

基于 MMG 登陆舰艇操纵运动模型的螺旋桨力研究

宋剑, 凌琳, 赵磊

91976 部队, 广州 510430

摘要 登陆舰艇是两栖作战中的主要输送装备, 针对其运动规律的复杂性, 建立了在深水和浅水条件下基于分离型船舶操纵运动模型(MMG)的登陆舰艇操纵运动模型。因登陆舰艇在航行中, 螺旋桨推力是主控力, 用来克服水的阻力, 维持舰艇的操纵运动, 所以螺旋桨的流体动力模型是登陆舰艇运动建模的一个重要组成部分。在登陆舰艇特有的操纵运动模型的基础上, 着重介绍了登陆舰艇操纵运动中螺旋桨力的模型。

关键词 登陆舰艇; 螺旋桨力; 操纵运动

两栖作战是海军的主要作战样式之一, 在岛礁夺控、区域控制、全域作战等领域有广阔的运用空间。两栖作战之所以复杂和困难, 一是难在其作战空间位于海与岸衔接处, 水文复杂、地形陌生, 很难进行实际演练; 二是难在其背水攻坚、协同复杂, 对指挥、控制、保障等的要求高。登陆舰是两栖作战中的主要输送装备, 以装载、航渡、抢滩等行动为登陆兵力兵器的上陆提供保障, 由于其在接近登陆地域作抵滩、退滩等运动时主要在近岸区, 受浅水、岸壁、风流、潮汐、底质、坡度、后锚、装载等影响明显, 运动规律异常复杂, 难以全面、综合地对以上影响因素进行定量分析, 直接影响了登陆舰操纵运动的仿真。

MMG 模型是 20 世纪 70 年代末日本拖曳水池委员会成立的船舶操纵运动数学模型小组(Ship Manoeuvring Mathematical Model Group)提出的一套船舶数学模型, 该模型的主要特点是将作用于船舶上的流体动力

和力矩按照物理意义, 分解为作用于裸船体、敞水螺旋桨和敞水舵上的流体动力和力矩, 以及他们之间的互相干涉流体动力和力矩^[1-2]。在 MMG 分离型船舶操纵运动模型和可靠的计算基础上, 建立了登陆舰艇在深水和浅水条件下的操纵运动数学模型, 有效地完成整个登陆舰艇操纵运动系统的整合表示, 该模型包含了风、流、车、舵、锚、缆、碰撞力模型^[3]。其中, 登陆舰艇在航行中, 螺旋桨推力是主控力, 用来克服水的阻力, 维持舰艇的操纵运动, 所以螺旋桨的流体动力模型是登陆舰艇运动建模的一个重要组成部分, 因此在建立了登陆舰艇特有的操纵运动模型的基础上, 着重介绍登陆舰艇操纵运动中螺旋桨力的模型。

1 建模的条件和要求

MMG 模型是对船舶在深层次的理论分析与广泛试

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2018-01-08

作者简介: 宋剑, 副教授, 研究方向为两栖作战, 电子信箱: jane0423@163.com

引用格式: 宋剑, 凌琳, 赵磊. 基于 MMG 登陆舰艇操纵运动模型的螺旋桨力研究[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 92-96. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.20.014

验研究相结合的基础上建立的,采用这种建模方法可构成具有相对于研究层次的精度模型^[4]。首先考虑登陆舰艇在静水面的水平操纵运动、常速域至低速域、漂角小于 30° 的情况,确定一个综合的、合适的,不随试验方法和状态而改变,而又可进行合理简化的操纵性方程,使之能科学正确地反映登陆舰艇在无限广水深下航行和操纵规律;然后通过非线性叠加的方法构建考虑浅水、岸壁、风流、潮汐、底质、坡度、后锚、装载等更复杂情况的模型^[5]。

模型坐标系的原点取在登陆舰艇的中心,取登陆舰艇的纵向速度 u 、横向速度 v 、转首速度 r 、舵角 δ 、主机转速 n 为数学模型的状态变量和控制变量,在后续仿真工作中前三者为输出量,后者为输入量。

2 登陆舰艇操纵运动方程模型

通过对MMG的修改^[6],建立登陆舰艇的操纵运动模型

$$\begin{aligned} & (m + \lambda_{11})\dot{u} - (m + \lambda_{22})vr - (mx_g + \lambda_{26})r^2 \\ & = X_H + X_P + X_R + X_A + X_W + X_C + X_L + X_S + (m + \lambda_{22})\dot{v} + \\ & \quad (m + \lambda_{11})ur + (mx_g + \lambda_{26})\dot{r} \\ & = Y_H + Y_P + Y_R + Y_A + Y_W + Y_C + Y_L + Y_S + (I_z + \lambda_{66})\dot{r} + \\ & \quad (mx_g + \lambda_{26})(\dot{v} + ur) \\ & = N_H + N_P + N_R + N_A + N_W + N_C + N_L + N_S + 2\pi(I_P + J_P)\dot{n}_p \\ & = Q_P + Q_E + Q_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中, m 是船体质量; X, Y, N 是作用在船舶重心的力和合力矩;其下标H、P、R、A、W、C、L、S分别表示船体、螺旋桨、舵、锚、风、流、缆和碰撞; Q_E, Q_P, Q_f 分别为主轴装置、螺旋桨的转矩和摩擦转矩。

以下风、流、车、舵、锚、缆、碰撞力模型需要考虑浅水影响,而浅水中的水动力导数可通过对深水中的水动力导数修正得到,即:

$$D_{SHW} = f(h)D_{dep} \quad (2)$$

式中, $h = d_m/H$, d_m 为平均吃水, H 为水深。

3 登陆舰艇螺旋桨力的计算模型

登陆舰艇螺旋桨的流体动力模型^[7-8]是登陆舰艇运动建模的一个重要组成部分,螺旋桨的推力计算方法

一般是使用敞水螺旋桨的试验结果,即螺旋桨单独地在均匀水流中工作时的流体动力特征。并在此基础上,考虑船体对螺旋桨的影响(伴流)以及螺旋桨对船体的影响(推力减额),再计入舵对螺旋桨的干扰,那么单螺旋桨的推力为

$$X_p = (1 - t_p)\rho n^2 D_p^4 K_T(J_p) \quad (3)$$

式中, t_p 为推力减额系数; K_T 为螺旋桨的推力系数; n 为螺旋桨转数; D_p 为螺旋桨直径。

3.1 船体对螺旋桨的干扰流体动力系数——伴流系数的确定

1) 伴流的成因与组成分析。

船舶以某速度 V 航行时,附近的水受到船体的影响而产生运动,其表现为船体周围将存在一股水流以某一速度随船前进,这股水流称为伴流。伴流的存在使得螺旋桨附近流场中水流对桨的相对速度和船速不同,从而使螺旋桨产生的推力与敞水螺旋桨不同。两者的差即为船体对螺旋桨干涉的流体动力。

产生伴流的原因一般有以下3种情况:1) 船身周围的流线运动,首尾处的水流具有向前的速度,称为正伴流;而在船侧处的水流具有向后的速度,称为负伴流。2) 水的黏性作用,通常称为摩擦伴流。摩擦伴流速度在紧靠船身处最大,由船身向外急剧减小,离船体远处即迅速消失,但在船后一定的相当距离内依然存在。3) 船舶的兴波作用。船舶在航行时水面形成波浪,若螺旋桨附近恰为波峰,水质点具有向前速度,如若恰为波谷,则具有向后的速度。

船后伴流的速度场异常地复杂,伴流速度在螺旋桨盘面各点处大小和方向各不相同。这样我们可以把伴流速度场用相对于螺旋桨的轴向速度、周向速度和径向速度3个分量来表示,经过实际测量,与轴向速度比较,周向和径向两种速度分量为较小的二阶量,因此下面着重讨论伴流的轴向伴流速度计算。

这样考虑伴流组成,当利用螺旋桨敞水图谱求推力时,常取盘面处伴流的平均轴向速度近似估算桨盘面处的速度场。若船速为 V ,桨盘面伴流的平均轴向速度为 u_a ,则螺旋桨与该处水流的相对速度(即进速) V_A 为

$$V_A = V - u_a \quad (4)$$

根据伴流的成因,可以将伴流速度 u_a 写为

$$u_a = u_t + u_f + u_w \quad (5)$$

式中, u_i 为桨盘面处势伴流的轴向平均速度; u_f 为桨盘面处摩擦伴流的轴向平均速度; u_w 为桨盘面处波浪伴流的轴向平均速度。

2) 伴流系数的确定。

当考虑船舶纵向运动时, 伴流系数与船型、螺旋桨尺度及螺旋桨与船体之间的相对位置等因素有关, 故决定伴流系数一般采取进行专门的模型试验。在无法进行模型试验的情况下, 为了达到仿真的一定精度, 采取用合适的经验公式进行估算。

此时求解的伴流系数 w_{p_0} 用巴普米尔公式进行计算, 另外因为资料限制, 此时使用霍尔特洛公式中用于双桨船的一套公式, 即

$$w_{p_0} = 0.165 C_b^x \sqrt{\frac{\sqrt[3]{\nabla}}{D_p}} - \Delta w \quad (6)$$

式中, x 为指数, $x=1$ 时适用于中线处的螺旋桨, $x=2$ 时适用于船舷侧螺旋桨; Δw 为伴流系数修正值, 由下式决定:

$$\Delta w = \begin{cases} 0.1(F_r - 0.2) & F_r \geq 0.2 \\ 0 & F_r \leq 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

此时取船速为 15 kn, 即 7.72 m/s, $F_r=0.306$, 经过计算可以得到 w_{p_0} 为 0.057。

当考虑到船舶横向和旋转运动伴流的影响时, 螺旋桨的伴流因子为 $1-w_p$, 它表示了船体对螺旋桨的干扰, 且随船舶的运动而变化, 一般它用直航时的伴流来表示。MMG 提出了多种表达式, 本文采用葛西表达式的形式:

$$w_p = w_{p_0} \cdot \exp(-4.0 \cdot \beta_p^2) \quad (8)$$

式中, $\beta_p = \beta - l'_p \cdot r'$, l'_p 为试验系数, 其值大致与螺旋桨的 X 坐标 X'_p 相一致, 一般瘦长型船取值 -0.5。

$$V_A = (1 - w_{p_0})V \quad (9)$$

$$u_p = (1 - w_p)u \quad (10)$$

如果再考虑螺旋桨负荷对伴流系数的影响, $1-w_p$ 除随船舶的运动状态变化外, 还随螺旋桨的负荷系数而变化。就直航伴流系数而言, 可表示为

$$(1 - w_{p_0}) = c_1 + c_2 J_p + c_3 J_p^2 \quad (11)$$

式中, $J_p = u_p / n D_p$; c_1, c_2, c_3 为试验数据。

直航伴流系数还与船尾形状有关, 松本宪洋给出了估算直航伴流系数的估算式

$$(1 - w_{p_0}) = \left[-1.12 \left(\frac{H_R}{D_p} \right) + 2.44 \right] \cdot \left[-0.0066 \left(r_A \cdot \frac{L}{D_p} \right) + 0.66 \right] \quad (12)$$

式中, H_R 为舵高, r_A 为舵处的伴流。

3.2 螺旋桨对船体的干扰流体动力系数——推力减额系数的确定

一般定义推力减额与推力的无量纲比值为推力减额系数, 推力减额系数的大小与船型、螺旋桨尺度、螺旋桨负荷以及船体之间的相对位置有关。但一般认为推力减额系数仅与螺旋桨的负荷系数有关, 而忽略舰型的影响, 直航时的推力减额系数可表示为

$$(1 - t_{p_0}) = 0.9806 - 0.1859J \quad (13)$$

式中, $J = V_A / n D_p$ 为螺旋桨的进速系数, 当船速为 15 kn 时, 即 463 m/min, 其主机转速为 580 r/min, 再根据 $V_A = (1 - w_{p_0})V$, 即可得进速系数 $J=0.458$ 。

考虑到横向与旋转运动对推力减额系数的影响, 根据松本宪洋的研究表明, 运动中的推力减额等于直航阻力的推力减额及由于操纵运动引起的推力减额增量之和^[9]。即

$$(1 - t_p) = (1 - t_{p_0}) + \Delta f \quad (14)$$

式中, Δf 为操纵运动引起的推力减额, 其表达式为

$$\Delta f = k_t \cdot \beta_R \quad (15)$$

式中, β_R 为舵处的漂角, 其表达式为 $\beta_R = -(180/\pi) \text{tg}^{-1} [(V' - 0.5r')/u']$, 该式中, u' , V' , r' 分别为船舶纵向速度、横向速度及旋回速度的无因次值。

当船舶直航时, 几何漂角为 0, 此时 $(1 - t_p) = (1 - t_{p_0})$ 。对于本文中的 037II 型舰艇, 根据 $J=0.458$ 则可求得 $t_p = 0.1044$ 。

3.3 推力系数的确定

螺旋桨推力一般有 2 种途径求解: 一是利用流体力学方法进行理论计算, 另一种是进行试验直接测量。螺旋桨的理论计算方法现在还不完善, 尚未进入实用阶段。目前, 无论是进行螺旋桨设计, 还是研究船舶操纵特性, 都是采用试验方法获得螺旋桨推力^[10]。

螺旋桨的推力系数 k_T 可根据螺旋桨的敞水试验图谱得到。对于一般没有敞水桨图谱的船舶, 可根据瓦格宁根 B-系列图谱或苏联米尼奥维奇的多工况图谱得到。为计算方便, 李国定对米尼奥维奇的多工况图谱

回归后,得到下式:

$$k_{T_1} = (\theta - 0.8)(\theta - 1.1)/0.18k_{T_1} - (\theta - 0.5)(\theta - 1.1)/0.09 \cdot k_{T_2} + (\theta - 0.5)(\theta - 0.8)/0.18 \cdot k_{T_3} \quad (16)$$

式中, θ 为螺旋桨的盘面比; k_{T_1} 、 k_{T_2} 、 k_{T_3} 分别为盘面比 0.5、0.8、1.1 时 K_T 值。

$$k_{T_i} = f(P/D_p, J_s) \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

式中, P 为螺旋桨螺距; D_p 为螺旋桨直径; $J_s = (1 - w_p) \cdot U / (n \cdot D_p)$ 为螺旋桨负荷系数。

3.4 螺旋桨推力计算方程的合理简化及修正因子分析

关于螺旋桨横向力 Y_p 及横向力矩 N_p 的计算方程简化讨论如下。

螺旋桨横向力 Y_p 是由螺旋桨深沉比、伴流横向力、排出流横向力、斜流横向力共同决定的,其数值经过试验及计算发现,其与船体的横向力以及舵的横向力相比是一个非常小的量。因此本文中将 Y_p 和 N_p 归在裸船体动力模型中,此时单螺旋桨流体动力模型为下式,且不考虑修正:

$$\begin{cases} X_p = (1 - t_p)T \\ Y_p = 0 \\ N_p = 0 \end{cases} \quad (18)$$

至于双螺旋桨的数学模型,式中 T 为单螺旋桨的推力,此处增加影响修正系数 ω_3 , 因为双螺旋桨船螺旋桨舵力的模型少见文,因此增加 ω_3 , 意为表现两部螺旋桨间的影响,对其加以修正。

此外当船舶操舵机动时,操纵运动引起的推力影响不能忽略,因此这里记入下面的修正

$$(1 - t_p) = (1 - t_{p0}) + \omega_4 \quad (19)$$

增加第 4 个修正系数 ω_4 , 最终式(18)变为

$$\begin{cases} X_p = 2\omega_3 [(1 - t_{p0}) + \omega_4]T \\ Y_p = 0 \\ N_p = 0 \end{cases}$$

4 结论

MMG 模型是建立在深层次的理论分析与广泛的试验研究相结合基础上的,根据在建模过程中发现的非线性影响关系,寻求并加入了合理的修正因子。采用这种建模方法可构成具有相对于研究层次的精度模型,以用于弥补传统船舶操纵运动仿真研究中工作量大、耗费人力物力、精度不够等问题。本文的研究成果不但说明了该方法的可行性及优缺点,更对登陆舰的深水操纵性能具有重要的意义,同时对其他舰型的操纵性仿真和预报都具有可移植性。

参考文献(References)

- [1] Clarke D. The application of manoeuvring criteria in hull design using liner theory[J]. Trans RINA, 1983, 125: 45-68.
- [2] Kijima K, Katsuno T, Nakiri Y, et al. On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition[C]. Journal of the society of naval architects of Japan, 1990(168): 141-148.
- [3] 陈小军, 曾芬芳, 林剑柠. 基于水动力模型的舰船航态的模拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 376-377.
- [4] 贾乐平, 杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999: 62-63.
- [5] 李百奇, 朱德祥, 何术龙. 中国船舶科学研究中心关于船舶性能新技术的研究进展[J]. 中国造船, 2006, 47(3): 1-13.
- [6] 吴秀恒, 刘祖源, 施生达, 等. 船舶操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 75-119.
- [7] 林莉, 万德钧, 李滋刚. 基于人工神经网络的船舶运动数学模型的辨识[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(2): 71-74.
- [8] Bohlmann H J. Prediction of submarine manoeuvrability[J]. Naval Forces, 1989, 10(5): 94-97.
- [9] Hess J L, Smith A M. Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies[J]. Journal of Ship Research, 1964, 8(2): 22-24.
- [10] 安卫, 陈新传, 赦晨阳. 基于 Matlab/Simulink 的气垫船动力系统仿真研究[J]. 船舶工程, 2007(1): 5-8.

Propeller force of landing ship maneuvering model based on MMG

SONG Jian, LING Lin, ZHAO Lei

Unit 91976 of PLA, Guangzhou 510430, China

Abstract Landing ship is an important transport equipment in amphibious warfare. Aiming at the complexity of its motion law, a maneuvering model of landing ship based on MMG is established in deep and shallow water. When a landing ship is sailing, the thrust of the propeller is the main force, which is used to overcome the resistance of the water and maintain the maneuvering motion of the ship. Therefore, the hydrodynamic model of propeller is an important component of landing ship motion modeling. On the basis of the special maneuvering model of landing ship, the model of propeller force in maneuvering motion of landing ship is emphatically introduced.

Keywords landing ship; propeller force; maneuvering motion ●



(责任编辑 王志敏)