

· 航道及通航建筑物 ·



急滩消滩指标的分析与运用

许光祥¹, 段周平¹, 胡小庆²

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 急滩是山区通航河流主要碍航滩险, 其消滩指标是急滩整治设计依据的技术性指标, 是急滩研究的重点内容之一。分析了将急滩坡流消滩指标合二为一形成综合消滩指标的应用方便性和可行性, 指出了综合指标及其理论判式结构复杂、难以实际应用的特点, 给出了综合指标及其简化的基本判式。基于实际情况, 提出了综合指标还存在一般抛物线、直线或折线型等精度更高的判式, 且指明了这些判式明确的数学意义, 指出了“搭跳”上滩过河区的消滩指标应区别对待, 宜根据实际情况灵活运用。

关键词: 急滩; 消滩指标; 坡流指标; 综合指标; 消滩判式

中图分类号: TV 133 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)07-0108-06

Analysis and application of rapids abating indicators

XU Guang-xiang¹, DUAN Zhou-ping¹, HU Xiao-qing²

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: The rapids shoal is the main navigation-hampering shoal in mountainous rivers, while the criterion of rapids abating is a technical parameter which has an influence on the regulation design of the rapids shoal channel, and it is also one of the most important focuses in the research of rapids. The paper analyzes the convenience and feasibility of a comprehensive index which combines rapids and hillside flow parameters as well as its difficulty of theoretical discrimination in practical using, and further it proposes the simplified basic discriminant. Based on the facts, the paper also points out that there are some preferable discriminants, such as parabola, straight line, broken line, etc., the precise meaning of which in mathematics is given. And it should be regarded as different parameters of rapids abating in river-crossing area of ascending rapids which uses “expanding the springboard” method.

Keywords: rapids; parameter of rapids abating; parameter of hillside flow; comprehensive index; discriminant of rapids abating

急滩在山区通航河流中普遍存在, 为山区河流主要碍航滩险类型之一^[1-2]。川江素以滩多、礁险、流急、水乱著称, 全长 1 045 km 共有 50 处急滩, 约占川江滩险总数的 1/4^[3], 如考虑险滩中急的碍航原因, 可达 1/2 以上; 澜沧江亦以滩险密布、流急水险著称, 思茅港以下 158 km 的航道内, 共有大小滩险 38 道, 其中急滩或以急为主碍航的滩险, 占 84.2%^[4]; 岷江、嘉陵江、乌江、闽江、赣江、北江、右江、沅水等山区河流, 急

滩也随处可见。因此, 急滩水流特性及整治方法是山区河流通航研究的重点内容, 受到人们的普遍关注^[1, 5-6]。

消滩水力指标 (简称消滩指标) 是判断是否成为急滩以及急滩整治设计和整治效果依据的关键指标, 目前研究也较多^[7-9]。消滩指标目前通常采用流速 v 和比降 J 配对表示 (简称坡流指标), 表 1 是根据一些文献和笔者平常研究统计的部分成果。文献 [7, 10] 针对坡流指标应用方面的一

收稿日期: 2014-11-07
作者简介: 许光祥 (1966—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及动力学、航道工程等方面研究工作。

些局限性, 将流速、比降合二为一提出了综合消滩水力指标 (简称综合指标), 并对其表达式 (消滩判式) 的合理性进行细致分析。笔者在后来的

一些研究过程中发现, 由于各航道船型、动力、技术要求的差异, 综合指标不完全遵循同一类型的消滩判式, 需要灵活运用。

表 1 急滩消滩指标部分研究成果

编号	船型		消滩指标(坡流指标)								船长/m	说明	
①	1 942 kW 顶推 9 艘	$J/\%$	0.1	0.2	0.3						271.9	长江三峡库区万吨级船队 ^[11]	
	1 000 t 级驳船	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.5	2.3	2.1								
②	881 kW 顶推	$J/\%$	1	2	3						68.0	长江上游渝叙段代表船型 ^[8]	
	1 000 t 级机驳船	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.5	3.0	2.6								
③	510 kW	$J/\%$	1	2	3	4	5	6	7	8	46.2	澜沧江 V 级航道代表船型 ^[7]	
	300 t 级机驳船	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.2	4.0	3.8	3.6	3.3	3.0	2.7	2.4			
④	960 kW	$J/\%$	0	0.5	1	2						92.6	三峡葛洲坝两坝间典型船型 ^[12]
	3 000 t 级机驳船	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.90	3.48	3.01	2.15							

1 综合指标及其理论消滩判式

船舶航行阻力由水流阻力和坡降阻力组成。根据兹万科夫水流阻力公式^[5]:

机动船水流阻力 R_{v1} :

$$R_{v1}=f_1A_s v_s^{1.83}+\xi_1\delta A_m v_s^{1.7+4Fr}$$

(1)

其中

$$v_s=(1.15\sim1.30)v_m+v_a$$

(2)

驳船水流阻力 R_{v2} :

$$R_{v2}=f_2A_s v_s^{1.83}+\xi_2\delta A_m v_s^{1.7+0.15v_s}$$

(3)

式中: f_1 为机动船摩阻系数; A_s 为船舶浸水面积 (m^2); v_s 为船与水的相对速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); ξ_1 为机动船剩余阻力系数; δ 为船舶方形系数; v_m 为船舶长度内纵向表面平均流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); v_a 为船舶上滩至少应保持的对岸航速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 一般取 $0.3\sim0.5\text{ m/s}$; A_m 为船舶浸水部分舢剖面积 (m^2); Fr 为船舶佛汝德数; f_2 为驳船阻力系数; ξ_2 为驳船剩余阻力系数。

坡降阻力为船舶重力在水流方向的分力:

$$R_j=\alpha WJ$$

(4)

式中: W 为船 (队) 排水总量 (kg); J 为船 (队) 长度范围内平均水面坡降; α 为考虑船舶上滩时水面比降局部增大的修正系数, 一般取 $1.1\sim1.2$ 。

而船舶的有效推力可简化为:

$$T=\frac{eP_e}{v_s}$$

(5)

式中: T 为船舶有效推力 (N); P_e 为船舶有效功

率 (kW); e 为有效推力系数, 根据川江长期研究结果, $e=0.38$ 。

根据船舶推力与阻力平衡原则, 则有:

$$T=R_{v_1}+\sum_{i=1}^nR_{v_{2i}}+R_j$$

(6)

式中: n 为驳船总数。

对于具体船型, 将式 (1) ~ (5) 代入式 (6), 便可建立只含 v 、 J 的关系式, 即有

$$E_C=f(v,J)$$

(7)

式中: 左侧的 E_C 为一具体的数值, 称为综合消滩指标; 右侧 $f(v,J)$ 称之为消滩判式。令 $E=f(v,J)$, 如有某急滩的一组 v 、 J 数据, 代入消滩判式便可获得一个 E 值, 假如 $E>E_C$ 则表示为急滩碍航, 否则为消滩。

但是, 综合指标的消滩判式很复杂, 并且 v 还是隐含参数, 难以实际应用, 需要简化。

2 综合指标及其消滩判式的简化

2.1 综合指标的基本简化判式

船舶航行阻力由水流阻力和坡降阻力组成, 水流阻力通常与流速的平方成正比, 坡降阻力为船舶重力在水流方向的分力, 即与比降成线性比例。当船舶均匀航行时, 其航行阻力和有效推力应达到平衡, 则有:

$$T=\alpha WJ+\frac{\beta v^2}{2g}$$

(8)

式中: β 为与船型、流速、对水航速等有关综合

系数； g 为重力加速度。

将式(8)两侧同除以 β ，注意到其具有长度量纲，并引入船长 L ，可得：

$$E_c = \lambda LJ + \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

式中： $E_c = T/\beta$ ； $\lambda L = \alpha W/\beta$ ，其中 λ 可理解为船长的倍数， L 为船长。

式(9)便是简化的综合指标及其判式(简称基本判式)，其中左侧 E_c 便是将流速、比降合二为一的综合指标，为一具体数值；其右侧 $E = \lambda LJ + \frac{v^2}{2g}$ 便是简化的基本判式。可以看出，基本判式在 v - J 坐标系中体现为无一次项的抛物线。

2.2 综合指标基本判式的可行性

首先，根据式(7)便可获得配对出现的坡流指标(表1)。再采用最小二乘法，便可将坡流指标转换为综合指标及其相应的判式。如表1所列4种船型的综合指标及其基本判式分别为：

$$\begin{cases} E_{c1} = 1.73LJ + \frac{v^2}{2g} \\ E_{c2} = 2.06LJ + \frac{v^2}{2g} \\ E_{c3} = 1.91LJ + \frac{v^2}{2g} \\ E_{c4} = 2.90LJ + \frac{v^2}{2g} \end{cases} \quad (10)$$

计算得 $E_{c1} = 0.365$ ， $E_{c2} = 0.756$ ， $E_{c3} = 0.996$ ， $E_{c4} = 0.758$ 。

图1是按综合指标基本简化判式拟合的曲线，可以看出，曲线与 (v, J) 点相关程度相当高，4种船型的最大偏差仅 $\pm 3.7\%$ 。因此，作为简化的综合指标基本判式具有较高的精度，实际应用是可行的。

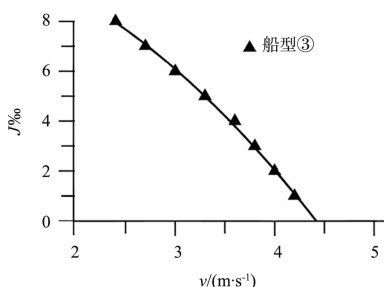
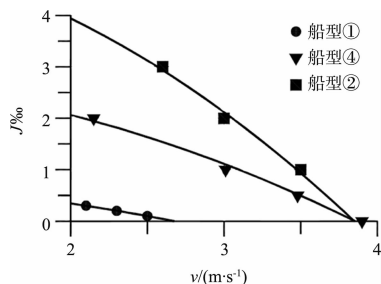


图1 各船型综合指标基本型曲线

2.3 综合指标的优点

与坡流指标相比，综合指标的最大优点是将两个指标变换为一个指标，使得应用十分方便。以船型④为例分析，综合指标的方便性体现在：

1) 可方便地判断出某滩点是否成滩。如某滩点 $v = 3.12$ m/s、 $J = 1.22‰$ ，将其代入式(10)的最后一式，得 $E (=0.824) > E_c (=0.758)$ ，说明成滩。而坡流指标需要通过内插或图形才能判断，并且内插还需要知道内插方式，实际上综合指标也为坡流指标提供了合适的内插方式。

2) 可直观地判断出碍航程度。如有两个滩点 $v_1 = 3.12$ m/s、 $J_1 = 1.22‰$ 和 $v_2 = 3.72$ m/s、 $J_2 = 0.61‰$ ，可分别算出 $E_1 = 0.824$ 、 $E_2 = 0.870$ ，说明第2点碍航更严重。而坡流指标是很难做到这一点的。

3) 可从一个简单的图中判断出多种信息。如通过图2所示的船型④综合指标随流量、里程的变化情况，可判断出：流量 $Q = 30\,000$ m³/s 时，综合指标 E 均小于临界指标 E_c ，整个河段不成急滩碍航；流量 $Q = 40\,000$ m³/s 时，约在里程 31.9 ~ 32.3 km 范围内出现急滩碍航，且约在里程 32.25 km 处碍航最严重；流量 $Q = 50\,000$ m³/s 时，约在里程 29.0 ~ 30.3 km 和 31.7 ~ 32.3 km 内出现两段急滩碍航，且在里程 31.95 ~ 32.25 km 河段内碍航最严重。而对于坡流指标，由于多了一个参数，根本无法用一个简单的图作出诸多判断。

4) 物理意义明确。式(10)为采用单位能量表示的有效推力和航行阻力，其物理意义为有效推力和航行阻力的对比。

5) 综合指标与坡流指标转换方便。由式(10)便可很容易获得配对出现的坡流指标。

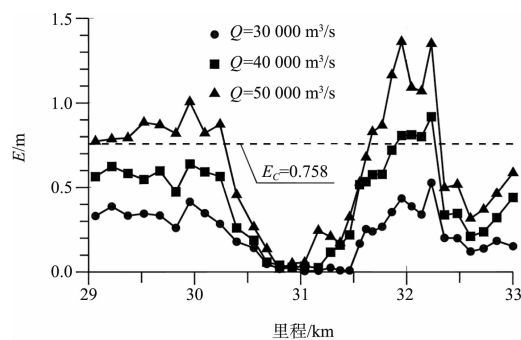


图2 船型④综合指标（基本判式）沿程变化

6) 综合指标也克服了坡流指标采用不连续的数值表示的不足。

3 综合指标的灵活运用

前面已经述及，用无一次项的抛物线表达的综合指标基本判式已有相当高的精度，实际应用也是可行的。但笔者在实际研究过程中发现，综合指标还可以用其它类型的消滩判式，使精度更高（几乎为 100%），应用更为方便。

3.1 综合指标的其它判式

从图 1 可以看出，4 种船型的 v 、 J 关系均不完全遵循综合指标基本判式，船型①、④为直线，船型②为一般抛物线，船型③为折线（图 3）。实际上，水流阻力与流速的平方成正比是理论上的，实际上由于水流条件、船型、编队、窄浅水效应、兴波阻力等复杂性，水流阻力不完全与流速的平方成正比，式(1)、(3)也体现了这一点。

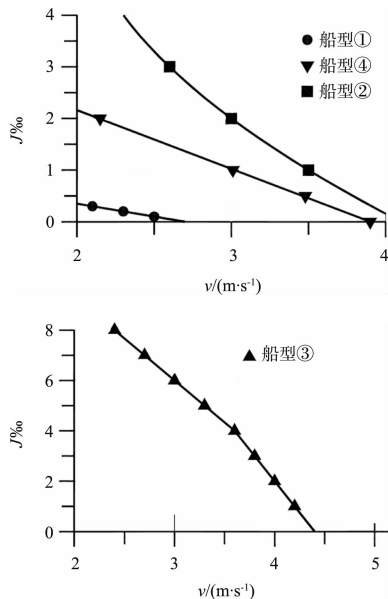


图3 各船型综合指标其它判式曲线

由此，可以将表 1 中 4 种船型的综合指标进一步简化为：

船型①为直线型：
$$E_{C1} = v + 2.0J \tag{11}$$

船型②为一般抛物线型：
$$E_{C2} = v + 0.65J - 0.05J^2 \tag{12}$$

船型③为折线型：
$$E_{C3} = \begin{cases} v + 0.2J (J \leq 4\text{‰}) \\ v + 0.3J (J > 4\text{‰}) \end{cases} \tag{13}$$

船型④也为直线型：
$$E_{C4} = v + 0.879J \tag{14}$$

计算得 $E_{C1} = 2.7$ ， $E_{C2} = 4.1$ ， $E_{C3} = 4.4$ ($J \leq 4\text{‰}$)、 4.8 ($J > 4\text{‰}$)， $E_{C4} = 3.9$ 。式(11)~(14)中，流速 v 的单位取 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，比降 J 的单位取‰。

与综合指标基本判式相比，其与坡流指标的相关度达到 100%（图 3），应用更为方便和准确。仍以船型④为例，将图 2 的原始数据按式(14)的直线型判式计算综合指标，其沿程变化趋势与图 2 基本一致（图 4），其成滩流量、成滩范围、碍航最严重河段等与图 2 得出的判断基本一致。

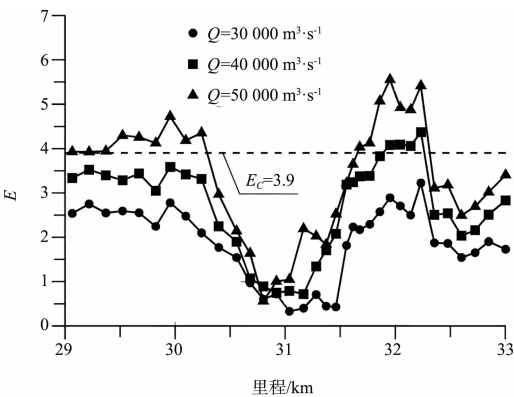


图4 船型④综合指标（直线判式）沿程变化

3.2 综合指标的数学意义

综合指标除基本判式具有明确的物理意义和和谐的因次外，其它类型的判式不仅物理意义不太明确，且因次也不和谐，但是其数学意义却十分明确。它是通过坐标转换，将 (v, J) 坐标系下的任意曲线转换为 (X, E) 坐标系下的水平线（图 5），其中 X 可以是 v 、 J 、 Q 、里程等任一变量，这样成滩判断更为快捷，应用更加方便。

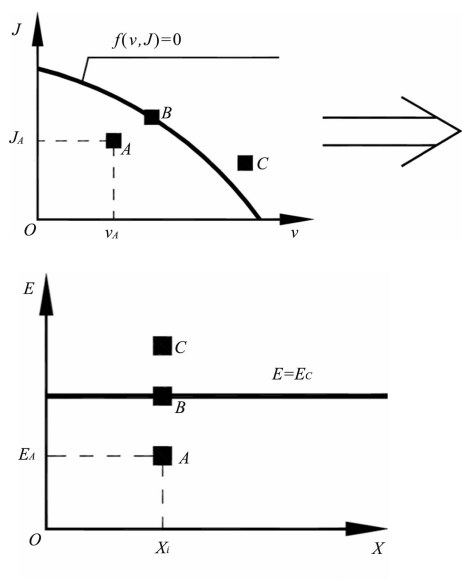


图5 综合指标的数学意义

对于同一断面的3级流量,其实测 v 、 J 值在 (v, J) 坐标系下可点绘为A、B、C共3点(图5)。其中点A位于曲线 $f(v, J) = 0$ 左下区,表明不成滩;点B位于曲线上,表明处于成滩临界状态;点C位于曲线右上区,表明成滩碍航。通过 $E = f(v, J)$ 坐标转换后,变为在 (X, E) 坐标系下的同一里程处对应的3点。点A、B、C分别位于 $E = E_c$ 水平线的下方、线上、上方,表明不成滩、临界状态、成滩,与转换前相对位置完全一致,但直观性更强、应用更为方便。

3.3 特殊水流条件的应用

一般山区河流,洪水期水位暴涨暴落,比降变化较快,以及电站泄洪形成的泄水波等,对通航水流的影响主要体现在增加了附加水面比降。对于这种特殊水流条件,只要将附加比降考虑在水流坡降 J 内,本文提出的综合指标方法仍然是适用的。

4 过河区综合指标的灵活运用

4.1 “搭跳”上滩

如图6所示的错口突嘴型急滩,突嘴上、下游两侧存在缓流带,上行船舶可沿缓流带驶至滩口下端,然后横渡冲到对岸突嘴上游的缓流带上行,这种航行方法俗称“搭跳”上滩。

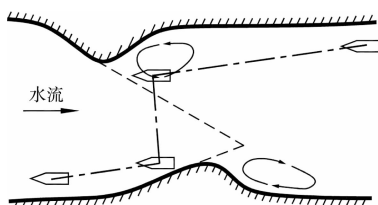


图6 急滩“搭跳”上滩

“搭跳”上滩需要船舶从一岸横渡到另一岸,此船舶横渡的主流水域即为过河区。过河区一般允许船舶上滩航速为零或负值,即允许式(2)中的 $v_a \leq 0$ 。因此,过河区的消滩指标应高于一般急滩的非过河区河段。

4.2 过河区的消滩指标

由于过河区的对岸航速允许 $v_a \leq 0$,说明在相同比降和对水航速情况下(航行阻力相同),可允许更大的通航流速。为了安全起见,过河区取 $v_a = 0$,并取浅水、狭航道、紊流等影响的流速修正系数为1.15,则有:

$$v_s = 1.15v_{m1} + v_a = 1.15v_{m2} \quad (15)$$

$$v_{m2} = v_{m1} + v_a/1.15 \quad (16)$$

式中: v_{m1} 为非过河区流速; v_{m2} 为过河区流速。

非过河区上滩航速通常取 $v_a = 0.5 \text{ m/s}$,则 $v_{m2} = v_{m1} + 0.43 \text{ m/s}$ 。这说明坡流消滩指标中,每个比降对应的流速可增大 0.43 m/s 。以船型④直线型综合指标为例,其过河区综合指标增加为4.33,消滩判式则不变,如式(17)所示:

$$E_{c4} = 4.33 = v + 0.879J \quad (17)$$

船型④在滩段里程31.9~32.3 km范围内实际上为过河区(图7),如整个河段均按非过河区滩段判断,流量 $Q = 40\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,里程31.9~32.3 km范围内成滩碍航(图4),但按非过河区和过河区分开判断,流量 $Q = 40\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时基本不碍航(图7)。采用后者的判断方式才符合实际。

对于 $v_a < 0$ 的情况, v_a 究竟取多少与滩段错口长度有关。实际应用中可根据错口长度确定,这里不再赘述,可参考有关文献[1,7]。

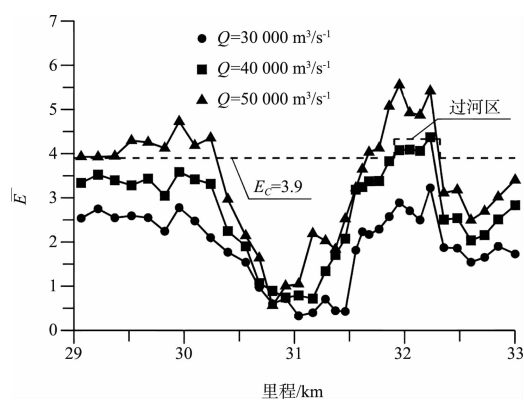


图 7 船型④综合指标 (含过河区) 沿程变化

5 结语

- 1) 将流速、比降表示的急滩消滩指标 (坡流指标) 合二为一形成综合指标, 大大提高了消滩指标应用的方便性。
- 2) 基于兹万科夫方法等航行阻力与船舶有效推力平衡的原则, 推导出的综合指标及其理论判式, 公式结构复杂、难以实际应用。采用坡流指标数值拟合获得的综合指标及其简化的基本判式, 不仅结构简单、应用方便, 且具有较高的精度。
- 3) 实际工程中, 基本不存在完全符合综合指标基本判式 (无一次项的抛物线) 的消滩指标, 而是一般抛物线、直线或折线型等判式, 采用此类判式, 精度基本可达到 100%, 应用也更加方便, 且具有明确的数学意义, 可根据实际情况灵活应用。
- 4) 对于需要“搭跳”上滩的急滩, 其过河区与非过河区的消滩指标应有所不同, 需要区别处理和灵活运用。
- 5) 综合指标确定的方法是: 根据式(7)的理论判式或实船试验、船模试验等其它方法获得一系列

坡流指标组合, 再以此拟合出简单的综合指标及其消滩判式。其中采用基本判式物理意义最明确、直线判式应用最方便, 完全拟合曲线精度最高。

参考文献:

[1] 《山区航道整治》三结合编写组. 山区航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1975.

[2] 曹民雄. 山区河流急流滩险航道整治技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.

[3] 长江航道局. 川江航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

[4] 云南省航务管理局, 重庆交通大学. 澜沧江国际边境河流急流滩通航水力指标研究报告[R]. 昆明: 云南省航务管理局, 2008.

[5] 周冠伦. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[6] 胡旭跃. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

[7] 许光祥, 邓明文, 童思陈, 等. 急滩通航水力工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[8] 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学. 长江宜宾至重庆段航道治理关键技术研究—长江叙渝段标准船型自航上滩水流指标研究[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2007.

[9] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 川江上游卵石急流滩消滩水力指标研究[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 67-72.

[10] 许光祥, 曾锋. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.

[11] 交通部科技教育司, 三峡工程航运领导小组办公室. 长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集[M]. 湖北: 武汉工业大学出版社, 1993.

[12] 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程模型试验研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2013.

(本文编辑 武亚庆)

欢迎投稿 欢迎订阅