

内河船舶航行阻力及通航水力指标计算

童思陈¹, 许光祥¹, 邓明文^{1,2}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 云南省航务管理局, 云南 昆明 650021)

摘要: 以山区河流澜沧江为代表, 采用实船静水航速试验资料, 对原兹万科夫公式进行了修正, 提出了适合于澜沧江代表船舶的水流阻力计算式。对比其他山区河流船舶航行阻力的研究成果, 讨论了内河船舶的航行阻力计算方法。结合坡降阻力计算, 建立了澜沧江急流滩的通航水力指标, 并与其他内河航道的通航水力指标进行了比较分析, 明确了各典型内河航道通航水力指标与航道条件的关系。

关 键 词: 航行阻力; 急流滩; 通航水力指标; 澜沧江

中图分类号: U661.78:TV131.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)02-0100-07

内河船舶航行阻力计算对于滩险整治规划、船舶设计与制造均具有重要的实际应用价值。但航行于山区航道的内河船舶与海船的航行条件存在巨大差异。海船的航行阻力主要是水流阻力与兴波阻力, 而内河船舶的航行阻力则主要由水流阻力与坡降阻力构成。在我国, 内河船舶水流阻力通常以兹万科夫公式为基础进行计算^[1-2], 已有不少研究成果^[3-5]。而坡降阻力计算是一个纯力学问题, 求解较简单。在此基础上, 考虑滩险特性, 在各种流速~比降组合情况下进行航行阻力与船舶推力的受力平衡, 即可计算得到通航水力指标。目前, 作为航道水流条件标准的水力指标, 在部分重要的内河航道上已较明确^[6]; 而其他更多的内河航道却没有明确标准。对此, 杨胜发等^[7]通过理论计算和船模试验, 提出了长江上游卵石急流滩消滩水力指标; 曹民雄等^[8-9]对消滩水力指标的确定方法进行了讨论。

本文以典型山区河流澜沧江的船舶航行阻力计算为案例, 揭示出山区航道船舶阻力计算的某些特点。同时, 针对各典型山区航道的通航水力指标问题也进行了分析探讨。

1 内河船舶航行阻力的计算方法

内河航道与海洋和深水航道差别很大, 其航行阻力的研究也更为复杂, 成果相对较少。由于川江航运的开发程度较高, 因此针对川江河段航行阻力的研究相对较多。川江航行阻力计算系采用前苏联兹万科夫公式结构, 结合川江特点和船型情况进行调整。内河船舶航行阻力通常是指船舶在上行过程中受到的水流阻力和坡降阻力, 其计算方法如下。

1.1 水流阻力的计算

计算内河船舶航行阻力常采用的兹万科夫法, 实际上是根据弗劳德对阻力的处理方式, 将水流阻力分为摩擦阻力 R_f 与剩余阻力 R_r 两部分考虑。根据理论分析和试验研究, 摩擦阻力 R_f 主要与雷诺数 Re 有关, 而剩余阻力 R_r 主要与弗劳德数 Fr 有关。即:

$$R_v = R_f + R_r = R_f(Re) + R_r(Fr) \quad (1)$$

$$\text{机动船的水流阻力} \quad R_{v1} = f_1 A_s V_s^{1.83} + \xi_1 \delta A_m V_s^{1.7+4Fr} \quad (2)$$

收稿日期: 2009-06-10

基金项目: 云南省科技计划项目(2006GG21)

作者简介: 童思陈(1973-), 男, 重庆北碚人, 副教授, 博士, 主要从事水力学与河流动力学研究。

E-mail: tongsichen@163.com

式中: $A_s = L_w(C_1 T + \delta B)$; $V_s = (1.15 \sim 1.30) V_{cp} + V_a$; $\xi_1 = \frac{17.7\delta^{2.5}}{(L_w/6B)^3 + 2}$; $A_m = \beta B T$; $Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gL_w}}$; f_1 为机动船摩阻系数,钢质船 $f_1 = 0.17$,木质船 $f_1 = 0.23$; A_s 为船舶浸水面积(m^2); L_w 为船舶水线长度(m); C_1 为系数(对机动船 $C_1 = 1.8$); T 为船舶吃水; δ 为船舶方形系数(对机动船 $\delta = 0.58 \sim 0.60$); B 为船舶型宽(m); V_s 为船与水的相对速度(m/s),考虑到浅水、狭航道、紊流等影响,对 V_s 式中的流速进行 $1.15 \sim 1.30$ 的系数修正; V_{cp} 为船舶(船队)长度内纵向表面平均流速(m/s); V_a 为船舶上滩至少应保持的对岸航速(m/s),一般取 $V_a = 0.3 \sim 0.5 m/s$; ξ_1 为剩余阻力系数; A_m 为船舶浸水部分舢剖面积(m^2); β 为船舶横断面系数,对机动船 $\beta = 0.93$; Fr 为船舶弗劳德数.

$$R_{V2} = f_2 A_s V_s^{1.83} + \xi_2 \delta A_m V_s^{1.7+0.15V_s} \quad (3)$$

式中: f_2 为驳船阻力系数,钢质船取 0.17 ,木质船取 $0.23 \sim 0.25$; A_s 为船舶浸水面积(m^2); C_1 为系数(对驳船取 2.0); 驳船方形系数常取 $\delta = 0.75 \sim 0.80$,分节驳常取 $\delta = 0.90$ 左右; A_m 计算式同机动船,取 $\beta = 0.95 \sim 0.99$; ξ_2 为驳船剩余阻力系数,对川江一般取 $\xi_2 = 6.0$. 根据实船和船模试验结果,川江驳船水流阻力按下式计算:

$$R_{V2} = f_2 A_s V_s^{1.83} + \xi_2 \delta A_m V_s^{1.7+0.03V_s} \quad (4)$$

式中: 摩擦阻力系数 $f_2 = K_0 \left(0.137 + \frac{0.258}{2.68 + L_w} \right)$; $K_0 = 1 + 0.0043(15 - t)$; t 为水温($^{\circ}C$).

1.2 坡降阻力的计算

坡降阻力的计算式为:

$$R_j = \alpha W J \quad (5)$$

式中: W 为船(队)总排水质量(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 $\alpha = 1.1 \sim 1.2$.

1.3 航行阻力的计算

船舶航行阻力计算可由式(2),(4)和(5)并考虑船舶的编队情况确定:

$$R = R_j + \sigma(R_{V1} + R_{V2}) = R_j + \sigma(R_{V1} + \sum_{i=1}^n R_{V2i}) \quad (6)$$

式中: R 为船舶航行阻力(kg); R_j 为坡降阻力(kg); R_{V1} 为机动船的航行阻力(kg); R_{V2i} 为驳船航行阻力(kg); σ 为船舶编队系数; n 为驳船数量.

2 澜沧江船舶航行阻力的计算

澜沧江属典型的山区内河航道,且滩险众多,航运开发价值巨大. 首先,经反复比较,选用 $300 t$ 级机动驳“华平号”进行了现场实船试验,获取了大量实测水位、流速等水力特性资料;通过不同载质量、不同功率的实船静水航速试验,获得了静水航速与载质量、螺旋桨转速、主机功率间的关系.

由于目前没有针对机动驳航行阻力的计算方法或公式,因此,本文仍借鉴兹万科夫法模式计算澜沧江机动驳的航行阻力.

2.1 船舶推力计算

由于实船试验中螺旋桨有关参数为已知,可通过螺旋桨工作参数计算出船舶推力^[10]. 船舶推力的计算步骤为:计算伴流分数 $\omega \rightarrow$ 计算螺旋桨进速 $V_A \rightarrow$ 计算进速系数 $J_v \rightarrow$ 由进速系数 J_v 查螺旋桨图谱并内插得到实船螺旋桨推力系数 K_T 值 $\rightarrow$ 计算螺旋桨推力 $T_0 \rightarrow$ 计算推力减额分数 $t \rightarrow$ 计算船舶推力 T . 根据实船试验资料,按照上述过程计算获得实船推力见表1.

表 1 澜沧江实船推力计算

Tab. 1 Propulsive forces calculation of prototype ship in Lancang River

载质量/ 排水量/ t	平均吃水/ m	螺旋桨 转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	轴功率 P/kW	静水 航速 $V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	方形 系数 δ	伴流 分数 ω	推力减 额分数 t	进速 $V_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	进速 系数 J_V	推力系数 KT			双桨 推力 T_0/kg	船舶 推力 T/kg	
										MAU 4-40	MAU 4-55	MAU 4-47			
157	282	1.255	250.4	63.0	4.02	0.640	0.127	0.136	3.24	0.66	0.113	0.103	0.109	746.1	644.6
			373.4	216.9	5.34	0.640	0.126	0.136	4.50	0.61	0.134	0.122	0.128	1 962.3	1695.4
			453.7	388.5	6.30	0.640	0.126	0.136	5.40	0.61	0.135	0.127	0.131	2 963.2	2 560.1
			483.5	469.9	6.67	0.640	0.126	0.136	5.73	0.60	0.137	0.128	0.133	3 405.9	2 942.6
265	390	1.703	250.4	63.0	3.36	0.717	0.166	0.171	2.37	0.48	0.183	0.177	0.180	1 237.2	1 025.3
			373.4	216.9	4.38	0.717	0.165	0.171	3.52	0.48	0.183	0.178	0.181	2 759.8	2 287.3
			453.7	388.5	5.23	0.717	0.165	0.171	4.28	0.48	0.183	0.178	0.181	4074.3	3376.6
			483.5	469.9	5.51	0.717	0.165	0.171	4.52	0.48	0.185	0.179	0.182	4 672.3	3 872.3
320	445	1.750	250.4	63.0	3.11	0.724	0.169	0.174	2.36	0.48	0.183	0.178	0.181	1 242.1	1 025.5
			373.4	216.9	4.25	0.724	0.168	0.174	3.39	0.46	0.189	0.184	0.187	2 852.8	2 355.5
			453.7	388.5	5.10	0.724	0.168	0.174	4.15	0.47	0.188	0.183	0.185	4 184.1	3 454.7
			483.5	469.9	5.33	0.724	0.168	0.174	4.35	0.46	0.190	0.186	0.188	4 809.8	3 971.3

注:本试验船型螺旋桨型号为 MAU4-47,其 K_T 值系通过查阅 MAU4-40 和 MAU4-55 相应的 K_T 值后再内插获得。

2.2 船舶航行阻力计算

2.2.1 兹万科夫法计算的实船水流阻力 据统计,航行于澜沧江的船舶基本为单船,加之试验也为单船,且具有较强的代表性.所以,航行阻力以及所有研究过程均以 300 t 级船舶“华平号”为基础.计算中参数的选取尽可能来自试验资料.以原兹万科夫公式为基础,根据试验参数资料和以上计算步骤推求得到水流阻力见表 2.

表 2 水流阻力的计算

Tab. 2 Flow resistance calculation of prototype ship in Lancang River

载质量/ t	平均吃水 T_b/m	水线长 L_w/m	方形系数 δ	船舶浸水 面积 A_s/m^2	剩余阻力 系数 ξ	舢剖面 系数 β	舢剖面 面积 A_m/m^2	轴功率 P/kW	静水航速 $V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	船舶弗 劳德数 Fr	水流阻力 R_v/kg
157	1.255	41.95	0.64	298.84	2.09	0.95	9.03	63.00	4.02	0.20	981.7
								216.91	5.34	0.26	2183.2
								388.46	6.30	0.31	4 008.4
								469.91	6.67	0.33	5 081.9
265	1.702	43.29	0.72	368.48	2.70	0.96	12.42	63.00	3.36	0.16	854.4
								216.91	4.38	0.21	1 944.6
								388.46	5.23	0.25	3 379.4
								469.91	5.51	0.27	4 050.5
320	1.750	44.00	0.72	380.71	2.72	0.96	12.78	63.00	3.11	0.15	904.9
								216.91	4.25	0.20	1 883.4
								388.46	5.10	0.25	3 246.1
								469.91	5.33	0.26	3 761.3

2.2.2 兹万科夫水流阻力计算公式的修正 依据表 1 中的船舶推力和表 2 的水流阻力计算成果,比较结果见表 3.可见,由兹万科夫法计算的航行阻力与船舶推力有较大误差,特别是对于低载质量,个别误差达到了 50% 以上.总体表现为低载质量时航行阻力偏大,而高载质量情况下航行阻力偏小.

鉴于兹万科夫法计算的船舶航行阻力与船舶推力误差较大,不满足受力平衡条件,说明兹万科夫法不完全适用于澜沧江的实际船舶,如果直接移用该法进行澜沧江通航水力指标的研究,会引起较大误差.为此,需对其进行修正.

表3 船舶推力与兹万科夫法计算航行阻力的比较

Tab.3 Comparison of the propulsive forces and the flow resistance calculated by Эиванков method

载质量/ t	排水量/ m ³	轴功率 P/kW	静水航速 V ₀ /(m·s ⁻¹)	船舶推力 T/kg	航行阻力 R/kg	(R-T)/T/%
157	282	63.0	4.02	644.6	981.7	52.29
		216.9	5.34	1 695.4	2 183.2	28.77
		388.5	6.30	2 560.1	4 008.4	56.57
		469.9	6.67	2 942.6	5 081.9	72.70
265	390	63.0	3.36	1 025.3	854.4	-16.67
		216.9	4.38	2 287.3	1 944.6	-14.98
		388.5	5.23	3 376.6	3 379.4	0.08
		469.9	5.51	3 872.3	4 050.5	4.60
320	445	63.0	3.11	1 025.5	904.9	-11.76
		216.9	4.25	2 355.5	1 883.4	-20.04
		388.5	5.10	3 454.7	3 246.1	-6.04
		469.9	5.33	3 971.3	3 761.3	-5.29

修正的方法是仅修正水流阻力,而坡降阻力仍沿用式(5)计算.水流阻力的修正仍以兹万科夫法为基础,在其公式前加1个与航速和船型有关的系数.通过反复综合的数值分析,获得了适用于澜沧江航行阻力计算的修正后的兹万科夫公式,即:

$$R_V = R_{V0} \left[0.959 \, 3 \ln \left(\frac{F_A}{F_r} \right) - 0.292 \, 2 \right] = \left[0.959 \, 3 \ln \left(\frac{F_A}{F_r} \right) - 0.292 \, 2 \right] (f_1 A_s V_s^{1.83} + \xi_1 \delta A_m V_s^{1.7+4Fr}) \quad (7)$$

式中: R_V 为修正的水流阻力; R_{V0} 为修正前原兹万科夫法计算的水流阻力,按式(2)计算; F_A 为船舶浸水面积比(=浸水面积/标准吃水的浸水面积,标准吃水的浸水面积是指船舶在标准吃水时相应的浸水面积); F_r 为船舶弗劳德数.于是,船舶航行的总阻力可按下式计算:

$$R = R_V + R_J = \left[0.959 \, 3 \ln \left(\frac{F_A}{F_r} \right) - 0.292 \, 2 \right] \cdot (f_1 A_s V_s^{1.83} + \xi_1 \delta A_m V_s^{1.7+4Fr}) + \alpha WJ \quad (8)$$

按照修正后的航行阻力计算法得到的航行阻力与船舶推力的比较见图1.可见,除在小功率(功率比仅12.3%的3个点)的情况下,其余各点均吻合较好,相关性非常高,其相对误差均在 $\pm 3.5\%$ 以内.由于小功率情况不是船舶上滩研究的重点,对通航水力指标的研究基本没有影响.

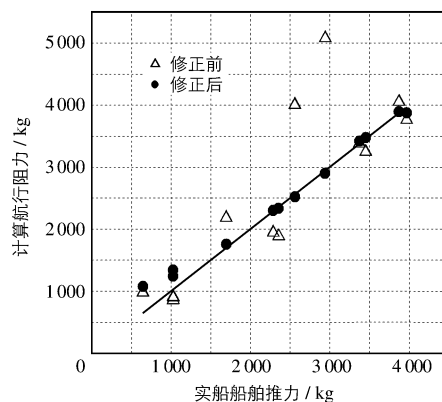


图1 修正后航行阻力与实船推力的比较

Fig.1 Comparison of the modified flow resistance with the propulsive forces of prototype ship

3 内河航道船舶航行阻力计算的讨论

兹万科夫法在我国山区航道整治设计中发挥了良好的作用.但由于公式本身的结构不尽完善,且大都采用川江河段和船型的有关参数,当应用于其他河流或河段的计算时,难免会出现与实际不尽相符的情况.就目前内河船舶航行阻力研究成果而言,大致可分为以下几种类型:

(1)认为兹万科夫公式计算的水流阻力与实际相符,而坡降阻力计算过于简化.如在对红水河航行阻力的研究中,兹万科夫法的计算结果与有效推力吻合良好.在漓江航行阻力的计算中,虽川江公式计算阻力偏小,但若只对水面坡降作进一步修正而不调整兹氏公式,也可得到满意结果^[4].类似的处理见于文献[3],认

为应考虑船舶航行引起的水面附加比降的影响。

(2)认为兹万科夫公式可用于水流阻力计算,坡降阻力也可按简单系数进行修正,但需考虑舵力影响。在对三峡工程导流明渠施工通航船队的航行阻力计算中就采用了这种模式^[5]。

(3)认为兹万科夫公式不能普遍适用于其他航道水流阻力的计算(本文观点)。前文已经阐明,在不考虑坡降阻力情况下,采用兹万科夫法计算的水流阻力与澜沧江实船推力差别较大。低载质量时计算值偏大,高载质量计算值偏小。这是因为同样功率情况下,低载质量时航速较快,而兹氏法计算的航行阻力与航速的高次方成正比。

此外,在已有公开发表成果中尚未见到在各种载质量、各种功率组合情况下的航行阻力计算。综上,以兹万科夫法为基础的川江船舶航行阻力计算公式只能适用于部分而非所有的河流。应根据不同河流及相应船型,建立适合于自身特点的计算公式,才能满足实际工程的需要。

4 典型内河航道通航水力指标的计算

利用前文方法系统研究了澜沧江急流滩船舶上滩的通航水力指标,针对澜沧江滩性及船型特点,分别对代表船型在载质量为 50% (140 t), 75% (210 t), 100% (280 t), 功率为 50% (255 kW), 75% (383 kW), 90% (459 kW), 100% (510 kW) 共 12 种工况下的流速-比降组合进行了计算。其中,比降选取了 0~8‰等工况。

计算方法为:根据载质量和船型确定吃水、水线长、浸水面积、舢剖面面积等参数→给定比降(0~8‰)→按式(5)计算坡降阻力→给定上滩流速→计算对水航速→按式(7)计算水流阻力→式(8)确定航行阻力 R →根据功率、转速及相关参数计算船舶推力 T →判定航行阻力 R 是否等于船舶推力 T ,如相等则给定的比降和流速即为该载质量、功率情况下的急流滩通航水力指标;否则,需重新假定流速,直到阻力和推力平衡为止。

根据上述计算思路,对拟定的工况进行了细致计算,获取了代表船舶在多种载质量、多种功率情况下能自航上滩的临界流速-比降组合,即急流滩的通航水力指标(见表 4)。

表 4 澜沧江急流滩通航水力指标

Tab. 4 The calculated results of the navigable hydraulic parameters of Lancang River

载质量/ t	载质量比/ %	主机功率 P/kW	功率比/ %	滩口流速 $V_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$								
				$J=0$	$J=1\text{‰}$	$J=2\text{‰}$	$J=3\text{‰}$	$J=4\text{‰}$	$J=5\text{‰}$	$J=6\text{‰}$	$J=7\text{‰}$	$J=8\text{‰}$
140	50	255	50	4.44	4.25	4.05	3.84	3.61	3.36	3.10	2.81	2.50
		383	75	5.07	4.92	4.76	4.59	4.42	4.23	4.03	3.81	3.58
		459	90	5.35	5.22	5.08	4.93	4.78	4.61	4.43	4.25	4.05
		510	100	5.52	5.40	5.27	5.13	4.98	4.83	4.67	4.50	4.31
210	75	255	50	3.99	3.78	3.54	3.28	3.00	2.68	2.33	1.94	1.50
		383	75	4.55	4.38	4.19	4.00	3.78	3.55	3.29	3.01	2.70
		459	90	4.80	4.65	4.49	4.31	4.12	3.92	3.70	3.46	3.20
		510	100	4.95	4.81	4.65	4.49	4.32	4.13	3.93	3.71	3.47
280	100	255	50	3.64	3.39	3.12	2.81	2.47	2.08	1.62	1.08	0.37
		383	75	4.15	3.96	3.74	3.51	3.25	2.97	2.64	2.28	1.87
		459	90	4.40	4.20	4.00	3.80	3.60	3.30	3.00	2.70	2.40
		510	100	4.50	4.40	4.20	4.00	3.80	3.60	3.30	3.00	2.70

考虑到航行阻力的计算及修正是基于实船静水航速试验成果进行的,而实船试验实测的功率为轴功率,是主机功率有一定传动等损耗后的功率,所代表的主机功率应比实测值轴功率大;且主机功率的使用上考虑了一定的安全储备。为此,建议将在额定载质量(280 t)、90%额定功率(459 kW)工况下的流速-比降组合作为澜沧江急流滩通航水力指标。

5 内河航道通航水力指标的讨论

内河航道通航水力指标通常也称急流滩的消滩水力指标,其确定方法有实船试验法、经验分析法、阻力计算法、能量分析法以及船模试验法^[8]. 根据文献[6-7]及本文研究成果,将典型航道的通航水力指标汇总于表 5.

表 5 典型航道的通航水力指标

Tab. 5 The navigable hydraulic parameters of typical navigation channel

河 段	设计船队标准 ^[6-7]	滩口比降/ ‰	流速/ (m·s ⁻¹)	河 段	设计船队标准 ^[6-7]	滩口比降/ ‰	流速/ (m·s ⁻¹)
重庆-宜宾段	(A) 850 kW 推船顶推 1 艘 1 000 t 级驳载货	1.0	4.0	渝叙段	(E) 881 kW 推船顶推 1 艘 1 000 t 驳组	1.0	3.9
	1 000 t	2.0	3.0		成的 1 000 t 级船队	2.0	3.5
		3.0	2.5			3.0	3.1
川江	(B) 1 942 kW 推船, 顶推 1 艘 1 000 t 驳船和 1 艘 500 t 级驳, 载货 2 000 t	0.8	4.0	澜沧江	(F) 300 t 机驳	0	4.4
		2.1	3.1			1	4.2
		3.0	2.0			2	4.0
	(C) 1 942 kW 推船, 顶推 1 艘 1 000 t 驳和 1 艘 800 t 级驳, 载货 1 560 t	1.5	4.3			3	3.8
		3.5	3.2			4	3.6
乌江		4.3	2.5			5	3.3
	(D) 350 kW 200 ~ 300 t 级机驳, 368 kW 500 客位客船	7.0	4.1			6	3.0
		6.5	4.5			7	2.7
						8	2.4

注: 澜沧江代表船型标准采用本文成果.

根据以上成果将各典型航道的通航水力指标绘制于图 2. 由于目前相关成果较少, 且获得的方法与途径也不尽相同, 总体表现较为分散. 尽管如此, 仍能得出一些基本认识:

(1) 通航水力指标不仅与航道条件有关, 还与代表船型有关. 如重庆-宜昌段, 当船舶吨位增大时, 水力指标要求也相应提高(B, C), 当将水面比降均内插统一至 2‰, 3‰ 时, 两者流速差值分别为 0.86 和 1.48 m/s, 相差较大, 说明通航水力指标只有在特定代表船型情况下才有意义. 即使同一航道, 对不同的船型可能有不同的标准; 同一航道, 代表船型相近情况下, 不同研究者给出的通航水力指标也不尽相同(A, E), 这可能与研究方法有关;

(2) 图 2 中偏向左下侧的通航水力指标标准较高, 而右上侧的标准则较低, 据此可直观地看出各山区河流的航道条件. 代表船舶载质量接近情况下, 乌江较澜沧江的航道条件差, 澜沧江航道条件介于渝叙河段与乌江的航道条件之间;

(3) 对于缺乏通航水力指标的其他山区航道, 可根据航道条件从图 2 中大致确定其标准范围.

6 结 语

以典型山区河流澜沧江为代表, 对内河船舶航行阻力计算方法进行了较详细的探讨. 分析认为, 以兹万科夫法为基础的川江船舶航行阻力计算公式对有的河流适用, 对有的河流则偏差较大, 应根据不同河流及相应船型建立适合于自身特点的计算公式才能满足实际需要. 同时, 计算了典型内河航道澜沧江的通航水力指标, 并结合其他内河航道的水力指标进行了综合讨论, 为进一步深入研究通航水力指标问题提供了基础和

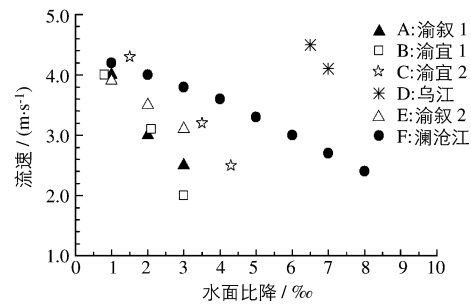


图 2 典型内河航道通航水力指标的比较

Fig. 2 Comparison of the navigable hydraulic parameters among typical inland navigation channels

借鉴.

参 考 文 献:

- [1] 钱徐涛. 船舶实用浅水阻力计算及发展前景[J]. 江苏船舶, 1993, 10(2): 1-7. (QIAN Xu-tao. The prospect of the calculation of the practical ship resistance[J]. Jiangsu Ship, 1993, 10(2): 1-7. (in Chinese))
- [2] 汤通生, 韩海林. 内河运输船舶的阻力计算公式[J]. 船舶工程, 1992(5): 21-23. (TANG Tong-sheng, HAN Hai-lin. The resistance calculation formula of the inland transportation ship[J]. Ship Engineering, 1992(5): 21-23. (in Chinese))
- [3] 曹民雄, 姜继红, 唐存本, 等. 船舶上滩阻力计算方法对比与分析[J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 41-45. (CAO Ming-xiong, JIANG Ji-hong, TANG Cun-ben, et al. Comparison and analyses of calculation methods for resistance of ships ascending rapids[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(2): 41-45. (in Chinese))
- [4] 李一兵. 内河船舶航行阻力计算方法讨论[J]. 水道港口, 2002, 23(1): 7-11. (LI Yi-bin. Discussion on the method of inland ship sailing resistance calculation[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2002, 23(1): 7-11. (in Chinese))
- [5] 陈永奎. 三峡工程导流明渠施工通航船队航行阻力计算分析[J]. 长江科学院院报, 1993, 10(4): 1-9. (CHEN Yong-kui. Ship-team sailing resistance computation and analysis on the open channel navigation of the Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 1993, 10(4): 1-9. (in Chinese))
- [6] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Yangtze River Waterway Bureau. Navigation project handbook[M]. Beijing: The People Communication Press, 2004. (in Chinese))
- [7] 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): 78-82. (YANG Sheng-fa, ZHAO Xiao-ma, WANG Han. On hydraulic parameter of rapids abating of pebble rapids on the upper reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(8): 78-82. (in Chinese))
- [8] 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. (CAO Ming-xiong, LI Hua-bai, LU Hong-jian. Discussion on the method of hydraulic parameter of rapids abating[J]. Yangtze River, 2004, 35(11): 35-37. (in Chinese))
- [9] 曹民雄. 山区河流急流滩险航道整治技术研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2005. (CAO Ming-xiong. Study on the regulation of waterway with rapids in mountainous rivers [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [10] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(下)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004. (SHENG Zhen-bang, LIU Ying-zhong. Ship principle[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese))

Calculation of sailing resistance and navigable hydraulic parameters for inland ships

TONG Si-chen¹, XU Guang-xiang¹, Deng Ming-wen^{1,2}

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Navigation Administration Bureau of Yunnan Province, Kunming 650021, China)

Abstract: By taking the Lancang River as the typical mountainous river and according to the results of prototype navigation testing in the static water area, the original Эиванков calculation method is modified and the flow resistance calculation method adapted to typical ship sailing in Lancang River is brought forth. Discussion is made on the flow resistance calculation methods of mountainous inland ships in order to seek its regularities. Based on the gradient resistance computation, the navigable hydraulic parameters for the rapids shoal of Lancang River are obtained. Through comparison and analysis of the results of the other inland rivers, the relationship between navigable hydraulic parameters and navigable conditions is put forward.

Key words: sailing resistance; rapids shoal; navigable hydraulic parameters; Lancang River