

档案号	CFD阻力及航速计算书					瑶光1号	
	详细设计					VZJ201-101-07JS	
	浙江北鲲智能科技有限公司 杭州现代船舶设计研究有限公司						

设 绘	校 对	审 核	标 检	审 定	
肖惟超	王兆伟	黄佳林			
比 例	船 级	版 本	页 码	会 签	日 期
	CCS	A	1 / 16	朱云翔	2025. 07

1 概述

本计算书基于商业数值计算软件 SimcenterSTAR-CCM+，给出该船在设计吃水下阻力计算，装船直翼舵桨的推力计算，以及该船航速功率预报的过程概述及结果。

2 船舶和推进器信息

该船设计吃水下的船型参数及船舶主尺度及推进器基本信息见表 1。

表 1 船型参数及船舶主尺度及推进器基本信息

主尺度和船型参数		推进装置参数	
总长/m	32.6	推进装置类型	直翼舵桨
水线长/m	30.5	主机额定功率/转速/rpm	2 台，412kW/1800rpm
设计吃水/m	1.05	桨叶回转直径（桨径）/m	0.810
型宽/m	5.5	桨叶长度/m	0.760
型深/m	2.3	桨叶数量	5
方型系数	0.496		
棱形系数	0.690		
浮心距中（舳后为负）/m	-2.210		

3 CFD 建模说明

3.1 模型几何说明

该船 CFD 采用全尺度建模，建模工具为 Rhino 8，公差 1mm。推进器同样采用全尺度建模，单独进行敞水数值计算。通过推进因子修正，可综合得出本船功率航速预报结果。建模的具体几何尺寸分别见表 2。

表 2 船体和推进装置建模数据

主尺度和船型参数		推进装置参数	
总长/m	32.6	推进装置类型	直翼舵桨
水线长/m	30.5	主机额定功率/转速/rpm	2 台，412kW/1800rpm
设计吃水/m	1.05	桨叶回转直径（桨径）/m	0.810
型宽/m	5.5	桨叶长度/m	0.760
型深/m	2.3	桨叶数量	5

船体三维数值模型见图 1，推进器数值模型及布置见图 2~图 3，包含桨叶的整体预览和桨叶的排布示意图。

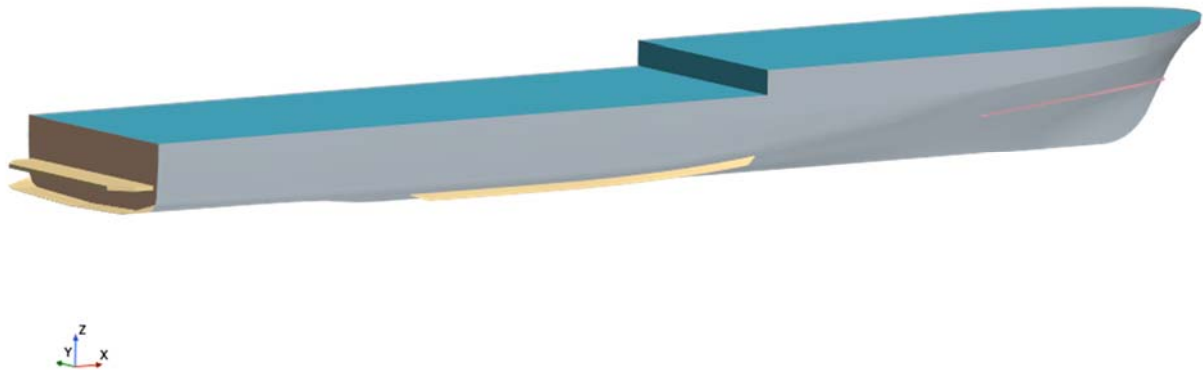


图 1 船舶整体几何建模

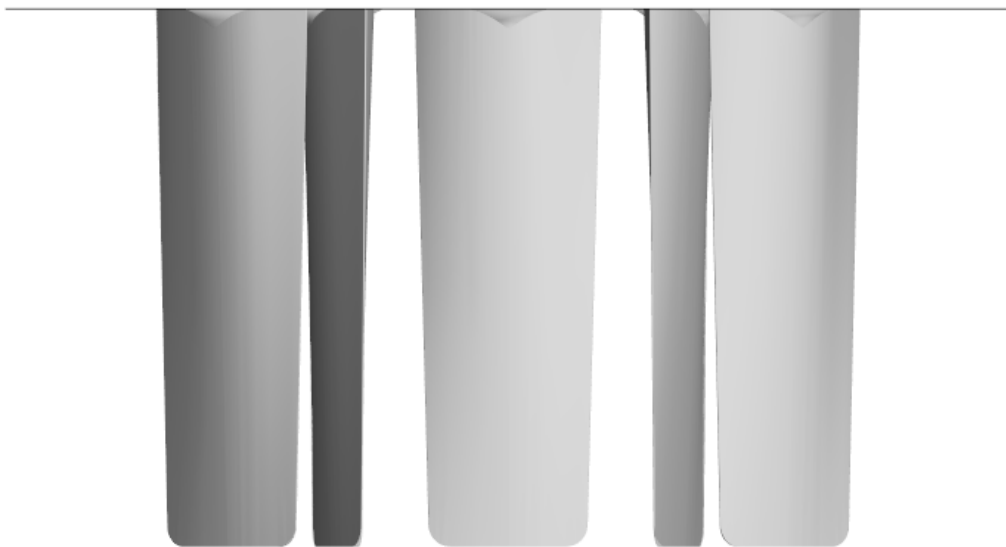


图2 直翼舵桨的几何模型

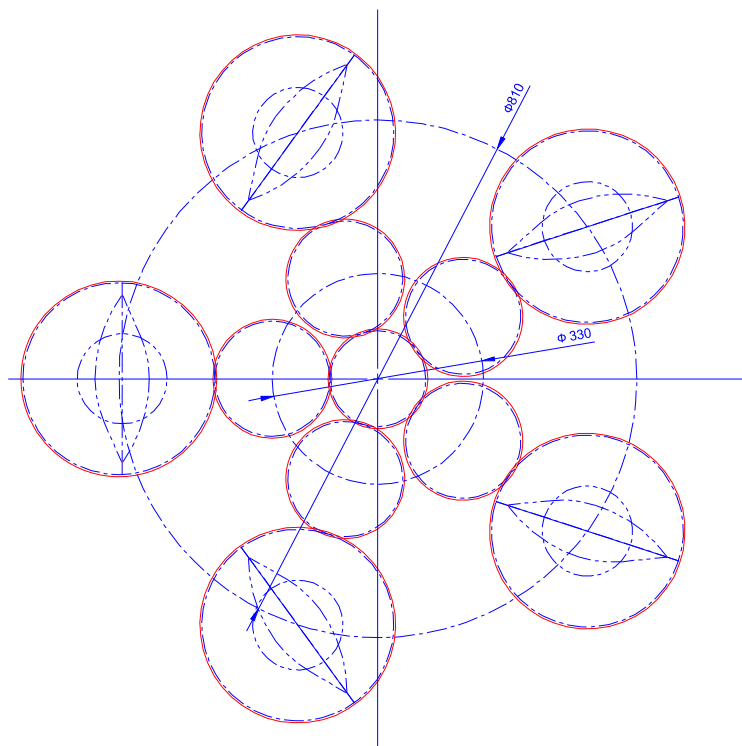


图3 直翼舵桨桨叶位置示意图

### 3.2 CFD 方法概述

该船 CFD 采用的是数值模拟软件 Simcenter STAR CCM+, 导入构建好的几何模型, 进行必要的修补和变换。

#### 3.2.1 模型方法

CFD 采用的是 VOF 方法, 建立 VOF 静水波, 以静水波的速度等效代替船舶航速, 不考虑船舶航态的变化, 船舶始终处于平浮状态。建立水和空气两相, 将水的密度设置为  $1025\text{kg/m}^3$ , 动力粘度设置为  $1.3\text{E-}3\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。由于船舶的雷诺数很高, 选择使用可实现的  $k-\varepsilon$  湍流模型, 应用壁面函数法求解边界层的剪切力, 通过适当的网格划分, 将船体的表面  $Y+$  值控制在 150 左右。船体为对称结构, 故取一半计算域进行计算, 阻力计算结果也相应乘 2。直翼舵桨敞水模拟则采用单相粘性流方法, 流体性质与湍流模型的选取与船体静水阻力

计算模型一致。

### 3.2.2 网格划分

船舶静水阻力 CFD 模拟采用的结构化网格,以 STAR CCM+自带的网格生成器为工具。由于使用了 VOF 方法,还需在自由表面及兴波位置进行加密。此外,在流场复杂区域进行体积控制,如船首和船尾。最终使用了约 155 万网格单元详见图 4 至图 6。直翼舵桨则采用动网格和滑移网格方法,将计算域分割为静止域,公转域和自转域,由于存在两个直翼舵桨,故除静止域外,左右各有一个公转域和四个自转域,混合采用结构化和非结构化网格,对每个区域应用不同的网格策略,从而以较低的计算资源消耗来获得足够的结果精度。详见图 7 至图 11,网格单元总数约 500 万。

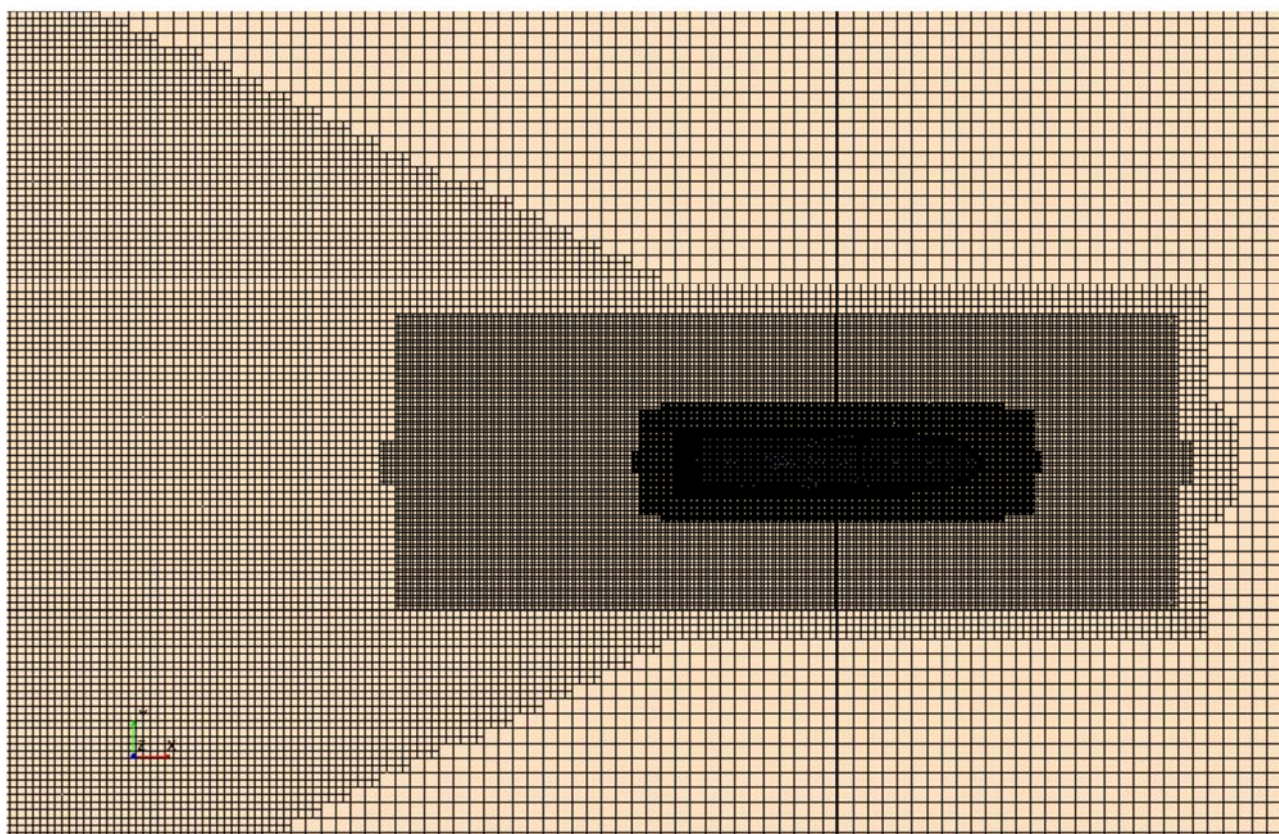


图 4 静水面截面网格示意



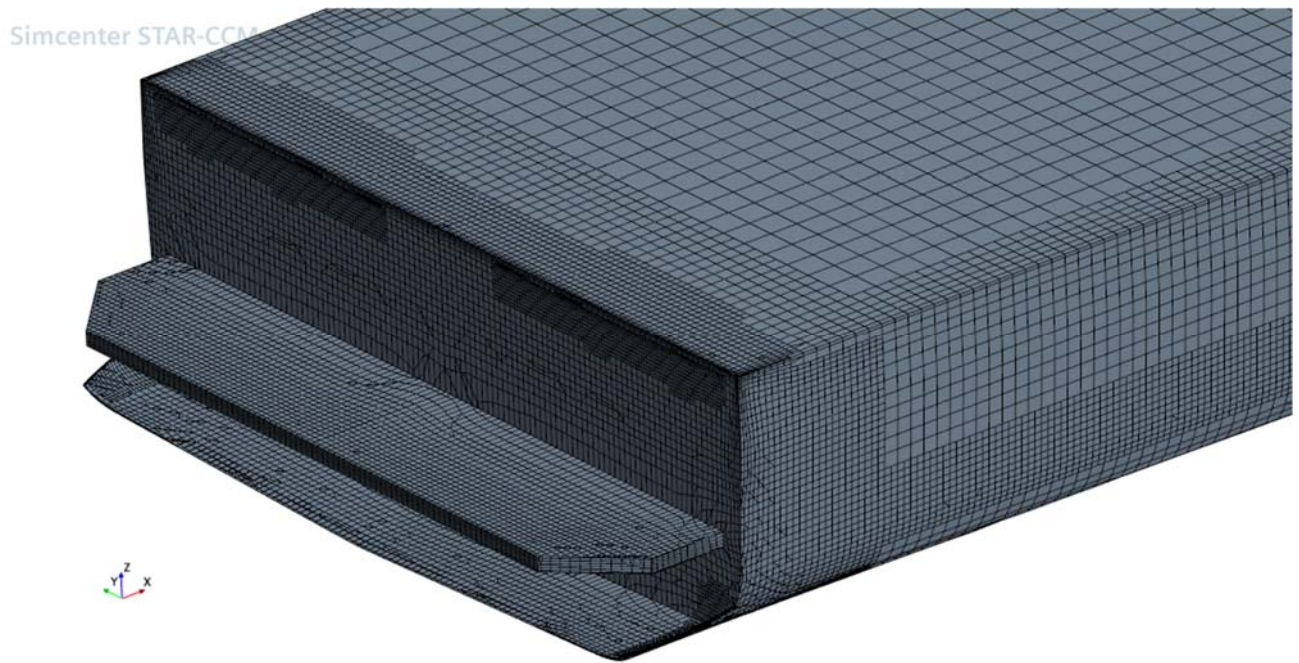


图 5 船尾网格示意

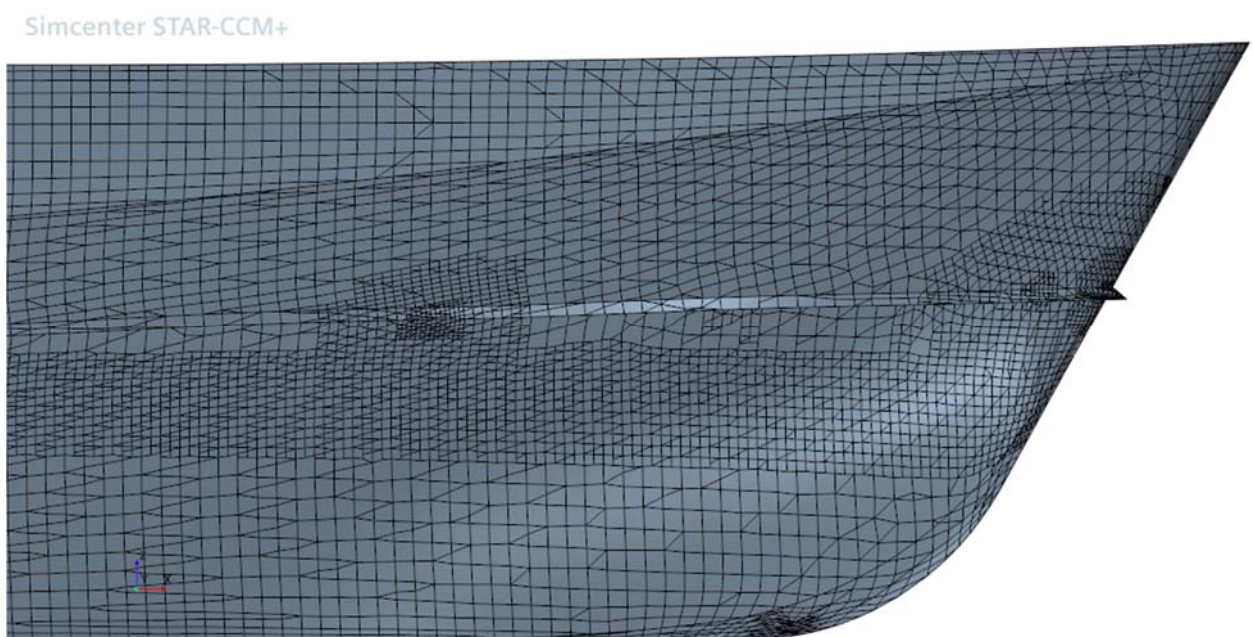


图 6 船首网格示意

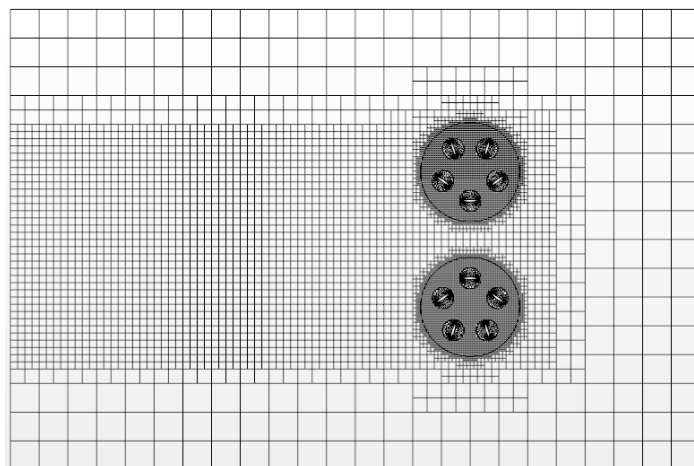


图 7 直翼舵桨桨叶一半高度处水平截面网格示意

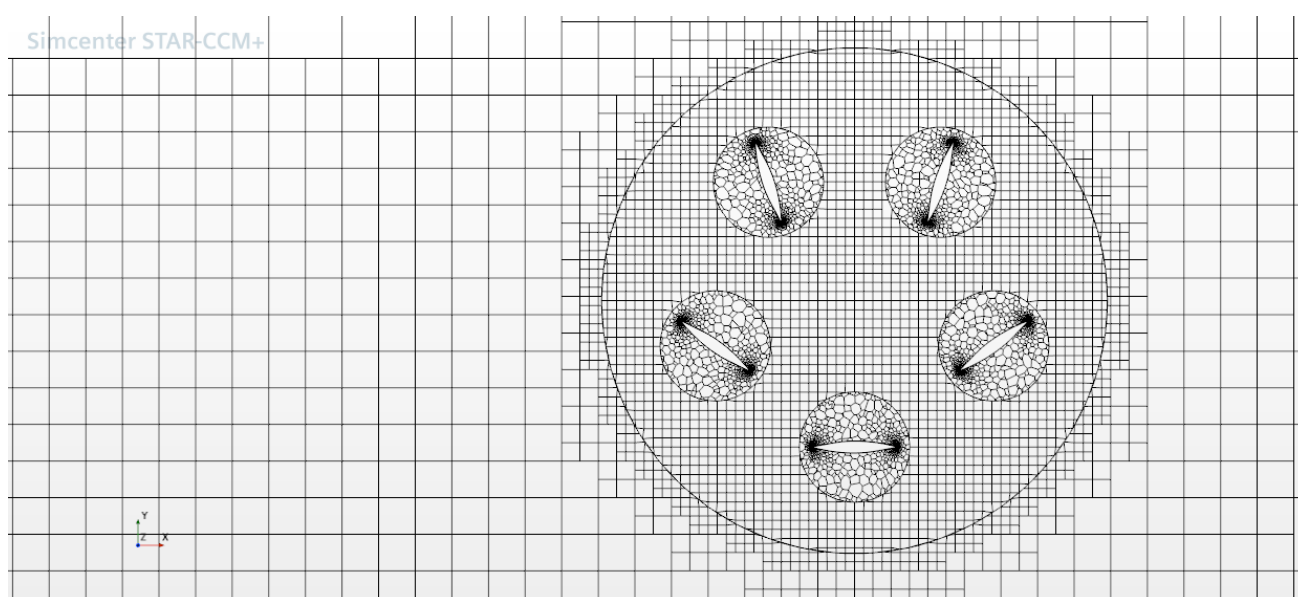


图 8 内域网格细节

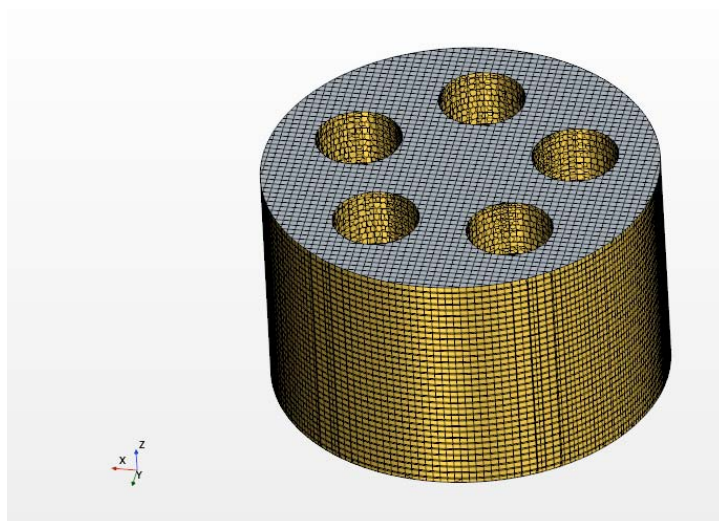


图 9 公转域网格细节

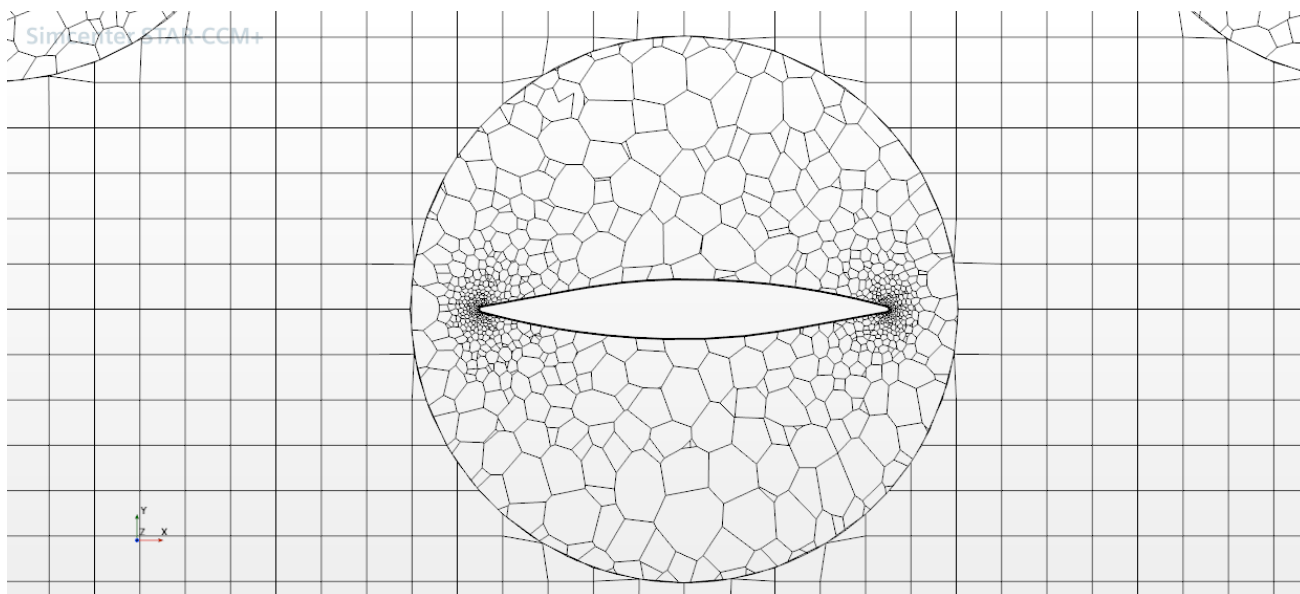


图 10 叶片域网格

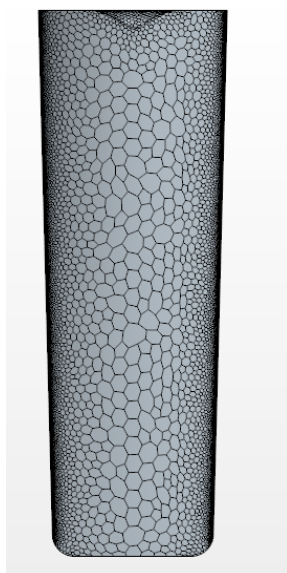


图 11 直翼舵桨桨叶网格

以网格单元总体质量为例，如图 12 所示，绝大多数网格质量大于 0.55，最小网格质量约 0.25，网格质量较好。

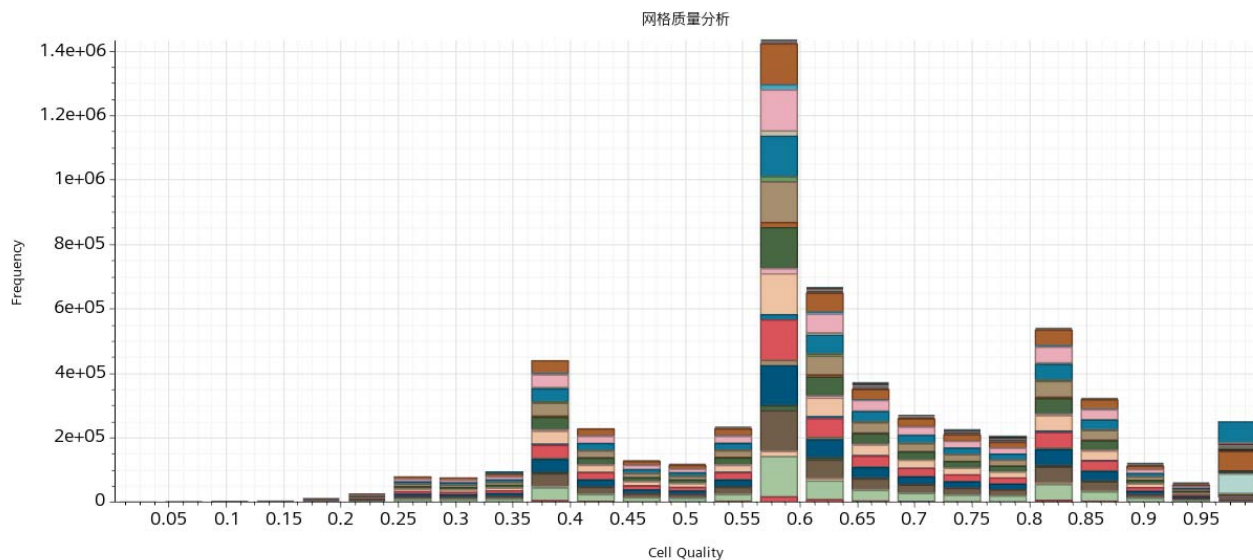


图 12 网格质量检查

### 3.2.3 求解器参数

船舶阻力和直翼舵桨推力均采用隐式非稳态方法计算，时间离散精度为一阶，单个时间步迭代 5 次。经过测试确定船舶阻力计算的时间步长取 0.02s，直翼舵桨推力计算的时间步长取转筒旋转 1° 所需的时间。

### 3.2.4 收敛性说明

以下是结果收敛的一些依据，其中残差结果（见图 13 和图 14）稳定且处于较低水平，同时阻力的计算结果也基本稳定，没有明显震荡。船舶静水阻力计算结果图如图 15~图 19 所示，具体数值结果可参见表 3。

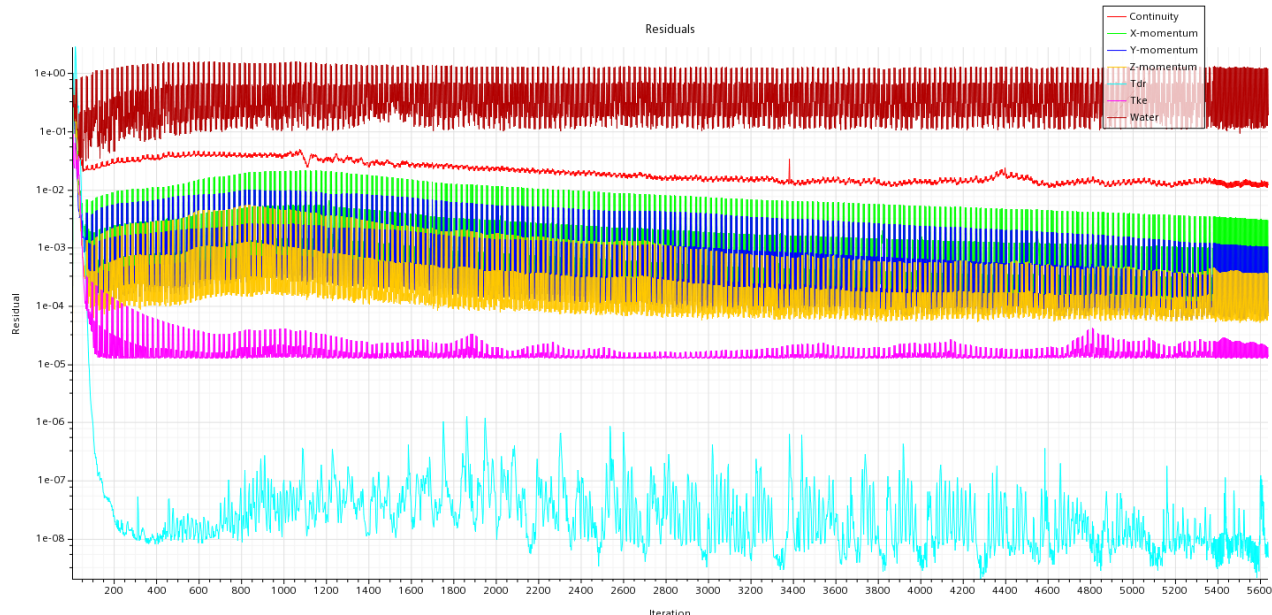


图 13 船舶阻力计算的残差迭代过程曲线（以 19kn 航速下为代表）



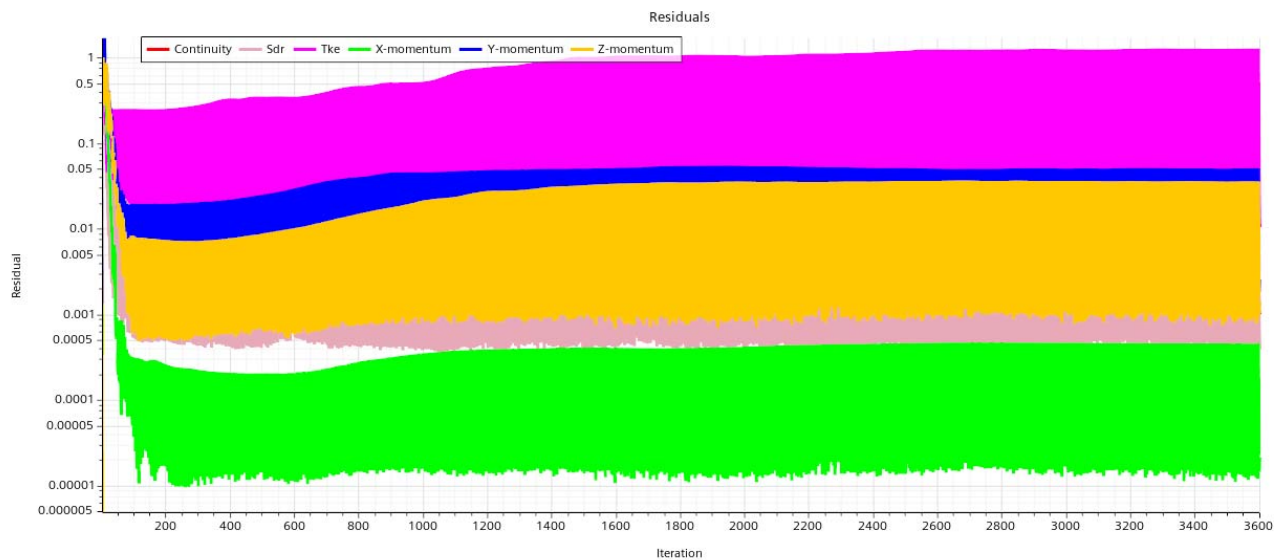


图 14 直翼舵桨推力计算的残差迭代过程曲线（以 19kn 航速下为代表）

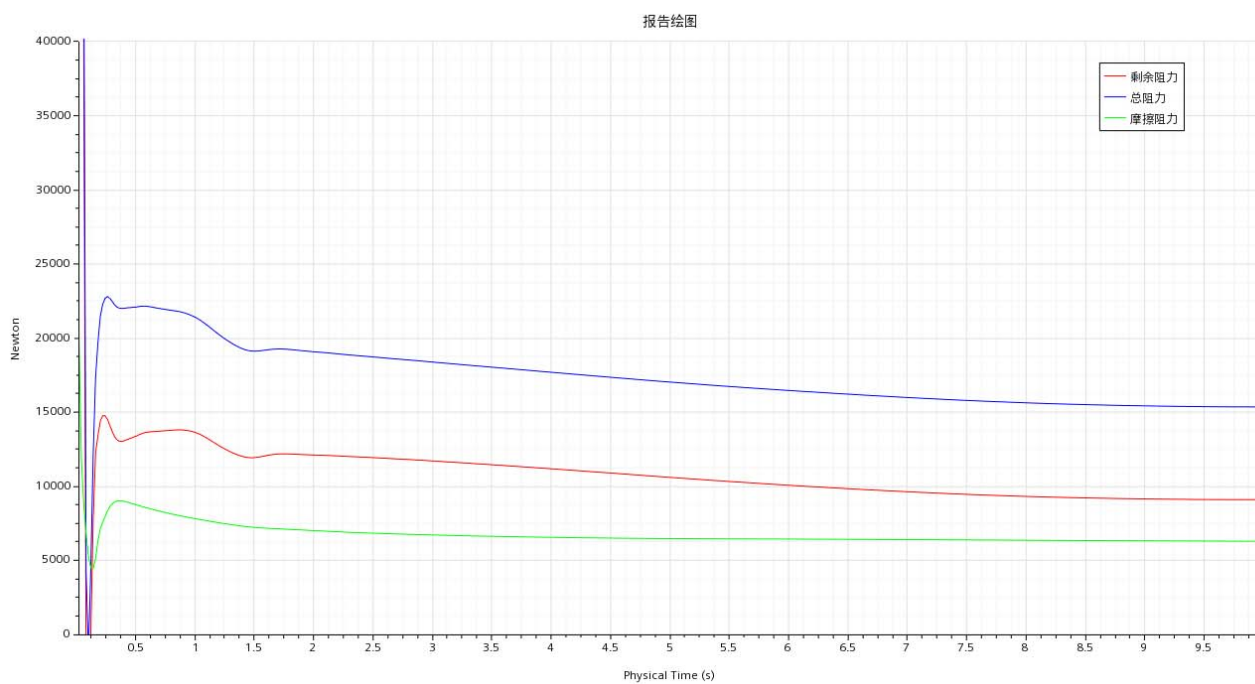


图 15 12.0kn 航速下船体静水阻力结果图

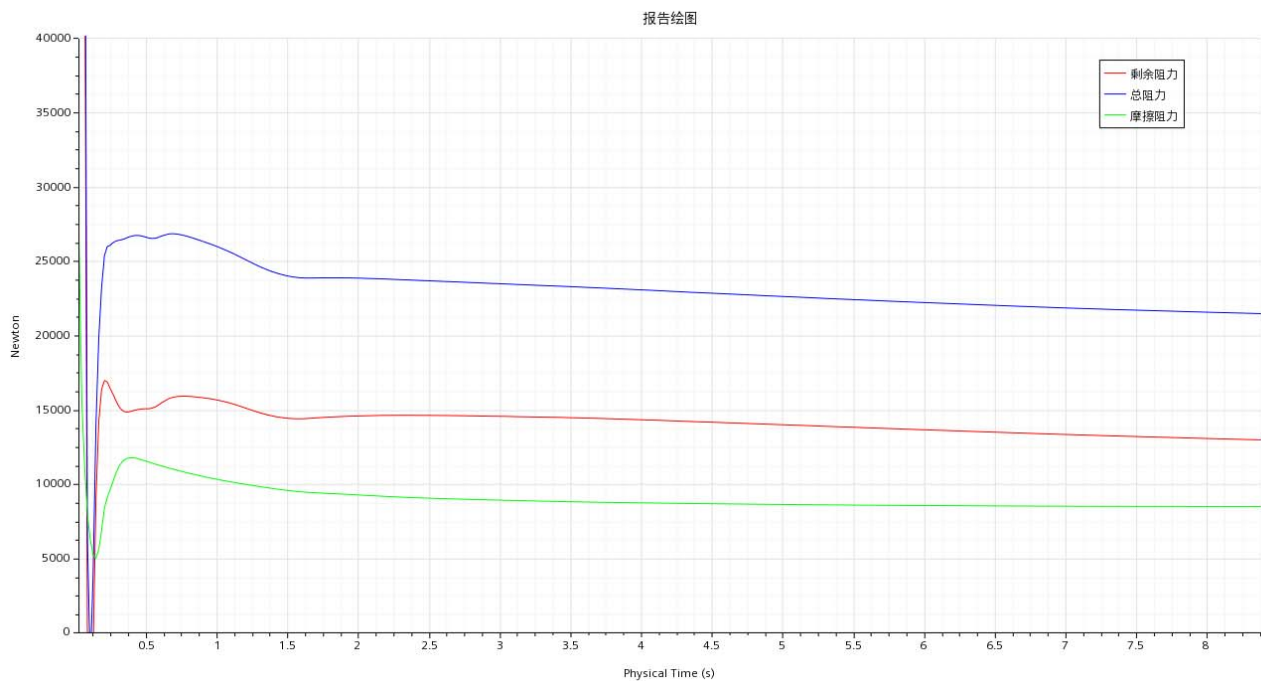


图 16 14.0kn 航速下船体静水阻力结果图

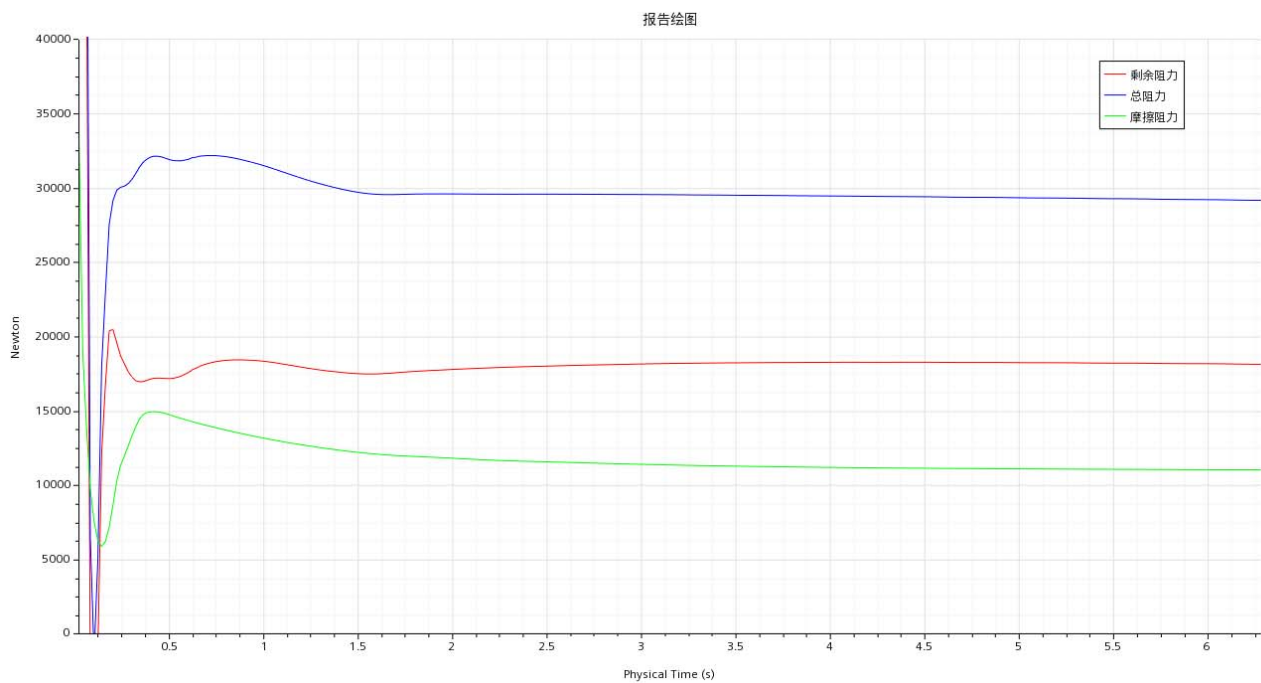


图 17 16.0kn 航速下船体静水阻力结果图

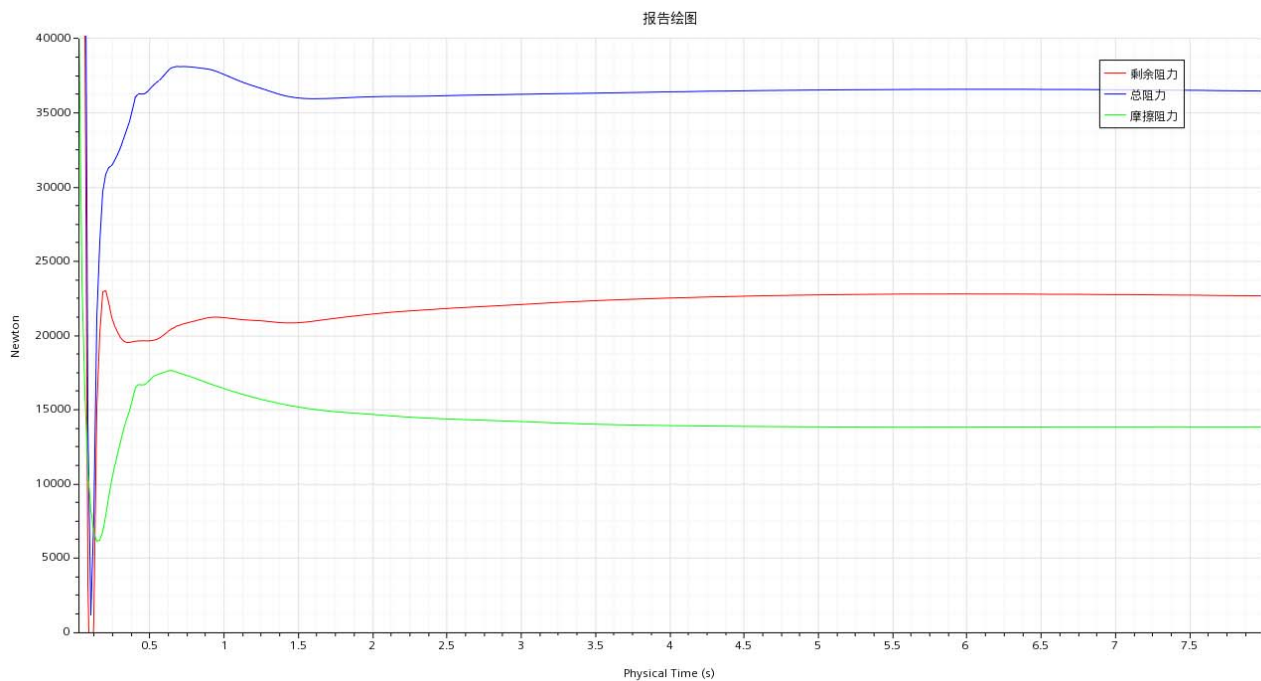


图 18 18.0kn 航速下船体静水阻力结果图

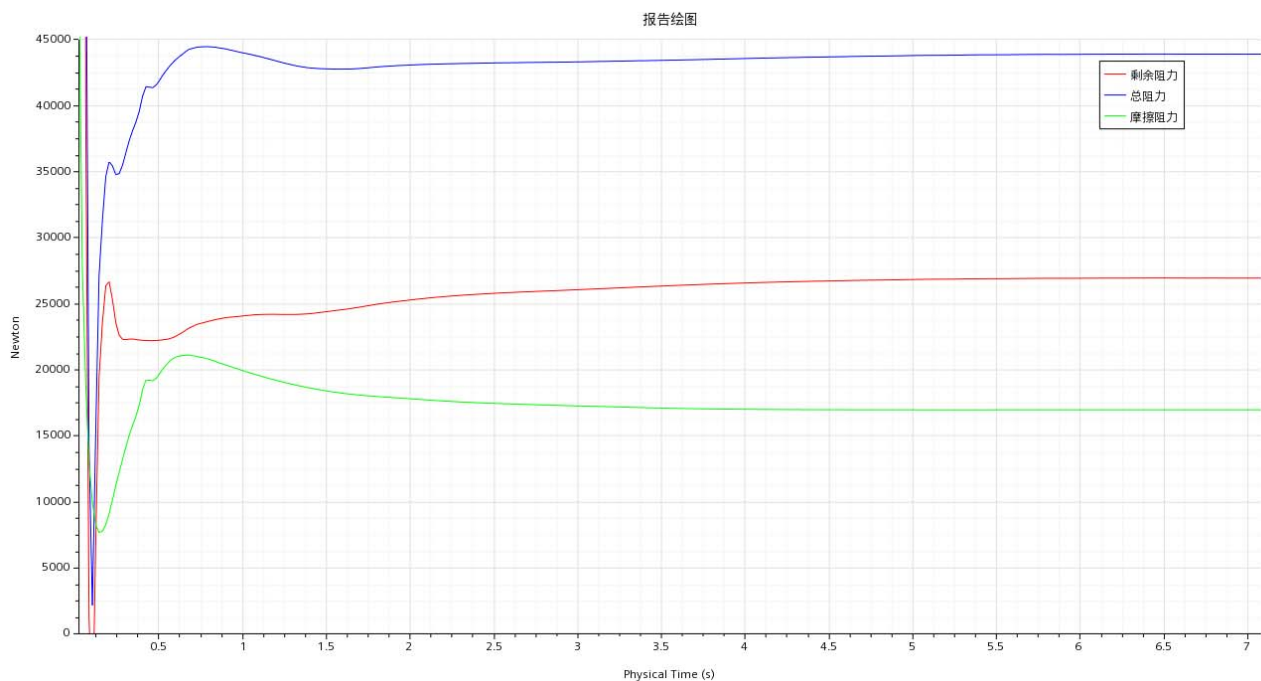


图 19 20.0kn 航速下船体静水阻力结果图

### 3.3 可视化结果处理

以下是 19kn 航速下的其余后处理结果图：

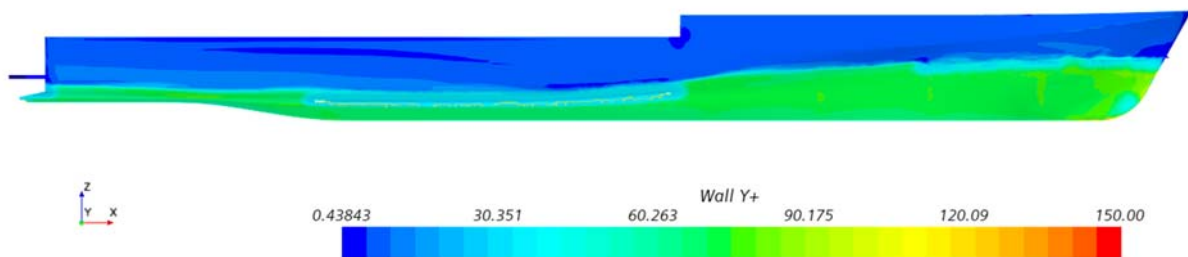


图 20 船体表面 Y+

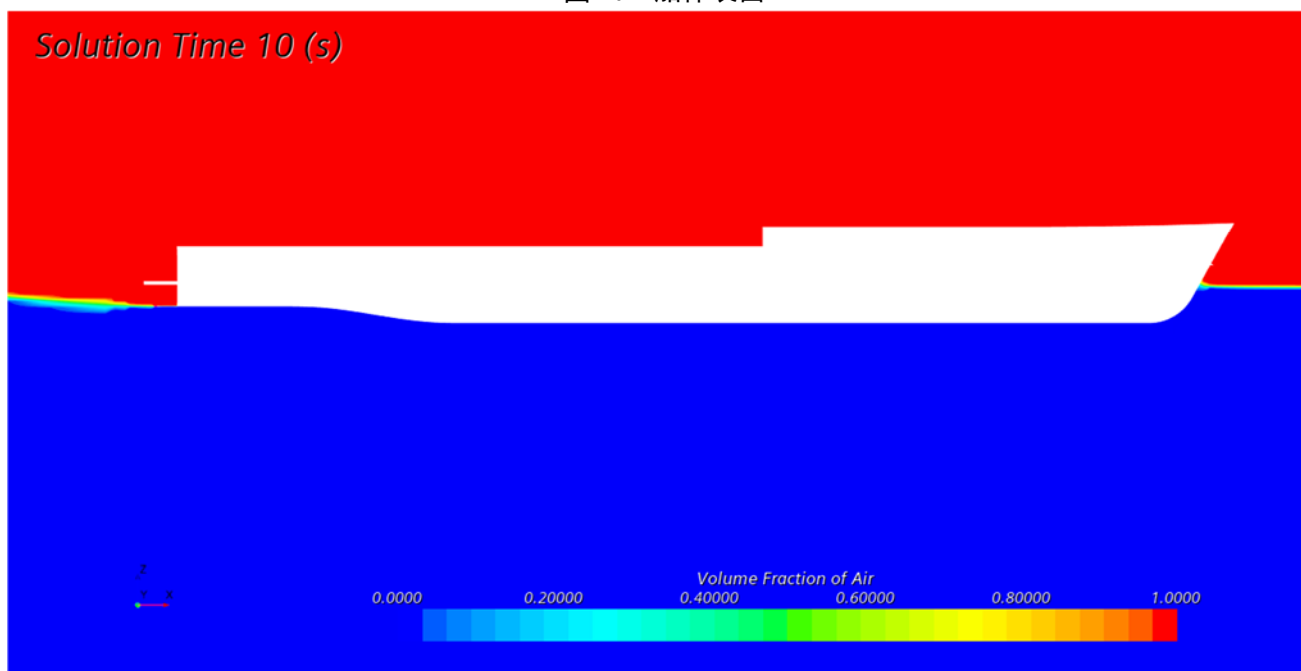


图 21 航行时自由水面示意（中纵截面）

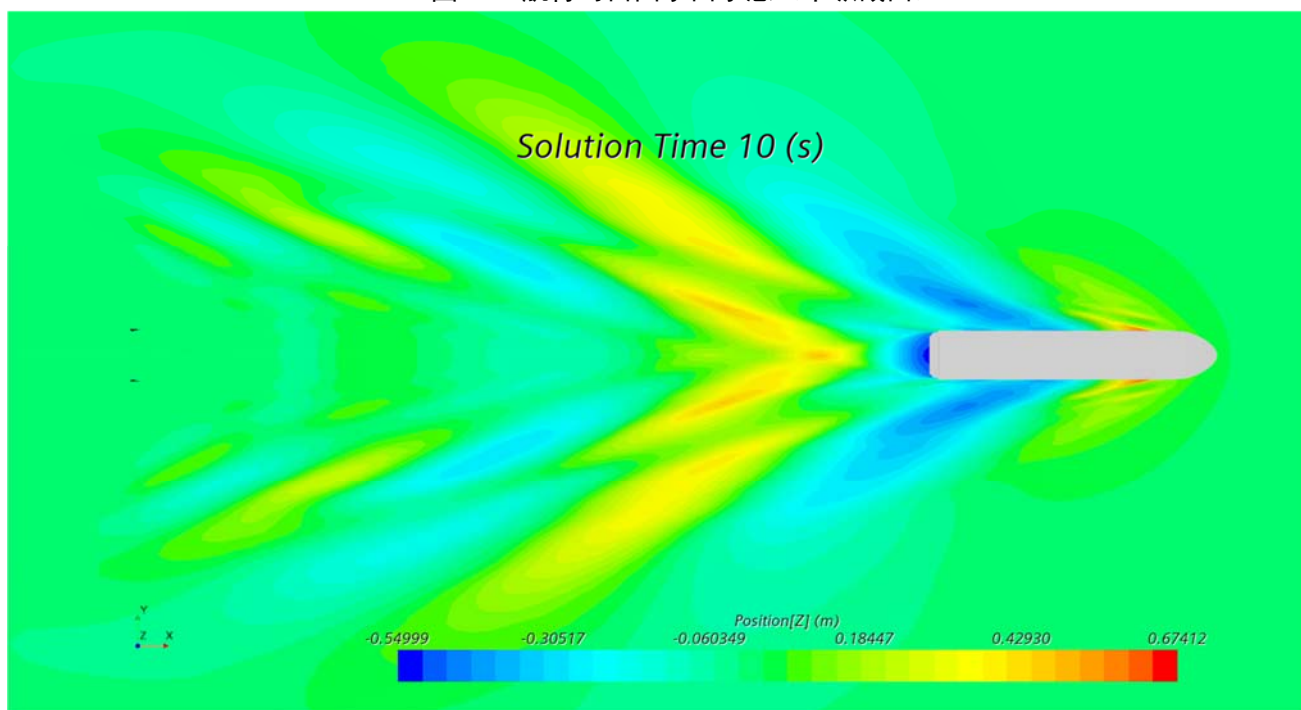


图 22 航行兴波示意



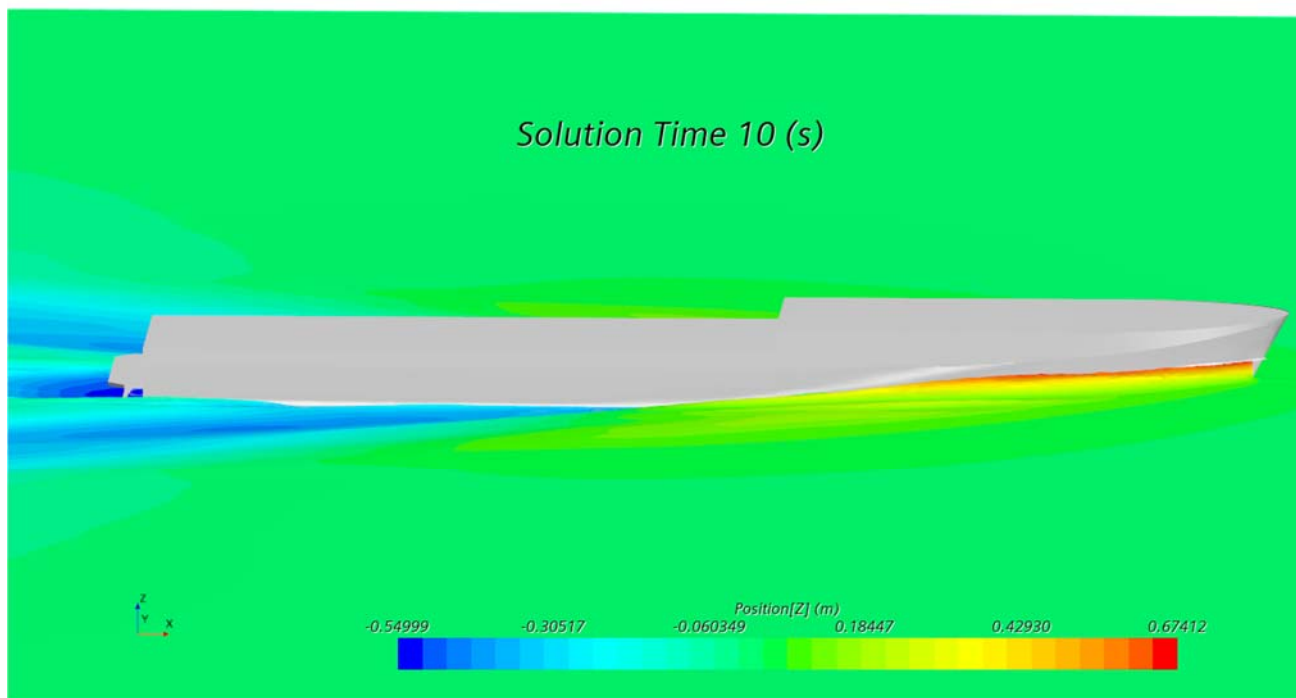


图 23 航行兴波示意（侧面）

Simcenter STAR-CCM+

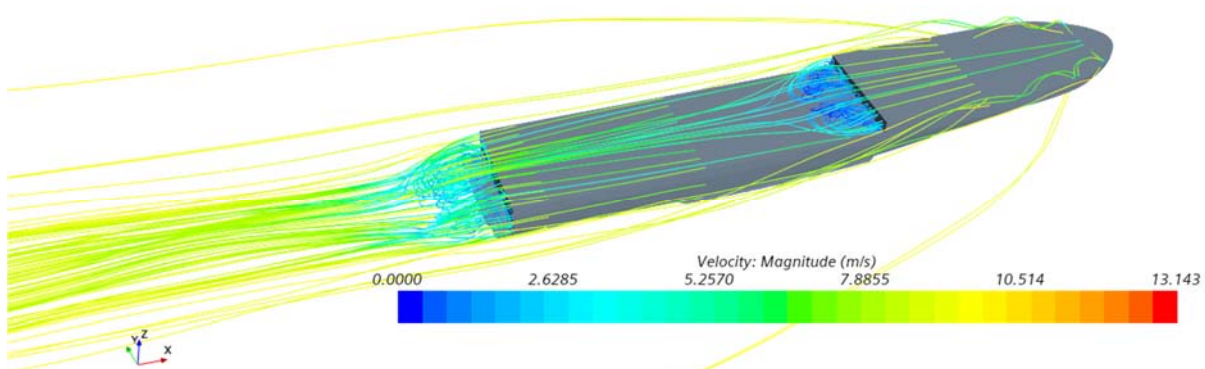


图 24 航行流线示意

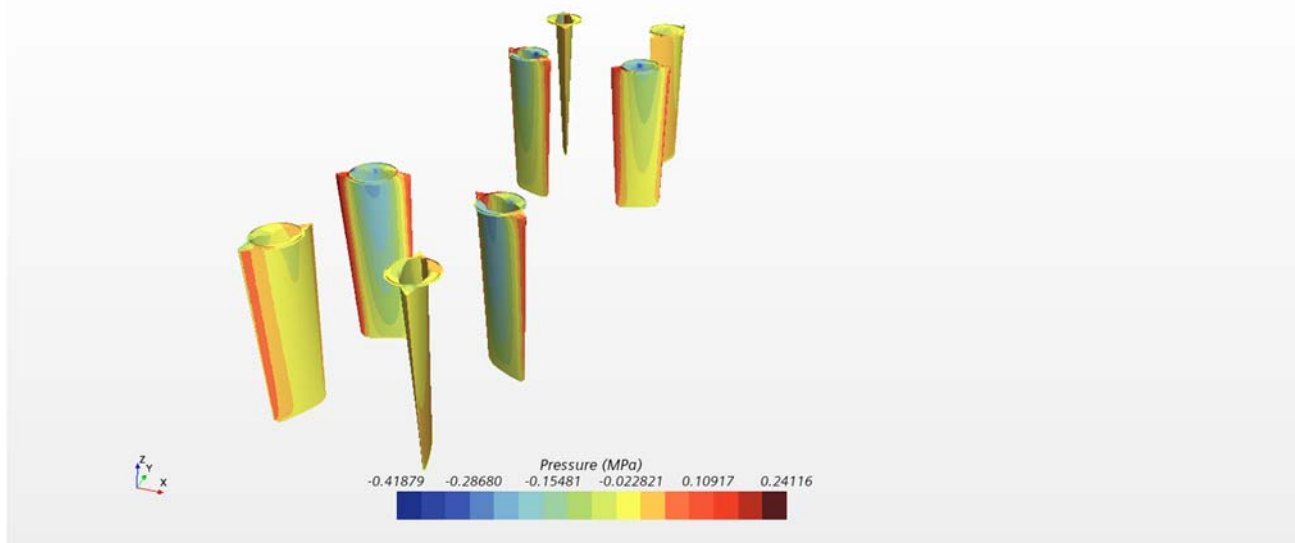


图 25 桨叶表面压力云图

### 3.4 船舶静水阻力计算结果

图 26 给出了该船摩擦阻力、剩余阻力及总阻力的 CFD 计算结果曲线。其中，船舶总阻力数值如表 3 所示。

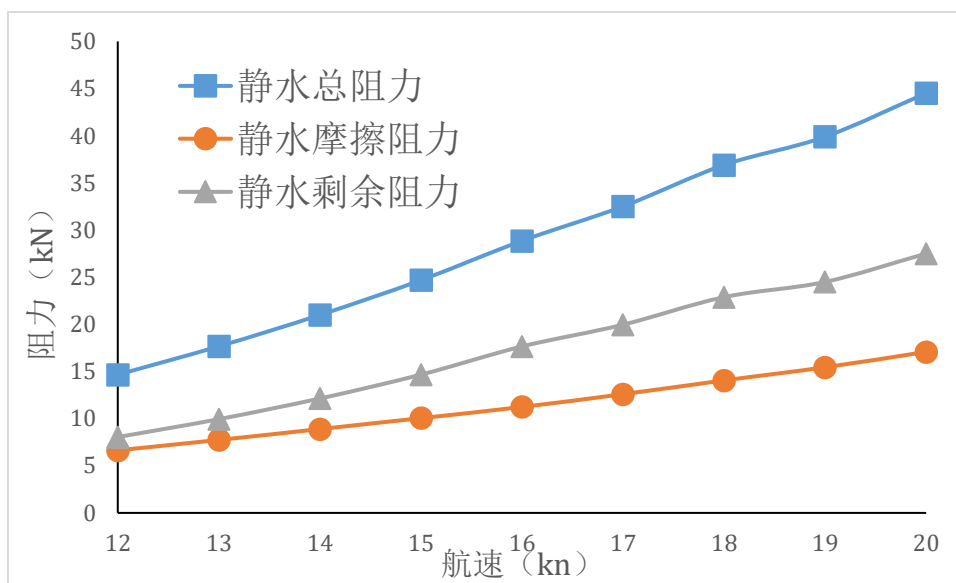


图 26 船舶静水阻力曲线

表 3 船舶静水阻力值 (储备 5%)

航速/kn	12	13	14	15	16	17	18	19	20
船舶总阻力/kN	16.09	19.40	23.08	27.14	31.72	35.75	40.58	43.88	48.97

### 3.5 推进器计算结果

#### 3.5.1 推进因子

对于双桨海上运输船舶，泰勒公式估算伴流分数的公式如下：

$$w = 0.55C_B - 0.2$$

相对旋转效率取 1.000。

3.5.2 直翼舵桨模拟

在额定转速条件下，获得不同进速系数条件下的直翼桨效率，其敞水特性曲线绘制如下：

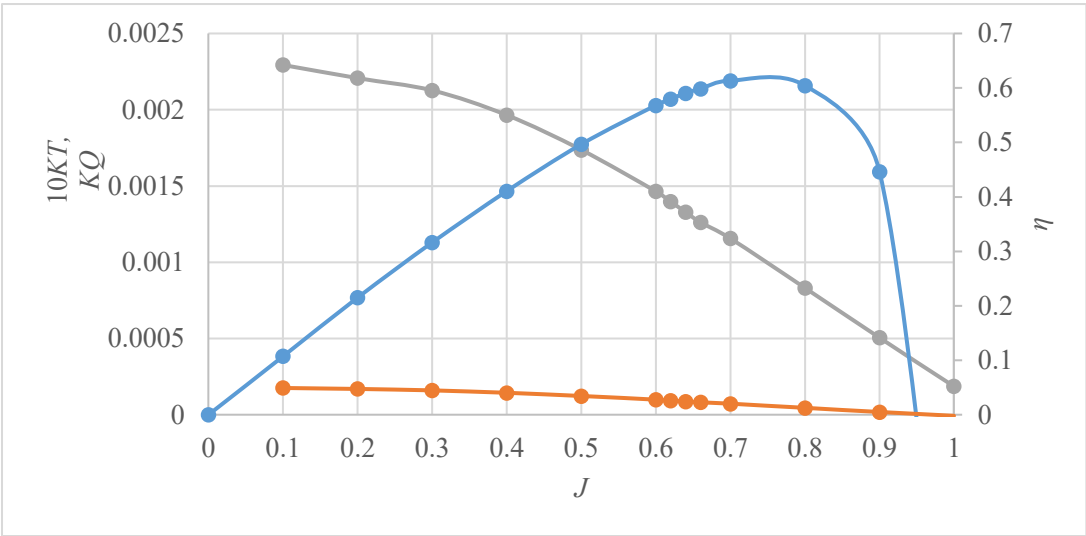


图 27 直翼桨敞水特性曲线

为了使船体、直翼舵桨、主机三者相配合，采用上文估算的伴流分数  $w$ ，假设一组转速，模拟直翼舵桨在相应进速下，不同转速下的推进特性。结合 19kn 航速下的阻力推进特性，如表 4 所示，得到 19kn 航速下满足推进需求及额定功率的直翼桨最佳转速为 327rpm。采用同样的方法（见图 28）可得 12kn 航速下直翼桨的最佳转速为 198.9rpm，插值得该转速下直翼桨的吸收功率应为 80.91kW，考虑轴系传送效率为 0.95，则 12kn 航速下单台主机需要提供的功率至少为 85.17kW。

表 4 19kn 航速下单台直翼舵桨推进特性结果

航速/kn	19						
进速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	9.187						
转速/rpm	316	318	320	322	324	326	328
推力/kN	20.58	21.25	21.93	22.61	23.31	24.01	24.707
扭矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	9.85	10.11	10.38	10.65	10.92	11.19	44.47
吸收功率/kW	325.98	336.81	347.77	359.01	370.54	382.05	393.8
推进效率	0.6171	0.6167	0.6163	0.6156	0.6148	0.6142	0.6132

表 5 12 kn 航速下单台直翼舵桨推进特性结果

航速/kn	12				
进速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5.802				
转速/rpm	190	198	200	202	204
推力/kN	6.26	7.88	8.30	8.73	9.16
扭矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	3.18	3.82	3.99	4.15	4.33
吸收功率/kW	63.25	79.23	83.50	87.87	92.39
推进效率	0.6105	0.6140	0.6138	0.6130	0.6123

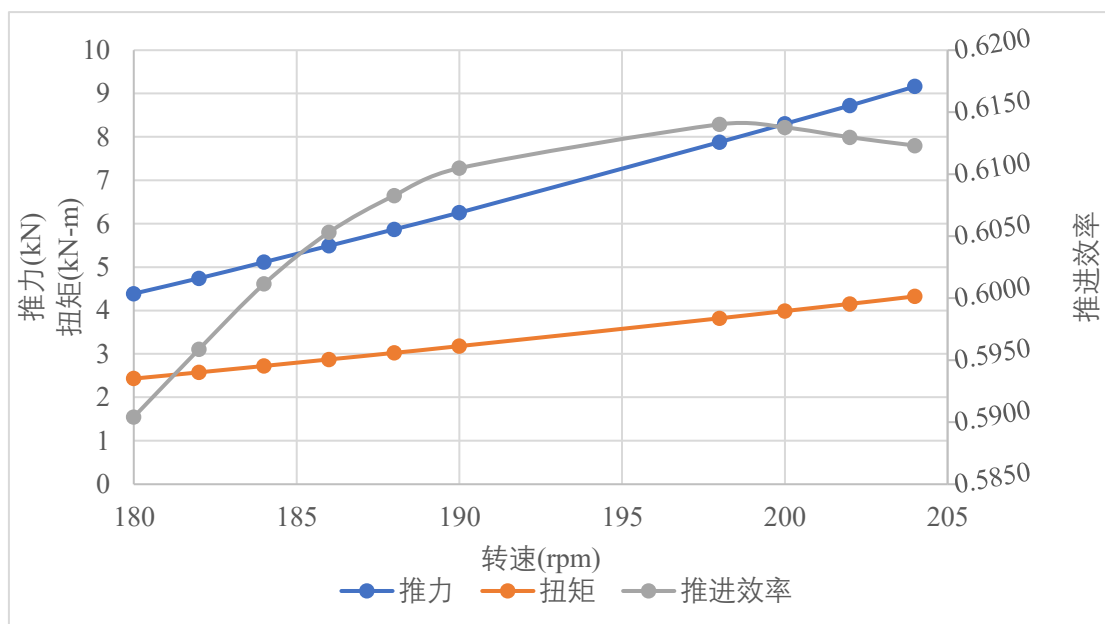


图 28 12 kn 航速下直翼桨推进性能预报

#### 4 航速及功率预报

船舶在设计吃水状态航速预报结果如图 29 所示，由图可知，该船在设计吃水条件下可以达到的最大航速为 19.35kn。

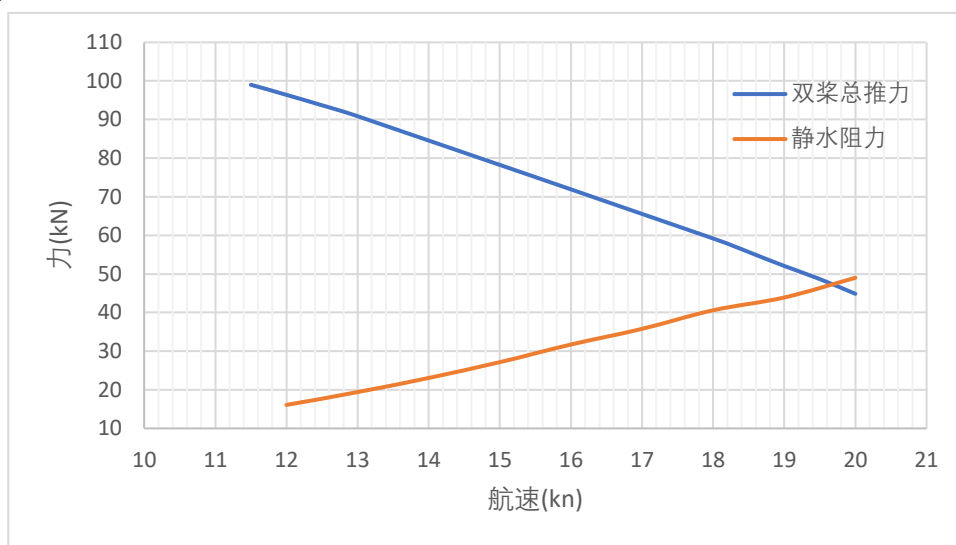


图 29 设计吃水船舶航速预报曲线