低比转速污水泵叶片包角对水力性能的影响

曹卫东，李 跃，张晓娣
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：利用商用软件FLUENT 6.2，在双坐标系下，对雷诺时均N-S方程进行离散，采用标准的湍流模型和SIMPLE方法进行求解，对5种不同的叶片包角叶轮与同一个蜗壳的耦合流场进行了数值模拟，得出了低比转速污水泵叶轮与蜗壳内的压力和速度分布规律，为低比转速污水泵的性能预测，水力设计和优化设计提供了依据. 包角为190°的叶片工作面流速分布优于其他包角叶片工作面的流速分布，且该叶轮在隔舌附近产生高压区的面积明显小于其他包角的叶轮，选择优化后包角为190°的叶轮试验并与泵外特性模拟预测结果进行了对比. 结果表明：若不改变泵水力部件其他几何参数，随着低比转速叶片包角由小向大变化，泵的内流特性存在较明显的差异，泵效率存在极大值.

关键词：污水泵；低比转速；叶片包角；数值模拟
中图分类号：TH311 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)06-0362-05

Study on performance of low specific speed sewage pump with different vane wrap angles

Cao Weidong, *Li Yue*, *Zhang Xiaodi*
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To study the coupling flow filed of impellers with different vane wrap angles in the same volute, numerical simulations were performed for a sewage pump by using commercial software FLUENT 6.2. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations was discretized, solved with standard $k-\varepsilon$ turbulence model and the SIMPLE algorithm in double coordinate system. The pressure and velocity distributions both in impeller and in volute were gained providing basis for the performance prediction, the hydraulic design and optimal design of a low specific speed sewage pump. The velocity distribution on the side of the impeller with 190° vane wrap angle is better than with other vane wrap angles, and the pressure distribution near the volute tongue of this impeller produces a certain obviously smaller high-pressure zone. Furthermore, the optimal scheme pump character gained experimentally was compared with simulating prediction. The results show that while other hydraulic geometrical parameters of a low specific speed sewage pump fixed, with the vane wrap angle adding, there exist significant differences of inner flow and a maximum value of pump efficiency.

Key words: sewage pump; low specific speed; vane wrap angle; numerical simulation

收稿日期：2009-08-08
基金项目：国家863计划项目(2007AA05Z207)；江苏高等学校优秀科技创新团队计划项目(苏教科[2009]10号)
作者简介：曹卫东(1972—)，男，江苏南通人，副研究员(cwd@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械水动力学研究.
李 跃(1985—)，男，山东莱芜人，硕士生(liyue200106@126.com)，主要从事流体机械理论与设计研究.

万方数据

污水泵的叶轮通常选用较大的叶片包角. 针对某一具体的泵而言，如何依据其进口直径 D_j、出口直径 D_2、出口宽度 b_2、叶片出口角 β_2、叶片数 Z 等选择一个最优包角，依然依赖于设计者的经验. 文献[1]深入探讨了污水泵叶轮的结构型式对无堵塞性能的影响，并对闭式叶片式叶轮的水力设计进行了探讨，指出了2叶片的污水泵具有相对较好的防缠绕抗堵塞性能，但是效率相对较低，且有过载危险. 2叶片的低比转速泵流道扩散严重，可以选用较大的叶片包角来减小叶轮流道的扩散. 文献[2]建议污水泵叶轮包角选取170°左右，在获得满意的泵效率的同时，还能得到无驼峰的扬程曲线. 在探讨离心泵叶轮优化设计中，大量文献研究叶轮参数 D_2，β_2，Z，b_2 的优化设计，但对于泵叶轮包角的优化设计研究相对较少，由于包角选取的推荐范围太大，给设计者选择带来困难，文献[3]给出常规离心泵的包角 θ 在90°～110°范围内，低比转速离心泵叶片包角取值比常规离心泵大，为150°～220°.

随着计算机技术和计算流体力学的迅速发展，CFD数值模拟已成为研究离心泵内部流动和优化设计的主要方法之一[4].

笔者利用FLUENT软件对一低比转速 n_s 为53的污水离心泵不同叶片包角条件下的内部流场进行数值模拟和性能预测，分析叶片包角变化对离心泵内部流场以及外特性的影响.

1　控制方程

采用的控制方程包括连续性方程，Reynolds时均Navier－Stokes方程(RANS)[5]

$$\frac{\partial}{\partial_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}\right) + S_i \tag{2}$$

标准 $k-\varepsilon$ 方程

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho}\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k}\frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \tag{3}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{C_1}{k}\varepsilon G_k - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

$$G_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{7}$$

式中 ρ 为液体密度；u_i 为雷诺平均速度；p 为雷诺平均静压；u'_i 为脉动量；ε 为湍动能耗散率；μ_t 为湍动粘度；G_k 为平均速度梯度引起的湍动能的产生项；$C_\mu = 0.09$；$\sigma_k = 1.0$；$\sigma_\varepsilon = 1.3$；$C_1 = 1.44$；$C_2 = 1.92$.

2　边界条件

进口条件：假定进口速度在轴向均匀分布，具体数值由流量与进口面积比值给定. 进口湍动能强度

$$I = 0.16(Re_{in})^{-1/8} \tag{8}$$

进口水力直径

$$D = D_j \tag{9}$$

式中 Re_{in} 为进口雷诺数；D_j 进口直径.

出口条件：采用自由出口边界条件，由于全部流场只有一个出口，其出流权重设为1.

固壁条件：在固壁处采用无滑移边界条件，在近壁区采用标准壁面函数.

3　计算模型

选取同一蜗壳及5个外形尺寸相等，包角分别为150°，170°，190°，210°，230°的叶轮水力模型作为计算对象，该低比转速离心泵流量 $Q = 30\ m^3/h$，扬程 $H = 50\ m$，转速 $n = 2\,970\ r/min$. 兼顾污水泵的效率和过流特性，选取 $Z = 3$，$\beta_2 = 22°$[6].

比转速

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H^{0.75}} = 53 \tag{10}$$

叶轮进口直径

$$D_j = k_1\left(\frac{Q}{n}\right)^{1/3} \tag{11}$$

式中 k_1 为叶轮进口系数，通常取3.5～5.5，兼顾效率与污水过流特性，k_1 取5.0. 计算得到 $D_j = 69\ mm$.

叶轮出口直径

$$D_2 = k_2\left(\frac{Q}{n}\right)^{1/3} \tag{12}$$

出口直径系数 $k_2 = 9.5 \sim 10.5(n_s/100)^{-0.5}$，计

万方数据

算得到 D_2 = 190 mm.

叶轮出口宽度[6]

$$b_2 = k\,k_{b2}\left(\frac{Q}{n}\right)^{1.3} \tag{13}$$

通常要求污水泵过流能力强,叶轮出口需加宽设计,若比转速较小,n_s < 60,修正系数 k = 1.5 ~ 2.5;$k_{b2} = 0.7(n_s/100)^{0.65}$,计算得到 b_2 = 16 mm.

泵体尺寸:泵体的出口直径 D_d = 50 mm,基圆直径 D_3 = 196 mm,泵体宽度 b_3 = 25 mm.

包角 190°叶轮水力模型如图 1 所示.

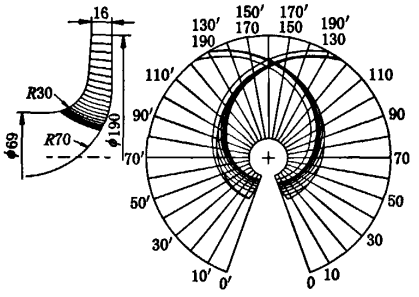


图 1 叶轮模型

Fig. 1 Hydraulic patterns of impeller

采用 Pro/E 三维造型软件对泵的叶轮和蜗壳进行实体造型,采用 GAMBIT 软件对叶轮与蜗壳水体进行非结构网格划分,并对网格质量进行检查.蜗壳网格数为 15 万网格单元,叶轮网格数为 11 万网格单元,网格质量良好.包角 190°模型实体见图 2,控制方程组离散后的速度与压力代数方程组采用分离式的求解方法,压力与速度耦合采用 FLUENT 软件提供的 SIMPLE 算法,参考压力为标准大气压,位置选在叶轮进口处,计算时不计重力;当计算区域内的三维速度、湍动能 k、耗散率 ε 的残差小于 10^{-5},且蜗壳出水口压力稳定时,认为计算收敛.为计算简单起见,计算介质选取清水.



图 2 叶片包角 190°实体图

Fig. 2 Model with 190° vane wrap angle

4 结果与分析

4.1 包角对速度分布特性的影响

图 3 是叶片包角分别为 150°,190°, 230°的全流场的速度矢量,省略描述包角 170°,210°的图形.在叶轮出口处,叶片压力面处存在回流及二次流,流道有局部及轻微的堵塞,在这一区域流速减小,从而在叶轮出口处形成了射流 - 尾流结构,这种结构作用面积大小与叶片包角等几何参数有关,且易导致流道内混合与扩散水力损失增加,使得泵的扬程降低,对叶轮以及蜗壳的效率产生严重影响.叶片包角为 190°的工作面流速分布优于包角为 150°,230°的叶片工作面的流速分布.在蜗壳的隔舌位置,包角为 190°的叶轮的回流区小于叶片包角为 150°,流场相对比较均匀;叶片包角 230°的叶轮内部速度分布均匀程度与 190°的叶轮较接近.

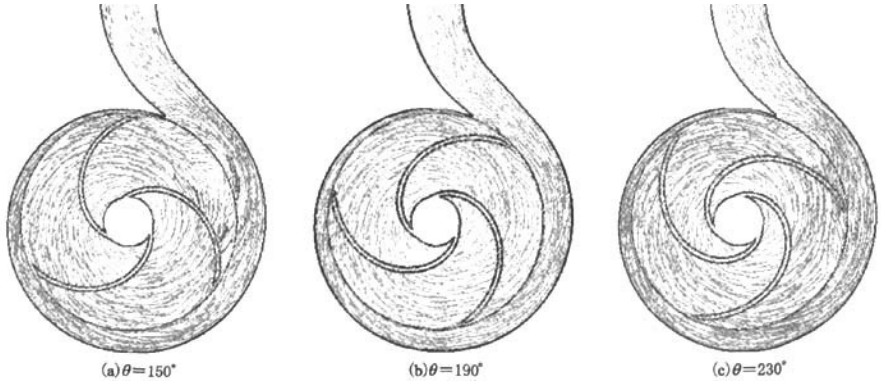


图 3 速度等值线

Fig. 3 Velocity contour of different models

万方数据

4.2　包角对静压分布特性的影响

图 4 是叶片包角为 150°,190°,230°的全流场的静压等值线. 在叶轮内,压力变化比较均匀,有进口到出口递增的变化趋势. 在全流场内,在隔舌附近产生一定的高压区,包角 190°的叶轮产生的高压区的面积明显小于包角为 150°,230°的叶轮.

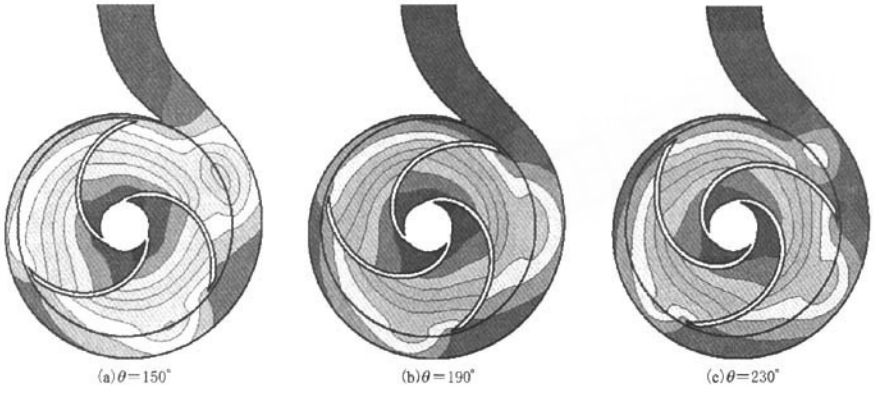


图 4　静压等值线

Fig. 4　Static pressure contour of different models

4.3　包角对泵外特性的影响

在 FLUENT 中,流场内某一点的总压 p_0 定义为 $p_0 = p_s + \rho|u|^2/2$,同时 FLUENT 软件提供了表面积分(area-weighted average)的功能,可以得出蜗壳出口总压和叶轮进口总压. 使用 FLUENT 后处理报告力矩值的功能,得到叶片表面绕转轴的力矩之和. 在设计流量下,对叶片包角分别为 150°,170°,190°,210°,230°的模型进行数值模拟,对外特性进行分析,具体数值见表 1.

表 1　预测外特性值

Tab. 1　Predicted characteristics

θ/(°)	H/m	转矩/(N·m)	η/%
150	48.39	19.91	56.43
170	49.31	18.97	61.65
190	51.59	21.66	62.56
210	52.29	22.15	62.00
230	51.18	21.93	61.30

通过外特性预测值比较发现:叶轮包角为 190°时,设计流量点可达到设计扬程,并且效率为 5 种对比模型中最高的,包角为 190°的叶轮应为较理想模型.

选取包角为 190°的水力模型,在 0 ~ 1.2Q 内进行数值计算,得到了预测的外特性曲线,且与试验结果较接近,如图 5 所示. 污水污物潜水电泵的标准 JB/T 5118—2001 规定该参数泵在额定流量点效率为 50.6%. 数值优化得到的包角 190°水力模型试验效率高于标准约 10%. 由图 5 可知,预测的结果和试验的结果变化趋势大体一致,尤其在设计工况附近,预测数据与试验数据吻合较好. 在流量小于设计工况范围内,预测扬程和效率偏小,在大于设计工况范围内,预测值偏大. 在设计工况点附近,泵内实际流态较理想,与 FLUENT 计算软件提供的湍流模型较吻合;而在偏离设计工况点较远时,泵内流动复杂,不能用单一湍流模型准确表达,因此偏差较大.

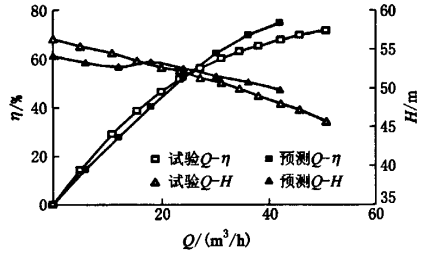


图 5　试验与预测特性曲线

Fig. 5　Test and predicted characteristics curves

5　结　论

利用商用软件 FLUENT 计算分析了不同叶片包角的叶轮与泵体耦合流场的速度、压力等内流特性,并选取较好的模型与试验扬程、效率的外特性数据进行了比较.

1)叶片包角的变化对污水泵叶轮的内流及外特性具有较大影响.

2)随着叶轮叶片包角的增大,泵效率有先增大后减小的趋势,利用 CFD 方法进行预估,可为合理选取低比转速污水泵叶轮的包角提供参考依据.

万方数据

参考文献(References)

[1] 施卫东,曹卫东,刘厚林,等. 不同叶轮结构型式对污水泵性能的影响[J]. 农业工程学报,2003, 19(2):114-116.
Shi Weidong, Cao Weidong, Liu Houlin, et al. Influence of different impeller structures on performance of sewage pump[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2):114-116. (in Chinese)

[2] 袁寿其. 低比转速离心泵理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[3] 刘剑军. 无过载设计方法在低比转速多级离心泵上的应用[J]. 水泵技术,2008(5):27-29.
Liu Jianjun. Non-overload design method applied on low specific speed multi-stage pump [J]. *Pump Technology*, 2008(5):27-29. (in Chinese)

[4] 任 涛,闫永强,梁武科. CFD技术在离心泵优化设计中的应用[J]. 排灌机械,2007, 25(1):25-28.
Ren Tao, Yan Yongqiang, Liang Wuke. Application of CFD to optimization design for centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(1):25-28. (in Chinese)

[5] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[6] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.

(责任编辑 贾国方)

第二届全国水力机械及其系统学术会议在江苏大学召开

10月17日至18日,第二届全国水力机械及其系统学术会议在江苏大学召开. 此次会议由国家自然科学基金委员会工程与材料科学部及相关的6个学会主办,江苏大学、西安理工大学、中国农业大学共同承办. 来自清华大学、浙江大学、武汉大学、河海大学等21个单位的150余名知名专家、教授、学术骨干及研究生代表参加了大会. 会议共收到学术论文70余篇,内容涉及水力机械学科的各个研究领域,代表了全国该学科研究的前沿水平.

"召开全国性的水力机械及其系统学术会议有利于促进同行交流沟通和学科人才培养,有利于推动水力机械学科的长远发展,是一件利国、利民、多赢的大好事,也是全国水力机械行业的一件大事."在10月17日上午举行的会议开幕式上,江苏大学校长、大会组委会主席袁寿其研究员强调. 袁寿其代表江苏大学致欢迎词,他向各位代表介绍了江苏大学的基本情况,并指出,流体机械及工程学科是江苏大学的"传统学科",创建于1962年,经过40余年的建设与发展,已成为我国重要的流体机械科学研究、人才培养、技术开发基地,是国内唯一以研究水泵为主的国家重点学科,多年来该学科的发展和与会领导、专家的关心、支持是分不开的.

开幕式上,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部水利学科李万红主任对大会提出两点希望:要通过学术交流研讨,让大家对当前学科领域、前沿热点问题有充分了解,进一步加大学科人才的培养力度;要加强对水力机械学科发展战略的研究,并加强与其他学科的合作、交叉与融合,促进大家对学科内涵与外延等进行深入思考. 会议组委会副主席、西安理工大学副校长罗兴锜教授主持了开幕式.

开幕式后,李万红主任首先向大家介绍了近年来本学科国家自然科学基金项目的申报情况和注意事项. 随后,清华大学吴玉林教授、西安理工大学罗兴锜教授、中国农业大学王福军教授、江苏大学袁寿其研究员分别围绕"大型水轮机关键问题研究"、"水力机械及其学科的研究现状与发展"、"双吸泵运行稳定性研究"、"多年科研积累,长期行业服务——谈国家科技进步二等奖的获奖内容及感受"等主题分别作特邀报告.

大会分为泵、水轮机和水力机械系统三个分会场. 在会议报告中,代表们就水力机械学科基础研究成果及进展、水力机械领域新产品开发和人才培养等问题进行了深入的讨论交流.

会议期间,代表们参观了江苏大学流体中心和能动学院实验室,考察了镇江,对江苏大学和镇江的历史文化和景观风貌留下了深刻印象.

(江苏大学流体中心,江苏大学宣传部供稿)

万方数据