

双流道泵叶轮边界涡量流分析与水力优化

赵斌娟 赵尤飞 仇晶 张成虎 陈汇龙

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为优化双流道泵叶轮,对原始泵的内流场进行数值模拟,引入边界涡量动力学理论进行流动诊断,分析了叶轮表面的边界涡量流(BVF)、摩擦力线以及涡量线的分布规律,找到了叶轮内产生不良流动的位置及其动力学根源。根据流动诊断结果,有针对性地调整影响双流道泵叶轮内流状态的结构参数,得到优化后的双流道泵叶轮。联合CFD计算和边界涡量动力学流动诊断方法,对比分析了优化前后的双流道泵叶轮,结果表明:优化后叶轮表面的BVF、摩擦力线以及涡线分布得到明显改善,BVF峰值和均值均显著降低,均匀性指数更接近于1,流动分离被抑制,叶轮受力状况得到改善,扬程和效率等水力性能明显提高。研究结果证明了基于边界涡量动力学理论的流动诊断和优化方法在流道式叶轮机械中应用的可行性。

关键词: 双流道泵叶轮; 内流诊断; 水力优化; 边界涡量动力学

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0085-06

Boundary Vorticity Flux Analysis and Hydraulic Optimization of Double-channel Pump Impeller

Zhao Binjuan Zhao Youfei Qiu Jing Zhang Chenghu Chen Huilong

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to optimize the double-channel pump impeller, inner flow field of the original pump was simulated and diagnosed by introducing boundary vorticity dynamics theory. Several positive and negative BVF peak areas were observed at different locations of the original impeller, which usually relates to large pressure gradient and flow separation. By analyzing the distribution of BVF, friction and vorticity lines on the impeller surface, the locations of the bad flow inside the impeller and their dynamic roots were found. According to diagnosis of the flow, the structural parameters affecting inner flow state of the double-channel pump impeller were adjusted to obtain the optimized double-channel pump impeller. Combined with CFD and boundary vorticity dynamics flow diagnosis method, the double-channel pump impellers, before and after optimization, were compared and analyzed. The results showed that the distribution of BVF, friction and vorticity lines on the surface of optimized impellers had been significantly improved. The peak and mean values of BVF were both decreased apparently and the uniform index was much closer to 1. The flow separation was suppressed and force distribution was improved, therefore, the head and efficiency of the pump were improved obviously. The research work proved the feasibility of applying inner flow diagnosis and optimization method based on boundary vorticity dynamics theory in the channel impeller machinery, and it also provided reference for the study of optimization design of other turbomachinery.

Key words: double-channel pump impeller; inner flow diagnosis; hydraulic optimization; boundary vorticity dynamics

收稿日期: 2016-02-28 修回日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109094、51279067)、江苏省高校优势学科建设工程项目和江苏省高校研究生实践创新计划项目(SJLX15-0493)

作者简介: 赵斌娟(1977—),女,副教授,主要从事叶轮机械内部复杂流动计算和优化设计研究,E-mail: zhaobinjuan@mail.ujs.edu.cn

引言

随着计算流体力学(CFD)的发展和水平的提高,根据叶轮机械内部流场的计算结果,对流道结构进行修改,以获得具有较好流动特性的流道结构优化设计方法已成为当前的研究热点。很多专家学者已经在这方面做了大量的研究工作,取得了不少研究成果^[1-8]。这些研究主要根据压力分布或者速度矢量从宏观上判断过流部件的流动性能,然而流场中的压力和速度等参数都是连续变化的,因此引起流态恶化的潜在原因无法揭示,明确的改进依据难以给出。

针对这一问题,将 CFD 计算和基于边界涡量动力学理论的流动诊断方法相结合的分析优化设计方法已经成为最新发展方向。根据 WU 等^[9-10]建立的边界涡量动力学理论,复杂分离流源于物面上产生的涡量及其离开物面后形成的自由剪切层,且任意形状物体所受的力和力矩可以严格地用边界涡量流(Boundary vorticity flux, BVF)积分得到。因此,如果能够很好地控制 BVF 在叶轮机械叶片表面上的分布,就能最大限度地抑制流动分离,改进叶轮的受力状况,进而提高叶轮机械的水力性能。张瑶等^[11-17]分别在高效离心泵、压气机、贯流式水轮机中结合 CFD 和边界涡动力学理论对叶轮机械进行诊断,经过优化设计后叶轮的叶片表面 BVF 分布更加均匀,水力性能都得到了很好的提高。

上述研究说明了边界涡量动力学和 CFD 计算相结合的分析优化设计方法在叶轮机械中有着良好的应用前景。因此,本文基于内流场计算结果,运用边界涡量动力学理论对一双流道泵叶轮进行内流诊断,利用 BVF、摩擦力线以及涡线分布,找到双流道泵叶轮内产生不良流动的动力学根源和位置,通过优化叶轮的主要结构参数,改善叶轮表面 BVF、摩擦力线以及涡线分布,进而提高双流道泵的水力性能。

1 边界涡量动力学理论

BVF 是边界涡量动力学的核心概念,它表征因粘性扩散在单位时间里穿过以 n 为法向的单位面积元的涡量,具体定义为

$$\sigma = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \omega}{\partial n} \quad (1)$$

式中 σ ——边界涡量流

ω ——涡量 μ ——动力粘度

ρ ——密度

n ——流体表面外法线方向的单位矢量

对于一般离心泵,在叶轮匀速转动、流体不可压缩、雷诺数较大、壁面无滑移且忽略体积力时,BVF 只存在由压力梯度产生的分量,即

$$\sigma = \sigma_p = \frac{1}{\rho} n \nabla p \quad (2)$$

式中 ∇p ——压强梯度

在体积力保守的不可压流场中,BVF 是涡量产生并扩散的根源,可诱发边界层分离、二次流动或大尺度分离等不良流动。20 世纪 80 年代以来,WU 等^[9-10]建立了边界涡量动力学理论,认为复杂分离流源于物面上产生的涡量及其离开物面后形成的自由剪切层,任意形状物体所受的力和力矩可以严格地用 BVF 积分得到。这就在涡量生成和水力性能之间建立了直接的联系。所以,控制 BVF 在叶片表面的分布,就能抑制流动分离,改进叶轮受力,达到优化叶轮设计的目的。

该理论指出表面摩擦力是判断流动分离的重要依据,其表达式为

$$\tau = -\mu \omega n \quad (3)$$

流动分离判据认为:在流动分离区,不仅摩擦力线有汇聚,并且涡线有大曲率,而涡线曲率有局部最大值的方即分离线所在;BVF 线折向和表面摩擦力线趋势一致则是分离的前兆。一般来讲,BVF 线和摩擦力线方向趋于一致就可以作为流动分离的判断依据。

2 原始叶轮及内流诊断

2.1 原始叶轮

本文所研究双流道泵的设计参数为:流量 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 10 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$ 。原始叶轮(图 1)的主要几何参数及取值为:进口直径 $D_1 = 85 \text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 200 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 60 \text{ mm}$,前盖板圆弧半径 $R_1 = 40 \text{ mm}$,后盖板圆弧半径 $R_2 = 110 \text{ mm}$,前盖板倾角 $T_1 = 89^\circ$,后盖板倾角 $T_2 = 90^\circ$,流道中线的包角 $\varphi = 160^\circ$ 。

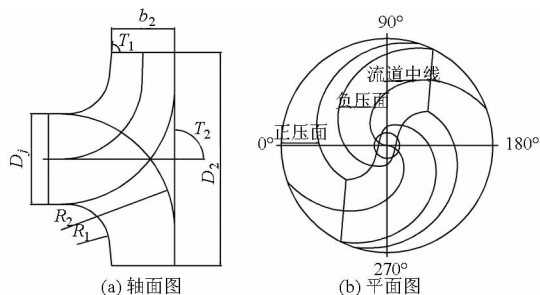


图 1 原始叶轮水力设计图

Fig. 1 Sketch of original double-channel pump's impeller

2.2 CFD 计算

利用 Pro/E 软件对原始泵的流道进行三维建

模,为充分考虑进、出口及泄漏对流场的影响,计算区域取包括叶轮流道、蜗壳流道、前后泵腔流道、密封环间隙流道以及进、出口流道在内的全流道区域。然后在 ANSYS-ICEM 中对计算区域进行非结构化网格划分。经网格无关性检验,叶轮流道、蜗壳流道、全流道网格数分别为 296 323、978 131、1 430 530。计算区域及网格划分如图 2 所示^[18-20]。

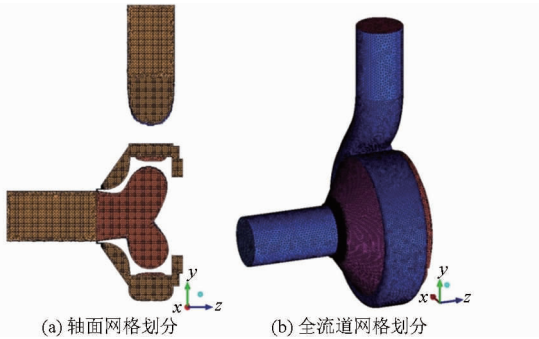


图 2 计算区域及网格划分

Fig. 2 Computational domain and grid

基于 ANSYS-CFX 软件对双流道泵的内流场进行数值计算,各个区域交界面之间采用 Interface 面耦合,网格采用 GGI (general grid interface) 方法连接,动静交界面设置为冰冻转子 FR (frozen rotor) 格式,前泵中密封环与叶轮的交界面设置为冰冻转子交界面。在前、后泵腔中将前、后盖板的表面设置动壁面。湍动能采用一阶差分格式,其余采用高阶差分格式。进口设置为质量流量进口、湍流强度为 5%;出口设置为 opening 出口,即沿出口方向所有流动参数不再变化;壁面采用无滑移壁面,近壁面区域的流动采用标准壁面函数进行计算,同时参考现有零件的机械加工精度设置表面的等效沙粒粗糙度高度值为 0.012 mm。残差收敛精度设为 10^{-5} ,监测双流道泵扬程和出口截面的平均静压,当其不再发生变化时,认为计算收敛。

2.3 内流诊断

计算收敛后,根据式(2)对数值模拟所得叶轮表面的压力分布进行适当处理,得到原始叶轮表面的 BVF 分布云图,如图 3 所示。由图可见,1 处出现了间断分布的小块区域正峰值,这是由该区域的几

何结构扭曲所致,在其附近还出现 2 大块负峰值区域,说明在此处产生了较大的压力梯度;2 处出现长条状的负峰值区域,说明此处也是压力梯度较大的区域,应重点关注;3 处(叶片出口靠近叶尖处)出现了类似三角形的 BVF 正峰值区域,说明此处压力梯度过大,容易造成流动分离;4 处则出现小区域的负峰值区,同样需要此后优化时重点关注。根据式(2),无论 BVF 峰值是正是负,都说明该区域压力梯度过大,这种剧烈的压力变化应该避免。为分析流动分离,可进一步作出叶轮表面 1、2、3 和 4 处的 (τ, σ) 曲线和 (τ, ω) 曲线,分别如图 4、5 所示,图 4 中白色是 τ 线,红色是 σ 线,图 5 中白色是 τ 线,红色是 ω 线。

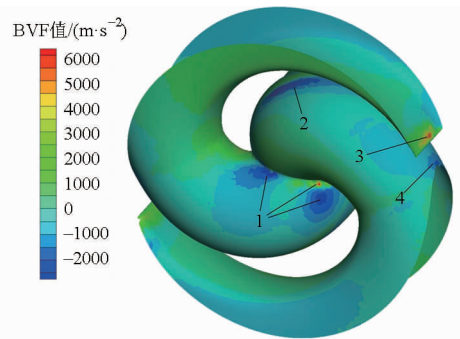
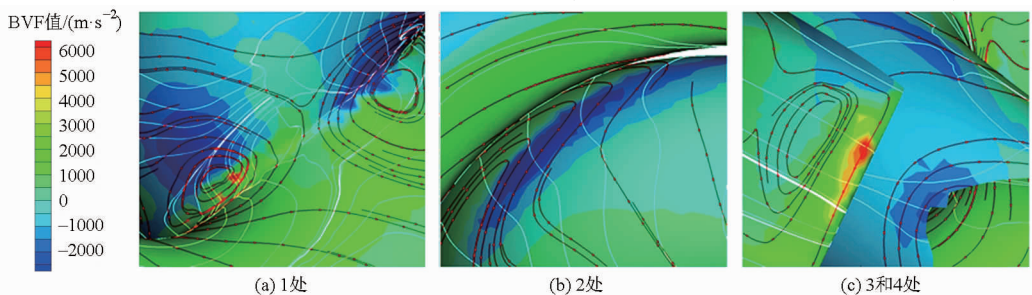


图 3 原始叶轮壁面 BVF 分布云图

Fig. 3 BVF contour on original impeller's wall

1 处可能由于几何结构本身并不理想, BVF 正峰值以及大面积负峰值出现在该区域。该处的 τ 线出现汇聚, BVF 线和 τ 线很明显趋于一致,另外参考 (τ, ω) 曲线, 涡量线局部曲率也较大。因此可以判定该处很可能发生了流动分离,是需要重点优化设计的部位。2 处出现的长条状 BVF 负峰值区域,通过观察两处的 (τ, σ) 曲线可以看出, τ 线在负峰值的核心区及附近均未出现汇聚,而 BVF 线在相应区域基本的折向与 τ 线并未出现一致的现象; (τ, ω) 曲线中该区域的涡量线曲率也没有局部最大值,因此可以判定此处没有发生流动分离,但考虑到该处的大面积负峰值区域,是压力梯度较大的地方,在此后优化中需要改进流道参数以避免甚至消除峰值的出现,从而改善流动。由图 4、5 可见,3 处和 4 处单从



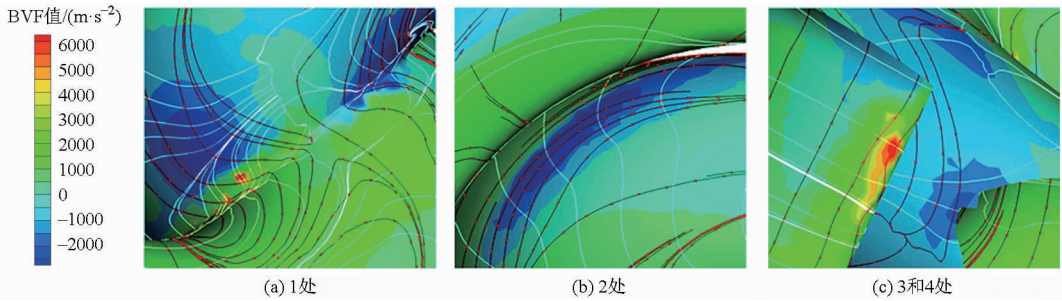
(a) 1处

(b) 2处

(c) 3和4处

图 4 原始叶轮壁面上的 (τ, σ) 曲线

Fig. 4 (τ, σ) curves on walls of original impeller

图5 原始叶轮壁面上的 (τ, ω) 曲线Fig.5 (τ, ω) curves on walls of original impeller

BVF 峰值角度分析,是容易发生流动分离的危险区域,但若结合 τ 线和 ω 线来分析,此处 τ 线并未出现大量汇聚,BVF线和 τ 线几乎是正交分布,而且 ω 线在此处局部曲率并不大,因此可以判定此处没有发生流动分离。当然,考虑到该部位压力梯度大,本文的数值计算也仅考虑了设计工况下的流动状态,针对此处容易发生不良流动,应该在优化中改进几何参数,避免BVF正峰值出现。

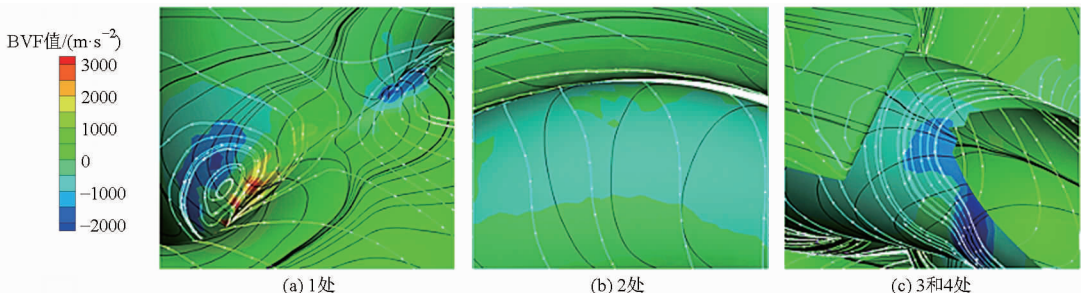
3 叶轮优化设计与分析

3.1 叶轮优化设计

针对原始叶轮1、2处存在的问题,通过适当减小叶轮的前后盖板圆弧半径 R_1 、 R_2 ,增大前盖板倾角 T_1 ,改进流道形状,使得过流断面沿流道中线面积变化更加均匀,以改善流道内的流动情况;而3处(叶片出口靠近叶尖处)以及4处则主要通过增大流道中线的包角 φ 和叶轮出口直径 D_2 来提高叶轮对液体的控制,从而改善相应位置出现的不良流动。优化后叶轮主要几何参数的取值为:进口直径 $D_1 = 74$ mm,出口直径 $D_2 = 211$ mm,出口宽度 $b_2 = 45$ mm,前盖板圆弧半径 $R_1 = 37$ mm,后盖板圆弧半径 $R_2 = 105.5$ mm,前盖板倾角 $T_1 = 95^\circ$,后盖板倾角 $T_2 = 90^\circ$,流道中线的包角 $\varphi = 172^\circ$ 。

3.2 结果分析

将优化后的叶轮进行三维建模、网格划分和数值计算,边界条件和计算方法与原始叶轮相同。计算收敛后,根据式(2)对优化后叶轮表面的压力分布进行适当处理,可得优化后叶轮表面的BVF分布

图7 优化叶轮壁面上的 (τ, σ) 曲线Fig.7 (τ, σ) curves on walls of optimized impeller

云图,如图6所示。

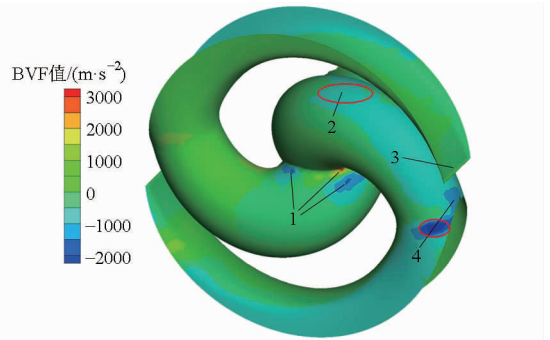
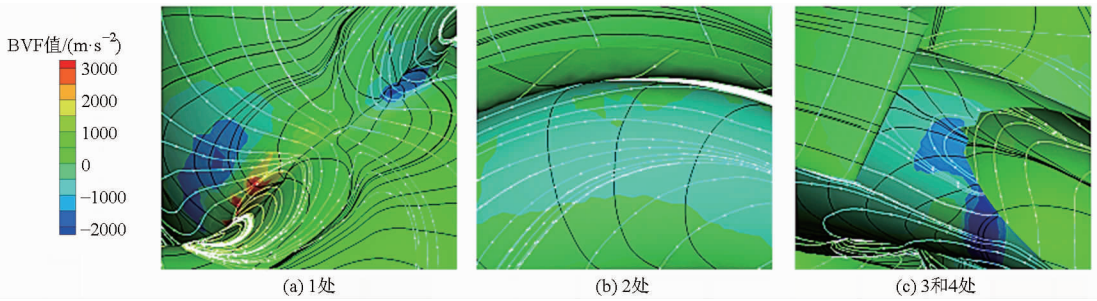


图6 优化后叶轮壁面BVF分布云图

Fig.6 BVF contour on optimized impeller's wall

由图可见,优化后叶轮表面的BVF分布明显更加均匀,正峰值也降低很多;原始叶轮1处2块明显的BVF负峰值区域优化后也变得很小,正峰值区域仍存在,但其峰值已经大大减小;2处的长条状负峰值区域经优化后已消失;3处(叶尖处)的BVF峰值也消失;4处位置的负峰值区发生了转移,说明叶轮此处仍需要进一步的优化。

图7、8分别给出了优化后叶轮表面1、2、3和4处的 (τ, σ) 曲线和 (τ, ω) 曲线分布情况,图7中黑色是 τ 线,白色是 σ 线,图8中黑色是 τ 线,白色是 ω 线。由图可见,优化后叶轮在1处仍出现BVF正峰值, (τ, σ) 曲线在正峰值区域附近,叶轮的扭曲部位有折向一致的现象, (τ, ω) 曲线在正峰值区域附近也有局部大曲率存在,说明此处的流动分离依然存在;在靠近正峰值区域的一块负峰值区 (τ, σ) 并没有折向一致, (τ, ω) 曲线也没有局部最大值,表明

图 8 优化叶轮壁面上的 (τ, ω) 曲线Fig. 8 (τ, ω) curves on walls of optimized impeller

该处并未发生流动分离,在与之相对应的另一块负峰值区, τ 线发生汇聚, (τ, σ) 折向一致, (τ, ω) 曲线曲率有局部最大值,说明此处也发生了流动分离;优化后 2 处的 (τ, σ) 和 (τ, ω) 曲线分布良好,说明该处优化效果良好。优化后叶轮 3 处的 (τ, σ) 曲线均是正交分布,而 (τ, ω) 曲线并没有局部曲率最大值出现,且原始叶轮中此处的 BVF 正峰值消失,也达到了优化的效果。优化后 4 处的负峰值区域发生转移,该处 (τ, σ) 曲线存在小的夹角, (τ, ω) 曲线局部曲率变化不明显,是发生流动分离的危险区域,表明此处仍然需要进一步的优化设计。综合来看,优化后叶轮表面 BVF 分布更加均匀,其内部流动得到改善,但仍有进一步优化的空间。

为进一步定量衡量优化叶轮表面 BVF 分布的均匀程度,本文引入均匀性指数 γ_a , 定义为

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\Phi_i - \bar{\Phi}_a|) A_i]}{2 |\bar{\Phi}_a| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

式中 i ——面元编号 Φ ——指定的变量

A_i ——微元面积

$\bar{\Phi}_a$ ——变量 Φ 在流域内表面的面积加权平均值

均匀性指数 γ_a , 代表流域内一个指定变量在某表面的变化,其值为 1 代表最高的均匀性。

表 1 给出了优化前、后叶轮表面的 BVF 峰值、BVF 均值和均匀性指数 γ_a , 由此可见,优化后叶轮的 BVF 无论是峰值还是均值,都比原始叶轮的要小,均匀性指数 γ_a 也更接近 1。因此,优化后叶轮的 BVF 分布更为均匀,流动分离得到抑制,流体对叶轮的做功效果更好,扬程和效率这些水力性能更优。

表 1 优化前、后叶轮主要性能指标对比

Tab. 1 Comparison of impeller's main performance indexes before and after optimization

参数	优化前	优化后
BVF 峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	6 531.56	3 593.75
BVF 均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	625.81	539.44
均匀性指数	0.769	0.775
扬程/m	10.29	11.63
效率/%	70.32	75.23

4 结束语

运用边界涡量动力学对双流道泵叶轮进行内流诊断,得到了叶轮表面的 BVF、 (τ, σ) 曲线和 (τ, ω) 曲线的分布情况,有效地捕捉到了叶轮内产生不良流动的部位,引入均匀性指数 γ_a 进行了定量分析,优化结果更具说服力。对流动分离判据的应用作出了实践性探索,结果表明边界涡量动力学理论在双流道泵叶轮的內流诊断中同样有效、可靠。

参 考 文 献

- 1 YUAN Shouqi, YUAN Jianping, LIU Houlin, et al. Advances in design methods and characteristics of internal flow for centrifugal pumps[C] // ASME 3rd Joint US-European Fluid Engineering Summer Meeting, 2010: 547 - 561.
- 2 ZHAO Binjuan, WANG Yu, CHEN Huilong, et al. Hydraulic optimization of a double-channel pump's impeller based on multi-objective genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 634 - 640.
- 3 MENG Fannian, DONG Quanlin, WANG Pengfei, et al. Multiobjective optimization for the impeller of centrifugal fan based on response surface methodology with grey relational analysis method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6(8): 614581.
- 4 王春林, 叶剑, 曾成, 等. 基于 NSGA-II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 100 - 106.
- 5 WANG Chunlin, YE Jian, ZENG Cheng, et al. Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA-II genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 100 - 106. (in Chinese)
- 6 曹璞钰, 印刚, 王洋, 等. 离心泵内双龙卷风式分离涡数值分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 22 - 28.
- 7 CAO Puyu, YIN Gang, WANG Yang, et al. Numerical analysis of double tornado-type separation vortices in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 22 - 28. (in Chinese)
- 8 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)
- 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)