

大型水电站地下厂房结构动力特性及机组振动响应

李振芳¹, 邱玲², 侯攀²

(1. 河南省林州市弓上水库灌区管理所, 河南 林州 456582;
2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要:针对大型水电站厂房结构振动问题日益突出的问题,结合某巨型水电站,对地下厂房结构动力特性及机组振动响应进行研究。选取一个完整的典型机组段,考虑围岩参振并与厂房结构一起构建有限元耦合模型,模拟厂房内部的主要结构和孔洞。研究表明,该水电站厂房结构振动响应满足设计规范要求,厂房结构设计安全、合理。

关键词:地下厂房;振动响应分析;有限元分析;自振特性;共振

中图分类号:TV731.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)S1-0024-02

近年来,我国一大批巨型水电站正在兴建或待建中。随着单机容量的不断增大,机组引起的厂房结构振动问题日益突出,水电站厂房设计人员、电厂运行管理部门越来越重视该问题。各机组制造厂家采用理论和模型试验等方法对机组振动进行研究和预防。由于振动问题的复杂性,需要深入研究水电站厂房结构的动力特性和机组振动作用引发的动力响应,在此基础上进行厂房结构优化设计,以确保电厂安全稳定运行^[1]。

某巨型水电站单机容量为770 MW,总装机容量达13 860 MW,正常运行水头为241 m,电站厂房规模巨大、结构复杂。本文结合该水电站,对大型电站地下厂房结构的动力特性及机组振动响应进行研究,可为其他大型水电工程的设计施工提供借鉴。

1 工程概况及计算模型

该水电站是以发电为主的巨型水电工程,正常运行工况水头为241 m,甩负荷工况水头为287 m,HD值较高。发电厂房为地下式,厂房结构形式复杂,规模巨大,采取“一机一缝”的布置方案,典型机组段长度为34.0 m,厂房下部跨度为28.4 m。蜗壳层为厂房下部大体积混凝土,高度为10.4 m,水泵布置在蜗壳层机组段右侧。蜗壳进口直径为7.74 m,正向进水。蜗壳的埋设方式采用组合方案,垫层从蜗壳进口铺设到150°范围,该埋设方式与传统垫层方案和直埋方案均不同。

选取典型机组段进行模拟,由于是地下厂房,需要考虑洞室围岩参振。计算模型范围:纵向取为一个典型机组段长度34 m;横向从上游边墙向上游侧取85.2 m,横向从下游边墙向下游侧取103 m;竖向从机组安装高程向上取170 m,从机组安装高程向下取145 m。模型中模拟了尾水管底板至发电机层楼板的所有主要结构和主要孔洞,以及厂房下游侧的主变室。计算模型见图1、图2。

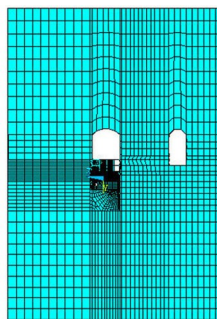


图1 整体模型网格

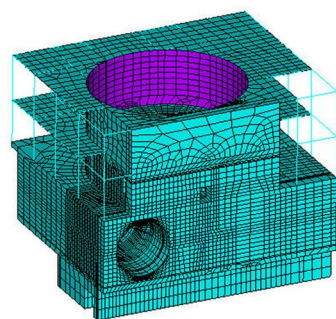


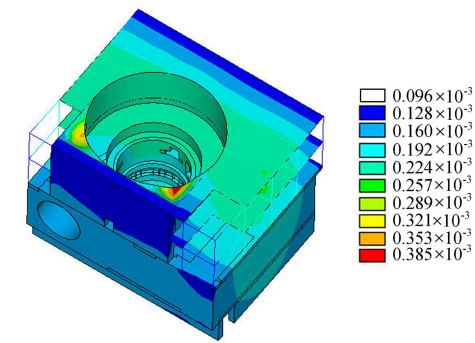
图2 厂房混凝土结构网格

模型边界条件:机组段分缝部位为自由边界,洞室围岩的侧面与顶部采用法向约束,洞室围岩底面采用全固定约束。

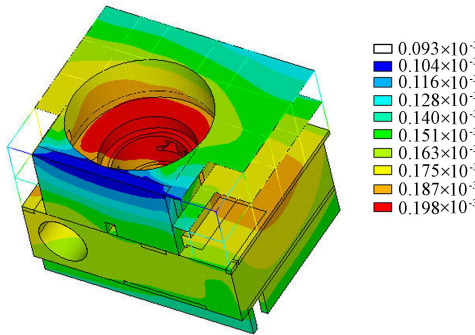
2 厂房结构自振特性分析及共振复核

a. 自振特性^[2]。采用模态分析方法研究该电站厂房结构自振特性(自振频率和振型)。该水电站厂房结构的前2阶振型见图3,图中数字表示虚拟位移,前10阶自振频率和振型特征见表1。

作者简介:李振芳(1983—),女,河南林州人,助理工程师,主要从事水电站运行维护等工作。E-mail: 33659392@qq.com



(a) 第1阶振型



(b) 第2阶振型

图3 水电站厂房结构振型

表1 厂房结构自振频率及振型特征

阶次	频率/Hz	振型特征
1	17.27	厂房竖向上下振动,发电机层偏上游侧楼板上下振动剧烈
2	19.16	厂房沿横向振动,机墩偏下游侧振动剧烈
3	23.70	发电机层右侧偏上游楼板上下振动剧烈
4	25.12	发电机层左侧偏上游楼板上下振动剧烈
5	26.50	厂房上部结构绕竖轴扭动,发电机层左侧偏上游楼板上下振动剧烈
6	27.47	发电机层偏上游侧楼板上下振动剧烈
7	33.13	厂房上部结构沿纵向摆动,发电机层右侧楼板上振动剧烈
8	34.73	厂房上部结构沿横向摆动,发电机层偏上游侧楼板上下振动剧烈
9	36.23	厂房上部结构沿纵向发生拉伸压缩振动,发电机层左右两侧楼板振动剧烈
10	37.93	厂房上部结构沿横向发生拉伸压缩振动,发电机层右侧偏下游楼板振动剧烈

b. 共振复核。根据 SL 266—2001《水电站厂房设计规范》中有关结构共振复核的规定,对该厂房结构进行共振复核。本文计算分析时认为当 $|(f_{自}-f_{激})/f_{自}| \leq 30\%$ 时可能产生共振。通过共振复核可知,厂房结构的前 10 阶自振频率与机组转动频率、固定导叶数频率、电气高频、尾水管低频和中频涡带等主要振源频率有足够错开度,主要机组振源不会引起厂房结构共振。但是,第 5~10 阶自振频率与 31.25 Hz 的叶片数频率错开度小于 30%,有可能发生共振。

3 厂房结构机组振动响应分析

采用谐响应分析研究机组振动荷载作用下厂房

结构的动力响应。考虑了正常运行、半数磁极短路、两相短路 3 种工况,正常运行工况动荷载的频率为机组转速频率,其值为 1.67 Hz;半数磁极短路和两相短路工况下轴向和径向荷载的频率为机组转动频率,切向荷载为电磁频率为 50 Hz。机组振动荷载见表 2。

表2 机电设备荷载

位置	工况	荷载/kN		
		径向	切向	轴向
上机架基础,每块基础板受力	正常运行	111	19	
	半数磁极短路	532	94	
	两相短路	47	9	
定子基础,每块基础板受力	正常运行	337	769	16.675
	半数磁极短路	1285	1169	55.475
	两相短路	2426	2922	6.275
下机架基础,每块基础板受力	正常运行	2600	2432	3225
	半数磁极短路	3545	2532	3841
	两相短路	0	0	225

3.1 厂房结构振动控制标准

根据 SL 266—2001《水电站厂房设计规范》^[3],机墩振幅应满足以下标准:垂直振幅短期组合不大于 0.15 mm,长期组合不大于 0.1 mm;水平横向与扭转振幅之和短期组合不大于 0.2 mm,长期组合不大于 0.15 mm。

在大量水电站振动研究的基础上,人们总结了水电站厂房振动的控制标准参考值,见表 3。本文也是依据该表中参考值进行振动评价。

表3 水电站厂房结构振动控制标准参考值

结构构件	位移/mm	速度/(mm·s ⁻¹)		加速度/(m·s ⁻²)	
		竖向	水平向	竖向	水平向
楼板(作为建筑结构)	0.2	5.0	5.0	1.0	1.0
楼板(作为仪器基础)		1.5	1.5		
楼板(人体健康评价)	0.2	3.2	5.0	0.4	1.0
楼板(机墩混凝土)	0.2	5.0	5.0	1.0	1.0

3.2 成果分析

根据计算成果,结合水电站厂房结构的特点,对发电机层楼板、电气夹层楼板、上机架基础、定子基础、下机架基础等振动较大部位进行分析评价。分析各特征部位在不同工况下的最大振动位移(振幅)、最大振动速度、最大振动加速度、动应力,各特征部位的最大振动位移见表 4。

厂房结构机组振动响应分析表明:该水电站厂房振动主要发生在板梁柱部位,以及振动荷载作用的机墩、风罩部位。正常运行工况下,主要部位的竖向和水平向振动位移均满足规范要求。半数磁极短路工况、两相短路工况均属偶然工况,其振动位移不需要满足规范要求的限值。分析这两个工况的计算

(下转第 40 页)

量)变化大得多,说明土体内部含水率的变化对压缩模量(再压缩模量)的影响不及其对回弹模量的影响。这主要是由于随着含水率下降,土体内部吸水所占比例增大,而吸水的作用是使土颗粒间的黏结更加坚固。

3 结 语

对取自嘉绍高速公路路基的原状土样进行了含水率等常规物理力学性质试验,通过试验获得了试验土样的物理性质及力学性质指标,为路基的设计、变形及稳定计算与分析提供参数。

根据超载预压处理地基方法中存在的加载、卸载及再加载应力作用过程,进行单向固结试验。加载、卸载及再加载阶段,土体模量与压力关系表现出不同的变化规律。加载阶段及再加载阶段土体模量与压力关系近似为线性变化,卸载阶段的回弹模量

随压力呈二次曲线变化规律,随压力的变化速率较加载及再加载时模量随压力的变化率大,反映了土体组成结构中,土颗粒间表现相互吸引的特点。

参考文献:

- [1] 朱向荣,潘秋元. 超载卸除后地基变形的研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1991,25(2):246-256.
- [2] 徐立新. 公路软土路堤预抛高的分析和计算[J]. 东南大学学报,2000,30(3):126-131.
- [3] 张光永,王靖涛,卫军,等. 超载预压法的卸载控制理论研究[J]. 岩土力学,2007(6):1250-1254.
- [4] 张光永,王靖涛,徐辉. 超载预压法的超载比及卸载控制研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2003(4):37-39.
- [5] 张光永,吴玉山,李彰明. 超载预压法阈值问题的室内试验研究[J]. 岩土力学,1999(1):79-83.

(收稿日期:2012-12-11 编辑:胡新宇)

(上接第25页)

表4 各特征部位最大振动位移 mm

结构部位	方向	正常运行工况	半数磁极短路工况	两相短路工况
定子基础截面	水平向	0.012	0.059	0.024
	竖 向	0.023	0.082	0.154
下机架基础截面	水平向	0.049	0.132	0.021
	竖 向	0.036	0.027	0.009
机墩底部截面	水平向	0.024	0.145	0.022
	竖 向	0.026	0.078	0.016
风罩	横流向	0.007	0.016	0.011
	顺流向	0.007	0.019	0.011
	竖 向	0.013	0.033	0.008
发电机层楼板	横流向	0.007	0.016	0.011
	顺流向	0.005	0.019	0.013
	竖 向	0.013	0.033	0.008
电气夹层楼板	横流向	0.007	0.018	0.009
	顺流向	0.006	0.023	0.015
	竖 向	0.012	0.030	0.009

注:水平向动位移是指水平横向位移与扭转动位移之和。

结果可知,两相短路工况下,定子基础板位置竖向振动位移最大值为0.154 mm,略微超出了规范限值0.15 mm,其他部位的振动位移均未超过规范要求。因此该水电站厂房结构在机组振动荷载下的动力响应满足规范要求。

该水电站厂房结构在机组振动荷载下的最大动位移、最大振动速度、最大振动加速度均满足厂房结构振动控制标准。由于在接头等刚度相差较大部位易发生异步振动,该部位动应力较大,但均未超过材

料的设计强度。该水电站厂房发电机层和电气夹层楼板较厚,刚度较大,改善了楼板的振动特性。在厂房布置时,机墩风罩上游与围岩的连接,并且上游墙支护锚杆外露50 cm,与机墩风罩钢筋焊接,加强了机墩、风罩与上游侧围岩连接,增大了机墩风罩的刚度,改善了厂房振动特性。

4 结 语

目前,运行水头高、单机容量大的水电站越来越多,大型水电站厂房结构形式复杂、规模巨大,导致厂房结构振动问题日益突出。本文选取一个完整的典型机组段,考虑围岩参振并与厂房结构一起建立了有限元耦合模型,模拟了厂房内部的主要结构和孔洞,并且模拟无限地基的弹性回复性能。模型足够精细,保证了计算结果的可靠性。该水电站厂房结构不与常见机组振源激励发生共振,机组振动作用下动力响应满足要求,厂房结构设计安全、合理。

参考文献:

- [1] 张运良,大型水电站蜗壳及厂房结构动力分析问题探讨[J]. 水利水电科技进展,2010,30(6):20-25.
- [2] 马震岳,董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [3] SL 266—2001 水电站厂房设计规范[S].

(收稿日期:2013-03-18 编辑:骆超)