DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.08.019

杨俊茹,于小东,李瑞川,等.拖拉机多路阀节流槽动态特性研究与试验[J].中国农机化学报,2024,45(8):126-131

Yang Junru, Yu Xiaodong, Li Ruichuan, et al. Research and experiment on dynamic characteristics of tractor multi-way valve throttling groove [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 126-131

拖拉机多路阀节流槽动态特性研究与试验*

杨俊茹^{1,2},于小东¹,李瑞川^{1,3},徐继康^{1,2},韩宗冉¹,李艳超^{1,2}

(1. 山东科技大学机械电子工程学院,青岛市,266590; 2. 日照海卓液压有限公司,山东日照,276800;3. 齐鲁工业大学,济南市,250353)

摘要:为优化部分拖拉机多路阀流量特性、减小压差等问题,设计一种具有U一半圆形节流槽结构的拖拉机多路阀,通过仿 真试验研究U一半圆形节流槽拖拉机多路阀的动态特性。结果表明:U一半圆形节流槽出口流量呈现先小后大再小的特点。 多路阀出口稳态流量为113 L/min,流量变化稳定无冲击,控制特性好。制定U一半圆形节流槽拖拉机多路阀试验方案,通 过试验得出阀口压差随着阀芯位移的增大而减小,阀口最小压差为1.2 MPa;测得多路阀最大泄漏量为10.5 mL/min,满足 泄漏指标。从而验证U一半圆形节流槽多路阀流量变化稳定,内泄漏量小。

关键词:拖拉机;多路阀;U-半圆形节流槽;动态特性;泄漏量

中图分类号:S222; S223 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2024) 08-0126-06

Research and experiment on dynamic characteristics of tractor multi-way valve throttling groove

Yang Junru^{1, 2}, Yu Xiaodong¹, Li Ruichuan^{1, 3}, Xu Jikang^{1, 2}, Han Zongran¹, Li Yanchao^{1, 2}

 College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China;
 Rizhao Haidro Hydraulic Co., Ltd., Rizhao, 276800, China;

3. Qilu University of Technology, Jinan, 250353, China)

Abstract: In order to solve the problems of large leakage and large vortex area of some tractor multi-way valves, a tractor multi-way valve with U-semi-circular throttle groove is designed, and the dynamic characteristics of U-semicircular throttle trough tractor multi-way valve are studied through simulation experiments. The results showed that the outlet flow of U-semicircular throttle valve showed the characteristics of slow first, then fast and then slow. The steady-state flow rate of the outlet of the multi-way valve was 113 L/min, the flow change was stable without shock, and the control characteristics were good. The test scheme of U-semicircular throttle groove tractor multi-way valve was formulated, and it was concluded that the pressure difference at the valve port decreased with the increase of the displacement of the valve core, and the minimum pressure difference at the valve port was 1.2 MPa. The maximum leakage of the multi-way valve was 10.5 mL/min, which met the leakage index. Therefore, it was verified that the flow change of the U-semicircular throttle channel multi-way valve was stable and the internal leakage was small.

Keywords: tractor; multi-way valve; U-semicircular throttling groove; dynamic characteristics; leakage

0 引言

拖拉机多路阀的优劣决定着拖拉机的作业质量。为

改善拖拉机多路阀的性能,众多学者对多路阀进行了大量研究。Coskun等^[1]建立了先导级多路阀AMESim模型,先导级多路阀可有效的降低阀内压力损失。Marko

*基金项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGC010812,2021TSGC1419,2022CXGC020702)

第一作者:杨俊茹,女,1969年生,河北乐亭人,博士,教授,硕导;研究方向为新型涂覆层材料结构件设计及分析。E-mail: jryangzhang@163.com 通讯作者:徐继康,男,1990年生,青岛人,博士;研究方向为阀门控制系统、系统集成与制造等。E-mail: xujikang121@163.com

收稿日期:2023年2月13日 修回日期:2023年8月5日

等^[2]利用 Ansys CFX 对多路阀性能进行分析,仿真发现 多路阀的结构参数会影响阀体内部油液的流动状态,通 过改变结构参数提高了多路阀的性能。

目前多数多路阀在工作时存在压力损失大、泄漏量 大、阀体内部旋涡面积大等问题,国内学者通过优化多路 阀阀体结构、设计新型节流槽等方法来提高多路阀的性 能。周思聪等^[3]在多路阀阀芯上增加环形凸台,研究了 稳态液动力在不同工况下的变化,研究发现,在阀芯上增 加环形凸台可以减小稳态液动力,提高了多路阀的性能。 王廷栋等^[4]对不同工况下的多路阀进行了流固耦合分析, 研究结果表明节流槽处的变形量最大,为阀芯优化方向 提供了理论支撑。目前节流槽的形式主要有U形、K形、 双U形等,其中以U形节流槽的压力、流量特性最为突出。

本文采用计算机仿真与试验验证的方法,以U形节 流槽为基础,提出一种具有U一半圆形节流槽结构的拖 拉机多路阀,主要研究U一半圆形节流槽拖拉机多路阀 的动态特性^[5]。采用仿真分析与试验验证的方法研究设 计的U一半圆形节流槽的压力、流量特性等。

1 节流槽原理及模型分析

U形节流槽的三维模型如图1所示,其示意图如图2 所示,U形节流槽有二级节流的特点,因为它有两个节流 面,阀口的压力变化发生在A₁面、A₂面附近,移动阀芯, A₁面、A₂面的过流面积就会改变,以此改变流量特征^[6]。 U形节流槽的节流原理如图3所示,由此可知过流面积的 计算准则为将过流面积A_U等效成A₁、A₂串联进行计算。



图 1 U形节流槽三维模型 Fig. 1 Three-dimensional model of U-shaped throttle





Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the U-shaped



图 3 U形节流槽节流原理

Fig. 3 Throttling principle of U-shaped throttle 而U一半圆形节流槽的三维模型、结构示意图、节流

原理图如图4~图6所示。其过流面积计算准则为将A₁ 与B₁串联后等效面积为A_{U1},A_{U1}与节流面A₂并联后再与 B₂串联等效为U-半圆形节流槽过流面积A_{UU}。



图 4 U-半圆形节流槽三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of U-semicircular throttle



图 5 U-半圆型节流槽结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the structure of U-semicircular throttle groove



图 6 U-半圆型节流槽节流原理图

Fig. 6 U-semicircular throttle throttling schematic

2 U-半圆形节流槽理论分析

U-半圆形节流槽的过流面积计算可以分为3个 阶段,分别如图7~图9所示。



图 7 一阶段简图

Fig. 7 Schematic diagram of the first stage



图 8 二阶段简图

Fig. 8 Schematic diagram of the second stage



图 9 三阶段简图

Fig. 9 Three-stage diagram

1) 阀口开度 x 小于 U 形节流槽小圆半径 R₁时,即

(4)

0<*x*<*R*₁。其计算原理图如图7所示。所以一阶段的 过流面积计算如式(1)~式(4)所示^[7,8]。

$$A_1 = \int_0^x \theta_{\rm b1} R \mathrm{d}x \tag{1}$$

$$A_2 = 0 \tag{2}$$

$$B_1 = \frac{R^2 \theta_{\rm b1}^2}{2} - \frac{W_1 H_1}{2} + W_1 (D_1 - R + H_1) \quad (3)$$

$$B_2 = 0$$

式中: W1-----U形阀芯位置处对应的槽宽,m;

$$A_1$$
—— A_1 面过流面积,m²;
 A_2 —— A_2 面过流面积,m²;
 R ——阀芯半径,m;
 θ_{n} ——U形表面弧长对应圆心角

- θ_{b1}——U形表面弧长对应圆心角,(°);
- B_1 —— B_1 面过流面积,m²;
- B_2 —— B_2 面过流面积,m²;
- D1-----U形槽深度,m。

2)阀口开度大于U形槽小圆半径,小于小圆半径与 矩形槽长度之和时,即R₁< x< L₁₂。计算原理如图8所 示。所以二阶段的过流面积计算如式(5)~式(8)所示。

$$A_{1} = A_{1R1} + \int_{R1}^{x} \theta_{b1} R dx$$
 (5)

$$A_2 = 0 \tag{6}$$

$$B_1 = \frac{R^2 \theta_{\rm b1}}{2} - \frac{W_1 H_1}{2} + W_1 (D_1 - R + H_1) \qquad (7)$$

$$B_2 = 0 \tag{8}$$

式中:A_{1R1}——一阶段横向面积,m²;

3)阀口开度大于U形槽小圆半径与矩形槽长度之 和小于U-半圆形节流槽槽长,即L₁₂<*x*<L₁+R₂时, 计算原理图如图9所示。三阶段的过流面积计算如 式(9)~式(12)所示^[9,10]。

$$A_1 = A_{1L} \tag{9}$$

$$A_2 = \int_{L_{12}}^{x} \theta_{b2} R \mathrm{d}x \tag{10}$$

$$B_1 = \frac{R^2 \theta_{\rm b1}}{2} - \frac{W_1 H_1}{2} + W_1 (D_1 - R + H_1) \quad (11)$$

$$B_2 = \frac{R^2 \theta_{b2}}{2} - \frac{W_2 H_2}{2} + W_2 (D_1 - R + H_2) \quad (12)$$

式中:A_{IL}——二阶段横向面积,m²;

H2——二节半圆形槽边高度,m;

 θ_{b2} ——二节半圆形表面弧长对应圆心角,(°)。

代入阀芯移动时的阀口开度值,由此得到U-半 圆形节流槽过流面积与阀口开度的关系曲线如图10 所示。由此可见,U-半圆形过流面积随阀口开度的 变化趋势为先缓慢增加后快速增加。



Fig. 10 Curve of U-semicircular throttle groove overflow area and valve port opening

3 节流槽模型仿真及分析

3.1 AMESim 模型建立

对U-半圆形节流槽进行AMESim 仿真建模分析,主要是对U-半圆形节流槽的拖拉机多路阀动态特性研究。动态特性是指系统在工作时输入量与输出量之间的关系,节流槽的动态特性主要为压力特性、流量特性,即压力、流量随时间的变化关系。

建立 AMESim 仿真模型之前,首先要明确:(1)压 力的作用面^[11];(2)独立运动的元件;(3)确定阀口处 的过流面积;(4)明确液压阀的可变容积腔。液压阀 是节流元件^[12],液阻会随着阀口处的过流面积改变而 改变,尤其是当阀芯上有节流槽时,过流面积对液压阀 的动态特性影响大,甚至是影响液压阀性能的关键 因素^[13]。

阀芯节流槽分布如图11所示,节流槽1和节流槽4 为相同形状的U形节流槽,节流槽2和节流槽3为相同 形状的U-半圆形节流槽^[14]。其主要起到节流作用, 此外还可以调节流量和压力,节流阀压差一定时,开口 大小影响着流量的变化。阀口模块提供了五种节流槽 形状:圆形区域、梯形区域、三角形区域、矩形区域、圆 边梯形区域^[15]。



Fig. 11 Throttle trough model

多路阀的指标为:当出口压力达到15 MPa时,流量 达到100 L/min。设定溢流阀压力值为15 MPa,如果多 路阀出口压力达到15 MPa,此时溢流阀就会开启,油液 通过溢流阀流入油箱。通过测定出口流量是否达到 100 L/min检验多路阀设计是否符合标准。多路阀主要 参数如表1所示。对多路阀的参数进行设置。

多路阀系统的仿真模型如图 12 所示,其中多路阀 的整体模型是由单侧仿真模型对称形成,液压缸设置 活塞直径为 150 mm,活塞杆直径为 15 mm,液压缸重 量为 300 kg,其余设置均保持不变。对模型进行仿真, 分析液压缸性能。

Tab. 1 Main parameters of multi-way valve						
子模型名称	子模型型号	参数名称	设定值			
pressure source	PS00-1	压力/MPa	20			
presscontro10	DV00 4	压力/MPa	21			
1-3	KV00-4	流量/(L•min ⁻¹)	300			
notchedgeabs0 1–2	BASEN01-2	轴肩直径/mm	16			
		阀杆直径/mm	8			
		径向深度/mm	3			
		阀芯覆盖量/mm	1.5			
		最大过流面积/mm ²	52			
haal	DA0019 2	轴肩直径/mm	16			
DA01 DA0012-5		阀杆直径/mm	8			
hap1_2	BAD12 = 2	轴肩直径/mm	16			
bapi 2	DAT 12 2	阀杆直径/mm	8			
notchedge— abs01—6	BASEN01-3	轴肩直径/mm	16			
		阀杆直径/mm	8			
		径向深度/mm	3			
		阀芯覆盖量/mm	0			
		最大过流面积/mm ²	85			
presscontro10	PV 00	压力/MPa	15			
1 - 4	IX V UU	流量/(L•min ⁻¹)	200			

表 1 多路阀主要参数



图 12 多路阀 AMESim 仿真模型

Fig. 12 AMESim simulation model of multi-way valve

3.2 动态特性仿真分析

移动阀芯改变阀口的过流面积能够实现对多路阀 的流量调节。设置阀芯的最大位移为6.5 mm,阀芯的 遮盖量为1.5 mm,位移信号设置为10 s达到最大位移 量6.5 mm,随后在最大位置处保持2 s。设置仿真时 间为12 s,步长设置为0.01,选用变步长积分法进行仿 真分析。对多路阀AMESim模型进行仿真。

由图 13可知,随着阀芯的移动,流量呈现增大的 趋势。在 0~2.3 s时,出口没有流量流过,这是因为阀 芯位移为 1.5 mm,等于阀芯遮盖量的长度,此时位于 多路阀死区,各油口均被堵死,所以出口流量为 0;随着 阀芯位移的增加,阀芯位移大于阀芯遮盖量时,此时油 液进入多路阀流道内,油液刚进入流道内时产生小幅 度波动;在 2.3~4.5 s时,出口流量增加较慢,随着阀 芯的移动,在 4.5~7 s时,出口流量增加较慢,随着阀 芯的移动,在 4.5~7 s时,出口流量增加较慢,随着阀 大位移量 6.5 mm,流量同时也达到最大值 113 L/min, 在出口压力为 15 MPa 的情况下,流量可以达到 100 L/min,因此,U-半圆形节流槽的设计可以满足 流量设计要求,能够达到相应技术指标;在10~12 s时, 阀芯保持最大位移量,流量也保持最大值不变。流量 曲线较平滑且流量增加先小后大再小,因此可以看出 流量变化较稳定,为后续验证提供基础。



Fig. 13 Egress flow curve

3.3 多路阀阀口压差仿真分析

较小的阀口压差有利于提高多路阀的效率,避免 能源浪费。油液进入阀口前和流出阀口后的压力差为 阀口压差,在AMESim 仿真分析中,将流入节流槽前 和流出节流槽后的压力认定为阀口压差,经仿真得到 节流槽前后压差曲线如图14所示。

25					
eg 20−					
	1	_;	槽后	压	力
田 5		;	槽前	j压フ	力
0	2 4	6	8	10	12
		时间	/s		

图 14 前后压差曲线图

Fig. 14 Differential pressure curve before and after

由图 14 可知,阀口前连接的是一个恒压源,所以仿 真开始后,节流槽前的压力一直为 20 MPa保持不变。随 着阀芯的移动,在 2.3 s时,阀芯位移大于阀芯遮盖量,此 时有油液进入多路阀流道内,节流槽前后压力迅速升高 到 15 MPa;在 2.3~4.5 s内,节流槽前后压差缓慢减小, 这是因为这段时间阀口处的过流面积变化较小;在 4.5~ 10 s时,阀口处的过流面积迅速增大,此时节流槽前后压 差值也快速减小;在 10 s时,阀芯达到最大位移量处,阀 口压差达到最小值 1.2 MPa;随后 2 s内,阀芯保持最大 位移量,节流槽前后压差也不再变化。通过分析可知,阀 口压差随着阀芯位移量增加逐渐减小。

为了突出U-半圆形节流槽的优越性,在过流尺 寸及槽深不变的情况下,只改变节流槽的形状。建立 U形节流槽和半圆形节流槽的AMESim模型进行对 比分析,仿真模型分别如图15、图16所示。



图 15 U形节流槽 AMESim 仿真模型

Fig. 15 Simulation model of U-shaped throttle slot AMESim



图 16 半圆形节流槽 AMESim 仿真模型

Fig. 16 U-semicircular throttle slot AMESim simulation model 设置仿真时间 10 s,步长 0.01 s,运行仿真得到 U 形节流槽和半圆形节流槽多路阀的出口流量曲线图, 记录各节流槽的出口流量数据,得到 3种节流槽的出 口流量对比曲线如图 17 所示。



图 17 出口流量对比曲线图

Fig. 17 Comparison graph of egress flow

由图 17 可以看出,U形节流槽在 2~4 s内的液压 冲击更明显,U形节流槽随着阀芯移动流量也呈增加 趋势,但达到的最大流量约为 73 L/min。在流量技术 指标为 15 MPa的情况下,达不到 100 L/min 的要求。 同理,半圆形节流槽的液压冲击相对于U形节流槽较 小,但总体不如U-半圆形节流槽,半圆形节流槽达到 的最大流量为 64 L/min 左右,依然不满足 15 MPa 的 指标下 100 L/min 的要求。因此,相比于U形节流槽 多路阀和半圆形节流槽,U-半圆形节流槽的流量设 计要求更贴近于仿真分析的结果,流量也较稳定,其压 力冲击的现象也要小于U形和半圆形节流槽。

4 多路阀试验装置及结果分析

按照U一半圆形节流槽加工出实体模型,利用液 压阀综合实验台进行试验,如图18、图19分别为组合 多路阀及U一半圆形节流槽结构放大图、液压阀综合 实验台。



图 18 U-半圆形节流槽局部放大图Fig. 18 U-semicircular throttle local enlargement



图 19 液压阀综合试验台

Fig. 19 Comprehensive test bench for hydraulic valves 液压阀综合试验台主要由油压源、调速阀、溢流 阀、单向阀、过滤器、冷却装置、控制系统等组成,可完 成多种试验,如内泄漏试验、流量特性试验等。试验台的最大流量可达200 L/min。

多路阀各油口位置处装有流量计和压力传感器, 传感器测得的信号经A/D转换器传输到液压阀测试 系统中,并在操控面板中显示数值大小,准确测得压 力、流量的数值。出油口处由溢流阀代替负载,可调定 溢流阀的开启压力来模拟负载。在测试U-半圆形节 流槽多路阀性能时,需要多路阀的供油压力保持恒定, 因为压力波动会对系统的测试结果造成很大影响。

流量特性试验方案为:将多路阀与试验台对应的 油口进行连接,通过移动手柄控制阀口开度的大小。 系统压力调定为20 MPa,溢流阀的加载压力调定为 15 MPa。记录阀口开度不同时对应出口处的流量,各 位置多次测量并计算平均值,绘制流量特性曲线。

按照U一半圆形节流阀的试验方案进行试验,收集 试验数据,得到多路阀的流量特性曲线如图 20 所示。由 图 20 可知,多路阀出口流量的最大值为 108 L/min,略小 于仿真结果的数值,这是因为实际加工生产存在加工误 差,装配过程中存在磨损造成的。但对比试验得到的流 量特性曲线和仿真得到的流量特性曲线,其变化趋势具 有较高的吻合度。流量曲线较平滑且流量变化趋势先小 后大再小,流量变化稳定无冲击,流量控制特性好。



图 20 多路阀流量特性曲线

Fig. 20 Flow characteristic curve of multi-way valve 阀芯的内泄漏量也是衡量多路阀的一个重要指标, 泄漏量过大可能会导致液压系统效率低,甚至不工作。 制定内泄漏特性试验方案:测量换向位置时堵住出油口 A、B口,P接进油口,T接回油口,多次移动阀芯测量泄 漏量;测量中立位置时堵住进油口,T接油箱,A、B与工 作油口连接,同样测量泄漏量。通过液压阀综合试验台 试验测得中立位置和换向位置处的泄漏量如表2所示。

表 2 内泄漏特性结果

Tab. 2 Results of internal leakage characteristics						
计心力存	闷口冶型	标准	试验数据			
山迎 石	阀口位直	$/(mL \cdot min^{-1})$	$/(mL \cdot min^{-1})$			
20 MPa下中立	ΑП	<12	8.5			
位置内泄漏量	ΒП	<12	7			
20 MPa下换向	АΠ	<12	10.5			
位置内泄漏量	ΒП	<12	8			

结果显示最大泄漏量小于标准泄漏量12 mL/min。 所以U-半圆形节流槽能满足内泄漏指标。

131

5 结论

对 U-半圆形节流槽进行理论分析,利用 AMESim中的液压元件库建立U-半圆形节流槽多路 阀的仿真模型并制定试验方案,对具有U-半圆形节 流槽的多路阀进行验证,研究U-半圆形节流槽的压 力流量特性。设定参数进行多路阀动态特性仿真,对 出口流量、阀口压差、液压缸一个工作周期进行分析。

 1) U一半圆形节流槽过流面积随着阀口开度的增加先缓慢增加后快速增加。为研究多路阀的动态特性 提供重要依据。

2)多路阀出口稳态流量为113 L/min,流量曲线 较平滑,流量变化稳定无冲击,控制特性好。

3) 阀口压差随着阀芯位移的增大而减小,阀口最 小压差为1.2 MPa。

4) U-半圆形节流槽多路阀在换向位置达到最大 泄漏量10.5 mL/min,小于标准中规定的12 mL/min, 满足泄漏指标。

参考文献

- [1] Li C, Liu X, Wang X, et al. Optimization of multi-way valve structure in digital hydraulic system of loader [J]. Energies, 2021, 14(3): 700.
- [2]张友杰.U形节流槽阀口流量特性的研究[J].九江学院学报(自然科学版),2021,36(1):38-42.
 Zhang Youjie. Study on the flow properties of the U-shaped notch throttle orifice in spool valve [J]. Journal of Jiujiang University (Natural Sciences), 2021, 36(1):38-42.
- [3] 丰章俊. 插装式二维大流量电液伺服阀的动态特性研究[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(7): 63-70.
 Feng Zhangjun. Research on dynamic characteristics of plug-in two-dimensional large flow electro-hydraulic servo valve [J].
 Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(7): 63-70.
- [4]马鹏鹏,邱楚然,孙志远.基于AMESim装载机用多路阀阀口优化[J].建设机械技术与管理,2022,35(1):93-95.
 Ma Pengpeng, Qiu Churan, Sun Zhiyuan. Optimizationof multi way valve stem for loader based on AMESim [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2022, 35(1):93-95.
- [5] 王佳怡,刘昕晖,王展,等.基于AMESim的恒流量控制 阀流量特性分析[J].吉林大学学报(工学版),2023(9): 2499-2507.

Wang Jiayi, Liu Xinhui, Wang Zhan, et al. Flow characteristics analysis of constant flow control valve based on AMESim [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023(9): 2499-2507.

[6] Bordovsky P, Schmitz I K, Murrenhoff I H. CFD

simulation and measurement of flow forces acting on a spool valve [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 37: 69-75.

- [7] Owczarek P, Rybarczyk D, Kubacki A. Dynamic model and simulation of electro-hydraulic proportional valve [M]. Automation 2017: Innovations in Automation, Robotics and Measurement Techniques. Cham: Springer International Publishing, 2017: 99-107.
- [8] Chen C, Song Y, Xie Y, et al. Simulation and analysis of inclined flow channel of hydraulic slide valve [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1707 (1): 012011.
- [9] Jia W, Liu Y, et al. Effects of U-shaped two-step throttling groove parameters on cavitation erosion characteristics [J].
 Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 59 (4): 529-538.
- [10]何鑫龙.单节U形节流槽滑阀内部流场能耗机理分析[D].
 兰州:兰州理工大学,2021.
 He Xinlong. Analysis of internal energy consumption mechanism of single section U-groove spool valve [D].
 Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [11] 吴卫东,丁一,蔡树文,等.粒子群算法的负载敏感阀节 流槽结构的优化[J].黑龙江科技大学学报,2021,31(1): 68-73.

Wu Weidong, Ding Yi, Cai Shuwen, et al. Structural optimization design of notches in load-sensitive valve based on PSO algorithm [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(1): 68-73.

- [12] 宋百顺.负载敏感多路阀阀口特性及液动力的研究[D]. 大连:大连交通大学,2019.
 Song Baishun. Research on valve port characteristics and hydraulic force of load sensitive multi-way valve [D].
 Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [13] 冯贵层.L+U形节流槽过流面积分析与计算[J].机床与 液压,2018,46(22):63-65,62.
 Feng Guiceng. Analysis and calculation of the orifice area of spool with L + U type notches [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018,46(22):63-65,62.
- [14] 谭立建,涂攀,阮登芳.某液压滑阀流场仿真及卡滞现象分析[C].2021中国汽车工程学会年会论文集(4),2021: 648-653.
- [15]高宇龙,姚丽英,张占东.基于AMESim自适应大流量安 全阀动态特性影响因素研究[J].山西大同大学学报(自然 科学版),2022,38(2):84-88.

Gao Yulong, Yao Liying, Zhang Zhandong. Research on influencing factors of dynamic characteristics of adaptive large flow safety valve based on AMESim [J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2022, 38(2): 84-88.