

# 厂顶溢流式厂房水流脉动数值模拟研究

葛文浩, 王海军

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 近年出现了一种将泄洪流道与发电流道重叠布置的新型厂顶溢流式水电站厂房,其运行过程中水流脉动是否会影响结构安全是一个非常值得研究的问题。文中采用大涡模拟对这一新型厂顶溢流式厂房泄流过程中的水流脉动进行了数值模拟,结合相关试验成果,得出了该水电站厂房流道的水压脉动分布特性。结果表明:水流脉动的频率与结构的自振频率相差较远,不会引起结构共振,结构安全。

**关键词:** 厂顶溢流式厂房; 水流脉动; 大涡模拟; 频率; 共振

**中图分类号:** TV312      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2013)01-0112-03

## Research on flow fluctuating numerical simulation of top overflow powerhouse

GE Wenhao, WANG Haijun

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In recent years, there has been a new top overflow hydropower plant which arranges discharge way and electricity generation flow way to overlap, and it is an important problem that whether flow fluctuation will affect the structural safety in the operation process. In this article, flow fluctuating of a new top overflow powerhouse was simulated by means of large eddy simulation. Combined with the relevant test results, we obtained the distribution characteristics of flow fluctuating of the hydropower house. The results show that flow fluctuation frequency is far different from the natural frequency and does not cause structural resonance, so the structure is safe.

**Key words:** top overflow powerhouse; flow fluctuating; large eddy simulation; frequency; resonance

## 1 概述

随着我国水电事业的发展,众多大型水利工程投入运行,而水流脉动对水工结构的影响成为工程建设中特别受人关注的问题。水工建筑物中出现的脉动现象是动水荷载的主要部分,一方面脉动压力可以使瞬时值增大从而加强了建筑物瞬间承受的荷载引起建筑物的损害,另一方面脉动压力可以使瞬时值降低而增大了空蚀的可能性<sup>[1-2]</sup>。如何降低脉动压力对建筑物的影响一直是工程设计中重要的关注点。近年来,一种新型的将泄洪建筑物与发电厂房建筑物重叠布置的厂顶溢流河床式水电站厂房引起了人们的注意。曹伟等人通过数值模拟对该类型水电站结构进行了动力分析研究,并且也分析了一些流道水压测试实验值<sup>[3]</sup>。本文采用大涡模拟方法对这一新型厂顶溢流河床式水电站厂房泄流情况进行了数值模拟,结合试验数据对其脉动压力的分布

规律进行系统分析。结果表明,水流脉动的频率与结构的自振频率相差较远,不会引起结构共振,结构安全。

## 2 数值模拟

### 2.1 大涡数值计算理论

目前为止,包括直接数值模拟(DNS)、雷诺时均数值模拟(RANS)和大涡数值模拟(LES)在内的3种紊流数值模拟方法是被用来解决湍流问题的常用方法。3种模拟方法都是从连续方程和 Navier - Stokes 方程出发,通过各自的理论方法,最终计算出紊流运动流场中的各种信息。紊流计算的大涡模拟方法在20世纪60年代由 Smagorinsky 提出<sup>[4]</sup>,随着近些年来计算机硬件条件的提高,对大涡模拟方法的研究与应用明显上升,成为目前的热点之一。

大涡模拟的控制方程可以通过对 Navier - Stokes 方程作滤波运算来得到<sup>[5]</sup>,不可压缩流动

收稿日期:2012-11-19; 修回日期:2012-12-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(50909072);国家创新研究群体科学基金(51021004);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090032120082)

作者简介:葛文浩(1985-),男,河北省衡水人,硕士生,水利水电工程专业。

通讯作者:王海军(1978-),男,江西萍乡人,副教授,从事水工结构静动力研究。

Navier - Stokes 方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} \vec{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \cdot \vec{u} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\nu$  为运动粘滞系数;  $u$  为流速矢量。

式(1) 第一个方程为不可压缩流体的质量守恒连续性方程, 第二个方程为动量守恒 Navier - Stokes 方程。

对式(1) 做低通滤波可以得到大涡模型的控制方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} \times \vec{u} = -\nabla \bar{p} + \nu \nabla^2 \vec{u} - \nabla \cdot \tau^{\Delta} \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau^{\Delta} = \vec{u} \vec{u} - \vec{u} \times \vec{u} \quad (3)$$

式(2) 和式(3) 可以用笛卡尔坐标系表示:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i \partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{\Delta}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_{ij}^{\Delta} = u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

式中: 密度  $\rho$  认为是常数, 式(3) 为亚滤波尺度应力, 表征亚滤波尺度对滤波可分辨尺度的影响。

自 20 世纪 90 年代以来, 大涡模拟方法已经在实际水利工程和理论研究中得到广泛使用, 并取得了大量的成果。

### 2.2 计算模型

本文以新型厂顶溢流河床式水电站厂房为研究对象, 其由河床式厂房、厂顶式泄洪表孔、泄水底孔、排沙孔及左右岸副坝等建筑物组成, 最大坝高 65.0 m, 坝顶全长 151.00 m, 坝顶设防浪墙, 工程主要任务是发电, 具有日调节性能。机组的转速为 107 r/min。

数值模拟针对单个机组段的泄洪工况进行模拟, 所选计算区域是由坝前 105.5 m 处的水库开始, 直到坝后 174.5 m 处下游尾水渠底板, 沿横向计算范围为 33 m, 垂向计算范围取为 52.5 m。区域中包括部分水库、泄流表孔、流道、消力池、尾水渠等建筑物。

为节约计算量和存储空间, 在泄流和发电流道等主要区域采用密集网格, 而在其他区域采用相对粗糙的计算网格。所有网格均选为正交结构化网格, 坝体部分网格分为三个区域, 坝前 105.5 ~ 40.5 m 区域内网格共 64 152 个单元, 坝后 114.5 ~ 174.5 m 区域内网格共 52 800 个单元, 坝前 40.5 ~ 114.5 m 区域为厂

房的主体部分, 相比上下游网格加密, 共 1 230 768 个网格单元。计算模型如图 1 所示。

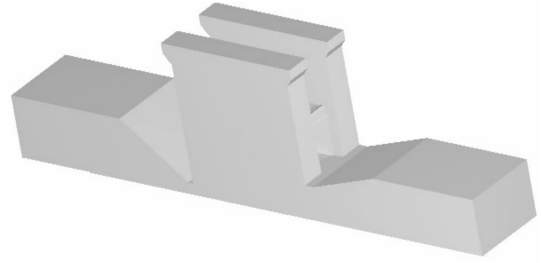


图 1 坝体模型图

计算区域的进口设为压力边界条件, 上下游水位为设计洪水位, 其他面设为对称面。坝体和尾水渠糙率取 0.015, 时间步长 0.02 s。

### 3 数据分析

通过正常工况表孔与机组流道联合泄洪时的大涡模拟计算结果与试验数据进行对比验证。文献所给出的试验数据是根据表 1、图 2 所示的测点位置进行测量的<sup>[3]</sup>, 因此, 数值模拟的计算结果同样按照图中所示的测点位置在计算结果中进行数据提取, 其中包括表孔中线底部测点 4 个, 表孔边墙测点两个和尾水管顶部和侧部测点 4 个。选取脉动压力时均值、脉动压力均方根作为比较对象, 得出如表 2 所示的数据结果。

表 1 测点位置分布表

编号	桩号	部位	高程 m
1	0 + 24. 20	表孔中线底部	1735. 00
2	0 + 34. 50	表孔中线底部	1735. 00
3	0 + 52. 40	表孔中线底部	1729. 73
4	0 + 60. 20	表孔中线底部	1727. 23
5	0 + 34. 50	表孔边墙	1741. 60
6	0 + 60. 20	表孔边墙	1730. 75
7	0 + 51. 25	尾水管顶部	1719. 93
8	0 + 56. 05	尾水管顶部	1720. 21
9	0 + 60. 85	尾水管顶部	1720. 49
10	0 + 60. 85	尾水管侧部	1715. 00

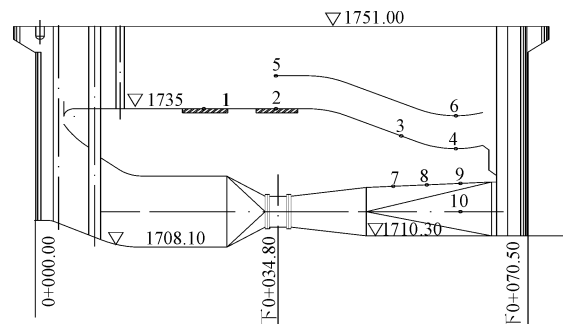


图 2 测点位置分布图

表2 联合泄洪计算结果与实验数据验证 kPa

测点	计算结果		试验结果	
	时均值	均方根	时均值	均方根
1	81.99	0.27	88.03	0.46
2	63.42	0.26	67.06	0.46
3	69.03	1.04	77.73	1.48
4	110.08	1.29	131.2	1.93
5	11.80	0.45	13.02	0.77
6	51.65	1.03	57.77	1.72
7	98.63	6.20	90.01	6.85
8	85.73	5.56	78.28	6.50
9	92.38	4.82	85.17	4.34
10	149.46	4.95	139.20	5.87

从表2可以看出联合泄洪时表孔的压力时均值计算值略低于模型试验数值而尾水管内部的压力时均值略高于模型试验数据,但总的来说,计算结果与模型试验结果趋势相当,吻合较好。从在均方根值对比结果来看,尾水管区域的脉动均方根计算值与试验数据相差不大。然而表孔的脉动均方根数值实测值与计算值差别较大,但是数值随各测点的分布

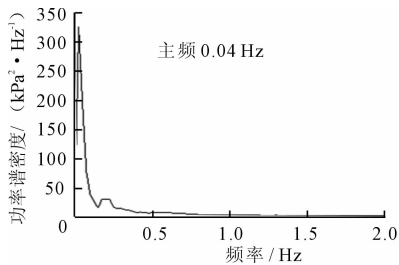


图3 表孔测点1水压频谱图

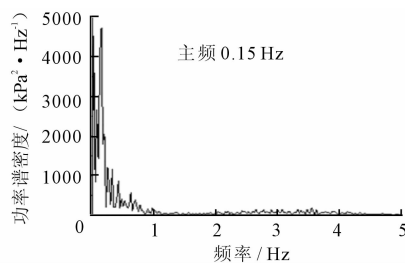


图4 流道测点7水压频谱图

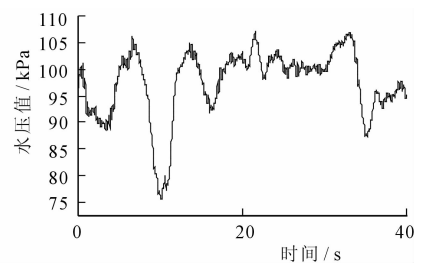


图5 测点7计算水压时程曲线图

可见采用大涡模拟可以较好的模拟水电站厂房复杂流道的水流脉动过程,且可以对多种工况进行仿真模拟,是实验测试一个非常好的补充。同时为结构振动的分析提供有效的数据支持。当然,由于缺乏更多的实验数据,需要对更多的工况数据进行复核验证。

## 4 结 语

经过上述分析,可以得出以下几点结论:

(1)采用大涡模拟方法计算水电站厂房的复杂流道脉动压力分布是可行的。

(2)新型厂顶溢流河床式水电站厂房溢流表孔的水流脉动值小于流道的水流脉动压力值。该水电站的水流脉动的频率值与结构的自振频率相差较

趋势均基本一致。

功率谱密度函数是频域分析中的重要特征参数,它能够直观的反应脉动能量在频率上的分布。图3、图4分别是表孔与流道典型测点的频谱图。

从计算结果可知,表孔主频为0.04~0.09 Hz,说明表孔的频率结构为低频分量突出的谱型,优势频率较小,与建筑物的固有频率(第一阶频率1.15 Hz<sup>[3]</sup>)相差较远。流道内部测点脉动压力的主频约在0.15 Hz,与结构的固有频率相差也较大。计算结果表明溢流表孔的压力明显小于流道,表孔上圆弧曲线段(0+39.0 m~0+44.37 m)和鼻坎处有低压区,甚至产生瞬时负压,其中鼻坎处负压较大应该引起注意。经过读取数据分析得出泄洪表孔负压最大值出现在0+41.76 m和0+64.40 m处附近,这可能是由于该处水流的曲率半径大于表孔圆弧的曲率半径,水流与壁面分离而造成的,可以通过加大圆弧的半径来消除负压<sup>[6]</sup>。流道内部脉压值较大,压强梯度大,测点7最大压力值为107.2 kPa(计算水压时程曲线见图5)和测点10最大压力值为163.9 kPa。

远,不会与建筑物发生共振作用。

## 参考文献:

- [1] 刘士和. 高速水流[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 崔广涛,练继建,彭新民,等. 水流动力荷载与流固相互作用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [3] 曹伟. 厂顶溢流式水电站厂房动力分析[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [4] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963,91(3):99-165.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 潘水波,钱鸣森,蔡茂龙,等. 三峡厂顶溢流形体形及水力特性研究[J]. 水力发电,1991,17(8):69-73.