

文章编号:1006-3080(2014)05-0675-06

# 叶轮几何参数对多级离心泵性能的影响

胡良波, 周邵萍, 丁晓霞

(华东理工大学承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237)

**摘要:**用分离涡模拟方法对多级离心泵整机流场进行了模拟,用该方法得到的预测值与实验值吻合较好。采用分离涡模拟法考察叶片出口角、叶片包角、叶轮出口宽度和叶片数对离心泵性能的影响。结果表明在模拟的流量范围内,叶片出口角、叶片出口宽度、叶片数与泵的扬程正相关,叶片包角与泵扬程负相关。

**关键词:**多级离心泵; 分离涡模拟; 叶轮几何参数

**中图分类号:**TH311

**文献标志码:**A

## Influence of Impeller Geometry Parameters on Performance of a Multistage Centrifugal Pump

HU Liang-bo, ZHOU Shao-ping, DING Xiao-xia

(Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education,  
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The performance of centrifugal pumps are affected by impeller geometry parameters. Detached Eddy Simulation (DES) was used to simulate the flow field of a multistage centrifugal pump. The obtained numerical results are compared with the experimental ones, and the outcome shows an acceptable agreement. In order to investigate the effect of structural parameters on the pump performance, this numerical solution is carried out for different cases of impeller geometry, such as outlet angle, wrap angle, outlet width and blade numbers. The results showed that the outlet angle, outlet width, blade numbers were positive correlated with head, while wrap angle was negative correlated with head.

**Key words:** multistage pumps; detached eddy simulation; impeller geometry parameters

多级耐磨离心泵(MD)具有高扬程、高流量和高效率的特点,被广泛应用于矿山排水、城市及工厂供水过程中。多级离心泵属于高能耗的动力机械,在全国呼吁节能的大背景下,对多级离心泵性能的优化研究具有重大的现实意义。随着计算流体力学和计算机的发展,运用数值模拟的方法预测离心泵内的流场分布和性能已成为可能<sup>[1]</sup>。罗先武等<sup>[2]</sup>采用标准  $k-\epsilon$  模型和 VOF 空化模型预测泵的平均

空化性能,研究结果表明延伸叶片的进口位置及加大叶片进口角均可较明显地改善离心泵的空化性能。黄思等<sup>[3]</sup>用 ANSYS-CFX 软件及标准  $k-\epsilon$  湍流模型,实现了对多级多出口离心泵整机全三维流场的数值模拟,得到水力效率与实验测定的水泵效率相符合。由于上述研究多采用雷诺时均模拟方法(RANS),模拟结果反映的仅是流动的平均规律,并不能捕捉流动过程的瞬时脉动特性。

收稿日期:2014-03-28

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAF01B01)

作者简介:胡良波(1991-),男,安徽六安人,硕士生,主要从事流体机械的数值模拟与结构优化。E-mail:jasonhu\_ecust@163.com

通信联系人:周邵萍,E-mail:shpzhou@ecust.edu.cn

分离涡模拟方法(DES)结合了大涡模拟方法(LES)与 RANS 的优点,在近壁区采用 RANS 模型,在远离壁面的区域采用 LES 模型。基于这两点,DES 兼有雷诺时均模型计算量小和大涡模型计算精度高的优点,不但可以很好地模拟高雷诺数下主流的湍流特性,而且可以像 LES 模型一样求解非定常的湍流流动。黄剑峰等<sup>[4]</sup>验证了 DES 方法能够全面真实地模拟水轮机内部的流动情况,捕捉到水力机械中复杂流道内的三维动态涡结构。杨锋苓等<sup>[5]</sup>通过对在无挡板涡轮桨搅拌槽内湍流流动的模拟研究表明 DES 模型具有与 LES 模型相近的预测精度,且计算量降低 65%。多级离心泵由于过流部件复杂,流体在内部的湍流和漩涡特性比单级离心泵更加明显,但是有关 DES 模型是否能应用于多级离心泵模拟方面的研究还鲜见报道。

离心泵叶轮的几何参数决定了泵的性能特性。谈明高等<sup>[6-7]</sup>研究了叶轮出口角对离心泵性能的影响,认为出口角对射流-尾迹结构影响较大;杨华等<sup>[8-10]</sup>运用数值模拟和实验的方法验证存在一个最佳的包角使离心泵性能最好;杨军虎等<sup>[11-12]</sup>运用数值模拟研究背叶片宽度对轴向力和噪声的影响。然而上述研究的对象均是单级离心泵,有关多级离心泵的叶片几何参数对其性能影响的研究却很少提及。

本文在验证分离涡模拟法可用于多级离心泵整机流场模拟分析的基础上考察了叶片出口角( $\beta$ )、叶片包角( $\alpha$ )、叶轮出口宽度( $b$ )以及叶片数( $z$ )对泵整机性能的影响。

## 1 计算模型与网格划分

### 1.1 计算模型

本文研究模型为 MD450-60 \* 4 型多级离心泵,其主要性能参数和结构参数如表 1 所示。其中  $Q$  为流量,  $H$  为扬程,  $\eta$  为效率,  $n$  为转速,  $n_s$  为比转速,  $D_1$  为叶轮入口直径,  $D_2$  为叶轮出口直径。利用 Solidworks 建模软件建立计算模型三维流道,通过各级叶轮、导叶、进出水段的建立和装配,得到的计算模型如图 1 所示。流体从进水段进入多级离心泵,依次通过首级叶轮,经导叶引入次级叶轮,最后由出水段流出,完成能量的转化和流体的输送。

### 1.2 网格划分与无关性验证

基于 ICEM CFD 平台对多级泵内流场进行网格划分。多级离心泵扭曲形叶片和正反导叶结构复杂,故采用鲁棒性较好的四面体网格,并进行局部加密。通过对不同网格数下定常计算的扬程和效

率,当计算外特性的变化小于 2% 时,可以确认网格的无关性,不同网格数结果对比如表 2 所示。

由表 2 可以看出,网格数量为 7 363 248 和 9 577 523 的扬程和效率相对误差均低于 2%。所以计算网格数取为  $7.36 \times 10^6$  左右是合适的,叶轮与导叶流道网格分别如图 2、3 所示。

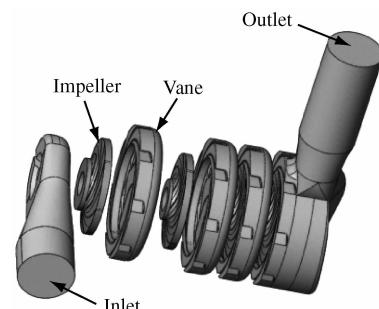


图 1 多级离心泵整机流道

Fig. 1 Flow channel of multistage pump

表 1 计算模型的主要性能和结构参数

Table 1 Main performance and structure parameters of the calculation model

$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$H/m$	$\eta/\%$	$n/(r \cdot min^{-1})$	$n_s$
450	240	78%	1480	89
$D_1/m$	$D_2/m$	$\beta/(^\circ)$	$z$	Stage
0.185	0.432	25	7	4

表 2 网格无关性验证结果

Table 2 Result of grid-independent solutions validation

Grid numbers	$H/m$	$\eta/\%$
7 363 248	220.1	74.8
9 577 523	221.4	74.6
Relative error	0.6%	0.3%

## 2 多级离心泵全流道的模拟

### 2.1 湍流模型和边界条件

本文运用非定常模拟方法,非定常计算以标准模型计算得到的稳态流场作为初场,湍流模型选用分离涡模型。进口边界条件设置为速度进口,速度由流量给定;出口边界条件为自由出流,在固壁处采用无滑移边界条件,动静区的交界面采用“interface”。进口的  $k$  和  $\epsilon$  的取值由下式给定:

$$k = 0.05 u_{in}^2,$$

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / l$$

式中: $l=0.07D$ ,  $D$  为泵进口水力直径; $u_{in}$  为进口流速; $C_\mu$  为经验系数。



图 2 叶轮流道网格

Fig. 2 Grid of guide impeller passage

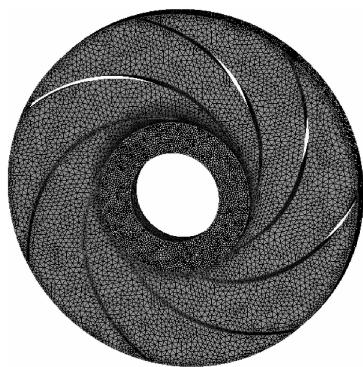


图 3 导叶流道网格

Fig. 3 Grid of guide vane passage

## 2.2 实验验证

根据 GB 3216-1989《离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵实验方法》对该离心泵进行全性能实验, 实验的精度为 C 级。将模拟得到的结果与实验数据对比, 结果分别如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知, DES 模拟得到的扬程随着流量的增大而减小, 且模拟的扬程和效率均与实验值趋势相似。DES 得到的扬程平均误差为 3.88%, 效率值平均误差为 3.14%, 均低于 4%, 因此采用 DES 对多级离心泵进行流场模拟是可行的。

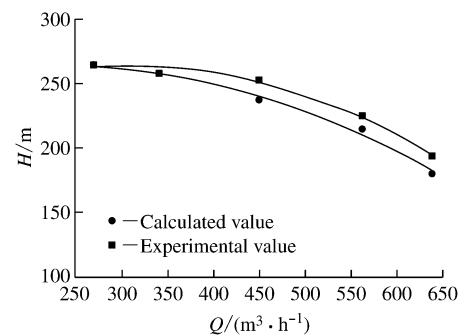


图 4 扬程-流量曲线对比

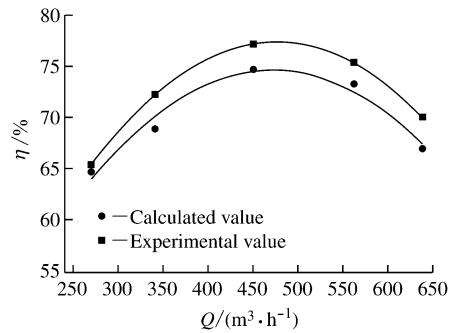
Fig. 4 Comparison of  $H$ - $Q$  curve

图 5 效率-流量曲线对比

Fig. 5 Comparison of  $\eta$ - $Q$  curve

## 3 结构参数对多级离心泵性能的影响

### 3.1 叶片出口角的影响

图 6 为不同出口角下第 3 级叶轮内的总压分布。不同的出口角下叶轮内压力分布规律相似, 出口角越大, 叶轮流道内压力的梯度越大, 叶片外缘附近的高压区相应扩大。当  $\beta=20^\circ$  和  $\beta=25^\circ$  时, 进出口的压力波动小; 当  $\beta=30^\circ$  和  $\beta=35^\circ$  时, 进口处有明显的变化。图 7 为不同叶片出口角下第 3 级叶轮的性能曲线, 从图中可以发现, 在模拟的流量范围内, 扬程随着出口角的增大而增大, 效率则随着出口

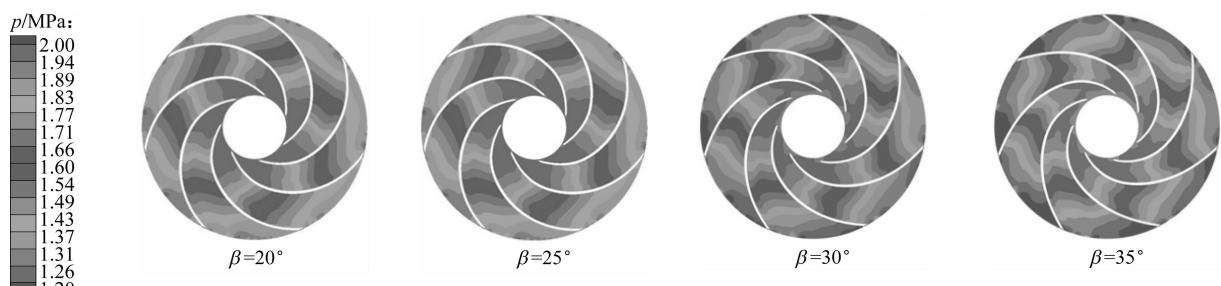


图 6 不同叶片出口角下的总压分布

Fig. 6 Total pressure distribution under different blade outlet angles

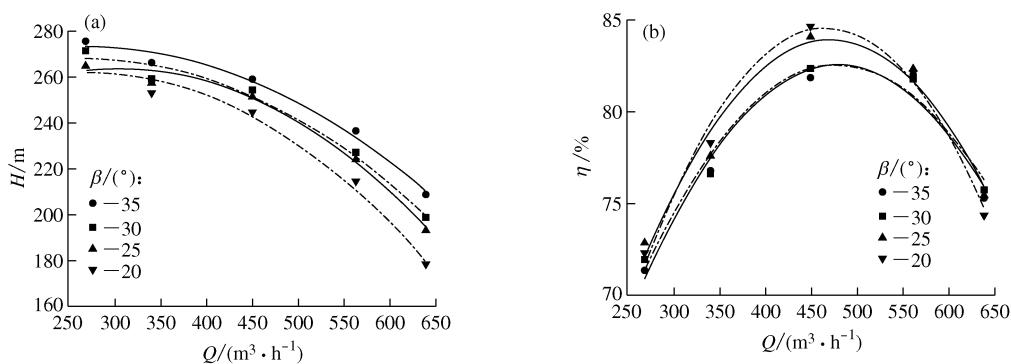


图 7 不同叶片出口角的扬程和效率曲线

Fig. 7 Head and efficiency curves under different blade outlet angles

角的增大而减小,角度超过 $30^{\circ}$ 后,效率不再有明显的改变。综合扬程和效率曲线,当出口角为 $25^{\circ}$ 时,既能达到较平坦的 $H$ - $Q$ 曲线,又能保证较高的效率。

### 3.2 叶片包角的影响

图 8 为不同出口角下第 3 级叶轮的总压分布,液流在叶片间从低压区流向高压区,叶片包角越大,叶片对应长度越大,叶片流道中的逆压梯度越小,所

以随着包角的增大,叶轮流道内的压力分布也愈加平缓。图 9 显示随着包角的增大, $H$ - $Q$  和  $\eta$ - $Q$  曲线均有下降的趋势,其中  $H$ - $Q$  曲线下降的幅度小,而  $\eta$ - $Q$  曲线的最高效率和高效区都有明显的缩小。这是由于当包角增大至一定程度后,叶轮流道相对增长,叶轮内部的水力损失增大。

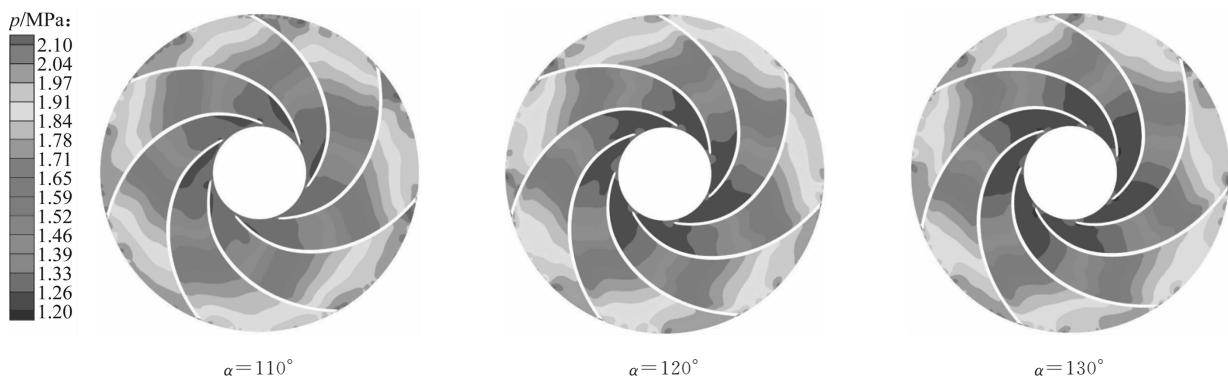


图 8 不同叶片包角的总压分布

Fig. 8 Total pressure distribution under different blade wrap angles

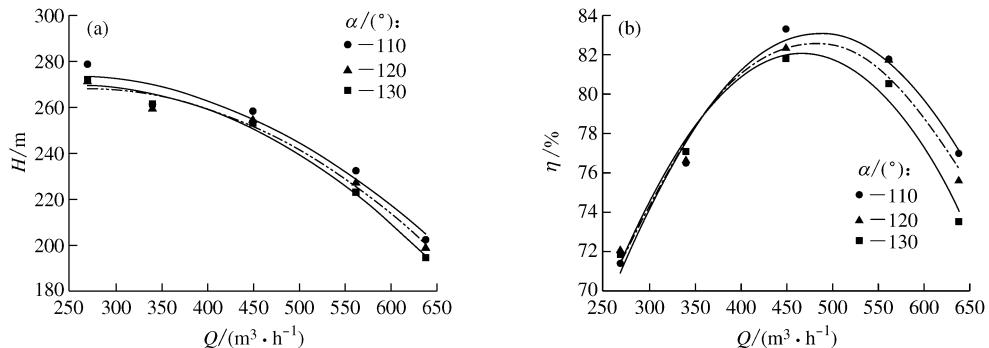


图 9 不同叶片包角的扬程和效率曲线

Fig. 9 Head and efficiency curves under different blade wrap angles

### 3.3 出口宽度的影响

图 10 显示了不同出口宽度下第 3 级叶轮流道内的压力分布。叶片出口宽度变大,泵的流道面积

增大,叶轮内流体的流速降低,叶轮进出口的压差逐步降低。如图 11 所示,改变叶片的出口宽度,离心泵的扬程也同时发生改变,叶片宽度越宽,同一流量

下扬程越大, 泵的额定点流量将右移。通过对比泵不同叶片出口宽度的效率曲线可知存在一个使泵效率最高的叶片宽度。

### 3.4 叶片数的影响

不同叶片数在设计点下的第 3 级叶轮内流场总压分布如图 12 所示。整体看来, 各叶片数下的总压变化趋势基本相同。从叶轮入口到出口, 压力沿着半径方向递增, 且在同一半径下, 叶片工作面压力高于非工作面压力。随着叶片数的递增, 总压分布也

更加均匀。

图 13 为不同叶片数下叶片的性能曲线, 从图中可以看出扬程随着叶片数的增加而增加, 而叶轮外缘的压力值大小相似, 故离心泵扬程增加和每周期内叶片与蜗壳出口的交替次数相关。3 种情况下泵的效率随着叶片增加有下降的趋势, 其中  $z=6$  与  $z=7$  的效率几乎相同, 当  $z=7$  时, 离心泵的扬程曲线比较平缓, 而且效率较高, 综合性能最好。

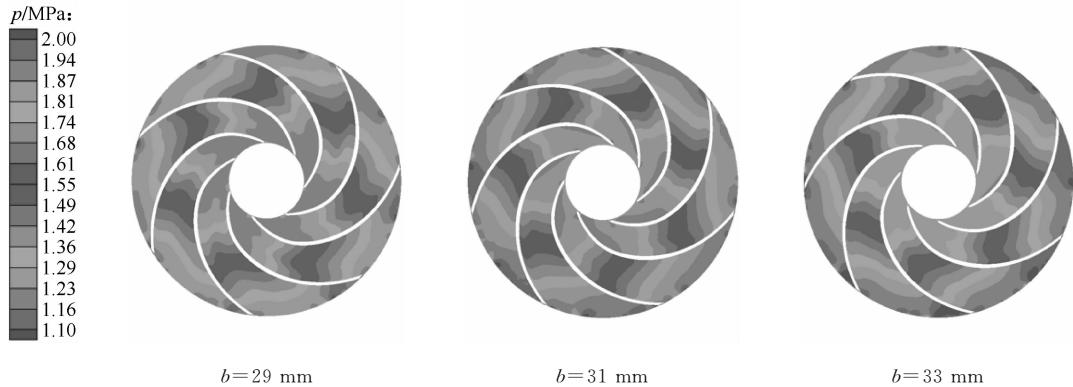


图 10 不同叶片出口宽度的总压分布

Fig. 10 Total pressure distribution under different blade outlet width

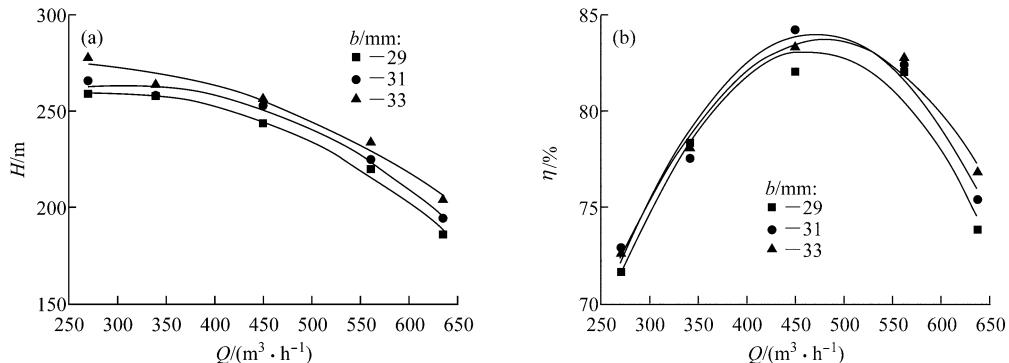


图 11 不同叶片宽度的扬程和效率曲线

Fig. 11 Head and efficiency curves under different blade outlet width

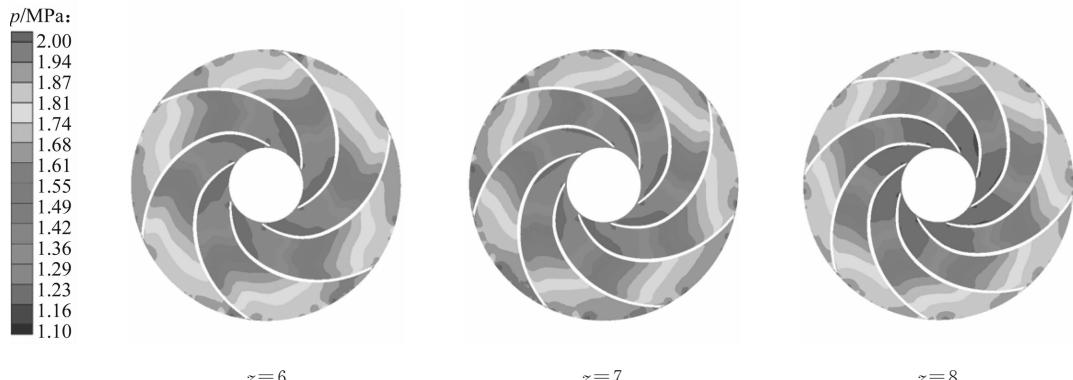


图 12 不同叶片数的总压分布

Fig. 12 Total pressure distribution under different blade numbers

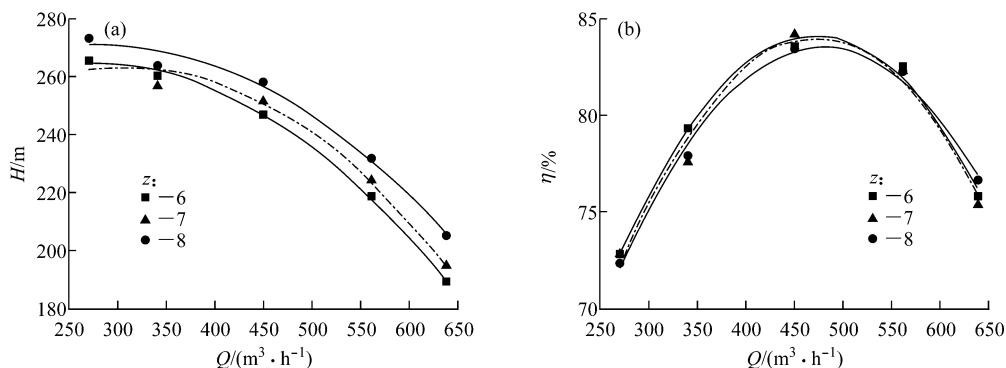


图 13 不同叶片数的扬程和效率曲线

Fig. 13 Head and efficiency curves under different blade numbers

## 4 结 论

本文采用 DES 湍流模拟方法对某型多级离心泵的内流场进行数值分析,通过实验值和模拟值的对比来确定多级离心泵内流场模拟的可靠性方法,并在此基础上分析了结构参数对多级泵性能的影响,结论如下:

(1) DES 湍流模型能有效预测多级离心泵的性能,通过与实验值的对比,发现采用 DES 得到的计算值与实验值的误差在 4% 以内。

(2) 叶片出口角增大有利于多级离心泵全流量范围内扬程增加。增大出口角会加剧叶轮内部的压力波动,从而引起离心泵效率的降低。

(3) 叶片包角越大,叶片流道中的逆压梯度越小,叶轮中的流道被延长也越明显,同时引起的水力损失也越多,从而降低了泵的扬程和效率,缩小了泵的高效区。

(4) 叶片宽度对泵的流量和扬程均有明显的影响,叶片宽度与泵的扬程和额定点流量正相关。通过对不同叶片出口宽度的效率曲线可知存在一个使泵效率最高的叶片宽度。

(5) 在模拟的流量范围内,叶片数的增加使每周期内叶片与蜗壳出口的交替次数增加,离心泵的扬程也将增加。但叶片数对离心泵的效率影响甚微。

## 参 考 文 献:

- [1] Jorge P, Javier P, Raul B, et al. A simple acoustic model to characterize the internal low frequency sound field in centrifugal pumps[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(1):59-64.
- [2] 罗先武, 张瑶, 彭俊奇, 等. 叶轮进口几何参数对离心泵空化性能的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(5): 836-839.
- [3] 黄思, 王朋, 区国维, 等. 多级多出口离心泵的数值模拟及试验验证[J]. 流体机械, 2013, 41(1):10-14.
- [4] 黄剑峰, 张立翔, 王文全, 等. 混流式水轮机三维非定常流分离涡模型的精细模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 83-89.
- [5] 杨锋苓, 周慎杰, 张翠勋. 无挡板涡轮桨搅拌槽内湍流流动的分离涡模拟[J]. 过程工程学报, 2009, 9(4):641-646.
- [6] 谈明高, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵出口角对能量性能影响的 CFD 研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(11):104-106.
- [7] 吴贤芳, 谈明高, 刘厚林, 等. 叶片出口角对离心泵性能曲线形状的影响[J]. 农机化研究, 2010, 32(9):166-169.
- [8] 张翔, 王洋, 徐小敏, 等. 叶片包角对离心泵性能的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):38-42.
- [9] 杨华, 刘超, 汤方平, 等. 不同叶片包角的离心泵试验与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10):166-169.
- [10] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 不同叶片包角离心泵空化振动和噪声特性[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5):393-393.
- [11] 杨军虎. 低比转数离心泵叶轮内的流动机理和叶轮设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2):47-49.
- [12] 李仁年, 高杨, 程效锐, 等. 螺旋离心泵叶轮背叶片对轴向力影响的数值分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12):156-161.