

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0115

曹玺, 刘启明, 占浩, 等. 仙居抽水蓄能电站地下厂房振动数值模拟分析与安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 195-201. CAO X, LIU Q M, ZHAN H, et al. Numerical analysis and safety evaluation of the underground powerhouse of the Xianju pumped storage Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 195-201. (in Chinese)

# 仙居抽水蓄能电站地下厂房振动 数值模拟分析与安全评价

曹玺<sup>1</sup>, 刘启明<sup>1</sup>, 占浩<sup>1</sup>, 马震岳<sup>2</sup>, 朱贺<sup>2</sup>

(1. 浙江仙居抽水蓄能有限公司, 浙江 仙居 317300; 2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 厂房振动问题为抽水蓄能电站设计关键, 以仙居抽水蓄能电站为实例, 对地下厂房进行共振复核和振动反应分析评价, 在总结国内外控制标准的基础上, 提出了适用该工程的振动控制标准建议值。有限元计算分析表明, 机墩结构竖向振幅稍大, 需要在结构设计中予以关注; 厂房整体结构和主要构件的共振复核满足要求, 地下厂房发生共振的可能性较小。振动最大位移、速度和加速度响应幅值均满足所拟定控制标准要求, 其中立柱结构的振动均方根加速度偏大, 但频率加权加速度幅值较小, 可满足要求。针对立柱等局部构件振动反应偏大的情况, 探讨了局部加固措施对降低振动强度的有效性, 为同类型厂房抗振动优化设计提供参考。

**关键词:** 抽水蓄能电站厂房; 数值分析; 结构振动; 抗振设计

**中图分类号:** TV7   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0195-07

## Numerical analysis and safety evaluation of the underground powerhouse of the Xianju pumped storage Project

CAO Xi<sup>1</sup>, LIU Qiming<sup>1</sup>, ZHAN Hao<sup>1</sup>, MA Zhenyue<sup>2</sup>, ZHU He<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Xianju Pumped storage Limitation Company, Xianju 317300, China;

2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The vibration problem of powerhouse is the key in designing pumped storage power plant. This paper took Xianju Pumped storage Project, one of the largest projects in China, as a case study. We conducted resonance check and vibration response evaluation of the underground powerhouse, and proposed the vibration control standard values for Xianju project. The analysis showed that attention should be paid to the vertical amplitude of machine pier in structure design as it is slightly larger than the control value. The resonance check showed that the overall structure of the powerhouse and its main components meet the code requirements, so the possibility of underground powerhouse resonance is small. The maximum vibration displacement, velocity, and acceleration all meet the requirements of the proposed vibration control standard. The vibration root mean square acceleration of the column structure is slightly large, but the frequency weighted acceleration amplitude is small, so it meets the proposed vibration control standard. In view of the situation where the vibration response of some local members such as the column is slightly large, we discussed the effectiveness of taking local reinforcement measures to reduce the intensity of vibration. This paper can provide a reference for the anti vibration optimization design of similar powerhouses.

**Key words:** pumped storage station powerhouse; numerical analysis; structure vibration; anti vibration design

收稿日期: 2017-10-08   修回日期: 2018-03-22   网络出版时间: 2018-04-24  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180423.1519.002.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(51379030)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51379030)

**作者简介:** 曹玺(1984), 男, 青海西宁人, 高级工程师, 主要从事水力发电工程建筑物设计与管理技术研究。

**通讯作者:** 马震岳(1962), 男, 河南南阳人, 教授, 主要从事水轮发电机组振动与建筑物结构分析方面研究。E-mail: dmzy@dlut.edu.cn

随着水轮发电机组容量和水头的不断提高,机组振动问题日益突出,由于涉及到水机电结构的耦联振动,问题更为复杂,虽经过长期大量的研究,其准确预测和完善解决仍较困难<sup>[1-5]</sup>。机组振动荷载传递到厂房支承结构上,会诱发厂房结构的整体或局部振动。国内外大中型水电站均有机组振动诱发结构振动,甚至导致结构破损而影响电站正常运行的实例<sup>[6,7]</sup>。抽水蓄能电站因为具有高水头、高转速、双向运转、过渡过程复杂等特点,机组振动诱发的厂房结构振动问题较常规电站更为突出,已成为厂房结构设计的关键问题之一<sup>[8]</sup>。我国最近建成运行的多座蓄能电站<sup>[9-19]</sup>,如西龙池、惠州、天荒坪、宝泉、张河湾、蒲石河等,均发生过不同程度的机组振动问题,其中也存在厂房振动现象,因此在大型蓄能电站厂房设计中,均开展振动稳定性分析评价与抗振优化设计,在设计阶段尽可能对振动加以预测和控制<sup>[20-23]</sup>。

高水头高转速可逆式机组机械、电磁和水力振动荷载的幅频特性更为复杂,诱发厂房结构振动反应特性也十分复杂<sup>[24,25]</sup>。厂房是机组重要的支承结构,故机墩必须要具有足够的支承刚度,避开共振区,控制强迫振动幅值在允许范围内;发电机层楼板是调速器和机旁盘的基础,对振动控制也有很高要求。因此,对厂房动力设计提出了更高的要求。在水电站厂房设计规范中,主要以共振和机墩振幅作为控制标准,关于振动速度、加速度、动应力和噪声等,缺少明确的规定,以往多参照其他国际或国内行业规范。在人体健康的影响评价上,主要以噪声和所处位置的加速度等级为指标进行评价<sup>[21]</sup>。电站内部布置的调速器等仪器设备对振动也十分敏感,其振动控制指标主要是振动速度。同时,厂房结构也属于建筑结构,应从振动位移和加速度等方面进行评价。当振动较大可能超标时,需要研究结构修改的抗振优化设计措施。近些年来我国由于大批抽水蓄能电站的建设,对此开展了大量的研究,主要采用三维有限元分析方法,但每个电站各有其特点,目前还缺少普遍性的机理研究和成熟的设计经验<sup>[22-23]</sup>。本文以仙居抽水蓄能电站为研究实例,参考国内外有关建筑结构、动力机械基础及人体健康的振动控制标准,从共振复核、刚度设计、强迫振动计算和抗振优化设计等角度,利用三维有限单元法,对厂房振动加以预测和控制,为厂房动力设计提供技术支撑,也为同类型工程抗振设计和安全运行提供参考。

## 1 计算模型及方法

浙江仙居抽水蓄能电站为日调节纯抽水蓄能电站,电站装机容量为 1 500 MW (4 × 375 MW)。电站枢纽主要包括上水库、输水系统、地下厂房系统、地面开关站及下水库,其中下水库为已建下岸水库等。地下厂房系统主要由主/副厂房洞、进厂交通洞、母线洞、主变洞、主变运输洞、500 kV 出线洞、通风兼安全洞及各层排水廊道等洞室群组成,另有 500 kV 开关站等地面建筑物。厂房区域的围岩为灰白、灰绿色角砾凝灰岩、凝灰岩,岩石致密坚硬,岩体呈中-厚层状结构,局部为薄层状,断层不发育,以 0 类围岩为主,断层破碎带附近为 Ⅰ 类围岩,工程地质条件较好。

主厂房宽度为 25.0 m,机组段总长度 113 m,机组中心距 26.5 m。地下厂房采用一机一缝布置形式,1 号至 4 号机组段长度分别为 32.0 m、26.5 m、26.5 m、28.0 m。地下厂房尺寸大,型式和受力复杂,振动稳定性是设计研究的最关键问题之一,必须进行振动评价、刚度复核和抗振设计。

### 1.1 有限元模型及参数取值

选取中间 2 号机组段建立三维有限元计算模型,整体模型见图 1,材料计算参数见表 1。采用商业有限元软件 ANSYS 进行有限元计算,厂房主体采用三维实体单元建模,规定上下游方向(横向)为 X 轴,机组段纵向方向为 Y 轴,竖向为 Z 轴。模型节点数为 101 542 个,实体单元 127 535 个,弹簧单元 5 734 个。左右侧为自由,模型底部采用固定约束。用弹簧单元来模拟上下游侧围岩约束边界条件,在边界节点上加法向弹性约束,其刚度按照公式(1)进行计算。

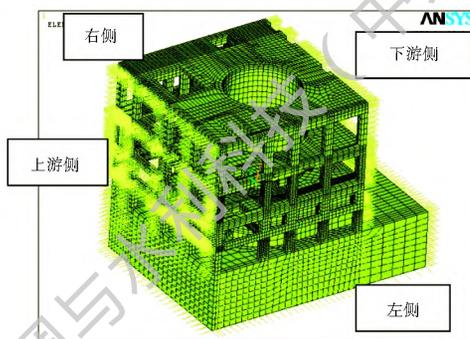


图 1 仙居地下厂房 2 号机组段三维有限元模型

Fig. 1 Three dimensional finite element model of 2# power unit of Xianju underground powerhouse

$$k = \frac{k_0 A}{r} \quad (1)$$

式中:  $k_0$  为岩石的单位弹性抗力系数,根据围岩物理

力学特性,取 10 GPa; $A$  为节点的作用面积( $m^2$ ); $r$  为地下洞室开挖半径,这里取洞室宽度的一半( $m$ )。

表 1 材料计算参数

Tab. 1 Material parameters for calculation

材料	密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 /GPa	单位弹性抗力系数 ( $MN \cdot m^{-3}$ )
混凝土	2 500	0.167	28	-
岩石	2 600	0.3	10	6 000

## 1.2 振源频率特性和共振复核要求

水电站厂房装备有水轮发电机组和各种机械及电气设备,水电站厂房的振源特性比较复杂,振动频率的范围从低频到高频、从低阶到高阶。甚至振动的形式和出现的范围都是不确定的,必须要根据机组、厂房结构设计及机组、电气设备的运行情况进行深入研究。本文依照水电站厂房设计规范中自振频率与共振频率的错开度大于 20% 的要求进行共振复核,表 2 列出了仙居电站主要振源类型及频率。

表 2 各类机组振源的频率

Tab. 2 The frequency of unit vibration sources

振源类型	编号	振动原因	振动频率/Hz
机械振源	1	正常转频	6.25
	2	飞逸转频	9.25
	3	2 倍转频	12.5
电磁振源	4	极频振动	50, 100
	5	尾水管低频涡带	1.25~ 2.08
水力振源	6	尾水管中频涡带	5~ 7.5
	7	转轮叶片- 振动	56.25, 112.5
	8	导叶后不均匀流场	125

## 1.3 振动反应计算工况

机组振动载荷主要是指机组通过轴系统及其支承结构传递到厂房的常规振动荷载,包括机械力、电磁力和轴向水推力等,而不包括蜗壳和尾水管中的脉动水压力。采用 Ansys 中稳态动力响应方法进行计算分析,计算工况和荷载特性列于表 3 中。机组运行时所产生的振动荷载均为简谐荷载,分布作

表 3 各基础板动力荷载幅值标准值

Tab. 3 Dynamic loading amplitude values of the base plate

作用位置/方向	工况	定子基础			下机架基础			上机架基础			kN
		径向	切向	轴向	径向	切向	轴向	径向	切向	轴向	
一	额定负荷	197	531	682	228	1	1 224	123	7	6	
二	转子半数磁极短路	790	577	926	437	5	1 371	594	142	7	
三	误同期	2 013	2 386	569	95	0	629	218	135	5	
四	定子绕组两相短路	1 370	1 734	581	0	16	57	132	91	5	

注:表中径向、切向、轴向分别对应图 2 中的  $R$ 、 $T$  和  $V$ 。

用于机墩定子基础(8 个基础板)、下机架基础(12 个基础板)和上机架基础(8 个基础板)上,荷载的施加方式见图 2。其中工况一按照转频 6.25 Hz 计算,工况二、三、四的径向和轴向荷载按转频 6.25 Hz 计算,切向荷载按照电磁频率 50 Hz 计算。

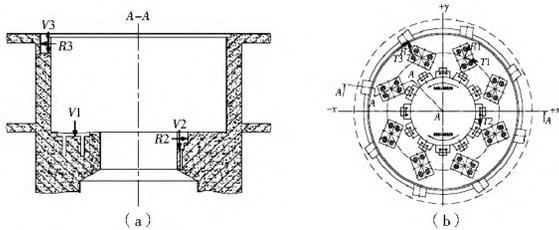


图 2 发电机基础所承担主要荷载示意图

Fig. 2 The main load diagram of generator foundation

## 1.4 振动控制标准

本文参考国内外有关建筑结构、动力机械基础以及人体健康等的振动控制标准,加以分析综合,结合大型抽水蓄能电站主厂房的结构特点、运行环境

和设计要求,并参考近年的设计和运行经验,提出对仙居水电站厂房振动控制标准的建议,列于表 4 中<sup>[6,9,13]</sup>。其中机墩振幅的控制标准为我国水电站厂房设计规范的规定。

表 4 仙居水电站厂房振动控制标准建议值

Tab. 4 The proposed standard vibration control values of Xianju Hydropower Plant

结构构件	振动位移/mm		速度/( $mm \cdot s^{-1}$ )		加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )	
	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平
楼梯、立柱等结构	0.2		10		1.0	
楼板	0.2		10		1.0	
人体健康评价	/		3.2	6.4	0.64	0.64
机墩	长期组合	0.1	0.15		10	1.0
	短期组合	0.15	0.2			

## 2 振动计算结果与讨论

### 2.1 自振特性及共振复核

有限单元法计算的厂房整体结构的前 20 阶固

有振动频率列于表 5 中。由图 3 可知,基频对应的振型表现为整体结构的纵向运动和主厂房各层楼板的竖向振动,说明整体结构在其上下游侧墙边界条件为水平约束条件下,厂房横向刚度较高,纵向刚度和楼板的竖向刚度较低。前 6 阶振型中均表现为楼板的竖向振动,这是由于楼板结构的刚度远小于风罩、机墩和蜗壳等主体结构的刚度,所以楼板与梁柱结构的振动较为突出。

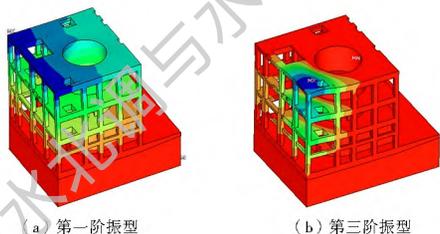


图 3 厂房整体结构振型图

Fig.3 The vibration mode of the powerhouse structure

表 5 厂房整体结构的自振频率

Tab.5 The natural frequency of powerhouse structure

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率	12.49	22.00	23.03	24.22	25.74	28.39	29.49	30.20	30.47	31.36
阶数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
频率	32.91	33.60	33.87	35.31	36.33	36.59	37.07	38.15	38.52	39.31

由自振频率计算结果可知,自振频率分布很密集,相邻各阶频率之间差别不大,且主要表现为上部楼板、梁柱结构和风罩的联合振动,各部分各构件的主振型出现的阶次不同,因此,除对地下厂房结构的基频进行共振校核外,还需适当考虑激振荷载频率与地下厂房结构中高阶自振频率产生共振的可能性,本文对结构前 20 阶自振频率进行共振校核。

比较表 2 和表 5 可知,厂房整体结构的基频相对较低,可能与机组振源遇合而发生共振的主要是飞逸转速频率和 2 倍转频,分析认为,飞逸工况是过渡过程,运行时间短,危害相对较小;实际工程中出现 2 倍转频的不平衡振动的也比较少,只要机组制造和安装质量有保证是可以避免的。因此,厂房整体结构发生共振的可能性相对很小。

各层楼板结构的自振频率在 20 Hz 以上,高于转速频率较多,又低于转轮叶片数频率和电磁频率,出现共振的可能性也不大;中间层楼板前几阶频率(除基频)比较接近 50 Hz 和 56.25 Hz,水轮机层楼板的基频比较接近 50 Hz 和 56.25 Hz,且低频参与系数较大,与电磁振源和水力振源发生共振的可能性稍大,需要重点关注。但总体上高阶振型参与系数较小,楼板结构出现共振的可能性较小。

各层立柱结构的前 20 阶分布在 30~ 110 Hz 范围,与机组的电磁振动频率(50, 100 Hz)、转轮叶片数频率(56.25 Hz)及其倍频(112.5 Hz)、导叶后卡门涡频率(125 Hz)的错开度均较小,存在明显的共振可能。可逆式机组的静动翼干涉水力振动是比较主要的振源,引起固定结构振动的激振频率主要是 2 倍频,即 112.5 Hz,而不主要是 56.25 Hz。虽然该频率(112.5 Hz)与立柱的高阶自振频率存在较大的共振可能性,但高阶振型参与系数小,共振危险性并不突出。

风罩和机墩的若干阶次的自振频率也可能与 50~ 100 Hz 左右的压力脉动频率遇合,而存在共振可能。但 112.5 Hz 的振动可能是主振源,遇合共振均为高阶振动,共振的可能性和危害性不突出。

## 2.2 动力响应计算结果与分析

### 2.2.1 机组机械和电磁振动荷载作用效应

本节重点进行了厂房结构在正常运行工况和事故工况下机组振动荷载作用下的振幅验算与振动反应分析评价。风罩、定子基础、下机架、楼板、立柱等典型部位的最大振动响应结果列于表 6。振动评价主要依据表 4 的标准建议值。从动力反应分析结果可以看出,在额定负荷正常运行工况下,机墩基础截面的水平横向与扭转位移之和最大值为 0.07 mm,小于振动控制标准值;竖向振幅相对较大(0.18 mm),位于下机架基础板处,这主要是由于正常运行时,下机架基础处的垂直动荷载较大,加之基础板作用面积较小,变形集中现象比较显著。因此有必要对其进行作用面积上的均化处理,减小集中现象的影响。均化处理后位移值为 0.12 mm,略微大于长期组合的规定值 0.1 mm。楼板、立柱、风罩等部位的振动位移均满足控制标准要求。在各工况下,厂房结构的振动速度和加速度反应,绝大部分均满足本文拟定的控制标准。只有中间层上游立柱的速度达到了 11.13 mm/s,略微大于设定的限值 10 mm/s,说明振动反应整体上并不大,仅仅是局部超标。

表 6 机组振动荷载作用下厂房结构振动反应幅值

Tab.6 The vibration response amplitude of powerhouse structure under unit vibration loads

计算工况	机墩振幅 /mm	楼板速度 / (mm · s <sup>-1</sup> )	结构加速度 / (m · s <sup>-2</sup> )
额定负荷	0.18(竖向)	1.92(竖向)	0.20(机墩)
转子半数磁极短路	0.20(竖向)	4.05(水平)	0.22(机墩)
误同期	0.10(水平)	8.80(水平)	0.44(立柱)
定子绕组两相短路	0.07(水平)	6.32(水平)	0.31(立柱)

在各运行工况机组振动荷载作用下,机墩结构和主厂房其他部位的动位移、振动速度、加速度均不是非常突出,结构振动反应总体上满足本文建议的控制标准要求。机墩竖向振幅偏大,有一定的振动变形集中成分,鉴于有限元计算方法与规范所采用的结构力学法的模型选取、边界条件和加载方式等均不相同,计算结果的差异性在所难免,因此,若结构力学法的计算结果能够满足规范要求,可以不必修改机墩结构设计,在结构强度上加以保证即可。

### 2.2.2 水轮机压力脉动作用效应

选取水轮机模型试验的2个典型工况计算水轮机压力脉动作用下的振动反应。2个工况的最大压力脉动幅值分别为5.32% H和6.61% H,主频率均为56.25 Hz和134.89 Hz,导叶后转轮前区域水力涡动最突出,属于典型的静动翼干涉。

两个工况的振动反应最大值列于表7中。对于工况一,机墩振幅和楼板等结构的加速度均比较小,在允许范围内;立柱的振动加速度均方根值稍微超出标准值,是由于振动频率较高的原因,若采用频率计权加速度,则仅为0.021 m/s<sup>2</sup>,是可以满足要求的。振动应力均很小,最大仅有83.71 kPa。工况二的计算结果基本与工况一接近。

因此,由于压力脉动的主频率较高,与立柱等结构的自振频率更为接近,振动加速度均方根值较为突出,接近于控制标准,但采用频率计权加速度则幅值就很小。

表7 水轮机压力脉动作用下厂房结构反应幅值

Tab.7 The vibration response amplitude of powerhouse structure under turbine pressure pulsation

计算工况	机墩振幅/ $\mu\text{m}$	楼板速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	结构加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
工况一	14.29	4.37	1.03(立柱)
工况二	16.51	3.04	0.99(立柱)

实际上,抽水蓄能电站地下厂房的结构形式基本相同,主要构件的尺寸也相差不多;立柱结构的断面也都在1.0 m~1.2 m左右,层高也在3~4 m的范围,其前几阶自振频率均在30~80 Hz的范围,结构加强和修改的余地不大,是否会发生共振和强迫振动,与厂房和立柱结构的设计有关但不是决定性的,重要的是压力脉动的强弱和主频率的大小。

## 3 结构抗振优化设计措施探讨

通过以上分析,认为厂房结构整体上满足振动复核要求,但也存在整体刚度偏低和局部振动较大的现象,如立柱的振动频率更接近于转轮叶片数频率等中高频振源频率,局部结构的振动反应幅值偏大。为

此,进一步对主厂房抗振加固的必要性和有效性进行探讨,重点探讨了紧靠上游侧围岩的立柱间增加部分实体墙加固和部分立柱加大断面的加固措施。

### 3.1 增设上游侧实体墙的抗振效果评价

由上述计算可知,立柱在机组荷载作用下的纵向(Y方向)响应相对较大,为此假定对此处的立柱进行加固,措施是:在上游侧的三个立柱之间增加实体墙结构,墙厚等同于柱子截面尺寸。加固后的有限元模型见图4。

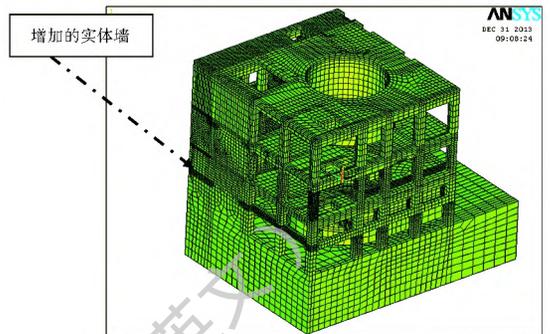


图4 增设上游侧实体墙加固方案有限元模型

Fig.4 The finite element model of the solid wall reinforcement scheme

加固后中间层立柱的基频振动仍然主要以横河向(Y方向)振动为主,加固位置立柱的刚度提高了,而没有加固的立柱的自振频率基本没有变化。对比加固前后的立柱自振频率可知,立柱的前6阶自振频率最大提高了6.3%。因此,局部加固对立柱自振特性没有显著影响,不影响共振复核的规律和结论。

加固后发电机层楼板的振型有一定变化,一阶自振频率提高了3.87%。因此,厂房结构的局部加固也不能有效提高楼板的刚度和动力性能,仅对结构局部的振动特性有所改变。

进一步研究采用修改修改后在脉动压力激励下的振动响应,加固前后典型部位的动响应列于表8中。可以看出,加固对水轮机层楼板以及立柱同一结点的位移、速度、加速度均有一定的改善作用,尤其对直接加固的部位,比如上游侧的立柱和楼板,增设实体墙后加速度振幅降低很多;个别部位振动速

表8 结构修改后(增设实体墙)的脉动压力激励响应

Tab.8 Fluctuating pressure response after the structure was modified (adding a solid wall)

结构位置	位移/ $\mu\text{m}$		均方根速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$		均方根加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
水轮机层 楼板	11.18	2.06	0.71	0.24	0.60	0.07
立柱	16.38	6.52	0.94	0.63	1.03	0.11
楼梯	9.16	7.53	0.48	0.88	0.51	0.53

度和加速度响应略有增大,主要是由于自振频率发生一定的改变,导致振动响应也相应的有所变化。

### 3.2 增大立柱断面的抗振效果评价

由于立柱的振动反应相对较明显,在结构修改的方案探讨中,重点对立柱的加强措施进行研究。这里假定对主厂房四个边角的四个立柱进行加固,截面尺寸从  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  增大到  $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。加固前后中间层立柱振型基本没有发生变化,前 6 阶自振频率分别提高了 0.54%, 1.16%, 5.01%, 7.54%, 4.05%, 3.23%。因此,对共振复核结论没有明显影响。

进一步研究加大立柱断面结构修改后的压力脉动振动响应,典型位置最大振幅列于表 9 中。结构的位移响应稍微有所增大,但总体上数值比较小,属于  $\mu\text{m}$  数量级的。振动速度和加速度响应有所减小,但效果并不显著,尤其是对于立柱的振动加速度,降低后基本可满足控制标准要求,但降低的幅度并不突出。

表 9 结构修改后(加大部分立柱断面)的脉动压力激励响应

Tab. 9 Fluctuating pressure response after the structure was modified (enlarging column section size)

结构位置	位移/ $\mu\text{m}$		均方根速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		均方根加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
水轮机层 楼板	11.18	12.50	0.71	0.76	0.60	0.11
立柱	16.38	16.40	0.94	0.63	1.03	1.00
楼梯	9.16	9.18	0.48	0.31	0.51	0.49

## 4 结语

本文采用三维有限单元法,对仙居抽水蓄能电站主厂房结构振动特性进行了全面分析评价,主要结论归纳如下。

(1) 厂房整体结构和主要构件的共振复核满足要求,共振危险性不显著。

(2) 在机组振动荷载和压力脉动激励下的振动幅值不突出,总体上满足拟定的控制标准要求。有限元法计算得到的机墩结构竖向振幅稍大,需要在结构设计中予以关注。

(3) 立柱结构的振动均方根加速度偏大,主要是由于压力脉动的主频率较高。但频率计权加速度幅值较小,可满足要求。因此,建议采用频率计权加速度的评价方法,同时也应在机组制造和运行中对压力脉动振源给予充分关注。

(4) 针对立柱振动较为突出的问题,探讨了局

部抗振加固方案,结果表明局部加固的总体效果不显著,今后的抗振优化设计还应从总体布置和结构设计上加以重视。

### 参考文献(References):

- [1] 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 Z Y, DONG Y X. Dynamics of water turbine generator set[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 沈可,张仲卿,梁政.岩滩水电站厂房水力振动计算[J].水电能源科学,2003,21(1):73-75.(SHEN K, ZHANG Z Q, LIANG Z. Hydraulic vibration calculation of Yantan Hydropower house[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(1): 73-75. (in Chinese))
- [3] ZHANG T, YU N LIANG Z, ZHENYUE M, et al. Effect of concrete cracks on dynamic characteristics of powerhouse for Giant-Scale Hydrostation[J]. Transaction of Tianjin University, 2008, 14(4): 307-312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12209-008-0052-4>.
- [4] ZHENYUE M, CUNHUI Z. Static and dynamic damage analysis of mass concrete in hydropower house of Three Gorges Project[J]. Transactions of Tianjin University, 2010, 16(6): 433-440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12209-010-1442-y>.
- [5] 欧阳金惠,张超然,陈厚群,等.巨型水电站厂房振动预测研究[J].土木工程学报,2008(2):100-104.(OUYANG J H, ZHANG C R, CHEN H Q, et al. Prediction of vibration of giant-scale hydropower house[J]. China Civil Engineering Journal, 2008(2): 100-104. (in Chinese)) DOI: 10.15951/j.tmgxb.2008.02.002.
- [6] 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.(MA Z Y, DONG Y X. Vibration and its corrective actions of water turbine generator set and dover house[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [7] 练继建,秦亮,何成连.基于原型观测的水电站厂房结构振动分析[J].天津大学学报,2006(2):176-180.(LIAN J J, QIN L, HE L C. Structural vibration of hydropower house based on prototype observation[J]. Journal of Tianjin University. 2006(2): 176-180. (in Chinese))
- [8] 严旭东,杜晓京,杨静,等.抽水蓄能电站厂房振动研究[C].抽水蓄能电站工程建设文集.2005.(YAN X D, DU X J, YANG J, et al. Vibration research of pumped storage power plant[C]. Proceedings of Pumped Storage Power Station Project Construction. 2005. (in Chinese))
- [9] 杜晓京.地下厂房机组支撑结构振动观测与分析[J].水力发电,1999(2):27-30.(DU X J. The vibration observation and analysis of underground powerhouse units supporting structure[J]. Water Power, 1999(2): 27-30. (in Chinese))
- [10] 韩芳,蔡元奇,朱以文.十三陵抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析[J].武汉大学学报(工学版),2007(5):91-94.(HAN F, CAI Y Q, ZHU Y W. Dynamical analysis on Shisanling pumped storage power plant underground powerhouse[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007(5): 91-94. (in Chinese))

- [11] 彭涛. 十三陵抽水蓄能电站地下厂房结构振动监测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005(5): 49-52. (PENG T. Monitoring of structural vibration of the underground powerhouse of Shisanling Pumped Storage Power Plant[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005(5): 49-52. (in Chinese))
- [12] 王俊红, 黄勇. 广蓄二期工程地下厂房结构振动研究及减振措施[J]. 水力发电, 2001(11): 30-34. (WANG J H, HUANG Y. Study on the structural vibration of underground powerhouse of Guangzhou pumped storage plant(second stage) and its vibration absorbing measures[J]. Water Power, 2001(11): 30-34. (in Chinese))
- [13] 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): 30-33. (WEN H, ZHANG C S, LIU Y Z, et al. Analysis and design of dynamic and static forces of underground powerhouse structure of Tianhuangping Pumped storage Power Station[J]. Water Power, 1998(8): 30-33. (in Chinese))
- [14] 熊卫, 史仁杰, 毛文然. 回龙抽水蓄能电站地下厂房整体结构振动研究[J]. 人民黄河, 2004(7): 40-41. (XIONG W, SHI R J, MAO W R. The vibration research of Huilong pumped storage power station underground powerhouse structure[J]. Yellow River, 2004(7): 40-41. (in Chinese))
- [15] 张宏战, 谭杰骥, 马震岳. 蒲石河抽水蓄能电站机墩结构刚度分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010(6): 8-10. (ZHANG H Z, TAN J J, MA Z Y. Study on stiffness of generator pedestals in Pushihe Pumped storage power station[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010(6): 8-10. (in Chinese))
- [16] 陈婧, 马震岳, 赵凤遥, 等. 抽水蓄能电站地下厂房机墩结构刚度分析与设计优化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009(4): 456-460. (CHEN J, MA Z Y, ZHAO F Y, et al. Rigidity analysis and dynamic design of supporting structure of underground powerhouse in pumped storage projects[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009(4): 456-460. (in Chinese))
- [17] 练继建, 张辉东, 王海军. 水电站厂房结构振动响应的神经网络预测[J]. 水利学报, 2007(03): 361-364. (LIAN J J, ZHANG H D, WANG H J. Prediction of vibration response of powerhouse structures by means of artificial neural network method[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2007(03): 361-364. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2007.03.018.
- [18] 彭新民, 郑伟, 秦亮. 水电站厂房结构振动规律探讨[J]. 水利水电技术, 2005(11): 62-64. (PENG X M, ZHENG W, QIN L. Study on structural vibration of hydropower plant[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005(11): 62-64. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2005.11.018.
- [19] 陈婧, 马震岳, 威海峰, 等. 宜兴抽水蓄能电站厂房结构水力振动反应分析[J]. 水力发电学报, 2009(5): 195-199. (CHEN J, MA Z Y, QI H F, et al. Research on dynamic response of powerhouse structure of Yixing pumped storage project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009(5): 195-199. (in Chinese))
- [20] 陈婧, 王粉玲, 马震岳. 大型抽水蓄能电站地下厂房结构振动响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(6): 78-81. (CHEN J, WANG F L, MA Z Y. Analysis on vibration responses of underground powerhouse structure of large scale pumped storage power station[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013(6): 78-81. (in Chinese))
- [21] 马震岳, 陈婧, 刘志明, 等. 三峡水电站主厂房振动分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004(2): 111-115. (MA Z Y, CHEN J, LIU Z M, et al. Vibration analysis of powerhouse of Three Gorges Hydropower Station[J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science), 2004(2): 111-115. (in Chinese))
- [22] 李小进, 申艳, 蒋彦超, 等. 白莲河抽水蓄能电站机墩结构刚度分析[J]. 水电能源科学, 2007(2): 53-56. (LI X J, SHEN Y, JIANG K C, et al. Research on stiffness of support for electric generator structure in Bailianhe Pumped Storage Station[J]. Water Resources and Power. 2007(2): 53-56. (in Chinese))
- [23] 孙万泉, 马震岳, 赵凤遥. 抽水蓄能电站振源特性分析研究[J]. 水电能源科学, 2003(4): 78-80. (SUN W Q, MA Z Y, ZHAO F Y. Analysis and study on vibration source characteristic of pumped storage powerplant[J]. Water Resources and Power. 2003(4): 78-80. (in Chinese))
- [24] ZHANG C H, ZHANG Y L. Nonlinear dynamic analysis of the Three Gorge Project powerhouse excited by pressure fluctuation[J]. Journal of Zhejiang University, 2009, 10(9): 1231-1240. (in Chinese)) DOI: 10.1631/jzus. A0820478.
- [25] 张辉东, 周颖. 大型水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J]. 水力发电学报, 2007(5): 134-137. (ZHANG X D, ZHOU Y. Study of fluid solid interaction vibration characteristics of the large scale powerhouse structure[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2007(5): 134-137. (in Chinese))

(上接第 194 页)

- [24] 王惠文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (WANG H W, WU Z B, MENG J. Partial least squares regression linear and nonlinear methods[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2006. (in Chinese)).
- [25] 吴思. 人工渠道糙率与明渠流态关系的试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. (WU S. Experimental study on the relationship between roughness of artificial channel and flow regime of open channel[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese))
- [26] 拜亚茹. 人工渠道糙率系数影响因素的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 230-232. (BAI Y R. Experiment on influence factors on roughness coefficient of artificial channel[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(4): 230-232. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.04.047.
- [27] 李榕. 关于影响曼宁粗糙系数  $n$  值的水力因素探讨[J]. 水利学报, 1989(12): 62-66. (LI R. Discussion on hydraulic factors influencing manning roughness coefficient  $n$  value[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 62-66. (in Chinese))