

# 双机共用尾水调压室水力特性数值模拟

朱峰, 蔡付林, 花玉龙, 黄笑同

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 基于计算流体力学(CFD), 对双机共用尾水调压室的几种典型工况进行了数值计算, 得到调压室底流速分布、水头损失系数和水流通过两个阻抗孔进(出)调压室的流量。通过分析各工况的模型内部流动状态, 并与模型试验结果进行对比, 发现: 水流进(出)调压室水头损失系数随流量比增大而增大, 且分流工况单台机组运行时损失系数数值比两台机组运行时小; 单机运行时, 水流流经两个阻抗孔进(出)调压室的流量大小不一定相等, 且随流量比变化而变化。

**关键词:** 尾水调压室; 双机共用调压室; 水头损失; 三维流态; 数值模拟

**中图分类号:** TV 732.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0095-04

## Numerical Simulation on Hydraulic Performance of Tailrace Surge Tanks Shared by Two Units

ZHU Feng, CAI Fu lin, HUA Yu long, HUANG Xiao tong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In this paper, computational fluid dynamics (CFD) method was used to simulate several typical working conditions of tailrace surge tanks shared by two units. The flow velocity distribution under the surge tank, head loss, and flow rate of water flowing into or out of the surge tank through the two impedance holes were obtained and analyzed. In addition, the simulated flow patterns under different working conditions were analyzed and compared with those obtained from experimental results. The results indicated that the head loss coefficient for water flowing into or out of the surge tank increases with the increasing of flow rate and the head loss coefficient under single unit operation is lower than that under two unit operation. Moreover, the flow rates of water flowing into or out of the surge tank through the two impedance holes shared by two units were not the same under single unit operation and they were affected by the variation of discharge ratio.

**Key words:** tailrace surge tank; surge tank shared by two units; head loss; three dimensional flow pattern; numerical simulation

具有有压长尾水道的水电站, 为了保持尾水系统运行的稳定性, 特别是防止丢弃负荷时产生过大的负水锤, 需要在尾水隧洞上设置尾水调压室<sup>[1]</sup>。大型尾水调压室一般采用两机或三机共用一个尾水调压室的布置型式, 比如龙滩、小湾等水电站采用三机共用型式, 而构皮滩、官地等电站采用两机共用型式。在具有尾水调压室的水电站中, 水轮发电机组启动、甩荷和增减负荷时, 均会发生水流流进和流出调压室的非恒定流态, 此流态下的水头损失系数及流场分布是研究水电站输水系统过渡过程所必须的基础数据。由于在非恒定流状态下, 无法准确测量计算水头损失系数所必须的流量、测压管水头, 国内外都是在每个非恒定流过程中取若干个点, 再采用恒定流模型试验量测其水头损失系数<sup>[2-4]</sup>。试验手段虽然准确可靠, 但研究周期长、成本高。近些年来,

计算流体力学(CFD)得到迅速发展, 数值模拟方法逐渐成为水利工程设计和研究的重要手段<sup>[5-9]</sup>, 应用数值计算方法对水力学问题进行研究已经成为一种趋势。本文拟利用计算流体力学方法, 对底部交汇型式双机共用阻抗式尾水调压室的底部流速分布和水头损失系数进行数值模拟。

## 1 计算方法

### 1.1 计算区域和工况

计算对象为某水电站尾水调压室系统, 其三维模型如图1所示。尾水岔管在调压室下采用阻抗圆孔(孔口面积 $2 \times 41.83 \text{ m}^2$ )与调压室相连, 阻抗孔下方有一导流墩, 两台机组的尾水支洞在导流墩后交汇。其中1号尾水支洞比2号尾水支洞多一个 $60^\circ$ 的弯段。

收稿日期: 2013-12-05    修回日期: 2014-04-17    网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.021.html>

作者简介: 朱峰(1989-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事水电站泵站水力学方面的研究。E-mail: zfnj89@163.com

通讯作者: 蔡付林(1963-)男, 湖南桃江人, 教授, 博士生导师, 从事水电站泵站水力学方面的研究。E-mail: fcaijin@163.com

### 1.1.1 研究工况

按照调压室中水流方向,选取两种典型工况进行研究:一种是上游来流分成两股水流,分别流入调压室和下游,即分流,见图 2(a)、2(b)中工况一和工况二;另一种是上游来流和从调压室中流出的水流汇成一股水流,流入下游,即汇流,见图 2(c)、2(d)中工况三和工况四。模型试验针对两台机组运行、1 号机组单独运行和 2 号机组单独运行三种工况分别进行了模拟,而数值方法仅针前两种工况进行模拟。

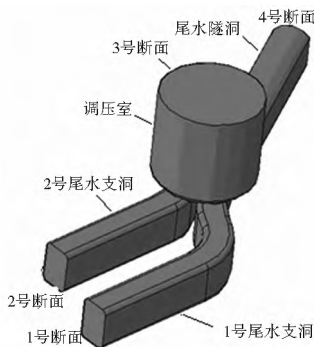


图 1 调压室三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of the surge tank

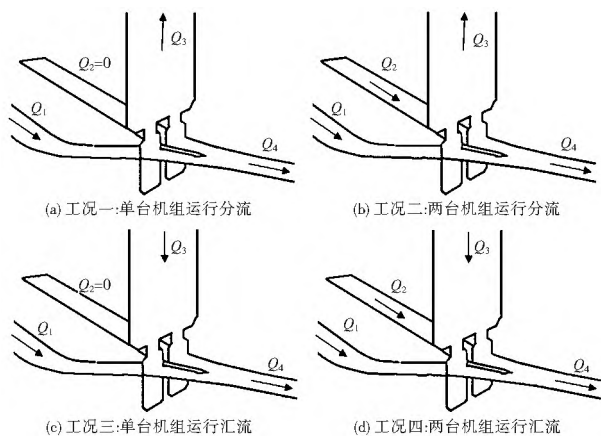


图 2 典型工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical working conditions

### 1.1.2 水力损失计算

根据能量方程,模型中任一进口与出口断面间的水头损失为:

$$\Delta h_{ij} = \left( Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} \right) - \left( Z_j + \frac{P_j}{\gamma} + \frac{V_j^2}{2g} \right) \quad (1)$$

式中:  $Z$ 、 $P/\gamma$ 、 $V$ 、 $\Delta h_{ij}$  分别为断面的位置高程、压强水头、平均流速、断面间的水头损失;下标  $i$  表示进口,下标  $j$  表示出口。

将水头损失除以相应管道的流速水头<sup>[4]</sup>(分流工况取分流前进口断面的流速水头,汇流工况取汇流后出口断面的流速水头),得到无量纲的水头损失系数  $\zeta_{ij}$ ,即:

$$\zeta_{ij} = \frac{\Delta h_{ij}}{V^2/2g} \quad (2)$$

式中:  $V$  分流工况取分流前进口断面流速,汇流工况取汇流后出口断面的流速。

### 1.1.3 模型试验结果的拟合

设流进或流出调压室的流量与相应管道中总流量(分流工况取分流前流量,汇流工况取汇流后流量)之比为流量比  $Q_i$ 。试验中对于每个流量比  $Q_i$ ,分别测出各断面的流量和

测压管水头,根据式(1)和式(2)计算出水头损失系数  $\zeta_i$ ,得到一个试验点( $Q_i, \zeta_i$ )。根据这些试验点的分布规律,利用最小二乘法原理进行拟合,得到水头损失系数关于流量比的二次多项式的拟合公式。

## 1.2 数学模型

本文利用计算流体力学方法对该调压室进行数值模拟,研究调压室内的水流流速分布并计算其阻抗损失系数。其中,损失系数的计算方法与 1.1.2 和 1.1.3 小节相同。将计算结果与该调压室局部模型试验观察的现象和试验测量计算结果进行比较,以观察各个工况水流流经调压室的细节。

### 1.2.1 计算模型的选择

数值计算中控制方程为液体流动不可压缩连续方程和 Reynolds 时均 N-S 方程。采用 RNG  $k-\epsilon$  模型进行计算<sup>[10-13]</sup>,利用有限体积法和非交错网格对方程进行离散,方程压力采用一阶迎风差分格式,利用 SIMPLEC 算法实现压力和速度变量的分离求解<sup>[14]</sup>。

### 1.2.2 边界条件及网格划分

调压室在各种典型工况下,各管口的边界条件设置如下。

上下游边界都放置在距调压室中心线 10 倍管道水力直径处。进口边界条件  $V_m$  按断面平均流速给出;出口边界条件选择自由出流,其中分流工况根据不同的流量比选择出流比。壁面采用无滑移边界条件。

网格划分时,在尾水支洞、尾水洞和调压室部分采用楔形网格,在调压室与尾水洞连接部分采用混合网格,并进行加密,网格总数约为 150 万,见图 3。



图 3 调压室网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mesh discretization on surge tanks

## 2 试验结果与计算结果及分析

### 2.1 分流工况流态及水头损失系数分析

分流工况一和工况二时,模型中流速的分布见图 4 和图 5。图 4、图 5 的截面分别为调压室两个阻抗孔中心点所在的竖直面和调压室底部流道的横切面。由图可见:在工况一时,一部分水流通过 1 号阻抗孔流入调压室,另一部分绕过调压室底的导流墩,从 2 号阻抗孔流入调压室,即 1 号尾水支洞中的水流通过两个阻抗孔进入调压室;在工况二时,1 号尾水支洞中的水流经过 1 号阻抗孔流入调压室,2 号尾水支洞中的水流经过 2 号阻抗孔流入调压室。

对比数值模拟计算得到的水头损失系数与模型试验值(图 6),发现不管是规律上还是数值大小上吻合程度都很高,体现了很好的一致性,验证了三维数值模拟计算的准确可靠性。在上述两种工况下,水流流进调压室时的水头损失系数  $\zeta_3$  均随流量比增大而增大,并且工况一时水流流入调压室的水头损失系数远远小于工况二,前者约是后者的 1/4。其原因是两种工况时调压室底部以及阻抗孔处的流态有很大不同:工况一时,单股来流流经两个阻抗孔流入调压室;工况二时,两股来流分别流经各自对应的阻抗孔流入调压室,相当

于每股水流流经一个阻抗孔进入调压室,其过流面积比工况一时相差一倍,造成水头损失系数相差很大。

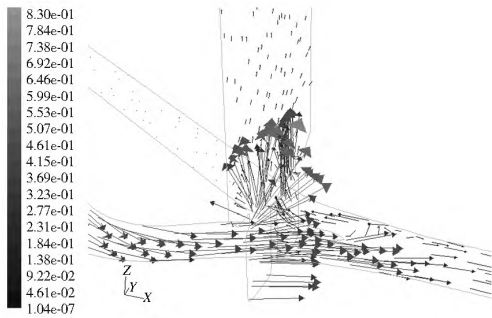


图 4 工况一调压室底流态

Fig. 4 Flow pattern of the surge tank under the divergent flow conditions for single unit operation

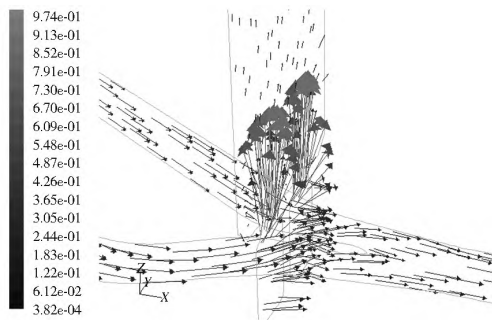


图 5 工况二调压室底部流态

Fig. 5 Flow pattern of the surge tank under the divergent flow conditions for two unit operation

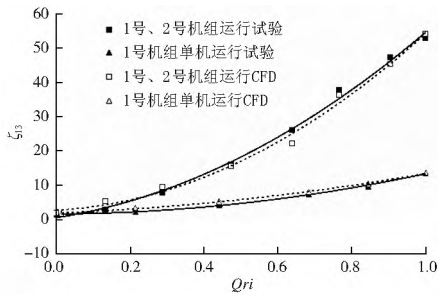


图 6 工况一和工况二时水流进入调压室水头损失数值计算结果与试验结果比较

Fig. 6 Comparison of the head losses of surge tank under the divergent flow conditions for two operations obtained from numerical simulation and model test

分析工况一,发现水流从 1 号阻抗孔流入调压室流量占所有流入调压室流量的比例与流量比  $Q_{ri}$  有关:  $Q_{ri}$  增大,经过 1 号阻抗孔流入调压室的水流比例减小;  $Q_{ri} > 0.7$  时,流经 1 号阻抗孔进入调压室的流量占所有流入调压室流量比例略小于 50%。分析认为,水流在 1 号尾水支洞中流速较大,从 1 号阻抗孔进入调压室的水流需要 90° 转弯进入调压室;另一部分水流受导流墩影响,流速变小,再经 2 号阻抗孔进入调压室后水流更为平顺,故流经 2 号阻抗孔进入调压室的水流占所有流入调压室的流量比例反而略大。

分析工况二,发现流经 1 号、2 号阻抗孔进入调压室水流流量相当。

## 2.2 汇流工况流态及水头损失系数分析

汇流工况三和工况四时,模型中流速分布见图 7 和图 8。

由图可见,在工况三时,调压室的水流一部分通过 1 号阻抗孔与尾水支洞来流汇流,另一部分通过 2 号阻抗孔流入调压室底部流道,两股水流在导流墩后交汇。在导流墩附近的 2 号尾水支洞中有一个漩涡。由于水流从调压室 2 号阻抗孔流出后垂直方向的速度降为零,水平方向流速从零逐渐加速,同时受到 1 号尾水支洞中水流黏滞剪切作用,形成了漩涡。在工况四时,调压室水流分成两股分别从两个阻抗孔流入底部流道,并分别与尾水支洞中的来流在导流墩后交汇,流入下游。

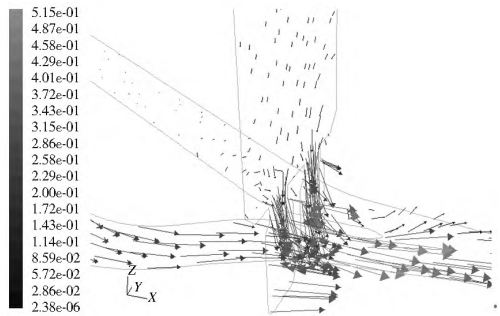


图 7 工况三时调压室底流态

Fig. 7 Flow pattern of the surge tank under the convergent flow conditions for single unit operation

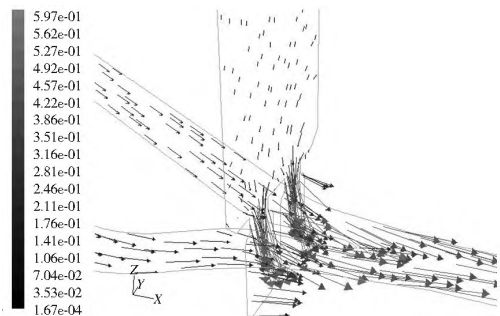


图 8 工况四时调压室底部流态

Fig. 8 Flow pattern of the surge tank under the convergent flow conditions for two unit operation

图 9 为两种工况下,水流从调压室流出时的水头损失系数  $\zeta_{34}$  随流量比变化情况。由图可见,  $\zeta_{34}$  随  $Q_{ri}$  增大而增大。工况三和工况四时,水流流出调压室的损失系数基本相等。

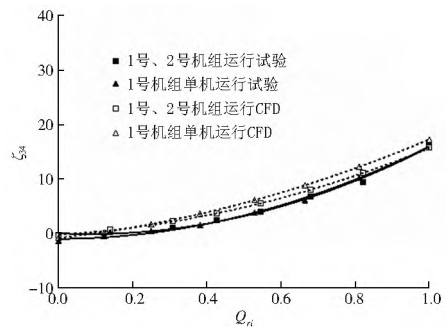


图 9 工况三和工况四时水流流出调压室水头损失数值计算结果与试验结果比较

Fig. 9 Comparison of the head losses of surge tank under the convergent flow conditions for two operations obtained from numerical simulation and model test

工况三时,水流从 1 号阻抗孔流出调压室流量占所有流

出调压室流量的比例与流量比  $Q_{ri}$  大小有关: 随着流量比  $Q_{ri}$  增大, 经过 1 号阻抗孔流出调压室的水流占有流出调压室流量的比例在逐渐增大, 直到 50%。其原因是, 当 1 号尾水支洞有流量、2 号尾水支洞流量为零时, 1 号机组来流在导流墩后会将 2 号尾水支洞中的一部分水带走, 此时 2 号尾水支洞中压力变小, 使得 2 号阻抗孔流量增加; 1 号尾水支洞中的流量越大, 则 2 号尾水支洞中压力减小得越明显, 因此 2 号阻抗孔流出的流量也越大。

### 3 结论

(1) 利用三维数值模拟计算得到的双机共用调压室底流速分布、水头损失系数, 与模型试验结果有很好的 consistency, 验证了三维数值模拟计算的准确可靠性。

(2) 水流进(出)调压室的水头损失系数随流量比  $Q_{ri}$  的增大而增大。其中, 分流工况下, 单台机组运行时水流流入调压室的水头损失系数比两台机组运行时要小; 汇流工况下, 单台机运行时水流流出调压室水头损失系数与两台机组运行时基本相当。

(3) 水流进(出)调压室时, 分为两股水流分别流经两个阻抗孔。这两股水流占有所有流进(出)调压室流量的比例不一定相等, 其大小关系与流量比和投入使用的机组台数有关: 两台机组运行时, 两股水流流量大小相当; 单台机组运行分流工况下, 流经运行机组对应阻抗孔的水流流量占有所有流进调压室流量的比例, 随流量比增大而减小; 单台机组运行汇流工况下, 流经运行机组对应阻抗孔的水流流量占有所有流出调压室的流量比例, 随流量比的增大而增大。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘启钊, 彭守拙. 水电站调压室[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995. (LIU Qi zhao, PENG Shou zhuo. The Surge Chambers in Hydroelectric Station [M]. Beijing: Water Power Press, 1995. (in Chinese))
- [2] 蔡付林, 刘启钊, 索丽生. 两机共用的尾水调压室水力特性试验研究[J]. 河海大学学报, 1996, 24(6): 66-71. (CAI Fu lin, Liu Qi zhao, SUO Li sheng. Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Rectangular Tailrace Surge Tank Shared by Two Units[J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(6): 66-71. (in Chinese))
- [3] 宋长福, 夏小娟. 有连接管的调压室水头损失系数研究[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(10): 604-606. (SONG Chang fu, XIA Xiao juan. Head Loss Coefficients of Throttled Surge Tanks with the Linking Pipe[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2005, 11(10): 604-606. (in Chinese))
- [4] 蔡付林, 胡明, 曹青. 有长连接管的阻抗式调压室阻抗损失系数研究[J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 57-60. (CAI Fu lin, Hu Ming, Cao Qing. Coefficients of Head Loss of Throttled Surge Tanks with Long Linking Pipe[J]. Water Resources and Power, 2001, 19(4): 57-60. (in Chinese))
- [5] 李向宾, 侯靖, 吴旭敏, 李新新. 调压室非对称孔口阻抗特性的数值模拟[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(4): 91-95. (LI Xiang bin, HOU Jing, WU Xu min, LI Xin xin. Numerical Simulation on Impedance Characteristics of Asymmetry Orifice in a Differential Surge Chamber[J]. Journal of North China Electric Power University. 2011, 38(4): 91-95. (in Chinese))
- [6] 巨江, 诸亮, 刘菁. 水电站水力过渡过程数值仿真的理论与实践[J]. 西北水电, 2009, 1(3): 1-6. (JU Jiang, ZHU Liang, LIU Jing. Numerical Simulation Theory and Practice in Hydraulic Transient of Hydropower Stations[J]. Northwest Hydropower, 2009, 1(3): 1-6. (in Chinese))
- [7] 陈方亮, 蔡付林, 耿亮, 姜成启. 多机组水电站调压室阻抗系数的三维数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 101-105. (CHEN Fang liang, CAI Fu lin, GENG Liang, JIANG Cheng qi. Three dimensional Numerical Simulation on Hydraulic Resistance Coefficient of Surge Chamber in Multunit Hydropower Plant[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 101-105. (in Chinese))
- [8] 陈方亮, 王凯, 张羽. 抽水蓄能电站调压室阻抗系数的三维数值模拟[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 101-105. (CHEN Fang liang, WANG Kai, ZHANG Yu. 3-D Numerical Simulation on Hydraulic Resistance Coefficient of Surge Tanks for Pumped Storage Plant[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 101-105. (in Chinese))
- [9] 郭杨. CFD 方法计算阻抗式调压室阻抗损失系数[J]. 江西水利科技, 2007, 33(3): 172-175. (GUO Yang. Calculation of Head Loss Coefficients of Throttled Surge Tanks By Means of Computational Fluid Dynamics. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2007, 33(3): 172-175. (in Chinese))
- [10] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004. (HAN Zhan zhong, WANG Jing, LAN Xiao ping. Simulation and Application Examples in Fluid Engineering Based on Fluent Software[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Fu jun. Computational Fluid Dynamics Analysis—The Principle And Application of CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 汪德燿. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG De yan. Computational Fluid Dynamics Analysis—The Principle And Application of CFD[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [13] S V Patanker, D B Spalding. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [14] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of the turbulent flows[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1974, 3(2): 269-289.