

闸下应用废旧轮胎消能防冲的三维数学模型建立

史国庆¹, 文恒²

(1.咸阳职业技术学院, 陕西咸阳 712046; 2.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)

摘要: 闸下海漫段冲刷是水利工程中经常出现的问题, 国内外许多学者对防冲进行了大量的研究, 研究表明采用废旧轮胎对海漫段进行加糙, 可以起到减少冲刷的作用。通过对不同湍流模型、数值计算方法、网格尺度、壁面处理方法进行对比分析, 最终采用了RNG k-ε湍流模型、PISO算法, 将整个流场划分为67.27万网格, 选择标准壁面函数进行壁面处理对海漫加糙后的流场进行模拟计算。计算结果与模型试验实测结果吻合较好, 说明模型能更好地用于加糙后的流场模拟计算。

关键词: 废旧轮胎; 数值模拟; RNG k-ε湍流模型; PISO算法

中图分类号: TV653+.7

文献标识码: A

文章编号: 94047-(2015)01-049-04

近年来, 计算机的迅速更新及功能的日益强大, 使得数值计算方法得到迅猛发展, 愈来愈多的工程问题借助数值计算来完成或者验证^{[1][2]}。虽然模型试验研究还是不能取代的重要研究手段, 但是某些方面能达到或者接近试验研究的结果。为此通过对不同网格数量、不同计算模型及不同的边界条件处理方法所得的模拟结果和物理模型试验结果进行比较, 选择出合适的计算方法、建立起合理的模型并进行数值模拟计算。

1 控制方程及湍流模型

该流场为粘性不可压湍流, 其控制方程可以由连续方程(1)和动量方程(2)来表示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + S_i \quad (2)$$

目前, 对于粘流模型, 工程中应用最为广泛的是双方程模型, 双方程模型中最基本的是标准k-ε模型, 该模型引入了湍动能k方程和耗散率ε方程。该方法简单、稳定、经济, 并在较大工程范围内具有足够的精度。但其缺点是在有回流、大曲率和强旋度等情况下, 不能很好地预测湍流特性。为

此, 人们提出了两种修正的k-ε模型: RNG k-ε模型和Realizable k-ε模型^[3]。RNG k-ε模型和Realizable k-ε模型继承了标准k-ε模型简单、经济的优点, 同时从不同的角度对标准k-ε模型进行了修正。加糙后流场的数值模拟计算中分别采用了3种湍流模型进行分析。

本文采用Hirt和Nichols提出的VOF模型对自由表面进行跟踪计算, 处理水和气的交界面^[4]。该模型涉及到多相流理论, 但并没有采用复杂的多流体模型, 而是引入简单的单流体模型解决问题。因此, 对于水气两相流, 假设在同一单元中, 水、气体、水气混合体具有相同的速度, 但它们的体积分数在整个流场中都作为单独变量。在每个单元中, 水和气的体积分数之和为1。与真正的单流体相比, 就多出一个体积分数变量。只要流场中各处水和气的体积分数已知, 所有其它水和气共有的未知特性参数均可用体积分数的加权平均值来表示。

为研究不同湍流模型在加糙后流场中的适用性, 本文分别采用标准k-ε模型、RNG k-ε模型和Realizable k-ε模型对布置七排加糙体方案下, 流量为310m³/h时的流场进行了数值模拟计算, 计算结果见图1。为了分析各湍流模型模拟结果和物理模型试验实测值的吻合程度, 采用模拟值和模型试验实测值的均方差进行比较, 其结果见表1。

收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50169001); 咸阳职业技术学院2013年院级科研基金项目(2013KYB05)。

作者简介: 史国庆(1983—), 男, 陕西咸阳人, 讲师, 博士。主要从事水利工程消能防冲技术方面研究。

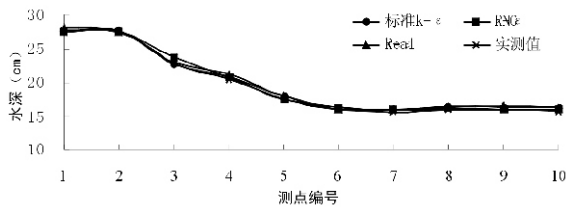


图1 不同湍流模型计算结果

为检验各模型模拟值与模型试验实测值的吻合程度, 采用均方差RMSE定量分析^[5]:

表1 不同湍流模型计算值与实测值均方差比较

加糙方案 m^3/h	标准 $k-\epsilon$ 模型	RNG $k-\epsilon$ 模型	Realizable $k-\epsilon$ 模型
七排加糙体 ($Q=310$)	0.36	0.32	0.40

由图1可知, 三种湍流模型模拟所得水面线差异不明显, 且都接近于模型试验实测结果。但通过表3可知, 分别采用标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和Realizable $k-\epsilon$ 模型计算所得的结果与模型试验实测值的均方差分别为0.36、0.32和0.40, 说明采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型更贴切实际水流形态。因此, 选用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对流场进行模拟计算。

2 计算域及网格划分

以物理模型为依据进行建模, 且为了让流场达到充分发挥, 对加糙段前后分别取2.0m作为计算域, 该流场计算域如图2所示。

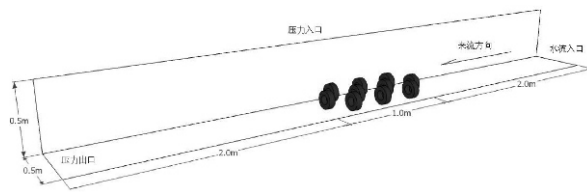


图2 计算域及边界条件

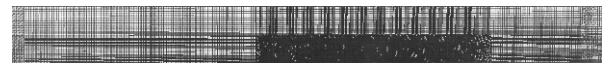
离散所使用的网格有结构化网格和非结构化网格两种。3D网格中, 结构网格为六面体单元, 非结构网格有四面体单元和五面体单元。在同样节点数的情况下, 结构化网格占用的存储空间相对较少, 计算速度较快, 并且在某种条件下可使用加速算法, 而后者反之。但结构化网格对实体模型的几何拓扑结构要求较为严格, 适应性较差, 网格划分耗时多, 而非结构化网格较为灵活, 对实体模型的适应性较强, 网格划分相对容易^{[6][7]}。在计算域

$$RESE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{mi} - Z_{si})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (3)$$

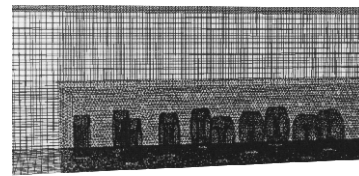
式中: Z_{mi} 、 Z_{si} 分别为各水位测量点模拟结果和实测结果, n 为物理模型试验时水位测量点的数量。根据式(3)计算出均方差误差, 其值越小, 表示模拟结果与实测值的吻合程度越好, 选用的湍流模型越优。

中, 由于加糙体附近模型结构较复杂, 受拓扑结构的限制, 使用结构化网格划分比较困难, 所以在加糙段区域采用非结构化网格对计算域进行离散。在加糙段上、游水槽部分采用规则四边形网格进行离散, 并且, 对加糙段的网格进行了加密。

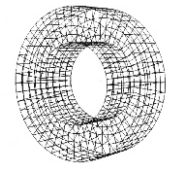
采用有限体积法离散时, 网格越粗计算所达到的收敛精度就越低, 甚至有时根本就无法收敛。网格尺度的选取和时间步长的设置跟数值模拟的对象和对象内湍流复杂程度有关。时间步长越小需要的计算网格尺度越小, 而计算网格尺度小, 则网格数量多, 所耗费的计算资源和时间就增加。



(a) 流场整体网格图



(b) 加糙段网格放大图



(c) 轮胎网格图

图3 计算模型网格

为检测不同网格尺度(数量)下, 数值模拟结果和模型试验结果的吻合程度, 本文采用三种网格尺度进行离散, 然后进行数值模拟。模拟使用电脑参数: CPU(8× Intel(R) 2.33GHz); 内存(3.25GB), 表4列出了三种网格尺度情况下的网格数量、选取的最大时间步长、迭代100步所需要的计算时间以及计算流体1s流动所需要的总时间。

表2 不同网格数量计算所用时间比较

网格数量 (万)	选用最大时间步长 (s)	迭代 100 步所需计算时间 (h)	计算 1s 流动时间所需的总时间 (h)
11.23	0.002	1.4	7.0
67.27	0.001	6.1	61.0
451.92	0.0005	25.4	508.0

通过表2比较可知,随着网格的加密,计算所用时间明显增长。图4列出以上三种网格尺度时的模拟结果,通过模拟结果可以得出网格数量分别为11.23万、67.27万和451.92万时,模拟值与实测值的均方差分别为0.38、0.20、0.15,说明随着网格的加密,模拟计算值与实测值的均方差减小并不多,由于该计算为非定常流动,每一工况计算所需时间较长,网格数量为67.27万的模型与451.92万的模型计算值相差甚微,而所需计算时间远大于67.27万所需时间,因此选用67.27万网格数量的模型进行模拟计算。

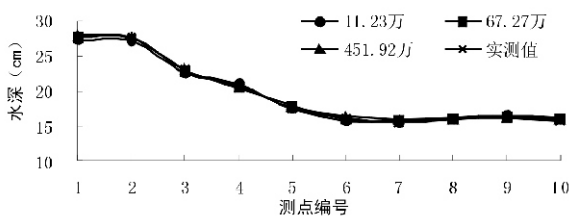


图4 不同网格数量模拟结果比较

3 数值计算方法

采用有限体积法对瞬态控制方程进行离散,非耦合隐式方程进行求解,对流项用二阶迎风格式,压力项离散采用Body Force Weighted格式^[8],利用PISO算法实速度和压力之间的耦合计算。原因是由于PISO算法与SIMPLE算法相比,在每时间步内的计算精度均高于SIMPLE和SIMPLC算法,减少了收敛所需CPU的时间使其更适用于非定常流动的计算。此外,PISO算法还增加了网格偏斜修正,使非交网格获得与正交网格一样的精度。

求解过程是先对一个变量在计算域中的每个控制体的离散方程进行求解,得出变量在整个计算域的值,然后再在全场求解另一个变量。由于控制方程本身是非线的,并且相互影响,因此,要获得收敛解,必须进行迭代求解。流场瞬态迭代计算的收敛标准为 1.0×10^{-3} ,每一个方程都达到收敛标准后

再进行下步的迭代计算。计算采用的时间步长为 1.0×10^{-3} s。

4 边界条件及初始条件

计算域边界条件如图3所示,在加糙段上游2.0m处的断面设为进口边界,该进口采用速度进口,分为两部分,上半部分为空气进口,设为压力边界条件;下半部分为水进口,设为速度边界条件。

出口设在加糙段上游2.0m处,设为压力出口。由于出口水流为自由出流,与大气相通,故可认为出口压力为大气压值。

所有的气体边界都定义为压力边界,该边界条件适用于边界压力已知,但边界上的通量未知的情况。气体边界处压力都为大气压,但气体流入或流出边界的流量未知,因此,采用压力边界。

整个水槽的壁面、底面和加糙体表面都为固体边界,设为无滑移边界条件,即时均速度和脉动速度的各个分量均为0。

在初始流场中,设整个初始流场中充满空气,水从水入口流入,通过瞬态相关的模拟,水流就会从水入口流入水槽。对于速度场,气体的初始速度都为零,水的初始速度与水入口速度相同。然后通过对方积分数进行迭代求解,生成水气交界面。对于紊流参数,如湍动能 k 和湍动耗散率 ε 的初始值都采用以下公式计算^{[9][10]}:

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{3}{2}(ul)^2 \\ \varepsilon &= C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, l 为湍流强度; u 为断面平均速度; l 为湍流长度尺度,一般取 $l=0.07L$,对于充分发展的湍流,可取 l 等于水力筒径; C_{μ} 取0.09。

考虑到各壁面处理方法对模拟计算结果的影响,图5为RNG $k-\varepsilon$ 模型结合标准壁面函数、非均

衡壁面函数、增强型壁面处理三种不同壁面函数处理方法的数值模拟结果。

从图5可以看出,采用不同壁面处理方法模拟所得各点水位模拟值与实测值均比较接近,且不同壁面处理方法对计算结果的影响很小。为检验不同壁面函数处理方法模拟计算值与实测值的差异,文中采用均方差进行比较,采用标准壁面函数、非均衡壁面函数、增强型壁面处理三种壁面处理方法计算所得模拟值与实测值的均方差分别为0.32、0.38和0.41。因均方差越小,精度越高,故标准壁面函数进行壁面处理的模拟结果精度相对较高。模拟计算选择标准壁面函数进行壁面处理。

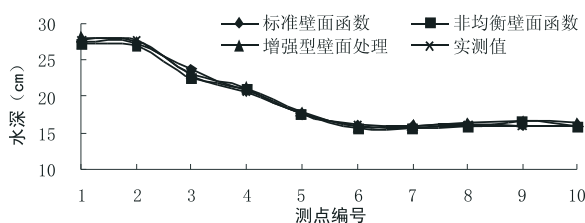


图5 不同壁面处理方法模拟结果比较

5 结语

本文建立了使用废旧轮胎对海漫段加糙后流场中水流输运三维数学模型,给出了三维模型建立的原理,并通过比较与验证数值模拟的各个环节,说明该模型建立正确合理。该模型能够较为合理地计算

模拟出流场中各点自由液面、三维流速等,该三维数学模型的建立为找出使用废旧轮胎消能防冲的机理奠定了基础。

参考文献

- [1]张生昌,张玉林,方志明等,基于CFD的球阀三维流场数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,12(2):157-161.
- [2]李志勤,李洪,李嘉,等.溢流丁坝附近自由水面的试验研究与数值模拟[J].水利学报,2003(8):53-57.
- [3]傅德薰.流体力学数值模拟[M].北京:国防工业出版社,1993.
- [4]Hirt C W,Nichols B D. Volume of fluid(VOF)method for the dynamics of free boundaries[J].J.Comput. Phys., 1981,39:201-225.
- [5]李利荣.自动滚筒闸门水力学特性的试验研究与数值模拟[D].呼和浩特:内蒙古农业大学博士学位论文,2009.
- [6]陈群,戴光清,刘浩吾.带有曲线自由水面的阶梯溢流坝面流场的数值模拟[J].水利学报,2002,20(9):20-26.
- [7]贾文浩,胡春光,郭良平,等.近壁面网格尺寸对湍流计算的影响[J].北京理工大学学报,2006,26(5):388-392.
- [8]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(3):185-188.
- [9]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.
- [10]张廷芳.计算流体力学[M].大连:大连理工大学出版社,2007.

[责任编辑、校对:魏惠强]

Formulation of Three Dimensional Mathematical Model of Scrap Tires in Energy Dissipation and Erosion Control under Sluice

SHI Guo-qing¹, WEN Heng²

(1.Xianyang Vocational Technical College, Xianyang, China 712046; 2.Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot,China 010018)

Abstract: Erosion is a recurrent problem in water conservancy projects, domestic and foreign scholars have gained many valuable experiences on the studying of erosion under the sluice. The results show that application of scrap tires had become an effective approach to increase the roughness of apron. By comparison and analysis on the different turbulence models, numerical methods, grid scale, wall surface methods were analyzed. The results show that Using the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, PISO algorithm, the whole flow field divided into 672700 grids, wall functions are used to deal with the boundary condition, calculated the flow field of scrap tires in energy dissipation and erosion control under sluice. The calculation results are well agreed with the model test results, indicating that the model can be used to the flow field.

Key words: scrap tires; RNG $k-\varepsilon$ turbulence model; Numerical simulation; PISO Algorithm