基于 DES 方法的 VLCC 实船阻力预报与流场分析

尹崇宏，吴建威，万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室，
高新船舶与深海开发装备协同创新中心，上海 200240)
*通信作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要：随着 CFD 技术的发展和计算机运算能力的提高，CFD 在船舶设计中发挥着越来越重要的作用。目前 CFD 对于船舶阻力的计算基本集中在模型尺度，一方面因为实尺度缺乏相关的实验数据；另一方面也是因为在实尺度高雷诺数下，数值计算的复杂性会大大增加，传统的 RANS 方法处理起来较为困难。本文应用 DES 方法，同时采用三因次法换算和直接实尺度 CFD 计算两种方法对 32 万吨 VLCC 进行了实船阻力预报，并与 RANS 的计算结果和模型实验进行比较分析。本文验证了采用 DES 方法在实船阻力预报中的可靠性和有效性，同时也对流场进行了讨论与分析。

关键词：DES；S-A IDDES；naoe-FOAM-SJTU；实船阻力预报；VLCC

1 引言

对船舶阻力的预报是船舶设计中的一个重要的课题。由于各种条件的限制，目前对于船舶阻力的预报大多基于模型试验。模型试验一般是在傅汝德数相等的条件下进行的，不能保证雷诺数的相等。由于尺度效应，船模雷诺数（约 10^6 量级）与实船雷诺数（约 10^9 量级）通常存在 3 个量级的差距。为了解决尺度效应的问题，在实际工程中诞生了一系列的外推经验公式，如傅汝德方法（二因次法）和 1954 年 Hughes 提出的三因次法，它们从模型试验测得的船模阻力出发，利用外推经验公式和船体粗糙度补贴系数得到实船阻力。这些方法虽然在工程上具有很强的实用性，但随着造船工业的精细化发展以及各种节能装置的出现，人们在试图寻找一种能够直接给出实船雷诺数下的流场信息的新的船舶阻力预报方法。

随着计算机技术和数值方法的迅速发展，运用计算流体力学技术（Computational Fluid Dynamics, CFD）来解决船舶与海洋工程水动力学问题越来越受到大家的重视。CFD 方法

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不仅可以充分考虑流体的粘性作用，还可以将流体的非线性因素计算在内，与传统的势流理论相比，CFD 方法展现出巨大的优势。近年来，采用 CFD 技术直接进行实尺度船舶数值计算的探索也越来越多。Tahsin Tezdogan 等[1]采用商业软件 Star-CCM+、控制方程 URANS，对迎浪下的实尺度 KCS 进行了波浪增阻的模拟研究，并与势流理论结果和实验数据进行了比较分析。Pablo M. Carrica 等[2]采用其开发的重叠网格求解器 CFDShip-Iowa v4.5 对实尺度 KCS 的自航试验进行了数值模拟，并对模型尺度和实尺度计算结果的桨盘面伴流场进行了比较分析。国内的学者在这方面也开展了一系列的工作。易文彬，王永生等[3]对傅汝德数 0.15-0.41 内的实尺度 DTMB5415 船型进行了流场模拟和阻力计算，同时采用了基于模型尺度数值模拟外推方法、虚流体粘度方法和实尺度船舶 RANS 计算等三种方法；对实尺度船型在 5 种不同 y+下进行阻力计算，并将摩擦阻力系数与平板摩擦阻力系数比较，认为船体表面第一层网格厚度应该使 y+在 5000~10000 的范围，这时能够准确模拟实船雷诺数下的摩擦阻力。倪崇本，朱仁传等[4]提出将实尺度下势流理论与模型尺度下湍流理论相结合的方法来求取实船的阻力，虽然阻力预报有较高的精度，但是不能给出实船雷诺数下的流场信息。

不难发现，目前基于 CFD 方法进行的实船阻力预报工作，仍然集中在采用 RANS 方法进行计算。但是 RANS 方法在实船计算中却存在以下两个方面的问题。一方面，在高雷诺数下的实船边界层厚度相对模型尺度更加薄，划分网格时需要在船体表面生成非常薄的第一层网格来捕捉边界层中的粘性力，这对网格的生成造成较大的困难。另一方面，由于实船计算中雷诺数更大，非定常的特征更加明显，目前传统 RANS 方法的涡黏性会被高估，这将抹去流场中重要的涡结构， RANS 长度尺度存在的缺陷会更加明显。

本文利用基于开源代码 OpenFOAM 工具箱和数据结构开发的针对船舶与海洋工程复杂水动力学问题的 RANS/DES 求解器 naoe-FOAM-SJTU[5]，采用 S-A IDDES 模型和 RANS 中的 k-ε 可 SST 模型对 VLCC 实船的静水阻力进行了预报，同时与从模型尺度阻力经三因次换算得到的结果进行比较。考虑到实尺度计算中边界层更薄的情况，采用了相对较小的第一层网格厚度来捕捉黏性力。计算中采用带可压缩技术的 VOF 法进行对自由液面的捕捉。控制方程和 VOF 方程采用有限体积法进行离散。速度压力耦合采用 PISO 算法[6]求解。

2 数学模型

为了弥补RANS在非定常湍流预测方面的不足，同时避免LES较大的网格量和计算量，Spalart等[7]在1997年提出了一种混合RANS/LES的分离涡模型，即DES (Detached Eddy Simulation)模型，之后又进一步发展为DDES[8]（Delayed Detached Eddy Simulation）模型。它将标准的Spalart-Allmaras（S-A）RANS 模型与LES模型进行结合。在近壁面以及亚格子区域(Sub-Grid Scale，SGS)采用S-A模型进行计算，在远场采用LES进行大涡模拟计算。DES模型通过计算域中某一处的网格尺度Δ和该处距最近壁面的距离d_w来进行RANS/LES的切换。这样就能使得边界层内仍然受湍流模型的控制，在远离壁面区域达到类似LES的滤波效

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

果。由于近壁面仍然采用壁面函数来计算，因此其网格需求量远小于理想的LES，仅略大于三维的RANS。

本文采用的DES模型是最新修正的DES模型——S-A IDDES模型，其近壁面采用S-A一方程RANS模型进行计算。IDDES（Improved Delayed Detached Eddy Simulation）模型是Travin[9]在2006年最初提出，并在2008年由Shur[10]进一步发展的一种融合DDES和WMLES（Wall Modeled LES）的方法。

IDDES在网格尺度Δ的定义中即引入距壁面距离的影响：

$$\Delta = f\left\{\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, d_w\right\} = \min\{\max\left[C_w d_w, C_w \Delta_{\max}, \Delta_{wn}\right], \Delta_{\max}\} \tag{1}$$

当来流中没有湍流成分时，IDDES采用DDES来计算；当来流不稳定、包含湍流成分、且网格足够密可以计算边界层中的漩涡时采用WMLES来计算。

DDSE分支的长度尺度为：

$$l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max\left\{0, l_{RANS} - l_{LES}\right\} \tag{2}$$

WMLES分支的长度尺度为：

$$l_{WMLES} = f_B(1+f_e)l_{RANS} + (1-f_B)l_{LES} \tag{3}$$

其中：$l_{RANS}=d_w$，$l_{LES}=C_{DES}\psi\Delta$。$C_{DES}$为常数，对 S-A 模型一般建议取 0.65，$\psi$ 为 IDDES

网格尺度Δ的系数函数，当亚格子涡黏度大于 10ν时=1；当小于 10ν时 LES 则会对的尺度起

到修正作用。

DDES的引入是为了解决传统DES计算中产生的GIS（Grid Induced Separation）问题，其在长度尺度中引入了湍流模型的第二长度尺度，而不是使用LES的滤波尺度。其中函数f_d的定义如下：

$$f_d = 1 - \tanh(8r_d)^3 \tag{4}$$

函数r_d的定义如下，其中κ 为von Karman常数：

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\kappa^2 d_w^{\ 2} \max[\sqrt{\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}};10^{-10}]} \tag{5}$$

在LES区域中，r_d<<1，函数fd 的值为1，其余区域则为0.

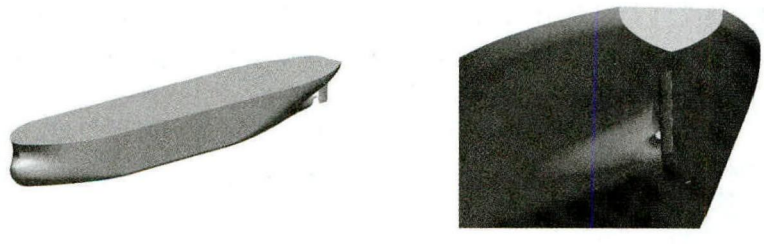
引入WMLES的主要目的则是为了解决传统DES产生的LLM（Log-Layer Mismatch）问题。WMLES的基本思想是将边界层中的黏性底层单独分离出来用RANS计算，其余有湍流发展的部分采用LES计算。其中的f_B，f_e为经验函数。

3 计算模型及网格

本次计算的船型为排水量 32 万吨的超大型油轮 VLCC (Very Large Crude Carrier)，其垂线间长 L_{pp} 为 320m，设计吃水 20.5m，模型尺度的缩尺比为 40，设计航速 16kn。船型参数如下表 1 所示，船体模型如下图 1 所示。

表 1 船型主尺度

参数	单位	模型尺度	实尺度
缩尺比	—	40	—
垂线间长	L_{PP}/m	8	320
设计水线长	L_{wl} /m	8.1498	325.992
吃水	T /m	0.5125	20.5
船模质量	M /kg	5011.57	$3.207*10^8$
湿表面积	S/m^2	17.9	28640
密度	ρ/(kg/m^3)	998.1	1025



(a)整体视图　　(b)船尾局部视图

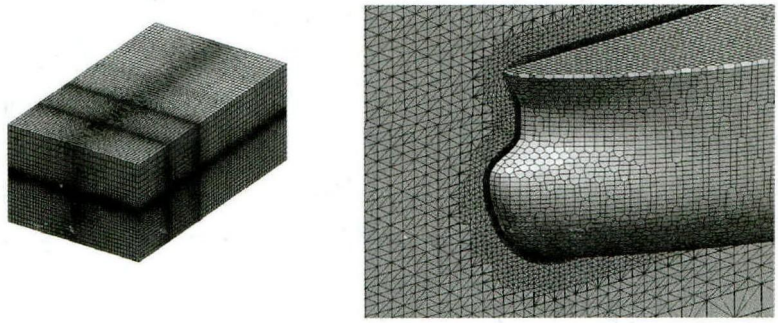
图 1 计算船型

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文中模型尺度算例和实尺度算例均采用相同的计算域进行计算。地球坐标系下该网格计算域为：1.0L<x< 4.0L，-1.5L<y<1.5L，-1.0L < z<1.0 L.

船体网格的生成具体采用 OpenFOAM 自带工具的网格生成工具 snappyHexMesh 来完成。具体方法为：首先生成均匀的笛卡尔坐标系下的背景网格，再通过将均匀网格分割成多个六面体单元，形成八叉树(octree) 的网格结构，来得到最后所需的网格。

计算中 DES 和 RANS 方法采用同一套网格，为了捕捉实船更薄的边界层，网格采用了较小的船体表面第一层边界层网格厚度，整个计算域的网格数约为 3.44×10^6。全局网格以及船首局部网格如图 2 所示。



(a)全局网格　　(b)船首局部网格

图 2 计算网格

4 计算结果及分析

我们对设计航速 16kn（Fr=0.147）下该 VLCC 在实船阻力阻力进行预报，计算中船体固定。本文同时采用了两种方式预报实尺度下的总阻力系数：

1、对船模进行 CFD 计算，再通过三因次法换算得到实船总阻力系数；

2、直接对实尺度船型进行 CFD 计算。

每种预报方式同时采用 DES、RANS 两种方法。其中 DES 方法采用的 S-A IDDES 模型；RANS 方法采用的是 k-ε SST 模型。

首先我们进行了船模阻力的计算。由于 S-A IDDES 中处理近壁面计算的是 S-A 一方程 RANS 模型，为了使 DES 和 RANS 的比较更具说服力，我们也采用 S-A 模型进行了模型尺度的计算。下表 2 中列出了模型尺度计算中三种湍流模型计算得到的船舶各项阻力系数与实验值的比较。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　模型尺度下三种湍流模型计算所得的各项船舶阻力系数比较

	C_p	C_f	C_t	R_t	总阻力误差
EFD	0.00098	0.00297	0.00395	59.02	—
S-A	0.00138	0.00312	0.00450	68.236	15.6%
S-A IDDES	0.00117	0.00287	0.00404	61.198	3.69%
k-ω SST	0.00124	0.00294	0.00418	63.375	7.37%

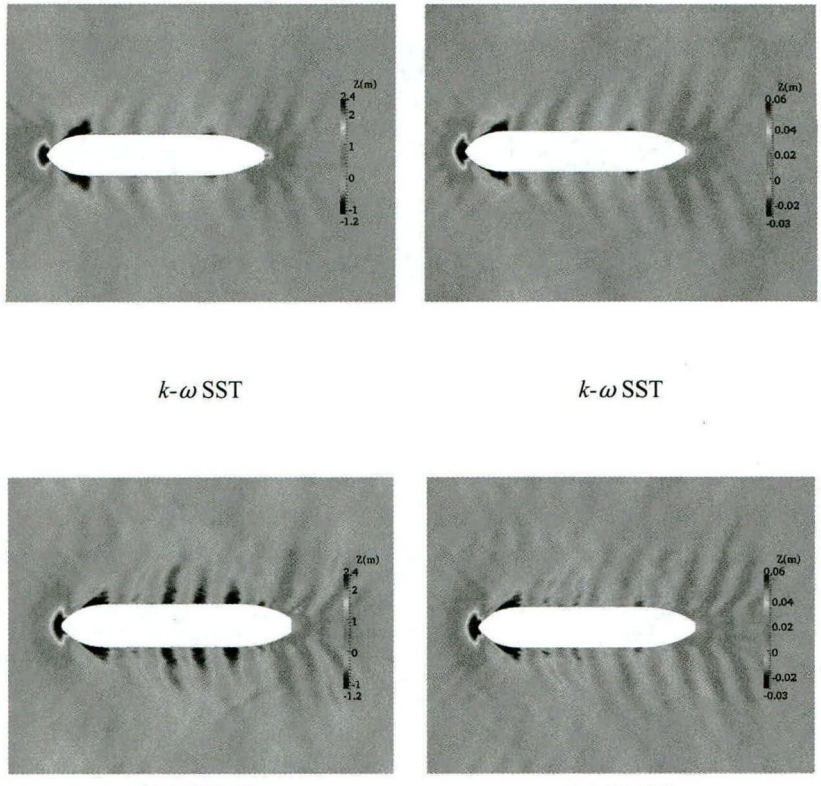
分析表 2 的结果可以看到，S-A 模型的计算结果与实验值相差较大。可见 S-A 作为一方程的 RANS 模型，在处理高雷诺数湍流时存在一定的问题。S-A IDDES 模型的计算结果与实验值最为接近，特别是在压阻力的计算上，展示出了相对两种 RANS 模型更高的精度。S-A IDDES 模型在计算中，仅用 S-A 模型在近壁面边界层内进行计算，实质更多是利用 S-A 的壁面函数，因此有效的克服了 S-A 模型的不足。

实船阻力的计算结果以及船模阻力的三因次换算结果如下表 3 所示。在船模阻力的三因次法换算中，形状因子 $1+k$ 和补偿系数ΔC_f均采用与船模实验相同的值。由表 3 结果可以看到，两种实船阻力预报方法均与模型实验三因次法换算得到的实船阻力结果接近。无论是直接实尺度计算的结果还是模型尺度换算的结果，S-A IDDES 模型预报的值相对 k-ε SST 模型均偏小 6%左右的，保持了一致性。

表 3　两种实船阻力预报方法与船模试验换算值对比

	C_{tm}	$1+k$	ΔC_f	C_{ts}	误差
船模实验三因次法换算	0.00395	1.280	0.00031	0.00221	—
S-A IDDES 实尺度计算	—	—	—	0.00215	-2.71%
k-ω SST 实尺度计算	—	—	—	0.00229	3.62%
S-A IDDES 三因次法换算	0.00404	1.280	0.00031	0.00217	-1.81%
k-ω SST 三因次法换算	0.00418	1.280	0.00031	0.00230	4.07%

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



k-*ω* SST　　*k*-*ω* SST

S-A IDDES　　S-A IDDES

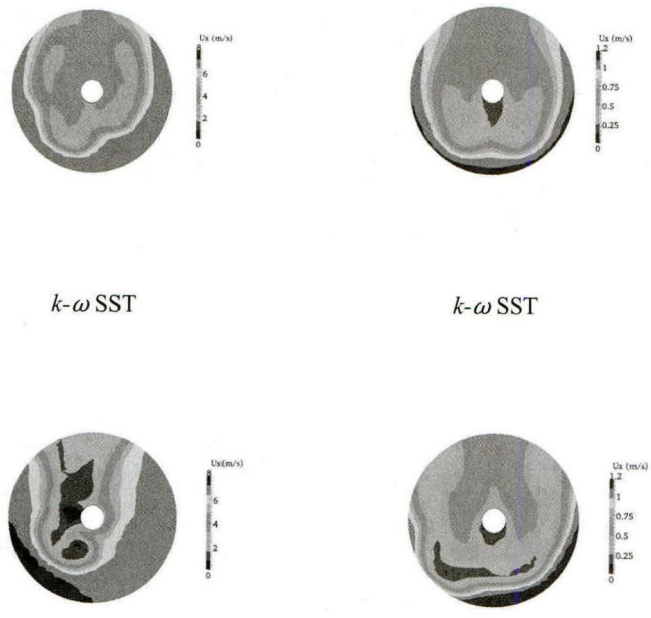
(a)实船尺度　　(b)模型尺度

图 3 船体附近兴波比较

S-A IDDES 和 *k*-*ε*SST 两种模型计算得到的自由面比较如图 3 所示。为了便于比较，将实船兴波的高度范围设为模型尺度的 40 倍（即缩尺比）。可以看到实船的自由面兴波要整体大于模型尺度，这是因为在模型尺度雷诺数下，边界层厚度相对较大，粘性作用导致了兴波波幅减小。同时，S-A IDDES 模型捕捉到的自由面相对 *k*-*ε*SST 模型更加的精细，特别在船尾处，S-A IDDES 计算结果的自由面清晰的捕捉到了两列波峰。

S-A IDDES 和 *k*-*ε*SST 两种模型计算结果的桨盘面伴流场比较如图 4 所示。从桨盘面伴流场的比较中我们可以看出，由于实船雷诺数下黏性的作用相对较弱，导致伴流较模型尺度下更弱；而且实船的伴流场不像模型尺度伴流场一样对称均匀，相对更紊乱一些，这也是由高雷诺数下的粘性效应下降所导致的。同时也可以发现，S-A IDDES 模型计算得到的桨盘面伴流场相对 *k*-*ε*SST 模型更加紊乱，非定常的特征更加明显。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



k-ω SST　　*k-ω* SST

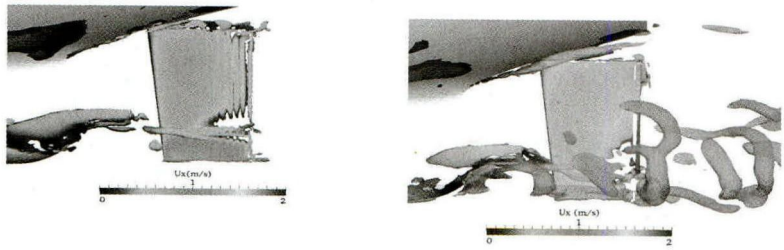
S-A IDDES　　S-A IDDES

(a)实船尺度　　(b)模型尺度

图 4 桨盘面伴流场比较

S-A IDDES 和 *k-ω* SST 两种模型计算得到的船尾涡结构比较如下图 5 所示。由于实船尺度黏性效应下降，船尾泻涡不明显，此处我们仅对模型尺度的船尾涡结构进行比较。取 Q=50 的截面，采用轴向速度染色。从图中可以看到，S-A IDDES 模型清晰的捕捉到了船尾的涡结构以及泻涡被舵打碎的形态，而 *k-ω* SST 模型则几乎没有捕捉到船尾的涡结构。

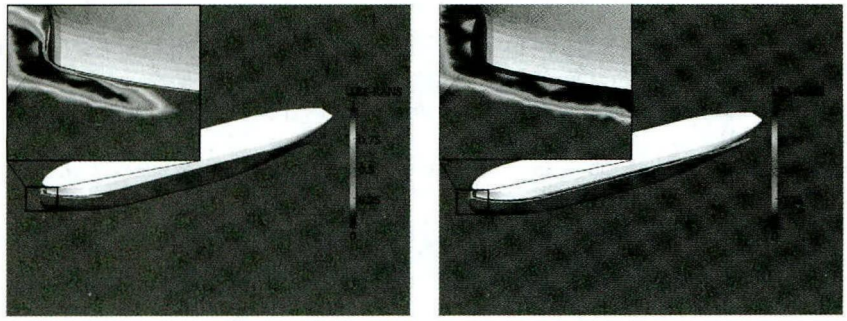
实尺度和模型尺度 DES 计算中 RANS/LES 区域如下图 6 所示。可以看到，船体壁面一定范围内的区域是采用 RANS 来计算的，而远离壁面的绝大部分区域都是采用 LES 模型来计算。相对模型尺度，实尺度计算由于边界层更薄，其近壁面的 RANS 计算范围也更窄。



k-ω SST　　S-A IDDES

图 5 船尾涡结构比较比较

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



S-A IDDES　　S-A IDDES

(a)实船尺度　　(b)模型尺度

图 6 DES 计算中的 RANS/LES 区域，红色表示 LES 计算区域，蓝色表示 RANS 计算区域

5 总结

本文利用基于开源代码 OpenFOAM 开发且专门运用于船舶与海洋工程水动力学问题的 RANS/DES 求解器 naoe-FOAM-SJTU，对 VLCC 实尺度阻力进行了数值预报，并与模型实验三因次法换算结果进行了比较验证。综合以上比较分析的结果，我们得到以下结论：

（1）在对于模型尺度 VLCC 的计算中，DES 方法相对 RANS 方法有更高的精度；在对实尺度 VLCC 的计算中，虽然缺乏实船实验数据比较，但 DES 方法相对 RANS 捕捉到了更加精细的流场结构，体现了 DES 方法的优势，也证明了其可靠性。

（2）RANS 由于长度尺度的问题对于高雷诺数强非定常湍流计算存在不足，这一点在实船计算中表现的尤为明显；DES 方法较好的弥补了 RANS 的不足，可以提供实船精细的流场信息供设计参考，这弥同时补了模型试验和势流理论预报的不足。

（3）实船有相对模型尺度更大的兴波，这是因为实船的边界层更薄，粘性效应更弱。更高的雷诺数和较低的粘性也导致实船尾部伴流场更弱，更紊乱。

综上所述，本文计算结果探讨了采用 CFD 技术，特别是 DES 方法在实船阻力和流场预报中的可行性。目前该方法正被应用于船-桨-舵相互作用的数值模拟之中。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目（Grant Nos 51379125，51490675，11432009，51411130131），长江学者奖励计划(Grant No. 2014099)，上海高校特聘教授（东方学者）岗位跟踪计划(Grant No. 2013022)，国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目（Grant No. 2013CB036103），工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

1 Tezdogann T, Demirel Y K, et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behavior and performance in head seas due to slow steaming [J]. Ocean Engineering, 97 (2015) 186–206.

2 Carrica P M, Castro A M, et al. Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

KRISO container ship KCS[J]. Computers & Fluids, 51 (2011) 35–47.
3 易文彬,王永生,杨琼方,等. 实船阻力及流场数值预报方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(5): 532-536.
4 倪崇本,朱仁传,缪国平,等. 基于CFD进行实船阻力预报的一种新方法[C]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会,中国,2010.
5 Shen Z R, Cao H J, Wan D C. Manual of CFD solver naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, 2012.
6 Issa R I. Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40-65.
7 P. Spalart, W. Jou, M. Strelets, and S. Allmaras. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. Advances in DNS/LES, 1, 1997.
8 Spalart P R, Deck S, Shur ML, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20: 181-195.
9 A.Travin, M.Shur, P.Spalart, et al. Improvement of delayed detached-eddy simulation for LES with wall modelling. In P.Wesseling, E.Oñate, and J. Périaux, editors, Proceedings of the European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006, Egmond aan Zee, The Netherlands, 2006.
10 M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets and A.K. Travin. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities, International Journal of Heat and Fluid Flow, 29: 1638-1649, 2008.

Full scale VLCC resistance prediction and flow field analysis based on DES method

YIN Chong-hong, WU Jian-wei, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)
*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: With the development of CFD technology and the improvement of computing capacity, CFD is playing an increasingly important role in ship design. However, at present CFD computations of ships are typically performed in model scale due to the lack of experimental results in full scale, and the increasingly complexity of numerical simulation at very high Reynolds numbers that RANS is hard to solve. In this paper, a DES solver for naval architecture and ocean engineering named naoe-FOAM-SJTU, which is developed from OpenFOAM, is applied to carry out the numerically simulation of VLCC. For model scale, we adopt the three-dimensional extrapolation method, and full scale calculation is carried out on the cruise speed of VLCC. Results are compared with the three-dimensional extrapolation results from model experiment. Analysis results show reliability and validity of our DES method in ship resistance prediction. This paper also made a discussion on the flow fields of full scale ship.

Key words: DES; S-A IDDES; naoe-FOAM-SJTU; full scale resistance prediction; VLCC

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net