

离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析*

刘建瑞 徐永刚 王董梅 苏起钦

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 基于 N-S 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 采用 SIMPLEC 法, 对离心叶轮三维固液两相流场进行了耦合计算, 得到了固相(颗粒)不同粒径、不同体积浓度不同密度以及不同流量时的固相(颗粒)浓度分布, 并研究了外特性的变化规律。模拟结果表明, 颗粒本身的性质-密度、粒径对颗粒的分布及运动规律影响较大, 密度、粒径越大的颗粒在惯性力作用下易偏向工作面; 颗粒体积浓度对颗粒的分布略有影响; 泵在非设计工况下运行时, 相对进口液流角的变化影响了颗粒在叶轮内的分布情况; 颗粒密度、粒径、固相体积浓度的增大会引起扬程的减小。

关键词: 离心泵 叶轮 固液两相流 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0086-05

Numerical Simulation of Solid-liquid Two-phase Turbulent Flow in Impeller Channel and Pump Characteristics Analysis

Liu Jianrui Xu Yonggang Wang Dongmei Su Qiqin

(Technology and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to study solid-liquid 3-D two-phase turbulent flow in a pump, the SIMPLEC algorithm was used with the casing to calculate the coupling question of a centrifugal impeller based on N-S equations and the standard two equations $k-\varepsilon$ turbulent model. From the computed information, the distribution of solid particles of different particle sizes and different volume fractions, at off-design conditions and different specific gravities were obtained, and the characteristic of pump was also calculated. The results indicated that specific gravity and particle diameter, which are the nature of particles, had more influence on the distribution of solid particles. Particles with large specific gravity value and diameter were easy to trend to working face by the effect of inertia force. The volume fraction also had an effect in particle distribution; because of relative flow angle changing in off-design conditions, particles had different distribution and movement laws. Increasing specific gravity, particle size and solid-phase volume would cause the reduction of head.

Key words Centrifugal pump, Impeller, Solid-liquid two-phase turbulent flow, Numerical simulation

引言

两相流离心泵广泛应用于冶金、矿山、煤电、化工、轻工、食品等行业^[1], 此外农业生产由于运行条件、水质的限制, 泵不可能完全输送不含任何固体颗粒

粒的介质。因此, 研究含有固体颗粒的介质对泵内部流场及外特性产生的影响是非常有意义的。

目前, CFD 方法已被国内外众多学者用来研究离心泵内三维湍流流场^[1~4], 许多学者从颗粒直径及颗粒体积浓度出发研究了设计工况下离心泵在输

收稿日期: 2009-03-10 修回日期: 2009-05-20

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAF34B10)

作者简介: 刘建瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: ljrwjj@126.com

送固液两相介质时泵内部流场的变化情况^[5~11],然而颗粒在流道内的运动及分布规律是受多重因素影响的。本文借助 CFD 工具具有分析周期短,费用低等特点,从固相颗粒本身性质及其他外部因素出发研究了颗粒运动及分布规律,通过计算以期获得离心叶轮流道内的流动规律,定量分析这些因素对泵外特性的影响,为进一步的试验研究和设计优化提供参考。

1 泵内湍流场的计算

1.1 基本参数及网格

泵的基本参数为:设计流量 $Q = 2\,440\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 40\text{ m}$,转速 $n = 990\text{ r/min}$,叶片数 $z = 6$ 。由于模型复杂,将其划分为含有六面体、四面体、锥体和楔形体的混合网格。叶轮网格节点数为 184 434,蜗壳网格节点数 499 157。计算区域网格如图 1 所示。

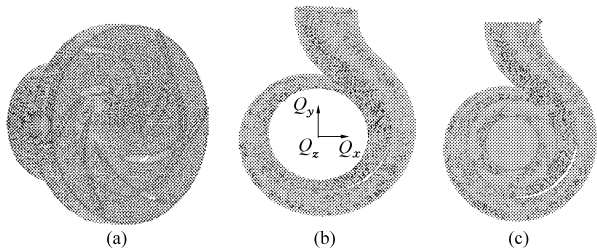


图 1 计算区域网格
Fig.1 Computational domain grid

(a) 叶轮计算区域 (b) 蜗壳计算区域 (c) 耦合计算区域

1.2 控制方程与湍流模型

叶轮与压水室的耦合采用多重参考坐标系法。假定泵运转时转速恒定,基于时均化的 N-S 方程,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来确定湍流粘性系数;多相流模型采用 Mixture 模型,考虑相与相之间的滑移速度,液固交换系数采用 Wen-Yu 模型,颗粒碰撞归还系数设为 0.9;采用有限体积法将空间域上连续的控制方程转化为离散方程;采用 SIMPLEC 算法求解压力速度耦合方程组,控制方程对流项的离散采用二阶迎风格式,扩散项、源项采用二阶中心差格式。

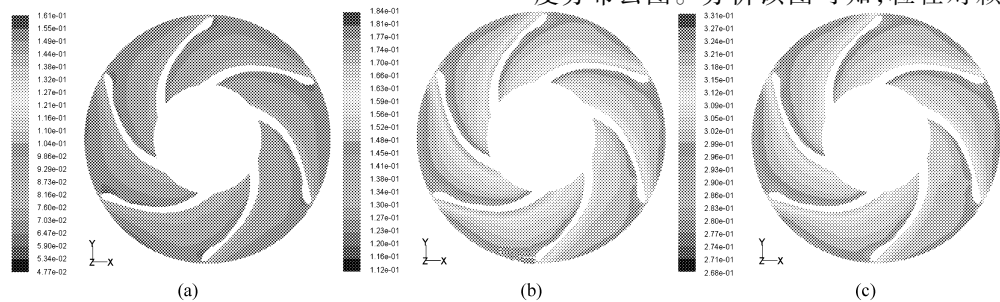


图 2 不同固相体积浓度时叶轮流道颗粒浓度分布云图 ($d = 0.10\text{ mm}$)

Fig.2 Contour of particle distribution with different volume fractions in impeller channel ($d = 0.10\text{ mm}$)

(a) $C_v = 7\%$ (b) $C_v = 15\%$ (c) $C_v = 25\%$

1.3 基本假设及边界条件

为实现流道内两相流的数值计算,假设:① 主相为清水,第二相为固体颗粒且全部为单一同种颗粒。② 流体相、颗粒相为连续不可压缩相,各相的物理特性保持常数。③ 颗粒相为球形,粒径均匀,不考虑相变。

假定进口速度轴向均匀分布,颗粒相与液相之间均匀分布,速度等于固体输送速度;根据进口流速确定 k 和 ε 值的大小,采用自由出口边界条件;在固壁处采用无滑移边界条件,近壁处采用标准壁函数。

2 计算结果及分析

对 3 个不同流量、不同固相体积浓度、不同粒径、不同密度进行了数值计算。模拟方案如表 1 所示,各项残差均为 10^{-5} 量级。

表 1 模拟方案
Tab.1 Scheme of simulation

参数	体积浓度 $C_v/\%$	粒径 d /mm	密度比 ρ_s	流量 Q / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
数值	7、15、 25	0.05、0.10、 0.15	0.92、2.00、 2.97	0.5Q、Q、 1.3Q

2.1 固相体积浓度对颗粒分布的影响

图 2 为不同固相体积浓度在设计流量, $d = 0.10\text{ mm}$ 时叶轮流道颗粒浓度分布云图。分析图 2 可知,固相体积浓度对颗粒的分布有略微影响,体积浓度增大,颗粒有向工作面运动的趋势。 $C_v = 7\%$ 时颗粒以一定进口角进入叶轮流道,有部分颗粒撞击进口叶片背面,随着流动的深入,在惯性力作用下向叶片工作面靠近,随着体积浓度增大,撞击背面的趋势逐渐消失,说明固相体积浓度对颗粒的分布有一定影响。

2.2 粒径对颗粒分布的影响

图 3 为不同粒径在设计流量, $C_v = 5\%$ 时颗粒浓度分布云图。分析该图可知,粒径对颗粒在叶轮流

道的分布、颗粒的运动规律影响很大。相同体积浓度时,随着粒径的增大,叶片工作面聚集的颗粒的浓度分布明显增加,说明颗粒在惯性力作用下向叶片工作面靠近。 $d=0.05\text{ mm}$ 时,叶轮流道内颗粒分布

比较均匀,只有少部分以较小角度进入叶轮流道的颗粒沿工作面流出,说明粒径越小,惯性力对颗粒的作用力越小,在离心力作用下,大部分颗粒在未到达工作面之前就离开叶轮流道。

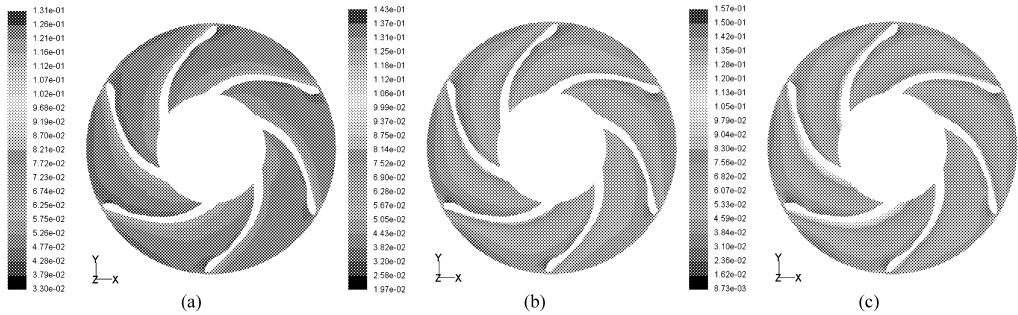


图3 不同粒径的叶轮流道颗粒浓度分布云图 ($C_v=5\%$)

Fig.3 Contour of particle distribution with different diameters in impeller channel ($C_v=5\%$)

(a) $d=0.05\text{ mm}$ (b) $d=0.10\text{ mm}$ (c) $d=0.15\text{ mm}$

2.3 密度对颗粒分布的影响

图4为不同密度下在设计流量, $d=0.10\text{ mm}$, $C_v=5\%$ 时的颗粒浓度分布云图。分析该图可知,密度不同对颗粒的分布规律有质的影响。当 $\rho_s=0.92$ 时颗粒的分布规律与 $\rho_s=2.00$ 和 $\rho_s=2.97$ 时的分布规律明显不同, $\rho_s=0.92$,颗粒密度小于主相密度,在离心力作用下颗粒向叶片背面运动,随着密度

值的增大,颗粒向工作面运动的趋势明显, $\rho_s=2.97$ 时,叶片工作面固相浓度分布明显高于 $\rho_s=2.00$ 时的浓度分布;此外,密度增大,单位体积颗粒的质量越大,其受到的惯性力也越大,颗粒运动轨迹越来越明显, $\rho_s=2.97$ 时颗粒运动轨迹明显比 $\rho_s=2.00$ 时清晰。

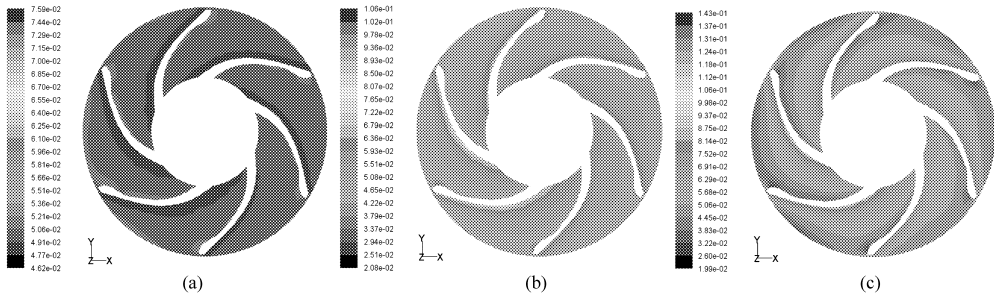


图4 不同密度的颗粒浓度分布云图

Fig.4 Contour of particle distribution with different specific gravities

(a) $\rho_s=0.92$ (b) $\rho_s=2.00$ (c) $\rho_s=2.97$

2.4 流量对颗粒分布的影响

图5为不同流量下 $d=0.10\text{ mm}$, $C_v=5\%$ 时的颗粒浓度分布云图。分析该图可知,流量变化对颗粒的运动及分布规律影响明显。由速度三角形知,

进口相对液流角随着流量的增加而增大,小流量时进口相对液流角小,颗粒以较小角度进入叶轮流道,在惯性力作用下很快到达工作面并沿工作面流出,图5a中 $0.5Q$ 工作面颗粒浓度分布高于其他流量时

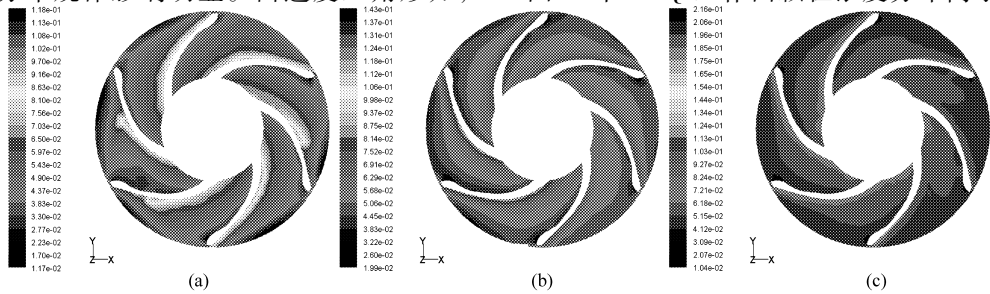


图5 不同流量时的颗粒浓度分布云图

Fig.5 Contour of particle distribution with different flows

(a) $0.5Q$ (b) Q (c) $1.3Q$

的浓度分布,流道中高浓度分布区域面积大,随着流量增加,进口相对液流角增加,颗粒以较大角度进入叶轮流道,在流道内的分布范围较广,但在惯性力作用下仍有向工作面运动的趋势,1.3Q 时,部分颗粒在进口处甚至撞击叶片背面,在流道中运动轨迹明显。

3 外特性分析

图 6~8 定量分析了颗粒直径、体积浓度以及密度变化时的泵进出口总压差变化以及对泵外特性的影响。图 6 可知,在一定粒径范围内,随着颗粒直径的增大,泵进出口总压差、扬程均呈减小趋势;由图 7 可知,固相体积浓度的增加对泵进出口总压差及扬程影响的趋势是不同的,进出口总压差随着体积浓度的增加而增大,而扬程减小。由于固相体积

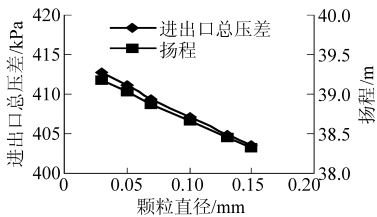


图 6 粒径对泵外特性的影响

Fig. 6 Influence of particle diameter on pump characteristics

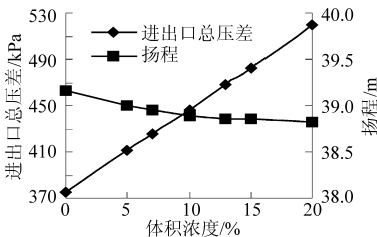


图 7 体积浓度对外特性的影响

Fig. 7 Influence of volume concentration on pump characteristics

浓度增加,造成固液混合物粘度增加,泵内摩擦损失增加,所以导致扬程下降。由图 8 可知,随着密度比的增加,进出口总压差是增加的,扬程呈现减小趋势。由此说明,固相体积浓度、密度、颗粒直径对泵的性能影响较大,随着这些值的增大,泵的扬程均会减小。

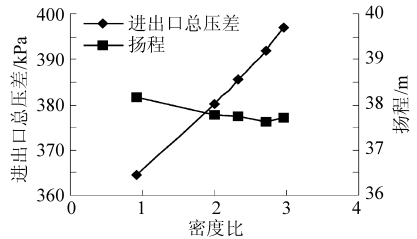


图 8 密度对外特性的影响

Fig. 8 Influence of specific gravity on pump characteristics

4 结论

- (1) 固相体积浓度的增加对颗粒在叶轮流道内的分布略有影响。
- (2) 颗粒粒径的变化对颗粒的分布影响较大,随着粒径的增大,颗粒在惯性力作用下靠近叶片工作面的趋势越来越强,运动轨迹明显。
- (3) 颗粒密度对颗粒的分布有质的影响,当固相颗粒密度小于液相密度时,在离心力作用下颗粒会偏向叶片背面,颗粒密度越大,单位体积颗粒质量越大,颗粒靠近工作面趋势越强,运动轨迹越明显。
- (4) 流量的变化影响了颗粒进入叶轮流道的角度,随着流量的增加,相对进口液流角增大,颗粒在流道内的运动轨迹明显。
- (5) 固相体积浓度、密度、颗粒直径对泵外特性影响较大,随着这些值的增加扬程会减小。

参 考 文 献

1 Kitano M. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(4):363 ~ 371.

2 Rikke K B, Christlan B J, Nicholas P. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions-part II : large eddy simulations [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125 (1):73 ~ 83.

3 耿少娟,聂超群,黄伟光,等.不同叶轮形式下离心泵整机非定常流场的数值研究[J]. 机械工程学报,2006,42(5): 27 ~ 31.

Geng Shaojuan, Nie Chaoqun, Huang Weiguang, et al. Numerical study of unsteady flow in centrifugal pump with different type of impellers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5):27 ~ 31. (in Chinese)

4 杨敏官,顾海飞,刘栋,等.离心泵叶轮内部湍流流动的数值计算及试验[J]. 机械工程学报,2006,42(12):180 ~ 185.

Yang Minguan, Gu Haifei, Liu Dong, et al. Numerical simulation and experiment study for turbulent flow in the impeller of centrifugal pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12):180 ~ 185. (in Chinese)

5 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1998.

6 吴玉林,葛亮,陈乃祥. 离心泵叶轮内部固液两相流动的大涡模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41(10): 93 ~ 96.

- Wu Yulin, Ge Liang, Chen Naixiang. Large eddy simulation of silt-liquid two-phase flow through a centrifugal pump impeller [J]. Tsinghua University: Sci. & Tech., 2001, 41(10):93~96. (in Chinese)
- 7 刘栋,杨敏官,李辉,等. 化工泵叶轮内部固液两相流场的研究[J]. 水泵技术, 2007(3):16~19.
Liu Dong, Yang Minguan, Li Hui, et al. Solid-liquid two-phase study in impeller of a chemical centrifugal pump [J]. Pump Technology, 2007(3): 16~19. (in Chinese)
- 8 刘栋,杨敏官,高波. 离心泵叶轮内部伴有盐析流场的 PIV 试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1):55~58, 63.
Liu Dong, Yang Minguan, Gao Bo. PIV measurement of flow with salt-out in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):55~58, 63. (in Chinese)
- 9 Schilling Rudolf, Frobenius, Moritz. Numerical simulation of two-phase flow in centrifugal pump impellers [C] // Proceedings of the 2002 ASME Joint U.S - European Fluids Engineering Conference, Simposia, 2002.
- 10 Shi Depan, Luo Zhenghong, Zheng Zuwei. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in a tubular loop polymerization reactor [J]. Power Technology, 2010, 198(n1):135~143.
- 11 陈次昌,杨昌明,熊茂涛. 低比转速离心泵叶轮内固液两相流的数值分析[J]. 排灌机械, 2006, 24(6):1~3.
Chen Cichang, Yang Changming, Xiong Maotao. Numerical analysis on two-phase flow through impeller of low-specific-speed centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(6): 1~3. (in Chinese)
-

(上接第 32 页)

- 3 刘凤国, 王晓燕, 封士彩. 连通式油气悬挂车辆三种行驶状况下数学模型的建立 [J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(3): 36~40.
Liu Fengguo, Wang Xiaoyan, Feng Shicai. The math-model's found of interconnect oil-air suspension vehicle in three exercise state [J]. Machine Building & Automation, 2006, 35(3): 36~40. (in Chinese)
- 4 卢毅非. 连接式油气悬架的特性分析 [J]. 工程机械, 1995, 26(4):11~14.
Lu Yifei. Characteristic analysis of connection type oil-gas suspension [J]. Construction Machinery and Equipment, 1995, 26(4):11~14. (in Chinese)
- 5 王云超, 高秀华, 杨旭, 等. 油气悬挂系统参数对多桥转向特性的影响 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(2): 269~274.
Wang Yunchao, Gao Xiuhua, Yang Xu, et al. Effect of hydro-pneumatic suspension parameters on steering characteristics of multi-axle-steering vehicle [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(2): 269~274. (in Chinese)
- 6 吴仁智. 混合与分离式油气悬架动力学试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
Wu Renzhi. Testing & research on dynamics of the mixed & separated hydro-pneumatic suspension [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- 7 杨杰, 陈思忠, 吴志成, 等. 油气悬架可控刚度阻尼设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 20~24.
Yang Jie, Chen Sizhong, Wu Zhicheng, et al. Design and testing on the hydro-pneumatic suspension with controllable stiffness and damping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 20~24. (in Chinese)
- 8 苏东海, 韩国惠, 于江华, 等. 液压同步控制系统及其应用 [J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(4): 364~367.
Su Donghai, Han Guohui, Yu Jianghua, et al. Design and application of hydraulic synchronization control system [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(4): 364~367. (in Chinese)
- 9 卢宁, 付永领, 孙新学. 基于 AMESim 的双压力柱塞泵的数字建模与热分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1055~1058.
Lu Ning, Fu Yongling, Sun Xinxue. Digital modeling of double press axial piston pump and its thermal analysis basing on AMESim [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1055~1058. (in Chinese)