

大型通用远洋舰船模型的数字建模与模型制作

义康乐, 刘 正, 姜钰心, 任思盈, 曾怡萱, 李钰婷, 郭思行, 郑宇星, 张大朋*

广东海洋大学船舶与海运学院, 广东 湛江

收稿日期: 2026年6月13日; 录用日期: 2026年7月6日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

在现代船舶工程教育高质量发展的背景下, 对船海专业人才的工程实践能力提出了更高的要求。然而当前高校普遍存在船海专业理论与实践脱节、学生应用工程能力培养缺失的问题。船舶模型制作作为连接理论与实践的核心教学环节, 在提高学生综合实践能力有着独特的作用。本文以大型通用远洋舰船为研究对象, 设计并实践了一种“参数获取 - 三维建模 - CFD兴波仿真预验证 - 物理模型制作”的模型制作方案。基于官方公开资料通过SolidWorks三维建模软件构建了1:138比例的三维参数化模型; 再利用Fluent流体仿真软件完成了大型通用远洋舰船在三种不同流速下的CFD兴波仿真; 最后通过手工制作与3D打印完成了实体模型制作。试验结果表明, 该制作方案能系统性的培养学生的工程能力与实践能力, 同时能为船海专业的实践教学提供可供参考的案例。

关键词

船舶模型制作, 海洋工程教育, 通用舰船模型, CFD兴波仿真

Digital Modeling and Physical Fabrication of Large General Seagoing Vessel Model

Kangle Yi, Zheng Liu, Yuxin Jiang, Siying Ren, Yixuan Zeng, Yuting Li, Sixing Guo, Yuxing Zheng, Dapeng Zhang*

College of Naval Architecture and Maritime, Ship and Maritime, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: June 13, 2026; accepted: July 6, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

Under the strategic layout of building maritime power, higher requirements are put forward for the engineering practical ability of marine engineering professionals. However, colleges and universities currently generally have the problems of disconnection between theory and practice in naval

*通讯作者。

文章引用: 义康乐, 刘正, 姜钰心, 任思盈, 曾怡萱, 李钰婷, 郭思行, 郑宇星, 张大朋. 大型通用远洋舰船模型的数字建模与模型制作[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(4): 957-971. DOI: 10.12677/isl.2026.104113

architecture and ocean engineering majors and the lack of training for students' applied engineering ability. As a core teaching link connecting theory and practice, ship model making plays a unique role in improving students' comprehensive practical ability. Taking the large general seagoing vessel model as the research object, this paper designs and practices a model production scheme of "parameter acquisition-three-dimensional modeling-CFD wave-making simulation pre-verification-physical model production". Based on official public data, a 1:138 scale three-dimensional parametric model is constructed by SolidWorks 3D modeling software, and then Fluent fluid simulation software is used to complete the CFD wave-making simulation of large general seagoing vessel model under three different flow velocities. Finally, the physical model is finished by manual production and 3D printing. The test results show that the production scheme can systematically cultivate students' engineering ability and practical ability, and provide a reference case for the practical teaching of marine engineering majors.

Keywords

Ship Model Fabrication, Ocean Engineering Education, General Vessel Model, CFD Wave-Making Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国船舶工业向高质量发展阶段迈进,行业对工程技术人才的实践能力和创新能力提出了更高的要求[1]。船舶产业作为我国传统行业的重要支柱之一,其高质量发展离不开高素质的工程人才的有力支撑。但目前高校对船海类学生培养以理论讲授为主,实践教学环节薄弱且碎片化,导致船海系本科学生的工程实践能力难以满足实际工程需求[2]。

船舶模型作为一种连接理论与实践的教学手段,涵盖信息收集、参数化模型构建、数值仿真、工艺规划、实体制作与性能验证等多个工程环节。学生通过参与一个完整的船舶模型制作项目,能深入了解船舶的结构、动力系统与水动力特性,从而全方面地提高学生的工程能力与实践能力。

本文以大型通用远洋舰船为研究载体,构建了“参数获取-三维建模-CFD预验证-物理模型制作”的一体化船舶模型制作方案。此方案首先基于官方公开资料完成了1:138比例的参数化三维建模,通过CFD兴波仿真验证了模型的水动力性能;最后采用3D打印与手工工艺相结合的方法完成了实体模型制作。本文通过该方案的实施与验证,展示了船舶模型制作在提升学生工程能力与实践能力的成效。

2. 制作方案设计与资料收集

2.1. 模型制作方案

本文模型制作流程如下图1所示。

2.2. 资料收集

本文通过查阅官方发布的资料、相关学术文献,收集了大型通用远洋舰船的主尺度参数、上层建筑布局、动力系统配置以及标准三视图等关键信息[3][4]。基于实船主尺度参数,为满足后续三维建模的几何精度、模型加工的精度与试验的兴波观测效果,选取1:138比例缩尺将实船主尺寸参数转化为模型的主尺寸参数。换算后得到的模型尺寸参数见表1。

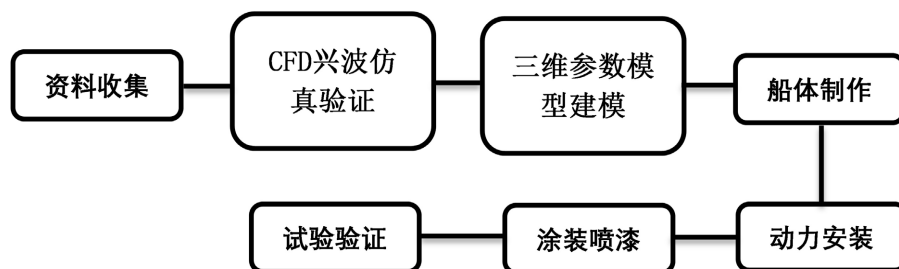


Figure 1. Production plan

图 1. 制作方案

Table 1. Model size parameters

表 1. 模型尺寸参数

信息名称	实船参数	模型参数
总长	157 m	1140 mm
型宽	18 m	130 mm
型深	27.5 m	199 mm
设计吃水	6 m	43 mm

3. 三维参数化模型建立

本次三维建模选择使用 SolidWorks 作为三维建模软件。SolidWorks 作为国内工程领域与教学科研应用最广泛的三维建模软件之一，相较于 Rhino7 和 3ds Max 等其他主流三维建模软件，其核心优势如下：一、其拥有友好的交互界面与完善的教学资源，学习门槛低；二、SolidWorks 具有强大的曲面 + 实体混合建模能力，能精准完成船体曲面与球鼻艏等复杂曲面的建模[5]。

通过 SolidWorks “草图工具 - 草图图片” 命令将预先获取并按 1:138 比例校准后的舰船三视图分别插入前视、上视、右视基准面中，为后续勾勒船体外型提供参考基准。将三视图导入完成后，为准确还原船体自由流线曲面，采用“草图重叠建模法”[6]将船体分成船艏部、船舯部和船艉部三部分分段建模。通过“草图 - 放样曲线”命令绘制出半侧船体轮廓线，再利用“插入 - 曲面 - 边界曲面”命令生成船艏部、船舯部和船艉部三部分的曲面。最后用镜像与放样命令生成完整船体。船体模型见下图 2。

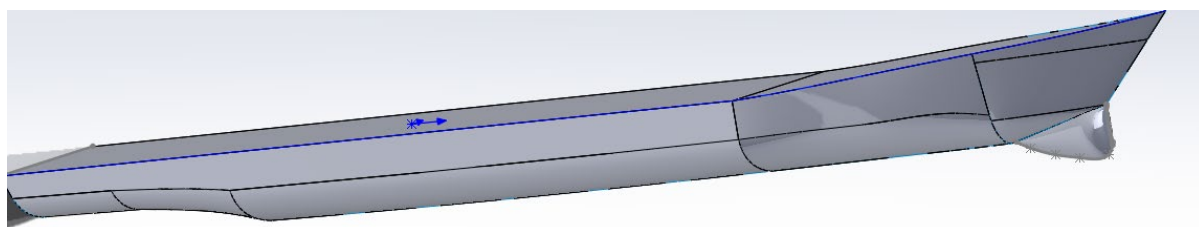


Figure 2. Hull model

图 2. 船体模型

通过切片和等距实体命令分别绘制出龙骨外边线与龙骨内边线。将边线连接成封闭图形后，使用“拉伸”命令生成龙骨实体。拉伸深度与后续实体制作所用的椴木板厚度保持一致。在此基础上为龙骨连接部位设计适合加工的榫卯结构。考虑到激光切割的平面加工工艺的限制，榫卯选择木板榫槽直角接合方式[7]。用“切除拉伸”指令切割出榫槽。龙骨模型如图 3 所示。

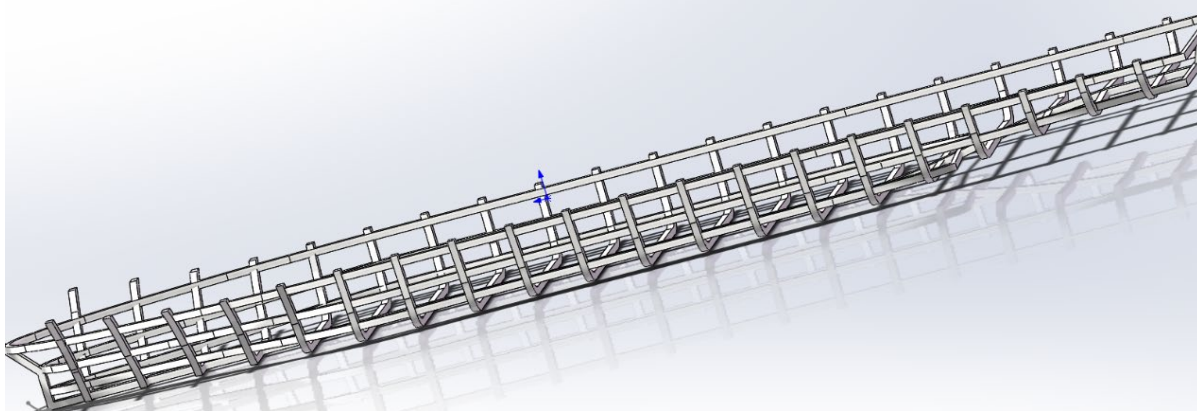


Figure 3. Keel model

图 3. 龙骨模型

上层建筑包含舰桥、武器系统等多个复杂结构，为简化建模，将上层建筑分模块建模。通过拉伸、扫描与放样指令生成上层建筑的实体，在建模时应注意将上层建筑尺寸按比例尺校准。最后将零件导入到装配体环境下进行装配，完成后完整模型如图 4 所示。

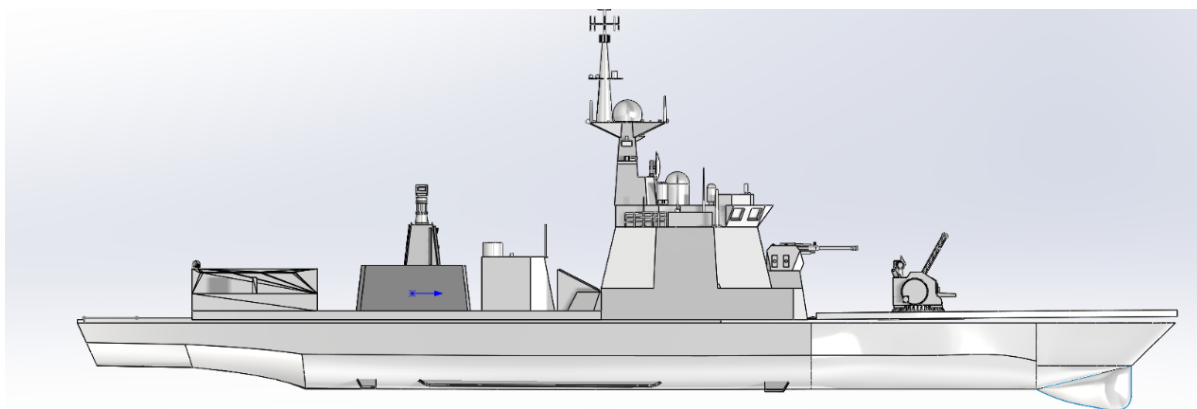


Figure 4. Integral model

图 4. 完整模型

4. CFD 兴波仿真验证

4.1. CFD 仿真方法与设置

本文 CFD 仿真选择 Ansys Fluent 作为仿真软件，该软件采用有限体积法离散方程，提供 SIMPLE、PISO 等成熟的压力校正算法，内置丰富的湍流与多相流物理模型，支持非结构化网格技术，因此被选为本次研究的仿真工具。

将之前在 SolidWorks 建立的数字三维模型导入到 ANSYS SpaceClaim，绘制流体区域包裹船体。设置流体区域长为 6 m、宽为 4 米、高为 3 米以消除边界反射对远场兴波的干扰，保证开尔文波传播区域的计算精度。为保证结果准确，去掉内部实体区域，仅保留流体部分。流场域见下图 5。

将模型导入到 Ansys Meshing 进行网格划分，将单元尺寸设为 20 mm。为了避免生成体积网格影响求解，将避免冲突选为梯步，平滑选为高。膨胀选项采用平滑过渡模式，可实现网格尺寸的均匀渐变，有效提高近壁区边界层的捕捉精度。其中最大层数设为 6，增长率为 1.15%。最终生成的网格节点有

976,232 个, 单元有 4,612,141 个。舰船所划分的整体网格如图 6 所示。

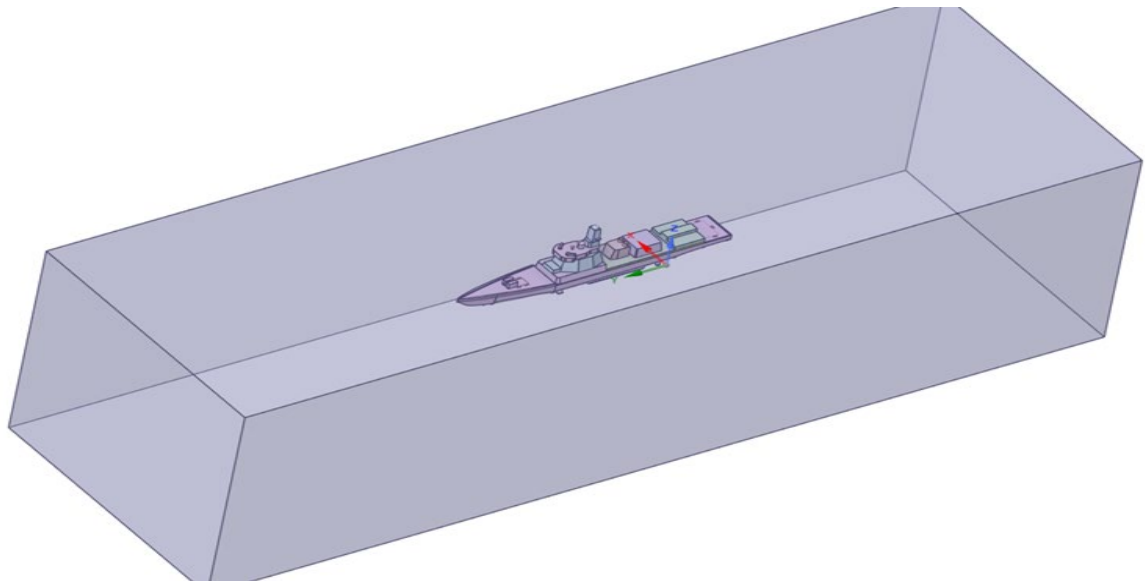


Figure 5. Fluid computational domain
图 5. 仿真流体域

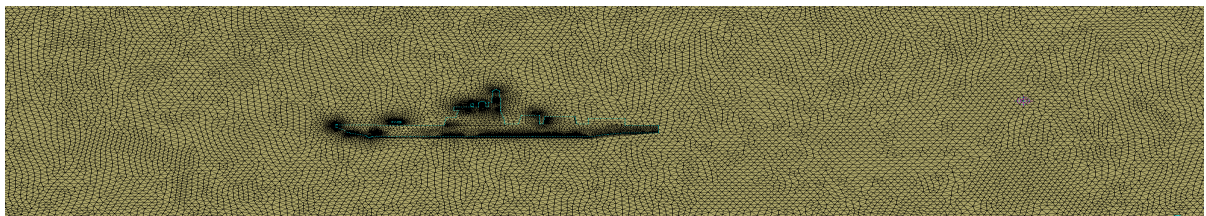


Figure 6. Global mesh
图 6. 整体网格

为了验证上文网格划分时单元尺寸采用 20 mm 是否正确以及确保数值结果的准确性和可靠性, 消除网格尺寸对计算结果的影响。首先需要进行网格独立性验证。本文选取了船舶总体阻力(Total Resistance)作为网格收敛性监测指标。

本文设置了 5 种不同疏密程度的网格方案: A 组为粗网格, 网格数量为 150.56 万; B 组为较粗网格, 网格数量为 214.43 万; C 组为中等网格, 网格数量为 461.21 万; D 组为较细网格, 网格数量为 1021.35 万; E 组为细网格, 网格数量为 2029.58 万。在边界条件、求解设置以及硬件条件完全一致的情况下, 分别进行计算并记录监测指标。

计算结果如图 7 和图 8 所示。当网格数量从 150.56 万增加到 214.43 万时, 总阻力相对误差为 11.11%, 误差较大; 当网格数量增加到 461.21 万时, 相对误差降至 5%, 满足工程初步精度要求; 当网格数量从 461.21 万增加到 1021.35 万时, 船舶总体阻力(Total Resistance)的变化幅度仅为 1.97%; 网格数量进一步增加到 2029.58 万时, 变化幅度减小至 1.34%。船舶总体阻力结果的变化率小于 3%就认为随着网格的增大, 对测量数据没有影响。况且随着网格数量的增加, 求解时间呈超线性增长, 考虑到计算效率与硬件的限制, C 组(461.21 万网格)已经能够获得网格独立性解。这说明网格划分策略的正确性。

将划分好的网格导入 Fluent, 计算域各边界条件设置如下: y 轴正方向为速度入口(Inlet), 对称面为

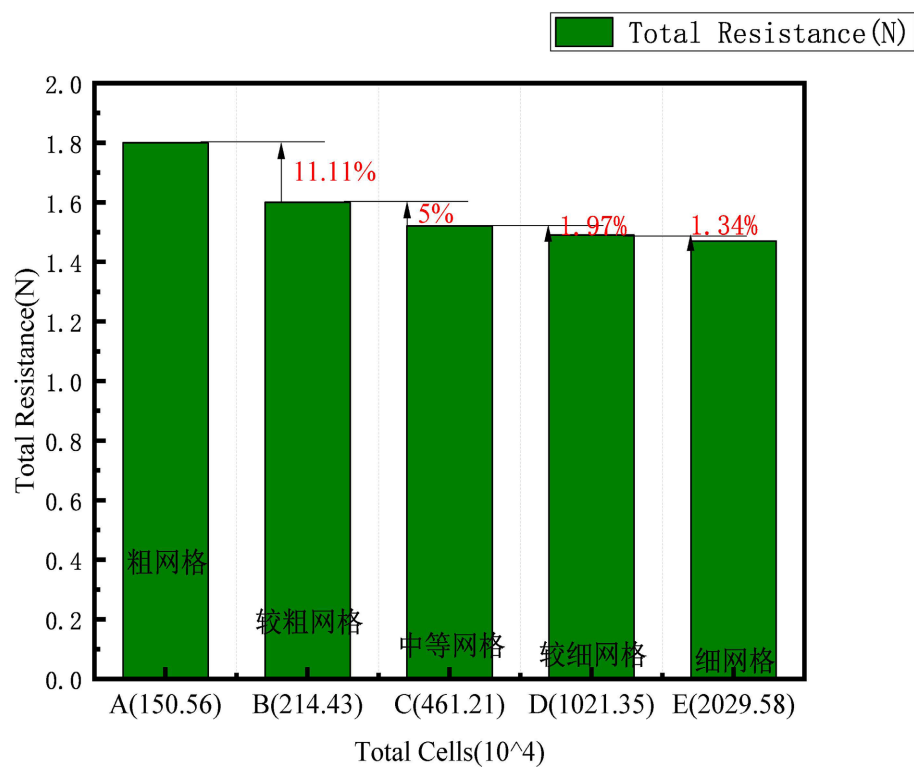


Figure 7. Relationship between total resistance and total cells

图 7. 总体阻力与网格数量的关系

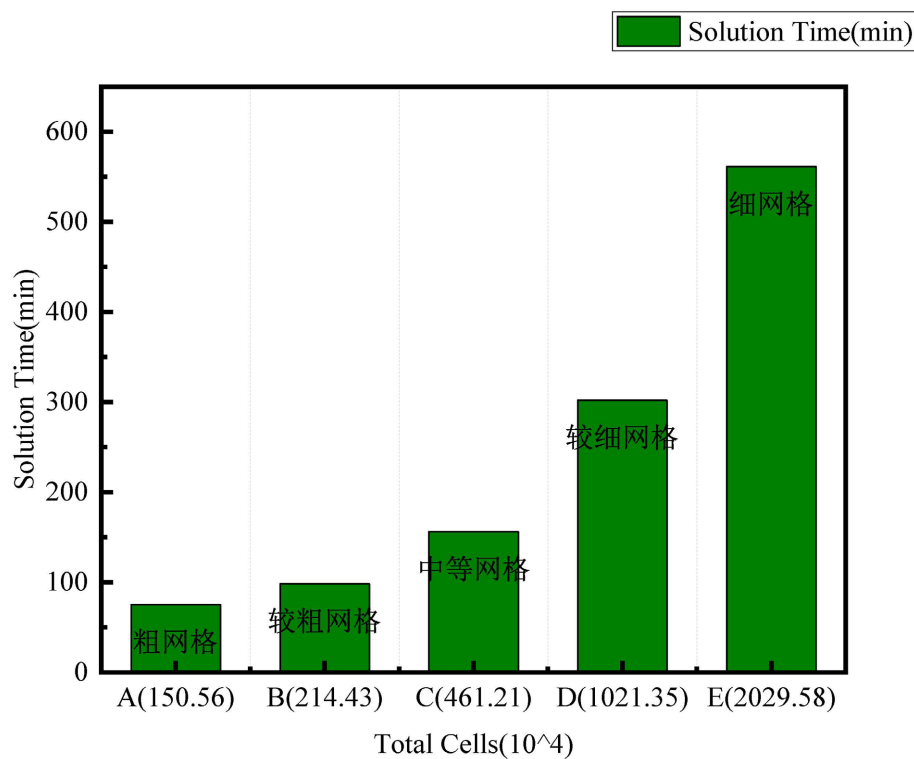


Figure 8. Relationship between solution time and total cells

图 8. 求解时间与网格数量的关系

对称边界(Sym), 船体壁面为无滑移壁面(Wall), 其余流域边界为压力出口(Outlet)。湍流模型设置为 SST $k-\omega$ 模型, 该模型能兼顾 $y^+ \approx 1$ 和高 y^+ 网格, 能够兼容网格设置中平滑过渡的膨胀选项。仿真需要计算船体受到的总阻力(空气阻力和流体阻力), 计算工况包含多相介质作用, 因此采用 VOF 多相流模型。VOF 子模型选明渠流, 体积分数参数离散格式选隐式, 打开体积力格式中的隐式体积力, 将表面张力系数设为 0.07 N/m , 在压力入口和压力出口设定相对应的速度、液位和自由表面水平。迭代次数设置为 300 次, 处理方程设为 2 阶迎风方程。最后仿真计算所得大型通用远洋舰船在 0.5 m/s 、 1.0 m/s 、 1.5 m/s 来流下的兴波如下图 9 所示。

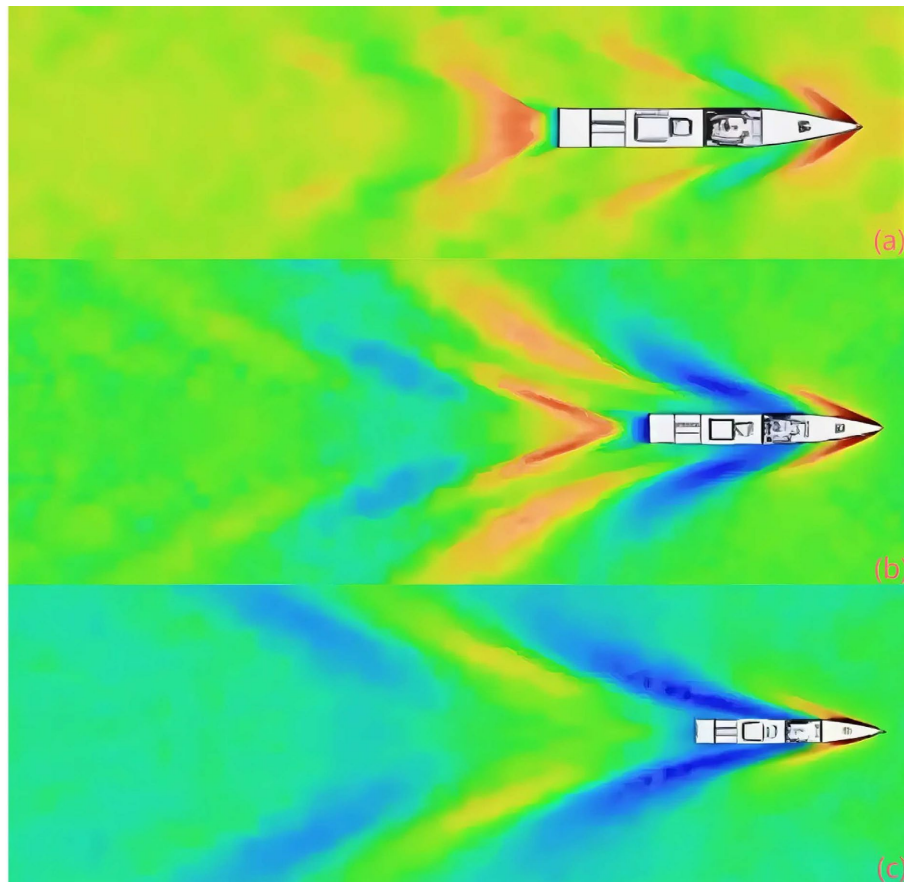


Figure 9. Wave pattern at three inflow velocities
图 9. 三种来流下的兴波图

4.2. 兴波流场分析

舰船在低速航行的工况下, 在船艏部、船艉部都能观察到明显的兴波, 随着波系向远场传播, 波能快速衰减, 远场波形逐渐模糊消失, 流体呈现了明显的粘滞特性。舰船在中速航行的工况下, 兴波强度分布表现为船艉兴波强度最高(波高最大), 船艏兴波强度次之, 船舯段兴波最弱。相较于低速工况, 中速工况的兴波特征更清晰显著, 波系向远场传播时的能量衰减速率明显放缓, 流体仍存在一定的粘滞特性。相较于低速、中速工况, 在高速航速的工况下, 舰船产生的波系向远处传播时, 延伸距离极远, 能量衰减最慢。流体对船体的粘滞作用影响较小。

在后续完成模型制作后, 开展下水航行试验, 并通过高速相机记录舰船航行时的兴波以验证仿真结果的准确性。在 1.5 m/s 速度下, 大型通用远洋舰船模型航行兴波如图 10 所示。通过比较图 9(c)与图 10

可知,在 1.5 m/s 高速工况下,仿真兴波与试验兴波高度相似,两者都表现出了延伸距离远、能量衰减慢的特征,之后再通过图像处理技术对兴波参数进行测量,定量测量结果见下表 2。分析表 2 得,试验的兴波角与波长均小于仿真值,推测实测值与仿真值的偏差主要来源于试验场地的水面微扰和图片处理技术的像素处理精度不足。但整体误差仍在工程允许的范围内,充分验证了 CFD 仿真结果的准确性。



Figure 10. Wave-making of vessel

图 10. 舰船航行兴波

Table 2. Comparison of wave-making simulation and experimental wave-making

表 2. 仿真与实测兴波参数对比

航速	仿真角	实测角	相对误差	仿真波长	实测波长	相对误差
0.5 m/s	18.2°	17.1°	6.0%	0.06 m	0.056 m	6.7%
1.0 m/s	19.0°	17.8°	6.3%	0.15 m	0.14 m	6.7%
1.5 m/s	19.5°	18.2°	6.7%	0.28 m	0.26 m	6.7%

4.3. 阻力特性分析

船舶在航行的过程中其所受到总阻力由粘性阻力和兴波阻力两部分组成,因此船舶总阻力计算公式为

$$R_t = R_v + R_w \quad (1)$$

其中 R_t 为总阻力, R_v 为粘性阻力, R_w 为兴波阻力。粘性阻力 R_v 参照 ITTC-1957 公式[8]计算,计算公式见式 2。由船体阻力模型[9]可计算出兴波阻力 R_w , 计算公式见式 3。

$$R_v = \frac{1}{2}(1+k)C_f\rho v^2S \quad (2)$$

$$R_w = \frac{1}{2}C_w\rho v^2S \quad (3)$$

其中 k 为形状修正系数, C_f 为摩擦阻力系数, C_w 为兴波阻力系数, ρ 为流体的密度(此处为水的密度), v 为船速(此处为流速), S 为船体湿表面积。由阻力的相似定律[10][11]得,摩擦阻力系数 C_f 由雷诺数 Re (雷诺定律)唯一确定,兴波阻力系数 C_w 由傅汝德数 Fr (傅汝德定律)唯一确定,两者均为船舶水动力学中的无量纲相似准则数。对于几何相似的船型,在满足对应相似准则的条件下,这两个系数保持不变。雷诺数 Re 计算公式见式 4,傅汝德数 Fr 计算公式见下式 5。

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (5)$$

其中 ν 为水的运动粘度, g 为重力加速度, L 为船体水线长。代入数据求得不同航速下的雷诺数 Re 和傅汝德数 Fr , 参考相似船型数据[10]求得对应的摩擦阻力系数 C_f 和 C_w 为兴波阻力系数, 最后计算出理论的总阻力 R_t 、粘性阻力 R_v 和兴波阻力 R_w 。计算所得的总阻力 R_t 、粘性阻力 R_v 和兴波阻力 R_w 随航速变化规律如下图 11 所示。

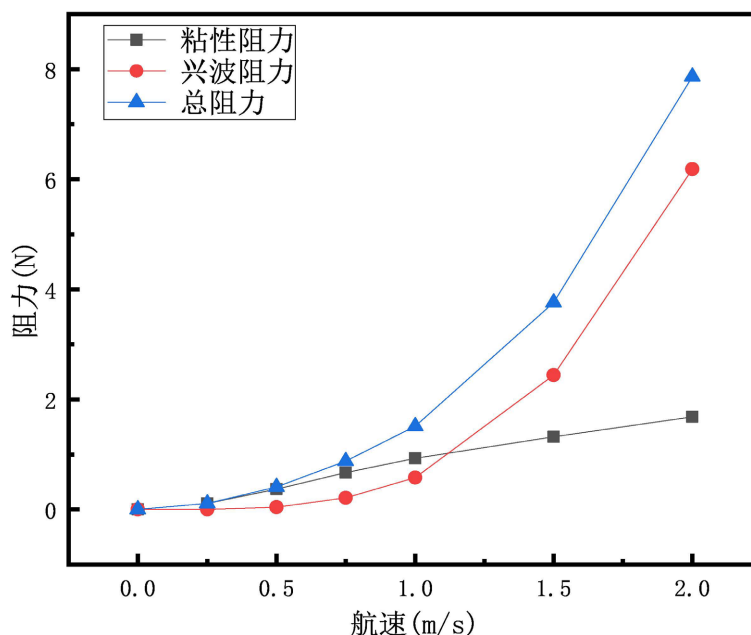


Figure 11. Variation curves of resistance with ship speed
图 11. 阻力随航速变化曲线

基于前文所述的 CFD 仿真方法, 得到了 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s 三个航速下的总阻力 R_t 、粘性阻力 R_v 和兴波阻力 R_w 仿真值; 同时基于前文推导的理论公式, 计算得到了对应航速下的理论阻力值。将两者进行定量对比, 结果如表 3 所示。

Table 3. Comparison of theoretical and simulated resistance parameters
表 3. 理论阻力与仿真阻力的参数对比

航速(m/s)	阻力分量	理论值(N)	仿真值(N)	相对误差(%)
0.5 m/s	R_v	0.37	0.38	2.7
	R_w	0.04	0.04	0.0
	R_t	0.41	0.42	2.4
1.0 m/s	R_v	0.93	0.96	3.2
	R_w	0.58	0.60	3.4
	R_t	1.51	1.56	3.3
1.5 m/s	R_v	1.32	1.36	3.0
	R_w	2.44	2.54	4.1
	R_t	3.76	3.90	3.7

由表 3 可得, 本文的 CFD 仿真结果与理论计算值整体吻合度良好, 充分验证仿真结果的准确性与可靠性。对阻力成分占比进行分析得: 在低速工况(0.5 m/s)下, 仿真的粘性阻力的占比可达 90.5%。而在中速工况(1.0 m/s)下, 仿真的兴波阻力占比升至 38.5%, 粘性阻力占比降至 61.5%。而在高速工况(1.5 m/s)下, 仿真的兴波阻力升至 65.1%。这一变化规律与船舶水动力学经典理论[12]相吻合。进一步的验证了理论计算和仿真的准确性。

4.4. 本章小结

本章基于 ANSYS Fluent 软件建立了大型通用远洋舰船数值仿真模型, 开展了不同航速下的兴波流场和阻力特性研究。研究结果表明: 一、兴波流场随航速升高呈现出明显的变化规律, 低速时兴波微弱且衰减迅速, 高速时兴波延伸距离远且能量衰减缓慢; 二、阻力成分随航速升高发生显著转变, 在 1.0 m/s 航速附近, 兴波阻力占比首次超过粘性阻力, 成为主导阻力成分; 三、仿真结果与理论计算和模型试验均具有良好的一致性, 整体误差在工程允许范围内。为后续实体模型的设计制作和下水试验提供了理论基础。

5. 实际模型制作

5.1. 龙骨制作

本文采用激光切割工艺进行龙骨零件的加工, 该工艺具有加工精度高、速度快的特点。将先前设计的龙骨模型导出为二维 DWG 工程图, 导入 AutoCAD 进行排版并输出为 PDF 加工图纸。将加工图纸导入进 LightBurn 激光加工软件中, 针对 3 mm 的椴木板设置合适的激光功率和切割速度, 启动设备完成龙骨零件的切割。切割完成后按预先设计的榫槽对各段龙骨进行拼接, 装配过程中使用胶水进行粘接以增强连接强度。

5.2. 船体制作

船体蒙皮所选用的材料为 2 mm 厚的椴木条。在蒙皮过程中应遵循“左右对称”的操作原则[13], 同步进行两侧的粘接作业。使用胶水进行粘接并辅以夹具临时固定, 平衡船体两侧的粘接应力, 避免因单侧应力集中导致船体发生扭曲变形。椴木条表面与拼接处会存在高低差和毛刺, 粗糙度较大, 会影响后续原子灰的刮涂质量。因此使用角磨机与砂纸将船体打磨至表面光滑平整, 打磨完成后的效果见图 12。



Figure 12. Polishing effect

图 12. 打磨后效果

在得到由椴木条构成的光滑船体后, 即可在船体表面涂抹原子灰。原子灰是汽车修补、工业制作中的填充材料。可用于填补蒙皮过程中相邻椴木条间的微小缝隙, 修复椴木条表面的凹坑, 同时能提高船体的整体刚度和表面平整度。

在涂抹原子灰时应遵循少量多次的原则并严格遵循原子灰的调配比例, 固化剂比原子灰比例过大会导致原子灰未完成涂抹就固化造成材料浪费[14], 比例过小则会导致原子灰固化速度过慢。在原子灰涂抹

完后，利用不同目数的砂纸将船体打磨光滑。打磨完成示意图如下图 13 所示。



Figure 13. Effect of atomic ash polishing

图 13. 打磨原子灰后

5.3. 上层建筑与甲板制作

上层建筑的建筑细节过多，若采用传统手工制作存在制作周期长、精度难以保障的问题。为节约制作时间与保证模型精度，上述零件均采用熔融沉积制作(Fused Deposition Modeling, FDM)技术 3D 打印制作。

FDM 技术让原料在喷嘴中受热熔融，在后续进料的挤压作用下从打印机喷嘴挤出，同时喷嘴在工作平面上进行程控运动，沿着切片的轮廓和填充区域的路径将挤出的材料沉积在指定位置，凝固成型。每一层与前一层形成材料熔接，逐层堆积最终形成制品。此方法优点在于打印过程无污染且打印件具有较高的成型精度且制品具有一定的力学强度[15]。不过 FDM 技术在打印时会在固定方向上呈现明显层纹。因此在打印之前要确定零件打印方向。打印完成的舰桥模型见图 14。



Figure 14. Effect of 3D printing

图 14. 3D 打印效果

为便于后续动力系统的调整与配重块的灵活添加，将船体甲板设计为上下双层结构，下甲板与船体通过胶水粘接为整体，上下甲板之间采用磁吸式可拆卸结构连接。二者接缝处采用原子灰进行无缝处理，保证船体表面的光滑度，该方案具有结构简单、制作方便、可无损多次拆装的优势，可保证模型的长期重复使用。

磁吸结构的具体实现方式为：在下甲板的船艏与船艉部进行镂空处理，预留出动力系统安装与更换的空间，并在镂空边缘加工出用于装配磁铁的凹槽；在上甲板对应位置，加工出尺寸一致的凹槽，选用 $2.5 \times 3 \times 2$ mm 钕铁硼强力磁铁，用胶水固定于凹槽内，装配时注意磁铁磁极匹配，确保上下甲板能精准配合。磁吸结构见下图 15。



Figure 15. Schematic diagram of magnetic attraction structure
图 15. 磁吸结构示意图

6. 动力系统安装及防水处理

动力系统由推进系统与转向系统两部分组成，推进系统由两个无刷电调、两个 $\Phi 3$ mm，长 25 mm 的传动轴、两个黄铜轴套、两台同参数 KV1400 无刷电机和一对螺旋桨组成。通过电调调节电机转速，实现船舶的加减速和进退；转向系统由舵机和船舵组成，通过舵机带动船舵偏转，实现船舶的转向[16]。电调和舵机统一接入 6 通道 2.4 GHz 接收机，实现对船舶的远程无线控制。安装效果见图 16。



Figure 16. Power system
图 16. 动力系统

采用环氧树脂作为船体内表面的防水材料。环氧树脂由环氧树脂 AB 胶按规定的比例(具体比例根据所使用 AB 胶款式)调配。将按比例(A 胶:B 胶 = 1:3)混合得到的环氧树脂均匀涂抹在船体内表面。防水处理后效果如图 17 所示。



Figure 17. Effect of waterproof treatment
图 17. 防水处理后效果

7. 涂装喷漆

喷漆能让被涂物表面形成一层薄而均匀的固态涂膜,可用来保护模型、提高模型的耐腐蚀性。且良好的喷漆技艺也能极大美化舰船外形,提高舰船的还原度。喷漆主要步骤为底漆涂装和面漆涂装[17]。喷涂底漆能给后面面漆涂装提供良好的附着力。面漆涂装则是舰船外观的重要组成部分。涂装喷漆按喷涂工具可分为自喷罐喷漆和喷笔喷涂。自喷罐喷涂适用于船体等大面积单色区域,喷笔喷涂适用于舷号、标识等精细图案的绘制。底漆一般采用自喷罐喷涂,面漆则根据涂装区域的复杂程度选择合适的工具。

首先对船体进行底漆涂装。喷漆前,为了确保其他部件不被误喷,用遮盖带对已安装好的传动轴、船舵等部件进行保护。船体底漆喷完成效果如图 18 所示。



Figure 18. Hull primer printing
图 18. 船身底漆喷涂

底漆完全干燥后,进行船身面漆喷涂作业。因船身喷涂面积最大,优先完成船身面漆喷涂,再按实船比例绘制水线。随后进行上层建筑的喷涂作业。上层建筑颜色种类远多于船身,喷涂难度较大,因此采用遮盖带分色喷涂法:用遮盖带遮盖非喷涂颜色的目标区域,仅对单一颜色区域进行喷涂;待该喷涂色块完全干燥后,用遮盖带遮盖该色块,再对其他色块进行喷涂,以此完成复杂色块的分色喷涂,待所有上层建筑的涂装作业完成后,将各零件进行组装,得到完整的大型通用远洋舰船模型,完整模型如图 19 所示。



Figure 19. Physical complete model
图 19. 实体制作完整模型

8. 船模试验

为验证模型制作的准确性,检验物理模型的航行稳定性、动力系统的可靠性与模型操作性,开展大型通

用远洋舰船模型的下水自航试验。并通过相机记录大型通用远洋舰船在低速、中速、高速直线行驶时的兴波状况与在转向时的舰船稳定性。大型通用远洋舰船直线行驶时兴波如图 20 所示。舰船转向如图 21 所示。



Figure 20. Wave-making of vessel in experiment
图 20. 舰船试验航行兴波



Figure 21. Turning of the vessel
图 21. 舰船转向

9. 结语

本文针对船海专业实践教学理论中理论与实践脱节问题,以大型通用远洋舰船为载体,构建并实践了“参数获取-三维建模-CFD 兴波仿真预验证-物理模型制作”的一体化的制作方案。通过数字模型与物理模型的双向验证,确保了模型制作与数字建模的准确性。学生在模型制作过程中,系统掌握了参数化建模、流体仿真、激光切割、3D 打印等工程技能,形成了从问题分析到方案落地的完整工程思维。该方案操作简单、可复制性强,可为新工科背景下船海专业的实践教学提供参考。本研究仍存在一定的局限性:CFD 仿真仅开展了直线航行的兴波分析,未涉及转向等复杂情景,在模型测试环节仅分析了舰船航行时的兴波状况,并没有分析船体所受阻力组成与大小。未来可进一步拓展试验内容:优化 CFD 仿真方法,开展转向、横摇等复杂情景下的水动力仿真;在模型上加装姿态传感器、拉力计等设备,进行更全面的水动力试验。

基金项目

2022 年校教改“基于船舶结构力学课程的船舶与海洋工程专业的‘课程思政’教学设计研

究”(010201132202);“新工科背景下海洋工程类专业实践教学体系改革研究”(粤教高函[2021]29 号、校教务[2021]65 号)。

参考文献

- [1] 谢予, 孙崇波, 阴晴. 中国船舶工业 2021 年发展回顾与未来展望[J]. 世界海运, 2022, 45(2): 1-6.
- [2] 林海花, 孙承猛, 高博, 等. 新质生产力背景下船舶阻力与推进课程教学改革研究[J]. 江苏航运职业技术学院学报, 2024, 23(4): 83-87.
- [3] 郭媛丹. “万吨大驱”十舰入列中国远海战力大跃升[N]. 环球时报, 2026-03-28(004).
- [4] 郑国祥. 滔海中坚: 国产 052D 型导弹驱逐舰[J]. 知识就是力量, 2023(7): 52-55.
- [5] 张俊, 负亚杰, 孙启哲. SolidWorks 在船舶曲面建模中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2015(5): 33-36.
- [6] 李尧, 陈仲铭, 严谨, 等. 复杂船体曲面的一种草图重叠建模法[J]. 机械工程与自动化, 2018(5): 54-55+58.
- [7] 张舒天, 谢一凡, 郭思行, 等. 基于福建舰的航空母舰教学实验平台的设计与制作[J]. 海洋工程装备与技术, 2025, 12(1): 9-18.
- [8] ITTC (2021) ITTC Recommended Procedures and Guidelines: 1978 ITTC Performance Prediction Method. <https://www.ittc.info/media/9872/75-02-03-014.pdf>
- [9] Molland, A.F., Turnock, S.R. and Hudson, D.A. (2011) Ship Resistance and Propulsion. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511974113>
- [10] 杨怡君. 船模的阻力计算和实验测定[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- [11] 鲍毅, 许定生. 船舶阻力的相关系数及其应用[J]. 船舶工程, 1996(6): 27-30+21-22.
- [12] 李永顺, 虞凯. 船舶航行阻力[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(2): 12-13.
- [13] 郭思行, 寿海, 陈泽瀚, 等. 海战模型制作——一种基于航母编队的构想海战模型[J]. 海洋工程装备与技术, 2025, 12(4): 10-17.
- [14] 徐来. 提高原子灰利用率的研究[J]. 四川水泥, 2020(11): 91-92.
- [15] 陈毅非. FDM 工艺参数对 3D 打印质量的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [16] 郑宇星, 张舒天, 寿海, 等. 海洋牧场拖曳作业船的船模制作及其兴波阻力实验研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2026, 13(1): 10-17.
- [17] 谢一凡, 张舒天, 郭思行, 等. 舰船模型制作介绍——以 903A 型综合补给舰为例[J]. 海洋工程装备与技术, 2025, 12(1): 19-27.