

“育鹏”轮斜航水动力数值计算及运动仿真

苑 洋¹, 张秀凤^{*1}, 周佳其¹, 马利华²

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;

2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 为了建立高精度船舶运动数学模型,以目前国内最大、最先进的大连海事大学教学实习船“育鹏”轮为研究对象,采用计算流体力学方法,分别对该船模压载状态下的直航运动和斜航运动水动力进行数值计算,将直航阻力系数计算结果与船模物理水池试验数据进行比较,验证了计算方法的可行性;对斜航水动力系数和力矩系数利用最小二乘法进行多项式拟合求取相关操纵性斜航水动力导数,代入“育鹏”轮六自由度运动数学模型中,用于预报和运动仿真.将部分仿真试验结果与实船海试数据进行对比,吻合较好,误差均在12%以内,验证了数学模型的正确性,提高了航海模拟器数学模型的精度.

关键词: “育鹏”轮;水动力导数;计算流体力学;船舶运动数学模型;斜航运动

中图分类号: U661.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201906009

0 引言

各国之间的贸易在世界经济全球化影响下越来越频繁,货物运输量不断上升.而船舶作为货物运输的主力军,正朝着大型化、紧密化和多样化发展,但是却忽略了船舶操纵性,导致操纵性变差,大大增加了海事事故发生的可能性^[1].海事事故发生的众多复杂原因中,最主要的两类原因:一是船舶的操纵性在最初设计上就存在问题;二是当船舶在风浪中运动时,驾驶员未能全面考虑船舶的耐波性,发出不适合甚至致命失误的指令,最终导致船舶事故的发生.为此,IMO于1993年通过了A.751(18)船舶操纵性暂行标准决议^[2],在此基础上,2002年又通过了MSC.137(76)船舶操纵性标准决议^[3],使船舶操纵性有了更加规范和具体的要求.

利用船舶运动数学模型进行运动仿真,是目前研究船舶操纵性和耐波性的一种有效方法^[4].对其系统的研究始于20世纪40年代由Davidson和Schiff提出的船舶操纵运动方程^[5].经过多年的探索和发展,船舶运动数学模型主要有两大学派:一是欧美学派的整体型模型,二是日本学派的

分离型模型.整体型模型由美国学者Abkowitz^[6]于1964年在丹麦水动力研究所的一次报告中提出,其思路是将船、桨、舵看作一个整体,将船体的水动力导数泰勒展开到3阶.分离型模型由日本船舶操纵性数学模型小组(Mathematical Modeling Group,简称MMG)于20世纪70年代末提出,其思路是将船体、螺旋桨、舵的各自性能分开讨论,但同时也考虑三者之间的相互干扰影响^[7].船舶运动数学模型的研究多注重静水中的船舶操纵性,随着研究的深入,静水中的船舶三自由度运动数学模型已经满足不了仿真需求,大量学者致力于完善船舶六自由度运动数学模型.

水动力导数是船舶运动数学模型的一项重要参数.之前水动力导数的获取大多通过试验法或者经验公式,前者所获取的水动力导数精度较高,但需要进行大量试验,耗时长,所需经费高;后者是基于已有试验资料通过估算拟合所得,方便使用但精度较低.随着科技的进步,采用计算流体力学(computational fluid dynamics,简称CFD)方法进行数值模拟实船试验兴起,该方法不仅可以比较精确地求取水动力导数,而且计算方便、费用较低,逐渐成为求取水动力导数的主流方法.本

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779029); 极地船舶航行安全研究中心开放基金项目(3132019306).

作者简介: 苑 洋(1994-),男,硕士生,E-mail: yuanyang_dmu@163.com; 张秀凤*(1972-),女,教授,E-mail: zxfdmu@dlmu.edu.cn.

文以大连海事大学教学实习船“育鹏”轮为研究对象,基于 MMG 分离建模思想^[8],在前人研究的基础上建立“育鹏”轮六自由度运动数学模型,同时加入风的干扰,采用船舶 CFD 方法对船舶直航和斜航运动进行水动力数值计算,并利用最小二乘法求得操纵斜航水动力导数代入数学模型中进行运动仿真.其中采用船舶 CFD 方法求得的直航阻力系数和斜航水动力导数,在所有水动力导数中占主要部分,它们的精准与否直接影响船舶运动数学模型的精度.

1 “育鹏”轮六自由度运动数学模型

1.1 坐标系的建立

为研究船舶海上航行,一般采用两种坐标系,即空间固定坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$ 和随船运动坐标系 $O-xyz$.图 1(a)为空间固定坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$,通常选在海面上的一点作为固定坐标系的原点 O_0 , O_0x_0 轴指向正北, O_0y_0 轴指向正东, O_0z_0 轴指向地心;图 1(b)为随船运动坐标系 $O-xyz$,原点 O 选在船舶重心 G 处, Ox 、 Oy 、 Oz 轴分别指向船舶、右舷和龙骨方向.

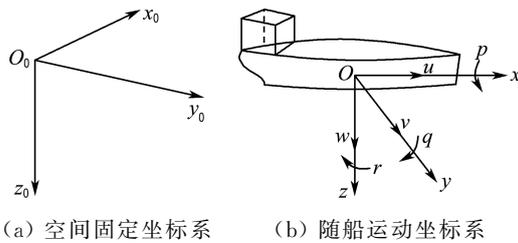


图 1 船舶运动坐标系

Fig. 1 Ship motion coordinate systems

1.2 船舶六自由度运动方程的建立

船舶六自由度的运动,受力十分复杂,为建立数学模型本文作出以下假设:

- (1)船舶为刚体;
- (2)船舶航行水域宽广;
- (3)分别考虑船体、螺旋桨和舵力.

将船舶运动六自由度之间的相互耦合解耦成纵荡、横荡、横摇和艏摇的耦合,纵摇和垂荡耦合的运动方式,建立以下 4+2 自由度的方程:

$$\begin{aligned} (m+m_x)\dot{u} - (m+m_y)vr &= X_h + X_p + X_r + X_{wind} \\ (m+m_y)\dot{v} + (m+m_x)ur &= Y_h + Y_p + Y_r + Y_{wind} \\ (I_{xx} + J_{xx})\dot{p} &= K_h + K_p + K_r + K_{wind} \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N_h + N_p + N_r + N_{wind} \end{aligned} \quad (1)$$

$$(m+m_z)\dot{w} = Z_h + Z_p + Z_r + Z_{wind} \quad (2)$$

$$(I_{yy} + J_{yy})\dot{q} = M_h + M_p + M_r + M_{wind}$$

式中: m 表示船舶质量; m_x 、 m_y 、 m_z 表示附加质量; I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 分别表示绕 Ox 、 Oy 、 Oz 轴的转动惯性矩; J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{zz} 分别表示绕 Ox 、 Oy 、 Oz 轴的附加转动惯性矩;下标 h、p、r、wind 分别表示裸船体的黏性类水动力和力矩、螺旋桨力和力矩、舵力和力矩、风的干扰力和力矩; u 、 v 、 w 、 p 、 q 、 r 分别表示船舶的纵向、横向和垂向的速度及横摇、纵摇和艏摇的角速度.

1.3 力和力矩的计算

根据方程(1)将作用在船体上的各种力和力矩分别按裸船体、螺旋桨、舵、风等的力与力矩进行计算^[9-12].其中量纲一化的直航阻力 $X'(u')$ 和斜航水动力导数 Y'_v 、 N'_v 、 Y'_{vv} 、 N'_{vv} 本文采用 CFD 方法进行数值计算得出.

2 数值计算

2.1 船体几何模型及计算域建立

CFD 的求解过程通常分为 3 个步骤:前处理、数值求解和后处理.前处理主要用来划分计算域的网格,划分网格前还要借助 CATIA 软件建立船体三维几何模型,之后利用专业的前处理软件 ICEM 进行网格划分,再利用 Fluent 软件进行数值求解.后处理主要用于观察和分析仿真结果,Fluent 软件配有后处理器,可直接使用.

本文研究对象为“育鹏”轮,所建立的船体三维几何模型采用的是其物理水池试验中的船体模型,缩尺比为 1 : 30.18,实船及船模的主要参数如表 1 所示.利用 CATIA 软件建立的船体三维几何模型如图 2 所示.对船模沿水线面进行划分,获得“育鹏”轮的浸湿面积.

表 1 “育鹏”轮实船和船模主要参数

Tab. 1 Principal particulars of YU PENG ship and its model

| 实船或船模 | 船长/ m | 船宽/ m | 型深/ m | 平均吃水/m | 浸湿面积/m ² |
|-------|-----------|----------|----------|---------|---------------------|
| 实船 | 189.000 0 | 27.800 0 | 15.500 0 | 6.300 0 | 5 495.320 0 |
| 船模 | 6.262 4 | 0.921 1 | 0.513 6 | 0.208 7 | 6.033 3 |

设计合适的计算域,是为了在保证计算精度的前提下,提高计算效率,减少计算消耗的资源和时间.为此,将建立好的“育鹏”轮船体三维几何模型导入 ICEM 网格划分软件中建立计算域.将计

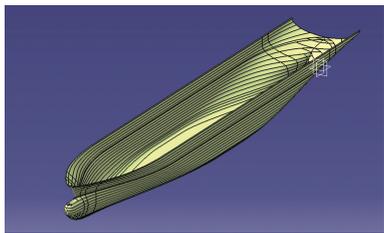


图 2 “育鹏”轮三维几何模型

Fig.2 3-D geometric model of YU PENG

算域的入口选在距离船艏 1 倍船长的位置,出口选在距离船艉 2 倍船长的位置,左右侧面分别在距离船中线面 6 倍船宽的位置,底面选在距离自由液面 4 倍吃水深度的位置.另外,本文主要研究船体在水中的受力情况,忽略空气阻力,船舶水线面上船体相对水下部分来说受力很小,因此本文选取“育鹏”轮自由液面以下部分进行计算.其计算域如图 3 所示.

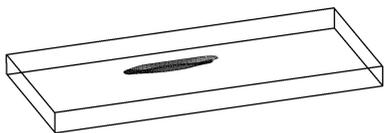


图 3 计算域

Fig.3 Computational domain

在整体网格划分过程中使用的是混合网格.由于球鼻艏和船艉的曲率变化较大,结构网格划分难度大,一般在船体周围使用非结构网格,但是会导致网格质量低,可能会影响计算结果.而本文为了提高网格质量,提升计算结果的准确性,在船体周围使用结构网格划分.结构网格的优点在于,在靠近船体表面处可以自动生成边界层网格,且边界层网格疏密及第 1 层网格高度可以精准控制,这样不仅网格数量不会太大,而且计算精度高.混合网格具体划分步骤如下:

(1)对导入的船体三维几何模型进行拓扑构建,可以对模型进行检查和修补,改进第三方建模软件造成的模型误差.

(2)在船体模型周围建立合适的六面体将其包在内部,创建初始 Block,方便之后进行结构网格的切分.

(3)在船艏和船艉处进行切割.切割时要注意及时建立映射关系,及时移动 Vertice 至合适位置并根据划分网格的需要不断进行调整.切割时要注意进行节点三角合并和选择性 Y 形切分.为

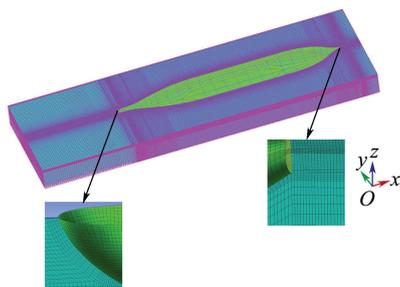
了保证 Block 的贴合度,尽可能在曲率大的地方多切分.

(4)删除无用 Block.本文主要对船体所在流场进行数值模拟,将船体内部的 Block 删除,节省计算资源.

(5)定义网格参数.设置好网格尺寸,同时对 Edge 的节点数和节点分布规律进行设置.

(6)预览网格,检查网格质量,观察有无负网格存在并不断进行修改完善.

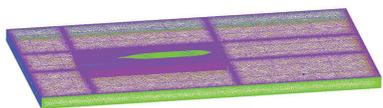
(7)建立外流计算域,设置好边界条件,利用 Body 创建外流计算域的非结构网格,设置全局网格参数与合适的节点数目,防止在与结构网格合并时纵横比过大,影响网格质量.生成非结构网格并进行光滑,提高网格质量,然后打开之前导出的结构网格合并生成最终混合网格,总网格数为 610 万,其中结构网格数为 500 万,非结构网格数为 110 万,具体见图 4.



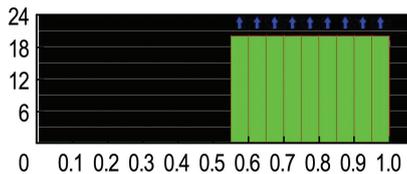
(a) 结构网格



(b) 船体网格



(c) 计算域网格



(d) 网格质量

图 4 网格划分

Fig.4 Meshing

(8)将内部六面体及所包裹的“育鹏”轮水下

模型进行旋转,切分好的 Block 也旋转同样的角度,生成结构网格,之后重复第(8)步,这样就生成了不同角度斜航运动的混合网格。

2.2 直航阻力系数数值计算

在 Fluent 软件中导入上一节所建立的网格文件,将结构网格与非结构网格的 Interface 进行合并,检查网格的质量较好,选择稳态模式,湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型;将计算域入口设置为速度入口边界,出口设置为 outflow 边界,顶面设置为对称面边界,左右侧面、底面和船体表面设置为壁面边界;求解器使用 SIMPLE 算法. 设置好参考值,以便阻力系数进行量纲一化计算和对比. 为了验证实际船舶航行时所受直航阻力的准确性以及模型的可靠性,本文通过对入口边界速度的改变,实现“育鹏”轮船模在压载状态下不同航速的直航模拟. 数值模拟计算结果见表 2.

表 2 总阻力系数

Tab. 2 Total resistance coefficient

| 航速/kn | 数值计算值/ 10^{-3} | 水池试验值/ 10^{-3} | 相对误差/% |
|-------|------------------|------------------|--------|
| 13.0 | 3.141 5 | 2.830 7 | 11.0 |
| 14.0 | 3.104 4 | 2.817 3 | 10.2 |
| 15.0 | 3.150 6 | 2.819 0 | 11.8 |
| 16.0 | 3.129 4 | 2.822 4 | 10.9 |
| 17.0 | 3.156 8 | 2.819 6 | 12.0 |
| 18.0 | 3.137 2 | 2.816 8 | 11.4 |
| 19.0 | 3.162 2 | 2.862 3 | 10.5 |

数值计算结果与物理水池试验结果相比,误差小于 12%,因此 CFD 数值计算方法可以应用于航海模拟器中的船舶运动数学模型的建立,计算方法合理可信。

2.3 斜航水动力导数数值计算

通过对直航阻力数值计算和对比,验证了此方法的可行性,接下来对斜航水动力导数进行数值计算. 将压载状态下漂角为 10° 、 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 45° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 和 90° 的船舶计算域网格文件分别导入 Fluent 软件,流场速度统一设置为 9.003 m/s ,其余条件设置与直航数值模拟相同. 计算稳定后的侧向水动力系数和力矩系数见表 3.

考虑到船舶左右对称, $Y_0 = N_0 = 0$,斜航水动力导数的数学表达式为^[13]

$$\begin{aligned} Y' &= Y'_v v' + Y'_{vvv} v'^3 / 6 \\ N' &= N'_v v' + N'_{vvv} v'^3 / 6 \end{aligned} \quad (3)$$

表 3 侧向水动力系数和力矩系数

Tab. 3 Lateral hydrodynamic coefficient and moment coefficient

| 漂角/ $^\circ$ | 量纲一化横向速度 | 侧向水动力系数 | 力矩系数 |
|--------------|----------|----------|----------|
| 10 | 0.173 6 | -0.046 1 | -0.005 3 |
| 20 | 0.342 0 | -0.093 7 | -0.010 5 |
| 25 | 0.422 6 | -0.118 3 | -0.013 0 |
| 30 | 0.500 0 | -0.143 4 | -0.015 4 |
| 40 | 0.642 8 | -0.194 4 | -0.019 9 |
| 45 | 0.707 1 | -0.219 8 | -0.021 9 |
| 50 | 0.766 0 | -0.244 5 | -0.023 8 |
| 60 | 0.866 0 | -0.289 9 | -0.027 0 |
| 70 | 0.939 7 | -0.326 6 | -0.029 4 |
| 80 | 0.984 8 | -0.350 4 | -0.030 8 |
| 90 | 1.000 0 | -0.358 8 | -0.031 3 |

利用最小二乘法对量纲一化的压载斜航水动力导数进行多项式拟合,拟合结果如图 5 所示,最后求得的结果为 $Y'_v = -0.234 1$, $Y'_{vvv} = -0.526 2$, $N'_v = -0.027 8$, $N'_{vvv} = -0.004 24$.

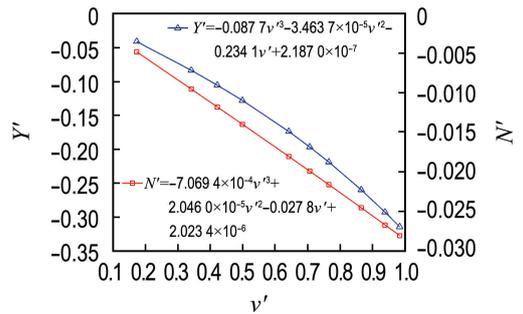


图 5 不同漂角下侧向水动力与力矩曲线
Fig. 5 Curves of lateral hydrodynamic force and moment at different drift angles

3 运动仿真试验

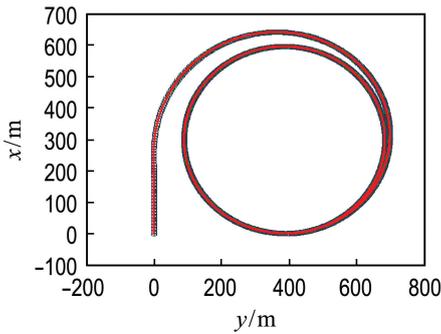
将数值计算得到的量纲一化直航阻力系数和斜航水动力导数代入“育鹏”轮六自由度运动数学模型中,以 Visual Studio 2013 作为编程工具来构建船舶运动仿真平台进行运动仿真试验。

3.1 实船海试条件下的右旋回仿真试验

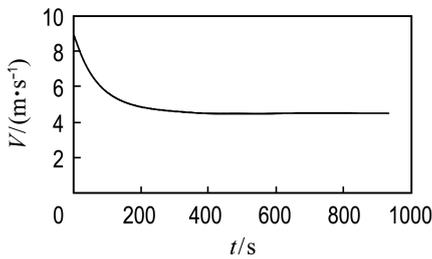
试验方案 1 3 级北风(风向 0°)中,“育鹏”轮在压载状态下达到稳定航速 18.17 kn 后,操右满舵 35° ,使船舶进行旋回运动。

图 6(a)为船舶总体运动轨迹变化. 观察图 6(b)可知,船舶的航速刚开始迅速下降,慢慢逐渐稳定在 4.47 m/s 上下. 观察图 6(c)可知,船舶的横摇角不断波动,最后趋于稳定,但由于受微风

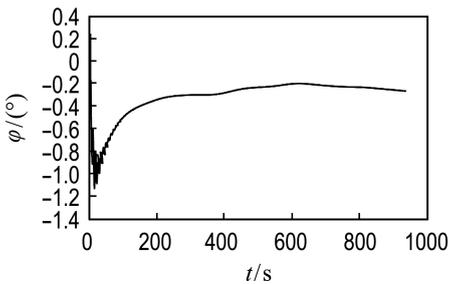
的影响,最后横摇角在向左倾斜 0.25° 不断变动,最大横摇角为 1.13° . 观察图 6(d)可知,艏摇角速度在旋回时先上升后下降,最后稳定在 $0.65^\circ/\text{s}$ 上下.



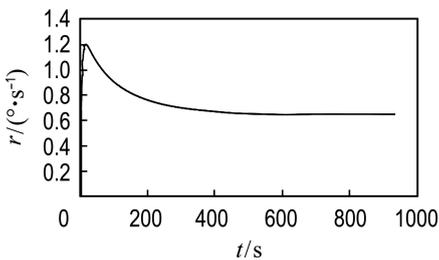
(a) 右旋回运动轨迹



(b) 船舶速度历时曲线



(c) 横摇角历时曲线



(d) 艏摇角速度历时曲线

图 6 右旋回仿真试验结果

Fig. 6 Simulation result of starboard turning test

通过表 4 中的相对误差可以看出,右旋回仿真试验结果与实船试验符合度较好,最大误差不超过 10%.

表 4 右旋回圈要素对比

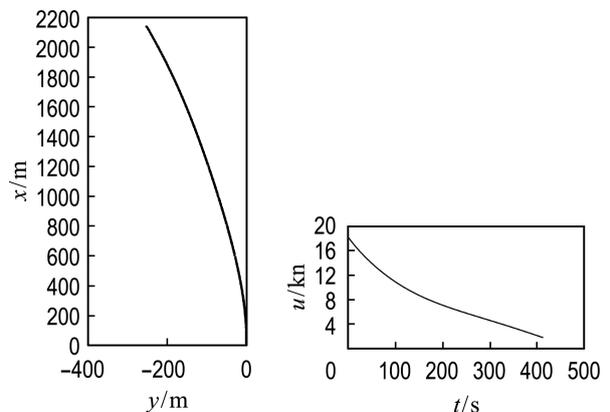
Tab. 4 Comparison of starboard turning circle parameters

| 90°时间 | | | 180°时间 | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 仿真数据/s | 实船数据/s | 相对误差/% | 仿真数据/s | 实船数据/s | 相对误差/% |
| 114 | 126 | 9.5 | 206 | 228 | 9.6 |
| 270°时间 | | | 360°时间 | | |
| 仿真数据/s | 实船数据/s | 相对误差/% | 仿真数据/s | 实船数据/s | 相对误差/% |
| 322 | 345 | 6.7 | 456 | 472 | 3.4 |
| 纵距 | | | 横距 | | |
| 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% | 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% |
| 640.74 | 686.48 | 6.7 | 361.19 | 398.36 | 9.3 |
| 战术直径 | | | 回转直径 | | |
| 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% | 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% |
| 697.86 | 715.04 | 2.4 | 606.86 | 633.36 | 4.2 |

3.2 实船海试条件下的倒车停船仿真试验

试验方案 2 3 级北风(风向 0°)中,“育鹏”轮在压载状态下,将主机转速增加到 101 r/min 全速前进,待航速稳定后,将主机转速降至 -70 r/min 全速倒车. 初始航速为 18.17 kn, 结束航速为 1.82 kn.

“育鹏”轮全速倒车停船试验运动轨迹如图 7(a)所示,图 7(b)为船舶的航速变化曲线. 通过表 5 仿真试验结果与实船试验结果相比较,误差小于 10%,可以看出倒车停船仿真试验与实船试



(a) 全速倒车停船轨迹 (b) 全速倒车停船航速变化曲线

图 7 倒车停船仿真结果

Fig. 7 Simulation result of crash stop test

表5 倒车停船试验数据对比

Tab.5 Comparison of crash stop test data

| 起始航速 | | | 结束航速 | | |
|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| 仿真数据/kn | 实船数据/kn | 相对误差/% | 仿真数据/kn | 实船数据/kn | 相对误差/% |
| 18.17 | 18.0 | 0.9 | 1.82 | 1.84 | 1.1 |
| 试验时间 | | | 试验距离 | | |
| 仿真数据/s | 实船数据/s | 相对误差/% | 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% |
| 413 | 401 | 3.0 | 2 204.17 | 2 013.54 | 9.5 |
| 纵距 | | | 横距 | | |
| 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% | 仿真数据/m | 实船数据/m | 相对误差/% |
| 2 122.41 | 1 931.78 | 9.9 | 252.03 | 256.73 | 1.8 |

验符合度较好。

3.3 实船海试条件下的Z形仿真试验

试验方案3 3级北风(风向0°)中,“育鹏”

轮在压载状态下以18.17 kn航速匀速前进几分钟后向右操10°舵,保持;当船艏向右偏离原航向10°时,再向左操10°舵,并保持;当船艏向左偏离初始航向10°时,向右操10°舵,保持.如此反复操舵4次,结束试验。

10°/10° Z形试验结果如图8所示.表6给出了10°/10° Z形试验仿真试验结果与实船数据的对比,可以看出仿真试验与实船试验误差在12%

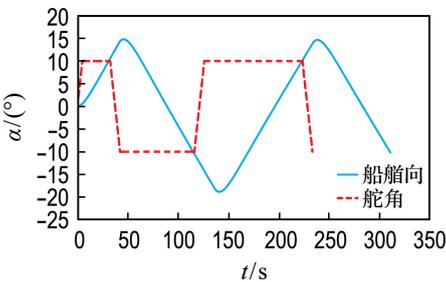


图8 10°/10°Z形试验

Fig.8 10°/10° Zigzag test

表6 10°/10° Z形试验超越角对比

Tab.6 Comparison of 10°/10° zigzag test overshoot angle

| 第1超越角 | | | 第2超越角 | | |
|----------|----------|--------|----------|----------|--------|
| 仿真数据/(°) | 实船数据/(°) | 相对误差/% | 仿真数据/(°) | 实船数据/(°) | 相对误差/% |
| 4.8 | 4.3 | 11.6 | 8.1 | 8.9 | 9.0 |

以内,符合度较好。

4 结 语

本文采用船舶CFD数值计算方法对压载状态下的“育鹏”轮直航和不同漂角下的斜航运动进行水动力数值计算和模拟,利用最小二乘法得到相应的操纵斜航水动力导数.综合船舶操纵性与耐波性,建立了风干扰下的船舶六自由度运动数学模型,并将CFD数值计算求得的直航阻力系数和斜航水动力导数代入数学模型,完成了船舶运动仿真平台的搭建,对“育鹏”轮进行了各种仿真试验,验证了船舶运动数学模型的准确性,为船舶操纵水动力导数的计算在无水池试验设备情况下提供了一种有效方法。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国务院. 船舶工业加快结构调整促进转型升级实施方案(2013—2015年) [EB/OL]. (2013-08-04). http://www.gov.cn/zwggk/2013-08/04/content_2460962.htm.

The State Council of the People's Republic of China. Implementation scheme of accelerating structural adjustment and promoting transformation and upgrading in shipbuilding industry (2013-2015) [EB/OL]. (2013-08-04). http://www.gov.cn/zwggk/2013-08/04/content_2460962.htm. (in Chinese)

[2] IMO. Interim standards for ship manoeuvrability: Resolution A. 751 (18) [S/OL]. [2018-12-06]. [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.751\(18\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.751(18).pdf).

[3] IMO. Standards for ship manoeuvrability: Resolution MSC.137(76) [S/OL]. [2018-12-06]. [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.137\(76\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.137(76).pdf).

[4] YANG Linjia, TAO Yihan. Calculation of regular longitudinal wave force in MMG model based on CFD [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2013, **423-426**: 1727-1731.

[5] DAVIDSON K, SCHIFF L. Turning and course keeping qualities of ships [J]. **Transactions of SNAME**, 1946, **54**(8): 152-188.

[6] ABKOWITZ M A. Lectures on ship hydrodynamics — steering and manoeuvrability [R]. Lyngby:

- Hydro- and Aerodynamics Laboratory, 1964.
- [7] 朱 军, 庞永杰, 徐玉如. 规则波浪中舰船操纵运动计算 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, **25**(1):1-5. ZHU Jun, PANG Yongjie, XU Yuru. Maneuvering prediction of a ship in regular waves [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, **25**(1):1-5. (in Chinese)
- [8] YASUKAWA H, YOSHIMURA Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions [J]. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 2015, **20**(1): 37-52.
- [9] 周昭明, 盛子寅, 冯悟时. 多用途货船的操纵性预报计算 [J]. 船舶工程, 1983(6):21-29,36. ZHOU Zhaoming, SHENG Ziyin, FENG Wushi. On Manoeuvrability prediction for multipurpose cargo ship [J]. *Ship Engineering*, 1983(6):21-29, 36. (in Chinese)
- [10] 李积德. 船舶耐波性 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007. LI Jide. *Seakeeping of Ships* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007. (in Chinese)
- [11] 贾欣乐, 杨益生. 船舶运动数学模型 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999. JIA Xinle, YANG Yansheng. *Mathematical Model of Ship Motion* [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999. (in Chinese)
- [12] 张秀凤, 尹 勇, 金一丞. 规则波中船舶运动六自由度数学模型 [J]. 交通运输工程学报, 2007(3):40-43. ZHANG Xiufeng, YIN Yong, JIN Yicheng. Ship motion mathematical model with six degrees of freedom in regular wave [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007(3): 40-43. (in Chinese)
- [13] 范余明, 盛子寅, 陶尧森, 等. 船舶在波浪中的操纵运动预报 [J]. 中国造船, 2001, **42**(2):26-33. FAN Sheming, SHENG Ziyin, TAO Yaosen, *et al.* Prediction of ship maneuvering motions in waves [J]. *Ship Building of China*, 2001, **42**(2): 26-33. (in Chinese)

Numerical calculation of oblique navigation hydrodynamics and motion simulation of YU PENG

YUAN Yang¹, ZHANG Xiufeng^{*1}, ZHOU Jiaqi¹, MA Lihua²

(1. School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to establish a high-precision mathematical model of ship motion, the domestic current most advanced teaching and practice ship YU PENG of Dalian Maritime University is taken as the research object, and the computational fluid dynamics method is applied to the ship model under ballast conditions. The numerical calculation of the hydrodynamics forces on the ship model in straight ahead motion and oblique motion is carried out. The calculation results of the resistance coefficient in straight ahead motion are compared with the physical model test data to verify the feasibility of the calculation method. For the hydrodynamic force and moment coefficients of oblique motion, the least squares polynomial fitting is used to obtain the relevant maneuvering hydrodynamic derivatives of oblique motion, which are substituted into the mathematical model of the six-degree-of-freedom motion of YU PENG for prediction and motion simulation. Comparing some simulation results with the actual ship sea trials data, the agreement is good, the error is within 12%, which verifies the correctness of the mathematical model and the accuracy of the mathematical model of the navigation simulator is improved.

Key words: YU PENG; hydrodynamic derivative; computational fluid dynamics; mathematical model of ship motion; oblique navigation motion