



导叶不同开度下水泵水轮机内流特性分析

李琪飞^{1,2}, 龙世灿^{1*}, 周峰¹, 赵超本¹, 魏显著³

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 哈尔滨大电机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040)



李琪飞

摘要: 为研究预开导叶不同开度下的内流特性,以某抽水蓄能电站水泵水轮机模型为研究对象,基于 SST $k-\omega$ 湍流模型,进行预开导叶不同开度下全流道三维非定常数值模拟和分析,并与试验结果进行对比验证.探讨活动导叶与转轮之间,以及转轮内的旋涡分布情况,定量分析了转轮受力情况和尾水管压力脉动.结果表明:在同步导叶开度一定的情况下,随着预开导叶个数的增加,其过流部件的流量将会增大,且存在于活动导叶和转轮区域的高速水环也会被破坏,形成紊乱的旋涡.从转轮区域看,在叶片的液道内形成不同的涡结构,其分布的不均匀性将直接影响转轮的受力情况.随着预开导叶个数的增加,这种情况将更为明显,转轮径向力的幅值逐渐增大.进一步分析尾水管压力脉动发现,尾水管压力脉动幅值也随着预开导叶个数的增加而增大,从而导致机组振动加剧、运行不稳定.

关键词: 水泵水轮机; 水轮机工况; 预开导叶; 内流特性; 转轮径向力; 数值模拟

中图分类号: TK734; S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2020)02-0133-06

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.18.0147

李琪飞, 龙世灿, 周峰, 等. 导叶不同开度下水泵水轮机内流特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(2): 133-138.

LI Qifei, LONG Shican, ZHOU Feng, et al. Analysis of internal flow characteristics of pump-turbine under different openings of misaligned guide vanes[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2020, 38(2): 133-138.(in Chinese)

Analysis of internal flow characteristics of pump-turbine under different openings of misaligned guide vanes

LI Qifei^{1,2}, LONG Shican^{1*}, ZHOU Feng¹, ZHAO Chaoben¹, WEI Xianzhu³

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Harbin Institute of Large Electric Machinery, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to obtain the internal flow characteristics of misaligned guide vanes under different openings, a model of pump-turbine in a turbine storage power station was taken as the research object. Based on SST $k-\omega$ turbulence model, the numerical simulation was carried out for full three-dimensional unsteady flow field under different openings of guide vanes and compared with the experiment results. The vortex structure between the guide vanes and the runner and inside the runner was discussed, and the force on runner and the pressure fluctuation in draft tube were quantitatively analyzed. The results show that the flow rate of the over current component will increase when the number of pre-opening guide vanes increases, and the high-speed water ring existing in the guide vane and runner area will be destroyed, forming a disordered turbulence. From the perspective of the runner area, different vortex structures are formed in the fluid passage of the blade. The distribution of these

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-09-18; 网络出版时间: 2020-01-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20200109.0908.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51566009)

第一作者简介: 李琪飞(1975—),男,甘肃靖远人,副教授,博士(lqfy@lut.cn),主要从事流体机械流动理论研究.

通信作者简介: 龙世灿(1990—),男,广西柳州人,硕士研究生(450255202@qq.com),主要从事流体机械及工程研究.

vortex structures is uneven, which directly affects the force of the runner. This situation is more obvious when the number of pre-opening guide vanes increases. As the number of pre-opening guide vanes increases, the amplitude of the radial force of the runner gradually increases. Further analysis of the pressure fluctuation of the draft tube shows that the change of the pressure fluctuation of the draft tube is also the same. As the number of pre-opening guide vanes increases, the increase of the pulsation causes the vibration of the unit to intensify, resulting in unstable operation of the unit.

Key words: pump-turbine; turbine condition; misaligned guide vane; flow characteristic; radial force of runner; numerical simulation

水泵水轮机在其“S”特性区内的运行非常不稳定,这种不稳定现象在中国已建成投产的天荒坪、张河湾、宝泉、黑麋峰等抽水蓄能电站均已出现^[1]. 针对水泵水轮机的“S”特性, GREIN 等在卢森堡维也丹 10 号机模型试验中,首次尝试使用少数导叶预开启的方式,即预先设置若干开度较大的导叶,使得其他导叶在小开度下就能在转轮内获得相应的速度和流量,并在实践中证明此方式的可行性^[2-4]; 挪威 KVAERNER 公司给机组加装了导叶预开导叶装置,取得了预期效果,但发现随着 MGV 装置的投入,机组的运行稳定性变差^[5]; 王乐勤等^[6]研究了活动导叶开度对水泵水轮机泵工况的影响; 钱忠东等^[7]对异步导叶对水轮机压力脉动的影响进行了分析研究; 肖若富等^[8]通过数值模拟和试验对比发现,加入预开导叶能有效解决水泵水轮机的“S”特性问题.

针对上述现象和问题,文中使用 SST $k-\omega$ 湍流模型,以某抽水蓄能电站模型水泵水轮机为研究对象,对预开导叶不同开度下水轮机的内部流动情况进行分析研究.根据计算结果,对无叶区和转轮流道的流场结构、转轮的受力情况及尾水管的压力脉动进行研究.通过对比试验结果,揭示流场结构对水轮机工况下机组不稳定状况的影响;采用数据处理方法,探讨合理的预开导叶开度范围,为工程实际提供指导.

1 研究对象及数值方法

1.1 计算模型

建立水泵水轮机机组全流道水力模型,其具体几何参数:转轮叶片数 $Z_1=9$,活动、固定导叶数 Z_2, Z_3 均为 20; 导叶高度 $b_0=66.7$ mm; 转轮高、低压侧直径 D_1, D_2 分别为 473.6, 300.0 mm; 蜗壳进口直径 $D_3=300.0$ mm. 根据几何参数建立水力模型,如图 1 所示.

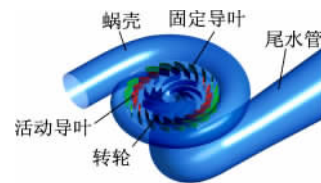


图 1 水泵水轮机三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of pump-turbine

为确保活动导叶和转轮表面 y^+ 值小于 6, 调整近壁面区网格尺寸,使网格基本满足数值计算对近壁面网格的要求.最终确定整机网格单元数约 7.5×10^6 , 总节点数在约 7.0×10^6 的网格进行计算.

1.2 MGV 的布置方式

试验结果表明, MGV 装置取 2 对 4 个导叶作轴对称分布,是理想的布置方式.文中在同步导叶开度 9 mm 下,分别取预开导叶 14, 22, 30, 38 mm 4 种开度进行分析. MGV 的布置方式如图 2 所示^[9].

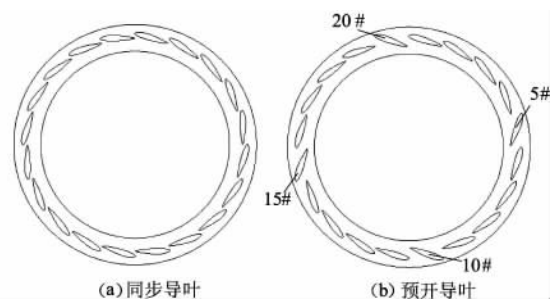


图 2 导叶布置方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of layout of guide vanes

2 数值模拟方法

2.1 湍流模型

文中采用 SST $k-\omega$ 模型进行数值计算. 诸多学者已验证了该模型的有效性和准确性,尤其对多导叶、多叶片所组成的复杂几何流道具有很强的还原能力.

2.2 边界条件

计算时用质量流量进口和自由出流,将转轮旋

转 3° 作为 1 个时间步长(即旋转周期的 $1/120$)。先对模型进行定常计算 10 000 步至稳定状态后,再进行非定常计算,选取最后 5 个旋转周期的数据进行分析。

2.3 预开导叶特性验证

取 2 组不同导叶开度的机组模型进行预开导叶特性验证。第 1 组取同步导叶开度 $A=4$ mm,导叶开度 $a=14$ mm;第 2 组取 $A=9$ mm, $a=46$ mm。同时,各取 13 个工况点进行非定常数值计算。将数值计算结果进行单位流量 q_{11} 和单位转速 n_{11} 的换算,并绘制出 $q_{11}-n_{11}$ 关系曲线;再用所得曲线与哈尔滨大电机研究所提供的模型试验曲线进行对比(见图 3)。经对比发现, q_{11} 和 n_{11} 的计算值和试验值的相对误差均小于 5.0%,平均误差分别为 4.312%,4.62%。由于误差在可接受范围内,因此数值计算模型具有较高的可靠性,数值计算方法也具备很强的可行性。

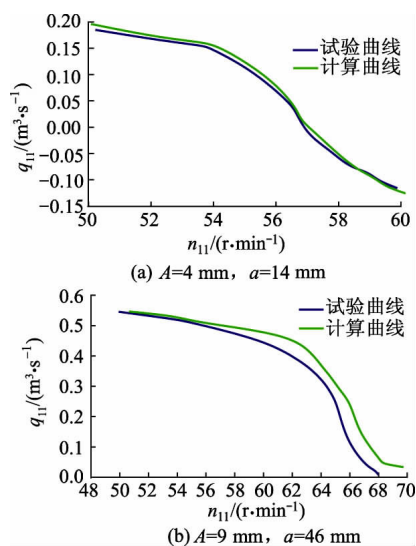


图 3 试验曲线与数值计算曲线对比

Fig.3 Comparison between test and calculation curves

3 数值计算结果

3.1 导叶不同开度下内流特性分析

涡结构和速度的变化是内部流态变化的表征,也是水力部件受力发生变化的原因。因此,文中取转轮的上冠与下环之间的等距面为 S1 流面(见图 4),对水泵水轮机内部的涡和速度 v 进行分析。同步导叶开度为 9 mm 时,如图 4a 所示,由于开度较小,流

进转轮的水流量较小,导致水流和转轮的工作面产生了大的冲角,发生了明显的流动分离现象,而在无叶区产生了明显的速度干扰现象,出现了严重的回流涡,阻碍了水流顺畅地流过转轮流道,进一步减少了转轮的过流量。在转轮流道内分布着结构相似且极为对称的涡结构,使转轮所受到的径向力也呈对称分布。在转轮出口处也发生了速度干扰,产生回流涡。预开导叶开度为 14 mm 时,如图 4b 所示,与同步导叶相比,内部的流动并无明显的变化,因为随着预开导叶开度的小幅增大,通过转轮的水流量有所增加,无叶区的速度干扰和转轮流道内的涡结构依然明显。预开导叶开度为 22 mm 时,如图 4c 所示,随着预开导叶开度的进一步增大,通过转轮的水流量进一步增加,转轮叶片进口工作面的涡结构明显消失,在 4 个预开导叶附近的转轮流道内,涡结构有所缓解和减少,但成涡位置仍在转轮流道的中段靠后、靠近叶片背面的流域,且仍呈对称分布。预开导叶开度为 30 mm 时,如图 4d 所示,活动导叶和转轮区域的内部流动出现了极大的变化,在活动导叶的进口处出现了明显的涡结构,集中分布在预开导叶两侧的同时导叶进口面前端。这是因为水流和活动导叶产生了较大的冲角,水流沿转轮旋转方向流入导叶的流速和流向在同步导叶流道和预开导叶流道出现了很大的差别。随着预开度的再次增大,进入转轮的流量显著增加,流线布满整个流域。导叶流道至转轮流道间的速度变化平缓,无叶区的回流现象明显缓和,局部区域消失;预开导叶附近的 4 个转轮流道内,流线均匀分布,涡结构明显消失,但其他转轮流道内的涡结构依旧明显存在,而成涡位置发生变化,集中分布在转轮流道中段靠前的整个流域内。这是因为预开导叶开度增大,使得与之相邻的转轮流道内的流量和流速增加而产生相互干扰。预开导叶开度为 38 mm 时,如图 4e 所示,与预开导叶开度 30 mm 相比,活动导叶的进口面附近流域均出现了大量小而混乱的涡结构,无叶区的回流现象消失,极大地提升了转轮的过流量;靠近预开导叶的转轮流道内,流线均匀且规则分布,涡结构基本消失;但在其余转轮流道内存在大量大小不一、形态各异的涡结构,且散乱无章地分布在整个转轮流道内,而在转轮出口处重新出现不稳定的流动结构。由此可见,随着预开导叶开度的增大,在增加转轮过流量的同时,内部的流动状态变得更混乱无序。

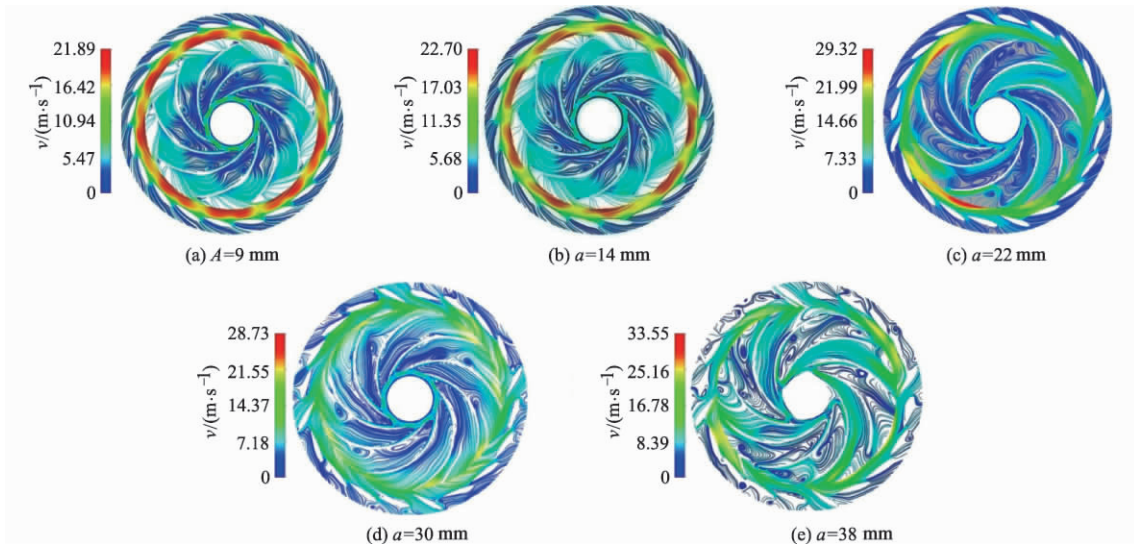


图 4 不同导叶开度下速度流线图

Fig.4 Velocity flow diagram under different guide vane openings

3.2 导叶不同开度下转轮径向力分析

力是造成材料破坏及振动的直接原因,文中对转轮径向力进行了非定常分析^[10].在数值计算中,对转轮整体沿 X,Y 轴的径向力进行监测,根据式(1)求出转轮所受径向力的合力.表 1 列出了导叶不同开度下作用于叶轮上的径向力,其中, F_{max} , F_{min} 分别为径向力 1 周内的波峰和波谷值; ΔF 为峰谷差值, F_c 为差值幅值.由于在多次的数值模拟结果分析中,发现同一工况下多次监测的径向力值出现一定的波动,因此为减小误差,采用求均方根的方法.转轮旋转 1 周为 360°.在数值计算时,每 3° 为 1 个时间步长,每个时间步长重复迭代 20 次,取 20 次迭代的平均值为这个时间步长的径向力值.

$$F_R = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \quad (1)$$

式中: F_R 为瞬时径向力; F_X 为沿 X 轴的径向力分力; F_Y 为沿 Y 轴的径向力分力.

表 1 不同开度下作用于叶轮上的径向力
Tab.1 Radial force applied to the runner under different guide vane openings

A(a) /mm	F_{min}/N	F_{max}/N	$\Delta F/N$	F_c/N
9	26.40	94.12	67.72	0
14	23.83	96.97	73.14	5.42
22	173.17	590.43	417.26	344.12
30	71.16	819.25	748.09	330.83
38	41.83	1 049.88	1008.05	259.96

随着预开导叶开度的进一步增大,径向力的峰谷差值成几何倍数增加.预开导叶开度 22 mm 下,其峰谷差值出现了巨幅提升;随着预开导叶开度的增大,其峰谷差值反而减小.在极坐标下表示 1 周内转轮所受径向力的合力大小,如图 5 所示.

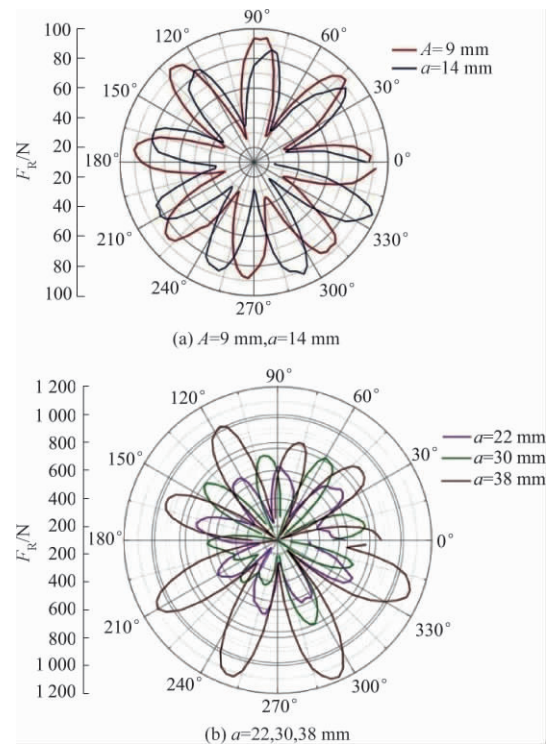


图 5 1 周内转轮所受径向力的合力大小

Fig.5 Radial force of runner after one revolution

在转轮旋转 1 周的时间内,径向力合力的大小呈连续性周期变化,峰谷个数和叶片数相对应,径向力大小的周期性变化与转轮的旋转紧密关联.分析图 5 可以发现 2 个明显的现象:一是随着预开导叶开度的增加,径向力峰谷差值显著增大,且径向力的对称性分布逐渐遭到破坏;二是随着预开导叶的开启,径向力轨迹不再闭合,这是因为预开导叶后,部分叶片流道内的流动速度和流量显著增加,对转轮进口处的冲角产生影响,这部分叶片流道与

相邻流道互相影响,并将这种影响不断传递下去,导致 1 周内的径向轨迹不再闭合.这些现象将导致机组在运行过程中振动加剧,并产生巨大的振动噪声.

3.3 尾水管压力脉动分析

水流的压力脉动是导致水力机组产生振动的重要原因之一,故文中对尾水管的压力脉动进行监测.各个开度下,在尾水管转轮出口处设定 1 个圆周平面,其距转轮出口 $0.5D_2$;以圆心为监测点,通过横向比较,分析不同导叶开度下,尾水管压力脉动的变化情况.为消除监测点自身静压对压力脉动的影响,用压力脉动系数 C_p 表示监测点的压力脉动^[11-12],其表示为

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{\frac{1}{2}\rho\omega^2}$$

式中: p 为监测点瞬时静压值, Pa; \bar{p} 为监测点静压平均值, Pa; ω 为转轮出口圆周速度, m/s; ρ 为流体的密度, kg/m^3 .

对监测点数据进行处理后,在瀑布图中连接显示,结果如图 6 所示.

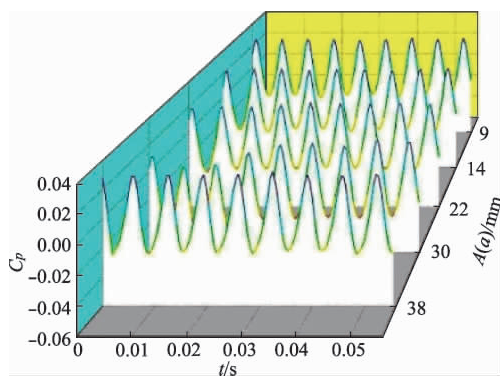


图 6 尾水管压力脉动
Fig.6 Pressure pulsation of draft

在同步导叶开度 9 mm 下, C_p 呈正弦函数分布, 压力脉动系数波峰值为 0.021 0, 波谷值为 -0.025 7, 峰谷差值为 0.048 1; 预开导叶开度 14 mm 下, 压力脉动系数仍呈正弦函数分布, 峰谷差值为 0.051 2, 较同步导叶开度 9 mm 有所增加; 预开导叶开度 22 mm 下, 压力脉动系数不再呈标准的正弦函数分布, 且开始出现主频外的一些次频波动, 主频波动幅度明显变大, 峰谷差值突增为 0.052 0; 随着预开导叶开度的进一步增大, 在预开导叶开度 38 mm 下, 压力脉动系数不再呈正弦函数分布, 主频的峰谷差值增至 0.069 0, 出现明显的不规律次频波动.

通过分析数据和图形, 可明显看出: 随着预开导叶开度的增加, 波形变化不大, 但压力脉动幅值增大; 随着预开导叶开度的增加, 1 个周期内波动的频次增多, 且在主频外出现了一些次频波动.

4 结 论

1) 水泵水轮机的“S”特性之所以能得到改善, 是因为预开导叶改变了无叶区的混乱流动状态, 使转轮的过流量增加, 部分转轮流道内的流动状态得到极大改善.

2) 预开导叶后, 导叶的水力矩发生变化, 转轮内的涡对称结构遭到破坏, 转轮径向力幅值大幅增加, 尾水管的压力脉动也随之增强.

3) 随着预开导叶开度的增加, “S”特性得到改善的同时, 机组的振动也会加剧, 运行稳定性变差. 因此, 在保证机组稳定运行的前提下, 可通过增加预开导叶开度来改善“S”特性. 不同的开度, 对应着不同的最优预开导叶开度. 在小开度下, 预开导叶的开度为同步导叶的 3 倍, 是理想的开度配比.

参考文献(References)

- [1] 杨建东, 曾威, 杨威嘉, 等. 水泵水轮机飞逸稳定性及其与反 S 特性曲线的关联[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 59-64.
YANG Jiandong, ZENG Wei, YANG Weijia, et al. Runaway stabilities of pump-turbines and its correlations with S characteristic curves[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(4): 59-64. (in Chinese)
- [2] 游光华, 孔令华, 刘德有. 天荒坪抽水蓄能电站水泵水轮机“S”形特性及其对策[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 136-139.
YOU Guanghua, KONG Linghua, LIU Deyou. Pump-turbine S zone & its effect at Tianhuangping pumped storage power plant[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2006, 25(6): 136-139. (in Chinese)
- [3] CHIRKOV D, AVDYUSHENKO A, PANOV L, et al. CFD simulation of pressure and discharge surge in Francis turbine at off-design conditions [C]//Proceedings of the 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems: Earth and Environmental Science, 2012.
- [4] 张飞, 樊玉林, 祝宝山, 等. 模型可逆式水泵水轮机 S 区压力脉动测试[J]. 流体机械, 2019, 47(6): 6-11, 28.
Zhang Fei, Fan Yulin, Zhu Baoshan, et al. S-shape re-

- gion pressure pulsation measurement of model reversible pump-turbine [J]. Fluid machinery, 2019, 47(6): 6-11, 28. (in Chinese)
- [5] XIAO 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] // Proceedings of the 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems: Earth and Environmental Science, 2012.
- [6] 王乐勤, 刘锦涛, 张乐福, 等. 活动导叶开度对水泵水轮机泵工况的影响研究 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 222-227.
- WANG Leqin, LIU Jintao, ZHANG Lefu, et al. Study of pump-turbine's pumping mode at different openings of guide vane [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012, 31(2): 222-227. (in Chinese)
- [7] 钱忠东, 郑彪, 杨建东. 不同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): 51-54.
- 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): 51-54. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 陈铁军, 郭鹏程, 左志钢, 等. 非同步导叶预开启动对水泵水轮机启动过程影响 [J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 203-206.
- CHEN Tiejun, GUO Pengcheng, ZUO Zhigang, et al. Effect of different openings of pre-opened guide vanes on start-up process of pump-turbine [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2015, 34(1): 203-206. (in Chinese)
- [10] 李琪飞, 张正杰, 李仁年, 等. 水泵水轮机泵工况空化特性与转轮受力分析 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 137-142.
- LI Qifei, ZHANG Zhengjie, LI Rennian, et al. Analysis of cavitation performance and force on runner of pump-turbine in pump mode [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(1): 137-142. (in Chinese)
- [11] 张德胜, 刘俊龙, 耿琳琳, 等. 斜流泵小流量工况压力脉动数值模拟与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 117-125.
- ZHANG Desheng, LIU Junlong, GENG Linlin, et al. Numerical simulation and experiment of pressure fluctuation in mixed-flow pumps under low flow conditions [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(2): 117-125. (in Chinese)
- [12] 钱忠东, 陆杰, 郭志伟, 等. 水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(8): 672-678.
- QIAN Zhongdong, LU Jie, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of pressure fluctuation in pump-turbine under turbine mode [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(8): 672-678. (in Chinese)

(责任编辑 顾艳)

沉痛悼念张立翔教授

惊闻噩耗,我们怀着十分沉痛的心情,深切悼念本刊第九、十届编委会委员,全国模范教师,云南省优秀共产党员,昆明理工大学特聘教授、博士生导师——张立翔教授。

张教授历任本刊第九、十届编委会委员。自 2010 年以来,在本刊发表论文 13 篇,最近一篇《植物网纹增厚导管流体力学建模与流动特性分析》发表于 2020 年第 1 期。张教授长期负责本刊流固耦合相关论文的审稿工作,2012 年以来共审稿 37 次,平均审稿时间为 11 天,最近一次审回日期为 2019 年 10 月 28 日。

张立翔,男,汉族,1959 年 8 月生,教授,博士生导师,水利与工程力学专家。兼任云南省力学学会理事长、中国力学学会理事、中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会委员,国家自然科学基金工学部专家评审组成员等。

(编辑部)