

# 闸下应用废旧轮胎消能防冲数值模拟结果验证

史国庆

(咸阳职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 针对流体计算软件Fluent选用不同网格数、不同收敛精度、不同湍流模型、不同流场计算方法对数值模拟结果的影响。采用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。通过对比分析, 计算结果与模型试验实测结果吻合较好, 说明使用Fluent软件数值模拟简洁、高效, 能获得理想的数据成果, 能更好地用于海漫段加糙后的流场模拟计算研究。

**关键词:** 废旧轮胎; 消能防冲; 数值模拟; RNG k-ε 湍流模型; PISO算法; 模型试验

**中图分类号:** TV653

**文献标识码:** A

**文章编号:** 94047-(2016)01-044-04

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。近年来, 愈来愈多的工程问题借助数值计算方法得以解决<sup>[1-2]</sup>, 为此采用了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, 所得的模拟结果和物理模型试验结果进行比较, 二者所得结果吻合较好, 说明该模型能更好地用于加糙后的流场模拟计算。

## 1 计算模型的选择

该三维数学模型的建立以物理模型试验为基础, 物理模型试验在长2m、宽0.5m、高0.9m的玻璃水槽中进行, 水槽底坡为1.24‰。选用外直径为15cm、内直径为8cm的模型汽车轮胎加糙处理, 加糙段长1m。试验对加糙段后5个断面的水深和流速进行测量, 各断面分别位于轮胎加糙段后0.1m、0.3m、0.5m、0.7m和0.9m处, 每个断面布置7条测线。加糙段及测量点布置如图1所示。

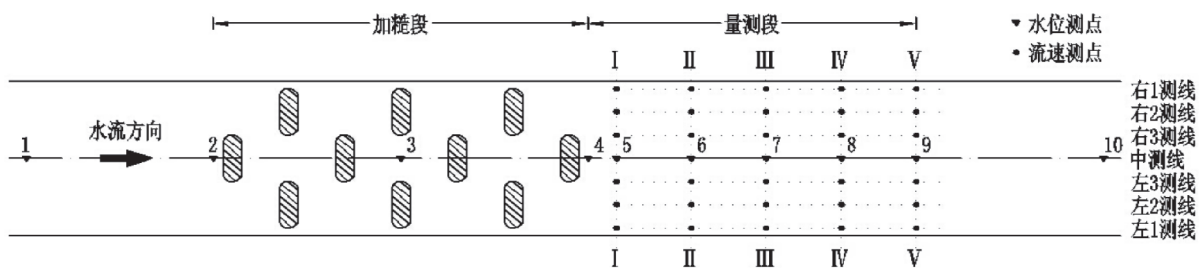


图1 测量断面及测点的布置

计算模拟流场为黏性不可压湍流, 其控制方程为:

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

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

式中:  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $u_i$ 、 $u_j$  为流体速度分量;  $p$  为压力;  $\mu$  为流体动力黏性系数;  $S_i$  为动量守恒方程的广义源项。

目前, 对于粘涡模型, 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

收稿日期: 2015-12-20

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, 博士, 讲师, 主要从事水利工程消能防冲技术方面的研究工作。

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 $k-\epsilon$ 模型：RNG  $k-\epsilon$ 模型和Realizable  $k-\epsilon$ 模型<sup>[3-5]</sup>。RNG  $k-\epsilon$ 模型和Realizable  $k-\epsilon$ 模型继承了标准 $k-\epsilon$ 模型简单、经济的优点，同时从不同的角度对标准 $k-\epsilon$ 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。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。但采用RNG  $k-\epsilon$ 模型计算所得的结果与模型试验实测值的均方差较小，说明采用RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型更贴切实际水流形态。因此，本研究采用RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型对各加糙方案情况下的流场进行模拟。

## 2 计算域及网格划分

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。

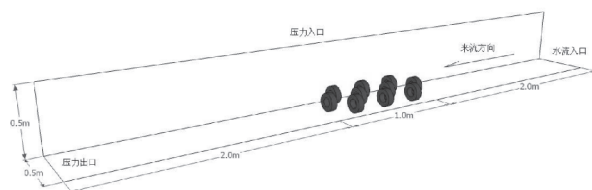
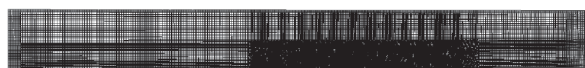
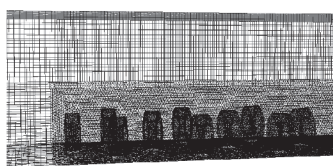


图2 计算域及边界条件

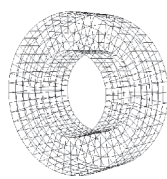
在计算域中，由于加糙体附近模型结构较复杂，受拓扑结构的限制，使用结构化网格划分比较困难，所以本文在加糙段区域采用非结构化网格对计算域进行离散<sup>[6-7]</sup>。在加糙段上、游水槽部分采用规则四边形网格进行离散，并且，对加糙段的网格进行了加密。计算域网格划分如图3所示。



(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

通过检测不同网格尺度（数量）下，数值模拟结果和模型试验结果的吻合程度，采用三种网格尺度进行离散，然后进行数值模拟。最终选用为

67.27万网格数量的模型进行更多工况的计算。

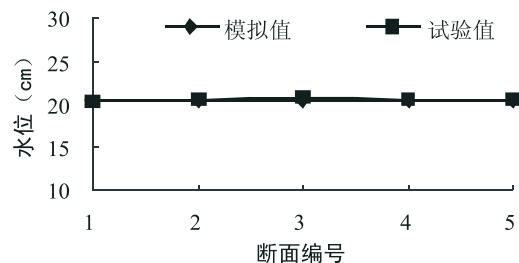
## 3 数值计算方法的选择

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<sup>[8-10]</sup>，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。

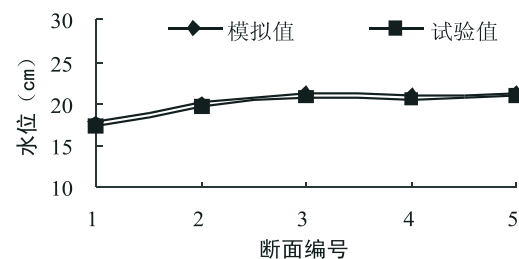
## 4 数值计算结果与模型试验结果验证

### 4.1 水位验证

图4给出了未布设加糙体方案和布设7排加糙体方案，在流量为 $310\text{m}^3/\text{h}$ 工况下，加糙体后各水位量测断面处，水位的数值计算模拟值与物理模型试验值<sup>[11-13]</sup>。图中横坐标为断面编号，纵坐标为水位值。



(a) 未布设加糙体方案



(b) 布设7排加糙体方案

图4 流量 $Q=250\text{m}^3/\text{h}$ ，各工况水位曲线

由图3可知，数值模型计算的各测点水深值与物理模型试验实测的水深值基本相同，各工况下水位曲线基本相吻，说明模拟值与模型试验值吻合越好。

### 4.2 三维流速验证

为验证数值模型计算结果与物理模型试验结果的吻合性,通过式(3)可以计算出三维流速( $u, v, w$ )模型试验值与模拟值之间的相关系数。相关系数越接近1,说明模拟值与模型试验值吻合越好。

$$\left\{ \begin{aligned} r_{uu'} &= \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(u'_i - \bar{u}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (u'_i - \bar{u}')^2}} \\ r_{vv'} &= \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(v'_i - \bar{v}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (v'_i - \bar{v}')^2}} \\ r_{ww'} &= \frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})(w'_i - \bar{w}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (w'_i - \bar{w}')^2}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: $r_{uu'}, r_{vv'}, r_{ww'}$ ——纵向时均流速试验值与模拟值相关系数,横向时均流速试验值与模拟值相关系数,垂向时均流速试验值与模拟值相关系数;

$u_i, v_i, w_i$ ——各测点纵向时均流速试验值,各测点横向时均流速试验值,各测点垂向时均流速试验值;

$u'_i, v'_i, w'_i$ ——各测点纵向时均流速模拟值,各测点横向时均流速模拟值,各测点垂向时均流速模拟值;

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ——各测点纵向时均流速试验值的均值,各测点横向时均流速试验值的均值,各测点垂向时均流速试验值的均值;

$\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$ ——各测点纵向时均流速试验值的均值,各测点横向时均流速试验值的均值,各测点垂向时均流速试验值的均值。

图5给出了未布设加糙体方案下,流量 $Q=310\text{m}^3/\text{h}$ 时,加糙段后流场各测点三维各向流速模拟值与物理模型试验值相关图,图中横坐标为试验值,纵坐标为模拟值。

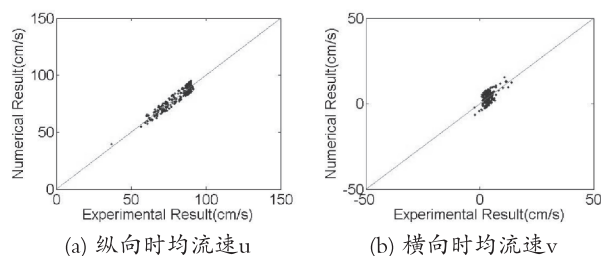
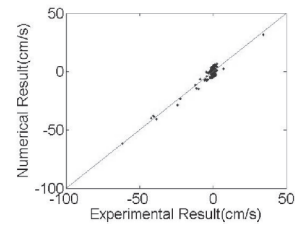
(a) 纵向时均流速 $u$ (b) 横向时均流速 $v$ (c) 垂向时均流速 $w$ 

图5 未布设加糙体方案下,流量 $Q=310\text{m}^3/\text{h}$ 时,三维流速试验值与模拟值相关图

由图5可知,数值模拟值与模型试验值除个别点外均分布在 $y=x$ 直线附近,由公式(3)计算所得相关系数 $r_{uu'}=0.959$ 、 $r_{vv'}=0.726$ 、 $r_{ww'}=0.741$ ,各流速测点量测的三维流速值与数值模拟值吻合较好。

图6给出了布设7排加糙体方案下,流量 $Q=310\text{m}^3/\text{h}$ 时,加糙段后流场各测点三维各向流速模拟值与物理模型试验值相关图,图中横坐标为试验值,纵坐标为模拟值。

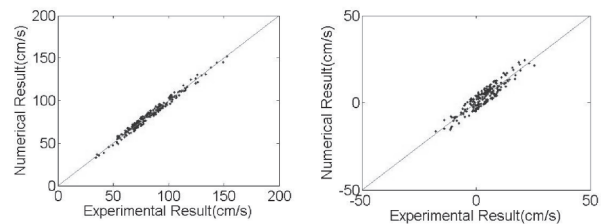
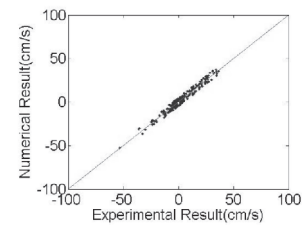
(a) 纵向时均流速 $u$ (b) 横向时均流速 $v$ (c) 垂向时均流速 $w$ 

图6 布设7排加糙体方案下,流量 $Q=310\text{m}^3/\text{h}$ 时,三维流速试验值与模拟值相关图

由图6可知,数值模拟值与模型试验值除个别点外均分布在 $y=x$ 直线附近,由公式(3)计算所得相关系数 $r_{uu'}=0.987$ 、 $r_{vv'}=0.927$ 、 $r_{ww'}=0.982$ ,各流速测点量测的三维流速值与数值模拟值吻合较好。

## 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,并通过与物理模型试验进行验证,说明该模型建立正确合理,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]金瑾,刘焕芳,陆杨.肯斯瓦特水利枢纽溢洪道流场的数值模拟研究[J].人民黄河,2014,36(11):104-106.
- [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]王福军.计算流体力学分析:CDF软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5]张廷芳.计算流体力学[M].大连:大连理工大学出版社,2007.
- [6]HIRT C W,NICHOLS B D.Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics,1981,39:201-225.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]贾文洁,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.
- [10]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.
- [11]牟献友,文恒.废旧轮胎在闸下消能防冲中的应用[J].水利水电科技进展,2007,27(3):64-66.
- [12]史国庆,文恒,牟献友.闸下海漫柔性加糙体消能防冲机理试验[J].水利水电科技进展,2011,31(5):49-52.
- [13]史国庆,文恒,牟献友,等.闸下应用废旧轮胎消能防冲的水流紊动特性[J].人民黄河,2011,33(10):110-112.

[责任编辑、校对:王军利]

## Verification of Mathematical Model Results of Scrap Tires in Energy Dissipation and Erosion Control under Sluice

SHI Guo-qing

(Xianyang Vocational & Technical College, Xianyang, Shaanxi 712046)

**Abstract:** The influence of the numerical simulation results of CFD on different grid numbers, different residual convergence precisions, different turbulence models, and different flow calculation methods, 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. It indicates that the numerical simulation technique CFD can calculation the flow field on complex projects for practical purpose.

**Key words:** scrap tires; energy dissipation and erosion control; numerical simulation; RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model; PISO algorithm; model test