

# 基于 SWATH 船型回转横倾角的舵设计

邬婷<sup>1,2</sup>, 杨立<sup>1,2</sup>, 梁家健<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;  
2. 江苏省绿色船舶技术重点实验室, 江苏 无锡 214082)

**摘要** 以小水线面双体船满舵回转时的稳定横倾角和舵的水动力性能(侧向力)为研究对象,以 CFD 计算为基础,开展不同舵面积比对回转横倾角和舵机功率的影响分析,分别评估了舵面积比为 3.0%和 4.0%共 2 种工况,并结合舵设计的一般规范、方法进行分析,可为 SWATH 船型舵面积的设计提供参考和依据。

**关键词** 小水线面双体船;舵;横倾角

中图分类号 U662.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)01-0067-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.012

## Rudder Design Based on Heel Angle of SWATH's Turning Motion

WU Ting<sup>1,2</sup>, YANG Li<sup>1,2</sup>, LIANG Jiajian<sup>1,2</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;  
2. Jiangsu Key Laboratory of Green Ship Technology, Wuxi 214082, China)

**Abstract** In this paper, the stable heel angle and the hydrodynamic performance (rudder side force) of SWATH during full rudder rotation are the research objects. Based on CFD calculations, the influence analysis of different rudder area ratios on the rotary heel angle and the power of the steering gear is carried out. The two working conditions with rudder area ratio of 3.0% and 4.0% are evaluated separately, and analyzed in combination with the general rules and methods of rudder design, which can provide reference and basis for the design of SWATH rudder area.

**Key words** SWATH; rudder; heel angle

## 0 引言

小水线面双体船型(SWATH)是一种高性能船型,有优良的耐波性和快速性,且甲板面积大易于布置<sup>[1]</sup>,非常适于用作客船、科考船等。但是小水线面双体船也存在一些问题,比如回转半径大<sup>[2]</sup>。导致在实船的设计过程中,有些船东会要求增加舵面积来减小回转半径,但是过大的舵面积可能会影响到船体回转时的横倾角。《2008 年国际完整稳性规则》<sup>[3]</sup>A 部分第三章规定客船计算回航时的稳

定横倾角应不大于 10°。由于船舶实际所能达到的最大横倾角要大于定常阶段的稳定横倾角,而这个最大横倾角才是最危险的状态。在 2014 年 SDC1 次会议上,波兰提议用瞬态最大横倾角代替稳定回转横倾角作为衡准检验的参数<sup>[4]</sup>;在 SLF55 次会议上,RINA 提议船舶回转瞬态最大横倾角不应超过 15°<sup>[5]</sup>;日本等国也对横倾角有相关的提案<sup>[6]</sup>。针对这一问题,本文将采用 CFD 数值评估方法计算满舵回转时舵面积对于稳定横倾角的影响,从而为 SWATH 船型的舵设计提供一定参考。

### 1 小水线面双体船基本要素

本文以一艘排水量 2 000 t 级的小水线面双体船为研究对象。该小水线面双体船为一艘科考船，主要用于深远海科学调查作业，设有双机、双桨、双舵，上层建筑布置于首部作为船员和科考人员起居处所与服务处所，尾部主甲板为作业处所，主要布置科考设备，机舱布置于尾部。2 000 t 级的小水线面双体船主参数可见表 1，其船体和舵的三维效果图如图 1 所示，船尾螺旋桨敞水曲线如图 2 所示。

表 1 2 000 t 级小水线面双体船船体和螺旋桨主要参数  
Table 1 Main parameters of hull and propeller of 2000t SWATH

参数名称	数值
船型	2 000 t 级小水线面双体船
垂线间长 $L_{pp}/m$	54.85
设计吃水 $d/m$	5.7
设计航速 $V_s/kn$	12
螺旋桨直径 $D/m$	3.8
螺旋桨叶数 $Z/\text{个}$	5
螺距 $P_{0.7R}/m$	3.383
螺旋桨类型	侧斜桨
旋向	左旋、右旋各 1 个

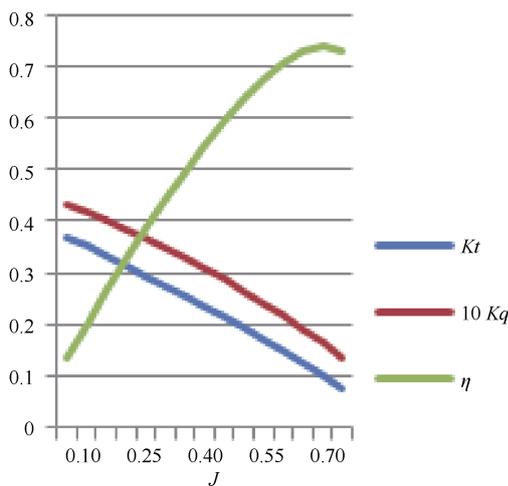


图 1 螺旋桨敞水曲线图  
Fig. 1 Open water curve of propeller

### 2 计算模型的建立

#### 2.1 控制方程

本文的计算所采用的控制方程包含连续性方程和 RANS 方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\overline{\rho u_i' u_j'} \right) \quad (2)$$

式中： $\rho$  为密度； $\mu$  为流体粘性系数； $p$  为压力； $u_i'$  为速度脉动量。

#### 2.2 湍流模型

为了模拟船体周围复杂的流场，本文采用 SST  $k-\omega$  湍流模型。

湍流动能 ( $k$ ) 及湍流脉动频率 ( $\omega$ ) 的输运方程为：

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

#### 2.3 自由面的处理

本文采用 VOF 方法来处理自由面。VOF 方法是在整个流场中定义一个函数  $C$ ，在每个网格中，这个函数定义为一种流体（我们称之为目标流体）的体积与网格体积的比值。VOF (volume of fluid) 函数满足连续性方程：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

#### 2.4 数值方法

计算中采用基于非结构网格的有限体积法离散计算区域和控制方程，动量输运方程的对流项采用三阶 MUSCL 格式离散。

$$Q_{ij}^L = Q_i + \frac{\chi}{2} (Q_j - Q_i) + \frac{1 - \chi}{2} \nabla Q_i \cdot \vec{r}_{ij} \quad (6)$$

$$Q_{ij}^R = Q_j - \frac{\chi}{2}(Q_j - Q_i) - \frac{1-\chi}{2}\nabla Q_j \cdot \vec{r}_{ij} \quad (7)$$

式中:  $\vec{r}_{ij}$  是控制单元  $i, j$  中心的方向矢量; 控制参数  $\chi=0 \sim 1$ 。

### 2.5 计算域和边界条件

本文粘流数值计算所采用的计算域如图 2 所示, 计算域的各边界设置如下。1) 入口边界: 距船首 1 倍船长, 为速度入口边界条件; 2) 出口边界: 距船尾 2 倍船长, 为压力出口边界条件; 3) 顶部边界: 距甲板 1 倍船长, 为速度入口边界条件; 4) 底部边界: 距船底 2 倍船长, 为速度入口边界条件; 5) 侧面边界: 距舷侧 1.5 倍船长, 为速度入口边界条件; 6) 船体和舵: 为无滑移的壁面边界条件。

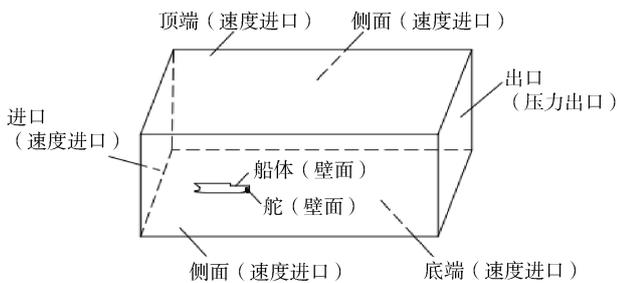
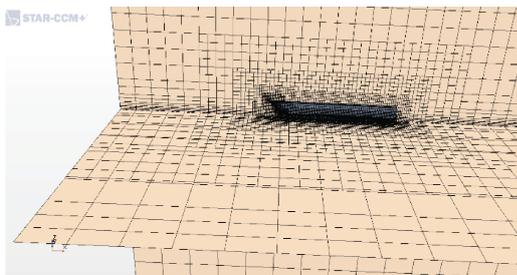


图 2 计算域和边界条件

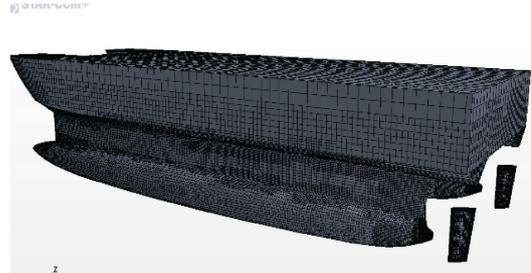
Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

### 2.6 网格划分

全局计算域的网格划分如图 3 (a) 所示, 为了能更加清晰地捕捉到自由面的特征, 可以看到在自由面附近的网格有所加密。船体和舵的网格如图 3 (b) 所示, 为了捕捉船体尾部周围的复杂流动, 在船尾包括舵附近网格均加密。



(a) 全局计算域网格



(b) 船体和舵网格

图 3 网格划分

Fig. 3 Meshing

### 2.7 数值计算工况的选取

利用所建立的模型对船舶在回转运动定常阶段的横倾角以及船后舵的水动力性能 (舵的侧向力) 进行计算。在计算过程中, 模型采用缩尺比为 1:8, 采用虚拟盘体 (Virtual Disk) 模拟船后螺旋桨旋转。模型总长为 7.875 m, 螺旋桨直径为 0.475 m, 以设计吃水为计算条件。

在舵面积的选择中经常采用的参数为舵面积比  $x$ :

$$x = \frac{A}{Ld} \times 100\%$$

式中:  $L$  为船长, m;  $d$  为夏季载重线吃水, m;  $A$  为舵面积,  $m^2$ 。

舵的总面积比选取 3.0%, 4.0% 共 2 种工况, 舵的剖面选用 NACA0020, 实船回转速度选取 12 kn。数值计算详细工况和参数见表 2。

表 2 数值计算详细参数

Table 2 Detailed parameters of numerical calculation

工况	舵面积比 $x\%$	缩尺比 $\lambda$	实船回转速度 $V/kn$	模型回转速度 $V_m/(m/s)$	舵角 $\delta/(\circ)$
1	3.0	8	12	2.1826	35
2	4.0				

## 3 计算结果及分析

模型的计算结果如表 3 所示。

表 3 模型计算结果

Table 3 Model calculation results

舵面积占比	横倾角/ $(\circ)$	左舵侧向力/N	右舵侧向力/N
3.0%	8.5	117.6	152.0
4.0%	12.2	217.8	305.7

舵的侧向力换算到实船,得到实船的计算结果如表4所示。

表4 实船计算结果  
Table 4 Calculation results of real ship

舵面积占比	横倾角/(°)	左舵侧向力/kN	右舵侧向力/kN
3.0%	8.5	60	78
4.0%	12.2	112	157

从计算结果可以看出,该船舶在回转定常阶段的横倾角会随着舵面积比的增大而增加。当舵面积比从3.0%增加到4.0%的时候,横倾角增加了3.7°。舵面积比为4.0%的时候,定常回转阶段的横倾角达到了12.2°,如果作为客船,则横倾角超过了客船所要求的最大稳定横倾角10°。

随着舵面积的增加,舵的侧向力也会随之增大。操右舵时,右舵的侧向力大于左舵。当舵面积占比从3.0%增加到4.0%的时候,右舵的侧向力增加了101%,左舵的侧向力增加了87%,从舵机选型的角度考虑,成本会增加,这对于船东来说,是不利的。

#### 4 SWATH 船型的舵设计

通常,在舵设计初期,可以有以下几种方法进行舵面积的选取<sup>[7]</sup>: 1) 完全针对具体一条船的舵面积尺寸选取的最好方式是参考母型船。这种方法在设计初期有母型船的资料,并且母型船实船操纵性优良的情况下,可以为舵的选取提供很好的参照依据。2) 按照各类船舶舵面积比的统计资料来选取。这些统计资料仅对于船型有一个大致的分类,不会针对到船舶具体的主尺度和特征,因此仅可作为大致的参考。3) 在没有性能优良母型船可参考情况下,通过船级社<sup>[8]</sup>公式计算或者查找图谱。这些给出的是舵面积的最小值,对舵面积的上限则没有给出相关的计算公式。

从设计的经验来看,由于SWATH船型存在回转半径大的缺点,有时船东会要求增加舵的面积,而上文的评估可以看出,舵面积过大可能会导致SWATH船型回转横倾角过大,这对于对回转横倾角有规范要求的客船来说是不允许的,对于科考船来说也会降低舒适性和安全性。同时,增大舵面积

也会增加舵机的功率,增加成本。因此在进行实船舵设计时,需要通过综合考虑和评估,对舵的面积进行论证。

#### 5 结束语

本文以某2 000 t级小水线面双体船为研究对象,以CFD计算为基础,采用通过缩尺比为1:8的水动力模型,利用所建立的模型对船舶在2种舵面积比工况下满舵回转运动定常阶段的横倾角以及船后舵的水动力性能(舵的侧向力)进行计算,并结合船舶设计的相关规范,得出如下结论。回转定常阶段的横倾角会随着舵面积比的增大而增加,目标小水线面双体船的舵面积比增加到4%时,横倾角会超过客船所允许的最大稳定横倾角。舵的侧向力也会随着舵面积的增加而增大,会导致舵机的功率增加,不利于成本控制。在舵的设计中,尤其对于SWATH这样比较特殊,没有太多母型船可供参考的船型,不能简单地通过增加舵面积来增加操纵性,而是需要综合考虑操纵性与安全性,对舵的面积进行论证,以保证实船的顺利完成试航。

#### 参考文献

- [1] 郑明,李百齐.二十一世纪海洋高性能船[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [2] 赵连恩.高性能船舶水动力原理与设计[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.
- [3] 国际海事组织.国际完整稳性规则[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [4] Poland. Proposal for the structure of the criterion for maximum angel of heel in turns of the 2008 IS Code[C]//IMO.SDC1. London: International Maritime Organization. 2014.
- [5] RINA. Proposed amendment to the 2008 IS Code[C]//IMO.SLF55. London: International Maritime Organization. 2013.
- [6] JAPAN. Comments on the revised proposals from RINA[C]//IMO.SDC1. London: International Maritime Organization. 2014.
- [7] 中国船舶工业集团公司,中国船舶重工集团公司.船舶设计实用手册[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [8] 中国船级社.钢制海船入级规范[M].北京:人民交通出版社,2018.

(责任编辑:张曼莉)