

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.20180025

祁媛媛, 李国栋, 李珊珊, 等. 琴键堰过流水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 164-169. QI Y Y, LI G D, LI S S, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of piano key weir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 164-169. (in Chinese)

## 琴键堰过流水力特性数值模拟

祁媛媛<sup>1</sup>, 李国栋<sup>1</sup>, 李珊珊<sup>1</sup>, 米田<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 榆林市水务局, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 琴键堰是一种新型的迷宫堰结构形式, 其特点是相同堰宽、水头条件下泄流能力提升显著, 采用 RNG k-ε 型湍流数学模型, VOF 法处理自由水面, 建立三维数学模型。通过对不同工况琴键堰体型的模拟计算, 获得三维流场水流流态、流速等信息。结果表明: (1) 采用 Fluent 软件对琴键堰进行数值模拟的适用性强, 并验证了琴键堰的泄流效果显著; (2) 琴键堰的三维流场流态复杂, 具有三元水流的性质, 堰上水头的变化影响琴键堰的泄流能力; (3) 上、下游处水流呈明渠流状态, 速度最小, 为 0.2 m/s, 流经堰体时形成水舌, 流速增大, 水舌与堰壁间空腔处有通气孔掺气, 形成漩涡区, 气体流速 2 m/s, 水舌入水后有水气混掺。利用数值模拟技术, 使获得的流场信息更加详尽, 为进一步研究琴键堰流场特性奠定基础。

**关键词:** 琴键堰; 水力特性; 数值模拟; 流速; 流态

**中图分类号:** TV 132    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0164-06

### Numerical simulation of hydraulic characteristics of piano key weir

QI Yuanyuan<sup>1</sup>, LI Guodong<sup>1</sup>, LI Shanshan<sup>1</sup>, MI Tian<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yulin Water Affairs Bureau, Yulin 719000, China)

**Abstract:** The piano key weir is a new form of labyrinth weir and is characterized by a significant increase in the discharge capacity under the same weir width and water head condition. We used the RNG k-ε type turbulence mathematical model and the VOF method to deal with the free water surface and to establish a three dimensional mathematical model. Through the calculation of the shape of the piano key weir in different conditions, we obtained the flow regime, flow velocity, and other information of the three dimensional flow field. The results were as follows. (1) The software Fluent was applicable to the numerical simulation of the piano key weir, and it proved the remarkable discharge effect of the piano key weir. (2) The three dimensional flow field of the piano key weir had a complex flow regime and the properties of ternary flow. The change of weir head would affect the discharge capacity of the piano key weir. (3) The flow at the upper and lower reaches showed the state of open channel flow with a minimum velocity of 0.2 m/s. When the flow passed the weir, it formed water jets with increased velocity. There was air entering from the ventilation holes at the cavities between the water jets and the weir wall, forming a whirlpool. The air flow velocity was 2 m/s. After the water jets entered the water, there was air mixed with the water. The numerical simulation technique generated more detailed flow field information, which laid the foundation for further study of the flow field characteristics of the piano key weir.

**Key words:** piano key weir; hydraulic characteristics; numerical simulation; flow velocity; flow regime

随着全球气温变暖, 气候变化的加快, 极端气候出现的频率增大, 致使洪涝灾害频繁发生, 水库大坝

收稿日期: 2017-06-29    修回日期: 2017-11-02    网络出版时间: 2018-01-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180106.0904.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579206); 陕西省水利厅科技计划项目(2017slkj17); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5201)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51579206); Shaanxi Provincial Water Resources Bureau Science and Technology Project (2017slkj17); The Provincial Natural Science Foundation Research Project of Shaanxi (2015JM5201)

作者简介: 祁媛媛(1994), 女, 安徽濉溪人, 主要从事水力学与河流动力学方面研究。E-mail: 402028910@qq.com

通讯作者: 李国栋(1967), 男, 陕西米脂人, 教授, 研究生导师, 主要从事水力学与河流动力学方面研究。E-mail: gldli2010@yeah.net

的防洪能力已经不能达到其设计洪水的标准,同时社会经济的高速发展对水库大坝的防洪能力提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。为了防止溃坝等极端致灾因子<sup>[2]</sup>,就必须提高溢流坝的泄流能力,从而保证水库大坝的稳定和安全<sup>[3]</sup>。琴键堰<sup>[3-14]</sup>可以增大水库兴利库容,增加水库效益,提高经济效益,增大泄流能力<sup>[15-16]</sup>,弥补传统溢洪道的不足<sup>[17]</sup>。作为一种新型迷宫堰堰型<sup>[18-20]</sup>,目前国内外对其的研究还较少,层次尚不深,而琴键堰过流特征明显,流态复杂<sup>[21]</sup>,几何参数多<sup>[22]</sup>,试验研究受到限制。本文以湍流数值模拟方法为主,把湍流模型应用于琴键堰流场的模拟计算中,在 Fluent 中采用基于多相流原理的 VOF 模型以有效求解自由水面<sup>[23]</sup>,并针对复杂的几何形状,对边界的结构与非结构的混合网格计算区域进行了离散,研究琴键堰过流水力特性,旨在明确琴键堰流场的流态、流速等过流水力特性。

## 1 琴键堰过流数学模型

### 1.1 琴键堰的体型和几何参数

琴键堰体型复杂,结构周期性重复排列,其基本结构是琴键堰单元,由两侧边墙,一个进口宫室,两个半出口宫室组成<sup>[24]</sup>,并且几何参数众多(图 1),包括进口堰高  $P_i$ ,出口堰高  $P_o$ ;堰宽( $W = (W_i + W_o) \times N$ ),其中,  $W_i$  为进口宽度,  $W_o$  为出口宽度,  $N$  为进口

或者出口个数;上下游长度为  $B$ ,其中,  $B_i$  为进口倒悬长度,  $B_o$  为出口倒悬长度,  $B_b$  为基座长度;  $T_s$  为侧壁厚;  $S_i$  为进口倒悬斜率,  $S_o$  为出口倒悬斜率。

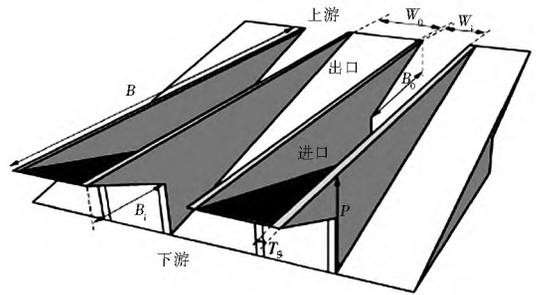


图 1 琴键堰三维立体图与几何参数

Fig. 1 The three dimensional stereogram and geometric parameters of piano key weir

### 1.2 计算模型的建立

#### 1.2.1 模型建立

计算模型见图 2,由上游水库,琴键堰堰体,通气孔,泄槽段组成。琴键堰堰体部分顺水流方向长度为 320 mm,进口宫室和出口宫室的宽度均为 125 mm,堰体总宽度为 500 mm。为了使水流过堰平稳,在计算模型中取上游渠道的长度为一倍堰长(大约三倍堰高)的值 320 mm,为了更好的模拟水舌及实际情况,取下游渠道的长度为两倍的堰长的值 640 mm。

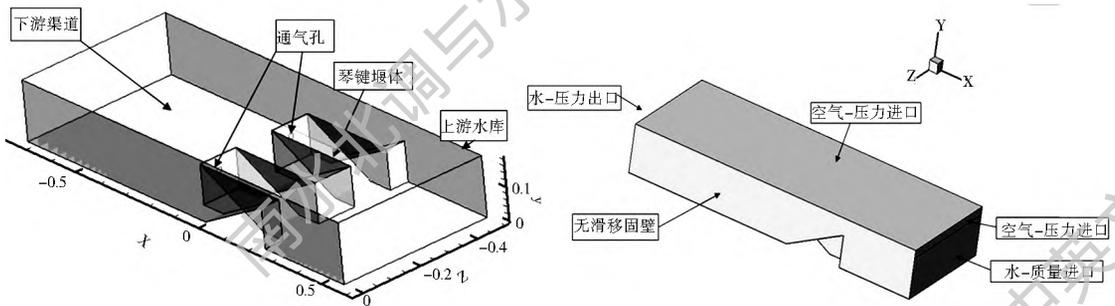


图 2 琴键堰计算模型及边界设置

Fig. 2 Calculation model and boundary settings of piano key weir

#### 1.2.2 模型网格划分

使用 GAMBIT 软件,建立几何外形和网格划分,生成区域整体及关键部位的网格。首先将模拟区域进行分区:上游库区渠道区域,琴键堰区域,下游渠道区域,针对不同的区域生成了不同形式的网格。上游库区的网格划分相对稀疏,上游渠道的网格在靠近琴键堰堰体的区域比较密,远离堰体的网格较稀,该部位体型较为规则,全部为结构网格。琴键堰堰体区域及堰后区域是网格划分的关键部位,见图 3,这部分区域网格最密,为保证整体的网格质量,采用非结构网格,避免局部网格质量较差。

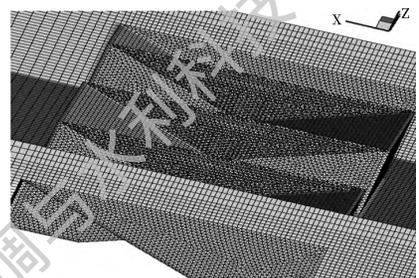


图 3 琴键堰堰体局部网格

Fig. 3 Local grid of the piano key weir

### 1.3 数值处理方法

#### 1.3.1 紊流数学模型

选择紊流模型选取 RNG k-ε 两方程模型,采用

多相流模型 VOF 法自动捕捉自由水面,  $\alpha_w$  表示水的体积分数。在一个控制单元里, 当  $\alpha_w = 0$  时, 说明单元内没有水; 当  $\alpha_w = 1$  时, 说明单元内充满着水, 当  $0 < \alpha_w < 1$  时, 说明单元内包含水气两相, 从而实现了对琴键堰水力特性的数值模拟。模拟计算采用非恒定算法, 时间步长取决于网格的空间尺寸和流速大小, 本次计算一般取  $0.0001 \sim 0.0005$  s。

### 1.3.2 控制方程

RNG k- $\varepsilon$  模型通过在大尺度运动和修正后的黏度项中体现小尺度的影响, 从而使这些小尺度运动有系统的从控制方程中除去, 所得到的 k 方程和  $\varepsilon$  方程与标准 k- $\varepsilon$  模型非常相似:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

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

式中:  $\rho$  为流体密度;  $k$  为紊动能;  $t$  为时间;  $u_i$  为速度分量;  $\mu_{eff}$  为黏性系数;  $\mu$  为紊动黏性系数;  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ ;  $\varepsilon$  为紊动能耗散率;  $G_k$  为关于平均流速梯度的紊动能产生项,  $G_k = \mu_t S^2$  系数  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ; 模型常数  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ;  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon$  分别是紊动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的有效紊流普朗特数,  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 。

与标准 k- $\varepsilon$  模型相比, RNG k- $\varepsilon$  模型主要通过修正紊动黏度, 考虑了平均流动中的旋转及旋转流动的情况; 在  $\varepsilon$  方程中增加了一项, 从而反映了主流的时均应变率, 使其产生项不仅与流动情况有关, 且在同一问题中仍为空间坐标的函数, 因此模型可以更好的处理高应变率以及流线弯曲程度较大的流动。

### 1.3.3 边界条件

进口采用压力进口, 给出上游控制水位, 出口处为压力出口。在黏性流动中, 壁面处默认为无滑移边界条件<sup>[25]</sup>, 近壁黏性底层用标准壁面函数法处理。边界条件设定见图 2。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 计算工况

文章首先根据文献[13]中的实验数据建立对应的数学模型, 模型参数与实验参数保持一致, 具体体型参数见图 4, 文献[13]中包含不同堰高及不同堰上水头等多种工况, 选取其中一种堰高:  $P = 120$  mm。在该堰高下根据堰上水头为 32 mm、54 mm、75 mm、104 mm 确定 4 种工况。为了充分比较分析数学模型和实验数据, 对每一种工况都进行了数值模拟, 旨在验证利用 Fluent 软件数值模拟琴键堰过

流问题的适用性, 为进一步研究琴键堰过流水力特性奠定基础。

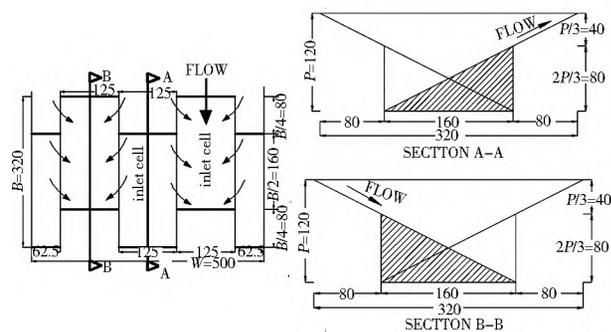


图 4 琴键堰模型尺寸

Fig. 4 The dimensions of the piano-key weir model

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 泄流能力分析 & 模型验证

泄流道的泄流能力与溢流堰的堰上水头和溢流前缘的长度相关, 对于一般薄壁堰来说, 前者由于堰顶高程低, 需通过加大坝高或设置闸门来增加有效库容, 增加了成本和投资; 后者会受到枢纽平面布置或地形的限制。迷宫堰通过曲折数倍加长泄流前缘, 使相同堰顶水头下的泄流能力成倍增加, 从而大幅增加泄洪流量或当流量相同时减小溢流水头, 以抬高堰顶高程增加兴利库容。而琴键堰作为一种新型的迷宫堰形式, 将宫室向上下游倒悬, 堰轴线纵向拉长, 侧堰首尾相连重复排列, 使过堰水流可从正向和侧向同时下泄, 增大超泄能力, 并大幅减小基座面积, 减少建筑成本, 扩大应用范围。

通过数值模拟得到不同堰上水头工况下琴键堰的泄流量, 并计算相同堰宽、堰上水头条件下一般薄壁堰的泄流量。根据实验结果和模拟数据的对比, 见图 5, 可以看出, 不同工况下泄流量模拟值与实验值的比值几乎位于斜率  $k=1$  的直线上, 并处于误差范围  $-5\%$  至  $+5\%$  的两直线之间, 表明琴键堰泄流量的模拟结果和实验数据十分接近, 模拟结果比较准确。由琴键堰泄流量与薄壁堰泄流量随堰上水头变化关系曲线可以看出, 相同堰宽、堰上水头条件下, 琴键堰的泄流量比薄壁堰大, 且在低水头条件下, 琴键堰泄流量约为薄壁堰的 3 倍, 而随着堰上水头的增大, 琴键堰与薄壁堰的泄流量之比降低至 1.6 左右, 表明琴键堰较薄壁堰的泄流能力显著, 但堰上水头增大时泄流效率减小。

### 2.2.2 流态分析

图 6 为堰高 120 mm、堰上水头  $h = 32$  mm 的工况下, 琴键堰进出口宫室的纵剖面以及沿水流方向的 6 个横剖面的水流流态图。

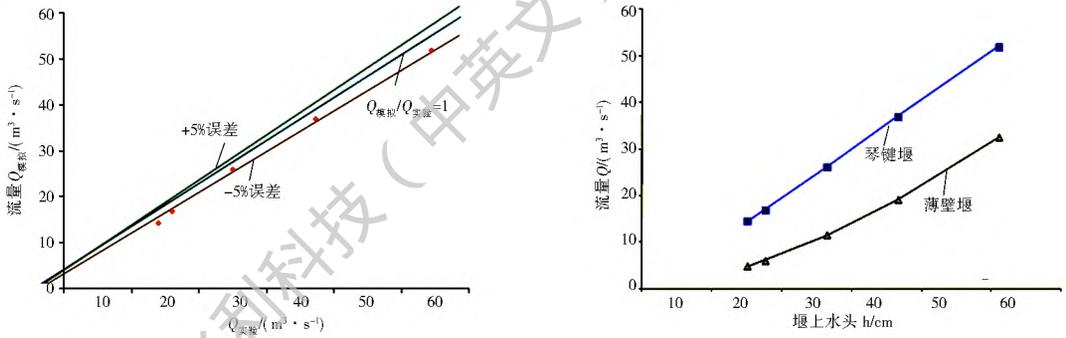


图5 泄流量模拟值与实验值对比关系(a)和堰上水头与泄流量的关系曲线(b)

Fig.5 Comparison between simulated discharge value and experimental value(a) and The Relation Curve of Water Head and Discharge Flow (b)

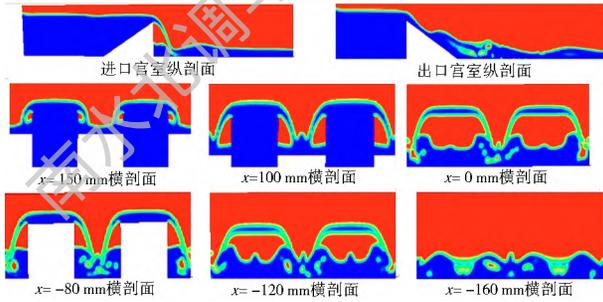


图6 琴键堰水流流态

Fig.6 The flow regime of the piano key weir

图6中蓝色部分为空气,红色部分为水流,可以直观的看出水面线的形状和变化情况。过堰水流为三元流,且流动形态复杂。由纵剖面图可以看出,进口宫室前的来流基本平顺,水面线平稳,进流较为对称,过堰水流顺畅,但在过堰及堰后发生急剧变化,从堰顶开始因重力影响呈现自由跌落的状态,水面线在上游渠段与琴键堰段衔接处开始急剧下降,水舌形状良好。出口宫室中间发生三向水流的相互冲击,出流之后因水流波动较大,水面线起伏大,下游水流以射流形式入水,形成淹没水跃,水面线逐渐稳定,趋于平直。从堰前沿着水流方向从  $x=150\text{ mm}$  到  $x=-160\text{ mm}$  取了6个特征剖面,通过这6个剖面的水流流态图,可以形象地看到水流的流动变化。入流时水流平稳,水面稳定,流经堰体部分时,进口水流分为三股水舌,其中一股水舌直接由出口前沿跌落至下游渠段,其余两股水舌分别从两侧流入相邻出口槽室内,通过侧面出口槽流向下游渠段;两侧面流进的两股水舌与由出口槽室内流出的水舌在出口处发生碰撞,随着进口宫室流入两侧的水流与原水流发生冲击,水面线出现较大的波动,水流过堰后,由于重力作用在堰前形成水舌及空腔,随着水流的向前流动,水舌长度变短、位置降低,水面线重新趋于平稳。

由图5堰上水头与流量的关系曲线可以得到:堰高相同时,琴键堰的泄流量随堰上水头的增加而增大。而图6水流流态图可以看出:当堰上水头  $h=$

32 mm 时,流量较小,进出口宫室中积聚的水量较少,流态较舒展,水舌明显且厚度较薄;下游水位低,出口宫室下游三向水流的相互冲击使水流波动剧烈,出流方式为自由出流,不影响琴键堰泄流能力,泄流效率高。图7、图8中,当堰上水头  $h=54\text{ mm}$  时,流量变大,进出口宫室中积聚的水量增多,但水舌变短,厚度变粗;下游水位升高,出现雍水现象,仍为自由出流,但雍水位的不断增高对琴键堰的泄水能力产生影响。随着堰上水头的增加,下游水深增大,当堰上水头达到 75 mm 时水流流量增大,进出口宫室及下游积聚的水量也增大,琴键堰段出口内水流自由面不断升高,进口断面水深与出口断面水深差距减小,使进出口断面自由液面高程相差不大,水流波动几乎消失,空腔也消失,表明堰上水头的增加对流态的影响显著;下游雍水明显,几乎完全淹没,出流方式变为淹没出流,说明随着下游雍水位升高,淹没深度增大,琴键堰的泄流能力受到影响,其泄流量虽然增大,但泄流效率降低。

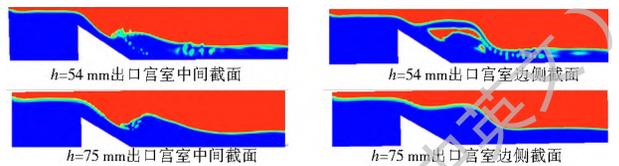


图7 不同堰上水头下琴键堰纵剖面水流流态

Fig.7 Flow regime at vertical profiles of the piano key weir under different weir heads

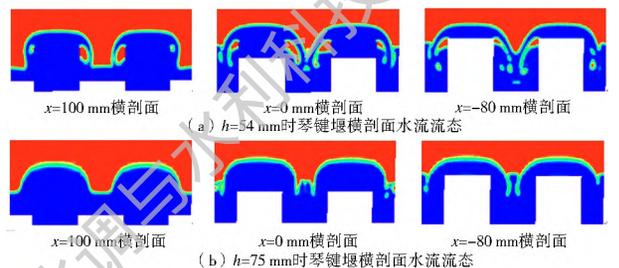


图8 不同堰上水头下琴键堰横剖面水流流态

Fig.8 Flow regime at horizontal profiles of the piano key weir under different weir heads

### 2.2.3 流速分布分析

图9、图10为堰高 120 mm、堰上水头  $h=32$

mm 的工况下, 琴键堰进口宫室的纵剖面以及垂直水流方向的横剖面矢量图与速度等值线云图。

间的空腔处有通气孔通气, 所以此处的气体速度较大(略大于水流速度)从而形成一个漩涡区, 水舌入水之后, 有一定的水气混掺, 最终流向下流。水流从堰体流出后受重力作用, 速度逐渐增大并达到最大。

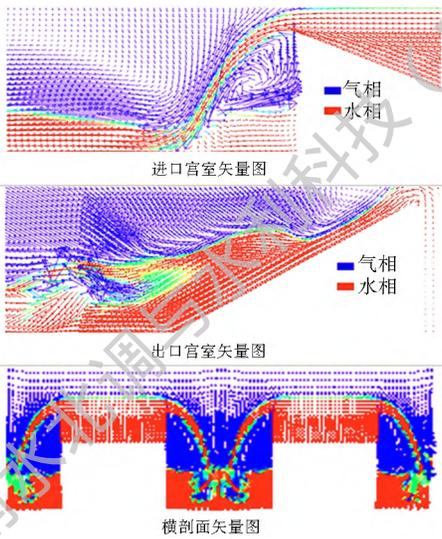


图 9  $h = 32 \text{ mm}$  琴键堰流速矢量图

Fig. 9 The velocity vector diagrams of the piano key weir when  $h = 32 \text{ mm}$

图 9、图 10 能够直观反映流体速度的大小和方向, 水流在上游进口处和下游出口处都呈明渠流状态, 速度最小, 水流流入琴键堰堰体之后, 速度开始增大, 水流从进口宫室流出后形成水舌, 水舌和堰壁之

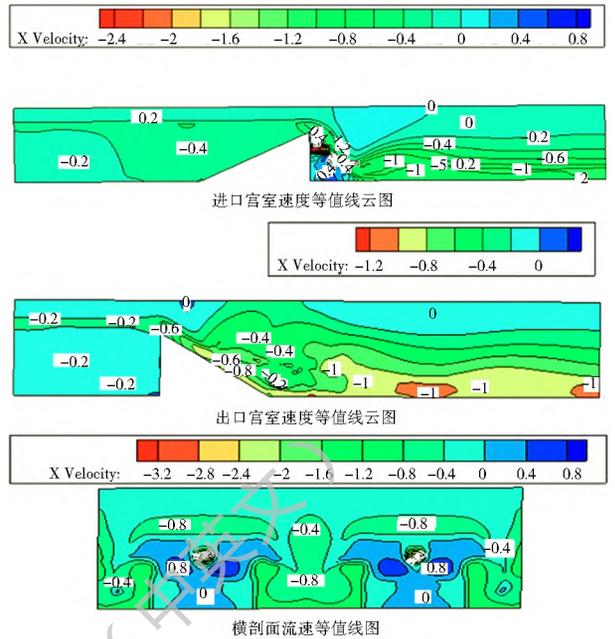


图 10  $h = 32 \text{ mm}$  琴键堰流速等值线云图

Fig. 10 Cloud charts of the velocity contours of the piano key weir

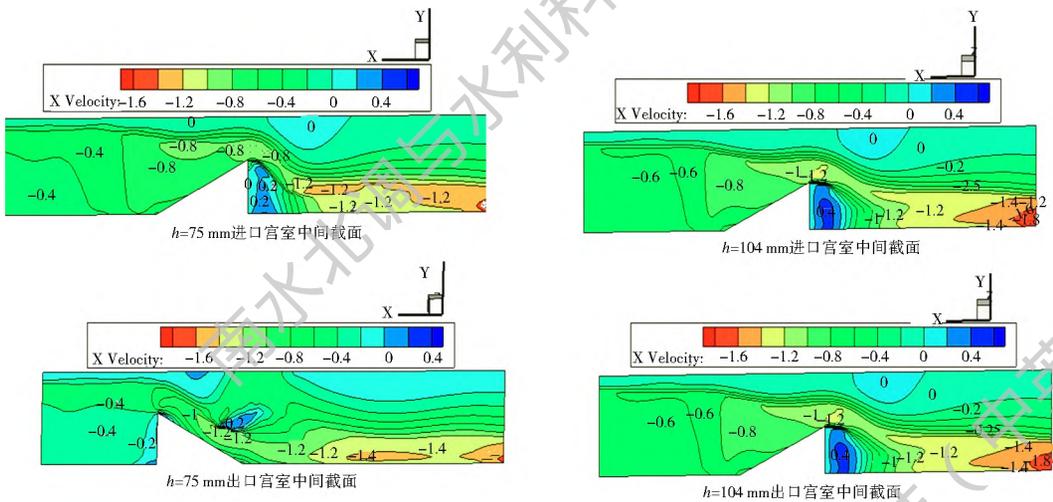


图 11 不同堰上水头进出口宫室流速等值线

Fig. 11 Velocity contours map of entry and exit sections under different weir heads

堰上水头  $h = 32 \text{ mm}$  时整体流速最小, 进口流速为  $0.2 \text{ m/s}$ , 最大流速在  $1 \text{ m/s}$  左右。从图 11 可以看出: 进口流速随堰上水头的增高而增大,  $h = 104 \text{ mm}$  时, 进口流速增至  $0.8 \text{ m/s}$ 。整体流场的最大流速也随着堰上水头的增高而增大,  $h = 75 \text{ mm}$  时, 最大流速为  $1.4 \text{ m/s}$  左右;  $h = 104 \text{ mm}$  时, 最大流速增至  $1.8 \text{ m/s}$ 。但由于出口宫室的下泄作用, 随堰上水头的增高, 流速的增大较进口宫室更为明显。由此可见, 堰上水头的增加对流速的增大有着

显著的影响。同时, 空腔内气体流速也随堰上水头的增高而增大, 但堰上水头增加到一定程度时下游淹没, 通气孔不再起作用, 空腔内气体流速又随之减少, 其影响的范围也随之减小。

### 3 结论

本文通过建立三维数学模型, 对不同工况体型的琴键堰进行数值模拟研究, 验证模型模拟结果的适用性, 对比分析琴键堰的流场流态、流速等过流水

力特性。模拟结果和实验数据的对比表明用 Fluent 软件对琴键堰数值模拟的适用性良好, 计算表明相同条件下, 琴键堰泄流量较一般薄壁堰大, 泄流能力显著, 但泄流效率受堰上水头影响。分析琴键堰过流水力特性得到琴键堰流场流动形态复杂, 不同宫室或部位流态不一致, 进口宫室流态较为平稳, 水流流经堰体时开始出现波动, 到达出口宫室水流流态波动较大, 堰上水头对流态的影响突出, 泄流效率随堰上水头的增大而减小; 流速的变化随水流的流动呈先增大后减小的趋势, 进出口宫室流速最小, 流入堰体时速度开始增大, 流出堰体时由于重力作用达到最大。通过对琴键堰流场的模拟研究结果表明, RNG k- $\epsilon$  两方程湍流模型、水气两相流的 VOF 模型和结构化与非结构化网格相结合能够成功模拟该三维流程的复杂流动, 为琴键堰的工程研究提供了新的研究手段和方法。如何从流态、流速分布等水力特性的分析中对琴键堰提出优化设计及应用是今后的研究方向。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭军. 应对变化条件下的洪水设计标准与评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(2): 151-156. (GU O J. The design flood evaluation and related new issues in the situation of climate changes[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(2): 151-156. (in Chinese))
- [2] 林继铺. 水工建筑物(第五版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIN J Y. Hydraulic structure[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 李建中, 宁利中. 高速水力学. 西安: 西北工业大学出版社, 1994: 250-253. (LI J Z, NING L Z. Hydraulics for high velocity. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1994: 250-253. (in Chinese))
- [4] LEMPÉRIÈRE F, OUAMANE A. The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways[J]. International Journal on Hydropower & Dams, 2003, 10(5): 144-149.
- [5] LEMPÉRIÈRE F, GU O J. Low cost increase of dams storage and flood mitigation: the Piano Keys weir[R]. 2005.
- [6] BLANCHER B, MONTARROS F, LAUGIER F. Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways[C]. Proc. International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs, Liege, Belgium, 2011.
- [7] ANDERSON R M. Piano Key Weir head discharge relationships[D]. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 880. Utah State University, 2011.
- [8] ANDERSON R M, TULLIS B P. Piano key weir: Reservoir versus channel application[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138: 773-776. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000464.
- [9] RIBEIRO M L, PFISTER M, SCHLEISS A J, et al. Hydraulic design of A-type piano key weirs[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(4): 400-408. DOI: 10.1080/00221686.2012.69504.
- [10] ANDERSON R M, TULLIS B P. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 2012, 138(4): 358-361. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000509.
- [11] LEITE RIBEIRO M, BIERI M, BOILLAT J L, et al. Discharge Capacity of Piano Key Weirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2012, 138(2): 199-203. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000490.
- [12] DABLING M R, TULLIS B P. Piano Key Weir Submergence in Channel Applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2012, 138: 661-666. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000563.
- [13] MACHIELS O, ERPICUM S, DEWALS B J, et al. Experimental observation of flow characteristics over a piano key weir[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(3): 359-366. DOI: 10.1080/00221686.2011.567761.
- [14] LAUGIER F, VERMEULEN J, LEFEBVRE V. Overview of Piano key Weirs experience developed at EDF during the past few years[C]. Proceedings of the second International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs, 2013.
- [15] 李国栋, 苗洲, 高蓓, 等. 琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 78-85. (LI G D, MIAO Z, GAO B, et al. Numerical study on discharge capacity of piano key weir at its different overflow edges. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(8): 78-85. (in Chinese))
- [16] 郭新蕾, 杨开林, 夏庆福, 等. 琴键堰泄流能力特性分析[J]. 水利学报, 2014(7): 867-874. (GU O X L, YANG K L, XIA Q F, et al. Discharge capacity characteristics of Piano Key Weir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(7): 867-874. (in Chinese))
- [17] 耿运生, 孙双科. 一种新型的迷宫堰布置型式 P. K 堰[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(4): 57-59. (GENG Y S, SUN S K, A New type of labyrinth weir-P. K Weir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(4): 57-59. (in Chinese))
- [18] ERPICUM S, LAUGIER F, PFISTER M, et al. Labyrinth and piano key weirs II[M]. CRC Press, 2013.
- [19] SCHLEISS A J. From Labyrinth to Piano Key Weirs—A historical review[C]. 2011. DOI: 10.1201/b123493.
- [20] 曾甄, 郭新蕾. 迷宫堰水力特性综合研究及其应用[D]. 南京: 河海大学, 2004: 33-39. (ZENG Z, GU O X L. Hydraulic characteristics and application for labyrinth weirs[D]. Nanjing: Hohai University, 2004: 33-39. (in Chinese))
- [21] MACHIELS O, ERPICUM S, DEWALS B J, et al. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(3): 359-366. DOI: 10.1080/00221686.2011.567761.
- [22] PRALONG J, VERMEULEN J, BLANCHER B, et al. A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. Proc. Int[J]. Workshop Labyrinth and Piano Key Weirs Liege B, 2011, 256-263.

(下转第 175 页)

- L, XU Y M. Experimental study on air concentration in flow along chute and length of protective segment[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 173-176. (in Chinese)
- [18] 颜敏, 徐一民. 挑流反弧段水流掺气浓度的试验研究[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(3): 105-109. (YAN M, XU Y M. Experimental study on air concentration in flow over flip bucket[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(3): 105-109. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2015.03.025.
- [19] 田嘉宁, 赵庆, 范留明. 台阶式溢流坝后消力池压强特性[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 113-118, 124. (TIAN J N, ZHAO Q, FAN L M. Pressure characteristics in stilling basin of stepped spillways[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 113-118, 124. (in Chinese))
- [20] 田静, 罗全胜, 杨香云, 等. 溪洛渡水电站泄洪洞脉动特性试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(8): 144-147. (TIAN J, LUO Q S, YANG X Y. Experimental research on pulsation pressure of spillway tunnels in the Xiluodu Hydropower Station[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(8): 144-147. (in Chinese))
- [21] 杨敏, 李树宁. 平底水垫塘透水底板下表面脉动压力试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(11): 1368-1371. (Yang M, Li S N. Experimental investigation of fluctuating pressure acting on the under surface of pervious slabs inflat bottom plunge pool[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1368-1371. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.11.016.
- [22] AIHARA Y. Formation of longitudinal vortices in the sublayer due to boundary-layer turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 214: 111. DOI: 10.1017/S0022112090000076
- [23] 杨庆, 张建民, 戴光清, 等. 脉动压力对空化的影响[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2004, 36(4): 19-21. (YANG Q, ZHANG J M, DAI G Q. Effects of fluctuation pressure on cavitation[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2004, 36(4): 19-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-3087.2004.04.005.
- [24] 练继建, 王继敏, 辜晋德. 水跃区水流脉动压力频谱相似律研究[J]. *科学通报*, 2007, 52(15): 1832-1839. (LIAN J J, WANG J M, GU J D. Study on similarity law of flow pressure spectrum in water jump area[J]. *Chinese science bulletin*, 2007, 52(15): 1832-1839. (in Chinese)) (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0023-074x.2007.15.018.
- [25] 聂孟喜, 李琳琳, 段冰等. 突扩突跌布置侧墙及底板脉动压力特征分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(3): 331-334, 339. (NIE M X, LI L L, DU AN B, et al. Fluctuant characteristics analysis of sidewall and bottom behind sudden lateral enlargement and vertical drop form[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(3): 331-334, 339. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2007.03.008.
- [26] 王红霄, 杨红宣, 等. 突扩突跌掺气设施后泄槽底板脉动压力试验研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9): 144-149. (WANG H X, YANG H X. Experimental study on the pulsating pressure behind sudden lateral enlargement and vertical drop form[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(9): 144-149. (in Chinese))

(上接第 169 页)

- [23] 陈妮, 陈大宏. 溢流堰过堰流动的数值计算[J]. *人民长江*, 2005, 36(1): 40-41, 46. (CHEN W, CHEN D H. Numerical computation of water flow across overflow weir. *Yangtze River*, 2005, 36(1): 40-41, 46. (in Chinese))
- [24] 李珊珊, 李国栋, 苗洲, 等. 琴键堰不同堰高泄流特性的数值模拟[J]. *水利水电技术*, 2016(5): 60-64. (LI S S, LI G D, MIAO Z, et al. Numerical simulation study on discharge characteristics of piano key weir with various heights[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016(5): 60-64. (in Chinese))
- [25] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006. (WEI W L, DAI H C. Turbulence model theory and engineering application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))