

数值模拟船舶航行时船体间的相互作用

张晨亮, 王建华, 万德成

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院

高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要

船舶在静水中航行已经是一个比较熟悉的话题了, 经过了多年的发展国内外学者已经开发出粘流、势流、试验等多种方法, 人们已经可以对静水中船舶阻力给出一个准确的预报; 大多数情况研究人员都把焦点聚集在单个船体静水中航行的阻力, 可是我们知道在海军作战或者船队运输的时候往往是多艘船一起航行以完成作战或者运输任务, 这个时候多个航行船舶间的相互干扰就成了一个需要我们注意的问题, 本文就采用基于线性势流 Neumann-Michell 理论的 NMSHIP-SJTU 求解器和基于 OpenFOAM 的 RANS 方程求解器 naoe-FOAM-SJTU 对静水中多种布局的两条 Wigley 船以相同速度航行的相互作用进行了数值研究和分析, 为实际多船航行的位置布局提供一定的指导意义。

关键词: 相互作用; 多种布局; Neumann-Michell 理论; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

船舶在静水中航行问题已经发展的比较成熟, 研究者已将开发出势流、粘流、试验等多种方式来进行预报; 但是大多数情况我们都着眼于单个船体在静水中航行的情况, 然而对于舰队、商队航行时, 往往是多个船体共同航行以满足作战或者运输的任务。在这种情况下前面船舶的兴波就会对后方或者侧后方航行的船舶造成一定的影响, 不同的位置布局、不同的航速情况下两艘船的兴波系就可能产生有利或者不利的干涉, 体现在船舶阻力和航行姿态上就可能出现曲线上的极小值和极大值。这样经过一系列的数值研究和预报, 我们就可以为舰队、商队航行时的位置布局提供一定的指导依据, 以获得有利的兴波干涉, 进而起到减小阻力、提高航行效率的目的。

本文对两艘 Wigley 船型, 三种前后位置布局进行了计算分析, 首先使用精度更高的 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对其中一种布局的三个航速进行了数值模拟, 并与基于 Neumann-Michell 理论的高速的线性势流求解器 NMSHIP-SJTU 求解器的计算结果进行了比较, 以证明 NMSHIP-SJTU 求解器在该问题上的适用性; 之后使用 NMSHIP-SJTU 求解器对三种布局, Froude 数 ($F \equiv V/\sqrt{gL}$) 在 $0.2 \leq F \leq 0.4$ 范围内的一系列航速进行了计算分析, 从兴波阻力随 Froude 数变化的曲线中找到对应位置布局的有利、不利干涉的航速, 进一步也可以根据舰队或者商队的设计航速寻求有利干涉产生的位置布局。

2 数值方法

本文使用的水动力学粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 采用有限体积法 (FVM) 求解 RANS 方程, 结合 VOF 方法捕捉自由面。对控制方程中的各项采用不同的数值离散格式, 采用隐式 Euler 格式对时间项进行离散, 对 RANS 方程中的对流项采用带线性控制器的 TVD 格式, 对 VOF 输运方程中的

对流项采用 Van Leer 格式, 采用人工压缩交界面的方法求解自由面, 其他各项采用二阶中心差分格式。采用 PISO 算法实现压力场和速度场的耦合求解。

本文使用的线性势流求解器 NMSHIP-SJTU 是基于 Neumann-Michell 理论, 该理论与 Neumann-Kelvin 理论不同, 使用了一致的线性模型, 将 Neumann-Kelvin 理论中的水线积分项的经过复杂的数学变换转化为船体表面积分, 进而得到了更稳定、可靠的数值计算结果, 该求解器对于单个船体的静水阻力问题已经在[1],[2]中进行了验证, 本文又拿粘流求解器计算结果与其对比, 证明了该求解器在多船计算中的适用性。

3 计算模型建立

本文选取两艘 Wigley 船型, 船长为 L 、航速为 V , 其前后布置如图 1 所示, 其中我们取 $dx \equiv \Delta X/L=2$ 和三组不同的 $dy \equiv \Delta Y/L=0, 0.3, 0.6$ 。这样位于后侧的船(我们称 Hull 2)就分别处于位于前方的船(我们称 Hull 1)兴波系的横波占主导位置、横波散波相当位置和散波占主导位置。对 $dy=0.3$ 情况, 本文采用粘流 RANS 方程求解器 naoe-FOAM-SJTU 对五个不同航速 $F=0.23, 0.25, 0.28, 0.3, 0.36$ 进行了数值模拟, 并采用线性势流求解器 NMSHIP-SJTU 对三种位置布局, $0.2 \leq F \leq 0.4$ 的航速范围进行了数值计算; 进一步将两种方法的计算结果与试验值进行比较, 保证线性势流理论计算结果的可靠性以进行更进一步的分析。计算时自由面计算域的选取如图 1 所示, 坐标系 (X, Y, Z) , X 轴由船尾指向船首, Y 轴由右舷指向左舷, Z 轴竖直向上。坐标用船长无因此化为 $(x, y, z) \equiv (X, Y, Z)/L$, 计算域坐标轴原点取在 Hull 1 的船中处, 计算自由面范围 $-6.5 \leq x \leq 1.5$, $-2.25 \leq y \leq 2.25$ 。

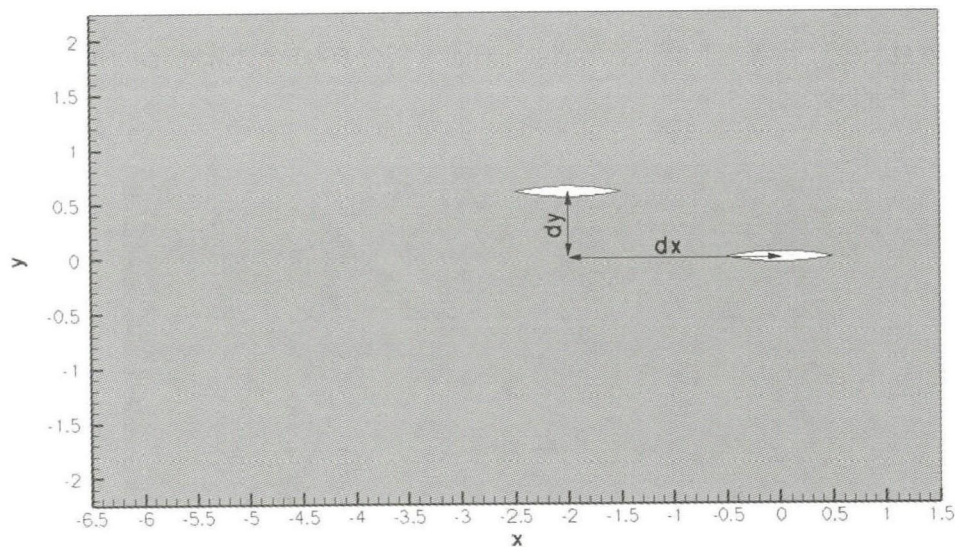


图 1 船体布置俯视图

4 计算网格

使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器的计算网格的生成包括两步, 首先使用 Pointwise 网格生成软件, 生成计算域的结构化背景网格, 并在自由面, 船体表面处进行适当的加密。之后使用 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 在自由面和船表面附近再进行局部的细化, 生成质量较高的非结构化网格, 以

捕捉精确地自由面变化和船体附近流场变化情况。网格数量 150 万，计算域左右各 1.5 个船长，水深 1 个船长在计算航速范围内属于深水范畴，这里我们没有进行网格收敛性验证，因为该求解器和网格生成手段以及本文使用的网格数量在[3]、[4]中已经给出了验证。计算网格在船首、船尾处的局部放大如图 2 所示。

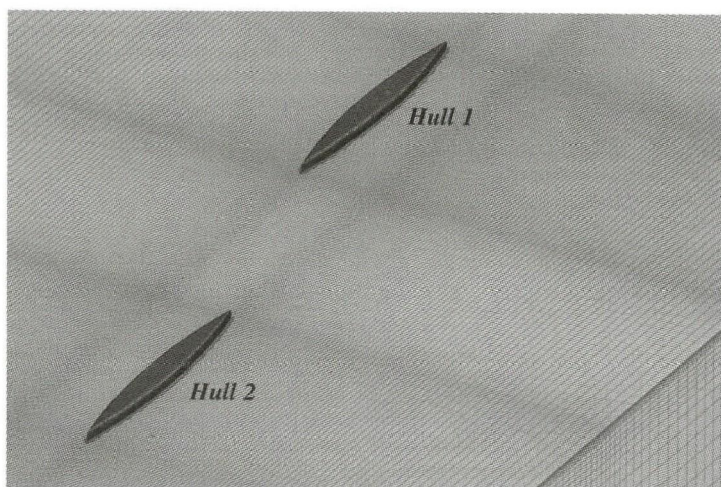


图 2 CFD 计算网格

使用 NMSHIP-SJTU 求解器的计算网格只分布在船体表面和自由面上，我们计算使用三角形面元，积分插值根据场点源点的相对位置分别采用 Gauss 一点、四点和七点法，如[5]、[6]中所述。对于 Hull 1，由于船型关于 XOZ 平面对称其流场也是关于 XOZ 坐标平面对称的，因此计算过程中计算网格只用取船体表面的一半，而对于 Hull 2，由于 Hull 1 流场对他的影响，其周围的流场分布不再对称，因此计算过程中计算网格取整个船体表面，Hull 1 共有 8000 个计算面元，Hull 2 共有 16000 个计算面元，其表面网格如图 3 所示。

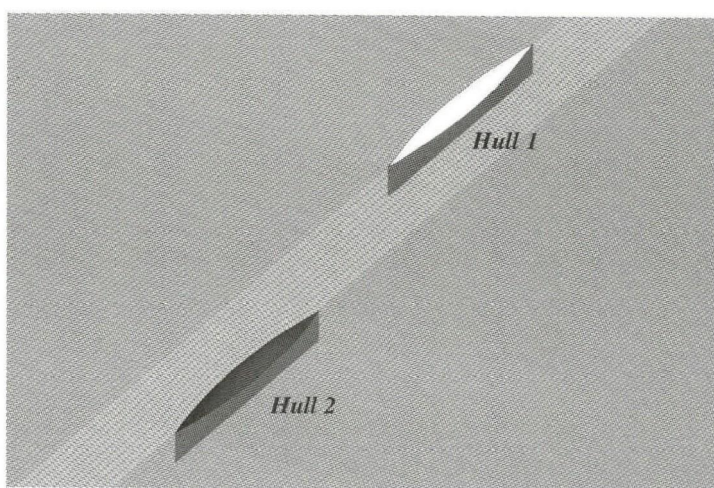


图 3 势流计算自由面船体表面网格

5 计算结果分析

由于前面船舶(Hull 1)兴波的影响，后面船舶(Hull 2)航行状态与在静水中航行不同，其航行所受

到的兴波阻力与前面船舶不同，而其受到的影响与 Hull 2 所处位置，航速等参数有关，这就涉及到了 Hull 1、Hull 2 两船兴波系的相互干扰。如图 4 所示，给出了 Hull 1、Hull 2 两船三个不同布局位置情况下不同航速的兴波阻力变化曲线。

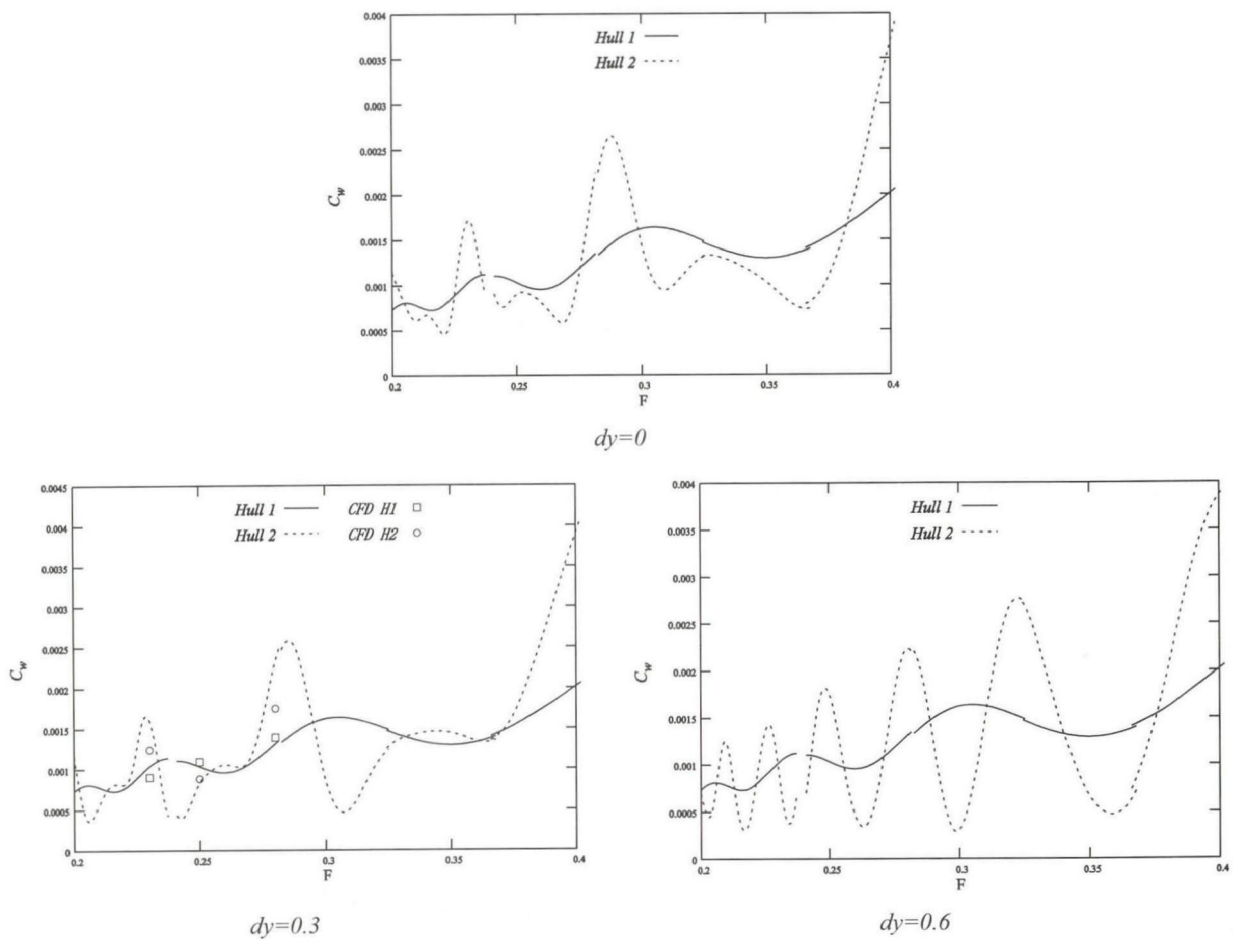


图 4 三种位置布局情况下前后两条船兴波阻力系数对比

首先从 $y=0.3$ 图中散点和曲线的对比可以看出，CFD 计算结果和势流理论对前船兴波阻力的预报结果差别不大，误差在 10% 以内，对于后面船体，由于 CFD 数值粘性的影响，其相对前船的兴波阻力变化幅度比势流结果偏小，但是趋势一致。且该 CFD 方法在[3]、[4]中对 Wigley、DTMB 等多种船型兴波阻力问题进行了验证且数值结果与试验值吻合良好，所以本文使用的 naoe-Foam-SJTU 求解器数值结果可靠，进一步也验证了 NMSHIP-SJTU 求解器对前后两条船兴波阻力预报结果的可靠性，进而我们可以针对 NMSHIP-SJTU 求解器不同位置布局、不同航速下给出的前后两条船兴波阻力变化曲线进行分析讨论。

对于 $dy=0$ 的兴波阻力曲线，我们知道 Hull 2 位于 Hull 1 兴波的横波区，我们知道深水中匀速航行船舶兴波横波波长为 $2\pi F^2$ ，Hull 1 船首兴波距离 Hull 2 船首两个船长，因此船 1 船首波峰传播到船 2 船首在 $2\pi F_n^2 = 2$ 时仍为波峰，因此有 $F_7 \approx 0.213$ 、 $F_6 \approx 0.230$ 、 $F_5 \approx 0.252$ 、 $F_4 \approx 0.282$ ……；可以看到在 $F=F_7$ 的时候船 2 兴波阻力值位于局部极大值，这就是两船兴波不利干扰的结果，但其兴波阻力并不是很大，这又是因为该航速下单个船体自身兴波处于相对有利干扰的结果；进一步看 $F=F_6$ 的时候船 2 兴波阻力系数处于局部的极大值，且该兴波阻力很大，看船 1 兴波阻力曲线不难发

现，这是单个船体和两个船体兴波系同时处于不利干扰航速的原因；同样对于 $F=F_5$ 和 $F=F_4$ 的情况船 2 兴波阻力又分别处于较小的极大值和较大的极大值情况下，可见对于 $dy=0$ 、 $dx=2$ 情况，单个船体自身首尾兴波，与两艘船两个兴波系分别存在有利干扰和不利干扰，当都处于不利干扰时船 2 兴波阻力曲线会出现较大的极大值，当相互干扰处于不利干扰、自身干扰处于有利干扰时船 2 兴波阻力曲线会出现较小的极大值，同理船 2 兴波阻力曲线也存在较小的极小值和较大的极小值。

同样对于 $dy=0.3$ 的情况，船 2 处于船 1 兴波系既有散波也有横波的位置，可以看出船 2 兴波阻力系数曲线同样存在较大的极大值、较小的极大值、较大的极小值、较小的极小值四类情况，有趣的是当船 2 兴波阻力曲线在较小极大值、较小极小值时，船 1 兴波阻力曲线位于极大值位置，既单个船体兴波自身处在不利干扰位置，这是由于散波的影响造成的。对于 $dy=0.6$ 的情况，船 2 位于船 1 兴波系散波区域，船 2 兴波阻力系数曲线只存在唯一的极大值和极小值点，不存在较大、较小区分，这可能与船 1 兴波系和船 2 兴波系散波横波相位差有关，因为散波波长、波数均与位置有关两波系干扰非常复杂只能定性的分析，无法定量。总之我们看到了多个船体一起航行情况下与静水情况下的区别，也可以根据阻力曲线给出多船航行时位置、设计航速的参考。

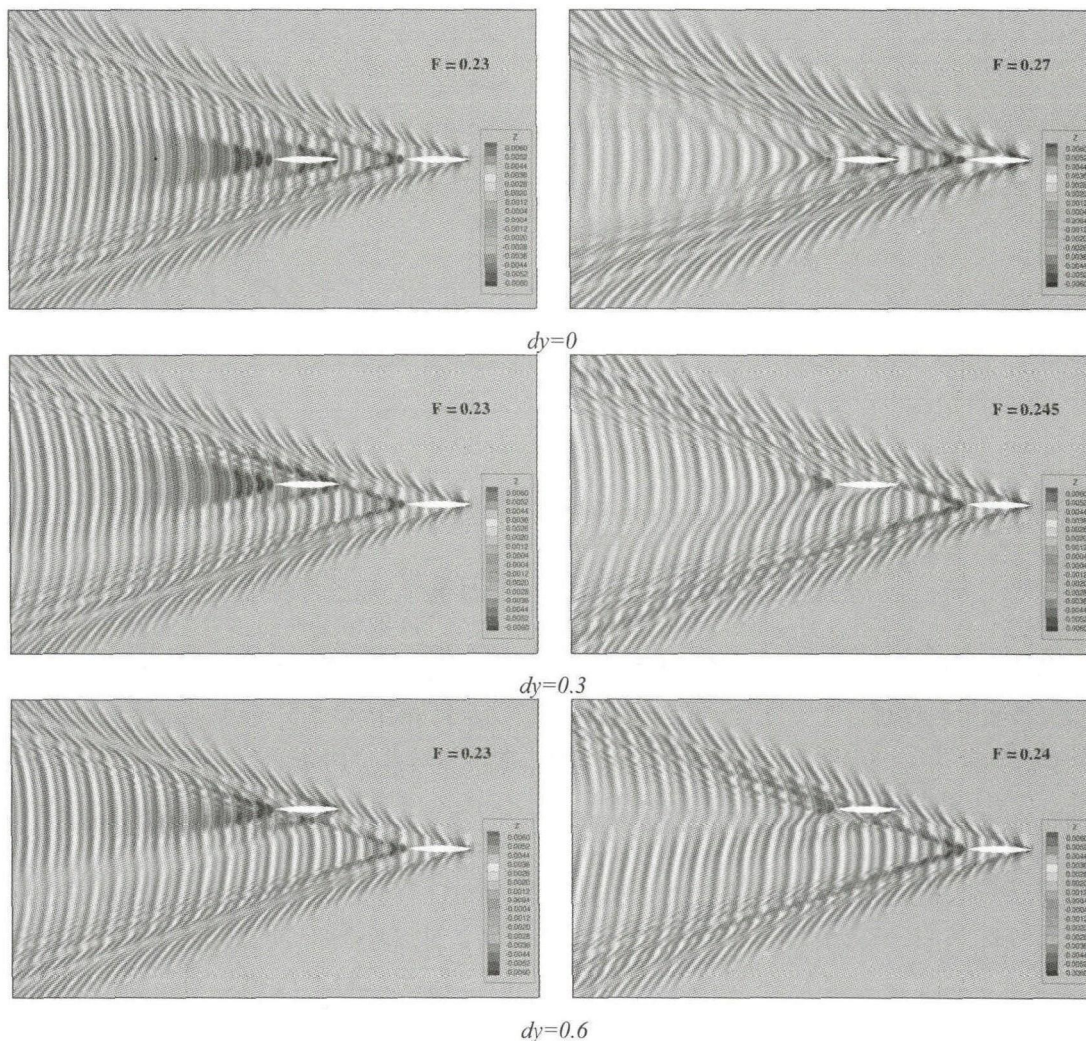


图 5 自由面波形图

为了更清晰的给出两船兴波系的干扰情况，我们给出了三种位置布局情况下的兴波阻力系数极

大值和极小值航速下的自由面波形,如图 5 所示。其中左侧的三张图从上到下依次对应 $dy=0$ 、 $dy=0.3$ 、 $dy=0.6$ 三种位置布局情况下兴波阻力曲线极小值时的自由面波形 Froude 数均取 $F=0.23$ 。右侧三张图从上到下依次对应 $dy=0$ 、 $dy=0.3$ 、 $dy=0.6$ 三种位置布局情况下兴波阻力曲线极大值时的自由面波形 Froude 数依次取 $F=0.27$ 、 $F=0.245$ 、 $F=0.24$ 。从波形图中可以明显的看出,对于兴波阻力极大值航速,自由面兴波波高在船 2 后会变得更高,说明船 1、船 2 两兴波系处于不利干扰,自由面兴波更高进而船 2 兴波阻力更大处于极大值位置。而对于兴波阻力极小值航速,可以看到自由面兴波在船 2 后变得非常小,船 1、船 2 兴波系相互抵消,兴波波高变小进而船 2 兴波阻力小处于极小值位置。

6 结论

本文利用线性势流兴波理论求解器 NMSHIP-SJTU 和粘性 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对两艘 Wigley 船模三种不同的位置布局情况下不同航速下兴波阻力系数进行了数值模拟,两种方法对兴波阻力预报结果吻合良好证明求解的可靠性。在此基础上我们对势流理论给出的前后两条船兴波阻力曲线进行分析,得出单个船体自身首尾兴波和两艘船各自兴波系的相互干扰会形成复杂的兴波阻力变化情况,本文研究可以为多船航行的位置布局和航速设计提供指导。

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] Noblesse, Francis, et al. "The Neumann-Michell theory of ship waves." *Journal of Engineering Mathematics* 79.1 (2013): 51-71.
- [2] Huang, Fuxin, et al. "Numerical implementation and validation of the Neumann-Michell theory of ship waves." *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 42 (2013): 47-68.
- [3] Zha, Ruosi, et al. "Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water." *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 26.6 (2015): 930-938.
- [4] Zha, Ruosi, et al. "Numerical study of viscous wave-making resistance of ship navigation in still water." *Journal of Marine Science and Application* 13.2 (2014): 158-166.
- [5] Noblesse, Francis, et al. "Practical mathematical representation of the flow due to a distribution of sources on a steadily advancing ship hull." *Journal of Engineering Mathematics* 71.4 (2011): 367-392.
- [6] Noblesse, Francis, et al. "Evaluation of ship waves at the free surface and removal of short waves." *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 38 (2013): 22-37.