

半开式单叶片螺旋离心泵叶轮内部压力脉动研究

陈斌¹ 张华¹ 李国锋² 王震² 王强¹

(1. 合肥工业大学化工机械研究所, 合肥 230009; 2. 蓝深集团股份有限公司, 南京 211500)

摘要: 半开式单叶片螺旋离心泵由于叶轮结构不对称、叶轮与蜗壳之间的动静耦合作用以及叶顶间隙泄漏等因素的共同作用, 泵内部伴随着很强的压力脉动效应, 不利于机组的安全运行。针对比转数 n_s 为 237 的半开式单叶片螺旋离心泵, 以 CCM + 为仿真平台, 采用多面体网格划分计算区域, 进行全流场定常/非定常数值计算, 监测叶轮叶片进口附近及叶片中部区域的压力脉动。结果表明: 数值计算监测得到的压力脉动趋势与试验结果基本一致, 但在监测点位置刚好离开叶片吸力面一定距离, 并与同一轴向高度处叶片压力面具有较大圆周距离范围内时, 数值计算得到的压力波动变化趋势与试验结果存在一定差异。结合数值计算得到的监测点附近压力云图分析发现, 当叶片压力面逼近监测点时, 压力达到最大值, 并在叶片圆周厚度 $1/3$ 处时, 压力达到最小值。另外, 从压力最低点到压力最高点范围内, 2 个监测点位置在 5 个工况下, 压力波动均呈现出 3 种斜率变化。

关键词: 半开式单叶片螺旋离心泵; 叶轮; 多面体网格; 压力脉动; 非定常数值计算

中图分类号: TH313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0073-05

Internal Pressure Fluctuation of Semi-open Screw Centrifugal Pump with Single Blade

Chen Bin¹ Zhang Hua¹ Li Guofeng² Wang Zhen² Wang Qiang¹

(1. Research Institute of Chemical Machinery, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Lanshen Corp., Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract: Strong pressure fluctuation existed in semi-open centrifugal screw pump with single blade under the combined influence of asymmetric impeller structure, static and dynamic coupling effects between impeller and volute and tip clearance leakage etc., which was not conducive to the safety operation of the units. The semi-open screw centrifugal pump with blade and specific speed of 237 was taken as research object, STAR-CCM+ simulation platform was used, calculation area was partitioned with polyhedral mesh, the steady and unsteady numerical calculations of whole flow field were conducted, meanwhile, the outer characteristic was predicted and the pressure fluctuation of inlet and middle area of the blade was monitored. Results showed that the error between predicted outer characteristic and test results was very small and the trend of monitored pressure fluctuation was basically consistent with the test, but when there was a distance between monitoring points and suction surface and a large circumferential distance from the same axial height of pressure surface, the results of numerical calculation were different from the test results. It can be found from the pressure time-domain diagram of two monitoring points that pressure fluctuation span of Pre2 was larger than that of Pre1, which was due to the work capacity of blade's middle area was better than that of inlet area. Analysis of pressure contour of monitoring points showed that when the pressure surface was close to the monitoring point, pressure reached its maximum value, and at $1/3$ circumferential thickness area of the blade, pressure reached its

收稿日期: 2016-05-20 修回日期: 2016-06-21

基金项目: 安徽省合肥工业大学“秋实计划”A类计划项目(JZ2015QJSJH0246)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2015HGBZ0129)

作者简介: 陈斌(1971—),男,研究员,主要从事流体机械及工程研究, E-mail: chenbin21cn@126.com

minimum value. In addition, in the range of the lowest point to the highest point, the pressure fluctuation of two monitoring points presented three kinds of slope change under five working conditions.

Key words: semi-open screw centrifugal pump with single-blade; impeller; polyhedral mesh; pressure fluctuation; unsteady numerical calculation

引言

单叶片螺旋离心泵具有较好的抗堵塞和抗缠绕能力,已广泛应用于污水输送作业^[1-2]。受叶轮结构上的非轴对称布置、叶轮与蜗壳之间的动静耦合作用^[3-4]以及叶顶间隙的泄漏作用^[5-7]的共同影响,半开式单叶片螺旋离心泵叶轮径向力偏大,内部流场更伴随着很强的压力脉动效应,极易诱导振动^[8-9]。因此,针对半开式单叶片螺旋离心泵内部压力脉动的研究尤为必要。朱荣生等^[10]分析了单叶片螺旋式轴流泵不同工况下压力脉动的时域及频域情况。程效锐等^[11]通过对单叶片螺旋离心泵内部不同位置压力脉动分布规律的研究,发现蜗壳中部监测点出现了2次压力脉动。HAN等^[12]通过非定常数值计算,研究了出口压力及径向力随着叶轮相位角的变化情况,并给出叶轮受力达到极值时叶轮与蜗壳的相对位置。PEI等^[13-15]通过引入波动量标准差概念,对单叶片离心泵多工况下的压力脉动强度进行了分析。

本文主要通过数值计算与试验相结合的手段,对半开式单叶片螺旋离心泵叶轮内部的压力脉动进行研究。通过压力脉动的对比,分析监测点在圆周不同相位角区间内,数值计算对压力脉动的预测精度,并结合内部压力云图分布,分析压力脉动时域图的走势原因,讨论压力极值出现的机理及监测点与叶轮的相对位置,为半开式单叶片螺旋离心叶轮的减振降噪提供参考和借鉴。

1 研究对象

本文研究的单叶片螺旋离心泵的设计工况为:流量 $190 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 9 m ,转速 $1470 \text{ r}/\text{min}$,比转数 $n_s = 237$ 。叶轮及蜗壳的设计结果如表1所示。

表1 叶轮及蜗壳设计结果

Tab.1 Impeller and volute design results

参数	数值	参数	数值
进口直径 D_1/mm	150	出口平均直径 D_2/mm	230
出口最大直径 $D_{2\text{max}}/\text{mm}$	270	出口最小直径 $D_{2\text{min}}/\text{mm}$	190
叶轮出口宽度 b_2/mm	67	叶片轴向长度 L/mm	232
进口平均安放角 $\beta_1/(\circ)$	18.5	出口平均安放角 $\beta_2/(\circ)$	20
蜗壳进口宽度 b_3/mm	130	蜗壳基圆直径 D_3/mm	280
蜗壳隔舌角度 $\Phi_3/(\circ)$	7	蜗壳出口直径 D_4/mm	150

叶轮、底盖及蜗壳的连接方式如图1所示。叶轮为半开式设计,叶轮与底盖的配合面为锥面。叶轮与底盖之间的间隙通过调整螺栓调节。底盖的同一圆周角度方向,开有2个螺纹通孔,用于安装高频压力传感器。

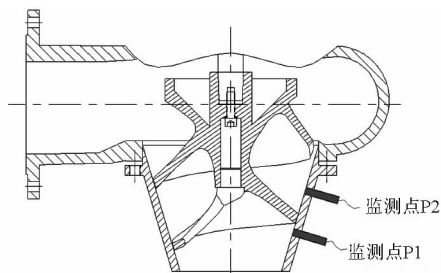


图1 泵结构形式及压力监测点位置

Fig.1 Pump structure and location of pressure monitoring points

2 数值计算与试验方法

2.1 数值计算方法

对计算区域全流场建模,其中叶顶间隙(0.3 mm)、叶轮内部及后泵腔为一整体,采用多面体网格^[16-17]划分方式,网格策略采用“Surface Remesh”和“Thin Mesher”的组合形式,通过网格无关性研究后,最终生成的计算网格总数约为250万,如图2所示。

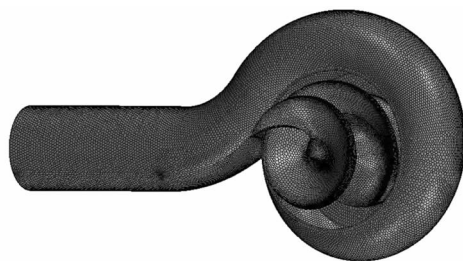


图2 计算区域网格

Fig.2 Mesh of calculation area

以CCM+为仿真平台,以时均N-S方程作为基本控制方程,以Realizable $k-\varepsilon$ 为湍流模型,采用多重坐标系法进行定常数值计算,并统计外特性预测结果,同时,以收敛的定常结果作为初始条件进行非定常数值计算,进行压力脉动的监测。

对 $0.6Q_{\text{opt}}$ 、 $0.8Q_{\text{opt}}$ 、 Q_{opt} 、 $1.2Q_{\text{opt}}$ 及 $1.4Q_{\text{opt}}$ (Q_{opt} 表示最优工况点)5个工况进行数值模拟,每个工况计算6个整周期,叶轮每旋转 1° 为一个时间步长^[18-19],每个时间步长内最大迭代次数为20次,则采样频率为820,采样时间为 0.2449 s 。

2.2 试验方法

首先将泵安装好之后,利用塞尺检查并调整叶顶间隙至 0.3 mm。在符合国家标准的 2 级精度开式试验台上进行外特性试验。然后,安装潜水型高频压力传感器,进行 $0.6Q_{opt}$ 、 $0.8Q_{opt}$ 、 Q_{opt} 、 $1.2Q_{opt}$ 及 $1.4Q_{opt}$ 5 个工况下的压力脉动数据采集。数据采集仪为华中科技大学开发的 HSJ-2010 型水力机械综合测试仪^[20]。压力传感器的采样频率设置为 8 192 Hz,每个工况采样时间为 30 ~ 50 s。并利用键相技术,完成对整周期数据样本的分离。试验现场如图 3 所示。



图 3 试验现场照片

Fig. 3 Picture of test spot

3 结果分析

3.1 外特性结果

图 4 为外特性数值计算结果与试验结果对比,其中,数值计算得到的效率为水力效率,试验中的效率为泵效率。从图中可以发现,二者具有较好的吻合度。

3.2 压力脉动结果

对数值计算及试验结果,分别取 2 个整周期的压力监测数据作为制图样本,横坐标为周期 t^* ,在 $t^* = 0$ 时刻,数值计算中叶轮与蜗壳的相对位置与试验中的相同;纵坐标为监测压力 P_i 。

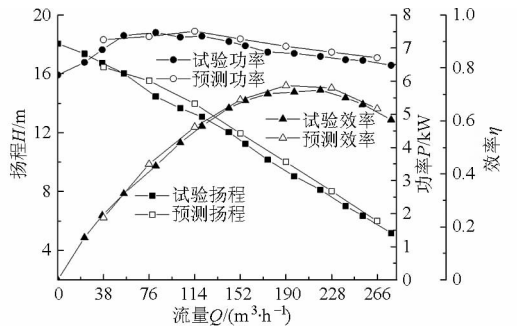


图 4 数值计算的外特性结果与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation and test results of external characteristic

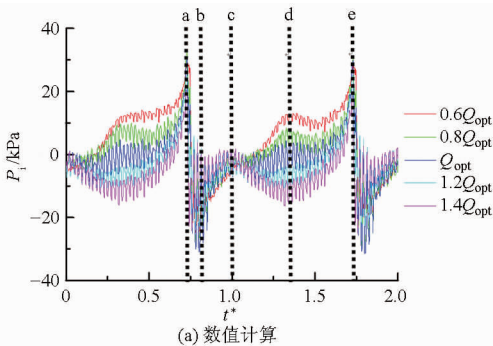
3.2.1 监测点 P1

图 5 为监测点 P1 处的数值计算与试验结果,从图 5 可看出,数值计算结果及试验结果 2 个周期内的压力分布趋势具有较高的相似性,表明非定常数值计算已达到收敛标准、试验过程中泵已稳定运行,2 种方式采集的数据具有较高的可信度。

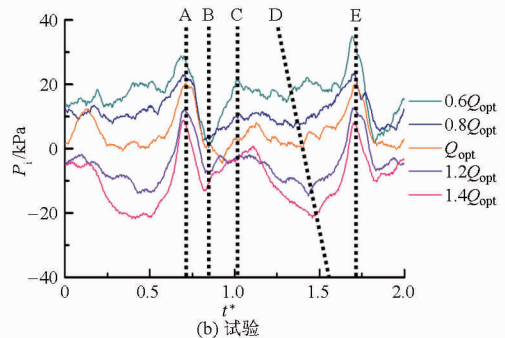
分别取图 5a 和图 5b 中两个最大波谷之间的数据为一个整周期进行分析,根据 5 个工况下压力波动的趋势划分为 4 个区间,分别以虚线 a、b、c、d、e 和 A、B、C、D、E 进行隔断。数值计算中,5 个工况下压力最大值的落点均在垂直线 a 和 e 上,与试验结果一致,表明监测位置 P1 处压力极大值点的出现只与叶片的相对位置有关,而与流量无关。取虚线 a 时刻的位置记为 0° ,虚线 e 时刻的位置记为 360° ,根据虚线 b、c、d 与横坐标的交点位置,推算出虚线 b、c、d 时刻的角度分别为 29.2° 、 95.4° 和 225.7° 。

图 6 为 $1.4Q_{opt}$ 工况下,压力波动线与区间标记 a、b、c、d 交点处,监测点 P1 附近的压力分布模拟结果。

结合图 5 及图 6 对监测位置 P1 处的压力脉动进行分析。当叶片工作面逼近监测点 P1 时,压力出现极大值;当监测点 P1 处于叶片圆周厚度的 $1/3$ 处附近时,压力出现极小值。这种现象主要是因为叶片压力面为做功区域,其压力较高,而本次叶轮为半开式设计,在叶顶存在间隙泄漏,间隙内的流速高、



(a) 数值计算



(b) 试验

图 5 监测点 P1 处压力脉动结果

Fig. 5 Pressure fluctuation results of point P1

压力低。图5中,数值计算结果的a-b区间和试验中A-B区间,压力均呈现出陡降趋势,但后者的下降坡度略小于前者。b-c区间与B-C区间,5个工况下,压力均出现一定的回升,且二者所占横坐标的跨度基本一致,结合图6可以发现,此区间内,叶片逐渐远离附着在间隙内部的低压漩涡区,并向着叶顶间隙外运动,受叶顶泄漏流动的影响逐渐减小,因此压力出现回升。图5中,数值计算结果的c-d区间,压力走势的斜率随着流量的增加,逐渐由正斜率变为负斜率;试验中C-D区间,与数值计算存在一定的差异,5个工况下压力走势的斜率均为负,且随着流量的增加,斜率的负值增加,这是由于随着叶轮的进一步旋转,监测点P1附近没有叶片做功,流体从进口流入后由于沿程损失作用,导致压力下降,并随着流量的增加,损失越多、压力下降越明显。在d-e区间,随着叶片工作面的再次靠近,压力逐渐上升并达到极大值,该区间的分布与试验结果一致。

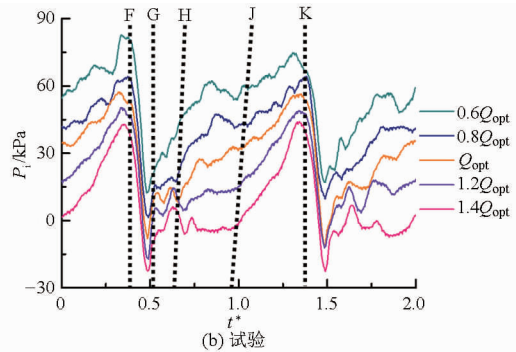
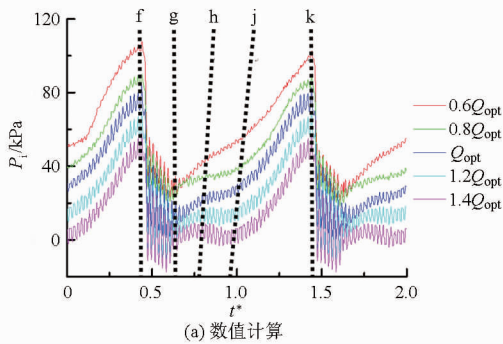


图7 监测点P2处压力脉动结果

Fig.7 Pressure fluctuation results of point P2

图8为 $1.4Q_{opt}$ 工况下,压力波动线与虚线f、g、h、j交点处,监测点P2附近的压力分布模拟结果。取虚线f时刻的位置记为 0° ,虚线k时刻的位置记为 360° ,根据虚线g、h、j的平均值在横坐标上的落点位置,推算出虚线g、h、j平均时刻的角度分别为 72.9° 、 141.2° 和 216.5° 。

从图7a分析可知,f-g区间,压力由最大值迅速下降到最小值,结合图8a、8b可知,此时监测点P2由叶片工作面进入到叶顶间隙内,在靠近工作面时,压力达到最大值,在叶片圆周方向厚度 $1/3$ 处时,达到最小值,由于叶顶间隙内部流动极为复杂,因此数值模拟的压力在间隙内部波动较为厉害。另外,监测点P2比P1处的外径大,叶片工作能力更强,导致前者该区间内的压力陡降程度比后者高。g-h区间内,由于叶片吸力面的远离,不同流量下压力均出现一定的回升。h-j区间内, $0.6Q_{opt}$ 、 $0.8Q_{opt}$ 和 Q_{opt} 工况下,压力继续回升; $1.2Q_{opt}$ 和 $1.4Q_{opt}$ 工况

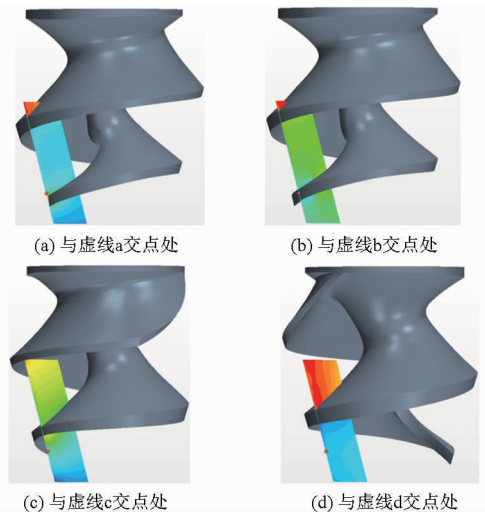


图6 4个位置下监测点P1附近的压力分布

Fig.6 Pressure distribution around point P1 of four locations

3.2.2 监测点P2

图7为监测点P2处的数值计算与试验结果,同样将其分为4个区间,分别以虚线f、g、h、j、k和F、G、H、J、K进行隔断。

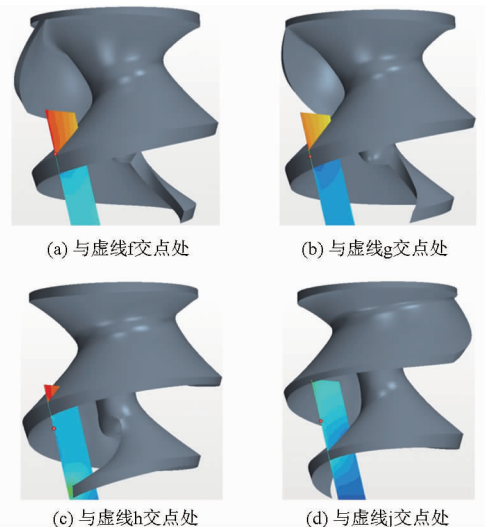


图8 4个位置下监测点P2附近的压力云图分布

Fig.8 Pressure distribution around point P2 of four locations

下,压力呈现一定的下降趋势。j-k区间内,由于叶片工作面的再度靠近,压力分布呈较大的正斜率上

升, 并达到最大值。

对比图 7b 中的试验结果, 发现其压力分布趋势与数值模拟结果相似, 仅在 h-j 区间内存在一定的差别, 此区间处于流道中部, 圆周跨度约为 75.3° , 且起点离最高压力点时的圆周角度为 141.2° 以上。

4 结论

(1) 采用多面体网格对半开式单叶片螺旋离心泵进行全流场定常/非定常数值计算, 预测得到的外特性结果及压力脉动结果与试验结果相符合, 能够准确地模拟叶轮内部的压力脉动趋势。

(2) 监测点 P1 和 P2 处, 分别在 c-d 区间与 h-j 区间与试验结果存在一定的差异, 此区间内, 监测点位置刚好离开叶片吸力面一定距离, 并与同一轴向高度处叶片压力面具有较大的圆周距离。

(3) 2 个监测点位置处, 均在极度靠近叶片压力面时出现压力最大值, 并在叶片圆周厚度 $1/3$ 处时出现压力最小值。

(4) 从叶轮吸力面刚刚转过监测点位置, 至叶片压力面旋转逼近监测点位置过程中, 2 个监测点处的压力脉动均呈现出 3 种不同的斜率变化趋势。

参 考 文 献

- 1 权辉, 李仁年, 苏清苗, 等. 含沙水下粒径对螺旋离心泵磨蚀效应的数值分析[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2014, 33(3): 91-94.
QUAN Hui, LI Rennian, SU Qingmiao, et al. Numerical analysis of erosion effect of sand-laden water on screw centrifugal pump [J]. Journal of Xihua University: Natrual Science, 2014, 33(3): 91-94. (in Chinese)
- 2 邓育轩, 李仁年, 韩伟, 等. 螺旋离心泵内回流涡空化特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 86-90.
DENG Yuxuan, LI Rennian, HAN Wei, et al. Characteristics of backflow vortex cavitation in screw centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 86-90. (in Chinese)
- 3 朱相源, 江伟, 李国君, 等. 导叶式离心泵内部流动特性数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 34-41.
ZHU Xiangyuan, JIANG Wei, LI Guojun, et al. Numerical analysis of hydraulic performance in centrifugal pump with vane diffuser [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 34-41. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 梁开洪, 张克危, 许丽. 轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力学分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 36-38.
LIANG Kaihong, ZHANG Kewei, XU Li. Analysis of the flow through the blade tip clearances of axial pumps by CFD [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2004, 32(9): 36-38. (in Chinese)
- 6 戴辰辰, 郭鹏程, 罗兴铸, 等. 轴流泵端壁间隙流动特性的数值分析[J]. 流体机械, 2009, 37(6): 32-35.
DAI Chenchen, GUO Pengcheng, LUO Xingqi, et al. Numerical analysis of tip clearance flow characteristic in axial flow pump [J]. Fluid Mechinery, 2009, 37(6): 32-35. (in Chinese)
- 7 施卫东, 张华, 陈斌, 等. 不同叶顶间隙下的轴流泵内部流场数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 374-377.
SHI Weidong, ZHANG Hua, CHEN Bin, et al. Numerical simulation of internal flow field in axial-flow pump with different blade tip clearance sizes [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 374-377. (in Chinese)
- 8 张华. 单叶片螺旋离心式潜水排污泵的优化设计及试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- 9 林鹏. 螺旋轴流泵的固液两相数值模拟及试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- 10 朱荣生, 龙云, 林鹏, 等. 螺旋轴流泵内部流场与压力脉动研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 103-109.
ZHU Rongsheng, LONG Yun, LIN Peng, et al. Internal flow and pressure pulsation chatacteristics of screw axial-flow pumps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 103-109. (in Chinese)
- 11 程效锐, 李仁年, 黎义斌, 等. 螺旋离心泵瞬态特性的数值分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 186-192.
CHENG Xiaorui, LI Rennian, LI Yibin, et al. Numerical analysis on transient regime of screw-type centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 186-192. (in Chinese)
- 12 HAN Wei, MA Wei, LI Rennian, et al. The numerical analysis of radial thrust and axial thrust in the screw centrifugal pump [J]. Procedia Engineering, 2012, 31: 176-181.
- 13 PEI J, YUAN S Q, YUAN J P. Numerical analysis of periodic flow unsteadiness in a single-blade centrifugal pump [J]. Science China—Technological Sciences, 2013, 56(1): 212-221.
- 14 裴吉, 袁寿其, 袁建平, 等. 单叶片离心泵压力脉动强度多工况对比研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 29-33.
PEI Ji, YUAN Shouqi, YUAN Jianping, et al. Comparative study of pressure fluctuation intensity for a single-blade pump under multiple operating conditions [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(12): 29-33. (in Chinese)

- 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)
- 7 李伟, 杨勇飞, 施卫东, 等. 基于双向流固耦合的混流泵叶轮力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 82-88.
- LI Wei, YANG Yongfei, SHI Weidong, et al. Mechanical properties of mixed-flow pump impeller based on bidirectional fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 82-88. (in Chinese)
- 8 张人会, 郭苗, 杨军虎, 等. 基于伴随方法的离心泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 943-947, 954.
- ZHANG Renhui, GUO Miao, YANG Junhu, et al. Blade shape optimization of centrifugal pump impeller with adjoint method[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(11): 943-947, 954. (in Chinese)
- 9 WU J Z, WU J M. Vorticity dynamics on boundaries[J]. Advances in Applied Mechanics, 1996, 32(8): 119-222.
- 10 WU J Z, ROACH R L, LO C F. Aerodynamics diagnostics and design based on boundary vorticity dynamics[C] // 17th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Paper No AIAA-99-3103, 1999: 33-46.
- 11 张瑶, 罗先武, 丁华, 等. 基于 BVF 流场诊断的高比转速离心泵叶轮优化[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(5): 765-768.
- ZHANG Yao, LUO Xianwu, DING Hua, et al. Design optimization of the impeller for a high specific speed pump based on BVF diagnosis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(5): 765-768. (in Chinese)
- 12 杨琳, 樊红刚, 陈乃祥. 基于涡动力学的可逆转轮双向流动诊断及优化设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(5): 686-690.
- YANG Lin, FAN Honggang, CHEN Naixiang. Bidirectional flow diagnosis to optimize the design of a pump-turbine runner using vorticity dynamics theory[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(5): 686-690. (in Chinese)
- 13 ZHOU Xin, ZHANG Yongxue, JI Zhongli, et al. The optimal hydraulic design of centrifugal impeller using genetic algorithm with BVF[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2014, Article ID845302: 1-14.
- 14 ZHOU Xin, ZHANG Yongxue, JI Zhongli, et al. The impeller improvement of the centrifugal pump based on BVF diagnostic method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(12): 1-9.
- 15 张永学, 陈龙, 周鑫, 等. 高效率离心泵水力设计及 BVF 诊断[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 479-483.
- ZHANG Yongxue, CHEN Long, ZHOU Xin, et al. Hydraulic design and BVF diagnosis of high efficiency centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 479-483. (in Chinese)
- 16 吴宏, 蒋洪德. 燃气轮机压气机涡量动力学理论及分析方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 903-910.
- WU Hong, JIANG Hongde. Theory and analysis method based on vorticity dynamics for gas turbine compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 903-910. (in Chinese)
- 17 LI Fengchao, FAN Honggang, WANG Zhengwei, et al. Coupled design and optimization for runner blades of a tubular turbine based on the boundary vorticity dynamics theory[C] // Proceedings of the ASME - JSME - KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 2011, 1: 603-609.
- 18 赵斌娟, 王瑜, 陈汇龙, 等. 离心泵尾流-射流现象及粗糙度对其影响的分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 138-143.
- ZHAO Binjuan, WANG Yu, CHEN Huilong, et al. Jet-wake flow in the channel of impeller and the effect of surface roughness on it[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 138-143. (in Chinese)
- 19 赵斌娟, 仇晶, 赵尤飞, 等. 双流道泵蜗壳多目标多学科设计优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 96-101.
- ZHAO Binjuan, QIU Jing, ZHAO Youfei, et al. Multi-objective and multidisciplinary optimization of double-channel pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 96-101. (in Chinese)
- 20 ZHAO Binjuan, HOU Duohua, CHEN Huilong, et al. Optimization design of a double-channel pump by means of orthogonal test, CFD, and experimental analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(11): 1-10.

(上接第 77 页)

- 15 PEI Ji, YUAN Shouqi, YUAN Jianping. Fluid-structure effects on periodically transient flow of a single-blade sewage centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2015-2023.
- 16 ANNIE-CLAUDE B, PATRICK D, GIOVANNA C, et al. Comparisons between numerical calculations and measurements in vaned diffuser of SHF impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 21(12): 1013-1019.
- 17 袁建平, 洪峰, 衡亚光, 等. 多面体网格在离心泵内部流动数值模拟中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(12): 1039-1044.
- YUAN Jianping, HONG Feng, HENG Yaguang, et al. Application on polyhedral mesh in numerical simulation of internal flow in centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(12): 1039-1044. (in Chinese)
- 18 ZHANG Hua, SHI Weidong, CHEN Bin, et al. Experimental study of flow field in interface area between impeller and guide vane of axial flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2014, 26(6): 894-901.
- 19 HUANG B, YOUNG Y L, WANG G, et al. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(7): 1-16.
- 20 施卫东, 姚捷, 张德胜, 等. 采样频率和时间对轴流泵压力脉动特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 190-194.
- SHI Weidong, YAO Jie, ZHANG Desheng, et al. Influence of sampling frequency and time on pressure fluctuation characteristics of axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 190-194. (in Chinese)