

用三维 VOF 模型对横置圆筒绕流流场的数值模拟

李利荣^{1 2} 文 恒¹ 王福军³ 周春生⁴

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院 ,内蒙古 呼和浩特 010018 ;
2. 内蒙古水利水电勘测设计院 ,内蒙古 呼和浩特 010018 ;
3. 中国农业大学水利与土木工程学院 ,北京 100083 ;4. 内蒙古财经学院 ,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要 :以物理模型试验为基础 ,利用 VOF 模型与 RNGk-ε 湍流模型相结合的方法 ,对横置圆筒绕流流场进行三维数值模拟。通过建立模型 ,分析不同时刻计算域内的相体积分布及其圆筒周围速度场和压力场的分布 ,并将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比 ,结果表明 ,模拟值与试验值吻合较好 ,且其结果符合流体动力学基本理论 ,并说明 VOF 能够有效模拟水流自由表面 ,适用于闸门等水工建筑物内水流流动的数值模拟。

关键词 :自由表面 ;VOF 模型 ;横置圆筒 ;数值模拟

中图分类号 :TV131.2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2009)S1-0024-04

洪水是水资源的重要组成部分 ,然而 ,多泥沙和高含沙洪水资源由于其自身的特殊性 ,在对其利用的过程中存在着一系列难题。水力自动滚筒闸门是一种放置在溢流坝顶 ,利用水压力产生的推动力矩与闸门自重以及闸门配重产生的回复力矩进行自动启闭 ,实现水流的自动调节、运行和排沙的新型水力自动闸门^[1] ,该种闸门的应用可提高河流中多泥沙和高含沙洪水资源的利用率 ,由于该种闸门的水力特性还没有被充分研究 ,故笔者对其圆筒闸体表面的水压力进行研究。

由于使圆筒闸体滚动开启的动力是作用在闸体上水动力的合力 ,故寻求作用在圆筒闸体表面动水压力的计算方法是设计水力自动闸门的关键。为此 ,采用处理自由表面流动的方法对横置圆筒不同开度和上游水深时圆筒表面的动水压力分布进行三维数值模拟。

1 VOF(volume of fluid)模型

横置圆筒绕流流场是典型的三维水气两相流 ,为了捕捉交界面 ,准确了解横置圆筒周围的流场状况 ,需对自由表面进行跟踪计算。目前处理带自由表面流动的主要方法有刚盖假定法、水位函数法、MAC 法、Lagrangian 法、VOF 法、SPLASH 法等^[2] ,其

中 ,VOF 法通过求解一个流体体积函数的对流输运方程来捕捉运动的自由水面 ,简便易行 ,能方便地处理自由表面的大变形和自由表面的拓扑结构发生变化等复杂情况 ,文献 [3-6] 等均通过 VOF 模型对自由表面跟踪计算 ,均得到了理想的结果 ,笔者亦采用 VOF 方法对自由表面进行跟踪计算。

1.1 模型基本思想

VOF 模型对自由表面的跟踪计算通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的各种流体体积分数来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体 ,将自由面看成不同相流体的界面 ,从而使“自由面”转化为“内流面” ,不再作为边界面 ,可以避免处理“动边界”带来的数学困难。其流体的体积分数就决定自由表面的位置。VOF 方法将混合流体中一种流体的流动视为主流态 ,其他流体的流动视为辅流态。对每种辅流态 ,在每一计算单元内定义 1 个体积函数 ,而且在每一控制体中所有流态的体积函数为 1。在单元中 ,如果用 α_q 表示第 q 相流体的体积函数 ,那么就有以下 3 种情况 :

$$\begin{cases} \alpha_q = 0 & \text{单元体内没有第 } q \text{ 相流体} \\ 0 < \alpha_q < 1 & \text{单元内存在流体之间的界面} \\ \alpha_q = 1 & \text{单元体内充满第 } q \text{ 相流体} \end{cases}$$

对于水气两相流 ,水一般作为不可压缩流体 ,其

体积函数的输移扩散方程为

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

式中： t 为时间； u_i 和 x_i 分别为速度分量和坐标分量； $\sum_{q=1}^n a_q = 1$ 。

通过求解方程 (1) 来对水气界面进行跟踪计算。运输方程中的特性参数在每一控制体中将由几种流态的组合来表示，对于水气两相流，分别用下标 w 和 a 表示，单元的密度 ρ 可表示为

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (2)$$

其他特性参数均以此方法计算。

1.2 模型基本方程

笔者采用的湍流模型与标准 $k-\epsilon$ 模型相比，在 ϵ 方程中增加了反映主流时均应变率的项，间接改进了 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型，且该湍流模型在一定程度上考虑了湍流的各向异性效应，特别是对流线弯曲流动的模拟。该模型的基本控制方程^[7]如下：

连续方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

动量方程
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (4)$$

k 方程
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \quad (5)$$

ϵ 方程
$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中
$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

式中： ρ 为容积比率加权平均的密度； μ 为分子黏性系数； p 为修正的压力； μ_t 为湍动黏度； k 为湍动能； ϵ 为湍动能耗散率； G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项。

整个计算域内应采用同一个动量方程，由于求解的速度场包括各个相，故式中 ρ 和 μ 均按各相的体积分数计算，按相进行体积平均处理。

在每一控制体积中，上述各方程中的流体物理参数均为各相体积加权平均值。模型中其他经验常数分别为： $C_\mu = 0.0845$ ， $C_{1\epsilon} = 1.42$ ， $C_{2\epsilon} = 1.68$ ， $\alpha_k =$

1.39， $\alpha_\epsilon = 1.39$ 。

2 离散格式及数值计算方法

本模型研究中采用的数值离散方法为有限体积法(FVM)^[8]，网格划分使用交错网格法，时间差分采用全隐式格式。离散方程组的求解采用 ADI 法，压力-速度的耦合采用 PISO^[9]算法。为了加快计算的收敛，引入了超松弛迭代因子，当独立变量的最大无量纲残差小于 0.001 时即为收敛。

3 边界条件及其初始条件

进口处由物理模型实测流量和上游水深算出平均速度 u ， $v = w = 0$ ；出口处给定出口压强为 1 个大气压，其余参数按出口边界条件。圆筒表面和水槽的固壁边界都定义为无滑移边界条件，对于近壁区流动，采用标准壁面函数来模拟，壁面上采用无滑移条件。湍动能 k 以及湍动能耗散率 ϵ 由以下经验公式计算：

$$k = \frac{3}{2} (uI)^2 \quad \epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{1.5}}{l}$$

其中 $I = 0.16 \text{Re}^{-1/8}$ ， $l = 0.07L$

式中： u 为断面流速； I 为湍流强度； l 为湍流长度尺度； L 为关联尺寸，对于充分发展的湍流，可取 L 等于水力直径。

整个初始流场中充满空气，水从入口流入，通过瞬态时间相关的模拟，水流就会从入口流入水槽。通过对体积分数的迭代求解对水气界面进行跟踪。

4 计算模型

计算的物理模型是以文献 [10] 中物理模型试验为基础，为了保证流场充分发展，在水槽上游取距圆筒中心 300 cm 处为水流入口，在圆筒水槽下游，取距圆筒中心 200 cm 处为出口，以保证流场达到稳定。在圆筒下游距圆筒中心 30 cm 处将闸底板降低 30 cm，以保证圆筒不受下游水位的影响，出流条件为自由出流。模型中其他尺寸见计算的物理模型示意图(图 1)。

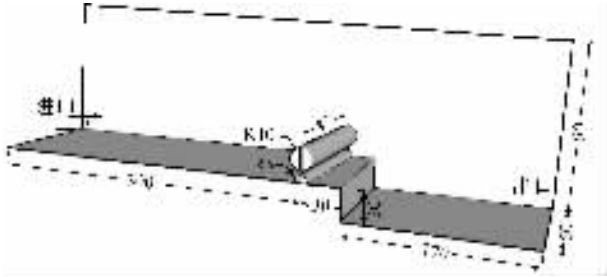


图 1 计算模型及其边界条件示意图(单位:cm)

5 计算结果及分析

5.1 相体积分布

为了了解不同时刻水流的流动情况,在筒底开度 $h = 2.00\text{ cm}$ 、上游水深 $H = 32.04\text{ cm}$ 的工况下截取了圆筒中央横断面,以显示不同时刻该断面的相体积分布。图 2 给出了断面不同时刻水流绕流圆筒闸体的流动情况,图 2(a)(b)(c)(d)分别对应 t 为 2.24 s 、 6.40 s 、 32.32 s 和 56.00 s 时水和气的体积分数。由图中可以看出水流绕流圆筒闸体的流动过程。初始状态为 $t = 0$ 时刻,水槽内无水,水由入口流入,当 $t = 2.24\text{ s}$ 时水舌前锋已流过圆筒底部,当 $t = 6.40\text{ s}$ 时由于筒底开度小,筒底过流流量小于进口流量,故圆筒上游水流出现壅高,水位逐渐升高;当 $t = 32.32\text{ s}$ 时上游水位高于筒顶,圆筒顶部开始过水,并随着计算时间的增加,筒顶水深逐渐加大;当 $t = 56.00\text{ s}$ 时进口和出口流量达到平衡,筒顶水深保持不变,水流达到稳定状态,与实际流动过程相符。由此可知,VOF 方法可以很好地实现自由水面的跟踪计算,有效生成水气的交界面,适合于带自由表面横置圆筒绕流流场的数值模拟。

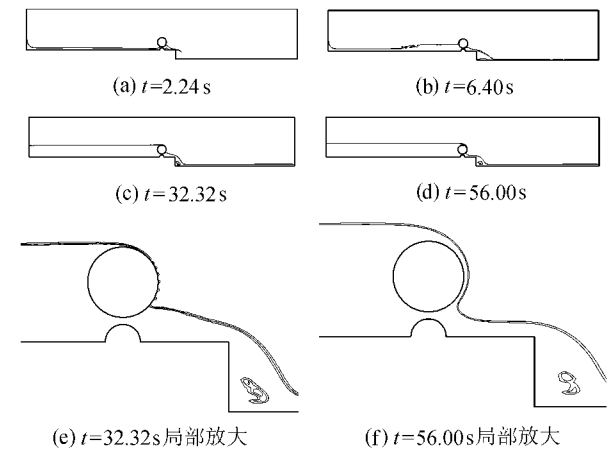


图 2 不同时刻流场相体积分布

5.2 速度场

图 3 为筒底开度 $h = 2.00\text{ cm}$ 、上游水位 $H = 32.04\text{ cm}$ 时计算所得的圆筒附近速度矢量。由图 3 可知,圆筒下方的速度最大,在横置圆筒前方与流速垂直方向处流速降到最小,即压能增加到最大。随之液体质点改变原来的方向,沿圆筒壁面向上和向下继续流动,流速逐渐加大。原因是液流沿圆筒壁面流动时能量由压能逐渐向动能转换,由伯努利方程可知,当流速增加到最大时压能降低。该结论与流体力学理论相吻合。

5.3 压力场

图 4 为筒底开度 $h = 2.00\text{ cm}$ 、上游水位 $H = 32.04\text{ cm}$ 时计算所得的圆筒表面压力分布。由图 4

可知,该工况时,沿圆筒迎水面向下的压力先增大后减小,在圆筒底部有负压产生,原因是筒底开度较小,流速加大,由于壁面弯曲,流体与壁面发生脱离,故在圆筒最下方壁面处有负压产生。其水力学现象和文丘里流量计的喉管段相同^[11]。

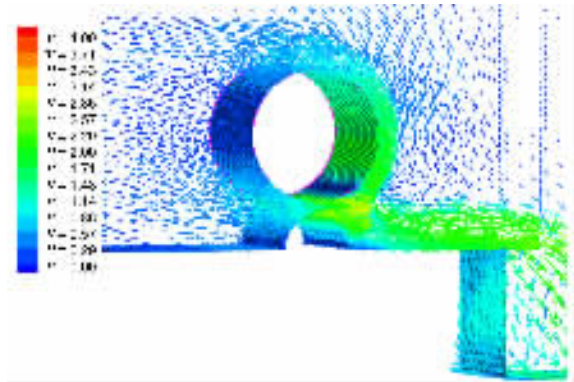


图 3 圆筒附近速度矢量(单位: m/s)

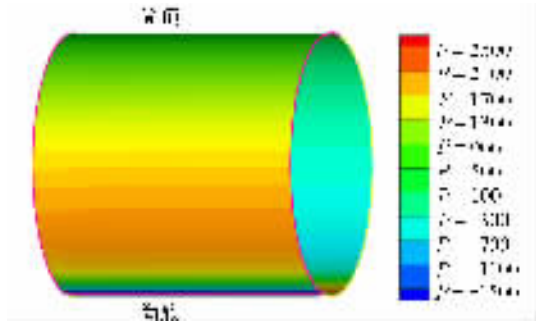


图 4 圆筒表面压力分布云图(单位: Pa)

为了与文献[10]中的物理模型试验结果进行对比,文中对筒下开度一定($h = 2.00\text{ cm}$)、不同上游水深时的各工况进行数值模拟,并且取圆筒中央横断面(即模型试验中安装压力传感器的断面)的时均压力分布与试验值进行比较。图 5 为不同上游水深时动水压力模拟值与试验值对比。图中 1~5 分别为模型试验中所布置的测压点编号,它们与铅直向上方向的夹角 ψ 分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° 。表 1 给出了各测压点实测和模拟所得的时均压力值。由图 5 可知,模拟值和实测值分布规律近似,由筒顶沿壁面向下呈先增大、后减小趋势。在 1~4 号测点之间,即 $0^\circ < \psi < 145^\circ$ 区域,模拟值和试验值吻合较好;在 4 号点和 5 号点之间,即 $145^\circ < \psi < 180^\circ$ 区域,模拟值与试验值相差较大。原因是该区间流场变化梯度较大,模型试验中由于圆筒尺寸的局限,在该区间没有布置传感器,该区域数据为 4 号点和 5 号点实测数据插值所得。由图 5 和表 1 可知,在圆筒最下方 5 号点计算所得的负压比实测值大,这是由于模型试验中为了排出圆筒最下方 5 号测压点压力传感器空腔内的空气,在传感器凹孔处连接 1 根通气管所致。其试验成果见文献[10]。

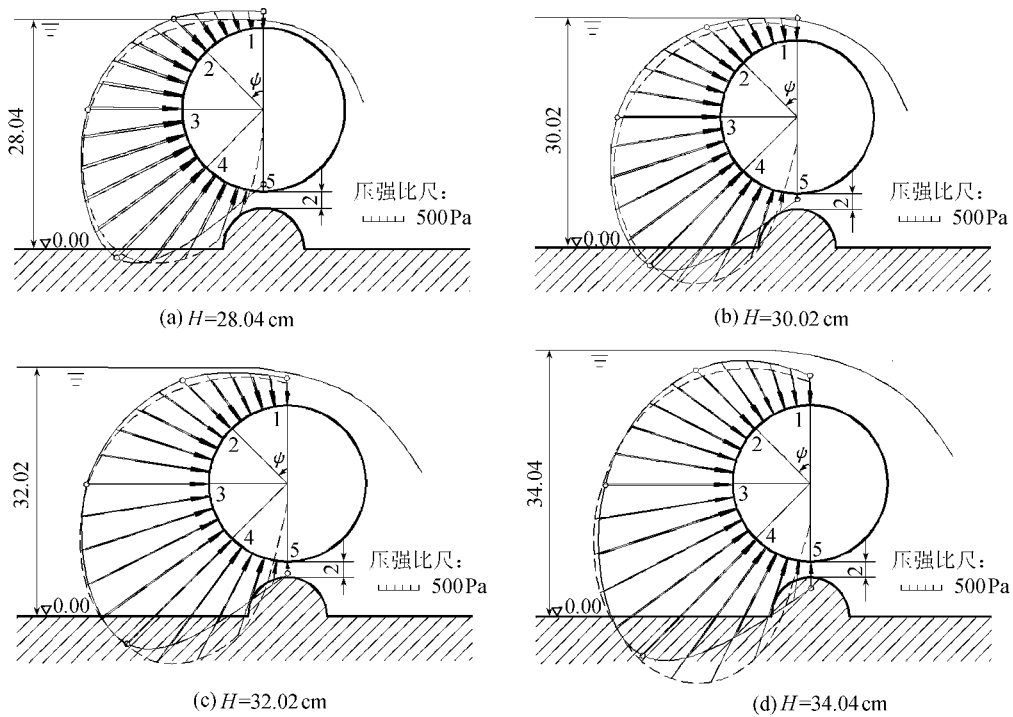


图 5 不同上游水深时的时均压力试验值和模拟值对比

表 1 不同上游水深时各测压点实测和模拟所得时均压力值

		Pa							
测压点	$\psi / (^\circ)$	$H = 28.04 \text{ cm}$		$H = 30.02 \text{ cm}$		$H = 32.02 \text{ cm}$		$H = 34.04 \text{ cm}$	
		试验值	模拟值	试验值	模拟值	试验值	模拟值	试验值	模拟值
1	0	200	123	291	195	354	303	375	338
2	45	575	468	762	601	926	780	1059	922
3	90	1215	1111	1356	1294	1548	1504	1735	1646
4	135	1556	1511	1733	1738	1904	1969	2088	2100
5	180	-89	-851	71	-756	160	-713	403	-392

6 结 语

采用三维 VOF 模型和 RANS 法相结合对横置圆筒绕流流场进行数值模拟,结果表明计算所得圆筒表面时均压力与实测值吻合较好,并且该模型的应用可以很好地模拟出横置圆筒绕流流场水面、流速、水压力等的变化形态。验证认为 VOF 方法用于横置圆筒绕流流场中自由表面的跟踪计算中是比较可行的。

计算结果表明,圆筒表面的时均压力沿圆筒壁面向下先增大、后减小,在圆筒的最下方产生负压,故形成空腔。随着上游水位的增加,各点压力逐渐增大。且计算所得圆筒表面速度分布也符合能量守恒及其理论分析。其计算结果对水力自动滚筒闸门的优化设计具有重要意义。

参考文献:

[1] 文恒,牟献友,赵宇明.多泥沙和高含沙洪水资源的利用

[C]/黄河水利科学研究院.第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.郑州:黄河水利出版社,2005:1155-1162.

[2] 戴会超,槐文信,吴玉林,等.水利水电工程水流精细模拟理论与应用[M].北京:科学出版社,2005.

[3] Dong Zhi-yong, LEE JOSEPH Hun-wei. Numerical simulation of skimming flow over mild stepped channel[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(3): 367-371.

[4] CHEN Qun, DAI Guang-qing, LIU Hao-wu. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 127(7): 683-688.

[5] 李玲,陈永灿,李永红.三维 VOF 模型及其在溢洪道水流计算中的应用[J].水力发电学报,2007,26(2): 83-87.

[6] 李福田,刘沛清,马宝峰.高拱坝宽尾墩三维流场数值模拟[J].水科学进展,2005,16(2): 185-188.

[7] 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: 7-12.

[8] MASHAYEK F, ASHGRIZ N. A hybrid finite element volume of fluid method for simulating free surface flows and interfaces[J]. International Journal of Numerical Method in Fluids, 1995, 20(10): 1363-1380.

[9] CHENG Xiang-ju, CHEN Yong-can, LUO Lin. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways[J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2006, 49(6): 674-684.

[10] 李利荣,文恒,王福军,等.水力自动滚筒闸门动水压力的模型试验[J].水利水电科技进展,2009,29(1): 26-30.

[11] 吴持恭.水力学[M].北京:高等教育出版社,2004: 85-87.

(收稿日期 2008-09-27 编辑 高建群)