

淮安三站结构振动特性及抗振分析

肖 烨¹, 丁晓唐²

(1. 东华理工大学建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为分析淮安三站的结构振动特性及成因,采用有限元动力分析方法,根据灯泡贯流式泵站的结构特点,建立三维有限元模型,深入分析了淮安三站结构的自振特性、动力响应及振动成因,并针对振动问题进行了抗振减振措施研究。结果表明:淮安三站振动主要成因为下部结构与水流脉动压力发生共振,在水流脉动压力作用下淮安三站泵房结构所产生的动位移较大,基本接近建筑结构振动允许位移值标准;通过增加泵房楼板厚度和加大梁截面尺寸等措施可达到抗振减振的目的。

关键词:灯泡贯流泵站;振动特性;脉动压力;动位移;淮安三站

中图分类号:TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0086-04

Vibration characteristics and resistance of structures of Third Huaian Pumping Station//XIAO Ye¹, DING Xiaotang²(1. Faculty of Civil and Architecture Engineering, East China University of Science and Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the vibration characteristics and causes of structural vibration of the Third Huaian Pumping Station, a three-dimensional finite element model was established, using the finite element-based dynamic analysis method, according to the structural characteristics of the bulb tubular pumping station. The finite element model was used to analyze the self-vibration characteristics, dynamic responses, and causes of vibration; measures for vibration resistance and reduction were also studied. The results show that the main cause of vibration of the Third Huaian Pumping Station is the resonance vibration induced by the substructure and fluctuating pressures of water flow. Under fluctuating pressures of water flow, the structures of the Third Huaian Pumping Station show large dynamic displacements, approaching the maximum allowable displacement of architectural structures. Corresponding measures for resisting and reducing vibration were developed by increasing the floor thickness and beam section size of the pumping station.

Key words: bulb tubular pumping station; vibration characteristics; fluctuating pressure; dynamic displacement; Third Huaian Pumping Station

振动是泵站运行中最为常见的问题,直接影响机组的安全运行。泵站的振动问题一直受到人们的重视,但泵站的振动问题十分复杂,很难精确地对其进行定量分析。大型灯泡贯流式泵站在国内运用还不是很成熟,目前淮安第三抽水泵站(淮安三站)是江苏省乃至全国建设时间最早、建设规模最大的贯流式泵站,投入运行后,机组和泵房出现了比较剧烈的振动,且有进一步发展的趋势,在一定程度上影响了泵站的正常运行,如何正确分析和降低灯泡贯流泵站的振动问题尤为重要。近年来研究人员开始对灯泡贯流泵站的振动计算进行了定量的分析研究,如李玉莹等^[1]以南水北调东线工程二级坝泵站为例,给出了适合泵站振动计算的定量分析方法;王新等^[2]通过三维有限元数值模拟对淮阴三站泵房振

动进行了分析,研究了泵房的自振特性,并采用谐响应分析法计算了泵房的振动响应;邢磊等^[3]以淮阴三站工程为例,结合泵站结构的自振特性进行抗振安全度评价,得出水力振源远高于上部厂房的基频时,可避免引发泵站结构共振;赵路静等^[4]采用大型有限元软件 ADINA 建立三维流固耦合有限元模型,对立式轴流泵站进行了自振特性分析及共振校核,并进行了振动安全评价;李四海等^[5]以国内某大型竖井贯流泵站为例,研究了竖井贯流式机组振动产生的机理,对压力脉动进行了数值模拟分析。目前水电站厂房和机组的振动研究已经比较成熟,如欧阳金惠等^[6]对三峡水电站主厂房进行了振动分析,并对水电站厂房结构振动进行了现场测试,将测试结果与计算结果进行了对比分析;马震岳等^[7]

基金项目:江西省教育厅科技计划(GJJ4497)

作者简介:肖烨(1982—),男,讲师,硕士,主要从事结构工程动力分析研究。E-mail: xiaoyebora@163.com

对红石水电站机组振动诱发厂房振动,造成厂房立柱开裂进行了研究,通过系统的数值分析与试验研究,认为振源为机组与厂房共振,在此基础上提出了厂房抗振加固方案;陈婧等^[8]研究了模型水轮机在水流脉动压力作用下的频域和时域特征,采用动力时程分析法计算了结构在脉动压力作用下的动力反应,探讨了脉动压力不同分布特性对振动强度的影响,借鉴国内外相关振动规程,对水电站厂房的振动进行了评价;张燎军等^[9]以一水电站厂房为例,建立厂房全流道湍流整体结构流固耦合仿真模型,进行了时程振动分析,揭示了水电站厂房的整体振动规律。本文借鉴已有灯泡贯流式泵站和水电站振动研究的理论和方法,采用有限元数值分析方法来分析淮安三站的振动特性和振动成因,并针对振动问题研究抗振减振措施。

1 自振特性计算分析

1.1 计算模型及材料参数

建立如图 1 所示的有限元模型,上部结构包括屋面梁与泵房柱组成的排架结构以及吊车梁等,采用 Beam4 单元进行离散。下部结构自下至上包括底板、进出水流道、廊道、辅机层、主泵房地面层、上下游胸墙及工作桥等,采用 Solid45 单元离散。地基底部和四周边界均采用固定约束。为降低人工固定边界的影响,考虑地基阻尼对振动的耗散作用,根据工程地质资料,取地基的阻尼比为 0.2。混凝土动弹性模量按静弹性模量的 1.3 倍考虑^[10],淮安三站泵站采用 C25 混凝土,动弹性模量为 36.4 GPa,泊松比为 0.167,密度为 2 500 kg/m³。

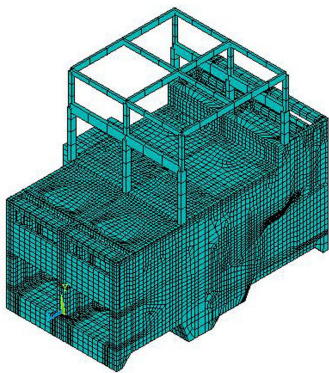


图 1 淮安三站有限元模型

1.2 计算结果分析

利用 ANSYS 进行模态分析,前 50 阶自振频率和振型描述见表 1。从表 1 可以看出:前 40 阶振动主要发生在上部厂房结构,这是因为上部厂房结构相对于泵房下部大体积块体结构刚度小很多,因此较容易发生振动;上部厂房结构的基频大概在 1.28 ~

1.61 Hz 范围内,而泵房下部结构基频在 20.02 ~ 20.72 Hz 之间,主要表现为泵房地面出现垂直方向上下振动。从 41 阶开始出现了以下部结构为主的振型,这是因为泵房的刚度相对较小,所以在下部结构中最容易发生振动。

表 1 淮安三站自振频率和振型

阶次	频率/Hz	振型描述
1	1.28	上部厂房横河向振动
2,3	1.61 ~ 1.80	上部厂房顺河向振动
4 ~ 7	2.33 ~ 3.12	上部厂房顺河向异向振动
8 ~ 11	3.47 ~ 4.30	上部厂房横河向同向振动
12,13	4.94	上部厂房顺河向异向振动
14,15	5.08 ~ 5.91	上部厂房横河向同向振动
16,17	6.97 ~ 7.33	上部厂房上下同向振动
18 ~ 40	7.63 ~ 17.67	上部厂房发生复杂扭转
41	20.02	泵房楼板垂直方向上下振动
42 ~ 46	21.84 ~ 22.68	上部厂房扭转,楼板上下振动
47 ~ 50	24.61	上部厂房扭转,下部整体扭转

2 振动成因分析

引起泵站结构振动的原因主要有水力、机械和电气等三方面因素,因机械和电气振源引起的机械和电磁等不平衡力较小,故在设计过程中可不考虑,因此水力振源是引起机组和结构振动的主要振源^[11]。水力振源主要来自于水流流过绕流体后所产生的漩涡诱发的脉动压力,水流脉动压力的频率由转轮叶片和导水叶片在单位时间内相互作用而发生的脉动次数决定,可按式(1)计算^[12]:

$$f = \frac{n_H Z_1 Z_2}{60A} \tag{1}$$

式中: Z_1 、 Z_2 分别为转轮叶片数和导水叶数; A 为 Z_1 、 Z_2 的最大公约数; n_H 为机组额定转速, r/min。对于淮安三站, $n_H = 136.4$ r/min, $Z_1 = 4$, $Z_2 = 8$, $A = 4$, 由式(1)可计算得 $f = 18.19$ Hz。

由淮安三站振动特性分析可知,下部结构基频在 20.02 ~ 20.72 Hz 之间,与水流脉动压力频率 18.19 Hz 较接近,错开度小于 5%,可能发生共振。由于水流脉动压力作用时间长,且水力振源直接作用在下部结构流道,引起泵房楼板垂直方向上下振动,会影响操作人员的工作环境及工作效率,而下部结构的振动还会影响控制泵站运行的机械仪器设备正常使用。下部结构与脉动压力发生共振可能是导致淮安三站现有振动问题的主要原因之一。

3 动力响应分析

在模态分析的基础上,采用 ANSYS 谐响应分析计算灯泡贯流泵站的结构动力响应,将水流脉动压力看成为该频率范围内的简谐荷载,其幅值为脉动

压力幅值,将它作用到相应的流道区域;简谐分析采用模式叠加法,简谐荷载采用简谐正弦波的形式施加,初始相位均为零,简谐荷载频率为 18.19 Hz。计算得出水流脉动压力作用下的泵站结构动位移云图如图 2 所示。

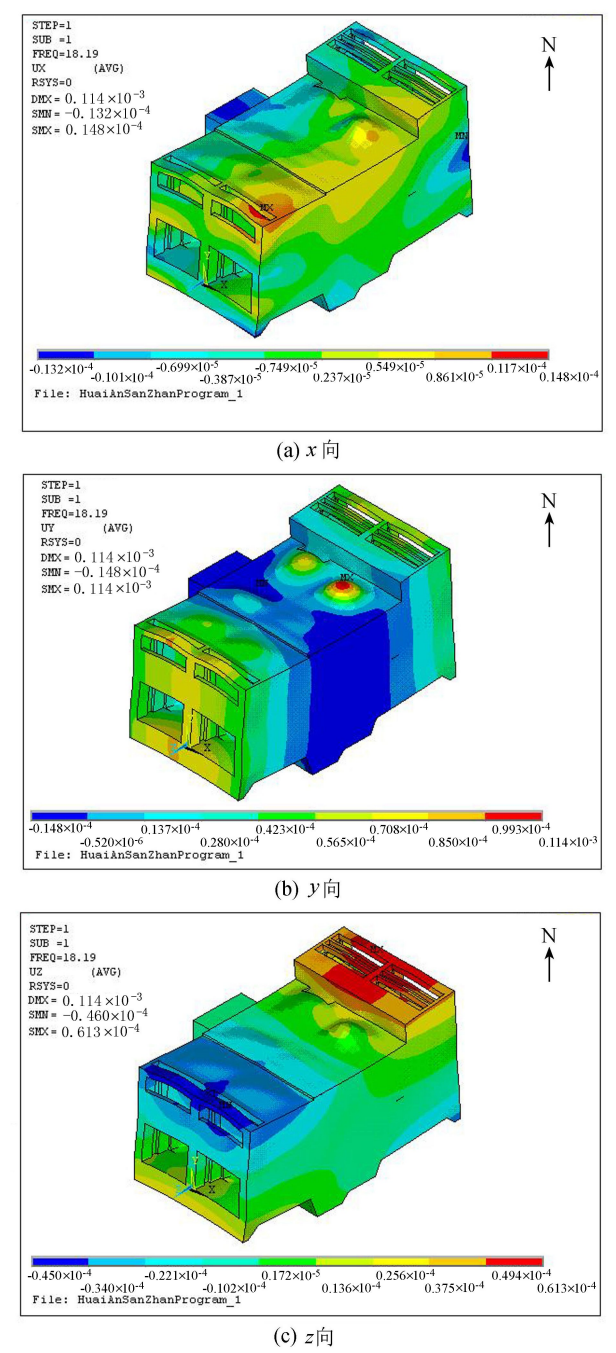


图 2 淮安三站结构动位移云图

表 2 泵站下部结构频率与脉动压力频率错开度

楼板厚度/m	不同梁截面尺寸的频率错开度/%					
	0.30 m×0.70 m	0.35 m×0.70 m	0.35 m×0.80 m	0.35 m×0.90 m	0.40 m×0.90 m	0.45 m×1.00 m
0.20	0.98	2.03	7.86	12.75	16.07	23.78
0.22	4.16	6.73	11.31	16.89	19.15	28.73
0.25	9.80	12.18	19.77	26.28	29.35	38.76
0.28	14.00	16.25	24.53	31.80	34.68	44.52
0.30	16.26	18.39	26.97	34.68	37.44	47.53

从图 2 可以看出,泵房楼板处振动反应最大,最大动位移为 0.114 mm。现行 GB 50265—2010《泵站设计规范》提出了对机墩结构的共振、振幅和强度的控制标准,对于卧式机组机墩只可进行垂直振幅的验算,其最大垂直振幅不超过 0.15 mm。但对于楼板等薄弱构件,以及在脉动压力作用下的厂房振动缺乏明确的技术标准,马震岳等^[13]结合振动对建筑物的影响评价,参照国内外有关建筑结构等方面的技术标准,提出了确定厂房振动控制合理标准的建议,即建筑结构振动允许位移为 0.15~0.20 mm。因此淮安三站灯泡贯流泵站结构所产生的动位移较接近建筑结构振动允许位移值标准,应对泵房楼板处的振动引起足够的重视。

4 抗振减振措施

结合淮安三站工程具体情况,通过改变泵房楼板的厚度以及梁截面尺寸(原始设计尺寸为楼板厚 0.20 m,梁截面尺寸为 0.30 m×0.70 m)来分析淮安三站的抗振减振措施,有限元计算得出泵房下部结构频率与水流脉动压力两者的频率错开度如表 2 所示。

由表 2 分析可知,加大泵房楼板的厚度以及梁截面尺寸都可以提高结构自振频率,使其远离脉动压力频率,避免结构发生共振。较之原始泵房楼板和梁截面尺寸,当板厚提高至 0.25 m、梁截面尺寸加大至 0.35 m×0.90 m 以上时,可使泵站结构自振频率错开脉动压力频率超过 20%,达到避免结构共振的目的。

5 结 论

a. 淮安三站下部结构基频为 20.02~20.72 Hz,与水流脉动压力频率 18.19 Hz 较为接近,引起现存振动问题的主要成因为下部结构与脉动压力发生共振,另由动力响应分析结果得知泵房楼板处振动反应最大,最大动位移达 0.114 mm,接近厂房振动允许的限值。

b. 通过改变楼板厚度和加大梁截面尺寸等抗振减振措施可提高下部结构的自振频率,较之原始泵房楼板和梁截面尺寸,当板厚提高至 0.25 m、梁截

面尺寸加大至 0.35 m×0.90 m 以上时,可使泵站结构自振频率错开脉动压力频率超过 20%,从而使其远离水流脉动压力频率,达到抗振减振的目的。

参考文献:

[1] 李玉莹,高峰,李清华,等.大型灯泡贯流泵站振动计算方法[J]. 水利水电科技进展,2014,34(5):69-73. (LI Yuying,GAO Feng,LI Qinghua,et al. Computing method of vibration in large bulb tubular pump system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(5):69-73. (in Chinese))

[2] 王新,李同春,潘树军.淮阴三站泵房振动分析[J]. 水利水电科技进展,2008,28(5):49-53. (WANG Xin,LI Tongchun, PAN Shujun. Vibration analysis of the pumphouse of the third Huaiyin Pumping Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008,28(5):49-53. (in Chinese))

[3] 邢磊,李同春,王新.淮阴三站灯泡式贯流泵抗振安全度评价[J]. 水电能源科学,2008,26(5):116-118. (XING Lei,LI Tongchun,WANG Xin. Evaluation of anti vibration safety degree of bulb tubular pumping station structure[J]. Water Resources and Power,2008,26(5):116-118. (in Chinese))

[4] 赵路静,张燎军,张汉云,等.钢制流道立式轴流泵站振动特性分析及安全评价[J]. 水电能源科学,2016,34(1):146-149. (ZHAO Lujing,ZHANG Liaojun,ZHANG Hanyun,et al. Vibration characteristics analysis and safety evaluation of steel-made flow passage in vertical axial-flow pumping station[J]. Water Resources and Power,2016,34(1):146-149. (in Chinese))

[5] 李四海,陈松山,周正富,等.竖井贯流泵装置压力脉动数值分析[J]. 水电能源科学,2015,33(7):175-179. (LI Sihai, CHEN Songshan, ZHOU Zhengfu, et al. Pressure fluctuation numerical analysis of shaft tubular pump device[J]. Water Resources and Power,2015,33(7):175-179. (in Chinese))

[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] 马震岳,王溢波,董毓新,等.红石水电站机组振动及诱发厂坝振动分析[J]. 水力发电,2000(9):52-54. (MA Zhenyue,WANG Yibo,DONG Yuxin,et al. Analysis of generating unit vibration and its induction effect on the powerhouse and dam vibration in the Hongsi Hydro Station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2000(9):52-54. (in Chinese))

[8] 陈婧,马震岳,刘志明,等.水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J]. 水力发电学报,2004,30(5):24-27. (CHEN Jing,MA Zhenyue,LIU Zhiming,et al. Vibration analysis of power house due to the pressure pulsation of hydro-turbine. [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2004,30(5):24-27. (in Chinese))

[9] 张燎军,魏述和,陈东升.水电站机厂房振动传递路径的仿真模拟及结构振动特性研究[J]. 水力发电学报,2012,31(1):108-113. (ZHANG Liaojun,WEI Shuhe, CHEN Dongsheng. Simulation of transmission path and study on structural vibration of hydropower house [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1):108-113. (in Chinese))

[10] 丁晓唐,王云极,江泉,等.淮安第三抽水站泵站贯流泵房动力特性的数值和测试研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(1):49-53. (DING Xiaotang,WANG Yunji,JIANG Quan,et al. Numerical and testing research on dynamic characteristics of a tubular pump house of the third Huaian Pumping Station [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2008,36(1):49-53. (in Chinese))

[11] 邢永欣.灯泡贯流式厂房结构计算分析[D]. 西安:西安理工大学,2006.

[12] 胡志刚.大型水电站地下厂房结构振动计算研究[D]. 天津:天津大学,2003.

[13] 马震岳,董毓新.水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.

(收稿日期:2015-11-10 编辑:熊水斌)

(上接第 38 页)

[7] FRANK S G, SUSAN J G, MARC V, et al. Free surface intake vortices: scale effects due to surface tension and viscosity[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(4): 513-522.

[8] YANG J, LIU Ting, BOTTACIN B A, LIN Chang. Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices [J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(4): 523-531.

[9] WANG Yingkui, JIANG Chunbo, LIANG Dongfang. Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes [J].

Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5): 696-701.

[10] 党媛媛,韩昌海.进水口旋涡问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1):90-94. (DANG Yuanyuan, HAN Changhai. Study of intakes vortex [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 90-94. (in Chinese))

[11] 裴少锋.闸前旋涡水力特性及消除措施试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.

(收稿日期:2016-05-10 编辑:骆超)