



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.031

张飞, 周喜军, 孙慧芳, 等. 水力激振作用下的蓄能机组泵工况稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 202-208. ZHANG Fei, ZHOU Xi jun, SUN Huifang, et al. Stability of pumped storage unit in pump operation mode under hydraulic excitation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 202-208. (in Chinese)

水力激振作用下的蓄能机组泵工况稳定性分析

张 飞^{1,2}, 周喜军^{1,2}, 孙慧芳^{1,2}, 周 攀^{1,2}

(1. 国网新能源控股有限公司技术中心, 北京 100161; 2. 国家电网公司抽水蓄能技术实验室, 北京 100161)

摘要: 随着我国蓄能机组的大量投运, 水力激振所引发的机组稳定性问题日益严重。针对蓄能机组泵工况运行时的水力激振问题, 采用现场试验手段获得了额定转速下蓄能机组调相压水工况与稳定泵水工况运行时的机组振动、摆度数据, 采用频谱对比分析方法, 研究了两种工况下各稳定性测点频谱, 通过频谱中频率成分的变化, 指出了不同部位测点中频率成分存在的差异。分析结果表明: 承受垂直载荷部件振动幅值水泵工况较调相工况略有增大趋势; 112.5 Hz 动静干涉频率成分主要在机组垂直振动方向上传播, 且逐渐衰减; 水力干扰导致泵工况部分测点的频率成分中增加了叶片通过频率 56.25 Hz 和动静干涉频率 112.5 Hz, 但频率成分的增加并不一定引起机组振动与摆度混频幅值的增大; 由于机组振动中 261 Hz 等高频成分的出现, 未来厂房与机组的动力分析报告中应包含高频成分, 并进行复核。本次观测为转轮设计及研发人员提供了翔实参考数据。

关键词: 蓄能机组; 水力激振; 动静干涉; 泵工况; 调相压水工况; 频谱分析

中图分类号: TK 734 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0202-07

Stability of pumped storage unit in pump operation mode under hydraulic excitation

ZHANG Fei^{1,2}, ZHOU Xi jun^{1,2}, SUN Huifang^{1,2}, ZHOU Pan^{1,2}

(1. Technology Center of State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100161, China;

2. Pumped Storage Technology Laboratory of State Grid, Beijing 100161, China)

Abstract: With a large number of pumped storage units put into operation, the stability problem of the unit caused by hydraulic vibration becomes serious. In this paper, we conducted field tests to obtain the unit vibration and run out data of pumped storage units running at rated speed in both synchronous condenser as pump (SCP) mode and pump operation (PO) mode. We used the frequency spectrum comparison analysis method to study the frequency spectrum of each measuring point in the two modes, and found differences in the frequency components of different measuring points. The results indicated that the vibration amplitude of the unit parts sustaining vertical load was larger in PO mode than in SCP mode. The 112.5 Hz rotor stator interaction frequency component mainly propagated vertically, and it was attenuated in the propagation. At some measuring points in PO mode, hydraulic interaction added runner blade passing frequency 56.25 Hz and rotor stator interaction frequency 112.5 Hz to the frequency components. However, the addition of frequency components did not necessarily cause an increase in the mixed frequency amplitude of unit vibration and run out. Since high frequencies such as 261 Hz emerged in unit vibration, the dynamic analysis report of power houses and units should include higher frequencies in the future. This investigation provided detailed data for the runner research and design engineers.

Key words: pumped storage unit; hydraulic excitation; rotor stator interaction; pump operation mode; synchronous condenser as pump mode; frequency analysis

收稿日期: 2016-08-21 修回日期: 2016-11-21 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1924.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51309258); 国家电网公司科技项目(52573016001G; 52573015000R)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51309258); State Grid Science & Technology Project(52573016001G; 52573015000R)

作者简介: 张 飞(1983-), 男, 山东枣庄人, 高级工程师, 主要从事蓄能机组性能测试研究与实践。E-mail: spiritgiant@126.com

“十三五”期间,我国将投运包括浙江仙居、江西洪屏、广东清远、河北丰宁等系列大型抽水蓄能机组,其中河北丰宁采用变频式机组。随着大型蓄能机组的投运,水力激振所引发的稳定性问题日益引起工程技术人员的注意。张河湾机组投运后由水力因素引发的机组与厂房振动问题严重且厂房噪声超标^[1],蒲石河、黑麋峰等机组也不同程度的存在较为严重的水力激振导致的机组振动问题,宜兴机组则在调试时发生小开度导水机构自激共振^[2,3],广蓄机组发生过因下迷宫环压力脉动产生的机组稳定性问题^[4]。目前,考虑到现场观测的实施复杂程序,水力激振及其影响方面的研究主要集中在两方面,一是采用计算流体力学方法进行模拟^[5-7],袁寿其等人对这一方面的研究进行了综述并指出了现场测试观测方面的不足^[8];二是采用理论分析手段对水力激振产生机理进行研究,如 Peter K. Doerfler 指出相位共振对水力机械径向振动的影响^[9],A lireza Zorbeiri 对动静干涉的产生机理进行了研究^[10],刘涛^[11]等人对这方面研究进行了详细综述。

2016年4月我国自主研发的首台浙江仙居蓄能电站机组并网发电成功,国网新源控股有限公司技术中心在机组调试阶段组织科研技术人员对机组不同工况下的振动、摆度和压力脉动情况进行了全面观测,积累了翔实丰富的机组稳定性数据。考虑到当蓄能机组在水泵工况下启动时机组经历充气水压阶段,此时机组水力干扰较小(部分机组受水环影响,机组稳定性反而较差^[12-13]),而并网稳定抽水时机组满载运行,此时水力因素将直接对机组的稳定性参数产生影响^{[14][15]}。基于此,本文将对额定转速下充气水压调相运行(Synchronous Condensed Pump, SCP)与稳定抽水运行(Pump Operation, PO)时的机组稳定性数据进行频域对比分析,研究水力因素干扰下的机组振动特征并将阐明水力因素对机组振动的影响,为工程技术人员理解水力因素对机组振动稳定性分析的重要性提供有效支撑。

1 测试条件

1.1 机组参数

浙江仙居抽水蓄能电站位于浙东南中心地带仙居县境内,东临台州、南近温州、西连金华和丽水、北接绍兴。电站设计安装4台单机容量375 MW的可逆式抽水蓄能机组,电站的主要任务是为华东电网提供调峰、填谷容量,并承担系统的紧急事故备用和调频、调相作用。水泵工况时最大入力400 MW,

最大流量 $81.8 \text{ m}^3/\text{s}$,最大扬程502.9 m,最小扬程437.3 m。转轮叶片数为9,活动导叶数为20。

1.2 测试系统描述

为探索首台国产400 MW级机组稳定性相关信息,调试阶段试验共对机组三部导轴承位置处摆度、发电机驱动端与非驱动端轴承、水轮机导轴承与定子基座振动、以及通流部件内压力脉动等测点进行观测,具体测点布置见图1。

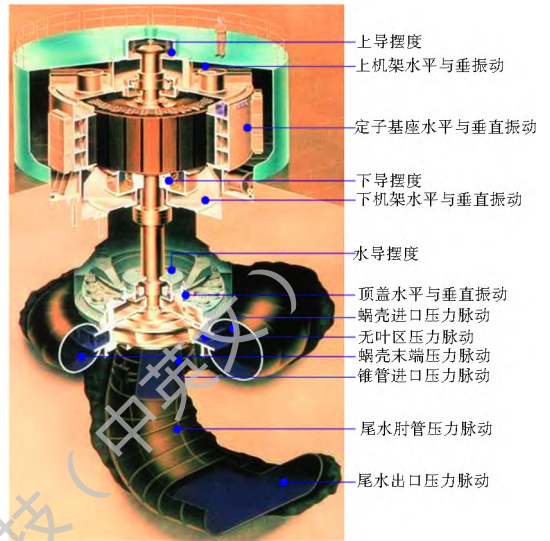


图1 试验测点布置

Fig. 1 Distribution of measuring points

试验所用传感器参数为:速度传感器采用本特利生产的330505型低频速度传感器,灵敏度 $20 \text{ mV}/(\text{mm}/\text{s})$,频响范围 $0.5 \sim 1\,000 \text{ Hz}$ (-30 dB);电涡流位移传感器采用本特利330180型传感器,灵敏度 $8 \text{ V}/\text{mm}$,频响范围 $0 \sim 10 \text{ kHz}$ (-3 dB);压力传感器采用通用生产的PTX5072型传感器,精度为 $\pm 0.2\%$,频响范围 $0 \sim 5 \text{ kHz}$ (-3 dB)。

试验数据采用两套采集仪器进行同步采集,分别是Bentley公司的ADRE408 DSPi用于机组振动与摆度的测量和HBM公司的QuantumX MX840A-P用于压力脉动及工况参数的测量。采样精度可以达到24位A/D,单通道最高采样率可以至 $96 \text{ kS}/\text{s}$ 。两套采集系统间采用电脑时钟进行同步。整个试验平台如图2所示。数据采样率为 $1\,280 \text{ S}/\text{s}$ 。



图2 现场测试采集平台

Fig. 2 Data acquisition rig

1.3 水文条件

试验数据采集时的上库水位为 657.71 m, 下库水位 197.83 m。

2 研究方法

当蓄能机组以泵工况启动时, 监控系统首先完成抽水工况换向刀和被拖动刀的合闸, 然后向充气压水系统发令启动压水流程向转轮室内注入高压空气, 将水体压至转轮下方某一高程, 而后静止变频器 (Static Frequency Converter, SFC) 拖动机组旋转, 机组拖动至额定转速后并网。待机组并网后启动排气回水流程同时执行开启球阀命令, 转轮室内压缩空气通过顶盖排气管路排出, 尾水锥管内水体在尾水压力下逐渐升高并淹没转轮, 从而形成溅水功率 (零流量试验)^[16]。当溅水功率至一定数值时, 转轮室内造压完成, 此时监控系统发指令至调速器打开导叶。在打开导叶过程中机组根据扬程进行导叶寻优, 寻找最佳协联点, 最终完成蓄能机组在泵工况的稳定运行。

从上述流程中可以看出, 机组并网后溅水功率形成前, 机组在电网拖动下运行, 此时机组处于压水调相工况运行, 机组稳定性主要受电气与机械因素的影响, 此时虽然转轮室内在尾水压力及主轴密封冷却水、止漏环冷却水作用下形成水环, 但在水环获得稳定控制的前提下, 这一因素对机组稳定性的影响较小 (下文测试数据表明机组压水调相运行时各测点信号中不含有明显的水力激振特征频率)。而在溅水功率形成至泵工况稳定运行及以后的时间内, 机组稳定性除受机械和电气因素影响外, 还叠加有水力因素的影响。考虑到溅水功率形成前机组振动的频域响应主要受电气和机械原因所激励, 而溅水功率形成后的频域响应增加了水力因素, 故频域响应中增加的频率成分应为水力因素激励所导致。因此采用频谱分析手段对泵工况启动全过程进行分析可以定性获得水力因素对蓄能机组稳定性的影响。同时考虑到泵工况启动包含压水过程、SFC 拖动机组转速上升过程、排气回水形成溅水功率过程及稳定运行等一系列过程的组合, 且部分过程时间短暂, 为实现对水力因素影响前后的机组振动进行对比观测, 将机组在额定转速下压水运行工况人为延长至一分钟, 即机组并网后在额定转速压水调相工况下稳定运行一分钟, 以便获得无水力干扰情况下的机组稳定性测点数据。当机组运行在额定转速泵水工况时亦采集稳态工况数据一分钟。从而通过两个工况下数据的对比获得水力因素干扰的影响。

3 数据分析

相关研究表明始于无叶区 (活动导叶后转轮叶片前) 区域的动静干涉所产生的压力脉动对机组稳定性影响突出^[8], 鉴于本文着重研究机组水力因素叠加前后机组稳定性测点的频率成分变化, 不涉及到厂房的振动评估, 因此论文中着重对水力因素下轴系及机组固定部件振动信号进行分析。

机组在压水调相工况和水泵工况运行的振动测点时域与频域波形分别见图 3 和 4 所示; 摆度测点时域与频域波形分别见图 5 和 6 所示。考虑到稳态运行时振动与摆度时域波形图稳定, 且长时间的时域波形图不易于图形直观显示, 图 3 和图 5 中仅给出了 5 s 的稳定运行数据。图 3- 图 6 中左侧为压水调相工况数据, 右侧为水泵工况数据。

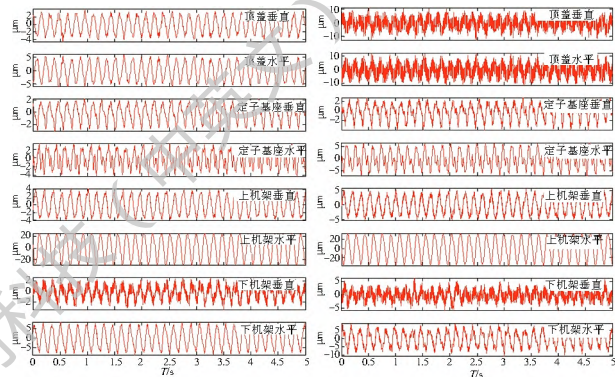


图 3 机组压水调相运行与稳定抽水工况下振动时域波形
Fig. 3 Unit vibration waveforms in time domain under SCP and PO modes

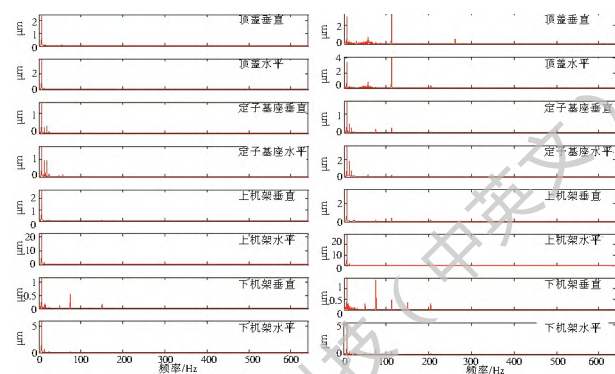


图 4 机组压水调相运行与稳定抽水工况下振动频谱
Fig. 4 Unit vibration waveforms in frequency domain under SCP and PO modes

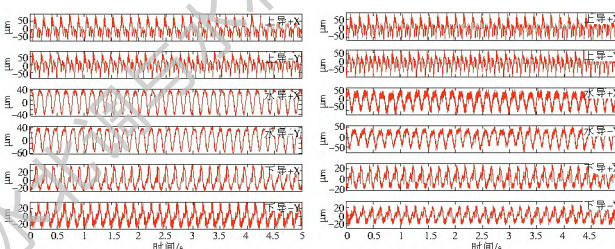


图 5 机组压水调相运行与稳定抽水工况下摆度时域波形
Fig. 5 Unit run-out waveforms in time domain under SCP and PO modes

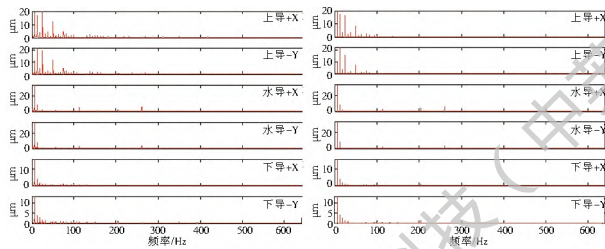


图6 机组压水调相运行与稳定抽水工况下振动频谱

Fig. 6 Unit runout waveforms in frequency domain under SCP and PO modes

3.1 充气压水运行数据分析

从图3和图5左侧图机组振动、摆度各测点时域波形图可见,在额定转速水泵方向调相工况运行时机组振动、摆度保持稳定,混频幅值保持在较小的水平上。整体上看,调相工况时振动、摆度波形图较为光滑,而水泵工况由于受到高频水力激振的影响波形较为粗糙。具体而言:在图4与图6左侧图频域波形图中可以看到,在调相工况运行时,下导与水导摆度、顶盖和上机架振动频率成分单一,均为一倍转频分量;定子基座主频为一倍转频分量,且包含两倍和三倍的转频分量(谐波);下机架主频也为一倍转频分量,其中垂直方向含有较强的75 Hz频率成分,该频率成分为机组额定转速下由推力瓦片数所确定的频率成分,即:6.25(转频)×12(推力瓦数)。考虑到水力激振频率主要为叶片过流频率和分数阶频率成分^[17],而调相工况运行时各测点频谱图中并未出现这些频率成分,因此在调相工况运行时,机组振动基本不受到水力因素的影响。由于设计不周导致安装位置受到限制,上导位置处摆度实际测量平面为滑转子绝缘环,而该绝缘环非精细加工面且存在一定程度的形变,因此导致上导摆度信号中存在大量的谐波成分。

3.2 额定抽水工况运行分析

根据文献[9],无叶区产生动静干涉时需满足:

$$m \times Z_s + v = k \times Z_r$$

式中: Z_s 为导叶数; Z_r 为转轮叶片数; k 为叶片通过

频率下的谐波阶数; m 为导叶通过频率下的谐波阶数; v 为带符号的节径,整数。

从图3与图5右图可见机组在满负荷抽水工况下,机组振动和摆度时域波形图稳定。在图4右侧频谱图中可以看到顶盖水平和垂直振动主频为112.5 Hz,该频率成分为两倍叶片过流频率(转轮叶片数×转频×2),属于典型的动静干涉频率。在其它测点中也出现了两倍叶片干扰频率,但该频率成分在顶盖部位测点中的幅值较其它测点强,这主要是因为该频率成分产生于无叶区,而顶盖在所有测点中离无叶区最近。

3.3 对比分析

调相工况与抽水工况时机组振动与摆度混频幅值与转频幅值分别见图7和图8所示,图中给出了稳定水泵方向调相工况至稳定抽水工况整个过程的混频幅值与转频幅值变化趋势。从图中可以看到,抽水工况下水力干扰对各个测点的混频幅值与转频幅值影响不同。水泵工况时顶盖振动混频幅值较调相工况时有增大趋势,说明顶盖振动易受水力因素的影响;而顶盖振动的转频分量变化不大,这说明机械因素引发的振动成分在两种工况下的影响未发生改变。两种工况下,其它测点的混频幅值与转频幅值趋势均未发生明显的改变,对比混频与转频幅值的波动情况可以看出,水泵工况时幅值的波动更小,更加平稳。部分测点(如上导、下导摆度)抽水工况下的混频幅值较压水调相工况小,说明抽水工况下水力因素并不必然引起机组振动混频幅值的增大;在转频幅值方面,对部分测点而言,抽水工况的转频幅值较压水调相工况小,说明在抽水工况下受水力因素的影响,机组机械方面振动成分有减小的趋势整个机组机械振动更加趋于稳定。产生这种情况的原因可能是:良好的水力设计情况下,抽水工况时由于水流通过转轮一方面使得整个旋转部件的附加质量增加,另一方面轴向水推力下压的作用下也使得机组更加稳定。

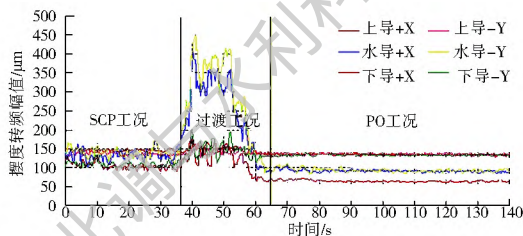
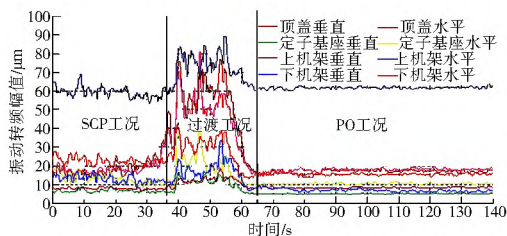


图7 调相工况至抽水工况机组振动、摆度混频幅值趋势

Fig. 7 Mixed frequency amplitude trend of unit vibration and run out from SCP to PO modes

对比图4和图6中压水调相工况与抽水工况运行时的各个测点的频谱及混频与转频幅值可以发现

如下结果。

(1) 水泵工况运行时顶盖水平振动中新出现了

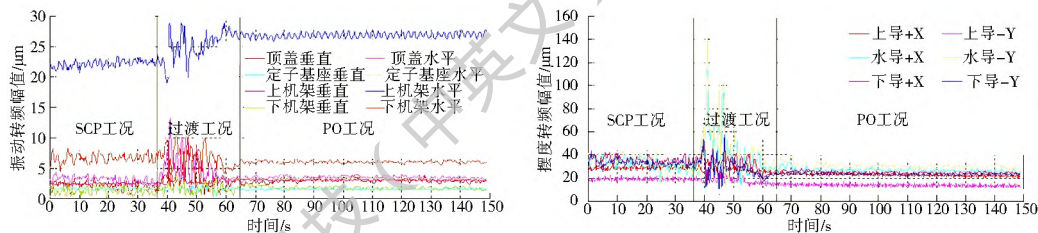


图 8 调相工况至抽水工况时振动、摆度转频幅值趋势

Fig. 8 Rotating frequency amplitude trend of unit vibration and run out from SCP to PO modes

幅值较大的一倍叶片过流频率 56.25 Hz、两倍叶片过流频率 112.5 Hz(动静干涉频率)和 204.72 Hz 频率成分,其中一倍与两倍叶片过流频率为典型的水力激振频率,而对比顶盖的固有频率计算报告^[18]未发现 204.72 Hz 频率成分,对比电站地下厂房结构动力分析报告^[19]发现,当围岩变模为 10 GPa 和 20 GPa 时机墩的第 19 阶自振频率为 206.42 Hz 和 206.83 Hz,考虑到计算误差且原报告基于厂房中间 2、3 号机组进行计算,而实际 1 号机组边界条件与计算略有差异,因此该频率成分最大可能为厂房自激振动传递导致的机组振动;顶盖垂直振动中除出现幅值较大的一倍叶片过流频率 56.25 Hz 和两倍叶片过流频率 112.5 Hz 外,还出现了 261 Hz 频率成分,经对比顶盖刚强度和厂房动力分析报告,两个报告均考虑到高阶的振动频率成分的激振能量较小未对较高的固有频率进行计算,而激发这一频率的来源极有可能来自顶盖自激振动或厂房自激振动所传递。从顶盖垂直振动测点频谱上看 261 Hz 频率成分为第四阶主频成分,因此在以后的蓄能电站厂房及机组结构部件的动力分析报告中应对高频分量予以充分考量。

(2) 两种工况下,上机架水平与垂直振动频率成分未发生明显改变,主要频率成分单一,均为转频分量。混频幅值与转频幅值方面,水泵工况较调相工况略大,说明水泵工况上机架承受载荷较调相工况大,两种工况下考虑到水泵工况时机组负荷具有明显改变,因此上机架振动变化主要由负荷变化所产生。

(3) 两种工况下,定子基座水平振动主要频率成分单一,以转频分量为主。混频幅值与转频幅值方面,水泵工况较调相工况小,这与摆度的变化趋势基本一致。考虑到抽水蓄能机组转轮与常规水电机组转轮的差异,蓄能机组转轮设计均采用水泵方向设计、水轮机方向校核的方式进行,因此水泵工况下的转轮在最优工况点工作,机组的稳定性较佳。而在 SCP 工况时,来自上、下迷宫环的冷却水和活动导叶端面间隙的渗漏水在活动导叶与转轮之间形成水环,当水环厚度较大时将造成转轮室内压力脉动增

大,造成机组的振动、摆度等稳定性较抽水工况偏大。定子基座垂直振动中出现了较为明显的两倍叶片过流频率(动静干涉频率),考虑到这一频率成分产生于无叶区,这表明产生于动静干涉现象垂直向上传递至定子基座。而水平振动未发现明显的叶片干扰频率,因此动静干涉在对定子基座的影响上主要表现在垂直方向,即垂直向上传播,在水平方向上传影响较小。

(4) 两种工况下,下机架水平振动频率成分未发生明显改变,主要频率成分单一,均为转频分量,混频幅值与转频幅值基本相当;下机架垂直振动中的 75 Hz 频率成分水泵工况下较调相工况下明显增强,造成这一现象振动原因可以解释为:水泵稳定泵水工况时推力轴承承受的载荷较调相工况明显增大,同时考虑到推力瓦数目为 12,因此在转速相同的情况下,水泵工况下推力瓦通过频率 75 Hz 引起的振动较调相工况大(这一频率类似与无叶区的一倍叶片过流频率)。水泵工况下运行时,受动静干涉影响,下机架垂直振动中出现了较为明显的两倍叶片过流频率,而这一频率成分为轴系或厂房振动所传递^[20-21],这进一步表明了动静干涉现象的传播主要是垂直方向传播,水平方向影响较小。

(5) 两种工况下,调相运行摆度较抽水工况的混频与转频幅值均大,与定子基座水平振动趋势相同,这表明水力干扰并不必然引起机组摆度的增大,对于测试机组而言,水泵工况的负荷增加使机组运行更加平稳,且水泵工况时转轮在最优工作点运行,无水环所产生的附加影响;频率成分上,水导摆度出现了叶片干扰成分,而在上导和下导摆度上则不明显,因此位于顶盖位置处的水导更容易受机组水力因素干扰。

4 总结

针对仙居电站首台机组的调试过程中调相压水与稳态抽水两种不同工况下的机组振动与摆度数据进行对比分析,获得了水力因素影响下的机组振动与摆度时域与频域信号特征差异,分析结果表明:承

受垂直载荷部件振动幅值水泵工况较调相工况略有增大趋势;顶盖振动含有丰富的水力干扰成分,受无叶区动静干涉、叶片过流等水力激振影响最为明显,动静干涉现象影响在垂直方向较水平方向大,且在垂直方向上传播逐渐衰减;水力激振导致部分测点的频率成分发生明显变化,但并不一定引起机组振动与摆度混频幅值的增大;考虑到机组振动中含有较为明显的高频成分,而这些成分可能与厂房某些部件的固有频率接近,因此厂房与机组动力分析报告应包含可能的高阶频率成分。

参考文献(References)

- [1] 尹铎,刘碧龙,常道庆,等.张河湾蓄能电站厂房噪声与振动调查[C].2012全国环境声学学术会议论文集,2012.(YIN Yao, LIU Bi long, CHANG Daoqing, et al. An investigation for noise and vibration of Zhanghewan pumped storage station [C]. Proceedings of the 2012 national conference on environmental acoustics, 2012. (in Chinese))
- [2] Nennemann B, Parkinson E. Yixing pump turbine guide vane vibrations: problem resolution with advanced CFD analysis [C]. 25th IAHR symposium on hydraulic machinery and systems, 2010.
- [3] 李启章,于纪幸,任绍成,等.江苏宜兴抽水蓄能电站水泵水轮机导水机构的自激振动[C].第十八届中国水电设备学术讨论会论文集.2011.(LI Qi zhang, YU Ji xing, REN Shao cheng, et al. Self excited vibration of pump turbine guide vane of Jiarsu Yixing hydropower station [C]. Proceedings of 18th symposium on China hydropower equipment, 2011. (in Chinese))
- [4] 姚泽,支发林,闫宗国,等.下迷宫压力脉动对抽水蓄能机组稳定性的影响分析[J].农业机械学报,2014,45(11):134-138.(YAO Ze, ZHI Fa lin, YAN Zong guo, et al. Influence analysis of lower labyrinth pressure pulsation for stability of pumped storage unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2014, 45(11): 134-138. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.021
- [5] Ran H J, Luo X W, Zhang Y, et al. Numerical simulation of the unsteady flow in high head pump turbine and the runner improvement [C]. ASME 2008 Fluids Engineering Division Summer Meeting: 1115-1123.
- [6] 贾伟,刘晶石,庞立军等.抽水蓄能电站水泵水轮机的动静干涉与振动分析[J].振动工程学报,2014,27(4):565-571.(JIA Wei, LIU Jing shi, PANG Li jun, et al. Analysis on rotor stator interaction and vibration of pump turbine in pumped storage power station [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4): 565-571. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2014.04.012
- [7] 吴广宽,罗兴铸,赵强等.水泵水轮机内部压力脉动特性研究[J].西安理工大学学报,2015,31(3):265-272.(WU Guang kuan, LUO Xing qi, ZHAO Qiang, et al. Research on characteristics of pressure fluctuation in a pump turbine [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 265-272 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.2015.03.003
- [8] 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.(YUAN Shou qi, FANG Yu jian, YUAN Jian ping, et al. Review on vibration problems of power units in commissioned pumped storage projects in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 1-15. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20151101
- [9] Doerfler P. On the role of phase resonance in vibrations caused by blade passage in radial hydraulic turbomachines [C]. IAHR Section Hydraulic Machinery, Equipment, and Cavitation, 12th Symposium (Stirling, 1984).
- [10] Zobeiri A. Investigations of time dependent flow phenomena in a turbine and a pump turbine of Francis type: Rotor-stator interactions and processing vortex rope [D]. EPFL Thesis No. 4272, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, 2009.
- [11] 刘涛,张宇宁,杜小泽.水泵水轮机旋转失速现象综述[J].水力发电学报,2015,34(11):16-24.(LIU Tao, ZHANG Yu ning, DU Xiao ze. A review of rotating stall of pump turbines [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 16-24. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20151102
- [12] 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.(XU Wei, PAN Xue shi. Design and analysis of the water ring in hydro turbine units in Zhanghewan pumped storage power station [J]. Hydropower and New Energy, 2016, 1: 46-48. (in Chinese)) DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2016.01.012
- [13] 郑小刚,谷振富.抽水蓄能机组调相压水过程的控制[J].水电站机电技术,2009,32(4):5-10.(ZHENG Xiao gang, GU Zhen fu. Condenser dewatering control of reversible units [J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2009, 32(4): 5-10. (in Chinese)) DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2009.04.009
- [14] 刘攀,陈学力,汪泉,等.高水头混流式水轮机的动静干涉与振动问题研究[J].水力发电学报,2016,35(3):91-98.(LIU Pan, CHEN Xue li, WANG Quan, et al. Analysis of rotor stator interaction and vibration in high head Francis turbines [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(3): 91-98. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20160311
- [15] 周大庆,张懒国,张成华.抽水蓄能电站泵工况全过流系统流场数值模拟[J].四川大学学报·工程科学版,2013,45(3):63-68.(ZHOU Daqing, ZHANG Lan guo, ZHANG Cheng hua. Numerical simulation of flow field in pumped storage power station's whole flow system at pump mode [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(3): 63-68. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2013.03.026
- [16] 梁睿光,陶迎新,温占营,等.浅析蒲石河抽水蓄能电站机组泵工况造压试验[J].水电站机电技术,2015,38(3):21-24.(LIANG Rui guang, TAO Ying xin, WEN Zhan ying, et al. Pressure establishment in pump mode of Pushihe hydropower station [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2015, 38(3): 21-24. (in Chinese)) DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2015.03.006
- [17] 沈冬,褚福涛,陈思.水轮发电机组振动故障诊断与识别[J].

- 水动力学研究与进展, 2000, 15(1): 129-133. (SHEN Dong, CHU Fir tao, CHEN Si. Diagnosis and identification of vibration accident for hydrogenerator unit[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 15(1): 129-133. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2000.01.015
- [18] 哈尔滨电机厂有限责任公司. 仙居电站水轮机顶盖刚强度计算报告[R]. 2013. (Harbin Electric Machinery Co., Ltd. Head cover stress calculation report of Zhejiang Xianju pumped storage power station[R], 2013. (in Chinese))
- [19] 大连理工大学. 浙江仙居抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析报告[R]. 2014. (Dalian University of Technology. Dynamic response analysis report on underground powerhouse structure of Zhejiang Xianju pumped storage power station[R]. 2014. (in Chinese))
- [20] 职保平. 基于复杂扰动的水电机组与厂房振动传导研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (ZHI Bao ping. Study of vibration transmission path about hydropower station units and powerhouse with complex disturbance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [21] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 水利水电出版社, 2004. (MA Zhenyue, DONG Yuxin. Vibration of water turbine generator set and powerhouse and its corrective actions[M]. China Water and Power Press, 2004. (in Chinese))

(上接第 194 页)

- [19] Jordi Guimer, Oriol Marf, Lucila Candela, et al. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1995, 56(2): 121-135.
- [20] Yuan B Z, Sun J, Nishiyama S. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse[J]. Biosystem Engineering, 2004, 87(2): 237-245.
- [21] 范希峰, 侯新村, 朱毅等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 48-52. (FAN Xifeng, HOU Xincun, ZHU Yi, et al. Biomass Yield and Quality of Hybrid Pennisetum[J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(1): 48-52. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5021.2012.01.009
- [22] 刘洪禄, 吴文勇. 都市农业高效用水原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 326-333. (LIU Honglu, WU Wenrong. Principle and technology of high efficient water use in urban agriculture[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012: 326-333. (in Chinese)) ISBN: 9787508494616.
- [23] Daugovish Oleg, Bolda Mark, Kaur, Sukhwinder et al. Drip irrigation in california strawberry nurseries to reduce the incidence of colletotrichum acutatum in fruit production[J]. Hortscience, 2012, 47(3): 368-373.
- [24] Kumar P Suresh, Choudhary, Choudhary V K. Influence of mulching and irrigation level on water use efficiency, plant growth and quality of strawberry (Fragaria x ananassa)[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 82(2): 127-133.
- [25] Kumar Sushil, Dey P. Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water use efficiency and yield of strawberry[J]. Scientia Horticulture, 2011, 127(3): 318-324. (in English)
- [26] Daugovish Oleg, Faber Ben, Mochizuki Maren J et al. Strawberry establishment with drip or sprinkler irrigation[J]. Hortscience, 2010, 45(8): 263-264.
- [27] Coelho Marcus V S, Palma Flavio R, Cafe Filho Adalberto C. Management of strawberry anthracnose by choice of irrigation system, mulching material and host resistance[J]. International Journal of Pest Management, 2008, 54(4): 347-354.
- [28] 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 112-113. (ZHANG Zhixin. Drip irrigation planning and design principles and application[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007: 112-113. (in Chinese)) ISBN: 9787508446158.