

# 直线型压电液压步进驱动器的研究

郑晓培,王洪臣,吴波,李 隰

(长春工程学院 机电工程学院,吉林 长春 130012)

**摘 要:**采用纯净水为媒介,在初始加载压力 0.04 MPa(最佳加载压力)时研究了不同外界负载时压电驱动器的输出规律。结果表明,加载后驱动器的输出速度规律发生变化,输出推力整体趋势不变。随着负载增加,输出速度和推力逐渐降低。空载时,驱动器在频率 350 Hz 有最大输出速度(为 25.83 mm/s);负载 5 N 时,驱动器在 400 Hz 达到最大输出速度(为 16.59 mm/s)。在频率 140~260 Hz 时,驱动器负载后的输出步长近似于直线。加载压力 0/0.04 MPa 时,驱动器的最大承载值是 30 N;加载压力 0.3 MPa 时,驱动器的最大承载值是 20 N。最大承载值随加载压力的增加而逐渐减小。存在最佳负载使驱动器输出功率达到最大;适当加载压力可提高驱动器的最佳负载值。驱动器的最大输出功率在 91 mW 以上。

**关键词:**驱动器;步进式;压电泵;双晶片;液压传动

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.014

## Study on a Linear Piezoelectric Step Actuator

ZHENG Xiaopei, WANG Hongchen, WU Bo, LI Kun

(College of mechanical and electrical engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The output of the piezoelectric actuators with different external loads was researched by using pure water as the transmission medium at the initial loading pressure of 0.04 MPa (the best load pressure). The results show that the output speed of driver is changed after loading, but the trend of output thrust is invariant. With the load increase, the output speed and thrust are gradually decreased. The driver has the largest output speed of 25.83 mm/s at 350 Hz frequency when there is no load; when the load is 5 N, the maximum output speed is 16.59 mm/s at 400 Hz. At the frequency of 140~260 Hz, the output of step length is approximate a straight line after loading. The maximum bearing value is 30 N at the loading pressure of 0/0.04 MPa; and the maximum bearing value is 20 N at the loading pressure of 0.3 MPa. The maximum bearing value is decreased with the increase of pressure. There is an optimal load to maximize the drive output power, and the proper loading pressure can improve the optimal load values of the driver. The maximum output power of the driver is above 91 mW.

**Key words:** actuator; stepping; piezoelectric pump; bimorph; hydraulic transmission

## 0 引言

压电液压驱动器具有输出位移/驱动力大,响应速度快,输出稳定,冲击小,噪音低,外界干扰小,结构简单,体积紧凑,无电磁干扰及成本低等优点<sup>[1-6]</sup>,常作为驱动装置用于推动汽车、机床等设备的运转部件产生定向运动。运转部件对液压缸的阻力成为驱动器的外界负载。因此,为了确定驱动器的实际工作性能,有必要对其在外界负载下的输出进行测试分析。

在压电液压驱动器中作为传导介质的液体通常是可压缩的,且含有一定量的气体<sup>[7]</sup>。这种情况会

导致压电泵腔体体积变化量大于液体的排出量,降低驱动器的输出能力。所以,采用合适的加载压力和减少泵中的气体含量可以有效提高驱动器的输出性能。为了提高压电液压驱动器的输出能力,本文采用纯净水作为传导介质,并在其最佳加载压力下研究了不同外界负载时驱动器的输出性能。该驱动器可满足同时要求大位移和高驱动力的工作场合。

## 1 驱动器结构及原理

压电液压驱动器结构如图 1 所示。液体从压电泵中排出,经蓄能器、换向阀进入液压缸驱动其运动,实现输出。液压缸另一侧的缸体经换向阀与压

收稿日期:2017-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977037)

作者简介:郑晓培(1986-),女,河南漯河人,硕士,主要从事压电驱动与控制技术的研究。通信作者:王洪臣(1972-),男,副教授,博士,主要从事压电驱动与控制技术的研究。

电泵进水口相连,缸体排出的液体进入压电泵,实现整个系统的密封性和循环性。控制外界输入条件(电压、频率)即可调节压电振子的振动幅度,改变泵腔体积变化量,即一个周期中压电泵的输出,进而控制液压缸的输出步长,调节驱动器的输出性能,实现精密驱动。

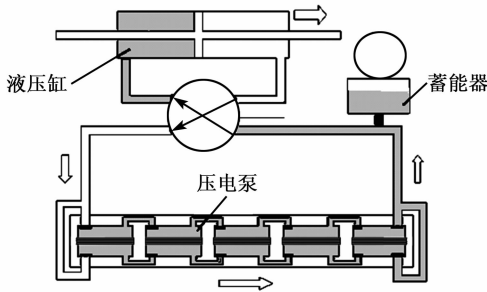


图 1 压电驱动器结构

在驱动器工作前,蓄能器对系统加载初始压力,液体被初次压缩;驱动器工作,压电振子变形,再次压缩液体。因此,同等变形量的压电振子引起的液体体积改变量增大,驱动器的输出能力增大。

压电泵工作原理如图 2 所示。图 2(a)时,压电晶片 A1、A3、A5 向下运动, A2、A4 向上运动,容积变小的泵腔排水,变大的泵腔吸水,压电泵 A 侧排水, B 侧吸水。图 2(b)时,压电振子运动至最大变形量。此时交变信号改变,压电晶片的运动方向随之变化,如图 2(c)所示。压电晶片变为图 2(e)所示状态时,泵腔 C1、C3、C5、C7、C9 开始吸水, C2、C4、C6、C8、C10 排水。在交流电压下,压电泵不断重复此过程,驱动液体完成连续定向运动。

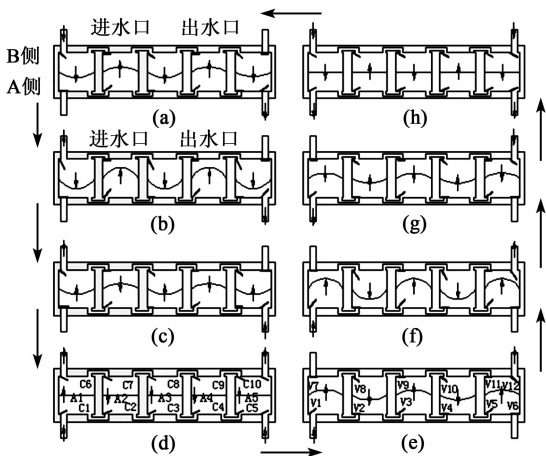


图 2 压电泵工作原理

## 2 理论分析

假设压电泵各腔体不相干涉,系统压力为 0,外界负载为 0 时,驱动器的输出速度最大<sup>[8-10]</sup>为

$$v_{\max} = \frac{3\sqrt{N}\pi d_{31}\lambda_v\eta_q R^4 f U}{2h_p^2 A_c} \left(1 - \frac{F_f}{F_b}\right) \quad (1)$$

最大输出推力为

$$F_{1,\max} = F_b - F_d \quad (2)$$

其中

$$F_b = \frac{3\pi d_{31}\lambda_v\beta_c R^4 U \eta_p N A_c p_g}{3\pi d_{31}\lambda_v\beta_c R^4 U + 2h_p^2 V_0 p_g} \quad (3)$$

$$\lambda_v = \frac{\alpha\eta(1+\alpha)}{3(1-\alpha^2\eta)^2 - 4(1+\alpha\eta)(1+\alpha^3\eta)} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{s_{11}^E E_m (1 - \mu_p^2)}{(1 - \mu_m^2)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{t_1}{t_2} \quad (6)$$

式中:  $F_1$  为外界负载;  $A_c$  为液压缸横截面面积;  $F_f$  为液压缸总摩擦力;  $f$  为频率;  $R$  为腔体半径;  $N$  为压电泵腔体数目;  $V_0$  为泵腔体积;  $p_g$  为电压下压电泵的最大压力;  $h_p$  为腔体高度;  $\eta_p$ 、 $\eta_q$  分别为阀的流量系数、压力系数;  $d_{31}$  为压电晶片直径;  $t_2$  为压电陶瓷的厚度;  $\mu_p$  为压电陶瓷的泊松比;  $\beta_c$  为有效体积弹性模量;  $E_m$  为金属基板的弹性模量;  $\mu_m$  为金属基板的泊松比;  $t_1$  为金属基板的厚度;  $s_{11}^E$  为压电陶瓷的弹性柔顺常数;  $F_b$  为驱动器的最大驱动力,即截止力。

分析式(1)、(2),可得输出功率关于外界负载的函数存在拐点,即  $dp/dF_1 = 0$ 。此时,存在最佳外界负载和输出速度,使驱动器的输出功率达到峰值。

对压电液步进驱动器性能的理论分析表明,影响驱动器输出能力的主要因素有压电振子的特性、压电泵和液压缸的结构、工作电压、频率、传递介质及外界负载等<sup>[11]</sup>。

## 3 驱动器的制造及实验

为使驱动器具有大位移及高驱动力的特性,选定压电陶瓷  $\varnothing 29$  mm 的压电振子制作的压电泵和  $\varnothing 25$  mm  $\times$  100 mm 的液压缸制作驱动器样机并进行试验。样机和测试系统如图 3 所示。压电泵异步驱动,工作电压 150 V。

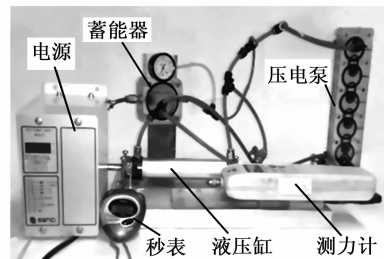


图 3 压电驱动器样机及测试系统

图4为驱动器采用纯净水作为传导介质,初始加载压力0.04 MPa(最佳加载压力)时的输出速度。结果表明,随着外界负载增加,驱动器的输出速度逐渐降低;负载低于15 N时,驱动器的速度随频率增加大致呈上升趋势,且空载与负载时驱动器的输出规律发生变化。空载时,驱动器的最大输出速度为25.83 mm/s;外界负载5 N时,驱动器在400 Hz达到最大输出速度16.59 mm/s;外界负载15 N时,驱动器在170~240 Hz的输出速度接近0。其原因是:加载后液压缸的活塞总摩擦力增大,液压缸的能量损耗增加,致使整个系统的能量损耗改变,驱动器的输出发生变化。

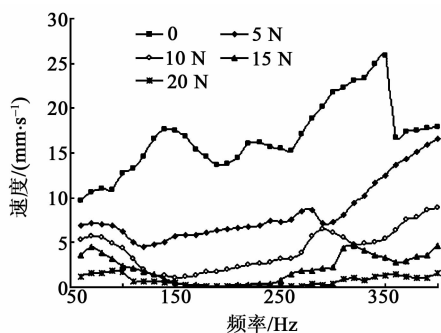


图4 驱动器的输出速度-频率曲线

图5为驱动器的输出推力随频率变化曲线。结果表明,随着外界负载增加,驱动器的输出推力逐渐降低,但整体趋势不变。驱动器的推力在60~140 Hz基本不变,140~200 Hz迅速降低,然后持续升高。

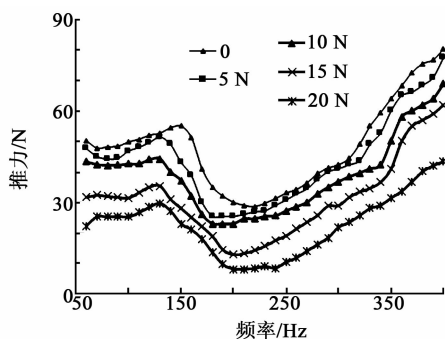


图5 驱动器的输出推力-频率曲线

压电液压驱动器是一种精密的步进式驱动器,输出步长的精度等级和变化趋势是一项重要指标。对图4分析得到外界负载下驱动器的输出步长与频率间的关系,如图6所示。结果显示:输出步长与外界负载成反比;负载时,驱动器的输出步长与空载相比趋势发生改变。空载时,驱动器的输出步长-频率曲线在频率60~90 Hz和140~200 Hz近似线性下降,其他频率相对稳定;外界负载下驱动器的输出步

长在60~120 Hz近似线性下降,120~400 Hz相对稳定,在140~260 Hz,驱动器的输出步长近似直线。空载时,驱动器的输出步长最大为162 μm;负载5 N时,驱动器的最大输出步长是115 μm。压电液压驱动器的输出步长为微米级。

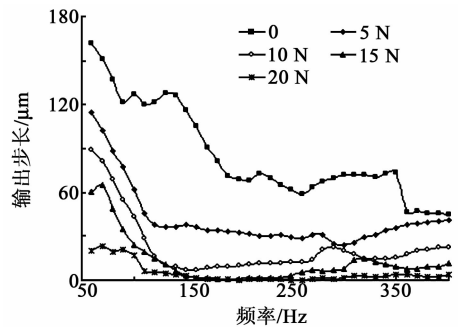


图6 驱动器的输出步长-频率曲线

为进一步研究驱动器在外界负载下的工作性能,测试频率400 Hz时驱动器在不同加载压力下的输出速度和负载的关系,结果如图7所示。由图可见,不同初始压力下的驱动器的输出速度随着外界负载的增大逐渐减小。当负载超过某一特定值(最大承载值)时,压电泵输出的能量几乎全用于克服系统的损耗,驱动器的输出速度接近0。加载压力0/0.04 MPa时,驱动器的最大承载值为30 N;0.3 MPa时的最大承载值为20 N,此时驱动器的输出被抑制,最大承载值随压力的增加逐渐减小。系统加载0.04 MPa时,相同负载下驱动器的输出速度高于不加载压力时的输出;系统加载0.3 MPa时,相同负载下驱动器的输出速度低于0时的输出,说明系统加载合适的压力可以提高驱动器的输出性能。

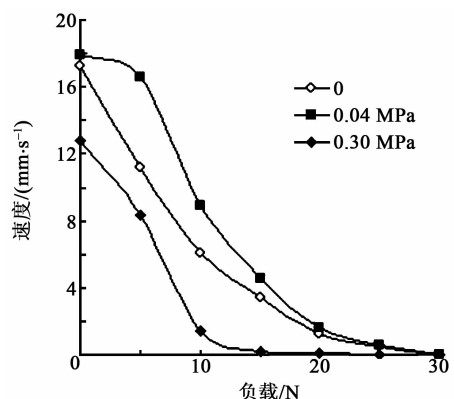


图7 驱动器的输出速度-负载曲线

图8为频率400 Hz下,压电液压驱动器的输出功率-负载曲线。结果表明,存在最佳负载使驱动器达到最大输出功率;适当加载压力可以提高驱动器

的最佳负载值,驱动器的最大输出功率在91 mW以上。负载低于最佳值,驱动器的输出功率随着负载的增加逐渐增加;负载高于最佳值,驱动器的输出功率随负载的增加逐渐降低。

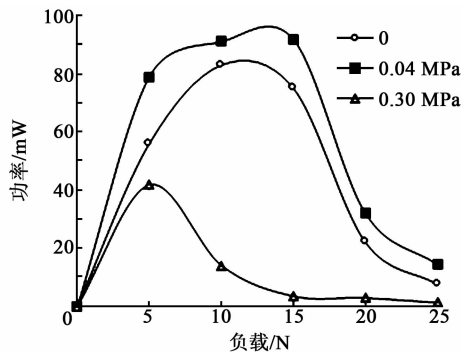


图8 驱动器的输出功率速度-负载曲线

#### 4 结论

为确定具有大位移和高驱动力的压电液压驱动器的实际工作性能,在采用纯净水作为传导介质,初始加载压力0.04 MPa(最佳加载压力)时研究不同外界负载时驱动器的输出规律。得到:

1) 加载前、后驱动器的输出速度规律发生变化。随着外界负载增加,驱动器的输出速度逐渐降低。空载时,驱动器在350 Hz时的输出速度最大为25.83 mm/s;外界负载5 N时,驱动器在400 Hz达到最大输出速度16.59 mm/s。

2) 随着外界负载的增加,驱动器的输出推力逐渐降低,但整体趋势不变。

3) 压电液压驱动器的输出步长为微米级。负载时,驱动器的输出步长在140~260 Hz近似直线。空载时,驱动器的最大输出步长为162  $\mu\text{m}$ ;负载5 N时,驱动器的最大输出步长是115  $\mu\text{m}$ 。

4) 加载压力0/0.04 MPa时,驱动器的最大承载值是30 N;加载压力0.3 MPa时的最大承载值是20 N,最大承载值随加载压力的增加逐渐减小。

5) 存在最佳负载使驱动器达到最大输出功率;适当加载压力可以提高驱动器的最佳负载值。驱动器的最大输出功率在91 mW以上。

#### 参考文献:

[1] 张治君,徐明龙,冯勃,等.双向变步长大位移压电作动器[J].应用力学报,2010,27(1):108-112.  
ZHANG Zhijun, XU Minglong, FENG Bo, et al. Large displacement piezoelectric step actuator of bidirectional [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1):108-112.

[2] 温建明,马继杰,曾平,等.压电旋转驱动器制作及性能

测试[J].光学精密工程,2013(1):131-136.

WEN Jianming, MA Jijie, ZENG Ping, et al. Machining and functional testing of piezoelectric rotary actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2013(1): 131-136.

[3] 王淑云,张肖逸,阚君武,等.气体耦合式宽带/低频压电振动俘能器[J].光学精密工程,2015,23(2): 497-503.

WANG Shuyun, ZHANG Xiaoyi, KAN Junwu, et al. Wideband/low frequency piezoelectric vibration energy harvester based on pneumato-coupling[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,23(2):497-503.

[4] CHEN Qianwei, JU Quanyong, HUANG Weiqing, et al. Stick-slip tower-shaped piezoelectric actuator[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,32(2):156-162.

[5] 阚君武,徐海龙,王淑云,等.多振子串联压电俘能器性能分析与测试[J].振动与冲击,2013,32(22): 79-83.

KAN Junwu, XU Hailong, WANG Shuyun, et al. Performance analysis and test of an energy harvester with serial-connected piezodiscs[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(22):79-83.

[6] 于月民,冷劲松.新型压电旋转驱动器的设计与性能测试[J].机械工程学报,2015,51(8):185-190.

YU Yuemin, LENG Jinsong. Design and performance testing of a new type piezoelectric rotary actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 185-190.

[7] 明仁雄,万会熊.液压与气压传动[D].北京:国防工业出版社,2003.

[8] KAN Junwu, TANG Kehong, LIU Guojun, et al. Development of serial-connection piezoelectric pumps [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008,144 (2):321-327.

[9] NNIEZRECKI C, SCHUELLER J K, BALASUBRAMANIAN K, et al. Piezoelectric-based fluid bulk modulus sensor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15(15):893-899.

[10] KAN Junwu, WANG Shuyun, ZENG Ping, et al. Development of piezohydraulic actuator driven by piezomembrane pump[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011,22(16): 1829-1840.

[11] 郑晓培,阚君武,王洪臣,等.双晶片压电驱动器的研究[J].压电与声光,2017,39(2):304-307.

ZHENG Xiaopei, KAN Junwu, WANG Hongchen, et al. Research on bimorph piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017,39(2):304-307.