

基于 Fluent 滑动网格对非全周开口滑阀阀口空化现象的研究

李森林^{1,2}, 杨胜清^{1,2,3}, 陈乾鹏^{1,2}

- (1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 甘肃省液压气动工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730050;
3. 广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要: 该文主要研究了湍流方程黏度修正函数、流体湍动能、油液流动方向、阀口开启行为对于阀口空化现象的影响以及空化现象对于阀口输出质量流量的影响。该文以滑阀非全周阀口中的 K 型阀口为研究对象, 利用 Fluent 滑动网格模型、Zwart 空化模型和黏度修正函数、湍动能修正函数展开该文的研究。研究表明: 湍流方程黏度项修正后, 阀口近壁面处出现了速度更大、范围更广的反射流, 进而改变空泡形状; 考虑湍动能在空化现象的影响后, 计算域内的空化量会增加; 油液流动方向不仅会影响阀口空化的形态, 空化发生的位置也会影响阀口输出的质量流量大小; 当空化发生在节流槽内部时, 空化气体会堵塞阀口降低阀口的有效过流面积, 进而影响阀口的输出流量; 阀口开度的变化会影响空化发生的位置数量以及强度; 由于气液两相的密度差异, 空化的不稳定性会影响阀口输出流量的不稳定性。

关键词: 黏度修正函数; 空化; 非全周阀口; 阀口流量

中图分类号: TH137 文献标志码: A 文章编号: 1008-0813(2021)01-0028-07

Research on Cavitation Phenomenon of Non-full-circumference Opening Spool Valve Port Based on Fluent Sliding Grid

LI Sen-lin^{1,2}, YANG Sheng-qing^{1,2,3}, CHEN Qian-peng^{1,2}

- (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Gansu Province Research Center of Hydraulics and Pneumatics Engineering Technology, Lanzhou 730050, China;
3. Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: This paper mainly studies the influence of viscosity correction function of turbulence equation, turbulent kinetic energy of fluid, flow direction of oil, opening behavior of valve port on cavitation phenomenon of valve port and the influence of cavitation phenomenon on output mass flow of valve port. In this paper, the K-type valve port in the non-full circumference valve port of slide valve is taken as the research object, and Fluent sliding mesh model, Zwart cavitation model, viscosity correction function and turbulent kinetic energy correction function are used to carry out this research. The results show that after the viscosity term of the turbulence equation is corrected, a jet with larger velocity and wider range appears near the valve port wall, thus changing the shape of the cavitation bubble. Considering the influence of turbulent kinetic energy on cavitation phenomenon, the amount of cavitation in the computational domain will increase. The direction of oil flow will not only affect the cavitation pattern of the valve port, but also the position where cavitation occurs will affect the mass flow output by the valve port. When cavitation occurs inside the throttling groove, cavitation gas will block the valve port and reduce the effective flow area of the valve port, thus affecting the output flow rate of the valve port. The change of valve port opening will affect the number and intensity of cavitation positions. Due to the density difference between gas and liquid phases, the instability of cavitation will affect the instability of valve port output flow.

Key words: viscosity correction function; cavitation; non-full circumference valve port; valve port flow

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51575254)

作者简介: 李森林(1990-), 男, 河南周口人, 硕士, 主要从事液压元件及 CFD 数值模拟方面的研究工作。

0 引言

非全周开口滑阀作为当前液压控制元件最常见的阀种之一, 其应用领域非常宽广。正因如此滑阀在使

用的过程中也暴露自身的诸多缺点,如卡滞^[1]、间隙泄漏、阀口空化、振动噪声等问题。滑阀阀口空化作为比较常见的问题之一,其不仅会对零件造成破坏,而且往往也是诸多问题的根源,如:

阀口空化对零件表面造成破坏的同时还降低了元件的密封性;被空蚀破坏所产生碎屑一般都不能被有效的清除,从而被保留在了液压系统中,这些被保留的碎屑一旦进入到元件的配合间隙,极易造成卡滞问题;空泡破裂时产生的高温高压同时会产生剧烈的噪声、振动等。针对阀口空化现象,不同的研究人员从不同的角度展开了调查。浙江大学杜学文^[2]曾利用流场可视化方法对 U、V 两种阀口进行了空化噪声研究,通过用高速摄像机记录了不同边界条件下滑阀阀口处空泡的运动行为,并且针对这些现象给出了自己合理的解释,同时针对阀口几何参数和流动条件对于空化现象的影响以及空化现象对于阀口流量特性的影响给出了详细的描述,最后针对阀口空化噪声现象提出了较为详细的解决方案。Washio^[3-5]通过建立锥阀阀口的可视化流场模型,并利用高速摄像机记录了阀口处空化空泡的流动行为,发现了空泡在发展阶段的发光现象以及阀芯所受液压力的周期性波动与空泡的脱落行为有关。

本文在研究非全周阀口的空化时,为了更好地描述阀口处的空化现象,以三维简化 K 型滑阀阀口为研究载体从而展开本文的论述。

1 空化模型及其湍动能修正

商用 CFD 软件 Fluent 在空化的数值模拟研究方面提供了三种空化模型:全空化模型、S-S 模型以及 Zwart 模型。无论哪种空化模型都是以 R-P 单气泡运动方程和气核假设理论为基础,通过一系列的简化与修正得到了最终的空化理论方程。根据一些研究人员^[6,7]的使用情况来看,全空化模型虽然最为全面,但收敛性差、易发散;S-S 模型在预测阀口空泡流动的非定常性的方面表现地较差。因而本文选择了 Zwart 空化模型同时结合 UDF 线性传质宏进行了湍动能的修正。Zwart 空化模型的传质速率表达式见式(1)、式(2)。式(3)、式(4)是对该空化模型在湍动能方面进行修正的理论表达式。

当 $p \leq p_v$ 时,液体气化。

$$R_c = F_{\text{vep}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad (1)$$

当 $p > p_v$ 时,气体液化。

$$R_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad (2)$$

$$p_v = p_{\text{sat}} + 0.5p_{\text{turb}} \quad (3)$$

$$p_{\text{turb}} = 0.39\rho_l k_l \quad (4)$$

式中 p —— 气核表面压力;

p_v —— 气核空化压力;

α_v —— 气体体积分数;

α_{nuc} —— 气核体积含量;

R_B —— 气核半径;

ρ_v —— 空化气体密度;

ρ_l —— 油液密度;

k_l —— 油液湍动能;

F_{vep} —— 蒸发校正系数;

F_{cond} —— 校正凝结系数。

2 湍流方程黏度修正函数

阀口空化现象发生以后,阀口内部的流动由单纯的油液流动变成油液与油蒸汽的两相混合流动。Fluent 默认的湍流方程都是建立在布辛尼斯克假设的基础上,即密度的变化不会影响流体黏度等相关属性。因此,一部分研究人员^[8-9]在对非定常空化的研究方面借助 Fluent UDF 使用了湍流方程的黏度修正函数,其详细表达式如式(5)、式(6)所示:

$$f(\rho) = \rho_v + \left(\frac{\rho_v - \rho}{\rho_l - \rho_v} \right)^n (\rho_l - \rho_v) \quad (5)$$

$$\mu_t = f(\rho) C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (6)$$

式中, ρ_v —— 油蒸汽气体密度;

ρ_l —— 液油液密度;

ρ —— 混合物密度;

μ_t —— 混合物黏度;

n —— 修正函数的常数相,根据相关文献^[9]的推荐取值为 10。

由湍流黏度修正函数的表达式可知,其修正机理是基于混合物的密度属性。图 1 反映的是黏度修正函数的影响,由图可知修正以后油液黏度将会有较大的改变。

3 数值模拟前处理

3.1 几何模型前处理

由于本文在研究阀口空化现象时涉及到了阀口的动态行为,因此在几何模型方面需要做出特殊化处理。与锥阀开启行为不同,滑阀在开启过程中,虽然阀口开

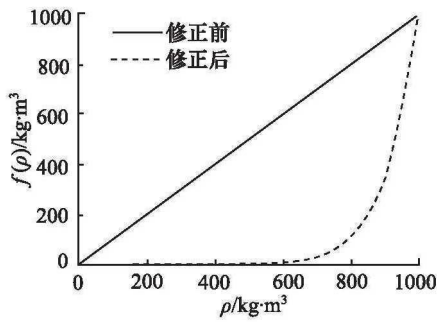


图1 修正前后 $f(\rho)$ 随密度 ρ 的变化

度有所变化,但是计算域的整体大小却没有出现增减,结合这一特点本文根据 Fluent 滑移网格的特点,确定滑移网格模型为本文阀口变化的驱动模型。滑移网格模型需要将计算域几何模型做出如图 2 所示的处理方式。本文运用三维建模软件 Creo,将计算域切分成两部分,其中一部分作为静域处理,另一部分为动域。动域需要运用结合 Fluent UDF 函数和网格区域运动模型进行驱动,而静域不需要。鉴于本文还涉及到油液流动方向对阀口空化的讨论,因此便在这里规定油液流动方向的正反向问题:当油液按照图 2 所示的方向流动时则为正向流动,反之为负方向流动。

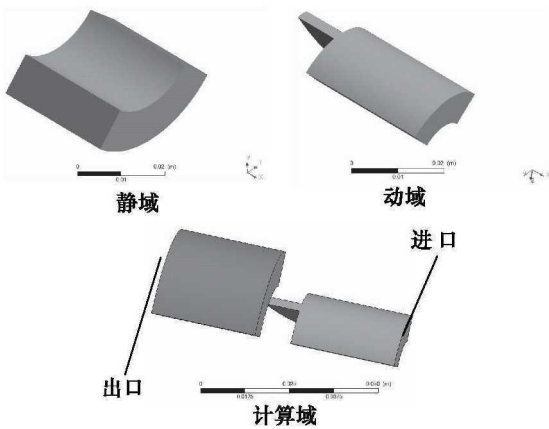


图2 数值模拟几何模型示意图

3.2 数值模拟设置

在湍流模型的设置方面,本文根据兰州理工大学王鹏飞^[9]在其毕业论文中的论述,确定 RNG $k-\epsilon$ 两方程湍流模型为本文所用到的湍流模型。在进出边界条件方面,除讨论湍动能的影响外,其余仿真案例进口压力均设置为 3 MPa;出口压力均为 0 MPa;考虑到空泡运动的非定常性,仿真算法选为瞬态算法,环境压力为一个标准大气压。表 1 列出了本文所用油液的材料物性参数。

文献[9]曾针对 Zwart 空化模型参数数值大小对于

阀口空化的影响方面进行过讨论,通过将数值模拟结果与实验结果进行对比确定了油液的空化模型参数。因此本文在数值模拟方面采用了其文中给出的推荐值,详见表 2。

表 1 油液物性参数

物理参数	数值
液体密度 (kg/m^3)	851
液体黏度 μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.046
液体饱和蒸汽压 (Pa)	400
蒸汽密度 (kg/m^3)	1.2
蒸汽黏度 μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.2×10^{-5}

表 2 空化模型参数

d (μm)	α_{nuc}	F_{vep}	F_{cond}
1	0.09	0.4	0.0001

4 湍流方程黏度修正函数对于空化现象的影响

在探究湍流方程黏度修正函数对阀口空化现象的影响方面,为了使修正前后的现象更加明显,本小节取了较大的阀口开度。

图 3、图 4 分别显示湍流方程黏度修正函数修正前后的气体含量分布云图以及局部速度矢量图,其中箭头的指向、长短表示速度的方向、大小。通过对比两图可以发现,湍流方程黏度修正函数通过获取混合物密度的大小降低混合物黏度,从而在近壁面附近处引发了速度更大、范围更广的回射流,使得空泡更容易脱离壁面,进而改变了空泡形状。

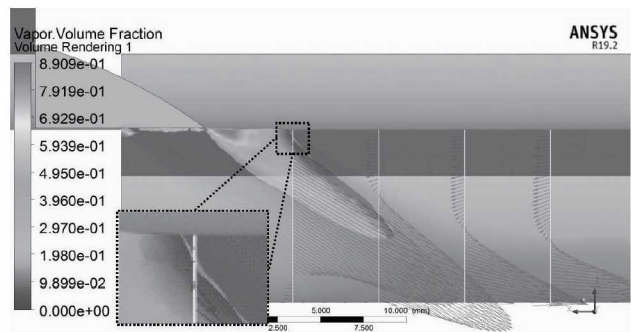


图3 湍流方程黏度函数修正前

表 3 反映的是湍流方程黏度修正函数修正前后计

算域气体体积含量和出口质量流量。从表 3 中我们可以看出,经过湍流方程黏度修正函数修正以后,出口质量流量有所提升,计算域气体含量有所下降。这主要是由于空化发生后,混合密度降低,黏度修正函数利用混合物密度,降低了混合物黏度使得混合物更容易流动,造成低压区范围更小,因而计算域气体含量更少。

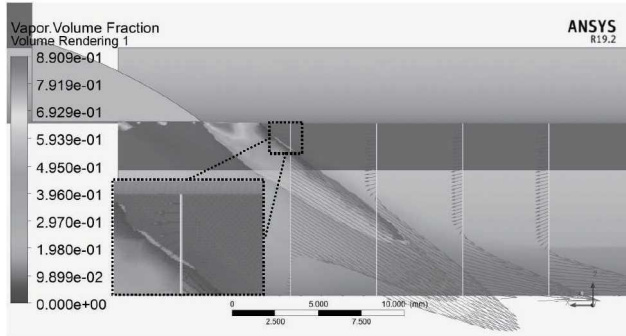


图 4 湍流方程黏度函数修正后

表 3 修正前后气体体积含量与出口质量流量的对比

	修正前	修正后
气体体积含量	0.00279	0.00231
出口质量流量(kg/s)	-0.43374	-0.43526

5 湍动能修正函数对于阀口空化现象的影响

为了使湍动能对于阀口空化现象的作用更加明显,本文在讨论湍动能对于阀口空化现象的影响时,进口以均值 3 MPa、振幅 0.3 MPa、频率 1000 Hz 正弦压力脉动信号输入。几何模型见图 2。

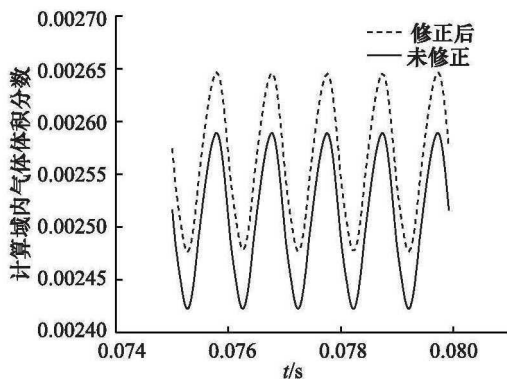


图 5 湍动能修正前后计算域气体含量随时间的变化

图 5 显示了湍动能修正前后,计算域气体含量在 0.075~0.08 s 时间段的变化。结合图 5、式(3),可以得出:空化模型将湍动能的影响加入以后,油液发生空

化的阈值压力将会提高,油液更加容易发生空化。因此在湍流比较激烈、湍动能比较高的情况下,为了更加真实的反映流场中的空化现象,有必要对空化模型进行湍动能的修正。

6 油液流向对阀口空化现象及输出流量的影响

图 6、图 7 分别显示了正反向流动过程中阀口空化量的气体体积分布云图,为了更好显示空化发生的位置以及空泡的形状,本文又在气体体积分数云图的基础上做出了其各自的气体含量为 0.1 的等值面图。图 8、图 9 是本文引用兰州理工大学郑直等人^[10]在 2009 年的实验结果图。通过将可视化实验结果和数值模拟对比可以发现,无论是阀口空化的形态还是空化发生的位置,数值模拟和实验研究表现出了较高的一致性。这一结果不仅体现了郑直等人实验结果的正确性,同时也增加了本文数值模拟的可信度。

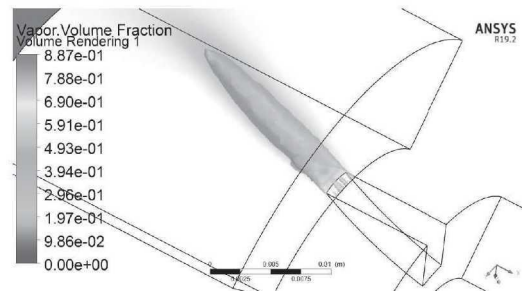


图 6 正向流动气体体积分数云图

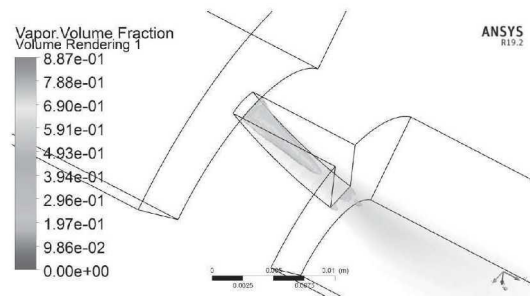


图 7 反向流动气体体积分数云图

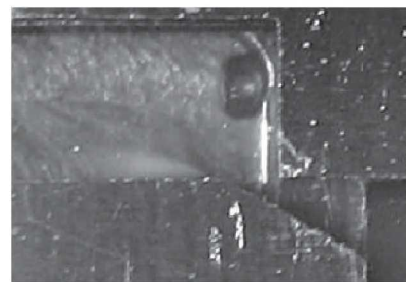


图 8 正向流动实验结果



图9 反向流动实验结果

表4 正反向流动进出口质量流量及误差

	正向流动	反向流动
进口(kg/s)	0.093435066	0.083544426
出口(kg/s)	-0.093436104	-0.083544675
净增量(kg/s)	-1.0379079e-06	-2.4991546e-07
误差(%)	-1.11083E-05	-2.99E-06

图10显示的是图11中数据提取线处的压力分布曲线。由图10可知正向流动时阀口前后压降略小于反向流动。但根据表4所描述的情况,正向流动时产生的质量流量比反向流动高。引起这种现象的主要原因可以从图6、图7看出,反向流动空化空泡发生在节流槽内,而正向流动则在节流槽之外。阀口流量公式是建立在没有空化的假设基础上,而阀口节流槽内的空化占据了节流槽的通流面积,增加了槽内流动阻力。因此即使槽口压差相差不大的情况下,空化现象的发生也会增加流动阻力,减小流量。对比图6、图7两计算域中的气体体积分分布云图,能够看出正向流动时计算域内的气体含量高于反向流动时的情况,而引起这种现象的主要原因是正向流动时的流量更大以及正向流动的几何结构导致了出口处形成了更大范围的低压区,因此气体分数较反向流动含量更高、范围更广。

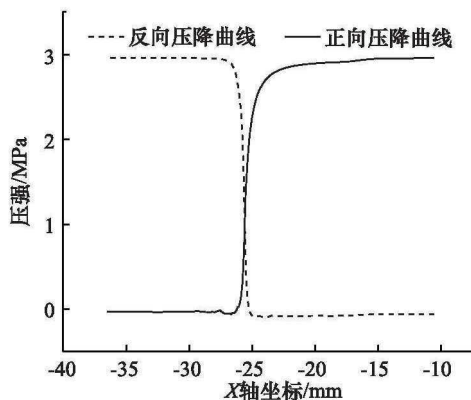


图10 正反向流动过程中的阀口压降曲线

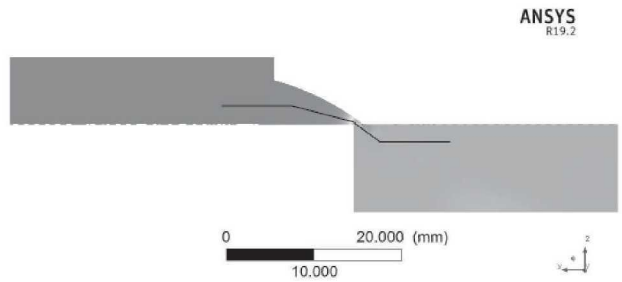


图11 数据提取线位置

7 阀口开启对阀口空化现象及输出流量的影响

考虑到实际阀口在开启过程中,其运动形式是从静止到运动再到静止的过程,本文在描述过程时运用分段线性函数做了近似等效替代,其具体等效结果见图12。

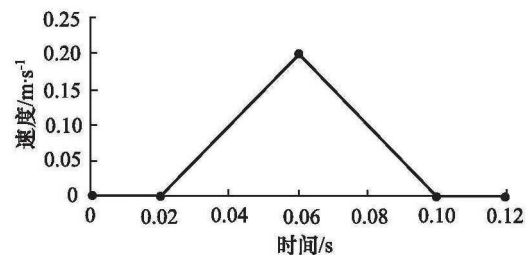


图12 速度运动形式

图13~图20分别显示了正反向流动阀口瞬间开启过程中阀口空化现象的变化。对于正向流动而言,阀口空化位置只有在0.06s以后才会在阀口节流槽内出现;而反向流动过程中节流槽内的空化位置一直增加,同时由于流场结构的原因,节流槽出口处也出现了大量空化。同时根据不同开度阀口的空化位置数量看,在研究滑阀非全周阀口空化方面,二维模型虽然可以反应出一部分现象,但空化发生的位置量却不能较好的体现,因此本文在这方面的研究本文推荐使用三维简化模型。

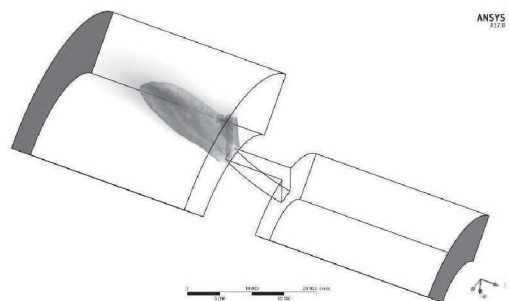


图13 t=0.0202s 正向流动

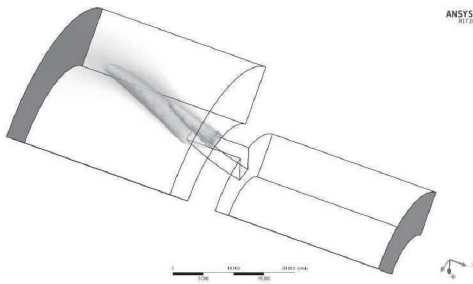


图 14 $t=0.06$ s 正向流动

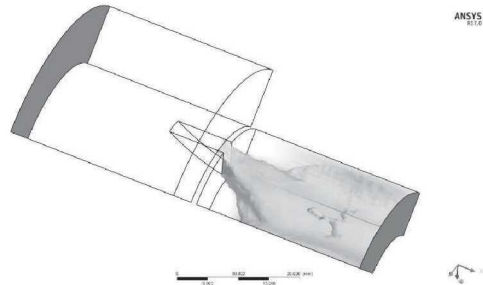


图 19 $t=0.10$ s 反向流动

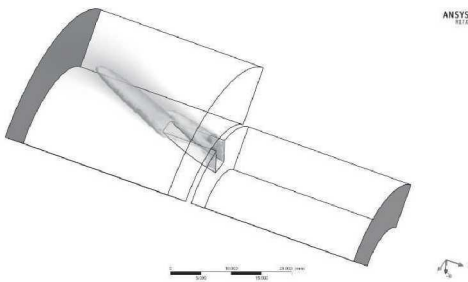


图 15 $t=0.10$ s 正向流动

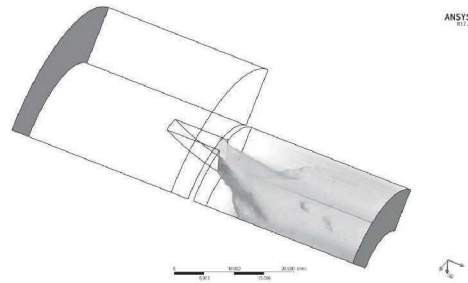


图 20 $t=0.12$ s 反向流动

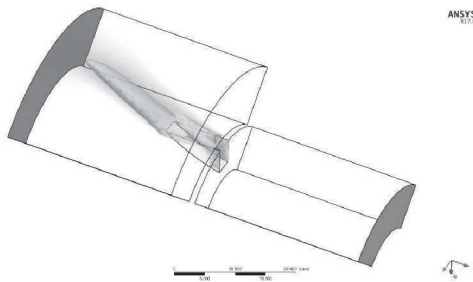


图 16 $t=0.12$ s 正向流动

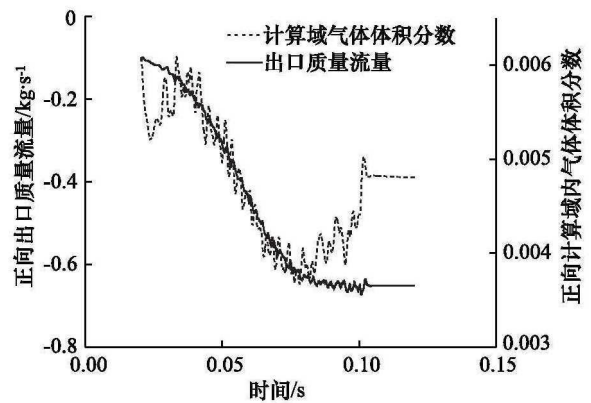


图 21 正向流动过程中监测物理量随时间的变化

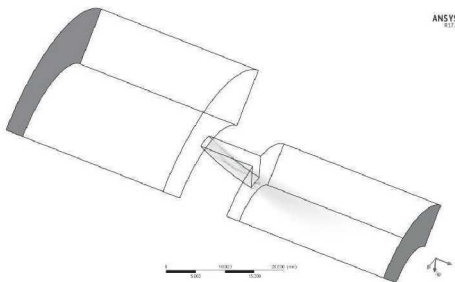


图 17 $t=0.0202$ s 反向流动

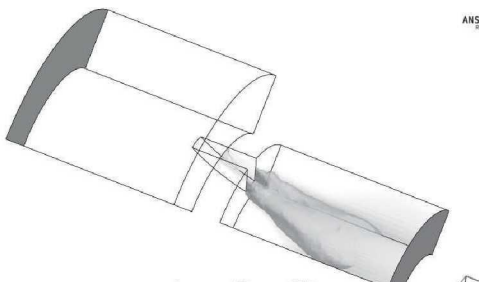


图 18 $t=0.06$ s 反向流动

图 21、图 22 分别显示的是正反向流动过程中出口质量流量和计算域气体体积含量随时间的变化关系。根据图 21 所示结果可知,对于正向流动,在 0.06 s 之前随着阀口开度的增加,计算域出口质量流量逐渐增加而计算域内的气体含量逐渐减少;0.06 s 以后阀口节流槽内部空化发生的位置逐渐增加,因而气体含量在此时刻之后随着开度的增加也呈现增长趋势,直至阀口运动在 0.1 s 以后停止,计算域气体含量呈现出一个相对稳定的状态。与正向流动情况不同,根据图 22 所示结果,反向流动过程中,出口质量流量和计算域气体含量都是随着开度的增加而逐渐增加,而且数值量的波动程度与正向流动相比较。通过将图 21、图 22 进行对比可以发现,虽然出口质量流量在开启过程中变化趋势相同,但由于正反向流动出口结构的差异使得计算域气体含量在这一变化过程中呈现出两种不同的变化趋势。

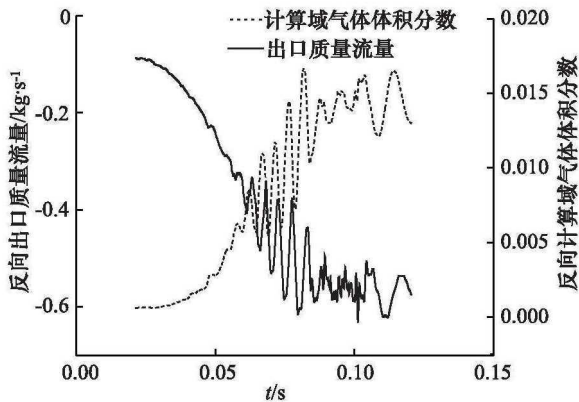


图 22 反向流动过程中监测物理量随时间的变化

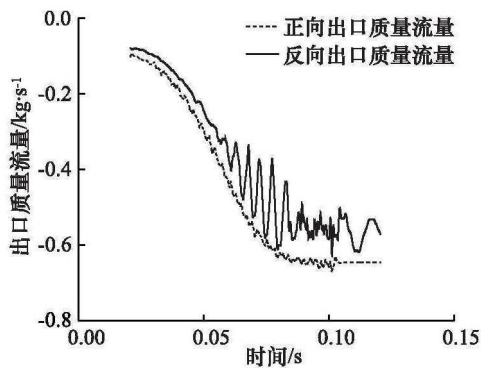


图 23 阀口开启过程中出口质量流量随时间的变化

图 23 显示的是正反向流动过程中, 阀口出口质量流量随时间的变化。根据图 23 所示结果, 正反向流动、阀口瞬间开启的过程中, 正向流动时的出口质量流量始终大于反向流动过程。而反向流动过程中出口质量流量的波动量较正向流动大。正向流动过程中出口质量大于反向过程的原因可以从图 13 到图 20 看出, 对于正向流动情况, 空化在大部分时间段内发生在了节流槽以外的部分; 反观反向流动情况, 从阀口运动开始到结束, 节流槽内始终有空化现象, 而且节流槽出口处也发生了大量的空化现象, 根据空化发生的位置以及空化发生的量, 可以推测空化的发生减小了节流槽的通流面积, 同时大量空化的发生会堵塞节流槽, 降低阀口输出流量。质量流量波动量的大小主要是因为油液和油蒸汽气液两相密度差异较大, 当油液以液体变为气体时, 其体积量将会发生数百倍的变化, 油蒸汽的体积占据了阀口空间, 同时由于阀口结构场、压力场的原因产生的气体又在不同位置处液化, 故而阀口空化现象越剧烈, 其在开启过程中的质量流量的波动性也越大, 也即空化的稳定性会影响阀口质量流量的稳定性。

8 结论

通过对 K 型阀口空化现象的动静态数值模拟及相

关的实验结果对比, 本文得出以下结论:

(1) 经过湍流方程黏度项修正函数修正后, 阀口近壁面处出现了速度更大、范围更广的回射流, 使空化气体更容易脱离壁面, 进而影响阀口空泡的形状;

(2) 湍动能修正函数通过利用流体湍动能提高了油液的空化压力使得空化现象更容易发生。因此本文推荐, 在流场变化比较激烈的情况下, 为了更加真实地反映出空化现象, 有必要对空化模型进行湍动能的修正;

(3) 根据正反向流动的动静态数值模拟结果可以得出: 空化空泡一旦发生在节流槽内会堵塞节流槽, 减小阀口有效过流面积, 从降低出口流量;

(4) 阀口开启过程中空化现象的不稳定性和气液两相密度差异是导致出口质量流量的不稳定性主要原因;

(5) 在阀口空化的数值模拟研究方面, 本文根据文中的数值模拟结果推荐使用三维简化模型。

以上便是本文在 K 型阀口空化现象方面的总结。

参考文献

- [1] 崔腾霞. 滑阀间隙中单个微米颗粒物旋转现象的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [2] 杜学文. 液压阀口空化机理及对系统的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [3] Washio S, Kikui S, Takahashi S. Nucleation and Subsequent Cavitation in a Hydraulic Oil Poppet Valve [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(4): 947-958.
- [4] Washio S, Takahashi S, Yoshimori S. Study on Cavitation Starting at the Point of Separation on a Smooth Wall in Hydraulic Oil Flow [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(6): 619-630.
- [5] Washio S, Takahashi S, Uemura K, et al. Singular Properties of Flow Separation as a Real Cause of Cavitation Inception [J]. Recent Developments in Cavitation Mechanisms, 2008, 222(222): 159-183.
- [6] 洪锋, 高振军, 袁建平. 基于 Rayleigh-Plesset 方程的空化模型改进与应用 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 126-132.
- [7] 郑小波, 刘莉莉, 郭鹏程, 等. 基于不同空化模型 NACA66 水翼三维空化特性数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2018, 33(2): 199-206.
- [8] 王万春. 液压锥阀阀口空化流动数值模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [9] 王鹏飞. 油压锥阀阀口空化流动数值模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [10] 吴必霖. 滑阀 V 型节流槽内瞬态空化流的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.