

· 航道及通航建筑物 ·



通航隧洞内船舶通航数值模拟*

卿正阳¹, 薛宏程^{1,2}, 陈明^{1,2}, 崔诗豪¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 通航隧洞可实现高山峡谷条件下通航建筑物间的有效衔接, 但隧洞断面尺寸与船舶航速、航行阻力、下沉量等船舶航行特性具有高度的相关性, 是一个多目标优化问题。采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与 GMO 运动模型对 1 000 吨级船舶在通航隧洞内的运动过程开展三维数值模拟, 分析隧洞内水力特性的时空变化规律, 探讨船舶行驶速度与隧洞宽度对船行波、横向流速、船舶阻力及下沉量的影响, 并给出通航隧洞断面系数与船舶下沉量之间的经验公式。研究表明, 当隧洞内航深为 5 m、船舶行驶速度小于 1.5 m/s、隧洞宽度大于 18 m 时, 船首孤立波波幅、船舶两侧最大横向流速、船舶阻力和下沉量均有明显改善。此外, 研究还发现船舶下沉量与通航隧洞断面系数成反比关系, 通航隧洞断面系数越小船舶下沉量越大, 且通航水深相较于隧洞宽度对于船舶下沉量的影响更为显著。研究结果可为 1 000 吨级船舶通航隧洞断面及航行关键参数设计提供参考。

关键词: 通航隧洞; 船舶水动力; 下沉量; 数值模拟; 断面系数

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0063-06

Numerical simulation of ship navigation in navigation tunnels

QING Zhengyang¹, XUE Hongcheng^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, CUI Shihao¹

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Navigation tunnels can achieve effective connections between navigable buildings under alpine canyon conditions, but the cross-sectional scale of the tunnel is highly correlated with ship navigation characteristics such as ship speed, navigation resistance, and sinking volume, posing a multi-objective optimization problem. This paper uses the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the GMO motion model to perform three-dimensional numerical simulations of the movement process of the 1, 000-ton ships in a navigation tunnel, analyzes the spatial-temporal changes of various hydraulic characteristics in the tunnel, explores the effects of the ship's driving speed and tunnel width on the ship's traveling wave, lateral flow rate, ship resistance and sinking volume, and presents an empirical formula between the cross-sectional coefficient of the navigation tunnel and the ship's sinking capacity. The research results show that when the depth of navigation in the tunnel is 5 m, the ship's driving speed is less than 1.5 m/s, and the tunnel width is greater than 18 m, the solitary wave amplitude of the bow, ship resistance, maximum lateral flow rate and sinking value on both sides of the ship improve markedly. Furthermore, the study also finds an inversely proportional relationship between the ship's sinking volume and the cross-sectional coefficient of the navigation tunnel. The smaller the navigation tunnel section coefficient, the greater the ship sinks. Moreover, the navigational water depth exhibits a more pronounced impact on the vessel's sinking volume compared to the width of the tunnel. The research results can provide reference for the design of navigation tunnel sections and key navigation parameters for the 1, 000-ton ships.

Keywords: navigation tunnel; ship hydrodynamics; sinking volume; numerical simulation; section modulus

收稿日期: 2024-01-12

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206104); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0767)

作者简介: 卿正阳 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学科研工作。

通讯作者: 薛宏程 (1988—), 男, 博士, 讲师, 从事通航水力学教学和研究工作。E-mail: xuehongcheng@cqjtu.edu.cn

通航隧洞是实现通航建筑物间有效衔接、解决高山峡谷条件下通航设施布置难题的有效手段,但船舶在隧洞内航行时易形成涌浪,不仅增加船舶阻力与纵倾幅度,还会在船舶两侧产生不对称侧向力,使船舶舵效变差,增加操纵难度。由于航行船舶的水动力条件受隧洞洞室尺寸制约,即隧洞断面尺度与船舶的航速、阻力、下沉量等航行要素密切相关^[1-2],而目前国内外对通航隧洞的设计参数及航行条件缺少规范依据,实际应用案例较少,亟需填补通航隧洞断面尺度与船舶航行要素关联性的研究。

通航隧洞作为典型的限制性航道,已有研究表明隧洞断面尺寸越小,船舶的允许航速越小,航行阻力越大^[3-4]。因此,在满足船舶安全快速航行的前提下得到最经济的隧洞断面尺寸是首要解决的问题。钮新强等^[5]以通过能力和船舶临界航速为约束条件,建立了通航隧洞断面系数和隧洞宽度为目标函数的多目标优化数学模型;汤建宏等^[6]结合船舶通航临界航速计算公式,基于溪洛渡枢纽通航隧道提出最经济隧道断面系数为2.74;李焱等^[7]采用水工物理模型和船模实验方法,以构皮滩水电站单线通航隧道为依托,结合船舶航行的船舶阻力、下沉量及水面波动等数据,建议500吨级船舶的渠道宽采用18m,水深不小于3.0m,船舶航速不超过1.2m/s;邓斌等^[8]运用二维数模对通航隧洞中的船行波传播规律进行研究,提出通航隧洞内船舶连续通航安全航行间距应满足的关系式;程弘宇等^[9]采用物理模型试验研究通航隧洞中船舶阻力受水力特性的影响程度,发现船舶航行阻力随着通航断面系数增大而减小。可见,确定经济的通航隧洞断面尺度、提出合理和安全的航速对通航隧洞设计具有现实意义。

本文采用数值模拟方法,研究静水条件下1000吨级船舶在不同隧洞宽度、航深、船速条件下的洞内横向水流流速和船舶下沉量的变化规律,揭示断面尺度与船舶航速、通航水深及航行条件间的关联性,旨在为通航隧道设计提供参考依据。

1 数学模型建立与工况选取

1.1 基本方程

在雷诺时均方程的整体架构下,采用重整化

群的湍流模型(RNG $k-\varepsilon$ 模型)使方程组封闭,进而实现水域流场的模拟。主要控制方程如下^[10]:

连续性方程:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y t \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y t \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y t \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - \frac{1}{2} C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 2} \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{(1+\beta\eta^3)} \quad (6)$$

式中: G_x 、 G_y 、 G_z 为 x 、 y 、 z 方向的重力加速度; f_x 、 f_y 、 f_z 为 3 个方向的黏滞力; V_F 为可流动的体积分数; ρ 为流体密度; p 为作用在流体微元上的压力; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; μ 为动力黏性系数; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$; G_k 为湍动能 k 的产生项; σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能和湍流耗散率所对应的普朗特数,均为 1.39; $C_{\varepsilon 1}^*$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, $C_{\varepsilon 1}^* = 1.42$, $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ 。

1.2 模型建立与网格划分

船舶模型采用 1000 吨级散货船,船体总长 64 m,型宽 10.8 m,型深 5.5 m,最大吃水 2.5 m,船舶计算模型如图 1a) 所示。计算区域为竖直隧洞,长 600 m,如图 1b) 所示。

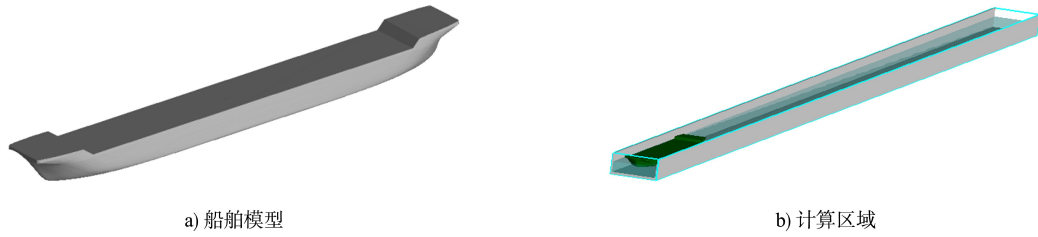


图 1 计算模型及区域

由于船舶在狭窄的限制性航道内运动, 波流耦合作用显著。如图 2 所示, 为了精确获得水体自由面, 对船舶吃水线附近的网格进行加密, 即计算区域网格间距为 0.50 m, 水面线附近网格间距为 0.25 m。

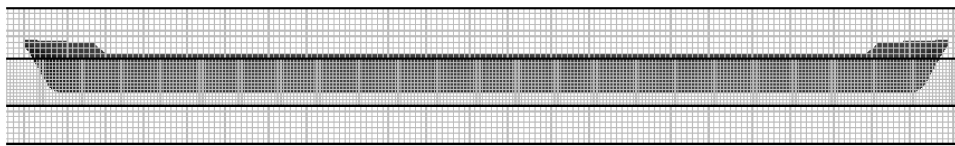


图 2 船体附近网格划分

1.3 计算工况

数值模拟工况主要考虑隧洞宽度、航深、船速等因素对船舶航行水动力特征的影响。如表 1 所示, 工况 1~20 主要研究航深 $h=5.0$ m 条件下, 不同隧洞宽度 B 与船速 v 对船舶水动力特性的影响, 工况 21~36 主要研究 $v=2.0$ m/s 条件下, 不同 B 与 h 对船舶水动力特性的影响。

表 1 模拟工况与参数设置

模拟工况	h/m	B/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	模拟工况	h/m	B/m	$v/(m \cdot s^{-1})$
1	5.0	16	0.5	22	4.0	16	2.0
2	5.0	16	1.0	23	4.5	16	2.0
3	5.0	16	1.5	24	5.0	16	2.0
4	5.0	16	2.0	25	3.5	18	2.0
5	5.0	16	2.5	26	4.0	18	2.0
6	5.0	18	0.5	27	4.5	18	2.0
7	5.0	18	1.0	28	5.0	18	2.0
8	5.0	18	1.5	29	3.5	20	2.0
9	5.0	18	2.0	30	4.0	20	2.0
10	5.0	18	2.5	31	4.5	20	2.0
11	5.0	20	0.5	32	5.0	20	2.0
12	5.0	20	1.0	33	3.5	23	2.0
13	5.0	20	1.5	34	4.0	23	2.0
14	5.0	20	2.0	35	4.5	23	2.0
15	5.0	20	2.5	36	5.0	23	2.0
16	5.0	23	0.5	37	5.5	16	0.75
17	5.0	23	1.0	38	5.5	16	1.00
18	5.0	23	1.5	39	5.5	16	1.25
19	5.0	23	2.0	40	5.5	16	1.50
20	5.0	23	2.5	41	5.5	16	1.75
21	3.5	16	2.0	42	5.5	16	2.00

2 数值模拟有效性验证

2.1 网格无关性分析

网格尺寸对数值求解精度具有较大影响。一般情况下, 网格尺寸越小, 计算结果越精确, 但计算量也越大, 所花费时间也越多。因此展开网格无关性分析, 可验证网格尺度对计算精度的影响, 实现计算精度与花费时间二者的平衡^[11]。

分别采用网格尺寸为 1.00、0.75、0.50、0.25 m 的 4 套网格对比计算, 图 3 为工况 4 下不同网格大小条件下船舶下沉量 D 随时间的变化过程(测点初始高程为 5.0 m), 随着网格数量的增加, D 逐渐趋于稳定。其中, 网格尺寸 0.50 与 0.25 m 的计算结果基本一致, 表明缩小网格尺寸对计算精度影响较小, 故所有工况计算网格尺寸均采用 0.50 m, 计算区域网格总数约 120 万个。

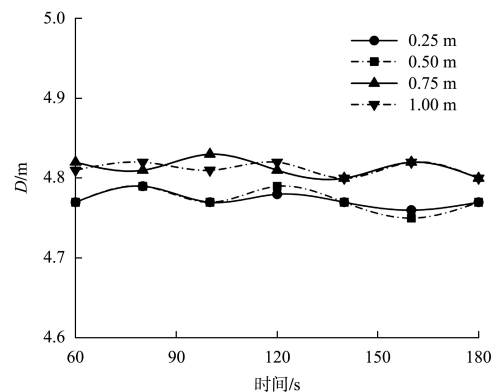


图 3 不同网格尺寸的最大下沉量计算结果

2.2 求解有效性验证

目前国内外通航隧洞实际工程应用案例极少，特别是通航隧洞内船舶航行过程中流场变化的实测或试验数据尚未见公开发表，故对隧洞内的流场信息进行单独验证较为困难。但目前关于船舶航行水动力数值模拟的研究则较多，如李志松等^[12]、Lo 等^[13]、Ma 等^[14]均采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了船行波的形成过程，并验证了该数值方法的可靠性。虽然本研究的船舶行驶区域由上述研究中的开阔水域或航道变为空间更小的通航隧洞，但船行波的传播规律和流场信息不会因研究区域缩小而产生较大的误差。此外，根据 1 000 吨级散货船下沉量经验公式^[15]对通航隧洞内 D 进行验证：

$$D = 3.129 9e^{0.934 9v} \quad (7)$$

选取工况 37~42 作为验证工况(断面系数 $n = 3.49$)。模拟结果如图 4 所示， D 模拟结果与经验公式计算值较吻合，相对误差小于 20%，采用的数值模拟方法可靠，计算结果可信。

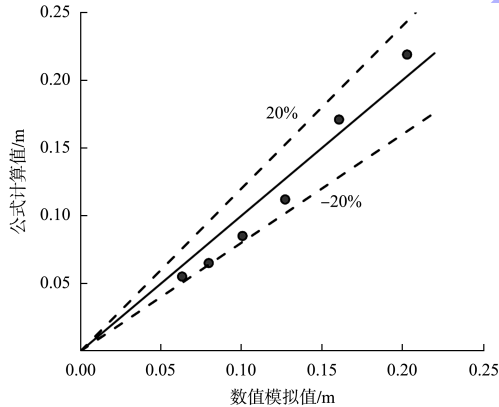


图 4 D 经验公式计算值与数值模拟值关系

3 计算结果与分析

3.1 船行波变化规律

船舶均从静止状态以加速度 $a = 0.05 \text{ m/s}^2$ 加速运动至工况设置的航速，故船速 1.5、2.0 与 2.5 m/s 达到最大船速分别需要 30、40 与 50 s(隧洞内初始水深为 5 m)。图 5 为船舶达到最大航速后匀速运动过程中船行波的变化趋势，可见 3 种航速对应的最大船首孤立波波高均在船舶达到最大船速时产生；同时，船首孤立波传播速度明显高于船速，从而导致船首孤立波逐渐远离船舶，在到达最大船速后的 20 s 内，船首孤立波继续向前

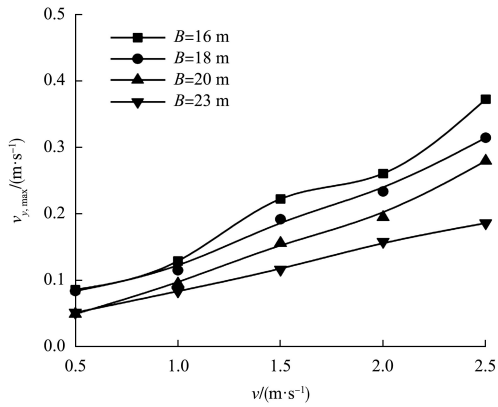
传播，波高变化不大，30 s 后，波高明显下降，但船速越大，波高下降越缓慢。船速在 1.5 m/s 时，船首孤立波最大值约 0.08 m；船速在 2.0 m/s 时，船首孤立波最大值约 0.13 m；而当船速达到 2.5 m/s 时，船首孤立波波高显著增大，最大值可达 0.22 m。因此，以低于 2.0 m/s 的船速运行可避免出现船首孤立波激增的现象。



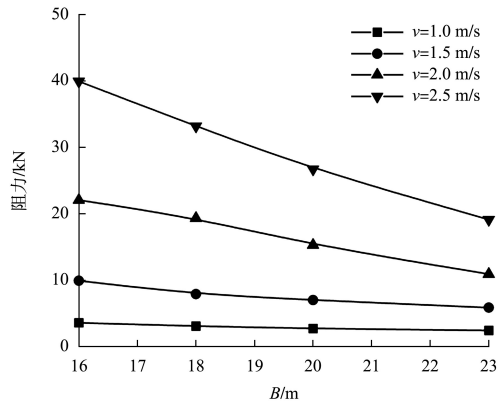
图 5 船行波与 v 关系

3.2 横向最大流速变化规律

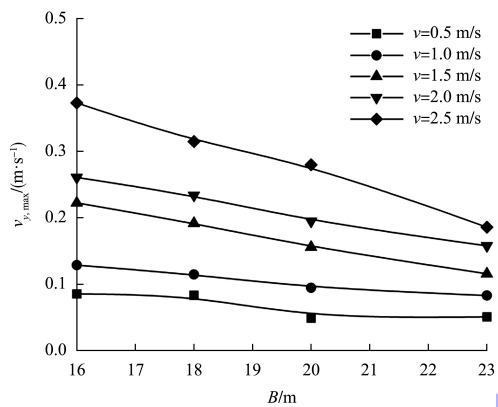
在航深 5.0 m 条件下，图 6 给出了不同 B 、 v 与船舶侧边最大横向流速 $v_{y,max}$ 之间的关系。其中，图 6a) 为不同隧洞尺寸下 v 与 $v_{y,max}$ 的关系，可以看出 $v_{y,max}$ 随 v 增大而增大，但其变化率随 B 增大而减小。如 v 达到 2.5 m/s， B 为 23 m 时，壁面与船舶距离约 6.1 m，船舶侧边的 $v_{y,max}$ 仅 0.18 m/s；而 B 为 16 m 时，船舶与壁面距离为 2.6 m，船舶侧边的 $v_{y,max}$ 则达到 0.37 m/s。图 6b) 为不同 v 下 B 与 $v_{y,max}$ 的关系，可以看出 $v_{y,max}$ 随着 B 增大而减小，但当 $v < 1.0 \text{ m/s}$ 时，增加 B 对降低 $v_{y,max}$ 效果不显著。



a) $v_{y,max}$ 随 v 的变化



b) 船舶阻力随 B 的变化

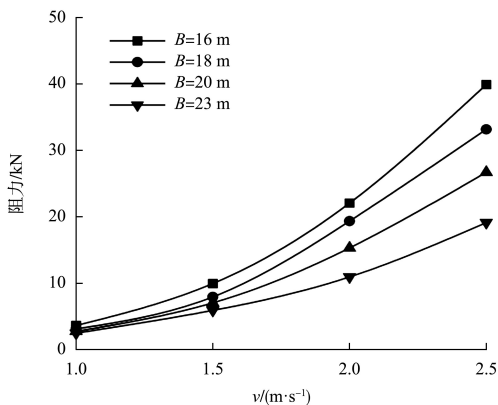


b) $v_{y,max}$ 随 B 的变化

图 6 $v_{y,max}$ 变化规律

3.3 航速对船舶阻力的影响

图 7a) 为不同 B 下 v 与船舶阻力的关系, 船舶阻力随 v 增大而增大, 尤其当 v 大于 2.0 m/s 后, 船舶阻力的增幅有一定提高。从图 7b) 可以看出, 船舶阻力随 B 增加而减小, 当 B 小于 18 m 后, 船舶阻力有显著的增幅。显然, v 是影响船舶阻力的主要因素, 船舶以低于 1.5 m/s 的速度运行可以避免阻力大幅增长的现象, 而 B 的减小不会导致船舶阻力出现激增现象。

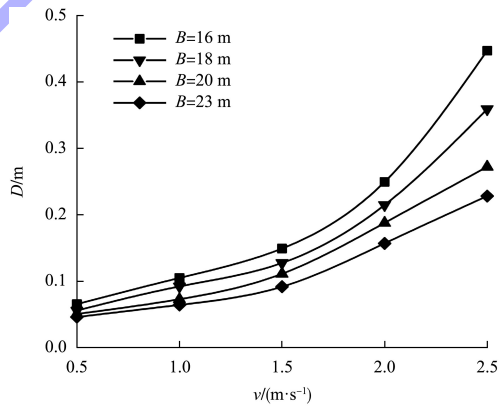


a) 船舶阻力随 v 的变化

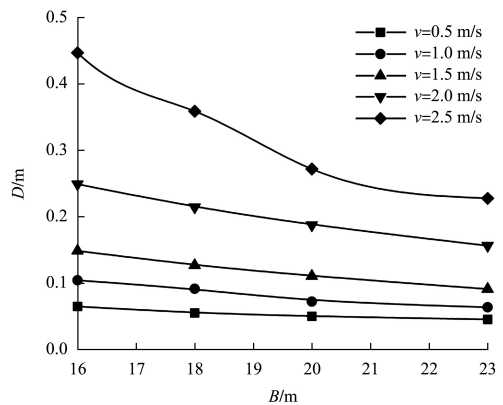
图 7 船舶阻力变化规律

3.4 航速对船舶下沉量的影响

图 8a) 为不同 B 下 v 与 D 的关系, 可以看出 D 随 v 增大而增大, 尤其当 v 大于 2.0 m/s 后, D 有显著的增幅。从图 8b) 也可以看出, D 随 B 增加而减小, 当 B 小于 18 m 后, D 有显著的增幅。显然, v 是影响 D 的主要因素, 而 B 限制了船舶两侧水体的扩散, 减小 B 也进一步加速了船舶两侧水位的抬升, 故使船舶最大下沉量出现了明显增加。



a) D 随 v 的变化



b) D 随 B 的变化

图 8 D 变化规律

3.5 隧洞断面系数对船舶下沉量的影响

隧洞水深较浅时，船底富余空间较小，限制了围绕船体的水流运动，易在船体附近形成水流阻塞效应^[16]，而增加水深又会增加工程投资，故通航隧洞的 n 与 D 间的关系至关重要，图 9 为 D 与 n 间的关系，在总体趋势上， D 随着 n 的增加而减小。然而，在 n 介于 3.25~3.75 情况下，多次出现 n 稍高但 D 增加的现象。这种变化主要可归因于当 n 稍大时，尽管 B 更宽，然而水深却相对较浅，这一结果表明了通航水深相较于 B 对于 D 的影响更为显著。同时，当 $n < 3.25$ 时， D 与 n 呈现出反比关系；但当 $n > 3.75$ 时， D 的变化并不显著。因此，在确定 n 的前提下，选择通航水深较大而 B 较小的设计方案，能更有效地降低 D 。

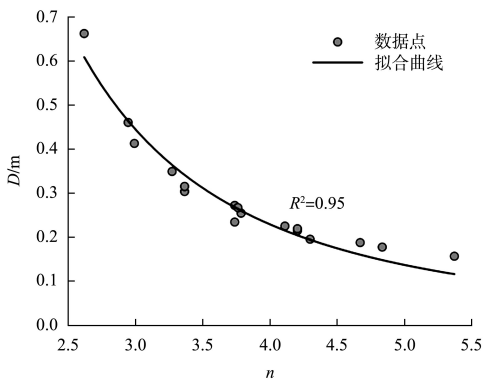


图 9 D 随 n 变化规律

根据图 9 可得 n 与 D 的经验公式：

$$D = 5.58/n^{2.3} \tag{8}$$

$$n = \frac{A_s}{A_m} \tag{9}$$

式中： A_s 为航道过水断面面积， m^2 ； A_m 为船舶浸水断面面积， m^2 。式(8)的决定系数 $R^2 = 0.95$ ，表明回归模型的拟合度较优，该式可为 n 取值 2.5~5.5 范围内的 1 000 吨级货船下沉量估算提供一定的参考。

4 结论

1) 在隧洞航深为 5 m 的情况下，当船舶行驶速度小于 1.5 m/s、隧洞宽度大于 18 m 时，船

首孤立波波幅、船舶两侧最大横向流速、船舶阻力和下沉量均有明显改善，有利于船舶正常运行。

2) 船舶下沉量与通航隧洞断面系数成反比关系，通航隧洞断面系数越小船舶下沉量越大。

3) 通航水深相较于隧洞宽度对船舶下沉量的影响更为显著，在确定隧洞断面系数的前提下，选择通航水深较大而隧洞宽度较小的设计方案，能更有效地降低船舶下沉量。

4) 研究成果可为 1 000 吨级船舶通航隧洞断面及航行参数设计提供参考，但针对通航隧洞上下游船闸灌泄水形成的复杂波流与船舶航态的耦合关系仍需进一步研究。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 俞中奇, 袁章新, 周超. 限制性Ⅲ级航道船舶阻力试验研究[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2014, 37(4): 23-27, 49.
- [4] THORENZ C, BOUSMAR D, DUBBELMAN J P, et al. PIANC working group 155 “Ship behaviour in locks and lock approaches” [C]//33rd PIANC world congress. San Francisco: PIANC, 2014: 1-11.
- [5] 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.
- [6] 汤建宏, 阚得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J]. 水运工程, 2017(7): 141-144.
- [7] 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.
- [8] 邓斌, 王孟飞, 蒋昌波, 等. 通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响 [J]. 科学通报, 2021, 66(9): 1101-1112.