上海交通大学学位论文

基于CFD方法的三体船片体布置对阻力及兴波干扰的数值模拟分析

姓　　名： 李 响

学　　号： 119010910196

导　　师： 万德成 教授

学　　院： 船舶海洋与建筑工程学院

学科/专业名称： 船舶与海洋工程

学 位 类 型： 专业型硕士

申请学位层次： 硕士

2021年12月

A Dissertation Submitted to

Shanghai Jiao Tong University for Master Degree

NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF THE RESISTANCE AND WAVE-GENERATING INTERFERENCE OF TRIMARAN BODY LAYOUT BASED ON CFD METHOD

Author: Li Xiang

Supervisor: Prof. Decheng Wan

School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

December, 2021

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全知晓本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：　　年　　月　　日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本人同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ：

□**公开论文**

□**内部论文**，保密□1 年/□2 年/□3 年，过保密期后适用本授权书。

□**秘密论文**，保密____年（不超过 10 年），过保密期后适用本授权书。

□**机密论文**，保密____年（不超过 20 年），过保密期后适用本授权书。

（请在以上方框内选择打“√”）

学位论文作者签名：　　指导教师签名：

日期：　　年　　月　　日　　日期：　　年　　月　　日

摘 要

三体船的水动力性能是目前水动力学研究的热门。对于中高速三体船来说，其静水阻力的很大一部分由兴波阻力构成，而对于兴波主要的影响因素就是三体船的片体布置。三体船片体的布置包括片体的横向位置布置，片体的纵向位置布置和片体的长度布置，不同的片体布置会对三体船的阻力及兴波干扰产生不同的影响，其影响同样和航速密切相关。

本文以一艘圆舭型三体船为研究对象，运用粘流 CFD 方法，使用船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对船体静水航行进行数值模拟。本文采用不可压缩的 RANS 模型对于船舶兴波进行数值模拟，并采用带有人工压缩项的 VOF 方法对自由面进行捕捉。为验证求解器的在求解静水阻力数值模拟的可靠性，本文对比了模型试验和数值仿真，得到了相吻合的结果，说明了该求解器是可靠的。

本文考虑三个不同航速（傅汝德数 Fr=0.18、0.27 和 0.30），选取以下三种方案进行数值模拟研究。首先，保持三体船片体距主体的横向距离和片体长度不变，仅改变片体的纵向位置（方案一）。其次，保持三体船纵向位置和片体长度不变，仅改变片体的横向位置（方案二）。最后，保持片体的重心纵向位置、距离主体的横向位置不变，仅改变片体的长度（方案三）。

分析得到片体的纵向位置布置对三体船主片体兴波干扰影响较大，同时对阻力的影响较大。随着片体位置远离船尾，Fr=0.18 时，三体船总阻力系数先增大后减小，Fr=0.27 和 0.30 时，三体船的总阻力系数会逐渐明显减小。片体的横向位置布置对三体船兴波干扰较小，同时对阻力的影响较小。随着片体的位置远离主体，Fr=0.18 时，三体船总阻力系数呈增大趋势，Fr=0.27 和 0.30 时，三体船的总阻力系数会逐渐小幅减小。的片体的长度布置的变化较小时，改变片体的长度相当于变相改变了片体的纵向位置。随着片体长度的减小，Fr=0.18 时，三体船总阻力系数也呈增大趋势，Fr=0.27 和 0.30 时，三体船的总阻力系数会逐渐减小。

关键词：三体船，片体布置，CFD 方法，静水阻力，兴波干扰

ABSTRACT

The hydrodynamic performance of trimaran is a hot topic in hydrodynamic research. For a medium-high speed trimaran, a large part of its static water resistance is composed of wave-making resistance, and the main factor for wave-making is the trimaran's side hull arrangement.

In this paper, a round bilge-type trimaran is taken as the research object, and viscous CFD method is used to simulate the static water navigation of the hull using the ship hydrodynamic solver naoe-FOAM-SJTU. In this paper, incompressible RANS model is used to calculate the fluid field, and VOF method with artificial compression term is used to capture the free surface. In order to verify the reliability of the solver in the static water resistance, this paper compares the model test with the numerical simulation, and obtains the consistent results, which shows that the solver is reliable.

The settings of trimaran segments include transverse position settings, longitudinal position settings and length settings. Different segments will have different effects on trimaran resistance and wave-making interference, which are also closely related to ship speed.

In this paper, three different ship speeds (Froude number Fr=0.18, 0.27 and 0.30) were considered and the following three schemes were selected for numerical simulation. First, keep the transverse distance and length of the trimaran body from the main body unchanged, and only change the longitudinal position of the body (Plan 1). Secondly, keep the longitudinal position of the trimaran and the length of the body unchanged, only change the transverse position of the body (Plan 2). Finally, keep the longitudinal position of the center of gravity of the piece and the transverse position from the main body unchanged, and only change the length of the piece (Plan 3).

The analysis shows that the longitudinal position of the hull has a great influence on the wave propagation and the resistance of the hull. When Fr=0.18, the coefficients of the total resistance of trimaran increase first and then decreases. When Fr=0.27 and 0.30, the coefficients of the total resistance of Trimaran gradually decrease obviously. The

transverse position of the plate has little influence on the wave initiation and the resistance of the trimaran. When Fr=0.18, the coefficients of the total resistance of trimaran tend to increase, while when Fr=0.27 and 0.30, the coefficients of the total resistance of Trimaran gradually decrease slightly. The change of the length of the slice is small, and the change of the length of the slice is equivalent to the change of the longitudinal position of the slice. When Fr=0.18, the coefficients of the total resistance of trimaran tend to increase with the decrease of the slice length, while when Fr=0.27 and 0.30, the coefficients of the total resistance of trimaran gradually decrease.

Key words: trimaran, segment settings, CFD method, static water resistance, wave-making interference

目 录

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

经济全球化的今天，船舶在其中也发挥了重要的作用。各国在追求拥有更低阻力、更高航速、能源消耗更小的航行器。由英国首次提出了三体船的相关定义，并于 2000 年 5 月建成下水一艘三体试验船“海神”号[1]，如图 1。之后由美国计划和研发的濒海战斗舰（Littoral Combat Ship，LCS）独立级（如图 2）因为其优异的性能轰动世界，让三体型舰船成为各国的焦点。三体船受到了各国青睐的主要原因可以总结为以下 5 点：1.总体布置性好；2.生存能力强；3.稳定性极佳；4.阻力性能好；5.适航性强。

图 1-1 “海神”号

Fig. 1-1 “RV Triton” trimaran

图 1-2 独立级濒海战斗舰

Fig. 1-2 Independence-class littoral combat ship

船舶的快速性是一个船舶水动力学的经典研究内容，其内容主要分为两大部分：1.船舶阻力；2.推进效率，其中船舶的阻力性能又是其研究的重点。在三体船中，兴波阻力占总阻力的一大部分，而且对于三体船的兴波阻力，三体船主体两侧的片体布置是影响其的关键因素。

现今国内外的研究方法主要分为试验方法和计算流体力学（CFD）方法，在试验方法方面，目前的测试技术已经相当成熟，试验方法也是判定水动力学的有效手段，同时也给数值模拟方法提供可靠的依据。而如今随着科学技术的发展，计算机的计算能力，处理数据时的精度，结果展示的功能等都大为进步。借助高性能计算平台和先

进数值方法也可以得到相对准确的数值模拟结果，同时 CFD 方法相对试验方法可以节约研究成本

1.2 三体船片体布置对阻力影响的国内外研究现状

根据上一节所说，三体船阻力研究与片体布置影响的主要研究方法除了理论研究方法之外主要分为模型试验方法和数值模拟方法，下面本文将阐述理论方法、模型试验和数值模拟研究方面的研究进展。

1.2.1 理论研究方法

理论研究方法是水动力学研究中的一门经典的方法，通过数学原理和计算方法等求解水动力学方程，计算成本很低。在三体船片体布局、兴波干扰和阻力影响方面有较多研究内容。

2002 年，李江华等[2] 基于 Noblesse 的新细长船理论，以某些被积函数为结合对象，引入特殊的函数展开方式，同时采用限制波陡的基本波模型，得到了出直接计算方法，并依此开发了三体船构型优化的两种计算方法：枚举法和遗传算法。文章用这两种方法研究三体船的阻力与三体船构型的关系，同时应用该方法研究了三体船片体构型的优化。

2006 年，李培勇[3]以高速三体船的兴波阻力为对象，结合船舶开发设计中阻力预报的特点，使用了 2 种针对三体船兴波阻力的计算方法：基于薄船理论的三体船兴波阻力计算方法，基于面元法的三体船兴波阻力计算方法。

2008 年，应业炬[4]以高速三体船片体与主体间的兴波干扰为研究对象，采用势流方法直接计算在三体船片体的主尺度改变的情况下的兴波阻力干扰因子，同时采用势流方法直接计算在三体船片体的横向位置与纵向位置在不同的设置下的兴波阻力影响因子，研究其影响的规律。

2011 年，徐敏等[5]文章中表示相比二维切片理论，三维势流理论对于船体的载荷计算更为合适同时将三维势流理论与格林函数法相结合得到文章的计算方法。之后文章用该方法以三体船船体选取的剖面为对象，改变航速的取值，浪向角的取值，并改变三体船片体的横向布置位置和纵向布置位置，计算这些特定剖面的波浪载荷。文章通过比较分析分计算得到的结果结果，得到其分布规律和收到较小波浪载荷的片体布局。

2014 年，李霞丽等[6]使用基于三维时域 Rankine 源法的势流计算方法以一艘三体船为计算对象，直接计算了其各项弯矩、剪力和扭矩。之后文章参考了真实海洋的长期波浪预报结果，以一艘三体船为计算对象，改变了三体船片体的纵向布置位置，与航速，研究其对波浪载荷沿船长分布的规律，研究其对波浪载荷随浪向改变的规律，同时研究其最载荷大小的影响规律。

1.2.2 试验研究方法

研究三体船的片体布局的试验方法受场地人工的限制较大。需要科学合理布置实验场地，仪器设备的精确测量。可靠的试验结果可以为理论研究和数值模拟研究提供参考。

2002 年，李江华等[2]之前在文章中开发了势流的直接计算方法的两种：枚举法和遗传算法。之后为了验证这两种方法在对三体船构型优化方面的可行性与可靠性，以三体船船模为试验对象进行的试验对比研究，对比试验得到的结果和该方法直接计算得到的结果，两者吻合较好，验证了该方法在研究此类问题的可靠。

2006 年，何术龙等[7]在 702 研究所开展了三体船模型试验。船型是一艘高速三体船，在一定范围内改变了三体船模型片体的横向位置布置和纵向位置布置。分析了三体船的不同片体布置对三体船的主片体兴波干扰的影响。

2007 年郦云等[8]以一艘主片体均为 Wigley 船型的三体船为试验对象，改变三体船模型片体的横向位置和纵向位置得到了一系列目标模型。经过一系列的试验，发现三体船片体纵向布置距离变化对三体船兴波阻力系数有较大的影响。航速较低的时候，片体的横向布置距离变化对兴波阻力系数影响不大，但在航速较高的时候，片体的横向布置距离改变对兴波阻力系数有较大的影响。

2010 年，周广利等[9]针对一艘工程实用设计的高速三体船，制作了缩尺比模型进行了一系列试验。涉及 9 种片体布局和 3 种侧体排水量，分析了其剩余阻力系数曲线特征以及其阻力组成成分。对比分析了片体布局与片体排水量的比对三体船兴波干扰和总阻力影响规律。给出了阻力性能较优的片体布局方案和偏题排水量比的范围。

2010 年，吴广怀等[10]开展了三种不同方案的三体船模型试验。首先，保持三体船片体的横向布置和片体的纵向布置不变，以航速为对象进行试验，得到了不同航速的剩余阻力。其次，保持三体船片体的横向布置距离不变，同时再固定航速，以三体船片体的纵向布置的不同距离为试验对象，得到了其剩余阻力。最后，保持三体船片体纵向布置距离不变，同时固定航速，以三体船片体的横向布置的不同距离为试验对

象，测量剩余阻力。文章对比分析了三组试验得到的结果，发现片体的横向布置距离和纵向布置距离都对三体船的剩余阻力有着很大程度的影响。

2014 年，许君林[11]介绍了高速排水型三体船的模型阻力试验（Fr=0.3~0.8），基于三体船的模型系列阻力试验结果，系统研究了片体位置对三体船阻力的影响。

2016 年，焦俊等[12]开展了浅浸侧体的高速三体船静水阻力试验，对改变主片体中心距和前后位置工况进行试验，结果表明，Fr 在 1.15 以内时布置片体能带来有利兴波干扰。Fr 大于 1.15 时，布置片体对兴波不利，侧体后移对三体船快速性有利。

2021 年，Abolfarh 等[13]在伊朗国家海洋实验室(NIMALA)的拖曳水池进行了片体为非对称形状和对称形状的穿浪三体船（如图 1-3）模型试验（Fr=0.225~0.60）。结果表明，片体靠近船艏可以降低三体船的总阻力系数。同时结果表明，在三种侧船型中，对称侧船型的总阻力性能最好。

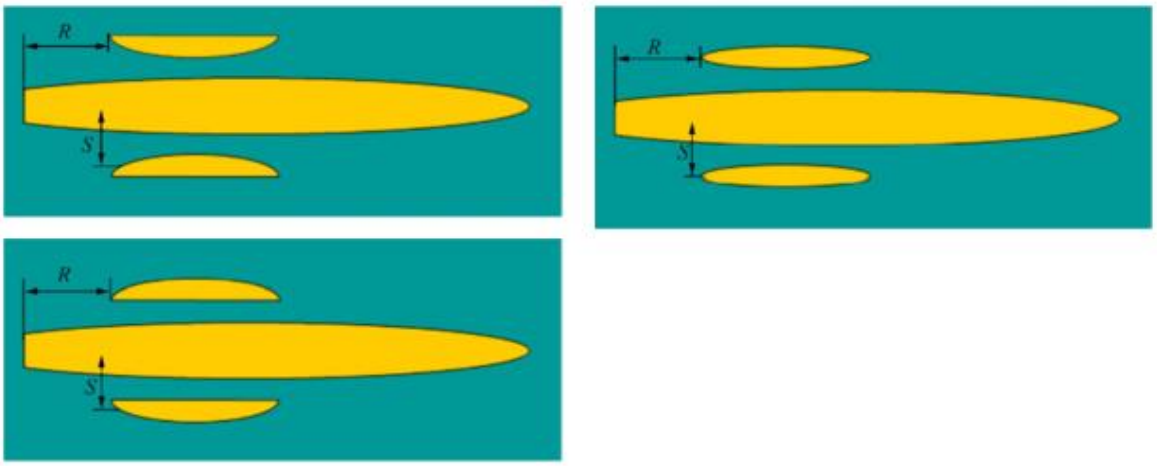


图 1-3 3 种三体船模型[13]

Fig. 1-3 3 kinds of trimaran models

1.2.3 数值模拟方法

相比较试验方法，数值模拟方法不仅节约成本，同时节省时间。得益于计算机硬件的发展，数值模拟方法越来越得到广大学者的青睐，同时数值模拟结果越来越可靠。

2006 年，陈京普等[14]以三体船和双体船为对象，使用改进的 Dawson 法开发了兴波阻力数值预报程序，同时考虑到方尾的情况进行了三体船的处理。文章中对一条小水线面双体船和一艘三体船为数值预报的模型，并对数值模拟方法进行了验证，在

一定范围内可对双体船和三体船的兴波阻力进行可靠的数值预报。同时，使用该方法优化了三体船的片体布置，并且对比了计算值和实验值，表明此方法课合理得应用于三体船的片体位置优化。

2008 年，邓锐等[15]使用 FLUENT 这一商业的 CFD 软件对某试验用三体船模型的周围流场进行了一系列数值模拟，预报了其阻力。文章以两种不同的片体位置为研究对象，模拟了该三体船模型周围的流场细节，得到了各种工况下三体船的模型阻力。通过分析确定了合理的侧体位置，在此基础上，文章再选取了三种横向位置间距不同的三体船片体布局，进行计算比较分析后，得出了片体布置最佳的间距。

2008 年，孙荣等[16]以船池试验过的三体船为对象，使用 CFD 方法取不同的速度对其船体模型进行数值模拟。文章对充分考虑自由面的影响，与试验结果吻合良好。之后在次方法的基础上，选取了 9 种改变横向位置和纵向位置的三体船布局方案，这 9 种方案经过数值模拟得到了各自的总阻力。文章再进行了各个方案得到计算结果的比较分析，得到了计算的 9 种方案中的较优三体船片体布置，同时发现了片体布局对三体船总阻力影响的一般规律，纵向位置布局相对横向位置布局对三体船的总阻力影响要大，而且大得多。文章总结了高速航行时，在片体横向布置不变的情况下，三体船的片体纵向位置靠近船尾能得到更为有利的阻力性能。

2010 年，周广利[17]在其硕士论文中以先使用势流方法计算了三体船的阻力性能，然后以 3 艘不同的三体船模型，9 种不同的片体布置方案为对象进行了数值模拟，对三体船的阻力进行了计算。同时与试验结果进行对比分析，数值模拟计算得到的结果与模型试验得到的结果有较好的吻合度，确定了该数值模拟方法的可行性，能得到较为精确的三体船阻力，对片体布置发生变化的三体船模型能正确得到其影响的规律。

2011 年，周利兰等[18]采用近远域结合的方法对深水条件下双、三体船的尾浪进行数值模拟。分析了片体间距对双体船影响，以及片体排水量与主片体纵横向间距对三体船尾浪影响。

2011 年，Khaled 等[19]在二维细长体法（SBM）框架下，计算一艘三体船在深水平静自由面的运动阻力，引入了宏 Tri-PL 计算了不同主片体布置的 4681 个工况（如图 1-4），得到了兴波阻力较小的主片体布置方案和总阻力较大的主片体布置方案。

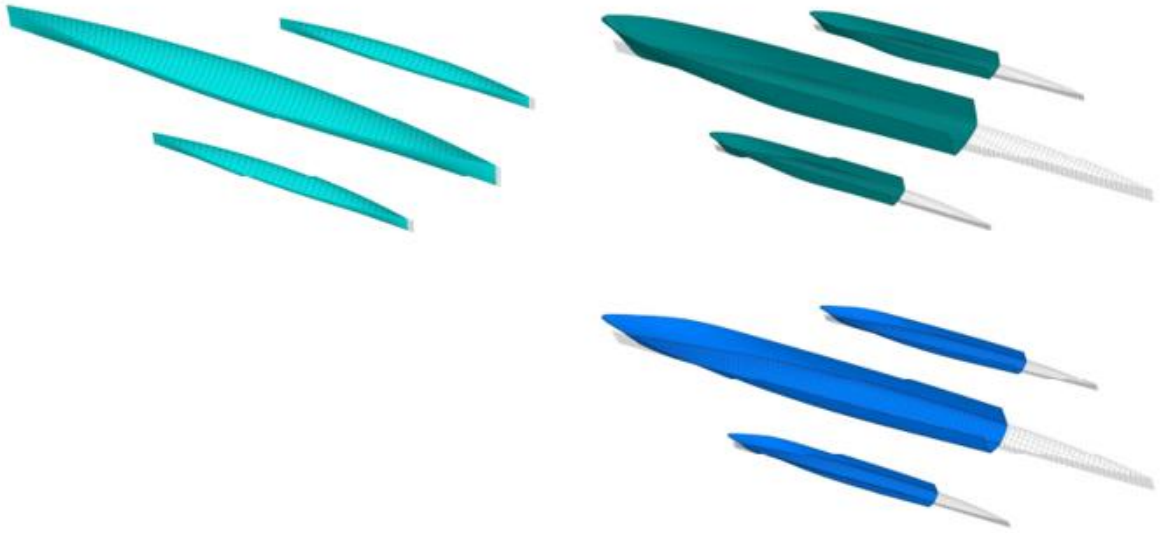


图 1-4 三体船片体工况设置[19]

Fig. 1-4 Settings of trimaran body working conditions

2012 年，张英晟[20]在其硕士论文中以某一高速三体船为数值模拟对象，使用粘流方法，改变了三体船片体的横向位置布置和纵向位置布置得到 8 个不同的三体船模型。从兴波干扰等 4 个方面对计算记过进行分析，发现片体的纵向位置对三体船阻力性能影响较大，横向位置对高速三体船的阻力性能影响较小。

2015 年，张雷[21]在其硕士论文中研究了田口正交试验方法的基础上，对三体船片体构型和布局参数等进行参数方案优化选取。之后对 16 组方案进行了数值模拟计算，采用正交设计的极差和方差分析对三体船总阻力影响因素研究，得到了基于最小总阻力的三体船片体优化参数。

2015 年，孙丽娜等[22]使用粘流 CFD 软件 Finemarine 计算三体船不同纵向与横向位置布局的样本方案，得到各总阻力，利用人工神经网络建立近似模型，最后近似模型代替数值计算，采用非劣分层一船算法（NSGA-II）自动优化（如图 1-5 为三体船片体布局优化流程）。

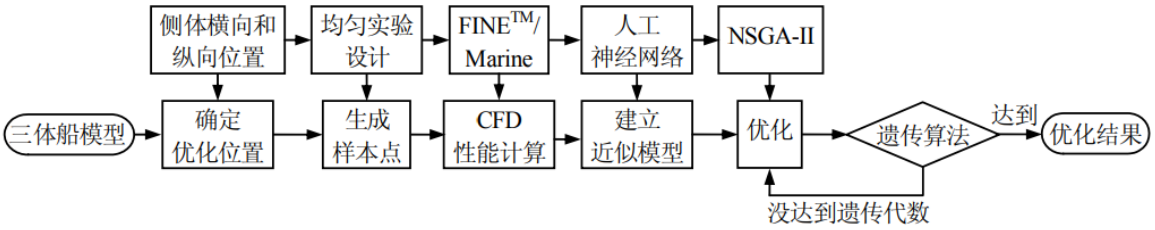


图 1-5 三体船片体布局优化流程[22]

Fig. 1-5 Optimization process of trimaran slice layout

2015 年，周广利等[23]使用粘流 CFD 商业软件 STAR-CCM+模拟对三体船的自由面周围流场进行数值模拟，对一艘三体船模型进行数值计算。计算中改变三体船片体的横向位置布置和纵向位置布置得到了 9 种不同方案的三体船模型，对其进行了详细模拟，求出了三体船主体与片体之间的的兴波干扰值，并模拟出了片体位置布置的最佳模型方案。

2016 年彭鹏[24]在其硕士论文中使用粘流 CFD 软件 Finemarine 以某一三体船模型为数值模拟对象，改变三体船片体的横向位置布置和纵向位置布置得到了多组片体的布局方案，计算得到了其静水阻力，之后对三体船片体的横向位置布置和纵向位置布置对三体船主体与片体间的兴波干扰以及阻力的影响做出了对比分析。

2016 年，陈飞宇等[25]使用建模商业软件 GAMBIT 构建三体船数值模型，再用粘流 CFD 商业软件 FLUENT 进行计算，改变三体船片体的横向位置布置和纵向位置布置得到了 25 种模型方案。通过数值模拟得到这 25 个模型方案兴波阻力干扰情况和阻力性能情况（图 1-6 为其中 4 种片体位置时的自由面波形图），文章通过对比分析得到片体布置在主体兴波波峰中时阻力较大，布置在主体兴波波谷时阻力较小，最后根据阻力最优原则确定了片体最佳的布置区域。

2018 年张明霞等[26]使用 STAR-CCM+平台，以小水线面三体船为研究对象，对船体周围粘流场进行数值模拟，结果表明随着航速增加，侧体布局于主体后部想主体靠拢时总阻力较小。

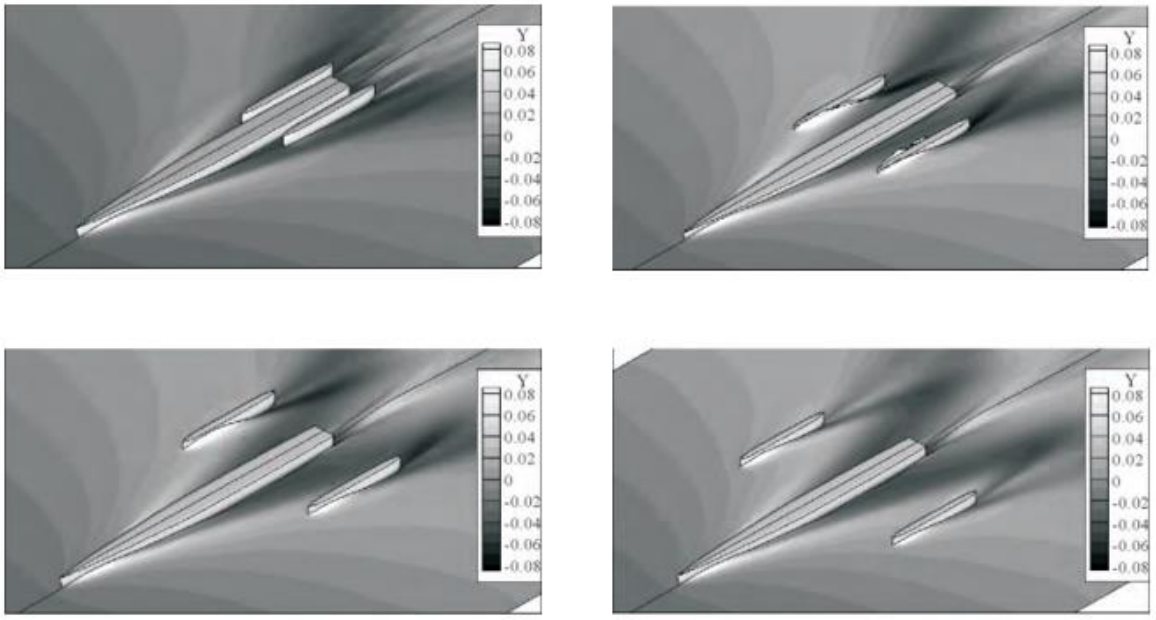


图 1-6 4 种片体位置时的自由面波形图[25]

Fig. 1-6 Free surface waveform at four different body positions

2020 年，李乐宇等[27]使用组内基于 OpenFOAM 开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 以粘流的方法模拟计算 16 个片体布局的三体船模型，发现设定航速下该三体船片体首部排布于主船体单独兴波的波谷位置尤其是波谷前侧位置可以获得较小的静水阻力。

2021 年，田高辉等[28]利用 SHIPMDO-WUT 软件平台构件了一种片体自动优化方法（如图 1-7 为片体自动检测方法流程），以某高速三体船为对象，使用 STAR-CCM+ 与 SHIPFLOW 进行阻力计算与分析， 并在 4 种 Fr 数下得到了最优的片体布局。

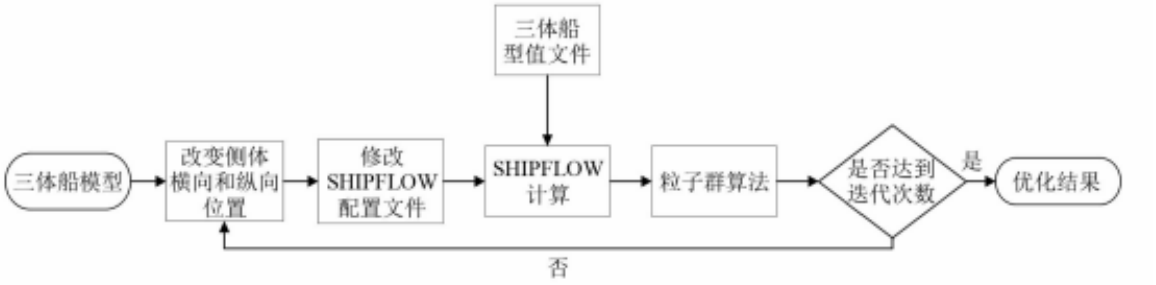


图 1-7 片体自动检测方法流程图

Fig. 1-7 Flow chart of automatic body detection method

1.3 本文主要工作

本文对不同片体布置的三体船进行数值模拟计算，分析片体布置对三体船兴波干扰以及对阻力的影响。本文共分为六个章节，第一章介绍了三体船片体布置对阻力及兴波干扰影响的国内外研究进展，分为理论研究方法、试验研究方法和数值模拟方法三个部分，第二章为本文数值模拟理论方法的阐述，本文数值模拟采用方法不可压缩的 RANS 模型对于船舶兴波进行数值模拟，并采用带有人工压缩项的 VOF 方法对自由面进行捕捉。为验证求解器的在求解静水阻力数值模拟的可靠性，本文对比了模型试验和数值仿真。

第三章对三体船片体的纵向位置布置对三体船主片体兴波干扰与阻力影响进行了数值模拟与分析，选取了 4 个不同的片体纵向位置的模型，依次选取了傅汝德数为 0.18、0.27 和 0.30 进行数值模拟，得到 4 个方案在三个航速下的总阻力系数、自由面兴波干扰图、船体尾部流线图和船体表面压力图。

第四章对三体船片体的横向位置布置对三体船主片体兴波干扰与阻力影响进行了数值模拟与分析，选取了 4 个不同的片体纵向位置的模型，依次选取了傅汝德数为 0.18、0.27 和 0.30 进行数值模拟，得到 4 个方案在三个航速下的总阻力系数、自由面兴波干扰图、船体尾部流线图和船体表面压力图。

第五章对三体船片体的长度布置对三体船主片体兴波干扰与阻力影响进行了数值模拟与分析，选取了 4 个不同的片体纵向位置的模型，依次选取了傅汝德数为 0.18、0.27 和 0.30 进行数值模拟，得到 4 个方案在三个航速下的总阻力系数、自由面兴波干扰图、船体尾部流线图和船体表面压力图。

第六章总结全文的内容，对每一个章节进行了结果与结论的整理和阐述，总结当前的工作，并在此基础上未来的工作进行了展望。

第二章 数值计算方法与理论基础

2.1 引言

本文基于CFD方法对三体船的各片体布置进行数值模拟，分析其对三体船主片体间的兴波干扰以及阻力的影响。使用了上海交通大学船舶与海洋工程计算水动力学研究中心（CMHL）团队基于开源的OpenFOAM[29-31]平台开发的粘流求解器naoe-FOAM-SJTU[32-40]，使用不可压的两相RANS模型求解N-S方程，带有人工压缩技术的VOF法捕捉自由面。为了验证当前的数值方法模拟三体船的可行性，本文将该三体船的模型试验结果与静水阻力数值模拟结果进行了对比验证。

2.2 控制方程

本文采用不可压缩RANS（Reynolds-Averaged Navier-Stokes）方程为的控制方程，控制方程如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1-1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s \tag{1-2}$$

其中：$\mathbf{U}$和$\mathbf{U}_\mathrm{g}$分别为速度场和网格移动速度；$p_d = p - \rho \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{x}$为流体动压力；$\rho$为液体或者气体的密度；$\mathbf{g}$为重力加速度向量；$\mu_{\mathrm{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$为动力粘性系数，其中$\nu$为运动粘度，$\nu_t$为湍流涡粘度并可由湍流模型求解得到；$f_\sigma$为两相流模型中的表面张力项；$f_s$为消波区域所施加的源项。

2.3 自由面捕捉

本文采用自由液面的捕捉方法选择带有人工压缩项的VOF（Volume of Fluid）法。其中的人工压缩项能有效控制数值耗散，提高自由液面捕捉能力和精度。其输运方程可以定义为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\nabla\cdot[(\mathbf{U}-\mathbf{U}_g)\alpha]+\nabla\cdot[\mathbf{U}_r(1-\alpha)\alpha]=0 \tag{1-3}$$

其中α为体积分数，代表每一个网格单元中液体部分所占整个网格单元的体积分数，

$$\begin{cases}\alpha=0 & \text{空气中}\\ \alpha=1 & \text{水中}\\ 0<\alpha<1 & \text{自由液面}\end{cases} \tag{1-4}$$

基于体积分数α，密度ρ和动力粘度μ分别定义为：

$$\begin{cases}\rho=\alpha\rho_l+(1-\alpha)\rho_g\\ \mu=\alpha\mu_l+(1-\alpha)\mu_g\end{cases} \tag{1-5}$$

其中：下标 g 和 l 分别代表气体和液体。

2.4 naoe-FOAM-SJTU 求解器

本文三体船的流场计算采用上海交通大学船舶与海洋工程计算水动力学研究中心（CMHL）团队基于 OpenFOAM 平台开发的船舶水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU（如图 2-1 所示）。该求解器在开源平台的基础上通过引入数值造波和消波模块、六自由度运动求解模块、系泊系统求解模块、重叠网格模块等针对船海水动力学的专用模块，可以实现各类船舶与海洋结构物的水动力性能数值预报。目前该求解器在船舶阻力、耐波、推进和操纵等领域已经得到了广泛的应用和验证。本文将采用目前的求解器针对三体船进行数值预报研究，进一步验证改求解器在三体船水动力性能预报方面的可靠性。

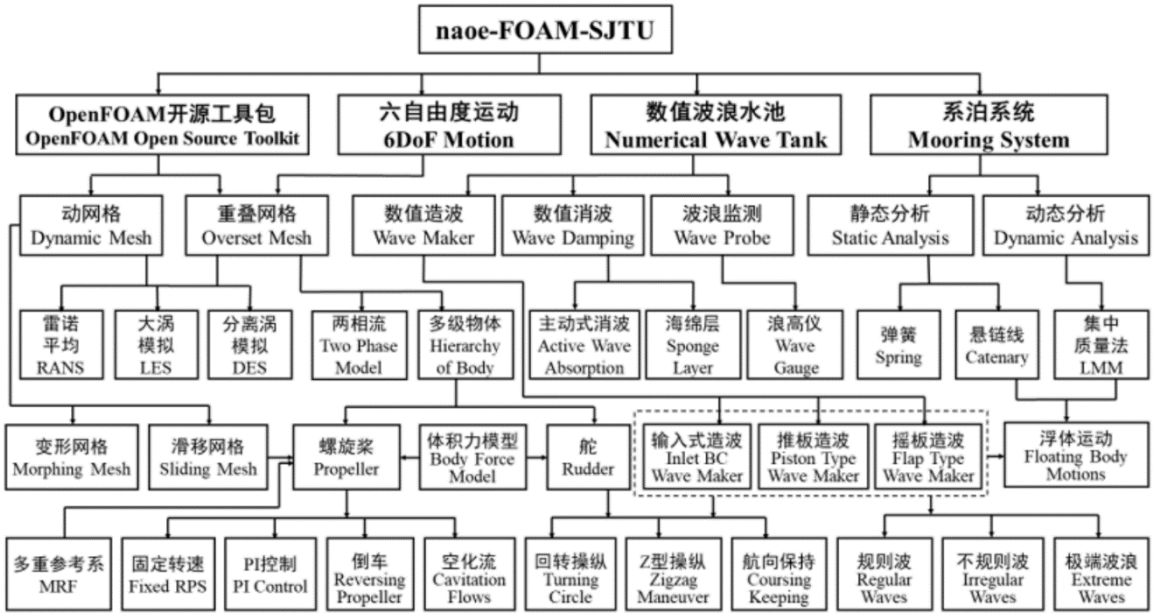


图 2-1 naoe-FOAM-SJTU 求解器框架

Fig. 2-1 Solver frame of naoe-FOAM-SJTU

目前该求解器能够处理的问题有：船舶计及航行姿态的快速性预报[41-43]、船舶在迎浪中的波浪增阻和运动响应计算[44-45]、大幅度运动[46]和甲板上浪问题的模拟、固定平台的波浪爬高和波浪力计算[47-48]、浮式平台在迎浪和横浪中的运动响应以及上浪砰击现象的预报[49]等。

2.5 静水阻力验证

为了验证本文使用的方法的可行性和可靠性，对模型以及求解器进行与试验结果的对比验证，数值模拟采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器，使用其中的不可压缩 RANS 方法求解 N-S 模型，选择带有人工压缩项的 VOF 方法捕捉自由面。

2.5.1 计算模型与工况

本文采用了一艘与试验使用的圆舭模型船相同参数的模型船（见图 2-2），总船长 7.44m，主体垂线间长 7.17m，片体水线长 3.31m，基本参数如表 2-1 所示。

表 2-1 模型参数

项目	参数数值
主体总长	7.44m
主体垂线间长 L_{pp}	7.17m
片体水线长	3.31m

图 2-2 三体船模型

Fig. 2-2 Trimaran model

在算例中选取 Fr=0.10、0.24 和 0.27 三个航速进行验证，重力加速度 g 取 9.81m/s^2，水的密度 ρ 取 1.000kg/m^3，运动粘性系数取 1.27m^2/s。

2.5.2 网格布置

为了节约计算资源，同时也减少计算时间，本数值计算采用半船法，船体网格由 OpenFOAM 自带的网格生成软件 snappyHexMesh 生成。背景计算域选择为：

长度方向：$-2L_{pp}<x<3L_{pp}$;

宽度方向：$0<y<2L_{PP}$;

高度方向：$-L_{PP}<z<0.5L_{PP}$。

整体计算域网格如图 2-3 所示。本文自由面采用逐步加密的网格，以更好捕捉自由面的流场状态，网格分为 4 部分如图 2-4（a）所示，图 2-4（b）中三体船静止时气体界面与液体界面的分相，上面蓝色部分为气体，下面红色部分为液体，黑色为船体模型。

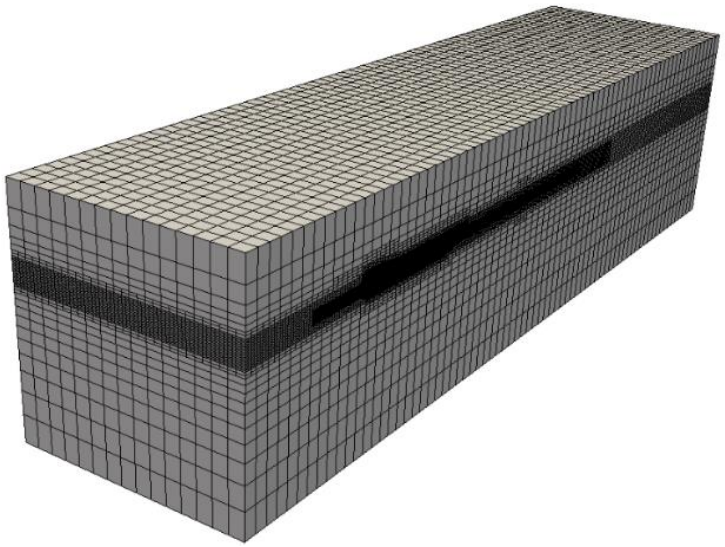
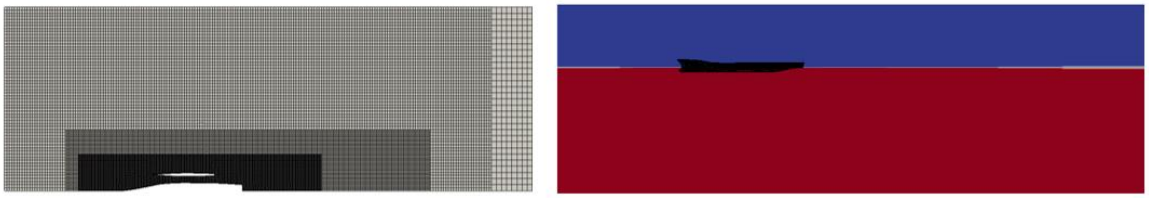


图 2-3 整体计算域网格

Fig. 2-2 Overall compute domain grid



(a) 自由面网格 (b) 气液分相

图 2-4 自由面网格与气液分相

Fig. 2-4 Free liquid surface grid and gas-liquid phase separation

2.5.3 验证结果

本文通过模型试验结果与数值仿真结果对比验证该求解器的可靠性。验证结果如表 2-2 所示。低航速 Fr=0.1 工况下数值预报误差为-4.22%，在中等航速和高航速下的数值预报误差分别为 0.24%和 2.31%，上述三体船总阻力计算结果表明本文采用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器在不同航速下的阻力数值计算结果可靠，可以满足工程实际要求。万德成等[50]已证明求解器在船舶水动力性能数值预报中有着适用性和可靠性。

表 2-2 静水阻力系数比较

Fr	数值模拟×10^{-3}	实验×10^{-3}	误差
0.10	3.63	3.79	-4.22%
0.24	4.23	4.22	0.34%
0.27	3.99	3.90	2.31%

除了船体受力结果外，本文还将数值计算得到的流场结果与模型试验测量结果进行了对比。图 2-5 为船舶试验和数值模拟方法得到的尾流场图，可以看到数值模拟得到的尾流场与试验得到的尾流场吻合较好。如箭头所示，箭头 2 与箭头 4 为处于主片体之间收到主片体兴波干扰下的兴波波谷与波峰。箭头 3 为受到主片体兴波干扰的片体尾兴波波峰，可以看到数值模拟与试验都有明显的波峰偏移。箭头 1 为主体尾兴波受到主片体间兴波干扰后的兴波波峰，同时可以看见尾波峰在与片体尾波叠加的位置产生了明显的偏折，这一点同试验结果一致

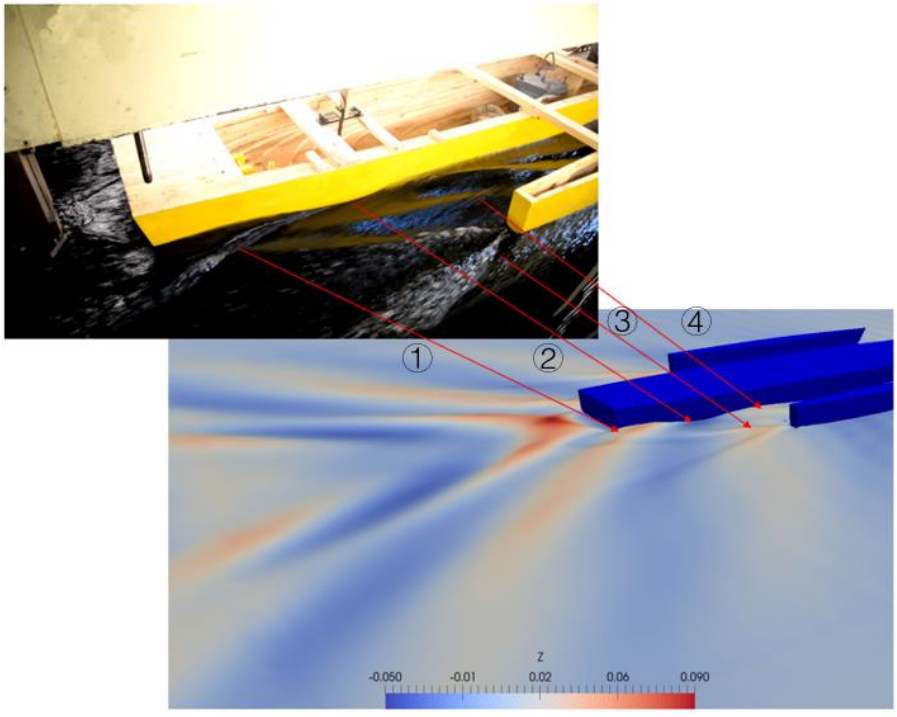


图 2-5 Fr=0.27 时试验尾流场与数值计算尾流场对比

Fig. 2-5 Comparison of the wave fields of experiment and numerical calculation when Fr=0.27

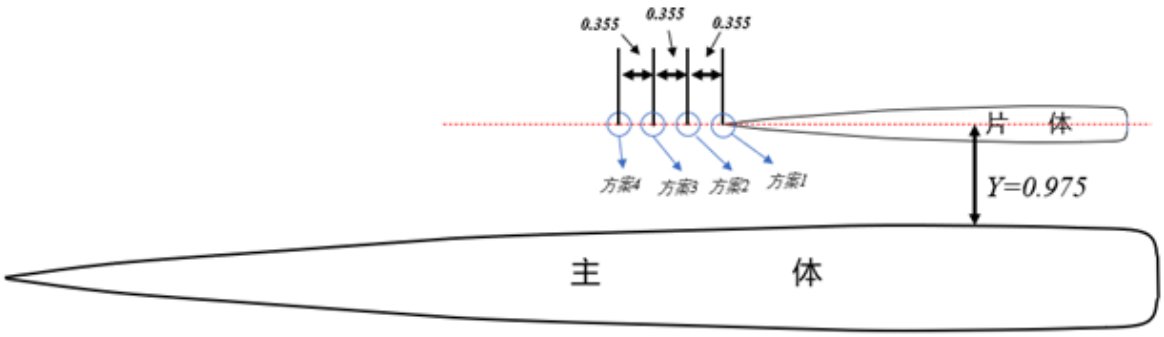
第三章 片体纵向位置对阻力及兴波干扰影响

3.1 引言

本章的数值模拟中控制了三体船片体的横向位置不变，只改变了片体的纵向位置，选取了 4 个不同的片体纵向位置，并选取了三个不同航速低速（Fr=0.18）、中速（Fr=0.27）以及高速（Fr=0.30），对应三体船模型航速低速（1.50276m/s）、中速（2.25414m/s）和高速（2.50460m/s）在三个不同航速情况下分析 4 个不同片体位置对三体船主体与片体间的兴波干扰带来的影响，同时得到 4 个片体位置中的有利兴波干扰位置。

3.2 计算设置

模型参数与 2.5.1 节所介绍的相同，只是固定了模型三体船片体的横向位置不变，选取了 4 个不同的片体位置如图 3-1 所示， 其中方案 2 为原始模型位置。以方案 2 为基础，方案 1 片体位置是向船尾移动 0.05L_{pp}，即 0.355 m；方案 3 片体位置是向船



首移动 0.05L_{pp}，即 0.355 m；方案 4 片体位置是向船首移动 0.1L_{pp}，即 0.711 m。

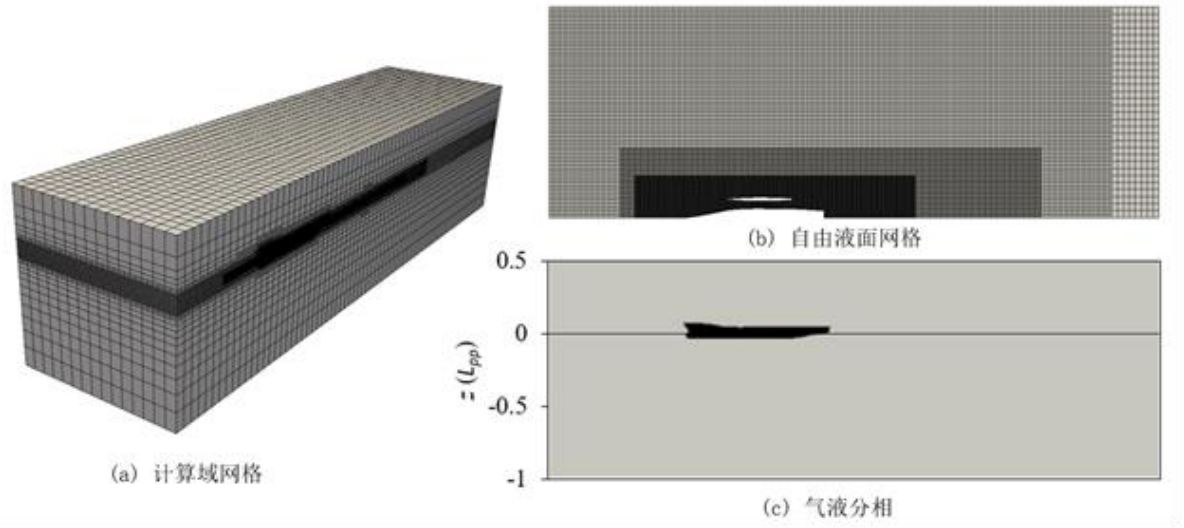
图 3-1 三体船纵向 4 种片体布局

Fig. 3-1 Trimaran longitudinal layout of 4 segments

网格同样用 OpenFOAM 自带的网格软件 snappyHexMesh 生成计算域网格。初始自由面与船艉的交点处设置为坐标原点，x 轴指向船舯，y 轴指向右舷，z 轴指向正上

方。边界入口在 $x=-2L_{pp}$ 处，边界出口在 $x=3L_{pp}$ 处。

因为静水阻力计算的数值模拟具有对称性，因此采用半域进行数值计算，以节约计算资源，减少计算时间。本文采用船固定位置流体为匀速来流来模拟船舶在静水航行的姿态。左右边界和底边界均设置为对称边界。右边界设置在 $y=2L_{pp}$ 处，底边界设置在 $z=-L_{pp}$，上边界设置在 $z=0.5L_{pp}$ 处。z=0 平面为水气交接面，即自由面，其上方



是空气，下方是水，网格全局计算域如图 3-2（a）所示。

图 3-2 CFD 计算域网格设置

Fig. 3-2 Grid settings of CFD calculation domain

3.3 数值模拟结果及分析

3.3.1 Fr=0.18 时片体纵向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.18）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 3-3 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。可以得到方案 2 的总阻力系数最大，方案 4 的总阻力系数最小，方案 1 的总阻力系数略大于方案 4，方案 3 的总阻力系数介于方案 1 和方案 2 之间，由此可推测出方案 2 的片体布局在 4 种方案中有着最不利的主片体兴波干扰，方案 4 存在较为有利的兴波干扰。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

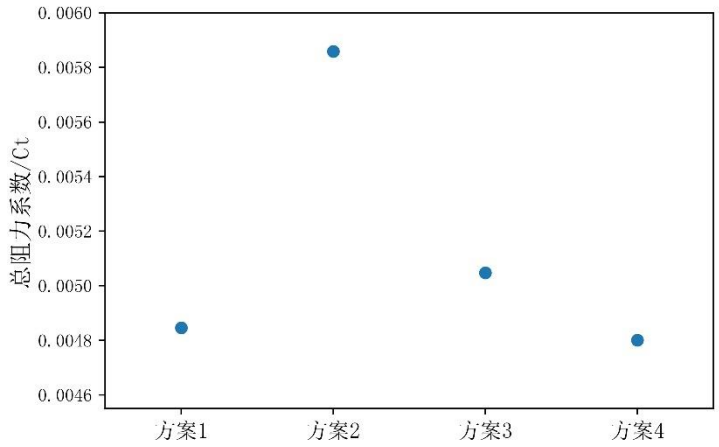


图 3-3 Fr=0.18 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 3-3 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.18

如图 3-4 所示，4 个模型的片体尾部产生了明显不同的兴波干扰。在 4 种方案中，很明显方案 2 兴波干扰最为不利，从图中也可以看到方案 2 三体船尾部的兴波颜色最深，面积最大，方案 2 的片体尾部产生的第一个波峰与主体产生的一个波峰处于峰峰叠加状态，使得三体船尾部兴波波高增大，产生更大的兴波阻力，这和图 3-3 中计算得到的总阻力系数相吻合。在方案 1 中，片体位置相对方案 2 偏向于船尾，使得方案 1 的片体尾兴波波峰与主体产生的尾波峰相互错开，从而兴波高度相对方案 2 平均要小，总阻力系数也相对小了一些，同样与图 3-3 总阻力系数结果吻合。在方案 3 中，由于片体位置相对方案 2 更靠近船首，不仅使片体兴波与主体兴波干扰减弱，而且片体尾兴波波峰也未和主体尾兴波波峰相遇，这两点使得主体船尾兴波波高相比方案 2 的小。但是相对于方案 1 兴波干扰还较为不利，明显也可以从图 3-3 中看到方案 3 产生的兴波波高相对于方案 1 的平均要大些，这是由于方案 3 中片体尾部产生的兴波波峰接近了主体尾兴波的波峰，产生了不利的兴波干扰。4 个方案中方案 4 的片体位置最靠近船艏，相比方案 3 有着更弱的主片体兴波干扰，从图中可以看到方案 4 的兴波波高平均是 4 个方案中最小，总阻力系数也是 4 种方案中最小的。

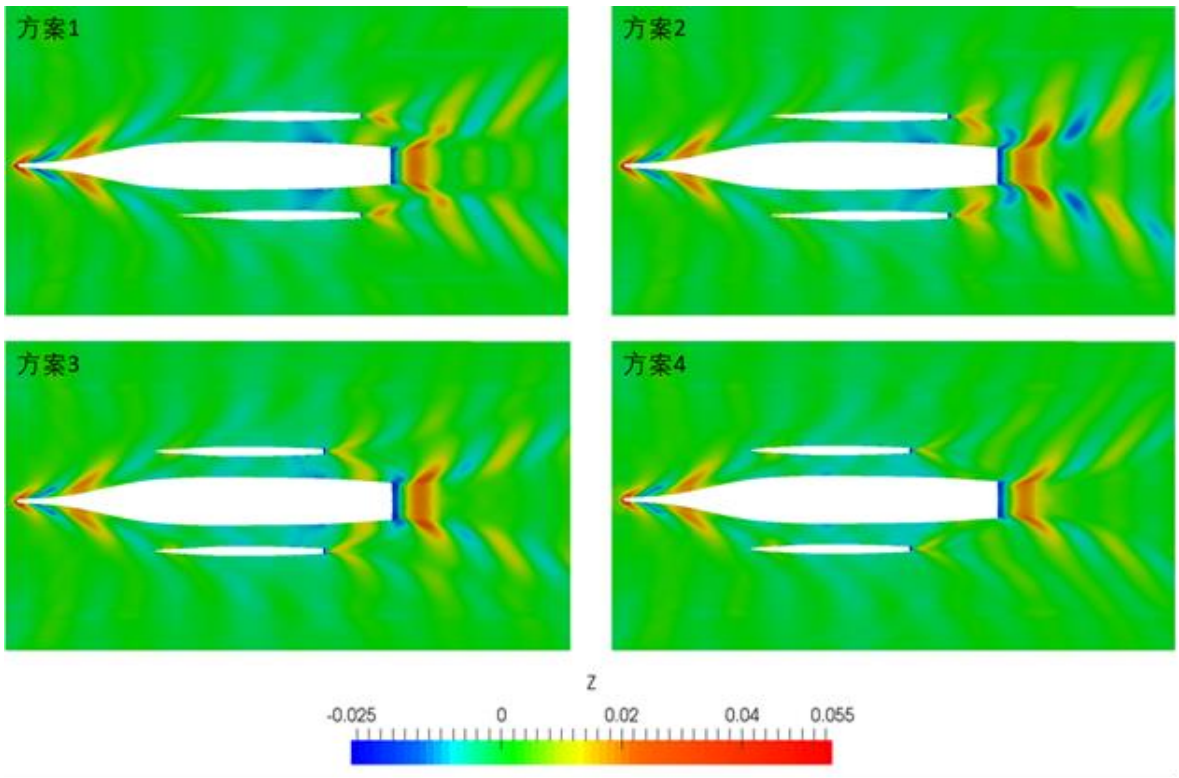


图 3-4 Fr=0.18 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 3-4 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.18

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图 3-5 所示）。由图中可以得到 4 种方案主体尾部有着不同程度的流体回流，可以看到在方案 2 中，主体尾部回流区最大，此时船体尾部压力最小，使整个船体压差阻力增加。同时在其他三个方案中，方案 1、3、4 主体船尾的回流区明显小于方案 2，造成这个现象的原因就是片体纵向布局不同使兴波干扰的影响发生改变，从而改变船尾流场的状态，方案 2 的主体片体之前有着相对不利的干扰，使其尾兴波产生的高度增加，从而尾部低速区范围更大，速度更低。相比方案 1、3、4，由之前的分析可知方案 4 的总阻力系数最小，也可从图中看见方案 4 主体尾部流线低速的部分最窄，片体兴波影响到尾部流场的程度更低。而相比方案 1 和 3，两个模型主体尾流宽度相似，但是从图中可以看到方案 3 主体尾流低速区的长度更长。

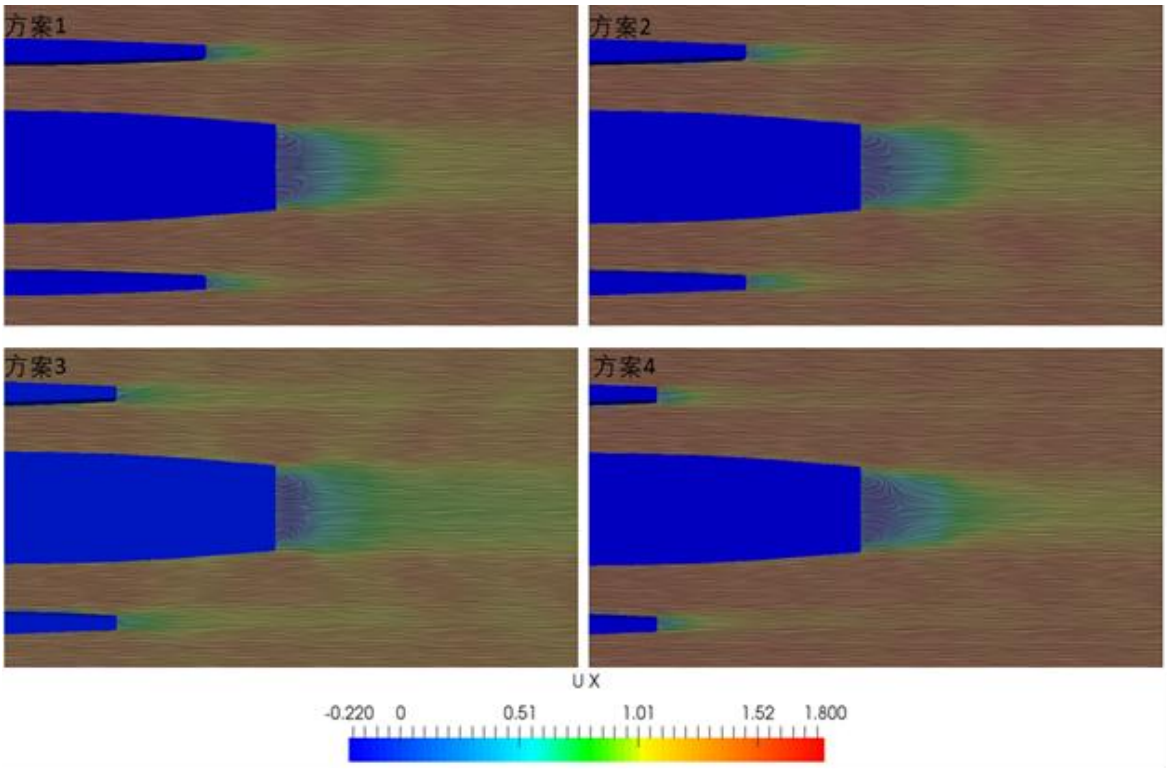


图 3-5 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 3-5 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.18

同时，从图中我们可以看到 4 种方案布局中片体尾部的流线会向外侧偏移，这是因为主体兴波同时在干扰片体的兴波，同样，方案 2 的片体兴波受到主体兴波干扰的程度最大，从而形成了相对面积更大的低速区，同样反应在了总阻力系数上。相比方案 1 和 3，从图中可以看到方案 3 中主体尾流深色区域面积更大，这表示方案 3 主体尾部相对方案 1 有着更大的低速区，产生的兴波波高更大，有着更大的总阻力系数，这也符合计算出的总阻力系数结果。

如图 3-6 为 4 种方案下三体船的表面压力图，可以看到在四个方案中，三体船的主体部分的船首与船尾都有一个高压区，船尾附近有一个低压区，同时可以看到在方案 2 中，船尾附近的低压区和高压区的颜色都要比其他三个方案的稍微深一些，表明了在方案 2 中低压区压力更低，高压区压力更高。从图中我们可以看到 4 种方案的三体船主体的表面压力差别不大，而片体的压力分布就有明显的区别。可以看到随着片体从靠近船尾的位置向船首方向移动，片体首部的的高压区和尾部的低压区都向着相对片体的位置向尾部移动，但是片体的高压区和低压区相对三体船主船体的位置相对

移动较小，这个现象的原因是在航速固定的情况下，三体船主体的兴波波长、波高和相位是不变的，片体纵向位置的移动，导致片体在主体整个兴波的位置发生移动，三体船主体兴波的同一个位置给了片体不同位置以同样的压力，这个压力作用的纵向距离相对三体船的主体位置是固定的，结合图 3-4 三体船的自由面的兴波图可以得到片体处于主体兴波波峰的位置的部分压力为正，相反片体处于主体兴波波谷位置的部分压力为负。

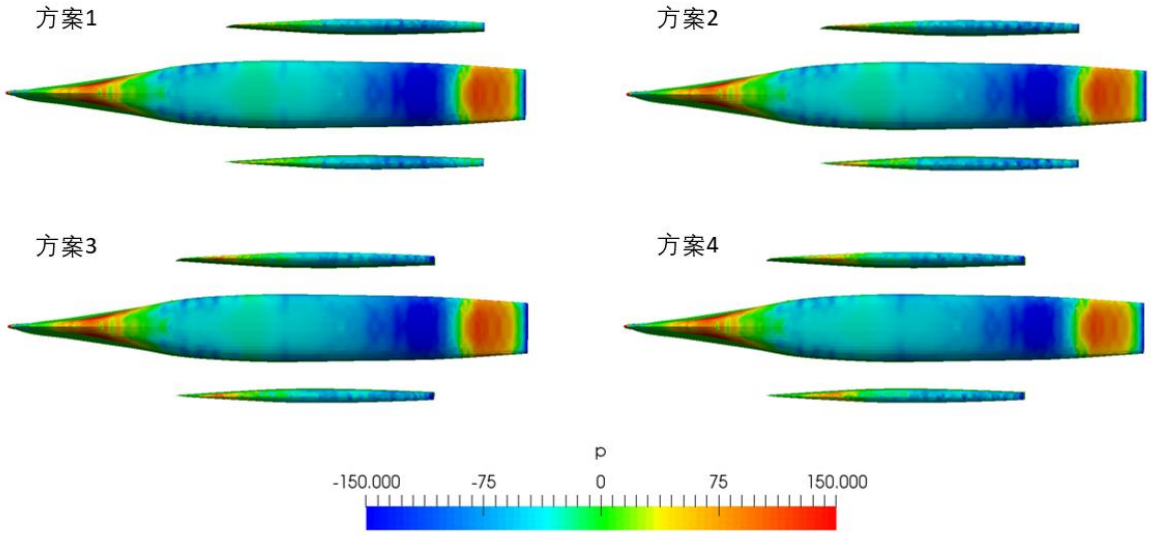


图 3-6 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 3-6 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.18

3.3.2 Fr=0.27 时片体纵向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.27）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、船体尾部流线图和船体表面压力图。图 3-7 展示了 4 种布局方案下的数值模拟得到的总阻力系数。可以得到依然是方案 3 的总阻力系数最小，方案 4 的总阻力系数紧随其后，而方案 1 的总阻力相比较 Fr=0.18 时的第二小变成了最大的，方案 2 的总阻力系数反而比方案 1 的小，介于方案 1 与 4 之间，这里可以推断出随着航速的改变，或者说是增大，船体主体和片体兴波的波长发生改变，主、片体兴波干扰的情况也会发生改变，当 Fr=0.27 时，方案 1 的布局是最不利的。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

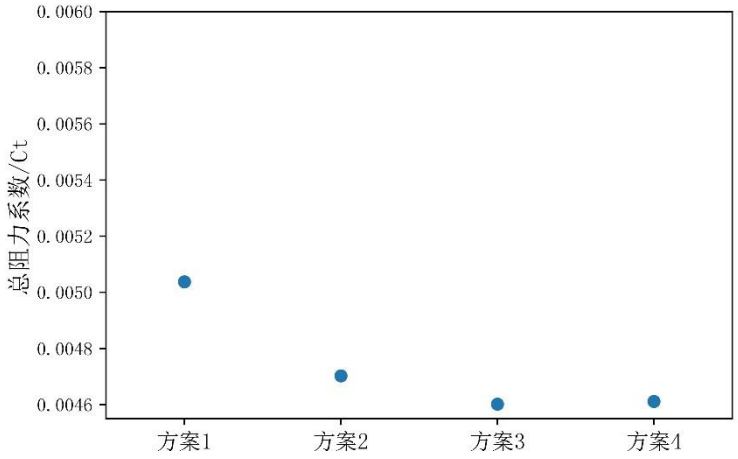


图 3-7 Fr=0.27 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 3-7 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fe=0.27

如图 3-8 所示，4 个不同片体布局的模型尾部产生了明显不同的尾兴波。4 中方案中明显方案 1 产生的兴波波高最大，其次是方案 2。可以明显地看到在方案 1 中，片体产生的尾兴波波峰与主体尾兴波的波峰叠加在了一起，产生了峰峰叠加的状态，很打程度地增加了三体船在尾部的兴波波高，而且片体更靠近船尾，使片体产生的兴波在减弱前更严重影响了主体尾兴波，这样产生了更大的兴波阻力，损失了更多的能量，不论是红色波峰区还是蓝色波谷区都要比其余三个方案面积大，这也很符合图 3-7 中的最大总阻力系数。而在方案 2 中，片体相对方案 1 的片体更靠近船艏，使片体产生的尾兴波波峰与主体产生的尾兴波波峰稍微错开了一些，同时因为相对远离了一些船尾，使得方案 2 中片体的为兴波略有耗散。方案 3 和 4 的片体由于更远离船尾，使得片体与主体间的兴波干扰朝有利的方向发展，不仅由于距离远离船尾使片体的尾兴波进一步耗散，而且片体的尾兴波波高与主体尾兴波波高错开得更大。对比图中方案 3 与方案 4 流场图，我们可以发现在方案 3 中片体片体的尾兴波波高与主体的艏兴波波谷相遇，之后这两干扰产生的波错开了主体尾兴波的波高，从整体看产生了有利的主片体的兴波干扰。而在方案 4 中，由于片体相对方案 3 更靠近船首，使片体兴波的干扰相对主体尾兴波有所降低，但是由于片体尾兴波波高与主体艏兴波波谷稍错开了一些，导致其兴波干扰相对方案 3 不利了些，综合来看方案 3 与方案 4 的主片体兴波干扰情况类似，正如图 3-7 所示两者的总阻力系数非常接近。

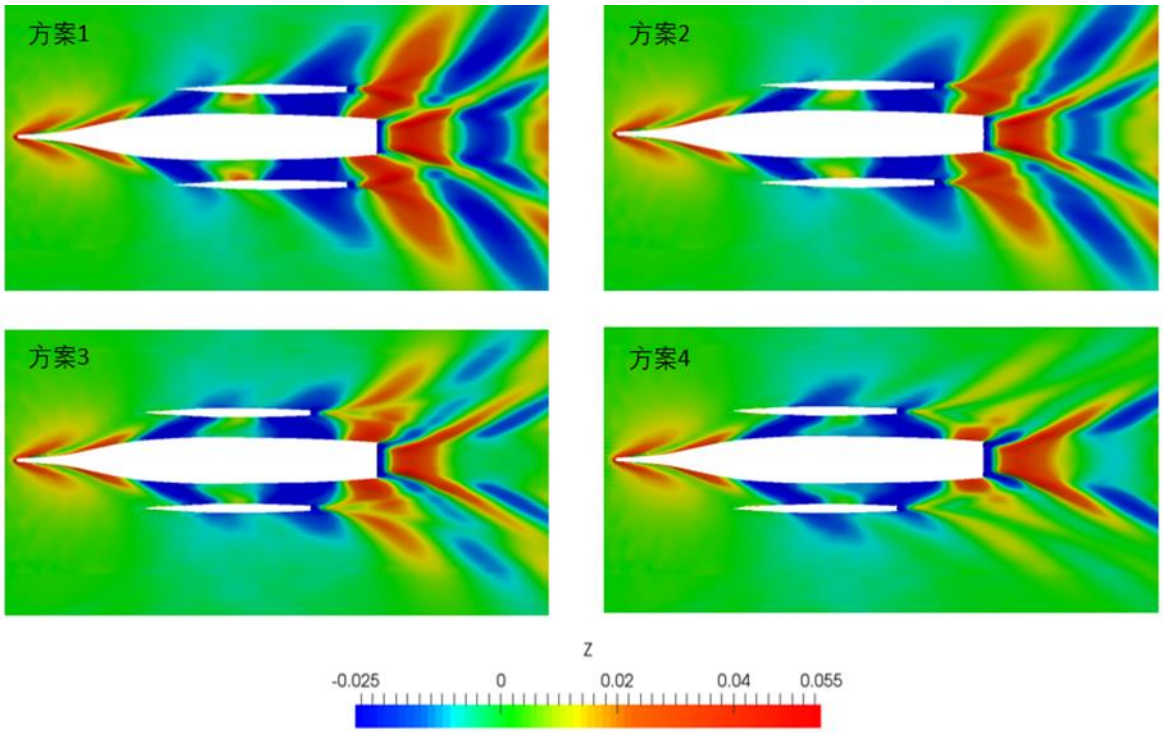


图 3-8 Fr=0.27 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 3-8 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.27

根据粘流的数值模拟结果，同时得到了 4 种方案的三体船船尾流线的情况（如图 3-9 所示），图中可以看到 4 种片体布局的模型尾部有着不同程度的回流，可以看见在方案 1 中主体的尾部回流区最大，低速区最大，导致了船体尾部的压力最小，使得压差阻力增加，同时也可以看到在方案 1 的片体尾流线中，低速区域也是最大的，也也是因为主体的兴波同时给与片体的尾兴波以不利的干扰，增加了片体的阻力，在其他三个方案中，可以明显地看到主体尾部回流区面积要小于方案 1。如图所示，在方案 2 中主体尾流的回流区和方案 4 接近，但是方案 2 的片体尾部兴波收到了主体尾部相对于方案 4 不利的兴波，导致方案 2 整体的阻力上升。方案 3 的主体尾流回流区面积最小，虽然明显地看到在方案 4 中片体的尾兴波流线对于主体尾部兴波的流线干扰最小，但是在方案 3 中片体的干扰是有利于船尾兴波的，使其降低了主体尾部的兴波，从而得到了最小的主体尾部回流区，同时由于方案 4 最弱的兴波干扰，是方案 3 与方案 4 得到的总阻力系数结果又较为接近。

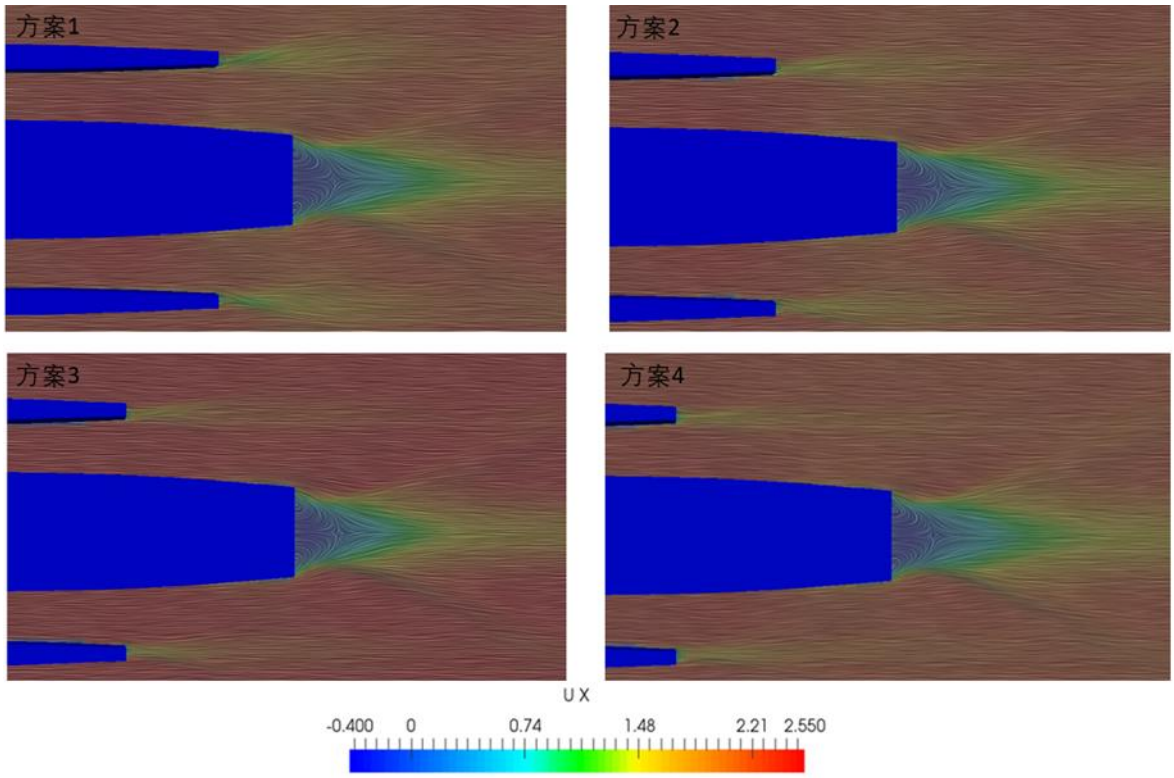


图 3-9 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 3-9 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.27

同时在图 3-9 中，可以看到 4 种片体布局的三体船片体尾部的的兴波流线会有明显的 y 方向偏移，这是由于收到了主体兴波的干扰。在方案 1 中，由于片体尾部离主体尾部更为接近，片体的尾部流线产生了向船外方向较大的偏移，这也是由于主体对于其兴波的较大影响，图中方案 2 的片体尾部兴波也有不小的偏移，但是相比较方案 1 明显小了很多，方案 3 和方案 4 的更是逐渐减小，离船尾越远的片体布局，片体收到的主体兴波干扰越弱，同时尾部流线的偏移会更小。

如图 3-10 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。同样可以看到在四个方案中，三体船的主体部分的船首与船尾都有一个高压区，船尾附近有一个低压区。同时从图中可以明显得看到和 Fr=0.18 时三体船主体表面压力几乎没变化不同的是，随着三体船片体布置从船尾向船首移动，船尾附近的低压区面积在不断减小，结合图 3-8 的三体船自由面兴波图可以发现，三体船片体尾部产生的兴波作用到三体船主体靠近尾部的部分，而片体作用在此处的兴波为波峰，给三体船主体以正压力，是原来主体低压区的部分得到正压力之后面积得到减少。而相比 Fr=0.18 的时候，由于航速

较慢，三体船片体尾部产生的兴波波高低，能量低，能量的耗散较快，传播到三体船主体的时候给主体施加的压力就很小了，所以 Fr=0.18 的时候三体船主体表面压力才基本没什么变化。同样，和 Fr=0.18 时的一样，三体船片体纵向位置的变化片体表面的压力明显与片体处于主体兴波的位置密切相关。

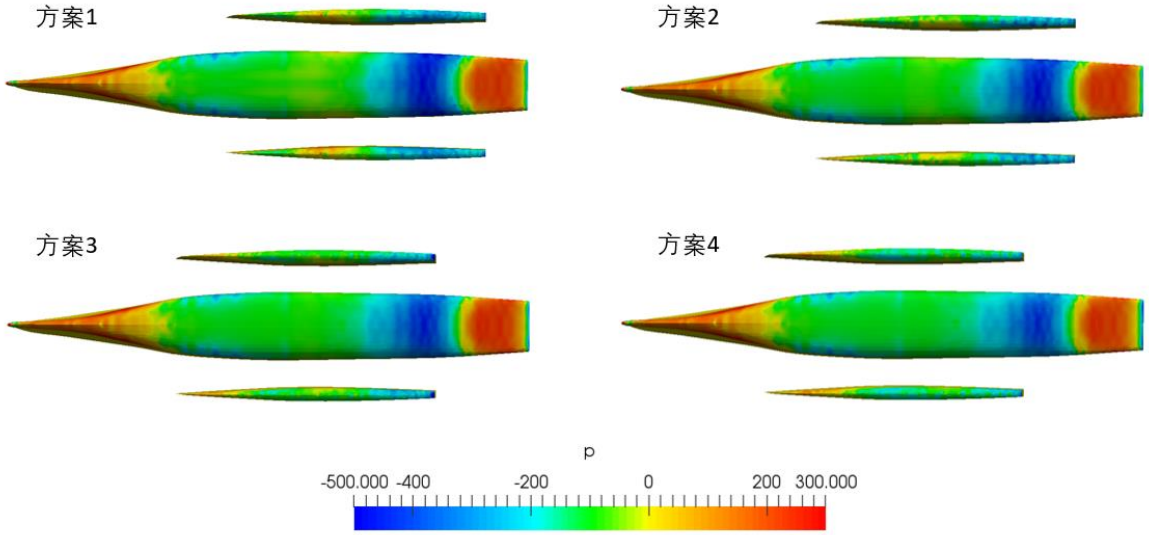


图 3-10 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 3-10 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.27

3.3.3 Fr=0.30 时片体纵向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.30）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 3-11 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数，可以看到 4 种片体布局的总阻力系数随着偏移远离船尾而减小，这是由于航速的增加，主体与片体间的兴波波长增加，使片体兴波与主体兴波之前波峰与波峰，波谷与波峰的叠加由于船长的限制不那么容易，大部分情况都是波峰与波峰，波谷与波峰错开的情况，这时影响三体船总阻力的因素就主要成为了片体尾部兴波到主体尾部兴波的强度，和片体布置是否是向有利的主片体干扰发展。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

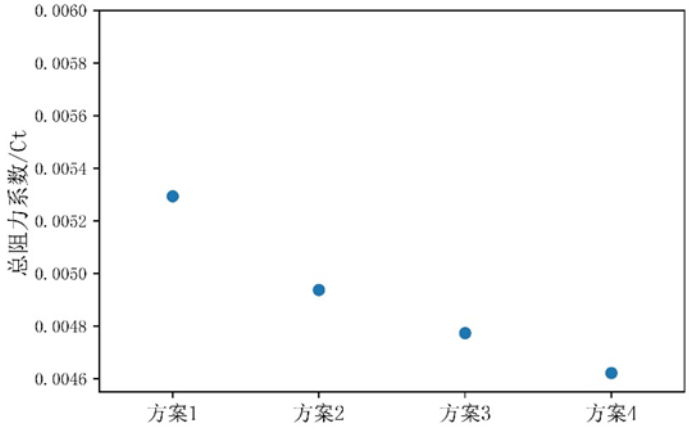


图 3-11 Fr=0.30 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 3-11 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.30

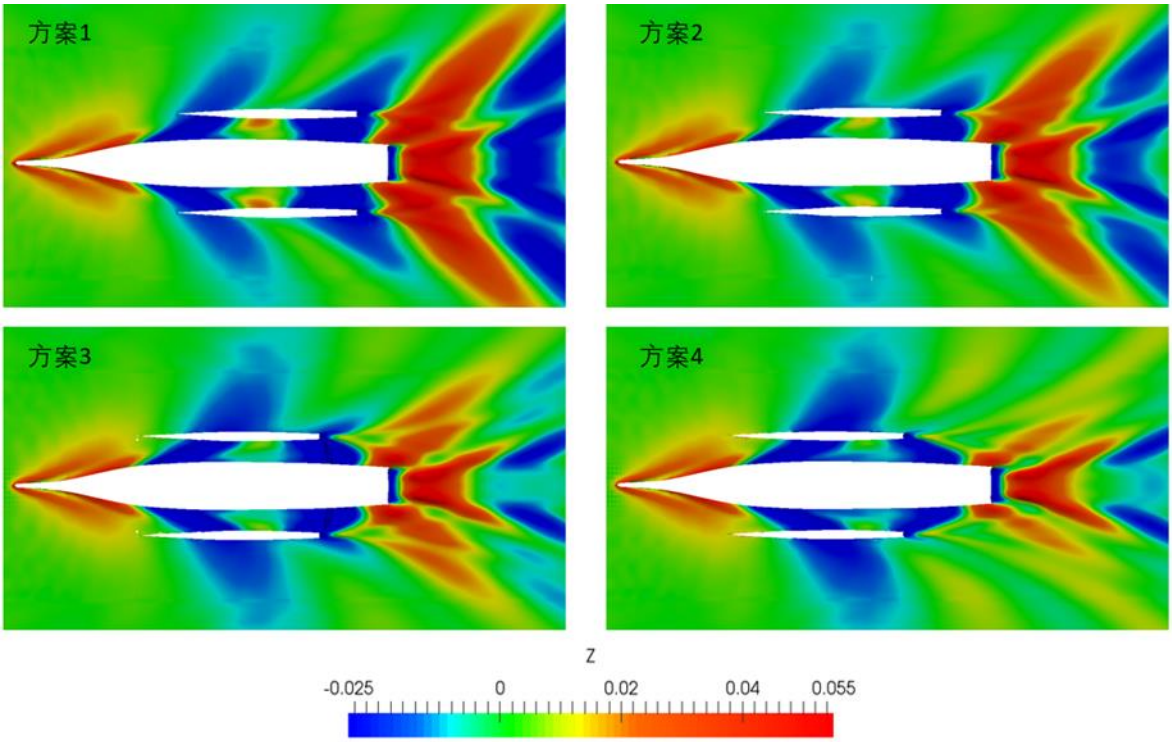


图 3-12 Fr=0.30 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 3-12 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.30

如图 3-12 所示，4 个不同片体布置的三体船模型兴波干扰呈现一种趋势，在方案 1 中，片体的尾兴波波高接近于主体尾兴波的波高，这时主片体产生了最不利的兴波干扰，从图中可以明显看到方案 1 自由面产生的最大的兴波波高与波谷。图中方案 2，由于片体向船首移动了一个距离，使片体的尾部兴波波高稍远离了主体的兴波波高，朝着主体收兴波的波谷靠近，这使得主片体的兴波干扰朝有利的方向发展。再如图方案 3 的自由面状态，片体继续向船首方向移动，片体的尾部兴波波高继续远离主体尾部兴波波高，继续靠近主体首部兴波波谷，使三体船模型整体兴波的波高降低，主片体间的兴波干扰继续朝着有利的方向发展。最后如图 3-12 中方案 4 的自由面情况，由于片体位置的继续靠近船艏，使得片体尾部兴波的波高更加远离主体尾部的兴波波高，同时与主体首部的兴波波谷几乎相遇，使得三体船模型整体的兴波更为减少，此时的片体布局有着最有利的兴波干扰，同时也对应了图 3-11 的 4 中片体布局的三体船模型随着片体远离船尾而总阻力减小的结果。

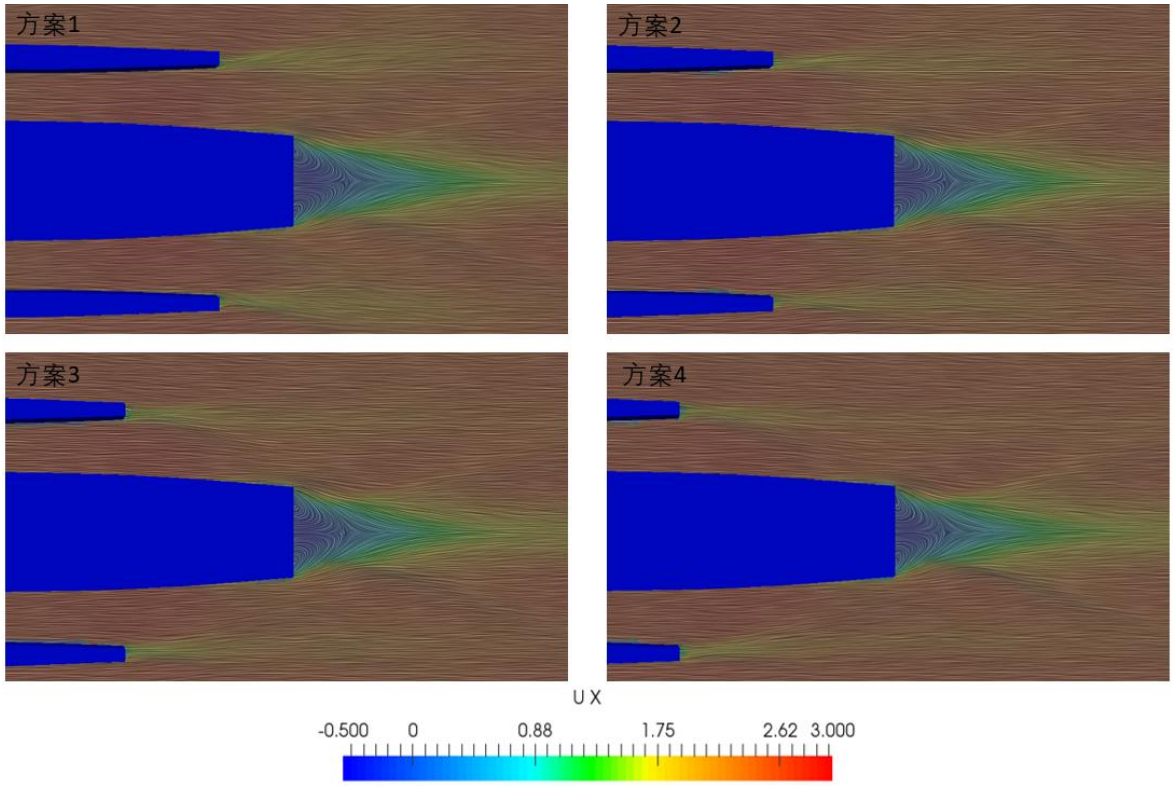


图 3-13 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 3-13 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.30

根据粘流的数值模拟结果，同时得到了 4 种方案的三体船船尾流线的情况（如图

3-13 所示），可以明显地看见，和之前分析的结论一致，从方案 1 到方案 4，主体尾部的兴波回流区逐渐减小，低速区逐渐减小。方案 1 中，片体最靠近船尾，片体对主体的兴波干扰最大，主体尾部得到最宽的低速区和面积最大的回流区，片体的尾部兴波的低速区面积也是最大的，随着片体远离船尾，主体尾部的低速区变窄，面积减小，同时回流区面积也逐渐缩短。直到方案 4，由图可以看见方案 4 中片体尾部的兴波低速区最小，主体尾部的回流区面积也最小，并且形成了明显的鸡尾流。

同时，从图 3-13 中还可以看到方案 1 中片体尾部的流线明显朝船外的防线偏斜，这也是由于在方案 1 中片体最靠近船尾，受到船尾兴波的干扰最严重。随着片体远离船尾，如图中的方案 2，片体尾部的流线还是有明显的偏斜，但是相比方案 1 的偏斜要明显小一些。再到方案 3，片体尾部的流线几乎没有偏斜或者略有一丝向主体方向偏斜，最后在方案 4 中，片体尾部的流线明显向主体的方向偏斜，流线更为集中，损失的能量最少，是最有利的主片体兴波干扰。

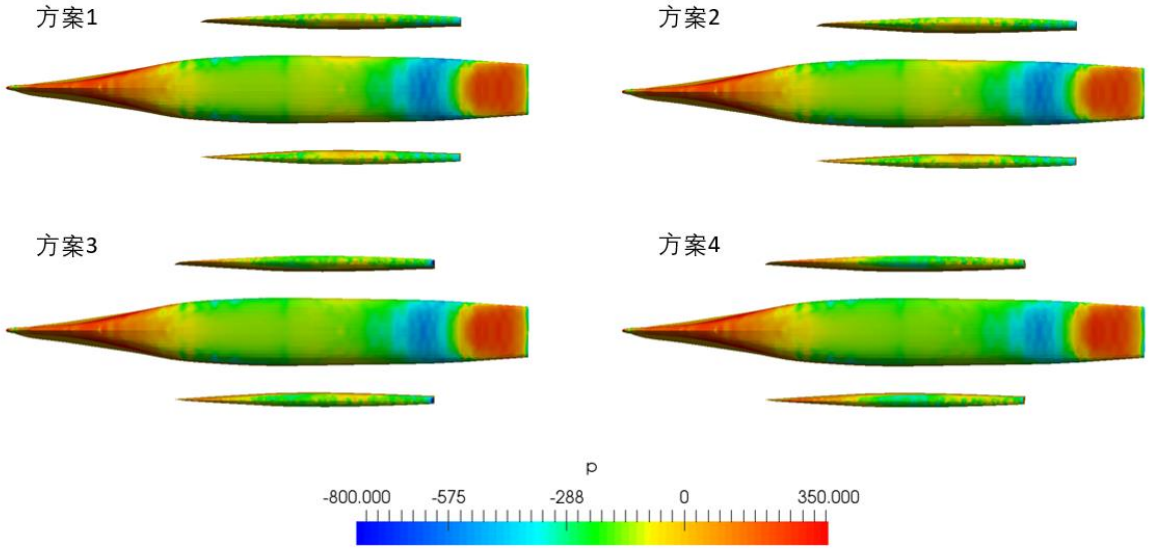


图 3-14 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 3-14 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.30

如图 3-14 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。同样可以看到在四个方案中，三体船的主体部分的船首与船尾都有一个高压区，船尾附近有一个低压区。随着航速的增加，船首的高压区和船尾的高压区和船尾附近的低压区数值上不断增大，这是由于航速的增加，三体船首部对液体的作用力增加，首波的兴波波高增加，兴波

的能量也增加。船尾处的压力变化也是由于兴波产生的能量增加，从而作用在船体上的力增加。同 Fr=0.27 时的一样，随着三体船片体布置从船尾向船首移动，船尾附近的低压区面积在不断减小，但是三体船主体尾部的高压区同样基本没什么变化，这是由于三体船主体尾部的兴波能量要比片体的兴波能量大得多，在主体的正后方很近的位区域内，受到片体尾部兴波的干扰影响不大。

3.4 本章小结

本章研究了在控制三体船模型片体的横向位置不变的情况下，改变片体的纵向位置，数值模拟了三体船在 Fr=0.18、0.27 和 0.30 的三个航速下 4 种模型的静水航行，分析了 4 种模型片体与主体间的兴波干扰以及对阻力的影响。

在 Fr=0.18 时，方案 2 的主片体兴波干扰最为不利，方案 3 的主片体兴波干扰最为有利，这是由于方案 2 的片体布局刚好导致片体尾兴波波高遇到主体尾兴波波高，相反方案 3 中由于航速较低，片体尾部的兴波传播耗散，使其给主体尾部的兴波带来的干扰较低，同时又避免了片体与主体间的兴波的峰峰叠加。

在 Fr=0.27 时，方案 1 的总阻力系数变成了最大，原因为航速增加，兴波的波长增加，使得方案 1 的片体兴波波高与主体兴波波高相遇，而且随着方案 1 片体距离船尾最近，片体兴波干扰的强度也最大。

在 Fr=0.30 时，总阻力系数随着三体船模型片体位置偏离船尾而减小，原因是从方案 1 到方案 4，片体尾部兴波波高逐渐远离主体尾部兴波波高，同时向主体首部兴波波谷靠近，使片体与主体间的兴波干扰逐渐向有利的方向移动，同时片体离船艏越远，片体兴波传播到主体尾波的兴波的耗散更多，两大因素造成了此结果。

三体船片体的纵向位置影响不是一直保持不变的，随着航速的改变，同一个片体位置的兴波干扰可能产生不同的影响，这和航速密切相关，某航速下的片体位置为有利的兴波干扰，可能另一个航速的兴波干扰就较为不利。同时从三个航速的 4 种片体布局的数值模拟中还可以得到，片体离船尾距离越远，相对片体产生的兴波传播到主体尾部兴波的能量耗散就越多，换句话来说，就是片体离三体船尾部越远，也就是离三体船首越近，产生的主片体兴波干扰相对就会越小。

对于三体船的表面压力来说，当航速较低时，由于主片体间的兴波干扰程度较低，三体船片体纵向位置改变对主体表面压力影响较小，随着航速的增加，这个影响的程度会逐渐加深，主要反应在三体船主体尾部附近的低压区，其面积会随着片体纵向位

置布置的远离船尾而减小。而片体表面压力受到三体船主体的兴波干扰影响很大，三体船主体的兴波波长、波高和相位是不变的，片体纵向位置的移动，导致片体在主体整个兴波的位置发生移动，三体船主体兴波的同一个位置给了片体不同位置以同样的压力，这个压力作用的纵向距离相对三体船的主体位置是固定的，在片体兴波和主体兴波相互干扰下得到了作用在片体上的波浪产生的压力。

第四章 片体横向位置对阻力及兴波干扰影响

4.1 引言

本章的数值模拟中控制了三体船片体的纵向位置不变，只改变了片体的横向位置，选取了 4 个不同的片体横向位置，并选取了三个不同航速低速（Fr=0.18）、中速（Fr=0.27）以及高速（Fr=0.30），对应三体船模型航速低速（1.50276m/s）、中速（2.25414m/s）和高速（2.50460m/s）在三个不同航速情况下分析 4 个不同片体位置对三体船主体与片体间的兴波干扰带来的影响，同时得到 4 个片体位置中的有利兴波干扰位置。

4.2 计算设置

模型参数与 2.5.1 节所介绍的相同，只是固定了模型三体船片体的横向位置不变，选取了 4 个不同的片体位置如图 4-1 所示， 其中方案 2 为原始模型位置。以方案 2 为基础，方案 1 片体位置是向船体主体移动 0.2*Y，即 0.195 m；方案 3 片体位置是向船体外侧移动 0.2*Y，即 0.195 m；方案 4 片体位置是向船体外侧移动 0.4*Y，即 0.390 m。

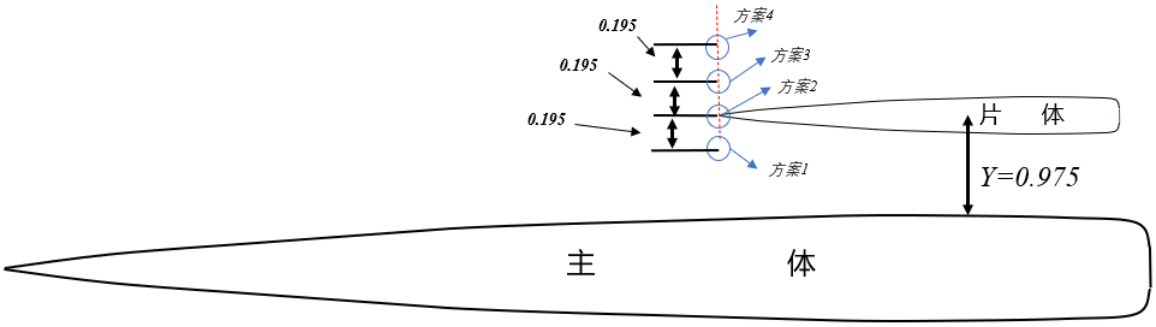


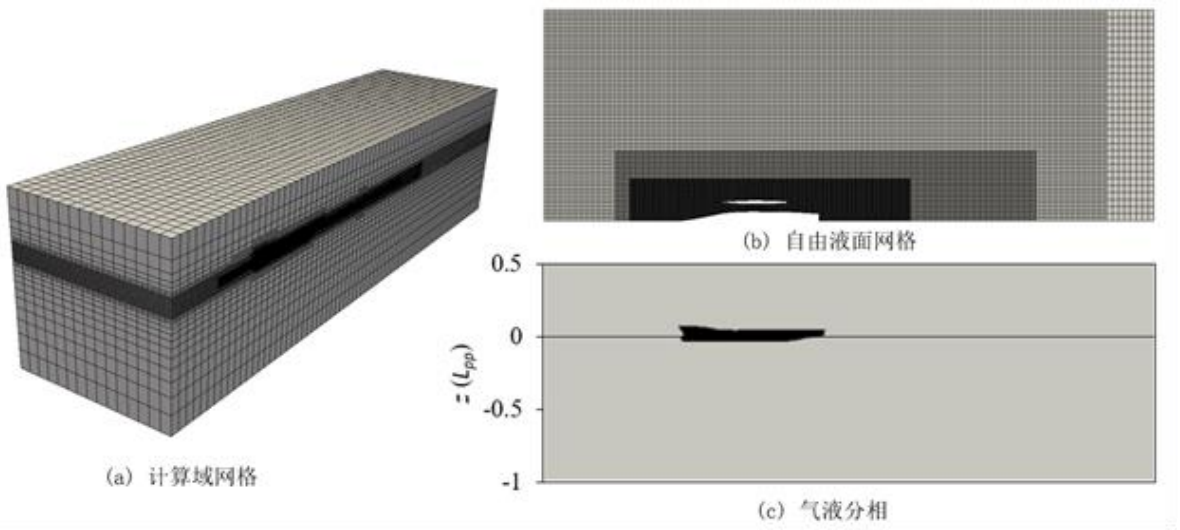
图 4-1 三体船横向 4 种片体布局

Fig. 4-1 Trimaran transverse layout of 4 segments

网格同样用 OpenFOAM 自带的网格软件 snappyHexMesh 生成计算域网格。初始自

由面与船艉的交点处设置为坐标原点，x 轴指向船舯，y 轴指向右舷，z 轴指向正上方。边界入口在 $x=-2L_{pp}$ 处，边界出口在 $x=3L_{pp}$ 处。

因为静水阻力计算的数值模拟具有对称性，因此采用半域进行数值计算，以节约计算资源，减少计算时间。本文采用船固定位置流体为匀速来流来模拟船舶在静水航行的姿态。左右边界和底边界均设置为对称边界。右边界设置在 $y=2L_{pp}$ 处，底边界设置在 $z=-L_{pp}$，上边界设置在 $z=0.5*L_{pp}$ 处。z=0 平面为水气交接面，即自由面，其上方



是空气，下方是水，网格全局计算域如图 4-2（a）所示。

图 4-2 CFD 计算域网格设置

Fig. 4-2 Grid settings of CFD calculation domain

4.3 数值模拟结果及分析

4.3.1 Fr=0.18 时片体横向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.18）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 4-3 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。除了方案 2 的总阻力系数偏高以外，方案 1、3 和 4 的总阻力系数都很接近，随着片体远离三体船主体，总阻力系数逐渐少量降低，可以简单猜测在一定范围内片体横向的布置对三体船主体与片体间的兴波干扰影响不大，对阻力的影响也不大。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

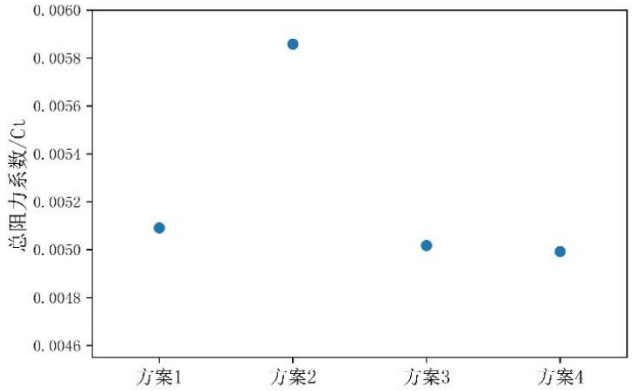


图 4-3 Fr=0.18 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 4-3 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.18

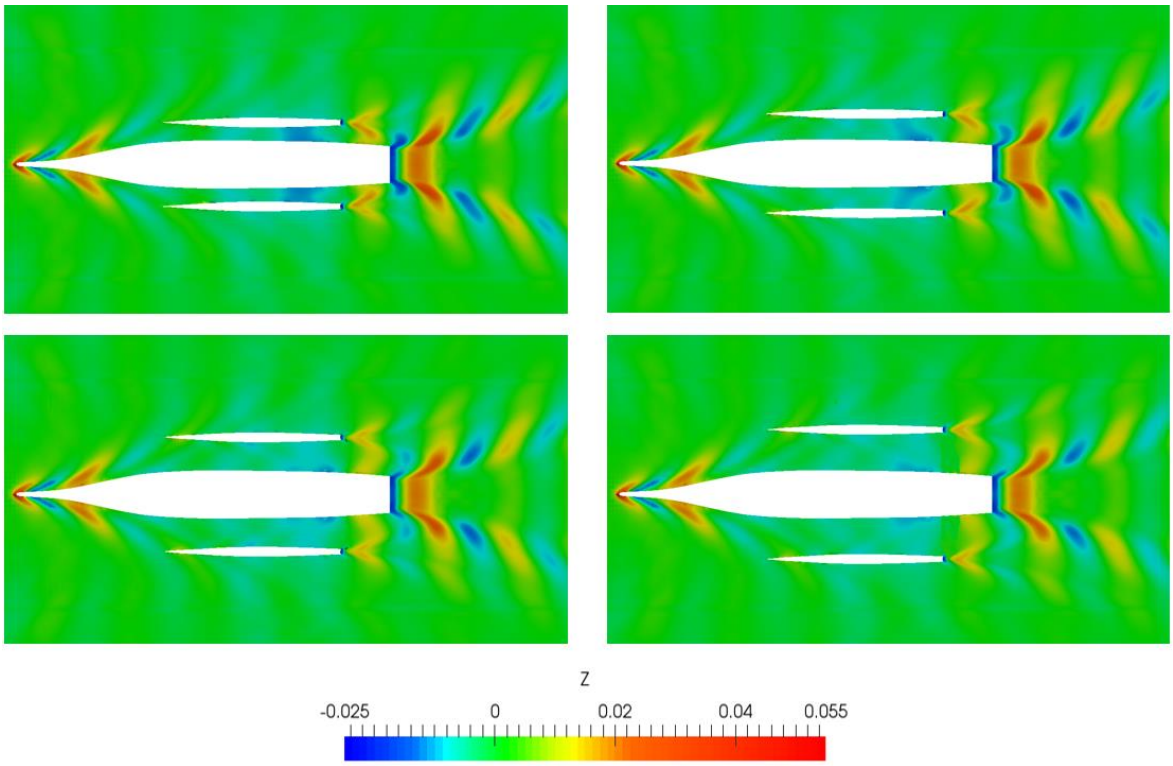


图 4-4 Fr=0.18 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 4-4 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.18

如图 4-4 所示，4 个三体船模型在 Fr=0.18 时的尾部产生了随片体变化的不同自由面流场情况。4 个方案片体尾部产生的尾兴波的波高与主体的尾兴波波高相遇，在 Fr=0.18 时片体与主体产生了不利的干扰，如 3.3.1 节所介绍的，方案 2 在其中有着最不利的干扰。方案 1 中，由于片体最靠近主体，片体尾部产生的兴波起始距离船尾更近，能量的损耗更小，可以从图中看到方案 1 片体尾部的兴波颜色最深，也就是兴波的波高更大，同时意味着产生的兴波阻力越大，但是在其他方案中，片体尾部的兴波波高与方案 1 的兴波波高差别不大。同样，可以明显地看到在方案 1 中主体尾部的兴波颜色更深，意味着主体尾部的兴波波高最大，产生了最大的兴波阻力，有着相对最不利的兴波干扰。

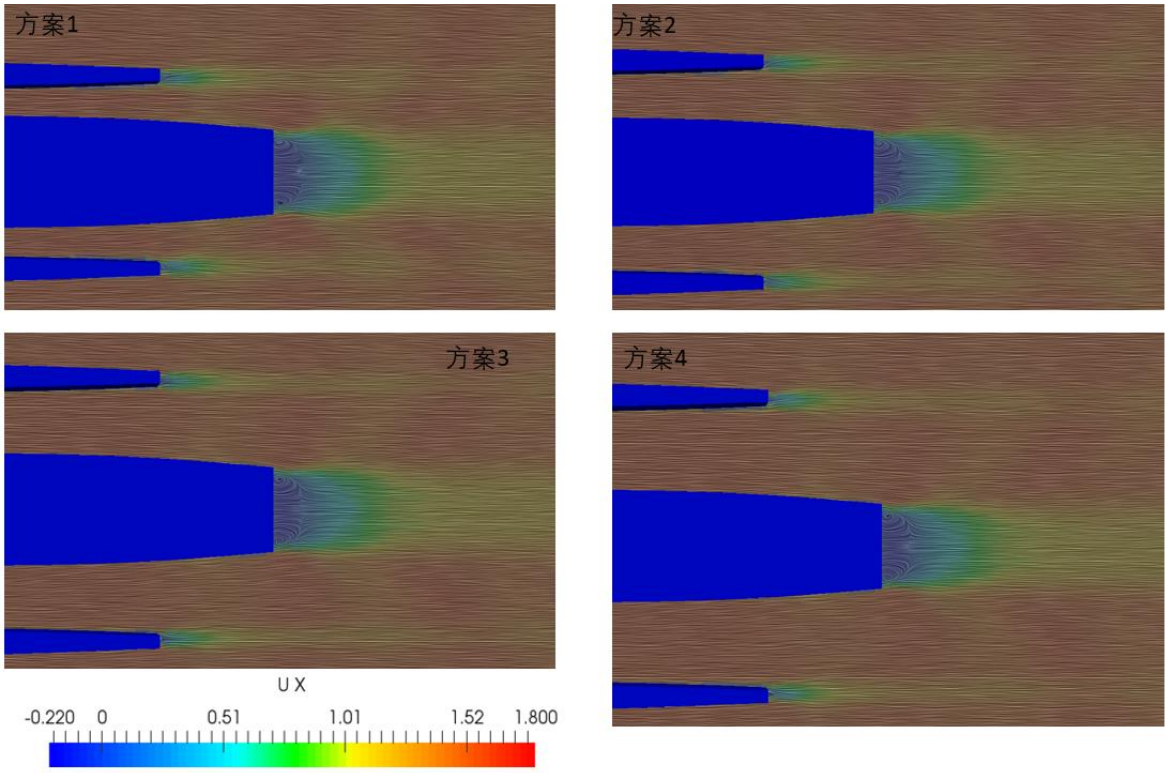


图 4-5 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 4-5 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.18

根据粘流的数值模拟结果，本文还得到了 4 中片体横向布置方案的三体船船尾流线情况（如图 4-5）。图中可以明显地看到在方案 1 中主体尾部回流区的面积相对最大，整体的浅色低速区也最大，对应着最大的总阻力系数，与数值模拟得到的计算数值结果匹配，随着片体恒信昂距离逐渐远离主体，从方案 1 到方案 2 到方案 3 到方案

4，片体主体的尾流区回流部分面积逐渐减小，尾部整体低速区宽度的逐渐变窄，同样也可以得到在 Fr=0.18 时，保持片体的纵向位置不变，片体横向位置越靠近主体，主片体之间的兴波干扰越严重；反之，片体的横向位置越远离主体，主片体间的兴波干扰越轻。

同时，我们从图 4-5 中可以看到，不论是方案 1 还是方案 2 或者方案 3、4，由于航速不高，使片体尾部的兴波流线产生了少量朝船体外部的偏移，在 4 种方案中，这种偏移现象程度相似，表明了三体船主体的兴波对片体的尾兴波干扰很接近，也表明了保持片体的纵向位置不变，改变片体横向位置对三体船主体与片体间的兴波干扰影响较小。

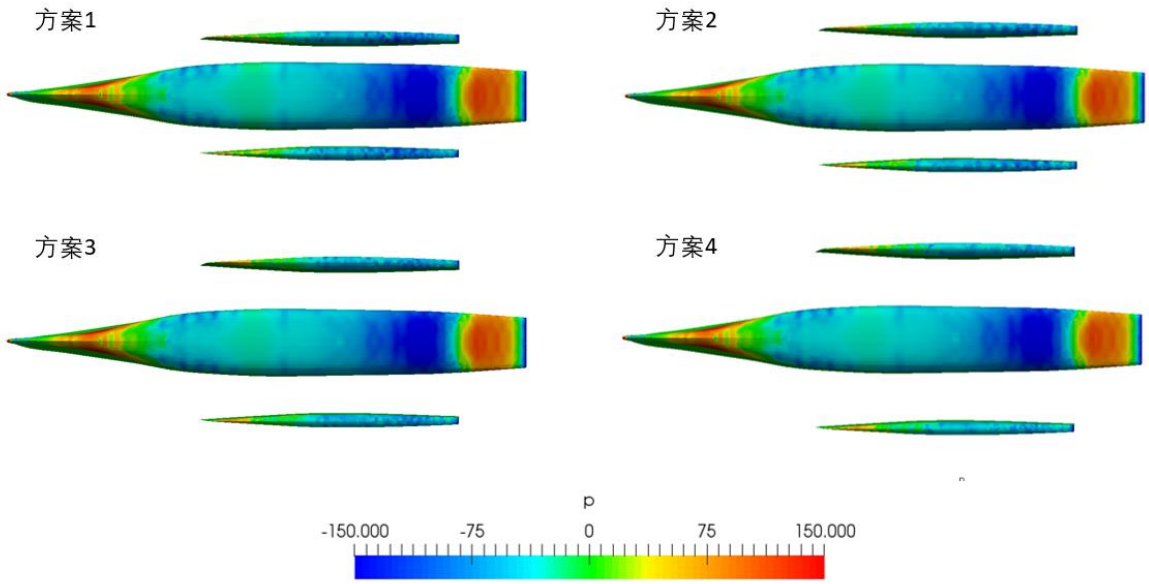


图 4-6 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 4-6 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.18

如图 4-6 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。同样和上一章得到的结论一样，在航速较低的时候，可以看到在 4 中方案中，三体船主体的表面压力基本没有随片体的横向位置发生变化而变化。同样变化主要集中在片体的表面压力上，可以看到，随着方案 1 到方案 4，三体船片体的横向位置逐渐远离三体船的主体，片体的表面低压区的面积随着距离增大而减小，这是因为随着三体船片体远离主体，片体受到主体兴波的干扰减弱，主体产生的兴波传播到片体时能量减弱，产生的力减弱。

4.3.2 Fr=0.27 时片体横向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.27）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 4-7 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。随着航速的增加，Fr 从 0.18 上升到 0.27，可以看到 4 中片体布局方案的总阻力系数十分接近，都在 0.0046 和 0.0047 之间，方案 4 与方案 2 的总阻力系数相对方案 1 与方案 3 略高一点点，也可能是由于误差的存在，导致计算的数值结果产生了一些波动。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

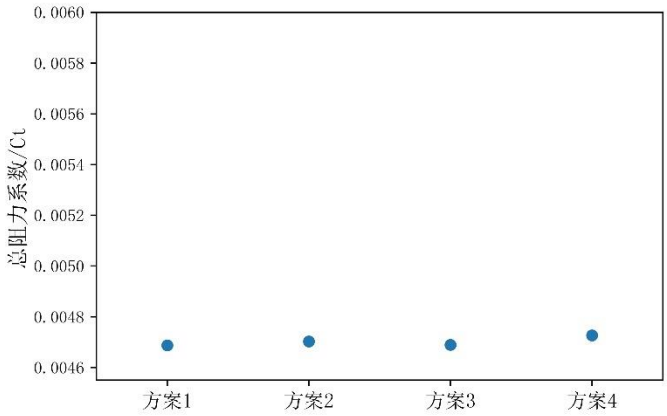


图 4-7 Fr=0.27 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 4-7 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.27

如图 4-8 所示，4 个三体船模型产生了明显不同的兴波干扰自由面状态图，4 个方案产生了 4 个不同的兴波形态，由于片体的纵向位置没变，片体产生的的为兴波波峰起始点纵向位置相同，4 中布局方案的片体尾兴波波高都与主体的兴波波高相遇，产生了同等级的不利主片体兴波干扰。但是同图中可以看到 4 种方案的兴波干扰形态都不一样。在方案 1 中，由于片体的横向布置靠近了主体，片体尾部的兴波更靠近主体的兴波，在更靠近船尾的地方与主体的兴波汇合，从形状和颜色来看在尾部的整体兴波更完整，而随着看向方案 2、3 和 4，片体的横向位置逐渐远离三体船主体，片体产生的尾部兴波与横向更远离三体船主体的位置与主体兴波相遇，从形状和颜色上看，得到了许多的颜色分块。

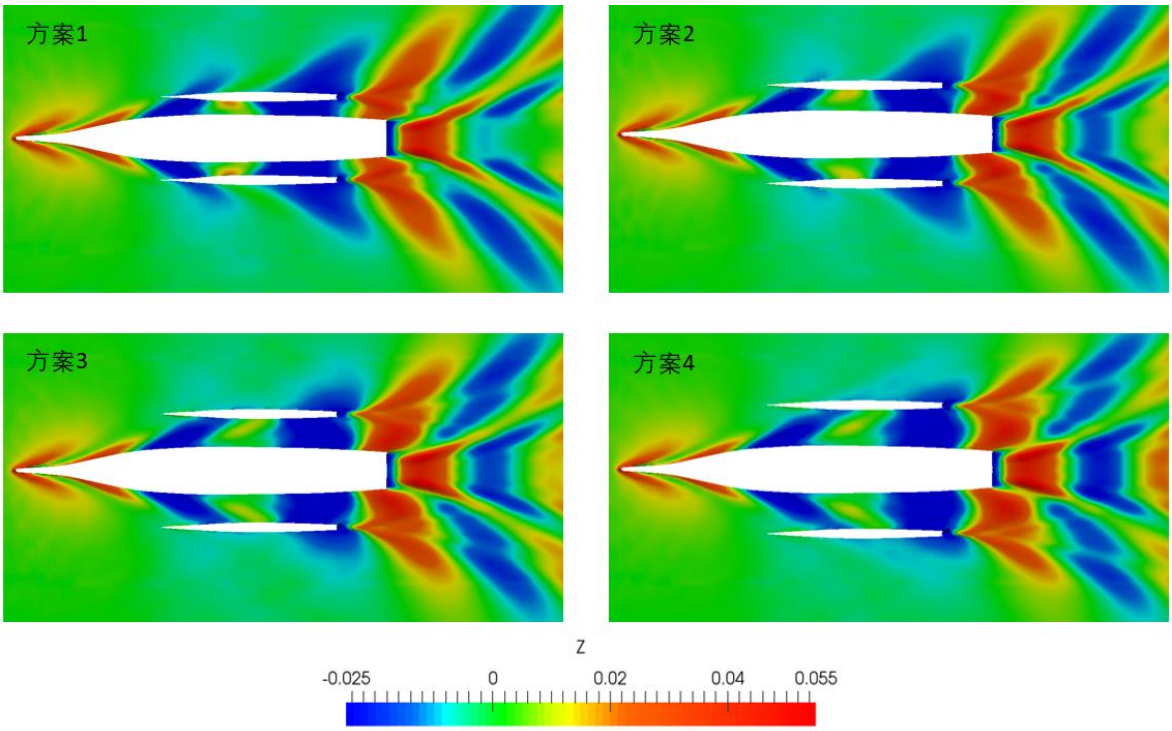


图 4-8 Fr=0.27 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 4-8 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.27

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图 4-9 所示）。可以看到在 4 种方案的三体船主体尾部的回流区，低速区都很相似，都是呈现鸡尾流的样子，同时又与计算得到的总阻力系数的相似得到呼应。仔细观察可以发现，三体船片体的横向布置越远离三体船的主体，鸡尾流的宽度就越小，但是减小的程度非常小，这同样是由于三体船片体的横向布置对其主片体兴波干扰的影响不大。

主要的区别就在于片体尾部的流线情况，由于方案 1 中片体的横向位置靠近三体船主体，片体尾部的流线明显向三体船主体外侧偏斜，同时在方案 2、3 和 4 中也有同样的偏斜情况，但是由于方案 1 的横向位置最接近主体，偏斜的程度相较于其他三个方案更加明显，而且随着片体的横向位置远离三体船主体，片体为部兴波的流线低速面积区会减小，这也是由于片体横向距离离三体船主体越近，片体受到主体的兴波干扰更严重。

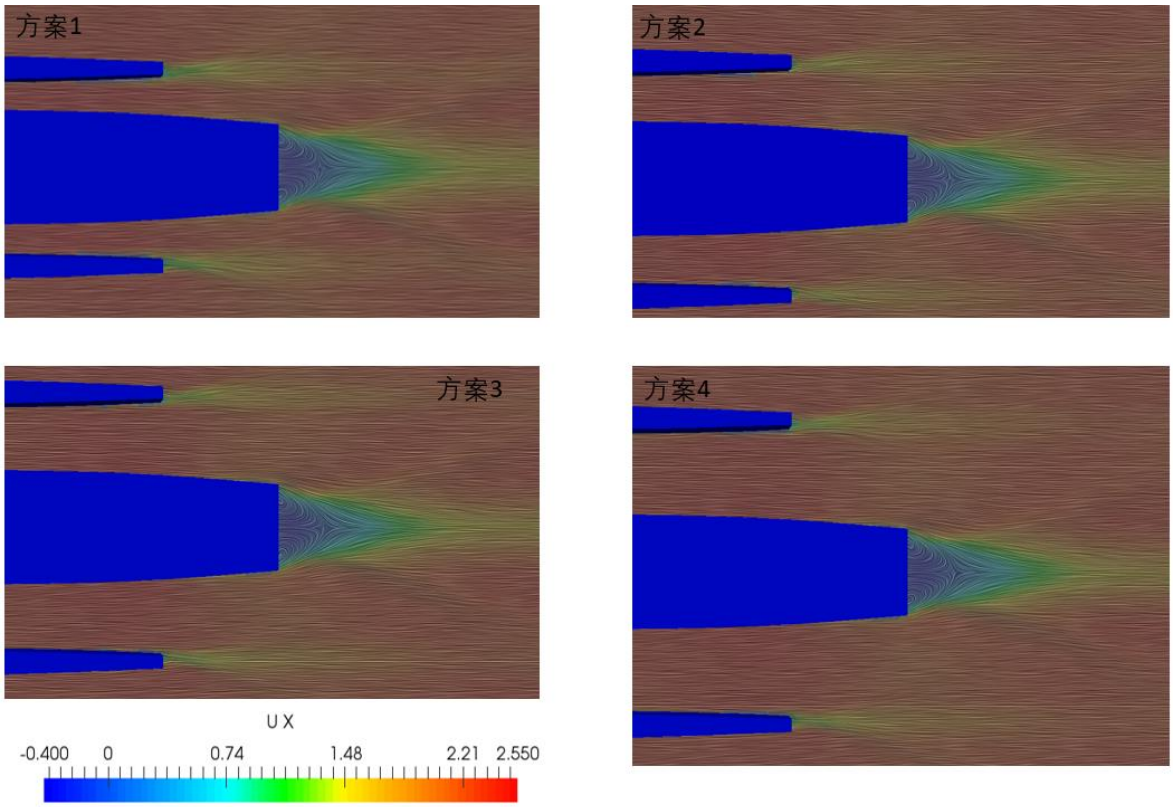


图 4-9 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 4-9 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.27

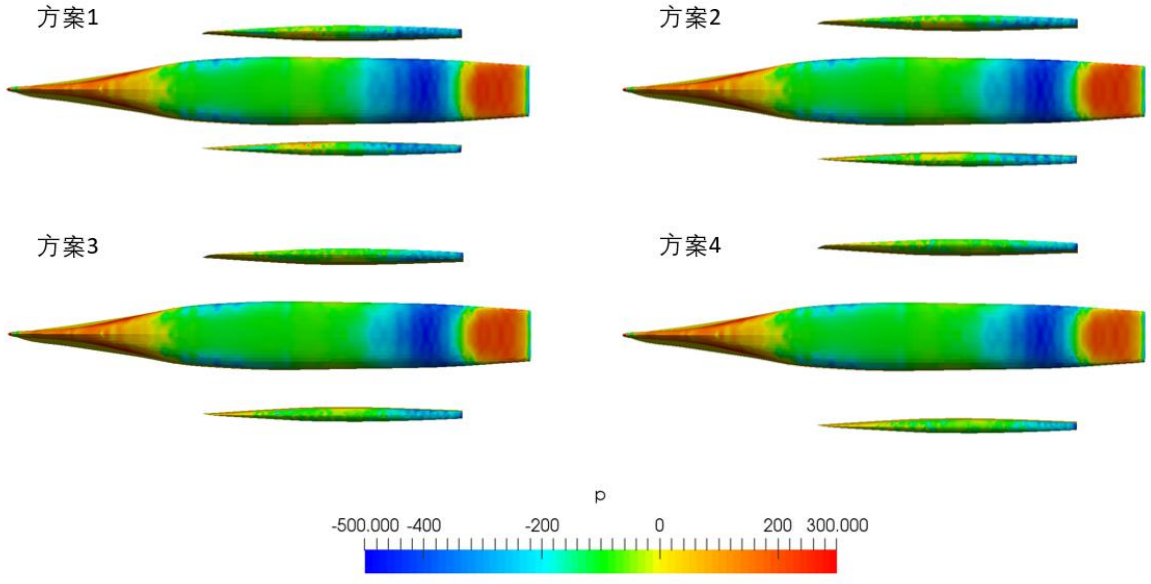


图 4-10 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 4-10 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.27

如图 4-10 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。可以看到方案 1 的三体船主体靠近尾部的低压区要比其他三个方案面积大一些，方案 4 的三体船主体靠近尾部的低压区要比其他三个方案面积小一些，方案 2 和 3 的很接近，但是尾部低压区的面积还是随三体船片体的横向布置远离主体而减小，由于航速的增加，同纵向位置变化对启动影响类似，片体产生的兴波有足够的力来影响主体表面的压力。三体船主体的兴波对片体表面压力的影响很 Fr=0.18 的时候相似，但是随着航速的增加，三体船主片体间的兴波干扰加强，相互作用得到的兴波叠加产生的波作用在片体表面，形成的表面压力分布没有较低航速形成的那么规则。

4.3.3 Fr=0.30 时片体横向位置对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体布局方案，固定航速不变（Fr=0.30）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 4-11 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。随着航速的增加，Fr 从 0.18 上升到 0.27 再上升至 0.30，可以看到 4 中片体布局方案的总阻力系数依然十分接近，都在 0.0049 和 0.0050 之间，方案 3 与方案 4 的总阻力系数相对方案 1 与方案 2 略高一点点，也可能是由于误差的存在，导致计算的数值结果产生了一些波动。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

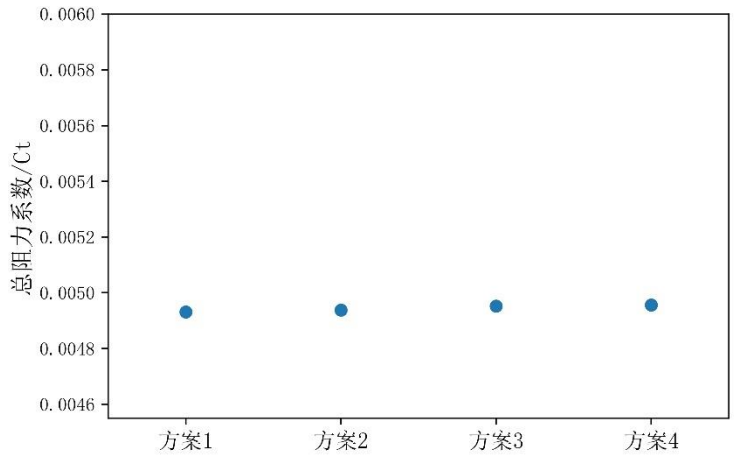


图 4-11 Fr=0.30 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 4-11 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.30

如图 4-12 所示，4 个三体船模型产生了明显不同的兴波干扰自由面状态图，4 个方案产生了 4 个不同的兴波形态，由于片体的纵向位置没变，片体产生的的为兴波波峰起始点纵向位置相同，4 中布局方案的片体尾兴波波高都与主体的兴波波高相遇，产生了同等级的不利主片体兴波干扰。但是同图中可以看到 4 种方案的兴波干扰形态都不一样。在方案 1 中，由于片体的横向布置靠近了主体，片体尾部的兴波更靠近主体的兴波，在更靠近船尾的地方与主体的兴波汇合，从形状和颜色来看在尾部的整体兴波更完整，而随着看向方案 2、3 和 4，片体的横向位置逐渐远离三体船主体，片体产生的尾部兴波与横向更远离三体船主体的位置与主体兴波相遇，从形状和颜色上看，得到了许多的颜色分块。

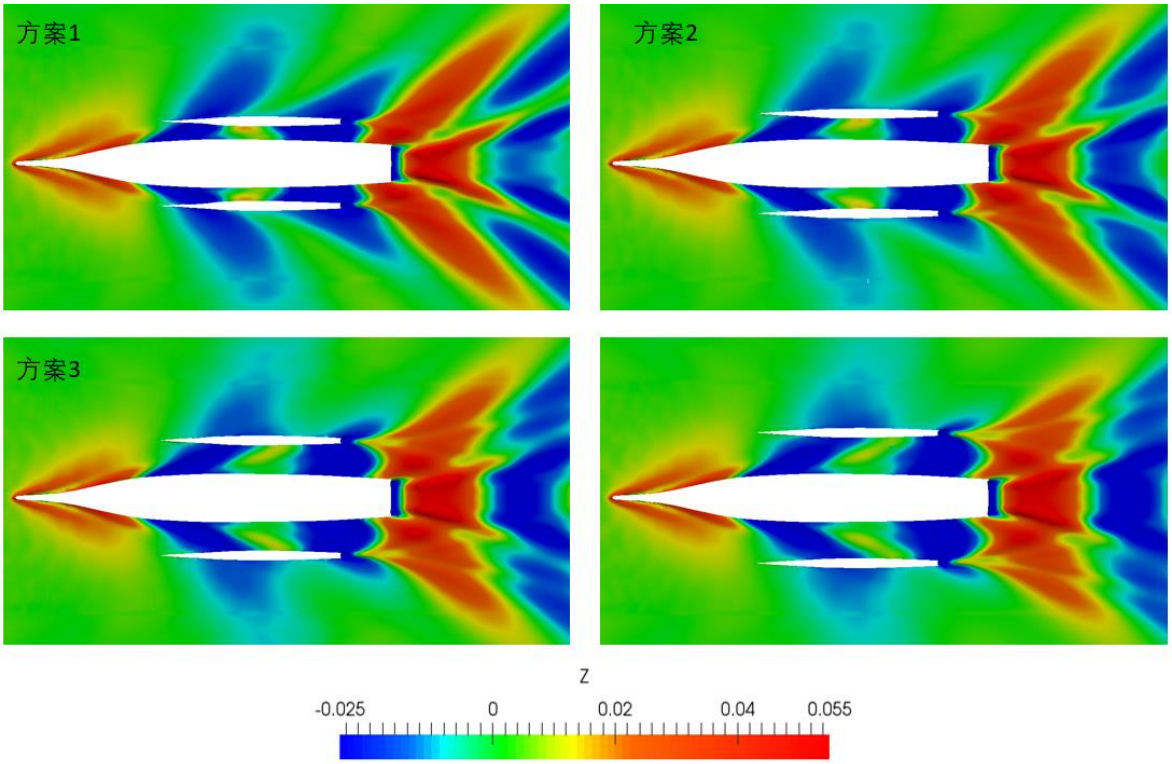


图 4-12 Fr=0.30 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 4-12 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.30

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图 4-13 所示）。可以看到在 4 种方案的三体船主体尾部的回流区，低速区都很相似，都是呈现鸡尾流的样子，同时又与计算得到的总阻力系数的相似得到呼应。仔细观察可

以发现，三体船片体的横向布置越远离三体船的主体，鸡尾流的宽度就越大，但是增大的程度非常小，这同样是由于三体船片体的横向布置对其主片体兴波干扰的影响不大。

如图主要的区别就在于片体尾部的流线情况，由于方案 1 中片体的横向位置靠近三体船主体，片体尾部的流线明显向三体船主体外侧偏斜，同时在方案 2、3 和 4 中也有同样的偏斜情况，但是由于方案 1 的横向位置最接近主体，偏斜的程度相较于其他三个方案更加明显，而且随着片体的横向位置远离三体船主体，片体尾部兴波的流线低速面积区会减小，这也是由于片体横向位置离三体船主体越近，片体受到主体的兴波干扰更严重。

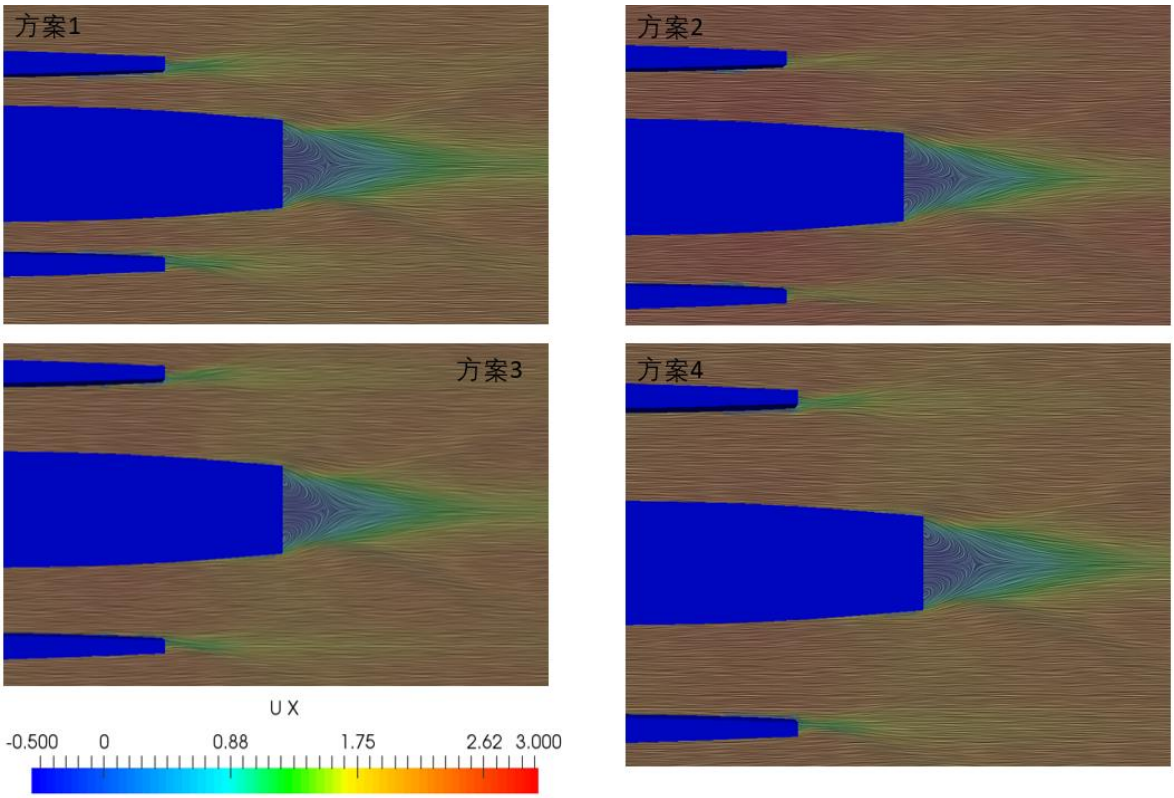


图 4-13 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 4-13 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.30

如图 4-14 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。Fr 从 0.18 上升到 0.27 再到 0.30，三体船主体与片体的兴波随航速增加而加强，相互干扰的程度加深，从图中可以看到，随着三体船片体的位置布置远离主体，三体船主体尾部的低压区逐渐减小。之前从图 4-12 的 4 种横向片体布置的方案自由面的兴波图分析可以得到，片

体横向距离增大的时候，片体尾部的兴波传播到三体船主体的位置随之向船艏移动，给了主体尾部低压区一个片体兴波波高的正压力，是主体尾部的低压区面积减少。

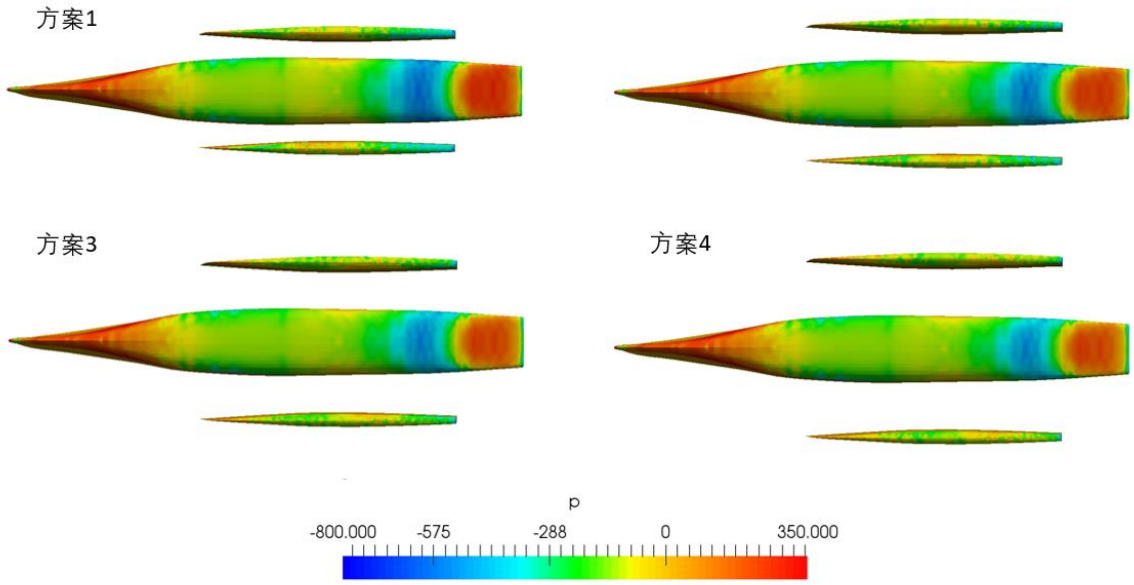


图 4-14 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 4-14 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.30

4.4 本章小结

本章研究了在控制三体船片体的纵向位置不变的情况下，仅改变片体的横向位置布局，数值模拟了三体船在 Fr=0.18、0.27 和 0.30 的三个航速下 4 种模型的静水航行，分析了 4 种模型片体与主体间的兴波干扰以及对阻力的影响。

Fr=0.18 时，方案 2 的总阻力系数在 4 个方案中有些突出，由上一章总结可知方案 2 在片体纵向布置中的兴波干扰确实是最为不利的，但是从 4.3.1 节的自由面图和三体船尾部流线图，和分析推断来看，方案 2 计算得到的总阻力系数与实际存在误差。

Fr=0.27 时，数值计算得到的 4 种片体布局的三体船模型总阻力系数很接近，自由面得到的兴波图总体兴波高度与面积类似，就是由于片体横向位置不同，使片体兴波的起始点横向位置不同，造成兴波干扰生成的波浪形状不同。

Fr=0.30 时，得到的结论与 Fr=0.27 时的相似，数值计算得到的 4 种片体布局的三体船模型总阻力系数也很接近，自由面得到的兴波图总体兴波高度与面积也类似，就是由于片体横向位置不同，使片体兴波的起始点横向位置不同，造成兴波干扰生成

的波浪形状不同。

根据上面的分析总结，片体的横向位置对主片体兴波干扰和阻力的影响较片体的纵向位置对其的的影响要小很多。

对于三体船的表面压力来看，当航速较低的时候，三体船片体横向布置对其的影响和片体纵向布置的影响类似，由于航速低不论是三体船主体还是片体的兴波都比较小，三体船主体表面的压力的决定性因素就是主体自身在流体中运动产生的与流体相互作用的力。随着航速的升高，相同片体布置方案的三体船主体与片体间的兴波相互影响的程度加深，兴波干扰程度加深，同片体纵向位置改变对其的影响类似，片体的横向布置改变的时候，片体尾部的兴波传播到三体船主体尾部的位置也发生变化，片体离主体越远，片体的尾部兴波传播到主体的位置越远离船尾，使主体尾部低压区的面积减小，航速越高这一减小程度越大。

第 5 章 片体长度对阻力及兴波干扰影响

5.1 引言

本章的数值模拟中控制了三体船片体的横向位置不变，改变了片体的长度，选取了 4 个不同的片体长度，并选取了三个不同航速低速（Fr=0.18）、中速（Fr=0.27）以及高速（Fr=0.30），对应三体船模型航速低速（1.50276m/s）、中速（2.25414m/s）和高速（2.50460m/s）在三个不同航速情况下分析 4 个不同片体长度对三体船主体与片体间的兴波干扰带来的影响。

5.2 计算设置

模型参数与 2.5.1 节所介绍的相同，只是固定了模型三体船片体的横向位置不变，选取了 4 个不同的片体长度如图 5-1 所示，其中方案 2 为原始模型位置。以方案 2 为基础，方案 1 片体设置是片体长度加长了 0.02*L_{PP}，即 0.142 m；方案 3 片体设置是片体长度缩短了 0.02*L_{PP}，即 0.142 m；方案 4 片体设置是片体长度缩短了 0.04*L_{PP}，即 0.284 m。

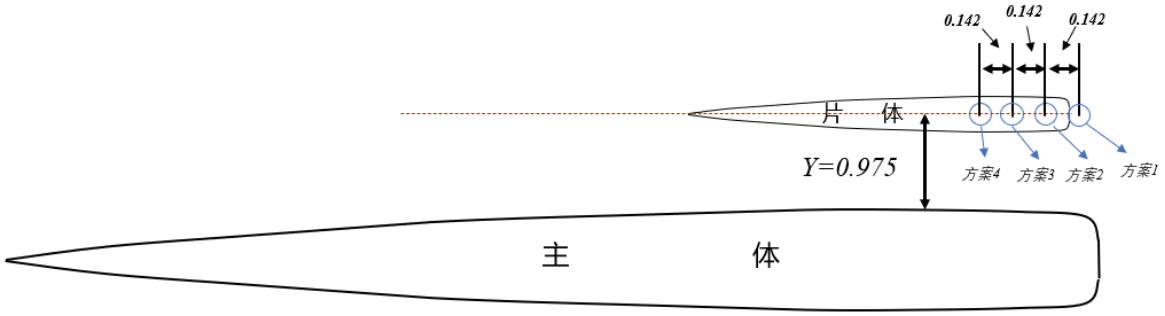


图 4-1 三体船横向 4 种片体布局

Fig. 4-1 Trimaran transverse layout of 4 segments

网格同样用 OpenFOAM 自带的网格软件 snappyHexMesh 生成计算域网格。初始自由面与船艉的交点处设置为坐标原点，x 轴指向船舯，y 轴指向右舷，z 轴指向正上

方。边界入口在 x=-2L_{pp}处，边界出口在 x=3L_{pp}处。

因为静水阻力计算的数值模拟具有对称性，因此采用半域进行数值计算，以节约计算资源，减少计算时间。本文采用船固定位置流体为匀速来流来模拟船舶在静水航行的姿态。左右边界和底边界均设置为对称边界。右边界设置在 y=2L_{pp}处，底边界设置在 z=-L_{pp}，上边界设置在 z=0.5*L_{pp}处。z=0 平面为水气交接面，即自由面，其上方是空气，下方是水，网格全局计算域如图 5-2（a）所示。

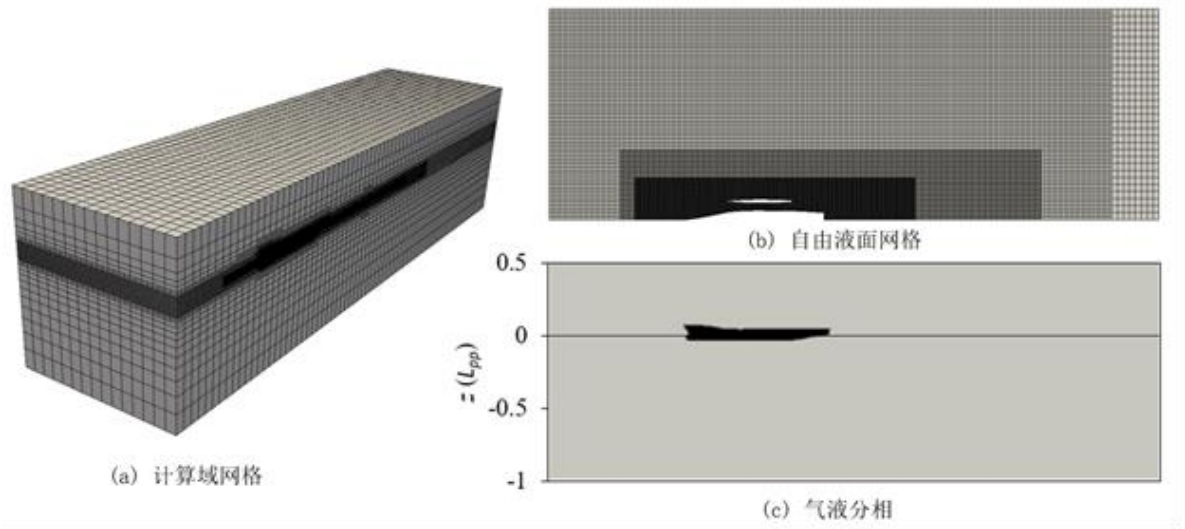


图 5-2 CFD 计算域网格设置

Fig. 5-2 Grid settings of CFD calculation domain

5.3 数值模拟结果及分析

5.3.1 Fr=0.18 时片体长度对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体长度方案，固定横向位置和纵向位置以及航速不变（Fr=0.18）使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 5-3 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。除了方案 2 的总阻力系数偏高以外，方案 1、3 和 4 的总阻力系数呈上升趋势，随着片体长度减小，总阻力系数逐渐少量升高。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

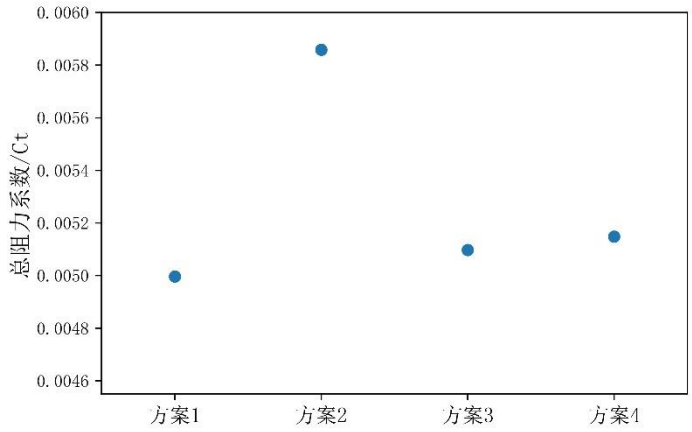


图 5-3 Fr=0.18 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 5-3 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.18

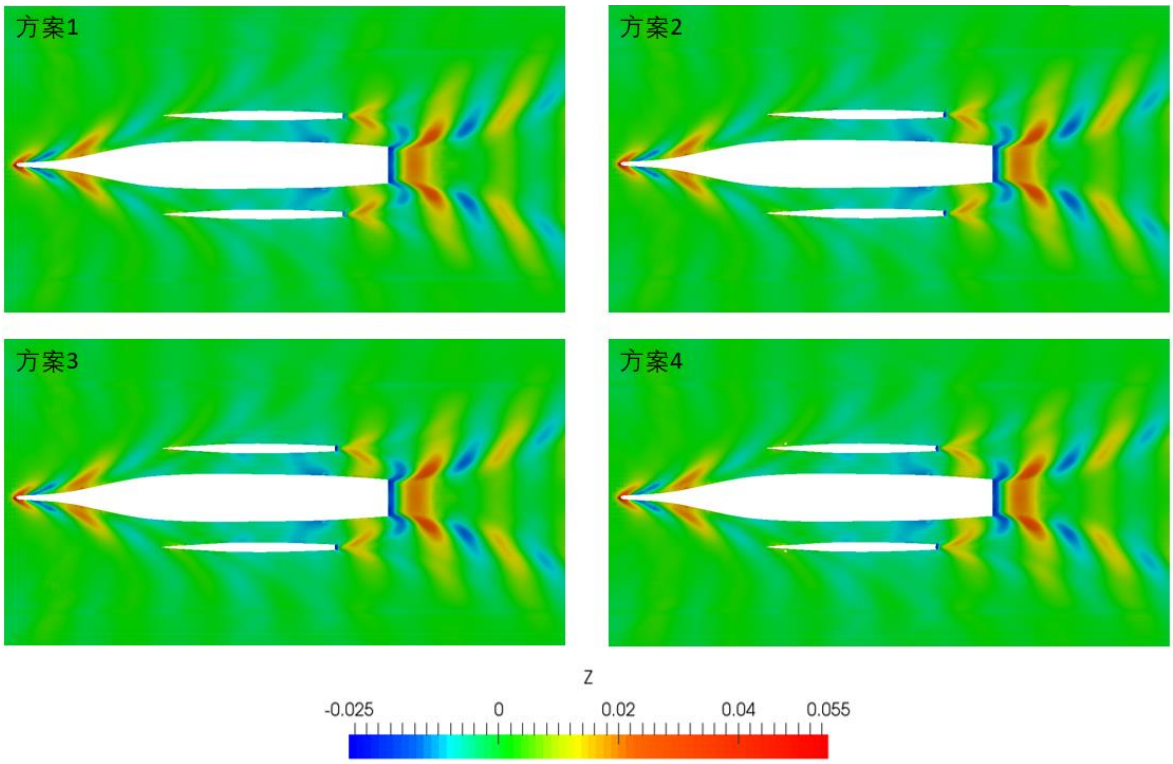


图 5-4 Fr=0.18 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 5-4 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.18

如图 5-4 所示，4 个三体船模型产生了明显不同的兴波干扰自由面状态图。可以看到方案 2 的波浪颜色比其他三个颜色更深一点，表示出方案 2 有着比其余三种方案更大的兴波波高，同时拥有最大的兴波阻力，此时片体尾部产生的兴波波高与主体的兴波波高相遇，导致了不利的兴波干扰，这与计算得到的总阻力系数最大的方案就是方案 2 符合。在方案 1、3 和 4 中，数值计算得到的总阻力系数一次增加，可以从图中看见从方案 1 到方案 3 到方案 4，自由面的波的颜色加深，意味着兴波高度的增加，也意味着有更大的兴波阻力。

由于片体的只改变长度，没有改变片体的横向位置，近似于改变了片体的纵向位置，同时改变了片体的排水体积和三体船整体的排水体积。在方案 1、3 和 4 中虽然片体长度减少了，三体船的整体排水体积减少了，湿表面积也减小了，粘性阻力减小，但是总阻力系数缺增大了，这里可以推断出在此航速下，减小片体的长度造成的兴波干扰会往不利的方向发展。

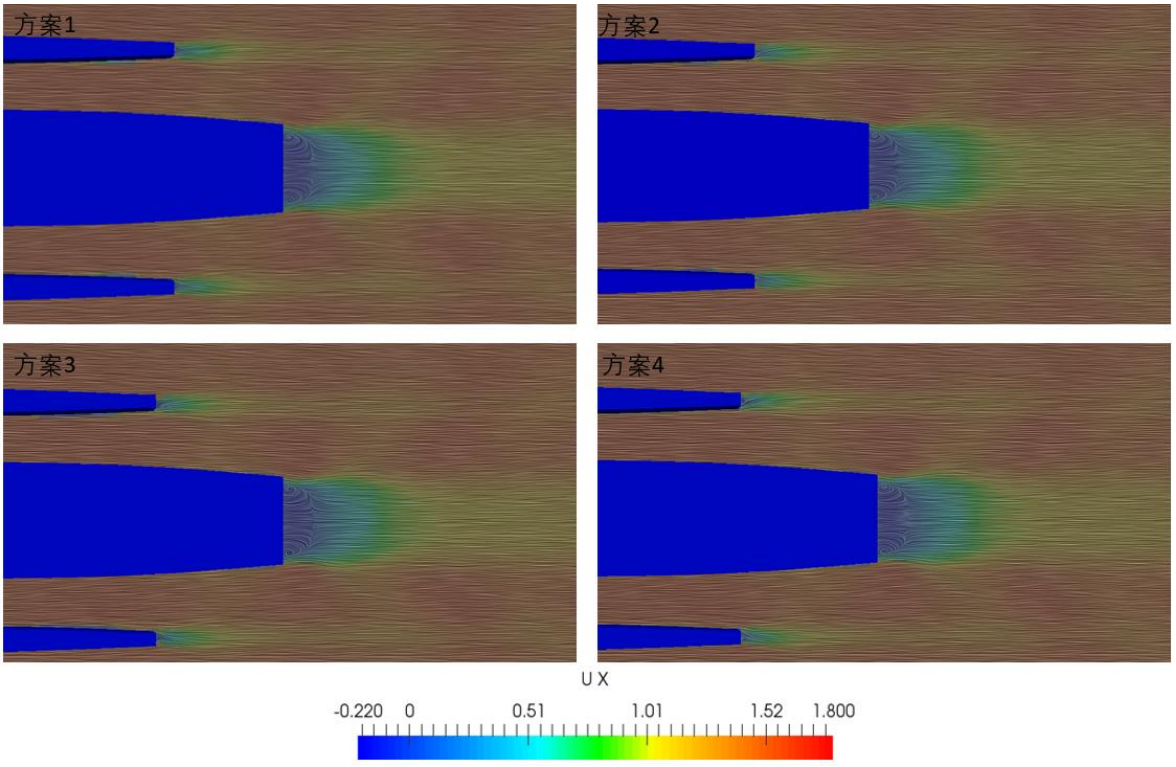


图 5-5 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 5-5 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.18

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图

5-5 所示）。图中方案 2 明显有着面积最大的主体尾流回流区和低速区，其次就是方案 4，回流区较方案 2 面积要小，在然后就是方案 3 和方案 1，这两个方案的回流区和低速区逐渐缩小。4 个方案中片体的尾部兴波流线很接近，也没什么流线是偏斜，这是由于航速较低，主体产生的兴波波高较小，对片体兴波的干扰较小。

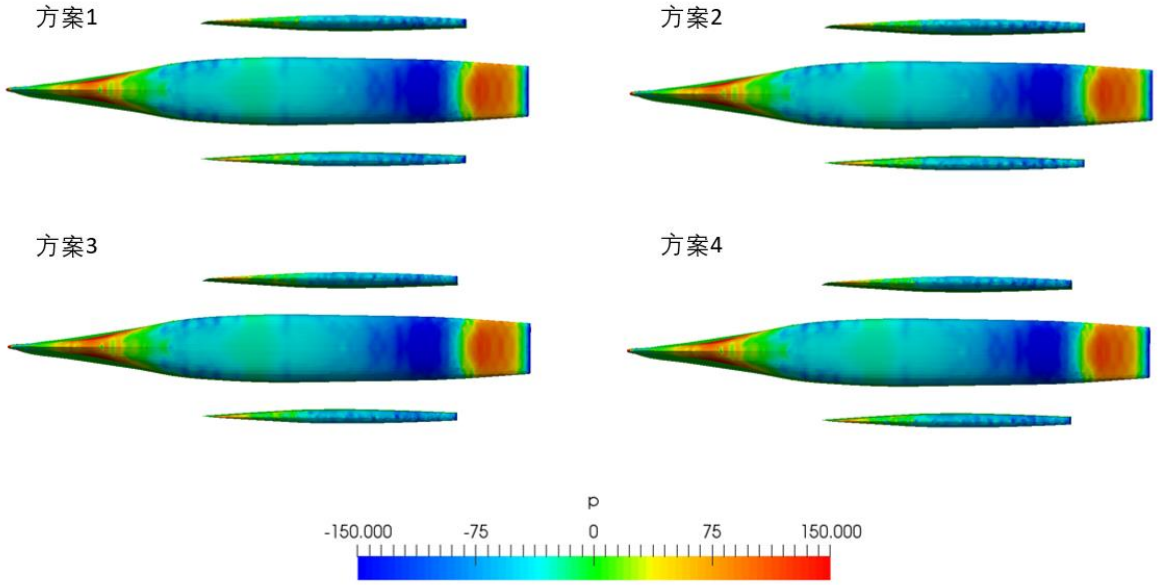


图 5-6 Fr=0.18 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 5-6 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.18

如图 5-6 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。同样和前两章得到的结论一样，在航速较低的时候，可以看到在 4 中方案中，三体船主体的表面压力基本没有随片体的长度发生变化而变化。由于航速较低，片体产生的兴波作用在三体船主体表面的影响很小，主体表面压力的主要影响因素还是主体自身与主体行驶与兴波产生的相互作用力

5.3.2 Fr=0.27 时片体长度对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体长度方案，固定片体的横向位置和纵向位置以及航速不变（Fr=0.27），使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 5-7 可以看到 4 种长度布局的三体船方案的总阻力系数依次减小，同时 4 个方案的总阻力系数值也比较接近。随着航速的增加，粘性阻力的占比下降，兴波阻力的占比上

升，之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

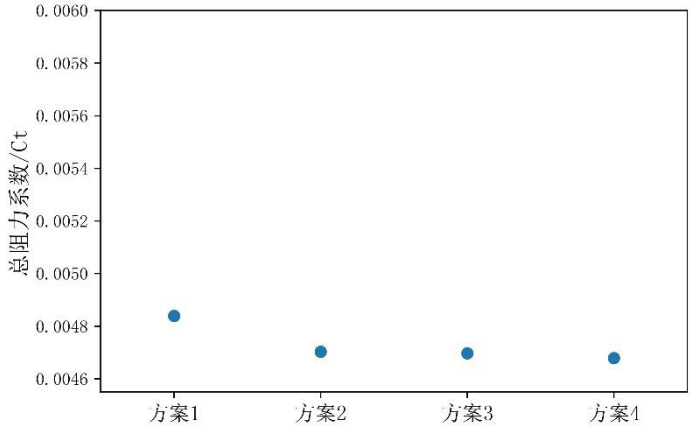


图 5-7 Fr=0.27 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 5-7 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.27

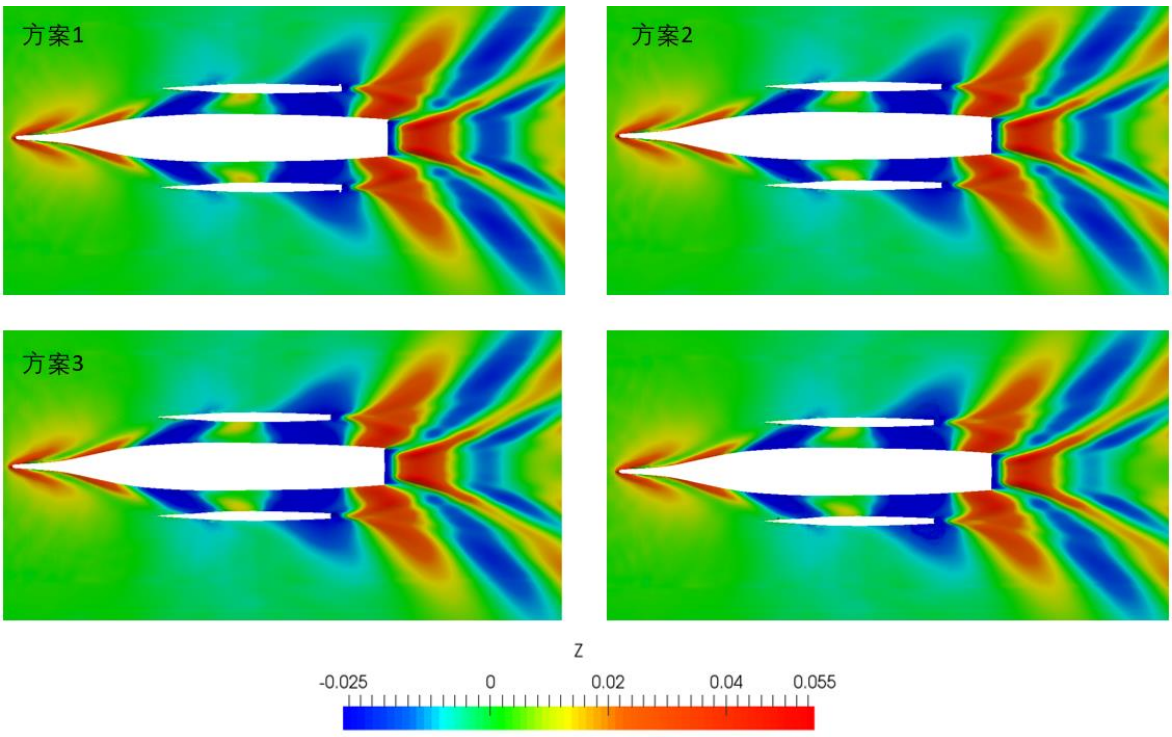


图 5-8 Fr=0.27 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 5-8 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.27

航速从 Fr=0.18 上升到 Fr=0.27，保持片体横向位置不变，改变片体长度的 5%得到的结果很接近，片体 5%的排水体积和湿表面积对于整个三体船来说占比很小，所以在改变片体长度较小的时候，改变片体的长度相当于变相改变了片体的纵向位置，这里近似分析片体的纵向位置对三体船主片体间兴波干扰和阻力影响。

如图 5-8 所示，4 种方案产生的自由面兴波图很相似，但是还是有细微的差别，方案 1 由于片体的长度最长，片体的尾部更靠近三体船主体尾部，而在此航速下，可以看到图中方案 1 的片体尾部兴波波高靠近与三体船主体的兴波波高，此时产生了较为不利的兴波干扰，随着片体的长度减小，从方案 2 到方案 3 到方案 4，片体的尾部的纵向位置逐渐远离三体船主体尾部，从图中可以看到，片体尾部的兴波波高逐渐远离三体船主体兴波的波高一些，使得主体与片体间的兴波干扰朝有利的方向发展，同时总阻力也逐渐减小，这也符合数值计算得到的总阻力系数结果。

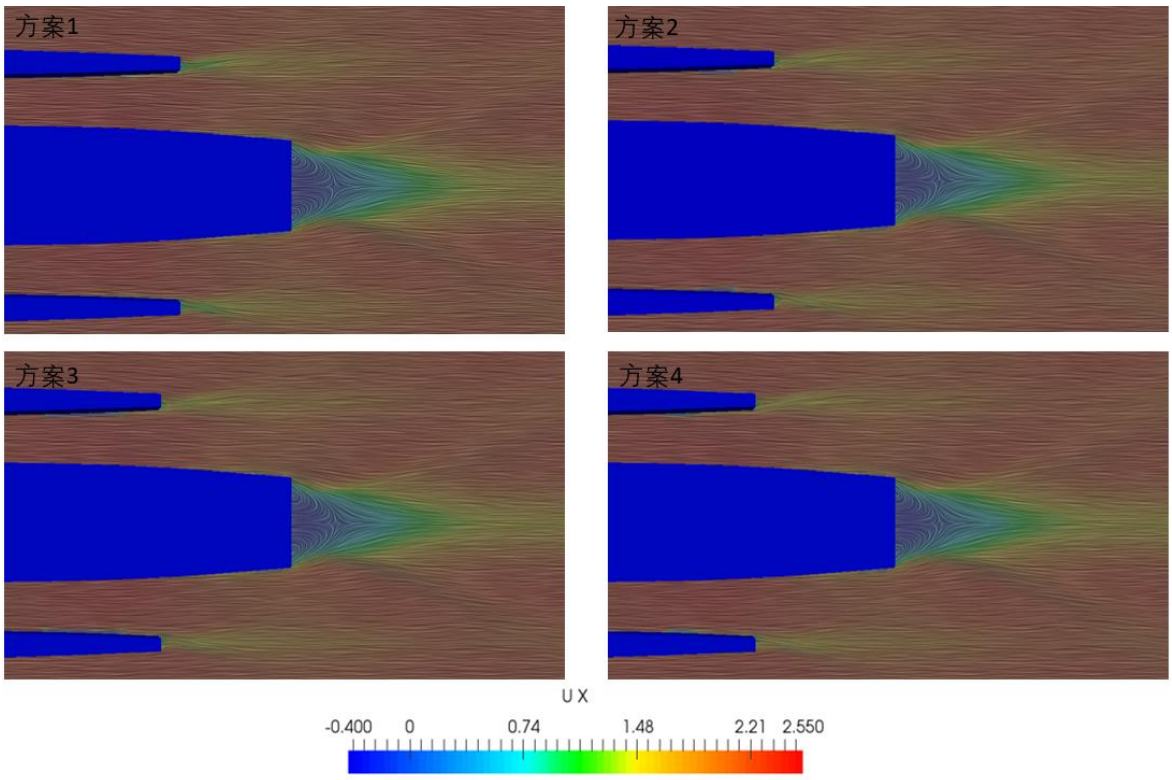


图 5-9 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 5-9 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.27

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图 5-9 所示）。4 种方案的可以看到在 4 种方案的三体船主体尾部的回流区，低速区都很

相似，都是呈现鸡尾流的样子，同时又与计算得到的总阻力系数的相似得到呼应。

主要的区别就在于片体尾部的流线情况，由于方案 1 中片体尾部靠近三体船主体尾部，片体尾部的流线明显向三体船主体外侧偏斜，同时在方案 2、3 和 4 中也有同样的偏斜情况，但是由于方案 1 的片体尾部最接近三体船主体尾部，偏斜的程度相较于其他三个方案更加明显，而且随着片体长度的减小，片体的尾部逐渐远离三体船主体的尾部，片体尾部兴波的流线低速面积区会减小，偏斜程度也减小，这与之前的分析相呼应，主体与片体间的兴波干扰朝有利的方向发展，片体尾部流线受到主体的兴波干扰降低。

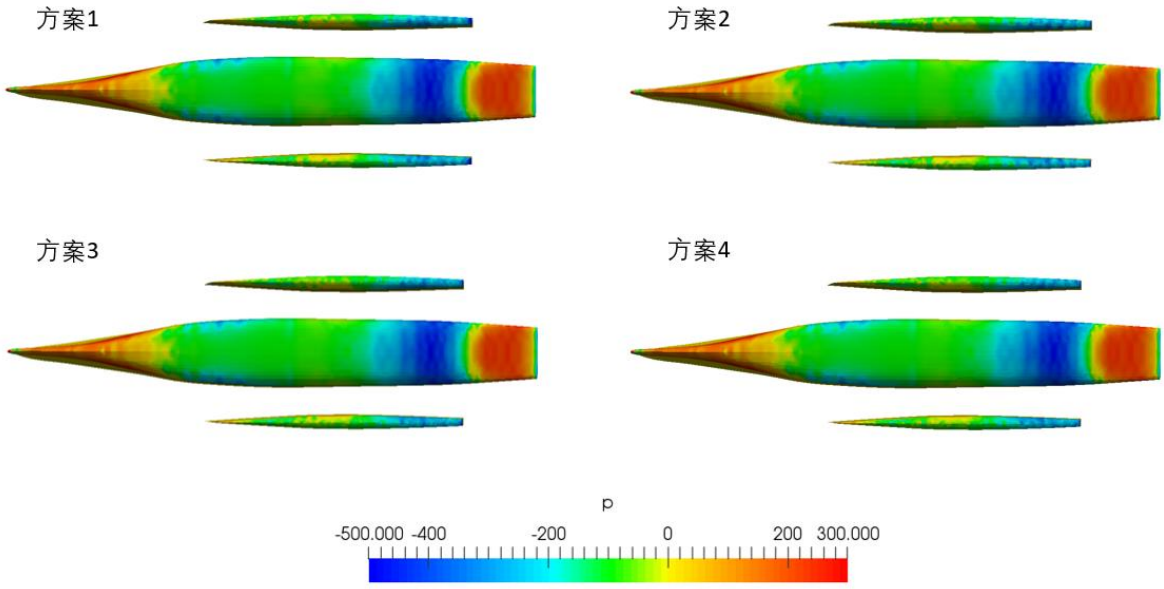


图 5-10 Fr=0.27 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 5-10 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.27

如图 5-10 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。由之前的分析，保持三体船片体距主体的横向距离，改变片体的长度带来的影响近似于改变片体的纵向位置带来的影响加上由于片体长度改变导致片体的排水体积、湿表面积等其他因素带来的影响，又由于片体的长度改变量相对很小，所以其他因素带来的影响相对较小，对三体船表面压力影响的主要因素还是片体尾部兴波的起始点改变，导致片体尾部的兴波的波高传播到三体船主体的位置发生变化，而然由于三体船长度变化近似的片体纵向位置变化的幅度较小，导致三体船主体尾部的低压区改变量相对较小，对比方案 1 和方案 4，片特长度改变量可以近似于片体纵向位置改变 0.06*L_{PP}，能够看出一些区

别。

5.3.3 Fr=0.30 时片体长度对阻力及兴波干扰影响

本节选择 4 种片体长度方案，固定片体的横向位置和纵向位置以及航速不变（Fr=0.30），使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报，得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰图、尾部流线图和船体表面压力图。图 5-11 为 4 种片体长度方案得到的数值计算总阻力系数，可以看到在 Fr=0.30 时，与 Fr=0.27 时结果的趋势一致，4 种长度布局的三体船方案的总阻力系数依次减小，同时 4 个方案的总阻力系数值也比较接近。随着航速的增加，粘性阻力的占比继续下降，兴波阻力的占比继续上升，之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

如图 5-12 所示，4 种方案产生的自由面兴波图很相似，但是还是有细微的差别，方案 1 由于片体的长度最长，片体的尾部更靠近三体船主体尾部，而在此航速下，可以看到图中方案 1 的片体尾部兴波波高靠近与三体船主体的兴波波高，同时靠近了三体船主体兴波的波谷，此时产生了较为有利的兴波干扰，随着片体的长度减小，从方案 2 到方案 3 到方案 4，片体的尾部的纵向位置逐渐远离三体船主体尾部，从图中可以看到，片体尾部的兴波波高继续远离三体船主体兴波的波高一些，同时更靠近三体船主体兴波的波谷，使得主体与片体间的兴波干扰朝有利的方向发展，同时总阻力也逐渐减小，这也符合数值计算得到的总阻力系数结果。

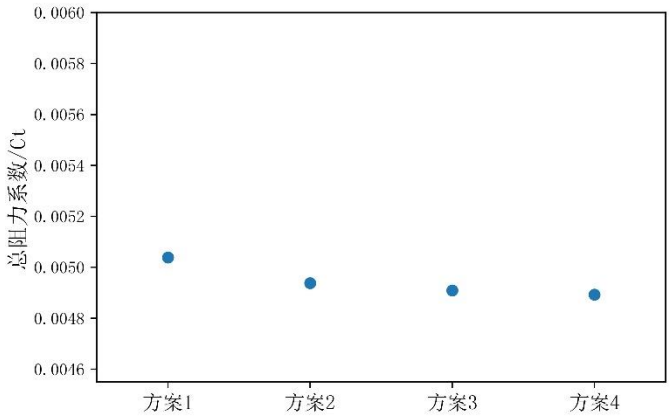


图 5-11 Fr=0.30 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 5-11 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when Fr=0.30

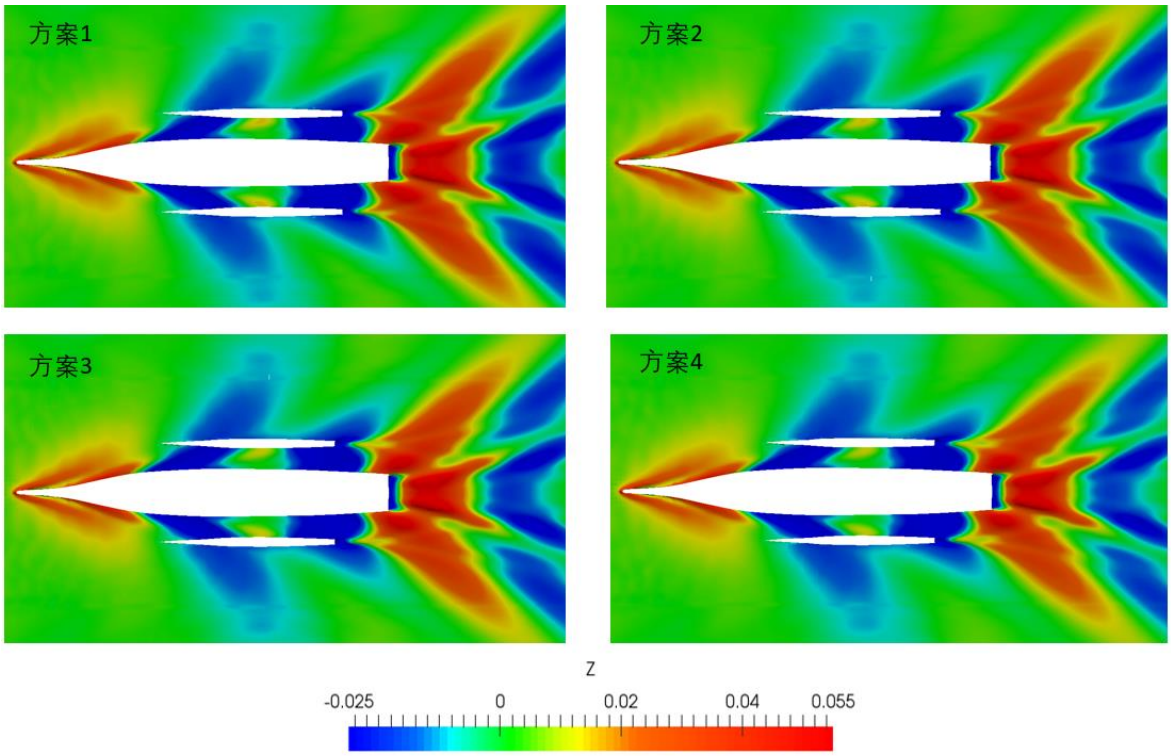


图 5-12 Fr=0.30 时 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比

Fig. 5-12 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes when Fr=0.30

根据粘流数值模拟结果，本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况（如图 5-13 所示）。4 种方案的可以看到在 4 种方案的三体船主体尾部的回流区，低速区都很相似，都是呈现鸡尾流的样子，同时又与计算得到的总阻力系数的相似得到呼应。

主要的区别就在于片体尾部的流线情况，由于方案 1 中片体尾部靠近三体船主体尾部，片体尾部的流线明显向三体船主体外侧偏斜，同时在方案 2、3 和 4 中也有同样的偏斜情况，但是由于方案 1 的片体尾部最接近三体船主体尾部，偏斜的程度相较于其他三个方案更加明显，而且随着片体长度的减小，片体的尾部逐渐远离三体船主体的尾部，片体尾部兴波的流线低速面积区会减小，偏斜程度也减小，这与之前的分析相呼应，主体与片体间的兴波干扰朝有利的方向发展，片体尾部流线受到主体的兴波干扰降低。

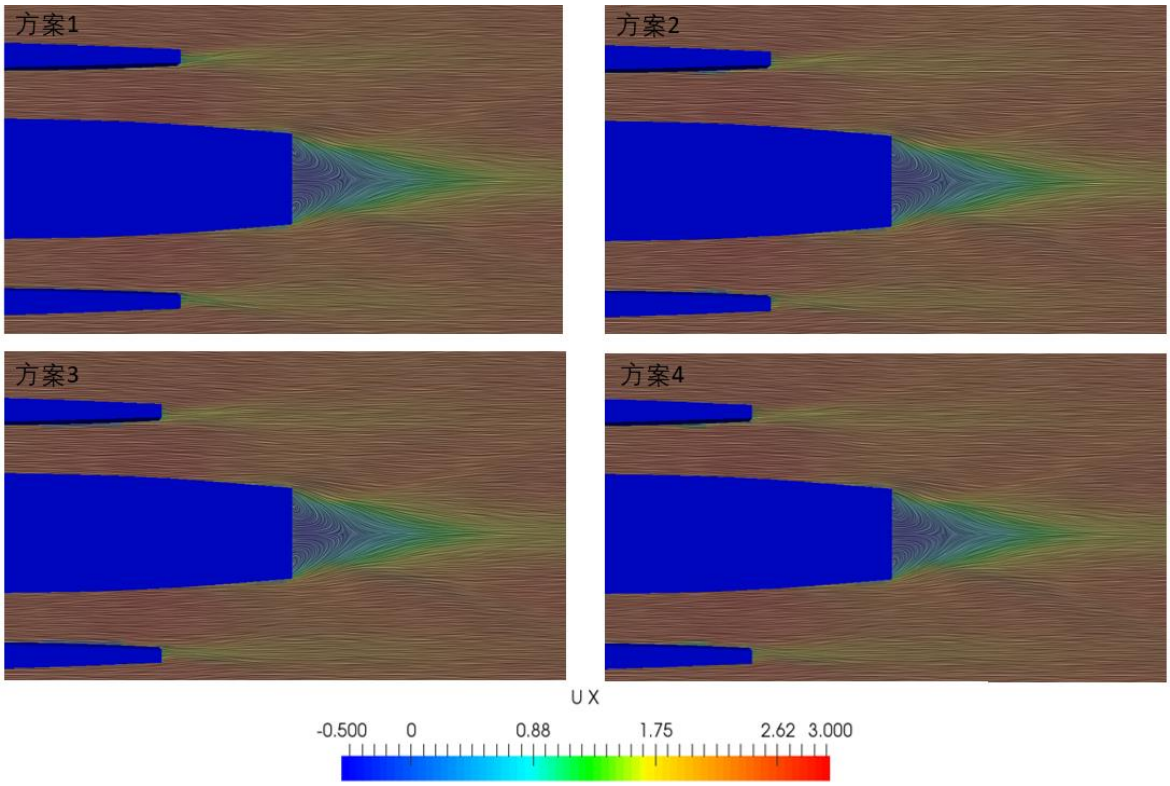


图 5-13 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体尾部流线对比

Fig. 5-13 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes when Fr=0.30

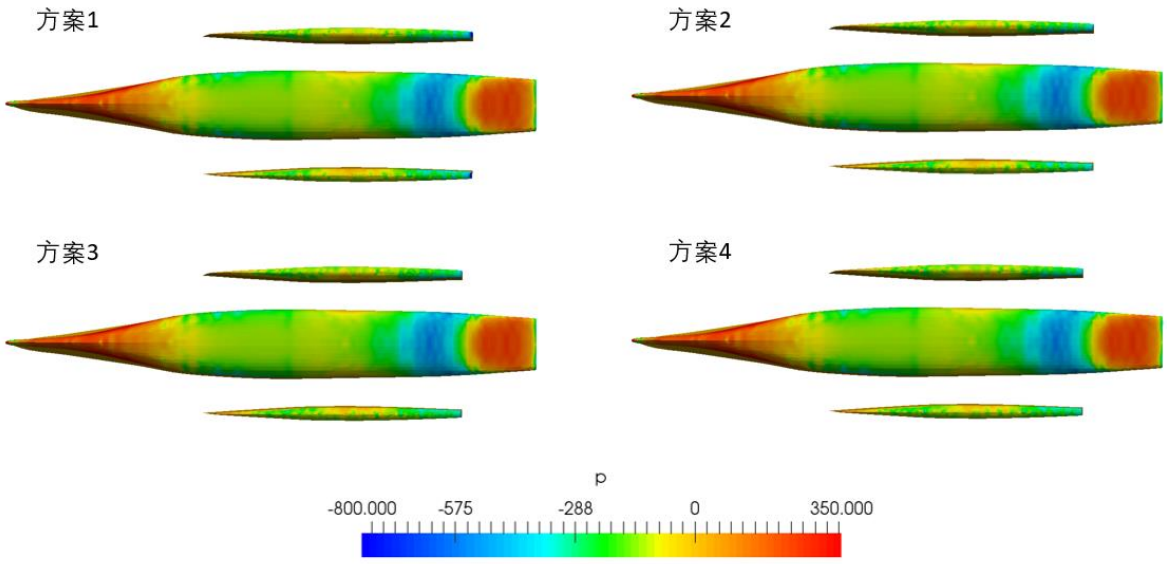


图 5-14 Fr=0.30 时 4 种片体方案下的船体表面压力图

Fig. 5-14 Hull surface pressure diagram under 4 different body schemes when Fr=0.30

如图 5-14 为 4 个片体布置方案下的三体船表面压力图。同 Fr=0.18 和 Fr=0.27 时的结果一样，4 种三体船长度布置得到的主体表面的压力分布变化很小，根据之前的分析，是因为片体尾部兴波起始点改变量较小，产生的兴波与主体干扰的变化较小，作用在三体船主体位置的变化量较小，使主体尾部的低压区变化较小。

5.4 本章小结

本章研究了在控制三体船片体的纵向位置和横向位置不变的情况下，仅改变片体的长度，数值模拟了三体船在 Fr=0.18、0.27 和 0.30 三个航速下 4 种模型的静水航行，分析了 4 种模型片体与主体间的兴波干扰以及对阻力的影响。

Fr=0.18 时，方案 2 确实同 4.4 小结所述的一样，存在一定的误差。其他三个方案由结果来看处于不利的兴波干扰的布局，减少片体长度反而增加了总阻力系数。

Fr=0.27 时，片体的设置同样处于一个不利的兴波干扰布局，但是不同于 Fr=0.18 时，减少片体的长度朝着兴波有利干扰的方向发展，同时总阻力系数得到减小。

Fr=0.30 时，片体的设置处于有利的兴波干扰阶段，而且随片体的长度减小，兴波干扰继续朝向有利的方向发展，总阻力系数同样减小。

本文片体的长度改变的幅度很小，随着航速的增加，保持片体横向位置不变，改变片体长度的很小的情况下得到的结果很接近，片体排水体积和湿表面积的改变量也很小，对于整个三体船来说占比更小，所以在改变片体长度较小的时候，改变片体的长度相当于变相改变了片体的纵向位置，这里近似分析片体的纵向位置对三体船主片体间兴波干扰和阻力影响。

对于保持三体船片体距主体的的横向距离，改变片体的长度带来的影响近似于改变片体的纵向位置带来的影响加上由于片体长度改变导致片体的排水体积、湿表面积等其他因素带来的影响，又由于片体的长度改变量相对很小，所以其他因素带来的影响相对较小，对三体船表面压力影响的主要因素还是片体尾部兴波的起始点改变，导致片体尾部的兴波的波高传播到三体船主体的位置发生变化，而然由于三体船长度变化近似的片体纵向位置变化的幅度较小，导致三体船主体尾部的低压区改变量相对较小。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

本文基于船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对三体船不同的片体布置进行了数值模拟。采用 RANS 方法对三体船周围流场进行数值模拟，采用带有人工压缩项的 VOF 方法对自由面进行捕捉，完成了以下三方面的研究工作：

1.研究了保持片体横向位置不变的情况下，改变片体的纵向位置后，对片体与主体间的兴波干扰以及阻力的影响。在Fr=0.18时，方案2的主片体兴波干扰最为不利，方案 3 的主片体兴波干扰最为有利，这是由于方案 2 的片体布局刚好导致片体尾兴波波峰遇到主体尾兴波波峰。方案 3 中由于航速较低，片体尾部的兴波传播耗散，对主体尾部的兴波带来的干扰较低，避免了片体与主体间的兴波的叠加。在 Fr=0.27 时，方案 1 的总阻力系数最大，原因为航速增加，兴波的波长增加，使得方案 1 的片体兴波波峰与主体兴波波峰相遇。在 Fr=0.30 时，总阻力系数随着三体船模型片体位置偏离船尾而减小，原因是从方案 1 到方案 4，片体尾部兴波波峰逐渐远离主体尾部兴波波峰，向主体首部兴波波谷靠近，使片体与主体间的兴波干扰逐渐向有利的方向移动。同时片体离船艏越远，传播到主体尾波的兴波耗散越大。随着航速的改变，同一个片体位置的兴波干扰可能产生不同的影响，某航速下的片体位置为有利的兴波，可能在另一个航速下产生较为不利的兴波干扰。从以上 3 个航速、4 种片体布局的数值模拟中还可以得到：片体距离三体船尾部越远（距离船首越近），产生的主片体兴波干扰越小。

2.研究了保持片体纵向位置不变的情况下，仅改变片体的横向位置布局对片体与主体间的兴波干扰以及对阻力的影响。Fr=0.18 时，方案 2 的总阻力系数在 4 个方案中最大。Fr=0.27 时，计算得到的 4 种片体布局的总阻力系数很接近。由于片体横向位置不同，使片体兴波的起始点不同，产生的兴波干扰有差异。Fr=0.30 时，结论与 Fr=0.27 时相似。根据以上，片体的横向位置对主片体兴波干扰的影响和对阻力的影响很小，且随着模型航速的增加，片体的横向位置对主片体的兴波干扰减弱。

3.研究了保持片体的纵向位置不变的情况下，仅改变片体长度对片体与主体间的兴波干扰以及对阻力的影响。方案 1、3、4 出现不利的兴波干扰，减少片体长度导致

总阻力系数的增加。Fr=0.27 时，片体的设置同样导致不利的兴波干扰，但是不同于 Fr=0.18 工况，减少片体的长度朝着有利兴波的方向发展，使得总阻力系数减小。Fr=0.30 时，随着片体长度减小，兴波继续朝向有利的方向发展。本文中片体长度改变的幅度较小，随着航速的增加，保持片体横向位置不变，改变片体长度的很小的情况下得到的结果很接近。

4.当航速较低时，由于片体间的兴波干扰程度较低，对三体船主体的表面压力的影响较小。随着航速的增加，主片体间的兴波干扰程度加剧，三类片体布置对三体船主体的表面压力的影响增大。该影响主要反映在三体船主体尾部附近的低压区，其面积会随着片体纵向位置布置的远离船尾、横向位置布置的远离主船体、片体长度的减小而减小。由于片体尾部的兴波起始点远离了三体船主体的船尾，使得片体的兴波产生的波峰向船首移动，使得低压区的面积逐渐降低。然而片体表面压力受到三体船主体的兴波干扰影响很大，三体船主体的兴波波长、波高和相位是不变的，片体纵向位置前移使片体在主体兴波的位置前移，横向位置远离主体，片体在主体兴波的位置沿主体的兴波角前移，三体船主体兴波的同一个位置给了片体不同位置以同样兴波干扰和压力，这个压力作用的纵向距离相对三体船的主体位置是固定的。

6.2 研究展望

本文基于船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对三体船不同的片体布置进行了数值模拟，得到了不同片体布置下对三体船兴波干扰及阻力影响的规律，但是目前仍有许多方面需要进一步改进和完善：

1.本文选取的航速范围，不能完全涵盖三体船目标航速，因此对兴波干扰及阻力影响的数值模拟不够充分。后续应完善航速影响方面的研究，找到对应不同片体布置的最优航速范围。

2.本文所涉及到的片体长度变化取值范围较小，以忽略长度变化所引起的排水体积与湿表面积变化。之后的工作中应综合考虑片体长度变化带来的效应。

3.本文暂时未考虑片体型线变化对三体船兴波干扰及阻力的影响，后续工作应加强这方面的研究。

参 考 文 献

[1] 田斌斌. 航行试验中的英国“海神”号三体船[J]. 国外舰船工程. 2002(10)：27-28,33.

[2] 李江华, 黄德波. 三体船构形与兴波阻力关系研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23 (1): 26-32.

[3] 李培勇. 三体船兴波阻力计算研究[J]. 江苏船舶, 2006, 23(2): 1-3+34.

[4] 应业炬，赵连恩. 用 Rankine 波幅函数预报高速三体/五体船主体与侧体的兴波阻力干扰[J]. 船舶力学. 2008(04)：529-538.

[5] 徐敏，张世联. 三体船波浪载荷与片体布局优化[J]. 上海交通大学学报. 2011, 45(04)：470-474.

[6] 李霞丽，张世联，郑轶刊. 片体位置及航速效应对三体船波浪载荷的影响[J]. 舰船科学技术. 2014, 36(11)：8-13.

[7] 何术龙，李百齐，程明道，朱德祥. 三体船船型分析及兴波干扰的模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑). 2006(01)：122-129.

[8] 郦云, 卢晓平. 高速三体船阻力性能研究[J]. 船舶力学. 2007, 11(2): 191-8.

[9] 周广利，黄德波，邓锐，马勇，由世洲. 三体船阻力性能的模型系列试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报. 2010, 31(05)：576-584.

[10] 吴广怀, 陈徐均, 吴培德, 等. 三体船模型的阻力试验和数值预报[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版). 2010, 11(4): 457-61.

[11] 许君林. 三体船阻力试验研究[J]. 中国水运. 2014(05)：34-35.

[12] 焦俊，王明振，史圣哲. 高速三体船侧体布局对快速性影响试验研究[C]. 第九届全国流体力学学术会议论文摘要集. 2016:194.

[13] Askarian Khoob, Abolfath et al. An Experimental Study on the Effect of the Side Hull Symmetry on the Resistance Performance of a Wave-Piercing Trimaran[J]. Journal of Marine Science and Application. 2021, 20(3): 1-11.

[14] 陈京普, 朱德祥, 何术龙. 双体船/三体船兴波阻力数值预报方法研究[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 23-9.

[15] 邓锐, 黄德波, 周广利. 三体船阻力的数值计算研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 673-6.

[16] 孙荣，吴晓光，姜治芳，吴启锐，卢晓晖. 三体船阻力数值计算及方案优选[J]. 中国舰船研究. 2008, 3(05)：21-24.

[17] 周广利. 三体船型阻力预报、优化与系列性试验分析研究[硕士论文]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2010.

[18] 周利兰，高高.双体及三体船船舶尾浪的数值计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版). 2011, 39(12)：50-53.

[19] Khaled Hafez, Abdel-Rahman El-Kot. Comparative Analysis of the Separation Variation Influence on the Hydrodynamic Performance of a High Speed Trimaran[J]. Journal of Marine Science and Application. 2011, 10(04):377-393.

[20] 张英晟. 船舶阻力计算及三体船片体布局优化研究[硕士论文]. 天津：天津大学, 2012.

[21] 张雷. 基于正交法的三体船侧体典型构型与布局优化方案研究[硕士论文]. 大连：大连海事大学, 2015.

[22] 孙丽娜，詹成胜，冯佰威，沈通. 三体船侧体布局及型线优化设计研究[J]. 船舶工程. 2015, 37(05)：7-10+26.

[23] 周广利，艾子涛，邓锐，黄德波，刘桂杰. 基于 CFD 的三体船侧体布局阻力研究[J]. 船舶工程. 2015, 37(01):27-30.

[24] 彭鹏. 三体风电维护船侧体布局与阻力及耐波性能综合研究[硕士论文]. 江苏：江苏科技大学. 2016.

[25] 陈飞宇，余建星，马维林，刘见德，赵羿羽. 三体船阻力预报与侧体布局的优化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版). 2016, 46(05)：125-131.

[26] 张明霞，韩兵兵，卢鹏程，赵正彬. 基于 STAR-CCM+的小水线面三体船阻力数值仿真[J]. 中国舰船研究. 2018, 13(04)：79-85.

[27] 李乐宇, 刘鑫旺, 万德成. 基于黏流对三体船主体与片体间兴波干扰对其阻力的影响分析[C], 第三十一届全国水动力学研讨会论文集, 中国福建厦门, 2020.

[28] 田高辉，冯佰威，常海超. 基于 CFD 的三体船侧体布局优化[J]. 造船技术. 2021, 49(05)：1-6+23.

[29] Official website of OpenFOAM[EB/OL]. http://www.openfoam.com/.

[30] Jasak, H，OpenF0AM : open source CFD in research and industry[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2009, 1(2): 89-94.

[31] Jasak, H. Dynamic mesh handing in OpenFOAM[C]. In Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Science Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, USA, 2009.

[32] 查晶晶，万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程. 2011, 29(3):1-12.

[33] Jingjing Zha, Decheng Wan. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J].

Ocean Engineering. 2011, 29(3): 1-12.

[34] Hongjian Cao, Decheng Wan, Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering. 2014, 4(1)：52-59.

[35] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[博士论文]. 上海：上海交通大学. 2014.

[36] Zhirong Shen, Decheng Wan, Pablo Carrica, Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering. 2015, 108: 287-306.

[37] 赵伟文，万德成. 用 DES 分离涡方法数值模拟串列双圆柱绕流问题[J]. 应用数学和力学. 2016, 37(12): 1272-1281.

[38] 赵伟文，万德成. 用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数值模拟亚临界雷诺数下三维圆柱绕流问题[J]. 水动力学研究与进展 A 辑. 2016, 31(1):1-8.

[39] 王建华. 基于重叠网格技术的船舶操纵性数值研究[博士论文]. 上海：上海交通大学. 2017.

[40] 尹崇宏. 带节能装置-桨-舵的船舶自航数值模拟与分析[硕士论文]. 上海：上海交通大学. 2017.

[41] Ruosi Zha, Haixuan Ye, Zhirong Shen, Decheng Wan, Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water[J], Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(6): 930-938.

[42] 尹崇宏，吴建威，万德成，基于 IDDES 方法的模型尺度和实尺度 VLCC 阻力预报与流场分析[J]，水动力学研究与进展. 2016, 31(3)：259-268.

[43] Jianhua Wang, Lu Zou, Decheng Wan, CFD simulations of free running ship under course keeping control[J], Ocean Engineering. 2017, 141: 450-464.

[44] Jianhua Wang, Decheng Wan, Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model[J], Applied Mathematics and Mechanics. 2016, 37(12): 1345-1358.

[45] Zhirong Shen and Decheng Wan. An Irregular Wave Generating Approach Based on naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. China Ocean Engineering. 2016, 30(2): 177-192.

[46] Luyi Xie, Liushuai Cao, Decheng Wan. Simulation of twin-cylinder water entry process based on overset grid method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics. 2021, 36(2): 244-251.

[47] Xiaotong Yang, Weiwen Zhao, Decheng Wan. Numerical simulation of wave run-up of semi-submersible offshore platform under regular wave[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics. 2021, 36(1): 48-55.

[48] Bo Han, Weiwen Zhao, Decheng Wan. Numerical simulation of Wave Elevation around fixed Vertical Cylinder Based on HOS-CFD[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics. 2021, 36(2):

228-236.

[49] Yao Peng, Xiaotong Zhang, Decheng Wan. Caiyun Huang, Numerical study of wave-current loads acting on foundation of fixed offshore wind turbine[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics. 2017, 32(1): 1-10.Vol.

[50] 万德成，王建华，赵伟文. naoe-FOAM-SJTU 求解器在船舶水动力性能数值预报中的应用[J]. 力学与工程-新时代工程技术发展与力学前沿研究. 2019, 437-453.

攻读学位期间学术论文和科研成果目录

[1] 李响，刘志强，万德成. CFD 数值分析三体船片体位置对阻力及兴波干扰影响[J]. 海洋工程. 2021.（第一作者，中文核心，已录用）

致　谢

回首，已是两年半的日子过去了，研究生的生涯就这样匆匆过去了，但是人生不会是这样的匆匆而过，回顾两年半时光感慨万千，里面遇到了很多帮助过我，指导过我，教导过我的人，是这些人让我能不放弃地走过这两年半的硕士时光，在此我想向这些人表达我最真挚的谢意。

首先要感谢的是我的导师万德成教授，从小论文到大论文，都离不开万老师的帮助与敦促，万老师不仅提供了宝贵的集群计算资源，还给了我们良好的学习与科研讨论氛围。万老师不仅教会了我们科研，还教会了我们做人，万老师说过，要做科研之前，先“做”人，科研固然重要，但是会为人更是处世的根本，在万老师的影响下，让我在为思考学习和人处世中受益匪浅。

其次要感谢的是养育了我从呱呱坠地的婴儿到长大成人的父母，25 年的养育包容，从黑发到零星白发，到眼角的皱纹，我们一天天长大，父母也一天天老去，此时已是开花结果之时，我将经我所能，定后半生幸福安康。

接着要感谢承载我两年半的上海交通大学，两年前有幸加入了这所百年名校，圆了一个梦，如今即将别离，有些不舍。还要感谢课题组的老师们，师兄师姐，师弟师妹们。最要感谢的是王建华老师、刘成老师、赵伟文老师和曹刘帅老师，在我的科研和学习中帮助了我很多，指导了我很多，还要感谢任振师兄和刘志强博士，这两位细心的教导使我受益良多，还要感谢那些在我人生低谷中鼓励我的朋友们，感谢原 A608 办公室的组长谢丰泽师兄和大家们，也感谢现 A706 的组长赵旻晟师兄和大家们，每个人都活泼开朗乐于助人。感谢和我一样马上要毕业的袁常乐、杨玉箫、李乐宇、张牧、兰小杰、郑建才、吴定坤、白鹤鸣、郭涵慧、卢泽宇，感谢一路走来的陪伴。