

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0244



## 槽口深度对 U 型节流阀空化流场的影响

贺杰<sup>1</sup>, 刘秀梅<sup>1\*</sup>, 李贝贝<sup>1,2</sup>, 徐化文<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)



贺杰

**摘要:** 采用数值计算的方法对 U 型节流阀内部流场进行了研究, 分析了不同节流槽深度对节流阀内部油液压力场、速度场及空化区域的影响. 研究表明: 流道内压力较大区域位于上游流道, 压力较小区域位于下游流道; U 型节流槽是压力及速度突变区, 在节流槽出口处出现压力骤降并在节流阀口处形成高速射流; 在相同工况下, 随着节流槽深度的增加, 槽内流量增多, 迫使油液急速流过节流口, 从而造成射流方向发生改变, 且高速射流的角度呈现不断减小的趋势, 但是油液最大流速逐渐增大. 节流槽出口靠近阀腔壁面处产生空化, 且随着槽口深度加深时, 节流槽内部压力恢复变慢, 空化区域的面积逐渐增大, 且径向截面空化较强的区域逐渐向节流槽中心扩展. 因此, 合理地控制 U 形节流槽的深度或增加节流槽内部阻力, 可以有效地抑制空化发生.

**关键词:** 节流阀; 数值计算; 深度; 空化; 速度; 压力

**中图分类号:** TH137; O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)06-0517-07

贺杰, 刘秀梅, 李贝贝, 等. 槽口深度对 U 型节流阀空化流场的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(6): 517-523.

HE Jie, LIU Xiumei, LI Beibei, et al. Effects of groove depths on cavitation flow field in U-shaped throttle valve[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(6): 517-523. (in Chinese)

## Effects of groove depths on cavitation flow field in U-shaped throttle valve

HE Jie<sup>1</sup>, LIU Xiumei<sup>1\*</sup>, LI Beibei<sup>1,2</sup>, XU Huawen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** A CFD numerical calculation model was established in order to study the flow field inside U-shaped throttle valve. The velocity, pressure drop and cavitation region in throttle with different groove depths were also obtained. The numerical results show that the maximum pressure is located at the upstream of the flow channel and the minimum pressure is located at the downstream of the flow channel. The pressure drops a lot and a high-speed jet forms when the fluid passes through the throttle outlet. Under the same working conditions, with the increase of groove depth, the flow in the notch increases. This situation forces the oil to flow rapidly through the orifice, which results in a change in the direction of the jet. The angle of high-speed jet shows a decreasing trend, but the maximum flow rate of oil gradually increases. At the outlet of the throttle groove, cavitation occurs near the wall of the valve cavity, and with the depth of the groove increasing, the internal pressure of the throttle notch is reco-

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2017-12-17; 网络出版时间: 2018-03-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180319.1045.010.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20171189); 流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金项目(GZKF-201609); 江苏省第十二批“六大人才高峰”高层次人才项目(ZBZZ-008)

第一作者简介: 贺杰(1977—), 男, 江苏徐州人, 副研究员(hejie794@163.com), 主要从事液压传动与空化空蚀研究.

通信作者简介: 刘秀梅(1982—), 女, 江苏徐州人, 副教授, 博士(liuxm@cumt.edu.cn), 主要从事液压传动与空化空蚀研究.



边界条件如下:将剖开截面处设置为对称(Symmetry)边界条件;进口采用压力入口(pressure-inlet)边界条件,入口压力分别设置为4.0,5.0,6.0 MPa;出口采用压力出口(pressure-outlet)边界条件,出口压力为0.5 MPa;其他边界设置为壁面(wall),壁面采用无滑移条件. 阀内流动介质为液压油,密度为 $899 \text{ kg/m}^3$ ,黏度为 $0.036 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . 在计算过程假设:①将流动方式处理为气、液两相流,并视为不可压缩流体;②流动过程视为恒温绝热过程且忽略重力的影响.

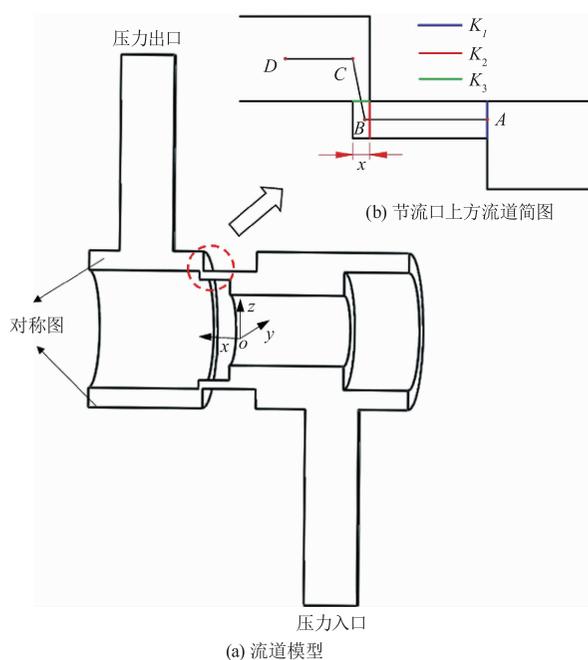


图2 数值计算模型  
Fig. 2 Numerical model

### 1.3 控制方程组

在节流阀内空化流动的计算选用了Fluent软件中的Mixture模型,且空化流动采用Singhal等发展的全空化模型完成计算,故而使用以下的控制方程对空化场进行描述<sup>[15,18]</sup>.

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \mathbf{F} + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)], \quad (2)$$

输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \mathbf{v}_v) = R_e - R_c, \quad (3)$$

式中: $\rho_m, \mu_m$ 分别为油相与泡内气相混合流体的密

度和动力黏性系数; $\rho_v$ 为空泡相(液压油蒸气)的密度; $\mathbf{v}_m$ 为混合流体的速度矢量; $R_e, R_c$ 分别为液压油蒸气产生率和凝结率; $\alpha_v$ 为气相的体积分.

为了描述空化的发生与溃灭过程,其中 $R_e$ 和 $R_c$ 由描述空泡动力学特性的Rayleigh-Plesset方程导出,即

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR_B}{dt} \right)^2 = \frac{p_B - p}{\rho_l} - \frac{4\mu}{R_B} \frac{dR_B}{dt} - \frac{2\sigma}{\rho_l R_B}, \quad (4)$$

式中: $R_B$ 为空化泡半径; $p_B$ 为泡内压强; $\mu$ 为液压介质黏性; $\sigma$ 为液压介质表面张力; $\rho_l$ 为流体相(液压油)的密度. 文中取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 液压油的饱和蒸气压 $p_v = 2000 \text{ Pa}$ , $\sigma = 3.14 \times 10^{-5} \text{ N/m}$ <sup>[19]</sup>.

此外,所采用RNG湍流模型为基于Boussinesq假设的雷诺应力关联式<sup>[20]</sup>,即

$$-\rho_m \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho_m k \delta_{ij}, \quad (5)$$

式中: $u'_i, \mu'_j$ 分别为 $x, y$ 方向上的脉动速度分量; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 分别为 $x, y$ 方向上的平均速度分量; $k$ 为单位质量的湍流脉动能; $\mu_t$ 为涡黏性系数; $\delta_{ij}$ 为单位张量.

## 2 计算结果与分析

基于上述计算模型以及边界条件,在进口压力分别为4.0,5.0,6.0 MPa,背压保持0.5 MPa不变的情况下,对开度为0.5 mm、节流槽深度为0.7~1.5 mm的节流阀内部空化流场变化情况进行分析,分别讨论槽口深度对油液压力场、速度场及空化的影响.

### 2.1 槽口深度对油液压力场与速度场的影响

图3为进口压力5.0 MPa,节流槽深度1.1 mm条件下,节流阀内部流场压力 $p$ 和速度 $v$ 分布图. 从图3a可以看出,流道内压力较大区域位于进口腔,压力较小区域位于出口腔,压降区主要分布在狭长的U型节流槽. 由于节流口面积突然收缩,当流体流经节流口时,压力急剧降低,高速流体流动方向突变,高速流体在惯性的作用下出现流体脱离壁面趋势,并在节流槽出口处的阀腔竖直近壁面形成低压区. 当流体流出节流口进入下游流道后,由于通流面积增大,使得流体再次贴附阀腔壁面,流体压力开始回升. 对图3b中流场内的速度分布特性进行分析,可以得出整个流道的进口和出口位置为低速区,而高速区主要集中在节流槽及节流槽口下游流

道中,这是由于当油液流经节流槽时,油液过流面积突然缩小导致油液流速上升.随后液压油流入下游流道,通流面积增大,液压油流动速度逐步减慢.

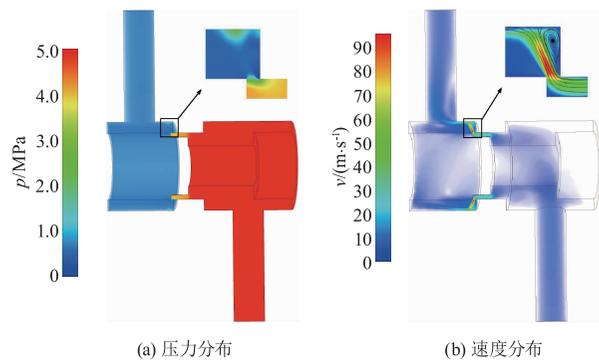


图3 油液流场压力与速度分布图

Fig. 3 Distribution of pressure and velocity contours in flow field

为了进一步说明节流口区域压力及速度分布情况,对流道中心线上压力和速度分布情况进行了分析.在图2b中选取流道几何中点A、D,并按照速度流线方向选择经过过流面 $K_3$ 中点的线段BC.等间距分析该流道中心线上200个压力及速度测试点的具体值,如图4所示.图4a、b分别为进口压力为5.0 MPa、节流槽深度为0.7、1.1、1.5 mm时,节流口流道中心线上压力 $p$ 及速度 $v$ 随轴向距离变化的曲线.从图3a槽口局部放大图中可以看出,对于不同的节流槽深度,当流体从点A流向点B时,压降变化相对BC段均较缓慢,且AB段总体压降均在1.0 MPa以内,但随着节流槽深度加深,在AB段压力下降速率逐渐变慢,这主要是由于随着节流槽深度加深,流经节流面 $K_1$ 的面积逐渐增大<sup>[21]</sup>,节流面 $K_1$ 的节流作用相对减弱;当油液经过节流口,即经过点B时,压力呈阶跃式下降,压力降低至接近饱和蒸气压;在点C,由于靠近阀腔壁面拐角处,油液在此处形成涡流,如图3b局部放大图所示,所以流速相对降低,从而导致压力回升;在流道下游点C到点D处,压力逐渐稳定,压力值大小接近背压0.5 MPa.图4b为节流口流道中心线上速度随轴向距离变化曲线,对于不同节流槽深度,当流体从点A流向点B时,速度均缓慢上升,但当油液从点B流向节流口时,节流面 $K_3$ 为主要节流面,通流面积突然缩小导致流速急速升高,所以在节流槽口处和节流槽口下游均有高速区出现,且最大流速随着槽口深度的增大而增大,其中最大流速由深度为0.7 mm时的85 m/s增加到深度为1.5 mm时的98 m/s.当油液从节流口流向点C时,由于通流面积变大,液

压油流动速度逐渐降低,同时油液在C处形成涡流,速度相对较低,因此在点C附近速度存在先下降后上升的趋势.此后,油液流向点D时,随着通流面积进一步变大,液压油流动速度逐渐降低至5 m/s左右,如图4b中点D所示.

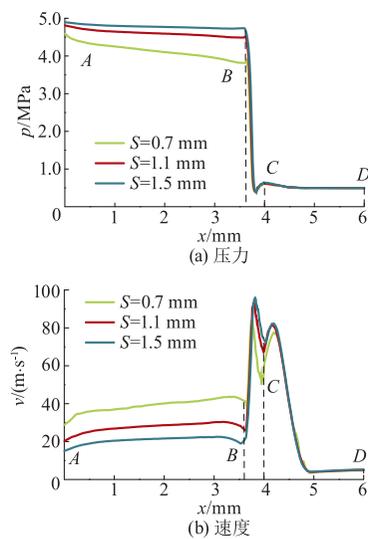


图4 节流口上方流道压力及速度分布曲线

Fig. 4 Pressure and velocity distribution curves in orifice

由图3、4可知,U型节流槽是压力及速度突变区,为节流阀提供了主要的节流作用.图5为进口压力为5.0 MPa、节流槽深度为0.7、1.1、1.5 mm时,节流槽处压力与油液流速分布情况.从图5a节流槽处压力分布图可以看出,节流槽内的压力值随着槽口深度的增大而增大.其中,槽口深度为0.7 mm时,槽内平均压力约为3.8 MPa;而当槽口深度为1.5 mm时,节流槽内平均压力值接近4.8 MPa.这主要是由于随着槽口深度的不断加深,等效过流面积增大<sup>[21]</sup>.在相同压差下,流入节流槽内流量不断增加,节流槽承担的油液压力提高,节流槽内压力会显著增加.但出口腔压力值不随深度的改变而变化,保持与背压值一致.

此外,图5a中取节流口几何中点处油液速度流线.黑色曲线为油液流线的流出方向,可以看出,当槽口深度增加时,出口处的高速射流方向发生了改变.定义射流角 $\alpha$ 为射流方向与水平线的法线的夹角.从图5a中得到槽口深度为0.7、1.1、1.5 mm时对应的射流角度分别为 $20^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $16^\circ$ ,即射流角度随槽口深度的增加而不断减小,也就是当槽口深度加深时,高速射流方向距离阀体壁面更近,这种情况的出现与槽口结构有关.当油液进入节流槽后,槽口的半圆形内壁将会阻碍流体的运动,从而改变流

体的运动方向;当槽口加深,槽内流量增多,更多的油液相互挤压,更大的压力迫使油液急速流过节流口,从而造成射流方向发生改变.图5b为节流槽处油液流速分布图,其中黑色曲线为90 m/s的速度等值线.从图中可以看出,油液速度分布情况基本一致,且高速流体产生的区域及槽口附近的高速射流形态也基本一致.当槽口深度较浅时,节流口 $K_1$ 承担了一部

分的节流作用,油液流向节流面 $K_3$ 时有相对较大的速度.由于节流面 $K_1$ 的面积随着深度的增加而增加,当槽口深度较深时,节流面 $K_1$ 节流作用减弱,所以油液流向节流面 $K_3$ 时速度相对较小.同时,根据图中90 m/s的速度等值线可以看出:当槽口深度增加时,流体在节流槽内流动阻力逐渐减小,此时节流面 $K_3$ 起主要节流作用,因此高速流体的区域增大.

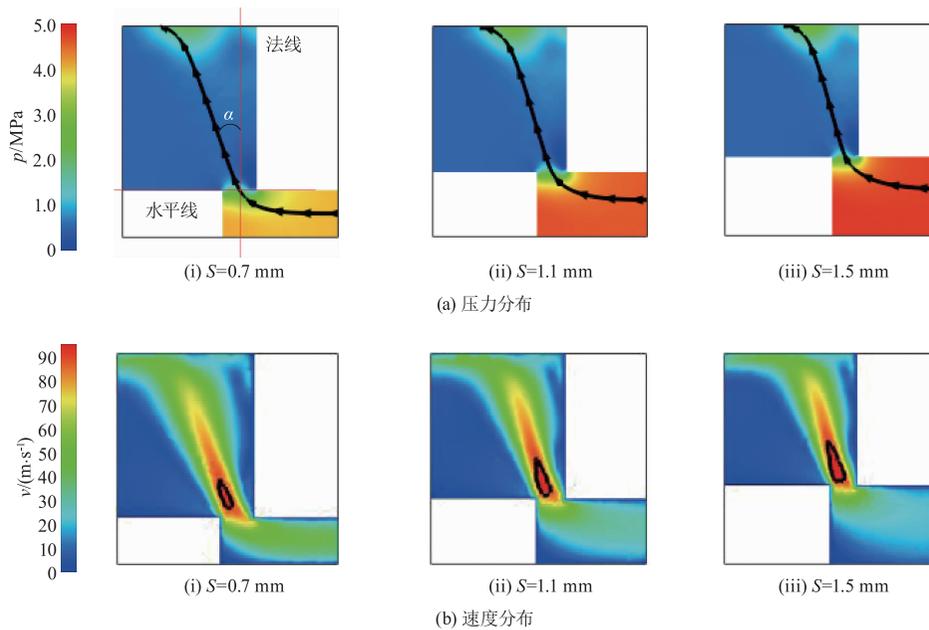


图5 不同槽口深度时阀口压力分布与速度分布图

Fig. 5 Pressure and velocity distribution in valve orifice at different notch depths

图6为进口压力分别为4.0,5.0,6.0 MPa,油液最高流速 $v_{\max}$ 随槽口深度变化曲线.从图中可以看出,槽口深度相同时,最大流速随着进口压力的增大而增大,并且在相同的进口压力下,当槽口深度增加时,流入节流槽内流量不断增加,而节流面 $K_3$ 过流面积保持不变,因此节流阀内流体最大流速逐步提高.当槽口深度达到1.3 mm时,油液最大流速逐步达到稳定,之后槽口深度继续增加,但最大流速增加不再明显.这主要是由于随着槽口深度的增加,空化区域的面积逐渐增大,对流体流动起到阻碍作用.

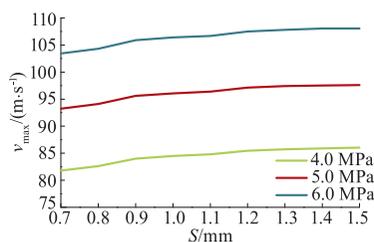


图6 不同槽口深度下油液流速最大值曲线  
Fig. 6 Maximum flow velocity of oil at different notch depths

## 2.2 槽口深度对油液空化强度的影响

气体体积分数 $\alpha_v$ 作为空化程度以及空化区域的衡量依据<sup>[13]</sup>,通过观察整个流体域计算结果可以发现,空化发生区域位于节流口出口近壁面处,且越靠近阀腔壁面,气体体积分数越大,空化程度越严重.图7为不同槽口深度时流场空化区域分布图.图7a为进口压力5.0 MPa、节流槽深度1.1 mm时径向截面空化区域分布图.从图可以看出,空化区域在上下两侧流道大小相同,因此重点分析上方流道的空化区域分布.图7b为节流槽深度0.7~1.5 mm时上方流道空化分布图,从图中可以看出,当节流槽深度介于0.7~1.5 mm时均有空化现象发生,且随着深度增加,空化发生较为严重的区域逐渐由节流口两侧向中心区域转移,且空化发生呈现逐渐增强的趋势.

为了进一步说明槽口深度对空化发生程度的影响,提取不同压差下径向截面处的空化面积 $A_v$ 随槽口深度变化曲线,如图8所示.从图8可以得出,槽口深度相同时,空化面积随着进口压力的增大而

增大.并且在相同的进口压力下,当槽口深度增加时,空化面积随之增大.这主要是由于随着槽口变深,节流槽内部压力恢复变慢,流体经过节流口处压力骤降,且流体回旋产生回流区,造成大范围的低压区域,空化面积变大.因此,合理控制U形槽深度或增加节流槽内部阻力,可以有效地抑制空化发生程度.

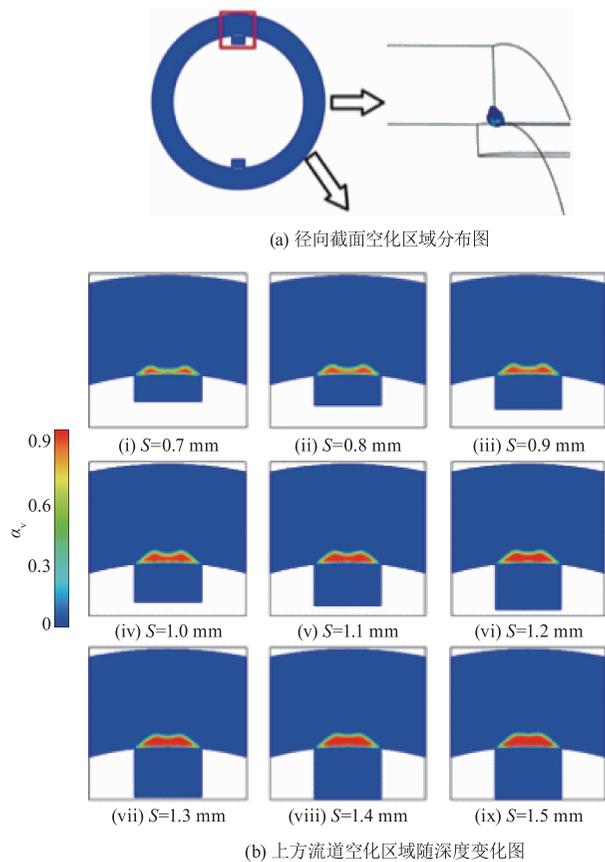


图7 不同槽口深度时流场空化区域分布图

Fig.7 Distribution of cavitation area at different throttle groove depths

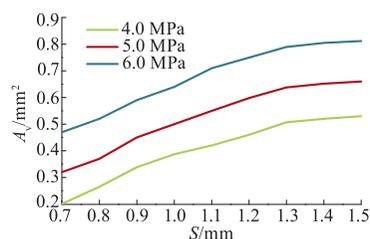


图8 空化面积随槽口深度变化曲线

Fig.8 Cavitation area at different depths

### 3 结论

采用 ANSYS Fluent 14.5 数值模拟了节流槽深度变化对 U 型节流阀内部空化流场的影响,并得出

以下结论:

1) 槽口深度变化对节流阀内部压力场、速度场、空化区域都产生较大影响.

2) U 型节流阀压降区域主要发生在节流槽口处,且节流槽内的压力值随着槽口深度的增大而增大;流体在流过节流槽口时形成高速射流,且最大流速随着槽口深度的增大而增大,射流角度随槽口深度的增加而不断减小.

3) 空化区域主要位于节流口出口近壁面处,空化强度及空化面积与槽口结构密切相关.随着槽口深度的增加,径向截面空化较强的区域向中心扩展.

### 参考文献 (References)

- [1] 晏静江. U 型节流槽式液压滑阀热特性的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- [2] WANG Zhaoqiang, GU Linyi, JI Hong, et al. Flow field simulation and establishment for mathematical models of flow area of spool valve with sloping U-shape notch machined by different methods [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(1): 140 - 150.
- [3] LIU Xiumei, HE Jie, ZHAO Jiyun, et al. Biofluid flow through a throttle valve: a computational fluid dynamics study of cavitation [J]. Journal of mechanics in medicine & biology, 2016, 16(3): 1650034.
- [4] 谭磊,曹树良,桂绍波,等. 绕水翼空化流动的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(7): 1058 - 1062.  
TAN Lei, CAO Shuliang, GUI Shaobo, et al. Numerical simulation of cavity flow around a hydrofoil [J]. Journal of Tsinghua University (natural science edition), 2010, 50(7): 1058 - 1062. (in Chinese)
- [5] 吴晓明,要继业,李伟,等. U + K 节流槽滑阀的数值模拟[J]. 流体传动与控制, 2010(5): 13 - 15.  
WU Xiaoming, YAO Jiye, LI Wei, et al. The numerical simulation of spool valve with U + K notches [J]. Fluid power transmission & control, 2010(5): 13 - 15. (in Chinese)
- [6] ZHENG Zhijian, OU Guofu, YE Haojie, et al. Investigation on failure process and structural optimization of a high pressure letdown valve [J]. Engineering failure analysis, 2016, 66: 223 - 239.
- [7] 冀宏,傅新,杨华勇,等. 节流槽型阀口噪声特性试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 42 - 46.  
JI Hong, FU Xin, YANG Huayong, et al. Experimental study on noise characteristics of groove-type orifices [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2004, 40(11): 42 - 46. (in Chinese)

- [ 8 ] RITO G D. Experiments and CFD simulations for the characterisation of the orifice flow in a four-way servo valve[J]. International journal of fluid power, 2007, 8 (2):37-46.
- [ 9 ] HUANG Hao, LEI Huihu. Modeling and simulation of flow field of main spool in servo valve[C]//International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, China: [ s. n. ], 2011:867-870.
- [10] DENG Jian, PAN Dingyi, XIE Fangfang, et al. Numerical investigation of cavitation flow inside spool valve with large pressure drop[C]//9th International Symposium on Cavitation. Lausanne, Switzerland: [ s. n. ], 2015:012067.
- [11] YE Yi, YIN Chenbo, LI Xingdong, et al. Effects of groove shape of notch on the flow characteristics of spool valve[J]. Energy conversion & management, 2014, 86 (5):1091-1101.
- [12] BORGHI M, MILANI M, PAOLUZZI R. Influence of notch shape and number of notches on the metering characteristics of hydraulic spool valves[J]. International journal of fluid power, 2005, 6(2):5-18.
- [13] 李贝贝,刘秀梅,龙正,等. 基于 Fluent 的节流阀油液空化流场数值分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 54-58.  
LI Beibei, LIU Xiumei, LONG Zheng, et al. Simulation and analysis for cavitation flow field in a throttle valve based on fluent [J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(21): 54-58. (in Chinese)
- [14] 张晓俊,权龙,赵斌. 内流式滑阀壁面压力分布可视化计算及试验验证[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14):196-203.  
ZHANG Xiaojun, QUAN Long, ZHAO Bin. Visualization calculation and experimental verification of steady axial flow force on the converged flow sliding valve[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(14):196-203. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] LIANG Jian, LUO Xiaohui, LIU Yinshui, et al. A numerical investigation in effects of inlet pressure fluctuations on the flow and cavitation characteristics inside water hydraulic poppet valves[J]. International journal of heat & mass transfer, 2016, 103: 684-700.
- [17] 杜学文,邹俊,傅新,等. 节流槽结构对气穴噪声的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(3):456-460.  
DU Xuewen, ZOU Jun, FU Xin, et al. Effect of throttling grooves structure on cavitation noise[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2007, 41(3):456-460. (in Chinese)
- [18] 陈庆光,吴玉林,刘树红,等. 轴流式水轮机全流道内非定常空化湍流的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6):211-216.  
CHEN Qingguang, WU Yulin, LIU Shuhong, et al. Numerical simulation of unsteady cavitating turbulent flow in the whole flow passage of a kaplan turbine[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2006, 42(6): 211-216. (in Chinese)
- [19] 张健,姜继海,白云峰,等. 气穴中液压油温度随气泡膨胀变化规律[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(4):539-543.  
ZHANG Jian, JIANG Jihai, BAI Yunfeng, et al. Change law of hydraulic oil temperature with bubble growth in cavitation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(4):539-543. (in Chinese)
- [20] 高红. 溢流阀阀口气穴与气穴噪声的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
- [21] 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 CSAM, 2009, 40(1): 198-202. (in Chinese)

(责任编辑 朱漪云)