

斜坡渐扩形节流槽对比比例阀微动特性影响研究

李娜娜 刘亚斌 魏列江 冀宏 谭振达 赵保才

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘要: 针对现有 U 形节流槽的比例阀在小开口处, 阀口过流面积变化梯度较为剧烈、流量增益较大, 导致比例阀在小开口时会产生启动不平稳、响应速度较慢和流量控制精度较低的问题, 提出一种节流槽形状为斜坡渐扩形的新阀芯。通过理论计算和模拟仿真的方法, 对比分析了 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽的过流面积变化梯度以及不同阀口开度下的位移特性、流量特性和阀口流动特性。由仿真结果可知, 相较于 U 形节流槽, 斜坡渐扩形节流槽在阀口开度为 1 mm 时, 阀芯位移响应时间缩短 0.04 s; 在阀口开度为 2 mm 时, 阀芯位移响应时间缩短 0.07 s。且斜坡渐扩形节流槽在阀口开度较小时, 稳态液动力更小, 流动状态更稳定, 造成的流动损耗也更小。最后进行了试验验证, 由试验结果可知, 斜坡渐扩形节流槽阀芯位移响应时间缩短 0.08 s, 且阀芯流量响应特性曲线的线性度更好。通过对仿真和试验结果的对比较可知, 当节流槽形状为斜坡渐扩形时, 阀芯在小开口处过流面积变化梯度较小, 流量增益较为平稳, 从而提高了阀的启动平稳性、响应速度和流量控制精度, 改善了比例阀微动特性。

关键词: 比例阀; 过流面积; 斜坡渐扩形; 位移响应; 流量控制; 微动特性

中图分类号: TH137.52

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)08-0418-09

OSID:



Influence of Slope-diverge-shaped Throttling Grooves on Micro-motion Characteristics of Proportional Valve

LI Na'na LIU Yabin WEI Liejiang JI Hong TAN Zhenda ZHAO Baocai

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: For the existing proportional valve with the U-shaped throttling grooves of the main spool, the discharge area change gradient of the valve port is more severe and the flow gain is large in the small opening, resulting in poor micro-motion characteristics such as unstable start, slower response and low flow control accuracy of the proportional valve in the small opening. A throttling grooves with slope-diverge-shaped was proposed. The discharge area change gradient of U-shaped throttling grooves and slope-diverge-shaped throttling grooves were compared and analyzed by theoretical calculation and simulation methods, as well as the displacement characteristics, flow characteristics and valve port flow characteristics under different valve port openings. It can be seen from the simulation results that compared with the U-shaped throttling grooves, the response time of the slope-diverge-shaped throttling grooves was shortened by 0.04 s when the opening of the valve port was 1 mm. When the opening of the valve port was 2 mm, the displacement response time was shortened by 0.07 s. And when the slope-diverge-shaped throttling grooves valve was ported at the small opening, its steady-state hydraulic power was smaller, the flow state was more stable, and the flow loss was smaller. And the experimental results showed that the displacement response time of the spool of the slope-diverge-shaped throttling grooves was shortened by 0.08 s, and the linearity of the flow response characteristic curve was better. Finally, through the comparative analysis of the simulation and experimental results, it can be seen that slope-diverge-shaped throttling grooves, the discharge area change gradient of the main valve core was smoothly in the small opening, and the flow gain was relatively stable, which improved the smoothness of valve start-up, speed of response and flow control accuracy. In summary, the slope-diverge-shaped throttling

收稿日期: 2023-02-14 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905243)

作者简介: 李娜娜(1989—), 女, 讲师, 博士生, 主要从事数字电液控制研究, E-mail: linncom@yeah.net

通信作者: 魏列江(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事电液控制研究, E-mail: weiliejiang@126.com

grooves realized the improvement of the micro-motion characteristics of the proportional valve.

Key words: proportional valve; discharge area; slope-diverge-shaped throttling grooves; displacement response; flow control; micro-motion characteristics

0 引言

节流槽滑阀又称非全周开口滑阀,是液压阀的基本结构形式之一,它的阀口是在阀芯凸肩上均布若干不同形状的节流槽,或者不同形状节流槽的组合,用于获得不同的流量控制特性。节流槽滑阀阀口水力半径大、抗阻塞性能好、流量调节范围宽、面积梯度容易控制、具有较好的流量微调性能^[1-4]。通过合理设计组合节流槽可以获得丰富的多级阀口面积曲线,能够实现对流量的多级节流控制,满足不同工况下液压执行机构对运动速度的要求^[5-8]。

工程机械中液压系统的可靠性、稳定性、安全性、舒适性等众多特性很大程度取决于节流槽滑阀的性能,而节流槽滑阀的性能又很大程度上取决于节流槽形状的设计,所以节流槽形状的设计是滑阀阀芯设计中很重要的一环。节流槽的形状决定了阀口过流面积,阀口过流面积又影响着阀的微动特性。随着对中高端工程机械的响应速度和悬停位置微调灵敏度的需求提高,对阀的分辨率和控制精度的要求也进一步提升,而传统的国产比例阀普遍存在工作装置在小开口下低频抖动,微小信号下响应速度、控制精度较低,即微动特性较差的问题。微动特性是液压元件设计的一个关键因素,如挖掘机、起重机在工作过程中常常需要进行一些微动操作,而阀微动特性直接影响着这一操作的可靠性和准确性^[9-13]。可以将微动特性定义为控制主阀芯以微小增量缓慢移动到各工作位置时,阀的响应特性和流量特性,可以用线性度、小开口处的流量稳定性、小开口处的响应时间、流量增益等性能指标来衡量。要使阀的微动特性有较好的表现,阀在小开口处通过节流槽的流量增益就不宜太大,且工作过程中流量线性度要好,小开口时阀芯位移响应时间要短。因此可以通过改变节流槽的结构,来实现对流量变化梯度及线性度的控制,进而提升比例阀在小开口处的微动特性。

文献[14-15]在对液压滑阀节流槽气穴噪声特性的研究中,对节流槽阀口的过流面积进行了分析和计算;对非全周开口滑阀的稳态液动力进行了研究。文献[16]对节流槽滑阀阀口系数及稳态液动力进行了研究,提出了利用节流槽阀口过流面积来衡量节流槽阀口流量控制特性的方法。ROGER^[17]利用 ANSYS 对阀内压力场和速度场进行

了仿真分析,得到了不同边界条件下阀口流量特性与阀口过流面积的关系。由于传统的 U 形节流槽在小开口处过流面积变化梯度和流量增益较大,导致比例阀存在着启动不平稳和流量控制精度较低的问题,为了使得阀芯移动时阀口过流面积近似于线性变化,以增强流量的平稳过渡^[18-22],本文提出一种节流槽形状为斜坡渐扩形的新阀芯,通过理论计算、仿真分析、试验验证对 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽的流量特性、位移响应特性进行分析和研究。

1 阀口过流面积推导与计算

阀口过流面积是影响阀口流量特性的最主要因素,它的计算是阀芯设计的关键,是流量计算的前提和基础^[23-25]。U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽阀口结构如图 1a、1b 所示,阀口压差分布如图 1c、1d 所示。

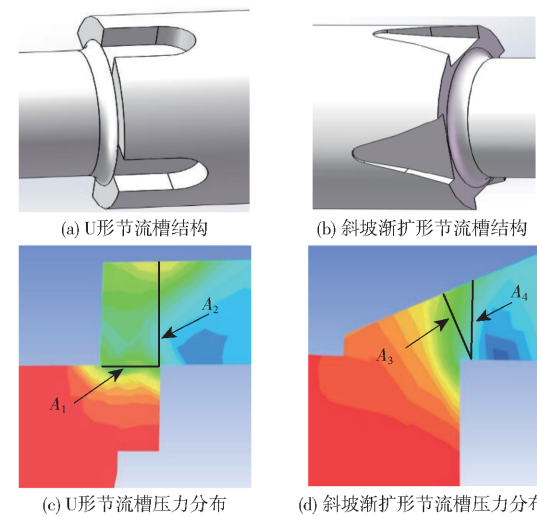


图 1 U 形和斜坡渐扩形节流槽三维图和阀口压力分布图
Fig. 1 U-shaped and slope-diverge-shaped throttle grooves 3D diagram and pressure distribution diagram

1.1 U 形节流槽阀口过流面积推导与计算

U 形节流槽又称矩形节流槽,由半圆段和矩形段组成。运用 Fluent 仿真软件对 U 形节流槽进行流场仿真,由 U 形阀口在某一开度下阀腔内部的压力分布图(图 1c)可以看到 U 形节流槽阀口压差主要集中在节流面 A₁、A₂上,且具有二级节流的特征,其节流槽过流面积计算简图如图 2 所示。

因为 U 形节流槽具有二级节流的典型特征,所以 U 形节流槽的阀口面积 S₀按节流面 A₁和 A₂的面积串联等效计算,其等效方程为

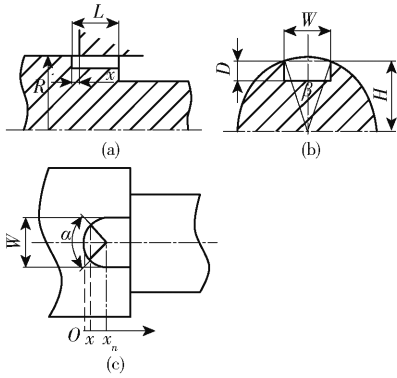


图 2 U 形节流槽过流面积计算简图

Fig. 2 Calculation diagram of discharge area of U-shaped throttle

$$S_U = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2}}} \quad (1)$$

阀口开度 $0 < x \leq x_n$ 时有

$$S_1 = \int_0^x \beta R dx \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{R^2 \beta}{2} - \frac{WH}{2} + W(D - R + H) \quad (3)$$

其中

$$x_n = \frac{W}{2}$$

阀口开度 $x_n < x \leq L$ 时有

$$S_1 = \frac{1}{2} \pi R^2 + \int_{x_n}^x \beta R dx \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{R^2 \beta}{2} - \frac{WH}{2} + W(D - R + H) \quad (5)$$

式中 x ——阀口开度 R ——阀芯半径
 β ——开口槽圆心角
 W ——节流槽口宽度
 H ——节流槽上平面到阀芯中心轴距离
 D ——节流槽特征深度
 L ——节流槽长度
 S_U 、 S_1 、 S_2 ——节流槽阀口面、节流面 A_1 、节流面 A_2 的面积

1.2 斜坡渐扩形节流槽阀口过流面积推导与计算

图 3 为阀口坡度为 β_1 时的斜坡渐扩形过流面积计算简图,运用 Fluent 对斜坡渐扩形节流槽进行流场仿真,得到如图 1d 所示在某一开度下阀腔内部的压差分布图,由图可知斜坡渐扩形节流槽阀口压差主要集中在节流面 A_3 的投影面 A_4 上,其具有单级节流特征。阀芯通过左右移动改变阀口开度 x 来获取相应的过流面积,进而控制通过节流口的流量。斜坡渐扩形节流槽的典型特征是随着阀口开度的增加,阀口过流面积也在持续增加,过流面积变化梯度较为平稳。

斜坡渐扩形节流槽阀口过流面积的计算可用最

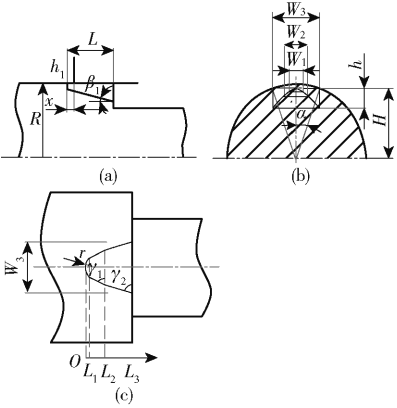


图 3 斜坡渐扩形节流槽过流面积计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of discharge area of slope-diverge-shape throttle

小截面来确定。由于阀芯节流口上节流边所在的面为圆弧面,围成曲面的相贯线为空间三维曲线,因此难以获得此处过流面积的精确解析解,所以本文在推导斜坡渐扩形节流槽过流面积时对阀口结构进行了简化,采用以直代曲的方法将阀口上节流边的圆弧简化为直线。因为斜坡渐扩形节流槽进出口压差集中分布在斜面 A_4 上,所以阀口面积可按阀口开度处的截面 A_4 在斜面 A_3 上的投影面积计算,其过流面积计算公式为

$$S_4 = S_3 \cos \beta_1 \quad (6)$$

$0 < x \leq L_1$ 时有

$$\frac{r-x}{r} = \cos \alpha_1 \quad (7)$$

$$h_x = x \tan \beta_1 + h_1 \quad (8)$$

$$W_x = 2r \sin \alpha_1 \quad (9)$$

$$S_3 = W_x h_x \quad (10)$$

$$S_4 = S_3 \cos \beta_1 = W_x h_x \cos \beta_1 \quad (11)$$

$$S_4 = 2r \sin \left(\arccos \frac{r-x}{x} \right) \cdot (x \tan \beta_1 + h_1) \cos \beta_1 \quad (12)$$

$L_1 < x \leq L_2$ 时有

$$h_x = x \tan \beta_1 + h_1 \quad (13)$$

$$\tan \gamma_1 = \frac{2(L_2 - L_1)}{W_2 - W_1} \quad (14)$$

$$W_x = W_1 + \frac{2(x - L_1)}{\tan \gamma_1} = W_1 + \frac{(x - L_1)(W_2 - W_1)}{L_2 - L_1} \quad (15)$$

$$S_4 = S_3 \cos \beta_1 = W_x h_x \cos \beta_1 \quad (16)$$

$$S_4 = \left[W_1 + \frac{(x - L_1)(W_2 - W_1)}{L_2 - L_1} \right] \cdot (x \tan \beta_1 + h_1) \cos \beta_1 \quad (17)$$

$L_2 < x \leq L_3$ 时有

$$h_x = x \tan \beta_1 + h_1 \quad (18)$$

$$\tan\gamma_2 = \frac{2(L-L_2)}{W_3-W_2} \tag{19}$$

$$W_x = W_2 + \frac{2(x-L_2)}{\tan\gamma_2} = W_2 + \frac{(x-L_2)(W_3-W_2)}{L-L_2} \tag{20}$$

$$S_4 = S_3 \cos\beta_1 = W_x h_x \cos\beta_1 \tag{21}$$

$$S_4 = \left[W_2 + \frac{(x-L_2)(W_3-W_2)}{L-L_2} \right] \cdot (x \tan\beta_1 + h_1) \cos\beta_1 \tag{22}$$

- 式中 r ——阀口半径
 α_1 ——节流槽渐扩度
 h_1 ——节流槽初始深度
 h_x ——阀口开度为 x 时的节流槽深度
 γ_1 ——二级节流槽渐扩角
 γ_2 ——三级节流槽渐扩角
 $L_1、L_2、L_3$ ——三级节流槽长度
 $W_1、W_2、W_3$ ——三级节流槽宽度
 W_x ——阀口开度为 x 时的节流槽宽度
 $S_3、S_4$ ——节流面 A_3 、节流面 A_4 的面积

通过上面的计算结果,可以得到 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽阀口面积随阀口开度变化的曲线图如图 4 所示。由图可知,在小开口处,斜坡渐扩形节流槽具有较小的面积变化梯度,即流量增益较小,因此执行机构起动过程较平稳、调速性能好、冲击力较小。整体来看,斜坡渐扩形节流槽的过流面积变化曲线的线性度较好,具有较好的响应速度和流量控制精度。

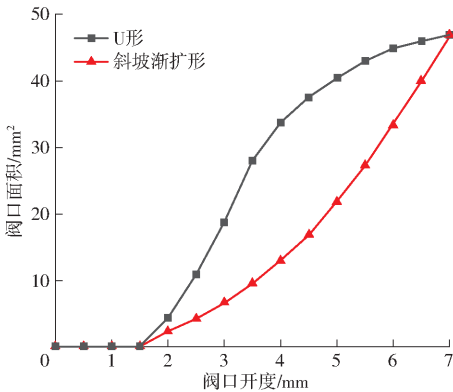


图 4 不同节流槽形状下阀口面积-阀口开度曲线
Fig.4 Valve port area – opening curves under different throttle groove shapes

2 流动特性仿真分析

为了验证过流面积理论计算的合理性,以及不同节流槽形状的阀芯对主阀在小开口处的启动平稳性、响应特性和流量特性的影响情况,运用计算流体力学的方法通过 Fluent 软件对不同阀口开度进行流场仿真。首先利用 SolidWorks 软件建立 U 形和斜

坡渐扩形节流槽阀芯的三维模型如图 1a、1b 所示。然后通过 DM 进行主阀阀口处流道的抽取,再利用 ICEM 进行网格划分,由于主阀阀口处分布有节流槽,阀口处的结构以及油液的流态复杂,压力、速度变化梯度较大,因此在阀口处采用局部网格加密,其它区域采用粗网格的方法。边界条件采用固定压差,入口压力设置为 20 MPa,出口压力设置为 18 MPa,固定压差为 2 MPa;油液密度 844 kg/m³,运动粘度 0.025 49 m²/s,仿真模型选择 $k-\varepsilon$ 。对两种阀芯在阀口开度分别为 1、2 mm 时进行仿真,得到压力云图如图 5 所示;速度云图如图 6 所示;速度流线图如图 7 所示。

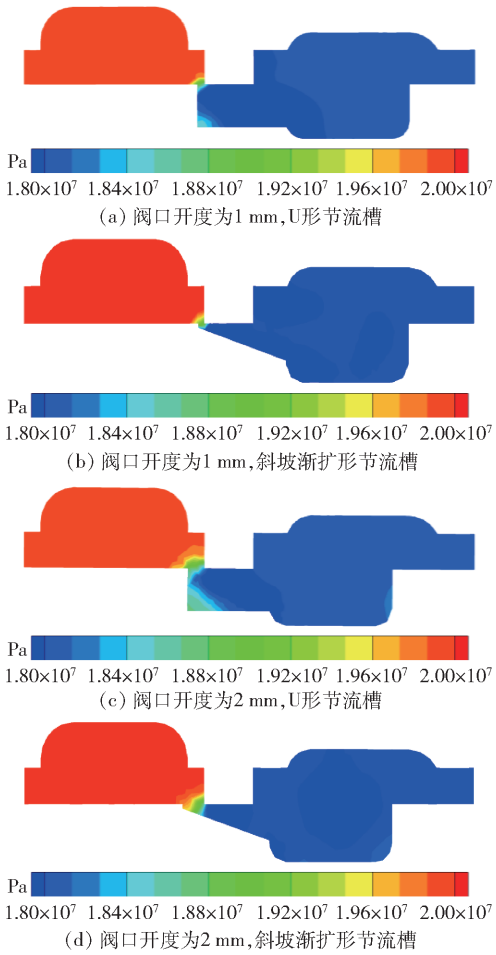


图 5 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽在不同阀口开度下的压力云图

Fig.5 U-shaped and slope-diverge-shaped throttle grooves pressure cloud diagram under different port openings

滑阀的稳态液动力可以理解为阀芯台阶面压力状态的改变,使得阀芯产生了一个轴向附加力。由于阀芯节流槽是对称分布的,所以阀芯径向力相互抵消,只有轴向力存在,而阀芯台阶面上的轴向压力差值即为稳态液动力^[26]。稳态液动力是影响比例阀控制特性的关键因素之一,本文针对 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽进行了流场仿真,在满足主阀

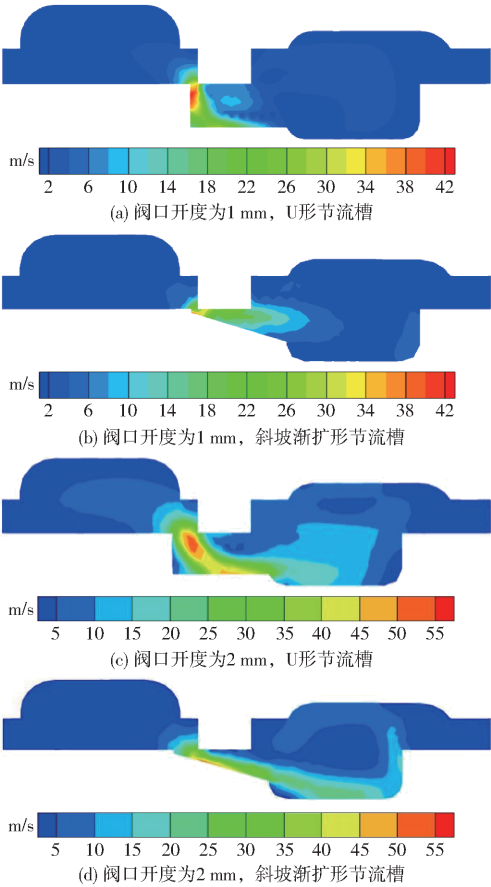


图 6 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽在不同阀口开度下的速度云图

Fig. 6 U-shaped and slope-diverge-shaped throttle grooves velocity cloud diagram under different port openings

最大流量特性要求的同时,比较两种节流槽结构哪个具有更小的稳态液动力。由图 5 可知,U 形节流槽在流动过程中在第 1 次节流和第 2 次节流处存在压力损耗,而斜坡渐扩形节流槽只有一次节流,所以节流口处的压力损耗相比 U 形节流槽更小。由图 6 可知,阀口开度较小时,流体的最大速度处于节流槽斜坡与阀体拐点的垂线上,由此证明了节流面积理论计算部分选取的节流位置是合理的。U 形节流槽入口处的流速大于斜坡渐扩形入口处的流速,根据稳态液动力的简化计算公式

$$F_s = \rho q_v v_1 \cos \alpha_1 \tag{23}$$

式中 ρ ——油液密度 q_v ——体积流量
 v_1 ——流速 α_1 ——射流角

可知,流速越大,产生的稳态液动力也更大。所以,相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽具有较小的稳态液动力,因而也具有更好的位移响应特性。

由图 7 可知,当油液冲击阀芯壁面产生偏转时,会在阀腔内形成漩涡,随着阀口开度逐渐增大,漩涡越来越明显,而漩涡的内摩擦、漩涡与射流的混合是液压系统能量损耗的重要原因。U 形节流槽结构在开口为 1 mm 时,射流沿着阀腔壁流入,在阀口附近

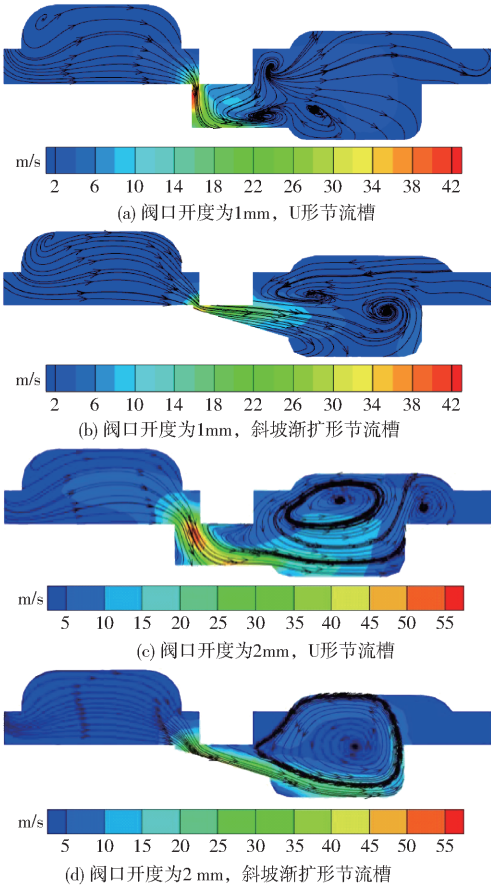


图 7 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽在不同阀口开度下的速度流线图

Fig. 7 U-shaped and slope-diverge-shaped throttle grooves speed streamline diagram under different port openings

形成多个漩涡,使得阀口附近的流动状态变差,也造成了较大的流动损耗。而在采用斜坡渐扩形节流槽后,阀腔内漩涡涡核的位置发生了明显的变化,漩涡的数量也明显减少,漩涡产生的位置离阀口较远,影响的范围也减小,预期会有更好的阀口流动状态以及更小的流动损耗。在阀口开度为 2 mm 时,U 形节流槽阀腔内部流场拓扑结构发生了本质上的变化,在阀腔内部形成了两个非对称漩涡,主要是由阀腔内部结构的不对称引起的,而在采用了斜坡渐扩形节流槽之后,涡核的位置产生了变化,漩涡的影响范围和程度也有明显的减弱。由于这种流场特性的不同,导致了 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽在阀口处的流量特性具有明显的差异,结合两种节流槽结构的压力云图、速度云图以及速度流线图可知,斜坡渐扩形节流槽在主阀小开口处具有更小的流动损耗和更平稳的启动特性。

3 阀口处流量与位移响应特性仿真分析

3.1 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽通过阀芯的流量随阀口开度的变化特性

将通过计算所得到的阀口过流面积曲线导入到

如图 8 所示的 AMESim 仿真模型里,得到流量-阀口开度曲线如图 9 所示。通过对比过流面积的仿真和计算结果可知,两者能够较好地吻合,证明了仿真模型的正确性和可行性^[27]。

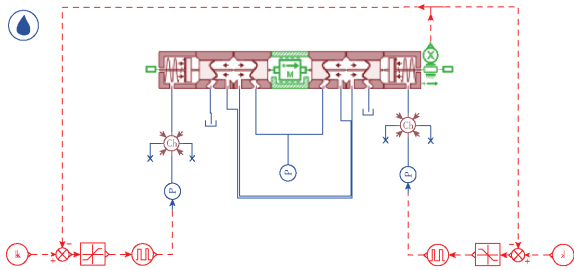


图 8 U 形和斜坡渐扩形节流槽 AMESim 模型

Fig. 8 U-shaped and slope-diverge-shaped throttle grooves AMESim model

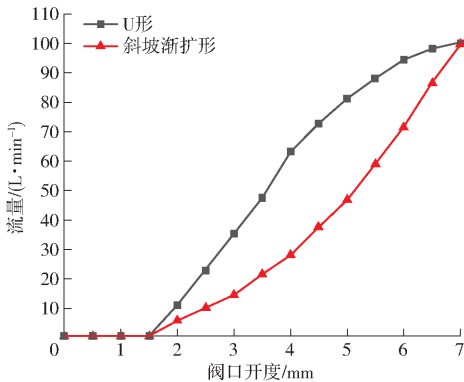


图 9 不同节流槽形状下流量-阀口开度曲线

Fig. 9 Flow - opening curves under different throttle groove shapes

由图 9 可知,在不影响主阀最大流量的前提下,U 形节流槽阀口开度小于顶部圆弧半径时,阀口面积梯度较大,流量增益较大;阀口开度大于顶部圆弧半径时,阀口面积梯度较小,流量增益较小,因此当主阀在小开口时,会产生微调性能较差、启动不平稳的问题。而斜坡渐扩形节流槽在开度较小时,阀口面积梯度较为平缓,流量增益较小;开度较大时,阀口面积梯度较大,流量增益也较大,所以当主阀在小开口时,流量变化缓慢平稳,流量控制精度较好,增加了执行机构的启动平稳性,提高了比例阀的微动特性。此外相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽的调速性能更好,能较好地满足有慢动作要求的工况,且在小流量工况下具有较好的缓冲效果,能够防止执行机构突然动作。

3.2 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽的阀芯位移响应特性和流量控制特性

由流场仿真结果可知,主阀在小开口时,相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽阀口处的稳态液动力较小,流动状态较好,具有较小的流动损耗。对于大流量比例阀,阀芯的位移响应速度和控制性能主

要由稳态液动力决定,稳态液动力过大会降低阀芯的响应时间,会对阀芯控制的稳定性产生较大的影响。由此可知斜坡渐扩形节流槽应该在阀口开度较小时具有更好的响应和控制性能。

由图 10 可知,当给定主阀位移信号为 1 mm 时,U 形节流槽在 0.27 s 时达到稳定状态,而斜坡渐扩形节流槽在 0.23 s 时就可以达到稳定状态,比 U 形节流槽快了 0.04 s。由图 11 可知,当给定主阀位移信号为 2 mm 时,U 形节流槽在 0.33 s 时达到稳定状态,而斜坡渐扩形节流槽在 0.26 s 时就达到稳定状态,比 U 形节流槽快了 0.07 s。因此,在阀芯小开口时,斜坡渐扩形节流槽具有更好的位移响应特性。

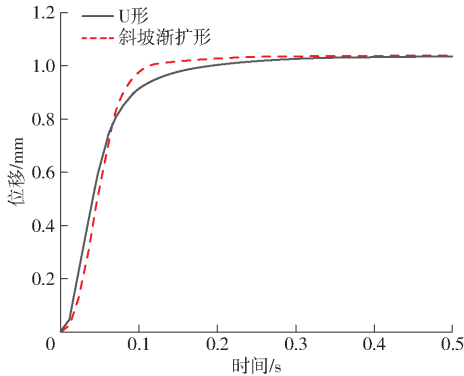


图 10 阀芯位移为 1 mm 时位移响应曲线

Fig. 10 Displacement response curves when spool displacement was 1 mm

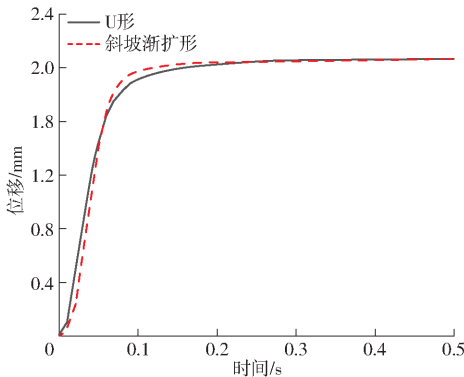


图 11 阀芯位移为 2 mm 时位移响应曲线

Fig. 11 Displacement response curves when spool displacement was 2 mm

4 试验

图 12、13 为不同节流槽形状下比例阀微动特性测试试验装置原理图和试验台,图 14 为斜坡渐扩形阀芯的实物图。比例阀节流口进出压力分别由变量泵和比例减压阀调定,系统最高压力由溢流阀设定为 30 MPa。软管和进油口过滤器、回油口过滤器能够有效地降低油液受污染的风险,以及减小油液脉动与冲击对节流口处流动特性的影响。采用透明度

高的亚克力板做成主阀的右控制腔壳体,然后再安装位移传感器,通过透明壳体可以直接观察到主阀芯的位移变化情况。测控系统利用 CompactRIO 虚拟仪器测控平台,对主阀芯进出口压力以及主阀芯的位移变化情况进行高精度实时控制和检测。采集系统利用 NI9401 板卡进行数据采集。

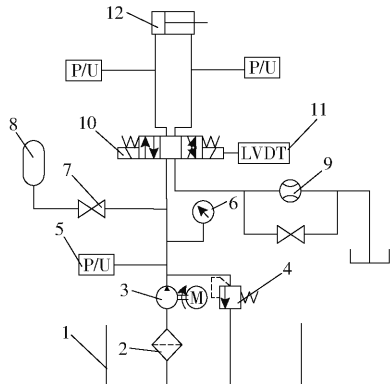


图 12 比例阀微动特性测试试验原理图

Fig. 12 Schematic of experimental scheme for testing micro-motion characteristics of proportional valves

1. 油箱 2. 过滤器 3. 变量泵 4. 溢流阀 5. 压力传感器 6. 温度计 7. 截止阀 8. 蓄能器 9. 流量计 10. 被试阀 11. 位移传感器 12. 油缸

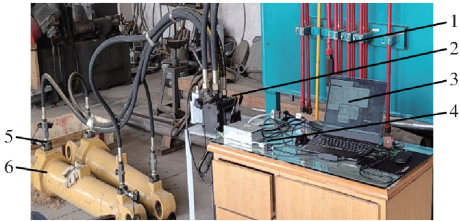


图 13 比例阀微动特性测试试验台

Fig. 13 Proportional valve micro-motion characteristics test bench

1. 泵站 2. 被试阀 3. 上位机 4. 电源 5. 压力传感器 6. 油缸

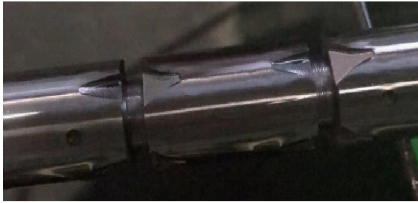


图 14 斜坡渐扩形阀芯实物图

Fig. 14 Physical diagram of slope-diverge-shaped throttle spool

针对比例阀微动特性的测试,分别采用 U 形节流槽和斜坡渐扩形节流槽两种不同节流槽形状的阀芯进行试验研究。采用 PWM 信号作为控制信号,向阀芯发送位移信号,观察不同节流槽形状下主阀芯的位移响应情况,以及不同阀口开度下,通过主阀芯的流量变化曲线。分别得到 U 形节流槽和斜坡

渐扩形节流槽的位移和流量特性曲线如图 15、16 所示。

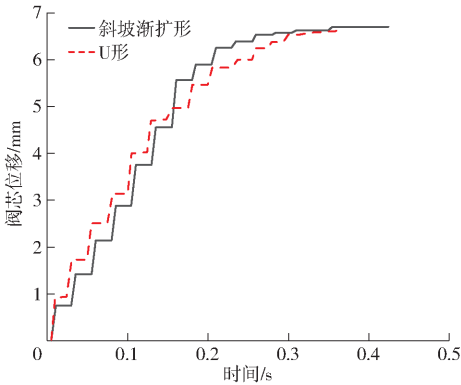


图 15 不同节流槽形状下阀芯位移曲线

Fig. 15 Spool displacement curves under different throttle groove shapes

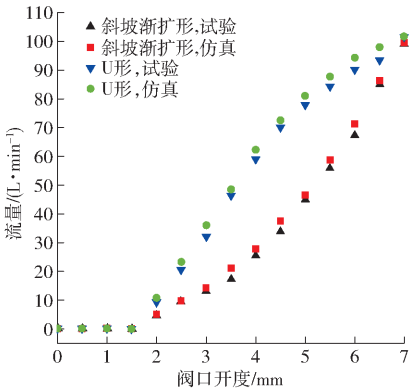


图 16 不同节流槽形状下阀芯流量曲线

Fig. 16 Spool flow curves under different throttle groove shapes

因为高速开关阀先导桥路输出的流量是离散化的,所以主阀芯的位移响应具有周期性的振荡。从图 15 可以看出,U 形节流槽阀芯在 0.41 s 达到稳定状态,而斜坡渐扩形节流槽阀芯在 0.33 s 达到稳定状态。相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽的位移响应时间缩短 0.08 s。从图 16 可以看出,试验结果与仿真结果基本吻合,证明了仿真模型的正确性和合理性,且在小开口阶段,斜坡渐扩形节流槽流量变化缓慢平稳,提高了执行机构的启动平稳性,且流量特性曲线线性度更好,即流量的控制精度更高,因此斜坡渐扩形节流槽具有较好的微动特性。

5 结论

(1)相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽阀芯在小开口处具有更小的稳态液动力,且阀口的流动状态更加稳定,因此斜坡渐扩形节流槽具有更小的流动损耗和更好的启闭特性。

(2)由仿真结果可知,相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽在阀口开度为 1 mm 时,阀芯位移响

应时间缩短 0.04 s;在阀口开度为 2 mm 时,阀芯的位移响应时间缩短 0.07 s。由试验结果可知,斜坡渐扩形节流槽达到稳定的时间相较于 U 形节流槽缩短 0.08 s。因此斜坡渐扩形节流槽具有更好的位移响应特性。

(3)相较于 U 形节流槽,斜坡渐扩形节流槽在阀芯小开口处,其过流面积变化梯度相对平缓,流量增益较小,且在阀芯的整个动作过程中,线性度更高,不存在过早的流量饱和。因此斜坡渐扩形节流槽具有更好的流量控制特性。

参 考 文 献

[1] 林建亚,何存兴. 液压元件[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[2] 王东升. 节流槽滑阀阀口流量系数及稳态液动力计算的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2008.
WANG Dongsheng. Study on flow coefficient and steady-state hydrodynamic calculation of throttle slot slide valve port[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2008. (in Chinese)

[3] 杨华勇,曹剑,徐兵,等. 多路换向阀的发展历程与研究展望[J]. 机械工程学报,2005,41(10):1-5.
YANG Huayong,CAO Jian,XU Bing,et al. Development history and research prospect of multi-way directional valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(10):1-5. (in Chinese)

[4] GORDEEV B A,OKHULKOV S N,IVANOV E,et al. Influence of working fluid in the throttle channels of hydraulic mounts on the damping properties[J]. Russian Engineering Research,2022,42(5):435-446.

[5] 张鑫,韩进,马德建,等. 双 U 形节流槽滑阀多场耦合特性研究[J]. 液压与气动,2021,45(4):13-18.
ZHANG Xin,HAN Jin,MA Dejian,et al. Study on multi-field coupling characteristics of the spool valve with double U-shaped throttling groove[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2021,45(4):13-18. (in Chinese)

[6] 王安麟,况龙,张小路. 换向滑阀组合节流槽流量系数研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(2):110-117.
WANG Anlin,KUANG Long,ZHANG Xiaolu. A study on flow coefficient of combined throttling groove in spool valves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2018,52(2):110-117. (in Chinese)

[7] 曹文斌,侯宝宝,牛壮,等. 组合型节流槽对多路阀内流场特性影响的仿真研究[J]. 液压与气动,2022,46(11):17-25.
CAO Wenbin,HOU Baobao,NIU Zhuang, et al. Simulation research on influence of combined throttle groove on flow field characteristics in multi-way valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022,46(11):17-25. (in Chinese)

[8] ZHANG Xiaolu,WANG Anlin,CHEN Wei,et al. Methodology for expressing the flow coefficients of coupled throttling grooves in a proportional-directional valve[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A,2020,21(10):799-816.

[9] ZHANG Xiaolu,WANG Anlin,TANG Jiangwei. Optimal design of multi-section proportional directional valve throttle grooves with artificial neural networks[C] // 2018 3rd International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering, Phuket, Thailand, 2018: 03003.

[10] 艾超,王娟,孔祥东,等. 多路阀异形阀口结构对微动特性影响研究[J]. 液压与气动,2015,39(2):20-24.
AI Chao,WANG Juan,KONG Xiangdong,et al. Influence of anomalous orifice structure on micro-characteristics of multi-way valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015,39(2):20-24. (in Chinese)

[11] LIU Yinshui,YANG Yousheng,LI Zhuangyun. Research on the flow and cavitation characteristics of multi-stage throttle in water-hydraulics[J]. Journal of Process Mechanical Engineering,2006,220(2):99-108.

[12] 赵慧鹏,周俊杰,包倩倩,等. 高速开关阀引导的智能换向阀特性分析[J]. 兵工学报,2022,43(10):2473-2484.
ZHAO Huipeng,ZHOU Junjie,BAO Qianqian,et al. Characteristic analysis of intelligent reversing valve based on high-speed on-off valve[J]. Acta Armamentarii,2022,43(10):2473-2484. (in Chinese)

[13] 王庆丰,魏建华,吴根茂,等. 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. Research progress and prospect of hydraulic control technology for construction machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(12):51-56. (in Chinese)

[14] 冀宏. 液压阀芯节流槽气穴噪声特性的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
JI Hong. Study on cavitation noise characteristics of throttling groove of hydraulic valve core[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2004. (in Chinese)

[15] 冀宏,傅新,杨华勇. 非全周开口滑阀稳态液动力研究[J]. 机械工程学报,2003,39(6):13-17.
JI Hong,FU Xin,YANG Huayong. Study on steady flow force of non-circular opening spool valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(6):13-17. (in Chinese)

[16] 冀宏,王东升,丁大力,等. 非全周开口滑阀阀口面积的计算方法[J]. 兰州理工大学学报,2008,34(3):48-51.
JI Hong,WANG Dongsheng,DING Dali,et al. Calculation method of orifice area of spool valve with notches[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2008,34(3):48-51. (in Chinese)

[17] ROGER Y. CFD simulations of oil flow and flow induced forces inside hydraulic valves[C] // International Off-highway & Powerplant Congress,2002:201-207.

[18] 孔祥东,宋豫,艾超,等. 比例阀异形阀口流量特性 PIV 可视化实验研究[J]. 农业机械学报,2015,46(5):328-335.
KONG Xiangdong,SONG Yu,AI Chao,et al. Visualization experiment of flow characteristics of special shaped valve port in

proportional valve using PIV technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5): 328 – 335. (in Chinese)

[19] SHOHEI R,MASAMI O,KATSUMI U,et al. Analysis of flow force in valve with notches on spool[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control,2005;435 – 438.

[20] AMIRANTE R,VESCOVE G,SLIPPOLIS A. Evalution of the flow force on an open centre directional control valve by mean of a computational fluid dynamic analysis[J]. Energy Conversion and Management,2006,47;1748 – 1760.

[21] 叶仪,殷晨波,刘辉,等. 节流槽阀口静态流动特性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(6):308 – 316.
YE Yi,YIN Chenbo,LIU Hui,et al. Stationary flow characteristics of notches on throttling grooves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):308 – 316. (in Chinese)

[22] 魏列江,李维,刘增光,等. 车辆换挡系统调压阀优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(10):360 – 366.
WEI Liejiang,LI Wei,LIU Zengguang,et al. Optimum design of pressure regulating valve in vehicle shift system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):360 – 366. (in Chinese)

[23] 徐龙. 高速开关阀组先导控制三位四通水压数字比例阀研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
XU Long. Research on pilot control three-position four-way water pressure digital proportional valve for high-speed on-off valve group[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2020. (in Chinese)

[24] 关天元. 基于稳态液动力分析的多路阀节流槽优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2020.
GUAN Tianyuan. Optimal design of multi-way valve notches based on steady-state flow force analysis[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2020. (in Chinese)

[25] 华博,赵建军,刘长卿,等. 重型拖拉机电液提升器插装式比例提升阀性能仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(8): 109 – 117.
HUA Bo,ZHAO Jianjun,LIU Changqing,et al. Performance simulation and test of plug-in proportional raising valve of electro-hydraulic hitch for heavy tractor[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(8):109 – 117. (in Chinese)

[26] DING Xinkai,LI Ruichuan,XU Jikang,et al. Study on flow force compensation characteristics and optimization design of jet guiding groove[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2022,86;102194.

[27] 尹杰,何彪,鲜雪萍,等. 基于 AMESim 的液压平衡阀动态特性[J]. 机床与液压,2017,45(20):107 – 109.
YIN Jie,HE Biao,XIAN Xueping,et al. Dynamic characteristics of hydraulic balance valve based on AMESim[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2017,45(20):107 – 109. (in Chinese)

(上接第 417 页)

[19] HUANG Y A, WU H, LIU H, et al. Research on variable stiffness and damping magnetorheological actuator for robot joint[C]// Intelligent Robotics and Applications; 10th International Conference, Springer International Publishing, 2017: 109 – 119.

[20] YUN S,KANG S,KIM M,et al. A novel design of high responsive variable stiffness joints for dependable manipula tor dependable manipulator[C]//Proceedings of ACMD,2006;A00695.

[21] CHOI J, PARK S, LEE W, et al. Design of a robot joint with variable stiffness[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2008: 1760 – 1765.

[22] 王新庆,刘艳立,李世庆,等. 一种新型变刚度柔顺关节设计与分析[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(6):506 – 511.
WANG Xinqing, LIU Yanli, LI Shiqing, et al. Design and analysis of a new variable stiffness flexible joint[J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2021,19(6): 506 – 511. (in Chinese)

[23] ZHANG L, ZHAO C, QIAN F, et al. A variable parameter ambient vibration control method based on quasi-zero stiffness in robotic drilling systems[J]. Machines, 2021, 9(3):67.

[24] 张明,马鹏菲,孙凤,等. 基于滑轮组和永磁弹簧的变刚度关节设计与控制[J]. 农业机械学报,2023,54(1):432 – 439.
ZHANG Ming, MA Pengfei, SUN Feng, et al. Design and control of variable stiffness joint based on pulley block and permanent magnet spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1): 432 – 439. (in Chinese)

[25] SHIN H, ISHIKAWA T, KAMIOKA T,et al. Design of high torque variable stiffness actuator with fast adjustment and wide range of stiffness using lever and parallel mechanism [C] // 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, 2020.

[26] 龙奕琳,王彬峦,金弘哲,等. 基于差动轮系的变刚度执行器及变刚度柔性手爪[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1):91 – 102.
LONG Yilin, WANG Binluan, JIN Hongzhe, et al. Variable stiffness actuator and variable stiffness flexible claw based on differential wheel system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023,59(1): 91 – 102. (in Chinese)