

基于 RANS 方法的片体间距对双体船静水阻力性能影响研究

卢苏立¹, 程细得^{1*}, 刘佳仑^{2,3,4}, 王绪明¹

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)

摘要: 双体船因其优良快速性、耐波性、操纵性等性能, 在实际中得到了广泛的应用。在影响双体船设计的众多参数中, 片体间距比具有十分重要的影响。随片体间距比的变化, 两片体间互扰力大小及其影响相应发生改变, 使得双体船的总阻力与单个片体总阻力的两倍之差, 即干扰阻力, 发生变化。为研究干扰阻力随片体间距比的变化规律, 本研究依托于计算流体力学理论, 应用 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 方法, 首先对 Wigley 船型单体船与双体船进行阻力性能的数值计算, 并将数值结果与实验数据比较, 以验证数值方法的正确性。之后, 以一艘双体客船为研究对象, 对其在设计航速下不同片体间距比的双体船模型开展静水阻力预报。研究表明, 随片体间距比的改变, 由于兴波干扰和黏性干扰的存在, 存在最佳间距比的范围使得双体船所受总阻力较小。通过 RANS 方法, 可以确定设计航速下的最佳片体间距比范围, 为双体船的设计提供指导。

关键词: RANS; 双体船; 片体间距比; 阻力性能

1 引言

相比于单体船, 双体船在快速性、耐波性、操纵性等方面具有更加优良的性能。对于观光客船, 双体船除具有优良的性能外, 还具有较大的甲板面积供游客观赏风景。因此, 近年来, 双体观光客船的需求不断增长, 对双体船的研究也不断增多。

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

双体船在航行过程中所受到的阻力，由于两片体间干扰效应的存在，与单个片体所受阻力的两倍并不相同。为此，研究者进行了大量的模型实验，理论与数值模拟，对片体间的干扰效应进行了探讨。

模型实验方面，Insel&Molland^[1]对 Wigley 船型和 3 种由 NPL 船型改造所得 3 种船型分别在单体和双体配置下进行了船模阻力实验。实验在不同的傅汝德数和片体间距比下进行，采用波形分析法计算船模所受的兴波阻力，并分析了各阻力成分的变化规律。Souto-Iglesias^[2]对系列 60 双体船型在自由和限制升沉与纵倾状态下的干扰阻力进行了研究，对测试状态与片体间距的影响进行了分析。

理论研究方面，Insel^[3]使用线性波理论计算了一系列高速船的波形与兴波阻力。Zhang^[4]使用 Neumann-Michell 理论对 Delft 和系列 60 双体船型进行了阻力计算，计算结果与实验结果匹配良好。

数值模拟方面，Broglia^[5]使用 RANS 方法对 Delft 372 船型双体船两片体间的干扰效应及雷诺数的影响进行了研究。Farkas^[6]使用 STAR CCM+网格生成工具，对系列 60 单个片体和双体船型进行了叠模和考虑自由面的数值模拟，将总阻力分为黏性阻力与兴波阻力成分，研究了每种阻力成分的干扰效应。

本文依托计算流体力学理论，使用 RANS 方法，研究了片体间距比对双体船静水阻力性能的研究。本研究分为以下几部分：下一部分介绍了所使用的数学模型。接下来，对 Wigley 船型单体船与双体船进行了阻力计算，将计算结果与实验结果进行比较，研究了数值方法的正确性。而后，对一艘双体客船在不同的片体间距比下进行阻力计算，确定使得总阻力最小的最佳片体间距比范围。

2 数学模型

基于 RANS 方法模拟了片体间距对双体船静水阻力的影响，控制方程为雷诺平均方程：

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (1)$$

式中， u_i, u_j 分别是笛卡尔坐标 x_i, x_j 方向上的速度分量时均值， $i = j = 1, 2, 3$ ； p 为压力时均值。

采用 $k-\omega$ SST 二方程湍流模型封闭 RANS 方程。 $k-\omega$ SST 湍流模型可以预测流动分离，并准确预测边界层内的流动。

3 计算参数

3.1 船模参数

对 Wigley 双体船与一艘双体客船分别进行了数值模拟，片体如图 1 所示，两艘双体船片体的船型参数如表 1 所示。对于双体客船，为研究设计航速下最佳片体间距比的范围，取不同的片体间距比 λ 进行计算。 λ 表示为片体间距与垂线间长的比值。



图 1 Wigley 双体船片体（上）与双体客船船模片体（下）

表 1 Wigley 双体船与双体客船船模片体的船型参数

模型	参数	符号	值
Wigley	垂线间长	Lpp ₁ (m)	1.8000
	船宽	B ₁ (m)	0.1800
	吃水	T ₁ (m)	0.1125
	湿表面积	A ₁ (m ²)	0.4820
双体客船船模	垂线间长	Lpp ₂ (m)	2.0000
	船宽	B ₂ (m)	0.2112
	吃水	T ₂ (m)	0.0846
	湿表面积	A ₂ (m ²)	0.50383

3.2 计算域参数

采用长方体计算域。由于所研究的双体船均相对于中线面对称，因此，为节约计算时间，将中线面设为对称面，取实际流域的一半进行计算。

4 RANS 模拟

4.1 数值方法验证

对 Wigley 单体船与片体间距比 $\lambda = 0.2$ 的 Wigley 双体船在 Froude 数为 0.25~0.4kn 的航速范围进行静水阻力数值模拟，以验证数值方法的正确性。采用商用软件 STAR CCM+

对计算域进行离散，采用非结构化网格进行网格划分。在片体周围、自由液面等流动较为复杂的部分，为更好地捕捉流动特征，采取适当的加密。总阻力系数 C_t 计算结果如表 2 所示，与文献 1 中的实验结果吻合较好。

表 2 Wigley 船型计算结果

模型	Fr	$C_{t_CFD} \times 10^3$	$C_{t_EFD} \times 10^3$	Ct_Error
Wigley 单体船	0.25	5.30	5.50	-3.60%
	0.30	5.75	5.80	-0.92%
	0.40	6.28	6.50	-3.39%
Wigley 双体船	0.25	5.70	5.90	-3.38%
	0.27	5.64	5.75	-1.91%
	0.30	6.09	6.25	-2.60%

4.2 双体客船船模计算

双体客船船模在尾轴处曲率变化较大，其前倾型艏与来流间的作用相较于 Wigley 船的直立型艏也有所不同。因此，在 4.1 中网格划分策略的基础上，在船首与船尾附近进一步加密，并进行网格独立性分析。当网格数超过 200 万后，各阻力成分基本不随网格数发生变化。因此，在后续计算中，采用 230 万~290 万网格进行计算。

对片体间距比 λ 分别为 0.2-0.8 的双体船进行了数值模拟， $\lambda=0.2,0.4,0.6,0.8$ 时的波形如图 2 所示，总阻力系数 C_t 随 λ 的变化如图 3 所示。可以看出， λ 在 0.3 附近时，总阻力值较大，建议将片体间距比取在 0.2 附近。

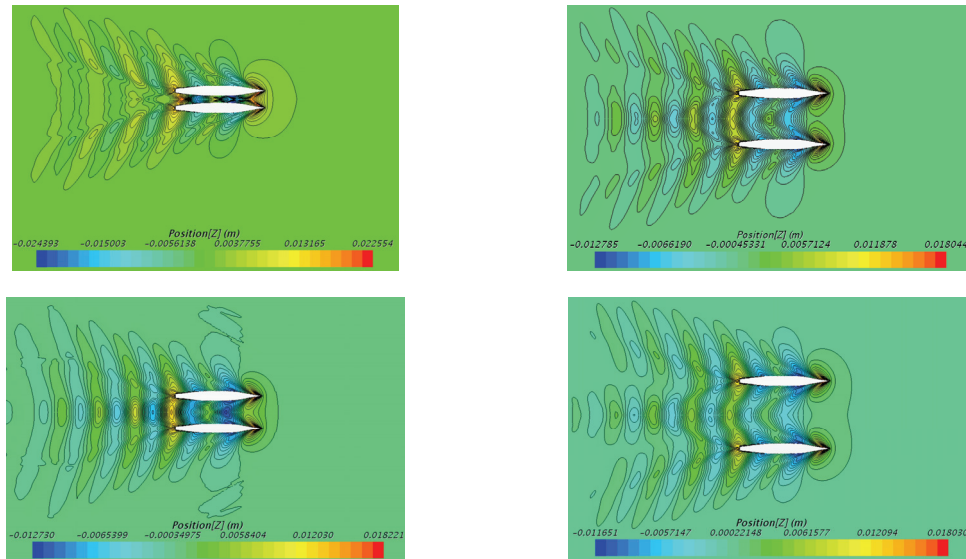
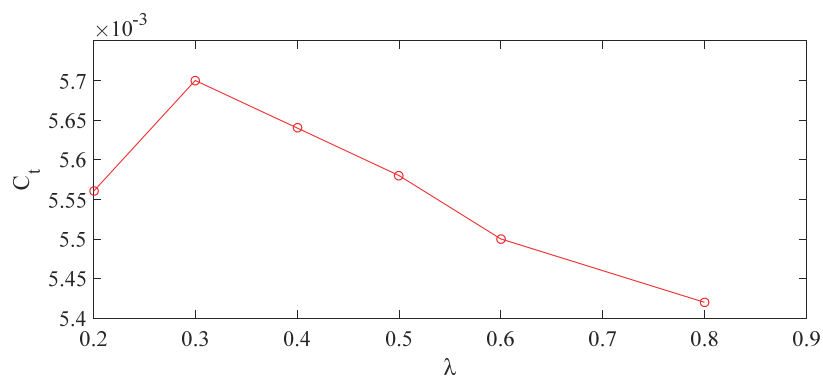


图 2 Fr=0.2 (左上) ,0.4 (左下) ,0.6 (右上) ,0.8 (右下) 时的波形

图3 总阻力系数 C_t 随 λ 的变化 ($Fr=0.27$)

5 结论

本研究在对 Wigley 单体与双体船型进行数值模拟的基础上,基于 RANS 方法对一艘双体客船设计航速下不同片体间距比时的静水阻力性能进行了计算,结合实际确定了最佳片体间距比的范围。后续将针对不同航速进一步探讨片体间距比的影响,为双体船的设计提供指导。

参考文献

- 1 Insel, Mustafa & Molland, A.F.. (1992). An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans. Trans. RINA. 134. 1-20.
- 2 Souto-Iglesias A , David Fernández-Gutiérrez, Luis Pérez-Rojas. Experimental assessment of interference resistance for a Series 60 catamaran in free and fixed trim-sinkage conditions[J]. Ocean Engineering, 2012, 53(none):38-47.
- 3 Insel, M., Molland, A. F., & Wellicome, J. F. (1970). Wave resistance prediction of a catamaran by linearised theory. WIT Transactions on The Built Environment, 5.
- 4 Zhang, C., He, J., Ma, C., Francis, N., Wan, D., Huang, F., & Yang, C. (2015, July). Validation of the Neumann-Michell theory for two catamarans. In The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- 5 Broglia, R., Zaghi, S., & Di Mascio, A. (2011). Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. Journal of marine science and technology, 16(3), 254-269.
- 6 Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2017). Numerical investigation into the interaction of resistance

components for a series 60 catamaran. Ocean Engineering, 146, 151-169.

Investigation into the effect of separation to length ratios on resistance performance of catamarans in calm water based on RANS methods

LU Su-li¹, CHENG Xi-de^{1*}, LIU Jia-lun^{2,3,4}, WANG Xu-ming¹

¹(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

²(Intelligent Transport Systems Center, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430063)

³(National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan, 430063)

⁴(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)

Abstract: Catamarans are widely used because of their excellent performance with respect to speed and resistance, sea-keeping and manoeuvrability. Among various parameters influencing the design of catamarans, the effects of separation to length ratios are of vital importance. With separation to length ratios changing, values of interference forces and their effects vary, contributing to the difference of the total resistance of the catamaran and double resistance of the monohull, the interference resistance, changing as well. In order to investigate the change rules of the interference resistance with separation to length ratios, depending on related theories of Computational Fluid Dynamics, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) based methods are applied. Firstly, numerical calculations of Wigley hull on monohull and catamaran configurations are performed, and the results are compared with experimental data to validate applied numerical methods. After that, the resistance forecast in calm water on passenger catamarans with different separation to length ratios of design speed are performed. The results of investigations above indicate that with the change of separation to length ratios, due to viscous interference and wave interference, there are optimal ratios that make the total resistance relatively small. Based on RANS methods, the range of such ratios can be obtained, which may provide guidance for catamaran design.

Key words: RANS; Catamarans; Separation to length ratios; Resistance performance.