

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.015

可调导叶式轴流泵压力脉动数值分析

王凡¹ 钱忠东¹ 郭志伟¹ 郜元勇²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

摘要: 轴流泵叶轮内部的压力脉动是影响其运行稳定性和叶片疲劳破坏的重要因素之一, 为了研究压力脉动的特征和根源, 探索压力脉动的水力优化方法, 应用 CFD 方法模拟轴流泵内部非定常流动, 在模型试验结果验证的基础上, 计算了叶轮叶片和导叶表面的压力脉动, 采用快速傅里叶变换进行信号处理和分析比较。研究表明: 叶轮叶片表面压力脉动的主频是导叶通过频率, 导叶表面压力脉动的主频是叶片通过频率; 在小流量工况下, 通过调节导叶角度可以显著降低叶轮叶片和导叶表面因动静干涉引起的压力脉动, 从而降低疲劳破坏的风险。

关键词: 轴流泵; 可调导叶; 叶片; 压力脉动; 数值模拟

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0119-05

Pressure Oscillations Prediction of Axial Flow Pump with Adjustable Guide Vanes

WANG Fan¹ QIAN Zhongdong¹ GUO Zhiwei¹ GAO Yuanyong²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Resuarch Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Pressure oscillations in the axial flow pump impeller are associated with operational stability of the pump unit and fatigue failure of the blade. In order to obtain the characteristics and sources of the pressure oscillations and investigate the effects of adjustable guide vanes (AGV) on pressure oscillations, the CFD method based on the RANS equations and SST $k-\omega$ turbulence model was applied to simulate the unsteady flow inside the axial flow pump. The monitor points were located on the impeller blade and the guide vane. The static pressure of each survey point was recorded for 14 rotation periods. The calculated head was performed and supported by experimental data with the maximum relative error less than 4%. It indicates that the geometric model, numerical method, and simulation scheme are reasonable and reliable. Fast Fourier transformation method was used in the pressure signal processing. The main frequency of the pressure oscillations on the impeller blade is the guide vane passing frequency and the main frequency on the guide vane is the blade passing frequency, which indicates that the rotor-stator interaction between the impeller and the guide vanes is the source of the pressure oscillation in studied operating points. After adjustment of the guide vanes, the amplitudes of the pressure oscillations on both the impeller blade and the guide vane are reduced. The flow pattern with different guide vane angle was shown by the streamline, and the vortex flow was partly suppressed. It indicates that the rotor-stator interaction is improved in such operating conditions. The adjustable guide vane provides a valid solution to protect the impeller from potential fatigue failure.

Key words: axial flow pump; adjustable guide vane; blade; pressure oscillations; numerical simulation

引言

轴流泵通常应用在大流量、低扬程的条件下。

在农业灌溉、防洪防涝、市政供水、船舶动力和航天工业中被广泛使用。轴流泵机组的压力脉动是影响大型机组稳定运行的主要原因之一。大量国内外学

收稿日期: 2016-06-12 修回日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51422906)

作者简介: 王凡(1988—), 男, 博士生, 主要从事流体机械研究, E-mail: kraps@qq.com

通信作者: 钱忠东(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械研究, E-mail: zdqian@whu.edu.cn

者研究了水力机械的压力脉动特性^[1-11]。施卫东等^[12]和王福军等^[13]重点研究了轴流泵在不同工况下的压力脉动特性,对不同位置测点的压力脉动进行了分析,发现在小流量工况下,泵内各部分压力脉动幅值会显著增大,但测点均布置在管道边壁,未涉及到叶轮叶片及导叶叶片上的压力脉动规律。

此外,流体的压力脉动还与固体结构所承受的动态应力密切相关^[14],是造成水力机械关键过流部件疲劳破坏的原因之一,影响其使用寿命,并造成严重的经济损失。研究表明^[15-16],在绝大多数运行工况下动静干涉是引起动态应力的典型现象之一。当动静干涉相关的激励频率与叶轮或者导叶的自然频率相一致时,机械共振能够放大动态应力,潜在地导致较高的疲劳破坏速率和显著的裂纹扩散^[17]。

本文研究一种可调导叶式轴流泵。对5个典型运行工况的内部流动进行数值模拟,重点分析叶轮叶片和导叶表面压力脉动的频率特性和幅值分布。对于压力脉动幅值较大的小流量工况,对比导叶角度调节前后的压力脉动,并对压力脉动变化的原因进行分析。

1 轴流泵计算模型

1.1 几何模型及网格划分

本文使用的模型轴流泵,其设计工况的主要参数如下:流量 $Q = 330 \text{ L/s}$,扬程 $H = 3.3 \text{ m}$,额定转速 $n = 1450 \text{ r/min}$ 。叶轮直径 $D_1 = 300 \text{ mm}$,叶顶间隙 $h = 0.15 \text{ mm}$,轮毂直径 $d = 99.34 \text{ mm}$,叶轮叶片数量为3,导叶数量为5。导叶角度调节方向的定义如图1所示。

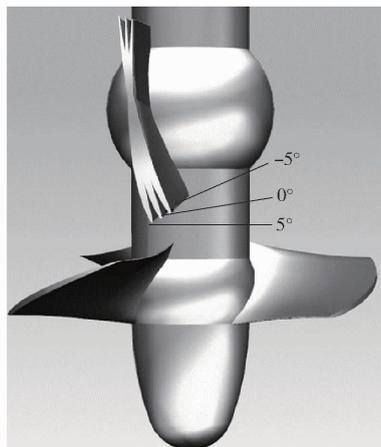


图1 导叶调节示意图

Fig.1 Adjustment of guide vanes

计算区域包括进口流道、叶轮、导叶和出口弯肘管道,同时考虑叶顶间隙。采用多块结构化六面体网格对计算域进行空间离散。如图2所示,叶轮叶片采用J型网格结构,导叶叶片采用H型网格结

构,用O型网格在叶片壁面建立边界层。为了提高计算精度,壁面 y^+ 值被控制在4以内。

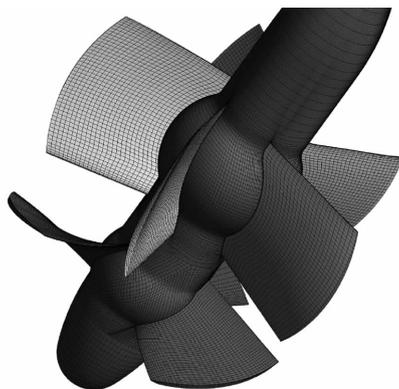


图2 叶轮和导叶网格

Fig.2 Mesh of the impeller and the guide vanes

采用5套网格进行网格无关性分析,计算结果如图3所示,考虑到计算结果的精确性和计算时间的经济性,最终确定网格单元总数约为 2.0×10^6 进行计算。

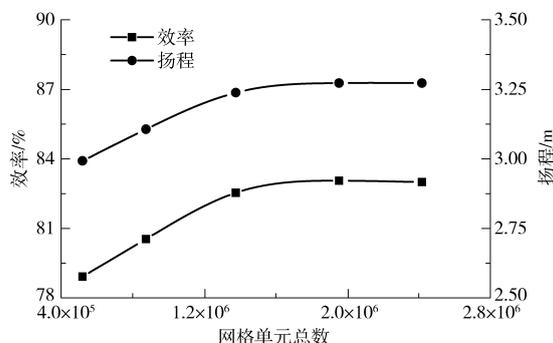


图3 网格无关性测试

Fig.3 Mesh independence

1.2 计算方法

数值模拟采用三维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes (RANS) 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型^[18-19]。采用有限体积法对控制方程进行离散,采用 SIMPLEC 算法求解压力-速度耦合。

采用总压进口和质量流量出口边界组合^[20],壁面为无滑移边界条件。首先进行定常计算,其结果作为初始流场进行非定常计算。采用滑移网格模型来模拟动静干涉。每个时间步叶轮转动 3° ,整个计算时长为14个转动周期。

在叶轮叶片及导叶的压力面和吸力面共设置了36个监测点,以获得关键过流部件壁面上较为详细的压力脉动信号,具体布置如图4所示。

1.3 数学模型验证

采用时均数据计算水泵的扬程,并与试验数据进行比较,结果如图5所示。可以看出,数值模拟的结果与模型试验的数据趋势一致,最高相对误差在4%以内。这说明,本文采用的几何模型、数值方法、

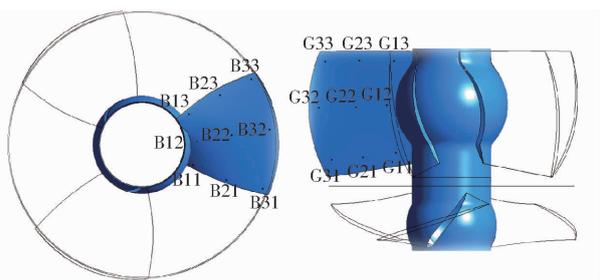


图 4 监测点布置
Fig. 4 Survey points

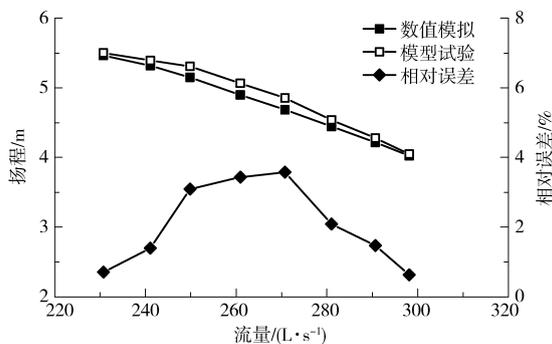


图 5 数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation with experiment

网格划分以及边界条件是合理的,计算结果是可靠的。

2 非定常流场计算结果

对 5 个典型工况(即流量分别为最优工况流量的 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 倍)的压力脉动进行分析和比较。分析方法采用快速傅里叶变换,以获得压力脉动的频率特性和幅值。

2.1 叶轮叶片及导叶的压力脉动

设计工况下,在叶片压力面和导叶压力面布置的监测点频谱特性如图 6、图 7(图中相对频率是指频率与转频的比值)所示。可以看到叶轮叶片表面的压力脉动频率主要是导叶通过频率(转频与导叶数乘积)和转动频率。总体来看导叶通过频率下幅值较高的位置是压力面 B33 点,而转动频率下幅值较高的位置则是压力面 B31 点。叶轮叶片在一个转动周期内依次通过每一个导叶,因此叶轮叶片与导叶之间的动静干涉所产生的压力脉动在叶片表面表现出的主要频率是导叶通过频率。

导叶表面的压力脉动频率主要是叶片通过频率。幅值由进口边至出口边逐渐减小,由轮毂处至轮缘处逐渐增大,最大幅值出现在导叶压力面 G31 点。在一个转动周期内,各个叶片将会依次通过任一导叶,因此叶轮叶片与导叶之间的动静干涉所产生的压力脉动在导叶叶片表现出的主要频率是导叶通过频率。

由于轴流泵小流量工况下泵内各部分压力脉动

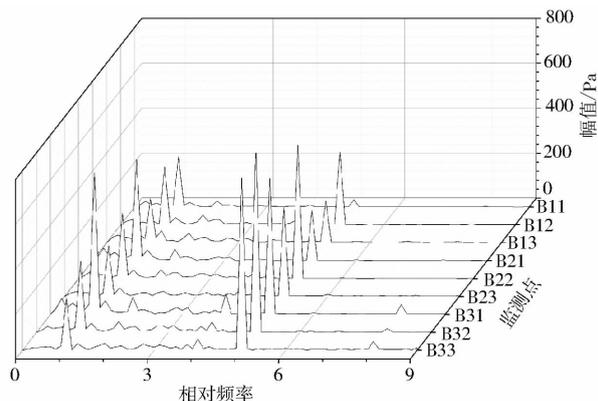


图 6 设计工况下叶片压力面频谱特性

Fig. 6 Frequency spectra at pressure side of blade

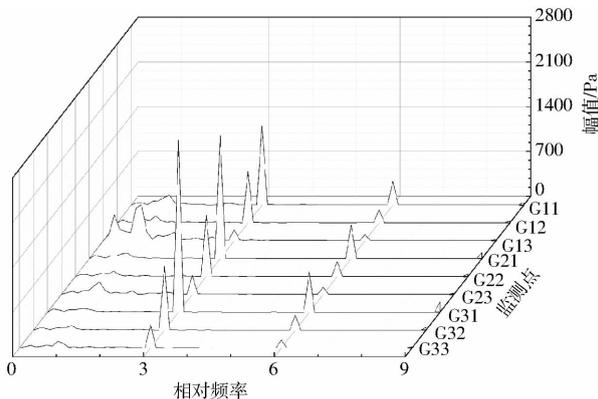


图 7 设计工况下导叶压力面频谱特性

Fig. 7 Frequency spectra at suction side of blade

幅值会显著增大^[7-8],下面着重分析导叶调节对轴流泵压力脉动的影响。

2.2 导叶角度对小流量工况的影响

对不同导叶角度下轴流泵的内部流动进行模拟,并对比压力脉动的频谱。可以看到,随着导叶角度的调整,叶轮叶片测点(B33)的压力脉动(图 8)主频仍是导叶通过频率,导叶角度调整后,其幅值有了明显的下降。在测试的导叶角度范围内,叶片压力面测点主频幅值由 858.29 Pa 降低至 355.29 Pa,降低了约 58.6%;叶片吸力面测点主频幅值由 465.09 Pa 降低至 189.55 Pa,降低了约 59.2%。

随着导叶角度的调整,导叶测点(G31)的压力脉动(图 9)主频仍是叶片通过频率,导叶角度调整后,导叶压力面测点主频幅值由 5 078.2 Pa 降低至 4 274.6 Pa,降低了约 15.8%;导叶吸力面测点主频幅值由 3 937.5 Pa 降低至 3 058.3 Pa,降低了约 22.3%。

2.3 影响因素分析

在设计工况下,流体经过叶轮做功,在叶轮出口边按照设计的速度方向平顺进入导叶区域,动静干涉的强度也较小。在小流量工况下,由速度三角形理论可知,流体在叶轮出口边的速度方向将发生改

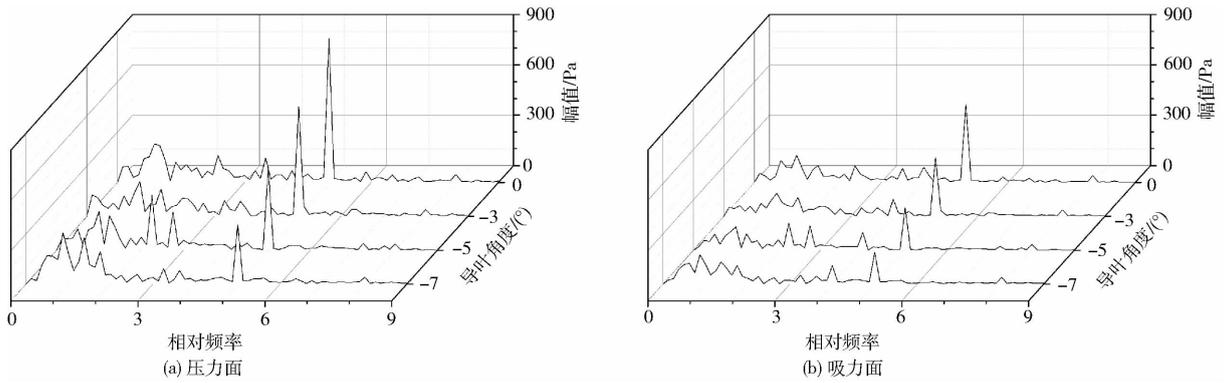


图8 不同导叶角度下叶片表面测点压力脉动频谱图

Fig.8 Frequency spectra of survey points on impeller blade with AGV

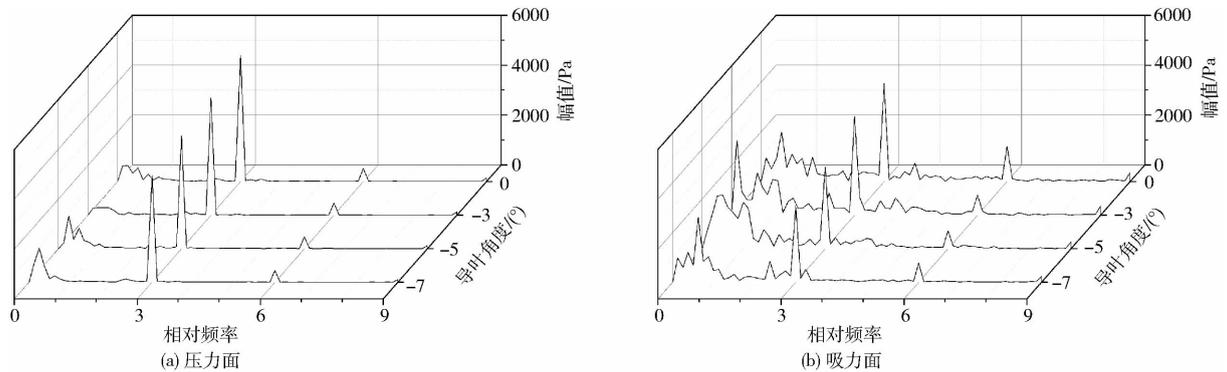


图9 不同导叶角度下导叶表面测点压力脉动频谱图

Fig.9 Frequency spectra of survey points on guide vane with AGV

变,并在导叶入口处产生冲角,加大了动静干涉的强度,使得由动静干涉引起的压力脉动幅值变大。

导叶角度调整后,其安放角度比调整之前更加适应流体的速度方向,使得冲角减小,减轻流体的冲击作用(图10)。同时导叶进口边往下游方向移动,与叶轮出口边之间的距离增大,也减弱了导叶受到

的流体冲击。因此,调整导叶角度能够优化小流量工况下轴流泵内部的压力脉动特性。

3 结论

(1) 在测试工况范围内,叶轮叶片表面压力脉动的主频是导叶通过频率,导叶叶片表面压力脉动的主频是叶片通过频率,造成压力脉动的主要原因是叶轮与导叶之间动静干涉。

(2) 压力脉动幅值较高的位置为叶轮叶片出口边外缘及导叶叶片进口边外缘。

(3) 调节导叶角度可以显著地降低小流量工况下动静干涉造成的压力脉动主频幅值,其中叶轮叶片压力面测点主频幅值降低了58.6%,吸力面测点降低了59.2%;导叶叶片压力面测点主频幅值降低了15.8%,吸力面测点降低了22.3%。调节导叶角度能够降低疲劳破坏的风险。

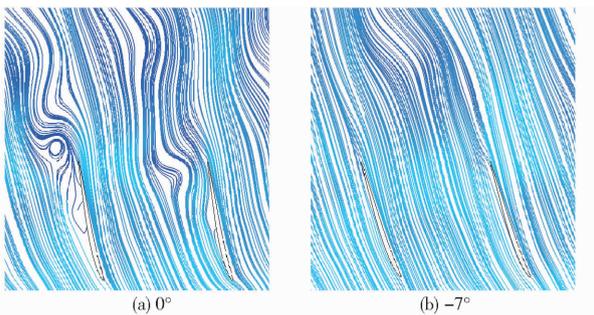


图10 角度调整前后导叶流态

Fig.10 Flow patterns around guide vanes after adjustment

参 考 文 献

- 1 ZHANG Desheng, SHI Weidong, CHEN Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(1): 35 - 43.
- 2 WU Yulin, LIU Shuhong, DOU Huashu, et al. Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine[J]. Computers & Fluids, 2012, 56(6): 128 - 142.
- 3 ANUP K C, THAPA B, LEE Y H. Transient numerical analysis of rotor-stator interaction in a Francis turbine[J]. Renew Energ, 2014, 65(8): 227 - 235.
- 4 GAO Z, ZHU W, LU L, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in a large centrifugal pump with stay vanes[J].

- ASME Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(7):69-74.
- 5 GUO L, LIU J T, WANG L Q, et al. Pressure fluctuation propagation of a pump turbine at pump mode under low head condition [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(4):811-818.
 - 6 LIU Q Z, YANG K, LI D Y, et al. Research of fluid-induced pressure fluctuation due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013, 52(2):022026.
 - 7 SHEN J F, LI Y J, LIU Z Q, et al. Turbulent flow and pressure fluctuation prediction of the impeller in an axial-flow pump based on LES[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013, 52(3):032015.
 - 8 程千, 冯卫民, 周龙才, 等. 前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4):8-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160402&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.002.
 - CHENG Qian, FENG Weimin, ZHOU Longcai, et al. Effects of inlet guide vane on characteristics of backflow vortex in hump region of axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):8-14. (in Chinese)
 - 9 冯卫民, 程千, 郭志伟, 等. 前置导叶可调式轴流泵低频压力脉动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10):62-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151010&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.010.
 - FENG Weimin, CHENG Qian, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of low frequency pressure fluctuation in axial flow pump with variable inlet guide vane[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):62-67. (in Chinese)
 - 10 QIAN Zhongdong, ZHENG Biao, HUAI Wenxin, et al. Analysis of pressure oscillations in a Francis hydraulic turbine with misaligned guide vanes[J]. Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224(1):139-152.
 - 11 QIAN Z D, LI W, HUAI W X, et al. The effect of runner cone design on pressure oscillation characteristics in a Francis hydraulic turbine[J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power & Energy, 2012, 226(1):137-150.
 - 12 施卫东, 冷洪飞, 张德胜, 等. 轴流泵内部流场压力脉动性能预测与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5):44-48.
 - SHI Weidong, LENG Hongfei, ZHANG Desheng, et al. Performance prediction and experiment for pressure fluctuation of interior flow in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):44-48. (in Chinese)
 - 13 王福军, 张玲, 张志民. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(8):1003-1009.
 - WANG Fujun, ZHANG Ling, ZHANG Zhimin. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in axial-flow pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8):1003-1009. (in Chinese)
 - 14 LIU Xin, LUO Yongyao, WANG Zhengwei. A review on fatigue damage mechanism in hydro turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54:1-14.
 - 15 GUILLAUME R, DENIAU J L, SCOLARO D, et al. Influence of the rotor-stator interaction on the dynamic stresses of Francis runners[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(5):052011.
 - 16 WANG Z, XIAO Y, YAN Z. Experimental and numerical analysis of blade channel vortices in a Francis turbine runner[J]. Engineering Computations, 2011, 28(2):154-171.
 - 17 COUTU A, ROY M D, MONETTE C, et al. Experience with rotor-stator interactions in high head Francis runner[C]//Proceedings of 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery, 2008.
 - 18 BENIGNI H, JABERG H. Stationary and transient numerical simulation of a bulb turbine[C]//5th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Machineries and Aerodynamics, 2007:135-140.
 - 19 MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.
 - 20 FU Y, YUAN J, YUAN S, et al. Numerical and experimental analysis of flow phenomena in a centrifugal pump operating under low flow rates[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2014, 137(1):205-207.