

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD25-2023



中国船级社

基于计算流体力学（CFD）的 内河船舶航速功率评估指南

Guidelines for the Speed & Power Assessment of Inland Vessel based on
Computational Fluid Dynamics

2023

2023年6月1日生效

北京

目 录

第 1 章 一般要求	1
1.1 适用范围	1
1.2 定义	1
1.3 图纸资料	2
第 2 章 数值模型	4
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	6
2.6 表面粗糙度	7
2.7 自由度	7
2.8 湍流模型	7
2.9 离散方案及求解算法	8
2.10 时间步长	8
2.11 收敛性判据	8
第 3 章 数值计算	9
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	11
第 4 章 报告要求	13
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
附录 1 报告模板	17

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，本指南适用于中国内河水域（包括江、河、湖泊和水库）以及河海交界区的船舶；就航行环境而言，本指南适用于深水、平静、开阔水域，暂不考虑风、浪、流、水深及岸壁效应等因素的影响。

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，其对应的船舶雷诺数量级为 $10^6 \sim 10^7$ ；对于实船尺度，其对应的船舶雷诺数量级为 $10^8 \sim 10^9$ 。

（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，其对应的傅汝德数不大于 0.4。

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。

（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的船舶，不包括三桨推进船舶、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）。

（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，且主要船型参数相似（长宽比 L_w/B 差异在 5% 以内，方形系数 C_b 差异在 5% 以内），设计航速对应的傅汝德数差异在 ± 0.05 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) 水线长 (L_{wl}): 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：

$$Re = \frac{VL_{wl}}{\nu}$$

式中： V 为船舶航速，m/s；

L_{wl} 为水线长，m；

ν 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：

$$Re = \frac{b_{0.75R} \sqrt{V_A^2 + (0.75n\pi D_p)^2}}{\nu}$$

式中： $b_{0.75R}$ 为螺旋桨 0.75 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；

ν 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

$$Fr = V / \sqrt{gL_{wl}}$$

式中： V 为船舶航速，m/s；

L_{wl} 为水线长，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/资料应提交批准：

(1) 船舶航速功率 CFD 计算报告。

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

(1) 最佳实践指南报告;

(2) 型线图及型值表;

(3) 肋骨型线图;

(4) 总布置图;

(5) 螺旋桨图;

(6) 舵叶图;

(7) 桨舵布置图;

(8) 静水力计算书;

(9) 计算数据文件 (含网格、计算结果及后处理);

(10) 三维几何模型 (如 IGES、X_T、STEP、STL 等格式)。

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或者开口，如舵、轴支架及侧推孔等，其位置关系应按照总布置图、桨舵布置图等送审图纸资料进行严格对应，对于模型的其他简化如舳龙骨等，应在实船航速功率换算中予以补充。

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水线长、型宽、型深、计算工况下的湿表面积、型排水体积、浮心纵向位置和浮心垂向位置等信息。其中型排水体积对比的相对误差应不大于 0.3%，湿表面积对比的相对误差不大于 2%，浮心纵向坐标对比的绝对误差不大于 $0.1\%L_{pp}$ ， L_{pp} 为垂线间长。

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的最小尺度：对于船模，其对应的临界雷诺数为 2×10^6 ，其最小船模尺度为 5m；对于敞水桨模，其对应的临界雷诺数为 10^6 ，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，计算域尺寸应不小于以下范围：

(1) 对于船舶阻力/自航计算采用矩形计算域，前方边界距离船首 $1.5L_{wl}$ ；后方边界距离船尾 $3.5L_{wl}$ ；侧边界距离船舶中纵平面 $1.5L_{wl}$ ；底部边界距离水线 $1.5L_{wl}$ ；顶部边界距离水线 $0.5L_{wl}$ ，其中 L_{wl} 为水线长。

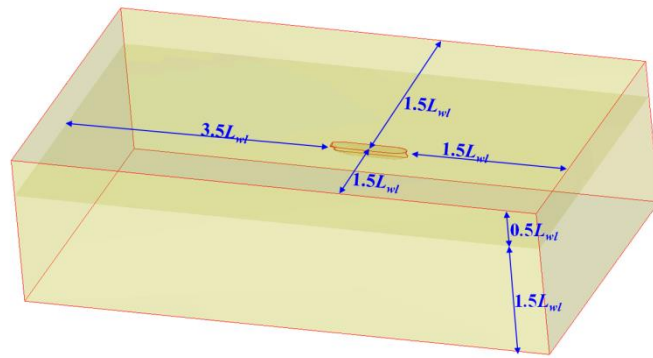


图 2.3.1: 船舶阻力/自航计算域设置示意图

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

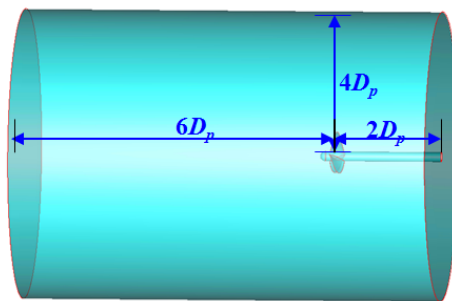


图 2.3.2: 螺旋桨敞水性能计算域设置示意图

(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，在进行敞水性能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，并通过最佳实践指南证明其合理性。

(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单元，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。对于几何特征变化较大的区域以及流场关键特征区域，应进行网格细化，以准确描述几何外形并能够捕捉关键流动区域的流动特征。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网格收敛性分析，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，应使用正交性较好的网格进行求解。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，船体附近的纵向方向应使用不少于 40 个网格点来求解船体兴波最短波长，兴波最短波长 λ_w 可参照下式计算：

$$\lambda_w = 2\pi F_r^2 L_{wl}$$

式中： λ_w —为兴波波长，m；

F_r —为傅汝德数；

L_{wl} —为水线长，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：

$$y^+ = \frac{\rho u^*}{\mu} y$$

式中： u^* —摩擦速度， $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ ， τ_w 为壁面剪切应力；

μ —水的动力粘性系数， $N \cdot s/m^2$ ；

ρ —水密度， kg/m^3 ；

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) 边界层网格应避免在壁面法线方向上伸展过快，推荐边界层网格伸展率不大于 1.2，边界层层数为 8~10 层。

2.5.4 网格质量检查

检查网格质量以保证所有网格没有负体积或扭曲网格，网格的扭曲度和长宽比在可接受范围内，并且在大多数地方满足正交性，网格最小正交角应大于 5 度。

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 ΔC_F 进行计算。对于二因次法换算， ΔC_F 可按水池经验选取；对于三因次法换算， ΔC_F 可按下列式计算：

$$\Delta C_F = \left[105(k_s/L_{wl})^{1/3} - 0.64 \right] \times 10^{-3}$$

式中： k_s —为粗糙度表观高度，如无特别要求，可取 $k_s=150 \times 10^{-6}$ ， m ；

L_{wl} —为水线长， m 。

2.7 自由度

2.7.1 对于船舶航速较高时 ($Fr > 0.2$)，进行阻力计算时应考虑纵倾 (pitch)、升沉 (heave) 的影响。

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 $k-\omega$)、显式代数应力模型 (EASM)、Realizable $k-\varepsilon$ 模型或其他类似功能的湍流模型。

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格式进行离散，边界层湍流的求解应具备二阶精度以上的差分格式。

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： $|\bar{u}|$ 一为局部速度；

Δt 一为时间步长；

Δx 一流动方向单元尺寸；

C_{\max} 一最大库朗数，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) 对于使用两方程湍流模型，时间步长应不大于 $0.01 L_{wl}/V$ ；对于使用雷诺应力湍流 (RSM) 模型，时间步长应不大于 $0.001 L_{wl}/V$ ， L_{wl} 为水线长， V 为航速。

(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。收敛性判据可根据具体的 CFD 求解器，对于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，CFD 计算报告应提供残差、力或力矩的历时曲线。

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 CCS 提交最佳实践指南（Best Practice Guideline），证明其具备基于 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性能计算、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船形（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，内河船三大主力船型（散货船、集装箱船和液货船）每型船舶应不少于 2 条，其他船型不少于 1 条。验证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评估的详细流程。

(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，并给出相对比较误差 E 的统计数据：

$$E = (S - D) / D$$

式中： 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选择使用基于模型尺度或者基于实船尺

度，评估报告应予以说明。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性能计算、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。

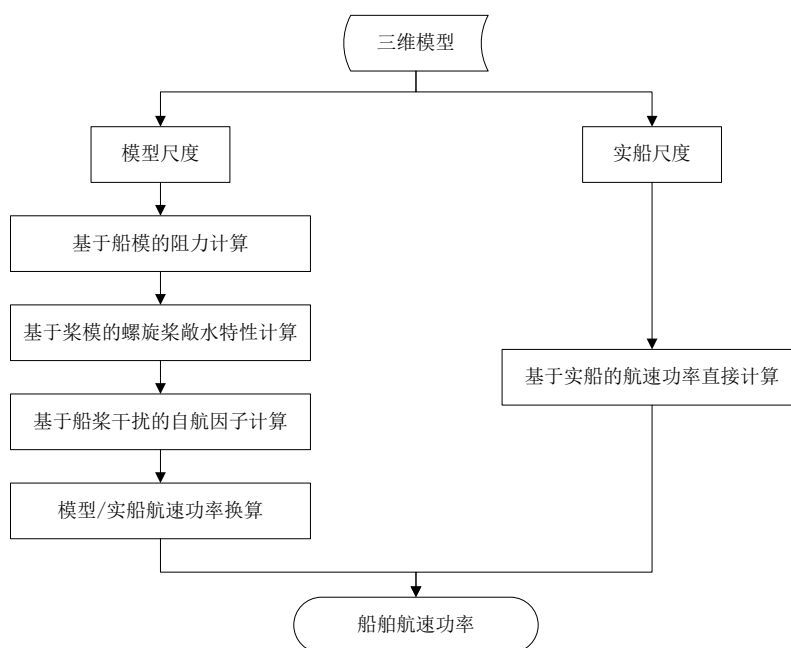


图 3.3.1：船舶航速功率评估流程示意图

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 1 km/h，有效功率曲线的速度点不少于 5 个。

3.3.3 基于桨模的敞水性能计算

(1) 螺旋桨敞水特性曲线应根据螺旋桨在船舶预期运行工况确认计算/验证进速系数的范围，应涵覆盖 EEDI 验证的功率点。敞水特性曲线对应的进速系数间隔应不大于 0.1。

(2) 对于采用 MAU 型桨、B 型桨等图谱系列螺旋桨，螺旋桨敞水特性曲线可采用基于回归图谱的计算结果。

(3) 对于螺旋桨敞水性能进行计算，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，螺旋桨可采用基于体积力的激励盘模

型（船艏有节能附体或其他复杂结构物以及有明显预旋的船舶除外）。激励盘模型应能够考虑螺旋桨推力和扭矩变化关系，推力扭矩变化关系应基于螺旋桨敞水特性曲线或者基于面元法实时计算得到。激励盘应采用局部速度场为螺旋桨盘面的进速，激励盘面厚度与网格特性应提供充分算例验证，时间步长不应大于阻力数值计算的时间步长要求。

(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 F_D ，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：

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

式中： $1+k$ —形状因子；

C_{Fm} —船模摩擦阻力系数；

C_{Fs} —实船摩擦阻力系数；

ΔC_F —粗糙度补贴系数，按本指南 2.6 计算；

ρ —水密度， kg/m^3 ；

S_w —船模的湿表面积， m^2 ；

V —航速， 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，每个航速下的螺旋桨转速应不小于 3 个，自航插值点应在 3 个转速点范围之内，避免外插。

3.3.5 模型/实船的航速功率换算

对于基于模型尺度的计算，阻力换算可采用二因次方法或者三因次方法。对于模型的简化（如舳龙骨等），应在实船有效功率以总阻力的补贴系数进行反馈。模型/实船的航速功率换算流程应按照《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。对于基于实船尺度航速功率直接预报，最终结果应考虑粗糙度补贴系数的影响。

3.4 验证要求

3.4.1 验证流程

(1) 基于最佳实践指南确定船舶航速功率评估的方法和流程，开展相似船舶航速功率的 CFD 评估，得到相似船舶的航速功率曲线。

(2) 应用相似船舶的模型试验或者实船试验对评估结果进行验证，以确定修正系数，如 CFD 评估基于模型尺度，则应使用水池试验结果进行验证；如 CFD 评估基于实船尺度，则应使用实船航速功率测试结果进行直接验证。

(3) 按照相同的 CFD 网格划分和计算设置开展目标船舶的航速功率评估，并基于相似船舶得到的修正系数修正得到目标船舶的航速功率曲线。

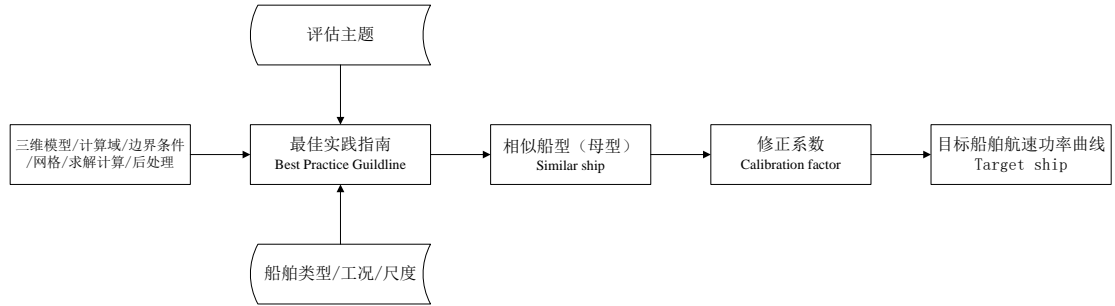


图 3.4.1: 船舶航速功率验证流程示意图

3.4.2 验证要求

(1) 目标船舶和相似船舶的模型长度基本相同，应采用相同的网格划分和 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。

(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。

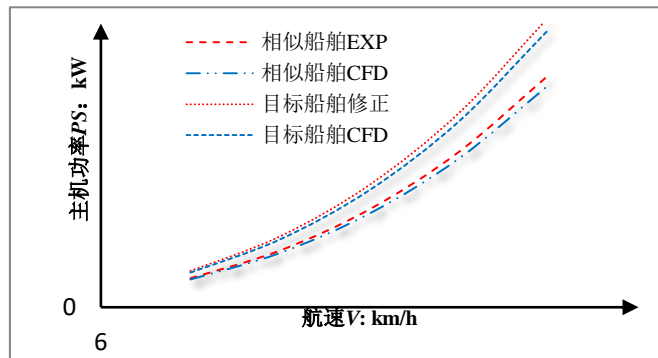


图 3.4.2: 船舶航速功率修正过程示意图

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舶试验数据来源以及相似船舶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，以验证精度。

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	船舶类型		
3	航区		
4	水线长 (L_{wl})		
5	型宽 (B)		
6	型深 (D)		
7	艏吃水 (T_f)		
8	艉吃水 (T_a)		
9	型排水体积 (∇)		
10	方形系数 (C_b)		
11	湿表面积 (S_w)		
12	迎风面积 (A_T)		
13	舳龙骨面积 (S_{BK})		
14	单舵湿表面积×舵数目		
15	设计航速 (V)		
16	主机类型及数量		
17	额定功率/额定转速		
18	减速箱减速比		

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(静水力计算书为准)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	水线长 (L_{wl})			
2	型宽 (B)			
3	型深 (D)			
4	艏吃水 (T_f)			
5	艉吃水 (T_a)			
6	型排水体积 (∇)			
7	湿表面积 (S_w)			
8	浮心纵向位置 LCB ($\% L_{pp}$)			
9	浮心垂向位置 VCB (距基线高度)			

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在横剖面、水线面及中纵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、网格扭曲度、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：定常或非定常；
- (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：真实桨、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 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（对于实尺度计算可免除），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；

- (6) 伴流分数;
- (7) 自航点转速;
- (8) 效率数据 (船身效率、相对旋转效率、轴系/减速箱传动效率等);
- (9) 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幅图;
- (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幅图;

(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), 则提供流经螺旋桨和 ESD 装置的横截面视图。

4.7.3 实船航速功率换算过程

基于模型尺度进行 CFD 计算, 应详细提供模型/实船的航速功率换算过程。基于实船尺度进行 CFD 计算, 则应进行航速功率直接计算。

4.7.4 修正系数计算过程

基于相似船舶进行修正系数计算, 应详细提供修正系数获取以及目标船舶基于修正系数进行航速功率修正的过程。

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 航速功率评估的过程。本报告所采用的方法流程符合《基于计算流体力学（CFD）的内河船舶航速功率评估指南》（以下简称“指南”）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

本部分应按照“指南”的第 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

本部分应按照“指南”4.4 的要求，对相似船舶和目标船舶的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

本部分应根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照“指南”4.6 的要求，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

本部分应根据最佳实践指南提供的计算流程和设置，按照“指南”4.6 的要求，进行相似船舶和目标船舶的螺旋桨敞水性能计算。

7 基于模型的船舶自航因子计算

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

8 实船航速功率换算

本部分应详细说明基于模型尺度计算的船型按照本指南要求进行模型/实船航速功率的换算过程。

9 相似船舶修正系数计算

本部分应详细记录相似船舶进行 CFD 计算、并将计算结果和试验结果对比

确定修正系数的过程。

10 目标船舶航速功率计算

本部分应详细记录基于相似船舶 CFD 验证结果确定的修正系数以进行目标船舶模型/实船的航速功率换算过程。