

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241820

# 立式轴流泵压力脉动激励下厂房结构振动特性分析

王建康<sup>1</sup>, 江琦<sup>2</sup>, 赵瑜<sup>1,2</sup>, 张建伟<sup>2</sup>, 刘喜珠<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046;  
3. 山东省水利勘测设计院有限公司济南市数字孪生与智慧水利重点实验室, 山东 济南 250013)

**摘要:** 为探究水泵机组压力脉动对厂房结构产生的影响,以打渔张泵站厂房为例,基于原型观测数据结合三维有限元模拟分析厂房结构的振源组成及振动特性,并从结构共振校核和振动响应出发对结构的安全性进行分析评价。结果表明,机组稳定运行工况下,动静干涉(RSI)引起的水力脉动与机组运行引起的转倍频激振对厂房振动影响最大,且与局部楼板结构自振频率吻合度较小,易发生共振;但从振动反应角度分析各局部部位的振动响应均在允许范围内,出水弯管和泵座处最大,水泵层楼板最小。研究结果对实现泵站厂房结构的长久安全运行具有重要的理论价值和现实意义。

**关键词:** 原型观测; 模态分析; 共振复核; 振动响应

**中图分类号:** TV675;TV731

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2025)09-0161-05

## 1 引言

厂房作为泵站的核心部分,对整个泵站的功能和运作起着至关重要的作用,与其他水工建筑物相比,最大的特点在于其振动是一个多振源相互影响、联合作用、共同激发的综合响应,同时在设备高速运转和高功率输出下会加剧振动,甚至引发共振,从而带来设备失效、结构损伤甚至安全隐患等问题<sup>[1]</sup>。目前,我国已建成并运行的一些大型电站的机组和厂房均产生了不同程度的振动及噪音问题,通常大多通过数值模拟与现场试验等手段分析出我国大型泵站厂房异常振动的不同成因,以共振现象和多振源耦合作用影响最大,主要包括叶片数增加引发机组与厂房发生耦合振动<sup>[2-3]</sup>、水泵进水渐缩管收缩过快和叶频与局部结构自振频率一致<sup>[4]</sup>及动静干涉引发的强水流脉动<sup>[5]</sup>。为此,本文结合打渔张泵站厂房已存在的振动问题,基于原型数据通过理论计算和数值模拟,对其自身特性和各种动荷载共同作用效果下的振动反应进行分析研究,保证厂房的安全运行,为类似工程的设计和运行提供参考。

## 2 工程概况

打渔张泵站位于山东省滨州市博兴县境内,设计流量 36.00 m<sup>3</sup>/s,泵站扬程为 4.02~7.42 m。该厂房内装机 5 台全调节立式轴流泵,4 用 1 备,作一字型排列,水泵型号 1700ZLQ-6,单机容量 900 kW,机组转轮叶片为 4,额定转速 250 r/min。其中各机组中心距为 4.85 m,安装间布置主厂房左端。泵站厂房结构自上而下为电机层、风罩层、水泵层、流道层。厂房横剖图见图 1,进水管口设喇叭管,下设有导流锥,采用平管式出水流道,其中电机层地面高程为 15.33 m,水泵层高程为 9.11 m。如图 2 所示,按照厂房内部振动强烈或薄弱位置共划分 5 种位置,分别为水泵层楼板、泵座、出水弯管、电机层楼板和电机。原型观测根据划分的 5 种典型位置共布置 20 个测点,每个测点分别布置 X、Y、Z 3 个方向振动加速度传感器,采用 DASP 系统采集数据,其中顺水流方向为 X,垂直水流方向为 Y,垂直结构方向为 Z。通过测量各部分的动态响应得到不同位置的振动幅值,并对其进行振动特性分析。5 种位置

**收稿日期:** 2024-09-25, **修回日期:** 2024-11-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52279133);河南省科技攻关项目(232102320003);华北水利水电大学高层次人才启动资助项目(202110001)

**作者简介:** 王建康(1999-),男,硕士研究生,研究方向为水工结构流激振动特性分析,E-mail:1870798371@qq.com

**通讯作者:** 江琦(1991-),女,博士、讲师,研究方向为水工结构损伤诊断与安全监测,E-mail:jiangqi\_tju@163.com

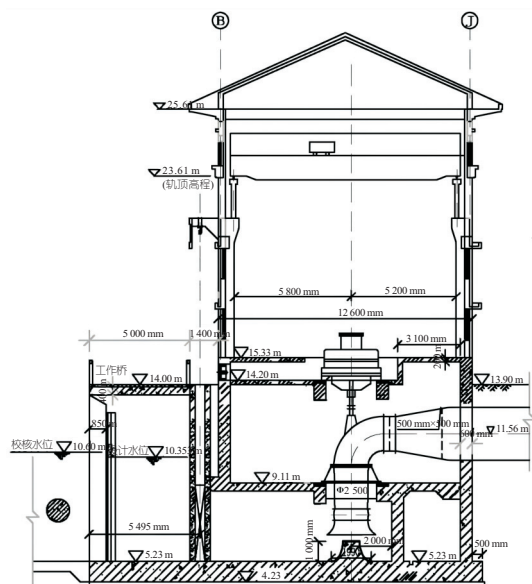


图 1 厂房横剖图

Fig. 1 Cross-sectional view of the plant

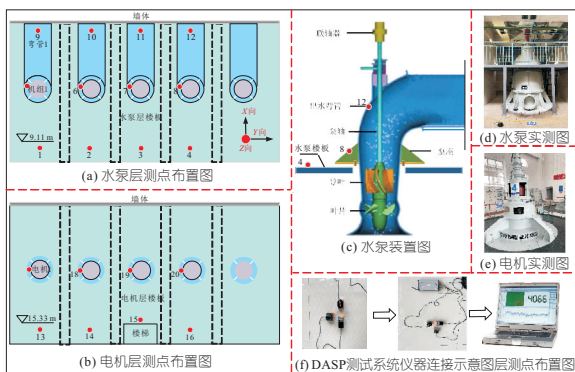


图 2 泵站厂房现场测点布置图

Fig. 2 Layout diagram of the on-site measurement points of the pumping station plant

描述、采样时间及采样频率见表 1。

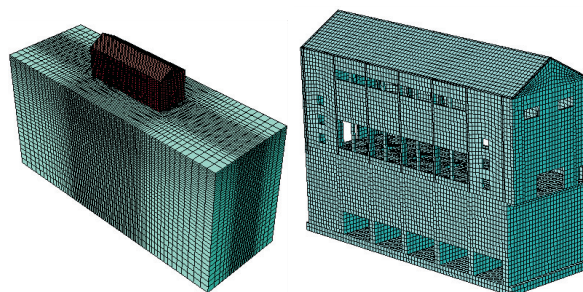
表 1 厂房原型试验测试位置

Tab. 1 Plant prototype test conditions

位置	位置描述	采样时间/s	采样频率/Hz
1	水泵层楼板	100	256
2	泵座	100	256
3	出水弯管	100	256
4	电机层楼板	100	256
5	电机	100	256

### 3 有限元模型

依据工程设计资料,采用 ABAQUS 建立了厂房结构三维有限元模型,见图 3。厂房总长 35.40 m,总宽 12.60 m,厂房主体结构构件采用 C30 混凝土,墙体采用 C20 混凝土,地基为粘土,采用摩尔库伦屈服准则本构模型,各种材料参数见表 2。为确保地基的稳定性和合理性,减少由于边界效应引起的计算误差,地基尺寸为厂房主



(a) 厂房整体(含地基)结构三维模型 (b) 厂房主体结构三维模型

图 3 泵站厂房结构三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of the pumping station structure

表 2 材料力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of materials

材料	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/(N·mm <sup>-2</sup> )	泊松比
C30	28	3.0×10 <sup>4</sup>	0.167
C20	25	2.0×10 <sup>4</sup>	0.167
粘土	18	1.3	0.350

体结构的 3 倍,以确保土应力均匀分布。厂房与地基采用摩擦接触,摩擦系数取 0.5<sup>[6]</sup>;为减少计算中力传递产生的应力集中现象,厂房各组件均采用 C3D8R 实体单元,共划分 126 552 个单元。模型边界条件为地基地部完全固定,四周法向约束。

### 4 厂房结构共振复核

#### 4.1 泵站厂房振源分析

对于泵站厂房结构而言,机组的振源特性比较复杂,根据现场监测数据进行泵站厂房振源分析。选取 5 种不同位置典型测点 4、8、12、16、20 数据进行功率谱分析,5 个测点 Z 向加速度功率谱见图 4。由图 4 可知,厂房振动受多振源共同影响,主要包括水力、机械及电气因素。其中以 RSI 引起的不均匀流场振动和机组运行引起的倍转频激振影响最大。

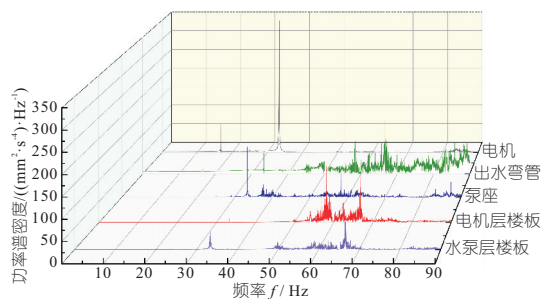


图 4 典型位置测点 Z 向加速度功率谱密度

Fig. 4 Z-acceleration power spectral density at typical locations

为直观分析引起泵站厂房振动的优势振源及变化规律,将典型位置测点各方向振动源主次频和压力幅值整理见表 3。由表 3 可看出,各个方

表 3 典型位置主次频及其主压力幅值

Tab. 3 Typical position primary and secondary frequencies and their principal pressure amplitudes

监测点位置	X			Y			Z		
	主频 /Hz	次频 /Hz	幅值 /mm	主频 /Hz	次频 /Hz	幅值 /mm	主频 /Hz	次频 /Hz	幅值 /mm
水泵层楼板	66.68	83.41	15.286	33.34	58.38	18.599	66.68	33.34	87.681
泵座	33.34	58.38	53.326	33.34	83.41	90.925	33.38	58.38	125.245
出水弯管	33.34	58.38	119.383	33.34	83.41	315.522	66.68	58.38	176.233
电机层楼板	83.40	66.68	12.926	83.41	33.34	14.052	58.38	66.68	102.764
电机	33.34	29.17	280.864	25.01	33.34	100.092	33.34	16.66	348.547

向主频和次频以 RSI 引起的振动和 14 倍转频为主。从主频振动幅值来看,电机位置 Z 向以 33.32 Hz 为主频的压力幅值最大,振动敏感性较高,而 X、Y 方向的转倍频振动幅值较为明显,显示出不同方向上振动的复杂性。楼板处各振源振幅值最小,仅在 Z 向有一定的幅值体现,这是因为振源从过流部位经转轮叶片后传出,随着距离的增加传递能量幅值逐渐减少,且楼板传播过程中通过机墩会发生能量分散和转移;而泵管内由 RSI 产生的水流脉动通过泵轴传递给电机能量损失较少,83.41 Hz 的卡门涡水流脉动在出水弯管处振动幅值最大,这是由于垂直于叶片水流绕转轮叶片及泵轴物体产生交变侧向力引起的,是空化空腔带来的危害。

4.2 厂房整体结构共振复核

厂房产生共振时,即使幅值很小的激振作用也能造成很大的振动反应,所以需进行共振校核。现行规范检验方法为结构自振频率与振源的频率之差与两者中的最大值之比需大于 20%<sup>[7]</sup>,以防发生共振。

由于该泵站厂房构造比较复杂,其刚度分布非常不均匀,大部分是楼板等局部结构的振型变化,且泵站厂房具有低密频特点,选取厂房结构前 20 阶段自振频率进行共振校核,见表 4,厂房整体结构典型阶振型见图 5。由表 4、图 5 可看出,第 1 阶为厂房上部整体顺河向振动,频率为 2.121 Hz,第 3 阶振型主要为侧边墙柱的横向向外凸起,楼板整体无明显竖向位移,第 9 阶表现为墙柱的背水侧纵向振动及电机层楼板竖向振动,而第 5 阶则表现为厂房整体结构发生扭转变形。前 20 阶振型中除第 1 阶、第 5 阶和第 6 阶表现为

表 4 厂房前 20 阶自振频率

Tab. 4 The 20th-order natural frequency in front of the plant

阶数	频率 /Hz	阶数	频率 /Hz	阶数	频率 /Hz	阶数	频率 /Hz
1	2.121	6	4.049	11	5.245	16	5.904
2	2.932	7	4.304	12	5.426	17	6.010
3	3.075	8	4.884	13	5.475	18	6.084
4	3.333	9	5.011	14	5.544	19	6.357
5	3.645	10	5.122	15	5.777	20	6.448

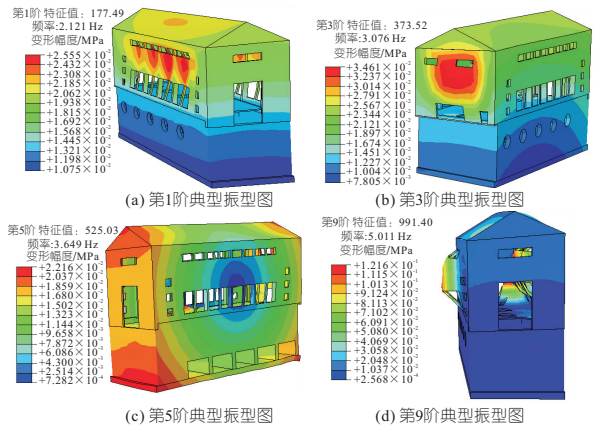


图 5 厂房整体典型阶数振型图

Fig. 5 Typical order mode shape diagram of the whole plant

整体振动,其他 17 阶振型主要表现为电机层楼板及以上墙柱结构的振动,这是由于其结构刚度较小,振型因而多表现为楼板和墙柱的振动。厂房整体结构前 20 阶振型的自振频率介于 2.121~6.448 Hz 之间,与机组转频 4.17 Hz 错开度小于 20%,该振源频率与结构固有频率可能发生共振现象,但由于涡带摆动振动幅值很小,不会引起厂房整体结构的剧烈振动,同时其自振频率与其他主要水力激励源错开度较大。因此,需更加关注对厂房内部局部结构的振动情况。

4.3 厂房局部结构共振复核

厂房结构中的薄弱部件主要为各层楼板和立柱结构,因此采用“无质量地基<sup>[8]</sup>”的方法计算 3 层楼板(水泵层、风罩层、电机层)和立柱结构前 10 阶自振频率见图 6。由图 6 可看出,各局部结构的自振频率在 5 Hz 以上、70 Hz 以下,根据错开度计算看出,各局部构件与低频水流脉动、转频、卡门涡高频脉动均有足够的错开度,不会发生共振。存在共振可能的频率区间主要为水泵层楼板的第 1 阶和立柱第 5 阶与叶片过流频率 16.66 Hz 遇合;风罩层楼板前 2 阶和水泵层楼板第 3 阶与 RSI 引起的主频 33.32 Hz 遇合;水泵层楼板第 7 阶和第 9 阶自振频率分别会与机械振动 14 倍转频和 RSI 引起的主频 66.64 Hz 发生遇合。

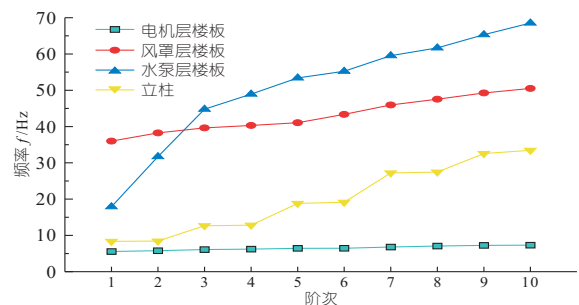


图 6 局部结构前 10 阶自振频率

Fig. 6 The first 10 natural frequencies of the local structure

以上错开度较低,同时水力因素往往影响较大,均有可能发生共振,需通过振动反应计算从振动强度方面进一步加以复核。

### 5 运行工况下厂房振动反应分析

#### 5.1 厂房振动计算结果分析

为清晰明确泵站厂房不同部位振动强度情况,基于传感器信号数据进行时域特征信息提取加速度均方根和峰值,对影响厂房结构的因素开展量化分析,测试结果见表 5。由表 5 可看出,楼板作为结构重要组成部分,振动情况往往备受关注,稳定运行工况下电机层楼板加速度均方根、峰值最大值分别为 99.97、423.12 mm/s<sup>2</sup>,水泵层楼板加速度均方根、峰值最大值分别为 76.87、286.53 mm/s<sup>2</sup>,两层楼板各个测点测试方向加速度均方根、峰值均未超过现行振动控制标准建议限制 1、10 m/s<sup>2</sup>。同时楼板最大振动反应均出现在 Z 方向,远大于其他两个方向上的振动响应,这是因为不均匀水流进入直管流道后,经转轮产生涡流及汽蚀现象带来强烈竖向水流冲击传递给楼板结构,而楼板本身竖向抗振性能较弱,造成该方向上振动明显。

表 5 典型测点加速度均方根和峰值  
Tab. 5 Root mean square and peak value of acceleration at typical measurement points

监测点位置	均方根/(mm·s <sup>-2</sup> )			峰值/(mm·s <sup>-2</sup> )		
	X	Y	Z	X	Y	Z
水泵层楼板	17.21	11.34	76.87	56.68	43.23	286.53
泵座	68.13	88.41	53.61	292.42	413.73	198.07
出水弯管	81.03	95.21	100.69	423.67	456.92	512.37
电机层楼板	27.28	15.52	99.97	132.17	62.58	423.12
电机	41.94	47.09	67.67	192.77	185.52	297.48

与泵座和电机位置相比,3 个方向出水弯管位置的振动强度最大,其次是泵座。这是因为两个位置处距离振源距离较近,为多振源激励区域,机械因素与水力因素耦合振动,互相影响,振动能量传播更为复杂,除泵座位置处,其他位置均为竖向上加速度均方根和峰值最大。随着距离振源位置的增加,加速度特征值逐渐减小,传递到楼板振动强度最小。

#### 5.2 厂房多位置测点变化规律分析

为全面把握厂房各位置振动特性,对所有测点信号数据进行特征信息提取加速度均方根,计算结果整理见表 6。由表 6 可看出,水弯管和泵座位置处加速度均方根值最大,振动反应最明显。出水弯管位置由于不稳定水流产生湍流冲击表现为 Z 向振动最大,但不同方向上加速度均方根值相差不大;泵座则主要表现为 Y 向振动最大,离

表 6 泵站厂房所有测点三个方向加速度均方根  
Tab. 6 The root mean square values of acceleration in three directions in the pumping station building

监测点位置	布置测点	加速度/(mm·s <sup>-2</sup> )			监测点位置	布置测点	加速度/(mm·s <sup>-2</sup> )		
		X 向	Y 向	Z 向			X 向	Y 向	Z 向
水泵层	1	11.18	1.55	61.77	电机层	11	81.68	83.76	90.31
	2	17.21	11.34	76.87		12	106.63	110.48	112.78
	3	24.42	14.00	96.48		13	23.08	12.26	58.31
	4	19.90	19.25	76.42		14	27.28	15.52	99.97
泵座	5	18.77	8.36	45.41	电机	15	59.95	21.13	68.25
	6	68.31	88.41	53.61		16	18.03	25.78	68.45
	7	83.82	141.80	58.56		17	59.06	49.47	57.62
	8	104.19	153.53	63.79		18	41.94	47.09	67.67
出水弯管	9	71.90	26.84	73.53	19	18.51	47.15	78.71	
	10	81.03	95.21	100.69	20	48.82	57.31	67.79	

水泵叶轮距离较近在叶片旋转水流时会与泵壳摩擦而产生沿 Y 向传播的振动激励。对于楼板来说,两层楼板测点加速度均方根在 Z 向均为最大,Y 向加速度均方根最小,同时电机层的水平 X 向振动加速度均方根明显大于水泵层,这是由于两者所受到的主要振动激励有所差别,对于电机层楼板不仅受到水力脉动作用,还有电机运行过程中转子不对中、磁拉力不均衡等电气因素导致电机产生轴向力,导致水平振动沿机座传给电机楼板。从竖向上来看,两层楼板振动响应互有大小,这与不同振源互相耦合激励、传递路径以及楼板边界条件有很大关系,且楼板各象限位置均未超过现行振动控制标准建议限制 1 m/s<sup>2</sup>。

为更好分析厂房多位置测点的振动响应变化情况,对 5 种位置的 20 个测点不同方向的加速度均方根值根据每个楼板不同象限测点对应位置分为 4 组进行整理,具体分组见表 7。图 7 则为 4 组各种位置振动反应不同方向振动对比曲线图。由表 7、图 7 可看出,电机楼板测点 14、15、16 的方向振动加速度均方根整体上相比测点 13 比较突出,这是因为测点 14、15、16 测点位于楼梯孔且受到楼梯振动及人行走振动的影响,同时 3 个方向上分组 4 的各个测点明显要高于其他三个分组的加速度均方根,原因是现场机组 5 并未进入运行状态,使得前池流道中的水流在汇入进水池过程中增大了机组 4 附近的水脉压力,加剧水泵中水流的不稳定现象造成强烈振动;而分组 1 的加速度均方根最小,是因为分组 1 水泵机组位于厂

表 7 监测点类别分组

Tab. 7 Grouping of monitoring points categories

分组类别	监测点位置				
	水泵层楼板	泵座	出水弯管	电机层楼板	电机
1	1	5	9	13	17
2	2	6	10	14	18
3	3	7	11	15	19
4	4	8	12	16	20

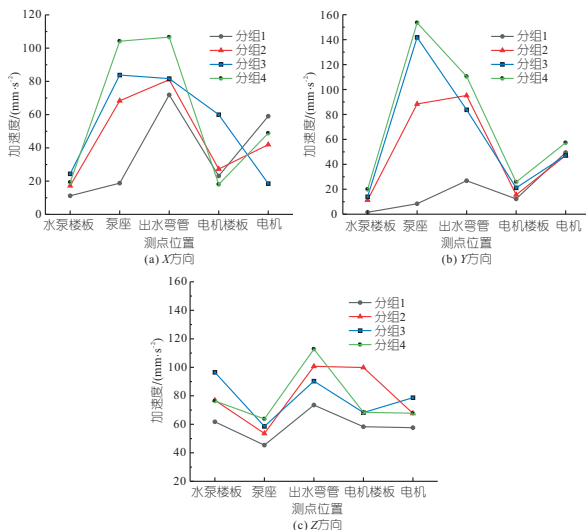


图 7 典型位置 3 个方向振动对比曲线图

Fig. 7 Comparison curves of vibration in three directions at typical locations

房最边缘位置,进水池引水过程中水流产生水力脉动能量最少,该分组测点位置所受激励振动最小,传递能量相比较小。考虑其他外在因素,从测点曲线变化趋势看出,厂房各部位振动强度大小即为出水弯管>泵座>电机>电机层楼板>水泵层楼板。

综上所述,厂房结构局部构件虽有与激励源发生共振的可能,振动幅值也较为显著,但通过振动反应分析,厂房结构在各脉动压力共同作用下,通过对各位置全方位进行特征提取信息,准确把握了厂房内各位置振动变化规律,且均未超出厂房振动控制标准。

## 6 结论

a. 针对打渔张泵站厂房扩建工程,基于原型观测数据并结合三维有限元模态分析对机组稳定运行下泵站厂房振动特性进行较为全面的研究,探究了多振源激励下结构共振现象及 5 种不同位

置振动响应变化规律,为泵站的运行稳定性提供重要依据。

b. 基于功率谱分析厂房各位置的主次振源及幅值,得出 RSI 引起的水力脉动在整个泵系统中占主导,以叶频 2、4 倍频体现。开展厂房结构自振特性和共振复核表明,厂房整体结构各阶为低频自振频率,与水泵机组产生主要激励源的错开度大于 20%,发生共振概率较小。局部部件与 RSI 水力脉动及机械振动 14 倍转频错开度小于 20%,易发生共振现象,因此需从振动反应角度进一步复核。

c. 在多源激励共同耦合作用下,通过对典型位置监测信号提取加速度特征信息,分析各部位振动响应大小依次为出水弯管>泵座>电机>电机层楼板>水泵层楼板,均满足现行规范控制标准。表明该厂房结构具有较大刚度和强度,且结构设计合理。

## 参考文献:

- [1] 黄波,谭新奇,魏加富,等. 水电站厂房楼板自振特性研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 100-103.
- [2] 毕智伟,赵补石,魏加富,等. 某水电站机组及厂房振动问题成因与处理[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 188-191.
- [3] 唐仁琥,陈浩鑫. 德能湘江水电站机组与厂房耦合振动分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 208-211.
- [4] 杨佳钦,程龙,刘德祥,等. 永湖泵站机组及厂房异常振动分析和研究[J]. 中国农村水利水电, 2022 (4): 170-175.
- [5] 刘聪. 某可逆式机组厂房振动问题的原因分析及处理方案[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 156-159.
- [6] 张建伟,刘贺,曹克磊,等. TBM 有压输水隧洞内张钢圈-管片-围岩组合结构联合承载力学特性分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1154-1169, 1180.
- [7] 国家能源局. 水电站厂房设计规范: NB/T 35011-2013[S]. 北京:中国电力出版社, 2012.
- [8] 刘依松,陈灯红. 基于无质量地基模型的重力坝地震响应分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 6-10.

## Analysis of Vibration Characteristics of Powerhouse Structure Under Pressure Pulsation Excitation of Vertical Axial Flow Pump

WANG Jian-kang<sup>1</sup>, JIANG Qi<sup>2</sup>, ZHAO Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-wei<sup>2</sup>, LIU Xi-zhu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Jinan Key Laboratory of Digital Twin and Smart Water Resources, Shandong Provincial Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of pressure pulsation of the pumping unit on the powerhouse structure, the powerhouse of Dayuzhang pumping station was taken for an example. Based on the prototype observation data, the vibration source composition and vibration characteristics of powerhouse structure were analyzed using three-dimensional finite element simulation. The safety of the structure was analyzed and evaluated from the perspective of structural resonance check and vibration response. The results show that the hydraulic pulsation caused by RSI and the rotational frequency excitation caused by the operation of the unit have the greatest impact on the vibration of powerhouse under the stable operation condition of the unit, and the natural frequency of the local floor structure has a small degree of coincidence, which is easy to resonate. However, from the perspective of vibration response, the vibration response of each local part is within the allowable range, the outlet elbow and pump seat are the largest, and the pump floor slab is the smallest. This study has important theoretical value and practical significance for realizing the long-term and safe operation of the pumping station powerhouse structure.

**Key words:** prototype observations; modal analysis; resonance review; vibration response