

# 滚轮压扭型 2D 电液比例方向阀特性分析

刘国文<sup>1,2</sup> 阮健<sup>2</sup> 左希庆<sup>1,2</sup> 李胜<sup>2</sup> 刁惠君<sup>2</sup>

(1. 湖州职业技术学院机电与汽车学院, 湖州 313000;

2. 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)

**摘要:** 设计了一种滚轮式双向压扭联轴器,以球型滚轮代替滚动轴承,既简化了压扭联轴器的加工,也减小了摩擦阻力;可实现比例电磁铁直线运动和阀芯旋转运动的转换,同时放大阀芯旋转扭矩,并将其与双向比例电磁铁和 2D 方向阀共轴联接,组成一种压力高、流量大、结构简单的位置反馈型 2D 电液比例方向阀。进而建立了该阀的数学模型,应用 Matlab 软件对阀的特性进行了仿真分析。实验结果表明:滚轮型压扭联轴器具有良好的输入输出特性,颤振补偿下空载滞环可达 1.0%;系统压力为 21 MPa 时,包括电磁铁滞环在内,该阀流量滞环小于 5%,且线性度和重复特性良好;对应  $-3$  dB、 $-90^\circ$  的频宽约为 12 Hz;阀的阶跃响应上升时间约为 0.45 s,无超调量。

**关键词:** 电液比例方向阀; 滚轮压扭; 流量滞环; 颤振补偿

中图分类号: TP271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0401-06

## Characteristic Analysis of 2D Electro-hydraulic Proportional Directional Valve with Roller Thrust-torsion Coupling

Liu Guowen<sup>1,2</sup> Ruan Jian<sup>2</sup> Zuo Xiqing<sup>1,2</sup> Li Sheng<sup>2</sup> Diao Huijun<sup>2</sup>

(1. Electromechanical and Automotive Engineering College, Huzhou Vocational and Technical College, Huzhou 313000, China

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

**Abstract:** A new kind of roller thrust-torsion coupling was designed with low friction and simple structure, the linear movement of proportional electromagnet armature can be changed into the rotation of the spool movement, at the same time, the rotary torque of spool was enlarged. With large flow and simple structure, the new kind of 2D electro-hydraulic proportional directional valve (EPDV) mainly consists of roller thrust-torsion coupling and electromagnet armature, which has position feedback. Based on the principle of the roller compression-torsion coupling, the mathematical model was established, and 2D valve was simulated by the software Matlab. Direct and pilot experiment results show that, with good input and output characteristics, the high pressure and large flow control can be achieved by this valve, the no-load hysteresis is 1.0%, flow hysteresis is under 5% when system pressure is at 21 MPa, and the linearity and repeating characteristic are all good. Frequency width is improved to about 12 Hz at  $-3$  dB and  $-90^\circ$  and rising time of step response is about 0.45 s. The valve's static and dynamic performance is good, and simulation analysis and experimental results are basically same, which lay foundation for its engineering application.

**Key words:** electro-hydraulic proportional directional valve; roller thrust-torsion coupling; hysteresis characteristic; dither compensation

收稿日期: 2015-11-09 修回日期: 2015-12-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51375445)、浙江省自然科学基金项目(LZ13E050002)、浙江省科技厅公益技术项目(2016C31056)和湖州市科技局基金项目(2013YZ10)

**作者简介:** 刘国文(1976—),男,讲师,浙江工业大学博士后,主要从事电液直接数字控制研究,E-mail: guowenliu2002@163.com

**通信作者:** 阮健(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事新型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

电液比例方向阀在行走机械、液压电梯、疲劳寿命试验机和轧钢机压力等控制系统中,得到了日益广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。国内外很多学者对其性能的改进和结构创新进行了研究与探索:文献[4]提出了一种流量反馈式二通导控流量阀,在主阀芯表面上开设导控油路,从而控制主阀敏感腔的压力,使进、出口压力成固定的比例关系,同时利用导控油路的开口变化调节主阀芯的平衡位置。文献[5]对采用上述原理的比例阀进行了结构创新,使其适用于双向三通或四通比例方向阀的控制。文献[6]提出了二级力反馈比例流量阀和三级力反馈比例流量阀。利用比例电磁铁的出力水平力特性与反馈弹簧力相平衡,实现主阀芯的位置反馈。文献[7]提出了一种位置反馈型的2D电液比例方向阀,该阀利用弹性压扭联轴器实现比例电磁铁衔铁直线运动和阀芯旋转运动的转换,同时放大比例电磁铁推力,但采用弹性压扭联轴器,重复性和精度较差。文献[8-9]提出了2种三位四通2D电液比例方向阀,采用2种不同模式的滑楔式刚性压扭联轴器,利用弹簧预压缩消除压扭联轴器间隙,并保持阀芯扭矩平衡,可实现大流量和低功耗、小流量的功能,但采用轴承导向,摩擦力大,且结构较复杂。

本文提出一种兼具直动式和导控式优点的2D电液比例方向阀,采用滚轮式双向压扭联轴器,将两侧的压扭联轴器与电-机械转换器安装于同一侧,将双向电-机械转换器与2D阀联为一体,实现高压、大流量控制。此结构非常适合螺纹插装。

## 1 2D电液比例方向阀工作原理

2D电液比例方向阀的结构类似于直动式比例方向阀,它由2D方向阀、双向压扭联轴器和双向比例电磁铁共轴联结而成。2D方向阀的阀芯在阀体中具有转动和滑动2个自由度。双向压扭联轴器将双向比例电磁铁的轴向运动转换为阀芯的旋转运动,然后利用压力差推动阀芯轴向移动,实现2D方向阀的导控功能。

其工作原理如图1所示,阀芯两端部台肩上各开设有一对高低压孔c和d,其中高压孔c通过阀芯内孔b与P口相通,低压孔d直接与T口连通;在阀体内孔壁上两端各开设有一半圆形截面敏感通道f1和f2,每个敏感通道分别与左、右敏感腔g1和g2相通;阀芯两端部台肩上的高低压孔与敏感通道相交,形成2个微小的开口面积,串联构成液压阻力半桥;两端的敏感腔的压力分别受控于两端的液压阻力半

桥;不考虑阀口液动力和摩擦力影响,静态时,高低压孔c和d与敏感通道f相交的弓形面积相等,左右敏感腔的压力相等,阀芯处于平衡位置。系统压力不为零时,双向电磁铁的推(拉)力无法直接克服阀芯液动力驱动阀芯轴向滑动,但双向压扭联轴器具有力矩放大功能,且阀芯径向摩擦力矩较小,双向电磁铁的推(拉)力足以使阀芯转动,从而使左右敏感腔的压力发生变化,阀芯在两端敏感腔压力差的推动下轴向移动。

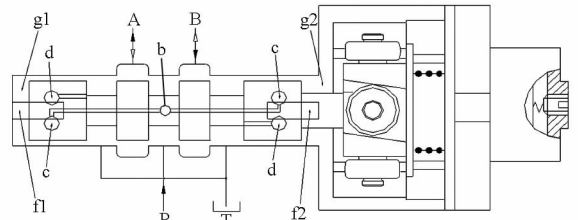


图1 2D电液比例方向阀工作原理图

Fig. 1 2D electro-hydraulic proportional directional valve

## 2 双向压扭联轴器工作原理

该2D电液比例方向阀的核心部件是滚轮式双向压扭联轴器,它利用滚轮代替滚动轴承,减小压扭联轴器的摩擦阻力,且不易被卡死;滚轮点接触滚动减小机械摩擦力等非线性因素的不利影响;同时可放大驱动阀杆转动的扭转力矩,压扭联轴器中用斜槽而非螺旋槽实现位置反馈,简化了加工工艺;由于压扭联轴器正常工作需存在间隙,实验中采用滞环颤振补偿方法,提高该压扭联轴器的输入输出特性。

双向压扭联轴器结构如图2所示,它主要由压扭组件和阀芯组件构成<sup>[10-11]</sup>。压扭联轴器与电磁铁推杆通过销联在一起。当阀芯由于液动力作用不能轴向移动时,楔形件轴向运动,滚轮产生滚动,带动中心轴旋转,从而将楔形件(电磁铁)的轴向运动转化为阀芯的旋转运动,与2D电液比例方向阀相连时可实现导控功能。

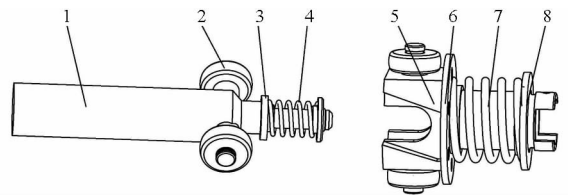


图2 压扭组件

Fig. 2 Thrust-torsion coupling assembly

1. 阀杆 2. 滚轮 3. 内垫片 4. 内弹簧 5. 楔形件 6. 大垫片
7. 外弹簧 8. 小垫片

## 3 数学模型

### 3.1 压扭联轴器力-转矩分析

依据功能互换原理<sup>[12]</sup>,忽略压扭联轴器中摩擦

力等因素的影响,其轴向力-扭矩转换关系为

$$\begin{cases} T = \frac{F_m R}{\tan\beta} \\ \theta = \frac{x_m}{R} \tan\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中  $T$ ——联轴器输出的扭矩

$F_m$ ——比例电磁铁对楔形件作用力

$R$ ——中心轴传递力的有效半径

$x_m$ ——楔形件轴向位移  $\theta$ ——阀芯转角

$\beta$ ——斜槽与垂直方向的夹角

### 3.2 导控油路分析

由于全桥可以看成差动的两个半桥,因此,只需对半桥导控进行研究。流入导控级中的流量一部分来自高压孔与感受通道重叠面积的流量  $Q_1$ ,另一部分来自从高压孔到感受通道的泄漏量  $Q_{l1}$ ;而流量导控级中流出的一部分是低压孔与感受通道重叠面积的流量  $Q_2$ ,还有一部分是感受通道向低压孔的泄漏量  $Q_{l2}$ 。则导控流量为

$$Q_c = Q_1 + Q_{l1} - Q_2 - Q_{l2} \quad (2)$$

其中 
$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2(p_s - p_c)}{\rho}} \quad (3)$$

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2p_c}{\rho}} \quad (4)$$

式中  $C_d$ ——流量系数  $p_s$ ——系统压力

$p_c$ ——敏感腔压力  $\rho$ ——油液密度

$A_1, A_2$ ——高压孔与直槽感受通道的相交面积,即导控油液的过流面积

高低压孔与感受通道相对位置如图3所示。

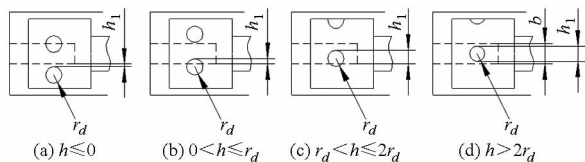


图3 高低压孔与感受通道的相对位置

Fig.3 Relative Position between hole and sensing channel

则过流面积  $A$  可表示为

$$A(h, r_d) =$$

$$\begin{cases} 0 & (h < 0) \\ 2h \sqrt{2r_d h - h^2} + 2r_d^2 \arcsin \frac{\sqrt{2r_d h_1 - h_1^2}}{r_d} - 2r_d \sqrt{2r_d h - h^2} & (0 < h \leq r_d) \\ 2\pi r_d^2 + 2h \sqrt{2r_d h - h^2} - 2r_d^2 \arcsin \frac{\sqrt{2r_d h_1 - h_1^2}}{r_d} - 2r_d \sqrt{2r_d h - h^2} & (r_d < h \leq 2r_d) \\ 2\pi r_d^2 & (h > 2r_d) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $h$ ——高低压孔与直槽感受通道的弓高

$r_d$ ——高低压小孔半径

### 3.3 流量连续性方程

在忽略阀芯台肩与阀孔之间的泄漏和不计摩擦力的情况下,可以认为阀左右敏感腔的压力相等,则该阀的流量连续方程为

$$Q_1 - Q_2 = A_s \frac{dx_v}{dt} + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_{cL}}{dt} \quad (6)$$

式中  $A_s$ ——阀芯台肩的截面积

$\beta_e$ ——油液的体积弹性模量

$V_t$ ——阀芯左、右敏感腔的体积之和

$x_v$ ——阀芯位移  $p_{cL}$ ——导控压力

### 3.4 阀芯的力平衡方程

阀芯的力平衡方程为

$$p_{cL} A_s = m_s \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B_s \frac{dx_v}{dt} + K_L x_v + F_L \quad (7)$$

式中  $B_s$ ——折算到阀芯上的总的粘性系数,包括瞬态液动力阻尼以及粘性阻尼

$F_L$ ——外部的负载折算到阀芯上的总作用力

$m_s$ ——折算到阀芯上的总质量

$K_L$ ——稳态液动力引起的液动力刚度

### 3.5 传递函数

由式(7)线性化后可得2D方向阀的闭环控制方框图如图4所示,依据该图可得其闭环传递函数为

$$\frac{\Delta x_v(s)}{\Delta x_m(s)} = \frac{\frac{K_q}{A} \frac{R_d}{R \tan\beta}}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s^2}{\omega_h} + s + \frac{K_q}{A} \frac{R_d}{R \tan\beta}} \quad (8)$$

式中  $x_m$ ——电磁铁位移  $K_q$ ——流量增益

$R$ ——中心轴有效施力半径

$\Delta x_v$ ——阀芯位移增益

$\Delta x_m$ ——电磁铁位移增益

$A$ ——过流面积

$\omega_h$ ——2D阀导控级固有频率

$\zeta_h$ ——阻尼比

## 4 仿真分析

式(2)~(8)构成该2D方向阀的动态性能支配方程,利用Matlab软件对2D阀进行数值仿真分析<sup>[13-14]</sup>,弄清结构参数与性能之间的关系。仿真所采用的2D阀结构参数如表1所示。

### 4.1 阶跃响应特性分析

仿真研究了2D比例方向阀高(低)压孔半径  $r_d$ 、系统压力  $p_s$  和压扭有效驱动力半径等参数对比例电磁铁位移  $x_m$  (输入) 和阀芯轴向位移  $x_v$  (输出)

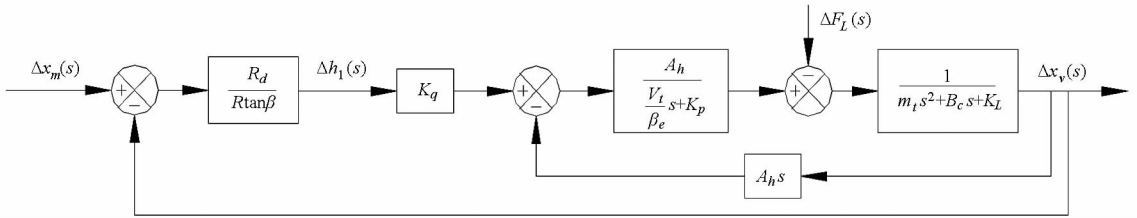


图4 2D方向阀闭环控制框图

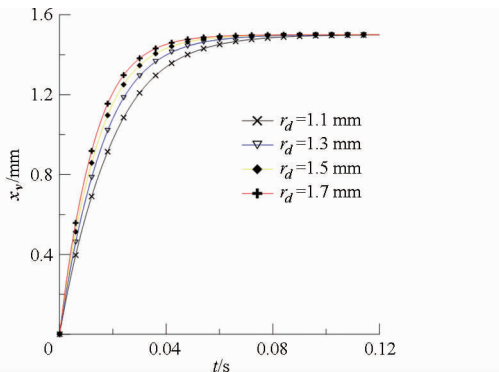
Fig. 4 Transfer function block diagram of 2D directional valve

阶跃响应的影响。仿真结果见图5~8。由图5可知:随着高(低)压孔半径的增大,阶跃响应时间减小;从图6中可以看出系统压力升高时,响应时间减小;由图7和图8中可知随着压扭有效驱动力半径 $R$ 和斜槽夹角 $\beta$ 的变大,响应时间增加。

表1 2D阀结构参数

Tab. 1 Structural parameters of 2D valves

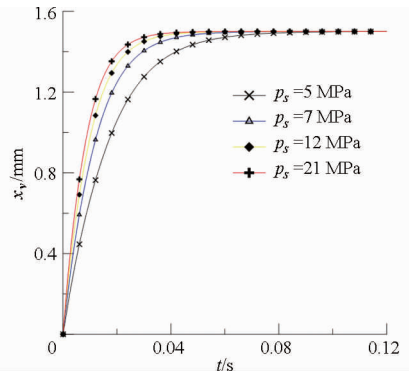
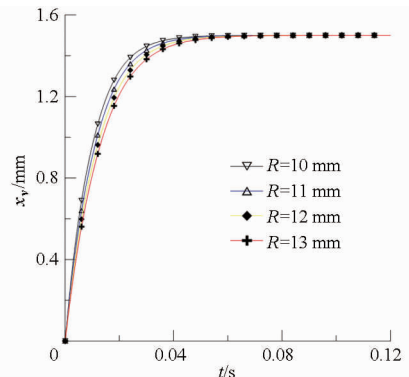
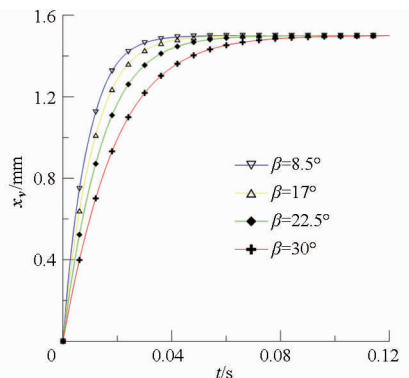
结构参数	数值
阀芯半径 $R/\text{mm}$	8
斜槽夹角 $\beta/(\text{°})$	22
过流面积 $A/\text{mm}^2$	28.3
阀芯质量 $m_v/\text{g}$	14
工作压力 $p_s/\text{MPa}$	21
阀芯最大行程 $x_{v\text{max}}/\text{mm}$	2.5
高低压小孔半径 $r_d/\text{mm}$	1.2
小孔初始弓高 $h_{10}/\text{mm}$	0.1
油液密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	880
粘性阻尼 $B$	23.83
敏感腔容积长度 $L_v/\text{mm}$	3

图5  $r_d$ 与阶跃特性的关系Fig. 5 Step response vs pressure hole  $r_d$ 

综上所述:斜槽夹角 $\beta$ 对阶跃响应的影响更为明显。其他参数对阀动态特性的影响与之类似,限于篇幅不再赘述。

#### 4.2 频率特性分析

根据2D阀的数学模型,利用Matlab软件得到其开环控制伯德图如图9所示,从图中可知,2D换向阀的固有频率 $\omega_h$ 与其幅值穿越频率 $\omega_c$ 相等,而穿越频率近似等于开环放大系数,由图可知,开环放大系数越大,其响应速度越快,控制精度越高。

图6  $p_s$ 与阶跃特性的关系Fig. 6 Step response vs system pressure  $p_s$ 图7  $R$ 与阶跃特性的关系Fig. 7 Step response vs effective radius  $R$ 图8  $\beta$ 与阶跃特性的关系Fig. 8 Step response vs wedge slope angle  $\beta$ 

## 5 实验

滚轮压扭型2D电液比例方向阀的实物如图10所示。本文设计了实验方案,并搭建实验平台,对压扭联轴器和该阀分别进行了实验研究<sup>[15]</sup>。

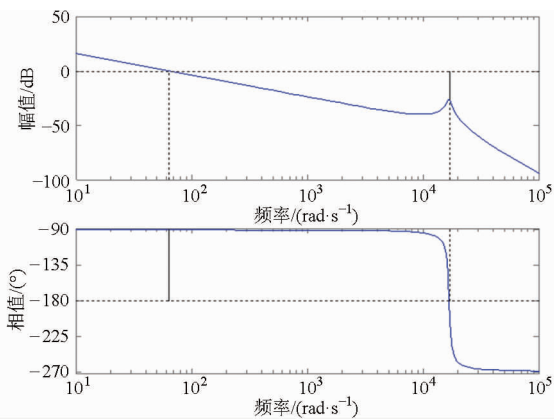


图 9 伯德图

Fig. 9 Bode diagram

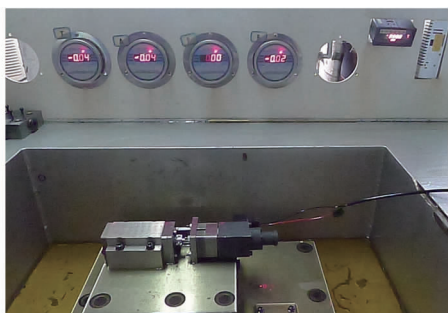


图 10 实验样机

Fig. 10 Photo of prototype

实验中为便于数据监测,将压扭装置与 2D 阀体中间空出,二者之间用对中导向机构固连,由铜片组成的反射板从中引出,用来检测阀芯和电磁铁位移信号。实验方案如图 11 所示,将阀在实验台上通高压油,通过比例控制放大器叠加不同的颤振信号,用激光位移传感器分别检测电磁铁位移与阀芯位移。

### 5.1 压扭联轴器实验

对滚轮式压扭联轴器进行了颤振补偿下的实验研究,得到压扭联轴器输入位移与输出位移实验曲线如图 12 所示,当颤振频率为 50 Hz 时,随着颤振信号幅值的逐渐增加,电磁铁位移与阀芯位移之间的滞环特性被明显削弱,颤振幅值为电流的 4% 时,滞环降到 0.5% 左右,输入输出特性得到很大提高,且具有良好的线性度。实验表明:2D

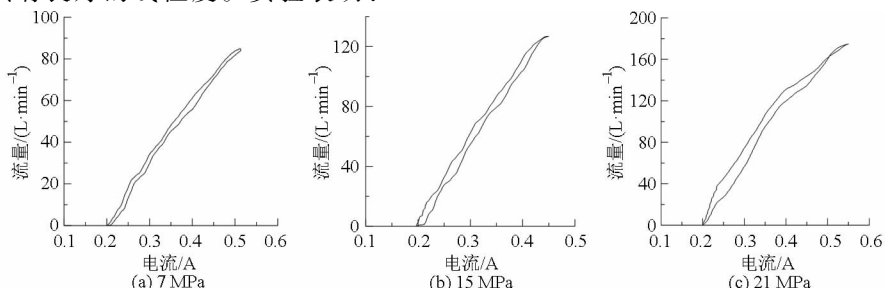


图 13 流量滞环曲线

Fig. 13 Experimental curves of flow rate

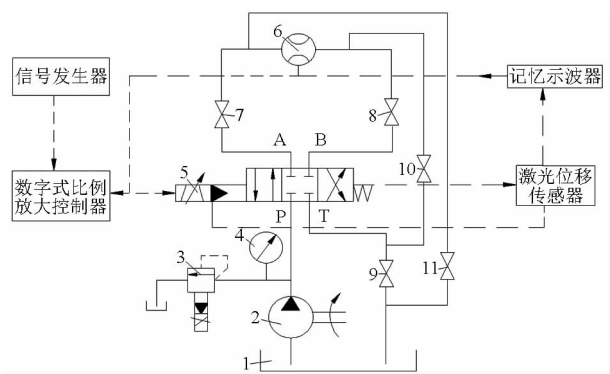


图 11 实验方案

Fig. 11 Measurement set-up for operation

- 1. 油箱 2. 液压泵 3. 溢流阀 4. 压力表 5. 2D 换向阀 6. 流量计 7、8、9、10、11. 截止阀

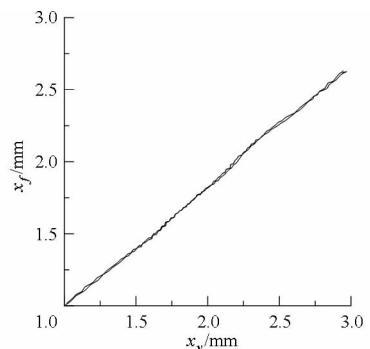


图 12 输入位移与输出位移实验曲线

Fig. 12 Experimental curves of input and output displacement

电液比例方向阀在无压力状态下可像直动方向阀一样正常工作。

通过流量计测量阀输出流量,得到不同系统压力下的流量滞环曲线和输入输出位移之间的关系曲线如图 13 所示,实际测得 2D 电液比例方向阀导控工作状态特性良好,可实现高压大流量控制。

### 5.2 动态实验

通过实验可得到该阀在不同频率正弦信号下的频率响应特性曲线。其相频、幅频特性如图 14、15 所示。从图中可以看出,该阀具有较宽的频宽,对应 -3 dB、-90°的频宽约为 12 Hz,表明该阀具有良好的动态特性。

实测阶跃响应曲线如图 16 所示。由图可知,其

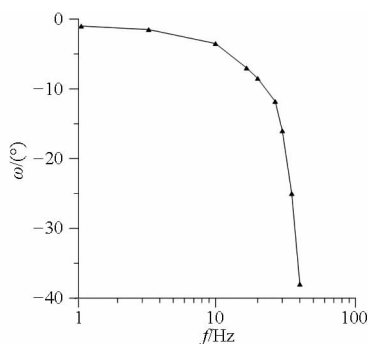


图 14 相频特性

Fig. 14 Experimental curves of phase response

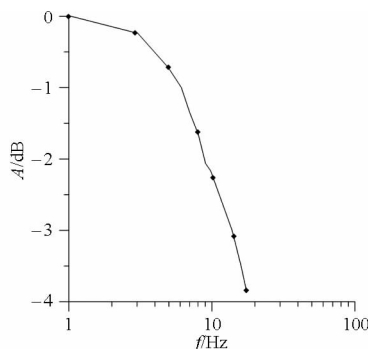


图 15 幅频特性

Fig. 15 Experimental curves of frequency response

阶跃响应上升时间约为 0.45 s, 无超调量, 稳态误差低, 说明该 2D 换向阀具有较快的响应速度。

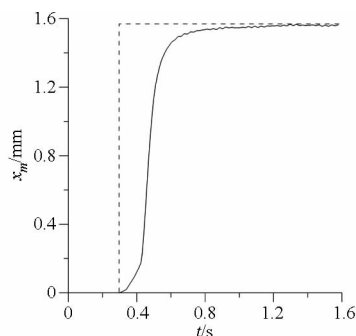


图 16 2D 电液比例换向阀阶跃特性

Fig. 16 Experimental curves of step response

## 6 结论

(1) 设计了一种滚轮式双向压扭联轴器, 摩擦力小, 结构简单, 与双向比例电磁铁和 2D 阀组成一种大流量位置反馈型的 2D 电液比例方向阀。

(2) 运用流体控制理论建立了该阀的数学模型, 应用 Matlab 软件仿真分析了该阀的阶跃特性和频率特性, 仿真结果表明: 该阀具有良好的动态特性, 为 2D 阀的设计优化提供了理论依据。

(3) 2D 电液比例方向阀实验结果表明: 该阀既可在零压下工作, 也可实现高压大流量的控制, 即兼具直动和导控电液比例方向阀的功能; 且在导控工作状态下具有很好的比例控制和动态特性。

## 参 考 文 献

- 王庆丰, 魏建华, 吴根茂. 工程机械液压控制技术的研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 51-56.  
WANG Qingfeng, WEI Jianhua, WU Genmao, et al. Progress and prospects in the researcher of hydraulic control for construction machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 51-56. (in Chinese)
- WU G M. Research on static and dynamic performance of 2 way proportional throttle valve with displacement force feedback[C]// Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 1985: 273-290.
- HERBERT E Merritt. Hydraulic control systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- ANDERSSON B. On the valvistor a proportionally controlled seat valve[D]. Linköping: Linköping University, 1984.
- QUAN Long, XU Xiaoqing, YAN Zheng, et al. A new kind of pilot controlled proportional direction valve with internal flow feedback[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 60-65.
- ANDERSSON B, ANDROW D, MARTIN A. Vickers new technologies applied to electronic hydraulic controls[C]. SAE International off-highway and Powerplant Congress and Exposition, Indian, USA, 1996: 71-76.
- 左强, 李胜, 阮健. 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. 2D electro-hydraulic proportional directional valve elastic thrust torsion coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 327-333. (in Chinese)
- 励伟, 阮健, 任燕, 等. 三位四通 2D 电液比例换向阀的静态特性实验研究[J]. 液压与气动, 2013(12): 124-127.
- RUAN J, BURTON R, UKRAINETZ P. An investigation into the characteristics of a two dimensional "2D" flow control valve[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2002, 124(1): 214-220.
- 刘国文, 李胜, 阮健, 等. 双向压扭联轴器滞环补偿技术研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 349-354.  
LIU Guowen, LI Sheng, RUAN Jian, et al. Dither compensation technology for hysteresis of bi-direction thrust torsion coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 349-354. (in Chinese)
- 刘国文. 位移放大型 2D 电液比例换向阀的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- 励伟. 大流量 2D 电液比例换向阀的设计及研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- 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.
- 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学的 MATLAB 的求解[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- 满在朋, 丁凡, 刘硕, 等. 大流量电液控制阀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 345-351.  
MAN Zaipeng, DING Fan, LIU Shuo, et al. Design and experiment on large-flow-rate electro-hydraulic control valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 345-351. (in Chinese)