

8-7-2020

Mathematical Model of Maneuvering Motion and Virtual Simulation for Ultra Large Twin-propeller Twin-rudder Ship

Guo Chen

Institute of Ship Automation and Simulator, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

Yan Lifei

Institute of Ship Automation and Simulator, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

Haiqing Shen

Institute of Ship Automation and Simulator, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Mathematical Model of Maneuvering Motion and Virtual Simulation for Ultra Large Twin-propeller Twin-rudder Ship

Abstract

Abstract: A three-degree freedom mathematical model of maneuvering motion for an ultra-large type container ship with twin-propeller twin-rudder is established, with turning circle test and zig-zig test simulation results to verify it. By abstracting the ship maneuvering process, the three-dimensional model of ship, helm, propeller and rudder are modeled according to virtual reality technology, and then the ship posture and the dynamic process of ship maneuvering are displayed by the virtual scene and the responsive three-dimensional model. A virtual simulation system for the maneuvering of ultra large twin-propeller twin-rudder ship is established by the MFC framework and the Vega API. The functions including scenes switching, environment switching, maneuvering switching and viewpoint switching are completed in the virtual simulation system. The system also could be used as a platform for simulation verification of ship maneuvering control strategy and optimization of control algorithm.

Keywords

twin-propeller twin-rudder ship, ship motion, mathematical model, virtual reality, Vega

Recommended Citation

Guo Chen, Yan Lifei, Shen Haiqing. Mathematical Model of Maneuvering Motion and Virtual Simulation for Ultra Large Twin-propeller Twin-rudder Ship[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1976-1982.

超大型双桨双舵船舶运动数学模型与虚拟仿真

郭晨, 焉丽飞, 沈海青

(大连海事大学船舶自动化与仿真器研究所, 大连 116026)

摘要: 建立了常速域大洋航行工况下超大型双桨双舵集装箱船舶三自由度运动数学模型。讨论了该船舶模型的旋回试验和 Z 型试验仿真。将实际船舶操纵过程抽象化, 应用虚拟现实技术建立船舶、舵轮、螺旋桨和舵叶局部三维实体模型, 通过虚拟场景和响应的三维模型来仿真显示船舶姿态和操纵的动态过程。基于 Vega API, 在 MFC 框架下, 设计并完成大型双桨双舵船舶操纵运动虚拟仿真系统。所生成的船舶操纵仿真系统, 可实现场景切换, 环境切换, 操纵方式切换以及视角切换等功能。可用以完成对船舶运动控制策略的仿真验证和控制算法优化。

关键词: 双桨双舵船舶; 船舶运动; 数学模型; 虚拟现实; Vega

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-1976-08

Mathematical Model of Maneuvering Motion and Virtual Simulation for Ultra Large Twin-propeller Twin-rudder Ship

Guo Chen, Yan Lifei, Shen Haiqing

(Institute of Ship Automation and Simulator, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract: A three-degree freedom mathematical model of maneuvering motion for an ultra-large type container ship with twin-propeller twin-rudder is established, with turning circle test and zig-zig test simulation results to verify it. By abstracting the ship maneuvering process, the three-dimensional model of ship, helm, propeller and rudder are modeled according to virtual reality technology, and then the ship posture and the dynamic process of ship maneuvering are displayed by the virtual scene and the responsive three-dimensional model. A virtual simulation system for the maneuvering of ultra large twin-propeller twin-rudder ship is established by the MFC framework and the Vega API. The functions including scenes switching, environment switching, maneuvering switching and viewpoint switching are completed in the virtual simulation system. The system also could be used as a platform for simulation verification of ship maneuvering control strategy and optimization of control algorithm.

Keywords: twin-propeller twin-rudder ship; ship motion; mathematical model; virtual reality; Vega

引言

近年来集装箱船舶日趋大型化, 出现了船总长达 399 m 的装备双桨双舵的大型集装箱船。与

单桨单舵船舶相比, 双桨双舵船舶具有提高船舶的操纵性及航行安全可靠; 吃水相对较浅, 对航道、港口的要求降低; 在相同载重条件下, 航速有所提高, 耗油量减少等优点^[1]。

虚拟现实技术具有交互性、沉浸性和构想性特点, 目前已在船舶设计和船舶操纵和轮机仿真领域中得到应用, 体现出诸多优势^[2-5]。

本文讨论双桨双舵船舶运动虚拟仿真系统的设计与实现。作者应用虚拟现实技术, 将实际的



收稿日期: 2015-05-12 修回日期: 2015-07-22;
基金项目: 国家自然科学基金项目(61374114); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132014321);
作者简介: 郭晨(1956-), 男, 江苏人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为船舶系统仿真与自动控制系统、智能控制理论与应用; 焉丽飞(1990-), 女, 山东人, 硕士, 研究方向为船舶运动仿真与智能控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1976 •

船舶操纵过程加以抽象化, 通过虚拟场景和响应的三维实体模型来模拟船舶航姿态和操纵过程, 从而使观察者能够直观地观察船舶运动。以所生成的虚拟仿真系统为实验平台, 可以完成对船舶运动控制策略的仿真验证及设计优化, 达到减少实船试验次数和船舶运行损耗, 缩短开发周期, 优化控制算法的目的。

本文在此基础上, 基于 Vega API, 在 MFC 框架下, 设计并实现了大型双桨双舵船舶操纵运动虚拟仿真系统, 利用 Matlab RTW^[6]工具箱, 通过 Matlab Engine^[7]的方式实现虚拟仿真系统与数学模型之间的数据交换。

1 双桨双舵船舶数学模型的建立

本文基于 MMG 机理, 在只考虑小漂角的情况下, 忽略两桨间的干扰作用, 参考文献[8]建立常速域大洋航行工况下的船舶运动数学模型。

图 1 为船舶平面运动坐标系统图, 图中, u 为纵荡速度; v 为横荡速度; r 为转首角速度; ψ 为航向角; δ 为舵角。采用随船运动坐标系, 结合图 1, 可将船舶运动方程表示为^[4]:

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X_{H_0} + X_P + X_R + \\ &\quad X_{\text{current}} + X_{\text{wind}} \\ m(\dot{v} + ur) &= Y_{H_0} + Y_P + X_R + \\ &\quad Y_{\text{current}} + Y_{\text{wind}} \\ I_{zz}\dot{r} &= N_{H_0} + N_P + N_R + N_{\text{current}} + \\ &\quad N_{\text{wind}} - Y_H \cdot x_C \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: 下标为 H 的项表示裸船体; 下标为 P 的项表示螺旋桨; 下标为 R 的项表示舵; 下标为 wind 的项表示风; 下标为 current 的项表示流; m 为船舶质量; I_{zz} 表示船舶绕通过中心的铅直轴的质量惯性矩; $Y_H \cdot x_C$ 为 N 关于船舶重心的修正项。

在方程(1)中, 船舶参数和流体动力导数都是有量纲的, 这些数值会受到船舶尺度、航速以及流体介质等物理因素的影响, 且不可忽略, 因此需根据相似原理对这些参量进行无量纲化, 本文采用参考面积为 Ld 的一撇系统进行无量纲化。

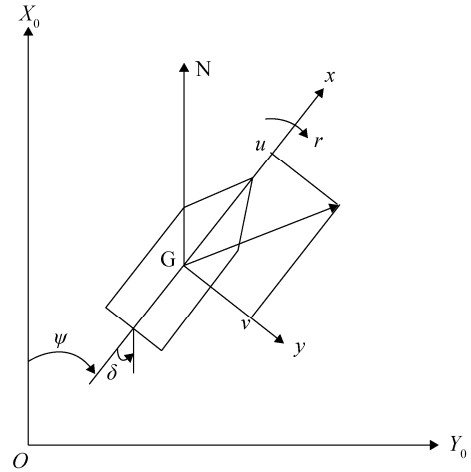


图 1 船舶平面运动坐标系统

1.1 作用于裸船上的流体动力和力矩

根据力和力矩产生的性质, 可以将作用于裸船上的流体动力和力矩分解为惯性类和粘性类, 则(1)式中下标为 H_0 的项可以表示为^[8]:

$$\left. \begin{aligned} X_{H_0} &= X_H + X_I \\ Y_{H_0} &= Y_H + Y_I \\ N_{H_0} &= N_H + N_I \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: 下标为 H 的项表示粘性类流体动力和力矩, 下标为 I 的项表示惯性类动力和力矩。

假设船舶前后对称, 则船舶在平面运动时, 附加动量和动量矩可以表示为^[8]:

$$\left. \begin{aligned} X_I &= -(m_x \dot{u} - m_y vr) \\ Y_I &= -(m_y \dot{v} + m_x ur) \\ N_I &= -(J_{zz} \dot{r} + (m_y - m_x) uv) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Munk 力矩 $(m_x - m_y)$ 是一个理论结果, 不能从船舶试验中分离出来, 通常在 N_H 中体现, 所以 $N_I = -J_{zz} \dot{r}$ 。 m_x , m_y 表示附体坐标系 x , y 轴上的附加质量, J_{zz} 表示绕 z 轴的附加惯性矩。

前文已假设为小漂角, 所以采用贵岛非线性模型估算粘性类流体动力和力矩, 可表示为^[4]:

$$\left. \begin{aligned} X_H &= X(u) + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_H &= Y_vv + Y_r r + Y_{|v|v}|v|v + Y_{|r|r}|r|r + \\ &\quad Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 \\ N_H &= N_vv + N_r r + N_{|v|v}|v|v + \\ &\quad N_{|r|r}|r|r + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

1.2 双螺旋桨的数学模型

在操纵双桨双舵船舶运动时，每个螺旋桨的转向、转速和船速构成了一个独立的四象限变化域，因此两桨有可能分别工作于不同的象限中，而双桨各自产生的水动力和水动力矩又可以综合的作用在一起，影响船舶的操纵控制。因此准确地表示出双桨纵向、横向以及首摇方向的水动力和水动力矩是一个关键的问题。本文忽略双桨间的干扰作用，且只考虑螺旋桨正车一种工况，螺旋桨力计算模型可表示为^[9-10]：

$$\left. \begin{aligned} X_P &= (1-t_p)\rho n^2 D_P^4 k_T(J_P) \\ Y_P &= 0, N_P = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： t_p 为推力减额系数； ρ 为水密度； n 为主机转速； D_P 为桨直径， $k_T(J_P)$ 为桨的推力系数。

1.3 联动双舵的数学模型

在计算舵力的时候需要考虑船体和螺旋桨的干涉作用，以保证模型的精确度，本文主要考虑大洋航行这一工况，此时，两舵可以看做是联动的，因此在建立舵机数学模型的时候将双舵等效为单舵，可以表示为^[9-10]：

$$\left. \begin{aligned} X_R &= (1-t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= (1+\alpha_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= (x_R + \alpha_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： t_R 表示舵力减额系数； α_H 表示计入操舵诱导船体横向力后关于舵力的修正因子； x_R 表示舵力上的横向力作用点的纵坐标值； x_H 表示操舵诱导船体横向力作用中心与产波重心之间的距离； F_N 表示正压力，垂直于舵叶面积。

舵机采用如下模型^[8]：

$$T_E \dot{\delta} = \delta_E - \delta, |\delta| \leq 35^\circ, |\dot{\delta}| \leq 3^\circ/s \quad (7)$$

式中： δ_E 为命令舵角； T_E 为舵机时间常数，一般为 2.5 s。

1.4 船舶运动干扰力模型

船舶在大洋上航行时，必然会受到风、浪、流的干扰作用，在建模的时候需要考虑进去，提

高模型的准确性，本文仅考虑风、流两项干扰。

1.4.1 风的干扰力数学模型

平均风压力和力矩的计算公式为^[8]：

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_{\text{wind}} &= 0.5\rho_\alpha A_f U_R^2 C_{wx}(\alpha_R) \\ \bar{Y}_{\text{wind}} &= 0.5\rho_\alpha A_s U_R^2 C_{wy}(\alpha_R) \\ \bar{N}_{\text{wind}} &= 0.5\rho_\alpha A_s L_{oa} U_R^2 C_{wn}(\alpha_R) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： ρ_α 表示空气密度； A_f 表示船舶水线以上的正投影面积； A_s 表示水线以上的侧投影面积； L_{oa} 表示船总长； $C_{wx}(\alpha_R)$ ， $C_{wy}(\alpha_R)$ ， $C_{wn}(\alpha_R)$ 表示 x，y 方向的风压力系数以及绕 z 轴方向的风压力矩系数。

1.4.2 流的干扰力数学模型

假设船舶所在流为定长且均匀的，则在附体坐标系中，船舶运动时对地的速度在 x，y 轴上的分量分别是 u ， v ，对流的速度分别是 u_r ， v_r ，满足^[8]

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_r &= \dot{u} - rv_C \\ \dot{v}_r &= \dot{v} + rv_C \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

1.5 船舶操纵性计算

以可载运 18 000 TEU 的马士基 Triple E 级集装箱为例，进行旋回试验和 Z 型试验，以验证所建立船舶运动模型的准确性。该船体参数如表 1 所示。

1.5.1 旋回试验

设船舶在理想海况下满载航行，平均吃水为 19.6 m，右舵 $\delta = 35^\circ$ ，初始航速为 $V_0 = 16$ kn，左右主机转速为 $n_1 = n_2 = 51$ r/min，且在试验过程中左右主机转速不变，风速为 0，则仿真曲线如图 2 所示，试验数据如表 2 所示， L_{pp} 为船舶两柱间长。

经过比较可知，所建立的双桨双舵船舶数学模型旋回圈特征参数与实船数据相比，误差较小，且满足《船舶操纵性标准》，因此所建立的数学模型的旋回性能较好。

表 1 马士基 Triple E 级集装箱船船体参数

名称	实船数据
两柱间长/m	360
船宽/m	59
型深/m	35.5
设计船速/kn	23
设计吃水/m	19.6
方形系数	0.56
重心纵向坐标/m	0
舵面积/m ²	75
舵高/m	10.8
展弦比	1.6
舵间距/m	23.3
螺距/m	8.576
螺距比	0.866
桨直径/m	9.9
盘面比	0.446
桨叶数	8
桨间距/m	8.5

表 2 满载右旋回仿真数据

旋回圈特征参数	实船试验	仿真试验	误差
纵距/m	1979 (5.50 L _{PP})	1786 (4.96 L _{PP})	193 (0.54 L _{PP})
横距/m	774 (2.15 L _{PP})	764 (2.12 L _{PP})	10 (0.03 L _{PP})
战术直径/m	1335 (3.71 L _{PP})	1753 (4.87 L _{PP})	7 (0.02 L _{PP})

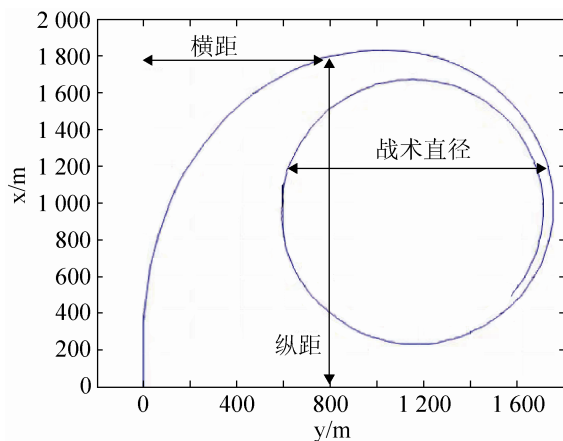


图 2 满载右旋回轨迹图

1.5.2 Z 型试验

分别进行 10° 和 20° Z 型试验, 其仿真曲线分别如图 3~4 所示。

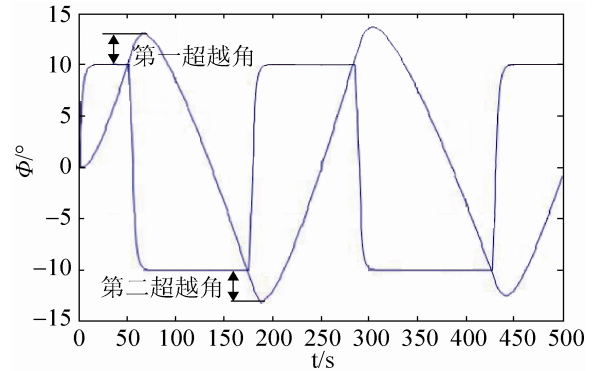


图 3 10° /10° Z 型试验仿真曲线

根据《船舶操纵性标准》, 马士基 Triple E 在进行 10° Z 型试验时, 第一超越角 $\phi_{ov1} \leq 16.70^\circ$, 第二超越角 $\phi_{ov2} \leq 30.54^\circ$, 由图 3 可得 $\phi_{ov1} = 3.01^\circ$, $\phi_{ov2} = 2.87^\circ$; 20° Z 型试验时, 第一超越角 $\phi_{ov1} \leq 25^\circ$, 由图 4 可得 $\phi_{ov1} = 7.01^\circ$ 。

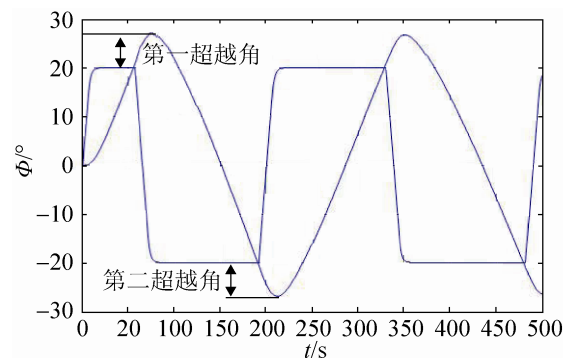


图 4 20° /20° Z 型试验仿真曲线

Z 型试验部分虽缺少实船数据, 但是由上述数据可得, 所建立的双桨双舵船舶运动数学模型具有良好的保向性。

综上所述, 所建立的船舶运动数学模型旋回性能和保向性能良好, 且与实船相比误差不大, 因此可满足建立虚拟仿真系统的要求。

2 双桨双舵船舶虚拟场景及三维实体建模

建立船舶虚拟仿真系统的关键技术是构建虚拟场景及其三维实体模型, 三维实体模型以及虚拟仿真系统的逼真程度直接影响到虚拟仿真系统的构建效果, 场景过于简单, 则系统的真实感不

强；而场景逼真复杂将会增加虚拟场景的加载及交互难度，降低系统的实时性。本文所需要建立的三维实体模型包括船舶、舵轮以及桨舵局部模型，前两者的建模平台是 MultiGen Creator，后者的建模平台是 3DS MAX 2012。

构建逼真合理的虚拟仿真系统的基础是严格按照三维模型建模的技术指标和原则建立虚拟仿真场景及其三维实体模型。

评估虚拟场景及其三维实体模型的技术指标主要有^[11-12]：精确性，实时性，可操纵性，可移植性，易用性。

本文为了构建良好的虚拟场景及其三维模型，在构建虚拟船舶操纵场景及其三维实体模型的过程中遵循了以下 4 个原则^[11]：

(1) 精简模型，减少多边形的数量。高精度的模型往往数据量也巨大，这将降低系统的加载速度，影响仿真系统的交互实时性。因此，在保证视觉效果和对象外形的基础上，应该尽可能的简化模型，去除不必要的面；对于系统中部分精度要求比较低的辅助模型，可以直接贴图或者使用单面模型。建模的最基本原则之一就是要尽可能的减少多边形的数量。

(2) 布局的合理性。虚拟仿真系统的运行速度和渲染时间与模型的布局是否合理有直接关系。在某些虚拟仿真系统中，有些模型并不是在开始的时候就显示出来，对于那些模型，可以为其设置单独的视点，例如 Creator 建模中的 LOD 技术。

(3) 采用等边三角形网络。如果采用曲面建模法，应该保证三维模型的分段处和弯曲处为等边三角形，尽量避免出现长条形，以防止锯齿、纹理模糊等不好的现象出现，同时，这也会增加数据量，影响系统交互性。

(4) 面与面之间要保持一定的间距。虚拟场景中的所有三维模型的面与面之间应该至少保持 2 mm 的距离，否则，在驱动虚拟场景的时，会出现 2 个面交替闪烁显示的现象。

根据以上指标和原则确定建立虚拟场景的建模流程，如图 5 所示。模型的建立过程分为 3 步：数据预处理、构建模型和优化模型。数据预处理主要是指确定好实体模型的尺寸，整理各个视角的照片，并且将各个局部的图片截图，作为后期贴图的素材，建立船舶三维模型所需的船舶参数如表 1 所示。构建模型主要是在 Creator 和 3DS MAX 2012 中按照船舶实际尺寸比例利用多边形建模的方法建立三维实体模型，然后将数据预处理中所得到的的贴图处理成建模平台所能够加载识别，且 Vega 可调用的格式^[13]，本文 Creator 中贴图格式为 RGB 格式，再调整模型底色与材质，使得贴图效果达到最佳。模型优化主要是将贴图粘贴到对应的局部，然后再将三维模型加载到虚拟场景中去^[13]。构建完成的船体，舵轮，桨舵局部模型分别如图 6~8 所示，其中船体为静态模型，舵轮中引入 DOF 节点，存储了舵轮的动作路径，为动态模型，桨舵局部模型为大洋航行和回转运动 2 种工况下的动画，也是动态模型。

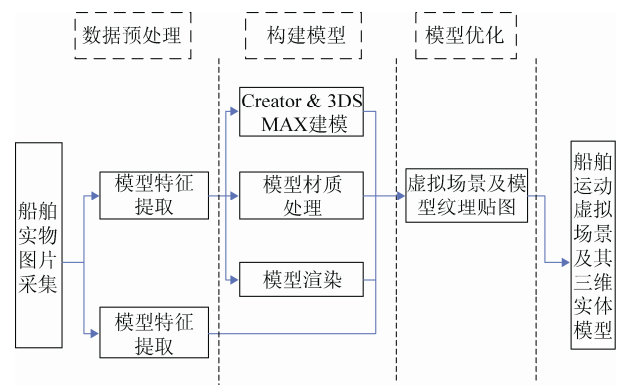


图 5 虚拟场景构建流程图



图 6 船体模型

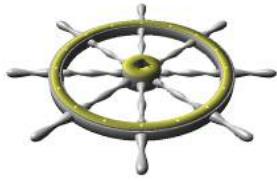


图 7 舵轮模型

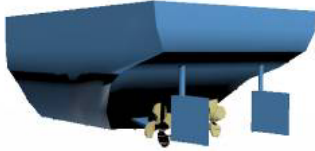


图 8 桨舵局部模型

在建立三维实体模型时,所选用的建模方法为多边形建模,简单易学,且在建模的过程中,对于线条复杂,且出现次数比较多的模型进行单独构建,再通过复制、组合等命令建立复杂的模型,简化了建模过程;按照实船实物比例进行建模,保证了所建模型与实物在形状上的匹配度;且在模型中引入了 DOF 节点,可实现人机交互;另外,在 MultiGen Creator 中所构建的 flt 格式的模型将格式转换为 fst 之后,数据量大大减小(船体和舵轮的数据量分别从 685KB 和 5715KB 减小为 17KB 和 727KB),而 3DS MAX 2012 中的模型数据量比较大,而且与整个船体相比,桨、舵的尺寸比较小,可视性不强,而此部分的目的是要比较直观地表现出船舶在运动过程中桨、舵的运动状态,所以此部分仅作桨舵局部模型以保证系统的实时性和可视性。综上所述,所建立的模型符合前文所列的五项建模技术指标。

3 仿真系统总体设计及实现

本文建立的船舶操纵运动虚拟仿真系统主要是由船舶运动数字仿真部分和船舶运动可视化仿真两部分组成。利用 Matlab/Simulink 实现数字仿真部分,采用 Vega 作为三维驱动平台,在 MFC 框架下,实现可视化仿真部分。而 Visual C++ 与 Matlab 之间的数据交换是利用 RTW 工具箱完成的,采用 External 模式,通过 Matlab Engine 直接调用 Simulink 模型,以实现虚拟仿真系统数据的

实时更新^[14-15]。

3.1 系统功能设计

本文所建立的虚拟仿真系统设计实现多种操纵方式、视角设置以及环境设置等功能。

3.1.1 操纵方式

系统设计了以下 4 种操纵方式:

(1) 航向控制。航向控制为自动控制状态,系统为闭环控制,采用 PID 控制策略,用户可通过“参数设置”面板设定航向和主机转速,给定 Matlab 模型不同的输入信号,船舶按照设定值自动航行,并且实时显示船舶航向和舵角的仿真曲线;

(2) 旋回试验。系统可进行旋回试验操作,实验时,可在“旋回试验”面板读取纵距、横距、战术直径、旋回直径四个旋回圈特征参数,以及显示船舶航迹曲线;

(3) Z 型试验。系统可以进行 10° 和 20° 两种 Z 型试验,实验时会实时显示船舶航向角和舵角的实时仿真曲线;

(4) 操舵控制。系统除了可自动操纵,也能手动操纵。利用鼠标模拟舵轮,通过拾取动作,左键模拟左舵,右键模拟右舵,将鼠标移动至舵轮处长按左键或者右键,即可以达到舵角的控制,实现船舶的手动操纵。

3.1.2 视角设置

为了更好的观察船舶的运动情况,系统可以通过视角设置多视角浏览船舶。视角设置分为粗调和微调。粗调功能可通过菜单栏“视角切换”选项选择右视、主视和俯视。微调功能则是通过键盘快捷键的方式小范围的调节视角位置。

3.1.3 环境设置

为了使系统的虚拟场景更好地接近实际情况,系统可以进行海况和时间的设置。共设有 6 种海况,时间则是把一天的 24 小时等分为 10 份,即有 10 种时间变化。

3.2 系统主界面设计及实现

系统的主显示界面是系统和用户之间进行交互和信息交换的媒介, 实现了信息的内部形式与用户可以接受形式之间的转换。因此, 系统主显示界面是仿真系统中非常重要的方面, 设计时既要保证显示的美观大方又要符合用户的操作习惯^[16]。本系统设计的主显示包括船舶运动主场景、舵轮场景、仪表场景以及桨舵局部动画场景, 可通过菜单栏进行切换, 最终设计实现的虚拟仿真系统主界面如图 9 所示。船舶运动场景是主场景; 舵轮场景位于整个场景的左上方, 在进行操舵控制的时候, 通过获取鼠标在该场景上的不同动作, 给定 Matlab 模型不同的舵角输入, 实现人机交互; 仪表场景位于场景的下方, 可以实时的显示出 Matlab 模型中的船舶参数, 包括左右主机转速、航速、转舵角速度、航向、舵角; 桨舵动画场景包括大洋航行、回转运动两种工况以及实时动画三个场景, 可以比较直观地观测到桨舵局部的动作, 桨舵实时动画场景如图 10 所示。

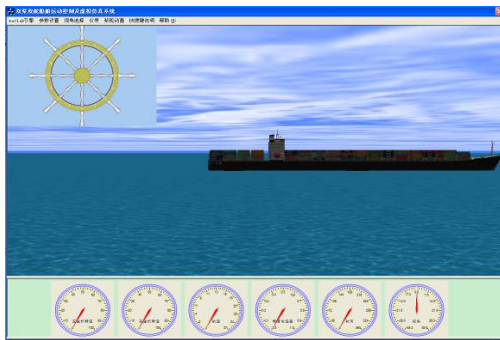


图 9 船舶运动虚拟仿真系统主界面

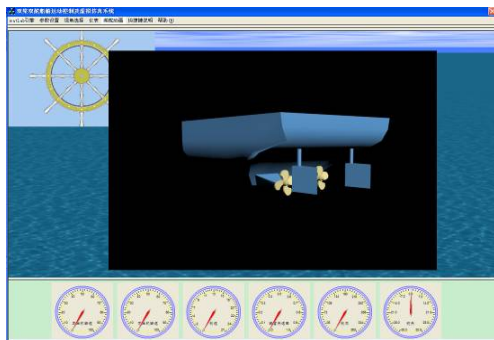


图 10 桨舵实时动画场景图

4 结论

本文基于 MMG 建模机理, 忽略两桨间的干扰作用, 考虑风、流的干扰作用, 建立常速域大洋航行工况下双桨双舵船舶运动的数学模型, 以 18000 TEU 马士基 Triple E 级集装箱为例, 进行旋回试验和 Z 型试验, 以验证所建立模型的精确性。基于 Vega API, 在 MFC 框架下, 建立了大型双桨双舵船舶操纵运动虚拟仿真系统, 利用 Matlab Engine 的方式实现 Visual C++ 系统与 Matlab 系统之间的数据交换, 整个系统实现了场景切换、环境设置、视角切换、操纵方式切换的主要功能, 视景仿真效果较为理想。

本文研究生成的大型双桨双舵船舶操纵运动虚拟仿真系统可用于研究船舶的操纵性和验证船舶先进运动控制策略。

参考文献:

- [1] 沈闻孙. 大型油船的发展趋势—v-2000 型 VLCC 方案设计介绍 [J]. 辽宁造船, 2000(3): 81-84.
- [2] 黄会营, 段晓黄. 船舶运动视景仿真系统设计与实现 [J]. 2012, 29(1): 369-373.
- [3] 金一丞. 航海模拟器 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 郭晨, 孙建波, 史成军, 等. 船舶运动智能控制虚拟现实仿真系统 [C]// 2003 年全国系统仿真学术年会. 2003. 北京: 中国系统仿真学会, 2003: 585-590.
- [5] 李新领, 张兴龙. 一种舰船电站实时仿真系统的实现 [J]. 中国航海, 2013, 36(4): 68-71.
- [6] Shan Y, Li W, Zhou M, *et al.* Development of hardware-in-the-loop driver for PCI-1710 data acquisition card [C]// Measurement, Information and Control (ICMIC), 2013 International Conference on. IEEE. USA: IEEE, 2013: 1065-1068.
- [7] Li H, Ye W. Hybrid Programming Based on Matlab Engine Technology [C]// Computer Sciences and Applications (CSA), 2013 International Conference on. IEEE. USA: IEEE, 2013: 454-457.
- [8] 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.
- [9] Lee S K, Fujino M. Assessment of A Mathematical Model for the Manoeuvring Motion of a Twin-Propeller Twinrudder Ship [J]. International Shipbuilding Progress (S0020-868X), 2003, 50(1): 109-123.

(下转第 1988 页)