

溢流坝漂木研究

丁惠仪 黄增斌

(水电部成都勘测设计院科研所)

提 要

本文以龚咀水电站溢流坝漂木为例,通过理论分析及模型、原型验证,论述了木材在坝面运动的规律,提出了保持木材不碰击坝面的最小水深公式。研究表明,选用自由面流能达到减少木材过坝损失的目的。通过研究,提出了扩大面流范围的措施,改善了漂木条件,并依据实验资料,给出了面流界限水深的经验公式。

一、木材流经溢流坝面的运动

溢流坝的剖面通常采用实用堰的型式。兼有漂木任务的溢流坝,其末端常设有鼻坎,以便为下游形成面流流态创造条件。

(一) 木材运动的描述

木料经溢流坝面的运动可以看作其重心随水流的平动(平行移动)与绕着重心转动两者合成的结果。其运动方程为:

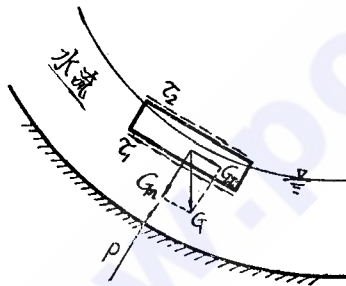


图1 木材的运动平面

$$\left. \begin{aligned} S &= S(t); \\ \psi &= \psi(t); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中第一式以路径表示法来表示木料重心的运动规律,第二式表示木材转动时的规律(各符号的意义参见图1)。木材重心运动的速度和加速度分别为:

$$\left. \begin{aligned} \vec{V} &= V \vec{\tau}, \\ V &= \frac{ds}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{W} &= \frac{dV}{dt} = W_{\tau} \vec{\tau} + W_n \vec{n}, \\ W_{\tau} &= \frac{dV}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}, \\ W_n &= \frac{V^2}{\rho}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)和(3)中, $\bar{\tau}$ 和 \bar{n} 分别为运动路径曲线的切向和内法向的单位矢量, ρ 为曲率半径。

木材转动的角速度和角加速度分别为:

$$\omega = \frac{d\psi}{dt}; \tag{4}$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\psi}{dt^2} \tag{5}$$

木材在各运动段的运动情况可描述如下(参见图2)。

在抛射段, 它的切向加速度、法向加速度、角速度和角加速度均不等于零, 即: $W_\tau \neq 0, W_n \neq 0, \omega \neq 0, \varepsilon \neq 0$ 。

木材在直线运动段作单一的平动, 式(1)中的第二式变为 $\psi = C_1$ (C_1 为常数), 因此 $\omega = \varepsilon = 0$; 同时, 只有切向加速度, 即 $W_\tau \neq 0, W_n = 0$ 。

木材完全处在反弧运动段时, 它的重心作近似的圆周运动, 同时以一定的角速度绕重心转动。当反弧段内的水面落差与上下游水位差相比很小时, 该段内的流速和水舌厚度变化不大, 此时, 木材重心的运动近似于匀速圆周运动, 其运动的角速度近似于常数(即 $v \approx C_2, W_\tau \approx 0; \omega \approx C_3, \varepsilon \approx 0 - C_2$ 与 C_3 均为常数, 但 $W_n \neq 0$)。

挑射段上木材的运动情况与下游水面衔接型式有密切的联系。当下游水面呈自由面流衔接时, 木材将随表层水流顺利通过鼻坎。

木材在上述各段的运动情况还取决于它的受力条件。

(二) 木材所承受的外力

切向作用力有: 木材自重沿切向的分力 G_τ 、木材与水流间的摩阻力 τ_1 和空气摩阻力 τ_2 。它们决定着木材运动的切向加速度。

法向作用力有: 木材自重沿法向的分力 G_n 和水对木材的总压力沿法向的分力 P (图3)。它们影响着木材运动的轨迹一曲率半径。这里主要是分析漂木是否碰击坝面, 故只需考虑法向力的作用。

各段上动水压力(严格地应称为压强)的分布规律受水流特性所制约, 也取决于溢流坝堰上的水头、坝面形状粗糙度以及所考虑断面的位置。当堰上水头及溢流坝的形状与尺寸确定时, 坝面上不同位置的动水压力将是一定的。在任一水流横断面上(图4), 动水压力高度沿水深的分布规律可表示为:

$$\frac{p}{\gamma} = y \cos\varphi + \eta H_2, \tag{6}$$

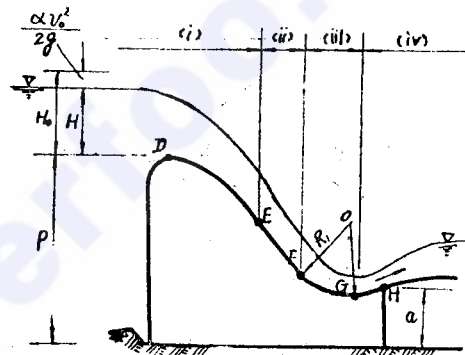


图2 木材在坝面的运动段

- (I) 抛射段
- (II) 直线运动段
- (III) 反弧运动段
- (IV) 挑射段

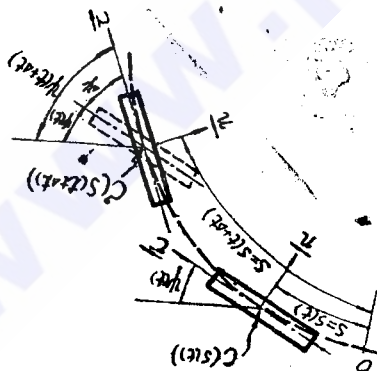


图3 作用于木材的外力

式中 y ——水面以下的垂直深度；

p ——水面以下 y 处的动水压力；

H_2 ——所取断面的水面与上游水位差；

φ ——所取断面与铅直方向的夹角；

γ ——水的容重；

η ——随水流特性和 y 等因素而变的系数。式(6)表明，在任一水流横断面上，

水面以下垂直深度 y 处，以水柱高表示的动水压力 $\frac{p}{\gamma}$ 等于静水压力 $y\cos\varphi$ 加上附加值 ηH_2 。

水流流线向下弯曲时，附加值 $\eta H_2 < 0$ ；流线不发生弯曲时， $\eta H_2 = 0$ ；流线向上弯曲时 $\eta H_2 > 0$ 。

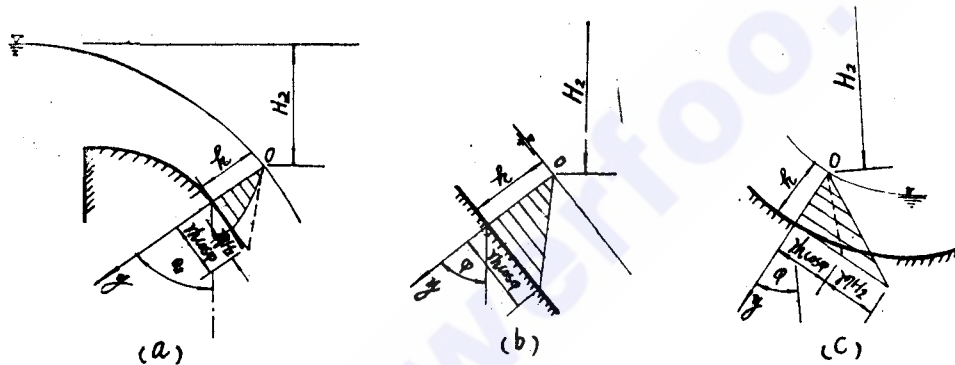


图4 任一水流横断面上的动水压力

(a) 流线向下弯曲 $\eta H_2 < 0$ (b) 流线不弯曲 $\eta H_2 = 0$ (c) 流线向上弯曲 $\eta H_2 > 0$

反弧段被认为是木材最可能碰击坝面的部位，现推求反弧段动水压力的具体表达式。对于反弧段，假定：(1) 水流断面上各点的能量相等；(2) 流线均系同心圆弧，可得动水压力及流速分布公式为〔3.2〕：

$$\frac{p}{\gamma} = y\cos\varphi + (H_1 - h\cos\varphi) \left[1 - \left(\frac{R}{R+y} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$\text{即} \quad \frac{p}{\gamma} = y\cos\varphi + H_2 \left[1 - \left(\frac{R}{R+y} \right)^2 \right]; \quad (7')$$

$$u_y = \frac{R}{R+y} u_s, \quad (8)$$

式中 R ——水面曲率半径；

h ——水舌厚度；

H_1 ——所取断面的坝面距上游水位的落差， $H_1 = H_2 + h\cos\varphi$ ；

u_y ——水面以下 y 处的流速；

u_s ——水流的表面流速。

若令 $\left[1 - \left(\frac{R}{R+y} \right)^2 \right] = \eta$ ，则式(7')变为式(6)的形式。当某一直径为 D ，长度为 L 的木材处在反弧段水流中时(图5)，其水面以下的木材表面的任一点上承受着 p

的作用。当我们把y轴的零点从水面o点移到木材中心o'点，并引入坐标参数θ时，以 $y = \frac{D}{2} \sin\theta + b$ (b为o'潜入水面以下的深度，若o'潜入水面以下时b为正值，o'露出水面以上时b为负值)，代入式(7')即得到沿木材表面的动水压力分布式：

$$p = \gamma \left\{ \left(\frac{D}{2} \sin\theta + b \right) \cos\varphi + H_2 \left[1 - \left(\frac{R}{R + \frac{D}{2} \sin\theta + b} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

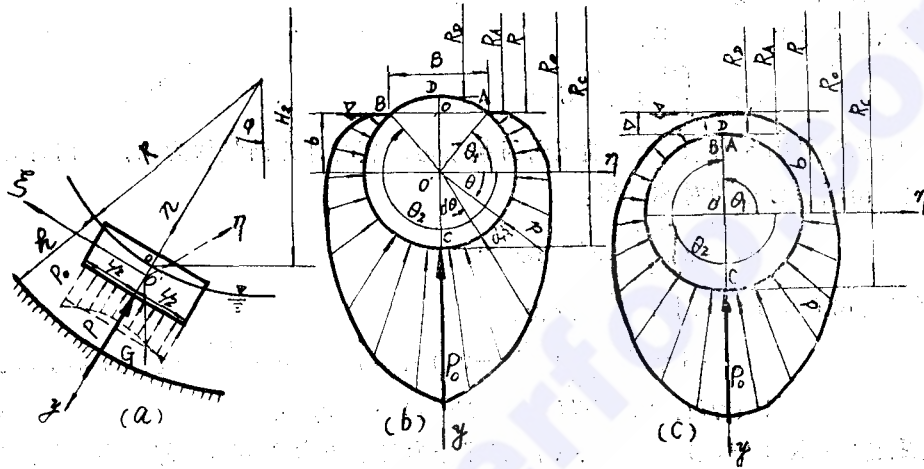


图5 作用于木材表面的动水压力

作用在木材单位长度的微小面积 $dA = \frac{D}{2} \cdot d\theta$ 上的动水压力记为 $\overline{dP_0}$ (注脚“0”表示单位长度)，其大小为：

$$dP_0 = p dA = p \frac{D}{2} d\theta. \quad (I)$$

它在y轴和η轴上的投影分别为：

$$dP_{0y} = -dP_0 \sin\theta = -p \frac{D}{2} \sin\theta d\theta; \quad (II)$$

$$dP_{0\eta} = -dP_0 \cos\theta = -p \frac{D}{2} \cos\theta d\theta. \quad (III)$$

式(II)和(III)右边的负号随所取坐标方向而定。

在y的反向取n轴，则 $\overline{dP_0}$ 在n轴上的投影为：

$$dP_{0n} = -dP_{0y} = p \frac{D}{2} \sin\theta d\theta. \quad (IV)$$

作用于木材单位长度的动水压力的合力记为 $\overline{P_0}$ ，它在n轴和η轴上的投影分别为：

$$P_{0n} = \int_A dP_{0n}; \quad (V)$$

$$P_{0\eta} = \int_A dP_{0\eta}. \quad (VI)$$

式中 A——木材浸入水中的表面积。

根据动水压力分布的对称性容易判断:

$$P_{0n} = \int_A dP_{0n} = 0.$$

则 \bar{P}_0 的大小为:

$$P_0 = \sqrt{P_{0n}^2 + P_{0\eta}^2} = P_{0\eta} = \int_A dP_{0\eta}. \quad (\text{VII})$$

其方向与 n 轴正向一致。

把式 (IV) 代入上式得:

$$P_0 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} p \frac{D}{2} \sin\theta d\theta. \quad (\text{VIII})$$

式中 θ_1 和 θ_2 见图 5 所示, 以 η 轴正向为起始边, 顺时针方向量取为正, 反时针方向量取为负。由压力分布的对称性得:

$$P_0 = 2 \int_{\theta_1}^{\pi/2} p \frac{D}{2} \sin\theta d\theta. \quad (\text{IX})$$

把 p 的表达式 (9) 代入上式并积分得:

$$P_0 = \left\{ \gamma \left[\frac{D^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) + \sin\theta_1 \cos\theta_1 \cdot \frac{D^2}{4} + bD \cos\theta_1 \right] \cos\varphi \right\} \\ + \left\{ \gamma H_2 B + \gamma D H_2 R^2 [F(\theta_1) - F(\pi/2)] \right\}. \quad (\text{X})$$

P_0 的表达式 (X) 中, 第一个花括弧内的部分为静水压力产生的“静水浮力”; 第二个花括弧内的部分为附加压力产生的“附加浮力”, 它们分别以 P_0' 和 P_0'' 表示, 则

$$P_0 = P_0' + P_0''. \quad (\text{10})$$

分析组成 P_0' 的各项可知: P_0' 等于木材所排开水体的重量乘以 $\cos\varphi$, 即

$$P_0' = \gamma V_0 \cos\varphi, \quad (\text{11})$$

式中 V_0 为单位长度的木材所排开水的体积, 数值上等于图 5 (b) 中弓形 ACB 的面积:

$$V_0 = \frac{D^2}{8} (\beta - \sin\beta), \quad (\text{12})$$

式中 $\beta = \theta_2 - \theta_1 = \pi - 2\theta_1$ 为弓形 ACB 的中心角。

再看组成 P_0'' 的各项: 第一项中 $B = D \cos\theta_1$, 为弦 AB 的长度; 第二项中的函数 $F(\theta)$ 可通过积分运算求得:

$$F(\theta) = -\frac{R_0 \cos\theta}{R_C R_D R_A} + \frac{D}{(R_C R_D)^{3/2}} \arctg \left[\sqrt{\frac{R_D}{R_C}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (\text{VI})$$

式中 R_0 、 R_C 、 R_D 、 R_A 分别为 O' 、 C 、 D 、 A 各点到坝面反弧中心轴的距离 [参见图 5 (b), (c)]

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= R + b, \\ R_C &= R_0 + \frac{D}{2}, \\ R_D &= R_0 - \frac{D}{2}, \\ R_A &= R_0 + \frac{D}{2} \sin\theta_1. \end{aligned} \right\} \quad (\text{13})$$

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, $F(\frac{\pi}{2}) = 0$; 当 $\theta = \theta_1$ 时,

$$F(\theta_1) = -\frac{R_0 \cos \theta_1}{R_C R_D R_A} + \frac{D}{(R_C R_D)^{3/2}} \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{R_D}{R_C}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_1}{2} \right) \right], \quad (14)$$

式中反三角正切取主值。

$$\text{因此} \quad P_0'' = \gamma H_2 B + \gamma D H_2 R^2 F(\theta_1). \quad (15)$$

从而得

$$P_0 = P_0' + P_0'' = \gamma V_0 \cos \varphi + \gamma H_2 (B + D R^2 F(\theta_1)). \quad (10')$$

当木材潜没水下, 即 $\theta_1 = -\frac{\pi}{2}$, $R_D = R + \nabla$, $R_C = R + D + \nabla$ (∇ 为木材上方 D 点潜入水面以下的距离), 式(10')变为:

$$P_0 = \gamma \frac{\pi D^2}{4} \cos \varphi + \gamma \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{2 H_2 R^2}{[(R + \nabla)(R + D + \nabla)]^{3/2}}. \quad (16)$$

当木材恰好全部淹没水中, 即 $\nabla = 0$ 时上式变为:

$$P_0 = \gamma \frac{\pi D^2}{4} \cos \varphi + \gamma \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{2 H_2 R^2}{[R(R + D)]^{3/2}}. \quad (17)$$

\bar{P}_0 具有以下性质:

- (1) 它的方向平行于动水压力的对称轴, 通过并指向木材横截面中心;
- (2) 比较式(10')、(16)和(17)可知, 当木材恰好全部淹没水中时, 由式(17)给出 P_0 的最大值。

当不计木材两端动水压力的作用时, 作用于木材全长的动水压力总合力为:

$$P = \int_L P_0 dl \approx \sum_{i=1}^n P_0(i) \Delta l_i. \quad (18)$$

如所取各 Δl_i 均相等, 即 $\Delta l_i = \Delta l = \frac{L}{n}$,

$$\text{则} \quad P \approx \Delta l \sum_{i=1}^n P_0(i) = \frac{L}{n} \sum_{i=1}^n P_0(i).$$

$$\text{令} \quad \bar{P}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_0(i), \quad (19)$$

$$\text{则} \quad P \approx L \bar{P}_0, \quad (20)$$

式中 L ——木材长度。

(三) 反弧段中木材的受力与运动

(1) 木材随水流作曲线运动

由于坝面反弧段的弯曲, 迫使水流沿坝面作曲线运动, 形成水流的附加压力, 即产生向心力($P - G \cos \varphi$)作用于木材上, 结果使木材在反弧段能随水流作曲线运动。

(2) 木材能浮于水面随水流作曲线运动

现以木材处于刚淹没的状态,取其单位长度来分析法向的受力情况。此时木材所受向上的力为水压力 P_0 ,其值由式(17)给出;向下的力为木材自重的法向分力和惯性离心力,合称为 F_n :

$$F_n = \gamma' \frac{\pi D^2}{4} \cos\varphi + \frac{\gamma'}{g} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{v^2}{\rho} \quad (\text{XII})$$

根据式(8) $u_y = \frac{R}{R+y} u$, 令 $y = D/2$ 时有:

$$u = \frac{R}{R + \frac{D}{2}} \sqrt{2g(H_1 - hc\cos\varphi)}$$

令 $v = u$,

而 $\rho = R + \frac{D}{2}$,

所以

$$F_n = \gamma' \frac{\pi D^2}{4} \cos\varphi + \gamma' \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{2H_2 R^2}{(R + \frac{D}{2})^3} \quad (21)$$

将式(17)中的 $1/[R(R+D)]^{3/2}$ 与式(21)中的 $1/(R + \frac{D}{2})^3$ 作比较,各乘以 $2/3$ 次方得:

$$\{1/[R(R+D)]^{3/2}\}^{2/3} = \frac{1}{R^2 + RD}$$

$$\{1/(R + \frac{D}{2})^3\}^{2/3} = \frac{1}{R^2 + RD + \frac{D^2}{4}}$$

因 $\frac{1}{R^2 + RD} > \frac{1}{R^2 + RD + \frac{D^2}{4}}$, 还有 $\gamma > \gamma'$ (γ' 为木材容重), 所以, 比较式(17)与式(21)可知:

$$P_0 > F_n$$

由此可见木材在反弧段能浮于水面而随水流作曲线运动, 而且有部分体积露出水面。至于木材浮出水面以上的高度 c 值, 可根据达兰贝尔原理确定的法向动平衡方程

$$P - G\cos\varphi = \frac{G}{g} \frac{v^2}{\rho} \quad (22)$$

进行试算得出。

(3) 木材始终平行于水流切线方向运动

对于流经溢流坝的浮木, 都有部分体积露出水面。当木材处在反弧段, 其前部有翘起趋势时(即木材转动超前于水流的转动), 则前部的 P_0 将减小, 后部的 P_0 相应增大, 因而阻止木材转动的超前; 反之, 则前部 P_0 将增大, 后部 P_0 将减小, 因而阻止木材转动的落后。我们以龚嘴溢流坝为例, 算得木材平行于水流切线方向时两端及中截面的 P_0 值沿材长呈对称分布, 力矩近似为零(即 $\varepsilon = 0$, $\omega \approx C_3$), 与前述木材运动特征一

致。因此，可以判定木材始终保持与水流切线基本平行的方向流动。

(四) 木材不碰反弧段坝面的必要条件

据以上分析，木材在坝面反弧段能浮于水面，基本平行于水流切线方向运动的前提下，若使材长 L 、材径 D 、反弧段水面曲率半径 R 及水深 h 之间保持相适应的关系，就能避免木材碰击坝面。按图 6 推得所要求的最小水深为：

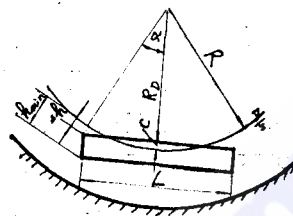


图 6 h_{min} 求解示意图

$$h_{min} = \Delta h + D \cos \alpha \approx \Delta h + D.$$

而
$$\Delta h = \sqrt{R_D^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - R,$$

故
$$h_{min} = \sqrt{R_D^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - R + D, \tag{23}$$

式中 $D=R-c$ ，为木材中截面顶点运动的曲率半径；

c ——木材中截面露出水面的高度。

或近似地按中截面恰好淹没 ($c=0$) 的情况计算：

$$h_{min} \approx \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - R + D. \tag{24}$$

这就是保持木材不碰击反弧坝面所要求的坝面最小水深。

(五) 模型及原型的验证

图 7 为龚嘴溢流坝剖面，当库水位为 520 米时，取流速系数 $\varphi=0.85$ ，理论计算的收缩水深 $h_c=2.57$ 米。如果考虑以下径级的木材：

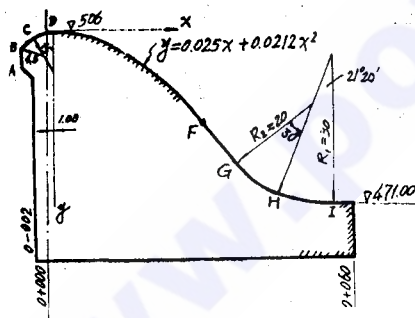


图 7 龚嘴溢流坝剖面示意图

长度 L (米)	4	6	7	8
直径 D (米)	1.0	0.7	0.4	0.3

按式 (24) 得 $h_{min}=1.11\sim 0.75$ 。从上可知：正常运行水位 520 米时， $h_c > h_{min}$ 流送上述各类木材不会碰击坝面，而且库水位降到 514 米时（相应的 $h_c=1.22$ 米），木材也不致碰击坝面，这个结论已从模型和原型观测得到了验证。

模型试验：分别用长度比尺为 1:42.5、1:70 的二元断面模型及 1:70、1:100 的枢纽模型，两者试验结果均为：当库水位为 520 米、514 米时，木材不碰坝面；但库水位为 510 米时，木材就明显碰击坝面。

原型观测：当库水位高于 514 米时木材浮于水面，不碰击坝面；若库水位低于 510 米时，木材则碰击坝面，并可听见碰击声。

二、溢流坝下游的面流漂木

上面分析了木材在溢流坝面的运动规律，这是保障木材安全过坝的一个方面；另一

方面在溢流坝下游还应保持木材的顺物流送。而木材流送取决于坝后的水流运动状态，尤其是水流衔接型式。下面依次讨论这些问题。

(一) 坝下水流衔接型式的选择

溢流坝下游水流衔接基本型式可分为底流、挑流和面流等型，对于兼有泄洪和漂木双重任务的溢流坝，只能采用无表旋滚的自由面流流态。但这种流态的稳定性较差，即要求下游水位变化范围较小。因此，必须通过模型试验来观测形成面流的条件，研究扩大面流范围的措施，以便改善漂木条件。

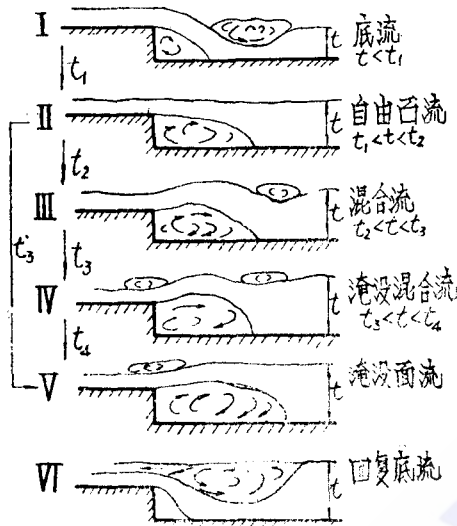


图8 流态变化示意图

我们认为面流之所以不稳定，是由于 q 、 P 、 a 、 θ 、 t 这些因子间暂时失去面流流态的平衡条件。所以，扩大自由面流流态范围的主要措施，就是选择和调整这些因子间的关系，使下游水位在较大范围内仍然保持与自由面流流态相适应的关系。所研究的措施包括：

(1) 降低护坦，增大坎高

图10系水流在I—I、II—II断面的水压力 P_1 、 P_2 作用下形成的流态。当坎高 a 值增大时，则断面I—I与II—II间的水跃体积亦增大（即惯性大）。因此，要改变水流原有运动状态，所应施加于水跃区的外力（水压力 ΔP_2 ）也需增大，这就意味着各种流态间的下游水位变幅必然会扩大。根据本次的二元试验成果和南京

(二) 面流的形成及扩大面流范围的措施

面流的形成和流态的转换主要与单宽流量 q 、堰高 P 、坎高 a 、鼻坎挑角 θ 及下游水深 t 有关。当 q 、 P 、 a 、 θ ($\theta < 180^\circ$)一定时，随着下游水深 t 的逐渐增大，将出现如图8所示的流态变化过程。二元条件下选用自由面流范围（适于漂木的面流范围）为 $t_1 \sim t_2$ ；三元条件下适宜漂木的面流范围为 $t_1^0 \sim t_2^0$ ，其意义（参见图9）再说明如下：

t_1^0 ——三元条件下从底流到自由面流的界限水深。

t_2^0 ——三元条件下从自由面流到跃首被侧向旋滚淹没一半宽度时的界限水深。

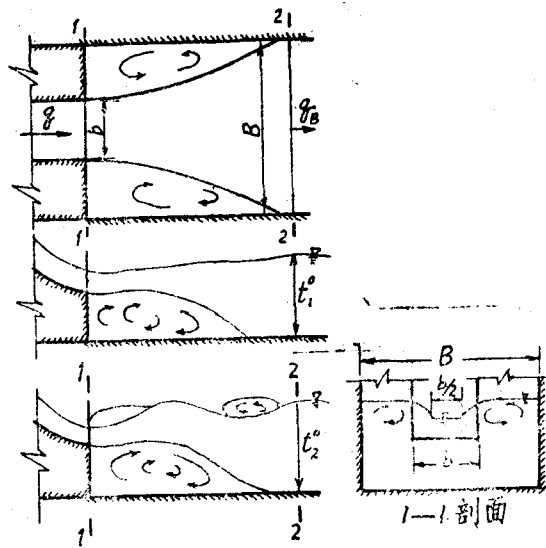


图9 三元 t_1^0 与 t_2^0 定义图

水科所的综合式〔7〕的计算结果(图11及下表)均可证明具有此种性质。

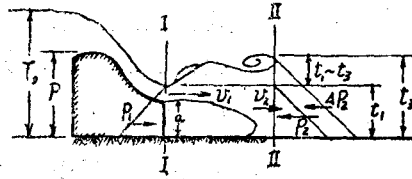


图10 面流剖面

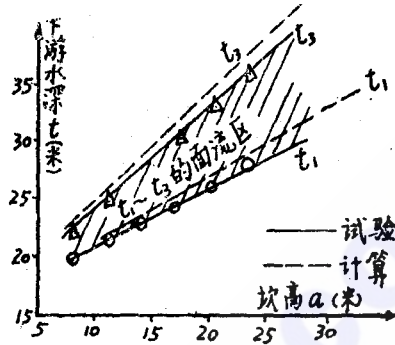


图11 坎高对面流范围的影响

坎高 a(米)*	8	14	20	23
试验的 t ₁ -t ₃ (米)	2.3	5.0	7.1	8.4
计算的 t ₁ -t ₃ (米)	3.1	4.8	6.8	7.4

* a值的变化是由于护坦高程的改变而形成

从试验资料可知:降低护坦高程的主要效果是使发生自由面流的下限下移;抬高鼻坎高程的主要效果是使自由面流消失的上限上移。所以增大坎高 a 能扩大自由面对下游水位的适应范围。

(2) 随下游水位的变化,控制闸门开启方式,逐级调整单宽流量

由面流的基本动量方程和各界限水深公式可知,坝高及来流条件一定时,面流各界限水深不仅与坎高 a 有关,而且与下游的单宽流量 q 有关。当坎高拟定后,在二元条件下,它们仅随鼻坎单宽流量 q 而变;在三元条件下,尚需引入扩散系数 β 来反映扩散后的河床单宽流量 q_B 的影响。因此可以随下游水位的变化,通过对闸门的控制,逐级调整单宽流量,使其在较大的下游水位变幅内仍能保持与自由面流相适应的关系。q 愈小,所要求的界限水深亦愈小。因此,当下游水深低于 t₁ 时,本将呈底流,但二元条件下可采用局部开启闸门,三元条件下还可只开启少数闸孔,通过水流的三元扩散,使下游河床单宽流量 q_B 减小,则所要求的 t₁ 自然降低,结果仍呈自由面流;相反,当下游水深大于 t₂ 或 t₂⁰ 时,自由面流本将消失,但可采用加大单宽流量的办法,即二元条件下可抬高库水位或降低下沉式弧门运行;三元条件下可增加开启孔数,则所要求的 t₂ 或 t₂⁰ 自然增大,故仍能保持自由面流流态。关于这种措施的效果,以龚嘴工程 520 米库水位为例,当下游水位低时只开中间的 8# 孔,随下游水位的增高逐渐开启 7#、9# 孔或 7#、8#、9# 孔,则 t₁⁰ ~ t₂⁰ 的范围可以从 3 米扩大到 8 米,其模型和原型观测结果如图 12 所示。

不过,采用此种措施时,宜在数孔溢流坝间加设导墙,以保证水流平面扩散得适

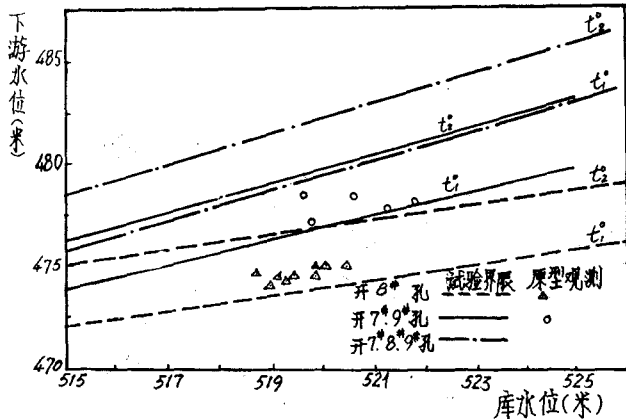


图12 龚嘴溢流坝运行期面流范围

注：△、○为自由面流

$$2 \frac{\alpha_0 q^2}{g h t} (h-t) = h' (h+2a) + (h+a)^2 - t^2$$

式中 α_0 ——动量校正系数；

φ ——流速系数；

h' ——鼻坎末端由于水流弯曲产生的附加压力高度，据式(7) h' 可表示为：

$$h' = (T_0 - a - h) \left[1 - \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \right]$$

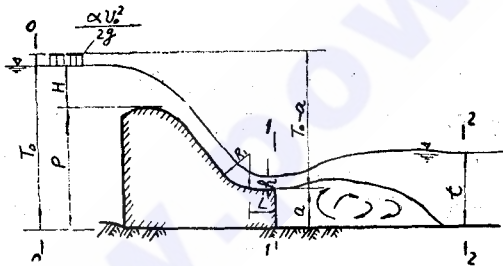


图13 面流水力计算

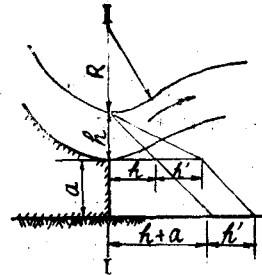


图14 鼻坎末端的水压力

但由于 R 的表达式目前尚不能确定，难于完全从理论上求解面流，故常用经验公式来计算面流各界限水深。我们认为，当溢流坝尺寸和库水位一定时，下游流态将取决于下游水压力对水跃水舌的顶托能力。就是说，当下游水深与坎高保持一定比值时，将发生某种相应的流态。因此本文取 t/a 作为各种界限水深的特征值，以 $h_K / (T_0 - a)$ 表示过坝水流的特征值，以 $(p-a)/a$ 表示溢流坝形状的特征值，以 $\beta = b/B$ 表示三元水流的扩散特征值，对本项试验研究的资料进行整理分析得出二元条件下的经验公式为：

第一界限水深

$$\frac{t_1}{a} = 0.65 - 0.09 \frac{p-a}{a} + (3.6 \frac{p-a}{a} - 0.4) \frac{h_K}{T_0 - a} \quad (25)$$

第三界限水深

当，否则两侧回流过大，将会压缩主流。

(三) 面流界限水深的计算

(1) 二元条件

本项试验研究采用鼻坎挑角 $\theta=0$ (参见图13和14)。断面0-0与1-1间的能量方程为：

$$T_0 = a + h + \frac{1}{2} h' + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h^2}$$

断面1-1至2-2的流量方程为：

$$\frac{t_3}{a} = 0.84 - 0.09 \frac{P-a}{a} + (3.7 \frac{P-a}{a} + 0.4) \frac{h_K}{T_0 - a}; \quad (26)$$

式中 h_K ——I—I断面的临界水深；其余符号意义参见图13。其适用范围：

$$\frac{P-a}{a} = 1.66 \sim 3.5, \quad \frac{L}{h} = 1.7 \sim 3.3, \quad \frac{h_K}{T_0 - a} = 0.11 \sim 0.16, \quad \theta = 0^\circ.$$

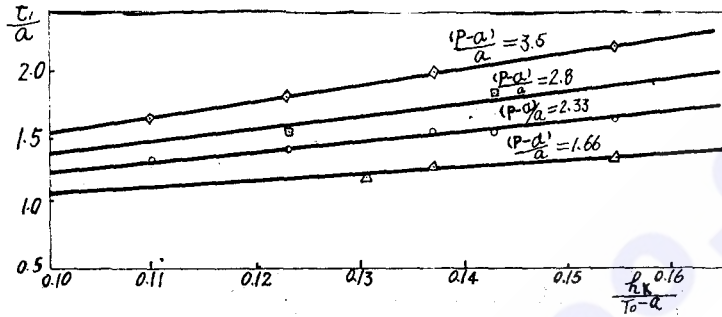


图15 二元条件 t_1 求解图

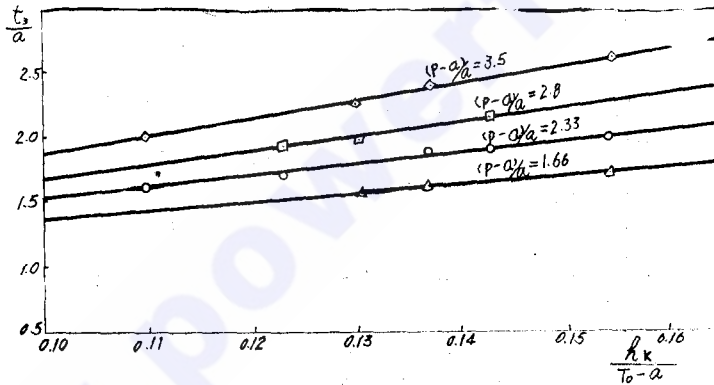


图16 二元条件 t_3 求解图

(2) 三元条件

三元条件下的能量方程和附加压力高度 h' 的表达式均与二元条件时相同，但动量方程则应为（取图17所示的 $ABCD$ 为脱离体）：

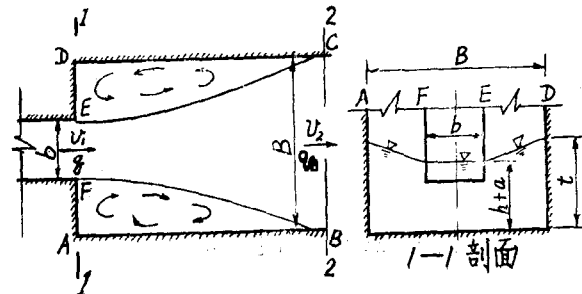


图17 三元动量方程脱离体示图

$$2 \frac{\alpha_0 b q}{g} (v_2 - v_1) = b [h' (h+2a) + (h+a)^2] + [\frac{1}{4}(B-b)(h+a+t)^2] - t^2 B.$$

AF、ED段的水面轮廓视为梯形分布。

显然，三元水流尤为复杂，更难于求得理论解。同样用前述的四个无因次特征参数对本项试验研究的资料进行整理分析得出三元经验公式如下：

第一界限水深

$$\frac{t_1^0}{a} = 0.72 - 0.385\beta + (1.8 + 10.4\beta) \frac{h_K}{T_0 - a}; \quad (27)$$

第二界限水深

$$\frac{t_2^0}{a} = 1 - 0.46\beta + (2 + 10.5\beta) \frac{h_K}{T_0 - a}. \quad (28)$$

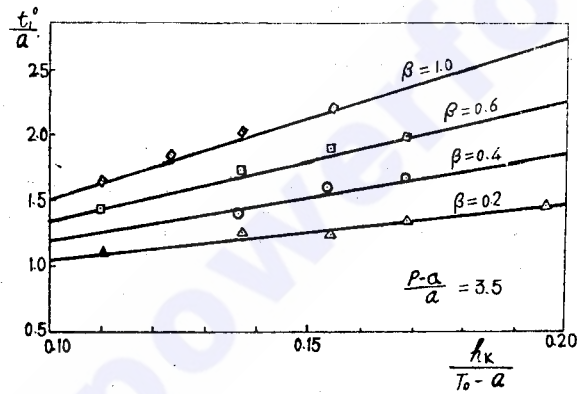


图18 三元条件 t_1^0 求解图

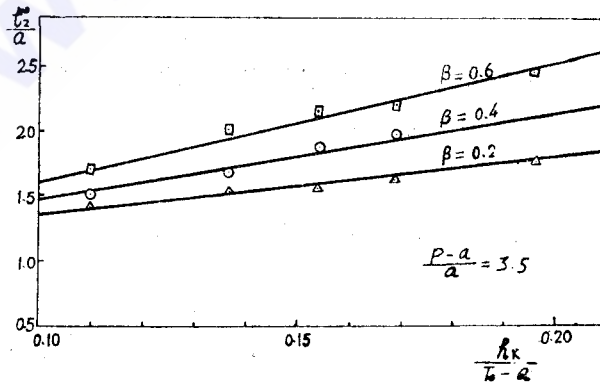


图19 三元条件 t_2^0 求解图

适用范围： $\frac{P-a}{a} = 3.5$, $\frac{L}{h} = 1.1 \sim 3.3$, $\beta = \frac{b}{B} = 0.2 \sim 1.0$.

$$\frac{h_K}{T_0 - a} = 0.1 \sim 0.2, \theta = 0^\circ.$$

三、结 论

1. 由理论分析、模型试验及原型验证表明, 在坝面水流未掺气的情况下, 木材流经坝面反弧段时能浮于水面, 始终保持与水流切线基本平行的方向作曲线运动。

2. 为了避免木材碰击坝面, 坝面收缩水深 h_c 应大于某一最小水深 h_{min} 。该 h_{min} 之值由式(23)或(24)确定。

3. 采用自由面流能达到消除水跃表旋滚, 减少木材过坝损失的目的。龚嘴工程采用了降低护坦增大坎高, 及随下游水位的变化通过控制闸门开启方式逐级调整单宽流量等措施, 使自由面流对下游水位的适应范围由3米扩大到8米。

4. 本文给出了根据该工程试验资料得出的面流界限水深〔二元情况见式(25)和(26), 三元情况见式(27)和(28)〕的经验公式。

5. 由于水流和漂木在溢流坝面和下游的运动速度很大, 粘滞力及表面张力均可忽略不计, 主要作用力为重力, 故按重力相似设计的模型, 其坝面水流及漂木运动情况与原型相似, 坝下水流及漂木运动的基本形态也与原型相似。但原型中坝下水流的掺气较重, 模型中未能模拟这种现象。

参 考 文 献

- 〔1〕华东水利学院工程力学教研组, 《理论力学》, 江苏人民出版社, 1961年9月。
- 〔2〕陈椿庭, 圆顶坝自由溢流水力特性中的曲率影响, 水利学报, 1957年第三期。
- 〔3〕Balloflet, A., Pressures on Spillway Flip Buckets, ASCE, vol. 87, No. Hy5, Sept. 1961.
- 〔4〕清华大学水力学教研组, 《水力学》, 人民教育出版社, 1965年及1981年
- 〔5〕吴持恭《流体力学》(讲稿), 1962年。
- 〔6〕水电部成都勘测设计院科研所, 具有鼻坎的溢流坝下游产生面流水跃的试验研究, 1959年。
- 〔7〕王正泉, 溢流坝面流式鼻坎衔接流态的水力计算, 水电部、交通部南京水科所, 1978年。
- 〔8〕Н·Н·БЕЛЯШЕВСКИЙ《СОПРЯЖЕНИЕ БЪЕФОВ ЗА ВОДОСЛИВНЫМИ ПЛОТИНАМИ С НОСКОМ》ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР КИЕВ-1953