

· 整治技术 ·



长江宜宾—重庆河段急滩消滩水力指标研究*

胡小庆

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 急滩是山区河流浅滩、急滩和险滩三大主要碍航滩险类型之一。介绍和评述了确定消滩水力指标的5种主要方法: 经验分析法、航行阻力推算法、实船试验法、船模试验法和数学船模法。采用航行阻力推算法和船模试验法对长江宜宾至重庆河段急滩消滩水力指标进行研究, 确定了消滩比降、流速组合, 可作为急滩整治设计依据的关键参数。

关键词: 山区河流; 急滩; 水力指标; 航行阻力; 船模试验

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0077-04

On hydraulic parameters of rapids shoal abating for Yibin-Chongqing section in the Yangtze River

HU Xiao-qing

(Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: The rapids shoal is one of the three navigation-hampering shoal types in mountain rivers: shoal, rapids shoal, dangerous shoal. This paper introduces and evaluates the five available methods for determining the hydraulic parameters of the rapids shoal abating, i.e. experiential analysis method, resistance of navigation method, prototype vessel test method, model vessel test method and mathematical model vessel test method. According to the typical standard ship type, this paper studies the hydraulic parameters of the rapids shoal abating for Yibin-Chongqing section in the Yangtze River by the resistance of navigation method and model vessel test method. It may be applied to the regulation design of the rapids shoal channel.

Key words: mountainous river; rapids shoal; hydraulic parameter; resistance of navigation; ship model experiment

长江宜宾—重庆河段为典型山区河流, 急滩普遍存在, 是山区河流浅滩、急滩和险滩等三大主要碍航滩险类型之一。坡陡流急是急滩碍航的直接原因, 消滩水力指标是判定船舶能否自航上滩的临界水流条件, 当滩段比降、流速超过该指标则认为成滩碍航。消滩水力指标是急滩整治设计依据的关键参数, 定得过高或过低都会对整治带来不利影响。过高, 则船舶仍不能自航上滩, 整治不彻底; 过低, 则造成工程量和投资增加, 同时还可能恶化上游滩险。国内学者^[1-9]对急滩消

滩水力指标进行了研究, 给出了特定河段特定船型的判别标准, 具有一定的指导意义。

长江宜宾—重庆河段, 长384 km, 航道等级Ⅲ级, 航道尺度2.7 m × 50 m × 560 m (水深 × 航宽 × 弯曲半径), 保证率98%, 通航由1 000 t级船舶组成的船队。设计代表船型为881 kW推轮梭顶1艘1 000 t驳船组成的船队。

1 消滩水力指标确定方法的选定

目前, 确定消滩水力指标的方法主要有经验

收稿日期: 2011-03-05

*基金项目: 西部交通建设科技项目(200532800029)

作者简介: 胡小庆(1973—), 男, 高级工程师, 从事航道整治科研及设计工作。

分析法、航行阻力推算法、实船试验法、船模试验法和数学船模法等。经验分析法是根据驾驶人员经验确定成滩或消滩水位，然后获取相应水位时的比降、流速，便是消滩水力指标。航行阻力推算法是根据力学原理，即船舶航行阻力与额定条件下的有效推力相等时便为成滩临界条件。实船试验法是通过船舶上滩的原体观测来确定消滩水力指标的方法。船模试验法确定消滩水力指标的基本方法与实船试验法相同，只是将实船变为船模，将实际河流变为模型河流或室内水槽。数学船模法是根据牛顿第二定律，将船舶运动视为前进、横移和旋回的复合运动，建立船舶操纵运动方程式，然后采用差分等方法求解，以模拟船舶在指定水流条件下航行过程的一种计算方法。

经验分析法方便简单、省时省力，但准确确定有一定难度，通常作为参考性指标。航行阻力推算理论扎实，但难以考虑特殊条件的影响；实船试验法最具真实性，但试验费用高、周期长，且完全确定一系列水力指标较为困难。船模试验法与实船试验法相比，试验方案灵活、重复试验便捷、水流条件可控，但浅水效应以及特殊条件的影响难以体现，缩尺效应也有一定影响。数学船模法精度难以与河工模型相比，目前应用还不多见。

由于水流及船舶运动均有较强的随机性，加之各种方法均有其局限性，采用一种方法通常难以准确确定。综合比较各种方法的优劣，长江宜宾—重庆河段消滩水力指标首先采用航行阻力推算法计算消滩比降、流速的系列组合，然后用船模试验法检验其指标是否正确并进行有关参数率定，最终确定消滩水力指标。

2 航行阻力推算法

2.1 航行阻力推算法

船舶上滩受到的阻力即航行阻力，包括水流阻力和比降阻力两部分。在船舶有效推力已知的情况下，当航行阻力与有效推力平衡时，即可获得消滩水力指标（图1）。

1) 有效推力计算。

$$T = \frac{eP_e}{v_s} \quad (1)$$

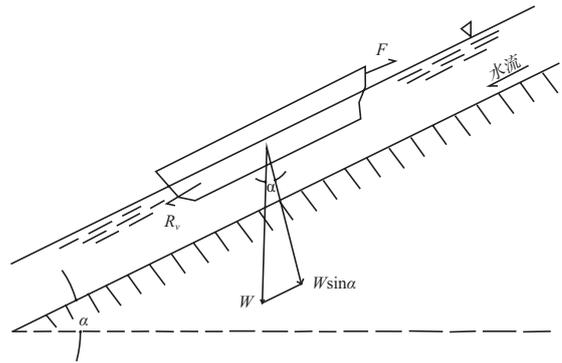


图1 船舶上滩受力示意

式中： T 为船舶有效推力； P_e 为船舶有效功率； e 为有效推力系数； v_s 为船舶对水航速， $v_s = v + v_a$ ； v 为表面流速； v_a 为船舶对岸航速。

2) 航行阻力计算。

$$R = R_J + \sigma(R_{v_1} + R_{v_2}) = R_J + \sigma(R_{v_1} + \sum_{i=1}^n R_{v_{2i}}) \quad (2)$$

$$R_J = \alpha W J \quad (3)$$

$$R_{v_1} = f A_s v_s^{1.83} + \xi \delta A_m v_s^{1.7+4F_r} \quad (4)$$

$$R_{v_2} = f A_s v_s^{1.83} + \xi \delta A_m v_s^{1.7+0.03v_s} \quad (5)$$

式中： R 为船舶航行阻力； R_J 为船舶比降阻力； R_{v_1} 为机动船水流阻力； R_{v_2} 为驳船水流阻力； σ 为船舶编队系数； n 为驳船数量； W 为船舶总排水质量； J 为船舶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； f 为摩阻系数； v_s 为船舶对水航速，考虑到航道狭窄、浅水、紊流等影响，需对航速进行修正，即 $v_s = \eta v_{cp} + v_a$ ， η 为航速修正系数； v_{cp} 为船舶长度内纵向表面平均流速； ξ 为船舶剩余阻力系数； F_r 为船舶傅汝德数； A_s 为船舶浸水面积， $A_s = L(C_1 T + \delta B)$ ， L 、 B 、 T 为船舶长、宽、吃水， C_1 为修正系数， δ 为船舶方形系数； A_m 为船舳剖面面积， $A_m = \beta B T$ ， β 为船舶横断面系数。

2.2 航行阻力推算法计算结果

采用881 kW推轮梭顶1艘1 000 t驳船组成的船队作为设计代表船型，其船舶航行阻力计算中各参数取值见表1。

航行阻力推算法先给定比降（ $J=1.0‰$ 、 $2.0‰$ 、 $3.0‰$ ），再计算不同流速时的有效推力和航行阻力，当有效推力略大于航行阻力时，该比降、流速组合即为一组消滩水力指标。计算结果见表2。

表1 设计代表船型航行阻力计算中有关参数取值

船型	L/m	B/m	T/m	P_e/kW	W/t	e	σ	f	δ	β	C_1	ζ	A_f/m^2	A_m/m^2	fA_f/m^2	$\zeta\delta A_m/m^2$
推轮	46	10.0	2.9	881	1 162	0.48	1.0	0.17	0.58	0.93	1.80	1.85	506.92	26.97	86.18	28.95
驳船	75	10.5	2.4	881	1 162	0.48	1.0	0.17	0.80	0.99	2.00	6.00	990.00	24.95	168.30	119.75

表2 设计代表船型有效推力、航行阻力

J/‰	$v/(m \cdot s^{-1})$	$v_d/(m \cdot s^{-1})$	η	T/kN	R/kN
1.0	4.0	0.5	1.15	94.00	94.00
2.0	3.7	0.5	1.15	100.71	96.16
3.0	3.4	0.5	1.15	108.46	98.97

3 船模试验法

3.1 船模试验法简介

船模试验法是通过试验水槽调整不同的比降、流速组合的水流条件，应用船模进行船舶上滩试验，通过对船模的航行要素和操纵要素的测试分析，即可获得消滩水力指标。

1) 试验水槽：试验水槽长22 m，宽2.3 m，高0.5 m；试验最大流量可达200 L/s；试验水深不小于6 cm；测控精度原体流速 ± 0.7 cm/s，水位 ± 0.7 cm，流量 $\pm 3\%$ 。

2) 船模参数：几何比尺1:100正态，标准吃水2.7 cm，静水航速0.5 m/s，舵角左 35° ~右 35° 。通过“Z”形试验对船模操纵性能进行率定和尺度效应修正。

3) 测控设备：进口流量由电磁流量计控制；尾门水位由带微调的翻板控制；水位采用量筒和游标卡尺组成的量测系统，精度0.1 mm。

4) 试验方法：以航行阻力推算法计算的消滩水力指标为基础，固定比降，在相应流速附近确定2~3个流速在水槽内分别进行试验，以寻求上滩困难时的比降、流速组合。



图2 试验水槽内船模上滩试验

3.2 船模试验法试验成果

比降 $J \geq 3\%$ ，流速 $v \leq 3.4$ m/s等高比降、低流速组合的水流条件在水槽内难以实现。因此，试验水槽内仅进行了 $J=1.0\%$ ， $v=4.00$ m/s， $J=1.5\%$ ， $v=3.75$ m/s和 $J=2.0\%$ ， $v=3.50$ m/s的船模上滩试验。试验成果见表3。

表3 设计代表船型船模试验成果

比降/‰	水深/m	流速/($m \cdot s^{-1}$)			最大舵角/度		最大漂角/度		航速/($m \cdot s^{-1}$)			相应比降、流速组合时航速/($m \cdot s^{-1}$)
		最大	平均	最小	右	左	右	左	最大	平均	最小	
1.0	12.8	3.93	3.87	3.76	9.45	9.39	12.38	6.61	1.11	0.93	0.62	0.81 (1.0‰-4.00 $m \cdot s^{-1}$)
	13.0	4.13	4.11	4.07	10.23	9.59	17.07	16.05	0.85	0.70	0.41	
	13.0	4.41	4.30	4.25	7.05	12.85	19.26	18.39	0.65	0.49	0.20	
1.5	9.0	3.69	3.56	3.42	5.59	3.69	7.75	2.34	1.15	0.97	0.90	0.77 (1.5‰-3.75 $m \cdot s^{-1}$)
	9.5	3.76	3.66	3.57	8.62	8.06	9.17	3.10	0.99	0.85	0.76	
	10.2	4.00	3.99	3.95	9.07	4.06	15.56	10.74	0.74	0.57	0.46	
2.0	6.5	3.35	3.31	3.26	4.71	6.56	5.29	3.94	0.89	0.84	0.76	0.65 (2.0‰-3.50 $m \cdot s^{-1}$)
	7.0	3.74	3.60	3.46	7.38	0.77	12.96	5.49	0.67	0.55	0.45	

注：试验数据已换算成原体值。

4 船模试验法对航行阻力推算法的航速修正系数率定

4.1 系列消滩水力指标比较

从表2和表3可见，两种方法获得的系列消滩

水力指标绝大多数相差较小，且变化趋势一致，变化规律相同，说明两种方法获得的成果基本一致。

4.2 航行阻力推算法航速修正系数率定

采用航行阻力推算法计算航行阻力，在不同

比降情况下船舶对水航速修正系数各有不同,应根据船模试验法试验成果率定不同比降的航速修正系数。计算表明,当比降 $J=1‰, 1.5‰, 2‰,$

航速修正系数取1.00, 1.12, 1.18时,航行阻力推算法计算结果与船模试验法试验成果吻合更好。计算结果见表4。

表4 根据船模试验法率定航速修正系数后设计代表船型有效推力、航行阻力

比降/ $‰$	水深/m	流速/ $(m \cdot s^{-1})$	对岸航速/ $(m \cdot s^{-1})$	航速修正系数	有效推力/kN	航行阻力/kN
1.0	12.8	3.87	0.94	1.00	87.94	83.39
	13.0	4.11	0.70	1.00	87.94	83.41
	13.0	4.30	0.49	1.00	88.30	82.86
1.5	9.0	3.56	0.98	1.08	93.17	92.12
	9.5	3.66	0.86	1.12	93.58	90.65
	10.2	3.99	0.51	1.12	93.58	91.51
2.0	6.5	3.31	0.85	1.18	101.68	98.37
	7.0	3.60	0.55	1.18	101.92	98.05

5 急滩消滩水力指标的确定

由于在试验水槽中各组次船模上滩试验的水深均较大,而长江宜宾—重庆河段急滩原水深一般为4~5 m。考虑浅水对船舶航行的影响,在确定消滩水力指标时应适当加大航速修正系数。当比降 $J=1‰, 2‰, 3‰,$ 航速修正系数取1.15, 1.25, 1.30,计算消滩流速 $v=3.9 m/s, 3.5 m/s, 3.1 m/s。$ 计算结果见表5。

表5 设计代表船型消滩水力指标

比降/ $‰$	流速/ $(m \cdot s^{-1})$	有效推力/kN	航行阻力/kN
1.0	3.9	96.13	90.60
2.0	3.5	105.75	101.02
3.0	3.1	117.50	104.17

6 结语

1) 确定消滩水力指标的方法主要有经验分析法、航行阻力推算法、实船试验法、船模试验法和数学船模法等。对于复杂的急滩应采用综合的研究方法,即综合两种或多种方法同时进行联合研究,取长补短,相互弥补和验证,以便更为准确地确定消滩水力指标。

2) 长江宜宾—重庆河段急滩消滩水力指标采用航行阻力推算法和船模试验法进行综合研究,最终确定消滩比降、流速组合为 $1.0‰-3.9 m/s, 2.0‰-3.5 m/s, 3.0‰-3.1 m/s,$ 可作为该河段急滩整治设计依据的关键参数。

3) 航行阻力推算法难以考虑横流、斜流、

风、浪等环境状态因素,驾驶熟练程度的人为操作因素,以及不同河道滩险特征等特殊条件的影响;船模试验法浅水效应以及风浪、操纵者等的影响难以体现,缩尺效应也有一定影响,而且在水槽内难以实现大比降、小流速的水流条件。因此,在有条件情况下可进行适当实船试验,验证所确定的消滩水力指标的正确性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 曹民雄,蔡国正.山区河流急流滩险航道整治技术研究[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [3] 云南省航务管理局,重庆交通大学,澜沧江航道工程建设指挥部.澜沧江国际边境河流急流滩通航水力指标研究[R].昆明:云南省航务管理局,2008.
- [4] 杨胜发,赵晓马,王涵.长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J].水运工程,2007(8): 78-81, 92.
- [5] 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.
- [6] 童思陈,许光祥,邓明文.澜沧江船舶航行阻力及通航水力指标研究[J].人民长江,2010,41(2): 67-72.
- [7] 童思陈,许光祥,邓明文.内河船舶航行阻力及通航水力指标计算[J].水利水运工程学报,2010,32(2): 100-106.
- [8] 曹民雄.消滩水力指标确定方法[J].交通运输工程学报,2006,6(4): 80-83.
- [9] 曹民雄,李花白,陆宏健.消滩水力指标的确定方法讨论[J].人民长江,2004,35(11): 35-37, 62.

(本文编辑 武亚庆)