

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.14.0213



水泵水轮机转轮区域脉动特性分析

李仁年, 谭海燕, 李琪飞, 聂国奎, 刘超

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)



李仁年

摘要: 为了揭示水泵水轮机转轮区域压力脉动特性, 选取模型水泵水轮机为对象. 基于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对模型水泵水轮机不同运行工况进行三维非定常数值计算, 研究水泵水轮机在不同水头下带部分负荷时转轮区域的脉动特性. 研究表明: 30% 负荷情况下, 随着水头的增加, 转轮区压力脉动逐渐剧烈; 在 1 个周期内, 转轮上冠的压力脉动在时域特性上呈现周期性变化, 而转轮出口轴线和与尾水管交界面处压力脉动在时域上相对紊乱; 转轮上冠处压力脉动从进口边到出口边逐渐增大, 其主频都为叶频. 转轮出口边轴线上压力脉动都属于低频脉动, 沿着负 Z 轴方向压力脉动幅值逐渐减小, 转轮与尾水管交界面上压力脉动主频随着水头的增加逐渐减小, 幅值的变化规律却相反.

关键词: 水泵水轮机; 转轮; 水头; 压力脉动; 数值模拟

中图分类号: TK734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)12-1038-06

李仁年, 谭海燕, 李琪飞, 等. 水泵水轮机转轮区域脉动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(12): 1038-1043.

LI Rennian, TAN Haiyan, LI Qifei, et al. Analysis of fluctuation characteristics at runner area of pump turbine[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2015, 33(12): 1038-1043. (in Chinese)

Analysis of fluctuation characteristics at runner area of pump turbine

LI Rennian, TAN Haiyan, LI Qifei, NIE Guokui, LIU Chao

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to reveal the pressure fluctuation characteristics at the runner area of the pump turbine, pump turbine models were selected as the study object. Based on the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model, three-dimensional unsteady numerical simulations were conducted and the pressure fluctuation characteristics of the runner were analyzed with part load under different conditions. The results show that when units with 30% load, the pressure fluctuation at the runner area becomes more severe with the head increasing. The pressure fluctuation characteristics at the upper canopy of the runner present periodic changes, and on the interface of runner outlet axis and the draft tube outlet the pressure fluctuation is in disorder in one cycle. The pressure fluctuation at the upper canopy of the runner increases from the inlet to the outlet, and its main frequency is the blade rotating passing frequency. The pressure fluctuation at the axis of the runner outlet is of low frequency and the amplitude decreases along the negative Z axis. The main frequency of pressure fluctuation on the interface of the runner and the draft tube decreases gradually with the head increasing, but the amplitude change is opposite.

Key words: pump turbine; runner; head; pressure fluctuation; numerical simulation

收稿日期: 2014-12-29; 网络出版时间: 2015-12-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151216.1552.008.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAF03B01); 甘肃省自然科学基金资助项目(1310RJZA023)

作者简介: 李仁年(1963—), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博士生导师(lim@163.com), 主要从事流体机械多相流动研究.

李琪飞(1975—), 男, 甘肃靖远人, 副教授, 博士研究生(通信作者), lqfy@lut.cn, 主要从事流体机械流动理论研究.

水泵水轮机既可作原动机运行也可作工作机运行,运行工况十分复杂.当机组启动、停机、大幅度增减负荷、事故甩负荷、紧急事故停机以及发电转调相等一系列大波动工况变迁时,常诱发系统出现强烈振动,甚至发生难以控制的稳定性安全事故.为了解决工况变迁时候的不稳定性的问题,需对特定工况作稳定性的研究.随着水泵水轮机技术的发展,机组振动问题逐渐被学者所重视.严重的机组振动会影响电站正常的运行,甚至对厂房的安全构成威胁.机组振动可分为机械振动、电磁振动和水力振动^[1].引起水力振动的原因很多,如卡门涡列、水封间隙不等、尾水管涡带、过流部件水流不均及动静干涉等^[2].压力脉动产生于机组运行过程的非定常流场,是水泵水轮机机组振动的主要原因之一^[3].目前,国内外对水泵水轮机工况压力脉动进行了初步探讨和研究.刘玲等^[4]将水力计算运用于对水轮机压力脉动的预测,得出压力脉动分频幅值与转轮出口环量值之间存在关系,但存在什么样的关系尚不确定.肖若富等^[5]、Xiao 等^[6]、钱忠东等^[7-8]对加入预开导叶的水泵水轮机的压力脉动进行了分析;刘锦涛等^[9]对水泵水轮机空载开度下压力脉动进行了研究;HASMATUCHI 等^[10]、CHIRKOV 等^[11]对水轮机甩负荷工况下压力脉动进行分析;孙跃昆等^[12]、刘树红等^[13]对水泵水轮机在开机过程中压力脉动特性及压力脉动的传动特性进行了研究.季斌等^[14]对涡带工况下混流式水轮机两级动静干涉及压力脉动传播特性进行了分析.查阅文献发现,对转轮处的内流特性研究较少,而转轮处内流特性不仅影响水泵工况运行,同时对水轮机工况的运行也至关重要.

为了研究水轮机工况下水泵水轮机转轮区域压力脉动特性,文中基于 Fluent 软件对不同水头工况下全流道模型进行数值模拟,根据结果重点分析转轮区域内非定常流动特性及脉动特性,以期对相关领域的研究提供参考.

1 研究对象及数值方法

1.1 计算模型

图 1 为以国内某抽蓄电站模型水泵水轮机为对象建立的全流道几何模型,其几何参数:转轮叶片数 $z_b = 9$;活动导叶数 $z_0 = 20$;固定导叶数 $z_c = 20$;导叶高度 $b_0 = 66.72$ mm;转轮高压侧直径 $D_1 = 473$ mm;转轮低压侧直径 $D_2 = 300$ mm.

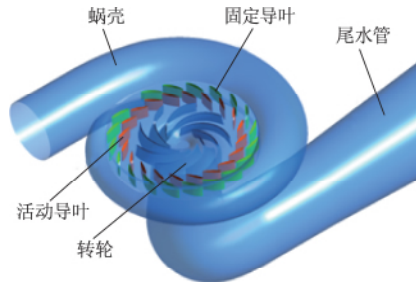


图 1 模型水泵水轮机示意图
Fig. 1 Sketch of pump-turbine model

将水泵水轮机三维全流道划分为蜗壳与固定导叶区、活动导叶区、转轮及尾水管 4 个计算域.网格划分过程中,发现隔舌附近结构复杂,考虑到非结构化网格对空间复杂几何边界适应性强,因此蜗壳与固定导叶区域采用非结构化四面体网格,其他区域则采用结构化网格进行划分,这样既可以保证高质量网格,又降低了数值模拟时间.经过网格无关性数值验证,确定整机网格单元数为 6 288 650,网格总节点数为 5 669 066.

1.2 湍流模型及边界条件

钱忠东等^[15]对比标准 $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 及大涡模拟,发现大涡模拟方法和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对压力脉动频率的预测结果基本一致,与试验结果吻合较好.标准 $k-\varepsilon$ 模型在转轮前的预测结果与试验结果基本一致,但尾水管内的预测结果与试验结果偏差较大.又考虑到大涡模拟计算周期较长,选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对流动控制方程组进行封闭.给定蜗壳进口边界条件为质量流量进口,尾水管出口为压力出口.在壁面处采用无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数,同时相邻计算域交界面设置为 interface.在非定常计算中采用了滑移网格模型来模拟因转轮与上游导叶和下游尾水管之间的相对运动而引起的瞬态交互效应.非定常模拟计算时,以转轮每旋转 4° 作为 1 个时间步长(即旋转周期的 $1/90$),选取 10 个旋转周期的数据进行分析.

2 计算结果分析

水泵水轮机带负荷时最强压力脉动常出现在 30% ~ 60% 负荷区域^[3],对选用的模型水泵水轮机转轮前导叶后监测点(监测点布置情况如图 2 所示)的模型试验压力脉动信号进行分析时,发现不同水头下机组带 30% 负荷情况时监测点的压力脉

动都很强烈,如图 3 所示,图中 $\Delta H/H$ 为转轮前导叶后监测点压力脉动相对值; G 为常负荷量;设计水头指原型机 190 m 水头工况;高水头指水头为 217 m;低水头指 172 m 水头工况. 所以为了研究水泵水轮机转轮处压力脉动特性,文中选取 3 种水头下机组带 30% 负荷工况进行分析.

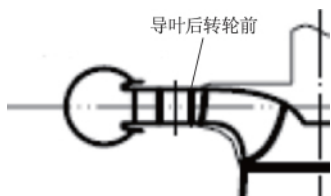


图 2 转轮前导叶后监测点的布置位置
Fig. 2 Monitoring points distribution between guide and runner

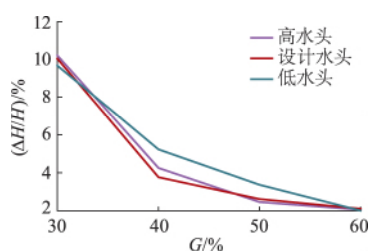


图 3 不同工况下压力脉动
Fig. 3 Pressure fluctuation on different conditions

2.1 模型验证

为了验证数值计算模型的可靠性,首先根据哈尔滨大电机研究所提供的模型试验数据对计算结果进行验证,如表 1 所示,表中 Q_{11} 为单位流量; n_{11} 为单位转速; H_m 为原型水头; H_c 为模型水头; M 为相对值.

表 1 试验结果与数值模拟计算结果对比
Tab. 1 Comparison between experimental results and numerical simulations

$Q_{11}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$n_{11}/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	H_m/m	H_c/m	$(\Delta H/H) / \%$		$M / \%$
				试验值	计算值	
0.444	62.48	172(低水头)	24.9	9.67	9.532 5	1.421 9
0.351	63.31	190(设计水头)	30.1	10.04	9.651 2	3.872 5
0.255	55.59	217(高水头)	35.2	10.21	9.875 8	3.273 3

通过数值计算,得出模型水泵水轮机 3 种工况下压力脉动相对误差均小于 5%,平均误差 2.856%,数值计算水头与试验水头两者吻合度较高,证明了数值模拟方法的可行性.

图 4 为对不同水头工况下水泵水轮机带 30% 负荷时转轮处内部流线分布. 图中将转轮中间流面展开,选取隔舌附近流道分析并绘出流线图. 从图 4 可以看出,在水泵水轮机带 30% 负荷时,随着水头

的增加,转轮处流态逐渐紊乱. 流动的紊乱度直接与压力脉动相关,内流场越紊乱对应的压力脉动就越剧烈,这与模型试验得出的结论一致. 以上分析说明,选用的数值模拟方法能够用于对水泵水轮机转轮处压力脉动的预测.

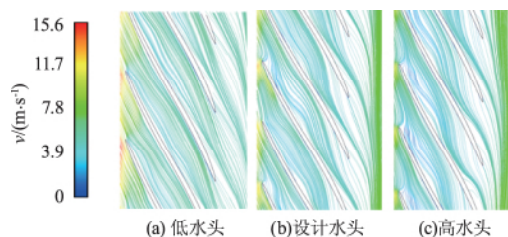


图 4 转轮中间流面流线分布
Fig. 4 Streamlines of middle surface in runner

2.2 转轮处压力脉动分析

为了分析转轮处的压力脉动分布情况,在隔舌附近 XZ 平面上,沿上冠进水边向出水边、轴向从上到下及转轮与尾水管交界面上均匀布置监测点,在转轮处共设 21 个监测点,如图 5 所示.

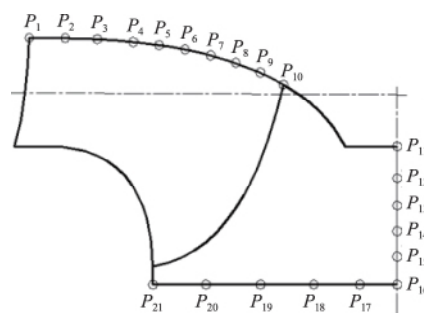


图 5 压力监测点位置
Fig. 5 Monitoring points distribution

从图 3 得到在 30% 负荷情况下高水头时转轮与活动导叶无叶区压力脉动最强,所以选用此工况下各个监测点的压力信号进行分析,提取 1 个周期的数据作出时域图,如图 6 所示.

从上冠处的监测点 $P_1 - P_{10}$ 时域图可以看出,上冠压力脉动信号从进口到出口逐渐增强,在出口边最强. 在 1 个周期内各监测点压力脉动出现的波峰数等于叶片数. 这说明转轮上冠处的压力脉动与叶片数有关,即上冠处的脉动受转轮旋转的影响. 对轴线处脉动分析发现: P_{11} 监测点压力脉动最剧烈,各个监测点压力脉动比较紊乱,没有特定的规律. 从时域图分析,在 1 个周期内,尾水管与转轮交界面上的监测点的压力脉动信号分布出现 2 种不同分布,即监测点 $P_{16} - P_{18}$ 的压力脉动变化规律与轴线处一致,而监测点 $P_{19} - P_{21}$ 的压力脉动存在周期性

变化的特点.

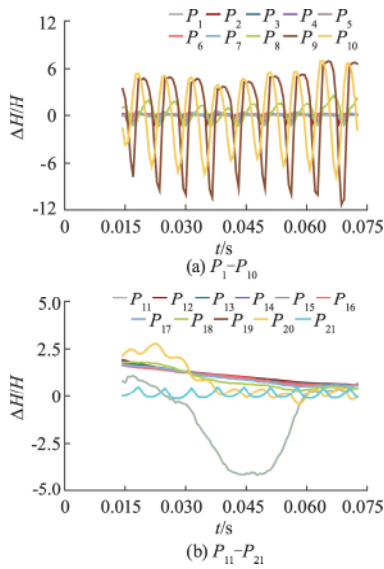


图 6 高水头下各监测点时域图

Fig. 6 Pressure fluctuation's time domains of monitoring points under higher head condition

图 7 为选取具有代表性的监测点 $P_1, P_6, P_{10}, P_{11}, P_{16}, P_{20}$ 的频域图, 图中 f 为监测点计算频率; f_n

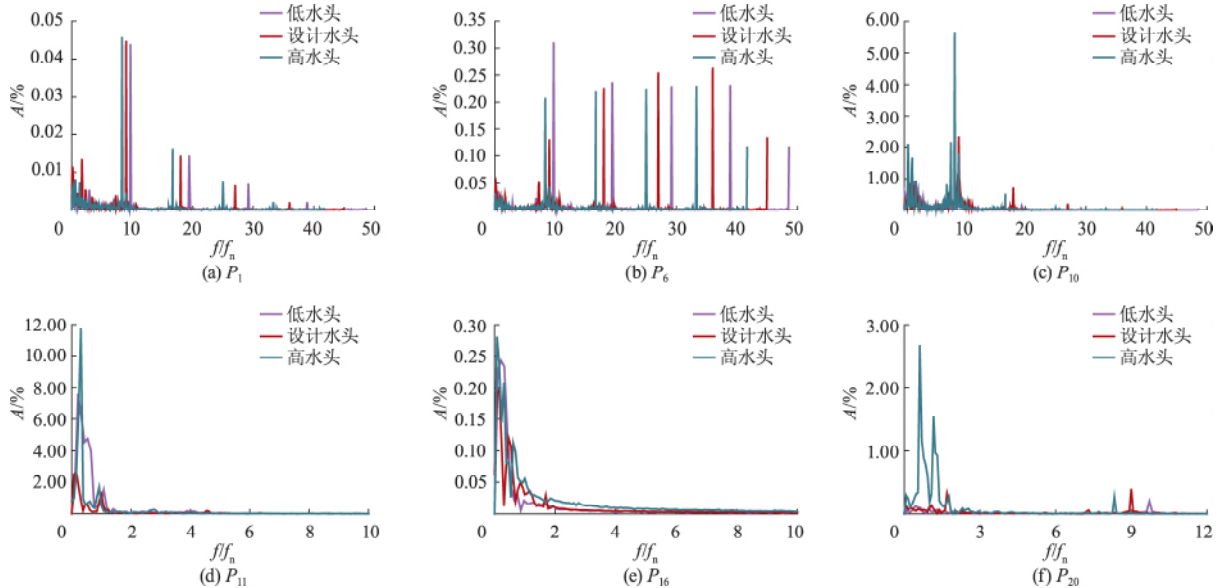


图 7 压力脉动频域图

Fig. 7 Frequency domains of pressure fluctuation

通过对监测点的模型试验压力脉动信号的分析还可以看出, 转轮出口边轴线上监测点 (P_{11} 和 P_{16}) 沿轴线向下移动, 压力脉动幅值逐渐减小, 频率特性相差不大. 此处的压力脉动是由于转轮旋转在尾水管内形成强制涡形, 甚至是涡带现象而引起的低频压力脉动. 3 种工况下 P_{11} 主频依次为 $0.22f_n, 0.15f_n$ 和 $0.31f_n$. 运行工况直接影响着尾水管与转

为水轮机转频; A 为振幅; 高水头时转频为 18.37 Hz , 设计水头转频为 18.17 Hz , 低水头转频为 17.52 Hz .

由图 7 可看出, 不同水头下, 转轮上冠处压力脉动主频均接近叶频, 但不同位置的脉动特性不同. P_1 压力脉动的主频都接近叶片通过频率, 随着水头的增加 f/f_n 的值逐渐减小. 其中, 低水头时主频为 9.72 倍转频, 占有所有频率的 18.8% ; 设计水头时主频为转频, 占有所有频率的 13.3% ; 高水头运行工况下, 主频为 8.33 倍转频, 占有所有频率成分的 15.1% . 这说明相同负荷下上冠进口边压力脉动特性受运行水头的影响, 水头的增加使得流量减小, 转轮流道内紊流度加强, 旋涡流动引起低频的脉动, 中和了高频分量, 从而出现不同的频率特性. 监测点 P_6 的主频随着水头的增加分别为 $9.72f_n, 36.00f_n$ 和 $33.30f_n$. 对于高频分量, 这种压力脉动主要由动静干涉作用引起. 在转轮上冠出口边, 监测点 P_{10} 压力脉动主频仍为叶频, 但低频分量占很大的比重. 随着水头的增加, 低于转频的频率占有成分的比例为 $20.9\%, 10.2\%$ 和 11.1% .

轮交界面上压力脉动特性, 在相同负荷情况下, 压力脉动随着水头的增加而增强. 监测点 P_{16} 主频随着水头的增加逐渐减小, 幅值存在相反的规律. P_{20} 和 P_{16} 的脉动特性规律相同, 低水头、设计水头压力脉动主频接近转频, 分别为 $9.72f_n$ 和 f_n , 高水头时主频为 $0.62f_n$. 这种频率的变化是由尾水管内流动状态决定的^[16-18].

3 结 论

用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对带 30% 负荷的水泵水轮机进行三维非定常数值模拟, 并与模型试验进行对比分析, 得出以下结论:

1) 相同负荷情况下, 随着水头的增加, 转轮处内流场逐渐紊乱, 使得压力脉动随之加强。

2) 对时域特性分析得到, 转轮上冠的压力脉动在 1 个周期内呈现周期性变化, 由于受到动静干涉作用和尾水管不稳定流动双重作用, 转轮出口轴线和尾水管进口处压力脉动相对紊乱。

3) 从频域特性分析发现, 转轮上冠处各个监测点压力脉动主频均接近叶频, 从进口到出口压力脉动逐渐增加, 转轮出口边轴线上压力脉动均属于低频脉动, 压力脉动幅值随着轴线向下移动而减小, 转轮与尾水管交界面上压力脉动主频随着水头的增加逐渐减小, 幅值的变化规律则相反。

参考文献(References)

- [1] 张大本, 李吉川. 混流式水轮机尾水管涡带引起的水力振动[J]. 广西电力技术, 1996(4): 17-21.
ZHANG Daben, LI Jichuan. Hydraulic vibration caused by belt-like vortex flow in tail-water pipe of combined-flow turbine[J]. Guangxi electric power, 1996(4): 17-21. (in Chinese)
- [2] 冯顺田. 混流式水轮机振动分析与优化运行[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(1): 26-28, 36.
FENG Shuntian. Vibration analysis and optimal operation of Francis turbine[J]. Hydropower automation and dam monitoring, 2005, 29(1): 26-28, 36. (in Chinese)
- [3] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 刘玲, 赵越, 吕延光. 水力计算在预测水轮机压力脉动中的应用初探[J]. 水力发电学报, 2003, 22(2): 103-108.
LIU Ling, ZHAO Yue, LYU Yanguang. An approach to predict the hydraulic turbine pressure pulsation by CFD[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2003, 22(2): 103-108. (in Chinese)
- [5] 肖若富, 孙卉, 刘伟超, 等. 预开导叶下水泵水轮机 S 特性及其压力脉动分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 174-179.
XIAO Ruofu, SUN Hui, LIU Weichao, et al. Analysis of S characteristics and its pressure pulsation of pump-turbine under pre-opening guide vanes[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(8): 174-179. (in Chinese)
- [6] XIAO Y X, SUN D G, WANG Z W, et al. Numerical analysis of unsteady flow behaviour and pressure pulsation in pump turbine with misaligned guide vanes[C]// 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems - Session 1: Hydraulic Turbines and Pumps of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2012.
- [7] 钱忠东, 郑彪, 杨建东. 不同步导叶对水轮机压力脉动的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(6): 51-53.
QIAN Zhongdong, ZHENG Biao, YANG Jiandong. Influence of misaligned guide vanes on pressure pulsation in Francis hydraulic turbines[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2008, 41(6): 51-53. (in Chinese)
- [8] 钱忠东, 郑彪. 不同步导叶对混流式水轮机压力脉动的影响分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 202-207.
QIAN Zhongdong, ZHENG Biao. Analysis of pressure pulsation in Francis hydraulic turbine with misaligned guide vanes[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2010, 29(3): 202-207. (in Chinese)
- [9] 刘锦涛, 刘树红, 孙跃昆, 等. 水泵水轮机空载开度压力脉动特性预测[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(3): 411-414.
LIU Jintao, LIU Shuhong, SUN Yuekun, et al. Prediction of pressure fluctuation of a pump-turbine at no-load opening[J]. Journal of engineering thermophysics, 2012, 33(3): 411-414. (in Chinese)
- [10] HASMATUCHI V, ROTH S, BOTERO F, et al. Hydrodynamics of a pump-turbine at off-design operating conditions: Numerical simulation[C]// ASME - JSME - KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 2011, 1: 495-506.
- [11] CHIRKOV D, AVDYUSHENKO A, PANOVA L, et al. CFD simulation of pressure and discharge surge in Francis turbine at off-design conditions[C]// 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems - Session 1: Hydraulic Turbines and Pumps of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2012.
- [12] 孙跃昆, 刘树红, 刘锦涛, 等. 水泵水轮机开机过程压力脉动的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1330-1333.
SUN Yuekun, LIU Shuhong, LIU Jintao, et al. Experiment study of pressure fluctuation of a pump-turbine in

- starting [J]. Journal of engineering thermophysics , 2012 , 33(8) : 1330 - 1333. (in Chinese)
- [13] 刘树红 孙跃昆 左志刚 等. 原型水泵水轮机压力脉动传递特性的数值模拟及分析 [C]//第十九次中国水电设备学术讨论会论文集. 大连 [s. n.] 2013.
- [14] 季斌 罗先武 西道弘 等. 混流式水轮机涡带工况下两级动静干涉及其压力脉动传播特性分析 [J]. 水力发电学报 2014 , 33(1) : 191 - 196.
- Ji Bin , LUO Xianwu , NISHI Michihiro , et al. Analysis on characteristics of two-stage rotor - stator interaction and pressure fluctuation propagation in Francis turbine under partial load [J]. Journal of hydroelectric engineering , 2014 , 33(1) : 191 - 196. (in Chinese)
- [15] 钱忠东 杨建东. 湍流模型对水轮机压力脉动数值预测的比较 [J]. 水力发电学报 , 2007 , 26(6) : 111 - 115.
- QIAN Zhongdong , YANG Jiandong. Comparison of numerical simulation of pressure pulsation in Francis hydraulic turbine by different turbulence models [J]. Journal of hydroelectric engineering , 2007 , 26(6) : 111 - 115. (in Chinese)
- [16] 张飞 高忠信 潘罗平 等. 混流式水轮机部分负荷下尾水管压力脉动试验研究 [J]. 水利学报 , 2011 , 42(10) : 1234 - 1238.
- ZHANG Fei , GAO Zhongxin , PAN Luoping , et al. Study on pressure fluctuation in Francis turbine draft tubes during partial load [J]. Journal of hydraulic engineering , 2011 , 42(10) : 1234 - 1238. (in Chinese)
- [17] 吴玉林 吴晓晶 刘树红. 水轮机内部涡流与尾水管压力脉动相关性分析 [J]. 水力发电学报 , 2007 , 26(5) : 122 - 127.
- WU Yulin , WU Xiaojing , LIU Shuhong. Correlation analysis of the internal vortex flow of hydro turbine with the pressure fluctuation inside draft tube [J]. Journal of hydroelectric engineering , 2007 , 26(5) : 122 - 127. (in Chinese)
- [18] MULLER A , BULLANI A , DREYER M , et al. Interaction of a pulsating vortex rope with the local velocity field in a Francis turbine draft tube [C]// 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems - Session 1: Hydraulic Turbines and Pumps of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science , 2012.

(责任编辑 朱漪云)