

地下厂房机墩振幅计算的数值模型取值范围

陈 鹏^{1,2}, 伍鹤皋¹, 袁文娜¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了分析地下厂房围岩边界条件对机墩动力特性的影响以及不同数值模型取值范围对机墩振幅计算结果的影响, 结合某水电站地下厂房实际情况, 建立了三维有限元数值模型。计算结果表明: 厂房边界弹性支撑的增强有助于机墩、风罩的抗振, 风罩壁厚的增加对增强机墩、风罩抗振能力效果不明显; 采用动力谐响应分析方法计算机墩振幅时, 数值模型的取值范围对振幅计算结果有较大影响; 计算机墩振幅时, 建议采用厂房整体模型, 但现行规范中推荐的机组振动荷载需进一步论证确定。

关键词: 地下厂房; 机墩; 水电站; 动力特性; 振幅; 数值模型

中图分类号: TV731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)04-0016-04

Research on range of numerical model for calculating amplitude of generator pier of underground powerhouse//
CHEN Peng^{1,2}, WU Hegao¹, YUAN Wenna¹ (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072; 2. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014)

Abstract: A 3D numerical model was set to analyze the influence of different rock boundary conditions on the dynamic characteristics of generator pier and the influence of different ranges of numerical model on the amplitude of generator pier. The results show that the enhancement of elastic support of hydropower house's boundary is beneficial to the anti-vibration of generator pier and ventilation barrel. The increase in thickness of ventilation barrel has less contribution to enhance the anti-vibration ability of generator pier. When harmonic response method is used to check the amplitude of generator pier, the range of numerical model has great influence on the result. The integral model of the powerhouse is suggested to be adopted for calculating the amplitude of generator pier. However, the vibration loads, recommended by the present specification, need further clarifications.

Key words: underground powerhouse; generator pier; hydropower station; dynamic characteristics; amplitude of generator; numerical model

水电站厂房承担着将水能转换为电能的任务。由于水电站厂房的功能和结构特点, 不可避免会出现振动现象。国内外大型水电站厂房结构的振动现象比较普遍, 例如, 国内某水电站(4×302.5 MW)由于在设计之初未重视厂房结构振动, 整个工程运行后水位上升, 机组和厂房结构都出现了强烈振动, 并曾使安装在楼板上的控制仪器误动而引起机组误停机事故^[1]。红石水电站(单机容量 50 MW)投产以来机组振动大, 尤其是在空载无励磁、空载有励磁以及负荷 38 MW 以下区域振动相当严重, 因此机组不能进行调峰, 主要表现为大轴摆度过大、噪声大, 机组段之间横缝逐年增大, 厂房四周墙体出现周边裂缝^[2]。随着我国水电事业的快速发展, 水电站单机容量急剧加大, 机组振动问题越来越为人们所关注。

当机墩结构发生变形时, 机组的轴线会发生偏移和倾斜, 轴承间隙发生一定的变化, 若支撑刚度不足, 导致偏移过大会影响机组的安全稳定运行^[3]。机墩作为发电机组的支撑结构, 受到各种静荷载和动荷载的作用, 且边界约束复杂, 其动力特性问题需要重点关注。

目前针对机组荷载作用下的机墩振幅计算存在诸多问题: ①机组实际振动荷载难以获得, 通常根据规范取值, 但是按规范取值的振动荷载包含各种设备的重力, 所以要比实际振动荷载大许多; ②现行 SL 266—2001《水电站厂房设计规范》^[4](以下简称《规范》)没有对有限元数值模型的取值范围给出建议, 实际计算中存在数值模型取值范围不明确的问题; ③振动荷载的实际振动频率不明确, 目前较为普

基金项目: 国家自然科学基金(51179141)

作者简介: 陈鹏(1988—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事水电站压力管道与地下工程研究。E-mail: shuyu1227@foxmail.com

通信作者: 伍鹤皋(1964—), 男, 江西宜丰人, 教授, 主要从事水电站压力管道与地下工程研究。E-mail: wbf1988@vip.sina.com

遍的做法是将振动荷载的振动频率视为机组转频或水力冲击频率等,这样的处理带有人为控制的因素。本文将重点研究数值模型的取值范围对机墩振幅计算结果的影响。

1 有限元数值模型

本文以某电站地下厂房中间的标准机组段为研究对象,其沿厂房纵轴线方向的长度为33.8m,宽度为27.0m。厂房高度是从尾水管底板开挖高程1437.45m至发电机层楼面高程1480.70m,总高度为43.25m。为了考虑厂房围岩对整体结构的影响,模型在高程1437.45m以下还取了7m深的基岩。有限元数值模型包括座环、钢蜗壳、尾水管和机井里衬,钢蜗壳、尾水管外围混凝土以及厂房各层楼板、边墙、立柱、梁格等结构均按实际体型尺寸进行模拟。

厂房混凝土结构主要采用C25强度等级;厂房蜗壳采用ADB610D钢板;尾水管的肘管、锥管采用Q235B钢板;厂房机组周围围岩大部分为Ⅲ类岩体。厂房各部分的材料参数如表1所示,厂房整体数值模型如图1所示。

表1 厂房各部分的材料参数

材 料	静弹性模量/ GPa	动弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
C25 混凝土	28.0	36.4	2500	0.167
ADB610D 钢板	206.0	267.8	7850	0.300
Q235B 钢板	206.0	267.8	7850	0.274
Ⅲ类岩体	90.0	11.7		0.300

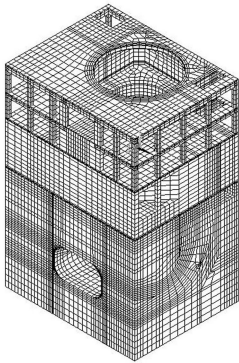


图1 厂房整体数值模型示意图

2 数值模型边界条件

为了分析数值模型边界条件对机墩动力特性的影响,拟定了6种边界方案(A1~A6),各方案两侧混凝土边界按自由面考虑,围岩各边界施加法向约束,底部施加全约束。

a. A1 方案:水轮机层以下厂房混凝土与围岩接触面上节点施加法向弹性链杆,以上节点自由。

b. A2 方案:水轮机层以下厂房混凝土与围岩接触面上节点施加法向和水平切向弹性链杆,以上

节点自由。

c. A3 方案:风罩壁厚增大到1.0m,其他条件同A2方案。

d. A4 方案:风罩壁厚增大到1.2m,其他条件同A2方案。

e. A5 方案:水轮机层以上厂房混凝土与围岩接触面上节点施加法向弹性链杆,水轮机层以下条件同A2方案。

f. A6 方案:水轮机层以上厂房混凝土与围岩接触面上节点施加法向和水平切向弹性链杆,水轮机层以下条件同A2方案。

各方案的厂房振动基频和风罩起振频率的计算结果如表2所示。从表2可以看出,随着混凝土周围弹性支撑的不断增强,风罩的起振频率呈现出增大趋势,特别是当发电机楼板和立柱的弹性支撑增强时,风罩的起振频率增幅明显,即A5方案比A2方案增加8.9%,这是因为风罩四周的约束主要依靠与各层楼板的连接,因此当楼板的约束增强时,机墩风罩的刚度相应会增大,自振频率也增大。另外,增加风罩壁厚可以在一定程度上增大风罩起振频率,但是效果并不显著。

表2 厂房振动基频和风罩起振频率计算结果 Hz

方案	厂房振动基频	风罩起振频率
A1	11.588	19.660
A2	12.758	19.701
A3	12.767	19.710
A4	12.722	19.871
A5	12.830	21.446
A6	17.458	22.115

3 机墩振幅计算方法

目前,《规范》规定的机墩振幅计算方法主要有结构力学解析法、拟静力法和动力法。《规范》认为机墩底部为固定端,顶部为自由端,不考虑楼板刚度的作用,按照圆筒式机墩进行计算。拟静力法是将发电机的动荷载乘以动力系数(1.5)后作为静荷载施加到厂房结构上,不考虑其他静荷载的作用,以拟静力计算的位移作为机墩的振幅。动力法包括谐响应分析法和时间历程分析法,通过动力有限元确定某个特定激励频率下的振幅^[5]。

《规范》规范明确了水轮发电机组运行时所产生的振动荷载由以下3部分组成:①垂直振动荷载,包括发电机转子带轴重力、水轮机转轮带轴重力、轴向水平推力、各种事故工况的竖向振动分力等;②水平振动荷载,包括不均匀磁拉力和机组偏心离心力等;③发电机扭矩,分正常扭矩和短路扭矩两种,在发电机运转时,以切向力的形式通过定子及机

架基础作用在机墩上。

《规范》给出的振动荷载偏大,秦亮^[6]通过原型观测数据并结合三维有限元计算进行反馈分析,认为《规范》的垂向计算动荷载值偏大。

《规范》明确规定了水电站厂房的机墩振幅控制标准:垂直振幅长期组合不大于 0.10 mm,短期组合不大于 0.15 mm;水平横向和扭转振幅之和长期组合不大于 0.15 mm,短期组合不大于 0.20 mm。

4 数值模型取值范围

本文主要分析有限元数值模型取值范围对机墩振幅的影响,故机组振动荷载仍然按照《规范》要求取值,机组振动荷载的振动频率取机组额定工况的转频 2.382Hz,按照谐响应分析方法进行计算,具体的机组振动荷载见表 3。

表 3 额定工况的机组振动荷载 kN

结 构	垂直振动荷载	径向振动荷载	切向振动荷载
定子基础		262	373
下机架基础	2 467	228	114
上机架基础		192	35

注:表中为单个基础板的振动荷载,计算中定子基础板共 14 个、下机架基础板共 12 个、上机架基础板共 14 个。

根据《规范》计算得到机墩垂直振幅为 0.024 mm;水平横向与扭转振幅之和为 0.008 mm。为研究有限元数值模型取值范围对振幅计算结果的影响,拟定以下 4 个模型取值范围方案:

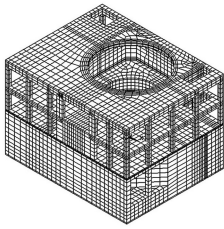
- a. B1 方案,建立厂房整体数值模型(图 1),约束条件见 A1 方案。
- b. B2 方案,建立蜗壳层底部以上的厂房结构模型,不考虑尾水管及底部围岩,底部施加全约束。
- c. B3 方案,建立水轮机层楼板以上的厂房结构模型,不考虑蜗壳、尾水管和底部围岩,底部施加全约束。
- d. B4 方案,建立机墩、风罩的单独结构模型,不考虑厂房其他部位,底部施加全约束。

B2、B3、B4 方案的数值模型如图 2 所示,不同方案的机墩、风罩典型部位最大振幅计算结果见表 4。由表 4 可知,随着有限元数值模型取值范围的不断缩小,各结构部位的最大垂直振幅呈逐渐减小的趋势,说明厂房下部结构及底部围岩的变形对机墩、风罩和楼板的振幅有很大的影响。

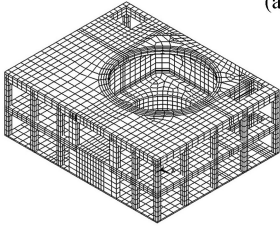
B4 方案因为是机墩、风罩的单独模型,没有考虑板、梁、柱在机墩四周的支撑作用,因此该模型的整体刚度要小,在相同荷载作用下,B4 方案机墩、风罩的各向振幅均大于 B3 方案。

表 4 机墩、风罩典型部位最大振幅计算结果 mm

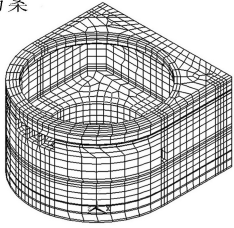
方案	结构	最大垂直振幅	最大水平横向与扭转振幅之和
----	----	--------	---------------



(a) B2方案



(b) B3方案



(c) B4方案

图 2 B2、B3、B4 方案数值模型示意图

B1	下机架基础	0.188	0.048
	定子基础	0.152	0.058
	风罩	0.114	0.078
B2	下机架基础	0.118	0.026
	定子基础	0.068	0.034
	风罩	0.056	0.064
B3	下机架基础	0.057	0.016
	定子基础	0.028	0.012
	风罩	0.012	0.050
B4	下机架基础	0.067	0.018
	定子基础	0.029	0.013
	风罩	0.022	0.125

4 种方案机墩、风罩的最大水平横向与扭转振幅之和均没有超过《规范》控制标准;B1 方案机墩、风罩的最大垂直振幅均超过《规范》控制标准;B2 方案的下机架基础最大垂直振幅超过《规范》控制标准;B3 方案和 B4 方案机墩、风罩最大垂直振幅均没有超过《规范》控制标准。这说明采用动力有限元谐响应分析方法计算机墩结构振幅时,不同的模型取值范围会给计算结果带来实质性影响。

5 结 论

a. 水电站地下厂房围岩边界对内部混凝土结构约束强度的增大,有利于提高厂房整体的刚度,对机墩的抗振也有利,但风罩壁厚的增加对机墩、风罩抗振能力的增强效果不显著。实际工程中,应当保证地下厂房混凝土与围岩的黏结强度,以增强结构的抗振能力。

b. 采用动力谐响应分析方法计算机墩振幅时,数值模型范围的大小对计算结果影响较大,取多大范围的数值模型进行机墩振幅的验算目前尚无定论,需要《规范》制定者进行相关的调研统计,然后给出指导性的建议。

c. 有限元整体模型能够更为真实地反映工程

实际情况,机墩振幅计算分析时建议采用厂房整体模型,但按《规范》采用的振动荷载偏大甚至不太合理,需通过进一步的理论分析、模型试验和现场观测来进行研究和论证。

参考文献:

[1] 欧阳金惠,张超然,陈厚群,等. 巨型水电站厂房振动预测研究[J]. 土木工程学报,2008,41(2):100-104. (OUYANG Jinhui,ZHANG Chaoran,CHEN Houqun,et al. Prediction of the vibration of giant-scale hydropower houses [J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(2):100-104. (in Chinese))

[2] 宋恩来. 红石水电站厂房振动及其加固研究[J]. 东北电力技术,2003(1):4-9. (SONG Enlai. Research on the building vibration and reinforcement of Hongshi Hydroelectric Generating Station [J]. Northeast Electric

Power Technology,2003(1):4-9. (in Chinese))

[3] 宋志强,马震岳,张运良,等. 小湾水电站机墩结构刚度分析[J]. 水电能源科学,2008,26(1):119-122. (SONG Zhiqiang,MA Zhenyue,ZHANG Yunliang,et al. Stiffness analysis of composite turbine pier structure of Xiaowan Power Station [J]. Water Resources and Power,2008,26(1):119-122. (in Chinese))

[4] SL 266—2001 水电站厂房设计规范[S].

[5] 马震岳,陈婧,刘志明,等. 三峡水电站主厂房振动分析[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2004,26(2):111-115. (MA Zhenyue,CHEN Jing,LIU Zhiming,et al. Vibration analysis of powerhouse of Three Gorges Hydropower Station [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences,2004,26(2):111-115. (in Chinese))

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

(收稿日期:2013-06-24 编辑:周红梅)

(上接第9页)

[4] FENG L P,BOUMAN B A M,TUONG T P,et al. Effects of groundwater depth and water-saving irrigation on rice yield and water balance in the Liuyankou Irrigation System, Henan, China [C]//Agricultural Water Management in China, ACIAR. Canberra Australia: [s. n.],2006: 52-66.

[5] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型[J]. 科学通报,2006,50(增刊1): 36-41. (HU Shunjun,TIAN Changyan,SONG Yudong,et al. Calculation model of phreatic evaporation from bare soil and tamarix growth conditions [J]. Chinese Science Bulletin,2006,50(Sup1): 36-41. (in Chinese))

[6] 王晓赞. 农作物有效潜水蒸发试验研究[J]. 徐州师范大学学报:自然科学版,1999,17(1): 60-63. (WANG Xiaozan. A primary analysis on analable groundwater evaporation of crop [J]. Journal of Xuzhou Normal University:Natural Science Edition,1999,17(1): 60-63. (in Chinese))

[7] 罗玉峰. 灌区水量平衡模型及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006.

[8] LUO Yufeng,KHAN Shahbaz,PENG Shizhang,et al. Effects of the discretisation cell size on the output uncertainty of regional groundwater evapotranspiration modeling [J]. Mathematical and Computer Modelling,2012,56(1/2): 1-13.

[9] 罗玉峰,毛怡雷,彭世彰,等. 作物生长条件下的阿维里扬诺夫潜水蒸发公式改进[J]. 农业工程学报,2013,29(4): 102-109. (LUO Yufeng,MAO Yilei,PENG Shizhang,et al. Modified Aver'yanov's phreatic evaporation equations under crop growing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(4):

102-109. (in Chinese))

[10] 罗玉峰,郑强,彭世彰,等. 基于GIS的区域潜水蒸发计算[J]. 水利学报. 2014,45(1): 79-86. (LUO Yufeng,ZHENG Qiang,PENG Shizhang,et al. Calculation of regional groundwater evaporation based on GIS [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(1): 79-86. (in Chinese))

[11] CHANG K. 基于VBA的Arcobjects编程:面向任务的方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

[12] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome:FAO,1998.

(收稿日期:2013-06-24 编辑:周红梅)

