

Unsteady Characteristics of Hydraulic Torque of Guide Vanes of a Pump Turbine

Yonghui Zhang¹, Yawu Zhang², Guiren Liu¹, Yue Teng¹, Xianbin Guan¹, Honggang Fan³, Funan Chen³, Deyou Liu⁴, Yun Cao⁴, Ling Zhou^{4*}

¹Baishan Power Station, Songhuajiang Hydropower Company Ltd., Jilin

²State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing

³College of Energy and Electric, Hohai University, Nanjing Jiangsu

⁴College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Email: 245746490@qq.com, *zlhhu@hhu.edu.cn

Received: Oct. 7th, 2018; accepted: Oct. 24th, 2018; published: Oct. 31st, 2018

Abstract

The magnitude of the hydraulic torque of the guide vane and the variation of the hydraulic torque during the operation of the unit are very important to the design of the guide vane shaft and the guide vane protection device. In this paper, the water torque characteristics of the guide vane of a pump turbine under normal generating conditions are studied by numerical simulation. The influence of unsteady flow field on the water torque of guide vanes is analyzed. Fast Fourier Transform (FFT) is used to analyze the frequency component of the hydraulic torque of the guide vane and the phase relation between the hydraulic torques of the adjacent guide vanes. The results show that with the increase of the guide vane opening, the hydraulic torque of the guide vane changes from positive value to negative value, which makes the guide vane turn from auto-closing to auto-opening. The hydraulic torque of the guide vane varies periodically with the static and dynamic interference of the guide vane. There is phase difference in the variation of the water torque of the adjacent guide vane, which reflects the regular change of the hydraulic torque of the guide vane caused by the rotation of the runner.

Keywords

Pump Turbine, Hydraulic Torque of Guide Vane, Rotor Stator Interaction, Unsteady Flow Characteristics

水泵水轮机导叶水力矩非定常特性研究

张永会¹, 张亚武², 刘贵仁¹, 滕跃¹, 关美滨¹, 樊红刚³, 陈阜南³, 刘德有⁴, 曹云⁴, 周领^{4*}

¹松花江水力发电有限公司白山发电厂, 吉林

*通讯作者。

文章引用: 张永会, 张亚武, 刘贵仁, 滕跃, 关美滨, 樊红刚, 陈阜南, 刘德有, 曹云, 周领. 水泵水轮机导叶水力矩非定常特性研究[J]. 机械工程与技术, 2018, 7(5): 409-417. DOI: 10.12677/met.2018.75050

²国网新源控股有限公司, 北京

³清华大学能源与动力工程系, 北京

⁴河海大学水利水电学院, 江苏 南京

Email: 245746490@qq.com, *zlhhu@hhu.edu.cn

收稿日期: 2018年10月7日; 录用日期: 2018年10月24日; 发布日期: 2018年10月31日

摘 要

活动导叶水力矩大小及机组运行过程中水力矩变化情况对导叶轴及导叶保护装置的设计十分重要。本文采用数值模拟的方法研究了水泵水轮机在正常发电工况下导叶的水力矩特性。分析了流场的非定常性对导叶水力矩的影响。采用快速傅里叶变换(FFT)的手段分析了导叶水力矩的频率成分及相邻导叶水力矩间的相位关系。结果表明, 随着导叶开度的增大, 导叶水力矩从正值变为负值, 这使得导叶由自关趋势转向自开趋势。转轮对导叶的动静干涉使得导叶水力矩呈周期性变化。相邻导叶的水力矩变化存在相位差, 这反映了转轮旋转引起的导叶水力矩的规律性变化。

关键词

水泵水轮机, 导叶水力矩, 动静干涉, 非定常特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泵水轮机在运行过程中, 安全稳定至关重要。活动导叶起到控制流量的作用, 同时, 使水流在流经转轮前形成一定的环量。水泵水轮机运行过程中, 活动导叶受到水力矩的作用。若水力矩使导叶有自开趋势, 则不利于机组安全运行。另外, 若某一导叶水力矩过大, 则导叶保护装置生效, 剪断销及导叶摩擦装置将起到保护作用, 使得其它导叶仍可以正常动作, 防止进一步破坏。因此, 在设计阶段, 了解导叶的水力矩特性对导叶保护装置等部件的设计十分重要。

目前, 可以通过计算流体力学(CFD)的方法来预测导叶的水力矩特性。对非同步导叶情形下机组内部流场的研究[1][2][3][4]表明, 非同步导叶可降低处转轮外其他流域内压力脉动的峰峰值。在启动过程空载工况下会导致低频压力脉动的频率发生改变。飞逸工况下非同步导叶的应用破坏了水流的轴对称性, 使得转轮受到非均匀的水力激励, 从而引发振动。对导叶水力矩的实验研究[5]表明, 导叶开度逐渐增大时, 不同导叶的水力矩因数变化一致。启用非同步导叶后, 非同步导叶与同步导叶开度相差较大时, 不同导叶水力矩因数相差较大。Christophe 等人[6]采用实验及数值模拟的方式研究了同步导叶及非同步导叶的水力矩, 对于同步导叶, 导叶开度较小时, 导叶水力矩使得导叶有自关趋势。当导叶开度较大时, 导叶水力矩使得导叶有自开趋势。而非同步导叶将造成其自身及相邻导叶的水力矩突增。Fan 等人[7]对水轮机工况开停机过程中导叶水力矩进行了预测, 发现停机过程中小开度区导叶水力矩变化较快, 是导致振动和噪声的主要原因。但上述对于导叶水力矩的研究, 均假定活动导叶出口为一固定静压值, 未考虑到转轮对导叶的动静干涉作用。李琪飞等人[8]通过实验与数值模拟的方式, 研究了水泵水轮机在水轮

机工况下的导叶水力矩特性。研究针对模型水泵水轮机,并建立了水泵水轮机的全流道模型。研究发现导叶水力矩会被导叶附近的静压影响,导叶附近水压力的周期性变化导致了导叶水力矩随时间的变化。

目前,针对导叶水力矩的非定常特性研究较少,同一工况下不同导叶水力矩的变化规律尚未得到深入研究。本文采用数值模拟的方法,针对原型水泵水轮机稳定发电工况下的导叶水力矩特性进行了研究,分析了导叶水力矩的非定常特性。

2. 物理模型及数值模拟方法

本文计算采用的原型水泵水轮机如图1所示。转轮进水边直径 $D_1 = 2.72$ m,出水边直径 $D_2 = 2.066$ m,转轮叶片数 $Z = 7$,固定导叶数 $Z_{sv} = 20$,活动导叶数 $Z_{gv} = 20$,导叶高度 $b_0 = 1.112$ m,活动导叶分布圆直径 $D_{gv} = 3.0875$ m,转轮额定转速为 200 rpm。将机组的导叶进行编号,如图2所示。

对上述模型进行离散,得到机组网格如图3所示。为确保计算结果的准确性,基于相似的网格拓扑结构,改变单元尺度,生成了3套网格,节点数分别为150万、350万和670万。选取额定工况进行网格无关性验证。不同节点数下机组外特性如图4所示。当网格数超过350万之后,机组的出力及效率趋于稳定。引入水力矩因数

$$T_{G,ED} = \frac{T_G}{\rho g H D_1^3}$$

其中, $T_{G,ED}$ 为导叶水力矩因数; T_G 为导叶水力矩, N·m; ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; H 为水头, m; D_1 为转轮进水边直径, m。

图5对比了不同节点数下导叶水力矩因数。可见节点数超过350万之后,导叶水力矩因数相差不大。

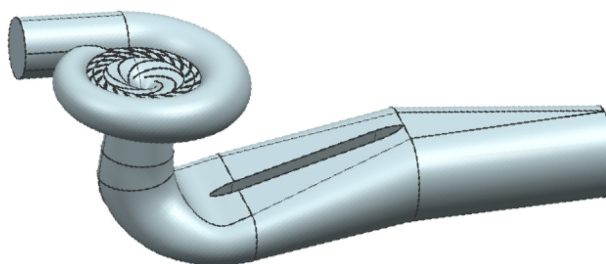


Figure 1. 3D model of pump turbine
图1. 水泵水轮机

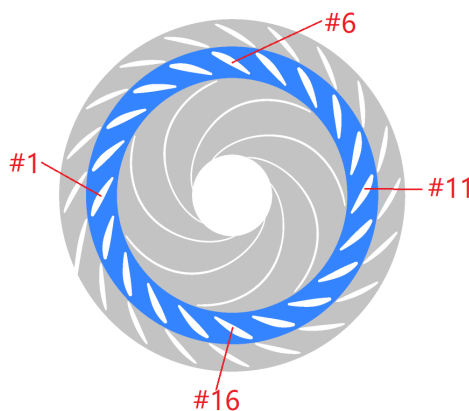


Figure 2. Guide vane numbering
图2. 导叶编号示意图

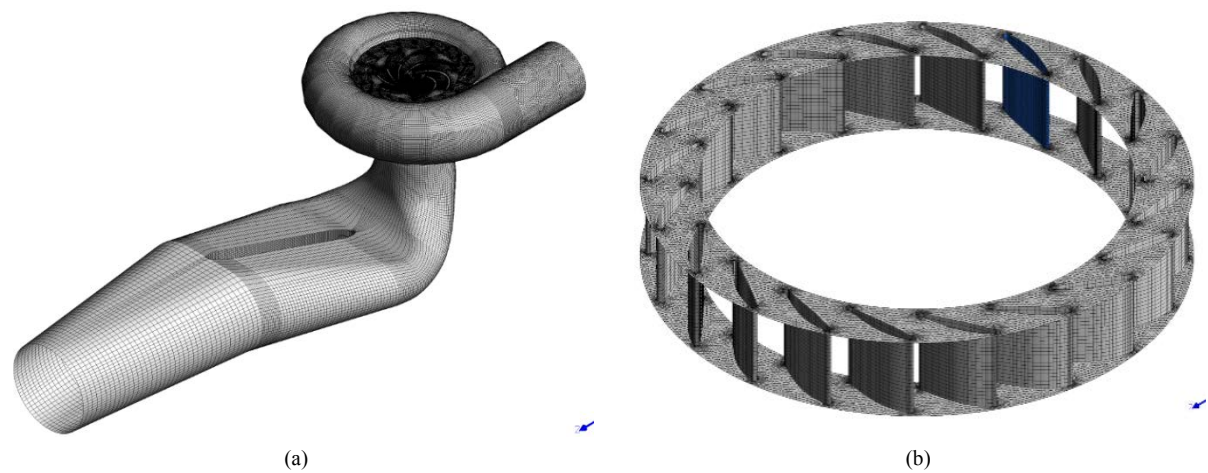


Figure 3. The grid of pump turbine. (a) The mesh of flow path, (b) The mesh of guide vane
图 3. 导叶编号示意图。(a) 机组全流道网格。(b) 活动导叶域网格

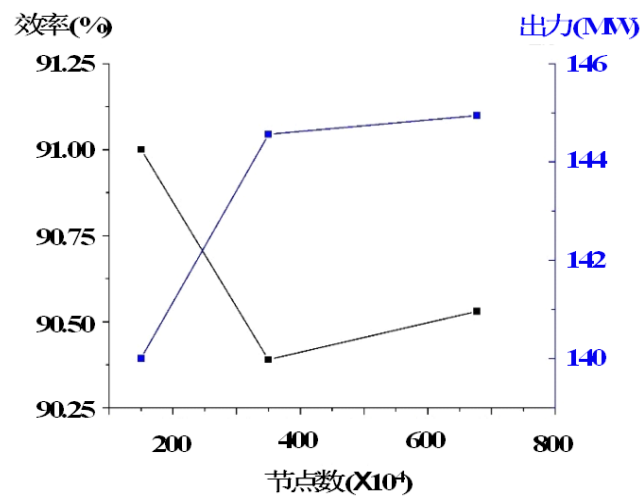


Figure 4. External characteristics of the unit
图 4. 不同节点数下机组外特性

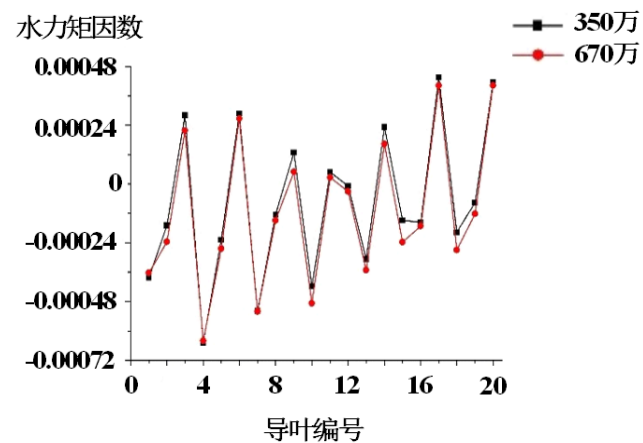


Figure 5. The factor of hydraulic torque of guide vane
图 5. 不同节点数下导叶水力矩因数

综合机组外特性及导叶水力矩计算结果,选取 350 万节点数的网格进行计算。

本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算。计算过程中在蜗壳进口给定总压边界条件,在尾水管出口给定静压边界条件。

3. 结果分析

图 6 显示了不同导叶开度下导叶水力矩因数的时均值。即使在同一导叶开度的情况下,每个导叶的水力矩大小并不相同。这主要是上游来流的不均匀性引起的。随着导叶开度的增加,导叶水力矩因数降低,且额定开度下,部分导叶水力矩的值由正变为负,形成自开趋势。

图 7 显示了额定开度(25°)下机组相邻三个导叶的水力矩因数时域图及频域图。图中 T 为转轮旋转一周所需时间, f_n 为转频。从时域图中可见,每个导叶水力矩均呈周期性变化,且周期性明显。对导叶水力矩进行傅里叶变换,得到水力矩因数的频域图。可见水力矩因数的频率成分为转轮对导叶的动静干涉频率及其整数倍。这反映了动静干涉对导叶水力矩的影响。导叶水力矩的周期性变化主要是由于动静干涉引起的。另外,各导叶水力矩的主频及次频均为 14 倍转频及 21 倍转频,这表明影响导叶水力矩的主要压力脉动频率成分为 14 倍及 21 倍转频。

从时域图中可以发现,两个相邻导叶的水力矩之间存在时间差。假设 $\#i$ 导叶水力矩因数随时间变化的规律为

$$T_{G,ED} = f(t)$$

则 $\#(i+1)$ 导叶水力矩因数随时间变化的规律可表示为

$$T_{G,ED} = A(t)f(t - \Delta t)$$

因此,对各导叶水力矩因数进行傅里叶变换,提取各导叶主频对应的相位 φ_i ,求得相邻导叶之间的相位差 $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i+1}$ 。并将其换算成时间差 $\Delta t_i = \frac{\Delta\varphi_i}{2\pi f}$,其中 f 为主频。对于次频成分也做类似处理。结果如图 8 所示。

相邻导叶间水力矩时间差为转轮旋转周期的 $1/20$,是转轮叶片扫过一个导叶所需时长。转轮顺时针旋转(从上往下看),因此转轮叶片按导叶编号顺序依次扫过各导叶,先扫过的导叶水力矩先发生变化,后扫过的导叶水力矩后发生变化。这进一步反映了转轮旋转对导叶水力矩的影响。

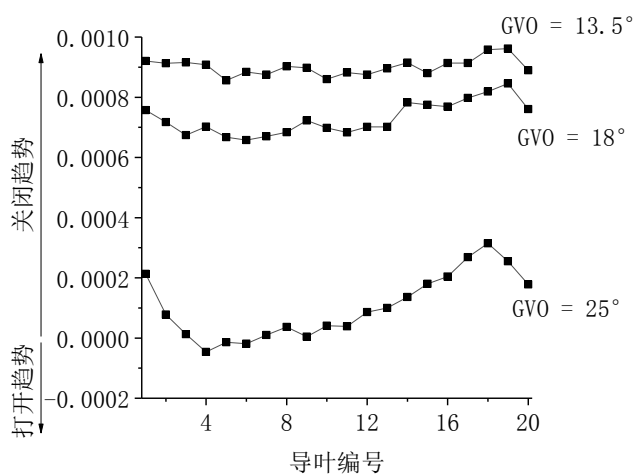


Figure 6. Mean value of the factor of hydraulic torque of guide vane

图 6. 导叶水力矩因数时均值

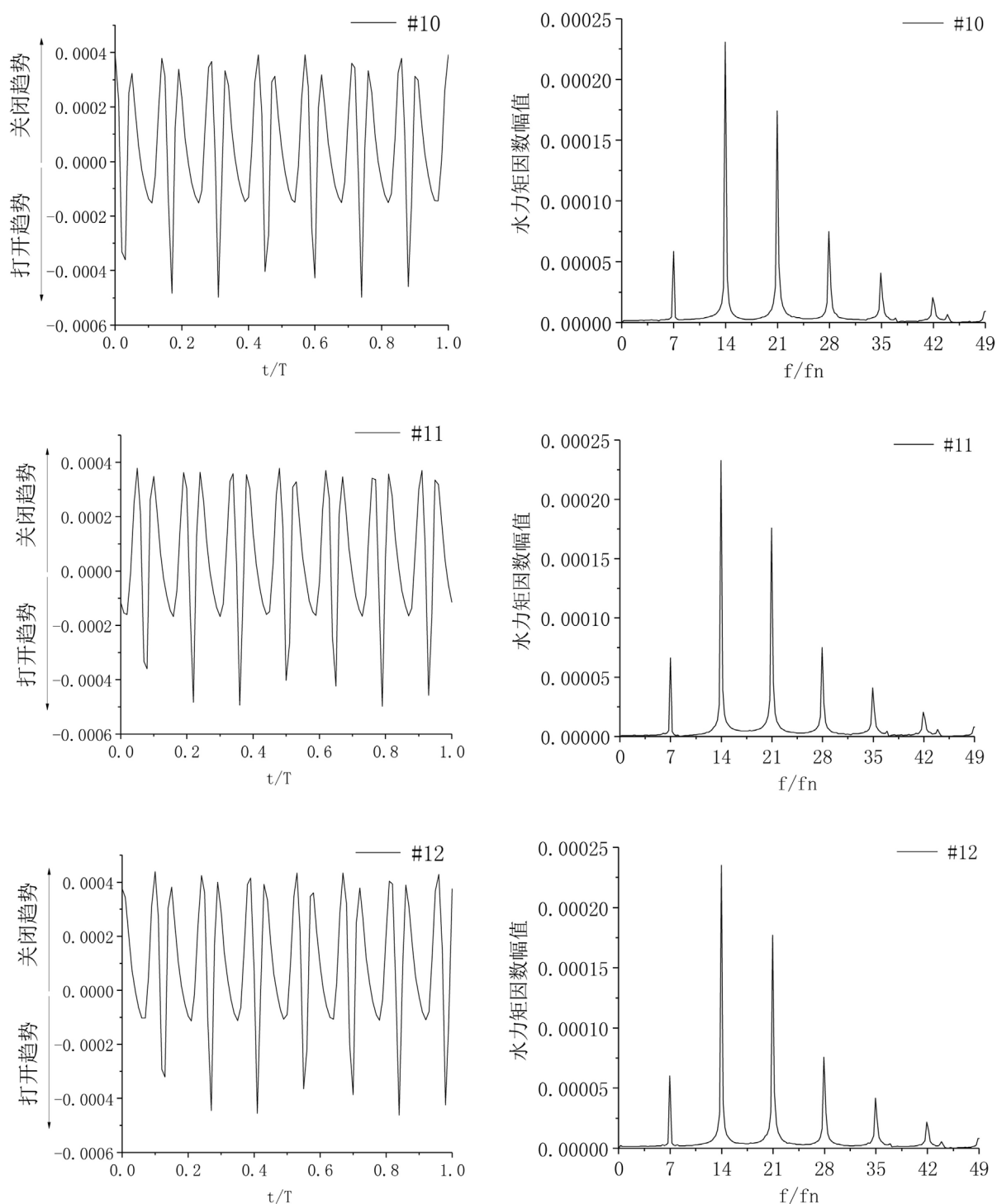


Figure 7. The hydraulic torque factor of different guide vanes (left: time domain diagram; right: frequency domain diagram)
图 7. 不同导叶水力矩因数(左: 时域图, 右: 频域图)

图 9 为一个转轮旋转周期内#1 导叶水力矩因数随时间的变化。从 $0.875T$ 到 $0.935T$ 这段时间内, 导叶水力矩先上升后下降, 直至变为负值。在这一时间段内, 选取了 8 个时刻, 如图 9 中 8 个点所示。定义相对压力 p_{ref} 为

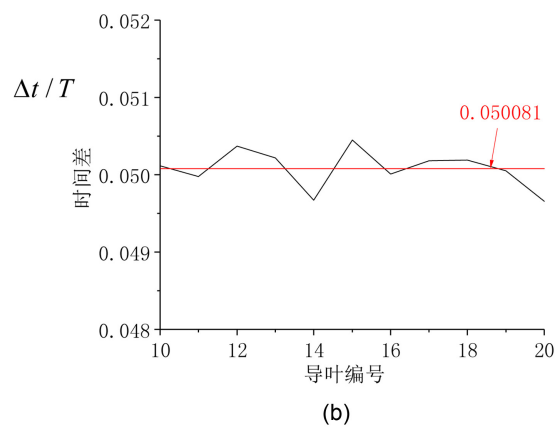
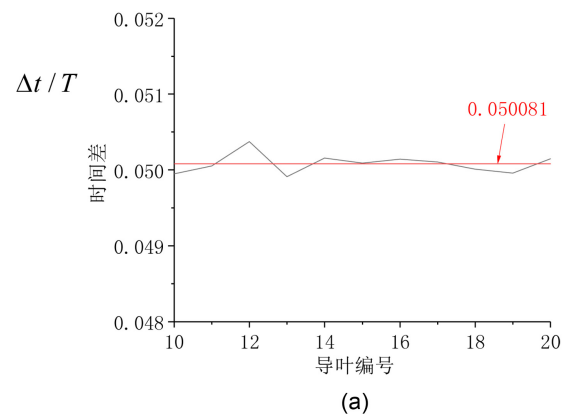


Figure 8. Time difference of hydraulic torque between adjacent guide vane. (a) Main frequency; (b) Sub frequency
图 8. 相邻导叶间水力矩时间差。(a) 主频成分; (b) 次频成分

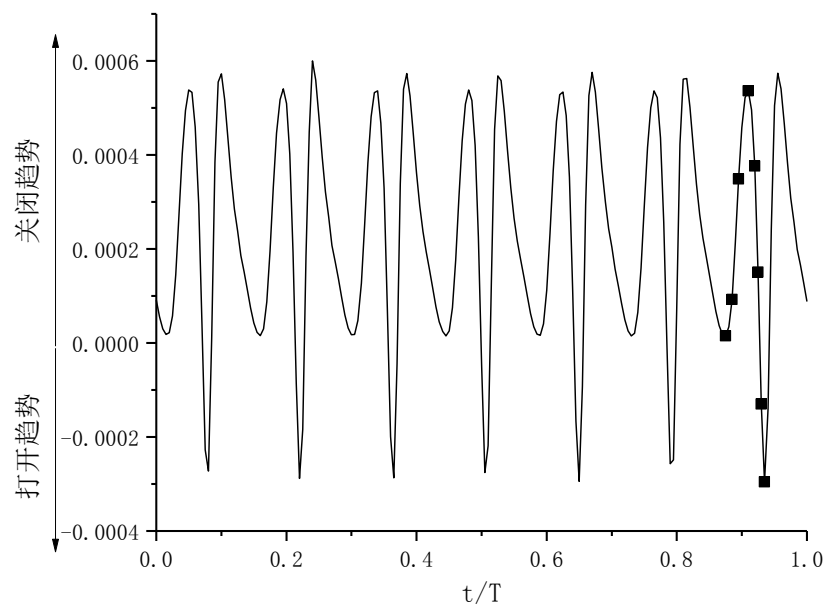


Figure 9. Hydraulic torque factor of #1 guide vane
图 9. #1 导叶水力矩因数

$$p_{ref} = \frac{p - p_{out}}{\rho gh}$$

其中 p_{out} 为尾水管出口压力， H 为水头， ρ 为水的密度， g 为重力加速度。

图 10 为 8 个时刻下的导叶中截面相对压力分布。 $t = 0.875T$ 时，#1 导叶处于转轮两个叶片之间。随

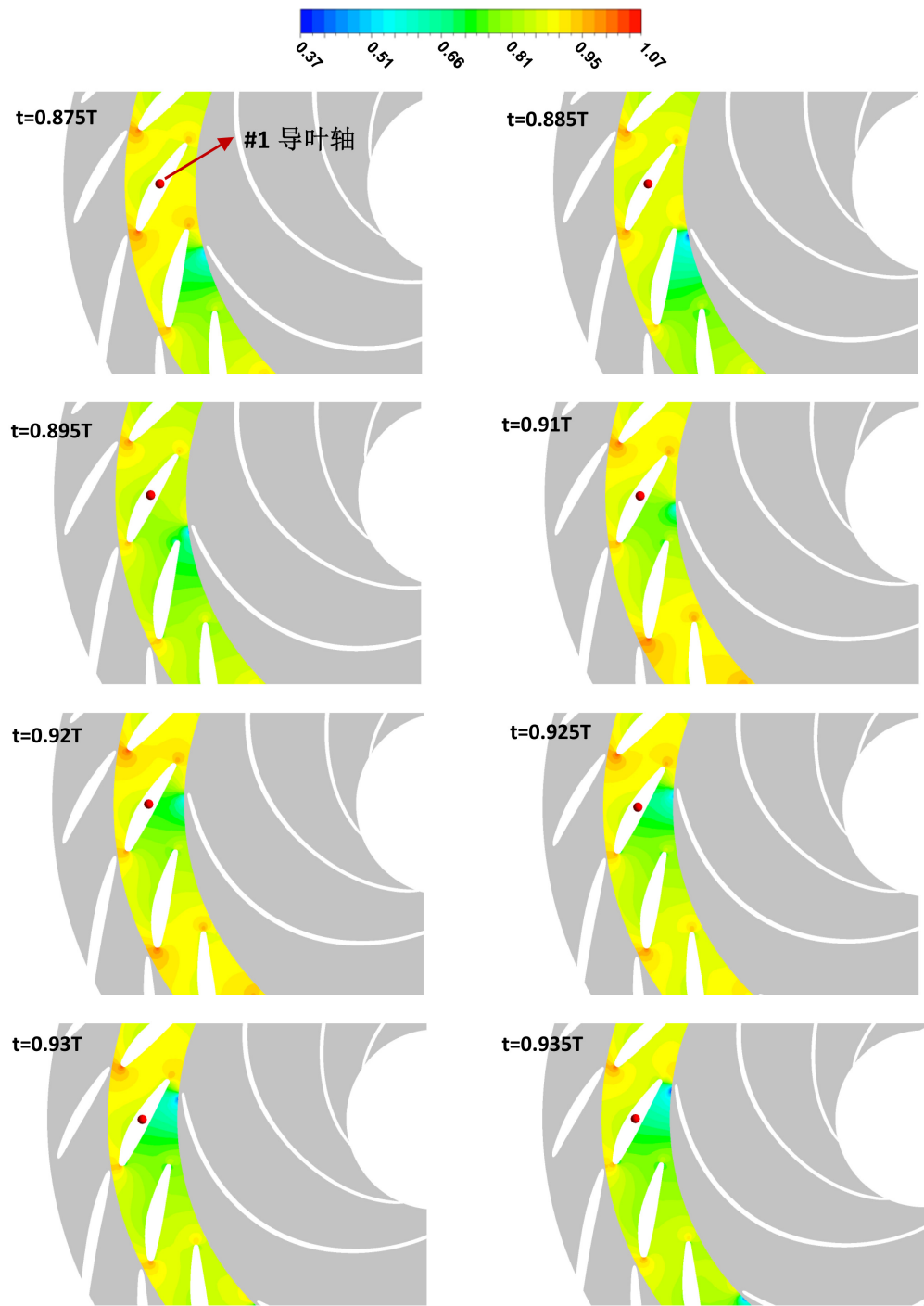


Figure 10. Relative pressure distribution in the cross section of the guide vane area
图 10. 活动导叶区域中截面相对压力分布

着转轮叶片的旋转, #1 导叶吸力面靠近头部的位置压力逐渐降低。受到转轮叶片头部压力面高压区的影响, #1 导叶吸力面靠近尾部的位置压力逐渐升高。因此#1 导叶水力矩上升。 $t = 0.91T$ 时, 导叶水力矩出现极大值。其后叶片继续扫过#1 导叶, 此时#1 导叶主要受到转轮叶片背面低压区的影响, 导叶吸力面靠近尾部的位置压力逐渐降低, 导叶水力矩减小。 $t = 0.935T$ 时, 低压区压力极低, 且接近#1 导叶尾部, 离导叶轴较远, 贡献了较大的反向水力矩, 因此在该时刻下水力矩为负值。

4. 结论

本文采用数值模拟方法研究了水泵水轮机在正常发电情况下的导叶水力矩特性。得到的主要结论如下:

随着导叶开度的增大, 导叶水力矩的数值逐渐减小, 并有变为负值的趋势。导叶开度较大时, 机组运行过程中导叶水力矩在正值与负值之间变化, 导叶轴上所受力矩不断反转, 容易引起材料疲劳;

各导叶水力矩呈周期性变化, 变化频率为转轮对导叶的动静干涉频率及其倍频。动静干涉现象是引起导叶水力矩变化的主要原因;

各个导叶水力矩变化趋势相同, 但相邻导叶间水力矩变化存在时间差, 为转轮旋转周期的 $1/20$ 。这表明转轮叶片在旋转过程中依次扫过各导叶, 使得导叶水力矩先后产生相似变化。

参考文献

- [1] Xiao, Y.X., Sun, D.G., Wang, Z.W., *et al.* (2012) Numerical Analysis of Unsteady Flow Behavior and Pressure Pulsation in Pump Turbine with Misaligned Guide Vanes. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences*, Beijing, 19-23 August 2012.
- [2] Liu, J.T., Liu, S.H., Sun, Y.K., *et al.* (2012) Numerical Simulation of Pressure Fluctuation of a Pump-Turbine with MGW at No-Load Condition. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences*, Beijing, 19-23 August 2012.
- [3] Sun, H., Xiao, R., Liu, W., *et al.* (2013) Analysis of S Characteristics and Pressure Pulsations in a Pump Turbine with Misaligned Guide Vanes. *ASME Journal of Fluids Engineering*, **135**, 1-6. <https://doi.org/10.1115/1.4023647>
- [4] Xiao, Y., Wang, Z., Zhang, J., *et al.* (2014) Numerical Predictions of Pressure Pulses in a Francis Pump Turbine with Misaligned Guide Vanes. *Journal of Hydrodynamics*, **26**, 250-256. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60028-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60028-7)
- [5] 李琪飞, 李光贤, 王仁本, 等. 水泵水轮机在水轮机工况下导叶水力矩试验研究[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 362-368.
- [6] Devals, C., Vu, T.C. and Guibault, F. (2015) CFD Analysis for Aligned and Misaligned Guide Vane Torque Prediction and Validation with Experimental Data. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, **8**, 132-141. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2015.8.3.132>
- [7] Fan, H.G., Yang, H.X., Li, F.C., *et al.* (2014) Hydraulic Torque on the Guide Vane within the Slight Opening of Pump Turbine in Turbine Operating Mode. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Montreal, QC, 22 September 2014.
- [8] 李琪飞, 李光贤, 李仁年, 王仁本, 陈雨. 水泵水轮机在水轮机工况的导叶水力矩特性[J/OL]. 排灌机械工程学报, 1-6. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1016.086.html>, 2018-07-22.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org