



中国船级社

# 基于计算流体力学（CFD）的 船舶航速功率评估指南

Guidelines for the Speed & Power Assessment of Vessel based on CFD

（初稿）

2022年8月

# 《基于计算流体力学（CFD）的船舶航速功率评估指南》

## 简要编写说明

为支持和促进“双碳”目标的实现，船舶能效设计指数（EEDI）作为强制性要求纳入海事法规。EEDI 的初步验证需要通过水池试验确定船舶的航速功率曲线；EEDI 的最终验证需要船舶满载工况，如压载航行则需要通过水池试验确定满载/压载航速功率关系。而考虑到 EEDI 适用的船舶范围扩大，有必要开展替代验证手段，为 EEDI 技术要求实施提供保障。

我社基于计算流体力学（CFD）方法开展了船舶航速功率的预报研究，研究对比了 CFD 方法在船舶阻力、螺旋桨敞水特性、船桨自航因子计算及航速功率换算方面的研究精度及影响因素，总结了 CFD 在船舶航速功率方面的计算流程。并参考国际拖曳水池会议（ITTC）、国际船级社协会（IACS）相关指南的要求，制定了《基于基于计算流体力学（CFD）的船舶航速功率评估指南》，用于指导业界基于 CFD 方法的船舶航速功率评估及 EEDI 验证。

《基于计算流体力学（CFD）的船舶航速功率评估指南》共分 4 章。第 1 章为一般要求，包含了适用范围、定义及图纸资料等三部分内容；第 2 章为数值模型，总结 CFD 的计算流程及不确定因素，包含几何模型、缩尺比、计算域、边界条件、网格划分、粗糙度、自由度、湍流模型、离散方法、时间步长和收敛性判据等内容。第 3 章为数值计算，包含资质要求、最佳实践指南、评估要求和验证要求等内容；第 4 章为报告要求：包含撰写评估报告的要求。附录 1 给出了报告模板。

# 目 录

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 一般要求</b> ..... | <b>1</b>  |
| 1.1 适用范围 .....          | 1         |
| 1.2 定义 .....            | 1         |
| 1.3 图纸资料 .....          | 2         |
| <b>第 2 章 数值模型</b> ..... | <b>4</b>  |
| 2.1 几何模型 .....          | 4         |
| 2.2 缩尺比 .....           | 4         |
| 2.3 计算域 .....           | 4         |
| 2.4 边界条件 .....          | 5         |
| 2.5 网格划分 .....          | 5         |
| 2.6 表面粗糙度 .....         | 6         |
| 2.7 自由度 .....           | 7         |
| 2.8 湍流模型 .....          | 7         |
| 2.9 离散方案及求解算法 .....     | 7         |
| 2.10 时间步长 .....         | 7         |
| 2.11 收敛性判据 .....        | 8         |
| <b>第 3 章 数值计算</b> ..... | <b>9</b>  |
| 3.1 资质要求 .....          | 9         |
| 3.2 最佳实践指南 .....        | 9         |
| 3.3 评估要求 .....          | 9         |
| 3.4 验证要求 .....          | 12        |
| <b>第 4 章 报告要求</b> ..... | <b>13</b> |
| 4.1 简介与目标 .....         | 13        |
| 4.2 资质认可 .....          | 13        |
| 4.3 图纸资料 .....          | 13        |
| 4.4 船型描述 .....          | 13        |
| 4.5 CFD 软件及版本 .....     | 14        |
| 4.6 CFD 计算流程 .....      | 14        |
| 4.7 结果后处理 .....         | 15        |
| <b>附录 1 报告模板</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>参考文献</b> .....       | <b>19</b> |

# 第 1 章 一般要求

## 1.1 适用范围

1.1.1 本指南适用于对常规主流船型进行基于计算流体力学（CFD）方法的船舶航速功率评估。就航行区域而言，本指南适用于内河船舶，其他船舶可参照执行。

1.1.2 本指南适用的 CFD 求解器类型和采用的流场基本假定如下：

(1) 本指南适用于基于网格化（结构化网格、非结构化网格或重叠网格）的 CFD 求解器，其采用的流体控制方程至少应为雷诺平均方程（RANS），本指南不适用于无网格方法。

(2) 本指南适用于湍流状态下的船舶水动力流动模拟：对于模型尺度，其对应的雷诺数量级为  $10^6 \sim 10^7$ ；对于实船尺度，其对应的雷诺数数量级为  $10^8 \sim 10^9$ 。

(3) 本指南适用于不可压缩状态下的自由面流动模拟，其介质为空气和水，其对应的傅汝德数量级为 0.1，不适用于傅汝德数大于 1 的模拟。

## 1.2 定义

1.2.1 就本指南而言，相关定义如下：

(1) **计算流体力学（CFD）**：系指采用计算流体力学求解器/软件，在计算机上对流动控制方程进行离散化求解，流动控制方程至少应使用雷诺平均方程（RANS），并可考虑自由面影响。CFD 一般分为三个典型步骤：前处理、计算求解和后处理。

(2) **常规主流船型**：系指采用常规轴系-螺旋桨推进，具有单桨推进或者双桨推进方式船舶。对于三桨推进船舶、非常规螺旋桨推进船舶（如直翼推进、轮缘推进、表面桨推进、喷水推进等）以及采用特殊流体节能措施的船舶（如涂层减阻、气膜减阻以及风力助推等），则不适用本指南进行评估/验证。

(3) **相似船舶**：系指船舶类型相同，并具有相似的船体线型、相同数量的轴/螺旋桨。相似的船体线型是指具有相似的艏形（球艏、直艏、V 形艏等）、艉形（双艉、双尾鳍、单艉、纵流形艉等）及附体布置，且主要船型参数（长宽比  $L/B$ 、宽吃水比  $B/T$ 、方形系数  $C_b$ ）差异在 5% 以内。

(4) **修正系数**：系指 CFD 的计算结果与模型试验或实船试航所得到的同等航速下的船舶功率比值，该比值为 50% 主机额定功率（MCR）和 100% MCR 之间（含）至少 4 个功率点（尽量均布，应含 75% MCR 附近的工况点）的比值的

平均值。

(5) **船长 ( $L$ )**: 系指船舶在计算工况下的水线面前后两端之间的水平距离, m。

(6) **雷诺数 ( $Re$ )**: 表征流场流动状态的无量纲数。对于船舶模拟, 雷诺数采用下式计算:

$$Re = \frac{V_s L}{\nu}$$

式中:  $V_s$  为船舶航速, m/s;

$L$  为船长, m;

$\nu$  为水的运动粘性系数,  $m^2/s$ ;

对于螺旋桨模拟, 雷诺数采用下式计算:

$$Re = \frac{b_{0.70R} \sqrt{V_A^2 + (0.70n\pi D_p)^2}}{\nu}$$

式中:  $b_{0.70R}$  为螺旋桨 0.70 半径处桨叶切面弦长, m;

$V_A$  为螺旋桨进速, m/s;

$n$  为螺旋桨转速, r/s;

$D_p$  为螺旋桨直径, m;

$\nu$  为水的运动粘性系数,  $m^2/s$ 。

(7) **傅汝德数 ( $Fr$ )**: 表征船舶航行兴波状态的无量纲数

$$Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gL}}$$

式中:  $V_s$  为船舶航速, m/s;

$L$  为船长, m;

$g$  为重力加速度, 取  $9.81m/s^2$ 。

### 1.3 图纸资料

1.3.1 基于 CFD 方法进行船舶航速功率评估时, 以下图纸/资料应提交备查:

- (1) 型线图及型值表;
- (2) 肋骨型线图;
- (3) 总布置图;
- (4) 螺旋桨图;
- (5) 舵叶图;
- (6) 桨舵布置图;
- (7) 静水力计算书。

1.3.2 基于 CFD 方法进行船舶航速功率评估时,以下图纸/资料应提交审核:

- (1) 三维几何模型 (如 IGES、X\_T、STEP、STL 等格式);
- (2) 最佳实践指南报告;
- (3) 船舶航速功率 CFD 计算报告;
- (4) 计算数据文件 (含网格、计算结果及后处理)。

## 第 2 章 数值模型 2.1 几何模型

2.1.1 几何模型应严格按照船舶型线图及型值表进行三维建模，三维模型能够精确反映船舶线型特征。船舶几何模型表面应确保光滑连接，并能够生成全封闭实体。几何模型应为可接受的通用数据格式，如 IGES、X\_T、STEP 及 STL 等格式。

2.1.2 几何模型应包含影响阻力及流场特性的船舶附体，如舵、轴支架及舦龙骨等，其位置关系应按照总布置图及桨舵布置图进行严格对应。

2.1.3 应提供三维几何模型和静水力计算书对比数据，对比要素应至少包含船长、型宽、型深、计算工况下的湿表面积、型排水体积、浮心（重心）纵向位置和浮心（重心）垂向位置等信息。其中湿表面积对比的相对误差应不大于 3%，其他要素对比的相对误差应不大于 1%。

### 2.2 缩尺比

2.2.1 CFD 计算可基于模型尺度也可采用实船尺度。对于基于模型尺度进行 CFD 计算时，计算模型可参照水池试验的船模尺度。为保证缩尺模型流动处于湍流状态，应根据船舶航速范围限制计算模型最小尺度：对于船模，其对应的临界雷诺数为  $2 \times 10^6$ ，其最小船模尺度为：5m；对于桨模，其对应的临界雷诺数为  $3.0 \times 10^5$ ，其最小桨模尺度为：0.2m。

### 2.3 计算域

2.3.1 计算域尺寸设置应足够大以便消除边界的影响，如无特别要求时，计算域尺寸可采用以下方案：

(1) 对于船舶阻力/自航计算采用矩形计算域，前方边界  $1.5L$ ；后方边界  $3.5L$ ；侧边界  $1.5L$ ；底部边界  $1.5L$ ；顶部边界  $0.5L$ ，其中  $L$  为船长；

(2) 对于螺旋桨敞水性能计算采用圆柱形计算域，前边界为  $2D_p$ ，后边界为桨后  $6D_p$ ，侧壁边界为  $4D_p$ ，其中  $D_p$  为螺旋桨直径。

(3) 对于流场存在对称性的船舶，在进行阻力/自航计算时可在船体一侧的中纵平面上使用对称边界，即计算域仅考虑完整计算域的对称的一半进行。

(4) 对于螺旋桨，流场在圆周方向存在周期性，在进行敞水计算时可使用

周期性边界，即计算域仅定义包含完整圆柱计算域的  $1/Z$  扇形区域（其中  $Z$  为桨叶数）。

## 2.4 边界条件

2.4.1 对于计算域的边界条件，应根据求解器类型及评估主题选择合适边界条件。

(1) 对于给定速度和湍流强度的边界条件，其湍流强度不应超过 10%，更大值应记录在案，并通过最佳实践证明其合理性；

(2) 对于采用对称计算域，对称面应选择对称边界条件；对于螺旋桨采用周期性计算域，扇形区域的侧边界应选择周期性边界条件；

(3) 对于船体、附体及螺旋桨表面，应选择固壁边界条件，壁面边界层求解可采用近壁模型或者壁面函数。

## 2.5 网格划分

### 2.5.1 网格划分原则

(1) 网格为离散化的空间求解节点，网格类型有结构化网格（包括多块结构化网格）、非结构网格、混合网格及重叠网格，网格单元类型有四面体、六面体、楔形及金字塔形等。

(2) 网格划分应能正确求解流场的所有重要特征，包括壁面边界层、尾部伴流及自由面波形等。对于流场关键特征区域，应进行网格细化，以提高网格分辨率。对于边界层、自由面以及其他高分辨率区域应避免使用四面体网格单元。

(3) 网格划分应根据求解器类型、硬件资源及流场特征区域选择合适的网格及单元类型、网格数量、加密细化原则。应至少提供一种工况下的系统性的网格细化分析，以评估流场对于网格的依赖性，根据评估主题形成网格划分的最佳实践。

### 2.5.2 自由面网格

对于自由面流动模拟，应使用正交网格进行求解。对于使用体积分数等场方程进行自由面求解时，应根据船体兴波波长确定网格节点数目，对于二阶空间精度，应使用不少于 40 个网格点来求解船体兴波波长，兴波波长  $\lambda_w$  可参照下式计算：

$$\lambda_w = 2\pi F_r^2 L$$

式中：  $\lambda_w$ —为兴波波长， m；

$F_r$ —为付如德数；

$L$ —为船长， m。

### 2.5.3 边界层网格

(1) 对于边界层的模拟，边界层网格第一层网格节点与壁面间距应根据无量纲的特征数  $y^+$  确定：

$$y^+ = \frac{\sqrt{\rho\tau_w}}{u} y$$

式中，  $\tau_w$ —壁面摩擦力；

$u$ —局部流速；

$\rho$ —为水密度；

$y$ —第一层网格节点与壁面间距， m。

(2) 采用模型尺度计算时，对于采用近壁模型求解，第一层网格节点对应的  $y^+$  推荐为不大于 1.0；对于采用壁面函数求解，第一层网格节点应布置在对数区域，对应的  $y^+$  推荐为：  $30 < y^+ < 100$ 。

(3) 边界层网格应在避免在壁面法线方向上伸展过快，推荐边界层网格伸展率为 1.2 。

### 2.5.4 网格质量检查

检查网格质量以保证所有网格体积都是正的，网格的扭曲度和纵横比在可接受范围内，并且在大多数地方满足正交性。

## 2.6 表面粗糙度

2.6.1 进行 CFD 计算时，不考虑表面粗糙度的影响。表面粗糙度在实船航速功率换算时按照粗糙度补贴系数  $\Delta C_F$  进行计算，  $\Delta C_F$  可按下式计算：

$$\Delta C_F = \left[ 150 \left( \frac{K_s}{L} \right)^{1/3} - 0.64 \right] \times 10^{-3}$$

式中， $k_s$ —为粗糙度表观高度，取  $k_s=150\times 10^{-6}$ ，m；

$L$ —为船长，m。

## 2.7 自由度

2.7.1 阻力计算运动自由度应至少考虑纵倾和升沉。

## 2.8 湍流模型

2.8.1 湍流模型应至少采用两方程模型，如无特别要求，推荐采用剪切应力输运  $k-\omega$  模型（SST  $k-\omega$ ）或显式代数应力模型（EASM）及其他类似功能湍流模型。

## 2.9 离散方案及求解算法

2.9.1 控制方程中的扩散项建议使用中心差分格式进行离散，对流项建议使用二阶迎风差分格式进行离散，边界层湍流的求解应具备二阶以上的差分格式。

2.9.2 对于求解定常流动，可使用一阶时间离散化方案。对于求解非定常流动，需使用二阶时间离散方案。

## 2.10 时间步长

2.10.1 时间步长选择应满足 Courant–Friedrichs–Lewy 条件（CFL），即：

$$\frac{|\bar{u}| \Delta t}{\Delta x} < C_{\max}$$

式中： $|\bar{u}|$ —为局部速度；

$\Delta t$ —为时间步长；

$\Delta x$ —流动方向单元尺寸；

$C_{\max}$ —最大库朗数，对于显式求解器， $C_{\max} < 1$ ；

2.10.2 可根据评估主题和求解器类型合理选择时间步长，时间步长可参照以下推荐方案：

(1) 对于使用二方程湍流模型，时间步长应不大于  $0.01 L/V_s$ ；对于使用雷诺应力湍流（RSM）模型，时间步长应不大于  $0.001 L/V_s$ ；

(2) 对于螺旋桨旋转流动模拟，每转至少使用 180 个时间步长。

## 2.11 收敛性判据

2.11.1 为确保求解方案可靠收敛，应定义和检查收敛性判据。收敛性判据可通过质量及动量方程的残差变化进行评估，同时监测力或力矩等积分量达到稳定。



## 第 3 章 数值计算

### 3.1 资质要求

3.1.1 基于 CFD 方法进行船舶航速功率评估及 EEDI 验证的单位或者团体，进行首次验证时，应制定并向验证方提交最佳实践指南(Best Practice Guideline)，证明其能够基于 CFD 方法开展船舶航速功率评估的能力。

### 3.2 最佳实践指南

3.2.1 最佳实践指南应参照本指南第 2 章所列举的各项内容进行制定，应包含 CFD 求解器类型及版本、几何模型、缩尺比、计算域、边界条件、网格划分、湍流模型、自由度、离散方案、时间步长、收敛性判据等内容。

3.2.2 最佳实践指南应根据评估主题、船型及所需要的不确定度进行区分化指导：

(1) 评估主题包括：基于船模的阻力计算、基于桨模的螺旋桨敞水特性计算、基于船桨干扰的自航因子计算以及基于实船尺度的船舶航速功率直接计算。

(2) 船型包括：船舶类型、船体型线特征。其中船舶类型及船体型线特征选取应尽可能丰富，型线特征应根据船舶艏（直形艏、球形艏、V 形艏等）、艉形（双艉、双尾鳍、单艉、纵流形艉）区分制定。验证船型总数应不少于 10 条，应至少包含内河船型，可使用各大水池公认的标准模型验证数据，如 KCS、KVLCC、JBC、DTC 等。

(3) 最佳实践指南应包含基于 CFD 方法进行船舶航速功率的评估的详细评估流程。

(4) 最佳实践指南应该根据评估主题对于算例船型 CFD 的计算结果进行总体不确定度分析，并给出比较误差  $E$  的统计数据：

$$E = D - S$$

其中， $D$  为试验数据， $S$  为计算数据。比较误差应基于相同的变量和相同的条件，包括尺度。

### 3.3 评估要求

#### 3.3.1 船舶航速功率评估流程

基于 CFD 方法进行航速功率评估可基于模型尺度也可以基于实船尺度。基于模型尺度进行航速功率评估基本流程为：基于船模的阻力计算、基于桨模的螺

旋桨敞水特性计算、基于船桨干扰的自航因子计算以及模型/实船航速功率换算；  
 基于实船尺度进行航速功率评估则基于 CFD 方法进行实船航速功率直接计算。

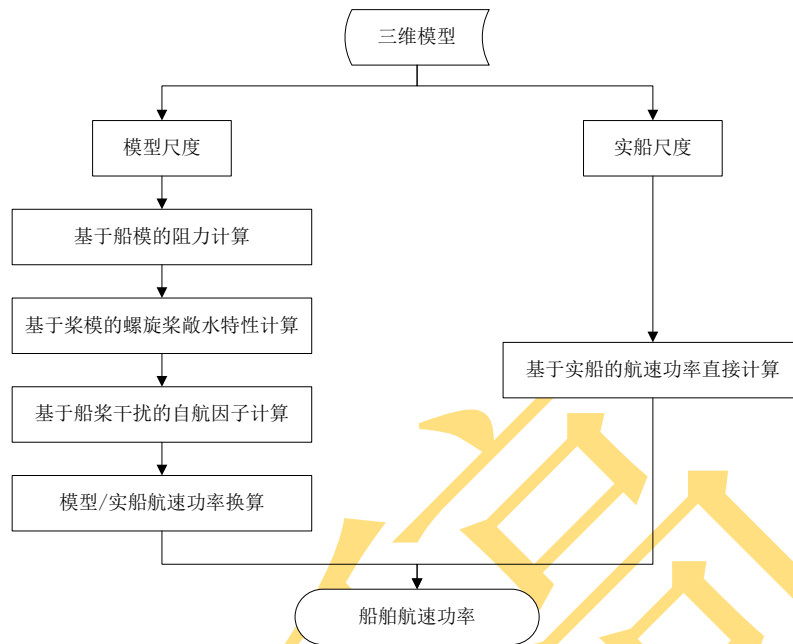


图 3.3.1: 船舶航速功率评估流程示意图

### 3.3.2 基于船模的阻力计算

为获得光滑的有效功率曲线，进行阻力计算的速度范围应包含 EEDI 验证的功率点，阻力计算的速度点间隔对应的实船航速应不大 1km/h，有效功率曲线的速度点不少于 8 个。

### 3.3.3 基于桨模的敞水性能计算

$$K_T = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} A_{ijk} (P/D_p)^i (J)^j (A_E/A_O)^k$$

$$10K_Q = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} B_{ijk} (P/D_p)^i (J)^j (A_E/A_O)^k$$

B 系列:

$$K_T = \sum_{i=0}^{39} C_{s,t,u,v} (J)^s (P/D_p)^t (A_E/A_O)^u (Z_p)^v$$

$$K_Q = \sum_{i=0}^{47} D_{s,t,u,v} (J)^s (P/D_p)^t (A_E/A_O)^u (Z_p)^v$$

式中： $J$ ——螺旋桨进速系数；

$P/D_p$ ——螺旋桨  $0.7R$  处螺距比；

$A_E/A_o$ ——螺旋桨盘面比；

$Z_p$ ——螺旋桨叶数；

$A_{ijk}$ ,  $B_{ijk}$ ,  $C_{s,t,u,v}$ ,  $D_{s,t,u,v}$ ——回归系数，可查阅相关船舶设计手册。

(3) 对于螺旋桨敞水进行计算，可接受基于边界元方法 (Boundary Element Method) 的势流计算程序，但是势流计算程序的有效性应得到充分验证。

### 3.3.4 基于船桨干扰的自航因子计算

(1) 对于船桨干扰的自航因子计算，螺旋桨可采用激励盘模型。

(2) 对于模型尺度的船桨自航计算，需在船体模型上施加强制力  $R_a$ ，以补充模型与实船摩擦阻力系数之间的差异，强制力按下式计算：

$$R_a = [(1+k)(C_{Fm} - C_{Fs}) - \Delta C_F] \times \frac{1}{2} \rho S_w V^2$$

式中： $1+k$ ——形状因子，可按二因次法计算；

$C_{Fm}$ ——船模摩擦阻力系数；

$C_{Fs}$ ——实船摩擦阻力系数；

$\Delta C_F$ ——粗糙度补贴系数，按本指南 2.6 计算；

$\rho$ ——水密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$S_w$ ——湿表面积， $\text{m}^2$ ；

$V$ ——船模航速， $\text{m/s}$ ；

(3) 基于船桨干扰的自航因子计算应详细说明自航点求解方案和自航因子的推导过程。对于自航点的求解可采用控制器进行定航速变转速进行，也可以采用定航速定转速进行插值得到。进行插值算法计算自航点，螺旋桨转速应不小于 3 个。

### 3.3.5 模型/实船的航速功率换算

对于采用基于模型尺度的计算，阻力换算可采用二因次方法，其他参数应按照《1978 ITTC 单桨船性能预报方法》进行，应详细记录模型和实船之间换算过程。

### 3.4 验证要求

#### 3.4.1 验证流程

基于最佳实践指南确定的基于 CF 的船舶航速功率评估流程，开展相似船舶航速功率的评估，根据模型试验或者实船试验进行验证，并确定修正系数；按照相同的 CFD 网格和设置开展目标船舶的航速功率评估，并基于修正系数修正得到目标船舶的航速功率曲线。

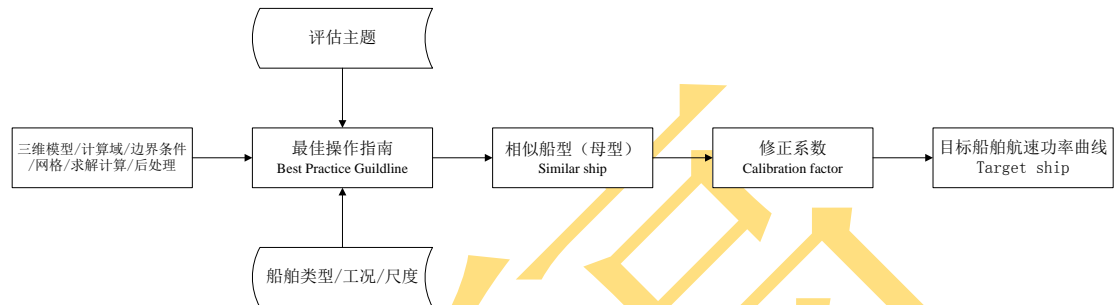


图 3.4.1: 船舶航速功率验证流程示意图

#### 3.4.2 验证要求

(1) 目标船舶和相似船舶应采用相同的缩尺比参数，相同的网格划分和 CFD 参数设置。

(2) 应详细提供相似船舶和目标船舶的网格一致性的说明，如自由面网格、边界层网格、附体网格以及整体网格质量；

(3) 相似船舶和目标船舶计算结果应提供  $Y^+$  的分布比较，并确保  $Y^+$  的分布保持一致。

(4) 根据相似船舶 CFD 计算结果与实船试航或者模型试验结果的差异确定修正系数，修正系数的范围应介于 0.95 和 1.05 之间。

## 第 4 章 报告要求

### 4.1 简介与目标

4.1.1 陈述开展的工作及模拟的目标，应详细说明模拟采用的相似船型试验数据来源以及相似船型和目标船舶计算采用的尺度。

### 4.2 资质认可

4.2.1 基于 CFD 方法进行船舶航速功率评估的单位或者团体，在首次认证时，应制定并向验证方提交流程化的最佳实践指南作为其资质认可，以证明其具备开展 CFD 进行航速功率预报的能力。最佳实践指南制定要求参见本指南 3.2。最佳实践指南应包含计算及验证船型采用的模型试验或者实船试验报告，并详细注明其对比的验证船型分布，验证精度。

### 4.3 图纸资料

4.3.1 提交图纸资料满足本指南 1.3 要求。

### 4.4 船型描述

4.4.1 报告中应包含相似船舶/目标船舶的船舶数据及螺旋桨数据，如下表所示：

表 4.4.1-1: CFD 计算船舶数据

| 序号 | 项目               | 相似船舶 | 目标船舶 |
|----|------------------|------|------|
| 1  | 船名               |      |      |
| 2  | IMO 编号 (如有时)     |      |      |
| 3  | 船舶类型             |      |      |
| 4  | 航区               |      |      |
| 5  | 计算吃水 ( $T$ )     |      |      |
| 6  | 排水量 ( $\Delta$ ) |      |      |
| 7  | 空船重量             |      |      |
| 8  | 方形系数 ( $C_b$ )   |      |      |
| 9  | 船长 ( $L_{wl}$ )  |      |      |
| 10 | 型宽 ( $B$ )       |      |      |
| 11 | 型深 ( $D$ )       |      |      |
| 12 | 主机类型及数量          |      |      |
| 13 | 额定功率/额定转速        |      |      |

表 4.4.1-2: CFD 计算螺旋桨数据

| 序号 | 项目    | 相似船舶 | 目标船舶 |
|----|-------|------|------|
| 1  | 螺旋桨类型 |      |      |
| 2  | 螺旋桨数量 |      |      |

|    |               |  |  |
|----|---------------|--|--|
| 3  | 螺旋桨直径 $D_p$   |  |  |
| 4  | 桨叶数           |  |  |
| 5  | 盘面比           |  |  |
| 6  | 螺距比 (0.7R 处)  |  |  |
| 7  | 弦长 (0.7R 处)   |  |  |
| 8  | 最大厚度 (0.7R 处) |  |  |
| 9  | 毂径比           |  |  |
| 10 | 节能装置类型 (如有时)  |  |  |

## 4.5 CFD 软件及版本

4.5.1 应包含对所用 CFD 软件/求解器名称、使用版本、网格划分方法及数值计算原理的描述。

## 4.6 CFD 计算流程

### 4.6.1 几何模型

应提供目标船舶所包含三维模型的详细数据，含 CFD 计算中使用的三维模型与模型试验或实际建造船舶静水力和船型系数对比表格，表格对比参数如下所示：

表 4.6.1-1: CFD 计算三维模型对比参数

| 序号 | 项目                    | 实际值 | 模型值 | 相对误差 |
|----|-----------------------|-----|-----|------|
| 1  | 总长 ( $L_{OA}$ )       |     |     |      |
| 2  | 垂线长 ( $L_{PP}$ )      |     |     |      |
| 3  | 水线长 ( $L_{WL}$ )      |     |     |      |
| 4  | 型宽 ( $B$ )            |     |     |      |
| 5  | 型深 ( $D$ )            |     |     |      |
| 6  | 计算吃水 ( $T$ )          |     |     |      |
| 7  | 排水量 ( $\Delta$ )      |     |     |      |
| 8  | 湿表面积 ( $S_w$ )        |     |     |      |
| 9  | 浮心 (重心) 纵向位置 $L_{CB}$ |     |     |      |
| 10 | 浮心 (重心) 垂向位置 $V_{CB}$ |     |     |      |

验证者有责任确保数值模型中使用的船舶三维模型真实地代表了所考虑的目标船舶。为此，需要提供三维模型和原始型线图的在横剖面、水线面及纵中剖面等不同方向的对比视图。

### 4.6.2 网格划分

应提供详细的相似船舶和目标船舶在计算域、网格划分的详细数据，至少包含以下信息：

(1) 相似船舶和目标船舶采用的网格尺寸、类型及网格主要大小的描述。如不同方向(x、y、z)细化原则及不同区域域采用的细化原则不同，则应分别提

供。

(2) 相似船舶和目标船舶不同部分的网格尺寸及特写视图：船体不同部分的边界层网格（尺寸、层数及扩展率）；船体关键部分的网格尺寸及特写视图：自由面、船艏、船艉、艉封板、螺旋桨和附体。

(3) 相似船舶和目标船舶的网格质量的说明，包括网格总数、网格扭曲率、斜率、长宽比、最小体积等。

### 4.6.3 CFD 计算设置

相似船舶/目标船舶使用的 CFD 设置详细信息。即根据最佳实践指南确定的 CFD 计算流程，应包括以下内容：

- (1) 模拟类型：定常 vs 非定常；
- (2) 湍流模型；
- (3) 计算域；
- (4) 边界条件；
- (5) 坐标系和模型原点；
- (6) 求解自由度；
- (7) 初始条件；
- (8) 螺旋桨模型说明：实体桨、激励盘等；
- (9) 时间步长；
- (10) 收敛准则及收敛情况说明。

## 4.7 结果后处理

4.7.1 应包含对相似船舶和目标船舶 CFD 所不同吃水航速下计算结果进行后处理（平均值、最终值等）、自航点的求解方式、自航因子的处理计算过程及数据合理性分析，包括：

- (1) 船舶阻力（总阻力、粘性阻力和压阻力）；
- (2) 螺旋桨推力；
- (3) 螺旋桨扭矩；
- (4) 螺旋桨效率；
- (5) 推力减额；
- (7) 伴流数据；
- (6) 自航点转速；

(7) 效率数据（船身效率、相对旋转效率、推进效率等）；

(8) 收到功率。

#### 4.7.2 报告应包含 CFD 计算结果的图示信息：

(1) 残差曲线图：每种评估主题至少展示一个图；

(2) 受力/力矩曲线图：总阻力、粘性阻力、压阻力、螺旋桨推力的收敛图。

每种类型的模拟至少有一个图；

(3) 彩色流场视图：

- 自由面波形的全局视图；
- 船舶艏艉区域波形的缩放视图；
- 船体和附体的  $y^+$  值视图；
- 船体和附体的压力系数视图；
- 如果螺旋桨实体建模或使用节能装置（ESD），则流经螺旋桨和 ESD 装置的横截面视图。

#### 4.7.3 实船船速功率换算过程

# 附录 1 报告模板

## 1 简介与目标

本报告描述了用于为 ITTC 标模 KCS 集装箱船模型开展基于 CFD 船模阻力评估及实船有效功率推导的过程。本报告所采用的规程符合 IACS 指南及最新的 ITTC 指南关于数值模型的要求。有关偏差已在本报告中正确记录，并提供了理由。

## 2 资质

本部分按照本指南第 3 章要求提供最佳实践指南。

## 3 CFD 软件与版本

本部分应包含对所用 CFD 软件名称、版本、网格划分及数值计算原理的描述。

## 4 船型描述

本部分按照本指南 4.4 要求，对于相似船舶及目标船舶船型参数及螺旋桨参数进行描述。

## 5 基于模型的船舶阻力计算

本部分根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照本指南 4.6 要求，进行相似船舶和目标船舶的船模阻力计算。

## 6 基于模型的螺旋桨敞水性能计算

本部分根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照本指南 4.6 要求，进行相似船舶和目标船舶的螺旋桨敞水特性计算。

## 7 基于模型的船舶自航因子计算

本部分根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照本指南 4.6 要求，进行相似船舶和目标船舶的船舶自航因子计算。

## 8 基于模型的船舶自航因子计算

本部分根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照本指南 4.6 要求，进行相似船舶和目标船舶的船舶自航因子计算。

## 9 船舶修正系数计算

本部分详细计算相似船舶进行 CFD 计算结果和试验结果对比确定修正系数

计算过程。

## 10 目标船舶航速功率计算

本部分详细记录目标船舶基于相似船舶验证结果确定的修正系数进行模型/实船航速功率换算过程。



## 参考文献

- [1] ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Practical Guidelines for Ship CFD Applications, No. 7.5-03-02-03 (2014).
- [2] ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Practical Guidelines for Ship Resistance CFD, No. 7.5-03-02-04 (2021).
- [3] ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD, No. 7.5-03-03-01 (2014).
- [4] ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Quality Assurance in Ship CFD Application, No. 7.5-03-01-02 (2021).
- [5] ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Uncertainty Analysis in CFD, Examples for Resistance and Flow, No. 7.5-03-02-01 (1999).
- [6] IACS Numerical Calculations Guidelines for the purposes of deriving the  $V_{ref}$  in the framework of the EEXI Regulation.