

导叶叶片数对井用潜水泵性能的影响

周岭 白玲 杨阳 施卫东 陆伟刚

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 选取一典型井用混流式潜水泵作为研究对象,借助数值模拟和试验测量的方法研究导叶叶片数对井用潜水泵性能的影响。在导叶叶片型线不变的情况下,通过调整叶片数6、7、8共3个方案进行数值模拟。以单级泵模型建立计算域,划分高密度结构化网格,通过网格无关性分析确定了合适的网格划分方案。基于SST $k-\omega$ 湍流模型和标准壁面函数进行多工况数值模拟,对不同叶片数方案的泵性能预测结果进行了对比。证实在小流量工况下,叶片数的增加提高了导叶叶片流道内整流效果,泵的扬程随叶片数的增加而提高。然而在大流量工况下,过多的叶片会占据更多的流道面积,并产生较大的水力损失。7叶片方案的进口面积与叶轮出口面积匹配较好,水力损失较小。将7叶片方案进行了加工制造和样机性能试验,试验结果表明模型泵性能优秀,高效区宽且具有无过载特性。数值模拟预测的扬程和功率均略高于试验结果,预测的泵效率与试验值基本一致,两者随流量变化的整体趋势基本一致,证实本文数值模拟具有一定的精度。

关键词: 井用潜水泵; 空间导叶; 水力损失; 数值模拟; 试验

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0078-07

Influence of Diffuser Vane Number on Submersible Well Pump Performance

Zhou Ling Bai Ling Yang Yang Shi Weidong Lu Weigang

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Diffuser is one of the most critical flow components in submersible well pump, its hydraulic design has an important influence on the pump performance. A typical submersible well pump was chosen as the research object to study the influence of space diffuser vane number on the performance of submersible well pump by means of numerical simulation and experimental test methods. Based on the same curve profile, the diffuser vane number was adjusted to 6, 7, 8. The calculation domain was created based on single stage pump model, which was meshed with the high density of structured grids. Grid independence analysis was processed to determine the proper meshing scheme. The numerical simulations under multi-conditions were performed based on SST $k-\omega$ turbulence and standard wall function. Through the comparisons of predicted pump performance, it is found that the pump head is increasing with the increase of vane number under small flow rates. However, too many vanes occupy more passage area, which led to blockings and more hydraulic losses under larger flow rates. The scheme of 7 diffuser vanes matches the impeller very well, its import area tallies with the impeller outlet area and less hydraulic losses. The test results that this scheme has an pump performance, both the single-stage head and efficiency are higher than the national standard, which successfully completes the expected design goal. The head and power of numerical simulation prediction are slightly higher than the test results, the predicted pump efficiency is slightly higher than the test results, but the change trend is

收稿日期: 2015-11-25 修回日期: 2016-01-11

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150508)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB570001)、江苏省博士后科研计划项目(1501069A)、中国博士后科学基金项目(2015M581737)、流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学)开放课题项目(szjj2015-023)和江苏大学高级人才启动基金项目(15JDG047)

作者简介: 周岭(1985—),男,助理研究员,主要从事多级离心泵设计与流动机理研究,E-mail: lingzhoo@hotmail.com

almost same with each other. The results of this study provide basis and reference for the improvement of submersible well pump performance.

Key words: submersible well pump; space diffuser; hydraulic losses; numerical simulation; experiment

引言

井用潜水泵属于多级离心泵的一种特殊型式,机泵一体深入井中、潜入水下工作,特殊的工作环境对其整体的结构设计、水力性能和可靠性要求较高^[1-3]。导叶是一种非常典型的压水室结构,广泛应用于各种形式的井用潜水泵中。导叶的作用类似于蜗壳,主要是收集从叶轮中流出的液体,将其输送到下一级叶轮入口或泵出口,将液体的速度能转换为压力能,并基本消除液流的旋转速度^[4-6]。

在多级离心泵中,单级扬程会影响泵体的长度,单级扬程过小时,为了达到总扬程必须借助于泵级数的增加,这样会使泵体长度和泵轴长度大幅度增加,对机械密封和安装使用的要求变高,泵的可靠性会降低,同时也使得制造成本倍增。因此,井用潜水泵设计过程中必须考虑的一个核心问题是如何减小水力损失、提高单级扬程^[7-8]。井用潜水泵常用的导叶型式有径向导叶、圆柱形导叶和空间导叶,其中径向导叶具有正反叶片,轴向长度较短,但是其缺陷是正导叶占据了一定的叶轮空间,从而也限制了叶轮直径,降低了泵的单级扬程;圆柱形导叶结构紧凑,但水力损失较大;空间导叶是最常用的型式,在中高比转数的井用潜水泵中水力损失较小,应用最为广泛^[9-10]。

近年来,越来越多的学者认识到导叶设计对于改善泵性能的重要性,先后借助理论分析、数值模拟和试验测量等研究手段进行了大量细致、深入的研究,丰富了导叶设计的理论基础,为改善导叶设计方法、提高泵水力性能作出了有益探索^[10-15]。由于井用潜水泵严格而独特的工作环境,对水力设计和结构设计的要求较高,其水力设计不同于、也难于普通多级离心泵的设计,因此有必要深入细致地研究叶轮、导叶等关键水力部件几何参数对井用潜水泵水力性能的影响^[16-18]。本文围绕空间导叶叶片数对井用潜水泵水力性能的影响,进行数值模拟和试验研究,以期掌握空间导叶的内部流动规律和完善水力设计方法奠定理论基础。

1 几何模型

选取150QJ36型井用混流式潜水泵作为研究对象,其总体水力设计参数为:额定流量 $Q = 36 \text{ m}^3/\text{h}$;总扬程 $H = 75 \text{ m}$;级数7级;转速 $n = 2\ 850 \text{ r}/\text{min}$;比

转数 $n_s = 175.8$ (根据单级扬程计算);泵壁内径为126 mm;泵效率 $\eta = 72\%$;最大配套功率 $P = 11 \text{ kW}$ 。

叶轮的设计采用施卫东等^[6-7]提出的叶轮极大扬程设计法(也称极大直径设计法),将叶轮的前盖板尺寸增大至泵体内壁边缘,从而使叶轮直径在相应的井径条件下达到极大值。图1为设计出的叶轮三维模型的俯视图和侧视图。



图1 叶轮的三维实体模型

Fig. 1 Impeller solid model

转的叶片数一般与叶轮叶片数互质。越少的叶轮叶片数越有利于脱模,因此确定叶轮的叶片数为5。在根据叶轮几何参数准确计算导叶进出口液流角的基础上,采用扭曲三角形法绘制空间导叶叶片,确保导叶的进口边和出口处能够与叶轮出口、下级叶轮进口(或出口段)光滑连接,整体的流道形状光滑过渡。确定空间导叶叶片形状后,在叶片型线不变的情况下,调整叶片数目为6、7、8 3个方案(图2)。本文将结合数值模拟与样机性能试验,分析导叶叶片数对泵性能和内部流场的影响。

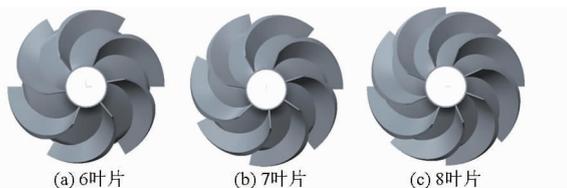


图2 不同叶片数的空间导叶

Fig. 2 Space diffusers with different blades number

2 数值模拟方法

2.1 三维建模

采用Pro/E软件分别对进口段、叶轮、空间导叶、侧腔和出口段进行建模,并根据二维装配图进行装配,构建整个计算域模型。模型泵叶轮和导叶的叶片均为扭曲叶片,对于这种不规则曲面的三维造型,本文采用“点-线-面-体”的思路构建叶轮与空间导叶的实体模型。本文模型泵的级数为7级,如果考虑所有的级数,会使得网格和计算量倍增,因此选取模型泵的一级来进行数值模拟,进口段和

出口段依照真实模型建模,并对各个组件进行装配,最终确定的用于数值模拟的三维实体模型如图3所示。



图3 计算域模型

Fig. 3 Calculation domain

2.2 网格划分

在 ANSYS - ICEM 软件中对整个计算域划分结构网格。采用创建块的方法,首先对单独的叶片流道进行网格划分。将块的边界与叶片流道型线进行关联,完成几何实体与网格模型的拓扑。对边界层和网格增长率进行设定,保证边界层网格的密度和厚度。最终根据叶片数进行阵列,完成全部流道的网格划分,图4所示为叶轮和导叶上的结构化网格。

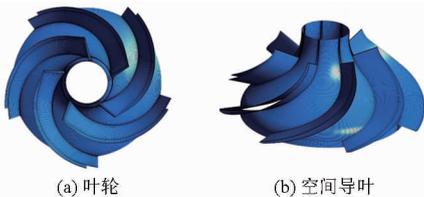


图4 叶轮和导叶上的结构网格

Fig. 4 Structured mesh on impeller and diffuser

2.3 网格无关性分析

将模型泵划分为5个方案的网格,叶轮和导叶上的网格数量以及数值模拟预测的泵外特性如表1所示。可以看出,随着网格数的增加,泵扬程、功率和效率的预测值趋于稳定,对比方案4和方案5,发现网格的增加对数值模拟的结果基本没有影响,说明方案4的网格密度已经具有足够高的精度。综合上述分析和计算机配置,选择方案4的网格划分方案进行后续的数值模拟研究,并在边界层网格划分的过程中确保 $30 < y^+ < 60$ 。

2.4 数值模拟方法

数值模拟在 ANSYS - Fluent 14.5 中完成,基于 SST $k-\omega$ 湍流模型,采用 SIMPLEC 算法求解二阶迎

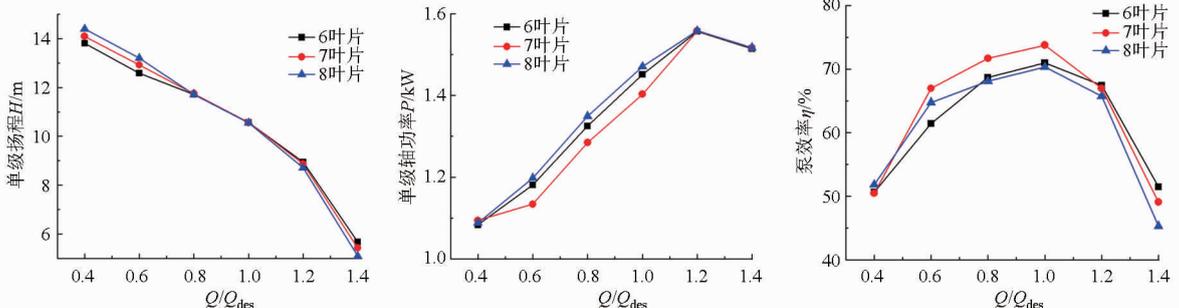


图6 数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparisons of numerical simulation results

表1 网格无关性分析

Tab. 1 Grid independence analysis

方案 序号	网格数		预测结果		
	叶轮	导叶	扬程/m	功率/kW	效率/%
1	43 695	62 564	10. 41	1. 573 9	64. 81
2	139 200	316 540	10. 54	1. 469 7	70. 29
3	313 750	509 208	10. 53	1. 402 1	73. 58
4	516 780	937 440	10. 56	1. 403 3	73. 77
5	950 895	1 297 380	10. 57	1. 404 2	73. 74

风格离散差分方程^[13]。壁面采用无滑移边界条件、标准壁面函数,不同的组件之间通过交界面连接,泵进口采用质量流量进口边界条件,出口采用压力出口边界条件,计算精度为 10^{-4} 。边界条件的位置和类型如图5所示。

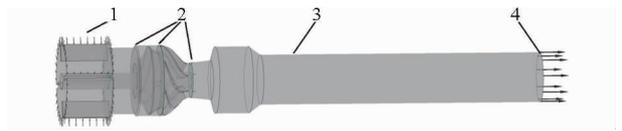


图5 边界条件的位置和类型

Fig. 5 Locations and types of boundary conditions

1. 速度进口 2. 交界面 3. 无滑移壁面 4. 压力出口

3 数值模拟结果

3.1 泵性能的预测结果

通过数值模拟,分别得到了0.4、0.6、0.8、1.0、1.2和1.4倍额定流量下的泵性能预测值,图6所示分别为这6个工况下的泵扬程、功率和效率的数值模拟预测结果。可以看出,在小流量工况下 ($0.4Q_{des} \sim 0.8Q_{des}$),叶片数的增加提高了空间导叶叶片流道内整流效果,泵的扬程随叶片数的增加而提高。与之相反,在大流量工况下 ($1.2Q_{des} \sim 1.4Q_{des}$),叶片数少反而有利于泵扬程的提高。这是由于过多的叶片会占据更多的流道面积,在大流量下容易发生阻塞,从而产生较多的水力损失。同时在额定流量附近,空间导叶叶片数的变化基本没有影响到泵的单级扬程。对比3个方案的流量-功率曲线,可以发现在工作工况附近 ($0.8Q_{des} \sim 1.2Q_{des}$),7叶片方案的功率明显低于另外2个方

案,而泵效率较高,且高效区范围较宽。

在额定流量处,7叶片方案预测的泵效率达到了73.77%,而6叶片方案仅为70.98%,8叶片方案仅为70.34%。为了分析其原因,表2统计了叶轮出口截面与导叶进口截面的面积,可以看出叶片数的增加会减小导叶的进口截面面积,而7叶片的方案能够与叶轮匹配较好,其进口面积与叶轮出口面积较为吻合,水力损失较小。

表2 叶轮出口与导叶进口面积统计

Tab.2 Area statistics of impeller outlet and diffuser inlet

方案	叶轮出口截面	导叶进口截面	面积比
	面积/mm ²	面积/mm ²	
6叶片	4 644	4 840	1.042 2
7叶片	4 644	4 724	1.017 2
8叶片	4 644	4 607	0.991 0

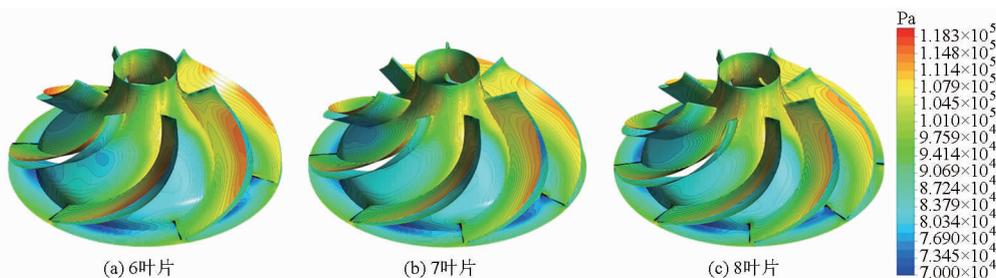


图7 额定流量下空间导叶的静压分布

Fig.7 Static pressure distributions under design flow rate

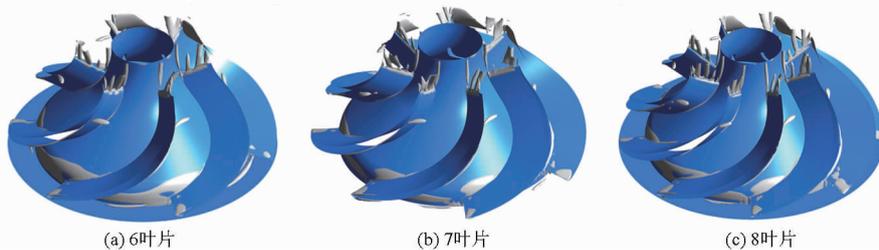


图8 额定流量下空间导叶内部的涡核心区域图

Fig.8 Vortex core region inside space diffuser under design flow rate

图9和图10分别对比了0.6倍额定流量工况下的静压分布和涡核心区域图。在小流量工况下,叶片表面的静压较设计工况大幅降低,6叶片方案的叶片流道内低压区面积较大,且静压从叶片进口到出口呈现了先增后减的趋势,水力损失较大。从涡核心区域图上可以看出,在叶片中部靠近吸力面出现了明显的旋涡。这种涡出现的原因是,在偏离设计工况时,导叶叶片进口的安放角不再与液流角吻合,也就是不再满足无冲击的进口几何条件,这时就会在导叶叶片的进口处产生脱流,脱流产生的旋涡进入叶片流道后呈现旋拧状,并形成了明显的低压区。

图11和图12分别为1.4倍额定流量工况下导叶内部的静压分布和涡核心区域图。相比小流量和

3.2 内流场分析

Q 准则判别法是基于速度梯度张量不变量分析来研究流场中涡团结构的演变,目前被广泛用于判断流场内部旋涡的产生位置和发展、演变规律^[18-19],本文选取阈值 $Q_c = 0.3$ 进行流场分析。

图7和图8分别对比了额定流量工况下3个方案的空间导叶叶片表面的静压分布和叶片流道内的涡核心区域图。可以看出,在额定流量下,相比7叶片和8叶片方案,6叶片方案的空间导叶叶片的背面,靠近导叶中部的区域,出现了明显的低压区。这是由于6叶片方案的叶片数少,叶片间的流道面积较大,液体更容易发生扩散和循环绕流,也会产生较高的水力损失。在额定流量下,3个方案的涡核心区域图非常相近,叶片流道内均出现明显的旋涡,在导叶叶片出口处观察到明显的由于脱流而产生的旋涡。

设计工况,此时导叶叶片的静压大幅增加。在8叶片方案的导叶叶片的工作面,靠近进口处,出现了明显的低压区。这说明在大流量工况下,过多的叶片导致叶片流道过流面积受限,同时再加上液流角与叶片进口安放角的差异,导致此处产生了较高的冲击损失。

4 泵性能试验与分析

4.1 模型泵加工与试验

通过上述分析,7叶片的方案相比另外2个方案,水力损失较小,流动较为稳定,效率较高,因此最终选择7叶片的空间导叶为最终方案,并进行了样机的加工制造。叶轮和导叶的材料为聚苯醚(PPO),它具有刚性大、耐热性高、强度较高、耐磨、

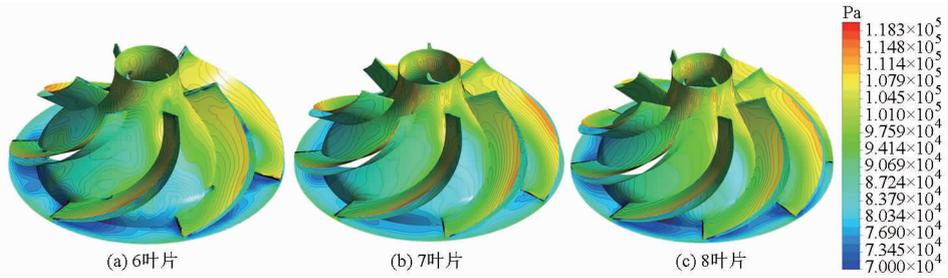


图9 0.6倍额定流量下空间导叶的静压分布

Fig. 9 Static pressure distributions under 0.6 times design flow rate

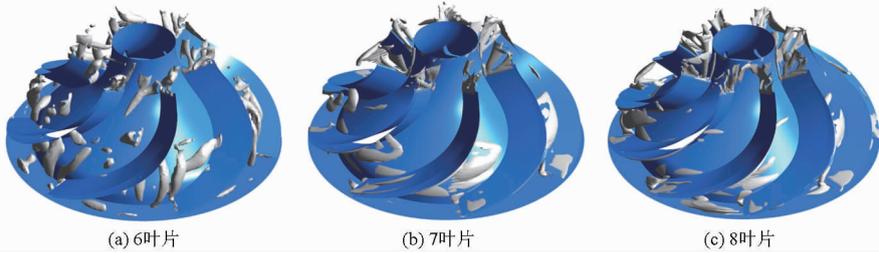


图10 0.6倍额定流量下空间导叶内部的涡核心区域图

Fig. 10 Vortex core region inside space diffuser under 0.6 times design flow rate

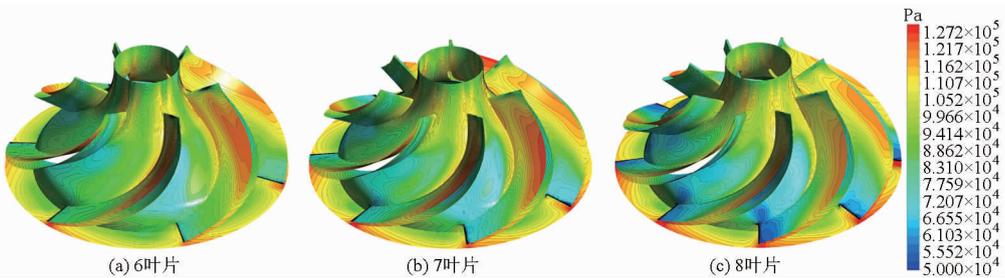


图11 1.4倍额定流量下空间导叶的静压分布

Fig. 11 Static pressure distributions under 1.4 times design flow rate

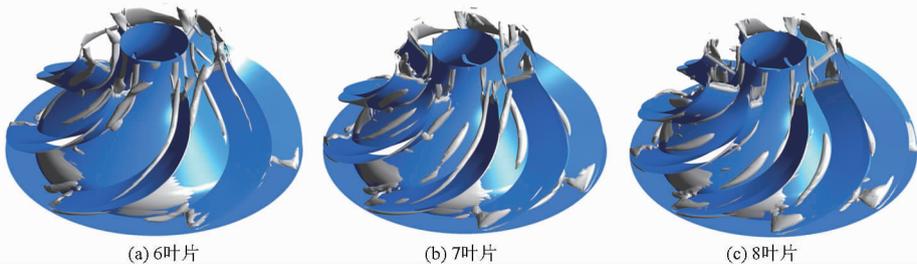


图12 1.4倍额定流量下空间导叶内部的涡核心区域图

Fig. 12 Vortex core region inside space diffuser under 1.4 times design flow rate

无污染等优点^[20]。图13所示为通过注塑脱模加工出的叶轮和导叶实体模型。

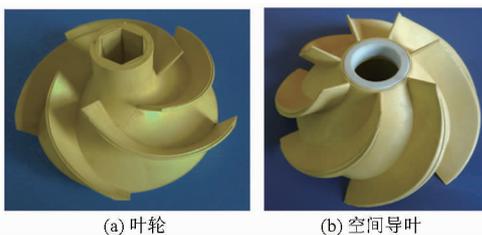


图13 叶轮和导叶的PPO实体模型

Fig. 13 PPO solid model of impeller and diffuser

试验装置总体框架如图14所示。并用潜水泵在潜水电机的驱动下,将水从水池中吸出并经过出口管路最终流回试验水池。其中流量采用DN400型电磁流量计采集,其原理是基于法拉第电磁感应定律,精度较高。功率的测量由三相功率测量仪基于电测功法完成。

4.2 泵性能试验结果

通过泵性能试验,得到了模型泵在不同流量下的扬程、功率和泵效率,如表3所示。可以看出模型泵的性能已经达到了预期目标,在额定流量 $36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,泵的总扬程超过了预定的75 m,而且泵效率达

性能试验在浙江省机电产品质量检测所完成。

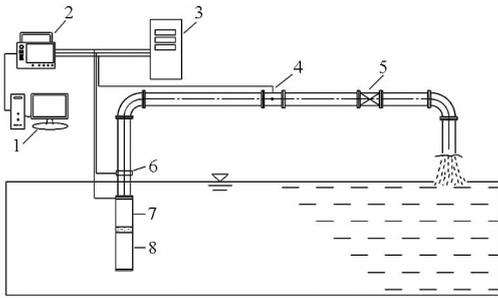


图 14 泵性能试验装置示意图

Fig. 14 Schematic of test rig

1. 计算机 2. 数据采集仪 3. 配电柜 4. 电磁流量计 5. 调节阀 6. 压力传感器 7. 泵体 8. 电动机

到了 73.5%, 泵单级扬程和泵效率均远超过国家标准的规定值, 而且其高效区较宽, 功率曲线呈现出明显的无过载特性, 泵性能优秀。

为了进一步验证数值模拟的精度, 将数值模拟预测的泵性能与试验结果进行了对比, 如图 15 所示。需要注意的是, 试验中模型泵的级数为 7, 因此先将其总扬程和总功率除以级数分别换算得到单级扬程和单级功率, 再根据单级扬程和单级功率计算出单级泵效率, 而后与单级泵的数值模拟结果进行对比。可以看出, 在额定流量下, 数值模拟预测的扬程高于试验结果 10%, 功率高于试验值 9.6%, 效率

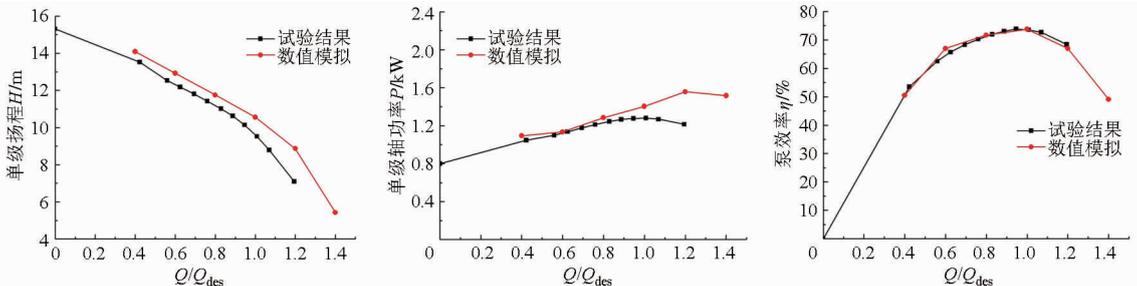


图 15 泵性能试验结果与数值模拟结果的对比

Fig. 15 Comparisons between test and numerical results

5 结论

(1) 在小流量工况下, 叶片数的增加提高了空间导叶叶片流道内整流效果, 泵的扬程随叶片数的增加而提高。在大流量工况下, 过多的叶片会产生较多的水力损失, 较少的叶片数有利于泵扬程的提高。

表 3 泵性能试验结果

Tab. 3 Pump performance test results

$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	H/m	P/kW	$\eta/\%$
0	122.52	6.397	0
15.20	108.17	8.372	53.49
20.14	100.28	8.800	62.51
22.49	97.47	9.093	65.68
25.00	94.47	9.414	68.33
27.36	91.38	9.694	70.26
29.84	88.15	9.958	71.96
31.94	85.02	10.127	73.04
34.09	81.11	10.205	73.84
36.28	76.21	10.242	73.54
38.51	70.30	10.142	72.71
43.01	56.78	9.721	68.43

高于试验值 0.3%, 两者整体随流量的变化趋势基本一致。分析两者间误差产生的原因, 其中一个原因是考虑到网格的数量和计算机配置, 本文仅选用了单级的模型来对多级并用潜水泵的性能进行预测。一般来说, 首级叶轮的进口为无旋转流动, 首级的扬程和功率往往会高于其后各级。因此, 在今后的多级泵数值计算中, 在计算机配置允许的情况下, 应尽可能的采用二级、三级的模型进行数值仿真, 这样能得到更为精确的泵性能预测结果。

(2) 7 叶片的方案能够与叶轮匹配较好, 水力损失较小。试验结果表明模型泵性能优秀, 高效区较宽, 功率曲线呈现出明显的无过载特性。

(3) 数值模拟预测的扬程和功率均略高于试验结果, 预测的泵效率与试验值基本一致, 预测值与试验结果随流量变化的整体趋势基本一致, 数值模拟结果具有一定的参考意义, 其准确性有待进一步改进。

参 考 文 献

- 1 施卫东, 袁寿其, 李世英, 等. 泵行业存在的主要问题及急需解决的关键技术[J]. 排灌机械, 2001, 19(6): 7-9. SHI Weidong, YUAN Shouqi, LI Shiyong, et al. Main existing problem and key technology to be solved of pump industry in China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(6): 7-9. (in Chinese)
- 2 DAZIN A, CAVAZZINI G, PAVESI G, et al. High-speed stereoscopic PIV study of rotating instabilities in a radial vaneless diffuser[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(1): 83-93.
- 3 江伟, 朱相源, 李国君, 等. 导叶与隔舌相对位置对离心泵叶轮径向力的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 28-34. JIANG Wei, ZHU Xiangyuan, LI Guojun, et al. Influence of relative installation positions of guide vane and volute tongue on

- radial force in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 28-34. (in Chinese)
- 4 徐媛晖, 张启华, 施卫东, 等. 塑料井泵新型轴向导叶设计及内部压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(1): 18-25.
XU Yuanhui, ZHANG Qihua, SHI Weidong, et al. Design of new type diffuser of plastic well pump and pulsation characteristics of internal pressure[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(1): 18-25. (in Chinese)
- 5 张启华, 徐燕, 施卫东, 等. 多级离心泵圆周弯扭式导叶设计及性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 37-43.
ZHANG Qihua, XU Yan, SHI Weidong, et al. Design and performance test of circumferential crangle guide vane of multistage centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 37-43. (in Chinese)
- 6 施卫东, 张启华, 陆伟刚. 新型井泵水力设计及内部流动的数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(6): 528-531.
SHI Weidong, ZHANG Qihua, LU Weigang. Hydraulic design of new-type deep well pump and its flow calculation[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(6): 528-531. (in Chinese)
- 7 ZHOU Ling, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Numerical investigations and performance experiments of a deep-well centrifugal pump with different diffusers[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 0711002-0711002-8.
- 8 周岭, 施卫东, 陆伟刚, 等. 深井离心泵轴向力数值预测与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 100-103, 140.
ZHOU Ling, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Numerical prediction and experiment of axial force on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 100-103, 140. (in Chinese)
- 9 杨敏官, 李辉, 高波, 等. 离心泵内流场计算及空间导叶内流动分析[J]. 流体机械, 2008, 36(7): 16-19.
YANG Minguan, LI Hui, GAO Bo, et al. Numerical calculation of turbulent flow in a centrifugal pump and flow field analysis to vaned diffuser[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(7): 16-19. (in Chinese)
- 10 曹树良, 谭磊, 桂绍波. 离心泵前置导叶设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 1-5.
CAO Shuliang, TAN Lei, GUI Shaobo. Experiment of inlet guide vane for centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 1-5. (in Chinese)
- 11 周邵萍, 胡良波, 张浩. 多级离心泵级间导叶性能优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 33-39.
ZHOU Shaoping, HU Liangbo, ZHANG Hao. Performance optimization for intermedia stage guide vanes of multistage centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 33-39. (in Chinese)
- 12 丛小青, 王光辉, 袁丹青, 等. 空间导叶式离心泵的数值计算及优化设计[J]. 排灌机械, 2010, 28(6): 488-491, 514.
CONG Xiaoqing, WANG Guanghui, YUAN Danqing, et al. Numerical calculation and optimal design of centrifugal pump with space guide vanes [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2010, 28(6): 488-491, 514. (in Chinese)
- 13 孔繁余, 宿向辉, 陈浩, 等. 离心泵径向导叶正叶片参数的优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 40-45.
KONG Fanyu, SU Xianghui, CHEN Hao, et al. Optimal design on parameters of guide vane of radial diffusers in centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 40-45. (in Chinese)
- 14 王伟, 施卫东, 蒋小平, 等. 基于正交试验及 CFD 的多级离心泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(3): 191-197.
WANG Wei, SHI Weidong, JIANG Xiaoping, et al. Optimization design of multistage centrifugal pump impeller by orthogonal experiment and CFD [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(3): 191-197. (in Chinese)
- 15 秦杰, 徐士鸣. 导叶结构对核主泵性能的影响[J]. 发电设备, 2010, 24(5): 315-318.
QIN Jie, XU Shiming. Influence of guide vane structure on performance of reactor coolant pumps [J]. Power Equipment, 2010, 24(5): 315-318. (in Chinese)
- 16 崔宝玲, 孟嘉嘉, 贾晓奇. 基于 CFD 技术的多级潜水泵优化设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 142-146.
CUI Baoling, MENG Jiajia, JIA Xiaoqi. Optimization design of multi-stage submersible pump based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 142-146. (in Chinese)
- 17 周岭, 施卫东, 陆伟刚, 等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 69-73.
ZHOU Ling, SHI Weidong, LU Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 69-73. (in Chinese)
- 18 秦文瑾, 解茂昭, 贾明. 基于大涡模拟的发动机缸内湍流流动及拟序结构[J]. 内燃机学报, 2012, 30(2): 133-140.
QIN Wenjin, XIE Maozhao, JIA Ming. Investigation on engine in-cylinder turbulent flow and coherent structure based on large eddy simulation [J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(2): 133-140. (in Chinese)
- 19 BELLANI G, BYRON M L, COLLIGNON A G, et al. Shape effects on turbulent modulation by large nearly neutrally buoyant particles [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 712: 41-60.
- 20 马丽华, 盛利军, 张振, 等. 我国动态保压注塑技术的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(7): 127-131.
MA Lihua, SHENG Lijun, ZHANG Zhen, et al. Research advance in dynamic packing injection molding technology of China [J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(7): 127-131. (in Chinese)