

DOI: 10.7652/xjtuxb201608005

# 多路换向阀换向耦合阀口节流结构拓扑设计

姜涛, 黄伟, 王安麟

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

**摘要:** 为解决多路换向阀换向过渡过程中分流特性所带来的阀口间节流结构耦合作用问题, 提出多路换向阀换向耦合阀口节流结构拓扑设计方法。将耦合阀口节流槽结构分类为由 U 型槽、半圆槽、圆孔槽等结构组成的参数化组合构成, 构建出多路换向阀工作口流量与其阀口节流槽结构变量间的函数模型; 在验证多路换向阀三维流体解析与其动态特性台架实验结果的基础上, 以设定的多路换向阀换向过渡过程工作口流量变化为评价目标, 采用粒子群算法求解阀口节流槽结构拓扑设计问题, 实现了耦合阀口节流结构响应与换向过渡过程节流特性的较好吻合。研究结果表明, 该方法对满足多路换向阀换向过渡特性要求的耦合阀口节流结构拓扑设计具有实际意义。

**关键词:** 多路换向阀; 耦合阀口; 节流结构; 结构拓扑设计; 粒子群算法

**中图分类号:** TH137.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0026-06

## Topology Design Method for Coupling Valve Throttle Structure of Multi-Way Directional Valves

JIANG Tao, HUANG Wei, WANG Anlin

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A topology design method for coupling valve ports throttling structure of multi-way directional valves is proposed to solve the coupling problem between the valve ports caused by flow distribution characteristic in the process of reversing transition. The throttling structures of coupling valve ports are classified into semicircle groove, U-shaped groove, round hole groove and so on, and formed by different parameterized combinations of these structures. A model to describe the function between work flow of multi-way directional valve and variables of its coupling valve ports throttling groove structure is constructed. The work flow in the process of reversing transition of multiple directional control valve is set as an evaluation target based on the validation of three-dimensional fluid dynamic analysis of multi-way directional valve and its dynamic characteristics results of test bench. Then a particle swarm algorithm is used to solve the topology design problem of valve ports throttling groove structure, so that a good agreement between the response of coupling valve throttling structure and the throttling characteristic in the process of reversing transition is realized. The results show that the method has a reference value of engineering for the topology design of coupling valve ports throttling structure in meeting the requirements of reversing transition characteristics of multi-way directional valves.

**Keywords:** multi-way directional valve; coupling valve ports; throttling structure; structure topology design; particle swarm algorithm

多路换向阀是由多个换向阀集成于一体的多功能换向阀,通过控制不同油路的启闭,实现不同执行机构的运动要求,具有结构紧凑、多位功能等特点,广泛应用于工程机械。在开环液压挖掘机中,多路换向阀作为其核心液压元件,通过换向过渡过程耦合阀口之间的共同作用,实现工作口流量的连续变化,满足执行机构的速度要求。国内外已经有许多学者利用三维流体解析以及实验台架分析,研究换向阀阀芯结构对其换向性能的影响:Amirant 等通过三维流体解析对液压滑阀内部流场特性进行了研究<sup>[1-3]</sup>;孙泽刚、方文敏等研究了换向阀单个阀口阀芯节流槽结构对其流量控制特性及液动力等方面的影响<sup>[4-6]</sup>。以上研究均是以换向阀单个阀口为研究对象,无法系统性地给出多路换向阀阀口流量控制特性与耦合阀口节流槽结构拓扑组合之间的关系。

针对上述的分析,本文的研究以某型多路换向阀回转联为例,提出多路换向阀换向耦合阀口节流结构拓扑设计方法。将耦合阀口节流槽结构分类为由 U 型槽、半圆槽、圆孔槽等结构组成的参数化组合构成,结合理论推导出多路换向阀工作口流量与其阀口节流槽结构变量间的函数关系;在验证多路换向阀三维流体解析与其动态特性台架实验结果的基础上,以设定的多路换向阀换向过渡过程工作口流量变化为评价目标,建立优化函数模型,采用粒子群算法对耦合阀口节流结构进行优化设计。该设计方法的提出,对满足多路换向阀换向过渡特性要求的耦合阀口节流结构拓扑设计具有实际意义。

## 1 换向阀三维流体解析

### 1.1 换向阀结构

本研究以开环液压挖掘机用多路换向阀的回转联为研究对象,其结构如图 1 所示,P 为进油口,A、B 为工作口, $T_a$ 、 $T_b$  分别为工作口 A、工作口 B 对应的回油口, $T_c$  为中路回油口;在先导力及弹簧力的作用下,通过阀芯的移动,实现 P 口到 A 口或 P 口到 B 口的连通,进而完成执行机构的回转动作。

整个阀芯移动过程可分为 3 个子过程:①当 P-B 阀口位于死区过程,即工作口 B 尚未工作时,随着阀芯的移动,P- $T_c$  阀口从全开阶段逐渐进入到节流阶段,换向阀的入口流量全部通过中路流回油箱;②当 P-B 阀口位于换向过渡过程,如图 1 所示,即工作阀口节流槽拓扑结构起到节流作用时,P- $T_c$  阀口从节流阶段逐渐趋于关闭,工作阀口与中路回油阀口相互耦合作用,以实现工作口 B 流量的连续变化;

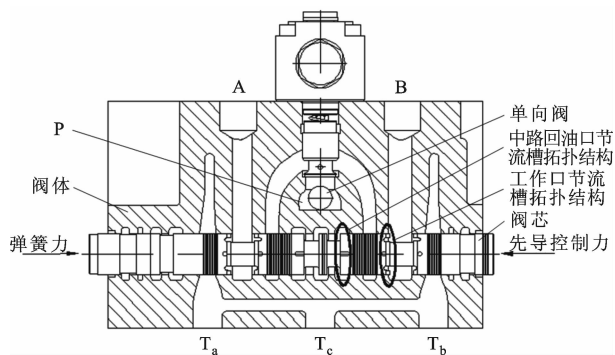


图 1 回转联换向阀结构图

③当 P-B 阀口位于全开过程,P- $T_c$  阀口关闭,换向阀入口流量全部通过 P-B 阀口进入到执行机构。

由于 A 口与 B 口的结构关于阀体中心线对称,故本文以 P-B 通道为例,针对过程 2(换向过渡过程)进行研究。在阀芯移动过程中,P-B 阀口与 P- $T_c$  阀口组成耦合阀口,以实现工作口 B 的流量特性需求。

### 1.2 换向阀三维流体解析模型

如图 2 所示,换向阀三维流体解析模型由阀口内流体以及阀口外流体两部分组成。仿真模型边界条件及模型参数的设置应与台架实验保持一致,即 P 口为进油口,设置流量值;B 口为工作口,设置压力值;流体为不可压缩牛顿流体,流动状态为湍流,采用标准  $k-\epsilon$  模型;节流系数取值范围为 0.62~0.75;油液密度为  $890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,动力黏度为  $0.036 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,体积模量为  $700 \text{ MPa}$ 。



图 2 换向阀三维流体解析模型图

如图 3 所示,左边为工作阀口内流体模型图,右边为中路回油阀口内流体模型图,入口油液通过耦合阀口之间的相互配合以及工作阀口的节流作用,实现工作口特定的流量特性需求。

### 1.3 换向阀三维流体解析的验证

为验证三维流体解析结果的合理性,采用同济大学液压元器件动态特性综合实验台(如图 4 所

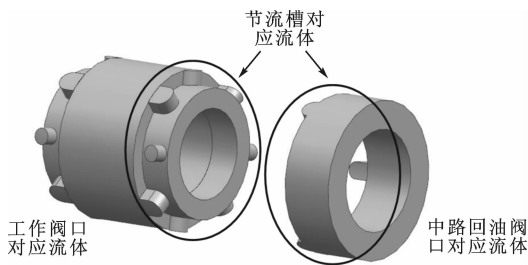


图3 阀口内流体模型图

示),对同等条件下的三维流体解析结果进行实验验证。采用阀芯进给装置以及实验台流量计,可测得多路换向阀回转联工作阀口在不同开度下对应的出口流量。

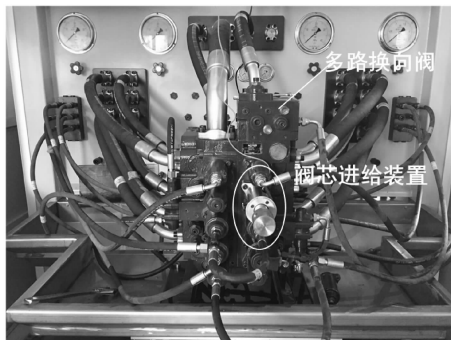


图4 实验台实物图

图5给出了同一工况下三维流体解析值与实验值的对比。多路换向阀回转联入口流量设为  $250 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,工作口负载压力设为  $25 \text{ MPa}$ ,中路回油口的背压设为  $6 \text{ MPa}$ ,多路换向阀回转联三维流体解析所得的工作口流量变化趋势与实验所得的工作口流量变化趋势一致,但由于实验台液压系统的泄漏,导致实验值会略低于三维流体解析值。

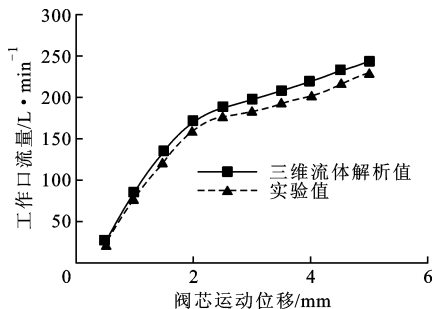


图5 同一工况下三维流体解析与实验结果的对比

综合以上分析,验证了三维流体解析结果的合理性。

## 2 换向阀数学模型

### 2.1 工作口的流量特性

多路换向阀在换向过渡过程中,由工作阀口与

中路回油阀口的相互耦合作用实现工作口流量的连续变化。整个运动过程是由工作阀口与中路回油阀口之间的分流过程以及两个阀口自身的节流过程组成。

在分流过程中,可得

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

式中: $Q$ 为入口总流量; $Q_1$ 为通过工作阀口的节流流量; $Q_2$ 为通过中路回油阀口的回油流量。

在节流过程中,根据节流公式有

$$Q_1 = C_{d1} A_1 (2\Delta p_1 / \rho)^{1/2} \quad (2)$$

$$Q_2 = C_{d2} A_2 (2\Delta p_2 / \rho)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $C_{d1}$ 为工作阀口流量系数; $C_{d2}$ 为中路回油阀口流量系数; $A_1$ 为工作阀口过流面积; $A_2$ 为中路回油阀口过流面积; $\Delta p_1$ 为工作阀口节流处进出口压差; $\Delta p_2$ 为中路回油阀口节流处进出口压差; $\rho$ 为液压油密度。

因节流系数变化范围相对较小,故可取

$$C_d = C_{d1} = C_{d2} \quad (4)$$

压差公式为

$$\Delta p_1 = p_1 - p_2 \quad (5)$$

$$\Delta p_2 = p_1 - p_3 \quad (6)$$

式中: $p_1$ 为换向阀入口压力; $p_2$ 为工作口负载压力; $p_3$ 为中路回油的系统背压。

结合  $Q_1 \geq 0$  及  $Q_2 \geq 0$ ,联立式(1)~式(6)可得

$$Q_1 = (A_1^2 Q - A_1 A_2 (Q^2 + 2(A_1^2 - A_2^2)(p_2 - p_3) C_d^2 / \rho)^{1/2}) / (A_1^2 - A_2^2) \quad (7)$$

多路换向阀回转联工作过程中,液压泵基本工作在恒流量阶段,入口总流量  $Q$  为定值,系统背压  $p_3$  也为定值。当给定工作口负载压力  $p_2$  为恒定值的情况下,由式(7)可知,工作口流量  $Q_1$  由工作阀口过流面积  $A_1$  及中路回油阀口过流面积  $A_2$  共同决定。因此,为实现所需的工作口流量特性,需结合工作阀口及中路回油阀口的过流面积组合,对节流槽结构拓扑组合进行合理设计。

### 2.2 节流槽结构拓扑组合的参数化表达

在对多路换向阀工作阀口及中路回油阀口的节流槽结构拓扑组合进行设计的过程中,将节流槽结构主要分为几种常见类型,即 U 型槽、半圆槽、圆孔槽和内环槽,通过确定不同结构的特征尺寸及定位坐标,实现节流槽结构拓扑组合的参数化表达<sup>[7]</sup>。

由于中路回油阀口一般没有内环槽及圆孔槽,故中路回油阀口只有 U 型槽和半圆槽。因此,在节流槽结构数及工作阀口内环槽尺寸一定的情况下,如图6所示,分别以换向阀对应内腔垂直于阀芯轴

线的一面作为参考面,工作阀口的半圆槽可由参数  $x_1$  表示,U 型槽可由参数  $x_2$  和  $r_1$  表示,圆孔槽可由参数  $x_3$  和  $r_2$  表示,中路回油阀口的半圆槽可由参数  $r_3$  表示,U 型槽可由参数  $x_4$  和  $r_4$  表示,即工作阀口与中路回油阀口的节流槽结构拓扑组合可由参数  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  和  $r_4$  表示。

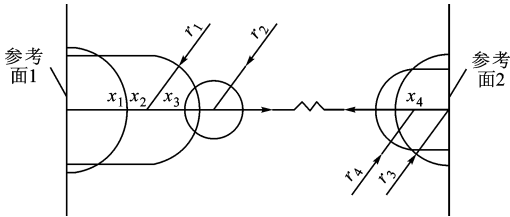


图 6 节流槽结构拓扑组合坐标图

工作阀口与中路回油阀口的过流面积函数分别可以表示为

$$A_1 = A(x_1, x_2, x_3, r_1, r_2, x) \tag{8}$$

$$A_2 = A(x_4, r_3, r_4, x) \tag{9}$$

式中:  $x$  为阀芯运动位移。

通过理论推导<sup>[8]</sup>及自动化编程,构建阀口过流面积与阀口节流槽结构变量间的函数,图 7 为某型多路阀回转联换向过渡过程的工作阀口及中路回油阀口的过流面积曲线。

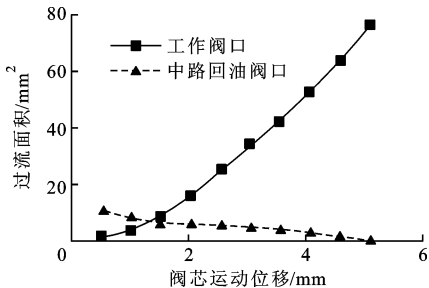


图 7 阀口过流面积曲线

在外界工况及系统背压一定的情况下,结合式(8)、(9)可得

$$Q_1 = Q(x_1, x_2, x_3, x_4, r_1, r_2, r_3, r_4, x) \tag{10}$$

故在阀口节流槽结构数一定的情况下,工作口的流量特性由参数  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  和  $r_4$  所决定。

3 多路换向阀换向耦合阀口节流结构拓扑优化设计

粒子群算法是一种通过群体中个体之间的相互协作与信息共享来实现寻优的进化计算技术,广泛应用于函数优化、系统控制以及结构设计等领域<sup>[9-12]</sup>。本文以多路换向阀换向过渡过程的三维流体解析结果作为评价目标,通过耦合阀口节流槽结

构的参数化表达,构建换向阀工作口流量与其耦合阀口节流槽结构参数化坐标变量之间的函数关系,再利用粒子群算法对节流槽结构拓扑组合进行优化设计。

3.1 优化数学模型的建立

为实现换向阀换向过渡过程耦合阀口节流槽结构拓扑组合的优化设计,将节流槽结构拓扑组合的参数化坐标变量作为设计变量,以三维流体解析的工作口流量为评价目标,构建优化数学模型<sup>[13]</sup>。设计变量  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, r_1, r_2, r_3, r_4\}^T$ ,约束条件:①多路换向阀换向过渡过程的三维流体解析中,入口流量以及工作口负载压力设置为定值;②工作阀口及中路回油阀口的节流槽结构数一定。

基于式(8)以及工作阀口与中路回油阀口的过流面积的连续性,可知工作口的流量也是连续变化的,因此,为了实现设定的多路换向阀换向过渡过程工作口流量变化需求,以不同阀口开度下设定的换向阀三维流体解析的工作口流量与理论计算的工作口流量之间的方差之和作为优化数学模型的目标函数

$$f(X) = \left( \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^t)^2 \right) / n \tag{11}$$

式中:  $n$  为换向阀换向过渡过程中阀口开度的节点数;  $Q_i^t$  为第  $i$  个阀口开度对应的换向阀三维流体解析的工作口流量;  $Q_i$  为第  $i$  个阀口开度对应的式(10)理论计算的工作口流量。

3.2 设计过程

采用粒子群算法对换向阀换向过渡过程耦合阀口进行优化设计,即将优化数学模型中的设计变量作为粒子群算法的粒子个体,以目标函数为粒子群算法中的适应度函数,对坐标变量进行寻优设计。

本文以某型多路换向阀回转联的耦合阀口节流槽结构为参照,设计 3 组仿真实验,见表 1,并以仿真所得的工作口流量曲线为设计需求,通过理论计算及粒子群算法寻优设计,反向求解耦合阀口节流槽结构拓扑设计问题。

表 1 换向阀三维流体解析的仿真实验样本

| 样本 | $x_1$ /<br>mm | $x_2$ /<br>mm | $x_3$ /<br>mm | $x_4$ /<br>mm | $r_1$ /<br>mm | $r_2$ /<br>mm | $r_3$ /<br>mm | $r_4$ /<br>mm |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1  | 2.0           | 2.0           | 2.4           | 4.5           | 2.0           | 1.45          | 2.0           | 1.5           |
| 2  | 2.5           | 1.5           | 2.6           | 4.0           | 2.5           | 1.20          | 1.0           | 2.0           |
| 3  | 1.5           | 2.5           | 2.0           | 4.8           | 1.6           | 1.60          | 1.6           | 1.2           |

设计流程图如图 8 所示。粒子群算法中种群规

模为 100,迭代步数为 100,速度更新参数为1.494 45,速度最大值和最小值分别为 0.1 和-0.1。

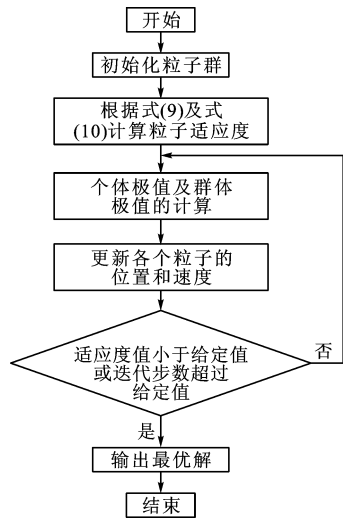


图 8 设计流程图

3.3 设计结果

采用粒子群算法对 3 组仿真实验样本进行寻优设计,如图 9~图 11 所示,优化设计所得的多路换向阀换向过渡过程的工作口流量变化趋势与三维流体解析所得的工作口流量变化趋势吻合较好,见表 2。以设定的多路换向阀换向过渡过程三维流体解析的工作口流量变化为评价目标,优化设计的结构坐标参数与设定的仿真实验样本的结构坐标参数吻合较好。3 组仿真实验样本设计结果对应的阀口过

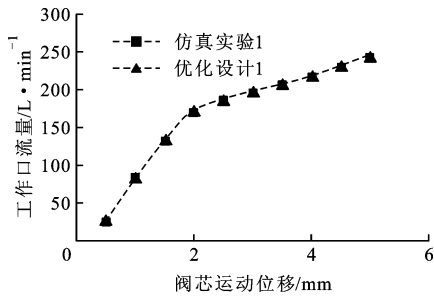


图 9 仿真实验样本 1 的优化设计结果

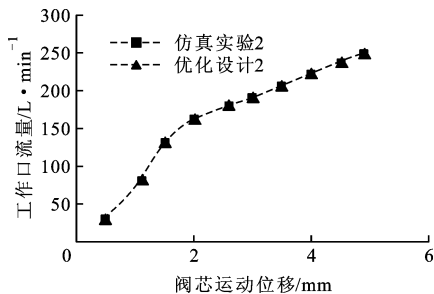


图 10 仿真实验样本 2 的优化设计结果

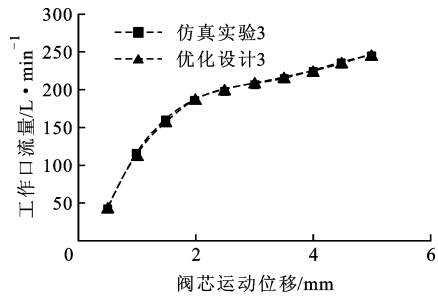


图 11 仿真实验样本 3 的优化设计结果

流面积曲线如图 12 所示,不同样本对应的耦合阀口过流面积曲线组合不同,以实现不同的工作口流量特性需求。

表 2 耦合阀口节流结构坐标参数优化设计结果

| 样本   | $x_1$ /<br>mm | $x_2$ /<br>mm | $x_3$ /<br>mm | $x_4$ /<br>mm | $r_1$ /<br>mm | $r_2$ /<br>mm | $r_3$ /<br>mm | $r_4$ /<br>mm |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|      | mm            | mm            | mm            | mm            | mm            | mm            | mm            | mm            |
| 仿真 1 | 2.00          | 2.00          | 2.40          | 4.50          | 2.00          | 1.45          | 2.00          | 1.50          |
| 设计 1 | 1.99          | 1.97          | 2.29          | 4.52          | 2.09          | 1.50          | 1.95          | 1.55          |
| 仿真 2 | 2.50          | 1.50          | 2.60          | 4.00          | 2.50          | 1.20          | 1.00          | 2.00          |
| 设计 2 | 2.38          | 1.54          | 2.49          | 4.05          | 2.37          | 1.25          | 1.05          | 1.96          |
| 仿真 3 | 1.50          | 2.50          | 2.00          | 4.80          | 1.60          | 1.60          | 1.60          | 1.20          |
| 设计 3 | 1.56          | 2.37          | 1.99          | 4.93          | 1.61          | 1.61          | 1.67          | 1.15          |

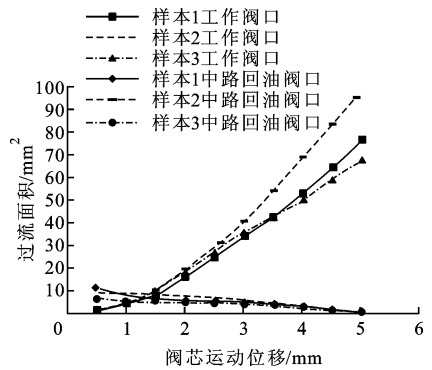


图 12 3 组仿真实验样本的优化设计结果

4 结 语

为解决多路换向阀换向过渡过程中分流特性所带来的阀口间的耦合作用问题,本文以多路换向阀回转联为研究对象,提出多路换向阀换向耦合阀口节流结构拓扑设计方法。

(1)将耦合阀口节流槽结构分类为由 U 型槽、半圆槽、圆型槽等结构组成的参数化组合构成,结合理论推导,构建出多路换向阀工作口流量与其阀口节流槽结构变量间的函数模型。

(2)在验证多路换向阀三维流体解析与其动态

特性台架实验结果的基础上,以设定的多路换向阀换向过渡过程工作口流量变化为评价目标,解决了实验成本大、结构单一的问题。

(3)建立优化函数模型,采用粒子群算法对多路换向阀换向过渡过程的耦合阀口节流结构坐标变量进行优化设计。本文提出的方法对满足多路换向阀换向过渡特性要求的耦合阀口节流结构拓扑设计具有实际意义。

## 参考文献:

- [1] AMIRANTE R, DEL VESCOVO G, LIPPOLOS A. Flow forces analysis of an open center hydraulic directional control valve sliding spool [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(1): 114-131.
- [2] GUILLERMO P S. Three-dimensional modeling and geometrical influence on the hydraulic performance of a control valve [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(1): 151-163.
- [3] AMIRANTE R, CATALANO L A, TAMBURRANO P. The importance of a full 3D fluid dynamic analysis to evaluate the flow forces in a hydraulic directional proportional valve [J]. *Engineering Computations*, 2014, 31(5): 898-922.
- [4] 孙泽刚,肖世德,王德华,等. 多路阀双U型节流槽结构对气穴的影响及优化 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 38-43.  
SUN Zegang, XIAO Shide, WANG Dehua, et al. Impaction and optimization of double U-throttle groove structure of multi-way valve on cavitation [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(4): 38-43.
- [5] 方文敏,成琳琳,傅新,等. 带U形节流槽的滑阀稳态液动力研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(3): 574-580.  
FANG Wenmin, CHENG Linlin, FU Xin, et al. Investigation on steady-state flow force of spool valve with U-grooves [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(3): 574-580.
- [6] 冀宏,王东升,刘小平,等. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 198-202.  
JI Hong, WANG Dongsheng, LIU Xiaoping, et al. Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(1): 198-202.
- [7] 姜涛,黄伟,王安麟. 多路阀阀芯节流槽拓扑结构组合的神经网络模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 1-7.  
JIANG Tao, HUANG Wei, WANG Anlin. Spool throttling groove topology combination neural network model of multi-way valve [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 1-7.
- [8] 侯敏,王涛,彭彪. 非全周开口滑阀阀口面积快速计算方法 [J]. *机床与液压*, 2013, 41(22): 91-92.  
HOU Min, WANG Tao, PENG Biao. Quick calculation method for orifice area of spool valve with orifice [J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2013, 41(22): 91-92.
- [9] 于颖,李永生,於孝春. 粒子群算法在工程优化设计中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(12): 226-231.  
YU Ying, LI Yongsheng, YU Xiaochun. Application of particle swarm algorithm in the engineering optimization design [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 226-231.
- [10] 赵辉,郭友寒,张春风. 改进的粒子群算法在挖掘机设计中的应用 [J]. *工程机械*, 2008, 39(6): 33-35.  
ZHAO Hui, GUO Youhan, ZHANG Chunfeng. Application of improved particle swarm algorithm in the excavator design [J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2008, 39(6): 33-35.
- [11] DEL VALLE Y, VENAYAGAMOORTHY G K, MOHAGHEGHI S, et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 12(2): 171-195.
- [12] LI Yancang, PENG Yang, ZHOU Shujing. Improved PSO algorithm for shape and sizing optimization of truss structure [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, 19(4): 542-549.
- [13] 李维嘉,兰秋华,彭勇,等. 基于粒子群算法的滑阀节流槽优化设计 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(8): 995-999.  
LI Weijia, LAN Qiuhua, PENG Yong, et al. Optimization design of notches in spool valve based on PSO algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(8): 995-999.

(编辑 武红江)