山区急滩航道整治设计代表船型有效功率确定方法研究*

贾国珍[1,2]

（1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610213；
2. 川渝内河港航工程技术研究中心，四川 成都 610213）

摘要：设计代表船型有效功率是确定急滩通航水力指标的核心参数。针对现有工程设计中由实船动力数据离散性大、尺度与设计代表船型存在差异导致的船舶主机功率确定缺乏统一标准的问题，开展了基于船舶建造法规约束的代表船型有效功率确定方法研究。通过引入船舶建造法规关于不同航段最低设计航速的强制性规定及船舶有效功率回归预报模型，构建了从标准船型主尺度到法定最低航速，再到有效功率的标准化计算流程。以金沙江乌东德库尾河段 1 000 吨级设计代表船型为例进行案例验证，得出满足 J_1 航段最低航速要求的有效功率约为 415 kW，折算额定主机功率区间为 1 012～1 092 kW，与该河段近年投运的新建大功率船舶实际配置高度吻合。该方法有效克服了传统经验分析法确定船舶动力参数的不确定性，为科学确定急流滩通航水力指标及整治工程规模提供了技术支撑。

关键词：山区急滩；航道整治；通航水力指标；设计代表船型；有效功率；最低航速；回归计算

中图分类号：U617　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0180-06

Determination method for the effective power of the design representative ship type in mountainous rapid shoal waterway regulation

JIA Guozhen[1,2]

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610213, China;
2. Sichuan & Chongqing Inland Port and Waterway Engineering Research Center, Chengdu 610213, China)

Abstract: The effective power of a design representative ship type is a pivotal parameter for determining the hydraulic parameters of rapids abating. Addressing the issues in current engineering design where the high dispersion of operational power data and dimensional discrepancies between existing vessels and typical ship-types lead to a lack of unified criteria for main engine power determination, a study on the determination method of effective power based on regulatory constraints is conducted. By incorporating the mandatory minimum design speed regulations for different navigation zones and utilizing an improved power regression prediction model, a standardized calculation workflow transitioning from standard principal dimensions to statutory minimum speed and subsequently to effective power is established. Taking the 1 000-ton-class typical ship-type in the reservoir head of the Wudongde on the Jinsha River as a verification case, the results indicate that the effective power required to meet the minimum speed requirement of the J_1 navigation zone is approximately 415 kW, corresponding to a rated main engine power range of 1, 012-1, 092 kW. This aligns closely with the actual configurations of high-power vessels recently commissioned in this reach. The proposed methodology effectively

收稿日期：2025-12-07　　**录用日期：**2026-01-04

***基金项目：**四川省交通运输科技项目(212025004)；四川省“天府青城计划”天府卓越工程师项目(232023023)

作者简介：贾国珍(1987—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为港口与航道工程。

水运工程

mitigates the uncertainties associated with traditional empirical analysis methods in determining ship dynamic parameters and provides a technical foundation for the scientific determination of hydraulic parameter navigation in rapids and regulation scales.

Keywords: mountainous rapid shoal; waterway regulation; navigable hydraulic parameter; design representative ship type; effective power; minimum speed; regression calculation

急流滩是山区河流航道整治的重点与难点。在急滩整治工程设计中，合理确定通航水力指标(即允许的流速和比降组合)，是科学制定航道整治方案、保障工程经济与安全的前提。通航水力指标的确定基于船舶推力与航行阻力的平衡原理。长期以来，关于船舶阻力的确定，国内学者已开展了大量工作，曹民雄等[1-2]系统归纳了实船试验法、模型试验法、经验分析法、能量分析法及阻力计算法等 5 种确定通航水力指标的方法，并指出阻力计算法因经济方便而被广泛应用；针对兹万科夫公式在浅水、狭窄航道及倒比降滩段的局限性，曹民雄等[3]、李一兵[4]、许光祥等[5]通过大量实船与船模试验，提出了针对不同水系（如川江、澜沧江）和流态的阻力修正系数及计算模式；吴俊等[6]、程弘宇等[7]、马希钦等[8]采用物理模型及数学模型，针对中间渠道及通航隧洞等限制性航道的船舶阻力进行了研究；刘添宇[9]进一步研究了跌水碍航机理，建立了跌水段通航水力指标计算模型。目前，关于船舶阻力的确定已有较为成熟的方法及工程应用体系。

对于设计代表船型推力（特别是有效功率）的确定，行业内尚缺乏统一的技术标准。在船舶推力计算方面，主要难点在于有效功率 P_e 和推进系数 e 的确定。现有研究主要有两种途径：1)依据《航道工程手册》[10]，根据主机额定功率 P_s 及推进系数 e 的乘积计算有效功率 P_e，其中 e 常取定值(如 0.38)；2)基于实船主机功率及螺旋桨参数的精细化计算。童思陈等[11]结合澜沧江实船试验，探讨了利用螺旋桨特性曲线计算推力的方法。蒋孜伟[12]在山区船舶推进特性研究中指出，推进系数 e 并非定值，而是随进速系数变化的函数，并给出了常用船型推进系数的分布范围。

上述推力计算方法大多适用于“已知具体船舶参数”的情况，在航道整治设计阶段，面对的是“标准设计船型”，常常缺乏具体的螺旋桨和主机参数。在工程实践中，航道工程设计人员一般根据《内河通航标准》《内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列》等标准综合分析确定代表船型的尺度，对于主机功率，通常通过搜集工程河段及邻近航道现有船舶资料凭经验选取。然而，受建造年代、船东需求及建造成本影响，现有船舶中，即使同一吨级的船舶，其主机功率也往往差异较大，且船舶尺度通常与基于相关标准确定的设计代表船型不一致。若选取功率较小的船舶作为通航水力指标计算的代表船型，会使得相关指标极为严苛，进而要求对河道进行大规模整治，以大幅减缓滩上流速、比降。在当前生态优先、绿色发展的背景下，高强度的航道整治措施往往面临严格的环境保护(如鱼类生境保护)和行洪安全审批制约，实施难度极大。若选取大功率船舶，又缺乏规范依据。

王志芳等[13]在船舶能效设计指数(energy efficiency design index，EEDI)验证研究中，基于大量船模实验数据，采用回归分析对传统艾尔法进行了修正，提出了适用于内河宽扁型船舶的有效功率回归计算公式。2023 年，中国海事局发布《内河船舶法定检验技术规则(2023 年修改通报)》[14]，对内河船舶在最大持续功率下的最低航速提出了明确要求；2024 年，中国海事局发布了《内河新建船舶能效设计指数(EEDI)实施指南》[15]，该指南提供了基于回归分析的有效功率计算方法，这为在航道工程设计中标准化确定代表船型有效功率提供了新的思路和方法。本文旨在将上述船舶设计领域的最新规定及方法引入航

道整治工程设计中，探讨一种基于最低航速要求和回归计算方法确定急滩航道整治设计代表船型有效功率的新方法，以期解决通航水力指标计算中主机功率参数取值不规范的难题。

1 基于最低航速及回归计算的代表船型有效功率确定方法

该方法的核心思想是：依据海事法规确定所在航区/航段“船舶最低航速”，利用回归公式计算满足该航速要求所需的“最小有效功率”，将其作为设计代表船型的动力参数输入，进而确定通航水力指标。

1.1 船舶最低航速标准

根据《内河船舶法定检验技术规则(2023 年修改通报)》，为确保船舶在复杂水域及气象环境下的操纵性，明确规定了船舶在最大持续功率下的航速下限。各航区/航段的最低航速要求见表 1。

表 1 内河船舶最低设计航速要求

Tab. 1 Minimum design speed requirements for inland vessels

序号	水系/航段	最低航速要求/(km·h^{-1})
1	长江水系 J_1 航段	≥20.7
2	长江水系 J_2 航段	≥18.0
3	长江水系其他水域	≥14.8
4	京杭运河、珠江水系	≥12.0
5	其他水系	参照长江水系执行

1.2 有效功率回归计算流程

根据《内河新建船舶能效设计指数(EEDI)实施指南》及相关研究，内河船舶(<1 000 GT)有效功率 P_e 的回归计算方法如下。

对于长江水系船舶：

$$P_e = 5.4\Delta^{0.64}V^3/C_3 \tag{1}$$

对于京杭运河船舶或珠江水系船舶：

$$P_e = 5.8\Delta^{0.64}V^3/C_3 \tag{2}$$

式中：P_e 为有效功率，kW；Δ 为排水量，t；V 为航速，m/s；C_3 为综合船型修正系数。

有效功率计算流程及图谱如下。

1）计算系数 C_0。分别计算船舶弗劳德数 Fr 及参数 $L/\Delta^{1/3}$，其中

$$Fr = V/\sqrt{gL} \tag{3}$$

式中：g 为重力加速度，取值为 9.81 m/s^2；L 为船舶垂线间长，m；根据计算的 Fr 及参数 $L/\Delta^{1/3}$，查阅图谱可得到系数 C_0，系数 C_0 图谱见图 1。

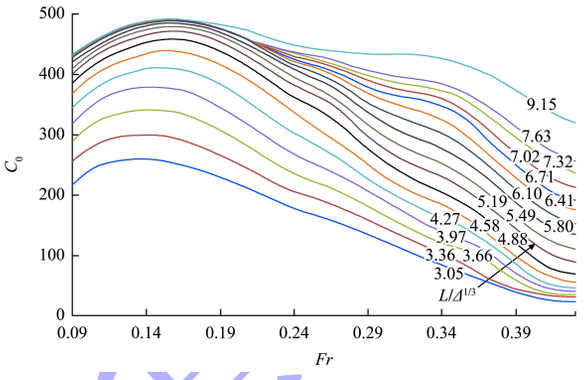

图 1 系数 C_0 图谱

Fig. 1 Chart for coefficient C_0

2）计算系数 C_1。根据船舶的 Fr 计算临界方形系数 C_{bc}，公式如下：

$$\begin{cases} C_{bc} = 1.08 - 1.68Fr & \text{(单桨船)} \\ C_{bc} = 1.09 - 1.68Fr & \text{(双桨船)} \end{cases} \tag{4}$$

根据方形系数 C_b 和临界方形系数 C_{bc}，按以下公式计算参数 t：

$$t = 10(C_{bc} - C_b)/C_{bc} \tag{5}$$

比较方形系数 C_b 和系数 C_{bc}，按以下公式计算参数 K_{bc}。

当 $C_b \geqslant C_{bc}$ 时：

$$K_{bc} = 30C_b t \tag{6}$$

若计算的 $K_{bc} < -10$，K_{bc} 取 -10。

当 $C_b < C_{bc}$ 时：

$$\begin{cases} K_{bc} = 1.248t^5 - 6.613t^4 + 9.79t^3 - \\ \qquad 2.308t^2 + 4.79t - 0.0393 & (t \leqslant 2.2) \\ K_{bc} = 13 & (t > 2.2) \end{cases} \tag{7}$$

根据参数 K_{bc} 和系数 C_0 计算系数 C_1：

$$C_1 = C_0 + C_0K_{bc}/100 \tag{8}$$

3）计算系数 C_2。根据宽吃水比 B/T(B 为船宽，T 为吃水)计算系数 δ。

$$\begin{cases} \delta = \dfrac{B}{T} - 2 & (B/T < 3) \\ \delta = 2\dfrac{B}{T} - 5 & (B/T \geqslant 3) \end{cases} \tag{9}$$

水运工程

对于京杭运河船舶或珠江水系船舶：

$$\delta = 2\frac{B}{T} - 5.5 \quad (C_b > 0.87 \text{ 且 } B/T > 3.5) \tag{10}$$

根据系数 δ 和系数 C_1 计算系数 C_2：

$$\begin{cases} C_2 = C_1 - C_1 C_b \delta/10 & (\delta < 4) \\ C_2 = C_1 - 0.4 C_1 C_b & (\delta \geqslant 4) \end{cases} \tag{11}$$

4）计算系数 C_3。

$$C_3 = C_2 L_{wl}/(1.025L) \tag{12}$$

式中：L 为垂线间长；L_{wl} 为水线长。

2　案例分析

选取长江水系金沙江乌东德库尾河段进行分析验证，根据中国海事局发布的《航区划分规则(2021)》[16]，长江金沙江段为 C 级航区，并为 J_1 级航段，因此，该航段为 J_1 航段。

金沙江乌东德库区常年回水区末端至雅砻江口之间河段为变动回水区，长约 58 km，现有滩险 18 个，其中下段紫石坝—糯鲊滩 13 km 河段为峡谷段，山高谷深、河道狭窄，基岩凸咀及溪沟堆积扇沿河道分布广泛。乌东德电站汛期低水位运行时，该河段恢复天然状况，遇中洪水流量，滩险段流速急、比降陡，滩上最大流速普遍在 5 m/s 以上，是典型的急滩河段。

2.1　现有船舶情况

根据统计，金沙江乌东德库尾河段营运的 1 000 吨级散货船共 6 艘，见表 2。

表 2　现有船舶参数

Tab. 2　Parameters of existing vessels

序号	代表船名	建造年代	船长/m	船宽/m	吃水/m	主机功率/kW
1	万友 6 号	2012	58.0	10.8	3.00	404
2	万友 8 号	2012	58.0	10.8	3.00	404
3	万友 9 号	2012	58.0	10.8	3.00	404
4	创顿 666	2019	54.0	10.8	2.75	1 060
5	创顿 888	2019	54.0	10.8	2.75	1 060
6	创顿 999	2019	54.0	10.8	2.75	1 060

由表 2 可见，工程河段现有的 1 000 吨级散货船主要分为两批次建造，其主机功率配置差异较大，2019 年建造的“创顿”系列主机功率是 2012 年“万友”系列的 2.6 倍。若以“万友”号为代表，计算出的消滩指标将极高，需对河道进行大规模整治；若直接采用“创顿”号，则需论证其功率配置的科学性。

2.2　方法验证

利用回归计算法计算“创顿 666”满足 J_1 航段最低航速要求(20.7 km/h)所需的有效功率，根据推进系数反算主机功率，并与实船对比。有效功率及主机功率计算结果见表 3。

表 3　有效功率计算

Tab. 3　Calculation of effective power

代表船型	L/m	B/m	T/m	C_b	Δ/t	N_p	$L/\Delta^{1/3}$	V'/(km·h^{-1})	Fr	C_0
创顿 666 号	54	10.8	2.75	0.8	1 283	2	4.970	20.7(5.75 m/s)	0.25	350
1 000 吨级设计代表船型	63	11.0	2.60	0.8	1 441	2	5.577	20.7(5.75 m/s)	0.231	410

代表船型	C_{bc}	t	K_{bc}	C_1	B/T	δ	C_2	C_3	P_e/kW	e	P_s/kW
创顿 666 号	0.670	−1.935	−10	315	3.927	2.855	243	237	422	0.38~0.41	1 029~1 110
1 000 吨级设计代表船型	0.701	−1.405	−10	369	4.231	3.462	267	260	415		1 012~1 092

注：L 为船长；N_p 为船桨数量；V' 为最低设计航速。

根据蒋孜伟及许光祥等[17]的研究，山区船舶在额定工况下的推进系数 e 介于 0.38~0.41 之间，由 e 反算得到的主机功率范围为 1 029~1 110 kW，与“创顿 666”实际配置的主机功率(1 060 kW)吻合较好，证明基于最低航速要求及回归计算的有效功率确定方法科学可靠，能够准确反映急流河段船舶的动力配置发展趋势。

2.3　设计代表船型有效功率确定

在金沙江乌东德库尾河段航道整治工程设计时，根据《内河通航标准》《内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列》确定设计代表船型为 1 000 吨级散货船，其尺度为 63.0 m×11.0 m×2.6 m，利用

上述方法进行计算，所得主机功率范围为 1 012～1 092 kW。因此，对于该设计代表船型，为满足 J_1 航段最低航速要求，主机功率范围应在 1 012～1 092 kW 范围内选取，结合近年船舶主机选型情况，最终确定设计代表船型主机功率为 1 060 kW（2×530 kW）。在该河段航道整治工程设计中，以此参数计算通航水力指标，有效解决了现状船舶主机功率数据差异大带来的参数选取困难问题，相比传统上取较小船舶功率作为计算参数的保守做法，按照上述功率计算通航水力指标，可将急流滩最大流速控制目标由 3.4 m/s 提高至 4.5 m/s，在满足船舶自航上滩要求的同时，避免了对峡谷段两侧山体的大幅开挖，有效降低了该河段急流滩整治的难度与规模，避免了高强度工程措施对生态环境、两岸山体边坡稳定及河道行洪安全带来的不利影响，取得了较好的应用效果。

3 结论

1）针对急滩整治中面临的现有船舶功率数据离散、船舶尺度与设计代表船型不匹配问题，引入了船舶法规中最低航速要求及船舶有效功率回归计算方法，为急滩通航水力指标计算中设计代表船型主机功率的确定提供了标准化方法。

2）案例验证表明，基于该方法计算的船舶功率指标与近年来新建船舶主机实际功率吻合较好，具有较高的可靠性。

3）鉴于航道整治工程面临的外部制约条件愈发严苛，在急滩航道整治设计中，建议采用上述方法确定设计代表船型有效功率，并以此为基础计算通航水力指标。

4）对于主机功率较低的老旧船舶，应在急滩成滩期采取减载上行或助拖措施，以保障航行安全。

参考文献：

[1] 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 M X, LI H B, LU H J. Discussion on methods to determine rapids suppression hydraulic indexes [J]. Yangtze River, 2004, 35(11): 35-37.

[2] 曹民雄. 山区河流急流滩险航道整治技术研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.
CAO M X. Study on the regulation of waterway with rapids in mountainous rivers [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005.

[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 M X, JIANG J H, TANG C B, et al. Comparison and analyses of calculation methods for resistance of ships ascending rapids [J]. Hydro-science and engineering, 2005(2): 41-45.

[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 Y B. Discussion on the method of inland ship sailing resistance calculation [J]. Journal of waterway and harbor, 2002, 23(1): 7-11.

[5] 许光祥, 范小寒, 马超峰, 等. 基于澜沧江实船试验对兹万科夫船舶阻力计算方法的修正[J]. 船海工程, 2023, 52(1): 56-61.
XU G X, FAN X H, MA C F, et al. Modification of the Эиванков ship resistance calculation method based on real ship test in Lancang River [J]. Ship & ocean engineering, 2023, 52(1): 56-61.

[6] 吴俊, 刘维, 马希钦, 等. 中间渠道船舶航行阻力计算方法与试验[J]. 水运工程, 2022(12): 84-91.
WU J, LIU W, MA X Q, et al. Calculation method and test of ship navigation resistance in intermediate channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 84-91.

[7] 程弘宇, 张首元, 赵根生, 等. 通航隧洞船舶航行阻力试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 101-105, 125.
CHENG H Y, ZHANG S Y, ZHAO G S, et al. Test of sailing resistance of ship in navigable tunnel [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 101-105, 125.

[8] 马希钦, 李宗激, 冯伟, 等. 中间渠道 3 000 吨级内河船舶浅水效应研究[J]. 水运工程, 2025(9): 153-161, 173.
MA X Q, LI Z J, FENG W, et al. Shallow water effects on 3, 000-ton-class inland waterway vessels in intermediate

channel[J]. Port & waterway engineering, 2025(9): 153-161, 173.

[9] 刘添宇. 山区河流跌水碍航机理及船舶上滩能力研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
LIU T Y. Study on the navigation-obstructing mechanisms of drops in mountain rivers and ship rapid-ascending capacity[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.

[10] 周冠伦. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
ZHOU G L. Waterway engineering handbook [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

[11] 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(2): 100-106.
TONG S C, XU G X, DENG M W. Calculation of sailing resistance and navigable hydraulic parameters for inland ships [J]. Hydro-science and engineering, 2010(2): 100-106.

[12] 蒋孜伟. 山区船舶推进特性及消滩水力指标研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
JIANG Z W. Study on ship propulsion characteristics and rapids abating hydraulic index in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

[13] 王志芳, 阳子轩, 陈庆任. 数字化船舶 EEDI 验证方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(10): 1189-1194.
WANG Z F, YANG Z X, CHEN Q R. Digital verification method of ship EEDI[J]. China mechanical engineering, 2022, 33(10): 1189-1194.

[14] 中国海事局. 内河船舶法定检验技术规则(2023 年修改通报)[EB/OL]. (2023-07-27)[2025-10-05]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mdgz/ntu4/~edisp/20230727083558407. pdf.
Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Rules for the statutory surveys of inland water ships(2023 amendment bulletin)[EB/OL]. (2023-07-27)[2025-10-05]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mdgz/ntu4/~edisp/20230727083558407. pdf.

[15] 中国海事局. 内河新建船舶能效设计指数(EEDI)实施指南[EB/OL]. (2024-09-25)[2025-10-08]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mta0/odmw/~edisp/20241008104830914. pdf.
Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Implementation guidelines for energy efficiency design index (EEDI) of newly-built inland water ships [EB/OL]. (2024-09-25)[2025-10-08]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mta0/odmw/~edisp/20241008104830914. pdf.

[16] 中国海事局. 航区划分规则(2021)[EB/OL]. (2021-09-15)[2025-10-15]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mduy/mde4/~edisp/20220310052018149. pdf.
Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Regulations on navigation area zoning(2021)[EB/OL]. (2021-09-15)[2025-10-15]. https: //www. msa. gov. cn/public/documents/document/mduy/mde4/~edisp/20220310052018149. pdf.

[17] 许光祥, 段周平, 胡小庆. 急滩消滩指标的分析与运用[J]. 水运工程, 2015(7): 108-113.
XU G X, DUAN Z P, HU X Q. Analysis and application of rapids abating indicators[J]. Port & waterwaye ngineering, 2015(7): 108-113.

(本文编辑　赵娟)

声　明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www. sygc. com. cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部