

叶片包角对离心泵性能的影响*

张翔 王洋 徐小敏 王洪玉

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 在保证离心泵主要几何参数不变的前提下,使用 Hermite 插值方法对叶片包角为 90°、120°、150°和 180°的 4 个叶轮进行叶片绘型。数值模拟分析了不同叶片包角与离心泵性能的关系。结果表明,叶片包角因改变叶轮出口相对速度液流角而使离心泵扬程和功率特性发生变化,其效果与改变叶片出口安放角类似。叶片包角增大的同时叶轮流道内的脱流与漩涡也随之减小,流动更贴近叶片型线,但叶轮流道内的摩擦损失也随之增大,离心泵存在一个使其效率最高的最佳叶片包角。

关键词: 离心泵 叶片包角 性能 液流角 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0038-05

Relationship between Wrap Angle of Impeller and Performance of Pump

Zhang Xiang Wang Yang Xu Xiaomin Wang Hongyu

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

Abstract

The influence of relationship between wrap angle of impeller on performance of a pump was analyzed with the same main dimensions of centrifugal pumps unchanged. Blades were shaped using Hermite interpolation method. The wrap angle of impellers used in this investigation is 90°, 120°, 150°and 180° respectively. The result of numerical simulation indicates that the wrap angle changes the head and power characteristics by changing the relative velocity angle in impeller outlet. The effect of the different wrap angles is similar to that of the different impeller outlet blade angles. The bigger the wrap angle is, the smaller the separation and vortex in impeller passages are. With the wrap angle increases, the streamlines and blade profiles are getting similar, but the friction loss in impeller passages is getting large. So there exists an optimum wrap angle that corresponds to the highest efficiency of a centrifugal pump.

Key words Centrifugal pump, Wrap angle, Performance, Velocity angle, Numerical simulation

引言

离心泵叶轮设计一般是通过相似换算、速度系数法或理论模型的优化计算确定叶轮和叶片主要几何参数继而完成水力设计的。速度系数法是广泛采用的设计方法,国内外科技工作者在统计大量优秀水力模型的基础上提出了各自的速度系数及其设计方法^[1~4]。优化模型的设计方法^[5~7],是以某一函数极值为目标,优化某一个或多个叶片几何参数,再

借助速度系数设计方法完成叶轮设计。这些设计方法对叶轮进出口直径、叶片进出口直径、叶轮轮毂直径、叶片进出口宽度、进出口安放角、叶片数等几何参数做了详尽的阐述,但对叶片包角的选择则留有相当大的空间。过大的叶片包角增大了叶片摩擦面积,不利于提高泵的水力效率^[8~9],过小的叶片包角降低了叶片对流体的控制能力和液流的稳定性^[1],也不利于提高泵的效率。

低比转数离心泵叶轮外径与流道宽度比值大,

收稿日期: 2009-10-19 修回日期: 2009-12-23

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100211)和江苏高等学校优秀科技创新团队计划资助项目(苏教科[2009]10号)

作者简介: 张翔,博士生,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: zx_impeller@gmail.com

通讯作者: 王洋,研究员,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: pgwy@ujs.edu.cn

叶轮流道长且流道内液体流速高,叶片包角大小的选择问题显得尤为重要。在满足叶轮基本几何参数相同的前提下,叶片造型具有多样性,不同的叶片包角将产生不同的叶片几何形状,从而导致泵性能的变化。

本文在保证叶片基本尺寸不变的前提下,采用文献[10]提出的插值绘型方法对离心泵叶片进行造型,通过数值模拟分析叶片包角与离心泵性能的关系。

1 基本几何参数

本文以一设计比转数 $n_s = 59$ 的单级端吸悬臂式蜗壳离心泵为研究对象。设计参数:流量 $Q_d = 50 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H_d = 60 \text{ m}$,转速 $n = 2\,950 \text{ r/min}$ 。主要几何尺寸如表 1 所示。

表 1 离心泵主要几何参数

Tab.1 Main dimensions of centrifugal pump

叶片出口直径	叶片出口宽度	叶片出口安放角
D_2/mm	b_2/mm	$\beta_2/(\text{^\circ})$
236	6.5	15
叶片进口直径	叶片进口安放角	叶片数 z
D_1/mm	$\beta_1/(\text{^\circ})$	
80	22	5
叶片厚度	蜗壳基圆直径	蜗壳第 8 断面面积
δ/mm	D_3/mm	A_8/mm^2
2	243	1\,093

若采用传统的圆弧或等变角螺旋线等方法进行叶片造型,叶片安放角或包角不可任意控制,而采用 Hermite 插值绘型的方法^[10]进行叶片绘型,能在保证叶片进出口安放角的同时任意控制叶片包角的大小且叶片型线光滑。故本文采用此方法,在离心泵主要几何参数完全一致的前提下仅改变叶片包角一个参数设计叶片包角 ϕ 分别为 90° 、 120° 、 150° 和 180° 的 4 个叶轮(图 1)。

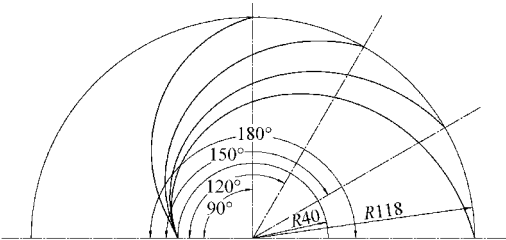


图 1 叶片工作面型线平面投影
Fig.1 Plan view of pressure sides

2 数值模拟计算策略

本文数值模拟使用 ANSYS FLUENT 12 进行计算,采用压力基求解器对定常不可压湍流场进行求

解。叶轮与蜗壳利用“冻结转子法”^[11]耦合。压强速度耦合格式使用 SIMPLEC 算法。本文所有模型网格数在 $(7 \sim 8) \times 10^5$ 之间,进出口管的延伸长度分别等于进出口管径的 3 倍和 5 倍,且使用结构化六面体网格,叶轮和蜗壳流道均采用非结构化四面体网格。湍流模型均选用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型,近壁区使用标准壁面函数处理。计算收敛判据有 2 个:①所有残差小于 10^{-4} 。②每 100 步迭代进出口总压变化不超过 10^3 Pa 。

使用“冻结转子法”计算离心泵的性能,叶轮与蜗壳的相对位置对结果有显著的影响^[12]。考虑这一因素,本文所使用的计算模型叶轮与蜗壳保持一致的相位关系,即蜗壳隔舌位于两临近叶片中央(图 2, 90° 包角叶轮)。

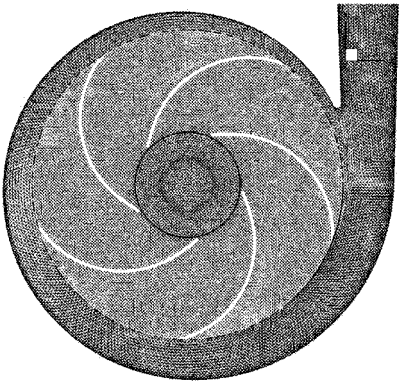


图 2 计算网格及叶轮位置
Fig.2 Mesh and rotor position

3 外特性分析

4 种不同叶片包角叶轮计算所得外特性结果如图 3 所示。

根据叶片泵基本方程式,在叶轮叶片几何参数相同的情况下叶轮应该具有相同的扬程和功率特性,而此组 4 个叶轮主要几何参数完全一致,仅叶片包角不同,导致性能差别的原因可能就是叶片包角的变化改变了叶片出口流体的滑移,使流体液流角发生改变进而导致性能不同。从图 3 可以看出,随着叶片包角的加大,流量-扬程曲线逐渐变得陡峭;功率对流量的导数逐渐减小,功率上升变得缓慢。这种流量和扬程以及流量和功率曲线的变化规律和叶片出口安放角减小的规律相同。对图 3 这种扬程和功率变化规律的一种解释是:①叶片包角影响了叶轮出口液体的滑移,包角的加大使液体受到叶片更强的约束,滑移程度降低,而小包角叶片流道内的液流相对自由。②随着叶片包角的减小叶轮出口喉部处的平均叶片安放角逐渐增大(图 4,表 2)。③从外特性结果来看,随着叶片包角减小,叶轮喉部

平均叶片安放角增大引起相对液流角增大的效果大于叶轮喉部面积增大,出口滑移增强从而导致相对

液流角减小的效果,最终结果是相对液流角增大,使叶轮产生了更高的扬程并消耗了更多的功率。

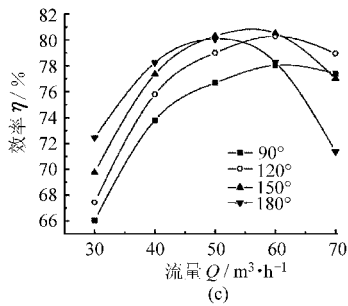
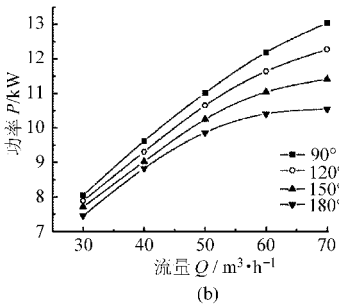
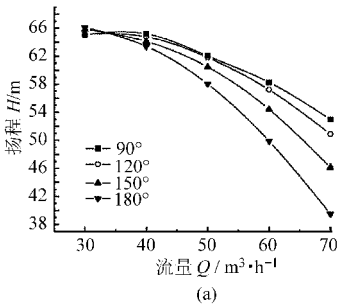


图 3 外特性曲线

Fig.3 Characteristics curves

(a) 扬程曲线 (b) 功率曲线 (c) 效率曲线

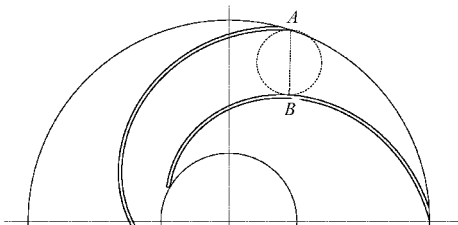


图 4 叶轮出口喉部

Fig.4 Throat of impeller

表 2 叶轮出口喉部叶片安放角

Tab.2 Blade angle in throat of impeller (°)

叶片包角	A 点叶片安放角 (背面)	B 点叶片安放角 (工作面)	平均安放角
90	15	39.3	27.15
120	15	29.5	22.25
150	15	21.8	18.40
180	15	16.2	15.60

从流量-效率曲线来看,随着叶片包角的增大,泵最高效率点流量向小流量偏移。根据叶轮和蜗壳的耦合关系^[13~14],叶片出口安放角和叶轮出口相对液流角的减小会引起泵最高效率点流量偏向小流量,从而也印证了叶片包角增大后叶片出口实际相对液流角逐渐减小的推测。从最高效率值看,叶片包角 90° 的泵效率明显低于其他更大叶片包角的泵,原因可能是叶片包角过小导致叶轮流道内扩散严重,叶片单位面积负荷加大,导致叶片表面脱流,

加重了水力损失。叶片包角 120°、150° 和 180° 泵的最高效率以叶片包角 120° 时为最高,原因可能是包角加大后过长的叶轮流道在更强的约束液体流动的同时也带来了更大的摩擦损失从而加大了轴功率,降低了效率。

4 内特性分析

离心泵外特性是内特性的外在表现,分析内特性有助于搞清楚外特性变化的原因。图 5 为叶轮出口相对速度平面投影液流角柱状分布图,因为本文所分析的离心泵比转数低,叶轮出流主要为径向流动,轴向分量很小,所以平面投影液流角能反应叶轮出流的情况。图中横坐标为相对速度平面投影液流角,纵坐标为不同角度液流角所占百分比。

图 5 显示,随着叶片包角的增大叶轮出口相对速度液流角逐渐减小(图 6,横坐标为叶片包角,纵坐标为平均相对速度液流角)并呈现出集中的趋势。这与通过外特性分析叶轮出口相对液流角结果相符。

根据外特性的分析结果,小叶片包角会降低叶片对液流的约束能力,加重叶片表面单位面积的负荷,加大叶片表面脱流的可能性,从而降低泵的效率。图 7 为 50 m³/h 流量下叶轮流道中面相对速度矢量图,反映了不同叶片包角下叶轮流道内的流动情况。

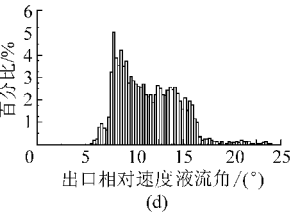
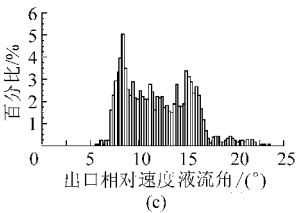
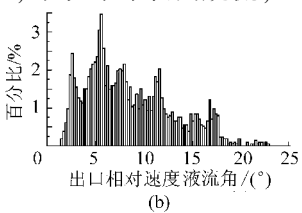
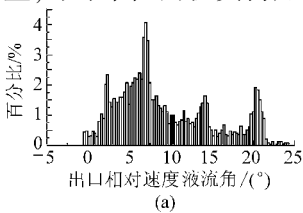


图 5 相对速度液流角柱状分布

Fig.5 Histogram of relative velocity angle

(a) 包角 90° (b) 包角 120° (c) 包角 150° (d) 包角 180°

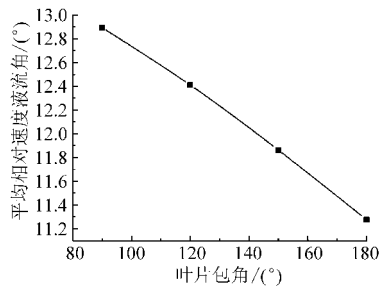


图 6 平均相对速度流角

Fig. 6 Average relative velocity angle

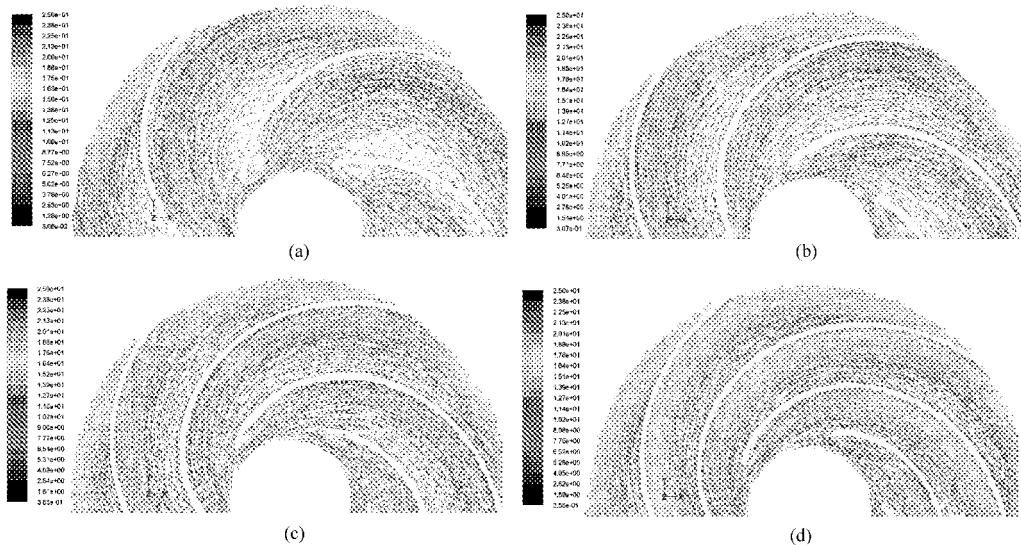


图 7 叶轮内相对速度矢量图 (m/s)

Fig. 7 Relative velocity vector of impeller (m/s)

(a) 包角 90° (b) 包角 120° (c) 包角 150° (d) 包角 180°

流动与流道扩散作用的叠加,使小叶片包角叶轮流道内的流动状况更加恶化,而大叶片包角叶轮流道

内由于叶片强烈的约束作用,脱流及漩涡流动仍然只在局部区域发生(图 8)。

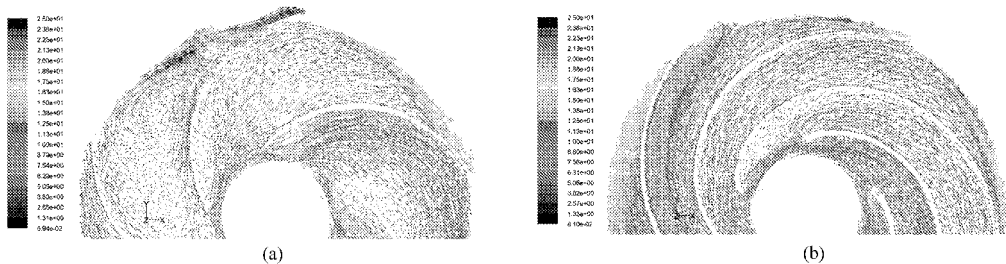


图 8 0.6 倍设计工况相对速度矢量图

Fig. 8 Relative velocity vector of impeller at 0.6 Q_d

(a) 叶片包角 90° (b) 叶片包角 180°

正如前文分析,过长的流道在带来液流平滑流动的同时也增加了摩擦损失,图 9 为不同叶片包角叶轮流道摩擦力矩对比图。

图 9 显示,叶片包角加大后,由于流道变长带来了更大的摩擦力矩。由于这种随叶片包角增大而增大的摩擦损失的存在,以及随叶片包角增大而降低的水力损失,使得叶片包角增大过程中泵的最高效率存在极值。

以本文所分析的离心泵为例,效率的最大值出现在叶片包角为 150° 时。但正如本文外特性分析结果所呈现的,叶片包角的选择应该以满足离心泵扬程和功率指标为首要前提,改变叶片包角对扬程和功率的影响在一定叶片包角范围内远大于对效率的影响。如本文所分析实例,叶片包角从 120° 到 180°,最高效率变化约为 1%,但设计点扬程下降 3.79 m,功率降低 0.79 kW 且离心泵特性曲线形状

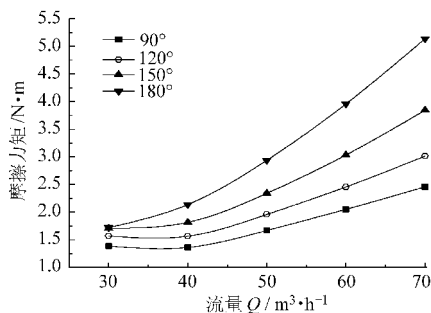


图9 叶轮流道摩擦力矩

Fig.9 Friction moment in impeller

完全改变。

5 结论

(1)随着叶片包角的增大,叶轮出口相对液流

角减小。叶片包角直接影响叶轮出口相对速度液流角进而改变了离心泵的外特性,具体表现为随着叶片包角的增加,离心泵扬程下降,曲线变得陡峭;功率降低且极值向小流量方向偏移;泵效率极值点流量也偏向小流量且效率极大值变化幅度小。

(2)随着叶片包角的增大叶轮流道内的流动扩散减小,流动更贴近叶片形状,水力损失减小。

(3)随着叶片包角的增大叶轮流道内摩擦阻力也随之增大,存在使离心泵效率最高的最佳叶片包角。

(4)在一定范围内,叶片包角对扬程和功率的影响大于对效率的影响,叶片包角的选取应以满足性能要求为原则。

参考文献

- 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- Johann Friedrich Gülich. Centrifugal pumps[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- Igor J, Karassik, Joseph P Messina, et al. Pump handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- Lobanoff Val S. Centrifugal pumps: design & application[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1992.
- 汪建华. 低比转速离心泵叶轮的优化设计[J]. 水泵技术, 1993(6): 10~13.
- 汪建华. 离心泵叶轮参数的优化设计[J]. 排灌机械, 1994, 12(2): 13~17.
- 严敬. 低比转速离心泵——原理、参数优化及绘形[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
- Mustafa Gölcüa, Yasar Pancar. Investigation of performance characteristics in a pump impeller with low blade discharge angle[J]. World Pumps, 2005, 468: 32~40.
- 谈明高, 刘厚林, 袁寿其. 离心泵水力损失的计算[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 405~408.
Tan Minggao, Liu Houlin, Yuan Shouqi. Calculation of hydraulic loss in centrifugal pumps[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(5): 405~408. (in Chinese)
- 严敬, 曹树森, 严利, 等. 扭曲叶片绘型新方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 48~50, 71.
Yan Jing, Cao Shusen, Yan Li, et al. A new way of distorted blade drawing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 48~50, 71. (in Chinese)
- 郭鹏程, 罗兴琦, 刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 1~5.
Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Liu Shengzhu. Numerical simulation of 3D turbulent flow fields through a centrifugal pump including impeller and volute casing[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 1~5. (in Chinese)
- 黎义斌. 冲压焊接离心泵叶轮及蜗壳耦合特性准非定常数值模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
Li Yibin. Quasi-unsteady numerical simulation of the impeller-volute coupling characteristics in stamping-welding centrifugal pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)
- Worster R C. The flow in volutes and its effect on centrifugal pump performance[J]. Proc. ImechE, 1963, 177: 843~875.
- 张翔. 低比速离心泵蜗壳对水力性能的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
Zhang Xiang. Influence of the volute in low specific speed centrifugal pumps on hydraulic performance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 谭磊, 曹树良, 桂绍波, 等. 离心泵叶轮正反面迭代设计方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 30~35, 10.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 30~35, 10. (in Chinese)