

矩形农渠机翼形量水槽水力特性数值模拟

孙 斌, 吕宏兴, 潘志宝

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用 VOF 方法与标准 $k-\epsilon$ 紊流模型相耦合, 对矩形农渠中三种不同收缩比的机翼形量水槽进行三维数值模拟, 并将渠道下游断面水深、过流流量等数值计算结果与物理模型试验结果进行对比, 结果表明, 二者吻合得较好, 从而证明采用三维 CFD 数值模型对实体模型内部流场的模拟是可靠的, 为今后机翼形量水槽的深入研究和优化设计提供了新的方法和依据。

关键词: VOF 方法; 标准 $k-\epsilon$ 模型; 矩形渠道; 机翼形; 数值模拟

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)02-0155-04

在节水灌溉各项技术的推广应用, 渠道量水技术是灌区实行计划用水, 节约用水和按方计收水费的关键技术措施之一, 因此研究与各型渠道相配套的流量测量设施具有十分重要的意义。机翼形量水槽是在农渠或斗渠两侧修筑仿机翼形状的槽壁, 是一种新型量水设施, 具有临近淹没度高, 水头损失小, 结构简单易于施工等优点, 而且量水精度较高, 已在灌区推广^[1,2]。

随着计算机技术的迅速发展以及计算方法的优化改进, 利用计算流体力学 (CFD) 对物理模型进行数值模拟被越来越多的采用^[3], 特别是近些年来, 运用紊流模型研究明渠问题得到较为充分的应用并取得了较好的结果^[4,5]。本文引入 VOF 方法, 采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型对矩形农渠中三种不同收缩比的机翼形量水槽进行数值模拟研究, 得到渠道下游断面水深、过流流量等计算结果, 并将其与模型试验结果进行比较, 从而验证数值模拟方法的可靠性。

1 数学模型

VOF(The Volume of Fluid)模型是通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的容积比来模拟两种或三种不能混合的流体。模型对每一相定义独立的体积分数, 通过求解连续性方程得到相应的体积分数, 最终确定交界面。

在只有水和空气的二相流中, 假设函数 α_w 和 α_a 分别代表计算域中每一控制单元内水和气的体积分数, 则二者体积分数之和为 1, 即:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (1)$$

水是不可压缩流体, 其体积分数可根据如下守

恒型连续性方程求解:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中, u_i 和 x_i 分别为速度分量与坐标分量。当 $\alpha_w = 1$ 时, 控制单元内完全充满水; 当 $\alpha_w = 0$ 时, 控制单元内完全充满气体; 当 $0 \leq \alpha_w \leq 1$ 时, 控制单元被水体部分充满, 存在自由水面。

1.1 控制方程

采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型, 基本控制方程如下:

(1) 连续性方程

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

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}) + S_i \quad (4)$$

(3) 湍动能 k 方程

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

(4) 湍动耗散率 ϵ 方程

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中, ρ 为流体密度; $\overline{u'_i u'_j}$ 为各脉动流速分量; μ 为流体动力粘滞系数; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 为湍动粘度; $G_k = G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; 常数 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 的取值分别为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3。

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD11B04)

作者简介: 孙 斌(1984—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: sunbin65@hotmail.com。

通讯作者: 吕宏兴(1955—), 男, 陕西陇县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水力学、农业水土工程方面的研究。

1.2 CFD 模型建立

量水槽收缩比 ϵ 由渠道比降和流量条件确定。由于本文物理模型试验在长 12.8 m, 宽 0.6 m, 高 0.3 m, 糙率为 0.013, 底坡为平底的矩形渠道中进行, 通过计算渠道断面比尺 λ_L 及流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$, 可得到不同断面尺寸矩形渠道的收缩比和底坡关系表, 故本文选取较有一般性的 0.48、0.53、0.58 三组收缩比作为研究对象, 并利用 Gambit 软件分别建立三维几何模型。选择顺水流渠道进口断面右下角为坐标原点, 顺水流方向为 x 轴正方向, 渠道宽度方向向左为 y 轴正方向, 渠道高度方向向上为 z 轴正方向。

为能逼真的模拟出渠道内流态, 同时便于最终计算, 将模型分割为 3 部分。进口与出口部分选择结构化网格, 中间量水槽部分由于流态较为复杂, 选择非结构网格, 并对喉口机翼部分进行局部加密。其中进口部分根据上游水深位置, 划分为上部空气进口与下部水流进口两部分。模型网格划分如图 1 所示。

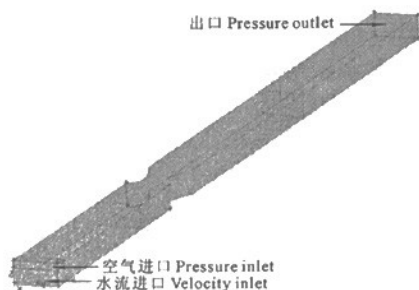


图 1 模型网格划分示意图

Fig. 1 The schematic diagram of grid-divided model

1.3 求解方法及边界条件

1.3.1 求解方法 由于渠道内水流为恒定均匀流, 故采用隐式 VOF 模型。利用有限体积法和雷诺时均 $N-S$ 方程, 并采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型对计算域进行求解。方程组离散时压力差值选择瞬态 PISO 格式, 体积比离散采用一阶迎风 (First-Order-Upwind) 格式, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。设置监视器中 Mass Flow Rate 选项, 当其值接近于 0 且基本保持不变, 或者各变量残差值小于 $1/10000$ 时, 认为计算收敛。

1.3.2 边界条件 进水口设置为流速进口边界条件 (VELOCITY INLET), 在紊流说明选项中选择紊流强度 I 和紊流长度 l , 二者计算公式如下:

$$I = 0.19 \left(\frac{u_m H}{\nu} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (7)$$

$$l = 0.40 H \quad (8)$$

式中, u_m 为渠道断面平均流速; H 为渠道上游断面水深; ν 为水的运动粘滞系数。

空气进口及模型上部选择压力进口边界条件 (PRESSURE INLET), 出口选择压力出口边界条件 (PRESSURE OUTLET), 紊流选项设置均与进水口边界条件设置相同。渠道的整个底部以及边壁选择固壁边界条件 (WALL), 并设置无滑移选项。以 $\epsilon = 0.53$ 的量水槽为例, 计算所需参数设置如下表所示。

表 1 $\epsilon = 0.53$ 机翼形量水槽参数表

Table 1 The parameter of airfoil-shaped measuring-flume for $\epsilon = 0.53$

序号 No.	实测上游 水深 H Measured upstream depth (cm)	断面平均 流速 u_m Mean velocity of the section (m/s)	紊流 长度 l Turbulence length (m)	紊流 强度 I Turbulence intensity
1	6.70	0.2488	0.0268	0.6087
2	8.74	0.2857	0.0350	0.6403
3	10.56	0.3150	0.0422	0.6636
4	12.28	0.3388	0.0491	0.6824
5	13.87	0.3610	0.0555	0.6984
6	15.34	0.3801	0.0614	0.7119
7	16.77	0.3986	0.0671	0.7241
8	18.08	0.4145	0.0723	0.7345
9	19.40	0.4295	0.0776	0.7443
10	20.66	0.4434	0.0826	0.7532
11	21.87	0.4576	0.0875	0.7616
12	23.06	0.4704	0.0922	0.7693
13	24.18	0.4824	0.0967	0.7763
14	25.24	0.4950	0.1010	0.7830
15	25.94	0.5031	0.1038	0.7873

2 计算结果与分析

为了检验本文数学模型参数设置及计算结果的合理性、可靠性, 以 $\epsilon = 0.53$ 的量水槽为例, 将计算下游水深及出口部分计算流量与实测资料进行对比分析。

2.1 下游水深计算

使用 ISO-SURFACE 工具, 在模型上切割出 $y = 0.3$ m 处即渠道过流中心部分的面, 记为 f_1 。同时, 通过设置水的体积分数 α_w 可得到水气交界面, 记为 f_2 。将 f_1 与 f_2 相交并输出结果, 可得到水面线数据, 如图 2 所示。

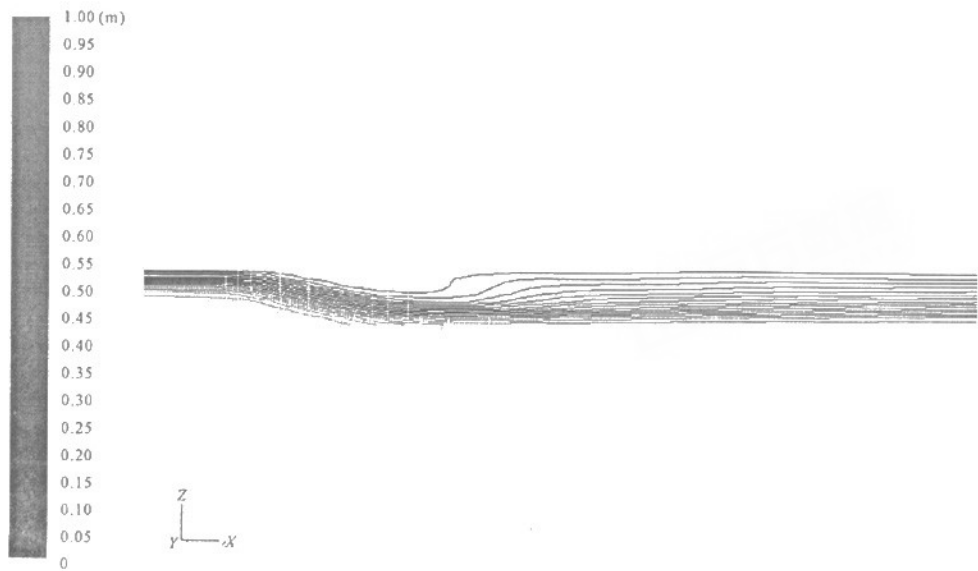


图 2 模型局部水面线示意图

Fig.2 The schematic diagram of water surface profile of local section in model

取结果中下游测针位置即 $x = 9.3\text{m}$ 处数据,并与物理模型试验结果进行对比,如表 2 所示,数值模拟结果与试验结果较为接近,平均误差为 1.82%。

表 2 $\epsilon = 0.53$ 量水槽实测下游水深与计算下游水深比较
Table 2 The comparison between measured and calculated downstream depth in measuring-flume for $\epsilon = 0.53$

序号 No.	实测下游 水深 h_1 Measured downstream depth (cm)	计算下游 水深 h_2 Calculated downstream depth (cm)	误差 Deviation (%)
1	5.80	5.91	1.90
2	7.55	7.42	1.72
3	9.33	9.19	1.50
4	10.84	10.74	0.92
5	12.18	11.99	1.56
6	13.24	13.01	1.74
7	14.1	13.85	1.77
8	15.4	15.18	1.43
9	16.35	16.16	1.16
10	17.13	17.38	1.46
11	17.7	17.29	2.32
12	18.39	17.97	2.28
13	19.02	18.47	2.89
14	19.67	19.15	2.64
15	20.44	20.02	2.05
		平均值	1.82

2.2 出口流量计算

使用 report 工具,将计算出口流量数据导出,并与实测资料相比较,如表 3 所示,从表中可以看出,二者误差平均值为 1.91%,吻合程度较高。 $\epsilon = 0.53$ 量水槽上游断面水深与实测流量及计算流量关系如图 3 所示。

表 3 $\epsilon = 0.53$ 量水槽实测流量与计算流量比较
Table 3 The comparison between measured flow and calculated flow in measuring-flume for $\epsilon = 0.53$

序号 No.	实测流量 q_1 Measured flow (L/s)	计算流量 q_2 Calculated flow (L/s)	误差 Deviation (%)
1	10.00	9.74	2.60
2	14.98	14.63	2.34
3	19.96	20.37	2.05
4	24.96	25.52	2.24
5	30.04	30.56	1.73
6	34.98	35.28	0.86
7	40.11	40.27	0.40
8	44.96	45.09	0.29
9	49.99	50.07	0.16
10	54.96	54.88	0.15
11	60.05	59.62	0.72
12	65.08	64.11	1.49
13	69.98	67.28	3.86
14	74.96	71.59	4.50
15	78.30	74.12	5.34
		平均值	1.91

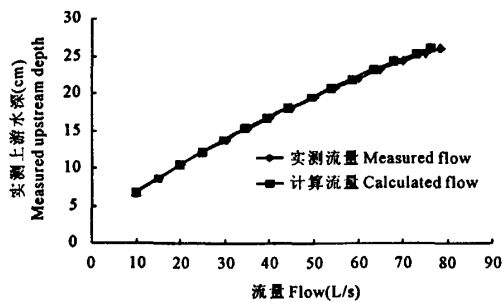


图 3 上游断面水深与实测流量及计算流量的关系
Fig.3 The relation between upstream section depth and measured flow or calculated flow

$\epsilon = 0.48$ 及 $\epsilon = 0.58$ 的量水槽数值计算结果与实测结果误差均小于 3%，吻合程度较高。三种收缩比量水槽模拟结果与物理模型试验结果比较如表 4 所示。

表 4 不同收缩比量水槽计算结果与实测结果比较

Table 4 The comparison between calculated results and measured results in measuring-flume of different contraction ratios

序号	收缩比 ϵ Contraction ratio	下游水深 平均误差 (%) Mean deviation of downstream depth	流量平均 误差 (%) Mean deviation of flow
1	0.48	2.07	2.18
2	0.53	1.82	1.91
3	0.58	1.94	2.03

3 结 论

本文利用 VOF 法与标准 $k-\epsilon$ 紊流模型相耦合,并用 SIMPLE 算法对矩形农渠中三种不同收缩比的机翼形量水槽进行三维数值模拟,得到下游断面水深、过流流量等水力参数。通过对比发现,数值计算结果与物理模型试验结果吻合度较高,表明所建立的 CFD 模型对该量水槽内部流场的数值模拟是合理和可靠的。

机翼形量水槽作为一种新型的渠道量水设施,适合应用于平原灌区缓坡斗渠或农渠当中,且测流精度高,施工精度易于控制,具有较好的推广应用前景和较高的实际应用价值。应用本文方法可以快速、可靠的对其设计参数和内部水力特性进行数值模拟,通过对大量计算结果的总结和分析,使计算模型具有一般性,从而最终达到对量水槽进行改进和优化的目的。

参 考 文 献:

[1] 吕宏兴,刘焕芳,朱晓群,等.机翼形量水槽试验研究[J].农业工程学报,2006,(9):119—123.
[2] 刘鸿涛,赵瑞娟,吕宏兴.矩形渠道机翼形量水槽试验研究与应用[J].节水灌溉,2008,(5):10—12.
[3] 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.
[4] 蔡甫歆,胡云进,毛根海.梯形断面明渠三维紊流数值模拟[J].中国农村水利水电,2006,(10):92—94.
[5] 郝晶晶,马孝义,王波雷,等.基于 VOF 的量水槽流场数值模拟[J].灌溉排水学报,2008,(4):26—29.

Numerical simulation of hydraulic characteristics on the airfoil-shaped measuring-flume in rectangular canal

SUN Bin, LÜ Hong-xing, PAN Zhi-bao

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: By means of conducting 3D numerical simulation on airfoil-shaped measuring-flume of 3 different contraction ratios in rectangular canal resorting to combination of VOF method and standard $k-\epsilon$ turbulence model, and comparing the numerical calculation results like downstream water depth at cross section, flow etc with physical model experiment, from which it can be seen that these data can match each other well, so the reliability of this kind of method to simulate the physical model internal flows is proved accordingly, and therefore the new concept can be referred to for further research and design optimization on air-foil-shaped measuring-flume.

Keywords: VOF method; standard $k-\epsilon$ turbulence model; rectangular canal; airfoil-shaped; numerical simulation