

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.033

水电站地下厂房楼板结构设计对振动特性的影响规律

吴 娴, 马震岳

(大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 以某大型水电站为工程实例, 为研究板梁结构、等方量厚板结构和等静力刚度厚板结构三种形式楼板结构振动特性的差异, 建立地下厂房三维有限元模型进行不同楼板结构动力特性的对比分析。结果表明: 在机组动荷载作用下, 不同形式楼板结构的动力响应差别并不明显; 在脉动水压力作用下, 当荷载频率接近楼板低阶自振频率时, 板梁结构振幅较小, 有一定优越性, 但从总体上评价, 特别是在高频区域, 厚板结构的振幅更小, 抗振性能更好。

关键词: 地下厂房; 楼板; 有限元法(FEM); 动力特性

中图分类号: TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0177-05

The Influencing Laws of Structure Design of Floor Slab in Underground Powerhouse on Its Vibration Characteristics

WU Xian, MA Zhenyue

(School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Taking a large hydropower station as an example, in order to study the differences between the dynamic characteristics of beam-slab structure, thick-slab structure with the same concrete volume and thick-slab structure with the same static stiffness, a three dimensional finite element model of the underground powerhouse was established to analyze the dynamic characteristics of different types of floor slab. The results show that, under the action of units' dynamic loads, differences between dynamic responses of each type floor slab are not obvious. Under the pulsation pressure, when the load frequency is close to the low order natural frequencies of the floor slab, vibration amplitude of beam-slab structure is lower than that of thick-slab structure, however, in general, especially in high-frequency region, the anti-vibration performance of thick-slab structure is better than that of beam-slab structure.

Keywords: underground powerhouse; floor slab; FEM; dynamic characteristics

随着我国一批巨型、大型水电站的规划和兴建以及抽水蓄能电站的不断发展, 很多大型工程均面临厂房结构动力分析和抗振设计的课题^[1]。水电站厂房楼板结构形式和支撑条件较为复杂, 其上往往布置有调速器、机旁盘等机电设备, 在工程实际中往往是备受关注的易振、强振部位。目前, 水电站地下厂房楼板结构主要采用板梁和厚板两种结构形式。板梁结构自身质量轻, 抗弯刚度大; 厚板结构施工方便, 有利于层顶布置。国内已投产电站当中, 采用板梁形式的岩滩和采用厚板形式的张河湾等工程均出

现过楼板结构的振动问题^[2-3]。文献[4-8]基于不同的工程, 对水电站厂房楼板结构的动力特性作出了有益的研究与评价。本文在此基础上, 结合某大型工程, 建立了板梁结构、等方量厚板结构和等静力刚度厚板结构三种模型, 分别研究其在机组动荷载、蜗壳脉动压力、尾水管脉动压力作用下的动力响应特性, 对其在不同荷载作用、不同频率区间的动力响应作出对比分析, 以期为厂房结构抗振优化设计提供明确思路, 为后续更加深入的厂房结构振动分析研究提供参考。

收稿日期: 2016-03-01

修稿日期: 2016-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379030)

作者简介: 吴 娴(1989—), 女, 湖南醴陵人, 硕士研究生, 研究方向为水电站厂房结构分析。E-mail: wxjiuyue@126.com

1 计算模型

1.1 模型范围

以某大型水电站地下厂房一个典型机组段为原型建立有限元数值模型,模型包括尾水管及其外围混凝土和部分基岩、蜗壳及其外围混凝土、机墩、风罩及各层楼板、梁、柱、边墙等,机坑进人通道、检修通道等尺寸较大孔洞亦按实际尺寸进行模拟。厂内安装 4 台单机容量为 425 MW 的混流式水轮发电机组,机组额定转速为 125 r/min,飞逸转速为 250 r/min,水轮机叶片数为 15。

计算模型采用笛卡尔直角坐标系, X 、 Y 轴为水平轴, X 轴沿厂房纵轴线方向,指向厂房左侧为正(面向下游), Y 轴指向上游为正; Z 轴为竖轴,向上为正。厂房下部大体积混凝土、机墩、楼板、柱、墙等均采用实体单元模拟,机坑、蜗壳和尾水管内部钢衬采用板壳单元模拟,座环立柱采用杆单元模拟。主厂房结构有限元网格剖分如图 1 所示,整个模型共划分 182 162 个单元,224 448 个节点。

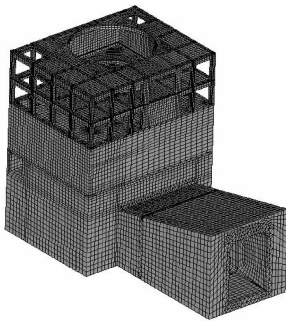


图 1 厂房有限元模型

1.2 边界条件

实际工程中水轮机层以上各层板梁、立柱及边墙与围岩不连接,在此处理为自由边界。水轮机层以下左右两侧混凝土结构边界视为自由边界,上下游侧混凝土结构边界上用法向和切向弹簧单元模拟围岩的约束作用^[9-10],弹簧单元刚度 $K = Ak_0/r$,其中 A 为节点控制面积, r 为围岩开挖半径, k_0 为围岩单位弹性抗力系数,根据地质资料,围岩按Ⅲ类围岩考虑, k_0 取 35 MPa/cm。基岩边界四周同样建立法向和切向弹簧单元,模型底面施加固定约束。

1.3 材料参数

根据工程资料,模型材料参数按表 1 取值,各种材料均按各向同性、线弹性材料进行计算。

表 1 厂房结构材料参数

材料	弹性模量 $E/(N \cdot mm^{-2})$	密度 ρ $/(kg \cdot m^{-3})$	泊松比 μ
C25 混凝土	2.80×10^4	2500	0.167
钢材	2.0×10^5	7850	0.300
垫层	2.5	200	0.300
岩石	8.0×10^3	2775	0.280

1.4 计算方案

选取发电机层楼板作为研究对象,探讨不同的楼板结构形式对结构动力特性的影响规律,将计算方案列于表 2。

表 2 计算方案

计算方案	楼板结构形式	楼板厚度/cm
1	板梁	40.0
2	厚板	59.0
3	厚板	65.5

方案 1 为板梁方案,发电机层楼板板厚 40 cm,上游侧梁断面尺寸 65 cm × 120 cm,其它部位梁断面尺寸 60 cm × 120 cm。

方案 2 为等方量混凝土厚板方案,在保证电气夹层以上结构混凝土方量和发电机层楼面高程不变的前提下,将方案 1 中的发电层板梁结构改为厚板结构,经计算得出板厚为 59 cm。

方案 3 为等静力刚度厚板方案,在方案 1 中发电层楼板上施加 0.1 MPa 的均匀压力,经静力计算得到楼板最大竖向位移为 5.13 mm,出现在楼板右侧跨中位置。保持发电机层楼面高程不变,以楼板厚度为参数建立厚板模型。经试算得出,当厚板结构板厚为 65.5 cm 时,楼板最大竖向位移为 5.12 mm,与方案 1 相比相差不到 1%,即两者静力刚度相同。

各方案除发电机层楼板结构形式及厚度发生变化外,模型约束、荷载条件等其它条件保持一致。

2 结构自振特性对比分析

采用 ANSYS 程序中的 Block Lanczos 特征值解法进行模态计算,提取厂房整体结构的前 50 阶模态。在求解固有频率时,假定结构振动为无阻尼及弹性范围内的微幅振动。各方案整体结构前 50 阶自振频率对比如图 2 所示。

从整体上看,厂房整体结构前 50 阶自振频率方案 1 较高,方案 2 较低,方案 3 介于两者之间。相比于方案 1,方案 2 前 50 阶自振频率平均下降 3.4%,方案 3 平均下降 2.6%。方案 3 与方案 2 均为厚板

结构,相比之下,方案 3 前 4 阶自振频率略低于方案 2(平均为 0.9%),5~50 阶自振频率基本上略高于方案 2(平均为 1.0%)。

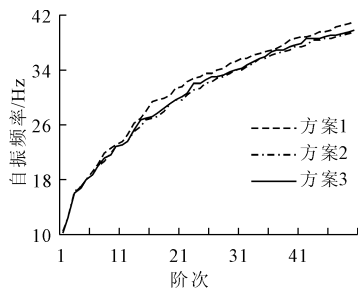


图 2 厂房整体结构前 50 阶自振频率

三个方案前 5 阶振型一致,前 3 阶振型分别为水轮机层以上结构沿 X 轴、Y 轴和绕 Z 轴的整体振动,第 4 阶为风罩沿 X 方向振动并带动发电机层楼板振动,第 5 阶主要为风罩沿 Y 方向相对振动。由于该模型水轮机层以上结构不考虑围岩约束,故低阶振动表现为上部结构的整体振动。三个方案前 5 阶频率的差别在 2% 以内。

三个方案 6~9 阶振型为发电机层楼板的前 4 阶振型,方案 1 振动频率范围为 19.1 Hz~22.6 Hz,方案 2、方案 3 振动频率范围为 18.8 Hz~21.8 Hz,略低于方案 1。这 4 阶振型当中有 3 阶振型主要表现为发电机层楼板右侧跨中位置竖向振动,三个方案的不同点在于方案 1 发电机层楼板与风罩联合振动更为明显。方案 1 第 8 阶和方案 2、方案 3 第 9 阶为风罩连同发电机层楼板沿 Y 方向振动,并伴随风罩下游侧楼板竖向振动。

方案 1 的 10~30 阶模态当中,10~13、15、18~24、30 阶主要为发电机层楼板不同部位的竖向振动,14、16、17、28 阶主要为电气夹层楼板的振动,其余为风罩、楼板、立柱联合振动。方案 2 的 10~30 阶模态当中,除 16、19、29、30 阶主要为电气夹层楼板的振动外,其余振型皆主要为发电机层楼板的振动,与方案 1 相比出现了一些新的振型,很少出现风罩与楼板的联合振动。方案 3 的前 30 阶振型与方案 2 基本相似。

3 机组振动荷载作用下楼板结构的动力响应对比分析

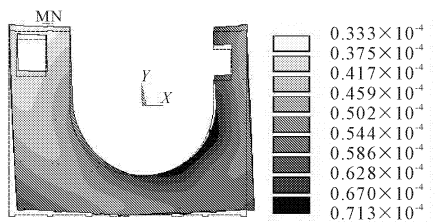
目前,有限元法计算厂房结构振幅最常用的方法是假定机组振动荷载为一种简谐激励,采用时间历程分析法或者谐响应分析法,确定结构在某个特定频率下的振幅^[11-12]。本文的计算分析采用谐响应分析方法,考虑结构的阻尼作用,阻尼系数取

0.05。谐响应计算荷载值根据机组制造厂家提供的资料采用机组正常运行时产生的动荷载值,即正常运行工况下各基础板上的负荷减去静止工况的相应负荷。

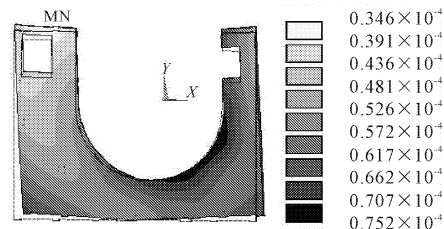
在机组运行过程当中,机械缺陷引起的振动往往是构成机组振动的主要振源之一,其振动频率多为转频或为转频的倍数,三峡水电站厂房结构的现场振动测试结果也表明,转频及其倍频的振动能量比重相当大^[13]。在此,主要考察荷载频率为转频 f_n (2.08 Hz) 及其倍频 $2f_n$ (4.17 Hz) 时楼板的振动情况。将两种荷载频率下各方案发电机层楼板各向振幅最大值列于表 3,下划线表示三个方案相比振幅值较小的值。三个方案发电机层楼板三向振幅矢量和云图相似,因此,只给出了方案 1 的振幅矢量和云图,如图 3 所示。根据计算结果,三个方案发电机层楼板各向振幅均表现为方案 1 最小,方案 2、方案 3 略大,其增大幅度不超过 5%。方案 2、方案 3 同为纯板结构,两个方案楼板各向振幅差别在 1% 以内。可见,在正常运行工况机组动荷载作用下,当荷载频率为转频及其倍频时,两种形式楼板结构的动力响应差别并不明显。

表 3 机组振动荷载作用下楼板各向振幅最大值

频率	方案	振幅/ μm			振幅矢量和/ μm
		X 向	Y 向	Z 向	
f_n	1	<u>50.5</u>	<u>38.5</u>	<u>61.8</u>	<u>71.3</u>
	2	51.6	40.1	62.1	72.0
	3	51.5	39.8	<u>61.8</u>	71.8
$2f_n$	1	<u>55.6</u>	<u>40.8</u>	<u>64.4</u>	<u>75.2</u>
	2	56.7	42.4	64.8	76.2
	3	56.8	42.2	64.5	76.0



(a) 荷载频率为 f_n



(b) 荷载频率为 $2f_n$

图 3 方案 1 发电机层楼板三向振幅矢量和云图(单位:m)

4 流道脉动压力作用下楼板结构的动力响应对比分析

将厂房流道划分为蜗壳和尾水管两个区域,分别讨论两个不同区域脉动压力对楼板结构的动力影响。动力计算仍采用谐响应分析方法^[14-15],假定单个区域内脉动压力为同频率、同相位、幅值为 5 m 水头的简谐荷载。为深入分析脉动压力频率特性对楼板结构的影响规律,开展频率范围为 $0 \sim 50f_n$ 的扫频计算,计算步数为 50 子步。选取发电机层楼板 4 个特征点进行结果提取,特征点的选取如图 4 所示。

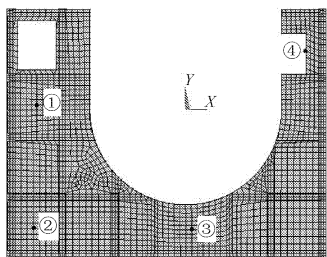


图 4 发电机层楼板特征点

分别将蜗壳脉动压力和尾水管脉动压力作用下发电机层楼板 4 个特征点的各向振幅峰值及其对应频率列于表 4 和表 5,用下划线标记三个方案相比最小的峰值振幅。

表 4 蜗壳脉动压力作用下特征点各向振幅峰值

点号	方案	频率/ f_n			振幅峰值/ $10^{-4}m$		
		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
①	1	9	6	11	1.96	5.00	<u>3.24</u>
	2	9	6	9	<u>1.49</u>	<u>4.48</u>	5.63
	3	9	6	10	1.58	4.81	5.11
②	1	9	6	13	<u>2.51</u>	5.28	2.06
	2	8	6	13	2.75	5.13	2.20
	3	8	6	12	2.52	<u>5.07</u>	<u>1.97</u>
③	1	8	6	16	<u>2.09</u>	<u>3.40</u>	2.72
	2	8	6	13	2.33	3.51	2.70
	3	8	6	10	2.13	<u>3.40</u>	<u>2.35</u>
④	1	8	6	17	1.39	4.27	5.44
	2	8	6	15	1.36	4.26	<u>3.47</u>
	3	8	6	16	<u>1.24</u>	<u>4.02</u>	3.56

由计算结果可得,与蜗壳脉动压力作用下楼板结构的振动响应相比,在尾水管脉动压力作用下,结构的水平向振动减小,而竖向振动加强,这是因为此时脉动荷载的竖向分量较大。

表 5 尾水管脉动压力作用下特征点各向振幅峰值

点号	方案	频率/ f_n			振幅峰值/ $10^{-4}m$		
		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
①	1	10	6	11	<u>1.52</u>	4.38	<u>7.06</u>
	2	9	6	9	2.33	4.28	11.41
	3	9	6	10	2.08	<u>4.22</u>	9.39
②	1	11	6	9	<u>0.72</u>	4.62	<u>3.10</u>
	2	17	6	9	0.82	4.52	3.74
	3	17	6	9	0.78	<u>4.44</u>	4.05
③	1	5	6	17	<u>0.61</u>	<u>2.98</u>	4.88
	2	5	6	9	<u>0.61</u>	3.08	3.63
	3	5	6	9	0.62	3.01	<u>3.59</u>
④	1	19	6	17	0.85	3.71	3.10
	2	9	5	9	1.12	3.71	<u>2.61</u>
	3	9	6	9	<u>0.85</u>	<u>3.55</u>	2.68

从表 4 和表 5 可以看出,在两种脉动压力荷载作用下,发电机层楼板的 Y 向振动比 X 向振动大,各特征点 Y 向振幅峰值主要出现在 $6f_n$ (12.50 Hz) 处。结合厂房结构自振特性可知,各方案厂房整体结构第 2 阶振型均为水轮机层以上结构沿 Y 轴振动,三个方案第 2 阶频率依次为 12.40 Hz、12.43 Hz、12.32 Hz,与荷载频率 $6f_n$ 十分接近,因此此时发电机层楼板 Y 向振幅出现峰值。此时,发电机层楼板振幅矢量和最大值出现在楼板右侧吊物孔边缘或下游角点,幅值大小表现为方案 2、方案 3 略低于方案 1,其降低幅度在 6% 以内。

图 5 给出了蜗壳脉动压力作用下各特征点竖向振幅随荷载频率变化的曲线。根据计算结果,在两种脉动压力荷载作用下楼板各特征点在 10 Hz 以内振动均较小,各方案曲线基本重合。各特征点竖向振幅峰值均出现在 $9f_n \sim 17f_n$ (18.75 Hz ~ 35.42 Hz) 范围内,其中特征点①竖向振幅峰值对应频率较低且幅值较其它点大,结合模态分析可知,发电机层楼板竖向振动的前若干阶模态主要为楼板右侧特征点①附近部位的振动,振动能量集中,故振幅值较大。三个方案相比,特征点①的竖向振幅峰值属方案 1 最小,在蜗壳脉动压力作用下方案 2、方案 3 分别为方案 1 的 1.74、1.58 倍;在尾水管脉动压力作用下,方案 2、方案 3 分别为方案 1 的 1.62、1.33 倍。可见,当脉动压力频率接近楼板低阶自振频率时,在楼板主要振动区域,方案 1 的抗振效果更好。特征点②竖向振幅峰值在两种脉动压力作用下分别属方案 3、方案 1 最小;特征点③竖向振幅峰值属方案 1 最大,且其峰值对应频率较高;特征点④位于楼梯孔附

近,方案 1 板厚较小,故其竖向振幅峰值最大。

在如图 5 所示的点划线频率范围内,各点竖向振幅值总体上表现为方案 1 较大,方案 2、方案 3 较小。各特征点在点划线频率范围内的竖向振幅平均

值方案 1 是方案 2、方案 3 的 1.84~3.15 倍;方案 2、方案 3 相差不大,方案 2 为方案 3 的 0.93~1.04 倍;在尾水管脉动压力作用下,各点在某高频区域内竖向振幅曲线呈现出类似的规律。

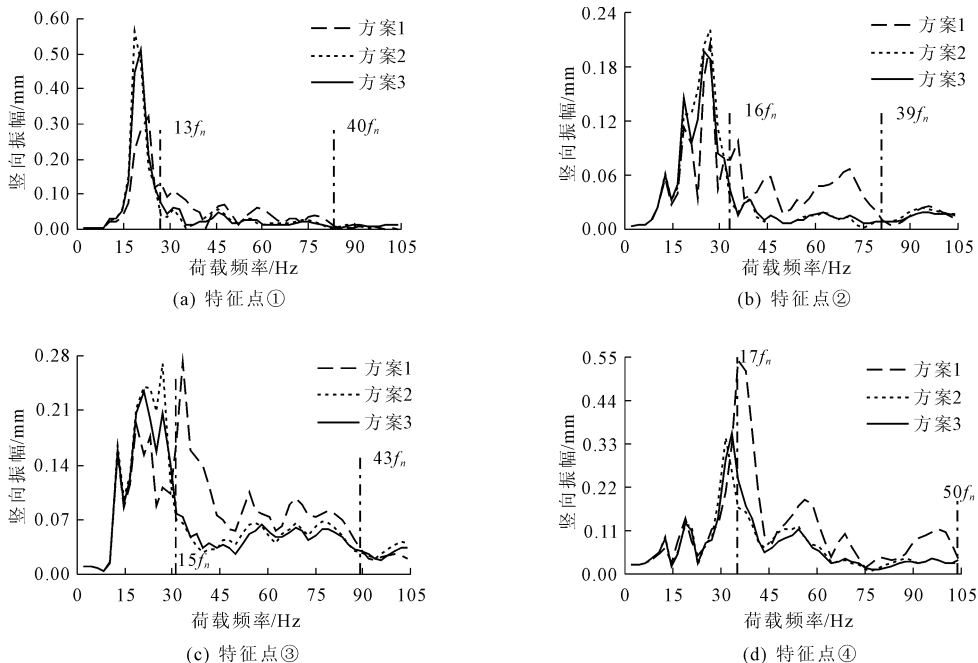


图 5 蜗壳脉动压力作用下,各特征点竖向振幅随荷载频率变化曲线

根据已运行电站的分析资料,频率为转轮叶片数频率及其两倍频率的流道水力脉动振动能量较大,可能引起结构产生较强烈振动。因此,这两种频率下结构的动力响应应引起重视。在蜗壳脉动压力作用下当荷载频率为转轮叶片数频率 $15f_n$ (32.15 Hz) 及其两倍频率 $30f_n$ (62.50 Hz) 时各方案发电机层楼板各向振幅最大值列于表 6。

楼板下游边缘和上游吊物孔附近振动较大,幅值大小表现为方案 1 稍大于方案 2 和方案 3,与方案 1 相比,方案 3 振幅矢量和最大值降低 8.5%。

5 结 论

本文对水电站主厂房楼板采用板梁和厚板的三个方案进行了振动特性分析,结果表明,发电机层楼板结构形式及尺寸的不同对厂房整体结构自振频率影响较小,相比于板梁结构,厚板结构整体自振频率略有降低,但平均下降幅度不到 5%。三个方案下发电机层楼板竖向振动的前 4 阶模态相似,自振频率差别不大。

在机组动荷载作用下,当荷载频率为转频及其倍频时,板梁结构的各向振幅最大值略小于厚板结构的,两种形式楼板结构的动力响应差别不明显。

在脉动压力作用下,当荷载频率接近楼板竖向振动低频频率时,板梁结构振幅较小,表现出优越性;从总体上看,特别是在频率较高区域,厚板结构的振幅较小,抗振性能更好。因此,当水力振动主要表现为尾水管的低频涡动时,选择板梁方案较为有利;但当水力激振频率较高时,尤其是对于抽水蓄能电站,厚板结构的抗振性能总体更优。

(下转第 191 页)

表 6 $15f_n$ 、 $30f_n$ 时,发电机层楼板各向振幅最大值

频率 $/f_n$	方案	振幅/mm			振幅 矢量和 /mm
		X 向	Y 向	Z 向	
15	1	0.110	0.133	0.215	0.224
	2	0.099	0.114	0.451	0.455
	3	0.101	0.107	0.378	0.383
30	1	0.066	0.079	0.103	0.129
	2	0.082	0.079	0.110	0.120
	3	0.046	0.056	0.115	0.118

当荷载频率为 32.15 Hz 时,三个方案楼板振幅矢量和最大值均出现在楼板左侧上游楼梯孔附近,幅值大小表现为方案 1 最小,方案 2、方案 3 分别为方案 1 的 2.0、1.7 倍。当荷载频率为 62.50 Hz 时,楼板振动较荷载频率为 32.15 Hz 时有所减小,此时

参考文献:

- [1] 马震岳,张运良,陈 婧,等.水电站厂房和机组耦合动力学理论及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [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.
- [3] 谷振富.张河湾蓄能电站厂房减振降噪项目研究[D].北京:华北电力大学,2014.
- [4] 沈 可,张仲卿.水电站厂房楼板振动分析[J].人民长江,2003,34(1):52-54.
- [5] 冯 硕,郭宪艳.宝泉抽水蓄能电站地下厂房结构静动力分析[J].水电能源科学,2011,29(6):96-99.
- [6] 李幼胜,何永清,熊 涛,等.大型抽水蓄能电站不同楼板结构形式的动力特性研究[J].水电能源科学,2014,32(4):76-80.
- [7] 陈 帅,张振华,罗先启,等.水口水电站发电机层楼板振动分析[J].水电能源科学,2010,28(9):76-78.
- [8] 杨 静.水电站厂房机组支承结构振动分析及结构优化[D].大连:大连理工大学,2006.
- [9] 陈 婧,马震岳,戚海峰,等.宜兴抽水蓄能电站地下厂房结构振动响应分析[J].水电能源科学,2009,27(3):81-83.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 苗毓海,陈 婧.瀑布沟水电站地下厂房机墩组合结构刚度分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):110-115.
- [13] 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,2007,38(3):361-364.
- [14] 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,2004,30(5):24-27.
- [15] 刘 建,伍鹤皋.脉动压力谐响应和时程分析的差异性研究[J].长江科学院院报,2014,31(8):93-97.