

## 2D 电液伺服流量阀特性研究

左希庆<sup>1,2</sup> 刘国文<sup>2</sup> 江海兵<sup>3</sup> 阮健<sup>1</sup> 赵建涛<sup>1</sup> 朱兆良<sup>1</sup>

(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. 湖州职业技术学院机电与汽车工程学院, 湖州 313000; 3. 衢州学院机械工程学院, 衢州 324000)

**摘要:** 提出了 2D 电液伺服流量阀设计方案, 应用磁栅霍尔传感器检测比例旋转电磁铁的角位移, 并与输入控制信号对比, 形成角位移信号闭环反馈; 采用变传动比拨杆拨叉驱动机构, 结合 2D 控制技术将旋转电磁铁角位移比例转换为阀芯轴向位移, 斜槽敏感通道形成位置闭环反馈, 提高了其控制精度和抗污染能力。建立了该阀的数学模型, 对整个系统进行了仿真分析, 并设计样机, 进行了实验研究, 实验结果表明: 当工作压力为 35 MPa、阀芯行程为 0.8 mm 时, 其频宽约为 120 Hz, 阶跃响应 5 ms, 6 mm 通径阀流量达 60 L/min, 且其质量仅为同级别阀的 1/3 左右, 适用于机载液压系统。

**关键词:** 比例旋转电磁铁; 伺服流量阀; 变传动比; 拨杆拨叉; 动态特性

中图分类号: TP271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0400-07

## Characteristics of Airborne 2D Electro-hydraulic Servo Flow Valve

ZUO Xiqing<sup>1,2</sup> LIU Guowen<sup>2</sup> JIANG Haibin<sup>3</sup> RUAN Jian<sup>1</sup> ZHAO Jiantao<sup>1</sup> ZHU Zhaoliang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Huzhou Vocational & Technical College, Huzhou 313000, China

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

**Abstract:** With the widespread application of servo system in major equipment of industrial, military, aerospace and other important areas, there is a great demand for the electro-hydraulic servo flow valve which can response fast under the condition of high pressure and high flow. So the novel design project plan of 2D (two-dimensional) electro-hydraulic servo flow valve was made. The angular displacement of the proportional rotary electromagnet was detected by HALL sensor in this project, and compared with the input control signal to realize closed-feedback of angular displacement's signal. Variable transmission ratio lever-fork structure was adopted. In order to enhance the valve's control precision and anti-pollution capability, the rotary electromagnet angular displacement was proportionally converted into spool axial displacement by 2D technology which realized a closed-feedback of the chute sensitive channel. The mathematical model of the valve was established, and the simulation analysis was carried out on the whole system. Based on the analysis of the valve's mathematical model and system parameters, sample equipment was manufactured and the experimental study was carried out. When the system pressure was 35 MPa and the spool displacement was 0.8 mm, the valve's bandwidth was about 120 Hz, dynamic response time was about 5 ms, and the flow rate of 6 mm spool diameter was 60 L/min. The valve had a small and simple bodies, its weight was only one third of the same level valves. It also had low power consumption, and easy to realize closed-loop control, its static and dynamic performance was superior; therefore, the research result showed that it worked very well for airborne hydraulic system.

**Key words:** proportional rotary electromagnet; servo flow valve; variable transmission ratio; lever-fork; dynamic characteristic

收稿日期: 2016-11-14 修回日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405443)、浙江省科技厅公益技术项目(2016C31056)和湖州市科技局基金项目(2016YZ07)

作者简介: 左希庆(1975—),男,博士生,湖州职业技术学院副教授,主要从事电液直接数字控制研究,E-mail: zuoxiqing@yeah.net

通信作者: 阮健(1963—),男,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

## 引言

为适应现代工业生产对高精度、反应快的自动控制系统的要求,液压伺服控制元件得到了快速发展<sup>[1-2]</sup>。传统的电液伺服阀主要有喷嘴挡板阀、射流管阀以及动圈式伺服阀和电液比例伺服阀等。喷嘴挡板阀动态响应速度很快,但是由于喷嘴挡板间的间隙小,容易堵塞,导致其抗污染能力较差;目前喷嘴挡板阀的研究和改进主要采用新材料制作电-机械转换器以提高其性能。BANG等<sup>[3]</sup>利用堆叠式压电元件开发了高速电液两级伺服阀,其先导级最高频响可达600 Hz,阀的频响则达到300 Hz;吉林大学将压电伸缩陶瓷驱动的新型驱动器应用于喷嘴挡板阀,提高了阀的性能<sup>[4]</sup>,超调量为2.4%、稳态时间达0.07 s<sup>[5]</sup>。射流管阀虽然抗污染能力有所增强,却以泄漏功耗大为代价,其频响也较喷嘴挡板阀低,工作性能差,零位泄漏大,限制了其供油压力的提高;另外,无论是喷嘴挡板阀还是射流管阀,由于其结构复杂,导致其质量偏高。

本文针对现有机载伺服阀抗污染能力差和质量大的缺点,设计2D电液伺服流量阀的研究方案,叙述其工作原理,建立数学建模并进行仿真分析,加工样机,对其动态特性进行实验研究。

## 1 2D电液伺服流量阀的工作原理

2D电液伺服流量阀由比例旋转电磁铁(加磁栅霍尔传感器)、拨杆拨叉机构和2D阀体组成。其三样机如图1所示,工作原理如图2所示,2D阀体包括阀体、阀芯及左右端盖。比例旋转电磁铁在控制器输入电信号作用下,输出力矩,旋转电磁铁转子轴末端为磁钢,霍尔转角传感器检测其磁场变化(即角位移变化),反馈给控制器,旋转力矩通过拨杆拨叉传力机构驱动阀芯旋转,阀芯右凸肩端面与阀体之间形成右敏感腔,右敏感腔与系统压力油源直接相连,其压力为 $p_r$ ,阀芯左凸肩、左端盖和阀体之间形成左敏感腔,其压力为 $p_l$ ,阀芯左端端面上对称开设一对高低压孔,阀体左端内孔壁上对称开设一对半圆形斜槽通道(敏感通道),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,低压孔通过低压通道与回油腔相通,且高压孔与低压孔分别位于敏感通道两侧,并与敏感通道形成弓形重叠,形成类似液阻联动的液压阻力半桥,控制阀芯左敏感腔的压力变化。左敏感腔作用面积为右敏感腔作用面积的2倍,当左敏感腔压力为右敏感腔压力的1/2时,阀芯轴向受力平衡,阀芯静止<sup>[6-9]</sup>。

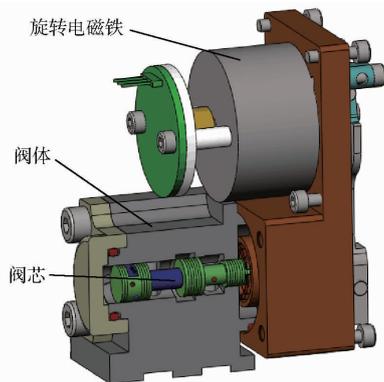


图1 2D电液伺服流量阀

Fig. 1 2D electro-hydraulic servo flow valve

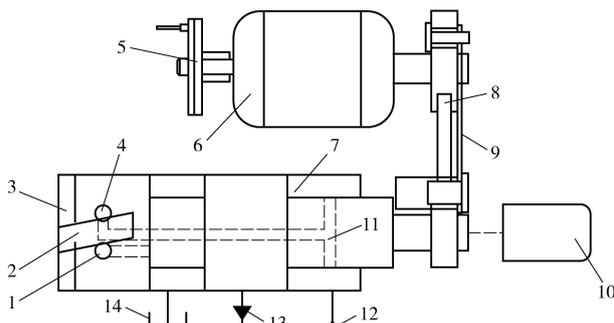


图2 2D电液流量伺服阀工作原理图

Fig. 2 Schematic of 2D servo flow valve

1. 低压孔 2. 敏感通道 3. 左敏感腔 4、11. 高压孔 5. 控制器
6. 旋转电磁铁 7. 右敏感腔 8. 拨杆拨叉 9. 连杆 10. 激光位移传感器
12. 油源 13. 出口 14. 油箱

从阀芯右侧向左看,当阀芯顺时针旋转时,低压孔与敏感通道重叠面积变大,高压孔重叠面积减小,因此左敏感腔压力 $p_l$ 降低,而右敏感腔压力不变,阀芯在左右敏感腔压差的作用下,轴向向左移动,与此同时敏感通道与高压孔的重叠面积逐渐变大,而与低压孔的重叠面积逐渐变小,直到高、低压孔与敏感通道的重叠面积再次相等时,阀芯轴向受力又达到新的平衡,而此时阀芯处于一个新的平衡位置,阀芯的移动距离与旋转电磁铁的输入信号呈正比;同理,阀芯逆时针旋转时,其运动过程相反。因此,2D电液伺服流量阀利用带霍尔转角传感器的旋转电磁铁和拨杆拨叉机构联动,驱动阀芯作精确旋转,使阀芯轴向位移与角位移之间呈线性变化关系,完成导阀功能;敏感腔两边压差推动阀芯作轴向移动,调节阀口的开度,从而达到调节出口流量变化的效果。

## 2 拨杆拨叉机构传动转化

图3中的拨杆拨叉机构是2D技术中的一个创新传动单元。它主要由上拨叉、下拨杆以及零位保持弹簧和紧定螺钉构成。其中上拨叉与旋转电磁铁

的转轴通过螺钉固连,下拨杆与阀芯固连,上拨叉和  
下拨杆之间为线接触,从而有效地减小了两者之间  
摩擦力,提高了传动精度<sup>[10]</sup>。

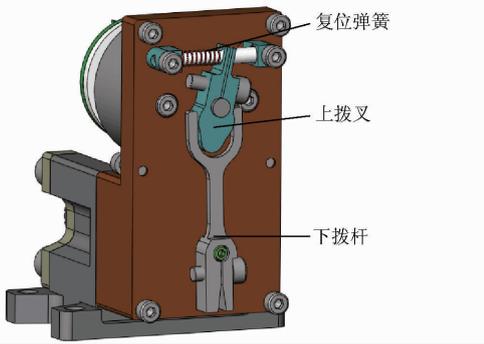


图3 拨杆拨叉  
Fig.3 Lever-fork

拨杆拨叉传力机构可放大旋转电磁铁的输出力  
矩,为克服阀芯“卡滞”现象,对其采用变传动比  
的设计,如图4所示, $O_2$ 为下拨杆的转动中心,在 $y$ 轴  
负半轴上, $O_1$ 为上拨叉转动中心,通过计算, $O_1$ 与  
 $O_2$ 之间的距离需确保 $\alpha = 2\beta$ ,上拨叉下部轮廓为接  
触点工作圆 $M$ 、 $X$ 的一部分,该设计使得2个转动中  
心到接触点的距离随着拨杆拨叉的转动不断变化,  
因此,其传动比也不再为恒定值,当遇到阀芯“卡滞”  
时,变传动比设计可使阀芯输出力矩放大 $N$ 倍,直  
到克服阀芯卡紧力正常工作。

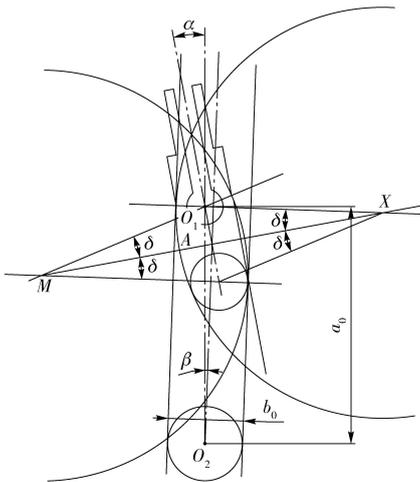


图4 变传动比设计  
Fig.4 Variable transmission ratio design

### 3 数学模型

#### 3.1 比例旋转电磁铁

比例旋转电磁铁绕组电压平衡方程为<sup>[11]</sup>

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

式中  $u$ ——旋转电磁铁绕组的输入电压  
 $i$ ——绕组电流  $R_L$ ——绕组电阻  
 $L$ ——绕组电感

$K_e$ ——绕组反电动势

$\theta_e$ ——旋转电磁铁旋转转角

旋转电磁铁电磁力矩方程为

$$T = K_L i \quad (2)$$

式中  $T$ ——旋转电磁铁转子转动力矩

$K_L$ ——转子转矩系数

旋转电磁铁在平衡位置(忽略阀芯的负载力  
矩)转子运动方程为

$$T = J_r \frac{d^2 \theta_e}{dt^2} + B_r \frac{d\theta_e}{dt} + K_r \theta_e + T_n \quad (3)$$

式中  $J_r$ ——转子上的转动惯量

$B_r$ ——转子阻尼

$K_r$ ——弹簧刚度

$T_n$ ——受压后作用在转子上的反力矩

磁栅霍尔传感器检测旋转电磁铁角位移的反馈  
方程

$$U_h(t) = k_h \theta_e \quad (4)$$

式中  $k_h$ ——传感器转换系数

#### 3.2 拨杆拨叉变传动比方程

拨杆拨叉的传动比

$$K = \frac{l_{O_1 A}}{l_{O_2 A}} = N \quad (5)$$

式中  $l_{O_1 A}$ ——拨杆转动中心 $O_1$ 到拨杆拨叉接触点  
 $A$ 的距离

$l_{O_2 A}$ ——拨叉转动中心 $O_2$ 到拨杆拨叉接触点  
 $A$ 的距离

#### 3.3 2D 阀数学模型

从高压孔流入左敏感腔的流量 $Q_1$ 为

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

式中  $C_d$ ——阀口流量系数

$A_1$ ——高压孔和敏感通道的重叠面积

$\rho$ ——油液密度

从左敏感腔流入低压孔的流量为

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2p_c}{\rho}} \quad (7)$$

式中  $A_2$ ——低压孔和敏感通道的重叠面积

根据流量连续性原理,敏感腔流量方程为

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dx_v}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_c}{dt} \quad (8)$$

其中

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

式中  $V_1$ ——敏感腔体积

$A$ ——敏感腔作用面积

$x_v$ ——阀芯轴向位移

$L_v$ ——敏感腔死容积长度

$\beta_e$ ——油液体积弹性模量

由图 5 可知, 高低压孔与敏感通道的弓形重叠面积  $A(h, r)$  可表示为

$$A(h, r) = \begin{cases} 0 & (h \leq 0) \\ 2h \sqrt{2rh - h^2} + 2r^2 \arcsin \sqrt{2h/r - h^2/r^2} - 2r \sqrt{2rh - h^2} & (0 < h \leq r) \\ 2\pi r^2 + 2h \sqrt{2rh - h^2} - 2r^2 \arcsin \sqrt{2h/r - h^2/r^2} - 2r \sqrt{2rh - h^2} & (r < h \leq 2r) \\ 2\pi r^2 & (2r < h \leq b) \end{cases} \quad (9)$$

其中  $h = h_0 + R_d \sin \beta - x_v \cos \beta$  (10)

式中  $r$ ——高低压小孔的半径  
 $h$ ——高低压孔与敏感通道的重叠面积弓高  
 $h_0$ ——初始弓高  $R_d$ ——阀芯半径  
 $\beta$ ——敏感腔斜槽倾角

阀芯运动方程为

$$\left( p_c - \frac{p_s}{2} \right) A = m \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B_e \frac{dx_v}{dt} + K_m x_v + F_L \quad (11)$$

式中  $m$ ——阀芯质量  $B_e$ ——阀芯阻尼

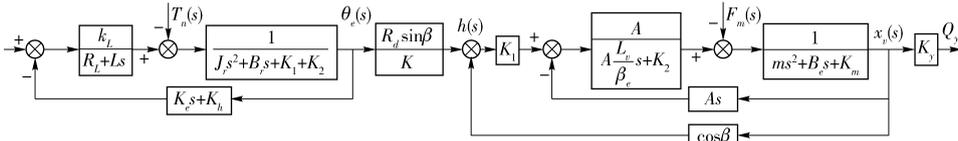


图 6 2D 阀传递函数框图

Fig. 6 Mathematical model diagram of 2D valve

图中

$$K_1 = 4C_d \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \sqrt{2h_0 r - h_0^2}$$

$$K_2 = 2C_d \left[ r^2 \arcsin \frac{\sqrt{2rh_0 - h_0^2}}{r} - (r - h_0) \sqrt{2rh_0 - h_0^2} \right] \frac{1}{\sqrt{p_s \rho}}$$

$$K_y = 2\pi C_d R_d \sqrt{\frac{2(p_s - p_A)}{\rho}}$$

## 4 仿真分析

### 4.1 比例旋转电磁铁仿真结果

机载 2D 电液伺服流量阀所用电机械转换器为自行研制的六叶子型比例旋转电磁铁, 为提高其动态响应, 设计成 6 个均匀分布的 26° 叶片转子, 极大地减小了转子惯量, 定子和转子材料均为精加工后退火处理的不锈软磁合金 1J117, 提高了磁通密度, 从而增大了力矩。图 7 为其磁力线分布<sup>[13-16]</sup>。

图 8 为该电磁铁的转角力矩特性曲线。由于电磁铁在正常工作时, 其气隙厚度不变, 因此给定不同电流时, 转角力矩特性曲线分布均匀, 线性度趋向水平, 转角力矩线性度良好。但随着转角的变大, 其力

$K_m$ ——阀芯弹簧刚度  $F_L$ ——阀芯负载  
 阀口流量方程为

$$Q_y = C_d A_y \sqrt{\frac{2(p_s - p_A)}{\rho}} \quad (12)$$

其中  $A_y = 2\pi R_d x_v$

式中  $A_y$ ——阀口工作面积

$p_A$ ——阀口输出压力

式(1)~(12)构成了机载 2D 电液伺服流量阀的数学模型, 对阀口和高、低压孔流量方程进行线性化, 建立传递函数框图如图 6 所示<sup>[12]</sup>。

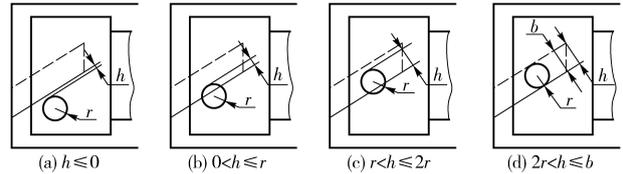


图 5 高低压小孔与斜槽相对位置

Fig. 5 Relative position between high and low pressure holes and groove

矩达到临界值。

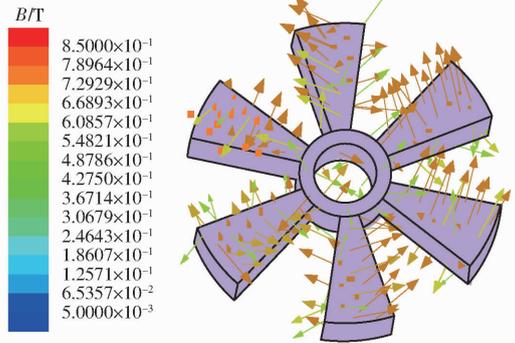


图 7 磁力线分布

Fig. 7 Distribution of magnetic force line

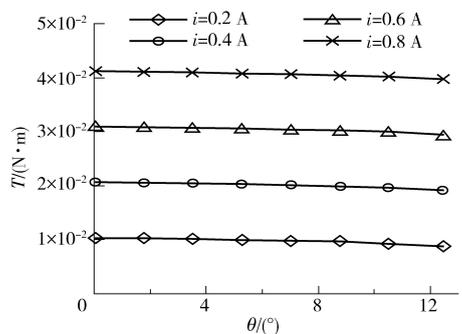


图 8 转角-力矩特性曲线

Fig. 8 Simulation curves of angular displacement and torque

图9为电磁铁的阶跃响应仿真曲线。其最大转角可达 $12.5^\circ$ ,超调约5%,上升时间为4.8 ms左右。

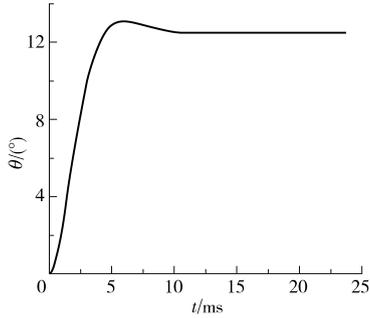


图9 电磁铁阶跃仿真曲线

Fig. 9 Step response simulation of electromagnet

## 4.2 2D 阀仿真结果

2D 电液伺服流量阀仿真参数如表1所示,采用 Matlab 软件对阀进行仿真可得其频率特性仿真曲线,如图10、11所示。低频时阀芯轴向位移的滞后、衰减都很小,且随着输入频率信号的增加,其位移相位的滞后和幅值衰减的幅度较缓。在 $-3\text{ dB}$ 、 $-90^\circ$ 时幅值衰减对应的频宽约为130 Hz,表明该阀频率特性良好<sup>[17]</sup>。

表1 仿真参数

Tab. 1 Structural parameters in simulation

参数	数值
阀芯质量 $m/g$	7
阀芯半径 $R_d/mm$	3
左敏感腔截面积 $A/mm^2$	28.3
工作压力 $p/MPa$	35
油液密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	880
流量系数 $C_d$	0.62
体积弹性模量 $\beta_e/MPa$	700
斜槽倾角 $\beta/(\circ)$	80
阀芯最大行程 $x_{v,max}/mm$	0.8
高低压小孔半径 $r/mm$	1
小孔初始弓高 $h_0/mm$	0.1
转动惯量 $J_r/(g \cdot cm^2)$	440
比例旋转电磁铁扭矩 $T/(N \cdot m)$	0.02

图12为该阀在额定压力阀芯满行程时的阶跃响应仿真曲线。其阶跃响应时间约为4.5 ms。

## 5 实验

### 5.1 实验原理

为验证仿真结果,设计了比例旋转电磁铁和2D电液伺服流量阀的实验方案,将实验结果与仿真分析对比研究<sup>[18-19]</sup>。

#### (1) 比例旋转电磁铁实验原理

图13为旋转电磁铁测试实验系统原理,实验采用德国 DRFL-I-5-n-K 型动态扭矩传感器,测

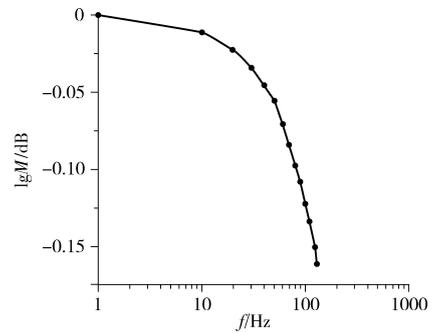


图10 相频特性实验曲线

Fig. 10 Experimental curve of phase response

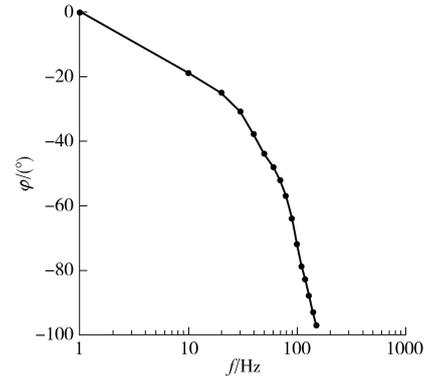


图11 幅频特性实验曲线

Fig. 11 Experimental curve of frequency response

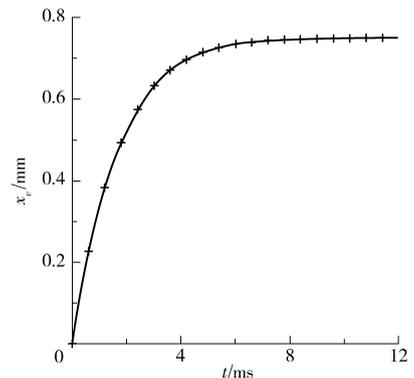


图12 2D电液比例换向阀阶跃特性实验曲线

Fig. 12 Experimental curve of step response

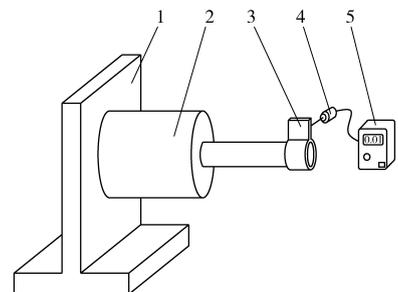


图13 旋转电磁铁的实验系统

Fig. 13 Experiment system of rotary electromagnet

1. 固定支架 2. 电磁铁 3. 反射板 4. 检测头 5. 位移传感器

试电磁铁的输出扭矩;利用 AS5600 型磁栅霍尔位移传感器检测磁钢的磁场变化,输出力矩和转角信号,在示波器上显示,示波器型号为 Agilent

DSO6014A。

### (2) 机载 2D 电液伺服流量阀实验原理

图 14 为机载 2D 电液伺服流量阀实验平台, 实验系统所能提供的最大油液压力为 42 MPa, 实验环境温度为 10 ~ 30℃。控制器输出伺服控制电压信号给比例旋转电磁铁, 通过拨杆拨叉驱动阀芯运动, 2D 阀比例输出流量, 用 LKG150 型激光位移传感器测试阀芯轴向位移, 流量计测量 A 口输出流量, 反馈给示波器记录其数据曲线。

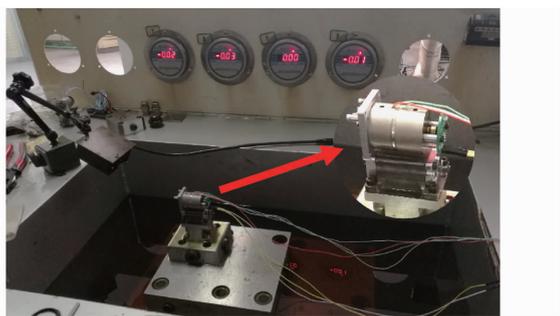


图 14 2D 阀的实验原理

Fig. 14 Experiment principle of 2D valve

## 5.2 实验结果

### (1) 比例旋转电磁铁

图 15 为六叶子型旋转电磁铁的转角-力矩特性实验曲线, 当电流为 0.2、0.4、0.6、0.8 A 时, 由图可知, 其输出力矩基本保持不变, 且随着电磁铁转角增大, 力矩趋饱和, 无法升高。力矩曲线之间基本保持平行, 且间距相差不大, 验证了力矩与电流呈正比的仿真结果。电流越大, 则力矩越大, 其最大力矩为 0.04 N·m 左右。

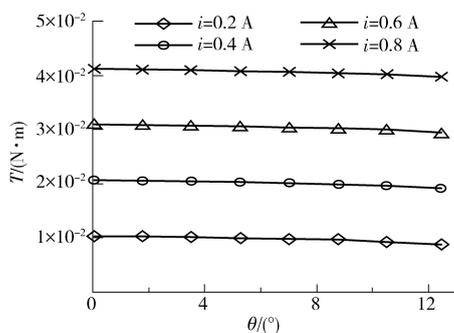


图 15 转角-力矩特性实验曲线

Fig. 15 Experimental curves of angular displacement and torque

电磁铁的阶跃响应实验曲线如图 16 所示, 由图可知, 其上升时间约为 5 ms, 略有超调, 实验结果与仿真分析基本一致。

### (2) 机载 2D 电液伺服流量阀

图 17、18 为该阀的相频和幅频实验曲线, 输入不同频率正弦信号, 对比计算得到 2D 阀的频宽, 可知频宽约在 120 Hz 处对应相位滞后 -90°, 幅值衰

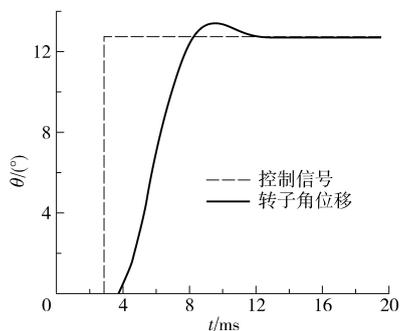


图 16 旋转电磁铁阶跃响应实验

Fig. 16 Experiment of rotary electromagnet's step response

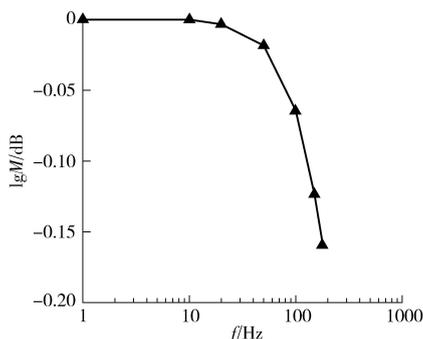


图 17 相频特性实验曲线

Fig. 17 Experimental curve of phase response

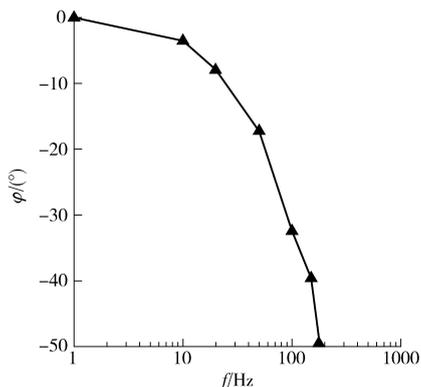


图 18 幅频特性实验曲线

Fig. 18 Experimental curve of frequency response

减 -3 dB, 实验结果基本验证了仿真分析。

在系统供油压力为 35 MPa 时, 得到该阀的阶跃响应实验曲线如图 19 所示。2D 阀阀芯满行程在

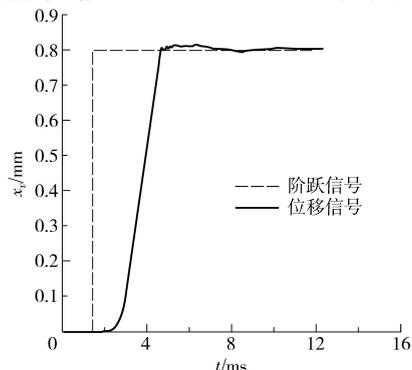


图 19 2D 阀阶跃响应实验曲线

Fig. 19 Experiment curves of 2D valve's step response

5.0 ms 左右,与仿真结果接近,说明该阀具有较好的快速响应能力。

## 6 结论

(1)提出2D电液伺服流量阀的设计方案,利用霍尔传感器检测电磁铁角位移,与输入控制信号对比,形成流量闭环反馈,且采用变传动比拨杆拨叉驱动机构,提高了控制精度和抗污染能力,通径为6 mm、压力为35 MPa、阀芯行程为0.8 mm时,其频宽约为120 Hz,阶跃响应5 ms,流量可达60 L/min。

(2)设计的六叶子型比例旋转电磁铁,采用不

锈钢软磁合金1J117材料制成,加以真空退火热处理,提高了工作气隙磁通密度,使输出力矩变大。其转角和电流基本呈正比变化,电流为0.8 A时,其最大力矩约为0.04 N·m。

(3)采用变传动比设计的拨杆拨叉机构,遇到阀芯“卡滞”时,可放大驱动阀芯的力矩,提高该阀的稳定性能和抗污染能力。

(4)2D电液伺服流量阀采取了电机械转换器和阀芯位移的双反馈方案,提高了阀的稳定性,与同级阀相比具有高压大流量、结构简单、性能可靠,且质量仅为其1/3左右,适用于机载液压系统。

## 参 考 文 献

- 李艳军. 飞机液压传动与控制[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 周汝胜,焦宗夏,王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2006,42(9):6-11. ZHOU Rusheng, JIAO Zongxia, WANG Shaoping. Current research and development trends on fault diagnosis of hydraulic systems [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9):6-11. (in Chinese)
- BANG Young-Bong, JOO Choon-Shik, LEE Kyo-Le, et al. Development of a two-stage high speed electrohydraulic servo valve systems using stack-type piezoelectric elements[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003,1: 131-136.
- 鄂世举,曲兴田,杨志刚,等. 电液伺服阀新型驱动器设计[J]. 压电与声光,2003,25(2):152-154. E Shiju, QU Xingtian, YANG Zhigang, et al. Design of new actuators of electro-hydraulic servo valves [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25(2):152-154. (in Chinese)
- 周淼磊,杨志刚,田彦涛,等. 压电型喷嘴挡板阀及其控制方法研究[J]. 光学精密工程,2007,15(3):372-377. ZHOU Miaolei, YANG Zhigang, TIAN Yantao, et al. Piezoelectric type nozzle flapper valve and its control method [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3):372-377. (in Chinese)
- RUAN J, BURTON R, UKRAINETZ P, et al. Two-dimensional pressure control valve [J]. Proc. IMech E Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2001, 215(9):1031-1039.
- 江海兵,阮健,左希庆,等. 2D电液高速开关阀设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):328-334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?file\_no=20150249&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.049. JIANG Haibin, RUAN Jian, ZUO Xiqing, et al. Design and experiment of 2D electrohydraulic high-speed on-off valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):328-334. (in Chinese)
- 朱兆良. 2D比例阀关键技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.
- 左强,李胜,阮健. 2D伺服流量阀规划补偿死区研究[J]. 中国机械工程,2014,25(17):2369-2374. ZUO Qiang, LI Sheng, RUAN Jian. Study on flow program compensation technology for dead zone of 2D digital valves [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(17):2369-2374. (in Chinese)
- 成大先. 机械设计手册[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2008.
- 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)
- 李友善. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,1981.
- 赵博,张洪亮. Ansoft 12在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- 左希庆,阮健,刘国文,等. 开关电磁铁比例应用的实验研究[J]. 机床与液压,2016,44(19):5-7. ZUO Xiqing, RUAN Jian, LIU Guowen, et al. Experimental study on proportional application of switching solenoids [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(19):5-7. (in Chinese)
- 孟彬,林琼,阮健. 单相对称磁路湿式力矩马达研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):406-412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?file\_no=20160954&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.054. MENG Bin, LIN Qiong, RUAN Jian. Research on wet type torque motor based on symmetrical magnetic circuit with single-phase excitation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):406-412. (in Chinese)
- 孟彬,阮健,李胜. 阀用耐高压旋转电磁铁特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):240-245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?file\_no=20121243&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.043. MENG Bin, RUAN Jian, LI Sheng. Characteristics of electromagnet with high pressure resistance for valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):240-245. (in Chinese)

- 5 DE WIT C C, NOEL P, AUBIN A, et al. Adaptive friction compensation in robot manipulators: low velocities [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1991,10(3): 189 – 199.
- 6 PFEIFFER F, HOLZL J. Parameter identification for industrial robots[C]//1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995,2: 1468 – 1476.
- 7 GROTHJAHN M, DAEMI M, HEIMANN B. Friction and rigid body identification of robot dynamics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001,38(10): 1889 – 1902.
- 8 吴文祥, 朱世强, 靳兴来. 基于改进傅里叶级数的机器人动力学参数辨识[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013,47(2): 231 – 237.  
WU Wenxiang, ZHU Shiqiang, JIN Xinglai. Dynamic identification for robot manipulators based on modified fourier series[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013,47(2): 231 – 237. (in Chinese)
- 9 KERMANI M R, PATEL R V, MOALLEM M. Friction identification and compensation in robotic manipulators [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007,56(6): 2346 – 2353.
- 10 CALANCA A, CAPISANI L M, FERRARA A, et al. MIMO closed loop identification of an industrial robot [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011,19(5): 1214 – 1224.
- 11 QIN Z K, BARON L, BIRGLEN L. A new approach to the dynamic parameter identification of robotic manipulators [J]. *Robotica*, 2010,28(4): 539 – 547.
- 12 KINSHEEL A, TAHA Z, DEBOUCHAL A, et al. Robust least square estimation of the CRS A465 robot arm's dynamic model parameters[J]. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 2012,4(3): 89 – 99.
- 13 丁力, 吴洪涛, 姚裕, 等. 基于 PEM – ABC 算法的小型无人直升机系统辨识[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(1): 8 – 14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160102&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160102&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.002.  
DING L, WU H T, YAO Y, et al. Hybrid PEM – ABC algorithm for system identification of small-scale unmanned helicopter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(1): 8 – 14. (in Chinese)
- 14 DUAN H B, SHAO S, SU B W, et al. New development thoughts on the bio-inspired intelligence based control for unmanned combat aerial vehicle[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010,53(8): 2025 – 2031.
- 15 SWEVERS J, GANSEMAN C, TUKEL D B, et al. Optimal robot excitation and identification [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997,13(5): 730 – 740.
- 16 SWEVERS J, GANSEMAN C, SCHUTTER J De, et al. Experimental robot identification using optimised periodic trajectories [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996,10(5): 561 – 577.
- 17 SWEVERS J, VERDONCK W, SCHUTTER J De. Dynamic model identification for industrial robots[J]. *IEEE Control Systems*, 2007,27(5): 58 – 71.
- 18 DING L, WU H, YAO Y, et al. Dynamic model identification for 6-DOF industrial robots[J]. *Journal of Robotics*, 2015.
- 19 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- 20 DING F, LIU X P, LIU G. Identification methods for Hammerstein nonlinear systems [J]. *Digital Signal Processing*, 2011, 21(2): 215 – 238.

(上接第 406 页)

- 17 宋志安, 曹连民, 黄靖. MATLAB/Simulink 与液压控制系统仿真[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- 18 刘国文, 阮健, 左希庆, 等. 滚轮压扭型 2D 电液比例方向阀特性分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(5): 401 – 406. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160555&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160555&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.055.  
LIU Guowen, RUAN Jian, ZUO Xiqing, et al. Characteristic analysis of 2D electro-hydraulic proportional directional valve with roller thrust torsion coupling [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(5): 401 – 406. (in Chinese)
- 19 满在朋, 丁凡, 刘硕, 等. 大流量电液控制阀设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 345 – 351. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150148&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150148&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.048.  
MAN Zaipeng, DING Fan, LIU Shuo, et al. Design and experiment on large flow rate electro-hydraulic control valve [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(1): 345 – 351. (in Chinese)