

# 射流式离心泵非设计工况下内部流动研究\*

李贵东<sup>1</sup> 王洋<sup>1</sup> 曹璞钰<sup>1</sup> 周国辉<sup>2</sup> 吴文<sup>1</sup> 韩亚文<sup>1</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 福建巨龙电机集团有限公司, 福安 355001)

**摘要:** 为了研究射流式离心泵在非设计工况下的内部流动特性, 选取 JETST-100 型射流式离心泵作为研究对象, 运用 CFX 软件提供的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 对模型泵内部流动情况进行了三维非定常数值模拟, 得到各过流部件内部的速度场和压力场分布等流动信息, 比较了在不同运行流量下, 射流器进口和喉管处质量流量的变化情况, 并将模拟结果与试验进行对比。结果表明: 射流器内部压力最高区域在喷嘴进口处, 低压区域在喉管附近, 喷嘴附近速度最大, 抽送液体的进流口速度最小; 叶轮中流出的液体大部分回流至射流器进口, 随着泵运行流量的减小, 回流所占射流器喉管处质量流的比例增加; 对叶轮内的流动分析显示, 叶片吸力面的速度普遍高于压力面的速度, 进一步影响了该型泵的运行效率。

**关键词:** 射流式离心泵 非设计工况 流场分析 数值模拟

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0048-06

## Internal Flow of Flow-ejecting Centrifugal Pump under Off-design Conditions

Li Guidong<sup>1</sup> Wang Yang<sup>1</sup> Cao Puyu<sup>1</sup> Zhou Guohui<sup>2</sup> Wu Wen<sup>1</sup> Han Yawen<sup>1</sup>

(1. National Research Center of Pump, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Fujian Glong Electric Group Co., Ltd., Fuan 355001, China)

**Abstract:** In order to study the internal flow characteristics in the flow passage components of flow-ejecting centrifugal pump under off-design conditions, the type JETST-100 self-priming pump was selected. It consists of seven parts: the inlet pipeline, jet aerator, wear ring, elbow, impeller, outlet pipeline and pump chamber. The transient numerical simulation for internal flow situation of computational model was carried out based on RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model by using CFX software. The flowing information of velocity and pressure in flow passage components of centrifugal pump were obtained. Comparison of flow change between inlet and throat of jet aerator under different operating conditions was performed and the simulation results were compared with the test results. The results showed that the highest pressure area of jet aerator was located at the inlet of nozzle, low pressure area was located at the vicinity of throat, and the maximum velocity occurred at the area of the vicinity of nozzle, the minimum velocity generated at the inflow part of suction liquid. With the flow rate decreased, mass flow rate of reverse flow in throat of jet aerator was increased; effluent liquid from the impeller was mostly reversed to the inlet of jet aerator. The flowing analysis of impeller showed that the blade suction surface velocity was generally higher than the blade pressure surface velocity, which further affected the operating efficiency of the pump. The study results will supply a theoretical reference for hydraulic optimization design of the internal flow status of flow-ejecting centrifugal pump under off-design conditions.

**Key words:** Flow-ejecting centrifugal pump Off-design conditions Flow analysis Numerical simulation

收稿日期: 2014-09-10 修回日期: 2014-12-04

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)、江苏高校优秀学科建设工程资助项目和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX15\_1064)

作者简介: 李贵东, 博士生, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: liguidong1201@163.com

通讯作者: 王洋, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: pgwy@ujs.edu.cn

## 引言

射流式离心泵具有结构新颖、体积小、重量轻、操作方便、自吸时间短、吸程高等优点,在喷灌、滴灌等节水系统中得到了十分广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。

近几年来,随着计算方法和数值理论快速发展,计算仿真在流体机械领域得到了广泛的运用<sup>[6-12]</sup>。许多学者对自吸泵性能进行了大量的仿真及试验研究。刘建瑞等<sup>[1]</sup>设计了一种新型射流式自吸离心泵,即在离心泵进口处增设了一个带文杜里管的自循环射流器,使普通离心泵实现自吸性能。经试验验证其自吸性能得到提高,效率提高了 3% 以上。李红等<sup>[13]</sup>对自吸泵叶轮和蜗壳进行了三维不可压缩数值模拟,研究了其内部流场的速度分布和压力分布情况,揭示泵自吸过程中流体的运动规律,预估了该泵的扬程及效率。刘建瑞等<sup>[14]</sup>运用正交试验探索了射流喷嘴几何参数对射流式自吸泵自吸性能的影响,得出了射流喷嘴各参数的最佳组合方案。王洋等<sup>[15]</sup>对在导叶背面添加防止环流的筋板进行了气液两相非定常数值模拟,得出此种导叶设计方案能够改善射流自吸泵的自吸性能。

射流式离心泵是一种结构复杂的自吸泵,其在运行过程中泵腔内的高压水通过射流器与进口管内的液体进行混合共同进入叶轮,液体通过叶轮做功从导叶流出,一部分液体排出泵腔,另一部分液体则通过射流器进口继续与进口管内液体混合输入叶轮中。由于射流式离心泵工作原理的特殊,关于该型泵内部流场流动规律的研究较少。本文对该型泵内部的非定常流动特性进行多工况数值分析,从射流器内部的速度压力转换、进口回流等特征,以及叶轮流道内的流动特性,分析过流部件的设计情况,对该型泵运行效率偏低的原因进行研究分析。

## 1 数值计算方法

### 1.1 模型基本参数

选取 JETST-100 型射流式离心泵作为研究对象,其主要性能参数为:设计流量  $Q = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H = 26 \text{ m}$ ,转速  $n = 2850 \text{ r}/\text{min}$ 。主要过流部件的几何参数为:射流器喷嘴直径  $f_1 = 9.7 \text{ mm}$ ,叶轮进口直径  $D_i = 37 \text{ mm}$ ,叶轮外径  $D_2 = 130 \text{ mm}$ ,叶轮出口宽度  $b_2 = 6.5 \text{ mm}$ ,叶轮叶片数  $Z = 6$ ,导叶叶片数  $Z_d = 5$ 。

为了尽可能反映口环及前后泵腔对外特性和内部流态的影响,提高数值计算的准确性,更准确地进行研究分析,本文对该型泵进行了三维全流场几何建模,如图 1 所示。计算模型包括进水管路、弯管、

射流器、口环、叶轮、导叶、泵腔和出水管路。该型泵过流部件总装图如图 2 所示。

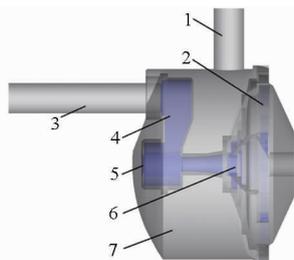


图 1 三维几何建模

Fig. 1 Three dimensional geometry model

1. 出水管路 2. 叶轮 3. 进水管路 4. 弯管 5. 射流器 6. 口环 7. 泵腔

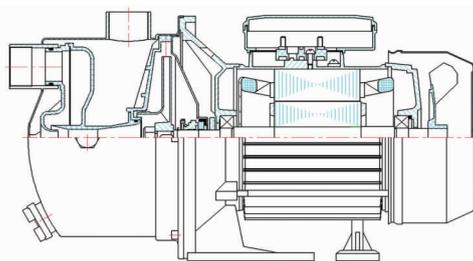


图 2 射流离心泵总装图

Fig. 2 Assembly drawing of pump

### 1.2 网格划分

利用 Pro/E 软件建立三维计算模型,导入 ICEM 软件中生成计算网格。由于射流式离心泵结构的复杂性,采用适应性较强的四面体非结构网格对过流部件进行网格划分及网格优化,对间隙水体、交界面及泵体曲率较小的部位进行网格局部加密。选用了 5 种不同网格尺寸进行划分,并进行网格无关性分析,随着网格节点数和网格数的逐渐增加,模拟结果趋于稳定,最终确定计算域网格总数约为 226.54 万,如图 3 所示。

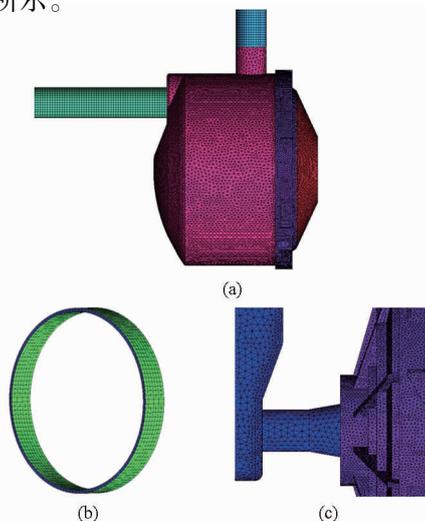


图 3 计算域网格划分

Fig. 3 Mesh of computational domain

(a) 泵体网格 (b) 口环网格 (c) 网格局部加密

### 1.3 数值计算

采用 ANSYS-CFX 软件对射流式离心泵进行三维全流场瞬态数值分析,计算域进口采用压力进口条件,出口给定速度出口,为保证进出口流态的充分发展,进出口管路进行适当的延伸。湍流模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型,并采用有限体积法对控制方程进行二阶精度的空间离散,时间离散采用二阶全隐格式。将定常数值计算结果作为初始条件进行瞬态数值分析,泵内转子部件和定子部件之间交界面设置为 Transient rotor-stator 模式进行处理,壁面采用绝热无滑移边界条件,近壁区使用 Scalable Wall Functions 进行处理。根据该型泵的转速及 courant number 公式<sup>[16]</sup>综合考虑选取时间步长为  $1.754 \times 10^{-4}$  s,总时间设置为 0.168 42 s,数值模拟精度达  $10^{-5}$ 。

## 2 性能预测分析

为验证小流量下射流式离心泵全流场数值方法的准确性,对该型泵在  $0.5Q \sim 1.0Q$  不同流量下进行了瞬态数值预测。并将得到的瞬态扬程、效率的平均值与试验结果进行对比分析,外特性曲线如图 4 所示。

试验结果表明,瞬态数值模拟得到的外特性曲线与试验得到的性能曲线在小流量范围内能够较好吻合。在设计工况下,扬程和效率的相对误差分别为 3.07% 和 2.6%。这表明全流场瞬态数值模拟在小流量条件下能较准确地预测该型射流式离心泵的试验性能,确保了进一步分析的准确性。由于该型射流式离心泵结构的特殊性,在设计工况右侧,试验曲线发生陡降,这可能与射流器的最大过流能力及

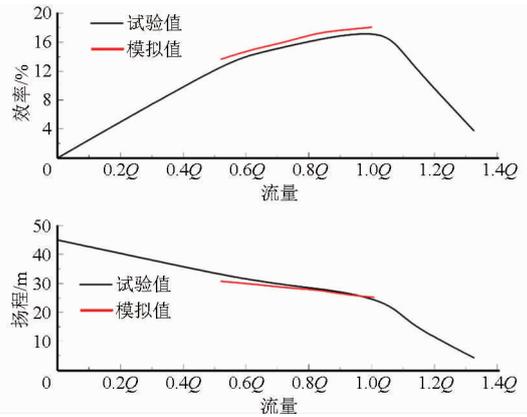


图 4 外特性试验对比

Fig. 4 Comparison of head and efficiency curves between experiment and simulation

大流量下在射流器中产生空化有关。在实际运用情况中,该型泵多数在设计工况点(最高效率点)及小流量工况下运行,所以本文只做非设计工况(小流量)瞬态流动研究。

## 3 计算结果分析

### 3.1 射流器内部流动分析

射流器的工作原理是将泵腔内的高压液体通过喷嘴射流在混合段中形成局部真空,泵进水管路的液体在大气压力的作用下流入进流口,并与喷嘴射流混合共同流入喉管及扩散段,最终进入叶轮。

图 5 所示为在非设计工况下射流器内部截面的压力云图分布情况。从图中可以看出,不同流量下射流器内部压力有较明显的变化。在  $0.5Q$  流量下,射流器内部压力从喷嘴进口到叶轮进口处先减小再逐渐增大,压力最高区域产生在射流器的喷嘴

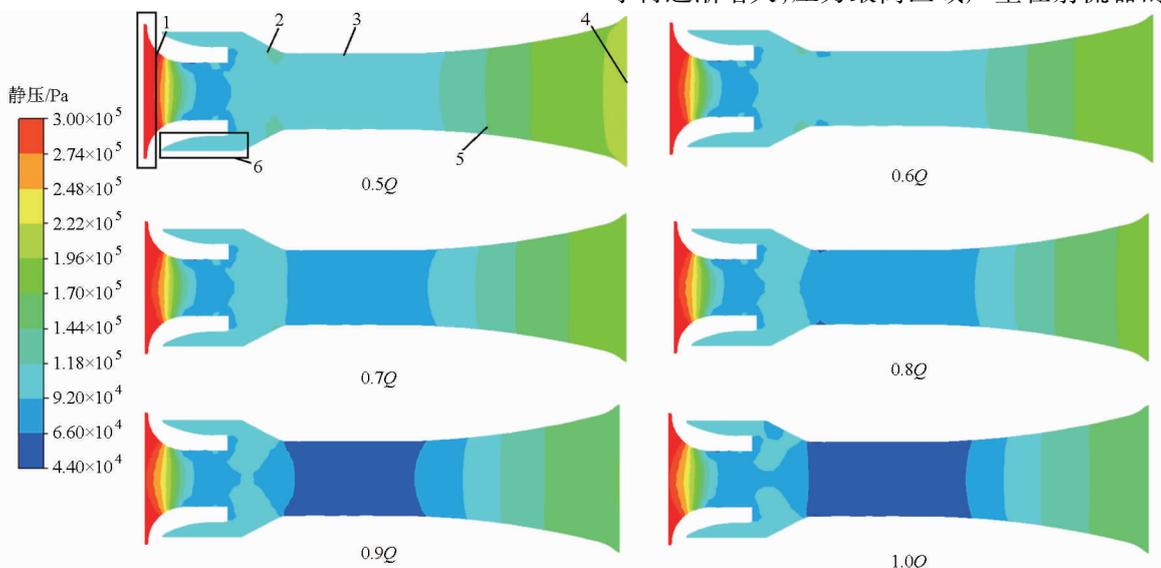


图 5 不同工况下射流器内部压力云图

Fig. 5 Contours of static pressure distribution in jet aerator under different conditions

1. 喷嘴进口 2. 混合段 3. 喉管 4. 叶轮进口 5. 扩散段 6. 进流口

进口位置,压力最低区域在靠近喷嘴出口处。随着流量的增加,喷嘴处依然是低压区,但最低压力位置逐渐向喉管区域偏移,当该型泵运行在  $0.7Q$  流量时,射流器喉管内开始形成低压区,并沿着扩散段的扩散方向,压力开始逐渐升高。当运行在  $1.0Q$  流量时,喉管内的压力进一步降低,并成为射流器内部压力最低的区域,而且在喷嘴到喉管之间的混合段也形成了局部压力较低的区域。

综上所述,在射流式离心泵中,压力的最低位置产生在喉管区域内,这就决定了该型泵的空化现象不会发生在叶轮进口处,而是发生在射流器喉管某一位置。并且随着流量的增加,喉管处的抗空化能力逐渐减弱,这也有可能是该型泵在大流量工况下运行时,试验外特性曲线发生陡降的原因。因为,喉

管的尺寸相对较小,在喉管位置产生的空泡容易阻断叶轮进口的来流。

图6所示为在非设计工况下射流器内部截面的绝对速度云图分布情况。从图中可以看出,在不同流量下射流器内的速度分布比较相似。沿着射流器喷嘴进流方向,喷嘴附近处为速度最大区域,抽送液体的进流口速度最小。在混合段内,由于射流器进口的工作液流与进流口的抽送液流发生混合,该区域速度梯度变化较为明显。液流进入喉管区域流向叶轮进口时,速度将得到进一步减小,扩散管将液体的一部分动能转换为压力势能,速度梯度变化明显。在射流器内部,由于摩擦阻力的影响,喉管和扩散段内壁面的速度小于射流器中心区域,呈现出中心区域速度大、壁面附近速度小的特征。

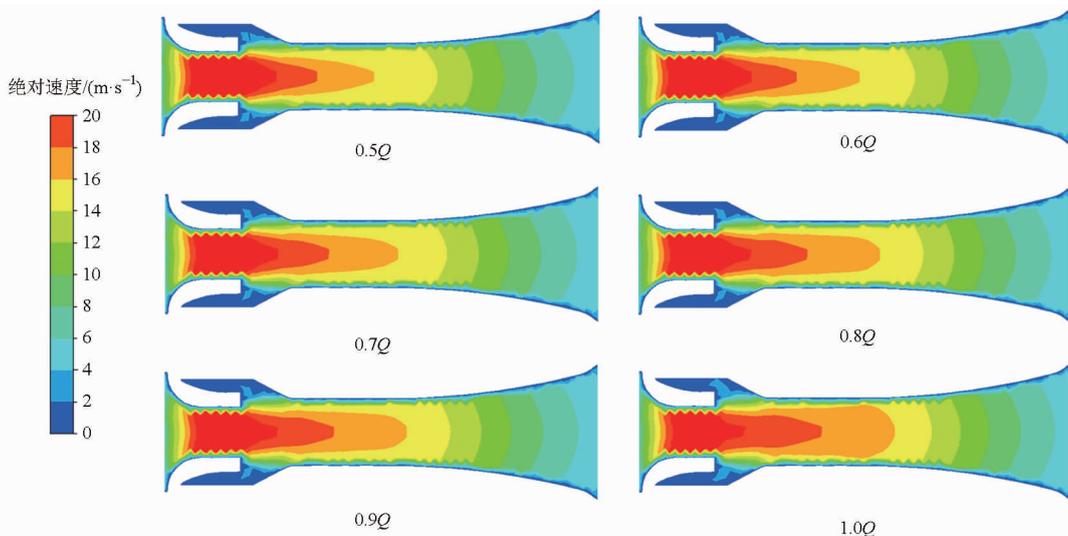


图6 不同工况下射流器内部绝对速度云图

Fig.6 Contours of absolute velocity in jet aerator under different conditions

从图6中也可以看出,非设计流量  $0.5Q$  到设计流量  $1.0Q$ ,射流器喷嘴处高速区域面积减小,喷嘴出口的高速区向喷嘴内收缩;抽送液体的进流口与混合段内的速度均有所增加;喉管和扩散段内高速区域面积增大,并向射流器内壁面处延伸,射流器中高速区域向叶轮的进口方向延伸。

### 3.2 射流器内质量流量分析

根据射流式离心泵的工作原理,可知泵腔出口的质量流量等于射流器喉管的质量流量减去射流器进口的质量流量。通过对喉管和射流器进口的监测可得射流器流道内部不同截面处的质量流量,如图7所示。图7中红色区域减去蓝色区域即为泵腔出口的质量流量。从图中也可以清楚地看到,随着泵运行流量的改变,射流器进口质量流量最大值发生在非设计工况  $0.5Q$ ,约为  $1.59 \text{ kg/s}$ ,最小值发生在设计点  $1.0Q$ 时,约为  $1.49 \text{ kg/s}$ ;喉管质量流量最大值发生在设计点  $1.0Q$ ,约为  $2.04 \text{ kg/s}$ ,最小值发

生在非设计工况  $0.5Q$ 时,约为  $1.87 \text{ kg/s}$ ;并且随着射流式离心泵运行流量的增加,射流器进口质量流量逐渐减小,喉管处质量流量逐渐增大。

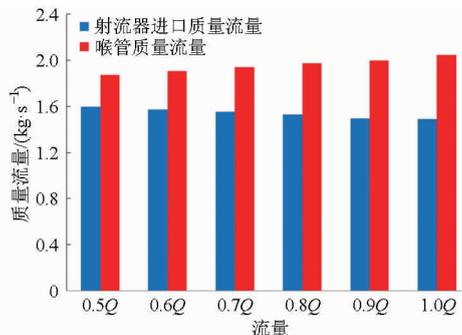


图7 不同工况下射流器内部质量流量变化  
Fig.7 Variation of mass flow rate in jet aerator under different conditions

图8所示为射流器进口质量流量占喉管处质量流量的百分比随流量变化的曲线图。从图中可以看出,在  $0.5Q$  小流量时,该值最大,为  $85.16\%$ ,在

1.0Q 设计流量时,该值最小,为 72.81%。这表明该型泵在运行工况 0.5Q ~ 1.0Q 范围内,导叶流出的液流大部分从泵腔回流到射流器的进口,回流的液体进行了重复做功,这也是该型射流式离心泵效率偏低的主要原因。并且从曲线图中也可以得到,随着泵运行流量的减小,射流器进口质量流量占喉管处质量流量的百分比逐渐增大,即回流增大,所以泵在小流量运行时效率会进一步降低。

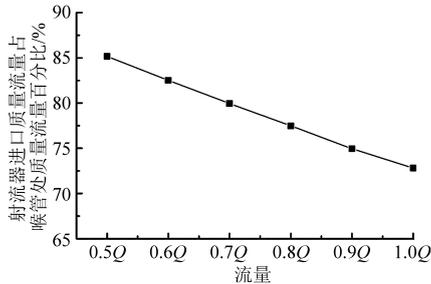


图8 射流器进口质量流量所占百分比变化曲线

Fig. 8 Percentage of mass flow rate change curve in jet aerator under different conditions

### 3.3 叶轮内相对速度云图分布

图9所示为在不同流量下叶轮中间截面相对速度云图的分布情况。从图中可以看出,叶轮流道内相对速度最大处为叶片进口吸力面区域,进口压力面区域速度相对较小;而在靠近叶片压力面的中间区域,液流的相对速度达到最小值,几乎为零;对于整个叶轮流道而言,叶片吸力面的速度普遍高于叶片压力面的速度。从图9中可以看出,随着流量的增大,叶片进口吸力面处相对速度增大,高速区域向叶片出口方向延伸。

从图中所观察到的现象可以说明:进入叶轮液体的液流角远大于叶片进口的安放角。这将导致泵在运行过程中,液体在叶片进口压力面产生脱流,如图中所示叶片压力面中间区域的低速区。因为压力面是叶道内的高压区域,所以在此处产生的旋涡将向下游扩散,影响叶轮下游的流动状态,也将影响泵

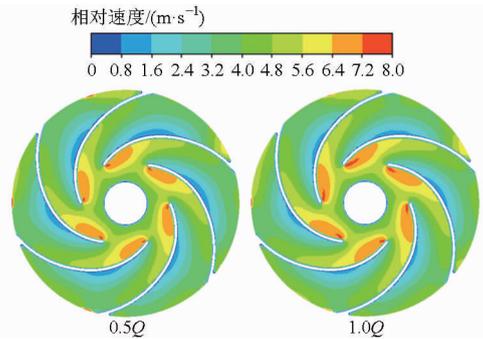


图9 不同工况下叶轮内部相对速度云图

Fig. 9 Contours of relative velocity in impeller under different conditions

的运行稳定性,降低泵的效率。产生液体液流角大于叶片进口安放角的原因可能是因为在设计该型泵时没有很好地考虑到射流器进口的大量回流,即射流器出口的液流量,如图7、8所示,致使叶轮叶片始终在大流量工况下运行。

## 4 结论

(1) 射流器内部压力最高区域产生在喷嘴进口处,喉管附近为压力的低压区域。随着流量的增加,喉管处成为压力最低区域,这使得喉管处的抗空化能力逐渐减弱。

(2) 沿着喷嘴进流方向,射流器内部速度先增大再逐渐减小,速度梯度变化明显。随着流量的增加,喷嘴出口的高速区向喷嘴内收缩,喉管和扩散段内的高速区域向叶轮进口方向延伸。

(3) 从叶轮中流出的液体大部分回流至射流器进口重复做功,并且随着泵运行流量的减小,射流器进口质量流量占喉管内质量流量的百分比增大,即回流的比增大。

(4) 在整个叶轮流道内,叶片吸力面的速度普遍高于压力面的速度,致使在叶片压力面容易产生了一向下游扩散的旋涡,影响了该型泵的运行效率。

## 参 考 文 献

- 刘建瑞,施卫东,孔繁余,等. 射流式自吸离心泵的设计[J]. 水泵技术,2005(2):14-17.  
Liu Jianrui, Shi Weidong, Kong Fanyu, et al. The design of self-priming centrifugal pump of jet flow[J]. Pump Technology, 2005(2):14-17. (in Chinese)
- 吕智君,兰才有,王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械,2005,23(3):1-5.  
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. The present status and development of self-priming pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3):1-5. (in Chinese)
- Rossi Mark J. Recognizing applications that require self-priming pumps[J]. Plant Engineering, 1985, 39(5): 64-66.
- John Shepard. Self-priming pumps: an overview[J]. World Pumps, 2003, 444: 21-25.
- John Kanute. Self-priming centrifugal pumps: a primer[J]. World Pumps, 2004, 456: 30-32.
- Derakhshan S, Nourbakhsh A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1620-1627.
- Okita K, Ugajin H, Matsumoto Y. Numerical analysis of the influence of the tip clearance flows on the unsteady cavitating flows in

- a three dimensional inducer[J]. *Journal of Hydrodynamics*,2009,21(1): 34-40.
- 8 Ding H, Visser F C, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*,2011,133(1): 1-14.
- 9 Chakraborty S, Pandey K M, Roy B. Numerical analysis on effects of blade number variations on performance of centrifugal pumps with various rotational speeds[J]. *Journal of Current Engineering and Technology*,2012,2(1): 143-152.
- 10 韩伟,李仁年,杨瑞,等. 基于内流场分析的机械搅拌式浮选机改型设计[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 84-88.  
Han Wei, Li Rennian, Yang Rui, et al. Redesign of mechanically agitated flotation machine based on interior flow fields simulation[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2009,45(12): 84-88. (in Chinese)
- 11 唐学林,王秀叶,贾玉霞. 基于流固耦合的灯泡贯流泵叶轮强度分析[J]. *排灌机械工程学报*,2014,32(11):921-926.
- 12 施卫东,张光建,张德胜,等. 入口非均匀流对轴流泵性能和压力脉动的影响[J]. *排灌机械工程学报*,2014,32(4):277-282.  
Shi Weidong, Zhang Guangjian, Zhang Desheng, et al. Effects of non-uniform suction flow on performance and pressure fluctuation in axial-flow pumps[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(4): 277-282. (in Chinese)
- 13 李红,王涛. 自吸泵内部流场的数值模拟及性能预测[J]. *排灌机械工程学报*,2010,28(3):194-197.  
Li Hong, Wang Tao. Numerical simulation of interior flow and performance prediction for self-priming pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*,2010,28(3):194-197. (in Chinese)
- 14 刘建瑞,文海罡,高振军. 射流喷嘴几何参数对喷灌泵自吸性能的影响[J]. *农业工程学报*,2012,28(24):47-54.  
Liu Jianrui, Wen Haigang, Gao Zhenjun. Effects of geometric parameters for jet nozzle on self-priming performance of spray pump [J]. *Transactions of the CSAE*,2012,28(24):47-54. (in Chinese)
- 15 王洋,李贵东,曹璞钰,等. 泵腔内部环流对射流式自吸泵自吸性能的影响[J]. *农业机械学报*,2014,45(11):129-133.  
Wang Yang, Li Guidong, Cao Puyu, et al. Effects of internal circulation flow on self-priming performance of flow-ejecting self-priming pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2014,45(11): 129-133. (in Chinese)
- 16 Shi F, Tsukamoto H. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*,2001,123(3): 466-474.
- 17 付燕霞,袁寿其,袁建平,等. 叶片数对离心泵小流量工况空化特性的影响[J]. *农业机械学报*,2015,46(4):21-27.  
Fu Yanxia, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Effect of blade numbers on cavitating flow of centrifugal pump under low flow rates[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(4): 21-21. (in Chinese)
- 18 张帆,袁寿其,付强,等. 双蜗壳式离心泵内部非定常流动压力特性分析[J]. *农业机械学报*,2015,46(2):52-58.  
Zhang Fan, Yuan Shouqi, Fu Qiang, et al. Analysis on pressure characteristics during internal unsteady flow in double volute centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(2): 52-58. (in Chinese)
- 19 蔡建程,潘杰, Guzzomi Andrew. 离心泵隔舌区压力脉动测量与分析[J]. *农业机械学报*,2015,46(6):92-96,72.  
Cai Jiancheng, Pan Jie, Guzzomi Andrew. Pressure fluctuations around volute tongue of centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(6): 92-96,72. (in Chinese)