

大型抽水蓄能电站地下厂房结构 振动响应数值模拟研究

杨钊¹, 刘国庆², 刘扬², 许亮华²

(1. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 宁夏 银川 750004; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 抽水蓄能电站振动问题较为突出, 强烈的振动会严重影响机组和厂房的安全稳定运行。采用黏弹性人工边界模拟厂房与围岩连接处的边界条件, 计算分析了丰宁抽水蓄能电站某机组段地下厂房整体结构的自振频率特性, 并对其进行了共振复核; 采用时程法计算分析了脉动压力作用下厂房结构的振动响应, 并与实测数据进行了对比。结果表明: 厂房整体结构前20阶自振频率范围为13.32~34.90 Hz, 产生共振的危险性很低; 楼板各测点竖向均方根加速度的计算值与实测值相差不大, 说明所采用的数值分析方法是合理有效的; 抽水工况下各典型部位最大振动响应均满足厂房振动控制标准, 发电工况下除水轮机层楼板竖向最大均方根加速度超过人体健康评价标准外, 其余结构的各项指标均满足厂房振动控制标准。

关键词: 抽水蓄能电站; 地下厂房结构; 脉动压力; 黏弹性人工边界; 振动响应

中图分类号: TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)05-0155-09

Numerical simulation of vibration response of the underground plant structure in a large pumped storage power station

YANG Zhao¹, LIU Guoqing², LIU Yang², XU Lianghua²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Eco-tech Research Institute, Yinchuan 750004, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The vibration problem is prominent in pumped storage power stations, and strong vibrations can seriously affect the safe and stable operation of power units and plants. This study employed viscoelastic artificial boundaries to simulate the boundary conditions at the connection parts between the plant and surrounding rock. Firstly, the natural frequency characteristics of the whole underground plant structure of a unit in Fengning Pumped Storage Power Station was calculated and analyzed, the resonance checks of which were then conducted. Subsequently, the time-history method was used to calculate and analyze the vibration responses of the plant structure under pulsation pressure, after which the calculation results were compared with the measured data. The results show that the first 20 natural frequencies of the whole plant structure range from 13.32 to 34.90 Hz, indicating a very low risk of structure resonance. There is little difference between the calculated value and measured value of the vertical root-mean-squared acceleration at each measuring point of the floors, which indicates that the numerical analysis method is reasonable and effective. In addition, the maximum vibration response of each typical part of the structure meets the vibration control standard of the plant under pumping condition. Except that the maximum vertical root-mean-square acceleration of the turbine floor exceeds the human health evaluation standard, all the indexes of the other structures meet the vibration control standard of the plant under power generation condition.

Key words: pumped storage power station; underground plant structure; pulsation pressure; viscoelastic

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-05-12

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5419-202243054A-1-1-ZN)

作者简介: 杨钊(1998—), 男, 宁夏固原人, 学士, 助理工程师, 研究方向为大数据分析。

通讯作者: 刘国庆(1989—), 男, 湖北随州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工结构抗震。

artificial boundary; vibration response

1 研究背景

抽水蓄能是目前开发条件中最具规模性的绿色储能技术^[1-2]。随着该技术的发展,抽水蓄能电站建设正朝着超高水头、大容量、高转速、变转速方向发展。与常规水电站相比,抽水蓄能电站启闭频繁,其机组和厂房振动问题更为突出^[3-5]。强烈的振动不仅严重危及机组的正常运行,还会对厂房内工作人员的健康产生危害^[6]。因此,深入研究厂房结构振动问题意义重大。

许多学者就抽水蓄能电站地下厂房振动问题开展了研究。Zhang等^[7]在分析厂房和引水管道振源频率的基础上,对某抽水蓄能电站地下厂房进行了模态和动力响应分析,揭示了较大振动位移位置的分布规律。侯加浩等^[8]结合某抽水蓄能电站厂房,对比分析了不同结构型式楼板的自振特性和振动响应,研究确定了相对较优的楼板结构型式,并建议以转轮叶片数频率及其2倍频为目标开展厂房结构的抗振优化设计。马雨峰等^[9]采用谐响应分析法计算了不同幅值及荷载频率下某抽水蓄能电站地下厂房整体结构的动力响应,并对厂房进行了共振复核,验证了地下厂房结构设计的合理性。于鑫等^[10]先后采用谐响应分析法计算了机组振动荷载作用下某抽水蓄能电站地下厂房振动响应,以及采用时程分析法计算了其在脉动压力作用下的振动响应,结果表明厂房混凝土结构最大振动响应均满足设计规范要求。崔琦等^[11]采用有限元仿真方法和现场振动测试手段对某抽水蓄能电站地下厂房结构的模态和动力响应进行了分析,确定了厂房边墙与围岩合理的约束条件,并对厂房结构进行了安全评估。

上述研究在处理地下厂房与围岩连接处的边界条件时,通常采用弹性边界或固定边界来模拟围岩对厂房的约束作用,这将导致实际中本该向围岩投射出去的波又反射回结构中,人为夸大了厂房结构的振动响应。黏弹性人工边界继承了黏性人工边界的优点,由于其稳定性好,且能精确模拟无限域介质的弹性恢复能力,在地下结构抗震分析中得到广泛应用,但将其应用于流道脉动压力作用下厂房结构振动响应的研究较少。

本文以丰宁抽水蓄能电站某机组段地下厂房为研究对象,采用黏弹性人工边界模拟厂房与围岩连接处的边界条件,在完成厂房整体结构自振频率特性分析及共振复核的基础上,计算分析了流道脉动

压力作用下厂房结构的振动响应,并基于厂房振动控制标准对厂房振动安全进行分析与评价。

2 黏弹性人工边界

黏弹性人工边界可以有效模拟地震荷载作用下及机组振动荷载作用下地下厂房的动力响应,前者属于外源振动,后者属于内源振动。在研究内源振动作用下地下厂房建模范围时,理论上考虑一定范围的围岩是合理的^[12]。然而增加围岩必然导致有限元模型规模大、计算耗时长,且围岩与厂房之间的连接设置也存在不确定性,而在厂房边界处设置黏弹性人工边界可以有效规避上述问题^[13]。

2.1 基本原理

黏弹性人工边界是基于黏性人工边界发展起来的一种局部应力型人工边界,用于在截断边界处吸收计算模型内产生的外行波动,以模拟无限域介质的波动辐射效应^[14-15]。

设置黏弹性人工边界可以较好地解决波在截断边界处的透射问题,使得波在有限计算模型中的传播过程与在无限域介质中的传播过程一致。其基本实现原理是在有限元模型边界上设置弹簧、阻尼器等虚拟元件,使得边界节点的应力状态与根据球面波的波动方程求解得到的应力状态一致。三维黏弹性人工边界示意图如图1所示。

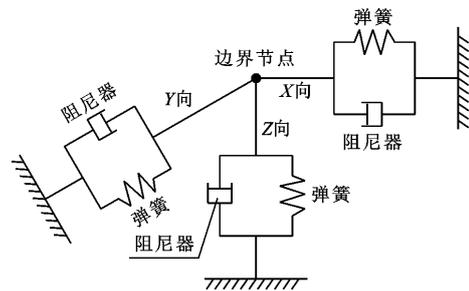


图1 三维黏弹性人工边界示意图

黏弹性人工边界施加在边界节点的作用力可用公式(1)表示。

$$F = A\sigma = A(Ku + C\dot{u}) \quad (1)$$

式中： F 为作用于边界节点的集中力，N； A 为边界节点的代表面积， m^2 ； σ 为边界节点的应力，Pa； u 为边界节点的位移，m； \dot{u} 为边界节点的速度，m/s； K 为弹簧刚度， N/m^3 ； C 为阻尼系数， $N \cdot s/m^3$ 。

在三维条件下,法向弹簧刚度 K_N 、切向弹簧刚度 K_T 、法向阻尼系数 C_N 和切向阻尼系数 C_T 用公式(2)计算。

$$\begin{cases} K_N = \alpha_N \frac{G}{R} \\ K_T = \alpha_T \frac{G}{R} \\ C_N = \rho c_P \\ C_T = \rho c_S \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_N 、 α_T 分别为法向和切向弹簧刚度修正系数; G 为介质的剪切模量, Pa; R 为截断半径, m; ρ 为介质的密度, kg/m^3 ; c_P 、 c_S 分别为 P 波(压缩波)波速和 S 波(剪切波)波速, m/s, 对于线弹性各向同性介质, c_P 、 c_S 满足公式(3)。

$$\begin{cases} c_P = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho} \\ c_S = \sqrt{G/\rho} \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ 为介质的拉梅常数, Pa。

2.2 算例验证

为验证黏弹性人工边界在地下厂房结构动力计算中的适用性, 建立如图 2 所示的立方体模型。模型尺寸为 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, 采用尺寸为 10 m 的 8 节点 6 面体单元离散, 共剖分了 64 000 个单元和 68 921 个节点。在有限元模型底部和四周设置黏弹性人工边界, 将模型底部中心点设为监测点 A, 中部中心点设为监测点 B, 顶部中心点设为监测点 C, 以考察入射波在半无限域介质中的传播过程。

设材料密度为 $2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$, 弹性模量为 10 GPa , 泊松比为 0.33 , 不考虑材料的阻尼。根据公式

(3) 计算得到 P 波波速为 $2\,434.46 \text{ m}/\text{s}$, S 波波速为 $1\,226.28 \text{ m}/\text{s}$ 。在模型底部沿 X 向垂直输入如公式(4)、(5)所示的剪切波, 计算总时长为 2 s 。

$$u = \begin{cases} 0.5(1 - \cos(8\pi t)) & (0 \leq t \leq 0.25) \\ 0 & (0.25 < t \leq 2.0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{u} = \begin{cases} 4\pi \sin(8\pi t) & (0 \leq t \leq 0.25) \\ 0 & (0.25 < t \leq 2.0) \end{cases} \quad (5)$$

理论上, 剪切波在 0.326 s 时到达顶部自由面, 0.576 s 时完成反射离开自由面并向下传播, 最终被底部人工边界完全吸收。图 3(a) 为根据波动理论计算获得的监测点 A、B、C 的位移时程曲线。图 3(b)、3(c)、3(d) 分别列出了模型四周设置为黏弹性边界、自由边界和法向固定边界时 3 个监测点的位移时程曲线。

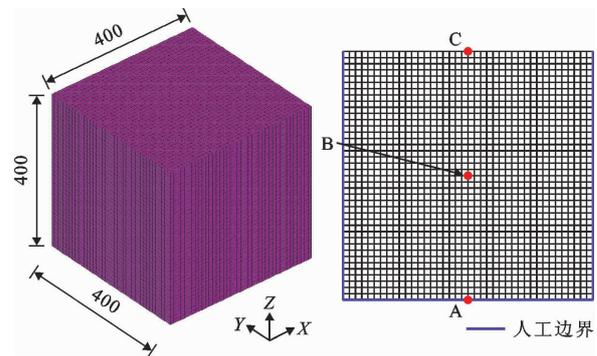


图 2 立方体计算模型(单位:m)

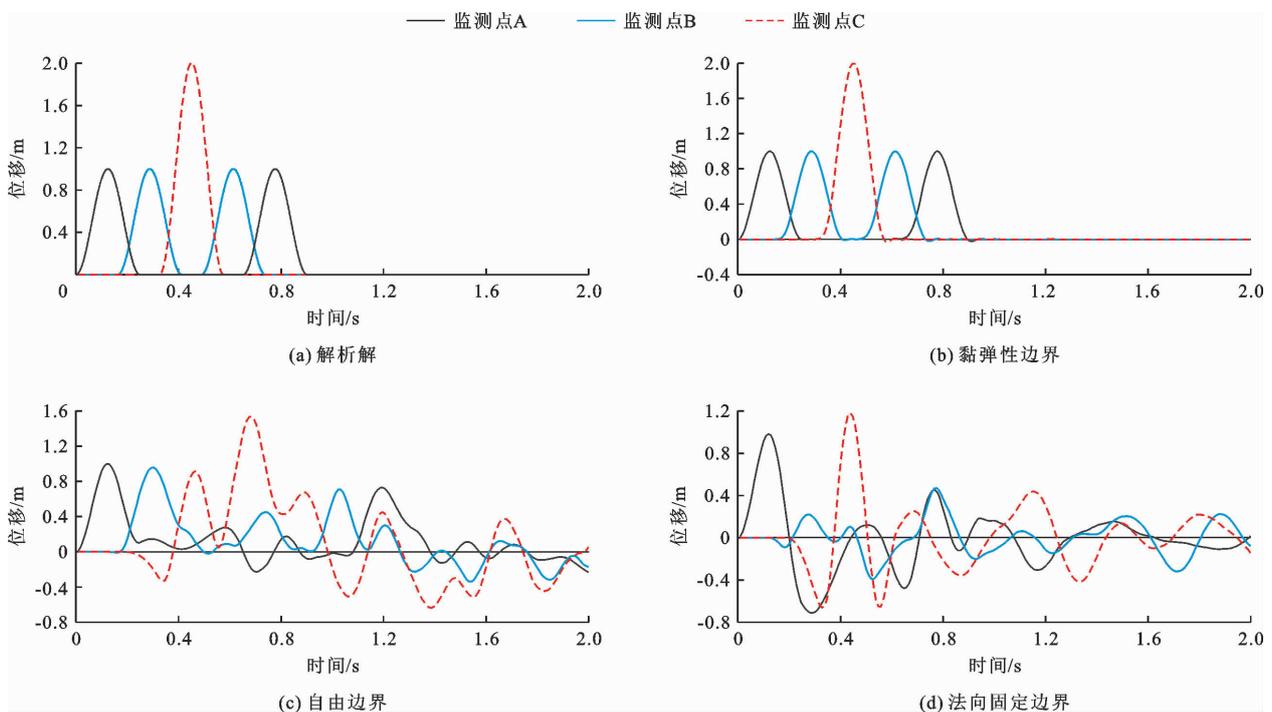


图 3 监测点位移时程曲线

从图3可以看出,黏弹性边界条件下监测点位移时程的数值解与波动理论的解析解吻合较好,而自由边界和固定边界条件下3个监测点反复监测到位移波动,这与实际情况明显不符。计算结果表明,黏弹性人工边界可以很好地模拟波在半无限域中的传播过程以及边界的吸能效果,并且具有较高的计算精度。

3 计算模型与参数

3.1 计算模型

丰宁抽水蓄能电站位于河北省承德市西部,距离北京市约180 km,主要向京津及冀北电网供电。电站设有上、下两座水库,落差为425 m。电站总装机容量为3 600 MW,分两期建设,共安装12台机组(单机容量为300 MW)。以某机组段地下厂房结构为研究对象,纵向设为 X 轴,以左、右结构缝为边界($-X$ 方向为左侧),长度范围为24 m;横向设为 Y 轴,以上、下游边墙为边界,长度范围为24.7 m;竖向设为 Z 轴,以发电机层地面和尾水管外围混凝土底板为边界,高度范围为29 m。

建立该段厂房结构的三维有限元模型,采用6节点3棱柱单元和8节点6面体单元划分蜗壳和尾水管外围混凝土、风罩、机墩、楼梯、楼板、边墙、立柱等混凝土结构,采用4边形壳单元划分蜗壳和尾水管等流道金属结构。单元网格尺寸控制在0.4 m以内,共划分311 820个单元和327 595个节点。

厂房整体结构有限元模型如图4所示,局部结构有限元模型如图5所示,计算分析采用ANSYS有限元软件。

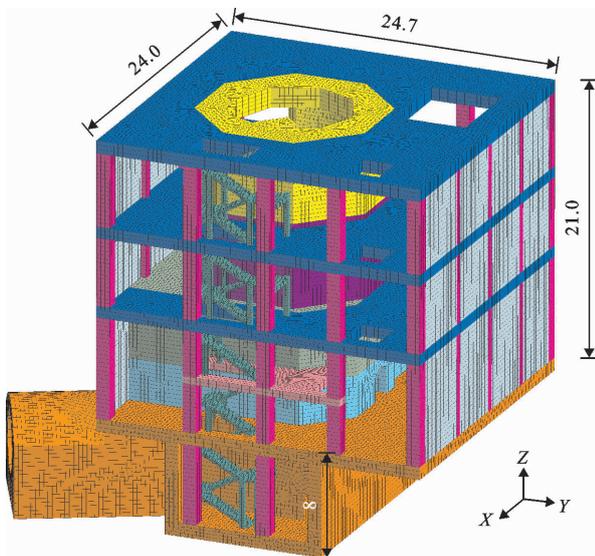


图4 厂房整体结构有限元模型(单位:m)

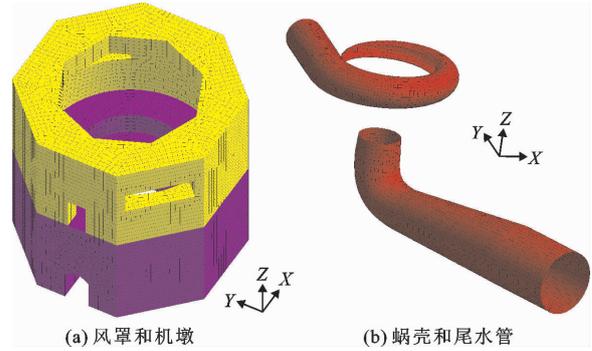


图5 厂房局部结构有限元模型

3.2 边界条件

有限元模型左、右两侧(主要基于结构分缝的考虑)及顶部设为自由边界,其余边界(厂房与围岩连接处)设为黏弹性人工边界。

3.3 材料参数

厂房结构采用弹性本构关系模拟,混凝土材料标号为C30,材料参数取值详见表1。

表1 厂房结构材料参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
C30 混凝土	2 500	30	0.167
钢材	7 850	200	0.300

4 厂房结构自振频率与共振复核

4.1 厂房结构自振频率

厂房整体结构前20阶自振频率计算结果如表2所示。

从表2可以看出,厂房相邻各阶自振频率相差较小,主要是因为抽水蓄能电站地下厂房空间结构较为复杂。厂房第1阶振型主要表现为水轮机层以上结构的整体纵向振动;第2阶振型主要表现为水轮机层以上结构的整体横向振动;第3阶振型主要表现为水轮机层以上结构绕竖轴的扭转振动;其余各阶振型主要表现为楼板和楼梯局部区域的竖向振动以及上游边墙局部区域的横向振动。

4.2 厂房结构共振复核

水力、机械和电磁振源是引起抽水蓄能电站厂区振动的3种常见振源,其中水力振源占据主导地位^[16]。丰宁抽水蓄能电站机组主要振源频率特性如表3所示。其中,蜗壳和无叶区脉动压力主频为 $7.15 \times 9 \times 2 = 128.70$ Hz,通常认为是机组转频(7.15 Hz)与转轮叶片数(丰宁电站机组转轮叶片数为9)乘积的2倍频。

表2 电站厂房结构前20阶自振频率

阶次	频率/Hz	主要振型描述
1	13.32	水轮机层以上结构的整体纵向振动
2	14.77	水轮机层以上结构的整体横向振动
3	16.88	水轮机层以上结构绕竖轴的扭转振动
4	19.46	发电机层楼板上游左侧局部区域的竖向振动
5	23.22	发电机层楼板下游左侧局部区域的竖向振动
6	23.32	发电机层楼板吊物孔附近区域的竖向振动
7	26.42	发电机层楼板母线洞顶部局部区域的竖向振动
8	27.10	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及发电机层楼板吊物孔与楼梯孔之间局部区域的竖向振动
9	27.25	蜗壳层上游边墙左侧局部区域的横向振动
10	27.70	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及蜗壳层上游边墙左侧局部区域的横向振动
11	28.18	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及蜗壳层上游边墙右侧局部区域的横向振动
12	29.28	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及发电机层楼板母线洞顶部局部区域的竖向振动
13	29.45	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动
14	29.99	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及发电机层楼板吊球阀孔左侧局部区域的竖向振动
15	30.61	母线层楼板吊物孔左侧局部区域的竖向振动
16	31.05	蜗壳夹层楼梯局部结构的竖向振动及母线层楼板吊球阀孔左侧局部区域的竖向振动
17	31.72	蜗壳层上游边墙左侧和右侧局部区域的横向振动
18	32.34	发电机层楼板吊球阀孔和吊物孔左侧局部区域的竖向振动
19	32.66	母线层楼梯局部结构的竖向振动及发电机层楼板楼梯孔右侧局部区域的竖向振动
20	34.90	蜗壳层楼梯局部结构的竖向振动

表3 电站机组不同振源频率

机械振源		电磁振源	水力振源			
机组转频	2倍频		尾水管低频涡带	尾水管中频涡带	蜗壳和无叶区脉动压力	导叶后脉动压力
7.15	14.3	50	1.43~2.36	5.72~8.58	128.70	157.03

按照水电站厂房设计规范(NB 35011—2016)^[17]有关规定对厂房结构进行共振复核。为有效规避共振带来的危害,厂房结构自振频率和振源频率之差的绝对值与较大频率的比值应超过20%。由于厂房整体结构前20阶自振频率范围为13.32~34.90 Hz,与机组转频、电磁频率、尾水管低频涡带和中频涡带的主频、蜗壳和无叶区的脉动压力主频、导叶后的脉动压力主频相差均超过20%,因而可以认为在这些振源频率作用下厂房不会产生共振。需要注意的是,厂房结构前3阶自振频率(13.32~16.88 Hz)与机组转频的2倍频(14.3 Hz)相差小于20%,但考虑到机械振源所占比重较小,厂房共振产生的可能性很小。

综上分析表明,厂房整体结构产生共振的危险性很低。

5 脉动压力作用下厂房结构振动响应分析

5.1 厂房振动控制标准

厂房作为电站工作人员日常办公场所,其结构设计对于保障员工的安全与舒适至关重要。现行水电站厂房设计规范仅对机墩最大振幅作出规定,针对抽水蓄能电站厂房结构振动控制尚未建立统一的评价标准。本文参考相关文献[9]~[10]、[18]~[19]对厂房振动评价标准的研究,结合本工程的结构设计、运行环境等实际情况,列出厂房振动控制标准(表4),作为厂房振动预测和控制的定量依据。

5.2 数值计算结果验证

由于水力振源占据主导地位,因此本文主要分

析水力振源作用下厂房结构的振动响应。谐响应分析法和时程分析法是计算水力振源作用下厂房结构动力响应的2种常用方法。考虑到实际工程中流道脉动压力几乎不会出现简谐规律变化,而是呈现随时间任意变化的特性,因此时程分析法计算结果更加符合实际情况^[20]。故本文采用时程分析法计算

脉动压力作用下厂房结构的动力响应,脉动压力来源于流道内各测点的现场测试数据,结构阻尼比取0.02。时程计算分抽水和发电(负荷300 MW)2种工况,选取的代表性荷载持续时间为2 s,不同工况下蜗壳进口和尾水管进口脉动压力时程曲线如图6、7所示。

表4 电站厂房各部位振动控制标准

部位	最大位移/mm		均方根速度/(mm·s ⁻¹)		均方根加速度/(m·s ⁻²)	
	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
楼板(作为建筑结构)	0.20	0.20	5.0~10.0	5.0~10.0	1.0~10.0	1.0~10.0
楼板(人体健康评价)			6.4	3.2	1.0	0.4
风罩、机墩	0.20	0.15	5.0	5.0	1.0~10.0	1.0~10.0
其他建筑结构	0.20	0.20	5.0~10.0	5.0~10.0	1.0~10.0	1.0~10.0

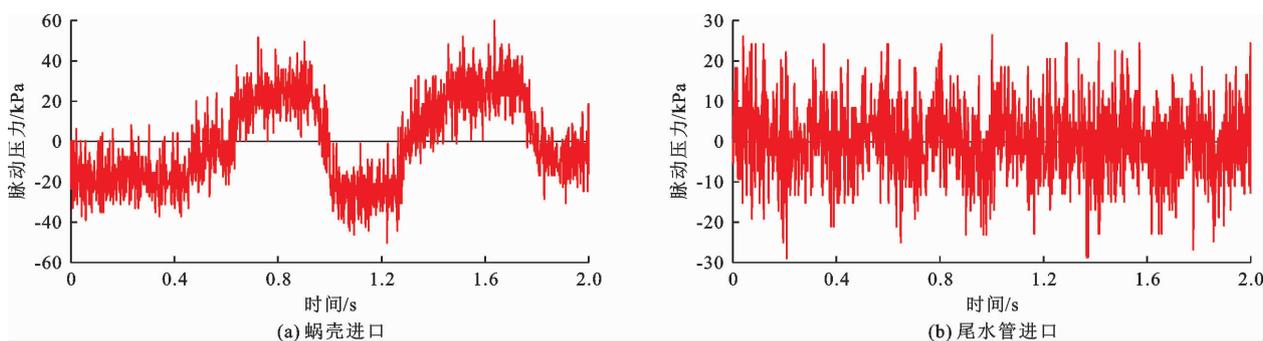


图6 抽水工况下脉动压力时程曲线

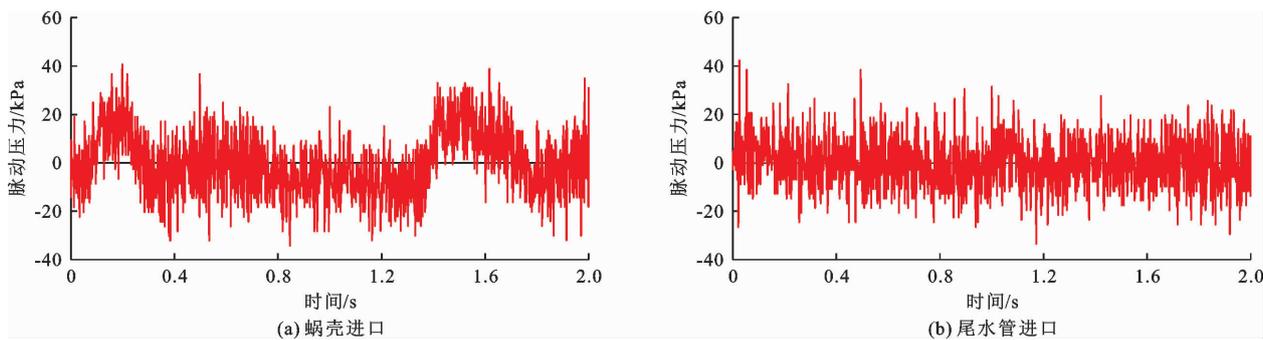


图7 发电工况下脉动压力时程曲线

现场在发电机层楼板、母线层楼板和轮机层楼板各布置2个固定加速度测点,其中测点FG_A、FG_D分别位于发电机层楼板的第一象限(+X、+Y区域)和第四象限(+X、-Y区域),测点FB_A、FB_D分别位于母线层楼板的第一象限和第四象限,测点FT_A、FT_D分别位于轮机层楼板的第一象限和第四象限。为进一步验证本文数值分析方法的可靠性,将抽水和发电2种工况下各测点竖向均方根加速度的计算值与实测值对比情况列于表5。从表5可以看出,抽水工况下各测点的竖向均方根加速度计算值与实测值的相对误差绝对值的最大值为

10.1%,发电工况下计算值与实测值的相对误差绝对值的最大值为9.5%。总体看来,3层楼板各测点的竖向均方根加速度计算值与实测值相差都不大,表明本文建立的计算模型和设置的黏弹性人工边界是合理的,采用的数值计算方法是可行的。

5.3 厂房振动响应分析与评价

抽水和发电2种工况下厂房结构典型部位最大振动响应分别见表6和7。其中,楼板是厂房振动的薄弱环节。

从表6、7可知,3层楼板的竖向振动响应均大于其水平向振动响应。

表 5 2 种工况下 3 层楼板各测点的竖向均方根加速度

部位	测点	抽水工况			发电工况		
		实测/(m·s ⁻²)	计算/(m·s ⁻²)	相对误差/%	实测/(m·s ⁻²)	计算/(m·s ⁻²)	相对误差/%
发电机层	FG_A	0.110	0.105	-4.5	0.126	0.118	-6.3
楼板	FG_D	0.065	0.060	-7.7	0.075	0.080	6.7
母线层	FB_A	0.104	0.098	-5.8	0.189	0.171	-9.5
楼板	FB_D	0.079	0.076	-3.8	0.092	0.095	3.3
水轮机层	FT_A	0.129	0.118	-8.5	0.160	0.146	-8.8
楼板	FT_D	0.119	0.131	10.1	0.169	0.176	4.1

表 6 抽水工况下各典型部位最大振动响应

部位	最大位移/μm			均方根速度/(mm·s ⁻¹)			均方根加速度/(m·s ⁻²)		
	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向
发电机层楼板	1.41	2.43	3.28	0.12	0.14	0.29	0.059	0.067	0.184
母线层楼板	1.25	2.06	3.69	0.15	0.15	0.24	0.075	0.073	0.198
水轮机层楼板	2.05	2.59	2.75	0.31	0.38	0.47	0.231	0.353	0.391
风罩	1.38	1.59	2.98	0.18	0.17	0.28	0.112	0.110	0.241
定子基础	0.87	1.42	2.05	0.07	0.08	0.24	0.057	0.049	0.210
下机架基础	0.89	1.34	1.54	0.09	0.08	0.18	0.066	0.061	0.139
母线层立柱	1.90	2.25	2.76	0.21	0.20	0.15	0.093	0.073	0.068
水轮机层立柱	2.84	2.37	2.23	0.45	0.22	0.16	0.222	0.104	0.131
母线层楼梯	1.70	2.54	4.77	0.19	0.47	0.95	0.121	0.287	0.562
水轮机层楼梯	2.27	2.31	4.09	0.24	0.24	0.48	0.136	0.143	0.278

表 7 发电工况下各典型部位最大振动响应

部位	最大位移/μm			均方根速度/(mm·s ⁻¹)			均方根加速度/(m·s ⁻²)		
	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向
发电机层楼板	1.48	2.00	4.95	0.14	0.17	0.36	0.068	0.076	0.210
母线层楼板	1.24	1.77	4.05	0.17	0.15	0.33	0.089	0.081	0.208
水轮机层楼板	2.03	2.32	3.28	0.36	0.43	0.72	0.263	0.382	0.482
风罩	1.20	1.45	2.70	0.24	0.18	0.27	0.152	0.117	0.235
定子基础	0.95	1.18	1.71	0.09	0.10	0.29	0.069	0.058	0.237
下机架基础	0.72	1.12	1.29	0.10	0.09	0.22	0.073	0.058	0.165
母线层立柱	2.20	2.12	3.47	0.24	0.22	0.23	0.100	0.111	0.092
水轮机层立柱	3.26	2.89	2.64	0.43	0.29	0.23	0.212	0.124	0.134
母线层楼梯	1.94	2.53	5.03	0.23	0.51	1.05	0.125	0.311	0.630
水轮机层楼梯	3.02	3.27	4.94	0.36	0.30	0.63	0.175	0.171	0.317

从表 6 可以看出,抽水工况下楼板竖向最大位移为 3.69 μm,出现在母线层吊球阀孔左侧;楼板竖

向最大均方根速度为 0.47 mm/s,出现在水轮机层楼梯孔下游侧;楼板竖向最大均方根加速度为 0.391

m/s^2 , 出现在水轮机层吊球阀孔下游侧。抽水工况下楼板竖向最大振动响应时程曲线如图8所示。结合表6、图8可知,3层楼板最大位移、最大均方根速度和均方根加速度均满足厂房振动控制标准。

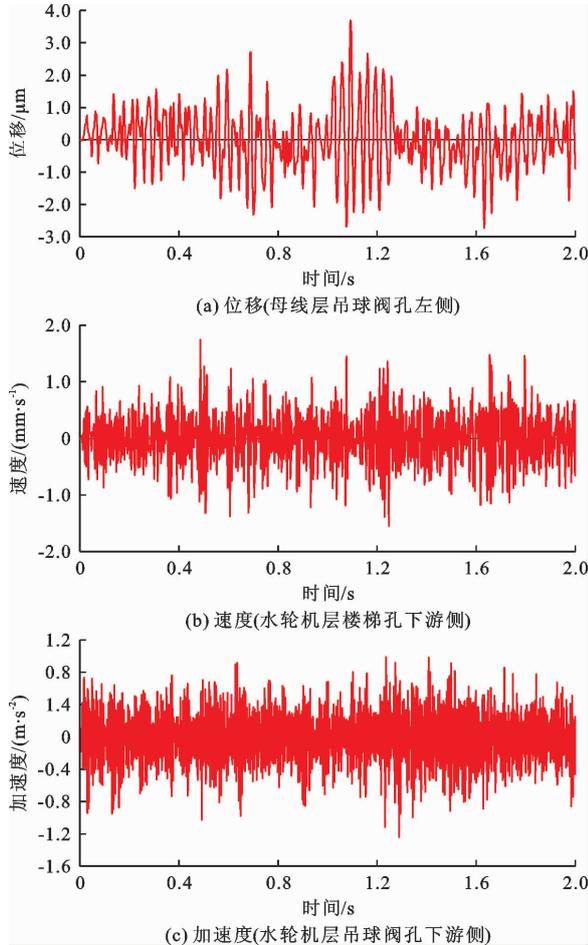


图8 抽水工况下楼板竖向最大振动响应时程曲线

从表7可以看出,发电工况下楼板竖向最大位移为 $4.95 \mu\text{m}$, 出现在发电机层母线洞顶处; 楼板竖向最大均方根速度为 0.72 mm/s , 出现在水轮机层下游左侧立柱旁; 楼板竖向最大均方根加速度为 0.482 m/s^2 , 分布位置与最大均方根速度一致。发电工况下楼板竖向最大振动响应时程曲线如图9所示。结合表7、图9可知,3层楼板最大位移、最大均方根速度均满足厂房振动控制标准。需要注意的是,水轮机层楼板竖向最大均方根加速度超过人体健康评价标准(0.4 m/s^2),可能会导致此处工作人员身体产生不适感。

2层楼梯的竖向振动响应均大于其水平向振动响应。2种工况下母线层楼梯竖向最大均方根加速度分别为 0.562 、 0.630 m/s^2 , 均满足厂房振动控制标准; 风罩、机墩、立柱各方向最大位移、最大均方根

速度和均方根加速度都较小, 同样满足厂房振动控制标准。

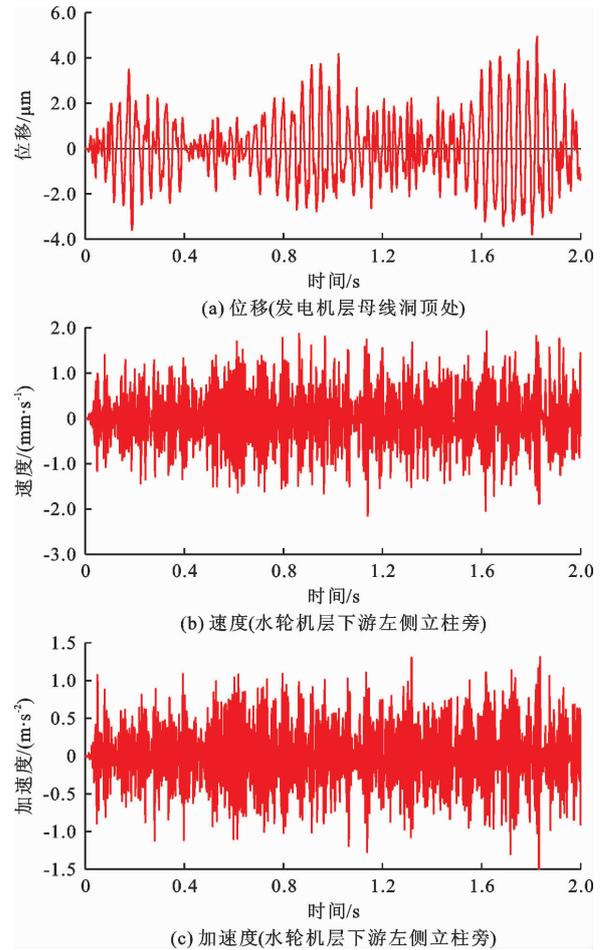


图9 发电工况下楼板竖向最大振动响应时程曲线

6 结论

本文采用黏弹性人工边界模拟厂房的边界条件, 计算分析了丰宁抽水蓄能电站某机组段地下厂房整体结构自振频率特性, 并进行了共振复核。采用时程分析法计算了流道脉动压力作用下厂房结构的振动响应。

(1) 通过算例验证了黏弹性人工边界可以很好地模拟半无限介质的弹性恢复能力以及人工边界的吸能效果, 凸显了其相对于传统自由边界和固定边界在模拟波的传播过程时的准确性和优越性。

(2) 厂房整体结构前20阶自振频率范围为 $13.32 \sim 34.90 \text{ Hz}$, 前3阶振型主要表现为水轮机层以上结构的整体振动, 其余各阶振型主要表现为楼板和楼梯局部区域的竖向振动以及上游边墙局部区域的横向振动。共振复核结果表明, 厂房整体结构产生共振的危险性很低。

(3)通过对比抽水和发电2种工况下楼板各测点竖向均方根加速度的计算值与实测值发现,两者数值大小吻合性较好,相对误差绝对值的最大值为10.1%,进一步从实测数据方面验证了本文数值分析方法的合理性以及计算结果的准确性。

(4)流道脉动压力作用下,楼板、楼梯的竖向振动响应均大于其水平向振动响应。抽水工况下楼板、风罩、机墩、立柱、楼梯等典型部位最大振动响应均满足厂房振动控制标准,发电工况下除水轮机层楼板竖向最大均方根加速度超过人体健康评价标准外,其余结构的各项指标均满足厂房振动控制标准。

参考文献:

- [1] 胡浩,张苏,赵剑喆,等.高比例水电系统抽水蓄能电站发展空间及趋势研究[J].水电与抽水蓄能,2024,10(1):115-120.
- [2] 周兴波,周建平,杜效鹄.新时期抽水蓄能电站高质量发展的思考[J].水电与抽水蓄能,2023,9(6):20-24+36.
- [3] 肖微,刘国庆,王伟,等.大型抽水蓄能电站地下厂房结构自振特性分析[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2024,22(2):138-148.
- [4] 郭德昌,张宏战,薛石平,等.抽水蓄能电站地下厂房相邻机组段间振动的相互影响[J].水利与建筑工程学报,2021,19(3):50-56.
- [5] 欧阳金惠,耿峻,许亮华,等.某大型抽水蓄能电站厂房强烈振动原因分析与减振措施研究[J].水利学报,2019,50(8):1029-1037.
- [6] 郭鹏,刘殿海,李赞俐,等.抽水蓄能电站厂房振动问题分析及经验[J].水电与抽水蓄能,2022,8(6):99-104+109.
- [7] ZHANG Lijuan, GUO Yaohua, WANG Haijun, et al. Research on vibration characteristics of an underground powerhouse of large pumped-storage power station[J]. Energies, 2023, 15(24): 9637.
- [8] 侯加浩,傅丹,伍鹤皋,等.抽水蓄能电站厂房板梁柱体系抗振性能研究[J].中国农村水利水电,2022(6):213-217+221.
- [9] 马雨峰,吕风英,刘双华,等.抽水蓄能电站地下厂房自振频率特性研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(5):221-225.
- [10] 于鑫,陈婧,闫滨.大型抽水蓄能电站地下厂房结构振动反应分析[J].沈阳农业大学学报,2019,50(4):507-512.
- [11] 崔琦,侯建国,宋一乐.抽水蓄能电站地下厂房围岩约束及结构振动特性分析[J].岩土力学,2019,40(2):809-817.
- [12] 苏超,徐云泉,胡绍沛,等.基于粘弹性人工边界的动力数值模拟范围研究[J].水电能源科学,2018,36(4):89-91+52.
- [13] 徐云泉,徐建,林志华.某抽水蓄能电站地下厂房动力特性研究[J].云南水力发电,2021,37(3):136-140.
- [14] 刘晶波,宝鑫,李述涛,等.采用黏弹性人工边界时显示算法稳定性条件[J].爆炸与冲击,2022,42(3):124-137.
- [15] 刘晶波,宝鑫,李述涛,等.采用粘弹性人工边界时显式算法稳定性的改善研究[J].工程力学,2023,40(5):20-21.
- [16] 王海军,陈波,杨秀维,等.抽水蓄能电站管道水力振动在围岩中的传播规律研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(3):116-122.
- [17] 国家能源局.水电站厂房设计规范:NB 35011—2016[S].北京:中国电力出版社,2017.
- [18] 景浩,陈婧,马震岳.新疆阜康抽水蓄能电站地下主厂房结构振动特性分析[J].西北水电,2023(6):72-77.
- [19] 郭冬云,胡林江,伍鹤皋.溧阳抽水蓄能电站地下厂房结构动力响应分析[J].水电与新能源,2018,32(7):13-18.
- [20] 刘建,伍鹤皋.脉动压力谱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.
- [21] 肖旻.塔里木灌区防渗渠道破坏机理及综合防治措施研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2011.
- [22] 肖旻.开放系统混凝土衬砌输水渠道冻胀破坏力学模型及应用[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [23] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.考虑冻土双向冻胀与衬砌板冻缩的大型渠道冻胀力学模型[J].农业工程学报,2018,34(8):100-108.
- [24] 叶琳昌,沈义.大体积混凝土施工[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.
- [25] ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2014.
- [26] 王正中.梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J].农业工程学报,2004(3):24-29.
- [27] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.考虑冻土与结构相互作用的梯形渠道冻胀破坏弹性地基梁模型[J].水利学报,2017,48(10):1229-1239.

(上接第154页)