

双吸离心泵蜗壳面积比对水力性能的影响研究

朱迪^{1,2} 肖若富^{1,2} 田芳^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学北京市供水管网系统安全与节能工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 双吸离心泵具有流量大、扬程高的特点,被广泛应用于农业输水灌溉等工程。双吸泵的蜗壳和叶轮间具有动静干涉作用,两者之间的匹配形式会对水泵的水力性能产生影响。将 CFD 数值模拟和已有试验数据相结合,通过研究不同比转数的双吸离心泵蜗壳面积比对水力性能的影响,得出不同比转数下双吸离心泵最优蜗壳面积比规律。研究发现,当蜗壳面积比在原有基础上增加时,其最高效率点向大流量工况偏移,且扬程和效率有下降的趋势,设计工况附近的平均效率降低;当蜗壳面积比减小时,其在一定范围内扬程和效率均出现上升,最高效率点偏向于小流量工况,但是当降低到一定程度时,扬程和效率均会出现急剧的下降,最终通过总结各个比转数双吸泵的最优蜗壳面积比,得到随着比转数的增加,最优蜗壳面积比增加,高效区范围逐渐加宽这一规律。

关键词: 双吸离心泵; 蜗壳面积比; 水力性能; 数值模拟

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0123-07

Influence of Double Suction Centrifugal Pump Volute Area Ratio on Hydraulic Performance

ZHU Di^{1,2} XIAO Ruofu^{1,2} TIAN Fang^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center of Safety and Energy Saving Technology for Water Supply Network System, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Double suction centrifugal pump has characteristics of large flow rate and high head. It is widely used in agricultural irrigation and water delivery and other projects. The volute and the impeller in double suction pump have rotor-stator interaction. The match between the two will have an impact on the hydraulic performance of double suction centrifugal pump. Therefore, it is very important to study the matching relationship between the volute and the impeller. The CFD numerical simulation was combined with the experimental data. By studying the impact on the hydraulic performance with different specific speeds, the optimal volute area ratio and its regular pattern were obtained. The findings were as follows: when the volute area ratio was increased, the maximum efficiency point was shifted to the large flow rate. The head and efficiency were decreased, and the average efficiency of the high efficiency area was reduced. When the area ratio was reduced, the head and efficiency were increased in a certain range, and the maximum efficiency point was moved to the small flow condition. However, when it was reduced to a certain extent, the head and efficiency showed a rapid decline. Finally, based on the summary of the optimal volute area ratio of the double suction pump with different specific speeds, it was found that with the increase of the specific speed, the optimal volute area ratio was increased, and the range of the high efficiency area was widened gradually. The results provided a reference for the reasonable selection of the volute area ratio in double suction centrifugal pump and improved the hydraulic performance of double suction pump.

Key words: double suction centrifugal pump; volute area ratio; hydraulic performance; numerical simulation

收稿日期: 2017-05-04 修回日期: 2017-06-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD20B01)和国家自然科学基金项目(51139007)

作者简介: 朱迪(1990—),女,博士生,主要从事水力机械内部流动研究,E-mail: zhu_di@cau.edu.cn

通信作者: 肖若富(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水力机械优化设计及流固耦合研究,E-mail: xrf@cau.edu.cn

0 引言

双吸离心泵作为离心泵的一种重要形式,因其具有扬程高、流量大等特点,被广泛应用于石油、化工、水利等领域^[1-2],双吸离心泵运行时叶轮和蜗壳之间有动静干涉的影响^[3-4],作为过流部件,蜗壳对整个离心泵的水力性能起着非常重要的作用^[5-7]。

对于蜗壳面积比这一原理,最初是由 ANDERSON^[8]提出的,他指出离心泵叶轮与蜗壳流动面积比是一个重要的参数,是决定泵的流量、扬程和功率等特性的主要因素。继而 WORSTER^[9]给出了接近于试验统计数据表示的泵工况理论解释,与此同时,还证明了型式数与蜗壳喉部面积的平方根和叶轮直径之比存在一定的函数关系。国内学者对于蜗壳面积比的研究始于20世纪80年代,郭自杰^[10]通过比较简捷的计算来确定最佳面积比与蜗壳泵比转数之间关系的表达式。张俊达^[11]通过对国产泵优秀水力模型的设计计算资料进行统计归纳,然后使用最小二乘法原理进行回归,推导出反映泵的比转数 n_s 与其面积比 Y 之间的关系式。袁寿其等^[12]研究了蜗壳面积比的原理对于单吸离心泵性能的影响程度,从理论上给出了面积比 $Y=1$ 、 $Y>1$ 和 $Y<1$ 时扬程和轴功率等特性曲线的大致形状,对无过载离心泵,推荐 Y 取1.0~2.0。刘在伦等^[13]指出面积比是决定泵性能参数的重要因素之一,对于较高扬程水泵的设计面积比应 $Y\leq 1$ 。

通过以上研究发现,目前对于单吸离心泵的蜗壳面积比已经进行了较为深入的研究,得到了单吸离心泵蜗壳面积比与比转数之间的关系,蜗壳面积比对扬程和效率等水力性能具有重要影响^[14-15],以及在不同工作状态下和不同性能要求下面积比的适用范围。但是对于双吸离心泵,叶轮为背靠背放置且出口的流动比单吸离心泵更为复杂^[16-17],而对双吸离心泵蜗壳面积比的相关研究却相对较少。本文采用数值模拟方法,研究不同比转数的双吸离心泵蜗壳面积比规律,得出不同比转数下双吸离心泵最优蜗壳面积比关系。

1 计算模型及网格划分

为了研究各个比转数下不同蜗壳面积比的双吸离心泵水力性能,以及其内部流动特性,以5个双吸式离心泵水力模型作为基础研究对象,具体参数如表1所示。建立计算域模型,如图1所示。

数值模拟采用商业软件 ICFM CFD 进行网格离散,双吸离心泵的各个部件模型均采用四面体非结构化网格,并进行计算网格数量的无关性检查。其

表1 双吸离心泵模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of double suction pump models

参数	泵1	泵2	泵3	泵4	泵5
流量 $Q_d / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	800	800	800	800	800
转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 490	1 490	1 490	1 490	1 490
比转数	185	162	126	88	62
扬程 H_d / m	21	25	35	56	90
叶轮进口前盖板直径 D_{1s} / mm	200	200	202	224	212
叶轮进口后盖板直径 D_{1h} / mm	85	87	87	96	111
叶轮出口直径 D_2 / mm	295	310	361	431	530
单侧叶轮出口宽度 b_2 / mm	34	38	35	28	17
叶轮叶片数	6	7	6	6	6

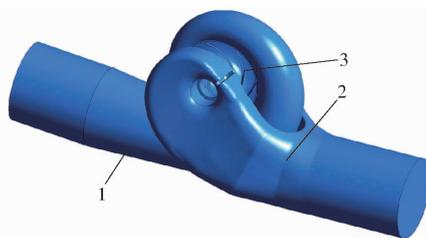


图1 双吸离心泵模型

Fig.1 Double suction pump model

1. 蜗壳 2. 吸水室 3. 叶轮

中以泵2为例,如图2所示,逐步增加计算网格节点数量,检验网格节点数增加过程中扬程模拟值的变化情况,选取一个兼顾计算精确性与计算时间的网格方案。同时,基于湍流模型中的壁面函数要求,控制近壁面网格层数与网格高度,确保 y^+ (网格第一层距离壁面的无量纲高度)分布于30~350范围内,使得网格能有效预测近壁面区域的流动。本研究中5个双吸离心泵模型各个部件最终采用的网格节点数如表2所示。

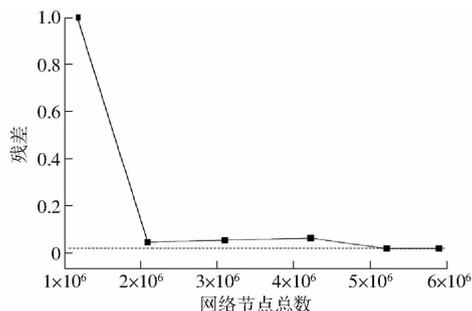


图2 网格规模无关性检查

Fig.2 Mesh scale independence check

表2 计算域各部件网格节点数量

Tab.2 Mesh node number of flow domain

components					
部件	泵1	泵2	泵3	泵4	泵5
吸水室	2 086 000	2 265 000	2 165 000	2 058 000	2 196 000
叶轮	965 400	993 000	943 100	958 000	969 500
蜗壳	1 781 000	1 868 000	1 758 000	1 815 000	1 780 000
总计	4 923 000	5 216 000	5 046 000	4 831 000	4 965 000

2 模拟方法与设置

2.1 模拟方法

数值模拟采用商业软件 ANSYS CFX, 采用 SST (Shear stress transport) $k-\omega$ 湍流模型^[18-19] 进行定常和非定常计算, SST $k-\omega$ 湍流模型的 k 方程与 ω 方程为^[20]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{k-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = C_\omega P - \beta \rho \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_t + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad l_{k-\omega} = k^{1/2} \beta_k \omega \quad (3)$$

式中 ρ ——粘度 P ——生成项

μ ——动力粘度

μ_t, μ_{t_i} ——涡粘性系数

$\sigma_k, \sigma_\omega, \sigma_{\omega_2}, \beta, \beta_k$ ——模型常数

C_ω ——生成项系数

F_1 ——混合系数

$l_{k-\omega}$ ——湍流尺度

k ——湍动能强度 t ——时间

u_i ——速度 x_i ——单位坐标

ω ——湍动能耗散项

2.2 计算设置

数值模拟计算采用多参考系模型(MRF), 其中双吸离心泵的叶轮部分设置为旋转域, 旋转域转速与叶轮转速一致, 吸水室和蜗壳部分设置为静止域。模拟参考压强为 1.01325×10^5 Pa。边界条件设置为: 进口边界条件采用质量流量进口, 出口边界条件给定静压出口, 静压值为 0 Pa, 固壁边界类型为无滑移壁面边界; 以定常计算的结果为基础, 进行非定常数值模拟, 模拟计算共 10 个转轮周期, 每个转轮周期计算 180 个时间步。

2.3 蜗壳面积比设置

为有针对性地研究不同比转数下双吸离心泵蜗壳面积比的变化对于水力性能的影响, 根据文献[21], 重新定义蜗壳面积比

$$Y = \frac{F_{\text{III}}}{F_2} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad F_2 = 2\pi D_2 b_2 \quad (5)$$

式中 F_{III} ——在蜗壳隔舌处与其垂直的过流断面面积, mm^2

F_2 ——双吸离心泵两侧叶轮出口总面积, mm^2

为了简化和方便设计, 将蜗壳喉部面积近似看作为蜗壳第 VIII 断面面积, 如图 3 所示。

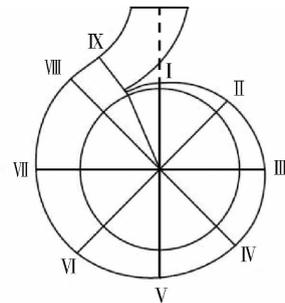


图 3 蜗壳水力图

Fig. 3 Hydraulic diagram of volute

因此对于蜗壳面积比进一步定义为

$$Y = \frac{F_{\text{VIII}}}{F_2} \quad (6)$$

式中 F_{VIII} ——蜗壳第 VIII 断面面积, mm^2

分别对 5 种不同比转数的双吸离心泵选取不同蜗壳面积比。首先通过原始几何参数计算出原始的叶轮出口面积 F_2 和蜗壳第 VIII 断面面积 F_{VIII} , 得到原始蜗壳面积比 Y , 并且查表得到单吸离心泵在该比转数下最优蜗壳面积比 Y_{sgl} , 同时考虑几何尺寸之间的匹配关系, 最终选取几种蜗壳面积比, 具体数值如表 3 所示。

表 3 双吸泵蜗壳面积比参数

Tab. 3 Volute area ratio parameters of double suction pumps

	泵 1	泵 2	泵 3	泵 4	泵 5
比转数	185	162	126	88	62
原始 F_2/mm^2	86 653	73 237	77 409	72 473	56 612
$F_{\text{VIII}}/\text{mm}^2$	38 150	41 430	31 840	16 387	11 062
原始 Y	0.440	0.560	0.410	0.230	0.190
Y_{sgl}	0.460	0.410	0.325	0.240	0.180
	0.500	0.830	0.500	0.300	0.240
	0.460	0.620	0.450	0.260	0.210
计算选取的	0.400	0.410	0.325	0.240	0.180
蜗壳面积比	0.300	0.380	0.300	0.200	0.150
	0.200	0.350	0.250	0.150	

3 结果分析

3.1 蜗壳面积比对扬程的影响

对 5 种不同比转数的双吸离心泵进行全流道的数值模拟, 为分析蜗壳面积比对扬程的影响, 图 4 列出了不同蜗壳面积比流量 (Q)—扬程 (H) 曲线模拟值与试验值对比。

首先通过图 4b~4d 中计算值和试验值的对比可以看出两者较为吻合, 证明数值模拟具有较强的可行性和准确性。然后从图 4 中可以看出, 对于

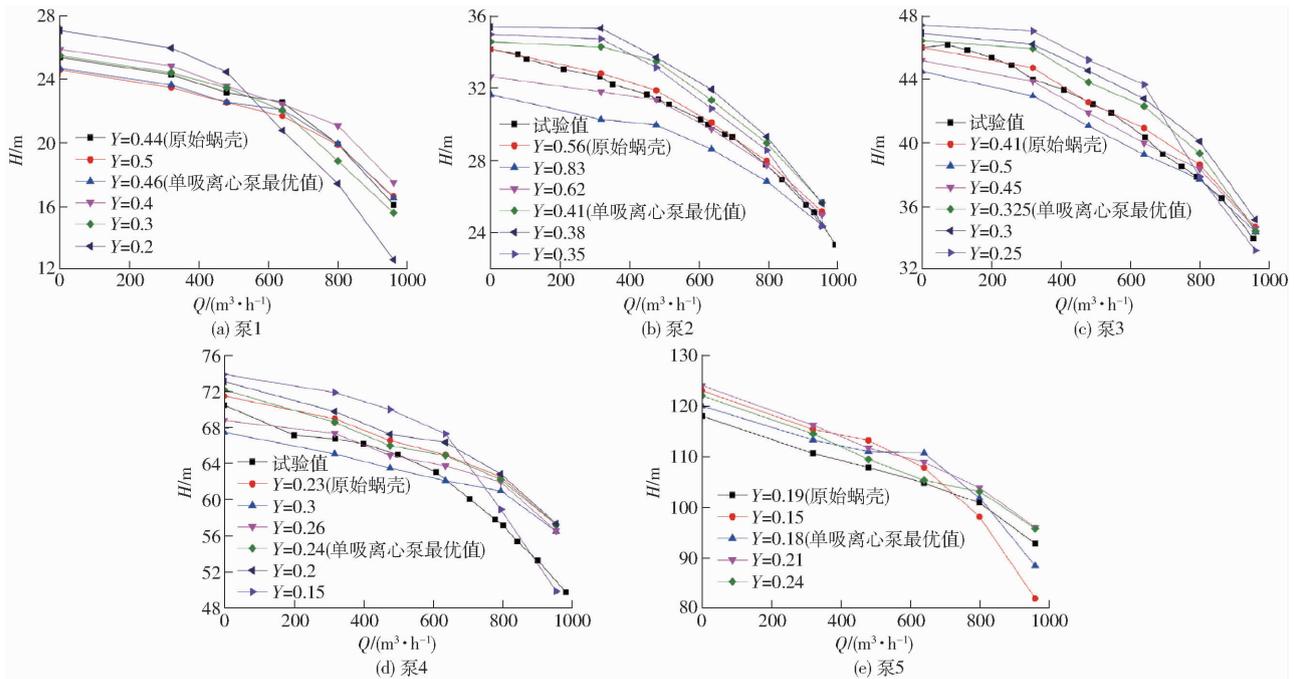


图4 流量-扬程曲线计算值与试验值对比

Fig. 4 Comparison between computational and experimental results of discharge-head curves

泵1,整体上同一流量下,当蜗壳面积比增加时扬程出现了下降,并且在小流量工况较为明显。当蜗壳面积比增加到0.46时,扬程在满足设计要求的边缘。当蜗壳面积比在原有基础上减小时,扬程出现了小幅提升,但当蜗壳面积比减小到0.2时,虽然在小流量工况下扬程最高,但扬程从0.8 Q 工况出现急剧下降,无法满足水力性能要求。从整体上来看,在蜗壳面积比为0.4时扬程最高。

当泵2蜗壳面积比增大时,在小流量及零流量工况扬程下降明显,且无法满足设计要求的扬程。当蜗壳面积比减小时,从0.41到0.35,扬程出现了先增加后减小的现象,其中蜗壳面积比为0.38时各个工况下的扬程均较高。

当泵3蜗壳面积比在原有基础上增大时,扬程也出现下降,当蜗壳面积比大于0.41时,其扬程低于设计要求。当蜗壳面积比在原有基础上减小时,扬程在一定程度上得到提升,但当蜗壳面积比减小到0.25时,虽在小流量工况扬程较高,但在设计工况其扬程出现了明显的下降,并且在大量工况扬程低于设计要求。当蜗壳面积比为0.3时,虽小流量工况扬程仅次于蜗壳面积比为0.25的情况,但在设计工况和大量工况扬程稳定,为最高值。

与泵3类似,当泵4蜗壳面积比增大时扬程出现下降,当蜗壳面积比大于0.3时,扬程在小流量工况时无法满足要求;当蜗壳面积比减小时,在一定范围内扬程也得到了提高,但当蜗壳面积比减小到

0.15时,虽在小流量工况时较高,但在设计工况及大量工况时出现了急剧的下降。蜗壳面积比为0.2时在各个工况下扬程均较高,扬程稳定。

当泵5蜗壳面积比增大时,其扬程出现上升趋势,但蜗壳面积比为0.24时,再次出现了下降,明显劣于蜗壳面积比为0.21时各个工况的扬程;当蜗壳面积比减小时,扬程在小流量工况增加,但在大量工况急剧下降,无法满足设计要求。

以上分析说明,选取不同的蜗壳面积比会对双吸离心泵的扬程具有较强的影响,针对这一现象,以泵3为例,分析设计工况下不同蜗壳面积比的吸水室和蜗壳的水力损失,如图5所示。

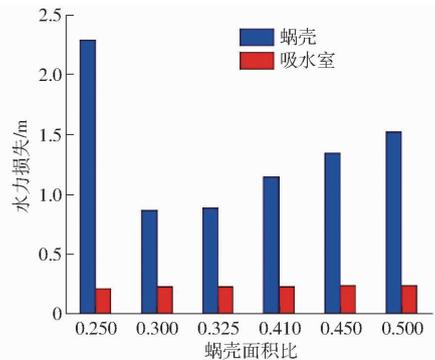


图5 设计工况下不同蜗壳面积比吸水室和蜗壳的水力损失

Fig. 5 Suction and volute hydraulic losses of different volute area ratios under design condition

从图5可以看出,在不同蜗壳面积比下,吸水室的水力损失基本不变,而蜗壳中的水力损失变化明显,当蜗壳面积比为0.3时,蜗壳中的水力损失最

小,当蜗壳面积比逐渐增大时,水力损失增加,这与图 4c 中扬程随蜗壳面积比的变化相符。当蜗壳面积比减小至 0.25 时,蜗壳中的水力损失突然大幅增加,导致图 4c 中扬程出现陡降现象,因此水力损失图与流量-扬程曲线中的分析相符。

综上所述,在双吸离心泵中,最优蜗壳面积比与同比转数单吸离心泵最优值并不相同,并且蜗壳面积比过大或过小都会引起水泵扬程的下降。

3.2 蜗壳面积比对效率的影响

图 6 为不同蜗壳面积比流量(Q)-效率(η)曲线模拟值与试验值对比。

图 6 中可以看出,对于泵 1 而言,当蜗壳面积比在原有基础上增大时,效率出现下降,并且当蜗壳面积比增大越多时效率下降得越明显;当蜗壳面积比在原有基础上减小时,效率在一定程度上提升,当蜗壳面积比为 0.4 时,效率最高,但是当蜗壳面积比减小到 0.2 时,效率明显下降,无法满足设计要求。

泵 2 当蜗壳面积比在原有基础上增大时,效率会随之下降,并且当蜗壳面积比越大时下降的程度越大,当蜗壳面积比大于原始蜗壳面积比 0.56 时,在设计工况无法满足效率的设计要求;当蜗壳面积比在原有基础上减小时,同样在一定程度效率提升,并且在一定范围内蜗壳面积比越小效率越高,但当蜗壳面积比减小为 0.35 时,效率不再提升反而出现下降趋势。

泵 3 当蜗壳面积比增大时,面积比越大效率越低;当蜗壳面积比减小时,在一定范围内效率得到了提高,但当蜗壳面积比减小到 0.25 时,效率在设计

工况时出现下降,无法满足设计要求。

泵 4 当蜗壳面积比在原有基础上增大时,效率出现下降,在小流量工况时下降明显;当蜗壳面积比减小时,一定范围内效率得到了提高,但当蜗壳面积比减小到 0.15 时,效率虽在小流量工况时较高,但在设计工况及大流量工况时出现了急剧的下降。

泵 5 当蜗壳面积比在原有基础上减小时,效率出现下降,并且在设计流量及大流量工况下扬程、效率下降十分明显,但当面积比为 0.18 时,小流量工况时效率较高;当蜗壳面积比增大时,其效率较平稳增加,但蜗壳面积比为 0.24 时,在小流量工况效率较低。

对于最高效率点,5 台泵呈现相同的规律,当蜗壳面积比增加时,最高效率点偏向于大流量工况;当蜗壳面积比减小时,最高效率点偏向于小流量工况。因此,对 5 台泵各个面积比取 $0.8Q$ 、 Q 、 $1.2Q$ 3 个工况下的效率取平均值进行对比分析,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,对于泵 1,当蜗壳面积比为 0.4 时设计工况附近的平均效率最高,比原始蜗壳面积比效率提高 1%,比采用同比转数下单吸离心泵的最优蜗壳面积比高 1%,而其余蜗壳面积比不论是增大还是减小,平均效率都出现一定程度的下降,因此对于效率而言,蜗壳面积比为 0.4 时最佳。

对于泵 2,蜗壳面积比为 0.38 时设计工况附近的平均效率最高,比原始蜗壳高 4%,同样优于采用同比转数下单吸离心泵的最优蜗壳面积比,同时蜗壳面积比为 0.41、0.35 时也在原有基础上有所提升。

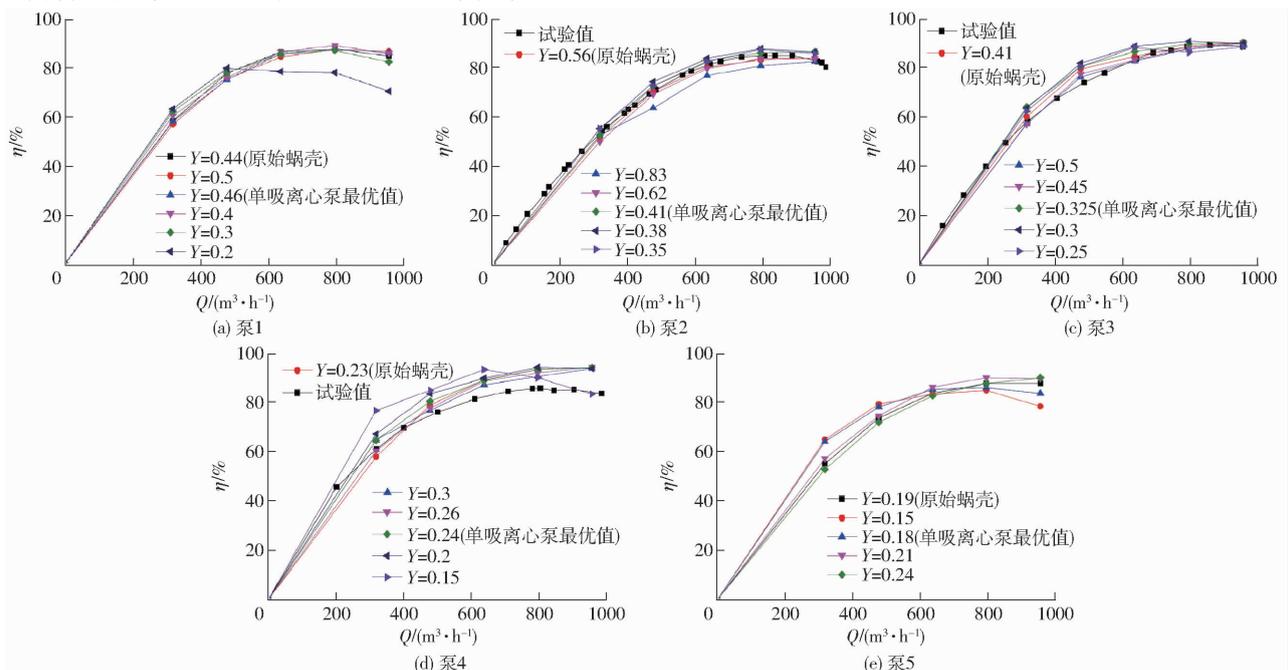


图 6 流量-效率曲线计算值与试验值对比

Fig. 6 Comparison between computational and experimental results of discharge - efficiency curves

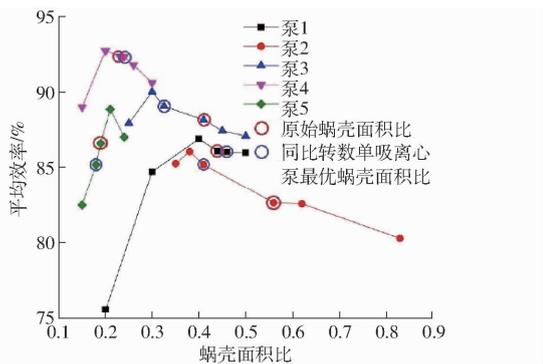


图7 不同蜗壳面积比下设计工况附近的平均效率

Fig.7 Average efficiency near design condition of different volute area ratios

对于泵3,蜗壳面积比为0.325(即同比转数单吸离心泵最优蜗壳面积比)时比原始蜗壳提高1%,蜗壳面积比为0.3时设计工况附近的平均效率比原始蜗壳高2%,因此蜗壳面积比为0.3时效率最优。

对于泵4,蜗壳面积比为0.2时设计工况附近的平均效率高出原始蜗壳面积比和同比转数单吸离

心泵最优蜗壳面积比,且仅在该蜗壳面积比效率得到了提升,因此蜗壳面积比为0.2时最佳。

对于泵5,蜗壳面积比为0.21时设计工况附近的平均效率最高,比原始蜗壳高2%,同样高于单吸离心泵最优面积比。

通过以上分析可以得出,对于双吸离心泵而言,叶轮为背靠背放置,叶轮出口的流动比单吸离心泵更为复杂,直接采用同比转数下单吸离心泵的最优蜗壳面积比是不可取的,因此选取适合双吸离心泵的合理蜗壳面积比对提升水泵效率具有很大影响。

3.3 最优蜗壳面积比规律

通过上述对同比转数双吸离心泵蜗壳面积比的修改得到各个比转数泵的最优蜗壳面积比,同时对各个泵在不同面积比下设计工况附近的效率平均值,如图8所示,分别取效率下降1%的范围作为高效区,效率下降3%作为蜗壳面积比的上、下界限。根据图8可得到5台不同比转数的双吸离心泵高效区以及上、下界限的值,如表4所示。

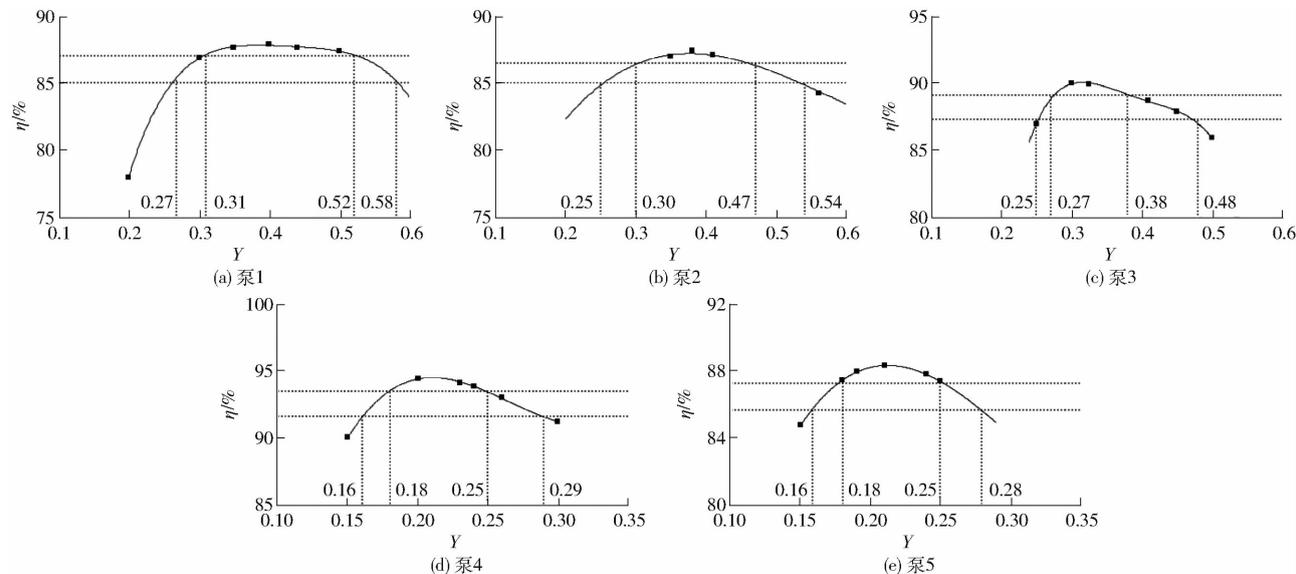


图8 双吸式离心泵不同面积比下最高效率图

Fig.8 The highest efficiency of double suction centrifugal pump under different volute area ratios

表4 双吸泵高效区蜗壳面积比范围及上、下界限

Tab.4 Volute area ratio range of high efficiency and upper and lower boundaries

比转数	高效区蜗壳面积比范围	上界限	下界限
泵1	0.31 ~ 0.52	0.58	0.27
泵2	0.30 ~ 0.47	0.54	0.25
泵3	0.27 ~ 0.38	0.48	0.25
泵4	0.18 ~ 0.25	0.29	0.16
泵5	0.18 ~ 0.25	0.28	0.16

通过上述对于双吸式离心泵蜗壳面积比的比较,最终得到比转数 n_s 在62 ~ 185范围内双吸式离心泵的高效区范围以及上、下界限值,如图9所示。

从图9可以看出随着比转数的增加,最优蜗壳面积比增加,高效区范围逐渐加宽,双吸离心泵 n_s 与 Y 呈非线性关系,与单吸离心泵最优蜗壳面积比

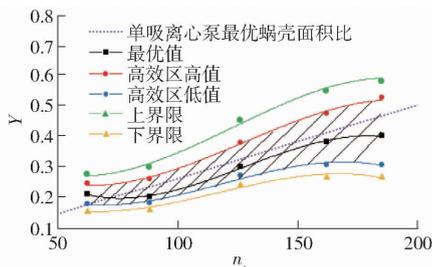


图9 双吸离心泵 n_s - Y 关系图及高效区推荐范围

Fig.9 n_s - Y relationship of double suction centrifugal pump and recommended range of high efficiency zone

相比差异明显, 泵 1 相对偏差为 0.15, 泵 2 相对偏差为 0.08, 泵 3 相对偏差为 0.09, 泵 4 相对偏差为 0.16, 泵 5 相对偏差为 0.20。由于双吸离心泵两侧叶轮为背靠背放置, 两侧叶轮出口处的流动会形成互相干扰, 从而影响水流进入蜗壳的流态, 单吸离心泵叶轮出口的流动方向较为一致, 两者在蜗壳进口处流态不同, 因此双吸离心泵与单吸离心泵的最优蜗壳面积比有差异。

4 结束语

通过对不同比转数的双吸离心泵不同蜗壳面积比进行非稳态数值模拟计算, 研究了流量-效率曲线和流量-扬程曲线的水力特性, 分析了各个比转数下不同蜗壳面积比对双吸离心泵水力性能的影响, 综

合扬程和效率特性, 发现两者之间最优蜗壳面积比相互吻合。最终得到比转数为 62~185 范围的双吸离心泵最优蜗壳面积比以及高效区推荐范围, 其中比转数为 185 的泵 1 的双吸离心泵最优蜗壳面积比为 0.4, 高效区推荐范围为 0.31~0.52; 比转数为 162 的泵 2 最优蜗壳面积比为 0.38, 高效区推荐范围为 0.30~0.47; 比转数为 126 的泵 3 最优蜗壳面积比为 0.3, 高效区推荐范围为 0.27~0.38; 比转数为 88 的泵 4 最优蜗壳面积比为 0.2, 高效区推荐范围为 0.18~0.25; 比转数为 62 的泵 5 最优蜗壳面积比为 0.21, 高效区推荐范围为 0.18~0.25。通过总结得出双吸离心泵最优蜗壳面积比规律, 发现双吸离心泵的最优蜗壳面积比与单吸离心泵的最优蜗壳面积比差异明显, 最大偏差为 0.20。

参 考 文 献

- 1 陈乃祥, 吴玉林. 离心泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 3.
- 2 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 2.
- 3 田辉, 郭涛, 孙秀玲, 等. 离心泵内部动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 92-95.
TIAN Hui, GUO Tao, SUN Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 92-95. (in Chinese)
- 4 姚志峰, 王福军, 肖若富, 等. 双吸离心泵吸水室和压水室压力脉动特性试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 473-479.
YAO Zhifeng, WANG Fujun, XIAO Ruofu, et al. Experimental investigation on pressure fluctuations in suction chamber and volute of a double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 473-479. (in Chinese)
- 5 THIN K C, KHAING M M, AYE K M. Design and performance analysis of centrifugal pump[J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology, 2008, 46: 422.
- 6 邓文剑, 楚武利. 叶轮和蜗壳匹配关系对离心泵性能影响的研究[J]. 石油机械, 2008, 36(3): 9-12.
- 7 袁寿其, 司乔瑞, 薛菲, 等. 离心泵蜗壳内部流动诱导噪声的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 93-98.
YUAN Shouqi, SI Qiaorui, XUE Fei, et al. Numerical calculation of internal flow-induced noise in centrifugal pump volute[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 93-98. (in Chinese)
- 8 ANDERSON H H. Mine pump[J]. Journal of Mining Society, 1984(6): 34-38.
- 9 WORSTER R C. The flow in volutes and its effect on centrifugal pump performance[C] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1963, 177(3): 171-174.
- 10 郭自杰. 蜗壳面积比原理讨论[J]. 排灌机械, 1989(2): 1-4.
- 11 张俊达. 面积比系数的统计[J]. 水泵技术, 1991(2): 28-29.
- 12 袁寿其, 曹武陵, 陈次昌, 等. 面积比原理和泵的性能[J]. 农业机械学报, 1993, 24(2): 36-41.
YUAN Shouqi, CAO Wuling, CHEN Cichang, et al. Area ratio principle and pump performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1993, 24(2): 36-41. (in Chinese)
- 13 刘在伦, 梁森, 魏清顺. 基于面积比原理的水泵设计方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 196-198.
- 14 徐耀刚, 宋文武, 符杰, 等. 不同面积比蜗壳对离心泵性能影响的分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 172-175.
XU Yaogang, SONG Wenwu, FU Jie, et al. Analysis of the influence of different area ratio volute on the performance of centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(8): 172-175. (in Chinese)
- 15 杨军虎, 张人会, 王春龙, 等. 低比转速离心泵的面积比原理[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(5): 53-55.
YANG Junhu, ZHANG Renhui, WANG Chunlong, et al. Area ratio principle for centrifugal pumps with low specific speed[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(5): 53-55. (in Chinese)
- 16 姚志峰, 王福军, 杨敏, 等. 叶轮形式对双吸离心泵压力脉动特性影响试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 133-137, 143.
YAO Zhifeng, WANG Fujun, YANG Min, et al. Effects of impeller type on pressure fluctuations in double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 133-137, 143. (in Chinese)
- 17 刘建瑞, 付威, 高振军, 等. 交错叶片对双吸离心泵性能影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(3): 196-202.
LIU Jianrui, FU Wei, GAO Zhenjun, et al. Numerical analysis of effects of staggered blades on characteristics of double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(3): 196-202. (in Chinese)
- 18 MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003(4): 625-632.
- 19 SPALART P R. Detached-eddy simulation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2009, 41: 181-202.
- 20 MENTER F R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows[J]. AIAA Paper, 1993, 2906: 1993.
- 21 杨军虎, 张人会, 王春龙, 等. 计算离心泵面积比和蜗壳面积的方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 67-70.
YANG Junhu, ZHANG Renhui, WANG Chunlong, et al. Calculation method of area ration and volute cross area for centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 67-70. (in Chinese)