Journal of Industry Applications**, 2017, 6(5):320-327.
- [12] 路新惠. 基于 Simulink 轮边二级减速系统动力学特性分析[J]. **机械设计与制造**, 2018(3):91-94.
- [13] 徐宝林, 王俊杰, 陈英龙. 基于 EHA 的鱼雷舵机伺服系统的设计与研究[J]. **液压与气动**, 2020(2):92-98.
- [14] 曾威璋, 郑水英. 管路主动减振系统作动器设计[J]. **轻工机械**, 2019, 37(5):57-61, 67.
- [15] 周国哲, 付永领, 齐海涛, 等. 基于力的电动静液作动器阻抗控制[J]. **北京航空航天大学学报**, 2017, 43(1):93-99.
- [16] 杨瑞, 马超善, 杨胜兵. 2 MW 风力机液压变桨电液作动器系统设计与仿真研究[J]. **液压气动与密封**, 2020(6):5-10, 15.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

冯洪高, 张亦斌. 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.FENG Hong-gao, ZHANG Chi-bin. High precision force feedback estimation on electro-hydrostatic actuator[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(4):458-463.
《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 457 页)

参考文献 (References):

- [1] 周森. 三维模型检索系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学软件学院, 2014.
- [2] 徐赐军, 田柳, 李炜龙, 等. 基于机械结构形态的三维 CAD 模型检索[J/OL]. **计算机集成制造系统**; 1-17[2021-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200426.1830.008.htm>.
- [3] XU L, JIANG Y. Research on 3D CAD model retrieval based on ant colony algorithm [R]. 8th International Conference on Management, Education and Information (MEICI 2018). Shenyang: [s. n.], 2018.
- [4] TASHIRO S, TATSUMA A, AONO M. Super-vector coding features extracted from both depth buffer and view-normal-angle images for part-based 3D shape retrieval[J]. **Multi-media Tools and Application**, 2017, 76(3):1-18
- [5] SIDDIQUA A, FAN G L. Semantics-enhanced supervised deep autoencoder for depth image-based 3D model retrieval [J]. **Pattern Recognition Letters**, 2019(125):806-812.
- [6] LI B. Research on the private customized information retrieval based on hadoop cluster[C]. Asia Pacific Institute of Science and Engineering. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Data Mining, Communications and Information Technology (DMCIT 2019). Beijing: APCSE, 2019.
- [7] 郭飞, 詹炳宏, 刘刚. 基于 Hadoop 的服饰图像存储与检索关键技术研究[J]. **计算机应用研究**, 2014, 31(4):1086-1089, 1126.
- [8] 杨进展. 在基于 Hadoop 的三维模型管理系统设计与实现[D]. 西安: 西北大学信息科学与技术学院, 2013.
- [9] 廖先富, 刘俊男. 基于 Django 与 HDFS 的分布式三维模型文件数据库构建[J]. **电子技术与软件工程**, 2018(18):189-191.
- [10] 徐赐军, 黄松林, 王向杰. 机械结构形态提取方法[J]. **计算机集成制造系统**, 2018, 24(11):2857-2866.
- [11] JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. **Computer-Aided Design**, 2006, 38(9):939-953.

[编辑:杨骏泽]