

长短叶片离心泵内固液两相流场三维数值模拟

郭仁宁, 肖春艳, 李国威

(辽宁工程技术大学 机械工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了分析长短叶片离心泵输送固液两相流时叶轮内部流场和流动规律,应用 FLUENT 软件分别对普通叶片离心泵和长短叶片离心泵内的固液两相流场进行数值模拟,对比分析两者的总压、静压以及固相颗粒浓度的分布规律。结果表明:无论是普通离心泵还是长短叶片离心泵,它们的静压和总压的变化规律相同,均沿着出流方向有增大趋势,在叶轮出口处压力达到最大值;长短叶片离心泵内固相颗粒浓度减小,明显提高了泵的抗磨损性能;与普通离心泵相比,长短叶片离心泵叶轮流道内颗粒的高浓度区域明显变小,运行更加平稳;长短叶片离心泵中颗粒的分布更均匀,流动损失大大减小,流动状态更好。

关键词: 长短叶片;离心泵;固液两相流;流场;数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.01.015

引言

在固液两相流物料输送问题上,磨损问题是首先应该得到的解决的最重要的问题。采用长短叶片间隔布置的方式既能提高泵的抗磨损性能,有效减小内部磨损,并能改善流动状态,减小水力损失,达到更好的流动效果,是非常有效的提高离心泵性能的方法^[1]。

近年来,我国在长短叶片离心泵的理论研究方面取得了一定的成绩^[2-4],对两相流在离心泵内的流动规律的理论探索也越来越深入^[5-9],但利用长短叶片离心泵输送固液两相流的三维数值模拟研究基本没有。本研究正是以长短叶片和固液两相流的结合为课题切入点和创新点,利用低成本、高效率的数值模拟研究方法,分析对比长短叶片离心泵和普通离心泵内各物理量的分布规律,为设计出工作性能优良的离心泵提供重要的参考依据。

1 离心泵三维实体建模和网格划分

离心泵叶轮流道的几何模型相对复杂,利用三

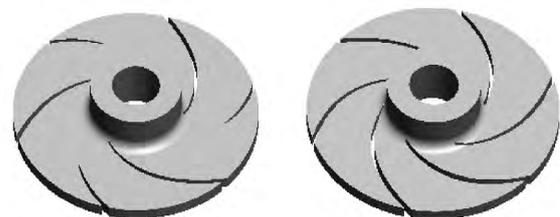
维实体造型软件 Pro/ENGINEER 对两种离心泵分别进行建模^[10-13]。普通离心泵和长短叶片离心泵的基本设计参数如表 1 所示。

表 1 两种离心泵的设计参数

Tab. 1 The design parameters of two kinds of centrifugal pumps

参数	普通离心泵	长短叶片离心泵
体积流量 $Q_v / m^3 \cdot h^{-1}$	25	25
扬程 H / m	15	15
叶轮进口直径 D_1 / mm	80	80
叶轮出口直径 D_2 / mm	204	204
叶片数 Z	6	3 长 3 短
叶轮出口宽度 b_2 / mm	7.5	7.5
叶片出口角 $\beta_2 / (^\circ)$	25	25
转速 $n / r \cdot min^{-1}$	1 450	1 450
短叶片进口直径 D / mm	-	143
偏置度 $l / (^\circ)$	-	0.5 θ
偏转角 $\alpha / (^\circ)$	-	0

普通离心泵和长短叶片离心泵三维实体图如图 1 所示。



(a) 普通离心泵

(b) 长短叶片离心泵

图 1 两种离心泵模型图

Fig. 1 The model graph of two kinds of centrifugal pumps

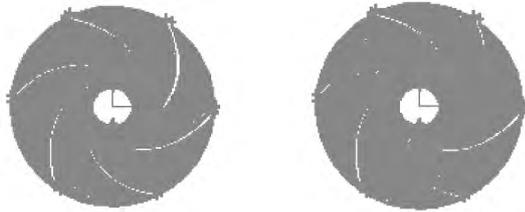
将建好的模型导入到前处理软件中,在 Gambit

收稿日期: 2015-02-03; 修订日期: 2015-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104083; 51374123)

作者简介: 郭仁宁(1956-),男,辽宁阜新人,辽宁工程技术大学教授。

完成网格的划分,采用混合网格进行划分。图 2 是两种叶型离心泵内的网格划分图,普通离心泵网格划分如图 2(a) 所示,共划分得到 247 072 个网格,长短叶片离心泵网格划分如图 2(b) 所示,共划分 280 105 个网格。



(a) 普通离心泵 (b) 长短叶片离心泵

图 2 两种离心泵内网格划分

Fig.2 The grid division of two kinds of centrifugal pumps

2 数值模拟

2.1 控制方程的建立和计算模型的选择

控制方程采用 RANS(雷诺时均 Navier - Stokes 方程),控制方程的离散化方法采用 FVM(有限体积法)。选用重整化 RNG $k - \epsilon$ 湍流粘性模型进行数值计算,对固液两相流的耦合方法选取多相流模型中的 Mixture 混合模型进行模拟,并采用 MRF(多重参考系)方法进行处理^[14]。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\alpha_n \rho_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_n \rho_n u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: α_n —第 n 相的体积分数; ρ_n —第 n 相的密度, kg/m^3 ; u_i —第 n 相的速度, m/s 。

动量守恒方程(N - S 方程)为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_d u_d) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_d \rho_d u_i u_j) = -\alpha_d \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \alpha_d \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: p —静压; τ_{ij} —应变张量, $\tau_{ij} = \alpha_d \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)$; $\alpha_d \rho g_i$ —重力体积力; F_i —其它体积力,包括其它模型源项和用户自定义各种源项。

RNG $k - \epsilon$ 方程的湍动能 k 方程为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

湍动耗散率 ϵ 方程为:

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \epsilon \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

式中: k —湍动能; G_k —由于平均速度梯度造成的湍动能生成项; ϵ —湍动耗散率; μ_t —湍动粘度(湍动粘性系数), $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $C_\mu = 0.09$; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ —默认经验常数, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$; σ_k —湍动能的湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$ 。

2.2 初始条件和边界条件的设定

假定两种离心泵所输送固液两相混合物完全相同,设定固相颗粒密度 $\rho_s = 2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、均为球形且大小相同,取粒径 $d_s = 0.1 \text{ mm}$,固相物质浓度是 $c_v = 10\%$,并将其看成是均匀连续的流体介质。液相物质为清水,密度 $\rho_w = 998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$,假定水和固体颗粒完全均匀混合,混合物为连续不可压缩介质,不发生相变。选定速度进口边界条件(Velocity - Inlet)为入口边界条件,速度值由流量和入口面积计算,速度大小为 $v = 1.843 \text{ m}/\text{s}$,方向垂直于入口边界,操作压力保持默认值 $p = 101325 \text{ Pa}$ 。由于叶轮出口处的压力和速度值都为未知量,假定在叶轮出口处湍流完全充分发展,选定自由出流(Outflow)出口边界条件^[15-16]。

3 模拟结果与对比分析

3.1 压力变化规律

图 3 为普通离心泵和长短叶片离心泵中截面的总压等值线分布图,在两种离心泵叶轮中,总压变化规律一致,仅压力值有所不同。两种离心泵中总压的变化规律符合以下特点:对于同一叶片的位置,也就是在相同径向半径处,叶片在压力面的总压总是大于叶片的吸力面;在两种离心泵的叶轮进出口存在一定的压力梯度,在叶片头部和非工作面的交汇处压力为最小值,存在汽蚀最容易发生的低压区域,总压值沿着两相流的出流方向不断增大,在叶轮出口处达到最大值,这与离心泵的工作原理相符合。

普通离心泵和长短叶片离心泵中截面上的静压等值线分布如图 4 所示,静压的变化趋势与总压相似,只是在数值上不同。

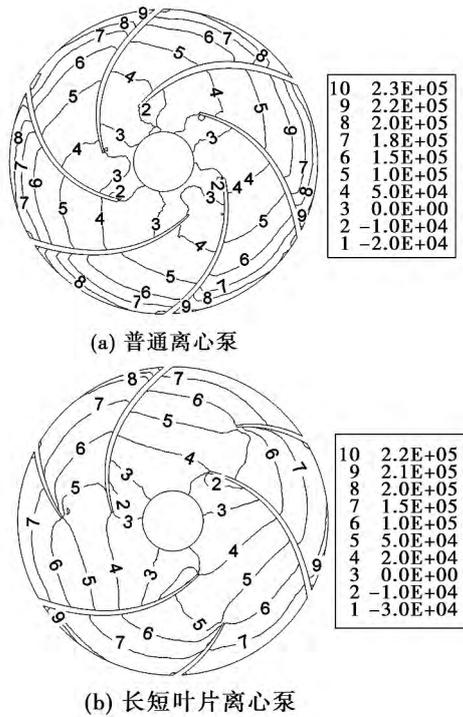


图 3 两种离心泵内总压等值线分布图 (Pa)
 Fig. 3 The equivalent lines distribution of total pressure in two kinds of centrifugal pumps (Pa)

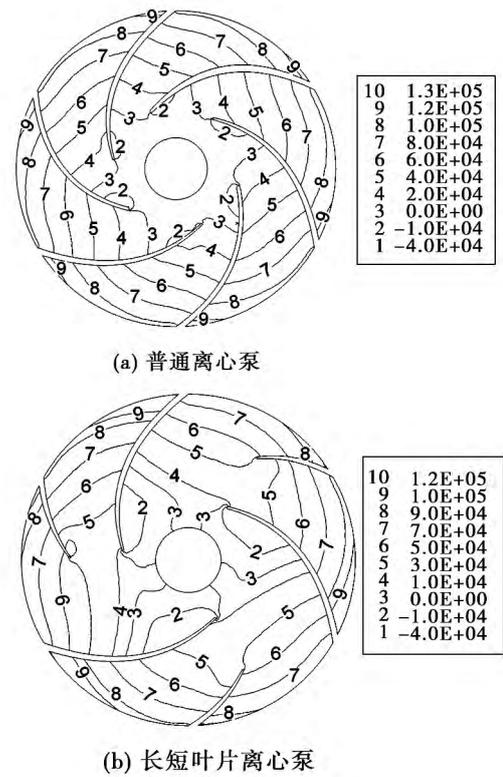


图 4 两种离心泵内静压等值线分布图 (Pa)
 Fig. 4 The equivalent lines distribution of static pressure in two kinds of centrifugal pumps (Pa)

3.2 固相颗粒浓度变化规律

抗磨损性能一直是衡量固液泵性能的重要指标。普通离心泵叶片和长短叶片离心泵叶片表面上的颗粒浓度分布如图 5 所示,两种离心泵的叶顶位置颗粒浓度变化较大,在叶片非工作面颗粒浓度随着径向半径增大而增大,而工作面则正好相反;普通离心泵吸力面处的颗粒浓度要明显大于长短叶片离心泵,说明采用长短叶片离心泵能够明显减小吸力面颗粒浓度,减缓叶轮等部位的磨损,改善泵抗磨损性能。

图 6 为两种离心泵中截面上的颗粒分布云图,随着叶轮旋转,颗粒在叶片吸力面不断堆积,吸力面颗粒浓度高于压力面;采用短叶片之后的离心泵颗粒浓度分布梯度减小,颗粒分布更均匀,流道中流体的流动损失和水力损失减小,流动效果更好,泵性能提高;两种离心泵流道中部均存在颗粒高浓度分布区域,能明显观察到在长短叶片离心泵中的颗粒高浓度区域大大缩小,运行更加平稳可靠,减小普通离心泵运行中的振动等不利因素的影响,并能避免由于叶片数多而导致的进口处排挤和堵塞现象。相对于传统的固液两相流离心泵,采用长短叶片离心泵更有优势。

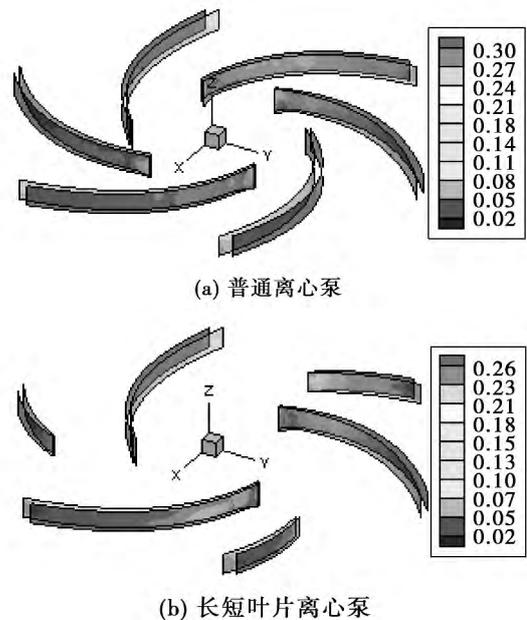
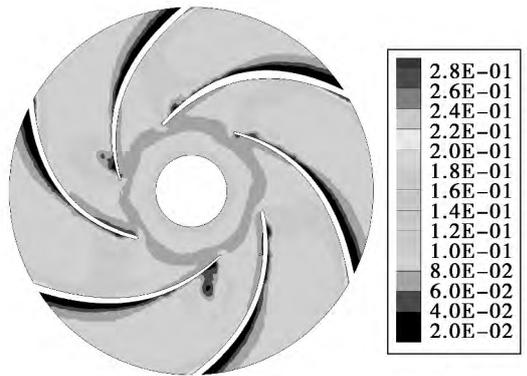


图 5 两种离心泵叶片表面的颗粒浓度分布 (kg/m³)

Fig. 5 Particle concentration distribution on the blades of two kinds of centrifugal pumps (kg/m³)



(a) 普通离心泵



(b) 长短叶片离心泵

图 6 两种离心泵中颗粒浓度分布 (kg/m^3)
Fig. 6 Particle concentration distribution of two kinds of centrifugal pumps (kg/m^3)

3.3 径向颗粒浓度分布

图 7 是 0° 、 90° 、 180° 和 270° 4 个轴面位置示意图 图 8 是普通离心泵和长短叶片离心泵内 4 个典型轴面位置叶轮流道内固相体积浓度沿叶轮径向的变化规律。在普通离心泵中固相体积浓度沿径向的变化曲线中存在两个浓度突变点,在径向半径约为 0.05 m 的压力面附近的位置,固相浓度骤降,在叶轮出口吸力面附近的位置,固相浓度突然增大,浓度值波动很大;在接近叶片出口位置存在一个浓度突然增大的吸力面附近的点,普通离心泵中浓度变化剧烈;在长短叶片离心泵中从叶片进口到出口的各个位置、各个角度的固相体积浓度很接近,浓度变化较小,与普通离心泵相似,在接近出口位置存在一个吸力面附近的点,使得固相浓度突然升高。总体来看,相对于普通离心泵,长短叶片使叶轮流道内各个位置的浓度变化更均匀,对叶轮等部位的磨损也减

小,长短叶片离心泵的抗磨损能力比普通离心泵更强。

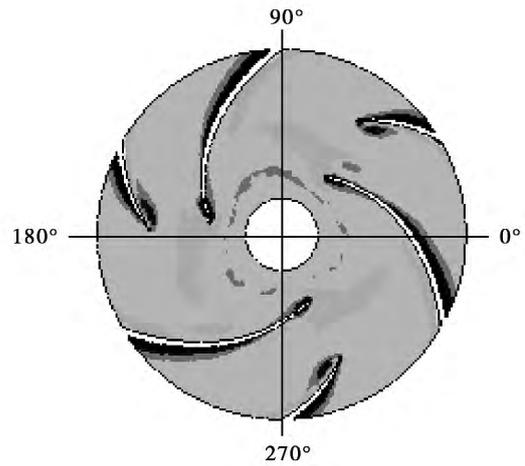
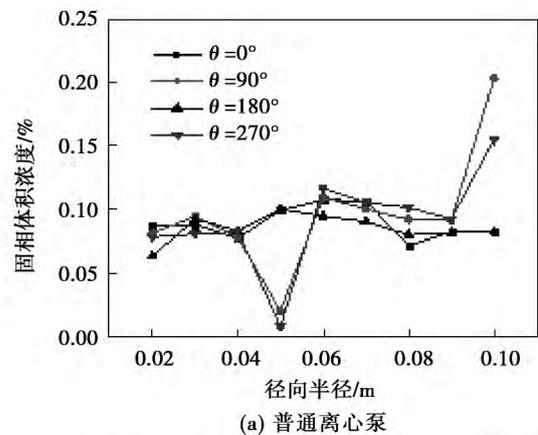
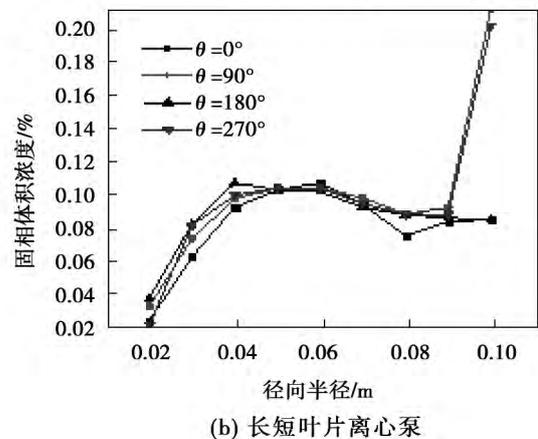


图 7 轴面位置示意图

Fig. 7 The schematic diagram of the position of axial plane



(a) 普通离心泵



(b) 长短叶片离心泵

图 8 固相体积浓度沿径向方向变化曲线图
Fig. 8 The changing curves of the solid phase concentration along the radial direction

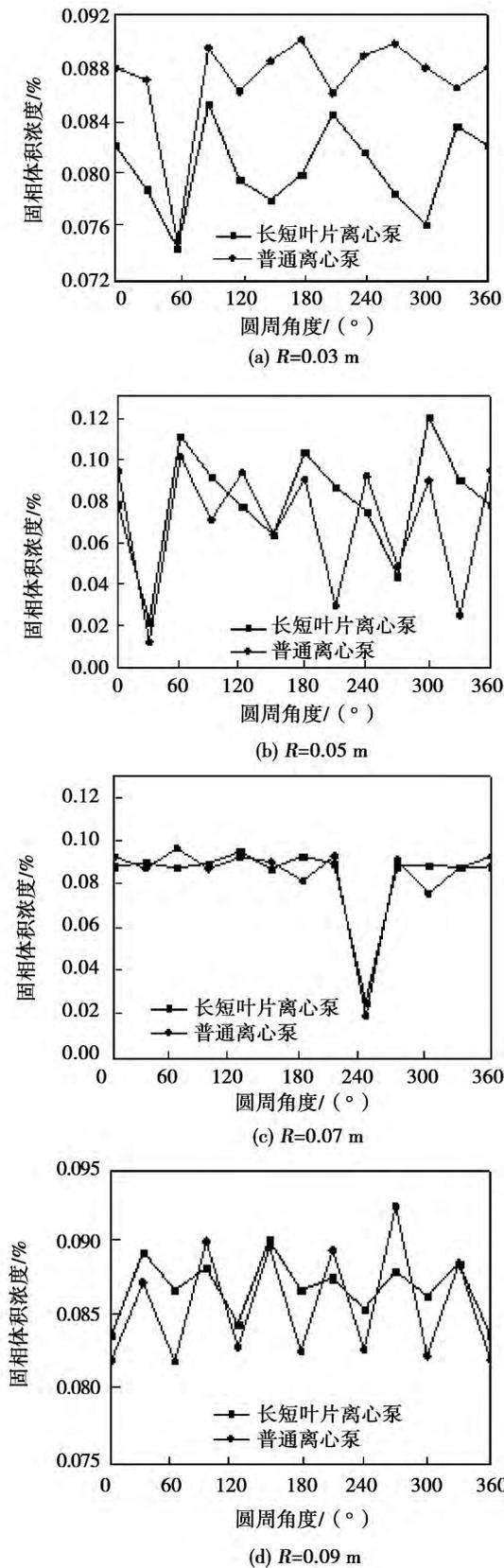


图 9 固相体积浓度沿周向变化曲线图

Fig. 9 The changing curves of the solid phase concentration along the circumferential direction

3.4 周向颗粒浓度分布

图 9 是普通离心泵和长短叶片离心泵内径向半径分别为 0.03、0.05、0.07 和 0.09 m 时固相体积浓度沿叶轮周向方向的变化曲线。在半径为 0.03 m 时,长短叶片离心泵和普通离心泵中均存在一定的浓度波动,长短叶片离心泵内的固相浓度值相对普通离心泵更小;在半径为 0.05 m 时,普通离心泵在各个角度的固相浓度值波动较大,浓度变化更剧烈,而长短叶片离心泵中的固相浓度变化小,分布相对均匀;在半径为 0.07 m 时,两种离心泵在靠近尾部位置各个角度的浓度存在一个浓度骤降点,其它位置均有较小波动,浓度变化和分布情况相似;在半径为 0.09 m 时,两种离心泵内固相体积浓度在数值上有一定的变化,普通离心泵内的浓度值变化更大,波动明显,长短叶片离心泵内的颗粒浓度波动幅度很小。总体上,在叶轮中不同半径的周向位置上的固相颗粒浓度分布都符合以下特点:在两种离心泵中,均存在固相体积浓度的波动现象;长短叶片离心泵中固相颗粒浓度要比普通离心泵小,故对叶片的磨损更小;普通离心泵内浓度波动幅度大,长短叶片离心泵中固相颗粒浓度波动幅度较小,固相颗粒浓度分布均匀,流动效果明显变好,长短叶片离心泵的抗磨损能力更强。

4 结 论

(1) 无论是普通离心泵还是长短叶片离心泵,叶轮流道内的静压和总压变化趋势相同,仅压力值不同。从叶轮进口至出口均存在一定的压力梯度,在叶轮流道内沿着流动方向逐渐增大,在叶轮出口达到最大值;叶片同一位置的压力面压力总是大于吸力面。

(2) 长短叶片离心泵叶轮流道中吸力面的固相颗粒浓度比普通离心泵吸力面浓度小,对叶轮的磨损更小;颗粒浓度变化更均匀,水力损失减小,水力性能提高;叶轮流道中的高浓度区域也大大减小,流动更加平稳可靠。

(3) 无论是沿着叶轮周向还是径向方向,长短叶片离心泵内固相颗粒浓度波动幅度较普通离心泵更小,浓度分布更均匀,有更好的抗磨损能力。长短叶片离心泵更适合固液两相流物料的输送。

参考文献:

[1] 王秀礼,袁寿其,朱荣生,等.长短叶片离心泵汽蚀性能数值模

- 拟分析及实验研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1154-1157.
- WANG Xiu-li, YUAN Shou-qi, ZHU Rong-sheng, et al. Numerical simulation analysis and experimental study of splitter blade centrifugal pump cavitation performance[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10): 1154-1157.
- [2] 李国威, 王岩, 吕秀丽, 等. 偏置短叶片离心泵内三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 151-155.
- LI Guo-wei, WANG Yan, LV Xiu-li, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow field in centrifugal pump with deviated short splitter vanes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 151-155.
- [3] 崔宝玲, 朱祖超, 林勇刚. 长中短叶片复合叶轮离心泵流动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 74-79.
- CUI Bao-ling, ZHU Zu-chao, LIN Yong-gang. Numerical simulation of inner flow in centrifugal pump with long-mid-short blade complex impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 74-79.
- [4] 陈松山, 连松锦, 周正富, 等. 三副长短叶片叶轮离心泵的湍流数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2014, 17(1): 50-55.
- CHEN Song-shan, LIAN Song-jin, ZHOU Zheng-fu, et al. Numerical simulation of turbulence three pairs of long and short blades of centrifugal pump impeller[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Sciences), 2014, 17(1): 50-55.
- [5] 刘建瑞, 徐永刚, 王董梅, 等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 86-90.
- LIU Jian-rui, XU Yong-gang, WANG Dong-mei, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 86-90.
- [6] 张静, 吴波, 覃正超. 离心泵内固液两相流动的三维数值模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(2): 189-191.
- ZHANG Jing, WU Bo, QIN Zheng-chao, et al. 3-D numerical simulation of solid-liquid two phase flow in centrifugal pump[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2009, 35(2): 189-191.
- [7] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 53-60.
- WANG Jia-qiong, JIANG Wan-ming, KONG Fan-yu, et al. Numerical simulation analysis and wear characteristics of inner flow field with solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 53-60.
- [8] 李国威, 冯新伟, 崔俊奎, 等. 两种叶形离心泵内固液两相流场的对比[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 116-119.
- LI Guo-wei, FENG Xin-wei, CUI Jun-kui, et al. Two kinds of flow field of solid-liquid two-phase flow in the centrifugal pump contrast leaf[J]. The South to North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(2): 116-119.
- [9] 李国威, 崔俊奎, 孙琦, 等. 离心叶轮输送固相颗粒的数值模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 115-118.
- LI Guo-wei, CUI Jun-kui, SUN Qi, et al. Study on numerical simulation of centrifugal impeller conveying solid particles[J]. The South to North Water Diversion and Water Science and Technology, 2011, 9(6): 115-118.
- [10] 罗先武, 季斌, 许洪元. 流体机械设计及优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012, 71-81.
- LUO Xian-wu, JI Bin, XU Hong-yuan. Mechanical design and optimization of fluids[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012, 71-81.
- [11] 黄俊雄, 耿少娟, 吴瑞, 等. 不同叶轮形式下离心泵噪声特性对比研究[J]. 声学学报, 2010, 35(2): 113-118.
- HUANG Jun-xiong, GENG Shao-juan, WU Rui, et al. Comparative study on the noise characteristics of centrifugal pump with the impeller forms[J]. Acta Acustica, 2010, 35(2): 113-118.
- [12] 张玉良, 崔宝玲, 等. 两相流离心泵水利输送性能计算分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 169-176.
- ZHANG Yu-liang, CUI Bao-ling, et al. Performance analysis of two-phase flow centrifugal pump water transport[J], 2012, 48(14): 169-176.
- [13] 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 基于结构化网格的离心泵全流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 50-54.
- LI Xiao-jun, YUAN Shou-qi, PAN Zhong-yong, et al. Numerical simulation of whole flow field for centrifugal pump with structured grids[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 50-54.
- [14] 程文章, 张伟国, 骆滨海, 等. 多级离心泵内部流场数值模拟与节能技术研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 115-117.
- CHENG Yun-zhang, ZHANG Wei-guo, LUO Bin-hai, et al. Research on numerical simulation of inside flow in multistage centrifugal pump and energy saving technology[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 115-117.
- [15] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通CFD工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011, 550-559.
- LI Peng-fei, XU Min-yi, WANG Fei-fei. Proficient in CFD engineering simulation and case of actual combat[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2011, 550-559.
- [16] 连松锦, 陈松山, 周正富, 等. 长短叶片离心泵的三维湍流数值模拟研究[J]. 流体机械, 2011, 39(3): 18-22.
- LIAN Song-jin, CHEN Song-shan, ZHOU Zheng-fu, et al. Numerical simulation of three dimensional turbulent flow splitter blade centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(3): 18-22.

(丛敏编辑)

or does not is determined by its initial location. At a same initial location, the drift will first increase and then decrease with an increase of the diameter of the particle and quickly increase with an increase of the intensity of the acoustic field. In a certain time duration of the action exerted by the acoustic wave, there exists a frequency of the acoustic field corresponding to the maximum drift. In the beginning, such a frequency value meets the condition that the non-dimensional relaxation time approximately equals to 1. With an extension of the time duration of the action exerted by the acoustic wave, the frequency value will go down. **Key words:** standing wave, acoustic field, inhalable particle, particle kinetics, drift, influencing factors

长短叶片离心泵内固液两相流场三维数值模拟 = **Three-dimensional Numerical Simulation of the Solid-liquid Two-phase Flow Field Inside a Centrifugal Pump Installed with Long and Short Blades** [刊, 汉] GUO Ren-ning, XIAO Chun-yan, LI Guo-wei (College of Mechanical Engineering, Liaoning Engineering Technology University, Fuxin, China, Post Code: 123000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(1) . - 87 - 92

To analyze the law governing the flow field and flow inside the impeller of a centrifugal pump installed with long and short blades when conveying a solid-liquid two-phase flow, the software Fluent was used to conduct a numerical simulation of the two-phase flow field inside a centrifugal pump installed with commonly-used blades and one installed with long and short blades respectively and contrast and analyze the law governing the distribution of the total pressure, static pressure and solid phase particle concentration. It has been found that the variation laws of the static pressure and total pressure are both identical no matter whether in a common centrifugal pump or in a centrifugal pump installed with long and short blades, both existing growth tendency along the out-going flow direction and arriving at their maximum values at the outlet of the impeller. The solid-phase particle concentration in the centrifugal pump installed with long and short blades is relatively small, thus conspicuously enhancing the wear-resistant performance of the pump. Compared with the common pumps, the zone with a high particle concentration in the flow passage of the impeller of the centrifugal pump installed with long and short blades conspicuously becomes small, thus securing a more smooth and stable operation. The particle distribution in the centrifugal pump installed with long and short blades is more uniform, therefore the flow loss will greatly decrease and the flow state can be better. **Key words:** long and short blade, centrifugal pump, solid-liquid two-phase flow, flow field, numerical simulation