

自由自航模全浪向波浪增阻试验研究

封培元¹, 王大建², 沈兴荣¹, 范余明¹, 王金宝³

(1. 上海市船舶工程重点实验室, 上海, 200011, Email: jichu@maric.com.cn

2. 中国船舶工业集团公司第七〇八研究所, 上海, 200011

3. 喷水推进技术重点实验室, 上海, 201100)

摘要: 随着 IMO 最小推进功率规范的实施和 ISO-15016 实船测试航速修正方法的修订改版, 波浪增阻研究引起了广泛的关注, 成为当前船舶耐波性领域研究的热点和难点。本研究针对传统的采用拖航方式的波浪增阻模型试验方法仅适用于迎浪和随浪两种浪向的问题, 提出了一种基于自由自航方式的全浪向波浪增阻模型试验方法, 并在拖曳水池中针对一型集装箱船开展了包含艏斜浪、横浪、艉斜浪等多个浪向下的模型试验, 通过与荷兰 MARIN 水池的试验结果进行对比, 证明了本试验结果的正确性和所提出方法的有效性, 该方法能够用于全浪向中的波浪增阻试验预报。

关键词: 波浪增阻; 模型试验; 全浪向; 自由自航

1 引言

船舶在波浪中航行时所受的总阻力较静水中不同, 在迎浪和艏斜浪中的总阻力均值往往较静水中有所增大, 一般称之为波浪增阻; 在艉斜浪和随浪中同样可能存在阻力增加的现象, 但量值上较迎浪和艏斜浪小一些。近年来, 在国际海事规范不断推陈出新的大背景下, 波浪增阻领域研究焕发出了全新的活力, 引起了广泛的关注, 成为当前船舶耐波性领域研究的热点和难点。与波浪增阻相关的法规规范和技术标准包括: 国际海事组织 (IMO) 推出的“新造船能效设计指数 (EEDI) 规范”^[1]和为保障船舶在恶劣海况下能够维持操纵性所发布的“最小推进功率确定临时导则”^[2], 以及国际标准化组织 (ISO) 新版的“实船测试航速和功率数据修正导则”^[3]和国际拖曳水池大会 (ITTC) 正在更新中的“实船测试航速/功率数据分析推荐规程”等^[4], 其中均对波浪增阻的正确预报提出了一定的要求。特别地, 在进行实船测试的航速和功率修正时, 需要用到全浪向中的波浪增阻信息, 因为实船试航时难以保证船舶始终以迎浪状态航行, 而艏斜浪中的波浪增阻有时较迎浪中更为显著 (参见德国汉堡水池公开发表的试验结果^[5])。另外, 船舶在艉斜浪和随浪中航行时也可

能遭受波浪增阻的影响，而目前的实船测试航速修正中是不对此类情况进行考虑的，这对于船舶的交付是不利的。因此，有必要对全浪向下的波浪增阻预报及试验验证方法开展研究。

已有的波浪增阻理论计算方法早就能够对全浪下的波浪增阻进行预报。日本的 Maruo^[6]早在 1980 年就提出了一种基于远场公式的简化计算方法，然而国内当前主流的与波浪增阻相关的研究，无论是船型优化^[7-9]还是先进数值计算研究^[10-14]，几乎都只关注迎浪中的波浪增阻。其中很重要的一个原因就是缺乏可靠的迎浪以外浪向的波浪增阻试验数据用于对计算结果进行验证。传统的波浪增阻试验往往采用拖航方式，试验时约束模型的横荡和摇艏运动，因此仅适用于迎浪和随浪两种浪向。为能将拖航方法拓展至全浪向范围，德国汉堡水池专门开发了六自由度的适航仪^[5]，但该试验设备结构复杂、造价高昂，且横向和纵向运动由弹簧约束，仍可能对模型运动产生限制作用，从而影响试验结果。针对以上问题，本研究借鉴荷兰 MARIN 水池的相关经验，阐述了一种基于自由自航方式的全浪向波浪增阻试验方法，通过测量螺旋桨发出的推力获得波浪增阻的结果。基于该方法，在中国船舶工业集团第 708 研究所（以下简称“708 所”）闵行分部的拖曳水池中针对一型集装箱船开展了包含艏斜浪、横浪、艉斜浪等多个浪向下的模型试验，通过与荷兰 MARIN 水池的试验结果进行对比，证明了所提出试验方法的正确性。

2 试验方法

传统的波浪增阻试验研究以迎浪为主，通常采用约束模方法，利用拖车拖曳船模保持恒定航速在波浪中前进，并利用力传感器测量船模所受的波浪力时历，分别在静水和波浪中开展试验，以所测得的波浪力时历的差值作为波浪增阻值。然而，传统的约束模方法对于全浪向（特别是斜浪）中的增阻试验不再适用，因为斜浪中船模将发生较大幅度的横摇、横荡和摇艏运动，若采用约束模方法，则会对船模运动产生限制。另外，即使是在迎浪和随浪中开展试验时，由于必须借助适航仪拖动船模前进，因此对船模的纵荡运动模式也会产生限制。目前一般采用弹簧约束的方式使船模在前进过程中仍能在纵荡自由度上保持一定程度的波频振荡运动，以此更真实地模拟实船在波浪中的运动特性，但波浪增阻的测试结果或多或少会受到影响。

采用自由自航模方式开展试验则能有效解决上述问题，对船模在斜浪、横浪等非迎（随）浪状态下航行时的运动不会产生任何限制，通过测量并对比螺旋桨发出的推力在波浪和静水中的差值来体现波浪增阻的程度。

整个的自航模测试系统如图 1 所示，需在船模上安装全套的推进系统，包括螺旋桨、用于测量螺旋桨推力的动力仪、用于驱动桨并控制桨转速的伺服电机、伺服电机驱动器，以及给电机供电的电池单元；另外，还需在船模上安装一套自动舵系统，包括舵、舵机、航向角陀螺、舵机控制模块和自动舵系统的动力模块。

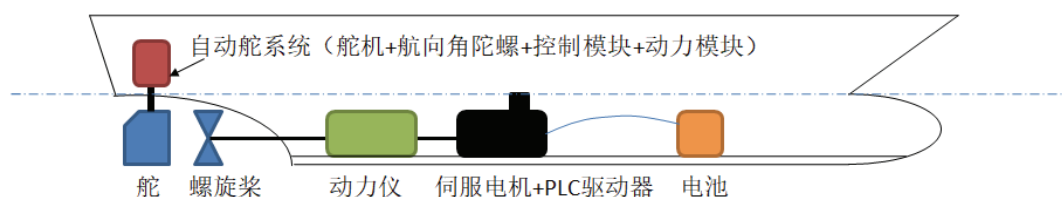


图1 自航模测试系统

试验前，首先对船模的重量重心和转动惯量进行调节，使模型与实船间满足佛汝德数相似条件。正式试验时先进行静水中的试验，再开展相同模型状态下的波浪中试验。测试开始时，启动螺旋桨并使其以指定的转速旋转并推动船模按所要求的航速前进，船模在波浪中发生失速时应及时调节桨的转速确保模型速度达到试验工况指定值。在此过程中，自动舵系统用于保持船模的航向。由于船模在航行过程中受波浪作用会偏离既定航向，自动舵系统会根据航向角陀螺采集到的实时航向角信息由控制模块产生一个用于纠正航向的舵角反馈，并由舵机实现操舵，以此实现航向保持。

分析试验测得的螺旋桨推力数据，波浪中和静水中的平均值之差即为波浪增阻值。需要说明的是，由此得到的波浪增阻结果中既包含了波浪力的作用，还包含了波浪中螺旋桨推进效率变化和操舵的影响，因此更为全面。当然，一般规则波中试验时为保证线性假定不会采用大的波高，因此螺旋桨推进效率变化不大，为保持航向而产生的操舵也有限；但对于恶劣海况下的模型试验，这些额外影响的重要性就将有所体现，特别是存在螺旋桨飞车情况时。

3 样船试验

采用自由自航模方法，针对一型集装箱船在 708 所闵行分部的拖曳水池中开展了包含艏斜浪、横浪、艉斜浪等多个浪向下的模型试验。

708 所拖曳水池长 280 m、宽 10 m、水深 5 m，拖车最高速度可达 9 m/s。水池同时配备有池端和池侧造波机，可生成各种浪向下的规则波和不规则波。其中，池端造波系统由 4 台单板造波机组成，可以生成周期 0.5~5.0 s 的规则波（最大波高 0.5 m）；池侧造波系统由 160 台造波机组成，每块摇板宽 0.5 m，可以生成周期 0.5~3.0 s 的规则波（最大波高 0.3 m），浪向范围 $\pm 45^\circ$ 。

如图 2 所示，试验对象为一艘超大型集装箱船，木模缩尺比为 60，其主要参数如表 1 所示。在试验准备阶段通过压载配置使船模的重心位置和横向、纵向惯量达到指定的值。

船模上所安装的自动舵系统如图 3 所示，采用比例控制策略实现航向角的快速纠偏；航向角陀螺型号为 HT-CJY-3，航向精度偏差在 10min 内小于 0.6° 。

表 1 试验目标船主要参数

参数	符号	单位	实船	模型
船长	L	m	383.0	6.383
船宽	B	m	58.6	0.977
平均吃水	d	m	14.0	0.233
方形系数	C_B	[-]	0.690	0.690
浮心纵向位置	LCB	m	3.700	0.062
重心垂向位置	VCG	m	24.2	0.403
横摇惯性半径	R_{xx}	m	23.4	0.391
纵摇惯性半径	R_{yy}	m	102.5	1.708



图 2 试验目标船模型

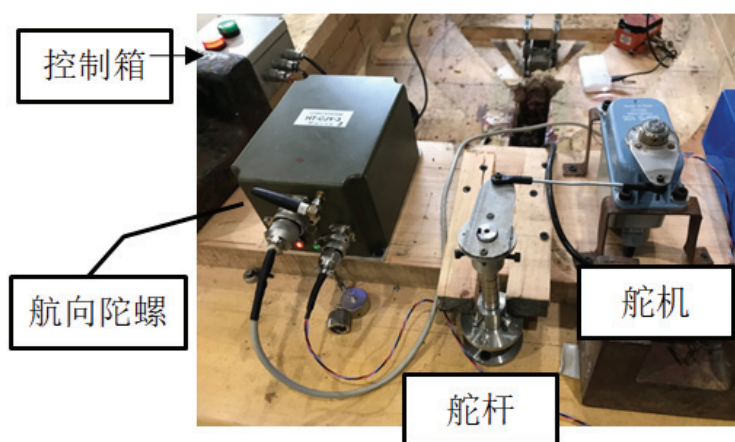


图 3 试验船模所用自动舵系统

用于测量螺旋桨推力的动力仪为 CUSSONS R31, 可测量的最大推力为 100N, 扭矩为 4Nm, 最大转速限制为 50 r/min, 推力和扭矩的测量精度可达 0.15%FS。推力的采样频率为 20Hz。螺旋桨转速由伺服电机控制, 精度可达 0.01 r/min, 足够满足本次试验对航速调控的精度要求。

在拖曳水池中开展试验的过程如下: 如图 4 所示, 船模位于侧桥之间, 待造波稳定后

启动船模上的螺旋桨和自动舵，同时启动拖车跟随船模一同前进；拖车上架设两台摄像机用于观察船模与拖车间的相对位置，根据船模和拖车间的速度关系实时调节螺旋桨的转速，确保船模的前进速度与拖车一致。另外，在水池中布置固定式的浪高仪，用于测量规则波的波高和周期。

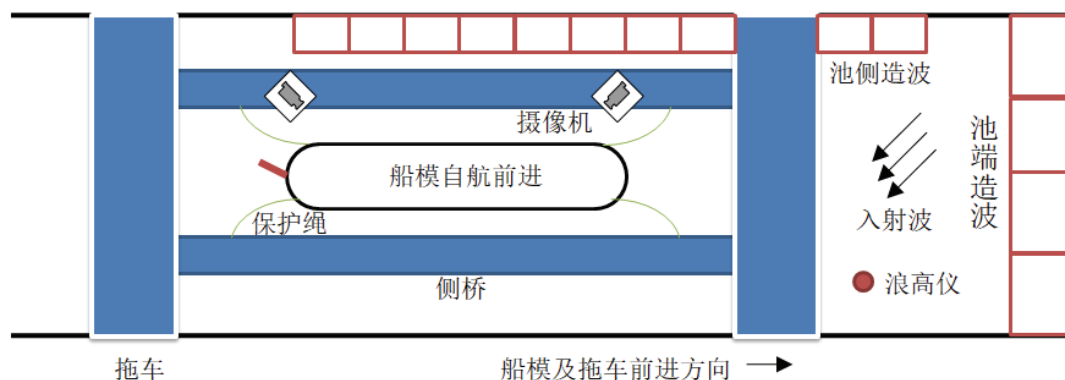


图4 试验布局示意

针对目标集装箱船的满载吃水状态，开展了服务航速 22.5kn（对应模型速度 1.49m/s）下 5 个不同浪向规则波中的波浪增阻试验，包括迎浪 180°、艏斜浪 135°、横浪 90°、艉斜浪 45° 和随浪 0°。试验采用等波高方法，所选取的规则波波高为 6 cm，覆盖的波长船长比范围在 0.25~1.5 之间。图 5 为首部视角下的试验照片。



图5 自由自航波浪增阻试验照片（船首视角）

4 试验结果

通过试验获得了对应 5 个不同浪向的 5 组波浪增阻响应曲线图 6 至图 10 所示。图中，横坐标 λ/L 为波长与船长之比；纵坐标为无因次化后的波浪增阻。从中可以发现：

- 艏斜浪中的波浪增阻甚至比迎浪中更为显著，其原因一方面可能是由于艏斜浪中船模的横摇、艏摇等自由度运动消耗了额外的能量；另一方面则来源于艏斜浪中船模的航向保持较迎浪中困难得多，更为频繁的操舵同样会导致额外的阻力增加；
- 横浪中的波浪增阻非常小，在某些波浪频率下甚至为负值，表明波浪的平均作用对船模起到了推进作用；
- 艉斜浪和随浪中同样存在波浪增阻，虽然数值上比迎浪和艏斜浪中要小，但对于实船测试航速修正能发挥一定的作用。

对于艏斜浪 135° 和艉斜浪 45° 两种浪向，委托荷兰 MARIN 水池针对相同工况同样采用自由航模方式开展了波浪增阻试验，将其获得的结果与本试验结果在图 7 和图 9 中进行了对比。从对比情况看，艏斜浪中两次试验的结果吻合良好；而对于艉斜浪情况，在个别工况点上存在一定的差异。考虑到艉斜浪工况中的波浪增阻值较小，因此测试时对航速、自动舵控制和传感器精度等因素较艏斜浪中敏感，测试的不确定性较大。总体而言，通过两组数据的对比基本能够证明本试验中所采用方法的有效性和正确性。

5 总结

本研究阐述了基于自由航模方式的全浪向中波浪增阻模型试验方法，并运用该方法在 708 所的拖曳水池中针对一型集装箱船实际开展了模型试验，结果表明该船在艏斜浪中的波浪增阻甚至比迎浪中更为显著，值得更深入的理论分析和数值计算研究；另一方面，船舶在艉斜浪和随浪中同样可能受到波浪增阻的影响，需在进行实船测试的航速修正时有所警觉。

最后，通过与荷兰 MARIN 水池的试验结果进行对比，证明了本试验结果的正确性和所提出方法的有效性。该方法能够作为全浪向中波浪增阻的试验手段，具有良好的应用前景。

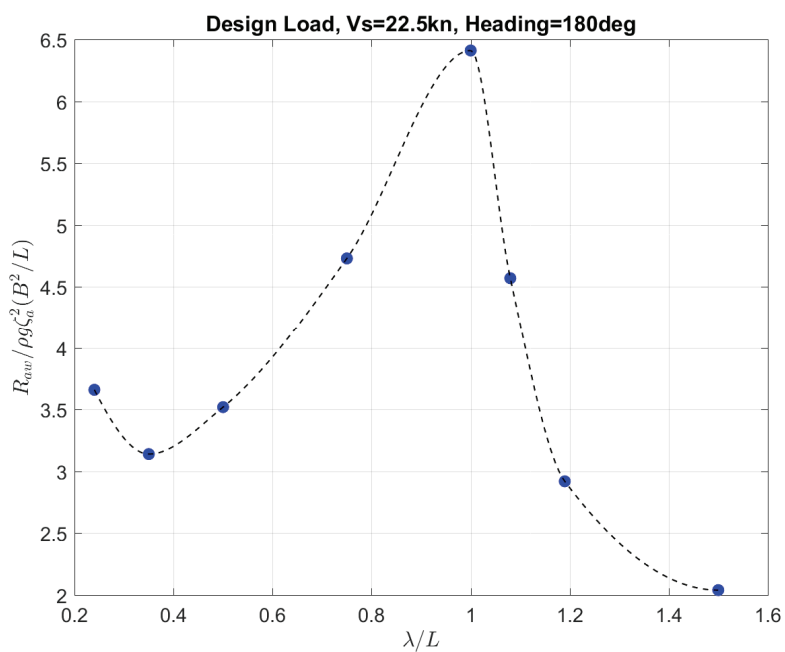


图6 迎浪 180° 波浪增阻响应试验结果

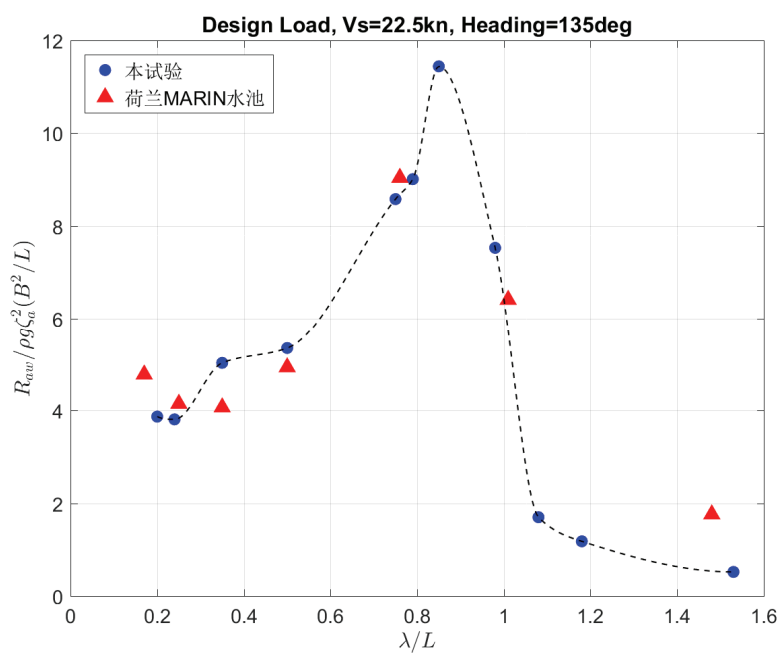


图7 艏斜浪 135° 波浪增阻响应试验结果

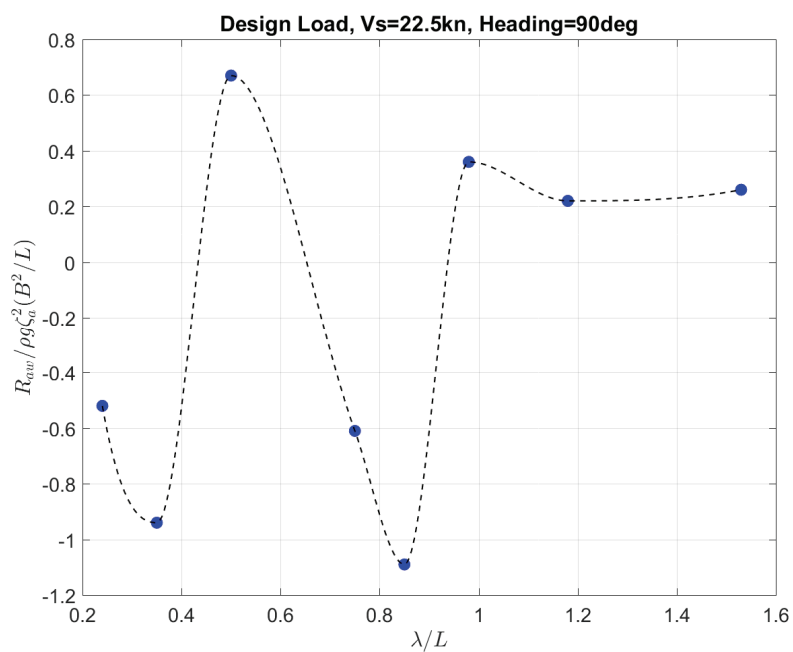


图8 横浪 90° 波浪增阻响应试验结果

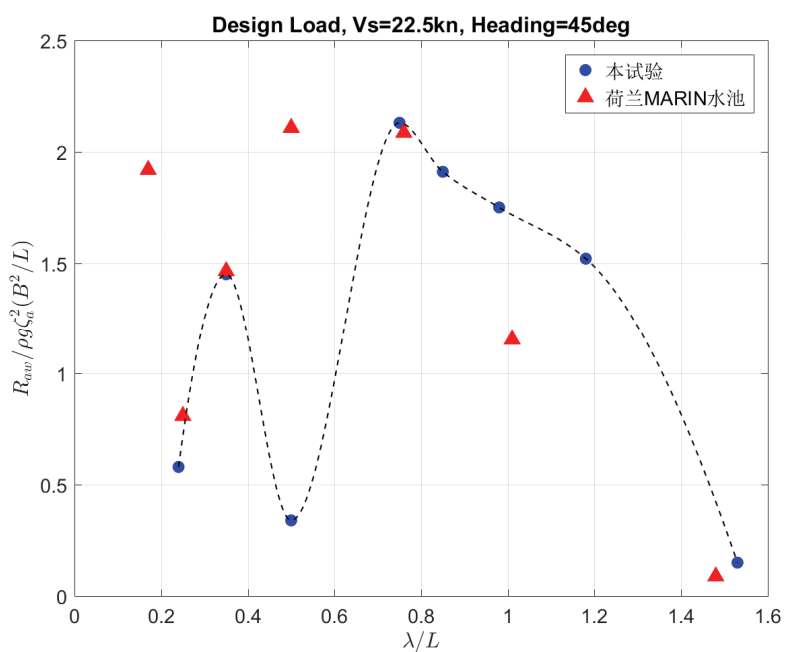


图9 艏斜浪 45° 波浪增阻响应试验结果

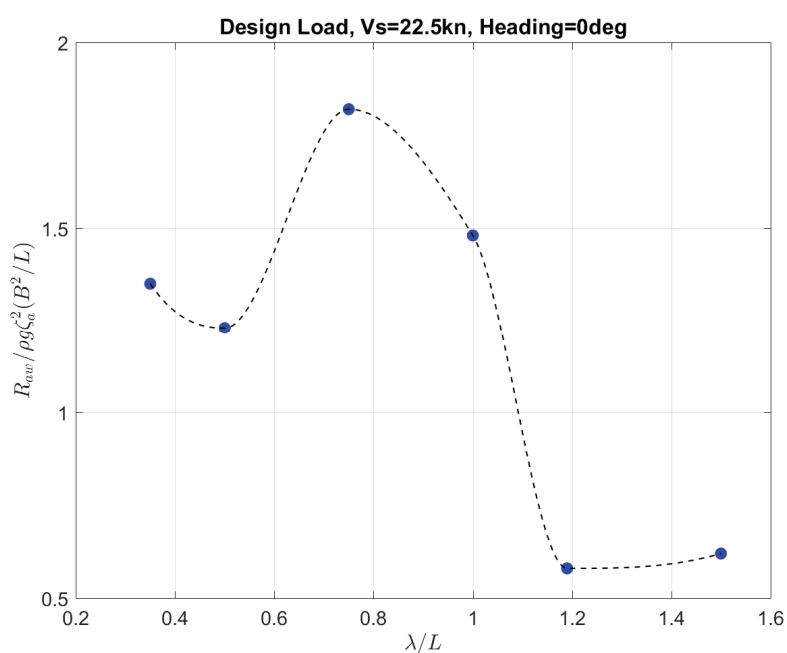


图 10 随浪 0° 波浪增阻响应试验结果

参 考 文 献

- 1 IMO. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index [S]. MEPC.1/Circ.682, August, 2009.
- 2 IMO. Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the maneuverability of ship in adverse conditions [S]. MEPC.232 (65), May, 2013.
- 3 ISO. Ships and marine technology--Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data [S]. ISO 15016, 2015.
- 4 ITTC. Full Scale Measurements Speed and Power Trials Analysis of Speed/Power Trial Data [S]. Recommended Procedures and Guidelines 7.5-04-01-01.2, 2017.
- 5 Petri V. Measurement of Wave Added Resistance in Oblique Seas, HSV A Newswave, 2014, 1:8-12.
- 6 Maruo H. Calculation of Added Resistance in Oblique Waves, Trans SNAJ, 1980, 147:36-43.
- 7 张宝吉. 基于静水阻力和波浪增阻的全船线型优化, 华中科技大学学报, 2011, 39(10):32-35.
- 8 王杉, 陈京普, 魏锦芳, 等. 静水阻力和波浪增阻集成优化系统开发与应用研究// 第二十五届全国水动力学研讨会论文集, 2013.
- 9 陈霞萍, 陈伟民, 陈兵, 等. 直型艏与常规球艏静水阻力与波浪增阻比较研究. 中国造船, 2014,

- 55(1):113-120.
- 10 李传庆, 高玉玲, 董国祥. 瞬时湿表面波浪增阻修正方法研究, 上海船舶运输科学研究所学报, 2016, 39(4):1-4.
 - 11 方昭昭, 赵丙乾, 朱仁传. 顶浪中船舶运动的数值模拟与波浪增阻计算. 中国造船, 2014, 55(2):8-17.
 - 12 陈思, 马宁, 顾解仲. 基于弱非线性假定的船舶波浪增阻数值计算. 上海交通大学学报, 2017, 51(3):277-282.
 - 13 许贺, 李传庆, 陈昌运, 等. 多载况多浮态下船舶波浪增阻数值计算分析. 上海船舶运输科学研究所学报, 2017, 40(2):1-5.
 - 14 李帅, 朱仁传, 缪国平, 等. 二维半理论的船舶运动及波浪增阻计算适用性研究. 水动力学研究与进展, 2017, 32(2):148-157.

Study on the wave added resistance test in all wave directions based on free running model

FENG Pei-yuan¹, WANG Da-jian², SHEN Xing-rong¹, FAN She-ming¹, WANG Jin-bao³

(1. Shanghai Key Laboratory of Ship Engineering, Shanghai200011, China

2. Marine Design & Research Institute of China (MARIC), Shanghai200011, China

3. Science and Technology on Water Jet Propulsion Laboratory, Shanghai200011, China)

Abstract: With the implementing of IMO minimum propulsion power regulation and the revision of ISO-15016 sea trial speed correction method, the researches on wave added resistance have caused wide concern and have become one of the most hot but difficult topics in the ship seakeeping field at the moment. Focusing on the issue of conventional wave added resistance test through towed model being only valid for head waves and following waves, this paper proposes a wave added resistance model testing method based on free running model, and performs the wave added resistance model test in all wave directions for a containership in the towing tank. Through comparing the results with those from MARIN, the correctness and validity of the proposed method are proved, which can be used for the wave added resistance prediction in all wave directions.

Key words: Wave added resistance, Model test, All wave directions, Free running.