

蜗壳脉动压力作用下抽水蓄能电站的振动路径研究

张鹏, 宋志强

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于结构声强理论并在 ANSYS 中进行二次开发提取计算值,通过 originPro 建立其相关结构的三维矢量图,将振动能量的传递可视化。建立某抽水蓄能电站地下厂房结构的有限元模型,提取发电和抽水两种工况下厂房结构在蜗壳脉动作用下各层的结构声强计算值,分析振动的传递路径并将其可视化。结果表明:发电工况下横河向与顺河向振动自蜗壳流道向上传递中逐渐向边墙立柱转移但仍以风罩为主,而在竖向振动传递中最终以左右岸立柱为主,其结构声强占比为 70.02%;抽水工况下横河向和顺河向的振动传递最终以左右岸立柱为主,竖向振动传递最终以风罩为主,其结构声强占比为 61.22%,与发电工况相反。

关键词: 蜗壳脉动压力; 振动传递; 结构声强; 可视化; 地下厂房; 振动路径; 抽水蓄能电站

中图分类号:TV312; TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0154-07

Study on vibration path of pumped storage power station under volute fluctuation pressure

ZHANG Peng, SONG Zhiqiang

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the theory of structural sound intensity and the two development in ANSYS, the calculated values are extracted. The vibration energy transmission was visualized by the 3D vector diagram of its related structure established through originPro. The finite element model of the underground powerhouse of a pumped storage power station was established. The sound intensity of each floor of the powerhouse under the action of spiral shell pulsation was extracted and calculated under the two working conditions of power generation and pumping. The transmission path of vibration was analyzed and visualized. The results showed that: Under the condition of power generation, the transverse and downstream vibrations from the spiral case flow channel gradually transfer to the side wall columns, but still mainly wind shield, whereas the left and right bank columns accounted for 70.02% in the vertical vibration transmission. Under pumping condition, the transverse and along-river vibration transmission is dominated by the left and right bank columns, and the vertical vibration transmission is dominated by the wind shield, accounting for 61.22%, which is just opposite to the power generation condition.

Key words: fluctuating pressure of volute; vibration transfer; structural sound intensity; visualization; underground powerhouse; vibration path; pumped-storage power station

1 研究背景

水电站在内源荷载作用下易引起电站厂房结构的振动问题,尤其是对于孔洞交叉、结构和边界条件复杂的水电站地下厂房更加不可忽视^[1]。目前水电站厂房结构振动研究方法主要是在大型有限元软件中建立厂房结构的仿真模型,再施加各种荷载计算出

厂房结构典型部位的位移、应力和振动速度等响应结果^[2]。但此种方法存在两个不可忽略的问题:一是振动在结构中的传播过程实质上是振动能量的传递过程,仅仅使用单一量化数值如位移、速度等,并不能很好地描述复杂结构的振动响应,不能有效识别振动传递路径,因为振动的传递不仅仅与力有关,而是以运动的形式进行能量传递^[3];二是随着动力机械设备功

收稿日期:2018-10-05; 修回日期:2018-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51479165);陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(2017KJXX-64)

作者简介:张鹏(1990-),男,甘肃定西人,在读硕士研究生,研究方向为水电站厂房内源震动。

率持续增强,分析频率的增加,结构的分析频率不可避免地要进入中频甚至高频段,此时结构的边界条件、阻尼分布、几何尺寸的微小变化将会对数值结果造成显著影响,特别是结构模态密集、重叠的情况下,任何的不确定因素都会造成求解失败^[4]。

基于上述问题 Goyder 与 White 提出了功率流的基本概念,它考虑了力与速度以及在同一时间里它们之间的相位关系,包含了更完整的振动信息,能够更好地描述振动过程。振动在结构中的传播过程实质上是振动能量的传递过程,振动能量的大小可用功率流的大小来描述^[5],功率流模型能够还原这种传递,采用功率流法能够合理地从能量的角度研究振动^[6]。结构振动声强法简称结构声强,是20世纪70年代由将空气声学中的声强理论移植到连续介质力学上^[7],也是一种功率流分析方法。它同时考虑了结构内部应力和质点响应,研究弹性介质中单位宽度截面上的功率流,结构声强可认为是振动功率流的密度,它代表的是一个矢量,表示结构中某点能量的大小和方向,对结构某截面的结构声强进行数值积分则可得到通过结构该截面上的总的能量流大小,即为振动功率流^[8]。

本文采用功率流中的结构声强法,以某一具体的抽水蓄能电站地下厂房为研究对象进行谐响应振动特性分析研究后,通过 ANSYS 二次开发提取计算结构声强值并绘制三维矢量图。重点分析计算了地下厂房在蜗壳脉动压力作用下各层结构的声强值与其占比,研究振动能量的传递分布并将振动传递路径可视化。

2 理论基础与可视化

有限元单元功率流的计算值亦称结构声强,即功率流密度,它是表示结构体上通过某点能量流大小和方向的矢量。三维实体 solid 单元的瞬时功率为:

$$p_i = \sigma_{ij}(t)v_j(t), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: i, j 为单元在三维空间内的两个方向; σ_{ij} 和 $v_j(t)$ 分别为在 j 方向上 t 时刻的应力和速度分量。

在有限元模型谐响应分析中,某一时段 T 内的功率流更具有讨论分析的意义^[9],假设 w 为简谐振动的角频率,应力和速度变化的相位角为 Φ ,将时间段 T 内的功率流如公式(2)进行积分平均化处理,便可得到时域内的功率流值或者说结构声强值。

$$\begin{aligned} I_j &= \frac{1}{T} \int_0^T |\sigma_j| \cos wt |v_j| \cos(wt + \Phi) dt \\ &= \frac{1}{2} |\sigma_j| |v_j| \cos \Phi \end{aligned} \quad (2)$$

但时域内的功率流计算对时间平均和积分时比较繁琐,将时域内的积分通过傅里叶变换转化为频域内的积分如公式(3)^[10],则计算分析将更为简单、快速、方便。

$$\begin{aligned} I_j &= \int_0^T -\sigma_{ij}(t)v_j(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} -v_j(t) \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{ij}(w) \exp(i2\pi wt) dw dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} -\sigma_{ij}(w) \int_{-\infty}^{\infty} v_j(t) \exp(i2\pi wt) dt dw \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} -\sigma_{ij}(w)v_j^*(w) dw \\ &= -\frac{w}{2} \text{Im}(\sigma_{ij}v_j^*) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为频域内的复应力; v_j^* 为速度的共轭复数; Im 为对复数结果取虚部。

本文抽水蓄能电站地下厂房结构模型主要采用的是 solid45 单元,单元通过 8 个节点来定义,每个节点有沿着 x, y, z 3 个方向平移的自由度。在谐振激励下,实体单元 solid45 稳态的表面结构声强^[11]可表示为:

$$I_j = \left(-\frac{w}{2}\right) \text{Im}(\sigma_j u_j^* + \tau_{j1} u_{j1}^* + \tau_{j2} u_{j2}^*) \quad (4)$$

式中: $u_j^*, u_{j1}^*, u_{j2}^*$ 分别为单元表面法向、径向、切向的共轭位移; $\sigma_j, \tau_{j1}, \tau_{j2}$ 分别为单元表面法向应力以及单元表面径向和切向的切应力,第1项表示由正应力对其贡献的结构声强分量,第2和第3项则表示由切应力对其贡献的结构声强分量^[12]。

x, y, z 3 个方向的 solid45 单元结构声强^[13]可以写为:

$$\begin{aligned} I_x &= -\frac{w}{2} \text{Im}(\sigma_x u_x^* + \tau_{xy} u_y^* + \tau_{xz} u_z^*) \\ I_y &= -\frac{w}{2} \text{Im}(\sigma_y u_y^* + \tau_{yx} u_x^* + \tau_{yz} u_z^*) \\ I_z &= -\frac{w}{2} \text{Im}(\sigma_z u_z^* + \tau_{zx} u_x^* + \tau_{zy} u_y^*) \end{aligned} \quad (5)$$

根据公式(4)计算单元结构声强值时要注意应力和位移的不同选取方式,从精度来说节点位移解高于单元应变解,单元的应力解高于节点的应力解。故在本文计算中采取单元的应力和单元 8 节点位移平均化处理得到更加精确的结构声强值,由此可知 x, y, z 3 个方向的声强值大小,可以用矢量值描述出结构声强在三维空间的实际方向,将其应用于振动分析领域来描述振动能量的传递路径^[14]。

ANSYS 中谐响应计算将有限元分析得到的结果数据按照事先设计好的数据格式,存入 EXCEL 文

档中,之后采用 originPro 绘图软件进行三维矢量图形的绘制。单元的 3 向坐标是将其单元 8 节点 3 向位移平均化得出,对结构声强矢量进行适当的放大处理,使其三维矢量图可以明确观察出大小和走向,也就是振动能量的传递路径。

3 有限元模型的建立

选择某抽水蓄能电站地下厂房 3 号机组段整体结构为研究对象,3 号机组段计算模型的总体坐标系取 z 轴为垂直竖向, x 轴为横河向,正方向指向左岸, y 轴为顺河向,正方向指向下游。整体计算模型的结点总数为 88 034,单元总数为 146 496,见图 1(a)。3 号机组段结构底部固定约束,在上、下游边墙与围岩之间边界约束均按在边界节点上加弹性水平约束,围岩模量 $E_0 = 10 \text{ GPa}$,采用弹簧单元进行模拟。

水力脉动的振源较多且频率分布相差较大,无法精确施加^[15],考虑对厂房结构影响因素大小以及结构声强的局限,从中选取蜗壳压力脉动作为模型计算的振源并分别选择蜗壳脉动压力幅值与频率较大的情况作为典型的计算工况,再通过相似原理将模型数据换算至原型。根据哈尔滨电机厂对岩滩、牛路岭、陈村等电站的模型和原型测试结果对比分析,可知模型与原型蜗壳压力脉动的脉动频率基本相近而脉动幅值之比约为 1.0~2.5。经分析,原型拟采用蜗壳脉动压力频率和幅值均与模型试验相等的方案,并假定蜗壳内脉动水压力是同频率同相位的简谐荷载。综上所述,蜗壳实际脉动压力在发电工况下幅值为 11.07 m、频率为 19.07 Hz,抽水工况下幅值为 3.74 m、频率为 4.17 Hz,再将其以图 1(b)

中面荷载的形式均匀施加于蜗壳流道面内。

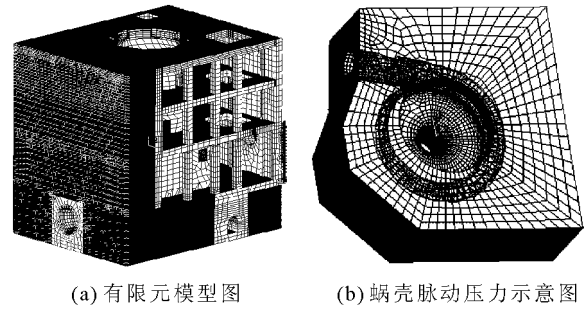


图 1 有限元模型及荷载图

4 蜗壳脉动压力下的振动路径研究

该抽水蓄能水电站地下主厂房分 5 层布置,分别是发电机层、母线层、水轮机层、蜗壳层和尾水管层,通过谐响应分析可知振动最突出的楼板是发电机层楼板,本文主要研究蜗壳脉动压力下振动能量的传导,因此只分析蜗壳层、水轮机层和母线层的振动能量传递分布。

4.1 母线层

母线层包括风罩、上下游边墙立柱和左右岸立柱,分别计算各部位的结构声强值和其占比,如表 1,并绘制如图 2 中发电工况和抽水工况下母线层的三维矢量图,由此可判断出振动能量的主要传递途径。由表 1 和图 2 可知,发电工况下横河向和顺河向的振动传递均以风罩为主,分别占 56.76% 和 64.21%,竖向则主要依靠左右岸立柱,其承担了 70.02% 的振动能量。而在抽水工况下,横河向以及顺河向振动的传递都以风罩和左右岸立柱为主,竖向振动传递则是主要由风罩承担。

表 1 两种工况下母线层结构声强值

		Pa · m/s, %					
工况	结构	横河向 I_x	I_x 占比	顺河向 I_y	I_y 占比	竖向 I_z	I_z 占比
发电工况	上下游边墙	0.685	22.63	0.323	14.68	0.895	10.37
	风罩	1.718	56.76	1.413	64.21	1.693	19.61
	左右岸立柱	0.624	20.61	0.465	21.11	6.044	70.02
	合计	3.027	100.00	2.201	100.00	8.632	100.00
抽水工况	上下游边墙	0.283	19.65	0.154	13.43	0.175	10.28
	风罩	0.530	36.85	0.512	44.74	1.046	61.56
	左右岸立柱	0.626	43.51	0.479	41.83	0.479	28.17
	合计	1.440	100.00	1.144	100.00	1.699	100.00

结合表 1 和图 2,对各部位进行更进一步的划分,以寻找更加详细的传递路径。分别将风罩和上下游边墙立柱按照上下游、左右岸划分为更加详细

的 4 部分,将立柱分为左岸和右岸,共计 10 部分结构,分别计算每个结构的结构声强值得到图 3。

由图 3 可知,发电工况横河向振动结构声强主

要集中于风罩下游左岸处,占整个母线层的24.80%,顺河向振动仍然集中于风罩下游左岸处,占比为29.94%,竖向振动的传递则是依靠左右岸两侧的立柱,左岸占40.17%、右岸29.85%;抽水工况时振动的传递发生了变化,横河向振动传递集中在右岸的立柱,占比为36.89%,顺河向的振动传递则主要集中在右岸立柱(占比28.16%)和风罩的下游左岸(占比23.66%),竖向振动能量的传递则主要依靠风罩下游左岸侧(占比37.69%)。总体来看发电工况3向振动能量的传递主要依靠风罩左岸侧,尤其是下游左岸侧;抽水工况则主要靠左右岸立柱以及风罩下游左岸侧。

4.2 水轮机层

水轮机层包含上下游边墙立柱、左右岸立柱和机墩,计算各部位的结构声强值和其占比制作为表2,绘制如图4中发电工况和抽水工况下水轮机层各结构声强的三维矢量图。由表2和图4可知,在发电工况下横河向和顺河向的振动传递以机墩为主,分别占62.01%和69.01%,竖向的振动传递则是由机墩和左右岸立柱共同承担,分别占35.00%和37.38%。而在

抽水工况下,横河向振动和顺河向振动传递都主要依靠左右岸立柱,分别占49.26%和61.39%,机墩次之。竖向的振动能量则是依靠左右岸立柱和机墩共同承担,分别占比45.88%和49.00%。再对各部位进行更进一步的详细划分,分别计算每个结构的结构声强值得到图5,寻找更加具体的传递路径。

由图5可知,发电工况下横河向振动传递主要集中于机墩下游右岸侧和机墩上游左岸侧以及边墙上游左岸侧,其占整层的振动传递能量分别为19.98%、17.25%和17.14%;顺河向振动的传递仍然主要靠机墩上游侧和机墩下游右岸以及边柱上游左岸侧;而竖向的振动传递集中于左右岸立柱,左岸占40.70%、右岸占22.16%。对于抽水工况,横河向的振动传递主要依靠左右岸立柱和机墩下游侧,其中以右岸侧立柱为主,占比为31.77%;顺河向的振动能量仍然依靠左右岸立柱和机墩下游侧,立柱左、右岸侧占比高达35.92%、25.47%;而在竖向的振动传递中还是靠左右岸立柱和机墩下游侧结构,其中以机墩下游左岸侧和立柱左岸侧为主,分别占27.18%和27.81%。

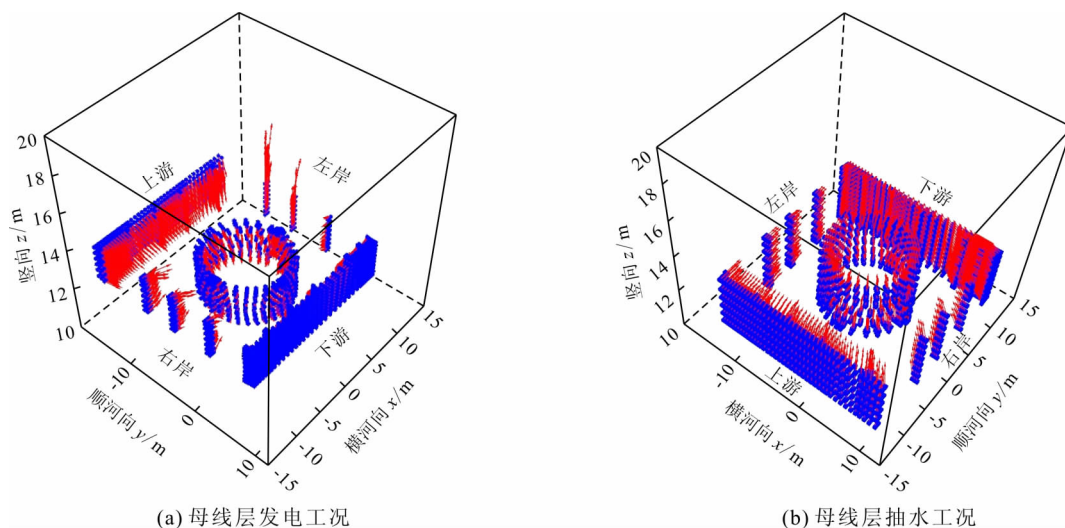


图2 发电、抽水工况下母线层各结构声强三维矢量图

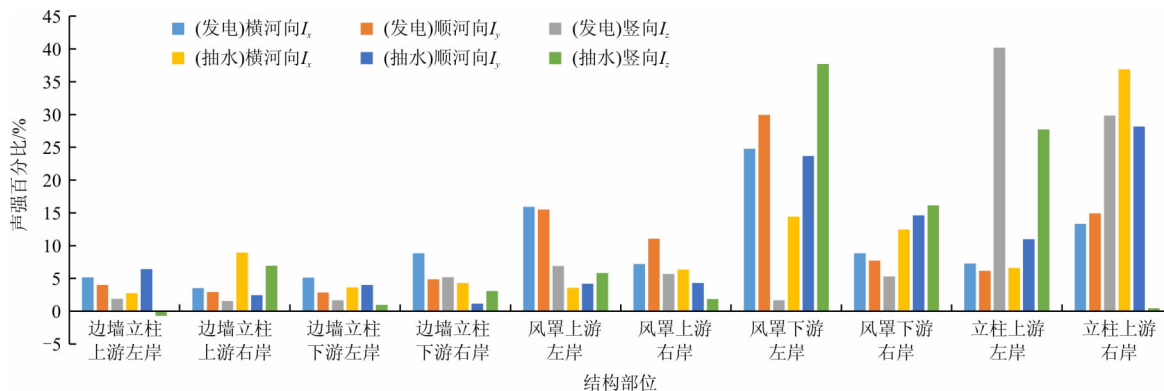


图3 发电、抽水工况下母线层各结构声强百分比

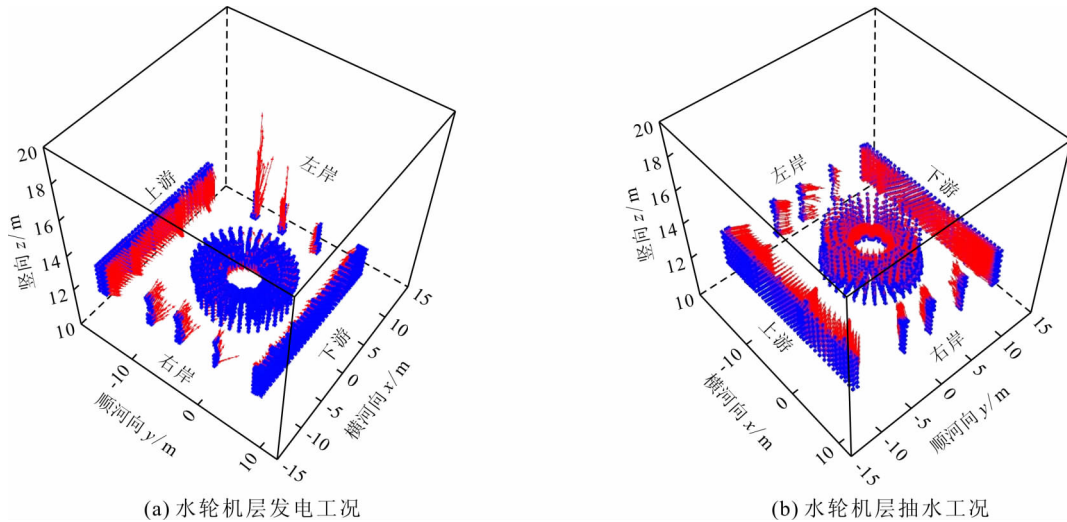


图4 发电、抽水工况下水轮机层各结构声强三维矢量图

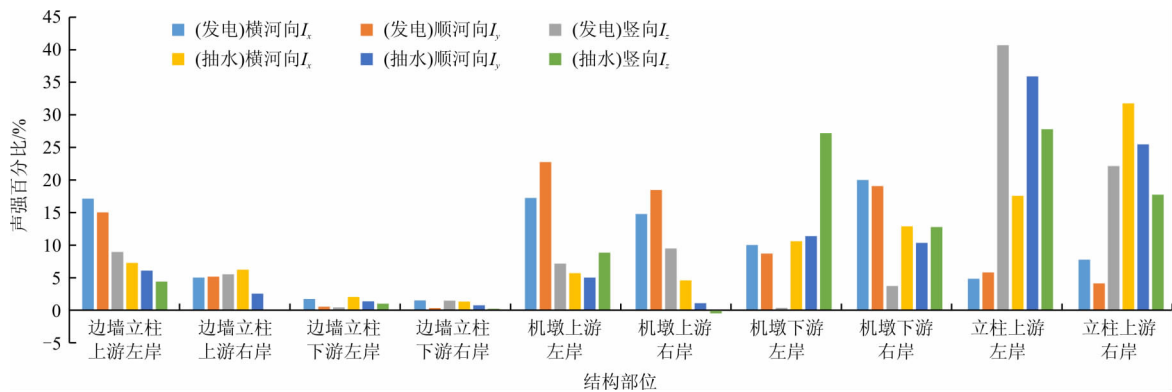


图5 发电、抽水工况下水轮机层各结构声强百分比

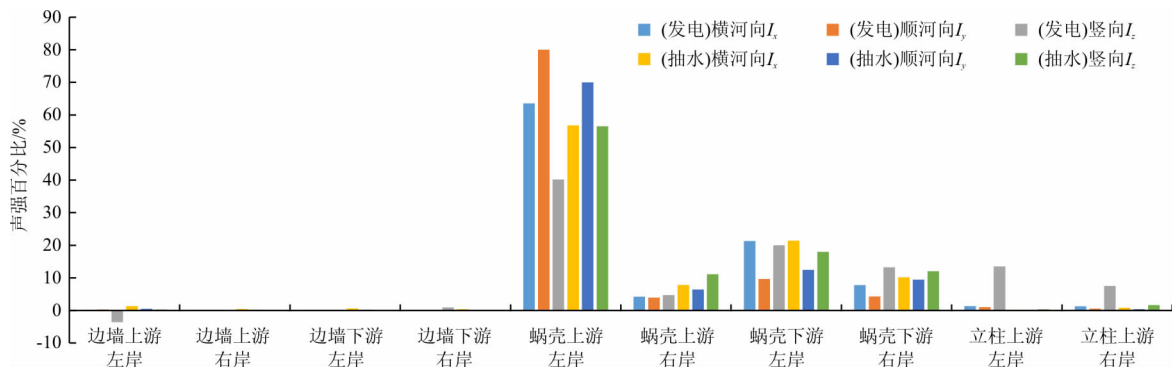


图6 发电、抽水工况下蜗壳层各结构声强百分比

4.3 蜗壳层

蜗壳层结构包括蜗壳层楼板、大体积蜗壳混凝土结构和边墙立柱,因蜗壳结构较为复杂且三维结构声强矢量图效果不明显,所以本文不绘制该层的矢量图。表3为发电、抽水工况下蜗壳层各结构声强百分比。

由表3可知,无论是抽水还是发电工况下蜗壳的结构声强占比最大均超过78%。发电工况下,横

河向和顺河向的振动传递中蜗壳结构占比高达96.86%、97.91%,在竖向的振动能量传递中由蜗壳承担78.20%,左右岸立柱承担21.03%。抽水工况下,蜗壳结构在横河向、顺河向和竖向的振动传递中占据绝对的主导地位,分别占比96.20%、98.31%和97.65%。对各部位再次详细划分,并计算每个结构的结构声强值得到图6,以观察蜗壳结构的振动能量传递路径。

表 2 两种工况下水轮机层各结构声强值详细分布

Pa · m/s, %

工况	结构	横河向 I_x	I_x 占比	顺河向 I_y	I_y 占比	竖向 I_z	I_z 占比
发电工况	上下游边墙	0.411	25.39	0.324	21.05	0.325	27.61
	机墩	1.004	62.01	1.062	69.01	0.412	35.00
	左右岸立柱	0.204	12.60	0.153	9.94	0.440	37.38
	合计	1.619	100.00	1.539	100.00	1.177	100.00
抽水工况	上下游边墙	0.092	16.91	0.047	10.73	0.02	5.12
	机墩	0.184	33.82	0.122	27.89	0.22	49.00
	左右岸立柱	0.268	49.26	0.269	61.39	0.21	45.88
	合计	0.544	100.00	0.438	100.00	0.45	100.00

表 3 两种工况下蜗壳层各结构声强值分布

Pa · m/s, %

工况	结构	横河向 I_x	I_x 占比	顺河向 I_y	I_y 占比	竖向 I_z	I_z 占比
发电工况	上下游边墙	0.377	0.56	0.413	0.49	0.335	0.78
	蜗壳	65.748	96.86	82.087	97.91	33.769	78.20
	左右岸立柱	1.756	2.59	1.341	1.60	9.080	21.03
	合计	67.881	100.00	83.840	100.00	43.184	100.00
抽水工况	上下游边墙	0.217	2.77	0.080	1.13	0.033	0.37
	蜗壳	7.542	96.20	7.015	98.31	8.624	97.65
	左右岸立柱	0.081	1.03	0.040	0.56	0.175	1.98
	合计	7.840	100.00	7.136	100.00	8.832	100.00

结合图 6 和表 3 可以看出,无论在发电还是抽水工况下,蜗壳上游左岸侧均为主要的振动能量传递结构,两种工况其结构声强占比分别为:发电工况下横河向 63.55%、顺河向 80.04%、竖向 40.20%,抽水工况下横河向 56.79%、顺河向 69.98%、竖向 56.54%。发电工况下左、右岸侧立柱在竖向振动的传递中分别承担了 13.51%、7.52%,其余的工况和方向振动传递中占比微小。

4.4 振动路径总结

发电工况主要是通过机组将水的势能转化为电能,振动的能量传递起始于蜗壳流道。横河向振动传递中蜗壳整体振动能量占水轮机层的 96.86%,尤其以上游左岸侧蜗壳为主,占水轮机层振动传递的 63.55%,左右岸立柱占比只有 2.59%;振动能量由蜗壳进入水轮机层楼板,逐渐从蜗壳上游左岸向其余 3 个方向传递,随后振动能量由水轮机层楼板进入水轮机层,机墩占该层整体振动能量的百分比下降至 62.01%,并且机墩 4 个部分振动能量分布逐渐均匀,而边墙立柱较蜗壳层振动能量的占比明显提升,上下游边墙占 25.39%,左右岸立柱占比 12.60%;之后振动能量进入母线层楼板,再通过楼

板进入母线层,该层风罩所占整层振动能量百分比下降至 56.76%并且偏向左岸侧,左右岸立柱逐渐上升至 20.61%,上下游边墙立柱基本维持不变;最后所有振动能量汇聚于发电机层楼板。同样顺河向振动也起始于蜗壳流道,其振动能量的传递详情与横河向基本一致。

对于竖向的振动传递,蜗壳结构占整体蜗壳层振动能量的 78.20%,左右岸立柱占比高达 21.03%,上下游边墙立柱可忽略不计;振动能量从蜗壳层穿过楼板进入水轮机层,在该层机墩振动能量占比下降至 35.00%,左右岸立柱上升至 37.38%,成为主要的振动传递结构,上下游边墙立柱增大为 27.61%,说明机墩的振动能量逐渐向上下游边墙和左右岸立柱转移;振动传递经过母线层楼板进入母线层,此时风罩的振动能量百分比减小至 19.61%,左右岸立柱成为了主要的振动传递结构,已增至 70.02%,上下游边墙也减少到 10.37%。

抽水工况主要是利用电能通过水泵将下游的水再次引入上游。横河向和顺河向的振动传递与发电工况基本一致,均起始于蜗壳结构最后汇聚于发电机层楼板。其中左右岸立柱成为最主要的振动传递

承担者并且以下游岸侧的振动传递为主,与发电工况下以上游岸侧振动传递正好相反,横河向、顺河向振动能量传递占比分别为43.51%、41.83%,风罩则略微次之。竖向的传递蜗壳占比高达97.65%,左右岸立柱则只占很小一部分;在上传递至水轮机层时,机墩所占振动能量减小至49%,左右岸立柱承担整层45.88%的振动能量;振动再次向上传递至母线层,此时风罩是最主要的振动承担者,承受61.56%的振动能量,并且偏向下游侧尤其是下游左岸侧,占整个风罩振动能量的61.22%。左右岸立柱占比仅有28.17%,并且由左岸的立柱承担高达98.40%的整体立柱的振动能量。

发电、抽水工况振动能量传递路径的不同主要与脉动荷载的频率和厂房结构阻抗有关:(1)功率流场的分布十分依赖于频率,随着脉动压力频率的不同,因结构的振动模态不同振动功率流的矢量场也不相同。风罩的振动频率为16~38 Hz,一阶频率与发电工况的频率相近,而墙体立柱相比风罩振动频率较低。(2)能量在传导过程中随着结构各部位阻抗的差异而不断改变,阻抗大则振动能量衰减快,相反则衰减慢,并且局部的阻抗变化将进一步引起能量传导方向的改变。风罩内的能量传导主要以横河向与顺河向功率流为主,而墙体立柱内能量传导则主要依靠竖向功率流。

5 结 论

(1)本文以某实际抽水蓄能电站地下厂房为研究对象,基于结构声强法分析其在发电和抽水工况蜗壳脉动压力作用下的振动传递路径。发电工况下横河向与顺河向振动自蜗壳向上传递至风罩,振动能量逐渐向上下游边墙和左右岸立柱传递,但仍以风罩为主;竖向振动的传递则最后以左右岸立柱为主。抽水工况下正好相反,横河向与顺河向以左右岸立柱为主,而竖向却以风罩为主。

(2)基于结构声强将振动能量可视化,可以直接观察振动的传递,对结构的安全性评价、水电站厂房的优化设计和结构的抗振减振具有重大的意义。

本文仅对单一振源蜗壳脉动压力做出了振动路径的推导,并未涉及其他脉动荷载与机组荷载,且忽略了水力荷载的精确施加,之后将进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 马震岳,李慧君,徐伟.水电站地下厂房内源振动数值计算模型的研究[J].水电能源科学,2009,27(3):77-80.
- [2] 欧阳金惠.三峡电站厂房结构振动研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2005.
- [3] 伍先俊,朱石坚.振动反馈主动控制的功率流计算方法研究[J].船舶力学,2009,13(2):298-304.
- [4] 殷学文,崔宏飞,顾晓军,等.功率流理论、统计能量分析和能量有限元法之间的关联性[J].船舶力学,2007,11(4):637-646.
- [5] 朱石坚,何琳.船舶机械振动控制[M].北京:国防工业出版社,2006:36-70.
- [6] 徐伟,马震岳,职保平.基于功率流理论的大型水电站厂房结构脉动压力频响分析[J].水利学报,2012,43(5):615-622.
- [7] CREMER L, HECKL M, UNGAR E E. Structure-borne sound, second [M]. Berlin: Edition Springer-Verlag, 2005.
- [8] 张雪冰,饶柱石,塔娜,等.变压器油箱振动功率流研究[J].振动与冲击,2009,28(5):188-191+214.
- [9] 徐伟,马震岳,职保平.水压脉动能量传导对水电站厂房墙体影响分析[J].水力发电学报,2013,32(2):233-239.
- [10] 华超锋.功率流理论及其在杆梁类结构振动分析中的应用[D].兰州:兰州大学,2018.
- [11] 张雄.薄板结构的振动功率流特性研究[D].南昌:南昌航空大学,2015.
- [12] 梁日兴.基于有限元的板结构振动功率流分析[D].广州:华南理工大学,2016.
- [13] 王海军,涂凯,练继建.基于结构声强的水电站厂房振动传递路径研究[J].水利学报.2015,46(10):1247-1252+1260.
- [14] 李凯,黎胜,赵德有.耦合板结构振动波传递及能量分布可视化研究[J].船舶力学,2011,15(4):419-426.
- [15] 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,2005,36(4):484-490.