

文章编号:1672-3031(2017)05-0376-06

抽水蓄能机组工况转换过程中无叶区压力特性

付婧¹, 张飞²

(1. 中国水利水电科学研究院 信息中心, 北京 100048; 2. 国网新源控股有限公司 技术中心, 北京 100161)

摘要: 抽水蓄能机组无叶区压力脉动是机组及厂房振动的重要振源之一, 尤其在工况转换过程中对厂房及机组振动起到决定性作用。考虑到工况转换过程属于典型的非稳态时变过程, 本文采用时域混频幅值方法与时频分析中的短时傅里叶分析方法对抽水方向调相转抽水与发电方向调相转发电过程中无叶区压力信号进行了分析。研究结果表明: 工况转换时无叶区水环吸收功率受球阀工作密封投退影响, 工作密封退出后至顶盖排气阀关闭前时间段内吸入功率恒定, 不受排气回水过程影响。工况转换时, 因密封退出导致水环增厚, 恶化了无叶区压力脉动情况。抽水方向调相至抽水工况转换与发电方向调相至发电工况转换时, 无叶区压力脉动分别在转轮造压过程中和小负荷区达到最大值。工况转换过程中, 无叶区存在明显的动静干涉频率和一倍叶片过流频率。一倍叶片过流频率均起源于球阀密封退出瞬间, 抽水方向调相转抽水时动静干涉频率起源于尾水与转轮接触时, 而发电方向调相转发电时动静干涉频率与一倍叶片过流频率同时产生。

关键词: 蓄能机组; 工况转换; 水环; 短时傅里叶变换; 叶片过流频率; 动静干涉

中图分类号: TK734

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.05.008

1 研究背景

抽水蓄能机组无叶区(转轮叶片与活动导叶之间区域)压力脉动是机组及厂房振动的主要振源^[1], 属于典型的水力激振源。通常情况下无叶区含有丰富的频率成分, 包括: 动静干涉频率、叶片过流频率、转频及其倍频等。这些频率成分通过蜗壳、机墩以及转轮、轴系等方式传播至机组及厂房^[2], 引起结构件的振动, 造成机组性能劣化, 影响机组运行稳定性, 并对机组的预期寿命产生严重影响^[3-4], 左志刚、刘树红等人从数值模拟、试验分析两方面对无叶区动静干涉所产生的压力脉动及其与厂房的关系等方面进行了详细综述^[5]。目前, 针对常规水电机组包含动静干涉等频率成分的无叶区压力脉动研究主要集中在偏离设计点的运行工况^[6-8]、开机过程^[9-10]以及飞逸工况^[11]等。考虑到抽水蓄能机组的运行特性, 对于开机工况的研究主要包括水泵工况和水轮机工况开机, 而对工况转换过程中的无叶区压力脉动关注则鲜有相关文献报道。基于此, 本文对两个典型工况转换过程: 抽水方向调相(Synchronous Condenser Pump, SCP)转抽水(Pumping Operation, PO)和发电方向调相(Synchronous Condenser Turbine, SCT)转发电(Generating Operation, GO)过程中无叶区压力、有功功率、导叶开度等进行了观测, 采用相关技术手段获得了叶片过流频率、动静干涉产生的过程。

2 工况转换流程

抽水蓄能机组在电网中承担功能包含事故备用、调峰、调频等重要功能, 因此要求机组能够实现各种运行工况间的快速转换^[12]。抽水蓄能机组典型工况转换主要有抽水方向调相(SCP)与抽水工况

收稿日期: 2017-05-18

基金项目: 国家电网公司科技项目(52573016001G); 国家自然科学基金项目(51309258)

作者简介: 付婧(1982-), 女, 北京人, 工程师, 主要从事水电机组状态监测技术研究。E-mail: fujing@iwhr.com

通讯作者: 张飞(1983-), 男, 山东枣庄人, 高级工程师, 注册电气工程师, 主要从事抽水蓄能机组性能测试技术研究与实践。

E-mail: spiritgiant@126.com

(PO)相互转换、发电方向调相(SCT)与发电工况(GO)相互转换以及水泵工况(PO)向发电方向转换(GO)等过程,见图1所示。

考虑到系统存在由于短路等相关故障而导致的频率突然降低可能,因此在工况转换图中存在PO向GO转换的情况发生。对于电力系统而言,发电负荷均根据预先设定的规则对负荷进行有序调整,因此抽水蓄能机组一般不设置GO向PO转换。PO向GO转换可以分解成PO向停机热备转换,并进一步由停机热备向GO转换,即可以看做PO停机,然后GO开机并带负荷。而PO停机与GO开机带负荷过程相关研究已有大量报道^[5],本文不在赘述。故着重分析SCP与PO以及SCT与GO之间的相互转换过程中的无叶区压力脉动情况。

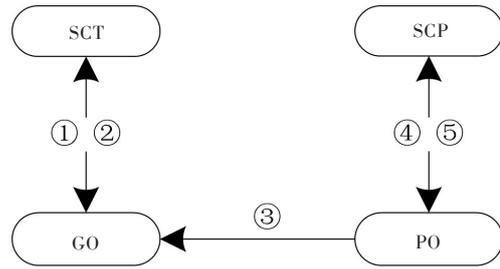


图1 工况转换图

通常调相工况运行时,在离心力的影响下迷宫环冷却水沿活动导叶表面流动,无叶区靠近活动导叶侧将形成水环。受水环厚度影响,一方面过厚的水环将造成机组吸入有功功率增大,引起机组振动增大;另一方面水环可以密封转轮室内气体同时对转轮进行冷却^[13]。调相时无叶区压力取决于下库尾水位,其压力脉动取决于水环厚度。水环设计合理的机组,水环厚度适中并不引起明显的无叶区压力脉动,其数值较有水工况小。故下文着重研究有水情况下的压力脉动数据。

抽水蓄能电站通常在上游侧引水管路末端与蜗壳进口段的联结部分设置球阀,用于停机时遮断水流以便机组检修,或者参与机组运行时的动水条件下调节保障等功能。这一条件下机组SCP与PO以及SCT与GO之间广泛采用的典型工况转换流程分别见图2和图3所示。



图2 SCP向PO及SCT向GO转换流程

图3 PO向SCP及GO向SCT转换流程图

根据工况转换流程图2和图3,本文所研究的过渡过程无叶区压力脉动是指:在SCP向PO转换时,无叶区压力脉动自球阀工作密封退出、调用排气回水流程开始形成时产生,至机组导叶开度至协联时结束;在SCT向GO转换时无叶区压力脉动亦自球阀工作密封退出、调用排气回水流程开始,至导叶开度至指定负荷点结束。对于PO向SCP和GO向SCT转换时则分别是SCP向PO和SCT向GO的

反过程，具有对称性。本文以调相工况向有水工况转换过程为对象进行分析。

3 机组参数与测点信息

某抽水蓄能电站立轴、单机、混流可逆式水泵水轮机主要参数如下：

水轮机工况额定出力：382.7 MW

额定水头：428 m

额定流量：96.34 m³/s

额定转速 375 rpm

水泵工况最大净水头：492.33 m

相应流量：85.51 m³/s

最小净水头：421.86 m

相应流量：92.75 m³/s

无叶区压力传感器采用通用电气公司生产的PTX5072型压力传感器，精度为±0.2%，频响范围0~5kHz(-3dB)。

无叶区压力脉动测点布置在顶盖上，对称布置，与厂房横向中心线夹角分别为45°和225°，见图4所示。

数据采集系统采用HBM公司的QuantumX MX840A-P，其采样精度为24位A/D，采样率为600 Hz。工况转换过程中，对导叶开度、机组吸入有功功率和无叶区压力进行连续采集。

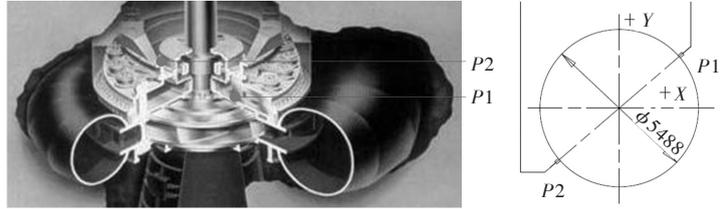


图4 无叶区压力测点位置图

4 SCP转PO时无叶区压力脉动分析

由于水泵水轮机在正常启机抽水时，首先经静止变频器(Static Frequency Converter, SFC)拖动机组至额定转速并网，并网后工况即SCP工况，短时SCP运行即向PO工况转换，故SCP工况向PO工况转换是发生最高的工况转换过程。典型SCP向PO工况转换时有功功率、导叶开度和无叶区压力数据见图5所示(考虑到两个压力测点数据趋势一致，以下分析以P1测点为例进行分析)。图5中为SCP稳定运行10 min后向PO工况转换过程的录波图。根据机组吸入有功功率及导叶开度变化情况，图中给出了6个关键时刻点。

图5可见：在T1时刻前SCP稳定运行时机组吸入功率与无叶区压力数值稳定；当上位机或LCU启动工况转换流程之后，同时启动排气回水流程并发出退出球阀工作密封指令，在T1至T2时刻之间执行球阀工作密封退出工作，密封退出后启动球阀开启流程，这一时间段内由于蜗壳内水压力由下库水位作用变换为上库水位压力，水环厚度随着球阀漏水增大而逐渐增大，导致机组吸入功率与无叶区压力也逐渐增大；T2时刻之后，机组吸入功率不受尾水水位上升的影响，顶盖排气过程中转轮溅水后亦基本不受排气过程的影响，无叶区压力逐渐增大；T3时刻时顶盖排气完毕，排气阀开始关闭，此后至T4时间段内(T4时刻对应顶盖排气阀完全关

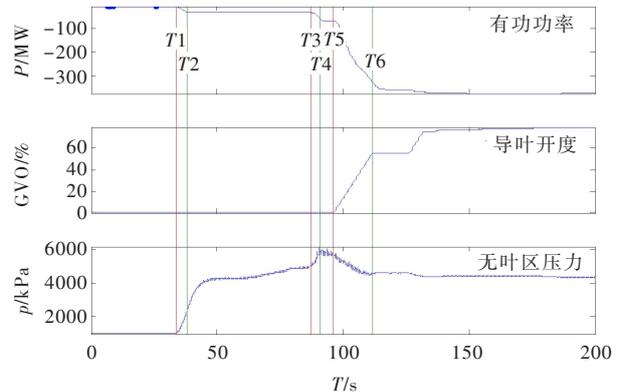


图5 SCP向PO转换时有功、导叶开度与无叶区压力录波

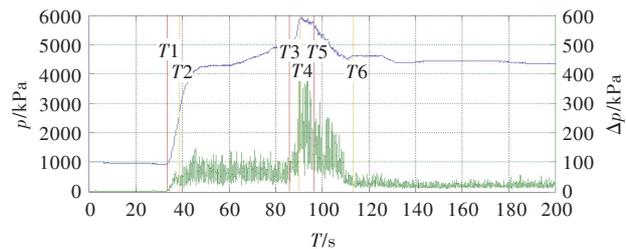


图6 SCP向PO转换时无叶区压力脉动项与趋势项

闭)转轮开始造压,无叶区压力急剧增大,机组吸入功率也增大,形成溅水功率;机组在 T_4 至 T_5 期间形成稳定的溅水功率,使其具备泵水条件; T_5 时刻,机组导叶开启,至 T_6 时刻完成第一阶段导叶开启工作; T_6 时间之后,导叶开启寻优工作,从而正式进入泵水工况。上述过程中无叶区压力脉动项及趋势项情况见图6所示。

从图6可以看出:在 T_1 时刻之前机组SCP工况稳定运行时脉动项混频幅值的均值为2.7 kPa,表明SCP工况运行时无叶区压力脉动处在较小的水平上;当球阀工作密封退出后 T_2 至 T_3 时无叶区压力脉动保持恒定,亦说明在尾水水位上升期间及顶盖排气完成前时间段内,无叶区压力脉动虽然较 T_1 之前明显增大,但保持较为恒定,其混频幅值的均值在68.2 kPa,引起增大的原因可以解释为水环工作密封退出后,蜗壳内水压由下库压力变为上库压力,使水环厚度明显增大,摩擦损耗大幅增加,造成吸入功率增大;在 T_4 与 T_5 时间段转轮造压期间一方面无叶区压力均值达到最大,以便机组形成扬程具备泵水条件,另一方面无叶区压力脉动达到最大,此时在无叶区高幅值压力脉动的影响下机组振动、摆度混频幅值亦达到最大;当导叶打开后,无叶区压力脉动混频幅值随着导叶开度的增大逐渐减小,至 T_6 时刻之后稳定,且基本不受导叶开度进一步增大的影响。

为进一步研究频率变化情况,采用短时傅里叶变换(Short-Time-Fourier-Transform, STFT)方法对这一过程无叶区压力进行分析,考虑到汉宁窗具有较好的频率分辨率及其良好的抑制泄露能力,对数据采用汉宁窗进行加窗操作。分析时滑移步长取0.33 s,窗口时间长度2s。

图7可见:在 T_1 时刻之前SCP稳定运行时无叶区压力不存在叶片过流频率及其倍频;在 T_1 和 T_2 之间,球阀工作密封退出后,蜗壳内水压力由尾水压力增大至上游侧压力,水环厚度增加,无叶区产生一倍叶片过流频率56.25 Hz(叶片数 $9 \times$ 转频6.25 Hz);在 T_2 时刻之后,48 s时产生动静干涉频率^[14]112.50 Hz(两倍叶片过流频率),根据整个回水排气流程所对应的时间约61s,这一时刻对应于转轮触水时刻,即当转轮接触水的瞬间;在 $T_3 \sim T_5$ 之间转轮造压过程中,水泵流量为零,在额定转速下旋转,无叶区流态复杂不稳定,产生复杂的低频压力脉动,造成机组及厂房的振动加大; T_5 之后,随着导叶的开启,机组低频压力脉动逐渐减小;在导叶寻优的过程中,无叶区压力脉动以一倍叶片过流频率和动静干涉频率为主频。

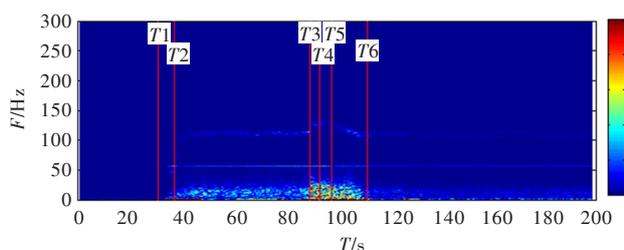


图7 SCP向PO转换时无叶区压力短时傅里叶变换图

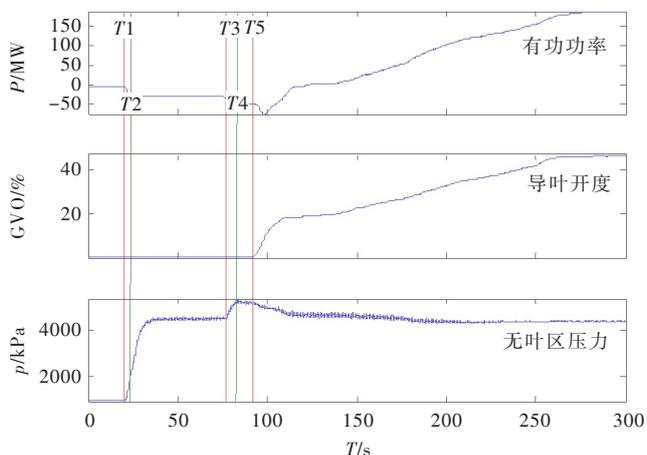


图8 SCT向GO转换时有功、导叶开度与无叶区压力曲线

5 SCT转GO时无叶区压力脉动分析

SCT转GO时机组有功功率、导叶开度和无叶区压力见图8所示。根据机组有功功率及导叶开度变化,图中给出了5个关键时间点。

图8可见:在 T_1 时刻前机组SCT稳定运行,机组吸入功率保持恒定; T_1 时刻后球阀工作密封退出至 T_2 时刻时工作密封退出到位,当工作密封退出瞬间机组吸入功率增大,无叶区压力急剧增大;密封退出到位,球阀开启过程中以及排气回水过程中机组吸入功率基本保持恒定; T_2 至 T_3 期间,在回水排气流程期间,无叶区建压至恒定值;顶盖排气阀自 T_3 时开始关闭,至 T_4 时关闭结束,在此之间机组流量为零,机组吸入功率增大,无叶区压力达到最大; T_4 时至 T_5 时刻之间时,由于顶盖排气阀已完全关闭且导叶尚未打开,因此吸入功率基本保持稳定,而压力脉动则达到最大;此后, T_5 时

导叶开启, 受限于导叶开度较小, 导叶前压力与无叶区水压进行消减, 从而导致机组吸入功率达到最大, 在此之后随着导叶开度的增大, 机组有功功率逐渐增大, 并由吸入转为发出功率。上述过程无叶区压力趋势及脉动见图9所示。

图9可见: SCT转GO过程中压力脉动自 $T1$ 时刻球阀工作密封退出时增大, 至 $T5$ 导叶开始打开时压力脉动基本保持在恒定的水平上, 这一现象可以解释为工作密封退出后, 水环厚度增加, 导致摩擦损耗增大, 压力脉动增大, 从而吸入功率亦增大; 在回水排气过程无叶区压力虽然增大, 而压力脉动基本保持恒定, 这一过程中无叶区压力基本与吸入功率绝对值趋势一致; $T5$ 之后导叶开启, 在小负荷区20MW附近达到最大。上述过程无叶区压力侧点的短时傅里叶变换结果见图10所示。参数设置与图7一致。

图10可见: SCT转GO时无叶区一倍叶片过流频率产生时间与SCP转PO时一致, 均是在球阀密封退出后活动导叶内侧水环厚度增大后产生; SCT转GO时的动静干涉频率幅值弱于SCP转PO过程, 其产生时间与一倍叶片过流频率基本一致; 相较于SCP转PO工况, SCT转GO时将激发169 Hz左右与260 Hz左右频率成分, 这一频率在工况转换时呈带状均匀分布在频谱中, 可能是由空化情况所导致。

6 结论

本文对抽水蓄能机组SCT转GO和SCP转PO两个工况转换过程中的无叶区压力采用时域混频幅值与时频域窗口傅里叶变换方法进行了详细分析, 获得以下结论:

(1) 工况转换过程中, 因球阀工作密封退出导致蜗壳水压增大, 水环厚度增大, 从而导致机组吸入功率增大; 排气回水过程中机组吸入功率保持恒定。

(2) 工况转换过程中, 球阀工作密封退出后及排气回水过程中, 无叶区压力增大, 至顶盖排气阀关闭瞬间达到最大值。

(3) SCP转PO时, 无叶区压力脉动在转轮造压时最大; SCT转GO时, 无叶区压力脉动在导叶开启后的小负荷区时最大。

(4) 工况转换过程中无叶区存在明显的一倍叶片过流频率与动静干涉频率; 受水环厚度影响, 一倍叶片过流频率起源于球阀密封退出瞬间; SCP转PO时, 动静干涉频率起源于排气回水过程中尾水与转轮接触瞬间; SCT转GO时, 动静干涉频率与叶片过流频率同时产生。

参 考 文 献:

- [1] 袁寿其, 方玉建, 袁建平, 等. 我国已建抽水蓄能电站机组振动问题综述[J]. 水力发电学报, 2015, 34(11): 1-15
- [2] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 35-36
- [3] OHASHI H. Case study of pump failure due to rotor-stator interaction[J]. International Journal of Rotating Machinery, 1994, 1(1): 53-60.
- [4] EGUSQUIZA E, VALERO C, HUANG XX, et al. Failure investigation of a large pump-turbine runner[C]//Eng

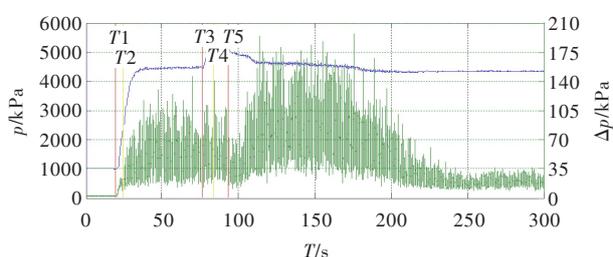


图9 SCT向GO转换时无叶区压力脉动项与趋势项

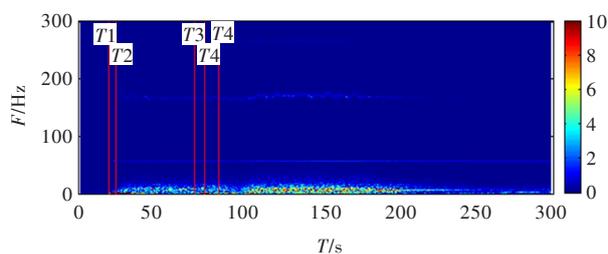


图10 SCT向GO转换时无叶区压力短时傅里叶变换图

- Fail Anal, 2012, 23: 27-34 .
- [5] ZUO Z, LIU S, SUN Y, et al . Pressure fluctuations in the vaneless space of High-head pump-turbines—A review [J] . Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 41:965-974 .
- [6] RAN HJ, LUO XW, ZHU L, et al . Experimental study of the pressure fluctuations in a pump turbine at large partial flow conditions[J] . Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25: 1-5 .
- [7] YAN JP, SEIDEL U, KOUTNIK J . Numerical simulation of hydrodynamics in a pump turbine at off-design operating conditions in turbine mode[C]//26th IAHR symposium on hydraulic machinery and system. Beijing, China, 2012 .
- [8] GUO L, LIU JT, WANG LQ, et al . Pressure fluctuation propagation of a pump turbine at pump mode under low head condition[J] . Science China of Technical Science, 2014, 57(4): 811-818 .
- [9] XIAO YX, SUN DG, WANG ZW . Numerical analysis of unsteady flow behavior and pressure pulsation in pump turbine with misaligned guide vanes[C]//26th IAHR symposium on hydraulic machinery and system. Beijing, China, 2012 .
- [10] LIU DM, ZHENG JS, SHI QH . Numerical simulation on the S characteristics and pressure fluctuation of reduced pump turbine a start-up condition[C]//26th IAHR symposium on hydraulic machinery and system, Beijing, China, 2012 .
- [11] 杨建东, 胡金弘, 曾威, 等 . 原型混流式水泵水轮机过渡过程中的压力脉动[J] . 水利学报, 2016, 47(7): 858-864 .
- [12] 高苏杰 . 抽水蓄能的责任[J] . 水电与抽水蓄能, 2015, 1(1): 1-6 .
- [13] 徐桅, 潘雪石 . 张河湾抽水蓄能电站机组水环设计与现状分析[J] . 水电与新能源, 2016(1): 46-48 .
- [14] NICOLAS R, CHRISTOPHE N, FRANCOIS A . Hydroacoustic modeling of rotor stator interaction in Francis pump-turbine[C]//IAHR Int . Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Barcelona, 2006 .

Vaneless zone pressure characteristics in working mode transferring process of pumped-storage unit

FU Jing¹, ZHANG Fei²

(1. Information Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Technology Center, State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: Vaneless zone pressure pulsation is the main vibration source of pump-storage powerhouse and unit, especially in the working mode transferring processes. Considering that the working mode transferring processes are typical non-stable processes, peak-to-peak value analysis in time domain and short-time-Fourier transform in time-frequency domain have been employed for analyzing the vaneless zone pressure in the processes of synchronous condenser pump (SCP) to pumping operation (PO) and synchronous condenser turbine (SCT) to generating operation (GO). The research indicates that water ring absorption power is heavily influenced by working seal operation, and the power absorption, which is not influenced by the process of air-evacuation-water-recover, keeps constant from the time working seal withdrawing to the time air evacuation valve closing in working mode transferring processes. Once the water ring thickness increases after the seal withdrawing, the vaneless zone pressure pulsation aggravates. During SCP to PO and SCT to PO, the maximum vaneless pressure peak-to-peak values occurs in the period of runner chamber pressure establishment and the low load operation zone respectively. During the working mode transferring processes, blade passing frequency and rotor-stator interaction frequency arise apparently. Blade passing frequency emerges on the time seal withdrawing; for SCP to PO, the rotor-stator interaction frequency emerges on the time runner contacting draft-tube water, while for SCT to GO, the rotor-stator interaction frequency emerges simultaneously with blade passing frequency.

Keywords: pumped-storage unit; working mode transferring; water ring; short-time-Fourier transform; blade passing frequency; rotor-stator interaction

(责任编辑: 李福田)