

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.03.005

水电站地下厂房机墩结构动力特性 分析中几点问题探讨

郑秀梅, 马震岳

(大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了研究《水电站厂房设计规范》中圆筒式机墩动力计算的简化算法对机墩动力特性的影响, 本文结合某大型水电站地下厂房, 从空间特性、模型范围、荷载加载方式方面探讨其对机墩动力特性的影响。计算结果表明: 结构空间特性对机墩动力特性的影响很大; 局部结构对机墩动力特性有影响, 不同围岩范围下机墩水平向振幅基本为恒值, 垂直振幅有变化, 当围岩范围取至9倍时, 垂直振幅计算结果更准确; 径向动荷载不同加载方式对机墩水平向振幅影响较大。

关键词: 地下厂房; 机墩; 动力特性; 模型范围; 加载方式

中图分类号: TV731+.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)03-0026-05

Discussion on Some Problems in the Dynamic Analysis of Pier Structure of Underground Powerhouse of Hydropower Station

ZHENG Xiumei, MA Zhenyue

(College of Water Resources Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to analyze the effects of simplified cylinder pier dynamic calculation method on the dynamic characteristics of the pier in the design code of the hydropower house, in this paper by taking a large underground powerhouse of hydropower station as an example, the influence of the spatial characteristics, the range of the calculation model and the application methods of dynamic loads on the dynamic characteristics of the pier are discussed. The results indicate that the spatial characteristics of the structure has great influence on the dynamic characteristics of the pier, the local structures could affect the dynamic characteristics of the pier, the horizontal amplitude is constant and the vertical amplitude varies in different surrounding rocks, when the surrounding rock is taken to 9 times, the vertical amplitude of the pier is more accurate; the application methods of radial dynamic load have different influence on the horizontal amplitude of the pier.

Keywords: underground powerhouse; pier; dynamic characteristics; model range; application methods

近几年随着高转速、高水头、双向运行的水电站数量的增多, 厂房振动问题显得尤为突出^[1-3], 机墩作为水电站厂房的支撑机构, 其刚度、变形等必须要满足要求, 对机墩结构的研究较多^[4-5], 目前存在的问题是机墩动力特性的有限元算法与规范算法计算结果存在差异^[6]。顾鹏飞等^[7]通过推导圆筒式机墩的动力计算公式总结出了规范算法的基本假设, 指出规范算法将机墩简化为下部固定、上端自由的厚

壁圆筒简单自由度体系。文献^[8-10]从模型边界条件、模型范围方面研究其对机墩动力特性影响。孙万泉^[11]采用拟静力法和动力法对径向荷载在机墩的几种不同作用方式进行研究, 指出采用动力法和二力杆单元模拟机架支臂更符合实际离心力的传递方式。马震岳等^[12]通过分析径向荷载的产生、分配、施加和传递机理, 考虑导轴承油膜和机架支臂的作用, 分析径向荷载不同加载方式对机墩动力特性

收稿日期: 2017-02-16

修稿日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379030)

作者简介: 郑秀梅(1991—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 研究方向水电站厂房振动。E-mail: zxmllut@126.com

通讯作者: 马震岳(1962—), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 博导, 主要从事水轮发电机组动力学和水电站建筑物结构分析方面的研究工作。

E-mail: dmzy@dlut.edu.cn

的影响。

本文在前人研究的基础上,结合某水电站地下厂房,从空间特性、模型范围、荷载加载方式三个方面探讨其对机墩动力特性的影响,力求在一定的程度上真实模拟机墩动力特征。对于切向和竖向荷载的作用方式已有较明确的认知^[13],所以本文仅研究径向荷载加载方式的影响。

1 空间特性

为了分析结构空间特性对机墩动力特性的影响,机墩有限元模型的约束条件、模型范围等因素保持与规范算法一致,具体的计算模型如图 1 所示。

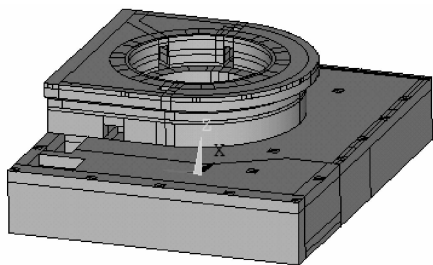


图 1 机墩结构的有限元模型

1.1 空间特性对机墩自振频率影响

利用 ANSYS 软件中的 Block Lanczos 特征值法对机墩结构进行了模态分析,得到机墩三个方向的自振频率,两种计算方法的机墩自振频率列于表 1。

表 1 两种算法的机墩自振频率

| 计算方法 | 自振频率/Hz | | |
|-----------------------|---------|-------|--------|
| | 垂直方向 | 水平横向 | 水平扭转方向 |
| 规范 ^[14] 算法 | 26.12 | 28.75 | 42.50 |
| 有限元算法 | 39.27 | 35.84 | 38.56 |
| (有-规)/有/% | 33.50 | 19.80 | -10.10 |

由表 1 可知,结构的空間特性对机墩各方向的自振频率影响程度较大,影响程度顺序为:垂直方向 > 水平横向 > 水平扭转方向。

1.2 空间特性对机墩结构振幅的影响

本文采用谐响应分析法计算机墩振幅^[15],动荷载频率取机组额定工况下的转频 2.08 Hz,结构阻尼系数取 0.05,动荷载均匀施加在每个支承点上。两种计算方法的机墩振幅结果,见表 2。

表 2 规范^[14]算法与有限元法的机墩振幅

单位:mm

| 结构部位 | 有限元算法振幅 | | | 规范算法振幅 | | |
|------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 径向 | 水平扭转 | 垂直方向 | 径向 | 水平扭转 | 垂直方向 |
| 定子基础 | 0.028 | 0.029 | 0.057 | 0.008 | 0.014 | 0.041 |
| 下机架 | 0.020 | 0.017 | 0.089 | | | |

由表 2 可以看出,通过有限元法计算的机墩结构各方向振幅远大于规范法结果。观察机墩结构的变形云图发现,变形后的机墩截面形状已不再是圆形。

2 计算模型范围

规范算法中机墩底部的约束高程与实际情况完全不同,目前对于模型选取范围没有统一的规定,不同的研究者所选取的范围多有不同。本节主要分析风罩、发电机层和水轮机层楼板、边墙、蜗壳、尾水管及不同方向围岩范围结构对机墩动力特性的影响,提出具体的围岩范围,为以后选取地下厂房动力计算模型范围提供参考。

2.1 厂房模型范围对机墩自振频率的影响

首先分析风罩、发电机层和水轮机层楼板、边墙、蜗壳、尾水管结构对机墩的影响,用弹簧单元来模拟围岩约束作用,具体的设计方案如下所示。

方案 A1:建立机墩单独的模型,模型底部施加

刚性约束;

方案 A2:建立机墩及风罩的单独结构,约束条件与 A1 方案一致;

方案 A3:建立机墩、风罩、楼板的结构模型,约束条件与上述方案一致;

方案 A4:建立机墩以上的结构模型,约束条件与上述方案一致;

方案 A5:建立蜗壳底板以上的厂房结构模型,模型底部至水轮机层周围施加弹性约束,底部施加刚性约束;

方案 A6:厂房整体结构模型,尾水管底板至水轮机层周围施加弹性约束,底部施加刚性约束。

6 种方案下结构的前 50 阶自振频率结果见图 2。

从图 2 可知,6 种方案对应结构的自振频率相差较大。通过各方案间自振频率的对比发现,增加风罩、楼板、蜗壳使得结构各方向自振频率降低;增加边墙后结构各方向自振频率提高,尤其是垂直方

向的自振频率;增加尾水管使得结构水平扭转、垂直方向自振频率提高,水平横向自振频率降低。说明周围局部结构对整体结构的刚度影响较大。改变围岩计算范围,计算方案见表 3,计算结果见图 3。

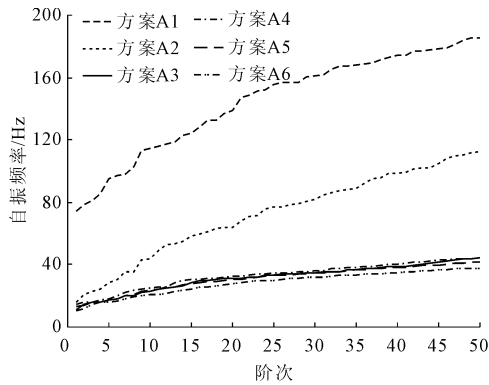


图 2 六种方案下结构的前 50 阶自振频率

表 3 围岩范围计算方案

| 计算方案 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 围岩深度/ L | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| 围岩上下游长度/ L | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 |
| 围岩左右岸长度/ L | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 |

注:围岩范围=(表中数值) $\times L$

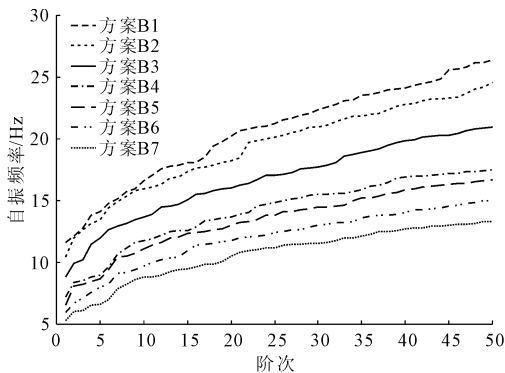


图 3 不同围岩范围的厂房结构自振频率

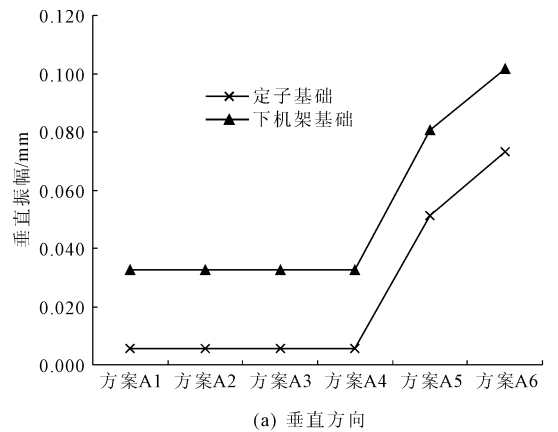
由图 3 可知,随着围岩范围的增加,厂房整体结构的自振频率逐渐减小,说明围岩范围的增加,厂房整体刚度降低。同时,观察厂房结构的振型发现,不同方案下自振频率相近的振型基本一致。

2.2 厂房模型范围对机墩振幅的影响

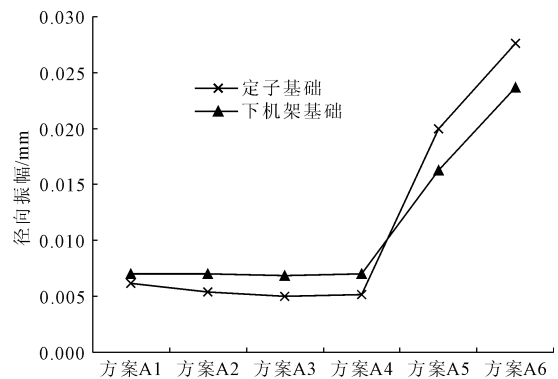
首先分析风罩、楼板、边墙、蜗壳、尾水管结构对机墩振幅的影响,提取了机墩典型部位(定子基础、下机架基础)的振幅,见图 4、图 5。

由图 4 可知,方案 A1—方案 A4 相同部位相同方向下机墩振幅基本上一致,方案 A5、方案 A6 的结果与前四种方案对应结果差异较大。说明风罩、楼板、边墙结构对机墩典型部位的各方向振幅基本上

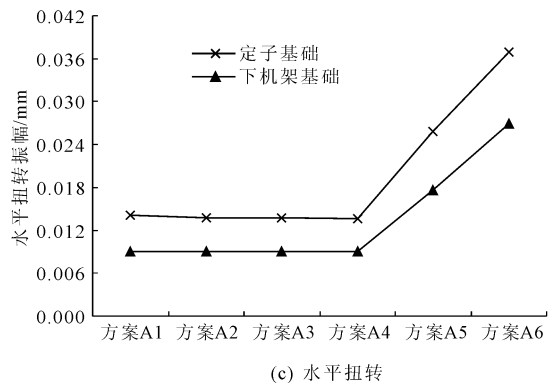
没有影响,而蜗壳、尾水管结构对机墩典型部位各方向振幅影响程度很大,不可忽视其影响。



(a) 垂直方向



(b) 径向



(c) 水平扭转

图 4 不同方案下机墩结构振幅

由图 5 可以看出,考虑不同围岩范围的机墩水平横向、水平扭转方向的振幅基本上是恒值,相对而言垂直振幅变化程度大些。通过各方案间的对比发现,水平方向的围岩范围对机墩垂直振幅影响较大,并且随着各方向围岩范围的增加,其对垂直振幅的影响程度减小。但并不是围岩范围越大计算结果越准确,当各方向围岩范围取至 $9L$ 时,机墩垂直振幅达到幅值,随后围岩范围增加垂直振幅反而减小。对于本结构模型而言机墩各方向振幅分别为 0.0246 mm 、 0.0255 mm 、 0.1197 mm ,总体来看有限元结果明

显大于规范算法结果。

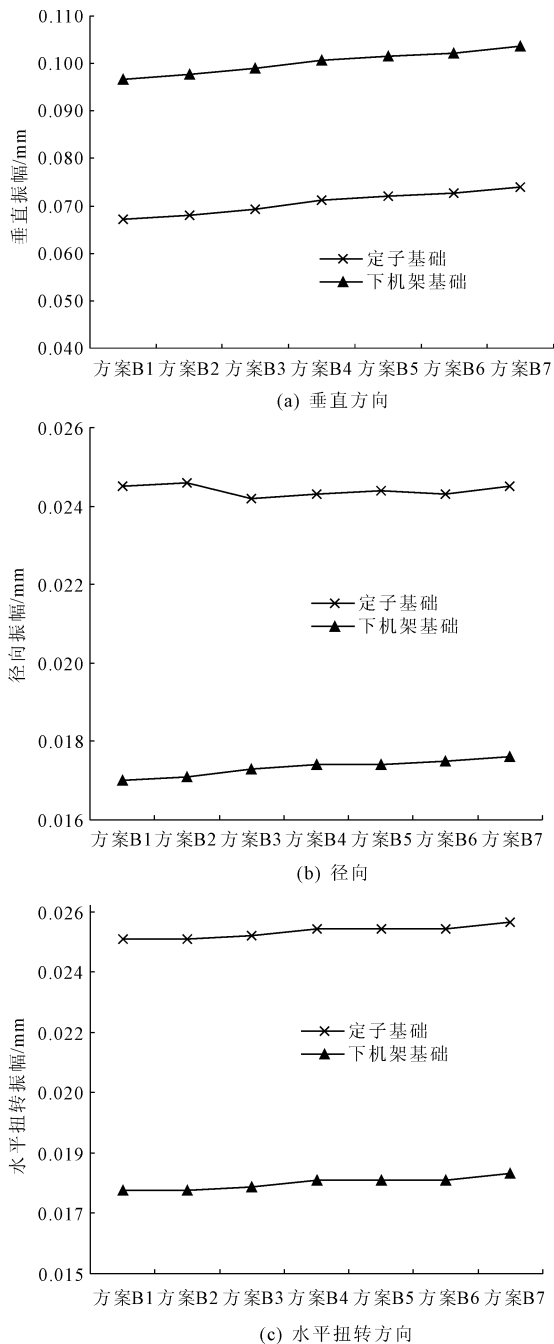


图 5 不同围岩范围下机墩结构振幅

3 荷载加载方式

随着机组的旋转,径向荷载的方向随时都在变化,但由于机组的转速是定值,所以径向荷载是一种大小不变、方向随时改变的力。所以本节采用两个相互垂直的简谐波模拟径向荷载,方案 3 定子基础及下机架基础处的动荷载形式如下式所示。其中 F_1 、 F_2 分别代表定子基础和下机架径向动荷载大小。模型范围与方案 A6 一致。

$$F_{1x} = 10\cos\varphi = 10\cos(\omega t),$$

$$F_{1y} = 10\sin\varphi = 10\sin(\omega t) \quad (1)$$

$$F_{2x} = 111\cos\varphi = 111\cos(\omega t),$$

$$F_{2y} = 111\sin\varphi = 111\sin(\omega t) \quad (2)$$

方案 1: 径向荷载均匀施加在每个基础板上面;

方案 2: 考虑到径向荷载具有分配不均匀和可旋转的特点,假设下机架的 12 个基础板中只有 7 个承受径向荷载;定子基础的 14 个基础板中只有 9 个承受径向荷载,荷载沿着刚度最小的方向施加;

方案 3: 因为大轴上的径向荷载是由机架支臂传递到机墩的基础板上,所以建立考虑机架支臂的厂房结构模型。采用箱式截面的梁单元 BEAM188 模拟机架支臂,梁单元尺寸为 $1.2\text{ m} \times 0.75\text{ m} \times 0.04\text{ m} \times 0.04\text{ m}$ (尺寸顺序为高度、宽度、翼板厚、腹板厚)。荷载作用在机架的中心点处,随着机组的转动而转动,见图 6。

因为仅考虑径向动荷载加载方式的影响,并且机墩定子基础与下机架振幅变化规律基本相同,所以仅给出各方案机墩定子基础水平方向的振幅,见图 7。

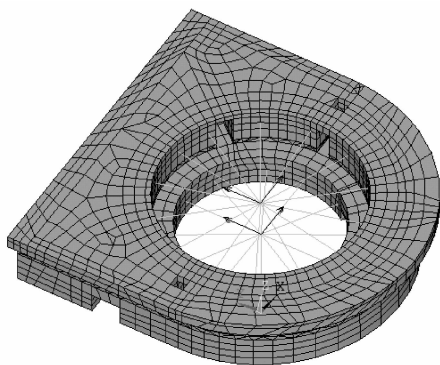


图 6 方案 3 径向荷载施加方案模型

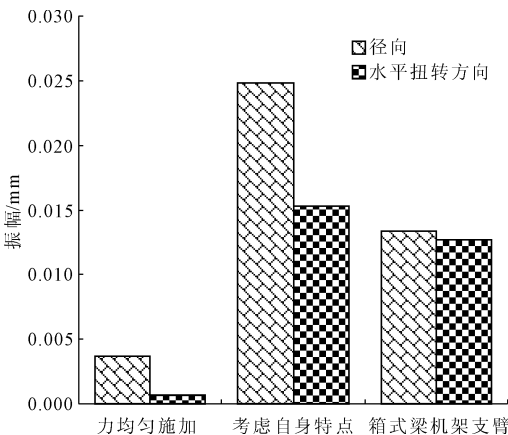


图 7 径向荷载不同加载方式下机墩定子基础的振幅

由图 7 可知,在径向荷载不同加载方式下机墩定子基础处水平向振幅相差程度很大,考虑荷载自身特性计算的水平向振幅最大。

4 结 论

本文从空间特性、模型范围和荷载加载方式三个方面研究了其对地下厂房机墩动力的影响,并将有限元结果与规范算法的结果进行了比较,得到了如下结论:

(1) 考虑机墩空间特性的有限元结果与规范算法结果相差很大,说明了空间特性对机墩动力特性的影响不可忽视。径向荷载不同加载方式下,机墩动力响应相差较大,按照方案 2 方式施加,结果偏于安全,但方案 3 施加方式更合理。

(2) 机墩周围局部结构及各方向围岩范围对整体结构自振频率均有影响。风罩、楼板、边墙对机墩振幅基本没有影响,蜗壳、尾水管对机墩振幅影响较大,不可忽略。不同围岩范围下机墩水平向振幅为恒值,垂直振幅有变化,随着围岩范围的增加其影响程度越小,但并不是考虑的围岩范围越大越好。当围岩范围取至 $9L$ 时,计算得到机墩各向振幅达到最大值。

所以,综上所述,规范算法所忽视的结构空间特性、模型范围以及径向荷载加载方式都对机墩结构有影响,导致了规范算法与有限元结果产生了差异。在对地下厂房进行振动分析时,最好建立考虑机架支臂及 $9L$ 范围围岩的三维有限元模型,计算得到的机墩动力响应更准确。

参考文献:

[1] 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.
- [2] 韩 芳,蔡元奇,朱以文.十三陵抽水蓄能电站地下厂房结构动力分析[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(5):91-94.
- [3] 姚新刚,沈振中,王孝州,等.洮河峡城水电站机墩自振特性研究[J].人民黄河,2008,30(2):70-71.
- [4] 苗毓海,陈 婧.瀑布沟水电站地下厂房机墩组合结构刚度分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):110-115.
- [5] 李振富,赵小娜,王日宣.万家寨水电站机墩组合结构动力分析[J].水力发电学报,2004,23(2):61-64.
- [6] 陈 婧,马震岳,张宏战.水电站厂房机墩振动计算分析方法的探讨[J].黑龙江大学工程学报,2015,6(1):12-16.
- [7] 顾鹏飞,喻远光.水电站厂房设计[M].北京:水利水电出版社,1987.
- [8] 陈 鹏,伍鹤皋,袁文娜.地下厂房机墩振幅计算的数值模型取值范围[J].水利水电科技进展,2014,34(4):16-19.
- [9] 霍学平.大型水电站地面厂房动力特性与抗振分析[D].大连:大连理工大学,2015.
- [10] 秦 亮.双排机水电站厂房支承结构动力特性研究[D].天津:天津大学,2003.
- [11] 孙万泉.水电站厂房结构振动分析及动态识别[D].大连:大连理工大学,2004.
- [12] 马震岳,宋志强,徐 伟,等.水电站厂房机组动荷载施加方式研究[J].水力发电学报,2009,28(5):200-204,28.
- [13] 马震岳,张 波.水电站厂房机墩结构加载方式探讨及刚度分析[J].水力发电,2009,35(7):40-43.
- [14] 国家能源局.水电站厂房设计规范:NB/T35011—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [15] 吴 娴,马震岳.水电站地下厂房楼板结构设计对振动特性的影响规律[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):177-181,191.