

压电叠堆电静液作动器 Simscape 模型与实验研究

朱 斌¹, 朱玉川¹, 罗 樟¹, 王晓露^{2,3}, 张鑫彬^{2,3}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

3. 上海伺服系统工程技术研究中心, 上海 201109)

摘要:将海德福斯螺纹插装换向阀集成到压电叠堆电静液作动器中, 形成一体化集成式双向运动的压电叠堆电静液作动器。基于压电叠堆电静液作动器的物理系统, 采用 Simscape 搭建压电叠堆电静液作动器系统模型。对比了在不同蓄能器偏压、不同电压峰值条件作用下, 压电叠堆电静液作动器的实验输出流量与仿真输出流量; 以及换向阀换向周期为 4 s 时, 压电叠堆电静液作动器的实验输出位移与仿真输出位移, 验证了搭建的 Simscape 模型的准确性。在系统模型得到验证的基础上, 分析发现阀片的回流现象是造成压电叠堆电静液作动器在高频驱动时输出流量衰减的原因。

关键词:压电叠堆; 电静液作动器; Simscape; 双向; 回流现象

中图分类号:TH137 **文献标识码:**A

Simscape Model and Experiment Study on Piezoelectric Stack Electro-Hydrostatic Actuator

ZHU Bin¹, ZHU Yuchuan¹, LUO Zhang¹, WANG Xiaolu^{2,3}, ZHANG Xinbing^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Servo Systems, Shanghai 201109, China)

Abstract: An integrated bidirectional motion piezoelectric stack electro-hydrostatic actuator (PEHA) has been realized by integrating the Heidelfos thread insertion valve into the piezoelectric stack electro-hydrostatic actuator (PEHA). Based on the physical system of PEHA, the PEHA model has been established by using the Simscape. The experimental output flow and the simulated output flow of the piezoelectric stack electro-hydrostatic actuator are compared under the conditions of different accumulator bias and different voltage peak conditions. The experimental output displacement and the simulated output displacement of the piezoelectric stack electro-hydrostatic actuator are also compared when the reversing valve period of the reversing valve is 4 s. The accuracy of the Simscape model is verified. Based on the verification of the system model, it is found that the backflow phenomenon of the valve plate is the cause of the attenuation of the output flow of the piezoelectric stack electro-hydrostatic actuator at high frequency driving.

Key words: piezoelectric stack; electro-hydrostatic actuator; Simscape; bidirection; backflow phenomenon

0 引言

压电叠堆电静液作动器(PEHA)基于频率整流的原理, 将压电叠堆的双向运动经单向阀片的整流转化为 PEHA 的单向输出^[1-2]。结合流体传输的灵活性与压电叠堆能量密度高、响应快的优点, PEHA 解决了压电叠堆在电压作用下输出位移小的问题, 拓宽了压电叠堆的应用范围^[3-4]。为了实现 PEHA 的双向运动, Jin X L 等直接将电磁换向阀引入 PE-

HA 油路系统中实现 PEHA 的换向^[5], 但存在 PEHA 体积大、集成难的问题。Shaju John 等利用磁流变液研制成磁流变液阀, 通过对 4 个磁流变液阀的时序控制实现磁致伸缩电静液作动器的双向运动^[6]。由于磁流变液阀的截止性能差, 作动器输出流量出现了较大的衰减。朱玉川等采用旋转圆柱转阀替代磁致伸缩电静液作动器中被动阀片, 通过电机的转向控制实现作动器的换向^[7], 但转阀配油频率

收稿日期: 2017-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575258); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(ykfjj20160518); 上海航天科技创新基金资助项目(SAST2016081); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人项目资助项目

作者简介: 朱斌(1993-), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 主要从事压电叠堆执行器及压电电静液作动器研究。E-mail: nuaazhubin@163.com。通信作者: 朱玉川, 主要从事智能材料与智能结构、航空先进液压技术、机电控制、电液伺服阀技术等研究。E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn。

受到电机转速的限制。目前,大量的数学模型用于分析 PEHA 的输出性能及影响因素,Chaudhuri 等采用集中参数模型对磁致伸缩电静液作动器系统动态建模,模型综合考虑了阀片的动态特性、油液惯性及压缩性等因素,磁致伸缩输出位移、流量实验与仿真对比验证了模型的准确性^[8]。Sirohi 等将作动器中液压回路等效为管路中流体运动,并用矩阵描述,确定出、入口压力与速度,建立了频域模型分析作动器的动态特性^[9]。

本文将德福斯螺纹插装换向阀集成到 PEAH 中实现 PEHA 的双向运动,采用的螺纹插装换向阀体积小、流量大,有利于 PEHA 的一体化。Simscape 中的 SimHydraulics、SimMechanics 工具箱在 Simulink 环境下搭建 PEHA 的系统模型。与数学模型相比,Simscape 采用模块化建模,每个模块能够考虑数学模型中不能考虑的因素,能够直观地表示 PEHA 的系统组成^[10]。在 Simscape 模型的准确性得到实验验证的基础上,分析 PEHA 输出流量在高频衰减的原因。

1 PEHA 工作原理

图 1 为 PEHA 的结构原理图。PEHA 主要由压电叠堆泵、换向阀、液压缸、蓄能器组成。压电叠堆在正弦电压作用下做周期性双向运动。当压电叠堆伸长时,泵腔压力上升,当单向阀 1 两侧压差大于单向阀 1 开启压力时,油液进入液压缸推动液压缸上升;当压电叠堆缩短时,泵腔压力下降,当单向阀 2 两侧压差大于单向阀 2 开启压力时,单向阀 2 开启,油液由液压缸进入泵腔。换向阀换向时可实现液压缸的向下运动。

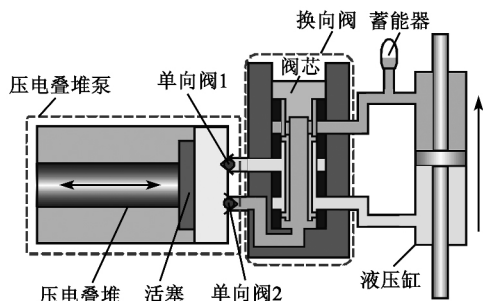


图 1 PEHA 结构原理图

2 PEHA 系统模型

依据 PEHA 物理系统,对 PEHA 中压电叠堆泵、单向阀片、换向阀及其油路、液压缸、蓄能器各个环节逐一建模,并利用 Simscape 搭建 PEHA 的系统模型。

将压电叠堆泵等效为单自由度的质量-弹簧-阻尼系统,其动力学方程^[11]:

$$m\ddot{x}_p + c\dot{x}_p + kx_p = au - p_{ch}A_p \quad (1)$$

式中: u 为输入电压; x_p 为压电叠堆位移; m 、 c 、 k 分别为压电叠堆泵的等效质量、阻尼、刚度; a 为压电叠堆电压-力转换系数; p_{ch} 为泵腔压力; A_p 为泵腔截面积。根据压电叠堆泵的动力学方程,利用 Simscape 中 SimHydraulics、SimMechanics 工具箱搭建的压电叠堆泵模型如图 2 所示。

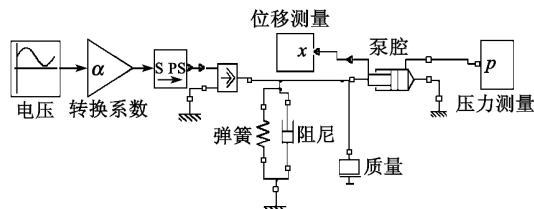


图 2 压电叠堆泵 Simscape 模型

PEHA 中采用悬臂梁式单向阀片进行整流配油,其动力学模型^[12]:

$$m_v\ddot{x}_v + c_v\dot{x}_v + k_vx_v = A_v\Delta p \quad (2)$$

式中: m_v 、 c_v 、 k_v 分别为悬臂阀片的等效质量、等效阻尼、等效刚度; x_v 为阀片位移 ($x_v \geq 0$); A_v 为阀片的作用面积; Δp 为阀片两端压差。对式(2)进行拉普拉斯变换,得到阀片的传递函数:

$$\frac{x_v(s)}{\Delta p(s)} = \frac{A_v}{m_v s^2 + c_v s + k_v} \quad (3)$$

结合阀片传递函数与 SimHydraulics 中提升阀模块中的流量方程,搭建悬臂阀片模型如图 3 所示。

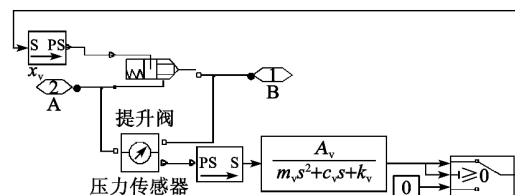


图 3 悬臂阀片 Simscape 模型

PEHA 中油液惯性、液阻、压缩性,换向阀、液压缸、蓄能器可采用 SimHydraulics 中的模块,通过接口相互连接,搭建 PEHA 系统模型如图 4 所示。

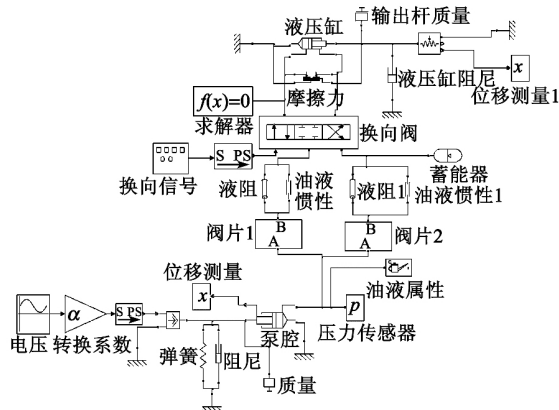


图 4 PEHA 系统 Simscape 模型

表1为PEHA系统模型中的主要参数。

表1 PEHA系统模型主要参数

名称	数值
m/kg	0.263
$k/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	183
$c/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1500
$\alpha/(\text{N} \cdot \text{V}^{-1})$	54
m_v/kg	0.001
$k_v/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	5800
$c_v/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	4
A_v/m^2	1.26×10^{-4}
A_p/m^2	1.72×10^{-3}
液压缸截面积 A_c/m^2	6.28×10^{-4}
油液密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	870
管路直径 D/mm	4

3 PEHA 仿真与实验研究

为了实现PEHA的双向运动,采用海德福斯SV-08-40螺纹插装式电磁换向阀,并设计油路块集成到PEHA中,形成一体式双向运动的PEHA如图5所示。



图5 集成式双向PEHA

为了验证PEHA模型的准确性,对不同蓄能器偏压、输入峰值电压条件下的实验结果与仿真结果进行了对比验证,如图6所示。由图6(a)可看出,随着驱动峰值电压的上升,PEHA的输出流量变大。这是由于峰值电压上升时,压电叠堆的输出位移变大,压电叠堆泵排量变大;在同一峰值电压作用下,PEHA的输出流量随着驱动频率的增加先增大再衰减,在250 Hz电压作用下,其输出流量达到最大值。由图6(b)可看出,在350 Hz驱动频率范围内,基于Simscape的PEHA系统模型能较好地反映不同蓄能器偏压、输入峰值电压条件下PEHA输出流量的变化趋势。

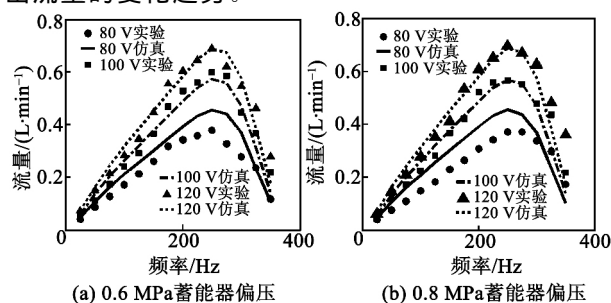


图6 在不同蓄能器偏压下,PEHA输出流量实验、仿真对比

图7为换向阀换向周期为4 s,驱动频率为50 Hz时,PEHA输出位移仿真与实验的对比。由图可见,仿真输出位移与实验输出位移吻合较好,进一步验证了模型的准确性,以及螺纹插装式换向阀实现PEHA双向运动的可行性。

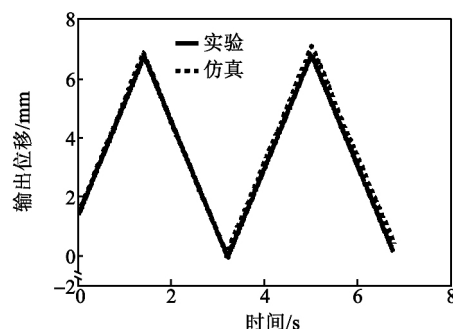


图7 换向周期4 s,PEHA输出位移

在PEHA的Simscape系统模型得到验证的基础上,针对PEHA高频驱动下流量衰减进行仿真分析。图8为驱动频率分别为100 Hz、300 Hz时,进、出油阀片出口瞬时流量。由图可看出,300 Hz时,进、出油阀片的出口流量出现负值,表明压电叠堆泵在吸/排油时,进、出油阀片未能及时关闭导致回油现象的产生,这也是随着驱动频率的增加,PEHA输出流量在峰值驱动频率后发生衰减的主要原因。

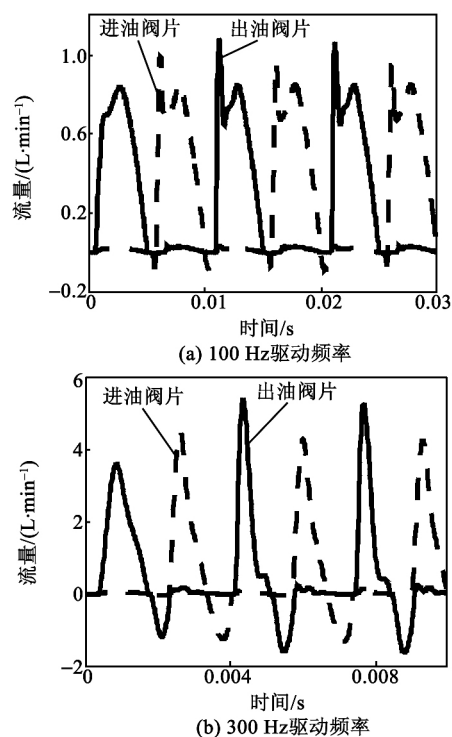


图8 进、出油阀片的出口流量

进一步改变阀片的刚度,分析阀片刚度对PE-

HA 输出流量的影响。图 9 为不同阀片刚度对 PEHA 输出流量的仿真曲线。由图可看出, 阀片刚度的增加使 PEHA 峰值流量对应的驱动频率变大, 峰值流量减少, 这是由于阀片刚度的增大使阀片的响应变快, 油液回流减小。

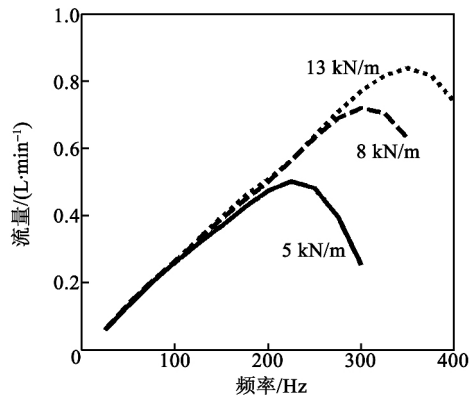


图 9 采用不同阀片刚度时的 PEHA 输出流量

4 结束语

本文采用海德福斯螺纹式插装阀, 并设计油路块集成到 PEHA 中形成一体化集成式双向运动 PEHA。基于 PEHA 中各个物理环节对压电叠堆泵、单向阀片、换向阀、油路、液压缸采用 Simscape 搭建物理模型, 与传统应用抽象数学模型建模相比, Simscape 按照能量传递的原则构成物理元件之间的连接, 模型更直观、方便地表现出物理系统的结构组成。通过不同蓄能器偏压、峰值电压作用下 PEHA 仿真输出流量与实验输出流量的对比, 验证了所建模型的准确性。在模型得到验证的基础上, 分析 PEHA 输出流量在高频驱动下衰减的原因: 阀片的回流现象, 并利用 Simscape 改变阀片刚度分析阀片刚度对 PEHA 输出性能的影响, 阀片刚度的提升, 可以提高 PEHA 在高频驱动下的输出流量。

参考文献:

- [1] SIROHI J, CADOU C, CHOPRA I. Investigation of the dynamic characteristics of a piezohydraulic actuator [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(6): 481-492.
- [2] CHAUDHURI A, YOO J H, WERELEY N M. Design, test and model of a hybrid magnetostrictive hydraulic actuator [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(8): 085019.
- [3] SIROHI J, CHOPRA I. Design and development of a high pumping frequency piezoelectric-hydraulic hybrid

- actuator [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(3): 135-147.
- [4] JOHN S, SIROHI J, WANG G, et al. Comparison of piezoelectric, magnetostrictive, and electrostrictive hybrid hydraulic actuators [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18 (10): 1035-1048.
- [5] JIN X L, SAN H N, LI Y Z, et al. Experimental study on the performance of a bidirectional hybrid piezoelectric-hydraulic actuator [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2015, 16(4): 520-528.
- [6] JOHN S, CHAUDHURI A, WERELEY N M. A magnetorheological actuation system: test and model [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17 (2): 025023.
- [7] 朱玉川, 朱斌, 费尚书, 等. 一种电静液作动器: 201610727547.0 [P]. 2016-04-14.
- [8] CHAUDHURI A, WERELEY N M. Dynamic model of a hybrid hydraulic actuator utilizing different smart materials [C]//Seattle, Washington, USA: ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2007: 193-202.
- [9] SIROHI J, CADOU C, CHOPRA I. Investigation of the dynamic characteristics of a piezohydraulic actuator [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(6): 481-492.
- [10] 刘迎澍, 刘建才. 基于 Simscape 的车辆 ABS 建模与仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2013, 30(9): 148-152.
LIU Yingshu, LIU Jiancai. Modeling and simulation of vehicle anti-lock braking system based on Matlab/Simscape [J]. *Computer Simulation*, 2013, 30 (9): 148-152.
- [11] CHAUDHURI A, WERELEY N M. Experimental validation of a hybrid electrostrictive hydraulic actuator analysis [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2010, 132(2): 021006.
- [12] 杨旭磊, 朱玉川, 纪良, 等. 超磁致伸缩电静液作动器的试验研究与特性分析 [J]. *航空学报*, 2016, 37 (9): 2839-2850.
YANG Xulei, ZHU Yuchuan, JI Liang, et al. Experimental investigation and characteristic analysis of a giant magnetostrictive materials-based electro-hydrostatic actuator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2839-2850.