

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.002

胡少伟, 许毅成, 张润, 等. 基于水轮机特征频率的组合长柱振动特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 10-18. (HU Shaowei, XU Yicheng, ZHANG Run, et al. Analysis of vibration performance of combined long columns based on characteristic frequencies of hydrogenerator[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 10-18. (in Chinese))

基于水轮机特征频率的组合长柱振动特性研究

胡少伟¹, 许毅成¹, 张润¹, 喻江^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了有效改善当前水电站厂房整体结构的使用性能与抗震性能,以水电站水轮发电机组运行的特征频率为参数指标,分别对矩形截面空心钢管长柱、圆形截面空心钢管长柱、矩形截面钢-混组合长柱、圆形截面钢-混组合长柱4种模型进行模态分析及共振校核。分析表明,圆形截面钢管混凝土组合长柱的自振频率与振源频率错开度大于20%,能够有效避免共振,具有显著的抗震特性。在此基础上,开展室内足尺寸模型振动特性试验,通过位移响应和加速度响应等力学指标进行对比分析。结果表明,在20 Hz的振源频率下,方截面柱的振动响应小于圆截面柱。上述振动特性分析结果可为水电站厂房柱结构的工程设计提供技术支持。

关键词: 特征频率; 组合长柱; 模态分析; 共振校核; 振动特性试验

中图分类号: TV34; TV32⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)06-0010-09

水电站的水轮发电机组在运行过程中不可避免要产生振动,若振动超出一定的范围,就会直接影响到机组的安全稳定运行,缩短其检修周期和使用寿命,严重时还会引起引水管道和整个厂房的振动,以至被迫停机^[1-5]。当水电站的水轮发电机组布置在楼上时,动力疲劳作用可能引起结构的局部破坏,导致内力重分布,最终降低结构强度。对于安装立轴机组的主厂房,按照一般习惯,将发电机层以下称为厂房下部结构。目前国内外对于考虑下部结构的钢管混凝土组合长柱振动响应的研究比较少见。

我国已投产的大型机组水电站如岩滩、二滩、小浪底、隔河岩、东江等,自运行以来均出现不同程度的水轮机振动问题。除了五强溪、小浪底、李家峡转轮因振动引起叶片裂纹问题外,正在规划的洪家渡、溪洛渡、小湾、龙滩、水布垭均等单机容量在400~700 MW的大型机组水轮机振动问题也很复杂。王俊红等^[6]对广蓄二期工程地下厂房的机墩组合进行了结构刚度和动力影响分析;韩芳等^[7]对十三陵抽水蓄能电站地下厂房不同的结构形式作了动力分析研究;李小进等^[8]对厂房结构在机组振动荷载和水轮机流道脉动压力荷载作用下的动力响应进行了分析。

本文通过对4根不同的组合柱进行室内足尺寸模型振动特性试验,完成了Workbench模态分析,研究了钢管混凝土组合柱相对于空心钢管柱振动位移响应、加速度响应峰值的变化,进一步验证组合柱性能的优越性。通过对不同截面的组合柱位移响应、加速度响应进行对比分析,研究了不同截面组合柱在机组运行特征频率下的动力性能。

收稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401902); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金资助项目(Y417012)

作者简介: 胡少伟(1969—),男,河南开封人,教授级高级工程师,博士,主要从事水工结构工程与材料方面研究。

E-mail: hushaowei@nhri.cn

1 模态分析

1.1 组合长柱模型的建立

组合长柱模型分方截面钢管柱、圆截面钢管柱、方截面钢管混凝土组合长柱、圆截面钢管混凝土组合长柱4种类型,长度(含混凝土基础)均为4 m,插入基础深度280 mm,与基础连接处做固结处理。钢管厚3 mm,距离梁顶端1 m处设有牛腿。牛腿与悬臂钢板连接,钢板长1 m。钢管边缘与圆柱钢垫块固结。CAD中的实体模型如图1所示。将CAD三维模型以sat格式导入Workbench^[9]。

1.2 网格划分

有限元网格的划分对于整个计算结果有着直接的影响,网格划分得太疏会影响计算精度,太密对于提高计算精度作用不是很明显,同时又会增加大量的计算。因此,合理的网格划分对于整个有限元分析至关重要。本文采用六面体主导网格划分,大部分网格是六面体单元,少部分是金字塔单元和四面体单元。设置相关性中心为粗糙,单元尺寸为10 mm,平滑度低,过渡快速,跨度中心角细化,单元最小边长5 mm。对于方截面钢管柱,共划分成346 336个节点,52 127个单元^[10]。其他类型组合长柱的网格划分基本类似。网格划分如图2所示。

1.3 结构模态的数值分析

为了分析不同类型对组合长柱动力学特性的影响,分别计算了空心圆钢管柱、实心圆钢管柱、空心方钢管柱、实心方钢管柱4种类型组合长柱的固有频率,并对计算结果进行比较。

在对组合长柱进行模态分析之前,要对整个组合长柱的各部件进行材料定义。钢管、牛腿、悬臂钢板采用结构钢,混凝土柱采用混凝土材料。在组合长柱底端施加对地固定约束。组合长柱模型各部件材料参数如下:混凝土柱的弹性模量为 3×10^4 MPa,泊松比为0.18,钢管柱、牛腿和悬臂钢板及垫块的弹性模量均为 2×10^5 MPa,泊松比为0.30。

通过ANSYS Workbench对组合长柱进行模态分析^[11-12],得出前10阶固有振动频率(表1)和振型模态云图(图3)。可见,当长柱与基础连接处固结,顶端无约束时,相对于矩形截面钢管柱,圆截面钢管柱的各阶固有频率明显上升,平均提高了25.4%。相对于矩形截面钢-混组合柱,圆截面钢-混组合柱的各阶频率平均提高12.7%。相对于方截面钢管柱,方截面钢-混组合柱的各阶频率明显上升,固有频率平均上升15.6%。相对于圆截面钢管柱,圆截面钢-混组合柱的各阶频率平均上升1.3%。截面形式对自振频率影响较大。施工设计时选择钢-混组合柱和圆截面柱能提高结构整体刚度,对抗振有利。

对前6阶固有振动频率进行分析,相对于圆截面钢管柱,圆截面钢-混组合柱的各阶频率平均上升7.3%,其他3种组合长柱的固有频率对比和上文分析结果相差不大。



图1 组合长柱模型和试验现场
Fig. 1 3D model of combined long column and experiment pictures

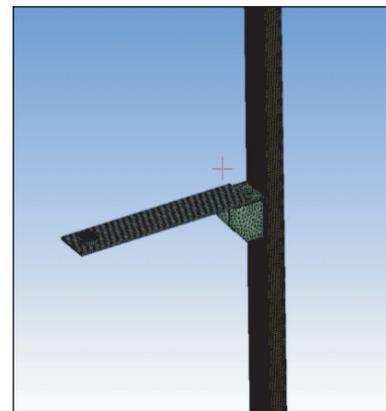


图2 网格划分
Fig. 2 Grid partition

表1 组合长柱的固有频率

Tab. 1 Natural frequencies of combined long columns

模态阶数	Hz			
	空心方柱	实心圆柱	空心圆柱	实心方柱
1	5.2	6.8	6.5	4.7
2	6.7	6.8	6.7	8.6
3	8.2	11.0	11.2	10.9
4	14.8	43.7	24.4	27.9
5	42.6	44.4	56.1	31.5
6	54.5	48.0	60.0	58.7
7	83.4	73.8	76.4	73.2
8	92.1	106.7	103.2	81.9
9	100.3	119.7	136.7	106.0
10	104.4	123.1	150.2	157.3

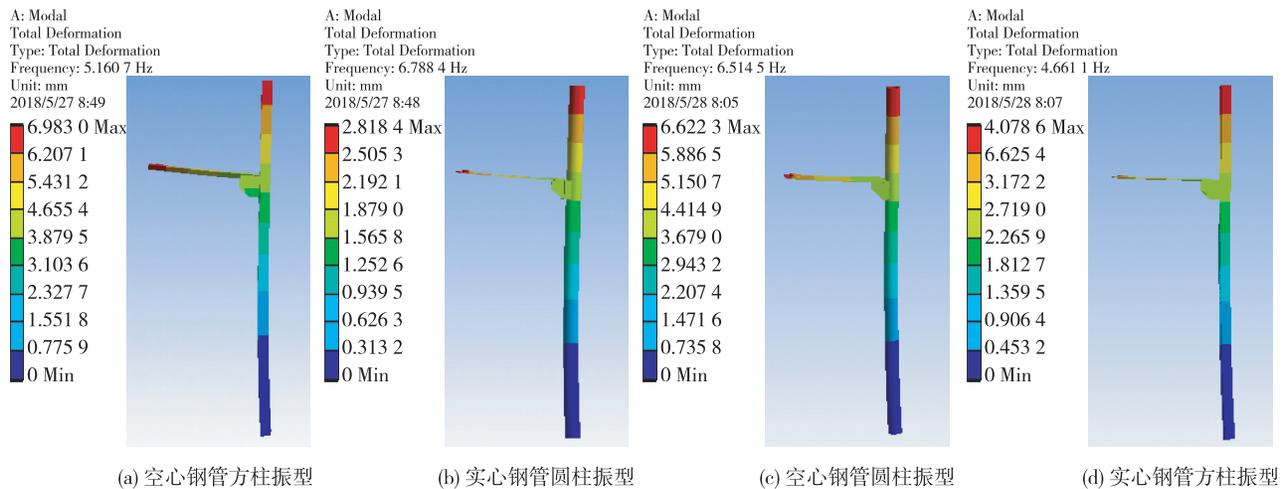


图 3 部分振型模态

Fig. 3 Part of vibration mode graphs

2 共振校核

引起水轮发电机组振动的振源很多,大致可分为机械、电磁和水力等 3 种。本文选取 6 座抽水蓄能电站的主要振源频率特性取平均值,见表 2^[12-17]。

表 2 抽水蓄能电站主要振源频率

振源	某大型抽水蓄能电站	宜兴抽水蓄能电站	白莲河抽水蓄能电站	十三陵抽水蓄能电站	新疆某大型水电站地面厂房	阿海水电站厂房	平均值
转速频率	5.6	6.3	6.8/4.2	8.3	3.6	1.5	5.2
转速频率倍频	11.1	12.5	13.5/8.3	16.7	7.1		11.5
尾水管低频	1.11~1.85	1.25~2.08	1.04/1.04	1.39~2.78	0.71~1.19		1.09~1.66
转轮叶片数频率	50.0	56.3		58.3	46.4		52.8
转轮叶片数频率倍频	100.0	112.5		116.6	92.9		105.5
导水叶片数频率	133.3	162.5					147.9

根据《水电站厂房设计规范》中有关结构共振校核的规定,对厂房结构是否发生共振进行校核。校核标准为:结构自振频率和强迫振动频率之差与自振频率的比值应大于 20%~30%。这里拟对结构前 10 阶自振频率进行共振校核。

2.1 矩形截面空心钢管长柱

空心方柱自振频率校核见表 3。

表 3 空心方柱自振频率校核

Tab. 3 Self vibration frequency checking of square section steel tube column

空心方柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%					空心方柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%				
	f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2		f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2
5.2	0.09					54.5	3.18				
6.7						83.4					
8.2						92.1	14.57				
14.8						100.3	5.21				
42.6						104.4	1.04				

注: f_n 为转速频率(5.156 Hz); f_1 为转轮叶片数频率(52.75 Hz); f_2 为导水叶片数频率(147.91 Hz)。

可见,空心方柱的低阶频率和转速频率错开度小于20%,存在共振可能性。第6阶频率与转轮叶片数频率的错开度小于20%,存在共振可能性。第8,9,10阶频率与转轮叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。高频振动的能量较低,振型参与系数小,因此产生共振的危害性大大降低。

2.2 圆形截面空心钢管长柱

空心圆柱自振频率校核见表4。空心圆柱低阶频率与各振源频率的错开度均较大,基本不存在共振的可能性。第3阶频率与转速频率倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。第5和6阶频率与转轮叶片数频率的错开度小于20%,存在共振可能性。第8阶频率与转轮叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。第9和10阶频率与导水叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。高频振动的能量较低,振型参与系数小,因此产生共振的危害性大大降低。

表4 空心圆柱自振频率校核

Tab.4 Self vibration frequency checking of circular section steel tube column

空心圆柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%					空心圆柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%				
	f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2		f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2
6.5						60.0		12.15			
6.7						76.4					
11.2		2.83				103.2			2.24		
24.4						136.7				8.23	
56.1			5.90			150.2				1.55	

注: f_n 为转速频率(5.156 Hz); f_1 为转轮叶片数频率(52.75 Hz); f_2 为导水叶片数频率(147.91 Hz)。

2.3 矩形截面钢-混组合长柱

实心方柱自振频率校核见表5。实心方柱低阶频率与各振源频率的错开度小于20%,存在共振可能性。第3阶频率与转速频率倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。第6阶频率与转轮叶片数频率的错开度小于20%,存在共振可能性。第9阶频率与转轮叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。第10阶频率与导水叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。高频振动的能量较低,振型参与系数小,因此产生共振的危害性大大降低。

表5 实心方柱自振频率校核

Tab.5 Self vibration frequency checking of composite column with square cross section

实心方柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%					实心方柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%				
	f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2		f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2
4.7	10.62					58.7		10.21			
8.6						73.2					
10.9		5.49				81.9					
27.9						106.0			0.48		
31.5						157.3				5.98	

注: f_n 为转速频率(5.156 Hz); f_1 为转轮叶片数频率(52.75 Hz); f_2 为导水叶片数频率(147.91 Hz)。

2.4 圆形截面钢-混组合长柱

实心圆柱自振频率校核见表6。实心圆柱低阶频率与各振源频率的错开度均较大,基本不存在共振的可能性。第3阶频率与转速频率倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。第5和6阶频率与转轮叶片数频率的错开度小于20%,存在共振可能性。第8,9和10阶频率与转轮叶片数频率的倍频的错开度小于20%,存在共振可能性。高频振动的能量较低,振型参与系数小,因此产生共振的危害性大大降低。

表 6 实心圆柱自振频率校核

Tab. 6 Self vibration frequency checking of circular cross section composite columns

实心圆柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%					实心圆柱 自振频率/Hz	机组可能振源频率与结构自振频率错开度/%				
	f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2		f_n	$2f_n$	f_1	$2f_1$	f_2
6.8						48.0			9.90		
6.8						73.8					
11.0		4.58				106.7				1.15	
43.7						119.7				11.84	
44.4			18.87			123.1				14.28	

注: f_n 为转速频率(5.156 Hz); f_1 为转轮叶片数频率(52.75 Hz); f_2 为导水叶片数频率(147.91 Hz)。

综上所述,方柱与振源发生共振的可能性较大,厂房较强振动产生的原因最有可能是方柱的自振频率与转速频率错开度较小,产生共振。圆柱与振源发生共振的可能性较小,较强振动产生的原因最有可能是圆柱的自振频率与转轮叶片数频率的倍频错开度较小,产生共振。

3 振动特性试验

3.1 试验概况

本试验共设计了 4 个试件,分别为圆形截面钢管柱、矩形截面钢管柱、圆形截面组合长柱、矩形截面组合长柱,其具体试验参数如表 7 所示。

试验所用钢管由南京光亚钢结构有限公司负责加工制作。同时为保证钢管两端截面平整,端部采用角磨机进行精细磨平处理;表中空心表示该试件为钢管柱,否则为钢管混凝土组合长柱,混凝土为膨胀混凝土,采用向混凝土中添加膨胀剂的方式制备而成,膨胀剂类型为 UEA 型膨胀剂,混凝土设计强度为 C50。在钢管距顶端 1 m 处焊接牛腿,并在牛腿上固定长 1 m 的悬臂钢板。钢管底端插入混凝土基础 280 mm。另外架设了钢管反力架,与基础卡死,反力架底部垫上布,减小与地面接触面的空隙。

表 7 试件设计参数

Tab. 7 Design parameters of specimens

试件编号	截面形状	截面尺寸 $a/\text{mm} \times b/\text{mm} \times h/\text{mm}$	钢管壁厚/mm	f_s/MPa	钢材型号	是否空心
1	矩形	200×100×4 000	3	205	Q235-B	是
2	圆形	140×4 000	3	205	Q335-B	否
3	矩形	200×100×4 000	3	205	Q435-B	否
4	圆形	140×4 000	3	205	Q136-B	是

注: a 为截面直径或长度; b 为截面宽度; h 为试件高度; f_s 为钢材屈服强度。

3.2 测点布置及加载方式

为测量钢管柱和组合长柱的振动响应,对于圆形试件,在钢管表面每隔 1 m,在两面沿轴向分别粘贴应变传感器,共 4 组,其中底端的一组距离底端 280 mm。牛腿所在的面为背面。在距离底端 1 m 的高度处沿轴向在正面布置位移传感器和加速度传感器,然后每隔 1 m 布置 1 个位移传感器和加速度传感器,共布置 3 个位移传感器和 3 个加速度传感器。位移传感器固定在反力架上,确保振动时位移传感器的弹性体独立于传感器支座振动。对于矩形试件,传感器布置在正背面的中线处。具体布置方式见图 4。

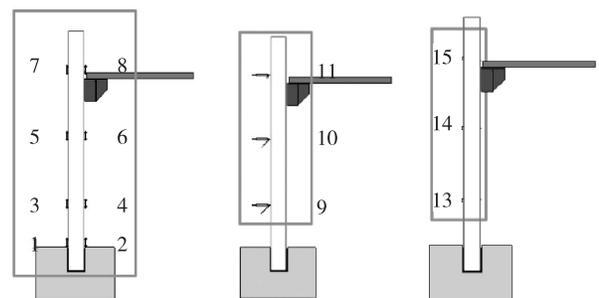


图 4 测点布置

Fig. 4 Measuring points layout

本次振动试验采用频率为 10~25 Hz, 力为 2 300 N 的活塞式振动器, 将空气压缩机用橡胶气管连接到振动器上, 振动器用螺栓固定在轮辐传感器上, 轮辐传感器用螺栓通过连接件固定在悬臂钢板末端的钢垫块上, 悬臂钢板的前端用螺栓固定在牛腿上。振动响应信号采集系统采用东华公司的 DHDAS 动态信号采集分析系统, 采样频率 200 Hz。振动频率选择 20 Hz。

3.3 试验结果分析

根据 4 根柱的振动响应试验结果(见表 8), 将它们的振动响应列于表 9, 位移和加速度时程曲线如图 5 和 6 所示。

表 8 结构自振频率与 20 Hz 错开度

Tab. 8 Staggering degree of vibration frequency of structure and 20 Hz

%

模态阶数	空心方柱	实心圆柱	空心圆柱	实心方柱	模态阶数	空心方柱	实心圆柱	空心圆柱	实心方柱
1	287.54	194.62	207.01	329.08	6	63.29	58.33	66.69	65.96
2	199.51	192.41	200.21	132.85	7	76.03	72.89	73.83	72.67
3	144.47	81.24	78.22	82.83	8	78.28	81.26	80.62	75.58
4	35.45	54.24	17.95	28.30	9	80.06	83.29	85.37	81.13
5	53.06	54.93	64.32	36.59	10	80.84	83.75	86.69	87.29

如表 8 所示, 圆截面钢管柱的第 4 阶固有频率与振源频率 20 Hz 的错开度小于 20%, 存在共振可能性。由表 9 可知, 在 20 Hz 的振动频率下, 相对于矩形截面钢管柱, 矩形截面钢-混组合柱的位移和加速度响应明显降低, 位移响应平均降低了 88.6%, 加速度响应降低了 80.6%。相对于圆截面钢管柱, 圆截面钢-混组合柱的位移和加速度响应明显降低, 位移响应平均降低了 54.2%, 加速度响应降低了 5.7%。表明钢-混组合柱在 20 Hz 振动频率下的振动响应小于钢管柱。

表 9 钢管柱与组合柱的振动响应最大值

Tab. 9 Maximum vibration response of steel tube column and composite column

柱的种类	挠度位移/mm			加速度/g
	9	10	11	15
钢管空心方柱	0.189	0.576	0.816	0.260
钢管实心方柱	0.241	0.262	0.305	0.144
钢管空心圆柱	0.326	0.615	0.703	0.297
钢管实心圆柱	0.211	0.447	0.412	0.281

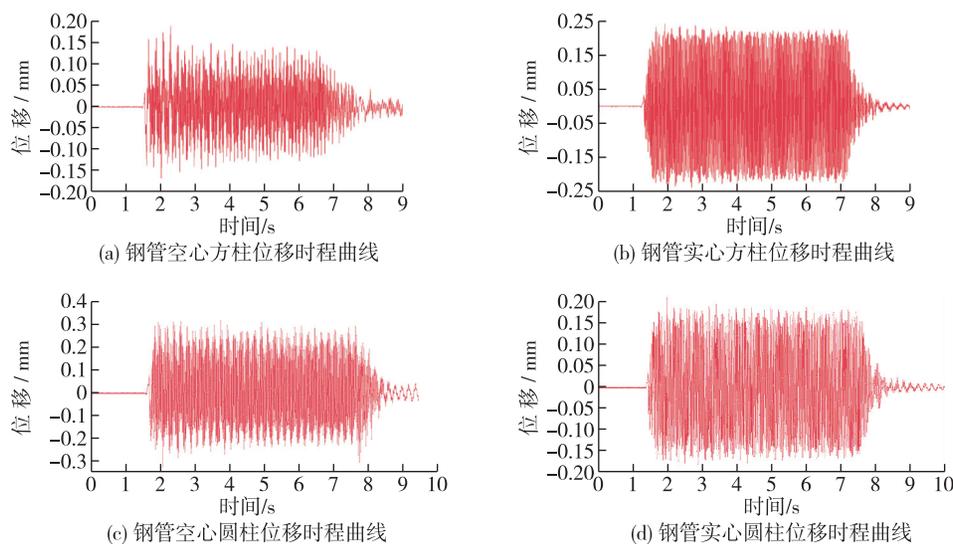


图 5 组合柱位移时程曲线

Fig. 5 Displacement time curves of composite column

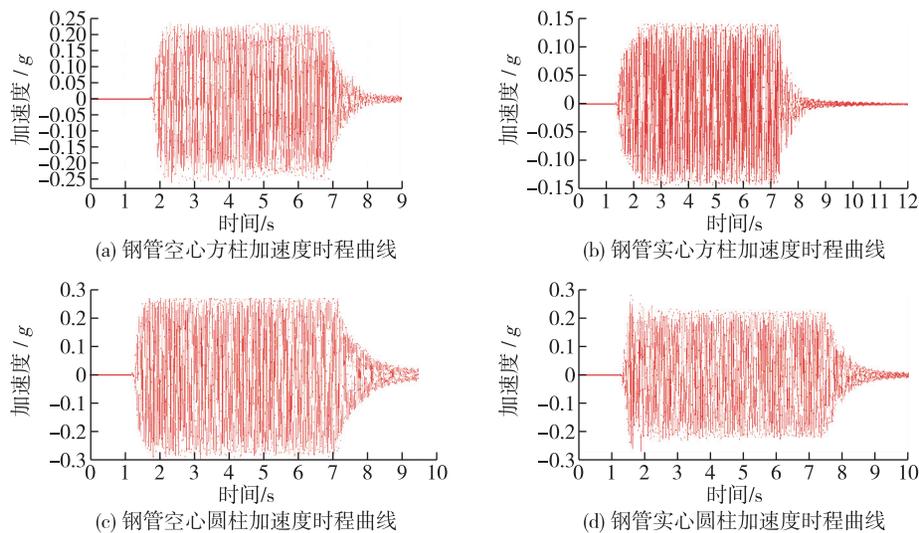


图 6 组合柱加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history curves of composite column

在 20 Hz 振动频率下,考虑组合长柱与 20 Hz 最接近的固有频率,模态分析得到的固有频率为:空心方柱 14.8 Hz,实心圆柱 11 Hz,空心圆柱 24.4 Hz,实心方柱 10.9 Hz。与矩形截面钢-混组合柱相比,矩形截面钢管柱的固有频率较高,刚度较大,能量吸收能力较差,所以振动响应较大。与圆截面钢-混组合柱相比,圆截面钢管柱的固有频率较高,刚度较大,能量吸收能力较差,所以振动响应较大。

在 20 Hz 振动频率下,相对于圆截面钢管柱,矩形截面钢管柱的位移和加速度响应明显降低,位移响应平均降低了 21.8%,加速度响应降低了 14.2%。相对于圆截面钢-混组合柱,矩形截面钢-混组合柱的位移和加速度响应明显降低,位移响应平均降低了 31.1%,加速度响应降低了 95.1%。表明矩形截面柱在 20 Hz 振动频率下的振动响应小于圆形截面柱。

与矩形截面钢管柱相比,圆形截面钢管柱的固有频率较高,刚度较大,能量吸收能力较差,所以振动响应较大。与矩形截面钢-混组合柱相比,圆截面钢-混组合柱的固有频率较高,刚度较大,能量吸收能力较差,所以振动响应较大。

4 结 语

通过对 4 种类型的矩形截面空心钢管长柱、圆形截面空心钢管长柱、矩形截面钢-混组合长柱、圆形截面钢-混组合长柱进行模态分析、共振校核,以及振动特性试验研究,主要得到以下结论:

(1) 当长柱与基础连接处固结,顶端无约束时,钢管混凝土组合柱的固有频率明显大于钢管柱,方截面组合柱的固有频率高出了 15.6%,圆截面组合柱的固有频率高出了 7.3%。钢管混凝土组合柱在施工速度快的同时保留了混凝土结构刚度大、造价低的优点,能显著改善水电站厂房结构的使用性能和抗震性能。

(2) 圆形截面钢管混凝土组合长柱的频率与水电站主要振源频率错开度大于 20%,能够有效避免共振,具有显著的抗震特性。

(3) 截面形式对组合柱刚度影响较大,在 20 Hz 的机组特征频率下,圆截面柱的顶端加速度响应高出矩形截面柱,组合柱更加明显,前者高出后者 95.1%;圆截面柱大部分位置的位移响应大于矩形截面柱,组合柱前者高出后者 31.1%。

钢-混凝土组合结构大量应用于水电站厂房建筑结构中,能显著改善水电站厂房结构的使用性能和抗震性能。与已有结果相比,重点研究长柱的动力特性,得到水力发电过程中长柱的振动规律,为解决水电厂房振动预测问题提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 马震岳,董毓新. 水电站机组与厂房振动的研究与治理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004. (MA Zhenyue, DONG Yuxin. Research and control of the vibration of the unit and plant of the hydropower station[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 马震岳,沈成能,王溢波,等. 红石水电站厂房的机组诱发振动及抗振加固研究[J]. 水力发电学报,2002(1): 28-36. (MA Zhenyue, SHEN Chengneng, WANG Yibo, et al. Studies on the anti-vibration and reinforcement of powerhouse in Hongshi hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(1): 28-36. (in Chinese))
- [3] 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. (OUYANG Jinhui, CHEN Houqun, LI Deyu. Computation of vibration in powerhouse of Three Gorges Project and prototype verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 484-490. (in Chinese))
- [4] 舒扬启,王日宣. 水电站厂房动力分析[M]. 北京:水利电力出版社,1987. (SHU Yangqi, WANG Rixuan. Dynamic analysis of powerhouse of hydroelectric power station[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1987. (in Chinese))
- [5] 马震岳,宋志强,陈婧,等. 小湾水电站地下厂房动力特性及抗震分析[J]. 水电能源科学,2007,25(6): 72-74, 149. (MA Zhenyue, SONG Zhiqiang, CHEN Jing, et al. Dynamic characteristics and anti-seismic analysis of underground power house of Xiaowan Hydropower Station[J]. Hydropower and Energy Science, 2007, 25(6): 72-74, 149. (in Chinese))
- [6] 王俊红,黄勇. 广蓄二期工程地下厂房结构振动研究及减振措施[J]. 水力发电,2001,27(11): 30-34. (WANG Junhong, HUANG Yong. Research on structural vibration of underground powerhouse of two phase project and vibration damping measures [J]. Hydroelectric Power, 2001, 27(11): 30-34. (in Chinese))
- [7] 韩芳,蔡元奇,朱以文. 十三陵抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2007,40(5): 91-94. (HAN Fang, CAI Yuanqi, ZHU Yiwen. Dynamic analysis of the structure of underground powerhouse of Ming Dynasty Tombs pumped storage power station[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2007, 40(5): 91-94. (in Chinese))
- [8] 李小进,申艳,蒋逵超,等. 白莲河抽水蓄能电站机墩结构刚度分析[J]. 水电能源科学,2007,25(2): 53-56. (LI Xiaojin, SHEN Yan, JIANG Kuichao, et al. Research on stiffness of support for electric generator structure in Bailianhe pumped storage station[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 53-56. (in Chinese))
- [9] 浦广益. ANSYS Workbench12 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010. (PU Guangyi. Detailed explanation of basic tutorials and examples of ANSYS Workbench 12[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))
- [10] BAIS R S, GUPTA A K, NAKRA B C. Studies in dynamic design of drilling machine using updated finite element models[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(12): 1307-1320.
- [11] 杨俊哲. 基于 Workbench 多倾角型振动筛的模态分析[J]. 煤炭学报,2012,37(1): 240-244. (YANG Junzhe. Modal analysis for multi-angle vibrating screen based on ANSYS Workbench[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 240-244. (in Chinese))
- [12] 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, 99. (CHEN Jing, MA Zhenyue, QI Haifeng, et al. Analysis on vibration response of underground powerhouse structure of Yixing pumped storage power station[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 81-83, 99. (in Chinese))
- [13] 陈婧,王粉玲,马震岳. 大型抽水蓄能电站地下厂房结构振动响应分析[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(6): 78-81. (CHEN Jing, WANG Fenling, MA Zhenyue. Analysis on vibration responses of underground powerhouse structure of large-scale pumped storage power station[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(6): 78-81. (in Chinese))
- [14] 申艳,伍鹤高,熊卫亚,等. 白莲河抽水蓄能电站地下厂房内部结构动力分析[J]. 水力发电,2010,36(7): 43-46, 49. (SHEN Yan, WU Hegao, XIONG Weiya, et al. Dynamic analysis on powerhouse structure of Bailianhe Pumped Storage power station, 2010, 36(7): 43-46, 49. (in Chinese))
- [15] 韩芳,蔡元奇,朱以文. 十三陵抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2007,40(5): 91-94. (HAN Fang, CAI Yuanqi, ZHU Yiwen. Dynamically structural analysis of underground powerhouse for Shisanling pumped storage power station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(5): 91-94. (in Chinese))

- [16] 曹连鹏, 赵兰浩, 曹泽伟, 等. 阿海水电站厂房结构抗振分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 93-95. (CAO Lianpeng, ZHAO Lanhao, CAO Zewei, et al. Vibration analysis of structure of Ahai Hydropower House[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 93-95. (in Chinese))
- [17] 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(2): 27-30. (DU Xiaojing. Vibration observation and analysis of the support structure of the underground powerhouse unit[J]. Hydroelectric Power, 1999(2): 27-30. (in Chinese))

Analysis of vibration performance of combined long columns based on characteristic frequencies of hydrogenerator

HU Shaowei¹, XU Yicheng¹, ZHANG Run¹, YU Jiang^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to improve the usability and seismic performance of the structures in hydropower station, taking the characteristic frequency of the hydrogenerator as the key parameter index, the modal analysis and resonance check of 4 models including rectangular hollow steel tube long column, circular section hollow steel tube long column, rectangle section steel composite long column and circular section steel-concrete combined long column are carried out in this study. The analysis shows that the staggering degree between the frequency of the circular section steel-concrete combined long column and the source frequency is greater than 20%, which means that the resonance can be effectively avoided, and this column has remarkable seismic characteristics. On this basis, the tests on the vibration characteristics of the indoor full-scale model are carried out to analyze and compare the mechanical indexes such as displacement response and acceleration response. From the research results it is found that the vibration response degree of the square section column is less than that of the circular section column at the frequency of the vibration source of 20 Hz. The above analysis results of the vibration characteristics given by this paper can provide a case history reference and a technical support for the engineering design of the powerhouse column structures of the hydropower stations.

Key words: characteristic frequency; composite long column; modal analysis; resonance check; tests on vibration characteristics