Hans汉斯

基于ANSYS的节流阀阀体优化设计

俞 涛¹,马琛俊²,张广成¹

¹上海理工大学机械工程学院,上海 ²上海电气液压气动有限公司,上海

收稿日期: 2025年1月27日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

为研究节流阀结构参数对空化现象的影响,通过CFD软件对节流阀在变负载工况下的空化现象进行模拟 仿真分析,并对关键几何参数阀体孔半径大小与阀座倒角长度进行响应面优化设计,比较相同开度下优 化后的节流阀结构内部气泡体积,阀口处气泡体积大小最终决定最优结构参数。研究结果表明,不同的 阀体孔半径大小与阀座倒角长度从小到大进行变化时对空化现象产生的气泡体积大小呈现出不同的趋势, 增大阀座倒角长度并减小阀座倒角长度可以很好的抑制空化现象的产生。研究工作具有一定的理论意义 和工程实用价值。

关键词

节流阀,变负载,阀体结构,空化现象,优化设计

Optimized Design of Throttle Valve Body Based on ANSYS

Tao Yu¹, Chenjun Ma², Guangcheng Zhang¹

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai ²Shanghai Electric Hydraulic Pneumatic Co. Ltd., Shanghai

Received: Jan. 27th, 2025; accepted: Feb. 20th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

In order to study the influence of throttle valve structure parameters on the cavitation phenomenon, through the CFD software on the throttle valve internal cavitation phenomenon simulation simulation analysis, and the key geometric parameters of the valve body hole radius size and seat chamfering length for the response surface optimization design, compared with different openings optimized throttle valve structure of the internal bubble volume, the size of the bubble volume at the

valve port to ultimately determine the optimal structural parameters. The results show that different valve body hole radius and seat chamfer length from small to large changes in the size of the bubble volume generated by the cavitation phenomenon show a different trend, increase the length of the seat chamfer and reduce the length of the seat chamfer can be very good inhibition of cavitation phenomenon. The research work has certain theoretical significance and engineering practical value.

Keywords

Throttle Valve, Variable Load, Valve Body Structure, Cavitation Phenomenon, Optimized Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

液压技术是一种以流体为基础的流体动力转换技术,它具有动作迅速,功率密度大,运动平稳,元 件布置灵活,控制方便,机械性能好,效率高,容易进行过载防护等优点[1]。从目前的发展趋势来看, 在高速、低噪声、安全性、集成化、稳定性等各领域,液压技术都有了长足的发展,然而,液压技术还有 一定的不足和局限性。如在高速液压和高压系统中往往会发生空化现象,特别是对液压系统至关重要的 液压节流阀往往也是受空化影响较为严重的地方[2]。液压节流阀由于结构简单、密封性好、灵敏度高、 抗污染能力强等优点,广泛应用于液压系统的主油路、液压阀的先导级和液压泵的调节机构中。负载的 突然变化,意味着油路中油液流速突然加快或减慢,根据空化现象的产生原理,在节流阀口处会有空化 现象产生,空化引起的噪声和振动非常严重,甚至会影响系统的稳定运行。

浙江大学流体传动及控制国家重点试验室[3]观察和测定了油管锥阀的空化和气门的噪音特征,在实 际液压阀的设计中,采用流路和节流孔的最优组合设计,从初始的空化状态和诱发的噪音两个角度来进 行抑制,结果能达到良好的噪声抑制作用。冀宏等[4]运用移动式套管液压阀流动特性测量技术,对节流 阀结构、流态与空化噪音之间的相关性进行了探讨,从两层阻尼理论和导流理论出发,介绍了液压节流 槽的降噪设计,液压阀的啸叫得到了有效地控制,进而减少了空化的噪音。王永广等[5]根据 Fluent 的计 算程序,选取了低压区的混合多相流动模式,用数值方法研究了孔板与文丘管复合气穴产生装置内孔板 在文丘里管喉前部、中部和后部的作用,并指出空化现象大部分发生在孔板小孔和文丘里管后部,且最 高含气率区域发生在孔板末端区域;在文丘里管道的后部,穿孔孔板的空化作用更为显著。陈雁鸣和周 志立[6]用数值方法研究了一种具有代表性的垂直轴流泵机的叶片空化现象,对两相流动模型的数值进行 了比较,得出了两相流动模式的数值与理论上的一致性,进而证明了该方法的正确性和可信度。陈海威 [7]通过实验和数值模拟分析了高压甲醇喷嘴中针阀运动对喷孔空化的影响。研究表明,针阀运动特性、 升程、速率和偏心度与空化现象密切相关。通过优化喷孔参数,显著改善了流量系数和空化程度。韩峰 [8]等通过数值模拟分析了柴油机气缸套冷却液空化引发的空蚀现象。结果显示,缸套壁面振动导致空化 气泡生成,空泡溃灭过程对空蚀有重要影响。研究发现,空泡间距越小,溃灭压力和微射流速度越大; 空泡数量增多时,溃灭压力先增后减,微射流速度显著增加。空泡溃灭产生的微射流通过水锤压力破坏 缸套壁面,导致空蚀。Oshima [9]采用半切模式详细地分析了锥形阀门内的空化现象,采用半切圆锥阀门 表面覆盖有机玻璃片以观测气穴,在该板上设置一个测压小孔,利用该小孔可以得到阀口处的压强分布,

得到了圆锥阀门的流动方向(外流和内流)与气穴、流量、噪声特征之间的相关性。Quangnha Thai 和 Changjin Lee [10]利用 Navier-stoke 和 k-E 两种典型的扰动模型对离心式水泵的内腔进行了数值计算。

空化数、压力分布和流速变化是影响空化现象的关键因素。空化数通过反应流体压力与饱和蒸气压 的相对关系,决定了空化发生的难易程度;压力分布的改变会直接影响流体局部压力是否低于饱和蒸气 压,从而触发空化;而流速变化则通过伯努利效应影响压力分布,并且流速增加会使空化数降低,进一 步促进空化现象的发生。在结构方面,狭窄的通道或孔隙会使流体流速加快,压力降低,从而更容易引 发空化。例如,在喷嘴中,流体通过微小的喷孔时,流速急剧增加,压力降低,容易形成空化。此外,通 道的形状也会影响空化现象,如在翼型绕流中,翼型的形状和攻角会影响流场的分布,进而影响空化现 象的发生和发展。

综上所述,现阶段液压技术研究的重点主要是如何有效地抑制空化现象,从而减小空化现象所带来 的不良影响,而变负载意味着负。因此在变负载工况下需要对液压元件进行合理的结构改进设计。本研 究首先通过模拟数值仿真初步验证所改进结构的可行性,再通过优化仿真对特定的参数进行优化处理, 进而得到最优参数。

2. 研究方法

2.1. 阀体结构

本研究的节流阀阀体剖面结构如图 1 所示,其中 1 为液压回路进油口,2 为节流阀阀芯与阀体连接 的阀体孔,3 为液压回路出油口,4 为阀座内倒角。





理论研究表明: 阀腔内压力的分布与空化现象的严重程度有着密切的关系。说明可通过改变阀体的 结构来修正其压力分布进而抑制空化现象的产生。本研究便由这一设想出发,设计出两种不同内部结构 的节流阀,具体模拟仿真方案见下表 1:

Table	• 1. Analog simulation scheme
表1.	模拟仿真方案

阀体	改进方案
初始阀体	无
改进阀体(1)	阀体孔增大4mm
改进模型(2)	无 45°内倒角

2.2. CFD 仿真

首先通过 ANSYS 对节流阀阀体内部流场进行抽取,再对流体域进行网格划分。根据节流阀尺寸大 小,以及网格划分质量要求,采用 CFD-FLUENT 划分网格方法,对近距(Proximity)和曲率(Curvature)处 的网格进行网格细化。近距主要控制薄壁与狭窄处的网格细化,曲率主要控制转角与孔洞处的网格细化。 在数值模拟中,为确保模拟结果的准确性和可靠性,须进行网格无关性验证,以关键因素空化体积分数 为目标,具体网格无关性验证表如下表2所示。

Table	2. Grid independence v	verification	basis	table
表 2.	网格无关性验证依据	表		

序号	网格数量	空化体积	收敛性
1	105214	0.989	收敛
2	245132	0.972	收敛
3	312341	0.963	收敛
4	498512	0.955	收敛
5	506132	0.956	收敛
6	612231	0.954	收敛
7	801234	0.954	收敛

通过网格无关性验证表中数据看出,网格数量在 50 万至 80 万时,网格数量对空话体积分数的影响 极小,所以根据表中内容以及湍流模型,设置网格参数长宽比为 0.95,单元质量接近 1,具体网格划分如 下图 2 所示。





节流阀中的流体主要有气相和液相两种。假设液相为不可压缩流体,气体为压缩流体,并且将整个过程视为恒温绝热过程。设定液相为水,命名为 water,气相为蒸汽,命名为 vapor。进出口边界分别设为压力入口和压力出口。其中入口压力总表压设为 0~4 MPa 变负载。湍动能设定为 0.03m²/s²,湍流耗散率设定为 1 m²/s³,出口压力为 0.5 MPa。湍动能设定为 0.03m²/s²,湍流耗散率设定为 1 m²/s³。

2.3. 仿真结果分析

下图 3 为不同结构节流阀内部流场在同一模拟仿真条件下的空化分布图。由图 3(a)可以看出,在初始阀体结构中,空化现象比较严重,多发生在阀出口下游区域,且空化的体积分数最大达到了 0.94,遍布区域较广;图 3(b)表明增大阀体孔,可以减弱空化现象,且空化区域仅出现在阀口端,空化体积分数最大的区域也随之减小;图 3(c)为阀座改造节流阀空化分布云图,可以看出将 45°内倒角去除后同样可以抑制空化现象的产生,空化体积分数最大的区域也有所减小。



图 3. 内部流场空化体积分数

下图 4 为不同结构节流阀在同一模拟仿真条件下,流场最大压力云图,其中图 4(a)为初始节流阀的 压力分布云图,压力变化主要发生在阀口处,最大压力为 4.33 MPa,对应空化区域的压力部分为最小值 3.58 kPa。图 4(b)为改进阀体孔节流阀的压力云图,在阀口处压力变化延伸至下端区域,最大压力为 4.4 MPa,对应空化区域的压力部分为最小值 4.61 kPa,图 4(c)为改进阀座节流阀的压力云图,同样在阀口处 压力变化延伸至出口下游区域,最大压力为 4.44 MPa,其对应空化区域的压力部分为最小值 3.61 kPa。



图 4. 内部流场压力云图

下图 5 为不同结构节流阀在同一模拟仿真条件下,其内部区域的速度云图。其中图 5(a)为初始节流 阀的速度云图,最大流速出现在阀口处,最大速度为 88.1 m/s 且最大流速区域面积较大,图 5(b)为阀体 孔改造节流阀的速度云图,从图中看出,最大速度出现在阀口处,最大速度为 85m/s,但其区域面积相对 初始节流阀而言较小,且速度变化较为迅速,图 5(c)为阀座改造节流阀的速度云图,最大速度同样出现 在阀口处,最大速度为 85.2 m/s,最大速度区域面积同样较小,速度变化较为迅速。



Figure 5. Velocity map of the internal flow field 图 5. 内部流场速度云图

3. 优化方法

3.1. 参数化及样本结果

由前文可知两种结构均可对空化现象产生抑制作用,根据两种结构的特点,以气泡体积最小为优化 目标,通过 ANSYS 响应面方法对初始阀体进行阀体孔半径大小与阀座倒角长度方面进行优化设计,寻 求阀体孔半径大小与阀座倒角长度的最优值,流场结构参数化如下图 6 所示,水平因素表如下表 3 所示。



Figure 6. Parameterization of flow field structure 图 6. 流场结构参数化

 Table 3. Response surface analysis factors and levels

 表 3. 响应面分析因素和水平

		水平	
凶杀	-1	0	1
半径	3.6	4	4.4
倒角长度	0	1	2

根据水平因素表,得出样本试验结果如下表4所示。当阀体孔半径为3.6mm,阀座倒角长度为0mm时,初始阀体的气泡体积含量最大,为4.5665mm³。当阀体孔半径为4mm,阀座倒角长度为0mm时,初始阀体的气泡体积含量最小,为1.8715mm³。

试验序号	阀体孔半径(mm)	阀座长度(mm)	气泡体积大小(mm³)
1	3.6	0	4.5665
2	3.6	0.5	2.6767
3	3.6	1	2.8519
4	3.6	1.5	2.4665
5	3.6	2	2.8818
6	3.8	0	4.3075
7	3.8	0.5	2.8124
8	3.8	1	2.6334
9	3.8	1.5	2.8197
10	3.8	2	2.7486
11	4	0	1.8715
12	4	0.5	2.8182

Table	4. Response surface simulation design and result	lts
表 4.	响应面仿真设计及结果	

续表			
13	4	1	2.8057
14	4	1.5	2.8234
15	4	2	2.7445
16	4.2	0	2.4061
17	4.2	0.5	2.4843
18	4.2	1	2.4911
19	4.2	1.5	2.5143
20	4.2	2	2.5341
21	4.4	0	2.6429
22	4.4	0.5	2.9948
23	4.4	1	2.9327
24	4.4	1.5	2.9703
25	4.4	2	2.9463

3.2. 响应面优化

俞涛 等



下图 7 为初始节流阀输入参数的变化对输出参数的响应 3D 曲面图,通过曲面颜色,以及右侧图例 可以看出在曲面的蓝色区域气泡体积较小的部分,而在曲面的红色区域则为气泡体积较大的部分。图 8 为初始节流阀优化后的 3D 权衡图,在优化后的曲面上,明显看出蓝色区域部分所代表的参数值,能够很 好地减小气泡体积。设置空泡含量最小为优化参数条件,选择算法进行求解,最终得到 3 组候选点如表 5 所示。



Figure 8. 3D trade-off diagram 图 8. 3D 权衡图

Table 5. Optimization candidate points 表 5. 优化候选点

因素	候选点1	候选点2	候选点3
阀体孔直径(mm)	4.3998	4.3956	4.3884
阀座倒角长度(mm)	0.56155	0.81155	1.21781
气泡体积大小(mm ³)	1.6942	1.7588	1.99309

3.3. 优化结果验证

下图 9 为候选点 1 结果验证图,从图中看出其所对应尺寸的节流阀空化现象得到有效抑制,与初始 节流阀相比,只发生在阀口周围,最大体积分数也下降为 0.937,其对应的气泡体积为 1.5995 mm³,与响 应面优化所得结果相比,误差较小。





4. 结论

本研究首先通过数值模拟仿真,分别探究了不同结构下节流阀在变负载条件下的空化现象,并得出 在空化状态下的总压力和速度云图,通过分析空化云图,了解到在变负载工况下,结构不同使得空化现 象的发生也不同,其次为减小节流阀阀口处的空化现象,对节流阀阀体孔与阀座倒角长度进行优化设计, 结论如下:

(1) 在变负载工况下,初始阀体的空化现象较为严重,空化区域集中在阀口下端处,改进阀体孔和阀 座之后,可以明显看出空化现象得到抑制,发生空化现象的区域也随之减少,所提出的两种方案,即增 大液体在阀体孔中的流动体积,可以明显抑制空化现象。

(2) 通过对比压力云图可以了解到,正因为阀口下端的空化现象,使得其压力变化极为迅速,原因则 是由于空化现象导致液体中分离出一部分气体,使得压力逸散到气体中,让压力变化迅速,且空化区域 的压力多为压力最小值。

(3) 在响应面优化中,对初始阀体阀体孔半径进行增大处理时,对空化现象有较好的抑制的效果,当 阀座倒角长度从小到大变化时,空化现象呈现出先减后增的趋势。再从优化后的响应曲面来看,印证了 当阀体孔半径增大,阀座倒角长度减小时,对空化现象均有较好的抑制现象。

参考文献

- [1] 许福玲, 陈尧明. 液压与气动传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 胡国清,罗任飞. ASM 和 K-E 模型对比研究液压集成块流道[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 1997(2): 226-230.
- [3] 杜学文. 液压阀口空化机理及对系统的影响[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [4] 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.
- [5] 王永广,赵连玉,邓橙,等.基于孔板和文丘里管复合结构空化器的空化效果数值模拟[J].环境工程,2012, 30(增刊2):458.
- [6] 陈雁明,周志立. 轴流泵叶片气蚀特性的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013(3): 174-176.
- [7] 陈海威. 基于针阀动力学行为喷嘴内空化现象研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [8] 韩峰, 刘泉, 李宇寒, 等. 柴油机气缸套空化现象与空蚀机理分析[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(1): 49-56.
- [9] Oshima, S., Leino, T., Linjama, M., Koskinen, K.T. and Vilenius, M.J. (2001) Effect of Cavitation in Water Hydraulic Poppet Valves. *International Journal of Fluid Power*, 2, 5-13. <u>https://doi.org/10.1080/14399776.2001.10781115</u>
- [10] Thai, Q. and Lee, C. (2010) The Cavitation Behavior with Short Length Blades in Centrifugal Pump. Journal of Mechanical Science and Technology, 24, 2007-2016. <u>https://doi.org/10.1007/s12206-010-0705-9</u>