

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.14.0146



螺旋离心泵固液两相非定常 流动诱导力特性



张钊

张钊¹, 苏敏², 韩伟¹, 李仁年¹, 权辉¹, 黎义斌¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用雷诺平均 N-S 方程, 结合滑移网格技术对 150 × 100LN-32 型螺旋离心泵进行了固液两相非定常流动的数值计算, 给出了在不同固相体积分数下蜗壳出口面的压力脉动、叶轮径向力、叶轮轴向力以及作用在叶轮上扭矩的分布规律, 并分析了固相体积分数的变化对其大小和方向的影响。结果表明, 不同固相体积分数对蜗壳出口面压力、作用在叶轮上的扭矩、轴向力和径向力在 1 个周期内的变化趋势和力的方向没有影响, 但各个力的大小随着固相体积分数的增加而增大; 蜗壳内壁各监测点的压力在 1 个旋转周期内呈波动状态, 并且波动趋势明显不同, 这与各监测点的位置和叶轮与蜗壳之间的干涉作用有关, 随着叶轮的旋转, 在螺旋叶片的作用下, 全流道内的压力顺着蜗壳内壁沿叶轮旋转的方向逐渐增大; 固相体积分数的改变对蜗壳内各监测点的压力脉动趋势影响较小, 固相体积分数的增加使得各监测点的压力值随着固相体积分数的增加而增加, 但是固相体积分数变化对蜗壳表面压力波动的幅值影响较小。

关键词: 螺旋离心泵; 固液两相流; 非定常; 诱导力**中图分类号:** TK7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)04-0296-05

张钊, 苏敏, 韩伟, 等. 螺旋离心泵固液两相非定常流动诱导力特性[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(4): 296-300.

Zhang Zhao, Su Min, Han Wei, et al. Inducted force characteristics of solid-liquid two-phase unsteady flow in screw centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(4): 296-300. (in Chinese)

Inducted force characteristics of solid-liquid two-phase unsteady flow in screw centrifugal pump

Zhang Zhao¹, Su Min², Han Wei¹, Li Rennian¹, Quan Hui¹, Li Yibin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Numerical simulation of solid-liquid two-phase unsteady flow in the 150 × 100LN-32 screw centrifugal pump was simulated by using unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equations and moving mesh. The distributions of the pressure at volute outlet, radial force, axial force and total moment were presented and the influence of different solid-volume fractions on the value and direction of inducted force. The results show that different solid-volume fractions have no effect on the trend and direction of pressure at volute, radial force, axial force and total moment during one period, but the values of inducted forces increase with the solid-volume fraction increasing. The pressure on the monitoring points have fluctuations with different trends during one period, which depends on the direction of the

收稿日期: 2014-09-11; 网络出版时间: 2015-04-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150422.1028.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079066, 51209113)

作者简介: 张钊(1973—), 男, 甘肃靖远人, 助理研究员(zhangwang_zsc@163.com), 主要从事水力机械多相流动理论研究。
苏敏(1979—), 女, 甘肃兰州人, 讲师(通信作者, hanwei@lut.cn), 主要从事水力机械内部流动控制研究。

monitoring points and the interaction of impeller and volute. With the rotation of the impeller, the pressure in the whole passage is further increased in the direction of the impeller rotation with the effect of impeller; different solid-volume fractions have no effect on fluctuation trend of monitoring points, but the values of pressure on monitoring points increase with the solid-volume fraction increasing.

Key words: screw centrifugal pump; solid-liquid two-phase flow; unsteady; induced force

螺旋离心泵是一种具有较宽流道的特殊叶片泵,结构和性能上兼具容积泵和叶片泵的特征.叶片螺旋段具有导向和螺旋推进作用,叶片离心段具有离心泵和混流泵的能量转换作用^[1-2].相比传统的离心式和旋流式杂质泵,螺旋离心泵输送含有大颗粒、长纤维污水以及鱼、水果、蔬菜等易损介质或高黏度流体时,在抗堵塞、耐磨和效率等方面具有无可比拟的优势.近年来,螺旋离心泵也被广泛应用于输送含有较高含气量的流体介质.在含气量体积分数达到40%时,虽然螺旋离心泵产生强烈振动,但仍然能正常工作^[3].由于单叶片螺旋离心泵叶轮结构上的非对称性,其内部流动同样会诱导周期性的非对称作用力,导致叶轮和蜗壳产生较大脉动的轴向力和径向力,进而影响到该类型泵的安全稳定运行,同时也对螺旋离心泵的优化设计提出了挑战.

对于泵内流动诱导力的研究,国内外也进行了很多理论和试验方面的研究.祝磊等^[4]采用SST模型对具有不同类型隔舌的离心泵进行了非稳态数值计算,获得了作用在叶轮上的径向力特性以及离心泵内的压力脉动特性;王春林等^[5]采用大涡模拟方法计算了核主泵内部流场压力脉动情况,得出压力脉动频率主要与叶轮转频有关;吴登昊等^[6]通过优化叶片几何参数,发现叶频及其谐波是压力脉动的主要激励频率;肖若富等^[7]研究了双蜗壳式双吸泵隔板结构对叶轮径向力的影响,提出了隔板结构的最优设计模型;成立等^[8]研究了叶片旋转交互作用引起的流体诱导水压力,得出轴上径向作用力的频率与工况有关.在国外,Tanaka等^[9-10]和Okamura等^[11]也做了泵诱导力相关的试验和CFD预测,但都是基于清水介质,由于螺旋离心泵主要用于输送固液多相流,固液两相介质对螺旋离心泵流动诱导力影响的研究成果还很少.

文中基于固液两相非定常流动的数值模拟方法,研究固液两相流工况下叶轮与蜗壳耦合作用产生的压力脉动,分析非定常情况下固相体积分数对螺旋离心泵径向力和轴向力的影响,为螺旋离心泵的优化设计和运行提供依据.

1 模型参数及网格划分

螺旋离心泵模型泵型号为150×100LN-32,其额定流量为165 m³/h,扬程为32 m.建立实体三维几何模型如图1所示.



图1 三维几何模型

Fig. 1 3D geometrical model

利用ICEM对其整体分成3个部分进行网格划分,包括进口区域、叶轮区域和蜗壳区域,并进行网格无关性检查,划分的网格总数为582 448,如图2所示.

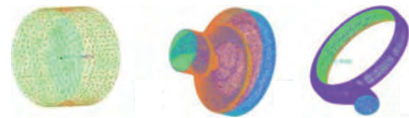


图2 计算网格模型

Fig. 2 Computational grid model

2 数值计算方法

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[3-5]、雷诺时均N-S方程、混合多相流模型^[12]和滑移网格技术来计算螺旋离心泵内固液两相非定常流动.先进行定常计算,在保证计算达到收敛精度后进行非定常计算,以此来保证非定常模拟的稳定性与精度.定义叶轮旋转1周为72个非定常计算时间步长,叶轮旋转1周为1个计算周期.

3 计算结果与分析

3.1 固相体积分数对蜗壳出口面压力的影响

为了分析固相体积分数对螺旋离心泵特性的影响规律,分别选取清水以及固相体积分数 C_V

为 5%、10%、20% 和 30% 这 5 个工况进行非定常数值计算。其中固相颗粒中值粒径为 0.076 mm, 均值密度为 2 650 kg/m³。图 3 为 1 个计算周期内蜗壳出口压力脉动 p 的变化情况, 其中 φ 为叶轮相位角。

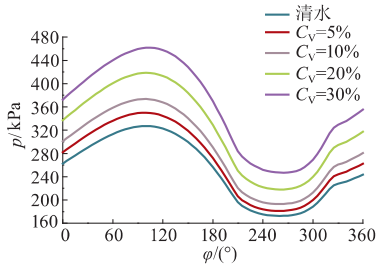


图 3 不同固相体积分数下蜗壳出口面压力对比图
Fig. 3 Pressure at volute outlet under different conditions

从图 3 中可以看出: 1 个计算周期内蜗壳出口压力脉动均按类正弦波形式变化, 压力脉动的幅值随着固相体积分数的增加而增大, C_v 为 5%、10%、20%、30% 工况的蜗壳出口面压力的幅值与清水工况相比分别增加了 7.3%、14.6%、28.6% 和 41.8%, 但压力脉动的波长几乎不受影响。这是由于蜗壳出口压力主要来自于叶轮旋转做功, 介质密度性质的改变只是改变了螺旋离心泵叶轮功-能转换的大小程度, 而不能改变该型叶轮的功-能转换周期。

3.2 不同体积分数下叶轮径向力和轴向力

图 4、5 分别为绝对坐标系下 1 个计算周期内不同固相体积分数对作用在叶轮上的径向力和轴向力矢量分布图, 其中 F_x 、 F_y 分别为 x 轴和 y 轴径向力, F_a 为轴向力。

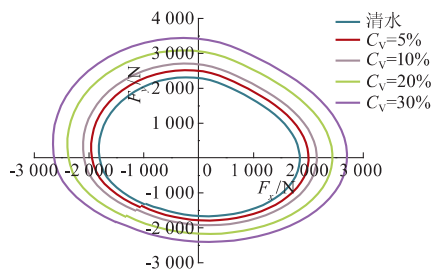


图 4 不同固相体积分数下径向力矢量图
Fig. 4 Radial force on impeller under different conditions

图 4 中闭合曲线上任意一点相对坐标原点的大小和指向均表示一个计算节点下对应的径向力大小和方向, 从图 4 可以看出叶轮径向力在 1 个计算周期内变化呈类椭圆状分布, 径向力的矢径与叶轮最大外径的夹角接近 90°, 在叶轮转向上滞后最大外径 90°; 径向力的大小随着固相体积分数的增加

而增大, 但固相体积分数的改变对径向力矢量方向几乎没有影响。

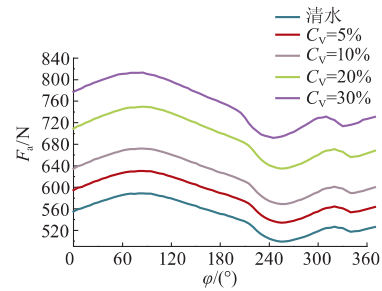


图 5 不同固相体积分数下的轴向力对比图
Fig. 5 Axial force on impeller under different conditions

从图 5 可看出叶轮上的轴向力在 1 个周期内存在波动, 随着固相体积分数的增加轴向力逐渐增大, 但是轴向力的变化趋势不随固相体积分数的变化而变化。 $C_v = 5\%$ 、10%、20%、30% 工况的轴向力的幅值与清水工况相比分别增加了 7.1%、14.3%、27.4% 和 38.1%。

3.3 不同体积分数下的叶轮扭矩

图 6、7 分别表示了 1 个旋转周期内不同固相体积分数下叶轮上的扭矩 T 与相位角 φ 的关系以及当扭矩达到最小值时叶轮的位置。

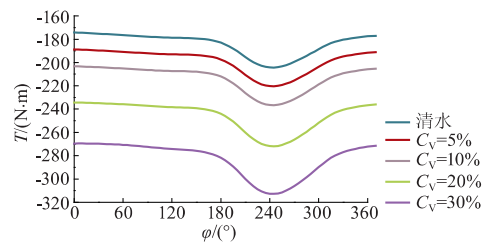


图 6 不同固相体积分数下的扭矩对比图
Fig. 6 Total moment on impeller under different conditions

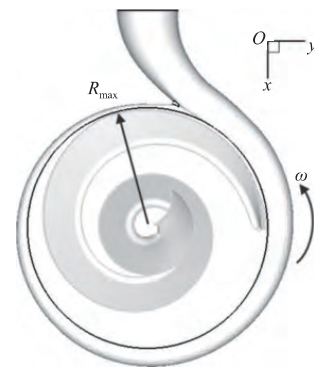


图 7 扭矩达到最小值时叶轮的位置
Fig. 7 Position of impeller at the minimum value of total moment

从图 6 中可以看出固相体积分数对叶轮扭矩的

影响与对径向力、轴向力的影响大致相同,即叶轮扭矩的大小随着固相体积分数的增加而增大,叶轮所受扭矩的变化趋势并没有受固相体积分数改变的影响.从图 7 可以得出,在叶轮的最大半径处刚好转过隔舌的时刻,由于此时叶轮已通过容积作用把主要能量传递到蜗壳出口,整个流道内压力达到 1 个周期内的最小值,叶轮受到的扭矩和输出功率均达到最小.

4.5 蜗壳壁面周向压力脉动

为了分析蜗壳内表面上的压力脉动特性,在蜗壳内表面沿圆周方向布置了 7 个测点^[12]如图 8 所示,监测点 a, b, c, d, e, f 分别布置在沿叶轮旋转方向与隔舌所在截面夹角为 $12^\circ, 57^\circ, 147^\circ, 180^\circ, 237^\circ, 327^\circ$ 的位置,监测点 g 刚好位于蜗壳轴向的中截面上.

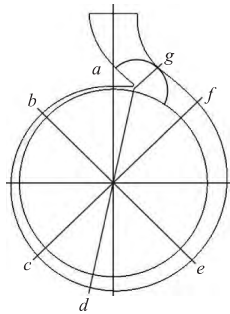


图 8 蜗壳内壁面监测点的布置
Fig. 8 Distribution of monitoring points

图 9a 显示的是清水工况下第 2 周期各监测点的压力波动,点 A、点 B 所指的是当监测点 f 、监测点 b 为所有监测点中压力最大值时叶轮转过的角度,如图 10, 11 所示.

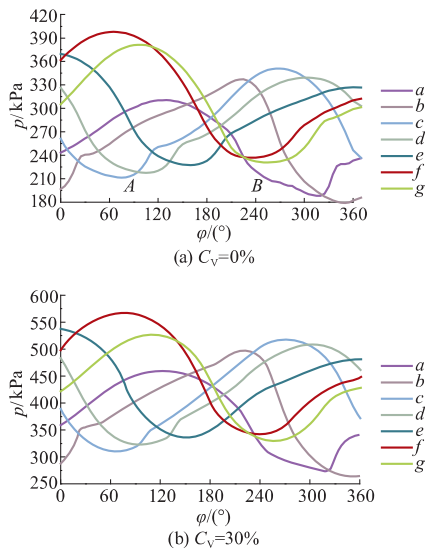


图 9 监测点的压力脉动
Fig. 9 Pressure fluctuation on every monitoring point

图 9b 为固相体积分数达到 0.3 时 1 个计算周

期内各监测点的压力脉动,蜗壳表面上压力脉动幅值随着固相体积分数的增加而增大,蜗壳内表面压力的脉动变化趋势并没有发生较明显的改变.这是由于颗粒固相体积分数的增加只是增加了介质的惯性力,而蜗壳内的压力脉动主要是由叶轮叶片与蜗壳之间相互运动所产生的动静干涉所引起的.

从图 9 中还可以看出受监测点的位置以及蜗壳与单叶片叶轮之间干涉作用的影响,不同的监测点在 1 个周期内压力脉动的趋势并不相同,这与普通的轴对称离心泵有所不同.结合图 10,蜗壳表面点 f 压力明显高于其他点,由此可以得出,随着叶轮的旋转,叶轮与蜗壳形成的封闭空间,通过在积聚-释放的形式将叶轮对输送介质所做的功传递到蜗壳扩散段,形成了较普通离心泵更为明显的能量输出周期性,螺旋离心泵叶轮与蜗壳相互作用形成的容积泵特性被表征出来.图 11 表示的是监测点 b 压力最高时叶轮在蜗壳内所处的位置,此时的叶轮刚把上 1 个周期流道内的集聚的能量传递到了蜗壳扩散段.

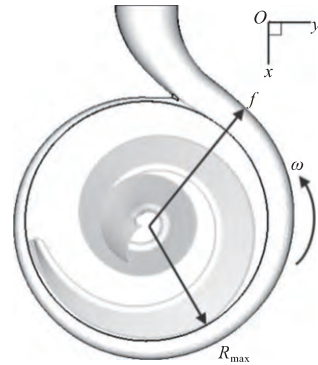


图 10 点 f 压力值最高时叶轮的位置
Fig. 10 Position of impeller at the maximum value of pressure on point f

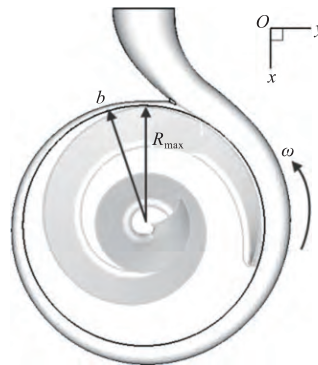


图 11 点 b 压力值最高时叶轮的位置
Fig. 11 Position of impeller at the maximum value of pressure on point b

4 结 论

通过对不同固相体积分数下的螺旋离心泵内非定常流动的数值分析,得出如下结论:

1) 固液两相流介质中的固相体积分数对蜗壳出口面压力、作用在叶轮上的扭矩、轴向力和径向力在 1 个周期内的变化趋势和诱导力的方向影响不大,叶轮上诱导力数值随着固相体积分数的增加而增大。

2) 当叶轮的最大半径处刚经过隔舌时,作用在叶轮上的扭矩在 1 个周期内达到最小值。

3) 蜗壳内壁上的压力在 1 个旋转周期内呈波动状态,并且不同位置的波动趋势明显不同。

4) 在单螺旋叶片与蜗壳的联合作用下,蜗壳扩散管内的压力变化表征了螺旋离心泵具有明显的容积泵周期性能量输出特性。

参考文献(References)

- [1] 李仁年,韩伟,李琪飞,等. 间隙对螺旋离心泵性能影响的预测及试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 79-81.
Li Rennian, Han Wei, Li Qifei, et al. Prediction and experiment about the effect of the clearance on performance of screw centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 79-81. (in Chinese)
- [2] Han Wei, Ma Wei, Li Rennian, et al. The numerical analysis of radial thrust and axial thrust in the screw centrifugal pump [J]. Procedia Engineering, 2012, 31: 176-181.
- [3] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [4] 祝磊,袁寿其,袁建平,等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 21-26.
Zhu Lei, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation on pressure fluctuations and radial hydraulic forces in centrifugal pump with step-tongue [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 21-26. (in Chinese)
- [5] 王春林,易同祥,吴志旺,等. 混流式核主泵非定常流场的压力脉动特性分析[J]. 动力工程, 2009, 29(11): 1036-1040.
Wang Chunlin, Yi Tongxiang, Wu Zhiwang, et al. Analysis on pressure fluctuations of unsteady flow field in mixed-flow main coolant pump [J]. Power Engineering, 2009, 29(11): 1036-1040. (in Chinese)
- [6] 吴登昊,袁寿其,任芸,等. 叶片几何参数对管道泵径向力及振动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(4): 277-283.
Wu Denghao, Yuan Shouqi, Ren Yun, et al. Effects of blade geometry parameters on radial force and vibration of in-line circulator pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(4): 277-283. (in Chinese)
- [7] 肖若富,吕腾飞,王福军. 双蜗壳式双吸泵隔板结构对叶轮径向力的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 40(9): 85-88.
Xiao Ruofu, Lü Tengfei, Wang Fujun. Influence of rib structure in double-volute centrifugal pumps on the impeller radial force [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 40(9): 85-88. (in Chinese)
- [8] 成立, Bart P M van Esch, 刘超, 等. 喷水推进混流泵叶片径向力[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 636-640.
Cheng Li, Bart P M van Esch, Liu Chao, et al. Radial forces of waterjet propulsion mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(6): 636-640. (in Chinese)
- [9] Tanaka K, Kobayashi T. Thrust prediction in screw-type centrifugal pump [C]. Proceedings of 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2003: 621-626.
- [10] Tanaka K, Arai M, Ikeo S, et al. Radial thrust in screw-type centrifugal pump [J]. Turbomachinery, 1989, 17(4): 215-220. (in Japanese)
- [11] Okamura T. Radial thrust in centrifugal pump with a single-blade impeller [J]. Bulletin of JSME, 1980, 23(180): 895-901. (in Japanese)
- [12] 马薇. 螺旋离心泵内固液两相非定常流动的数值计算与分析[D]. 兰州: 兰州理工大学能源与动力工程学院, 2012.

(责任编辑 徐云峰)