

环保会 MEPC.1/Circ.896 通函
(2021 年 12 月 14 日)

2021 年用于计算和验证 Attained EEDI 和 EEXI 的创新能效技术处理导则

- 1 海上环境保护委员会在其 77 届会议（2021 年 11 月 22 日至 26 日）上，批准了《2021 年用于计算和验证 Attained EEDI 和 EEXI 的创新能效技术处理导则》，文本载于附件。
- 2 请各成员国政府使其主管机关、业界、相关航运组织、航运公司和其他利益相关方者注意附件中的本导则。
- 3 本委员会同意根据本导则应用中获得的经验保持对本导则的评审。
- 4 本通函取代 MEPC.1/Circ.815 通函。

附件
2021 年用于计算和验证 Attained EEDI 和 EEXI 的创新能效技术处理导则

目 录

- 1 通则
 - 2 定义
 - 3 创新能效技术的分类
 - 4 创新能效技术效果的计算和验证
- 附件 1 B 类创新技术效果的计算和验证导则
- 附录 1 空气润滑系统 (B-1 类)
 - 附录 2 风力辅助推进系统 (B-2 类)
 - 附录 1 风洞模型试验方法
 - 附录 2 全球风力概率矩阵 W_k
- 附件 2 C 类创新技术效果的计算和验证导则
- 附录 1 发电用的余热回收系统 (C-1 类)
 - 附录 2 光伏发电系统 (C-2 类)

1 通则

1.1 本导则旨在协助制造商、船厂、船东、验证方和船舶能效设计指数 (EEDI) 和现有船能效指数 (EEXI) 的其他相关方, 按 MARPOL 附则 VI 第 5、6、7、8、9 和 20 条的规定在进行 Attained EEDI 计算和验证时考虑创新能效技术。尽管在整个导则中只使用了 EEDI, 但其按适用情况对 EEDI 和 EEXI 计算都适用。

1.2 EEDI 计算指南和 EEDI 检验指南已予发布。本导则无意取代这些指南, 而是补充有关创新技术能效的计算、检验和发证方法。如本导则和这些指南之间存在不一致, 应以这些指南的要求为准。

1.3 考虑到 EEDI 计算指南中的 Attained EEDI 公式不适用于柴电推进系统、涡轮机推进系统和混合动力推进系统, 本导则也未提供这些推进系统船舶的计算和验证方法。

1.4 应对本导则进行评审, 以纳入本导则尚未考虑的新技术。

1.5 每项创新技术积累了经验后, 还应采用实际运行数据的反馈对本导则进行评估, 使其更为可靠有效。因此, 应在实际运行条件下监测和收集各项创新技术的效果, 以供完善本指导性文件。

2 定义

2.1 EEDI 计算指南系指《2018 年新船 Attained EEDI 计算方法指南》(经修正的 MEPC.308 (73) 决议)。

2.2 EEDI 检验指南系指《2014 年能效设计指数 (EEDI) 检验和发证指南》(经 MEPC.261(68) 决议和 MEPC.309(73) 决议修正的 MEPC.254(67) 决议)。

2.3 P_P 为推进功率, 其定义为 ΣP_{ME} (如安装了轴带电动机, 则为 EEDI 计算指南 2.2.5.3 所列的 $\Sigma P_{ME} + \Sigma P_{PTI(i), shaft}$)。

2.4 除上述外, 本导则中用词的定义与 MARPOL 附则 VI、EEDI 计算指南和 EEDI 检验指南中的相同。

3 创新能效技术的分类

3.1 创新能效技术根据其特点及对 EEDI 公式的作用, 分为 A、B 和 C 三类。而且, B 类和 C 类创新能效技术还分别进一步细分出两个子类 (B-1 类和 B-2 类以及 C-1 类和 C-2 类)。

A 类: 改变功率曲线的技术, 导致 P_P 和 V_{ref} 的组合的变化: 如当 V_{ref} 保持不变时, P_P 减小, 而当 P_P 保持不变时, V_{ref} 增大。

B 类: 减小推进功率 V_{ref} 时的 P_P , 但不产生电力的技术。节约的能量计为 P_{eff} 。

B-1 类: 操作期间可在任何时候使用的技术, 因而可用系数 (f_{eff}) 应视为 1.00。

B-2 类: 仅在受限条件下全输出时才可使用使用的技术。可用系数 (f_{eff}) 的设定值应小于 1.00。

C 类: 产生电力的技术。节约的能量计为 P_{AEff} 。

C-1 类: 操作期间可在任何时候使用的技术, 因而可用系数 (f_{eff}) 应视为 1.00。

C-2 类: 仅在受限条件下全输出时才可使用使用的技术。可用系数 (f_{eff}) 的设定值应小于 1.00。

(C) 最大正常波浪载荷 (P_{AEff}) 条件下通过发电降低辅助功率来减少排放

(B) 通过降低推进功率 (P_{eff}) 来减少排放

$$\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} \right) \left(\sum_{i=1}^{nPEff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{nPEff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \right) \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}^{**}$$

$f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}$

(A) 功率曲线 (Knot-kW 曲线) 显示的 P_P 和 V_{ref} 组合

创新能效技术				
主机功率的降低			辅助功率的降低	
A 类	B-1 类	B-2 类	C-1 类	C-2 类
不能与船舶的总体性能分开	能与船舶的总体性能分开处理		随时有效	根据周边环境
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
-低摩擦涂层	- 船体空气润滑系	- 风力辅助 (船帆、	- 余热回收系统	- 光伏电池

-裸层优化 -舵阻力 -螺旋桨设计	统（通过喷射空气形成气泡来减少船舶阻力）（可以关闭）	旋筒、箬帆）	（废气热量回收并转换为电力）	
-------------------------	----------------------------	--------	----------------	--

4 创新能效技术效果的计算和验证

4.1 一般规定

4.1.1 应结合拟使用的船体形式和推进系统，对创新技术的效益进行评价。创新技术结合不同船体形式和推进系统所进行的模型试验或试航的结果可能并不适用。

4.2 A类技术

4.2.1 A类创新能效技术影响 P_P 和/或 V_{ref} ，而且其效果不能单独测量。因此，该类技术的效果不应在本导则中单独予以计算或核准，而应作为 EEDI 计算指南和 EEDI 检验指南中船舶的一个部分处理。

4.3 B类技术

4.3.1 B类创新能效技术的效果以 P_{eff} 表示，乘以 C_{FME} 和 SFC_{ME} （如果 $P_{PTI(i)} > 0$ ，则为 $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$ 和 $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$ 的平均加权值）和 f_{eff} 后，再从 EEDI 公式中扣除。对 B-1 类技术， f_{eff} 取 1.00。

4.3.2 B类创新能效技术效果的计算和验证的方法见附件 1。

4.4 C类技术

4.4.1 C类创新能效技术的效果以 P_{AEff} 表示，乘以 C_{FAE} 、 SFC_{AE} 和 f_{eff} 后，再从 EEDI 公式中扣除。对 C-1 类技术， f_{eff} 取 1.00。

4.4.2 C类创新能效技术效果的计算和验证的指导见附件 2。

4.5 $P_{PTI(i)} > 0$ 时平均加权值

4.5.1 如 $P_{PTI(i)} > 0$ ，B类和C类技术都可以扣除 $P_{PTI(i)}$ 值，在此情况下，应采用下列数值作为 Attained EEDI 公式中计算 $(\sum(f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_F \cdot SFC))$ 的平均加权值：

对轴功率：

$$\left(\sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)} \right) / \left(\sum P_{ME(i)} + \sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)} \right),$$

式中，如 $(\sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ 为负值，则 $(\sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ 应取 0；和

对主机：

$$\sum P_{ME(i)} / \left(\sum P_{ME(i)} + \sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)} \right),$$

式中，如 $\sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)}$ 为负值，则 $(\sum P_{PTI(i),shaft} - \cdot \sum P_{AEff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ 应取 0。

B 类创新技术效果的计算和验证导则

1 空气润滑系统 (B-1 类)

1.1 创新能效技术概要

1.1.1 空气润滑系统是创新能效技术中的一种，采用鼓风机从船底前部喷射气体，在船体表面覆盖气泡以减少船舶的摩擦阻力。

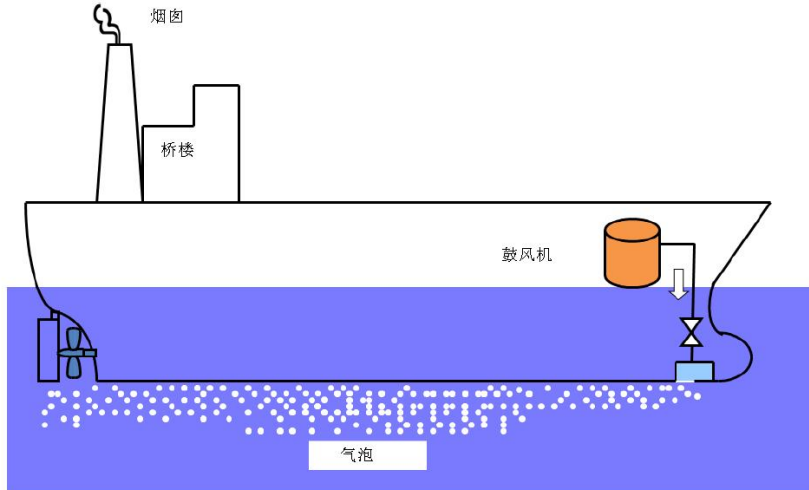


图 1 空气润滑系统示意图

1.2 计算方法

1.2.1 由空气润滑系统导致的功率降低

1.2.1.1 作为创新能效技术，采用空气润滑系统的功率减少系数 P_{eff} 通过下列公式计算。右边第一项和第二项分别表示由空气润滑系统减少的推进功率以及系统运行所必要的附加功率。对该系统，EEDI 公式中的 f_{eff} 取 1.0。

$$P_{eff} = P_{PeffAL} - P_{AEffAL} \frac{C_{FAE}}{C_{FME}} \frac{SFC_{AE}}{SFC_{ME}} * \quad (1)$$

*如 $P_{PTI(i)} > 0$ ，则取 $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$ 和 $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$ 的平均加权值。

1.2.1.2 P_{eff} 为 75% 的额定装机功率 (MCR) 时空气润滑系统的有效功率减少量，(kW)。如安装了轴带发电机， P_{eff} 应按照 EEDI 计算指南 2.2.5 的要求在扣除安装的任何轴带发电机后，以 75% 的 MCR 进行计算。 P_{eff} 的计算应在满载工况以及试航工况进行。

1.2.1.3 P_{PeffAL} 为采用空气润滑系统导致的推进功率减少量，(kW)。 P_{PeffAL} 的计算应在 EEDI 计算指南所定义的载运能力对应工况 (以下称为“满载工况”) 以及试航工况下进行，并考虑以下各个因素：

- 1 覆盖气泡船舶表面面积；
- 2 气泡层的厚度；
- 3 覆盖气泡层导致的摩擦阻力减低率；
- 4 与气泡相互作用导致的推进效率变化 (自航因素和螺旋桨敞水特征)；和
- 5 附加设备 (如安装) 引起的阻力变化。

1.2.1.4 P_{AEffAL} 为满载工况下空气润滑系统运行所需要的附加辅助功率，(kW)。 P_{AEffAL} 应根据制造商测试报告，以鼓风机 75% 的额定输出功率计算。如上述计算值与满载工况下正常操作所使用的输出功率有很大的差异， P_{AEffAL} 值可以采用替代方法进行估算。在这种情况下，应向验证方提交计算过程。

1.2.2 空气润滑系统 Attained EEDI 计算注意事项

① 本章中的所有例子仅用于说明所建议的计算和验证方法。

1.2.2.1 EEDI 计算指南 2.2.2 中的 V_{ref} 应在空气润滑系统关闭的工况下进行计算以避免重复计入这一系统的效果。

1.2.2.2 按 EEDI 计算指南的要求，船上空气润滑系统处于工作时的 EEDI 值计算应在满载工况下进行。

1.3 验证方法

1.3.1 通则

1.3.1.1 采用创新能效技术的船舶应按 EEDI 检验指南验证 Attained EEDI。EEDI 检验指南中未包含的有关空气润滑系统应用的附加资料见下文。

1.3.2 设计阶段的前期验证

1.3.2.1 除 EEDI 检验指南 4.2.2 要求外，船东或船厂编制的 EEDI 技术案卷还应包括：

- 1 空气润滑系统的简图；
- 2 P_{PEffAL} ：满载工况以及试航工况下航速 V_{ref} 时，空气润滑系统导致的推进功率的降低；
- 3 EDR_{full} ：满载工况下空气润滑系统导致的推进功率降低率。 EDR_{full} 通过 P_{MEffAL} 除以满载工况下 EEDI 计算指南中的 P_{ME} 来计算（见图 2）；
- 4 EDR_{trial} ：试航工况下空气润滑系统导致的推进功率降低率。 EDR_{trial} 通过 P_{MEffAL} 除以试航工况下 EEDI 计算指南中的 P_{ME} 来计算（见图 2）；

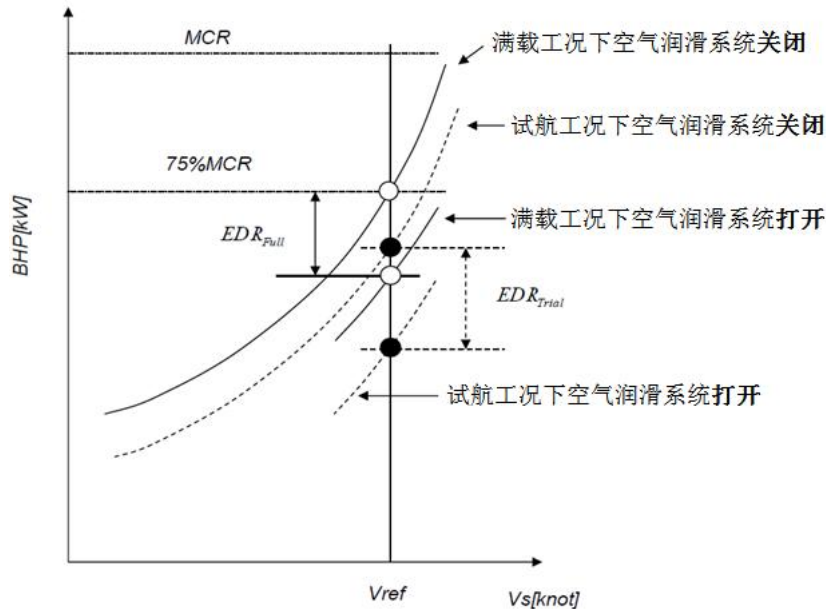


图 2 空气润滑系统导致的推进功率降低率 (EDR_{full} 和 EDR_{trial}) 计算

- 5 P_{AEffAL} ：空气润滑系统运行所需要的附加功率；和
- 6 满载工况下空气润滑系统工作时的 EEDI 计算值。

1.3.2.2 除 EEDI 检验指南 4.2.7 要求外，验证方还可能要求船厂直接提供的附加资料包括：

- 1 空气润滑系统导致的推进功率降低详细计算过程： P_{PEffAL} ；和
- 2 空气润滑系统运行所必需的附加功率详细计算过程： P_{AEffAL} 。

1.3.3 试航时 Attained EEDI 的最终验证

1.3.3.1 设有空气润滑系统的船舶，EEDI 的最终验证应在试航时进行。最终验证的程序基本上应按照 EEDI 检验指南 4.3 的要求。

1.3.3.2 试航前，应向验证方提交试验程序说明，包括设有空气润滑系统的船舶试航时所使用的测量方法。

1.3.3.3 验证方应参加试航，并确认 EEDI 检验指南 4.4.3 中所列项目在空气润滑系统处于打开和关闭状态下进行了测量。

1.3.3.4 试航中空气润滑系统处于打开和关闭状态下主机输出功率的设定，应使所制定的功率

曲线范围包括船舶航速 V_{ref} 。

1.3.3.5 应根据所制定的空气润滑系统处于关闭状态下的功率曲线完成下列程序：

- 1 应计算满载工况下主机 75% MCR 时的航速 V_{ref} 。如安装了轴带发电机, V_{ref} 应按照 EEDI 计算指南 2.2.5 的要求在扣除所安装的任何轴带发电机后, 以 75% 的 MCR 进行计算; 和
- 2 如以上所得 V_{ref} 不同于设计阶段的估算值, 主机的功率降低率应在满载工况和试航工况条件下以新的航速 V_{ref} 重新计算。

1.3.3.6 船厂应根据试航时测量的航速和主机输出功率来制定空气润滑系统打开状态下的功率曲线。应进行下列计算：

- 1 试航时航速 V_{ref} 下的推进功率实际降低率 ADR_{trial} ; 和
- 2 如试航未在满载工况下进行, 此工况下的推进功率降低率应通过下式计算：

$$1 - ADR_{Full} = (1 - EDR_{Full}) \times \frac{1 - ADR_{Trial}}{1 - EDR_{Trial}}$$

即：

$$ADR_{Full} = 1 - (1 - EDR_{Full}) \times \frac{1 - ADR_{Trial}}{1 - EDR_{Trial}} \quad (2)$$

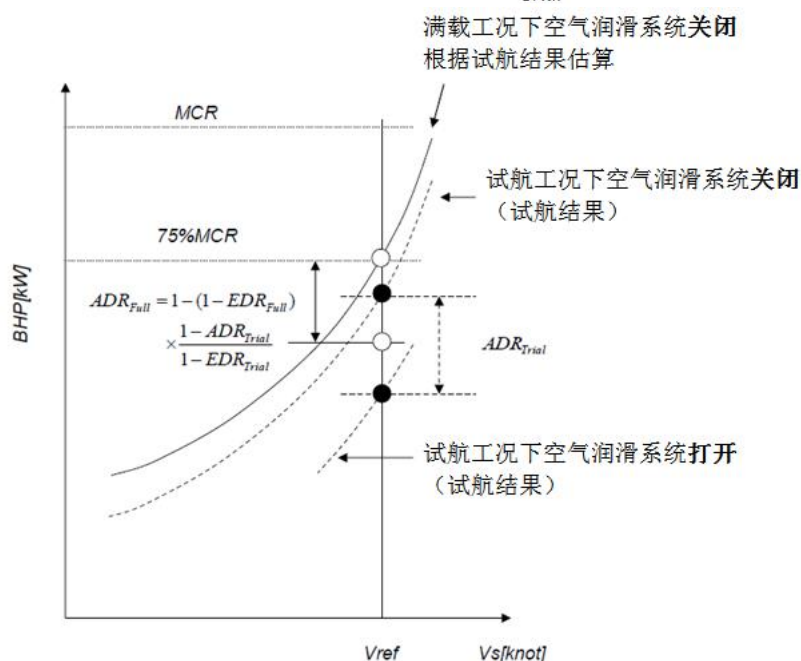


图 3 空气润滑系统导致的推进功率实际降低率 (ADR_{full} 和 ADR_{trial}) 计算

1.3.3.7 满载工况和试航工况下由空气润滑系统导致的推进功率降低率 P_{MEffAL} 应按下式计算：

$$P_{PeffAL_Full} = ADR_{Full} \times P_P \quad (3)$$

$$P_{PeffAL_Trial} = ADR_{Trial} \times P_P \quad (4)$$

1.3.3.8 必要时, 船东或船厂应考虑试航的结果修改 EEDI 技术案卷。该修改应包括下列内容：

- 1 V_{ref} , 如果与设计阶段的估算值有差异;
- 2 满载工况和试航工况下空气润滑系统打开且航速 V_{ref} 时, 推进功率的降低率 P_{PeffAL} ;
- 3 满载工况和试航工况下空气润滑系统 (ADR_{full} 和 ADR_{trial}) 导致的推进功率降低率; 和
- 4 满载工况下空气润滑系统打开时 EEDI 计算值。

2 风力辅助推进系统 (B-2 类)

2.1 创新能效技术概要

2.1.1 风力推进系统 (WAPS) 属于减少船舶 CO₂ 排放的创新机械能效技术。有各种根据风况产生动力的风力推进技术 (船帆、船翼、箏帆等)。本技术导则把 WAPS 的可用有效功率定义为基准速度与风力辅助推进系统力和全球风力概率分布之和的乘积。

2.1.2 在应用风力辅助推进系统时,可能增加船舶阻力的次要影响在这些指南中被忽略。忽略诸如风压差、舵角和横倾或螺旋桨在轻转运行工况下效率降低这些因素导致的额外阻力,这种简化方法不会对准确性造成显著影响。尽管如此,相应的力被认为是排除了不能安全操作船舶的工况,例如超过横倾角。

2.2 定义

2.2.1 就本指南而言,以下定义适用:

- 1 可用有效功率系指 EEDI 计算中定义的有效功率 P_{eff} 和可用系数 f_{eff} 乘积;
- 2 风力辅助推进系统 (WAPS) 属于减少船舶 CO₂ 排放的创新机械能效技术。本指南适用于直接把机械推进力传送到船舶结构的风力推进技术 (船帆、船翼、箏帆等);
- 3 风力推进系统力矩阵是一个二维矩阵,表示风力辅助推进系统的力特性,其视航速、风速和相对于首向的风向角而定;
- 4 全球风力概率矩阵,以世界各地风力统计调查数据为依据收集的全球主要航路路线上的风力数据,代表了风况的概率;
- 5 风速是在海平面以上 10m 处测量的风的速度,单位为 m/s;
- 6 风向是指在海平面以上 10 m 处测得的向北的风向,分为八个部分(北、东北、东、东南、南、西南、西、西北);
- 7 风向角是在海平面以上 10m 处的相对于船舶首向的风向角,每隔 5°分为 72 个角度 (0°, 5°, ..., 355°); 和
- 8 全球主要航运网络是航行频率最高的全球航线网路。

2.3 风力辅助推进系统 (WAPS) 的可用有效功率

2.3.1 作为创新能效技术,风力辅助推进系统的可用有效功率计算按下述公式进行:

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\eta_T} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(V_{ref})_{i,j} \cdot W_{i,j} \right) - \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(V_{ref})_{i,j} \cdot W_{i,j} \right)$$

其中: $F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0$

(将所有力矩阵要素按降序排序)

和 $\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$

(定义 q: 在公式中添加的要素数)

式中:

- 1 ($f_{eff} \cdot P_{eff}$) 为具体风力辅助推进系统输出的可用有效功率, (kW)。将 f_{eff} 和 P_{eff} 组合计算,是由于可用性和功率的乘积为矩阵运算的结果,对每种风况均考虑概率和具体的风力推进系统力;
- 2 系数 0.5144 为海里/小时 (节) 转换为米/秒 (m/s) 的换算系数;
- 3 V_{ref} 为以海里/小时 (节) 为单位测量的船舶基准速度,定义见 EEDI 计算指南。
- 4 η_D 为主机 75% 额定装机功率 (MCR) 下 (各) 主驱动装置的总效率。如无规定经验证方验证的其他数值, η_D 应设定为 0.7;
- 5 $F(V_{ref})_k$ 为给定航速 V_{ref} 下各风力辅助推进系统的力矩阵。每个矩阵要素均表示各自的风速和风向角的推进力,单位为千牛顿(kN)。风向角以相对方位表示(船首为 0°);
- 6 W_k 为全球风力概率矩阵。每个矩阵要素均表示风速和相对于船舶航向的风向角的概率。所有矩阵要素的和等于 1,并为无因次的; 和
- 7 $P(V_{ref})_k$ 为具有与 $F(V_{ref})_k$ 和 W_k 一样尺寸的矩阵,表示风力辅助推进系统操作所需要的功率, (kW)。

2.3.2 公式前一项规定了总体 EEDI 计算时应考虑的附加推进功率，包括船舶特定航速、力矩阵和全球风力概率矩阵的乘积。后一项则包括具体风力辅助推进系统操作所需要的功率，应从获得的风力功率中扣除。

2.4 风力推进系统的力矩阵 $F(V_{ref})_k$

2.4.1 风力推进系数的测量

2.4.1.1 风力推进系统的力矩阵是一个描述全球风力概率矩阵对应的平均风力推进系数的表格。因此，为了得到风力推进系统的力矩阵，需要先对风力推进系数进行测量。

2.4.1.2 可以使用多种方法来确定风力辅助船的气动力，首先取决于风力辅助推进系统的类型，但也有尺寸限制和文献中已经显示的方法的成功验证。方法包括：

- 1 风洞模型试验；
- 2 CFD/数值计算；和
- 3 全尺度试验。

2.4.1.3 应风力辅助推进系统与船舶组合的力，除非由于技术或经济原因不可行。在后一种情况下，2.4.1.4 的情况适用。

2.4.1.4 在安装多个风力辅助推进系统的情况下，可采用一个经过验证的方法来明确风力推进器之间以及船与风力推进器之间的相互作用效果，此时可单独确定对每个设备的力，并将组成系统的每个单元的系数相加。

2.4.1.5 风力推进装置应在其运行雷诺数下进行分析，因为这已被证明会影响其性能。

2.4.1.6 风洞模型试验是测量风力辅助船舶推进系统在典型状态下气动力的主要方法。本附件的附录 1 描述了风洞模型试验的试验方法。如采用风洞模型试验测得风力推进系数，应按附录 1 进行。

2.4.1.7 对于某些类型的风力辅助推进系统，不适宜用风洞模型试验来测量风力推进系数。因此，可以接受采用数值计算，例如 CFD 计算，来估算风力推进系数，但数值计算的条件和模型应参考实验代表性结果，且数值计算应按照规定的质量和技术标准(ITTC 7.5-03-01-02 和 ITTC 7.5-03-01-04 最新修订版或等效版本)进行。如果风洞模型试验和数值计算都不适合估算系数，在验证方批准的情况下，可以接受其他试验方法。

2.4.1.8 在进行确定风力推进系数的试验或计算时，应在进行试验或计算前将试验或计算程序提交验证方。此外，试验结束后，还应向验证方提交试验和计算程序的详细报告。验证方可视必要要求提交方提供进一步的文件/资料，以验证风力推进系数。

2.4.1.9 无风力辅助推进系统的船模试验，主要测量不同风向下船模指向船首的风力。采用风力辅助推进系统的船模试验主要测量不同风向下船模指向船首的最大风推进力，然后利用其计算风力推进系统的风力推进系数。风力辅助推进系统的系数应在一系列风向角中确定，范围 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，间隔 5° 。

2.4.1.10 对于几个相同的风力辅助推进系统和相同的船舶，可以接受一次风洞试验。验证方可以要求提供支持文件。

2.4.2 风洞试验方法和数据处理

方案1：在装有整套风力辅助推进系统的船模上进行试验

2.4.2.1 用船模和风力辅助推进系统模型进行风洞试验时，试验方法应符合附录 1 的规定。作用在船舶模型上的风力归一化为：

$$C_{Fx} = F_x / (0.5 \rho V^2 A)$$

2.4.2.2 风力辅助推进系统的风力推进系数^①可确定为：

$$\Delta C_{Fx} = C_{Fx-with WPS} - C_{Fx-without WPS}$$

式中：

- 1 C_{Fx} 为模型指向船首的风力系数；
- 2 F_x 为模型指向船首的风力；
- 3 ΔC_{Fx} 为风力辅助推进系统的风力推进系数；
- 4 ρ 为模型试验的空气密度；

① 力系数是无因次的，其计算单位可以自由选择，但必须相互一致。

- .5 V 为模型试验的风速；
- .6 A 为风力辅助推进系统的总投影面积；和
- .7 下标“有 WAPS”表示船模有风力辅助推进系统的状态，“无 WAPS”表示船舶无风力辅助推进系统的状态。

方案 2:单一风力辅助推进装置进行试验

2.4.2.3 采用单一风力推进装置进行风洞试验时，试验方法应符合附录 1 的规定。模型的风力推进系数^①可按式确定：

$$C_{Fx} = F_x / (0.5 \rho V^2 A)$$

式中：

- .1 C_{Fx} 为模型指向船首的风力系数；
- .2 F_x 为模型指向船首的风力；
- .3 ρ 为模型试验的空气密度；
- .4 V 为模型试验的风速；和
- .5 A 为风力辅助推进系统的总投影面积。

2.4.2.4 多单元风力辅助推进系统的风力推进系数 ΔC_{Fx} 可通过求组成系统的各单元的系数总和来计算，其中对其相互作用效应进行加权，并计及上层建筑的遮蔽效应。

对于方案 1 和方案 2：计算风洞试验时主动风力辅助推进系统的平均功率消耗系数

2.4.2.5 应根据测得的值和系统控制方案，对风力辅助推进系统的功率消耗进行测量，填写功耗矩阵。

2.4.3 风力推进系统力矩计算

2.4.3.1 船舶风力辅助推进系统的风力推进系数^②可用于预测风力推进系统力矩矩阵。视风定义为相对于地面的风和由船舶速度产生的风的组合。风力推进系统力矩矩阵的计算步骤如下：

- .1 确定船舶速度 V_{ref} ；
- .2 选取10 m高度全球风力概率矩阵 W_k 对应的平均风速。例如，选择风力概率矩阵第一风速范围(0-1 m/s)对应的平均风速为0.5 m/s，选择第二风速范围(1-2 m/s)对应的平均风速为1.5 m/s，以此类推；
- .3 将风速外插至风力辅助推进系统的参考高度，参考高度取出力高度的气动中心或从水线量起的一半高度；

$$v_{Zref} = v_{10m} \left(\frac{z_{ref}}{10} \right)^\alpha \quad \text{for } z_{ref} < 300m$$

$$v_{Zref} = v_{10m} \left(\frac{300}{10} \right)^\alpha \quad \text{for } z_{ref} \geq 300m$$

- 式中：.1 z_{ref} 为风力辅助推进系统中，在水线以上的参考高度，等于各船帆、旋筒等的高度中点；
- .2 v_{10m} 为海平面上10m的风速；
 - .3 v_{Zref} 为参考高度处得到的风速；和
 - .4 α 取符合 ITTC 建议案^③的 1/9。

.4 根据相应的平均风速、风向角和船舶的速度，计算相对风速 V_k 和船舶的相对风向角；

.5 根据相对风向角和试验得到的相对风向角与风力推进系数 ΔC_{Fx} 的对应关系，计算 W_k 对应的风力辅助推进系统的平均风力推进系数 $(\Delta C_{Fx})_k$ 。

.6 根据风力辅助推进系统的平均风力推进系数，通过下式计算相对于 W_k 的全尺度船舶的风力推进系统力矩矩阵 $F(V_{ref})_k$ 。

①力系数是无因次的，其计算单位可以自由选择，但必须相互一致。

②力系数是无因次的，其计算单位可以自由选择，但必须相互一致。

③国际拖曳水池会议(ITTC)会议以自由选建议的程序和指南；速度/功率试验的准备、实施和分析”，国际拖曳水池会议(ITTC)，7.5-04-01-01.1, 2017。

注:对于海拔300米以上的风速，ITCC不提供指导。然而，在该指南中假定海拔300米以上的高度是恒定的。

$$F(V_{ref})_k = (\Delta C_{Fx})_k * (0.5 \rho V_k^2 A)$$

式中:

- 1 $(\Delta C_{Fx})_k$ 为相对于 W_k 的平均风力推进系数;
- 2 ρ 为航运环境下平均空气密度, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$;
- 3 V_k 为全尺度船舶对于 W_k 的相对风速;
- 4 A 为风力辅助推进系统的总投影面积;
- 5 为找到最佳 $(\Delta C_{Fx})_k$, 可以改变风力推进器的设置; 可以通过插值来实现, 前提是设置中的增量要足够小;
- 6 风力辅助推进系统的设置和布置必须符合系统定义的操作约束条件(例如, 如果低于全球风力概率矩阵提供的值, 最大运行风速 $> Bf 8, 19 \text{ m/s}$);
- 7 系统引起的潜在风阻力应予以考虑, 例如在接近顶风的不可用风向, 以及当系统因超过运行限制而无法运行时;
- 8 如果 $F(V_{ref})_k$ 超过了船舶的阻力, 使得螺旋桨推力为负, $F(V_{ref})_k$ 将被限制在阻力值。

2.4.4 考虑风力辅助推进系统的运行限制和侧向力及偏航力矩

2.4.4.1 力 $F(V_{ref})_k$ 必须在风力辅助推进系统适用的操作范围内计算。这些运行限制可至少由风况或风力辅助推进系统产生的总的力引起, 并施加到船舶上。

2.4.4.2 对于与验证方在风力辅助推进系统和船舶操作手册中确定的风力辅助推进系统运行域不一致的任何配对(风向; 风力), $F(V_{ref})_k$ 必须为0。

2.4.4.3 风力辅助系统对船舶施加的侧向力及由此产生的偏航力矩会影响系统性能, 从而影响 EEDI 计算。因此, 船厂和/或推进系统制造商应记录船上的侧向力和风力辅助推进系统对船舶施加的偏航力矩, 并由验证方观察。在本通函 2.4.1 所述的试验期间, 无需额外努力即可获得。

2.4.4.4 与运行域一致则要求, 对于任意配对(风向; 风力), 考虑到风力辅助推进系统产生的总力(即包括船舶的侧向力和偏航力矩)情况下, 风力辅助推进系统的强度、嵌入处的受力和船的横倾分别符合船舶结构设计案卷和船舶稳性案卷。当侧向力和偏航力矩特别显著时, 验证方可以要求保持航向和显示舵角, 以验证与运行域一致。

2.5 全球风力概率矩阵 W_k

2.5.1 风力概率

2.5.1.1 风况不是恒定的。风的速度和方向随时间而变化。地球上不同地区对风的预期是不相等的。

2.5.1.2 然而, 对于全球的每一个特定位置, 对每种风的预期都可以用一个独特的风力概率模式来表示。总是有一定的概率发生一定的风向和风速。这些概率被记录在风图中。采用这种方法, 每个地理区域都有一个独特的风图。

2.5.2 相对船舶的风向角

2.5.2.1 对于风力辅助推进系统, 是南风还是北风无关紧要。只有相对于船首向的风向角是重要的。因此, 当应用于风力辅助推进系统时, 天气数据中给出的风向必须针对船舶在贸易航线上的首向重新计算, 其中 0 线表示船首, 90 船表示右舷, 180 船表示船尾, 270 尾表示船左舷。

2.5.3 全球主要航运网络

2.5.3.1 为确定全球风力概率图以进行风力辅助推进系统的 EEDI 计算, 需要全球主要航线上所有风况的平均值。

2.5.3.2 图 1 显示了用以确定全球风况的全球主要航运网络。沿所示航线分析了 106 个风况图。这些图是基于 868,500 个单独的风数据。

2.5.3.3 先在船首坐标中重新计算各位置的风况图, 再求平均值, 形成全球风况图。结果显示在图 2 中, 完整的图表(全球风力概率矩阵)显示在本附件附录 2 的表格中。

2.5.3.4 矩阵 W_k 的每个要素代表了相对于船舶的特定风速和风向角。所有矩阵要素之和为一(1.0), 代表 100% 所有风况的。

2.5.3.5 结果表明, 船头或船尾风比舷侧风多。有两个可能的原因可以解释这一现象:

- 1 航运路线和全球天气系统更偏向东西方向而不是南北方向; 和
- 2 航线和风受到海岸线的影响, 所以在有些地区它们往往是平行的。

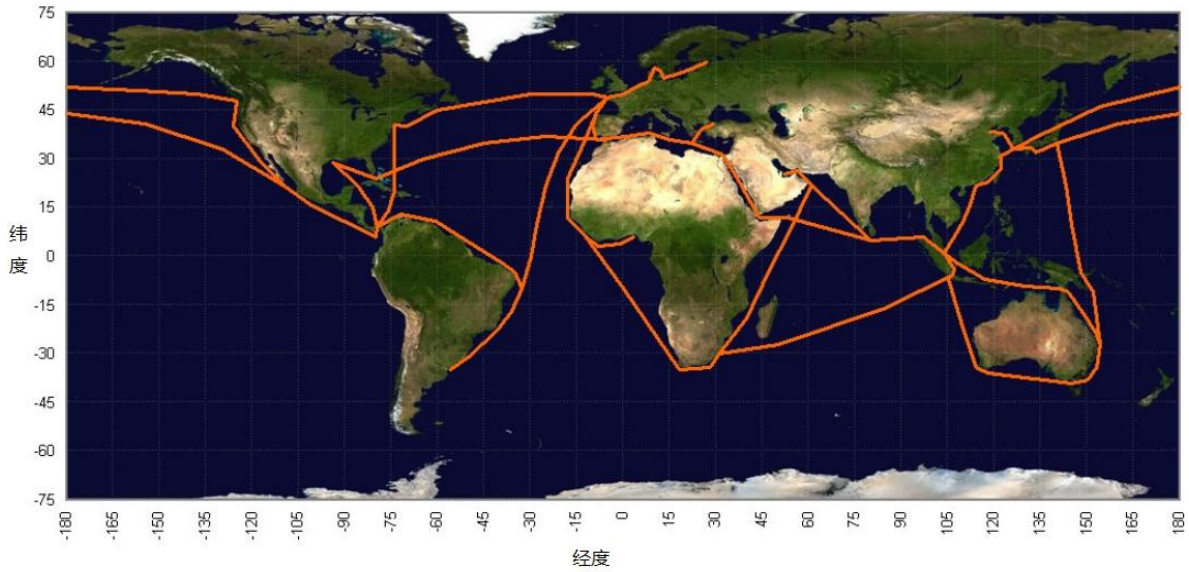


图1 用于风图的全球主要航运网路

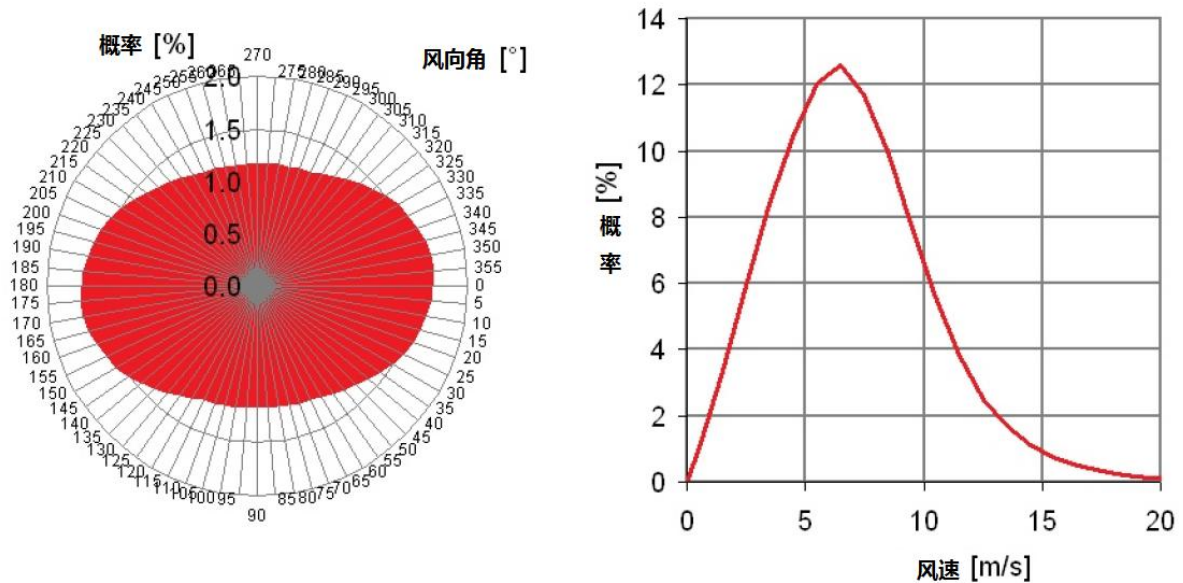


图2 得出的全球主要航线上相对于船舶的风曲线

2.6 风力辅助推进系统有效 CO₂ 减少量

2.6.1 为计算 CO₂ 的减少量，应将计算得到的可用有效功率 ($f_{eff} * P_{eff}$) 乘以原 EEDI 公式中的换算系数 C_{FME} 和 SFC_{ME} 。

2.7 EEDI 发证过程中风力辅助推进系统的验证

2.7.1 一般规定

2.7.1.1 采用创新能效技术的船舶应按 EEDI 检验指南进行 EEDI 验证。EEDI 检验指南中未包括的有关创新能效技术的附加资料见下文。

2.7.2 设计阶段的前期验证

2.7.2.1 除 EEDI 检验指南 4.2.2 要求外，船东或船厂编制的 EEDI 技术案卷还应包括：

- 1 风力辅助推进系统的简图；和
- 2 采用风力辅助推进系统的 EEDI 计算值。

2.7.2.2 除 EEDI 检验指南 4.2.7 要求外，验证方还可能要求船厂提供的附加资料包括：

- 1 风力推进系统力矩矩阵 $F(V_{ref})_k$ 的详细计算过程及性能试验结果。

2.7.2.3 为防止对船舶结构和主驱动装置产生不利影响，EEDI 发证过程中应确定附加力对船舶的影响。如有必要，风力推进系统力矩阵要素可以受限于船舶具体的限制条件。限制风力推进系统力的技术方法应作为性能试验的一部分而进行验证。

2.7.2.4 如 EEDI 发证过程中需认可多个创新能效技术，应考虑这些技术之间的相互影响。发证过程中向验证方提交的附加资料中应包括相应的技术文件。

2.7.3 试航时 Attained EEDI 的最终验证

2.7.3.1 应根据 EEDI 技术案卷中的文件，对风力辅助推进系统产生的总净功率进行确认。对于最终验证，验证方应检查安装的风力辅助推进系统的配置是否与 EEDI 技术案卷中的描述一致。

附录 1 风洞模型试验方法

根据本通函第2.4.1节, 定义了两种试验方法:

- 1.1 方案1: 在装有整套风力辅助推进系统的船模上进行试验
- 1.2 方案2: 在单个风力推进装置的完整模型上进行试验

方案1: 在装有整套风力辅助推进系统的船模上进行试验

1 模型

1.1 风力辅助推进系统模型和船体模型应与真实形态相似, 但不影响气动特性的附件可以在模型中忽略(如扶手、绞车等)。

1.2 船体模型的吃水工况应与 EEDI 计算指南中定义的载运能力相对应。

1.3 船体模型通过力平衡和风向与转台连接, 通过改变转台的角度来改变船体模型的风向角度。

2 试验工况

2.1 船舶风力辅助推进系统风力矩阵风洞模型试验除几何相似性外, 还必须满足动力相似性衡准。即当试验风速大于某一临界风速时, 无因次风系数趋于稳定, 模型周围流场与实船相似。测得的风系数可以直接外推到实船上。在试验中, 通过可变的风速试验确定临界风速。

2.2 在风洞模型试验中, 在试验段前部布置了尖劈和粗糙元, 得到进行风力矩阵试验的模型尺度下海洋表面大气边界层的风场。试验的雷诺数应大于 1.0×10^6 。雷诺数 Re 表示为:

式中, ρ 和 μ 分别为空气的密度和粘度, U 为风速, L_{pp} 为模型船垂线间的长度。

2.3 阻塞比不应超过5%。该比值由模型的横向投影面积除以风洞的横截面面积计算得到。

3 试验方法

3.1 在相同船体风向下, 不同迎角下风力辅助推进系统的风力推进系数不同。为得到每个船体风向角下风力辅助推进系统的最大风力推进系数, 试验方案应包括:

- 1.1 测量无风力辅助推进系统的船模在 0° 到 360° 的一系列风向角(以 5° 为间隔)范围下的气动力特性, 仅在船梁到船尾可扩大到 10° 。
- 1.2 测量具有风力辅助推进系统的船模在 0° 到 360° 的一系列风向角(以 5° 或 10° 为间隔)范围下的气动力特性, 风力辅助推进系统的迎角范围为 0° 到 180° , 船模每一风向角间隔为 5° 或 10° 。在最大风力推进系数附近, 应需要更小的迎角间隔; 和
- 1.3 在测量间隔为 10° 的情况下, 应该用测量结果对每个中间力特性(例如在 $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ \dots$ 的 F_x)进行插值。

3.2 当船舶形状和风力辅助推进系统在右舷和左舷对称时, 风力推进系数也是对称的, 因此, 从 0° 到 180° 或 180° 到 360° 的一系列风向角的测量可以省略。

3.3 如果风力辅助推进系统具有船帆、旋筒等可变和可控结构, 则风力辅助推进系统的模型可布置为风向角、旋筒速度或其他可控结构使获得的风力最大化或使风阻力最小化。

方案2: 在单个风力推进装置的完整模型上进行试验

4 模型

4.1 纠正措施应考虑船体和上层建筑的影响, 并考虑到遮蔽区域和距离。如果船上安装了多个风力推进装置, 则纠正措施应考虑它们之间的气动相互作用。验证方可要求试验编写者提供案卷, 以验证这些影响已被考虑在内。

4.2 通过力平衡将风力推进单元模型与转台连接, 通过改变转台的角度来改变船模的风向角。

5 试验工况

5.1 船舶风力辅助推进系统风矩阵风洞模型试验除几何相似性外, 还必须满足动力相似性衡准。即当试验风速大于某一临界风速时, 无因次风系数趋于稳定, 模型周围流场与实船相似。测得的风系数可以直接外推到实船上。在试验中, 通过可变风速试验确定临界风速。

5.2 试验的最大雷诺数应大于 5.0×10^5 。雷诺数 Re 表示为:

$$Re = \rho \cdot U \cdot C / \mu$$

式中， ρ 和 μ 分别为空气的密度和粘度，U为风速，C为风力推进装置的平均弦长。

5.3 阻塞比不应超过5%。该比值由模型的横向投影面积除以风洞的横截面面积计算得到。

6 试验方法

6.1 为了获得每一船舶风向角下的风力辅助推进系统的最大风推进系数，试验方案中应包括以下气动特性的测量：

- .1 风力推进装置的许用迎角范围；和
- .2 许用设置范围(剖面弧度、转速、吸气率、缩小面积等)。

6.2 作用在船上的推进力是指在风力推进装置上测得的指向船首的气动力。

附件 2^①
C 类创新技术效果的计算和验证指南

附录 1 发电用余热回收系统 (C-1 类)

1.1 创新能效技术概要

1.1.1 本章为高温余热回收系统（发电类型）作为创新能效技术时有关辅助功率 ($P_{AEff(i)}$) 减少的计算和验证方法的提供指导。直接以机械方式传到驱动轴的余热回收能量已在 V_{ref} 中得到了反映，因此在本类别内不必测量。

1.1.2 余热能效技术通过回收废气、冷却水等的热能用以发电，提高发动机内燃料燃烧所产生能量的利用效率。

1.1.3 通过余热能效技术（发电类型）进行发电有如下两种方法。

- 1 (A) 通过热交换器回收热能用以驱动热机来带动发电机的方法；和
- 2 (B) 采用动力涡轮增压机等直接驱动发电机的方法。而且，有一种余热回收系统能组合以上两种方法。

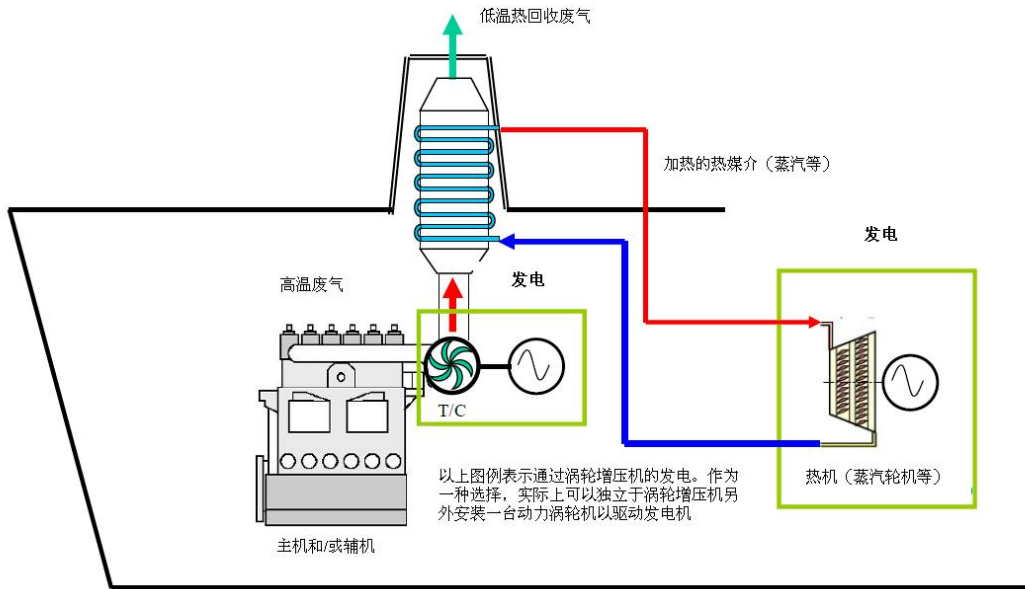


图 1-废气热回收系统图

1.2 计算方法

1.2.1 余热回收系统导致的功率减少量

1.2.1.1 通过余热回收系统减少的功率可用下式计算。对该系统， f_{eff} 在 EEDI 公式中取 1.00。

$$P_{AEff} = P'_{AEff} - P_{AEff_loss} \quad (1)$$

以上公式中， P'_{AEff} 为余热回收系统产生的功率， P_{AEff_Loss} 则为驱动余热回收系统所需的功率。

1.2.1.2 P_{AEff} 为在 EEDI 计算所适用的船舶性能状态下，通过余热回收系统减少的船舶总辅助功率 (kW)。不论其在船上的应用情况如何（除本章 1.2.1.4 所述的设备消耗功率外），回收系统在此状态下产生并输入主配电板的功率均应予以考虑。

1.2.1.3 P'_{AEff} 按下式定义。

$$P'_{AEff} = \frac{W_e}{\eta_g}, \quad (2)$$

式中：

W_e ：采用余热回收系统发电的计算值；

① 本章中所有的例子仅用于说明计算和验证的方法。

η_g : 加权的平均发电机效率。

1.2.1.4 P_{AEff} 由下列因素确定:

- 1 发动机废气的温度和质量流量等;
- 2 余热回收系统的构成; 和
- 3 余热回收系统部件的效率和性能。

1.2.1.5 P_{AEff_Loss} 为驱动余热回收系统所需泵等设备的功率 (kW)。

1.3 验证方法

1.3.1 一般规定

1.3.1.1 创新能效技术的船舶 EEDI 应按 EEDI 检验指南进行验证。EEDI 检验指南中未包括的有关创新能效技术的附加内容见下文。

1.3.2 设计阶段的前期验证

1.3.2.1 除 EEDI 检验指南 4.2.2 要求外, 船东或船厂编制的 EEDI 技术案卷还应包括:

- 1 余热回收系统的简图, 如装置图、工作过程流程图、或管路和仪表图, 以及系统部件规格等的相关资料;
- 2 余热回收系统节省的辅机功率; 和
- 3 EEDI 计算结果。

1.3.2.2 除 EEDI 检验指南 4.2.7 要求外, 验证方还可能要求船厂直接提供的附加资料包括:

- 1 主机在 75%MCR(和/或辅机在 SFC 的测量状态)时, 不同空气进口的环境温度(如 5°C、25°C 和 35°C)条件下的废气数据, 包括:
 - 1 涡轮增压器的废气质量流量 (kg/h);
 - 2 涡轮增压器后的废气温度 (°C);
 - 3 动力涡轮机可用的废气旁通质量流量 (如有) (kg/h);
 - 4 旁通废气温度 (°C); 和
 - 5 旁通废气压力(bar)。
- 2 对于采用热交换器的系统, 根据主机的废气数据, 该热交换器预计的输出蒸汽流量和蒸汽温度;
- 3 余热回收系统所回收的热能估算过程; 和
- 4 本节 1.2.1 中所定义的 P_{AEff} 计算方法的进一步详细资料。

1.3.3 试航时 Attained EEDI 的最终验证

1.3.3.1 余热回收系统节省的辅机功率应通过余热回收系统主要部件的工厂试验结果予以验证, 并如有可能, 在试航时进行验证。

1.3.3.2 对于很难进行工厂试验的系统, 如废气经济器, 余热回收系统的性能应在试航时通过测量其蒸汽量及温度等进行验证。在此情况下, 所测得的蒸汽量、温度等应修正到其设计时的废气状态下以及主/辅机 SFC 测量状态下的对应值。废气状态应根据机舱中的空气温度进行修正 (主/辅机 SFC 测量状态, 即 25°C) 等。

2 光伏发电系统 (C-2 类)

2.1 创新能效技术概要

2.1.1 船上安装的光伏 (PV) 发电系统将提供船舶推进或船上使用的部分电力。光伏发电系统由光伏模块和其他电气设备构成。图 1 为光伏发电系统的示意图。光伏模块由太阳能电池组合构成, 例如陆地用晶体硅太阳能电池和陆地用薄膜太阳能电池等类型。

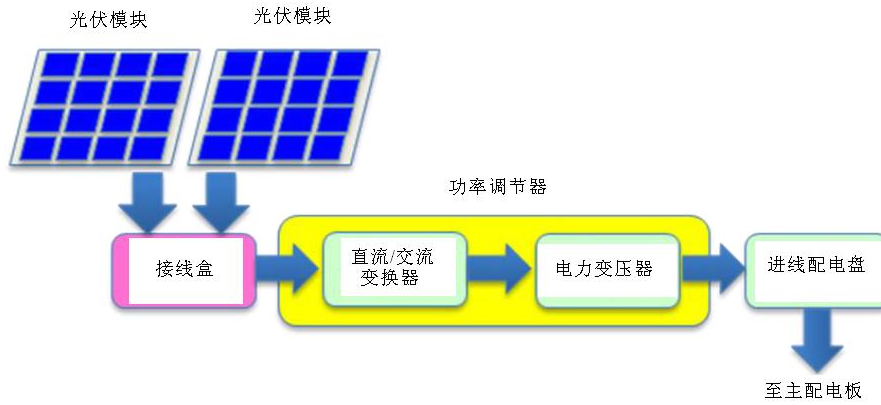


图 1 光伏发电系统的示意图

2.2 计算方法

2.2.1 光伏发电系统产生的电力

2.2.1.1 光伏发电系统导致的辅助机械功率降低可通过下式进行计算：

$$f_{eff} \cdot P_{AEff} = \{f_{rad} \times (1 + L_{temp} / 100)\} \times \{P_{max} \times (1 - L_{others} / 100) \times N / \eta_{GEN}\} \quad (1)$$

式中 $f_{eff} \cdot P_{AEff}$ 是由光伏发电系统产生的总净电力 (kW)。

2.2.1.2 有效系数 f_{eff} 是在全球主要航路线上的平均光伏发电量与厂商规定的名义光伏发电量的比值。有效系数可以采用全球主要航路线上的太阳辐照度和气温通过下式进行计算：

$$f_{eff} = f_{rad} \times (1 + L_{temp} / 100) \quad (2)$$

2.2.1.3 f_{rad} 是全球主要航路线上的平均太阳辐照度与厂商规定的名义太阳辐照度的比值。最大名义发电量 P_{max} 在 IEC 标准^①的标准测试条件 (STC) 下进行测量。厂商规定的 STC 为：气团 (AM) 1.5, 模块温度 25°C, 太阳辐照度 1000 W/m²。全球主要航路线上的平均太阳辐照度为 200 W/m²。因此, f_{rad} 由下式进行计算：

$$f_{rad} = 200 \text{ W/m}^2 \div 1000 \text{ W/m}^2 = 0.2 \quad (3)$$

2.2.1.4 L_{temp} 为修正系数, 通常为负数, 由 PV 模块的温度而得出, 数值以百分比表示。根据全球主要航路线上的平均气温, 认为模块的平均温度为 40°C。因此, L_{temp} 通过以下公式从厂商规定的温度系数 f_{temp} (%/K) (见 IEC 标准^①) 得出：

$$L_{temp} = f_{temp} \times (40^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \quad (4)$$

2.2.1.5 P_{AEff} 为由所产生的 PV 功率除以厂商规定条件下发电机的加权平均效率, 以下式表示：

$$P_{AEff} = P_{max} \times (1 - L_{others} / 100) \times N / \eta_{GEN}, \quad (5)$$

式中: η_{GEN} 为发电机的加权平均效率。

2.2.1.6 根据 IEC 标准^①的规定, P_{max} 为一个模块所产生的最大名义 PV 发电量, (kW)。

2.2.1.7 L_{others} 是其他损耗的总和, (%) , 包括功率调节器中的损耗、接通时的损耗和电阻造成的损耗等。根据经验, 估计 L_{others} 为 10% (功率调节器中的损耗 5%, 其他损耗总计 5%)。但是, 对于功率调节器中的损耗, 采用根据 IEC 标准^②而规定的数值是可行的。

2.2.1.8 N 为光伏发电系统所采用的模块的数量。

2.3 验证方法

2.3.1 一般规定

2.3.1.1 采用创新能效技术的船舶 EEDI 应按 EEDI 检验指南进行验证。本节规定了与创新技术

① 陆地用晶体硅光伏模块, 参见 IEC61215 “陆地用晶体硅光伏 (PV) 模块-设计鉴定和型式认可”。陆地用薄膜光伏模块, 参见 IEC61646 “陆地用薄膜光伏 (PV) 模块-设计鉴定和型式认可”。

② IEC61683 “光伏系统-功率调节器-效率测定程序”。

相关的附加要求。

2.3.2 设计阶段的前期验证

2.3.2.1 除 EEDI 检验指南 4.2.2 要求外，船东或船厂编制的 EEDI 技术案卷还应包括：

- .1 光伏发电系统的简图；
- .2 光伏发电系统所产生的功率；和
- .3 光伏发电系统产生的 EEDI 计算值。

2.3.2.2 除 EEDI 检验指南 4.2.7 的要求外，验证方还可能要求船厂直接提供的附加资料包括：

- .1 光伏发电系统产生的辅助功率降低的详细计算过程；和
- .2 本导则 2.2 中规定的总净电力 ($f_{eff} \cdot P_{AEff}$) 的详细计算过程。

2.3.3 试航时 Attained EEDI 的最终验证

2.3.3.1 应根据 EEDI 技术案卷对由 PV 发电系统所发的总净电力进行确认。除此之外，还应在最终验证之前确认船上 PV 发电系统的配置是否与前期验证中所采用的相同。