

【特约稿】

基于 CFD 的粗糙度及污损附着对船舶阻力的影响

姚雪蕾, 袁成清, 赵相宽, 白秀琴

(武汉理工大学 a.能源与动力工程学院可靠性工程研究所,
b.船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063)

摘要: **目的** 研究船体表面粗糙度及污损附着在不同航速下对航行阻力的影响。**方法** 参考船体粗糙表面条件下的阻力估算方法, 并通过目检法对船舶污底分级, 由船体附着的生物类型判断此时污损附着的严重程度。划分三种不同的船体表面条件, 对应建立三种模型, 采用计算流体力学 (CFD) 方法, 使用 FLUENT 软件进行数值模拟。将仿真结果与经验结论进行对比, 分析阻力的增长情况与阻力性质。**结果** 船体表面条件越差, 增加的航行阻力越大。同一表面条件下, 增加的航行阻力随航速的增大而增大。在粗糙度 (包含轻度污底) 和中度污底情况下, 增加的航行阻力主要为摩擦阻力; 重度污底情况下, 增加的航行阻力不再以摩擦阻力为主, 粘压阻力、兴波阻力所占比例会增大。**结论** 在重度污底的情况下, 经验推荐的摩擦补贴系数已不适用于实际情况, 数值模拟方法的计算结果可供参考。通过降低航速来减少增阻适用于任何表面条件。

关键词: 粗糙度; 污底; 船舶阻力; 摩擦阻力补偿系数; FLUENT; 数值模拟

中图分类号: U661.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0027-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.005

Effect of Surface Roughness and Fouling on Ship Resistance Based on CFD Analysis

YAO Xue-lei, YUAN Cheng-qing, ZHAO Xiang-kuan, BAI Xiu-qin

(a. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, b. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology (Ministry of Transport), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: Effects of surface roughness and fouling on ship resistance are analyzed by numerical simulation, the fouling covered on hull are graded through the visual inspection, three different hull surface conditions are divided corresponding to three models used to simulate by FLUENT software through computational fluid dynamics (CFD) method. The simulation results are compared with the empirical conclusions, and the resistance growth and resistance properties are analyzed. It shows that poor hull surface conditions make ship resistance increase, added resistance increase with speed grow under the same surface condition. On the condition of surface roughness (including mild fouling) and moderate fouling, the increased resistance is mainly frictional resistance, however, there is not the same under the condition of heavy fouling that viscous pressure resistance, wave resistance increase more than frictional resistance, and the recommended coefficient is not applicable to the reality situation under the condition of heavy fouling, the results calculated though CFD method are useful. Speed reduce is helpful to drag reduce on any surface condition of ship.

KEY WORDS: Roughness; Fouling; Ship resistance; Roughness allowance; FLUENT; Numerical simulation.

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2017-06-15

Received: 2017-05-26; Revised: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51422507, 51379166)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51422507, 51379166)

作者简介: 姚雪蕾 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为摩擦学系统及表面工程。

Biography: YAO Xue-lei (1992—), Female, Master, Research focus: tribology and surface engineering.

通讯作者: 袁成清 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶摩擦学、船舶绿色技术等。

Corresponding author: YUAN Cheng-qing (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ship tribology and green technology.

与未下水的新船或是拖曳试验时的船模不同,实际中船舶在航行过一段时间后,船体表面受到污损生物的附着或者腐蚀的影响将会不再光滑,由边界层理论可知,这些因素必然会影响船体阻力而使其增大,特别是对摩擦阻力的影响更为显著。基于经验公式或船模试验来估算船舶的摩擦阻力会有很大误差,尤其是污损附着程度严重时对船型都会产生影响,阻力大大增加。

1 表面粗糙度对阻力的影响

1.1 船体表面粗糙度

船体浸水部分的表面粗糙一般由下列因素构成:船体壳板本身高低不平;外板接缝不平;涂料性能不好,涂层质量不高,旧涂层起泡或脱落;壳板锈蚀或机械损坏;海生物附着造成污损等。从表观上理解船体表面的粗糙度,按类型分为:普遍粗糙度——油漆的粗糙度和壳板表面不平等;局部粗糙度——焊缝、铆钉、开孔及突出物等^[1]。

船体表面粗糙度一般采用英国造船研究会的定义:在船体壳板表面取 50~100 处长度为 50 mm 的范围,每处测得 10 点中最高峰和最低谷的差值,取其平均值定义为平均粗糙度参数,单位为 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$ ^[2]。船体壳板表面粗糙度受船龄和表面工艺的影响。新船的壳板表面粗糙度为 100~150 μm ,船舶初营运的几年,粗糙度平均每年增加 25~30 μm ^[2]。但实际上每艘船的情况各不相同,与使用的壳板涂料以及运营的海洋环境有关。通常认为,用普通涂料、船龄 6~8 年的旧船,粗糙度约为 500 μm ,船龄 12~14 年的粗糙度约为 1000 μm ^[2]。

1.2 摩擦阻力补偿系数

Todd 根据试验数据总结出:粗糙表面船体的摩擦阻力系数为光滑平板的摩擦阻力系数加上一常数。该理论得到了后来实践的不断论证,故目前公认的船体粗糙表面摩擦阻力计算的处理方法是,先根据相当平板假设计算摩擦阻力系数,再做船模与实船

间的尺度效应、粗糙度影响的系数修正^[1]。计算公式如下:

$$R_{\text{船}} = (C_{\text{F相当平板}} + C_A) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (1)$$

式(1)中 C_A 就是摩擦阻力补偿系数(incremental resistance coefficient),也称为船模实船换算补贴(model-ship allowance coefficient)。不同类型或不同尺寸的船舶 C_A 值不同,根据实船试航的试验数据得出,各国根据自己船模水池的情况合适取值^[1,3~5]。粗糙度是影响阻力补贴 C_A 大小的主要因素,因此也有将其称为粗糙度补贴(roughness allowance) ΔC_{f} 。但严格来讲,阻力补贴系数 C_A 是由粗糙度补贴系数 ΔC_{f} 和尺度影响系数 ΔC_{L} 两者组成的^[1]。粗糙度补贴系数 ΔC_{f} 主要影响实船的摩擦阻力系数,尺度影响系数 ΔC_{L} 主要影响实船的剩余阻力系数^[6]。

粗糙度补贴系数 ΔC_{f} 大小和粗糙度粒子高度 k_s 与船长 L 的比值有关。当 k_s 近似不变时,则粗糙度补贴系数仅随船长 L 变化^[3]。尺度影响系数 ΔC_{L} 也与船长 L 有关,故通常认为 C_A 是船长 L 的函数^[6]。如 1957 年 ITTC 推荐公式——Bowden and Davison formula(式 2)。该公式适用于船长 L 小于 400 m 的情况。粗糙度未知时推荐 k_s 取 150 μm 。

$$C_A = \left[105 \left(\frac{k_s}{L} \right)^{1/3} - 0.64 \right] \times 10^{-3} \quad (2)$$

2 污底对船体阻力的影响

在海洋中,海洋生物、植物及微生物会附着于船底表面造成污底^[7],见图 1。危害较大的污损生物有藤壶、牡蛎、贻贝、盘管虫等^[8]。污底附着、腐蚀生锈会使得船底湿表面越来越粗糙,增加航行阻力,增加燃油消耗。

2.1 污损生物的附着机制

污损生物通常随船舶出坞时间按照如下阶段在船体表面进行附着:



a 污损生物附着的船底表面

b 船壳表面附着的藤壶

c 船壳表面附着的海藻

图 1 船舶污底情况
Fig.1 Fouling of hull

1) 微生物的粘附。海水中的船壳经过一系列物理、化学和生物因素作用后, 表面很快就被单层的聚合物材料所覆盖, 形成一种条件膜, 接着细菌开始附着^[9]。初期的附着是可逆的, 可由水冲掉, 长期后细菌繁殖成菌落, 分泌大量细胞外聚合物, 这种牢固的粘液使得吸附变成不可逆^[10]。

2) 小型藻类的粘附。在细菌之后, 真菌、硅藻和原生动物等微生物也在表面附着成群落, 硅藻类以及蓝绿海藻给大型污损生物的孢子和幼虫提供定居和粘附机会。用刷子可除去硅藻纲类生物, 但去除了细菌^[10]。

3) 大型海藻类的粘附。大型海藻是一群肉眼能见到的多细胞的丝状体、膜状体、管状体或叶状体植物, 有蓝藻门、红藻门、绿藻门、褐藻门等^[11]。

4) 大型污损动物幼虫的粘附定居。此为藤壶、贻贝、管栖蠕虫等大型污损生物的幼虫粘附定居的阶段^[12], 这些污损生物有硬性和软性的, 附着牢固。

5) 生物群落的形成。船体表面从微生物膜发展成生物膜, 所有的生物在其表面形成一个污损生物群落^[12]。

2.2 污底评判

污底的严重程度主要从污底类型、生物大小、污底面积这三个方面来判断^[13]。目前判断方法采用目检法, 即不定期采集图像, 然后进行图形分析^[13]。据研究表明, 微污损生物, 如细菌类、真菌类、微小海藻等使船体的摩擦阻力增加 1%~2%; 软性污损生物, 如大型海藻、海鞘、水螅等使船体的摩擦阻力增加 10%; 硬性污损生物, 如无柄蔓足类、双壳类软体动物、管虫、苔藓虫类等使船体的摩擦阻力增加 40%^[14]。因此本文研究也参考污损生物附着图片以及生物类型进行污底分级, 图 2 为在厦门进行金属板防污涂料试验的图片, 随时间增长, 污底附着从轻到重。



图 2 污底严重程度对比

Fig.2 Comparison of the severity of the fouling

轻度污底主要为微生物的附着阶段, 包括细菌、硅藻、原生动物等。虽然数量多, 但个体形貌较微小, 肉眼几乎不可见, 体径小于 0.4 mm, 最大不超过 1 mm, 故归入船体表面粗糙度来体现其附着情况。

中度污底主要为软性污损生物的附着阶段, 如海藻、海葵、海鞘、水螅等。常见的海藻有丝状和片状, 单层藻体厚度一般 0.3~5 mm。结合实际图片来看, 软性生物贴覆船体表面都较均匀, 加上泥沙, 附着厚度大约 10 mm。

重度污底主要为硬性污损生物附着后的阶段, 如藤壶, 贻贝、牡蛎等, 这种情况下船体已不能以粗糙度来体现表面形貌了。据图观察, 藤壶较小, 分布密集, 直径和凸起约为 10~20 mm; 贝类较大, 分布稀疏, 直径 30~40 mm, 凸起高度 20~30 mm。

3 船体表面粗糙及污损附着的数值模拟

3.1 计算模型

基于 1、2 节所述内容, 将船体表面粗糙及污底

附着的表观形貌转化成能进行数值模拟的计算模型。物理模型选用湍流 $k-\epsilon$ RNG 模型。考虑到计算机资源, 控制网格数量, 采用二维流场分析。创建一个矩形, 船轮廓线以外为流场计算区域, 计算域的起始和结束位置为: 前边界距离船首 1 倍船长, 后边界距离船尾 3 倍船长, 下边界距离船底 1 倍船长。以 20000 DWT 江海直达散货船的轮廓线为基础创建几何模型, 船体表面粗糙度可在 FLUENT 中设置大小。对粗糙度已不适合体现船体实际形貌的情况, 则通过改变船型作近似处理。总结如下:

1) 粗糙度以及轻度污底 (几何模型 I)。以目标船水线以下部分的船体作为几何模型 I, 改变船体粗糙度参数, 参考 1.1 小节, 选取变化范围为 100~1000 μm 。

2) 中度污底 (几何模型 II)。中度污底覆盖厚度较均匀, 参考 2.2 小节, 在几何模型 I 的基础上增加船体厚度 10 mm 作为近似模拟, 如图 3a 和图 4, 粗糙度参数设置为 1000 μm 。

3) 重度污底 (几何模型 III)。重度污底覆盖有一些分

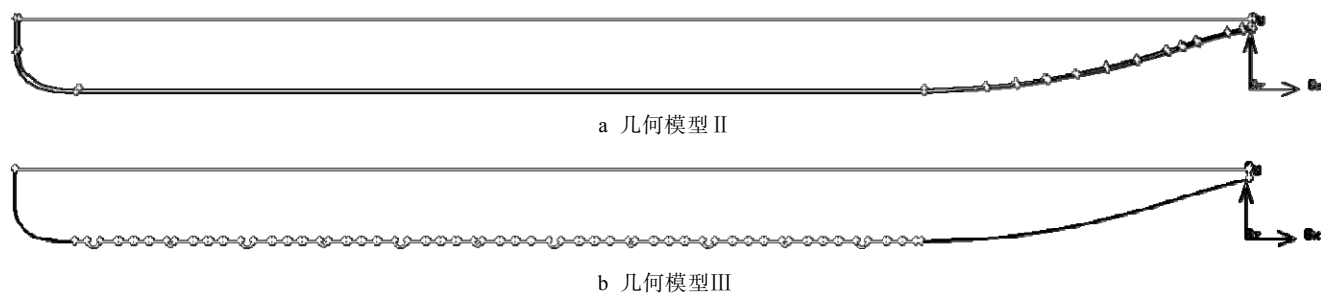


图3 污底几何模型

Fig.3 Geometric models of fouling

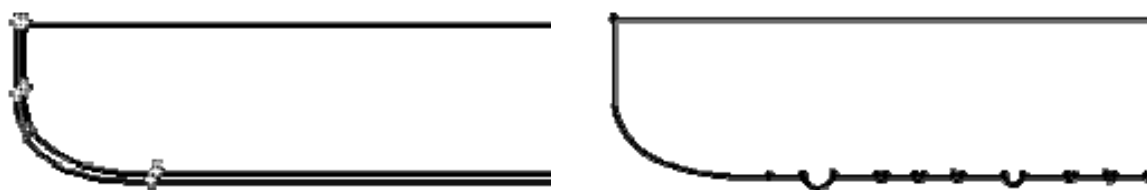


图4 船前端放大图

Fig.4 Enlarged FIGs of front of the ship

散的凸起,参考2.2小节,在中度污底船型(几何模型II)的基础上添加一些规则的半圆凸起,共大、中、小三种,直径 \times 高分别为40 mm \times 30 mm、30 mm \times 20 mm、10 mm \times 5 mm,如图3b和图4。不设置粗糙度参数。

3.2 计算过程

靠近船体表面的网格要细致,以便能捕捉到相关物理量变化,而远离船体表面的网格可以粗一些,故将计算域划分成6个部分后分别进行网格划分,如图5c。几何模型I和II还在船壳曲线附近增加边界层网格,如图5a。几何模型III的船底有凸起,边界层不同于平滑曲面情况,故只进行网格加密,如图5b。三种几何模型的网格的节点及单元的数量均在5~6万。

由于目前的CFD软件还不能很好地直接对实船进行数值模拟,故在网格导入FLUENT后,按船模比例进行几何尺寸缩小(缩尺比40),流体介质为水,密度、黏度保持为默认值,环境条件为大气压强,温度为20℃。考虑到散货船航速一般不高,少有超过15 kn(1 kn=1.852 km/h),按相似定律换算成船模速度,选取为0.2、0.4、0.8、1.0、1.2。

为了验证求解值与网格的无关性,增大网格数量和密度并比较。以几何模型I为例,选取航速为0.2 m/s、粗糙度为0 mm的条件下分别进行FLUENT计算,所有设置条件均相同,两种网格计算结果见表1。两种网格得出的值误差为0.22%,说明网格加密后影响不大,使用节点数为55462的网格进行计算即可。几何模型II、III的网格检验误差同样在1%以内。

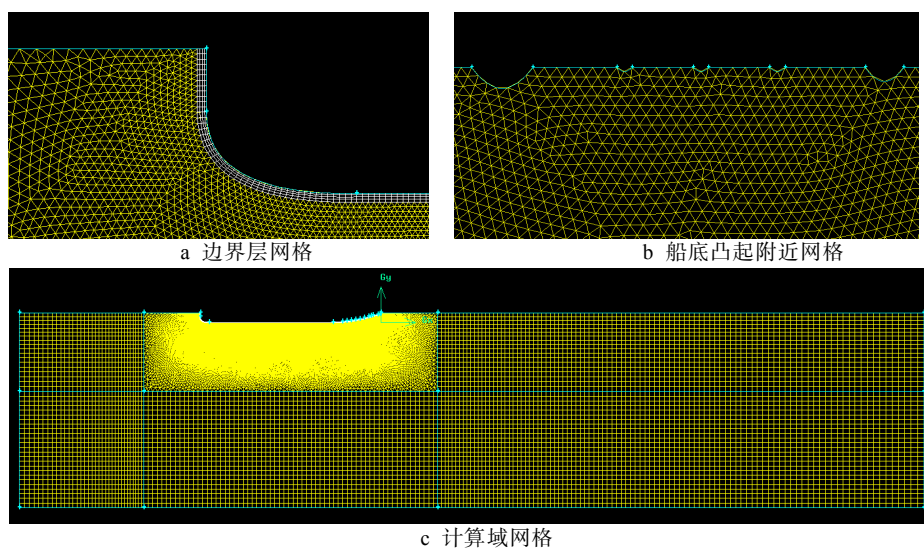


图5 网格划分

Fig.5 Mesh model

表 1 网格无关性比较

Tab.1 Results contrast between different mesh models

Grid nodes	55 462	77 687
Total forces	0.958 763 78	0.960 915 12

3.3 计算结果分析

每种航速下分别用几何模型 I、II、III 进行仿真计算，记录总阻力 R_t 及粘性力值 R_v （认为粘性力近似等同于摩擦阻力）。为了更加直观地研究粗糙度及污底造成航行阻力增大的影响，引入增阻值 ΔR_r 进行分析（式 3）。式中， $R_{t-rough}$ 是粗糙表面和污底影响下的总阻力， $R_{t-smooth}$ 是在同一航速下光滑表面（粗糙度为 0 mm）时的总阻力。绘制 ΔR_r 的变化趋势如图 6。

$$\Delta R_r = R_{t-rough} - R_{t-smooth} \tag{3}$$

图 6 中的折线图显示了五种航速下 ΔR_r 随粗糙度及污底程度的增长趋势，从中可以看出：1）所有航速下，都存在粗糙度越大，污底越严重， ΔR_r 值越大；2）所有航速下，船体表面粗糙、轻度污底以及中度污底附着阶段时， ΔR_r 值增长趋势较平缓，而重度污底附着阶段 ΔR_r 急剧增大，几乎均是粗糙度为 1.0 mm 时的 2 倍，说明重度污底对航行阻力的影响最不容忽视，船舶的防污处理非常重要；3）低航速下阻力增长不明显，但随航速增大，阻力增长越来越明显，在 1.2 m/s 时 ΔR_r 最大接近 24 N，说明航速越高，由粗糙度及污底导致的增阻影响越大；4）在粗糙度 0~1.0 mm 阶段， ΔR_r 随粗糙度的增长率都有减小的趋势，可以推断，由于船体表面粗糙度随船龄时长而增大，因此初运营的新船每年因表面粗糙造成的增阻影响会大于旧船。图 6 中的柱状图则比较了每种粗糙度或污底级别时 ΔR_r 值随航速变化，从中可以

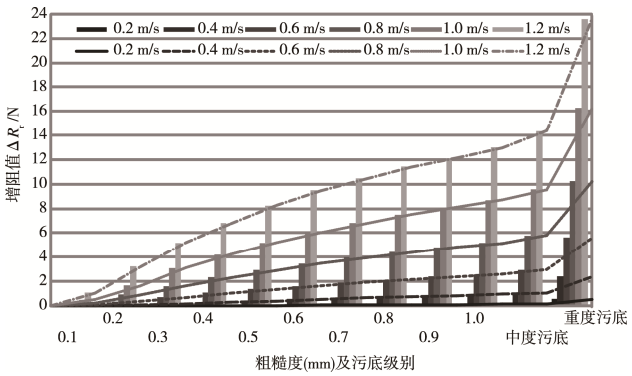


图 6 ΔR_r 变化趋势

Fig.6 the trend of ΔR_r

看出：对所有粗糙度及污底级别， ΔR_r 均随航速呈抛物线增长。这说明通过降低航速来减少增阻适用于任何表面条件。

以上是对总阻力增值 ΔR_r 的分析，下面对增加的阻力性质进行分析，用同样方法计算粘性力的增值 ΔR_{rv} （式 4），计算其占总阻力增值的百分比，结果见表 2。

$$\Delta R_{rv} = R_{v-rough} - R_{v-smooth} \tag{4}$$

从表 2 可以看出，表面粗糙度、轻度污底、中度污底阶段， $\Delta R_{rv}/\Delta R_r$ 均在 60% 左右，说明增大的航行阻力主要是摩擦阻力，且增加的阻力与航速呈抛物线曲线，也验证了工程上采用摩擦补贴系数来修正表面粗糙对船体阻力的影响的合理性。

重度污底时比较特殊，总阻力相对于光滑表面时虽然增大，但摩擦阻力反而减小。结合沟槽减阻机理，猜想是由于几何模型中小凸起存在，导致凸起间低速流体的近壁面速度梯度减小，边界层厚度增大（图 7），比相同雷诺数下平板的边界层厚度要大，使得流向方向的切应力减小；但凸起存在会增大压阻力，所以总阻力仍增大。

表 2 粘性力增值占总阻力增值的百分比（ $\Delta R_{rv}/\Delta R_r$ ）

Tab.2 Percentage of $\Delta R_{rv}/\Delta R_r$

航速/(m·s ⁻¹)	粗糙度（轻度污底）										中度污底 重度污底	
	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm	0.7 mm	0.8 mm	0.9 mm	1.0 mm		
0.2	57	74	69	62	58	60	64	61	61	61	51	—38
0.4	72	62	62	62	62	61	60	61	61	61	51	—38
0.6	57	61	62	60	61	61	61	62	62	62	55	—31
0.8	61	61	62	61	62	61	62	62	62	62	56	—29
1.0	64	69	62	61	62	62	62	62	62	62	57	—27
1.2	62	62	61	62	61	62	62	62	63	63	57	—25

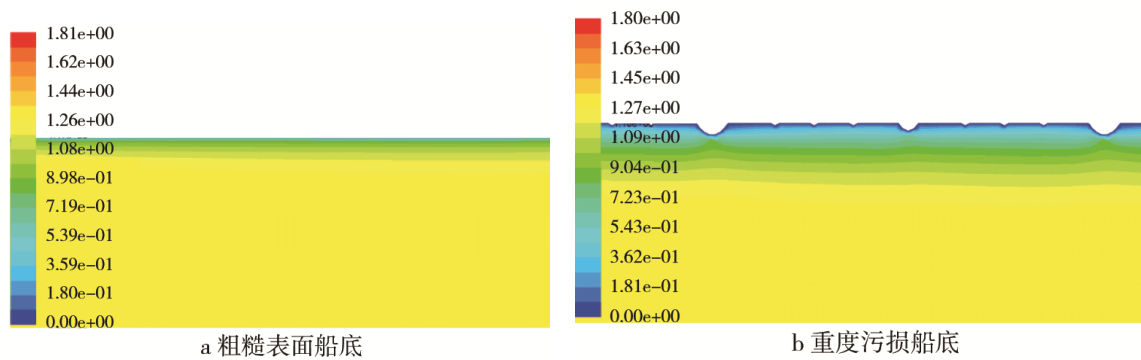


图 7 不同表面船底的速度分布
Fig.7 Velocity distribution of different surface bottom

3.4 与文献结论比较

使用 CFD 方法研究流体力学问题，会受到诸多因素的影响，误差的存在不可避免，通常都需对计算结果进行校核，看是否符合实际情况，因此这里将仿真的计算结果与试验结论作比较。

3.4.1 粗糙度的增阻影响

根据仿真结果，在粗糙度最大为 1.0 mm 时， $\Delta R_f/R_t$ 值为 13%~33%， $\Delta R_f/R_0$ 值为 29%~69%。符合文献[15]中的结论：因粗糙度引起的摩擦阻力增大最大可达摩擦阻力的 77%，占到总阻力的 34%。说明仿真结果可信。

3.4.2 污底的增阻影响

根据仿真结果，在中度污底情况下 $\Delta R_f/R_t$ 为

15%~34%，在重度污底情况下 $\Delta R_f/R_t$ 值为 38%~47%，符合文献[14]中的结论：污损生物能增加船体 10%~40%的阻力。说明仿真结果可信。

3.4.3 阻力补偿系数

为方便与试验得出的经验值—摩擦阻力补偿系数 C_A 作对照比较，定义类似的补偿阻力系数 ΔC_r (式 5)。式中， ρ 为水密度， s 是船模的湿周面积， v 为航速。计算结果如表 3。

$$\Delta C_r = \frac{\Delta R_f}{\frac{1}{2} \rho s v^2} \quad (5)$$

由公式 (2) 算得船模在粗糙度为 0.1~1 mm 时摩擦阻力补偿系数 C_A 的范围为 $(2.430 \sim 5.975) \times 10^{-3}$ 。表

表 3 $\Delta C_r \times 10^3$ 计算结果
Tab.3 Results of $\Delta C_r \times 10^3$

航速/(m·s ⁻¹)	粗糙度 (轻度污底)											中度污底	重度污底
	0 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm	0.7 mm	0.8 mm	0.9 mm	1.0 mm		
0.2	0	0.019	0.037	0.140	0.360	0.645	0.893	1.088	1.391	1.669	1.924	2.400	7.841
0.4	0	0.037	0.280	0.664	1.080	1.478	1.887	2.288	2.612	2.973	3.288	3.761	8.339
0.6	0	0.100	0.566	1.088	1.628	2.108	2.521	2.937	3.308	3.655	3.948	4.509	8.515
0.8	0	0.194	0.815	1.414	2.021	2.501	2.995	3.402	3.787	4.134	4.429	4.956	8.750
1.0	0	0.290	0.922	1.711	2.330	2.854	3.321	3.727	4.116	4.438	4.752	5.238	8.894
1.2	0	0.409	1.236	1.975	2.587	3.139	3.603	3.971	4.343	4.599	4.929	5.456	8.951

3 中仿真结果得到 ΔC_r 的范围为 $(0.019 \sim 4.929) \times 10^{-3}$ ，仿真结果偏小。这一方面是仿真误差的原因；另一方面是因为仿真针对船模，而试验得出的经验公式针对实船， C_A 值还包括了船模-实船间的尺度影响。

3.5 仿真结果在目标船上的应用

摩擦阻力补贴系数的推荐值是通过试验数据统

计得到的，根据船的尺寸大小来估算，而理论上摩擦阻力系数是与雷诺数相关的，特征因素除尺寸外，还包括船速。不同类型船的航速范围会不同，故试验总结的推荐值不一定适用于每条船。在船模阻力试验的基础上，结合数值模拟的方法，得出目标船的粗糙度补贴系数更有针对性。

以相似定律为理论基础，结合经验公式 (2)，在粗糙度确定时，摩擦阻力补贴系数与船长有如下关

系: $C_A \propto (1/L)^{1/3}$, 推出关系式 (6), 根据该关系式即可由船模的仿真结果近似估算 20000 DWT 江海直达散货船的阻力补贴系数 ΔC_f 。

$$\frac{\Delta C_f}{\Delta C_r} = \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^{1/3} = 0.3 \quad (6)$$

例如, 粗糙度为 $150 \mu\text{m}$ 的船模在以 1.2 m/s 船速航行时, 根据表 3 中结果插值得出 $\Delta C_r = 0.823 \times 10^{-3}$, 则可估算粗糙度为 $150 \mu\text{m}$ 的实船在以 14.8 kn 船速航行时, $\Delta C_f = 0.247 \times 10^{-3}$ 。换算后的 ΔC_f 值分布情况如图 8。

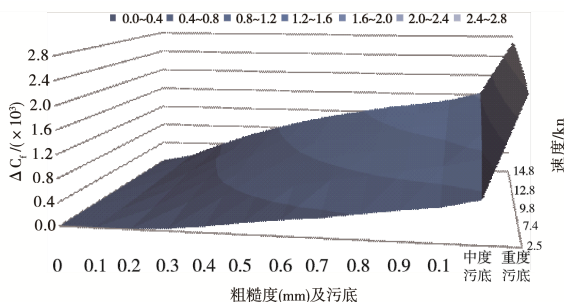


图 8 ΔC_f 值分布图

Fig.8 Distribution of ΔC_f

由 ΔC_f 值分布图 (图 8) 可以看出, ΔC_f 随粗糙度的增大以及航速的提高而增大。在船模-实船换算时, 常取粗糙度补贴系数 $\Delta C_r = 0.4 \times 10^{-3}$, 由图显示, 若船的运营航速在 15 kn 左右, 表面粗糙度大于 0.3 mm , ΔC_f 就超过了 0.4×10^{-3} 。因此, 若想减小粗糙度对阻力的影响, 船体表面粗糙度要尽可能小, 适当降低航速也有利于减小增阻。同时, 污底对阻力的影响比粗糙度要大得多, 重度污底的 ΔC_f 值在 $0.0024 \sim 0.0028$ 范围, 约是粗糙度为 1.0 mm 时的 2~3 倍, 也远远大于经验推荐的 C_A 值。船体防污十分重要, 且重度污底条件下, 航速高低对 ΔC_f 值影响不大。

4 结论

1) 根据污损生物附着情况以及生物附着类型对污底进行了分级, 划分了三种不同的船体表面条件。

2) 采用 CFD 方法仿真分析了船体粗糙表面及污损附着对航行阻力的影响。结果表明在其影响下, 船舶增加的航行阻力随粗糙度的增大以及航速的提高而增大, 最大可占到总阻力的约 30%; 污底的影响比粗糙度更大, 最大可占到总阻力的约 50%; 重度污底情况下, 增加的航行阻力可能不再以摩擦阻力为主, 增阻的阻力系数远大于经验推荐的补贴系数, 使用经验公式估算重度污底对增阻的影响已不合适。

3) 尝试将仿真结果应用在目标船上, 得出了目

标船在不同船体表面条件、不同航速下的阻力补贴系数分布情况, 可为 ΔC_f 经验取值提供参考。

参考文献:

- [1] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上册) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
SHENG Zhen-bang, LIU Ying-zhong. Principle of Ship (Volume 1) [M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, 2015.
- [2] 陈彤, 陈岗军. 海水腐蚀、海生物污损与船舶营运经济性[J]. 中国修船, 2006(4): 44—45, 48.
CHEN Tong, CHEN Gang-jun. Eroding of Sea Water and Sea Biological Defile on the Economics of Shipping Operation[J]. China Shiprepair, 2006(4): 44—45, 48.
- [3] MOLLAND A F, TURNOCK S R, HUDSON D A. Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [4] 鲍毅, 许定生. 船舶阻力的相关系数及其应用[J]. 船舶工程, 1996(6): 27—30.
BAO Yi, XU Dingsheng. Correlation Coefficient and Its Application of Ship Resistance[J]. Ship Engineering, 1996 (6): 27—30.
- [5] CARLTON J S. Chapter 12-Ship Resistance and Propulsion[M]. Marine Propellers and Propulsion (Third Edition), 2012: 299—332.
- [6] 许定生. 尺度作用与阻力系数的相关性分析[J]. 船舶力学, 2001(2): 23—29.
XU Ding-sheng. Study of Correlation Analysis on Scale Function and Resistance Coefficient[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001(2): 23—29.
- [7] 刘超, 付玉彬, 郑纪勇. 环境友好型防污剂及海洋防污涂料的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2009(4): 69—74.
LIU Chao, FU Yu-bin, ZHENG Ji-yong. Review on Environmental Friendly Biocides and Marine Antifouling Coatings[J]. Development and Application of Materials, 2009 (4): 69—74.
- [8] 王瑞刚. 非光滑表面纹理与海洋污损生物附着关系研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
WANG Rui-gang. Research of Non-smooth Surface Texture's Effect on Marine Fouling Organisms[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [9] 张明明, 赵文, 于世超. 我国海洋污损生物的研究概况 [J]. 水产科学, 2008(10): 545—549.
ZHANG Ming-ming, ZHAO Wen, YU Shi-chao. Research

- Progress of Marine Fouling Organisms in China[J]. Fisheries Science, 2008(10): 545—549.
- [10] 宋永香, 王志政. 海洋生物及其粘附机理——微生物、小型海藻、巨型海藻、贻贝[J]. 中国胶粘剂, 2002(4): 48—52.
- SONG Yong-xiang, WANG Zhi-zheng. Marine Organisms and Their Adhesion — Microbial, Microalgal, Macroalgal, Mussel[J]. China Adhesives, 2002(4): 48—52.
- [11] 丁兰平, 黄冰心, 谢艳齐. 中国大型海藻的研究现状及其存在的问题[J]. 生物多样性, 2011(6): 798—804.
- DING Lan-ping, HUANG Bing-xin, XIE Yan-qi. Advances and Problems with the Study of Marine Macroalgae of China Seas[J]. Biodiversity Science, 2011(6): 798—804.
- [12] 周文木, 王孝杰, 胡碧茹, 等. 海洋污损生物粘附机制及防污涂料表面工程[J]. 应用化学, 2010(9): 993—997.
- ZHOU Wen-mu, WANG Xiao-jie, HU Bi-ru, et al. Marine Bioadhesion Mechanism and Surface Engineering for Antifouling Coatings[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2010(9): 993—997.
- [13] 侯大志, 酆智斌. 船舶表面状态信息采集与评估研究[J]. 中国修船, 2013(6): 37—39.
- HOU Da-zhi, LI Zhi-bin. Collection and Evaluation of the Information on the Hull Surface[J]. China Shiprepair, 2013(6): 37—39.
- [14] 陈永红, 孙团, 孙俊忠, 等. 船舶海洋污损生物防治技术及装置研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2015(12): 52—58.
- CHEN Yong-hong, SUN Tuan, SUN Jun-zhong, et al. Progress of Marine Antifouling Solutions and Devices[J]. Total Corrosion Control, 2015(12): 52—58.
- [15] 陈爱国, 叶家玮. 船舶表面状况对船舶性能的影响及其应对措施[J]. 船海工程, 2008(2): 36—39.
- CHEN Ai-guo, YE Jia-wei. Effect of Ship Surface Status on Ship Performance and Countermeasure[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008(2): 36—39.