

船舶在斜浪作用下波浪漂移力的计算

刘聪，王建华，万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要 船舶在具有较大波高的短波中斜浪航行时，船体瞬时湿表面积变化剧烈，波浪绕射和辐射较为复杂导致非线性性质显著，引起较大的波浪飘逸力，影响和改变船舶原有的航向。为了准确估计波浪漂移力，本文对波浪作用下的 DTC (Duisburg Test Case) 船模进行了计算，对船舶受到的波浪力的非线性性质进行了分析，将计算得到的平均波浪力进行了分析并与实验进行了对比。本文基于自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，利用流体体积法 (VOF) 对自由液面求解；利用重叠网格技术和六自由度运动模块对船舶的波浪运动响应进行了计算；利用 wave2Foam 开源程序对数值波浪进行模拟。计算结果显示，波浪平均漂移力的计算结果与实验结果趋势吻合，波浪频率对船体受力及运动起主导作用，波浪力非线性现象明显。通过对波浪力时历曲线及船体周围流场分析发现，船模在波浪中的运动响应及船舷两侧复杂的不对称湿表面积变化以及波浪砰击是导致波浪力呈现出非线性性质的主要原因。本文计算捕捉到了船舶在斜浪中的非线性现象，为之后进行船舶在波浪中的运动计算模拟及分析提供了支持。

关键字 波浪漂移力；naoe-FOAM-SJTU 求解器；重叠网格；数值造波

1 引言

国际海事组织 IMO 在 2013 年施行新船能效设计指数 (EEDI)。EEDI 要求，对于 2013 年 1 月 1 日以后的新建船舶必须满足 EEDI 排放标准。EEDI 施行后，许多船东选择通过降低航速的方式来减少排放，从而达到新的排放标准。但是降低航速会对船舶的操纵性能产生不利影响，人们担心在复杂的海洋波浪环境条件下，船舶是否还有足够的操纵性来保证航行安全。

为了评估大型船舶在波浪中的操纵性问题，欧盟发起了 ship operation (SHOPERA) 项目。在这个项目中，针对 14000 箱集装箱船杜伊斯堡实验船型 (DTC) 做了一系列实验来评估其波浪漂移力及操纵性性能。

本文使用 CFD 方法，对 DTC 船型在波浪中的漂移力进行了计算，并且与 SHOPERA 的实验结果进行了对比。计算使用本课题组基于 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU (Shen 和 Wan [1]) 求解器，实现了在计算域中造波、消波及船舶六自由度运动的计算。计算使用 VOF 方法模拟自由液面，速度压力解耦使用 PIMPLE (混合 PISO、SIMPLE) 算法，使用重叠网格技术实现船舶六自由度运动模拟。考虑到波浪问题中粘性不占主导作用，求解过程中使用层流模型进行计算。为了防止波浪衰减，时间离散使用二阶 backward 格式。

2 数值方法

2.1 控制方程

本文通过求解不可压缩 Navier-Stokes 方程来求解流场流动，控制方程如下：

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\partial \rho U / \partial t + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)U) = -\nabla p_d - g \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla U) \quad (2)$$

其中 U 是流场速度， U_g 网格位移速度； $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为动压力， ρ 是相密度， \mathbf{g} 为重力加速度， μ 为动力粘性系数。

2.2 自由液面捕捉

本文使用体积分数 (VOF) 法配合自由液面压缩技术来对自由液面进行捕捉。详细的 VOF 方法在 OpenFOAM 中的实现可以参考 Ruseche [2]，本文仅简要的对 VOF 进行概括。VOF 方法可以简要的概括为对相分数的计算，通过 α 来表征网格单元中水和空气的比例：

$$\begin{aligned} \alpha = 0 & \quad \text{空气} \\ \alpha = 1 & \quad \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \quad \text{交界面} \end{aligned} \quad (3)$$

通过求解 α 的输运方程，来模拟自由面的变化：

$$\partial \alpha / \partial t + \nabla \cdot (\rho(U - U_g) \alpha) + \nabla \cdot (U_r(1 - \alpha) \alpha) = 0 \quad (4)$$

在公式(4)中， U_r 是用来对自由液面进行压缩的速度，其只在自由液面附近起作用，关于 U_r 详细的论述参考 Berberović[3]等人的文章。

2.3 重叠网格技术

重叠网格是指一种网格系统，它可以由任意数量的结构或非结构网格模块组成。通过重叠网格技术，我们可以将一个复杂的几何体分解呈若干简单几何体分别进行网格划分，然后将这些网格进行嵌套组合。不同网格模块之间可以实现任意自由度的相对运动，可以实现对大幅度运动的求解。

重叠网格技术中最关键的部分是要实现不同网格模块之间的信息传递。我们利用 Suggar++ (Noack[4]等人)计算网格之间的连接信息(DCI)，将DCI传递给 naoe-FOAM-SJTU 求解器对流场的求解及多级物体的相对运动，实现对任意大幅度自由度运动的模拟。详细的 Suggar++与 naoe-FOAM-SJTU 的结合方法见 Shen 和 Wan[4]的文章。重叠网格技术可以用来计算船-桨-舵相互作用的问题，例如，Wang[6]等人利用重叠网格技术计算了船在水中的自航回转运动。

2.4 数值造波

传统的数值造波方法是将波浪条件施加在入口边界条件，实现在计算域内造波；并且在计算域出口设置消波区域实现数值消波。当计算域内没有结构物，或者计算时间较短时，这种造波方法是有效的。但是当计算域内有物体时，为了防止结构物反射的波浪与入口边界波浪发生干扰，需要增加物体到入口边界的距离，但是增加计算域长度后，需要更多的网格保证波浪在传播到物体之前不会衰减，显著增加网格数量。针对这一问题，Jacobsen [7]等人提出了松弛区域(relaxation zone)的区域造波技术，使得造波消波功能在形式上得到统一，有效的避免了波浪在计算域内的来回反射。Jacobsen[7]在 OpenFOAM 平台上开发了 wave2FOAM 模块，实现了对松弛区域技术的应用。本文简要阐述 wave2FOAM 的原理及方法。

在计算域内，wave2FOAM 利用一个在边界附近的区域进行造波(如图1所示)。在这个区域内，物理量 ϕ (可以是压力也可以是速度)由式(5)决定。其中 ϕ_{target} 代表波浪的精确解， $\phi_{computed}$ 代表计算域内的求解结果。由式(5)可以看出，在松弛区域内，物理量 ϕ 是波浪精确解和计算域内计算解的混合。在松弛区和非松弛区的交界处， α_R 等于1以确保在此处的解是计算域内求解得到的解(如遇到结构物反射回来的波浪)；在松弛区域与边界的交界处， α_R 等于0以确保此处的解为波浪的精确解；在这之间的区域的解均为这两者的混合。利用这种方法，我们可以说在松弛区域内，既可以实现造波，也可以防止波浪的反射。

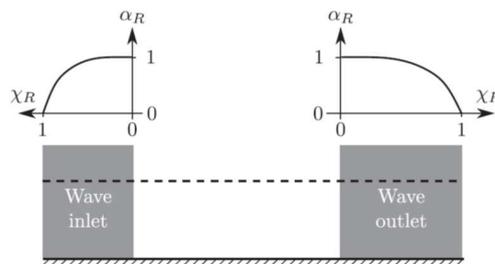


图 1 松弛区域造波

$$\phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}} \quad (5)$$

3 船型及计算配置

3.1 船体几何参数

本文计算的船型为杜伊斯堡测试船型 (DTC)，船体模型和舵模型见图 2。MARINTEK 水池针对这种船型做了一系列的耐波性实验。实验布置及数据可以参考 Springer^[8]等人的文章。DTC 船主尺度见表 1。表中， L_{pp} 为垂线间长， B 为船宽， LCG 为重心距离艏垂线的距离， VCG 为重心相对于基线的高度， GMT 为横稳心高度， r_{xx} ， r_{yy} ， r_{zz} 分别是各个方向相对于重心的惯性半径。

本文在计算过程中考虑了舵的影响，但是省略了船体两侧的舳龙骨。这是因为舳龙骨较小，在舳龙骨附件划分网格会显著增加网格复杂度，尤其是舳龙骨在计算过程中可能会出水，舳龙骨附近复杂的网格过渡不利于相分数计算的稳定。



图 2 DTC 船体和舵

表 1 DTC 船模主尺度 (缩尺比 1:63.65)

Main particular	λ	L_{pp} m	B m	T m	CB	Δ	LCG m	VCG m	GMT m	r_{xx} m	r_{yy} m	r_{zz} m
Value	1:63.6	5.5	0.8	0.2	0.66	672.	2.7	0.3	20.	0.3	1.3	1.3
	5	7	0	3	1	7	4	9	3	1	7	7

3.2 计算工况

本文重点关注的是不同浪向角下船体受到的波浪力，所以只选取了一个波浪周期和波高计算。波浪角度从迎浪 0° 到顺浪 180° ，不同浪向角之间间隔 30° 。模型尺度下，波浪波高 0.157m ，周期 1.128s 。考虑到波陡较大，计算中使用斯托克斯 5 阶波。计算过程中没有考虑航速，放开纵倾、升沉、横摇三个自由度，固定首摇、横荡、纵荡三个自由度。试验中使用了弹簧绳来限制首摇、横荡、纵荡三个自由度，所以这三个自由度并不完全为 0。在斜浪工况下横向运动会引起较大的波浪辐射力，计算中固定首摇、横荡、纵荡会使波浪辐射力偏小导致波浪漂移力的计算结果会与实验结果产生一些误差。有两个原因使本文的计算中放弃使用

弹簧系统来固定船模。其一，由于波浪波长较短，计算域内需要两百万网格和较短的时间步来保证波浪在传播过程中不产生严重的衰减，计算资源消耗较大。如果计算中考虑弹簧系统，由于弹簧系统固有周期为波浪周期 10 倍左右，在计算中需要多消耗大量的时间来等待弹簧系统达到稳定之后才能得到较为准确的波浪漂移力计算结果。其二，如果用弹簧系统固定船模，船模艏漂角会在斜浪作用下偏移初始位置，导致无法保证计算在指定的波浪浪向角下进行，产生偏差。

3.3 网格及计算域

本文运动重叠网格技术方法来处理船在波浪中的运动。重叠网格一共包含两套网格：一个是背景网格，用来计算波浪的传播；另一个是随船体运动的网格。两套网格的布置见图 3，整个计算域形状设计成圆形域。对于本文的研究，在计算域内生成合适的波浪对计算结果有十分重要的影响。如前面章节所述，本文利用 wave2FOAM 模块来完成造波。由于松弛区域造波技术的应用，造波区域可以同时完成造波、消波的作用，防止波浪在计算域内来回反射，影响计算结果。我们选择建立一个环形的造波区域（如图 4 所示）来完成造波。如此，想要改变波浪只需对造波边界条件进行调整即可。

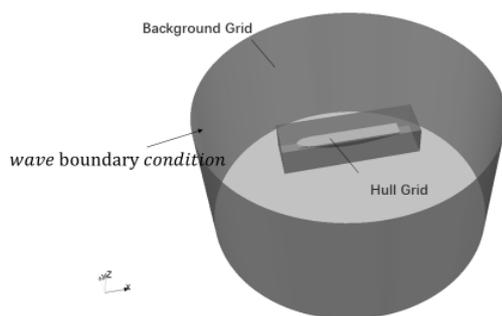
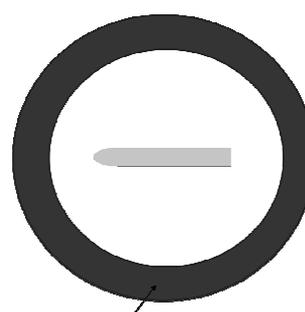


图 3 重叠网格分布示意图



环形造波域

图 4 造波区示意图

两套网格经过 Suggar++ 差值后的结果见图 5，图中为中纵剖面的网格。图中，浅色代表贴体网格，深色代表背景网格。

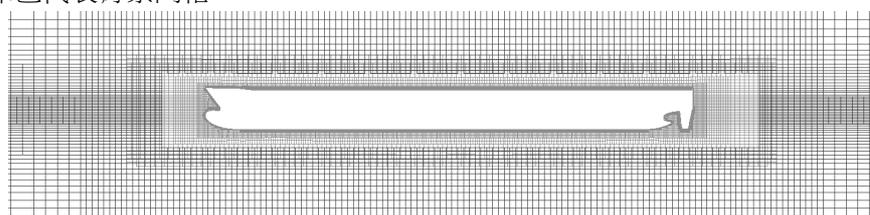


图 5 中纵剖面网格示意图

网格生成利用 OpenFOAM 自带网格生成工具 SnappyHexMesh 完成，网格示意图见图 6。网格数量见表 2。为了精确捕捉自由面使波浪不至于衰减太过严重，要求背景网格在波高方向上至少布置 10 个网格，波长方向上布置 50 个网格。由波长较短，所以背景网格数量占据了整体网格数量的 60%。

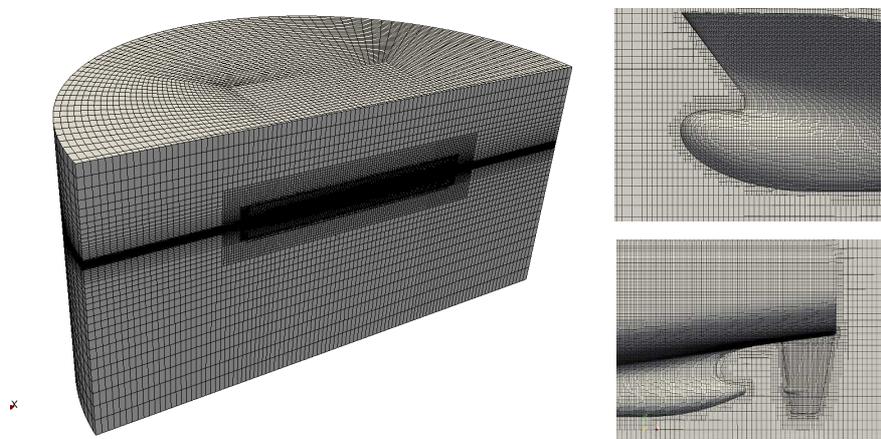


图 6 网格示意图（左图为计算域整体网格，右图为船首尾网格）

表 2 计算网格单元分布

	船体网格	背景网格	网格总数
网格单元数	1,461,919	2,226,624	3,688,543

每个算例使用 40 核进行计算，其中一个核分配给 Suggar++ 进程。对于迎浪的工况，我们取时间步长为 $1 \times 10^{-3} \text{s}$ 。对于随浪或者横浪的工况，时间步长设定为 $5 \times 10^{-4} \text{s}$ 。较小的时间步长是为了保证计算的稳定性。在船尾部，为了使网格捕捉到舵的形状，网格经过多级的加密，网格结构复杂。在网格密度过度的区域网格质量不高，而且这些网格都分布在自由液面附近。在自由液面的区域，由于采用自由液面压缩方法，这些网格的过度会使得计算不稳定，必须降低时间步长保证自由液面附近库朗数小于 1，保证计算的稳定性。在现有计算机配置下，计算一个时间步长需要 14s。我们尝试在相同网格量下，使用变形网格技术来捕捉船体运动，计算一个时间步长需要 20s。变形网格需要在每一个时间步内求解计算域内所有网格节点的位置，与重叠网格相比变花费了大量的计算时间。可见，重叠网格的网格迭代速度要高效的多。

4 计算结果及分析

4.1 空场造波

为了验证前文提到的计算域设置能否造出合适的波浪，我们首先进行了空场造波以验证波浪的精度。计算域内波面如图 7 所示。由图可以看出，大部分区域的波浪保持了应有的形状，只是在波浪再此进入消波区的时候波浪有些许变形。实际计算时，船将布置在计算域中心，我们在计算域中心布置一个测波点，测量的波高时历曲线见图 8。由图 8 可以看出，在中心位置的波浪波高为 0.156m 左右，与要求的波高一致。

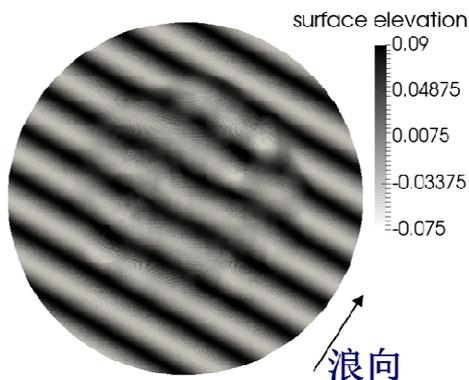


图 7 空场造波自由液面高度图

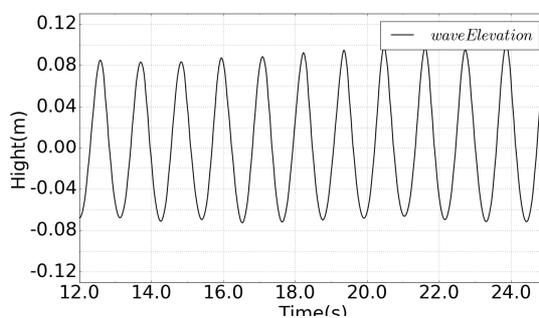


图 8 测波点波高时历曲线

4.2 平均波浪力计算结果

我们将计算得到的船舶纵向受力，横向受力以及首摇力矩的时历数据取平均得到各个方向的平均波浪漂移力系数，结果见图 9。各个系数的定义如下：

$$\overline{C_{fx}} = \frac{\overline{F_x}}{\rho \cdot g \frac{B^2}{L_{pp}} (H/2)^2} \quad (6)$$

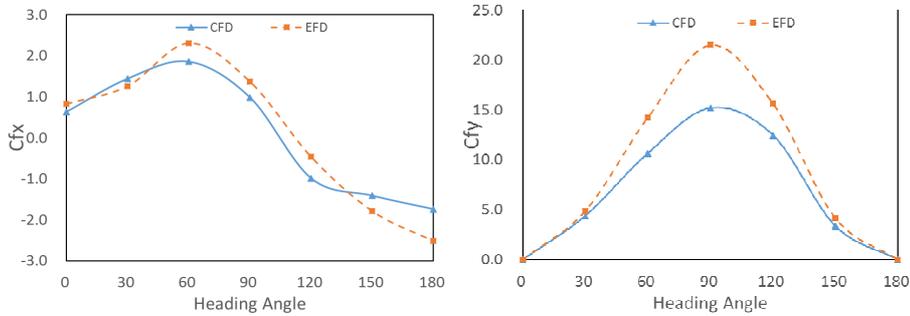
$$\overline{C_{fy}} = \frac{\overline{F_y}}{\rho \cdot g \frac{B^2}{L_{pp}} (H/2)^2} \quad (7)$$

$$\overline{C_{fzm}} = \frac{\overline{M_z}}{\rho \cdot g \cdot B^2 (H/2)^2} \quad (8)$$

其中， $\overline{F_x}$ ， $\overline{F_y}$ 和 $\overline{M_z}$ ， $\overline{M_z}$ 分别为纵向、横向及艏摇力矩的时间平均值，H 为波高。

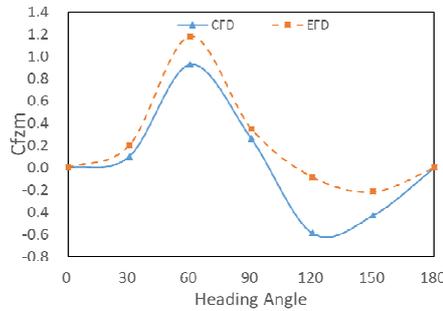
由图 9 可以发现，总体来讲，计算结果与试验数据趋势吻合良好，在 90° 达到最大。但是

纵向和横向漂移力及艏摇力矩均小于实验值。如前所述，这主要是由于计算中固定了纵荡、横荡和艏摇自由度，导致辐射力成分偏小所致。尤其对于横浪工况，横向运动的辐射力不可忽略，使图 9 (b) 中横向漂移力计算结果偏小很多。



(a) 纵向平均漂移力

(b) 横向平均漂移力



(c) 平均首摇漂移力矩

图 9 平均波浪漂移力结果

4.3 船体在波浪中的受力结果

对不同浪向角下船体受到的纵向力系数 C_x 及横向力 C_y 的时历曲线计算结果整理见图 10。其中 C_x 与 C_y 的定义与由图 10 可以看出，在浪向角为 90° 时，纵向及横向力的变化幅值均为最大。浪向角由 0° 增加到 90° 的过程中，横向受力幅值逐渐增大，由 90° 增加到 180° 的过程中，横向受力幅值逐渐减小。纵向力随浪向角的变化规律比较复杂：浪向角由 0° 增加到 60° 的过程中，纵向力受力幅值逐渐增大， 90° 与 60° 相比，纵向力最大值不变，但是最小值有所增加。 120° 时，纵向力的极值最小。

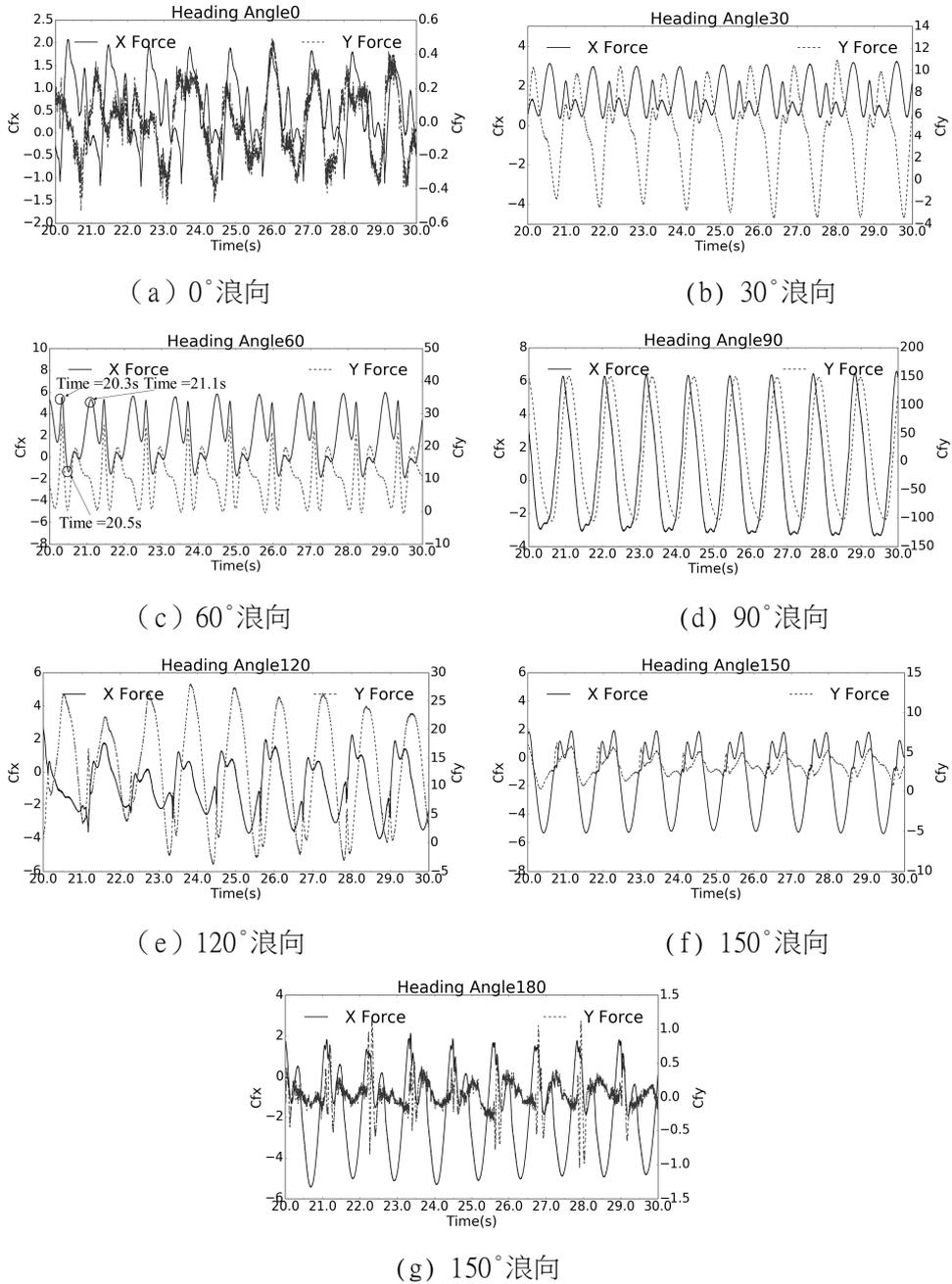


图 10 船体纵向力及横向力系数时历曲线

由图 10 还可以发现，除了 90° 以外，所有的受力曲线在一个周期内有多个极值点，说明这些曲线均呈现出较强的非线性特征，为了分析非线性的原因，对 30° 时的纵向受力及 60° 时的横向受力视域数据变换到频域，做 FFT 变换结果如下：

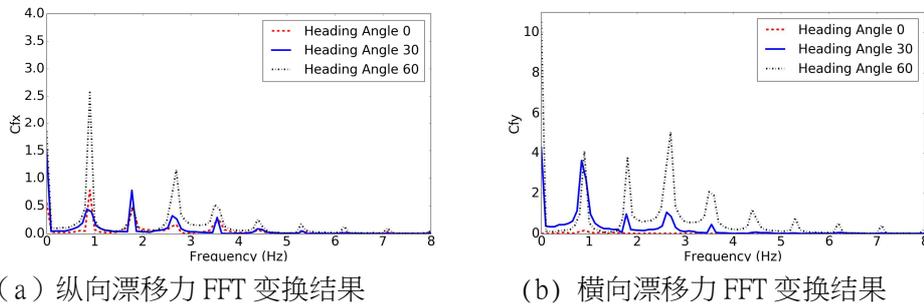


图 11 浪向角 0° 到 60° 漂移力 FFT 变换结果

由图 11 可以发现，纵向和横向波浪力以波浪频率为基频（波浪频率 0.886Hz），其他频率成分皆为波浪频率的倍数，0 频率成分即为波浪漂移力。随着浪向角的增加，0 阶频率和高阶频率的幅值均有所增加，非线性现象越加明显。例如在 60° 浪向下，横向力的 3 倍波频成分赋值最大。非线性现象主要是由于船舶运动引起的辐射力，船舶在斜浪中复杂的波浪绕射，以及波浪砰击现象引起的，随后本文将通过分析船体周围波浪辐射反射，船舶运动响应及波浪砰击来分别分析非线性力产生的原因。

4.4 船体在波浪中的运动

船体在波浪中做纵倾、升沉及横摇运动产生辐射力，是船舶受到非线性波浪力的原因之一。对所有工况的纵倾、升沉及横摇做频率分析发现，纵倾及升沉运动响应频率成分与波浪频率一致或为波浪频率的倍数，其频率成分单一。利用这一点，我们将运动时域数据用傅里叶级数展开到波浪频率的三阶谐波。定义升沉及纵倾的传递函数为：

$$TF_{3i} = \frac{X_{3i}}{a} \quad (9)$$

$$TF_{5i} = \frac{X_{5i}}{ak} \quad (10)$$

其中 X_{3i} 、 X_{5i} 分别为升沉及纵倾的第 i 阶傅里叶谐波的振幅幅值， a 为波幅， ak 为波陡。

表 3 不同浪向角下 TF_{3i} ($\times 10^3$)

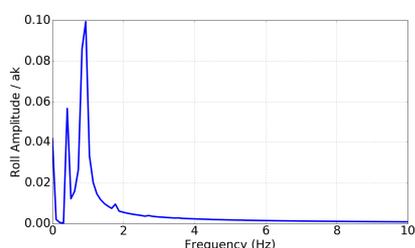
阶数\浪向角	0	30	60	90	120	150	180
0	0.75	-8.32	3.69	-2.04	-6.73	1.09	2.79
1	86.73	123.11	211.63	678.86	177.18	68.90	77.67
2	1.75	0.86	8.41	21.43	0.84	0.91	3.81
3	0.49	0.31	0.53	1.71	0.68	0.52	0.54

表 4 不同浪向角下 TF_{5i} ($\times 10^3$)

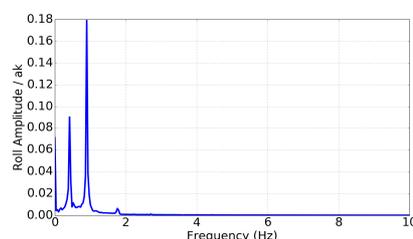
阶数\浪向角	0	30	60	90	120	150	180
0	-10.28	-2.54	-7.75	-13.52	-28.03	-25.77	-27.32
1	111.13	150.42	241.41	34.23	95.21	115.21	83.52
2	2.54	1.83	9.01	0.42	4.79	3.80	2.25
3	0.70	0.28	0.99	0.42	1.27	1.27	1.69

由表 3 表 4 可以看出,与受力拥有复杂的频率成分不同,升沉纵倾的频率成分相对简单。一阶谐波频率占主导作用。90°时升沉的幅值最大,这时横向漂移力也为最大,60°时纵倾的幅值最大,对应纵向漂移力最大的浪向。可以推测,运动对波浪漂移力有一定的影响。

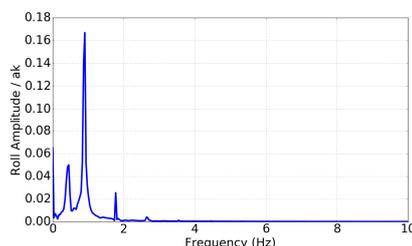
对于横摇运动,对0°及180°其进行FFT变换我们发现,其频率成分中包含着一个低于一倍波频的成分。参照 DTC 船横摇自由衰减实验,这个频率与横摇的自然频率一致。横摇运动不以波浪频率为基频,所以没有像纵倾和升沉一样按照波浪的频率进行傅里叶级数展开,而是直接对其进行FFT变换。30°到90°横摇FFT变换结果见图12。图中纵轴为个频率成分的横摇角幅值,其中横摇角度用波斗做无因次化处理。由图12可以发现,可以十分明显的观察到固有频率的存在,在30°及60°浪向下,其幅值约为波浪频率幅值的一半。随着浪向角的增加,波浪频率逐渐变为主导。当波浪入射角为90°时,与波浪频率相比,横摇自然频率约为波浪频率幅值的1/4。由图12还可以发现,0阶频率成分幅值并不为0,说明在波浪的作用下,船舶产生了一个平均横倾角。在60°浪向下,横摇各个频率的幅值均为最大,横摇最为明显。



(a) 30°浪向横摇运动频率成分



(b) 60°浪向横摇运动频率成分



(c) 90°浪向横摇运动频率成分

图12 不同浪向角下横摇运动频率成分

为了更加清楚的说明运动与非线性波浪力的关系,将运动与受力的时历曲线绘制在同一

个图中如图 13 所示。图中虚线对应纵向波浪力达到峰值及谷值的时刻。由图可以看出，当纵倾和升沉运动达到最大值时，纵向波浪力也达到最大时，此时横向波浪力曲线的变化率也有明显的变化。当纵倾和升沉运动达到最小值时，纵向及横向波浪力也达到最小。船体运动影响了受力曲线的曲率和极值，即运动与受力曲线的非线性特征密切相关，说明船舶运动与波浪力的非线性性质密切相关。

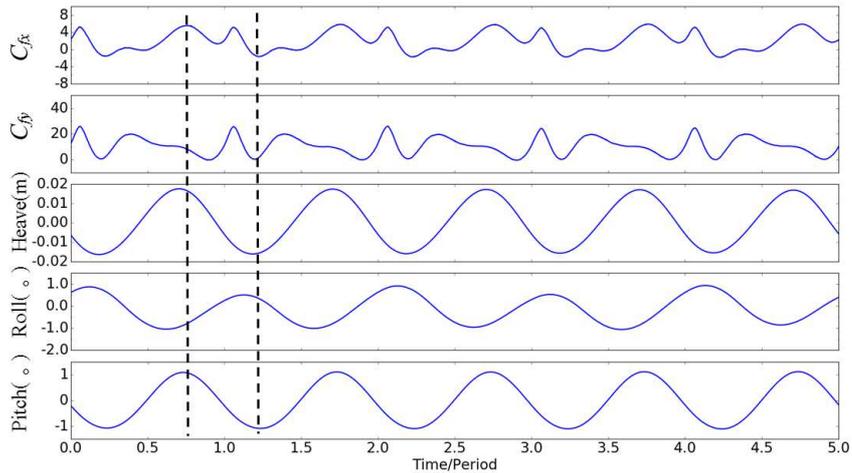


图 13 60°浪向下受力及运动时历曲线

4.5 自由面结果分析

除了运动，自由面波浪的复杂绕射及辐射也与波浪力的非线性密切相关。波高较高波斗较大的斜波使得船体表面的湿表面积变化剧烈，加上波浪砰击破碎的现象，导致波浪力非线性性质明显。如对于 60°浪向下的 C_{fx} 和 C_{fy} 曲线（图 14），在一个周期内极大值出现 3 次，有着明显的非线性特征。为了分析产生非线性的原因，对纵向力达到极大值和极小值的 3 个特征时间（图 14 中所示）的自由面及船体表面压力进行分析见图 15。

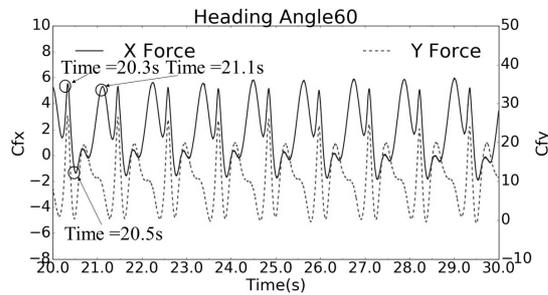


图 14 浪向角 60°下的纵向和横向力时历曲线

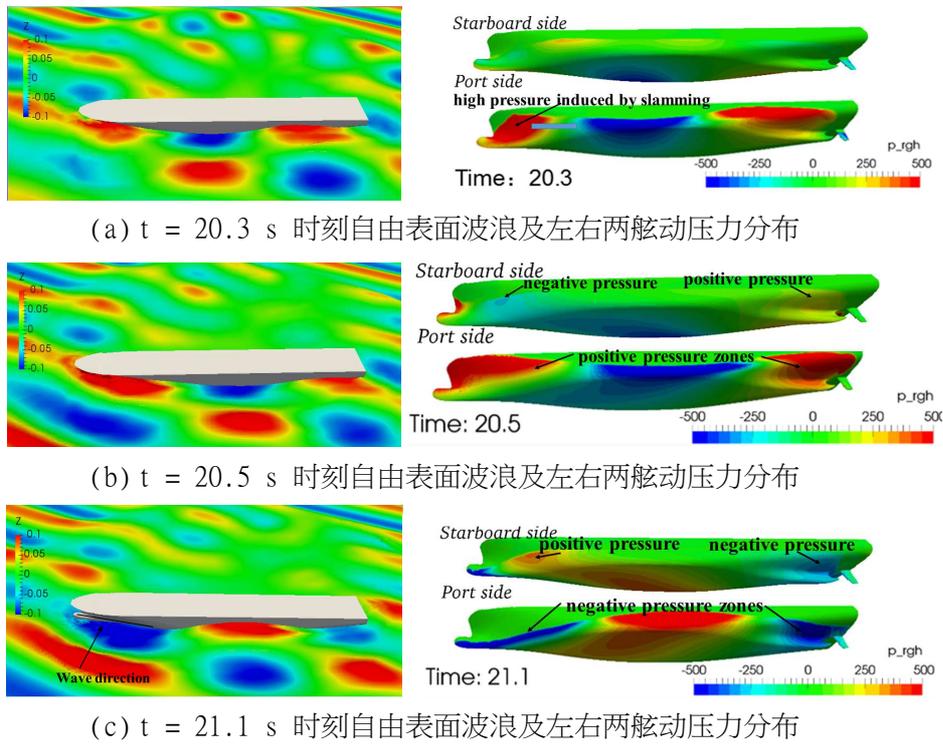
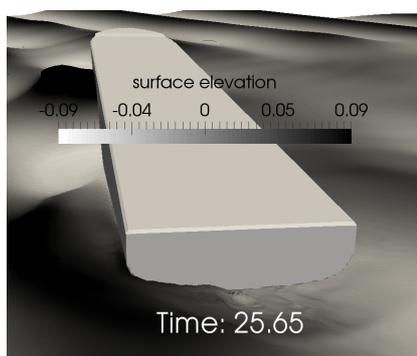


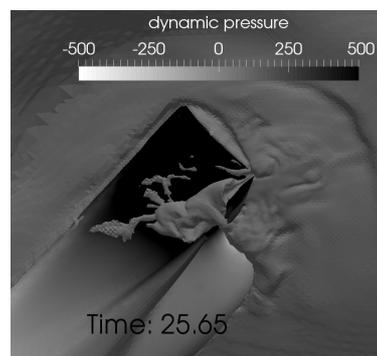
图 15 60° 浪向下自由表面波浪及船体表面压力分布

由图 15 可以发现，船舷左侧波面入射波和反射波相互叠加，形成一个波峰两个波谷，或者一个波谷两个波峰交替出现的状态，自由面非线性特征十分明显。而在船舷右侧波浪较为平缓。当一个波峰打到左舷前肩位置时（图 15 (a)），在相应船体表面产生波浪砰击，船舷出现一个高压区，使得纵向力 C_{fx} 在 $t = 20.3$ s 时刻达到最大值，这时左舷的压力分布决定了 C_{fx} 的最大值。当时间推进到 $t = 20.5$ s 时，左舷船舷及船艏同时出现一个高压区，左舷压力达到一个较为平衡的状态，但是观察右舷压力分布我们发现，右舷船舷出现负压区，而船艏出现高压区，使得这个时刻 C_{fx} 达到最小值。时间继续推进到 $t = 21.1$ s，这时左舷船舷及船艏同时出现一个低压区，同时在右舷，船舷出现一个高压区而船艏出现一个低压区，使得 C_{fx} 达到最大值。对 $t = 20.5$ s 和 $t = 21.1$ s 时刻，决定 C_{fx} 的极值的是右舷的压力分布。通过以上分析可以发现，由于波浪的绕射及辐射，在斜浪中船舷两侧出现了非线性明显的不对称波浪分布，使得船体湿表面积和动压力变化复杂，导致了波浪力的非线性现象。

波浪砰击也是波浪力呈现非线性的原因之一，在 120° 浪向下，船体受力曲线存在非线性明显的多处突变（图 10 (e)），分析船体表面压力及自由液面变化后，发现在 120° 时，由于船体运动及波浪角度的原因，波浪周期性的砰击在船尾底端，造成受力的突变。例如在第 25.56s 时，船尾部运动处于下落阶段（见图 16 (a)），与波浪正好相撞，使得船尾部左侧受到强力的砰击，造成图 10 (e) 中的曲线突变。



(a) 船尾波浪碎击瞬时自由面形状



(a) 船尾波浪碎击瞬时动压力分布

图 16 船尾碎击示意图

5 结论

本文使用 naoe-FOAM-STJU-求解器计算了 DTC 船在 7 个浪向下的波浪力及运动。利用重叠网格技术实现船体六自由度模拟；应用松弛区域造波技术，从而有效避免了波浪在造波域与结构物之间的反射。平均波浪力计算结果与试验相比较为吻合，由于计算中忽略了由纵荡、横荡和艏摇引起的辐射力，平均波浪漂移力的计算结果普遍比实验值偏小。波浪力的时历曲线呈现出明显的非线性特征，对船体在波浪中的受力曲线做频域分析我们发现，波浪频率决定了船舶的受力频率成分，随着浪向从迎浪变到横浪的过程中，高阶波浪力的幅值增加，非线性现象越加明显。对运动进行分析发现，随着纵倾和升沉幅值的增加，船体所受到的波浪力的非线性现象也越发明显，对运动的时历曲线与船体纵向及横向力时历曲线进行对比发现，纵倾和升沉运动对波浪力的非线性有一定的关联。对自由面波面及船体表面动压力分析发现，波浪力的非线性是由于非线性的绕射辐射和波浪碎击导致了复杂的船体湿表面积变化所致。综上所述，本文较为准确的预报了波浪漂移力的同时，也捕捉到了波浪力的非线性现象，这为之后计算船舶在波浪上的自航提供了保障。

致謝 本文工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)，上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)，上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)，以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)的资助。在此一并表示衷心感谢。

參考文獻

- 1 Shen, Z R, and Wan, D C. Numerical Simulation of Sphere Water Entry Problem Based on VOF and Dynamic Mesh Methods, Proc 21st Int Offshore Polar Eng Conf, Maui, Hawaii, USA, 2011, 3: 695-702.

- 2 Rusche, H. “Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-phase Flows at High Phase Fractions,” Ph.D. thesis, Imperial College, London, UK, 2002
- 3 Berberović, E, van Hinsberg N P, Jakirlić, S, Roisman, IV, and Tropea, C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution. *Phys Rev E*, 2009, 79(3) : 36306.
- 4 Noack, R W, Boger, D A, Kunz, R F, and Carrica, P M . Suggar++: an improved general overset grid assembly capability. *Proc 19th AIAA Comp Fluid Dyn Conf*, San Antonio, USA, 2009
- 5 Shen, Z R, Wan, D C and Carrica, P M . Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Eng*, 2015, 108 : 287-306.
- 6 Wang, J H, Zhao, W W, Wan, D C. Self-propulsion Simulation of ONR Tumblehome Using Dynamic Overset Grid Method. *Proc 7th Int Conf Comput Method*, Berkeley, USA, 2016, No. ID 1499-5539-1-PB.
- 7 Jacobsen, NG, Fuhrman, DR, and Fredsøe, J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 2012, 70 : 1073-1088.
- 8 Sprenger, F, Hassani, V, Maron, A. Establishment of a validation and benchmark database for the assessment of ship operation in adverse conditions. *Proc 35th Int Conf Ocean, Offshore Arctic Eng*, Busan, South Korea, 2016, OMAE2016-54865

Computation of Wave Drift Forces and Motions for DTC ship in Oblique Waves

Liu Cong, Wang Jian-hua, Wan De-cheng

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT : To assess ship maneuverability in waves, computations of a ship with heave, roll and pitch motions in oblique wave are presented. The wave drift forces, heave and pitch motions are investigated numerically. The computations are based on volume of fluid (VOF) and overset mesh methods, discretized by finite volume method (FVM). An open source library, wave2Foam, is used to generate desired wave conditions. Seven wave conditions with a wide range of incident angle are considered. The wavelength is in the range of short waves and the results show strong nonlinear

features especially for following waves , where the waves directly impacts on the bottom of stern presented by the peak value in the force curves. The comparison of wave drift forces between the present computational results and measurements shows good agreement. The motions and forces of ship are dominated by the wave frequency. Precise prediction of wave forces is a fundamental ability to tackle with the maneuverability in waves in the future works.

Key words : Wave drift forces; Naoe-FOAM-SJTU solver; Overset grid; Oblique wave.