

# 某水电站厂房结构固有频率及共振分析

李志龙<sup>1</sup>, 张博<sup>2</sup>

(1. 中国水电集团公司西藏分公司, 西藏 拉萨 850008;

2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:**水电站厂房作为水利工程中的一个重要水工建筑物,应首先保证其运行的安全可靠,其次再考虑经济性。设计时应利用合理的技术措施,确保厂房工程质量,取得工程投资建设的经济效益和社会效益。因此,对厂房进行结构动力分析具有重要意义。笔者以某引水式水电站工程的厂房结构为研究对象,选取其中典型机组段,建立机组段三维有限元模型,对厂房进行地震作用分析以及厂房结构固有频率分析与共振校核,为该工程的设计和运行提供合理的依据。

**关键词:**水电站厂房结构;可能振源;频率特征;频率分析;共振校核

**中图分类号:**TV731;I043;P424.3+6;TL501+.3

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2016)05-0116-07

## 0 引言

厂房结构动力分析主要包含结构动力特性分析和动力响应分析两个方面。在水电站厂房的结构动力分析中,主要研究的是厂房结构在机组振动和地震作用等情况下,厂房的应力、变形及稳定性情况。水电站运行过程中机组振动现象多种多样,甚至可能会诱发厂房整体或局部振动,导致水电站无法稳定、安全、高效运行。笔者对背景工程厂房结构的抗震分析及其结构固有频率和共振校核做了研究,目的是运用三维有限元分析,评价厂房结构各部位运行的安全性,为工程提供一定的参考。

## 1 工程概况

某水电站采用左岸独立的引水发电系统布置,引水系统由电站的进水口、引水隧洞、压力钢管、发电厂房和尾水渠等建筑物组成。供水方式采用“一管两机”,以“卜型”岔管分成两条支管进厂分别与蜗壳连接。电站主厂房内安装两台90 MW的立式混流式水轮发电机组,总装机180 MW,电站额定水头84 m,单机引用流量119.7 m<sup>3</sup>/s。

## 2 计算资料

### 2.1 计算模型

#### 2.1.1 计算范围

本文的背景工程其厂房两个机组段结构基本相同,为简化计算,选取右侧靠近安装间的机组段

结构进行三维有限元计算。

#### 2.1.2 边界条件

(1) 机组两侧处楼板、立柱和边墙等外边界处理为自由变形,不考虑约束;

(2) 各层楼板与厂房中间梁柱或边墙连接按整体连接考虑(整体浇筑);

(3) 混凝土结构与外围岩石(一定范围)作为耦联体系进行整体计算(厂房基础沿上下游及底部延伸深度为50 m),围岩底部固定约束,上下游侧及左右侧采用对称约束。

#### 2.1.3 有限元模型网格划分

本文的计算模型中小型孔洞予以忽略,局部结构也根据需求和可能加以简化。

在三维有限元计算模型中,共采用了四种单元类型:

(1) 8节点块体单元,主要用来模拟厂房下部及边墙等大体积混凝土结构及岩石基础;

(2) 板壳单元,用来模拟屋顶、楼板和风罩等;

(3) 三维梁单元,用来模拟厂房的立柱和楼板下的梁格结构;

(4) 质量单元,用来模拟结构中的水体及其他结构的附加质量作用。

考虑围岩结构的整体计算模型的结点总数为84858,单元总数为114574,整体有限元模型网格剖分如图1所示。

#### 2.1.4 计算坐标系

收稿日期:2016-09-08

计算模型的坐标原点为 1 400.10 m 高程(水轮机安装高程),Z 轴为竖向,取上方为正。水平面以机组中心为原点,X 轴为纵向,左侧为正;Y 轴为横向,上游为正。

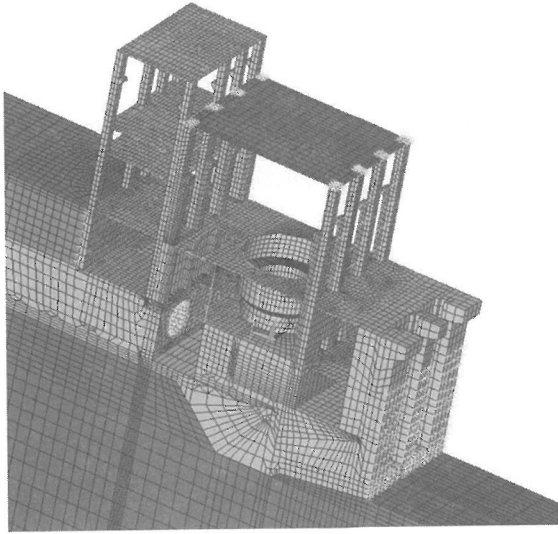


图1 考虑围岩的整体有限元模型网格剖分图

## 2.2 基本计算参数

### 2.2.1 工程的特征水位

工程的特征水位见表 1。

表 1 特征水位

上游:	
校核洪水位	1 497.00 m
正常蓄水位	1 494.50 m
下游:	
校核尾水位	1 411.76 m
设计尾水位	1 410.02 m
满载运行水位	1 406.76 m

### 2.2.2 厂房结构混凝土材料参数

厂房结构中的混凝土相关参数见表 2。

### 2.2.3 地震烈度

本工程抗震设防类别为丙类,主要建筑物设防烈度为 8 度。

## 3 机组运行中可能的振源及其频率特征

机组的振源主要包括电磁、机械和水力振源,

表 2 混凝土相关参数

混凝土等级	容重 kN/m <sup>3</sup>	设计强度		弹性模量 $E_c$ /MPa	泊松比
		轴心抗拉 $f_t$ /MPa	轴心抗压 $f_c$ /MPa		
C20	24	1.10	9.6	25 500	0.167
C25	24	1.27	11.9	28 000	0.167
C30	24	1.43	14.3	30 000	0.137

振源频率分量较多。不同机组,振动的表现形式和主频不同,必须结合机组自身设计特点和结合理论分析进行。混流式水轮发电机组的主要振源频率特性<sup>[2-5]</sup>可以归纳如下。

### 3.1 机械缺陷引起的振动

机械缺陷引起的振动频率多为转频或倍频。机械不平衡是机组主要振源之一。

机械振动的主频率在正常运行时(转速为 187.5 r/min):

$$f_n = \frac{n}{60} = 3.125 \text{ Hz}, 2f_n = 6.25 \text{ Hz}, \dots \quad (1)$$

当机组发生甩负荷运行时(转速取为额定转速的 1.6 倍,即 300 r/min):

$$f_n = \frac{n}{60} = 5 \text{ Hz}, 2f_n = 10 \text{ Hz}, \quad (2)$$

当机组发生飞逸时(转速为 330 r/min):

$$f'_n = \frac{n}{60} = 5.5 \text{ Hz}, 2f'_n = 11 \text{ Hz}, \dots \quad (3)$$

甩负荷工况和飞逸工况均为短暂运行工况,为过渡工况,运行时间很短,一般均不作重点校核。

### 3.2 机组的电磁振动

水轮发电机组的电磁振动包括转频和极频振动,其频率为:

$$f_a = \frac{3000}{60} K = 50 K (\text{Hz}) (K = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

### 3.3 水力振动的振源和频率

#### 3.3.1 尾水管内低频涡带

低频涡带水力脉动是混流式和轴流式水轮机普遍存在的振源之一。其频率由下式确定:

$$f_d = \mu_s f_n \quad (5)$$

式中  $\mu_s$  为系数。

据模型试验资料,本电站的低频涡带频率大约在 0.521 ~ 1.042 Hz 范围内。

#### 3.3.2 导叶水流不均匀引起的振动

引水道中的水流并不象理论假说的那样完全

均匀,不均匀水流撞击叶片,引起转轮振动,其振动为转频与水轮机叶片数  $Z_r$  的乘积或其乘积的整数倍:

$$f_b = Z_r f_n = 46.875 \text{ Hz} \quad (Z_r = 15), \dots, \quad (6)$$

### 3.3.3 其他震源

在机组的运行过程中,还可能出现其他不常见的振源,但都不是经常遇到的,不作重点复核。

## 4 厂房结构固有频率分析与共振校核

### 4.1 结构固有频率分析

结构自振频率计算时,进行了以下二种模型前 30 阶频率的计算:

模型一:整体计算模型;

模型二:下部计算模型(不考虑上游副厂房和主厂房上部结构)。

模型前 6 阶固有振动频率和对应振型,列于表 3 中。模型前 6 阶振型图如图 1 ~ 图 12 所示(共计算了 12 阶振型,限于篇幅,文中仅提供前 6 阶振型),表中所述及图中所示均不包括岩石基础。

表 3 厂房结构固有频率及振型表

频率阶次	模型一(含上部结构的整体模型)		模型二(下部结构模型)	
	频率	振型	频率	振型
1	0.314	主厂房框架横向	7.107	主厂房下部整体纵向
2	0.391	主厂房框架水平扭转	8.887	主厂房下部整体横向
3	0.622	副厂房框架横向	11.09	主厂房下部整体水平扭转
4	1.191	副厂房框架水平扭转	14.59	主厂房下部整体竖向
5	2.464	主、副厂房框架纵向	15.81	主厂房上下游墙及闸墩横向
6	2.465	副厂房框架二阶横向	16.02	主厂房上游墙及闸墩扭转
7	3.965	副厂房框架二阶纵向	17.78	尾水副厂房楼板竖向
8	4.449	副厂房框架扭转	18.24	主厂房发电机层楼板振动
9	5.442	副厂房框架三阶横向	18.73	主厂房发电机层楼板振动
10	6.206	主厂房框架横向	18.77	主厂房和尾水副厂房楼板振动
11	6.774	副厂房电缆夹层及 GIS 层楼板竖向	19.21	上游墙及主副厂房楼板振动
12	7.27	主厂房上下游框架横向相对振动	19.53	主副厂房楼板振动

(注:模型一振型描述中副厂房均指上游副厂房)

从表中和图中可以看出:

(1)对于模型一,由于上部主副厂房结构的刚度相对下部结构小许多,因此其振型基本上均表现为上部主副厂房的整体和局部振动。第 1 阶和第 2 阶振型表现为主厂房上部框架顺河向振动和水平扭转振动。第 3 阶和第 4 阶振型表现为副厂房上部框架结构顺河向振动和水平扭转振动。以后各阶都是主副厂房整体和局部振型,其中第 12 阶主要表现为主副厂房的顺河向相对振动,频率为 7.27 Hz。厂房整体前 12 阶振型,上部结构振型明显。因此,对于上部结构与下部结构质量及刚度相差较大的整体结构,下部大体积混凝土结构完全可以作为固定端处理,而不致引起明显的误差。

(2)对于模型二,第 1 阶振型表现为主厂房下部整体纵向振动,第二、三、四阶均表现为主厂房下部的整体振动形式。以后各阶为上、下游墙

及闸墩的振动,楼板振动从第 7 阶开始,以后各阶均表现为楼板振动。

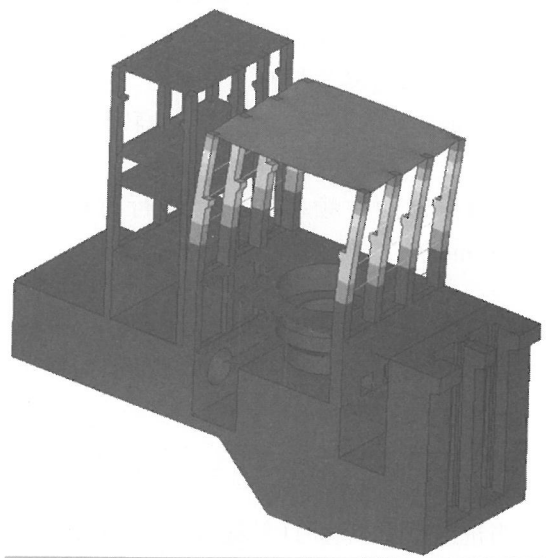


图 2 厂房整体结构第一阶(0.314 Hz)振型

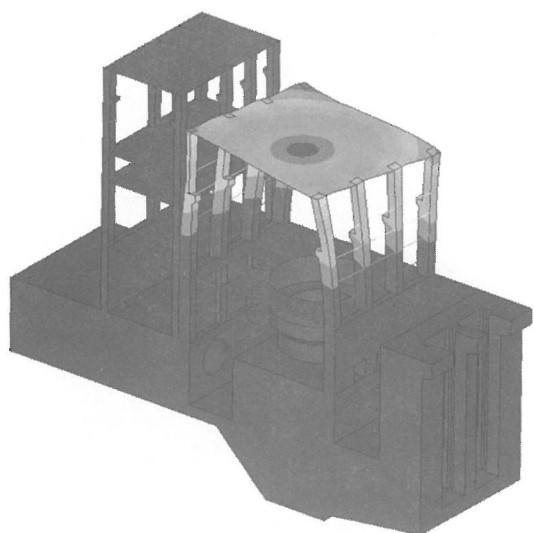


图3 厂房整体结构第二阶(0.391 Hz)振型

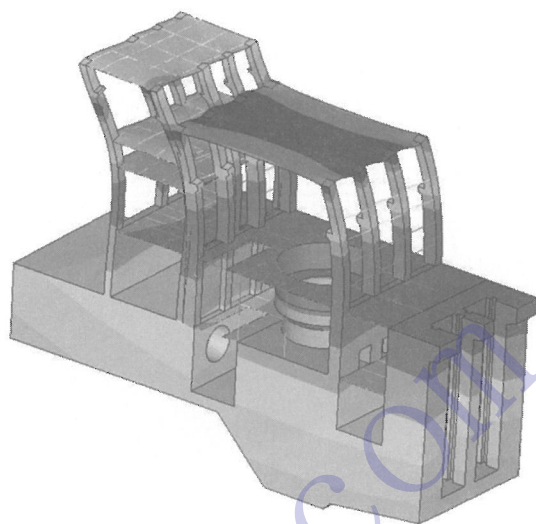


图6 厂房整体结构第五阶(2.464 Hz)振型

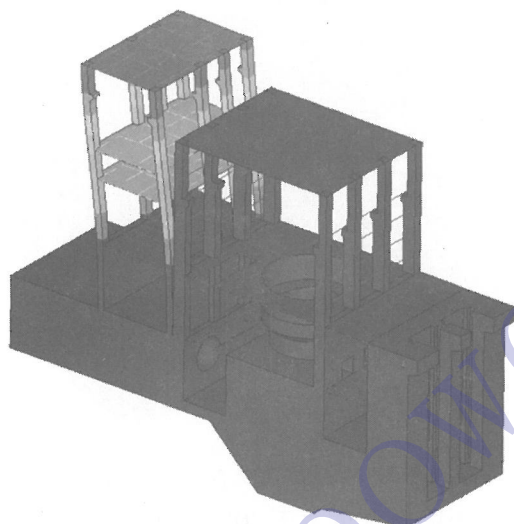


图4 厂房整体结构第三阶(0.622 Hz)振型

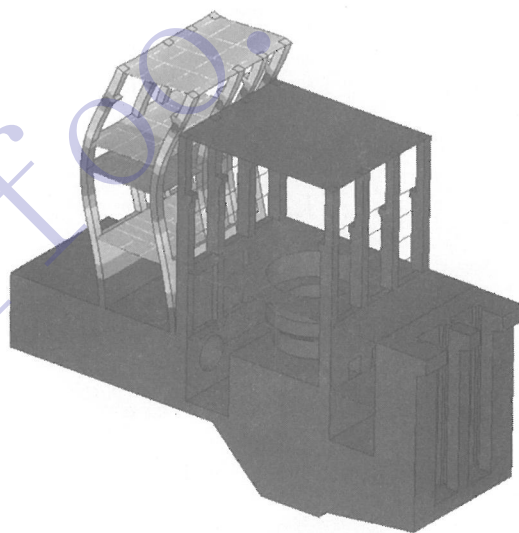


图7 厂房整体结构第六阶(2.465 Hz)振型

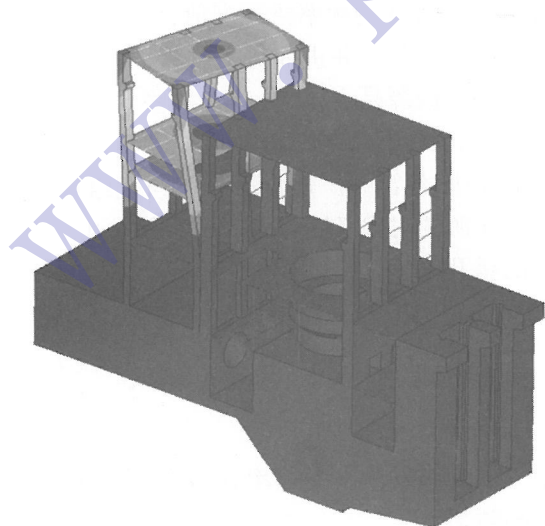


图5 厂房整体结构第四阶(1.191 Hz)振型

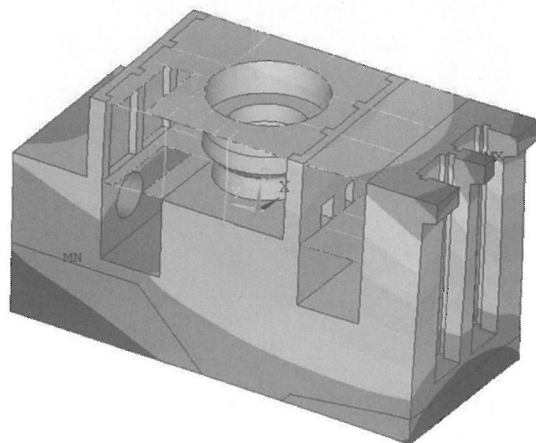


图8 厂房下部结构第一阶(7.107 Hz)振型

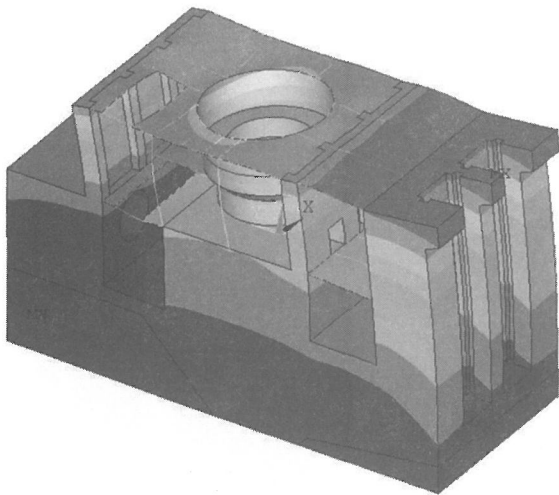


图 9 厂房下部结构第二阶(8.887 Hz)振型

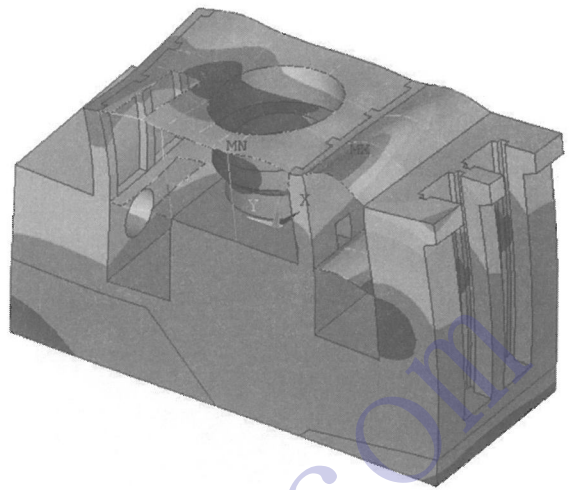


图 12 厂房下部结构第五阶(15.81 Hz)振型

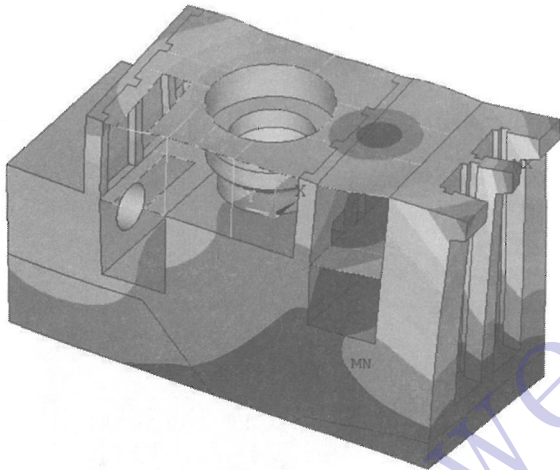


图 10 厂房下部结构第三阶(11.09 Hz)振型

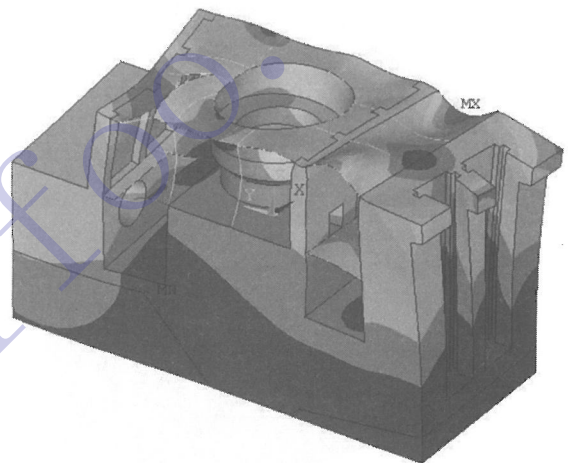


图 13 厂房下部结构第六阶(16.02 Hz)振型

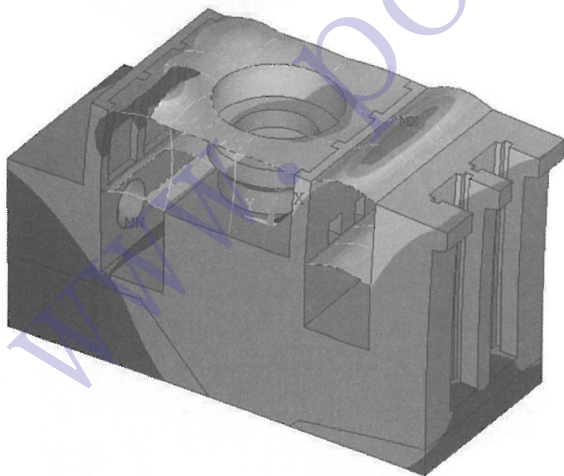


图 11 厂房下部结构第四阶(14.59 Hz)振型

振源频率的错开度大于 20% ~ 30%。现将主要的振源频率和模型的自振频率对比列于表 4 中,并给出 20% 以内的频率错开度值,可以对共振的可能性一目了然。并进而分析共振的危险性,因为只有某些振源是主要的,或者某些振型是主要的,需特别关注<sup>[6-9]</sup>。

表 4 中,给出了厂房自振频率与机组所有主要可能振源的对比复核情况。表中所列百分数为频率的错开度,采用下式计算,且只给出了错开度接近 20% 或 20% 以内的数值:

$$\frac{|f_i - f_0|}{f_i} \times 100\% < 20\% \sim 30\% \text{ 或 } \frac{|f_i - f_0|}{f_0} \times 100\% < 20\% \sim 30\% \quad (7)$$

式中  $f_0$  为结构的自振频率,  $f_i$  为机组可能振源的激励频率。

根据表中的计算结果可以得出以下基本结论:

#### 4.2 共振复核

共振复核以《水电站厂房设计规范》(SL266-2001)为依据,要求机墩结构自振频率和干扰

(1) 厂房结构的频率十分密集,基本在每一个个位数内均有频率出现,且很多为局部框架结构的振型;机组运行中的振源频率从低频(0.36 Hz)到高频(100 Hz)的分布极广。这样,共振校核只能抓住主要问题,把握结构基本频率与可能振源的错开。

(2) 水轮机转轮叶片数频率及电磁高频远远错开,不会共振。存在共振可能的频率区间为:第9阶频率与甩负荷和飞逸频率十分接近,第10阶频率与2倍转频接近,第3~4阶频率与低频涡带频率的错开度也较低。

(3) 对于模型二(厂房下部结构),尾水管低

频涡带、转速频率及电气高频也有足够的错开度。但是下部结构基频与2倍转速频率错开度不满足要求。

(4) 由于2倍转速频率的出现概率相对于转速频率还是较低的,可不作重要问题研究。但共振可能性还是存在的,在设计,生产,安装过程中,避免因过大的不平衡、转子定子不圆、局部突出等引起的2倍转速频率的机械振动的发生。

(5) 甩负荷工况和飞逸工况是偶然工况,一般不会发生强烈共振危害。但在开、停机过程中,应加以注意。

## 5 结 语

表4 主厂房结构固有振动频率与振源频率汇总及共振复核

自振频率 /Hz	机组可能振源频率 /Hz						
	低频涡带	转速 $f_n$	$2f_n$	甩负荷 $f'_n$	飞逸 $f''_n$	叶片数	电气
	0.521 ~ 1.042	3.125	6.25	5	5.5	46.875	50, 100
1 0.314	39.7%						
2 0.391	24.9%						
3 0.622	19.38%						
4 1.191	14.30%						
5 2.464		21.15%					
6 2.465		21.15%					
7 3.965		26.88%					
8 4.449				11.02%	19.10%		
9 5.442			12.93%	8.84%	1.05%		
10 6.206			0.7%	24.12%	12.84%		
11 6.774			26.2%		23.16%		
12 7.27							

由于主厂房结构形式的复杂性,为更准确地反映结构的固有振动特性,分别建立了整体结构和下部结构(不考虑上游副厂房和主厂房上部结构)两种不同的计算模型,比较真实的反应了结构的振动形态,分析结果可归纳为:

(1) 水轮发电机组的振源主要包括机械振动的振源、电磁振动的振源和水力振动的振源。机械振动振源频率主要表现为机组的转频、飞逸转频以及它们的倍数;电磁振动振源频率主要表现为机组的转频、电流频率及其它们的倍数;水力振动的振源比较复杂,包括尾水管中低频涡带、转轮叶片数振动、导叶后的压力脉动以及导叶后的卡门涡等。

(2) 对于整体结构模型,第1、2阶自振频率

分别为0.314 Hz和0.391 Hz,表现为主厂房上部框架顺河向振动和水平扭转振动,其他各阶主要体现为主、副厂房上部结构的振动形式;对于下部结构模型,第1阶自振频率为7.107 Hz,振型表现为主厂房下部整体纵向振动,第2、3、4阶均表现为主厂房下部的整体振动形式,楼板振动从第7阶振型(频率为17.78 Hz)开始,以后各阶均表现为楼板振动。

(3) 可能发生共振的振型主要表现为主副厂房框架结构整体及水平扭转振动,这些部位距离机组振源较远。并且低频涡带和2倍转速频率以及甩负荷和飞逸频率发生概论相对较低,因此,认为在没有特殊的机组振动区存在的情况下,厂房结构不存在与机组振源的共振可能。

参考文献:

[1] 张登仕. 有关水电站设计中的几个概念问题[J]. 水电站设计, 2008, 4: 48 - 49.

[2] 刘光宁, 陶明星, 钟苏. 混流式水轮机的水力稳定性问题[J]. 水电站机电技术, 2003, (12): 2 - 9.

[3] 何成连, 王正伟, 邱华. 水轮机尾水管内部压力脉动试验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 62 - 66.

[4] 何成连, 龚长年, 方源. 混流式水轮机低负荷压力脉动[J]. 水电站机电技术, 2003(12): 31 - 33.

[5] 秦亮. 双排及水电站厂房结构动力分析与识别[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[6] 刘云贺, 宋兴君, 李守义. 溢流式水电站厂房结构动力特性研究[J]. 水力发电学报, 2017, 3: 39 - 43.

[7] 赵仕杰, 崔炜, 朱银邦等. 高烈度地震区河岸式水电站厂房

的有限元抗震分析[J]. 水力发电, 2009, 4: 34 - 37.

[8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 水工建筑物抗震设计规范 DL5073 - 2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[9] 李炎. 当前我国水电站厂房结构振动的主要问题和研究现状[J]. 水利水运工程学报, 2006, 1: 74 - 77.

作者简介:

李志龙(1984-), 男, 甘肃通渭人, 工程师, 从事水利水电工程管理工作;

张博(1984-), 男, 陕西富平人, 工程师, 从事水利水电工程设计工作.

(责任编辑: 卓政昌)

(上接第 115 页)

输过程中坍落度的经时损失和混凝土温升(降)。冬季混凝土入仓温度控制在 5℃ 以上, 必要时在混凝土配合比中掺入防冻剂。在混凝土浇筑过程中, 在出机口和浇筑现场进行混凝土取样试验和温度检测工作, 结合现场计算分析和气象预报采用必要的降温和保温措施。

(4) 适当延长拆模与养护时间。在混凝土浇筑完成后, 模板的拆除应在达到有关规范规定的强度后才能拆模, 在不影响下一道工序施工时, 尽量延迟拆模时间; 避免在夜间或气温骤降期间拆模。混凝土浇筑完后 12h 内进行养护, 一般采用洒水养护即可满足要求。当遇气温骤降时, 须提前采取混凝土保温措施, 即在混凝土表面铺设塑料薄膜、旧麻袋或保温被等进行表面保温。在干燥或大风季节采用塑料薄膜覆盖洒水养护, 并保持薄膜内水汽充足。

8 结 语

混凝土施工是一项系统工程, 砂石拌合系统的规划设计是关键, 两大系统规划不合理、设计欠缺都将影响进度目标的实现。嘉陵江上石盘电航综合枢纽工程自开工至完工, 通过精心规划, 合理设计砂石拌合系统, 高效组织施工, 加强过程管控, 并采取相应的保证措施, 施工期间混凝土两大系统满足施工强度及进度要求, 确保节点工期和总体目标的实现。本文通过对混凝土两大系统施工规划设计以及采取各种措施总结和归纳, 对类似工程有一定借鉴作用。

作者简介:

谭翔(1975-), 男, 重庆大足人, 工程师, 本科, 从事水利水电工程施工技术与管理工作;

邵芳(1984-), 女, 宁夏中宁人, 工程师, 本科, 从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(责任编辑: 卓政昌)

长河坝水电蓄水阶段移民安置通过验收

日前, 四川省扶贫和移民工作局在成都组织召开长河坝水电站蓄水阶段移民安置验收会议。经会议讨论, 验收委员会一致同意通过验收, 为 9 月中旬工程蓄水验收奠定了基础, 向今年 10 月下旬下闸蓄水目标实现迈出了关键一步。

移民安置实施过程中, 长河坝移民项目部深入现场积极开展设计交底、技术支持等工作, 按时完成各项任务, 获得实施各方的一致好评, 编制完成的《四川大渡河长河坝水电站蓄水阶段移民安置规划设计专题报告》为验收顺利通过发挥了关键作用。

乌东德水电站最大仓号混凝土浇筑顺利完工

9 月 12 日, 由中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司承建的乌东德水电站左岸地下电站 6 号进水塔底板首仓混凝土浇筑顺利完成施工, 该仓号是乌东德水电站工程自开工以来施工面积最大、浇筑方量最高的仓号。此举拉开了乌东德左岸地下电站进水口混凝土施工序幕, 为后续左岸地下电站首台机组发电奠定了良好基础。

自 9 月 10 日下午起, 经过 30 多个小时的连续作业, 左岸 6 号进水塔底板首仓混凝土浇筑圆满完成任务。此次进水塔首仓浇筑共计完成钢筋制安 200 余吨、混凝土浇筑建基面清理 1221 平方米、混凝土浇筑量 1 832 立方米。整个 6 号进水塔底板预计将于两个月后结束全部施工。