

超细长双体船阻力性能计算研究

刘鑫旺, 缪爱琴, 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

摘要: 超细长双体船在高航速下航行兴波阻力占总阻力的比重相比于常规船型而言较大。本文主要是通过 Neumann-Michell 理论快速地对三个已拟定的船型设计方案的兴波阻力进行计算, 以及通过 ITTC 公式估算摩擦阻力进而得到总阻力, 然后进行对比阻力大小, 并分析自由面兴波情况和船体压力分布, 初步优选出阻力性能较优的船型方案。最后, 通过 CFD 方法做更加精确的阻力性能预报以及更多的流场细节分析, 以确定最终的优选船型。

关键词: 超细长双体船; Neumann-Michell 理论; 阻力性能; 初步设计

1 引言

高速双体船是当今双体船中发展较快的一种。典型的高速双体船的船型一般由两个瘦长的片体组成, 片体之间以甲板结构相连。超细长双体船属于特殊的高速双体船, 其两个片体极其细长。高速双体船的快速性较好, 可以达到很高的航速以满足实际工程需求。然而双体船在高航速下产生的兴波既会对航运设施、海岸等带来严重的冲刷破坏, 同时也会影响本身的阻力性能^[1]。因此, 双体船阻力性能数值模拟与预报, 对其船型的设计和优化具有十分重要的意义。

高速双体船的阻力性能预报一般分为两种方法: 一种是基于势流理论, 另一种是基于 CFD 计算。虽然近年来计算流体力学发展迅速, 但基于势流理论的方法仍然占有一席之地。主要基于以下两方面的原因: 一方面是本身高速双体船的阻力成分中兴波阻力成分所占比例较大, 准确预报兴波阻力对于设计者较为关心; 另一方面在船舶初步设计阶段, 需要设计者快速、准确判断船型设计方案的阻力性能, 从而进行船型优化设计。其中一种势流方法是由 Francis Noblesse 等学者于 2013 年提出的 Neumann-Michell (NM) 理论, 它是基于 Neumann-Kelvin (NK) 理论并做出一些改进而形成的方法^[2]。NM 理论消去了 NK 理论中原有的船舶水线积分项, 将全部计算转化为在船体湿表面积上的积分。这种理论采用了协调线性流动模型, 不要求解分布在边界上的源强, 而是通过对速度势的迭代求解兴波阻力, 有效提高了计算速度^[3]。此外, 应用 NM 理论对 Wigley 船, 系列 60 船和 DTMB 5415 模型船的研究和数值模拟有很多。本课题组张晨亮采用基于 NM 理论自主开发的 NMSHIP-SJTU 求解器对双体船进行了阻力计算, 包括对 Delft 双体船和系列 60 的双体船在不同片体间距情况下的阻力进行了计算并与试验进行对比, 吻合较好^[4]。吴建威等采用 NM 理论评估兴波阻力性能对 Wigley 船型进行船型优化, 最终获得优化船型^[5]。杨和黄认为, ITTC 公式估计的摩擦阻力和 Neumann-Michell 理论的兴波阻力的总和可以预估船的实际总阻力, 适用于常规的排水型船舶的船型优化^[6]。基于 NM 理论计算稳定流场中移动的船是有效的, Kim 等指出, 由于这一理论的简洁稳健, 由 NM 理论预测的兴波阻力与实际测量结果相当吻合^[7]。使用 NM 理论完全可以在个人计算机上快速完成阻力性能预报。相比之下, 基于 CFD 计算耗时较长。对于初步定下的方案作进一步的考察, CFD 方法占有很大优势, 因为可以得到较为完整的流场信息, 并可以减少试验成本。

本文针对超细长双体船进行阻力性能计算, 以评估三个设计方案(模型一, 模型二, 模型三)的阻力性能。主要是通过 NM 理论快速地对三个已拟定的船型设计方案的兴波阻力计算(包括三个航速: 30kn, 33kn, 36kn), 以及通过 ITTC 公式估算摩擦阻力进而得到总阻力, 然后进行对比并分析自由面兴波情况, 初步优选出阻力性能较优的船型方案——模型三。通过 CFD 方法进一步分析片体间干扰对船舶所受阻力的影响, 并对模型三做更加精确的阻力性能预报并与 NM 理论所获的阻力值进行了对比, 验证了 NM 理论在船型方案初步设计阶段的可靠性与优越性。

2 Neumann-Michell 理论

假设这样一种基于势流理论的模型：一艘船长为 L_s 的船舶以均匀航速 V_s 沿直线前进，它所在的水域拥有无限大的自由水面与无限水深，没有外来的波浪干扰，不考虑水的粘性。傅汝德数定义为： $Fr \equiv V_s / \sqrt{gL_s}$ ，其中 g 代表重力加速度。我们在一个固定于船上并随船运动的右手直角坐标系 $\mathbf{X} \equiv (X, Y, Z)$ 中观察船体周围的流动(X 沿船长方向且指向船艏， Z 垂直于平均自由面并指向上，平均自由面取为 $Z = 0$ 的平面， Y 平行于平均自由面并指向船右舷侧，如图 1 中所示)，相当于将固定的船舶置放在 $(-V_s, 0, 0)$ 的均匀来流中，并且由于船体的扰动作用，在船体周围有速度为 $\mathbf{U} \equiv (U, V, W)$ 的流动。船长 L_s 及航速 V_s 用于定义无量纲量：无量纲化坐标定义为 $\mathbf{x} \equiv \mathbf{X} / L_s$ ，无量纲化速度定义为 $\mathbf{u} \equiv \mathbf{U} / V_s$ ，无量纲化速度势定义为 $\phi \equiv \Phi / (V_s L_s)$ 。

格林函数 $G(\tilde{\mathbf{x}}; \mathbf{x})$ 中的点分别定义为船体边界上的点 $\mathbf{x} \equiv (x, y, z)$ ，以及流场中的点 $\tilde{\mathbf{x}} \equiv (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ ，它既可以落在船体边界上，也可以落在船体边界之外的流场中。格林函数必须满足泊松方程，也即：

$$\nabla^2 G(\mathbf{x}; \tilde{\mathbf{x}}) = \delta(x - \tilde{x})\delta(y - \tilde{y})\delta(z - \tilde{z}) \quad (1)$$

其中 $\delta(x - \tilde{x})$ 代表狄拉克函数，它是奇异函数，可以通过积分形式来定义：

$$\int_a^b \delta(x - \tilde{x})f(x)dx = \begin{cases} f(\tilde{x}) \\ 0 \end{cases} \text{ 如果 } \begin{cases} a < \tilde{x} < b \\ \tilde{x} < a \text{ 或 } b < \tilde{x} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $f(\tilde{x})$ 为任意在 $x = \tilde{x}$ 处满足连续的函数。(2)式同样可以推广到更高维数下：

$$\int_D \delta(x - \tilde{x})\delta(y - \tilde{y})\delta(z - \tilde{z})f(\mathbf{x})dv = \begin{cases} f(\tilde{\mathbf{x}}) \\ 0 \\ f(\tilde{\mathbf{x}})/2 \end{cases} \text{ 如果 } \begin{cases} \tilde{\mathbf{x}} \in D \\ \tilde{\mathbf{x}} \notin D \\ \tilde{\mathbf{x}} \in \Sigma \end{cases} \quad (3)$$

其中 $dv = dxdydz$ ， $f(\mathbf{x}) \equiv f(x, y, z)$ ， $f(\tilde{\mathbf{x}}) \equiv f(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ ， Σ 是区域 D 的包络面。

场点与船体边界点处的速度势分别定义为 $\tilde{\phi} \equiv \phi(\tilde{\mathbf{x}})$ ， $\phi \equiv \phi(\mathbf{x})$ ，速度可由 $\tilde{\mathbf{u}} \equiv (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}) \equiv \nabla \tilde{\phi}$ ， $\mathbf{u} \equiv (u, v, w) \equiv \nabla \phi$ 分别求得。 da 代表船体表面上的面积微元， $\mathbf{n} \equiv (n^x, n^y, n^z)$ 代表船体边界上任意点处指向流场中的单位法向量，如图 1 所示。

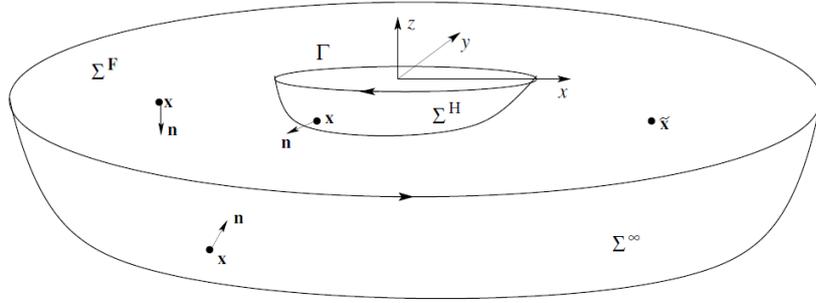


图 1 坐标系及边界示意图

根据相关文献给出的推导^[3]，最终可得基于 NM 理论的速度势表达式为：

$$\tilde{\phi} \approx \tilde{\phi}_H + \tilde{\psi}^W \equiv \tilde{\phi}_H^L + \tilde{\phi}_H^W + \tilde{\psi}^W \quad (4)$$

$\tilde{\phi}_H$ 与 $\tilde{\psi}^W$ 分别定义为：

$$\tilde{\phi}_H \equiv \int_{\Sigma^H} G n^x da - \int_{\Sigma^F} G \pi^\phi dxdy \quad (5)$$

$$\tilde{\psi}^W \equiv \int_{\Sigma^H} (\phi_r \mathbf{d}_* + \phi_a \mathbf{t}_*) \cdot \mathbf{W} da \quad (6)$$

其中，

Σ^H 为船体的平均湿表面积；

G 为格林函数；

n^x 为船体湿表面处的单位法向量 $\mathbf{n} = (n^x, n^y, n^z)$ 在 x 方向的投影;

$\pi^\phi \equiv \phi_z + Fr^2 \phi_{xx}$, Fr 为傅汝德数;

\mathbf{t}' 与 \mathbf{d}' 是与船体湿表面相切的两个任意单位向量, 分别可取为

$$\mathbf{d}' = (0, -v^z, v^y), \quad \mathbf{t}' = (v, -n^x v^y, -n^x v^z), \quad v \equiv \sqrt{(n^y)^2 + (n^z)^2}, \quad (v^y, v^z) \equiv (n^y, n^z) / v \quad (7)$$

$\phi_{t'}$ 与 $\phi_{d'}$ 是船体湿表面处的流场速度在 \mathbf{t}' 、 \mathbf{d}' 方向的分量:

$$\begin{aligned} \phi_{t'} &\equiv \partial \phi / \partial t' \equiv \mathbf{t}' \cdot \nabla \phi \equiv t'^x \phi_x + t'^y \phi_y + t'^z \phi_z \\ \phi_{d'} &\equiv \partial \phi / \partial d' \equiv \mathbf{d}' \cdot \nabla \phi \equiv d'^x \phi_x + d'^y \phi_y + d'^z \phi_z \end{aligned} \quad (8)$$

波浪函数 \mathbf{W} 满足关系: $G = W + L$, $\nabla \times \mathbf{W} = \nabla W$ 且有

$$\mathbf{d}_* \equiv \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{t}' - \varepsilon \mathbf{n} \times \mathbf{d}'}{1 - \varepsilon^2}, \quad \mathbf{t}_* \equiv \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{d}' - \varepsilon \mathbf{n} \times \mathbf{t}'}{1 - \varepsilon^2}, \quad \varepsilon \equiv \mathbf{t}' \cdot \mathbf{d}' \quad (9)$$

NMShip-SJTU 求解器是基于 Neumann-Michell 理论开发的船舶定常兴波阻力求解器, 采用 C++ 语言进行开发的^[8]。程序的输入文件包括船体网格、自由面网格和船型参数, 最终可以得到船体阻力, 自由面兴波, 以及船体表面压力分布、升沉等信息。

3 计算模型

本文的计算模型选择三个形状不同的超细长型双体船 (如图 2~4), 采用基于 NM 理论自主开发的势流求解器 NMShip-SJTU, 对其进行阻力数值计算, 根据设计要求, 计算航速选择三个: 30kn, 33kn, 36kn。三个模型的水线长为 53.74m, 水密度取 1000kg/m³, 重力加速度取为 9.81m/s², 其余具体型值如表 1。

双体船模型如下图所示:



图 2 模型一



图 3 模型二



图 4 模型三

表 1 不同双体船对应的船型参数以及数值计算的船体面元数

船型	B/L	D/L	s/L	面元数
模型一	0.03653	0.00913	0.16438	26594
模型二	0.03684	0.01289	0.16579	22818
模型三	0.03730	0.00791	0.16744	23326

从图 2-4 和表 1 可以看出,三个双体船的船艏明显的不同:模型一与模型三相似但模型一前倾程度较大,而模型二的线形比较平直,不如模型一、三流线型好;船型参数上,模型三的船宽最大,模型二的吃水最大,片体间距基本相同。

自由面区域及网格如图 5,自由面区域大小 $-L < x < 4L, -2L < y < 2L$,总共约 50 万网格单元数。

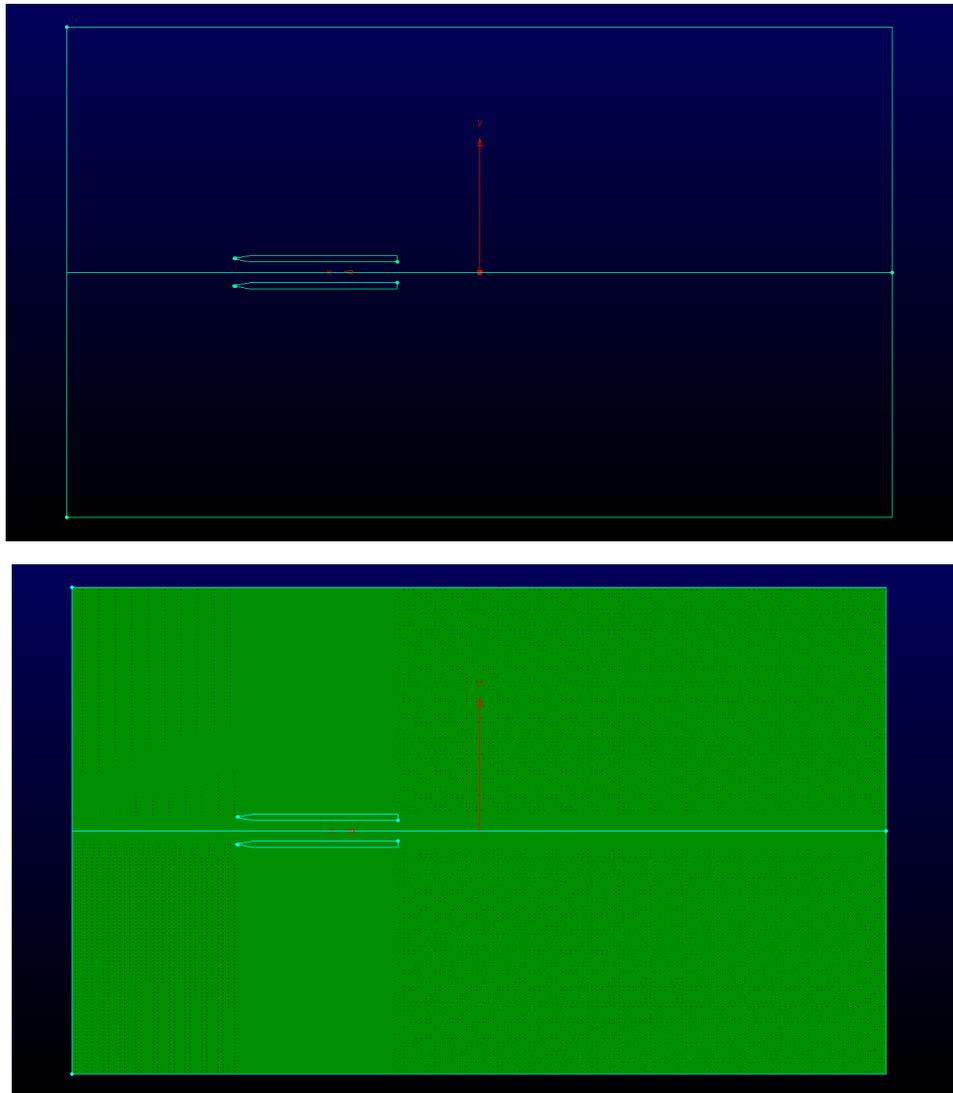


图 5 自由面区域范围及自由面网格图

4 计算结果及分析

表 2 给出了三个模型的阻力计算结果,包括三个航速,不同阻力成分的情况对比。

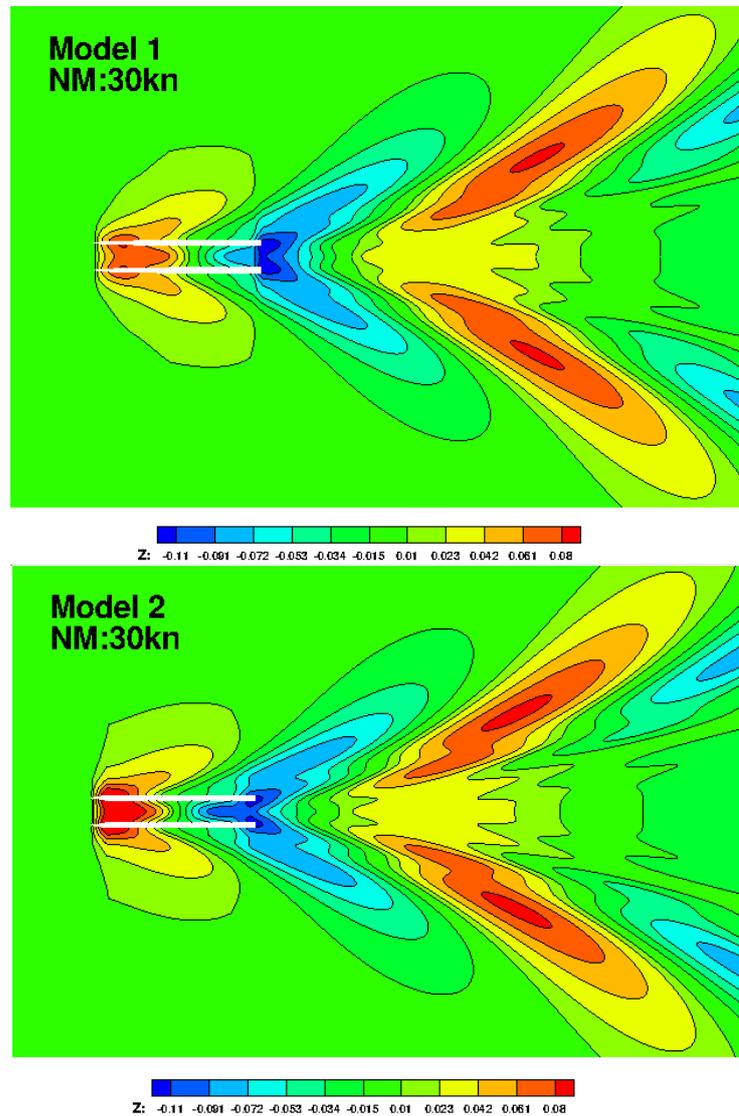
表 2 不同双体船的阻力计算结果

船型	航速(kn)	摩擦阻力(ITTC) (N)	兴波阻力(N)	总阻力(N)
模型一	30	47345.24	3850.57	51195.82
	33	56605.51	4123.97	60729.48
	36	66636.61	4413.81	71050.41
模型二	30	50268.13	9308.04	59576.17

	33	60099.70	10144.41	70244.11
	36	70749.59	10981.08	81730.67
模型三	30	43829.09	3610.17	47439.27
	33	52400.91	3932.31	56333.22
	36	61686.13	4291.69	65977.82

从表 2 可以看出，模型二吃水最大，湿表面积最大，所以摩擦阻力最大，且其兴波阻力也最大，因此总阻力最大。模型三的总阻力以及各阻力成分与模型一对应相当，模型三稍微小些，相差 10% 以内。摩擦阻力值在总阻力成分中占主导。

对于兴波阻力成分，基于 NM 理论我们可以得到各模型在不同航速下的自由面波形图。我们可以从自由面波形图对兴波阻力进行进一步分析。



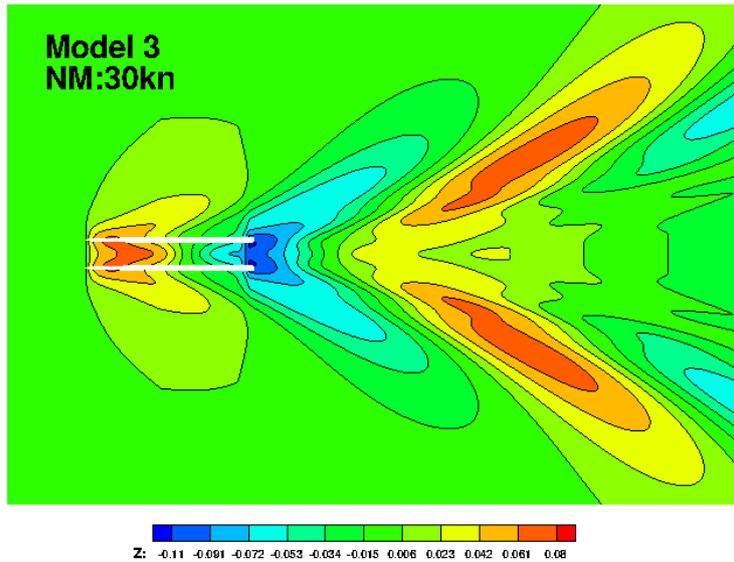
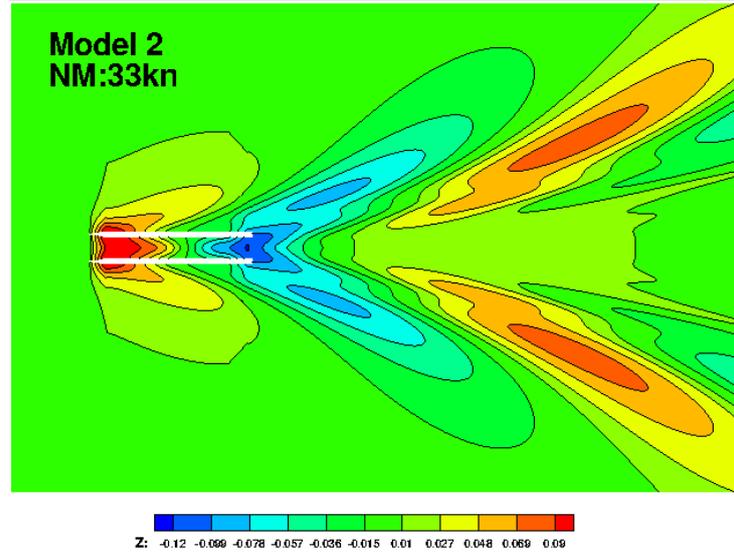
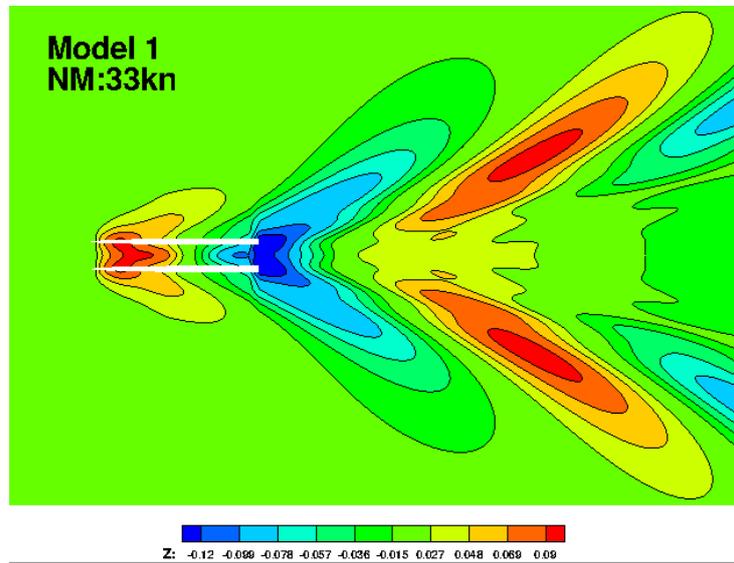


图 6 不同模型在航速为 30kn 的自由面波形图



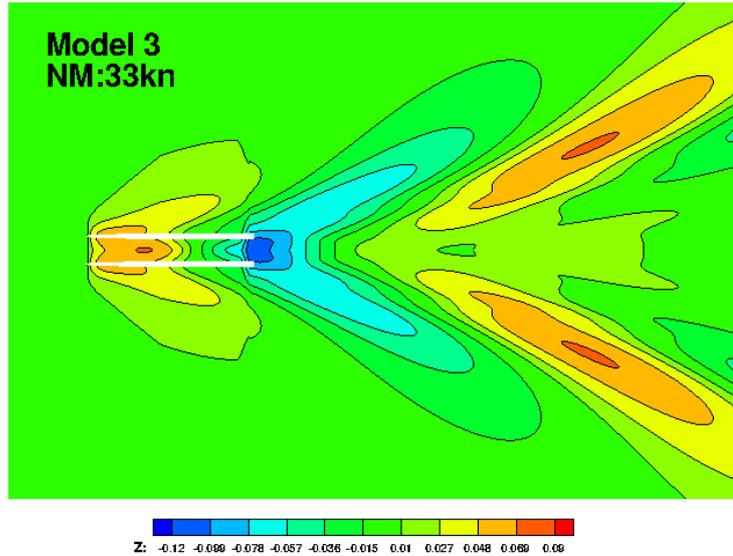
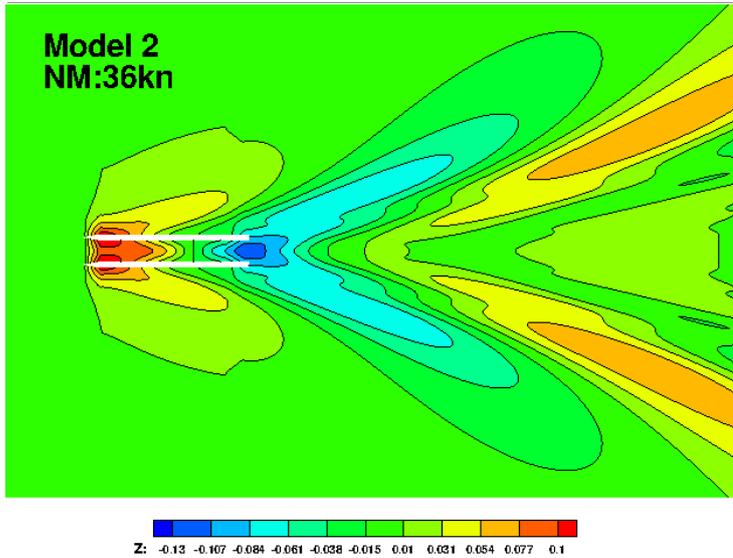
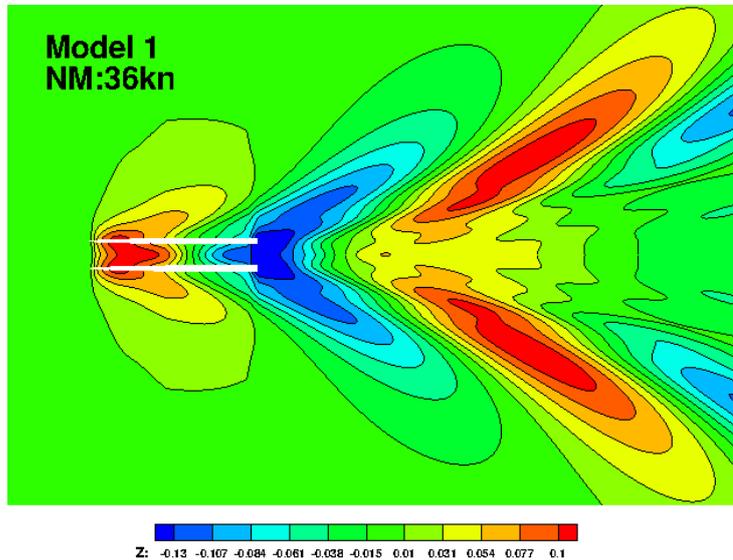


图 7 不同模型在航速为 33kn 的自由面波形图



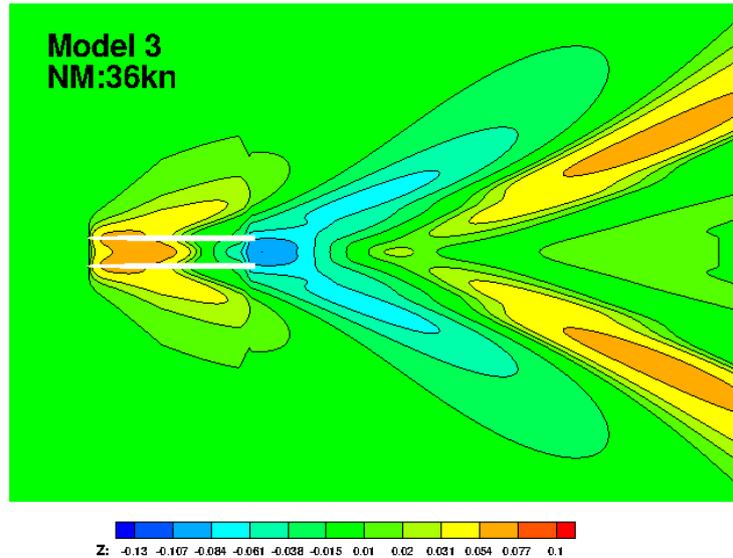


图 8 不同模型在航速为 36kn 的自由面波形图

从图 6~8 可以明显看出，同航速下，模型三的自由面兴波高度最低，兴波阻力相对较小。模型一的自由面兴波高度最大，模型二次之。模型一和模型二的兴波更为明显，首部波峰及尾部波谷处的波高峰值均明显大于模型三。但由于模型二湿表面积最大，总体兴波阻力值高于模型一。同时，随着航速增加，同模型的兴波程度变大。从船型角度考虑，模型一较模型三的船首前倾更明显，模型二较模型三船首型线欠流线型。综上所述，模型三的阻力性能最优，可以初步选择模型三的船型方案。

为了更加精确地确定模型三的阻力性能，我们采用了本课题组基于开源 CFD 平台 OpenFOAM 自主开发的面向船舶与海洋工程的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU^[9]。水密度取 1000kg/m^3 ，运动粘性系数取 $10\text{e-}6\text{m}^2/\text{s}$ 。

表 3 模型三基于 NM 及 CFD 理论的数值计算结果与对比

航速 (kn)	NM 计算结果 (N)			CFD 计算结果 (N)			误差对比	
	摩擦阻力	兴波阻力	总阻力	摩擦阻力	压阻力	总阻力	绝对(N)	相对
30	43829.09	3610.17	47439.27	43586.2	7220.54	50806.74	-3367.47	-6.63%
33	52400.91	3932.31	56333.22	53238.7	9030.9	62269.6	-5936.38	-9.53%
36	61686.13	4291.69	65977.82	63992.78	9563.14	73555.92	-7578.1	-10.30%

根据表 3 的对比结果，基于 CFD 的船体摩擦阻力预报与基于 ITTC 公式计算所得值相差很小，只是随着航速增加，偏差变大。事实上，摩擦阻力的预报也应该考虑片体间兴波干扰的存在而不是独立计算摩擦阻力和兴波阻力，但由于势流理论的限制以及工程上快速预报阻力性能及船型优化的需求，利用 NM 理论及 ITTC 公式不失为一种可行的办法。对于总阻力情况，随着航速增加，两种方法误差加大。但是在实际工程误差允许范围内，对于初步设计阶段 NM 理论完全可以进行快速，较准确地预报阻力值。

5 结论

本文中着重研究了特殊船型即超细长型双体船的阻力预报，针对三种不同的船型方案，采用 NM 理论对其进行了三个高航速下的阻力性能预报分析，并从中初步选择了较为合理的船型方案。合理的船首形状设计可以很好地减弱双体船的片体间不利兴波干扰。根据计算结果，较小的船首前倾，首部线条更加流线型，可

以降低使双体船的兴波阻力，阻力性能较优。针对初步选择的船型方案，采用 CFD 方法与 NM 方法进行阻力性能计算的对比，进一步验证了 NM 理论在双体船阻力性能快速预报的可靠度。

参考文献

- [1] 赵连恩, 谢永和. (2009)高性能船舶原理与设计(精). 国防工业出版社.p:64-69.
- [2] Noblesse, F., et al. (2012) The Neumann–Michell theory of ship waves. *Journal of Engineering Mathematics* **79**(1): 51-71.
- [3] Noblesse F, Huang FX, Yang C. (2013) The Neumann-Michell Theory of Ship Waves. *Journal of Engineering Mathematics* **79**(1): 51-71.
- [4] Chengliang Zhang, Jiayi He, Chao Ma, et al. (2015) Validation of the Neumann-Michell Theory for Two Catamarans. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- [5] 吴建威, 刘晓义, 万德成. (2015)基于 NM 理论的船型优化技术应用[C], 中国海洋.
- [6] Chi Y, Huang F, Noblesse F. Practical evaluation of the drag of a ship for design and optimization[J]. (2013)水动力学研究与进展 B 辑, **25**(5):645-654.
- [7] H. Kim, C. Yang, H. Kim, H.H. Chun. (2009) Hydrodynamic optimization of a modern container ship using variable fidelity models. *19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.
- [8] ZHANG C L, WAN D C. (2015) The manual of NMSHIP-SJTU solver[R]. Technique Report No. 2015SR011407, Shanghai Jiao Tong University.
- [9] Shen ZR, Jiang L, Miao S, Wan DC, Yang C. (2015) RANS simulations of benchmark ships based on open source code. *7th International Workshop on Ship Hydrodynamics (IWSH 2011)*, Shanghai, China.