

浅水域对瘦长型舰船操纵性的影响*

海军兵种指挥学院 吴 晞 郑环宇 曹之新

内容摘要:研究浅水对瘦长型舰船操纵的影响是舰船航行操纵的一项重要课题。根据势流理论,以某型船舶为仿真实体,基于不同船体网格模型,采用 MSC-Patran 对船体进行网格划分,进行了浅水域的操纵性计算与仿真。所得结果能够较好反映瘦长型船舶在浅水域的操纵特性。

关键词:浅水域 附加质量 操纵性

The Effect of Shallow Waters to Long-then Warship's Maneuver ability

Abstract:It is an important problem about be all legs-type warship sails safely that ship's manoeuvre and control on shallow water. The thesis considers numeration hydrodynamics as its ground, the thesis takes one-type warship as the sample. takes use of MSC-Patran pretreatment program to pantition the grid of the warship, Calculate and simulate on the maneuver when warship sails on shallow water. when we use it in the ship navigation simulation, it is proved to be of results conherence. And we use simulate and forecast the manoeuvre law on shallow water with the program, it can supply a reliable reference for the captain navigating the warship on the shallow water.

Key word: shallow water additional mass manoeuvre

0 引言

浅水域是舰船经常活动的区域。目前国内很少有具备作浅水试验的船模试验池,浅水条件下的船模试验很难进行。对于一种新型舰,若是用实船进行浅水试验,其危险性较大,所以实船的浅水试验也难以实施。因此关于舰船在浅水域的各操纵性参数在以往的资料中只给出了一个定性的分析,如:浅水效应使舰船吃水增加,旋回运动时旋回圈变大,停车倒车制动时惯性冲距变小。但对于具体舰船,发生浅水效应时,其变化情况没有定量的结果。特别是新型舰船在交付使用时,也没有提供浅水中航行操纵的相关参数。

本文应用计算流体力学势流理论,引入面元法求解舰船的附加质量,建立了舰船在浅水域中的操纵性模型,仿真和预报舰船在浅水域的操纵运动,为舰船在浅水域的航行和操纵提供定量的参考依据。在仿真预报中,以某瘦长型舰船为仿真对象,进行了浅水域中惯性、旋回、制动运动的仿真和预报。该计算仿真方法也适应于其它瘦长型舰船在浅水域中的定量分析和操纵性预报。

首先以流体理论为基础,采用 Msc-Patran 有限元计算软件对规则几何体进行网格划分,用 Hess-Smith 方法构建三维物体的附加质量计算方法,编制相应的数值计算程序。并通过对规则椭球体附加质量的计算^[2],获得与理论值比较一致的结果,可以证明该程序能对三维物体水中的附加质量进行计算。在实际计算浅水域舰船的附加质量时,将船体表面、海平面和海底表面网格化,计算舰船在不同水深时的附加质量;将计算的附加质量用于 MMG 模型,对舰船的操纵性进行计算与仿真,并将深水域仿真结果和实船试航结果相比对,证明该附加质量系数可以用于舰船的操纵性计

算;再将浅水域的舰船附加质量应用于操纵性方程,仿真和预报浅水域舰船的操纵性规律。

1 浅水域船舶附加质量的计算

在计算流体力学中,势流理论可以对三维物体的附加质量进行计算,而计算中比较常用的方法是 Hess-Smith 方法^[3]。该方法是一种求解水动力学问题的常用数值计算方法。这种方法以分布源和偶极为基础,只需将区域的边界离散化,在满足速度势方程的函数集合中寻找一些函数,使它们满足速度势的定解条件,以近似逼近真解。此方法只需在物面边界划分面元,安排节点,使面元划分更加简洁和准确。

1.1 基本方程和边界条件

建立坐标系 $O-XYZ$ 如图 1 所示。坐标原点 O 取在船体对称面中心上, OX 轴、 OY 轴和 OZ 轴分别指向船首、右舷和向上,并认为 OX 、 OY 和 OZ 轴是船舶的惯性主轴。用 S 表示物体表面,来流为均匀流,其无穷远处的速度为^[1]:

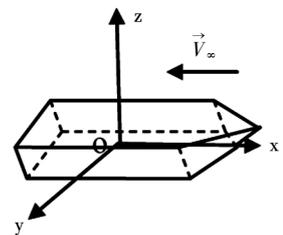


图 1 三维物体在流场中的示意图

$$\vec{V}_{\infty} = V_{\infty x} \vec{i} + V_{\infty y} \vec{j} + V_{\infty z} \vec{k} \quad (1)$$

(i, j, k 分别为 x, y, z 方向上的单位矢量)

由势流理论可知,在流场中,定常速度势为调和函数,所以满足以下基本方程和边界条件^[3]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 & \text{物体外} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & \text{物面上} \\ \varphi = xV_{\infty x} + yV_{\infty y} + zV_{\infty z} & \text{无穷远处} \\ \varphi = xV_{\infty x} + yV_{\infty y} + zV_{\infty z} + \varphi & \text{物体临近区域} \end{cases} \quad (2)$$

这里 φ 是扰动速度势,在不可压缩势流中,运动无旋,扰动速度势 φ 的定解条件^[3],在物体临近区域,扰动速度势也是调和函数,且满足以下方程和边界条件:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 & \text{物体临近区域} \\ \varphi = 0, \text{grad} \varphi = 0 & \text{无穷远处} \\ \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_s = -\vec{V}_\infty \cdot \vec{n} & \text{物面上} \\ \varphi \rightarrow 0 & \text{无穷远处} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \vec{n} 是物面 S 的单位外法线矢量; \vec{V} 为物体运动速度。

要求得物体附加质量,关键是要求解出扰动速度势 φ 。采用有限基本解方法解以上方程,即在满足速度势方程的函数集合中,寻找一些函数,使它们满足定解条件,这些函数称为基本解。对于一般流动,要寻找一些基本解的线性组合满足所有的定解条件是相当困难的,所以只能在某些近似意义上满足定解条件。如在某些重要部位,满足物面条件常常是可以做到的。这种在某种意义上满足某些定解条件的线性组合 φ 称为近似解。

扰动速度势的理论解为^[3]:

$$\varphi(p) = -\frac{1}{4\pi} \int_s \frac{\sigma(q)}{r(p,q)} ds \quad (4)$$

附加质量可表示为:

$$m_{ij} = -\rho \int_s \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} ds = -\rho \int_s \varphi_i n_j ds \quad (5)$$

式中: p 点的扰动速度势由分布在 q 点的源对 p 点的影响进行求解;其中 $\sigma(q)$ 表示 q 点的源强度, $r(p,q)$ 为 p 点和 q 点的距离。 m_{ij} 表示六自由度舰船在某一方向的附加质量; S 的曲面积分为整个舰体水线以下的表面积; ρ 为水的密度。

计算时,将舰船水线以下表面划分网格,只要网格大小划分合适,就可以认为在每一小曲面上的源密度为一常数。此时计算公式(4)和(5)的连续积分就可以离散化,在每一小曲面上进行求解。若有 n 个面,便能得到 n 个方程,形成 $n \times n$ 阶矩阵,采用塞德尔迭代可求得每个面的源强度,由源强度便可求得速度势和附加质量。

1.2 三维物体和瘦长型舰船的网格划分

用计算流体力学进行流场数值计算,第一步就是计算域的离散化,即将物理域用有限的离散点来代替的过程,称为网格生成。一般网格生成的原则是:确保物体表面形状真实,即确保计算精度;尽量减少网格数目,以适应计算机的计算能力;物理梯度大的区域,网格点尽量密些,保证连续性;考虑到对

称性对物体所受水动力的影响,网格应体现出物体的对称性;尽量使网格线与液体流动方向一致。

本文采用 MSC 的 Patran 软件对物体进行网格划分,然后将网格数据输入数值计算程序,求得物体的附加质量。为了求解舰体附加质量,首先采用规则椭球体进行网格划分。水中漂浮状态的椭球体其外形近似瘦长型,且可以通过理论公式计算准确的附加质量值。所以,用椭球体的附加质量计算值和理论值比较,验证计算程序的正确性,再用此计算程序计算舰体深水和浅水的附加质量。

本文对长半轴 $a = 3.0 \text{ m}$,短半轴 $b = c = 1.0 \text{ m}$ 的旋转椭球体进行了网格划分。如图 2 所示:对椭球体,按曲率方向分布网格种子,其网格划分只选取两种直观的示意图,能够充分反映其椭球体的外部特征。

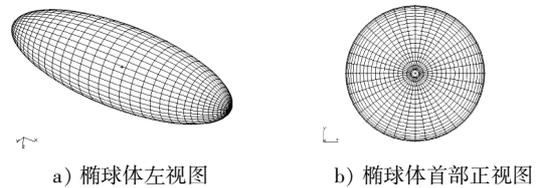


图 2 椭球体网格图

图 3 为某瘦长型舰船水线以下表面的网格划分。划分表面时,先依据舰体型值表,在各肋骨处生成样条曲线,再拟合成有理面。在舰体艏部,由于有球鼻首,型线曲率变化较大,所以对局部网格进行加密。网格划分完毕后,再对网格进行无缝检查,确保网格的连贯性。

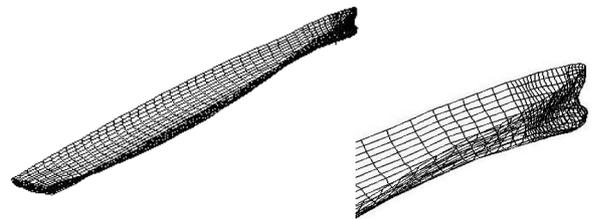


图 3 舰体水线以下部分和舰首网格图

1.3 椭球体附加质量随网格变化的相对误差分析

计算椭球体和舰体的附加质量时,本文研究了网格数对计算结果的影响,求得相对误差如图 4、图 5 所示。计算了 10 组网格数(120~2 000)的旋转椭球体的附加质量系数,且均与兰伯的势流理论值^[2]进行比较。

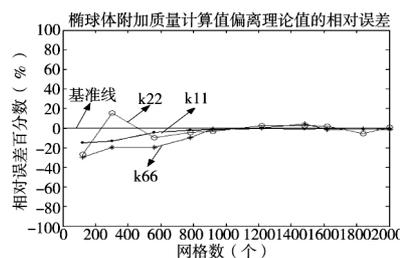


图 4 椭球体附加质量计算值随网格变化误差图

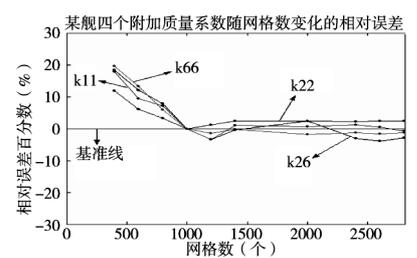


图 5 某型舰附加质量系数随网格变化误差图

观察相对误差随网格数的变化情况,由图可看出:旋转椭球体附加质量系数计算值在网格数较少时误差较大,但随着网格数不断增加,相对误差变小,800个网格后相对误差均在5%以内。这也进一步验证了数值计算程序的正确性。

将舰船网格化划分为10组,分别从400到2800个网格进行递增,由此得到舰船表面网格节点坐标值,传入数值计算程序。同理可得,舰体网格800个以上时都能满足精度要求。

1.4 边界长度和宽度的选取

首先要截取海底局部边界进行网格划分,然后进行数值计算。但究竟截取多大尺寸的底部边界比较合适,既可以满足精度要求又不占用太多计算机资源,对此本文进行了系列计算。

计算对象:长半轴、短半轴旋转椭球体,距海底高度为10m,且设底部为平板底部,平板中心与椭球体容积中心在同一铅垂线上。截取平板宽度大于计算物体的宽度,截取平板长度为计算物体长度的2倍后,可得出平板边界尺寸对附加质量系数计算结果的影响不大。

1.5 瘦长型舰船浅水域附加质量与水深的关系

依据海底尺寸对附加质量的影响,截取2倍舰长、1倍舰宽的海底进行网格划分。舰体水线以下表面划分为1000个表面、1072个节点;将海底底部划分为1200个表面、1280个节点,其面元数为2200个,节点数为2352个。将其形成数据文件后,输入有限水深下的附加质量计算程序,可算出结果。论文中选取了6~30m的10种不同水深,对舰体和海底进行网格划分。当水深小于6m时,由于流场变化较复杂,势流理论已不适应求解;而水深大于30m的情况,对该型舰船和无限水深的流场相似。图6给出水深8m时的舰船海底网格划分。

依据计算结果绘制的附加质量随水深变化曲线图,如图7所示。

由图7可以看出:当水深从6m变化到30m时,附加质量的变化规律。图中m11、m22、m26分别表示舰船纵向附加质量、横向附加质量和旋转附加质量。附加质量随水深变化,在6m左右水深时,其浅水附加质量约为30m水深时的2.5~3倍;随水深增加,附加质量渐渐变小。此计算结果符合浅水对舰船附加质量的影响。

2 浅水中舰船的吃

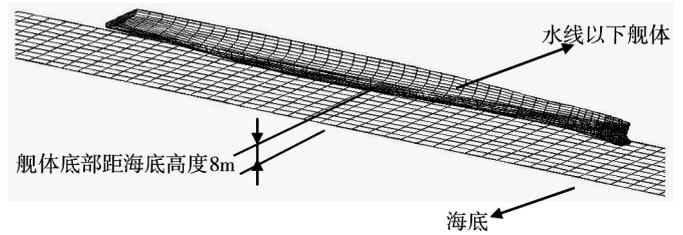


图6 8m水深时舰体和海底网格图

水和纵倾变化的计算

舰船在浅水域航行存在浅水效应,可能会引起螺旋桨触底、船体搁浅等事故。所以,舰船在浅水域航行时的吃水和纵倾变化的计算相当重要。船体下沉量的计算有多种方法,但基本上都是经验公式,只适合特定的船型。本文首先从理论上探讨某型舰的下沉和纵倾变化,并求解水深吃水比为1.5时,舰船在不同速度下的纵倾和吃水的变化规律,计算舰船在此浅水状态下的最大安全航速。

舰船平均吃水的变化和纵倾角的变化可表示为以下公式:

$$\begin{cases} \Delta T = \Delta T_A + \Delta T_B \\ \psi = \Delta \psi_A + \Delta \psi_B \end{cases} \quad (6)$$

式中: ΔT 为航行中船舶平均吃水的变化; ψ 为船舶航行的纵倾角; ΔT_A 、 $\Delta \psi_A$ 由流体动力作用而引起的船舶吃水和船倾的变化量; ΔT_B 、 $\Delta \psi_B$ 由兴波引起的舰吃水和舰倾的变化量。

舰船平均吃水的变化量可以用下面公式进行近似计算:

$$\Delta T = (R_z + \gamma \Delta V) / \gamma S \quad (7)$$

式中: ΔV 为由兴波引起的体积变化; S 为设计水线面积; γ 为水的比重; R_z 为流体动力。

船舶航行纵倾角可用下式计算:

$$\psi = (M_y + \gamma M_v) / \Delta \cdot H \quad (8)$$

式中: M_y 为流体动力纵倾力矩; M_v 为附加体积静矩; Δ 为船的排水量; H 为纵稳心高。

引入335船模波幅函数模拟舰船兴波,结合以上公式经过计算,可得水深吃水比为1.5的情况下,当航行速度为22kn时,可算得舰船平均下沉量为0.7515m,

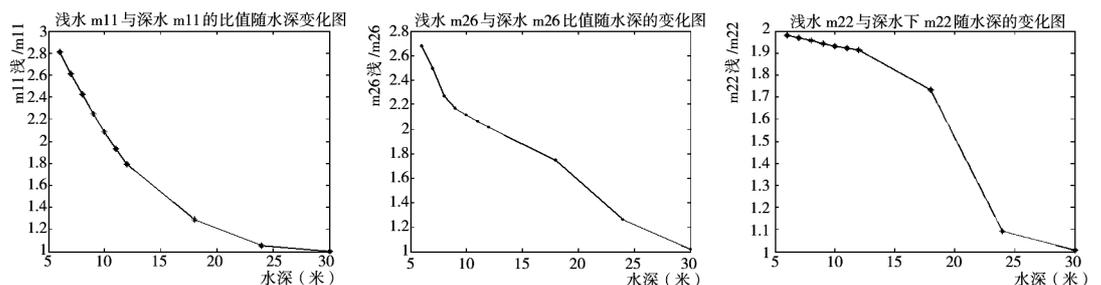


图7 水深变化时附加质量变化规律图

舰船纵倾为 0.0095 弧度(0.544°),如图 8 所示。

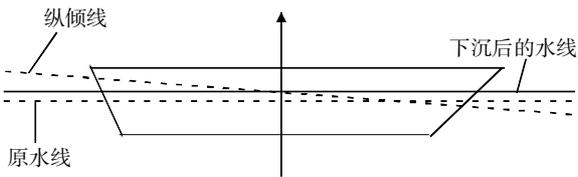


图 8 舰体吃水变化图

下面分析此状况下舰船是否处于危险状态。

当舰船平均下沉量为 0.7515 m,纵倾为 0.0095 弧度时,设由于舰船纵倾引起的尾部下沉量为 x ;又因下沉量相对于舰船的长度是小量,则可近似认为纵倾后水线和原水线长度相等。

所以,由纵倾引起的下沉量为: $x = (L/2)\sin\psi \approx (L/2) \cdot \psi = 0.722 \text{ m}$,舰船尾部下沉量 ΔT_B 为 1.473 5 m;舰首下沉量 ΔT_A 为 0.029 5(m)。若舰船在静止状态下,富余水深为 2.1 m(水深吃水比为 1.5 时,水深为 6.3 m,吃水为 4.2 m),当舰速为 22 kn 时,舰尾富余水深为 0.626 5 m;若设安全阈值为 1 m,则可求得该舰通过该水域最大速度应小于 17 kn。

3 浅水中瘦长型舰船的操纵性能计算与仿真

目前还没有被确认的有关浅水域的操纵运动数学模型,通常以深水域的数学模型为基础,在形式上与深水域的数学模型一样,主要通过水动力系数来反应浅水的影响。为建立起浅水域数学模型,引入以下假设:

- 风与浪、流互不干扰,舰船在波浪中振荡是小量,且只考虑波的影响;
 - 水的边界影响仅限于边界层内,其外为理想有势流动;
 - 忽略舰船横摇、纵摇及垂荡对操纵运动的影响。
- 依据上述假定,根据动量定理、势流理论和线性波浪理论,可导出操纵运动方程^[4]:

$$\begin{aligned} (m + m_{11})\ddot{u} - (m + m_{22} + X_{ur})v \cdot r - (mX_G + m_{26})r^2 = & X_{Hv} + X_{Hr} + X_R + X_P + X_a + X_f + X_w \\ (m + m_{22})\dot{v} + (m + m_{11})ur + (mX_G + m_{26})\dot{r} = & Y_{Hv} + Y_{Hr} + Y_R + Y_P + Y_a + Y_f + Y_w \\ (mX_G + m_{26})(\dot{v} + ur) + (I_{zz} + m_{66})\dot{r} = & N_{Hv}v + N_{Hr}r + \\ & N_{Hvv}v^2 \cdot r + N_{Hvr}v \cdot r^2 + N_{Hvv}v^3 - (1 + a_H)X_{HR}F_{HN}\cos\delta \\ (I_{xx} + m_{11})\dot{p} = -W \cdot G \cdot Z(\theta) - N(P) - Y_H Z_H - & \\ & (1 + a_H)Z_R F_N \cos\delta \\ 2\pi(I_{pp} + J_{pp})\dot{n} = Q_E + Q_P + Q_{f_i} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: m_{11} 、 m_{22} 、 m_{26} 、 m_{66} 为舰船附加质量; I_{pp} 、 J_{pp} 为轴系和螺旋桨的转动惯量和附加转动惯量; X 、 Y 、 N 、 Q 分别表示舰船所受的纵向力、横向力、力矩和轴系扭矩;下标 Hv 、 HR 、 P 、 R 、 a 、 f 、 w 则分别表示粘性力、辐射力、桨力、舵力、风力、浪力、流力,其具体计算公式由船舶操

纵性^[5]导出,详细推导从略。SHP 为主机功率; k_Q 为螺旋桨转矩系数,这里取 $k_Q = 0.0973$ 。

3.1 深水下的仿真结果验证

仿真条件:水深吃水比为 7 时,由泰勒观点认为此时已处于深水状态。计算某型舰船在全速和 17 kn 巡航速度下的停车、倒车、旋回操纵运动,并对其仿真结果和实船试航数据进行比较,得出仿真结果与实船试航结果对照表,如表 1 所示。

表 1 仿真结果与实船试航结果对照表

直航停车 倒车惯性	实船试航数据		仿真数据		相对 误差
	停车时间	惯性冲距	停车时间	惯性冲距	
31 kn-停车	266 s	2 004 m	218 s	2 034 m	1.4%
17 kn-停车	310 s	1 150 m	280 s	1 136 m	-1.3%
31 kn-倒车五	135 s	1 180 m	136 s	1 133 m	-2.3%
旋回运动	旋回直径		旋回直径		
17 kn 右满舵旋回	490 m		511 m		3.2%
31 kn 右满舵旋回	719 m		716 m		0.28%

试航试验结果和仿真结果在无限水深时较为一致。证明程序对计算某型船的操纵运动是可行的。下面利用该程序对深水 and 浅水状态下的操纵运动进行仿真,并比较其仿真结果。

3.2 在深水和浅水状况下对某型船操纵运动的仿真 仿真结果如图 9、表 2 所示。

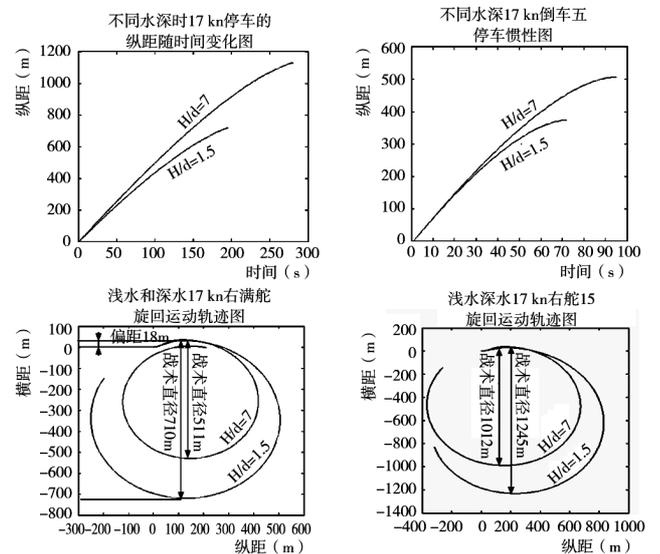


图 9 深水和浅水状态下舰船的仿真轨迹图

3.3 仿真结果分析

在深水和浅水两种状态下,通过对某型舰船在 10 kn、17 kn、31 kn 的停车惯性、倒车惯性、右满舵旋回、右舵 15°旋回、右满舵后停车的一系列仿真,计算出舰船各运动状态下的操纵性参数。

(1)在停车惯性和倒车惯性方面,深水和浅水的惯性冲程相差较大,说明浅水对舰船直航停车惯性影响

表 2 深水 and 浅水仿真结果对照表

直航停 倒车惯性	深水结果		浅水结果		差值
	停船时间	惯性冲距	停船时间	惯性冲距	
17 kn-停车	280 s	1 136 m	195 s	720.5 m	415.5 m
17 kn-倒车五	92 s	506 m	71 s	374 m	132 m
17 kn 右满 舵停车		纵距 682 m		纵距 520 m	162 m
旋回运动	旋回直径		旋回直径		差值
17 kn 右满 舵旋回	511 m		710 m		199 m
17 kn 右舵 15	1 012 m		1 245 m		233 m

大。在 17 kn 时浅水的正舵停车纵距比深水的停车纵距小 415.5 m; 双车倒车五时浅水比深水小 132 m。

(2) 在旋回性能方面, 由于旋回中的阻尼力矩增加, 致使舰船在浅水中的旋回性能变差, 浅水中旋回直径增加较多。对于某舰而言, 水深吃水比分别为 7 和 1.5, 在 17 kn 速度、右舵 15° 时, 深水和浅水的旋回战术直径分别为 1 012 m 和 1 245 m。满舵时浅水旋回直径约为深水的 1.39 倍。

对于浅水域 17 kn 速度下的旋回规律采用日本 MSS-II 的试验结果进行比较。MSS-II 采用瘦长型船模, 方形系数为 0.5, 水深吃水比为 8 时, 其试验结果为 $D_T/L = 3.9$; 水深吃水比为 1.5 时, 其试验结果为 $D_T/L = 5.5$ 。而本文以右满舵 17 kn 初速旋回, 其水深吃水比为 7 时, $D_T/L = 3.6$; 水深吃水比为 1.5 时, $D_T/L = 5.01$ 。仿真结果符合不同水深时舰船的旋回规律。

此研究方法, 适合于方形系数在 0.4 ~ 0.6 之间的舰船进行浅水域的操纵性仿真。只要舰船具备齐全的船型参数(主要包括舰船长、宽、吃水、方形系数、水线面系数、型值表), 就可以对舰体表面进行合理的网格划分, 从而计算出舰船在任意状态时的附加质量, 并对操纵性方程进行计算, 得到舰船的特征参数, 掌握舰船在浅水域中的操纵规律。

4 浅水中的航行与操纵应注意的问题

由仿真图可看出, 浅水对舰船的直航惯性、旋回性能影响较大。基于以上分析, 舰船在浅水域航行与操纵时应该注意如下问题:

(1) 浅水域对舰船冲程的影响。舰船在浅水域停车或倒车时, 其惯性冲距变小, 停船时间变短。如水深吃水比 1.5 时某舰 17 kn 速度正舵停车, 或先停车后倒车, 其停船的时间在 195 ~ 71 s 之间, 停船产生的纵距在 720 ~ 374 m 之间。而在深水时同样速度下正舵停车, 或先停车后倒车, 其停船时间在 310 ~ 105 s 之间, 停船纵距约在 1 100 ~ 500 m 之间, 所以浅水域对舰船的停船比较有利。在狭水道浅水域, 不适合于转向避让的场合, 采用停车后再倒车能在较短时间内把船停住,

这对于浅水域中的停船避险是有利的。

(2) 浅水域对舰船避碰和掉头的影响。舰船在浅水域进行旋回运动时, 浅水引起的舰船旋回半径变大, 旋回时间变长。依据水深吃水比不同, 浅水域对舰船的旋回直径影响也不同, 总的规律是水深吃水比越小, 其旋回直径越大。水深吃水比 1.5 时, 某型舰艇 17 kn 右满舵旋回, 其旋回直径比深水增加了 199 m。对于不同的水深, 该舰发生浅水效应时的旋回直径在 500 ~ 700 m 之间, 即在 3 ~ 5 倍船长间变化。所以当舰船需要在狭窄浅水道掉头时, 必须考虑旋回半径增大的不利因素。同时, 因旋回时间变长, 在紧急避让时, 舰船不能够在预计的时间内达到预定的避让角度, 使得舰船在浅水域的转向避让更加困难。

(3) 浅水域对舰船追越的影响。当舰船在浅水域追越它船时, 由于吃水和纵倾的变化, 追越时要防止吃水过深或纵倾过大, 导致搁浅事故的发生。所以, 舰船在浅水域追越它船时, 其追越速度不能超过计算的最高安全航速, 本文中某型舰在水深 6.3 m 时, 追越速度应小于 17 kn。

5 结束语

本文依据势流理论, 采用网格划分的方法对某型舰艇进行了网格划分, 通过编制数值计算程序, 求出了该舰艇在深水和浅水状态下的附加质量, 并以 MMG 模型为基础, 通过简化初始条件, 对舰艇在深水和浅水条件下进行了仿真。在深水情况下的结果和试航结果比较一致, 所以用该程序能对舰船浅水下的操纵进行预报, 并通过计算舰船在浅水域不同速度时的吃水变化, 求出舰船通过浅水域的最大速度, 为舰船通过浅水域的航速选择提供一定的参考。

该方法解决了舰船无法在浅水状态下获得各种特征参数的问题, 对舰船在浅水域的航行具有一定的指导意义。该仿真不足的地方是舰船网格划分时, 仍然假定海平面为刚性平面, 海底为平面海底, 而实际海平面有随机波浪, 海底形状也比较复杂, 这将是以后研究的重点。

* 作者: 吴 晔, 海军兵种指挥学院航行与操纵教研室 教授, 硕士生导师; 郑环宇, 海军兵种指挥学院航行与操纵教研室 讲师。

参考文献

- David Clarke. The effect of shallow water on manoeuvring derivatives using conformal mapping Control Engineering Practice 6(1998), 629-634.
- 曾董南. 计算流体力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- 戴遗山. 舰船在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008, 28-33.
- 余志兴, 吴秀恒, 张乐文. 限制水域中三维船舶操纵运动水动力计算[J]. 武汉交通科技大学学报, 1996, 20(6): 677-682.
- 吴秀恒, 刘祖源, 施生达. 船舶操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005, 150-157.