

基于流固耦合的 立式轴流泵站振动特性数值模拟研究

侯程程, 荐 威, 鲁 健, 于贤磊, 张 苗, 李昌龙

(南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029)

摘要:针对由水体引发的立式轴流泵站泵房振动问题,采用基于流固耦合的模态分析方法,对水体作用下的某立式轴流泵站泵房模态进行分析,进而分析泵房在水体作用下的应力和变形情况。研究表明,基于流固耦合的模态分析可以较确切的反应内部水体作用下的泵房模态;发现在水体的耦合作用下,水体对于泵房结构的影响主要集中在流道外壁混凝土结构处,对出水流道驼峰上部楼板以及下降段混凝土结构的变形影响较大,对于泵房整体结构影响较小。

关键词:立式轴流泵站; 流固耦合; 振动特性; 数值模拟

中图分类号:TV675

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)04-0011-0005

Numerical simulation of vibration characteristics of vertical axial flow pump station based on fluid-structure coupling

HOU Chengcheng, JIAN Wei, LU Jian, YU Xianglei, ZHANG Miao, LI Changlong
(The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: In response to the vibration problem of a vertical axial flow pump station caused by water, a modal analysis method based on fluid-structure coupling is adopted to analyze the mode of a certain vertical axial flow pump station under the action of water, and then analyze the stress and deformation of the pump station under the action of water. It was shown that modal analysis based on fluid-structure coupling can accurately reflect the pump station mode under the action of internal water bodies; It was found that under the coupling effect of water bodies, the impact of water bodies on the pump station structure is mainly concentrated at the concrete structure of the outer wall of the flow channel, with a greater impact on the deformation of the upper floor slab and the concrete structure of the descending section of the outlet flow channel hump, and a smaller impact on the overall structure of the pump station.

Key words: vertical axial flow pump station; fluid-structure coupling; vibration characteristics; numerical simulation

1 概 述

立式轴流泵站由于其占地面积小、结构紧凑、工程投资少等优点,被广泛应用于排涝和灌溉工程中。但立式轴流泵站在运行过程中,由于水体等因素的影响,泵站泵房容易发生振动,可能对整个泵站的安全稳定运行产生严重影响。因此,研究流固耦合作用下立式轴流泵站结构的振动特性,对于泵站的稳定运行具有重要的工程意义。

国内外很多专家就流固耦合对结构振动特性的影响作出了很多研究。傅作新^[1-2]对水体与固体的相互作用效应进行了研究,发现水的压缩性受相互作用的影响而发生变化,这对研究固液两相之间的动力相互作用问题很有参考价值;练继建等^[3]依托黄河小峡工程,对河床式厂房结构振动特性进行分析,计算比较了有、无流固耦合作用时两种模型动力特性以及二者的区别,发现流固耦合作用对结构几乎没有影响,有、无流固耦合作用时,频率与振

收稿日期: 2024-01-03

作者简介: 侯程程(1997—),女,硕士,主要从事南水北调泵站工程管理研究。E-mail: 1401818232@qq.com

型基本相同。在实际工程中,受到诸多不确定因素的影响,结构设计与理论计算存在着一定差距,这就需要人们去深入研究其机理,进而为设计提供参考依据。王新等^[4]构建了具有非恒定湍流和结构相互作用的泵站流固耦合界面的有限元模型,并对流固耦合界面进行了振动分析,通过预测各结构部件的振动响应,为泵站的抗振设计奠定了基础;谢伟等^[5]利用CAD/CAE集成系统实现了水利工程流固耦合界面的精确数值模拟和快速优化设计,大大提高了优化过程的效率;Matthias H G等^[6]认为耦合方程可用于流固耦合的有关计算;赵兰浩等^[7]在广义Newmark- β 法的基础上,为流固耦合动力相互作用问题开发了两种新的数值求解格式,以克服目前数值格式求解效率不足的问题;张新等^[8]为避免轴流泵工作时发生共振,研究分析其转轮的振动特性,对比了有无流固耦合作用两种情况下转轮的自振特性,发现水体附加振动质量将使转轮各阶自振频率减小,通过分析叶轮内部流动情况,可以看出叶片与导叶之间存在着强烈的相互作用,而导致叶片产生共振现象;高海司等^[9]用APDL命令流耦合进行研究,比较了叶轮部件流固耦合作用效果,对混流泵振动特性和结构设计研究奠定基础。近年来,学者们采用流固耦合^[10-12]对各种机械部件的研究较多,方法运用也更加成熟,主要研究蜗壳式混流泵的叶轮部件、导叶式离心泵的叶轮、竖井贯流泵的转子等部件。

2 流固耦合控制方程

2.1 流体控制方程

不可压缩流体的守恒定律基于质量和动量的守恒,可通过以下控制方程来描述:

质量守恒控制方程为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v) = 0 \quad (1)$$

动量守恒控制方程为

$$\frac{\partial \rho_f v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v v - \tau_f) = f_f \quad (2)$$

式中: ρ_f 为流体密度; t 为时间; v 为速度矢量; τ_f 为剪切力张量; f_f 为体积力矢量。

2.2 固体控制方程

根据牛顿第二定律,固体守恒的方程式为

$$\rho_s \ddot{d}_s = \nabla \cdot \sigma_s + f_s \quad (3)$$

式中: ρ_s 为固体密度; \ddot{d}_s 为固体域当地加速度矢量; σ_s 为柯西应力张量; f_s 为体积力张量。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (v \tau) + \nabla \cdot \rho f_f + S_E \quad (4)$$

式中: λ 为导热系数; S_E 为能量源项。

固体部分的热变形项公式为

$$f_T = \alpha_T \nabla T \quad (5)$$

式中, α_T 为热膨胀系数。

3 泵站几何模型及计算设置

3.1 几何模型

以某立式轴流泵站为研究对象,泵站纵剖面如图1所示。由于泵站上部结构主要以排架结构为主,相对于泵站水下局部混凝土结构,排架结构刚度低,振动频率小很多,共同建模计算不能很好地体现泵房下部结构振动特征,所以,在泵房下部结构振动特性研究中,没有对地面厂房进行建模和计算,上部排架结构以重力的形式施加在下部结构楼板之上。

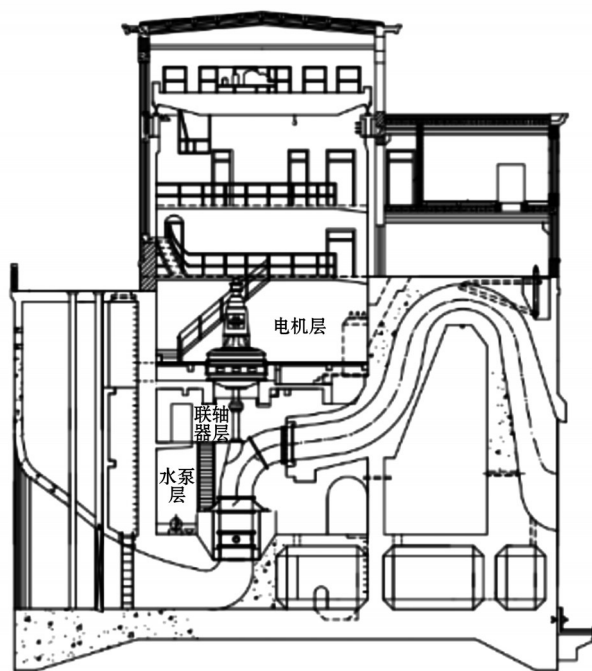


图1 立式轴流泵站纵剖面

本文以某立式轴流泵站为研究对象,使用UG软件对立式轴流泵站下部混凝土结构进行建模。泵房纵轴向总长度为26.5 m,8台机组沿泵房横轴向的总宽度为51.4 m,底板到电机层的高程共计19.3 m,泵房的三维有限元模型如图2所示。

为了研究水体对结构振动特性的影响,对泵站流道与泵房混凝土结构之间进行单向流固耦合^[13-14]振动分析,模拟泵房主机组开机工况,分别对主机

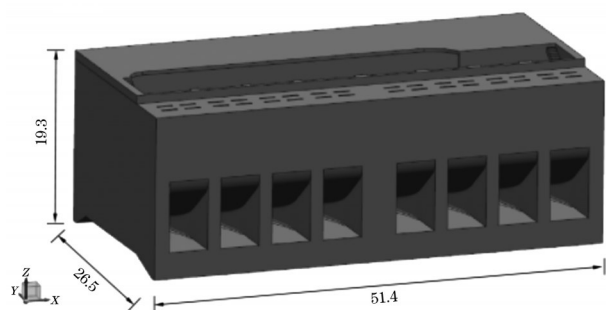


图2 泵房三维有限元模型(单位:m)

组开机一台、开机两台、开机四台的情况进行分析,分析不同开机工况下泵站流道的内部流场情况以及泵房结构振动情况,为保证泵房结构安全运行提供依据。

3.2 计算设置

本文对流体域用 Fluid Flow (CFX) 进行计算,对固体结构用 Static Structural 进行计算,并均在 Workbench 中进行,具体流程图如图3所示。首先在 UG 中建立固体域模型,并在 Spaceclaim 软件中对流体域进行抽取,保证流体域与固体域完整地贴合,同时保证计算的准确性。采用 Mesh 对固体域和流体域的网格进行剖分,并对固体域与液体域界面处进行网格加密处理,以确保数值模拟的真实性。固体域的网格总数为 88.83 万个,流体域的网格总数为 293.46 万个。

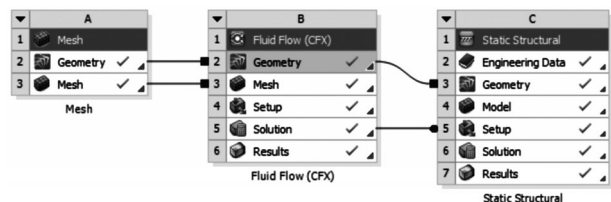


图3 单向流固耦合流程

本文所建单向流固耦合有限元模型将流体域划分为进、出水流动静止段和叶轮室段旋转段。固体域由泵站下部混凝土结构以及机组结构组成,其中混凝土结构包括各层楼板以及流道外侧结构等,机组结构包括电动机、联轴器、叶轮以及导叶,图4和图5分别为单流道内单向流固耦合固体域示意图以及流体域示意图,其余流道内固体域以及流体域内设置与单流道内的设置保持一致。

固体域在泵站底板处设置固端约束,设置泵站混凝土结构与流道之间的交界面为流体固体交界面,整个固体域受重力的作用。流体域进口采用质量流进口,流量大小为 $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$,出口采用静压出口,压力大小为 1 atm 。内部旋转部件与非旋转部件

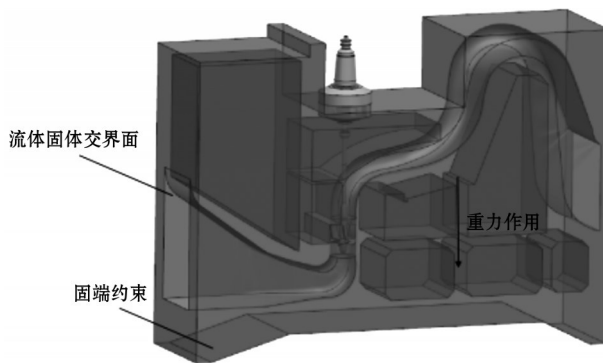


图4 单向流固耦合流程



图5 单向流固耦合流程

之间交界面使用 Frozen-rotor 方法进行处理。为了得到更为准确的数值模拟结果,定义图中灰色区域的泵房固体结构采用混凝土材料,混凝土材料密度为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $2.8 \times 10^7 \text{ Pa}$,泊松比为 0.167;定义图中橙色区域的电机导叶以及叶轮采用钢结构材料,钢结构材料的密度为 $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$,泊松比为 0.25。

4 结果分析

4.1 流体域计算结果分析

图6为泵站流道内流线图,图中展示了从进水流道到出水流道内的水体流动情况以及速度大小。可以清晰地发现水体通过肘型进水流道进入叶轮,在叶轮的旋转之下积攒能量,接着通过导叶排向虹吸式出水流道。泵站流道内速度最高处出现在叶轮区域,同时发现在虹吸式出水流道驼峰段前出现明显的流线紊乱现象,这是由于水体在出水管内爬升时,受到离心力以及惯性的共同作用,使得水体主要聚集在出水流道上升段管壁区域而出现流线的紊乱。而当经过驼峰段后,水体流线趋于平稳,无明显旋涡产生。图7为泵站流道中截面压力云图,从图7可以明显看出泵站流道内的高压区主要存在于进水流道以及出水流道区域,在叶轮



图6 泵站流道内流线



图7 泵站流道中截面压力云图

与导叶区域的压力相对较低,同时发现在进水流道以及出水流道中压力分布不均匀,在进水流道出口位置以及出水流道进口位置有小部分压力较低的区域。这是由于从进水流道出口处叶轮卷吸的水体以及叶轮流出的出水流道进口处流出的水体速度加快,在流道内与管壁发生碰撞摩擦产生水力损失而导致压力降低。

4.2 固体域计算结果分析

图8~10为不同工况下泵房结构X、Y、Z方向的振型图。从图中可以清晰地看出,从整体上看,在X方向上,当左侧1台机组开机时,产生位移最小的区域在其进水流道的左侧,产生位移最大的区域存在于进水流道的右侧,同时对于其他流道混凝土结构的影响较小;在左侧2台机组开机的工况下,由于两个流道对结构的相互作用,作用力相互抵消,使得在1台机组下受影响较大的区域消失,最大位移区域出现在左侧第二个流道右侧;而当4台机组同时开机时,对整个泵房结构产生了一定的影响,右侧四流道结构变形大于左侧四流道结构的变形,与前几个开机工况一致,最小位移区域依然存在于左侧第一个进水流道左侧。在Y方向上,开机工况的不同对泵房结构产生位移的变化影响不大,产生的最大位移为0.67 mm。在Z方向上,可以清晰地看出,

位移最大的区域出现在各虹吸式出水流道驼峰顶部区域的泵房楼板上,最大位移为0.22 mm,这是由于虹吸式出水流道驼峰顶部区域流态较差,流线较为混乱,水流不断冲击上部泵房楼板从而产生较大的位移。同时可以发现在进水流道的上部也产生了较大的位移。

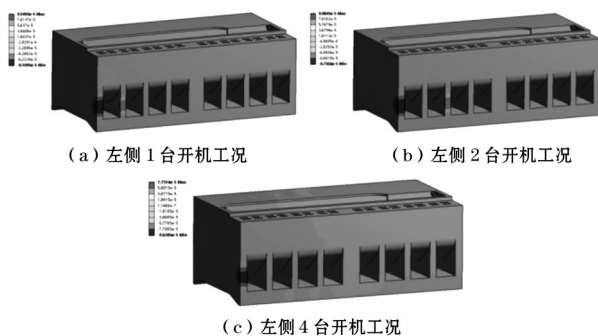


图8 不同开机工况下泵房结构X方向振型

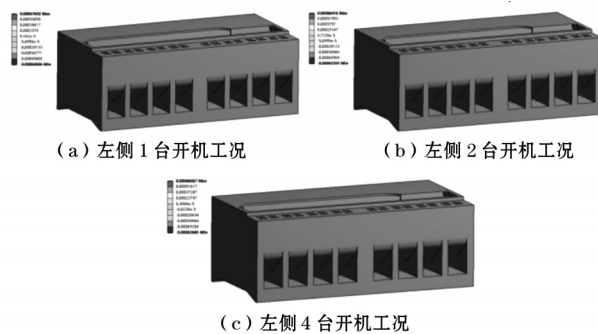


图9 不同开机工况下泵房结构Y方向振型

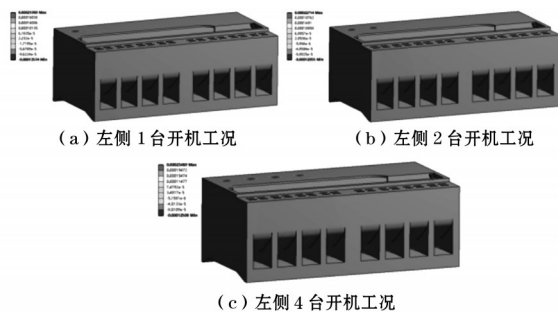


图10 不同开机工况下泵房结构Z方向振型

为了进一步确定单流道内部区域结构的变化情况,作出如图11所示泵房单流道中截面振型。从图11可以发现,在泵房出水流道区域产生的位移较大,主要分布在出水流道下降段以及出口段区域,主要是由于出水流道下降段内水体在重力作用下流速增加,获得较大的能量冲击混凝土结构而使其产生明显的位移,最大位移为0.7 mm。同时可以发现,在进水流道上部混凝土结构也产生了变形较为明显的区域,这是由于水体在进水流道入口处流态

不佳,如图5的流体域流线图所示,水体在进水流道中出现了偏折,偏向进水流道上部混凝土结构,对进水流道上部混凝土结构产生冲击作用,导致其产生较大的变形。

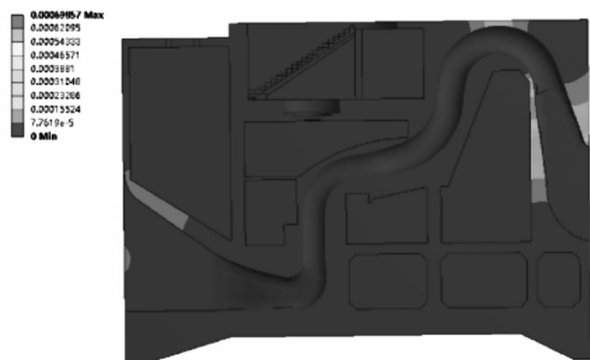


图11 单流道泵房结构中截面振型

图12为不同工况下泵房结构等效应力云图。可以发现,在不同工况下每个流道对结构的应力的规律具有一致性,应力较大的区域主要分布在进水流道上部以及虹吸式出水流道驼峰顶部区域的泵房底板处,其他区域的等效应力变化较小。

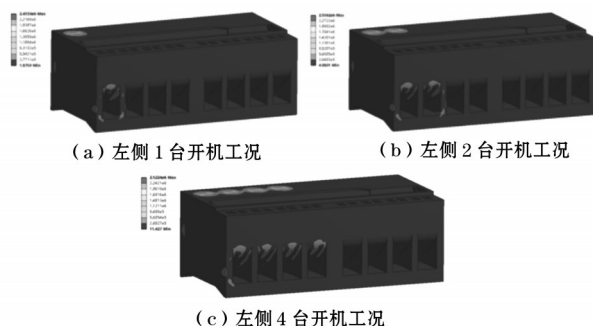


图12 不同工况下泵房结构等效应力云图

5 结 语

本文采用单向流固耦合的方法研究了水体对立式泵站泵房结构振动的影响,通过分析数值结果发现:

(1)对流体域进行分析,可以发现水体在流道内各区域流动情况不一,在进水流道中,流线出现了小角度的偏折,在虹吸式出水流道驼峰段,流线较为紊乱,而当经过驼峰段后,水体流线趋于平稳。

(2)对固体域进行分析可以发现,泵房结构中产生较大应力与产生较大变形的区域具有一致

性。主要分布在进水流道上部区域、出水流道下降段以及出口段区域,其他区域的位移以及应力变化很小。

(3)在不同开机工况下各流道对结构的应力的规律具有一致性,应力较大的区域主要分布在进水流道上部以及虹吸式出水流道驼峰顶部区域的泵房底板处,其他区域的等效应力较小。水体对结构的影响仅发生在流道内,对泵房整体结构并没有发生特别大的影响,但也要注意出水流道驼峰上部底板以及下降段混凝土结构的变形情况。

参考文献:

- [1] 傅作新. 结构与水体的耦合作用问题[J]. 合肥工业大学学报, 1983(4): 224-230.
- [2] 傅作新. 结构与水体的动力相互作用问题[J]. 水利水电科学, 1982(2): 104-119.
- [3] 练继建, 王海军, 王日宣. 河床式水电站厂房结构动力特性研究[J]. 水利水电技术, 2004(8): 37-40.
- [4] 王新, 魏述和. 大型泵站的流固耦合振动分析[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 56-59.
- [5] 谢伟, 陈坚. 基于CAD/CAE的泵站装置流固耦合数值仿真[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 114-118.
- [6] MATTHIES H G, NIEKAMP R, STEINDORF J. Algorithms for strong coupling procedures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2006, 195(17): 2028-2049.
- [7] 赵兰浩, 李同春, 牛志伟. 坝体-库水动力相互作用的数值求解格式[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008(4): 491-495.
- [8] 张新, 郑源, 钱钧, 等. 基于流固耦合的卧式轴流泵叶轮模态分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(7): 164-167.
- [9] 高海司, 裴吉, 袁寿其, 等. 蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J]. 流体机械, 2018, 46(1): 5, 46-51.
- [10] 刘迎圆, 宫建国, 徐颖, 等. 流固耦合作用下空间导叶式离心泵叶轮湿模态分析[J]. 流体机械, 2020, 48(7): 50-56, 65.
- [11] 蔡克伦, 刘玉红, 朱亚强, 等. 刚-液-柔耦合结构湿模态试验与仿真分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 128-134, 147.
- [12] 沈家伟. 基于流固耦合的竖井贯流泵转子结构力学分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [13] 夏斌, 金雷, 朱庆龙, 等. 基于流固耦合的轴流泵流动与可靠性分析[J/OL]. 水泵技术, 2023(1): 1-5.
- [14] 曹洋, 王逸, 邵雨辰. 基于仿真体系模态下的流固耦合场泵站出水塔动力响应特征分析研究[J]. 水利技术监督, 2020, 157(5): 164-169.