



# 低水头枢纽消力墩位置对消能效果的影响

张宇, 刘晓平, 苏天宇, 罗鹏飞, 叶玉康

(长沙理工大学, 湖南长沙 410076)

**摘要:** 低水头枢纽通常采用消力池底流消能的方式来消减泄水闸下泄水流的能量, 而消力墩的位置对水跃的形式、强弱影响较大, 从而影响整个消力池的消能率。采用计算流体力学软件 Fluent 的 VOF 模型, 探讨消力墩位置对消力池内水跃特征、湍动能耗散率分布及消能率的影响。结果表明: 消力墩位置会影响消力池消能率——消力墩布置在消力池长度的 0.65 及以上时, 其消能效果与不布置消力墩时相差不大; 消力墩布置在消力池长度的 0.35 处时, 消力池的消能率最大, 比布置在 0.65 时消能率提高约 10.5%。

**关键词:** 消力池; 消力墩; 消能率; VOF

中图分类号: TV 653.1, U 64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0088-04

## Influence of low-head hydraulic stilling pier's location on energy dissipating effect

ZHANG Yu, LIU Xiao-ping, SU Tian-yu, LUO Peng-fei, YE Yu-kang

(Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** For the low-head hydro-junction, we usually adopt the way of stilling basin's bottom underflow energy-dissipation to reduce the sluice discharge's flow energy. The location of the baffle pier has a great influence on the form and strength of the hydraulic jump, which affects the dissipation of the stilling basin. Adopting the computational fluid dynamics software Fluent's VOF model, we investigate the effects of the location of the baffle pier on the stilling basin, inland waters jump's characteristics, distribution of the turbulent kinetic energy dissipation rate and energy dissipation ratio. The results show that the location of baffle pier will affect the stilling basin energy dissipation. When the baffle pier is arranged at the 0.65 and above length of the baffle basin, there is a tiny difference about the effect of energy dissipation; When the baffle pier is arranged at the 0.35 length of the baffle basin, the energy dissipation ratio of stilling basin is the maximum, with a 5% energy dissipation improvement comparing that when the baffle pier is arranged at the 0.65.

**Key words:** stilling basin; baffle pier; energy dissipation ratio; VOF

我国已建成或在建的水利工程中, 低水头中小型水利工程占绝大多数, 并且其泄水闸大多采用消力池作为消能设施<sup>[1]</sup>。而低水头泄水闸消能率普遍较低, 常通过增设辅助消能工来提高泄水闸消能率<sup>[2]</sup>, 消力墩就是消力池中重要的辅助消能工之一。在有限的条件下如何提高泄水闸消能率是值得探讨的问题。本文通过流体软件 Fluent 中 VOF 模块建立二维数学模型, 分析消力墩位置

对消力池消能效果的影响, 为消力池的设计提供参考。

## 1 数学模型建立

### 1.1 模型概化

以湘江长沙综合枢纽泄水闸为研究背景, 建立如图 1a) 所示的二维模型。其中消力池长度为 26 m, 弧形闸门开度取 1.43 m, 消力墩为梯形墩,

高 2.5 m、顶宽 0.48 m、底宽 3 m; 计算域长 125 m, 宽 20 m。

## 1.2 模型边界条件和计算方法

RNG  $k-\varepsilon$  模型中方程的常数不是用实验方法确定的, 而是由理论推导得出的; 其通过修正紊流粘性系数, 考虑了平均流动中的漩流流动和旋转情况的影响; 并且 RNG  $k-\varepsilon$  模型能较好地模拟各向异性的高速射流和流线弯曲程度较大及高应变率的流动。VOF 模型根据各个时刻流体在网格单元中所占体积函数  $F$  构造和追踪自由面, 若在某时刻网格单元中  $F=1$ , 则说明该单元全部为指定相流体所占据, 为流体单元; 若  $F=0$ , 则该单元全部为另一相流体所占据, 相对于前相流体则称为空单元; 当  $0 < F < 1$  时, 该单元为包含两相物质的交界面单元<sup>[3]</sup>。SIMPLEC 是在 SIMPLE 算法的基础上对速度修正方程中的系数计算公式进行改进, 加快了计算的收敛速度, 而且得到的压力修正值也更加合适。很多学者采用以上的模型和算法做了水跃方面的数值, 其计算结果与物理模型试验基本吻合, 如: 袁新明<sup>[4]</sup>采用  $k-\varepsilon$  紊流模式和体积率 (VOF) 跟踪自由水面的方法, 模拟了闸后水跃的水流结构, 其结果与试验资料基本吻合; 戴会超<sup>[5]</sup>采用 SIMPLEC 算法结合 VOF 方法模拟淹没水跃的大尺度紊流结构及其微观结构, 其结果与物模吻合较好。

本文流场计算采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 自由液面采用 VOF 方法进行捕捉, 压力速度耦合方式采用 SIMPLEC 算法。空气入口采用压力入口, 入口压力为一个标准大气压; 水流入口采用速度入口, 模拟水流速度为 0.8 m/s; 出口为压力出口; 上游水位为 29.94 m, 下游水位为 22.89 m, 每个工况实际计算水位略有差别。折线堰和消力池采用粗糙的混凝土护面, 糙率取 0.017, 海漫考虑采用长沙枢纽天然河床的糙率, 取 0.025。计算域大部分区域采用基本均匀的网格密度, 对主要研究的消力池等区域进行加密处理, 区域之间网格平滑过渡, 同时为减少网格数量, 选择曲边四边形与三角形相结合的混合格网。

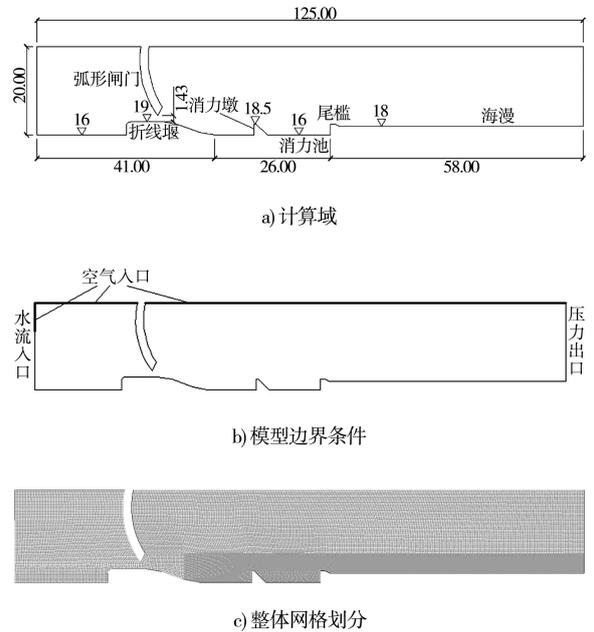


图1 计算模型和网格划分 (单位: m)

## 2 数学模型计算与分析

闸门的开度、消力墩自身的体型尺寸、位置及阻塞比等都会影响消力池的消能效果, 本文主要分析不同消力墩位置时泄水闸泄水消能情况。选择的计算工况见表 1。

表 1 工况

序号	1	2	3	4	5	6
位置	无	0.25L	0.35L	0.45L	0.55L	0.65L

注:  $L$  为消力池长度。

### 2.1 水跃特征

水跃是明槽水流从急流状态过渡到缓流状态时水面突然跃起的局部水力现象。水跃区的水流可以分为两部分: 上部不断翻腾旋滚, 因掺入空气而呈白色, 下部是主流, 是流速急剧变化的区域。这两部分的交界面上流速梯度很大, 液体质点不断地穿越交界面进行交换, 紊动、摩擦混掺强烈, 消耗大量动能, 因此底流消能实质上就是水跃消能。

利用 Fluent 对各个工况建立数学模型并进行数值计算, 其计算如图 2 所示。水流与消力墩碰撞产生强迫自由水跃, 在消力墩后发生剧烈旋滚, 于水跃末端破碎。如图 3 所示, 水跃表面水流流

速较大,水跃内部的竖向环流流速较小;在水跃顶部有少量水流逆流而下。

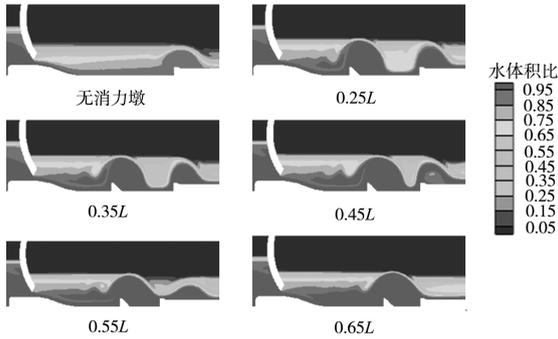


图2 水跃对比

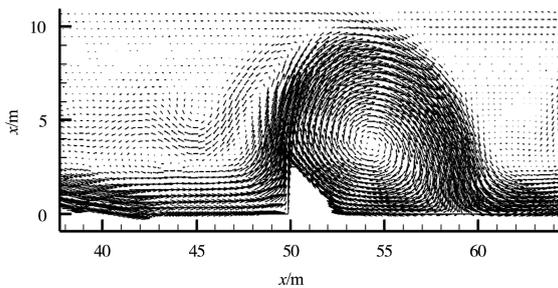


图3 水跃局部速度矢量

不设消力墩时,水跃部位在消力池尾槛处,属于远驱水跃。消力墩位置在 0.25L~0.45L 时,急速水流碰撞消力墩,发生强迫水跃,结束后与尾槛碰撞出现第二次水跃,并且消力墩位置从 0.25L 增大到 0.45L,两个水跃间间距变小。而当消力墩位置处于 0.55L~0.65L 时,强迫水跃末端处于尾槛上,不再与尾槛碰撞发生水跃,全程只发生一次水跃。

### 2.2 消能率

消能率是衡量消能工的消能效率的重要指标。为了分析消力墩位置改变对它的影响,本文根据水流的能量方程,结合数学模型计算结果进行计算和分析。取闸前 1-1 断面和尾槛即消力池末端 2-2 断面(图 4),按以下方法进行消能率计算和分析:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \left( Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (1)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  分别为断面 1-1 和断面 2-2 处断面能量;  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为断面 1-1 和断面 2-2 处水面高程;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为断面 1-1 和断面 2-2 处水流的动能修正系数(本文  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  均取 1.0);  $v_1$ 、 $v_2$  分别为断面 1-1 和断面 2-2 处水流平均流速,  $\Delta E/E_1$  为消能率。

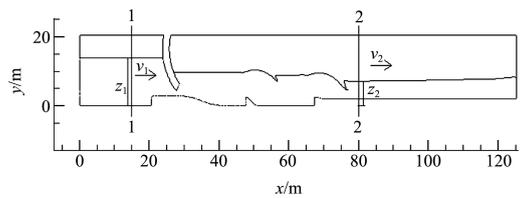


图4 消能率计算

各种工况下消力池消能率计算结果见表 2。不设置消力墩和消力墩布置在 0.6L 处消力池消能率非常接近(分别为 43.6% 和 43.8%),说明消力墩布置在 0.65L 及以上时,其对消力池消能效果影响很小;消力墩位置在 0.25L~0.45L 之间时,水流从泄水闸出来会发生 2 次水跃,其消力池消能效果较其他 3 种工况好;其中 0.35L 时,尾槛断面水深最小,消力池消能率最大为 48.4%。

表 2 消能率计算

消力墩位置	闸前断面			尾槛断面			消能率 ( $E_1 - E_2$ )/ $E_1$
	$Z_1$	$V_1$	$E_1$	$Z_2$	$V_2$	$E_2$	
无	13.395	0.861	13.432	6.720	4.094	7.574	0.436
0.25L	13.981	0.789	14.012	7.076	3.234	7.609	0.456
0.35L	13.845	0.805	13.878	6.440	3.750	7.156	0.484
0.45L	13.914	0.783	13.945	6.500	3.573	7.400	0.469
0.55L	14.101	0.790	14.133	6.850	4.103	7.743	0.452
0.65L	13.863	0.793	13.895	7.570	3.270	7.802	0.438

### 2.3 湍动能耗散率

前两节从水跃特征及理论计算角度分析消力墩位置对泄水闸消能效果的影响。下面从湍动能耗散率的角度分析其对消能效果影响的机理。根据水流的状态将整个消能过程分为 a、b、c、d 4 个区域分别进行分析(图 5)。其中 0.25L 和 0.35L 均存在 4 个区域的消能,而 0.65L 时,只存在 a 区和 b 区;并且对于 a 区,三者湍动能耗散率分布类似:较大值(>4.0)均分在 X 坐标为 30~37 范围内,其中 0.35L 最大值为 7.5,0.65L 最大值为 7.0,相差不大;而其他区域湍动能耗散率均处 0.5~2.5 之间,0.65L 该区域范围较另外二者大一些。b 区湍动能耗散率分布呈现“n”字形,水跃内部湍动能耗散率基本为 0,而外围较大,并且“n”字形右侧水跃破碎区域湍动能耗散

率明显大于左侧水跃起始区域。0.25L、0.35L 和 0.65L 的左侧区域湍动能耗散率分布基本一致,右侧水跃破碎区域 0.65L 最大湍动能耗散率为 6.0 比 0.25L 和 0.35L 的 4.5 大了 1.5。综上可知,0.65L 的消能效果明显不及 0.25L 和 0.35L。消力墩在 0.25L 时,其距离泄水闸过近,不利于底流的充分发展,a 区湍动能耗散率小于 0.35L,c 区和 d 区亦是如此;消力墩位置后移至 0.45L,c 区底流还未完全形成就与尾槛发生碰撞,c 区和 d 区湍动能耗散率小于 0.35L;继续后移至 0.65L,c 区和 d 区消失,整个消力池效能效果更差,所以从湍动能耗散率角度分析建议消力墩布置在 0.35L 左右。

### 3 结论

1) 消力墩能够使消力池发生强迫水跃,改变水流结构,增大消力池内湍动能耗散率,增大消能率。

2) 消力墩位置会影响消力池消能率:消力墩布置在消力池长度的 0.65 及以上时,其消能效果与不布置消力墩时相差不大;消力墩布置在消力池长度的 0.35 处时,消力池的消能率最大,比布置在 0.65 时消能率提高约 10.5%。

### 参考文献:

- [1] 孙永娟,孙双科.高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J].水力发电,2005,31(8):70-72.
- [2] 哈尔曼 D R F,王湧泉.消力池中消力墩的作用[J].水力发电,1957(21):35-39.
- [3] 童亮,余罡,彭政,等.基于 VOF 模型与动网格技术的两相流耦合模拟[J].武汉理工大学学报信息与管理工程版,2008,30(4):528-528.
- [4] 袁新明,毛根海.闸门水跃水流的数值模拟[J].水利学报,1995(5):44-48.
- [5] 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.

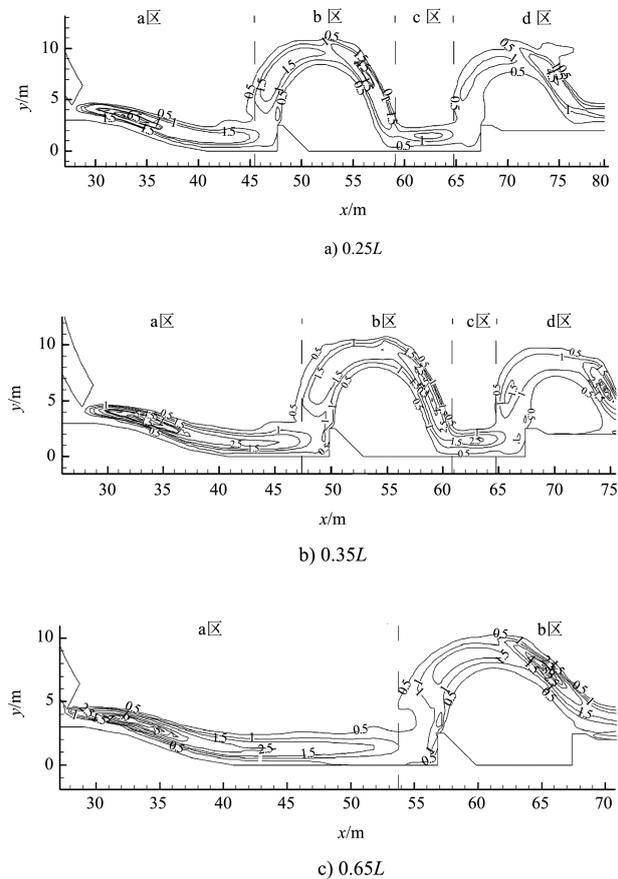


图 5 湍动能耗散率对比