

文章编号: 1007-7294(2026)02-0329-12

船舶操纵模拟方法的验证与确认研究综述

赵桥生^{1,2}, 何春荣², 任梦晨², 韩 阳², 彭 超²

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 船舶操纵性是船舶最基本且至关重要的航行性能之一。SIMMAN 研讨会是国际上系统性地开展船舶操纵模拟方法验证与确认的学术会议, 在世界范围内备受关注。本文通过梳理历届 SIMMAN 研讨会计划、最新动态及相关文献, 系统综述了三次 SIMMAN 研讨会的主要研究内容、进展及所取得的重要成果; 进而分析了研讨计划所揭示的国际上船舶操纵性预报方法及试验技术发展趋势, 并总结了其对船舶操纵性试验及预报方法未来发展的启示。

关键词: 船舶; 操纵性; SIMMAN 研讨会; 仿真

中图分类号: U661.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.02.013

Review of verification and validation of ship maneuvering simulation methods

ZHAO Qiao-sheng^{1,2}, HE Chun-rong², REN Meng-chen², HAN Yang², PENG Chao²

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Ship maneuverability is one of the most critical navigation performance of ships. The SIMMAN workshop is a systematic and authoritative international academic event focusing on the verification and validation of ship maneuvering prediction methods, which has garnered widespread attention worldwide. Based on a review of the SIMMAN workshop programs, latest developments, and related literature, this paper systematically summarizes the main research content, progress, and significant achievements of the three workshops. Furthermore, it analyzes the development trends and research directions in international ship maneuvering prediction methods and model test technologies as reflected by these workshops, and elucidates the insights they provide for the advancement of ship maneuverability testing and prediction methodologies.

Key words: ship; maneuverability; SIMMAN; simulation

0 引 言

船舶操纵性是关系船舶航行安全与经济性的核心性能指标。自国际海事组织(IMO)颁布船舶操纵性标准^[1-2]以来, 该性能已成为新船设计的强制性要求之一。当前船舶操纵性研究热点主要集中在: 浅水及限制航道操纵性研究^[3-5]、操纵性 CFD 方法及其验证^[6-8]、操纵性模型试验与其不确定度及尺度效应研究^[9-10]、船舶在波浪环境中的操纵性评估^[11-12], 以及操纵模拟方法的验证与确认。

船舶操纵模拟方法的验证与确认是船舶操纵性研究的核心问题之一^[13-14]。在 ITTC 操纵性委员会

收稿日期: 2025-11-08

基金项目: 重点研发计划项目(2021YFC2803400)

作者简介: 赵桥生(1981-), 男, 研究员, 通讯作者, Email: zhaocsrc@163.com。

的倡导下,由 FORCE、MARIN 等机构联合发起了船舶操纵模拟方法验证与确认研讨会 SIMMAN (Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods)。该研讨会汇集了各国研究机构提供的大量操纵性基准船模试验数据(如 KVLCC1、KVLCC2、KCS、5415 以及 ONRT 的拘束模和自航模试验结果),极大地推动了船舶操纵性学科发展。作为国际上系统性开展船舶操纵模拟方法比对研究的学术会议, SIMMAN 吸引了包括全球多数知名拖曳水池在内的研究机构参与,通常每 5 至 6 年举办一届。迄今已成功举办三届,对国际船舶操纵性研究产生了深远影响。

本文旨在系统阐述 SIMMAN 研讨会的起源、目的、内容及成果,并对其进行深入分析与评述。通过对该计划进展及相关文献的分析,本文梳理了 SIMMAN 研讨会所揭示的国际上关于船舶操纵性模拟方法验证与确认的研究方向和发展趋势,并阐述了其对发展船舶操纵性预报方法的启示。

1 SIMMAN 会议简介

1.1 SIMMAN 会议背景

在船舶初始设计阶段,操纵性预报方法主要有数据库法、经验模型法、自航模操纵性试验、基于 CFD 的数值模拟以及基于系统动力学模型仿真等^[15]。相较于物理模型试验,数值模拟方法具有成本低、周期短、信息量丰富且便于快速迭代的优势,但其结果必须经过试验数据的验证与确认。

船舶操纵模拟方法验证与确认的系统性研究可追溯至 ITTC 的相关工作:第 12 届国际拖曳水池会议 (ITTC) 组织了针对“航海者”号商船的操纵性水动力模型试验与比对,由此产生了首批用于比对的模型试验数据;第 22 届 ITTC 操纵性委员会则选用 OSAKA 油船作为标模开展了比较研究;第 25 届 ITTC 操纵性委员会倡导并推动了一项针对各种船舶操纵模拟方法的验证与确认比较研究^[15],直接促成了首届 SIMMAN 研讨会于 2008 年在丹麦召开。近年来,该领域的主要进展均与 SIMMAN 研讨会密切相关,其所采用的验证基准数据涵盖拘束模试验、自航模试验数据以及 PMM 试验中的流场测量数据^[16]。

1.2 SIMMAN 会议目的

SIMMAN 研讨会的主要目的在于,通过对比标准船型的操纵模拟结果,系统评估不同仿真方法(如基于系统模型、CFD、系统辨识、神经网络及经验模型等方法)在预报船舶操纵性方面的能力,从而检验并建立仿真代码的最佳实践规范,为行业技术发展提供指导^[17]。研讨会的核心工作在于,将各类模拟方法所得的船舶运动与水动力计算结果,与高置信度的基准模型试验数据进行定量比对。这种系统的比较分析,不仅能直观评估模拟轨迹以及水动力与试验结果的一致性,更重要的是能够揭示各种模拟方法的内在优势与局限性,从而提升操纵性预报能力。

1.3 SIMMAN 会议研讨内容

(1) 船舶操纵性比对研究船型

SIMMAN 研讨会所采用的基准模型试验数据,由多家知名研究机构共同提供。研讨会选用的标准船型涵盖了 KVLCC1、KVLCC2、KCS、5415 以及 ONRT。其中,KVLCC2 船型(如图 1 所示)作为典型代表被广泛研究。在研讨会初期,KVLCC 系列包含 KVLCC1 与 KVLCC2。自首届研讨会后,KVLCC1 被移出基准船型序列。因此,第二届研讨会确定的基准船型为 KVLCC2、KCS 和 5415。至第三届研讨会,则进一步引入了 ONRT 船型,并特别补充了其在波浪中的操纵运动数据。

(2) 比较研究内容

用于比对的模型试验主要分为两大类:拘束模试验与自航模试验。在 SIMMAN 研讨会框架下,针对每一型基准船舶,均至少涵盖了其在深水条件下的拘束模与自航模试验数据。核心比对工作在于评估各类操纵模拟方法的预报性能,其中,具体的操纵运动比对内容见表 1。



图 1 KVLCC2 船型

Fig.1 Ship shape of KVLCC2

表 1 船舶操纵运动比对内容

Tab.1 The contents of maneuvering comparison

基准船型	比对内容	试验类型	仿真方法
KVLCC	回转运动轨迹、时间、速度、姿态角	自航模回转运动	经验模型方法、CFD方法、 基于系统模型的方法等
5415			
KCS	Z形操纵的第一超越角、第二超越角	自航模Z形运动	
ONRT			

除船舶运动预报结果的比对外, SIMMAN 研讨会亦深入开展操纵性水动力的对比研究, 具体比对项目见表 2。该研究的核心在于, 将基于 CFD 数值模拟获得的船体水动力结果, 与平面运动机构 (PMM) 和圆周运动试验(CMT) 等拘束模试验所测得的基准数据进行比较。比对工况覆盖深水与浅水条件, 研究对象则包括光体船型与全附体船型, 以系统评估数值方法的预报精度与可靠性。

表 2 操纵性水动力比对内容

Tab.2 Comparative study on hydrodynamic maneuverability

基准船型	比对内容	模型试验	模拟方法
KVLCC	船舶操纵性水动力	CMT试验、PMM试验, 类型包括固定漂角试验、 固定舵角试验、纯横荡试验、纯艏摇试验等	经验模型、系统辨识、 CFD方法如RANS、 RANS-BEM和IDES
5415			
KCS			
ONRT			

2 SIMMAN 会议进展概况

2.1 SIMMAN 研讨会测试计划

首届 SIMMAN 会议于 2008 年在丹麦哥本哈根举行, 其核心议题在于通过对 KVLCC、KCS 及 5415 等标准船型的基准试验数据进行系统性与定量化比较, 实现对各类操纵模拟方法的验证与确认。可靠的基准试验数据是开展验证与确认工作的根本前提。第一届会议的模型试验测试规划详见表 3。

表 3 第一届 SIMMAN 会议试验测试计划

Tab.3 Model test plan of the first SIMMAN workshop

类 型		拘束模试验			自航模试验	
船 型	PMM试验 全附体深水	PMM试验 全附体浅水	PMM试验 光体深水	PMM试验 光体浅水	回转运动 全附体深水	自航模全 附体深水
KVLCC1	KRISO	INSEAN	—	—	NMRI	HSVA
	INSEAN					MARIN CTO
KVLCC2	BSHC	INSEAN	INSEAN	INSEAN	NMRI	CTO
	INSEAN	BSHC		BSHC		HSVA
	HMRI	FHR		FHR		MARIN
KCS	FORCE	MARIN	FORCE	—	NMRI	BSHC
	CEHIPAR	FHR				
5415	MARIN	—	FORCE	—	MARIN	MARIN
	FORCE		IIHR INSEAN			

注：以下为本文中出现的机构缩写对应的中文名称：BSHC-保加利亚船舶水动力学中心；HSVA-德国汉堡水池；JMU-日本日本海洋联合公司；CEHIPAR-西班牙埃尔帕尔多实验室；HMRI-韩国现代海事研究所；KRISO-韩国船舶与海洋工程研究所；CTO-波兰海事先进研究中心；HU-芬兰赫尔辛基大学；MARIN-荷兰海事研究所；FHR- 比利时弗拉芒水利研究院；IIHR-美国爱荷华大学水力学研究所；NMRI-日本国家海事研究所；FORCE-丹麦福思力智科技公司；INSEAN-意大利海洋技术研究中心；SNU-韩国首尔大学。

第二届 SIMMAN 会议由 FORCE、MARIN 和 IIHR 等研究机构组织, 2014 年在丹麦举行。该届会议的模型试验测试计划见表 4。括号内的年份代表提交的试验数据是在该年开展的试验测试。

表 4 第二届 SIMMAN 会议试验测试计划

Tab.4 Model test plan of the second SIMMAN workshop

类型	拘束模水动力试验					自航模试验	
船型	PMM 试验 全附体 深水	PMM 试验 全附体 浅水	PMM 试验 光体 深水	PMM 试验 光体 浅水	回转运动 全附体 深水	自航模 全附体 深水	自航模 全附体 浅水
KVLCC2	INSEAN (2013)	BSHC (2013)	INSEAN (2013)	BSHC (2013)	NMRI (2006)	HSVA (2006)	FHR (2010)
	HMRI (2012)	FHR (2010)	—	FHR (2010)	—	MARIN (2007) CTO (2007)	—
KCS	FORCE (2009)	FHR (2010) KRISO (2014)	FORCE (2009)	—	NMRI (2005) CSSRC (2014)	MARIN (2009)	BSHC (2011) FHR (2010)
5415	MARIN (2007)	—	FORCE (2004)	—	MARIN (2007)	MARIN (2007)	
			IIHR (2005)				
			INSEAN (2005)				

第三届研讨会(SIMMAN 2020)则由韩国船舶与海洋工程研究所(KRISO)牵头, 联合 FORCE、MARIN 及 IIHR 共同主办, 于 2023 年在韩国仁川举行。其相应的模型试验测试计划详见表 5。表中 Case 后的数字为工况编号, 如 Case4-2 为表示静水中的轨迹试验工况编号。

表 5 第三届 SIMMAN 会议试验测试计划

Tab.5 Model test plan of the third SIMMAN workshop

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
	KVLCC2-深水	KVLCC2-浅水	KCS-深水	KCS-浅水	ONRT
静水拘束模力和力矩	Case1-1 斜拖	Case2-1 斜拖	Case3-1 斜拖	Case4-1 斜拖	Case5-1 斜拖
	艏摇变漂角试验 试验: HMRI	艏摇变漂角试验 试验: BSHC	艏摇变漂角试验 试验: JMU	艏摇变漂角试验 试验: KRISO	艏摇变漂角试验 试验: SNU
	Case1-2 20/20 Z形(右舵) 35°左舵回转	Case2-2 20/20 Z形(右舵) 35°左舵回转	Case3-2 20/20 Z形(左舵) 10/10 Z形(左舵) 35°左舵回转	Case4-2 20/5 Z形(左舵) 35°左舵回转	Case5-2 20/20 Z形(右舵) 35°左舵回转
静水中的轨迹	— — 试验: MARIN	— — 试验: FHR/MARIN	— 20/20 Z形(右舵) 试验: MARIN	— — 试验: MARIN	— — 试验: IIHR
波浪中的轨迹	—	—	Case3-3	—	Case5-3
	—	—	静水35°右舵回转	—	35°左舵回转
	—	—	波浪35°右舵回转	—	波浪中35°右舵回转
	—	—	试验: HU	—	试验: IIHR

2.2 SIMMAN 会议进展与成果

首届研讨会共收集了 64 份操纵性仿真计算结果^[18], 所采用的预报方法涵盖了系统模型、CFD、系统辨识、神经网络以及各类经验方法等^[19-20]。

除了运动轨迹比对外,研讨会同时进行了操纵性水动力数值计算方法的验证与确认。其中,一项核心内容是利用 CFD 技术模拟拘束模试验中的船舶运动,并将计算结果与 PMM/CMT 所获的基准数据进行对比^[21-22]。

在针对强制运动的水动力数值模拟方面,会议共收到 16 份提交结果,其所采用的 CFD 方法主要包括 RANS、URANS 与 DES^[23]。从预报结果看,回转运动战术直径预报结果的比较见图 2。

定量分析表明,对于回转运动,回转运动轨迹结果平均误差为 6%;而 Z 形操纵预报结果的平均误差为 13%。在水动力方面,数值计算的平均误差为 13.6%,而非线性水动力导数的预测误差则高达 40%。

首届研讨会也反映出一些有待改进之处。例如,由于未对试验初始速度、船模初稳性高(GM 值)及自航模操舵速率等关键细节上作出统一规定,导致所提交数据的离散性较大,这在 10°/10° Z 形操纵试验的第二超越角预报中表现得尤为显著。此外,结果表明,CFD 方法在船舶操纵性预报中的应用仍需改进,包括采用更精细的计算网格(尤其针对舵、附体及大涡流发展等关键区域)、发展更先进的湍流模型,以及结合局部流场测量数据进行更为深入的验证。

相较于首次会议,第二届 SIMMAN 会议收到了更多数据,且标准船型的参数与试验工况得到了更好的统一^[24-25]。组委会提供了系统的自航模测试结果作为基准,并对标模的操纵性水动力与运动轨迹进行了全面的对比分析^[26-28]。此外,比对工作不再局限于深水操纵性,还拓展至浅水操纵性模拟^[29-30]。

船舶在运动过程中所受的水动力是决定其操纵性能的根本物理因素。因此,研讨会除比较运动轨迹外,还着重对比了基于 CFD 计算得到的水动力与 PMM/CMT 基准数据^[31-32]。以 KVLCC2 船型为例,其操纵性水动力基准试验主要包含以下几种类型:固定舵角试验(SR)、固定漂角试验(SD)、纯横荡试验(PS)与纯艏摇试验(PY)。这些试验的具体工况与参数详见表 6。

表 6 KVLCC2 拘束模试验内容和参数

Tab.6 The Conditions and contents of maneuvering captive model test

测试 序号	试验 类型	傅氏数 [-]	雷诺数 (×10 ⁶)	速度/ (m·s ⁻¹)	转速 /rps	漂角/ °	舵角/ °	横向速度 [-]	角速度 [-]
Case 1	SR	0.142	7.07	1.170	9.9	0	0	0	0
Case 2	SR	0.142	7.07	1.170	9.9	0	10	0	0
Case 3	SD	0.142	7.07	1.170	9.9	12.0	0	0.208	0
Case 4	PS	0.142	7.07	1.170	9.9	0	0	0.086	0
Case 5	PY	0.142	7.07	1.170	9.9	0	0	0	0.30

在研讨会中,操纵性水动力的数值计算以 RANS 方法与 DES 方法为主流^[31,33]。所使用的计算工具涵盖了自研代码与商业软件:前者如 CFDSHIP-IOWA、ISIS-CFD、XNAVIS、NEP、Neptuno 及基于 OpenFOAM 的各类求解器;后者则包括 Fluent、CFX、STAR-CCM+等。图 3 展示了采用 Fluent 软件对 KVLCC2 船型在固定舵角工况下的操纵水动力计算结果,图 4 则呈现了相应的计算网格细节^[34]。关于 KVLCC2 船型的运动轨迹预报,其回转运动与 Z 形操纵的对比结果分别见图 5 与图 6^[35]。

针对标模 5415,图 7 展示了静水中操纵运动模拟结果与试验数据的对比,同时呈现了 10°Z 形操纵过程中的流场细节^[36]。定量分析表明,回转直径仿真结果与试验结果相比平均误差为 12%。

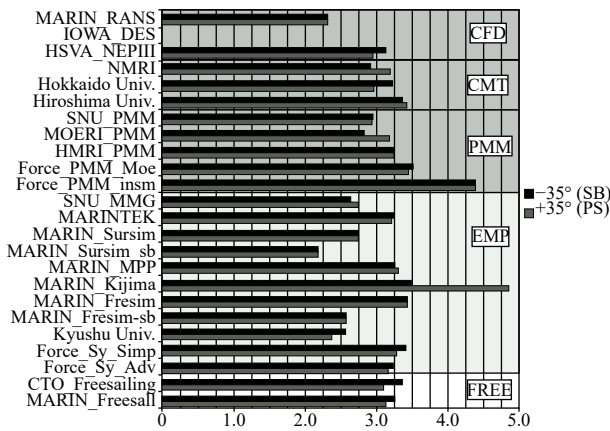
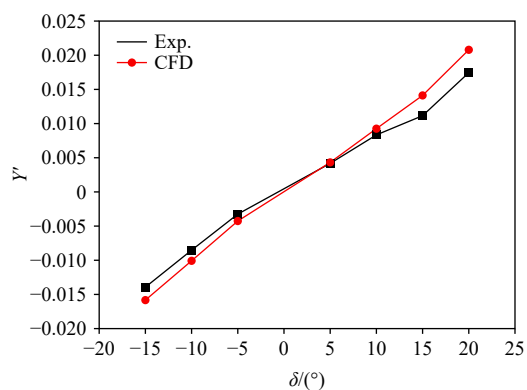
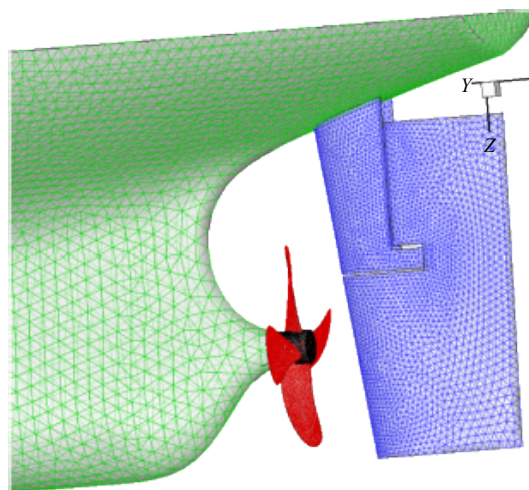
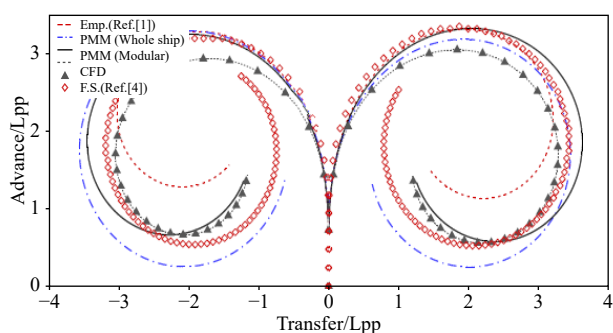
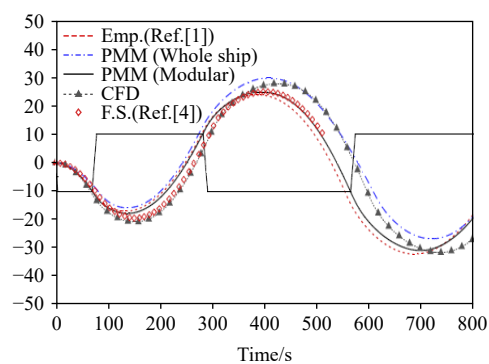
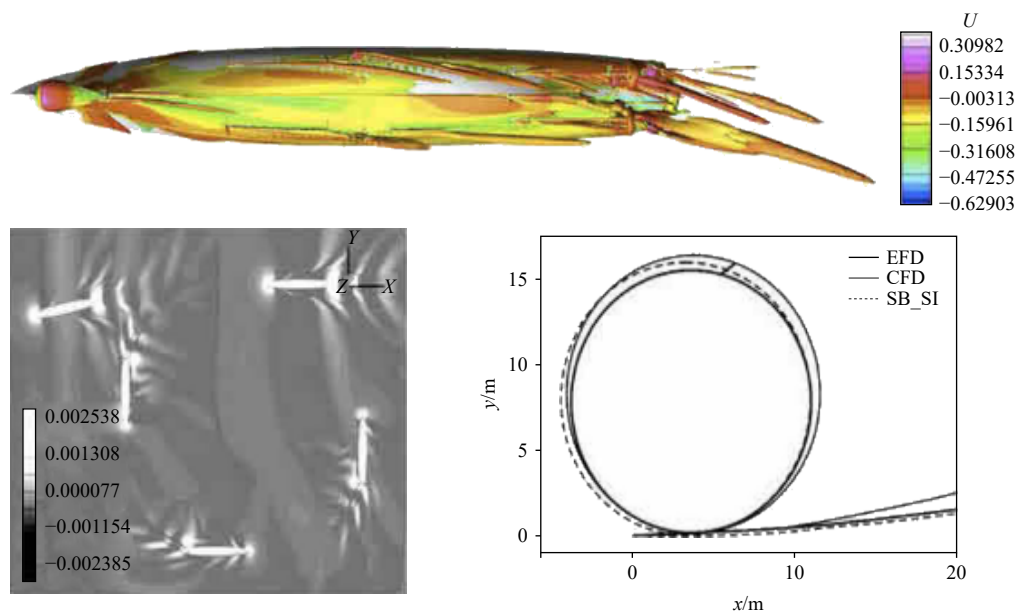


图 2 回转运动的战术直径预报结果比较^[23]

Fig.2 Comparison of tactical diameter prediction results for turning motion^[23]

图3 不同舵角下的力计算与试验比较^[34]Fig.3 Comparison between calculated and experimental forces at different rudder angles^[34]图4 计算模型网格划分^[34]Fig.4 Computational mesh generated for the simulations^[34]图5 KVLCC2 回转运动轨迹结果比较^[35]Fig.5 Comparison of turning trajectories results for KVLCC2^[35]图6 Z形运动轨迹结果比较^[35]Fig.6 Comparison of Zigzag manoeuvre results^[35]图7 静水中 5145 船型的操纵模拟^[36]Fig.7 The maneuvering simulations of ship model 5145 in calm water^[36]

在第三届 SIMMAN 会议中,CFD 方法在船舶操纵模拟中的应用显著增加,并普遍展现出较高的预报精度。然而,该方法也有计算耗时长的问题。其中,推进器数值模拟是影响整体计算效率的关键环节。为平衡计算精度与效率,研究人员提出了多种改进策略,旨在降低计算耗时,其主要技术路线见表 7。

表 7 船舶操纵运动数值模拟中推进器模拟改进情况

Tab.7 Improvement of propeller modeling in numerical simulation of ship maneuvering motion

序号	人员	计算软件	推进器模拟方法
1	Van Hoydonck, Wim ^[37]	ISIS-CFD	激励盘模型
2	Otzen, Janne Flensburg ^[38]	STAR-CCM+	体积力方法
3	Park, Sang-Hun ^[39]	STAR-CCM+	实际螺旋桨模拟(滑移网格)
4	Wang, Jianhua ^[40]	naoe-FOAM-SJTU	实际螺旋桨模拟(重叠网格)
5	Queutey, Patrick ^[41]	ISIS-CFD	体积力、旋转参考系、实际桨(重叠网格)
6	Geremia, Paolo ^[42]	HELYX	基于响应面近似的激励盘模型
7	Zhang, Zhiguo ^[43]	HUST-Ship	两种体积力模型:基于Hough方法的体积力(敞水曲线), Tokgoz简化准定常边界元法(OUM)
8	Kim, Yoo-Chul ^[44]	WAVIS	基于升力面法的体积力方法
9	Sakamoto, Nobuaki ^[45]	NAGISA与 UP_GRID	基于升力线理论的体积力方法
10	Ren, Zhen ^[46]	naoe-FOAM-SJTU	真实螺旋桨模拟(重叠网格)

如表 7 所示,当前用于模拟推进器的数值方法主要可分为三类:真实螺旋桨几何模拟、体积力法与旋转参考系法。为降低计算成本,研究中多采用体积力法或旋转参考系法等简化方法,以替代对真实螺旋桨的直接模拟。

体积力法的具体实现方式多样,例如基于定常升力线理论的 OUM 方法、非定常升力面方法等。由于不同方法对“船-桨”相互作用的考虑程度存在差异,其最终计算精度亦有所不同。因此,如何在体积力框架中更真实地反映船-桨干扰效应,仍是未来需持续深入研究的关键问题。

此外,越来越多的研究采用自主开发的程序开展相关数值模拟,例如 HUST-Ship、naoe-FOAM-SJTU 与 NAGISA 等。在方法层面,部分学者发展了如灰箱模型^[47]与经验模型^[48]等降阶模型,以在保证精度的前提下提高计算速度。

在浅水操纵性研究方面,采用“假底”模拟浅水效应是水池试验中常见的技术手段。本次研讨会中,针对池底边界条件的设置,对完整池底与假底两种模拟方式的效果进行了对比分析^[49]。结果表明:假底模拟与水池模型试验结果具有良好的一致性,然而该方法是否能完全复现真实浅水环境中船舶的操纵运动特性,仍有待进一步验证。

3 船舶操纵模拟比较研究分析与建议

通过对系列 SIMMAN 研讨会进行系统梳理与分析,本文归纳了各届会议研究方案、基准船型、核心结论及技术发展趋势等方面的比对概况,详见表 8。

国际上几十家研究机构共同推进了船舶操纵性预报方法的验证与确认工作。SIMMAN 系列研讨会促进了船舶操纵性预报方法的发展,主要进展有:

(1)数据一致性持续改善。首次研讨会所提交数据的离散性较大,而后两届数据结果逐渐收敛,反映出参与方在试验与模拟规范方面达成良好共识。

(2)基准船型序列动态优化。自第二届研讨会起,KVLCC1 被移出基准船型序列,KVLCC2、KCS、5415 和 ONRT 成为核心比对船型。

(3)浅水操纵性成为研究焦点。船舶在浅水与限制水域中的操纵性能备受关注,通过自航模试验

表8 船舶操纵模拟方法的验证与确认研讨会比较

Tab.8 Comparison of the SIMMAN workshops

会议主题	船舶操纵预报方法验证和确认		
研讨目的	通过对比试验结果, 检验基于系统模型模拟方法及CFD方法等不同预报方法的预报操纵性能力		
研讨方案	①基于系统模型模拟的方法预报操纵性和自航模试验结果进行对比; ②基于CFD模拟方法计算的结果和PMM试验、CMT试验比较; ③基于CFD方法计算的运动和自航模试验数据比较		
会议名称	SIMMAN2008研讨会	SIMMAN2014研讨会	SIMMAN2020研讨会 (2023年7月)
地点	丹麦, 哥本哈根	丹麦, 哥本哈根	韩国, 仁川
主办单位	FORCE	FORCE	KRISO
组织单位	IIHR、KRISO、HSVA、NMRI、MARIN	MARIN、IIHR、HSVA、ONR	MARIN、IIHR、CSSRC、FORCE
基准船型	KCS、KVLCC1、KVLCC2、5415	KCS、KVLCC2、5415	KCS、KVLCC2、ONRT
主要结论与 发展趋势	操纵性预报方法: 基于系统模型模拟的预报方法、CFD预报方法、不同水池的自航模试验结果吻合良好; 拘束模试验结果离散性明显降低; 运动轨迹预测精度显著提高; 基于CFD方法的预报能力提升, 应用前景好 基于系统辨识的方法、神经网络方法和各种经验方法; CFD方法依赖较高的计算能力, 向精细化发展, 但能获得的信息较多; 提交的比对数据离散性较大 Z形运动预报精度显著提升; 关注船舶机动中的非定常现象, 增加了机动; 浅水中的操纵运动问题未解决, 需持续开展研究; 建立一套含网格划分、湍流模拟与壁面解析等内容的CFD实施指南; 推动基于机器学习和AI的预报方法应用		

与数值模拟手段对其进行深入研究, 已成为第二次研讨会以来的重点方向之一。

(4)横摇运动预报的重要性得到凸显。基于 KCS 等船型的预报结果分析, 在操纵性数学模型中考虑横摇的影响, 对提高预报精度至关重要。

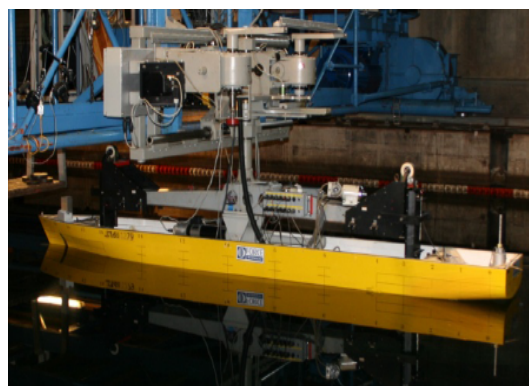
(5)CFD 方法作用日益显著。基于模型试验的比对总体呈现积极发展趋势, 运动轨迹的预报精度显著提高, 其中 CFD 方法的预报能力提升尤为明显。CFD 技术不仅可直接与模型试验的水动力结果进行对比, 还能为动力学模型提供水动力导数输入, 展现出其独特的价值与发展潜力。

(6)不同船型的操纵性预报难度存在差异。例如, KVLCC 的操纵性预报结果离散性较大, 而 5415 船型的预报结果则相对集中(船模见图 8)。这一现象与 5415 船型本身所具有的优异航向稳定性密切相关。另一方面, 船舶操纵性测试方法也不断完善, 促进了操纵模拟方法发展。例如, 丹麦 FORCE 所有 PMM 试验工况中, 均采用了半拘束模型试验方法, 测量船体四分力以及纵摇角、深沉运动, 见图 9。



图8 试验船模 5415

Fig.8 Ship model of 5415

图9 PMM 基准试验^[15] 丹麦 (FORCE)Fig.9 Benchmark test of PMM^[15] (Denmark FORCE)

随着船舶操纵性研究的深入, 研究焦点正逐渐从宏观运动特性延伸至微观流动机理, 对操纵过程

中非定常流动细节的捕捉与分析已成为新的趋势。除 SIMMAN 系列会议外, 浅水与限制水域操纵会议(MASHCON)亦发布了 DTC 等船型的浅水基准试验数据, 进一步丰富了该领域的公共数据库。

近年来, 中国船舶科学研究中心在操纵性水池中相继开展了多型船模的操纵性基准试验以及操纵模拟计算^[50-51], 并从早期的参与者发展为组织单位之一。上海交通大学针对 KVLCC 以及 KCS 等基准船型开展了操纵性数值模拟研究^[52-54]。相关研究包括: 对 KVLCC2 斜航运动粘性流场的模拟, 系统获取了不同漂角下的横向力、艏摇力矩、船体压力分布及尾流场结构^[55]; 针对 KVLCC2 船模在纯横荡、纯艏摇及带漂角艏摇等低速小振幅运动中的水动力特性进行了精细的 CFD 研究^[56]; 此外, 还基于细长体理论对 KCS 船型在浅水条件下的操纵性水动力进行了计算^[57]。

总体而言, SIMMAN 研讨会显著推动了船舶操纵性试验技术与 CFD 方法的进步。在此带动下, 国内也涌现出多款自主开发的船舶水动力求解器, 如基于 OpenFOAM 的粘性流求解器 naoe-FOAM-SJTU 等^[58]。值得关注的是, 第 30 届 ITTC 近期发布了关于操纵性预报基准数据使用的指导性文件^[59-60]。然而, 当前研究仍存在一定局限: 现有标准船型普遍缺乏实船试验数据的支撑, 制约了模拟结果向实船性能的外推精度。

4 结 语

本文系统评述了国际上关于船舶操纵模拟方法验证与确认研讨会(SIMMAN)的主要宗旨、测试规划、研究进展与关键成果, 深入探讨了其对船舶操纵性试验与模拟方法发展的重要启示。结果表明, 通过系统性的模拟方法比对, 初步实现了定量评估操纵性预测能力的阶段目标。

当前, 船舶操纵模拟方法的比对研究仍主要集中于静水、深水等条件。从 SIMMAN 系列会议的发展趋势看, 未来研究将更侧重于波浪环境与浅水/限制水域等复杂工况下的操纵性问题, 这些条件下的验证与确认工作因其强烈的非定常与非均匀流动特性而面临更大挑战。与此同时, CFD 方法在船舶操纵性预报中的潜力和作用将日益凸显。这一趋势必将推动研究范式从宏观水动力特性的模拟, 进一步转向对微观精细流动机理的阐释, 从而在根本上提升船舶操纵性的预报能力和物理规律认知。

参 考 文 献:

- [1] International Maritime Organization, Resolution MSC. 137(76), Standards for Ship Maneuverability[S]. 2002.
- [2] International Maritime Organization, MSC/Circ. 1053, Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability[S]. 2002.
- [3] Liu Y, Zou Z, Xia L, Wang F. CFD-based manoeuvrability prediction for inland ships in deep and Shallow waters[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(6): 739-751.
- [4] Lee S, Hong C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD[J]. Ocean Engineering, 2017, 145: 395-405.
- [5] Mucha P, Moctar O, Böttner C U. Workshop on numerical prediction of ship squat in restricted waters[J]. Ship Technology Research, 2014, 61(3): 162-165.
- [6] Carrica P M, Mofidi A, Elout K, Delefortrie G. Direct simulation and experimental study of zigzag maneuver of KCS in shallow Water[J]. Ocean Engineering, 2016, 112: 117-133.
- [7] Cao H J, Wan D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [8] Shen Z Y, Wan D C, Carrica P M. Dynamic overset grids in openFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [9] Abbas N, Kornev N. Validation of hybrid URANS/LES methods for determination of forces and wake parameters of KVLCC2 Tanker at manoeuvring conditions[J]. Ship Technology Research, 2016, 63(2): 96-109.
- [10] Bonci M, Viviani M, Broglia R, Dubbioso G. Method for estimating parameters of practical ship manoeuvring models

- based on the combination of RANSE computations and system identification[J]. *Applied Ocean Research*, 2015(52): 274–294.
- [11] 吴宝山. 船舶 CFD 不确定度分析方法述评[J]. *船舶力学*, 2011, 15(6): 577–591.
Wu B S. Review of CFD uncertainty analysis method for ships[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(6): 577–591. (in Chinese)
- [12] Dash A, Chandran P, Khan M, Nagarajan V, Sha O. Roll-induced bifurcation in ship maneuvering under model uncertainty[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(4): 689–708.
- [13] Miao Aiqin, Wan Decheng. Hull form optimization based on an NM+CFD integrated method for KCS[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2020, 17(10): 1–14.
- [14] Jin Y, Duffy J, Chai S, Magee, A. R. DTMB 5415M dynamic manoeuvres with URANS computation using body-force and discretised propeller models[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 182: 305–317.
- [15] Simonsen C D, Otzen J F, Klimt C, Larsen N L, Stern F. Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data[C]//*Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2012.
- [16] ITTC Manoeuvring Committee. Final report and recommendations to the 25th ITTC[C]//*Proceedings of the 25th International Towing Tank Conference*, Fukuokai, Japan. 2008.
- [17] ITTC Manoeuvring Committee. Final report and recommendations to the 28th ITTC[C]//*Proceedings of the 28th International Towing Tank Conference*, Wuxi, China. 2017.
- [18] Miller R W. PMM calculations for the bare and appended DTMB 5415 using the RANS solver CFDShip-IOWA[C]//*The Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, Denmark, 2008.
- [19] Simonsen C D, Stern F. RANS simulation of the flow around the KCS container ship in pure yaw[C]//*The Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [20] Yoshimura Y, Ueno M, Tsukada Y. Effects of rudder and propeller on hull force derivatives with KVLCC1 and KVLCC2[C]//*The Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [21] Yoshimura Y, Ueno M, Tsukada Y. Analysis of steady hydrodynamic force components and prediction of manoeuvring ship motion with KVLCC12, KVLCC2 and KCS[C]//*The Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [22] Turnock S R, Phillips A B, Furlong M. Urans simulations of static drift and dynamic manoeuvres of the KVLCC2 tanker[C]//*The Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [23] Stern F, Agdrup K, Kim S Y, et al. Experience from SIMMAN 2008-the first Workshop on Verification and Validation Of Ship Maneuvering Simulation Methods[J]. *Journal of Ship Research*, 2011, 55(2): 135–147.
- [24] Yasukawa H, Sano M. Manoeuvring prediction of a KVLCC2 model in shallow water by a combination of EFD and CFD[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [25] Sung Y J, Park S H. Evaluation on deep water manoeuvring performances of KVLCC2 based on PMM test and RANS simulation[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [26] Zipfel J S, Wagner S, Abdel M. RANS simulations of hydrodynamic forces acting on the KVLCC2 tanker[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [27] Araki M, Ohashi K, Hirata N. KVLCC2 simulations with overset grid method[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [28] Woolliscroft M, Maki K. Simulations of static and dynamic maneuvering tests using a linearized urans method[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [29] Bottner C U, Kastens M, et al. Contribution to numerical test cases in shallow water conditions[C]//*Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*. Copenhagen, Denmark, 2014.

- [30] Hoydonck W V, Eloit K. Shallow water CFD computations for SIMMAN 2014[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [31] Mucha P, Moctar O. Maneuvering prediction for a large tanker through virtual captive model tests[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [32] Otzen J F, Simonsen C D. Manoeuvring predictions for the KCS container ship based on experimental and numerical PMM tests[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [33] Guilmineau E, Deng G, Queutey P, et al. URANS simulations of planar motion mechanism for two hulls[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [34] Feng Songbo, Zou Zaojian. RANS simulation of pure draft and static rudder tests of KVLCC2 tanker with rudder and rotating propeller [C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [35] Young Jae Sung, Sang-Hun Park, Kyoung-soo Ahn, et al. Evaluation on deep water manoeuvring performances of KVLCC2 based on PMM test and RANS simulation[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Copenhagen, Denmark, 2014.
- [36] Stern Frederick, Wang Zhaoyuan, Yang Jianming, et al. Recent progress in CFD for naval architecture and ocean engineering[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(1): 1–23.
- [37] Van Hoydonck W, Delefortrie G, Katrien. Prediction of hydrodynamic forces on KVLCC2 in shallow water using RANS simulations[C]//SIMMAN 2020, Korea, 2023.
- [38] Otzen J F, Ingvorsen T, de Pablo P E, et al. Manoeuvring predictions for the KCS container ship based on RANS simulations[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, , 2023.
- [39] Park S, Kim J, Chung S, et al. Numerical maneuvering simulations of ONRT using STAR-CCM+[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [40] Wang J, Wan D. Computations of ship maneuvering in calm water and waves for fully appended ONRT model[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [41] Queutey P, Deng G, Wackers J, et al. Numerical predictions of ONRT tumblehome zigzag motion[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [42] Geremia P, Maki K, Alexias P. A response surface driven URANS method for free running maneuvering tests[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [43] Zhang Z, Yu J, Liu L, et al. Turn and zigzag maneuvers of KCS with URANS computation using different body-force methods[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [44] Kim Y, Yang K, Kim K, et al. URANS simulations of free-running tests of KCS[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [45] Sakamoto N, Kobayashi H, Ohashi K. 6 DOF overset URANS simulations of KCS under zigzag and turning tests in deep water[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [46] Ren Z, Wang J, Wan D. Numerical simulations of KCS self-propulsion and zigzag maneuver by URANS-overset grid method[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [47] Mei B, Sun L, Shi G. A novel grey box manoeuvring model for free running model and full-scale ship based on system identification[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [48] Sutulo S, Soares C G. Application of an empiric method for predicting manoeuvring performance of the ONRT virtual benchmark ship[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [49] Sakamoto N, Kobayashi H, Ohashi K. Overset RANS study of the effect of tank bottom condition for KCS under static drift/rudder configurations in shallow water[C]//SIMMAN 2020. Gao yang, Korea, 2023.
- [50] Han Y, Wu B S, Miao Q M, et al. Study of Effects of model scale and free surface on maneuvering hydrodynamics of KVLCC2 model by CFD[C]//Proceedings of 8th International Conference on Hydrodynamics. France, 2008: 69–76.
- [51] 赵桥生, 吴宝山, 杜 莱, 等. 船舶半约束模操纵性试验研究[C]//2015 年船舶水动力学学术会议论文集, 南京, 2015: 47–51.

- Zhao Q S, Wu B S, Du M, et al. Overview of ship maneuverability research and work report of the study group [C]//The 8th Plenary Meeting of Academic Committee of Ship Mechanics, Chinese society of naval architecture and engineering, Nanjing, 2015: 47–51. (in Chinese)
- [52] Wang H M, Tian X M, Zou Z J, et al. Experimental and numerical researches on the viscous hydrodynamic forces acting on a KVLCC2 model in oblique motion[C]//Proceedings of SIMMAN2008. Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [53] 田喜民, 邹早建, 王化明. KVLCC2 船模斜航运动粘性流场及水动力数值计算[J]. 船舶力学, 2010, 14(8): 14–20.
Tian X M, Zou Z J, Wang H M. Dynamic viscous flow field and hydrodynamic numerical calculation in oblique shipping of KVLCC2 ship model[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(8): 14–20. (in Chinese)
- [54] Wang H M, Zou Z J, Tian X M. Computation of the viscous hydrodynamic forces on a KVLCC2 model moving obliquely in shallow water[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science), 2009, 14(2): 241–244.
- [55] 冯松波, 邹早建, 邹璐. KVLCC2 船-舵系统斜航水动力数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 470–474.
Feng S B, Zou Z J, Zou L. Numerical calculation of hydrodynamic forces on a KVLCC2 hull-rudder system in oblique motion[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(4): 470–474. (in Chinese)
- [56] 杨勇, 邹早建, 张晨曦. 深浅水中 KVLCC 船体横荡运动水动力数值计算[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011(1): 95–103.
Yang Y, Zou Z J, Zhang C X. Numerical calculation of the hydrodynamic force of KVLCC ships in shallow and deep water[J]. Hydrodynamics Research and Progress Series A, 2011(1): 95–103. (in Chinese)
- [57] 马兴磊, 邹早建. KCS 船型浅水操纵性水动力计算[J]. 船海工程. 2008, 37(3): 4–6.
Ma X L, Zou Z J. Calculation of the manoeuvring hydrodynamic forces on KCS ship in shallow water[J]. Ship Ocean Engineering, 2008, 37(3): 4–6. (in Chinese)
- [58] Wang Jianhua, Zhao Weiwen, Wan Decheng, Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(1): 1–20.
- [59] ITTC Manoeuvring Committee. Benchmark data for validation of manoeuvring predictions[R]. 2024.
- [60] ITTC Manoeuvring Committee. Report of the manoeuvring committee [C]//Proceedings of the 30th International Towing Tank Conference, Hobart, Australia. 2024.