



指导性文件

GUIDANCE NOTES

GDxx—2xxx

中国船级社

船舶低阻涂层验证与检验指南

(初稿)

中国船级社

2023年12月

目录

第 1 章 通则	1
1.1 一般规定.....	1
1.2 定义.....	1
1.3 附加标志.....	2
1.4 图纸资料.....	3
1.5 检验.....	3
第 2 章 涂料低阻性能验证	5
2.1 一般规定.....	5
2.2 低阻性能验证.....	5
第 3 章 应用低阻涂层技术船舶的航速预报与验证	8
3.1 一般规定.....	8
3.2 航速预报.....	8
3.3 航速验证.....	10
第 4 章 建造中检验	12
4.1 一般规定.....	12
4.2 施工及资质要求.....	12
4.3 施工工艺评定.....	12
4.4 涂层粗糙度检测.....	15
第 5 章 船体表面涂层管理计划（HCMP）	17
5.1 一般要求.....	17
5.2 HCMP 的编制.....	18
5.3 HCMP 的实施.....	18
5.4 HCMP 的监测.....	19
第 6 章 建造后检验	21

船舶低阻涂层验证与检验指南

6.1 一般规定	21
6.2 年度检验	21
6.3 船底外部检验	21
6.4 中间检验	21
6.5 特别检验	21
附录 1 基于模型试验实船性能预报标准程序	22
附录 2: 船舶涂料种类表格文件示例	31
附录 3: 涂装过程记录表	32
附录 4: 涂装明细表格文件示例	34
附录 5: 船体表面涂层监测记录表	35
附录 6: 粗糙度检测记录表	37

编写说明

根据 2023 IMO 航运温室气体减排战略,正式明确了国际航运的减排目标为尽快实现国际航运温室气体排放达峰,到 2050 年或 2050 年左右(接近 2050 年)实现航运净零排放。对于新造船,需要满足 EEDI 的标准。对现有船,尤其是实施 EEDI 要求前的船舶,需要充分的时间进行能效评估并完成能效提升措施的选择和实施。营运船舶与新造船相比能效水平普遍偏低,现有船主机功率较高(航速较高),能效较低,温室气体排放较多,故迫切需要优化现有船舶的营运能效(EEXI)。低阻涂层技术是一项创新型能效技术,通过减少船体表面摩擦力实现低阻从而提高船舶推进效率,达到减少能源能耗和温室气体排放的目的,是降低船舶 EEDI/EEXI/CII 等能效指标的有效措施。

为减少船舶航行时的摩擦阻力,低阻涂层系统应确保船舶交付时具有较低的表面粗糙度,同时需要确保船舶营运过程中低阻性能保持良好。在船舶生命周期中,随着时间的变化船体表面条件发生变化,对船体摩擦阻力产生影响,从而影响船舶的功率消耗。船体表面条件发生的变化包括涂层的机械变化和化学降解,但最重要的是污垢堆积。

本指南主要对涂料的低阻性能及保持能力提出了评价标准,旨在为船东选择理想的低阻涂料提供指导,降低新造船的 EEDI 指数和现有船的 EEXI 指数,并为降低船舶碳排放及 CII 指数评级贡献新的技术选项。

本指南适用于自愿申请 LFHC 附加标志的船舶,仅对该船舶的涂层系统的低阻性能进行检验和验证,该船舶的防污底性能还应满足《船舶防污底系统检验指南》的要求。

本指南分六部分:

第 1 章:明确了授予 LFHC 低阻涂层系统附加标志的要求及检验总体要求。

第 2 章:明确了涂层低阻性能验证要求。

第 3 章:应用低阻涂层船舶的航速预报方法及验证方法。

第 4 章:建造中检验主要对施工工艺、粗糙度检测等相关要求。

第 5 章:明确营运船船体表面涂层管理计划(HCMP)的制定和实施要求

第 6 章:船舶营运检验包括船体表面涂层完整性和污垢覆盖情况的检验

第 1 章 通则

1.1 一般规定

1.1.1 本指南适用于新造船在交付阶段或现有船在完成重新涂装后，在水线以下应用低阻涂层系统来减少船舶摩擦阻力，达到降低船舶能耗，减小新造船能效设计指数（EEDI）、现有船能效指数（EEXI）或碳强度指数 CII 目的的海上航行船舶。

1.1.2 本指南规定了低阻涂料的产品检验、低阻性能预报、船舶建造中检验、建造后检验和营运期间船体表面涂层管理的相关要求。

1.1.3 本指南主要适用于船舶低阻涂层的验证和检验，包括但不限于自抛光涂层、污垢脱附涂层等。考虑到低阻涂层技术尚处于发展阶段，对于其他类型的低阻涂层（如仿生涂层等），其计算方法、评定标准、检验和试验方法，应提供相应的试验、理论依据、使用经验或有效的公认标准，经 CCS 同意，可接受作为等效方法。

1.1.4 应用低阻涂层技术的海上航行船舶，除应满足本指南的要求外，还应满足 CCS《钢质海船入级规范》和《船舶防污底系统检验指南》的适用要求。

1.2 定义

1.2.1 本指南使用的术语定义如下：

(1) 低阻涂层技术：系指船舶水线下的船体表面通过使用低阻涂料来减少摩擦阻力而达到节能减排效果的技术。

(2) 低阻涂料：系指具有低表面粗糙度和/或低阻耐久性能的涂料。

(3) 低阻涂层：系指船体表面通过使用低阻涂料实现减阻效果的涂层。

(4) 船体表面粗糙度：系指由涂层本身的表面不规则性或涂层损坏引起的船体表面粗糙度。

(5) 申请方：系指申请 CCS 进行船舶低阻涂层系统检验的船东或船厂。

(6) 涂层耐久性：系指涂层应能在 60 个月或以上的预期使用寿命内保持良好的低阻性能。

(7) Rt50：测量船体表面 50mm 长度上的最大峰谷高度。

1.2.2 本指南使用的缩略语如下：

- (1) ROV: Remotely operated vehicle;
- (2) HCMP: Hull coating management plan;
- (3) LFHC: Low friction hull coating;
- (4) AHR: Average hull roughness value;
- (5) MHR: Mean hull roughness value

1.3 附加标志

1.3.1 如应用低阻涂层技术的船舶满足本指南的要求，经申请方申请并检验合格，可授予附加标志 LFHC (FxMy)。

(1) Fx，表征船体表面涂层粗糙度，反映新造船在交付阶段的船体表面粗糙度水平和现有船在完成重新涂装后的船体表面粗糙度水平，x 根据表 1.3 对应的标准分三级。该附加标志根据本指南第 4 章 4.4 条的要求进行实船测量数据授予不同等级。

(2) My，表征船体表面涂层低阻耐久性，反映船舶在营运过程中的低阻耐久性水平，y 根据表 1.3 对应的标准分三级，根据浅海浸泡和动态试验综合水平。该附加标志根据本指南第 2 章 2.2.2 条的要求进行试验获得的评分授予不同等级。

附加标志对应等级水平

表 1.3

船体表面涂层粗糙度标志	粗糙度水平
F1	$90 < AHR \leq 110\mu\text{m}$
F2	$70 < AHR \leq 90\mu\text{m}$
F3	$AHR \leq 70\mu\text{m}$
船体表面涂层低阻耐久性标志	评分
M1	$85 \leq M1 < 90$
M2	$90 \leq M2 < 93$
M3	93 分及以上

1.3.2 对于适用 CCS《绿色生态船舶规范》2.3.2 条和 4.3.2 条的新造船，如应用了低阻涂层技术，按照本指南第 3 章要求进行航速预报与验证后并计入该船的 Attained EEDI 计算，可授予绿色生态船舶生态保护子要素附加标志 CO₂ 排

放设计指数附加标志 CD_x 。

1.3.3 对于适用 CCS《绿色生态船舶规范》2.3.3 条的营运船，如应用了低阻涂层技术，按照本指南第 3 章要求进行航速预报与验证后并计入该船的 Attained EEXI 计算，可授予绿色生态船舶生态保护子要素附加标志 CO_2 排放设计指数附加标志 CDE_x 。

1.4 图纸资料

1.4.1 申请附加标志 LFHC 时，应提交下列图纸资料审查：

- (1) 涂料产品说明书；
- (2) 涂装工艺施工程序；
- (3) 低阻涂料耐久性试验报告；
- (4) 航速预报报告；
- (5) 低阻涂料涂装部位布置图。
- (6) 船体表面粗糙度测量报告；
- (7) 船体表面涂层管理计划；
- (8) 其他 CCS 认为有必要提供的图纸资料。

1.5 检验

1.5.1 低阻涂料应按照 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇第 3 章的要求获得工厂认可，同时应满足本指南第 2 章的相关要求。

1.5.2 船舶设计阶段，船舶的参考航速获得方式应满足《国际航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》或《国内航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》或《现有船舶能效指数 (EEXI) 计算与验证指南》的前期验证要求。

1.5.3 新造船涂层的建造中检验、现有船涂层的改造中检验和船舶营运期间的检验应分别满足本指南第 4 章和第 6 章的相关要求。

1.5.4 船舶建造完成后验证实船涂层性能的测速试航应按照《国际航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》或《国内航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》最终验证要求。

1.5.5 船舶营运期间船体表面涂层管理应按照本指南第 5 章的要求进行监测和记录，并由 CCS 对记录数据进行审核。

第 2 章 涂料低阻性能验证

2.1 一般规定

2.1.1 本章规定了申请 LFHC (FxMy) 附加标志的船舶应用涂料的低阻性能验证要求。除满足本指南的规定外, 涂料的检验还应满足适用的法定检验、CCS 规范和产品检验指南的相关规定。

2.1.2 涂料厂商应提供低阻涂料的产品说明书, 明确说明该产品的涂装工艺及完工后船体表面达到的粗糙度水平。

2.1.3 根据本章第 2.2 条, 或 ISO 标准实验室测试方法或其他等效的测试方法, 测试低阻涂层的耐久性能, 测试结果验证低阻涂层应具有预期使用寿命 60 个月或以上的耐久性能。

2.1.4 对于申请 LFHC 附加标志的低阻涂料应满足 CCS 《钢质海船入级规范》第 1 篇第 3 章第 5 节工厂认可的相关要求。

2.2 低阻性能验证

2.2.1 根据作用机理, 低阻涂料分两类:

(1) I 型 (先进的自抛光型或磨蚀型): 含生物杀伤剂或不含生物杀伤剂表面光滑的低阻涂料 (表面粗糙度 150um 以下)。

(2) II 型 (污损脱附型): 基于先进聚合物技术形成的疏水表面或两亲表面的涂料。

2.2.2 涂层耐久性验证要求

2.2.2.1 低阻涂料耐久性试验包括浅海浸泡试验和动态试验, 试验测试样品的选取、检查和准备应满足 ISO 15528 和 ISO 1513 的规定。

2.2.2.2 低阻涂料耐久性试验应在具有资质的试验机构开展。

2.2.2.3 低阻涂料耐久性试验报告应提交 CCS。

2.2.2.4 浅海浸泡试验要求如下:

(1) I 型: 依据 GB/T 5370 的规定进行浅海浸泡性试验, 要求进行 3 个海生物生长旺季浅海浸泡, 并且至少每半年检查评级一次。试验结束后, 按 GB/T 5370 的方法对试板防污性及漆膜物理状态进行评定, 用最低评估值的样板作为

最终的总性能评定，根据评分标准分成三个等级分别为 S1、S2、S3，见表 2.5.2。

(2) II 型：依据 GB/T 5370 进行浅海浸泡性试验，要求进行 2 个海生物生长旺季，并且至少每半年检查评级一次。试验结束后，按 GB/T 5370 的方法对试板防污性及漆膜物理状态进行评定，用最低评估值的样板作为最终的总性能评定，根据评分标准分成三个等级分别为 S1、S2、S3，见表 2.5.2。

2.2.2.5 动态试验要求如下：

(1) I 型：自抛光防污涂层样板的试验参照 GB/T 7789 的规定，试验线速度为 (18 ± 0.5) 节，样板连续运转 7 天后，停机检查样板表面状态，然后进行浅海浸泡试验 45 天为 1 个周期，每个周期结束后，采用激光测厚装置或光学显微镜等测试防污涂层膜厚变化，应进行 8 个周期试验，按 GB/T 5370 的方法对试板防污性及漆膜物理状态进行评定，用最低评估值的样板作为最终的总性能评定，根据评分标准分成三个等级分别为 D1、D2、D3，见表 2.5.2。

(2) II 型：先将试板放入试验浮筏进行浅海浸泡试验至少 45 天（依据产品技术要求确定，并在检查结果中注明适用的最长的海港静态浸泡时间），检查试板表面的硬壳附着生物（藤壶、硬壳苔藓虫、盘管虫等）覆盖面积和其他类型的附着生物，并记录拍照；然后将样板移到动态试验装置，调整试板表面的线速度为 (18 ± 0.5) 节（knot），试板连续运转 3 天后，检查试样表面保留的附着生物（藤壶、硬壳苔藓虫、盘管虫等）覆盖面积并记录拍照，以此作为动态试验的一个周期。应进行 8 个周期试验，按 GB/T 5370 的方法对试板防污性及漆膜物理状态进行评定，用最低评估值的样板作为最终的总性能评定，根据评分标准分成三个等级分别为 D1、D2、D3，见表 2.5.2。

低阻耐久性面漆试验评分表

表 2.4.2.5

		I 型（自抛光型或磨蚀型）	II 型（污损脱附型）
试验名称	评级	评级分数	评级分数
浅海浸泡	S1	≥ 93	≥ 93
	S2	≥ 90 且 < 93	≥ 90 且 < 93
	S3	≥ 85 且 < 90	≥ 85 且 < 90
动态试验	D1	≥ 93	≥ 93
	D2	≥ 90 且 < 93	≥ 90 且 < 93

船舶低阻涂层验证与检验指南

	D3	≥ 85 且 < 90	≥ 85 且 < 90
总评	M	$\Sigma(0.8*S+0.2*D)$	

第 3 章 应用低阻涂层技术船舶的航速预报与验证

3.1 一般规定

3.1.1 本章适用于应用低阻涂层的海上航行新船和营运船涂装改装后的航速预报与验证。

3.1.2 本章旨在为验证低阻涂层对船舶阻力和航速的影响，为申请将低阻涂层产生的节能效果计入 Attained EEDI/EEXI 指数的船舶提供相关的验证指导。

3.1.3 本章是在 CCS《绿色生态船舶规范》、《国际航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》、《国内航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》和《现有船舶能效指数 (EEXI) 计算与验证指南》的基础上，对使用低阻涂层的船舶的补充要求，并为授予新造船 CO₂ 排放设计指数附加标志 (CD_x) 和营运船 CO₂ 排放设计指数附加标志 (CDE_x) 提供依据。

3.1.4 低阻涂层属于改变船舶速度-功率曲线的能效技术，新的速度-功率曲线的获取需要基于模型试验或 CFD 数值模拟。

3.2 航速预报

3.2.1 基于水池模型试验的航速预报

3.2.1.1 水池试验机构，原则上应为 ITTC 成员，其试验程序能够满足 ITTC 的相关程序。试验机构同时还应经过 ISO 9001 质量管理体系认证，并对试验和阻力预报人员的资质以及服务进行有效管理和监控。阻力试验程序参考 ITTC7.5-02-02-01。

3.2.1.2 水池试验机构所采用的模型-船舶关联方法应形成文件并参考 ITTC 建议程序 7.5-02-03-01.4 最新版。

3.2.1.3 可采用根据产品说明书提供的涂层表面粗糙度对摩擦阻力预报值进行修正的方法或其他合理等效的方法对船舶摩擦阻力进行修正。如根据产品说明书中提供的涂层表面粗糙度对摩擦阻力预报值进行修正，预报方法可参考附件 1 中的 1.1.2 和 1.2.3 条；如采用其他方法，需提交完整的预报计算报告。

3.2.1.4 基于水池模型试验的实船航速预报，需要以下资料：

- (1) 模型试验报告

(2) 实尺度螺旋桨敞水特性数据

(3) 涂料产品说明书（含表面粗糙度参数）

3.3.1.5 对船舶总阻力进行修正后，需要重新计算实船的伴流分数和螺旋桨进速系数，从而获得新的速度-功率曲线，具体参照附录 1 中的 1.1.6 条和 1.2.4 条的计算方法。

3.2.2 基于 CFD 的航速预报

3.2.2.1 CFD 计算的基本要求

(1) 数值计算应符合 ITTC 7.5-03-01-02、ITTC 7.5-03-01-04、ITTC 7.5-03-03-01 最新版的相关要求。

(2) 数值计算所采用数值方法的准确性应通过对比目标船舶的母型船、同形船舶或相似船舶的数值计算结果与模型试验或实船试航结果予以验证。用于比较的试航结果的获得应符合 ISO 15016 最新版或同等标准要求。数值计算方法的准确性采用校准系数表示，校准系数为同一工况点下母型船、同形船舶或相似船舶数值计算结果与模型试验或实船试航结果的比值，其值应介于 0.95 和 1.05 之间（含）。

(3) 对于有常规模型试验结果的船舶，对于速度—阻力曲线，校准系数的核定可取至少 4 个阻力点的比值的平均值。对于没有常规模型试验结果的船舶，需要与试航结果比较验证数值方法的准确性，对于速度-功率曲线，校准系数的核定可取 65%主机额定功率（MCR）和 100%MCR 之间（含）至少 4 个功率点（尽量均布，含 75%MCR 工况点）的比值的平均值。

(4) 为得到完整的速度-功率曲线，同一曲线上数值计算工况点不应少于模型试验取点数。

(5) 计算报告应提交审查，报告格式参照《国内航行海船能效设计指数（EEDI）计算与验证指南》附录 3。

3.2.2.2 基于模型尺度 CFD 计算的实船阻力预报

(1) 模型尺度的数值计算无需考虑粗糙度的影响，按照 3.2.1 参考 ITTC 规程外推到实船尺度并形成文件。用于数值计算的船舶模型垂线间长不小于 6m。

(2) 数值计算报告中所采用的方法和外推至实船尺度的换算方法应与报告提供的既有方法的准确性验证所采用的方法完全一致。计算结果采用校准系数予

以修正。对于各个阻力点/功率点校准系数不一致的情况，应对各个阻力点/功率点采用各自校准系数分别进行修正。

3.2.2.3 基于实船尺度 CFD 计算的实船阻力预报

(1) 实船尺度的 CFD 计算保持经过验证的 CFD 模型计算方法和参数不变，根据产品说明书中提供的涂层表面粗糙度，修改表面粗糙度参数，计算考虑低阻涂层效果的实船阻力；

(2) 在 Reynolds 平均法 (RANS) 计算中，目前有两种方法包括粗糙度效应：

- ① 在壁面函数中考虑粗糙度 (仅适用使用了壁面函数的情况)；
- ② 通过湍流边界条件的适应，例如 k-w 模型。

3.2.2.4 基于 CFD 的实船航速预报

(1) 需要以下资料：

- ① CFD 数值计算报告
- ② 实尺度螺旋桨敞水特性数据
- ③ 涂料产品说明书 (含表面粗糙度参数)

(2) 对船舶总阻力进行修正后，需要重新计算实船的伴流分数和螺旋桨进速系数，从而获得新的速度-功率曲线，具体参照附录 1 中的 1.1.6 条和 1.2.4 条的计算方法。

3.3 航速验证

3.3.1 前期验证

3.3.1.1 国际航行船舶 Attained EEDI 的前期验证应满足《国际航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》第 4 章前期验证要求；

3.3.1.2 国内航行船舶 Attained EEDI 的前期验证应满足《国内航行海船能效设计指数 (EEDI) 计算与验证指南》第 3 章前期验证要求；

3.3.2 最终验证

3.3.2.1 在干船坞完成低阻涂层涂装后，按照本指南 4.4 条的要求测量船体粗糙度，如与前期预报的速度-功率曲线使用的船体粗糙度相差较大，应先修正船模试验的速度-功率曲线。

3.3.2.2 船舶建造完毕，国际航行海船应满足《国际航行海船能效设计指数（EEDI）计算与验证指南》第 5 章的相关验证要求。

3.3.2.3 船舶建造完毕，国内航行海船应满足《国内航行海船能效设计指数（EEDI）计算与验证指南》第 4 章的相关验证要求。

3.3.2.4 对于现有船应满足《现有船舶能效指数（EEXI）计算与验证指南》第 3 章的相关验证要求。

3.3.3 涂装改装验证

3.3.3.1 对 EEDI 船进行涂装改装，其验证方法按照《国际航行海船能效设计指数（EEDI）计算与验证指南》第 6 章 6.3 条的要求。

3.3.3.2 对 EEXI 船进行涂装改装，航速验证可以按照以下任一方法执行：

（1）可以按照《现有船舶能效指数（EEXI）计算与验证指南》附录 3 的要求进行海试。

（2）按照 3.3 条的预报方法获得的新的速度-功率曲线直接修正现有的试航报告中的速度-功率曲线。

第 4 章 建造中检验

4.1 一般规定

4.1.1 在低阻涂料施工前，船舶的建造厂需向 CCS 现场检验单位申请涂层检验。

4.1.2 CCS 验船师确认涂料的相关图纸资料，船厂的生产能力，包括生产场所、设施等船厂的质量保证体系、施工人员的总体资质等相关信息。

4.1.3 规定涂装过程质量控制的职责、内容、检测方法和要求，以确保涂装质量。

4.1.4 根据测量得到的平均船体粗糙度（AHR）授予相应的船体表面涂层粗糙度标志（Fx）

4.2 施工及资质要求

4.2.1 施工人员应了解施工条件，环境要求对人员的健康影响，采取适当的保护措施。

4.2.2 施工人员应熟悉涂装操作要领和质量要求，经岗位培训合格后上岗，喷漆操作人员须取得上岗操作证。

4.2.3 涂装应在涂料厂家服务代表技术指导下施工。

4.2.4 按照船东、涂料厂家服务代表的技术工艺和质量标准的要求组织施工，经自检、互检、专检合格后，向 CCS 验船师提交验收。

4.3 施工工艺评定

4.3.1 涂装初步设计涂装工作的内容

4.3.1.1 初步设计的内容应包含在船舶的“建造说明书”中，并应包括以下技术要求：

（1）钢材表面面处理(包括二次表面处理)的方式、引用标准和质量等级要求；

（2）船舶水线以下涂层配套系统、涂料种类、颜色、涂装道数、干膜厚度和膜厚分布要求；

(3) 除锈涂装质量验收要求。

4.3.1.2 必要时可补充以下技术要求：

- (1) 结构性处理(如自由边、焊缝等)要求；
- (2) 涂装施工环境要求。

4.3.2 涂装详细设计涂装工作的内容

4.3.2.1 涂装详细设计应在初步设计的基础上进行，并应编制以下图纸与文件：

- (1) 钢材表面除锈清理要求；
- (2) 涂装说明书；
- (3) 全船涂装面积表；
- (4) 除锈涂装原则工艺；
- (5) 除锈涂装验收要求

4.3.2.2 钢材表面除锈清理要求至少应包括下列四个方面：

- (1) 表面预处理；
- (2) 车间底漆；
- (3) 二次除锈；
- (4) 表面清理(包括可溶性盐和灰尘等级)

4.3.3 涂装说明书

4.3.3.1 涂装说明书一般包括概述、涂料种类表和涂装明细表。其中，概述部分应以建造说明书为依据，对钢材表面处理及船舶涂装工作的主要要求作综合性叙述，是涂装作业的基本原则。

4.3.3.2 涂料种类表应对全船所使用的每一种涂料的牌号、名称、颜色、物理与化学性能参数、施工工艺参数、主要使用部位等以表格的形式进行汇总处理。表格形式参见附录 2。

4.3.3.3 涂装明细表应对涂装部位、涂料牌号、名称、颜色、涂装道数、膜厚等以表格的形式进行详细汇总，表格示例参见附录 4。

4.3.3.4 验收原则与程序应包括以下内容：

- (1) 接受验收的部门；
- (2) 涂料生产商技术服务人员的职责或分工；

- (3) 粗糙度检测，
- (4) 验收工作的具体程序与做法。

4.3.4 检验要求

4.3.4.1 船舶建造过程中的涂装检验，按照建造说明书、涂装工艺书中有关规定进行，由涂装部组织施工单位合格后负责向 CCS 提交验收。

4.3.5 过程记录

4.3.5.1 涂层文件

(1) 用于整船的涂层系统和技术规格书、船厂和船东的涂装工作记录、涂层系统选择的详细标准，涂层文件内容要符合军标特殊工序控制中对操作人员资格鉴定、使用的设备性能、中间产品质量、作业指导书及工艺文件、工作环境等方面的要求及记录，原则上当工艺变化、材料变化、设备大修后应进行再确认。

(2) 涂层技术文件至少应包括与本标准相关的下列项目，并在修造船阶段由船厂准备：

- (3) 符合证明或形式认可证书的副本；
- (4) 技术规格书副本，包括
 - ① 产品名称，识别标记或编号；
 - ② 涂层系统的材料、成分和组成、颜色；
 - ③ 涂装的方式、工具、机械；
 - ④ 涂装前的表面状况（除锈等级、清洁度、粗糙度等）；
 - ⑤ 环境限制条件（温度和湿度）。
- (5) 涂装作业工作记录，包括：
 - ① 每个舱室涂装的真实空间和面积（平方米计算）；
 - ② 操作人员资质；
 - ③ 使用的设备资质；
 - ④ 涂装的涂层系统资料；
 - ⑤ 作业指导书及工艺文件；
 - ⑥ 涂装的时间、厚度、道数等；
 - ⑦ 涂装时的周围环境条件；
- (6) 船舶修造期间涂层系统的检查和修补程序；

(7) 涂层检查人员签署的涂装过程记录表, 声明涂层依照技术条件涂装, 已得到涂料供应商代表的认可, 并详细说明与操作要求的差异。

4.3.5.2 记录文件应提交验船师审查。

4.4 涂层粗糙度检测

4.4.1 船厂和厂商按照涂装程序的要求进行涂装, 经申请方申请进行涂层粗糙度检验。

4.4.2 由验船师审查试验大纲后, 并按 CCS 规范、指南及机构认可相关文件对申请方申请范围内的技术能力和质量管理活动进行现场审核。现场审核时, 须审核申请方申请范围覆盖的、开展一项或多项关键活动的的所有其他场所。现场审核应至少包括以下内容:

- (1) 核查检测机构对其管理体系文件、操作程序等文件的执行情况;
- (2) 对检测机构的人员培训、经历、文化程度、资质等资格的核查、确认;
- (3) 验证检测机构设施、环境是否有助于检测、试验、维护的正确实施;
- (4) 验证检测机构是否使用适合的方法和程序安全有效地进行认可范围内的检测、试验和维护工作。检测、样品的抽取、处置、存储是否符合有关规定的要求;
- (5) 验证检测机构是否配备必需的检测、试验设备, 计量器具及软件能否达到要求的精确度并符合检测、试验相应的规范要求, 是否建立周期校准及核查制度等;
- (6) 验证检测机构检测、试验结果、检测、试验质量记录及报告的正确性和可追溯性, 报告的编写、签署、审核、签发是否符合有关规定;
- (7) 为验证检测机构的检测、试验能力, 并同时验证操作人员在执行检测、试验时的准确性和安全有效性, 必要时, 验船师将现场见证申请的主要试验项目。
- (8) 从事符合经修订的 IMOMSC.215(82)决议和 IACSUISC223 和/或经修订的 MSC.288(87)的涂层系统检测公司。
- (9) 应由 CCS 接受的测量公司进行测量。只有当测量公司能够向 CCS 证明其以前的测量和报告经验, 并确认测量公司和涂层制造商之间没有任何关系时, 测量公司才能被接受。

4.4.3 船体表面粗糙度测量需要在干船坞内或船排上进行，应按照 NACE SP0616-2022 “干船坞船体粗糙度的测量标准” 第 3 部分进行粗糙度测量，应经验船师见证，测量记录表见附件 6。

4.4.4 编制一份船体粗糙度测量报告，考虑吃水深度的平均船体粗糙度值的详细信息，包括原始测量的平均船体粗糙(MHR)和推导的平均船体粗糙(AHR)，由船级社参加见证的验船师对测量报告进行验收。

第 5 章 船体表面涂层管理计划（HCMP）

5.1 一般要求

5.1.1 每艘船舶应在船上保存一份 HCMP。

5.1.2 制订 HCMP 的目的在于指导船上人员合理、有效地开展船体表面涂层监测，必要时采取措施以确保涂层的低阻性能得到良好保持。

5.1.3 HCMP 应遵循计划、实施、监测与检查、评估与改进的循环改进步骤。

5.1.4 HCMP 应明确体现船舶本身的特点，应充分考虑船舶的类型、航线、航程、航区、船舶管理人员及实践中可能遇到的情况。

5.1.5 HCMP 应包括基本的目标与指标、资源与职责、文件管理与运行控制等要素。

5.1.6 管理目标和指标

5.1.6.1 至少应符合当前的国家、国际法律法规设定的要求。

5.1.6.2 指标由目标产生，是对目标的细化、分解及实现目标的具体要求。指标应具有可量化的特点，由一定的参数指示。

5.1.7 HCMP 资源与职责

5.1.7.1 HCMP 的实施所需要的必备资源，包括人力、物力等各方面。

5.1.7.2 资源的提供，如：需要具有适任的船员和船上/岸基船舶专业的管理人员和技术支持；为监测和测量数据，船舶需要配备相应的数据计量工具、数据存储设备、器械和软件系统。

5.1.7.3 应明确规定各层次人员的职责、作用和权限。计划应使用船上人员的工作语言，如果该语言不是英文或中文，则至少应包括其中之一的译文。

5.1.8 HCMP 文件管理与运行控制

5.1.8.1 此计划可作为现行管理体系的一部分（如安全管理体系），或单独存在。

5.1.8.2 此计划运行记录和监测记录应予以保持，用于船舶评估船体表面涂层管理情况和改进措施。

5.2 HCMP 的编制

5.2.1 船体表面涂层低阻耐久性因素

5.2.1.1 涂层低阻耐久性因素的识别。识别涂层低阻耐久性因素需要船公司、船厂、涂层供方以及其他相关方共同参与，识别涂层低阻耐久性因素时要考虑船舶类型、涂层种类、航区、航线和航程等因素。

5.2.1.2 涂层低阻耐久性因素的评估。目的是确定涂层低阻耐久性因素的优先级别和最佳控制措施。

5.2.2 船体表面涂层管理措施

5.2.2.1 船体表面涂层管理措施的确定。涂层低阻耐久性因素清单确定后，根据船舶类型、航线、航程、航区等确定管理措施。

5.2.2.2 管理措施应基于安全前提且满足相关法规规范的要求。

5.3 HCMP 的实施

5.3.1 在 HCMP 实施过程中，应提供必要的岸基资源支持。

5.3.2 HCMP 应描述对从事管理和操作的船上人员的培训要求，并考虑下列因素：

- (1) 高级船员和船员熟悉其在服务船舶实施 HCMP 的职责；
- (2) 船长和 HCMP 操作人员熟悉有关方面的知识；
- (3) 熟悉本船的 HCMP；
- (4) 熟悉有关本船 HCMP 相关系统和设备的操作；
- (5) 熟悉本船船体表面涂层管理记录和日志的填写；
- (6) 熟悉操作安全要求。

5.3.3 船体表面涂层管理报告和记录

(1) 应描述实施船体表面涂层管理报告内容，至少应包括：

- ① 指明负责船体表面涂层管理记录和保存的船员；
- ② 当船舶实施船体表面涂层监控或处理时，至少应记录日期、地理位置、海水温度、含盐度和浊度；
- ③ 应规定当船舶因天气、海况或其他导致不可操作的原因，应在船体表面涂层记录簿上进行记录。

- (2) 计划应提供船体表面涂层管理报告格式；
- (3) 记录应提交 CCS；
- (4) 应规定记录簿的保存期（船上保存至少 2 年，此后应由公司保持至少 3 年）。

5.3.4 保存实施 HCMP 过程中产生数据的记录及相关活动记录的文件资料。

5.3.5 在实施 HCMP 过程中，按照流程控制和相关程序进行监控，确保实施的有效性。

5.4 HCMP 的监测

5.4.1 对船体表面涂层低阻性能的监测方法可采用但不限于表面观测法、功率分析法。

5.4.2 表面观测法包括进坞观测和水下观测，水下观测可采用近观观测或遥控潜水器（ROV）观测。

5.4.3 如采用表面观测法对船体表面涂层低阻性能实施监测，应在船舶靠港/靠锚地后尽早完成监测作业。

5.4.4 设备配置

5.4.4.1 如采用遥控潜水器（ROV）进行观测，船上或码头上需要配备适用于该船舶的 ROV，且该 ROV 应具有一定航速的自航能力、定位系统、路径规划系统、清晰记录水下船体表面污损状态的系统、数据传输和存储系统。如船上配备相应的存储设备，ROV 自身的数据存储系统可免于配备。

5.4.4.2 对于 ROV 记录的水下船体表面污损状态的图像数据，船上应安装数据分析系统，也可采用岸基支持的方式实现。

5.4.4.3 如采用功率分析法进行船体表面涂层低阻性能的监测，则船上应安装自动数据记录设备并连接到相关传感器，记录船舶航行时的数据。

5.4.5 数据收集

5.4.5.1 船舶无论采用何种船体表面涂层低阻性能监测方法，应在实施前策划并明确规定该监测方法的实施条件和数据采集要求。

5.4.5.2 船体表面涂层低阻性能监测应按照 HCMP 规定的时间、地点、方法开展。如遇船舶装载条件、气象条件、水流条件、海水质量等不适合实施该项性

能监测的情况，应在记录簿上进行记录，并提出临时调整实施的计划。

5.4.5.3 如采用表面观测法，收集的图像数据应至少能覆盖水下船体表面面积的 70%，图像的清晰度应能确保下一步的图像数据处理的顺利开展。

5.4.5.4 如采用功率分析法，应详细记录船舶的装载工况、气象条件、海况条件、螺旋桨收到功率、船舶航速等参数以确保功率分析的顺利开展。

5.4.6 计算与分析

5.4.6.1 船舶无论采用何种船体表面涂层低阻性能监测方法，应对计算方法及相关参数和定义做出明确具体的说明。

5.4.6.2 如采用软件对收集到的数据进行分析并出具分析报告提交 CCS 审核，该软件应得到 CCS 的认可。

5.4.7 整改措施

5.4.7.1 当采用表面观测法观测到的水下船体表面污垢附着面积之和与船体湿表面面积的比例超过船舶所获得的船体表面涂层低阻耐久性附加标志 M_x 的相当程度时，船舶营运方应及时采取措施进行修复。并将修复过程和修复结果记录在船体表面涂层记录簿上。

5.4.7.2 当采用功率分析法分析得到的数据证明船体表面的摩擦阻力已明显增加，船舶营运方应及时制定措施并进行实施，确保船体表面涂层恢复良好状态。并将修复过程和修复结果记录在船体表面涂层记录簿上。

第 6 章 建造后检验

6.1 一般规定

6.1.1 对于应用了低阻涂层技术且申请了 LFHC (Fx,Mx) 附加标志的船舶,应在营运期间保持船体水线以下涂层的低阻性能。

6.1.2 本章 6.2-6.5 提及的检验周期与钢规保持一致。

6.2 年度检验

6.2.1 对《船体表面涂层监测记录簿》进行检查,确认按照 HCMP 进行了有效记录,记录表的格式详见附录 5;

6.2.2 检查《船体表面涂层监测记录簿》的记录数据及数据分析报告,确认其分析结果反映的船体表面状况满足船体表面涂层低阻耐久性 Mx 相应等级附加标志的要求。

6.3 船底外部检验

6.3.1 对船体表面涂层状态进行检查,采用表面观测法,在船舶靠港/锚泊后尽早完成检验。

6.3.2 如发现动物性污底,应要求进行处理,同时保证涂层完整性。

6.3.3 可采用水下检验的方式替代船底外部检验。

6.4 中间检验

6.4.1 同 6.2 中年度检验项目。

6.5 特别检验

6.5.1 同 6.2 中所有年度检验项目。

6.5.2 如使用 I 型低阻涂层,应测量涂层厚度,以确定涂层的使用性能。

附录 1 基于模型试验实船性能预报标准程序

以下程序是考虑所有输入值都来自模型测试报告的情况编写的。此程序也适用于输入值来自模型尺度 CFD，根据模型测试报告进行校准，而不是海上试验报告，前提是该 CFD 计算符合 IACS Rec 173。

1.1. 采用三因次进行模型测试时的 V_{ref} 计算

1.1.1 所需数据

为了在粗糙度修正后估算 V_{ref} ，需要以下内容：

- (1) 模型测试报告，包括 EEDI 吃水的全尺度功率预测
- (2) 实尺度螺旋桨敞水特性
- (3) 相关模型船尺寸： L_{BP} , L_{WL} , B , T , C_b , A_T (横向受风面积)， S (湿表面积)。

如果没有 EEDI 吃水模型的测试数据，该方法可以应用于设计吃水，也可以应用已知的公式来推算 EEDI 吃水——如 MEPC.350(78) – 2.2.3.4.

1.1.2 模型试验标准程序

标准的模型测试程序是测量模型尺度的 R_{TM} ，并使用定义 $C_{TM} = R_{TM} / (0.5\rho_M V_M^2 S_M)$ 计算 C_{TM} ，其中 R_{TM} , ρ_M , V_M , S_M 分别为模型总阻力、水池水密度、模型速度和模型湿表面积。

然后，根据 ITTC 57 模型-船相关线使用(1)计算模型摩擦阻力系数 C_{FM} ：

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_M) - 2)^2} \#(1)$$

其中 Re_M 为模型雷诺数，定义为 $Re_M = V_M \cdot L_{WL} / (\lambda \cdot \nu_M)$ ，式中， L_{WL} 为水线长度， λ 为缩尺比， ν_M 为水池水的运动粘度系数。

然后，波浪阻力系数计算如下：

$$C_{WM} = C_{TM} - (1 + k)C_{FM} \#(2)$$

C_W 基于 Froude 的假设有 $C_W = C_{WS} = C_{WM}$ 。剩余阻力系数命名对应于 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法的命名法-生效日期 2008-版本 01 或更高版本，但可以重新命名 C_R 为符合 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 1999-版本 00 的命名法。

实尺度下的摩擦系数 C_{FS} 的计算方法为

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_S) - 2)^2} \#(3)$$

其中 Re_S 为雷诺数，定义为 $Re_S = V_S \cdot L_{WL} / \nu_S$ ， V_S 为船舶速度， ν_S 为海水的运动粘度系数。

实尺度下的总阻力系数 C_{TS} 定义为：

$$C_{TS} = \frac{R_{TS}}{0.5 \cdot \rho_S \cdot V_S^2 \cdot S_S} \#(4)$$

其中 R_{TS} , ρ_S , S_S 分别为总阻力、海水密度和船舶湿表面积。

C_{TS} 的计算参考 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法的修订方法。

1.1.3 根据 ITTC 78 - Rev00 的传统拖曳水池试验

如果按照 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 1999 年-Rev00 进行了三因次模型测试，则总阻力系数计算如下：

$$C_{TS} = \frac{S_S + S_{BK}}{S_S} ((1 + k) \cdot C_{FS} + \Delta C_{F,1999}) + C_W + C_{AA} \#(5)$$

其中：

k 是形状因子

C_{AA} 是空气阻力系数

S_{BK} 是舱底龙骨的表面积

$\Delta C_{F,1999}$ 是粗糙度修正系数，用以下公式计算

$$\Delta C_{F,1999} = \left[105(k_s/L_{WL})^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right] \times 10^{-3} \#(6)$$

其中 k_s 为表面粗糙度系数，通过船体粗糙度检测得到。测量方法为：船体表面将被分成 100 - 120 个小块，每个小块取 12 个 Rt50 值。Rt50 在 50 mm 的单向距离内平均一个最小-最大峰值。将计算每个小块的船体粗糙度平均值（MHR），进而得出平均船体粗糙度（AHR）。

1.1.4 根据 ITTC 78 - Rev01 或更高版本进行的传统拖曳水池试验

如果按照 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 2008-版本 01 或以上版本进行的三因次模型测试，则总阻力系数的计算方法如下：

$$C_{TS} = \frac{S_S + S_{BK}}{S_S} ((1 + k) \cdot C_{FS} + \Delta C_{F,2008} + C_A) + C_W + C_{AA} \#(7)$$

其中：

k 是形状因子

C_{AA} 是空气阻力系数

S_{BK} 是舱底龙骨的表面积

$\Delta C_{F,2008}$ 是粗糙度修正系数，用以下公式计算

$$\Delta C_{F,2008} = 0.044 \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot Re_S^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125 \#(8)$$

其中 C_A 由拖曳水池设施提供(参考 ITTC 78, Rev.01 以了解更多细节)。 C_A 是预报方法没考虑到的其他效应的阻力容许系数，通常 $C_A = (5.68 - 0.6 \log Re) \times 10^{-3}$ 。

1.1.5 粗糙度修正（阻力部分）后的有效功率 P_E 的计算程序

C_{TS} 无论是使用 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 1999-版本 00 计算，还是使用 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 2008-版本 01 或更高版本计算，粗糙度修正后的新总阻力系数 C_{TS_1} 通过以下计算：

$$C_{TS_1} = C_{TS} + \frac{S_S + S_{BK}}{S_S} \left(\Delta C_{F,2008}(k_{s_1}) - \Delta C_{F,2008}(k_{s_0}) \right) \#(9)$$

其中：

k_{s_0} 是原始模型试验报告中给出的船体粗糙度的原始值

k_{s_1} 是应用低摩擦涂层后在船上测量的 AHR（船体平均粗糙度），如测量报告所述。

$\Delta C_{F,2008}(k_{s_0})$ 是公式(8)使用 k_{s_0} 的粗糙度余量

$\Delta C_{F,2008}(k_{s_1})$ 是公式(8)使用 k_{s_1} 的粗糙度余量

总阻力易根据定义：

$$R_{TS_1} = C_{TS_1} \cdot 0.5 \rho_S V_S^2 S_S \#(10)$$

随后，计算出有效功率 P_{E_1} ：

$$P_{E_1} = C_{TS_1} \cdot 0.5 \rho_S V_S^3 S_S \#(11)$$

1.1.6 粗糙度修正后新收到功率 P_D 的计算程序（自推进部分）与航速预报螺旋桨将以不同的进速系数运行 $J = V_A / n_S D_S$ ，其中 V_A 是进速， $V_A = V(1 -$

w_{TS}), w_{TS} 是伴流分数, n_S 是螺旋桨转数, D_S 是螺旋桨直径。要获得 J 的新值, 我们需要考虑以下公式:

$$K_T/J^2 = \frac{T/\rho_S n_S^2 D_S^4}{V_A^2/n_S^2 D_S^2} = \frac{R_{TS1}}{\rho_S(1-t)(1-w_{TS})^2 V_S^2 D_S^2} = C \Rightarrow K_T = C J^2 \#(12)$$

K_T 其中是推力系数。

对于 K_T/J^2 的计算, 需要重新计算全尺度下的伴流分数 w_{TS} , 以调整新的粗糙度值。

如果按照 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 2008-Rev01 进行了三维模型测试, 则新的实尺度伴流分数的计算方法如下:

$$w_{TS1} = (t + w_R) + (w_{TM} - t - w_R) \times \frac{(1+k)C_{FS} + \Delta C_{F,2008}(k_{S1})}{(1+k)C_{FM}} \#(13)$$

其中 w_{TM} 其中为模型尺度的伴流分数, w_R 表示舵对伴流分数的影响。如果 w_R 没有估计值, 则使用的标准值 $w_R = 0.04$ 。如果 $w_{TS1} > w_{TM}$, 那么 $w_{TS1} = w_{TM}$ 。

如果执行原始模型试验的拖曳水池设施没有使用 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-有效日期 2008-Rev01, 则新的全尺度伴流分数计算如下:

$$w_{TS1} = w_{TS0} \frac{w_{TS1,calc}}{w_{TS0,calc}} \#(14)$$

其中 w_{TS0} 为原始拖曳水池试验对伴流分数的实尺度预测, 和, $w_{TS0,calc}$, $w_{TS1,calc}$ 分别为使用初始 AHR 和新 AHR 通过(13)计算出的值。如果 $w_{TS1} > w_{TM}$, 那么 $w_{TS1} = w_{TM}$ 。

使用(10)中的总阻力值, 可以很容易地计算出每个模型试验速度下公式(12)中的因子 C 。

要找到 J 的新值, 必须求解以下方程:

$$K_T(J) = C J^2 \#(15)$$

为了对 J 解析求解(15), 推力系数曲线近似为二次多项式回归: $K_T(J) \approx \bar{K}_T = aJ^2 + bJ + k$ 。因此:

$$aJ^2 + bJ + k = C J^2 \Rightarrow (a - C)J^2 + bJ + k = 0 \#(16)$$

(16) 的解为:

$$J = \frac{-b \pm \sqrt{\text{Det}}}{2(a - C)}, \text{Det} = b^2 - 4(a - C)k \quad (17)$$

舍去其中的一个负解，我们现在有了新的进速系数值 J_1 。对于每个速度，新的收到功率计算如下：

$$P_{D_1}(V) = \frac{P_{E_1}(V)}{\eta_D} = \frac{P_{E_1}(V)}{\eta_0(V, J_1)\eta_H(V)\eta_R(V)} \quad (18)$$

其中 $\eta_H(V) = (1 - t)/(1 - w_{TS_1})$ ， w_{TS_1} 根据（13）或（14）进行计算。

新的制动功率预测为 $P_{B_1} = P_{D_1}/\eta_S$ ， η_S ：轴系效率。从新的速度-功率预测曲线， $V_S - P_{B_1}$ ，代入 $P_{B_1} = P_{ME}$ ，得到了新的参考速度 $V_{ref,1}$ 的新预测。

1.2 采用二因次法进行模型试验时 V_{ref} 的计算

1.2.1 所需数据

为了估算粗糙度修正后的 V_{ref} ，需要以下内容：

- (1) 模型测试报告，包括 EEDI 吃水的实尺功率预测
- (2) 实尺螺旋桨敞水特性
- (3) 相关模型船尺寸： L_{BP} , L_{WL} , B , T , C_b , A_T (横向受风面积)， S (湿表面积)。

如果没有 EEDI 吃水模型的测试数据，该方法可以应用于设计吃水，也可以应用已知的公式来推断 EEDI 吃水——如 MEPC.350(78) – 2.2.3.4.

1.2.2 模型试验标准程序

标准的模型测试程序是在模型尺度上测量 R_{TM} ，并使用定义 $C_{TM} = R_{TM}/(0.5\rho_M V_M^2 S_M)$ 计算 C_{TM} ，其中 R_{TM} , ρ_M , V_M , S_M 分别为模型总阻力、水池水密度、模型速度和模型润湿表面积。

然后，根据 ITTC 57 模型船相关线使用 (19) 计算模型摩擦阻力系数 C_{FM} ：

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_M) - 2)^2} \#(19)$$

其中 Re_M 为模型雷诺数，定义为 $Re_M = V_M \cdot L_{WL}/(\lambda \cdot \nu_M)$ ， L_{WL} 为水线处的长度， λ 为缩尺比， ν_M 为水池中水的运动粘度系数。

然后，剩余阻力系数计算如下：

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \#(20)$$

C_R 基于弗鲁德假设有 $C_R = C_{RS} = C_{RM}$ 。

实尺度下的摩擦系数 C_{FS} 的计算方法为

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_S) - 2)^2} \#(21)$$

式中 Re_S 为雷诺数，定义为 $Re_S = V_S \cdot L_{WL}/\nu_S$ ， V_S 为船舶速度， ν_S 为海水的运动粘度系数。

实尺度下的总阻力系数 C_{TS} 定义为：

$$C_{TS} = \frac{R_{TS}}{0.5 \cdot \rho_S \cdot V_S^2 \cdot S_S} \#(22)$$

式中 R_{TS} , ρ_S , S_S 分别为总阻力、海水密度和船舶湿润表面积。

总阻力系数 C_{TS} 的计算方法为：

$$C_{TS} = \frac{S_S + S_{BK}}{S_S} (C_{FS} + C_A) + C_R + C_{AA} \#(23)$$

其中：

C_A 为修正允许量，通常由拖曳水池设施设置，包括不确定度效应、粗糙度效应等。

C_{AA} 是空气阻力系数

S_{BK} 是舱底船龙骨的表面积

1.2.3 有效功率 P_E 的计算程序（阻力部分）

根据 75-02-03-01.4-1978 ITTC 性能预测方法-生效日期 2008-Rev01 或更高版本，粗糙度效应由以下公式考虑：

$$\Delta C_{F,2008} = 0.044 \left[(k_s/L_{WL})^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125 \#(24)$$

粗糙度修正后的新总阻力系数 C_{TS_1} 计算为：

$$C_{TS_1} = C_{TS} + \frac{S_S + S_{BK}}{S_S} (\Delta C_{F,2008}(k_{s_1}) - \Delta C_{F,2008}(k_{s_0})) \#(25)$$

其中：

k_{s_0} 为模型试验报告中给出的船体粗糙度的原始值。如果在报告中没有给出任何值，则可以使用 $k_{s_0} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ 。

k_{s_1} 是在应用低摩擦涂层后在船上测量的 AHR，如测量报告所述。

$\Delta C_{F,2008}(k_{s_0})$ 是公式（24）使用 k_{s_0} 的粗糙度修正系数

$\Delta C_{F,2008}(k_{s_1})$ 是公式（24）使用 k_{s_1} 的粗糙度修正系数

总阻力容易根据定义：

$$R_{TS_1} = C_{TS_1} \cdot 0.5 \rho_S V_S^2 S_S \#(26)$$

随后，计算出有效功率 P_{E_1} ：

$$P_{E_1} = C_{TS_1} \cdot 0.5 \rho_S V_S^3 S_S \#(27)$$

1.2.4 输出功率 P_D 的计算程序（自推进部分）与航速预报

螺旋桨将以不同的前进系数运行 $J = V_A/n_S D_S$ ，其中， $V_A = V(1 - w_{TS})$ ， n_S 是螺旋桨的转数和 D_S 螺旋桨的直径。要找到 J 的新值，我们需要考虑以下几点：

$$K_T/J^2 = \frac{T/\rho_S n_S^2 D_S^4}{V_A^2/n_S^2 D_S^2} = \frac{R_{TS_1}}{\rho_S(1-t)(1-w_{TS})^2 V_S^2 D_S^2} = C \Rightarrow K_T = C J^2 \#(28)$$

其中, K_T 是推力系数。

为 K_T/J^2 的计算,需要重新计算实尺度下的伴流分数 w_{TS} , 以调整新的粗糙度值。

如果执行原始模型试验的拖曳水池设施使用以下公式进行原始实尺度伴流分数预测:

$$w_{TS_0} = (t + w_R) + (w_{TM} - t - w_R) \times \frac{C_{FS} + C_A}{C_{FM}} \#(29)$$

然后, 得到新的实尺度伴流分数, 计算方法如下:

$$w_{TS_1} = (t + w_R) + (w_{TM} - t - w_R) \times \frac{C_{FS} + C_A + \Delta C_{F,2008}(k_{S_1}) - \Delta C_{F,2008}(k_{S_0})}{C_{FM}} \#(30)$$

其中 w_{TM} 为模型尺度的伴流分数, w_R 表示舵对伴流分数的影响。如果没有 w_R 的估计值, 则使用的标准值为 $w_R = 0.04$ 。如果 $w_{TS_1} > w_{TM}$, 那么 $w_{TS_1} = w_{TM}$ 。

如果执行原始模型试验的拖曳水池设施未使用公式(30), 则新的实尺度伴流分数计算如下:

$$w_{TS_1} = w_{TS_0} \frac{w_{TS_1,calc}}{w_{TS_0,calc}} \#(31)$$

式中 w_{TS_0} 为来自原始拖曳水池试验的伴流分数的实尺度预测, 和, $w_{TS_0,calc}$, $w_{TS_1,calc}$ 分别为通过(29)和(30)计算的值。如果 $w_{TS_1} > w_{TM}$, 那么 $w_{TS_1} = w_{TM}$ 。

C 利用公式(26)中计算的系数隐含的总阻力值, 可以很容易地计算出每个模型试验速度下公式(28)中的因子C。

要找到J的新值, 必须求解以下方程:

$$K_T(J) = C J^2 \#(32)$$

为了对J解析求解(31), 推力系数曲线近似为二次多项式回归: $K_T(J) \approx \bar{K}_T = aJ^2 + bJ + k$ 。因此:

$$aJ^2 + bJ + k = C J^2 \Rightarrow (a - C)J^2 + bJ + k = 0 \#(33)$$

(33)的解如下所示:

$$J = \frac{-b \pm \sqrt{\text{Det}}}{2(a - C)}, \text{Det} = b^2 - 4(a - C)k \quad \#(34)$$

拒绝其中一个解（结果是负的），我们现在有了新的前进系数值 J_1 。对于每个速度值，新的输出功率计算如下：

$$P_{D_1}(V) = \frac{P_{E_1}(V)}{\eta_D} = \frac{P_{E_1}(V)}{\eta_0(V, J_1)\eta_H(V)\eta_R(V)} \quad \#(35)$$

其中 $\eta_H(V) = (1 - t)/(1 - w_{TS_1})$ ， w_{TS_1} 根据（30）或（31）进行计算。

新的制动功率预测为 $P_{B_1} = P_{D_1}/\eta_S$ ， η_S ：轴效率。从新的速度-功率预测曲线， $V_S - P_{B_1}$ ，代入 $P_{B_1} = P_{ME}$ ，得到了新的参考速度 $V_{ref,1}$ 的新预测。

附录 2：船舶涂料种类表格文件示例

序号	涂料品种		颜色 (色卡号)	涂膜厚度		密度 kg/m ³	混合比例 (体积比)	混合适用期 h	理论涂布率 kg/m ³	干燥时间 h	涂装间隔 h/20℃		稀释率	稀释剂	主要使用部位
	牌号	名称		干膜	湿膜						最短	最长			
1															
2															
3															
4															
5															

附录 3：涂装过程记录表

涂装过程记录表

地点：		日期：		序列号：	
船名/编号：				分段号：	
施工公司：				质检员：	
使用工艺（标准）编号/ 名称：					
涂装确认过程的参数标准要求：					
操作者/资格证编号：	姓名/编号	姓名/编号	姓名/编号	姓名/编号	姓名/编号
使用设备名称/编号/有效期：					
检测设备名称/编号/有效期：					
涂料生产商				分段面积 m ²	
涂料度数	第一度	第二度	第三度	第四度	第五度
涂料名称					
产品标识/编号：					6
涂料批号 基料/固化剂					
测量时间					
钢板温度	℃				

船舶低阻涂层验证与检验指南

气温	℃										
相对湿度	%										
露点	℃										
油污污染		<input type="checkbox"/> Yes 是 <input type="checkbox"/> No 否		<input type="checkbox"/> Yes 是 <input type="checkbox"/> No 否		<input type="checkbox"/> Yes 是 <input type="checkbox"/> No 否		<input type="checkbox"/> Yes 是 <input type="checkbox"/> No 否		<input type="checkbox"/> Yes 是 <input type="checkbox"/> No 否	
干膜厚要求		测 量 数 量	百 分 比	测 量 数 量	百 分 比	测 量 数 量	百 分 比	测 量 数 量	百 分 比	测 量 数 量	百 分 比
<90% NDFT											
90%NDFT~NDFT											
≥NDFT											
总计											
备注：（附测量数据表）											
条件	人员资格	设备工具			涂料材料		工艺文件		环境条件		
确认结果											
检查人：						日期：					

附录 4：涂装明细表格文件示例

序号	涂料部位	底漆			面漆				备注
		涂料品种	干膜厚度	涂装道数	涂料品种	干膜厚度	涂装道数	颜色	
	一. 船体外板								
1	船底区(包括海水阀箱、舳龙骨)								
2	水线区								

附录 5：船体表面涂层监测记录表

1	船名		
2	IMO 号		
3	挂旗		
4	交船日期		
5	上次涂装日期		
6	涂料类型、型号		
7	上一个航次航线		
8	上一个航次航速		
9	船舶到港/锚地时间		
10	表面涂层监测方法		
11	监测开始时间		
12	监测完成时间		
13	监测地方		
14	监测人员		
15	装载吃水		
16	监测地点 天气和海 况条件	海水温度	
		含盐度和浊度	
		风级	
		浪高	
		流速	
17	不可操作/未记录原因（如需）		
18	监测报告	见附件	

船舶低阻涂层验证与检验指南

19	涂层管理建议	
20	建议落实情况	
21	记录人	
22	记录日期	

记录人签名：

附录 6：粗糙度检测记录表

1	船名	
2	操作员	
3	干坞位置和国家	
4	干坞时间	
5	检验日期	
6	检验形式（干坞/船排）	
7	检验人员	
8	检测仪器/仪表编号	
9	测量机构	
10	仪器和设备最新校准日期	
11	监测报告	见附件