doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.01.007

动态海面上方船舶六自由度运动仿真

陈万紫, 张培珍*, 黄健儿, 区丽连
(广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

摘 要: 在 Fudide-Krylov 假设条件下, 依据船舶分离建模理论在固定和运动坐标系中计算海面船只六自由度运动数学模型。主要包括: 对风、浪、流的单独建模并进行矢量叠加, 并在风浪流联合作用下对船舶六自由度运动构建简化的数学建模, 完成实时仿真。基于 Simulink 和 V-Realm Builder 虚拟现实技术创建船舶运动模型、海洋表面环境及船只的几何模型, 对船舶六自由度运动进行视景仿真, 给出了有风无浪、有浪无风和风浪兼有三种情况下船只旋回路径和船舶运动轨迹。在 VR 视景浏览器中创建动态海面上船舶六自由度运动模型, 不仅易于实现且结果逼真。得到的结果为进一步研究动态船只目标声散射特性的精确预报提供基础。

关键词: 傅汝得-克雷洛夫假设; 六自由度; VR 与 Simulink; 视景仿真
中图分类号: P733.24　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-2029(2019)01-0040-06

在船舶六自由度运动数学模型方面, 近年来国内外已取得一定的研究成果, 综述船舶载荷和运动研究在船舶设计和运行研究中的重要意义。由于船舶六自由度运动方程比较复杂, 若利用传统的程序设计语言编制仿真软件, 计算量较大且不易调试, 不具备可移植性。近年来, 许多国内外专家和学者在船舶六自由运动仿真的发展和研究中做出了很大的贡献。徐静[1]等基于船舶六自由度操纵运动开展了一系列的试验和数值模拟研究。考虑三自由度船舶平面运动与横摇、纵摇、垂荡运动的耦合, 建立了波浪中船舶六自由度操纵耐波全运动模态的数学模型; Tahsin Tezdogan[2]使用非定常 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 求解器, 进行了浅水船舶运动的数值研究。使用全尺寸大型油轮模型作为案例研究来预测其在不同水深处的船艏部波浪的升沉和俯仰响应。与 3-D 理论模型进行了比较和验证; 吴汉才 [3] 以船舶自身为参考, 建立船舶坐标系 O-XYZ, 从船舶三自由度平面、横摇、纵摇、垂荡对船舶受力情况进行数学分析, 提出规则波浪下 S-175 集装箱船运动预报模型; Eirik Bøckmann[4]介绍了一种带有两个固定弓形金属薄片(波导)的油轮的模型试验, 完成船舶阻力的测量、波形推力和船舶运动, 并与时域仿真进行了比较, 作者使用略微修改的 Leishman-Beddoes 动态失速模型计算波形力, 其具有与船舶运动的双向耦合; 刘伟[5]等对船舶三自由度运动试验平台液压伺服控制系统进行了设计, 引入 PID 控制对液压伺服控制系统进行校正和补偿, 为三自由度模拟试验平台的设计和改进提供了一个参考; 吴成成等[6]采用 MMG 分离式船舶运动数学模型, 建立由拖轮、拖缆、被拖轮组成的拖航系统六自由度操纵运动模型, 编制仿真程序, 通过数值计算, 对该系统操纵运动进行仿真模拟; J. M. Varela[7]描述了一个模拟危机情况下船舶运动的软件系统。该情景包括遭受由随机海况产生的波激发力的受损船。模拟显示在交互式虚拟环境中的可视化船舶运动。旨在完成海面和船舶运动的数值模拟密集计算的实时、快速模拟, 开发用于及时分析船舶行为的专用工具。该系统可用于评估船舶对当前海况的

收稿日期: 2018-09-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11774299); 大学生创新创业项目资助"动态海面上方六自由度运动舰船虚拟现实可视化系统设计"
作者简介: 陈万紫(1995-), 男, 工学学士, 主要研究方向为海洋技术。E-mail:m13729030180@163.com
通讯作者: 张培珍, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水中目标特性与信号处理。E-mail:zpzhen7242@163.com

响应,即船舶运动的幅度,变化和趋势,并有助于救援行动的规划和协调;陈姚节等[8]建立基于 MMG 思想的船舶六自由度运动数学模型;通过有限差分法或有限元法求解 N-S 方程,得到流体质点在任意时刻的状态,进而得到波浪的形态,实现水域海洋的模拟。进行船舶摇荡运动时域仿真,分析船舶稳性变化;吴伟萍[9]基于海浪、海风、洋流等因素,建立多个力的作用下的横摇、垂荡、横荡等运动,结合传统的船舶耦合运动模型,建立了船舶迎浪航向下的运动模型,并进行了船舶垂荡运动的仿真分析,对提高船体稳定性有重要意义。 随着计算机仿真技术的迅速发展,船舶运动实时视景仿真技术又向前迈进了一大步,船舶实时仿真视景更加逼真,使船舶操纵者有置身其中的真实体验。在船舶六自由度运动模型研究方面,分为以 Abkowitz 为代表的整体性模型和以日本操纵性研究小组(MMG)提出的分离型模型。本文基于 Simulink 完成了动态海面上方六自由度船舶虚拟现实系统的设计,能够实时模拟船舶在海上以及各种天气情况下的六自由度运动规律 [10-12]。系统设计具有适应面广、结构和流程清晰、贴近实际、效率高的优点。海面舰船声散射特性的研究是水声研究领域一个重要的方面。通过对水面上方舰船建模,并对其方位特性、频率特性、回波结构等进行理论预报和模拟,利用目标的回声特性分析预测海面舰船的运动特性一直备受关注。水面目标声散射回波特性在实际运用过程中,通常从统计意义上对目标强度进行分析,论文所采用的方法可以有效地观测船舶运动姿态的同时实现船舶运动实时仿真,充分考虑船只的运动姿态,为更准确、真实地研究动态船舶目标声散射统计特性提供基础。

1　六自由度运行模型的简化与设计

1.1　坐标系

固定坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 对于水面船舶而言,通常选取海面或海中一点作为定系原点,Ox_1 保持水平(指向正北),Oy_1 水平 (指向正东),Oz_1 垂直于 Ox_1y_1 平面指向地心; 运动坐标系 $Oxyz$ 则选取船舶吃水面左右对称点作为坐标原点,Ox 指向舰首,Oy 指向右舷,Oz 垂直 Oxy 平面并指向龙骨方向。坐标系如图 1 所示。

1.2　仿真模型

在海面上运动的船舶可以看成刚体,研究其运动特性通常采用固定坐标系(定系)和运动坐标系(动系)。基于分离建模的思想,对船舶各自由度运动方程进行详细的推导[13-15],许多研究都是基于船舶标准运动方程基础,其中含有许多需要详细船舶设计资料才可计算的系数。通过大量实验和分析,本文在船舶标准方程上进行简化,建立仿真使用的船舶模型。

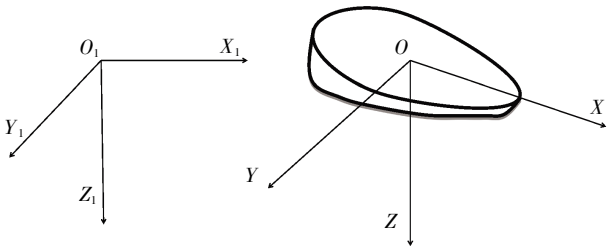


图 1　坐标系

Fig.1　Coordinate system

假设船舶原点在重心位置 $x_G=x_G=z_G$, 对船舶标准方程进行简化,得到船舶平移运动、旋转运动方程如式 1 所示[16]:

$$\begin{cases}(m+m_x)(u'-vr+wq)=X_P+X_R+X_{wind}+X_{wave}\\(m+m_y)(v'-wp+ur)=Y_P+Y_R+Y_{wind}+Y_{wave}\\(m+m_z)(w'-uq+vp)=Z_{wind}+Z_{wave}\\(I_{xx}+J_{xx})p'+(I_{zz}-I_{yy})rq=K_{wind}+k_{wave}\\(I_{yy}+J_{yy})q'+(I_{xx}-I_{zz})rp=M_{wind}+M_{wave}\\(I_{zz}+J_{zz})r'+(I_{yy}-I_{xx})pq=N_p+N_R+N_{wind}+N_{wave}\end{cases}\tag{1}$$

式中:m 为船舶质量;X,Y,Z,K,M,N 为船舶在运动过程中各自由度所受的总力和总力矩;u,v,w,p,q,r 分别为 Ox,Oy,Oz 轴的横荡、纵荡和垂荡的平移速度及横摇、纵摇和艏摇的角速度;I_{xx},I_{yy},I_{zz} 分别为绕 X,Y,Z 轴的转动惯量;J_{xx},J_{yy},J_{zz}, 分别为绕 X, Y,Z 轴的附加转动惯量。

2　V-Realm 视景模型的建立和驱动

2.1　海洋表面环境和船舶模型的建立

利用 MATLAB 中 V-Realm Builder 仿真软件创建船舶几何模型和海洋表面环境。通过 Elevation Gird 节点创建海面环境,在 Size 窗口修改海面仿真参数, 并对其进行美化处理。通过 Extrusion、Indexed Face Set 和 Box 节点建立船舶几何模型,节点个数和种类越多,船舶几何模型越精确。本文船舶几何模型总共 12 个节点, 其中 3 个 Extrusion 节点、8 个 Indexed Face Set 节点和 1 个 Box 节点,船

舶几何模型如图 2 所示。通过 Viewpoint 节点在适当的位置创建固定的视点,便于描述船舶实时运动姿态。

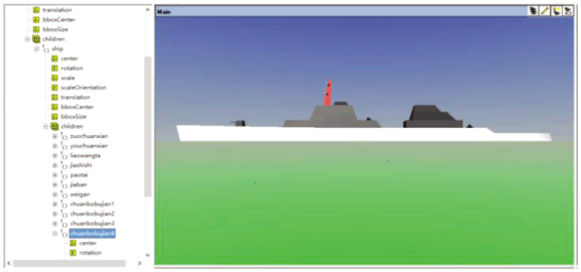


图 2 船舶几何模型(左为节点树状图、右为几何模型)

Fig.2 Geometry model of ship (The left diagram is node tree, the right is geometric model)

2.2 运动模型的创建及驱动

根据公式对环境干扰力、船舶六自由度运动数学模型、舵和螺旋桨力及力矩进行建模,运用 Simulink 模块链接,船舶六自由度运动模型子系统如图 3 所示。

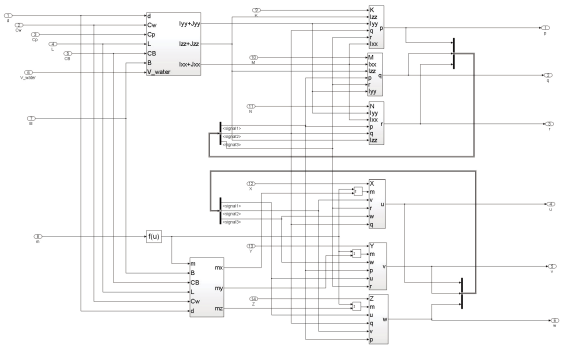


图 3 船舶运动数学模型

Fig.3 Mathematical model of ship motion

运用 VR Sink 模块,将 Simulink 控制舰船运动的仿真信号读入 VR Sink 模块中,借助 VRML 的 Transform 节点(translation 域定义模型的空间位置、rotation 域定义模型的旋转姿态、scale 域定义模型的比例大小),驱动虚拟环境中舰船实体进行实时运动,如图 4 所示。

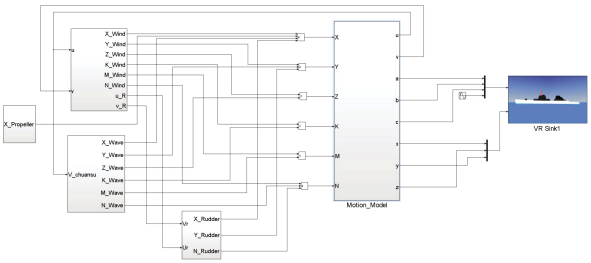


图 4 船舶六自由度运动仿真模型

Fig.4 Six-degree-of-freedom motion simulation model

3 仿真与分析

3.1 仿真结果

设置仿真参数(初始状态 [0 0]、仿真时间[0 3000]、最小仿真步长 25、Type 为 Variable-step、Solver 为 ode45);舰船按照仿真任务进行数字解算,并将舰船的状态信息实时发送至视景仿真处理;仿真计算机即时接受和处理信息后,视景模块进行实时动态显示。仿真过程中,为表现舰船运动特性,侧视图和正视图如图 5 所示。

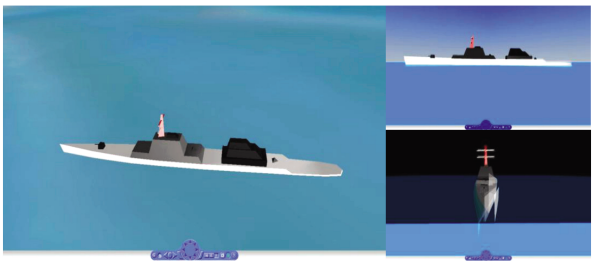


图 5 仿真效果图

Fig.5 Simulation view

根据运动数学模型得到船舶运动趋势:船舶在起初 20 s 内并没有明显的运动趋势,之后开始相对明显运动,横摇和纵摇具有明显运动趋势和运动方向,但纵摇很快被横荡所掩盖。之后船舶主要运动为横摇,其余都为次要运动。随着船舶在风浪流干扰下的运动,在 200 s 左右船舶发生回旋改变方向继续运行,并在之后的运动过程中船尾因为垂荡低于海面。在 500 s 时船舶发生第二次回旋改变方向,且船舶有明显的提速,1 200 s 时船舶发生第 3 次旋回,横摇和纵摇运动都比较明显。

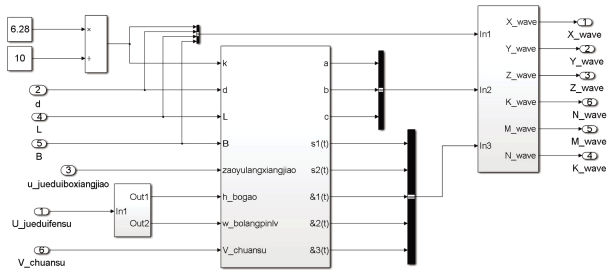
3.2 仿真分析

实验船参数见表 1,舵角 60°、风速 U=10 m/s(风速保持不变,风向角任意)波高 $h=0.015*U^2$、波浪周期 $T=-0.0014U^3+0.042U^2+5.6$[13]对有风无浪、有浪无风、有风有浪 3 种海况下的船舶运动进行仿真,其中风、浪的数学模型与船舶参数关系如图 6 所示。

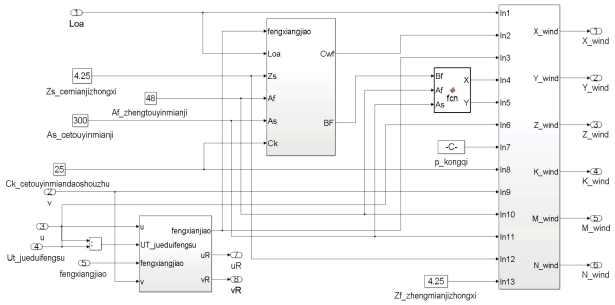
表 1 仿真船舶参数

Tab.1 Simulation ship parameters

总长 L_{oa}/m	两柱间长 L_{pp}/m	船宽 B/m	型深 D/m
139.80	130.55	20.8	11.40
设计吃水 d/m	方形系数 C_b	菱形系数 C_p	排水量 Δ/t
8.00	0.680	0.693	14 680



(a) 波浪力模块

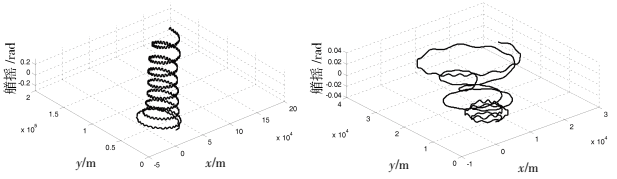


(b) 风力模块

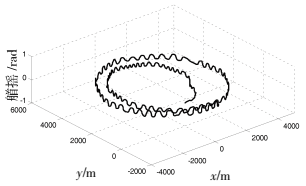
图 6　船舶参数与风、浪数学模型关系

Fig.6　Relationship between ship parameters and mathematical models of wave and wind

将 Simulink 中船舶横荡、纵荡和艏摇的数据以 mat 文件格式导出,对数据进行三维图形绘制,如图 7 所示,可以看出三种海况下船舶运动轨迹。波高和波频都是通过风速计算得出,则定常风单一作用于船舶时船只艏摇频率比随机浪单一作用时高很多,而当定常风和随机浪共同作用时,船只各自由度之间耦合相对加强, 则船只在艏摇的角度明显加强,但由于波向角为随机变量,变化强度并不固定。同时给出了风浪共同作用下横摇角度、横摇角速度、纵摇角度、纵摇角速度、艏摇角度、艏摇角速度的回旋周期的时间历程,仿真结果曲线如图 8 所示。



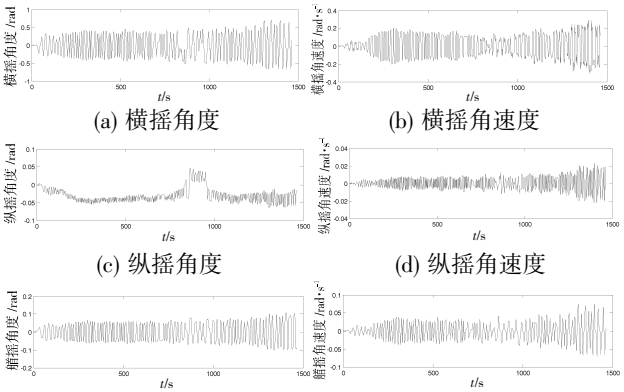
(a) 定常风　　(b) 随机浪



(c) 定常风和随机浪

图 7　3 种情况下船舶运动轨迹

Fig.7　Ship motion trajectory in three cases (a) Constant wind; (b) Random wave; (c) Constant winds and random wave



(a) 横摇角度　(b) 横摇角速度　(c) 纵摇角度　(d) 纵摇角速度　(e) 艏摇角度　(f) 艏摇角速度

图 8　仿真曲线

Fig.8　Simulation curve

(a) Roll angle; (b) Rolling angular velocity; (c) Pitch angle; (d) Pitch angular velocity; (e) Tilt angle; (f) Tilt angular velocity

从船舶运动轨迹中可以看出,定常风(风向角和风速一定)下的舰船旋回直径保持不变,舰船位置发生变化且可预测;随机浪(波高和波频一定、波向角随机变化频率 30s/次)下舰船位置发生了变化,且舰船旋回直径由于波向角的变化也发生相对的变化,舰船位置变化不可预测;定常风和随机浪共同作用时(不考虑风向角对波向角的影响),存在一部分力和力矩相互抵消,在舵角不变的情况下舰船旋回直径有减小的趋势。

4　结 论

本文基于 Fudide-Krylov 假设、利用 Simulink 建立船舶数学模型及其六自由度进行实时仿真。给出了固定风速、随机浪及风浪兼有 3 种情况下船舶的旋回轨迹和船舶运动路径,并对固定风速和随机浪的共同作用下船舶的旋转角度和角速度进行分析。在 VR 视景浏览器中对其进行观察船舶,仿真运动能够很好地体现船舶的运动视景。由于本文在适当的假设条件下对船舶六自由度进行仿真,与真实环境相比存在一定的误差。为提高精度,模型还需进一步完善海表环境,同时考虑侧舵对船舶六自由度的影响,增加船舶视景模型的节点等。对船舶运动趋势进行研究, 更加精确的对船舶进行观察,提高对船舶运动仿真的逼真度,为今后分析计算真实场景下船舶目标声散射统计特性提供有效依据。所以进一步研究工作的重点在于,考虑更为精确的

船舶六自由度影响的船舶声散射统计特性分析与验证。所得到的成果应用在船舶设计阶段,可以有效地对操纵性能进行预报,对船舶的航运驾驶训练有明显的实用价值。另一方面,能够比较真实地再现船只运行时的场景,为提高水面运动目标声学探测能力和识别精度提供基础。

参考文献:

[1] 徐静. 船舶在波浪中的六自由度操纵运动模型研究[D].上海:上海交通大学,2014.
Xu Jing. Research on six-degree-of-freedom maneuvering motion model of ship in wave [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.

[2] Tahsin Tezdogan, Atilla Incecik, Osman Turan. Full-scale unsteady RANS simulations of vertical ship motions in shallow water[J]. Ocean Engineering, 2016(123):131-145.

[3] 吴汉才.S-175 集装箱船在规则波浪中运动的六自由度运动预报[J].舰船科学技术,2016,38(18):61-63.
Wu Hancai. Prediction of Six-DOF movement of S-175 container ship in regular waves [J].Ship Science and Technology,2016,38(18): 61-63.

[4] Eirik Bøckmann, Sverre Steen. Model test and simulation of a ship with wavefoils[J].Applied Ocean Research,2016(55):8-18.

[5] 刘伟,赵锬鸿.船舶三自由度运动试验平台控制系统设计与仿真[J].机械与电子,2015(12):57-59.
Liu Wei, Zhao Yuhong. Design and simulation of control system for three-degree-of-freedom motion test platform for vessels[J]. Machinery and Electronics,2015(12):57-59.

[6] 吴成成,袁利毫,昝英飞, 等.船舶拖航系统六自由度操纵运动仿真[J].舰船科学技术,2016, 38(11):57-62.
Wu Chengcheng, Yuan Limu, Qi Yingfei,etal. Six-DOF maneuvering simulation of ship towing system[J].Ship Science and Technology, 2016, 38(11): 57-62.

[7] J M Varela, J M Rodrigues, C Guedes Soares. 3D simulation of ship motions to support the planning of rescue operations on damaged ships[J].Procedia Computer Science, 2015(51):2397-2405.

[8] 陈姚节,陈飞翔,汤文军.水上船舶航行稳定性控制仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(11): 203-207.
Chen Yaojie, Chen Feixiang, Tang Wenjun. Simulation research on navigation stability control of watercraft [J]. Computer Simulation, 2016, 33(11): 203-207.

[9] 吴伟萍.船舶迎浪航向下的垂荡运动建模与仿真分析[J].舰船科学技术,2018(22):4-6.
Wu Weiping. Research on Modeling and Simuliation of heave motion of ships in waves[J].Ship Science and Technology, 2018(22): 4-6.

[10] 程艳辉.船舶操控运动稳定特性在风浪中的仿真研究[J].舰船科学技术,2016,38(20):10-12.
Cheng Yanhui. The simulation research on the stability of ship handing and moving stability in wind and waves [J]. Ship Science and Technology, 2016,38(20):10-12.

[11] 漆亮东.船舶在风浪中的运动稳定性研究[J].科技风,2015(13):92.
Qi Liangdong. Research on the stability of ship motion in wind and waves[J].Science and Technology,2015(13):92.

[12] 杨久亮. 风浪影响下半潜船载运重大件稳性的研究[D].大连:大连海事大学,2017.
Yang Jiuliang. The research on the stability of semi-submersible Vessels with Transporting and Loading Awkward Cargo under the influence of wind and waves [D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2017.

[13] 贾欣乐,杨盐生.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.

[14] Full six degrees of freedom coupled dynamic simulation of ship collision and grounding accidents[J]. Marine Structures,2016:1-22.

[15] 徐静. 船舶在波浪中的六自由度操纵运动模型研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
Xu Jing. Study on Six-DOF numerical model of ship maneuvering motions in waves[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2014.

[16] 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(03):40-43.
Zhang Xiufeng, Yin Yong, Jin Yizhen. Ship motion mathematical model with Six-DOF in Regular Waves [J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007(03):40-43.

Study on the Simulation of Six Degrees of Freedom Motion of Ships on the Sea Surface

CHEN Wan-zi, ZHANG Pei-zhen, HUANG Jian-er, OU Li-lian

School of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, *Guangdong Province, China*

Abstract: Under the assumption of the Fudide-Krylov hypothesis, mathematical model of the six-degree-of-freedom motion of the ship on the surface of sea is established, which is constructed and calculated based on the separation modeling theory in the static and moving coordinate systems. The main contents of the paper include: modeling wind, wave, and flow separately, and then performing vector superposition, and further constructing a simplified mathematical model of six-degree-of-freedom ship motion under the combined action of wind and waves. The purpose of this work is to achieve real-time simulation. Based on the Simulink and V-Realm Builder, namely virtual reality technology in MATLAB, the researchers created the ship movement model, the sea surface environment and the ship´s geometric model. The visual simulation of the ship´s six degrees of freedom movement is given under three kinds of situations. The ship´s rotation path and movement trajectory are described when there is wind and no waves, there is wares and no wind, and there is wind and wave, respectively. The research results can provide the basis for further research on the accurate prediction of the acoustic scattering characteristics of dynamic targets.

Key words: Fudide-Krylov hypothesis; six degrees of freedom; VR and Simulink; visual simulation