

应用计算流体力学进行 VLCC 船型的线型优化

张红玲, 朱丽萍, 钟应华

(江南造船(集团)有限责任公司, 上海 200011)

摘要: 应用计算流体力学(CFD)的计算结果对 VLCC 船进行了线型优化工作。首先按照航线、总布置的要求, 确定了一初步线型, 然后两个不同的首部备选线型和两个尾部备选线型共组合成了 4 个 VLCC 线型方案。根据势流理论的计算结果进行首部线型选优; 根据求解雷诺时均的 RANSE 方程的计算结果进行尾部线型选优。在首部线型的比较中主要应用了波形分布图、波高图、沿船体表面的压力分布等流场信息, 在尾部线型的比较中通过桨盘面处的轴向伴流分布和形状因子, 来判断后体线型的优劣。最后通过模型试验验证了选优的线型方案的快速性。

关键词: 线型优化; CFD; VLCC

中图分类号: U661.31⁺2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1005-9962(2006)03-0005-04

Abstract: In this paper, a Very Large Crude Carrier (VLCC) hull form was optimized by CFD calculation. Two fore bodies and two aft bodies were combined into four VLCC hulls. Fore hull form was optimized by the computation based on the potential theory. Aft body optimization was done through RANSE flow calculation. Our work of fore body focused on comparing wave height levels, wave profiles and pressure distributions; and the work of aft body focused on comparing axial velocity distribution at propeller plane and form factors. Model tests were carried out to verify the optimization.

Key words: hull form optimization; CFD; VLCC

1 前言

长兴造船基地的建设,使江南造船(集团)有限公司承接超大型原油船(VLCC)变为可能。另一方面,随着世界各国对能源需求量的日益增加,油价的飞速上涨,使 VLCC 成了当前市场的热点。为了更好地迎接激烈的市场竞争,有必要对这类船型进行深入研究,做好充分的技术储备。了解 VLCC 船型的快速性能,进行线型优化,提高其航速指标,是一项重要的技术储备工作。

进行线型优化的传统方法是经验公式和模型试验。但经验公式所用数据已显陈旧,和现代船舶设计的趋势不匹配,而船模试验尽管精度高,但费用昂贵,耗时长,不能对市场做出快速响应。所以在新船型开发阶段和初步设计阶段,越来越多的研究机关、设计院开始应用计算流体力学(CFD)这一现代而快速的工具进行线型优化的工作。

CFD 是在计算机上求解描述船舶流体运动的偏微分方程组,对船舶的周围流场进行数值模拟,从而对船舶水动力性能做出预报和评估。它相当于在计算机上进行数字试验,但与船模试验相比,具有费用低、周期短、信息量大等优点,并且它显示的详细流场信息,能为设计者提供方案改进的方向。

江南造船(集团)有限责任公司是国内最早尝试

将 CFD 应用于船舶初步设计和船型优化的单位之一,并做了 CFD 应用的大量基础性工作,包括将 CFD 融入现有 CAD 系统的应用策略、对典型船型进行分类计算等,并应用 CFD 对快速集装箱船、LPG 船、散货船等作了船型线型优化和分析工作^[1]。

在已有成果和经验的基础上,本文应用 CFD 对 VLCC 船型几个可能的线型方案,进行阻力和尾流场计算,通过波形、桨盘面伴流分布等,分析 VLCC 流场,进行线型选优。

线型优化流程如下:

- (1) 根据肥大型船的特点,确定一性能适中的初步线型;
- (2) 根据初步线型提供两种可能的首部线型前体 F1、F2 和尾部线型 A1、A2 方案,组合得到 4 个线型方案 F1A1, F1A2, F2A2, F2A1;
- (3) 应用船用 CFD 软件 SHIPFLOW 对这 4 个线型进行船舶静水阻力计算和流场的详细分析,依据这些数值计算与分析的结果,提出线型优化的方向和方案;
- (4) 进行船模试验,对线型优化方案做进一步验证。

2 线型方案确定

2.1 基本线型

根据市场调研,初步确定了要开发的 VLCC 船型的主尺度和目标航速,见表 1。然后按照总布置

第一作者简介: 张红玲,女,高级工程师。1971 年生,1999 年上海交通大学船舶及海洋结构设计制造专业博士研究生毕业,长期从事船型优化工作。

和载量量的要求,确定本船的方形系数以及平行中体长度,接着从设计吃水下的船舶快速性要求着手进行线型设计。

表 1 主尺度

总长	333.00 m
垂线间长	320.00 m
型宽	60.00 m
型深	30.20 m
设计吃水	20.50 m
结构吃水	22.50 m
目标航速	16.00 kn

对应 16 kn 的目标航速,该船的傅氏数为 0.14。如此低的傅氏数表明剩余阻力对总阻力影响较大,兴波阻力在总阻力中所占比例较小,另外,兴波阻力本身也不会因船首丰满度有很大的变化。因此,以静水中快速性能的观点,线型设计首先是考虑浮心位置尽可能前移,增加船首的丰满度。当然,船首丰满度与波浪中的阻力增加有密切的关系,如仅为提高静水中快速性能而使船艏肥大化,则有招致在波浪中性能变坏的危险,这必需要有一个很好的平衡。

以往船模试验表明,对这类肥大船型,流体分离现象几乎是不可避免的,而分离区的大小与后体的棱形系数关系甚密。为此,从减小粘性阻力出发,主要着眼点是使船具有尽量小的浸湿面积,以尽量减小摩擦阻力。在此前提下,在确定尾部型线时,应尽量避免或减少界层分离,以减小粘压阻力。

在主要以快速性为指标考虑船舶的初步线型时,必需还要兼顾船舶的其他水动力性能。对于像本船 $C_B/(L/B)$ 很大的这类肥大型船,最易出现应舵迟缓、操纵异常现象,对尾部线型要有一个很好的控制以保证其良好的操纵性,因此,对桨毂下方的线型做了特别处理,使其能起到类似呆木的作用保持航向稳定性。

综上各因素,根据本船的设计指标要求,在参考一些同类船舶的基础上确定了船舶的初步线型。

2.2 4 个线型方案

在得到初步线型后,着手线型的精细优化。随后从减小兴波阻力出发,开发另一首部备选线型方案;从减小粘压阻力、提高桨盘面处的伴流均匀度出发,开发尾部备选线型方案。

将初步线型的首部线型称为 F1、尾部线型称为 A1,备选的首部线型方案为 F2,尾部的另一种线型方案为 A2。将 F1、F2、A1、A2 组合,从而得到 4 个线型方案 F1A1、F1A2、F2A1、F2A2。

下一步应用船用 CFD 软件对这 4 个线型方案进行阻力及流场计算、分析和选优。在优化时将首部和尾部线型的优化工作分开进行,首部线型优化的着眼点是兴波阻力最小,尾部线型优化的着眼点是粘压阻力最小、桨盘面处的伴流分布是否均匀。

3 CFD 计算分析

3.1 CFD 计算原理

在利用 CFD 进行船舶阻力计算时,通常依据傅汝德假设,认为兴波阻力和粘性阻力是彼此独立的,且分别与傅汝德数和雷诺数有关。因此计算时,依据势流理论,不考虑粘性而仅考虑自由表面影响;计算兴波阻力,不考虑自由表面影响来求解粘性阻力。

本文主要采用船用 CFD 专用软件 SHIPFLOW 进行 4 个 VLCC 线型方案的阻力计算。SHIPFLOW 采用分区域计算方法,将绕船体的计算流域分成势流区、薄边界层区和湍流区,在每一区域使用数值计算方法。

湍流区求解 RANSE 方程时,SHIPFLOW 有两种湍流模型可供选择。在本艘 VLCC 的线型优化设计中,使用了 $k-\epsilon$ -SST 湍流模型,它和常规的 $k-\epsilon$ 湍流模型相比,不再使用壁面函数,在靠近船体表面可以使用更细小的网格,从而提高了粘性阻力和伴流场的计算精度。

3.2 兴波阻力计算

首先计算 4 个线型设计吃水(20.5 m)、设计航速(16 kn)下的兴波阻力,通过兴波阻力计算考查首部线型。

基于势流理论的兴波阻力计算,其计算精度与流场特性在很大程度上取决于网格质量。根据我们的经验,这类船型在长度方向自由面在一个波长内网格数为 30 个左右。本船自由面在一个船长上的网格数为 160,船身的网格数为 100 个。

用以上的网格划分方案对 4 个线型方案进行计算,在计算时采用了非线性的自由面。由于网格数选取和布置合适,各计算方案都在迭代 5 次后收敛。

因为兴波是向下游传播,尾部后体 A1A2 对首部兴波的影响很弱,所以只介绍 F1A1 和 F2A1 的计算结果,它和 F1A2 和 F2A2 的计算结果是一致的。

设计吃水时,航速为 16 kn 时的波形分布图见图 1。图 1 的上半部是 F2A1,下半部是 F1A1。从图 1 可以明显看出,F1 和 F2 两个线型产生的波形都较弱,都属于性能良好的前体线型。两者相比,F1 的波形分布更均匀,F2 的前肩波明显比 F1 高,

但此局部高的波形抑制了兴波往下游传播,图 2 沿船体的自由面波高图可以更明显地证实这一结论。

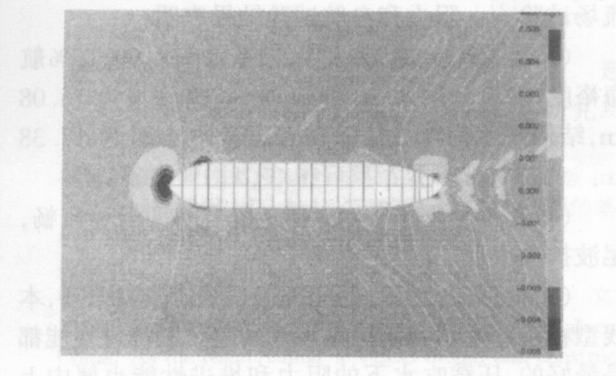


图 1 波形分布图($T=20.5\text{m}$, $Fn=0.146$, 上半部为 F2, 下半部为 F1)

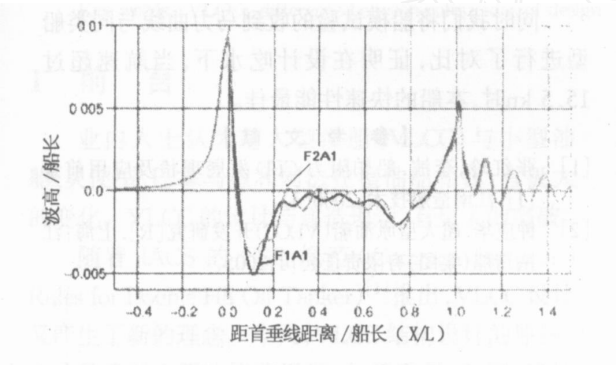


图 2 沿船体的波高分布

从沿船体的压力分布图(图 3 和图 4)可见,在前体 F1 压力梯度比 F2 低。根据以往对此类船的计算分析看,在这样的压力梯度下会产生一定的舵涡,但此类舵涡并不严重,对阻力的影响并不太大。因而从整体兴波特性看,我们认为 F2 的线型比 F1 好。

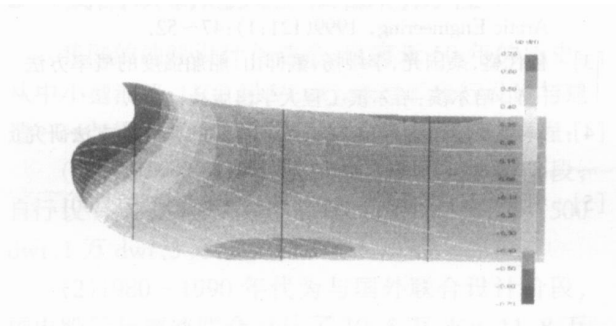


图 3 F1A1 沿船体表面的压力分布

3.3 粘性阻力计算

粘性阻力的计算是采用固定自由面下求解 RANSE 方程。在非线形计算得到的自由面条件下进行粘性阻力计算,计算域纵向从船中开始,船尾到 1.8 个船长位置,横向取 1.5 个船长,网格数取 135

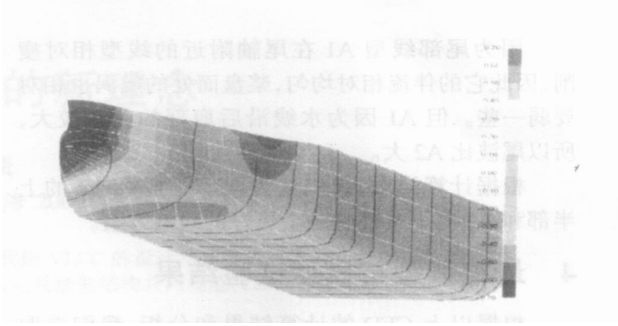


图 4 F2A1 沿船体表面的压力分布

$\times 30 \times 60$ (长度方向网格数 \times 周向网格数 \times 径向网格数)。程序中没有设计收敛的判断条件,但是从摩擦阻力系数 C_{df} 和压阻力系数 C_{dp} 的值可以判断,计算在 1500 次迭代后收敛。

应用以上的网格策略对 F2A1 和 F2A2 进行粘性流的计算,计算结果见表 2。表中的数值结果如形状因子等只作为两线型排序的依据。数值结果的精度与计算模型、算法、网格划分的精度有关,例如若取网格数为 $182 \times 40 \times 80$,则计算结果精度有所提高。但网格数的增加会带来计算时间成几何数的增长,从线型比较的实用性出发, $135 \times 30 \times 60$ 的网格划分用于两个线型方案的比较是可行的。

表 2 粘性流计算结果(网格数 = $130 \times 30 \times 60$)

船体线型组合	F2A1	F2A2
摩擦阻力系数	3.141×10^{-3}	3.208×10^{-3}
粘压阻力系数	0.752×10^{-3}	0.750×10^{-3}
粘性阻力系数	3.893×10^{-3}	3.958×10^{-3}
形状因子	0.253	0.274

我们还仔细考查了与表 2 结果相对应的尾流场压力分布、速度分布等。以图 5 所示的 0.5 站处的速度分布图为例,从图中可以明显地得到舵涡的形态、伴流分布的均匀程度等,对比两个线型的尾流场特性,从而对线型作出判断。

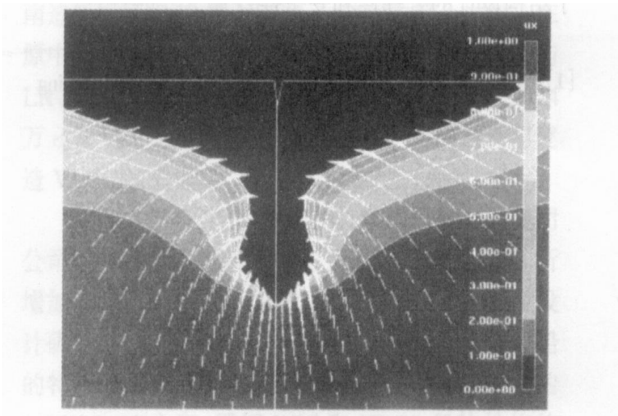


图 5 0.5 站处速度分布图(左半边 A1,右半部 A2)

因为尾部线型 A1 在尾轴附近的线型相对瘦削,因此它的伴流相对均匀,桨盘面处的舭涡也相对要弱一些。但 A1 因为水线沿后肩部的曲率较大,所以尾波比 A2 大。

根据计算结果,我们认为尾部线型取 A2 的上半部和 A1 的下半部是一个更好的线型方案。

4 最终线型与模型试验结果

根据以上 CFD 的计算结果和分析,我们选取 F2 作为首部线型,综合 A1 和 A2 的优点重新构造了尾部线型 A3,得到了新的线型,见图 6。

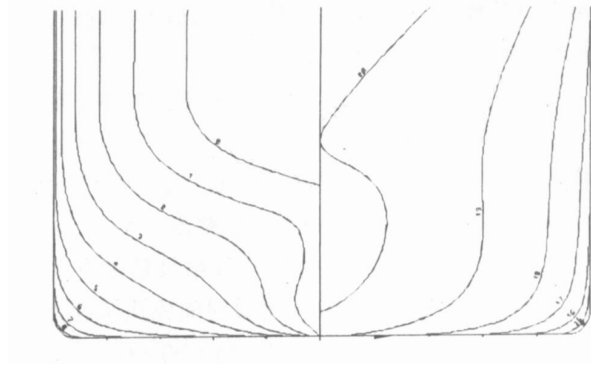


图 6 优化后的线型

* * * * *

(上接第 4 页)

4 结 论

理论预报值与模型试验结果相比较,可见将常规的多级展开法进行改进和扩展,能成功预报扁平双首船型的动力响应。这对复杂形状剖面的具有优良性能的新船型的结构设计提供了理论基础,提高了结构设计的合理性和安全性。

【参 考 文 献】

[1] Coint R. Free surface flows close to a surface-piercing

我们委托船池对最终线型进行了设计吃水和结构吃水下的阻力和自航试验,以及设计吃水下的伴流场试验^[2]。阻力和自航试验结果表明:

(1)若 $CSO = 24939 \text{ kW}$,轴系效率 0.99,15 %航海裕度,在设计吃水 20.5 m 时,航速预报为 16.08 kn,结构吃水时为 15.61 kn,压载吃水时为 17.38 kn。

(2)在各个吃水下,波形都相当的平滑和流畅,尾波扩散很低。

(3)根据船池做过的同类船型统计资料来看,本线型在设计吃水和结构吃水下的阻力和推进性能都是最好的,压载吃水下的阻力和推进性能也属中上水平。

同时我们将船模试验的收到马力曲线与同类船型进行了对比,证明在设计吃水下,当航速超过 15.5 kn 时,本船的快速性能最佳。

【参 考 文 献】

- [1] 张红玲,李波. 船舶阻力 CFD 发展现状及应用前景[J]. 江南造船技术,2000(3).
- [2] 钟应华. 超大型原油船(VLCC)开发研究[R]. 上海:江南造船(集团)有限责任公司,2005.

body[M]. Mathematical Approaches in Hydrodynamic, 1991:319~334.

- [2] Sames P C, Schellin T E, Muzaferija S and Peric M. Application of a two fluid finite volume method to ship slamming[J]. ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999(121:1):47~52.
- [3] 杨代盛,桑国光,李维扬,戴仰山. 船舶强度的概率方法[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1994.
- [4] 秦洪德. 船舶运动与波浪载荷计算的非线性方法研究[D]. 哈尔滨工程大学博士学位论文,2003.
- [5] 中国船级社. 船体结构强度直接计算指南[S]. 2001.