

基于重叠网格技术数值 计算分析多体船流场与阻力性能

沈志荣 马娟 万德成

上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院

摘要: 由于多体船和单体船相比,有良好的快速性和耐波性能,以及其具有较大的加班面积,现在已经被广泛运用到民用和军事领域。本文将基于雷诺时均方程(RANS),对多体船中的两个主要种类:双体船和多体船的阻力性能和流场进行求解。自由面将采用 level-set 自由面捕捉法。同时,重叠网格技术也将运用到其中。每个多体船的片体都可以有一套贴体网格所包络,而这套贴体网格又可以随意嵌入到一套正交的背景网格中。那么,无论片体的数量有多少,片体间的间距有多少,都可以通过各套网格之间的相互嵌套来完成。为了研究多体船的最佳片体距离,各算例将会考虑不同的片体间距和不同的傅汝德数。

关键字: 双体船 三体船 重叠网格 level-set 阻力性能

1. 引言

近几十年来,由于其良好的快速性和耐波性,多体船快速发展并运用到民用和军事领域。和单体船相比,多体船具有以下几个优势:第一,其甲板面积和舱容较大。第二,由于其片体较为瘦长,因此阻力性能较好。第三,多体船横向间距较大,所以横摇稳定性好。传统的多体船有以下几类:双体船、三体船、五体船、小水面双体船等。本文将主要针对双体船和三体船的阻力性能进行数值计算和研究。

对双体船和三体船的水动力性能的研究,主要集中在试验和计算两种方法上。汪诚仪[1]根据三种不同剖面形状的高速双体船的模型阻力试验资料,分析了船型、间距比和 Froude 数对双体船阻力的影响,并提出把双体船片体间波系干扰分为横波干扰和散波干扰的方法,同时考虑片体间的流动阻塞现象。王兴权[2]通过模型试验得出高速双体船两片体中心线间距与船长的比值(K/L)对阻力性能的影响与常规低速双体船不同的结论,并推测产生这种现象的原因,讨论了高速双体船尺度要素及航速选择的注意问题。李培勇[3]通过一些列试验研究了三体船的侧体对主体的影响,以及各个船体之间的兴波干扰。Saunders[4]基于 Taylor 系列和 64 系列的试验结果,分析了侧体排水量对有效功率的影响。Elcin Z[5]采用三维 Rankie 面元法分析了侧体位置对三体船的兴波最烂的影响。文献[6]采用改进的 Dawson 型方法开发了既适用于双体船又可用于三体船的兴波阻力的计算程序。

然而,大部分的数值方法都是基于势流理论的,粘性流则很少会被考虑。这主要还是由于计算效率的关系。但是,随着计算机计算性能的飞快提高,越来越多基于不可压粘性 Navier-Stokes 方程的方法被开发出来[7-11]。在本文当中,将采用被广泛采用的雷诺时均方程(RANS)的方法,来对双体船和多体船的阻力性能和粘性流动进行数值计算和研究。同时引入重叠网格技术,使得每个片体的贴体网格能够任意地嵌入到代表整个流场的背景网格当中。船体网格不受背景网格的限制,并且随意移动片体之间的间距而无需重新生成网格。在文献[7, 8]中,美国的 IOWA 大学就成功地将重叠网格技术运用到船舶的耐波性和操纵性的计算当中。

本文将对双体船和三体船的阻力性能进行数值计算。通过计算不同双体船的片体间距以及三体船的侧体位置,我们将要寻找一个最佳片体间距比(K/L)以及最佳的侧体位置。

2. 数值方法

2.1 控制方程

在本文当中,将采用不可压 RANS 方程来求解粘性流动。其连续性方程和动量方程组如下:

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \rho \cdot \mathbf{g} + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right) \right] - \nabla \cdot (\rho \overline{\mathbf{U}' \mathbf{U}'}) + f_s \quad (2)$$

其中, $\mathbf{U}$ 是速度场; p 是压力场; μ 动力粘性; $\mathbf{g}$ 是重力加速度; f_s 是源项; 此外 $\overline{\mathbf{U}' \mathbf{U}'}$ 是雷诺应力张量, 其满足 Boussinesq 假定:

$$-\overline{\mathbf{U}' \mathbf{U}'} = \nu_t \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right) + \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (3)$$

对于湍流模型, 采用的是混合型 $k-\varepsilon/k-\omega$ SST 模型, 由 Menter[12] 在 1994 年提出。

2.2 Level-Set 方法

自由面是通过 level-set 方法来捕捉得到, 该方法由 Osher 和 Sethian[13] 提出。在 level-set 方法当中, 一个带符号距离函数 ϕ 被引入用于表示距离自由面的距离。 $\phi=0$ 表示自由面处。 $\phi>0$ 和 $\phi<0$ 分别表示水和空气。而这个距离函数 ϕ 是通过求解下面输运方程得到:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

然而, 在求解方程(4)之后, ϕ 就不能保持为一个距离函数, 而需要进行修正。因此, 需要引入重初始化(Reinitialization)步骤, 来 ϕ 重初始化为距离函数。其中具体细节可以参考文献[14]。

2.3 动量方程求解

动量方程和连续性方程则通过压力隐式算子分割算法(PISO)来求解。该方法最早由 Issa[15] 提出, 适用于非定常问题的求解。主要是在一个时刻内, 先进行速度场的预估, 然后将连续性方程代入到动量方程组, 求解压力泊松方程, 再修正速度场。可以连续修正 2~5 次。最后经过多步的修正后, 在该时刻流场达到稳态, 并进入下一时刻的计算。

2.4 重叠网格技术

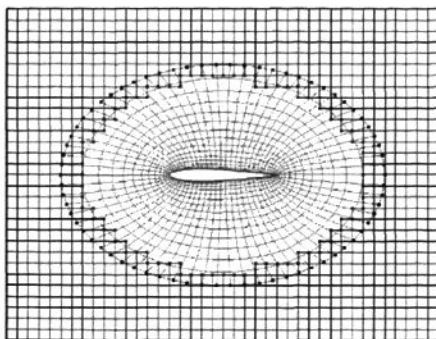


图. 1. 重叠网格示意图

对于多体船而言, 每一个单体都可以有一套贴体网格来包络, 然后可以将这套网格嵌入到一套背景网格当中的任意位置。贴体网格不受背景网格形式的约束, 并且可以在其中任意运动。因此, 为了研究不同片体间距或者侧体的位置时, 可以非常方便地移动各个单体网格的位置, 而不需要重新生成网格。

运用重叠网格方法的主要过程是在各个网格之间建立联系, 其中包括, 投影、挖洞以及边界点插值[16]。投影过程是为了减小曲面离散时候的误差, 从而平移曲面上的网格点。这种情况往往出现在复杂的物面插值上。然而, 在本文当中, 由于船型相对简单, 因此不会考虑这步。挖洞过程是除去两套网格当中重叠的部分中, 在保留下若干层重叠部分以后的剩余部分。在挖洞以后剩下边界就是插值边界。最后一步就是需要给每一个在插值边界上的点, 在另一套网格相对应的位置上寻找一组能提供插值系数的插值点。插值系数就可以通过这组插值点来得到, 而相应的流场变量就能通过所计算得到的插值系数来求得, 式(5)。

$$\phi_m = \sum_{i=1}^8 \xi_i \phi_i + \eta_i \phi_i + \zeta_i \phi_i \quad (5)$$

其中, ϕ 是流场当中的任意变量, 如速度, 压力等; ϕ_m 是插值边界上的被插值点; ξ_i, η_i, ζ_i 代表三个方向的插值系数; $i=1, 2, 3 \dots 8$ 代表另一套网格上 8 个提供数据的插值点。这样, 通过给每一个插值边界上的点求得插值系数, 那么这一插值边界就能通过插值系数从另一套网格上获得数据。这样, 两套网格之间的数据交换就建立起来了。通常, 为了保证离散格式的精度, 需要提供两层以上的插值边界。

例如, 图. 1 展示了由两套网格组成的重叠网格。一个是有贴体网格构成的机翼网格, 另一个是直角的背景网格。机翼网格嵌入到背景网格当中。在机翼网格当中, 相当一部分网格已被挖去, 只剩下两层网格用于插值, 以完成网格之间的数据交换。

3. 算例描述

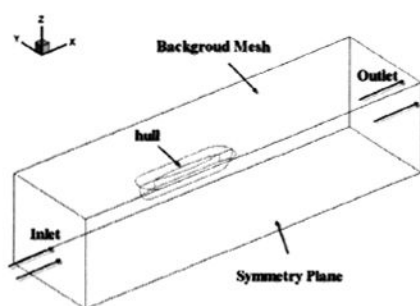
3.1 双体船

本文研究的双体船将是由两个 Wigley 船模所组成, 船长均为 4 米。如图表. 2 所示, L 是船长; B 是船宽; K 是片体间的间距。在本文中, 将要寻找一个最佳的片体间距比 (K/L)。因此需要考虑多

个 K/L , 分别是: 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 1.0。同时, 每个 K/L 还要考虑不同的傅汝德数, 包括: 0.25, 0.316, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 和 1.0。



图表. 2. 双体船几何图



(a) 计算域



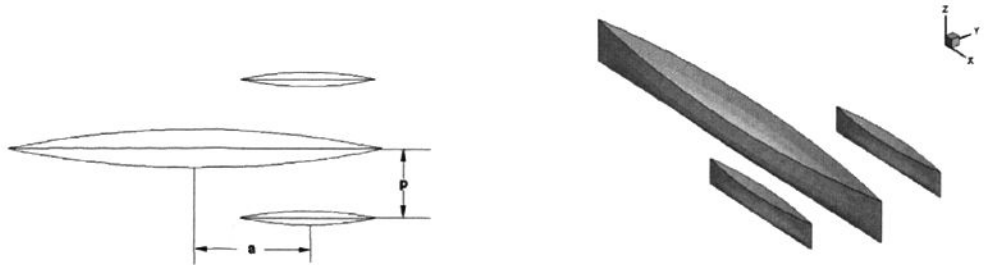
(b) 重叠网格(挖洞后)

图表. 3. 计算域和重叠网格

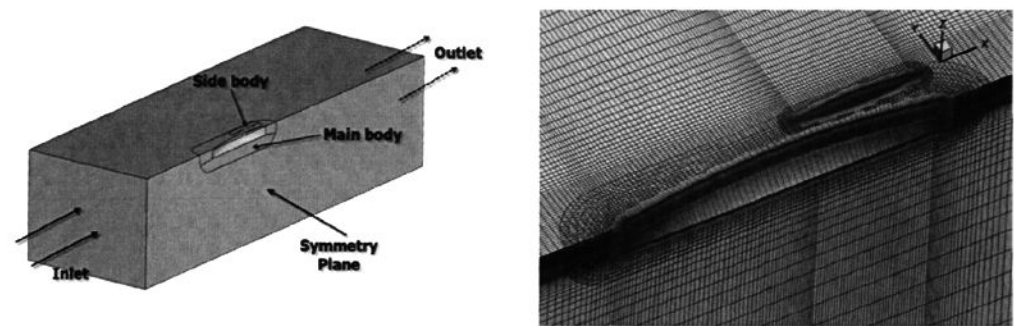
图表. 3(a) 显示的是计算区域。因为双体船是关于 y 轴对称的, 因此只考虑双体船的一半, 在对称面上采用了对称边界条件。计算域的范围为, 在 x 轴方向是从 $-1.2L$ 到 $4.0L$, 宽度和水深方向均为 $1.5L$ 。图表. 3(b) 显示的是两套重叠网格。其中, 蓝色网格是船体网格。该网格被嵌入到正交的背景网格当中(黑色网格)。在完成挖洞过程之后, 部分存留在船体网格内部的背景网格被除去, 只留下若干层重叠区域和差值边界。然后经过差值之后, 两套网格之间的数据交换就建立起来了。

3.2 三体船

如图表. 4 所示, 三体船同样由三个 Wigley 船模组成。其中, 一个大的为主体船, 船长为 1 米, 另外两个小的为侧体, 船长为 0.36 米。为了研究侧体的最佳位置, 这里考虑两个主要变量, 一个是侧体距离主体船中心的纵向间距, 另一个是侧体距离主体的横向间距。两个变量分别有“ a ”和“ p ”表示, 如图表. 4 所示。同时, 对于每一个侧体位置, 所要计算的傅汝德数的范围是从 0.4 到 0.7。

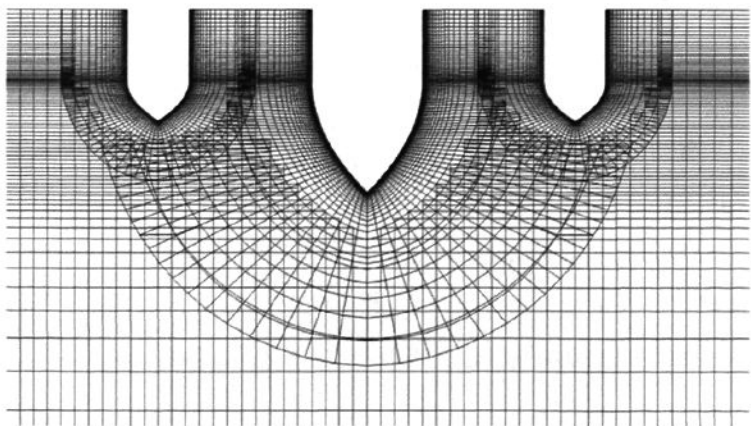


图表. 4. 三体船几何图



(a) 计算域

(b) 重叠网格(挖洞后)



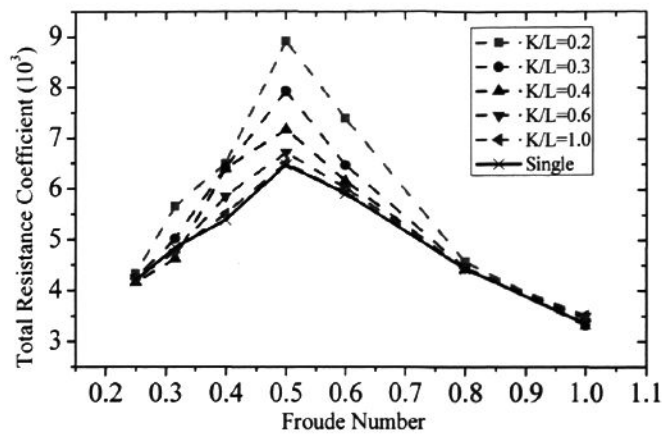
(c) 重叠网格横切面图

图表. 5. 计算域和重叠网格

图表. 5(a)是三体船的计算区域。和双体船相似，三体船也是关于中纵剖面对称的，因此只需要考虑一半三体船模型即可。计算区域和双体船的一致，但是三体船则是采用了两个船体网格，并嵌入到背景网格当中，如图表. 5(b)所示。其中，红色为主体船网格，在每个算例中该网格始终保持固定，而蓝色为侧体船网格，该网格会根据不同的纵向间距（a）和横向间距（p）来移动，以满足不同的需要。图表. 5(c) 显示的是重叠网格的横剖面（以对称）。每套船体网格和背景网格均建立数据交换链接，同时由于侧体和主体之间也有重叠部分，因此它们之间也有相似的数据传递。

4. 结果和讨论

4.1 双体船



图表. 6. 每个 K/L 总阻力系数总结

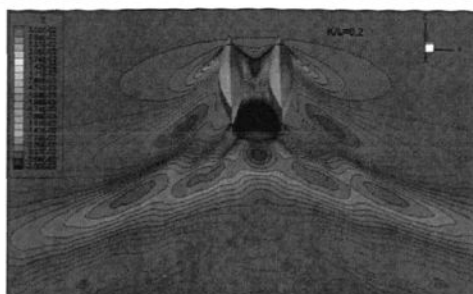
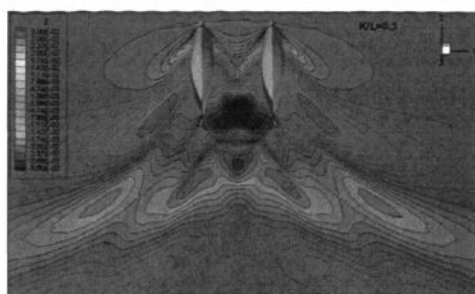
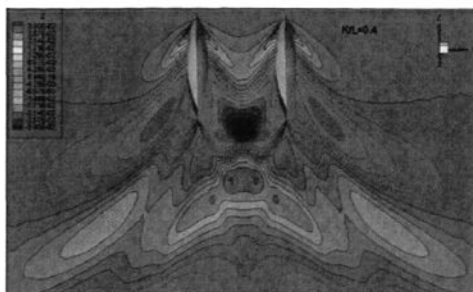
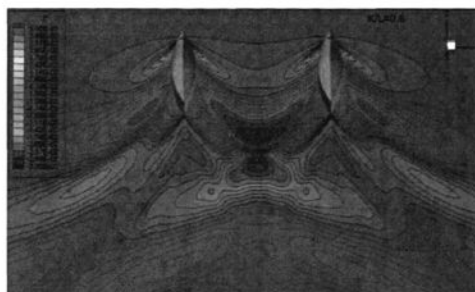
图表. 6 是双体船不同间距比(K/L)下的阻力系数计算结果。其中 C_t 代表的是总阻力系数，其由摩擦阻力系数和压差阻力构成系数。同时这些结果还和单体船计算结果（黑色实线）相比较。从计算结果中可以看到，在低傅汝德数 Fn 小于 0.8 的时候，双体船的阻力系数会随着片体间距的减小而增大。对于最小间距比 $K/L=0.2$ ，片体间的相互干扰最为严重，如图中灰色虚线所示。其阻力结果远远大于单体船的结果。然而，随着 K/L 的增大，片体间的相互干扰也随之减小。当 $K/L>0.6$ 是，比如 $K/L=1.0$ ，片体间的相互干扰几乎可以忽略。

同时，对于所有的 K/L 来说，其总阻力系数均在 $Fn=0.5$ 的时候达到峰值，随后随着航速的增加，阻力系数随之减小。同时也在 $Fn=0.5$ 的时候，片体间的兴波干扰最为严重，其阻力增幅最大。

然而，当 Fn 大于 0.8 时，无论片体间的间距是多少，之间的相互作用几乎可以不计，阻力结果和单体的基本保持一致。我们将 $Fn=0.8$ 和 1.0 的计算结果列于表 1。从结果中可以看到，当 $Fn=0.8$ 的时候，双体船的阻力系数几乎和单体船的相同，最小出现在 $K/L=0.4$ 的配置上。当 $Fn=1.0$ 的时候，双体船的阻力并没有随着间距比 K/L 的增加而减小，反而是随着 K/L 的减小而减小，并在 $K/L=0.3$ 的时候达到最小值，并且比单体船的阻力还小。因此，当 $Fn>0.8$ 的时候，双体船片体之间的有利干扰开始显现出来。

表 1. 高弗劳德数下的总阻力系数解 ($\times 10^3$)

Fn	$K/L=0.2$	$K/L=0.3$	$K/L=0.4$	$K/L=0.6$	$K/L=1.0$	Single Hull
0.8	4.57	4.45	4.43	4.46	4.46	4.44
1.0	3.37	3.32	3.46	3.49	3.51	3.35

(a) $K/L=0.2$ (b) $K/L=0.3$ (c) $K/L=0.4$ (d) $K/L=0.6$ 图表. 7. $Fn=0.6$ 波形图

图表. 7 显示的是当 $Fn=0.6$ 时候, 不同片体间距(K/L)的波面图。当 $K/L=0.2$ 时, 此时片体之间的相互干扰最为严重, 从波形上看亦是如此。对于船首波来讲, 两股波的波峰叠加在一起, 从而造成了极大的波高。船尾处情况也是如此。波谷与波谷的叠加, 造成了更大的波谷。这样一个波面的一高一低的巨大落差, 使得兴波阻力大大增加。然而, 随着 K/L 的逐渐增加, 叠加部分开始慢慢减小。当 $K/L=0.6$ 时, 这里仅有一些船尾波的相互叠加, 而船首波几乎没有互相影响。因此, 在此间距下, 双体之间的相互干扰几乎可以忽略, 其阻力结果几乎和单体船一致。

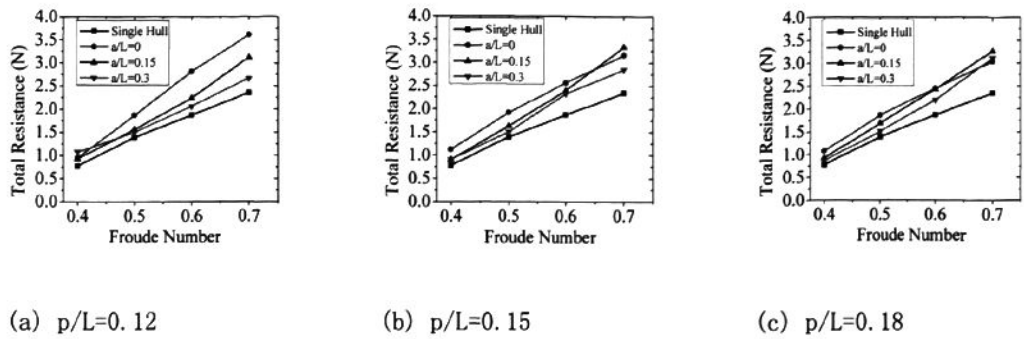
4.2 三体船

对于三体船而言, 我们将要寻找的是一个最佳的侧体为主。为了需要这个位置, 我们需要考虑两个变量, 其分别是侧体距离主体中心的纵向位置以及横向位置, 两个变量分别用“ a ”和“ p ”表示, 如图表. 4 所示。

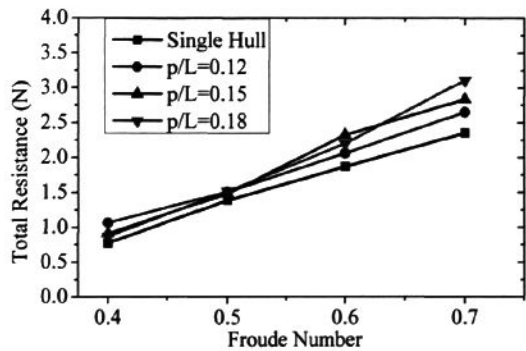
首先, 我们考虑不同的侧体纵向位置 a 。我们先固定参数 p/L , 其中 p 为横向间距, L 为主体船长。然后对应每一个 p/L , 计算不同的 a/L , 从而得每一个位置下的阻力系数。其结果如图表. 8 所示。该结果显示, 对应每一个横向间距比 p/L , 阻力系数一直在 $a/L=0.3$ 的时候达到最小。随着 a/L 的减小, 其阻力系数持续地增大。因此, 可以判断为 $a/L=0.3$ 为最佳的纵向间距。

其次, 我们再固定 $a/L=0.3$, 同时考虑不同的横向间距比 p/L 。计算结果如图表. 9 所示。从计算结果中, 可以得到, 当 $Fn>0.50$ 时, $p/L=0.12$ 的阻力系数一直是最小的一个。而 $Fn<0.50$, $p/L=0.18$ 是最佳的。而然, 考虑到三体船往往是高速航行体, 因此我们主要考虑 $Fn>0.5$ 的情况。因此, 我们可以判断 $p/L=0.12$ 为最佳横向间距。

综上所述, $a/L=0.3$ 以及 $p/L=0.12$ 为该船型的最佳侧体位置。

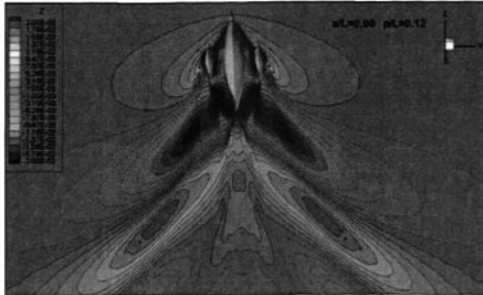


图表. 8. 不同 P/L 阻力的汇总

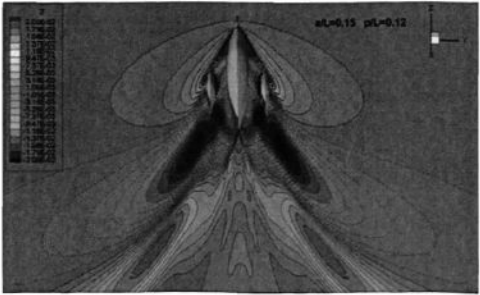


图表. 9. $a/L=0.30$ 阻力

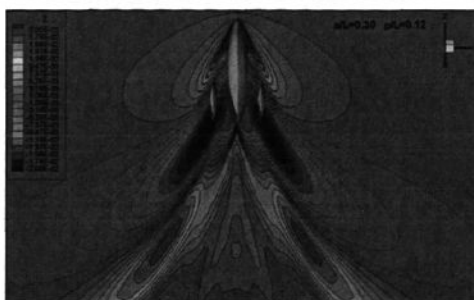
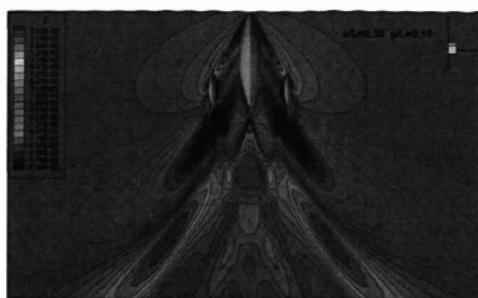
图表. 10 是 $F_n=0.7$ 时, 不同 a/L 和不同 p/L 的波形图计算结果。图表. 10(a)是侧体处于 $a/L=0.00$ 和 $p/L=0.12$ 的位置上。从图中, 可以看到, 侧体的船首位于主体引起的船首波的波峰当中, 再加上侧体自身所产生的船首波, 两股的叠加产生了更大的波高。侧体的船尾也是类似的, 同样也位于主体所产生的船尾波的波谷当中, 同时再加上其本身所产生的船尾波, 就叠加形成了一个更深的波谷。所以这种工况下的兴波阻力十分巨大。然而, 随着侧体慢慢向主体的船尾以后, 侧体船首慢慢走出船首波的波峰区域, 波的叠加效应慢慢减小如图表. 10(b)(c)所示。在这种工况下, 由于波高的减小, 从而导致兴波阻力也随之减小。但是, 如果增加侧体的横向间距, 如图表. 10(d)所示, 侧体船首又回到了主体引起的船首波当中。所以, 正如之前的阻力计算结果一样, 在这种情况下, 三体船的阻力又开始增加。所以根据上述计算结果图表. 10(c) 是该船型的最佳侧体位置。



(a) $a/L=0.00$, $p/L=0.12$



(b) $a/L=0.15$, $p/L=0.12$

(c) $a/L=0.30$, $p/L=0.12$ (d) $a/L=0.30$, $p/L=0.18$

图表. 10. 侧面不同位置的波形图

5. 总结

本文基于重叠网格技术,通过求解 RANS 方程来的方式,计算了多体船(双体船和三体船)的阻力性能和兴波流场,并采用 Level-set 方法来捕捉自由液面。为了简化问题,本文的三体船都是由 Wigley 船模所构成。

对于双体船而言,所要考虑的是其片体的横向间距。从计算结果中可以得到,当傅汝德数 Fn 在 0.25 至 0.6 范围内时,片体之间的存在着使阻力增大的不利干扰。而且这些干扰会随着间距的减小而增大。当片体间距最小时,其总阻力系数远远大于单体船。然而,当傅汝德数 Fn 大于 0.8 时,双体船片体之间的有利干扰开始显现出来,由兴波干扰引起的阻力增幅可以忽略不计,其阻力结果几乎和单体船一致,并且会随着间距比 K/L 的减小而减小,在 $Fn=0.8$, $K/L=0.4$ 以及 $Fn=1.0$, $K/L=0.3$ 的时候达到最小值。

对于三体船而言,其侧体的距离主体的纵向和横向间距是主要的考虑因素,而考察的傅汝德数 Fn 的范围为 0.4 到 0.7。整个计算过程分两步走。第一步是固定横向间距 p/L ,计算每一个纵向间距 a/L 对船体阻力的影响。计算结果发现对于每一个 p/L ,当 $a/L=0.3$ 时,其阻力永远是最小的。所以第二步就是固定 $a/L=0.3$,考察不同 p/L 对结果的影响。结果发现当纵向间距 $a/L=0.3$,以及横向间距 $p/L=0.12$ 时,并且在高傅汝德数下($Fn>0.5$),船舶的阻力性能达到最优。这主要是由于在其他位置,侧体会处于主体所引起的船首波波峰位置,从而使得兴波阻力增加。因此可以判断 $a/L=0.3$ 和 $p/L=0.12$ 为最佳侧体位置。

致谢: 本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant No. 11072154, 50739004),海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金(Grant No. GKZD010064)和上海东方学者人才计划基金资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1]. 汪诚仪. 高速双体船模型阻力试验及片体间波系干扰分析[J]. 中国造船, 1989, 3.
- [2]. 王兴权. 高速双体船阻力性能[J]. 武汉交通科技大学学报, 1997, 21 (005): 513-516.
- [3]. 李培勇, 袁泳铭, 顾敏童, etc. 三体船阻力模型试验[J]. 中国造船, 2002, 43 (004): 6-12.

- [4]. Saunders Jr, R. An Investigation of the Resistance Properties of a Modern Trimaran Combatant Ship Based on Taylor Standard Series and Series 64[D]. Master Thesis, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA 1995.
- [5]. Elcin, Z. Wave Making Resistance Characteristics of Trimaran Hulls[D]. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA 2003.
- [6]. 陈京普, 朱德祥 and 何术龙. 双体船/三体船兴波阻力数值预报方法研究[J]. 船舶力学, 2006, 10 (002): 23-29.
- [7]. Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W., etc. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids[J]. Computers and Fluids, 2007, 36 (9): 1415-1433.
- [8]. Carrica, P.M., Paik, K.J., Hosseini, H.S., etc. URANS analysis of a broaching event in irregular quartering seas[J]. J Mar Sci Technol, 2008, 13 (4): 395-407.
- [9]. Sakamoto, N. URANS and DES simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant[J]. 2009.
- [10]. Wilson, R.V., Carrica, P.M. and Stern, F. Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant[J]. Computers & Fluids 35 (2006) 501 - 524, 2006.
- [11]. Rhee, S. and Stern, F. Unsteady RANS method for surface ship boundary layer and wake and wave field[J]. Int J Numer Meth Fl, 2001, 37 (4): 445-478.
- [12]. Menter, F. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. Aiaa J, 1994, 32 (8): 1598-1605.
- [13]. Osher, S. and Sethian, J. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. J Comput Phys, 1988, 79 (1): 12-49.
- [14]. Carrica, P.M., Wilson, R.V. and Stern, F. An unsteady single-phase level set method for viscous free surface flows[J]. Int J Numer Meth Fl, 2007, 53 (2): 229-256.
- [15]. Issa, R. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. J Comput Phys, 1986, 62 (1): 40-65.
- [16]. Chan, W., Gomez, R., Rogers, S., etc. Best Practices in Overset Grid Generation, ' ' AIAA Paper 2002-3191[A]. In 2002.