

# 打捞工程中双驳船的相互影响

大连海事大学

徐舟远，陈圣涛

**摘要：**在打捞的过程中，出于对吊力和安全的考虑，往往需要两艘甚至多艘工程驳船同时打捞。对于双船打捞，不仅仅要考虑风浪流引起的单艘船舶的横摇和垂荡对打捞的影响，同时要考虑两艘工程船舶之间的相互响应对打捞的影响。针对这一问题，本文研究了两个大小相同的 wigley 船模。基于 Navier-Stokes 方程建立了二维数值造波水池，通过 VOF 模型监测自由液面的变化，并采用嵌套网格的方式对网格进行更新。从而求得六自由度下双驳船系统在波浪中的横摇与垂荡运动的时历。此外，本文还研究了双驳船情况下，两艘模型驳船之间的漂移力大小变化。

**关键词：**双驳船；cfd；横摇；垂荡；波高

## 0 引言

近年来，随着海洋运输行业的恢复，船舶在向着更大的吨位和更大的载货量方向发展。这就使得在打捞的时候，单艘起重驳船的吊力可能不足，往往需要两艘甚至多艘工程船舶共同打捞。在多艘船舶打捞的过程中为了精准控制沉船起浮的速度，每根吊缆的吊力的大小，工程驳船的锚缆的数量及方位以及起吊船的间距等问题，需要对船舶的运动以及受力过程有足够的认识。

双船打捞的问题可以看作是一个多体问题。多体问题最早可以追溯到 1976 年 Ohkusu<sup>[1]</sup>利用二维切片理论研究结构物对其周围船体的影响。经过多人的研究，2005 年 Hong<sup>[2]</sup>等人通过高阶边界元法（HOBEN）分析穿梭邮轮和 LNG 的运动和漂移，从而得出高阶边界元法更适合多体问题的分析的结论。上海交通大学的徐亮瑜<sup>[3]</sup>利用商业软件 CFD 建立了浮拖法安装的三维模型，分析了双驳船系统之间的波浪的升高，运动响应以及平均漂移力并且得出了相同间隔内的波高随着入射波的周期的增大而减小，而当入射波较小时，双驳船之间发生震荡的结论。但其共振的周期下的计算值与实验值之间误差较大。其后，B.W.Nam<sup>[4]</sup>通过 CFD 软件建立了三维嵌套网格模型，通过不同周期，不同波高，不同波头角的波浪计算了时域下不同速度的穿梭油轮靠近 FPSO 的情况，随着靠泊速度的增加，靠泊船的运动变得更简单和更小。Feng 和 Bai<sup>[5]</sup>利用 OpenFOAM®平台根系两个并排方箱之间的狭窄间隙中波浪共振，并发现对于圆形舱底驳船，并不会像尖锐舱底驳船那样产生流动分离和涡旋脱落，并强调了入射波的陡峭程度对模拟结果由影响。

由于时域模拟需要耗费大量时间，为此往往把多体问题简化到二维进行模拟。大连理工大学的 Chen<sup>[6]</sup>基于 OpenFOAM®模拟了两个不同大小的二维方箱，通过比对调整两个方箱的吃水，发现随着下游箱形吃水的增加，波浪响应和能量耗散的增加，并把他归结为下游方箱吃水的增加减小了上游方箱的反射系数。吕林<sup>[7]</sup>研究了在波浪中三个相同大小并排排列的方箱的窄缝的共振问题。并发现三个并排物体的每个窄缝有两个不同的共振频率。其中基频处的谐振波高度是入射波高的 4 倍，而第二谐振频率处的谐振波高度是入射波高的 3 倍。在其后来的文章里<sup>[8]</sup>，他通过改变方箱大小和距离宽度，得出随着间隙宽度，体宽比和体牵引的增加，波浪力的特征响应频率趋于减小。并提出通过引入适当的阻尼力，可以有效地提高在预测波浪力方面的准确性。

本文利用 Fluent 建立数字造波水池的基础上，基于切片理论，研究了两艘 wigley 静止在水面上时的水动力，以研究双船系统的相互扰动，通过改变两个模型之间的距离，从而得

到船舶间距对船舶运动姿态影响和双船漂移力的影响。

## 1 模型及边界条件的设置

对于驳船而言，由于其长度一般比较长，其纵倾的幅度很小，故而这里简化船舶模型。把船舶沿着船长方向简化到二维，只考虑横浪对船舶的影响。

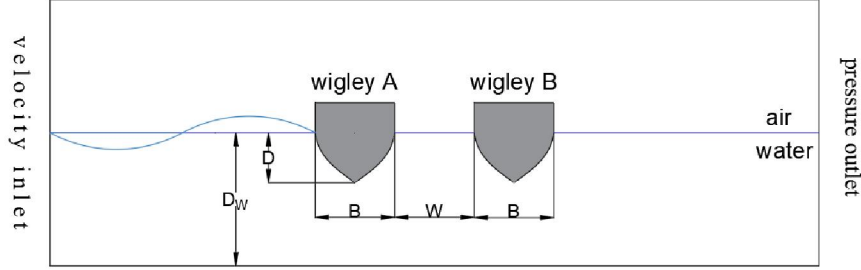


图 1 数字波浪水池的草图

由此，建立二维数字波浪水池的建立如图 1 所示。波浪水池全长 9m，高 1m，其中全局坐标系的原点位于数字波浪水槽的几何中心，气、液两相的交接面位于数字水池的正中间，水深  $D_W=0.5\text{m}$ 。经过简化后具有相同尺寸的两艘驳船静止在水面上，驳船模型采用  $L_{pp}=3\text{m}$  的 wigley 船模，其余各部分尺寸由公式算得到：

$$y = 2B \cdot \left[ \frac{1}{4} - \left( \frac{x}{L_{pp}} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{z}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中  $\frac{D}{L_{pp}} = 0.0625$  ，  $\frac{B}{L_{pp}} = 0.1$  。

数字水池的左边界设置为速度入口，利用 fluent 内置的 Channel Wave BC 引入一束一阶 Airy 波，其波高为 0.024m，波长为 2.4m。右侧则设置为压力出口。其余部分均为 wall。

## 2 数值建模

### 2.1 控制方程

假设流体是不可压缩和有黏性的，则其连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中， $\rho$  是流体密度， $t$  是时间， $u$ 、 $v$  和  $w$  是速度矢量  $\mu$  在  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的分量。而动量方程则使用 N-S 方程：

$$\rho \frac{d\mu}{dt} = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (3)$$

其中  $f$  为质量力， $\nabla^2$  为拉普拉斯算子，其值为： $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

### 2.2 六自由度求解

为了获得两艘工程驳船在水中的运动情况，需要求解 6 自由度运动方程。以 wigley A 为研究对象，其频域运动方程为：

$$-w^2 M^{(1)} X^{(1)} = F^{(1)} \quad (4)$$

其中  $M^{(1)}$  为 wigley 的质量两矩阵,  $X^{(1)}$  为 wigley 的六自由度运动矢量,  $F^{(1)}$  为 wigley 所受到的外力矢量, 包括波浪力  $F_w^{(1)}$ 、辐射力  $F_r^{(1)}$  和静水回复力  $F_c^{(1)}$ 。其中  $F_c^{(1)} = C^{(1)}X^{(1)}$ 。

$$C^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w^{(1)} & 0 & \rho g A_w^{(1)} \bar{x}_f^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g (A_w^{(1)} d_3^{(1)2} + z_B^{(1)} \Delta^{(1)}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w^{(1)} \bar{x}_f^{(1)} & 0 & \rho g (A_w^{(1)} d_1^{(1)2} + z_B^{(1)} \Delta^{(1)}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$A_w^{(1)}$  为方箱 1 水线面面积;  $\Delta^{(1)}$  为方箱 1 的排水量;  $d_1^{(1)}$  和  $d_3^{(1)}$  分别为方箱绕轴的转动半径。

### 3 网格模型

#### 3.1 网格的划分

网格的划分使用嵌套网格, 分别使用 icem 生成前景网格和背景。如图 2 所示。

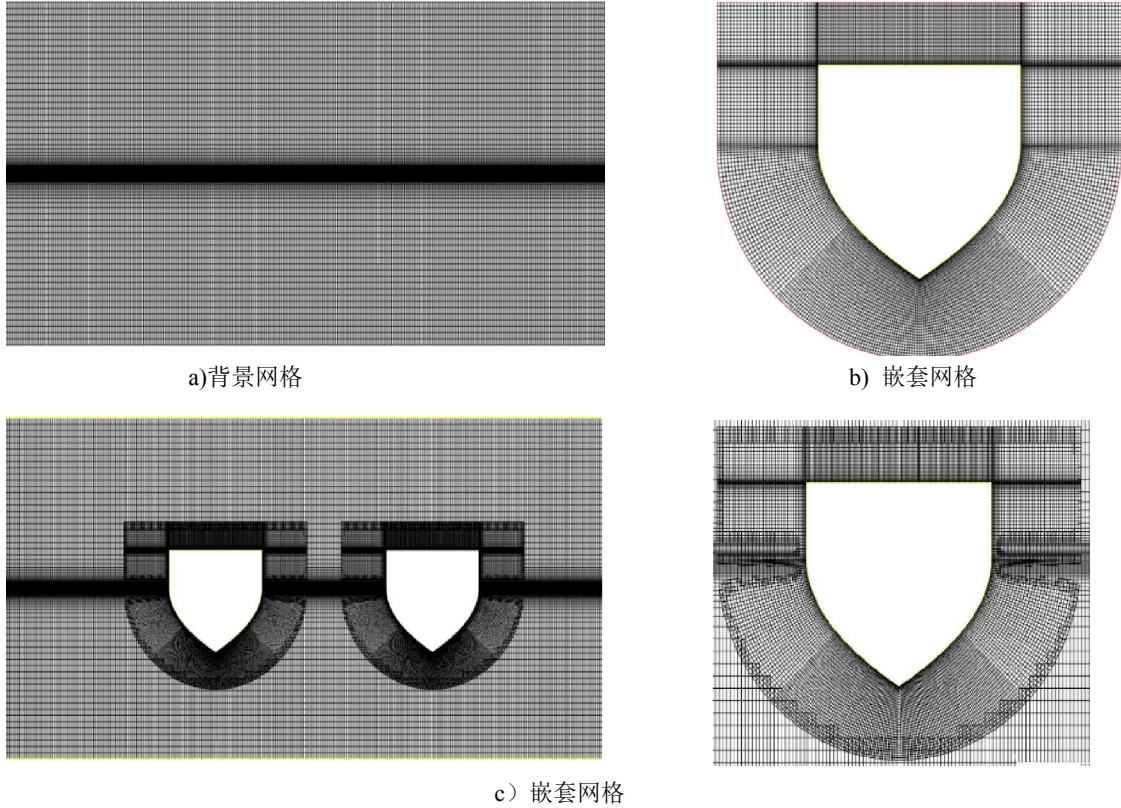


图 2 嵌套网格

图 2a 是两艘驳船的前景网格, 在网格的周围生成了局部流体域网格, 局部流体域在每条边上生成了 36 个网格, 从而使得前景网格与背景网格有足够多的网格能够寻点、挖洞, 进而进行数值传递。同时, 在船舶的周围加密网格生成边界层网格, 以模拟壁面附近产生的层流, 边界层网格第一层高度为 0.001m。对于图 2c 所示背景网格, 为了能很好的模拟波浪的规则性和连续性和船舶周围流体的运动, 需要对自由表面区域和驳船所在的区域进行局部加密。对波高设置了 12 个网格, 每个波长布置了 400 个网格。同时在驳船以外的区域让网格

变稀疏以减小网格数量。最终嵌套的网格共有 16 万个网格，如图 2c 所示。

### 3.2 动态嵌套网格的更新过程

动态嵌套网格的更新流程如图 3 所示，它主要思想就是随着船舶在六自由度求解下不断改变姿态，根据船舶姿态的变换调整随船变化的流体域，并通过寻点和挖洞来更新前景网格和背景网格的相交点，从而模拟驳船的运动过程。

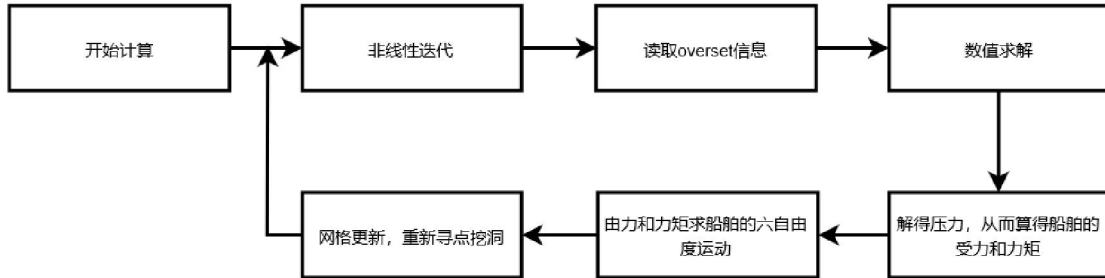


图 3 嵌套网格的更新流程

## 4 结果与分析

分别计算了不同间距下双 wigley 模型船的水动力响应。图 4、5、6 给出了间距为 1 倍船长的情况下，双船的垂荡、横摇、漂移力的时历。由图 4 可以看到，双船在波浪的作用下在水面震动，其震动的频率基本保持一致。但是上游船舶的震动幅度要小于下游船舶，这与其他学者所模拟的原始尺度的船舶的共震规律不太一致，这可能是由于船舶尺度偏小所导致的，但具体原因尚不明确。而对于横摇和漂移力，下游船舶的运动响应要明显低于上游船舶。但是由图 5 可以看出，双船的横摇有比较剧烈的震荡，这主要是由于双船的模式比较小且船舶的船底比较尖锐所导致的。同时，基于相同原因，使得双船的横摇角度主要偏向于正方向。

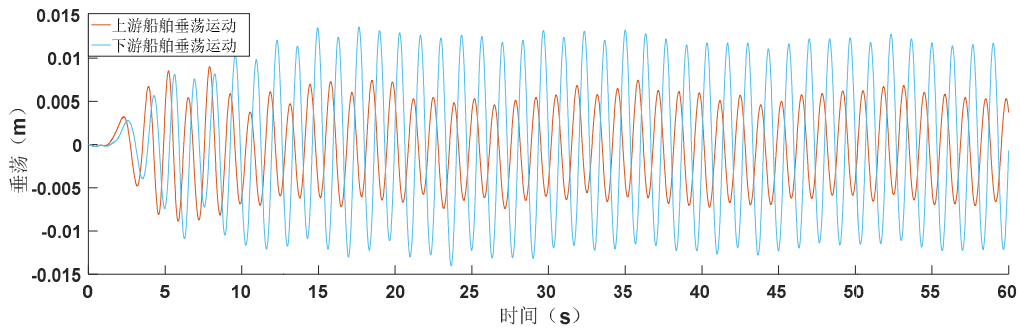


图 4  $W=1$  倍船长时，双船垂荡时历

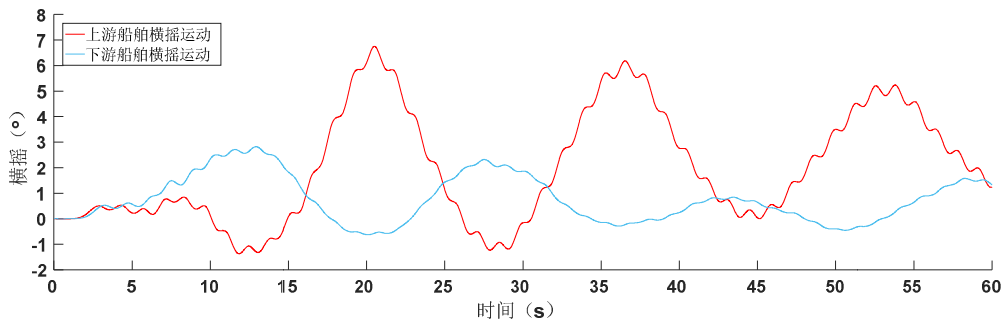


图 5  $W=1$  倍船长时，双船横摇时历

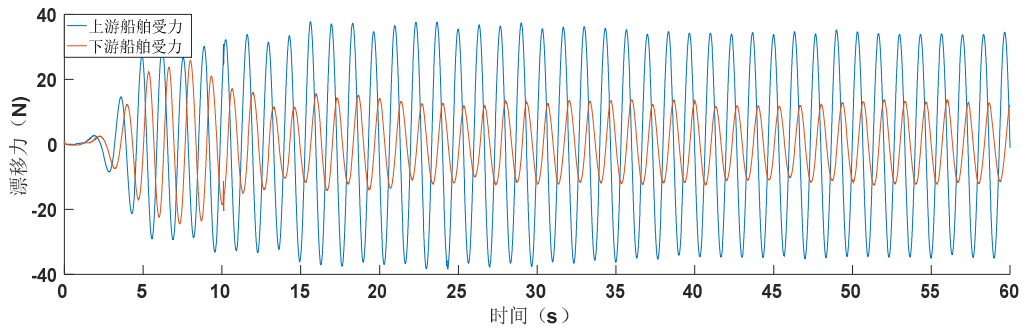


图 6  $W=1$  倍船长时，双船漂移力时历

为了能表示双船响应的剧烈程度，求得了不同的宽度下双船响应参数的标准差。可以看到，上下游船舶的运动与双船之间的距离并不是呈简单的线性关系。但我们可以看到，上游船舶的垂荡幅度要小于下游船舶，随着双船距离的增大，上游船舶的垂荡幅度逐渐增大，而下游船舶垂荡幅度的变化不大；同时，上游船舶的横摇和漂移力都呈现先增大后减小的趋势，而下游船舶则都表现为先减小后增大。

表 1 双船运动响应的标准差

两船距离	上游船舶	上游船舶	下游船舶	下游船舶	上游船舶	下游船舶
	垂荡	横摇	垂荡	横摇	漂移力	漂移力
$W=0.01B$	0.00454	2.99346	0.00834	2.09656	21.15950	11.93250
$W=0.02B$	0.00445	2.85824	0.00845	2.42330	21.83620	11.60104
$W=1/3B$	0.00428	3.06685	0.00857	1.81516	22.65666	10.97626
$W=2/3B$	0.00419	2.67771	0.00865	1.47564	24.27780	9.55101
$W=B$	0.00442	2.10450	0.00865	0.79331	25.09540	8.74751
$W=4/3B$	0.00638	0.79090	0.00852	1.13111	25.46721	9.44263
$W=5/3B$	0.00627	0.79185	0.00834	1.28016	24.94093	9.31238
$W=2B$	0.00748	0.53596	0.00810	0.99172	23.64914	10.53453

## 参考文献

- [1] Ohkusu, M. On the heaving motion of two circular cylinders on the surface of a fluid. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, XVII, No.58, 1969: 167-185.
- [2] S.Y. Hong, J.H. Kim, S.K. Cho, Y.R. Choi, Y.S. Kim, Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels, Ocean Engineering, Volume 32, Issue 7, 2005, Pages 783-801.
- [3] 徐亮瑜. 多浮体水动力干扰研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- [4] B.W. Nam, Y. Kim, S.Y. Hong, Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves, Applied Ocean Research, Volume 58, 2016, Pages 49-61.
- [5] X. Feng, W. Bai, X.B. Chen, L. Qian, Z.H. Ma, Numerical investigation of viscous effects on the gap resonance between side-by-side barges, Ocean Engineering, Volume 145, 2017, Pages 44-58.
- [6] Lin Lu, Bin Teng, Liang Sun, Bing Chen, Modelling of multi-bodies in close proximity under water waves fluid forces on floating bodies, Ocean Engineering, Volume 38, Issue 13, 2011, Pages 1403-1416.
- [7] Lin Lu, Liang Cheng, Bin Teng, Liang Sun, Numerical simulation and comparison of potential flow and viscous fluid models in near trapping of narrow gaps, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Volume 22, Issue 5, Supplement 1, 2010, Pages 120-125.
- [8] Lin Lu, Liang Cheng, Bin Teng, Ming Zhao, Numerical investigation of fluid resonance in two narrow gaps of three identical rectangular structures, Applied Ocean Research, Volume 32, Issue 2, 2010, Pages 177-190.