DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.30

# 倒V形阶梯与传统阶梯流场特性对比研究

徐鹏<sup>1</sup>,赵信峰<sup>1</sup>,白兆亮<sup>2</sup>
(1.黄河水利职业技术学院,河南开封 475000;
2.水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘 要: 倒 V 形阶梯溢洪道作为一种新型阶梯溢洪道,具有特殊的流场特性。为探究倒 V 形阶梯独特的流场特性,在模型试验研究的基础上,采用数值模拟的方法,对比研究了倒 V 形阶梯与传统形阶梯溢洪道滑行水流流态下的流速矢量分布、压强分布及消能特性。研究结果表明:倒 V 形阶梯水流结构及压强分布与传统阶梯有较大差异, 其分布在溢洪道宽度方向呈现明显的差异,呈现出独特的三维流动特性;倒 V 形阶梯相较于传统阶梯溢洪道具有 更好的消能效果。

## Comparison of the flow field in inverted V-shaped and traditional stepped spillway

XU Peng<sup>1</sup>, ZHAO Xinfeng<sup>1</sup>, BAI Zhaoliang<sup>2</sup>

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475000, China;2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China)

**Abstract**: Inverted V-shaped stepped spillway is a new shaped stepped spillway, which has unique flow characteristics. In order to study the unique flow field characteristics of inverted V-shaped stepped spillway, a comparison study on flow velocity distribution, pressure distribution and energy dissipation characteristics was made by numerical simulation between the inverted V-shaped and traditional stepped spillways, based on the model test research. The result shows that the flow structure and the pressure distribution between inverted V-shaped and traditional stepped spillways are quite different, these distributions have obvious differences along the cross section with unique three dimensional characteristics. It has better energy dissipation rates in inverted V-shaped stepped spillway than that of in traditional stepped spillway.

Key words: inverted V-shaped stepped spillway; traditional stepped spillway; flow field; numerical simulation

### 1 研究背景

由于阶梯溢洪道结构的特殊性,导致水流结构 改变,阶梯附近产生能量耗散涡<sup>[1]</sup>,极易实现动能 向紊动能及热能的转化,有效增加了消能效果,且其 实用性较强,因此,阶梯溢洪道近几十年来得到了广 泛的应用。 阶梯溢洪道的水流流态反映了水流的水力特性,经过田嘉宁等<sup>[2]</sup>的研究,将阶梯上流态分为:跌落水流、过渡水流、滑行水流。目前针对传统阶梯溢 洪道的研究较多,研究多集中在阶梯尺寸、阶梯布置 形式、流态等方面。田嘉宁等<sup>[3]</sup>、程高等<sup>[4]</sup>、伍平 等<sup>[5]</sup>、王强等<sup>[6]</sup>、Mero等<sup>[7]</sup>、Tabari<sup>[8]</sup>、Bai Zhaoliang 等<sup>[9]</sup>研究了流态、阶梯尺寸、阶梯坡度和体型等对

收稿日期:2017-05-24; 修回日期:2017-08-11

基金项目:水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目;国家自然科学基金项目——河南省人 才培养联合基金项目(U1304503)

作者简介:徐鹏(1981-),男,江苏宿迁人,讲师,研究方向:水利工程。

通讯作者:赵信峰(1980-),男,河南濮阳人,讲师,研究方向:水利工程。

阶梯消能率的影响。张志昌等<sup>[10]</sup>、Dhatrak 等<sup>[11]</sup>研究了阶梯压强分布特性。吴守荣等<sup>[12]</sup>、陈剑刚等<sup>[13]</sup>通过设置掺气坎,研究了强迫掺气时的阶梯水流特性。

可以看出,长期以来,大多数研究成果主要涉及 传统形阶梯自身尺寸、布置形式等方面,而对于阶梯 体型变化的研究成果较少。倒 V 形阶梯作为一种 异型阶梯消能工,由于其结构的特殊性,产生了许多 不同于传统形阶梯溢洪道的流场特性。本文在试验 研究的基础上,结合三维 RNG *k* - *ε* 紊流数值模拟 的方法对传统形、倒 V 形阶梯溢洪道滑行水流流场 特性进行对比研究,获得了一些重要的流动特性,可 为倒 V 形阶梯消能工的应用提供参考。

### 2 数值模型的建立

### 2.1 计算模型

将 θ = 240°、θ = 180°的阶梯溢洪道分别命名 为倒 V 形、传统形阶梯溢洪道。计算模型均由压坡 调整段、光滑段、阶梯段、尾水段组成。区别在于阶 梯段:倒 V 形、传统形阶梯溢洪道分别布置倒 V 形 阶梯及传统形阶梯,且阶梯宽度均为 0.4 m。模型 进口高度 0.12 m,压坡段的出口高度为 0.08 m,阶 梯段共设置 56 级阶梯,前 28 级阶梯为过渡阶梯用 来调整水流流态,后 28 级为均匀阶梯,阶梯水平面 宽度为 0.12 m,高度为 0.06 m,阶梯坡度为 1: 2, 阶梯段后直接连接尾水段。计算模型采用结构化网 格划分,计算模型及网格划分如图 1 所示。



图1 计算模型

### 2.2 控制方程及边界条件

计算采用 RNG *k* - ε 紊流模型求解,已有结果 表明该紊流模型能够有效的模拟阶梯溢洪道的水流 特性<sup>[14-15]</sup>。采用结构化网格与有限体积法相结合 来离散计算区域。利用 PISO 算法对速度和压力耦 合求解,自由面追踪采用 VOF 模型。基本控制方程 如下:

(1)连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_i) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$
(2)

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

(4) 耗散率方程:  

$$\frac{\partial(\rho_{\mathcal{E}})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_{i}\varepsilon)}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{i}} \right] + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(4)

式中: $\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a$ ,  $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.42 - \eta (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) / (1 + \beta \eta^3)$ ,  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ,  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ 式中:  $\alpha_w$  为水的体积分数;  $\rho_w$ ,  $\rho_a$  分别为水和气的 密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho$  为平均密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u_i$ ,  $u_j$  为速度分 量, m/s,  $i, j = 1, 2, 3; \mu$  为平均黏性系数; k 为紊动 能;  $\varepsilon$  为紊动能耗散率;  $G_k$  为由平均速度梯度引起 的紊动能产生项;  $\eta_0 = 4.38$ ,  $C_\mu = 0.085$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$  均为经验常数; t 为时间, s<sub>0</sub>

### 2.3 边界条件

(1)人口边界:采用速度人口边界条件,根据计 算工况获得入口流速为2.61~4.08 m/s;

(2)出口边界:采用压力出口边界条件,所有变 量的法向梯度为0;

(3)壁面边界:壁面采用无滑移边界条件,对黏 性底层采用壁面函数处理;

(4)自由水面:自由水面按压力边界处理,压力 边界上的压力值为 *P* =0。

#### 2.4 试验验证

为验证数值计算结果的准确性,对倒 V 形阶梯 进行了模型试验研究。试验模型主要由上游水箱、 阶梯段、尾水段、量水堰、蓄水池组成,形成一个循环 系统,模型总高度 5.4 m,阶梯段尺寸与计算模型相 同,试验装置及试验模型布置剖面图如图 2 所示。 通过量水堰控制流量,试验工况与数值模拟试验相 同。在水流充分发展流态下,对阶梯底板压强采用 测压管进行测量。



(a) 阶梯段试验模型



(b) 试验模型布置剖面图

图 2 模型试验装置及剖面布置图

将测得的压强与对应位置的压强计算值进行对 比,各级阶梯压强实测值与计算值的对比情况基本相 同,因此只给出了倒 V 形阶梯溢洪道中 43<sup>#</sup>阶梯 v = 3.542 m/s 时的压强对比,如表 1、2 所示。表中 X 表 示阶梯水平面测压点距阶梯凹角的距离,L 表示阶梯 水平面的长度;Y 表示阶梯竖直面测压点距阶梯凹角 的距离,H 表示阶梯水平面的高度。溢洪道边墙、1/4 溢洪道宽度剖面及溢洪道中轴面分别命名为 a、b、c 剖面。从表 1、表 2 可以看出,数值模拟的计算值与实 测值吻合较好,阶梯水平面压强最大误差为 7.62%, 阶梯竖直面压强最大误差为 7.95%,且大部分测压点 误差较小,表明计算结果是准确的。

### 3 结果分析

### 3.1 速度矢量分布

图 3 所示为传统形及倒 V 形阶梯速度矢量及 水面线图,从图 3 可以看出,倒 V 形阶梯作为异型 阶梯消能工,由于其特殊的体型结构,流速分布与传 统阶梯溢洪道中的流速分布有较大差异。对于传统

表 1 阶梯水半面压强计	算值与实测值比较
--------------	----------

	a 剖面			b 剖面			c 剖面		
$\Lambda/L$	试验值/Pa	计算值/Pa	误差/%	试验值/Pa	计算值/Pa	误差/%	试验值/Pa	计算值/Pa	误差/%
0.08	1313.4	1308.5	0.37	787.3	822.3	4.46	-718.6	-724.3	0.79
0.17	1245.9	1287.5	3.34	373.2	396.4	6.23	- 929.5	-963.9	3.70
0.25	1255.7	1286.2	2.43	137.7	143.4	4.16	- 1248.3	- 1292.8	3.56
0.33	1378.3	1304.6	5.35	335.6	316.3	5.76	- 1420.0	- 1456.4	2.57
0.42	1397.1	1341.0	4.01	811.8	830.2	2.27	- 1083.1	- 1160.9	7.19
0.50	1470.7	1382.4	6.01	1498.5	1494.1	0.30	-265.3	-285.4	7.55
0.58	1488.4	1407.6	5.43	2204.8	2122.8	3.72	1145.3	1218.7	6.41
0.67	1416.8	1395.1	1.53	2744.4	2577.6	6.08	3104.6	3224.2	3.85
0.75	1429.1	1339.2	6.30	3004.6	2798.6	6.86	5093.8	5165.5	1.41
0.83	1314.3	1239.7	5.68	3064.3	2830.9	7.62	5991.5	6194.6	3.39
0.92	1162.4	1097.4	5.59	2680.6	2522.9	5.88	5941.5	5616.3	5.47

#### 表 2 阶梯竖直面压强计算值与实测值比较

V/II	a 剖面				b 剖面			c 剖面		
1/П	试验值/Pa	计算值/Pa	误差/%	试验值/Pa	计算值/Pa	误差/%	试验	值/Pa	计算值/Pa	误差/%
0.17	800.5	750.8	6.21	- 324.5	- 346.8	6.86	- 23	348.6	-2521.3	7.35
0.33	851.3	833.0	2.14	- 146.0	- 152.4	4.35	- 11	135.5	- 1209.8	6.54
0.50	873.4	885.5	1.39	-279.0	-259.3	7.09	- 10	027.6	-1105.8	7.61
0.67	1050.9	1019.2	3.01	156.4	144.0	7.95	- 8	395.2	-929.4	3.83
0.83	1169.8	1213.1	3.70	878.4	938.3	6.82	- 7	746.1	-712.7	4.48

阶梯而言,当水流从上一阶梯流到下一阶梯时,水流 与阶梯发生碰撞,一部分水流继续向下游方向流动, 另一部分水流方向发生改变,产生回流,回流的水体 与阶梯竖直面发生碰撞,水流被迫爬升,爬升的水流 受主流的阻挡,形成稳定的漩涡。因过流断面在横 向上无变化,其流速矢量平行于中轴面,但对倒 V 形阶梯而言,受过流断面变化的影响,其流速矢量在 溢洪道宽度方向发生明显变化,整体流速矢量方向 均从中轴面偏向两侧边墙。



(c) 传统形阶梯横断面水面线

由于水流流态的差异,使得倒 V 形阶梯与传统 阶梯的水面有着明显的区别:传统形阶梯水面在同 一横断面是水平的,而倒 V 形阶梯溢洪道中轴面及 边墙处水面较高,呈"W"形,如图 3(c)、3(d)所示。

#### 3.2 剖面流速分布

如 3.1 所述,传统形阶梯形成的漩涡,因过流断 面在横向上无变化,其漩涡尺度等在溢洪道宽度方 向没有显著变化。图 4 为传统形、倒 V 形阶梯不同 剖面流速矢量图。









从图4中可以看出:倒V形阶梯溢洪道漩涡位 置及大小在横向存在较大变化;在中轴面附近,漩涡 尺度较大,越靠近边墙,漩涡尺度越小,直至消失,在 a~b 剖面范围内漩涡尺度变化较大,在b~c 剖面 范围内漩涡尺度变化较小,在边墙附近无漩涡存在。

### 3.3 剖面压强分布

图 5 所示为传统形及倒 V 形阶梯不同剖面压强 分布图。从图 5 中可以看出:传统形阶梯压强在溢洪 道宽度方向没有显著变化,而倒 V 形阶梯中不同剖面 压强存在显著差异;倒 V 形阶梯水平面压强也呈"S" 形分布,但压强波动从中轴面向两侧边墙逐渐减小, 在边墙附近各处压强差异不大;在该 Fr 下,倒 V 形阶 梯竖直面压强,在中轴面处全为负压,在边墙附近没 有负压出现;倒V形阶梯水平面最大压强大于传统形 阶梯,而阶梯竖直面最小压强小于传统形阶梯。

### 3.4 消能率

利用上下游能量守恒原理,用减小的能量与上 游能量之比作为消能率,即:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100\% = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\%$$
(5)

式中:  $E_1$  为光滑段末端断面总能量, $E_1 = \Delta h + v_1^2/(2g)$ ,其中 $\Delta h$  为两断面的高差,m;  $E_2$  为阶梯结 束断面总能量, $E_2 = v_2^2/(2g)$ ;  $v_1 \ v_2$  分别为两断面 的平均流速,m/s。各单宽流量下的消能率见表3。





表 3 各单宽流量下的消能率

I	况	传统	阶梯	倒V形阶梯			
q /	Fr	模拟值/	实测值/	模拟值/	实测值/		
$(m^2 \cdot s^{-1})$		%	%	%	%		
0.313	4.409	60.04	60.77	78.56	81.00		
0.425	5.997	53.70	51.76	75.09	76.86		
0.489	6.914	46.22	47.79	74.84	76.37		
0.552	7.789	42.17	44.87	73.16	74.86		
0.600	8.466	40.63	42.09	70.24	74.06		

从表3可以看出:各单宽流量下,消能率数值模 拟与试验测量结果吻合较好;同一单宽流量下,倒V 形阶梯消能率均明显大于传统阶梯;随着单宽流量 的增加,传统形、倒V形阶梯溢洪道的消能率均减 小,但传统形阶梯溢洪道的消能率递减的速率明显 大于倒V形阶梯溢洪道。倒V形阶梯在消能方面 明显优于传统阶梯溢洪道。

### 4 结 论

在试验研究的基础上,采用三维 RNG k - ε 紊 流模型,对比研究了传统形、倒 V 形阶梯溢洪道滑 行水流时的流场特性,主要结论有:

(1)倒 V 形阶梯由于其体型的特殊性,阶梯附 近漩涡在溢洪道宽度方向上存在显著差异,水面呈 "W"形;

(2)倒 V 形阶梯压强分布在溢洪道宽度方向存 在显著差异,最大压力出现在中轴面阶梯水平面靠 近阶梯凸角处,最小压力出现在中轴面阶梯竖直面 靠近阶梯凸角处,且最小压力小于传统阶梯;

(3)倒 V 形阶梯的消能率大于传统阶梯,相较 于传统阶梯,倒 V 形阶梯具有更好的消能特性。

#### 参考文献:

- [1] Chen Qun, Dai Guangqin, Liu Haowu. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7):683-688.
- [2] 田嘉宁,大津岩夫,李建中,等. 台阶式溢洪道各流况的 消能特性[J]. 水利学报,2003,34(4):35-39.
- [3]田嘉宁,李建中,大津岩夫,等.几种坡度的台阶式溢洪 道消能特性试验研究[J].西北农林科技大学学报(自 然科学版),2004,32(10):119-122.
- [4] 程高,唐新军,高强.外凸式台阶溢洪道的消能率及影响因素分析[J].新疆农业大学学报,2011,34(4):348-352.
- [5] 伍 平,王 波,陈云良,等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):24-29.
- [6] 王强,杨具瑞,武振中,等.不同台阶数的过渡阶梯对阶 梯溢流坝面压强及消能特性的影响研究[J].水力发电

学报,2016,35(5):84-93.

- [7] Mero S, Mitchell S. Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways [J].
   Water and Environment Journal, 2016, 31 (2017): 127 – 137.
- [8] Tabari M M R, Tavakoli S. Effects of stepped spillway geometry on flow pattern and energy dissipation [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(4):1215 – 1224.
- [9] Bai Zhaoliang, Peng Yong, Zhang Jianmin. Three turbulence simulation of flow in a V shaped stepped spillway
   [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 06017011-1 06017011-10.
- [10] 张志昌,曾东洋,郑阿漫,等. 台阶式溢洪道滑行水流 压强特性的试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003,18(5):652-659.
- [11] Dhatrak A I, Tatewar S P. Air entrainment and pressure fields over stepped spillway in skimming flow regime [J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2(4):53 -57.
- [12] 吴守荣,张建民,许唯临,等.前置掺气坎式阶梯溢洪道 体型布置优化试验研究[J].四川大学学报(工程科学 版),2008,40(3):37-42.
- [13] 陈剑刚,张建民,许唯临. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体 型特点及工程应用试验研究[J]. 四川大学学报(工程 科学版),2010,42(6):6-11.
- [14] Cheng Xiangju, Chen Yongcan, Luo Lin. Numerical simulation of air – water two – phase flow over s tepped spillways[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2006, 49(6):674 – 684.
- [15] Sarkardeh H, Marosi M, Roshan R. Stepped spillway optimization through numerical and physical modeling [J]. International Journal of Energy and Environment, 2015, 6 (6):597-606.