

基于数值模拟的某阶梯溢洪道方案优化研究

靳晟, 李琳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 基于数值模拟方法, 利用 FLUENT 软件对某阶梯溢洪道原设计方案下的泄流能力、闸门全开时的水面线、沿程各段压力等值线、闸门全开时沿程流速分布等流场要素进行模拟计算, 根据计算结果分析原设计方案中存在的不足和问题, 并提出了新的优化设计方案。研究结果表明: 新方案能较好的满足工程设计实际要求, 并可对同类型阶梯溢洪道的优化设计提供有价值的参考。

关键词: 数值模拟; FLUENT; 阶梯溢洪道; 方案优化

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0017-06

Study on optimization of stepped spillway scheme based on numerical simulation

JIN Sheng, LI Lin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based the method of numerical simulation, this paper simulated and calculated the discharge capacity of original design scheme of stepped spillway, the line of water surface and the equal value line of pressure when sluice gate was fully opened, as well as the velocity distribution along the element process field by use of FLUENT software. According to the simulation result, it analyzed the deficiencies and problems existing in the original design scheme, and put forward a new scheme of optimization design. The simulation results have indicated that the new scheme can meet the practical requirement of engineering design, and can provide a valuable reference for optimization design of the same type of stepped spillway.

Key words: numerical simulation; FLUENT; stepped spillway; scheme optimization

随着数值模拟计算技术的不断完善, 利用各类计算软件来分析流场特性已得到越来越广泛的应用。现在已有众多的计算流体力学(CFD)商业程序可供选用, 如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDIP、FLUENT 等。相比于物理模型试验, 数值模拟具有花费少、适应能力强、提供细腻的流场特征值、取得成果迅速、便于方案比选等优点。目前, 工程界愈来愈重视运用数值模拟手段研究流场的内部结构^[1-4], 由过去的以物理模型试验为主要研究手段转化为以数值模拟为主要研究手段。本文即采用 FLUENT 软件对某阶梯溢洪道进行方案优化研究。

1 某阶梯式溢洪道原方案

某阶梯溢洪道原方案纵坡剖面采用阶梯式泄槽+消力池组合消能方式。该阶梯式溢洪道进口溢流

堰前沿总长 24 m, 最大泄洪量 1 202.0 m³/s, 最大单宽流量 51.8 m³/s; 溢洪道毛水头 91.1 m; 光滑泄槽段长 61.05 m, 纵坡 1: 50; 台阶泄槽段长 193 m, 纵坡 1: 0.9, 台阶总数 74 个, 台阶步高 0.9 m, 步长 1 m。消力池全长 39.75 m, 池尾坎高 4 m。后接水平输水段坡度为 0, 尾部挑坎挑角 0°, 直接将水流挑入河床。

1.1 阶梯式溢洪道计算域的离散

对阶梯式溢洪道的阶梯面附近的流场, 尤其是阶梯凹角内的漩涡流场是人们最关心的, 这个域内离散网格应划分得细密些, 而在自由水面以上的气体流场部分的网格可以划分稀疏些, 如果凹角内的网格密度不足, 则不能反映漩涡的流场特性。因此, 本研究采用四边形(二维)或六面体(三维)结构化网格对该阶梯溢洪道的流场进行离散, 该阶梯式溢

收稿日期: 2013-05-28

基金项目: 新疆水利水电工程重点学科基金项目资助(2012XJSLSD02)

作者简介: 靳晟(1976-), 男, 天津人, 副教授, 主要从事农业水土信息化研究。

通讯作者: 李琳(1979-), 女, 山东人, 副教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。

洪道网格剖分采用二维四边形单元,其节点总数7 476个,单元总数6 967个。网格最小几何尺度为0.3 m,最大几何尺度1.0 m。在阶梯溢段网格较密,其余部分网格较稀。为了保证壁函数有效,使阶梯内的漩涡流场特性得以真实的反映,对壁面附近一定距离内网格布置较密。

1.2 边界条件和初始条件

该阶梯式溢洪道的边界条件。泄洪时水流进口断面设在堰前一定距离处,它分为上部的气体进口和下面的水流进口两部分,水流进口用水深控制。水流进口定义为速度进口边界;所有气体边界都定义为压力边界,即气体边界处的压力为0;阶梯式溢洪道出口边界同样定义为压力边界,以保证泄洪时水流能够自由出流;所有阶梯式溢洪道的固定边界均定义为无滑移边界条件,对粘性底层采用壁函数来处理。

该阶梯式溢洪道的初始条件。整个初始流场均设定为被空气所充满,通过瞬态时间相关模拟,水流逐步由进口流入,再由对体积分数的迭代求解,能够

自动生成水气的交界面,这就是自由水面,水流将逐步充满整个流畅,达到稳定的流态。

2 某阶梯溢洪道原设计方案流场要素数值模拟成果

2.1 原方案溢洪道的泄流能力

经数值模拟计算可知在校核洪水位947.8 m,溢洪道闸门全开工况时,下泄流量为1 243.2 m³/s,略大于设计泄流量1 202.0 m³/s,满足安全泄洪要求。

2.2 原方案溢洪道闸门全开时的的水面线

计算结果表明,校核洪水947.8 m下溢洪道沿程水面线连续光滑,分布有序,但在水流进入消力池后水层较薄,消力池内没有形成水跃。受消力池尾槛顶托,水流随后水面爬升,尾槛顶部水流雍高过大,已远超过4 m的设计边墙高度。因此,溢洪道水平输水段边墙高度不能满足泄流要求。

2.3 原方案溢洪道沿程压力分布

原方案溢洪道的控制段、台阶段、消力池段及水平输水段各段压力等值线见图1。

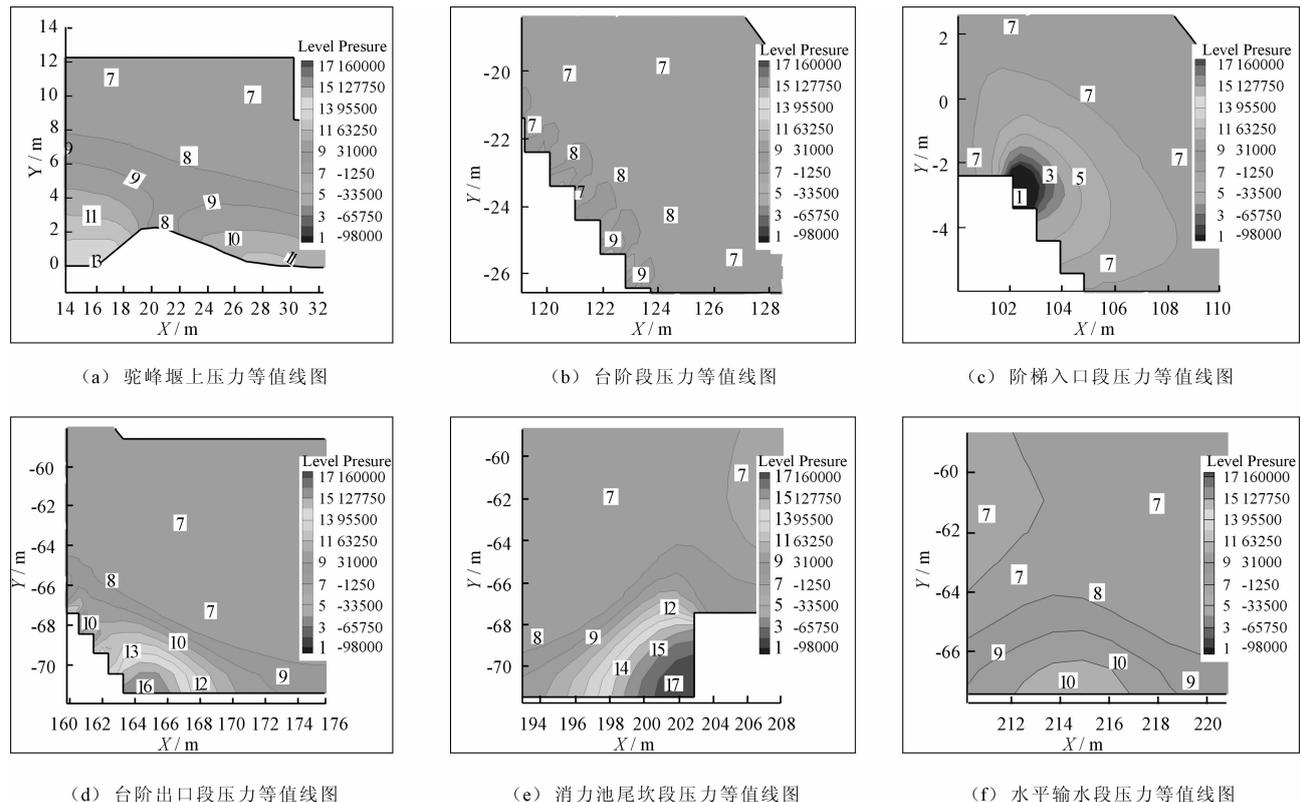


图1 原方案:阶梯式溢洪道典型地段压力等值线(单位:Pa)

从图1中可以看出:溢洪道控制段驼峰堰上及光滑泄流段均无负压(如图1(a))。阶梯泄槽段每个阶梯上压力分布均匀,相邻阶梯上压力分布稍有

波动(如图1(b)),各阶梯上压力场的分布规律基本相同。最大正压强出现在台阶水平面上,负压强出现在台阶立面上缘三分之一的范围内,这主要是

由于水流流动受阶梯边界突变影响,主流与边界分离形成空腔,产生负压。

总体上计算压强沿程分布和溢洪道沿程体型特征变化是相应的。最大负压值出现在自上游向下游第一个阶梯的立面(如图1(c)),负压值接近 -98 kPa,负压的绝对值过大。最大正压出现在消力池进口底板和消力池尾坎处(如图1(d)、(e)),最大正

压出现在消力池底板桩号 $0+182.8$ m处,压强值为 181.7 kPa。根据计算结果,该阶梯溢洪道原设计方案会产生严重空蚀破坏,必须对原设计方案进行优化。

2.4 原方案溢洪道闸门全开时沿程流速分布

校核洪水位 947.8 m 闸门全开时溢洪道沿程各个典型断面平均流速见表1。

表1 原方案溢洪道沿程典型断面平均流速

	m/s, m						
	导墙段	控制段		光滑泄流段			台阶段
桩号	0-020.0	0+000.0	0+020.3	0+040.3	0+060.3	0+080.3	0+100.3
底部高程	936.75	939.00	936.53	936.14	935.75	935.36	913.33
断面平均流速	5.50	8.40	10.80	11.70	12.40	15.30	16.30
	台阶段		消力池			水平输水段	
桩号	0+120.3	0+140.3	0+160.3	0+165.0	0+180.3	0+200.3	0+220.3
底部高程	891.33	869.33	865.33	865.33	865.33	869.33	869.33
断面平均流速	16.40	17.50	16.10	16.40	11.60	8.80	9.00

流动水流在过堰后进入光滑泄流段,由于具有 $1:50$ 的比降,流速随流程的增加而增加,由堰后的 10.8 m/s增至 15.3 m/s,然后进入阶梯泄流段。水流进入消力池中最大流速为 16.4 m/s至消力池尾部出口的流速降低到 11.6 m/s,受尾槛的阻挡,在池内未形成水跃,水流方向由水平陡然变为垂直,附近水面突然雍高,进入水平输水段后发生陡降。水流进入水平输水段后,流速变化不大,基本维持在 9 m/s左右。

2.5 原方案阶梯溢洪道原设计方案小结

(1)原方案溢洪道泄流能力满足校核洪水的泄洪要求。在校核洪水情况下,闸门全开时,溢洪道的泄流能力的数值模拟值略大于设计计算值,模拟泄流量为 1243.2 m³/s。

(2)1#台阶面上的负压值接近 -98 kPa,负压过大,极易产生空蚀破坏,必须对其进行体形优化,提高抗空蚀破坏能力。

(3)消力池效能效果欠佳,未能形成水跃,且水流直冲尾坎,造成壅水翻越边墙,危及岸坡安全。

(4)由于溢洪道出口流速仅 9 m/s,流速过低,将产生贴面流,容易发生溯源破坏。

鉴于以上原因,应对阶梯溢洪道原设计方案进行改进。

3 某阶梯溢洪道优化方案及流场要素数值模拟成果

针对原设计方案存在的问题,对原方案修正为

阶梯泄槽+挑流鼻坎方案,先后进行了7次修改和比选,重点对阶梯过渡段的体形设置、消力池和出口挑流等开展研究。选用其中的一个优化方案进行深入研究。具体为:将设计方案的底流消能改为挑流+消能,取消原方案的消力池,尾部挑流鼻坎高程为 868.33 m,在泄槽 $0+215.10\sim 0+225.7$ 段接一挑角 25° 、反弧半径 25 m的挑坎,挑流鼻坎至河床的高差为 5.86 m。水流自阶梯段下泄后直接进入矩形水平输水段,通过挑流鼻坎与下游衔接,这样处理有利于保证通过阶梯泄槽消能,将溢洪道最大流速控制在 20 m/s以下,又要使挑流鼻坎处有一定的流速,使下泄水流有一定的能量保证挑射水流有足够的射程,防止溯源破坏。同时优化修改了阶梯的起始位置和体形,原设计方案阶梯段桩号 $0+081.2$ 断面为开始断面,优化方案改阶梯段起始桩号为 $0+072.7$,台阶尺寸依次为(高度×宽度) 25 cm× 140 cm, 50 cm× 140 cm, 50 cm× 100 cm, 50 cm× 100 cm, 50 cm× 100 cm, 75 cm× 100 cm, 75 cm× 100 cm, 75 cm× 100 cm, 75 cm× 100 cm,其后的台阶体型与原设计方案相同。优化方案台阶总数增加至 87 个。

3.1 优化方案溢洪道闸门全开时的水面线

通过计算发现,阶梯式溢洪道优化方案与原设计方案相比水面波动较小,连接过渡段、阶梯段和水平输水段的水面变化不明显。其中连接过渡段的最大水深为 4.88 m,位于桩号 $0+020.3$ m处;阶梯段

最大水深为 5.06 m,位于桩号 0 + 100.3 m 处;水平输水段最大水深为 3.68 m,位于桩号 0 + 145.0 m 处;挑坎段末端水深为 3.08 m,位于桩号 0 + 225.7 m 处。根据经验公式(1)进行溢洪道掺气水深的计算。对应最大水深的掺气水深值见表 2。

$$h_a = \frac{h}{0.937} \left(Fr^2 \Psi \frac{b}{h} \right)^{0.088[5]} \quad (1)$$

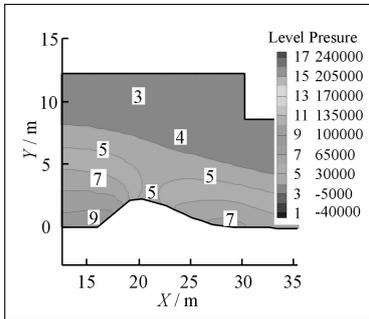
式中: h_a 为掺气水深; h 为正常水深; b 为矩形泄槽宽度。佛汝德数 $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$, $\Psi = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}}$; n 为糙率; R 为水力半径。

3.2 优化方案溢洪道沿程压力分布

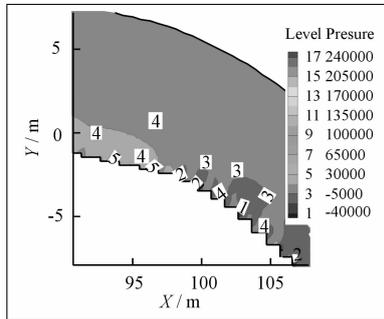
优化方案溢洪道的控制段、阶梯泄槽段、水平输水段和出口挑流段的压力等值线如图 2 所示。

表 2 优化方案校核洪水闸门全开时

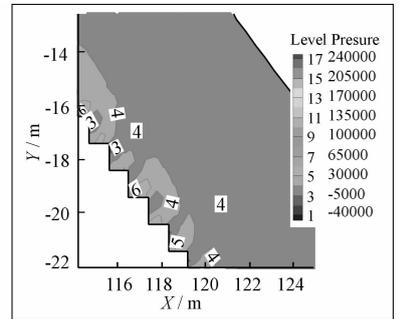
库水位	溢洪道闸门全开			
	连接过渡段	阶梯泄槽段	水平输水段	挑流段
947.8 m				
位置(桩号)	0 + 014.3	0 + 089.4	0 + 145.0	0 + 225.7
最大水深	5.2	6.20	3.68	3.08
掺气水深	5.2	6.46	4.13	3.65



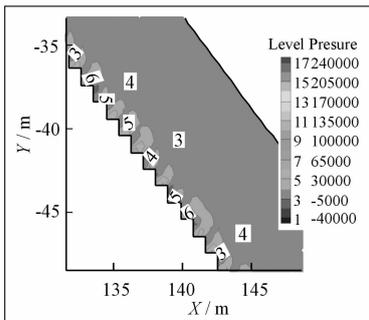
(a) 驼峰堰上压力等值线图



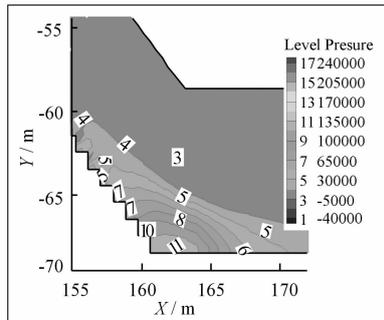
(b) 台阶入口段压力等值线图



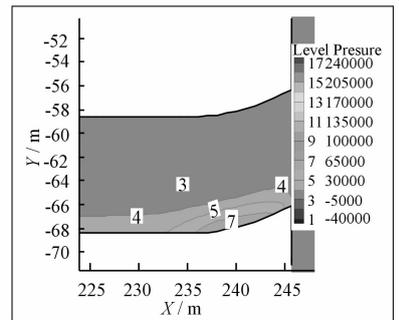
(c) 台阶段压力等值线图



(d) 台阶段压力等值线图



(e) 台阶出口段压力等值线图



(f) 挑坎段压力等值线图

图 2 优化方案:阶梯式溢洪道典型地段压力等值线(单位:Pa)

从图 2 中可以看出:溢洪道控制段驼峰堰上及光滑泄槽段均无负压(如图 2(a)),进入阶梯段后沿程均有负压,最大负压值出现在桩号 0 + 082.7 m 处(如图 2(b))的立面,负压值为 -40.77 kPa,对应的空化数为 0.47,小于初生空化数经验值 0.8 ~ 1.1。溢洪道最大正压值约为 147 kPa,发生在平坡泄流段 0 + 142.5 m 处(如图 2(e))。阶梯段压力分布均匀(如图 2(c)、(d)),各台阶上均有正负压强(如图 2(a)、(b)),除个别台阶外,正压强基本出现在台阶水平面上,负压强出现在台阶立面。这主要是由于流动边界急剧变化,主流与边界分离形成空腔,产生负压。台阶立面的最大负压值出现在台阶顶角下缘三分之一高度的范围内,台阶水平面的

最大正值出现在台阶水平面末端三分之一长度范围内。总体上看,压强沿程分布和溢洪道沿程体型特征变化是相应的。

3.3 优化方案溢洪道闸门全开时沿程流速分布

校核洪水位 947.8 m 闸门全开时溢洪道挑流反弧段最低点断面处流速为 19.11 m/s。阶梯段最大流速位于 0 + 129 断面处,速度值为 18 m/s。各个典型断面平均流速见表 3。

3.4 优化方案溢洪道闸门全开时的当地水流空化数估算

校核洪水位 947.8 m 时,溢洪道闸门全开时相应特征点的水流空化数由式(2)计算,见表 4、表 5 所示。

表 3 优化方案溢洪道沿程典型断面平均流速

m/s, m

导墙段	控制段	光滑泄流段			阶梯段		
桩号	0-020.0	0+000.0	0+020.3	0+040.3	0+060.3	0+080.3	0+100.3
底部高程	936.75	939.00	936.54	936.16	935.79	933.33	913.33
断面平均流速	5.40	8.10	10.70	11.30	11.80	13.60	17.20

	阶梯段		水平输水段			挑坎段	
桩号	0+120.3	0+140.3	0+160.3	0+180.3	0+200.3	0+215.	0+225.7
底部高程	891.33	869.33	868.33	868.33	868.33	868.33	870.67
断面平均流速	17.00	14.30	19.20	19.10	19.10	18.40	18.30

表 4 优化方案溢洪道各光滑泄槽段特征点的

压强水头、断面平均流速及空化数 m, m/s

桩号	压强水头	流速	空化数	桩号	压强水头	流速	空化数
0+005	6.4	8.32	4.4	0+160	3.0	19.18	0.6
0+010	6.0	8.86	3.8	0+170	2.9	19.16	0.6
0+035	4.8	11.18	2.2	0+180	2.9	19.13	0.6
0+055	4.8	11.63	2.0	0+210	3.5	18.76	0.7
0+72.4	4.3	12.64	1.6	0+225	3.2	18.27	0.7

$$\sigma = \frac{h_0 + h_a - h_v}{v_0^2 / 2g} \quad (2)$$

式中: h_0 是计算断面处的动水压力水头; h_a 计算断面处的大气压力水头; h_v 是水的汽化压力水头; v_0 是计算断面处的断面平均流速。 h_a 用式(3)估算:

$$h_a = 10.33 - \frac{\text{坝顶高程}}{900} \quad (3)$$

按坝顶高程 939.0 m 计算,得 $h_a = 9.28$ m; h_v 和水的温度有关,假定泄流时平均水温为 15℃,则 $h_v = 0.174$ m。

表中的空化数按式(2)定义。

表 5 优化方案溢洪道阶梯段特征点的压强水头、断面平均流速及空化数

m, m/s

桩号	阶梯号	压强	流速	空化数	桩号	阶梯号	压强	流速	空化数
0+071.3	1	-1.83	12.91	0.86	0+084.7	12	-1.63	14.01	0.75
0+072.7	2	0.35	12.66	1.16	0+085.7	15	-3.18	14.57	0.55
0+074.1	3	0.93	12.77	1.21	0+086.6	16	-3.19	15.37	0.49
0+075.5	4	0.26	12.85	1.11	0+087.5	17	-0.76	15.52	0.68
0+076.9	5	-0.85	13.34	0.91	0+088.4	18	-0.80	15.71	0.66
0+078.3	6	-3.04	14.11	0.60	0+089.3	19	1.11	15.75	0.81
0+079.7	7	-3.19	14.21	0.57	0+090.2	20	-1.51	15.56	0.61
0+080.7	8	-1.72	14.04	0.73	0+091.1	25	0.16	15.89	0.72
0+081.7	9	-2.16	14.14	0.68	0+092.0	30	-0.56	16.08	0.65
0+082.7	10	-4.16	14.62	0.45	0+096.5	35	0.94	17.35	0.65
0+083.7	11	-1.27	14.40	0.74	0+101.0	40	-0.69	17.81	0.52

表 4 中数据显示,校核水位闸门全开时,溢洪道非阶梯段各测点的计算空化数均较大,不会发生空化。对于阶梯泄槽段,取平坡跌坎的初生空化数 $\sigma_{kp} = 0.8 \sim 1.1$ [6],表 5 中数据显示,1~20 号台阶中 10 号台阶立面(桩号 0+82.7 m)上负压值最大,其对应的空化数最小为 0.45,若取初生空化数 $\sigma_{sp} = 0.6$, $\sigma_{kp} = 0.48 \sim 0.66$,则该处的空化数小于初生空化数,即 $\sigma < \sigma_{sp}$,即溢洪道的该台阶混凝土可能产生空蚀。其他台阶的空化数虽小于初生空化数,但均大于初生空化数,不会发生空蚀破坏。另外,实际水流下泄时,会发生自掺气,当水流形成完全掺气后,

掺气点后的台阶上的负压会减小或消失。因此对阶梯前段不掺气区应进行重点保护,可设置通气管进行强迫掺气,以避免发生空蚀破坏。

表 4 中数据显示,校核水位闸门全开时,溢洪道各测点的计算空化数介于 0.6~4.4 之间,初生空化数经验值为 1.1。小于初生空化数的流程主要分布在桩号 0+121.5 以后的水平输水段。由于本段流速不超过 20 m/s,尽管其空化数低于初生空化数 $\sigma_{kp} = 0.8 \sim 1.1$,但它仍过大,因此泄槽边墙及底板的混凝土应选用较高的标号,以降低产生严重空蚀破坏的风险。另外,建议在溢洪道上合适位置设

置掺气槽,以降低发生空蚀破坏的风险。

3.5 优化方案阶梯溢洪道消能率

在阶梯溢洪道坝面滑移水流条件下,坝面水流的能量消耗主要是通过水流裂散掺气以及主流和底部漩涡之间的紊动交换实现,坝面台阶的消能效果一般用消能率来衡量。阶梯消能的消能率定义为过坝水流从堰顶流至最末段台阶所消耗的能量与总能量之比,消能率的计算公式为:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (4)$$

式中: η 为消能率; E_1 为水流的初始能量; E_2 为最末段台阶上水流具有的能量。

按照实测流速求得的阶梯溢洪道消能率的结果见表6所示。

表6 优化方案阶梯溢洪道的消能率 m, m/s, %

库水位	总水头 H	水深 h	计算 流速 v	E_2	E_1	ΔE	η
947.8	73.45	4.9	18.17	16.84	73.45	56.6	77.0

校核洪水位 947.8 m 闸门全开时,由于沿程台阶消能的作用,溢洪道挑流反弧段最低点断面处流速为 19.11 m/s,水舌挑射距离约为 38 m,这个挑距有利于防止泄洪产生溯源破坏。

根据经验公式(5)^[7]计算挑距值见表7。

$$L_0 = \frac{u_1^2 \sin\theta \cos\theta}{g} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2g(a - h_t + \frac{h_1}{2} \cos\theta)}{u_1^2 \sin^2\theta}} \right) \quad (5)$$

式(5)中: a 为鼻坎高度,即下游河床到坎顶的高度; h_t 为冲坑后的下游水深,假定为 3 m; u_1 为挑坎末端断面平均流速; g 取 9.8 m/s², $\theta = 25^\circ$, $h_1 = 3.08$ m, $u_1 = 18.54$ m/s。

表7 鼻坎高度不同时对应的挑距计算值 m

鼻坎高度	5	10	12	15	18	20
挑距	33	39	41	44	47	49

对比表6、7的计算结果发现,在下游水深设定为 3 m 的情况下,数值模拟结果和经验公式计算结果在鼻坎高度低于 15 m 时,二者较为接近。随着坎

高的增加,经验计算值大于数值模拟结果。

4 某阶梯溢洪道优化方案结论

通过数值模拟计算表明在优化方案下,校核洪水情况闸门全开时,溢洪道泄流能力的数值模拟值略大于设计计算值,模拟泄流量为 1 243.2 m³/s,满足校核洪水的泄洪要求。当库水位为校核洪水位,闸门全开时,连接过渡段的最大掺气水深为 5.2 m,阶梯段的最大掺气水深为 6.46 m,水平输水段的最大掺气水深为 4.13 m,挑流段的最大掺气水深为 3.65 m。其中连接过渡段、阶梯段和挑流段的最大掺气水深值可为边墙高度设计提供参考。校核洪水位闸门全开时阶梯溢洪道的消能率为 77%,满足工程要求。校核洪水位 947.8 m 闸门全开时溢洪道沿程流速模拟结果表明,水体在溢洪道各段流动顺畅。阶梯平面与立面之间有稳定的横向漩涡,表明阶梯尺寸设计合理。当库水位为校核洪水位,闸门全开时,压强沿程分布和溢洪道沿程体型特征变化是相应的。溢洪道非阶梯段各测点的计算空化数均较大,不会发生空化。在校核洪水位 947.8 m,闸门全开时,挑距达 38 m,满足设计要求。根据上述各项情况,该阶梯溢洪道优化方案能较好的满足工程设计实际要求。

参考文献:

- [1] 戴会超,等. 水利水电工程水流精细模拟理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等. 挑流消能水气二相流数值模拟[J]. 水利学报,2003,34(9):77-82.
- [3] 李玲,陈永灿,李永红. 三维 VOF 模型及其在溢洪道水流计算中的应用[J]. 水力发电学报,2007,26(2):83-87.
- [4] 王福军. 计算流体力学分析 - CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 李建中,宁利中. 高速水力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [6] 张挺. 宽尾墩和阶梯溢流坝一体化数值模拟[D]. 博士学位论文,成都:四川大学,2005.
- [7] 邱秀云,等. 水力学[M]. 乌鲁木齐:新疆电子出版社,2008.