

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD27-2020



中国船级社

船舶能效设计指数(EEDI)验证指南
Guidelines on Survey and Verification of the Energy
Efficiency Design Index (EEDI) of Ships
2020

2020年12月1日生效

北京

目 录

第 1 章 通 则.....	1
1.1 一般要求.....	1
1.2 定义.....	1
1.3 适用范围.....	4
1.4 EEDI 验证流程.....	5
第 2 章 前期验证.....	8
2.1 一般规定.....	8
2.2 资料文件.....	9
2.3 EEDI 技术案卷基本要求.....	9
2.4 附加信息的基本要求.....	11
2.5 试验水池的基本要求.....	13
第 3 章 最终验证.....	15
3.1 一般规定.....	15
3.2 资料文件.....	15
3.3 测速试航验证.....	15
3.4 Attained EEDI 的重新计算.....	17
3.5 经修订的 EEDI 技术案卷的基本要求.....	19
3.6 对试验机构/单位的基本要求.....	19
第 4 章 重大改建验证.....	20
4.1 一般规定.....	20
4.2 资料文件.....	20
4.3 重大改建后的 Attained EEDI 验证.....	21
附录 1 EEDI 验证重要节点.....	22
附录 2 EEDI 电力负荷计算表 (EPT-EEDI) 验证导则.....	24
附件 EEDI 电力负荷计算表 (EPT-EEDI) 和认证声明.....	27
附录 3 EEDI 技术案卷样本.....	28
附录 4 模型试验设备的校准.....	35
附件 1 测量设备卡范例.....	37
附件 2 校准证书范例.....	38
附录 5 模型试验的评审与见证.....	40
附录 6 基于 ISO15016:2015 的 EEDI 实船试航.....	45
第 1 章 通则.....	45
1.1 一般规定.....	45
1.2 图纸资料.....	45
1.3 定义.....	46
1.4 符号和缩略语.....	47
第 2 章 试航组织管理与程序.....	53
2.1 试航队伍.....	53
2.2 试航前会议.....	53
2.3 试航各方职责.....	53
第 3 章 试航准备.....	55

3.1 一般规定.....	55
3.2 试航时的船舶状态.....	55
3.3 试航外界条件.....	56
3.4 水池试验资料.....	58
3.5 基本信息.....	59
3.6 测量仪器的安装和校准.....	59
第4章 试航实施.....	61
4.1 一般规定.....	61
4.2 试航开始.....	61
4.3 试航期间的船舶轨迹.....	61
4.4 航次持续时间.....	62
4.5 航向.....	62
4.6 操舵.....	62
4.7 航行稳定段.....	62
4.8 测速航次次数.....	62
第5章 航速数据采集.....	64
5.1 一般规定.....	64
5.2 试航测量操作.....	64
5.3 通用数据.....	64
5.4 每航次数据.....	65
5.5 数据采集.....	66
第6章 试航数据分析.....	69
6.1 一般规定.....	69
6.2 分析程序概述.....	69
6.3 数据分析.....	70
6.4 试航数据分析示例.....	74
6.5 试航报告.....	80
附录 6-A 通用数据和试航记录表.....	81
附录 6-B 蒲氏风级.....	84
附录 6-C 风引起的阻力增加.....	87
附录 6-D 波浪引起的阻力增加.....	100
附录 6-E 流的影响.....	112
附录 6-F 水温和水密度的影响.....	116
附录 6-G 船舶状态的影响.....	117
附录 6-H 水深的影响.....	118
附录 6-I 由试航条件换算至 EEDI 工况或合同规定工况（如有）.....	119
附录 6-J 负荷变化系数的推导过程.....	121
附录 6-K 直接功率法的分析过程.....	126

第 1 章 通 则

1.1 一般要求

1.1.1 本指南旨在指导验证船舶达到的能效设计指数（Attained EEDI）。

1.1.2 本指南主要依据下列IMO文件编制：

（1）MEPC.203（62）决议《MARPOL73/78公约附则修正案-MARPOL附则VI中引入船舶能效条款》及MEPC.251（66）决议《MARPOL附则VI及2008NO_x技术规则修正案》；

（2）MEPC.308（73）决议通过的《2018年新船达到的能效设计指数（Attained EEDI）计算方法导则》（以下简称IMO“2018年EEDI计算导则”）；

（3）经MEPC.261（68）决议、MEPC.309（73）决议修订的《2014年能效设计指数（EEDI）检验与发证导则》（MEPC.254（67）决议）；

（4）MEPC.1/795.Rev2通函《MARPOL附则VI统一解释》；

（5）国际船级社协会（IACS）《船舶能效设计指数（EEDI）计算和验证程序》（PR38.Rev.1）；

（6）中国船级社《绿色生态船舶规范》；

（7）ISO 15016:2015 “Ships and marine technology-Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data”；

1.1.3 船舶达到的能效设计指数（Attained EEDI）的验证申请，一般包含在船舶审图申请中，可提交CCS审图单位；仅进行水池试验见证的申请，可提交就近的CCS检验机构。

1.2 定义

1.2.1 船型定义

（1）散货船（Bulk carrier）：系指在 SOLAS 第 XII 章第 1 条所定义的主要用于运输散装干货的船舶，包括矿砂船船型，但不包括兼用船；

（2）气体运输船（Gas tanker）：系指除液化天然气船（LNG carrier）外¹，经建造或

¹ 就满足法定要求而言，如 LNG 船在 2019 年 9 月 1 日之前交船，则按照“气体运输船”船型对应的相关要求；如 2019 年 9 月 1 日或以后交船，则按照“液化天然气船”船型对应的相关要求。

改建用于散装运输任何液化气体的货船；

(3) 液货船(Tanker): 系指在 MARPOL 附则 I 第 1 条所定义的油船 (Oil tanker) 或 MARPOL 附则 II 第 1 条所定义的化学品船(Chemical tanker)及有毒液体物质(NLS) 船 (NLS tanker) ;

(4) 集装箱船(Container ship): 系指专门设计在货物处所和甲板上装载集装箱的船舶;

(5) 杂货船(General cargo ship): 系指设有多层甲板或单层甲板主要用于装载干杂货的船舶。该定义不包括专用干货船, 其不属于杂货船基线计算范围, 即牲畜运输船、载驳母船、重货运输船、游艇运输船和核燃料运输船。

(6) 冷藏货船 (Refrigerated cargo carrier) : 系指专门设计用于在其货物处所载运冷藏货物的船舶;

(7) 兼用船 (Combination carrier) : 系指设计用于装载 100%载重吨散装液货且也可装载 100%载重吨散装干货 (包括矿砂) 的船舶。

(8) 客船 (Passenger ship) : 系指载客超过 12 人的船舶。

(9) 客滚船(Ro-ro passenger ship): 系指设有滚装处所的客船。

(10) 滚装货船 (车辆运输船) (Ro-ro cargo ship: Vehicle carrier) : 系指具有多层甲板的、设计载运空的小汽车和卡车的滚装货船。

(11) 滚装货船 (Ro-ro cargo ship) : 系指设计成载运滚装运货单元的货船。

(12)液化天然气船(LNG carrier):系指建造或改造用于散装载运液化天然气(LNG) 的货船。

(13) 邮轮 (Cruise passenger ship) : 系指没有货物甲板且专门设计用于商业运输在海上航行中过夜的乘客的船舶。

1.2.2 达到的 EEDI 值 (Attained EEDI): 系指单一船舶实际达到的 EEDI 值。

1.2.3 要求的 EEDI 值 (Required EEDI): 系指对特定船舶类型和尺度所允许的最大 Attained EEDI 值。

1.2.4 相同类型船舶: 系指除增加的船体特征 (如鳍板) 外, 船型 (以型线表示, 例如型线侧视图和型线横剖图) 和主要细节与母型船舶相同的船舶。

1.2.5 传统推进: 系指以往复式内燃机作为原动机且直接或通过齿轮箱与推力轴连接的一种推进方式。

1.2.6 非传统推进: 系指不属于传统推进的一种推进方式, 包括柴电推进、透平推进和混合推进。

1.2.7 水池试验：系指模型阻力试验、自航试验和螺旋桨敞水试验。经 CCS 同意，数值计算也可等同于螺旋桨敞水试验，或用于补充水池试验结果（如用于评估附加的船体特征对船舶性能的影响）。

1.2.8 验证方：系指按照 MARPOL 附则 VI 第 5、6、7、8 条及其相关导则进行 EEDI 检验及发证的主管机关或其授权的组织。

1.2.9 满载吃水：系指夏季载重线吃水，集装箱船为 70%DWT 对应的吃水。

1.2.10 重大改建：系指对 CCS 本指南适用船舶所作的下述改建：

- (1) 实质上改变了该船的尺度、载运能力或发动机功率；或
- (2) 改变了该船的类型；或
- (3) 改建的目的实际上是为了要延长该船的使用年限；或
- (4) 改建使得如该船等同于一艘新船，该船应遵守 MEPC.203（62）决议关于 MARPOL 附则 VI 中船舶能效要求中不适用于现有船舶的有关规定；或
- (5) 实质上改变了该船的能效并且其包括的改装使得该船超出 MARPOL 附则 VI 中第 21 条所述适用的 Required EEDI。

1.2.11 审查：系指对文件进行检查以确定文件已标识并可追溯，并确认已获得相关的资料和信息且 EEDI 计算过程符合相关要求。

1.2.12 见证：系指按商定的试验计划在必要范围内参与水池试验的计划关键步骤，以检查是否符合检验和发证要求。

1.2.13 与 Attained EEDI 计算相关的参数定义应按照 IMO 2018 年 EEDI 计算导则中的定义。

1.2.14 新船系指：

- (1) 2013 年 1 月 1 日或以后签订建造合同；或
- (2) 无建造合同，2013 年 7 月 1 日或以后安放龙骨或处于类似建造阶段；或
- (3) 2015 年 7 月 1 日或以后交付的船舶。

1.2.15 2019 年 9 月 1 日或以后交船的船舶系指：

- (1) 2015 年 9 月 1 日或以后签订建造合同；或
- (2) 无建造合同，2016 年 3 月 1 日或以后安放龙骨或处于类似建造阶段；或
- (3) 2019 年 9 月 1 日或以后交付的船舶。

1.2.16 验证船级社系指进行船舶 EEDI 检验和验证的船级社。

1.2.17 见证船级社系指见证了与 EEDI 验证船级社验证的船舶属于相同类型船舶的

水池试验的船级社。

1.2.18 见证协议系指证明见证船级社见证和接受水池试验的文件，并标明日期、验船师的签名和可能的备注。

1.3 适用范围

1.3.1 本指南适用于400总吨及以上的下列船舶：

- (1) 散货船 (Bulk carrier) ；
- (2) 气体运输船(Gas tanker)；
- (3) 液货船(Tanker)；
- (4) 集装箱船(Container ship)；
- (5) 杂货船(General cargo ship)；
- (6) 冷藏货船 (Refrigerated cargo carrier) ；
- (7) 兼用船 (Combination carrier) ；
- (8) 客船 (Passenger ship) ；
- (9) 客滚船(Ro-ro passenger ship) ¹；
- (10) 滚装货船 (车辆运输船) (Ro-ro cargo ship: Vehicle carrier) ¹；
- (11) 滚装货船 (Ro-ro cargo ship) ¹；
- (12) 液化天然气船 (LNG carrier) ¹；
- (13) 非传统推进的邮轮(Cruise passenger ship having non-conventional propulsion)

¹。

1.3.2 本指南暂不适用于上述 1.3.1 (1) 至 (11) 船舶类型中具有非传统推进系统的船舶。

1.3.3 CCS 本指南仅适用于具有非传统推进系统的豪华邮轮。

1.3.4 就法定要求而言，“新船”适用MAPROL附则VI中每个能效削减阶段要求的时间见下表：

表 1.3.4

0阶段	1阶段	2阶段	3阶段
2013.1.1-2014.12.31	2015.1.1-2019.12.31	2020.1.1-2024.12.31	2025.1.1及以后 ²

¹ 就满足法定要求而言，2019年9月1日或以后交船的船舶需要满足 MARPOL 附则 VI 中的能效削减要求。

² 就载重吨大于等于 15000DWT 的气体运输船、集装箱船、杂货船、LNG 船和具有非传统推进系统的豪华邮轮而言，“新船”适用的 3 阶段能效削减要求的时间为 2022.1.1 及以后。

在2013.1.1-2014.12.31间签订造船合同，并于2019.1.1前交船；或	在2015.1.1-2019.12.31间签订造船合同，并于2024.1.1前交船；或	在2020.1.1-2024.12.31间签订造船合同，并于2029.1.1前交船；或	(1) 在2025.1.1及以后签订造船合同；或 (3) 对于没有建造合同的，2025.7.1及以后安放龙骨或处于类似建造阶段；或 (3) 2029.1.1及以后交船。
2013.1.1前签订造船合同，并于2015.7.1-2018.12.31间交船。或	在2015.1.1前签订造船合同，并于2019.1.1-2023.12.31间交船。或	在2020.1.1前签订造船合同，并于2024.1.1-2028.12.31间交船。或	
对于没有建造合同的， (1) 在2013.7.1-2015.6.30间安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2019.1.1前交船；或 (2) 在2013.7.1前安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2015.7.1-2018.12.31日间交船。	对于没有建造合同的， (1) 在2015.7.1-2020.6.30间安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2024.1.1前交船；或 (2) 在2015.7.1前安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2019.1.1-2023.12.31日间交船。	对于没有建造合同的， (1) 在2020.7.1-2025.6.30间安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2029.1.1前交船；或 (2) 在2020.7.1前安放龙骨或处于类似建造阶段，并于2024.1.1-2028.12.31日间交船。	

1.4 EEDI 验证流程

1.4.1 一般规定

(1) Attained EEDI应按照《绿色生态船舶规范》附录1-1、1-2 Attained EEDI计算导则进行计算。

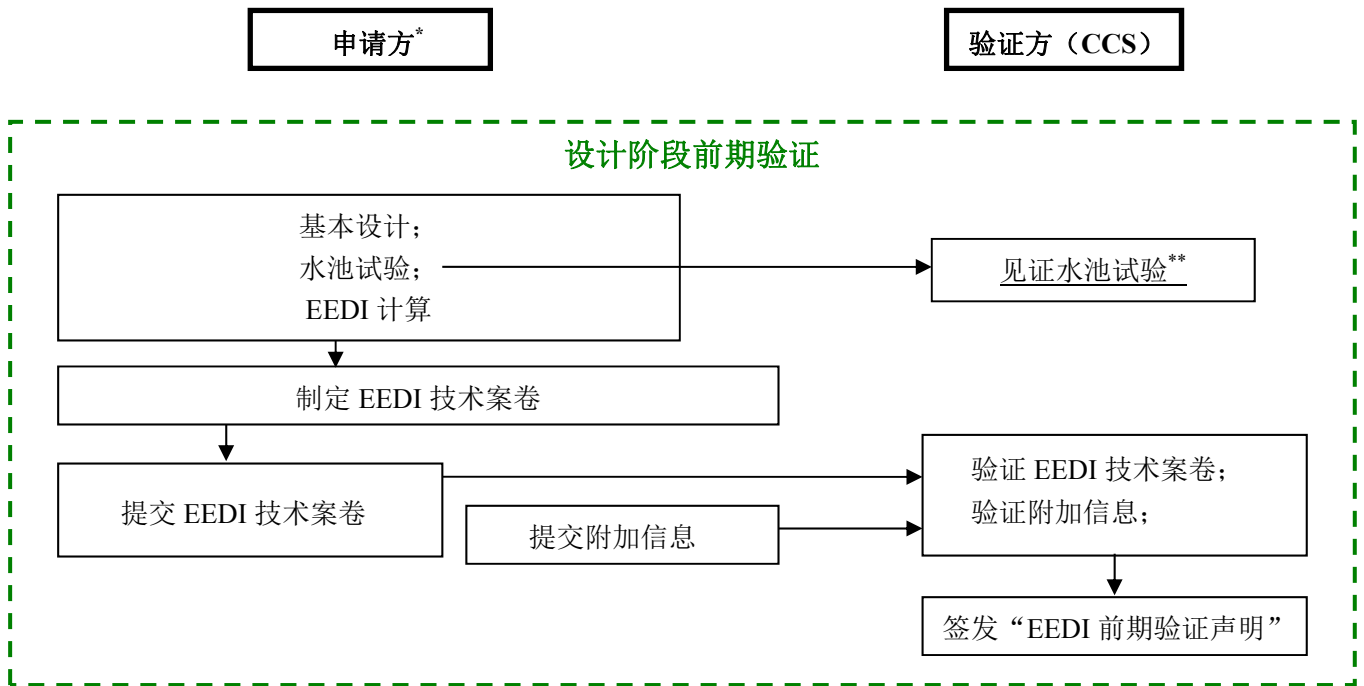
(2) Attained EEDI验证¹应分两个阶段进行：设计阶段的前期验证和试航阶段的最终验证。EEDI验证的重要节点见附录1。

(3) 验证过程中使用的信息可能会包含提交方的保密信息，需对客户知识产权进行保护。提交方与 CCS 达成保密约定后，提交方应依据双方保密约定范围向 CCS 提供验证所需的附加信息材料。

1.4.2 “水池试验见证项目检查表”、“水池试验见证协议”由CCS接受水池试验见证申请的审图单位或检验单位完成和签发。“EEDI前期验证声明”、“审图意见函”、“EEDI电力负荷计算表前期验证声明”（如有时）由CCS接受EEDI验证申请的审图单位完成和签发。“试航试验见证项目检查表”和““EEDI电力负荷计算表最终验证声明”（如有时）”由现场检验单位完成和签发。完成EEDI验证后，由现场检验单位签发能效证书和/或授予CO₂排放设计指数附加标志。

1.4.3 验证程序如图1.4.3-1所示，水池试验见证流程如图1.4.3-2所示：

¹ 就法定要求而言，对于 MARPOL 附则 VI 中无 Required EEDI 要求的船舶，对其 Attained EEDI 的仅要求基于 EEDI 技术案卷的验证。



* EEDI 验证申请方为船东、船厂或设计单位; 水池试验的申请方为船东、船厂、设计单位或其委托的水池试验机构等。

** 参见图 1.4.3-2。

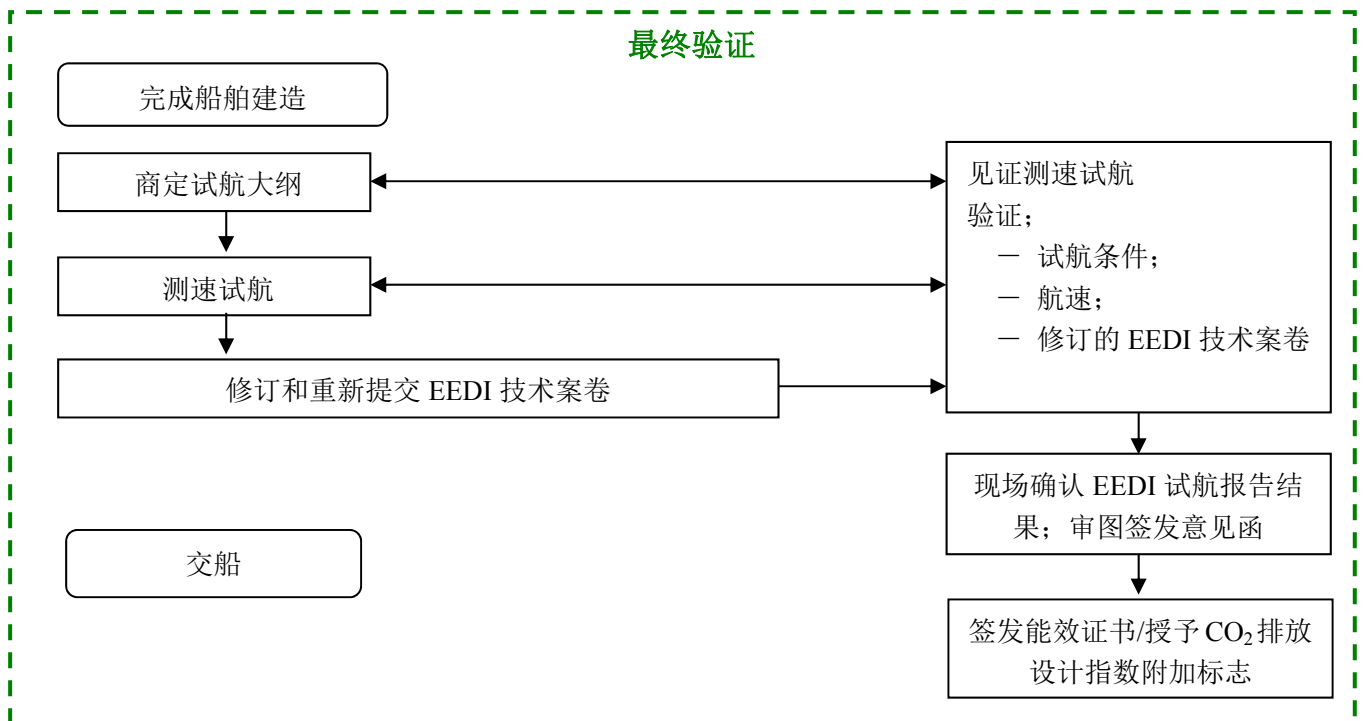


图 1.4.3-1 验证程序

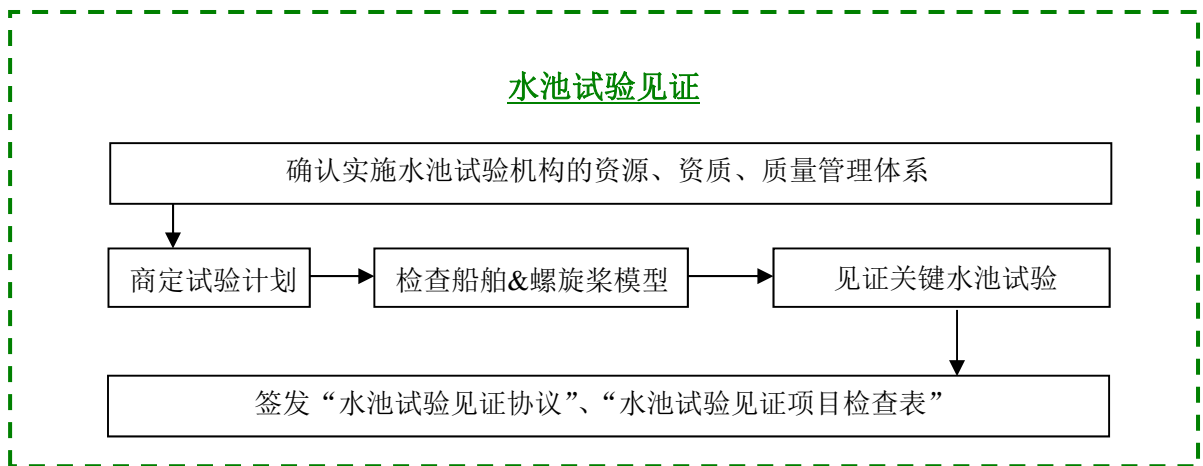


图 1.4.3-2 水池试验见证流程

第 2 章 前期验证

2.1 一般规定

2.1.1 在提交 EEDI 验证申请前，申请方应先完成船舶的基本设计。前期验证一般包括：见证水池试验、基本设计验证以及 Attained EEDI 计算的验证。

2.1.2 对于水池试验的见证，如申请方不是经授权的水池试验机构，应确保水池试验机构能够提供完成见证所需的相关信息和资料。由 CCS 接受 EEDI 验证申请的审图单位执行：

(1) 审核实施水池试验机构的资源、资质、质量管理体系和试验符合本章 2.5 的要求；

(2) 按申请方和 CCS 执行检验单位商定的计划见证试验（包括阻力试验、螺旋桨敞水试验和自航试验）过程；

(3) 对申请方拟提交的“附加信息”进行确认；

(4) 完成试验见证，签发“水池试验见证项目检查表”和“EEDI 水池试验见证协议”，其中“水池试验见证协议”应签发给申请方。

2.1.3 对基本设计的验证以及 Attained EEDI 计算的验证，由 CCS 接受 EEDI 验证申请的审图单位通过对申请方所提交的 EEDI 技术案卷以及水池试验“附加信息”的审查来进行。对于 EEDI 技术案卷的审查要点见附录 1 的描述。完成验证后，由 CCS 审图单位签发“EEDI 前期验证声明”给 CCS 执行建造检验单位。

2.1.4 在 EEDI 技术文件提交方和船东之间达成一致的基础上，如果进行水池试验的船舶与 EEDI 验证的船舶属于相同类型船舶，验证船级社可接受经另一船级社见证的水池试验报告。下列文件副本应提供给验证船级社，并可按 1.4.1 (3) 考虑保护知识产权：

(1) 参照水池试验船舶模型的速度功率曲线，计算经验证船舶的航速；

(2) 经见证船级社的验船师签署的水池试验船舶的见证协议；

(3) 水池试验船舶的水池试验报告。

应验证船级社的特别要求，应提交下列附加信息：经修正的 IMO《2014 年能效设计指数(EEDI)检验和发证指南》4.2.7.2 中所述的水池试验船舶的船舶型线和模型细节，

装载和操作工况，以表明经验证船舶和水池试验船舶为相同类型船舶。

如果原见证船级社拥有某些相关信息，提交方应授权见证船级社，使验证船级社可获得该信息。

2.1.5 对于 2013 年 1 月 1 日前某些新船已在 ITTC 成员水池试验机构进行水池试验但未经验证方见证的情况，验证船级社（CCS）可根据水池试验机构提交的水池试验结果和按公认方式认证的质量控制措施，或该水池的试验经验，接受其水池试验结果。

2.1.6 对于在已获得 CCS《供方认可及人员资格管理指南》中“从事船舶能效设计指数（EEDI）水池试验的供方”资质的水池试验机构开展的水池试验，可采取灵活的方式进行试验见证。

2.2 资料文件

2.2.1 申请方（船东/设计单位、造船厂、经授权的水池试验机构或其他单位）需向 CCS 提交下列资料文件：

- （1）包含验证信息的 EEDI 技术案卷以及其他相关背景文件，如 NO_x 技术案卷、功率限定的技术措施等；
- （2）用于验证所必须的附加信息。

2.2.2 包含基本设计信息的 EEDI 技术案卷以及其它相关背景文件，其中应包括申请验证船舶进行水池试验的说明或免除水池试验的说明（如适用）。

2.2.3 申请验证的船舶除经 CCS 确认符合免除水池试验的情况外，应提交反映水池试验情况的“附加信息”（如 2.4 条所述）。

2.3 EEDI 技术案卷基本要求

2.3.1 国际航行海船的 EEDI 技术案卷应至少用英语编写，国内航行海船的 EEDI 技术案卷至少用中文编写。EEDI 技术案卷的制定可参考本指南附录 3。

2.3.2 EEDI 技术案卷应至少包括但不限于以下内容：

- （1）相关设计参数
 - ① 船舶载重吨（DWT）；对客船和客滚船而言，则为总吨（GT）；
 - ② 主机和辅机的最大持续功率（MCR）；
 - ③ Attained EEDI 计算的航速（ V_{ref} ）；

- ④ 主机在 75%MCR 功率下的燃料类型及单位燃油消耗量 (SFC);
- ⑤ 辅机在 50%MCR 功率下的燃料类型及单位燃油消耗量 (SFC);
- ⑥ 用于某些特定船舶类型 (如客船、邮轮) 计算 EEDI 用的电力负荷计算表 (EPT-EEDI) 的制定应按照《绿色生态船舶规范》附录 2 相关要求, 并按照本指南附录 2 进行验证。

(2) 设计阶段(经水池试验后修正)得出的船舶在满载(注:集装箱船为 70%DWT)吃水下和假定无风无浪无流和深水条件下估算的功率曲线 (kW-knot)。

(3) 如果预计试航在非满载吃水下进行, 则除上述 (2) 之外, 还应通过水池试验得出船舶在该预计试航工况下和假定无风无浪无流和深水条件下估算的功率曲线 (kW-knot)。

(4) 主要参数细节、船型以及船型界定资料; 船级符号; 船上推进系统和电力供应系统的总体情况。

(5) 节能设备的描述。

(6) 船舶 *Attained EEDI* 的计算值 (包括计算概述), 该计算概述应至少含有用于确定船舶 *Attained EEDI* 的每一计算参数值和计算过程。

(7) 如果采用了船舶风浪失速系数 (f_w), 则其计算的 *Attained EEDI* 应以 *Attained EEDI_{Weather}* 表示。因此, 此时还应包括 f_w 值和 *Attained EEDI_{Weather}* 的计算值。

(8) 如是化学品船和 LNG 船¹, 还包括舱容修正系数 (f_c);

(9) 如是 LNG 船², 还应包括:

- ① 推进系统的类型和概述 (如柴油机直推、电力推进或蒸气轮机推进);
- ② LNG 货舱容积 (M^3) 和 *BOR* (船舶建造合同中规定的整船每天的设计气化速率);
- ③ 100% 发电机额定输出功率 (MPP_{Motor}) 下传动装置后的轴功率和柴油发电机效率 $\eta_{(i)}$;
- ④ 蒸汽轮机的最大持续额定功率 ($MCR_{SteamTurbine}$);
- ⑤ 蒸汽轮机的 $SFC_{SteamTurbine}$ 。

(10) 如是按船级社共同结构规范 (CSR) 建造的船舶, 则还包括 CSR 船修正系数 (f_{csr});

¹ 如 LNG 船按照“气体运输船”船型定义时适用。

² 就满足法定要求而言, 2019 年 9 月 1 日或以后交船的 LNG 船适用本条款。

(11) 如是采用自愿结构加强船舶, 则还包括自愿结构加强修正系数 (f_{ivse}), 同时应按IMO 2018年EEDI计算导则要求, 提供加强前和加强后两套结构图纸供审核; 作为一种替代方法, 也可只提交一套基本设计的结构图纸, 但其应带有自愿结构加强的标识。

(12) 如果自愿对推进功率采用可验证的方式进行限制, 应包括推进功率限定措施的说明。

2.3.3 如船舶设有双燃料主机或辅机, 针对气体燃料的碳转换系数(C_F)和针对燃油的碳转换系数(C_F)应适用, 并应在相关的 EEDI 负荷点乘上相应燃料的单位燃气消耗值 (SFC)。同时应考虑:

(1) 气体燃料是否被视为“主要燃料”;

(2) 如船上安装的不全是双燃料发动机, 气体燃料的碳转换系数(C_F)只能应用于安装上船的双燃料发动机, 并保证这些发动机有足够的气体燃料供应;

2.3.4 在计算 *Attained EEDI* 时, 主辅机的单位燃料消耗值 (SFC) 应取自经批准的 NO_x 技术案卷, 并且是相对于 ISO 标准基准条件用燃油标准低热值 (42700kJ/kg) 修正过的值, 可参照 ISO 15550:2002 和 ISO 3046-1:2002。为确认 SFC 值, 应向 CCS 提供经批准的 NO_x 技术案卷副本和修正计算的概述文件。如果在申请前期验证时 NO_x 技术案卷尚未经批准, 则可使用生产厂提供的试验报告。对该情况, 在试航验证阶段应向 CCS 提供经批准的 NO_x 技术案卷副本和修正计算的概述文件。当根据 2.3.3 被认可为主要燃料是气体燃料且安装发动机的技术案卷没有气体模式下的测试值时, 其气体模式下的 SFC 应由制造厂提供并由 CCS 确认。

2.3.5 基本设计验证的主要项目包括:

(1) 与 EEDI 有关的船舶和主机的参数;

(2) 船体线型特征参数;

(3) 功率曲线计算所必须的船体阻力/有效功率曲线、自航因子、螺旋桨参数及敞水性能曲线;

(4) 满载吃水及压载状态的功率曲线、*Attained EEDI* 计算航速的估算数据。

2.4 附加信息的基本要求

2.4.1 附加信息应至少包括但不限于以下内容:

(1) 水池试验设施的描述: 如设施名称、水池及拖曳设备的技术细节、监测设备

的校准记录、水池试验机构的质量管理体系情况等；

(2) 船模与实船的型线（如型线侧视图，型线横剖图和半宽图）和螺旋桨模型报告，用于证明模型与实船之间的相似性以验证水池试验的合适性；

(3) 船舶空船重量和排水量以验证载重吨；

(4) 水池试验计划。该试验计划中包括对试验步骤的说明，以及需要 CCS 检验单位见证的节点。

(5) 水池试验方法及结果的详细报告，至少包括满载吃水条件和压载试航条件下的水池试验结果（如不能在满载吃水条件下进行试航），以及两种条件下的功率曲线；

(6) 航速的详细计算过程；

(7) 水池试验后推算的实船功率曲线应基于：

- ①船舶模型试验结果换算得出的实船伴流分数 w 和推力减额分数 t ；
- ② 相对旋转效率、实船有效功率曲线，和
- ③螺旋桨敞水性能曲线；

按照船—机—桨相互作用原理计算确定。

(8) 对于相同类型船舶，可基于技术依据（例如水池试验结果的可用性）来免除单个船舶的水池试验。应提供相同船型船舶的线型及水池试验结果，以及与实船的主要参数之间的对比。还应提供技术证明解释为什么水池试验是不必要的。另外，如果某船将在试航阶段以满载吃水进行试航试验，经船东和造船厂同意并经 CCS 批准，则可免除水池试验。

(9) 数值计算可等同于螺旋桨敞水试验予以接受。如只有一个母型船船型通过水池试验进行验证，可根据数值计算为制定航速功率曲线提供依据，以评估附加船体特征（例如船艏球鼻变化，鳍和水动力节能设备）的影响，并提交相应的计算评估报告。数值计算可包括航速 V_{ref} 时推进效率的 CFD 计算，以及船体阻力变化和螺旋桨敞水效率。这些数值计算应按 ITTC 7.5-03-01-04 的最新版或等效文件进行。对于未修改的母船船型的 CFD 计算值和水池试验结果之间的比较，必须提交进行评审。

2.4.2 CCS 验船师应按照本章 2.5 的要求对水池试验机构资质进行审核，并对阻力试验、螺旋桨敞水试验和自航试验进行见证。在水池试验开始之前，提交方应将试验计划提交给 CCS 执行检验单位。由于水池试验的详细过程取决于每个提交方的做法，应在提交给 CCS 执行检验单位的文件中包括足够信息以表明水池试验过程，具体的审查与见证要求见附录 5。在商定试验计划之后，提交方应通知 CCS 执行检验单位需见证

的试验。提交方应告知 CCS 执行检验单位试验计划中商定活动的任何变化，并向 CCS 执行检验单位提供水池试验报告和航速试验预报结果。

2.4.3 水池试验机构所采用的模型-船舶关联方法应适当地形成文件并参考ITTC 建议程序7.5-02-03-1.4最新版。

2.4.4 由于水池试验的详细过程取决于每个提交方的做法，提交给CCS的文件中应包括足够信息，以表明水池试验过程符合附录1和附录5中所列参考文件的要求。

2.5 试验水池的基本要求

2.5.1 为进行EEDI前期验证而进行船模试验的试验机构/单位，应为ITTC¹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，并对试验人员资质及服务提供进行有效管理和监控。如果水池试验机构质量控制体系未按认可计划（ISO 9001或等效文件）予以认证，应向CCS执行试验见证单位提交有关水池试验机构的以下附加信息：

(1) 水池试验设施的描述；包括设施名称、水池及拖曳设备的细节以及附录4中所述的每个监测设备的校准记录；

(2) 至少包括ITTC 质量手册示例（2002版）所列信息的质量手册；

2.5.2 用于预报船舶航速 V_{ref} 的试验通常在船模拖曳水池中进行。拖曳水池的尺度和水深应与使用的模型的长度、试验速度相适应，水池模型试验应具有足够的测量段长度和测量时间。试验场所应配备针对阻力试验、自航试验及螺旋桨敞水试验的设备和测量仪器。水池应至少设有下列设备和设施：

(1) 造波机和消波器（验证 f_w 和 Attained EEDI_{weather} 需要）；

(2) 船模及螺旋桨加工/测量设备；

(3) 用于测力和测速的仪器，至少能测量：

- 船模速度 (V_m)
- 船模总阻力 (R_m)
- 螺旋桨推力 (T_m)
- 螺旋桨的转矩 (Q_m)
- 螺旋桨转速 (n_m)

¹ ITTC-国际拖曳水池大会 (International Towing Tank Conference)。

(4) 其他测量设备，如纵倾测量仪、吃水测量仪、比重表、浪高仪、普兰特毕托管和五孔毕托管、压力传感器、水压力计、热线仪、激光多普勒测速仪、应变仪电桥设备、电子设备（记录器、滤波器、分析器）等。

2.5.3 试验机构对试验设备进行有效管理，定期进行校准并予以记录，确保监测、测量和试验设备的有效性，以此保证试验结果的准确性。对试验设备的管理及校准应参照 ITTC 7.6-01-01 要求。有关试验设备校准的具体要求可参见附录 4。

2.5.4 试验仪器应定期校准并进行不确定性评估。不确定性评估方法可参照 ITTC 7.5-01-03-01。

2.5.5 试验用船模和桨模应符合 EEDI 验证的要求。船模需要根据提供的船舶线型制作。确保试验过程中模型保持良好、船模的排水量正确。模型制作应参照 ITTC 7.5-01-01-01。

2.5.6 激流(Turbulence Stimulation)措施应在模型制造文件或者试验文件中清晰表明，激流丝（Wires）或沙带（Sand strips）的使用应参照 ITTC 7.5-01-01-01 相关要求。

2.5.7 试验前应完成模型吃水的确定与浮态控制以及模型（包括船体模型和螺旋桨模型）相关资料的准备；具体应参照 ITTC 7.5-01-01-01。

2.5.8 试验场所应在每次试验前，根据 ITTC 建议程序制定试验程序大纲；试验大纲应包括阻力/自航/螺旋桨敞水试验的试验模型状况、设备安装以及需测量参数，针对上述试验的测量仪器的使用及测量精度的说明、试验流程以及数据的获取与分析；并能对试验结果进行可靠性分析，以及试验后出具报告应包含信息。具体应分别参照 ITTC 7.5-02-02-01、7.5-02-03-01.1、7.5-02-03-02.1 要求。

2.5.9 试验机构对试验过程中产生的数据进行有效管理。包括在试验过程中，对试验关键数据、结果等做适当的记录；试验结束后，能够将试验结果用图线表示，如阻力系数、伴流分数、推力减额和收到功率曲线。试验记录、试验资料和预报分析应存档保留。

2.5.10 试验场所具有相应的试验数据管理、分析软件平台；水池试验数据积累能够满足所试验船型修正精度要求。

第3章 最终验证

3.1 一般规定

3.1.1 EEDI 最终验证应包括：

- (1) 现场检验单位检查试验大纲，并对试航条件进行确认；
- (2) 现场检验单位见证试航并核实获得的用于 EEDI 最终计算的相关参数（如需要时，对 EPT 中用电设备负荷的检查）；试航结束后，CCS 现场检验单位对试航试验机构提交的试航报告中涉及 EEDI 试航验证的结果进行审查批准，完成试航试验见证项目检查表，发给审图单位；
- (3) 审图单位评审试验机构提交的试验报告，确认功率和航速已按 ITTC 建议程序 7.5-04-01-01.2 航速和功率测试，第 2 部分；2017 或 ISO 15016:2015 标准进行修正；
- (4) 审图单位对经申请方修订和重新提交的 EEDI 技术案卷进行评审和验证。核定船舶最终的 EEDI 值之后，签发审图意见函。

3.1.2 检验单位根据审图单位签发的审图意见函，在核查船舶满足相关要求后，签发能效证书。

3.2 资料文件

3.2.1 试航前，应向现场检验单位提交如下资料：

- (1) 试航大纲（包括测速试航大纲），应至少包括对试航工况的说明、需测量的参数及其测量方法、测量仪器及其仪器校准的说明、数据记录表以及数据分析和修正方法的说明等。
- (2) 最终的排水量和测定的空船重量，或最终的倾斜试验报告；
- (3) 主机和辅机的 NO_x 技术案卷副本。

3.3 测速试航验证

3.3.1 试航条件应尽可能设定在 IMO 2018 年 EEDI 计算导则第 2.2.2 条所述的 EEDI 条件。

3.3.2 测速试航要求

(1) CCS 验船师应见证测速过程；

(2) 测速试航的验证应确认以下方面：

- ① 推进系统（包括功率限定措施，如有时）和供电系统、柴油机或蒸汽轮机（LNG 船采用蒸汽轮机推进系统时）的技术细节、EEDI 技术案卷中描述的其他相关项；
- ② 船舶吃水和纵倾；
- ③ 试航的海况及其他要求的环境条件参数；
- ④ 航速的测试；
- ⑤ 原动机轴功率和转速（RPM）的测试。

(3) 吃水和纵倾应在试航前通过测量吃水进行确认；吃水和纵倾应尽实际可能接近用于估计功率曲线的假定条件；

(4) 海况应根据ITTC建议程序7.5-04-01-01.1航速和功率测试，第1部分；2017或ISO 15016:2015¹标准进行测量；

(5) 航速应根据ITTC建议程序7.5-04-01-01.1航速和功率测试，第1部分；2017或ISO 15016:2015¹标准进行测量，并且要在至少三个功率点测量航速，其中包含主机在IMO《2018年 EEDI计算导则》第2.2.5条所述的功率下的航速；该要求单独适用于每艘船舶（即使该船是母型船的姐妹船）。

(6) 主机输出功率、螺旋桨轴功率（LNG 船采用柴电推进系统时）、蒸汽轮机输出功率（LNG 船采用蒸汽轮机推进系统时）测量应按以下方式进行：

- ①. 应按轴功率表或根据柴油机厂推荐且经 CCS 认可的方法进行测量；可采用测量扭转应变方式测量轴扭矩、脉冲式仪表测量主机（传动轴）转速等，并据此推算出轴功率和主机功率；
- ②. 各测试工况的测量可按 GB/T 3471 中推荐的方法进行。
- ③. 其他测量方法如经船东及造船厂同意并经过 CCS 批准，也可接受。

(7) 试航结果提交方应根据试航时测量的航速和主机输出功率制定功率曲线。在制定功率曲线时，提交方应根据 ITTC 7.5-04-01-01.2 航速和功率测试，第 2 部分；2017 或 ISO15016:2015 标准通过考虑风、浪、流、浅水、排水量、水温及水密度等因素影响后修正所测得的航速（如必要）。提交方应将航速测试报告包括功率曲线制定的详情提交给验证方供验证用。

3.3.3 CCS 验船师对试航的测量项目应进行确认。试航时应测量和记录的数据至少包括：

- 试航时间和持续时间
- 吃水标记读数
- 空气和海水温度
- 主机设定
- 航向 (rad)
- 对地航速 (m/s)
- 螺旋桨每分钟转速 (rpm)
- 测量的功率 (kW)
- 相对风速 (m/s)
- 相对风向 (rad)
- 平均波浪周期 (风浪和涌浪) (s)
- 有义波高 (风浪和涌浪) (m)
- 波浪入射角 (风浪和涌浪) (rad)
- 舵角(rad)
- 偏航角(rad)

3.4 Attained EEDI 的重新计算

3.4.1 应将试航后获得的功率曲线与设计阶段的估计功率曲线进行比较，如果两者之间有差异，则应按照下述方法重新计算船舶的 *Attained EEDI* 值：

(1) 如果船舶试航是在满载吃水条件下进行，应使用在试航时在计算 *Attained EEDI* 所选取的主机功率 (P_{ME}) 下测得的航速重新计算 *Attained EEDI*；

(2) 如果船舶试航不是在满载吃水条件下进行，则应通过经 CCS 同意的适当的修正方法将航速修正到满载吃水条件下的航速，再重新计算 *Attained EEDI*。

下面给出了一种航速修正方法示例。

V_{ref} 可根据基于水池试验预测得到的速度估计功率曲线和试航条件下的实船试航结果获得。水池试验应在对应试航条件和 EEDI 条件下进行。由水池试验预报和试航结果得到试航条件下的功率比 α_p ，再通过 EEDI 条件下的水池试验的航速预报结果乘以 α_p

即得到 V_{ref} 。

$$\alpha_p = \frac{P_{Trail,P}}{P_{Trail,S}}$$

式中：

$P_{Trail,P}$ ：水池试验预报得到的试航条件下的功率；

$P_{Trail,S}$ ：船舶实船试航阶段得到的试航条件下的功率；

α_p ：功率比

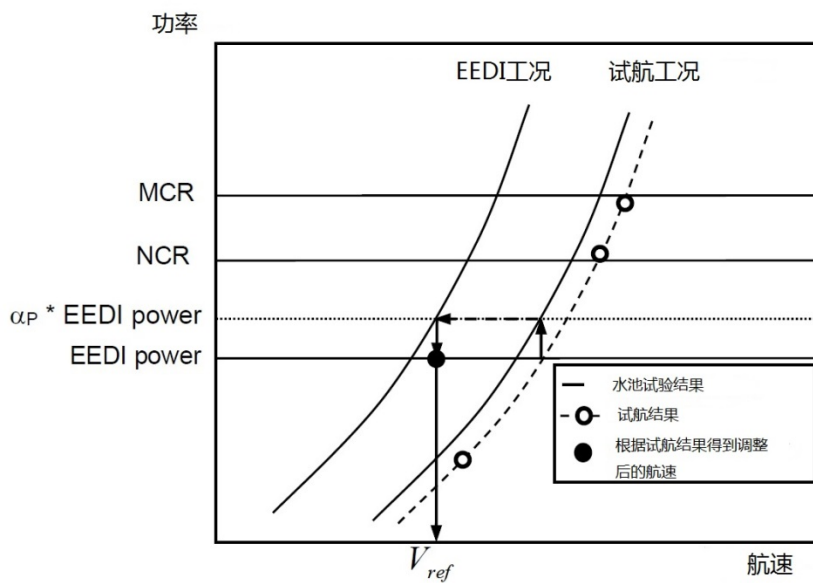


图 3.4.1 航速修正示例

3.4.2 如果最终确定的载重吨/总吨与在设计阶段 EEDI 计算时使用的的设计载重吨/总吨不同，则提交方应使用最终确定的载重吨/总吨重新计算 *Attained EEDI*。最终确定的总吨应与该船的吨位证书相一致。

3.4.3 对于采用柴电推进系统的 LNG 船，在计算 *Attained EEDI* 时，电效率 ($\eta_{(i)}$) 应取值 91.3%。若采用大于 91.3% 的值，电效率 ($\eta_{(i)}$) 应由实际测量获得，同时提出可验证方法且该方法应提交 CCS 批准。

3.4.4 如果在前期验证阶段 *Attained EEDI* 是用柴油机制造厂提供的试验报告中的 *SFC* 值计算的（由于当时还没有经批准的 NO_x 技术案卷），则应确认使用批准的 NO_x 技术案卷中的 *SFC* 重新计算 *Attained EEDI*；对于蒸汽轮机，也应采用 CCS 确认的 *SFC* 重新计算 *Attained EEDI*。

3.4.5 应确认根据试航结果修订后的功率曲线以及航速 V_{ref} 最终确定的载重吨/总吨、电效率 (η , LNG 船采用柴电推进系统时)、批准的 NO_x 技术案卷中的 *SFC* 以及根据这些修订重新计算的 *Attained EEDI* 值。

3.4.6 应确认修订后的 *Attained EEDI* 是按照 IMO “2018 年 EEDI 计算导则” 和/或《绿色生态船舶规范》附录 1-1、1-2 *Attained EEDI* 计算导则进行计算。

3.5 经修订的 EEDI 技术案卷的基本要求

3.5.1 所提交的 EEDI 技术案卷应包括:

- (1) 试航后得到的满载工况功率曲线和航速;
- (2) 船舶的 *Attained EEDI* 值及其所有与计算参数相关的细节。

3.5.2 提交经修订 EEDI 技术案卷的同时, 应提交测速试航报告、最终稳性文件 (最终的排水量和测定的空船重量, 或最终的倾斜试验报告) 以及实船型线 (如有修改)。满载吃水工况的功率曲线和航速的计算和确定应依据试航时测量的数据, 并按照 ITTC 7.5-04-01-01.2 航速和功率测试, 第 2 部分; 2017 或 ISO 15016:2015 标准考虑风、浪、流、浅水、排水量、水温及水密度等因素加以修正而确定。

3.6 对试验机构/单位的基本要求

3.6.1 为 EEDI 最终验证进行航速试验测试的机构/单位, 应获得 CCS《供方认可及人员资格管理指南》中关于“从事船舶试航测速的供方”资质。

第 4 章 重大改建验证

4.1 一般规定

4.1.1 如果船舶经过重大改建，船东应向 CCS 提交附加检验申请，同时还应提交基于重大改建而修订的 EEDI 技术案卷以及其他相关背景资料。

4.1.2 对于 1.2.10 (1), 1.2.10 (2), 1.2.10 (3) 和 1.2.10 (5) 所对应的重大改建适用于新船，其改建后适用的 Required EEDI 要求按照原船舶的签订合同日期或安放龙骨日期或交船日期所适用的对应于改建后船舶的船型和尺度的 EEDI 要求。

4.1.3 对于 1.2.10 (4) 条，新船或现有船舶的重大改建的范围如此之大而使主管机关将其视为新船时，其改建后适用的 Required EEDI 要求按照签订改建合同之日或如无合同情况下的改建开始之日所适用的对应于改建船舶的船型和尺度的 EEDI 要求。

4.1.4 如实质上改变了该船的尺度、载运能力（如改变了垂线间长或干舷）或增加发动机总推进功率均被认定为重大改建。

4.1.5 在未改变船舶结构情况下，如减小干舷或因进港吃水或载重受限而需临时增加干舷的情况可不被认定为重大改建。然而，除临时性的增加干舷外，其他任何的增加干舷情况，均应被认定为重大改建。

4.1.6 在任何情况下，主管机关有权认定改建是否为重大改建。

4.1.7 如船舶改进了船舶能效且不构成重大改建，船东可自愿申请验证并重新签发能效证书和/或 CO₂ 排放设计指数附加标志。

4.2 资料文件

4.2.1 背景资料应至少包括但不限于以下内容：

- (1) 重大改建的改造方案及说明；
- (2) 重大改建后发生改变的 EEDI 相关参数以及对每个相关参数的技术证明；
- (3) EEDI 技术案卷的其他改变的理由（如有）；

(4) Attained EEDI 的计算值以及计算概述，计算概述应至少包含用于确定改建后的船舶 Attained EEDI 的每一计算参数值和计算过程。

4.3 重大改建后的 Attained EEDI 验证

4.3.1 CCS 应核查经修订的 EEDI 技术案卷及其他相关文件，验证 Attained EEDI 的计算过程确保其遵循 IMO “2018 年 EEDI 计算导则” 和/或《绿色生态船舶规范》附录 1-1、1-2 Attained EEDI 计算导则要求并且技术可靠合理。

4.3.2 为验证改建后的 Attained EEDI，必要时 CCS 将要求进行测速试航。经审图部门评估认为需要重新进行航速测量的，则改建后应进行测速试航，如果船舶不能在 EEDI 所要求的相应载运能力的条件下进行测速试航，则需要进行水池试验。该情况下验证方还可接受按照 ITTC 7.5-03-01-04 的最新版或等效文件进行的数值模拟计算替代水池试验对船体型线修改的影响进行评估。

4.3.3 对重大改建后 Attained EEDI 的验证，如果改建不涉及航速 V_{ref} 的变化，则无需进行试航。就法定要求而言，如果对改建后经修订的 EEDI 技术案卷及其他相关文件进行评审得出结论，即重大改建不会使船舶超过适用的 Required EEDI，则不要求进行试航验证。若不符合以上条件，则需进行试航验证。如船东自愿要求重新验证 EEDI 以验证船舶能效有所改进，并要求重新签发 IEE 证书，则可要求进行试航验证。

4.3.4 验证结束后，CCS 审图单位将签发一份审图意见函，并标明改建后船舶的 Attained EEDI 和 Required EEDI 值。

附录 1 EEDI 验证重要节点

编号.	项目	检验方式	参考文件	应提交 CCS 的文件	备注
01	EEDI 技术案卷	审查	本指南 2.3 条	本指南 2.3 条所要求的相关资料	
02	功率的限制	审查	《绿色生态船舶规范》附录 1-1、1-2	技术性限制措施的验证文件	仅适用于设置了功率限制措施的情况
03	电功率表	审查	《绿色生态船舶规范》附录 2 本指南附录 2	EPT-EEDI 表	如果航行所需辅机功率 P_{AE} 与按照《绿色生态船舶规范》附录 1-1、1-2EEDI 计算导则中 P_{AE} 的估算值相差较大
04	水池测量设备的校准	审查&见证	本指南附录 4	校准报告	随机检查测量设备的校准记录是否有效
05	模型试验-船模	审查&见证	本指南附录 5	船体型线图&型值表 船模报告	
06	模型试验-桨模	审查&见证	本指南附录 5	桨模报告	
07	模型试验-阻力试验、自航试验和螺旋桨敞水试验	审查&见证	本指南附录 5	水池试验报告	如使用备用桨，可不进行螺旋桨敞水试验。但备用桨的敞水特性应作为水池试验报告的附件
08	模型到实船的外推和修正	审查	ITTC 7.5-02-03-01.4 1978 ITTC 性能预报方法 最新版； 本指南附录 5	外推和修正的计算报告	检查 EEDI 工况和试航工况下的功率-航速曲线使用相同计算方法和修正方法。
09	替代水池试验的数值计算	审查	ITTC 7.5-03-01-04 最新版 或等效方法	计算报告	用于验证模型试验的替代计算

编号.	项目	检验方式	参考文件	应提交 CCS 的文件	备注
10	试航前 EPT-EEDI 表中设备功率的核查	见证	本指南附录 2		仅适用于 P_{AE} 通过 EPT 计算的情况
11	试航大纲	审查	本指南 3.2.1	测速试航大纲	检查测量功率点至少 3 个 核查 EPT-EEDI (当 P_{AE} 通过 EPT-EEDI 进行计算)
12	试航	见证	ITTC 7.5-04-01-01.1 (最新版本) 或 ISO 15016: 2015		检查: <ul style="list-style-type: none"> • 推进功率, 主机状况 • 吃水和纵倾 • 海况 • 航速 • 轴功率&转速 检查主机或轴功率限制情况 (如使用) 检查 EPT-EEDI 中某些设备的功率消耗是否符合 EPT 列明的试航的情况 (当 P_{AE} 通过 EPT 计算的情况)
13	试航-修正计算	审查	ITTC 7.5-04-01-01.2 或 ISO 15016: 2015	试航报告	检查试航工况下吃水和纵倾是否准确 检查修正方法是否按照 ITTC 7.5-04-01-01.2 或 ISO15016: 2015 标准
14	试航-试航条件调整到 EEDI 工况	审查	本指南 3.4.1 (2)	试航后的制定的功率曲线	检查 EEDI 工况的功率曲线已通过修正获取
15	EEDI 技术案卷 -试航后修改	审查	本指南 3.4.2-3.4.5	经修正的 EEDI 技术案卷	检查试航后是否对 EEDI 技术案卷进行修订

附录 2 EEDI 电力负荷计算表 (EPT-EEDI) 验证导则

1 目的

本导则旨在帮助验船师认证用于 EEDI 的电力负荷计算表 (EPT-EEDI)。本导则还帮助船东、造船厂、船舶设计单位和制造商了解 EPT-EEDI 认证程序。

2 定义

2.1 就本导则而言，认证系指对所提交文件的审核和船舶在建造及试航时的检验。

2.2 标准 EPT-EEDI 表系指附件中表格，该表含需认证的 EPT-EEDI 结果。其他以此目的提交的支持性文件仅供参考，无需接受认证。

2.3 船舶负载和机舱负荷系指船体、甲板、航行和安全负载、推进和辅机负载、机舱通风和辅助设备以及船舶的一般负载所需的全部负荷组。

2.4 需用系数系指“总安装负荷功率”与连续负荷及间断负荷之和的“实际负荷功率”之比。该系数等于负荷使用系数、负荷连续使用系数及负荷间断使用系数的乘积。

3 适用范围

3.1 本导则适用于《绿色生态船舶规范》附录 1-1 中 3.5.4 (3) 所述的船舶。

3.2 认证过程包括的步骤：

(1) 在设计阶段审核文件

- ① 检查 EPT 中是否列出所有相关负荷；
- ② 检查是否使用合理使用系数；和
- ③ 根据 EPT 所给数据检查 P_{AE} 的计算是否正确；

(2) 在建造阶段检验安装的系统 and 组件

- ① 检查 EPT 中任意选取的安装系统和组件及其特性是否予以正确列出；

(3) 试航检验

- ① 检查 EPT 中选取的装置/负荷是否与实际情况相符。

4 支持性文件

4.1 申请方应至少提供船舶电力平衡负荷分析。

4.2 此类信息可能含有造船厂或船舶设计单位的保密信息。因此，在认证后，如申请方要求，

验船师应向申请方退回全部或部分此类信息。

4.3 每艘船舶应在试航时需要定义特定的 EEDI 状态，且将其包括在批准的试航计划中。对此状态应在 EPT 中插入特定的一列。

5 认证程序

5.1 一般规定

5.1.1 应按 EPT-EEDI 指南计算 P_{AE} 。EPT-EEDI 认证应分两阶段进行：设计阶段的前期认证和试航阶段的最终认证。认证过程见图 5.1.1。

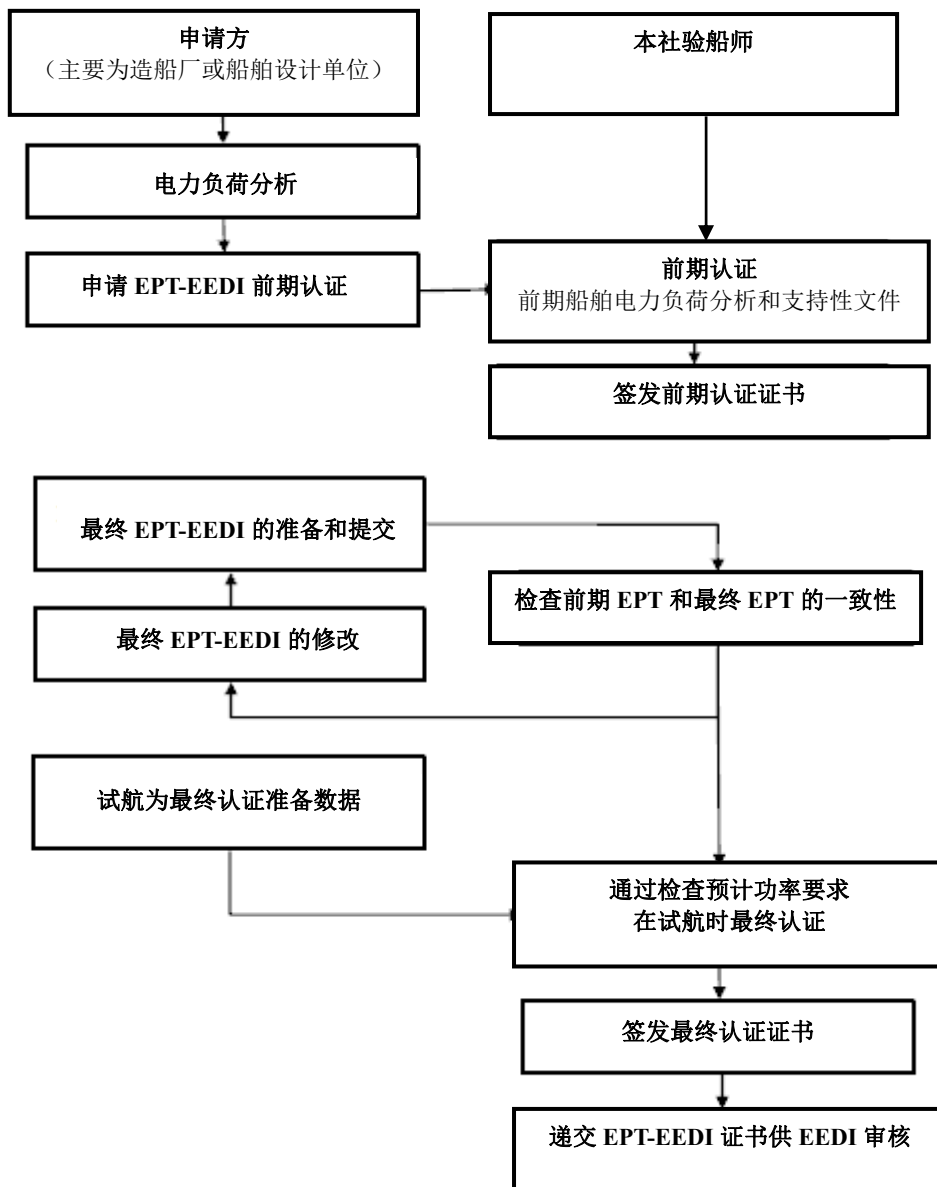


图 5.1.1 EPT-EEDI 认证过程的基本流程

5.2 前期认证

5.2.1 对于设计阶段的前期认证，申请方应在向 CCS 提交 EEDI 验证申请同时提出 EPT-EEDI 认证申请，包括 EPT-EEDI 表和所有与认证相关和必需的信息作为支持性文件。

5.2.2 验船师在必要时可要求申请方提供本指南包含信息外的附加信息，以检查 EPT-EEDI 的计算过程。设计阶段对船舶 EPT-EEDI 的估算取决于每个申请方的经验，且全面检查每个机器组件的技术方面和细节可能不可行。因此，前期认证应关注 EPT-EEDI 的计算过程。

5.3 最终认证

5.3.1 最终认证过程应至少包括船舶电力负荷分析检查以确保所有用电设备予以列出；其在电路负荷计算表的数据和计算正确且有试航结果支持。如需要，必须要求附加信息。

5.3.2 对于最终认证，申请方应在必要时根据船上机器特性和其他实际安装电力负荷修改 EPT-EEDI 表和支持性文件。应对试航时 EEDI 条件进行定义，且在这些状态下的预计功率应在 EPT 中予以纪录。从设计阶段到建造阶段任何 EPT 内的更改应由造船厂或船舶设计单位予以说明。

5.3.3 最终认证的准备包括文件检查：

- 1 前期 EPT 和最终 EPT 的一致性；
- 2 负载系数的变更（和前期认证相比）；
- 3 所有用电设备予以列出；
- 4 其在电力负荷计算表内的数据和计算正确性；和
- 5 如有疑问，还需检查部件规格数据。

5.3.4 试航前，应抽样检查机器特性和数据以及其他电力负荷符合支持性文件中的记录。。

5.3.5 试航过程中，验船师应通过所安装的测量仪器进行测量，以核查 4.3 所述的 EPT 特定一列中所选取的系统和（或）设备的数据，并核查电力负荷的总值。

6 EPT-EEDI 认证声明的签发

6.1 审图验船师按照本导则在前期认证阶段认证 EPT-EEDI 后，应在 EPT-EEDI 表盖章（备查）。

6.2 现场验船师按照本导则在最终认证阶段认证 EPT-EEDI 后，应在 EPT-EEDI 表盖章（签署）。

附件 EEDI 电力负荷计算表 (EPT-EEDI) 和认证声明

船舶编号:

IMO编号:

船名:

船厂:

船厂编号:

申请方:

认证阶段:

名称:

前期认证

地址:

最终认证

EPT-EEDI结果总结

负荷组	航行状态		备注
	连续负荷 (千瓦)	间断负荷 (千瓦)	
船舶运行和机舱负荷			
起居 (和货物) 负荷			
总安装负荷			
需用系数			
正常航行负荷			
发电机加权平均效率			
P_{AE}			

支持性文件

文件名	编号或备注

验证方资料:

名称:

地址:

兹证明上述电力负荷和支持性文件业已按EPT-EEDI指南进行审核, 且审核显示在EEDI计算中使用以上 P_{AE} 是合理可信的。

审核日期:

认证声明编号:

本声明在船舶电力负荷特性不变的条件下有效。

验船师签名:

附录3 EEDI 技术案卷样本

1 数据

1.1 一般信息

造船厂	XXX
船厂编号	12345
IMO 编号	94111XX
船舶类型	散货船
CCS CLASS No.	

1.2 主要船舶资料

总长	250.0 m
垂线间长	240.0 m
型宽	40.0 m
型深	20.0 m
夏季载重线吃水，型吃水	14.0 m
夏季载重线吃水时的载重吨	150,000 吨

(说明：上述型吃水及载重吨应取自稳性资料/干舷计算)

1.3 主机

生产商	XXX
型号	6J70A
最大持续功率 (MCR)	15,000kW×80 rpm
75%MCR 下的单位燃油消耗量	165.0 g/kWh
台数	1
燃料类型	柴油

(说明：该部分数据应取自总布置和 NO_x 技术案卷。)

1.4 辅机

生产商	XXX
型号	5J-200
最大持续功率 (MCR)	600kW×900rpm
50%MCR 下的单位燃油消耗量	220.0 g/kWh
台数	3
燃料类型	柴油

(说明：该部分数据应取自总布置和 NO_x 技术案卷。)

1.5 轴带发电机 (如适用)

轴带发电机编号

制造厂

2 功率曲线

设计阶段估算的和经航速测试后修订的功率曲线见图 2.1。

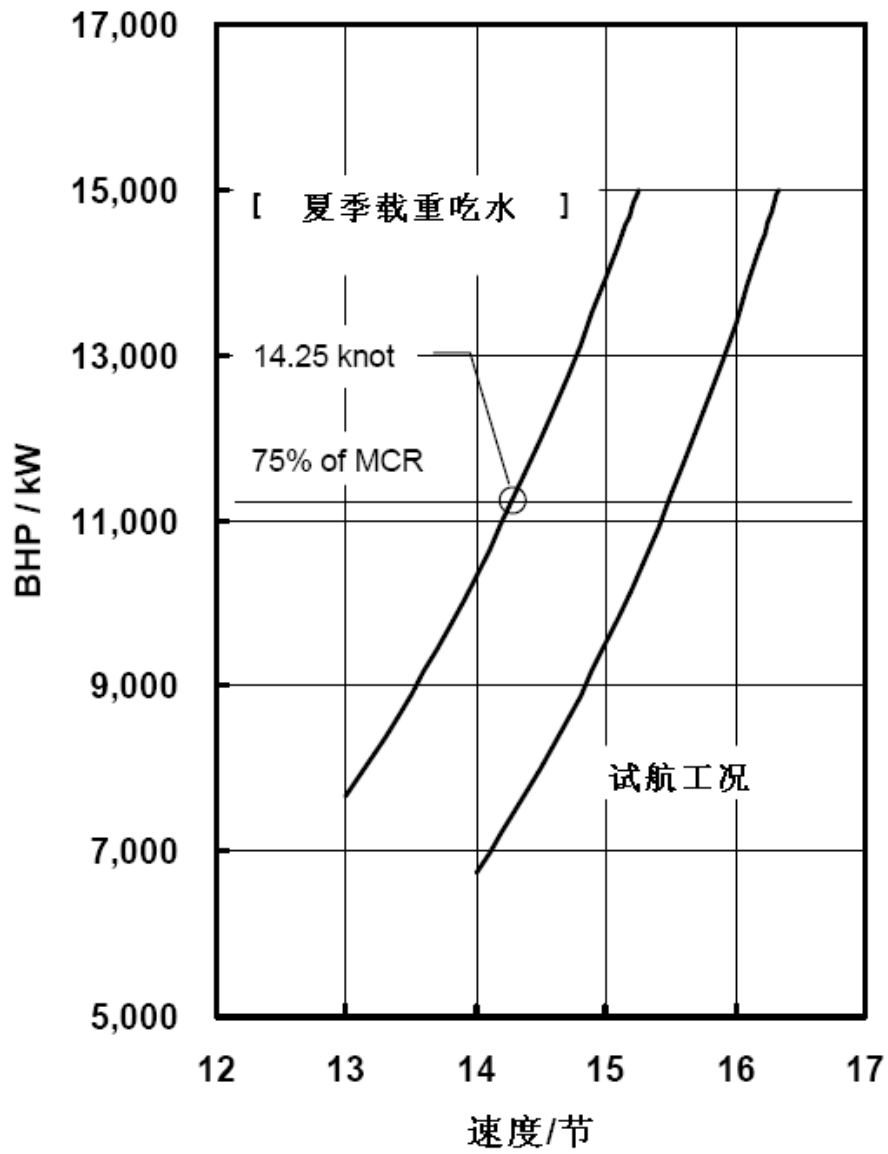


图 2.1 功率曲线

3 推进系统和电力供应系统概述

3.1 推进系统

3.1.1 主机

参见 1.3.

3.1.2 螺旋桨

类型	固定螺距螺旋桨
直径	7.0 m
桨叶数量	4
台数	1

3.2 电力供应系统

3.2.1 辅机

参见 1.4.

3.2.2 主发电机（轴带发电机参见 1.5）

生产商	XXX
额定功率	560 kW(700 kVA)×900 rpm
电压	AC 450V
台数	3
发电机加权平均效率 (η_{Gen})	

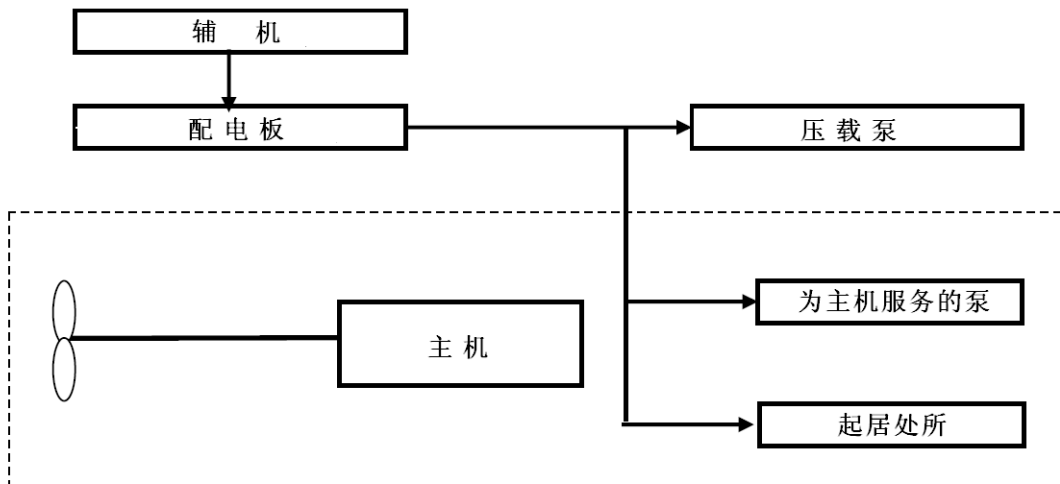


图 3.1— 推进和电力供应系统原理图

4 设计阶段功率曲线估算过程

功率曲线的估算基于模型试验结果。估算过程的流程如下。

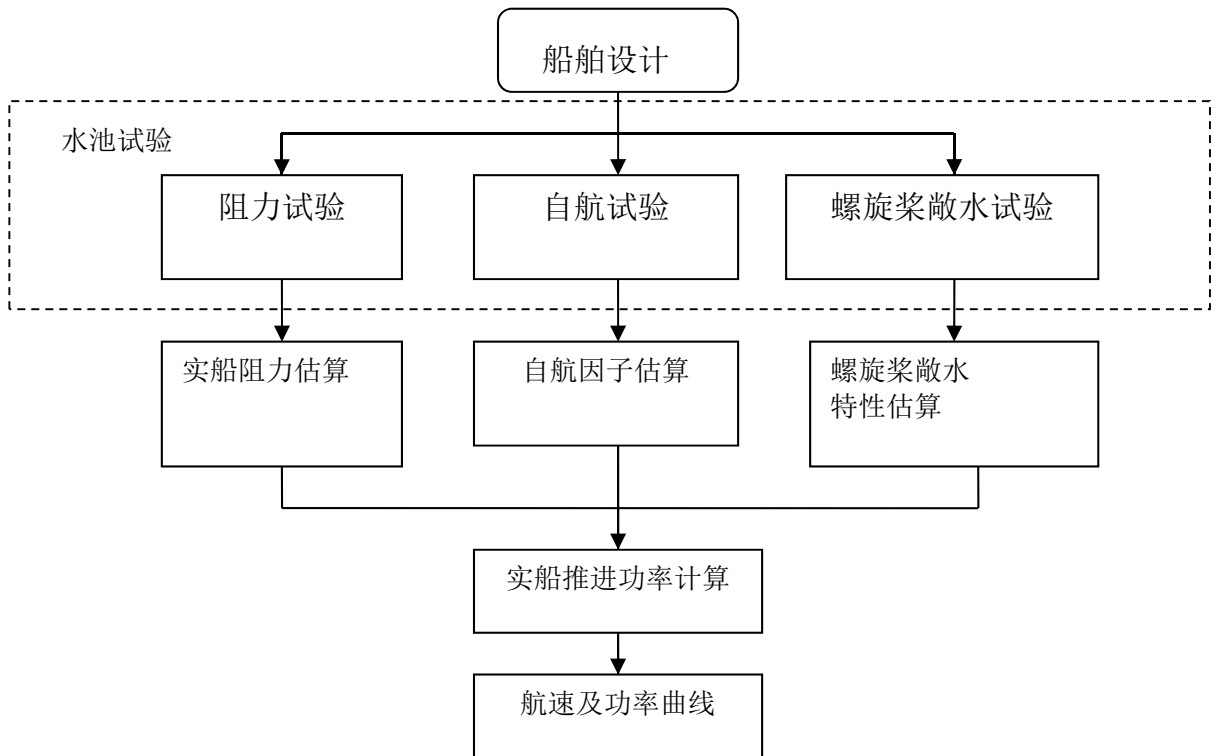


图 4.1 功率曲线估算过程流程图

5 节能设备描述

5.1 其效果在 EEDI 计算公式中表述为 $P_{AEff(i)}$ 和/或 $P_{eff(i)}$ 的节能设备。

未知

5.2 其他节能设备

(举例)

5.2.1 舵鳍

5.2.2 桨毂鳍

……(应出示每台设备或装置的规格书、原理图和/或照片等。或者附上产品商业目录也可以接受。)

6 Attained EEDI 的计算值

6.1 基本数据

船型	载重吨	航速 V_{ref} (kn)
散货船	150,000	14.25

6.2 主机

MCR_{ME} (kW)	轴带发电机	P_{ME} (kW)	燃油类型	C_{FME}	SFC_{ME} (g/kWh)
15,000	无	11,250	柴油	3.206	165.0

6.3 辅机

P_{AE} (kW)	燃油类型	C_{FAE}	SFC_{AE} (g/kWh)
625	柴油	3.206	220.0

6.4 冰级

无

6.5 创新型节电技术

创新电力辅机（如适用）

系统编号
制造厂
输出功率
有效因数

说明：系统编号应取自系统设计说明书；其他数据应取自制造厂文件。

6.6 创新型节能技术

减小主机推进功率的创新技术（如适用）

系统编号
制造厂
机械输出
有效因数

说明：系统编号应取自系统设计说明书；其他数据应取自制造厂文件。

6.7 舱容量修正系数

无

6.7 Attained EEDI 的计算值

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPPI} P_{PPI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}^{**} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_i \cdot Capacity \cdot f_n \cdot V_{ref} \cdot f_n}$$

$$= \frac{1 \times (11250 \times 3.206 \times 165.0) + (625 \times 3.206 \times 220.0) + 0 - 0}{1 \cdot 150000 \cdot 14.25 \cdot 1} = 2.99 (g-CO_2 / ton \cdot nmile)$$

Attained EEDI: 2.99 g-CO₂/ton mile

7. Attained EEDI_{weather}的计算值

7.1 代表性海况

	平均风速	平均风向	有义波高	平均周期	平均浪向
BF6	12.6 (m/s)	0 (deg.)	3.0 (m)	6.7 (s)	0 (deg.)

* 0 (deg.) 表示迎浪。

7.2 计算的 f_w 值

f_w	0.900
-------	-------

7.3 Attained EEDI_{weather}的计算值:

Attained EEDI_{weather} = Attained EEDI/ f_w = 2.99/0.9 = 3.32 g-CO₂/ton mile

Attained EEDI_{weather}: 3.32 g-CO₂/ton mile

附录 4 模型试验设备的校准

1 测量设备

1.1 测量设备仪器应有包含下列数据的单独记录：设备名称、制造商、型号、系列、实验室标识号、状况（验证，校准，指示）。

1.2 记录中应有关于上一次和下一次校准或验证日期的信息。所有数据应由经授权的人员签字。

2 测量标准

2.1 实验室用于校准的测量标准应经度量衡机构定期确认和验证。

2.2 实验室用于确认的所有测量标准应由证书、报告或设备数据单支持，以确认来源、不确定性和获得结果的条件。

3 校准

3.1 因测量设备不同，各试验机构的校准方法可能不同，但所有校准应包含整个测量链（测量仪，放大器，数据获得系统等）。

3.2 实验室应确保使用核准的具有与国际或国家认可的标准已知有效关系的测量标准进行校准试验，至少包含以下要素：

(1) 校准报告

校准报告应包括：测量标准证书标识、环境状况的描述、校准因数或校准曲线、测量的不确定性、测量仪器的误差在规定的（可接受的）限值范围内的最小和最大容积。

(2) 确认的间隔时间

测量设备（包括测量标准）应根据其稳性、用途和损耗以适当的间隔（通常定期）进行确认。间隔时间应使在设备精度发生任何可能的变化之前再次进行确认。根据先前校准的结果，确认周期可能缩短（如必需）以确保测量设备持续准确。实验室应有具体的目标校准用于确认间隔的选择。

(3) 不符合设备

测量设备的任何部分遭受破损、过载或处理不当、显示故障、工作的准确性受到怀疑、超过指定的确认间隔时间、密封完整性遭到破坏时，应通过隔离、清晰标明或注销予以停止使用，直至已消除不符合的原因并再次经过确认。如果在进行调整或修理之前，校准结果指示校准前设备的任何测量存在严重误差的风险，实验室应采取必要的纠正措施。

4 测量仪器

4.1 需特别注意关于下列测量设备的校准文件记录：

(1) 拖车速度

拖车速度应按照距离与时间之比进行校准。校准周期应遵照水池试验机构的内部程序。

(2) 水温

由持证的经校准的温度计（精度 0.1℃）进行测量。

(3) 纵倾

校核长度标准。校准周期应遵照水池试验机构的内部程序。

(4) 阻力试验

阻力试验是一种力的测量，应按照标准重量进行校准。校准通常应在每个试验系列之前进行。

(5) 自航试验

自航试验需测量扭矩、推力和转速。推力和扭矩按照标准重量进行校准。转速通常由脉冲转速计和有示波器校准的电子计数器进行测量。校准周期应遵照水池试验机构的内部程序。

(6) 螺旋桨敞水试验

螺旋桨敞水试验需测量扭矩、推力和转速。推力和扭矩按照标准重量进行校准。转速通常由脉冲转速计和有示波器校准的电子计数器进行测量。校准周期应遵照水池试验机构的内部程序。

5 测量和校准表格

5.1 测量和校准表格范例见附件 1 和 2。

附件 2 校准证书范例

质量管理 4.10.6.2	校准证书 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">螺旋桨动力仪</div>		编号 <input style="width: 100%;" type="text"/> LIN <input style="width: 100%;" type="text"/>	
校准说明 校准日期	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	校准者: 校核者:	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	
测量组合				
动力仪 LIN	制造商 序列号 工作说明	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	型号 购买日期 上次校准	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>
电缆 <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>				
放大器 LIN	制造商 序列号 工作说明 励磁 推力：放大 扭矩：放大	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	型号 购买日期 转换器种类 励磁频率 零无载 零无载	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>
电缆 <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>				
A/C 转换器 LIN	制造商 序列号 工作说明	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	型号 购买日期 证书号	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>
测量标准				
质量 长度力臂 伏特计	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	证书号 证书号 证书号	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	

质量管理
4.10.6.2

校准结果

环境条件

试验地点

温度：

初始

最终

湿度：

初始

最终

校准试验的计算结果

执行的计划

程序

证书号

推力

扭矩

偏差：

非线性误差：

滞后：

精度误差：

总的不确定性：

校准因数：

校准请求：

规定的限值

推力

扭矩

误差：

最大容积：

最小容积：

注：报告中包含试验和计算结果

制表人 _____

审核人 _____

日期

附录 5 模型试验的评审与见证

1 船舶模型

1.1 水动力衡准

1.1.1 模型尺寸：模型的大小一般应尽可能与拖曳水池的尺寸相配，并考虑到池壁、阻滞和有限深度的影响以及模型质量和拖船的最大航速。

1.1.2 雷诺数：雷诺数应大于 2.5×10^5 。

1.1.3 湍流模拟装置：为确保存在湍流，应使用湍流激流装置。

1.2 制造精度

船舶模型的精度应按照 ITTC 建议程序 7.5-01-01-01 船舶模型中给出的衡准，主要包括主尺度确认、表面光滑、站点水线标注以及排水量的确认等。

1.3 报告要求

提交方给出的报告应至少包括：

- 标识（模型编号或类似号码）
- 结构材料
- 主尺度
- 垂线间长（ L_{pp} ）
- 水线长度（ L_{ww} ）
- 宽度（ B ）
- 吃水（ T ）
- 对于多体船而言，纵向和横向船体间距
- 设计排水量（ Δ ）（kg, 淡水）
- 静水力参数，包括水平面区域和湿表面区域
- 湍流模拟的细节
- 附体的细节
- 制造公差

2 螺旋桨模型

2.1 制造精度

螺旋桨制造公差参见 ITTC 建议程序 7.5-01-01-01 船舶模型第 3.1.2 章。对具有直径（ D ）为 150mm 至 300mm 范围内的螺旋桨应符合下列公差：

- 直径 (D) ± 0.10 mm
- 厚度 (t) ± 0.10 mm
- 叶片宽度(c) ± 0.20 mm
- 每一半径的平均螺距 (P/D) $\pm 0.5\%$ 设计值

2.2 报告要求

提交方给出的报告应至少包括:

- 标识 (模型编号或类似号码)
- 结构材料
- 主尺度
- 直径
- 螺距与直径的比 (P/D)
- 扩展的叶面积比(A_E/A_0)
- 厚度比 (t/D)
- 轮毂/轴套直径(d_h)
- 制造公差

3 模型试验

3.1 阻力试验

应按照 ITTC 建议程序 7.5-02-02-01 阻力试验进行阻力试验。提交方给出的报告应至少包括:

- 船体模型规格
 - 标识 (模型编号或类似号码)
 - 负荷条件
 - 湍流模拟方法
 - 模型比例
 - 主尺度和静水力参数
- 拖曳水池资料, 包括长度、宽度和水深
- 试验日期
- 试验的参考数据
 - 水温
 - 水的密度
 - 水的运动粘度
 - 波形因素

·各航速的实测和外推数据

模型速度

模型的阻力

船艏和船艉下沉，或者下沉和纵倾

3.2 自航试验

应按照 ITTC 建议程序 7.5-02-03-01.1 进行试验。提交方给出的报告应至少包括：

·船体模型规格

标识（模型编号或类似号码）

负荷条件

湍流模拟方法

模型比例

主尺度和静水力参数

·螺旋桨模型规格

标识（模型编号或类似号码）

模型比例

主尺寸和资料

·拖曳水池资料，包括长度、宽度和水深

·试验日期

·试验的参考数据

水温

水的密度

水的运动粘度

波形因素

附体修正系数

·各航速的实测和外推数据

模型速度

外部拖力

螺旋桨推力

螺旋桨扭矩

转速

船艏和船艉下沉，或者下沉和纵倾

输出功率 P_D

3.3 螺旋桨敞水试验

应按照 ITTC 建议程序 7.5-02-03-02.1 敞水试验进行螺旋桨敞水试验。提交方给出的报告应至少包括：

- 螺旋桨模型规格
 - 标识（模型编号或类似号码）
 - 模型比例
 - 主尺寸和资料
 - 拖曳水池中螺旋桨轴浸没中心线
- 拖曳水池或空泡水筒的资料，包括长度、宽度和水深或者测试区的长度、宽度和高度
- 试验日期
- 试验的参考资料
 - 水温
 - 水的密度
 - 水的运动粘度
 - 雷诺数（0.7R 处）
- 各航速的实测和外推数据
 - 速度
 - 螺旋桨推力
 - 螺旋桨扭矩
 - 转速
 - 螺旋桨轴方向上喷嘴的力（如为导管螺旋桨）
- 螺旋桨敞水曲线

4 航速预测

航速预测计算的主要步骤参见 ITTC 建议程序 7.5-02-03-1.4 ITTC1978 年试验预测方法（2011 年最新评审版）。预测以阻力试验、自航试验和试验期间所使用的螺旋桨模型的敞水特征以及完工螺旋桨的敞水特征为基础。提交方给出的报告应至少包括：

- 船体模型规格
 - 标识（模型编号或类似号码）
 - 负荷条件
 - 湍流模拟方法
 - 模型比例
 - 主尺度和静水力参数

- 螺旋桨模型规格
 - 主尺寸和资料
- 拖曳水池资料，包括长度、宽度和水深
- 阻力试验标识（试验编号或类似号码）
- 敞水试验标识（试验编号或类似号码）
- 螺旋桨模型的敞水特征
- 船舶螺旋桨的敞水特征
- 船舶特征
 - 预测风区
 - 风阻力系数
 - 假设的 BF
- 各航速的实测和外推数据
 - 模型速度
 - 模型伴流系数
 - 船舶伴流系数
 - 船舶的螺旋桨推力
 - 船舶的螺旋桨扭矩
 - 船舶的螺旋桨转速
 - 船舶的预测功率（螺旋桨输出功率 P_D ）
 - 船艏和船艉下沉，或者下沉和纵倾

附录6 基于 ISO15016:2015 的 EEDI 实船试航

第1章 通则

1.1 一般规定

1.1.1 本附录旨在为船舶试航阶段的 EEDI 最终验证提供测速试航及编写试验报告的指导。

1.1.2 EEDI 测速试航（以下简称“试航”）的目的是要获得 EEDI 速度/功率曲线，验证船舶的航速及各航速对应的轴功率、扭矩、转速等。

1.1.3 试航的验证内容包括：

- (1) 推进系统、发动机的特征以及 EEDI 技术案卷中叙述的其他相关项目；
- (2) 吃水和纵倾；
- (3) 试航海况；
- (4) 航速；和
- (5) 主机轴功率。

1.2 图纸资料

1.2.1 应将下列图纸资料提交船级社。

- (1) 试航大纲
- (2) 最终的排水量表
- (3) 最终的空船重量数据或载重吨检验报告的副本
- (4) NO_x 技术案卷副本
- (5) 测量仪器校准报告
- (6) 试验船舶的吃水和纵倾数据
- (7) 速度/功率试验报告（船模试验）
- (8) 航速修正计算报告（包括最后入坞与船体和螺旋桨清洁的日期）

上述（1）~（7）图纸资料应在试航前提交船级社试验见证人员，其中（1）需要得到试验见证人员的认可。试航结束提交（8），需要取得 EEDI 验证人员的认可。

1.3 定义

1.3.1 下列定义和术语适用于本指南：

- (1) **制动功率**，系指推进装置在未经过任何减速和传动装置之前在联轴器处的输出功率；
- (2) **轴功率**，系指经过所有减速和其他传动装置并减去附带辅助设备功率后，并考虑螺旋桨和功率测量点之间轴系能量损失后推进装置向轴系提供的净功率；
- (3) **收到功率**，系指螺旋桨收到的用于船舶推进的有效功率；
- (4) **合同功率**，系指船厂和船东之间在新建或改建合同中规定的制动功率或轴功率；
- (5) **合同航速**，系指在新建和改建合同条款中协议的应达到的船舶速度；
- (6) **往返航次**，系指在同一功率下相反方向的连续的两个测速航次；
- (7) **EEDI**，系指MEPC.203（62）决议通过的MARPOL附则VI修正案中引入的船舶能效设计指数；
- (8) **EEDI功率**，系指MEPC.245（66）决议通过的《2014年新造船达到的能效设计指数（EEDI）计算方法指南》中定义的主机制动功率；
- (9) **EEDI航速**，系指MEPC.245（66）决议通过的《2014年新造船达到的能效设计指数（EEDI）计算方法指南》中定义的船舶航速；
- (10) **理想条件**，系指理想天气和理想海况条件，即无风、无浪、无流、15℃水温的深水条件；
- (11) **功率设定**，系指设定发动机油门和定距桨（FPP）的轴转速，设定调距桨（CPP）的螺距角；
- (12) **螺旋桨螺距**，系指定距桨的设计螺距；
- (13) **螺距角**，系指调距桨的可操作螺距角；
- (14) **测得的船舶速度**，系指根据测速航次开始位置和结束位置之间的航行距离和航行时间得到的船舶平均速度；
- (15) **系列船**，系指由同一个造船厂按系列建造的具有相同主尺度、型线、附体和推进系统，并且按照“EEDI检验导则”适用相同水池试验的船舶；
- (16) **速度/功率试验**，系指速度和功率试验，用于得出某一艘船舶的功率和速度之间的关系；
- (17) **速度/功率试验计划**，系指描述某一速度/功率试验范围的文件。
- (18) **测速航次**，系指具有指定的航向、航程和持续时间的船舶轨迹，并据此计算测得船舶速度和轴功率的航次。

(19) **水池试验**，系指模型水池试验，用于预报规定条件下的速度功率关系。

(20) **试验日志**，系指在速度/功率试验之前、期间和之后记录的所有数据。

(21) **零螺距**，系指当螺距角处于等效为零的典型半径时调距桨的叶片角。

1.3.2 本附录中，如无特别说明，出现的角度单位为rad，速度单位为m/s。

1.4 符号和缩略语

1.4.1 符号

A_{LV}	水线以上包括上层建筑在内的侧投影面积
A_M	水下舢横剖面积
A_{OD}	上甲板以上的上层建筑的侧投影面积
a_Q, b_Q, c_Q	扭矩系数曲线的系数
a_T, b_T, c_T	推力系数曲线的系数
A_{XV}	水线以上包括上层建筑在内的横截面积
B	船宽
$B(x)$	剖面宽度
B_f	钝型系数
C_{AA}	风阻力系数； C_{AA0} 指迎风阻力系数
C_B	方形系数
C_F	实际水温和水密度下的摩擦阻力系数
C_{F0}	参考水温和水密度下的摩擦阻力系数
C_{MC}	船中截面至侧投影面积 A_{LV} 中心的水平距离，船中以前为正
C_{Pv}	垂向菱形系数
C_{T0}	参考水温和水密度下的总阻力系数
C_U	船舶进速系数
D	螺旋桨直径
E	方向谱
e_i	伴流分数的尺度修正因子
F_D	自航试验中表面摩擦修正力
Fr	傅汝德数
F_X	变负荷试验中测得的外部拖力
g	重力加速度

G	角度分布函数
h	水深
$H_1(\text{m})$	奇点分布函数
$H_{1/3}$	三一有义波高
H_{BR}	上层建筑顶部的高度
H_C	水线到侧投影面积 A_{LV} 中心的高度
$H_{S1/3}$	涌浪的三一有义波高
$H_{W1/3}$	风浪的三一有义波高
(i)	航次数
I_1	第一类修正的一阶贝塞尔函数
J	螺旋桨进速系数
J_{id}	理想条件下的螺旋桨进速系数
J_{ms}	试航条件下的螺旋桨进速系数
k	波数
K_1	第二类修正的一阶贝塞尔函数
K_Q	扭矩系数
K_{Qid}	理想条件下的扭矩系数
K_{Qms}	试航条件下的扭矩系数
K_T	推力系数
K_{Tid}	理想条件下的推力系数
K_{Tms}	试航条件下的推力系数
k_{yy}	无量纲横向回转半径
L_{BWL}	在水线上船艏到 95%最大船宽之间的距离
L_{OA}	船舶总长
L_{PP}	船舶垂线间长
MCR	额定功率
m_n	频率谱的 n 阶矩
n_{id}	修正后的螺旋桨轴转速
n_{ms}	测得的螺旋桨轴转速
P_1	对应于测速试验期间排水体积 ∇_1 的功率
P_2	对应于水池试验时排水体积 ∇_2 的功率
P_{Bms}	测得的制动功率

P_{Did}	理想条件下的收到功率
P_{Dms}	试航条件下的收到功率
$P_{Full,P}$	水池试验预报的满载或规定条件下的功率
$P_{Full,S}$	测速试验获得的满载或规定条件下的功率
P_{Sms}	测得的轴功率
$P_{Trial,P}$	水池试验预报的试航条件下的功率
$P_{Trial,S}$	测速试验获得的试航条件下的功率
R_{AA}	相对风引起的阻力增加
R_{AS}	水温和水密度偏差引起的阻力增加
R_{AW}	波浪引起的阻力增加
R_{AWL}	长峰不规则波中的平均增阻
R_{AWM}	基于 Maruo 理论的规则波中的平均增阻，根据辐射和绕射组分计算
R_{AWR}	对 R_{AWM} 的修正项
R_F	实际水温和水密度下的摩擦阻力
R_{F0}	参考水温和水密度下的摩擦阻力
R_{id}	理想条件下的阻力
R_{ms}	试航条件下的阻力
R_{T0}	参考水温和水密度下的总阻力
R_{wave}	规则波中的平均增阻
R_{wave}^{EXP}	水池试验测得的规则波中的平均增阻
s	方向扩展系数
S	湿表面积
S_S	实尺度湿表面积，与常规自航试验中使用的数值相同
S_η	频率谱
t	推力减额分数
T_C	流速变化周期
T_{deep}	吃水；对于纵倾状态， T_{deep} 就是最深吃水
t_{id}	理想条件下的推力减额分数
T_M	船舳吃水
t_{ms}	试航条件下的推力减额分数
V'_{WR}	在风速计垂直位置的修正风速

V'_{WT}	在风速计垂直位置的平均绝对风速
V_A	螺旋桨来流速度
V_C	流速
V_G	测得的船舶对地速度
V_{G1}	四个航次中第一个航次测得的船舶对地速度
V_{G2}	四个航次中第二个航次测得的船舶对地速度
V_{G3}	四个航次中第三个航次测得的船舶对地速度
V_{G4}	四个航次中第四个航次测得的船舶对地速度
V_S	船舶对水速度
V_{WR}	相对风速
V_{WRref}	参考高度的相对风速
V_{WT}	绝对风速
V_{WTref}	参考高度的绝对风速
w_M	模型伴流分数
w_{Mid}	理想条件下的模型伴流分数
w_{Mms}	试航条件下的模型伴流分数
w_S	实尺度伴流分数
w_{Sid}	理想条件下的实尺度伴流分数
w_{Sms}	试航条件下的实尺度伴流分数
x	纵向坐标
Z_a	风速计的垂直位置
Z_{ref}	风阻力系数的参考高度
Z_Γ	定常运动下相对于波浪的垂直位移
α_p	功率比
α_T	吃水和遭遇频率的影响
α	船舶航向与成分波之间的夹角；0 为迎浪
β_w	沿水线的线素 dl 的斜率
Γ	伽马函数
ΔP	功率修正值
ΔR	总阻力增加
Δt	推力减额分数的偏差
ΔV	浅水引起的船舶速度减少

ΔW_M	伴流分数的偏差
$\Delta \eta_R$	相对旋转效率的偏差
ζ_A	波幅
η_D	推进效率系数
η_{Did}	理想条件下的推进效率系数
η_{Dms}	试航条件下的推进效率系数
η_M	传递效率
η_O	螺旋桨敞水效率
η_{Oid}	理想条件下的螺旋桨效率
η_{Oms}	试航条件下的螺旋桨效率
η_R	相对旋转效率
η_{Rid}	理想条件下的相对旋转效率
η_{Rms}	试航条件下的相对旋转效率
η_S	轴系效率
θ_m	船舶航向与相对于船首的浪向之间的角度；0 表示迎浪
λ	尺度因子
μ	平滑范围
ξ_n, ξ_V	如附录 6-J 中描述的考虑变负荷效应获得
ξ_P	如附录 6-J 中描述的考虑变负荷效应获得
ρ_A	空气质量密度
ρ_M	模型试验中的水密度
ρ_S	实际水温和盐度下的水密度
ρ_{S0}	参考水温和盐度下的水密度
τ_P	载荷系数，等于 K_T/J^2
τ_{Pid}	理想条件下的载荷系数
τ_{Pms}	试航条件下的载荷系数
ψ	船舶航向
ψ'_{WR}	风速计垂直位置处修正后的相对风向
ψ'_{WT}	风速计垂直位置处的平均绝对风向
ψ_{WR}	相对风向，0 为迎风
ψ_{WRref}	参考高度处的相对风向
ψ_{WT}	地球系统中的绝对风向

ω	规则波的圆频率
ω_E	遭遇圆频率
∇_1	速度/功率试验间的排水体积
∇_2	水池试验的排水体积

1.4.2 缩略语

FPP	定距桨
CPP	调距桨
IMO	国际海事组织
ITTC	国际拖曳水池大会
JASNAOE	日本船舶与海洋工程学会
JONSWAP	北海海浪联合计划
MEPC	IMO 海上环境保护委员会
SNAJ	日本造船协会
SNAME	美国造船师与轮机工程师学会
STA-Group	由船东、造船厂、研究所、船级社和大学组成、研究和改进试航程序和试航分析的国际组织 (STA)

第2章 试航组织管理与程序

2.1 试航队伍

2.1.1 试航队伍是由试航负责人、船东代表、指定的负责速度和功率试验测量人员和验证方（如果该船适用EEDI要求）组成的队伍。

2.1.2 试航负责人是得到充分授权的人员（一般由造船厂的代表承担），负责执行所有阶段的速度/功率试验，包括试航前的准备。

2.1.3 试航队伍负责根据本附录进行速度/功率试验的正确测量和报告编写，通过对测得数据的分析获得规定条件下的船舶速度和功率。具体负责以下工作：

- (1) 在速度/功率试验开始前进行船舶检查，包括检查船体和螺旋桨/推进器状态；
- (2) 提供安装、操作和拆卸所有必需的试验仪器和临时的导线；
- (3) 在下船前，向船东代表和验证方提供原始数据包和初步分析结果；
- (4) 完成试验测量结果的全部分析后，提交一份最终报告。

2.1.4 检测单位应具有验证方认可的供方资质证书，或者具备培训证书或相应的检测证的测试人员。

2.2 试航前会议

2.2.1 在试航出发之前，应召开一次试航前会议，以确定速度/功率试验的计划。参加人员应包括船东、船厂、验证方等。在这个会议期间应确定以下事情：

- (1) 试航日期；
- (2) 将要用于计算实船航速和提交试航报告的重要航速修正方法；
- (3) 根据拟采用的航速修正方法，确定试验程序和测量数据。

图2.1 船舶试航验证流程图

2.3 试航各方职责

2.3.1 造船厂职责

2.3.1.1 造船厂负责试验的全面协调。召开试航队伍和船员间的试航前会议，讨论试航项目和解决所有未解决的问题。

2.3.1.2 船舶建造完成，造船厂负责速度/功率试验的计划、实施和评估，具体应负责：

- (1) 选择一个适当授权的试航负责人负责速度/功率试验期间各类事项；

- (2) 提供所有船舶出海所需的许可证和证书;
- (3) 海上试航期间, 确保操作船舶、发动机、系统和设备所必需的合格人员均在船上;
- (4) 通知所有开展试验所必需的监管机构, 包括船级社、船东、厂方代理人、服务商、承包商、港口设备以及安排供给品、燃料、水、拖船等供应的部门, 确保他们可沟通且在船上(如有需要);
- (5) 检查所有安全措施;
- (6) 确保所有固定的、便携的和个人物品(对于船员、试航人员和宾客而言)在船上且有效;
- (7) 确保已根据管理要求检查开展速度/功率试验需要的所有安全系统;
- (8) 完成倾斜试验, 和/或根据SOLAS公约, 至少确保一份包括速度/功率试验条件的初稳性手册通过审核;
- (9) 在速度/功率试验前, 向试航团队提交与速度/功率试验准备、实施、分析和报告编写相关的所有船舶数据。这些数据应该包括附录6-A中要求的资料, 以及试航吃水和纵倾、EEDI吃水和纵倾、合同吃水和纵倾条件下的水池试验结果。

2.3.1.3 速度和功率的测量与分析应该由公认的有能力承担这些任务的人员来完成, 且应经过造船厂、船东和验证方(如适用)的一致认可。

2.3.1.4 如有必要, 造船厂应该安排潜水员观察船体和螺旋桨。

2.3.1.5 试航负责人应该与试航队伍在速度/功率试验准备、实施和结果等方面保持联系。

2.3.2 船东职责

2.3.2.1 在试航出发之前, 船东代表应参加试航队伍组织的试航前会议, 以确定速度/功率试验的计划, 包括试航日期、测量地点、测量方法、以及航速修正方法等重要信息。

2.3.2.2 试航期间, 船东代表应在船上, 并确保随时可沟通以解决试航过程中的突发问题。

2.3.3 船级社职责

2.3.3.1 船级社作为验证方, 在试航出发之前, 应参加试航队伍组织的试航前会议, 以明确速度/功率试验的计划, 包括试航日期、测量地点、测量方法、以及航速修正方法等重要信息, 并对试航大纲进行认可。

2.3.3.2 试航期间, 船级社见证人员应按照附录6-A表A.2“试航状态记录表”和表A.3“试航次数据表”对记录数据进行见证。

2.3.3.3 试航结束, 船级社验证人员应对测速航速报告进行认可。

第3章 试航准备

3.1 一般规定

3.1.1 试航的目的是要获得船舶的航速数据及各航速相应的轴功率、扭矩、转速等数据，用于该船试航阶段的 EEDI 最终验证。

3.2 试航时的船舶状态

3.2.1 船舶

3.2.1.1 船舶试航时应该具有清洁的船体和螺旋桨。船体粗糙度和海洋生物会显著增加船舶阻力，且在速度/功率试验中无法予以合理修正。

3.2.1.2 出坞前船体水下部分完成油漆涂装，船体及螺旋桨表面完好并完成清洗。

3.2.1.3 船舶出坞后应尽快开展试航。

3.2.1.4 最后一次进坞以及船体和螺旋桨的清洁日期应记录在试航报告中。

3.2.2 装载工况

3.2.2.1 船舶的试航装载工况应尽可能接近 EEDI 工况或满载出港的排水量和纵倾情况（对液货船），或尽可能接近合同条件和/或水池试验时的状态；

3.2.2.2 如不可行，船舶实际排水量与要求的排水量之间的偏差值应小于要求的排水量的 2%。如果使用水池试验结果进行速度/功率试验分析，当速度/功率试验期间的实际排水量与水池试验时排水量的偏差不超过 2%时，可采用附录 6-G 的修正方法进行排水量修正，当这个偏差超过 2%时，附录 6-G 的修正方法不再适用。

3.2.2.3 纵倾偏差应维持在非常小的限制范围内，

——对于无纵倾状态，纵倾应小于 $0.1\%L_{PP}$ 。

——对于纵倾状态，艏艉吃水与水池试验对应的艏艉吃水的偏差应控制在 $\pm 0.1\text{m}$ 范围内。

其中， L_{PP} 为船舶垂线间长，m。

3.2.2.4 船舶试航装载工况应在零航速状态下测量并记录吃水，由验证方验船师进行确认。

3.2.2.5 船舶吃水、纵倾和排水量应在速度/功率试验前通过艏艉垂线和船舳左右舷处吃水标尺读数取平均值获得，或通过读取校准后的内部吃水测量系统或评估所有货舱测深来确定。

3.2.2.6 船舶试航装载工况及压载工况应进行稳性和强度校核。

3.3 试航外界条件

3.3.1 一般规定

3.3.1.1 试航期间的天气情况和海况，与 EEDI 理想条件或合同规定的条件相比，一定存在着差异。

3.3.1.2 本附录中所有修正方法虽可用于修正实船的试航条件与 EEDI 理想条件或合同条件之间的偏差，但这些方法的有效性受到一定范围的限制。

3.3.1.3 为了减小外界条件对试航的影响，得到相对可靠的试航结果，应尽可能减少各影响因素的数量，同时减小各因素的影响程度，各外界条件不应超过本附录所给出的适用范围。

3.3.2 试航地点

3.3.2.1 大风和高海况会导致航向偏离迎浪和随浪，为了保持航向需要进行更多的操舵，这会使轴扭矩、螺旋桨轴转速和实测航速产生过多的波动。

3.3.2.2 为了避免试航结果中出现不可预见的环境影响，试航应在环境条件基本不变且对船舶影响很小的地点进行。

3.3.2.4 试航应尽可能在避风区域进行（即限定的风、浪和流）。

3.3.2.5 试航区应水域宽广，潮流影响小并排除与其他船舶碰撞的可能性。

3.3.3 风

3.3.3.1 试航期间，风力应满足以下条件：

(1) 对于 $L_{PP} > 100\text{m}$ 的船舶，风力不应超过 BF6；

(2) 对于 $L_{PP} \leq 100\text{m}$ 的船舶，风力不应超过 BF5。

3.3.4 海况

3.3.4.1 三一有义波高按以下公式计算：

$$H_{1/3} = \sqrt{H_{W1/3}^2 + H_{S1/3}^2} \quad (3.1)$$

式中：

$H_{1/3}$ ——三一有义波高，m；

$H_{W1/3}$ ——风浪的三一有义波高，m；

$H_{S1/3}$ ——涌浪的三一有义波高，m。

3.3.4.2 对于所有波浪修正方法，适用以下与船长有关的经验准则，以确定最大允许修正的波浪增阻。

(1) 如果在试航期间测量了波浪谱，应满足：

$$H_{1/3} \leq 2.25\sqrt{L_{PP}/100} \quad (3.2)$$

(2) 如果波高通过目测得到，应满足：

$$H_{1/3} \leq 1.50\sqrt{L_{PP}/100} \quad (3.3)$$

(3) 如果使用了模型试验获得的波浪增阻传递函数，除非波高满足式 (3.4)，否则在试航时应测量波浪谱。

$$H_{1/3} \leq 0.50\sqrt{L_{PP}/100} \quad (3.4)$$

式中：

L_{PP} ——船舶垂线间长，m；

$H_{1/3}$ ——三一有义波高，m；

$H_{W1/3}$ ——风浪的三一有义波高，m；

$H_{S1/3}$ ——涌浪的三一有义波高，m。

3.3.4.3 上述限制如图 3.1 所示，建议试航海况条件不要超过上述限制条件。如实际测量值超过上限，则按上限值进行波浪增阻修正。

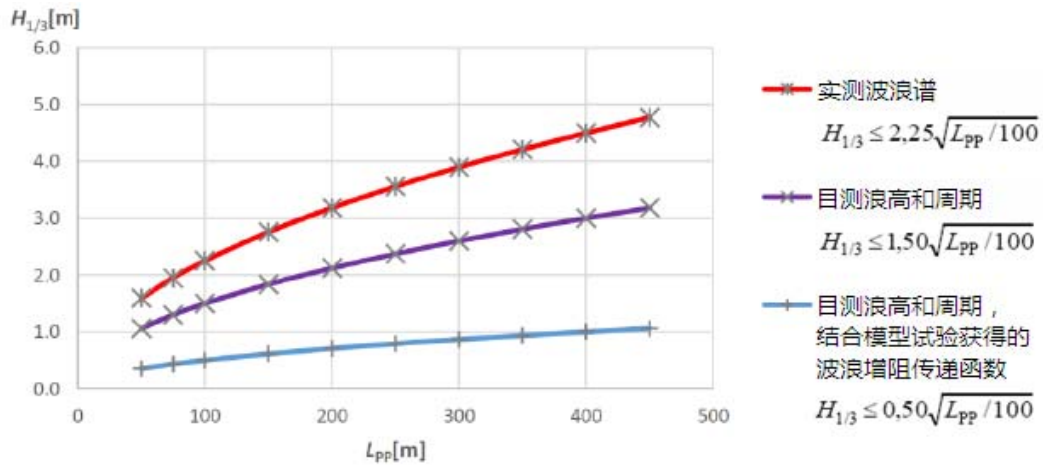


图 3.1 速度/功率试验期间的波高限制

3.3.4.4 在所有情况下，风浪和涌浪的方向可以通过目测得到。

3.3.5 水深

3.3.5.1 一般通过选择合适的地点进行试航，尽可能避免水深不足对航速的影响。

3.3.5.2 如试航区域水深 h 不小于以下两个公式计算得到的水深值（取大者），认为满足了深水条件：

$$h = 3\sqrt{B \cdot T_M} \quad \text{和} \quad h = 2.75 \frac{V_S^2}{g} \quad (3.5)$$

式中：

h ——水深，m；
 B ——船宽，m；
 T_M ——船舳吃水，m；
 V_S ——测得的船舶速度，m/s；
 g ——重力加速度， m/s^2 。

3.3.5.3 如试航区域水深达不到上述条件，可对测得的航速进行浅水效应补偿修正。用于修正的水深值 h 应不小于以下两个公式计算得到的水深值（取大者）：

$$h = 2\sqrt{B \cdot T_M} \quad \text{和} \quad h = 2 \frac{V_S^2}{g} \quad (3.6)$$

详见附录 6-H。

3.3.5.4 应避免海床底部外形的显著变化。每一测速航次的实际水深应该从船舶测深仪或海图读取并记录在试验日志中。

3.3.6 流

3.3.6.1 一般通过选择流速和流向基本不变的区域进行试航，尽可能避免流对航速的影响。

3.3.6.2 如果流的时间关系曲线不同于假定的抛物线或正弦趋势且在一个往返航行内流速的变化大于 0.5knots，附录 6-E 中的修正方法都不适用。试航应避免可能发生此类情况的区域。

3.4 水池试验资料

3.4.1 精准的水池试验对实船试航结果影响很大。对某些船型，实船试航通常只能在压载工况下进行，不同于 EEDI 工况和合同规定工况。为了将实船压载工况试航结果换算到 EEDI 工况和合同规定工况下，需使用压载工况水池试验曲线和设计吃水装载工况水池试验曲线之间的差值。因此，需要准确的水池试验和经验证的、协调一致的推算至实尺度的方法。

3.4.2 水池试验应根据以下原则进行：

(1) 水池试验工况至少但不限于 EEDI 吃水和纵倾、合同规定的吃水和纵倾以及试航吃水和纵倾工况；

(2) 应根据 ITTC 阻力和自航水池试验推荐规程进行模型试验，包括应进行的变负荷试验；

(3) 应对所有的吃水和纵倾工况采用同样的方法、规程和经验系数进行从模型试验结果到实船结果的推算。如果对不同吃水和纵倾使用了不同的经验系数，应在水池试验报告中记录详情，包括通过实船试航数据证明特定船型、尺寸、装载条件、水池试验设施和评估方法是正确的。

3.5 基本信息

3.5.1 试航前，应记录附录 6-A 中的相关数据，并提供给船厂、船东和验证方（如适用）。

3.5.2 附录 6-A 中跟速度/功率航次相关的数据应在试验期间记录。

3.6 测量仪器的安装和校准

3.6.1 轴功率、轴转速的测量

3.6.1.1 轴功率应该通过轴扭矩和螺旋桨轴转速获得。轴扭矩可以采用测功仪或遥测扭矩仪测量，或采用制造商建议且经验证机构许可的方法进行测量；经船东和造船厂协商一致且验证机构许可后，允许采用其他方法测量。轴转速采用转速计测量。用于测量轴扭矩、轴转速的仪器应具有同步测试功能；若无同步测试功能，进行多轴测量时应有同步讯号控制。

3.6.1.2 所有测量仪器应有国家法定计量部门出具的标定或检定合格证书。

3.6.1.3 造船厂应该详尽描述轴的材料特性，如剪切弹性模量 G ，并以文档记录。剪切弹性模量 G 应取实测值，由推进轴承制方提供；如果没有真实的轴扭力试验证书，剪切模量 G 应使用 82400 N/mm^2 。

3.6.1.4 用于计算轴功率的轴直径，应该通过在扭力计安装位置测得的轴周线获得。如果是调距桨，可能需要考虑钻孔直径（由造船厂提供）。

3.6.1.5 测量轴扭矩/轴功率时，被测轴测量段的光滑长度一般不小于 0.5 m ，轴的径向四周一般不小于 0.2 m 。在安装轴扭矩测量系统前，应清洗轴段表面油污，去除被测轴段的表面油漆；用细砂纸打光被测轴段表面。轴扭矩测量系统安装完毕后，由于安装在中间轴轴承上的轴上有残余扭矩，因此应该确定扭力计的零位读数。可根据厂家的使用说明书进行扭力计的零位设置。如果没有特别说明，扭矩零位值由停船时正向和反向盘车读数的平均值确定。

3.6.2 全球定位系统（GPS）

3.6.2.1 应该使用全球定位系统（GPS）测量船舶的位置和速度。定位系统应该使用差分模式以确保足够的精度。船舶位置和速度应该连续监测和存储。

3.6.3 船舶状态的测量

3.6.3.1 船舶吃水、纵倾和排水量应该在速度/功率试验前通过垂线和船舳的左右舷处吃水线读数取平均获得。

3.6.3.2 如果读吃水线不安全或无法提供准确结果，排水量应该通过读取校准后的内部吃水测量系统或者评估所有货舱测深来确定。

3.6.3.3 应该考虑中拱/下垂，使用吃水数据（艏部、艉部和半长处）和水密度，根据邦戎曲线或使用静水力数据的二次方程获得排水量。

3.6.4 风速计

3.6.4.1 应使用船载风速风向计。但是，如果船载风速风向计不可用，可以使用测试队伍临时安装的试航风速风向计，安装位置应该尽可能避免上层建筑对风速风向计的干扰。

3.6.5 波浪测量

3.6.5.1 最好在测速试验期间测量风浪和涌浪的三一有义波高、波浪周期和方向。可以在测速试验区域使用测浪浮标或测波雷达、激光或波浪扫描仪等船载设备进行波浪测量。波浪测量设备应该经过校准，其精度经过证实并以文档记录。

3.6.5.2 如果某一船舶使用了模型试验获得的波浪增阻传递函数进行波浪修正，除非波高满足 $H_{1/3} \leq 0.50\sqrt{L_{PP}/100}$ （见第 3.3.4 节），否则在测速试验期间应该测量波浪谱。

3.6.5.3 如果使用附录 6-D 中描述的波浪增阻计算方法（未进行详尽的模型试验），且波高满足 $H_{1/3} \leq 1.50\sqrt{L_{PP}/100}$ （见第 3.3.4 节），风浪和涌浪的遭遇波高、周期和方向可以通过包括船东代表和验证方在内的多位经验丰富的海员观测得到。

3.6.6 密度和温度测量

3.6.6.1 应测量并记录当地水温和密度，以进行船舶排水量计算和与粘度相关的修正。水温建议在船舶海底阀进水口的同一平面测得。气温和气压应该使用经校准的温度计和气压计测量。

3.6.7 流

3.6.7.1 流速应该作为每一航次评估的一部分得到。

3.6.7.2 如果使用“平均再平均（Mean of means）”方法，在同一功率设定下两次往返航行后，可以通过每航次测得的航速和两次往返航行的“平均再平均”值计算流速（见附录 6-E.3）。

3.6.7.3 也可使用“迭代（Iterative）”法获得流速（见附录 6-E.2）。

3.6.8 船体艏部垂向加速度的测量

3.6.8.1 船体艏部垂向加速度应使用加速度传感器测量。所使用的传感器应有国家法定计量部门出具的标定或检定合格证书。

3.6.8.2 加速度传感器应安装在指定检测点，测点位置需经验证方、船东、船厂协商一致确定。传感器轴向应尽可能与船体轴平行，并与船体固结，防止测量过程中传感器移位。测量艏部垂向加速度时，加速度传感器应安装在纵中剖面上；传感器电缆不宜过长，敷设时应注意避免高温，穿越门窗时应采取适当措施防止挤压弄端。

3.6.8.3 在测速过程中，船体艏部垂向加速度应该连续监测和存储，并取每航次所有监测记录数据的平均值作为该航次的船体艏部垂向加速度测量值。

第4章 试航实施

4.1 一般规定

4.1.1 在试航的当天以及整个试航过程中，应满足大量的必备条件以获得可靠的试航结果。本章仅给出了基本要求。

4.2 试航开始

4.2.1 在试航之前应了解天气情况。

4.2.2 如果目测浪高、周期和浪向，应该安排速度/功率试验计划，例如在白天进行 EEDI 功率下的所有测速航次。

4.2.3 试航期间，发动机装置的配置应与船舶在海上的常规操作保持一致。

4.2.4 试航之前，应在对水航速为零时进行以下操作：

- (1) 读取吃水和计算排水量；
- (2) 记录轴扭矩测量仪的零位；
- (3) 测量水温和密度。

4.3 试航期间的船舶轨迹

4.3.1 各个试航航次应该在同一区域完成。对于每个基本过程，每一测速航次需在同一位置开始（COMEX）和结束（FINEX）。

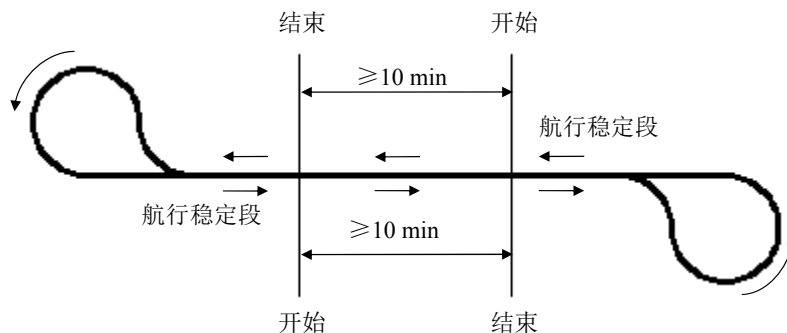


图 4.1 往返航行期间的船舶轨迹

4.3.2 应使用修正威廉姆森回转或相似的操纵方法，使船舶在每一航次的航行轨迹与试航基线相反或并行。并行是指与试航基线的偏差不超过 1 倍船长。

4.3.3 在此期间应保证主机油门、转速设定或螺距设定不变。在操纵过程中使用最小操舵角使得船舶失速程度最小。

4.4 航次持续时间

4.4.1 试航应持续足够长的时间。对于所有测速航次，测速持续时间应保持一致，至少 10 分钟。同一功率下的测速航次应平均分配时间。

4.5 航向

4.5.1 试航应在迎浪或随浪下进行。一旦测速航次的航向及其相应的返航航向确定后，整个试航所选择的轨迹应该非常精确。

4.5.2 在试航过程中应严格控制每一航次的航向，每一航次中船舶的首向角变化应严格限制在 $\pm 3^\circ$ 范围内。

4.6 操舵

4.6.1 在每次测试过程中，需要一位有经验的舵手或采用自动舵来保持航向。使用最小舵角进行调节以维持稳定的航行。

4.6.2 测试过程中，最大操舵角不得超过 5° 。

4.7 航行稳定段

4.7.1 试航的稳定段应足够长，以确保每航次开始测速前船舶处于稳定状态。在航行过程中，应使用最小操舵角保证船舶航向。

4.7.2 为了证明船舶达到了稳定状态，应监测该控制点下的螺旋桨轴转速、轴扭矩和船舶速度的实测值。当这三个数值稳定后，可认为船舶处于稳定航行状态。

4.8 测速航次次数

4.8.1 所有的试航应采用往返航行，即每一个航次后应紧跟着一个主机功率相同而航行方向完全相反的航次。

4.8.2 要求的航次次数取决于所应用的流修正方法（见附录 6-E）：“迭代”法和“平均再平均”法。

4.8.3 EEDI 功率下的航次应在白天进行，以便于清楚地目测波浪的方向。如果试航中采用

直接测量风浪和涌浪的遭遇波浪谱和浪向方法，可以不要求在白天进行试航。

4.8.4 “迭代”法

4.8.4.1 如采用“迭代”法对测量数据进行修正，为了确定系列船中首制船的速度/功率曲线，需要至少在三种主机工况下至少进行四次往返航行。

4.8.4.2 主机工况设定应分布在 65%MCR 和 100%MCR 之间且至少包括：

(1) 在 EEDI 功率或合同功率下，首制船往返航行两次，系列船往返航行一次（在相同的功率下）；

(2) 在低于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行一次；

(3) 在高于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行一次。

如果浪高接近限制条件且船舶运动显著，应该在该主机工况下额外增加一次往返航行测速。

4.8.5 “平均再平均”法

4.8.5.1 如采用“平均再平均”法对测量数据进行修正，为了确定系列船中首制船的速度/功率曲线，需要至少在三种主机工况下至少进行六次往返航行。

4.8.5.2 主机工况设定应分布在 65%MCR 和 100%MCR 之间且至少包括：

(1) 在 EEDI 功率或合同功率下，往返航行两次；

(2) 在低于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行两次；

(3) 在高于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行两次。

4.8.5.3 往返航行两次可以抵消流和二阶流变化的影响。为了获得足够的精度，相同主机工况下每一航次之间的时间间隔应该基本相同（允许有 25%的时间间隔偏差）。

4.8.5.4 如果系列船中首制船的速度/功率试验结果被认可，那么后续的系列船可以使用简化的测速试验程序。对于这类系列船，至少在三种主机工况下至少进行三次往返航行。

4.8.5.5 主机工况设定应分布在 65%MCR 和 100%MCR 之间且至少包括：

(1) 在 EEDI 功率或合同功率下，往返航行一次；

(2) 在低于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行一次；

(3) 在高于 EEDI 功率或合同功率的某一工况下，往返航行一次。

4.8.5.6 但为了保证航速修正具有足够的精度，如果要使用“平均再平均”法，建议在每一主机工况下应至少进行两次往返航行。

4.8.5.7 如果浪高接近限制条件且船舶运动显著，并且/或者流速变化超过 0.2kn，应在该主机工况下额外增加一次往返航行测速。

第5章 航速数据采集

5.1 一般规定

5.1.1 船舶的速度和功率特性对船体和螺旋桨条件、船舶排水量、浅水效应、海况和风速等因素非常敏感，因此，在试航期间，应尽最大可能监测并记录这些参数。

5.1.3 在试航期间，应同时采用两种数据采集方法：自动采集（利用数据采集系统）和手动记录信息（使用数据记录表）。

【编写依据】目的是利用测试用电脑记录尽可能多的参数以提高试航的精度水平。

5.1.4 采集的数据一般可以划分为适用于所有测速航次的通用数据和每一航次都不同的航次数据。

5.2 试航测量操作

5.2.1 为获得一航速一功率曲线，应测量不同主机功率下的航速、轴功率、轴扭矩和转速，其中，主机功率的选定应满足第4章4.8节的相关要求。

5.2.2 每一测速应保持螺旋桨转速和其他主机参数固定不变。一次测量结束后船舶调向时，为了避免航速降低太大，操舵次数应尽可能少，操舵要求在 $\pm 5^\circ$ 范围内。

5.2.3 航速测量可采用电子跟踪仪、GPS测量航速或其他等效方法。

5.2.4 应在测量航速的同时测量轴扭矩和转速，由此来确定轴功率。

5.2.5 应采用扭力仪测量轴扭矩，即在一段长度已知的轴上测量轴扭转变形。测量时应已知轴的内、外径和轴材料的扭转模量。

5.1.6 转速一般采用磁头方法测量。

5.1.7 轴扭矩和转速至少每秒采样一次，并在测试中取平均值。

5.1.8 轴功率 P_S 按下式计算：

$$P_S = Q \times n / 9550 \quad \text{kW}$$

式中：

Q ——实船扭矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

n ——轴转速，rpm。

5.3 通用数据

5.3.1 试航前应根据测量记录下列数据：

- (1) 试航区域（经纬度坐标）；
- (2) 天气条件；
- (3) 水温和密度；
- (4) 气温；
- (5) 风速风向计距离水线面的垂直高度；
- (6) 船艏、舳、艉的吃水；
- (7) 根据吃水计算得到的排水量；
- (8) 根据吃水计算得到的纵倾；
- (9) 水线以上包括上层建筑在内的横截面积；
- (10) 上甲板以上的上层建筑的侧投影面积（Fujiwara）及上层建筑的高度；
- (11) 水线以上包括上层建筑在内的侧投影面积（Fujiwara）及重心位置；
- (12) 艏部加速度（STAWAVE-1）。

5.3.2 为了验证速度/功率试验期间测得的风的数据，建议通过岸上基站记录绝对风速和风向，或者通过测速前或测速后停船进行直接测量。

5.4 每航次数据

5.4.1 每个试航航次应根据测量记录下列数据：

- (1) 日期；
- (2) 开始测量时的时间；
- (3) 每航次持续测量的时间；
- (4) 船舶航向；
- (5) 测得的船舶对地速度，根据每航次开始和结束的位置以及持续测量的时间计算得到；
- (6) 螺旋桨轴转速；
- (7) 螺旋桨轴扭矩和/或轴功率；
- (8) 螺旋桨螺距（如使用调距桨）；
- (9) 风速风向计测得的相对风速和风向；
- (10) 风浪的平均周期、三一有义波高和浪向；
- (11) 涌浪的平均周期、三一有义波高和浪向；
- (12) 平均水深。

5.5 数据采集

5.5.1 数据采集包括系统自动采集和手动数据记录。

5.5.2 采集系统应记录如 5.5.3.1 节中所述的随时间的变化测量值，以确保质量控制并提供进行不确定度分析所需的资料。

5.5.3 记录数据

5.5.3.1 每一测速航次期间应至少记录以下参数：

- (1) 时间；
- (2) 螺旋桨轴扭矩或功率；
- (3) 螺旋桨轴转速；
- (4) 调距桨的螺距；
- (5) 船舶位置；
- (6) 船舶航向；
- (7) 测得的船舶对地速度；
- (8) 相对风向；
- (9) 相对风速。

5.5.3.2 上述参数，除（4）外，其它参数都应进行连续记录。

5.5.4 系统要求

5.5.4.1 数据采集系统应满足：

- (1) 可以同时记录所有的有用参数；
- (2) 以至少 1Hz 的采样率进行时历曲线记录；
- (3) 显示 5.4.1 节规定的试验测量值的时历曲线；
- (4) 计算统计值（平均值、最大值、最小值、标准偏差）。

5.5.4.2 在每个航次结束后，数据采集系统应该显示所有记录的时间关系曲线图，以便于评估试验数据的质量和一致性，并存储读数用于随后的图形显示。

5.5.4.3 此外，对于每一测量数据，采集系统应提供以下统计值：

- (1) 试验开始时间；
- (2) 获取的样本数；
- (3) 平均值；
- (4) 最大值；
- (5) 最小值；
- (6) 标准偏差。

5.5.4.4 建议过滤航次数据，以避免时间关系曲线记录中出现“峰值”。可使用肖维纳 (Chauvent) 准则，该准则为以 N 个测量值的函数表示的准确度提供了最大可接受偏差的概率。当测量值超出了选定的平均值带宽时，该数据将在数据分析过程中自动舍弃。

5.5.5 安装位置

5.5.5.1 数据采集系统应安装于驾驶室或其它适合于数据采集的位置。

5.5.6 手动数据记录

5.5.6.1 对于那些不能通过数据采集系统自动测量和记录的参数，需要使用记录表进行手动数据记录或同时需要另外手动记录的数据。

5.5.6.2 记录表的两个重要方面是：

- (1) 完善数据组；
- (2) 为自动测量提供备份，提供测量值的手写概况。

5.5.6.3 应每隔几分钟记录一次随着时间变化的参数，以便确定整个航次内的平均值。

5.5.6.4 附录 6-A 中给出了一个可用的记录表模板。图 5.1 和图 5.2 给出了用于风向和浪向的符号规定。

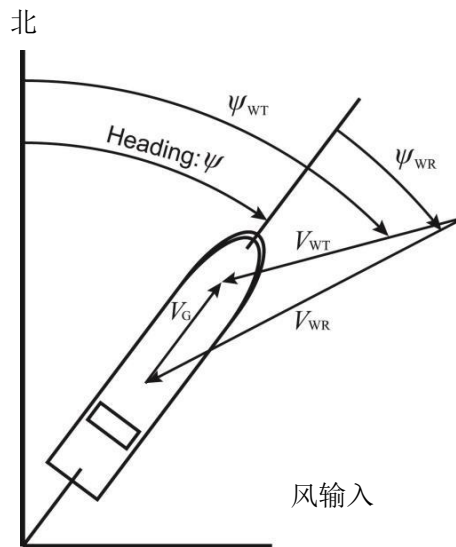


图 5.1 风向的符号规定

5.5.6.5 风向的定义是风吹过来的方向。船舶为 0 度，右舷为正（顺时针）。

其中，输入参数是：

- ψ ——船舶航向， $^{\circ}$ ；
- ψ_{WR} ——相对风向， $^{\circ}$ ， 0 为迎风；
- V_{WR} ——相对风速， m/s ；

V_G ——测得的船舶对地速度，m/s。

计算得到的参数是：

ψ_{WT} ——为地球系统的绝对风向，°；

V_{WT} ——绝对风速，m/s。

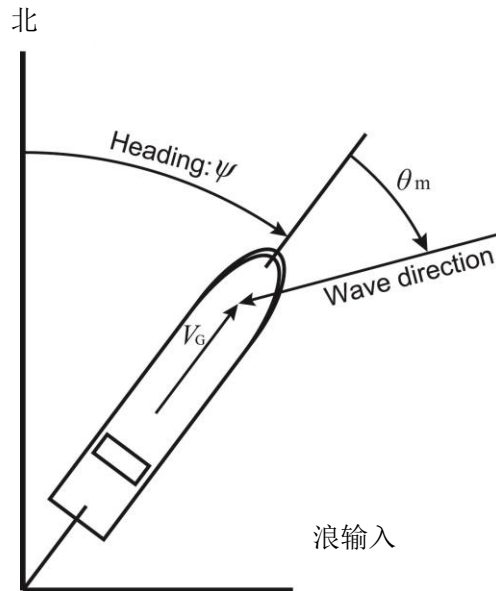


图 5.2 浪向的符号规定

5.5.6.6 浪向的定义是相对于船舶航向的波浪逼近的方向。船舶为 0 度，右舷为正(顺时针)。

其中，输入参数是：

ψ ——船舶航向，°；

θ_m ——相对于船首的船舶航向与浪向之间的夹角，°，0 为迎浪；

V_G ——测得的船舶对地速度，m/s。

第 6 章 试航数据分析

6.1 一般规定

本章描述了试航结果分析的必要步骤。

数据分析包括修正试航期间外界条件对速度和功率的影响。

本附录提供了不同的修正方法，详见相应的附录。

6.2 分析程序概述

6.2.1 完成试航后，应按以下步骤处理测得的数据：

- (1) 得出每往返航次功率、转速、扭矩和航速的平均值；
- (2) 从 DGPS 记录的航次开始和结束位置以及持续测量时间得出在每航次航向上的平均航速；
- (3) 计算每航次的绝对风速和风向；
- (4) 修正风和浪引起的阻力增加对功率的影响（见附录 6-C 和附录 6-D）；
- (5) 修正水温和水密度对功率的影响（见附录 6-F）；
- (6) 修正流对航速的影响（见附录 6-E）；
- (7) 修正浅水效应对航速的影响（见附录 6-H）；
- (8) 修正排水量对功率的影响（见附录 6-G）；
- (9) 确定试航吃水下最终的速度/功率关系如下：使用模型试验得到的某一船舶在试航吃水下的速度/功率曲线，根据最小二乘法，移动曲线使其与所有修正后的速度/功率点达到最佳匹配。如果有超过三组主机功率下的数据，可以使用最小二乘法对所有修正后的速度/功率点进行拟合；
- (10) 根据指定的功率在曲线上插值得到在理想条件下试航吃水状态下的船舶速度；
- (11) 由试航条件下的速度/功率曲线换算到其它规定的装载条件下的速度/功率曲线（见附录 6-I）；
- (12) 如果天气条件与理想条件不同，需修正至合同规定的天气条件下。
- (13) 提交试验结果。

6.2.2 数据分析程序的细节将在本章 6.3 节中给出。

6.2.3 对于功率评估，应使用直接功率法（direct power method）。

6.2.4 将在附录中给出修正方法的细节，包括不同修正方法的适用性的说明。

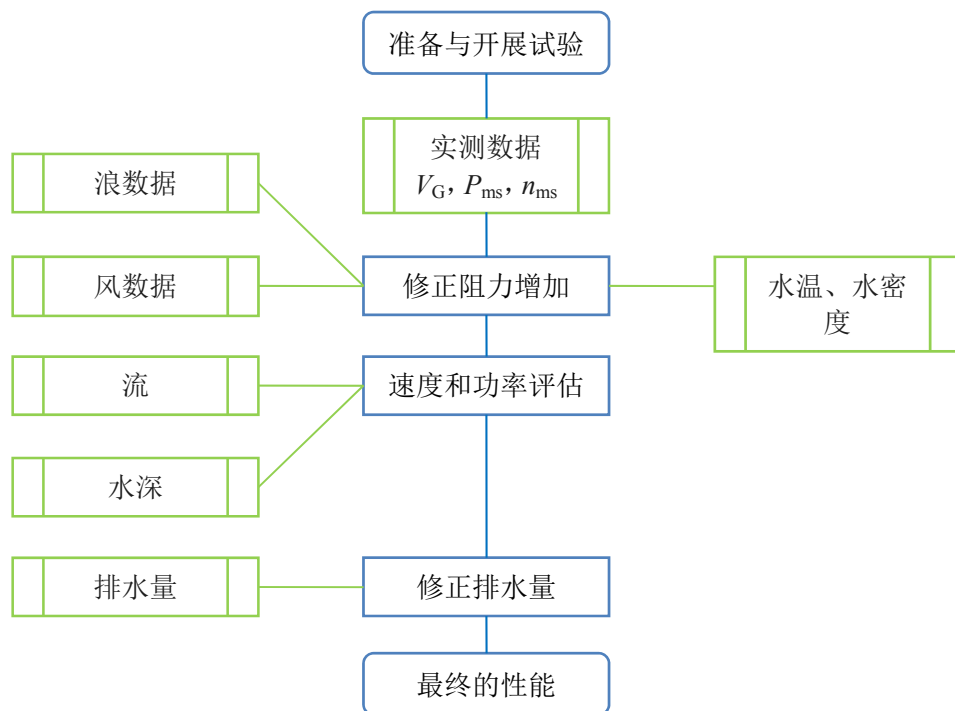


图 6.1 分析流程图

6.3 数据分析

6.3.1 由测得数据推算得到的阻力值

6.3.1.1 通过评估阻力增加 ΔR ，修正每一航次由环境影响引起的阻力值，计算公式如下：

$$\Delta R = R_{AA} + R_{AW} + R_{AS} \quad (6.6)$$

式中：

ΔR ——阻力增加，N；

R_{AA} ——相对风引起的阻力增加（见附录 6-C），N；

R_{AW} ——波浪引起的阻力增加（见附录 6-D），N；

R_{AS} ——水温和水密度偏差引起的阻力增加（见附录 6-F），N。

6.3.2 对测得数据的评估

6.3.2.1 已获得数据的评估包括针对试航每一航次计算与实测功率相关的阻力值。

6.3.3 基于直接功率法的计算

6.3.3.1 根据测得的对地航速 V_G 、功率 P_{ms} 和螺旋桨轴转速 n_{ms} ，使用直接功率法获得船舶的速度/功率性能。

6.3.3.2 基于收到功率进行分析。试航条件下的收到功率 P_{Dms} 与实测功率的关系如下式所示:

$$P_{Dms} = P_{Sms} \cdot \eta_S \quad (6.2)$$

式中:

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率, kW;

P_{Sms} ——测得的轴功率, kW;

η_S ——轴系效率。

或:

$$P_{Dms} = P_{Bms} \cdot \eta_M \quad (6.3)$$

式中:

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率, kW;

P_{Bms} ——测得的制动功率, kW;

η_M ——传递效率。

6.3.3.3 在该方法中, 直接使用由试航条件下阻力增加 ΔR 引起的功率增加 ΔP 修正收到功率 P_{Dms} 。

$$P_{Did} = P_{Dms} - \Delta P \quad (6.4)$$

式中:

P_{Did} ——理想条件下的收到功率, kW;

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率, kW;

ΔP ——需要修正的功率, kW。

需要修正的功率 ΔP 根据以下公式计算:

$$\Delta P = \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} + P_{Dms} \left(1 - \frac{\eta_{Dms}}{\eta_{Did}} \right) \quad (6.5)$$

式中:

ΔP ——需要修正的功率, kW;

ΔR ——总阻力增加, N;

V_S ——船舶对水速度, m/s;

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，kW；

η_{Dms} ——试航条件下的推进效率系数；

η_{Did} ——理想条件下的推进效率系数。

6.3.3.4 理想条件下的推进效率系数 η_{Did} 由标准拖曳水池试验按航速 V_S 插值获得。

6.3.3.5 阻力增加影响螺旋桨负载，进而影响推进效率系数。 η_{Dms} 考虑负荷变化系数得到。

6.3.3.6 假定推进效率随增阻线性变化，满足：

$$\frac{\eta_{Dms}}{\eta_{Did}} = \xi_P \frac{\Delta R}{R_{id}} + 1 \quad (6.6)$$

式中：

η_{Dms} ——试航条件下的推进效率系数；

η_{Did} ——理想条件下的推进效率系数；

ξ_P ——附录 6-J 中描述的考虑变负荷效应获得；

ΔR ——总阻力增加，N；

R_{id} ——理想条件下的阻力，N。

6.3.3.7 修正后的收到功率如下式：

$$P_{Did} = P_{Dms} - \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} \left(1 - \frac{P_{Dms}}{P_{Did}} \xi_P \right) \quad (6.7)$$

6.3.3.8 对上式进行变换后可得到以下二次方程：

$$P_{Did}^2 - \left(P_{Dms} - \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} \right) P_{Did} - P_{Dms} \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} \xi_P = 0 \quad (6.8)$$

当 $P_{Dms} - \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} > 0$ 时，

$$P_{Did} = \frac{1}{2} \left(P_{Dms} - \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} + \sqrt{\left(P_{Dms} - \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} \right)^2 + 4 P_{Dms} \frac{\Delta R V_S}{\eta_{Did}} \xi_P} \right) \quad (6.9)$$

式中：

P_{Did} ——理想条件下的收到功率，kW；

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，kW；

ΔR ——总阻力增加，N；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

η_{Did} ——理想条件下的推进效率系数；

ζ_P 如附录 6-J 中描述的考虑变负荷效应获得。

6.3.3.9 对螺旋桨轴转速的修正同样考虑负荷变化效应。

6.3.3.10 根据上述已知的 P_{Did} ，对螺旋桨轴转速的修正如下：

$$\frac{\Delta n}{n_{id}} = \zeta_n \frac{P_{Dms} - P_{Did}}{P_{Did}} + \zeta_V \frac{\Delta V}{V_S} \quad (6.10)$$

$$\Delta n = n_{ms} - n_{id} \quad (6.11)$$

6.3.3.11 据此得出修正后的螺旋桨轴转速 n_{id} 为：

$$n_{id} = \frac{n_{ms}}{\zeta_n \frac{P_{Dms} - P_{Did}}{P_{Did}} + \zeta_V \frac{\Delta V}{V_S} + 1} \quad (6.7)$$

式中：

n_{ms} ——测得的螺旋桨轴转速，rpm；

n_{id} ——修正后的螺旋桨轴转速，rpm；

P_{Did} ——理想条件下的收到功率，kW；

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，kW；

ζ_n 和 ζ_V 如附录 6-J 中描述的考虑变负荷效应获得；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

ΔV ——由浅水引起的船舶失速，根据附录 6-H 计算。

6.3.3.12 直接功率法是基于实尺度伴流分数进行的，附录 6-K 中的分析可以加深对该方法的理解。

6.3.4 流影响对实测航速的修正

6.3.4.1 流的影响通过每航次测得的船舶对地速度 V_G 减去流速 V_C 进行修正，即：

$$V_S = V_G - V_C \quad (6.13)$$

式中：

V_S ——船舶对水速度，knots；

V_G ——测得的对地航速，knots；

V_C ——流速，knots。

可使用以下两种不同的方法进行流修正：

(1) “迭代”法

假定流速以半日为周期变化，流速曲线表示为时间的函数。在相同的过程中，可以确定一个回归曲线，表示船舶对水速度（式 6.13）和修正后的功率（6.3.3 节）之间的关系。流速曲线和回归曲线在同一过程中建立。回归曲线与水池试验得到的速度/功率曲线没有关联。

当使用“迭代法”修正流影响后，需要使用修正分析得到 V_S 值，重复进行 6.3.3 节描述的直接功率法分析。

(2) “平均再平均”法

假定给定主机功率下的流速呈抛物线变化，对相同主机功率下的所有测速使用“平均再平均”法抵消流的影响。

“迭代”法和“平均再平均”法的详细说明见附录 6-E。

6.3.5 浅水效应对航速的修正

6.3.5.1 按照附录 6-H 对航速进行浅水修正。

6.3.6 排水量影响对船舶性能的修正

6.3.6.1 一般情况下可以在试航时将排水量和纵倾调整至约定的数值。如有其他不可避免的原因而导致的排水量的实际值与要求值的差异，当这种偏差在 2% 以内时，可按照附录 6-G 对主机功率予以修正。

6.3.7 将功率曲线由试航工况换算至 EEDI 工况和合同规定工况（如有）

6.3.7.1 对于无法在 EEDI 工况和合同规定工况（如有）下进行试航的船舶，如干散货船，可在压载状态下进行试航，并根据水池试验得到的功率曲线，将速度/功率曲线换算到 EEDI 工况和合同规定工况（如有）。

6.3.7.2 由试航工况至 EEDI 工况和合同规定的工况的换算方法见附录 6-I。

6.4 试航数据分析示例

试航数据分析示例见表 6.1。

表 6.1 试航数据分析示例

试航日期	2017/2/25	船体													
造船厂名称	船厂	L _{OA}	L _{PP}	L _{BWL}	B	T _A	T _{F1}	T _{F2}	Δ ₁	Δ ₂	k _{yy}	A _M	A _{XV}	A _{LV}	A _{OD}
船舶编号	15016	m	m	m	m	m	m	m	ton	ton		m ²	m ²	m ²	m ²
船名	M/V	-	320.00	40.00	60.00	19.90	19.90	-	301000	300000	-	1190.0	1000.0	-	-
船型	VLCC	船体						螺旋桨	效率				风的高度		MCR
吃水状态	满载 (EEDI 吃水)	H _C	H _{BR}	C _{MC}	T _M	trim	C _B	D	η _M	η _{R0}	1-t ₀	1-w _{M0}	Z _{ref}	Z _a	P _{MCR}
纵倾状态	无纵倾	m	m	m	m	m		m					m	m	kW
试航地点	ISO BAY	-	-	-	19.9	0.0		9.86	0.970	-	-	-	10.00	40.00	22065
天气	良好	水深	水温		密度		限制条件								
蒲氏风级	4	h	T _w		ρ	ρ _A	(Δ ₁ -Δ ₂)/Δ ₂	trim/T _M	T _{F1} -T _{F2}	h _{MIN}	h _{MAX}	Beaufort number		V _w	H _{1/3}
波浪测量方法	目测	m	°C		kg/m ³	kg/m ³	%	%	m					m/s	m
打印日期	2014/7/9 17:53	500.0	15.00		1025.8	8	1.23	0.3%	-0.5%	-	-	-	6	13.80	2.68

分析方法选择	
风修正	附录 6-C.1.1 和附录 6-C.2.2
浪修正	附录 6-D.1
流修正	附录 6-E.2

实测或观测数据											参考公式序号
1	主机功率设定			70%	85%	100%					
2	航次			1	2	3	4	5	6	7	8

3	航向	(deg)	Ψ_0	0.0	180.0	0.0	180.0	0.0	180.0			实测值
4	每航次的中间时刻	(hour)	t_i	15.07	17.40	19.67	21.85	23.98	26.07			实测值
5	船舶对地速度	(knots)	V_G	13.923	13.088	14.707	15.357	14.460	15.766			实测值
6	螺旋桨轴转速	(rpm)	n	66.03	66.26	70.31	70.62	73.95	74.41			实测值
7	轴功率	(kW)	P_{SM}	15513	15425	18790	18777	21918	22074			实测值
8	风速风向计高度的相对风速	(m/s)	V_{WR}	13.68	3.56	14.07	3.95	13.95	4.06			实测值
9	风速风向计高度的相对风向	(deg)	Ψ_{WR}	14.8	-79.1	14.4	-62.3	14.5	-59.7			实测值
10	风速风向计高度的绝对风速	(m/s)	V_{WT}	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0			(C.2)
11	风速风向计高度的绝对风向	(deg)	Ψ_{WT}	30.0	30.0	30.0	30.0	29.9	30.0			(C.3)
12	风速风向计高度的绝对风速（一组往返航行的平均）	(m/s)	$V'_{WT(i/i+1)}$	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0			(C.4)
13	风速风向计高度的绝对风向（一组往返航行的平均）	(deg)	$\Psi'_{WT(i/i+1)}$	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0			(C.5)
14	风速风向计高度的相对风速（一组往返航行的平均）	(m/s)	$V'_{WR(i)}$	13.68	3.56	14.07	3.95	13.95	4.05			(C.6)
15	风速风向计高度的相对风向（一组往返航行的平均）	(deg)	$\Psi'_{WR(i)}$	14.8	-79.1	14.4	-62.3	14.5	-59.7			(C.7)
16	参考高度的绝对风速	(m/s)	V_{WTref}	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74			(C.8)
17	参考高度的相对风速	(m/s)	V_{WRref}	12.47	3.36	12.86	4.10	12.74	4.25			(C.9)
18	参考高度的相对风向	(deg)	Ψ_{WRref}	13.3	-58.5	12.9	-44.4	13.0	-42.5			(C.10)
19	风阻力系数		C_{AA}	0.92	0.38	0.92	0.58	0.92	0.60			附录 6-C.2
20	平均波浪周期（风浪）	(s)	T_{wm}									实测值
21	三一有义波高（风浪）（实测值）	(m)	$H_{w1/3}$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7			实测值
22	三一有义波高（风浪）（用于计算的值）	(m)	$H_{w1/3}$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7			实测值
23	浪向角（风浪）	(deg)	χ_w	30.0	-150.0	30.0	-150.0	30.0	-150.0			实测值
24	平均波浪周期（涌浪）	(s)	T_{sm}									实测值

25	三一有义波高（涌浪）（实测值）	(m)	$H_{s1/3}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			实测值
26	三一有义波高（涌浪）（用于计算的值）	(m)	$H_{s1/3}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			实测值
27	浪向角（涌浪）	(deg)	χ_s	0.0	180.0	0.0	180.0	0.0	180.0			实测值
28	三一有义波高（实测值）	(m)	$H_{1/3}$	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22			合成波高
29	三一有义波高（用于计算的值）	(m)	$H_{1/3}$	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22			允许值
30	收到功率	(kW)	P_{DM}	15047	14962	18226	18214	21261	21411			(6.2)或(6.3)
31	船舶对水速度	(knots)	V_S	13.506	13.506	15.032	15.032	15.113	15.113			V_G 的平均值
32	流速	(knots)	V_C	0.418	-0.418	-0.325	0.325	-0.653	0.653			$V_C=V_G-V_S$

阻力数据											参考公式序号	
33	风引起的阻力增加	(kN)	R_{AA}	56.95	-24.55	59.23	-31.49	58.51	-32.78			(C.1)
34	波浪增阻	(kN)	R_{AW}	68.80	0.00	68.80	0.00	68.80	0.00			(D.1)
35	水温和密度偏差引起的阻力增加	(kN)	R_{AS}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			(E.1)
36	总阻力增加	(kN)	ΔR	125.79	-24.55	128.08	-31.49	127.36	-32.78			(6.1)

直接功率法（1）											参考公式序号	
37	理想条件下的推进效率系数		η_{D0}	0.694	0.673	0.717	0.696	0.685	0.665			水池试验
38	负荷变化影响		ε_p	-0.207	-0.207	-0.207	-0.207	-0.207	-0.207			附录 6-J
39	收到功率	(kW)	P_{Did}	13497. 8	15267. 1	16529. 8	18634. 3	19488. 6	21872. 6			(6.9)
40	负荷变化影响		ε_n	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248			附录 6-J
41	负荷变化影响		ε_v	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193			附录 6-J
42	螺旋桨轴转速	(rpm)	N_{id}	64.23	66.57	68.52	71.01	72.35	74.78			(6.12)

流修正 (1) : 参见附录 6-E.2										参考公式序号	
43	平均航速	(knots)	V_{Gm}	13.506	15.032	15.113					V_G 的平均值
44	平均制动功率	(kW)	P_{Bm}	14830	18100	21325					P_{DId}/η_T 的平均
45	曲线上的制动功率	(kW)	P'	13933	15727	16900	19210	20123	22527		$V_G \rightarrow (E.2)$
46	曲线上的制动功率的平均值	(kW)	P'_{Bm}	14830	18100	21325					P' 的平均值
47	修正流后的航速	(knots)	V'_S	13.459	13.988	14.335	14.905	15.127	15.678		(E.5)
48	流速	(knots)	V'_C	0.465	0.899	0.372	-0.451	-0.667	-0.089		(E.4)
49	流速曲线上的流速	(knots)	V_C	0.465	0.899	0.372	-0.451	-0.667	-0.089		(E.1)

直接功率法 (2) : 第 6.3.3 节最后第二段中规定的步骤										参考公式序号	
50	收到功率	(kW)	P_{DId}	13521	15266	16568	18630	19518	21869		(6.9)
51	螺旋桨轴转速	(rpm)	N_{id}	64.24	66.59	68.61	71.01	82.35	74.80		(6.12)

流修正 (2) : 参见附录 6-E.2										参考公式序号	
52	修正流后的航速	(knots)	V'_S	13.446	13.980	14.351	14.899	15.122	15.681		(E.5)
53	流速	(knots)	V'_C	0.477	0.891	0.356	-0.458	-0.662	-0.086		(E.4)
54	流速曲线上的流速	(knots)	V_C	0.477	0.891	0.356	-0.458	-0.662	-0.086		(E.1)

浅水修正										参考公式序号	
55	最小水深	(m)	h_{MIN}	-	-	-	-	-	-		第 3.3.5 节
56	最大水深	(m)	h_{MAX}	-	-	-	-	-	-		第 3.3.5 节
57	水深 (用于计算的)	(m)	h								第 3.3.5 节
58	浅水引起的船舶失速	(knots)	ΔV								附录 6-H
59	深水中的船舶对水速度	(knots)	V_S								(H.1) $\rightarrow V_S$

排水量修正											参考公式序号	
60	收到功率	(kW)	P_{DC}	13491	15232	16532	18589	19474	21821			(G.1)

最终的性能											参考公式序号	
61	螺旋桨轴转速	(rpm)	n_c	64.24	66.59	68.61	71.01	82.35	74.80			同第 51 行
62	船舶对水速度	(knots)	V_S	13.446	13.980	14.351	14.899	15.122	15.681			同第 52 行
63	制动功率	(kW)	P_{BC}	13908	15703	17043	19163	20077	22495			P_{DC}/η_M

6.5 试航报告

6.5.1 试航报告中应描述试航条件和为得到 EEDI 工况和合同规定工况（如有）下的航速进行的所有修正。

6.5.2 试航报告应包含与数据分析相关的所有信息。其编写方式应保证可以重新计算所有结果。

6.5.3 试航报告应包含以下几个部分：

- (1) 试航报告摘要，包括：船舶要素、螺旋桨细节、主机数据、船体附属物和舵的信息。
- (2) EEDI 工况，包括 EEDI 航速、功率和排水量。
- (3) 合同规定工况（如有），包括合同航速、功率和排水量。
- (4) 仪器设备描述，包括仪器安装和校准、传感器安装位置（例如风速风向计）等。
- (5) 描述试航地点，提供地理位置、水深等信息。
- (6) 环境参数，列出速度/功率试验期间在试航地点处实测或观测得到的环境条件，包括浪高和周期、浪向、气压、风向、风速、气温、水温、水密度等。
- (7) 每航次的试航结果包括：
 - 1) 日期和每航次开始时间；
 - 2) 航次数；
 - 3) 船舶位置；
 - 4) 船舶航向；
 - 5) 航行时长；
 - 6) 实测航速的平均值；
 - 7) （每个轴）轴扭矩的平均值；
 - 8) （每个轴）轴转速的平均值；
 - 9) （每个轴）轴功率的平均值；
 - 10) 相对风速和风向；
 - 11) 三一有义波高、平均周期和浪向；
 - 12) 水深；
- (8) 分析和修正方法。测得的试航数据的分析与修正应该按照本章进行。
- (9) 总结。

附录 6-A 通用数据和试航记录表

试航开始之前，要完成试航登录数据的填写，提交相关方确认。其中，船舶主要参数记录表如表 A.1 所示，测速试航状态记录表如表 A.2 所示。

船舶主要参数记录表

A. 1

测速试航登录数据			
船名 IMO 编号 船舶类型 造船厂			
主要尺度	水线长 L_{WL} m 垂线间长 L_{PP} m 型宽 B m 型深 D m	主机	机型 台数 额定功率 kW 额定转速 rpm 用于推进的功率 kW 减速比
设计装载状态	首吃水 d_F m 尾吃水 d_A m 平均吃水 d_M m 排水体积 ∇ m ³ 方形系数 C_B 棱形系数 C_P 中剖面系数 C_M 浮心纵向位置 x_C 船体湿表面积 S m ²	辅机	机型 台数 额定功率 kW 额定转速 rpm 机型 台数 额定功率 kW 额定转速 rpm
吨位	总吨 GT 载重量 DWT t	螺旋桨参数	螺旋桨数目 类型（定距桨或调距桨） 直径 D_P m 螺距比 P/D_P 叶数 Z 盘面比 A_E/A_0 额定转速 rpm 材料 旋向（从船尾看，R 或 L） 叶片数
船体状态	最后一次清洁船体时间（mm/yyyy） 船体表面状况 螺旋桨表面状况	轴系	材料 G 模量 N/mm （默认值 82400 N/mm） 测量段内径 mm 测量段外径 mm 轴系效率 η_S
船体附属物	艤龙骨湿表面积 m ² 舵的湿表面积 m ² 其他附属物的湿表面积 m ²		

测速试航状态记录表

A. 2

测速试航登录数据	
试航日期	
试航地点（经度、纬度）	
天气情况（目测）	
环境 状 态	风速风向计距离水线的垂直高度 m
	水温 °C
	水密度 kg/m ³
	空气温度 °C
	空气密度 kg/m ³
	气压 hPa, mbar
船 舶 状 态	艏吃水 PS m
	艏吃水 SB m
	艉吃水 PS m
	艉吃水 SB m
	舳吃水 PS m
	舳吃水 SB m
	纵倾
	排水量 ton
	水线以上包括上层建筑在内的横截面积 m ²
	水线以上包括上层建筑在内的侧投影面积（Fujiwara） m ²
	上甲板以上的上层建筑的侧投影面积（Fujiwara） m ²

试航开始，按照试航大纲要求试验，记录航次相关数据，并提交相关方确认。试航航次数据记录表如表 A.3 所示。

测速试航航次数据表

A. 3

航次编号	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
主机功率设定	%MCR												
日期	yyyy-mm-dd												
航次开始时间	hh:mm												
航向：去/回	-												
航向	°												
测速持续时间	mm:ss												
实测航速	knots												
相 对 风	风速	m/s											
	风向	°											
风浪	三一有义波 高	m											
	浪向	°											
	周期	s											

涌浪	三一有义波高	m												
	浪向	°												
	周期	s												
螺旋桨 PS	功率	kW												
	轴转速	rpm												
	调距桨螺距角	°												
螺旋桨 SB	功率	kW												
	轴转速	rpm												
	调距桨螺距角	°												
船舶垂向加速度 (如采用 D.2 修正法)		m/s ²												
水深		m												

附录 6-B 蒲氏风级

下表仅表示远离陆地的开阔海域中的大概情况，不能反向使用，即不能用于记录或报告海况。在封闭水域或靠近陆地时，有离岸风，波高将会更小，波浪会更陡峭。括号中的数值表示的是可能发生的最大波高。

表 B.1 风力等级表

蒲氏 风级	名称	开阔平地上 10 米标准高度处的等效 速度				征状			大概波高	
		平均速度 kn	m/s	km/h	m.p.h	陆地	海洋	海岸	m	ft
0	无风	<1	0-0.2	<1	<1	静，烟直上升	海面如镜	平静	-	-
1	软风	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	烟能表示风向，但风向标不因风转动	鱼鳞状涟漪，没有浪花	渔船尚能操舵	0.1 (0.1)	¼ (¼)
2	轻风	4-6	1.6-3.3	6-11	4-7	脸感觉有风，树叶发出沙沙的声音，普通的风向标转动	小波，波长尚短，但波形显著，波峰呈玻璃色，未破碎	单桅小帆船随风移行速度达 1~2 节	0.2 (0.3)	½ (1)
3	微风	7-10	3.4-5.4	12-19	8-12	树叶和细小的枝叶摇动不息，旌旗招展	较大的小波；波峰开始破碎，出现玻璃色浪花；间或有稀疏白浪	单桅小帆船略觉簸动，随风移行速度达 3~4 节	0.6 (1)	2 (3)
4	和风	11-16	5.5-7.9	20-28	13-18	灰尘和纸片飞舞，树叶的小枝摇动	小浪，波长变长，白浪成群出现	适宜的微风，渔船满帆	1 (1.5)	¾ (5)
5	清劲风	17-21	8.0-10.7	29-38	19-24	有叶的小树摇摆，内河水面其小波	中浪，具有较显著的长波形状，许多白浪形成（偶有飞沫）	渔船需缩帆	2 (2.5)	6 (8½)
6	强风	22-27	10.8-13.8	39-49	25-31	大树枝摇动，电线呼呼发声，撑	大浪开始形成；带着白色浪花的波峰到	渔船需加倍缩帆至大部分，捕	3 (4)	9½ (13)

蒲氏 风级	名称	开阔平地上 10 米标准高度处的等效 速度				征状			大概波高	
		平均速度 kn	m/s	km/h	m.p.h	陆地	海洋	海岸	m	ft
						伞困难	处皆是（可能 有些飞沫）	鱼需要注 意安全		
7	疾风	28-33	13.9-17. 1	50-61	32-38	全树摇动， 迎风步行 感觉不便	大浪，破碎的 白色浪花开始 沿风向被吹成 条纹状	渔船停泊 在港口，在 海上的渔 船需下锚	4 (5.5)	13½ (19)
8	大风	34-40	17.2-20. 7	62-74	39-46	折毁小枝， 迎风步行 感觉阻力 很大	较长的中长 浪，波峰边缘 开始破碎成为 浪花，浪花沿 风向形成很显 著的条纹状	所有近港 渔船都要 靠港	5.5 (7.5)	18 (25)
9	烈风	41-47	20.8-24. 4	75-88	47-54	普通楼房 上的杂物 件（铝窗和 花盆等）容 易吹毁掉 落	狂浪，沿风向 出现密集的白 浪花条纹，波 峰开始摇动， 翻滚，飞沫可 影响能见度		7 (10)	23 (32)
10	狂风	48-55	24.5-28. 4	89-102	55-63	陆地上不 常见到，如 果有，往往 会拔树毁 屋	狂涛，波峰长 而翻卷，白色 浪花大片地被 风削去，沿风 向形成条条浓 密的白色条 纹，整个海面 呈白色，海面 翻滚动荡更加 猛烈，影响能 见度		9 (12.5)	29 (41)
11	暴风	55-63	28.5-32. 6	103-117	64-72	陆地上不 常见到，如 果有，必遭 受重大的 损毁	异常狂涛（浪 后中小船只可 被遮蔽一时）， 沿风向伸展的 大片白浪花完 全覆盖海面， 视线所及，波 峰边缘都被吹 到空中，影响 能见度		11.5 (16)	37 (52)

蒲氏 风级	名称	开阔平地上 10 米标准高度处的等效 速度				征状			大概波高	
		平均速度 kn	m/s	km/h	m.p.h	陆地	海洋	海岸	m	ft
12	飓风	64 及以上	32.7 及以上	118 及以上	73 及以上		空中充满了白色的浪花和飞沫，被风驱赶的飞沫使海面完全变成白色，严重影响能见度		14 (-)	45 (-)

表 B.2 海况等级表

等级	名称	浪高 m
0	无浪	0
1	微浪	0-0.1
2	小浪	0.1-0.5
3	轻浪	0.5-1.25
4	中浪	1.25-2.5
5	大浪	2.5-4
6	巨浪	4-6
7	狂浪	6-9
8	狂涛	9-14
9	怒涛	Over 14

注：分界点上的浪高应被认定为较低的海况等级，如高度为 4 米的浪被认定为是 5 级海况。

附录 6-C 风引起的阻力增加

风引起的阻力增加按下式计算：

$$R_{AA} = 0.5\rho_A \cdot C_{AA}(\psi_{WRref}) \cdot A_{XV} \cdot V_{WRref}^2 - 0.5\rho_A \cdot C_{AA}(0) \cdot A_{XV} \cdot V_G^2 \quad (C.1)$$

式中：

R_{AA} ——相对风引起的阻力增加，N；

A_{XV} ——水线以上包括上层建筑在内的横截面积， m^2 ；

C_{AA} ——风阻力系数，

$C_{AA}(0)$ ——迎风阻力系数，即相对风向为 0° 时的风阻力系数；

V_G ——测得的船舶对地航速，m/s；

V_{WRref} ——参考高度的相对风速，m/s；

ψ_{WRref} ——参考高度处的相对风向， $^\circ$ ；

ρ_A ——空气质量密度， kg/m^3 。

风数据的评估详见本附录第 C.1 节。

风阻力系数是基于风洞中的模型试验获得的数据。如果有包含相似船型的数据库，其中的数据可用于代替风洞模型试验。此外，制定了不同船型的风阻力系数统计回归公式。所推荐方法的描述详见本附录第 C.2 节。

C.1 风数据的评估

由于自然风的速度和方向时刻变化，因此，风速和风向定义为所选时段内风速和风向的平均值。

假定试航期间风是稳定的，即在每一航次测速期间内风速和风向基本不变。在每一航次期间记录风向和风速的平均值，并作为该航次的“实际”值。

C.1.1 绝对风速和风向的求平均

通常使用安装在驾驶室顶上雷达桅杆上的船载风速风向计测量相对风速和风向。该位置的风速和风向可能受到船舶几何形状特别是上层建筑形状的影响。

对于每一个测速航次，其真实风矢量通过船舶航向、对地航速、测得的相对风速和风向得到。通过计算一组往返航行所有测速航次真实风矢量的平均值，可以得到一组往返航行的真实风矢量。往返航行的平均风矢量将用于计算该组往返航行下每一测速航次的相对风矢量。

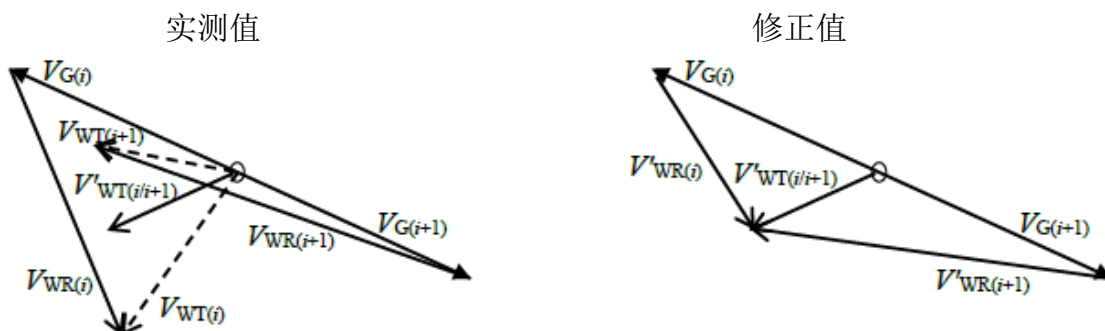


图 C.1 真实风矢量和相对风矢量

在风速计垂直位置处的绝对风速和风向按下式计算：

$$V_{WT} = \sqrt{V_{WR}^2 + V_G^2 - 2V_{WR}V_G \cos\psi_{WR}} \quad (C.2)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos(\psi) \geq 0 \text{ 时, } \psi_{WT} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WR} \sin(\psi_{WR} + \psi) - V_G \sin(\psi)}{V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos(\psi)} \right\} \\ \text{当 } V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos(\psi) < 0 \text{ 时, } \psi_{WT} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WR} \sin(\psi_{WR} + \psi) - V_G \sin(\psi)}{V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos(\psi)} \right\} + 180 \end{aligned} \quad (C.3)$$

式中：

V_G ——测得的船舶对地速度，m/s；

V_{WR} ——在风速计垂直位置处测得的相对风速的平均值，m/s；

V_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风速，m/s；

ψ ——船舶航向，°；

ψ_{WR} ——在风速计垂直位置处测得的相对风向的平均值，°；

ψ_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风向，°。

通过对一组往返航行的所有航次求平均处理得到绝对风速和风向，即：

$$V'_{WT(i/i+1)} = \sqrt{\left(\frac{V_{WT(i)} \cos\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \cos\psi_{WT(i+1)}}{2} \right)^2 + \left(\frac{V_{WT(i)} \sin\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \sin\psi_{WT(i+1)}}{2} \right)^2} \quad (C.4)$$

当 $V_{WT(i)} \cos\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \cos\psi_{WT(i+1)} \geq 0$ 时，

$$\psi'_{WT(i/i+1)} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WT(i)} \sin\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \sin\psi_{WT(i+1)}}{V_{WT(i)} \cos\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \cos\psi_{WT(i+1)}} \right\}$$

当 $V_{WT(i)} \cos\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \cos\psi_{WT(i+1)} < 0$ 时，

$$\psi'_{WT(i/i+1)} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WT(i)} \sin\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \sin\psi_{WT(i+1)}}{V_{WT(i)} \cos\psi_{WT(i)} + V_{WT(i+1)} \cos\psi_{WT(i+1)}} \right\} + 180 \quad (C.5)$$

$$V'_{WR(i)} = \sqrt{V'^2_{WT(i)} + V^2_{G(i)} + 2V'_{WT(i)}V_{G(i)} \cos(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)})} \quad (C.6)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } V_{G(i)} + V'_{WT(i)} \cos(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)}) \geq 0 \text{ 时, } \psi'_{WR(i)} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V'_{WT(i)} \sin(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)})}{V_{G(i)} + V'_{WT(i)} \cos(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)})} \right\} \\ \text{当 } V_{G(i)} + V'_{WT(i)} \cos(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)}) < 0 \text{ 时, } \psi'_{WR(i)} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V'_{WT(i)} \sin(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)})}{V_{G(i)} + V'_{WT(i)} \cos(\psi'_{WT(i)} - \psi_{(i)})} \right\} + 180 \end{aligned} \quad (C.7)$$

式中:

V_G ——测得的船舶对地速度, m/s;

V_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风速, m/s;

V'_{WT} ——风速计垂直位置处绝对风速的平均值, m/s;

V'_{WR} ——在风速计垂直位置处修正后的相对风速, m/s;

ψ ——船舶航向, °;

ψ_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风向, °;

ψ'_{WT} ——风速计垂直位置处绝对风向的平均值, °;

ψ'_{WR} ——风速计垂直位置处修正后的相对风向, °;

i ——航次编号。

于是, 绝对风速 $V_{WT(i)}$ 、绝对风向 $\psi_{WT(i)}$ 、相对风速 $V_{WR(i)}$ 和相对风向 $\psi_{WR(i)}$ 将被 $V'_{WT(i)}$ 、 $\psi'_{WT(i)}$ 、 $V'_{WR(i)}$ 和 $\psi'_{WR(i)}$ 取代。

绝对风速和风向应该考虑以下情况进行校核:

- (1) 每一航次期间绝对风速和风向曲线的一致性;
- (2) 每一航次期间气温和气压曲线的一致性;
- (3) 可公开获得的气象信息。

C.1.2 考虑风速计垂直位置的修正

风对船舶的影响包括两个方面: 剪切流和等速流。剪切流是自然风。等速流是静止空气与船舶自身运动之间的相对速度。

为了计算风阻力, 需要使用风洞试验中参考高度处的风速和风向。因此, 应该将在风速计垂直位置处的风速和风向修正到参考高度处。

风速计垂直位置与参考高度之间的偏差对风阻力的影响通过风速剖面进行修正, 即:

$$V_{WTref} = V_{WT} \left(\frac{Z_{ref}}{Z_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (C.8)$$

式中：

V_{WTrref} ——参考高度处的绝对风速，m/s；

V_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风速，m/s；

Z_{ref} ——风阻力系数的参考高度，m；

Z_a ——风速计的垂直高度，m。

风阻力系数的参考高度 Z_{ref} 按照风洞试验获得的风阻力系数对应的高度进行选择。

参考高度处的相对风速根据下式计算：

$$V_{WRref} = \sqrt{V_{WTrref}^2 + V_G^2 - 2V_{WTrref}V_G \cos(\psi_{WT} - \psi)} \quad (C.9)$$

参考高度处的相对风向根据下式计算：

$$\begin{aligned} \text{当 } V_G + V_{WTrref} \cos(\psi_{WT} - \psi) \geq 0 \text{ 时, } \psi_{WRref} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WTrref} \sin(\psi_{WT} - \psi)}{V_G + V_{WTrref} \cos(\psi_{WT} - \psi)} \right\} \\ \text{当 } V_G + V_{WTrref} \cos(\psi_{WT} - \psi) < 0 \text{ 时, } \psi_{WRref} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WTrref} \sin(\psi_{WT} - \psi)}{V_G + V_{WTrref} \cos(\psi_{WT} - \psi)} \right\} + 180 \end{aligned} \quad (C.10)$$

式中：

V_G ——测得的船舶对地速度，m/s；

V_{WRref} ——参考高度处的相对风速，m/s；

V_{WTrref} ——参考高度处的绝对风速，m/s；

ψ ——船舶航向，°；

ψ_{WRref} ——参考高度处的相对风向，°；

ψ_{WT} ——风速计垂直位置处的绝对风向，°。

C.2 风阻力系数

风阻力系数应该使用以下方法确定。

C.2.1 风洞试验

如果风洞试验结果可获得，应该使用风洞试验计算得到的风阻力系数。

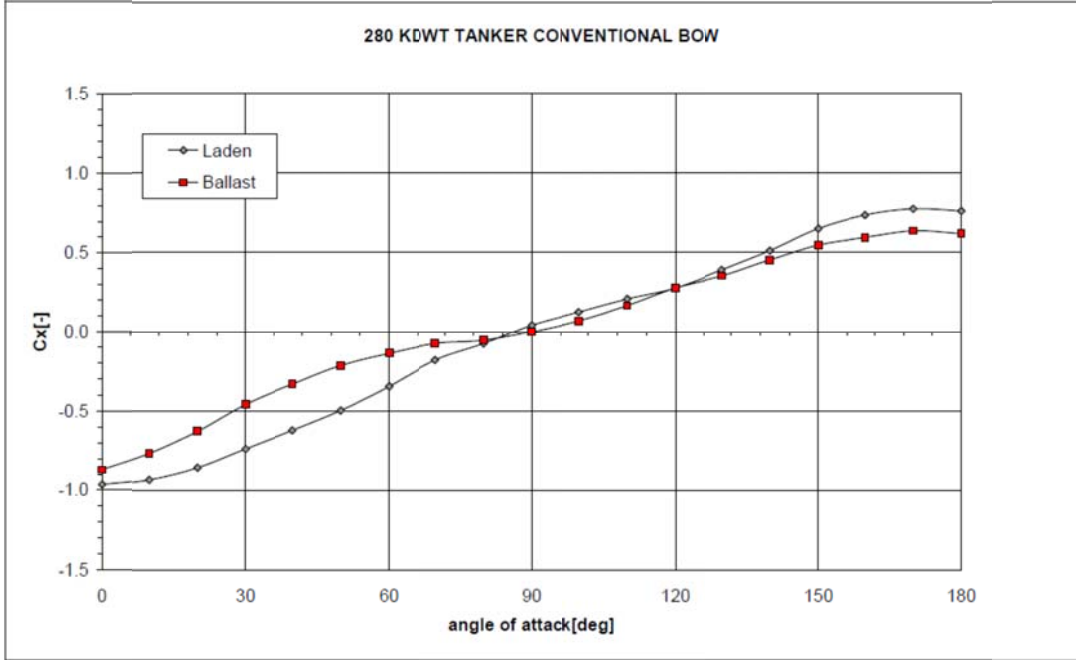
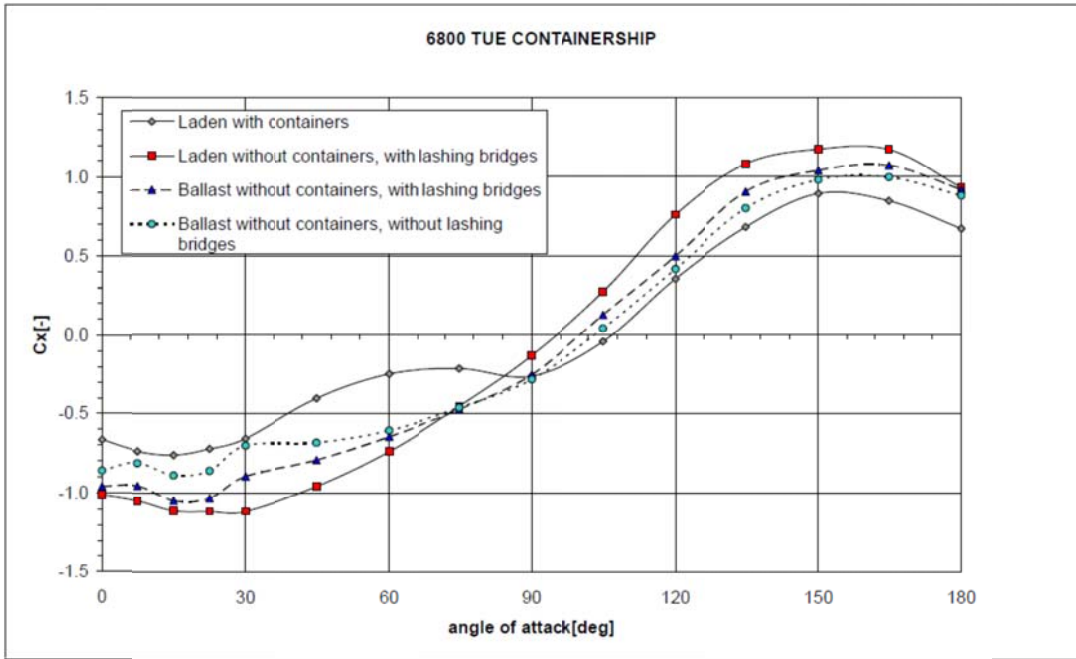
C.2.2 风阻力系数数据组

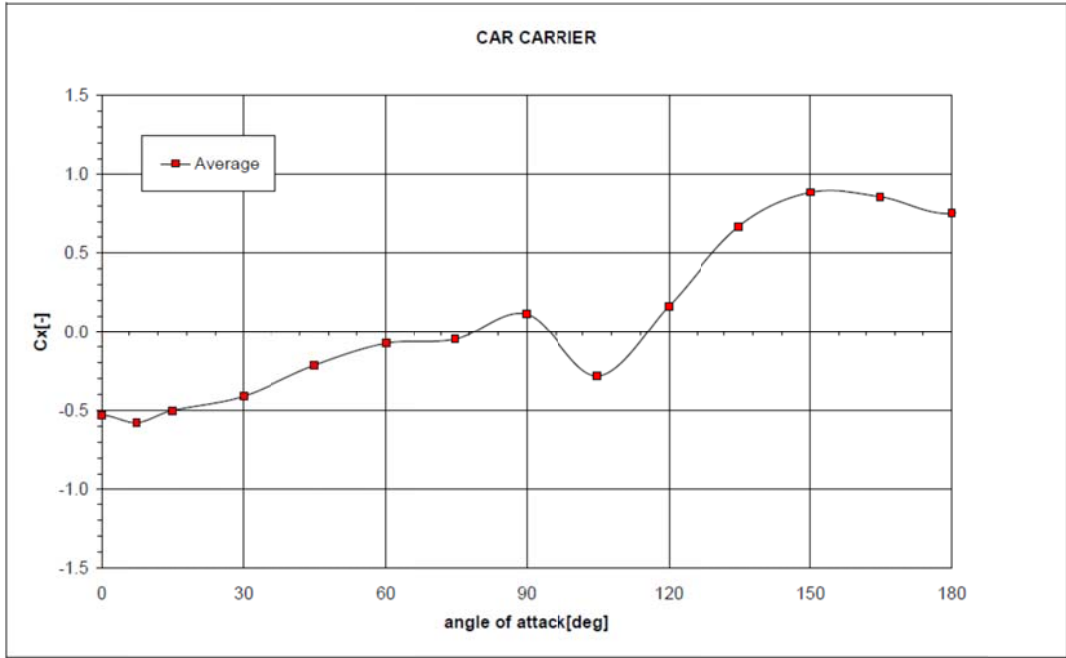
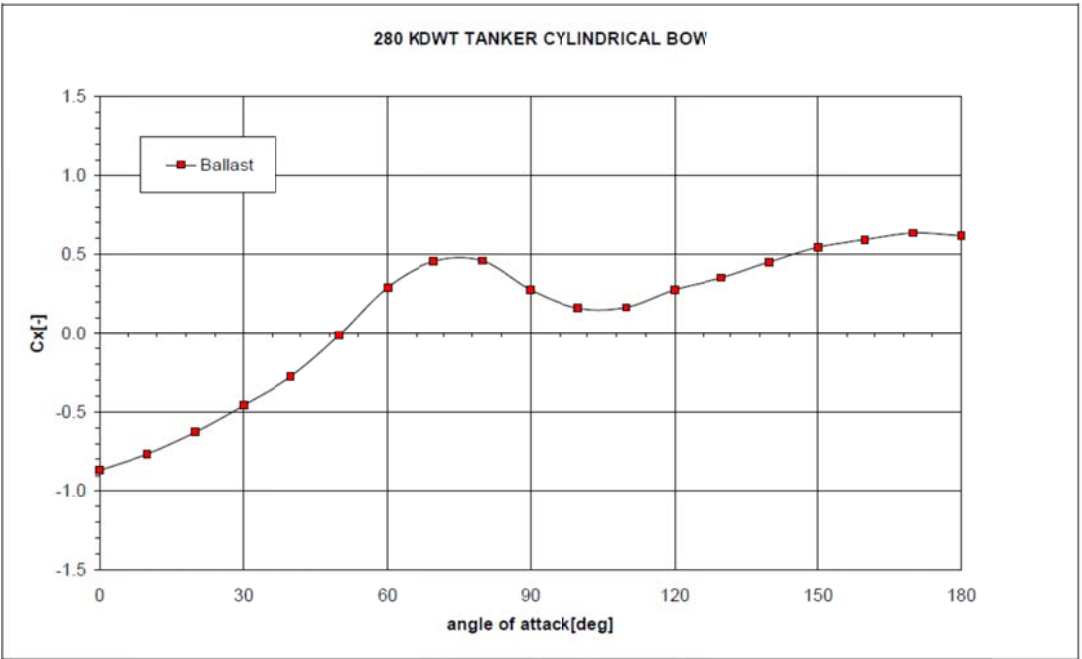
风阻力数据组由 STA-JIP 提供。数据可用于油船、LNG 运输船、集装箱船、车辆运输船、渡轮/游轮、杂货船和散货船，如表 C.1 所示。图 C.2 给出了每种船型的风阻力系数 ($C_{AA} = -C_X$)。

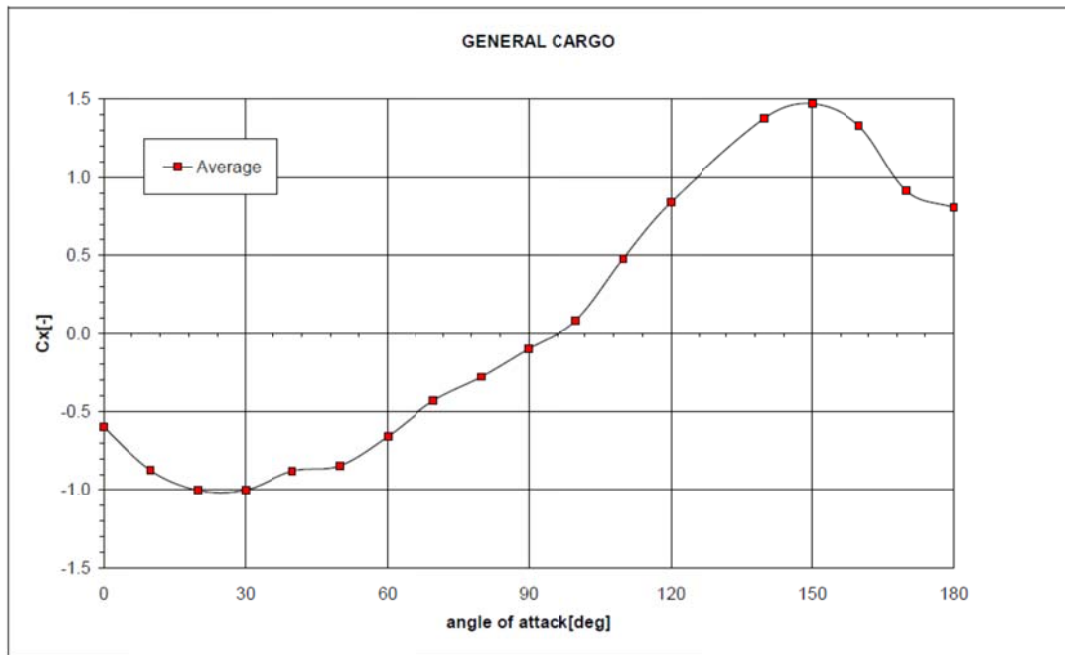
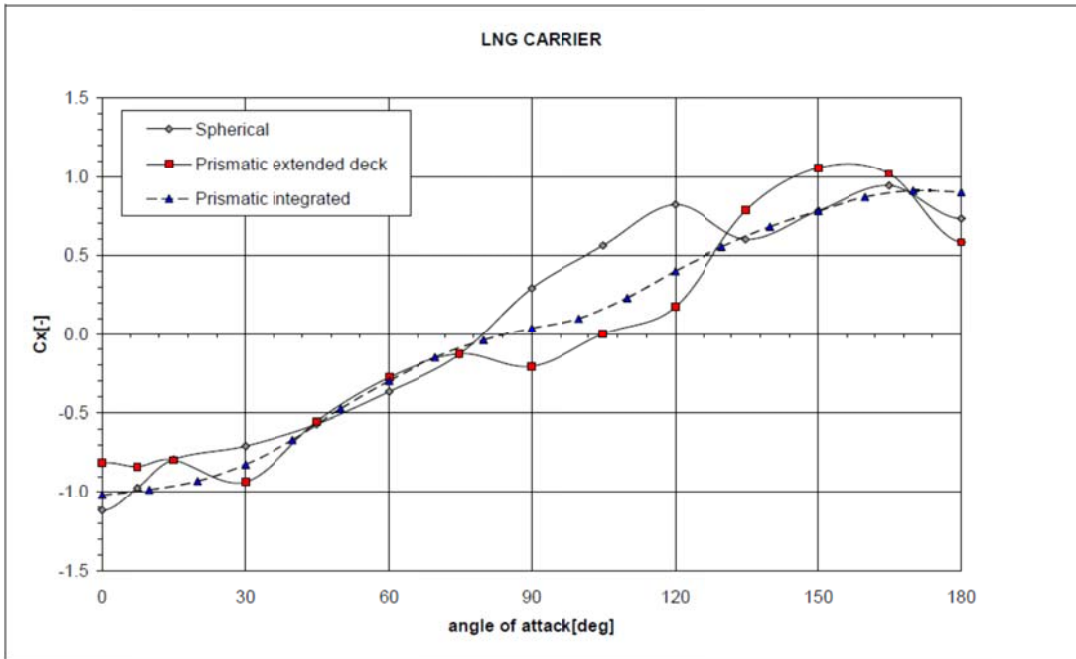
在应用这些系数之前，应认真评估船舶的类型、形状和舾装，将船舶的几何形状与数据组中的几何形状（见图 C.3）进行比较。提供的数据仅限于近年来的普通船型。数据组不适用于特殊船舶，如拖船、近海供应船、渔船和快艇以及其他具有独特几何外形的船舶。

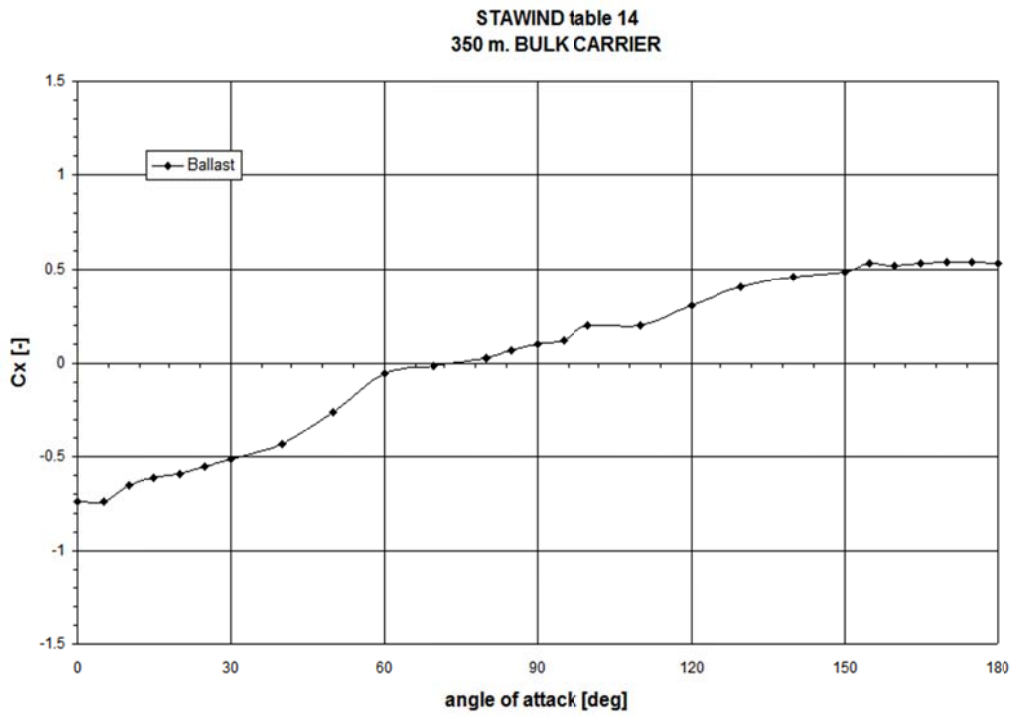
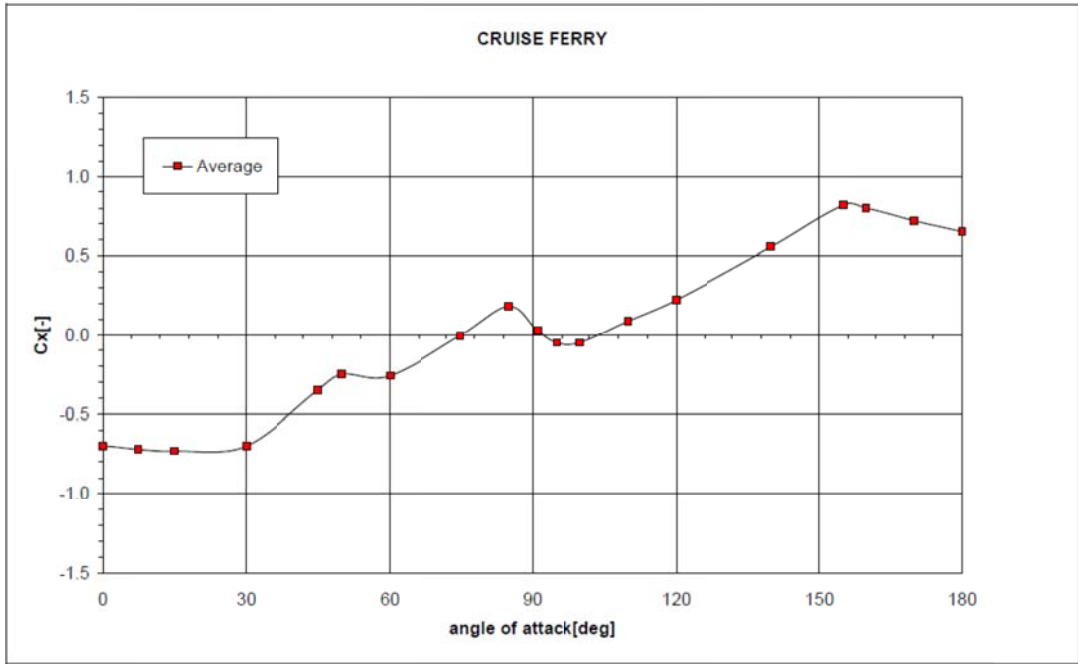
表 C.1 风阻力系数数据组中包含的船型

船型	装载工况	上层建筑	试验船
普通球艏的油船	满载	常规	280kDWT
普通球艏的油船	压载	常规	280kDWT
圆柱形球艏的油船	压载	常规	280kDWT
LNG 运输船	设计吃水	棱柱形整体甲板	125k-m ³
LNG 运输船	设计吃水	棱柱形扩展甲板	138k-m ³
LNG 运输船	设计吃水	球形	125k-m ³
集装箱船	满载	带集装箱	6800TEU
集装箱船	满载	无集装箱，有绑扎桥	6800TEU
集装箱船	压载	有绑扎桥	6800TEU
集装箱船	压载	无绑扎桥	6800 TEU
车辆运输船	设计吃水	常规	Autosky
渡轮/游轮	设计吃水	常规	
杂货船	设计吃水	常规	
散货船	压载	常规	350 m 散货船
散货船	满载	常规	350 m 散货船









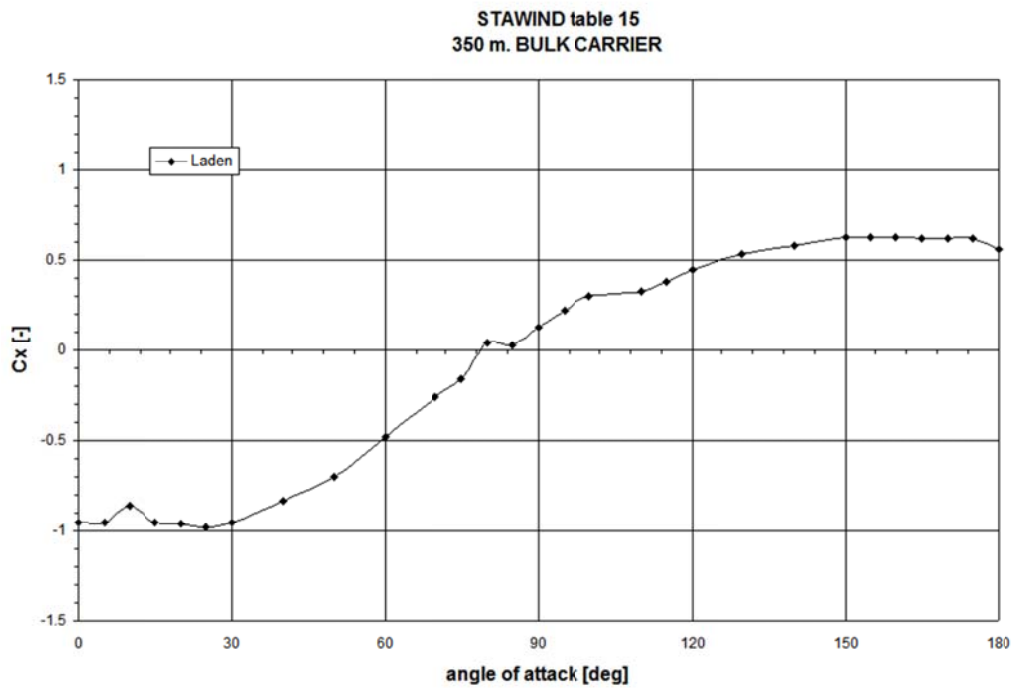


图 C.2 典型船型的风阻力系数



a) 集装箱船，满载有集装箱



b) 集装箱船，压载无集装箱



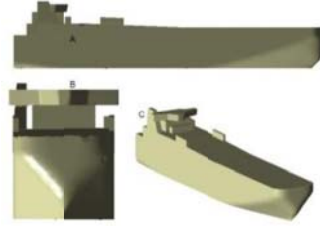
c) 280k DWT 油船，普通球艏，满载



d) 280k DWT 油船，普通球艏，压载



e) 280k DWT 油船，圆柱形球艏，压载



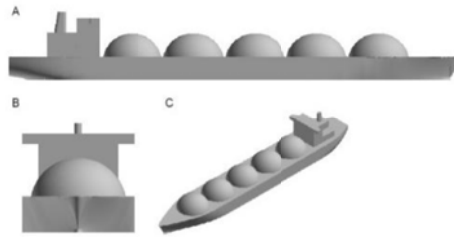
f) 车辆运输船



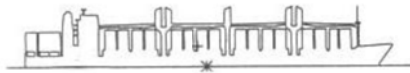
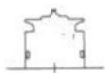
g) LNG 运输船，棱柱形扩展甲板



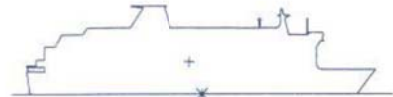
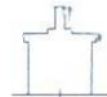
h) LNG 运输船，棱柱形整体甲板



i) LNG 运输船（上层建筑球形）



j) 杂货船



k) 渡轮/游轮

图 C.3 船舶外形

C.2.3 Fujiwara 等提供的回归公式

Fujiwara 等建立了以下基于风洞试验的回归公式：

$$C_{AA}(\psi_{WR}) = C_{LF} \cos \psi_{WR} + C_{XLI} \left(\sin \psi_{WR} - \frac{1}{2} \sin \psi_{WR} \cos^2 \psi_{WR} \right) \sin \psi_{WR} \cos \psi_{WR} + C_{ALF} \sin \psi_{WR} \cos^3 \psi_{WR} \quad (C.7)$$

式中：

当 $0 \leq \psi_{WR} < 90^\circ$ 时,

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \frac{A_{LV}}{L_{OA} B} + \beta_{12} \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad (C.12)$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \frac{A_{LV}}{L_{OA} H_{BR}} + \delta_{12} \frac{A_{XV}}{BH_{BR}} \quad (C.8)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \frac{A_{OD}}{A_{LV}} + \varepsilon_{12} \frac{B}{L_{OA}} \quad (C.14)$$

当 $90 < \psi_{WR} \leq 180^\circ$ 时,

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \frac{H_C}{L_{OA}} + \beta_{23} \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \frac{A_{XV}}{B^2} \quad (C.9)$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \frac{A_{LV}}{L_{OA} H_{BR}} + \delta_{22} \frac{A_{XV}}{A_{LV}} + \delta_{23} \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \frac{A_{XV}}{BH_{BR}} \quad (C.10)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \frac{A_{OD}}{A_{LV}} \quad (C.11)$$

当 $\psi_{WR} = 90^\circ$ 时,

$$C_{AA}(90) = \frac{1}{2} \{ C_{AA}(90 - \mu) + C_{AA}(90 + \mu) \} \quad (C.12)$$

式中:

$C_{AA(\psi_{WR})}$ ——风阻力系数;

ψ_{WR} ——相对风向, $^\circ$;

L_{OA} ——船舶总长, m;

B ——船舶宽度, m;

A_{OD} ——上甲板以上的上层建筑的侧投影面积, m^2 ;

A_{XV} ——水线以上包括上层建筑在内的横截面积, m^2 ;

A_{LV} ——水线以上包括上层建筑在内的侧投影面积, m^2 ;

C_{MC} ——船中截面至侧投影面积 A_{LV} 中心的水平距离, 船中以前为正, m;

H_{BR} ——上层建筑顶部的高度, m;

H_C ——水线到侧投影面积 A_{LV} 中心的高度, m;

μ ——平滑范围, $^\circ$, 一般为 10° 。

公式中的无量纲参数 β_{ij} 、 δ_{ij} 和 ϵ_{ij} 如表 C.2 所示。

表 C.2 无量纲参数 β_{ij} 、 δ_{ij} 和 ϵ_{ij}

	i	j				
		0	1	2	3	4
β_{ij}	1	0.922	-0.507	-1.162	-	-
	2	-0.018	5.091	-10.367	3.011	0.341
δ_{ij}	1	-0.458	-3.245	2.313	-	-
	2	1.901	-12.727	-24.407	40.310	5.481
ϵ_{ij}	1	0.585	0.906	-3.239	-	-
	2	0.314	1.117	-	-	-

坐标系及符号规定如图 C.4 所示。

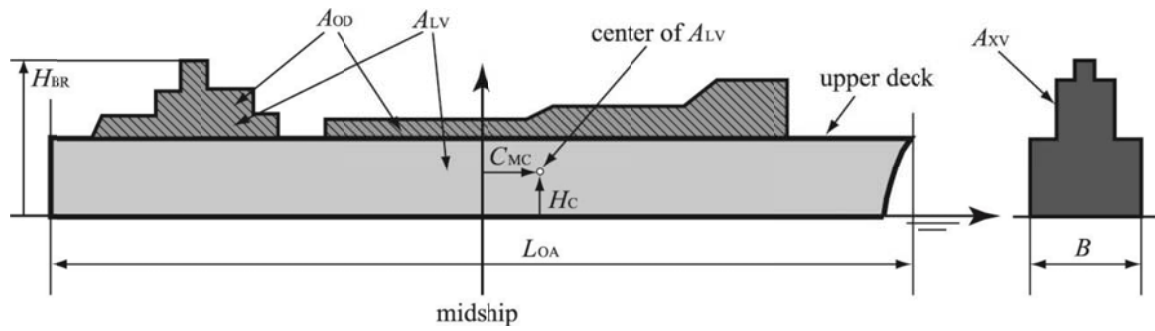


图 C.4 Fujiwara 回归公式的输入参数

附录 6-D 波浪引起的阻力增加

不规则波可以用规则波的线性叠加来表示。因此在短峰不规则波中的平均增阻 R_{AW} 可以通过方向谱 E 和规则波中平均增阻的响应函数 R_{wave} 的线性叠加来计算，即：

$$R_{AW} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{R_{wave}(\omega, \alpha, V_S)}{\zeta_A^2} E(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (D.1)$$

式中：

R_{AW} ——短峰不规则波中的平均增阻，N；

R_{wave} ——规则波中的平均增阻，N；

ζ_A ——波幅，m；

ω ——规则波的圆频率，rad/s；

α ——船舶航向与成分波之间的夹角，rad，0 为迎浪；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

E ——方向谱， m^2s 。

如果在试航时用传感器测量了方向谱且能确保精度，那么可以使用测得的方向谱。如果没有测量方向谱，则应该使用以下关系式计算：

$$E = S_{\eta}(\omega)G(\alpha) \quad (D.2)$$

式中：

S_{η} ——频率谱，如式 (D.3) 所示， m^2s ；

G ——角度分布函数。

为了计算，对频率谱和角度分布函数进行假设。对于风浪，应使用 ITTC1978 中修正的 Pierson-Moskowitz 频率谱，如式 (D.3) 所示。

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{A_{fw}}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B_{fw}}{\omega^4}\right) \quad (D.3)$$

$$A_{fw} = 173 \frac{H_{01}^2}{T_{01}^4} \quad (D.4)$$

$$B_{fw} = \frac{691}{T_{01}^4} \quad (D.5)$$

对于窄频带波浪谱（如北海），通常使用如式 (D.6) 所示的 JONSWAP 频率谱。

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{A_{fs}}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B_{fs}}{\omega^4}\right) 3.3 \exp\left\{-0.5\left(1.3T_{01}\frac{\omega}{2\pi}-1\right)^2/\sigma_f^2\right\} \quad (\text{D.6})$$

$$A_{fs} = (2\pi)^4 \frac{0.072H_{1/3}^2}{T_{01}^4} \quad (\text{D.7})$$

$$B_{fs} = (2\pi)^4 \frac{0.44}{T_{01}^4} \quad (\text{D.8})$$

$$\text{当 } \omega \leq \frac{2\pi}{1.3T_{01}} \text{ 时, } \sigma_f = 0.07$$

$$\text{当 } \omega > \frac{2\pi}{1.3T_{01}} \text{ 时, } \sigma_f = 0.09 \quad (\text{D.9})$$

式中:

$$T_{01} = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (\text{D.10})$$

$H_{1/3}$ ——三一有义波高, m;

ω ——规则波的圆频率, rad/s;

m_n ——频率谱的 n 阶矩。

对于角度分布函数, 通常使用式 (D.11) 中的余弦-功率型, 在实际使用中, 对于风浪, $s=1$;

对于涌浪, $s=75$ 。

$$G(\alpha) = \frac{2^{2s}}{\pi} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s}(\alpha - \theta_m) - \frac{\pi}{2} \leq \alpha - \theta_m \leq \frac{\pi}{2}$$

(D.11)

式中:

s ——方向扩展系数;

Γ ——伽马函数;

α ——船舶航向与成分波之间的夹角, rad, 0 为迎浪;

θ_m ——主浪向, rad, 0 表示迎浪。

对于风浪和涌浪, R_{AW} 采用不同的浪高、周期、方向进行计算。

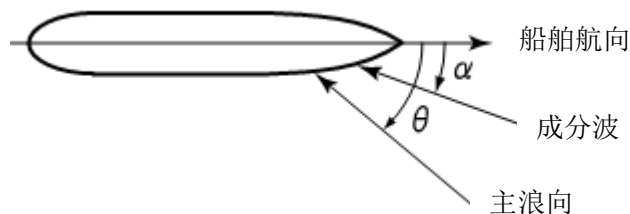


图 D.1 船舶航向和浪向

在计算波浪增阻时，应使用以下任一种方法：

如果在一个测速航次期间，船舶的垂荡和纵摇很小，可以使用第 D.1 节描述的“简化估算方法”。

第 D.2 节中描述的关于频率响应函数的“经验估算方法”也可用于修正。这个经验传递函数包括波浪反射引起的平均增阻和运动引起的阻力。

如果能获得 C_P （垂向菱形系数）和 C_{WP} （水线面面积系数）曲线，可以使用第 D.3 节描述的“基于短波中简化的水池试验的理论方法”。

确定波浪中船舶失速的最可靠的方法，是在不同速度、相同规则波波高但不同波长和方向下开展耐波性试验。如果能获得第 D.4 节描述的耐波性试验传递函数，则可将其用于速度/功率试航修正。

D.1 测速期间船舶发生微小垂荡和纵摇时的简化修正方法（STAWAVE-1）

针对近年来船舶的试航条件，建立了一种在有限的输入数据下估算波浪增阻的专门的“简化估算方法”。

当试航在低海况且限制浪高下进行，迎浪时，波浪的遭遇频率很高。在这种条件下，波浪引起的运动可以忽略不计，而增阻主要由水线上船体对波浪的反射引起。水线几何形状可以根据船宽和水面线上船艏部截面的长度估算（如图 D.2 所示）。

公式（D.12）估算了垂荡和纵摇很小时迎浪的波浪增阻。该方法仅适用于船艏部范围内的波浪（在艏部 $\pm 45^\circ$ 范围内）。浪向在这一范围以外时，将不做波浪修正。

$$R_{AWL} = \frac{1}{16} \rho_S g H_{1/3}^2 B \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad (D.12)$$

式中：

s ——方向扩展系数；

R_{AWL} ——长峰不规则波中的平均增阻，N；

ρ_S ——实船的水密度， kg/m^3 ；

g ——重力加速度, m/s^2 ;

B ——船宽, m ;

$H_{1/3}$ ——三一有义波高, m ;

L_{BWL} ——在水线上船首到 95%最大船宽之间的距离 (如图 D.2 所示), m 。

上式的限制条件为:

(1) 三一有义波高 $H_{1/3}$ 满足: $H_{1/3} \leq 2.25\sqrt{L_{pp}/100}$;

(2) 试航期间, 船舶的垂荡和纵摇很小 (艏部垂向加速度低于 $0.05g$);

(3) 浪向在 $0\sim\pm 45^\circ$ 之间。

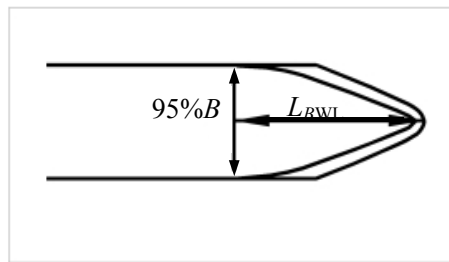


图 D.2 水线上船首到 95%最大船宽之间的距离的定义

D.2 测速期间船舶发生明显垂荡和纵摇时经验修正方法 (STAWAVE-2)

基于频率响应函数的经验修正方法可用于测速期间船舶发生明显垂荡和纵摇时的波浪增阻计算。该方法使用船舶尺度、航速等主要参数估算规则波迎浪下平均增阻的传递函数 R_{wave} (如图 D.3 所示)。

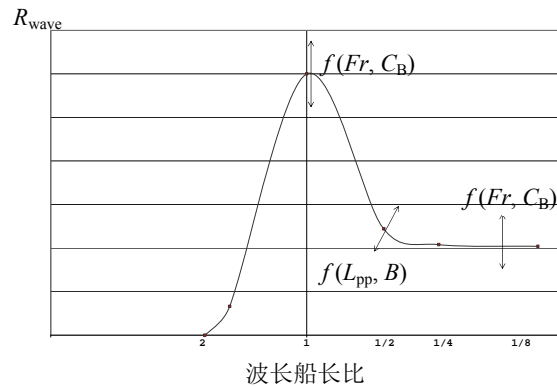


图 D.3 规则波中平均增阻的参数化传递函数

这一经验型的传递函数 R_{wave} 包含了波浪反射引起的平均增阻 R_{AWRL} 和运动引起的阻力 R_{AWML} 两部分,

$$R_{wave} = R_{AWML} + R_{AWRL} \quad (D.13)$$

其成分可按以下公式计算,

$$R_{AWML} = 4\rho_S g \zeta_A^2 \frac{B^2}{L_{PP}} \bar{r}_{aw}(\omega) \quad (D.14)$$

同时,

$$\bar{r}_{aw}(\omega) = \bar{\omega}^{-b_1} \exp\left\{\frac{b_1}{d_1}(1-\bar{\omega}^{-d_1})\right\} a_1 Fr^{1.50} \exp(-3.50Fr) \quad (D.15)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{PP}}{g}} \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17 Fr^{-0.143}} \omega \quad (D.16)$$

$$a_1 = 60.3 C_B^{1.34} \quad (D.17)$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & \text{当 } \bar{\omega} < 1 \text{ 时} \\ -8.50 & \text{其他} \end{cases} \quad (D.18)$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 & \text{当 } \bar{\omega} < 1 \text{ 时} \\ -566 \left(\frac{L_{PP}}{B}\right)^{-2.66} & \text{其他} \end{cases} \quad (D.19)$$

且,

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} \rho_S g \zeta_A^2 B \alpha_1(\omega) \quad (D.20)$$

$$\alpha_1(\omega) = \frac{\pi^2 I_1^2 (1.5kT_M)}{\pi^2 I_1^2 (1.5kT_M) + K_1^2 (1.5kT_M)} f_1 \quad (D.21)$$

$$f_1 = 0.692 \left(\frac{V_S}{\sqrt{T_M g}} \right)^{0.769} + 1.81 C_B^{6.95}$$

(D.22)

式中:

ρ_S ——实船试航时的水密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

ζ_A ——波幅, m ;

L_{PP} ——船舶垂线间长, m ;

B ——船宽, m ;

T_M ——船舳吃水, m;

C_B ——方形系数;

Fr ——傅汝德数;

V_S ——船舶对水速度, m/s;

k_{yy} ——无量纲横向回转半径;

I_1 ——第一类修正的一阶贝塞尔函数;

K_1 ——第二类修正的一阶贝塞尔函数;

k ——波数, rad/m。

以上公式的限制条件如下:

(1) $L_{PP} > 75\text{m}$;

(2) $4.0 < \frac{L_{PP}}{B} < 9.0$;

(3) $2.2 < \frac{B}{T_M} < 9.0$;

(4) $0.10 < Fr < 0.30$;

(5) $0.50 < C_B < 0.90$;

(6) 浪向在 $0 \sim \pm 45^\circ$ 之间。

该方法适用于长峰不规则波中的平均增阻 R_{AWL} (见公式 (D.23))。仅适用于船艏至与船艏夹角在 $\pm 45^\circ$ 范围的波浪。浪向在这一范围以外时, 将不做波浪修正。

$$R_{AWL} = 2 \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega; V_S)}{\zeta_A^2} S_\eta(\omega) d\omega \quad (\text{D.23})$$

式中:

R_{AWL} ——长峰不规则波中的平均增阻, N, 可代替 R_{AW} ;

R_{wave} ——规则波中的平均增阻, N;

ζ_A ——波幅, m;

ω ——规则波的圆频率, rad/s;

V_S ——船舶对水速度, m/s;

S_η ——频率谱, m^2s , 对于风浪为修正的 Pierson-Moskowitz 谱, 如公式 (D.3)。

D.3 基于短波中简化的水池试验的理论方法

本方法适用于船长超过 190m 的集装箱船、散货船、油船或滚装货船 (车辆运输船)。

本方法仅适用于浪向在 $0\sim\pm 45^\circ$ 之间的波浪。浪向在这一范围以外时，将不做波浪修正。

应用理论方法，规则波中的平均增阻 R_{wave} 根据基于 Maruo 理论得到的各成分波的平均增阻 R_{AWM} 计算，其修正项主要是短波增阻 R_{AWR} 。

$$R_{wave} = R_{AWM} + R_{AWR} \quad (D.24)$$

式中：

R_{AWM} ——基于 Maruo 理论得到的规则波中的平均增阻，根据辐射和绕射成分计算，N；

R_{AWR} ——对 R_{AWM} 的修正项，N。

由于在不规则波中的平均增阻中，短波中的平均增阻是主要因素，因此应该精确计算 R_{AWR} 。

R_{AWM} 的表达式如下：

$$R_{AWM} = 4\pi\rho_S \left(-\int_{-\infty}^{m_c} + \int_{m_d}^{\infty} \right) |H_1(m)|^2 \frac{(m+k_0\tau)^2 (m+k\cos\alpha)}{\sqrt{(m+k_0\tau)^4 - m^2 k_0^2}} dm \quad \text{当 } \tau \geq \frac{1}{4} \text{ 时} \quad (D.25)$$

$$R_{AWM} = 4\pi\rho_S \left(-\int_{-\infty}^{m_c} + \int_{m_d}^{m_b} + \int_{m_a}^{\infty} \right) |H_1(m)|^2 \frac{(m+k_0\tau)^2 (m+k\cos\alpha)}{\sqrt{(m+k_0\tau)^4 - m^2 k_0^2}} dm \quad \text{当 } \tau < \frac{1}{4} \text{ 时} \quad (D.26)$$

其中：

$$\tau = \frac{\omega_E V_S}{g} \quad (D.27)$$

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (D.28)$$

$$k_0 = \frac{g}{V_S^2} \quad (D.29)$$

$$\omega_E = \omega + kV_S \cos\alpha \quad (D.30)$$

$$m_a = \frac{k_0(1-2\tau + \sqrt{1-4\tau})}{2} \quad (D.31)$$

$$m_b = \frac{k_0(1-2\tau - \sqrt{1-4\tau})}{2} \quad (D.32)$$

$$m_c = -\frac{k_0(1+2\tau + \sqrt{1+4\tau})}{2} \quad (D.33)$$

$$m_d = -\frac{k_0(1+2\tau - \sqrt{1+4\tau})}{2} \quad (D.34)$$

$$H_1(m) = \int_L \sigma(x) e^{imx} dx \quad (D.35)$$

式中:

ρ_S ——实船的水密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

V_S ——船舶对水速度, m/s ;

ω ——规则波的圆频率, rad/s ;

ω_E ——遭遇圆频率, rad/s ;

α ——入射波的遭遇角, rad , 0 为迎浪;

$H_{1(m)}$ ——由奇点分布 $\sigma(x)$ 确定的、代表船舶周期性干扰的函数, m^3/s , 在实际处理中, 奇点分布 $\sigma(x)$ 根据细长体理论计算, 如下式所示, 其中奇点集中于 $C_{Pv}TM$ 的深度, 并计算 R_{AWM} 的半无穷积分 (注意收敛)。

$$\sigma(x) = -\frac{1}{4\pi} \left(i\omega_E - V_S \frac{\partial}{\partial x} \right) \{ Z_\Gamma(x) B(x) \} \quad (D.36)$$

式中:

$B(x)$ ——剖面宽度, m ;

C_{Pv} ——垂向菱形系数;

T_M ——船舳吃水, m ;

x ——纵向坐标, m ;

ω_E ——遭遇圆频率, rad/s ;

V_S ——船舶对水速度, m/s ;

Z_Γ ——一定常运动下相对于波浪的垂直位移, m 。

R_{AWR} 的表达式是由 Tsujimoto 等给出的。根据计算精度, 在计算方法中引入了短波中的一个实验系数并且考虑了水上部分船艏部形状的影响。

$$R_{AWRR} = \frac{1}{2} \rho_S g \zeta_A^2 B B_f \alpha_T (1 + C_U Fr)$$

(D.37)

式中:

ρ_S ——实船试航时的水密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

ζ_A ——波幅, m ;

B ——船宽, m ;

B_f ——由公式 (D.41) 计算得到的钝型系数;

C_U ——进速系数;

Fr ——傅汝德数;

α_T ——吃水和遭遇频率的影响, 按公式 (D.38) 计算。

$$\alpha_T = \frac{\pi^2 I_1^2 (k_e T_{deep})}{\pi^2 I_1^2 (k_e T_{deep}) + K_1^2 (k_e T_{deep})} \quad (\text{D.38})$$

$$k_e = k (1 + \Omega \cos \alpha)^2 \quad (\text{D.39})$$

$$\Omega = \frac{\omega V_S}{g} \quad (\text{D.40})$$

$$B_f = \frac{1}{B} \left\{ \int_I \sin^2(\alpha + \beta_w) \sin \beta_w dl + \int_{II} \sin^2(\alpha - \beta_w) \sin \beta_w dl \right\} \quad (\text{D.41})$$

式中:

I_1 ——第一类修正的一阶贝塞尔函数;

K_1 ——第二类修正的一阶贝塞尔函数;

k ——波数, rad/m ;

T_{deep} ——吃水, 对于纵倾状态, T_{deep} 就是最深吃水;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

V_S ——船舶对水速度, m/s ;

ω ——规则波的圆频率, rad/s ;

α ——入射波的遭遇角, rad , 0 为迎浪;

β_w ——沿水线的线素 dl 的斜率, rad 。

在图 D.4 中给出了积分 (I 和 II) 的域。当 B_f 小于 0 时, 假设 $R_{wave} = 0$ 。

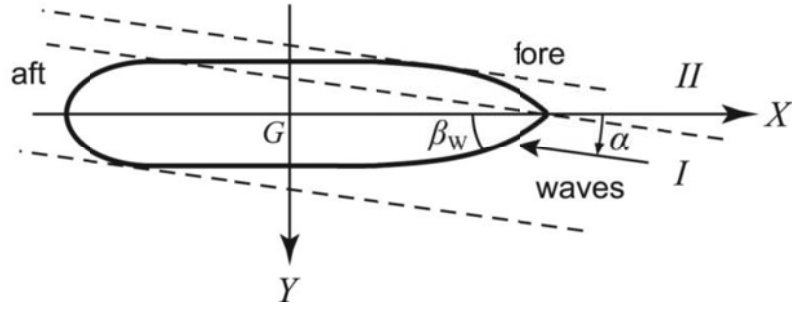


图 D.4 波浪反射的坐标系

斜浪中的进速系数 $C_{U(\alpha)}$ 可以根据图 D.5 所示的经验关系曲线计算, 这一曲线是由各种不同的船型按照第 D.4 节的程序进行水池试验得到的。当通过水池试验得到 $C_{U(\alpha=0)}$ 后, 斜浪中的关系可以通过平移经验关系曲线 (如公式 (D.42) 和 (D.43) 所示) 得到。对于瘦型船和肥型船如图 D.6 所示。

$$C_U = -310B_f + 68 \quad \text{当 } B_f < \frac{58}{310} \text{ 时} \quad (\text{D.42})$$

$$C_U = 10 \quad \text{当 } B_f \geq \frac{58}{310} \text{ 时} \quad (\text{D.43})$$

图 D.5 所示的经验关系曲线按以下方式获得。 C_U 根据水池试验结果和 R_{AWR} 得到, 见公式 (D.44)。

$$C_U = \frac{1}{Fr} \left\{ \frac{R_{wave}^{EXP}(Fr) - R_{AWM}(Fr)}{\frac{1}{2} \rho_S g \zeta_A^2 B B_f \alpha_T} - 1 \right\} \quad (\text{D.44})$$

式中:

I_1 ——第一类修正的一阶贝塞尔函数;

R_{wave}^{EXP} ——水池试验测得的规则波中的平均增阻, N;

Fr ——傅汝德数;

R_{AWM} ——基于 Maruo 理论得到的规则波中的平均增阻, 根据辐射和绕射成分计算, N;

ρ_S ——实船的水密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²;

ζ_A ——波幅, m;

B ——船宽, m;

B_f ——由公式 (D.41) 计算得到的钝型系数;

α_T ——吃水和遭遇频率的影响, 按公式 (D.38) 计算。

用于确定上述参数 $C_U(\alpha=0)$ 的简化的水池试验应该在短波下进行, 因为 R_{AWR} 主要受短波影响。

应该在试航吃水和纵倾下及合同吃水（如需要）下进行特定船舶几何外形的水池试验。在短波中波频的数量为 1。短波的波长应该不大于 $0.5L_{PP}$ 。波高对应于 BF 6 级海况，即入射波高为 3m。尽管如此，当有合理的理由如甲板浸湿时，需要有合理的限制条件，可将波高的上限或下限设置为波高船长比 ($2\zeta_A/L_{PP}$) 为 1/100。在任何情况下，波陡（即波高波长比）应不大于 1/20，以避免非线性波。入射波测量应该在定常状态下测量不少于 10 个。试验组织与程序应该遵照 ITTC 7.5-02 07-02.2。

进速系数 C_U 使用最小二乘法确定，如图 D.7 所示。

水池试验必须至少在三个不同的傅汝德数 (F_r) 下进行。 F_r 的选择必须要使实船试航的航速落在选择的最小和最大的 F_r 之间。

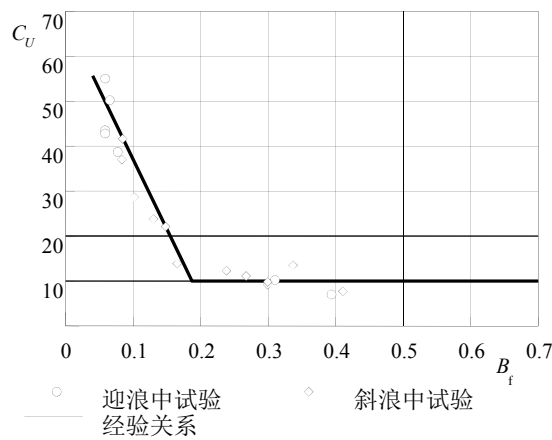


图 D.5 水上常规船型由波浪反射引起的增阻进速系数与钝型系数之间的关系

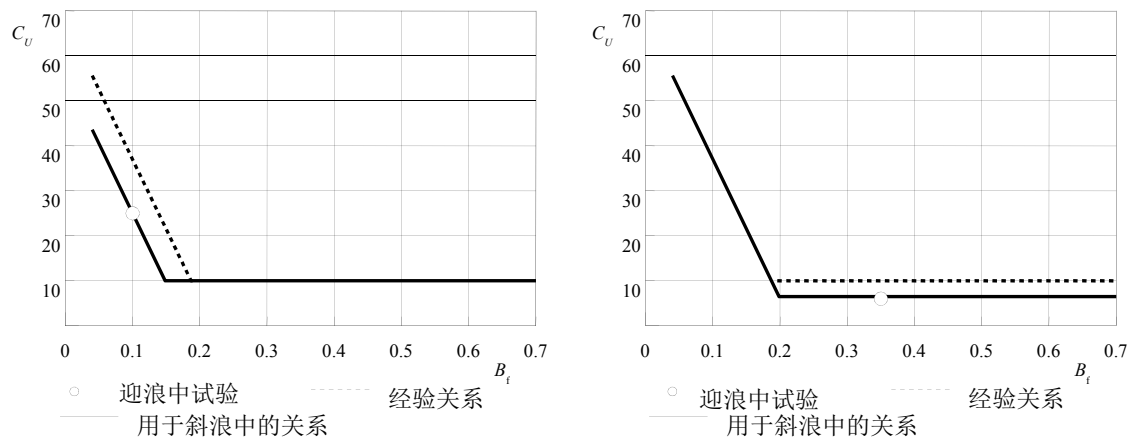


图 D.6 斜浪中经验关系的移动（对瘦型船 $B_f < 58/310$ ，左移；对肥型船 $B_f \geq 58/310$ ，右移）

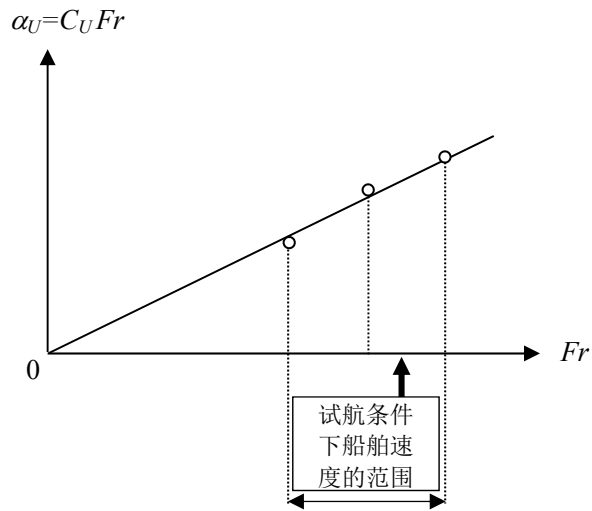


图 D.7 进速影响 ($\alpha_U=C_U Fr$) 和傅汝德数 Fr 之间的关系

D.4 耐波性模型试验

波浪增阻 (R_{wave}) 的传递函数能通过规则波中的水池试验获得。应在试航吃水和纵倾下及合同吃水 (如需要) 下进行特定船型的水池试验。至少在不同航速 (V_S) 下进行水池试验, 且覆盖速度/功率试验测试的速度范围。

如果试航不在迎浪或随浪下进行, 水池试验应至少包括迎浪、横浪和随浪状态。波浪入射角在迎浪到横浪之间 ($0^\circ\sim 90^\circ$) 的最大间隔应该是 30° , 从横浪到随浪 ($90^\circ\sim 180^\circ$) 之间可以取较大间隔。

这些试验应该在一组规则波的圆频率 (ω)、船舶航向与入射规则波之间的夹角 (α) 和船舶对水速度 (V_S) 下开展, 波长至少 5 个且在 $0.5L_{PP}\sim 2.0L_{PP}$ 之间。试验组织与程序应该遵照 ITTC 7.5-02 07-02.2。

附录 6-E 流的影响

E.1 一般规定

考虑到流的特性，应该根据每航次测得的船舶速度估算流速。

可使用以下两种方法计算流的影响：

- (1) “迭代”法，假定流速以半日为周期变化。
- (2) “平均再平均”法，假定流速在给定主机功率下呈抛物线变化。

E.2 “迭代”法

在“迭代”法中，假定流速以半日为周期变化。流速可表达为如下的时间函数：

$$V_C = V_{C,C} \cos\left(\frac{2\pi}{T_C}t\right) + V_{C,S} \sin\left(\frac{2\pi}{T_C}t\right) + V_{C,T}t + V_{C,0} \quad (\text{E.1})$$

式中：

V_C ——流速，kn；

T_C ——流速变化周期；

t ——每航次的时间；

$V_{C,C}$ 、 $V_{C,S}$ 、 $V_{C,T}$ 和 $V_{C,0}$ 为未知因子。

最主要的周期是太阴半日周期，即 0.51753 天（12 小时 25 分 12 秒）。

船舶对水速度根据回归曲线（见式（E.2））获得，该曲线表示船舶对水速度和根据第 12.2.3 节修正后的功率之间的关系。

第一步：船舶对水速度的第一近似值

$$P(V_S) = a + bV_S^q \quad (\text{E.2})$$

因此：

$$V_S = \sqrt[q]{\frac{P(V_S) - a}{b}} \quad (\text{E.3})$$

式中：

$P(V_S)$ ——回归曲线；

V_S ——船舶对水速度，knots；

a 、 b 、 q 为未知因子。

V_S 的初始值应该是一组往返航行测得航速的平均 V'_G 。作为代表航速和功率关系的回归曲线的

第一近似值，按照式 (E.2) 根据最小二乘法对 V_S 的初始值和平均修正功率 P'_{id} 进行拟合，确定式 (E.2) 的未知因子 a 、 b 和 q ，得到平均曲线。

平均曲线上每一航次修正后功率对应的航速，根据公式 (E.3) 使用上述获得的系数计算，作为修正后的船舶对水速度 V_S 。

第二步：计算流速

每一航次的流速 V'_C 使用测得的对地航速 V_G 减去修正后的船舶对水速度 V_S 计算，即：

$$V'_C = V_G - V_S \quad (\text{E.4})$$

按照式 (E.4) 使用最小二乘法对时间和流速进行拟合，确定式 (E.1) 的未知因子 $V_{C,C}$ 、 $V_{C,S}$ 、 $V_{C,T}$ 和 $V_{C,0}$ ，得到流速曲线。

第三步：计算船舶对水速度

修正流后的船舶速度 V'_S 使用测得的对地航速 V_G 减去修正后的流速 V'_C 计算，即：

$$V'_S = V_G - V'_C \quad (\text{E.5})$$

按照式 (E.2) 使用最小二乘法对由式 (E.5) 获得的船舶速度与修正后的功率进行拟合，确定式 (E.2) 中新的未知，得到修正后的回归曲线（表示船舶航速与功率之间的关系）。

通过式 (E.3) 重新计算每航次在修正后的功率下对应的船舶对水速度，作为新的船舶对水速度，重复第二步和第三步直至 $\sum (P(V'_S)_i - P_{id})^2$ 最小。

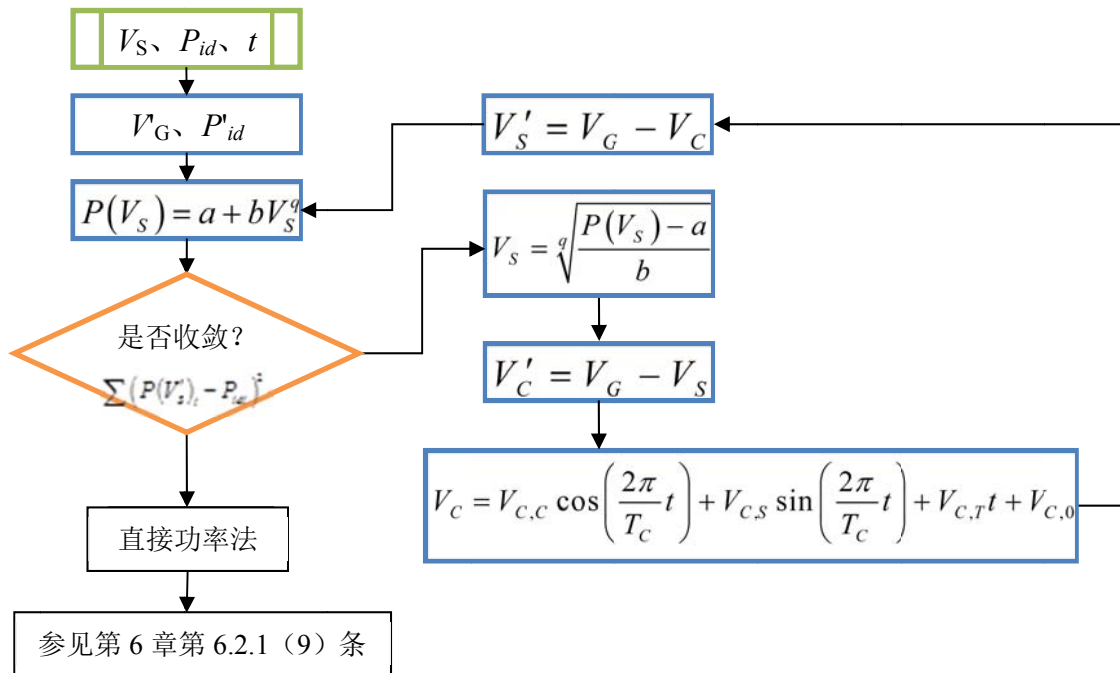


图 E.1 “Iterative” 法的流程图

E.3 “平均再平均”法

如果进行了两组往返航行，即 4 个航次，则可以使用“平均再平均”法。

本方法假定流速随时间呈抛物线变化，使用以下公式计算流的影响：

$$V_S = \frac{V_{G1} + 3V_{G2} + 3V_{G3} + V_{G4}}{8} \quad (\text{E.6})$$

式中：

V_S ——船舶对水速度，knots；

V_{G1} ——四个航次中第一个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G2} ——四个航次中第二个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G3} ——四个航次中第三个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G4} ——四个航次中第四个航次测得的船舶对地速度，knots。

如果流速呈抛物线变化，流速可以用时间的二次函数来定义，即：

$$V_C = V_{C,2}t^2 - V_{C,1}t + V_{C,0} \quad (\text{E.7})$$

式中：

$V_{C,0}$ 、 $V_{C,1}$ 和 $V_{C,2}$ 为未知因子。

如果进行了两组往返航行，即 4 个航次，可根据式 (E.7) 得到以下关系式：

$$V_{G1} = V_S + \{V_{C,2}(t + 3\Delta t)^2 - V_{C,1}(t + 3\Delta t) + V_{C,0}\} \quad (\text{E.8})$$

$$V_{G2} = V_S - \{V_{C,2}(t + \Delta t)^2 - V_{C,1}(t + \Delta t) + V_{C,0}\}$$

(E.9)

$$V_{G3} = V_S + \{V_{C,2}(t - \Delta t)^2 - V_{C,1}(t - \Delta t) + V_{C,0}\} \quad (\text{E.10})$$

$$V_{G4} = V_S - \{V_{C,2}(t - 3\Delta t)^2 - V_{C,1}(t - 3\Delta t) + V_{C,0}\} \quad (\text{E.11})$$

式中：

V_S ——船舶对水速度，knots；

V_{G1} ——四个航次中第一个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G2} ——四个航次中第二个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G3} ——四个航次中第三个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G4} ——四个航次中第四个航次测得的船舶对地速度，knots；

t ——一个主机功率下第一个测速航次的开始时间；

Δt ——两个连续航次之间耗时的一半。

流的影响通过用公式 (E.8) 至公式 (E.11) 替代公式 (E.6) 来计算。

船舶对水速度是两组往返航行的“平均再平均”。

每一单独测速航次的流速应该通过与同一主机工况下“平均再平均”的结果进行比较来校核。

螺旋桨轴转速和功率应该是同一主机功率下所有往返航次的平均。

如果使用了 4.7.2 节中描述的简化的测速试验程序，即每一主机工况下仅进行了 1 组往返航行时，则使用以下公式计算流的影响：

$$V_S = \frac{V_{G1} + V_{G2}}{2} \quad (\text{E.12})$$

式中：

V_S ——船舶对水速度，knots；

V_{G1} ——两个航次中第一个航次测得的船舶对地速度，knots；

V_{G2} ——两个航次中第二个航次测得的船舶对地速度，knots。

而每航次的流速可用下式计算：

$$V_C = V_G - V_S \quad (\text{E.13})$$

式中：

V_C ——流速，knots；

V_S ——船舶对水速度，knots。

附录 6-F 水温和水密度的影响

水温和水密度都影响水的粘度，从而影响航行阻力。

一般采用海水温度 15℃、密度 1026 kg/m³ 进行试航的预报计算。对于 EEDI 修正，应该使用这些基准数值。

水温和水密度的影响可通过下式计算：

$$R_{AS} = R_{T0} \left(\frac{\rho_S}{\rho_{S0}} - 1 \right) - R_F \left(\frac{C_{F0}}{C_F} - 1 \right) \quad (\text{F.1})$$

且：

$$R_F = \frac{1}{2} \rho_S S V_S^2 C_F \quad (\text{F.2})$$

$$R_{F0} = \frac{1}{2} \rho_{S0} S V_S^2 C_{F0} \quad (\text{F.3})$$

$$R_{T0} = \frac{1}{2} \rho_{S0} S V_S^2 C_{T0} \quad (\text{F.4})$$

式中：

R_{AS} ——水温和水密度偏差引起的阻力增加，N；

C_F ——实际水温和水密度下的摩擦阻力系数， $C_F = \frac{0.075}{\left(\log \left(\frac{V_S L_{PP}}{v_a} \right) - 2 \right)^2}$ ；

C_{F0} ——参考水温和水密度下的摩擦阻力系数，取自水池试验报告；

C_{T0} ——参考水温和水密度下的总阻力系数，取自水池试验报告；

R_F ——实际水温和水密度下的摩擦阻力，N；

R_{F0} ——参考水温和水密度下的摩擦阻力，N；

R_{T0} ——参考水温和水密度下的总阻力，N；

S ——湿表面积，m²； V_S 为船舶对水速度，m/s；

ρ_S ——实际水温和盐度下的水密度，kg/m³；

ρ_{S0} ——参考水温和盐度下的水密度，kg/m³；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

L_{PP} ——船舶垂线间长，m；

ν_a ——粘性系数, m^2/s , 可根据水温查表获得。

附录 6-G 船舶状态的影响

G.1 排水量和纵倾

一般情况下, 排水量和纵倾要求在试航时调整到规定值, 但可能因具体的原因而存在差异。

试航时的实际排水量与规定值之间的相差不应超过 2%。

如果试航的排水量与要求的排水量之间的差别在 2% 以内, 应使用以下公式对每航次的功率进行修正:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\nabla_2}{\nabla_1} \right)^{2/3} \quad (G.1)$$

式中:

P_1 ——对应于试航时排水体积 ∇_1 的功率, kW;

P_2 ——对应于水池试验时排水体积 ∇_2 的功率, kW;

∇_1 ——试航时的排水体积, m^3 ;

∇_2 ——水池试验时的排水体积, m^3 。

试航时纵倾应保持在很小的范围内, 一般不作修正。然而, 也可参考固定排水量而改变纵倾所做的模型试验, 如果该试验结果对所考虑情况的船体是可用的。

G.2 船体和螺旋桨表面粗糙度

如果试航是在船体最终油漆和螺旋桨磨光之后一个合理的时期内进行, 则表面粗糙度的改变应是最小的, 其对船舶快速性的影响可忽略不计。

如试航是在出坞后间隔较长时间以后进行的, 表面粗糙度的影响则不能忽略, 但为修正该影响而采用的一些方法, 因无法证明其科学性, 故所得出的修正结果无法被接受。

附录 6-H 水深的影响

浅水引起的速度损失 $\Delta V_S / V_S$ 应按参数 $\sqrt{A_M} / h$ 和 $V_S^2 / (gh)$ 由 Lackenby 给出的公式 (H.1)

确定:

$$\frac{\Delta V_S}{V_S} = 0.1242 \left(\frac{A_M}{h^2} - 0.05 \right) + 1 - \left(\tanh \frac{gh}{V_S^2} \right)^{1/2} \frac{A_M}{h^2} \geq 0.05 \quad (\text{H.1})$$

式中:

A_M ——船中剖面的水下面积, m^2 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

h ——水深, m ;

V_S ——船舶对水速度, m/s ;

ΔV_S ——浅水引起的速度损失, m/s 。

用于修正的水深值 h 应不小于以下两个公式计算得到的水深值 (取大者):

$$h = 2\sqrt{B \cdot T_M} \quad \text{和} \quad h = 2 \frac{V_S^2}{g} \quad (\text{H.2})$$

附录 6-I 由试航条件换算至 EEDI 工况或合同规定工况（如有）

对于那些不在 EEDI 工况或合同规定工况下试航的船舶，试航结果需要使用水池试验结果换算至 EEDI 工况或合同规定工况（如有）。

其它规定条件下的速度/功率曲线使用模型试验预报的速度-功率曲线根据试航条件下的速度/功率试验结果得到。水池试验应该在两种吃水下进行：与速度/功率试验期间真实条件相对应的试航状态和其它的规定状态。

采用由速度/功率试验在试航状态下获得的速度/功率曲线，使用公式 (I.1) 定义的功率比 α_p ，将试航条件下的航速换算到其他规定的条件下。

修正到满载条件下的功率 ($P_{Full,S}$) 通过公式 (I.2) 计算。

$$\alpha_p = \frac{P_{Trial,P}}{P_{Trial,S}} \quad (I.1)$$

$$P_{Full,S} = \frac{P_{Full,P}}{\alpha_p} \quad (I.2)$$

式中：

$P_{Trial,P}$ ——水池试验预报的试航条件下的功率，kW；

$P_{Trial,S}$ ——测速试验获得的试航条件下的功率，kW；

$P_{Full,P}$ ——水池试验预报的满载或规定条件下的功率，kW；

$P_{Full,S}$ ——测速试验获得的满载或规定条件下的功率，kW；

α_p ——功率比。

图 I.1 给出了获得在 75%MCR 下满载或规定条件下航速 $V_{Full,S}$ 的换算案例。

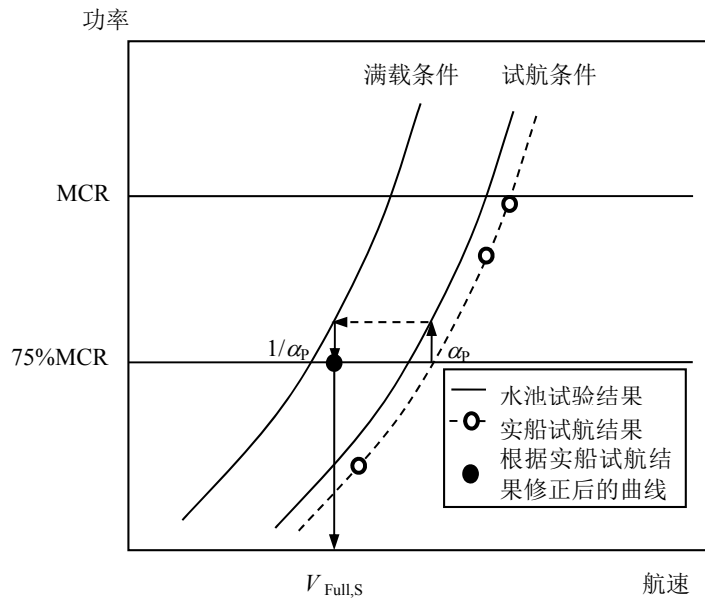


图 I.1 由试航条件换算到 75%MCR 下其他规定装载条件的示例

附录 6-J 负荷变化系数的推导过程

J.1 船体和螺旋桨表面粗糙度

变负荷试验由至少四个自航试验航次组成，每一航次在保持船模速度不变的情况下在不同螺旋桨轴转速下进行。螺旋桨轴转速按以下方式选择：

$$\frac{\Delta R}{R_{id}} \approx [-0.1 \quad 0 \quad 0.1 \quad 0.2] \quad (\text{J.1})$$

其中：

$$\Delta R = (F_D - F_X) \lambda^3 \frac{\rho_S}{\rho_M} \quad (\text{J.2})$$

式中：

ΔR ——阻力增加，N；

R_{id} ——阻力试验获得的真实速度下的实尺度阻力，N；

F_X ——变负荷试验期间测得的外部拖力，N；

F_D ——常规自航试验中表面摩擦修正力，N；

λ ——尺度因子； ρ_S 为实尺度的水密度， kg/m^3 ；

ρ_M ——模型试验中的水密度， kg/m^3 。

变负荷试验中的增阻需要在后处理中计算。例如，如果在拖力 F_D 下根据 ITTC 7.5-02-03-01.4 (1978 ITTC 性能预报方法) 进行了标准自航试验和处理，测得的数据根据上述规程进行了处理，即用 C_{TSadd} 代替 C_{TS} ：

$$C_{TSadd} = C_{TS} + \frac{\Delta R}{1/2 \rho_S V_S^2 S_S} \quad (\text{J.3})$$

式中：

ρ_S ——实尺度的水密度， kg/m^3 ；

ΔR ——阻力增加，N；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

S_S ——实船湿表面积，与常规自航试验中使用的数值相同。

这样，增阻可以用螺旋桨载荷 K_T/J^2 反映，作为 J_{TS} 、 n_S 、 P_{DS} 、 η_{DS} 和 η_D 的结果。

J.2 推进效率与阻力增加的相关性

理想条件下的推进效率系数 η_{Did} 由标准拖曳水池试验按航速 V_S 插值得到。

将变负荷试验得到的推进效率 η_{Dms} 与常规自航试验得到的 η_{Did} 之间的比值，按增阻分数 $\Delta R/R_{id}$ （以理想条件的 R_{id} 为分母）绘图。在验证过程中应该处理 η_{Did} 和每一个 η_{Dms} 。变量 ζ_P 是使用最小二乘法对数据点进行拟合得到的线性曲线的斜率，在 0~1 之间。

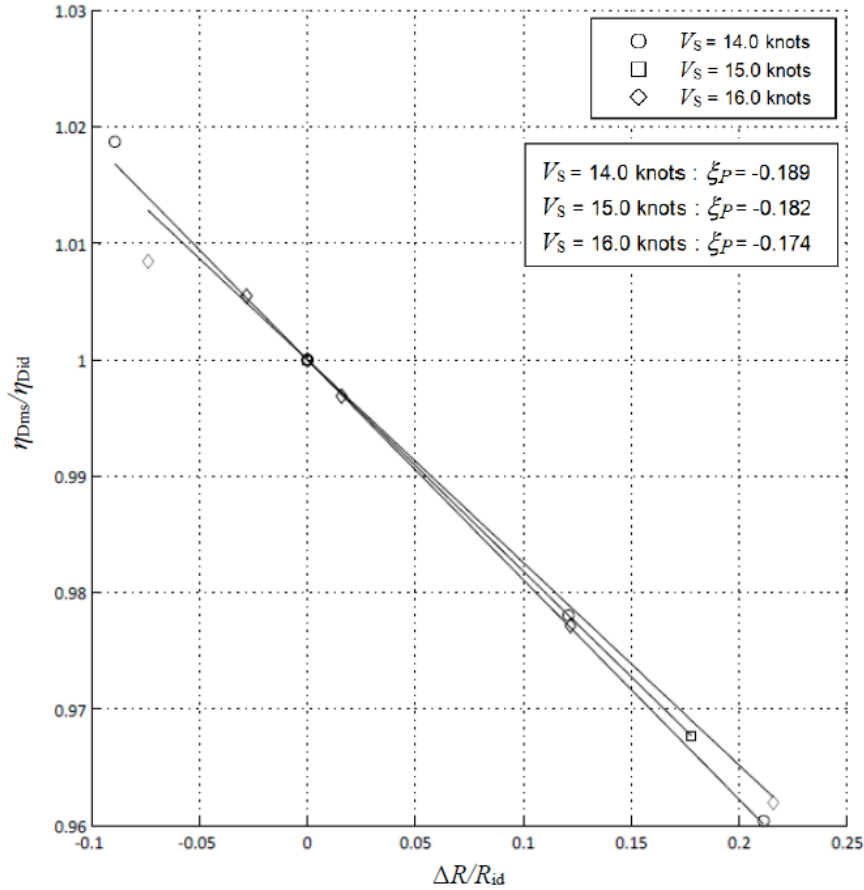


图 J.1 使用最小二乘法拟合 η_{Dms}/η_{Did} 与 $\Delta R/R_{id}$ 曲线的示例

假定推进效率随增阻线性变化，即：

$$\frac{\eta_{Dms}}{\eta_{Did}} = \zeta_P \frac{\Delta R}{R_{id}} + 1 \quad (J.4)$$

式中：

η_{Dms} ——试航条件下的推进效率系数；

η_{Did} ——理想条件下的推进效率系数；

ζ_P ——由变负荷试验得到；

ΔR ——阻力增加，N；

R_{id} ——理想条件下的阻力，N。

修正后的收到功率如下式：

$$P_{Did} = P_{Dms} - \frac{\Delta R \cdot V_S}{\eta_{Did}} \cdot \left(1 - \frac{P_{Dms}}{P_{Did}} \cdot \xi_P \right) \quad (J.5)$$

$$P_{Did} = \frac{1}{2} \left(P_{Dms} - \frac{\Delta R \cdot V_S}{\eta_{Did}} + \sqrt{\left(P_{Dms} - \frac{\Delta R \cdot V_S}{\eta_{Did}} \right)^2 + 4P_{Dms} \frac{\Delta R \cdot V_S}{\eta_{Did}} \cdot \xi_P} \right) \quad (J.6)$$

式中：

P_{Did} ——理想条件下的收到功率，kW；

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，kW；

ΔR ——阻力增加，N；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

η_{Did} ——理想条件下的推进效率系数；

ξ_P ——由变负荷试验得到。

J.3 螺旋桨轴转速与功率增加的相关性

相似的，将对螺旋桨轴转速的影响 $\Delta n/n_{id}$ 按 $\Delta P_D/P_{Did}$ （以理想条件的 n 和 P_{Did} 为分母）绘图。

变量 ξ_n 是使用最小二乘法对数据点进行拟合得到的线性曲线的斜率，在 0~1 之间。

当 P 如上已知时，对螺旋桨轴转速的修正如下：

$$\frac{\Delta n}{n_{id}} = \xi_n \frac{P_{Dms} - P_{Did}}{P_{Did}} + \xi_V \frac{\Delta V}{V_S} \quad (J.7)$$

即：

$$n_{id} = \frac{n_{ms}}{\xi_n \cdot \frac{P_{Dms} - P_{Did}}{P_{Did}} + \xi_V \cdot \frac{\Delta V}{V_S} + 1} \quad (J.8)$$

$$\Delta n = n_{ms} - n_{id} \quad (J.9)$$

式中：

n_{ms} ——测得的螺旋桨轴转速，r/s；

n_{id} ——修正后的螺旋桨轴转速，r/s；

P_{Did} ——理想条件下的收到功率，kW；

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，kW；

ξ_n 和 ξ_V ——由变负荷试验得到；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

ΔV ——由于浅水效应对航速的修正量，根据附录 G 确定，m/s。

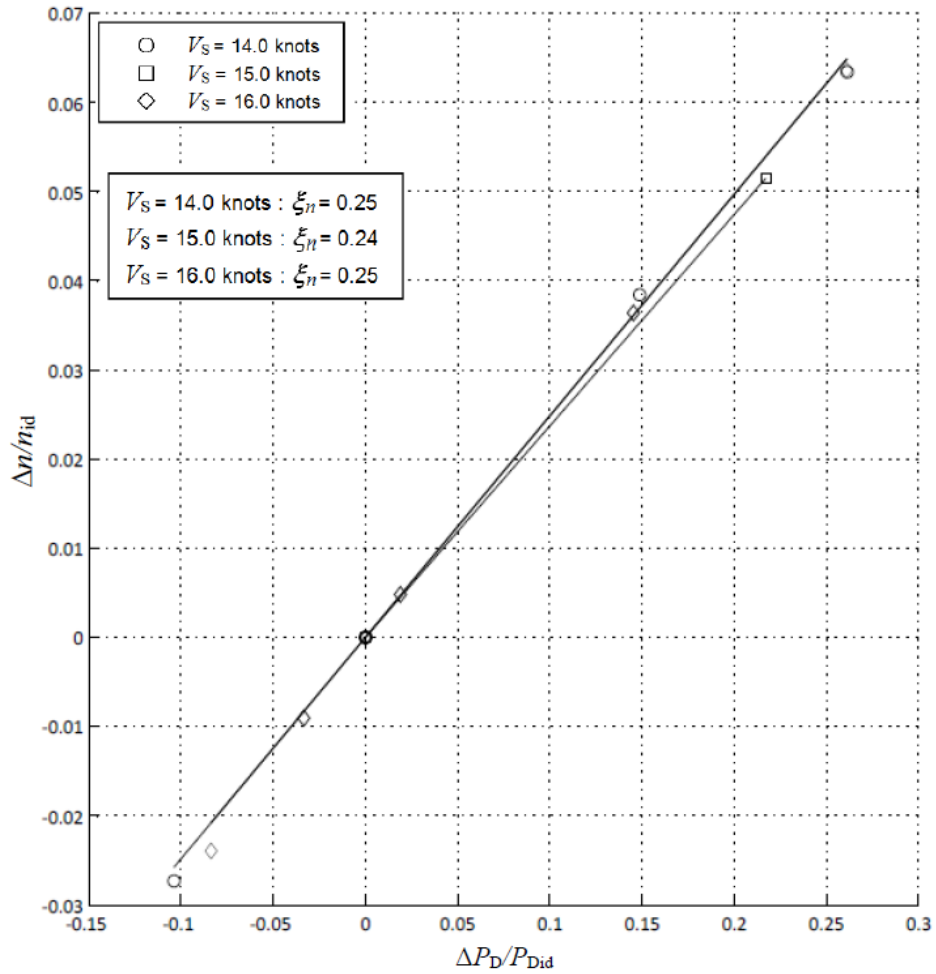


图 J.2 使用最小二乘法拟合 $\Delta n/n_{id}$ 与 $\Delta P_D/P_{D_{id}}$ 曲线的示例

J.4 螺旋桨转速与航速变化的相关性

将变负荷试验的螺旋桨转速 n 按阻力 $R_{id} + \Delta R$ 绘图。假定其他速度下的相应曲线与该曲线平行且通过静水自航试验的数据点 $\{R_{id}, n\}$ 。恒定的阻力与这些线的交叉点给出了转速与航速的相关性。使用最小二乘法拟合得到的 $\Delta n/n - \Delta V/V$ 曲线的斜率，即为 ξ_v 。

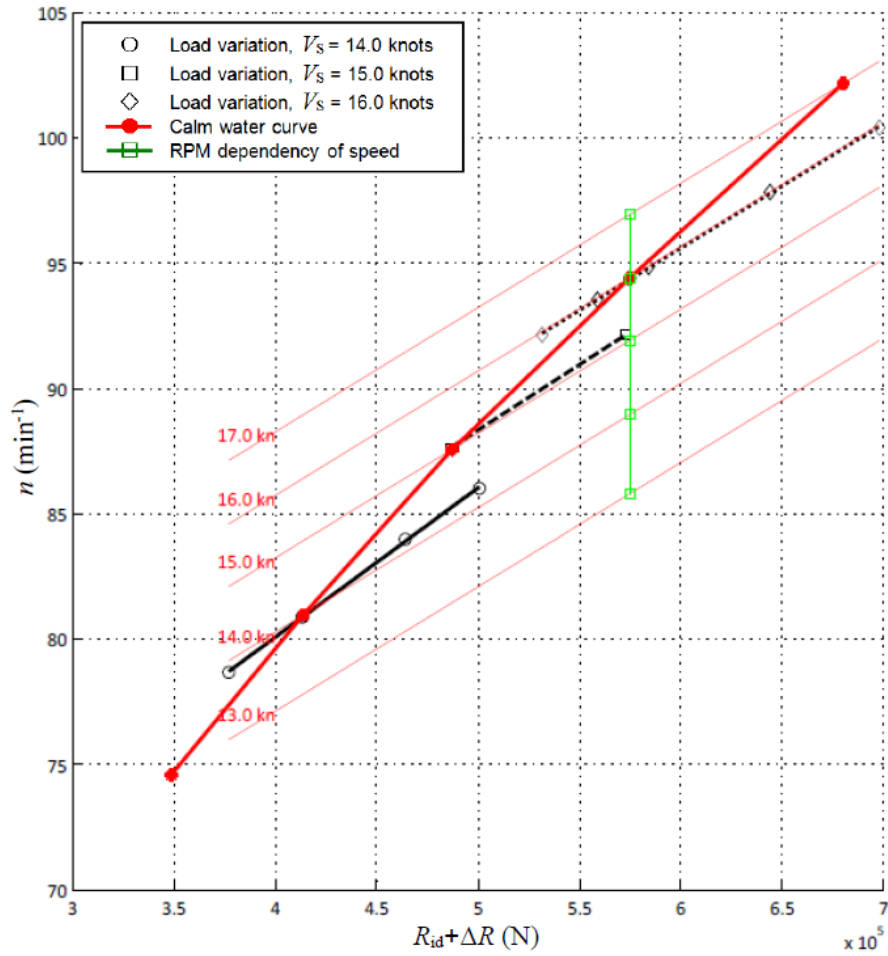


图 J.3 关于负荷变化和航速对螺旋桨转速的影响的示例

如果没有进行变负荷试验，允许假定考虑变负荷效应的自航因子等于理想条件下的自航因子。这是因为与负荷变化效应引起的螺旋桨效率的偏差相比，变负荷效应引起的自航因子的偏差很小，可忽略不计。 η_0 的变化可以根据 ITTC 7.5-02-03-01.4 (2011 版) 获得。

附录 6-K 直接功率法的分析过程

K.1 推进效率修正

推进效率系数 η_D 通常使用螺旋桨效率 η_O 和自航系数 η_R 、 t 和 w_S 计算。

$$\eta_D = \eta_O \eta_R \frac{1-t}{1-w_S} \quad (\text{K. 1})$$

式中：

η_D ——推进效率系数；

η_O ——螺旋桨敞水效率；

η_R ——相对旋转效率；

t ——推力减额分数；

w_S ——实尺度伴流分数，可根据 ITTC 规程 7.5-02-03-01.4 1978 ITTC 性能预报方法计算。

实尺度伴流分数 w_S 可根据模型伴流分数 w_M ，计及伴流分数的尺度修正因子 e_i 获得，即：

$$1 - w_S = (1 - w_M) e_i \quad (\text{K. 2})$$

式中：

w_S ——实尺度伴流分数；

w_M ——模型伴流分数；

e_i ——伴流分数的尺度修正因子。

自航系数 η_R 、 t 和 w_S 由模型自航试验结果得到。

试航条件下的每一个自航系数 η_{Rms} 、 t_{ms} 和 w_{Sms} ，通过试航和理想条件下每一系数的偏差 $\Delta\eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M 分别与理想条件下每一系数相加得到。偏差 $\Delta\eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M 由 $\Delta R/R_{id}$ 的函数得到，根据考虑变负荷效应的自航试验，使用阻力增加 ΔR 和理想条件下的总阻力 R_{id} 计算。

$$\eta_{Rms} = \eta_{Rid} + \Delta\eta_R (\Delta R/R_{id}) \quad (\text{K. 3})$$

$$t_{ms} = t_{id} + \Delta t (\Delta R/R_{id}) \quad (\text{K. 4})$$

$$w_{Sms} = w_{Mid} + \Delta w_M (\Delta R/R_{id}) \quad (\text{K. 5})$$

式中：

η_{Rms} ——试航条件下的相对旋转效率；

t_{ms} ——试航条件下的推力减额分数；

w_{Mms} ——试航条件下的模型伴流分数；

η_{Rid} ——理想条件下的相对旋转效率；

t_{id} ——理想条件下的推力减额分数；

w_{Mid} ——理想条件下的模型伴流分数；

$\Delta\eta_R$ ——相对旋转效率的偏差；

Δt ——推力减额分数的偏差；

Δw_M ——伴流分数的偏差；

ΔR ——阻力增加，N；

R_{id} ——理想条件下的阻力，N。

$\Delta R/R_{id}$ 的函数代表自航系数的偏差 $\Delta\eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M ，详见第 K.2 节。

可以将 $\Delta\eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M 设为 0，因为与变负荷效应引起的 η_0 的偏差相比，这些数值可忽略不计。

在应用公式 (K.3) ~ (K.5) 时，式中所需要的总阻力 R_{id} 应该通过实测数据得到。

螺旋桨效率 η_0 和实尺度伴流分数 w_s 通过螺旋桨敞水特性得到。螺旋桨敞水特性即根据以下步骤拟合得到的推力系数、扭矩系数和载荷系数的曲线。

推力系数、扭矩系数和载荷系数的公式如下：

$$K_T = a_T J^2 + b_T J + c_T \quad (K.6)$$

$$K_Q = a_Q J^2 + b_Q J + c_Q \quad (K.7)$$

$$\tau_p = a_T + b_T/J + c_T/J^2 \quad (K.8)$$

式中：

K_T ——推力系数；

K_Q ——扭矩系数；

τ_p ——载荷系数，等于 K_T/J^2 ；

J ——螺旋桨进速系数；

a_T 、 b_T 、 c_T ——推力系数曲线的系数；

a_Q 、 b_Q 、 c_Q ——扭矩系数曲线的系数。

试航条件下的扭矩系数 K_{Qms} 可按下式计算：

$$K_{Qms} = \frac{P_{Dms}}{2\pi\rho_s n_{ms}^3 D^5} \eta_{Rms} \quad (K.9)$$

式中：

K_{Qms} ——试航条件下的扭矩系数；

P_{Dms} ——试航条件下的收到功率，W；

ρ_s ——水密度， kg/m^3 ；

n_{ms} ——测得的螺旋桨轴转速，r/s；

D ——螺旋桨直径，m；

η_{Rms} ——试航条件下的相对旋转效率。

螺旋桨进速系数 J_{ms} 根据公式 (K.10) 使用公式 (K.9) 得到的扭矩系数 K_{Qms} 计算，即：

$$J_{ms} = \frac{-b_Q - \sqrt{b_Q^2 - 4a_Q(c_Q - K_{Qms})}}{2a_Q} \quad (\text{K. 10})$$

式中：

J_{ms} ——试航条件下的螺旋桨进速系数；

K_{Qms} ——试航条件下的扭矩系数；

a_Q 、 b_Q 、 c_Q ——扭矩系数曲线的系数。

试航条件下的推力系数 K_{Tms} 根据公式 (K.6) 使用螺旋桨进速系数 J_{ms} 计算。

因此，螺旋桨效率 η_{Oms} 为：

$$\eta_{Oms} = \frac{J_{ms} K_{Tms}}{2\pi K_{Qms}} \quad (\text{K. 11})$$

式中：

η_{Oms} ——试航条件下的螺旋桨效率；

J_{ms} ——试航条件下的螺旋桨进速系数；

K_{Tms} ——试航条件下的推力系数；

K_{Qms} ——试航条件下的扭矩系数。

载荷系数 τ_{Pms} 为：

$$\tau_{Pms} = \frac{K_{Tms}}{J_{ms}^2} \quad (\text{K. 12})$$

式中：

τ_{Pms} ——试航条件下的载荷系数；

J_{ms} ——试航条件下的螺旋桨进速系数；

K_{Tms} ——试航条件下的推力系数。

螺旋桨来流速度 V_A 为：

$$V_A = J_{ms} n_{ms} D \quad (\text{K. 13})$$

式中：

V_A ——螺旋桨来流速度，m/s；

J_{ms} ——试航条件下的螺旋桨进速系数；

n_{ms} ——测得的螺旋桨轴转速，r/s；

D ——螺旋桨直径，m。

实尺度伴流分数为：

$$1 - w_{Sms} = \frac{V_A}{V_S} \quad (\text{K. 14})$$

式中：

w_{Sms} ——试航条件下的实尺度伴流分数；

V_A ——螺旋桨来流速度，m/s；

V_S ——船舶对水速度，m/s。

试航条件下的总阻力 R_{ms} 使用试航条件下的载荷系数 τ_{Pms} 估算，即：

$$R_{ms} = \tau_{Pms} (1 - t_{ms}) (1 - w_{Sms})^2 \rho_S V_S^2 D^2 \quad (\text{K. 15})$$

式中：

R_{ms} ——试航条件下的阻力，N；

τ_{Pms} ——试航条件下的载荷系数；

t_{ms} ——试航条件下的推力减额分数；

w_{Sms} ——试航条件下的实尺度伴流分数；

ρ_S ——水密度， kg/m^3 ；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

D ——螺旋桨直径，m。

理想条件下的总阻力 R_{id} 使用试航条件下的总阻力 R_{ms} 减去阻力增加 ΔR 得到，即：

$$R_{id} = R_{ms} - \Delta R \quad (\text{K. 16})$$

式中：

R_{id} ——理想条件下的阻力，N；

R_{ms} ——试航条件下的阻力，N；

ΔR ——阻力增加，N。

使用公式 (K.3)、(K.4) 和 (K.5)，可以计算自航系数。

理想条件下的载荷系数 τ_{pid} 根据下式计算：

$$\tau_{pid} = \frac{R_{id}}{(1 - t_{id})(1 - w_{Sid})^2 \rho_S V_S^2 D^2} \quad (K.17)$$

式中：

τ_{pid} ——理想条件下的载荷系数；

R_{id} ——理想条件下的阻力，N；

t_{id} ——理想条件下的推力减额分数；

w_{Sid} ——理想条件下的实尺度伴流分数；

ρ_S ——水密度， kg/m^3 ；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

D ——螺旋桨直径，m。

螺旋桨进速系数 J_{id} 根据公式 (K.18) 使用公式 (K.17) 得到的载荷系数 τ_{pid} 计算，即：

$$J_{id} = \frac{-b_T - \sqrt{b_T^2 - 4(a_T - \tau_{pid})c_T}}{2(a_T - \tau_{pid})} \quad (K.18)$$

式中：

J_{id} ——理想条件下的螺旋桨进速系数；

τ_{pid} ——理想条件下的载荷系数；

a_T 、 b_T 、 c_T ——推力系数曲线的系数。

使用螺旋桨进速系数 J_{id} ，分别根据公式 (K.6) 和 (K.7) 获得推力系数 K_{Tid} 和扭矩系数 K_{Qid} 。

因此，螺旋桨效率 η_{Oid} 为：

$$\eta_{Oid} = \frac{J_{id} K_{Tid}}{2\pi K_{Qid}} \quad (K.19)$$

式中：

η_{Oid} ——理想条件下的螺旋桨效率；

J_{id} ——理想条件下的螺旋桨进速系数；

K_{Tid} ——理想条件下的推力系数；

K_{Qid} ——理想条件下的扭矩系数。

理想条件下的实尺度伴流分数可根据下式计算：

$$1 - w_{Sid} = (1 - w_{Mid}) e_i \quad (\text{K. 20})$$

公式 (K.20) 中的伴流分数的尺度修正因子可使用试航条件下的实尺度伴流分数和模型半流分数计算，即：

$$e_i = \frac{1 - w_{Sms}}{1 - w_{Mms}} \quad (\text{K. 21})$$

式中：

w_{Sid} ——理想条件下的实尺度伴流分数；

w_{Mid} ——理想条件下的模型伴流分数；

w_{Sms} ——试航条件下的实尺度伴流分数；

w_{Mms} ——试航条件下的模型伴流分数；

e_i ——伴流分数的尺度修正因子。

最后，修正后的螺旋桨轴转速 n_{id} 可根据理想条件下的螺旋桨进速系数和实桨敞水特性得到，即：

$$n_{id} = \frac{V_S (1 - w_{Sid})}{J_{id} D} \quad (\text{K. 22})$$

式中：

n_{id} ——理想条件下的螺旋桨轴转速，r/s；

V_S ——船舶对水速度，m/s；

w_{Sid} ——理想条件下的实尺度伴流分数；

J_{id} ——理想条件下的螺旋桨进速系数；

D ——螺旋桨直径，m。

应用图 K.1 所示的分析流程，在流速分析后，可得到 V_S 、 η_{Rid} 、 t_{id} 和 w_{Mid} 。

此外，使用直接功率法分析后，可得到 $\Delta R/R_{id}$ 、 $\Delta \eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M 。因此，在根据第 12.2.4 节或得了 V_S 的值后，应该重新进行直接功率法分析。

对于以上评估，可以使用一组往返航行的平均值 V_G 或两组往返航行的“平均再平均”值 V_G 作为初始值，并设 $\Delta \eta_R$ 、 Δt 和 Δw_M 为 0。

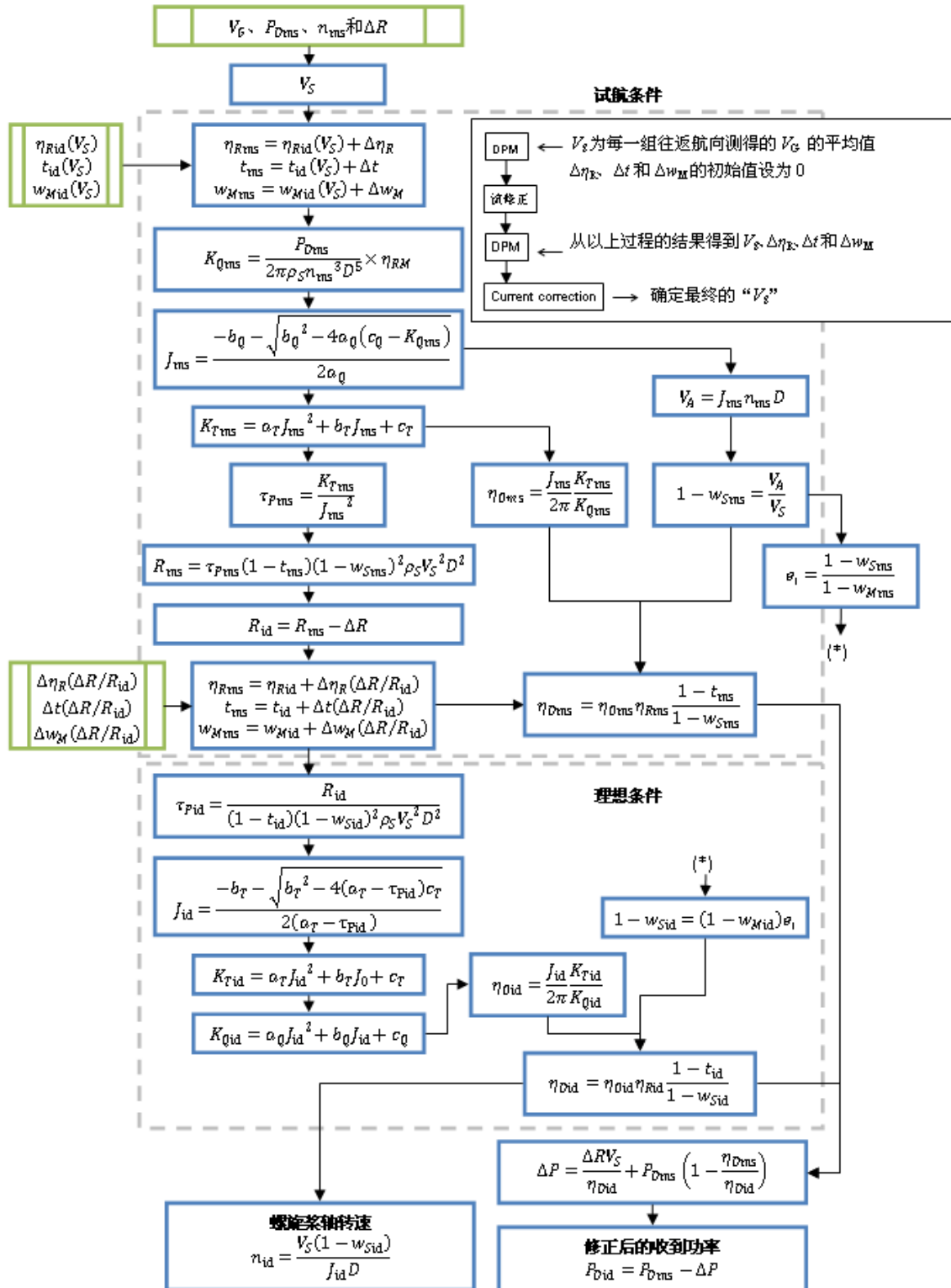


图 10.1 基于直接功率法的评估流程图

K.2 变负荷试验结果的应用

为了确定推进效率系数 η_D 的每一个成分，需在试航吃水下进行螺旋桨敞水试验、阻力和自航试验并根据水池常规程序进行评估。此外，考虑变负荷效应的自航试验应该在试航吃水下、在至少

一个接近于预报的 EEDI 航速（主机 75%MCR 时）下进行。这个航速应该是常规自航试验中测试的航速之一。

考虑变负荷效应的自航试验包括至少四个自航试验航次，每一航次在保持船模速度不变的情况下在不同螺旋桨轴转速下进行。螺旋桨轴转速按以下方式选择：

$$\frac{\Delta R}{R_{id}} \approx [-0.1 \quad 0 \quad 0.1 \quad 0.2] \quad (\text{K.23})$$

其中：

$$\Delta R = (F_D - F_X) \lambda^3 \frac{\rho_S}{\rho_M} \quad (\text{K.24})$$

式中：

ΔR ——阻力增加，N；

R_{id} ——阻力试验获得的真实速度下的实尺度阻力，N；

F_X ——变负荷试验期间测得的外部拖力，N；

F_D ——常规自航试验中表面摩擦修正力，N；

λ ——尺度因子；

ρ_S ——实尺度的水密度， kg/m^3 ；

ρ_M ——模型试验中的水密度， kg/m^3 。

从上述程序中获得的每一个自航系数应该用以下由 $\Delta R/R_{id}$ 的函数表达：

$$\Delta \eta_R = \xi_R \left(\frac{\Delta R}{R_{id}} \right)^2 + \zeta_R \frac{\Delta R}{R_{id}} \quad (\text{K.25})$$

$$\Delta t = \xi_t \left(\frac{\Delta R}{R_{id}} \right)^2 + \zeta_t \frac{\Delta R}{R_{id}} \quad (\text{K.26})$$

$$\Delta w = \xi_w \left(\frac{\Delta R}{R_{id}} \right)^2 + \zeta_w \frac{\Delta R}{R_{id}} \quad (\text{K.27})$$

式中：

$\Delta \eta_R$ ——相对旋转效率的偏差；

Δt ——推力减额分数的偏差；

Δw_M ——伴流分数的偏差；

ΔR ——阻力增加，N；

R_{id} ——理想条件下的阻力，N； ξ_R 、 ξ_t 、 ξ_w 、 ζ_R 、 ζ_t 和 ζ_w 是未知因子，使用最小。