

地下厂房结构振动响应分析

张捷, 周长兴

(中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:通过正分析计算与实测响应的综合对比分析可知:结构左右向和上下游向产生的极频振动的磁拉力幅值不相等,上游侧荷载大于左右侧荷载。根据实测的振动响应,进行机组激励荷载的动态识别,结论认为,在所进行的各种振动试验工况条件下,识别得到的动荷载幅值均小于设计阶段厂家所提出的动态荷载幅值,水泵水轮机的压力脉动也不突出,因此,厂房的抗振设计是安全合理的,可以满足动态安全控制要求。

关键词:地下厂房;测点布置;模型参数;共振复核;振源及传递

中图分类号:TV731.6;O571.21;R852.25

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)05-0108-05

0 引言

西龙池抽水蓄能电站,单机容量 300 MW,额定水头为 640 m,最大动水头为 1 015 m,水泵工况的最大扬程 703.93 m,额定转速为 500 r/min,飞逸转速为 725 r/min。本工程在机组调试前就完成了振动仪器的埋设,在机组试验过程中对该组进行了系统的观测,并根据实测资料进行了反演分析。

1 测点布置和测试工况

西龙池选择 2#、4#两个典型机组段进行机组支撑结构振动监测,每台机组需布置 12 个振动加速度计和 12 个振动速度计。测点位置与类型见表 1。振动监测采用 EDS24-24 型工程数字振动仪,配有《EDS 地震数据频谱分析程序》,用来完成测试信号的分析处理任务。

本工程在机组调试前就完成了振动仪器的埋设,在机组试验过程中对该组进行了系统的观测,测试的工况有:停机工况、升负荷工况、甩负荷工况、发电机调相测试、动平衡测试和抽水工况等所有运行工况的振动资料。

2 模型参数和边界参数反演分析

2.1 分析方法

首先,对发电机层楼板进行局部结构的自振特性分析,利用实测的发电机层楼板(DA8 测点)的垂直向自由振动频率 33.48 Hz 和 34.1 Hz,并通过计算分析识别出合理的主厂房结构混凝土材料的动弹模。再利用结构发生上下游整体自由振

收稿日期:2017-08-25

表 1 测点位置、测点类型及通道对应编号

测点编号	位置	仪器名称	方向	通道号
DA-1	尾水进人门	速度计	垂直	13
		速度计	水平径向	14
		加速度计	水平径向	3
DA-2	蜗壳层机墩	速度计	垂直	16
		速度计	水平径向	17
		加速度计	水平径向	6
DA-3	水机层机墩	速度计	垂直	19
		速度计	水平径向	20
		加速度计	水平径向	9
DA-4	母线层机墩	速度计	垂直	22
		速度计	水平径向	23
		加速度计	水平径向	12
DA-5	蜗壳层夹层 高程 721.98	加速度计	垂直	1
		加速度计	水平径向	2
		速度计	水平径向	15
DA-6	水轮机层 高程 726.15	加速度计	垂直	4
		加速度计	水平径向	5
		速度计	水平径向	18
DA-7	母线层 高程 731.65	加速度计	垂直	7
		加速度计	水平径向	8
		速度计	水平径向	21
DA-8	发电机层 高程 737.95	加速度计	垂直	10
		加速度计	水平径向	11
		速度计	水平径向	24

动的 24.77 Hz 主频,识别厂房上下游面的法向弹簧边界参数(或实体单元边界的法向弹性模量)。

2.2 混凝土材料的动弹模

将厂房结构的 DA4 测点高程以下的所有节点自由度全部约束,仅对发电机层楼板进行局部自振特性分析。表 2 为楼板结构的不同弹性模量取值的自振频率计算结果,分析可知结构材料的

表 2 厂房混凝土结构不同弹性模量取值的自振频率结果 (Hz)

混凝土弹性模量	静弹模 2.80e ¹⁰ Pa	1.1 倍静弹模 3.08e ¹⁰ Pa	1.2 倍静弹模 3.36e ¹⁰ Pa	1.3 倍静弹模 3.64e ¹⁰ Pa	1.4 倍静弹模 3.92e ¹⁰ Pa
第 1 阶	28.301	29.658	30.956	32.201	33.399
第 2 阶	36.283	38.032	39.703	41.306	42.849

在主厂房钢筋混凝土结构材料的动弹模取值为素混凝土静弹模的 1.4 倍的基础上,继续对弹簧单元模拟其围岩边界的参数进行识别。

主厂房结构底部完全固定,左右侧由于伸缩缝构造取为自由边界,上下游取三向弹簧约束模拟围岩边界(如图 1 所示)。三向正交弹簧模型分别为法向(x 向)、水平切向(y 向)和竖向切向(z 向),识别中假设水平切向和竖向切向的弹簧参数相等。为使各方向弹簧仅约束自身方向,相互受力不影响,所以弹簧支座按滑动支座模拟。

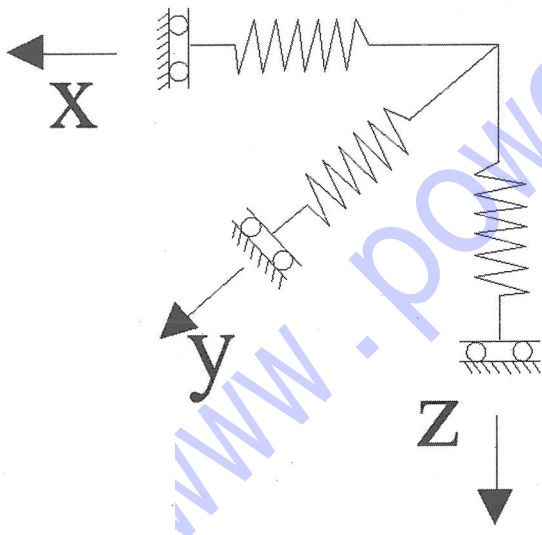


图 1 厂房上下游围岩约束的三向弹簧单元(滑动支座)模型

由于各弹簧采用单向自由度约束,所以法向(x 向)弹簧仅对厂房上下游方向的自振频率有影响,并且两者是单调增加的关系。因此,通过试算便可识别出 x 向弹簧的刚度系数为 0.435×10^3 kN/mm,转换为 1 m^2 单位面积上的法向弹性抗力系数为: 0.185×10^3 kN/mm。同理,y 向和 z 向的切向弹簧在一定范围内仅对厂房整体左右向的自

弹模取值对其自振频率较为敏感。对于此种有限元模型(板单元模拟楼板结构),其单元材料的动态弹性模量取值为混凝土静弹模的 1.4 倍为宜。该取值方法与规范规定的 1.3 倍有所差别^[2]。

2.3 弹簧单元的围岩边界

振频率有影响。通过初步有限元计算可知,如果切向弹簧的刚度相对于法向弹簧的刚度较低,便会出现厂房左右向的自振频率低于上下游向频率的现象,这与实际不符。所以,在法向弹簧刚度确定的情况下,可以通过提高切向弹簧的刚度实现厂房左右振动频率高于上下游向振动频率。通过这一准则便可识别出切向弹簧的刚度系数下限值为 0.7×10^3 kN/mm,转换为 1 m^2 单位面积上的切向弹性抗力系数为: 0.298×10^3 kN/mm。该模型计算结果与实测结果基本吻合。

由承压板法将识别的弹性抗力系数转换为相应的弹性模量:转换结果为:厂房上下游面围岩的法向动态弹性模量为 0.17×10^3 MPa,切向剪切模量(忽略泊松比的影响)为 0.298×10^3 MPa。从该识别的边界结果看出:边界弹模的识别值要远远小于原始围岩地质资料值。并且法向和切向模量的相对关系也与线弹性理论有所不同。

分析该差异存在的主要原因是:厂房边墙是在围岩支护混凝土变位稳定后浇筑的,二者之间未进行锚固,再加上混凝土的收缩效应,最终可能导致边墙与支护混凝土之间接触不紧密,甚至在相当的区域存在缝隙,致使二者间的相互作用减弱,使得模拟边界的弹簧刚度系数总体偏低。并且上下游面切向方向由于不均匀面的摩擦和咬合作用,使得实际切向刚度大于法向刚度。因此,计算中所要建立的厂房弹簧边界不能单纯地由地质资料通过理论公式进行转换得出。

2.4 实体单元对的围岩边界

在结构材料参数不变的情况下(动弹模取值仍为素混凝土静弹模的 1.4 倍: $3.92e^{10}$ Pa),将围岩边界改为线弹性实体单元进行模拟,不考虑围岩质量,泊松比取围岩地质资料的平均值 0.28。

厂房主结构底部全部固定,围岩底部和四周也全部固定,围岩顶部仅约束法向。通过有限元试算可知,该无质量围岩边界对厂房自振频率的影响范围应该为厂房宽度的 2 倍(40 m)。

用线弹性实体单元模拟围岩的动态弹性模量,其最优识别值为 1.67 GPa,但同样低于实际围岩的地质资料值(1~10GPa),并且与弹簧单元边界的识别结果相差较大。因此可以看出,用该实体单元无法正确模拟围岩与厂房的各向异性接触和约束特性,该识别值也仅仅能体现厂房上下游自由振动的动力特性。

2.5 阻尼比识别

取发电机层楼板 DA4 测点的水平径向(第 12 通道)加速度时程的停机阶段进行阻尼比识别,进行小波段分解可知结构 24.77Hz 的阻尼比是 0.012 2。

3 共振复核

根据厂房自振特性计算分析结果和对机组振源进行的频率特性分析,可以进行共振复核。共振复核依据《水电站厂房设计规范》,要求结构自振频率和振源干扰频率的错开度大于 20%~30%。^[1]现将主要振源频率和自振频率列于表 3 中,并给出 30% 以内的错开值,共振的可能性一目了然。

表 3 地下厂房结构固有频率与振源频率汇总及共振复核表

自振频率 /Hz	振源频率 /Hz							
	低频涡带	中频涡带	转频 f_n	飞逸 f'_n	$2f_n$	$2f'_n$	叶片导叶	电气
	2.31	6.67-10.00	8.33	12.5	16.67	25	58.33-166.67	50-100
识别得到的自振频率	19-20.09				17%	19.6%		
	24.77					0.9%		
	33.48					25.3%		

机组转速频率(8.33 Hz)较高,地下厂房由于本身刚度较大且受围岩的约束作用,整体刚度相对也较高,不存在结构自振频率与低频振源的(尾水管低频涡动、转速频率振动等)存在共振可能。而水轮机内部水流涡动产生的叶片数频率或导叶数频率振动,以及电磁振动,频率均较高,也不存在于厂房结构基本频率共振的可能。从表 3 可以看出,发生共振的可能区域是 2 倍转速频率,但由于从振动数据分析中没有发现明显的转速频率倍频成分,所以可以认为不存在此种共振的可能。

因此,综合评价认为,西龙池地下厂房结构不存在与机组主振源共振的显著特征,实际测试分析中也没有发现共振现象,可以得出不存在共振

区的确切结论。

4 振源及传递分析

在对结构模型边界条件、动力学参数、自由振动频率和阻尼特性参数分析确定的基础上,再对 300 MW(100%)负荷运行工况下机械振源、电磁振源、水力振源的影响范围、特征规律和传递方式进行分析,确定振动分析振动反应状态水平、振动传播规律等。

4.1 机械振源

通过信号处理对实际观测资料进行分析机械振源荷载(8.33 Hz,及其倍频)的影响范围、特征规律和传递方式。利用小波分析工具提取出测试信号的转频 8.33 Hz 及其倍频的振动信号特征曲线,通过变换得到真实振幅如表 4 所示。

表 4 结构实测信号在转频及其倍频下的真实幅值

/cm · s⁻²

方向	径 向			垂 向		
	1 倍转频(8.33 Hz) 加速度振幅	2 倍转频(16.6 Hz) 加速度振幅	3 倍转频(24.9 Hz) 加速度振幅	1 倍转频(8.33 Hz) 加速度振幅	2 倍转频(16.6 Hz) 加速度振幅	3 倍转频(24.9 Hz) 加速度振幅
测点						
DA8	0.397	0.043	0.029	0.130	0.064	0.091
DA7	0.240	0.034	0.004	0.134	0.067	0.057
DA6	0.255	0.014	0.032	0.153	0.070	0.050
DA5	0.143	0.037	0.040	0.115	0.032	0.031
DA4	0.200	0.044	0.021	0.1429	0.053	0.049
DA3	0.208	0.005	0.051	0.182	0.059	0.050
DA2	0.142	0.027	0.032	0.1558	0.0367	0.050
DA1	0.087	0.029	0.004	0.0914	0.0189	0.0365

通过本次识别分析和综合以往分析结果可知:

(1)结构机械转频下的响应主要以1倍转频为主,2、3倍转频响应能量较小。这同时也说明结构在100%负荷运行工况下,3倍转频荷载很小,结构共振现象不存在(结构整体上下游自振频率为24.77 Hz);同时振动荷载也基本可以用1倍转频荷载表示。

(2)结构转频下纵向振动略大于上下游向振动,结构上部振动大于下部。

(3)结构响应从大到小的顺序是:楼板 > 机

墩 > 风罩 > 蜗壳层 > 尾水管层。这说明机械不平衡荷载主要还是通过上机架、下机架和定子基础传递的,而且通过水导传递的振动荷载也很大,不容忽视。

4.2 水力振源

通过信号处理对实际观测资料进行分析由转轮水流不均匀引起的振动荷载(58.35 Hz,116.62 Hz)的影响范围、特征规律和传递方式。通过FFT变换得到58.35 Hz,116.62 Hz下真实振幅如表5所示。

表5 结构实测信号在转轮水力振动频率及其倍频下的真实幅值 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$

测点	径 向		垂 向	
	58.11 Hz 加速度振幅	116.2 Hz 加速度振幅	58.11 Hz 加速度振幅	116.2 Hz 加速度振幅
DA8	6.58	0.063	2.402	0.05
DA7	4.516	0.116	4.408	0.0315
DA6	2.208	0.087	3.962	0.014
DA5	1.841	0.113	2.47	0.034
DA4	1.225	0.118	0.584	0.018
DA3	0.594	0.056	0.716	0.031
DA2	0.908	0.054	0.125	0.027
DA1	1.327	0.016	0.398	0.028

通过本次识别分析和综合以往分析结果可知:

(1)转轮水力振源(58.35 Hz,116.62 Hz),该频率荷载是引起厂房整体振动的最主要荷载。转轮水力脉动荷载下结构的响应主要以1倍频率为主,2倍频率响应能量较小。由于转轮水流不均匀引起的水压脉动是水电站厂房振动的最主要动力荷载,主要分布于蜗壳内和转轮出水口附近,且主要通过蜗壳外围混凝土传递给整个厂房结构。

(2)58 Hz下的响应幅值,无论是径向还是垂向,结构左侧测点振幅明显大于上游侧测点振幅,其原因是:厂房蜗壳外围混凝土结构下游侧紧靠围岩,而左右侧自由,使得该转轮水力振动荷载通

过蜗壳流道和固定部件作用引起蜗壳混凝土左右向较大振动,从而传递给整个厂房。

(3)沿着机墩结构高程向上,该频率响应有放大现象,这也说明该频率荷载有可能部分地通过大轴和下机架传递。

4.3 电磁振源

水轮机电磁振动分为两类:一类是转频振动,振动频率为8.33 Hz及其倍频,该频率荷载的识别已经包括在机械荷载识别部分;另一类是极频振动,频率是50 Hz和100 Hz。本次主要对100%负荷下电磁振动频率荷载进行识别和分析。

通过FFT变换得到50 Hz,100 Hz下真实振幅如表6所示。根据测试结果和计算分析可知:

表6 FFT变换下结构实测信号在极频振动频率下的真实幅值 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$

方向 测点	径 向		垂 向	
	50 Hz 加速度振幅	100 Hz 加速度振幅	50 Hz 加速度振幅	100 Hz 加速度振幅
DA8	0.462	0.788	0.016	0.808
DA7	0.84	0.423	1.047	0.150
DA6	0.148	0.224	0.1251	0.446
DA5	0.029	0.444	0.018	0.688
DA4	1.88	0.94	0.215	0.807
DA3	0.063	0.313	0.086	0.949
DA2	0.017	0.037	0.069	0.937
DA1	0.08	0.404	0.042	1.858

从实测结果和识别结果可以看出:

(1)电磁荷载也是结构发生振动的主要荷载之一,结构电磁振动的荷载幅值在各方向是不对称的,总体规律性不强。100 Hz的荷载幅值小于50 Hz的荷载幅值,但其由于频率较高,所以产生的加速度幅值较大。结构在风罩处和上游侧的垂向响应超出了由于转轮水力不均匀引起的58 Hz响应。50 Hz的垂向响应中,在风罩处最大。100 Hz的垂向响应中,上游侧振动大于左侧的。并且高程越低响应越大。

(2)结构在50 Hz振动下,风罩处发生了较大的实测振动,而这与计算规律不相符,分析其中原因应该有两方面:其一是结构在该频率下发生的复杂振动可能与风罩结构本身的自振频率相近从而造成了一定的振动放大效应;其二是传感器布置在风罩处受环境电磁噪声的干扰较大(该原因应该占主导)。

由风罩处的结构响应可知,结构50 Hz的电磁环境噪声要大于其100 Hz的电磁噪声。

(3)通过正分析计算与实测响应的综合对比分析可知:结构左右向和上下游向产生的极频振动的磁拉力幅值不相等,上游侧荷载大于左右侧荷载。分析其中原因应该这是由于定子本身结构不对称,以及定子和转子间气隙不对称等原因引起的。

5 结 语

(1)从振动测试结果分析,电站的振动激励主要来源于机械不平衡和水轮机的水力振动,振动频率以转速频率和转轮叶片数频率为主,调相运行或停机状态下,出现100Hz的电磁振动成分。甩负荷、调相运行和部分负荷等工况下,振动幅值相对较高,而设计工况下的振动水平相对较低;抽水工况的振动高于发电工况。

(2)反演分析认为,厂房结构的基本自振频率约为24.77 Hz,结构局部横向自振频率19-20.09 Hz,发电机楼板竖向振动频率33.48 Hz左右。厂房结构低频(24.77 Hz)的阻尼比是0.0122。混凝土材料的动态弹性模量应取值为混凝土静弹模的1.4倍,与规范建议的1.3倍稍有差

别。结构自振频率远高于机组转速频率(2倍以上),厂房的整体刚度较大,对抗振安全有利。

(3)用滑动支座的三向正交弹簧单元能够正确模拟厂房上下游围岩边界对厂房动力特性的影响,也能够真实反映围岩与厂房接触不紧密和各向异性的传力特点。分析结果是:法向弹性抗力系数为: 0.185×10^3 kN/mm;切向弹性抗力系数为: 0.298×10^3 kN/mm。用承压板法转换成相应的弹性模量分别为:法向动态弹性模量为0.17 GPa,切向剪切模量为0.298 GPa。其值远小于围岩的原始地质资料值。分析认为,采用厂房混凝土结构与围岩耦联的实体单元模型,不能正确反映围岩的动态耦联特性,岩石动态弹性模量的识别也比较困难。因此,建议在有限元数值模型中采用三向弹簧单元模拟围岩约束边界条件。

(4)根据自振频率的识别结果和机组振源主频率的分析成果进行共振复核,认为不存在明显的共振区间。基本自振频率与转速频率的倍频较为接近,但此种主频率的振动在实测中并不显著。总体评价认为,厂房结构不存在与机组振源的共振可能。

(5)根据实测的振动响应,进行机组激励荷载的动态识别,结论认为,在所进行的各种振动试验工况条件下,识别得到的动荷载幅值均小于设计阶段厂家所提出的动态荷载幅值,水泵水轮机的压力脉动也不突出,因此,厂房的抗振设计是安全合理的,可以满足动态安全控制要求。

参考资料:

- [1] 陈东升,尹葵霞,王建玲,大渡河泸定水电站厂房振动分析[J].水力发电,2011,37(5),29-33.
- [2] 幸享林,陈建康,廖成刚,张宏战,大型地下厂房结构振动反应分析[J].振动与冲击,2013,32(9),21-27.

作者简介:

张捷(1979-),男,湖北竹山人,毕业于武汉大学水利水电工程专业,高级工程师,中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司从事水电工程设计工作;

周长兴(1964-),男,陕西岐山人,毕业于陕西机械学院水利水电工程专业,教授级高级工程师,中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司从事水电工程设计工作。

(责任编辑:卓政昌)