

# 插装型液压锥阀流场与气穴仿真研究

张迪嘉, 姜继海

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 以插装型液压锥阀为研究对象, 研究了几何结构参数及边界条件对锥阀流场及气穴现象的影响。按照实际使用中的插装型液压锥阀的参数, 建立了锥阀的几何仿真模型, 利用 FLUENT 软件多相流模型对插装型液压锥阀内的流场及气相分布情况进行了仿真计算, 并与修改阀芯几何结构进行对比。研究表明: 增大阀口开度, 增大出口压力, 并对阀芯结构进行修改后, 插装型液压锥阀阀口气穴现象均可有效减弱。

**关键词:** 插装型锥阀; FLUENT 软件; 气穴; 仿真; 气相

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号:

## Simulation of Flow Field and Cavitation of Hydraulic Cartridge Cone Valve

ZHANG Di-jia, JIANG Ji-hai

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The hydraulic cartridge cone valve is chosen for the study of possibility to explore its effects of geometry parameters and boundary condition on flow field and cavitation of cone valve. The geometric model of the cone valve is established based on the actual parameters of the hydraulic cone valve. The flow field and the distribution of vapor phase have been simulated using a multiphase flow model in FLUENT software program, and the results have been compared by offering different geometry parameters of valve spool. It can be concluded that cavitation of hydraulic cartridge cone valve is reduced by increasing the opening stroke and the outlet pressure and changing the geometrical structure of valve spool.

**Keywords:** cartridge cone valve; FLUENT; cavitation; simulation; vapor phase

### 引言

液压传动具有功率密度大、元件布置灵活、控制方便、动态性能好等优点, 同时液压传动因受介质流动影响存在一些问题, 如液压冲击、流体脉动和气穴现象等<sup>[1]</sup>, 引起液压系统噪声问题, 带来能量损失。液压阀作为液压系统主要的压力和流量控制元件, 是液压系统噪声主要来源之一, 其噪声的产生与气穴现象有密切的关系。当液压油流经阀口时, 通流面积减小, 流速急剧增加, 使阀口两端产生压力差, 当阀口节流处压力低于当时温度下的液压油饱和蒸汽压时, 阀口内部流体呈现气液两相, 即气穴现象发生。由于液压锥阀阀道尺寸小、阀口压差大、流速变化急剧, 使得通过实验研究阀口流场情况比较困难<sup>[2-3]</sup>。CFD (computational fluid dynamics) 技术的快速发展为深入研究液压元件内部复杂流场提供了有力手段, 该技术可以很好的表达锥阀阀

口的细微结构对气穴效应的影响。文献[4]中设计了一种液压方向控制阀, 并且对其进行了计算流体力学分析, 指出对于插装阀的压力流量损失, 计算流体力学分析结果与试验值的差值不超过 5%。文献[5]对液压升降阀进行流量和空化的研究, 通过声学 and 空化试验表明, 阀芯具有最小的扩张角度和最高的临界速度时, 在节流孔中, 空化噪声最小。文献[6]通过对以油为介质的液压锥阀的气穴现象进行理论分析和可视化实验, 强化证明了气穴现象的发生有两种可能的方式, 对锥阀气穴现象未来的研究提供了理论支持。文献[7]对 5 种典型的节流阀口过流面积建立了数学模型, 并采用 AMESim 进行建模及动态特性仿真, 指出不同节流阀口的适用情况。文献[8]对液压锥阀阀口结构进行了优化, 并采用

---

作者简介: 张迪嘉 (1992—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为流体传动与控制。  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275123)

ANSYS 软件对优化前后的液压阀口进行流场分析,指出采用二级节流并在阀芯及阀座的关键部位以过渡圆弧代替直角的锥阀结构,可以有效降低阀口气穴现象发生的可能性。

上述工作多种形式的阀进行了理论研究以及仿真和试验研究,但对于高压大流量插装型锥阀的气穴现象研究工作较少,而插装阀由于其易实现模块化、集成化已广泛应用于各类高压大流量液压系统中,因此,研究边界条件和几何结构参数对插装型锥阀的流场与气穴现象的影响有现实意义和理论价值。

本研究以插装型锥阀作为研究对象,研究了不同阀口开度及出口压力对锥阀流场及气穴现象的影响,利用 ANSYS/Fluent 软件对插装型锥阀阀口和内流道的压力、气相分布情况进行了仿真研究。

## 1 基本方程

根据前文对阀口气穴现象产生原因分析可知,气穴现象实质上是一种多相流。FLUENT 软件是在多相流建模方面的领导者,具有丰富的模拟能力,可以利用 FLUENT 软件中多相流模型中的 Mixture 模型,实现求解混合相的连续性方程、动量方程、能量方程以及第二相的体积分数的功能。

气穴现象发生时,油液流速急剧增加形成湍流,假设油液不可压缩,采用标准  $k-\varepsilon$  模型,在湍动能  $k$  方程的基础上,引入一个湍动耗散率  $\varepsilon$  的方程,形成了  $k-\varepsilon$  双方程模型,成为标准  $k-\varepsilon$  模型,模型中的  $\varepsilon$  定义为:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \quad (1)$$

于是,湍动粘度  $\mu_t$  可以表示成  $k$  与  $\varepsilon$  的函数:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

因此,标准  $k-\varepsilon$  模型的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

$$\text{其中, } G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x_i},$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad Y_M = 2 \rho \varepsilon M_t^2, \quad M_t = \sqrt{k/a^2},$$

$$a = \sqrt{\gamma R T}.$$

式中,  $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动能;  $G_b$  是由于浮力影响引起的湍动能;  $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为经验常数, FLUENT 中默认值为  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_{3\varepsilon} = 0.09$ ;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数, FLUENT 中默认值为  $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ;  $\text{Pr}_t$  为湍动普朗特数, 默认取  $\text{Pr}_t = 0.85$ ;  $g_i$  为重力加速度在  $i$  方向上的分量;  $\beta$  为热膨胀系数;  $M_t$  为湍动马赫数;  $a$  为声速。

标准  $k-\varepsilon$  模型中湍动能的输运方程是通过精确方程推导得到的,但耗散率的方程是通过物理推理及数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流,忽略了分子黏性的影响。

## 2 仿真研究

### 2.1 仿真模型及参数

本文仿真计算采用的锥阀结构如图 1 所示,锥阀结构由阀芯和阀座组成,阀芯是不完整锥形,阀芯锥角  $70^\circ$ 。按照实际使用中插装型锥阀的参数,建立锥阀几何模型,采用 CAD 软件对锥阀进行建模。

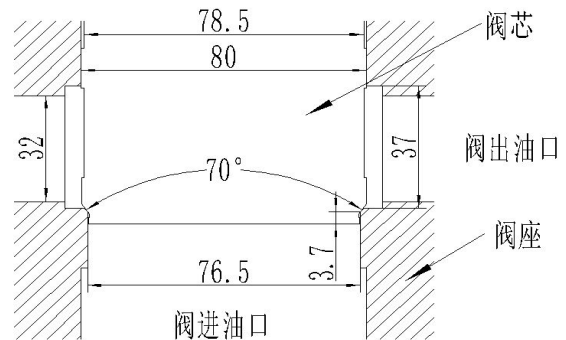


图1 锥阀基本结构

利用 CFD 前处理软件 GAMBIT 进行网格划分。Gambit 是 FLUENT 公司根据 CFD 计算的特殊要求而开发的 CFD 前处理软件。考虑到阀内部流道的复杂性以及内部流场的压力多变性,对节流口以及边界处进行了网格细化,图 2 为阀口开度为 7mm 时的网格划分示意图。

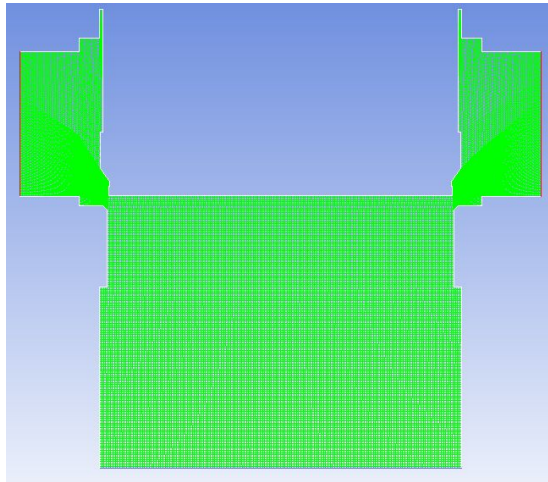


图 2 阀口开度为 7mm 时的网格划分

液压锥阀内主相为液相,油液采用 32 号抗磨液压油,其密度为  $870\text{kg/m}^3$ ,粘度为  $2.78 \times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;次相为气相,密度为  $1.225\text{kg/m}^3$ ,粘度  $1.26 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。饱和蒸气压力为  $1\text{kPa}$ ,进油口压力为  $32\text{MPa}$ ,出油口压力为  $0.1\text{MPa}$ 。

## 2.2 阀口开度对气穴现象的影响

阀口开度是插装型液压锥阀阀口气穴产生的影响因素之一,本文分别对阀口开度为  $1\text{mm}$ 、 $7\text{mm}$ 、 $15\text{mm}$  进行仿真计算,所得气相分布云图、压力分布云图分别如图 3、图 4 和图 5 所示。

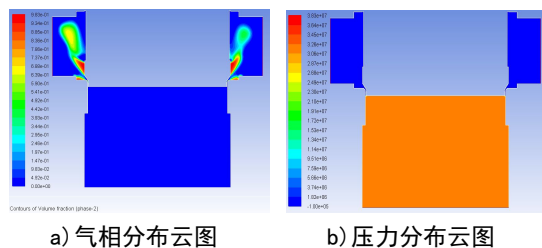


图 3 阀口开度为 1mm 流场仿真云图

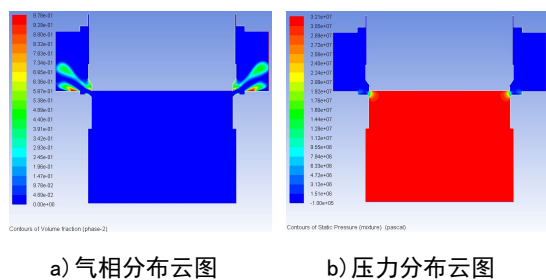


图 4 阀口开度为 7mm 流场仿真云图

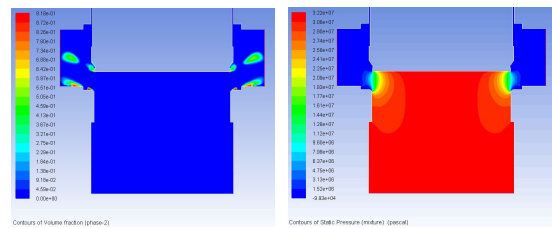


图 5 阀口开度为 15mm 流场仿真云图

比较图 3、图 4 和图 5 的仿真结果,从图中可以看出,随着开口度的增大,阀口通流面积增大,最大气体体积比由  $98.3\%$  下降到  $91.8\%$ ,阀芯周围气相的范围减小,从而气穴现象减弱。但随着阀口开度增大,流道的拐角处出现气穴现象,表明阀体结构还需要进一步优化。

## 2.3 出口压力对气穴现象的影响

出口压力是插装型液压锥阀阀口气穴产生的影响因素之一,在前文仿真基础上,将出口压力分别增加至  $0.5\text{MPa}$ 、 $1\text{MPa}$ 、 $5\text{MPa}$ 、 $10\text{MPa}$ ,当阀口开度为  $7\text{mm}$  时,仿真计算结果如图 6 所示。

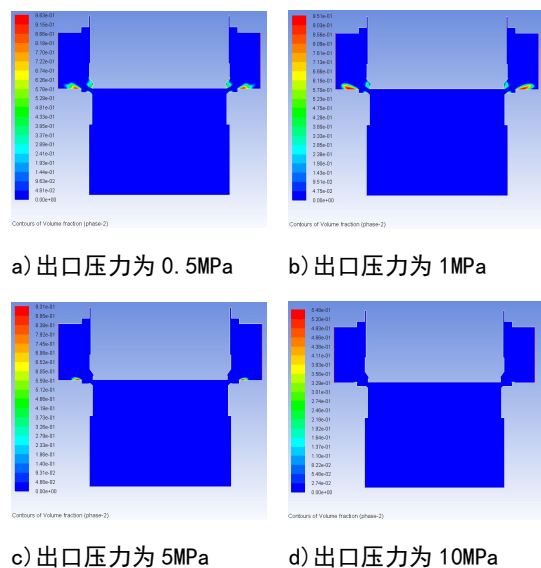


图 6 阀口开度为 7mm 不同出口压力的气相云图

通过对图 6 以及图 4 (a) 进行比较后,可以看出,阀口出口压力由  $0.1\text{MPa}$  逐渐增加至  $10\text{MPa}$ ,最大气体体积由  $97.8\%$  明显下降至  $54.8\%$ ,节流口周围气相的范围逐渐减小,气穴现象减弱,因此,提高出口压力有利于控制和改善气穴。

## 2.4 阀芯结构对气穴现象的影响

修改后的阀芯结构如图 7 所示,增加阀入口口处阀芯长度,出口压力为  $0.1\text{MPa}$  时,分别对

阀口开度为 7mm 时和 15mm 时进行仿真计算, 计算结果如图 8、图 9 所示。

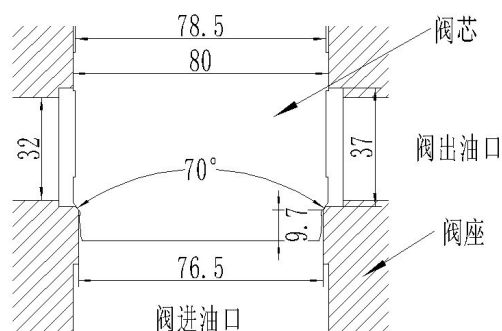
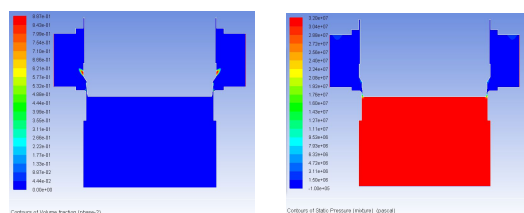


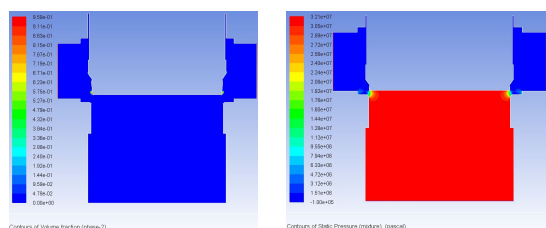
图 7 修改后的锥阀结构



a) 气相分布云图

b) 压力分布云图

图 8 阀口开度为 7mm 流场仿真云图



a) 气相分布云图

b) 压力分布云图

图 9 阀口开度为 15mm 流场仿真云图

通过对图 4 和图 8、图 5 和图 9 进行对比后, 可以看出, 对阀芯结构进行修改后, 阀口周围气相的范围明显减小, 气穴现象减弱, 阀口开度为 7mm, 最大气体体积由 97.8% 下降至 88.7%, 阀口开度为 15mm, 最大气体体积由 91.8% 下降至 80.6%。因此, 修改后的阀芯几何结构可有效减弱气穴现象。

### 3 结论

本文利用 ANSYS/Fluent 软件对插装型锥阀阀口和内流道的压力、气相分布情况进行了仿真研究, 通过对其内部流场仿真分析, 得到不同阀口开度和不同出口压力下压力分布图和气相分布图, 并修改阀芯几何结构, 通过比较分析可知: 气相分布集中于阀口壁面, 增大阀口开度或增大出口压力, 可有效减弱插装型液压锥阀阀口气穴现象, 从而降低能量损失, 减小液压系统噪声。

为插装型液压锥阀的进一步研究和结构设计提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 李翔. 液压系统的泄漏原因及应对措施[J]. 科技资讯, 2011(11): 110, 112  
Li Xiang, Reasons and countermeasures on leakage of hydraulic system[J]. SCIENCE and TECHNOLOGY INFORMATION, 2011(11): 110, 112
- [2] 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, 3 (3): 456-460.  
Xue-Wen D U, Zou J, Xin F U, et al. Effect of throttling grooves structure on cavitation noise[J]. Journal of Zhejiang University, 2007. 3 (3): 456-460.
- [3] Posa A, Oresta P, Lippolis A. Analysis of a directional hydraulic valve by a Direct Numerical Simulation using an immersed-boundary method[J]. Energy Conversion & Management, 2013, 65(6):497-506.
- [4] Lisowski E, Rajda J. CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic valves [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 65(1):285-291.
- [5] Z. Kudźma, M. Stosiak. Studies of flow and cavitation in hydraulic lift valve[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015.15(4): 951-961
- [6] Washio S, Kikui S, Takahashi S. Nucleation and subsequent cavitation in a hydraulic oil poppet valve[J]. Journal of Mechanical Engineering Science 2010, 224(C4):947-958.
- [7] 陈晋市, 刘昕晖, 元万荣等. 典型液压节流阀口的动态特性[J]. 西南交通大学学报, 2012,47(2): 325-332.  
Chen J, Liu X, Yuan W, et al. Dynamic Characteristics of Typical Hydraulic Notches[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012.47(2): 325-332
- [8] 王京涛, 吴张永, 岑顺锋, 等. 基于 ANSYS 的液压锥阀流场分析及结构优化[J]. 机床与液压, 2011, 33(13): 128-130.  
Wang J, Zhangyong W U, Cen S, et al. Flow Field Analysis and Structural Optimization of Hydraulic Poppet Valve Based on ANSYS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011.33(13): 128-130.