

文章编号: 2097-096X(2023)-02-0105-11

岸边泄洪洞最大泄量的估算方法

徐建荣¹, 孙双科², 彭育¹, 柳海涛², 薛阳¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 大型水电站泄洪洞单洞泄洪规模是关乎枢纽布置、泄洪安全、以及工程投资的重要技术指标, 以往未见量化研究报导。本文从计算泄洪洞挑流水舌挑距与下游河道冲刷深度出发, 建立了泄洪洞泄量与下游河道宽度、泄洪洞布置轴线与下游河道夹角、基岩抗冲能力以及泄洪洞运行方式等指标之间的量化关系, 对白鹤滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级泄洪洞分别进行了定量估算研究, 所得结果与工程实际以及相应的设计方案基本一致, 表明该估算方法具有较高的可靠性, 可用于估算待建工程泄洪洞最大泄量或对已建工程泄洪洞泄洪规模的合理性进行评价。

关键词: 岸边泄洪洞; 最大泄量; 估算研究; 下游冲刷; 运行方式

中图分类号: TV651

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220284

1 研究背景

高坝工程泄水建筑物分坝身泄洪与岸边泄洪两大类型, 其中坝身泄水建筑物包括溢流表孔、中孔、深孔与泄洪底孔, 其主要优点是流程短, 下泄水流能顺利归槽, 便于进行消能防冲设计, 缺点是流道泄洪安全及其下游消能防冲设计对于大坝安全有直接影响; 岸边泄水建筑物主要为岸边溢洪道、泄洪洞、放空洞, 其优点是可把水流导向距坝较远的地方, 下游消能防冲不会危及大坝安全, 缺点是流程长, 高速水流问题相对突出, 且工程投资高。

高坝工程泄洪方式的选择和设计, 主要取决于坝型、坝址地质地形条件、泄洪规模、下游河道的承受能力、枢纽布置格局与要求、以及施工和运行要求等因素^[1-2]。大型土石坝与堆石坝工程, 由于坝身不具备过流条件, 较多采用岸边溢洪道与泄洪洞相结合的泄水建筑物布置方式^[3], 如小浪底^[4-5]、瀑布沟^[6-7]、双江口^[8]、两河口^[9-10]等, 我国的大型高拱坝工程, 为了确保高拱坝的运行安全与水垫塘检修, 通常大都采用坝身泄洪与岸边泄洪洞并重的设计思路, 岸边泄洪洞单独泄洪可以满足宣泄常年洪水的任务。如二滩^[11-12]、小湾^[13-16]、溪洛渡^[17-18]、白鹤滩^[19-23]都是如此。

表 1 列出了国内外大型泄洪洞的主要技术指标^[3], 墨西哥奇克森与美国胡佛泄洪洞最大泄量分别为 5790 m³/s、5500 m³/s, 是目前世界上规模最大的泄洪洞。我国溪洛渡水电站最大坝高 278 m, 沿左右两岸布置了 4 条泄洪洞, 采用水下对撞消能方式, 单洞泄量高达 4127 m³/s, 位居国内首位。白鹤滩水电站则布置有 3 条泄洪洞, 单洞泄量也达到 4100 m³/s。

通常而言, 与坝身孔口泄洪相比, 采用泄洪洞的泄流单价要更高, 我国二滩水电站, 泄洪洞泄流 1 m³/s 的投资为 2.7 万元人民币, 经坝身表中孔泄流的投资则为 2.0 万元人民币, 前者要高 35%^[12]。因此, 尽管从方便运行调度角度看, 采用相对较小的单洞泄洪规模布置多条泄洪洞无疑更有利于提升泄洪运行调度的灵活性, 但采用更大泄洪规模的泄洪洞往往大幅节省工程投资并有利于优化枢纽布置

收稿日期: 2022-06-24; 网络首发时间: 2023-03-14

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20230313.0917.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401700)

作者简介: 徐建荣(1964-), 硕士, 正高级工程师, 主要从事水利水电设计与研究工作。E-mail: xu_jr@ecidi.com

通讯作者: 孙双科(1966-), 博士, 博士生导师, 正高级工程师, 主要从事水工水力学研究工作。E-mail: sunsk@iwhr.com

格局。我国小湾水电站在九五科技攻关研究中,通过提高坝身泄量与泄洪洞单洞泄量,将2条泄洪洞优化为1条泄洪洞,节省工程投资约2亿元^[14,16]。我国特大型高拱坝工程,如溪洛渡水电站与白鹤滩水电站都针对坝身泄洪最大泄量开展了大量研究,在枢纽布置中采用了最高水平的坝身泄洪规模与国内最大的泄洪洞单洞泄量,分别布置了4条与3条泄洪洞。为减轻泄洪洞泄洪对下游河道的消能防冲难度,溪洛渡泄洪洞采用了两岸对称布置、对撞消能的布置方案。白鹤滩泄洪洞则采用了3条泄洪洞均布置于左岸并对下游河道进行扩挖的布置方案。与上述工程不同的是,锦屏一级水电站^[2-3]则在设计过程中通过开展大量的下游河道冲刷试验研究,调低了泄洪洞泄量规模。

可见,泄洪洞泄洪规模论证直接关系到枢纽总体布置、工程造价与泄洪运行的灵活性与安全性,是枢纽布置十分重要的先决性控制因素,但目前对于泄洪洞的泄洪规模确定问题鲜见相关研究报导,更多的只是类比已建工程进行评估。

本研究拟从研究下游河道冲刷出发,尝试进行单洞泄洪规模评估的量化研究,以期对相关设计工作提供量化依据。

表1 国内外部分大型泄洪洞技术指标
Table 1 Technical indexes of some large spillway tunnels at home and abroad

序号	工程名	国家	坝型	坝高/m	布置方式	工作闸门尺寸 (孔数-宽×高)/m	单洞泄量 /(m ³ /s)	最大流速 /(m ³ /s)	建成年份
1	奇科森	墨西哥	土石坝	261	/	3-9.7×22	5790	/	1980
2	胡佛	美国	拱坝	221	龙抬头	8-30×5	5500	46	1936
3	溪洛渡	中国	拱坝	278	龙落尾	4-14×12	4127	47	2013
4	白鹤滩	中国	拱坝	289	龙落尾	3-15×9.5	4084	47	2022
5	格兰峡	美国	拱坝	216	龙抬头	1-12.2×16	3900	39	1966
6	小湾	中国	拱坝	292	龙抬头	1-13×13.5	3811	45	2012
7	二滩	中国	拱坝	240	龙抬头	1-13.5×15.0	3800	45	1999
8	东风	中国	拱坝	168	一坡到底	1-12×21	3560	32	1995
9	英菲尔尼罗	墨西哥	堆石坝	/	龙抬头	1-7.42×15.5	3450	39	1963
10	瀑布沟	中国	堆石坝	186	一坡到底	1-11×11.5	3412	40	2010
11	锦屏一级	中国	拱坝	305	龙落尾	1-12×14	3320	51.55	2013
12	糯扎渡	中国	堆石坝	261.5	一坡到底	2-5×8.5	3313	39	2014
13	构皮滩	中国	拱坝	232.5	一坡到底	1-11×12	3030		2011
14	黄尾	美国	拱坝	160	龙抬头	2-7.6×19.6	2600		1968
15	刘家峡	中国	重力坝	147	龙抬头	1-8×9.5	2205		1974
16	乌江渡	中国	拱形重力坝	165	一坡到底	1-9×10	2160	43.1	1983
17	洪家渡	中国	拱形重力坝	179.5	有压接无压	1-6.2×8	1643	37.5	2004
18	去学	中国	堆石坝	164.2	一坡到底	1-5.4×4.8	787	33	2017

2 定量分析方法的建立

从水力学角度看,确保泄洪洞挑流水舌归槽并减轻下游河道冲刷是水工水力学研究中的永恒课题之一。“小洪水干砸本岸、大洪水顶冲对岸”是很多泄洪洞经常遇到的技术难题,其中的原因涉及两个方面:一是挑流鼻坎布置体型不够合理;二是下泄洪水能量超出了下游河道所能承受的最大消能荷载。前者通常通过体型优化试验研究予以解决,而体型优化需要以合理的泄洪规模为前提,若单洞泄

洪规模过大，则无法通过优化试验研究得到满意答案。

大量已有研究表明，下游河道冲刷问题通常相对容易解决，可以采用各种优化措施降低入水单宽流量，但与此同时也会导致挑流水舌入水形态的过于分散，从而使“小洪水干砸本岸、大洪水顶冲对岸”问题更加突出。

基于上述原因，本研究拟以最简单的等宽挑流鼻坎为研究对象，对下游河道最大冲刷深度进行研究，通过研究冲坑范围与下游河道水面宽度之间的关系，对单洞泄洪规模进行量化研究。

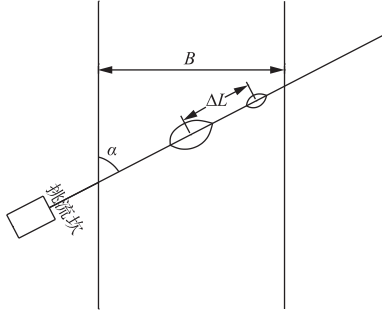


图1 与下游河道斜交的岸边泄洪洞

Fig.1 Bank spillway with an oblique angle to the downstream channel

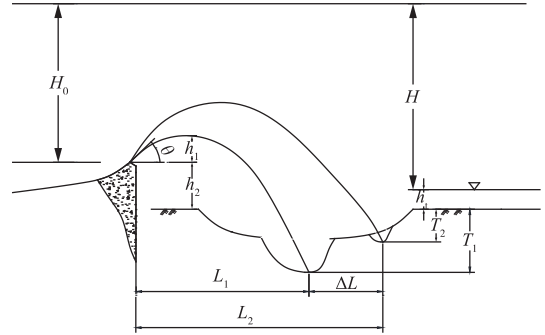


图2 挑流水舌水力计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of hydraulic calculation of jet flow

如图1所示，设定泄洪洞所在位置下游河道宽度为 B ，泄洪洞布置轴线与下游河道夹角为 α ，泄洪洞典型运行水位为上游起调水位与校核洪水水位，分别计算起调水位与校核洪水运行工况下的挑距与下游河道最大冲坑深度，其与下游河道枯水期水面宽度之间应存在如下量化关系：

模式1：起调水位运行工况下游河道冲刷占据主导地位

$$F_1(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_1}{J_2} \leq \frac{B}{\sin\alpha} \quad (1)$$

模式2：起调水位与校核洪水运行工况的组合起主导地位

$$F_2(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L \leq \frac{B}{\sin\alpha} \quad (2)$$

模式3：校核洪水运行工况下游河道冲刷占据主导地位

$$F_3(Q) = \frac{T_2}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} \leq \frac{B}{\sin\alpha} \quad (3)$$

合并上述各式，则有

$$F(Q) = \max\left\{\frac{T_1}{J_1} + \frac{T_1}{J_2}, \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L, \frac{T_2}{J_1} + \frac{T_2}{J_2}\right\} \leq \frac{B}{\sin\alpha} \quad (4)$$

式中： $F(Q)$ 为沿泄洪洞轴线方向冲刷坑上下游连线长度； T_1 、 T_2 为起调水位与校核洪水运行工况下游河道冲刷坑最大深度； J_1 、 J_2 分别为上述两个冲刷坑的上游边坡与下游边坡坡度，边坡坡度愈大对挑流鼻坎的安全愈不利。许可的冲刷坑上下游坡度，应根据地质条件进行估计，可采用1:3~1:6。采用陈椿庭^[24]建议，在初步比选时可以取 $J_1 = J_2 = 1/3$ 。 $\Delta L = L_2 - L_1$ ，为两个运行工况下按冲刷坑中心位置计算的挑距之差； B 为下游河道枯水期水面宽度； α 为泄洪洞轴线与下游河道夹角。

上式中，水舌挑距 L 与冲刷坑最大深度可以按文献[25]计算。

如图2所示，坎顶至水舌外缘与冲坑最深点的水平挑距 L 的计算式为：

$$L = \frac{1.21V^2 \sin\theta \cos\theta + 1.1v \cos\theta \sqrt{1.21v^2 \sin^2\theta + 2g(h_1 + h_2 + T)}}{g} \quad (5)$$

式中： V 为挑坎出口断面平均流速，m/s，可通过沿程水面线计算获得； θ 为水舌出射角(可近似取挑坎挑角)，($^\circ$)； h_1 为挑坎坎顶铅直方向水深， $h_1 = h/\cos\theta$ (h 为坎顶法向平均水深)，m； h_2 为挑坎坎顶与下游水位的高差，m； g 为重力加速度， m/s^2 ； H_0 为上游水位至挑坎坎顶的高差(含行近流速水

头), m。

对于等宽挑坎, 岩基河床冲坑深度 T 的计算, 我国目前较普遍采用的计算公式为:

$$T = Kq^{0.5}Z^{0.25} - h_t \quad (6)$$

式中: t 为下游水面至坑底的最大水垫深度, m; q 为坎顶单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$; Z 为上下游水位差, m; T 为冲坑深度, 河床面与坑底的高差, m; h_t 为下游水深, m; K 为冲刷系数, 主要与河床的地质条件有关, 其数值见表 2。当抗冲流速 V 已知时, 可通过 $K = 2.71 \times V^{-0.3}$ 计算^[26]。

表 2 基岩冲刷系数 K 值
Table 2 K value of bedrock scour coefficient

可冲性类别		难冲	可冲	较易冲	易冲
节理裂隙	间距/cm	>150	50~150	20~50	<20
	发育程度	不发育, 节理(裂隙)1~2组, 规则	较发育, 节理(裂隙)2~3组, 呈X形, 较规则	发育, 节理(裂隙)3组以上, 不规则呈X或米字形, 不规则	很发育, 节理(裂隙)3组以上, 杂乱, 岩体被切割呈碎石状
岩基构造特征	完整程度	大块状	大块状	块石、碎石状	碎石状
	结构类型	整体结构	砌体状结构	镶嵌结构	碎裂结构
	裂隙性质	多为原生型或构造型, 多密闭, 延展不长	以构造型为主, 多密闭, 部分微张, 少有充填, 胶结好	以构造或风化型为主, 大部分微张, 部分张开, 部分为粘土充填, 胶结较差	以风化型或构造型为主, 裂隙微张或张开, 部分为粘性土充填, 胶结很差
K	范围	0.6~0.9	0.9~1.2	1.2~1.6	1.6~2.0
	平均	0.8	1.1	1.4	1.8

注: 适用范围为水舌入水角 $30^\circ \sim 70^\circ$ 。

根据式(1)一式(6), 可以对泄洪洞初步设计方案的合理性进行评估, 也可以通过计算不同流量条件下的 $F(Q)$, 并建立 $F(Q) \sim Q$ 关系曲线, 然后根据实际的下流河道宽度, 定量估算适合于该河道宽度的泄洪洞最大流量。

3 白鹤滩 3#泄洪洞最大泄洪规模估算研究

以白鹤滩水电站可研阶段推荐的 IXB11 布置方案 3#泄洪洞为例进行泄洪洞最大泄量估算研究。IXB11 方案 3#泄洪洞出口对应的下游河道比较狭窄, 枯水期宽度为 70 m, 泄洪洞布置轴线与下游河道夹角为 30° , 因此有 $B = 70$ m, $\alpha = 30^\circ$ 。按照起调水位 785 m 与校核水位 832.23 m 分别计算水舌挑距与下游河道冲刷坑深度, 如表 3 所示。计算中, 下游河道基岩抗冲流速为 $8 \sim 10$ m/s, 按 9 m/s 取值, 计算可得冲刷系数 $K = 1.4$ 。

表 3 白鹤滩水电站 IXB11 方案挑流水舌挑距与下游冲刷计算结果

Table 3 Calculation results of trajectory length and downstream scour of IXB11 scheme of Baihetan Hydropower Station

特征洪水	上游水位/m	下游水位/m	泄量/(m^3/s)	机组流量/(m^3/s)	总泄量/(m^3/s)	挑距/m	最大冲深/m
起调	785	597.18	1673(1孔)	3286.8	5516	273.2	31.68
校核洪水	832.23	632.46	12376(3孔)	0	42335	317.0	22.73

$$\text{因此有, } F(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L = 31.683 + 22.733 + 317.0 - 273.2 = 207.0 \text{ (m)}$$

$$\text{而 } \frac{B}{\sin \theta} = 70 \times 2 = 140 \text{ (m)}$$

可见 $F(Q) > \frac{B}{\sin\theta}$ ，且 $F_1(Q) < F_2(Q)$ ，这表明 IXB11 布置方案中，对应的下游河道消能承载力主要由模式 2，即起调水位与校核洪水工况综合决定，而设计方案的泄洪规模对于所在河段而言偏大。

进一步的试算研究表明，对于 IXB11 方案对应的下游河道宽度，能够满足消能荷载的起调水位与校核洪水最大泄洪规模分别为 $1163 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2726 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

试算步骤如下：步骤 1. 将起调水位运行工况的下泄流量按 5% 的比例第次缩减；步骤 2. 校核水位工况的下泄流量可根据工作闸门处顶端处工作水头的 0.5 次方比例关系计算得到：

$$\frac{Q_{\text{校核}}}{Q_{785}} = \sqrt{\frac{H_{\text{校核}} - 765 - 9.5}{785 - 765 - 9.5}} = \sqrt{\frac{832.23 - 765 - 9.5}{785 - 765 - 9.5}} = 2.344$$

步骤 3. 起调水位工况的下游河道水位按下流水位流量关系得出，校核洪水工况由于枢纽总下泄流量不变，仍取原值；步骤 4. 分别计算 $F_1(Q)$ 、 $F_2(Q)$ 、 $F_3(Q)$ ，取其最大值与下游河道斜长 140 m 相比较，当接近 140 m 时即得到试算结果，即泄洪洞最大泄量约为 $2726 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 3 给出了挑流鼻坎不同挑角情况下的计算结果，结果表明，挑流鼻坎挑角在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 变化范围内，其量值大小对计算结果的影响甚微，基本可以忽略不计。

上述计算结果表明，IXB11 方案中的泄洪洞布置方案由于出口位置处下游河道狭窄，难以承受消能荷载作用，因此泄洪规模设计值偏大。

为此，设计单位在技施阶段对泄洪洞布置方案进行了调整，在泄洪洞泄洪规模保持不变的前提下，通过调整泄洪洞布置轴线，将泄洪洞出口下移至河道相对开阔的断面位置，并对出口消能区进行了适当的河道拓挖处理，从而形成了白鹤滩泄洪洞最终布置方案，该方案中泄洪洞与下游河道夹角为 40° ，泄洪洞出口所在位置处下游河道库水位最小宽度为 170 m。沿泄洪洞出口轴线方向河道斜长为 $170/\sin 40^\circ = 264(\text{m})$ ，这个量值与 IXB11 方案的 140 m 相比，有大幅增加。表明下游河道完全能够承受如此量级泄洪洞泄洪规模的消能负荷作用。

经试算可以得到，新的泄洪洞布置方案在起调水位与校核洪水工况下，对应于 30° 的出口鼻坎挑角，最大下泄流量可以提高约 21.4%，即分别达到 $2032 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4965 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 4 给出了泄洪洞最终布置方案挑流鼻坎挑角与最大泄量之间的关系，从图 4 可以发现，随出口鼻坎挑角的增大，允许的泄洪洞最大下泄流量有一定程度的减小。这表明，采用相对较小的出口鼻坎挑角，有利于获取更大的泄洪洞最大流量允许值。

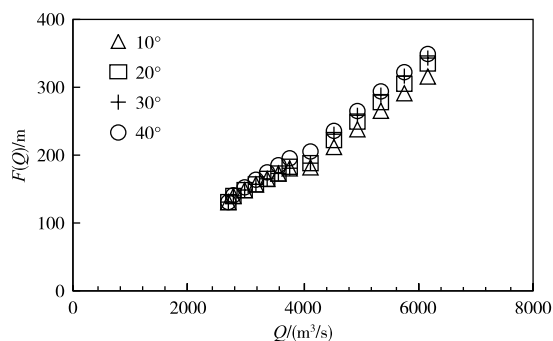


图 3 $F(Q) \sim Q$ 关系曲线

Fig.3 Relation curve of $F(Q) \sim Q$

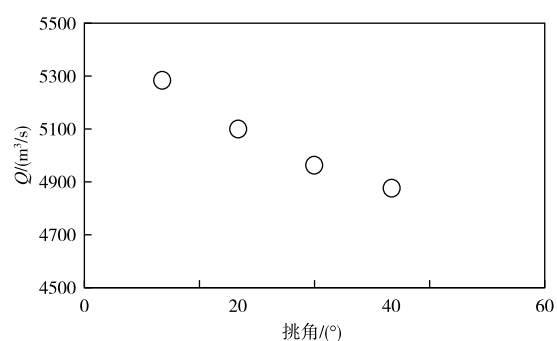


图 4 出口挑角与最大流量上限值的关系

Fig.4 Relationship between bucket angle and maximum flow discharge

4 估算方法在大型泄洪洞工程中的应用

4.1 溪洛渡泄洪洞 溪洛渡水电站 3#泄洪洞出口对应的下游河道比较狭窄，枯水期宽度为 80 m，泄洪洞布置轴线与下游河道夹角为 26° ，因此有 $B = 80 \text{ m}$ ， $\alpha = 26^\circ$ 。在宣泄 2 年一遇运行工况下，需要开启 8 个深孔与 2 条泄洪洞泄洪，对应的电站发电流量为 $3814 \text{ m}^3/\text{s}$ ，该运行工况下泄洪洞泄量较大，而

下游水深相对较浅, 可视为下游冲刷的最不利运行工况, 因此将该工况对应的上游水位 572.8 m 视作起调水位进行计算, 校核水位工况下上游水位 608.9 m, 下游水位 145.54 m, 分别计算水舌挑距与下游河道冲刷坑深度, 如表 4 所示。计算中, 下游河道基岩抗冲流速为 11 m/s, 计算可得冲刷系数 $K=1.32$ 。

表 4 溪洛渡 3#泄洪洞挑流水舌挑距与下游冲刷计算结果

Table 4 Calculation results of trajectory length and downstream scour of 3# tunnel spillway in Xiluodu Hydropower Station

特征洪水	上游水位/m	下游水位/m	泄量/(m ³ /s)	机组流量/(m ³ /s)	总泄量/(m ³ /s)	挑距/m	最大冲深/m
起调	572.8	388.58	2582	3814	13762	298.9	34.18
校核	608.9	415.54	4162	0	42335	336.0	22.70

$$\text{因此有, } F(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L = 34.183 + 22.73 + 336 - 298.9 = 210.7(\text{m})$$

$$\text{而 } \frac{B}{\sin\theta} = 80/\sin 26 = 182(\text{m})$$

可见 $F(Q) > \frac{B}{\sin\theta}$, 且 $F_1(Q) < F_2(Q)$, 这表明 3#泄洪洞下游河道消能承载力主要由模式 2, 即起调水位与校核洪水工况综合决定, 而设计方案的泄洪规模对于所在河段而言偏大。水工模型试验也表明, 因泄洪规模较大, 泄洪洞单独泄洪时下游河道冲刷严重, 为此设计方面最终采用了 4 条泄洪洞并列两岸对称布置方案, 通过水舌对撞促进消能, 以减轻下游河道冲刷。

4.2 锦屏一级泄洪洞 锦屏一级水电站泄洪洞出口对应的下游河道, 枯水期宽度为 60 m, 泄洪洞布置轴线与下游河道夹角为 23°, 因此有 $B = 60 \text{ m}$, $\alpha = 23^\circ$ 。该泄洪洞起调水位为 1865 m, 校核水位 1882.6 m, 对应的下泄流量分别为 2520 m³/s、3780 m³/s, 是下游河道冲刷的两个控制性运行工况, 其水舌挑距与下游河道冲刷坑深度, 如表 5 所示。计算中, 下游河道基岩抗冲流速取 10~12 m/s, 按 11 m/s 取值, 计算可得冲刷系数 $K=1.32$ 。

表 5 锦屏一级水电站泄洪洞挑流水舌挑距与下游冲刷计算结果

Table 5 Calculation results of trajectory length and downstream scour of tunnel spillway in Jingping I Hydropower Station

特征洪水	上游水位/m	下游水位/m	泄量/(m ³ /s)	机组流量/(m ³ /s)	总泄量/(m ³ /s)	挑距/m	最大冲深/m
起调	1865	1646.48	2520	1012	3532	397.9	55.29
校核	1882.6	1658.16	3780	0	13897	420.6	40.64

$$\text{因此有, } F_1(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_1}{J_1^*} = 55.29 \times 6 = 331.7(\text{m})$$

$$F_2(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L = 55.293 + 40.643 + 420.6 - 397.9 = 310.5(\text{m})$$

$$\text{而 } \frac{B}{\sin\theta} = 60/\sin 23 = 154(\text{m})$$

可见 $F(Q) > \frac{B}{\sin\theta}$, 且 $F_1(Q) > F_2(Q)$, 这表明泄洪洞下游河道消能承载力主要由模式 1, 即起调水位工况决定, 泄洪洞泄洪规模对于所在河段而言偏大, 不能满足消能荷载要求。

4.3 小湾泄洪洞 小湾水电站泄洪洞出口对应的下游河道, 枯水期宽度为 150 m, 泄洪洞布置轴线与下游河道夹角为 30°, 因此有 $B = 150 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$ 。该泄洪洞起调水位为 1236.5 m, 校核水位 1242.51 m, 对应的下泄流量分别为 3460 m³/s、3799 m³/s, 是下游河道冲刷的两个控制性运行工况, 其水舌挑距与下游河道冲刷坑深度, 如表 6 所示。计算中, 下游河道基岩抗冲流速为 5~10 m/s, 取上限值 10 m/s

进行计算，冲刷系数 $K=1.36$ 。

表 6 小湾水电站泄洪洞挑流水舌挑距与下游冲刷计算结果

Table 6 Calculation results of trajectory length and downstream scour of tunnel spillway in Xiaowan Hydropower Station

特征洪水	上游水位/m	下游水位/m	泄量/(m ³ /s)	机组流量/(m ³ /s)	总泄量/(m ³ /s)	挑距/m	最大冲深/m
起调	1236.5	998.92	3460	0	3460	198.3	45.09
校核	1242.51	1016.70	3799	0	20709	205.2	28.27

$$\text{因此有, } F_1(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_1}{J_1^*} = 45.09 \times 6 = 270.5 \text{ (m)}$$

$$F_2(Q) = \frac{T_1}{J_1} + \frac{T_2}{J_2} + \Delta L = 45.093 + 28.273 + 205.2 - 198.3 = 227 \text{ (m)}$$

$$\text{而 } \frac{B}{\sin\theta} = 150/\sin 30 = 300 \text{ (m)}$$

可见 $F(Q) < \frac{B}{\sin\theta}$ ，且 $F_1(Q) > F_2(Q)$ ，这表明泄洪洞下游河道消能承载力主要由模式 1，即起调水位工况决定，泄洪洞泄洪规模对于所在河段而言能够满足消能荷载要求，是适当的。

5 分析与讨论

前文从计算泄洪洞挑流水舌挑距与下游河道冲刷深度出发，建立了泄洪洞泄量与下游河道宽度、泄洪洞布置轴线与下游河道夹角、基岩抗冲能力、以及泄洪洞运行方式等指标之间的量化关系，据此可以对泄洪洞最大泄量的取值进行定量估算或合理性评估。根据上述估算方法对白鹤滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级泄洪洞分别进行了定量估算研究，所得结果与工程实际以及设计方案基本一致，表明该估算方案具有较高的计算精度与可靠性。

上述工程实例中，小湾泄洪洞、锦屏一级泄洪洞、溪洛渡泄洪洞均已经历了高水位泄洪运行考验，白鹤滩泄洪洞 2021 年也进行了水力学原型观测泄洪运用。小湾泄洪洞与白鹤滩泄洪洞最大泄量估算研究表明，泄洪洞规模是合理的，而溪洛渡泄洪洞与锦屏一级泄洪洞单洞泄洪规模均偏大，不能满足下游河道消能荷载的限制，为此，溪洛渡水电站采用了左右各 2 条泄洪洞分开布置且水下对撞消能的布置方式，实践证明是合理且有效的。锦屏一级泄洪洞 2014 年在接近正常蓄水位的高水位运行条件下进行了水力学原型观测，2015 年实测结果发现下游河道冲刷在可控范围之内，未对下游河道岸坡防护构成明显不利影响。但泄洪洞泄洪会加剧下游河道推移质运动并对锦屏二级水电站电站进水口构成威胁，为此电厂管理部门制定了在中小洪水情况下优化开启坝身泄洪避免泄洪洞运行的泄洪运行原则。这一原则实际上相当于提高了泄洪洞运行的起调水位，这与本文针对锦屏泄洪洞最大泄量的估算研究结果具有良好的一致性。

必须指出的是，本文建立的定量计算方法仅可作为泄洪规模较为粗略的初步估算之用，其可靠性与计算精度存在如下局限性：其一，计算的前提是需要将挑流鼻坎概化为等宽挑坎，尽管这样处理会与实际情况有一定出入，但其最大的好处是可以将挑距与冲坑相对精确的计算出来，克服了不确定性，降低了问题分析的难度，而且按等宽挑坎计算也更能体现下游河道承受挑流水舌能量荷载的极限情况，进而使我们得以从能量耗散角度切入问题的量化研究；其二是下游冲刷公式的选用，挑流水舌对下游河道冲刷深度的计算一直是水工水力学关注的经典问题，长期以来，国内外众多学者开展了大量的研究工作，提出了许多经验性或半经验性的估算公式，刘沛清^[26]通过对各家公式进行分析发现，各公式的结构基本相同，差异在于基岩系数的取值有所不同，鉴于陈椿庭公式目前为我国工程界普遍采用，故本文仍沿用该公式进行估算。

本文所建立估算方法的计算精度主要取决于基岩抗冲系数 K 以及冲刷坑的上下游坡比，其中抗冲系数 K 的取值涉及基岩的岩性与节理分布，各工程之间差异很大，即便是同一工程不同下游河道断面之间也会有较大不同，在取值上难免存在一定的主观性，目前大部分工程都是根据实践经验积累确定 K 值。而冲沙坑的上下游坡比也同样是难以准确确定的参数，从水力学角度看，冲刷坑的坡比不仅取决于基岩抗冲流速，也与挑流水舌的入水角度与流速量值密切相关，问题十分复杂，目前尚未见有相关研究成果可以进行准确计算。文献^[29]收集了部分已建工程下游冲刷坑原型观测结果以及相应的泄流流量等水力学参数，并根据冲刷深度计算公式计算得出了对应的基岩抗冲系数 K ，见表 7。根据基岩抗冲流速与抗冲系数之间的定量关系^[27,28] $K=2.71 \times V^{-0.3}$ ，可由 K 值计算出相应的抗冲流速 V ，通过绘制抗冲流速与上下游冲刷坑坡比发现二者之间存在较明显的相关关系，见图 5 所示。

表 7 部分工程冲刷坑实测参数
Table 7 Measured parameters of scour pit in some project

工程	冲坑上游边坡 $1/J_1$	冲坑下游边坡 $1/J_2$	K	抗冲流速 V (m/s)
湖南水府庙 11 孔泄洪	3	2.5	1.5	4.39
湖南水府庙 5 孔泄洪	3	4	1.32	6.04
湖南双牌	4.5	3.5	1.8	2.78
桓仁	3	5	1.1	9.53
三门峡隧洞与深孔泄洪	1.5	5	1.2	7.66
三门峡隧洞泄洪	2	6	1.03	11.23
丹江口	2.5	4.7	1.38	5.40

根据图 5 中点据的拟合结果可以得到上下游坡比的如下估算公式：

$$1/J_1 = -0.2139V + 4.223 \quad (5)$$

$$1/J_2 = 0.3315V + 2.1586 \quad (6)$$

式中： J_1 与 J_2 分别为冲刷坑上、下游坡比值之倒数； V 为基岩抗冲流速，m/s。

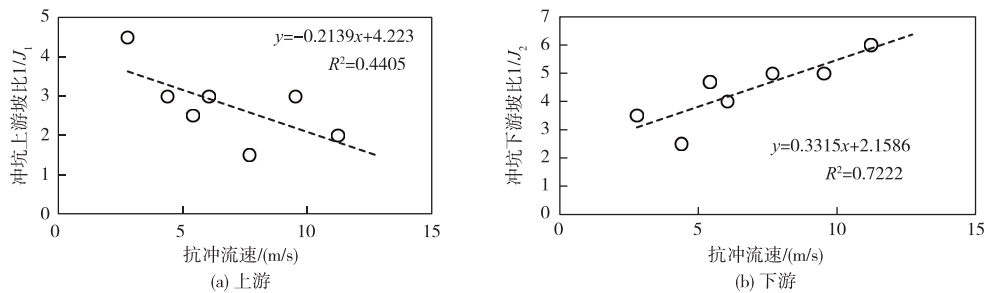


图 5 部分已建工程冲刷坑上下游坡比与基岩抗冲流速的关系

Fig.5 Relationship between slope ratio upstream and downstream of scour pit and bedrock anti-scour velocity in some built projects

根据式(5)、式(6)可计算得到基岩抗冲流速 9 m/s、10 m/s、11 m/s 情况下，上下游坡比分别为 2.3、5.1/2.1、5.4/1.9、5.8，表明冲刷坑的上游坡比要陡于 1/3，而下游坡比则缓于 1/3，而二者之和 $1/J_1 + 1/J_2 = 0.1176V + 6.382$ ，仅略高于 $1/J_1 + 1/J_2 = 3 + 3 = 6$ 。可见，对于本文研究的白鹤滩、溪洛渡、小湾、锦屏二级泄洪洞而言，直接采用 $1/J_1 = 1/J_2 = 3$ 估算泄洪洞最大流量上限值时，所得结果与采用式(5)、式(6)所得结果不会产生显著差异。这也在一定程度上表明了估算研究时采用 1:3 的坡比具有一定的合理性。鉴于式(5)与式(6)的确定系数有待进一步提高，且不能反映挑流水舌入水速度与入水角度等因素的影响，故本文在进行估算研究时未采用上述两式，如何更准确估算冲刷坑上下游坡比依然是一个需要进一步深入研究的课题。

另一方面，本研究的结果表明，泄洪洞最大泄流流量与泄洪洞运行方式有显著关系，提高泄洪洞起调水位，无疑有利于泄洪洞最大泄洪规模的进一步提高，而过分强调低水位条件下泄洪洞参与泄

洪, 则会影响泄洪洞最大泄洪规模的取值上限。因此在设计之初, 就应该重视泄洪洞运行方式的研究, 以确定泄洪洞运行合理可行的起调水位量值, 如此也有利于提升枢纽泄水建筑物总体布置方案的合理性与经济性。

6 结论

(1) 本文从计算泄洪洞挑流水舌挑距与下游河道冲刷深度出发, 建立了可定量估算泄洪洞最大泄量的估算方法, 该方法能综合考虑下游河道宽度、泄洪洞布置轴线与下游河道夹角、基岩抗冲能力、以及泄洪洞运行方式等指标的影响。

(2) 利用文中建立的估算方法, 对白鹤滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级泄洪洞分别进行了定量估算研究, 所得结果与工程实际与设计方案基本一致, 表明该方法具有较高的可靠性。

(3) 研究还表明, 按照等宽挑坎进行计算时, 下游冲刷坑深度起主要作用, 而挑距的影响相对较弱, 因此采用不同挑角进行估计所得结果相差不大; 另外, 在同等条件下, 采用较小的挑流鼻坎挑角, 可以获得相对较大的泄洪洞最大流量上限值。

参 考 文 献:

- [1] 潘家铮, 何璟. 中国大坝五十年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (PAN Jiazheng, HE Jing. Fifty Years of DAMS in China[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 彭程. 21 世纪中国水电工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (PENG Cheng. Hydropower Projects in China in the 21st Century[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 孙双科. 我国高坝泄洪消能研究的最新进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 249-255. (SUN Shuangke. Recent progress in the research of flood discharge dissipation of high DAMS in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(2): 249-255. (in Chinese))
- [4] 罗义生. 小浪底水利枢纽泄水建筑物总布置[J]. 人民黄河, 1995(6): 7-12. (LUO Yisheng. Layout of flow discharge structure of Xiaolangdi Project[J]. Yellow River, 1995(6): 7-12. (in Chinese))
- [5] 李玉柱. 小浪底工程多条隧洞泄洪布置的特点与消能问题[J]. 水利水电技术, 1999(3): 10-14. (LI Yuzhu. Layout characteristics and energy dissipation of multiple flood releasing tunnels of Xiaolangdi Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999(3): 10-14. (in Chinese))
- [6] 张建华, 严军, 吴基昌, 等. 瀑布沟水电站枢纽工程关键技术综述[J]. 四川水力发电, 2006(3): 8-11, 147. (ZHANG Jianhua, YAN Jun, WU Jichang, et al. Summary of key technologies of Pugugou Hydropower Station Project[J]. Sichuan Water Power, 2006(3): 8-11, 147. (in Chinese))
- [7] 严军. 瀑布沟水电站工程优化综述[J]. 四川水力发电, 2006(3): 22-24, 31, 147. (YAN Jun. Summary of optimization design of Pugugou Hydropower Station Project[J]. Sichuan Water Power, 2006(3): 22-24, 31, 147. (in Chinese))
- [8] 严沁之, 邹婷, 段斌, 等. 双江口水电站 300 m 级高坝泄洪消能关键技术研究[J]. 四川水力发电, 2019, 38(S2): 76-80, 100. (YAN Qinzi, ZOU Ting, DUAN Bin, et al. Summary of key technologies of Shuangjiangkou Hydropower Station Project[J]. Sichuan Water Power, 2019, 38(S2): 76-80, 100. (in Chinese))
- [9] 朱先文, 谢金元, 王川, 等. 两河口水电站超高流速洞式溢洪道出口挑坎型式研究[J]. 水电站设计, 2018, 34(4): 7-9, 13. (ZHU Xianwen, XIE Jinyuan, WANG Chuan, et al. Study on the layout of outlet bucket of ultra-high velocity cave spillway in Lianghekou Hydropower Station Project[J]. Design of Hydropower Station, 2018, 34(4): 7-9, 13. (in Chinese))
- [10] 柳海涛, 孙双科, 郑铁刚, 等. 两河口水电站泄洪雾化影响分析[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 54-57. (LIU Haitai, SUN Shuangke, ZHENG Tiegang, et al. Analysis of flood discharge atomization in Lianghekou Hydropower Station[J]. Water Power, 2016, 42(11): 54-57. (in Chinese))
- [11] 程志华. 二滩水电站枢纽总体布置[J]. 水力发电, 1998(7): 3-5. (CHENG Zhihua. Layout of Ertan Hydropower Station[J]. Water Power, 1998(7): 3-5. (in Chinese))

- [12] 周鸿汉. 二滩水电站泄洪隧洞布置设计[J]. 水电站设计, 1992(2): 24-30. (ZHOU Honghan. Design of tunnel spillway of Ertan Hydropower Station Project[J]. Design of Hydropower Station, 1992(2): 24-30. (in Chinese))
- [13] 马洪琪. 小湾水电站枢纽工程关键技术综述[J]. 水力发电, 2004(10): 13-16, 35. (MA Hongqi. Summary of key technologies of Xiaowan Hydropower Station[J]. Water Power, 2004(10): 13-16, 35. (in Chinese))
- [14] 杨宜文, 孙双科, 唐建华, 等. 小湾高拱坝泄洪消能研究与设计[C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 中国水利学会中国水力发电工程学会中国大坝委员会, 2006. (YANG Yiwen, SUN Shuangke, TANG Jianhua, et al. Research and design of flow discharge structure in Xiaowan high arch dam[C]//Proceedings of the 2006 International Symposium on Hydropower, 2006. (in Chinese))
- [15] 张绍春, 孙双科, 罗永钦, 等. 小湾水电站泄洪隧洞掺气减蚀研究及实际效果分析[J]. 云南水力发电, 2018, 34(5): 70-72. (ZHANG Shaochun, SUN Shuangke, LUO Yongqin, et al. Study on flow aeration and erosion reduction of tunnel spillway and analysis of actual effect in Xiaowan Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 2018, 34(5): 70-72. (in Chinese))
- [16] 高云峰, 唐建华. 小湾工程增大坝身泄量减少一条泄洪洞方案的试验研究[J]. 云南水力发电, 2000(1): 45-49. (GAO Yunfeng, TANG Jianhua. Experimental study on the scheme of increasing dam discharge and reducing a spillway tunnel in Xiaowan Project[J]. Yunnan Water Power, 2000(1): 45-49. (in Chinese))
- [17] 王仁坤. 溪洛渡工程规划设计历程及关键技术研究与实践[J]. 中国三峡, 2013(7): 64-72. (WANG Renkun. Study and practice on the planning and design process and key technologies of Xiluodu Project[J]. China Three Gorges, 2013(7): 64-72. (in Chinese))
- [18] 沈文莉, 李旭东. 溪洛渡水电站泄洪隧洞的布置及体型设计[J]. 水电站设计, 2006(4): 1-5. (SHEN Wenli, LI Xudong. Layout and design of tunnel spillway of Xiluodu Hydropower Station Project[J]. Design of Hydropower Station, 2006(4): 1-5. (in Chinese))
- [19] 孙双科, 彭育, 徐建荣. 高拱坝坝身泄洪规模探析——以白鹤滩水电站为例[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1169-1177. (SUN Shuangke, PENG Yu, XU Jianrong, et al. Analysis of maximum dam body flood discharge in large high arch dam: Case study of Baihetan Hydropower Station Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1169-1177. (in Chinese))
- [20] 孙双科, 徐建荣, 柳海涛, 等. 高拱坝溢流表孔分流齿坎的布置体型与作用效果[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1240-1247, 1262. (SUN Shuangke, XU Jianrong, LIU Haitao, et al. Layout and effect of dentated bucket on overflow outlet in high arch dam: Case study of Baihetan Hydropower Station Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1240-1247, 1262. (in Chinese))
- [21] 徐建荣, 彭育, 薛阳, 等. 白鹤滩水电站泄洪洞水力特性研究[J]. 中国水利, 2019(18): 110-112. (XU Jianrong, PENG Yu, XUE Yang, et al. Hydraulic characteristics of tunnel spillway in Baihaitan Hydropower station Project[J]. China Water Resources, 2019(18): 110-112. (in Chinese))
- [22] 徐建荣, 柳海涛, 彭育, 等. 基于泄洪雾化影响的白鹤滩水电站坝身泄洪调度方式研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 449-456, 468. (XU Jianrong, LIU Haitao, PENG Yu, et al. Analysis of dam orifice operation mode of Baihetan hydropower station based on the influence of flood discharge atomization[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(5): 449-456, 468. (in Chinese))
- [23] 辜晋德, 徐建荣, 颜志庆, 等. 基于河道冲刷特性的枢纽流量调度研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(5): 121-128. (GU Jinde, XU Jianrong, YAN Zhiqing, et al. Study on the flow rate scheduling based on the river channel scouring characteristics[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(5): 121-128. (in Chinese))
- [24] 陈椿庭. 关于高坝挑流消能和局部冲刷深度的一个估算方法[J]. 水利学报, 1963(2): 13-24. (CHEN Chunting. A method for estimating energy dissipation and local scour depth in high dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(2): 13-24. (in Chinese))
- [25] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 混凝土重力坝设计规范: DL5108-1999[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000. (State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Design Specification for Concrete Gravity Dams[S]. Beijing: China Power Press, 2000. (in Chinese))

- [26] 刘沛清. 现代坝工消能防冲原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (LIU Peiqing. Principle of Flood Discharge and Energy Dissipation for Modern Dam Construction[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [27] 刘树坤. 岩石河床抗冲能力的初步探讨[R]. 水电第十三工程局勘测设计研究院, 1978. (LIU Shukun. Preliminary Study on the Anti-scouring Capacity of Rock Bed[R]. Hydropower 13th Engineering Bureau Survey and Design Research Institute, 1978. (in Chinese))
- [28] 华东水利学院. 水工设计手册第六卷-泄水与过坝建筑物[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. (Huadong Institute of Water Resources. Hydraulic Design Manual Volume 6-Drainage and Dam Crossing structures[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1987. (in Chinese))
- [29] 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (XIA Yuchang, ZHANG Liming. Prototype Observation and Model Test of Hydraulic Engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))

Estimation of the maximum discharge for bank spillway tunnel

XU Jianrong¹, SUN Shuangke², PENG Yu¹, LIU Haitao², XUE Yang¹

(1. Huadong Engineering Co., Ltd., Power China, Hangzhou 311122;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The discharge for a single spillway tunnel in a large hydropower station is an important design parameter for the dam layout, spillway safety, and project investments. However, quantitative investigation of the maximum discharge was limited in previous studies. Based on the calculation of the tunnel discharge jet trajectory length and downstream scour depth, this study established relationships between tunnel discharge and downstream width, tunnel layout axis and downstream river channel width, bedrock scour resistance, tunnel operation mode, etc. Quantitative estimation studies have been conducted on the spillway tunnels respectively for the projects of Baihetan, Xiaowan, Xiluodu, and Jinping-I. The estimation results are well consistent with the engineering practice and the design schemes, indicating high reliability for the estimation method. This method can be applied to predict the maximum discharge for construction-scheduling spillway tunnels and to assess existing spillway tunnels in terms of the maximum flow discharge.

Keywords: bank spillway tunnel; maximum flow discharge; estimation; downstream channel scour; operation mode

(责任编辑: 王学风)