

# 通口水电站冲沙底孔廊道压力和消能问题的试验\*

张绪进, 尹崇清, 刘亚辉

(重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:**通口水电站是以发电为主,采用混合开发方式的综合性水利枢纽工程,坝高73.5 m。本文结合水工模型试验成果,论述了通口电站冲沙底孔的过流能力和流量系数,研究了冲沙底孔体型布置对廊道压力、消能防冲及电站尾水等的影响,提出了改善冲沙底孔廊道压力和改善消能防冲条件的工程措施,该研究成果已被设计采用。

**关键词:**冲沙底孔;廊道压力;消能防冲

**中图分类号:**TV61 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)05-0018-05

## Study on the Sand Duct Pressure and Energy Dissipation for Tongkou Hydro Power Station

ZHANG Xu-jin, YIN Chong-qing, LIU Ya-hui

(The Southwest Waterway Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, P. R China)

**Abstract:** Tongkou power station is an all-round hydro project, where the mixed exploitation mode is adopted with mainly for power generation. Integrated with the model test result, the duct discharge capacity and flow coefficient in various discharge hole are discussed, the influence of duct shape on inlet pressure, energy dissipation and tail water is analyzed, the improvement measures on conveyer way pressure and energy dissipation are put forward too. The achievements of this study have been adopted by the designers.

**Keywords:** sand duct; conveyer way pressure; energy dissipation

通口水电站位于涪江支流通口河中游末段,四川省北川县境内,该工程是以发电为主,采用混合方式开发的水电枢纽工程。通口河为涪江的一级支流,属典型的山区河流,通口电站坝址处多年平均流量 $94.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,径流年内分配与降水相适应,年径流主要集中在5~10月,通口河洪水具有峰高量大洪峰尖瘦的特点,大坝设计洪水流量 $Q_{P=2\%} = 6240 \text{ m}^3/\text{s}$ ,校核洪水流量 $Q_{P=0.2\%} = 9700 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据设计推算通口电站坝址处多年平均悬移质输沙量为515万t,多年平均含沙量 $1.54 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,悬移质最大粒径2.12 mm,推移质多年平均输沙量8.8万t。水库正常蓄水位598 m,汛限水位584 m,设计洪水位594.89 m,校核洪水位599.52 m,正常蓄水位相应的水库库容 $3361 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,不同频率洪水流量资料见表1。通口水电站枢纽工程主要包括拦河坝、电站引水系统、主副厂房和升压站等工程,该工程电站装机45 MW,电站取水口布置于河床右岸,

大坝轴线上游约25 m,电站厂房位于大坝下游约300 m处的右岸岸边,电站尾水经尾水渠汇入下游主河槽。通口水电站拦河坝由左右岸非溢流坝段和中部溢流坝段组成,总挡水宽度231.57 m,其中左岸非溢流坝段长94.8 m,右岸非溢流坝长33.77 m,中间溢流坝段长103 m,溢流坝由5个 $14 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ (宽×高)表孔组成,采用曲线型溢流堰面曲线,堰顶高程583.5 m,溢流坝中墩厚4 m,边墩厚3 m,各闸孔均设弧型闸门控制流量及坝前水位。溢流坝段和非溢流坝均为砼重力坝,坝顶高程601.5 m,最大坝高73.5 m,该工程的闸墩采用宽尾墩,溢流坝尾端加多级梯坎以消除小流量时水体的能量,其后接长44.5 m,深5 m,尾坎挑角为1:2.5的屏式消力池(图1)。

表1 通口水电站坝址处不同频率洪水流量表

洪水频率 P/%	0.2	0.5	2	3.33	10	50
流量 Q/m <sup>3</sup> /s	9700	8270	6240	5480	3880	1650

\* 收稿日期:2006-05-15

作者简介:张绪进(1959-),男,四川蓬安人,研究员,主要从事水利水运工程研究。

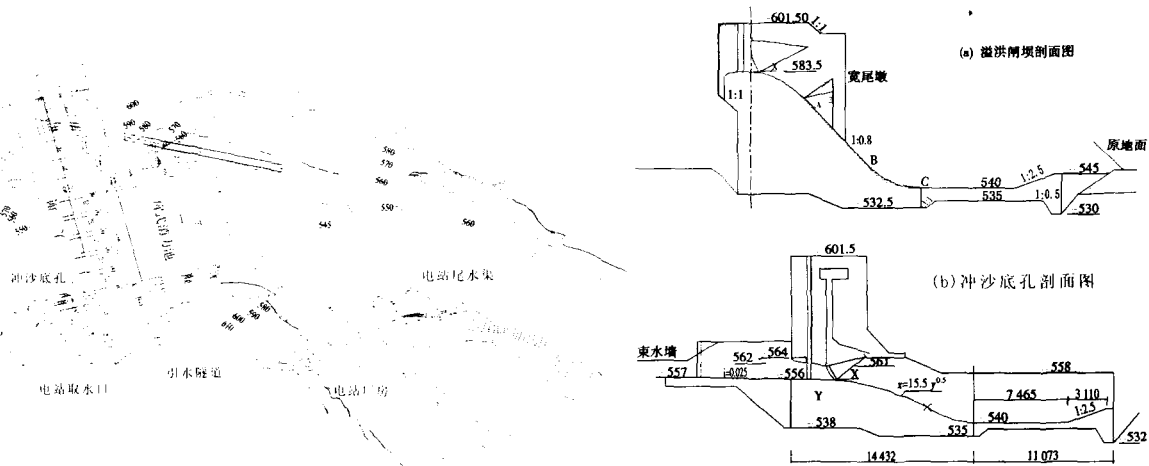


图1 通口水电站枢纽布置图

通口水电站的冲沙底孔布置在大坝右岸一侧,位于紧接溢流坝段右侧底部电站进水口附近。该冲沙底孔进口顶缘采用椭圆曲线喇叭口布置形式,进口尺寸5×5 m(宽×高),底板高程556 m,由设于坝体内的弧型闸门控制流量。在紧邻该冲沙底孔左侧布置有长26 m高13 m的分水隔墙以形成电站取水口前沿的拉沙道。冲沙底孔闸后过流通道采用抛物线及圆弧曲线与长30 m的消能设施光滑衔接,消力坎挑角1:2.5,坎高5 m,坎顶宽2 m,底板高程540 m。

本文主要通过1:80的正态模型,研究了不同运行工况下通口水电站冲沙底孔廊道的过流能力、廊道压力和廊道出口段的消能情况,并提出了改善廊道压力和出流条件的优化工程措施。

### 1 冲沙底孔的泄洪能力

为了获取冲沙底孔的泄洪能力,试验实测了不同频率洪水流量在溢流坝表孔和冲沙底孔闸门全开、电站停机情况下的坝上游水位与各泄水建筑物(包括溢流表孔和冲沙底孔)的流量分配资料。根据孔流公式  $Q = m' A \sqrt{2gH_0}$  及表2所给出的各泄水建筑物分流量等资料,分别计算出各级流量情况下冲沙底孔的综合流量系数(表2)。由表2可以看出:各级流量和不同

表2 通口水电站冲沙底孔流量系数计算表

$Q_{总}$ /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	1 650 P=50%	5 480 P=3.33%	6 240 P=2%	8 270 P=0.5%	9 700 P=0.2%
$Q_{底孔}$ /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	554	535	539	512	497
$Z_{上}$ /m	587.90	595.15	596.31	599.22	601.01
$Z_{下}$ /m	555.12	565.72	567.52	572.22	575.42
$m'$	0.908	0.785	0.778	0.712	0.676

水位情况下,冲沙底孔的泄流量在497~554 m<sup>3</sup>/s之间,其综合流量系数的变化范围是0.676~0.908,平均值为0.772。当上游来流量  $Q_{P=50\%} = 1 650$  m<sup>3</sup>/s时,

冲沙底孔的过流量及流量系数最大,当上游来流量  $Q_{P=0.2\%} = 9 700$  m<sup>3</sup>/s时,冲沙底孔的过流量及流量系数最小。这是因为随着流量的增大,下游水位的抬高,上下游水位差随之减小,下游出口的淹没度相应增大,冲沙底孔的过流量及流量系数也随之减小。

### 2 冲沙底孔沿程压力分布研究

#### 2.1 原设计方案冲沙底孔的沿程压力分布

为了检验冲沙底孔是否产生对坝体结构有害的负压真空,在模型上沿冲沙底孔中心剖面布置了15个测压管。试验实测了:(1)在坝前水位为正常水位598 m,电站发电、冲沙底孔全开、溢流坝表孔控制开启或全开情况下冲沙底孔的压力分布;(2)在电站发电,冲沙底孔和5个表孔全开情况下冲沙底孔的压力分布,冲沙底孔特征点压力值(表3)。

由模型实测的冲沙底孔中心剖面压力值分布可知:(1)在坝前水位保持正常高水位,冲沙底孔全开的各级流量情况下,原设计方案冲沙底孔进口顶部的1#、2#测点和位于冲沙底孔中后段的9#~12#测点存在负压真空,实测最大负压值发生在冲沙底孔进口的1#测点,其最大值达到-11.64 m;(2)当冲沙底孔控制闸门开度和坝前水位时,1#、2#测点和9#~12#测点仍存在负压真空,其中流量  $Q = 5 480$  m<sup>3</sup>/s时,1#测点的负压值达到-9.04 m;(3)当冲沙底孔前沿分水隔墙(束水墙)顶高程由570 m降至563.00 m时,进口段1#、2#测点负压值明显减小,5#测点负压有所增大,其余位置压力变化不大;(4)取消冲沙底孔前沿束水墙时,1#测点负压消失,2#、3#测点的负压显著增大,例如当流量  $Q = 5 480$  m<sup>3</sup>/s时,位于2#测点的最大负压值为-6.18 m。

由上述分析可知,原设计冲沙底孔进口段所产生负压值较大,已明显超过结构安全允许值,分析其主要

原因,一方面是由于该冲沙底孔的进口段体形和结构尺寸设计不尽合理,另一方面是由于在该冲沙底孔前沿多种建筑物交织布置,各建筑物相互干扰,特别是冲沙底孔前沿的束水墙的存在,使得电站进口前沿拉沙

通道内流速增大,并有绕流形成产生负压真空。欲减小该处负压值的大小,确保坝体结构安全,需要对进口段体型进行优化,并对进口段附近建筑物的布置进行适当调整。

表 3 通口电站冲沙底孔特征点压力值 (米水柱)

方案及布置	流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	进口段			闸后廊道段				运行方式	
		1#	2#	3#	9#	10#	11#	12#		
原方案	1 030	-11.64	-5.26	1.81	-0.48	-1.72	-2.72	-0.36	坝前水位 598 m	
	5 480	-8.44	-0.70	5.09	0.40	1.68	4.00	10.88		
	束水墙顶 高程 570 m	665	-6.40	-2.22	1.53	0.92	0.12	-0.68	1.08	坝前水位 584 m
		1 650	-7.24	-2.42	1.49	0.56	-0.44	-1.24	0.20	全闸敞泄
		5 480	-9.04	-1.30	4.05	0.68	2.16	4.76	11.20	全闸敞泄
		665	-5.96	0.26	2.73	1.28	0.40	-0.12	0.64	坝前水位 584 m
	束水墙顶 高程 563 m	1 650	-6.92	0.50	3.97	1.16	0.20	-0.48	0.36	全闸敞泄
		5 480	-7.84	1.58	5.89	1.08	0.32	1.76	10.00	全闸敞泄
	取消 束水墙	665	0.88	-4.58	-1.47	1.08	0.40	-0.32	1.16	坝前水位 584 m
		1 650	1.36	-4.98	-1.39	0.60	-0.04	-0.80	1.00	全闸敞泄
		5 480	2.36	-6.18	-1.63	0.92	2.80	5.44	11.28	全闸敞泄
		665	5.33	4.63	4.44	2.13	1.40	2.02	1.85	坝前水位 584 m
修改方案	束水墙顶 高程 570 m	1 650	6.13	5.39	6.20	1.73	0.96	1.74	1.57	全闸敞泄
		5 480	10.41	8.51	9.12	1.81	1.68	4.26	7.61	全闸敞泄
	束水墙顶 高程 563 m	665	6.21	6.11	6.04	1.65	1.16	1.86	1.49	坝前水位 584 m
		1 650	7.33	7.23	7.24	1.45	0.92	1.58	1.53	全闸敞泄
		5 480	10.49	10.03	10.12	2.21	1.96	4.22	8.61	全闸敞泄
		665	9.29	5.39	5.92	2.13	1.32	2.02	1.85	坝前水位 584 m
	取消 束水墙	1 650	10.97	6.39	6.92	1.93	1.00	1.90	1.77	全闸敞泄
		5 480	14.53	8.39	9.04	1.81	1.96	4.78	8.45	全闸敞泄

2.2 减小冲沙底孔负压的工程措施

为改善冲沙底孔沿程的压力分布特别是最大限度地减小或消除该底孔进口段所存在的负压问题,确保结构安全,在模型上对冲沙底孔的线型布置和结构尺寸进行了如下修改(见图 2):(1)扩大冲沙底孔喇叭形进口尺寸,以达到减小冲沙底孔进口段的绕流流态,改善进流条件目的,其具体方案是将冲沙底孔顶缘线型由原设计方案的  $\frac{x^2}{6^2} + \frac{y^2}{2^2} = 1$  曲线调整为  $\frac{x^2}{6^2} + \frac{y^2}{3^2} = 1$  曲线,冲沙底孔进口底缘由原来的直角进口调整为半

径  $R = 1.5\text{ m}$  的园角衔接;(2)修改冲沙底孔底板线型,将过流抛物线型曲线由原方案的  $X = 15.5y^{0.5}$  调整为  $X = 12.48y^{0.5}$ ,同时将冲沙底孔末段的反弧半径由 20 m 调整为 25 m,并与上游过流曲线及下游水平段光滑衔接。

在上述对冲沙底孔体型曲线进行调整和修改的基础上,试验分别测定了保持冲沙底孔前沿束水墙顶高程 570 m,降低束水墙顶高程至 563 m 和取消束水墙三种不同布置方案冲沙底孔沿程的压力分布。试验结

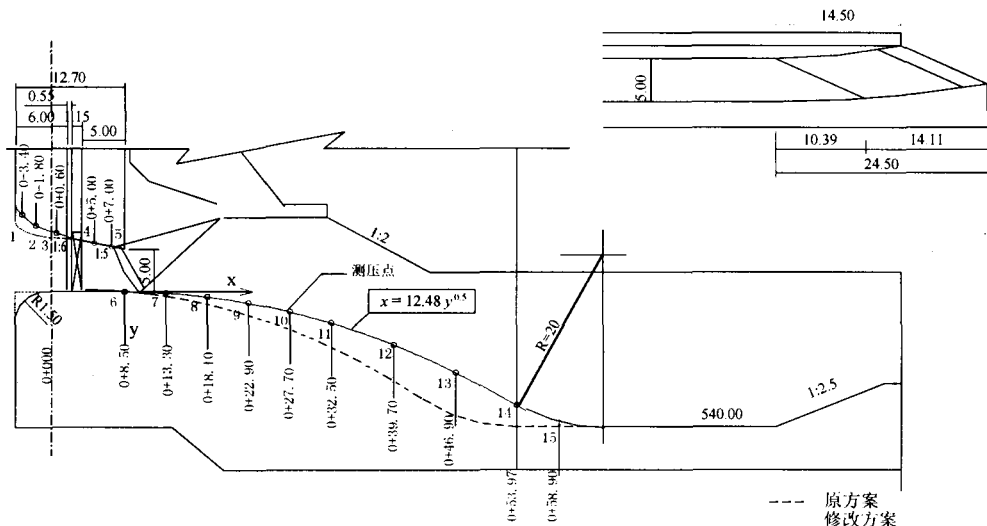


图 2 冲沙底孔修改方案及测压点布置图

果表明:冲沙底孔体型曲线调整后,在各级流量及不同运行工况下,冲沙底孔沿程的负压基本消除,特别是在进口段(1#和2#测点)的负压均基本变为正压,这对于确保该冲沙底孔的正常安全运行十分有利,而束水墙高程的变化对冲沙廊道压力值的影响相对较小,例如:当上游来流量  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ,坝前水位保持正常蓄水位 598 m 运行,电站正常发电,冲沙底孔闸门小开度泄流情况下,上述三种方案仅在冲沙底孔中部 10#测点出现较小的负压,其负压力值范围为  $-0.04 \sim -0.24 \text{ m}$ ,其余各测点均为正压。随着流量的增加,冲沙底孔沿程更不存在负压问题。由此可见,通过扩大冲沙底孔喇叭形进口尺寸,优化过流通道线型,减缓闸后过流通道坡度等工程措施后,冲沙底孔沿程的压力分布得到大为改善,仅在小流量情况下,个别测点处出现非常小的负压,不会对结构安全产生明显的不利影响。

### 3 冲沙底孔消能防冲情况

#### 3.1 原设计方案消能防冲情况

试验观察到在流量  $Q_{p=50\%} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$ ,电站正常发电,冲沙底孔和溢流坝表孔全部开启泄洪时,由于坝下游水位较低,经冲沙底孔下泄的水流形成挑射水

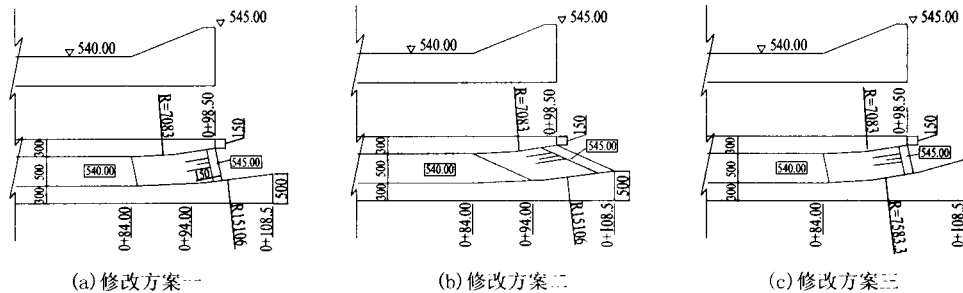


图3 冲沙底孔消能设施修改方案布置图

孔下泄主流流向以减小对电站尾水的影响,则上述三种修改方案的出流情况均较原方案有一定程度的改善。在中小流量情况下,三种方案的区别在于:方案一下泄水流仍较集中,出口水流呈挑射状态,电站尾水渠内水面波动略大;方案二冲沙底孔出流相对均匀,下泄水流扩散较好,电站尾水渠附近水面波动相对略小;方案三出坎水流明显向左偏移,因水流较集中将会对左岸岸坡造成较为严重的冲刷影响,但电站尾水渠附近水面较为平静。随着上游来流量的增加和坝下游水位的升高,冲沙底孔下泄水流逐渐成为淹没出流,出坎水流流速有所减缓,流向也会发生一定变化,方案一和方案二出坎主流中偏右,而方案三出坎主流位于河道中部,对电站尾水影响相对较小。此外,试验过程中还发现,当上游来流量增大,坝下水位升高至冲沙底孔出口段墙顶高程附近时,沿冲沙底孔下泄水流呈现不稳定震荡状态,在模型上可听到水流间隙式撞击冲沙底孔

流,沿冲沙底孔轴线方向直冲至下游主河槽深潭,实测冲沙底孔下游河道最大流速达到  $16.46 \text{ m/s}$ 。随着上游来流量的增加和下游水位的升高,沿冲沙底孔下泄的高速水流受河道主流(戽式消力池下泄水流)的挤压,逐渐向河道右侧电站厂房尾水渠附近移动,直接波及到该尾水渠左侧边墙,并对该尾水渠边墙的稳定和安全及电站正常发电造成不利影响。模型实测当流量  $Q = 5480 \text{ m}^3/\text{s}$  时,冲沙底孔下游最大流速  $7.01 \text{ m/s}$ ,且主流靠近电站尾水渠,使该尾水渠附近最大流速达  $4.09 \text{ m/s}$ ,最大波高  $2.0 \text{ m}$  左右。由此可见,经冲沙底孔下泄的水流流速大,消能效果差,需要通过调整该冲沙底孔出口段的平面布置,改变下泄水流流向改善消能效果以最大限度地减小其对电厂尾水及尾水渠左墙的不利影响。

#### 3.2 消能设施的改善措施

针对原冲沙底孔消能设施布置方案所存在的问题和试验观测,对冲沙底孔出口段的平面布置提出了如下三种修改方案。修改方案一:小弯导墙+小斜尾坎;修改方案二:小弯导墙+大斜尾坎;修改方案三:大弯导墙+小斜尾坎(图3)。

模型对比试验结果表明:如果仅考虑调整冲沙底

下段边墙的“啪啪”响声,随着下游水位的进一步抬高,当冲沙底孔出口完全淹没后,其响声逐渐减弱。分析上述现象产生的原因可能是经冲沙底孔下泄的高速主流在底孔洞内发生临界水跃,形成漩滚掺气水流与洞壁相互碰撞的结果。

综合上述模型对比试验成果,将修改方案二作为冲沙底孔下段布置的推荐方案,并对该方案进一步进行了较系列的试验观测,根据试验实测结果:采用修改方案二即小弯导墙+大斜尾坎布置方案后,在中小流量情况下,特别是坝下游水位相对较低时,冲沙底孔下游河床的流速降低,水流扩散相对均匀,有利于坝下消能防冲,且其抛射水流对电站尾水的影响相对较小。

#### 3.3 冲沙底孔闸门开启方式对出口段消能的影响

根据试验观测,当上游来流量较小坝下游水位较低时,冲沙底孔闸门开度的大小对坝下游流速分布及流态具有重要影响。在冲沙底孔全开或开度较大,而

溢流坝表孔关闭或开度较小时,冲沙底孔出口段下游流速很大,主流持续较远,分布极不均匀,流态亦不好,随着上游来流量的增加和下游水位的升高,溢流坝表孔开启孔数越多,开启越均匀,坝下流速越小,分布越均匀,流态亦较好。例如:在流量  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ,坝前水位保持正常蓄水位 598 m 情况下,当冲沙底孔控制开启,溢流坝表孔关闭时,实测冲沙底孔下游河床的最大流速为 17.47 m/s;当冲沙底孔关闭,溢流坝表孔控开时,坝下游河床的最大流速则降至 4.02 m/s。在流量  $Q = 665 \text{ m}^3/\text{s}$ ,坝前水位按防洪汛限水位 584 m 控制情况下,如此时冲沙底孔全开,溢流坝表孔关闭,实测冲沙底孔下游河床的最大流速达到 28 m/s,而当冲沙底孔关闭,溢流坝 1#、3# 和 5# 表孔控制开启过流情况下,坝下游最大流速仅为 3.58 m/s。当流量为两年一遇洪水  $Q = 1\ 650 \text{ m}^3/\text{s}$  时,在冲沙底孔全开,溢流坝表孔全开情况下,实测坝下游河床最大流速为 12.59 m/s,而在冲沙底孔开度  $n = 0.8$ ,溢流坝表孔全开时,坝下游河床的最大流速减小到 8.34 m/s。随着上游来流量的继续增加,溢流坝表孔过流量也随之增大,坝下游河床特别是冲沙底孔下游河床的流速也随之减小。分析上述现象产生的原因是由于中小流量情况下,坝前水位保持高水位运行,而坝下水位很低,上下游水位差很大,经冲沙底孔下泄的水流形成挑射水流,径直沿冲沙底孔轴线方向冲至下游主河槽,水流流速很大,主流持续距离较远,不利于坝下游消能防冲。

综上所述,冲沙底孔闸门开度的大小及调度方式对坝下游河床的流速、流态及消能情况具有重要影响。因此,建议中小流量情况下特别是坝下水位较低时,尽量少开冲沙底孔或减小冲沙底孔的开启度,以减小其对坝下游河床及电站厂房尾水渠的不利影响。

### 3.4 冲沙底孔出口段布置型式对电站尾水的影响分析

电站厂房尾水渠位于大坝下游约 300 m 处的右岸一侧,尾水渠底宽 21.2 m,厂房尾水渠出口坡度采用反坡 1:4 与下游河床相衔接,平面上向右弯逐渐过渡到主河槽,左侧挡墙顶部高程 555 m。模型试验结果表明:在上游来流量较小,冲沙底孔关闭的情况下,电站尾水渠波动较小,出流条件较好。随着冲沙底孔的逐步开启直至全开,经冲沙底孔下泄的水流流速逐渐增大,电站尾水渠内水面波动也随之增大,当冲沙底孔闸门全开,坝下水位较低时,经冲沙底孔抛射的高速主流位于该尾水渠左侧主河槽深潭,随着上游来流量的增大,通过溢流坝表孔和屏式消力池下泄的流量逐渐增大,并对经冲沙底孔下泄的主流产生挤压作用,使该股高速主流逐渐右移,直接威胁电站厂房尾水渠左侧隔墙的安全,且尾水渠内水面波动相应增加。针对原

布置方案所存在的问题,为进一步改善经冲沙底孔下泄水流对电站尾水渠的不利影响,对冲沙底孔出口段的布置进行多方案对比试验,试验结果表明:采用上述方案二即小弯导墙+无斜尾坎方案后收到较好效果。试验表明:该沿冲沙底孔下泄的高速主流方向得到适当调整,对电站尾水渠的不利影响有一定程度改善,随流量的增大,电站尾水波动有一定程度减小(表 4)。

表 4 通口电站尾水渠水位波动值/m

流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1 650	5 480	6 240	8 270	9 700
原方案	0.96	1.96	2.10	2.24	2.40
修改方案	—	1.92	1.85	1.52	1.28

## 4 结论

1) 高中水头枢纽冲沙底孔负压真空的大小及出口段消能情况是关系到工程安全运行的重要问题,其影响因素主要包括进口段体型、过流通道线型、出口段消能设施的结构尺寸的选择和闸门的开启运行方式,需要借助一般经验和模型试验综合分析予以确定。

2) 试验研究表明,通口电站冲沙底孔原设计方案在进口段和紧邻闸门下游廊道段存在负压真空,特别是进口段的负压真空最大值达到  $-5.26 \sim -12 \text{ m}$ ,对结构安全将会造成重要影响。分析产生负压真空的主要原因是该冲沙底孔体型(线型)设计不尽合理,其次是进口段各种建筑物交织布置,进流不畅,试验通过扩大进口段尺寸,改善进口段和廊道线型,解决了冲沙底孔局部负压偏大的问题。

3) 原设计冲沙底孔出口段在坝上游保持高水位运行,坝下水位较低的各级流量情况下,如冲沙底孔闸门全开或开度较大,则下泄高速主流持续较远,水面波动大,消能效果差,且对电站尾水渠左边墙结构安全及电站正常运行造成重要影响。修改方案通过调整冲沙底孔出口段的线型布置,配合闸门的优化调度,基本解决了中小流量情况下冲沙底孔下游的消能问题,最大限度地减轻了下泄水流对电站尾水渠边墙的冲刷。

## 参考文献:

- [1] 张绪进,尹崇清,刘亚辉. 通口水电站枢纽水工模型试验研究报告[R]. 重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2003.
- [2] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京:人民教育出版社,1975.
- [3] 毛昶熙,周名德,柴恭纯. 闸坝工程水力学与设计管理[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [4] 郭子中. 消能防冲原理与水力设计[M]. 北京:科学出版社,1992.