

水电站地下厂房结构振动荷载反馈研究

毛柳丹, 王海军

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 结合某大型水电站地下厂房, 首先采用三维有限元方法分析了其自振特性, 并对其进行了共振校核。其次基于该电站的实测振动数据, 分析了机组与厂房结构响应的关系。在此基础上, 采用结构动力谱响应计算, 对该电站厂房机墩上的垂向动荷载进行了反馈分析, 并分析了厂房结构的振动响应。计算结果可为同类型厂房结构设计提供参考。

关键词: 水电站地下厂房; 数值模拟; 振动荷载; 轴向水推力; 反馈分析

中图分类号: TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0079-04

Research on load feedback of structure vibration of underground house of hydropower station

MAO Liudan, WANG Haijun

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Combined with a big scale underground hydropower house, the paper first analyzed its natural vibration characteristics by use of three-dimensional finite element method and carry out the check of resonance vibration. Based on the measured vibration data, it secondly studied the relationship between units and powerhouse structure. Thirdly, the paper made feedback analysis for the vertical dynamic load on unit pier and studied the vibration response of powerhouse structure. Form the numerical simulation, the response of the powerhouse structure can be known. The results can provide reference for the design of the same type of powerhouse structure.

Key words: underground hydropower house; numerical simulation; vibration load; axial hydraulic thrust; feedback analysis

1 研究背景

随着高水头电站的不断兴建, 机组单机容量和尺寸增大, 结构的刚度相对减小, 机组振动和水力脉动诱发的厂房振动问题日益突出。根据国内外已建水电站运行资料来看, 机组振动诱发厂房结构剧烈振动导致破坏甚至引发事故的现象并不少见^[1-2], 使电站的安全稳定运行与电厂运行人员的身心健康都受到了严重威胁。

水电站在运行过程中, 必然伴随着机组的振动, 而当振动幅值超出允许限值时, 将影响其安全稳定运行。由于机组动荷载影响因素多且复杂, 难以具体确定。目前分析动荷载的主要方法有两种, 一是根据现行水电站厂房设计规范推荐的动荷载计算公

式进行计算^[3]; 二是根据振动试验, 包括室内模型试验和现场原型试验, 进行荷载的反馈分析^[4-7], 在反馈分析的基础上再分析厂房结构的动力响应。本文结合某大型水电站地下厂房, 首先采用三维有限元方法分析了其自振特性, 并对其进行了共振校核; 其次基于电站的实测振动数据, 分析了机组与厂房结构响应的关系。在此基础上, 采用结构动力谱响应计算, 对水电站厂房机墩上的垂向动荷载进行了反馈分析, 并分析了厂房结构的振动响应。计算结果可为实际工程的设计提供参考。

2 三维有限元模拟

2.1 计算模型

某大型水电站装机容量 2 400 MW, 装 4 台混流

收稿日期: 2013-12-25; 修回日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50909072); 国家创新群体科学基金资助项目(51021004)

作者简介: 毛柳丹(1989-), 女, 浙江江山人, 硕士研究生, 主要从事水工建筑物静动力研究。

通讯作者: 王海军(1978-), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 主要从事水工建筑物、海上风电结构静动力研究。

式水轮发电机组,地下式水电站厂房。主厂房、主变室、尾调室3大洞室依次平行布置。地下厂房洞室群以Ⅱ类围岩为主,无区域性断裂,成洞条件好。地下厂房开挖尺寸约为243 m×31 m×76 m(长×宽×高)。

选取典型机组段进行有限元计算,厂房结构模拟范围为:向下至尾水底板底部,向上至发电机层楼面,上下游侧取至蜗壳外围混凝土和岩石的结合面,两侧取至机组段间分缝处。计算模型对厂房结构中主要结构和主要孔洞均进行了如实模拟,采用8节点块体单元模拟混凝土结构,用壳单元模拟钢蜗壳和座环结构,用质量单元模拟主要设备。有限元模型见图1。模型采用直角坐标系,坐标原点在机组安装高程中心点, X 轴平行于机组纵轴中心线; Y 轴与机组中心线一致,向上为正; Z 轴垂直机组中心线和机组纵轴中心线,且指向下游方向为正。

混凝土强度等级为C25,弹性模量28 GPa,泊松比0.2;围岩弹性模量20 GPa,泊松比0.2,钢板弹性模量210 GPa,泊松比0.3。整体模型划分单元157 000个,节点102 660个。混凝土动弹性模量按

静弹性模量的1.3倍考虑,谐响应计算的阻尼比取0.05。模型边界条件:蜗壳底板以上的机组段分缝处设为自由边界,洞室围岩四周采用法向约束,围岩底部采用全约束。

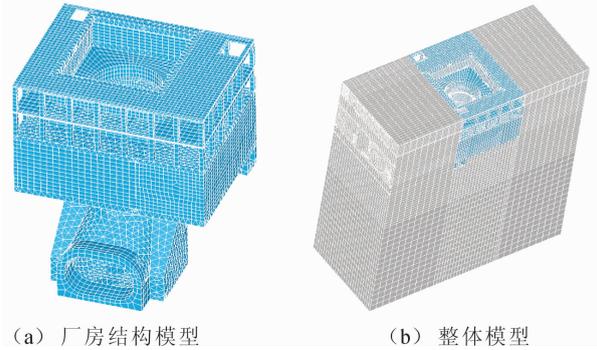


图1 有限元模型

2.2 自振特性

采用模态分析方法研究该电站地下厂房结构的自振特性。厂房结构的部分振型如图2,前10阶自振频率和振型特征描述见表1。

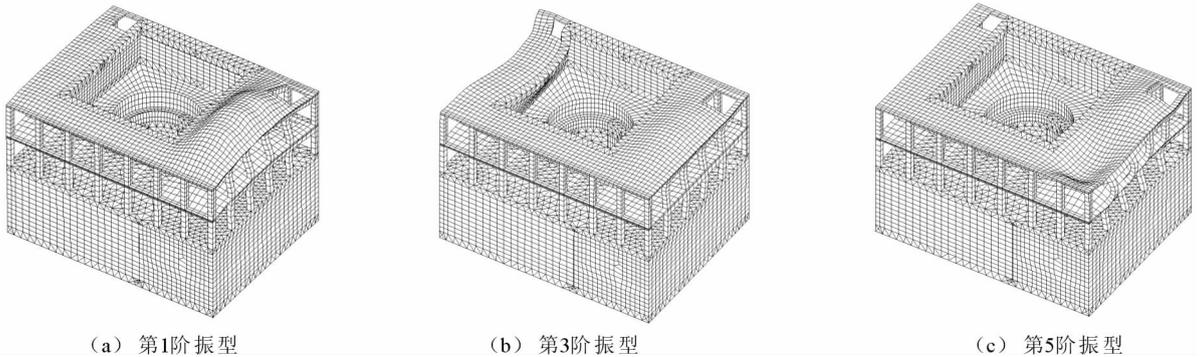


图2 整体模型前奇数阶振型图

表1 整体模型前10阶阵型汇总表

阶数	频率	振型
1	20.144	上部板梁柱一、二象限竖向振动和机墩振动
2	23.436	发电机层楼板一、二象限竖向振动及梁柱振动
3	24.109	上部板梁柱在三、四象限横河向振动
4	25.351	上部板梁柱在一、二象限内竖向振动和三、四象限的横河向振动
5	26.840	上部板梁柱在一、二象限竖向振动以及柱子的扭动
6	27.288	一、二象限内发电机楼板竖向振动及柱子扭动
7	30.340	一、二象限内母线层楼板竖向振动及柱子扭动
8	30.867	发电机层板梁柱扭动、风罩横向振动及母线层楼板与机墩等结构竖向振动
9	32.360	板梁柱、风罩与机墩扭动
10	33.177	一、二象限内发电机楼板竖向振动以及梁柱的扭动

2.3 共振复核

按照《水电站厂房设计规范》(SL266-2001)规定^[3]:“机墩自振频率和强迫振动频率之差与自振

频率(或强迫振动频率)的比值的绝对值应大于20%~30%,以防共振。”

文献[7]中给出了水电站激振源频率的计算公

式,将机墩自振频率和强迫频率进行比较可知:由整体结构自振频率计算结果可知,其自振频率分布密集,且主要表现为发电机与母线层楼板、上部梁柱、风罩与机墩的联合振动,首阶自振频率与低阶激励荷载频率相差较大;整体结构可能与蜗壳不均匀流场(25 Hz)、导叶不均匀流(40 Hz)及推力瓦制造不良产生的电气振动(53.33 Hz)发生共振,其中蜗壳不均匀流场与整体结构前几阶自振频率接近,在实际工程中应当引起重视并及时采取相应的减振消振措施。

3 振动荷载反馈分析

3.1 机组与厂房结构垂向振动响应关系

图3为下机架基础与定子基础水平向振动随负

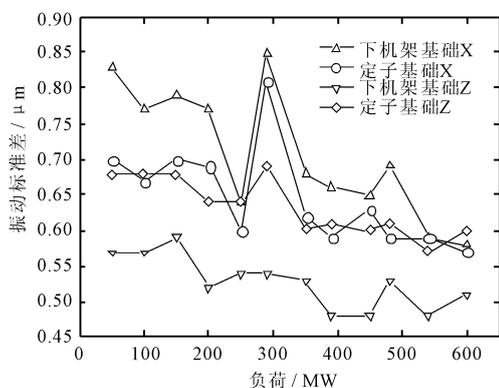


图3 机墩水平向振动标准差随负荷变化图

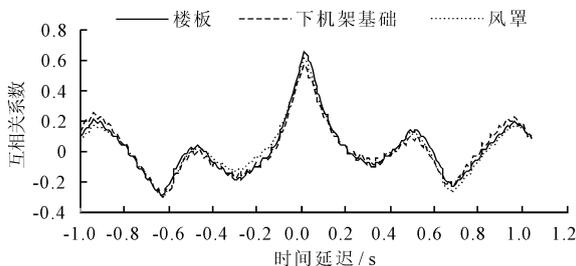


图5 楼板、风罩及下机架基础与下机架垂向振动位移信号互相关图

3.2 反馈分析

机墩是水轮发电机组的支撑结构,承受着巨大的动荷载和静荷载。通常进行厂房动力响应计算时,机墩上的动荷载是采用水电站厂房结构设计规范上的公式计算所得,包括扭矩、水平离心力及垂直动荷载。将荷载分配到各支撑点上即可进行计算,其中垂直和扭矩动荷载可以等效为各支撑点上的垂直和切向力;水平离心力则等效为相应结点的径向力。

采用规范中的水平动荷载为离心力(正常工况

荷变化曲线。从图3可知,两者变化规律一致且振动量相近,主要受机械和电磁作用的影响。图4为机组与厂房结构垂向振动随负荷变化曲线。从中可知下机架垂向振动与下机架基础、楼板及风罩的垂向振动规律十分相似且机组振动量均比厂房结构振动量大。通过分析厂房结构在振动量较大的290 MW负荷工况下的主频率可知,定子基础垂向振动的主频率为2.22 Hz,下机架基础、楼板及风罩垂向振动的主频率为1.13 Hz,下机架垂向的振动主频率即转频1.67 Hz。由图5可知,风罩、楼板及下机架基础与下机架垂向振动位移信号具有很高的相关性。因此机墩垂向力的传递路径可为:推力轴承→下机架基础→定子基础,然后再向上传递到楼板、风罩等混凝土结构。

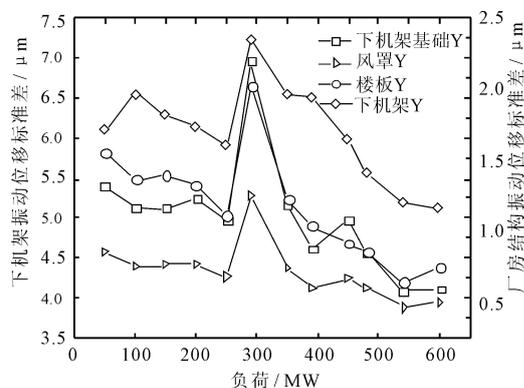


图4 机组与厂房结构垂向振动随负荷变化图

时为148 kN)及扭矩力(58530 kN·m),作用在定子基础板位置;推力轴承按照下机架的传力方式,将垂直动荷载(28 000 kN)均匀施加在下机架基础的地脚螺栓处。将该组荷载施加在厂房机墩上进行动位移计算,其计算结果往往比实测动位移值大。故根据机组与厂房结构的耦联振动规律,通过实测尝试反馈机墩所承受的垂向动荷载。机墩垂直动荷载主要来源于水轮机轴向水推力,该机组的轴向水推力为8 400 kN。

为了明确机墩组合结构的振动特性,根据厂房结构原型观测结果,在模态分析的基础上,利用三维有限元谐响应动力计算模块,分析不同垂向动荷载作用下的地下厂房动力位移响应,以此进行垂向动荷载反馈分析,荷载的谐振频率为机组转频。水平动荷载仍按照规范计算值施加。选取了1、1.2和1.5倍的轴向水推力值作为垂向动荷载,与水平动荷载一起施加在厂房机墩结构相应位置上,得出机墩在动荷载作用下最大动位移值及传感器位置的动位移值,如表2所示。表中值为振动位移双幅值,其

中括号中的数据为传感器位置的计算值。

表2 机墩振动双幅统计表

工况		正常运行(轴推力倍数)			传感器位置实测值
部位	方向	1.0	1.2	1.5	
定子基础	横河向	(12.78)	(12.62)	(12.39)	6.41
		-33.81	-37.43	-42.86	
	顺河向	(5.79)	(8.41)	(12.34)	5.72
		-33.60	-38.18	-45.05	
	竖向	(50.45)	(60.22)	(74.88)	70.91
		-62.93	-74.99	-93.10	
下机架基础	横河向	(7.34)	(7.98)	(8.94)	5.40
		-21.64	-24.76	-29.49	
	顺河向	(2.48)	(3.71)	(5.54)	4.90
		-21.28	-24.93	-30.40	
	竖向	(62.28)	(74.66)	(93.24)	19.23
		-87.22	-104.49	-130.4	

从表2中可知,定子基础水平向振动位移的计算值与实测值相差较多,而竖向动位移当垂直荷载取1.5倍轴向水推力时计算结果为74.88 μm ,与实测值70.91 μm 接近。下机架基础的振动位移值在取1.5倍轴向水推力时,水平振动位移值与实测值基本相当,但竖向位移相差很大,可能是由于在下机架基础上施加了较大的垂向荷载所致。采用规范计算垂直动荷载值近28 000 kN,是轴向水推力的3.3倍,计算出的定子基础垂向位移双幅值为160 μm (测点位置),最大值为200 μm 。最大值已经达到了规范上限,与实测值相差甚远,并不符合实际情况。垂直动荷载采用1.5倍轴向水推力时,虽然定子基础水平向和下机架基础的垂向计算振动位移值比实测值大较多,但定子基础垂向和下机架水平向计算与实测振动位移值基本相当。可见采用1.5倍轴向水推力作为机墩的垂直动荷载比采用规范方法计算的动位移值更接近实际情况,并且也是偏安全的。

当然该结论仍需更多电站和实测数据进行验证。

4 结 语

基于电站的实测振动数据对厂房机墩垂向动荷载进行了反馈分析,主要结论如下:

(1)采用规范方法计算的动荷载进行厂房机墩结构的振动位移计算,其值比实测值大。而垂直动荷载采用1.5倍轴向水推力时,振动位移计算值更接近实际情况,并偏保守。当然仍需更多实际工程进行验证。

(2)该电站地下厂房自振频率分布密集,主要表现为发电机与母线层楼板、上部梁柱、风罩与机墩的联合振动。第一阶自振频率与低阶激振荷载频率相差较远,不会发生共振;整体结构前几阶频率与蜗壳不均匀流场频率接近,可能发生共振,在实际工程中应当引起重视。

参考文献:

- [1] 杨建东,赵琨,李玲,等. 浅析俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站7号和9号机组事故原因分析[J]. 水力发电学报,2011,30(4):226-234.
- [2] 欧阳金惠,陈厚群,李德玉. 三峡电站发电厂房动力特性与低水头振动问题研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004,2(3):215-220.
- [3] 中国水利水电科学研究院,电力工业部昆明勘测设计研究院,电力工业部西北勘测设计研究院. DL 5073-2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [4] 陈婧,马震岳,刘志明,等. 水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J]. 水力发电,2004,30(5):24-27.
- [5] 练继建,王海军,秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [6] 练继建,秦亮,何成连. 基于原型观测的水电站厂房结构振动分析[J]. 天津大学学报,2006,39(2):176-180.
- [7] 王海军,练继建,杨敏,等. 混流式水轮机轴向动荷载识别[J]. 振动与冲击,2007,26(4):123-125.