

# 水筏道齿坎型式的选择

丁惠仪

(水电部成都勘测院科研所)

## 提 要

水筏道设计中,以往常只从消能观点选择齿坎型式,但对漂木来讲,除应考虑加糙消能效果以外水流结构同样起着重要作用。因此本文从分析各种坎型的水流结构特性和糙率大小着手,论述木材在不同运行方式及筏道在不同坡度条件下的适宜坎型(所提建议得到部份工程的验证)。本文还提出了一种适合排运的新齿型。即“斜方格加人字形”,其水流结构适于排运,同时消能效果亦较佳。

## 一、水筏道齿坎型式的选择原则

设置加糙齿坎的水工建筑物主要有两类,一类是泄水建筑物,它采用加糙齿坎的唯一目的是消能,所以只从糙率大小来选择所需的齿型,另一类是水筏道,其采用加糙齿坎的目的是漂木和消能,即在保证安全运送木材的前提下,通过沿程加糙消能来增大坡度减短筏道长度,增大水深减少流量,达到节省工程量和水量的目的。水槽加糙后必然引起水流结构的变化和糙率的增加。如形成各式各样的旋涡、水面波动、水流摆动等,齿坎型式不同,水流结构和糙率也不相同。

在以往的著作中,对不同的齿型常常只分述其不同的糙率特性<sup>[1]</sup>,而对其不同的水流结构特性很少论述,因此过去设计水筏道时,常常只从满足消能角度来选择齿型,但实际上对漂木来讲,除应考虑加糙消能效果以外,水流结构特性同样起着重要作用。从表1可知,糙率相近的不同齿型,因其水流结构不同和过木方式不同,其漂木效果亦大不相同。

所以水筏道齿坎的选择原则,应是在水流结构特性有利于漂木的前提下,来选择能满足消能要求的齿坎型式。

## 二、几种齿坎的糙率特性

$$\text{均匀流糙率} \quad n = \frac{WR^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q} \quad (1)$$

杨国瑞工程师对本文提了建议,在此表示感谢。

表1 国内已建水轮运行情况

工程名称	运行方式	坡度 (%)	长度 (m)	净宽 (m)	糙平	齿面形状	齿高 $\Delta$ (cm)	Q $m^3/s$	q $m^3/s$	正常水深 (m)	平均流速 (m/s)	木村速度 (m/s)	$F_r$ (出口)	出口型式	下游流态	效率 $\eta$	运行情况
龚嘴原方案 (四川)	单漂	13	380	9~6	三人形	梯形	40	105	11.7	2.0	5.85	7	1.33	平台	波状水跃	0.077	搞齿严重未运用 (水流紊乱, 秽气严重, 木村下沉槽底)
龚嘴改造方案	单漂	13~11	380	9	一字形	顺齿	20	105	11.7	1.08	10.86	12.5	2.1	平台	弱水跃	0.028	尚未施工。试验结果, 有明显改善。槽齿坎数较原方案减少11倍
洛天河 (湖南)	排运	10.9	585	6.5	梅花形	矩形	18	13	2	0.6	3.3	4.3	1.4	延长纵坡	波状水跃	0.063	可过排但不能站人 (部份齿坎磨损)
春江 (湖南)	排运	6.9	95	3.5	综合消力池	跌坎	4.2	4.2	1.2					反坡	弱水跃		良好 (行排安全, 无打排事故, 但有擦底现象)
映秀湾 (四川)	单漂	6	85	12	单梯形	矩形	20	100	8.3	1.45	5.7		1.5	平台	波状水跃	0.047	运行正常
东谷	排运	5	64	3.6	双人形加纵梁	纵=16 横=10 矩形	6.7	6.7	1.86	0.6	3.06	3.63	1.4	延长纵坡	波状水跃	0.042	很好 (木排上可乘坐多人安全过筏, 不撞边墙)
螺滩 (江西)	排运	4.05	420	4.1	双人形加纵梁	纵=15 横=8 矩形	7.05	7.05	1.72	0.55	2.63	4.84	1.2	延长纵坡	波状水跃	0.040	很好 (木排上可乘坐多人安全过筏, 不撞边墙)
叶坊 (福建)	排运	3.33	177	5	斜方格	矩形	17	11.5	2.3	0.62	3.6		1.5	平扩加反坡	波状水跃	0.031	很好 (木排运行平稳, 无碰齿现象)
岚岭 (福建)	排运	2.0~3.3	188	5	斜方格	矩形	20								波状水跃	0.035	很好

式中  $Q$ ——流量( $m^3/s$ );  
 $R$ ——水力半径( $m$ );  
 $W$ ——过水面积( $m^2$ )  
 $i$ ——坡度。

单位糙率

$$n_1 = 1/C = n/R^{1/3} \quad (\text{当 } R=1 \text{ 时, } n_1 = n) \quad (2)$$

据彼卡洛夫实验<sup>[1]</sup>, 当  $\lambda = 8\Delta$  时。

$$n_1 = (a - ca + d\beta) S_i \quad (3)$$

式中  $a$ 、 $c$ 、 $d$ ——随齿型变化的系数(见表 2);

$a$ —— $h/\Delta$ ;

$\beta$ —— $b/h$ ;

$S_i$ ——随  $i$  变化的系数(见表 3);

$h$ ——坎上水深;

$b$ ——槽宽;

$\lambda$ ——齿距;

$\Delta$ ——齿高

表 2

齿坎型式	(3) 式的系数		
	a	c	d
双人形的矩形坎	0.11610	0.00610	-0.0012
单人形的矩形坎	0.08577	0.00385	-0.0008
梅花长条形的矩形坎	0.05422	0.00210	+0.00033
一字形的矩形坎	0.04748	0.00117	+0.000075
一字形的边角加圆坎	0.05049	0.00326	+0.00021
梅花方块形的矩形坎	0.0500	0.00510	-0.0008

表 3

齿坎型式	(3) 式的 $S_i$ 值			
	$i=0.04\sim0.06$	$i=0.10$	$i=0.15$	$i=0.20$
双人形的矩形坎	0.75	0.80	1.00	1.00
单人形的矩形坎	0.75	0.90	1.00	1.00
梅花长条形的矩形坎	1.00	1.00	1.00	1.00
一字形的矩形坎	0.90	1.10	1.00	0.90
一字形的边角加圆坎	0.90	1.10	1.00	0.90
梅花方块形的矩形坎	1.00	1.00	1.00	1.00

注: 齿坎型式参阅图 1~10 及文献[1]。

分析(3)式及表 2、3 可知:

$$n_1 = f\left(\frac{h}{\Delta}, \frac{b}{h}, i, \lambda, \text{齿型}\right) \quad (4)$$

由(4)式可知,当其他因素相同时, $n_1$ 值随齿型而定,先就平面型式来看,根据(3)式及表2,当 $\alpha$ 及 $\beta$ 在常用范围内时, $n_1$ 值从大到小的排列顺序为:双人形→单人形→梅花形→一字形。根据国内已建工程(表1),可知 $n$ 值从大到小的排列顺序为:三人形→梅花形→单梯形→双人形加纵梁→斜方格形→一字形顺齿。

再就齿坎横剖面形状来看,沙马林教授提出以下计算公式<sup>[1]</sup>。

$$1000n_1 = (A - B\alpha + 10\sqrt{\beta})$$

式中  $\alpha = h/\Delta$ ,  $\beta = b/h$

A、B为随齿型变化的系数(见表4)

从(5)式及表4可知当 $\alpha, \beta$ 值在常用范围内( $\alpha \leq 21$ )时,逆齿的糙率大于顺齿。至于综合消力池形的糙率大小,目前研究尚少。

综合以上分析结果,就齿坎平面形状而论,以人字形、梯形、梅花形糙率最大,斜方格及人字形加纵梁居中,一字形最小。就齿坎横剖面形状而论,矩形、梯形和逆齿的糙率大于顺齿。

表4

齿坎横剖面形状	B	A		
		i=0.06	i=0.09	i=0.12
顺流锯齿形	0.67	19	21	22
逆流锯齿形	1.33	33	36	38

### 三、几种齿坎的水流结构特性

#### 1. 平面型式(横剖面均以矩形而论)

(1)人字形(以三人形为例) 水流及漂木状态如图1所示。从平面上看沿纵向形成了几股较强的螺旋流,紊动强烈。从横剖面上看在人字的顶部呈低凹水面,且流速大,人字的脚部呈凸起水面,表层水流是由凸起部份向低凹部份流动,底部水流是由低凹部份向凸起部分流动,因此形成数个环流。由于螺旋流将表面空气带入水中,掺气减少了水的浮力,同时螺旋流易将木材卷入水中,故木材易下沉撞底,尤其是单根木材,因其直径接近旋滚尺寸,更易被卷入水中撞底。但由于两侧呈凸起水面,环流向内翻卷,故木材不易撞边墙,单漂多沿波谷运行。

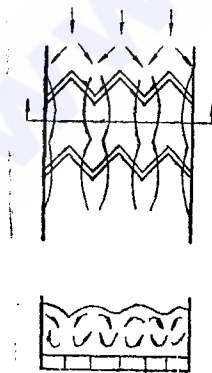


图1

还有一种改进方式——波折型,即将人字内角由 $90^\circ$ 加大为 $135^\circ$ ,水流结构与人字形相似,但旋滚强度弱些,对漂木有所改善。

螺旋流形成原因的分析:当底部水流流到人字顶部时,被人字的尖端分成两股沿人字斜边流动,此斜向水股在人字脚部碰到边墙或对面水流时就只能向上翻卷,翻卷上来的水流再去补充下一个人字的底部水流,如此纵横上下流动的结果,即形成纵向螺旋流,而其环流强度与坡度、流速成正比。

(2)人字形加纵梁(以双人形加纵梁为例) 水流及漂木状态如图2所示。从平面上看仍有几股沿纵向的螺旋流,但因纵梁的影响,其环流强度较单纯的人字形弱些。从横断面上看仍有凸起和低凹的水面,但水面高差小些,环流流速低些。仍有卷气卷木现象,单根木材

易被螺旋流卷入水中撞底,但木排因纵梁的保护不会撞齿,只能在纵梁上漂送或滑动。同样由于两侧水面高,环流向内翻卷,木材一般不撞边墙。如表 1 中的螺滩、东谷漂木道,排运情况很好。

(3)梯形(以双梯形为例) 水流及漂木状态如图 3 所示。梯形的脚部有螺旋流,水面凸起有环流,梯形的顶部水流平顺,水面低凹且流速大。螺旋流带仍有卷气卷木现象。木材多沿低凹主槽摆动流送,一般不撞边墙。

(4)斜方格 水流及漂木状态如图 4 所示。从平面上看无螺旋流,只有交错排列的波。从横剖面看,仅有微弱的水面波,无螺旋流引起的卷木卷气现象。木材的漂浮和稳定性能较好,如表 1 中叶坊、贵岭漂木道,运行很好。

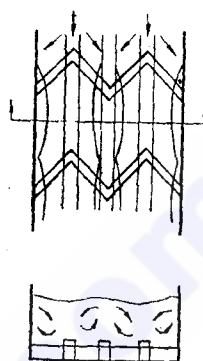


图 2

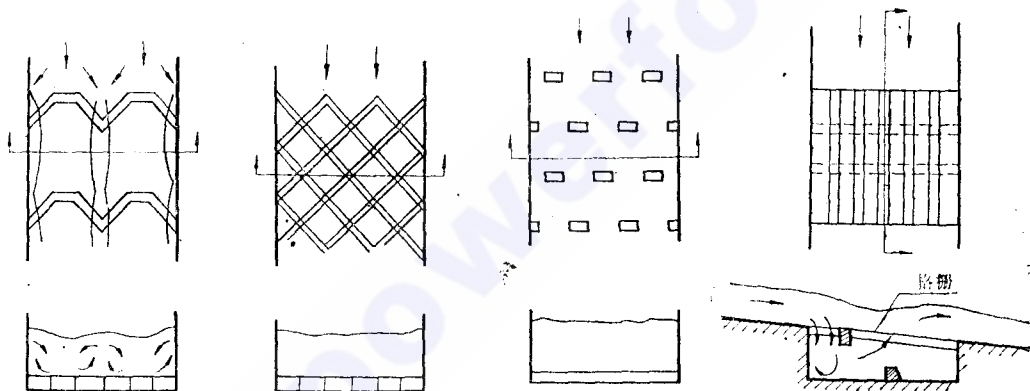


图 3

图 4

图 5

图 6

螺旋流消失的原因,由于相邻断面的加糙齿是由正反人字交错排列组成,故相邻断面的水深、流向、流速亦交错变化,故破坏了螺旋流的形成。

(5)梅花形 水流及漂木状态如图 5 所示。从平面上看无螺旋流,仅有交错排列的波峰,水流较平顺。从横剖面看,仅有微弱的水面波而无环流,无卷气卷木现象。木材的漂浮和稳定性能较好。

(6)综合消力池(跌坎式) 水流及漂木状态如图 6 所示。分段设置消力池(亦可在各消力池间沿程设置加糙齿),消力池呈自由面流流态,表面无旋滚但有涌波,格栅下呈底旋滚消能,表面水流较平稳掺气少,木材运行较平稳无撞齿现象,但木材通过波谷时易擦底部格栅。

(7)一字形 水流及漂木状态如图 7 所示。仅齿坎上有波峰,无螺旋流,掺气少水流平顺,但因紊动小、糙率低,故水深较以上几种小。

(8)斜方格加人字形 本文作者在分析了以上几种型的特性后,综合其优点,提出了此种适于排运的新齿型,以期达到木材不撞边墙,集中在中间平稳漂送的目的。

水流及漂木状态如图 8 所示。中间水流与斜方格形相同,两边水流与人字形相同。

两侧有螺旋流，其水面高有向内翻卷的环流，因此可以避免木排撞边墙，中间水面低且较平顺无环流，因此木排可在中间部份较平稳的漂送。

## 2. 齿坎横剖面

(1) 矩形、梯形或逆齿 其横剖面形状如图9所示。主要特点是迎水面较陡，即阻力大。齿坎引起的紊动，掺气亦较重，消能效果好，但木材的漂浮、稳定性能较差，若木材撞底则撞击力也较大。

(2) 顺齿 其横剖面形状如图10所示。迎水面坡度较缓，即阻力小，齿坎引起的紊动、掺气较小，水流的浮力较大。但消能效果差些，水深较矩形和逆齿小，若木材撞底则撞击力亦小，可沿底滑动而下。其迎水面坡度也可根据糙率要求适当改变其大小。

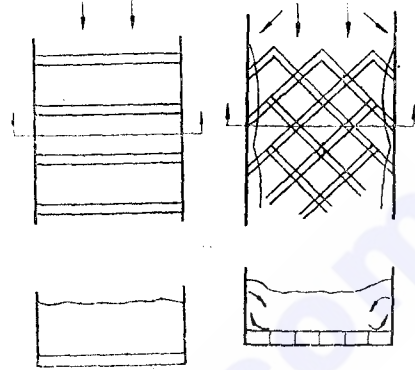


图7

图8



矩形

梯形

逆齿

顺齿

图9

图10

## 四、较优齿型的选择

下面就不同过木方式，不同坡度条件下，较优齿型的选择问题进行论述。出发点是消能效果和水流结构两方面来选择齿型。

### 1. 排运

(1) 筏道坡度大 ( $i=7\% \sim 10\%$ ) 此时因流速大，齿坎对水流的影响较大，紊动掺气亦较严重，但木排本身的稳定性较好，故宜选用中等糙率的齿型，以免因素动和掺气过重造成浮力减少导致木排撞齿。适宜的齿坎有斜方格形、斜方格加人字形以及双人形加纵梁等，但以上齿型一般消能率不太高，而陡槽坡度大，出口可能形成水跃，此时出口段可采用综合消力池，形成面流水跃以利漂木。

人字形加纵梁虽然有螺旋流，但因水流旋滚尺寸小，而木排尺寸大，螺旋流不会影响木排的稳定性，同时由于纵梁的保护可避免木排撞齿，两侧螺旋流还可以防止木排撞边墙，消能效果较佳，故适于排运。如表1中东谷、螺滩漂木道运行都很好。

(2) 筏道坡度小 ( $i$ 约小于7%) 此时因流速小，齿坎对水流的影响较小，紊动、掺气少，而木排本身的稳定性好，故宜选用糙率和紊动大的齿型。如人字形、梅花形、梯形、斜方格加人字形、斜方格，横剖面可采用矩形、梯形或逆齿。因此时即或有螺旋流其紊动性亦不大，不致于影响木排的稳定性。

### 2. 单漂



(1) 筏道坡度大 此时因流速大, 齿形对水流的影响大, 容易产生紊动和使掺气增多, 水流浮力减小, 同时单漂木材稳定性差, 所以应特别注意选型问题。宜选用糙率小、且无螺旋流的齿型。故以平面上为一字形、横剖面为顺齿, 即“一字形顺齿”较优, 因其不会形成螺旋流, 紊动小可减免卷气卷木现象, 增加木材的漂浮能力, 即使当因水深不足出现撞齿现象, 其撞击力也不会大, 亦可沿底滑动而下。必要时亦可采用齿高较小的斜方格型, 但此时决不能采用人字形或梯形齿坎, 因它形成的螺旋流旋滚尺寸与单漂直径相近, 木材可能被卷入水底撞齿。但此类齿坎消能效果差; 陡槽坡度大, 出口可能出现水跃。在出口段采用综合消力池, 形成面流水跃, 既可改善上述情况, 亦可满足漂木要求。

在分析各种齿型水流结构特性后, 笔者曾于1978年和1982年建议龚嘴漂木道改为“一字形顺齿”。该工程是坡度很大的单漂筏道, 原采用“三人形梯形齿”, 水流紊乱撞齿严重, 以后为了施工方便曾改成“三人形顺齿”, 放水结果有一定改善。后在模型试验中采用了“一字形顺齿”, 试验结果证明水流及漂木状态有明显改善, 撞齿次数减少11倍。

(2) 筏道坡度小 此时因流速小, 齿坎对水流的影响小, 紊动掺气少, 但单漂木材稳定性差, 因此也不宜选用紊动性太大的螺旋流齿型。此时以采用斜方格形、梅花形、综合消力池为宜, 齿坎横剖面可采用矩形或梯型。

## 五、结 语

设置水筏道的目的是既要安全运送木材, 还要节省工程量和水量。其加糙齿坎型式选择的原则, 应是在水流结构特性有利于漂木的前提下, 来选择满足消能要求的齿型。

由于过木方式和坡度条件不同, 对齿型将有不同的要求。如单漂木材的稳定性较排运差, 要求水流较平稳, 故应选择糙率和紊动较小的齿型。从水流结构来讲, 则不宜采用形成螺旋流的人字形和梯形齿坎, 因这些齿坎要产生卷气、卷木的水流, 易造成木材撞齿。又如坡度大时流速也大, 应选择紊动和糙率小的齿坎, 以免产生大量掺气, 水流浮力减少, 导致木材撞齿。

本文作者分析了现有几种齿型的糙率大小和水流结构特性后, 取其优点提出了一种适于排运的新齿型。即“斜方格加人字形”, 以期达到木材不撞边墙, 集中在中间部分平稳漂送的目的。在使木材运行要求和齿坎糙率及水流结构相一致的原则下, 现提出各类水筏道适宜坎型的建议如表5。

龚嘴漂木道是坡度很大的单漂筏道, 故不宜采用“三人形梯形坎”, 其改建方案采用了本文笔者建议的“一字形顺齿”, 试验证明水流及漂木状态有明显改

表5

过木方式	坡度	适宜的坎型
排 运	i大	斜方格, 斜方格加人字, 人字加纵梁(出口段采用综合消力池)
	i小	人字形, 梯形, 梅花形, 斜方格加人字形, 斜方格
单 漂	i大	一字形顺齿, 低齿斜方格(出口段采用综合消力池)
	i小	斜方格, 梅花形, 综合消力池

注: (1) 齿坎横剖面未注明者, 均为矩形或梯形。

(2) 筏道宽度 $B < 5.5\text{m}$ 时, 宜采用双人形;  $B > 5.5\text{m}$ 时, 宜采用三人形。

(3) i大一般指 $i = 7\% \sim 10\%$ , i小一般指i小于 $7\%$ 。



善。同时从表1可见东谷、螺滩、叶坊、贵岭等排运筏道，采用斜方格、双人形加纵梁齿坎，运行情况很好，均证明本文建议是可行的。

### 主要参考文献

〈1〉И·И·阿格罗斯金，《水力学》下册。

### 《四川水力发电》被评选为省科协系统优秀期刊

【本刊讯】四川省水力发电工程学会主办的《四川水力发电》学报，在今年五月十一~十二日召开的“四川省科学技术协会系统科技报刊经验交流及表彰会”上，被评选为优秀期刊；我刊唐少甫同志获优秀编辑称号。省科协主席康振黄、副主席李昌泽以及省新闻出版局、省科技情报局等领导出席会议，并向评选出的四十个优秀报刊和八十一名优秀编辑颁发奖状和证书。

同时，我们向40个荣获优秀报刊称号的单位表示祝贺！他们是：

《四川冶金》《汽车杂志》《四川建筑》《纸和造纸》《四川水力发电》《四川测绘》《机械》《电子天府》《四川建筑科学研究》《自动化与仪器仪表》《四川标准化与计量》《四川畜牧兽医》《农村经济》《四川农机》《四川农业学报》《四川林业科技》《四川蚕业》《数学教学通讯》《四川图书馆学报》《爆炸与冲击》《矿物岩石》《数学爱好者》《地理教育》《四川生理科学》《华西口腔医学杂志》《四川医学》《四川中医》《实用妇产科杂志》《生物医学工程学杂志》《课堂内外》《科学文艺》《四川体育科学学报》《四川烹饪》《计划与管理》《成都财税与会计》《电子报》《成都科技报》《四川震苑》《农民之友》《渠县科普》。

