

# 抽水蓄能电站地下厂房振因仿真分析

王学谦, 赵兰浩

( 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 利用三维有限元分析方法, 对某抽水蓄能电站主厂房两台机组进行了动力特性及动力响应仿真分析研究。根据地下厂房整体自振频率、局部构件自振频率与厂房振动主频的错开度分析结果, 厂房的剧烈振动是由局部支撑构件在振源激励频率下发生共振引起的。通过对比现场试验振动加速度分布规律和有限元模型时间历程响应数值计算得到的振动加速度分布规律的对比分析, 发现引起厂房振动的主要水力振源为导叶后与转轮之间的压力脉动, 频率为2倍叶片过流频率(100Hz)。对该抽水蓄能电站的振因分析的研究结果为今后抽水蓄能电站设计阶段的抗振校核和运行阶段振动原因分析提供了参考。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 厂房; 振动; 振源位置; 传递路径

**中图分类号:** TV 312   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0076-06

## Simulation Analysis of the Vibration Causes of Underground Powerhouse in Pumped Storage Power Station

WANG Xueqian, ZHAO Lanhao

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The three dimensional finite element analysis method was used to simulate the dynamic characteristics and dynamic response of two units in the main powerhouse of the pumped storage power station. According to analysis results of the natural vibration frequency of the whole powerhouse structure, natural vibration frequency of the partial structures, and the staggered degree of main vibration frequency of the powerhouse, resonance does not occur for the whole structure of powerhouse, and the severe vibration of the powerhouse is caused by the resonance of the partial support components under the excitation frequency of vibration source. With the comparative analysis of vibration acceleration distribution patterns obtained from the field tests and the time history response of the finite element model, the main hydraulic vibration source stimulating the powerhouse vibration is the pressure pulsation between the rotor and the vanes. The frequency of pressure pulsation (100 Hz) is twice of the blade overcurrent frequency. The analysis of the vibration causes of the pumped storage power station can provide references for the anti-vibration check during the design stage and vibration cause analysis during the operation period of the pumped storage power station.

**Key words:** pumped storage power station; underground powerhouse; vibration; position of vibration source; transfer path

相对于普通水电站, 抽水蓄能电站地下厂房具有孔洞多、空间结构复杂、整体和局部刚度差别大、围岩与厂房之间相互作用机理复杂等特点, 因此机组及厂房振动问题, 一直以来都是水电站建设和运行过程中非常关注的课题<sup>[1]</sup>, 围绕水电站厂房的振动问题也有不少研究成果。马震岳<sup>[2]</sup>等曾对蒲石河、宜兴、十三陵等抽水蓄能电站进行了整体振动预测及振动分析; 欧阳金惠等也对三峡等大型水电站厂房进行了振动试验结果和振源分析; 黄源芳<sup>[3]</sup>等则针对国内外原型水轮机运行过程中的水力、机械、电磁等问题进行了大量的

调研和分析工作。

过去, 研究人员对厂房振动的研究主要集中在普通水电站厂房, 近年来出现了一些针对抽水蓄能电站厂房振动的研究<sup>[4]</sup>, 取得了一些成果。但是已有研究主要针对的是电站厂房的设计阶段, 使用的分析方法也是根据规范采用的整体自振特性计算、共振复核和基于转频的动力时程分析, 因此研究目的是为了符合设计要求。而在抽水蓄能电站建成后运行的过程中, 或多或少地出现了一些振动问题, 其中尤以十三陵和广蓄一期问题较为突出。由于抽水蓄能电站一般布

收稿日期: 2012-12-14   修回日期: 2013-05-02   网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079044); 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2012AA112507)

作者简介: 王学谦(1987-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事水工结构动力方面的研究。E-mail: xueqian0108@126.com

通讯作者: 赵兰浩(1980-), 男, 山东临沂人, 教授, 博士, 主要从事流固耦合、电站厂房静动力分析研究。E-mail: zhlhhu@163.com

置为地下结构,产生振动问题后减振措施的实施较为困难且代价较高,所以必须准确地确定振源位置和振动传递路径,为后期抗振减振措施提供必要的参考依据。

本文结合某抽水蓄能电站在运行过程中厂房出现的高频振动问题,对引起该厂房振动的水力振源位置、振动的传递方式及产生激振频率的原因进行深入的分析,以期对抽水蓄能电站设计和振动特性分析提供一些合理建议。

## 1 工程概述

某抽水蓄能电站,电站安装4台单机250MW的机组,额定水头305m,额定流量94.1 m<sup>3</sup>/s,额定转速333.3 r/min,地下厂房位于水道系统尾部的微风化变质安山岩内,围岩以II类为主。地下厂房洞室内自左至右依次为副厂房、主机间、安装场,主机间发电机层以上为桥机工作空间,桥机安装在牛腿上,牛腿和围岩锚固,牛腿受力向围岩进行传递。发电机层以下结构为现浇混凝土整体结构,包括机组周围混凝土结构、四周边墙结构和结构柱与楼板结构。蜗壳四周外包混凝土三面临空,在下游侧与岩石和边墙联成一体,四周边墙结构为混凝土连续墙结构,紧贴岩石面浇筑,并用锚杆连接。2号机组段与3号机组段之间、主机间与安装场和副厂房之间均设有结构缝。电站机组采用悬式发电机和可逆式水轮机,拆卸方式为上拆,蜗壳采用充水保压的方式浇筑,金属蜗壳和外围混凝土联合受力。

目前,该抽水蓄能电站在运行过程中出现了强烈的振动,为此对机组和厂房进行了一系列的现场试验,包括变负荷试验、变转速试验、变励磁试验、空载、抽水等。经过对试验结果的分析,认为:(1)该抽水蓄能电站厂房振动主频为100 Hz明显,杂波含量很低;(2)已检测到的最大加速响应发生在发电机层楼板上,大小为2.5 g;(3)振源为水力因素引起的厂房振动。

## 2 研究思路与方法

### 2.1 研究思路

本文利用三维有限元分析方法,对某抽水蓄能电站主厂房两台机组进行了动力特性及动力响应仿真分析研究。思路如下:首先运用自振特性分析方法对整体结构进行了自振特性分析和共振复核,针对薄弱构件运用“无质量”分析方法<sup>[5]</sup>将除分析外的构件作为无质量处理,仅提供刚度进行自振特性计算和共振复核;进而采用谐响应分析方法,由位移幅值进一步确定共振构件共振频率范围;同时将外荷载假定为简谐荷载,运用时间历程分析方法<sup>[6]</sup>分析结构在高频荷载下的振动响应分布规律;最后结合水轮机参数和现场试验结果,进行动力特性和现场测试的综合分析。

### 2.2 基本理论

#### 2.2.1 自振特性分析方法

根据最小势能原理可以导出结构动力学基本运动方程为:

$$\mathbf{K}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{a}}(t) + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{a}}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{M}$ 分别为结构的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵; $\mathbf{a}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{a}}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{a}}(t)$ 分别为位移向量、速度向量和加速度向

量; $\mathbf{Q}(t)$ 为结构的外荷载矩阵。

一般结构系统的阻尼对自振频率和振型的影响很小,因此,可略去阻尼影响来确定系统的自由振动频率和振型,即:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{a}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{a}(t) = 0 \quad (2)$$

其解可以假设为以下形式:

$$\mathbf{a} = \Phi \sin \omega(t - t_0) \quad (3)$$

其中: $\Phi$ 是 $n$ 阶向量, $\omega$ 是向量 $\Phi$ 的振动频率, $t$ 是时间变量, $t_0$ 是由初始条件确定的时间常数。

将式(3)代入式(2),就可以得到一个广义特征值问题,即:

$$\mathbf{K}\Phi - \omega^2 \mathbf{M}\Phi = 0 \quad (4)$$

对以上方程采用以反幂法为基础的直接虚频法进行求解,得到 $n$ 个特征解: $(\omega_1^2, \Phi_1)$ ,  $(\omega_2^2, \Phi_2)$ , ...,  $(\omega_n^2, \Phi_n)$ 其中特征值 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 代表系统的 $n$ 个固有频率;特征向量 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 代表系统的 $n$ 个固有振型。

#### 2.2.2 谐响应分析方法

当式(1)中的 $\mathbf{Q}(t)$ 为简谐激振荷载时,根据微分方程理论,可求得式(1)非其次方程的解包含两部分内容:自由振动部分和稳态响应部分,其中自由振动部分由于阻尼的存在迅速的衰减消失,而稳态振动则是以激振频率持续振动。故在进行谐响应分析时式(1)中激振力 $\mathbf{Q}(t)$ 和方程的解 $\mathbf{a}(t)$ 可以表达为:

$$\mathbf{Q}(t) = (\mathbf{Q}_{\max} e^{i\Psi}) e^{i\omega t} = (\mathbf{Q}_1 + i\mathbf{Q}_2) e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(t) = (\mathbf{a}_{\max} e^{i\varphi}) e^{i\omega t} = (\mathbf{a}_1 + i\mathbf{a}_2) e^{i\omega t} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Q}_{\max}$ 、 $\mathbf{a}_{\max}$ 分别为激振力和位移幅值; $\Psi$ 为激振力相位角; $\varphi$ 为位移相位角; $\mathbf{Q}_1$ 、 $\mathbf{Q}_2$ 分别为激振力实部和虚部; $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 分别为位移实部和虚部。

将式(5)、(6)代入式(1),可得谐响应分析的运动方程为:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})(\mathbf{a}_1 + i\mathbf{a}_2) = (\mathbf{Q}_1 + i\mathbf{Q}_2) \quad (7)$$

通过对模型的原始方程直接积分进行求解,无需提取结构的特征频率,较基于模态的分析方法更为精确。

### 2.3 仿真计算模型

某抽水蓄能电站主厂房4台机组结构形式相同,采用两机一组的结构形式,选取厂房的1号、2号机组段进行有限元计算。计算模型范围取为:顺河向,厂上0+014.200 m至厂下0+020.000 m;横河向,厂左0+016.00 m至厂右0+033.20 m。模型高度从尾水管层402.70 m高程至发电机层430.70 m高程。计算模型模拟了集水井、尾水管外围混凝土、座环、蜗壳外围混凝土、机墩、风罩、各层楼板、厂房边墙和结构柱等结构。由于某抽蓄电站在运行过程中出现了强烈的振动情况,且大都主要表现在楼板和各楼层的结构柱,对于一些并不会对楼板、结构柱等振动强烈部位产生较大影响的廊道和机墩进人孔进行了适当的简化,所有混凝土结构及其它开口均按实际体型尺寸进行模拟,厂房结构有限元网格见图1。

计算模型的整体坐标系:垂直向上为 $Z$ 轴正方向、垂直水流为 $X$ 轴方向,正方向指向左侧;顺河向为 $Y$ 轴方向,正方向指向上游。厂房结构整体计算模型的结点数75 169,单元数为70 752。

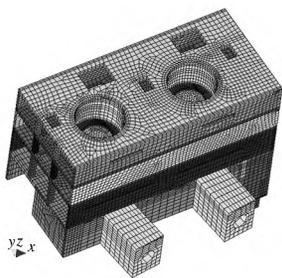


图 1 1 号、2 号机组段厂房整体有限元模型网格  
Fig. 1 The finite element model grids of the No. 1 and No. 2 units of the powerhouse

### 3 计算参数及实测压力脉动特征

#### 3.1 计算参数

根据地址勘测资料, 岩石、混凝土、座环等相关力学参数见表 1, 其中岩石的单位弹性抗力系数取为  $15 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$ 。

表 1 材料计算参数

Table 1 The material parameters

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $r/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$
岩石	35	0.2	30
混凝土	28	0.167	25
钢材	210	0.28	78.5

#### 3.2 机组参数及实测压力脉动特征频率

某抽水蓄能电站的水泵水轮机的额定转速为 333.3 r/min, 最大飞逸转速为 535.0 r/min, 固定导叶及活动导叶均 20 个, 转轮叶片 9 个。

根据所提供的现场测试资料分析认为, 在单机运行过程

表 3 厂房整体结构自振频率

Table 3 Natural frequency of the whole structure of powerhouse

阶次	边界				阶次	边界			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	2.959	16.257	18.068	25.406	11	32.358	36.707	38.078	44.694
2	15.181	24.172	24.640	28.475	12	32.622	37.929	39.012	45.200
3	16.411	26.014	26.718	31.690	13	33.240	38.605	39.659	46.475
4	23.394	28.853	29.583	34.044	14	34.483	40.207	40.916	47.281
5	24.770	29.432	30.231	36.024	15	34.748	41.336	42.372	48.544
6	25.166	32.221	32.980	38.236	16	35.114	41.861	43.111	49.010
7	27.131	33.638	34.686	40.073	17	36.117	42.947	43.956	49.207
8	27.574	35.050	35.355	40.679	18	36.400	43.815	44.597	49.357
9	29.269	35.942	37.310	41.557	19	36.928	44.399	45.729	50.532
10	30.170	36.316	37.492	42.261	20	37.150	45.743	46.650	51.017

由表 3 可知, 上下游边界的约束条件对主厂房自振频率的影响较大, 对厂房整体结构上下游向和横河向约束越严格, 自振频率越大。若不考虑整体厂房的振动, 发电机层楼板的起振频率均为 24~25 Hz 之间, 可见上下游边界约束的严格对厂房局部构件自振频率的影响较小。

根据厂房实测振动频率特性进行共振复核, 依据 20%~30% 的错开度评价标准<sup>[7]</sup>, 厂房的实测振动主频和四种边界条件下的整体自振频率错开度均大于 30%, 则厂房整体结构并未在 100 Hz 时发生共振, 100 Hz 的振动频率应为迫振频率。

中, 随着负荷的增加振动逐渐增大, 因此本文选择试验单机满负荷为 250 MW 发电工况下的测试数据作为动力响应计算的动荷载输入依据, 试验结果见表 2。

表 2 压力脉动特征频率

Table 2 Characteristic frequency of pressure fluctuation

测点位置	主频 / Hz	主频幅值 / kPa	测点位置	主频 / Hz	主频幅值 / kPa
蜗壳进口	7.988	20.35	锥管进口	2.08	12.69
活动导叶出口	49.995	457.74	肘管进口	2.78	13.04
无叶区	99.99	318.27	肘管中部	4.17	18.00
转轮出口	99.99	158.42	肘管出口	2.08	12.53

### 4 动力特性分析

#### 4.1 厂房整体自振特性

根据已经产生振动的实际情况, 充分分析厂房振动整体振动的可能性, 本文根据对三峡、岩滩、红石等水电站所做的分析手段, 选取四种边界条件进行自振特性的分析: (1) 上下自由; (2) 上下游全部连杆约束; (3) 水轮机层以下固定约束, 以上弹性连杆约束; (4) 上下游固定约束。

前 20 阶自振频率的计算结果为: 整体结构在边界 1 的约束作用下前 4 阶振型主要为上下游方向的振动, 从第 5 阶开始表现为结构上部的楼板和结构柱的振动。整体结构在边界 2、3 的约束作用下除第 1 阶表现为厂房上部的横河向振动外, 其余振型均表现为厂房上部楼板和结构柱的振动。整体结构在边界 4 的约束作用下均表现为上部楼板带动结构柱等薄弱构件的振动。自振频率见表 3。

#### 4.2 厂房局部构件自振特性

理论上, 模拟一定范围的围岩更为科学和合理, 但从实用的角度分析, 将围岩处理为弹性支承边界更为方便和直观<sup>[1]</sup>。本文采用能够反应围岩弹性和抗力的弹性连杆模拟围岩对结构的约束作用。

为了进一步分析厂房整体结构的迫振原因, 试图对厂房的局部构件进行自振特性分析和共振复核, 为此, 选取整体结构中的结构柱和楼板等薄弱构件进行自振特性分析。由文献[8]可知, 抽水蓄能电站局部构件对边界条件较为不敏

感,改变围岩对结构的约束,局部构件的自振频率变化较小,所以本文选取第三种边界条件进行计算。局部构件的自振频率和 100 Hz 主频的错开度见图 2。

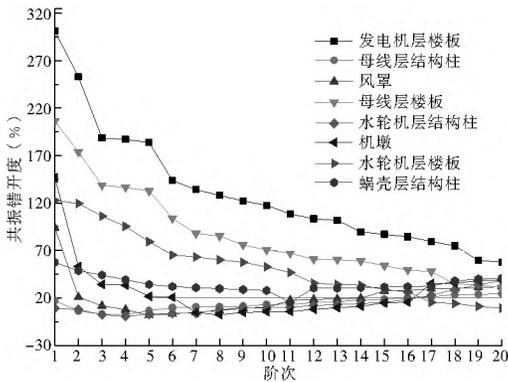


图 2 厂房局部构件共振错开度比较

Fig. 2 Comparison of the resonance staggered degree of partial structure of powerhouse

从图 2 可以看出,在共振复核中选择 20% 作为共振发生与否的界限时,局部构件水轮机层结构柱、母线层结构柱、风罩、机墩与振动主频均存在共振阶次。其中水轮机层结构柱的共振阶次从 1~ 16 阶,最小共振错开度为 0.5%;母线层结构柱的共振阶次从 1~ 15 阶,最小共振错开度为 2.38%;风罩的共振阶次从 3~ 14 阶,最小共振错开度为 1.72%;机墩的共振阶次从 7~ 16 阶,最小共振错开度 2.26%。可见,在厂房的整体结构虽未发生共振,但存在局部构件共振环节,使得振动在此环节上产生振动放大作用。

## 5 厂房振动响应分析

为了研究厂房结构的振动原因,本文采用谱响应和时间历程分析方法计算厂房结构在水力脉动压力作用下的振动响应。

### 5.1 谱响应分析

假设水轮机流道内的脉动压力沿流道壁面同相位分布,可能与实际情况不符,但对厂房的振动影响并不十分显著,关键是振动的频率和幅值<sup>[9]</sup>,根据表 3 现场实测试验数据,选取蜗壳进口处的幅值作为频率响应计算的幅值,由于厂房中各局部构件的自振频率相差较大,故取计算频率范围为 1~ 150 Hz,作为分布面荷载施加到整个蜗壳内壁上。水轮机层结构柱、母线层结构柱、机墩和风罩的振动反应见图 3、图 4。

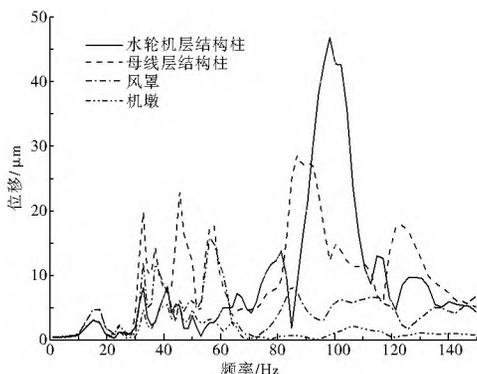


图 3 局部构件 X 向简谐振动反应

Fig. 3 Dynamic response in the X direction of partial structure

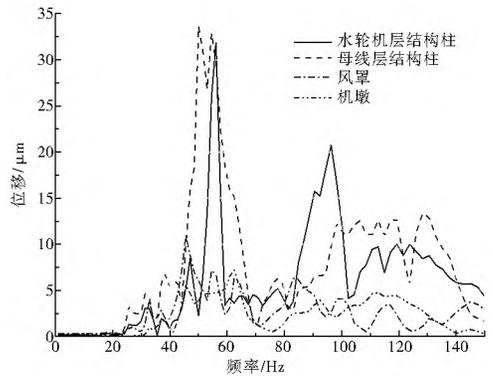


图 4 局部构件 Y 向振动反应

Fig. 4 Dynamic response in the Y direction of partial structure

从图 3、图 4 可以看出,局部构件响应值较大频率范围大致分为两个区间,其中 X 向振动反应较大值集中在 80~ 120 Hz 范围内,Y 向振动反应较大值集中在 40~ 70 Hz 范围内。可见 100 Hz 的振动主频引起了 X 向较大的振动响应值,而同频率下在 Y 向的振动响应值稍小。比较各局部构件在 100 Hz 频率激励作用下的振动响应值,可以看出,水轮机层结构柱和母线层结构柱的响应值最为突出,振动放大作用明显。这一结论基本与自振特性的计算结果相吻合,进一步说明上述四种局部构件在 100 Hz 的频率作用下存在共振环节。

### 5.2 动力时程响应分析

水轮机发电机组的周期性转动所引起的动荷载为周期性荷载,在这种周期性激励作用下的强迫振动,包含过渡过程和稳态响应两部分<sup>[10]</sup>。由于厂房结构中阻尼的存在,过渡过程是迅速衰减的瞬态振动,在厂房运行过程中所测试得到的厂房振动主频即为水力脉动压力的主频。本文根据提供的现场测试数据表 1,将所测到的与 100 Hz 接近的频率和幅值作为简谐荷载的频率和幅值输入到结构的响应部位进行动力时程分析,将阻尼矩阵考虑为瑞利阻尼,采用基于广义 Newmark-β 法的数值离散格式进行求解<sup>[11]</sup>。为了进一步分析蜗壳内水力脉动对厂房结构的影响,假设蜗壳内水力脉动主频同样为 100 Hz。以发电机层楼板为例,现场试验结果如图 5,计算结果见图 6~ 图 8。

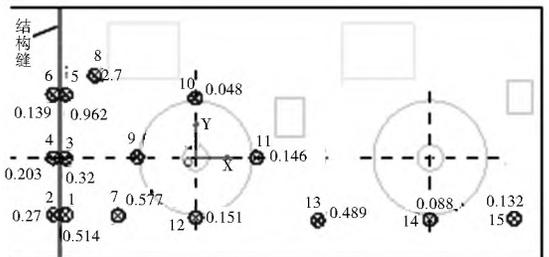


图 5 发电机层楼板现场试验测点 Z 向加速度分布规律  
Fig. 5 Distribution of vibration acceleration in the Z direction of the field test points at the generator floor

由于荷载为单独施加,通过分析动力响应幅值来确定振源位置已没有太大意义,更应该关注的是动力响应的分布规律。对比分析图 5~ 图 8,从发电机层楼板 Z 向的振动反应分布规律可以得出,发电层楼板在无叶区压力脉动和活动导叶出口压力脉动的激励下 Z 向振动加速度分布和现场测试得到的 Z 向振动加速度分布相同,均表现为:(1)较大振动加速度均出现在结构缝附近位置。(2)距离风罩较近位置振动

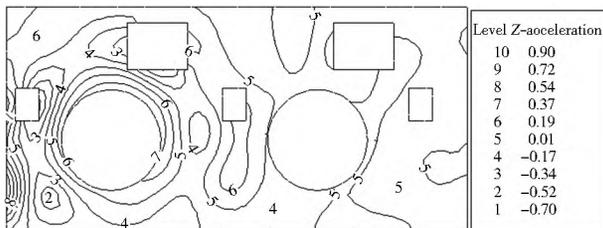


图 6 无叶区压力脉动作用下发电机层楼板 Z 向振动加速度分布

Fig. 6 Distribution of vibration acceleration in the Z direction of the generator floor under the pressure fluctuation of vaneless region

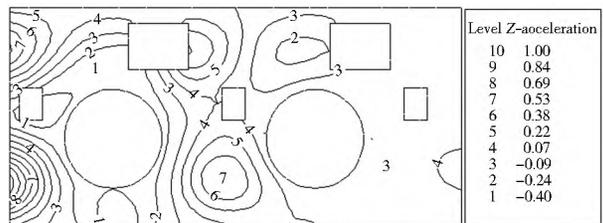


图 7 活动导叶出口脉动压力作用下发电机层楼板 Z 向加速度分布

Fig. 7 Distribution of vibration acceleration in the Z direction of the generator floor under the pressure fluctuation behind guide vanes

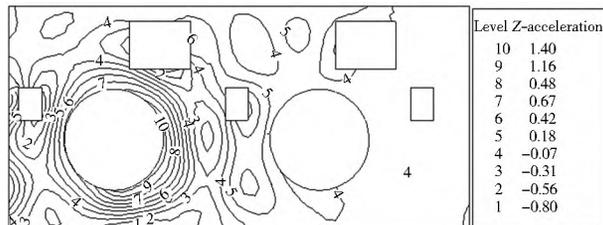


图 8 假设蜗壳内脉动压力作用下的发电机层楼板 Z 向加速度分布

Fig. 8 Distribution of vibration acceleration in the Z direction of the generator floor under the pressure fluctuation in the hypothetical volute

加速度并不大。(3) 在距离激励机组较远位置的振动响应较小。图 8 中当具有 100 Hz 的脉动压力作用在蜗壳内壁上时, 发电机层楼板 Z 向振动较大部位分布在风罩周围, 可见机墩及风罩对振动的传递起主要作用。所以引起厂房振动的振源位置并不在蜗壳内, 而应该在活动导叶出口至转轮间的流道内。

通过提供的机组参数对可能产生 100 Hz 的水力脉动力进行分析<sup>[2]</sup>可知, 水轮发电机组的转频为 5.555 Hz, 机组甩负荷达到飞逸转速时, 对应的频率为 8.92 Hz, 机组甩负荷为电站运行中的过渡过程, 可以不作为振源频率产生的主要方面。而额定工况下叶片的过流频率为 49.995 Hz, 其倍频即为 99.99 Hz, 与 100 Hz 极为接近, 导叶出口脱流引起的脉动力频率为 111.1 Hz, 也与 100 Hz 接近。以上理论分析和现场试验结果极为吻合, 激振源极可能为蜗壳尾舌和转轮叶片间水流的相互干涉, 频率为叶片过流频率的倍频<sup>[13]</sup>。

综合现场测试结果、厂房的振动响应分析结果、动力特性分析结果和水力脉动频率理论分析结果得出, 该抽水蓄能电站厂房的振动起源为蜗壳尾舌和转轮叶片间的流道内的水力干涉, 产生了能量较大的 100 Hz 水力脉动, 主要通过水轮机层结构柱和母线层结构柱对振动进行进一步的放大作

用, 将较大的振动传递给楼板和其他支撑结构, 使得厂房整体结构产生迫振。

## 6 结语

抽水蓄能电站的厂房结构较为复杂, 单纯的通过整体自振特性分析和基于转频选取一定水头高度作为幅值的动力响应分析来判断水电站厂房在未来运行过程中可能出现的振动问题是不够的, 应对水电站实际情况增加叶片过流频率倍数工况进行共振复核和动力响应计算。当振动问题出现时, 单纯的依靠经验解决厂房的振动问题较为困难, 必须运用现场试验和数值模拟两种手段进行分析。对比仿真分析结果和现场监测结果时, 更应该注重动力响应的分布规律。

本文通过对某抽水蓄能电站的振动研究成果表明, 由于蜗壳尾舌和转轮叶片间水流的相互干涉作用使得两倍的叶片通过频率成为了主要的激振源, 频率为 100 Hz, 结果与现场测试数据吻合。水电厂厂房在此激振源的作用下虽未发生结构的整体振动, 但是水轮机层结构柱和发电层结构柱等局部构件处发生了局部共振, 同时对振动的传递和放大提供了路径, 从而在发电层楼板远离机墩、风罩等跨度较大部位测到较大的振动加速度。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈婧, 马震岳, 威海峰, 等. 宜兴抽水蓄能电站地下厂房结构振动反应分析[J]. 水利发电学报. 2009, 28(5): 91, 195-199. (CHEN Jing, MA Zhenyue, QI Haifeng, et al. Research on Dynamic Response of Powerhouse Structure of Yixing Pumped storage Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5), 195-199. 91. (in Chinese))
- [2] 马震岳, 董毓新. 水电站机组与厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (MA Zhenyue, DONG Yuxin. Vibration and Its Corrective Actions of Water Turbine Generator Set and Power House[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 黄源芳, 刘光宁, 樊世英. 原型水轮机运行研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. (HUANG Yuanfang, LIU Guangning, FAN Shiyong. Research on Prototype Hydro-Turbine Operation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 文洪, 张春生, 刘郁子, 等. 天荒坪电站地下厂房结构动静力分析及设计[J]. 水力发电, 1998, (8): 28-31. 41. (WEN Hong, ZHANG Chunsheng, LIU Yuzi, et al. Analysis and Design of Dynamic and Static Forces of Underground Power House Structure of Tianhuangping Pumped storage Power Station[J]. Water Power, 1998, (8): 28-31. 41. (in Chinese))
- [5] 孙万泉. 水电站厂房结构振动分析及动态识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2004. (SUN Wanquan. Research on Structure Vibration and Identification of Hydropower House[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [6] 张宏战, 相昆山, 马震岳. 机组振动荷载作用下大型水电站厂房振动反应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(5): 41-44. (ZHANG Hongzhan, XIANG Kurshan, MA Zhenyue. Analysis for Vibration Responses of Large scale Hydropower House under Vibration Loads of Hydroelectric Units[J]. Journal of

- Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(5): 41-44. (in Chinese)
- [7] SL 266-2001, 水电站厂房设计标准[S]. (SL 266-2001, Design Code for Hydropower House[S]. (in Chinese))
- [8] 李慧君. 水电站地下厂房内源振动计算模型和边界条件研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004. (LI Huijun. Study on the Dynamic Numerical Model and Boundary of Underground Hydropower House under the Action of Internal Dynamic Loadings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [9] 陈婧, 马震岳, 刘志明, 等. 水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J]. 水力发电, 2004, (5): 24-27. (CHEN Jing, MA Zhenyue, LIU Zhiming, et al. Vibration Analysis of Power House due to the Pressure Pulsation of Hydropower Turbine [J]. Water Power, 2004, (5): 24-27. (in Chinese))
- [10] 马震岳, 董毓新. 水轮发电机组动力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003. (MA Zhenyue, DONG Yuxin. Dynamics of Water Turbine Generator Set [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [11] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (ZHU Bofang. The Finite Element Method Theory and Applications [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 李慧君. 水电站地下厂房内源振动计算模型和边界条件的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (LI Huijun. Study on the Dynamic Numerical Model and Boundary of Underground Hydropower House under the Action of Internal Dynamic Loading [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [13] Netsch H, Giacometti A. Axial Flow-induced Vibrations in Large Highhead Machines [J]. Water Power and Dam Construction, 1986, (1): 37-39.

(上接第 75 页)

- [7] 张有天, 刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 104-111. (ZHANG You Tian, LIU Zhong. Saturated/Unsaturated, Unsteady Seepage Analysis of Rock Fractured Networks Due to the Percolation of Rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 104-111. (in Chinese))
- [8] 秦俊虹. 基于块体系统理论的非连续性岩体边坡稳定性和评价[D]. 南京: 河海大学, 2009. (QIN Junhong. Research and Applications of Discontinuous Deformation Analysis in Slope Stability Evaluation [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [9] 李晓莲, 余云燕, 崔建林. 基于 FLAC3D 强度折减法的边坡稳定性研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2012, 32(2): F2. (LI Xiaolian, YU Yunyan, CUI Jianlin. Stability Study of Slope Based on Shear Strength Reduction Method with FLAC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), 2012, 32(2): F2. (in Chinese))
- [10] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577-596.
- [11] 李宗伟, 尹大娟. 基于强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 长春工程学院学报, 2011, 12(3): 32. (LI Zongwei, YIN Dajuan. The Slope Stability Analysis Based on Strength Reduction [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Social Science Edition), 2011, 12(3): 32. (in Chinese))
- [12] 王小波, 徐文杰, 张丙印, 等. DDA 强度折减法及其在东苗家滑坡中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(6): 814-815. (WANG Xiaobo, XU Wenjie, ZHANG Bingyin, et al. Strength Reduction of DDA and Its Application in Dongmiaojia Landslide [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(6): 814-815. (in Chinese))
- [13] 郭爱清, 丁秀丽, 卢波, 等. DDA 方法块体稳定性验证及其在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 665-666. (GUO Aiqing, DING Xiuli, LU Bo, et al. Validation for Rock Block Stability and Its Application to Rock Slope Stability Evaluation Using DDA Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 665-666. (in Chinese))
- [14] 沈振中, 大西有三. 基于非连续变形分析的水库边坡稳定分析方法[J]. 水利学报, 2004(3): 117-122. (SHEN Zhenzhong, Ohnishi Yuzo. Stability Analysis Method for Reservoir Rock Slope Based on Discontinuous Deformation Analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 117-122. (in Chinese))
- [15] 沈振中, 郑磊. 基于数值流形方法的水库岩体边坡稳定分析[J]. 水电能源科学, 2006, 24(1): 32-33, 96. (SHEN Zhenzhong, ZHENG Lei. Stability Analysis for Reservoir Rock Slope Based on Numerical Manifold Method [J]. Water Resources and Power, 2006, 24(1): 32-33, 96. (in Chinese))