

圆中环沉沙排沙过滤池三维流场数值模拟

郭鑫, 侍克斌

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 在对圆中环沉沙排沙过滤池的计算区域作了特殊处理后, 选用适当的边界条件, 采用 VOF 方法追踪自由水面, 结合标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 对圆中环沉沙排沙过滤池进行了三维数值模拟研究。给出了特定断面的清水流速矢量图、流速等值线图 and 流速轨迹线图等水力参数。计算结果对研究圆中环沉沙排沙过滤池的流场特性和输沙机理以及圆中环沉沙排沙过滤池设计具有一定的指导意义

关键词: 圆中环沉沙排沙过滤池; Fluent; 三维数值模拟; 流速场

中图分类号: TV673.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0065-04

Numerical simulation of 3D flow field for circular ring filter of desilting sediment

GUO Xin, SHI Kebin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China)

Abstract: After the computation region of desilting filter of sediment of circular ring was especially treated, the paper chose some reasonable boundary conditions, used Volume of Fluid (VOF) method to trace free-surface and combined standard RNG model to simulate 3-D water flow field in the desilting filter of sediment of circular ring. Meanwhile, the vorticity field and velocity as well as the flow line of all the measured planes inside the equipment are all presented. The computed result has some instructive significance for the study of characteristic of flow field in the desilting filter of sediment of circular ring.

Key words: circular ring filter of desilting sediment; FLUENT; 3-D numerical simulation; velocity field

1 研究背景

新疆的河流众多, 大多数河流都属于山溪性河流, 此类河流的特点是: 水体中的泥沙粗细不均, 最大泥沙粒径可达十几厘米, 细颗粒泥沙粒径又大都小于 0.05mm, 且含沙量波动范围较大, 从十至数百千克每立方米不等。数据显示, 部分河流中泥沙分布极为不均, 细颗粒泥沙(粒径小于 0.03 mm)占含沙总量的 40% 以上。而根据规定要求, 新疆一般采用的滴灌带过滤器的数目为 100 目, 含沙浓度低于 5 kg/m³。基于这种情况, 就需要通过对渠道用水进行水沙分离的技术处理。圆中环沉沙排沙过滤池是一种新型的水沙分离装置, 能有效地解决河道引水的泥沙问题。圆中环沉沙排沙过滤池过滤槽内部分层铺设滤料, 处理泥沙的范围很大, 对推移质、悬移质和少量漂浮物都有很好的过滤作用。到目前为

止, 圆中环沉沙排沙过滤池(以下简称圆中环)的研究主要依靠物理模型试验^[1-4], 刘宝星利用 FLUENT 软件二维模拟计算得到了沉沙池内的清水流速矢量图、流速等值线图、流速轨迹线和水气两相分布图等水力参数^[5]。本研究从 N-S 方程出发, 运用标准 $k-\varepsilon$ 计算模型, 对圆中环清水流场进行三维数值模拟, 并将数值计算得到的流速分布与试验实测结果进行了对比, 两者吻合较好。通过数值模拟得到圆中环内各种参数分布的详细信息, 有利于对圆中环的水沙分离机理作进一步分析。

2 模型及边界条件

2.1 模型及工作原理

圆中环沉沙排沙过滤的结构从内到外可分为出溢流筒、中心出水环堰、矩形进水廊道、冲沙廊道、沉沙池倒锥体池底、水闸井、排沙闸、环流冲沙闸、环形

收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-07-23

基金项目: 新疆科技支撑项目(201233132); 新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(xjzdxk-2010-02-12)

作者简介: 郭鑫(1988-), 男, 新疆伊宁人, 硕士研究生, 从事河流泥沙工程研究。

通讯作者: 侍克斌(1957-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构及施工方面。

沉沙冲沙道、过滤槽、溢流侧堰、环形汇流槽、叠环出水口和进水闸井等部分,水工模型示意图见图 1 所示。

其工作原理为:将冲沙闸和排沙闸关闭,原水会通过矩形进水廊道进入圆中环沉沙排沙过滤池,当进入池内的水量不断增加,原水则从中心出水环堰溢出,呈辐射状流入沉沙池倒锥型池底,随池内水位上升,在过滤槽与沉沙池水位差作用下,水流首先通过过滤槽下部进水口流入过滤槽,由溢流堰溢出,流入环形汇流槽,最终流进叠环出水口。

2.2 数学模型

本文在计算流场过程中只用清水代替实际水流,选用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,流动基本方程组如下^[6]:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

ε 方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数分别取值 (1.44, 1.92); σ_k 为湍动能的普朗特数,在标准 $k-\varepsilon$ 模型中取值为 $\sigma_k = 1.0$; Pr_t 是普朗特数, $Pr_t = 0.85$; g_i 为重力加速度; ρ 为体积分数加权平均的密度; p 为修正压力; μ_t 为湍动粘度^[7-9]。

2.3 计算区域和边界条件

本文计算采用的物理模型如图 2 所示,具体几何参数为,沉沙池直径 240 cm,高度 45.5 cm,倒锥形池底高 22.5 cm,矩形进水廊道高 8 cm,宽 10 cm,进水底孔直径 $d = 3$ cm。坐标原点设在圆中环中心, X 轴正向沿进水方向, Z 轴向上为正。由于此次数值模拟只针对圆中环沉沙排沙过滤池中的清水流场进行模拟,过滤槽内部的滤料对模拟影响较小,故本文没有对过滤槽内部的滤料进行模拟。本文将采用结构化网格和非结构化网格结合的方式划分网格,最终网格数量为 413 559,网格划分图如图 2。

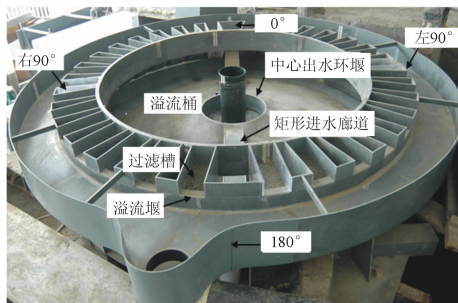


图 1 圆中环沉沙排沙过滤池模型示意图

边界条件如下:

(1) 进口边界。装置的进流涵洞为切向涵管进流,即设置为速度进口边界条件。取来流方向为 x 正向,故进口边界条件为: $u_x = V$, $u_y = 0$, $u_z = 0$; 式中 u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的分速度, V 为来

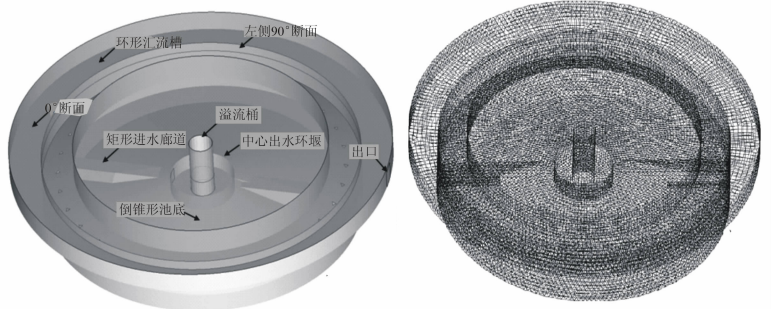


图 2 圆中环模型及网格划分图

流平均速度。为方便与前期物理模型实验结果进行对比,设置装置进口流速为 0.39 m/s。

(2) 出口边界。沉沙池的出口设置在圆形汇流槽 180° 方向,与大气接触,故采用压力出口边界条件,压强设定为大气压。

(3)自由表面的边界条件。模型试验观测发现,在本文模拟的进流量下,沉沙池中水头变化量约为 $\pm 0.5\text{ mm}$,可近似认为水头不变。故在自由液面采用刚盖假定,即认为此边界为无粘性的“刚性盖”,除垂向流速为零外,其它所有变量的法向梯度为零。

(4)壁面边界条件。在壁面上采用无滑移条件,即: $U = V = W = 0$ 。

3 计算结果及分析

为了解沉沙池内部的流速分布,本文截取并分析了四个断面上的流速云图和流场迹线图。四个断面分别为: $y = 22.5\text{ cm}$, $y = 41.0\text{ cm}$, $x = 0.0\text{ cm}$ 以及 $z = 0.0\text{ cm}$ 。具体见图 3~9。由图 3~5 可以看出,在 $y = 22.5\text{ cm}$ 截面上,流速在中心溢水环堰处较大,先沿半径方向逐渐减小,后在进水底孔处增大;在 0° 方向,靠近沉沙池边壁出,流速最小;沉沙池右侧 90° 方向流速稍大于左侧 90° ;沉沙池内左右 45° 方向出现涡流特征。在 $y = 41.0\text{ cm}$ 截面上,靠

近中心出水环堰周围的水流在右侧 90° 方向最大, 0° 方向最小;流速沿半径方向逐渐减小;外侧圆形汇流槽中,流速从 0° 方向至 180° 出口处逐渐增加。

从流场流线分布图中不难发现,沉沙池内左右 45° 方向均产生漩涡。沉沙池内部结构是产生涡流的主要原因,水流经进水廊道流出后,大部分水流沿进水廊道方向运动,受到沉沙池边壁的阻碍作用,改变原有水流方向,最终形成漩涡。

$x = 0.0\text{ cm}$ 截面,即左右 90° 断面。从图 4~6 中可以看出,水流在中心溢水环堰流出流速最大,沿半径方向逐渐减小;左侧 90° 断面上平均流速稍大于右侧 90° 断面,进水底孔处,流速也较大。通过分析图 4~7 可以看出, $Z = 0.0\text{ cm}$ 截面 ($0^\circ - 180^\circ$ 断面)上,水流分布稍显不均。在 0° 进口方向,矩形进水廊道进口处,水流流速最大,与之对应的 180° 方向中心出水环堰处次之。在 0° 方向和 180° 断面上,水流流速均沿着半径方向逐渐减小,不同的是, 0° 方向减小较快,水流梯度较大, 180° 方向变化较慢。

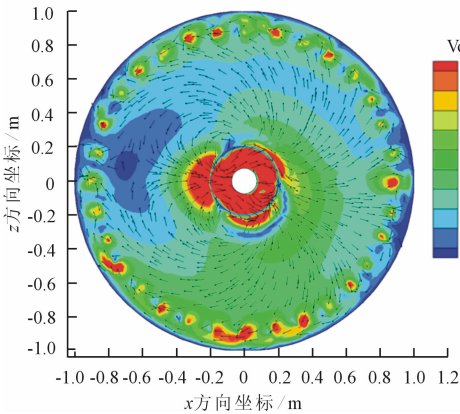


图 3 $y = 22.5\text{ cm}$ 截面流速云图 (流速单位: m/s)

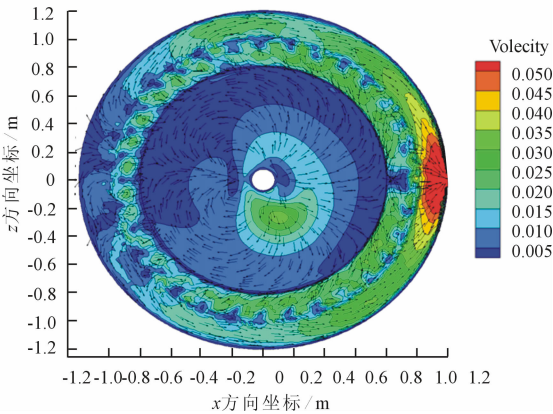


图 4 $y = 41.0\text{ cm}$ 截面流速云图 (流速单位: m/s)

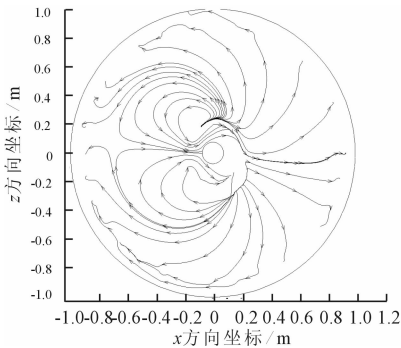


图 5 $y = 22.5\text{ cm}$ 、 $y = 41.0\text{ cm}$ 截面流场流线分布图

通过图 8、9 可以看出断面上水流的运动轨迹,先从中心溢水环堰流出,顺着倒锥形池底,最终流经

进水底孔,通过汇流槽流出池外。值得一提的是,图 4 的 -90° 方向流场流线一反常态,在中心溢流桶到

过滤槽中间的区域中,水流沿着 x 轴正方向运动,结合图 3、4 不难发现,此处存在漩涡是导致这一现状的主要原因。

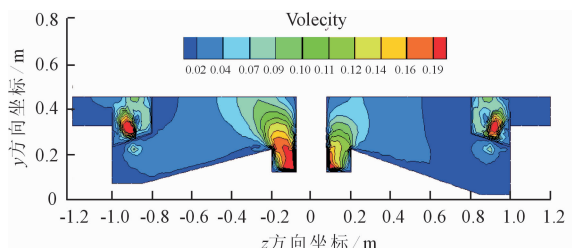


图 6 $x = 0.0$ cm 截面流速云图(流速单位:m/s)

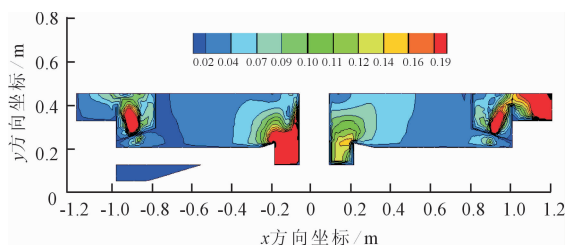


图 7 $z = 0.0$ cm 截面流速云图(流速单位:m/s)

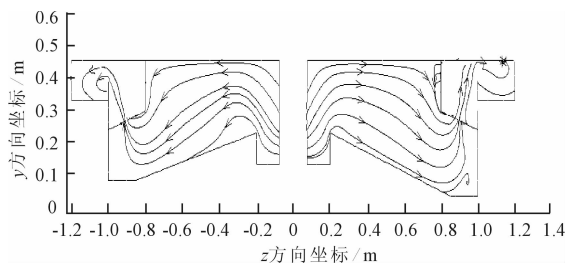


图 8 $x = 0.0$ cm 截面流场流线分布图

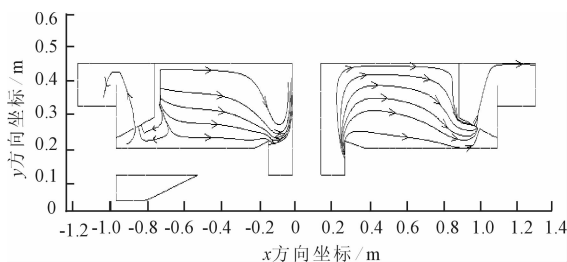


图 9 $z = 0.0$ cm 截面流场流线分布图

4 结 语

本文运用标准 $k-\varepsilon$ 计算模型,通过对圆中环清水流场的三维数值模拟,得到以下结论:

圆中环内水流流速在中心溢水环堰处较大,先沿半径方向逐渐减小,后在进水底孔处增大。在圆中环内左侧 45° 及右侧 45° 方向形成漩涡,不利于圆中环泥沙排沙。

本研究首次通过三维数值模拟的研究方法对圆中环进行了研究,分析得出中心出水环堰周围水流是影响圆中环内部水流流场的重要因素,为圆中环的结构优化奠定了理论基础。研究成果有一定的参考价值,对引水工程泥沙处理具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 刘宝星,侍克斌,郝杰. 圆中环泥沙排沙过滤池结构特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):90-92.
- [2] 刘宝星,侍克斌,李玉建,等. 圆中环泥沙排沙过滤池水工模型试验研究[J]. 水力发电学报,2013,32(4):82-87.
- [3] 赵江涛,侍克斌,李玉建,等. 圆中环泥沙排沙过滤池滤水槽过滤性能试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):57-60.
- [4] 周 著,侯 杰,邱秀云,等. 浑水水力分离清水装置:中国,03159507.3[P]. 2005.11.2.
- [5] 刘新阳,罗金耀,高传昌. 水力旋流器中水沙两相流动三维数值模拟[J]. 水力发电学报,2010,29(4):224-229.
- [6] 李 琳,邱秀云. 浑水水力分离清水装置内弱旋流动的数值模拟[J]. 水力发电学报,2008,27(2):103-109.
- [7] 华根福,刘焕芳,汤 骅,等. 沉沙池中水流流态的数值模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2009,27(4):482-486.
- [8] 吴 均,宗全利,刘焕芳,等. 沉沙池中调流板对水流调节作用的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(5):6-9.
- [9] 李 琳,邱秀云,龚守远,等. 浑水水力分离清水装置弱旋流场特性研究[J]. 水动力学研究与进展,2007,22(3):520-528.