

文章编号: 1000-4882 (2023) 03-0247-15

含半开放水舱的船舶波浪特性数值分析

张珂¹, 孔耀华², 王乾浩², 王建华¹, 万德成^{*1}

(1. 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要

含有半开放水舱的船舶在实际波浪中航行时, 由于船体运动和舱壁反射等而导致舱内波浪环境条件十分复杂, 增加了小型船舶进该水舱内作业安全的不确定性。基于自研求解器 naoc-FOAM-SJTU, 并利用重叠网格技术对不规则波中含半开放水舱的船舶进行运动模拟。以船舶零航速迎浪时的模拟为基础分析半开放水舱内的波浪演化特性, 研究不同航速和浪向对半开放水舱内波浪环境的影响。结果表明, 在半开放水舱内波浪从舱尾到舱首呈现逐渐减小的趋势, 航速增加后舱内波高明显降低, 这在舱首尤为明显; 随着浪向角的减小, 舱内波高明显增加。已完成的计算工况表明, 增加航速或浪向角可减小半开放水舱内波浪, 从而降低小船驶入水舱内作业的风险, 这项研究结果可为制定实际船舶的作业方案提供参考。

关键词: 含半开放水舱的船舶; 重叠网格; 波浪特性; 航速影响; 浪向影响

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引言

在船尾设置半开放式水舱的大型船舶可供小型船舶进出, 用于运送物资或设备, 而且小型船舶可在舱内停留, 得到能源补给。当含半开放水舱的大型船舶在海上航行时, 受到风、浪、流等的影响, 存在摇荡运动。外部波浪向舱内传播并与舱内的流体相互作用, 在水舱中形成较为复杂的波浪环境, 增加了水舱内小型船舶安全作业的不确定性。

Hopman 等^[1]较早就关注船坞运输舰 (LPD) 坞舱内波浪的相互作用, 使用通用模型测试程序, 在两种不规则波谱条件下测试船舶模型。其中一项性能评估是基于水舱内最小波高的测量, 即通过比较不同结构布置的坞舱内的最小波高来评估船舶的水动力性能。这是考虑了不同航速、浪向和坞舱布置的较为完整的建模方法。Du Pre 等^[2]分析了这些重要的变量对 LPD 船的水动力学性能的影响。Vergote 等^[3]采用 Vrijburcht 的六波模型计算船闸内的波浪, 将计算结果与经验数据比较, 并考虑到船体形状和船闸入口的布局, 对六波模型进行了改进。Vantorre 等^[4]在比利时根特大学进行了综合约束模型试验, 通过 4 个船模的交叉检验获得浅水中船舶之间的相互作用力。Pinkster 等^[5]在浅水中进行了一系列模型试验, 研究过往船舶对系泊船舶水动力的影响。Bass 等^[6]在 Flow-3D 基础上, 用非线性时域分析方法模拟停靠船坞中的船舶和波浪的相互作用, 比较不同几何形状船舱内的波浪幅值。Cartwright 等^[7]通过

二维 SPH (smoothed particle hydrodynamics) 数值方法, 模拟不同波浪条件下舱室入口和空船舱中的波浪环境, 分析船舱几何形状对船舱入口和舱内波浪的影响。Yoon 等^[8]进行了模型测试, 研究小船在舱内移动时波浪的强度和操作的安全性。

随着计算流体力学在海洋工程领域的广泛应用, 许多数值方法被用来研究船-船水动力相互作用。Gourlay^[9]计算了两艘船平行航行时的下沉和纵倾。Varyani 等^[10-11]获得了在受限水域相遇的几艘船之间的相互作用力和力矩。Chen 等^[12]使用 Chimera-RANS 方法计算了航道中的多船相互作用。Wang 等^[13]用 RANS 方法预测运河中不同水深、船岸距离和河岸几何形状对两条低速航行油轮下沉量、纵倾力、水动力和力矩的影响。

本文以 naoe-FOAM-SJTU 求解器为基础, 使用重叠网格技术模拟不规则波中含半开放水舱的船舶运动。在不同航速和浪向等工况下进行数值模拟。研究结果可为小型船舶进出半开放水舱流程的设计和安全性评估提供参考。

1 数值方法

1.1 控制方程

本文数值模拟非定常、不可压的黏性流体, 不考虑温度、密度、内能的变化, 使用如式 (1) 和式 (2) 所示的两相 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为流体速度; \mathbf{U}_g 为网格移动速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$, 为流体动压; ρ 为流体密度; \mathbf{g} 为重力加速度向量; $\mu_{\text{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$, 为有效动力黏度; \mathbf{f}_σ 和 \mathbf{f}_s 为广义源项。

关于控制方程中速度和压力的耦合, Chandar^[14]于 1986 年提出用 PISO (pressure implicit with splitting of operator) 算法, 即压力隐式分裂算子法来求解。在 OpenFOAM 中的 PISO 算法运用了同位网格方法, 该方法于 1983 年由 Rhie 等^[15]提出, 与传统的交错式网格相比, 数据储存在同位网格的中心点上, 在编程求解三维问题时更容易和高效。

1.2 自由面捕捉方法

针对含半开放水舱的船舶在不规则波中运动时自由面效应的准确模拟, 本文使用基于人工压缩技术的 VOF (volume of fluid) 方法, 具体可参见文献[16]。通过计算网格单元中不同流体占有的体积分数 α 来确定界面。 α 的取值范围为 0 到 1, 0 代表空气, 1 代表水, $0 < \alpha < 1$ 代表自由面。与传统的 VOF 方法相比, 现在采用的人工压缩技术实现了密度相差较大 (如水和空气) 条件下自由面的精确求解。人工压缩技术主要是通过引入对流项来实现。

通过以下的输运方程分别求解空气和水的体积分数:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}_1 \alpha) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (1 - \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}_g (1 - \alpha)) = 0 \quad (4)$$

式中, 下标 1 和 g 分别表示水和空气。

根据体积分数对水和空气的速度进行比例分配, 即可得流场中的有效速度:

$$\mathbf{U} = \alpha \mathbf{U}_1 + (1 - \alpha) \mathbf{U}_g \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3) 可得:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{U}_r\alpha(1-\alpha)) = 0 \quad (6)$$

式中, $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_g$, 为水和空气的相对速度; \mathbf{U}_r 可通过下式求得:

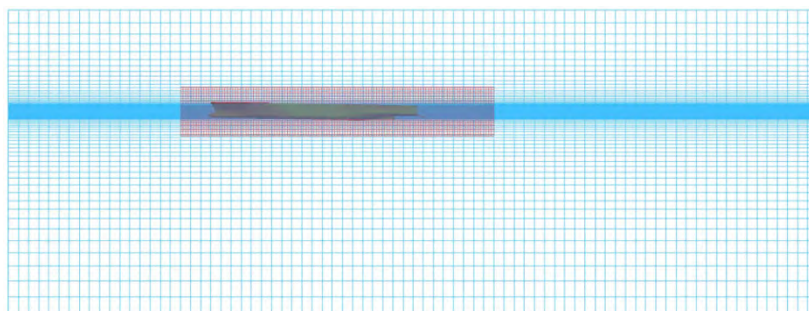
$$\mathbf{U}_{r,f} = \mathbf{n}_f \min \left\{ C_\alpha \frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_f|}, \max \left(\frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_f|} \right) \right\} \quad (7)$$

式中, 下标 f 为网格单元面存储的物理量; ϕ 为速度通量, 由 PISO 算法求解得到; \mathbf{S}_f 为离散单元面的法向向量; C_α 为自由面压缩系数, 表示自由面的压缩效果, 数值越大效果越明显; \mathbf{n}_f 为自由面的单元法向量。通过人工压缩项的采用, 可以控制数值耗散, 实现对自由面的精确捕捉。

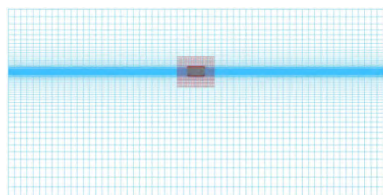
1.3 动态重叠网格技术

重叠网格技术在处理物体的运动边界问题中已得到普遍应用。一些学者将重叠网格技术引入到了开源代码平台 OpenFOAM^[17-18]中, 可以方便地将它与非结构化网格结合起来使用。上海交通大学沈志荣等^[19-22]介绍了基于 OpenFOAM 的全非结构化网格模块, 并开发了船舶流体动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。该求解器实现了黏性流场的分析和重叠网格插值计算的并行处理。本文研究含半开放水舱船舶在波浪中的摇荡运动, 其中最关心的是纵摇、垂荡和横摇这 3 种运动, 它们对坞舱内的波浪环境以及小船进出过程有显著影响, 需要使用重叠网格方法求解船舶的水动力学问题。如图 1 所示, 每个计算区域都被单独网格化并整合到背景网格中。在一系列预处理后, 将计算区域之外的网格挖出不再进行计算, 然后建立一定的插值关系, 以控制网格中的重叠区域。最后通过插值方法允许重叠区中的不同网格进行数据交换, 并计算全局流场。

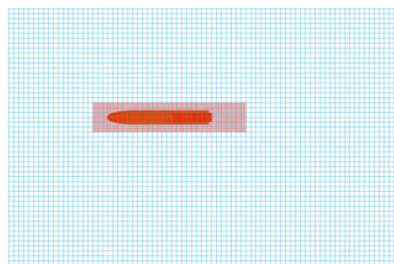
为了准确捕捉半开放水舱和流场中的波浪发展, 对背景网格进行加密, 首先对自由面 z 方向 (垂向) 0.1 m 附近的网格垂向加密, 其次关注半开放水舱所在的区域, 对其进行局部加密, 以便精准捕捉舱内波浪的运动。



(a) 正视图



(b) 侧视图



(c) 俯视图

图 1 求解船舶运动的重叠网格系统

1.4 计算设置和网格收敛性验证

1.4.1 船型和半开放水舱测点布置

在船尾设置一矩形半开放水舱，表 1 中列出了该船的主要参数。

表 1 含半开放水舱船舶航行状态的计算参数

水线长 L_{wl}/m	水线宽 B/m	排水量 W_m/t	吃水 d/m	重心垂向坐标 z_g/m	重心纵向坐标 x_g/m
16.000	2.267	12.698	0.510	0.962	0.064

在半开放水舱内外选取 7 个测点，其中舱内布置 5 个测点，舱外布置 2 个测点。如图 2 所示，1[#]、2[#]、3[#] 测点布置在水舱的中纵剖面，其中 2[#] 测点位于半开放水舱中心，较具代表性，用该测点的数据表示半开放水舱内的波浪。4[#] 和 5[#] 测点布置在舱首右、左舷侧。6[#] 和 7[#] 测点的纵向位置与 2[#] 测点相同，横向分别距离船体中纵剖面 0.25 倍和 0.5 倍船长。

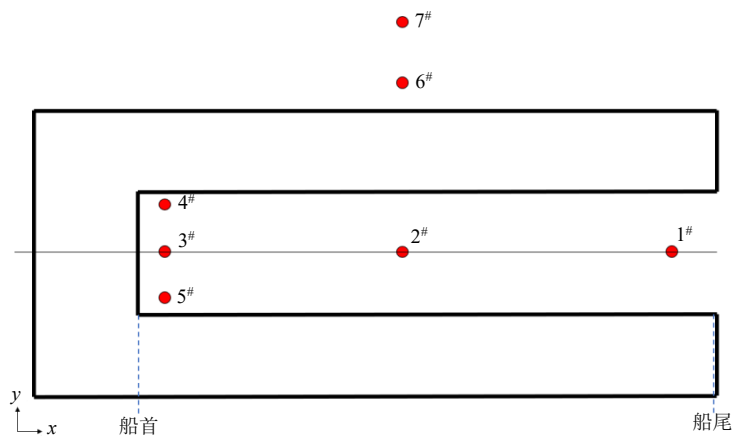


图 2 半开放水舱测点布置

波浪条件为单向不规则波，采用 ITTC 双参数谱，波高为 0.08 m，特征周期为 1.549 s。

1.4.2 计算域设置

计算域的设置参考 ITTC 关于船舶水动力数值计算的标准。如图 3 所示，由背景网格和船体网格两套网格组成 CFD 整体计算域。将船首基线和水线面的交点作为原点。在 x 方向，设定入口处船速和波浪条件，造波边界距离船首 1 倍船长；出口消波边界到船尾的距离为 2 倍船长。在 y 方向，设定左右边界到船体的距离为 1.5 倍船长。在 z 方向，设定上下边界到船体的距离为 1 倍船长。在 y 方向和 z 方向均为对称边界条件。

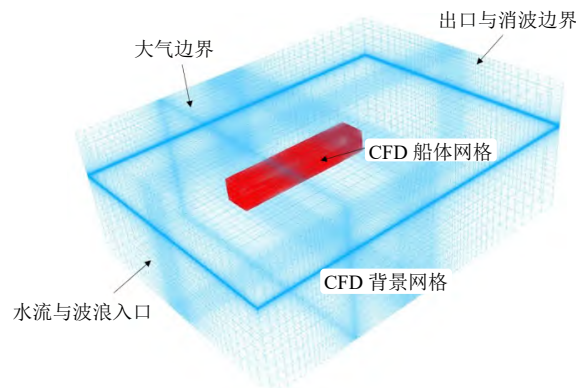


图 3 CFD 计算域

1.4.3 网格无关性和时间步长无关性验证

分别采用粗网格、中等网格和细网格这 3 种网格进行数值模拟。背景网格和船体网格在 x, y, z 这 3 个方向上用等比例缩放。中等网格与粗网格、细网格与中等网格的加密比均为 1.5 : 1, 背景网格和含半开放水舱的船舶不涉及复杂的几何边界, 能保证缩放的比例关系。3 种方案的网格信息如表 2 所示。

表 2 3 套网格基本信息

项目	网格总数/百万	背景网格/百万	船体网格/百万
粗网格	2.09	0.74	1.35
中等网格	3.26	1.12	2.14
细网格	5.10	1.70	3.40

图 4 给出了不同网格方案下半开放水舱内 2[#] 测点波高的时历曲线。船舶航速很小, 主要关心外部波浪在水舱内的演化及其与水舱壁面和舱底的相互作用。可以看出, 在 15 s 之后, 波浪发展到船舶尾部半开放水舱处, 舱内波高明显增加。采用中等网格和细网格得到的波高时历曲线在 $t < 22.5$ s 时十分接近, 而在 $22.5 \text{ s} < t < 30 \text{ s}$ 阶段波峰瞬时值存在偏差。对这一时间段峰值存在差异的数据以及从造波到波浪充分发展的完整数据分别进行计算分析, 如表 3 所示。中等网格和细网格下波高统计值最大偏差为 3.186%, 即网格数量达到中等后计算结果趋于稳定。因此, 可近似认为中等网格达到了网格收敛性的要求, 采用中等网格进行后续数值模拟。

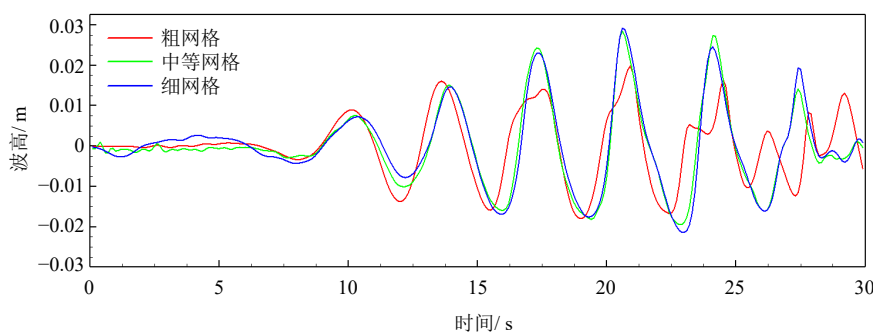


图 4 3 套网格计算的舱内 2[#] 测点波高对比

表 3 中等网格和细网格下舱内 2[#] 测点波高计算结果

22.5 s < t < 30 s						0 s < t < 30 s					
最大值			有义值			最大值			有义值		
中等网格 /m	细网格 /m	偏差 /%	中等网格 /m	细网格 /m	偏差 /%	中等网格 /m	细网格 /m	偏差 /%	中等网格 /m	细网格 /m	偏差 /%
0.042 1	0.040 8	3.186	0.036 1	0.035 3	2.266	0.047 9	0.049 3	2.839	0.036 3	0.037 1	2.156

在中等网格的情况下, 分别取时间步长为 0.000 5, 0.001 和 0.002 s, 进行时间步长无关性检验。在 20 ~ 50 s 内对船舶运动及水舱内波高的模拟数据进行统计分析, 如表 4 所示。在中等网格数量下, 时间步长对运动响应的计算结果影响不大, 但对波高有一定影响, 0.002 s 时间步长相对于 0.000 5 s 时间步长的数据误差在 2.5% ~ 4%, 而 0.001 s 时间步长相对于 0.000 5 s 时间步长的数据误差在 0.5% 以内, 即时间步长达到 0.001 s 后计算结果趋于稳定。综合考虑计算时间和计算的准确性, 本文数值模拟的时间步长取为 0.001 s。

表 4 时间步长无关性检验计算结果

时间步长 $\Delta t / s$	有义值			2# 测点最大波高		2# 测点有义波高	
	垂荡/m	横摇/°	纵摇/°	数值/m	相对 0.000 5 s 计算结果偏差/%	数值/m	相对 0.000 5 s 计算结果偏差/%
0.000 5	0.013 78	0.114 41	0.290 31	0.048 34	—	0.035 59	—
0.001	0.013 55	0.114 60	0.292 61	0.048 11	0.475 8	0.035 46	0.365 2
0.002	0.013 28	0.113 39	0.290 84	0.047 13	2.503 1	0.034 19	3.934

2 计算结果和讨论

2.1 水舱内外测点波浪特性

以船舶零航速，浪向 180° （迎浪）的模拟结果为基础，分析半开放水舱内的波浪演化特性。

数值模拟得到的原始数据是相对于大地坐标系的。为了反映半开放水舱内实际遭遇的波浪条件，需要对波高数据进行修正，即去除由于船体运动即舱底抬升或下降而引起的波面抬升或下降。选取具有代表性的 2# 测点的计算结果，显示波高数据修正过程。图 5 中的虚线是数值模拟直接得到的舱内波高历时曲线，未经过修正；图中实线数据去除了水舱底部垂荡运动的影响。由图 6 所示船舶周围波浪的发展可知，波浪在 $5 \sim 10$ s 左右到达船体，在 $10 \sim 15$ s 到达船尾半开放水舱，在 $25 \sim 30$ s 左右船舶周围波浪场充分发展。这和图 5 所示的波浪时历相对应，在 10 s 之前，半开放水舱内波高几乎为 0，在 10 s 之后波浪发展到船坞，波高显著增加，在 30 s 之后舱内波浪峰值趋于稳定。

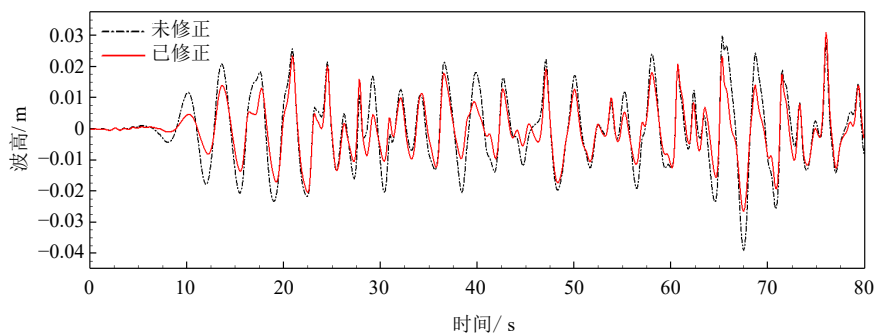
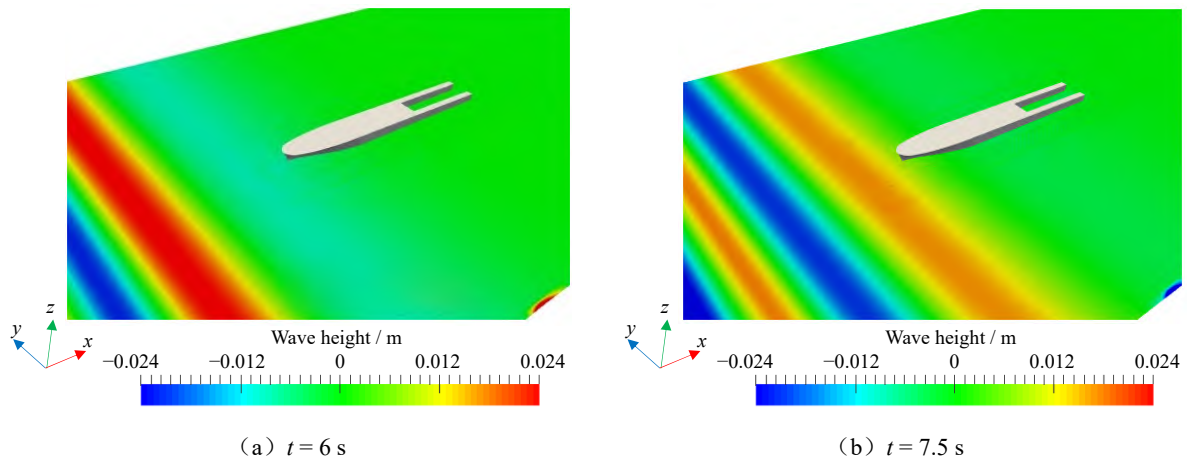
图 5 2# 测点波高时历曲线（船舶零航速，浪向 180° ）

图 6 拖航状态下含半开放水舱船舶周围波浪的发展

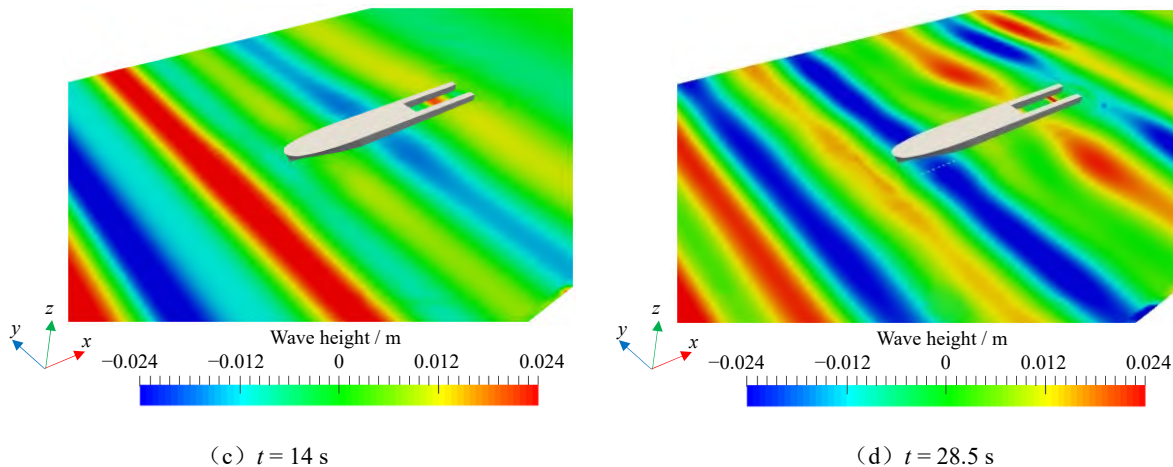


图 6 续 拖航状态下含半开放水舱船舶周围波浪的发展

对半开放水舱内的波浪进行时域分析。图 7 所示为船舶零航速、浪向 180° 时 1#、2#、3# 测点波高时历对比, 图 8 所示为 3#、4#、5# 测点波高时历对比。

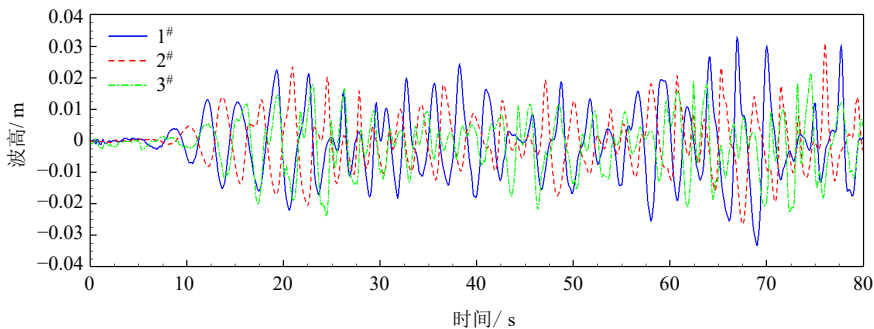


图 7 1#、2#、3# 测点波高时历对比 (船舶零航速, 浪向 180°)

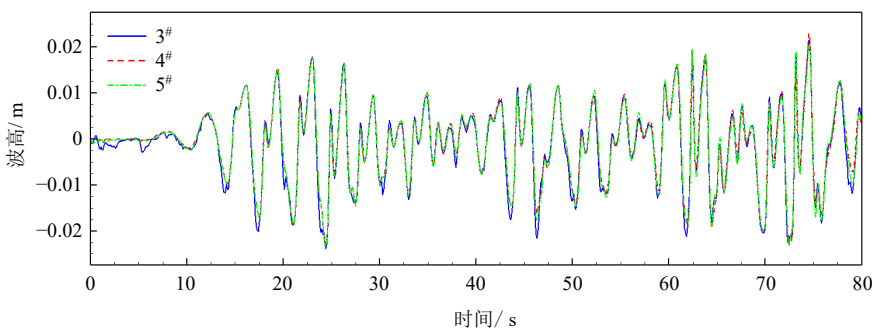


图 8 3#、4#、5# 测点波高时历对比 (船舶零航速, 浪向 180°)

由图 7 可知, 3 个纵向测点的波浪相位与测点的排列顺序一致, 即靠近舱尾的测点测到的波浪首先达到峰值, 纵向 3# 测点得到的波浪的演变没有明显的突变, 但是测点 1# 处波高的幅值最大。由图 8 可以看出, 横向的 3#、4#、5# 测点在波浪演化过程中测得的波高与相位几乎相同, 这可能是在浪向 180° 时船舶对波浪有明显的遮蔽作用。

由图 6 所示的波浪发展可知, 在 30 s 之后舱内波浪已充分发展, 现取 30~80 s 舱内波浪数据作统计分析, 图 9 所示为 5 个测点处波浪的最大值、平均值和有义值。可以看出水舱尾部波浪统计值最高, 该处为外部波浪进入水舱的入口, 在该处发生流动阻塞。波浪在水舱内传播时, 由于舱壁、舱底的摩

擦或反射而导致波能损耗，波高逐渐减小。位于相同纵向位置的 3#、4#、5# 测点波高的有义值基本相同，说明波浪在舱内沿横向基本没有损耗。

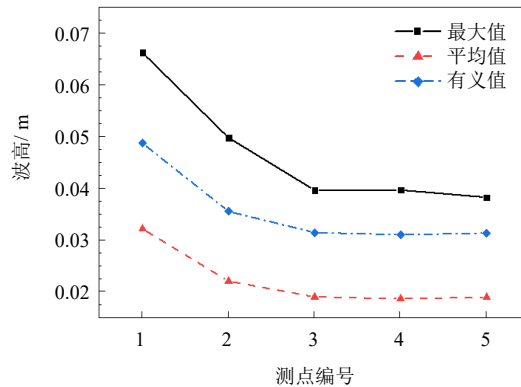


图9 不同测点波高统计值对比(船舶零航速, 浪向 180°)

对不同测点处的波浪数据进行频域分析, 如图 10 和图 11 所示。纵向 1#、2#、3# 测点的波浪频率特性差别较小, 能量密度分布较为集中, 区别主要在波浪主频数目上, 舱尾受外部波浪、半开放水舱内波浪及反射波浪等多种波浪成分的影响, 主频不止一个, 而越靠近舱首(如 3# 测点), 波浪单一主频越明显; 横向 3#、4#、5# 这 3 个测点的频谱图几乎完全重合, 说明波浪几乎是完全单向的。因此在以下章节不再对 4#、5# 测点数据进行频域分析。

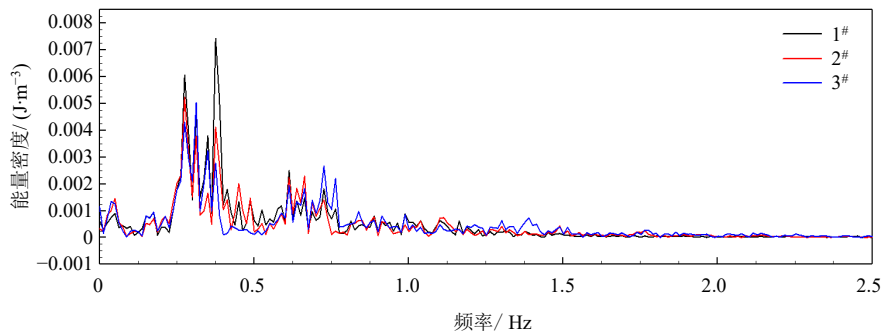


图 10 1#、2#、3# 测点波浪频率特性(船舶零航速, 浪向 180°)

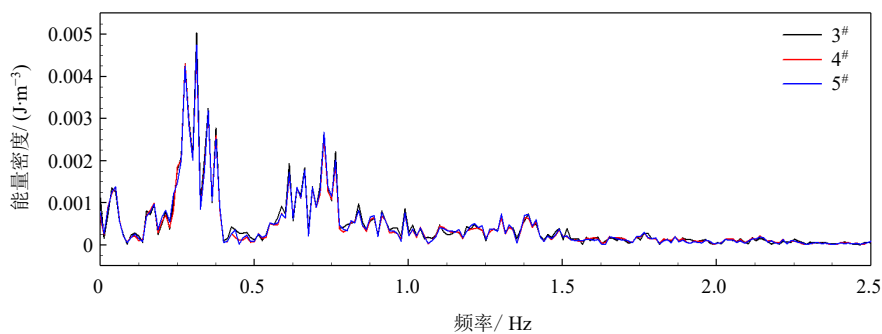


图 11 3#、4#、5# 测点波浪频率特性(船舶零航速, 浪向 180°)

本节选取的工况为迎浪零航速, 船体兴波的影响较小, 可以较好地对比半开放水舱内外的波浪情况。

图 12 所示为 2#、6# 和 7# 测点处波高的时历曲线。7# 测点的波高比 6# 测点的波高大, 这是船体运动辐射波浪与主流波浪叠加的结果, 而从波的整体演化来看, 这两个测点的波形比较相似, 大波高和

小波高出现的时刻基本相同。在波浪演化初期, 舱内波浪与舱外波浪的相关性较强, 大波高和小波高出现的时间相近。但在随后的演化中舱内波浪受到反射等作用与外部波浪出现差异, 舱内波浪比原始波浪具有更强的非线性, 而且出现了很多小波。

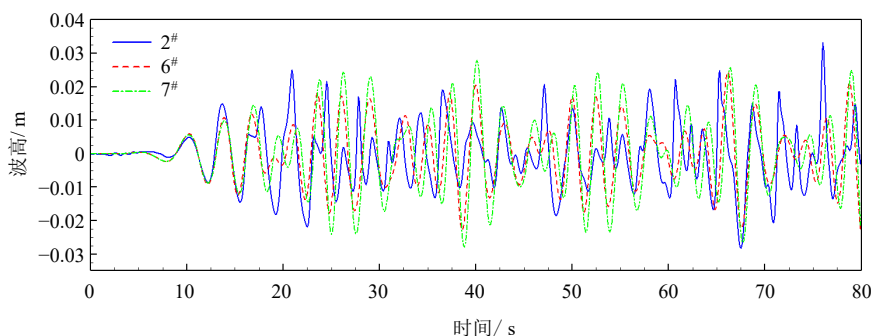


图 12 2[#]、6[#]、7[#] 测点波高历时曲线对比 (船舶零航速, 浪向 180°)

图 13 所示为 2[#]、6[#] 和 7[#] 测点处波浪频率特性的对比。船舱外部两个测点的波浪频率特性类似, 能量集中的频段较为显著。舱内波浪的主频与外部波浪接近, 但明显出现了许多高频成分, 这主要是舱内波浪反射引起的。

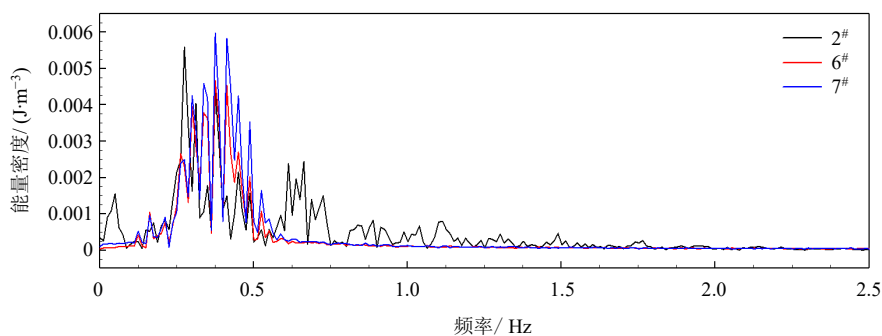


图 13 2[#]、6[#]、7[#]测点波浪频率特性 (船舶零航速, 浪向 180°)

2.2 航速的影响

现研究迎浪不同航速下含半开放水舱的船舶在设定的湿坞吃水时舱内的流场, 计算工况如表 5 所示, 其中设定零航速、迎浪 (浪向 180°) 为基础工况。

表 5 不同航速下含半开放水舱的船舶湿坞航行工况 (作业形式: 固定吃水)

航速/(m/s)	浪向/(°)	航速/(m/s)	浪向/(°)
0	180	0.40	180
0.13	180	0.66	180

图 14(a) 所示为浪向 180° 时 5 个测点处的有义波高和平均水深随航速的变化。在同一航速下对比舱内不同测点的波高, 变化规律同 2.1 节, 即纵向从舱尾到舱首波高的统计值在减小, 而横向测点波高基本一致。在同一测点观察不同航速下波浪的变化, 航速越高, 舱内波高越低, 舱首的有义波高减小约一半, 且航速越高波高降低的速率越大。5 个测点处平均水深随航速的变化如图 14(b) 所示。随着航速增加, 舱内各处水深都在降低, 舱尾 1[#] 测点处水深降低的幅度比较明显。

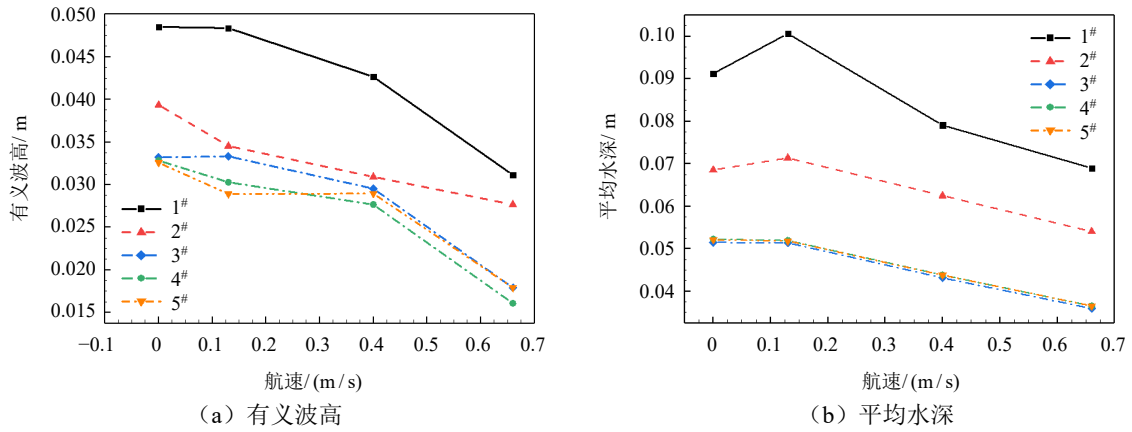


图 14 5 个测点处有义波高和平均水深随航速的变化 (浪向 180°)

不同航速下半开放水舱压力云图如图 15 所示, 舱首和舱尾测点压力统计值如图 16 所示。在高航速下, 船尾后方的压降更加明显, 导致船尾 (即舱尾) 周围流动加速, 使得舱内的水向外流出, 而外部水流很难进入水舱, 这使得靠近舱首位置水得不到补充, 水深变小。

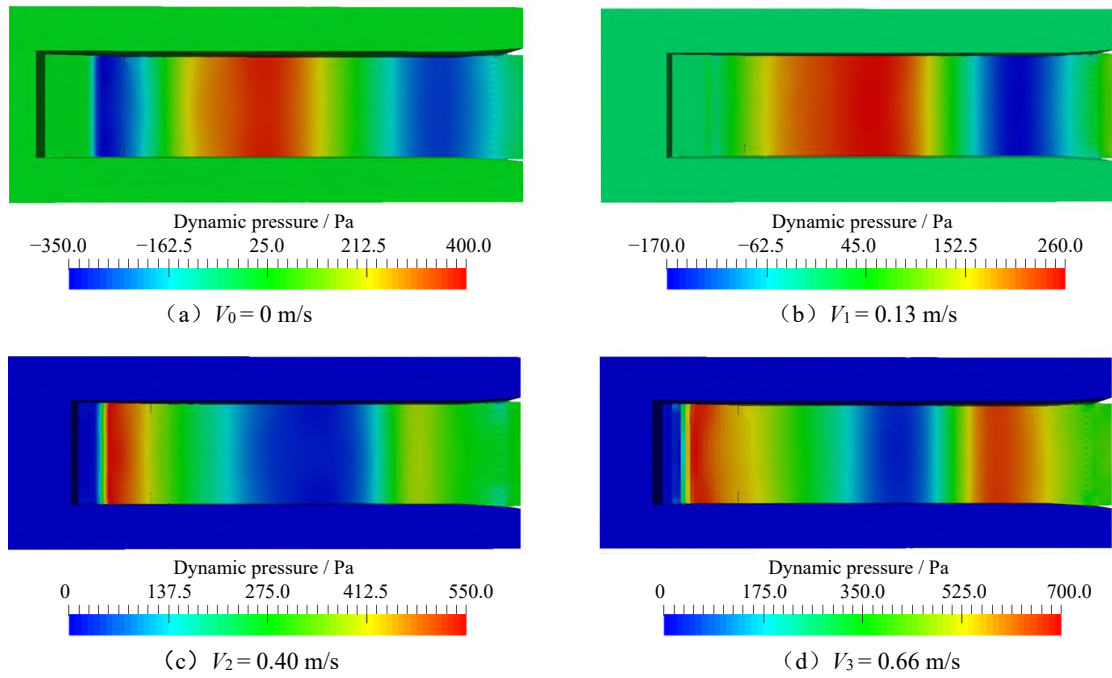


图 15 不同航速下半开放水舱压力云图 ($t = 60 \text{ s}$)

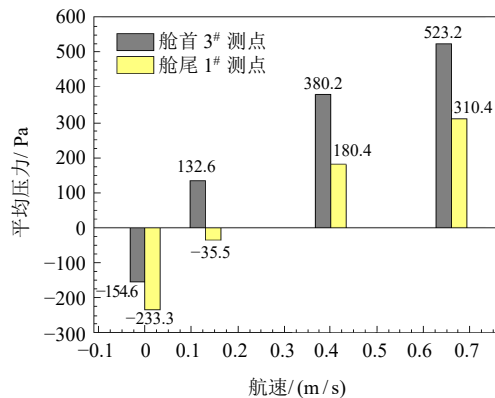


图 16 不同航速下舱首和舱尾测点处平均压力 ($t = 60 \text{ s}$)

图 17 所示为 1[#], 2[#], 3[#] 测点处不同航速下波浪频率特性的对比。可以看出, 在航速增加后, 波浪能量更加集中在较低的频率区间, 即舱内波浪出现了长周期的变化, 这与零航速时的频率特性不同。此外, 舱内各测点处的波浪都含有各种频率的成分, 舱尾处的影响因素较多, 波浪成分最为复杂, 而不同航速下舱首波浪单一主频的特征较为明显。

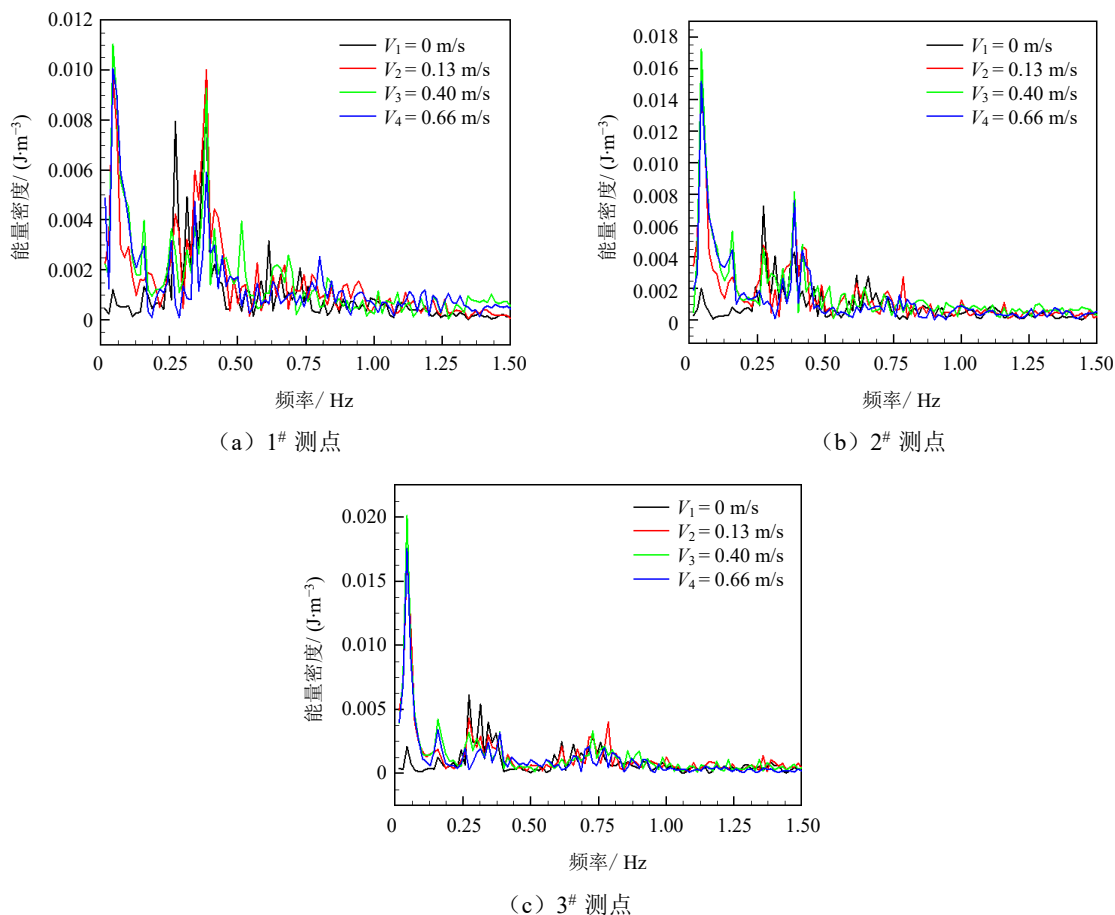


图 17 不同航速下 3 个测点波浪频率特性对比 (浪向 180°)

2.3 浪向的影响

研究不同浪向条件下, 含半开放水舱的船舶在设定的湿坞吃水情况下舱内的流场, 计算工况如表 6 所示, 其中设定零航速、迎浪 (即浪向 180°) 为基础工况。

表 6 不同浪向下含半开放水舱船舶湿坞航行工况 (作业形式: 固定吃水)

航速/(m/s)	浪向/ $(^\circ)$	航速/(m/s)	浪向/ $(^\circ)$
0	180	0	160
0	150	0	170

图 18 所示为船舶零航速时 5 个测点处有义波高随浪向的变化。波浪在舱尾处较高, 并向舱首递减, 3[#], 4[#], 5[#] 这 3 个测点之间的差异不大。各测点的波高都随浪向角的减小而增大, 舱内测点 (2[#], 3[#], 4[#], 5[#]) 波高的增加幅度接近。如图 19 所示, 浪向角减小 (即斜浪角度增加), 船舶对波浪的遮蔽作用减小, 波浪更容易进入到半开放水舱内。舱尾测点对波浪变化更加敏感, 横向波浪在该测点处引起的波高显著增大。

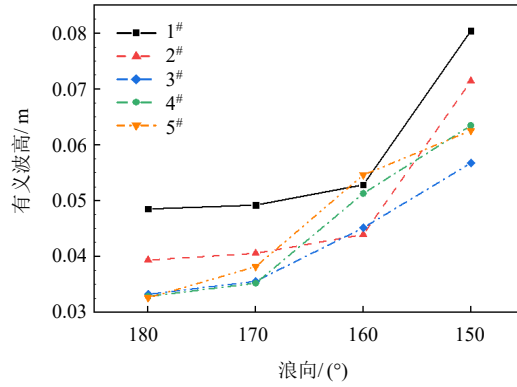


图 18 5 个测点处有义波高随浪向的变化 (船舶零航速)

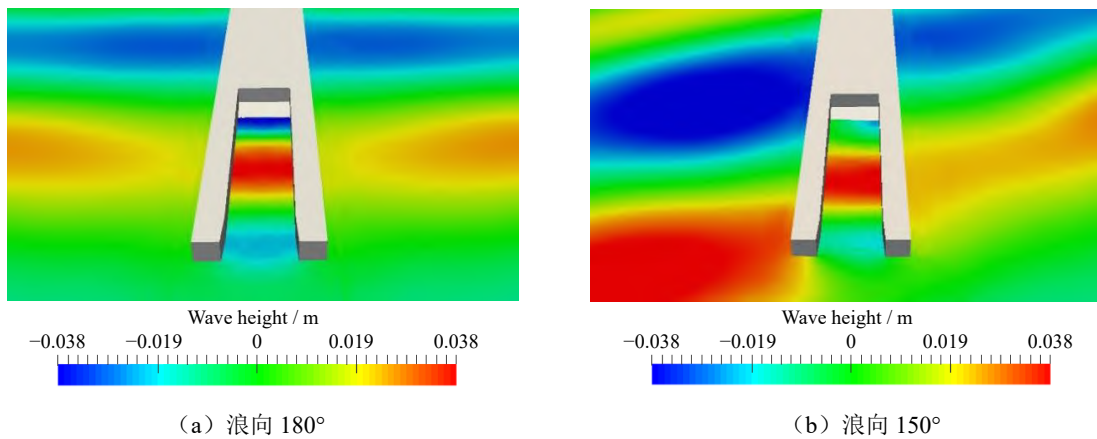


图 19 不同浪向角下自由面上的波浪

图 20 所示为 1[#]、2[#]、3[#] 这 3 个测点处在不同浪向下波浪频率特性的对比。浪向从 180° 变化到 150° 时舱内波浪的主频率变化不大，能量集中的频率范围基本一致。浪向角越小（斜浪角度越大），波浪能量密度增加越明显，即波浪更容易传播到半开放水舱内。在靠近舱首的 2[#] 和 3[#] 测点处，由于舱首底板、侧壁多向反射作用呈现更多的高频成分。

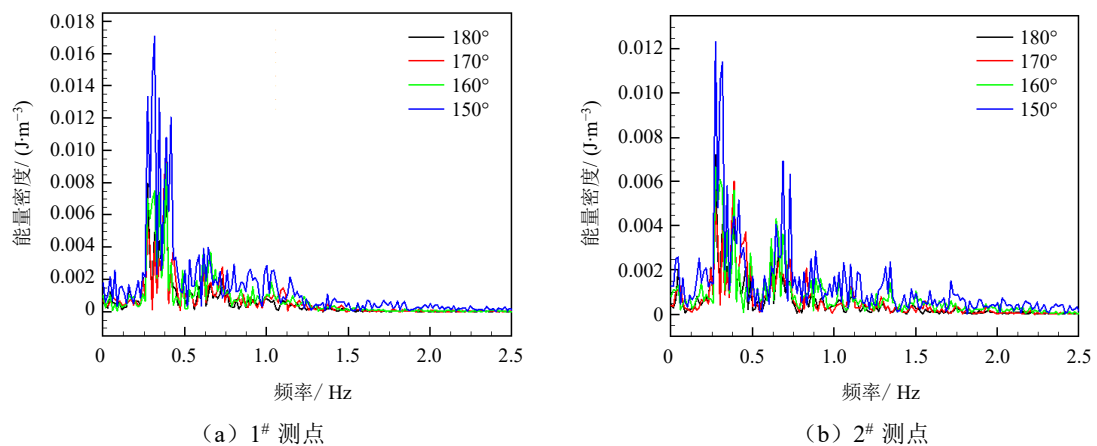
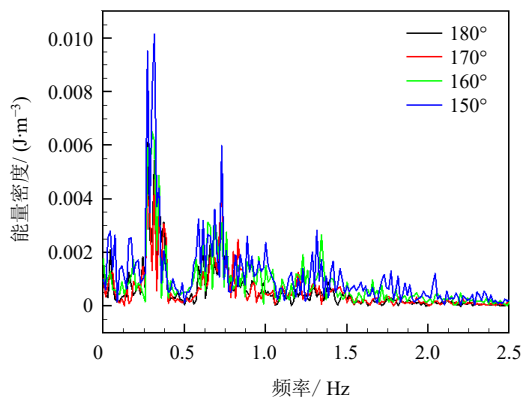


图 20 不同浪向下 3 个测点处舱内波浪频率特性对比 (船舶零航速)



(c) 3# 测点

图 20 续 不同浪向下 3 个测点处舱内波浪频率特性对比 (船舶零航速)

3 结 论

本文基于重叠网格技术对含半开放式水舱的船舶在不规则波中的运动进行数值模拟, 研究不同航速和浪向角下半开放水舱内的波浪特性, 对其波高进行纵向、横向对比, 通过时域和频域分析得到主要结论如下:

(1) 波浪传播到舱尾处出现阻塞效应, 有义波高在舱口处最大, 越靠近舱首越小。舱口的波浪受到外部波浪、舱内波浪及反射波浪等多重影响, 成分复杂, 波浪主频不止一个。越靠近舱首, 波浪单一主频特征越明显。舱首附近横向测点的波长、波高与相位都几乎一致, 显示波浪传播几乎是单向的。

(2) 在波反射等影响下, 随着时间的推进舱内波浪与外部波浪呈现差异, 非线性特征更强, 同时出现了很多小波。

(3) 舱内波高随航速增大而降低, 且航速越高, 降低速率越大, 舱内波高降低的现象在舱首比较明显, 波高降低一半左右, 这与航速提高后舱内水向外流出的现象有关。随着航速的增加, 波浪能量集中在较低的频率范围, 意味着舱内波浪呈长周期变化。

(4) 当浪向角减小, 即斜浪角度增大时, 船体的遮蔽作用减小, 舱内波浪高度显著增加。综上所述, 从小船进入水舱遭遇的波浪高度这个因素来分析, 增大航速或浪向角可降低小船驶入半开放水舱内作业的风险。

参 考 文 献

- [1] HOPMAN H, KAPSENBERG G K, KRIKKE E M. Design and hydromechanic aspects of the amphibious transport vessel for the Royal Netherlands Navy[J]. Naval Engineers Journal, 1994, 106(3): 163-174.
- [2] DU PRE A, WOOD M. 'The alternative landing ship logistic' warship 2000[M]. Warships for Amphibious Operations and Mine Warfare, RINA, 2000.
- [3] VERGOTE T, ELOOT K, VANTORRE M, et al. Hydrodynamics of a ship while entering a lock[C]// 3rd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: with non exclusive focus on ship behavior in locks, Flanders Hydraulic Research, 2013: 1-9.
- [4] VANTORRE M, VERZHBITSKAYA E, LAFORCE E. Model test-based formulations of ship-ship interaction forces[J]. Ship Technology Research, 2002, 49: 124-141.

- [5] PINKSTER J A, RUIJTER M N. The influence of passing ships on ships moored in restricted waters[C]// Offshore Technology Conference, OnePetro, 2004.
- [6] BASS D, MOLYNEUX D, MC TAGGART K. Simulating wave action in the well deck of landing platform dock ships using computational fluid dynamics[C]// Warship-International Symposium then Conference, 2004: 71-82.
- [7] CARTWRIGHT B, RENILSON G, MACFARLANE G, et al. Motions of a landing craft in a flooded well dock - effect of well dock design[C]// International Conference on Military Support Ships, 2007.
- [8] YOON S H, SEO K H. Well dock design and assessment of relative motions during the operation of the landing crafts within well dock[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 2012, 49(2): 164-173.
- [9] GOURLAY T. Sinkage and trim of two ships passing each other on parallel courses[J]. Ocean Engineering, 2009, 36(14): 1119-1127.
- [10] VARYANI K S, MCGREGOR R, WOLD P. Interactive forces and moments between several ships meeting in confined waters[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(5): 635-642.
- [11] VARYANI K S. Identification of trends in extremes of sway-yaw interference for several ships meeting in restricted waters[J]. Schiffahrts-Verag Hansa, 2002, 49: 174-191.
- [12] CHEN H C, LIN W M, HWANG W Y. Application of Chimera RANS method for multiple-ship interactions in a navigation channel[C]// International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2002.
- [13] WANG Hongzhi, ZOU Zaojian. Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock[J]. Ocean Engineering, 2014, 88: 409-425.
- [14] CHANDAR D. Development of a parallel overset grid framework for moving body simulations in OpenFOAM[J]. Journal of Applied Computer Science and Mathematics. 2015, 9(20): 22-30.
- [15] RHIE C M, CHOW W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525-1532.
- [16] RUSCHE H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. London: Imperial College, 2002.
- [17] BOGER D, NOACK R, PATERSON E. Dynamic overset grid implementation in OpenFOAM[C]// Proceedings of the 5th OpenFOAM Workshop, Gothenburg, Sweden, 2010.
- [18] CHANDAR D, NGUYEN V T, GOPALAN H, et al. Flow past tandem circular cylinders at high Reynolds numbers using overset grids in openFOAM[C]// Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, USA, 2015: 315-335.
- [19] SHEN Z, WAN D, CARRICA P. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering. 2015, 108: 287-306.
- [20] SHEN Z, YE H, WAN D. URANS simulations of ship motion responses in long-crest irregular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2014, 26(3): 436-446.
- [21] SHEN Z, WAN D, CARRICA P. RANS simulations of free maneuvers with moving rudders and propellers using overset grids in OpenFOAM[C]// Proceedings of SIMMAN 2014 workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods, Lyngby, Denmark, 2014.
- [22] SHEN Z, KORPUS R. Numerical simulations of ship self-propulsion and maneuvering using dynamic overset grids in OpenFOAM[C]// Proceedings of Tokyo 2015 CFD Workshop, Tokyo, Japan, 2015.

Numerical Simulation of Wave Characteristics of a Ship Containing Semi-Open Water Tank Based on Overset Grid

ZHANG Ke¹, KONG Yaohua², WANG Qianhao², WANG Jianhua¹, WAN Decheng^{*1}

(1. Computational Marine Hydrodynamics Laboratory (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract

When a ship containing semi-open water tank is sailing across the sea, due to the motion of the hull and the reflection of the bulkhead, wave environment conditions in the water tank are complex, which increases the uncertainty of the performance and operation safety of small boats entering the water tank. Based on the solver naoe-FOAM-SJTU developed independently by the research group, motion simulation of ships in irregular waves is realized by using overset grid technique. Wave evolution characteristics in the semi-open water tank are analyzed on the basis of the simulation results for the ship at zero speed. Influence of ship speed and wave direction angle on the wave environment in the water tank is studied. Waves in the water tank gradually decreased from the stern to the bow, and wave height is significantly reduced as the speed increases, which are more obvious at the bow. As the wave angle decreases, wave height in the dock increases significantly. It can be known that increasing ship speed or wave direction angle can reduce waves in the semi-open water tank so as to reduce the risk of small boats entering water tank. The research results may provide a reference for actual ship operation plans.

Key words: ship containing semi-open water tank; overset grid; wave characteristics; influence of speed; influence of wave direction

作者简介

张 珂 女, 1998 年生, 硕士。主要从事船海计算水动力学研究。

孔耀华 男, 1993 年生, 硕士, 工程师。主要从事船舶舾装设计研究工作。

王乾浩 男, 1995 年生, 硕士, 工程师。主要从事船舶舾装设计研究工作。

王建华 男, 1988 年生, 博士, 助理研究员。主要从事计算船舶水动力学, 波浪中船舶操纵研究。

万德成 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事计算船舶水动力学和高性能计算研究及 CFD 和 CAE 软件开发。

*通讯作者: 万德成