

离心泵内部两相流模拟及其叶轮的流固耦合分析

章 城¹, 徐圣永¹, 吕兆聪¹, 周迪锋², 贺思琪³

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进技术教育部重点实验室, 杭州 310014; 2. 上海工业自动化仪表研究院, 上海 200235; 3. 绍兴市信息管网有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 应用 N-S 方法和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 采用 SIMPLE 法, 对离心泵内部三维固液两相流进行了模拟计算。得到不同固相(颗粒)浓度下的离心泵内部压力分布和内部颗粒浓度分布情况, 并且基于流固耦合原理对离心泵叶轮进行结构分析, 采用多物理场协同仿真平台 ANSYS Workbench, 通过单向流固耦合技术实现离心泵叶轮结构的仿真计算, 获得了离心泵叶轮在同一工况、不同固相浓度下的等效应力及变形情况。计算结果表明, 蜗壳中压力和固相体积浓度分布规律都是从进口处随蜗壳半径增大而增大, 并且在隔舌处出现浓度分布不均匀的现象。各种计算条件下, 叶轮的等效应力和总变形情况变化趋势基本上相同, 叶轮的应力分布都不均并且存在局部应力集中, 固相体积浓度越大离心泵叶片的变形也越严重。

关键词: 离心泵; 叶轮; 固液两相流; 流固耦合; 数值模拟

中图分类号: TH 311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 03- 0506- 04

Numerical simulation of two phase flow in centrifugal pump and analysis of fluid-structure interaction of the impeller

ZHANG cheng¹, XU Sheng yong¹, LYU ZHAO cong¹, ZHOU Di feng², HE Si qi³

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Shanghai Institute of Process Automation Instrumentation, Shanghai 200235, China; 3. Shaoxing Information Network Co., Ltd, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Based on the N-S equation and the traditional $k-\epsilon$ turbulent model, the SIMPLE method was applied to simulate the three dimensional solid liquid two phase flow field in the centrifugal pump. The distributions of internal pressure and particle concentration were obtained under different concentrations of the solid phase in the centrifugal pump. The structure of centrifugal impeller was analyzed based on the fluid-structure interaction theorem. The multi physical simulation platform ANSYS Workbench was used, and the numerical simulation of centrifugal impeller structure was conducted based on the one way fluid-structure interaction technology. The equivalent stress and deformation under the different concentrations of the solid phase and same working conditions were determined. The results showed that the volute pressure and solid volume concentration increase with the increasing of spiral radius from the entrance, and the uneven distribution of regional concentration appears at the tongue. Under all the calculation conditions, the variation trends of equivalent stress and total deformation of the impeller are basically the same. The stress distribution of the impeller is uneven and local stress concentration occurs. The greater the solids volume concentration, the higher the deformation of centrifugal pump impeller.

Key words: centrifugal pump; impeller; solid liquid two phase flow; fluid structure interaction; numerical simulation

离心泵在水利运输、农田排灌、冶金、城市给排水、轻工、石油化工和船舶工业等行业中都有广泛的应用^[1-2]。离心泵的运行过程中内部流动非常复杂, 首先流体载荷对叶轮和蜗壳变形有一定的影响^[3-4], 同时在实际水利输送过程中不能完全输送不含固体颗粒的介质, 故使得叶轮的变形形式更

为复杂, 而离心泵的磨损和变形主要为工作介质中有相当硬度的固体颗粒对部件表面冲击破坏作用的累积效应^[5-7]。因此研究含固体颗粒的介质对泵内部流场分析及叶轮结构变形具有重要意义。

目前, 针对离心泵内部流场的研究已经有一定的成果,

收稿日期: 2014-09-18 修回日期: 2015-04-08 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1556.024.html>

作者简介: 章 城(1989-), 男, 浙江苍南人, 主要从事计算流体动力学和流体机械数值模拟研究。E-mail: zjutzc@126.com

流固耦合的分析在近些年也有些突破,但是离心泵流场的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics)分析主要考虑单一相流体对固体的影响,并未考虑固液两相流情况下的流体对固体的影响^[8-15]。因此在含有颗粒杂质工作环境下的离心泵叶轮进行流固耦合数值模拟分析,对离心泵叶轮受到固相颗粒的不断冲刷而磨损和变形的研究十分有意义。

本文采用 ANSYS Workbench 软件中流动分析及静态结构分析模块,采用单向流固耦合方法对离心泵进行流固耦合数值模拟,通过对离心泵在不同颗粒浓度下固液两相流的计算,得到叶轮所承受的流场压力载荷,进而对叶轮进行结构分析,获得不同条件下离心泵叶轮的应力状态及变形情况。

1 离心泵的基本参数与网格划分

本文选用 ZA80-50-160 型泵作为研究对象,主要性能参数为:流量 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=34.13\text{ m}$,转速 $n=2\,950\text{ r}/\text{min}$,叶轮为闭式叶轮,叶片数为 6,叶轮直径 169 mm,进口直径 80 mm,出口直径 50 mm。叶轮的材料为不锈钢,密度为 $7\,770\text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量 216 GPa,泊松比为 0.28。

采用 GAMBIT 网格划分软件对离心泵水体部分进行非结构网格划分,网格单元总数为 206 352,节点数为 62 268,运用 ANSYS Workbench 的自带网格划分软件,对结构部分进行网格划分,计算网格单元数为 40 249,节点数为 72 867,水体部分和结构部分网格见图 1。

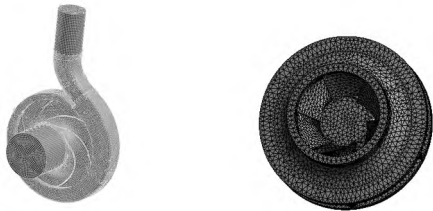


图 1 离心泵流体部分和叶轮结构部分网格
Fig. 1 Grids of the fluid section of centrifugal pump and impeller structure

2 流场模拟

将划分好网格后的离心泵水体部分导入到流场分析软件 FLUENT 对离心泵内部流场进行数值模拟。假设流动为不可压,基于雷诺时均方法,采用 SIMPLE 算法及基于压力基稳态求解器,定常计算的湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,多相流模型采用 Mixture 模型,固相颗粒选择密度为 $2\,500\text{ kg}/\text{m}^3$,粒径 $d=0.2\text{ mm}$ 的沙粒。边界条件设定:采用均速进口、压力出口条件,近避区域采用标准壁面函数处理。采用多参考坐标系模型(MRF)方式处理旋转坐标系与静止坐标系下流动参数的转换问题。

3 流场计算结果及分析

经过在设计流量,相同固相密度,相同固相粒径,固相体积浓度分别为 10%、15%、20% 中的数值模拟分析,模拟方案见表 1。将流场分析结果进行对比。

表 1 模拟方案

Tab. 1 Simulation schemes				
参数	体积浓度 C (%)	粒径 d / mm	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流量 Q / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
数值	10、15、20	0.2	2 500	50

由图 2 可以看出沿着流道进口到出口,静压分布逐渐增大,且分布比较均匀,叶轮的静压变化规律为从叶轮进口到出口逐渐增大,蜗壳中压力分布规律也是从进口处随蜗壳半径增大而增大,最大出现在蜗壳出口处,且在隔舌处出现压力突变。在设计流量,相同粒径,固相体积浓度越大离心泵内部压力越大。

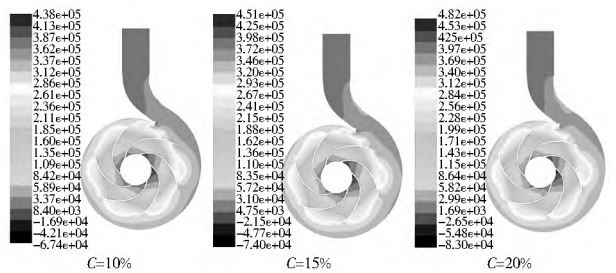


图 2 不同固相浓度下离心泵内部流场静压分布云图(单位: Pa)

Fig. 2 Contour of static pressure distribution with different solid phase volume fractions in the internal flow field of centrifugal pump (Unit: Pa)

由图 3 分析可知,蜗壳中固相浓度分布是与蜗壳半径成正比的,近蜗壳出口处固相体积浓度明显大于其他地方,最大浓度出现在蜗壳最大半径处。浓度分布不均匀的区域出现在隔舌处。

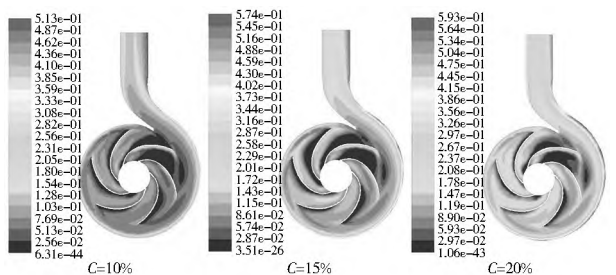


图 3 不同固相浓度下离心泵内部固相颗粒浓度分布云图
Fig. 3 Contour of particle distribution with different solid phase volume fractions in the internal flow field of centrifugal pump

叶轮的固相浓度值从叶片进口处向叶片出口区域逐渐降低,浓度最小值出现在叶片出口近隔舌部分区域,颗粒以一定进口速度进入离心泵流道内,在流动过程中会有部分颗粒在惯性力作用下有向叶轮工作面运动的趋势。

4 离心泵叶轮结构流固耦合分析

基于流固耦合原理对离心泵叶轮进行结构分析,采用多物理场协同仿真平台 ANSYS Workbench,通过单向流固耦合技术实现离心泵叶轮结构的仿真计算。将 FLUENT 计算得到的流体仿真结果完美地转换到静态结构分析模块中。

结构部分边界条件:对轴承处设置轴承约束,定义叶轮转速,将叶轮前后盖板面和叶片表面定义为流固耦合相互作用面;叶轮所受到的载荷包括惯性力、离心力、重力和流体对

叶轮的压力。由于叶轮转速较大,惯性大,而且叶面承受的压力也较大,所以叶轮自身的重力可以忽略不计。

在标准工况 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 下,对不同固相体积浓度中离心泵叶轮进行等效应力及变形情况分析。

5 流固耦合计算结果分析

经过对叶轮结构的流固耦合分析,对比在设计流量,相同固相密度,相同固相粒径,固相体积浓度 C_V 分别为 10%、15%、20% 中的叶轮应力及变形情况。

图 4 中分布显示了 3 种不同固相体积浓度下叶轮等效应力与总变形情况,并将模拟结果统计见表 2。

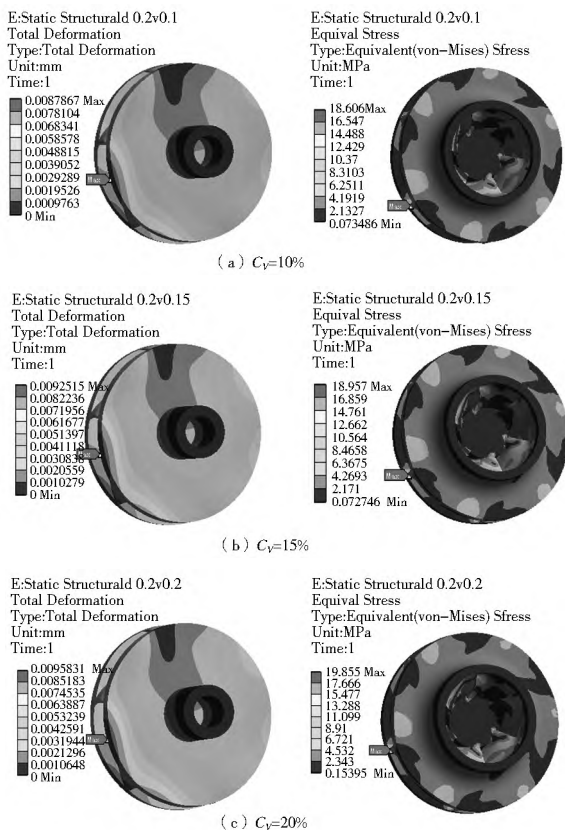


图 4 不同固相体积浓度下叶轮等效应力与总变形

Fig. 4 The equivalent stress and total deformation of impeller with different solid phase volume fractions

表 2 模拟结果

Tab. 2 Simulation results

体积浓度 $C(\%)$	10	15	20
最大变形量/mm	0.008 786 7	0.009 251 5	0.009 583 1
最大应力/MPa	18.606	18.957	19.855

从图 4 可知,从总体上来看,该型号离心泵叶轮在不同的浓度下的等效应力和总变形情况变化趋势基本上相同。并且叶轮的最大等效应力和总变形都随着固相浓度的增大而增大。

离心泵叶轮总体变形量小,设计符合要求,总体上变形量随半径的增大而增大,最大总变形出现在叶轮的后盖板边缘上,在固相体积浓度为 10%、15%、20% 时分别为 0.008 786 7 mm、0.009 251 5 mm、0.009 583 1 mm,并且在轮毂处应力及变形在各种固相浓度下都较小。

叶轮的受力分布不均,在叶片进口与前后盖板交接处和盖板边缘与叶片交接处都存在应力集中,故此叶轮是最容易破坏也是较危险的部分。叶轮的最大等效应力随浓度的增大而增大,在固相浓度为 10%、15%、20% 时分别为 18 606 MPa, 18 957 MPa, 19 855 MPa。

出现上述这些情况的主要原因是由于叶轮所受到的载荷主要为惯性力、离心力、流体对叶轮的压,多个压力的作用使得叶轮受力不均,而离心力和惯性力都使叶轮的受力从中心到外轮廓逐渐变大,并结合之前流体分析结果可知叶轮流道压力由进口到出口逐渐增大,故叶轮的最大变形和最大应力都在叶轮的最外边缘上。

6 结论

(1) 蜗壳和叶轮中压力和固相体积浓度分布规律都是从进口处随半径增大而增大,蜗壳中最大值都是出现在蜗壳右侧最外缘处。对蜗壳的改进和优化设计时应对此着重考虑。

(2) 近蜗壳出口处固相体积浓度明显大于其他地方,蜗壳中固相浓度分布是与蜗壳半径成正比的,并且浓度分布不均匀的区域出现在隔舌处,从而可知隔舌处受到固体颗粒冲击磨损最为严重。

(3) 叶轮的最大等效应力和总变形都随着固相浓度的增大而增大,为保证离心泵正常工作,应尽量避免在含有过高杂质的流体工作环境下运行。

(4) 叶轮的受力分布不均,在叶片进口与前后盖板交接处和盖板边缘与叶片交接处都存在应力集中,故此叶轮是最容易破坏也是较危险的部分,此处最好在设计上增加强度。离心泵叶轮总体变形量小,设计符合要求,总体上变形量随半径的增大而增大,最大总变形出现在叶轮的后盖板边缘上。

参考文献 (References):

[1] 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. (in Chinese))

[2] 李国威,崔俊奎,孙琦,等.离心泵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. Numerical simulation on solid phase particle transport in centrifugal pump impellers[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 115-118. (in Chinese))

[3] 江伟,郭涛,李国君,等.离心泵流场流固耦合数值模拟[J].农业机械学报,2012,43(9):53-56. (JIANG Wei, GUO Tao, LI Guo jun, et al. Numerical calculation on flow field in centrifugal pump based on fluid structure interaction theorem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 53-56. (in Chinese))

[4] 刘厚林,徐欢,吴贤芳,等.流固耦合作用对离心泵内外特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(13):82-87. (LIU Hou lin, XU Huan, WU Xian fang, et al. Effect of fluid structure inter-

- action on internal and external characteristics of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 82-87. (in Chinese)
- [5] Spence R, Amaral Teixeira J. A CFD parameter study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump[J]. Computer & Fluids, 2009, 38(6): 1243-1257.
- [6] 李国威, 冯新伟, 崔俊奎, 等. 两种叶型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. Comparative study of solid-liquid two-phase flow field in centrifugal pump with two types of vanes[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 116-119. (in Chinese))
- [7] 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 54-59. (LIU Juan, XU Hong yuan, TANG Shu, et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 54-59. (in Chinese))
- [8] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 99-103. (WANG yong, LIU Hou lin, YUAN Shou qi et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 99-103. (in Chinese))
- [9] 王志坚, 佟亮, 李璐璐, 等. 基于 CFD 的离心泵内部三维流动数值模拟和性能预测[J]. 流体机械, 2012, 40(6): 14-18. (WANG Zhi jian, TONG Liang, LI Lu lu, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow in centrifugal pump and performance prediction based on CFD[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(6): 14-18. (in Chinese))
- [10] 王洋, 徐小敏, 张翔. 离心泵内低浓度固体颗粒运动的数值模拟[J]. 流体机械, 2009, 37(2): 24-31. (WANG Yang, XU Xiaomin, ZHANG Xiang. Numerical simulation for the motion of dilute solid particles in centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(2): 24-31. (in Chinese))
- [11] 张淑佳, 李贤华, 朱保林, 等. k-ε 湍流模型用于离心泵数值模拟的适用性[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 238-242. (ZHANG Shu jia, LI Xian hua, ZHU Bao lin, et al. Applicability of k-ε eddy viscosity turbulence models on numerical simulation of centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 238-242. (in Chinese))
- [12] 谭磊, 曹树良, 桂绍波, 等. 有前导叶离心泵空化性能的试验及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 177-182. (TAN Lei, CAO Shu liang, GUI Shao bo, et al. Experiment and numerical simulation of cavitation performance for centrifugal pump with inlet guide vane[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 177-182. (in Chinese))
- [13] Westra R W, Broersma L, Andel K V, et al. PIV measurement and CFD computations of secondary flow in a centrifugal pump impeller[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6): 611-617.
- [14] 牛权. 基于拟序结构的离心泵内空泡运动规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 106-109. (NIU Quan. Research of bubble motion in the centrifugal pump based on coherent structure[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 106-109. (in Chinese))
- [15] 田辉, 郭涛, 孙秀玲, 等. 离心泵内部动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 92-95. (TIAN Hui, GUO Tao, SUN Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 92-95. (in Chinese))

(上接第 475 页)

- [10] Xu Weilin, Liao Huasheng, Yang Yongquan and Wu Chigong. Turbulent flow and energy dissipation in plunge pool of high arch dam[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(4): 471-476.
- [11] 刘沛清, 李福田. 高坝下游水垫塘内典型流态演变问题探讨[J]. 水利学报, 2001, 32(10): 38-43. (LIU Peiqing, LI Futian. Flow pattern evolution in plunge pools of high dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(10): 38-43. (in Chinese))
- [12] 刘沛清, 李福田, 王颖. 挑跌流水垫塘内流态结构控制参数与冲击压力变化规律实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 25-28. (LIU Peiqing, LI Futian, WANG Yin. Experimental study on controlling parameters of flow in plunge pools and corresponding impact pressure characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 25-28. (in Chinese))
- [13] LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Yongmei. Experiments on the submerged jet in a plunge pool[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 1998, 28(4): 370-377.
- [14] 姜国强, 李炜. 横流中有限宽窄缝射流的涡旋结构[J]. 水利学报, 2004, 35(5): 52-57. (JIANG Guoqiang, LI Wei. Vortex structure of slot turbulent jets in cross-flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5): 52-57. (in Chinese))
- [15] ZHANG Yan, FAN Jingyu, WANG Daozeng. Experimental study for wake vortices of an impinging jet in cross flow[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4): 539-543.
- [16] XU Jinglei, SHA Jiang, LIN Chufeng. PIV experiment research of instantaneous flow characteristics of circular orifice synthetic jet[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2007, 19(4): 453-458.
- [17] Tsikata J M, Tachie M F, Katopodis C. Particle image velocimetry study of flow near trash rack models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135(8): 671-684.
- [18] CHEN Jianguang, ZHANG Jiamin, XU Weilin et al. Particle image velocimetry measurements of vortex structures in stilling basin of multi horizontal submerged jets[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(4): 556-563.
- [19] Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry[J]. Experimental in Fluids, 2005, 39(2): 159-169.