

低比转速离心泵内部流场分析及试验

张德胜, 施卫东, 陈 斌, 曹卫东, 田 飞

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘 要: 为了研究低比转速离心泵内部流动特性, 对 10 种不同设计方案的低比转速离心泵进行了数值模拟和性能预测, 讨论了叶轮和蜗壳的关键几何参数对内部流场和外特性的影响, 分析了不同设计方案下泵内的静压、流线、速度和湍动能等分布, 并针对复合式叶轮短叶片的位置和蜗壳喉部面积进行了对比试验。试验结果表明, 该文优选的方案 D, 通过增加偏置短叶片后, 扬程提高了 5.5 m, 效率提高了 3.23%; 增大蜗壳内部和喉部面积后, 5 种设计方案的额定点扬程均提高了约 10 m, 效率提高了约 5%, 且扩大了高效区范围。该研究将为低比转速离心泵的性能优化提供一定的科学依据。

关键词: 泵, 流场, 试验, 短叶片, 喉部面积, 性能预测

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.019

中图分类号: S220.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0108-06

张德胜, 施卫东, 陈 斌, 等. 低比转速离心泵内部流场分析及试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 108—113.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Turbulence analysis and experiments of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 108—113. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

低比转速离心泵具有流量小、扬程高的特点, 广泛应用于农业排灌、城市供水、锅炉给水、矿山、石油、化工等国民经济各个领域。由于低比转速离心泵叶片出口宽度小、叶轮外径大、叶轮流道狭长等特点, 其圆盘摩擦损失较大, 易产生“射流-尾迹”和驼峰现象, 且在大流量区运行易过载。因此低比转速离心泵一直是国内外研究的热点和难点, 众多学者在几何参数优化设计、试验研究、设计方法和数值模拟等方面进行了大量的研究^[1-7], 本课题根据某装备对泵的特殊需要, 讨论了不同设计方案叶轮和蜗壳的几何参数对低比转速离心泵内部流动和外特性的影响, 通过数值模拟方法在设计初期发现和消除水泵内部流动产生的旋涡、二次流、边界层分离、尾流等不良现象, 并通过试验对短叶片和喉部面积对性能的影响进行了试验验证, 取得了满意的结果。

1 设计方案

该低比转速离心泵的设计参数及要求见表 1。该泵比转速为 32, 属于低比转速离心泵。

本文基于加大流量设计法, 采用增加短叶片、加大蜗壳喉部面积等措施^[4-5], 设计了 10 种不同的组合方案, 通过性能预测和内部流动分析, 对水力模型进行优化。

收稿日期: 2009-07-28 修订日期: 2010-09-10

基金项目: 国家“863 计划”(2007AA05Z207); 国家科技支撑计划(2008BAF34B15)

作者简介: 张德胜(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为流体机械理论及 CFD。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。

Email: zds@ujs.edu.cn

表 1 设计参数及要求

Table 1 Design parameters and requirements

工况	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	扬程/ m	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	功率/ kW	效率/ %
设计流量点	18	≥ 86	3 500		≥ 43.9
1.5 倍设计流量点	27	≥ 55.9	3 500	≤ 12.3	
关死点	0	≤ 120	3 500		

表 2 10 种低比转速离心泵设计方案

Table 2 Ten design cases

设计 方案	喉部 面积/ mm^2	叶轮 外径/ mm	长叶 片数/ 枚	短叶 片数/ 枚	叶片出 口宽度 /mm	短叶片 进口直 径/mm	叶片 包角/ ($^\circ$)	叶片出 口角/ ($^\circ$)
A	319 236	214	4	4	7	101.6	120	22.5
a	300							
B	319 236	214	3	3	7	102.4	150	30
b	300							
C	319 236	214	4	/	7	/	200	28
c	300							
D	319 236	214	4	4	7	169	200	28
d	300							
E	319 236	214	5	/	7	/	130	30
e	300							

2 内部流场计算与讨论

2.1 计算方法

运用 FLUENT 软件, 采用三维定常 N-S 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 二方程湍流模型对泵的三维全流场进行了数值计算。进口采用均匀速度进口条件, 出口采用自由出流条件。采用动静双参考系处理叶轮和蜗壳中的水流运动问题。叶轮流道区域采取旋转坐标系, 旋转方向为沿 z 轴正向, 转速 3 500 r/min, 蜗壳流道区域为静止系。近壁面的湍流流动采用标准壁面函数处理。采用 SIMPLE 算法和二阶

迎风格式离散差分方程^[8-15]。泵内部采用非结构化网格, 网格总数约 120 万。设定各个速度分量及 k 、 ε 的收敛精度为 10^{-5} , 且叶轮出口压力稳定后计算收敛。

2.2 性能预测

根据数值计算结果求得不同工况下的泵进、出口总压 p_{in} 、 p_{out} , 根据 (1) 式计算扬程。

$$H = z_2 - z_1 + \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho g} \quad (1)$$

式中, H 为泵的扬程, m; z_1 、 z_2 为泵进出口到基准面的高度, m; p_{out} 为泵的出口总压, Pa; p_{in} 为泵的进口总压, Pa; ρ 为水的密度, kg/m^3 。

根据 FLUENT 叶轮绕 z 轴的力矩之和 M_n (不计机械损失和容积损失), 在该假设情况下, 可根据下式可算出泵的输入功率 P 。

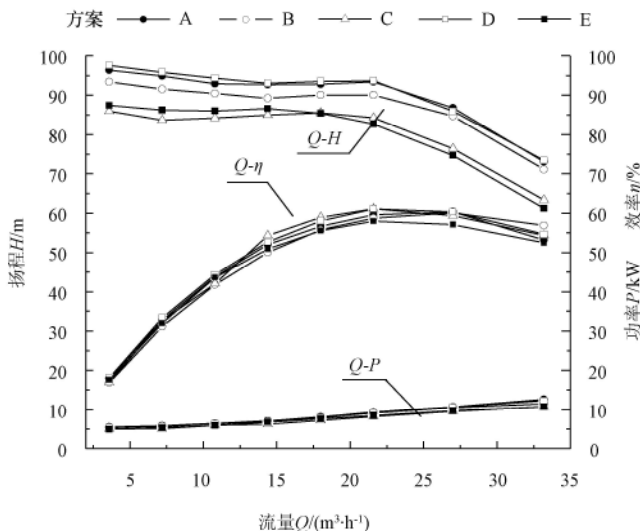
$$P = n \cdot M_n / 9552 \quad (2)$$

式中, P 为泵的输入功率, kW; n 为水泵转速, r/min; M_n 为叶轮转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

水力效率

$$\eta = \rho g Q H / P \quad (3)$$

根据式 (1)、(2) 和 (3) 计算得到泵的扬程和效率, 对不同工况点的预测结果进行曲线拟合, 性能预测结果如图 1 和图 2 所示。



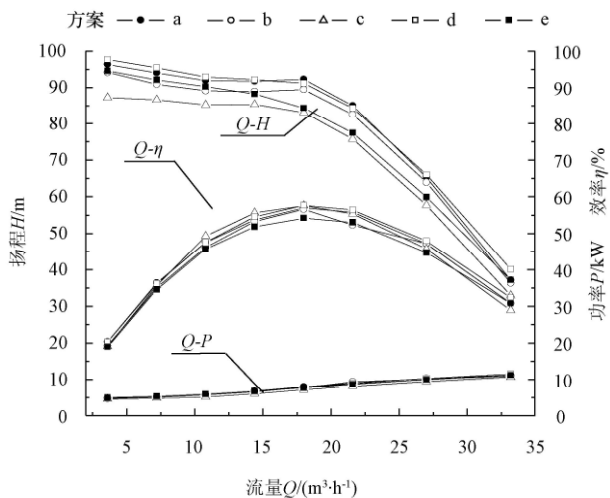
注: $Q-H$ 为流量-扬程曲线; $Q-\eta$ 为流量-效率曲线; $Q-P$ 为流量-功率曲线

图 1 方案 A~E 外特性预测

Fig.1 Performance prediction of cases A-E

从图 1 和图 2 可以得知, 蜗壳喉部面积增大后, 扬程曲线变得更加平坦, 在全扬程范围内效率提高, 高效区范围增大, 最高效率点向大流量区偏移。根据低比转速离心泵扬程曲线的要求, 方案 A~E 优于方案 a~e, 为此, 选择方案 A~E 作进一步分析。图 1 中, 设计点的扬程大小排序依次为: 方案 D→A→B→C→E, 叶片数为“4 长+4 短”的方案 D 扬程最高, 主要原因为短叶片有效控制了轴向旋涡, 减小了滑移; 效率大小排序依次为: C→D→A→B→E, 方案 C 效率最高, 其叶片数为 4, 减

少了叶片沿程摩擦和边界层损失。方案 D 增加短叶片后, 高效区向大流量区偏移, 其效率在大流量区比方案 C 略高。方案 A 和 D 相比较, 方案 D 的短叶片设计较合理, 方案 A 的短叶片较长, 引起较大冲击损失和沿程摩擦损失, 导致水力效率降低。从外特性对比可知, 方案 C 和 D 均具有较优的性能, 由于方案 D 增加了短叶片, 其扬程高于方案 C。



注: $Q-H$ 为流量-扬程曲线; $Q-\eta$ 为流量-效率曲线; $Q-P$ 为流量-功率曲线

图 2 方案 a~e 外特性预测

Fig.2 Performance prediction of cases a-e

2.3 内部流场特性

方案 A~E 为设计工况下中截面流线和速度矢量分布, 分别如图 3、图 4 所示。方案 A 和 B 中叶片出口处出现明显的旋涡区, 方案 B 的短叶片进口出现强烈的湍流脉动, 从流动分布来看, 方案 A 和 B 的短叶片设计不合理, 导致叶道中的流动不稳定。方案 C 和 D 流线分布均匀, 没有出现局部回流和脱流现象。方案 E 由于叶片数较少, 且包角较小, 流线滑移较大。从图 4 的速度场分布可知, 速度矢量分布与流线分布一致, 方案 C 和 D 的速度场分布合理。

图 5 为方案 C 和 D 设计工况下中截面静压分布。对比发现, 方案 C 和 D 静压梯度分布较均匀。由于复合式叶轮进口叶片数少, 静压相对较高, 有利于提高泵的汽蚀性能。增加短叶片后, 叶片出口的静压增大, 提高了扬程。为此, 可通过采用增加短叶片而减小叶轮外径的措施, 从而进一步提高低比转速离心泵的效率。

湍动能表示了湍流脉动的程度, 其大小和空间不均匀性也在一定程度上表明了脉动扩散和粘性耗散损失的大小和发生范围。图 6 为设计工况下方案 A~E 湍动能分布。从图中可以看出, 方案 A、B 和 E 湍动能值较大且分布范围广, 这与前面的流线分布情况相一致。方案 C 和 D 湍流脉动相对较小, 方案 D 中短叶片进口边两侧冲击产生的湍动能较小。为此多种设计方案中, 方案 D 表现出较优的性能, 内部流动稳定, 外特性符合设计要求。

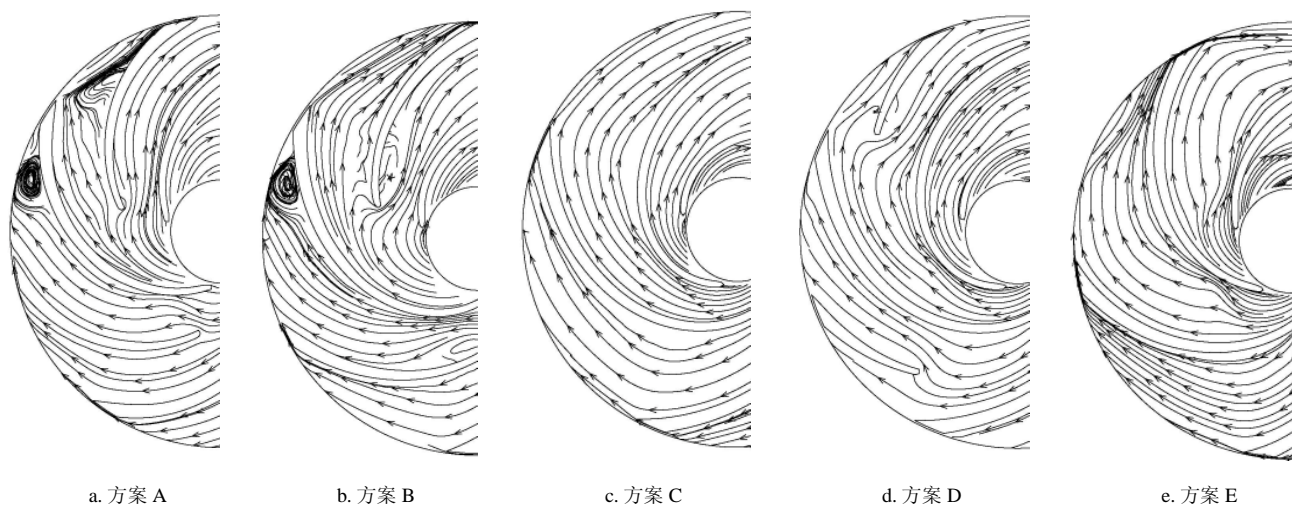


图 3 方案 A~E 中截面流线分布
Fig.3 Streamline distribution of cases A-E

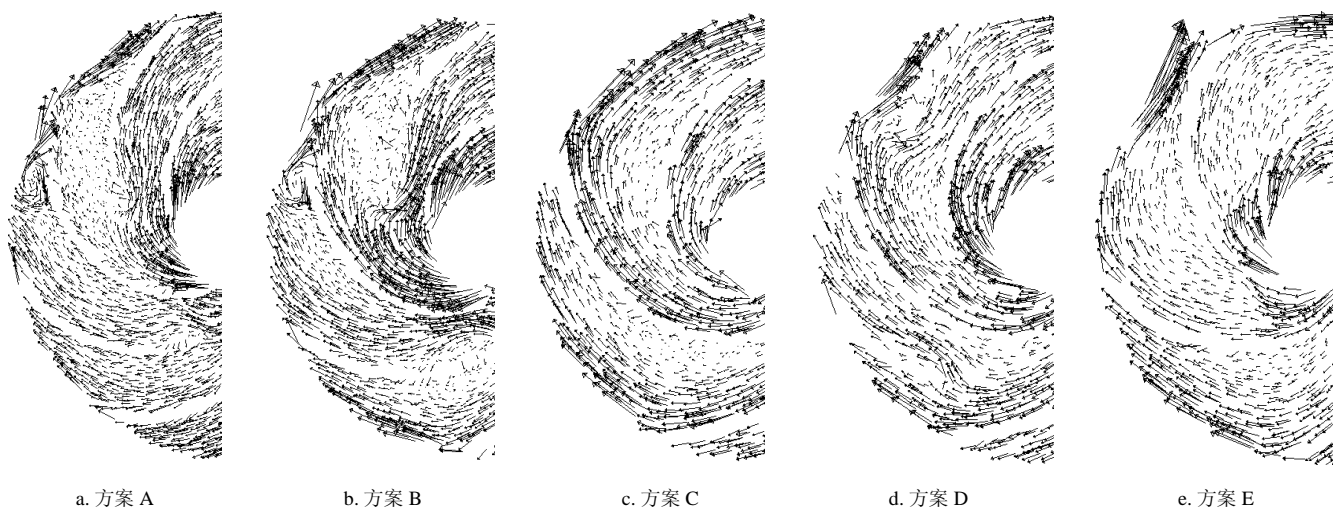
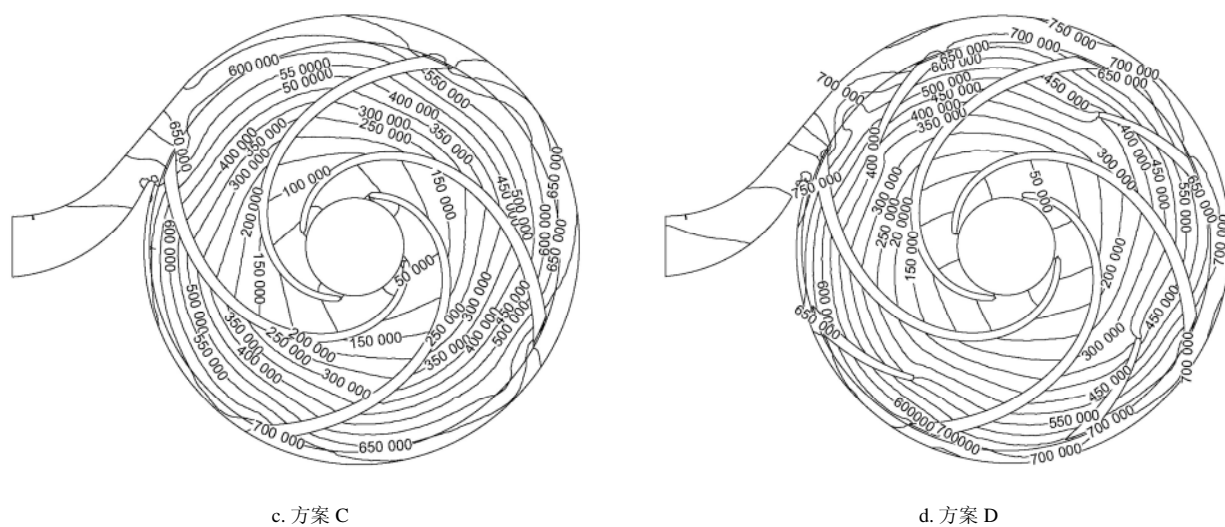
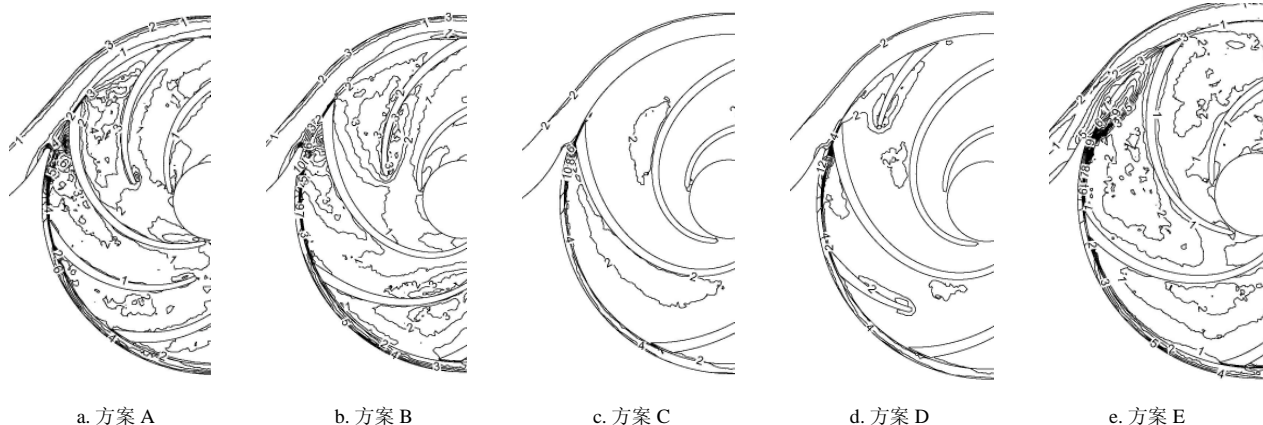


图 4 方案 A~E 中截面速度矢量
Fig.4 Velocity vector distribution of cases A-E



注：图中截面数值为静压值，Pa

图 5 方案 C、D 中截面静压分布
Fig.5 Static pressure distribution of cases C, D



注: 中截面数值为湍动能值, m^2/s^2

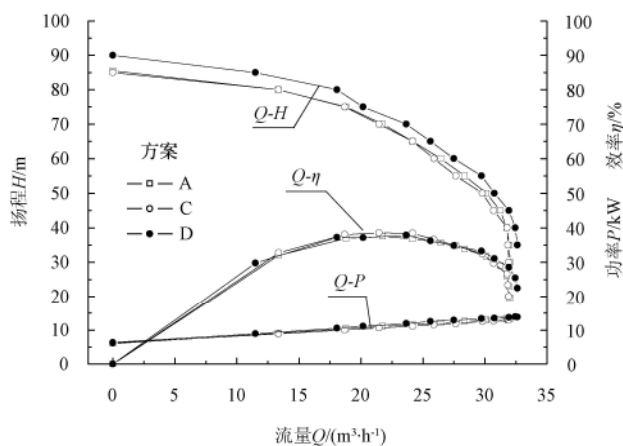
图 6 方案 A~E 中截面湍动能分布

Fig.6 Turbulent kinetic energy distribution of case A- E

3 试验研究

3.1 短叶片及其位置对性能影响

短叶片的长度和偏置对效率和扬程具有重要的影响, 为了进一步研究短叶片对低比转速离心泵性能的影响, 将方案 C 与方案 A 和 D 进行了对比试验, 其中方案 C 不含短叶片, 方案 A 和 D 含有不同结构的短叶片。试验结果如图 7 所示。



注: $Q-H$ 为流量-扬程曲线; $Q-\eta$ 为流量-效率曲线; $Q-P$ 为流量-功率曲线

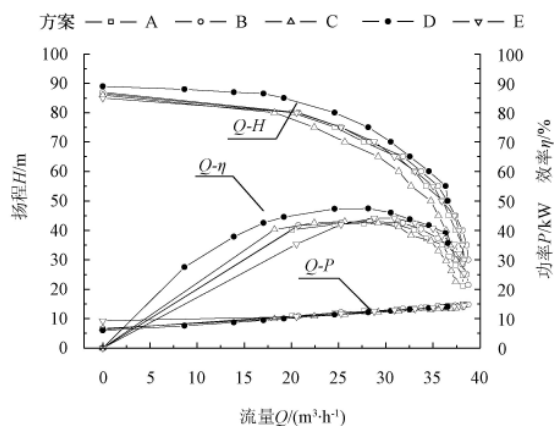
图 7 加短叶片后的性能试验

Fig.7 Performance comparison of adding splitters

图 7 中的试验结果表明, 方案 D 增加短叶片后, 在全扬程范围内扬程提高了约 6%, 效率提高约 1%。方案 A 中的短叶片较长, 其进口直径为 $0.48D_2$, 与不含短叶片的方案 C 相比较, 其扬程并没有增大, 通过流动分析得知, 其内部流动较差, 湍流脉动大, 短叶片太长后沿程摩擦损失也较大, 水力效率低。方案 C 为 4 枚长叶片, 其内部流动稳定, 沿程摩擦损失小, 效率较高。通过对比发现, 合理的短叶片可以有效抑制轴向旋涡, 改变叶轮出口相对速度分布, 阻止二次流的产生和发展, 有效控制了“射流-尾迹”结构, 提高泵的扬程和效率。但若短叶片设计不合理, 可能导致性能下降。

3.2 两组不同的喉部面积对比试验

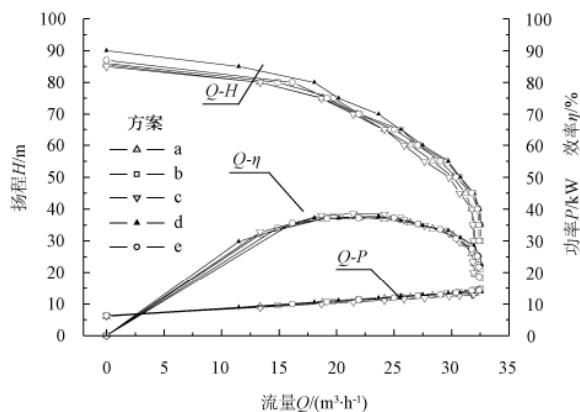
喉部面积是低比转速离心泵设计的重要参数之一。喉部面积对扬程的平坦性和效率具有较大的影响, 在性能预测中也论证了这一观点。为了进一步证实, 将 5 种设计方案与 2 种不同喉部面积蜗壳进行了对比试验, 试验结果如图 8 和图 9 所示。



注: $Q-H$ 为流量-扬程曲线; $Q-\eta$ 为流量-效率曲线; $Q-P$ 为流量-功率曲线

图 8 常规喉部面积的性能试验

Fig.8 Performance experiments of normal throat area



注: $Q-H$ 为流量-扬程曲线; $Q-\eta$ 为流量-效率曲线; $Q-P$ 为流量-功率曲线

图 9 较大喉部面积的性能试验

Fig.9 Performance experiments of bigger throat area

从图 8、图 9 的性能试验对比可知,增大蜗壳喉部面积后,在全扬程范围内,5 种方案的扬程均增大,扬程曲线变得更加平坦,改善了非设计工况下低比转速离心泵的水力性能。主要因为低比转速离心泵蜗壳的几何参数对性能影响较大,流道过流面积增大,流速减小,减小了沿程摩擦损失。从效率指标上看,效率提高明显,高效区加宽,最高效率点向大流量区偏移。

通过多方案内部湍流场分析和试验验证,方案 D 复合型叶轮与较大喉部面积的蜗壳进行组合,可获得理想的性能。

4 结 论

1) 通过多方案离心泵内部流场分析和性能预测,周期短,效率高,成本低,在一定程度上可代替部分试验,在短期内可对特殊性能要求的泵进行优化设计。

2) 低比转速离心泵叶轮增加合适的短叶片后,可改善内部流动,提高扬程和效率,但短叶片与其他几何参数匹配不当,可能会导致性能下降。

3) 在一定范围内增大蜗壳喉部面积,可以扩大高效区范围,并且使性能曲线变得更加平坦,其对指导低比转速离心泵设计具有一定的参考价值。

4) 通过本文的流场分析和试验验证,推荐低比转速离心泵采用叶片数为“4 长 4 短”的复合叶轮,其可以获得较优的性能。

[参 考 文 献]

- [1] Gonzalez J, blanco E, Santolaria C. Numerical Simulation of the Dynamic Effects Due to Impeller Volute Interaction in a Centrifugal Pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002(124): 348—355.
- [2] 陈松山,周正富,葛强,等. 长短叶片离心泵叶轮内部流动的 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 98—101. Chen Songshan, Zhou zhengfu, et al. PIV measurement of internal flow in centrifugal pump impeller with splitters[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(2): 98—101. (in Chinese with English abstract)
- [3] 袁寿其,张金凤,袁建平. 正交试验研究短叶片主要参数对性能影响[J]. 排灌机械, 2008, 26(2): 1—5. Yuan Shouqi, Zhang Jinfeng, Yuan Jianping. Orthogonal experimental study effect of main geometry factors of splitter blades on pump performance[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(2): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yuan Shouqi, Zhang Jinfeng, Yuan Jianping, et al. Effects of splitter blades on the law of inner flow within a centrifugal pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2007, 20(5): 59—63.
- [5] 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.
- [6] 何有世,袁寿其,郭晓梅,等. 带分流叶片的离心泵叶轮内三维不可压湍流场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 153—157. He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for 3D incompressible turbulent flow in the impeller with splitting vanes of centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [7] 黎义斌,张德胜,赵伟国,等. 叶片数及分流叶片位置对离心泵性能的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 45—48. Li Yibin, Zhang Desheng, Zhao Weiguo, et al. Influence of blade number and splitter-blade position on performance of centrifugal pumps[J]. Journal of Lanzhou University, 2008, 34(2): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张德胜,施卫东,陆伟刚,等. 离心式消防泵性能影响因素及内流场分析[J]. 排灌机械, 2008, 26(1): 10—14. Zhang Desheng, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Hydraulic influence factors and inner flow analysis of centrifugal fire pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 newtype deep well pump and its flow calculation[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(6): 528—531. (in Chinese with English abstract)
- [10] 施卫东,汪永志,沙毅. 旋流泵内部流动的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 67—70. Shi Weidong, Wang Yongzhi, Sha Yi. Research on the internal flow of vortex pump[J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(1): 67—70. (in Chinese with English abstract)
- [11] 袁寿其,何有世,袁建平,等. 带分流叶片的离心泵叶轮内部流场的 PIV 测量与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 60—63. Yuan Shouqi, He Youshi, Yuan Jianping, et al. PIV measurements and numerical simulations of flow in centrifugal pump impellers with splitting vanes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [12] 施卫东,汪永志,孔繁余. 旋流泵无叶腔内部流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 72—75. Shi Weidong, Wang Yongzhi, Kong Fanyu. Numerical simulation of internal flow field within the volute of vortex pump[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵斌娟,袁寿其,陈汇龙. 基于滑移网格研究双流道泵内非定常流场特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 115—119. Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Chen Huilong. Unsteady flow characteristics in double-channel pumps based on sliding mesh[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 115—119. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐朝晖,吴玉林,陈乃祥,等. 基于滑移网格与 RNG 湍流模型计算泵内的动静干扰[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 66—68. Xu Zhaohui, Wu Yulin, Chen Naixiang, et al. Simulation of turbulent flow in pump based on sliding mesh and RNG k-model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005,

26(1): 66—68. (in Chinese with English abstract)
[15] Shum Y K P, Tan C S, Cumpsty N A. Impeller-diffuser

interaction in a centrifugal compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4): 777—786.

Turbulence analysis and experiments of low-specific-speed centrifugal pump

Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, Cao Weidong, Tian Fei

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

Abstract: In order to investigate the flow field characteristics of low-specific-speed centrifugal pump under multi-conditions, ten different design cases were simulated and their performances were predicted, and the impact of key geometric parameters of impeller and volute on performance and flow field were discussed. The comparative experiments on location of splitter blades and volute throat area were carried out. The investigation results showed that the head increased by 5.5 m and the efficiency increased by 3.23% in the optimal case *D* by adding splitter blades. Through increasing the area of volute flow and throat, the head in all of the five cases improved by 10 m approximately, efficiency improved by about 5%, which could expand the high-efficiency scope and improve maximum efficiency. The investigation can provide certain scientific basis for the performance optimization of low-specific-speed centrifugal pump.

Key words: pump, flowfield, experiments, splitter blade, throat area of volute, performance prediction