

Numerical Analysis of Performance of Jet Pump with Different Nozzle Number

Fengrong Yu¹, Guojun Yan²

¹Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming

²School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin

Email: yufengrong@21cn.com, 89060448@qq.com

Received: May 13th, 2014; revised: Jun. 12th, 2014; accepted: Jun. 19th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The structure of jet pump is simple, and it cannot be replaced in some special technological process. But the efficiency of energy transfer of jet pump is low, and jet pump performance can be improved by reasonable structural design. The three-dimensional spatial model of multi-nozzle jet pump was established by GAMBIT software. Under the premise of certain area ratio, flow ratio and outlet pressure, the Computational Fluid Dynamic (CFD) software—FLUENT was used to calculate the inner flow field of multi-nozzle jet pump with uniform distribution and horizontal jet flow and different nozzle numbers. The rule of inner flow field of multi-nozzle jet pump is changed with the number of nozzle. According to the simulated flow field, the result shows that the number of nozzle has much effect on the fluid track and the number of nozzle determines the size of back-flow region. The performance of the jet pump is not increased with the increase of nozzle numbers; it is not a monotonous rising trend. The result will provide reference for design and study on multi-nozzle jet pumps in the future.

Keywords

Jet Pump, Multi-Nozzle, Numerical Simulation, Flow Field

喷嘴数目对多喷嘴射流泵性能影响的数值分析

于凤荣¹, 闫国军²

¹昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明

²哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨

Email: yufengrong@21cn.com, 89060448@qq.com

收稿日期: 2014年5月13日; 修回日期: 2014年6月12日; 录用日期: 2014年6月19日

摘要

射流泵结构简单, 在某些特殊工艺流程中具有明显的优越性和不可替代性, 但传能效率低, 通过合理设计结构可改善其性能。利用前处理软件GAMBIT建立多喷嘴射流泵三维空间模型, 在不改变面积比、流量比及出口压力的前提下, 应用CFD软件——FLUENT, 对均匀分布、水平射流出流的、具有不同喷嘴数目的射流泵内部流场分别进行数值模拟计算, 得到了多喷嘴射流泵内部流场随喷嘴数目的不同而变化的规律。通过对数值模拟结果进行分析, 发现: 喷嘴数目对流体轨迹的影响很大, 喷嘴数目决定着回流区域的大小。射流泵的性能不是随着喷嘴数目的增加而呈单调上升趋势。该结果为多喷嘴射流泵的设计及研究提供参考。

关键词

射流泵, 多喷嘴, 数值模拟, 流场

1. 引言

射流泵是应用广泛的流体机械[1]-[5], 在高温、高压、放射等特殊场合有明显优越性。但射流泵传能效率低, 一定程度上制约了它的发展。近年来众多学者在如何改进结构以改善性能方面做了诸多研究, 如研究喉管长度对射流泵性能的影响[6], 采用 CFD 技术对射流泵的性能进行分析, 并进行优化设计[7], 或研究在超大面积的情况下射流泵的性能[8], 借助 CFD 对射流泵的空化性能进行预测[9]针对射流泵在油田应用中不能满足要求而设计新型结构的射流泵等等[10]-[12]。射流泵的发展趋势是进一步剖析各结构参数间的联系, 深入研究内部各流动参数(压力、速度、温度等)的变化规律, 研究与发展各种新机理、新结构的射流泵, 以提高综合效益[13]。

射流泵依靠射流的紊动扩散和卷吸作用来传递能量和质量, 射流结构是影响其性能的主要因素。目前的研究以传统射流泵(单喷嘴射流泵)居多。传统射流泵由一个中心驱动喷嘴及一个环形吸入通道组成, 工作流体由一个喷嘴射出。多喷嘴射流泵中工作流体通过多个喷嘴水平射出后与被吸流体相混合, 减少了环形聚焦射流中由于流体相互碰撞而造成的能量损失, 两股流体的接触表面比传统射流泵大, 可在较短的混合管内得到充分的混合。

射流泵内部流体流动属于高雷诺数湍流流动, 通过数值模拟, 得到射流泵内部流场较详尽的流态分布, 对射流泵内部细微流动结构、传能及传质过程机理进行深入细致的研究。分析不同喷嘴个数对多喷嘴射流泵性能的影响, 为优化结构、提高效率提供依据。

2. 多喷嘴射流泵基本参数与几何结构

2.1. 基本参数

单喷嘴射流泵的参数包括几何结构参数和无因次参数。几何结构参数主要有: 工作流体入口内径、喷嘴出口直径、吸入流体入口内径、混合管直径、混合管长度、扩散管出口内径、喉嘴距等。无因次参数主要有: 压力比、流量比、面积比和密度比。对于多喷嘴射流泵而言, 面积比的定义式相对于单喷嘴

射流泵有所改变，用 m 表示面积比， n 表示喷嘴的数目，则 $m = \text{混合管横截面积} / \text{喷嘴出口截面积}$ 。

2.2. 几何结构

传统射流泵只有一个喷嘴，喷嘴、混合管和扩散管位于同一轴线上，吸入管旁置，被吸流体在射流泵内改变流向。多喷嘴射流泵有多个喷嘴，文中喷嘴数目分别取三个、四个和五个，射流泵详细几何尺寸见参[12]，多喷嘴射流泵的射流结构相对于传统射流泵有所改变，即射流泵中工作流体由单束射流变为三束、四束和五束射流。图 1 给出了五个喷嘴的射流泵几何结构模型图。

3. 数值模拟计算

射流泵内部流体流动状态由射流泵几何形状、流体性质及运行工况决定，它影响着射流泵性能的好坏，因而对射流泵性能的研究可以通过采用数值模拟方法研究射流泵内部流场来进行。

3.1. 边界条件及初始条件

进口边界：流体介质为水，可考虑为不可压缩流动，工作流体及被吸流体进口边界条件均设为速度入口。以五喷嘴射流泵为例 $u_o = 6.988 \text{ m/s}$ ， $u_s = 2.052 \text{ m/s}$ ，下标 o 、 s 分别表示工作流体和被吸流体。

出口边界：Fluent 软件中有出流边界条件和压力出口边界条件两种。出流边界条件要求出口处流动不能对上游流动产生影响，而射流泵可能会遇到出口发生回流的现象，所以不能选择出流边界条件，设定出口边界条件为压力出口， $p_c = 14,800 \text{ Pa}$ 。

内部界面：指的是喷嘴出口处工作流体与被吸流体的交界面。需设定的进口及内部界面的数目随喷嘴数目的不同而不同。

固壁边界：由于工作流体是高速射流，射流泵内部流体的流动为湍流运动。在射流泵内近壁区的 Re 数较低，相对而言，湍流发展不充分，湍流脉动影响不如分子粘性影响大，故采用标准壁面函数。

3.2. 网格划分

射流泵内部流动属于不规则区域的有限空间射流流动，故采用非结构网格中适应性较强的混合格网来划分射流泵内部计算区域。网格质量对计算精度和计算效率有重要影响。网格过疏，会影响计算精度；网格过密，会加大计算量，甚至计算机不能满足计算要求。基于上述考虑，先选取适当网格间距进行初步计算，以速度梯度为基础，采用网格自适应技术，对速度梯度大的喷嘴出口附近进行局部网格加密。即节约计算时间也有效加速了收敛。局部网格划分示意图见图 2。

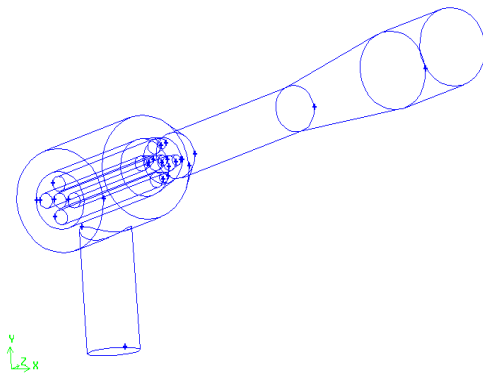


Figure 1. Geometric structure of five nozzle jet pump
图 1. 五个喷嘴的射流泵几何结构图

3.3. 给定求解方案

对湍流流动进行模拟的数值方法，目前在工程中广泛使用。最基本的两方程模型是标准 $k-\varepsilon$ 模型，即引入关于湍动能 k 和湍动耗散率 ε 的方程。但标准 $k-\varepsilon$ 模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流动时，会出现一定失真[13]，所以采用在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上改进的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。应用有限体积法建立离散方程，采用二阶迎风离散格式。在此基础上，用分离的隐式求解器，压力修正法中的 SIMPLE 算法对射流泵内部流场进行模拟计算。

4. 数值模拟结果及分析

在相同面积比、流量比以及出口压力的前提下，变换喷嘴个数，对均匀分布、水平射流出流的三个喷嘴、四个喷嘴和五个喷嘴的射流泵内部流场分别进行数值模拟计算，所采用的求解方法具有良好的稳定性和收敛性。

4.1. 喷嘴个数对壁面压力的影响

喷嘴数目多少对壁面压力影响不大，故只给出四个喷嘴射流泵和五个喷嘴射流泵的壁面压力沿射流泵轴向分布情况示意图作对比，见图 3 和图 4。

尽管采用的喉嘴距不同，但在扩散管段以后壁面压力基本相等，喉嘴距的变化对壁面压力没有明显的影响，图中只给出了喷嘴出口处到喉管出口处的轴向壁面压力分布。在喷嘴出口处至喉管入口处，壁面压强随喉嘴距的增加有所下降，但当喉嘴距增加到一定值(图 3 中喉嘴距等于 30 mm，图 4 中喉嘴距等

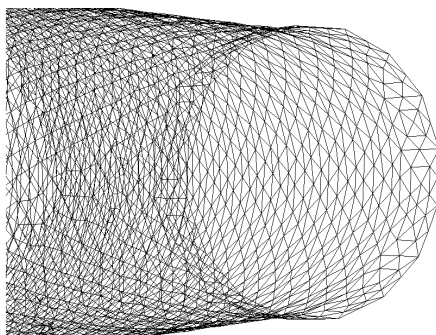


Figure 2. Adaptive mesh of the nozzle exit
图 2. 采用自适应技术后的喷嘴出口处的网格

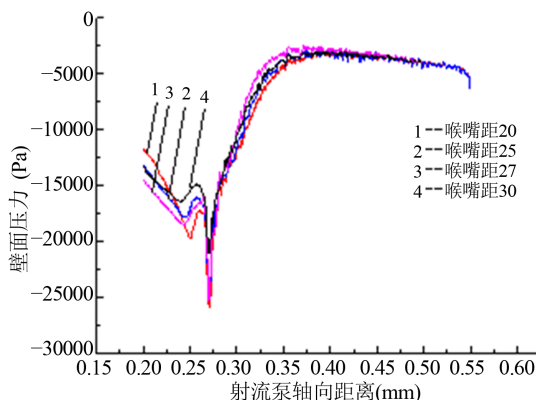


Figure 3. Wall pressure distribution of four nozzle jet pump
图 3. 四个喷嘴的射流泵壁面压力分布图

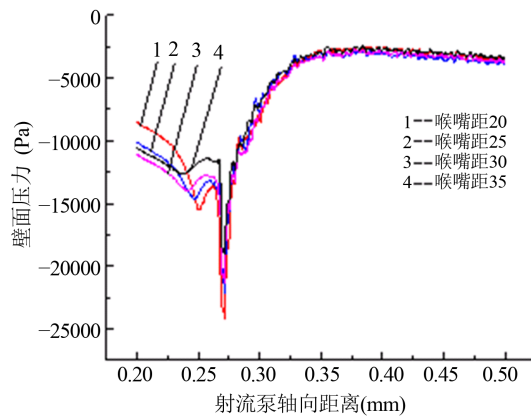


Figure 4. Wall pressure distribution of five nozzle jet pump
图 4. 五个喷嘴的射流泵壁面压力分布图

于 35 mm)时, 壁面压强又有所上升。

由于吸入室与混合管连接处是收缩的, 流体流经此处时速度增加, 在图中相应位置处可看到: 壁面压力有一个下降的过程, 且下降点基本不随喉嘴距的变化而变化。工作流体与被吸流体在混合管内混合, 进行能量交换, 工作流体的速度逐渐降低, 而被吸流体的速度相应增加, 部分动能转化为压能, 所以壁面压力在下降后又呈现上升趋势。

4.2. 喷嘴个数对流体轨迹的影响

喷嘴数目不同, 工作流体与被吸流体的混合程度随之不同, 则混合流体在射流泵内部的流动状态也不同。取吸入室入口处的一条径线做为起点, 绘制吸入流体在不同喷嘴数目的射流泵内部流动的轨迹, 见图 5~图 10。

在图 5~图 7 中, 以不同的颜色来区分速度的大小。在射流泵的不同部位, 被吸流体迹线的颜色也不同, 表示该流体以不同的速度流经射流泵各个部位。被吸流体以一定的速度进入吸入室后, 由于所占据的空间突然变大, 则被吸流体的速度降低, 图中可以明显的看出, 经过混合管入口段后, 被吸流体的速度增大了。这是由于工作流体的部分能量传递给了被吸流体。由流体轨迹线可以看出: 被吸流体在射流泵内部流动的过程中, 由于受到壁面的阻碍作用, 以及高速射流的工作流体的夹带作用, 被吸流体在吸入室内的迹线变化较频繁, 在进入混合管段后逐渐趋于稳定。被吸流体在吸入室内左右两侧均形成了回流, 在图 6 中, 被吸流体进入吸入室上部后, 在其右侧形成回流区, 而左侧的回流区域非常小。比较而言, 图 6 中的被吸流体的迹线要光滑些, 并且被吸流体和工作流体混合得比较均匀。图 5 和图 7 中的被吸流体的迹线变化比较多, 并且左右两侧的回流区域更大。

图 8、9、10 分别为在三个喷嘴、四个喷嘴、五个喷嘴的射流泵中, 吸入流体由吸入室入口到进入混合管之前的流动轨迹的局部放大图, 图中以不同的颜色来区分不同的流体质点。在对应的局部放大图中, 我们可以清楚地看到流体质点从吸入室入口进入射流泵后, 所流经的路线。对比三张吸入流体轨迹局部放大图, 可以看到: 四个喷嘴的射流泵内部流体轨迹相对光滑, 回流区域小, 效果相对要好一些。另外两组射流泵中流体的运动轨迹要复杂些, 回流区域也很大。上述分析说明喷嘴个数对射流泵内流体质点所走过的轨迹是有影响的。

5. 结论

通过对多喷嘴射流泵内部流场进行数值模拟计算, 分析了喷嘴数目的变化对射流泵壁面压力的影响,

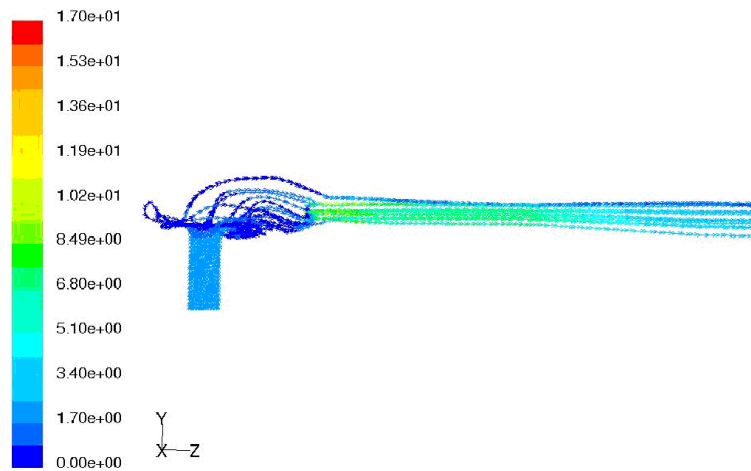


Figure 5. Suction fluid track of three-nozzle jet pump
图 5. 三喷嘴射流泵吸入流体的轨迹图

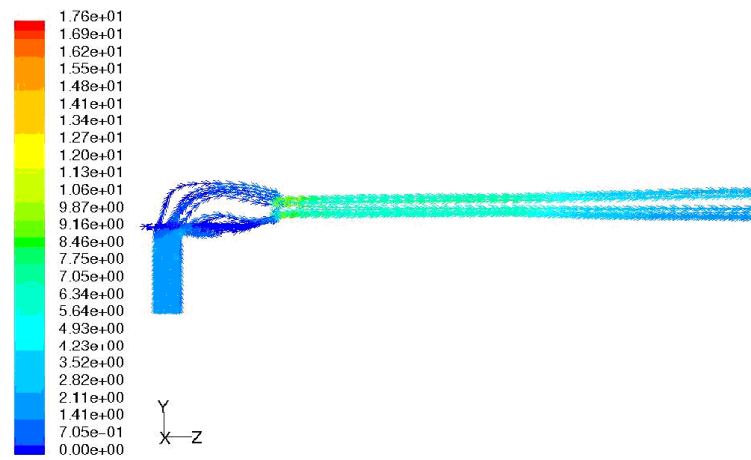


Figure 6. Suction fluid track of four-nozzle jet pump
图 6. 四喷嘴射流泵吸入流体的轨迹图

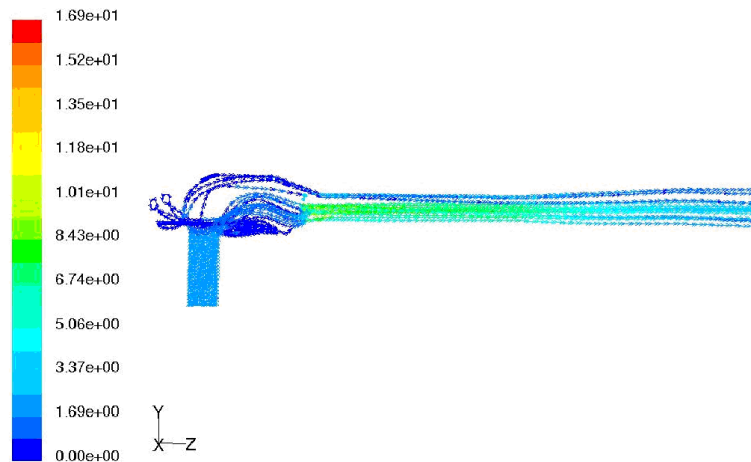


Figure 7. Suction fluid track of five-nozzle jet pump
图 7. 五喷嘴射流泵吸入流体的轨迹图

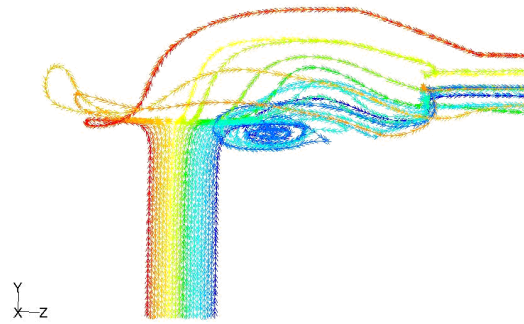


Figure 8. Local suction fluid of three-nozzle jet pump
图 8. 三喷嘴射流泵吸入流体局部放大图

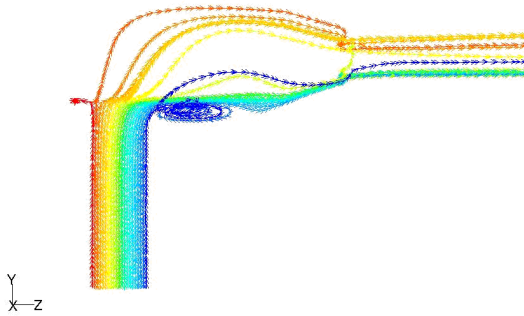


Figure 9. Local suction fluid of four-nozzle jet pump
图 9. 四喷嘴射流泵吸入流体局部放大图

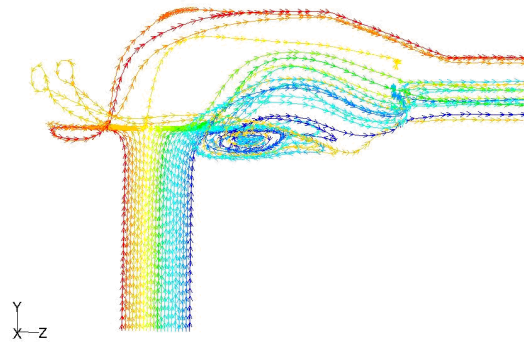


Figure 10. Local suction fluid of five-nozzle jet pump
图 10. 五喷嘴射流泵吸入流体局部放大图

曲线的变化趋势一样，只是具体数值略有不同。喷嘴数目对流体轨迹的影响很大，喷嘴数目决定着在射流泵内部是否存在回流区域及回流区域的大小。回流区域的大小随着喷嘴数目的增加先降后升，回流区域越大，流体损失的能量就越多，这表明射流泵的性能不是随着喷嘴数目的增加而呈单调上升趋势。上述结论对优化射流泵的结构，提高射流泵的性能有一定的参考价值。采用数值模拟的方法可以进一步深化对射流泵工作机理及其流动规律的认识。

基金项目

国家自然科学基金(51279071)；高等学校博士学科点专项科研基金(20135314130002)；云南省教育厅基金(2012Y546)。

参考文献 (References)

- [1] 陈凤官, 綦耀光, 王渭, 等 (2012) 煤层气井水力射流泵排采的适应性研究. *石油和化工设备*, **4**, 8-10.
- [2] 苏吉鑫, 陈正文, 王永强, 等 (2010) 船用消防射流泵流场的数值分析. *流体机械*, **6**, 29-32.
- [3] 朱劲木, 张松波 (2013) 可调射流泵在水电站技术供水中的应用研究. *中国农村水利水电*, **3**, 160-166.
- [4] Piotrowski, K., Matynia, A. and Hutnik, N. (2013) Gas-liquid jet pump crystallizer in phosphorus recycling technology—Neural network model. *Procedia Environmental Sciences*, **18**, 756-765.
- [5] 冯卫华, 宋新华 (2012) 射流泵在海洋探井测试中的应用. *油气井测试*, **3**, 38-39.
- [6] 龙新平, 鄢恒飞, 张松艳, 等 (2010) 喉管长度对环形射流泵性能影响的数值模拟. *排灌机械工程学报*, **3**, 198-206.
- [7] Fan, J., Eves, J. and Thompson, H.M. (2011) Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps. *Computers & Fluids*, **46**, 212-217.
- [8] 龙新平, 程洪贵, 杨雪龙 (2012) 超大面积比射流泵性能模拟与试验研究. *石油机械*, **4**, 379-383.
- [9] Song, X.-G., Park, J.-H. and Kim, S.-G. (2013) Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method. *Mathematical and Computer Modelling*, **57**, 245-253.
- [10] Shah, A., Chughtai, I.R. and Inayat, M.H. (2011) Experimental and numerical analysis of steam jet pump. *International Journal of Multiphase Flow*, **37**, 1305-1314.
- [11] 汪超, 徐建宁, 曲文涛, 等 (2008) 内滑套式射流泵的研制. *流体机械*, **1**, 47-49.
- [12] 龙新平, 姚鑫, 杨雪龙 (2012) 多孔喷嘴射流泵流动模拟与涡结构分析. *排灌机械工程学报*, **2**, 136-140.
- [13] 乌骏, 袁丹青, 王冠军, 等 (2007) 射流泵的发展现状与展望. *排灌机械*, **2**, 65-68.