

基于CFD的巴歇尔槽进口连接段 结构优化与水动力学特性分析

许虎¹, 吴文勇^{1,2*}, 王振华¹, 乔长录¹, 王秋良³

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;

2.中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3.深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518000)

摘要:【目的】探究巴歇尔槽上游进口连接段最优形式。【方法】采用SolidWorks建模软件对不同进口连接段形式(内接圆弧过渡段、外接圆弧过渡段、直面过渡段、无过渡段)建立物理模型, 利用ANSYS18.0软件对模型进行网格划分与数值模拟, 运用Tecplot后处理软件, 在自由出流情况下, 分析不同进口连接段形式对水头损失、水面线、测流误差、流速及压强的变化情况, 得出输水效率最高的连接段形式。【结果】采取进口连接段过渡的巴歇尔槽相比无连接段过渡的水流流线更平缓; 无连接段过渡的巴歇尔槽局部水头损失最大、内接圆弧过渡段形式巴歇尔槽局部水头损失最小。巴歇尔槽测流精度相对误差随着来流流量的增大而减小; 当来流流量为 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 4种设计方案测流误差分别为: 16.3、15.9、15.4、17.7; 当来流流量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 4种设计方案测流误差分别为: 6、5.9、5.2、5.5。4种设计方案中, 直面过渡段形式巴歇尔槽测流精度最高; 巴歇尔槽纵剖面速度、压强云图变化梯度明显, 流速最大处位于喉道段、静水压强最大处位于上游雍水段。湍动能云图数值最大处位于气相所分布的区域, 气相相较于液相具有更强的流动性, 分子间的能量交换更加剧烈, 内能消耗更大。【结论】测流工作应该在来流流量较大时完成、进口连接段加以衬砌, 防止因静水压强导致巴歇尔槽形变而产生测流误差。

关键词: 巴歇尔槽; 进口连接段; 数值模拟; 测流精度

中图分类号: TV131.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020236

OSID: 

许虎, 吴文勇, 王振华, 等. 基于CFD的巴歇尔槽进口连接段结构优化与水动力学特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 77-83.

XU Hu, WU Wenyong, WANG Zhenhua, et al. Optimizing Structure of Inlet Connection Section of the Parshall Flume and Analyzing Hydrodynamics in It Using CFD[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 77-83.

0 引言

【研究意义】水资源优化调配是农业节水灌溉的基础, 做好灌区量水工作是保障灌区合理运营的关键。巴歇尔槽具有量测精度高、读数方便、不易淤积等优点, 在我国灌区应用广泛^[1]。水流由上游流经进口收缩段时, 水位升高、流速增大形成临界流。此时上游水位与流量形成单一的函数关系, 通过量测上游水位能够推求渠道流量变化^[2]。

随着计算流体力学(CFD)的发展, 数值模拟应

用于水利工程设施的相关研究^[3]。通过建立数值模型, 能够将流体运动轨迹、流速、压强、温度等物理量清晰地呈现出来。相较于传统的模型试验, 数值模拟具有适用性强、试验周期短、计算结果清晰等优点^[4]。

【研究进展】近年来, 国内外学者对各式量水装置进行模型试验与数值模拟分析, 得出不同工况下槽内水流水力特性和试验结果。刘英等^[5]、吉庆丰等^[6]对不同体型圆柱形量水柱三维水流运动进行数值计算结果表明, 水力参数的实测值与模拟值具有良好的 consistency, 在收缩比为0.63时, 最大测流误差为4.95%, 三维水流流态与试验结果一致。孙斌等^[7]、宋金妍^[8]、肖苡轲等^[9]对不同收缩比的翼型量水槽进行流速场、水面线、水头损失、佛汝德数水力计算, 认为收缩比为0.50~0.60比较合理, 并对机翼形量水槽翼面进行优化。张敏等^[10]基于Flow-3D软件对不同喉道长度的

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400102, 2017YFC0403205); 国家自然科学基金项目(51769030)

作者简介: 许虎(1995-), 男, 河南上蔡人。硕士研究生, 主要从事灌溉节水理论与技术方面的研究。E-mail: Xh_Shz832000@163.com

通信作者: 吴文勇(1977-), 男, 江苏射阳人。教授级高级工程师, 博士, 主要从事灌溉节水原理与技术方面的研究。E-mail: wenyongwu@126.com

短喉道量水槽进行数值模拟选型,得出临界水深随喉道长度的增加而增加,短喉道量水槽较长喉道和无喉道量水槽水头损失小,且水流流态平稳,形式最优。侯莹等^[11]、冉聘颀等^[12]、景志芳等^[13]对无喉道量水槽过渡段形式水力特性分析,建立流量公式,得出直线形过渡段形式测流精度高但水头损失大、圆形过渡段形式测流精度低但水头损失小,湍动能耗散主要在变比和底部区域,在测流范围内水头损失小于总水头损失的 10%,试验值与模拟值相吻合。

数值模拟对量水堰的试验研究也同样适用,柳双环等^[14]基于 FLUENT 软件对 U 形渠道三角形剖面堰数值模拟,得出不同底坡、渠道边坡、堰高下的水头损失,并对不同堰高拟合流量公式。叶青青^[15]使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,VOF 方法对无喉堰在自由出流和淹没出流情况下拟合流量公式,通过数值模拟得出自由液面、流速、压力云图分布情况。【切入点】在实际工程建设中,巴歇尔槽与渠道上游连接段并没有明确的要求,目前常见的过渡段形式有圆弧段连接、斜面连接和无过渡连接。不同连接段形式对局部水头损失、水面线波动、测流精度有很大影响,在实际的输水过程中,连接段形式的选取决定了渠道输水效率高与水资源配置决策。【拟解决的关键问题】本文采用数值模拟方法为巴歇尔槽连接段优化选型,为灌区巴歇尔槽的流道设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 物理结构模型

采用标准设计尺寸(表 1)和 SolidWorks 建模软件建立喉道宽度为 0.25 m 巴歇尔槽三维物理模型。巴歇尔槽由上游收缩段、喉道段、下游扩散段组成,结构尺寸如图 1、图 2 所示。Z1 断面为巴歇尔槽俯视图(图 1),巴歇尔槽上下游 0.25 m 处 X1、X2 断面作为水力特性计算断面(图 2)。置于宽度为 1.10 m

的矩形渠道内,在上游收缩段和喉道段设置水位观测点,记录水位信息。

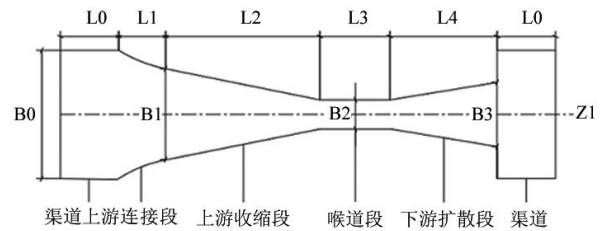


图 1 巴歇尔槽俯视

Fig.1 Parshall flume vertical view

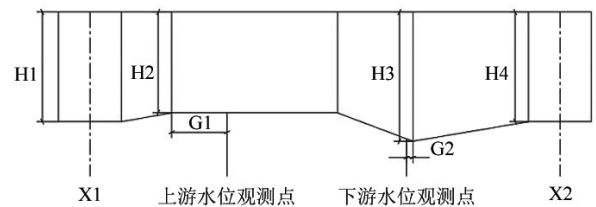


图 2 巴歇尔槽左视

Fig.2 Parshall flume left view

上游收缩段与渠道采用 4 种形式连接(图 3),分别为方案 1(内接圆弧过渡段)、方案 2(外接圆弧过渡段)、方案 3(直面过渡段)、方案 4(无过渡段)。方案 1、方案 2 和方案 3 进口连接段 L1 长度为 0.4 m(3 种方案巴歇尔槽长度尺寸相同,故不在表 1 中详细描述,统一由方案 1 表示。),方案 4 无连接段 L1 长度为 0。

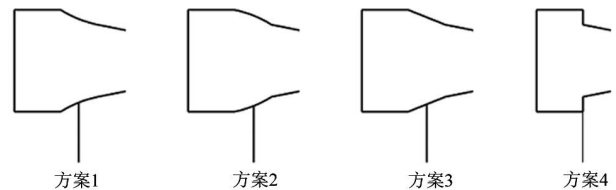


图 3 巴歇尔槽上游连接段形式

Fig.3 Parshall flume upstream inlet connection section

表 1 标准巴歇尔槽结构尺寸

Fig.1 Standard Parshall flume structural dimensions

方案	渠道及上游连接段				上游收缩段				喉道段				下游扩散段		
	L0	L1	B0	H1	L2	B1	H2	G1	L3	B2	H3	G2	L4	B3	H4
方案 1	0.5	0.4	1.1	0.87	1.325	0.78	0.8	0.44	0.6	0.25	1.025	0.05	0.92	0.55	0.87
方案 4	0.5	0	1.1	0.87	1.325	0.78	0.8	0.44	0.6	0.25	1.025	0.05	0.92	0.55	0.87

1.2 数学计算模型

明渠流动涉及气-液两相流动,VOF(流体体积)模型在处理多种互不交融的交界面时有很好的应用。在 VOF 模型中,不同流体组分共用一套动量方程,对每一个网格流场计算时都记录下各组分所占有的体积率,跟踪自由流体表面^[16]。在处理自由液面、分层流动、水坝决堤时有比较精确的效果。对于水气二

相流场,假设水和空气具有相同的速度,在每个网格单元中,水和空气的体积分数之和为 1,即:

$$a_w + a_a = 1, \quad (1)$$

式中: a_w 、 a_a 分别表示计算域中每一个控制单元内水和空气的体积分数($a_w=1$ 时,表示控制体积内全部充满水;当 $a_w=0$ 时,表示控制体积内全部充满空气)。

水气交界面使用连续性方程进行追踪,即:

$$\frac{\partial a_w}{\partial a_a} + u_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

式中： u_i 为速度分量； x_i 为坐标分量。

流体运动遵循三大守恒定律，即：质量守恒定律、能量守恒定律、动量守恒定律。明渠内水流为不可压缩流且黏性恒定，不涉及能量交换。对质量守恒定律和动量守恒定律的连续性方程和动量方程进行描述^[17]。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0, \quad (3)$$

式中： ρ 为密度； t 为时间； u 为速度矢量。

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g, \quad (4)$$

式中： u_i 、 u_j 分别为 x 方向流速分量 ($i, j=1, 2, 3$)； p 为静压力； t 为时间； μ 为黏滞系数； ρ 为流体密度； g 为重力加速度。

明渠水流为充分发展的湍流，需要满足湍流输运方程。RNG k - ε 湍流模型考虑了平均流动中的旋转流动，能够很好地处理明渠水流流线弯曲较大的情况。

湍动能 k 表示为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon. \quad (5)$$

耗散率 ε 表示为：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

式中： k 为湍动能 (m^2/s^2)； ε 为湍动能耗散率 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s}^2)$ ； μ 为动力黏滞系数 $\text{N}/(\text{s m}^2)$ ； μ_{eff} 为有效动力黏滞系数

$\text{N}/(\text{s m}^2)$ ，(μ 与 μ_t 之和，其中： $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ， $C_\mu = 0.0845$ ，

$\alpha_k = \alpha_s = 1.39$)， G_k 为平均流速梯度引起的湍动能 k 的产生项 ($G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ； $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{(1+\beta\eta^3)}$ ； $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ；

$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon}$ ； $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ； $\eta_0 = 4.377$ ； $\beta = 0.012$ ；

$C_{2\varepsilon} = 1.68$ ； $i, j=1, 2, 3$)。

1.3 网格划分与无关性分析

利用 ANSYS18.0 软件进行网格划分，结构性网格具有网格节点分布规则、占用计算资源较小等优点，本次计算模型采用六面体结构网格划分。为了提高计算精度，更好地模拟近壁面水体流动特性，对壁面网格自下而上进行整体加密。为了确定网格单元个数及网格整体质量，将全局网格最大尺寸分别设定为 0.05、0.04、0.03、0.02、0.01 划分网格。为了探究不同网格单元大小对于模拟结果的影响，对 5 种尺寸的网格文件进行数值模拟计算。设置进口流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，流速 0.232 m/s ，渠道进口水深 0.392 m ，求解方法与边界

条件设置按照 1.4 部分内容。分析计算结果：当网格最大单元尺寸小于 0.03 以后，上游水深不再随着网格加密发生变化（表 2）。因此选用最大网格尺寸大小为 0.03 对模型网格划分（图 4），网格整体质量在 0.7 以上。4 种方案下网格单元个数分别为 303 452、303 918、303 726、301 794。

表 2 网格无关性分析

Fig.2 Analysis of meshing independence					
最大网格单元尺寸	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
水深/m	0.320	0.321	0.322	0.322	0.322

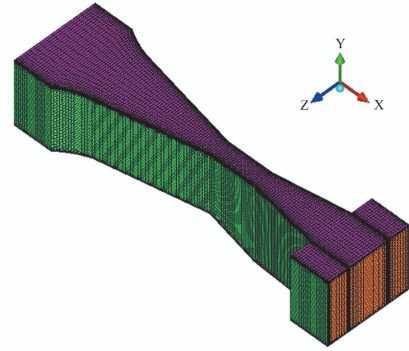


图 4 六面体网格划分

Fig.4 Hexahedral meshing

1.4 数值求解方法与边界条件

1.4.1 求解方法

数值模型基于三维稳态压力法求解器，VOF 方法，对 Y 方向设置重力 -9.81 m/s^2 。基本控制方程为 N-S 方程，采用 RNG k - ε 湍流模型计算。采用一阶迎风格式离散，PISO 算法进行流场计算，对全局区域进行初始化，设置残差收敛值为 0.000 1，迭代步数为 1 000 步。

1.4.2 边界条件

在自由出流情况下分别设置来流流量：0.01、0.05、0.10、0.15、0.20 m^3/s 。渠道进口分别设置气液两相，空气相采用压强入口，默认为标准大气压强、水流相采用速度入口，分别设置进口流速和水力直径、出口设置为自由出流、壁面设置为标准无滑移壁面。

2 结果与分析

2.1 模型合理性验证

为了验证数值模型和边界条件能够满足实际情况，对方案 1 模型进行数值模拟并与文献试验结果进行对比分析（文献试验模型为喉道宽度为 0.25 m 的标准巴歇尔槽，与方案 1 模型结构尺寸一致），比较二者误差^[18]。上、下游水深与流量通过对计算结果进行数据处理得到。如表 3 所示，数值模拟结果与模型试验结果最大误差小于 5.22%，表明此次模型选取较合理，能够满足数值模拟计算。

表 3 数值模拟结果与试验结果误差分析

Fig.3 Error analysis of simulation results and test results

试验结果	工况 1 (自由出流)			工况 2 (自由出流)		
	上游水深/m	下游水深/m	流量/(m ³ s ⁻¹)	上游水深/m	下游水深/m	流量/(m ³ s ⁻¹)
模型试验值	0.136 9	0.054 6	0.025 37	0.166 7	0.067 2	0.034 62
数值模拟值	0.132	0.052	0.024 62	0.158	0.065	0.033 21
相对误差/%	3.58	4.76	2.96	5.22	3.27	4.07

2.2 水力特性分析

2.2.1 水面线与流线

运用 Tecplot 软件对模拟结果进行后处理分析,取 Z1 断面作为研究断面,图 5 为过流流量为 0.1 m³/s 时,4 种方案的巴歇尔槽水面线模拟情况。水流由渠道进口流经至上游收缩段,由于流道束窄形成雍水水位升高,此时水流流速增大形成临界流。水流由喉道段流经至下游扩散段,流道扩宽形成跌水水位降低,此时水流流速减小流向下游。4 种方案整体而言,喉道段前后水位落差较大,流线曲率变化在此处达到极值。水流方向发生较大的改变,分子间相互作用加剧,动能转化为内能,水头损失较大。方案 1、方案 2、方案 3 由于过渡段的存在水流流线较为平缓;方案 4 由于没有过渡段连接,水流流線在渠道与巴歇尔槽交界处有较大的起伏。

2.2.2 局部水头损失

依据不可压缩流体恒定总流的能量方程,对巴歇尔槽上下游水头损失计算。由于沿程渠道较短,沿程水头损失相对于整体水头损失比值过小,不予考虑。取上下游断面 X1、X2 断面作为计算断面,其能量守恒方程为^[19]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2}, \quad (7)$$

表 4 不同流量下 4 种方案水头损失

Fig.4 Head loss of four schemes under different flow rates

指标	方案 1					方案 2				
流量/(m ³ s ⁻¹)	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
水头损失/m	0.054	0.086	0.141	0.181	0.209	0.058	0.093	0.147	0.182	0.216
指标	方案 3					方案 4				
流量/(m ³ s ⁻¹)	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
水头损失/m	0.062	0.082	0.144	0.189	0.211	0.061	0.092	0.141	0.185	0.228

2.2.3 测流精度分析

依据《JJG(水利)004—2015 明渠堰槽流量计计量检定规程》流量计算公式,对 4 种方案巴歇尔槽水流流量进行计算。自由出流情况下,流量与上游水头呈现单一的因变关系,流量计算式为:

$$Q = Ch^n, \quad (8)$$

式中: Q 为流量 (m³/s); C 为流量系数; h 为上游实测水头; n 为指数。

式中: z_1 、 z_2 分别为上下游液位高度 (m); p_1 、 p_2 分别为上下游静水压强 (kN/m²); γ 为流体重度 (N/m³); α_1 、 α_2 分别为动能修正系数,取值为 1, v_1 、 v_2 分别为断面平均流速 (m/s); g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s², h_{w1-2} 为上下游水头损失 (m)。

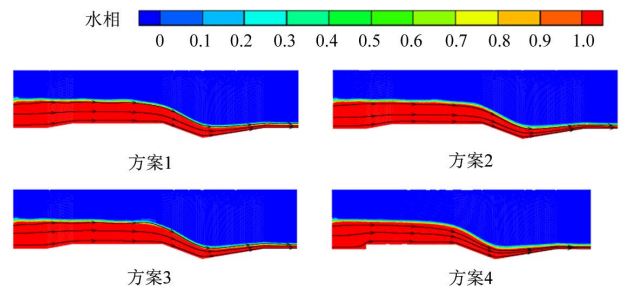


图 5 4 种方案水面线

Fig.5 Four schemes for surface lines

由表 4 所示,4 种方案下的巴歇尔槽局部水头损失与流量之间关系,局部水头损失随着来流流量的增大而增加。4 种方案平均水头损失:方案 4>方案 2>方案 3>方案 1。方案 1、方案 2 采用弧面过渡,水流流经圆弧壁面形成 2 个分力。一部分分力垂直于壁面,产生损耗;另一部分分力平行于壁面,汇入主流。方案 4 无过渡段直接采用边墙连接,水流流动方向垂直于边墙发生撞击,动能转化为内能,水力损失最大。

由表 5 所示,4 种方案巴歇尔槽测流精度相对误差分析,测流精度相对误差随来流流量的增大而减小。

当来流流量较小时,上游液位较低,液位高度读数误差相较于液位高度占比较大,因而产生较大的流量计算误差;当来流流量增大时,上游液位较高,液位高度读数误差相较于液位高度占比较小,流量计算误差变小。方案 1、方案 2、方案 3 由于过渡段的存在,能够发挥引导来流水流的功能,使上游液位波动

范围较小，读数精度较方案 4 更加准确。通过对 4 种方案巴歇尔槽测流精度平均误差计算得出结论：方案 4>方案 2>方案 1>方案 3，方案 3 连接形式的巴歇尔槽有较高的测流精度。

表 5 不同流量下 4 种方案测流精度相对误差

Fig.5 The relative errors of measuring accuracy of four schemes under different flow raters

指标		方案 1					方案 2				
流量/($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	
相对误差/%	16.3	10.1	7.5	6.3	6	15.9	10.3	8	6.5	5.9	
指标		方案 3					方案 4				
流量/($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	
相对误差/%	15.4	9.7	8.2	5.8	5.2	17.7	10.3	7.7	6.2	5.5	

2.3 流场分析

2.3.1 速度

取 Z1 断面作为研究断面，图 6 为过流流量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，4 种方案巴歇尔槽纵剖面速度云图。水流流速沿渠道进口至渠道出口方向依次增大，流速梯度变化明显。水流流速大小与流道宽度成反比，流速变化引起水流流态由缓流向急流过渡，在喉道附近形成临界流，达到测流目的^[20]。在水流与空气交界处，水面波动引起空气局部范围内的扰动，产生较小的流速变化。

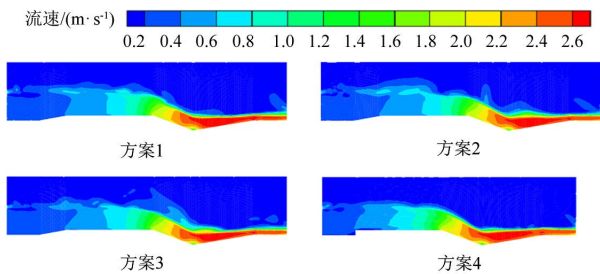


图 6 4 种方案速度

Fig.6 Four schemes for velocity

2.3.2 压强

取 Z1 断面作为研究断面，图 7 为过流流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，4 种方案巴歇尔槽纵剖面压强云图。静水压强随着水深的增加而增大，压强梯度变化明显。渠道上游雍水，上游连接段处静水压强最大。在巴歇尔槽的安装施工过程中，应当在上游连接段处衬砌加固，防止因静水压强过大导致巴歇尔槽物理结构变形而产生测流误差。

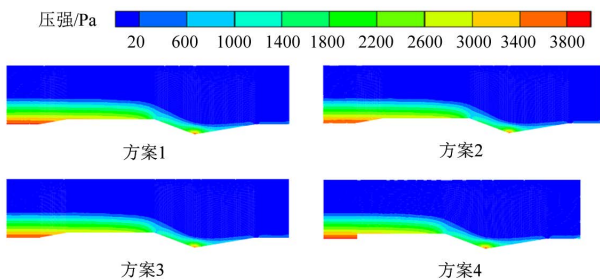


图 7 4 种方案压强

Fig.7 Four schemes for pressure

2.3.3 湍动能

取 Z1 断面作为研究断面，图 8 为过流流量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，4 种方案巴歇尔槽纵剖面湍动能云图。湍动能数值较大处皆位于气相所分布的区域，因为气体相较于液相有更大的流动性与扩散性，分子间的能量交换与传递更强烈。湍动能数值最大处位于水流与空气交界处，由于水体运动带动水气交界处空气做相对运动，气体分子间做剪切运动产生摩擦力，消耗内能。水相区域的湍动能分布沿着水流方向有增大的趋势，流道的突扩和突缩改变水流的流动方向使水体内部产生旋涡，液体分子之间发生大量无规律的碰撞与摩擦，消耗水流能量。湍动能数值较大处一般位于分子运动活跃的区域。

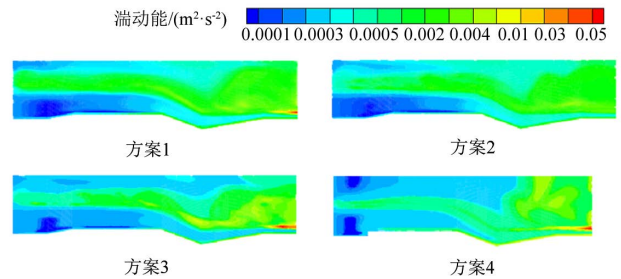


图 8 4 种方案湍动能

Fig.8 Four schemes for turbulent kinetic energy

3 讨论

巴歇尔槽普遍应用于我国大中型灌区，上游连接段作为流道的一部分，在施工过程中考虑其最优形式尤为重要。巴歇尔槽进口连接段形式一方面要考虑测流精度、水头损失的因素，另一方面也要根据渠道断面形状、施工条件来决定。内接圆弧过渡段形式水头损失小，直面过渡段形式测流精度高^[11]，无过渡段形式水头损失较大、测流精度低。

本文研究发现巴歇尔槽在来流流量小的情况下，测流精度较低，为了保证较高的测流精度应在来流流量较大的情况下进行流量量测工作。局部水头损失随着来流流量的增加而变大，流速云图与压强云图分布符合水力学定律，水流在喉道段由于流道缩

窄形成临界流此时流速最大,静水压强与淹没水深呈线性关系,随着水深的增加而变大。湍动能大小衡量分子间能量、动量的传递关系,气体相较于液体有更强的流动性与扩散性。气体分子的活跃度与无规律运动更加强烈,因此耗散性更强。

从工程建设方面考虑:由于流道上游雍水的缘故,上游连接段处静水压强最大,在安装过程中对此处进行加固,防止流道变形沉降。数值模拟具有成本低、计算结果准确、后处理可视化等优点,能够应用于水利工程的建设。文中仅对自由出流情况下的巴歇尔槽进行水力特性数值模拟分析,后期将对淹没出流情况下的巴歇尔槽进行水力特性数值计算,并比较二者之间的差异。

4 结 论

1) 采用进口连接段过渡的巴歇尔槽相比无连接段过渡的巴歇尔槽水流流线更加平缓、起伏较小。

2) 内接圆弧过渡段形式巴歇尔槽局部水头损失最小、无连接段过渡的巴歇尔槽局部水头损失最大。

3) 为提高测流精度,巴歇尔槽上游连接段宜采用直面过渡形式。

4) 巴歇尔槽纵剖面速度云图与压强云图变化梯度明显,流速最大处位于喉道段、静水压强最大处位于上游雍水段,湍动能数值较大处位于流体运动活跃的区域。

参考文献:

- [1] 徐义军, 韩启彪. 我国灌区量水槽研究概述[J]. 节水灌溉, 2012(5): 56-59.
XU Yijun, HAN Qibiao. Summary of current research on measuring flume in irrigation districts of China[J]. Water Saving Irrigation, 2012(5): 56-59.
- [2] 李华. 宽喉道巴歇尔水槽水力特性的研究[J]. 水文, 1988, 8(1): 38-42, 54.
- [3] 徐波, 张从从, 李占超, 等. 基于 CFD 的导流墩几何参数对闸站合建枢纽通航水流条件的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 115-122.
XU Bo, ZHANG Congcong, LI Zhanchao, et al. Using CFD model to analyze the influence of geometric parameters of diversion piers on water flow in sluice station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 115-122.
- [4] 颜红勤, 蒋红樱, 成立, 等. 基于 CFD 的泵安装位置对一体化泵站水力特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 90-95.
YAN Hongqin, JIANG Hongying, CHENG Li, et al. Study on the influence of pump installation location on the hydraulic performance of integrated pumping station by CFD[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 90-95.

- [5] 刘英, 王文娥, 胡笑涛, 等. U 形渠道圆头量水柱测流影响因素试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 97-106.
LIU Ying, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. Experiment and simulation of factors affecting flow measurement of water-measuring column with round head in U-shaped channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 97-106.
- [6] 吉庆丰, 袁晓渊, 葛蕴, 等. 梯形渠道圆柱形量水槽水力特性数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 59-61.
JI Qingfeng, YUAN Xiaoyuan, GE Yun, et al. Numerical simulation research on hydraulic characteristics of cylinder measuring flume in trapezoidal channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 59-61.
- [7] 孙斌. 机翼形量水槽测流机理与体形优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
SUN Bin. Mechanism of flow gauge and structure optimization for airfoil-shaped measuring flume[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [8] 宋金妍. 翼型量水槽水力特性数值模拟及体型类比研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
SONG Jinyan. Research on numerical simulation of hydraulic characters and somatotype analogy for airfoil-shaped measuring flume[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [9] 肖苒轲, 王文娥, 胡笑涛. 基于 CFD 的田间量水槽选型研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 126-131.
XIAO Yizhou, WANG Wen'e, HU Xiaotao. A comparison of flumes in the field based on CFD[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(8): 126-131.
- [10] 张敏, 马孝义, 景志芳, 等. 基于 VOF 的弧底梯形短喉道量水槽水力性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 145-150.
ZHANG Min, MA Xiaoyi, JING Zhifang, et al. Research on the hydraulic performance of arc-based trapezoidal short-throat flow measurement flume based on VOF[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12): 145-150.
- [11] 侯莹, 张新燕. 过渡段形式对无喉道量水槽水力特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 19-22.
HOU Ying, ZHANG Xinyan. Influence of transition section on hydraulic characteristics of cut-throat flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 19-22.
- [12] 冉聃颖, 王文娥, 胡笑涛. 梯形喉口无喉道量水槽设计及其水力性能模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 177-183.
RAN Danjie, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Design of trapezoidal cut-throated flume and its hydraulic performance simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 177-183.
- [13] 景志芳, 马孝义, 杨珮珮. 弧角梯形渠道无喉道量水槽水力特性研究[J]. 节水灌溉, 2017(7): 107-111.
JING Zhifang, MA Xiaoyi, YANG Peipei. Hydraulic characteristics of arc angle trapezoidal canal without throated measuring flume[J]. Water Saving Irrigation, 2017(7): 107-111.

- [14] 柳双环, 张敏, 陈超飞, 等. U 形渠道三角剖面堰数值模拟与水力性能探究[J]. 节水灌溉, 2018(8): 108-113.
- LIU Shuanghuan, ZHANG Min, CHEN Chaofei, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of triangular profile weir for U shape channel[J]. Water Saving Irrigation, 2018(8): 108-113.
- [15] 叶青青. 无喉堰水力特性及三维数值模拟[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- YE Qingqing. Cutthroat flume hydraulic characteristics and three-dimensional numerical simulation[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [17] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [18] 李杰. 巴歇尔量水槽水力特性试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- LI Jie. Study and experiment on hydraulic characteristics of parshall flume[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [19] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [20] 田志刚, 李延开, 李浩. 巴歇尔量水槽选型安装存在问题及建议[J]. 山东水利, 2018(7): 1-2, 8.
- TIAN Zhigang, Li Yankai, Li Hao. Problems and suggestions in selection and installation of Parshall measuring flume[J]. Shandong Water Resources, 2018(7): 1-2, 8.

Optimizing Structure of Inlet Connection Section of the Parshall Flume and Analyzing Hydrodynamics in It Using CFD

XU Hu¹, WU Wenyon^{1,2*}, WANG Zhenhua¹, QIAO Changlu¹, WANG Qiuliang³

(1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2.The China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3.Shenzhen Water Planning & Design Institute Co, Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: 【Background】 Agricultural production in China uses approximately 70% of the total water consumed nationwide and developing sustainable irrigation districts faces many challenges such as channel leakage, inferior and dated irrigation projects, dwindling water supply and low water utilization efficiency. Optimal allocation of water resources is a key to developing water-saving irrigation, in which the Parshall flume has been widely used due to its high accuracy, convenient reading and ease of installation. In water conveyance, selection of a connection form in the flume controls the conveyance efficiency of the channel and its associated water resource allocation.

【Objective】 The purpose of this paper is to determine the optimal structure of the upstream inlet connection section of the Parshall flume, as well as the associated water pressure loss, water surface line, the measurement errors, velocity and pressure cloud under different inlet connections. 【Method】 We first used the SolidWorks software to design physical models of four inlet connection sections: interconnected arc transition, external arc transition, direct transition. The control was without transition. The ANSYS18.0 software was then used to generate the meshes and simulate water flow for each design. The simulated data were analyzed using the Tecplot and Origin software.

【Result】 The filament line in the Parshall flume was smoother with an inlet connection than without one. The local waterhead loss in the flume was the highest in transition without connection section and the lowest in the inner circular transition section. The relative errors of the flow measured by the flume decreased with incoming water flow rate, and when the incoming flow rate was 0.01 m³/s, the errors of the above four designs were 16.3, 15.9, 15.4 and 17.7 respectively. When the incoming flow rate increased to 0.2 m³/s, the errors of the above four designs reduced to 6, 5.9, 5.2 and 5.5 respectively. Among the four designs, the rectilinear transition section was most accurate. The change in velocity gradient and pressure cloud in the longitudinal profile of the flume was noticeable, and the highest velocity and water pressure were in the throat section and the upstream hydrosphere, respectively. The largest turbulent kinetic cloud map was in the region of the gas phase distribution, and the gas phase was more fluidic than the liquid phase. The energy exchange between molecules is more intense and consumes internal energy.

【Conclusion】 The flume is more accurate when the incoming flow rate is high. Adding an inlet connection section can reduce the measurement errors induced by flume deformation caused by water pressure.

Key word: Parshall flume; inlet connection section; numerical simulation; flow measurement precision

责任编辑: 陆红飞