

12-12-2019

## Numerical Simulation of Steady Flow Performance of Venturi Tube Based on FLUENT

Fuyu Liu

*College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

Xiaodong Hu

*College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

Zhixi Liang

*College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

Qinglei Liu

*College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Numerical Simulation of Steady Flow Performance of Venturi Tube Based on FLUENT

## Abstract

**Abstract:** *The cavitation flow performances of a given Venturi tube were studied to get the steady flow curve and predict the cavitation region based on the realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model and Zwart (Zwart-Gerber-Belamri) cavitation model under the designed conditions with FLUENT software. The throat diameters  $D$  of the Venturi tube were chosen as 3mm, 5mm, 7mm and 9mm respectively; and the distances  $L$  between the throat and the entrance were 60mm, 40mm and 20mm respectively. It can be concluded that: (1) The phenomenon of hydraulic cavitation is the main reason for the steady flow of Venturi tubes; (2) Throat diameter affects the steady flow performance of cavitation. When  $D$  is 9mm, the maximum increase of flow rate is  $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; and when  $D$  is 3mm, the minimum increase of flow rate is  $0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (3) The distance between the throat and the entrance mainly affects the inception of hydraulic cavitation. When  $L$  equals 20mm, the minimum initial entrance pressure of cavitation is 10.77 MPa; and when  $L$  equals 60mm, the maximum initial entrance pressure of cavitation is 10.98 MPa.*

## Keywords

Venturi tube, steady flow, throat, cavitation

## Recommended Citation

Liu Fuyu, Hu Xiaodong, Liang Zhixi, Liu Qinglei. Numerical Simulation of Steady Flow Performance of Venturi Tube Based on FLUENT[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1460-1468.

## 基于 FLUENT 的文丘里管稳流性能数值模拟

刘馥瑜, 胡效东\*, 梁之西, 柳庆磊

(山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 采用可实现  $k-\varepsilon$  湍流模型和 Zwart 空化模型对某种文丘里管规定工况下的空化流动进行了数值模拟, 得到流量变化曲线, 有效预测空化区域。选取管路喉部管径  $d$  分别为 3 mm、5 mm、7 mm、9 mm; 选取喉部到入口之间距离  $L$  为 60 mm、40 mm、20 mm。得出结论: 水力空化现象是文丘里管稳流作用的主因; 喉部管径影响空化稳流性能,  $d$  为 9 mm 时流量增幅最大为  $0.13\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $d$  为 3mm 时流量增幅最小为  $0.02\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; 喉部与入口的距离主要影响水力空化的初生,  $L$  为 20 mm 空化初生入口压力最小为 10.77 MPa,  $L$  为 60 mm, 空化初生入口压力最大为 10.98 MPa。

**关键词:** 文丘里管; 稳流; 喉部; 空化

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2019)07-1460-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0247

## Numerical Simulation of Steady Flow Performance of Venturi Tube Based on FLUENT

Liu Fuyu, Hu Xiaodong\*, Liang Zhixi, Liu Qinglei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The cavitation flow performances of a given Venturi tube were studied to get the steady flow curve and predict the cavitation region based on the realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model and Zwart (Zwart-Gerber-Belamri) cavitation model under the designed conditions with FLUENT software. The throat diameters  $D$  of the Venturi tube were chosen as 3mm, 5mm, 7mm and 9mm respectively; and the distances  $L$  between the throat and the entrance were 60mm, 40mm and 20mm respectively. It can be concluded that: (1) The phenomenon of hydraulic cavitation is the main reason for the steady flow of Venturi tubes; (2) Throat diameter affects the steady flow performance of cavitation. When  $D$  is 9mm, the maximum increase of flow rate is  $0.13\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; and when  $D$  is 3mm, the minimum increase of flow rate is  $0.02\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; (3) The distance between the throat and the entrance mainly affects the inception of hydraulic cavitation. When  $L$  equals 20mm, the minimum initial entrance pressure of cavitation is 10.77 MPa; and when  $L$  equals 60mm, the maximum initial entrance pressure of cavitation is 10.98 MPa.

**Keywords:** Venturi tube; steady flow; throat; cavitation

## 引言

文丘里管作为一种流量控制、调节原件被广泛



收稿日期: 2017-05-23 修回日期: 2017-07-18;  
基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014EEM018);  
作者简介: 刘馥瑜(1991-), 男, 山东临沂, 硕士, 研究方向为多相流水力机械; 胡效东(通讯作者 1971-), 男, 山东菏泽, 博士, 副教授, 研究方向为化工设备先进设计方法。

的应用与化工、石化等工业生产之中, 其具有结构简单耐用, 压力损失小的优点。在核电、化工等特殊生产工况中, 对于高压条件下供水量的控制, 相对于传统的阀门节流反馈控制方式, 文丘里管稳流控制具有性能稳定, 响应迅速, 安全耐用和无需外部能量输入的特点。文丘里管的喉部是整个管路的核心部位, 其结构尺寸影响文丘里管的空化稳流性

<http://www.china-simulation.com>

• 1460 •

能及空化初生条件。对于文丘里管空化流动的研究主要有实验和数值模拟 2 种方法<sup>[1-3]</sup>。Wang Xiaojing 等<sup>[4]</sup>对黄磷净化系统中的喷射反应器内部流场进行模拟计算, 发现采用文丘里管结构设计可以提高反应器的吸入能力, 减少压力损失。Lomakin V O 等<sup>[5]</sup>对文丘里管结构节流通道的汽蚀流动情况进行计算, 分析其形成规律并与实验结果对比。Huang Yongchun 等<sup>[6]</sup>模拟文丘里管降解壳聚糖的过程, 发现射流空化与撞击流组合能够提高壳聚糖完全降解的效率, 节省能量。Kuldeep 等<sup>[7]</sup>对不同几何结构的 HC 文丘里反应器内的空化流动进行研究以确定最佳的喉部高径比。Jun Ishimoto 等<sup>[8]</sup>对文丘里管通道内液氮的空化流动情况进行了模拟, 揭示了其相变规律。Jean Decaix 等<sup>[9]</sup>使用可压缩单流体 RANS/LES 混合求解器对空泡文丘里管内的三维效应进行了数值模拟, 研究了湍流与空化之间的相互作用。Ji B 等<sup>[10]</sup>使用大涡模拟的方法对 NACA66 水翼周围涡流形成与脱落进行了仿真研究, 发现涡流腔形成的规律。Liang Jian 等<sup>[11]</sup>模拟了入口压力波动对液压锥阀内部空化流动的影响过程, 发现压力波动对空化发展的影响规律。Seyed Mehdi Ashrafizadeh 等<sup>[12]</sup>对不同几何结构的小尺寸文丘里管空化稳流进行比较研究, 结果发现当管路出口压力与入口压力的比值小于临界值时, 流量的变化将会与出口压力的波动无关。

本文采用可实现  $k-\epsilon$  湍流模型和 Zwart 空化模型, 对规定工况下文丘里管内部空化流动进行了数值模拟。在规定的文丘里管出口压力为定值 10 MPa, 以 0.1 MPa 为区间增大入口压力的工况下, 计算管路流量, 得到管路流量的变化曲线, 分析文丘里管空化稳流的原理与形成规律, 有效预测空化发生的区域。分析总结比较喉部管径尺寸和喉部分布位置对文丘里管空化稳流性能的影响规律, 为文丘里管实际的设计制造与使用提供理论参考。

## 1 数学模型

### 1.1 湍流模型

当空化稳流发生时, 在近壁面空化处存在高速微射流与撞击流, 2 种流动配合形成涡旋流动, 使得时均应变率极大, 在理论计算中, 需避免由于时均应变率而出现负的正应力的情况, 对正应力施加数学约束, 故对于管路湍流的模拟采用可实现  $k-\epsilon$  模型(Realizable  $k-\epsilon$  模型)。湍流动能与耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} E \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (2)$$

式中:  $G_K$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率影响;  $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$  均为经验常数, 在 FLUENT 中,  $C_{1\epsilon}=1.44$ 、 $C_{3\epsilon}=0.09$ 、 $C_{2\epsilon}=1.9$ ;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\epsilon$  分别为湍流动能和湍流动能耗散率对应的普朗特数, 默认值为  $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.5$ 。

### 1.2 空化模型

Zwart(Zwart-Gerber-Belamri)空化模型是基于气液两相输运方程而提出的和湍流模型兼容性较高的空化模型。模型假设液流中所有气泡大小一致, 通过气泡数密度计算单位体积内两相之间的质量传输率。且在模型中, 用  $\alpha_{muc}(1-\alpha_v)$  代替  $\alpha_v$ , 方程如下:

$$p \leq p_v \text{ 时:} \\ R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{muc}(1-\alpha_v)p_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} \quad (3)$$

$$p > p_v \text{ 时:} \\ R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} \quad (4)$$

$p$  为流场内部压力;  $p_v$  为空化临界压力;  $R_e$  为

汽化产率;  $R_c$  为凝结产率;  $F_{vap}$  为蒸发项经验校正系数;  $F_{cond}$  为凝结项经验校正系数;  $\alpha_{nuc}$  为气核处体积分数;  $\alpha_v$  为气相体积分数;  $R_B$  为气泡半径;  $\rho_v$ 、 $\rho_l$  分别为气相, 液相密度。

本次模拟采用 FLUENT 软件自带的空化模型, 使用推荐数值  $\alpha_{nuc}=5 \times 10^{-4}$ ,  $R_B=10^{-6} \text{m}$ ,  $F_{vap}=50$ ,  $F_{cond}=0.01$ 。

## 2 几何建模与边界条件

文丘里管尺寸和结构如图 1(a)~(b)所示, 模拟计算喉管直径  $d$  分别为 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 喉部距入口距离  $L$  分别为 60 mm, 40 mm, 20 mm。由于文丘里管回转对称结构, 故只需沿对称轴建立文丘里管上半部分截面作为计算模型。本次的模拟计算的规定压力工况条件均为文丘里管出口压力设为定值 10 MPa, 以 0.1 MPa 为区间逐次增大入口压力。

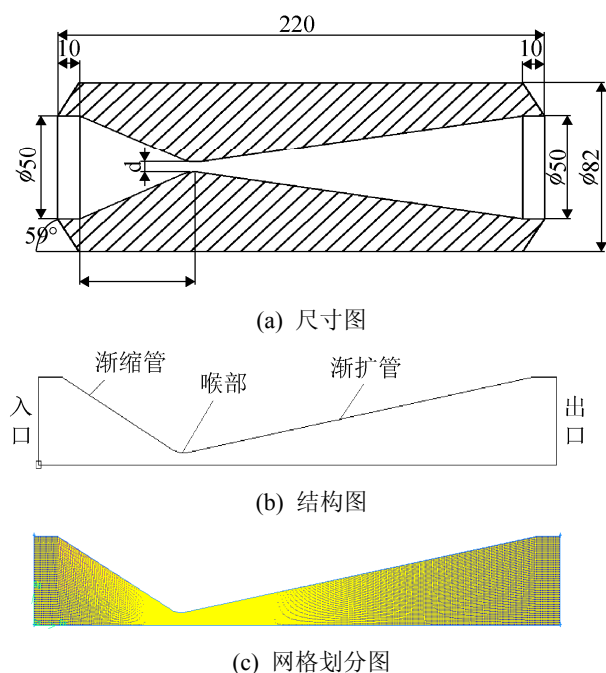


图 1 模型图

Fig. 1 Model drawing

采用 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 对模型进行网格划分, 对整个流场采用结构化网格进行划分, 采用结构化网格计算可以节省计算成本, 计算

收敛性好。对喉部等关键结构部位进行网格加密, 以保证计算准确度和计算收敛性。网格划分时, 需对网格进行无关性验证, 以确定最佳的网格划分数量。文丘里管的入口与出口设置为压力入口、压力出口。对于  $d=7 \text{mm}$ ,  $L=60 \text{mm}$  的文丘里管网格划分情况如图 1(c)所示, 网格数量为 16 530, 最差网格扭曲度为 0.41。

对于气液两相流的描述采用 Mixture 模型进行处理, 通过 PISO 算法对压力项与速度项进行耦合, PISO 算法计算分三步进行, 一步预测, 两步修正, 每一步的计算精度与收敛度较其他算法具有优势。压力差格式设置为 PRESTO! 格式, 其它项采用 QUICK 格式。湍流强度设置为 5%, 气相体积分数初始值为 0, 空化临界压力设置为 3 540 Pa, 近壁面计算采用标准壁面函数进行处理。

## 3 数值模拟结果分析与讨论

当水流通过文丘里管, 在流经喉部位置时, 管路截面变小, 水流速度增加, 压力下降, 当压力降至环境温度的饱和蒸汽压力以下, 水发生汽化相变, 导致水中的微气核爆发性生长、膨胀、收缩、溃灭, 此过程称为水力空化。空化的产生会伴随一系列高压、高速射流现象, 合理利用空化可以提高生产效率, 节省能量。

### 3.1 空化流动数值模拟结果

为探究空化流场的分布区域, 对  $d=7 \text{mm}$ ,  $L=60 \text{mm}$  的文丘里管进行数值计算。数值计算的工况条件为规定压力工况。随着入口压力增加, 文丘里管产生空化, 起到塞流的作用, 限制水流量的增大。如图 2 文丘里管气相分布图所示, 空化最早出现喉部偏后的贴近壁面位置处。

在贴近壁面处空化程度最高, 当入口压力增加到本次模拟最大值 16 MPa, 空化区气相体积分数, 即气含率为 0.94 左右, 并沿管路轴线方向气含率逐渐减小。当水流通过喉部, 压力降至环境温度饱和蒸汽压以下, 汽化相变开始发生, 水流中的微气核初生膨胀形成空泡。空化发生时会计随高速射流

的出现, 空泡在水射流的带动下沿壁面向出口流动, 在喉部偏后位置聚集, 形成气相聚集区, 且距壁面距离近, 气相的含量越高。空泡随水流继续流动, 压力逐渐变大, 空泡发生溃灭。空化区呈圆环状分布于文丘里管喉部偏后位置, 限制水流量的继续增大。

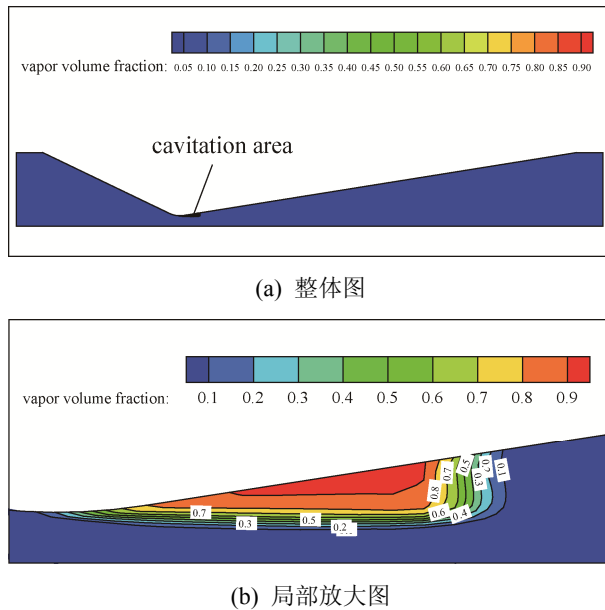


图 2 气相分布图

Fig. 2 Gas distribution contours

如图 3 压力分布云图所示, 最低压力出现在空化区, 高速射流伴随空化出现, 沿管壁向出口方向发展。水流通过喉部, 进入渐扩管, 流速逐渐下降, 压力上升。低压区域沿管壁逐渐发展, 与高速射流的发展方向一致。文丘里管两端压力等级并不一致, 靠近入口处压力小于出口压力, 这与空化造成的能量的不可逆耗散有关。

如图 4 文丘里管空化流场速度分布云图所示, 速度分布情况与压力云图相对应, 压力值小的区域速度值大, 水流通过渐缩管, 流速逐渐增大, 在喉部位置达到最大值。本次模拟入口压力最大值为 16 MPa, 最大速度达到  $179.361 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。水流通过喉部, 随管径增大, 速度值减小。在喉部偏后靠近壁面处, 空化发生, 气核生长膨胀形成空泡, 空泡呈环状分布于空化位置处, 限制流速得进一步增大,

达到减速稳流的作用。

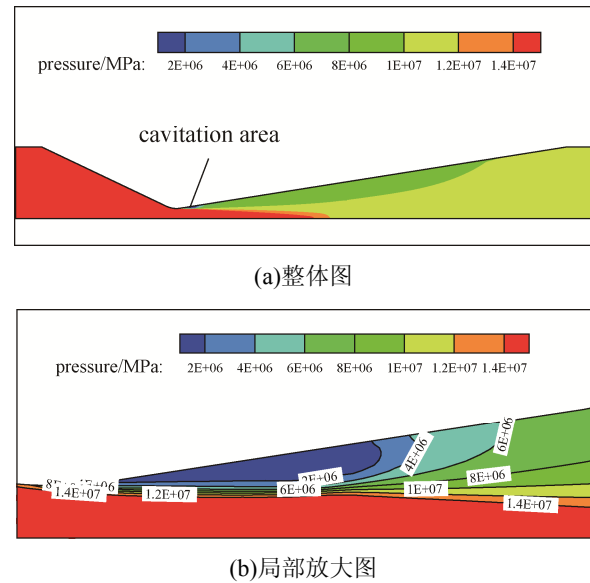


图 3 压力分布云图

Fig. 3 Pressure distribution contours

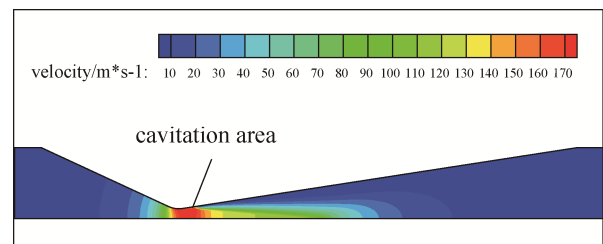


图 4 速度分布云图

Fig. 4 Velocity distribution contours

如图 5 湍流动能分布图所示, 高湍流动能区域出现在空化区的尾部, 并沿出口方向逐渐发展。水力空化产生的空泡随水流运动, 在渐扩管中, 压力逐渐增大, 空泡溃灭。空泡溃灭的瞬间会产生大量碰撞流与旋涡流, 造成附近流体域的湍流程度的增大, 形成高湍流动能分布带。

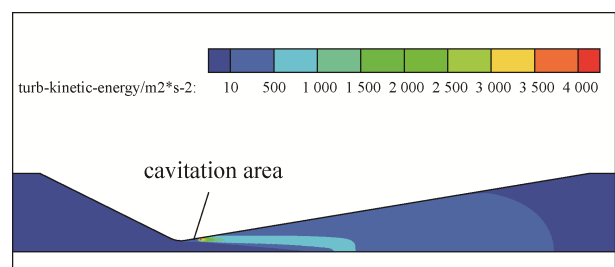


图 5 湍流动能分布图

Fig. 5 Turbulent kinetic energy distribution contours



空泡的溃灭过程极为迅速，集中出现在渐扩管的前端位置。从能量守恒的观点出发，空泡的集中溃灭会造成流场能量的不可逆耗散，限制流速的增加，达到稳流的作用。

根据工况条件，介质水的温度为 280.75 K 到 327.55 K，如图 6 温度场云图所示，对 280.75 K 和 327.55K 两个水温的空化流动进行模拟。出口压力为 10 MPa，入口压力为 16 MPa。水温为 280.75 K，流量为  $23.778 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，气含率为 0.9676；水温为 327.55 K，流量为  $23.787 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，气含率为 0.9516。两个温度下的空化流动规律相似，但空化发展程度，稳流能力均有差别。空化区水流发生相变时，会消耗自身的能量，导致空化区水的温度较周围水流温度明显降低。在一定范围内，水流整体温度低，临界压力低，空化更难发生，压差相同流量更大，稳流效果差；水流整体温度高，临界压力高，空化更易发生，压差相同流量更小，稳流效果佳。

### 3.2 文丘里管空化稳流性能

在规定的压力工况下， $d=7 \text{ mm}$ ， $L=60 \text{ mm}$  的文丘里管流量变化计算结果如图 7 所示，在入口压力增长初期，管路流量单调增加，曲线上升迅

速。当入口压力达到 11 MPa 左右，空化开始发生，汽化相变开始，出现空泡，空化区的气含率不为 0。气含率是单位体积内气相的体积分数，其数值大小表示空化发展的程度。在入口压力达到 11 MPa 左右，流量曲线增长突然变缓，曲线增长斜率较增长初期明显减小，显示出明显的规律性，入口压力每增加 0.1 MPa，管路流量增加  $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。文丘里管的稳流作用属于相对稳流，将流量增长的幅值控制在一定的范围以内，流量值不是恒定不变。

在压力增长初期，气含率为 0，空化未发生，流量增长迅速；当入口压力达到 11 MPa 左右，空化初生，气含率迅速增加，同时，流量增长放缓，流量变化曲线斜率变小，稳流效应开始发挥作用。气含率在达到 0.9 左右，曲线增长放缓，斜率变小。气含率不为 0 的点与流量增长放缓的拐点所对应的压力区间几乎一致，在一定程度上证明了空化是文丘里管稳流作用的内因。入口压力值大，实现稳流控制的难度越大，文丘里管的特殊结构保证空化流动能够随压力增加而不断发展，气含率增长，保证足够的控流强度，流量增幅被控制在一定范围内，确保流量的平稳上涨。

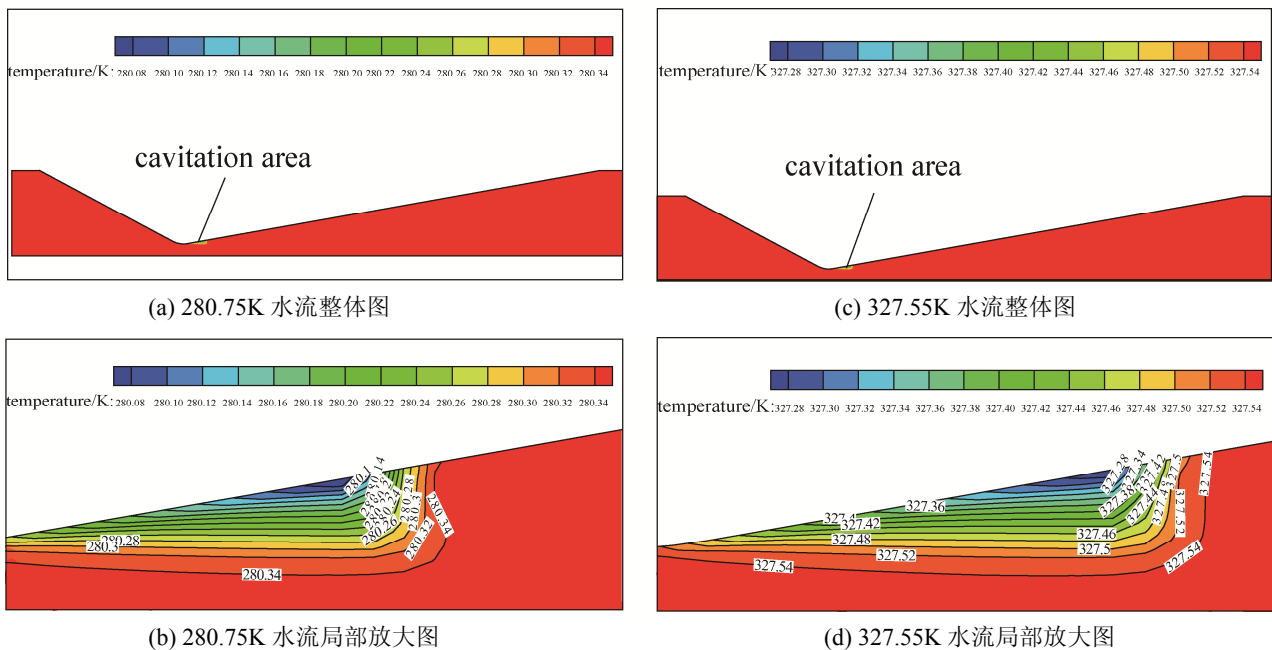


图 6 温度场分布云图

Fig. 6 Temperature distribution contours

<http://www.china-simulation.com>

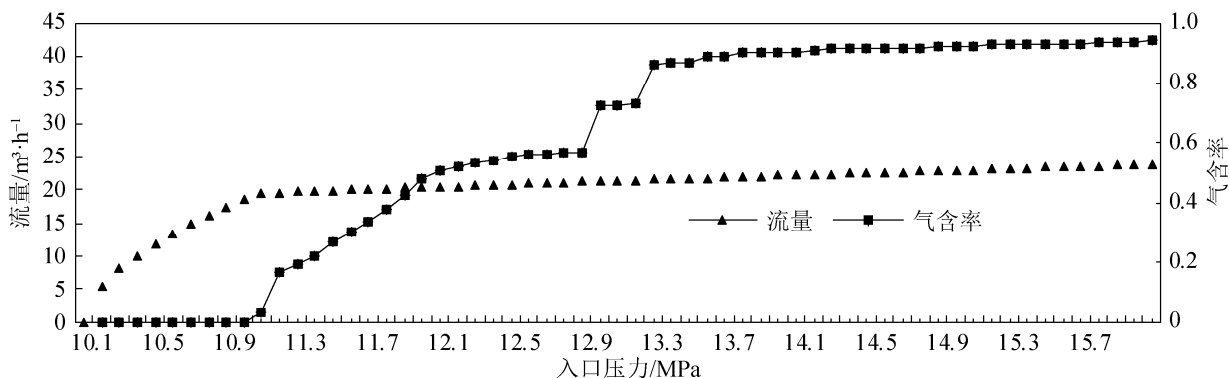


图 7 空化性能曲线图

Fig. 7 Cavitation performance curves

### 3.3 喉部直径对空化稳流性能影响

喉部作为文丘里管核心结构, 其管径尺寸大小对于其空化稳流性能与初生条件有直接影响, 为研究文丘里管喉部管径因素对管路空化稳流性能影响规律, 对喉部管径  $d$  分别为 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm 的 4 种文丘里管在规定的压力工况的空化流动进行了数值模拟。如图 8(a)所示, 4 种管路都具有不同程度的空化稳流能力。在稳流过程中, 3 mm 喉部管径入口压力每增加 0.1 MPa, 流量增加  $0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; 5 mm 喉部管径入口压力每增加 0.1 MPa, 流量增加  $0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; 7 mm 喉部管径入口压力每增加 0.1 MPa, 流量增加  $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; 9 mm 喉部管径入口压力每增加 0.1 MPa, 流量增加  $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。喉部管径大, 通过管路的流量大, 流量增长的幅值大。

如图 8(b)气含率对比图所示, 在入口压力增长初期, 气含率均为 0, 当达到一定压力值, 空化初生, 气含率不再为 0。喉部管径不同, 气含率转变的点所对应的压力值也不同, 即空化初生条件不同。3 mm 喉部管径管路空化初生压力为 13 MPa 左右, 5 mm 喉部管径管路空化初生压力为 11.6 MPa 左右, 7 mm 和 9 mm 喉部管径管路空化初生压力为 11 MPa 左右, 但 9 mm 略小, 相同压力条件下, 9 mm 管径所对应的气含率更大。

在一定范围内, 喉部管径大, 空化初生压力小, 稳流作用出现早, 汽含率上升迅速, 空化发展程度

更剧烈, 控流能力更强。喉部管径小, 空化稳流作用出现并不及时, 但管路流动更加平稳, 流量曲线波动小。合理的选择设计喉部直径对于文丘里管空化的初生与发展有直接影响。喉部管径大, 空化初生压力值较小, 空化更易发生, 稳流控制工作更及时性, 但在稳流过程中, 流量增长幅值大, 流动稳定性差; 喉部管径小, 空化初生压力大, 空化不易发生, 稳流工作及时性差, 但流量增长幅值小, 流动更加平稳。对于不同的生产工况, 文丘里管喉部管径尺寸需要合理设计选择。

### 3.4 喉部位置对管路空化稳流性能影响

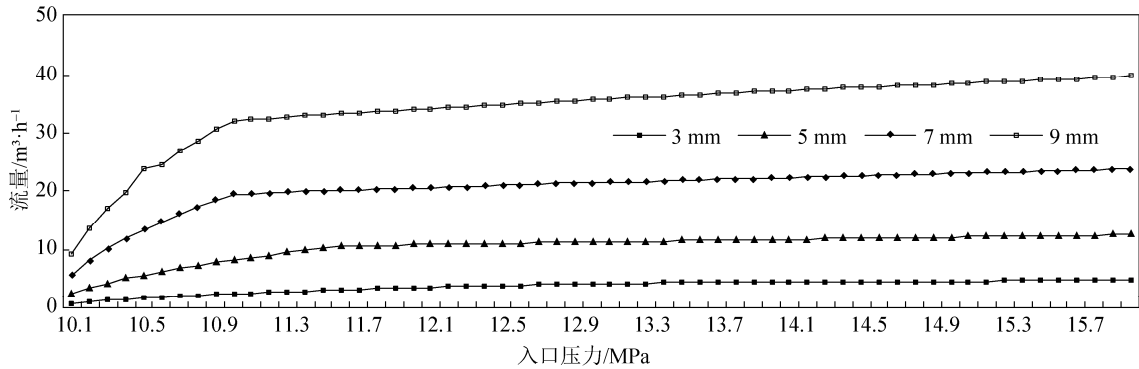
在空化流动过程中, 喉部是决定空化初生的关键结构。水流在流经文丘里管时, 在通过喉部位置之前, 在渐缩管内流动时, 逐渐加速减压。为探究喉部的位置距离对管路空化稳流性能的影响, 对 3 种喉部位置不同的文丘里管空化流动进行数值模拟, 结果如图 9 所示。3 种文丘里管喉部结构与入口之间的距离  $L$  分别为 60 mm, 40 mm, 20 mm, 管路出口压力设为定值 10 MPa, 流动条件为规定压力工况。为更精确的比较 3 种管路的空化初生压力, 在流量曲线拐点所在的压力范围内, 出口压力条件不变, 以 0.01 MPa 为区间增加入口压力。

在增压初期, 3 种管路水流量增长迅速, 在达到空化初生压力时, 稳流效应开始工作, 流量增长放缓, 曲线斜率变小。3 种管路空化初生压力不同, 喉部距入口 60 mm 的管路在入口压力达

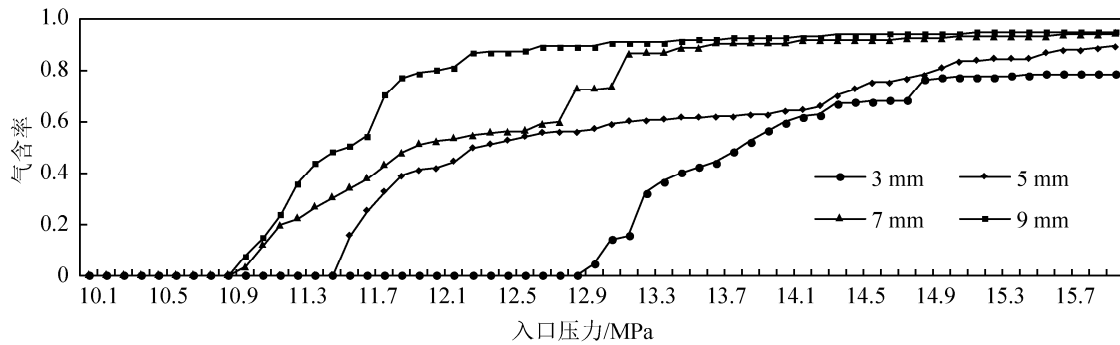


到 10.98 MPa 时开始发生空化稳流；喉部距入口 40 mm 的管路在入口压力达到 10.82 MPa 时开始发生空化稳流；喉部距入口 20 mm 的管路在入口压力达到 10.77 MPa 时开始发生空化稳流。随着入口压力继续增大，流量增长平稳，3 种管路的流量值和流量增幅近乎一致。

喉部结构离入口距离短，渐缩管升角大，水流进入喉部时自身流速大、压力小，更容易使得局部压力降至环境饱和蒸气压以下，空化更易实现。当压力增大到一定程度，由于喉部位置所造成的空化流动差异则可以忽略不计，在增压后期，3 种管路水流量近乎一致。



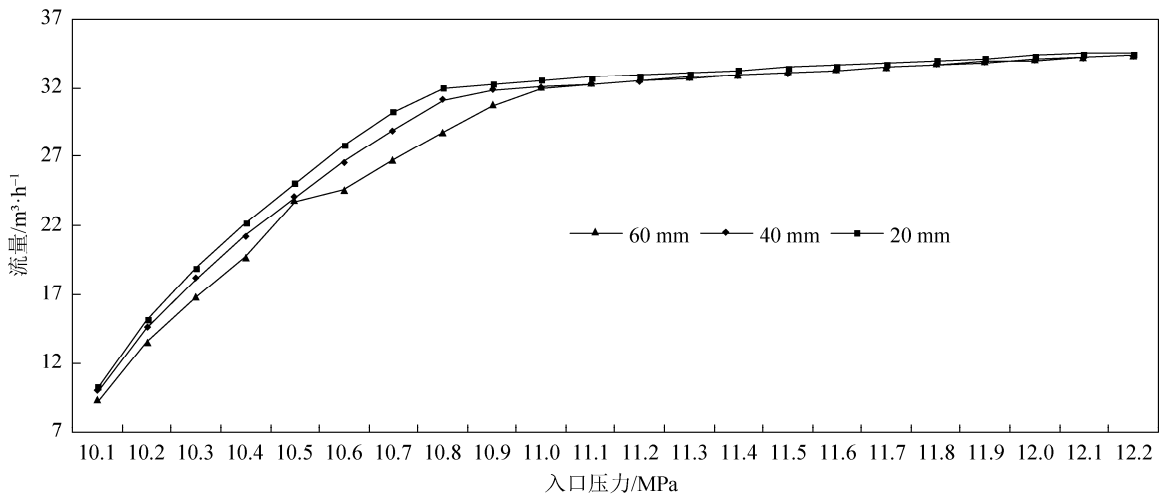
(a) 流量对比曲线图



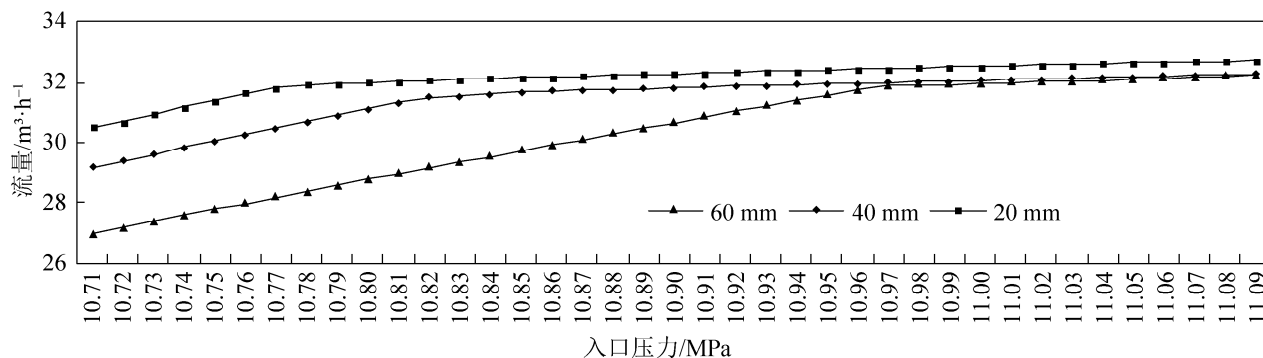
(b) 气含率对比曲线图

图 8 空化性能对比图

Fig.8 Characteristics curves of Venturis with different throat diameters



(a) 流量对比曲线图



(b) 空化初生对比图

图 9 空化性能对比图

Fig. 9 Characterization curves of cavitating

喉部距入口距离短, 空化稳流效应更易发生, 流量的控制工作更及时, 而对于空化稳流时流量值的影响则可忽略不计。

## 4 结论

本次研究采用实现化  $k-\epsilon$  湍流模型和 Zwart 空化模型对高压工况下的文丘里管的空化稳流效应进行了数值模拟。为比较喉部不同的文丘里管空化稳流特性差别, 对喉部管径为 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm 的 4 种文丘里管空化流动进行了数值模拟, 对喉部结构距离入口距离分别为 60 mm, 40 mm, 20 mm 的 3 种管路空化流动进行了模拟计算比较, 分别得到管路流量变化曲线和气含率变化曲线。得出如下结论:

(1) 水流通过喉部, 压力降至空化压力以下, 水力空化发生, 产生塞流, 产生稳定流量作用, 水力空化时文丘里管稳流作用的内因。入口压力每增大 0.1 MPa, 流量增大  $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2) 通过比较 4 种喉部管径不同的文丘里管空化性能曲线, 9 mm 喉部管径的空化初生压力最小, 为 11 MPa, 但流量增幅最大, 为  $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 流动稳定性差; 3 mm 喉部管径空化初生压力最大, 为 13 MPa, 流量增幅最小, 为  $0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 流动稳定性佳。在一定范围内, 喉部管径大, 空化稳流作用更易发生, 空化流动发展更剧烈, 流量增幅大; 喉部管径小, 空化稳流出现较难, 但流动更稳定, 流

量增幅小。

(3) 喉部与入口距离因素主要影响空化的初生, 对比 3 种管路的模拟结果, 喉部离入口 20 mm 的管路入口压力为 10.77 MPa 空化初生, 喉部离入口 60 mm 的管路入口压力为 10.98 MPa 时空化初生, 稳流流量增幅近乎一致。L 值小, 管路稳流及时性更佳。

## 参考文献:

- [1] 王宁, 黄彪, 吴钦, 等. 绕水翼空化流动及振动特性的实验与数值模拟[J]. 灌溉机械工程学报, 2016, 34(4): 321-327.  
Wang Ning, Huang Biao, Wu Qin, et al. Experiment and Numerical Simulation of Vibration Characteristics of Hydrofoil in Cavitating Flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery, 2016, 34(4): 321-327.
- [2] 张皓晨, 左志钢, 刘树红, 等. 高速涡轮泵额定工况空化特性及压力脉动预测[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2633-2636.  
Zhang Haochen, Zuo Zhigang, Liu Shuhong, et al. Characteristics of Cavitation and Prediction of Pressure Fluctuation at Rated Condition in High-Speed Turbopump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2633-2636.
- [3] 刘艳, 赵鹏飞, 王晓放. 两种空化模型计算二维水翼空化流动研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(2): 175-182.  
Liu Yan, Zhao Pengfei, Wang Xiaofang. Study of Cavitating flows around two-dimensional hydrofoil using two cavitation models[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(2): 175-182.
- [4] Wang Xiaojing, Tang Lei, Jiang Zeng. Numerical

- Simulation of Venturi Ejector Reactor in Yellow Purification System[J]. Nuclear Design Engineering and Design (S0029-5493), 2014, 268: 18-23.
- [5] Lomakin V O, Kuleshova M S, Kraeva E A. Fluid Flow in the Throttle Channel in the Presence of Cavitation[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2015, 106: 27-35.
- [6] Huang Yongchun, Wang Pengfei, Yuan Yuan, et al. Synergistic Degradation of Chitosan by Impinging Stream and Jet Cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry (S1350-4177), 2015, 27: 592-601.
- [7] Kuldeep, Saharan V K. Computational Study of Different Venture and Orifice Type Hydrodynamic Cavitating Devices[J]. Journal of Hydrodynamics (S1001-6058), 2016, 28(2): 293-305.
- [8] Jun Ishimoto, Kenjiro Kamijo. Numerical Simulation of Cavitatingflow of Liquid Helium in Venturi Channel[J]. Cryogenics (S0011-2275), 2013, 43: 9-17.
- [9] Jean Decaix. Investigation of Three-dimensional Effects on a Cavitating Venturi Flow[J]. Internal Journal of Heat and Fluid Flow (S0142-727X), 2013, 44: 576-595.
- [10] Ji B, Luo X W, Roger Arndt E A, et al. Large Eddy Simulation and Theoretical Investigations of the Transient Cavitating Vertical Flow Structure around a NACA66 Hydrofoil[J]. International Journal of Multiphase Flow (S0301-9322), 2015(68): 121-134.
- [11] 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 and Mass Transfer (S0317-9300), 2016(103): 684-700.
- [12] Seyed Mehdi Ashrafizadeh, Hojat Ghassemi. Experimental and Numerical Investigation on the Performance of Small-sized Cavitating venturis[J]. Flow Measurement and Instrumentation (S0955-5986), 2015(42): 6-15.