



中间渠道船舶航行阻力计算方法与试验^{*}

吴俊¹, 刘维², 马希钦¹, 舒岳阶¹, 李晓飚¹

(1. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

2. 重庆交通大学, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 中间渠道作为特殊限制性航道, 船舶航行阻力是其尺度确定的关键参数。针对现有船舶航行阻力计算方法, 分析其适用性, 选取考虑了航道宽度和吃水比等因素的俞中奇公式作为中间渠道船舶阻力的参考计算公式, 设计中间渠道船舶航行阻力试验方案, 并开展3 000吨级散货船模航行试验, 根据试验结果对俞中奇公式进行修正, 利用Flow3D模拟船舶在不同断面系数下中间渠道中航行并提取阻力, 验证修正公式的准确性。结果表明, 修正后的经验公式计算结果与数模对比, 最大误差不超过16.89%。该公式具有较高的计算精度, 对中间渠道设计具有重要的参考价值。

关键词: 中间渠道; 阻力; 估算公式; 船模试验; 数值计算

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0084-08

Calculation method and test of ship navigation resistance in intermediate channel

WU Jun¹, LIU Wei², MA Xi-qin¹, SHU Yue-jie¹, LI Xiao-biao¹

(1. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of the Ministry of Transport,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The intermediate channel is a special restricted channel, and the ship navigation resistance is the key parameter to determine its scale. This paper analyzes the applicability of the existing calculation methods for ship navigation resistance and selects YU Zhongqi's formula considering factors such as the channel width and draft ratio as the reference formula for the calculation of ship resistance in the intermediate channel. The paper designs the test plan of the ship navigation resistance in the intermediate channel and carries out the navigation test on a 3 000-ton bulk carrier model. According to the test results, the paper revises YU Zhongqi's formula and uses Flow3D to simulate the ship navigation in the intermediate channel under different section coefficients and extract the resistance to verify the accuracy of the corrected formula. The calculation results of the revised empirical formula are compared with those of the numerical model and the physical model separately, and the maximum error is no more than 16.89%. The results show that the formula has high calculation accuracy and has an important reference value for the design of intermediate channels.

Keywords: intermediate channels; resistance; estimation formula; ship model test; numerical calculation

对于西部山区高坝, 由于山区地形地势的限制, 需要通过中间渠道的方式将梯级船闸或者升船机之间进行串联。因此中间渠道可充分利用现场地形进行设计和布置, 适用性强。但中间渠道

是典型的限制性航道, 船舶在此类航道中航行阻力增加、速度降低、操纵性能变差^[1]。鉴于以上特点, 中间渠道尺度和船舶通航标准的确定有别于《内河通航标准》^[2]中一般河流的限制性航道,

收稿日期: 2022-04-01

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402006); 重庆市交通局科技项目(2020-08)

作者简介: 吴俊(1981—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为码头结构智能监测与水利信息化。

具有其自身的特点, 特别是高等级航道中间渠道的设计, 尚无规范或标准可供遵循。

高等级航道中间渠道的设计可认为与航速、航行阻力、船尾下沉等船舶航行特性具有高度的相关性。现已对船闸输水特性、中间渠道内非恒定流和尺度之间的关系进行一系列研究^[3-5], 另现有限制性航道船舶阻力计算方法通常是以人工运河、内河或闸室为研究对象: 如兹万科夫公式和我国川江驳船船舶阻力计算公式^[6]; 周华兴等^[7]、胡绪锯^[8]分别以运河为例分别对 60~1 000 t 的驳船进行阻力与断面系数关系的分析计算, 得到限制性航道船舶阻力换算系数 K_n ; 周华兴^[9]通过分析国内外船闸闸室阻力与航速、断面系数的关系, 得到船舶进出船闸的阻力公式; 俞中奇等^[10]基于 1 000 吨级散货船的阻力试验结果, 得出适用于内河限制性 III 级航道的船舶阻力估算公式; 李果^[11]考虑了不同缩尺对船舶阻力影响, 通过数值模拟不同缩尺比模型的船舶阻力后得到适用于 1 万吨级船舶在长江人工水道的阻力预报公式, 另长江干线主力运输船型方形系数普遍较大, 一般在 0.80~0.87, 中横剖面系数趋近 1.0 且属于肥大型船舶。而肥大型船舶航行时, 破波阻力不同于普通船型的阻力成分, 它遵循弗劳德相似规律, 起因于兴波机理, 表现为尾流速度亏损^[12]。该船型的球鼻艏和艉部型线改变了船舶的兴波阻力, 其对摩擦阻力影响不大, 但是对剩余阻力有较大的影响, 因此有必要对与船型参数有关的剩余阻力进行修正^[13]。

寻找影响通航条件下阻力、流速和断面系数之间的规律, 得出中间渠道船舶航行阻力计算方法, 有利于确定中间渠道合理的尺度及相应的安全通航标准, 优化本身就具有较大阻力的大型船舶。这不仅与通航安全和经济效益直接相关, 还符合节约资源与环保的理念^[14]。

1 现有船舶航行阻力计算公式适用性分析

1.1 船舶阻力

船体在航行过程中所受船体总阻力与各阻力

成分之间关系如图 1 所示。按产生阻力的物理现象分类时, 各种阻力成分在总阻力中所占比例在不同航速的船中是不同的。对于低速船来说, 摩擦阻力 R_f 占总阻力的 70%~80%, 黏压阻力 R_{vp} 约等于或大于 10%, 而兴波阻力 R_w 比例很小; 对于高速船, R_f 占总阻力的 40%~50%, 而 R_w 产生的能量与其扩散的角度由水深弗劳德数 Fr_h 决定, 可达 50% 左右, R_{vp} 仅占 5% 左右; 对于肥大型船舶, 被船体兴起后很快就破碎的波浪称为破波, 并不以波浪的形式留在船后, 其波能转化为涡动量, 然后以湍流形式而耗散。

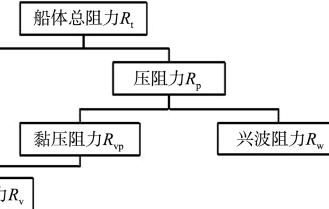


图 1 船体阻力成分

1.2 现有计算公式

Holtorp 阻力估算公式为^[15-18]:

$$R_t = R_f (1 + K_1) + R_{app} + R_w + R_b + R_{tr} + R_a \quad (1)$$

式中: R_f 为根据国际拖曳水池会议 ITTC1957 公式得到的摩擦阻力; R_{app} 为附体阻力; R_b 为球鼻艏引起的附加阻力; R_{tr} 为方艉浸没引起的附加阻力, 由于 3 000 吨级干散货船无尾板, 则 $R_{tr} = 0$; R_a 为船模与实船换算的相关补贴阻力。

式(1)在船型过于肥大、船型变化剧烈的情况下, 计算波浪阻力时会有数值上的振荡问题产生, 对船舶阻力系数和波形的计算造成一定困难^[19]。适用于估算方形系数为 0.46 的细长型军舰和弗劳德数较低的船舶阻力。

兹万科夫公式为^[20]:

$$R = 0.17Sv^{1.83} + \xi C_B A_M v^{1.7+4Fr_h} \quad (2)$$

$$S = L_w (1.8d + C_B B) \quad (3)$$

$$\xi = 1.77m C_B^{2.5} / [(L/6B)^3 + 2] \quad (4)$$

式中: R 为水流阻力 (N); S 为船舶浸湿面积 (m^2); L_w 为水线长 (m); d 为吃水 (m); B 为船宽 (m); C_B 为方形系数; v 为船对水速度 (m/s), 其值为表面流速 v_s 与船舶对岸航速 v_c 之和; A_M 为

中横剖面面积(m^2)； ξ 为剩余阻力系数； L 为船长(m)； m 为相关参数，无隧道船取 1.0，有隧道船取 1.2。

式(2)右侧第 1 项为船舶摩擦阻力，第 2 项为船舶剩余阻力。与无限水深中船舶航行阻力相比，其摩擦阻力相同，中间渠道的船舶阻力受到岸壁效应和浅水效应的影响，总阻力差异主要反映在剩余阻力的增大。因此，应用该公式在中间渠道、人工运河等限制性渠道中的船舶阻力估算，须通过试验修正剩余阻力系数。内河船舶的水流阻力常使用该公式粗略计算。

川江驳船船舶阻力计算公式为：

$$R = f' S v^{1.83} + \xi C_B A_M v^{1.7+0.03v} \quad (5)$$

$$f' = k [0.137 + 0.258 / (2.68 + L_w)] \quad (6)$$

$$k = [1 + 0.0043 (15 - t)] \quad (7)$$

式中： f' 为摩擦阻力系数； t 为水温(℃)； ξ 为剩余阻力系数，取 6.0。

由于中间渠道断面系数小，通过自航船模试验观测到：船底和船侧的流速较无船时航道中的流速有明显增加 15%~20%。因此，在使用该公式时均将表面流速乘以修正系数 $\alpha = 1.15$ ，即 $v = 1.15 v_s + v_c$ ^[21]。

俞中奇等根据相关文献，参考有关近似计算方法及公式，提出了船舶在限制性航道中航行阻力的近似估算公式：

$$R = 1.7 S v^{1.83} + 0.5 S v^2 \xi \left(Fr_h, \frac{h}{d} \right) / \left(\frac{L}{6B} \right)^3 K_b \quad (8)$$

$$K_b = 0.0995 \left(\frac{W}{B} \right)^2 - 1.371 \cdot \frac{W}{B} + 5.55 \quad (9)$$

为便于计算，对剩余阻力系数进行了回归分析，得到：

$$\xi \left(Fr_h, \frac{h}{d} \right) = a Fr_h^3 + b Fr_h^2 + c Fr_h + d' \quad (10)$$

$$a = -1118 \left(\frac{h}{d} \right)^3 + 6723 \left(\frac{h}{d} \right)^2 - 13427 \cdot \frac{h}{d} + 90 \quad (11)$$

$$b = 1087 \left(\frac{h}{d} \right)^3 - 6517 \left(\frac{h}{d} \right)^2 + 12989 \cdot \frac{h}{d} - 870 \quad (12)$$

$$c = -388.1 \left(\frac{h}{d} \right)^3 + 2331 \left(\frac{h}{d} \right)^2 - 4655 \cdot \frac{h}{d} + 31 \quad (13)$$

$$d' = 47.6 \left(\frac{h}{d} \right)^3 - 286.3 \left(\frac{h}{d} \right)^2 + 570.4 \cdot \frac{h}{d} - 378.5 \quad (14)$$

式中： R 为船舶阻力(N)； S 为船体湿表面积(m^2)，可按 $L_w (2d + C_B B)$ 估算； h 为水深(m)； W 为航道宽度(m)； a 、 b 、 c 、 d' 为回归系数。

俞中奇公式考虑到船舶在限制性航道中航行时，航道深度和宽度对船舶航行阻力影响较大。因此在内河船舶水流阻力计算公式的基础上，通过船模试验以 Fr_h 和 h/d 为参数对船舶剩余阻力系数进行修正，使其对 1 000 吨级散货船在限制性Ⅲ级航道的航行阻力计算中有更高的精度。

1.3 分析比较

针对多种方法在不同水深弗劳德数下的船舶阻力通过试算进行了分析比较。3 000 吨级干散货船的船舶参数为：船长 86.8 m，设计吃水 2.8 m，船宽 16.2 m，方形系数 0.837，水线长 84.8 m，船体湿表面积 1 577.2 m^2 ，排水量 3 962.1 t，中横剖面系数 0.985，菱形系数 0.849。中间渠道底宽 40.6 m，梯形截面坡度为 1:2，水深 6 m。计算结果如图 2 所示。

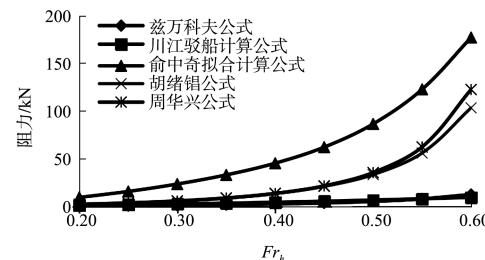


图 2 不同水深弗劳德数下各公式船舶阻力计算结果

由图 2 可看出，各公式计算结果趋势一致，均随着水深弗劳德数增加而增加。 Fr_h 为 0.2~0.4 时，胡绪锯和周华兴公式的计算值为兹万科夫和川江驳船公式计算值的 2~3 倍；俞中奇公式计算值为兹万科夫和川江驳船公式计算值的 7~10 倍。 Fr_h 为 0.4~0.6 时，胡绪锯和周华兴公式的计算值为兹万科夫和川江驳船公式计算值的 3~12 倍；俞中奇公式计算值为兹万科夫和川江驳船公式计算值的 10~18 倍。

胡绪锯和周华兴的公式在川江驳船阻力计算公式的基础上，还考虑了断面系数对船舶阻力的

影响, 在深水航道阻力计算公式的基础上乘以换算系数 K_n 。俞中奇公式则分别对兹万科夫公式的摩擦阻力项和剩余阻力项进行修正: 摩擦阻力方面, 船体湿表面面积的吃水项由 $1.8d$ 改成 $2d$, 主要考虑到在限制性航道中, 船底流速增加, 压力降低, 从而使船体下沉, 吃水增加; 剩余阻力方面, 则使用 Fr_h 、 h/d 、 W/B 经量纲分析对剩余阻力系数进行修正。

综上分析, 俞中奇公式较其他公式更有优越性以及可研究性, 理由如下: 1) 船闸灌泄水在中间渠道内形成非恒定流, 会加大渠道水面比降和流速并额外产生往返传递的波。对船舶航态产生不利影响, 船舶阻力的峰值较一般限制性航道大。2) 摩擦阻力主要与舷侧湿面积和船周流速有关, 剩余阻力与渠道内兴波、回流速度和水面比降等产生的压力梯度有关, 二者对船舶阻力的影响宜分开考虑。因此选择俞中奇限制性渠道船舶阻力计算公式进行改进, 使其适用于中间渠道船舶阻力计算。

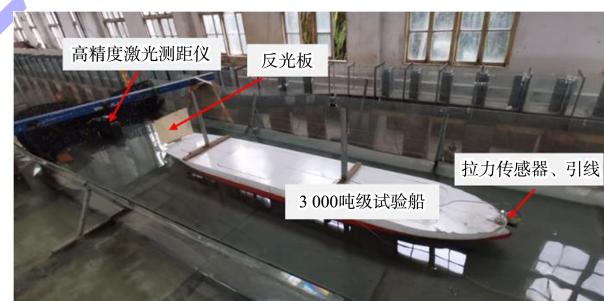
2 中间渠道船舶阻力试验

2.1 试验方案

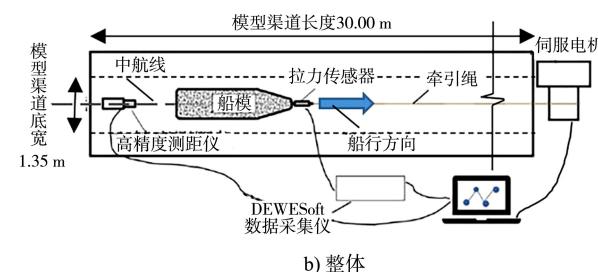
在 1:30 的中间渠道概化模型(梯形截面坡度为 1:2)上进行船舶通航试验, 渠道底宽 40.6 m, 设计最低通航水位为 3.5 m。船舶阻力测定试验设备主要包括: 按缩尺比为 1:30 制作的 3 000 吨级试验船、高精度激光测距仪、拉力传感器以及伺服电机。激光测距仪布置在中间渠道左侧底部, 利用高精度激光测距仪实时获取船舶航行时的距离, 通过时间换算得到船舶航行时的速度; 拉力传感器布置在船头与牵引线之间, 牵引器由右侧底部伺服电机牵引, 从而带动船模运动。根据中间渠道尺度与船舶航速, 利用俞中奇公式对船舶阻力进行计算。同时利用船舶上设置的阻力测定传感器对船舶阻力进行测量, 两者比较, 对船舶阻力计算方法进行验证。船舶参数与 1.3 节相同, 船舶阻力测量工况见表 1, 试验设备布置如图 3 所示。

表 1 3 000 吨级单船船舶阻力测量工况

水深/m	断面系数 n	实测船速/(m·s ⁻¹)	Fr_h
4.9	4.65	1.04	0.15
		2.39	0.34
		2.91	0.42
		3.31	0.48
		3.53	0.51
		3.63	0.52
4.5	4.25	1.10	0.13
		2.30	0.26
		2.71	0.31
		2.92	0.35
		3.16	0.44
		1.14	0.18
3.9	3.66	2.01	0.32
		2.40	0.39
		2.52	0.41
		2.64	0.43
		0.90	0.15
		1.68	0.29
3.5	3.27	1.93	0.33
		2.12	0.36
		2.20	0.38



a) 现场



b) 整体

图 3 船舶阻力测定试验设备布置

2.2 试验结果

由于俞中奇公式主要针对内河限制性Ⅲ级航道条件情况下的船舶阻力计算, 为了评价其在中间渠道中的适用性, 需要通过模型试验对其进行验证,

并根据试验结果对其进行修正。实测结果和俞中奇公式计算的结果如图 4 所示。

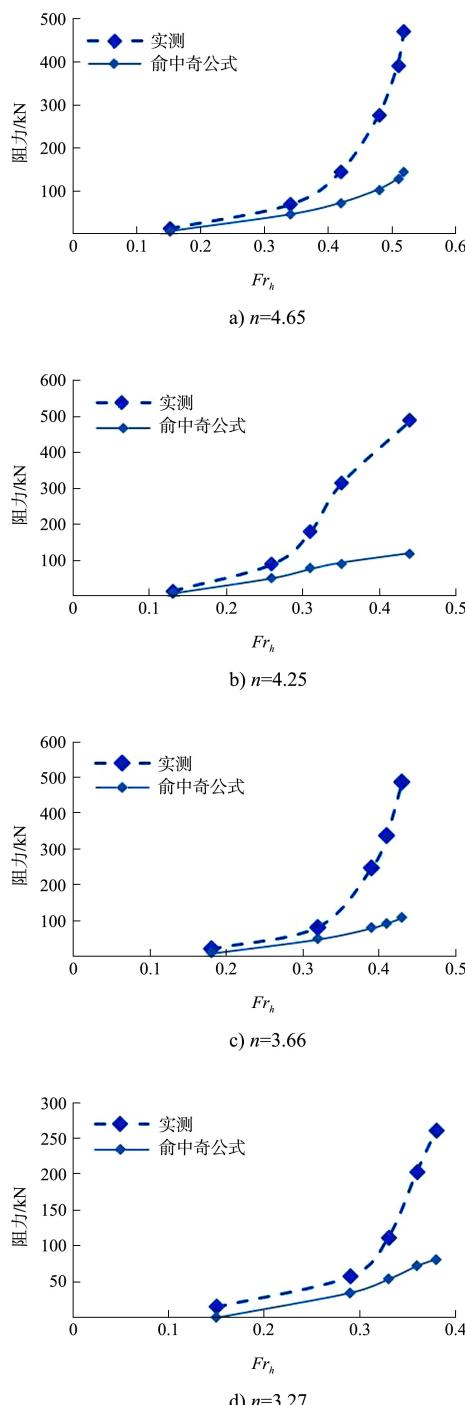


图 4 梯形截面坡度为 1:2 的实测数据
与俞中奇公式计算结果对比

3 改进船舶航行阻力计算方法

3.1 改进公式

通过船舶阻力试验, 测定不同航速条件下 3 000 吨级干散货船在不同水深情况下的航行阻力

值。由图 4 可知, 虽然试验船舶阻力值与俞中奇公式计算值都随佛罗德数增加均呈逐渐增大的趋势, 但每一级弗罗德数的船舶阻力值相差较大。因此针对中间渠道限制性航道结合俞中奇提出的经验公式, 需提出船舶在中间渠道限制性航道中航行阻力的近似估算公式。

由于船体形状是沿其纵中剖面对称分布的, 因此船体表面上压力和切向力都以其纵中剖面都对称分布, 其合力 P_1 必位于纵中剖面上。根据力的平移定理, 在船的重心 G 处加上一对大小等于合力 P_1 , 但方向相反的力 P_2 和 P , 如图 5 所示。于是船体可以被看作在重心 G 处受到一个 P 作用力和由 P_1 、 P_2 组成力偶的作用, 力偶使船发生纵倾。作用力 P 的垂向分力 Q 即浮力, 水平分量 R_t 即为与船舶运动相反的阻力。水平分量 R_t 即船体表面上所有微面积 dS 上切向力 τ 和压力 p 在运动方向的合力:

$$R_t = - \int_S \tau \cos \beta dS - \int_S p \cos \gamma dS = R_f + R_p \quad (15)$$

式中: β 为 τ 与船体运动方向的夹角; γ 为 p 与船体运动方向的夹角。

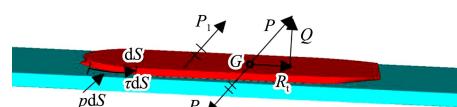


图 5 船体受力

式(15)中负号表示该作用力为阻力且与船体运动方向相反。船体在中间渠道中进行直线运动时, 一方面由于中间渠道尺度有限使船周更易产生漩涡和兴波, 造成垂直于船体表面的压力; 另一方面, 船体还受到水的摩擦阻力作用, 这种阻力是由于水质点沿着船体表面切向运动引起的。所以中间渠道船舶航行阻力除受船舶参数和回流速度会对摩擦阻力影响外, 渠道断面系数、水深、船舶参数和回流速度等还会影响其压阻力, 分析影响阻力的因素即:

$$R_f = f_1(L_w, B, d, C_B, v, r, \rho, g, \nu, Re_1, x) \quad (16)$$

$$R_p = f_2(W, h, i, L_w, B, d, C_B, v, r, \rho, g, \nu, Fr_h, x) \quad (17)$$

根据相关文献, 得到阻力与相关参数:

$$R_t = R_f + R_p = f_1 \left(Re_t, \frac{\Delta v}{v}, S \right) + f_2 \left(n, \frac{L}{B}, Fr_h, \frac{\Delta v}{v}, S \right) \quad (18)$$

当船舶尺度、水体的物理特性等因子固定时, 参考有关近似计算方法及公式, 则:

$$R_t = R_f + R_p = 1.7S v^{1.83} + 0.5S v^2 \xi(Fr_h, n) / \left(\frac{L}{6B} \right)^3 \quad (19)$$

$$\xi(Fr_h, n) = a_1 Fr_h^3 + b_1 Fr_h^2 + c_1 Fr_h + d_1 \quad (20)$$

式中: r 为水力半径 (m), 其值为 ω/x , 其中 x 为渠道的湿周 (m), ω 为渠道断面面积 (m^2); Δv 为回流速度 (m/s); i 为渠道坡度; ρ 为水的密度 (kg/m^3); v 为运动黏性系数 (m^2/s); Re_t 为船舶雷诺数; a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 为回归系数。

通过 3 000 吨级单船船舶阻力试验数据, 结合式(19)(20)计算得到 ξ 与 Fr_h 的关系, 其具体剩余系数计算值见图 6。

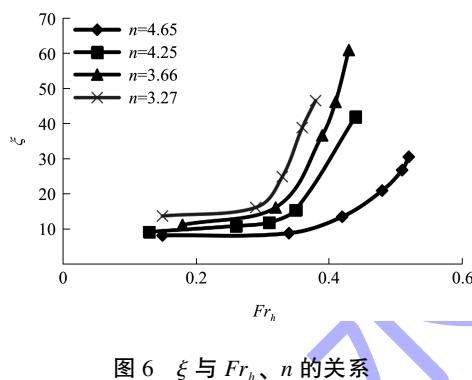


图 6 ξ 与 Fr_h 、 n 的关系

为便于计算, 对剩余阻力系数进行了回归分析, 得到回归系数为:

$$a_1 = 5\ 024\ n^3 - 59\ 618\ n^2 + 228\ 257.1n - 276\ 459 \quad (21)$$

$$b_1 = -4\ 100.8\ n^3 + 49\ 301.6\ n^2 - 192\ 345.3n + 240\ 005.6 \quad (22)$$

$$c_1 = 1\ 072.4\ n^3 - 13\ 029.3\ n^2 + 51\ 561.7n - 65\ 703 \quad (23)$$

$$d_1 = -95\ n^3 + 1\ 164.2\ n^2 - 4\ 665.2n + 6\ 068.5 \quad (24)$$

为验证拟合公式的精度, 将试验数据代入式(19)中, 将试验结果与拟合公式计算结果进行比较, 见表 2。可以看出, 拟合公式具有比较满意的计算误差, 平均相对误差 $\leq 8.45\%$ 。计算结果与试验结果吻合良好。由此可知, 所提出的船舶航行阻力计算公式是合理的, 对分析船舶阻力具有

很好的参考价值。

表 2 实测与拟合公式计算的剩余阻力系数误差

n	Fr_h	拟合公式计算的剩余阻力系数	实测剩余阻力系数	误差/%
4.65	0.15	7.84	8.09	3.06
	0.34	8.89	8.74	1.71
	0.42	13.57	13.41	1.20
	0.48	21.07	20.84	1.14
	0.51	27.19	26.66	1.96
	0.52	30.58	30.44	0.48
4.25	0.13	9.00	9.14	1.58
	0.26	12.90	13.17	2.07
	0.31	21.78	20.08	8.45
	0.35	29.72	31.21	4.80
	0.44	42.81	42.12	1.63
	0.18	11.04	11.12	0.75
3.66	0.32	16.16	16.04	0.74
	0.39	36.02	36.53	1.40
	0.41	46.97	46.05	1.99
	0.43	60.60	60.80	0.34
	0.15	13.54	13.62	0.56
	0.29	15.99	16.05	0.36
3.27	0.33	25.04	24.80	0.97
	0.36	38.45	38.75	0.77
	0.38	46.65	46.41	0.50

3.2 数值计算方法验证

目标船为 3 000 吨级干散货船, 参数见 1.3 节。考虑到比尺效应可能会影响验证的精度, 数模与船模自航试验选取相同几何比尺 (1:30) 的 3 000 吨级船舶, 将船体、边壁、水面附近等重点关注区域的网格进行加密 (图 7), 以下为中间渠道长 900 m, 宽 52.65 m, 水深 3.4 m, 船舶沿中航线航行, 船舶航速在 2 s 内线性增加至 0.77 m/s, 其后以 0.77 m/s 匀速行驶, 总网格量约为 500 万个, 验证时船舶航速取 0.77 m/s。

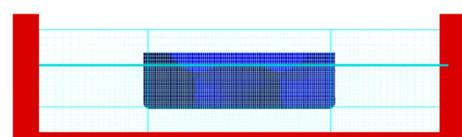


图 7 计算网格

为了关注更多断面系数与不同航速下船舶下沉量和航行阻力的关联关系,采用流固耦合数值模拟方法对下沉量和航行阻力,尤其是航行阻力中剩余阻力和黏性阻力的影响,基于通用商业软件平台 Flow3D 求解器,对中间渠道船舶运动黏性流场进行数值模拟,并布置观测点于船体上。流体的质量守恒定律由连续方程来描述。流体的动量守恒定律由动量方程(N-S 方程)描述。采用重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型使方程封闭。计算区域内的流体具有自由液面,采用 TrueVOF 模型。方程离散采用有限差分法。

计算域范围及边界条件如图 8 所示。矩形计算区域对于船舶在渠道流场数值计算是简明而有效的,具体范围为:上边界从船首向前延伸至 0.5 倍船长处;下边界从船尾向后延伸值 1 倍船长处;侧面边界从船体中纵剖面向两侧延伸相应倍数的船长;底部边界为从设计吃水的水平面向下取 3.4、3.8 及 4.3 m。船首前方边界(边界 A)设定为定常均匀流来流边界,船尾后方边界(边界 B)设定为自由出流边界,船体左、右两侧侧边界(边界 C 和 D)及等深的河床底部边界(边界 E)为不可渗透无滑移壁面边界,作为上边界的自由表面(边界 F)上给定常压条件。在边界 A 上,来流的速度和流向恒定。

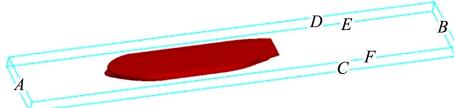


图 8 计算域范围及边界条件

船舶稳定后的船周压力与渠道内流速分布见图 9。可以看出,渠道的断面系数较小,渠道内水体的过水面积比较小,由于船舶扰动,渠道内的水体,尤其是船舶所处局部区域与船舶的运动相互耦合,同时,渠道水面波动由于壁面及船体的反射作用在狭窄渠道内回荡叠加,渠道内水面波动也不断产生,也造成了船舶的航行阻力。

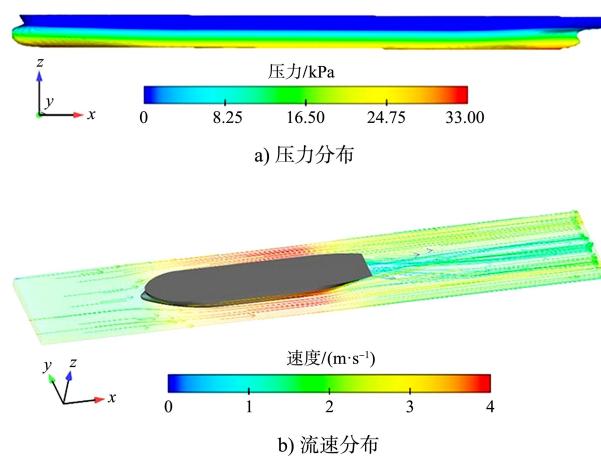


图 9 船周压力与渠道内流速分布

数值模拟与修正后的俞中奇公式计算的剩余阻力系数及总阻力见图 10、表 3。可以看出,船舶阻力数模计算结果与修正后的经验公式计算结果最大误差不超过 16.89%,修正后的俞中奇公式计算结果与实测值吻合精度较高。

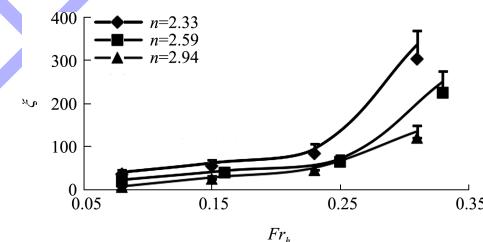


图 10 数模与拟合公式结果对比

表 3 各工况下船舶阻力结果

n	Fr_h	数模计算的总阻力/kN	修正俞中奇公式计算的总阻力/kN	误差/%
2.59	0.08	18.70	22.50	16.89
	0.16	39.34	43.44	9.44
	0.25	64.08	71.35	10.19
	0.33	224.13	249.37	10.12
2.94	0.08	6.17	7.32	15.71
	0.15	24.91	27.93	10.81
	0.23	45.12	50.31	10.32
	0.31	120.02	134.51	10.77
2.33	0.08	35.33	40.01	11.70
	0.16	54.40	61.49	11.53
	0.25	83.29	94.15	11.53
	0.33	302.19	334.87	9.76

4 结论

1) 本文提出了适用于 3 000 吨级干散货船、梯形截面坡度为 1:2、断面系数为 3.27~4.65 的中间渠道阻力计算公式, 且其在矩形截面、断面系数为 2.33~2.59、水深弗劳德数为 0.08~0.33 的中间渠道有较高精度, 可为中间渠道中最小断面系数确定和肥大型船舶快速性的预报分析提供参考。

2) 过去限制性渠道中船舶航行阻力计算方法主要以人工运河、内河或闸室为研究对象。本文在分析已有限制性渠道阻力计算方法的基础上, 结合中间渠道内的非恒定流会对船舶航态产生不利影响的特点, 通过试验和数模验证的方法得出中间渠道内船舶航行阻力计算方法。

3) 由于航道断面和试验的船型状态有限, 也未考虑中间渠道由于非恒定流引起额外产生往返传递的波和水面比降对阻力的影响。该阻力估算公式的适用范围仍有一定的局限性, 需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 祝龙, 刘本芹, 宣国祥, 等. 分散梯级船闸中间渠道水力特性及关键参数影响研究[J]. 水运工程, 2020(12): 15-21.
- [2] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] TERZIEV M, TEZDOGAN T, OGUZ E, et al. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters[J]. Journal of fluids and structures, 2018, 76: 185-215.
- [4] 孟祥玮. 船闸灌泄水引航道非恒定流研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [5] 杨俊毅, 于广年, 汪磊, 等. 不同船闸泄水过程限制性中间通航航道流速变化规律[J]. 水运工程, 2022(3): 106-110.
- [6] 伊绍琳. 船舶阻力[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [7] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006(1): 53-58, 67.
- [8] 胡绪辑. 浅水航道与狭窄航道对船舶阻力的影响[J]. 水运工程, 1984(6): 27-29.
- [9] 周华兴. 船闸闸室断面系数与阻力、航速关系的初步探讨[J]. 水道港口, 1983(1): 18-25.
- [10] 俞中奇, 袁章新, 周超. 限制性Ⅲ级航道船舶阻力试验研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2014, 37(4): 23-27, 49.
- [11] 李果. 长江人工水道与万吨级船舶相关性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [12] BABA E. A new component of viscous resistance of ship[C]//The Proceeding of Society of Naval Architects of Japan. Tokyo: Society of Naval Architects of Japan, 1969: 23-34.
- [13] 郭春雨, 黄超, 邓锐, 等. 肥大型船舶阻力计算方法修正[J]. 船海工程, 2014, 43(3): 1-5.
- [14] 朱广春, 艾万政. 大型船舶在限制性航道航行时的航行阻力及减阻对策[J]. 水运管理, 2022, 44(1): 37-39.
- [15] HOLTROP J. A statistical analysis of performance test results [J]. International shipbuilding progress, 1977, 24: 23-28.
- [16] HOLTROP J, MENNEN G G J. A statistical power prediction method [J]. International shipbuilding progress, 1978, 25: 253-256.
- [17] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method [J]. International shipbuilding progress, 1982, 29: 166-170.
- [18] HOLTROP J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data [J]. International shipbuilding progress, 1984, 31: 272-276.
- [19] 宋雅岚. Kelvin 源在船舶兴波阻力计算上的应用以及船舶总阻力预报[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [20] 李一兵. 内河船舶航行阻力计算方法讨论[J]. 水道港口, 2002(1): 7-11.
- [21] 王育林. 王家滩付槽断面系数和整治工程试验研究[R]. 天津: 天津水运工程科研所, 1985.