

# 溢洪道水力学问题优化设计研究

——以延安市王瑶水库扩容工程溢洪道优化设计为例

杨砾<sup>1</sup>, 燕荔<sup>1</sup>, 高利瑶<sup>2</sup>, 杨史杰<sup>2</sup>

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710001;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为消除延安市王瑶水库扩容工程溢洪道泄槽、消力池及下游河道中的不良流态,减轻下游河床冲刷坑深度,采用模型试验及数值模拟方法,对王瑶水库扩容工程溢洪道进行优化设计,并进行放水观测检验。结果表明:在陡坡上布置27个台阶后,有效的消除了消力池中的回流流态,确保了消力池中水流流态良好;通过调整人工退水渠长度及方向,使消力池出池水流居河流中部流动,将下游河道右岸顶冲冲刷深度17 m的不利态势扭转为淤积状态,完美的解决了河道右岸顶冲问题及冲刷坑深度较大问题。优化设计后的溢洪道泄槽、消力池及下游河道中水流流态、水位、流速分布、底板上负压值及下游河床冲刷深度均满足设计及有关规范要求。

**关键词:** 溢洪道;消力池;水流流态;冲刷坑;优化设计

中图分类号: TV651.1;TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0155-07

## Optimization Design of Hydraulic Problems of Spillway

——A Case Study of Optimization Design of Spillway in Wangyao Reservoir

Expansion Project of Yan'an City

YANG Li<sup>1</sup>, YAN Li<sup>1</sup>, GAO Liyao<sup>2</sup>, YANG Shijie<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Provincial Institute of Water Resources and Electric Power Survey

and Design(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to eliminate the bad flow state in the spillway discharge slot, energy dissipation pool and downstream channel of the Wangyao reservoir expansion project and to reduce the depth of the scouring pit in the downstream riverbed, the optimization design of the spillway of the Wangyao reservoir expansion project was carried out by using model test and numerical simulation method, and the water release observation test was carried out. The results show that after arranging 27 steps on the steep slope, the backflow flow in the energy dissipation pool is effectively eliminated, and the flow state of the water flow in the energy dissipation pool is ensured to be in good condition. By adjusting the length and of the artificial water return channel, the outgoing flow of the energy dissipation pool is made to flow in the middle of the river, and the unfavorable state of the right bank scouring depth of 17 m in the downstream channel is transformed into a siltation state, and the right bank head scouring problem and the problem of large scouring depth in the river channel are perfectly solved. After optimization design, the flow state, water level, velocity distribution, negative pressure value on the bottom plate and scouring depth of the riverbed in the spillway discharge slot, energy dissipation pool and downstream channel of the reservoir all meet the design and relevant specification requirements.

**Keywords:** spillway; stilling basin; flow patterns; scour pit; design optimization

溢洪道结合底流消能是一种在水利工程中广泛应用且行之有效的泄水建筑物型式。但由于不同工程所处位置的地形地质条件各异,在实际应用中仍常常出现一些问题。例如,狭窄河谷对泄流能力的限制、复杂边坡引发的沿程流态变化,以及软弱地基条件下消能防冲结构的稳定性问题<sup>[1-3]</sup>。针对这些问题,早期的研究通常采用物理模型试验结合理论分析方法,通过导流、分区等方式直接干预水流流态。例如,徐岗等<sup>[4]</sup>和陆芳春等<sup>[5]</sup>在泄槽中设置折流坎,有效均化了进入消力池的水流,消除了池内回流。面对更为复杂的水力条件,林荷节等<sup>[6]</sup>和毛昶熙等<sup>[7]</sup>采用了斜尾坎、不等高尾坎或横向倾斜池底等非常规结构,通过主动调整池体形态来修正横向流速分布,促使主流扩散。随着认识的深化,研究重点逐渐转向通过增强紊动耗散、提升消能效果并抑制回流等方面。其主要思路是在消力池内增设辅助消能工,主动激发并调控紊动结构。例如,史修府等<sup>[8]</sup>在池内布设交错糙条,将大尺度漩涡分解为小尺度涡旋,从而加强剪切耗能;黄智敏等<sup>[9]</sup>则利用不连续台阶改善沿程流速分布。这些措施的核心在于提高池内能量耗散效率及流速分布均匀性。更为关键的是,上述工程实践引起了对回流产生机理的理论研究。王二平等<sup>[10]</sup>指出,回流是否出现取决于入池动量差所产生的回流能量与水跃旋滚能量之间的对比关系。孙东坡等<sup>[11-12]</sup>则从浅层急流动量分布的椭圆形特征入手,阐明了水跃发生随机偏移的根源,并创新性地提出了通过构建马鞍形动量分布实现水跃稳定的介入式方法。该研究将消能措施的设计从经验性调整提升至机理驱动层面。尽管物理模型试验结合理论分析的方法直观可靠,但其局限性也制约了研究的深入与理论的提升:如试验周期长、成本较高,方案调整不够灵活,不利于多方案快速比较与优选;受缩尺效应影响,难以准确复现紊动、掺气等细微物理现象;更重要的是,其宏观、离散的测量方式难以全域、定量地捕捉复杂三维流场中的精细结构与瞬态物理机制。这些瓶颈使得仅依靠模型试验深入揭示消能机理、高效评估新型消能工仍存在明显不足。

近些年来,数值模拟技术已成为与物理模型试验相辅相成、不可或缺的研究手段。学者们借助数值模拟不仅能够快速、高效地复现消能工中的复杂流场,还在机理揭示与设计优化方面取得了系统性进展。首先,数值模拟有效揭示了特定消能措施对流态的改善作用。例如,高力瑶<sup>[13]</sup>利用 FLOW<sup>3D</sup>软

件模拟对比了不同阶梯形式对溢洪道水力特性的影响,指出阶梯布置有助于促进断面水力要素均匀化,从而从根源上消除了消力池内平面回流的产生。李强等<sup>[14]</sup>针对大角度弯道引水渠的复杂流态,通过 FLOW<sup>3D</sup>建立全流道模型,系统分析了整体水流结构与压强分布,为优化此类受限地形条件下的工程设计提供了直接依据。此外,数值模拟实现了从设计、优化到验证的一体化流程。李勇<sup>[15]</sup>基于 Fluent 软件对沟水坡水库溢洪道进行了模拟,在验证模型可靠性的同时,发现了原设计方案在特定洪水工况下存在的结构缺陷,并据此提出两级水垫塘的优化方案,再经数值模拟验证了其可行性,体现了数值方法在主动优化设计、缩短研究周期方面的显著作用。更重要的是,数值模拟在研究回流、漩涡等复杂水流现象的机理方面提供了复杂、量化的流场信息。高力瑶<sup>[13]</sup>的研究已深入机理层面,指出了回流形成与入池剪切差强度和水跃旋滚强度的相关性。苏晓玉等<sup>[16]</sup>利用 MIKE21 模型成功模拟了前坪水库溢洪道,进一步积累了关键水力参数(如泄流能力、水面线)的数值预测经验,增强了该方法在工程应用中的可信度。

综上所述,每个溢洪道工程所处位置的地质地形条件差异较大,致使其工程泄水陡槽及消力池中水流流态千差万别,工程师也因地制宜采用了不同的工程措施,使溢洪道中水流流态、进池流速分布得到了较大改善,保证了水流在消力池中形成了稳定水跃及良好的消能效果,确保了工程的安全运行。

基于前人研究成果,本文采用模型试验及数值模拟方法,对王瑶水库扩容工程溢洪道进行了优化设计,确定了最终设计方案。最终设计方案的泄槽、消力池及下游河道中水流流态、水位、流速分布、底板上负压值及下游河床冲刷深度均满足设计及有关规范要求,为王瑶水库扩容工程顺利开工及安全运行提供了强有力的技术支持。

## 1 工程概况

王瑶水库工程位于延安市杏子河中游河段安塞县境内,距离下游延安市约 65 km。水库总库容 2.03 亿 m<sup>3</sup>,是一座以防洪为主,兼有城市供水、灌溉、发电等功能的 II 等大(2)型水利枢纽。扩容工程防洪标准仍维持原设计防洪标准,100 年一遇洪水设计,相应洪峰流量为 3 120 m<sup>3</sup>/s;2000 年一遇洪水校核,相应的洪峰流量为 5 820 m<sup>3</sup>/s;50 年一遇消能防冲洪水标准。在溢洪道单独泄洪时,100 年一

遇设计洪水位 1 185.79 m, 相应溢洪道下泄流量 277.31 m<sup>3</sup>/s; 2000 年一遇校核洪水位 1 188.10 m, 相应溢洪道下泄流量 429.20 m<sup>3</sup>/s。溢洪道布置在大坝右岸, 采用正槽开敞式。溢洪道由进口引渠段、控制段、泄槽段、底流消能段、护坦段及海漫段等六部分组成, 全长 452.73 m。

## 2 研究方法

本研究主要采用物理模型试验为主, 辅助以数学模型研究。

### 2.1 物理模型设计

王瑶水库扩容工程水工模型试验以重力相似准则设计, 模型几何比尺为  $\lambda_L = 50$ , 模型其它的比尺如下:

- (1) 流速比尺  $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 7.07$
- (2) 流量比尺  $\lambda_Q = \lambda_A \lambda_v = \lambda_L^2 \lambda_L^{0.5} = \lambda_L^{2.5} = 17677.7$
- (3) 时间比尺  $\lambda_t = \frac{\lambda_v}{\lambda_Q} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_L^{2.5}} = \lambda_L^{0.5} = 7.07$

式中:  $\lambda_A$ 、 $\lambda_v$  分别为原型与模型的面积比和体积比。

模型范围包括了坝轴线上 300 m、溢洪道长 380 m 及坝轴线以下 600 m 的河段。

鉴于溢洪道下游河道覆盖层较薄, 下游河道仅模拟基岩冲刷。基岩冲刷采用散砂砾模拟。根据设计提供的基岩抗冲流速 (1.2 m/s ~ 1.5 m/s) 及依兹巴什公式 ( $V = K \sqrt{D}$ ,  $V$  为抗冲流速, m/s;  $D$  为散沙料粒径, m;  $K$  为岩性系数, 一般取 5 ~ 7) 计算得原型基岩抗冲流速对应的散砂砾粒径范围为  $D = 0.03$  m ~ 0.09 m, 相应的模型沙粒径范围为  $D = 0.6$  mm ~ 1.8 mm, 并筛选该粒径范围的散砂砾替代模拟模型枢纽下游基岩层。

### 2.2 数学模型

基于 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型的基本流体控制方程如下:

连续性方程:

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

式中:  $\rho$  为液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为时间, s;  $u_i$  为速度矢量, m/s;  $x_i$  为三维坐标矢量, m。

RANS 动量方程:

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

式中:  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力, Pa;  $\overline{p}$  为时均压力, Pa;  $x_j$  为三维坐标矢量, m。

湍流动能 ( $k$ ) 方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

式中:  $k$  为湍流动能系数;  $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$  为扩散系数;  $G_k$  为湍流动能产生项;  $\varepsilon$  为湍动能耗散项。

耗散率 ( $\varepsilon$ ) 方程:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: 模型常数  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 、 $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$ , 其中  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ 、 $\eta_0 = 4.377$ 、 $\beta = 0.012$ 、 $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1.2} k/\varepsilon$ , 其中  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为时均应变率;  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  为涡粘系数,  $C_\mu = 0.0845$ 。

为了准确的模拟溢洪道泄流情况, 本文基于 (多相流) VOF 模型 (Hirt and Nichols 1981) 追踪水气交界面, 控制方程为:

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

式中:  $a_n$  为流体自由表面处的液相体积分, 气相体积分, 当  $a_n = 1$  时, 表示计算单元内不存在空气。

## 3 溢洪道优化设计

### 3.1 原设计方案

模型试验表明, 溢洪道过流能力满足设计要求, 但在弯道段形成最大达 3.6 m 的横向水面差。存在的主要问题: 设计及校核工况下, 消力池中形成远驱水跃; 流量  $Q \leq 141.6$  m<sup>3</sup>/s 消力池内可形成淹没水跃, 但左侧出现大范围回流, 占池宽 40% ~ 50% (见图 1); 出池水流严重顶冲右岸, 校核工况下河道最大冲刷深度约 17 m (见图 2)。



图 1 原方案泄流量 141.6 m<sup>3</sup>/s 消力池及下游河道水流流态



图 2 原方案校核工况护坦下游河床冲刷形态

### 3.2 优化方案对比与最终成果

围绕改善池内流态与消除下游顶冲两大目标,依次进行了 4 个优化方案。

方案 1:增大消力池长度和深度、增设人工渠。放水试验发现,池内回流依然存在,下游顶冲问题仍很显著。

方案 2:通过缩短退缩渠,成功实现了水流归槽、冲刷坑居中、两岸出现淤积,因此解决了下游顶冲问题。

方案 3:主要集中解决消力池中流态,进行了一系列局部措施尝试,包括设置陡坡台阶、不对称尾坎高程以及在池内增设消力墩等,见图 3。

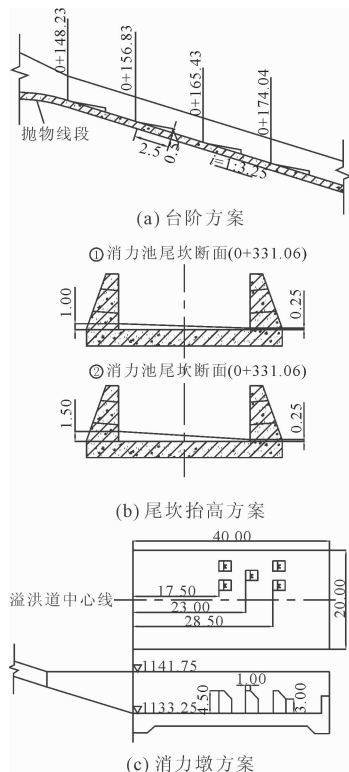


图 3 修改方案 3 的 3 个修改尝试方案

放水试验发现,消力墩方案效果相对明显,能够缩小回流范围并降低冲刷深度(校核工况下冲刷深

度降至 10.08 m),但未能彻底解决池内流态问题;台阶方案对消力池内流态有一定改善,但还需要进一步完善。

方案 4:主要是通过数值模拟方法优化完善台阶群布置方案,推荐体型见图 4,计算结果见图 5。进一步放水试验验证表明,池内回流消失,流态良好,台阶面负压可控( $< 1 \times 9.8 \text{ kPa}$ ),因此确定为最终设计方案。

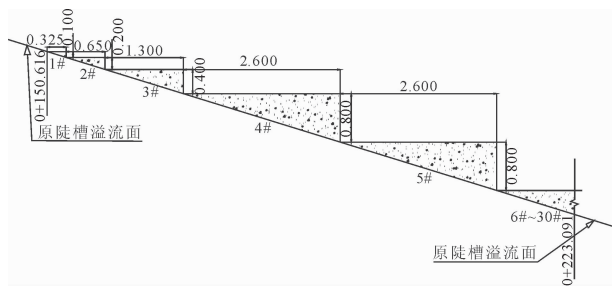


图 4 溢洪道陡坡上台阶布置方案

### 3.3 最终设计方案观测结果

最终设计方案进行了校核工况、设计工况及消能防冲工况的放水观测试验,试验结果简述如下。

#### 3.3.1 库区水流流态

王瑶水库坝前库区开阔,各工况下库区水流平稳、水面平静,坝前水流流速较小,溢洪道进口流态良好。

#### 3.3.2 溢洪道泄流能力

在校核工况(库水位 1 188.20 m)及消能防冲工况(库水位 1 185.10 m)下,溢洪道闸门全开运行,实测溢洪道下泄流量分别为  $451.77 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $191.07 \text{ m}^3/\text{s}$ ;在设计工况(库水位 1 185.97 m)下,溢洪道闸门局开 2.5 m 运行,实测枢纽下泄流量  $194.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 。总之,溢洪道泄流能力均满足设计要求。

#### 3.3.3 溢洪道及消力池内水面线及水流流态

三个工况溢洪道内水面线沿程变化基本相似。在溢洪道弯道起点(桩号溢 0+048.85 m)上游,溢洪道中左右岸水位基本一致;在弯道段桩号溢 0+048.85 m—溢 0+132.18 m,弯道右岸水位明显高于左岸水位,校核、设计及消能防冲工况最大差值分别为 2.7 m、2.05 m 和 1.19 m。在桩号溢 0+132.18 m 下游,水流经过短暂的过渡,进入陡坡台阶整流段,溢洪道左右岸水位差异明显减小,并趋于均匀一致,见图 6。水流进入消力池前后发生水跃,校核工况发生远趋式水跃,起跃位置位于池首断面下 3.5 m,见图 7;设计工况和消能防冲工况均发生

淹没式水跃,起跃断面均位于池首断面上 7.5 m;水流在消力池尾坎形成较大涌浪及二次跌落水流,水位落差分别为 1.97 m~2.47 m、1.42 m~1.92 m 和

1.12 m~1.72 m;之后水流流过退水渠,平稳进入护坦及下游河道并居中流动。

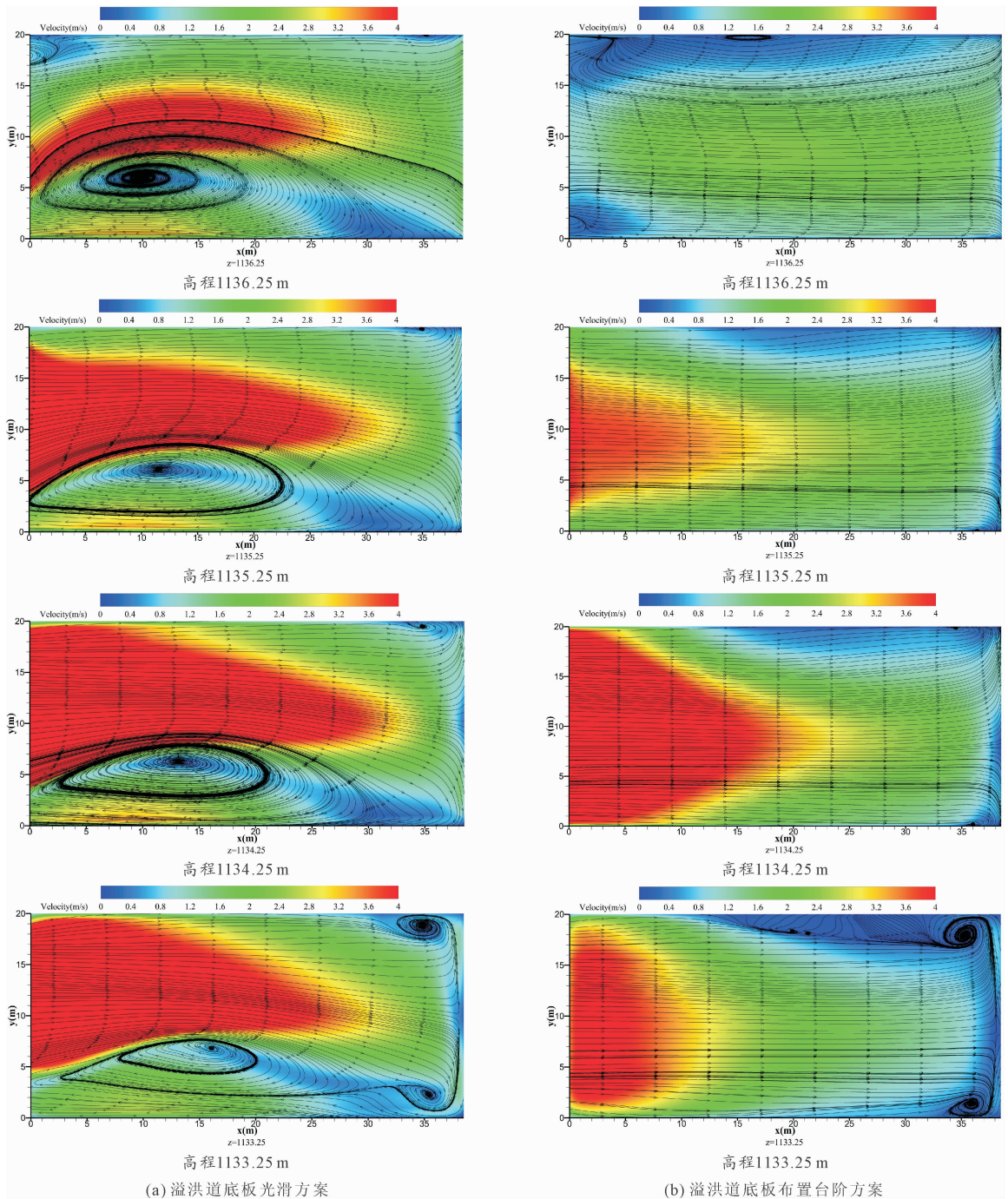


图 5 消能防冲工况消力池中不同高程平面流线云图及流速分布

### 3.3.4 溢洪道底板上压力分布

三个工况溢洪道非台阶整流段底板上均为正压,台阶整流段垂直面上也为正压;在桩号溢 0 + 217.89 m 及溢 0 + 223.70 m 处底板上均出现负压,校核工况负压最大值分别为  $0.31 \times 9.8 \text{ kPa}$  和  $2.02$

$\times 9.8 \text{ kPa}$ ,设计工况负压最大值分别为  $0.41 \times 9.8 \text{ kPa}$  和  $0.92 \times 9.8 \text{ kPa}$ ,消能防冲工况负压最大值分别为  $0.36 \times 9.8 \text{ kPa}$  和  $0.92 \times 9.8 \text{ kPa}$ 。

### 3.3.5 溢洪道及消力池内流速分布

在溢洪道进口段,因受喇叭口平面收缩影响,水

流流速由进口断面较小的流速逐渐增大;进入闸室后,水流流速进一步增大;在溢 0 + 025.00 m—0 + 142.18 m 段,溢洪道虽然在平面上加宽,但因纵剖面坡降加大到 1/50,水流流速进一步增大;之后,水流进入陡坡段,水流流速迅速增大,直至跃首断面,水流流速达到最大。



图 6 最终设计方案校核工况陡坡流道上水流流态



图 7 最终设计方案校核工况消力池及下游河道水流流态

在校核工况下,进口断面水流流速为 1.0 m/s ~ 2.0 m/s;在溢 0 - 020.00 m 断面流速增大到 4.0 m/s ~ 5.0 m/s;在闸室出口断面,水流流速达到 8 m/s 左右;在桩号溢 0 + 142.18 m 断面,水流流速接近 11 m/s 左右;之后水流流速迅速增大,直至跃首断面最大流速达到 28.36 m/s。水跃发生后水流流速迅速衰减,池中最大流速 20.05 m/s,出池最大流速 4.98 m/s,退水渠上最大流速 11.44 m/s,退水渠出口最大流速 8.74 m/s;河道中最大主流流速 5.35 m/s,左右岸两侧最大回流流速分别为 1.68 m/s 和 2.06 m/s。

在设计工况下,因溢洪道闸门局开运行,闸门上游水流流速均较小,进口断面流速 0.7 m/s;闸门前最大流速 3.31 m/s,过闸后流速迅速增大到 7.6 m/s;在桩号溢 0 + 142.18 m 断面,最大水流流速 11.48 m/s;在水跃起跃断面,水流最大流速 23.52 m/s;池首断面最大流速 12.22 m/s,池中部最大流速 2.58 m/s,出池最大流速 4.43 m/s;退水渠上最大流速 6.33 m/s,退水渠出口最大流速 5.78 m/s;

河道中主流最大流速 5.55 m/s,左右岸两侧最大回流流速分别为 1.52 m/s 和 1.00 m/s。

在消能防冲工况下,溢洪道进口流速 1.0 m/s,闸室出口断面最大流速 5.8 m/s;在桩号 0 + 142.18 m 断面最大流速 10 m/s;在水流起跃断面,水流最大流速 23.34 m/s;在池首断面最大流速 14.19 m/s,池前部最大流速 5.84 m/s,池中部最大流速 2.76 m/s,池后部最大流速 2.33 m/s,出池最大流速 4.85 m/s;退水渠上最大流速 6.22 m/s;河道中主流最大流速 5.66 m/s,左右岸两侧最大回流流速分别为 1.57 m/s 和 1.51 m/s。

### 3.3.6 护坦下游河床冲刷

三个工况护坦下游河床冲刷坑位于河槽中心区域。三个工况冲刷坑最深点高程分别为 1 125.75 m、1 127.75 m 和 1 128.25 m,见图 8;相对退水渠末端高程 1 136.22 m 冲刷深度分别为 10.47 m、8.47 m 和 7.97 m。

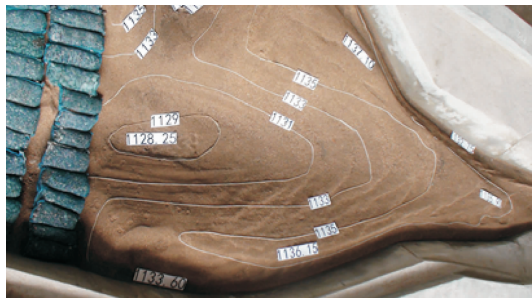


图 8 最终设计方案消能防冲工况护坦下游河床冲刷形态

## 4 结 论

采用模型试验及数值模拟方法,对王瑶水库扩容工程溢洪道工程进行了多个方案修改完善,确定了最终设计方案。最终设计方案放水试验表明:

(1) 在陡坡上布置 27 个台阶后,消力池中流态良好、回流消失。

(2) 通过调整人工退水渠长度及方向,下游河道水流居中部流动,将原设计方案下游河道右岸顶冲冲刷深度 17 m 的不利态势扭转为淤积状态,彻底解决了河道右岸顶冲问题及冲刷坑深度较大问题。

上述两个问题的圆满解决为王瑶水库扩容工程顺利开工及运行提供了强有力的技术支持。

### 参考文献:

- [1] 范 凯,廖智颖,曾雪艳,等.东涌水库溢洪道弯道水流特性及优化试验研究[J].海河水利,2025(10):67-72.

- [2] 黄智敏,付波,陆汉柱,等. 溢洪道弯道段流态改善试验研究和应用[J]. 广东水利水电,2024(4):9-13,24.
- [3] 王志超,许新发,邬年华,等. 太湖水库弯曲溢洪道水流特征及优化措施研究[J]. 水利水电技术,2019,50(3):110-116.
- [4] 徐岗,王斌,周文妍. 诸暨青山水库除险加固工程溢洪道优化布置研究[J]. 浙江水利科技,2009(2):26-27,34.
- [5] 陆芳春,徐海飞,何晓敏. 横锦水库除险加固工程溢洪道优化布置研究[J]. 浙江水利科技,2006(5):4-6.
- [6] 林荷节,屠兴刚,史斌. 青山水库泄洪隧洞出口消力池研究[J]. 浙江水利科技,2022,50(6):96-99.
- [7] 毛昶熙,周名德,柴恭纯,等. 闸坝工程水力学[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [8] 史修府,牧振伟,吕智,等. 溢洪道转弯段消力池水力特性优化模拟研究[J]. 长江科学院院报,2024,41(12):91-100.
- [9] 黄智敏,何小惠,黄健东,等. 阳江抽水蓄能电站下库溢洪道消能研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):92-96.
- [10] 王二平,赵静雅,孙东坡,等. 宽浅陡槽急流动量分布特征及稳定性研究[J]. 水土保持学报,2011,25(1):249-252.
- [11] 孙东坡,薛海,宋永军,等. 宽浅陡槽水流的稳定性及控导措施[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(3):29-33,42.
- [12] 孙东坡,罗秋实,严军,等. 控导浅层急流的潜没式三角翼体特性研究[J]. 水科学进展,2007,18(4):509-515.
- [13] 高利瑶. 王瑶水库溢洪道泄洪消能特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.
- [14] 李强,林浩,孔筱雅. 基于FLOW-3D的溢洪道数值模拟[J]. 水科学与工程学报,2025(4):50-52.
- [15] 李勇,李松平,杨炬敏,等. 基于数值模拟的溢洪道水流沿程变化与护坡高度合理性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(2):399-408.
- [16] 苏晓玉,潘亚炜,苏保印,等. 前坪水库溢洪道过流能力数值模拟研究与应用[J]. 河南水利与南水北调,2024,53(1):73-74.

(上接第154页)

- [7] 海绵城市建设技术指南:GB/T 51345—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [8] U S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Dust Control in Construction[R]. Washington, DC: EPA, 2018.
- [9] 兰琪. 建筑施工场所扬尘噪声在线监测系统研究与设计[J]. 山西电子技术,2018(1):84-87.
- [10] 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南:HJ 772—2015[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015.
- [11] U S. Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors[S]. Washington, DC: EPA, 1995.
- [12] Architectural Institute of Japan. Guidelines for Environmental Design of Buildings[S]. Tokyo: AIJ, 2016.
- [13] International Tunnelling Association. Guidelines for Good Working Practice in the Tunnel Environment[R]. Switzerland: ITA, 2018.
- [14] 声环境质量标准:GB 3096—2008[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.