

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.008

淮安第三抽水泵站贯流泵房动力特性的数值和测试研究

丁晓唐,王云极,江 泉,肖 烨

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究贯流式块基型泵房的自振特性,结合淮安第三抽水泵站工程,采用有限元数值分析和脉动测试方法,确定贯流式块基型泵房的主要振型和频率.对比有限元数值计算和脉动测试结果,认为上下部结构刚度相差悬殊的贯流式块基型泵房,其基频主要受上部厂房结构的影响,而正确模拟厂房地坪处楼板的作用是确定泵房下部结构自振频率的关键.在研究贯流式块基型泵房的自振特性时,应选择结构刚度变化较大层布置测点.

关键词:贯流式块基型泵房;自振特性;有限元;动力特性;脉动法;淮安第三抽水泵站

中图分类号:TV675;TV131.4 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)05-0615-05

贯流式块基型泵房因其在低扬程下具有装置效率高等优点而应用于南水北调东线工程.目前国内外对于泵房结构动力特性的研究相对较少,而且大多采用有限元数值分析的方法.由于泵房结构本身以及副厂房、水体和地基影响的复杂性,仅仅依靠模型试验或者有限元数值模拟,有时并不能反映实际情况,因此,在有限元分析计算的基础上,对泵房结构的动力特性进行安全测试具有重要意义.

本文以淮安第三抽水泵站为例,利用 ANSYS 软件对有限元计算模型进行了模态分析,并且对其泵房结构的动力特性进行了现场测试.

1 动力特性的有限元数值分析方法

1.1 结构自振特性及求解

结构的自振特性是结构动力分析的最基本问题,也是结构共振校核、动力响应分析的基础.一般结构系统的阻尼对自振频率和振型的影响很小,若不考虑结构系统的阻尼,可使结构自振特性计算的工作量大为减少,因此,确定系统的自振频率和振型可略去阻尼的影响^[1].

无阻尼系统的自由振动方程为

$$M\ddot{y} + Ky = 0 \tag{1}$$

式中: M 、 K ——系统的质量矩阵和劲度矩阵; y 、 $\ddot{y}$ ——位移和加速度向量.

式(1)的通解可以表示为各个特解之和,设其中 1 组的特解形式为

$$y = \varphi \sin(\omega t + \nu) \tag{2}$$

$$\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$$

式中: φ ——各质点的振幅; ω 、 ν ——圆频率和初相角.代入式(1)化简后可得

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0 \tag{3}$$

要得到各个质点振幅不全为零的解,就要求振幅 φ 的系数行列式等于零,即

$$|K - \omega^2 M| = 0 \tag{4}$$

式(4)即为求解结构自振频率的方程,在数学上称其为特征值问题.求解特征值的方法有很多,Lanczos 算法是其中最有效的算法之一.Lanczos 算法是将一个实对称阵在保持矩阵稀疏性不变的同时实现其三对角化的一种方法^[2].ANSYS 软件提供的 Block Lanczos 模态提取方法是经典 Lanczos 算法的一个变种,所以本文采用

Block Lanczos 模态提取方法进行模态分析,求解结构的自振频率.

1.2 淮安第三抽水泵站动力特性分析

1.2.1 工程概况

淮安第三抽水泵站位于江苏省淮安市楚州区南郊,地处苏北灌溉总渠与京杭大运河交汇处,是江苏省江水北调工程的第二梯级泵站,也是南水北调东线工程的重要组成部分.泵站建于1997年,是全国建设时间最早、建设规模最大的贯流泵站之一,泵房采用堤身式块基型结构,布置 GDN(F05)-WP-310 型后置灯泡式贯流泵机组 2 台套.

淮安第三抽水泵站的作用包括区域性农田灌溉、抗旱、排涝、航运水调节等,创造了巨大的经济和社会效益.但机组在运行过程中也出现了一系列的问题,主要表现为机组启动困难、超功率运行、振动、噪声较大等^[3].

1.2.2 空间有限元数值计算模型及材料参数取值

有限元数值分析法是解决结构动力问题最有效的数值方法之一.有限元计算模型由地基、泵房下部结构以及上部厂房结构组成,考虑了结构与地基、水体的相互作用.图 1 为空间三维有限元仿真计算模型的泵房结构部分.模型的坐标原点高程与废黄河零点相同,采用笛卡儿坐标系: x 轴为横河向,以自右岸指向左岸为正; y 轴为竖直向,以竖直向上为正; z 轴为顺河向,以自上游指向下游为正.

为了较真实地模拟泵房结构的自振特性,采用质量单元(Mass 21)模拟水体作用,并将发电机和水轮机等机械设备质量荷载施加于模型.屋面梁系、吊车梁及排架柱采用空间梁单元(Beam 4)进行模拟,块基结构和地基均采用八结点六面体单元(Solid 45)^[46].以块基底板为参考系,分别沿 x 轴和 z 轴的正负两向向四周各延伸 40 m,沿 y 轴负向延伸 30 m,作为地基范围.地基按实际地质条件概化为 3 种不同的水平土层,混凝土以及各土层材料参数取值见表 1.在进行动力特性计算时,选取材料的动弹性模量为其静弹性模量的 1.3 倍^[7],并且不考虑地基的质量,所以天然地基密度取为零^[8].

1.2.3 结构自振特性结果

对于有限元计算模型计算了前 60 阶自振频率.表 2 仅列出了部分频率及相应的振型描述.

表 1 材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of materials

材料	静弹性模量/MPa	泊松比 ν	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
混凝土(C25)	28 000	0.167	2 500
粉质黏土夹砂礓 (土层 1,土层底高程-7.1 m)	23	0.350	0
轻粉质壤土 (土层 2,土层底高程-10.1 m)	24	0.250	0
粉砂、极细砂、轻砂壤土 (土层 3,土层底高程-35.0 m)	53	0.250	0

由表 2 可以看出:前 31 阶振动主要发生在上部厂房部分,这是由于厂房结构相对于泵房下部大体积的块基结构而言,刚度要小得多,所以更容易振动.因此,正确模拟上部厂房柱、柱间墙体、梁系及屋面结构的作用,是确定泵房结构基频的关键.

结构的第 32 阶频率为 21.075 Hz,主要表现为厂房地坪的竖直向振动.从这一阶振动开始出现了以下部结构振动为主

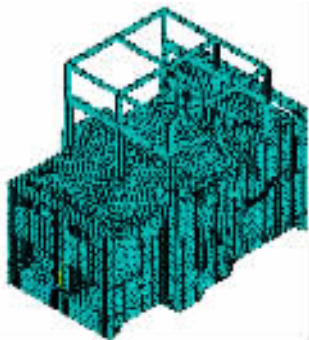


图 1 泵房结构空间三维有限元计算模型

Fig.1 3-D finite element model for pump house structure

表 2 自振频率计算结果

Table 2 Calculated values of natural frequencies

阶次	频率/Hz	振型描述
1	2.727	上部厂房顺河向振动
2	2.962	上部厂房横河向振动
3	4.041	上部厂房顺河向振动
4	4.716	上部厂房竖直向振动
5	5.067	上部厂房横河向振动
6	5.884	上部厂房顺河向振动
7	5.934	上部厂房竖直向振动
8	7.721	上部厂房横河向、竖直向复杂振动
13	10.775	上部厂房横河向、顺河向复杂振动
18	13.142	上部厂房横河向振动
23	18.122	上部厂房横河向、顺河向复杂振动
28	18.888	上部厂房横河向、顺河向、竖直向复杂振动
32	21.075	厂房地坪竖直向振动
36	22.431	厂房地坪竖直向振动
45	28.901	整体顺河向振动,上部厂房复杂振动
46	29.241	整体横河向振动,上部厂房复杂振动

的振型.这是由于厂房地坪处的楼板刚度相对较小,所以在下部结构中该楼板最容易引起振动.同理,正确模拟该楼板的作用是确定泵房下部结构自振频率的关键.

2 动力测试成果分析

泵房结构动力测试可归属于水工建筑物安全检测的范畴,其目的是评价对象是否安全,过程是对效应量的观测^[9].

2.1 脉动测试概述

对于泵房结构的动力特性,采用脉动测试进行测定.得到结构自由振动时的位移历时曲线(或离散点)以后,通过频谱分析,就可得到泵房结构振动的频谱图,从中可以分析结构的各阶自振频率^[10].

在进行脉动测试以及对其响应信号进行分析处理时,对响应信号作如下假设:

- a. 泵房结构的脉动是一个各态历经的随机过程,只要采样记录的时间足够长,就可以用单个样本函数上的时间平均来描述这个过程所有样本的平均特性.
- b. 脉动源信号的频谱较平坦,可以把它近似为有限带宽的白噪声,这样结构响应的频谱就是它的动力特性.

脉动测试从参数识别的角度来说,就是不用输入激励,仅利用输出响应来识别参数.利用环境振动来量测结构的响应,分析确定结构的动力特性,是一种有效而简便的方法.

2.2 淮安第三抽水泵站脉动测试

2.2.1 测点布置

本次试验采用 941B 型超低频拾振器采集泵房结构的脉动信号,经 DFL 型线性放大器适调放大后,由 DASP 多通道信号采集和分析处理系统对脉动信号进行采集和分析处理.图 2 为脉动测试示意图.

根据淮安第三抽水泵站泵房结构的形式及现场条件,测点分别布置在泵房上、中、下 3 个不同层位上.即在高程为 -2.8 m 的廊道层、高程为 6.4 m 的中间层、高程为 10.8 m 的厂房地坪分别沿竖直向、水平顺河向、水平横河向的 3 个方向各布置 1 个 941B 型超低频拾振器,与 DFL 型适调放大器配接后的分辨率为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$,最大量程为 20 m/s^2 .

2.2.2 测试结果

通过将现场实测记录得到的脉动信号进行时间域与频率域分析处理,得到了淮安第三抽水泵站泵房结构的各阶自振频率值(取前 8 阶实测到的频率值),见表 3.

表 3 自振频率实测结果

Table 3 Measured values of natural frequencies

测试方向	测点位置	自振频率值/Hz							
		1	2	3	4	5	6	7	8
竖直向	厂房地坪	2.726	3.293		4.677	18.269	20.908	23.828	27.384
	中间层	2.734		3.516	4.492	18.594	20.898		
	廊道层	2.734		3.476	4.883				
顺河向	厂房地坪	2.956		3.668	4.870	18.269	20.908	24.805	
	中间层	2.734			4.688				
	廊道层	2.514		3.872	4.677				
横河向	厂房地坪	2.734	3.320		4.492	17.969	21.094		27.734
	中间层		3.125		4.688				
	廊道层	2.726	3.120		4.688				
各阶频率均值		2.732	3.215	3.633	4.684	18.275	20.991	24.317	27.559

图 3 和图 4 分别为厂房地坪竖直向脉动原始记录的时程曲线图和经频域谱分析后得到频谱曲线图.根据测试与分析得到的数据结果,可以看到:

- a. 从自振频率值的分布大致可以看出,前 4 阶频率值基本反映出泵房结构整体的动力特性,后 4 阶较高频率值主要是泵房下部结构的特征表现较明显,这与该泵房上下两部分结构的刚度差异较大有关.

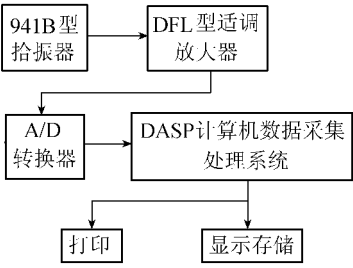


图 2 泵房结构脉动测试示意图
Fig.2 Sketch of pulsation test on pump house structure

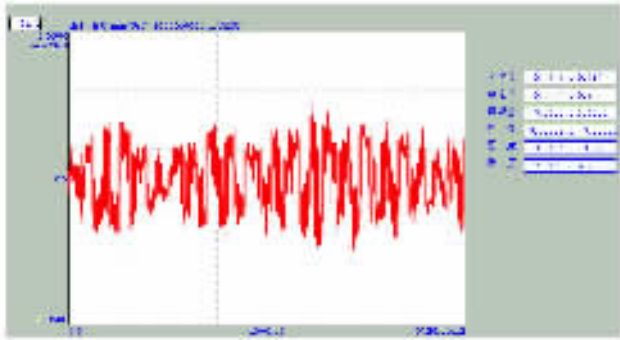


图3 厂房地坪竖直向脉动时程曲线

Fig.3 Time-history curve of vertical pulsation for powerhouse floor

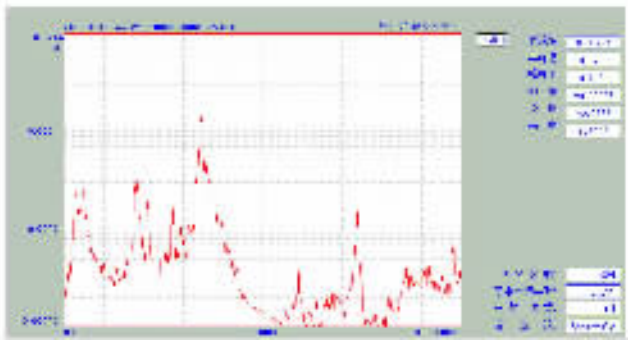


图4 厂房地坪竖直向脉动频谱曲线

Fig.4 Frequency spectrum curve of vertical pulsation for powerhouse floor

- b. 从不同测点、不同测试方向上获得的数据分析可知,2阶振动可能以横河向振动为主,3阶振动可能以顺河向振动为主,7阶振动可能以泵房下部结构的顺河向振动为主,8阶振动可能以泵房下部结构的横河向振动为主。
- c. 从实测的脉动信号时程曲线可看出,厂房地坪层的竖直向振动(楼板中部)峰值较其他2个方向及其他测点(中间层、廊道层)要大5~10倍。实际上对泵房结构而言,楼板竖直向的刚度相对较小,因此在淮安第三抽水泵站机组运行过程中,感觉楼板振动较大。

3 数值计算与动力测试的结果对比分析

表4为泵房结构自振频率计算值和实测值的比较。

表4 自振频率计算值和实测值比较

Table 4 Comparison of measured and calculated natural frequencies

计算值			实测值			误差/%
阶次	频率/Hz	振型描述	阶次	频率/Hz	振型描述	
1	2.727	上部厂房顺河向振动	1	2.732		-0.18
2	2.962	上部厂房横河向振动	2	3.215	整体横河向振动	-7.87
3	4.041	上部厂房顺河向振动	3	3.633	整体顺河向振动	11.23
4	4.716	上部厂房竖直向振动	4	4.684		0.68
32	21.075	厂房地坪竖直向振动	5	18.275		15.32
36	22.431	厂房地坪顺河向振动	6	20.991		6.86
45	28.901	整体顺河向振动,上部厂房复杂振动	7	24.317	泵房下部顺河向振动	18.85
46	29.241	整体横河向振动,上部厂房复杂振动	8	27.559	泵房下部横河向振动	6.10

从数值计算和动力测试的频率结果来看,表4中前4阶频率吻合较好,后4阶虽有一定的误差,但并不大,说明有限元计算模型的建立及各参数的取值基本合理,同时也说明,选择结构刚度变化较大层布置脉动测试测点是合理的。

观察计算值与实测值之间的误差发现,实测值第6~8阶频率均小于相应的计算值,而这几阶频率主要表现为结构整体或下部结构的振动。

数值计算和脉动测试的结果存在一定的差异,究其原因,一方面是由于模型没有考虑副厂房以及上下游水压力的影响,致使自振频率计算值与真实情况有一定的差距,而且淮安第三抽水泵站厂房地坪处的楼板以活动盖板为主,但有限元计算模型将其简化为现浇整体楼板,导致结构下部乃至结构整体刚度较实际情况偏大,造成数值计算值大于实测值的现象。

另一方面,由于脉动测试受扰动源特征的影响,可能遗漏了有用的结构自振频率成分,所以,虽然脉动测试不受结构大小和形状的限制,是一种可行而有效的结构动力特性测试方法,但是为了确保测试数据的可靠性,还应充分认识脉动测试的前提假设,并结合结构动力计算分析,从结构的动力特性规律来综合判定。另外,由于淮安第三抽水泵站泵房结构为空间结构,而且现有测点数较少,仅仅依靠测试结果难以反映振动形态的空间分布情况,所以其各阶振动形态应具体对照有限元数值分析计算结果来综合考虑较为可靠。

4 结 语

贯流式块基型泵房是由上部厂房和下部块基组成的复杂空间结构,上下部结构刚度和质量相差悬殊,本文分别采用有限元数值分析法和脉动测试研究其动力特性,得出以下结论:

- a. 由于上部厂房的刚度较下部块基小很多,故贯流式块基型泵房的基频主要受上部厂房结构的影响,所以,正确模拟上部厂房柱、柱间墙体、梁系及屋面结构的作用,是确定泵房结构基频的关键。
- b. 有限元数值计算结果与脉动测试结果吻合较好,一方面表明有限元计算模型的建立及各参数的取值基本合理;另一方面表明,在研究贯流式块基型泵房的自振特性时,选择结构刚度变化较大层布置测点是合理的。
- c. 综合分析贯流式块基型泵房结构的自振特性可知,由于厂房地坪是下部块基结构中刚度最小的部分,故下部块基的首阶频率主要取决于厂房地坪处楼板的厚度和梁格布置情况。

参考文献:

[1] 张子明,杜成斌,江泉.结构动力学[M].南京:河海大学出版社,2004.
[2] 文世鹏.应用数值分析[M].北京:石油工业出版社,2001.
[3] 郑源,江泉,陈学富,等.大型贯流泵机组稳定性测试与诊断研究[R].南京:河海大学水利水电工程学院,2005.
[4] 孙永明,李同春,牛志伟.苏州大龙港泵站三维有限元结构应力分析[J].水利水电科技进展,2007,27(增刊2):97-99.
[5] 张仁东.具有块基型泵房的大型泵站动力特性分析研究[D].南京:河海大学,2006.
[6] 欧阳金惠.三峡电站厂房结构振动研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2005.
[7] 蔡新,武颖利,郭兴文.混凝土坝及坝后式厂房整体地震响应分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):49-53.
[8] 邢永欣.灯泡贯流式水电站厂房结构计算分析[D].西安:西安理工大学,2006.
[9] 冯波.大型坝后式电站厂房动力特性及动力监测研究[D].南京:河海大学,2006.
[10] 张文翠,别社安,才君眉.水工结构自振频率和动应力测试分析系统[J].水利水电技术,1999,30(3):26-28.

Numerical and testing research on dynamic characteristics of
a tubular pump house of the third Huaian Pumping Station

DING Xiao-tang, WANG Yun-ji, JIANG Quan, XIAO Ye

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A case study was performed on the third Huaian pumping station to study the vibration characteristics of tubular block-foundation pump house. The main vibration modes and frequencies were determined by the finite element method and pulsating method. Comparison of the results of the two methods shows that the upper powerhouse structure has an important influence on the fundamental frequency of tubular block-foundation pump house whose lower structure has higher stiffness than the upper structure, and that the key to determine the natural frequency of lower pump house structure is to correctly simulate the effect of the slab on the powerhouse floor. It is also indicated that the measuring points should be arranged at the layers with great stiffness variation.

Key words: tubular block-foundation pump house; natural vibration characteristics; finite element method; dynamic characteristics; pulsating method; third Huaian Pumping Station