

基于 RANS 方法的球鼻艏型式对肥大型船舶绕流场影响分析

张艳云¹, 阙瑾瑜¹, 刘佳仑^{2,3,4*}

1. 武汉理工大学交通学院, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063

3. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063; 4. 海洋工程国家重点实验室 上海交通大学, 上海 200240

Email: jialunliu@whut.edu.cn

摘要: 球鼻艏是一种用来降低船舶总阻力的水面下球状艏部结构, 虽然该设备被广泛应用于各类船型, 但该结构对不同船型阻力的影响存在明显差异, 且目前尚未有一种通用的减阻优化方案。为研究球鼻艏型式对船舶绕流场及黏性阻力的不同影响, 本文基于计算流体力学理论建立了数值水池, 以青岛大学基于 KVLCC2 标准船模提出的变种肥大型艏部变体系列船 S-Cb87 为对象, 结合叠模实验方法对其黏性流场开展模拟研究。本文基于 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 方法, 采用 STAR-CCM+ 作为非结构化网格生成器, 使用 ANSYS Fluent 作为求解器对该系列船进行黏性阻力预报, 并研究了不同船艏对黏性流场的影响, 所用数值仿真方法能够捕捉船艏伴流场的“钩状”特征, 结果显示不同球鼻艏型式对船舶黏压阻力系数有一定影响, 但黏性总阻力系数和摩擦阻力系数作用不大。

关键词: RANS 方法; 球鼻艏; 绕流场; 叠模实验; 阻力预报

1 引言

球鼻艏已逐渐成为大部分商业远洋船的重要组成部分, 但由于水池实验的昂贵性以及相关专项研究的匮乏, 从水动力学角度优化球鼻艏结构设计仍然存在一定的困难^[1]。对高速船, 球鼻作为船首突出的部分, 可以改变流场, 削弱首波以减小兴波阻力^[2]。但对于 VLCC 这类低速肥大型船来说, 航行过程中黏性阻力占据主导地位^[3]。理论上球鼻部分可以通过缓和艏部流场达到减小黏性阻力的目的, 但这一点并未得到拖曳水池实验或计算流体力学 (CFD) 仿真的证实。依据 MOERI 提供的 KVLCC2 水池实验数据, 当佛汝德数为 0.142 时, 兴波阻力在数值上仅占黏性阻力的 2.7%^[4]。基于以上内容, 本文将研究重点放在黏性绕流与黏性阻力上。

基金项目: (国家自然科学基金资助项目 (51709217), 湖北省自然科学基金资助项目 (2018CFB640), 海洋工程国家重点实验室 (上海交通大学) 开放课题项目 (1707), 中央高校基本科研业务费专项 (WUT:2018IVA034, WUT:2018IVB079), 武汉理工大学双一流项目资金资助)

随着 CFD 方法和高速计算机的发展,数值水池实验逐渐成为船体阻力预报的主要手段之一。与传统模型实验 (EFD) 相比,CFD 方法可以低成本、高效率地模拟出详细的流场。目前 CFD 方法已被应用于模拟 KVLCC2 等低速肥大型船舶的黏性绕流场^[5,6,7]。本文针对一组装备不同型式球鼻艏的肥大型船舶进行了 RANS 仿真,研究了不同球鼻艏型式对船舶黏性绕流和阻力的影响。

2 船体几何与设计工况

本文的研究对象为国际标准船模 KVLCC2 的变体:系列 S-Cb87,包括三条装备不同型式球鼻艏的船舶,分别命名为 S-Cb87、S-Cb87A 和 S-Cb87B。系列 S-Cb87 与 KVLCC2 的主尺度如表 1 所示,艏部形状以及横剖线如图 1 所示。本文使用标准 KVLCC2 模型对所采取 RANS 方法进行了验证,并对 S-Cb87 系列船模在满载工况下选取了多个速度点进行了 CFD 仿真计算。具体的计算条件如表 2 所示。

表 1 KVLCC2 与系列 S-Cb87 船型主尺度

船名	KVLCC2	S-Cb87	S-Cb87A	S-Cb87B
L_{pp} (m)	320	178	178	178
B (m)	58	32.263	32.263	32.263
D (m)	30	14.463	14.463	14.463
λ	58	61.1875	61.1875	61.1875
T_m (m)	20.8	11.57	11.57	11.57
S (m^2)	27194	8891	8897	8906

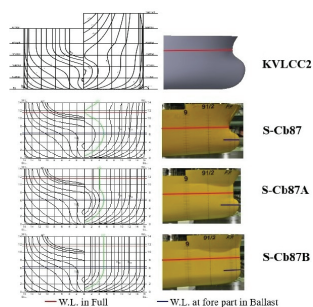


图 1 各船型艏部形状及横剖线

表 2 各船型的 CFD 计算条件

KVLCC2 验证条件	λ	L_{pp} (m)	Fr	$Re (\times 10^6)$	V (ms^{-1})
	58	5.5172	0.142	4.6	1.047
系列 S-Cb87 计算条件	61.1875	2.9091	0.0966	1.5061	0.5202
	61.1875	2.9091	0.1157	1.8038	0.6230
	61.1875	2.9091	0.1354	2.1110	0.7291
	61.1875	2.9091	0.1545	2.4087	0.8320
	61.1875	2.9091	0.1737	2.7108	0.9354

3 计算流体力学方法

计算域如图 2 所示。边界条件如下：船体表面为不可滑移壁面；水线面，中纵剖面 and 侧面为对称边界；进口与底部为速度进口；出口为压力出口。使用商业软件 Star CCM+生成非结构化六面体网格。网格总视图与船体局部加密网格如图 3 所示。

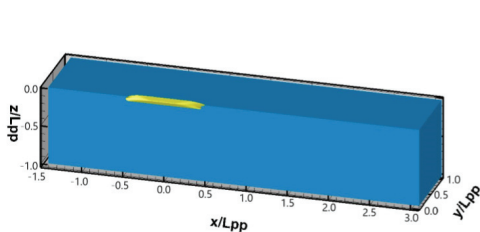


图 2 计算域几何

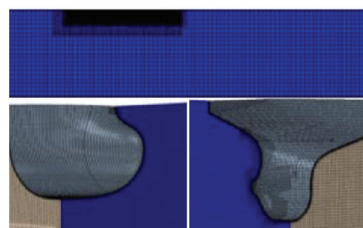


图 3 船体网格

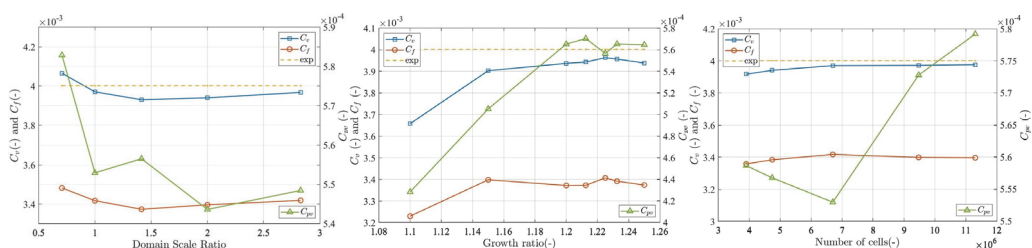


图 4 网格独立性分析

表 3 阻力系数验证

方法	EFD	CFD
$C_v (\times 10^{-3})$	4.002	3.971
$U(C_v \%)$		-0.780
$C_f (\times 10^{-3})$	3.450	3.418
$U(C_f \%)$		-0.935
$C_{pv} (\times 10^{-3})$	0.552	0.553
$U(C_{pv} \%)$		0.169

本研究使用商业 CFD 软件 ANSYS 18.2 进行了 RANS 仿真，使用 $k-\omega$ SST 湍流模型。RANS 方法的使用应该排除网格对结果的影响，因此需要进行网格独立性验证。本文以 $\sqrt{2}$ 为变化比例，分别针对计算域尺寸，边界层网格增长比例以及网格数量进行了网格独立性分析，分析结果见图 4。由图 4 可知，边界层增长率增加至 1.2 后，网格数量增长至 $6.7 \times$

10^6 之后,自变量对计算结果的影响已经很小并且不再大幅变化。为了节省计算资源,提高收敛速度,本文选取计算域大小如图2,边界层增长率1.225和网格数量 6.7×10^6 作为RANS方法验证的条件,验证数据如表3。

4 结果与分析

4.1 不同型式球鼻艏对阻力系数的影响

系列S-Cb87模型在不同Fr数下的黏性阻力系数和黏压阻力系数以及S-Cb87A、B相对S-Cb87的阻力差异如表4所示。由表可知S-Cb87系列三个不同型式球鼻艏船型的黏性阻力系数差距并不是很大,但是S-Cb87B的黏压阻力相对另外两条船较小。

表4 S-Cb87系列船模在不同Fr数下的黏性阻力系数与黏压阻力系数

V	S-Cb87 ($C_v \times 10^{-3}$)	Diff. _A ($C_v\%$)	Diff. _B ($C_v\%$)	S-Cb87 ($C_{pv} \times 10^{-3}$)	Diff. _A ($C_{pv}\%$)	Diff. _B ($C_{pv}\%$)
0.5202	5.032	0.0402%	-0.0429%	1.171	-0.2756%	-0.7234%
0.6230	4.861	0.0583%	-0.1540%	1.122	-0.0766%	-1.2084%
0.7291	4.758	-0.1249%	-0.1184%	1.069	-0.1582%	-0.7373%
0.8320	4.647	-0.1190%	-0.0883%	1.032	-0.1739%	-0.6613%
0.9354	4.541	-0.0914%	-0.0835%	1.000	-0.0277%	-0.4926%

4.2 不同型式球鼻艏对螺旋桨盘面处轴向速度的影响

在 $Fr=0.1354$ 条件下的S-Cb87系列船模型螺旋桨盘面处轴向速度云图如图7所示。由图7可知,S-Cb87与S-Cb87B相对于S-Cb87A,在螺旋桨下方有着更大的低速区,并且在螺旋桨附近有着更大的钩状低速区,这意味着S-Cb87A的速度变化梯度更为平缓。

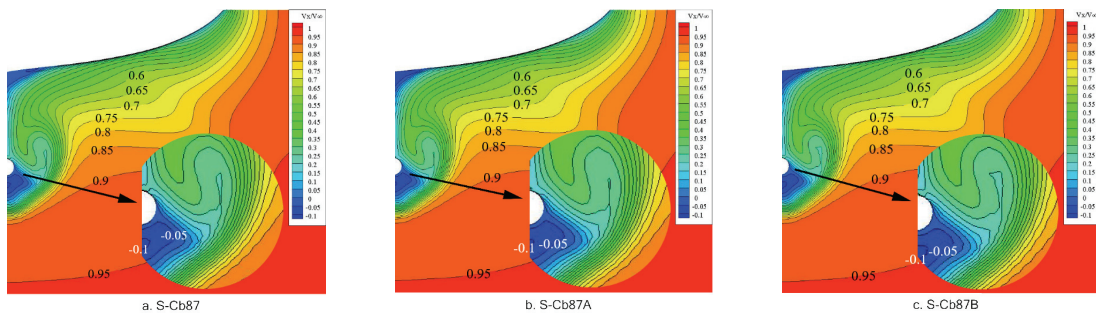


图7 螺旋桨盘面处轴向速度

4.3 不同型式球鼻艏对压力场的影响

系列 S-Cb87 船艏部压力场如图 8 所示。由图 8 可知，S-Cb87 系列船的球鼻艏上方存在高压区，这意味着球鼻艏增加了艏部流场的压力，并且 S-Cb87 船艏部的高压区比其他两条船要大，表明它具有较大的黏压阻力。由于系列船船艏相同，因此艏部压力场几乎相同。

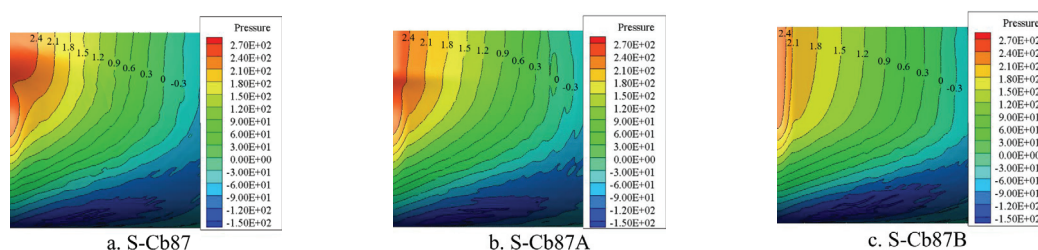


图 8 艏部压力场

5 结论

本研究基于 RANS 方法对 S-Cb87 系列船进行了数值模拟计算，分析并得到以下结论：

①由于 S-Cb87 系列船模的几何差异相对较小，黏性阻力系数的差距并不明显。本研究模拟出的系列船阻力系数可能受到 CFD 方法的不确定性影响。②S-Cb87 系列船在满载工况下对大多数 Fr 数具有相同的阻力性能，这意味着球鼻艏的设计并不能使船艏水的流动变得平滑从而减小黏性阻力。

参考文献

- 1 Sharma, R., and Sha, O. P., 2010. "Practical hydrodynamic design of bulbous bows for ships". Naval Engineers Journal, 117(1), pp.57-76.
- 2 Kracht, A. M., 1978. "Design of bulbous bows". SNAME Transactions, 86(1), pp.197-217.
- 3 Ahmed, Y., and Soares, C. G., 2009. "Simulation of free surface flow around a vlcc hull using viscous and potential flow methods". Ocean Engineering, 36(9), pp.691-696.
- 4 Sadat-Hosseini, H., Wu, P.-C., Carrica, P.M., Kim, H., Toda, Y., and Stern, F., 2013. "Cfd verification and validation of added resistance and motions of kvlcc2 with fixed and free surge in short and long head waves". Ocean Engineering, 59(1), pp.240-273.
- 5 Pereira, F. S., Ec, a, L., and Vaz, G., 2017. "Verification and validation exercises for the flow around the kvlcc2 tanker at model and full-scale reynolds numbers". Ocean Engineering, 129(1), pp.133-148.
- 6 Toxopeus, S., 2013. "Viscous-flow calculations for kvlcc2 in deep and shallow water". In International

- Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Springer Netherlands, pp.151–169.
- 7 Crepier, P., 2017. “Ship resistance prediction: verification and validation exercise on unstructured grids”. In VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering.
- 8 Kim, W.J., Van, S.H., and Kim, D.H., 2001. “Measurement of flows around modern commercial ship models”. Experiments in Fluids, 31(5), pp.567–578.

RANS study on the flow around a high block coefficient ship with different shapes of bulbous BOWS

ZHANG Yan-yun¹, KAN Jin-yu¹, LIU Jia-lun^{2,3,4}

1.School of Transportation Wuhan University of Technology Wuhan, 430063, P. R. China;
2.Intelligent Transportation Systems Research Center Wuhan University of Technology Wuhan, 430063, P. R. China; 3.National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Ministry of Science and Technology, Wuhan, 430063, P. R. China; 4.State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, P. R. China Email: jialunliu@whut.edu.cn

Abstract: Bulbous bows have been applied to a large variety of ships to reduce resistance and fuel consumption. The mechanism of how to optimize the bulbous bow remains unsolved. Furthermore, the impacts of the bulbous shape on resistance deduction are commonly not available from the public. Three scaled models, which are modified from the standard KVLCC2 tanker, with different bulbous bows have been built and tested in the towing tank of Hiroshima University. Based on which, double-model tests are performed through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and presented in this paper. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) simulations are carried out with unstructured hexahedral trimmed grids generated by the commercial code Star CCM+. The commercial solver ANSYS Fluent is used with a k- ω SST turbulence model. Simulations are performed to show the relationship between performance and bulbous bow shapes and catch the “hook” shape at propeller plane. The results show that the different bow shapes have a certain effect on the C_{pv} , but have little effect on C_v and C_f .

Key words: RANS method, bulbous bow, double-model test, resistance prediction