

抽水蓄能电站地下厂房整体与局部模态分析

杨 浩¹, 蒋 璆¹, 王 琪¹, 杨 季 松¹, 王 青 华², 李 冬 冬²

(1.惠州蓄能发电有限公司,广东 惠州 5161000;2.上海安乃基能源科技有限公司,上海 201806)

摘 要:抽水蓄能电站厂房结构常受到因水轮机运行过程中的离心力、电磁力矩以及流道内压力脉动所产生的振动影响,严重威胁厂房的安全稳定。本文以某抽水蓄能电站地下厂房下部结构作为研究对象,建立其整体三维结构有限元模型,对厂房整体及局部结构进行模态分析。结果表明:对于厂房整体结构,其一阶模态频率同转轮转动频率、动静干涉产生的压力脉动频率及其二倍频有较大的差距,满足防共振规范要求;对厂房局部结构,立柱和楼梯的低阶频率与动静干涉压力脉动频率相近,容易引发局部共振;而其高阶频率与动静干涉载荷二倍频相近,虽然高阶模态对结构振动贡献较小,但由于 150 Hz 载荷将会导致附近各模态振型叠加,其作用效果不能忽视。

关键词:抽水蓄能电站;厂房结构;振动;局部模态分析;有限元

中图分类号:TV743;TV731+.6;B815.1

文献标识码:A

文章编号:1001-2184(2020)01-0078-05

Overall and Local Modal Analysis of Underground Powerhouse of Pumped Storage Power Station

YANG Hao¹, JIANG Qiu¹, WANG Qi¹, YANG Jisong¹, WANG Qinghua², LI Dongdong²

(1. Huizhou Pumped Storage Co., Ltd, Huizhou, Guangdong, 516100;

2. Shanghai Energy Science&Technology Co., Ltd, Shanghai, 201806)

Abstract: The structure of the pumped storage powerhouse is often affected by the centrifugal force, electromagnetic moment and the vibration caused by the pressure fluctuation in the flow passage during the operation of the water turbine, which seriously threatens the safety and stability of the power house. In this paper, the lower structure of the underground powerhouse of a pumped storage power station is chosen as the research object, and its overall 3D structure finite element model is established to carry out the modal analysis of the overall and local structure of the powerhouse. The results show that, for the whole structure of the powerhouse, the first-level modal frequency is quite different from the rotating frequency of the runner, pressure fluctuation frequency and its twice frequency produced by the dynamic and static interference, which meet the requirements of anti resonance specification; for the local structure of power house, the lower frequency of the column and stair is similar to the fluctuating frequency of dynamic and static interference pressure, which is easy to cause local resonance; while the higher frequency is similar to the twice frequency of dynamic and static interference load, although the contribution of higher-level modal to the structure vibration is small, because the 150 Hz load will lead to the superposition of nearby modals, the effect cannot be ignored.

Key words: pumped storage power station; powerhouse structure; vibration; local modal analysis; finite element

0 引 言

为适应大电网的调节需求,我国已经建成了一大批高水头、大容量的抽水蓄能电站^[1-2]。因其具有高水头、高转速和双向运行的特点,且与常规水电站相比,机组支撑的厂房结构承受的离心力、电磁力矩以及流道压力脉动产生的振动都大得多,因此,对厂房结构的振动问题不容忽视^[3-4]。

尹铄等对某蓄能电站进行环境噪声与振动现场测试和数据分析,研究得到厂房各层柱子中以水轮机层柱子振动最强烈,母线和蜗壳层柱子次之^[5]。廖俊利用 ANSYS 软件对某抽水蓄能电站厂房结构进行了有限元数值计算,通过分析研究了地下厂房结构模型的建立及其自振特性,并对影响厂房数值模型较大的边界条件进行了计算分析。结果表明,在水电站厂房的振动过程中,由于

收稿日期:2019-11-30

吊物孔处楼板、风罩等部分的刚度较低,模型的绝大多数阶的振型均表现为楼板、风罩的局部振动,这些部位属于厂房振动的薄弱环节^[6]。张超等采用模态试验技术对抽水蓄能电站地下厂房结构的动力特性进行了研究。结果表明,电站厂房一阶振型为厂房整体沿轴线方向弯剪振动,两边墙以剪切振型为主,厚板—梁—柱构成的厂房框架结构沿轴线方向以弯曲振动为主。通过对某抽水蓄能水电站的地下厂房进行振源测试及整体结构环境激励下的模态测试,并与有限元计算结果进行了对比^[7]。徐丽等人发现振源振动主要表现为发电机组工作转速引起的 8.3 Hz 及其倍频振动,7 倍转频 58.3 Hz 显著;并有与涡带压力脉动有关的 2.3 Hz 频率成分一阶模态为长轴向的整体平动;板、梁构件的局部竖向振动模态较多^[8]。陈晨等为分析抽水蓄能电站地下厂房结构在干湿模态下的振动特性,建立某抽水蓄能电站地下厂房的动力分析模型,计算厂房整体结构在考虑尾水管流体作用后的湿模态,并与厂房的干模态进行比较^[9]。

上述研究大多将厂房整体作为研究对象,通过实验模态或有限元方法得到厂房整体结构的模态振型与模态频率,然而厂房局部模态振动频率及其振型对厂房整体共振亦有较大影响。本文对某抽水蓄能电站地下厂房下部结构进行自振特性研究。主要包括两部分内容:(1) 厂房整体模态分析,求得厂房的模态频率与对应振型,分析评价厂房共振复核指标;(2) 厂房局部模态分析,求得厂房各层立柱和楼梯的自振特性,评价厂房局部结构对共振的影响。

1 厂房结构及有限元模型

1.1 厂房几何模型

水电站主厂房一般以发电机层楼板为界分为上部结构和下部结构。上部结构主要包括屋面体系、吊车梁、厂房框架,下部结构主要包括发电机层梁板系统、发电机的机墩、蜗壳、尾水管、上下游边墙和层间立柱等。很多资料表明,机组在一定的导叶开度下,出现强烈振动,并引发厂房结构共振,强振部位主要集中在下部结构,尤其在发电机层楼板上振感最为强烈,因此,研究建模的重点应放在厂房的下部结构。本文以某抽水蓄能电站 5 号厂房下部结构为研

究对象,其几何模型如图 1 所示。

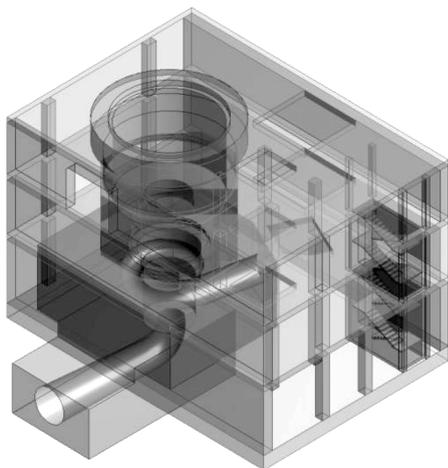


图 1 厂房三维模型

1.2 厂房有限元模型

该抽水蓄能电站地下厂房结构模型计算采用以下假定:(1)进行厂房动力分析时,假定结构为无阻尼,且在弹性范围内微幅振动;(2)假定混凝土及围岩均为各向同性材料;(3)计算中不考虑楼板混凝土与岩石的黏结力。

振动测试分析表明,厂房振动的主要振源为水力振源,因此,本次计算有限元模型按照流道结构的设计尺寸,严格模拟了流道结构及其外围大体积混凝土。鉴于各层楼板、柱子以及蜗壳层以上的楼梯等部位振动相对强烈,本次计算有限元网格严格按照设计尺寸对振动强烈部位进行了精细模拟。此外与地震作用下的厂房整体振动不同,厂房振动为楼板中间部位、柱子以及楼梯等局部振动,厂房墙体对楼板竖向振动、柱子水平振动约束较小;同时,根据现场调查,上下游墙体与围岩之间存在局部联接,因此,本次计算分析对墙体的孔洞及其与围岩联接关系与结构细节特征进行了合理简化。经网格无关性验证,确定 5 号厂房有限元单元总数为 566 116 个。图 2 给出了厂房整体网格模型,图 3 给出了厂房局部网格划分。

1.3 有限元模型的边界条件

计算模型中的模型底部与两侧基岩边界如下:模型底部采用三方向固定约束,上下游基岩采用弹性边界条件。此外,两厂房分缝处为自由边界(无约束)。

对于弹性边界条件,由现场调查表明,实际厂

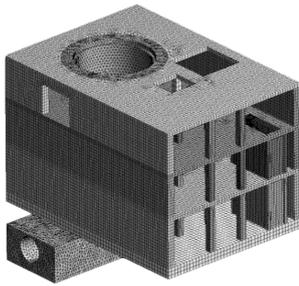


图 2 厂房整体网格划分

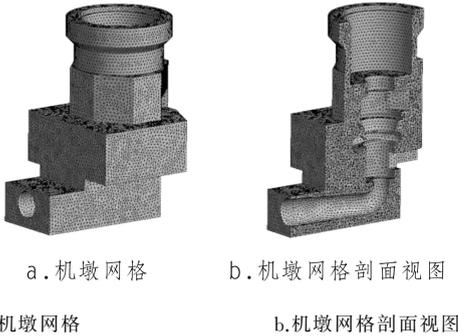


图 3 厂房局部网格划分

房结构与围岩之间存在局部联接。因此,本次计算还将考虑围岩对厂房结构自振特性的影响。本次计算中将围岩抗力刚度采用弹簧单元等效。围岩的抗力系数参考小浪底工程进水塔柱基础围岩的抗力系数试验成果(Ⅲ类围岩的抗力系数为 80 kg/cm³)。

2 厂房整体模态分析

2.1 模态分析标准

关于水电站厂房结构的共振复核,《水电站厂房设计规范》(SL266—2001)对机墩结构作了规定。根据该规范 4.3.8 条规定,机墩自振频率与强迫振动频率之差和自振频率之比值应大于 20%~30%,或强迫振动频率与自振频率之差和机墩强迫振动频率之比值应大于 20%~30%,即:

$$\frac{|f - f_0|}{f} \times 100\% > 20\% \sim 30\%$$

式中 f_0 为机墩结构的自振频率, f 为机组振源的频率。

根据相关水电工程厂房结构分析成果,由于水电站厂房结构比较复杂,各构件不仅刚度相差较大,而且其自振频率存在交叉和耦合。同时,由于有限元方法求解多自由度自振频率的局限性,往往频率的阶数越高,其计算累计误差越大。因此,对具有复杂结构的水电站厂房开展整体结构

自振特性分析时,求解阶数取值不宜过高。

2.2 厂房整体结构自振特性

由于厂房结构主要载荷为转动部件质量不均产生激振力与动静干涉产生的压力脉动,其激励频率分别为 8.33 Hz 与 75 Hz,然而实际测试中发现压力脉动 2 倍频 150 Hz 也占较高分量,此处着重对上述频率进行分析。

本次开展电站 5 号机组段整体厂房结构自振特性分析时,取 20 阶振型和频率,各阶模态频率计算结果见表 1。

表 1 厂房整体结构模态频率表

模态阶数	模态频率 /Hz	模态阶数	模态频率 /Hz
1	17.5	11	32.4
2	18.1	12	33.2
3	20.6	13	33.8
4	23.4	14	34.1
5	25.9	15	34.8
6	27.2	16	35.7
7	27.4	17	36.3
8	28.1	18	37.2
9	30.3	19	37.5
10	30.8	20	37.9

图 4 给出了厂房整体结构前 6 阶模态振型图。

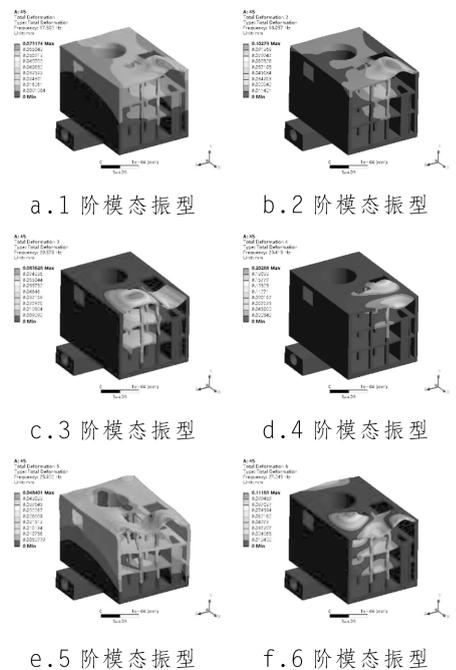


图 4 厂房整体结构模态振型

厂房整体结构自振特性计算结果表明:

(1)地下厂房结构的一阶模态频率为 17.5 Hz,与转轮转动频率 8.33 Hz 以及动静干涉产生的压力脉动频率以及其二倍频(75 Hz, 150 Hz)

有一定的差距,满足规范规定的防共振 20% 的错开度要求。

(2)从表 1 及图 4 可以看出,由于厂房结构各部位刚度存在较大差异,从第 6 阶后的各阶频率幅值相差较小,同一阶振型表现为不同部位的振动,因此,很难从整体模型的自振特性分析中判断局部是否会发生共振。因此,需要开展厂房结构的局部自振特性分析。

3 厂房局部模态分析

如前所述,由于厂房结构各部位刚度存在较大差异,各阶频率幅值相差较小,同一阶振型表现为不同部位的振动,故难以从整体模型的自振特性分析中判断局部结构是否会发生共振。因此,需要开展厂房结构的局部自振特性分析。

建筑振动主要由低阶模态贡献,高阶模态模态贡献度较低,高阶模态对振动贡献较小,此处忽略高阶模态对振动的影响,取前 6 阶模态进行重点分析。对厂房某一局部结构进行模态分析和研究时,应将其余结构均视为无质量,以模拟整体模型其他结构对该局部结构的约束。

在实际测试中,厂房立柱及厂房楼梯振动严重,且厂房各层立柱结构相似、约束相同,故本次研究分析针对厂房中间层立柱和厂房楼梯开展自振特性分析。

3.1 厂房中间层立柱自振特性

对于楼层支柱上、下接触楼板是支柱结构的唯一约束,机组所在的厂房各层(中间层、水轮机层与蜗壳层)层高差距较小且各层楼板厚度一致,所以厂房各楼层间立柱约束相同,自振特性具有相似性。本文以厂房中间层立柱为例,研究楼层立柱的自振特性。

由于立柱结构的相似性与对称性,致使各阶模态频率与振型相近,相近振型与模态频率实为不同立柱同一阶模态,此处结合模态频率与振型图,对中间层取前 24 阶模态进行分析。

表 2 给出了厂房中间层立柱各模态阶数对应的模态频率表。

间层各立柱 X 方向 1 阶模态频率分别为 61.5 Hz、62.1 Hz、64.4 Hz、66.7 Hz、68.5 Hz、69.4 Hz、70.7 Hz、71.7 Hz;中间层各立柱 Y 方向 1 阶模态频率分别为 54.3 Hz、55.8 Hz、57.8 Hz、63.4 Hz、64.94 Hz、69.6 Hz、70.1 Hz、71.4 Hz。

表 2 厂房中间层立柱模态频率表

模态阶数	厂房中间层模态频率 /Hz	模态阶数	厂房中间层模态频率 /Hz
1	54.4	13	69.6
2	55.8	14	70.2
3	57.8	15	70.8
4	61.5	16	71.5
5	62.1	17	71.7
6	63.5	18	72.3
7	64.4	19	74.1
8	64.9	20	76.7
9	65.2	21	78.6
10	66.8	22	78.8
11	68.5	23	88.4
12	69.4	24	96.6

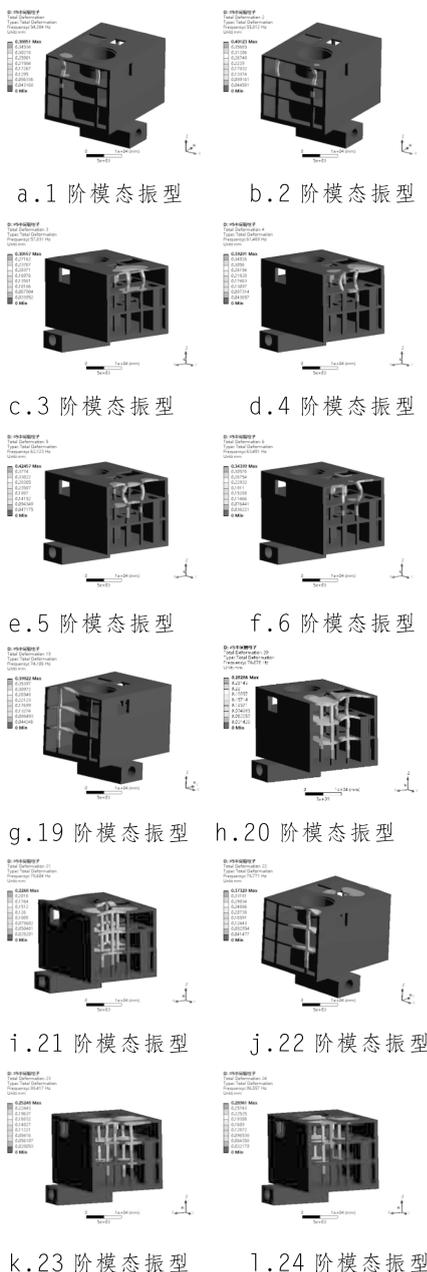


图 5 厂房中间层立柱模态振型

图 5 给出了中间层立柱 1~6 阶与 19~24 阶模态振型图,可以发现前 6 阶均为各立柱非支撑方向扭振,且模态频率十分接近,结合表 2 可以发现中间层立柱 1~18 阶模态频率(54.4~72.3 Hz)差距很小,其原因是立柱结构的相似性与对称性,各支柱交替振动,且其振型均为非支撑方向振动(截面积越大其模态频率越高)。立柱 19~24 阶模态频率开始快速上升,其振型特点转变为支撑方向振动,并且其频率范围为(74.1~96.6 Hz)。前 24 阶模态频率范围(54.4~96.6 Hz)与 75Hz 动静干涉压力脉动频率相近,会引起中间层立柱结构局部共振。

中间层立柱 25~40 阶模态频率与动静干涉产生的压力脉动频率二倍频 150 Hz 相近,容易产生共振现象。

3.2 厂房楼梯自振特性

对于厂房楼梯的自振特性研究,同样将其余结构做无质量处理,以作为厂房楼梯的支撑边界条件。表 3 给出了厂房楼梯各模态阶数对应的模态频率表。图 6 给出了厂房楼梯前 8 阶模态振型。

表 3 厂房楼梯模态频率表

模态阶数	厂房楼梯模态频率 /Hz	模态阶数	厂房楼梯模态频率 /Hz
1	85.4	11	129.5
2	87.1	12	133.8
3	88.5	13	138.8
4	91.8	14	139.6
5	92.0	15	140.9
6	93.4	16	142.0
7	98.8	17	145.4
8	100.8	18	149.1
9	123.3	19	153.7
10	126.0	20	160.8

结合表 3 与图 6,可以发现楼梯结构前 8 阶模态振型相似,表现为各楼层楼梯台阶上下振动。厂房楼梯前 8 阶频率范围(85.4~100.8 Hz)与 75 Hz 激励频率差距不足 30%,均在危险范围内,容易发生局部共振。其 9~35 阶模态频率均与动静干涉载荷二倍频 150 Hz 不足 20%,容易发生楼梯局部共振。

4 结语

(1)厂房整体结构的一阶模态频率为 17.5 Hz,与转轮转动频率 8.33 Hz、动静干涉产生的压

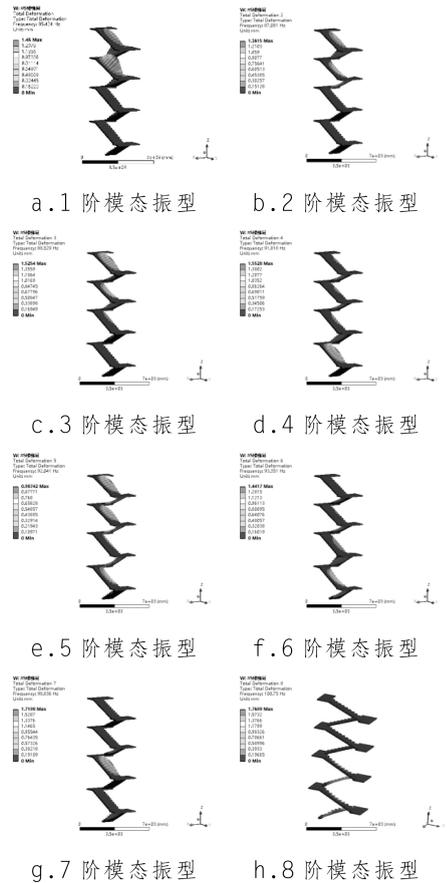


图 6 厂房楼梯模态振型图

力脉动频率及其二倍频(75 Hz, 150 Hz)有较大的差距,满足规范规定的防共振 20% 的错开度要求。

(2)中间层立柱前 24 阶模态频率(54.4~96.6 Hz)与 75 Hz 动静干涉压力脉动频率相近,容易引起立柱结构局部共振,从而带动楼板振动。

(3)厂房楼梯结构前 8 阶模态振型相似,均表现为各楼层楼梯台阶上下振动;各厂房楼梯前 8 阶频率范围(85.4~100.8 Hz)与 75 Hz 激励频率差距不足 30%,均在危险范围内,容易引发楼梯结构发生局部共振,导致楼梯间腔振进一步放大振动噪声。

(4)厂房中间层立柱 25~40 阶模态频率与动静干涉产生的压力脉动频率二倍频 150 Hz 相近。厂房楼梯 9~35 阶模态频率与动静干涉载荷二倍频 150 Hz 不足 20%。虽然高阶模态对结构振动贡献较小,但由于 150 Hz 载荷将会导致附近各模态振型叠加,其作用效果不能忽视。

(下转第 143 页)

遍,不同承包人申报停工缓建补偿的方法不尽相同,发包人及审计单位审核时也差别较大,本文推荐的停工缓建索赔具体项目计算方法具有借鉴性。同时笔者建议国家相关行政机关出台可操作性的具体停工缓建索赔补偿方法,以便各单位可参照执行。

参考文献:

[1] 张云.工程窝工索赔的法律依据及其费用补偿标准探讨[J].四川水力发电,2008,11(27)增:81-83.

[2] 解华.浅谈电站 EPC 总承包项目缓建索赔与争议处理原则与方法[J].发电技术,154(34):47-49.

[3] 中华人民共和国全国人民代表大会.中华人民共和国合同法[S].1999.

[4] 水利水运工程合同条件(示范文本 GF—2000—0208)[S].

[5] 中华人民共和国全国人民代表大会.中华人民共和国劳动合同法[S].2007.

[6] 云南省人力资源和社会保障厅.云南省人力资源和社会保障厅关于公布 2012 年度全省在岗职工平均工资、企业退休人员平均基本养老金和 2013 年度基本养老保险个人账户

利息计算办法的通知[S].2013.

[7] 中华人民共和国国务院.中华人民共和国企业所得税法实施条例[S].2007.

作者简介:

阙清华(1979-),男,福建上杭人,经济师,现就职于华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局,从事水电工程合同管理工作;

毛 华(1974-),男,云南昆明人,教授级高级工程师,现就职于华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局,从事水电工程建设及管理工作;

贺华清(1973-),男,湖北天门人,高级经济师,现就职于华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局,从事水电工程合同管理工作;

操龙明(1972-),男,安徽潜山人,经济师,现就职于华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局,从事水电工程合同管理工作;

赖发旺(1977-)男,福建宁化人,高级经济师,现工作于华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局,从事水电工程合同管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 82 页)

参考文献:

[1] 罗莎莎,韩 冰,刘 云,等.广东抽水蓄能电站功能发挥情况研究[J].南方能源建设,2017,4(03):69-74.

[2] 傅新芬,羊 鸣,郑 波等.天荒坪抽水蓄能电站控制系统设计特点及技术发展[J].水电与抽水蓄能,2018,4(05):40-44.

[3] 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(02):27-30.

[4] 欧阳金惠,陈厚群,李德玉.三峡电站厂房结构振动计算与试验研究[J].水利学报,2005(04):484-490.

[5] 尹 铖,刘碧龙,常道庆等.张河湾蓄能电站厂房噪声与振动调查:绿色声环境——2012 全国环境声学学术会议,中国浙江杭州,2012[C].

[6] 廖 俊.抽水蓄能电厂地下厂房的振动性能评定研究[D].广州大学,2011.

[7] 张 超,宋一乐.抽水蓄能电站厂房结构动力特性研究[J].水电与新能源,2014(2):75-78.

[8] 徐 丽,廖 俊,陈建秋等.广州抽水蓄能电站 A 厂振动测试与分析[J].水电与抽水蓄能,2017,3(04):50-55.

[9] 陈 晨,王 沛.抽水蓄能电站地下厂房结构振动反应分析

[J].水电能源科学,2018,36(11):92-95.

作者简介:

杨 浩(1993-),男,云南大理人,助理工程师,工学学士,现供职于惠州蓄能发电有限公司,主要从事抽蓄电站技术管理工作;

蒋 璆(1990-),男,江西上饶人,工程师,工学学士,现供职于惠州蓄能发电有限公司,主要从事抽蓄电站技术管理工作;

王 琪(1982-),男,吉林蛟河人,高级工程师,工学硕士,现供职于调峰调频发电有限公司检修试验分公司,主要从事抽蓄电站检修项目管理工作;

杨季松(1983-),男,江苏启东人,工程师,工学学士,现供职于调峰调频发电有限公司检修试验分公司,主要从事抽蓄电站检修项目管理工作;

王青华(1975-)男,江西丰城人,高级工程师,工学硕士,现供职于上海安乃基能源科技有限公司,主要从事发电机组故障诊断与产品开发服务;

李冬冬(1983-)男,河南沁阳人,高级工程师,工学博士,现供职于上海安乃基能源科技有限公司,主要从事发电机组故障诊断与产品开发服务.

(责任编辑:卓政昌)

四川对参与疫情防控的企业给予 30% 电费补贴支持

日前四川省发布关于实施灵活水电气价格措施支持有关用户抗击疫情影响和平稳健康发展的通知,称对参与生活物资保供的商贸流通和防疫药品、医疗设备、物资器材等疫情防控相关生产的中小企业,在每月结算电费时及时落实省级层面承担的 15% 电费补贴,并积极协助地方政府和用电企业落实企业注册所在地政府承担的 15% 电费补贴。不能按期交纳水电气费的企业用户可向水电气供应企业提出申请延期缴纳相关费用,最长不超过 3 个月。