

## 喉管长度对环形射流泵性能影响的数值模拟

龙新平, 鄢恒飞, 张松艳, 姚鑫

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于有限体积法和 Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型, 应用 Fluent 软件对环形射流泵内部流场进行数值模拟, 并对计算的可靠性进行验证。由射流泵内部流场可以看出, 环形射流泵射流的扩展混合在喉管和扩散管中均存在。针对不同喉管长度下环形射流泵内部射流扩展和壁面压力分布情况, 模拟分析了不同喉管长度对环形射流泵性能和效率的影响。结果表明, 喉管长度对喉管内射流扩展、环形射流泵性能和效率均有一定影响。喉管越长, 射流扩展混合程度越好, 但过长的喉管会带来较大的摩擦损失。根据效率最高原则, 环形射流泵喉管长度  $L_t$  应符合  $L_t/D_t = 2.17 \sim 2.89$ , 其中当喉管长度为喉管直径 2.69 倍时效率最高, 可达到 35.6%。

**关键词:** 射流泵; 环形射流泵; 喉管; 计算流体力学; Fluent 软件

**中图分类号:** S277.9; TV131.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)03-0198-04

### Numerical simulation for influence of throat length on annular jet pump performance

Long Xinping, Yan Hengfei, Zhang Songyan, Yao Xin

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The flow inside an annular jet pump was investigated numerically by Fluent based on finite volume method and Realizable  $k-\varepsilon$  turbulent model, and the reliability of calculations was examined and validated. From the flow field of the jet pump, the expansion and mixing of two streams in the annular jet pump exist in both throat pipe and diffuser. The development of jet flow and wall pressure distribution under different length of the throat pipe was discussed and the effect of throat length on performance and efficiency of annular jet pump was also compared and analyzed. The results show that the throat length has some influence on the expanding of jet flow inside the throat, as well as the performance and efficiency of annular jet pump. The longer throat length, the better expanding and mixability of jet, but over-long throat length will result in more friction loss. According to the principle of best efficiency, the range of throat length is  $L_t/D_t = 2.17 \sim 2.89$ , and when the throat length is 2.69 times of throat diameter, the efficiency achieves its maximum value of 35.6%.

**Key words:** jet pump; annular jet pump; throat; computational fluid dynamics; Fluent software

射流泵是利用射流剪切和紊流扩散作用进行传质传能的流体机械和混合反应设备, 主要由喷嘴、吸入管、喉管和扩散管等组成。该装置因结构简单、工

作可靠、密封性好、成本低廉而应用广泛, 特别适用于水下、放射性和易燃易爆等场合。射流泵根据其喷嘴和吸入管的位置不同可分为中心射流泵和环形射

收稿日期: 2009-06-30

基金项目: 武汉大学 2008 年度新兴交叉科学研究项目(5081011)

作者简介: 龙新平(1967—), 男, 湖北监利人, 教授, 博士生导师(xplong@whu.edu.cn), 主要从事流体机械及工程、流体喷射技术、泵与泵装置的优化运行等研究。

鄢恒飞(1986—), 男, 江西玉山人, 硕士研究生(yanhengfei-f@163.com), 主要从事流体机械及工程研究。

流泵两种.中心射流泵的喷嘴置于中间,吸入管环绕在喷嘴外端;环形射流泵则相反,吸入管置于中间,喷嘴环绕在吸入管外端,如图1所示.两种射流泵内部流动存在着一定差异.中心射流出流后处于被吸流体的环绕之中,射流扩展受管壁的影响较小.而环形射流出流后,外侧为管壁,射流扩展受到壁面的制约,为单侧扩展的射流,其流动发展与中心射流泵存在一定区别.

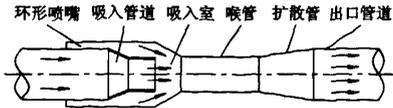


图1 环形射流泵结构  
Fig.1 Annular jet pump structure

国内外学者对中心射流泵作了大量的理论和试验研究<sup>[1-4]</sup>,而对环形射流泵的研究较少. Elger等<sup>[5]</sup>测量了不同面积比环形射流泵的回流区大小和发生位置,并引入无因次参数  $J$  描述回流区的大小; Namiki等<sup>[6]</sup>用数值方法模拟了环形射流泵的性能,表明RSM模型比标准  $k-\varepsilon$  模型更加准确; Gazzar等<sup>[7]</sup>应用CFX-TASC模拟了环形射流泵的性能和内部流动. Shimizu等<sup>[8]</sup>试验研究了环形射流泵结构对其性能的影响,比较了射流有旋和无旋的异同,并初步研究了环形射流泵的空化性能. 刘晖霞<sup>[9]</sup>对环形射流泵空化问题进行了研究.但是上述对环形射流泵的内部流动机理与结构研究不够系统,特别是喉管长度对环形射流泵性能影响的研究不够深入.

文中拟应用Fluent软件,采用Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型对环形射流泵内部流场和性能进行数值模拟,在此基础上,分别计算不同喉管长度下环形射流泵的内部流场,以效率最高为原则,确定出常用范围内环形射流泵的最优喉管长度,为环形射流泵的设计和优化提供依据.

## 1 数值计算方法

### 1.1 计算模型

文中射流泵内部流场考虑为定常不可压流动,由于结构上是轴对称的,可简化为轴对称流动. Realizable  $k-\varepsilon$  模型基于标准  $k-\varepsilon$  模型,满足了在雷诺压力上的特定数学约束,与物理紊流流动一致,对圆形射流的扩展率预测得更加精确.因此,笔者采用Realizable  $k-\varepsilon$  模型.鉴于射流泵流场并不复杂,采用一阶迎风格式和SIMPLE算法.

### 1.2 计算域网格划分

射流泵内部流动属于高雷诺数的强剪切湍射流流动.在实际求解过程中,轴对称流动只需求解一半区域.建立二维实体模型并对其进行网格划分,并根据流动速度梯度和压力梯度大小调节网格的疏密.在喷嘴出口到喉管入口区域,工作流体和被吸入流体开始混合,进行动量剪切和能量交换,存在较大的紊流剪切力,所以在这一区域的网格划分比较密.

### 1.3 边界条件

①进口边界:考虑到计算域进口边与喷嘴出口处距离较远,可将来流设为均匀来流,来流速度方向与进口边垂直;②出口边界:设为压力出口;③轴对称边界:各变量仅沿轴向发生变化;④固壁边界:采用壁面函数法处理.

## 2 环形射流泵性能数值模拟

### 2.1 环形射流泵性能方程

环形射流泵的基本性能方程以一组无因次参数(面积比、流量比和压力比)表示,其定义如下<sup>[8]</sup>:

面积比

$$R = \frac{A_j}{A_i}, \quad (1)$$

流量比

$$M = \frac{Q_j}{Q_i}, \quad (2)$$

压力比

$$N = \frac{(K_k - K_p) \frac{v_d^2}{2g} + \frac{P_d}{\rho g} - \frac{v_s^2}{2g} - \frac{P_s}{\rho g}}{\frac{K_i v_j^2}{2g} + \frac{P_j}{\rho g} - (K_k - K_p) \frac{v_d^2}{2g} - \frac{P_s}{\rho g}}, \quad (3)$$

效率

$$\eta = MN, \quad (4)$$

其中

$$K_v = 1 + \left( \frac{\int_{(D_0/2)-w}^{D_0/2} v_\phi r dr}{\int_{(D_0/2)-w}^{D_0/2} v_r r dr} \right)^2, \quad (5)$$

$$K_k = \frac{\rho \int_0^w 2\pi (v_r^2 + v_\phi^2) v_r r dr}{(\rho/2) v_d^2 (Q_j + Q_i)}, \quad (6)$$

$$K_p = \frac{\int_0^w 2\pi v_r r \left( \rho \int_r^w \frac{v_\phi^2}{r} dr \right) dr}{(\rho/2) v_d^2 (Q_j + Q_i)}, \quad (7)$$

式中  $A_j, A_i$  分别为环形喷嘴面积和喉管的面积;  $D_0$

为出口管道直径;  $v_z, v_\theta$  分别为轴向速度和圆周速度;  $K_v, K_k, K_p$  分别为速度修正系数、动能修正系数和压力修正系数;  $r, r_0$  分别为管道半径和环形喷嘴半径;  $w$  为环形喷嘴厚度;  $Q$  为流量;  $p$  为压力;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为密度. 下标  $j, s, d$  分别表示射流、被吸流和混合流;  $t$  表示喉管.

由于计算域简化为二维轴对称, 故不存在圆周速度, 即  $v_\theta = 0$ .

## 2.2 计算结果与试验结果对比分析

为和试验结果进行对比, 文中引用文献[8]中的环形射流泵结构尺寸进行数值计算, 取环形喷嘴和喉管的面积比  $R = 0.57$ , 吸入室收缩角  $\alpha = 18^\circ$ , 吸入室和喉管总长  $L = 233$  mm, 喉管直径  $D_t = 38$  mm, 出口管道直径  $D_0 = 55$  mm 和喉管长度与喉管直径之比  $L_t/D_t = 4.72$ . 先进行流场的模拟计算, 再将计算结果根据上述公式进行整理得到射流泵的性能及效率曲线, 如图2所示.

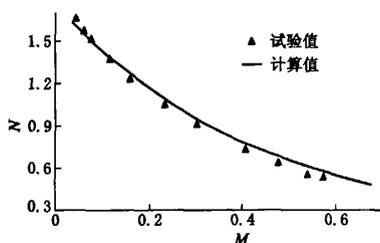


图2 射流泵性能曲线

Fig.2 Performance curve of jet pump

由图2可以看出, 计算结果和试验结果吻合较好, 表明应用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型进行数值计算分析射流泵内部流场并预测其性能和效率是可靠的.

## 3 喉管长度对性能和流场的影响

为分析喉管长度对环形射流泵性能和流场的影响, 采用上述射流泵模型进行计算. 计算时保持其他参数不变,  $D_t = 38$  mm,  $R = 0.57$ , 分别取  $L_t = 179.4, 165.0, 137.5, 110.0, 102.3, 82.5, 55.0$  mm, 即  $L_t/D_t = 4.72, 4.34, 3.62, 2.89, 2.69, 2.17, 1.45$ .

### 3.1 喉管长度对性能的影响

图3为环形射流泵在不同喉管长度下的压力比和效率特性曲线. 由于泵的高效运行区域是在流量比较大位置, 故图3仅给出了流量比在0.3~0.6的各参数分布情况.

由图3可以看出, 当  $L_t/D_t = 1.45$  时, 压力比和效

率明显偏低;  $L_t/D_t$  在 2.17~2.89 时压力比和效率有一个最大值, 当  $L_t/D_t = 2.69$  时, 效率达到 35.6%;  $L_t/D_t$  在 2.89~3.62 时, 压力比和效率变化不明显; 而当  $L_t/D_t > 3.62$  时, 压力比和效率又有所下降, 但降幅不大. Shimizu 等试验也显示当  $L_t/D_t = 2.69$  (即  $L_t/D_0 = 1.86$ ) 时泵的效率最高<sup>[8]</sup>. 由此可见, 喉管长度的高效范围可以定为  $L_t/D_t = 2.17 \sim 2.89$ , 以  $L_t/D_t = 2.69$  为最高效率对应的喉管长度.

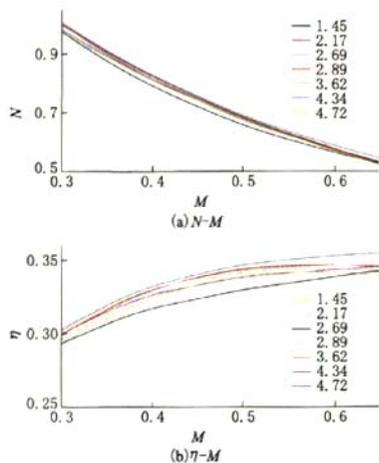


图3 不同喉管长度的  $N-M$  和  $\eta-M$  曲线

Fig.3  $N-M$  and  $\eta-M$  curves at different throat lengths

### 3.2 喉管长度对流场的影响

图4为当流量比  $M = 0.594$  时环形射流泵在不同喉管长度  $L_t/D_t = 1.45, 2.69, 3.62$  和  $4.72$  下的喉管和扩散管出口处的轴向速度剖面.

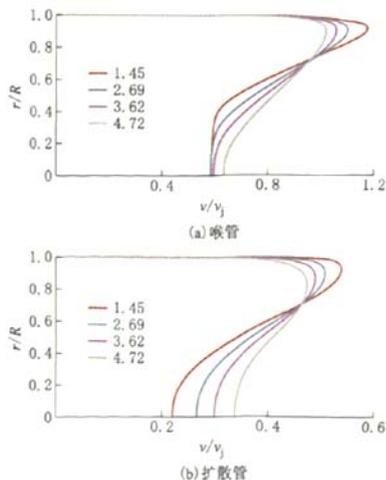


图4 喉管和扩散管出口处轴向速度剖面

Fig.4 Sections of axial velocity at throat and diffuser outlet

由图 4a 可以看出,在喉管内射流向中心扩展.随着  $L_t/D_t$  变大,喉管内射流扩展的程度越深.当喉管长度为  $(3.62 \sim 4.72) D_t$  时,射流扩展到中心位置.由图 4b 可以看出,喉管越长,扩散管中的射流混合越好.

图 5 为当流量比  $M=0.594$  时在上述 4 种喉管长度下的环形射流泵喉管和扩散管中的速度云图.

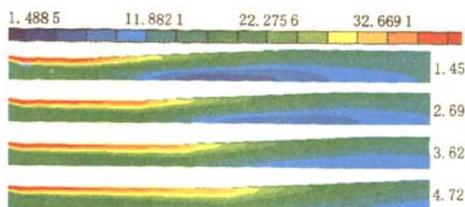


图 5 不同喉管长度速度云图

Fig. 5 Velocity nephogram at different throat lengths

由图 5 可以看出,不同喉管长度下喉管和扩散管中的速度分布趋势是一致的.在喉管内高速射流和被吸流体速度梯度较大,两股流体混合程度较低,射流扩展和混合一直延伸到扩散管内,这与中心射流泵存在着较大不同.由于环形射流是单边扩展,在喉管边壁上的射流速度较高,随着喉管变长,射流在喉管内的沿程损失越大.因此,尽管喉管越长,喉管与扩散管中的射流混合越理想,但是当喉管过长时,其能量损失也越大,环形射流泵效率将降低.图 6 为当流量比  $M=0.594$  时环形射流泵在上述 4 种喉管长度下吸入室、喉管和扩散管的壁面压力分布.其中压力分布用压力系数  $C_p$  表示,

$$C_p = \frac{p_x - p_{\infty}}{v_j^2}, \quad (8)$$

式中  $p$  为压力;  $v$  为速度.下标  $j$  表示射流;  $x$  表示轴向位置;  $\infty$  表示中心吸嘴.

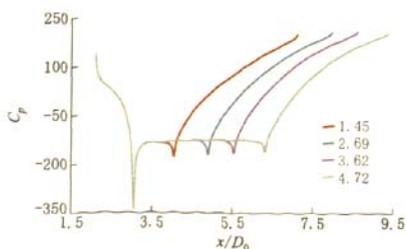


图 6 不同喉管长度的边壁压力分布

Fig. 6 Wall pressure distributions for different throat lengths

由图 6 可以看出,  $L_t/D_t$  增大时对喉管吸入室的壁面压力几乎没有影响,而喉管和扩散管的壁面压

力分布趋势也基本相同.当  $L_t/D_t = 1.45$  时,喉管与扩散管之间的压力降比其他几组工况稍大,扩散管出口压力回升也稍低.环形射流泵和中心射流泵的喉管壁面压力存在很大的区别.在中心射流泵喉管内,被吸流体环绕于高速射流,两股流体发生剪切混合,中心射流不断将能量传递给被吸流体,壁面压力不断升高,两股流体混合均匀后进入扩散管.而在环形射流泵喉管内,由于射流贴壁,壁面压力几乎保持不变.当射流进入扩散管后,在射流扩展和扩散管增压的共同作用下,壁面压力迅速升高.

由此可见,环形射流泵的高速射流受壁面影响,贴壁速度梯度变化缓慢,壁面压力几乎没有变化;在扩散管内,环形射流因扩压作用,速度明显下降,两股流体迅速混合,速度分布随之趋于均匀,壁面压力逐步上升.

## 4 结 论

利用 Fluent 软件对环形射流泵内部流动进行了数值计算,并对计算的可靠性进行了验证.在此基础上比较了环形射流泵在不同喉管长度下的  $N-M$  和  $\eta-M$  曲线,并分析了喉管长度对环形射流泵流场的影响.结果表明,在环形射流泵高效流量比区域内,喉管长度对其性能和效率均有一定的影响,压力比受喉管长度的影响在各流量比工况下变化不大,而效率则在大流量比时受喉管影响较大.当喉管长度为喉管直径 2.69 倍时,效率在各流量比下均最高,其最高效率为 35.6%.

与中心射流泵有所不同的是,环形射流泵射流的扩展混合在喉管和扩散管中均存在.喉管长度对环形射流泵流场的影响比较明显.喉管越长,在喉管和扩散管内射流扩展混合程度越好,但喉管过长时,环形射流泵效率将降低.根据效率最高原则,可以确定环形射流泵喉管长度范围为  $L_t/D_t = 2.17 \sim 2.89$ .

## 参考文献 (References)

- [1] Winoto S H, Li H, Shah D A. Efficiency of jet pumps [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 150-156.
- [2] 陆宏圻.射流泵技术的理论及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2004.
- [3] 常洪军,朱 熠.液体射流泵内部流场的三维数值模拟[J].排灌机械,2005,23(6): 13-15.

(下转第 206 页)

进行了耦合,由此得到了考虑流场力作用下转子系统响应结果,并对结果进行了简单分析.该方法忽略流体力环节,从而更直观了解泄漏流参数变化对转子系统振动特性的影响,对通过优化泄漏流相关参数以提高转子系统稳定性具有重要意义.在现有耦合程序的基础上,笔者将完善泄漏流场模型,进行更多工况下的数值研究以获得不同流道形状、不同湍动率、不同涡动率及不同入口速度对转子系统上临界转速、振幅等特性的影响,并在此基础上进行泄漏流场的参数优化.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Adkins D R, Brennen C E. Analyses of hydrodynamic radial forces on centrifugal pump impeller [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 1988, 110(1): 20 - 28.
- [ 2 ] 黄义刚,朱荣生,陈松,等. 泵振动的原因及其消除措施 [ J ]. 排灌机械, 2009, 27(6): 56 - 59.  
Huang Yigang, Zhu Rongsheng, Chen Song, et al. Numerical analysis of radial force in double-suction centrifugal pumps [ J ]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(6): 56 - 59. (in Chinese).
- [ 3 ] Robert V U, Brennen C E. Experimental measurements of rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121(3): 633 - 637.
- [ 4 ] Childs D W. Fluid-structure interaction forces at pump-impeller-shroud surfaces for axial vibration analysis [ J ]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113(1): 108 - 115.
- [ 5 ] Guinzburg A, Brennen C E, Acosta A J, et al. Experimental results for the rotordynamic characteristics of leakage flows in centrifugal pumps [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(1): 110 - 115.
- [ 6 ] Yun Hsu, Brennen C E. Effect of swirl on rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(4): 1005 - 1010.
- [ 7 ] Brennen C E, Acosta A J. Fluid-induced rotordynamic forces and instabilities [ J ]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13(1): 10 - 26.
- [ 8 ] Takayuki S, Romain P, Hironori H, et al. Measurements of rotordynamic forces on an artificial heart pump impeller [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(11): 1422 - 1427.
- [ 9 ] 郑林庆. 摩擦学原理 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 13 - 18.
- [ 1 ] Chang Hongjun, Zhu Yi. Three-dimensional numerical simulation on interior flow field for liquid jet pump [ J ]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(6): 13 - 15. (in Chinese)
- [ 4 ] 龙新平,关运生,韩宁,等. 可调式射流泵性能的数值模拟 [ J ]. 排灌机械, 2008, 26(6): 1 - 5.  
Long Xinping, Guan Yunsheng, Han Ning, et al. Numerical simulation on performance of self-regulating jet pump [ J ]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(6): 1 - 5. (in Chinese)
- [ 5 ] Elger D F, Taylor S J, Liou C P. Recirculation in an annular-type jet pump [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(4): 735 - 740.
- [ 6 ] Namiki N, Kitamura O, Yamamoto M. Numerical prediction of performance of annular-type jet pump [ J ]. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, 1997, 63(607): 950 - 956.
- [ 7 ] Gazzar M E, Meakhail T, Mikhail S. Numerical study of flow inside an annular jet pump [ J ]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(4): 930 - 932.
- [ 8 ] Shimizu Y, Nakamura S, Kazumura S, et al. Studies of the configuration and performance of annular type jet pump [ J ]. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, 109(3): 205 - 212.
- [ 9 ] 刘晖霞. 环形射流泵产生空化的机理及其改善的研究 [ D ]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2007.

(责任编辑 陈建华)

(上接第 201 页)

(责任编辑 陈建华)