

浅谈龚咀电站泄洪消能与木材过坝

肖富仁

(水电部成都勘测设计院)

一、概 况

龚咀电站位于大渡河中下游的峡谷河段上,距河口90公里。主要任务是发电,兼有木材过坝、下游通航等综合效益。

坝址区河谷较窄,枯水期水面宽100~120米。河床复盖层厚10~15米,混凝土重力坝建于古老的花岗岩基础上,最大坝高85.5米(后期拟加高到150米)。壅高水位50米,库区回水长38公里,总库容3.1亿米³,水库面积13.8平方公里。电站引用流量1687米³/秒,装机七台,总容量70万千瓦。

龚咀坝址控制流域面积76,400公里²,占全流域面积的98%。多年平均流量1530米³/秒,平均年径流量482亿米³。实测最大流量10,400米³/秒,实测最小流量370米³/秒。大坝按当时规范属I级建筑物,设计洪水为($P=0.1\%$)13,700米³/秒,校核洪水为($P=0.01\%$)15,800米³/秒。大渡河洪峰主要由降雨形成,具有洪峰低、水量大、历时长的特点。洪峰基流量2,000~3,000米³/秒。汛期(集中6~9月份),平均流量4000米³/秒。平水期(5月、10月)平均流量2000~2800米³/秒。枯水期(11月至次年4月)流量低于1,500米³/秒,一般为430~940米³/秒。坝区洪枯水位变幅12~16米。

大渡河上游林区,木材蓄量约2亿米³,年采伐量110~130万米³。计划近期年采伐量150万米³;远景年采伐量200万米³。木材输送主要靠水上散漂,一般长5~8米,最长12米;一般直径0.4米左右,最大直径1.2米。木材容重0.7~0.9吨/米³,但在水中浸泡过久后,容重将增至1吨/米³,而成为沉木或半沉木。据统计木材散漂时间,集中于洪水期(6~9月份),一般占全年的90%以上;平水期(5月、10月)约占全年的5%;枯水期极少。漂木时洪水流量多为3,000~6,500米³/秒,并集中在每年头二、三次洪水(据统计一次来材最多可达50万米³左右),来材最大强度每分钟200件。

大坝设四个表孔溢洪道,其中三孔位于主河床,一孔位于左侧导流明渠的位置。右岸设坝后式明厂房(装机四台);左岸有地下厂房(装机三台)。在河床三孔溢洪道的左侧,利用导流明渠的右边墙作为基础,设置一条宽9米的漂木道(见图1),最大过流量100米³/秒。

二、溢洪道及木材过坝设计

因木材过坝量大而集中,林业部门要求过坝设施能做到“随到随漂”,“来多少漂

多少”。即大坝修建后，要与天然的大渡河具有同样巨大的过木能力，这就使通常的过木设施（如水筏道，机械筏道，筏闸之类）难于胜任。我们在设计中考虑到材峰与洪峰在时间上重叠，这就有条件利用溢洪道的巨大吞吐能力，借助弃水漂木，解决漂木与发电争水的矛盾，工程投资亦较经济。平水期，来水量仅稍大于电站引用流量，若仍用溢

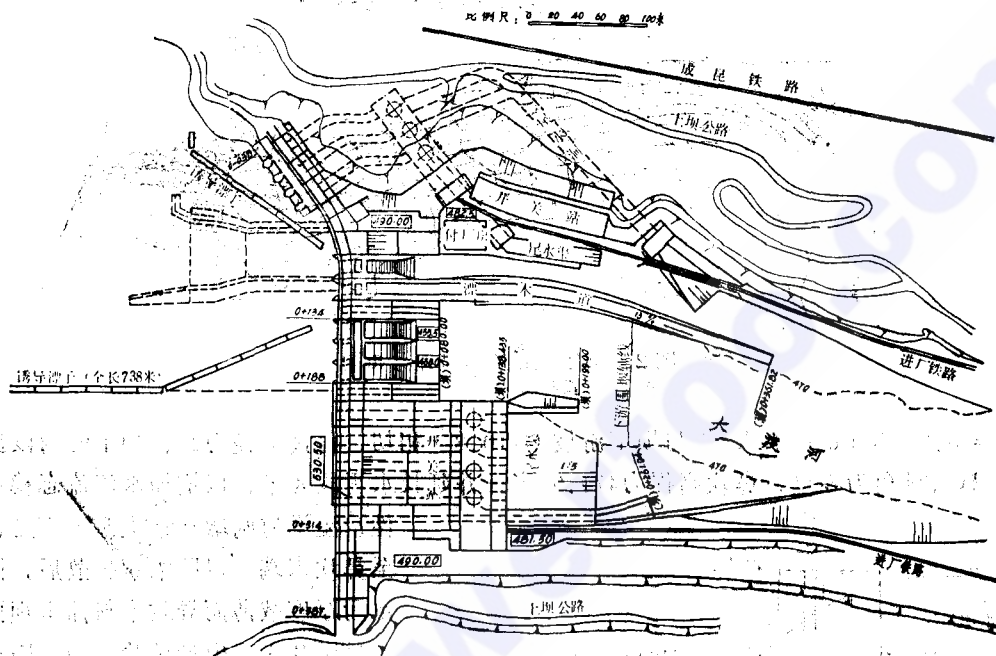


图1 龚咀电站平面布置图

洪道漂木，必然减少发电出力；显然是不合理的。为此，设一漂木道供平水期漂木使用。枯水期来水量更小（远小于电站引用流量），应全部用来发电，而此时来材量亦少，可采用铁路运送。

对于在水头高达50米的坝上过木，国内没有先例，国外亦少见。选用溢洪道漂木过坝方案，必须在技术上解决以下三个问题：

1. 使木材顺利地进入溢洪道；
2. 使木材安全地通过坝身；
3. 使木材完好地送入下游天然河道。

为此作过两种比例尺（1:70，1:100）的枢纽水力模型，观测了木材在坝址上、下游的运动情况。并作过两种比例尺（1:42.5，1:70）的溢流坝断面水力模型。

试验表明：水库形成后，尽管库区流速大为降低——来水量 $3,000\text{米}^3/\text{秒}$ 时，流速 $0.4\sim 0.6\text{米}/\text{秒}$ ；来水量 $10,600\text{米}^3/\text{秒}$ 时，流速 $0.9\sim 1.1\text{米}/\text{秒}$ ——比天然河床一般流速 $3\sim 4\text{米}/\text{秒}$ 减缓许多，但库区内仍然存在着明显的主流区（见图2），木材就集中在这个主流区呈“带”形徐徐向坝前运动。由于库区流速较小，木材运动速度较慢，所以未发生过木材钻漂，而引起厂房取水口堵塞的情况。当木材漂至溢流坝前沿时，水流行速逐渐加大，所有的散漂木材，都能顺利地沿着流线方向进入溢洪道。

溢洪道孔口宽度，按最大木材长度12米考虑，以防止木材横堵溢流孔口。堰顶高程，按泄流能力定为506.00米。设计水位528.00米时，堰顶单宽流量200米³/秒，鼻坎单宽流量137米³/秒。为使木材平顺地通过坝身，溢流面采用较肥胖的非真空溢流曲线

$$Y = 10600 X^{2.5} \quad V_L = 521.00 \text{米}$$

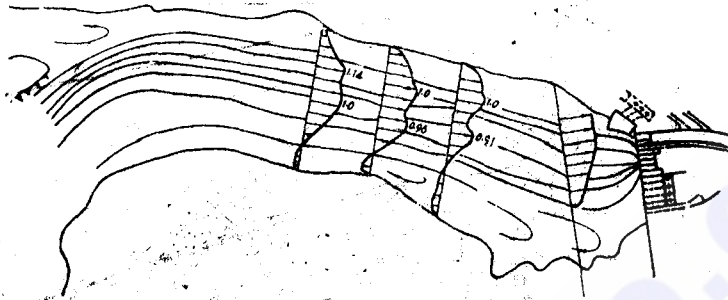


图2 龚咀电站库区流速分布图

($Y = 0.025X + 0.0212X^2$) 与坝下游坡(1:0.8)相切，再接半径为20、30米的两段反弧。鼻坎挑角为零度，鼻坎高程为471.00米，并延长水平段4米，以增加水流流态稳定性。

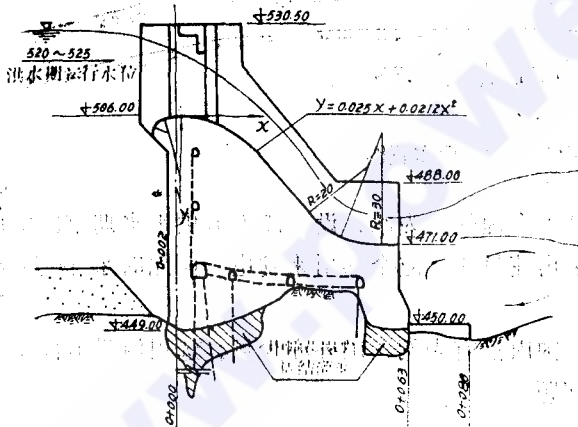


图3 溢流坝剖面图(8坝段)

溢洪道闸墩，自上游一直延伸至鼻坎末端，以防水流扩散后，因水舌厚度减薄而导致木材撞击坝面(见图3)。模型试验表明，因坝面单宽流量大，水舌较厚(3米以上)，且反弧半径较大，因此木材过坝时，撞击坝面或鼻坎的可能性很小。根据计算(详见参考资料4)，若反弧段水深大于1.1米时，木材不致于撞击坝面或鼻坎。由于闸墩引起侧收缩及门槽导致的旋涡、掺气作用，使水流的主流区向溢流孔口宽度的三分之二的范围内压

缩，木材就正好在这个主流区运动，而不撞击闸墩。

为安全地把木材送入天然河道，坝下选用表面流速大的面流水跃消能型式(见图4)。在自由面流时表层无旋滚，适合于漂木。而面流流态的底部流速小，又大大地减少了河床护底工程。但自由面流流态稳定性较差，是不利的一面。通过溢洪道水力模型试验，找到了一些扩大自由面流范围的措施，以改善漂木条件，主要措施是：

(一) 通过泄水孔口合理地调整坝下游的单宽流量，使下游水位在变化范围内保持面流流态

从试验、分析可知，当堰高和鼻坎高拟定后，各界限水深将随单宽流量 q 而变，在

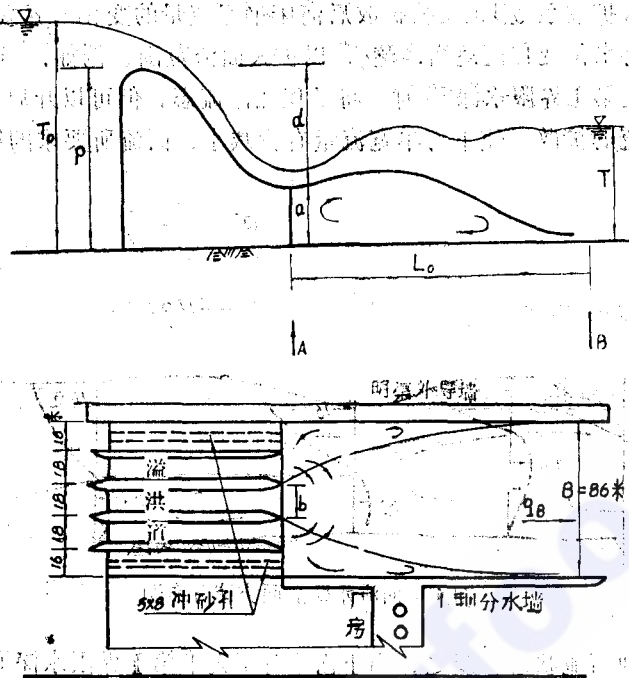


图6 面流水跃计算略图

$$T_0 = \nabla_{上} - 450 \quad (\text{米}) \quad \text{护坦上总能头}$$

$$h_k = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} \quad (\text{米}) \quad \text{临界水深}$$

$$\xi_0 = T_0 / h_k$$

$$\xi_{am} = 0.4 \sqrt{\xi_0 - 1.5} \quad \text{最小坎高系数 (切尔陀乌索夫公式)}$$

$$a_{m \text{ 米}} = \xi_{am} \times h_k \quad (\text{米}) \quad \text{最小坎高}$$

当上游水位 $\nabla_{上} = 528.00$ 米时，形成面流水跃所需要的最小鼻坎高度 $a = 11$ 米。通过水力模型试验，选定 $a = 21$ 米，护坦高程 450.00 米，鼻坎高程 471.00 米。

鼻坎过流宽度 b 与水跃末端水面宽度 B 的比为： $\beta = b : B \leq 3 \times 18 / 86 < 0.8$ ，属空间水跃。按切尔陀乌索夫经验公式计算临界水深：

$$\xi_1 = 1.74\eta (\xi_0 - 0.49\beta - 1.3) + 1.78\beta + 0.22$$

$$T_1 = \xi_1 \times h_k - a \quad \dots\dots \text{第 I 临界水深}$$

$$\xi_2 = [1.96\eta + 0.1(1 - \beta)(2 - \eta)] (\xi_0 - 0.45\beta - 1.3) + 1.9\beta + 0.4$$

$$T_2 = \xi_2 \times h_k - a \quad \dots\dots \text{第 II 临界水深}$$

式中 $\beta = b/B$ ($\beta_1 = 0.209, \beta_2 = 0.419, \beta_3 = 0.627$)

$$a = 471 - 450 = 21 \quad (\text{米}) \dots\dots \text{鼻坎高度}$$

$$p = 506 - 450 = 56 \quad (\text{米}) \dots\dots \text{堰体高度}$$

$$d = p - a = 31 \quad (\text{米}) \dots\dots \text{堰顶与鼻坎高差}$$

$$\eta = a/d = 0.6$$

$$\xi_0 = (T_0 / h_k)$$

(二) 泄水孔口运行方式

只要采取适当的泄水孔口运行方式,就能在各级流量下,保持坝下形成较为理想的自由面流水跃。例如一孔溢洪道过木时:

1. 枢纽下泄总流量为 $2,400\sim 3,300\text{米}^3/\text{秒}$ 时,上游水位可在 $520.00\sim 522.00\text{米}$ 之间运行,泄水孔开启方式可以是:

$$(1) \quad Q_{\text{溢}} + 5Q_{\text{厂}}$$

$$(2) \quad Q_{\text{溢}} + 5Q_{\text{厂}} + Q_{\text{孔}_1}$$

2. 枢纽下泄总流量为 $3,000\sim 6,600\text{米}^3/\text{秒}$ 时,上游水位可在 $520.00\sim 528.00\text{米}$ 之间运行。泄水孔开启方式可以是:

$$(1) \quad Q_{\text{溢}} + 5Q_{\text{厂}} + Q_{\text{孔}_1} + Q_{\text{孔}_2}$$

$$(2) \quad Q_{\text{溢}} + 5Q_{\text{厂}} + Q_{\text{孔}_1} + 2Q_{\text{孔}_2}$$

同理:二孔、三孔溢洪道过木时,亦可在计算成果中,查到在不同下泄流量情况下,相应的上游水位与运行方式。

(三) 自由面流水跃底滚估算

上游水位为 528.00米 时,鼻坎处流速 $V\approx 29\text{米}/\text{秒}$,平均单宽流量 $q=139\text{米}^2/\text{秒}$,平均水深 $h=p/V=4.8\text{米}$,佛氏数 $Fr=V^2/gh=17.8>10$ 。下游形成自由面流时,水位为 $477.00\sim 483.8\text{米}$,相应下游水深 $T=27.0\sim 33.8\text{米}$ 。自由面流水跃底旋滚长度,按M.Φ.斯克拉德涅夫经验公式计算:

$$L_0=0.015(T-h)(420+Fr)=145\sim 190\text{米}$$

$$L_1=1.2L_0=1.2\times 190=228\text{米}$$

自由面流水跃最大近底流速:

$$V_e=0.25V=7.25\text{米}/\text{秒} \quad (\text{M.}\Phi.\text{斯克拉德涅夫公式})$$

水滚区末端近底流速:

$$V_m=0.1V=2.9\text{米}/\text{秒} \quad (\text{M.}\Phi.\text{斯克拉德涅夫公式})$$

水滚区可能被冲动的石块直径:

$$D=(0.025\sim 0.03)V_e=0.18\sim 0.218\text{米} \quad (\text{H.H.别利亚谢夫斯基公式})$$

试验和计算认为自由面流水跃底旋滚可能冲动消能区部分石块,并将石块带到溢流坝鼻坎下堆积起来。根据H.H.别利亚谢夫斯基的资料,当堆积体高度 $a_0>\frac{1}{2}a$ 和长度 $L_0>3a$ 时,(a 为坎高),坝下水流将不能产生自由面流水跃。

四、运行情况

龚咀电站自1971年初明渠封堵后,溢流坝因导流需要而开始溢水运行,发电后开始作为溢洪建筑物,到1980年止,已投入运行十多年。在此期间,水库运行水位 $520.90\sim 522.50\text{米}$,最大下泄流量 $6,000\text{米}^3/\text{秒}$ 。溢流坝每年从5月份开始泄洪,溢洪道闸门开启频繁(每年每孔平均开启100次左右,每年每孔平均泄洪2300~3450小时,其中8坝段溢流孔开启次数最多,泄流时间最长)。每年弃水量约占全年来水量的37~50%,溢流顶单宽流量,一般是 $140\text{米}^2/\text{秒}$ 左右,最大达 $165\text{米}^2/\text{秒}$ 。十年来的运行实践表明:

1. 溢洪道过木能力十分巨大,对远景漂木要求 $200\text{万米}^3/\text{年}$,完全可以满足。当

坝前二~三公里的库面上布满木材(估计有30~40万 米^3)时,只要溢洪道开闸过流,经一~二天时间,即可将全部木材泄入下游。照此估算,溢洪道实际过木能力可超过2,000万 米^3 /每年。

2. 溢洪道进口木材插垛现象(即散漂木材相互挤压封堵在溢洪道进口处),在正常水位(520.00米)以上运行时,还没有发生过。但在水库蓄水过程中尚未升到正常水位时,溢洪道过木曾出现过两次插垛现象。一次用人工方法排除;另一次采用启闭旁孔溢洪道闸门来松动被挤压的木材而得到解决。看来正常水位运行时,不易发生插垛现象,一旦出现亦不难解决。

3. 木材过坝的损失问题。据水运部门反映,过坝木材损伤率达5%。关于这个数值我们认为还值得研究:1)5%的测定方法是否可靠;2)在建坝前的木材水运损伤率是否测定过?应从这5%中扣除多少;3)经损伤后的木材是否还可以按短材小材回收一部分。总之,通过溢流坝漂木,木材损伤有所增加,具体数值尚待核实。

4. 不同流态的过木情况。龚咀工程施工期间,水库水位尚未升至设计水位520.00米以上,溢洪道便投入了运行。由于堰顶单宽过流量过小,曾出现过回复底流和淹没面

流流态;水库水位520.00米以上时,为自由面流流态。以上三种流态散漂过木情况如下:

1) 回复底流:由于过坝的单宽流量小,而河床的下游水深却远大于该单宽流量所对应的第Ⅰ临界水深,因此形成了回复底流使水流呈现出完整的表旋滚。木材在此旋滚区反复旋转,相互撞击,并撞击溢流坝鼻坎,故造成木材损伤(见图7)。

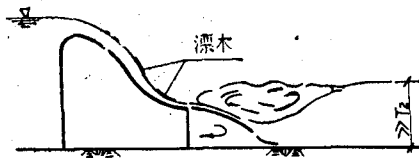


图7 回复底流过木示意图

2) 淹没面流:单宽流量小,下游水深仍大于相应的第Ⅰ临界水深时,水流表面虽然有旋滚,但由于水库水位低,佛氏数小,表旋滚小而不完整,木材无翻滚现象,仅有部分木材窜出水面,然后落下随水漂走,此时木材损伤率比回复底流的低(图8)。

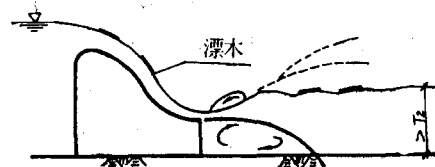


图8 淹没面流过木示意图

3) 自由面流:下游水深在Ⅰ、Ⅱ临界水深 T_1 、 T_2 之间,水流表面无旋滚,木材通过射流区和缓流区时,均以较平顺的状态下漂,但通过过渡段时,因水流掺气、容重减小,故木材多潜于掺气水花之下流送。由于溢洪道单宽流量较大,水头较高,过渡区水流紊乱,虽然个别木材窜出水面,但流送过程中没有出现表旋滚,故木材损伤率远比前两种流态小(图9)。

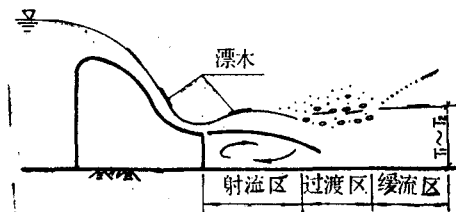


图9 自由面流过木示意图

五、结 论

龚咀水力枢纽利用洪水期弃水，借助溢洪道面流水跃散漂木材过坝的方案，工程措施上是经济的，技术上是可行的，管理上是简单方便的。木材通过溢洪道而造成的损伤，如果能消除不利于面流稳定的因素，按照规定的水位、流量、开启方式运行就能限制到较小的程度。

实践证明：利用溢洪道面流水跃漂木，不仅在低水头的水力枢纽中是可行的，在50米左右的中等水头的水力枢纽中，同样是可行的。

参 考 资 料

- 〔1〕清华大学水利工程系水力学教研组编 水力学 1961年
- 〔2〕M. П切尔陀乌索夫编 水力学专门教程（合订本）
- 〔3〕百丈崖水电站初步设计报告附件四
——水工机电设计 水利电力部成都勘测设计院 1966年7月
- 〔4〕百丈崖水电站初步设计报告附件五
——木材过坝设计 水利电力部成都勘测设计院 1966年7月
- 〔5〕515工程枢纽水力模型试验
（4—4方案总结）水利电力部成都勘测设计院 1966年6月
- 〔6〕龚咀溢流坝水工模型试验与坝上漂木研究 水利电力部成都勘测设计院 1982年12月
- 〔7〕龚咀水电站大坝下游冲刷补强说明 电力工业部成都勘测设计院
- 〔8〕龚咀电站水工建筑物运行情况报告 龚咀电厂 1981年9月