

文章编号:1000-4653(2025)01-0150-07

基于 EFD 和 CFD 组合方法的肥大船型功率预报研究

高旋, 高玉玲, 陈伟民

(上海船舶运输科学研究所有限公司 水路交通控制全国重点实验室, 上海 200135;
上海船舶运输科学研究所有限公司 航运技术交通行业重点实验室, 上海 200135)

摘要:对三种肥大船型不同载况下形状因子($1+k$)的确定方法及其适应性开展研究,探讨建立基于模型试验流体动力学(EFD)和计算流体动力学(CFD)组合方法的肥大船型实船功率预报方法。以某肥大大型散货船为主要研究对象,分别采用模型试验和数值模拟方法确定形状因子并进行对比分析,然后采用 EFD 和 CFD 组合方法进行实船性能预报。研究表明:基于 CFD 获取形状因子并结合模型试验进行肥大船型功率预报,结果与实船试航结果比较接近且在误差允许范围内,验证基于 EFD 和 CFD 组合方法预报实船航速功率具有实用性和可行性。

关键词:模型试验流体动力学;计算流体动力学;模型试验与数值计算组合方法;形状因子;实船功率预报

中图分类号:U661.31

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.019

A study on power prediction of full-formed ships using a combined EFD/CFD method

GAO Xuan, GAO Yuling, CHEN Weimin

(State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200135, China; Key Laboratory of Marine Technology, Ministry of Communications, PRC, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200135, China)

Abstract: To predict the delivered power of full-formed ships using a combined EFD/CFD method, this work investigated methods of obtaining the hull form factor ($1+k$) for three full-formed ships under various loading conditions, and analyzed their applicability. The hull form factors of each vessel were obtained using model test and numerical simulation, respectively. They were compared and then utilized to perform full-scale predictions of the delivered power using the combined method. The research indicated that the hull form factor obtained from numerical simulation resulted in a closer match between the predicted full-scale delivered power and the trial data, with an allowable difference. The research also validated the applicability of the delivered power prediction of full-formed ships using the combined method.

Key words: experimental fluid dynamics; computational fluid dynamics; a combined EFD/CFD method; form factor; full-scale power prediction

航速功率预报技术作为船舶性能研究的核心技术,在新的国际航运节能减排大背景下被赋予了新的内涵。为应对世界航运发展所带来的全球变暖问题,国际海事组织(International Maritime Organiza-

tion, IMO)率先出台对新造船技术减排的控制措施,作为船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design Index, EEDI)两步验证过程中的航速和功率预报,应采用国际拖曳水池会议(International Towing Tank

收稿日期:2023-11-04

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4300802)

作者简介:高旋(1997—),女,助理研究员,研究方向为船舶水动力性能研究。E-mail: gao.xuan@coscoshipping.com

通信作者:高玉玲(1982—),女,研究员,研究方向为船舶水动力性能研究。E-mail: gao.yuling@coscoshipping.com

引用格式:高旋,高玉玲,陈伟民.基于 EFD 和 CFD 组合方法的肥大船型功率预报研究[J].中国航海,2025,48(1):150-156.

GAO X, GAO Y L, CHEN W M. A study on power prediction of full-formed ships using a combined EFD/CFD method[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 150-156. (in Chinese)

Conference, ITTC) 速度和功率试验推荐规程进行^[1]。ITTC 国际专家委员会认为试验流体动力学 (Experimental Fluid Dynamics, EFD) 和计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法的组合,可能是一个提高功率预测准确性的可行性解决方案。

国内外学者对船舶的形状因子已经进行了较多的研究,而基于 EFD 与 CFD 组合方法进行肥大船型实船性能预报的研究相对较少。其中,王金宝等^[2-4]从 7 万吨油船、超大型油轮 (Very Large Crude Carrier, VLCC) 的航速预报结果与实船测试结果基本一致来看,采用基于 CFD 计算得到的 k 可以较为可靠地用于肥大船舶的三因次换算;并且发现对于油船和集装箱船,CFD 得出的 k 值与 Prohaska 方法一致,适用于没有球艏(或远低于水线)且没有浸没(或非常小)方尾的船舶;当 Prohaska 方法不适用于在某些吃水深度(特别是在集装箱船上)具有明显球艏或浸没方尾的船舶时,CFD 方法仍然有效;通过采用 CFD 与试验相结合的方法进行实船预报,发现结果与 20.8 万吨散货船和 2 万箱集装箱船两种典型船型的系列姊妹船海试结果非常一致。

通过模型试验和 CFD 方法获得准确的形状因子计算方法,然后通过外推形状因子进行实船功率预报与实船试航结果进行对比,可以观察实船性能预报的准确性。以某肥大散货船为主要研究对象,并结合对三种肥大船型不同载况下形状因子的确定,研究获得肥大船型形状因子 $(1+k)$ 的方法及其适应性,探讨建立基于 EFD 和 CFD 组合方法进行实船功率预报的实用性和可行性。

1 模型试验 (EFD) 确定形状因子

某大型散货船的船模阻力试验是在上海船舶运输科学研究所深水拖曳水池中开展的,拖曳水池长 192 m,宽 10 m,深 4.2 m。船模按照一定的缩尺比由木材加工制成,其船体几何外形如图 1 所示。



图 1 某大型散货船船体几何图形

Fig. 1 Hull geometry of the large bulk carrier

摩擦阻力系数采用 ITTC-1957 公式计算,根据船模阻力试验结果,选取傅汝德数在 0.1~0.2 范围内的原始船模试验数据,作出其 Prohaska 方法图例^[5],如图 2 所示。 C_m 为船模总阻力系数, C_{im} 为摩擦阻力系数, F_r 为傅汝德数。应用 Prohaska 方法得到 C_T/C_F 值在推荐傅汝德数范围内并非均呈直线,其中,设计载况和结构载况下 C_T/C_F 曲线呈现波动

现象,而压载载况下 C_T/C_F 曲线比较接近一条直线,符合 Prohaska (1966 年) 描述。根据线性拟合结果,可以得到该船在三种不同载况下曲线的截距(即形状因子 $(1+k)$) 并列于表 1,结果验证了不同载况下形状因子也不同。

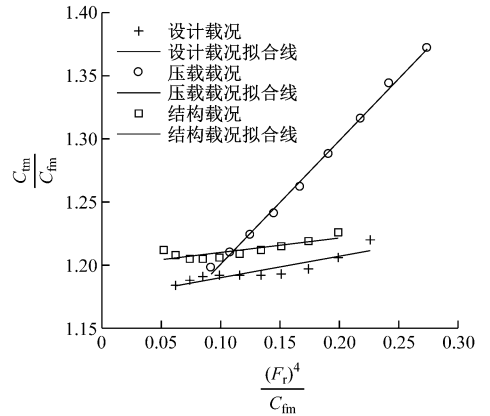


图 2 某大型散货船三种载况下 Prohaska 方法图例

Fig. 2 Legend of Prohaska method for a large bulk carrier under three loading conditions

表 1 基于模型试验采用 Prohaska 方法确定形状因子
Tab. 1 Determination of $(1+k)$ by Prohaska method based on model test results

形状因子\载况	设计	压载	结构
$(1+k)$	1.173	1.103	1.199

2 数值模拟 (CFD) 确定形状因子

2.1 控制方程

采用商业软件 STAR-CCM+ 进行数值分析,通过求解非定常雷诺平均纳维尔-斯托克斯 (URANS) 方程实现。控制方程是连续性方程和动量方程,考虑到流动为不可压缩湍流,模拟计算采用 URANS 求解控制方程。

不可压缩粘流的平均连续性方程和动量方程用张量符号和笛卡尔坐标给出,如式(1)所示:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{\rho} \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中, $\bar{\rho}$ 是水的密度, ∂ 为偏导数符号, \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 是平均速度向量的平均笛卡尔分量(分别沿 x 、 y 方向), x_i 、 x_j 是坐标分量, t 是时间, \bar{u}'_i 、 \bar{u}'_j 是脉动速度(分别沿 x 、 y 方向), $\bar{\rho} \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ 是雷诺应力张量 (RST), \bar{p} 是平均压力, $\bar{\tau}_{ij}$ 是平均黏性应力张量分量,如式(3)所示:

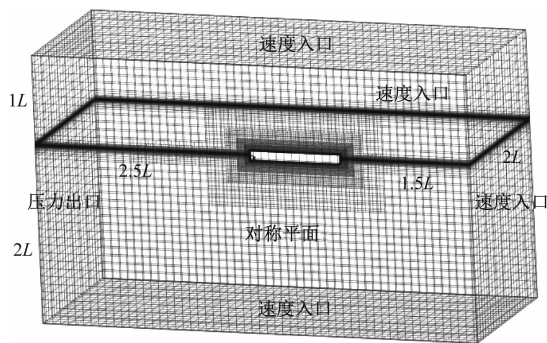
$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中, μ 是动力黏性系数。

为使方程形成一个封闭方程组,需要应用湍流模型,此处采用剪切应力运输(Shear Stress Transfer, SST) $k-\omega$ 湍流模型,由于其集合了 $k-\omega$ 湍流模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型优点,故可产生更为精确的壁面处理。且由于船体绕流带有复杂的分离和伴流现象,故湍流模式对于准确预报伴流及流动分离具有重要作用^[6]。

2.2 计算方法有效性验证

采用与模型试验相同的缩尺比建立数值计算模型,首先基于设计载况进行计算方法的有效性验证。对于阻力试验数值模拟,创建一半计算域,计算域边界必须放置在离船足够远的地方,以避免其对数值解的影响,具体边界设置见图3。对于船模自由表面计算模拟,计算域采用非结构化六面体网格进行离散,船体表面为无滑移壁面边界条件。速度入口边界用于模拟来流入口,出口边界为压力出口,侧面边界为对称平面,底部和顶部边界用于模拟深水和无限空气假设。近壁网格生成是通过在船体表面创建棱柱层,使用壁面函数,设置棱柱层厚度使 $y+$ 值保持在30以上。船首和船尾、靠近船体周围以及自由表面处的网格均进行了加密。此外,网格也被细化用以捕捉开尔文尾流,具体如图4所示。



注:图中 $2L$ 代表间距为2倍船长,以此类推。

图3 VOF 计算域

Fig. 3 Computational domain of VOF



图4 体网格截面

Fig. 4 Volume grid section

使用 STAR-CCM+ 中定义的阻尼函数,阻尼长度设为 L_{pp} ,且将流体体积(Volume of Fluid, VOF)波阻尼应用于入口、出口和左侧边界^[7]。

设置带自由液面的数值模拟网格方案,通过网格加密以保证 $y+$ 值不变,改变棱柱层生长率以及棱柱层数,探究某大型散货船在三种不同网格方案下的静水阻力计算结果。

为评估 CFD 模型数值模拟不确定性,并确定足够网格间距和时间步长,采用验证与校验(Verification & Validation)方法进行带自由液面的验证研究^[8]。通过应用三种网格分辨率(即极细网格 N1、细网格 N2 和粗糙网格 N3),对带自由液面的某大型散货船船模尺度进行空间收敛性研究。空间离散化的数值不确定性是基于 Richardson 外推法的网格收敛指数(Grid Convergence Index, GCI)方法进行估算,具体可见 ITTC(2017)^[9]。表2显示计算空间离散化误差所需参数,其中 C_F, C_T 为关键变量, GCI 用变量 G 表示。此处 CFD 模拟也是在设计速度下进行。

为验证模拟方法有效性,分别使用三种网格方案,将某大型散货船船模自由液面模拟结果与船模试验结果进行比较。表3比较了设计载况下 CFD 模拟计算总阻力系数 C_T 和对应试验值。

由表2和表3可知,某大型散货船基于 C_F 的空间离散数值不确定性为2.10%,而基于 C_T 的空间离散数值不确定性为3.79%,并且数值模拟结果与相应模型试验结果的相对误差较小且小于3%,表明 CFD 结果与 EFD 结果吻合较好,此处选择细网格方案较为合适,故 CFD 计算模型及其计算策略可用于后续的模拟计算中。

2.3 CFD 确定形状因子

通过叠模模拟计算形状因子,无自由面影响,不会因为航速增大引起兴波阻力而对测量值产生影响^[10]。叠模模拟可以做到在真正无波条件下求得设计速度点附近的形状因子。根据前述自由液面数值模拟验证的有效性,采用相同网格方案和时间步长开展 CFD 叠模模拟,其顶部平面也被定义为对称平面,以反映浸湿的船体表面,具体如图5所示。

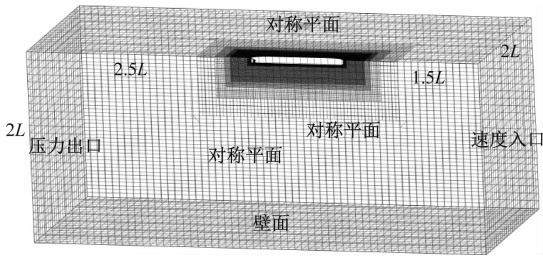
对船模在不同载况下一定航速范围内均进行叠模模拟,摩擦阻力线分别采用 ITTC-1957 公式和 CFD 叠模摩擦阻力系数值进行计算,在某一相同速度下形状因子的计算结果如表4所示。表4中, $(1+k)$ ITTC,代表在 CFD 确定形状因子时,公式中的摩擦阻力系数用 ITTC-1957 公式确定;而 $(1+k)$ CFD,代表在 CFD 确定形状因子时,公式中的摩擦阻力系数直接用 CFD 叠模摩擦阻力系数。结果表明,即使航速相同, CFD 计算得到形状因子 $(1+k)$ 值也不同;可见不同摩擦阻力线下,形状因子的计算结果存

表 2 基于 C_F 和 C_T 的空间离散化误差计算参数Tab. 2 Calculation parameters of spatial discretization error based on C_F and C_T

参数	参数名称	基于 C_F 的空间离散化误差计算参数	基于 C_T 的空间离散化误差计算参数
N_1	第 1 个网格的数量	3 348 464	3 348 464
N_2	第 2 个网格的数量	2 003 370	2 003 370
N_3	第 3 个网格的数量	1 315 463	1 315 463
r_{21}	第 1、2 个网格的细化因子	1.19	1.19
r_{32}	第 2、3 个网格的细化因子	1.15	1.15
ϕ_1	第 1 个网格上的解(C_F 或 C_T)	3.075×10^{-3}	3.785×10^{-3}
ϕ_2	第 2 个网格上的解(C_F 或 C_T)	3.091×10^{-3}	3.706×10^{-3}
ϕ_3	第 3 个网格上的解(C_F 或 C_T)	3.099×10^{-3}	3.840×10^{-3}
ε_{32}	第 3、2 个网格上的解的差值	7.890×10^{-6}	1.341×10^{-4}
ε_{21}	第 2、1 个网格上的解的差值	1.559×10^{-5}	-7.899×10^{-5}
s	两网格上解的差值比的符号函数	1	-1
$e_{a,21}$	近似相对误差	0.51%	2.09%
q	细化因子 r 为常数时, $q = 0$	0.242 2	0.068 6
p_a	表观阶数	2.56	3.50
$\phi_{ext,21}$	外推值	3.047×10^{-3}	3.881×10^{-3}
$e_{ext,21}$	外推相对误差	0.93%	2.48%
$G_{\text{细网格},21}$	细网格收敛指数	2.10%	3.79%

表 3 不同网格方案对 C_T 的影响Tab. 3 Influence of different grid schemes on C_T

网格类型	网格数/万个	计算值	误差/%
粗网格(Coarse)	132	3.840×10^{-3}	2.86
细网格(Fine)	200	3.706×10^{-3}	0.46
极细网格(Very fine)	335	3.785×10^{-3}	2.60



注:图中 $2L$ 代表间距为 2 倍船长,以此类推。

图 5 叠模计算域

Fig. 5 Computational domain of double body model

在差异,其中采用 ITTC-1957 摩擦线计算形状因子偏大。

3 EFD 和 CFD 获得 $(1+k)$ 对比分析

根据模型试验(EFD)结果,分别采用 Prohaska 方法以及和船型参数有关的形状因子经验公式获取

表 4 设计速度下 CFD 确定形状因子

Tab. 4 Determination of $(1+k)$ by CFD at design speed

形状因子	载况		
	设计	压载	结构
$(1+k)$ (ITTC)	1.186	1.151	1.213
$(1+k)$ (CFD)	1.173	1.139	1.196

形状因子值。其中,两种形状因子经验公式如式(4)~(6)所示。

Gross and Watanabe (G&W) 经验公式:

$$k = 0.017 + 20 \cdot \frac{C_B}{LB^2 \cdot \sqrt{BT}} \quad (4)$$

Marintek 形状因子经验公式^[11]:

$$k = 0.6\phi + 75\phi^3 \quad (5)$$

$$\phi = \frac{C_B}{L_{WL}} \sqrt{(T_{AP} + T_{FP})B} \quad (6)$$

式(4)~(6)中, k 为形状系数, C_B 是方形系数, L 是船长, B 是船宽, T 是平均吃水, L_{WL} 是水线长, T_{FP} 、 T_{AP} 分别代表船体首尾吃水, ϕ 为过程量。

将模型试验(EFD)结果分别采用 Prohaska 方法和形状因子经验公式获得的形状因子值,以及根据船模 CFD 叠模模拟结果分别采用 ITTC-1957 摩擦

线和 CFD 叠模摩擦阻力系数获得的形状因子值进行比较,绘制图 6。

图 6 中,分别使用三种不同方法计算 EFD 确定形状因子在三种不同载况下的差别较大。其中,应用 G&W 形状因子经验公式所得形状因子值较大;而应用 Marintek 形状因子经验公式和 Prohaska 方法所得形状因子值比较接近,但结构载况下存在差异。通过 EFD 和 CFD 确定形状因子,发现该船在三种不同载况下形状因子不同,其中结构载况 $(1+k)$ 值最大,设计载况次之,而压载载况 $(1+k)$ 值最小,验证了不同载况对形状因子存在影响。同时,该船在设计载况和结构载况下 CFD 确定形状因子值比较接近于根据模型试验结果采用 Prohaska 方法确定形状因子值,而压载载况下采用 Prohaska 方法确定形

状因子值小于 CFD 确定形状因子值,并且误差分别在 3% 和 4% 左右。

对于此肥大大型散货船,同一载况下 CFD 确定形状因子 $(1+k)$ 在不同航速下略有不同,应用 ITTC 摩擦线下 $(1+k)$ 随航速增加而略微增大,验证了 ITTC 摩擦线下形状因子的速度依赖性^[12];而应用 CFD 叠模摩擦阻力系数获得形状因子 $(1+k)$ 几乎不变,其 $(1+k)$ 均值与中间航速下对应形状因子值基本保持一致且非常接近于设计航速形状因子值,表明直接应用 CFD 叠模模拟结果来计算形状因子比较稳定。综上可知,对于不含球鼻艏或浸湿方尾的肥大船型来说,形状因子可以直接通过 CFD 叠模模拟进行计算。

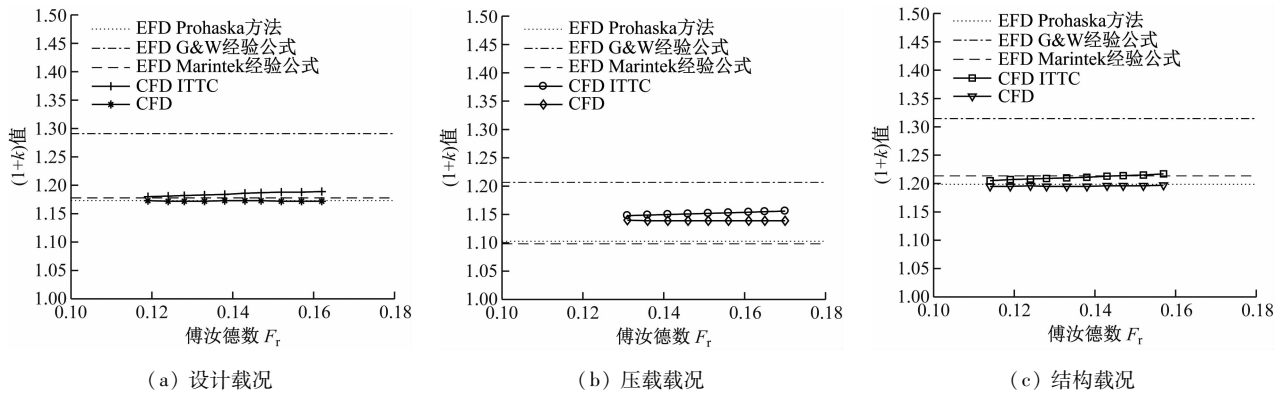


图 6 某大型散货船三种载况下形状因子对比

Fig. 6 Comparison of form factors of the large bulk carrier under three loading conditions

结合三种肥大船型在不同载况下分别采用 EFD 和 CFD 方法获得 $(1+k)$ 值进行比较分析,如表 5 所示。已知设计载况下某肥大大型散货船带有直艏且浸湿方尾非常小,而油船 A 和散货船 B 分别带有两种不同球艏(如图 7 所示),并且肥大大型油船 A 具

有明显浸湿方尾,而肥大大型散货船 B 浸湿方尾较小。一般来说,不同方法获得 k 值不会产生非常显著的差异。然而,肥大大型油船 A 在压载载况下由 EFD 方法确定形状因子相比 CFD 方法确定 $(1+k)$ 值大 4.97%,可见压载吃水的纵倾可能会对肥大

表 5 三种肥大船型不同载况下以两种不同方式获得 $(1+k)$ 的比较

Tab. 5 Comparison of two different ways to obtain $(1+k)$ under different loading conditions for three large full ships

变量	某大型散货船(直艏)			油船 A(球艏 1)		散货船 B(球艏 2)	
	结构	设计	压载	设计	压载	设计	压载
船长与船宽比值	5.88	5.88	5.88	5.52	5.52	5.99	5.99
方形系数	0.835	0.835	0.835	0.81	0.746	0.847	0.803
艏吃水/m	18.4	16.1	8.761	20.8	8.6	18.1	9.3
艉吃水/m	18.4	16.1	9.955	20.8	11.4	18.1	10.3
$(1+k)$ (EFD)	1.199	1.173	1.103	1.226	1.204	1.206	1.171
$(1+k)$ (CFD)	1.196	1.173	1.139	1.197	1.147	1.199	1.151
$(1+k)$ EFD 与 $(1+k)$ CFD 的关系	0.003	0.000	-0.036	0.029	0.057	0.007	0.020
误差 $d_{(1+k)}$ 所占 $(1+k)$ CFD 的百分比	0.25	0.00	-3.16	2.42	4.97	0.58	1.74

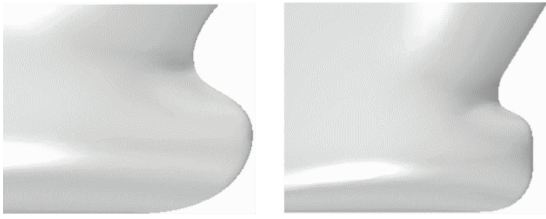


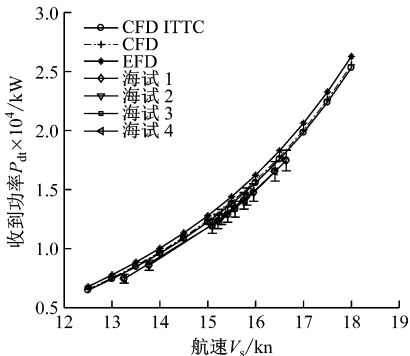
图7 油船 A 和散货船 B 的船首几何图形

Fig. 7 Bow geometry of tanker A and bulk carrier B

船型产生较大影响;同时,肥大型油船 A 相比某大型散货船和肥大型散货船 B 来说,其在两种不同载况下差异较大,从而验证了对于具有明显球艏或浸没方尾的肥大船型来说,应用 Prohaska 方法确定形状因子存在较大差异,而 CFD 方法相对来说较为可靠。

4 EFD 和 CFD 组合方法的实船预报

采用 ITTC-1957 摩擦线和 CFD 叠模摩擦阻力系数分别获取 CFD 确定的形状因子值,同时根据模型试验结果利用 Prohaska 方法获得形状因子值,再结合压载载况下的模型试验结果来外推实船航速功率值,最后与压载载况下实船试航结果进行对比,具体如图 8 所示。



注:图中纵向短虚线为 $\pm 5\%$ 误差线。

图8 某肥大型散货船实船航速-功率曲线(压载载况下)

Fig. 8 Speed-power curve of a large bulk carrier (under ballast condition)

由图 8 可知,在压载载况下,相比 Prohaska 方法获得形状因子来外推得到实船航速功率结果来说,采用 EFD 和 CFD 组合方法(其中 $(1+k)$ 来自 CFD 叠模计算)进行实船功率预报结果曲线与实船试航功率-航速曲线比较接近且误差在 5% 左右,表明基于 EFD 和 CFD 组合方法预报肥大船型的实船功率具有实用性和可行性。同时由于误差存在,使得关于船模-实船修正因子的准确确定仍然是一个值得研究的问题。

在应用 EFD 和 CFD 组合方法进行本船实船功率预报时发现,根据 CFD 叠模模拟结果,选用 ITTC-

1957 摩擦阻力线获得形状因子进行实船预报结果,与直接应用 CFD 叠模摩擦阻力系数获得稳定形状因子再进行实船预报结果存在略微差异且为 1% 左右。通过对以上三种方法的实船预报结果进行对比分析,发现形状因子 $(1+k)$ 越大,预报航速越高、阻力越低,由此可能会产生航速难以达到的风险。综上,基于 EFD 和 CFD 组合方法预报实船航速功率具有实用性和可行性。

5 结束语

通过对三种肥大船型分别进行 EFD 确定形状因子、CFD 确定形状因子以及二者的对比研究,并且开展基于 EFD 和 CFD 组合方法的某肥大型散货船实船航速功率预报,得到主要结论如下:

1) 不同载况下,形状因子不同,且吃水越大,形状因子越大;对于同一载况,CFD 确定形状因子在不同航速下略有不同,应用 ITTC 摩擦线所得形状因子 $(1+k)$ 具有速度依赖性,而直接应用 CFD 叠模摩擦阻力系数获得形状因子比较稳定。故对于不含球艏或浸没方尾的肥大船型来说,形状因子 $(1+k)$ 可以直接通过 CFD 叠模结果进行计算;而对于具有明显球艏或浸没方尾的肥大船型来说,应用 Prohaska 方法确定形状因子会产生较大差异,而 CFD 方法相对来说较为可靠。

2) 采用 EFD 和 CFD 组合方法进行某大型散货船实船功率预报结果与实船试航结果比较接近,表明基于 EFD 和 CFD 组合方法进行实船航速功率预报具有实用性和可行性。而若直接应用 Prohaska 方法获得的形状因子外推实船航速功率,可能会产生实船航速难以达到的风险。

综上,需要继续关注压载吃水的纵倾对于肥大船型所产生的影响,并对更多不同类型的船舶案例进行进一步的研究分析;同时由于误差的存在,关于船模-实船修正因子的准确确定也有待继续研究。

参 考 文 献

- [1] International Maritime Organization. Annex 19: resolution MEPC. 203 (62): report of the marine environment protection committee on its sixty-session [R]. London: IMO, 2011.
- [2] 王金宝,于海,张越峰,等. CFD 技术在确定肥大船舶形状因子中的应用研究[J]. 船舶与海洋工程, 2013(4): 1-5.
WANG J B, YU H, ZHANG Y F, et al. Research on the application of CFD technology in determining the form factor of large ships [J]. Naval Architecture and

- Ocean Engineering, 2013(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] WANG J B, YU H, ZHANG Y F, et al. CFD-based method of determining form factor k for different ship types and different drafts[J]. Journal of Marine Science and Application, 2016, 15(3): 236-241.
- [4] WANG J B, YU H, FENG Y. Feasible study on full-scale delivered power prediction using CFD/EFD combination method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(1): 1250-1254.
- [5] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- SHENG Z B, LIU Y Z. Ship theory [M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 江杰, 李彦强. 船舶阻力换算中形状因子的计算研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 132-135.
- JIANG J, LI Y Q. Calculation of form factor in ship resistance conversion[J]. Journal of Sichuan Ordnance Engineering, 2015, 36(4): 132-135. (in Chinese)
- [7] FARKAS A, DEGIULI N, MARTIC I. Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran [J]. Ocean Engineering, 2017, 146: 151-169.
- [8] DOGRUL A, SONG S, DEMIREL Y K. Scale effect on ship resistance components and form factor[J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107428.
- [9] International Towing Tank Conference. ITTC Quality System Manual, Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures[R]. Wuxi: Resistance Committee of 28th ITTC, 2017.
- [10] BERTRAM V. Practical ship hydrodynamics [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [11] NIKLAS K, PRUSZKO H. Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments [J]. Ocean Engineering, 2019, 190: 106435.
- [12] 高旋, 高玉玲, 董国祥. 采用数值计算方法获得 KVLCC2 形状因子($1+k$)的探讨[C] //第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2020: 741-749.
- GAO X, GAO Y L, DONG G X. Discussion on obtaining form factor ($1+k$) of KVLCC2 by numerical method [C] //Proceedings of the 31st National Hydrodynamics Symposium (Volume 1). Beijing: China Ocean Press, 2020: 741-749. (in Chinese)
- (上接第 149 页)
- [7] 刘祖源, 冯佰威, 詹成胜. 船体型线多学科设计优化 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 112-117.
- LIU Z Y, FENG B W, ZHAN C S. Multidisciplinary design optimization of ship hull form [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 112-117. (in Chinese)
- [8] FISCHER C C, GRANDHI R V. A surrogate-based adjustment factor approach to multi-fidelity design optimization [C] //Non-Deterministic Approaches Conference, 2015, Kissimmee, Florida: AIAA, 2015: 1375.
- [9] HAN Z H, GORTZ S, ZIMMERMANN R. Improving variable-fidelity surrogate modeling via gradient-enhanced kriging and a generalized hybrid bridge function[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 25(1): 177-189.
- [10] XIA B, HONG S, CHOI K, et al. Optimal design of winding transposition of power transformer using adaptive Cokriging surrogate model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-4.
- [11] HOLTROP J, MENNEN G G J. A statistical power prediction method [J]. International Ship Building Progress, 1978, 25: 253-256.
- [12] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method [J]. International Ship Building Progress, 1982, 29: 166-170.
- [13] HOLTROP J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data [J]. International Ship Building Progress, 1984, 31: 272-276.
- [14] 周俊秋, 孙凤胜, 张维英, 等. 基于可视化编程环境的船型参数化融合与降阻优化研究[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(5): 471-480.
- ZHOU J Q, SUN F S, ZHANG W Y, et al. Research on hull form parametric morphing and optimization of resistance reduction based on visual programming environment [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(5): 471-480. (in Chinese)
- [15] 王英第, 陈彦臻, 周伟健, 等. 船体阻力数值预报研究及黏性流场计算[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 17-22.
- WANG Y D, CHEN Y Z, ZHOU W J, et al. Research on resistance prediction and calculation of viscous flow field[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(1): 17-22. (in Chinese)
- [16] 杨兆臣, 张怀新. 基于双向流固耦合的柔性表面覆盖层减阻性能[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(8): 1165-1172.
- YANG Z C, ZHANG H X. Investigation of drag reduction of flexible surface based on bi-directional fluid-structure interaction [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(8): 1165-1172. (in Chinese)