

# 全浪向波浪增阻预报新方法在实船试航中的应用研究

王金宝<sup>1,2</sup> 马翔<sup>1</sup> 冯毅<sup>1</sup> 熊小青<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院 上海 200011 ; 2. 上海市船舶工程重点实验室 上海 200011)

**摘要:** 波浪增阻的正确预报对实船的功率修正具有重要影响, 需要恰当消除才能准确评价约定功率下的航速是否达到要求。2022年12月召开的MEPC 79会议正式将ITTC 2021版“实船航速测试分析规程”确定为法定规程, 该规程引入了全浪向波浪增阻预报方法SNNM, 弥补了现有波浪增阻预报方法的局限。该文重点研究了周期、浪向、波谱以及RAO曲线形状等因素对SNNM预报方法的影响, 可用于指导实船试航的功率修正。

**关键词:** 全浪向; 波浪增阻预报新方法; 实船试航; 应用研究

**中图分类号:** U661.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.03.053

## Application of New Method for Predicting Added Resistance of Ships in Waves of Arbitrary Heading During Sea Trial

WANG Jinbao<sup>1,2</sup> MA Xiang<sup>1</sup> FENG Yi<sup>1</sup> XIONG Xiaoqing<sup>1,2</sup>

(1. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Ship Engineering, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The accurate prediction of the added resistance in waves has an important impact on the power correction of the full-scale ship, and it needs to be properly eliminated to accurately evaluate whether the speed at the agreed power meets the requirements. The MEPC 79 meeting held in December 2022 officially recognized the ITTC 2021 version of the “Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials” as a statutory procedure, and the SNNM method for the prediction of the added resistance of ships in waves of arbitrary heading was introduced to fill the gap of current prediction methods. The influences of the period, wave direction, wave spectrum and the shape of RAO curve on the SNNM method have been examined in detail for the power correction in sea trials.

**Keywords:** waves of arbitrary heading; new method for predicting added resistance in waves; sea trial; application

## 0 引言

实船试航约定的状态通常为无风、无浪、无流、深水等条件下的理想状态, 但实际航速功率测试往往

在一定的风、浪、流等非理想状态下进行, 故需对实船测试数据进行科学合理地修正。为此, 国际拖曳水池会议 (international towing tank conference, ITTC) 应国际海事组织 (international maritime organization,

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-01

作者简介: 王金宝 (1969-), 男, 博士, 研究员/博士生导师。研究方向: 基于CFD和模型试验的船舶航速预报及实船测试验证。

马翔 (1981-), 男, 本科, 高级工程师。研究方向: 实船性能测试验证和节能技术开发。

冯毅 (1982-), 男, 硕士, 研究员。研究方向: 船舶快速性及程序实现。

熊小青 (1982-), 男, 本科, 研究员。研究方向: 船舶快速性。



IMO) 所属的海事环保委员会 (marine environment protection committee, MEPC) 要求, 2011 年成立了“实船航行性能”委员会, 专门开展有关实船测试规程的制定 / 修订工作。该委员会经过坚持不懈的努力, 先后完成了实船测试分析规程 2014/2017/2021 版<sup>[1-4]</sup>, 并分别被 MEPC 68/73/79 次会议于 2015 年、2018 年和 2022 年确定为与 ISO 15016: 2015 并列的法定规程<sup>[5-7]</sup>。本文简要回顾 ITTC 2021 版取得的重要技术进步, 重点研究影响全浪向波浪增阻预报新方

法 (SHOPERA-NTUA-NTU-MARIC, SNNM) 的主要因素及其变化趋势, 服务实船试航功率修正。

### 1 ITTC 2021 版亮点概述

与实船测试规程 ITTC 2017 版相比, ITTC 2021 版在波浪修正方法、浅水修正方法、姊妹船增加往返次数的要求等方面具有显著变化, 主要改进如表 1 所示, 详见文献 [8]。

表 1 ITTC 2021 版对 ITTC 2017 版的主要改进

主要改进项	ITTC 2017 版	ITTC 2021 版
波浪增阻修正方法	STA 法 (前进方向 45° 范围), NMRI 法 (全浪向, 需要型线)	新增 SNNM 法, 无需型线, 适用于全浪向和所有船型, 船长范围 75 ~ 400 m
浅水修正方法	Lackenby 法、Raven 法	只保留 Raven 法; 只修正功率, 不再对速度进行修正
浅水下限	$h = \max\left(2\sqrt{BT}, 2\frac{V_s^2}{g}\right)$	$h = \max\left(2.5T, 2.4\frac{V_s^2}{g}\right)$
浅水上限	$h = \max\left(3\sqrt{BT}, 2.75\frac{V_s^2}{g}\right)$	取消, 保持修正数值的连续性
姊妹船增加往返次数的条件	单次往返流速变化超过 0.2 kn (不能及时发现, 不具有操作性)	与首制船相差 0.3 kn, 并且流速修正采用荷兰的“平均法”

其中, SNNM 法为 ITTC 2021 版新增方法, 也是新版规程最大的亮点, 得到 ITTC 顾问委员会高度评价。该方法系本院与雅典国立科技大学、新加坡南洋理工大学长期紧密合作的结果, 并在开发、验证及进入 ITTC 规程的过程中, 得到了国内外同行的大力支持。

### 2 波浪增阻响应幅值算子预报方法

ITTC 2021 版预报波浪增阻响应幅值算子 (response amplitude operator, RAO) 的方法包含 STA1 法、STA2 法、SNNM 法、NMRI 法和模型试验法这 5 种方法, 同时给出了每种预报方法的详细计算公式<sup>[4]</sup>。SNNM 法的引入有效解决了浪向范围受限以及使用不方便等问题。与浪向范围限制在 45° 内的 STA1 法和 STA2 法相比, SNNM 法适

用于全浪向和具有初始纵倾的状态, 且输入参数与 STA2 法相当 (见表 2)。

表 2 SNNM 法与 STA 法的输入参数比较

输入参数	预报方法		
	STA1	STA2	SNNM
垂线间长 $L_{pp}/m$	—	√	√
型宽 $B/m$	√	√	√
艏吃水 $T_F/m$	—	√	√
艉吃水 $T_A/m$	—	√	√
方形系数 $C_B$	—	√	√
纵向回转半径与 $L_{pp}$ 之比 $K_{yy}$	—	0.25	√
试航状态对应 0.99B 的进流段长度 $L_E/m$	—	—	√
试航状态对应 0.99B 的去流段长度 $L_R/m$	—	—	√
试航状态对应 0.95B 的进流段长度 $L_{BWL}/m$	√	—	—

与 NMRI 法相比, SNNM 法无需水线面和横剖面曲线, 应用更加方便。因此, 该方法在 ITTC 实船航行性能委员会充分验证后<sup>[9]</sup>, 经过 ITTC 顾问委员会的投票, 以高票赞成顺利进入 ITTC 2021 实

船测试分析规程, 有关过程详见文献 [10]。部分船型参数如图 1 与图 2 所示, ITTC 2021 版中不同 RAO 预报方法的优缺点、适用范围及预报精度分别见表 3 和图 3。

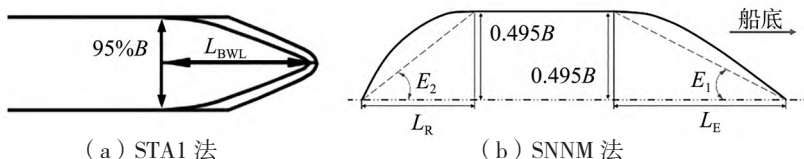


图 1 部分参数示意图

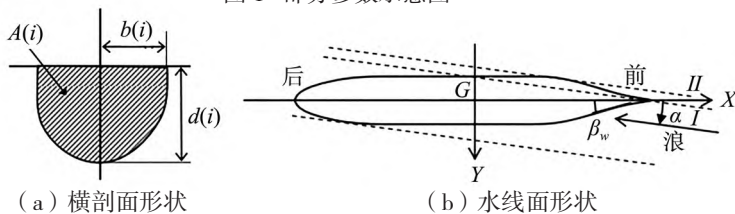


图 2 日本 NMRI 法所需输入参数示意图

表 3 ITTC 2021 版不同 RAO 预报方法比较

方 法	优 点	缺 点
STA1	使用方便	仅限于非常小的纵摇和升沉运动, 限制在与航向 $45^\circ$ 范围内, 不考虑初始纵倾、速度和波浪周期的影响
STA2	使用方便	不能考虑初始纵倾影响; 限制在与航向 $45^\circ$ 以内并假设 RAO 在 $0 \sim 45^\circ$ 内相同; 不考虑角分布函数, 仅适用于长峰波
SNNM	易于使用且精度高、无需型线、适用于所有浪向	短波中的上翘趋势尚未得到充分验证, 尽管理论、数值模拟和模型试验中的部分案例已经显示出这种趋势
NMRI	当有水线面和横截面曲线时, 精度更高	前处理时间长, 许可需要申请
水池试验	当有型线和船模时最为可靠	试验时间长、对水池要求高、能够开展全浪向的水池少

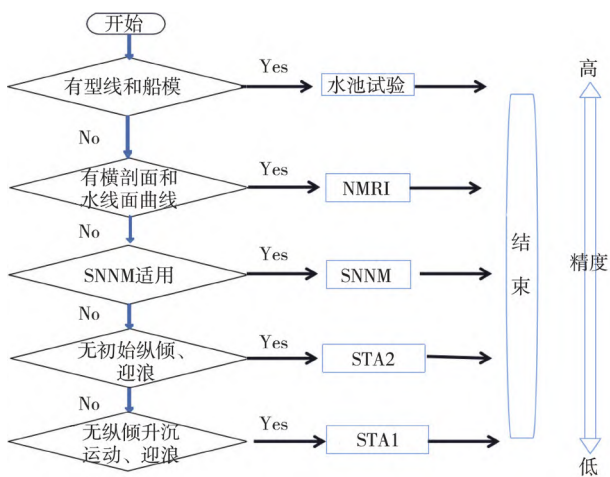


图 3 不同预报方法适用范围及预报精度比较

可见, 综合考虑预报精度、适用范围、使用方便和试验成本等因素, SNNM 法是 RAO 预报的首选方法。

### 3 不同波浪增阻预报方法比较

除了 STA1 法预报波浪增阻无需波浪谱外, ITTC 2021 推荐的 STA2 法、SNNM 法、NMRI 法和模型试验法预报波浪增阻均是 RAO 与波浪谱的结合。对于波浪谱, ITTC 2021 优先采用测量的波浪谱, 若波谱没有测量, 则推荐使用标准波浪谱 Pierson-Moskowitz (简称 P-M) 谱。当然, 其他波浪谱 (如



Jonswap 谱，简称 J-S 谱）只要有公开参考文献支持也可以使用。对于测量的波谱及标准的波浪谱与不同 RAO 预报方法的组合，允许的最大波高及浪向适用范围如表 4 所示。

表 4 ITTC 2021 版不同 RAO 预报方法与波浪谱组合的适用范围

方 法	浪向适用范围	测量波浪谱	标准波浪谱
STA1	-45° ~ 45°	无需波谱， 波高上限 2.25 <i>X</i>	无需波谱， 波高上限 1.5 <i>X</i>
STA2		2.25 <i>X</i>	1.5 <i>X</i>
SNNM			
NMRI	全浪向		
水池试验			

表 4 中： $X=0.15\sqrt{L_{pp}}$ ， $L_{pp}$  为垂线间长；0° 表示迎浪。

本节分别以大型箱船、KVLCC2 和散货船为对象，采用相同的 P-M 谱，分析不同预报方法（STA1/STA2/SNNM）对波浪阻力增加的影响。不同船型的主要参数如表 5 所示。

表 5 不同船型的主要参数

主要参数	大型箱船	KVLCC2	散货船
垂线间长 /m	386	320	183
型宽 /m	58.6	58	32.26
艏吃水 /m	4.5	20.8	5.1
艉吃水 /m	10.7	20.8	7.1
初始纵倾角 / (°)	0.92	0.0	0.63
航速 /kn	23.0	15.5	15
静水阻力 /kN	2 945	1 770	634
最大目测允许波高 /m	2.95	2.68	2.03
本文采用波高 /m	—	2	—

为了更加直观地反映波浪增阻对功率的影响，本文采用无因次的平均波浪增阻比例，即相同航速下平均波浪增阻与静水阻力的比值，而平均波浪增阻主要考虑了不同频率的贡献；对 P-M 谱，还进

一步考虑了不同浪向的综合贡献。

### 3.1 不同方法对大型箱船波浪增阻预报的影响

图 4 为大型箱船在压载吃水和迎浪下，采用不同 RAO 预报方法获得的平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势。

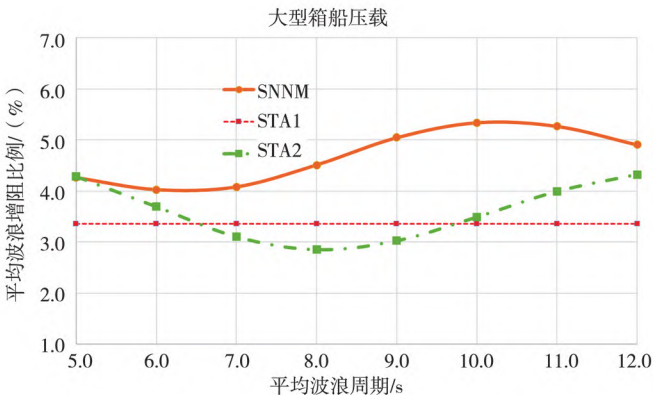


图 4 大型箱船在迎浪下，不同预报方法比较

由图 4 可见，对于 STA1 法，由于不考虑周期的变化，因此平均波阻增加是条平直线。8 s 以后，STA1 法比 SNNM 法低 1% ~ 2%；STA2 法在 7 ~ 11 s 区间，平均波浪增阻比 SNNM 方法低 1% ~ 2%；其他周期下，差异在 1% 以内。

### 3.2 不同方法对 KVLCC2 波浪增阻预报的影响

图 5 为 KVLCC2 在设计吃水及迎浪情况下，采用不同 RAO 预报方法获得的平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势。

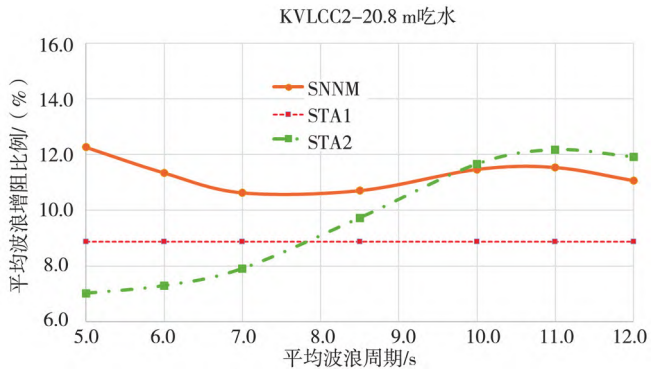


图 5 KVLCC2 在迎浪下，不同预报方法比较

从图 5 可见，对于 STA2 法，不同周期下变化幅度非常大：5 ~ 11 s 范围内，平均波阻增加比例



从7%增加到12%;对于SNNM法,在5~12 s内,平均波阻增加比例为10.5%~12%,变化幅度较小;STA1法在5~12 s周期内,比SNNM法预报的波浪增阻小2%~3%。

### 3.3 不同方法对散货船波浪增阻预报的影响

散货船在压载吃水和迎浪下,采用不同RAO预报方法获得的平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势,如图6所示。

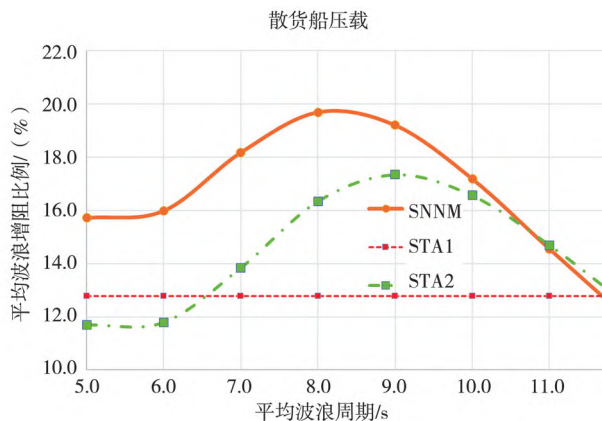


图6 散货船在迎浪下,不同预报方法比较

由图6可见,在5~8 s范围内,STA2法的曲线走势与SNNM法基本平行,但平均波浪增阻比例明显比SNNM法低约4%;9 s时两者差异约2%;在10~12 s范围内,两者基本相当。

综合大型箱船、KVLCC2和散货船发现,在5~12 s范围内,采用相同的P-M谱,STA1法预报的波浪增阻均较SNNM法低1%~7%不等;10 s以下,STA2法预报的波浪增阻均低于SNNM法,其中大型箱船的最大差异在9 s附近(约为2%),KVLCC2和散货船的最大差异在5 s附近(为4%~5%)。

### 3.4 典型船舶不同RAO预报方法验证

不同方法预报的波浪增阻显然并不相同。为说明哪种方法更加合理和正确,本节进一步针对大型箱船、KVLCC2和散货船,将SNNM法与特点相当的STA2法作比较,SNNM法的详细验证参见文献[9]和文献[11]。图7至图9给出了SNNM法、STA2法预报的RAO曲线与试验点比较。

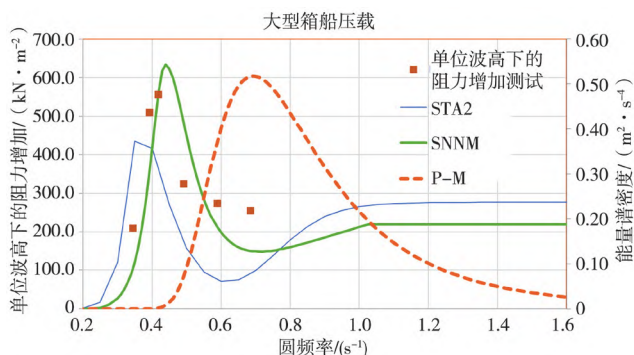


图7 大型箱船SNNM法和STA2法预报的RAO曲线与试验比较(P-M谱为7 s平均周期)

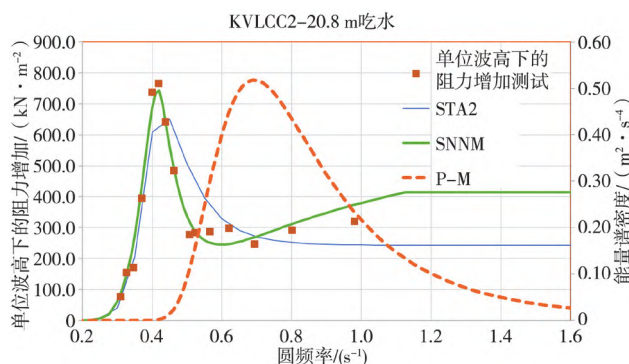


图8 KVLCC2船SNNM法和STA2法预报的RAO曲线与试验比较(P-M谱为7 s平均周期)

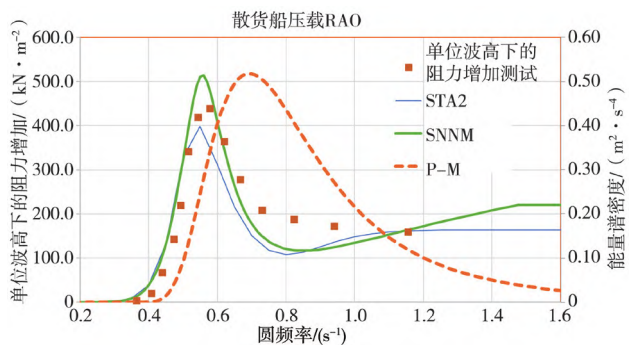


图9 散货船SNNM法和STA2法预报的RAO曲线与试验比较(P-M谱为7 s平均周期)

由图7至图9可见,SNNM法预报的RAO曲线与试验点更加接近,STA2法均低报了RAO曲线峰值且偏离试验点更远。结合典型的7 s周期下的P-M波浪谱,显然,SNNM法具有更大且更合理的波浪增阻。



## 4 SNNM 波浪增阻预报方法影响因素研究

本节重点研究波浪周期、浪向、波谱及短波中 RAO 曲线形状对 SNNM 法预报波浪增阻的影响。

### 4.1 周期与浪向角变化对波浪增阻预报的影响

在深水有限振幅规则波 (Stokes) 理论中, 波陡 (即波高波长之比) 的极限值为 0.142。当波陡大于此值时, 波面发生破碎。本文考察的平均波浪周期范围为 5 ~ 12 s, 对应谱峰周期 6 ~ 16 s, 可以涵盖绝大部分常用范围。在此范围内, 考察浪向角变化对波浪增阻预报的影响。

#### 4.1.1 周期与浪向角对大型箱船波浪增阻预报的影响

选择较为典型的 7 s 和 10 s 平均波浪周期, 大型箱船压载吃水下平均波浪增阻比例随浪向角变化的趋势如图 10 所示。

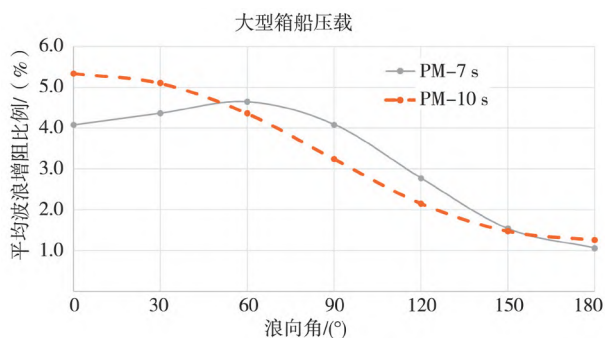


图 10 典型周期下, 大型箱船平均波浪增阻比例随浪向角变化

可见, 在所有的浪向范围内, 大型箱船均存在不同程度的波浪增阻。以 60° 和 120° 往返的不利浪向角为例, 7 s 和 10 s 这 2 个周期下, 平均波浪增阻比例分别约为 4.5% 和 2.5%, 往返平均为 3.5%, 对航速影响超过 0.2 kn, 这对大型箱船顺利交船非常重要。STA 法将浪向角限定在与前进方向 45° 范围内, 其他浪向下, 阻力修正量为 0。显然, 这具有很大的局限性, 因此采用 SNNM 修正方法更加合理。

由于主浪向 0 ~ 60° 对平均波浪增阻影响较大,

以下进一步分析 0 ~ 60° 时本船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势, 如图 11 所示。

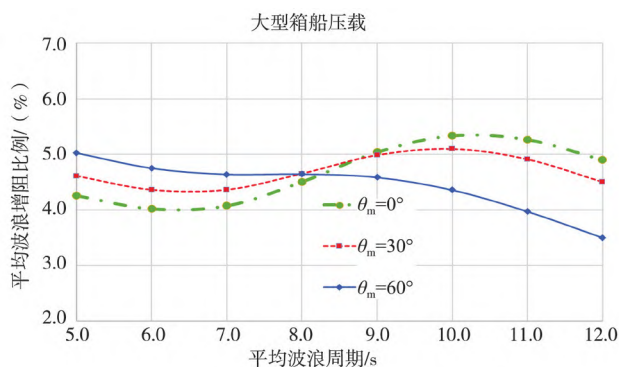


图 11 不同主浪向下, 大型箱船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势

由图 11 可以看出:

(1) 主浪向角为 0° 和 30° 时, 平均波阻增加随周期的变化均呈波浪走势, 但变化幅度均较小 (1 个为 4% ~ 5.5%, 1 个为 4.5% ~ 5%), 2 根曲线差异不大。

(2) 主浪向角 60° 时, 平均波阻增加曲线呈单调下行走势, 变化幅度为 3.5% ~ 5.0%。不过, 该数值同样不可忽视。因为不同周期下, 平均 4.5% 左右的阻力增加已经显著影响功率修正, 可能给交船验收带来明显影响。

#### 4.1.2 周期与浪向角对 KVLCC2 波浪增阻预报的影响

20.8 m 吃水下, KVLCC2 的平均波浪增阻比例随浪向角变化的趋势如图 12 所示, 平均波浪周期同样选择较为典型的 7 s 和 10 s。

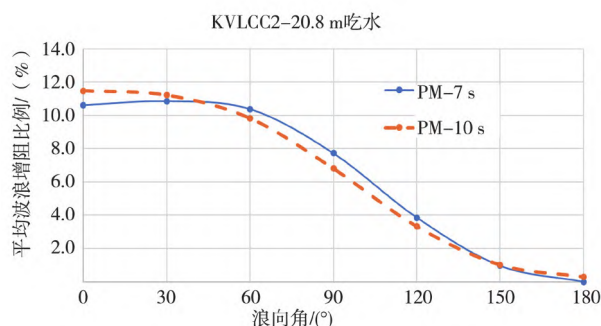


图 12 典型周期下, KVLCC2 平均波浪增阻比例随浪向角变化

可见, 在  $0 \sim 60^\circ$  范围内, 平均波浪增阻基本保持在 11% 左右; 随着浪向角增加, 波浪增阻比例下降; 但即使浪向角达到  $120^\circ$  时, 波浪增阻仍接近 4%。因此, 全浪向修正仍然十分必要。7 s 和 10 s 下的平均波浪增阻曲线在所有浪向下差异均小于 1%。

对于 KVLCC2, 主浪向  $0 \sim 60^\circ$  范围内对平均波浪增阻影响非常显著, 有必要进一步分析其平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势, 如图 13 所示。

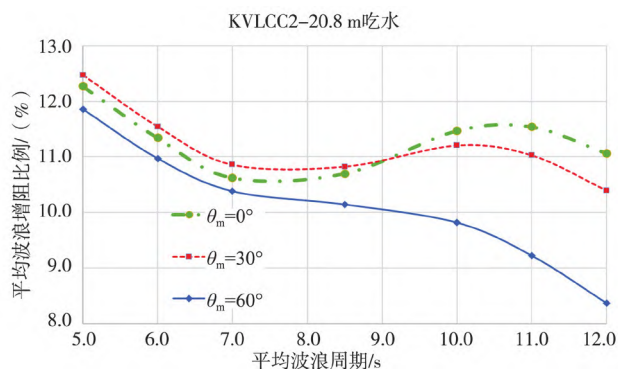


图 13 不同主浪向下, KVLCC2 平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势

由图 13 可见:

(1) 主浪向角在  $0 \sim 30^\circ$  范围内, 平均波阻增加比例随周期的增加呈波浪起伏, 在 10.5% ~ 12.5% 区间变化; 相同周期下, 与  $0^\circ$  和  $30^\circ$  的差异均在 1% 以内。

(2) 主浪向角为  $60^\circ$  时, 平均波阻增加的变化呈单调下行走势, 在 5 ~ 12 s 范围内变化幅度在 8.5% ~ 12%。尤其值得关注的是, 如果采用 STA 法,  $60^\circ$  的浪向角是无法进行波阻增加修正的, 这显然很不科学, 对交船也极其不利。因为对于像 KVLCC2 这样的大船, 试航时间通常超过 10 h, 期间浪向角改变  $45^\circ$  也极有可能出现。

综合大型箱船和 KVLCC2, 在主浪向  $0 \sim 30^\circ$  范围内和相同周期下, 不同浪向角引起的波阻增加比例差异均小于 1%。需要注意的是, 当主浪向角达到  $60^\circ$  时, 在 5 ~ 12 s 范围内, 波阻增加比例仍然明显; 即使浪向角达到  $120^\circ$ , 波阻增加比例仍然有 2% ~ 4%, 不可忽略。

## 4.2 不同波浪谱对波浪增阻预报的影响

P-M 谱主要适用于充分发展的风浪, 其特点为除了主浪向外, 还存在其他浪向, 表现为短峰波; 而 J-S 谱主要适用于涌浪, 浪向单一, 表现为长峰波。因此, 本文在采用 P-M 谱计算风浪引起的波阻增加时, 考虑了主浪向  $\pm 90^\circ$  范围内其他浪向的贡献。

### 4.2.1 不同波谱对大型箱船波浪增阻预报的影响

$0^\circ$  迎浪下, P-M 谱和 J-S 谱对大型箱船波浪增阻的影响如图 14 所示。

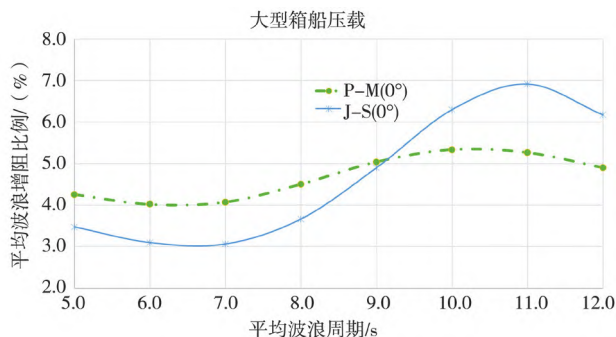


图 14 不同波谱下, 大型箱船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势

由图 14 可见: 10 s 之前, 采用 P-M 谱和 J-S 谱获得的平均波浪增阻比例, 两者差异小于 1%; 11 s 时, 两者差异最大约为 1.5%。采用 J-S 谱, 平均增阻随周期增加的变化幅度为 3% ~ 7%, 明显高于 P-M 谱的 4% ~ 5.5%, 这与 P-M 谱综合考虑了不同浪向的贡献有关。

### 4.2.2 不同波谱对 KVLCC2 波浪增阻预报的影响

$0^\circ$  迎浪下, P-M 谱和 J-S 谱对 KVLCC2 波浪增阻的影响如图 15 所示。

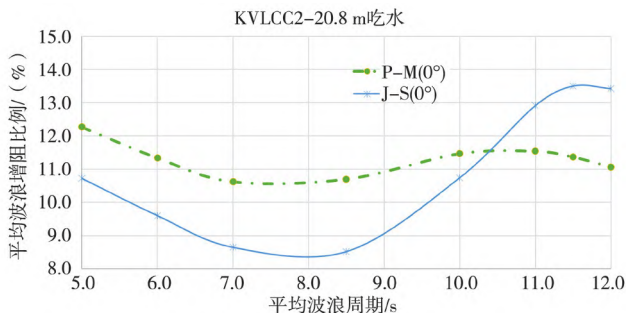


图 15 不同波谱下, KVLCC2 平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势



由图 15 可见:

(1) 对 P-M 谱, 平均波浪增阻随周期变化比较平缓, 变化幅度为 10.5%~12.5%; 而对 J-S 谱, 平均波浪增阻随周期变化幅度明显增加, 变化区间为 8.5%~13.5%。

(2) 8.5 s 之前, 2 条曲线的走势几乎平行, 采用 P-M 谱比 J-S 谱波阻比例高约 1.5%~2%; 8.5~11.5 s, J-S 谱对应的波阻增加呈快速上升趋势, 并在 11.5 s 达到峰值。对 320 m 长的船, 当平均周期为 11.5 s 左右时, 波长与船长相当, 由涌浪引起的船舶运动增阻显著增加。

综合大型箱船和 KVLCC2, 采用 J-S 谱在不同周期下的波浪增阻变化幅度明显高于 P-M 谱。J-S 谱在平均周期 10~11 s 后引起的波浪增阻比例才超过 P-M 谱, 这与船长 ( $L_{pp}$ ) 和波长 ( $\lambda$ ) 接近, 并且船舶的运动增阻趋于显著有关。其余周期下, P-M 谱下的波浪增阻比例更高。

### 4.3 短波中RAO曲线抑制的影响

ITTC 在讨论 SNNM 法时, 有人曾提出需要对短波中 RAO 上翘趋势进行抑制以避免陡峭的问题。所谓抑制, 即当波长小于某个数值后, RAO 曲线强制走平。本文重点考察不同抑制范围内  $\lambda_{\min}=0.05L_{pp}\sim 0.15L_{pp}$  下, 平均波浪阻力增加比例随平均周期变化的趋势。当  $\lambda_{\min}=0.05L_{pp}$  时, 可以近似认为对 RAO 曲线不抑制; 而当  $\lambda_{\min}=0.15L_{pp}$  时, 则是 ISO 15016 工作组讨论 SNNM 法时认为可以接受且需要抑制的起点。图 16 为 RAO 不同抑制范围示意图, 深水中波长 ( $\lambda$ ) 与波浪频率 ( $\omega$ ) 的关系见式 (1):

$$\omega = 2\pi / \sqrt{\lambda / 1.56} \quad (1)$$

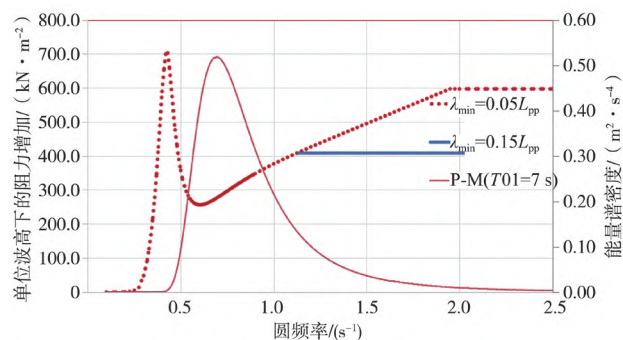


图 16 RAO 不同抑制范围示意图

#### 4.3.1 RAO 趋势抑制对大型箱船波浪增阻预报的影响

图 17 给出了不同抑制范围下, 大型箱船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势。

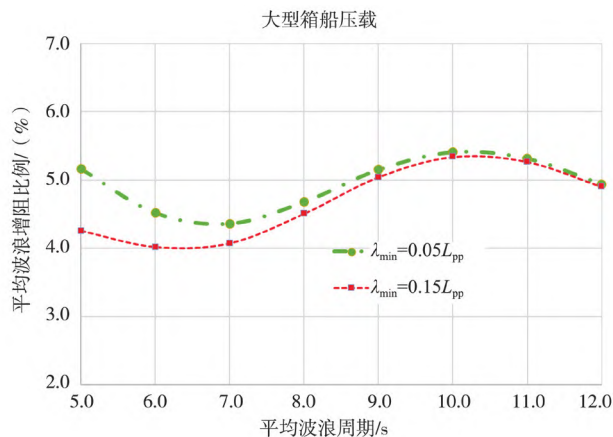


图 17 不同抑制范围下, 大型箱船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势

本船平均波浪增阻随周期变化更加平缓, 当  $\lambda_{\min}$  为  $0.05L_{pp}$  和  $0.15L_{pp}$  时, 波阻增加比例变化幅度均在 4%~5.5%。在 5~12 s 范围内, 2 条曲线除了 5 s 时相差约 1% 外, 其余周期均明显低于 1%。故对于大箱船, 短波中是否抑制 RAO 形状, 仅稍微影响到 5 s 附近的波阻增加比例。

#### 4.3.2 RAO 趋势抑制对 KVLCC2 波浪增阻预报的影响

KVLCC2 平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势如图 18 所示。

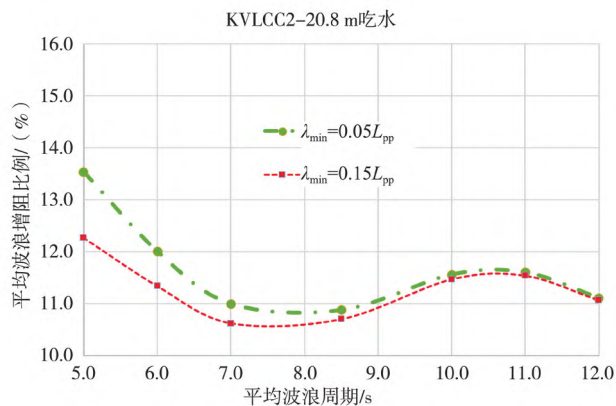


图 18 不同抑制范围下, KVLCC2 平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势



从图 18 可以发现:

(1) 对不同的抑制范围, 平均波浪增阻曲线变化趋势基本相当, 即当周期小于 7 s 时, 平均波浪增阻单调下降; 7 ~ 12 s 时, 曲线变化幅度在 1% 范围内呈起伏状。

(2) 当  $\lambda_{\min}=0.05L_{pp}$  时, 7 s 前曲线下下降较快, 变化幅值为 11% ~ 13.5%; 当  $\lambda_{\min}=0.15L_{pp}$  时, 曲线变化减缓, 变化幅值为 10.5% ~ 12.5%。

(3) 当  $\lambda_{\min}=0.05L_{pp}$  时, 5 s 周期下的波浪增阻比例 13.6% 明显高于 10 s 周期下的 11.7%, 可能并不合理; 而当  $\lambda_{\min}=0.15L_{pp}$  时, 5 s 下的波阻增加比例略高于 10 s, 更趋合理。

#### 4.3.3 RAO 趋势抑制对散货船波浪增阻预报的影响

为了进一步考察不同抑制范围的影响, 本节增加对散货船的考察。散货船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势如图 19 所示。

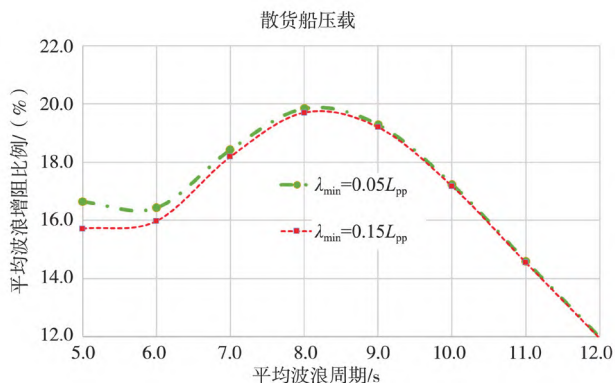


图 19 不同抑制范围下, 散货船平均波浪增阻比例随平均周期变化的趋势

从图 19 可以发现:

(1) 对不同的抑制范围, 平均波浪增阻曲线的变化趋势基本相当, 即: 当周期小于 8 s 时, 平均波浪增阻单调快速上升, 变化幅度为 16% ~ 20%; 周期大于 8 s 后, 平均波浪增阻单调快速下降, 变化幅度为 12% ~ 20%。

(2) 在 5 ~ 12 s 范围内, 2 条平均波浪增阻曲线差异很小, 基本均在 1% 以内, 即是否限制  $0.15L_{pp}$  以下波长的 RAO 形状, 对波阻增加预报比例影响小于 1%。

综合大型箱船、KVLCC2 和散货船发现, 是否限制  $0.15L_{pp}$  以下波长的 RAO 形状, 从趋势看影响主要为 5 s 附近, 对 KVLCC2 波阻增加比例影响约 1.5%; 对大型箱船和散货船影响约 1%。其他周期影响均小于 1%。

## 5 结 论

本文对 ITTC 2021 版“实船航速测试分析规程”新引入的全浪向波浪增阻预报方法 SNNM 进行了较为深入的研究, 重点考察了周期、浪向、波谱以及 RAO 曲线形状等因素对 SNNM 法的影响, 主要结论和建议如下:

(1) 对于波浪增阻预报, 不同 RAO 预报方法的精度和适用范围均不同, 应该优先选择精度高、工程适用的预报方法。SNNM 法的引入, 为方便实现全浪向、高精度的 RAO 预报提供了新的手段。

(2) 将平均波阻增加限定在浪向角  $45^\circ$  范围内既不合理, 也不科学。其实, 即使浪向角达到  $120^\circ$ , 不同平均周期下, 平均波阻增加依然显著, 其数值仍然不可忽视。

(3) 对考察的大型箱船、KVLCC2 和散货船发现, 在 5 ~ 12 s 范围内, STA1 预报的波浪增阻均低于 SNNM 法; STA2 预报的波浪增阻 9 s 以下均低于 SNNM 法。与试验比较发现, SNNM 法预报的 RAO 曲线比 STA2 法更加接近试验点。

(4) 采用 P-M 和 J-S 谱, 不同平均波浪周期对平均波浪阻力增加影响不一样, 总体而言, 短波中, P-M 谱影响更大; 长波中 J-S 谱影响更加显著。对于波浪谱, 可采用 ITTC 推荐的波浪谱, 同时建议积极创造条件开展实际海况下的波浪谱测试, 并考察与标准波浪谱的差异, 以应对今后波浪谱测量带来的挑战。

(5) 是否限制  $0.15L_{pp}$  以下波长的 RAO 形状, 对本文的研究对象影响主要在 5 s 附近, 其他周期下的影响不大。

实船航速 - 功率测试修正方法研究是一项持续改进的工作, 为此, ITTC 于 2021 年将“实船航





行性能”专门委员会升级为常设委员会, 长期开展有关工作; 而正在进行的 ISO 15016 新版修订也将持续到 2024 年。ITTC 与 ISO 共同努力, 将不断推动实船测试分析规程朝着更加科学合理、公开透明、工程适用的目标迈进。

## 参考文献

- [ 1 ] ITTC. Recommended procedures and guidelines 7.5-04-01-01.1: preparation and conduct of speed/power trials [ S ] . Zürich, 2014.
- [ 2 ] ITTC. Recommended procedures and guidelines 7.5-04-01-01.2: analysis of speed/power trials [ S ] . Zürich, 2014.
- [ 3 ] ITTC. Recommended procedures and guidelines 7.5-04-01-01.1: preparation, conduct and analysis of speed/power trials [ S ] . Zürich, 2017.
- [ 4 ] ITTC. Recommended procedures and guidelines 7.5-04-01-01.1: preparation, conduct and analysis of speed/power trials [ S ] . Zürich, 2021.
- [ 5 ] Marine Environment Protection Committee ( MEPC ) . 68th session, 11 to 15 May 2015 ( imo.org ) [ EB/OL ] . [ 2023-01-05 ] . <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-68th-session.aspx>.
- [ 6 ] Marine Environment Protection Committee ( MEPC ) . 73rd session, 22-26 October 2018 ( imo.org ) [ EB/OL ] . [ 2023-01-05 ] . <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-73rd-session.aspx>.
- [ 7 ] Marine Environment Protection Committee ( MEPC ) . 79th session, 12-16 December 2022 ( imo.org ) [ EB/OL ] . [ 2023-01-05 ] . <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-73rd-session.aspx>.
- [ 8 ] 王金宝. 实船航速测试规程持续更新及建议 [ EB/OL ] . [ 2023-01-05 ] . <https://www.imarine.cn/article-9721-1.html>.
- [ 9 ] WANG J B, BIELICKI S, KLUWE F, et al. Validation study on a new semi-empirical method for the prediction of added resistance in waves of arbitrary heading in analyzing ship speed trial results [ J ] . Ocean Engineering, 2021, 240: 109959.
- [ 10 ] 王金宝. 全浪向波浪增阻预报方法开发验证及建议 [ EB/OL ] . [ 2023-01-05 ] . <https://www.imarine.cn/article-9757-1.html>.
- [ 11 ] LIU S K, PAPANIKOLAOU A. Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula [ J ] . Ocean Engineering, 2020, 206: 107357.