



通航隧洞船舶航行阻力试验研究

程弘宇¹, 张首元², 赵根生², 张小刚¹, 王熔荣², 何萌³

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650033;
2. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为进一步了解船舶在通航隧洞中航行阻力的变化规律, 针对大型船舶提出航行阻力估算公式, 建立物理模型开展船模试验对公式进行验证与分析。结果表明: 阻力实测值与公式拟合程度较高, 验证效果良好; 隧洞水域横截面积的变化对航行阻力扰动更大, 航行阻力对隧洞水域横截面积的敏感性高于航速; 航行阻力与航速的二次方成正比, 随着通航断面系数的增大而减小。

关键词: 通航隧洞; 船舶航行阻力; 阻力估算; 理论分析; 船模试验

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0101-05

Test of sailing resistance of ship in navigable tunnel

CHENG Hongyu¹, ZHANG Shouyuan², ZHAO Gensheng², ZHANG Xiaogang¹, WANG Rongrong², HE Meng³

(1. PowerChina Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650033, China;
2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to further clarify the changing law of the sailing resistance of a ship in a navigable tunnel, this paper proposes a sailing resistance estimation formula for large ships and builds a physical model to carry out ship model tests to verify and analyze the formula. The results show that the measured resistance value and the formula have a high degree of fitting, and the verification effect is great. The change of the cross-sectional area of the tunnel water area has a greater disturbance to the sailing resistance, and the sensitivity of the sailing resistance to the cross-sectional area of the tunnel water area is higher than that to the ship speed. The sailing resistance is proportional to the square of the ship speed and decreases with the increase in the navigable section coefficient.

Keywords: navigation tunnel; sailing resistance of ship; resistance estimation; theoretical analysis; ship model test

通航隧洞作为一种较为特殊的新型通航建筑物, 逐渐成为克服高山峡谷等复杂地形条件下通航建筑物布置难题的有效方式。近年来, 随着我国在山区河段的投入逐步增大, 规划并开发了大量的梯级航运枢纽, 通航隧洞得到了广泛的应用与实践^[1]。贵州构皮滩枢纽是我国建造的第一个带有通

航隧洞的枢纽, 地处乌江干流, 可通过 500 吨级船舶, 船舶在隧洞中主要采取自航方式航行。由于隧洞宽度狭窄, 且在密闭隧洞环境内行船视线受阻^[2], 在此类半封闭式限制型航道行驶时, 船舶不易操控, 易发生安全事故^[3]。

国内外学者针对船舶的阻力问题进行了大量

收稿日期: 2022-11-18

作者简介: 程弘宇 (1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事水工设计、船闸水动力学研究。

的研究。Hideo 等^[4]基于大量的实际船舶阻力测量数据, 对宽阔水域船舶阻力的计算方法进行分析研究, 总结出一套高精度的计算方式。在浅水船舶阻力模拟计算方面, Schlichting^[5]假设深浅水区域航行阻力基本一致, 并融合波浪滞后假定提出船舶浅水阻力计算方式; Shahjada 等^[6]对浅水匀速行驶的船舶非线性自由表面流动展开分析, 对比一阶解与二阶解的差异, 明确了二阶解可用于浅水船舶水动力分析。在内河通航隧洞船舶阻力计算方面, 俞中奇等^[7]基于物理模型, 开展 1 000 吨级船舶在限制性航道航行的模拟试验, 对兹万科夫公式中的剩余阻力进行改进, 并对限制性航道的船舶阻力估算公式进行总结归纳; 李一兵^[8]则将阻力划分为水流摩擦力、水流压力以及水面坡降阻力进行计算, 在实船试验数据的基础上修正了兹万科夫公式阻力项, 给出航行阻力计算方法; 徐双喜等^[9]基于 STAR-CCM 软件采用可实现的 $k-\varepsilon$ (湍动能-耗散率) 湍流模型结合流体体积法 (VOF) 捕捉气液交界面, 模拟浅水航道和深水航道两种不同情况下船舶阻力和下沉量, 分析浅水效应对船舶阻力的影响; 肖应彪^[10]基于 Froude 阻力分类法构建 1 000 吨级船舶在通航隧洞航行时的阻力计算模型, 阻力模型考虑航速、船长、吃水、水深以及航道断面系数 5 个因素, 并结合乌江 1 000 吨级通航隧洞提升工程物理模型验证阻力计算模型, 并取得良好效果; 陈雪华^[11]基于 STAR-CCM+ 平台对 1 000 吨级船舶在通航隧洞航行阻力和下沉量的影响因素展开分析, 对 1 000 吨级船舶在通航隧洞内的最大航速进行论证。

综上所述, 目前针对通航隧洞船舶航行阻力已有广泛研究, 但多数研究都针对 100 或 1 000 吨级船舶进行研究分析, 并且由于 Froude 阻力分类中剩余阻力设定本身具有一定局限性, 因此有必要从阻力构成角度对大型船舶在通航隧洞的航行阻力进一步研究。

1 航行阻力分析

根据船舶航行时物理现象, 船舶航行阻力包

含兴波阻力、摩擦阻力和黏压阻力 3 个部分。船舶航行时, 船首的压力呈增长趋势且大于船尾处压力, 船舶整体的压力分布发生变化, 引发兴波阻力。船体与边界层水体共同运动时, 黏性切应力所引发的摩擦力在船舶运动方向上的面积分即为摩擦阻力。航行时船尾产生持续的涡, 涡耗散的能量就等同于船舶克服黏压阻力所做的功。根据上述航行阻力构成因素的分析, 总阻力 R_v 可以表示为:

$$R_v = R_w + R_f + R_{pv} \quad (1)$$

式中: R_w 为兴波阻力, kN; R_f 为摩擦阻力, kN; R_{pv} 为黏压阻力, kN。

在不同的航行速度下, 兴波阻力相对于总阻力的占比有所不同。当船舶低速行驶时, 摩擦阻力为主, 占比达到总阻力的 80%, 兴波和黏压阻力占比较少, 各占约 10%。对于中高速航行的船舶, 兴波阻力的影响逐步突出, 兴波和摩擦阻力基本上构成了船舶航行的总阻力, 黏压阻力仅占总阻力的 5% 左右^[12]。弗劳德数 Fr 和雷诺数 Re 的变化与阻力系数息息相关, 二者表达式为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

$$Re = \frac{Lv}{\nu} \quad (3)$$

式中: L 为船舶长度, m; v 为航行速度, m/s; ν 为水的运动黏性系数, m^2/s 。

对式(1)中 3 种阻力进行无量纲化, 3 种阻力系数 C_v 、 C_f 、 C_w 见式(4)~(6)。对于固定船型而言, 随着雷诺数的增加, 船体的边界层厚度将减小, 边界层内的水体速度梯度将增大, 摩擦切应力和摩擦阻力也将随之增大。根据巴甫密尔公式以及边界层理论, 黏压阻力与水体黏性和船舶的前后体形状有关^[13]。故摩擦阻力和黏压阻力均是雷诺数的函数^[14]。根据休斯理论, 兴波阻力是弗劳德数的函数。

$$C_v = \frac{R_v}{2\rho v^2 S} \quad (4)$$

$$C_f = \frac{R_f}{2\rho v^2 S} \quad (5)$$

$$C_w = \frac{R_w}{2\rho v^2 S} \quad (6)$$

式中: ρ 为水密度, kg/m^3 ; S 为浸湿面积, m^2 。

根据已有船舶航行阻力的研究成果^[15-16], 船舶排水量 V_G 以及水对船舶的上托力 F_G 可表示为:

$$V_G = LBTC_B \quad (7)$$

$$F_G = \rho g V_G \quad (8)$$

式中: L 为船舶长度, m ; B 为船舶宽度, m ; C_B 为方形系数; T 为船舶吃水, m 。

船舶浸湿面积 S 是指船体在静止水域中船体与水体接触部分的面积, 中横剖面面积 A_M 是指船体横剖面的面积, 可表示为:

$$S = L_W (1.8T + C_B B) \quad (9)$$

$$A_M = C_M BT \quad (10)$$

式中: L_W 为水线长, m ; C_M 为中横剖面系数。

若以 L 、 M 、 T 分别表示 3 个基本量长度、质量和时间的量纲, 则船舶航行阻力关系式所涉及的各个参量的量纲见表 1。

表 1 各参量的量纲

参量 量纲	L L	B L	T L	ρ ML^{-3}	g LT^{-2}	V_G L^3	L_W L	B L	C_M 1
----------	----------	----------	----------	----------------------------	-------------------------	-----------------------	------------	----------	------------

求解量纲一的量 Π 。参数的幂为待定值, 则有:

$$\begin{aligned} \dim \Pi &= \dim(F_G^a T^b A_M^c S^d v^e g^f W^g H^h R_v^i) = \\ &= (\text{MLT}^{-2})^a L^b (L^2)^c (L^2)^d (LT^{-1})^e (LT^{-2})^f L^g L^h (\text{MLT}^{-2})^i \end{aligned} \quad (11)$$

得到待定常数 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $c=1$ 、 $d=1$ 、 $e=2$ 、 $f=-1$ 、 $g=-3$ 、 $h=-3$ 、 $i=-1$ 。故可得:

$$\Pi = f(F_G T A_M S v^2 g^{-1} W^{-3} H^{-3} R_v^{-1}) \quad (12)$$

得到船舶航行阻力的关系式为:

$$R_v = \psi F_G T A_M S v^2 / (g W^3 H^3) \quad (13)$$

式中: ψ 为系数, 取 0.013; H 为隧洞水深, m ; W 为隧洞宽度, m 。

2 航行阻力规律变化研究

为探究船舶在通航隧洞航行的阻力特性并验证上述公式适用性, 试验选取国内某拟建通航隧洞作为研究主体, 根据相关发展规划以及通航建筑物货运总量预测, 拟建隧洞可通过 1 万吨级单船, 设计船型尺寸为 $130.0 \text{ m} \times 22.0 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ (船长×船宽×吃水)。依据重力相似准则构建几何比尺为 1:32 的正态物理模型展开试验, 模型隧洞总长约 75 m, 其中停泊段长度约 20 m, 船舶模型几何比尺与物理模型一致。船舶航行阻力数据通过多通道数据采集系统进行采集, 传感器阻力测量极值为 196 kN, 系统能够自动去除过滤数据噪点, 并可以按照力的比尺换算为原型

数据导出分析。

在隧洞水深 8~11 m、航速 0.4~1.5 m/s、隧洞宽度 25.0~33.6 m 共 16 种工况下对阻力进行测量, 航行阻力实测值见表 2。

表 2 物理模型航行阻力实测值

	隧洞 宽度/ m	隧洞 水深/ m	航速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	航行阻力/kN		
				数据 1	数据 2	数据 3
25.0	11	1.5	40.28	42.62	-	
		1.2	28.29	28.29	-	
		1.0	20.85	22.37	-	
		0.7	12.22	14.10	-	
		0.4	9.52	10.57	-	
		1.5	48.42	49.70	51.11	
		1.5	74.62	65.03	84.21	
		1.5	127.19	131.51	136.19	
28.0	11	1.5	22.18	28.97	26.39	
		1.5	35.05	33.30	35.87	
		1.5	40.79	38.22	39.86	
		1.5	46.94	53.25	51.80	
33.6	11	1.5	19.07	21.55	22.40	
		1.5	24.40	23.67	22.08	
		1.5	38.22	36.11	36.34	
		1.5	48.33	51.56	49.97	

物理模型对不同船舶航速和隧洞宽度、水深下的船舶航行情况进行模拟。船舶阻力与航速二次方、隧洞水深及断面系数关系曲线见图 1。

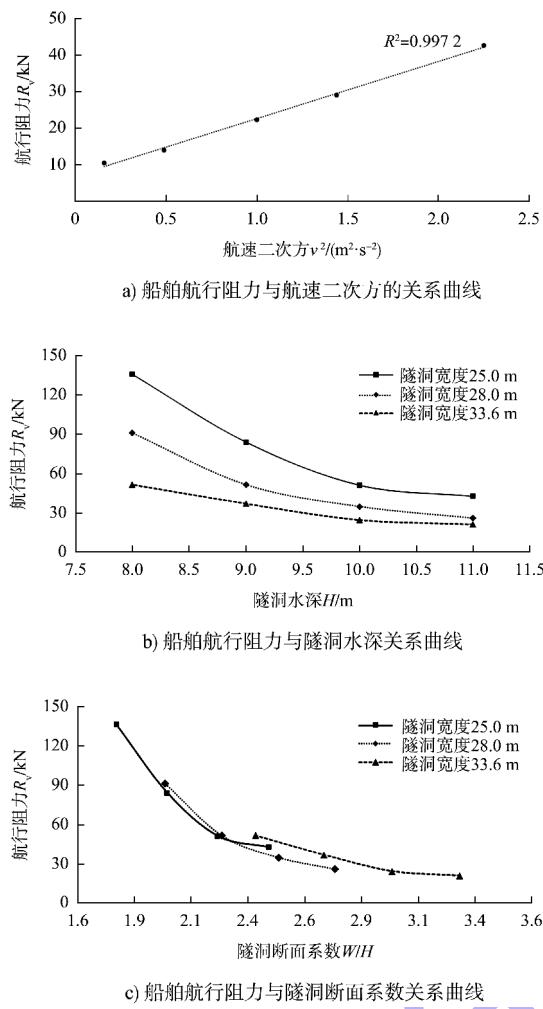


图 1 船舶航行阻力与航速二次方、隧洞水深、断面系数关系曲线

由图 1a) 可知, 当隧洞宽度和水深一定即断面系数不变时, 船舶主要航行阻力取决于航速, 航速越高航行阻力越大; 当隧洞宽度 25.0 m、隧洞水深 11 m 时, 船舶航速为 1.50 m/s, 在隧洞中航行最大阻力为 42.62 kN; 船舶航速降低至 0.4 m/s 时, 船舶航行最大阻力降低为 10.57 kN; 在断面尺度及水深一定的情况下, 船舶在隧洞内的航行阻力与船舶航速的二次方成正比例关系。由图 1b)、c) 可知, 当航速一定时船舶最大航行阻力取决于隧洞宽度和水深, 隧洞宽度越小或隧洞水深越浅, 航行阻力越大。航行阻力随通航断面系数的减小而增大; 隧洞宽度 25.0 m、船舶航速为 1.50 m/s 时, 隧洞水深由 8 m 增加至 10 m, 航行阻力由 51.11 kN 增至 136.19 kN; 当水深由 10 m 增至 11 m 时, 航行阻力虽继续减小, 但下降速度明显减弱。

此外, 当断面系数在 1.78~2.24 之间时, 航行阻力下降速率较快, 趋势线斜率约为 -188.0; 当断面系数在 2.24~2.44 时, 下降速率突然减缓, 趋势线斜率升至 -44.5。从航行阻力与隧洞断面系数关系曲线可见, 不同隧洞宽度下, 阻力的下降趋势是一致的, 阻力降低速率均是由快到慢, 且总能找到一个临界的断面系数使得阻力下降速率突变减缓。当隧洞宽度分别为 25.0、28.0 和 33.6 m 时, 临界断面系数分别为 2.24、2.36 和 2.99。通航隧洞设计阶段, 适当增大隧洞断面系数可以有效地减小船舶航行阻力, 但过大的断面系数不仅阻力减小有限, 且过宽的隧洞也会增加施工量和施工难度。因此, 参考临界断面系数选择适当的隧道断面系数具有一定意义。

3 航行阻力的拟合分析

根据船模试验实测的 43 组阻力数据, 结合式(13)对阻力进行拟合。对于通航建筑物的代表船型而言, 其船长、船宽、船舶吃水、方形系数以及设计水线平面到船体首尾端交点的水平距离是相对确定的, 航行阻力主要受到航速、水深以及隧洞设计宽度影响, 实测阻力值与估算公式主要因素的倒数之间的关系见图 2。

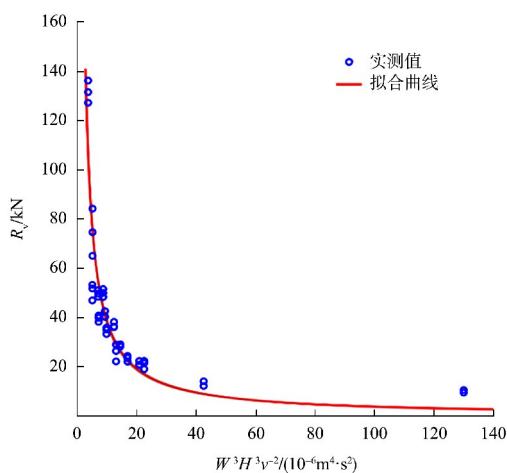


图 2 实测数据与拟合曲线

阻力实测结果均在估算公式的 95% 的置信区间内, 当航速为 0.4 m/s 时, 由于未考虑空气阻力等因素, 实测航行阻力值较公式计算值偏大, 该估算公式在中高航速情况下拟合良好。补测 20 组

阻力试验实测阻力值与拟合曲面的关系见图3, 图中以航速 v 和隧洞水域横截面积 WH 为自变量, 实测阻力值为因变量, 对估算公式中常系数以及代表船型的特征值进行简化, 结果显示实测阻力散点与拟合曲面重合性较好, 决定系数达到0.981, 中高航速下阻力拟合良好。从拟合曲面对于 xOz 和 yOz 两个立面的投影来看, 散点分布变化趋势与估算公式所反映的基本一致。船舶航行阻力随航速的增大而增大, 拟合曲面在 xOz 面上的投影也是一条单调递增的曲线; 航行阻力随隧洞宽度和隧洞水深增大而减小, 拟合曲面在 yOz 面上的投影是一条单调递减的曲线。此外, 航行阻力相对于航速而言, 对隧洞水域横截面积的变化更加敏感, 单位长度上曲面在 yOz 平面投影的因变量变化速率大于 xOz 平面投影。相同横截面积下, 航速由1.0 m/s增加50%后, 航行平均阻力由21.61 kN增至41.45 kN, 变化率为47.86%; 相同航速下, 横截面积由200 m²增加50%后, 航行平均阻力由131.63 kN降至25.85 kN, 变化率为80.36%。相同变化率下, 隧洞水域横截面积的变化对航行阻力扰动更大, 故航行阻力对隧洞水域横截面积的敏感性高于航速。

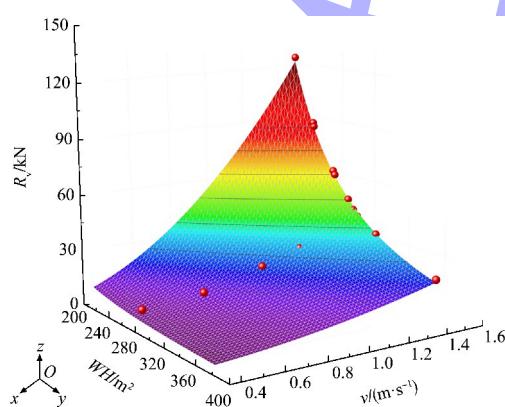


图3 实测点与拟合曲面

综上所述, 估算公式与阻力实测值吻合性较好, 适用于中高速船舶在通航隧洞等浅水狭窄型航道航行阻力的估算。

4 结论

1) 船舶航行阻力实测值与估算公式拟合程度

较高, 估算公式可以较好地反映中高速船舶在通航隧洞等浅水狭窄型航道的航行阻力, 且航行阻力对隧洞水域横截面积的敏感性高于航速。

2) 在隧洞宽度和隧洞水深不变的情况下, 航行阻力随航速的增大而增大, 与航速的二次方成正比关系。当航速一定时, 阻力随着隧洞宽度或水深的增大而减小。

3) 航速一定时, 航行阻力随通航断面系数的增大而减小, 阻力降低速率由快到慢, 且存在临界断面系数使得阻力下降速率突变减缓。

参考文献:

- [1] 邓健, 廖芳达, 谢澄, 等. 船舶操纵仿真的狭长通航隧洞航行安全研究[J]. 中国航海, 2021, 44(4): 7-12.
- [2] 钮新强, 吴俊东, 王小威. 基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 1-8.
- [3] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
- [4] HIDEO S, EIICHI Y, ICHIRO T, MICHIO N. Form effects on frictional resistance of ships and power prediction of large tankers [J]. Journal of Zosen Kiokai, 1958, 103: 19-30.
- [5] SCHLICHTING O. Schiffswiderstand auf beschränkter wassertiefe: widerstand von seeschiffen auf flachem wasser[J]. Jahrbuch der schiffbautechnischen gesellschaft, 1935, 35: 1-6.
- [6] SHAHJADA T, KAZUO S. Computation of free surface flow around a ship in shallow water using a potential based panel method [J]. International shipbuilding progress, 2006, 53(1): 1-5.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 徐双喜, 林江萍, 董威, 等. 浅水航道船舶阻力计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(3): 414-417, 422.

(下转第125页)