

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220426-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220426

滑阀式压电高速开关阀特性研究

王玉文, 朱玉川, 凌 杰, 陈晓明, 张洺铭
(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 针对高速开关阀响应速度慢, 且在开、关过程中存在阀芯冲击问题, 提出一种压电叠堆驱动的滑阀式高速开关阀, 利用压电叠堆作电-机转换器, 提高其响应速度, 采用滑阀式阀芯, 避免了阀芯与阀体的刚性碰撞。建立了高速开关阀的数学模型, 分析了影响其性能的关键参数, 测试了样机的相关性能。仿真与实验结果表明: 该高速开关阀在 4 MPa 压差下输出流量为 3.8 L/min, 泄漏量为 0.48 L/min, 开、关时间分别为 0.6、0.65 ms, 可以通过提高加工质量以减小泄漏量。相较于传统锥阀式阀芯, 滑阀式压电高速开关阀关闭过程中的振动加速度降低 32.8%, 300 Hz 工作频率下噪声从 70.5 dB 降至 64 dB。所提滑阀式压电高速开关阀具有较高的响应速度, 大幅减小了阀芯冲击, 提高了使用寿命, 降低了工作噪声。

关 键 词: 高速开关阀; 响应时间; 阀芯冲击; 压电叠堆; 滑阀

中图分类号: V233; TH137

文献标志码: A

Research on the characteristics of sliding valve piezoelectric high-speed on/off valve

WANG Yuwen, ZHU Yuchuan, LING Jie, CHEN Xiaoming, ZHANG Mingming

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A spool type high-speed on/off valve (HSV) driven by piezoelectric was designed to improve the response speed and reduce the spool's impact. The piezoelectric was used to improve its response speed and the spool valve was adopted to avoid the rigid collision between the valve spool and the valve body. The mathematical model of HSV was established, the influences of design parameters on its performance were analyzed, and the performance indexes were studied. The simulation and experimental results indicated that the HSV had a flow rate of 3.8 L/min, a leakage flow rate of 0.48 L/min, an opening time of 0.6 ms and a closing time of 0.65 ms at the pressure of 4 MPa. The leakage flow can be reduced by improving the manufacturing quality. Compared with the traditional conical valve structure, the vibration acceleration of the valve body in the closing process of the spool type HSV driven by piezoelectric actuator was reduced by 32.8%, and the noise was reduced from 70.5 dB to 64 dB at the working frequency of 300 Hz. The proposed spool type HSV driven by piezoelectric had higher response speed, weaker spool's impact, longer service life and lower noise during working.

Keywords: high-speed on/off valve; response time; spool's impact; piezoelectric stack; sliding valve

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51975275); 江苏省重点研发计划(BE2021034)

作者简介: 王玉文(1998—), 男, 硕士生, 主要从事数字液压元件与控制技术方面的研究。

通信作者: 朱玉川(1974—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事高性能电液传动与控制技术方面的研究。E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn

引用格式: 王玉文, 朱玉川, 凌杰, 等. 滑阀式压电高速开关阀特性研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220426. WANG Yuwen, ZHU Yuchuan, LING Jie, et al. Research on the characteristics of sliding valve piezoelectric high-speed on/off valve[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220426.

目前国际航空发动机控制系统发展的主要趋势为用以计算机为核心的数字电子控制系统取代传统的机械液压调节器,进而整合飞行、燃油流量、进气等控制系统,实现集成化数字控制^[1]。燃油调节器是航空发动机控制系统乃至整个飞行器的核心部件之一,也开始向数字电子调节器发展^[2]。常用的燃油调节器,采用电液伺服阀接收控制器模拟信号,驱动流量调节活门开度改变,进而控制燃油流量^[3]。但电液伺服阀存在对油液污染敏感、采用模拟量控制容易受电子噪声影响、在高温、高压及强振动的环境下极易产生零漂或卡死等问题,长期工作可靠性难以保证^[4]。随着电子技术发展,数字电子设备的灵活性和准确性超过了模拟电子设备,采用高速开关阀(high speed on/off valve, HSV)的燃油调节器通过调节高速开关阀占空比来调节流量,控制活门控制腔的压力,进而控制流量调节活门开度的方法^[5]。高速开关阀相比于传统的电液伺服阀,其工作过程中一直处于全开或全关,因此对油液污染不敏感、可靠性较高,广泛应用于航空发动机^[6]、飞机刹车^[7]、起落架缓冲器^[8]等领域。

高速开关阀是通过调节脉宽调制(PWM)信号占空比对油液流量进行控制,其响应速度是衡量高速开关阀性能的重要指标,更是决定高速开关阀控制液压系统控制精度的关键^[9]。目前,市场上的高速开关阀多采用电磁铁作为其电-机转换器,其工作频率通常低于 50 Hz。与电磁式高速开关阀相比,将智能材料应用在高速开关阀上,可以提高其频响与流量输出精度^[10]。Yokota 等^[11]提出一种由两个压电叠堆驱动的锥阀结构的高速开关阀,该阀开、关时间小于 0.1 ms。欧阳小平等^[12]提出一种新型压电叠堆驱动的高速开关阀结构,该阀利用压电叠堆棒瞬时产生的高输出力撞击阀芯加速运动。Nalbach 等^[13]研制了一种温控形状记忆合金的高速开关阀,通过给记忆合金施加一定的电流使得合金的温度升高进而产生形变拉动阀芯动作。俞军涛等^[14]提出一种具有桥式位移放大结构的压电叠堆直驱型高速开关阀,实测开、关时间分别为 1.05、0.85 ms。陈晓明等^[15]设计了一款磁致伸缩驱动的高速开关阀,其开、关响应时间小于 1 ms。

上述研究的高速开关阀多是以锥阀或球阀结构为主,在提高响应速度的同时,必然导致在高速开关阀打开或者关闭时,阀芯会以很大的速度

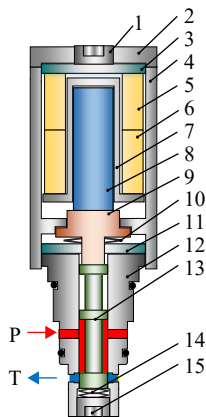
撞击阀座,产生阀芯冲击现象,一方面导致阀座密封面的冲击破坏,造成高速开关阀有效过流面积的变化,进而影响高速开关阀流量特性,影响其使用寿命,另一方面阀芯高频冲击产生的撞击噪声也会影响工作环境的舒适性^[16]。

为了减小高速开关阀的阀芯冲击现象,诸多学者^[17-18]在高速开关阀的设计中采用了阻尼油膜、阻尼小孔等液压缓冲装置对阀芯末端行程进行缓冲以减小阀芯冲击,但其必然会导致响应速度的降低。随着液压系统向高压、大流量、高频响和大功率方向发展,阀芯冲击现象表现也越发突出。如何在保证高速开关阀快速响应的前提下,减小阀芯冲击,提高高速开关阀使用寿命,对液压行业技术的发展具有重要意义。

滑阀通过控制阀芯与阀套的相对位置来启闭阀口,具有流量增益大,开、关过程无碰撞的特点,传统观点认为滑阀惯量较大,无法实现高频往复运动,不适合做高速开关阀阀芯^[19]。但压电叠堆材料具有响应速度快、输出力大的特点,利用压电叠堆做电-机转换器,可以克服滑阀响应速度慢的缺点。针对上述特点,本文提出一种压电叠堆驱动的滑阀式高速开关阀,使高速开关阀具有较高的响应速度,避免了高频开、关时阀芯与阀座发生刚性碰撞,减小了阀芯冲击现象。

1 结构与工作原理

本文所提出的滑阀式压电高速开关阀结构示意图和实物图如图 1、图 2 所示,为两位两通常闭式高速开关阀,其主要由压电叠堆、滑阀阀芯、调零装置等组成。两个环形压电叠堆轴向方向上叠堆布置,径向方向上通过“几”字形套筒嵌入一个方形压电叠堆,提高空间利用率。阀芯采用滑阀结构,避免高速开关阀打开、关闭时与阀体发生刚性碰撞,减小阀芯冲击现象。预紧端盖与壳体螺纹连接,通过调节预紧端盖,压缩预紧碟簧,调节压电叠堆受到的预紧力,预紧力的大小约为压电叠堆阻断力的 10%。阀芯在复位碟簧的作用下始终与输出杆保持接触,当压电叠堆未通电时,输出杆在预紧碟簧的作用下位于最上端,阀芯与阀体形成的节流口保持关闭,进油口 P 和出油口 T 不连通,高速开关阀关闭。当压电叠堆通电后发生形变,推动输出杆向下运动,使得阀芯与阀体形成的节流口打开,进油口 P 和出油口 T 连通,高速开关阀打开。对压电叠堆施加 PWM 电压信



1 调零螺钉; 2 端盖; 3 防扭垫片; 4 壳体; 5 环形压电叠堆一;
6 环形压电叠堆二; 7 套筒; 8 方形压电叠堆; 9 输出杆;
10 预紧碟簧; 11 预紧端盖; 12 阀体; 13 阀芯; 14 复位碟簧;
15 复位螺钉。

图 1 高速开关阀结构示意图
Fig. 1 Structure schematic of HSV



图 2 高速开关阀实物图
Fig. 2 Photograph of HSV

号, 可以实现高速开关阀的高频开、关运动。调零螺钉可以调节阀芯与阀体的零位遮盖量。

2 数学建模

2.1 压电执行器模型

选用苏州攀特公司 PTH1502619201 环形压电叠堆、PTJ1501010401 方形压电叠堆, 其基本参数如表 1 所示。

单个压电叠堆材料无负载条件下的应变量为自身长度的 1‰, 输出位移难以满足高速开关阀的使用要求, 通常采用柔性铰链、压曲放大、液压放大等位移放大机构来放大压电叠堆输出位移^[20]。但位移放大机构会降低系统的频响, 本文通过将压电叠堆材料进行轴向、径向嵌套布置, 在不明显增加压电执行器尺寸的前提下实现高频、大位

表 1 压电叠堆材料参数

Table 1 Parameters of the piezoelectric stack material

参数	数值
方形压电叠堆结构尺寸/mm	10 × 10 × 36
方形压电叠堆阻断力/N	3 600
方形压电叠堆刚度/(N/μm)	100
环形压电叠堆结构尺寸/mm	26 × 19 × 18
环形压电叠堆阻断力/N	7 200
环形压电叠堆刚度/(N/μm)	400

移的输出。图 3 为实验测得的分别给 3 个压电叠堆 200 Hz 的正弦电压激励与同时给 3 个压电叠堆 200 Hz 的正弦电压激励时压电执行器的输出位移与激励电压之间的关系。

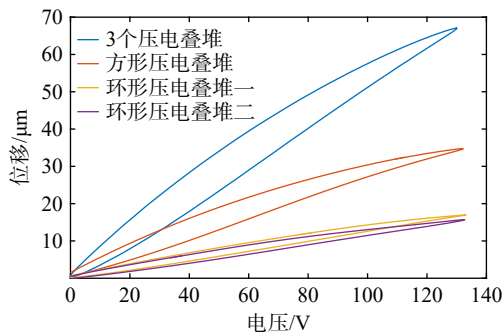


图 3 输出位移与激励电压之间的关系曲线

Fig. 3 Curve of the relationship between output displacement and xcitation voltage

从图 3 可知, 在 130 V 电压分别激励下环形压电叠堆一、环形压电叠堆二、方形压电叠堆的输出位移为 15.5、17、34.5 μm, 当在 130 V 电压同时激励下时, 3 个压电叠堆总的输出位移为 67 μm, 3 个压电叠堆同时激励时总的输出位移等于分别激励时输出位移之和, 采用轴向、径向嵌套的设计, 可以在保证较大输出位移的前提下, 减小执行器的体积, 提高空间利用率。

由于高速开关阀为 PWM 电压驱动, 在数学建模中忽略压电叠堆本身的迟滞现象, 进行简化处理, 认为压电叠堆的输出力与输出位移成线性关系。当激励电压一定, 作用在压电叠堆上的负载力为零时, 压电叠堆输出位移最大。随着负载力的增大, 压电叠堆输出位移会逐步减小。当压电叠堆输出位移为零时, 压电叠堆输出力最大, 最大输出力称为阻断力。压电叠堆输出力 F_p 、输出位移 x 和激励电压 U 的关系可以表示为

$$F_p = K_1 n d_{33} U - K_1 x \quad (1)$$

式中 n 为压电叠堆的层数, d_{33} 为压电叠堆的压电

系数, K_t 为压电叠堆的刚度, 其可以由下式计算得到

$$K_t = \frac{E_p A_p}{L_p} \quad (2)$$

式中 E_p 为压电叠堆的弹性模量; A_p 为压电叠堆的横截面积; L_p 为压电叠堆长度。

压电叠堆在使用中往往需要与其他机械结构组成一个系统, 其他机械结构固有的弹性特性将吸收一部分叠堆的输出力, 其实际输出的力 F'_p 、输出位移 x 和激励电压 U 可表示为:

$$F'_p = K_t n d_{33} U - F_1 - (K_t + K_s) x \quad (3)$$

式中 F_1 为预紧力, K_s 为机械结构刚度。

2.2 阀芯动力学模型

环形压电叠堆一与环形压电叠堆二轴向布置, 两者可以看成是一个长度为 36 mm 的环形压电叠堆, 其阻断力保持不变, 刚度减小为原来的一半, 忽略套筒、输出杆、阀芯的弹性变形。根据压电高速开关阀的结构与工作原理, 得到高速开关阀的受力示意图如图 4 所示。

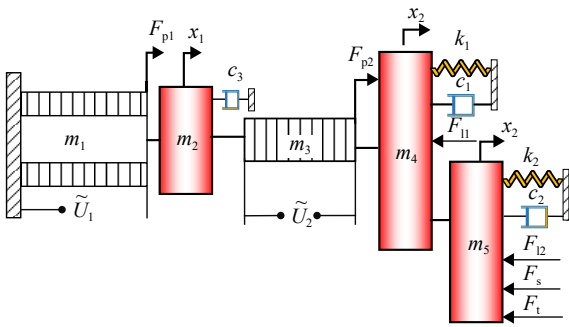


图 4 高速开关阀受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of force on high-speed on-off valve

高速开关阀的动力学方程可以表示为

$$\begin{cases} F_{p1} - F_{p2} = \left(\frac{1}{3}m_1 + m_2\right) \ddot{x}_1 + c_3 \dot{x}_2 \\ F_{p2} - F_s - F_t - F_{11} - F_{12} = \left(\frac{1}{3}m_3 + m_4 + m_5\right) \ddot{x}_2 + \\ (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_{p1} 为环形压电叠堆输出力, F_{p2} 为方形压电叠堆输出力, F_s 为阀芯受到的稳态液动力, F_t 为阀芯受到的瞬态液动力, F_{11} 为预紧碟簧预紧力, F_{12} 为复位碟簧预紧力, m_1 为环形压电叠堆质量, m_2 为套筒质量, m_3 为方形压电叠堆质量, m_4 是输出杆质量, m_5 是阀芯质量, k_1 为预紧碟簧刚度, k_2 为复位碟簧刚度, c_1 为输出杆的阻尼系数, c_2 为阀

芯的阻尼系数, c_3 为套筒的阻尼系数。

阀芯受到的稳态液动力为

$$F_s = 2C_v C_d \pi D x_2 (p_s - p_t) \cos \theta \quad (5)$$

式中 C_v 为速度系数, θ 为射流角。

阀芯受到的瞬态液动力为

$$F_t = C_d \pi D L \sqrt{2(p_s - p_t) \rho \dot{x}_2} \quad (6)$$

式中 L 为流体在阀腔内实际流程长度。

高速开关阀的阀芯位移难以测量, 可以通过测量执行器的位移间接反映高速开关阀阀芯的位移响应。采用电容位移传感器(哈尔滨芯明天 E09)实验测得 130 V 阶跃电压作用下执行器位移的动态响应曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 由于执行器没有安装阀芯、阀体, 系统阻尼较小, 执行器输出位移会产生超调, 阶跃打开时上升时间为 0.45 ms, 调整时间为 0.9 ms, 阶跃关闭时上升时间为 0.4 ms, 调整时间为 1.3 ms。由于位移传感器测量的是与初始位置的相对位移差值, 所以执行器阶关闭时的输出位移会出现负值。

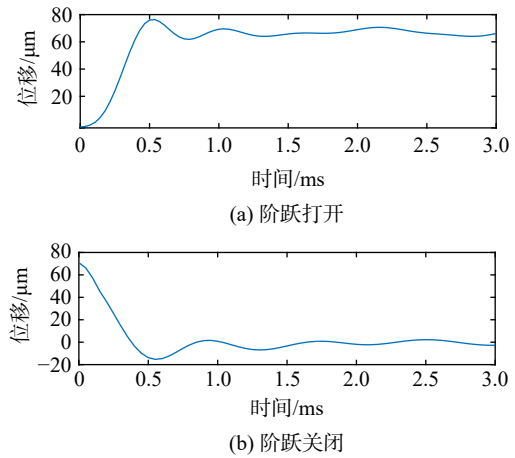


图 5 执行器输出位移的动态响应曲线

Fig. 5 Dynamic response curve of actuator output displacement

通过对实验数据进行辨识、数学计算得到阀芯动力学模型的主要参数如表 2 所示。

2.3 阀口流量模型

受限于零件加工精度的问题, 阀芯与阀体配合不可避免地存在径向间隙, 考虑到环形间隙泄漏与节流边圆角的滑阀结构示意图如图 6 所示。

当滑阀有效开度 $x > 0$ 时, 滑阀的有效通流面积可以表示为

$$A = \pi \left(d_s + \frac{d_c}{2} \right) \left(\sqrt{x^2 + \left(\frac{d_c}{2} + 2r_c \right)^2} - 2r_c \right) \quad (7)$$

表 2 阀芯动力学模型主要参数

Table 2 Parameters of the dynamics model

参数	数值
预紧碟簧刚度 k_1 /(N/mm)	950
预紧碟簧预紧力 F_{11} /N	300
复位碟簧刚度 k_2 /(N/mm)	350
复位碟簧预紧力 F_{12} /N	100
环型压电叠堆质量 m_1 /kg	0.04
套筒质量 m_2 /kg	0.025
方形压电叠堆质量 m_3 /kg	0.015
输出杆质量 m_4 /kg	0.02
阀芯质量 m_5 /kg	0.02
输出杆阻尼系数 c_1 /(N·s/m)	900
阀芯阻尼系数 c_2 /(N·s/m)	1 500
套筒阻尼系数 c_3 /(N·s/m)	1 200

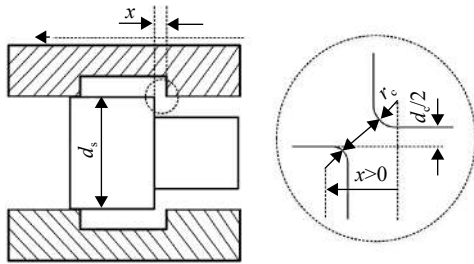


图 6 滑阀结构示意图

Fig. 6 Schematic of a spool valve

式中 A 为通流面积, x 为滑阀的有效开度, 其值等于 $x_2 - x_0$, x_2 为阀芯位移, x_0 为阀关闭时阀芯的遮盖量, r_c 为滑阀节流边处圆角半径, d_c 为滑阀径向间隙, d_s 为滑阀直径。

当滑阀有效开度 $x > 0$ 时, 滑阀的流量连续性方程为

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2(p_s - p_t)}{\rho}} \quad (8)$$

式中 Q 为通过阀口的流量, C_d 为阀口的流量系数, p_s 为进油口压力, p_t 回油口压力, ρ 为油液密度。

滑阀有效开度 $x < 0$ 时, 流体的流动可以看成环形间隙流动, 其流量连续性方程为

$$Q = \frac{\pi(p_s - p_t) d_s \left(\frac{d_c}{2}\right)^3 \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2\right)}{12\mu|x|} \quad (9)$$

式中 μ 为油液动力黏度, ε 为相对偏心量。

通过流场仿真与对实验数据进行辨识, 得到阀口流量模型的主要参数如表 3 所示。

表 3 阀口流量模型主要参数

Table 3 Main parameters of the valve port flow model

参数	数值
阀芯直径 d_s /mm	10
径向间隙 d_c /mm	0.012
节流边圆角 r_c /mm	0
遮盖量 x_0 /mm	0.03
相对偏心量 ε	1
流量系数 C_d	0.56
油液密度 ρ /(kg/m ³)	870
油液运动黏度 μ /(mm ² /s)	10

3 仿真分析

3.1 开关阀性能仿真

在 MATLAB/Simulink 中建立高速开关阀的仿真模型, 取 PWM 驱动电压频率 $f=200$ Hz, 占空比 $\rho=0.5$, 仿真得到一周期内 130 V 电压激励下高速开关阀的动态响应曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 高速开关阀在 4 MPa 供油压力下阀芯开启时的流量为 3.75 L/min, 完全开启时间为 0.5 ms, 阀芯关闭时泄漏量为 0.5 L/min, 完全关闭时间为 0.55 ms, 响应迅速, 后期可以通过提高加工质量, 减小阀芯与阀体的径向间隙, 以减小阀芯关闭时的泄漏量。

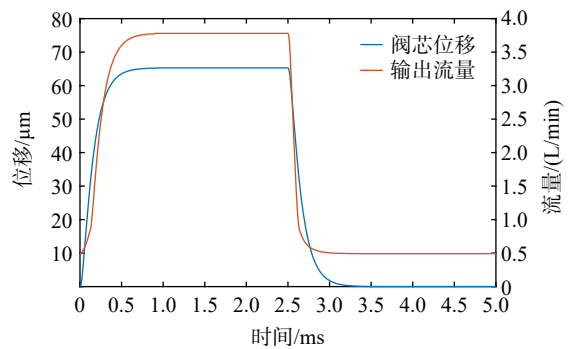


图 7 高速开关阀动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic response curves of high-speed on-off valve

3.2 关键参数分析

理想的高速开关阀应该具有较大流量和较小泄漏量, 而高速开关阀打开时的流量和高速开关阀关闭时的泄漏量均与阀芯直径、径向间隙和遮盖量有关, 阀打开时的流量和阀关闭时的泄漏量相互耦合。为了便于分析, 本文以阀打开时的流量和阀关闭时的泄漏量的差值作为评价指标, 该指标反映的是高速开关阀的有效控制流量。

3.2.1 阀芯直径

为了分析阀芯直径对高速开关阀的影响,在其他参数不变的前提下,改变阀芯直径,得到 4 MPa 供油压力下不同阀芯直径时高速开关阀的流量曲线如图 8 所示。

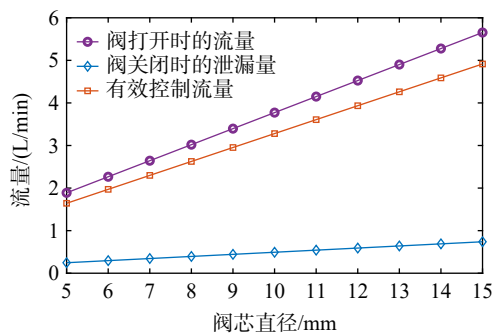


图 8 不同阀芯直径下流量曲线

Fig. 8 Flow curves under different sliding valve diameters

从图中可以看出,随着阀芯直径的增大,阀打开时的流量和阀关闭时的泄漏量均增大,由于阀芯与阀体之间存在径向间隙,泄漏难以避免,而有效控制流量则体现了高速开关阀打开、关闭状态对其输出流量的影响,反映了阀本身的控制特性,从图中可以看出其有效控制流量与阀芯直径成线性关系,由于高速开关阀开、关过程中产生的液动力相较于压电执行器的输出力不在一个数量级,因此流量增大导致液动力的增大对高速开关阀的动态响应时间影响很小,可以根据实际的流量使用需要选择合适的阀芯直径。

3.2.2 径向间隙

理想滑阀的径向间隙为零,但是由于加工质量的问题,径向间隙难以避免。在其他参数不变的前提下,改变径向间隙,得到不同径向间隙时高速开关阀的流量曲线如图 9 所示。从图中可以看出,径向间隙对阀打开时的流量影响很小,对

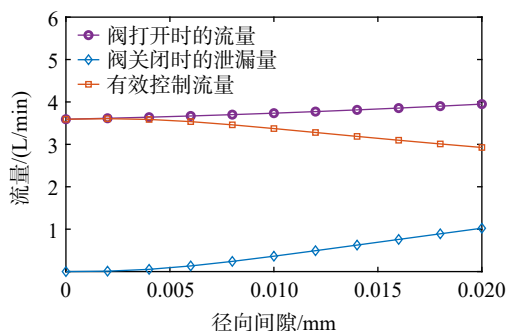


图 9 不同径向间隙下流量曲线

Fig. 9 Flow curves under different radial clearance

阀关闭时的泄漏量影响很大。因为阀完全打开时,其流动是节流边节流,其输出流量仅与通流面积有关,而阀关闭时流体流动是环形间隙流动,泄漏量和阀芯与阀体的径向间隙成三次方关系。因此在阀加工时,应该使得阀芯与阀体之间的径向间隙处于 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 之内,以减小泄漏量,提高高速开关阀的有效控制流量。

3.2.3 遮盖量

当高速开关阀零部件加工完成后,阀芯直径和径向间隙也就随之确定,遮盖量的大小需要装配时进行调整。改变遮盖量的大小,得到不同遮盖量时高速开关阀的流量曲线如图 10 所示。

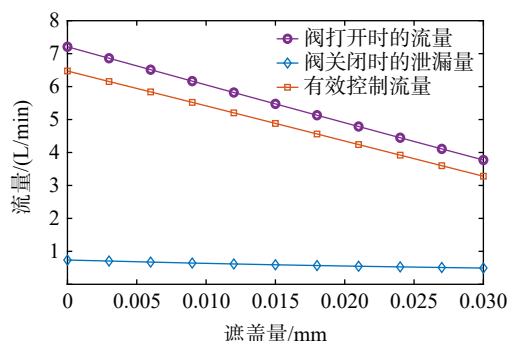


图 10 不同遮盖量下流量曲线

Fig. 10 Flow curves under different amounts of coverage

从图 10 中可以看出,遮盖量的大小对阀打开时的流量和阀关闭时的泄漏量均有很大的影响,相较于泄漏量,阀打开时的流量对遮盖量的大小更加敏感。实际装配过程中,应该根据所能接受的泄漏量大小和所需的有效控制流量,通过调节调零螺钉选择合理的遮盖量。

4 实验研究

4.1 实验测试系统搭建

设计高速开关阀实验测试系统如图 11 所示,实验系统主要由信号发生器(北京普源 DG1022)、示波器(南京恒经通 GDS-1104B)、功率放大器(美国 AETechron 7224)、压力传感器(昆山双桥 CYG1401F)、流量传感器(上海颀科 SFG20-8L)、加速度传感器(江苏联能 CA-YD-185)、声级计(杭州爱华 AWA5661)组成。压力传感器接在高速开关阀进油口,高速开关阀的回油口接油箱,通过调节信号发生器的输出信号,测量高速开关阀在不同供油压力下的输出流量。为了评估阀芯冲击引发的振动,将加速度传感器安装在高速开关阀油路块上,测量方向与阀芯运动方向一致,

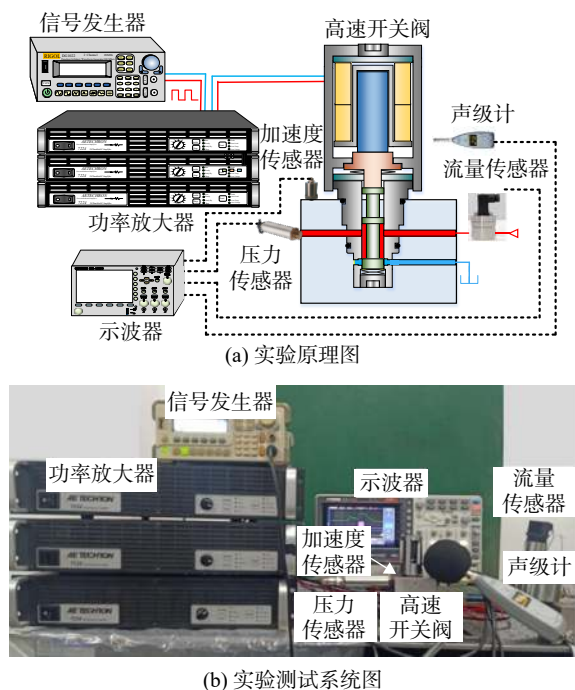


图 11 高速开关阀实验测试系统

Fig. 11 High-speed on-off valve experimental test system

并通过声级计实时测量高速开关阀的工作噪声。

4.2 静、动态特性测试

高速开关阀的压力-流量特性是其重要的指标, 改变供油压力测得高速开关阀打开时的流量和关闭时的泄漏量实验与仿真的对比结果如图 12 所示。

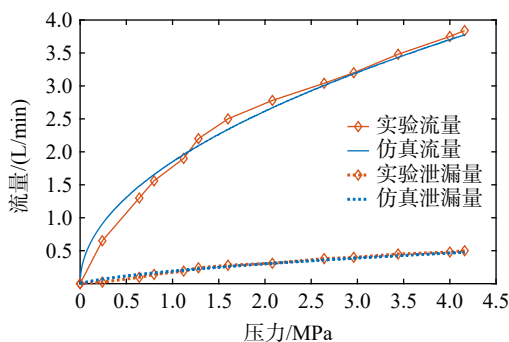


图 12 压力-流量特性曲线

Fig. 12 Pressure-flow characteristic curve

从图 12 中可以看出随着压力的增大, 阀打开时的流量与阀关闭时的泄漏量都随之增大, 阀打开时的流量与供油压力成两次方关系, 阀关闭时的泄漏量与供油压力成线性关系, 实验结果与仿真结果基本一致。当供油压力为 4 MPa 时, 阀打开时的流量达到了 3.8 L/min, 由于阀芯加工质量较差, 阀芯与阀体之间的配合存在径向间隙, 导致阀关闭时的泄漏量为 0.48 L/min, 后期可以通过

提高阀芯与阀体的加工质量, 减小阀芯与阀体之间的径向间隙, 来减小泄漏量。

遮盖量的大小需要实际装配过程中根据阀芯的加工质量和流量需求进行调整, 改变遮盖量的大小, 实验测得不同遮盖量下高速开关阀的压力-流量特性曲线如图 13 所示。

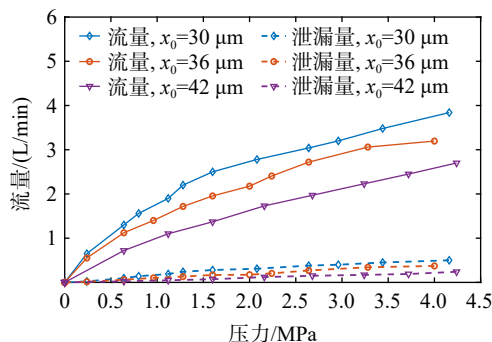


图 13 不同遮盖量下的压力-流量特性曲线

Fig. 13 Pressure-flow characteristic curves for different amounts of coverage

从图 13 中可以看出随着遮盖量的增大, 泄漏量随之减小, 流量也随之减小。4 MPa 供油压力下高速开关阀的遮盖量从 30 μm 增大至 42 μm 时, 流量从 3.8 L/min 减小至 2.7 L/min, 泄漏量从 0.48 L/min 减小至 0.24 L/min。遮盖量的大小对阀打开时的流量和阀关闭时的泄漏量均有很大的影响, 实际加工、装配过程中, 应提高阀芯、阀体的加工质量, 选择合理的遮盖量以保证高速开关阀的压力-流量特性满足要求。

高速开关阀作为数字液压系统中的核心控制元件, 通过调解 PWM 信号的占空比来控制其平均输出流量, 在 4 MPa 供油压力、200 Hz 的 PWM 驱动频率下, 高速开关阀的平均输出流量与占空比关系曲线如图 14 所示。从图中可以看出, 高速开关阀在 200 Hz 的 PWM 驱动频率下, 当占空比为 0 时, 平均输出流量等于阀关闭时的泄漏量, 平均输出流量与占空比关系曲线没有死区和饱和区, 线性区范围是 0.07~0.94。无死区和饱和区的原因主要是由于高速开关阀的阀芯位移响应无死区时间, 当占空比过小或者过大, 高速开关阀虽不能完全开启或关闭, 但是阀芯的有效开度会发生改变, 导致其平均输出流量也会发生变化。

在高速开关阀实际工作过程中, 难以测量其阀芯位移的动态响应时间, 可以通过测量进口口的压力响应来近似反映阀芯的位移响应^[21], 实验得到 4 MPa 工作压力下高速开关阀的压力响应曲

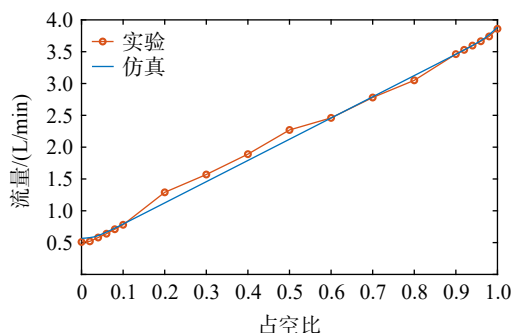


图 14 平均输出流量-占空比关系特性曲线

Fig. 14 Average output flow-duty ratio characteristic curves

线如图 15 所示。通过高速开关阀的压力响应曲线可以看出 4 MPa 供油压力下, 高速开关阀的开启压力响应时间为 0.6 ms, 关闭压力响应时间为 0.65 ms。

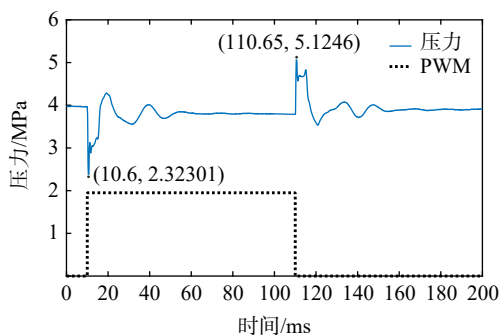


图 15 高速开关阀的压力响应曲线

Fig. 15 Pressure response curve of high speed on-off valve

4.3 振动、噪声测试

为了验证本文提出的滑阀式压电高速开关阀相比于传统的球阀或锥阀结构, 在减小阀芯冲击方面的有效性, 使用一个与本文使用的滑阀式阀芯直径相同的锥阀阀芯进行对比实验, 得到 4 MPa 供油压力下使用滑阀与锥阀阀芯的高速开关阀在关闭过程中阀块的振动加速度对比如图 16 所示。

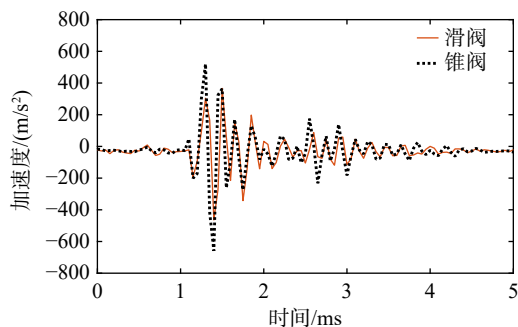


图 16 阀块振动加速度对比

Fig. 16 Comparison of vibration acceleration of valve block

通过对比 4 MPa 供油压力下采用滑阀和锥阀的高速开关阀阀块振动加速度可以看出, 采用了滑阀结构的高速开关阀相较于传统锥阀结构, 关闭时阀块振动加速度从 660 m/s^2 降低到 443 m/s^2 , 减小了 32.8%, 验证了滑阀结构的高速开关阀在减小阀芯冲击方面的优点。

为了对比不同阀芯结构在降噪方面的效果, 采用声级计对高速开关阀工作过程中的噪声进行实测, 得到两种阀芯结构的高速开关阀在 4 MPa 供油压力、不同 PWM 频率下噪声测试结果对比如图 17 所示。通过不同 PWM 频率下噪声结果可以看出, 高速开关阀的噪声随着 PWM 频率的增大而增大, 300 Hz 工作频率下滑阀式高速开关阀的噪声为 64 dB, 相较于锥阀式高速开关阀的 70.5 dB, 降低了 9.2%。

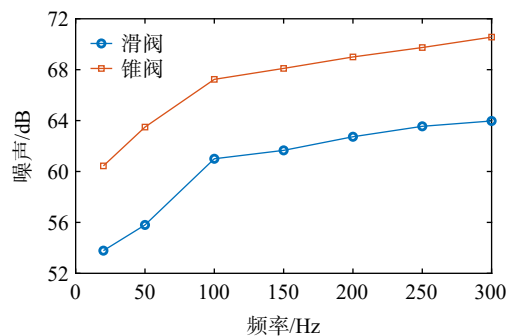


图 17 不同 PWM 频率下噪声对比

Fig. 17 Comparison of noise at different PWM frequencies

5 结 论

1) 在 4 MPa 供油压力下, 滑阀式压电高速开关阀打开时的流量为 3.8 L/min, 其开启时间约为 0.6 ms, 由于加工质量较差, 存在径向间隙, 阀芯关闭时的泄漏量为 0.48 L/min, 关闭时间约为 0.65 ms, 后期可以通过提高加工质量, 以减小阀芯关闭时的泄漏量。

2) 200 Hz 驱动频率下, 滑阀式压电高速开关阀的平均输出流量与 PWM 信号占空比关系曲线的线性段范围为 7%~94%, 无死区和饱和区, 通过调节占空比的大小可以有效调节滑阀式压电高速开关阀的平均输出流量。

3) 相较于传统的锥阀式阀芯, 滑阀式压电高速开关阀关闭过程中的阀块振动加速度降低了 42.7%, 300 Hz 工作频率下噪声从 70.5 dB 降至 64 dB, 说明采用滑阀式阀芯结构可以较大程度地减小高速开关阀的阀芯冲击现象。

参考文献:

- [1] 姚华, 王国祥. 航空发动机全权限数控系统研究和试飞验证[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(2): 247-253.
YAO Hua, WANG Guoxiang. A study and flight evaluation of full authority digital engine control system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(2): 247-253. (in Chinese)
- [2] 李吉. X6 发动机燃油调节器建模与仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006. (in Chinese)
LI Ji. Modeling and simulation of X6 engine fuel regulator[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [3] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 修订版. 北京: 航空工业出版社, 2009.
SUN Jianguo. Control of modern aviation power plant[M]. Revised ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [4] WU Shuai, ZHAO Xiangyu, LI Chunfang, et al. Multiobjective optimization of a hollow plunger type solenoid for high speed on/off valve[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3115-3124.
- [5] 司国雷, 陆亮, 陈君辉, 等. 航空发动机燃油调节器技术发展综述[J]. *液压与气动*, 2022, 46(5): 167-174.
SI Guolei, LU Liang, CHEN Junhui, et al. Review of aero-engine fuel regulator technology development[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(5): 167-174. (in Chinese)
- [6] 王秋霞, 樊丁, 彭凯. AMESim 仿真技术在高速电磁阀中的应用[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(3): 702-707.
WANG Qiuxia, FAN Ding, PENG Kai. High speed solenoid valve with the application of AMESim[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 702-707. (in Chinese)
- [7] JIAO Zongxia, LIU Xiaochao, SHANG Yaoxing, et al. An integrated self-energized brake system for aircrafts based on a switching valve control[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 60: 20-30.
- [8] LIU Hui, GU Hongbin, CHEN Dawei. Application of high-speed solenoid valve to the semi-active control of landing gear[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(3): 232-240.
- [9] 钟麒, 何贤剑, 李研彪, 等. 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6): 224-235.
ZHONG Qi, HE Xianjian, LI Yanbiao, et al. Research on control algorithm for high-speed on/off valves that adaptive to supply pressure changes[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(6): 224-235. (in Chinese)
- [10] 罗樟, 朱玉川. 智能材料驱动的高速开关阀[J]. *压电与声光*, 2019, 41(4): 575-581.
LUO Zhang, ZHU Yuchuan. High speed on-off valve driven by smart material[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(4): 575-581. (in Chinese)
- [11] YOKOTA S, AKUTU K. A fast-acting electro-hydraulic digital transducer: a poppet-type on-off valve using a multilayered piezoelectric device[J]. *JSME International Journal Ser 2, Fluids Engineering, Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties*, 1991, 34(4): 489-495.
- [12] 欧阳小平, 杨华勇, 蒋昊宜, 等. 新型压电高速开关阀仿真研究[J]. *科学通报*, 2008, 53(14): 1737-1741.
OUYANG Xiaoping, YANG Huayong, JIANG Haoyi, et al. Simulation study on new piezoelectric high-speed on-off valve[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(14): 1737-1741. (in Chinese)
- [13] NALBACH S, MOTZKI P, SEELECKE S. SMA-based hydraulic switching valve[C]// Integrated System Design and Implementation; Structural Health Monitoring; Bioinspired Smart Materials and Systems; Energy Harvesting. Colorado Springs, US: American Society of Mechanical Engineers, 2015: 8901-8909.
- [14] 俞军涛, 焦宗夏, 吴帅. 大流量压电式高速开关阀设计与仿真测试[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 226-234.
YU Juntao, JIAO Zongxia, WU Shuai. Design, simulation and test of high-flow high-speed on/off valve driven by piezoelectric[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 226-234. (in Chinese)
- [15] CHEN Xiaoming, ZHU Yuchuan, LUO Zhang, et al. Characteristic investigation of a magnetostrictive fast switching valve for digital hydraulic converter[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part I Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235(2): 190-206.
- [16] 江海兵. 大流量高速开关阀关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
JIANG Haibing. Research on the key technologies of large flow high-speed on-off valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 江海兵, 阮健. 大流量高速开关阀阀芯挤压油膜缓冲技术研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(16): 1933-1937.
JIANG Haibing, RUAN Jian. Study on spool squeeze film damper of a larger flow rate high-speed on/off valve[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(16): 1933-1937. (in Chinese)
- [18] 刘金榕. 基于高速电磁阀的变气门执行系统关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
LIU Jinrong. Key technologies for engine variable valve actuator system based on high-speed electro-hydraulic valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [19] WINKLER B, PLOECKINGER A, SCHEIDL R. A novel piloted fast switching multi poppet valve[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2010, 11(3): 7-14.
- [20] 江裕雷, 朱玉川, 陈龙, 等. 径向双压电叠堆执行器建模与实验研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(1): 45-50.
JIANG Yulei, ZHU Yuchuan, CHEN Long, et al. Modeling and experimental study on radial dual-piezoelectric stack actuator[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(1): 45-50. (in Chinese)
- [21] 陈晓明, 朱玉川, 吴昌文, 等. 数字开关液压系统管路压力波传播建模与分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(7): 1335-1344.
CHEN Xiaoming, ZHU Yuchuan, WU Changwen, et al. Modeling and analysis of pressure wave propagation inside pipeline of digital switched hydraulic system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(7): 1335-1344. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)