

水电站调压室内三维湍流场数值模拟

华富刚¹, 秦柳燕²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要 运用计算流体动力学方法(CFD)对某抽水蓄能电站尾水调压室进行了数值模拟。计算时选用适合调压室流动特性的 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,采用标准 SIMPLE 算法,离散格式采用一阶迎风格式。计算结果揭示了调压室内流道流场的速度及压力分布规律,并据此计算出调压室水头损失系数。将水头损失系数计算结果与水力模型试验结果进行比较,发现采用 CFD 方法计算得到的结果不论在变化规律上还是数值上均可达到与模型试验结果相当的精度,表明 CFD 方法可以应用于调压室的设计和優化中。

关键词 调压室 数值模拟 速度分布 压力分布 水头损失系数

中图分类号:TV732.5 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)05-0047-03

Numerical simulation of 3D turbulent flow in surge tanks of hydropower stations//HUA Fu-gang¹, QIN Liu-yan² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The method of computational fluid dynamics (CFD) was adopted for numerical simulation of tailrace surge tanks of pumped storage power stations. In the calculation, the Realizable $k-\epsilon$ turbulence model suitable for reflecting the flow characteristics in surge tanks was selected, and the standard SIMPLE algorithm and the first order upwind scheme were adopted. The calculated result reveals the distribution of flow velocity and pressure in flow channel in surge tanks, and thus, the coefficients of head loss of surge tanks were obtained. It is found that the calculated result of the coefficients of head loss by the CFD method is almost the same accuracy as those of model tests. Therefore, the CFD method can be used for design and optimization of surge tanks.

Key words: surge tank; numerical simulation; velocity distribution; pressure distribution; coefficient of head loss

具有有压长尾水道的抽水蓄能电站由于尾水道较长,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调压室。因此,尾水调压室设计的好坏会影响到水电站系统运行的安全性和稳定性。为了能设计出性能好、体型优、造价低的调压室,有必要对调压室内的流场进行研究,包括调压室内的流速分布、压力分布和水头损失等。

传统的研究流体运动规律的方法主要有两种:一种是模型试验研究;另一种是理论分析方法,利用简单流动模型假设,给出某些问题的解析解。前者耗费大、周期长;后者对于较复杂的非线性流动目前还有些无能为力^[1]。随着计算流体动力学(CFD)和计算机技术的快速发展,CFD 数值模拟方法正在逐步成为研究流场的一种重要手段。现在 CFD 方法已经被广泛应用于流体机械(如蜗壳、离心泵等)内

部流场的研究^[2],但对于水电站调压室流场的数值模拟在国内还不多见。

1 数值模拟

1.1 研究对象

本文运用 CFD 软件 FLUENT 对文献[3]中某抽水蓄能电站尾水调压室进行数值模拟。该调压室是有长连接管的阻抗式调压室,大井高 60.0 m,直径 10.0 m,连接管直径 4.3 m,连接管长 27.3 m,尾水洞直径 7.2 m。为了便于叙述,按水流方向将调压室中的流态分为两种:一种是两股水流汇合成一股水流,简称汇流;另一种是一股水流分成两股水流,简称分流。本文按分流与汇流各研究一种典型流态,如图 1 所示。

1.2 计算方法

本文采用有限体积法离散恒定的不可压缩 $N-S$

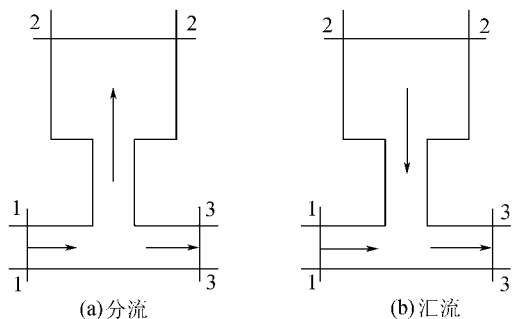


图1 调压室流态

方程,离散格式采用一阶迎风格式,压力速度耦合方式采用 SIMPLE 算法,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型。考虑到调压室的流动特性,经比较分析,最终选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型。该模型是对标准 $k-\epsilon$ 模型的改进,在模拟强旋流、弯曲壁面流动或弯曲流线流动时,效果比标准 $k-\epsilon$ 模型好。另外,所有方程都有与之相关的欠松弛因子,在迭代计算过程中为了使迭代尽快稳定收敛,可通过修改欠松弛因子来加快收敛速度^[4]。

1.3 基本控制方程

a. 连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

b. 动量方程 (Reynolds 时均 $N-S$ 方程):

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + F_i \quad (2)$$

其中 $-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$

c. k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

其中

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

d. ϵ 方程:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (4)$$

其中

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$$

$$\eta = (2 E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon} \quad E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中 δ_{ij} 为 Kronecker 符号,当 $i = j$ 时 $\delta_{ij} = 1$,当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij} = 0$; G_k 为关于平均流速梯度的湍动产生项; μ_t

为湍动黏度,其形式仍然为 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$,但 C_μ 不是常数,而是随应变率和旋转率变化的量^[5]; C_1, C_2, σ_k 和 σ_ϵ 为系数, $C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$ 。

1.4 计算区域

图2所示的是在 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 中进行网格划分后的非结构网格及计算区域。在计算水头损失时控制断面应选在流速相对均匀的位置,尽量避开动能分布不均匀区。本文中3个断面(如图1所示)的选择分别为:断面1-1距连接管中心线35.0m,断面3-3距连接管中心线50.0m,断面2-2距尾水管中心线65.9m。网格划分采用 TGrid 技术,考虑到计算机内存及计算速度,网格间隔定为0.8mm,网格总数约为10万个。

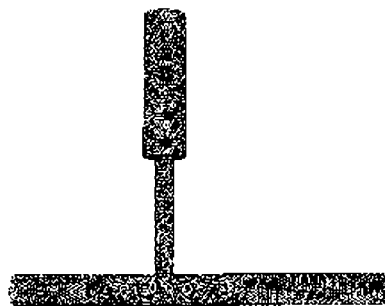


图2 计算区域及计算网格

1.5 边界条件

进口边界采用速度入口边界条件,速度按断面平均流速给出,进口界面上的湍动能 k 和湍动耗散率 ϵ 分别由下列经验公式给定:

$$k = 1.5 \bar{u} l \gamma$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{l}$$

式中: l 为湍流强度, $l = 0.16 (Re_{D_H})^{-1/8}$, Re_{D_H} 为按水力直径 D_H 计算得到的雷诺数; l 为湍流长度尺度, $l = 0.07 L$, 对于充分发展的湍流, L 可取水力直径。

出口边界采用自由出流边界。在采用这种边界条件时只需给出指定出流边界上流体流出量的权重(占总流出量的百分比)。计算时,采用完全发展流动假设,即出流面上的流动情况由区域内部外推得到,且对上游流动没有影响。本文在处理调压室边界时将它视为有压管道边界,故其边界条件采用出流边界条件。

湍流解的固壁上使用无滑移条件: $u = v = w = 0$ 。由于 $k-\epsilon$ 模型及其改进型均是针对充分发展的湍流才有效的,而近壁区的流动雷诺数较低,湍流发展并不充分,在这个区域内不能使用 $k-\epsilon$ 模型进行计算。计算时可采用2种处理方式:①壁面函数法;②低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型。这里采用壁面函数法。

2 计算结果及分析

机组负荷变化过程中的调压室水头损失系数 λ_0 大小既与流量比 q_{ij} 有关 ($q_{ij} = Q_i/Q_j$, Q_j 为 j - j 断面处的总流量, Q_i 为 i - i 断面处的分流量), 又与调压室中的水流状态相关。这里总流量为 $Q_j = 161.56 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

通过计算可得: 分流时, 在调压室进出口处流动较均匀, 调压室底部流道没有出现漩涡。在水流流进调压室大井时, 在大井底部四周发生了回流。随着分流比 Q_2/Q_1 的增大, 回流现象有所加剧并伴有漩涡产生, 连接管底部靠进口一侧也发生了轻微回流。汇流时, 调压室进出口流动较均匀, 大井内流态平稳, 没有产生回流和漩涡。当汇流比 Q_1/Q_3 较小时, 调压室底部流道(连接管附近)靠进口一侧局部出现了回流和漩涡现象, 但随着汇流比的增大上述现象逐渐消失。对应于每个分流比或汇流比, FLUENT 可以监测每个测压断面的压强收敛情况, 并显示计算完成时的整个调压室的压力分布情况。

上述计算结果均可以通过 FLUENT 的后处理功能以图像的形式显示, 例如显示速度矢量图、压力分布图等。具体的图像生成技术可参考文献 [4]。

根据计算得到的对应于不同流量比的流速分布和压力分布, 就可算出调压室的水头损失系数, 计算公式如下:

$$\Delta H_{ij} = H_i - H_j = \xi_{ij} \frac{v^2}{2g} \tag{5}$$

式中: i, j 为断面的位置, 取 1, 2, 3 (如图 1 所示); H_i, H_j 分别为测量断面 i - i 和 j - j 的总水头; ξ_{ij} 为断面 i, j 之间的阻抗损失系数; v 为总流量所对应的流速。

将用 CFD 方法计算得到的水头损失系数与试验值作比较, 如图 3、图 4 所示。

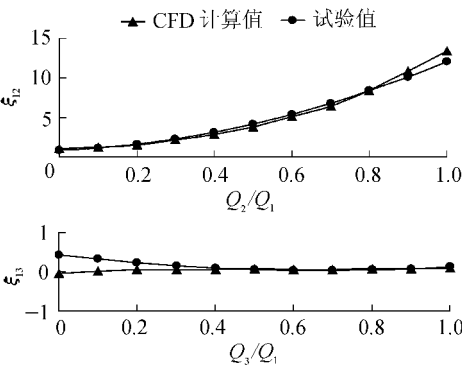


图 3 分流情况下水头损失系数随分流比的变化

从图 3 可以看出: 在分流时 CFD 计算值与试验值基本吻合。当分流比 Q_2/Q_1 小于 0.7 时两者吻合较好, 随着分流比 Q_2/Q_1 的增大, 两者的差值有

所增加, 但在数量上增加不大, 相对偏差在 20% 以下。从图 4 可以看出: 汇流时 CFD 计算值与试验值总体上吻合, 但当汇流比 Q_2/Q_3 大于 0.7 时 ξ_{23} 的计算值与试验值的差值相对比较大, 且保持在 20% 以下, 其原因可能是试验误差或计算误差所造成的。

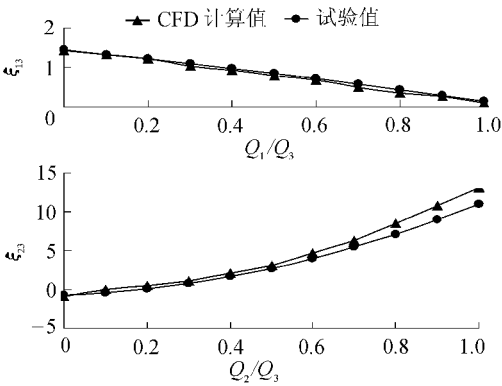


图 4 汇流情况下水头损失系数随汇流比的变化

3 结 论

本文应用 CFD 方法对某抽水蓄能电站尾水调压室内三维湍流场进行了数值模拟, 得出调压室内的流速分布、压力分布, 并据此算出调压室水头损失系数。计算过程表明: 只要在计算前详细了解流动特性, 合理选择计算模型和计算精度, 正确处理边界条件, 划分足够计算网格并保证计算结果收敛, CFD 数值模拟计算的结果能够达到与试验结果相同的可靠程度。设计者可以根据计算结果分析调整相关设计参数, 从而实现调压室的优化设计。由于 CFD 方法方便快捷, 耗费比模型试验小得多, 今后可将其作为调压室设计和优化的一种手段。

参考文献:

[1] 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.
[2] VU T C, SHYY W. Performance prediction by viscous flow analysis for francis turbine runner [J]. J of Fluid Engineering, 1994, 116: 116-120.
[3] 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(4): 40-42.
[4] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[5] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows model development and validation [J]. Comput Fluids, 1995, 24(3): 227-238.

(收稿日期: 2006-06-30 编辑: 高建群)