

文章编号: 1673-5196(2019)01-0057-05

水泵水轮机制动工况内流特性分析

李琪飞^{1,2}, 刘萌萌¹, 张震¹, 张建勋¹, 刘谦¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为研究水泵水轮机在制动工况运行时内部流动特性, 在确定的等开度线上选取具有代表性的制动工况点, 对其进行了全流道数值计算. 选用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 采用 SIMPLEC 耦合算法, 对选定工况点的机组整体流动域内的三维复杂流态进行了分析. 结果表明: 机组进入制动工况后流态总体上呈现出不稳定状态, 多伴有大规模旋涡的产生. 其中蜗壳及固定导叶内流动较为平稳, 自活动导叶进口处出现小尺度旋涡, 在转轮中流态不稳定达到极致, 叶道间出现大规模旋涡; 转轮进出口流动虽以水轮机工况流动方向为主, 但受转轮内大规模旋涡及离心力影响, 回流严重流动紊乱, 流态转入反水泵工况的趋势明显; 尾水管内流动呈现显著的螺旋态, 从进口开始流动回旋紧贴壁面, 直锥段出现大幅回流反向进入转轮区域. 此工况机组整体流动的复杂流动势必加剧机组的振动, 对其稳定运行造成极大的影响.

关键词: 水泵水轮机; 制动工况; 内流特性; 全流道

中图分类号: TK734 **文献标志码:** A

Analysis on internal flow characteristics of pump-turbine on braking regime

LI Qi-fei^{1,2}, LIU Meng-meng¹, ZHANG Zhen¹, ZHANG Jian-xun¹, LIU Qian¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Gansu Fluid Machinery and Systems, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the characteristics of internal flow in pump-turbine on braking operation, a set of representative braking regime points was selected on a certain equal opening line to carry out numerical calculation of full flow passage of pump-turbine. By means of SST $k-\omega$ turbulent mode and SIMPLEC algorithm, the three-dimensional complex flow condition in integrate flow domain at those selected regime points was analyzed. The result showed that the flow condition of the unit on braking regime would exhibit as a whole an unstable state accompanied with occurrence of large-scale vortices. Among others, the flow in volute and stationary guide vanes would be more stable, but the small-scale vortices would appear at the inlet of movable guide vanes and go forth to make the flow condition instable to the utmost extent in the runner with large vortices in flow passage of blades. Although the main flow direction at runner inlet and outlet would be consistent with that on turbine regime, the backflow in there would be serious and the flow in there would be chaotic because of the impact of large-scale vortices and centrifugal force in the runner, so that the flow condition would tend to turn obviously into reverse pump regime. The flow in draft tube would exhibit a remarkable helical state, attaching closely to the wall of the draft tube from its inlet, and there in its conical segment would be a large-scale backflow returning back into the runner. The complex flow in the whole flow passage would necessarily exacerbate the vibration of the unit on this regime and have great impact on its stable operation.

Key words: pump-turbine; braking regime; internal flow characteristics; full flow passage

可逆式水泵水轮机组兼具了发电及储能的特

点, 对调整电网负荷起重大作用, 尤其对于西北地区新能源大发展中的储能与改善能源配送结构意义重大. 受电力系统调度的支配, 水泵水轮机运行时多经过不稳定的过渡过程, 频繁切换运行模式, 普遍存在

收稿日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(51566009)

作者简介: 李琪飞(1975-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副教授.

“S”形水力特性。“S”特性区是一个极不稳定区域,由于“S”特性区的存在而导致的水泵水轮机运行中的不稳定问题已然成为水泵水轮机设计中最重要的问题之一,直接影响水泵水轮机发电工况启动时空载的稳定性,最终导致机组在启动并网时发生困难。针对此问题对水泵水轮机启动过程中“S”形区域内部流动进行实验分析^[1-3],说明该过程最终产生水力不稳定及强烈的结构振动;HASMATUCHI 等^[4]给出水泵水轮机的“S”特性与转轮之间以及转轮与活动导叶的无叶片空间的回流涡有关;在水泵水轮机模型试验流态观测基础上^[5-6],讨论了“S”特性区不稳定流动的原因;尹俊连^[7]对水泵水轮机的“S”特性问题进行研究,得到转轮是导致水泵水轮机“S”特性的主要原因,初步解释了“S”特性曲线形成机理。目前国内外均开始重点研究可逆式机组运行稳定性的问题,试图通过内流特性来解释“S”特性产生的原因。其中制动工况处于水轮机工况与反水泵工况之间,起着承上启下的作用,既能反映水轮机工况终止的水流状态,又能决定以什么样的流态进入反水泵工况。本文以某抽水蓄能电站模型水泵水轮机为研究对象,研究了其制动工况各部件内流流态,分析了各种流动现象对机组稳定性的影响,为机组运行提供参考。

1 水泵水轮机内流场计算方法

1.1 数值计算模型

本文研究对象为某大型抽水蓄能电站机组模型机,其几何参数见表 1。选取开度 $a_0 = 11 \text{ mm}$ 的小开度工况,建立全流道三维几何模型,如图 1 所示。采用 ICEM 软件对其进行网格划分,其中蜗壳及固定导叶部分采用非结构网格,其余部分均采用六面体结构化网格。经过网格无关性验证,最终确定网格总单元数为 558 万。

表 1 模型水泵水轮机几何参数

Tab.1 Geometric parameters of modeled pump-turbine

参数	数值
转轮叶片数	9
活动导叶数	20
固定导叶数	20
导叶高度/mm	66.72
转轮高压侧直径/mm	473.6
转轮低压侧直径/mm	300
蜗壳进口直径/mm	315
尾水管出口直径/mm	660

1.2 数值模拟及试验对比

水泵水轮机在制动工况运行时内流复杂,水流

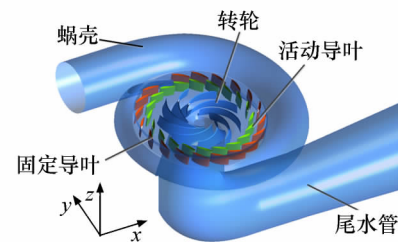


图 1 全流道三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of full flow passage

主体从蜗壳进入,尾水管流出,但由于处在过渡过程,易受到扰动,在中间流道及壁面附近都有可能出现不稳定流动形式,因此湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型^[8-9],该模型能够有效地捕捉近壁区以及远壁区的流动特征,适应对“S”特性区复杂流动模拟的精度要求。SST $k-\omega$ 模型的方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; k 为湍动能; ω 为单位耗散率; u_i 为平均速度分量; G_k 为湍流动能; G_ω 为 ω 方程; Γ_k 、 Γ_ω 分别为 k 与 ω 的有效扩散项; D_ω 为正交发散项; S_k 、 S_ω 为自定义项; Y_k 、 Y_ω 分别为 k 与 ω 的耗散项。

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。压力速度耦合算法采用 SIMPLEC 算法,定常计算 5 000 步后结果收敛。在采用数据前先进行可靠性分析。选取“S”特性曲线上 7 个工况点(参数见表 2)进行全流道数值计算,并将数值计算结果和试验结果进行对比验证。对单位转速 n_{11} 和单位流量 $q_{v,11}$ 进行计算,得出 n_{11} 和 $q_{v,11}$ 的数值关系,绘制出对应工况下水泵水轮机“S”区特性曲线并与试验得到的曲线比较,结果如图 2 所示。图中两条曲线都呈现出明显的“S”型。经误差计算,此次模拟最大误差在 5% 左右,符合分析准确度要求。

表 2 工况点参数

Tab.2 Parameters of regime points

工况点	$n_{11}/$ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	$q_{v,11}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$n/$ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	$q_v/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	52.78	0.278 8	963.626 6	0.137 4
2	55.56	0.236 4	1 014.382 2	0.116 5
3	56.94	0.212 1	1 039.577 4	0.104 5
4	57.51	0.115 0	1 049.984 1	0.056 7
5	57.44	0.097 0	1 048.706 1	0.047 8
6	57.14	-0.060 1	1 043.228 9	-0.029 6
7	72.65	-0.236 5	1 326.401 5	-0.116 6

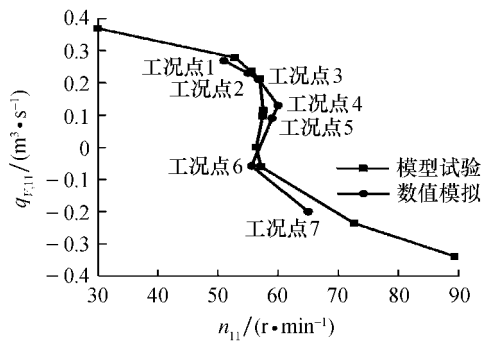


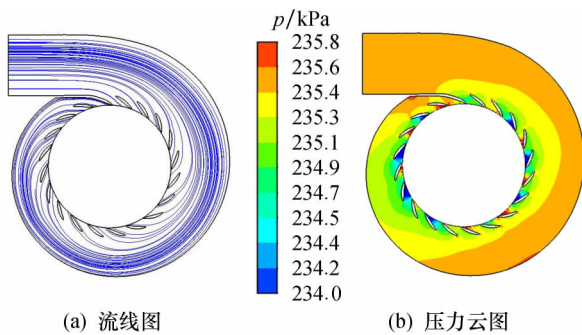
图 2 试验与模拟结果对比

Fig.2 Contrast of test result to simulation one

2 各部件内流动分析

2.1 蜗壳内流动分析

作出蜗壳的三维流线图及中间截面的压力分布云图,如图 3 所示.此时蜗壳内的流线分布均匀,流动顺畅,沿固定导叶边缘进入流道,未产生回流、横流.速度分布也比较均匀,只是在进入固定导叶间流道前略有增加.压力分布云图显示从蜗壳进口至固定导叶出口压力总体逐渐减小,固定导叶尾部间隔出现最高压和最低压,这可能与活动导叶及转轮区的流态有关联^[10].总体来说,此时蜗壳内流动较为平缓,未对机组稳定性造成显著影响.



(a) 流线图 (b) 压力云图

图 3 蜗壳内流动现象

Fig.3 Internal flow phenomenon in volute

2.2 活动导叶及转轮区域流动分析

对转轮及活动导叶区域作中间 S_1 流面^[11],显示其上的流线分布如图 4 所示.从图中可以看出,活动导叶和转轮之间存在一圈高速挡水环,该挡水环的

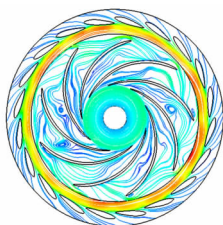


图 4 S_1 流面流线图

Fig.4 Streamline plot on S_1 stream-surface

周向运动阻碍了水流顺利流入转轮,造成了其后一系列紊乱的流动问题.转轮内叶道间的流动非常混乱,伴有横流产生,局部甚至演化出大尺度漩涡,对叶片的材料寿命及轴系稳定带来了极大威胁^[12-14].单独对活动导叶区域进行分析,得到更为精细的流线图,如图 5 所示.此时固定导叶出口至活动导叶进口局部存在漩涡,说明水流出现冲击导叶的现象,流态从此处开始向紊乱发展.

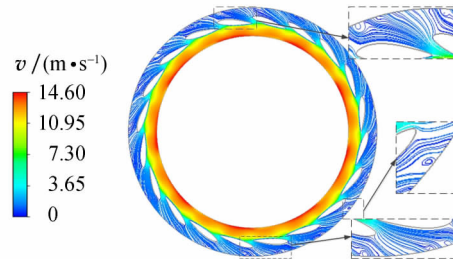
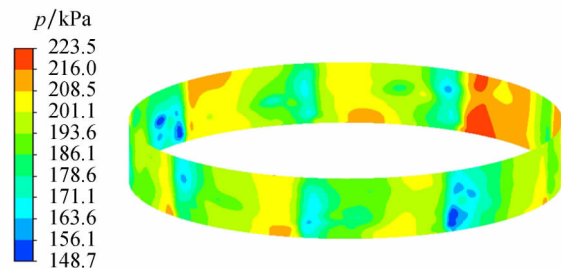


图 5 活动导叶区域流线图

Fig.5 Streamline plot of movable guide vane region

除了对转轮区 S_1 流面的流态进行分析外,还需分析转轮进出口流态.作转轮进口环面,研究其压力分布规律和水流进出的速度大小和方向,作出环面压力云图及速度方向图,如图 6 所示.从压力云图可以看出,进口环面呈现高低压相间分布,共有 9 个明显的高低压相间区域,与转轮叶片数相对应.其总体压力分布 148.6~223.5 kPa 不等,相差约 75 kPa.伴随着压力的起伏,水流呈回旋状流入和流出转轮,其具体表现为在环面上下的边缘,流动以从导叶区向转轮内流动为主,其速度较大,说明流量较大;而在环面中间区域位置,流动以流出转轮为主,其速度较流入小,因此机组才保持着主流方向与水轮机工



(a) 压力分布云图



(b) 速度方向图

图 6 进口环面

Fig.6 Ring surface at inlet

况一致的制动工况,未进入反水泵工况区,说明此时转轮离心力对水流的作用还不足以克服上游压力及环量对水流做的功,但流出转轮的水流区域范围较大,因此机组很有可能进入反水泵工况.此外,这种方向相反的混杂流动势必产生一系列流动损失,从而进一步对转轮内的水流流态造成影响.再对转轮出口进行分析,截取出口截面,作出该截面涡量、速度、压力沿半径位置的变化曲线,如图 7 所示.从反映涡量的曲线图 7 可以看出,涡量在靠近中心区域保持着平稳较低的水平,当接近壁面时有一个突然上升的趋势,之后因为到达壁面而陡然下降至零.速度曲线的大体走势与湍动能相同,也有一个陡升陡降的过程,在接近壁面处与湍动能同时达到峰值.与前两者不同的是,压力曲线呈现出一个先缓慢后急促的持续上升过程,在壁面处达到峰值.这些现象与转轮的离心力有关.离心力对水流做功转化为水流的压力势能,而壁面处半径最大,显然离心力最

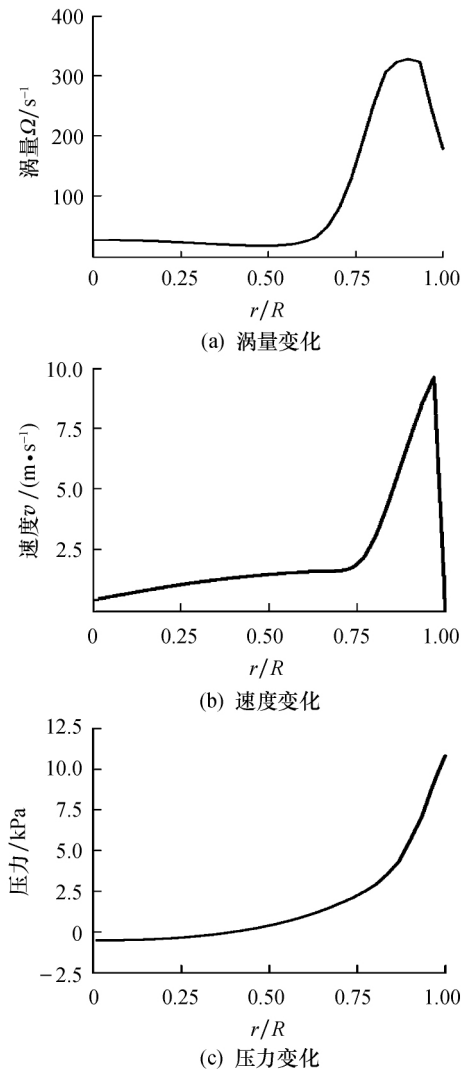


图 7 出口截面各参数

Fig.7 Parameters at outlet section

大^[15],从而压力最高;湍动能与速度一方面与离心力做功的能量相关,但更主要的是水流流态混程程度的突然增加使得两者在数值上激增,之后因到达壁面而陡降,因此才会呈现上述分布特征.结合该断面水流进出情况进一步分析,作该截面速度矢量图,如图 8 所示.从侧面可以看出水流流出转轮与反向流入的情况,如图 8a 所示,水流以流出转轮为主.参照图 8b 和图 8c 可以发现流出转轮的水流主要集中在尾水管壁面附近,以一定角度斜向下流出,速度大.流入转轮的水流主要集中在尾水管中间位置,也有一定的倾斜角度,速度很小.这样就保证了水流从流出转轮到达尾水管为主.但此时有水流的流入说明存在回流,结合之前转轮进口情况,如这种趋势继续演化,机组极可能进入反水泵工况,这对机组稳定性是个更大的挑战^[16].

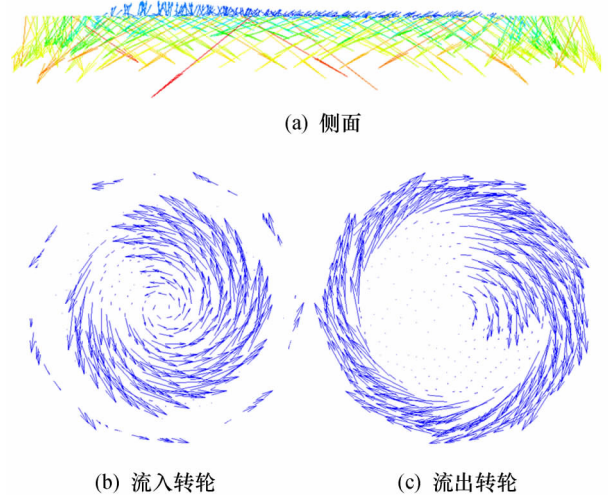


图 8 截面速度矢量图

Fig.8 Sectional velocity vector diagram

总体来说,制动工况不稳定因素主要来源便是转轮区域的混乱流态,而此处的流态对尾水管流动造成的影响也不容忽视.

2.3 尾水管流动分析

首先对尾水管进口断面的水流回旋情况进行分析,作出其上的流线图,如图 9 所示.此时该截面上流动极其混杂,完全呈现出一种旋流状态,并最终交汇于壁面从而向下游流动,此时尾水管直锥段壁面应受到较大的压力冲击.作出尾水管部的三维流线,如图 10 所示.图中流线呈现旋拧态,进口处直锥段的空间相对而言较小,流线分布较为密集,流速也较大.随着流道面积的扩大,流速有所降低但较缓慢.同时从该图中仔细观察可知,该工况旋拧流分为“内圈”和“外圈”两部分,“外圈”水流紧贴壁面,“包裹”着“内圈”水流.尾水管内这种紊乱的流动特征是偏

心涡带的螺旋运动与回流涡共同作用的结果,往往会引起机组轴向推力和转轮出力的剧烈波动^[17]。为了进一步分析该部分内流状态,作尾水管子午面,得到子午面上的流线图,如图 11 所示。图 11 反映了尾水管进口直锥段存在的明显回流,此处水流从上游转轮出口沿壁面流出后向直锥段中心回旋,除紧贴壁面的水流流向尾水管下游外,中间部分水流回流进入转轮区域。正是此处的回流造成了转轮出口截面的反方向流动。回流一旦出现,势必伴随压力、速度等参数的非均匀分布脉动,加之整个尾水管内部充斥着螺旋流动带来的剧烈压力脉动及其向上游的传播^[16],将会对机组稳定性造成严重的影响。

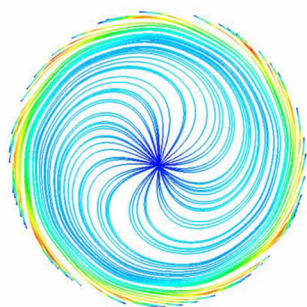


图 9 尾水管进口断面流线图

Fig.9 Streamline plot on inlet section of draft tube



图 10 尾水管三维流线图

Fig.10 Three-dimensional streamline plot in draft tube



图 11 尾水管子午面流线图

Fig.11 Streamline plot on meridian surface of draft tube

3 结论

基于 SST $k-\omega$ 湍流模型对水泵水轮机模型机制动工况进行了全流道三维数值模拟,并与模型试验进行对比分析,得出了以下结论:

1) 位于小开度下的制动工况,从活动导叶进口处出现不稳定流动,转轮内部部分叶道存在大尺度漩涡,水流受旋涡及转轮离心力的影响,随半径增大

方向涡量、速度、压力皆显著增加。

2) 转轮进出口均存在范围较大的回流,虽主流方向与水轮机工况相同,但流态转入反水泵工况的趋势明显。

3) 对尾水管流态的分析发现其从入口开始便以复杂螺旋流态为主,分为内外两股流动,一直延伸至出口。进口直锥段存在大范围回流,其产生的压力、速度等参数的脉动将对机组稳定性造成威胁。

参考文献:

- [1] HASMATUCHI V, ROTH S, BOTERO F, *et al.* High-speed flow visualization in a pump turbine under off design operating conditions [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 12 (1): 1-8.
- [2] NAKAMURA T, NISHIZAWA H, YASUDA M, *et al.* Study on high speed and high head reversible pump turbines [C]// 18th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Symposium. Berlin: Springer, 1996: 210-219.
- [3] ZUO Z, FAN H, LIU S, *et al.* S-shaped characteristics on the performance curves of pump-turbines in turbine mode [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 836-851.
- [4] HASMATUCHI V, FARHAT M, ROTH S, *et al.* Experimental evidence of rotating stall in a pump-turbine at off-design conditions in generating mode [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(5): 623-635.
- [5] 陈德新, 谢 辉. 低比速水泵水轮机“S”特性区的内部流动 [J]. 水利学报, 2001, 32(2): 76-78.
- [6] 王玲花, 高传昌, 陈德新, 等. 水泵水轮机流动可视化图像解析系统的设计 [J]. 中国农村水利水电, 2006(1): 96-98.
- [7] 尹俊连. 水泵水轮机“S”区内流机理及优化设计研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 王福军. 流体机械旋流湍流计算模型研究进展 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 1-14.
- [9] 张兰金, 王正伟, 常近时. 混流式水泵水轮机全特性曲线 S 形区流动特性 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 39-43, 73.
- [10] 李琪飞, 李仁年, 韩 伟, 等. 混流式水轮机引水、导水部件内部固液两相流动的数值分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(6): 47-50.
- [11] 阮 辉, 罗兴铸, 廖伟丽, 等. 叶片低压边厚度对水泵水轮机空化性能与强度的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 32-39.
- [12] 周佩剑, 王福军, 姚志峰. 离心泵叶轮在旋转失速条件下压力脉动特性研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 56-61.
- [13] 唐狄毅, 郭 捷, 李立君, 等. 旋转失速和喘振的统一模型 [J]. 工程热物理学报, 1992, 13(3): 273-275.
- [14] 张立翔, 王文全, 姚 激. 混流式水轮机转轮叶片流激振动分析 [J]. 工程力学, 2007, 24(8): 143-150.
- [15] 李琪飞, 张毅鹏, 敏 政, 等. 变工况下贯流式水轮机叶片形变分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(2): 61-64.
- [16] 李琪飞, 蒋 雷, 李仁年, 等. 水泵水轮机反水泵工况区压力脉动特性分析 [J]. 水利学报, 2015, 46(3): 350-356.
- [17] 郑 源, 汪宝罗, 屈 波. 混流式水轮机压力脉动研究综述 [J]. 水力发电, 2007, 33(2): 66-69.