

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.011

叶片空间型面造型对离心泵性能的影响研究

陶仁和¹, 张 勇¹, 陈旭来^{1,2}, 郭 嘉¹, 汪灿飞¹, 吴 飞¹

(1. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江省机电产品质量检测所, 浙江 杭州 310051)

摘要: 为了研究叶片空间型面造型对离心泵外特性、内部流场的影响, 以一台普通离心泵为研究模型, 利用 Cfturbo 软件设计了两种相同设计参数, 不同叶片型面造型的叶轮模型, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对两种模型叶轮离心泵内部流场进行单相定常数值模拟, 并采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对两种叶轮模型离心泵空化性能进行数值模拟, 得到内部流场特征、水力性能。并通过离心泵性能试验对数值模拟结果进行验证。研究表明: 设计工况下, 自由曲面叶片叶轮离心泵的扬程比倾斜直纹面叶片叶轮离心泵高 0.45 m, NPSHR 相同; 通过优化倾斜直纹面叶片叶轮完全可以代替自由曲面叶片叶轮, 降低企业的生产成本。

关键词: 叶片; 型面造型; 外特性; 数值分析;

中图分类号: TH137.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)11-1283-04

Effect of different blade surface profiles on performance of centrifugal pump

TAO Ren-he¹, ZHANG Yong¹, CHEN Xu-lai^{1,2}, GUO Jia¹, WANG Can-fei¹, WU Fei¹

(1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310051 China;

2. Zhejiang Testing & Inspection Institute for Mechanical and Electrical Products Quality, Hangzhou 310051 China)

Abstract: In order to research on effect of different Blade Surface Profiles on Performance and Flow field of centrifugal pump. A common centrifugal pump is analyzed. Two kinds of impeller models with the same design parameters and different Blade Surface Profiles were designed based on Cfturbo software. The standard $k-\varepsilon$ turbulence model were applied to simulate characteristics and The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, homogeneous multiphase model and Rayleigh-Plesset equation were applied to simulate cavitation characteristics of two centrifugal pump models. The flow field characteristics and the hydraulic performance were predicted and compared with experimental results. The result indicated that At the same flow rate, the centrifugal pump of the impeller of 3-D free surface blades was 0.45 meter smaller than he centrifugal pump of the impeller of ruled surface blades and the same NPSHR. The impeller of the free-form blades can be replaced by optimizing the impeller of ruled surface blades in order to reduce the cost of production.

Key words: blade; surface profiles; external characteristic; numerical simulations

0 引 言

离心泵内部流动是非常复杂的三元流动, 在叶轮旋转以及表面曲率的影响之下容易引发流动分离、进口回流、旋转失速等不稳定现象^[1]。到目前为止离心泵叶轮内部真实的流动机理远未被人们所掌握。叶轮作为离心泵的主要做功部件, 其内部流动直接影响泵的性能。由于叶轮的重要性, 研究人员

利用先进的计算流体力学(CFD)方法及一些前沿的实验手段对离心泵叶轮的几何参数对离心泵性能的影响做了大量研究。通过对叶轮几何参数的优化, 改善其水力性能来提高离心泵的性能具有重要的现实意义。

叶片载荷的分布与叶片形状、叶轮的水力性能密切相关^[2]。对于普通离心泵而言, 自由曲面叶片脱模困难, 制造成本高, 由此限制了任意曲面叶片叶

轮的工程应用^[3-4]。因而自由曲面叶片与直纹面叶片之间的转化问题逐步成为近年来工程界的热点问题^[5]。

本文对自由曲面叶片与倾斜直纹面叶片这两个不同空间曲面造型叶片叶轮,通过数值模拟与试验验证相结合的手段来研究叶片空间曲面形状对离心泵性能的影响,为以后离心泵直纹面叶片代替自由曲面叶片增加设计经验。

1 方案设计及模型计算

1.1 方案设计

本文以设计的某一型号普通离心泵为研究对象,该泵的设计参数为流量 $Q_d = 30 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程为 $H_d = 18 \text{ m}$,额定转速 $n = 3\,000 \text{ r}/\text{min}$ 。功率 $P = 3.4 \text{ HP}$ 。

设计两种不同空间曲面叶片叶轮方案:1号方案为自由曲面叶片叶轮,2号方案为倾斜直纹面叶片叶轮。除此以外,两叶轮的其他主要几何参数完全相同。叶轮进口直径 $D_0 = 64 \text{ mm}$,叶轮外径 $D_2 = 124 \text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2 = 11.4 \text{ mm}$,叶片包角 $= 118^\circ$,叶片进口角 $\beta_1 = 16.4^\circ$,叶片出口角 $\beta_2 = 30^\circ$,叶片数 $Z = 6$ 。

两种方案叶片模型如图1所示。

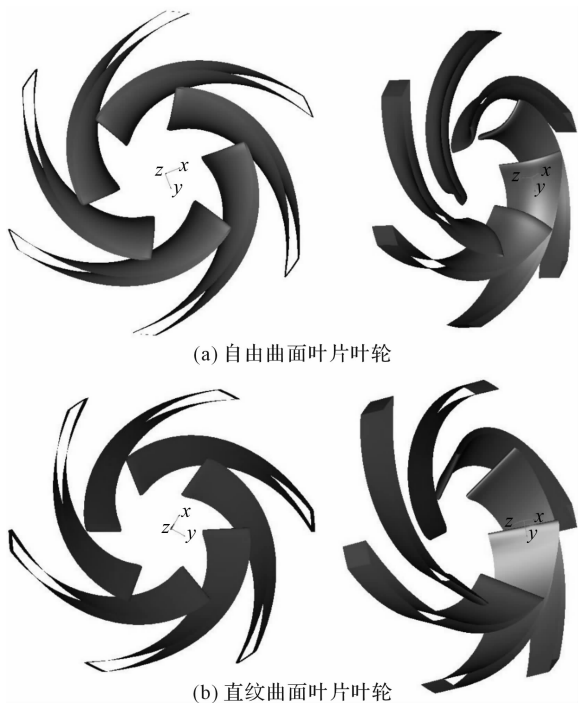
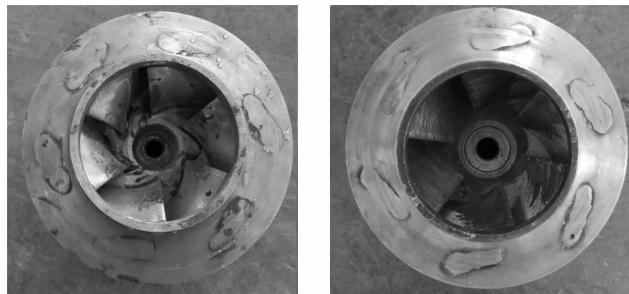


图1 两种方案叶轮模型

两种方案叶轮实物如图2所示。

1.2 模型计算

利用 Cfturbo 软件设计出叶轮与蜗壳,导入到 PRO/



(a) 方案叶轮 (b) 方案叶轮

图2 两种方案叶轮模型

E 软件对模型泵进行最终的三维造型与组装。为了减小进出口边界条件和造型对进口回流的影响,将进水管和出口段作适当延伸^[6]。计算区域包括进水管、叶轮、蜗壳和出口4个水体流道组成,如图3所示。

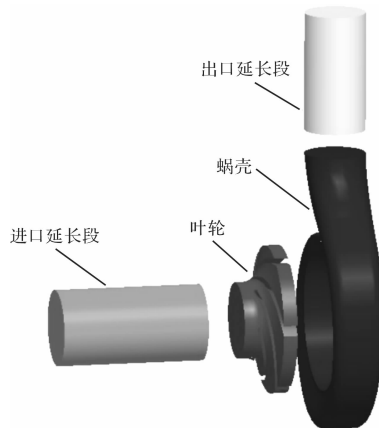


图3 模型泵三维造型计算域水体

2 数值分析方法

2.1 网格无关性分析

采用 ICEM 软件对模型进行四面体混合网格划分,为了验证网格密度变化对计算结果的影响,进行了网格无关性分析。

本文主要对叶轮与蜗壳进行网格加密,得到5种不同网格数的网格,在计算设置条件均相同的情况下,对两个方案模型泵设计工况下进行了数值模拟,结果如表1所示。

表1 网格无关性分析表

方案	TE	H/m	方案	TE	H/m		
1	5 705 166	18.645	1	5 705 729	18.258		
2	6 504 230	18.652	2	6 520 339	18.294		
1号泵	3	7 476 809	18.678	2号泵	3	7 495 154	18.252
4	8 904 295	18.666	4	8 898 545	18.285		
5	10 022 222	18.677	5	10 013 396	18.276		

TE—网格总数,H—计算扬程

由表1数据得出:5种网格数的网格计算模型得到的计算扬程误差在0.2%以内。随着网格数增加,

计算扬程已趋于稳定。综合考虑计算的准确性和经济性,两种方案叶轮最终都选用方案 1 网格,网格数分别为 5 705 166 和 5 705 729。

2.2 湍流模型及边界条件

单相定常数值模拟采用 ANSYS CFX 17.0 全隐式耦合多网格线性求解器,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流方程模型,并对所有变量联立求解,同时求解连续方程和动量方程组。进出口边界条件分别定义为静压进口和质量流出口。叶轮进口与叶轮及叶轮与蜗壳利用冻结转子法 (frozen rotor) 耦合。在 ANSYS CFX17.0 中,采用有限体积法对方程组进行离散,离散过程中的对流项采用高分辨率格式 (high resolution), 湍流数值项采用一阶格式 (first order)。固体壁面为无滑移边界条件。考虑到模型泵叶轮与蜗壳为铝铸快速成型,叶轮与蜗壳等效粗糙度取为 0.025 mm。收敛残差小于 10^{-4} , 计算工况为 $0.6Q_d \sim 1.4Q_d$ 。

在单相定常数值模拟结果为初始值进行设计工况流量点的空化数值模拟。采用修正的 $RNGk-\epsilon$ 湍流方程^[7-8]、均质多相模型和 Rayleigh-Plesset 方程^[9]。设介质的饱和蒸汽压力为 3 574 Pa, 空泡的平均直径为 2×10^{-6} m。进口的空泡体积分数设为 0, 液体水的体积分数设为 1。进口的湍流状态由湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 计算公式分别为:

$$k = 0.005 u^2 \tag{1}$$

$$\epsilon = C^{3/4} k^{3/2} / l \tag{2}$$

式中: u —进口速度; $C = 0.09$; $l = 0.07D_0$

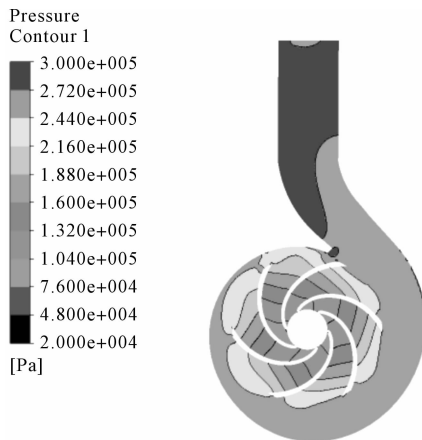
3 计算结果与分析

设计工况静压云图如图 4 所示。

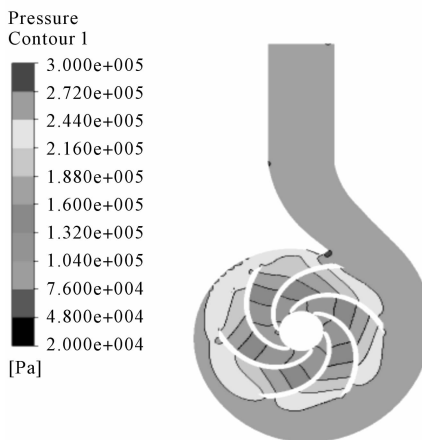
由图 4 可知:叶轮流道内压力从进口到出口逐渐增加,最低压力出现在叶轮进口处且靠近叶片背面,最高压力出现在隔舌处。两模型叶轮内部静压变化梯度相差不大。其中 1 号泵叶轮出口附近相同静压区域大于 2 号泵叶轮出口。蜗壳流场内隔舌附近存在较大的压力梯度,导致隔舌处压力显著增高。其中 1 号泵在隔舌处的静压区域大于 2 号泵。除隔舌外,蜗壳各断面静压较均匀,1 号泵蜗壳出水段压力比 2 号泵蜗壳出水段压力高。

数值模拟外特性曲线对比图如图 5 所示。

由图 5 可知:两模型泵的 $H-Q$ 曲线、 $\eta-Q$ 曲线和 NPSH 曲线变化趋势基本一致。 $H-Q$ 曲线、 $\eta-Q$ 曲线偏大流量方向变化稍微增大。设计点工况 1 号泵扬程比 2 号泵扬程高 0.45 m, 设计工况点 NPSH 值基本一致。

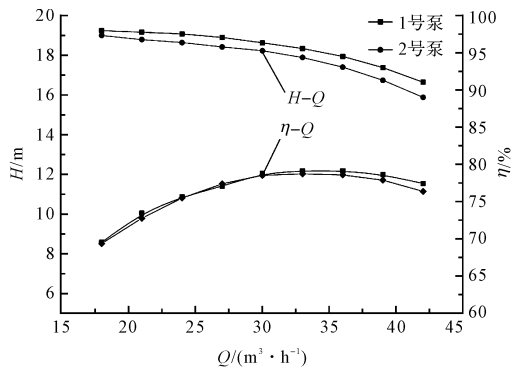


(a) 1号泵X-Y截面静压云图

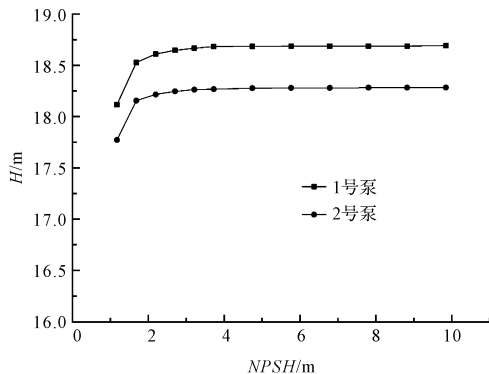


(b) 2号泵X-Y截面静压云图

图 4 设计工况静压云图



(a) 流量-扬程与流量-效率曲线



(b) 设计工况点NPSH曲线

图 5 数值模拟外特性曲线对比图

4 试验验证

为了验证数值计算的正确性,对 1 号模型泵与 2 号模型泵进行外特性试验,试验在闭式试验台上进行,流量、压力及功率分别用电磁流量计、压力传感器及扭矩仪采集,试验满足 2 级精度要求。

试验现场模型泵试验安装图如图 6 所示。

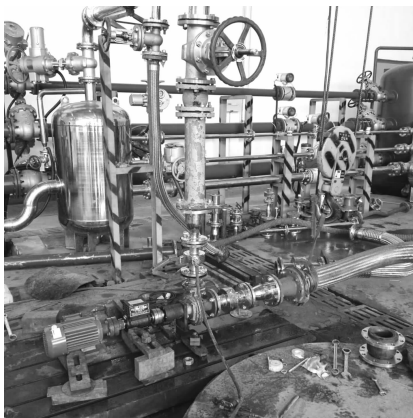


图 6 模型泵试验安装图

根据试验测量数据,可以得到各流量工况下泵的扬程值,并与数值计算扬程值进行对比,如图 7 所示。

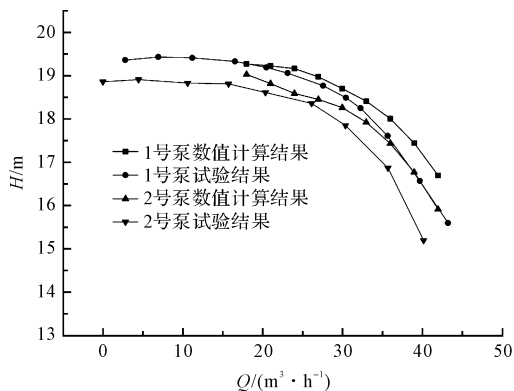


图 7 数值模拟结果与试验结果对比

可以看出:试验曲线和数值计算曲线变化趋势一致,大流量点误差增大,而计算值均稍大于试验值,相对误差均小于 6%,表明文中所采用的数值计算方法是可靠的。

5 结束语

研究表明:

(1)设计工况下,自由曲面叶片叶轮离心泵比倾

斜直纹面叶片叶轮扬程高 0.45 m,效率高 0.3%;自由曲面叶片叶轮的内部流场更符合流动规律,流场损失少,对泵的 NPSH 值基本没有影响;

(2)由于自由曲面叶片叶轮制作加工复杂,加工成本高,特别是叶片进口边扭曲严重的叶轮不容易拔模,使成品的叶片与图纸不符;通过优化倾斜直纹面叶片叶轮完全可以代替自由曲面叶片叶轮,降低企业的生产成本。

参考文献(References):

- [1] 侯树强,王灿星,林建忠. 叶轮机械内部流场数值模拟研究综述[J]. 流体机械,2005,33(5):30-34.
- [2] 张人会,樊家成,杨军虎,等. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片载荷优化[J]. 农业机械学报,2015,46(10):37-43.
- [3] HU Chuanguo, ZHENG Junjun, ZUO Pingying, et al. A study on intergrated milling process of shrouded impeller[C] //Proceedings of ASME Turbo Expo. NewYork, USA: ASME,2014:22A008.
- [4] WILLIAM T, LEI Yu, JACQUELYNN G, et al. Test and simulation of the effects of surface roughness on a shrouded centrifugal impeller[C] //Proceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME,2014:42A012.
- [5] 孙晔晨,田玉宝,席光,等. 三元叶片型面造型对离心压缩机叶轮气动性能影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报,2015,49(11):135-144.
- [6] 王德军,周惠忠,黄志勇,等. 对旋式轴流泵全流道三维定常紊流场的数值模拟[J],清华大学学报(自然科学版),2003.43(10):1339-1342.
- [7] Wang Weijun, Wang Yang. Applicability of eddy viscosity turbulence models in low specific speed centrifugal pump [C] 2012 IOPConference Series: Earth and Environmental Science,2012,15(15):062013.
- [8] Feng Jianjun, Benra F K, Dohmen H J. Application of different turbulence models in unsteady flow simulations of a radial diffuserpump[J]. **ForschIngenieurwes**,2010,74:123-133.
- [9] 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 农业机械学报,2011,29(2):99-103.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

陶仁和,张勇,陈旭来,等. 叶片空间型面造型对离心泵性能的影响研究[J]. 机电工程,2017,34(11):1283-1286.

TAO Ren-he, ZHANG Yong, CHEN Xu-lai, et al. Effect of different blade surface profiles on performance of centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(11):1283-1286.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>