

文章编号: 1672-9897(2013)01-0065-08

U形渠道机翼形量水槽水跃数值模拟与试验研究

孙斌¹, 吕宏兴¹, 张宽地¹, 石喜¹, DINH Thi Huong¹, 周亚森²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 水利部综合事业局, 北京 100053)

摘要:量水槽是灌区常见的特设量水设备,而槽后水力特性是判断其选型是否合理的重要指标之一。以某小型灌区末级灌溉渠系改造工程为原型,针对两种不同工况,采用基于 TruVOF 方法跟踪自由液面、Favor 技术实现网格优化的湍流数学模型,对 U 形渠道机翼形量水槽水跃问题进行三维数值模拟,分析了水跃的时均流场、共轭水深、发生位置、跃长、断面流速分布以及水跃段能量损失等相关水力特性。采用与原型 1:1 比尺的水工模型试验资料对模拟结果进行验证,结果表明,二者吻合较好。通过对实测与数值仿真的共轭水深数据进行统计分析,得到了适用于 U 形渠道机翼形量水槽水跃共轭水深的近似计算公式。研究结果对机翼形量水槽在平原缓坡灌区末级渠系的应用研究提供了一定的参考和建议。

关键词: U 形渠道; 机翼形量水槽; 水跃; Flow-3D 软件; 数值模拟

中图分类号: TV131.4 **文献标识码:** A

Numerical simulation and experimental research of hydraulic jumps on the airfoil-shaped measuring flume in U-shaped canal

SUN Bin¹, LÜ Hong-xing¹, ZHANG Kuan-di¹,
SHI Xi¹, DINH Thi Huong¹, ZHOU Ya-sen²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Bureau of Comprehensive Development Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: Measuring flume is a common water measuring device which is designed for irrigation. The characteristics of hydraulic jump is one of the important indexes to judge whether the selected shape is suitable. This paper discussed the last stage of irrigation canal renovation project in a certain small irrigation area as an archetype, with two different experimental conditions, computed by the turbulence mathematical model tracking the free surface of liquid based on TruVOF method and realized mesh optimization based on Favor. We also simulated the water jump in U-shaped canal airfoil-shaped flume in three dimensions, and analyzed the hydraulic characteristics such as time-averaged flow field, conjugate depth, occurring position, jump length, distribution of hydraulic velocity in cross section and the loss of energy of hydraulic jump section. We verified simulation results by using experimental data of hydraulic model test whose ratio archetype is 1:1. The results of experimental and the computational model are consistent. In the end, we analyzed the conjugate depths of experimental data and simulation results, and inferred the approximate calculation formula of conjugate depths for U-shaped canal airfoil-shaped flume. This research provides some basic advice and suggestions on the application of airfoil-shaped flume in irrigated area in last stage of canal system in plain with gentle slope.

Key words: U-shaped canal; airfoil-shaped measuring flume; hydraulic jump; Flow-3D; numerical simulation

0 引言

U形渠道因具有诸多优越的水力条件和结构特

点,已经成为国内外灌区普遍采用的一种输水形式。随着灌区精准灌溉的需求,U形渠道量水设施已经成为研究热点之一,国内外学者对此进行了大量研

收稿日期: 2011-12-02; 修订日期: 2012-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41001159); 高校博士点基金(20090204110019); 陕西省自然科学基金(2011JQ5004)

究,得到了多种不同形式的量水设施。尚民勇^[1]、U形渠道量水设备试验研究课题组等根据中国北方灌区特点,先后提出了长喉道量水槽和平底抛物线形量水槽;王智等^[2]又采用试验与仿真的手段对后者水力特性与设计应用方法进行了进一步研究;张志昌等^[3]提出了直壁式量水槽,实现了U形渠道大流量量测;何武全等^[4]基于前人研究,提出适用于中国外翻式U形渠道的圆柱体量水槽;吕宏兴等^[5]针对现有量水设施流量计算复杂、阻水较大,且难以适用于平原缓坡降灌区等问题,提出了机翼形量水槽,并在工程应用中进行了较为系统的检验^[6-8]。上述量水槽都是基于明渠水力学理论^[9],通过自身不同形式的建筑物束窄渠道,使过流发生势能与动能的转换,形成缓流-急流-缓流的水流流态转换,最终形成稳定的水位流量关系。急流与缓流转换时,必然会产生水跃现象,其相关水力参数是判别量水槽选型优劣的重要标准之一,而上述研究对于该方面涉及较少,因此有必要对其进行进一步探讨。随着计算机技术与湍流计算方法的发展,物模试验与数值仿真相结合的方法成为目前研究水跃问题的趋势。戴会超^[10]、Abbaspour A^[11]、Mignot E^[12]等分别对恒定或非恒定水跃进行模拟,并通过与实测结果的对比,验证了各自方法的可靠性,提出了相应工况下水跃的水力特性与变化规律。因此,在上述研究的基础上,以某小型灌区末级渠系改造工程为原型,尝试建立基于改进的自由液面追踪方法 TruVOF法和实现网格优化的 Favor 技术相结合的湍流数值模型,对U形渠道机翼形量水槽水跃过程进行三维数值模拟,并结合与原型1:1比尺的水工模型试验数据对计算结果进行对比验证,系统分析槽后水跃的湍流结构与相关水力参数。

1 数值模型的建立

1.1 控制方程

机翼形量水槽过槽水流可由以下方程组描述:

连续性方程:

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

动量方程(Reynolds 方程):

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率 ϵ 方程:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial x_i} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度; u_i, u_j 为各脉动流速分量, 下标 $i, j = 1, 2, 3$; μ 为流体动力粘滞系数; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, 为湍动粘度, 平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项 $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, 常数 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09$ 。

1.2 基于 TruVOF 方法的自由液面处理

传统的 VOF (Volume of Fluid) 方法是一种通过构造网格单元中流体体积与网格体积之比的函数 F 来追踪每个单元内流体的变化, 并最终确定自由表面^[13]。如果 $F = 1$, 则说明该单元全部充满流体; 如果 $F = 0$, 则说明该网格为空, 不含流体; 如果 $0 < F < 1$, 则说明在该单元内存在自由液面。VOF 方法动态追踪的方程如下式所示:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

其中,

$$F = \frac{V_F}{V} \quad (6)$$

式中, V_F 为单元中的流体体积, V 为单元体积。

对于一般含有自由表面的出流问题, 由于空气的密度和黏性较之于水小得多, 所以其引起的压力和应力的变化往往可以忽略不计。所选用的 Flow-3D 软件对自由表面的描述是经过优化的 VOF 方法, 称之为 TruVOF 方法。该方法不考虑只含有气体的控制单元, 只计算含有液体的单元, 因此很大程度上减少了模型收敛所需的时间, 对自由液面的描述也更为准确。TruVOF 法对流体界面的三维重构一般分为三步^[14-15]:

步骤 1: 使用分段线性表示, 将控制单元内的流体界面近似设定为一个平面, 并对其进行三维重构;

步骤 2: 根据局部流速场的变化来确定单元体内的流体体积;

步骤 3: 计算单元体内新的流体体积分数值 F , 重构流体边界。

其控制方程如下所示^[16]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u}_m \cdot \nabla F = 0 \quad (7)$$

式中, \bar{u}_m 为混合流体的平均速度, t 为时间, F 即

为所需要的流体体积分变量。

1.3 数值模型描述与应用 FAVOR 技术的网格划分

数模原型为某小型灌区末级渠系,根据灌溉要求

的不同,共分为 2 种工况,如表 1 所示,其渠首部分设计见图 1。

表 1 U形渠道及机翼形量水槽设计参数

Table 1 Parameters of U-shaped canal and airfoil-shaped flume

工况 序号	机翼形量水槽					U形渠道							
	收缩比 ϵ	喉口宽度 B_c/m	翼长 L/m	翼高 P/m	底坎高度 H_d/m	顶宽 B/m	渠深 H/m	渠长 L_c/m	边坡系数 m	底弧半径 R/m	底弧弓形高 a/m	底弧圆心角 θ	底坡 i
1	0.49	0.30	0.71	0.15	0.10	0.61	0.60	36	0.25	0.20	0.152	151°56'	0.001
2	0.45	0.35	0.81	0.21	0.10	0.77	0.60	36	0.25	0.30	0.227	151°56'	0.001

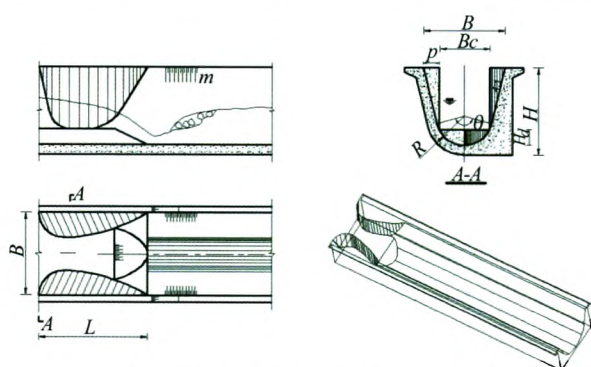


图 1 原型 U形渠道机翼形量水槽设计图

Fig. 1 Design drawing of airfoil-shaped measuring flume in U-shaped canal

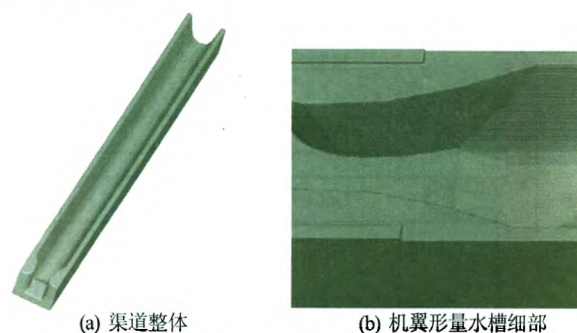
利用 Pro/ENGINEER 软件建立不同工况下 U形渠道机翼形量水槽三维实体模型,并导入至 Flow-3D 软件。设置渠道左岸方向为 x 轴正向,顺水流方向为 y 轴正向,重力反方向为 z 轴正向。模型性质设为固体 (solid),单位为 CSG (centimeter-gram-second) 制。采用均匀性的正立方体网格,对模型进行整体自适应网格 (fit to geometry) 划分,设定网格单元大小为 $2.4\text{cm} \times 2.4\text{cm} \times 2.4\text{cm}$,共计产生 366446 个网格。

在网格划分的过程当中,不论结构网格、非结构网格或者混合网格都不能绝对精准地描述出模型外形曲线,所以网格化的模型边缘通常会出现具有锯齿形或梯形效果的不平整区域,而 Favor 技术是运用有限差分法,通过剪切和记录单元中没有被物体占据的面积和体积的百分比来模拟复杂形状,所以能够以较少数量的矩形网格单元很好地消除和顺滑这种不平整区域,使建立起来的网格模型不会失真。对网格化的数值模型进行 Favor 处理,如图 2 所示。

1.4 边界条件划分

上游进水口设置为流量边界条件 (Volume flow rate),给定流量,默认流体从整个边界开放区域流入,流动方向与边界垂直;下游出口部分设定为流出边界 (Outflow);渠道底部及左右岸渠壁均选择固壁边界 (Wall);渠道顶部空气入口设定为 (Symmetry) 边界,即默认无流体穿过该边界,为零流动区域,且在

边界上无需计算剪应力,在该边界上不会产生对流或者扩散通量。



(a) 渠道整体

(b) 机翼形量水槽细部

图 2 Favor 处理后模型示意图

Fig. 2 Model after Favor treatment

设定计算终止时间为 300s,并分别设定相应初始时间步长与最小时间步长。对数值模型进行预处理,如无错误提示则开始迭代计算。

2 模型试验验证

由于原型末级灌溉渠系实际水流条件和边界条件较为复杂,输水流量经常处于非恒定状态,且过流挟带泥沙或污物较多,难以实现精准量测。为对计算结果进行验证,以原型为参照对象,按照 1:1 的比尺设计水工模型,试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室完成。如图 3 所示,试验系统包括提水泵、三角形薄壁堰、稳水池、U形渠道、机翼形量水槽、回水渠道等 8 部分。试验段 U形渠道及机翼形量水槽均为混凝土结构,喉口断面中心线与渠道中心线一致。模型整体布设完成并检查无误后,逐一对各工况进行量测。流量测定采用直角三角形薄壁堰,计算公式如下:

$$Q = 1.343H^{2.47} \quad (8)$$

通过调整阀门开度改变流量,每次调节幅度为 10L/s。水深测定采用可移动式水位测针,精度为 $\pm 0.1\text{mm}$,量测堰上水头 H 及水跃共轭水深 h_i ($i=1, 2$)。流速测量选用挪威 Nortek AS 公司 Vectrino⁺ 小威龙点式流速仪,其主要性能指标如表 2 所示。该设备基于多普勒测速原理,采用极小粒子作为反射信

号,通过聚焦得到声学波束,可以长时间连续观测测点的三维流速,具有阻流扰动小、测流精度高、量测范围广等优点,适用于对湍流的量测。根据数据采集需要,试验中采样频率设定为 25Hz,采集时间控制在 15s 以上,即对于每个测点至少收集 375 个数据,通过与仪器配套的相关软件转换与分析,最终获取该测点的时均流速。

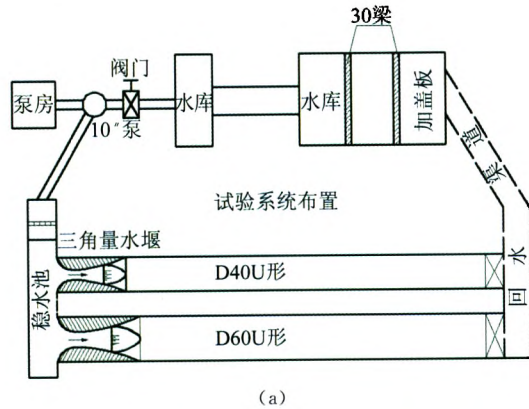


图3 试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model experiment

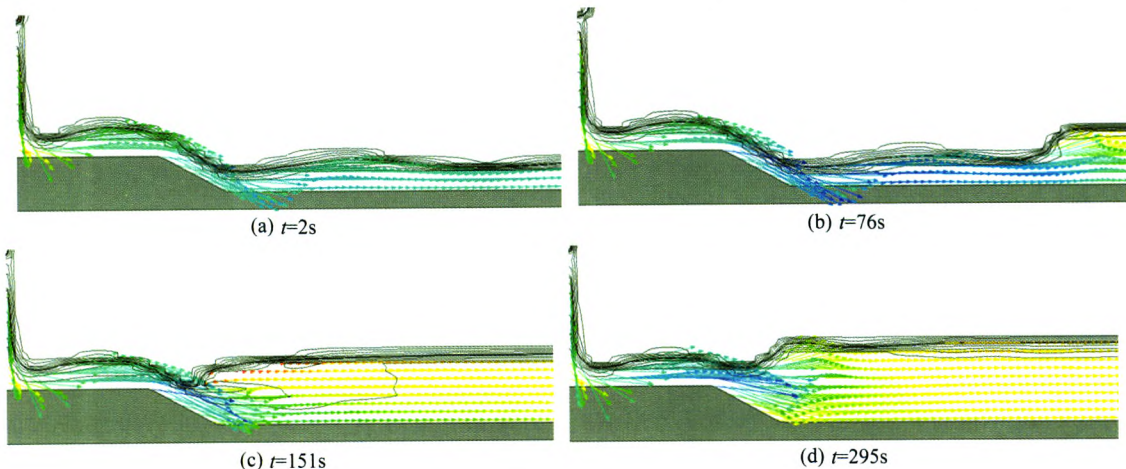


图4 流场变化过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flow field changes process

表2 Vectrino⁺流速仪主要性能指标

Table 2 Main performance indexes of Vectrino⁺ velocimeter

声学频率	强度范围	最高采样频率	最小采样体积	最大量测流速	测量精度
10MHz	25dB	200Hz	<0.085cm ³	4m/s	测量值的±0.5% ±1mm/s

3 数值计算结果与模型试验结果的对比研究

3.1 流场时均分析

图4给出了工况2在 $Q=60.17L/s$ 条件下量水槽后纵剖面不同时刻的流场变化过程。由图可知,当上游控制阀门刚开启时 ($t=2s$),水流急速下泄并通过槽后底坎冲向下游;随着水的不断流入,渠道末端形成自由出流,下游产生回水并逐渐向上游移动 ($t=76s$);经过一段时间 ($t=151s$),下游水位升高至底坎斜坡处,出流与回流相互掺杂,湍动逐渐加剧,水跃开始形成;随着下游水位的继续增高,水跃漩滚区向上游移动,之后 ($t=295s$),水跃移动至量水槽喉口下游位置停止并被淹没,整个流场趋于稳定。

图5为两种工况在不同流量条件下经过充分发展的水跃位置变化规律。由图可以看出,同一工况下,随着流量的增大,下游水位不断雍高,与该水深相应的共轭水深逐渐减小并趋于接近收缩水深,因此水跃的发生位置与建筑物之间的距离逐渐减小,漩滚区不断向上游方向移动。

经过与试验资料对比,从图4、5还可以看出,本文所采用的数值模型能够较好地模拟出水跃段的时均流场,TruVOF方法可以较为精准地追踪到大量掺气且具有大曲率流线的水跃段的自由表面,较好地解决了物理模型试验中难以准确定位自由表面位置

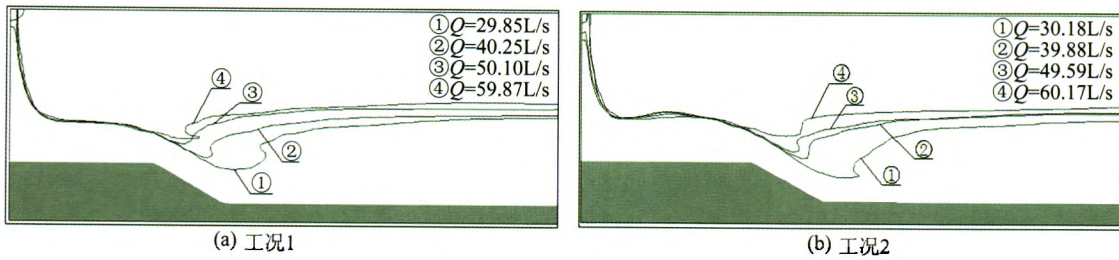


图 5 水跃位置变化规律示意图

Fig. 5 Schematic diagram of hydraulic jump position changes regularity

置的问题。

3.2 断面流速分布

对各工况下跃前、跃后横断面的流速分布与水深进行无量纲化,如图 6 所示。各断面流速分布规律整体趋势较为相似,实测流速指标与模拟结果吻合较好。在水跃段,漩滚区域与下部主流区混掺剧烈,水流的湍动非常强烈,流速变化较大,在跃前段的收缩断面底部区域达到最大(图 6(a)、(b));经过充分发展至跃后段时,水流流速逐渐变缓,其分布规律基本趋于正常化(图 6(c)、(d))。

3.3 共轭水深与水跃跃长

分别量测出各工况下水跃的共轭水深和跃长,并将其与数值计算结果相比较,如表 3 所示。

水跃共轭水深的精准量测与计算是获知水跃长度与水跃能量损失的基础。在两种工况下,实测槽后水跃的跃前、跃后水深与数值模拟水深平均误差分别为 2.08%、2.48%、4.09%、4.36%,跃长误差分别为 4.28%、4.75%。这是由于水跃漩滚区域湍动程度较高,掺气与流线曲率也较大,从而使跃后断面的精确选取较为困难,因此跃后水深与水跃长度均是相对脉动的,当然仿真计算结果也均为时均值。这在一定程度上使得数值计算结果与实测结果存在偏差,但从误差本身而言,模拟计算得到的各要素精度均能满足小于 5% 的工程误差要求,表明本数值仿真方法具有一定的可靠性和真实性,其模拟计算结果亦能够作为共轭水深理论计算过程中的相关参数。

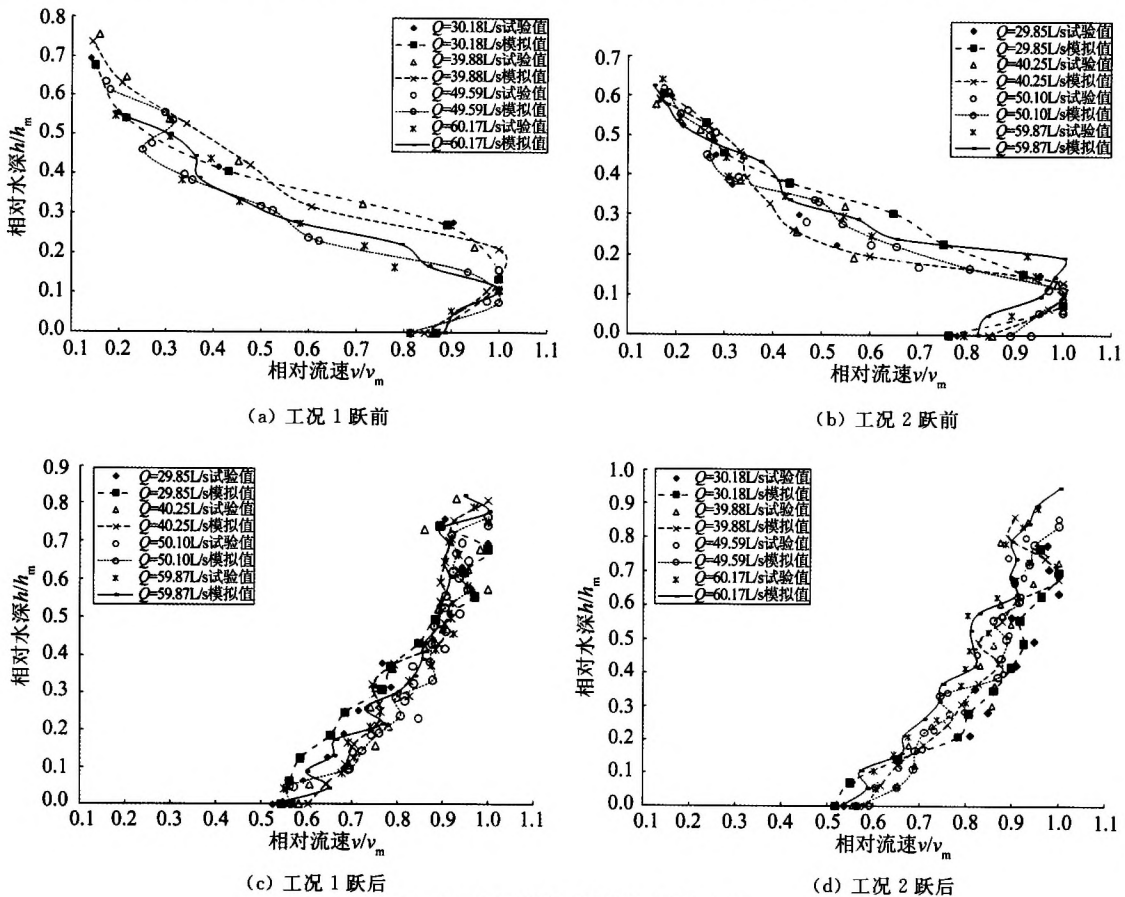


图 6 各工况下跃前、跃后断面流速分布

Fig. 6 Velocity distribution of hydraulic jump cross section in different conditions

表 3 模型试验与数值计算结果

Table 3 The results comparison between numerical simulation and experiment

工况 序号	量水槽 收缩比 ϵ	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	实测跃前水深 h_1/cm	模拟计算跃 前水深 h_1'/cm	误差 $m_1/\%$	实测跃后水深 h_2/cm	模拟计算跃后 水深 h_2'/cm	误差 $m_2/\%$	实测跃长 L_j/cm	模拟计算跃长 L_j'/cm	误差 $m_3/\%$
1	0.49	29.85	6.76	6.60	2.37	15.87	16.61	4.66	60.33	57.73	4.31
		40.25	7.79	7.65	1.80	19.11	18.35	3.98	76.76	80.19	4.47
		50.10	8.89	9.04	1.66	21.53	20.72	3.76	84.45	87.53	3.65
		59.87	10.14	10.40	2.50	24.09	25.04	3.94	98.59	93.98	4.68
				平均值	2.08		平均值	4.09		平均值	4.28
2	0.45	30.18	3.60	3.70	2.70	14.19	14.63	3.10	56.29	53.45	5.05
		39.88	4.64	4.75	2.32	16.51	17.28	4.66	69.87	73.36	4.99
		49.59	6.30	6.52	3.37	17.55	18.39	4.79	76.32	79.57	4.26
		60.17	9.14	9.01	1.53	19.23	20.17	4.89	84.64	88.62	4.70
				平均值	2.48		平均值	4.36		平均值	4.75

由动量方程可知,一般形式的水跃方程为:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 h_{c1} = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 h_{c2} \quad (9)$$

式中, Q 为流量, g 为重力加速度,取 $g=9.81m/s^2$; A_1 、 A_2 、 h_{c1} 、 h_{c2} 分别为跃前、跃后断面的面积和断面形心位置的水深。

张晓宏^[17]、张志昌等^[18]研究表明中国外翻式 U 形渠道水跃方程也符合公式(9),并且后者指出 h_2/h_1 与跃前断面 Fr_1 呈现较好的线性关系,即:

$$\frac{h_2}{h_1} = m + nFr_1 \quad (10)$$

式中, m 、 n 为与渠道断面形状有关的两个参数。

本研究中,渠道断面形式亦为外翻式 U 形渠道,两种工况条件下,流量范围均为 30~60L/s,因此,基于本数值计算方法在该流量范围内对各工况随机假

定 20 组流量,并分别解析出其共轭水深数据,通过运用 MATLAB 对大量数据进行统计分析,最终得到本实验条件下 U 形渠道机翼形量水槽后水跃共轭水深的近似计算公式,即:

$$h_2 = (1.47 + 0.35Fr_1)h_1 \quad (11)$$

为了评价式(11)的精度,将所有实测与数值模拟跃前水深数据代入该式进行跃后水深相对误差计算,其误差平均值仅为 2.96%,因篇幅所限,仅列出实测数据部分的误差对比,如表 4 所示。

由表 4 可知,除流量在 60.17L/s 时相对误差较大(5.10%),其它各工况条件下公式计算水深与实测跃后水深的误差均较小,满足工程实际要求,且该公式形式简单,物理概念较为明确,计算精度高,可为工程设计与运用提供一定的参考。

表 4 实测数据精度评价表

Table 4 Accuracy evaluation for measured data

工况序号	量水槽收缩比 ϵ	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	Fr_1	实测跃前水深 h_1/cm	实测跃后水深 h_2/cm	公式计算跃后水深 h_2'/cm	相对误差 $m/\%$
1	0.49	29.85	2.6196	6.76	15.87	16.14	1.67
		40.25	2.6783	7.79	19.11	18.75	1.86
		50.10	2.5805	8.89	21.53	21.10	2.01
		59.87	2.3928	10.14	24.09	23.40	2.87
		30.18	7.3639	3.60	14.19	14.57	2.68
2	0.45	39.88	5.8555	4.64	16.51	16.33	1.09
		49.59	4.0994	6.30	17.55	18.30	4.28
		60.17	2.1178	9.14	19.23	20.21	5.10

3.4 水跃的能量损失

根据能量守恒定律,选用跃前、跃后断面水头之差表示水跃的能量损失,即:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (12)$$

式中, E_1 、 E_2 、 h_1 、 h_2 、 v_1 、 v_2 分别为跃前、跃后断面的总水头、位置水头(由于底坡较小且断面间距离较短,对水头的影响可以忽略,故选取该参数为断面

水深)、断面平均流速; α_1 、 α_2 分别为跃前、跃后断面的动能修正系数,取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 。

水跃的消能系数为:

$$K_j = \frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{2 + Fr_2^2}{2 + Fr_1^2} \quad (13)$$

式中, Fr_1 、 Fr_2 分别为跃前、跃后断面的弗劳德数。

将各工况模拟与实测参数带入式(13),即可求得水跃的消能效率,结果如图 7 所示。

由图7可以看出:消能效率 K_j 与跃前断面 Fr_1 呈现出很好的相关关系,随着跃前断面 Fr_1 增大,消能效率 K_j 亦上升,如在工况2中,当 $Fr_1 \geq 4.0$ 时, K_j 已接近60%,当 $Fr_1 \geq 7.0$ 时, K_j 达到80%以上,但增率逐渐减小,这与吴持恭^[19]、张志昌等^[18]的研究基本一致;工况1跃前断面 Fr_1 较小且相对集中,与之相应的消能效率 K_j 亦较小,最大值也仅为43.22%。同时笔者在试验研究过程中也发现,虽然实测结果与数值计算结果拟合较好,但该工况下水跃跃后段的湍动程度及波动范围较之工况2明显加剧,而采用一般工程手段对其实现精准量测也更为繁琐和困难。Chow^[20]与吴持恭^[19]先后指出,当 $2.5 \leq Fr_1 < 4.5$ 时, K_j 一般情况下小于44%,由于同一单宽流量条件下工况1较工况2的跃前水深 h_1 大,因而跃前断面 Fr_1 较小,其跃前段大部分动能被转化成跃后段的湍动能和波动能并不断向下游传播,因此其水跃段的能量损失较小。鉴于此,对工况1的水跃能量损失研究只是针对某一时刻而言,同时也说明所采用的数值模拟方法能够适用于低弗劳德数水跃的研究。

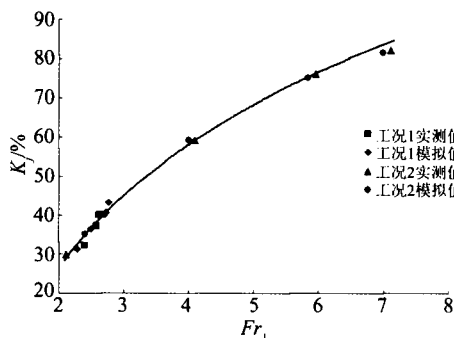


图7 水跃能量损失示意图

Fig. 7 Schematic diagram of hydraulic jump energy dissipation

4 结 论

(1) 以某小型灌区末级渠系改造工程为原型,针对其两种工况,选用 TruVOF 方法和 Favor 技术相结合的湍流数学模型,对 U 形渠道机翼形量水槽水跃过程进行三维数值模拟,并采用与原型 1:1 比尺的水工模型试验对模拟结果的各项参数指标进行对比验证。结果表明二者较为吻合,为进一步采用该数值模拟方法研究平原缓坡灌区末级渠系量水设备及其在过流过程中的水跃问题提供了一定的参考和依据;

(2) 通过对大量的实测与数值仿真数据进行统计分析,得到了 U 形渠道机翼形量水槽水跃共轭水深的近似计算公式,通过精度分析表明,该公式形式简单,物理概念较为明确,计算精度高,可以较好地适

用于工程实践;

(3) 工况1水跃段水头损失较低,但其跃后段湍动及波动程度较大,可通过适当减小量水槽底坎高度或增大收缩比等手段促使水跃充分发展;工况2较工况1水头损失较高,但其整体流场较为稳定,且过流进入稳态后即被淹没,较为适用于低水头的平原缓坡灌区末级渠道;

(4) 由于充分发展的水跃段大量掺气,且流线条率较大,因此其断面流速分布、共轭水深及跃长等相关水力特性在数值计算与模型试验过程中均存在着一定程度的误差,尤以跃后段较为明显,因此,本研究有必要为此做进一步的改进与优化。

参考文献:

- [1] 尚民勇. U形长喉道量水槽的试验研究及其应用[J]. 陕西水利, 1991, (3): 41-44.
- [2] 王智, 朱凤书, 刘晓明. 平底抛物线形无喉段量水槽试验研究[J]. 水利学报, 1994, (7): 12-23.
- [3] 张志昌, 张宗孝, 闫晋垣, 等. 一种新型的量水设备-U形渠道直壁式量水堰[J]. 陕西机械学院学报, 1992, 8(1): 44-52.
- [4] 何武全, 王玉宝, 蔡明科. U形渠道圆柱体量水槽研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 573-577.
- [5] 吕宏兴, 刘焕芳, 朱晓群, 等. 机翼形量水槽的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 119-123.
- [6] 吕宏兴, 杨岑, 路泽生, 等. 引洮供水一期工程总干渠糙率原型观测(1)——研究方法与水、流量监测[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 41-45.
- [7] 胥维纤, 吕宏兴, 潘志宝. 末级渠道机翼形量水槽标准化试验研究[J]. 节水灌溉, 2010, (1): 39-41.
- [8] 潘志宝, 吕宏兴, 张晓斐等. 梯形渠道机翼形量水槽试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 97-100.
- [9] 吕宏兴. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [10] 戴会超, 王玲玲. 淹没水跃的数值模拟[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 184-188.
- [11] ABBASPOUR A, FARSAZADEH D, HOSSEINADEH Dalir A H, et al. Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models[J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2009, 33(2): 61-72.
- [12] MIGNOT E, CIENFUEGOS R. Energy dissipation and turbulent production in weak hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(2): 116-121.
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, (39): 201-225.

(下转第101页)

最后, 进入 S_2 段后, 阀门轨线方程为:

$$v = kS$$

切换点坐标为:

$$v_2 = \frac{a_m}{k}$$

$$S_2 = \frac{a_m}{k^2}$$

图 6 中, 当阀门速度降为零时, 阀门的 S 并不为零, 其原因是当气源压力比较低时, 阀门开度比较大, 阀门开启到位的时间会较长, 而此时压力已下降较多, 这时需根据气源压力的情况适当增加调压阀的开度。

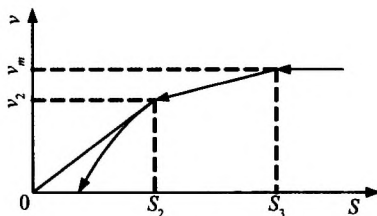


图 6 减速阶段 $a_{mm} > a_m$
Fig. 6 The phase of decelerating

3 应用及结论

本系统所用调压阀通径为 150mm, 阀芯行程 60mm, 重约 6×10^3 kg, 调压阀的执行机构选用 SIEMENS 公司的 SIMODRIVE 611-A 模拟驱动交流伺服系统, 功率 11kW, 输出力矩 55Nm, 配置 1:10 减速器, 实际输出力矩约 550Nm, 电机驱动功率放大器采用速度自动调节模式, 控制策略采用西门子可编程控制器软件实现, 控制输出直接控制伺服电机转速, 阀门位置的检测, 选用德国 Novotechnik 公司的直线位

移传感器。本方案经试验调试验证, 最高压力下阀门快速开启时间 1.6~1.8s(调压阀从全关到 22% 的开度), 比原专用快速阀开启时间 1.2~1.5s(快速阀从全关到全开状态)略慢; 总压测点处压力上升速率与采用专用快速阀基本一致, 达到预期的效果, 可以满足应用要求。

尽管将调压阀当作快速阀使用, 其动作时间比专用快速阀慢, 但由于新的方案只改变了系统的启动过程, 系统充压过程结束后压力控制算法未变, 因此, 对系统性能没有不利影响。通过采用新的设计方案, 减小了系统体积和重量, 增加了运载车的有效载荷, 节省了经费, 更好地适应了车载的需要。

参考文献:

- [1] 2006 版新编调节阀设计及应用实务全书[S]. 中国知识出版社, 2006.
- [2] WILIAM C Dunn. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control[S]. McGraw-Hill, 2005.
- [3] Hong Kong IGDS 2000 Industrial Control.
- [4] GREGORY K McMillan. Process-industrial instruments and control handbook(Fifth Edition)[S]. McGRAW-HILL, 1999.

作者简介:



李 政(1966-), 男, 湖北松滋人, 高级工程师。研究方向: 自动控制系统设计研究。通讯地址: 四川绵阳中国空气动力研究与发展中心(621000), E-mail: lizn_cardc@126.com

(上接第 71 页)

- [14] MICHAEL R B. Lagrangian VOF advection method for flow-3D [J]. Flow Science, Inc. Technical Note FSIO3TN63R, 2004, 1(7): 1-11.
- [15] XING Fang P E, SHOUDONG Jiang, SHOEB R Alam. Numerical simulations of efficiency of curb-opening inlets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(1): 62-66.
- [16] MATTHEWS B W, FLETCHER C A J, PARTRIDGE A C, et al. Computations of curved free surface water flow on spiral concentrators[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(10): 1126-1139.
- [17] 张晓宏, 吴文平, 徐天有. 一般 U 形渠道的水跃计算 [J]. 西北纺织工学院学报, 1997, 11(4): 372-374.
- [18] 张志昌, 李郁侠, 朱岳钢. U 形渠道水跃的试验研究[J].

西安理工大学学报, 1998, 14(4): 377-381.

- [19] CHOW V T. Open-channel hydraulics[M]. New York: USA, McGraw-Hill, 1959.
- [20] 吴持恭. 水力学第 3 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

作者简介:



孙 斌(1984-), 男, 河南新乡人, 博士研究生。研究方向: 工程水力学、计算流体力学。通讯地址: 陕西省杨凌示范区渭惠路 23 号西北农林科技大学水建学院综合楼 224 室(712100), 联系电话: 13571816607, E-mail: sunbin65@hotmail.com, 通讯作者: 吕宏兴, 教授, 博士生导师, 主要从事工程水力学、灌溉水力学方面的研究, E-mail: lvhongxing@nwsuaf.edu.cn