

2D 电液高速开关阀设计与实验^{*}

江海兵^{1,2} 阮健¹ 李胜¹ 左希庆¹ 陈莹¹

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014

2. 衢州学院机械工程学院, 衢州 324000)

摘要: 2D 电液高速开关阀是采用具有双运动自由度阀芯的两级高速开关阀, 该阀利用旋转电磁铁和拨杆拨叉机构驱动阀芯作旋转运动, 实现导阀功能, 由油液压力差推动阀芯作轴向移动, 实现阀口的高速开启与关闭。为提高阀的动态特性, 旋转电磁铁转子设计成 3 个 52° 叶片环形均布结构形式, 拨杆拨叉对旋转电磁铁的输出转矩放大 5 倍。为测试 2D 高速开关阀的动态特性, 设计了双摆轮和旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀两种实验方案。在建立数学模型和制作样机的基础上, 对其动态特性进行了数字仿真和实验研究, 仿真与实验研究结果吻合, 2D 高速开关阀的液压伺服螺旋机构具有很高的频响, 当用旋转电磁铁驱动时, 在 28 MPa 工作压力下, 阀芯轴向行程为 0.8 mm, 开启时间约为 18 ms, 6 mm 通径阀流量高达 60 L/min。

关键词: 旋转电磁铁 高速开关阀 拨杆拨叉 动态特性

中图分类号: TH137.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0328-07

Design and Experiment of 2D Electrohydraulic High-speed On-off Valve

Jiang Haibing^{1,2} Ruan Jian¹ Li Sheng¹ Zuo Xiqing¹ Chen Ying¹

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: 2D electrohydraulic high-speed on-off valve was a two-stage valve, which had a spool with two dimensional motions, a rotary electromagnet drove the spool to rotate by a set of lever-fork and achieve pilot function, and pressure difference pushed the spool to open or close quickly. The form of three circumferential uniformly distributed 52° blades was adopted by the rotor of rotary electromagnet. The output torque of rotary electromagnet was multiplied by five times, the rotor inertia was reduced by lever-fork and the dynamic characteristics of 2D high-speed on-off valve were improved. To test the dynamic characteristics of 2D high-speed on-off valve driven by double torsion pendulum wheel and rotary electromagnet, two experimental programs of the valve were designed. The digital simulation and experimental results were quite coincide, which showed that the dynamic characteristics of 2D high-speed on-off valve were very quick; when the system pressure was 28 MPa and the valve of 6 mm diameter with spool driven by rotary electromagnet, the dynamic response time was about 18 ms, spool displacement was 0.8 mm and the flow rate was 60 L/min.

Key words: Rotary electromagnet High speed on-off valve Lever-fork Dynamic characteristic

引言

随着工业对高速开关阀的要求越来越高, 国内

外学者对电-机械转换器、阀芯阀体结构改进与创新设计、控制策略以及应用新型功能材料进行了研究^[1-5]。电-机械转换器作为高速开关阀的关键部

收稿日期: 2014-04-15 修回日期: 2014-09-02

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375445)、浙江省自然科学基金资助项目(LZ13E050002)、湖州市科技局基金资助项目(2013YZ10)、浙江省大学生科技创新活动计划资助项目(新苗人才计划)(2013R403080)

作者简介: 江海兵, 博士生, 衢州学院副教授, 主要从事电液直接数字控制研究, E-mail: dahai77@163.com

通讯作者: 阮健, 教授, 博士生导师, 主要从事流体控制元件及电液直接数字控制研究, E-mail: wxmin@mail.hz.zj.com

件,其功能是将输入电信号转换为输出力或力矩以驱动阀芯作相应的滑动或转动,要求其在保证一定输出力或力矩的同时,具有较高的动态响应,但现有的电-机械转换器结构复杂、加工困难、价格昂贵^[6-10]。新型材料如压电陶瓷、磁致伸缩、磁流变体等具有很高的响应速度和输出力,但行程小,不能满足大流量阀的要求^[11-12]。在阀结构方面,新型结构有双节流口并联输出流量的高速开关阀、内外阀结构的二位三通阀和二位三通式锥阀等^[13-20]。本文进行 2D 电液高速开关阀的方案设计,通过数学建模、仿真分析和样机实验对其动态特性进行研究。

1 2D 电液高速开关阀

1.1 2D 电液高速开关阀的工作原理

2D 电液高速开关阀如图 1 所示,由旋转电磁铁、拨杆拨叉机构、2D 高速开关阀组成。工作原理:旋转电磁铁在电信号作用下,输出力矩和角位移,通过拨杆拨叉机构驱动 2D 高速开关阀阀芯旋转,伺服螺旋机构通过液压力把阀芯转角呈比例转换为阀芯轴向位移,旋转电磁铁断电时,复位弹簧推动拨杆拨叉转动,驱动阀芯复位,以上过程就实现了阀芯的高速开启与关闭。

1.2 2D 高速开关阀工作原理

2D 高速开关阀工作原理如图 2 所示,其主要由阀体、阀芯、弹簧、弹簧座和右端盖组成。阀芯左端面与阀体之间形成敏感腔,压力为 p_c , 阀芯右端凸肩与阀体之间形成压力腔,压力腔与进油口直接相通,压力为 p_s , 阀芯敏感腔的作用面积为压力腔作用面积的 2 倍,当敏感腔的压力为压力腔的 1/2 时,阀芯轴向受力恰好平衡,阀芯稳定不动。阀体中孔左端内壁上对称设置一对螺旋槽(螺旋升角为 β), 阀芯左凸肩上对称地设有一对高压孔和一对低压孔,高压孔通过高压通道与压力腔连通,低压孔通过低压

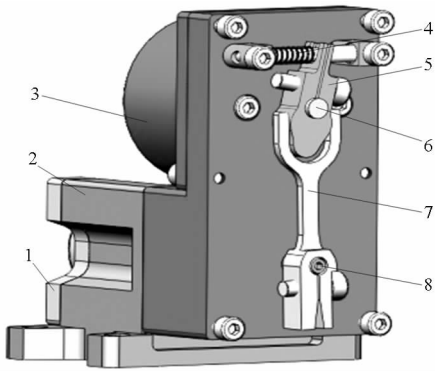


图 1 2D 电液高速开关阀

Fig. 1 2D electrohydraulic high-speed on-off valve

1.端盖 2.阀体 3.旋转电磁铁 4.复位弹簧 5.拨杆 6.转叉子轴 7.拨叉 8.阀芯

通道与回油腔相通,且高压孔与低压孔分别位于螺旋槽两侧,并与螺旋槽形成弓形重叠,2 个弓形重叠相当于 2 个液阻,它们在压力腔与回油腔之间形成如图 3 所示的液阻联动的液压阻力半桥,控制阀芯敏感腔的压力。如图 2 所示,当阀芯以顺时针方向旋转时(从阀芯右侧观察),低压孔与螺旋槽重叠面积增大,高压孔与螺旋槽重叠面积减小,此时敏感腔压力 p_c 降低,阀芯受到压力腔的作用力大于敏感腔的作用力,阀芯向左移,阀芯向左移动过程中,高压孔与螺旋槽的重叠面积逐渐增大,低压孔与螺旋槽的重叠面积逐渐缩小,当高、低压孔与螺旋槽的重叠面积相等时,敏感腔的油压力再次升至压力腔压力的 1/2,阀芯受力重新达到平衡状态;反之,当阀芯逆时针方向旋转时,以上变化过程恰好相反,因此,2D 电液高速开关阀是阀芯具有双运动自由度的 2 级高速开关阀,阀芯角位移与轴向位移之间存在着线性关系,该阀利用旋转电磁铁和拨杆拨叉机构驱动阀芯作旋转运动,实现导阀功能,由油液压力差推动阀芯轴向移动,实现阀口的高速开启与关闭。

图 2 所示的 2D 高速开关阀的压力口 P 与控制

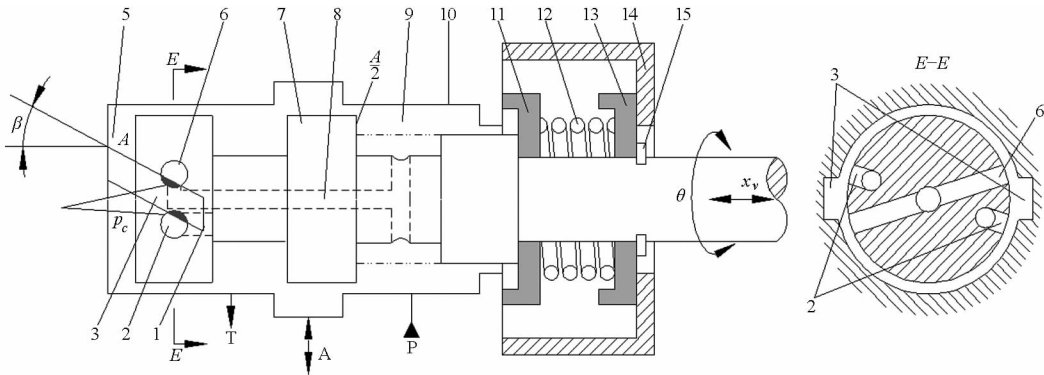


图 2 2D 高速开关阀的工作原理图

Fig. 2 Schematic of 2D high-speed on-off valve

1.低压通道 2.低压孔 3.螺旋槽 4.弓形重叠 5.敏感腔 6.高压孔 7.阀芯 8.高压通道 9.压力腔 10.阀体 11.左弹簧座 12.弹簧 13.右弹簧座 14.右端盖 15.卡圈

口 A 处于关闭状态,A 口与回油口 T 连通,高速开关阀为常闭状态,如将左右弹簧座的安装方向旋转 180°时,阀芯初始位置左移,此时 P 口与 A 口连通,A 口与 T 口断开,高速开关阀为常开状态,该设计方案实现了同一高速开关阀的常开与常闭状态的转换,方案简单,切换方便。

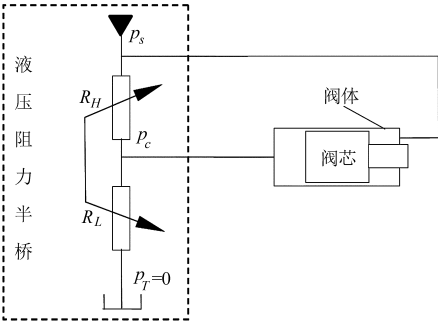


图 3 伺服螺旋机构液压阻力半桥

Fig.3 Hydraulic half bridge of servo spiral mechanism

1.3 旋转电磁铁的工作原理

旋转电磁铁如图 4 和图 5 所示,由左定子、右定子、转子和线圈保持架等组成。其工作原理为:线圈内通环形电流,产生通过左定子、转子、右定子和壳体的闭合磁场,磁力线如图 5 所示,磁力线的收缩特性使得定子对转子产生电磁转矩,驱动转子旋转到转子叶片与左右定子叶片对齐的位置。为提高转子动态特性,减小其转动惯量,转子做成 3 个 52°叶片均布的结构形式,为限制转子最大转角,利用线圈保持架的内置挡块加以限制;定、转子采用了不锈钢软磁合金 1J117 材料,精加工后真空退火处理,以提高旋转电磁铁工作气隙的磁通密度,增大输出转矩。

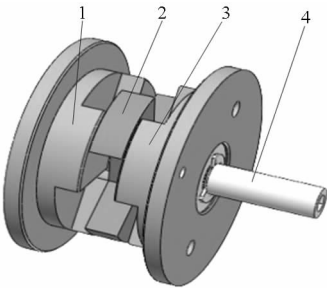


图 4 旋转电磁铁内部结构

Fig.4 Structure of rotary electromagnet

1. 左定子 2. 转子 3. 右定子 4. 转子轴

1.4 拨杆拨叉机构

拨杆拨叉机构(图 1),旋转电磁铁转子轴与拨杆固连,拨叉与阀芯固连,拨杆拨叉之间为线接触,可有效减小拨杆和拨叉之间摩擦力。当旋转电磁铁转子转动时,带动拨杆拨叉驱动阀芯转动,复位弹簧对阀芯进行复位。拨杆拨叉机构主要对旋转电磁铁的输出扭矩进行放大,使阀芯获得较大驱动力矩,克服阀芯阀体之间的摩擦力矩。为提高 2D 电液高速

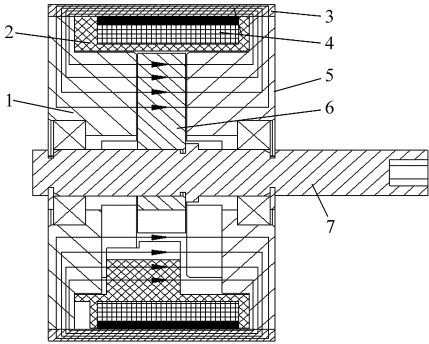


图 5 旋转电磁铁剖面图

Fig.5 Axial section view of rotary electromagnet

1. 左定子 2. 线圈保持架 3. 壳体 4. 线圈 5. 右定子 6. 转子 7. 转子轴

开关阀工作的稳定性,对拨杆和拨叉的重心进行了特别设计,拨杆重心与旋转电磁铁转子轴线重合,拨叉重心与阀芯轴线重合。

2 2D 电液高速开关阀数学模型

2.1 旋转电磁铁绕组电压平衡方程

旋转电磁铁工作原理如图 6 所示,绕组的电压平衡方程为

$$u = R_L i + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{d\theta_e}{dt}$$
 (1)

式中 u ——旋转电磁铁绕组的输入电压
 R_L ——绕组电阻 L ——绕组电感
 k_e ——绕组反电动势系数
 θ_e ——旋转电磁铁转子转角
 i ——绕组电流

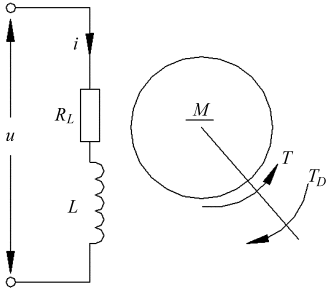


图 6 旋转电磁铁原理图

Fig.6 Schematic of rotary electromagnet

2.2 旋转电磁铁输出力矩方程

旋转电磁铁力矩方程为

$$T = k_t i$$
 (2)

式中 T ——旋转电磁铁驱动力矩
 k_t ——转矩系数

2.3 旋转电磁铁转矩方程

旋转电磁铁转子的运动方程为

$$T = J_r \frac{d^2 \theta_e}{dt^2} + B_e \frac{d\theta_e}{dt} + K_L \theta_e + T_D$$
 (3)

式中 J_r ——折算到转子上的转动惯量
 B_e ——转子阻尼系数 K_L ——弹性刚度
 T_D ——折算到转子上的负载转矩

2.4 拨杆拨叉传动方程

拨杆拨叉的传动比

$$K = \frac{\theta_c}{\theta} = 5 \tag{4}$$

式中 K ——拨杆拨叉的传动比
 θ ——拨叉转角(即阀芯转角)

2.5 2D 高速开关阀数学模型

根据流量连续性原理,敏感腔的流量方程为

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dx_v}{dt} + \frac{V_1 dp_c}{\beta_e dt} \tag{5}$$

其中 $V_1 = (L_v + x_v)AV_1 = (L_v + x_v)A$

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2(p_s - p_c)}{\rho}} \tag{6}$$

$$A_1 = \begin{cases} 0 & (h_1 \leq 0) \\ h_1 \sqrt{2r_d h_1 - h_1^2} + r_d^2 \arcsin \frac{\sqrt{2r_d h_1 - h_1^2}}{r_d} - r_d \sqrt{2r_d h_1 - h_1^2} & (0 < h_1 \leq r_d) \\ \pi r_d^2 + h_1 \sqrt{2r_d h_1 - h_1^2} - r_d^2 \arcsin \frac{\sqrt{2r_d h_1 - h_1^2}}{r_d} - r_d \sqrt{2r_d h_1 - h_1^2} & (r_d < h_1 \leq 2r_d) \\ \pi r_d^2 & (2r_d < h_1 \leq b) \end{cases} \tag{8}$$

式中 r_d ——高、低压小孔的半径
 h_1 ——高压孔和伺服螺旋槽重叠圆弧弓高
高压孔和伺服螺旋槽重叠圆弧的弓高为

$$h_1 = h_{10} + R\theta \sin \beta - x_v \cos \beta \tag{9}$$

式中 R ——阀芯半径 β ——螺旋槽升角
 θ ——阀芯转角位移
 h_{10} ——高、低压孔和伺服螺旋槽重叠圆弧的初始弓高

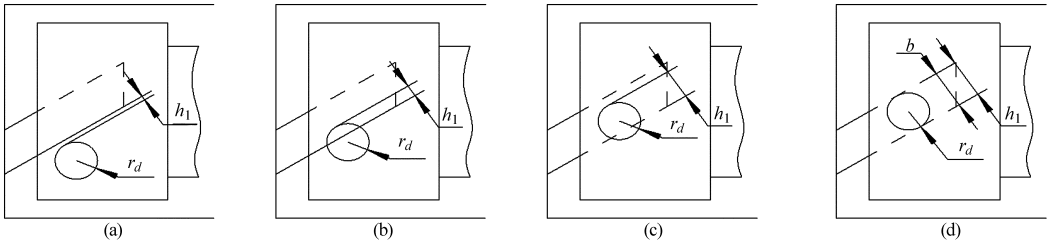


图 7 高低压小孔与螺旋槽相对位置

Fig. 7 Relative position between high and low pressure holes and spiral groove

(a) $h_1 \leq 0$ (b) $0 < h_1 \leq r_d$ (c) $r_d < h_1 \leq 2r_d$ (d) $2r_d < h_1 \leq b$

3 数学建模与仿真

3.1 仿真模型

式(1)~(10)构成了 2D 电液高速开关阀的数学模型,在对高、低压孔的流量进行线性化基础上,建立 2D 电液高速开关阀的数学模型如图 8 所示。

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2p_c}{\rho}} \tag{7}$$

式中 x_v ——阀芯轴向位移
 Q_1 ——流入敏感腔的流量
 Q_2 ——敏感腔流出的流量
 A_1 ——高压孔和伺服螺旋槽重叠面积
 A_2 ——低压孔和伺服螺旋槽重叠面积
 A ——敏感腔作用面积
 C_d ——阀口流量系数
 p_s ——工作压力 ρ ——油液密度
 p_c ——敏感腔压力
 V_1 ——敏感腔的体积
 L_v ——敏感腔死容积长度
 β_e ——油液体积弹性模量

高压孔与螺旋槽的重叠面积 A_1 根据图 7 得出,可以表示为

同理,可以计算得到低压孔与螺旋槽的重叠面积 A_2 和重叠弓高 h_2 。

阀芯运动方程为

$$A(p_c - p_s/2) = m_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B \frac{dx_v}{dt} + K_v x_v + F_L \tag{10}$$

式中 m_v ——折算到阀芯上的质量
 B ——阀芯阻尼系数 K_v ——阀芯弹簧刚度
 F_L ——阀芯负载

图中 $K_1 = 4C_d \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \sqrt{2h_{10}r_d - h_{10}^2}$

$$K_2 = 2C_d \left[r_d^2 \arcsin \frac{\sqrt{2r_d h_{10} - h_{10}^2}}{r_d} - (r_d - h_{10}) \cdot \sqrt{2r_d h_{10} - h_{10}^2} \right] \frac{1}{\sqrt{p_s \rho}}$$

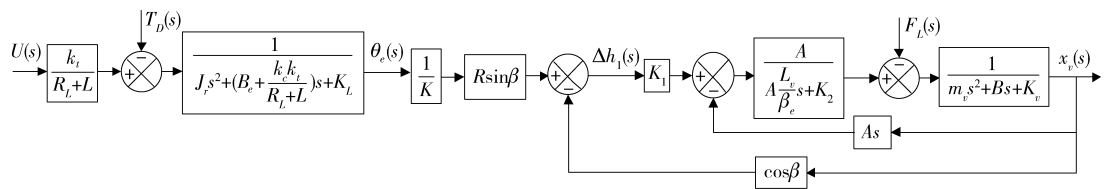


图 8 2D 电液高速开关阀数学模型

Fig. 8 Mathematical model of 2D electrohydraulic high-speed on-off valve

2D 电液高速开关阀的结构参数如表 1 所示。

表 1 结构参数

Tab.1 Structural parameters

参数	数值
转动惯量 $J_r/(g \cdot \text{cm}^2)$	440
电磁铁扭矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.02
阀芯半径 R/mm	3
螺旋槽升角 $\beta/(\circ)$	72
敏感腔作用面积 A/mm^2	28.3
阀芯质量 m_v/g	7
工作压力 p_s/MPa	28
阀芯最大行程 $x_{v\max}/\text{mm}$	0.8
高低压小孔半径 r_d/mm	1
小孔初始弓高 h_{10}/mm	0.1
油液密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	880
粘性阻尼系数 B	23.83
敏感腔死容积积度 L_v/mm	1
拨杆拨叉传动比 K	5

3.2 仿真结果

2D 电液高速开关阀动态特性很大程度上影响着液压系统的性能,为了掌握影响 2D 电液高速开关阀动态特性的主要因素,有针对性地进行 2D 高速开关阀的性能优化,分别对安装和不安装旋转电磁铁的 2D 高速开关阀进行了阶跃响应对比分析。在 Simulink 中建立仿真模型并进行仿真,仿真结果如图 9 所示,给 2D 高速开关阀阀芯施加一理想角位移阶跃信号(对应双摆轮驱动 2D 高速开关阀的实验)时,阀芯完全开启(轴向移动 0.8 mm)的上升时间约为 2 ms,响应速度非常快,表明采用液压伺服螺旋的 2D 高速开关阀本身频响很高;当使用旋转电磁铁驱动阀芯转动时,阀芯完全开启的阶跃响应上升时间为 17 ms;对比仿真结果可知:采用液压伺服螺旋机构工作的 2D 高速开关阀具有很高的响应速度,但因旋转电磁铁频响、输出力矩难以大幅提高,一定程度上影响了 2D 电液高速开关阀的动态特性,如能提高旋转电磁铁的频响和驱动能力,2D 电液高速开关阀的动态性能可进一步得以提高。

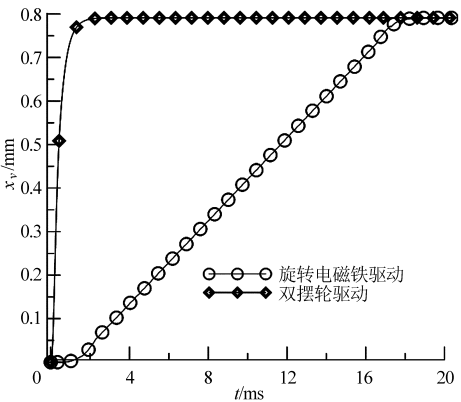


图 9 2D 电液高速开关阀仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of 2D electrohydraulic high-speed on-off valve

4 实验

4.1 实验原理

根据 2D 电液高速开关阀的仿真结果,设计了 2 种实验方案:方案 1 为双摆轮驱动 2D 高速开关阀的动态特性实验,方案 2 为旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀的动态特性实验。

(1) 双摆轮驱动 2D 高速开关阀实验原理

如图 10 所示,双摆轮结构由直流电机、主动轮、从动轮和凯夫拉线组成,其原理是凯夫拉线连接主动轮和从动轮,并穿过从动轮的径向孔和中心孔连接到 2D 高速开关阀的拨叉上,直流电动机转速最高可达 6 000 r/min,当直流电动机转子旋转时,主动轮通过凯夫拉线驱动从动轮转动,当从动轮上的凯夫拉线完全绕在主动轮上时,就高速拉动拨叉,对阀芯产生角位移阶跃信号,驱动阀芯迅速转动。本实验方案的优点是能对拨叉产生一个较理想的转角阶跃信号,能保证多次测试结果稳定,且凯夫拉线穿过从动轮中心孔,在拉动拨叉的过程中不会甩出而产生危险和绕紧;流量计用于测量 2D 高速开关阀控制口 A 的输出流量。图 11 为双摆轮驱动 2D 高速开关阀的实验照片,阀芯位移测试方法如图 12 所示。

(2) 旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀实验原理

图 12 为旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀的实验原理,旋转电磁铁绕组在阶跃电压信号的作用下,

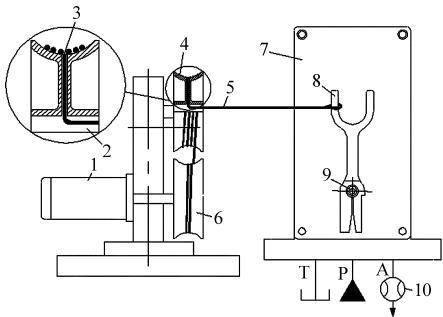


图 10 双摆轮驱动 2D 高速开关阀实验原理
Fig. 10 Experiment principle of 2D high-speed on-off valve driven by double torsion pendulum wheels

1. 直流电动机 2. 中心孔 3. 径向孔 4. 从动轮 5. 凯夫拉线
6. 主动轮 7. 2D 高速开关阀 8. 拨叉 9. 阀芯 10. 流量计

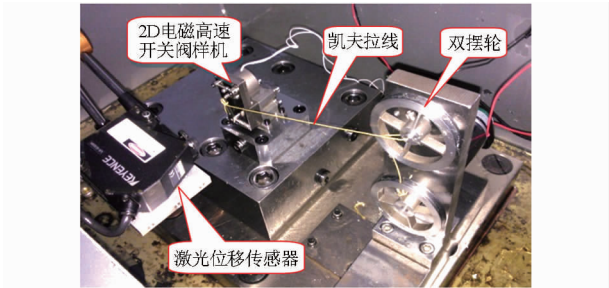


图 11 双摆轮驱动 2D 高速开关阀的实验系统
Fig. 11 Experiment system of 2D high-speed on-off valve driven by double torsion pendulum wheels

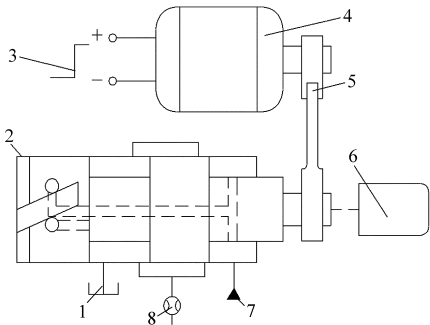


图 12 旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀的实验原理
Fig. 12 Experiment principle of 2D high-speed on-off valve driven by rotary electromagnet

1. 油箱 2. 2D 高速开关阀 3. 阶跃电压 4. 旋转电磁铁 5. 拨杆拨叉 6. 激光位移传感器 7. 油源 8. 流量计

转子旋转,并通过拨杆拨叉驱动 2D 高速开关阀的阀芯转动,液压伺服螺旋机构则把阀芯角位移线性转换为阀芯轴向位移,实现阀芯开启,激光位移传感器(型号为 LKG150)测试并记录阀芯轴向位移,流量计用于测量 2D 高速开关阀控制口 A 输出的流量。

4.2 实验结果

在工作压力 28 MPa 和阀满开口的条件下,上述 2 种实验方案的测试结果如图 13 所示,双摆轮驱动 2D 高速开关阀阶跃响应的上升时间大约为 2 ms,峰

值时间 2.5 ms 左右,最大超调量为 5%;旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀阶跃响应的上升时间约为 18 ms,峰值时间 20 ms 左右,最大超调量为 2%。由此可见:实验研究结果与仿真结果基本一致,实验曲线出现的超调是敏感腔的液压弹簧效应引起的,结果显示 2D 高速开关阀具有很高的响应速度。

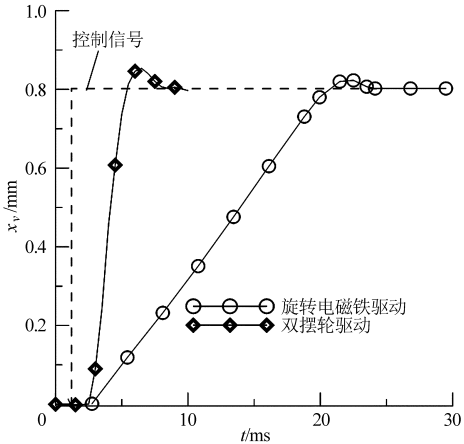


图 13 2D 高速开关阀阶跃响应实验
Fig. 13 Step response of 2D high-speed on-off valve

5 结论

(1) 提出 2D 电液高速开关阀新型设计方案, 2D 高速开关阀采用液压螺旋伺服机构的工作原理,其具有很高的响应速度;工作压力为 28 MPa 时,阀芯行程为 0.8 mm,在旋转电磁铁驱动下,开启时间约为 18 ms,6 mm 通径阀的流量高达 60 L/min。

(2) 旋转电磁铁转子为 3 个 52°叶片环形均布的结构形式,减小了转动惯量;左定子、右定子和转子采用不锈软磁合金 1J117,精加工后真空退火处理,有效提高了旋转电磁铁工作气隙的磁通密度,增大了输出转矩,改善了旋转电磁铁的动态特性。

(3) 拨杆拨叉机构传将旋转电磁铁输出力矩放大 5 倍,增大了阀芯的驱动力矩;拨杆拨叉间的线接触有利于减小拨杆和拨叉之间摩擦力和传动间隙,重心设计有利于提高阀的工作稳定性。

(4) 从双摆轮和旋转电磁铁驱动 2D 高速开关阀的动态响应分析可知,如果能进一步提高旋转电磁铁频响和输出力矩,2D 电液高速开关阀的动态特性能够得到进一步提高。

(5) 2D 电液高速开关阀使用了高频响的液压伺服螺旋机构,因此,与同级别高速开关阀相比,不仅具有流量大、结构简单、价格低和质量轻等优点,还可改变液压伺服螺旋机构的结构参数来增大阀芯行程以提高输出流量,而阀芯开启时间基本不变。

参 考 文 献

1 丁凡,姚健娣,笄靖,等.高速开关阀的研究现状[J].中国工程机械学报,2011,9(3):351-358.
Ding Fan, Yao Jiandi, Da Jing, et al. Advances on high-speed on-off valves[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011,9(3):351-358. (in Chinese)

2 向忠.气动高速开关阀关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2010.
Xiang Zhong. Research on key technologies of pneumatic high-speed on-off valve[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010. (in Chinese)

3 Ouyang Xiaoping, Yang Huayong, Jiang Haoyi, et al. Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve[J]. Chinese Science Bulletin,2008,53(17):2706-2711.

4 Passarini L C, Nakajima P R. Development of a high-speed solenoid valve: an investigation of the importance of the armature mass on the dynamic response[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2003,25(4):329-335.

5 徐权奎,祝轲卿,陈自强,等.高压、共轨式柴油机电磁阀驱动响应性研究[J].内燃机工程,2007,28(3):15-19.
Xu Quankui, Zhu Keqing, Cheng Ziqiang, et al. Research on responsibility of solenoid valve driver circuit for high pressure common rail diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007,28(3):15-19. (in Chinese)

6 崔剑,丁凡,李其朋,等.耐高压双向旋转比例电磁铁的静态力矩特性[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(9):1578-1581.
Cui Jian, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Static torque characteristics of high-pressure bidirectional rotary proportional solenoid[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2007,41(9):1578-1581. (in Chinese)

7 Man Jun, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Novel high-speed electromagnetic actuator with permanent-magnet shielding for high-pressure applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010,46(12):4030-4033.

8 满军,丁凡,李其朋,等.圆锥和平面形磁极高速电磁铁动态特性对比[J].农业机械学报,2009,40(3):213-217.
Man Jun,Ding Fan, Li Qipeng, et al. Comparative researches on high-speed solenoids of conical pole and planar pole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):213-217. (in Chinese)

9 孟彬,阮健,李胜.2-D 数字阀用低惯量旋转电磁铁及其矩角特性研究[J].农业机械学报,2011,42(12):220-224.
Meng Bin, Ruan Jian, Li Sheng. Low inertia rotary electromagnet of 2-D digital valve and research on its torque-angle characteristic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(12):220-224. (in Chinese)

10 Mutaih Yamasawak. Fundamental operations of a multipolar disk-solenoid[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995,31(4):2445-2449.

11 Shinichiy Kotarob. Research on high-speed electric converter[J]. Japan Mechanical Engineering Society Proceedings;B, 1990, 56(524):281-286.

12 Lindler J E, Anderson E H. Piezoelectric direct drive servo valve[C]//Proceeding of SPIE 2002 on Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2002:488-496.

13 黄钰璽,裴翔,赵伟,等.2D 阀控大流量高速开关阀的研究[J].液压与气动,2012(10):71-73.
Huang Yuzhao, Pei Xiang, Zhao Wei, et al. Study on large-flow high-speed valve driven by 2D control valve[J]. Hydraulics & Pneumatics,2012(10):71-73. (in Chinese)

14 赵伟,张凯,黄钰璽,等.一种大流量高速开关阀的设计与实验研究[J].液压与气动,2013(9):38-40.
Zhao Wei,Zhang Kai,Huang Yuzhao, et al. Design and experimental study of an on-off valve with large flow rate and fast response [J]. Hydraulics & Pneumatics, 2013(9):38-40. (in Chinese)

15 左强,李胜,阮健,等.2D 电液比例方向阀弹性压扭联轴器研究[J].农业机械学报,2014,45(5):327-333.
Zuo Qiang, Li Sheng, Ruan Jian, et al. Study on 2D electro-hydraulic proportional directional valve elastic pressure torsion coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(5):327-333. (in Chinese)

16 白继平,贾文昂,阮健.2D 高频转阀液动力矩研究[J].农业机械学报,2014,45(3):320-326.
Bai Jiping, Jia Wen'ang,Ruan Jian. Numerical study on flow moment of 2D high frequency rotary valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(3):320-326. (in Chinese)

17 江海兵,阮健.一种新型大流量高速开关阀[J].液压与气动,2013(11):96-99.

18 兰叶深,裴翔,马超,等.先导自锁式高速开关阀的研究[J].流体传动与控制,2013(4):34-36.

19 钱人一.日本电装公司的 ECD-U2 柴油机共轨喷油系统:(2)[J].汽车与配件,2003(19):29-31.

20 张小军,凌宁,朱国伟,等.新型高速开关阀的设计与研究[J].机床与液压,2001(6):88-89.