

6-28-2024

Development and Application of Simulation Platform for Aquatic Movement of an Amphibious Armored Vehicle

Mingzhe Chen

School of Physics and Electronics, He'nan University, Kaifeng 475004, China, chenmingzhe@henu.edu.cn

Yunzheng Song

Shanghai Electric Control Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China

Pei Wang

Shanghai Electric Control Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China

Lei Zhang

School of Physics and Electronics, He'nan University, Kaifeng 475004, China, zhanglei@vip.henu.edu.cn

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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Development and Application of Simulation Platform for Aquatic Movement of an Amphibious Armored Vehicle

Abstract

Abstract: In order to design and verify the fire control system(FCS) algorithm of amphibious assault vehicle under heavy wind and wave conditions, a real-time simulation platform is developed. The traditional single rigid body dynamic model can't describe the body-turret-barrel dynamic coupling relationship and it is not suitable for FCS simulation with high dynamic characteristics. Twist-wrench method is used to establish the multiple rigid body dynamic model of vehicle, the buoyancy and the hydrodynamic calculation is carried out according to the body and the moving relationship between visual generated waves, and the hydrodynamic coefficient is obtained by the computational fluid dynamic method. The example of a sliding mode controller verifies the effectiveness of the FCS algorithm development and verify platform.

Keywords

amphibious assault vehicle, virtual simulation, multiple rigid body, hydrodynamic analysis, fire control system

Recommended Citation

Chen Mingzhe, Song Yunzheng, Wang Pei, et al. Development and Application of Simulation Platform for Aquatic Movement of an Amphibious Armored Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1442-1451.

两栖装甲车水上运动仿真平台开发与应用研究

陈明哲¹, 宋韞峥², 王佩², 张镭^{1*}

(1. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475004; 2. 上海电控研究所有限公司, 上海 200092)

摘要: 为设计及验证两栖装甲突击车大风浪条件下的火控算法, 需要开发其实时仿真平台。传统单刚体车辆动力学模型无法反映车体-炮塔-炮管间复杂的动力学耦合关系, 不适合于高动态特性的火控仿真。使用 *twist-wrench* 方法建立了车辆的多刚体动力学模型, 根据车体与视景中生成的海浪之间的运动关系计算浮力和水动力, 水动力系数则事先通过计算流体动力学方法得出。以一种滑模控制器为例验证了此系统作为火控算法开发及验证平台的有效性。

关键词: 两栖装甲; 虚拟仿真; 多刚体; 水动力学分析; 火控仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)06-1442-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0296

引用格式: 陈明哲, 宋韞峥, 王佩, 等. 两栖装甲车水上运动仿真平台开发与应用研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1442-1451.

Reference format: Chen Mingzhe, Song Yunzheng, Wang Pei, et al. Development and Application of Simulation Platform for Aquatic Movement of an Amphibious Armored Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1442-1451.

Development and Application of Simulation Platform for Aquatic Movement of an Amphibious Armored Vehicle

Chen Mingzhe¹, Song Yunzheng², Wang Pei², Zhang Lei^{1*}

(1. School of Physics and Electronics, He'nan University, Kaifeng 475004, China;

2. Shanghai Electric Control Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to design and verify the fire control system(FCS) algorithm of amphibious assault vehicle under heavy wind and wave conditions, a real-time simulation platform is developed. The traditional single rigid body dynamic model can't describe the body-turret-barrel dynamic coupling relationship and it is not suitable for FCS simulation with high dynamic characteristics. *Twist-wrench method is used to establish the multiple rigid body dynamic model of vehicle, the buoyancy and the hydrodynamic calculation is carried out according to the body and the moving relationship between visual generated waves, and the hydrodynamic coefficient is obtained by the computational fluid dynamic method.* The example of a sliding mode controller verifies the effectiveness of the FCS algorithm development and verify platform.

Keywords: amphibious assault vehicle; virtual simulation; multiple rigid body; hydrodynamic analysis; fire control system

0 引言

两栖装甲是不需要舟桥、渡船等辅助设备就能通过江河湖海等水障, 并能在水上进行航行和

射击的履带式装甲, 两栖作战研究的是不可预测的环境下发生的复杂多域问题^[1]。视景仿真技术具有高逼真度、强稳定性、强反馈等特性被广泛应

收稿日期: 2023-03-15

修回日期: 2023-05-23

第一作者: 陈明哲(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为检测技术与自动化装置。E-mail: chenmingzhe@henu.edu.cn

通讯作者: 张镭(1980-), 男, 教授, 博士, 研究方向为机电系统仿真与控制。E-mail: zhanglei@vip.henu.edu.cn

用于军事训练^[2], 目前, 两栖装甲视景平台在分析水上运动时往往忽略火控系统对装甲车体的影响, 而且水上仿真运动模型的研究方法也不能满足视景仿真的准确性或实时性要求。因此, 急需建立一种能够进行火控系统控制验证和实时准确的水上仿真分析的装甲视景仿真平台。

在两栖装甲视景仿真研究方面, 文献[3]在选择视景仿真软件时受到了硬件条件的限制导致海浪模型的建立、可视化以及海上车辆姿态仿真的精度和可变性较差。文献[4]在虚拟现实的基础上构建了装甲车的结构外形并求解了在不同地形下的车身姿态数据, 但文中只对特定的几个地形进行动力学求解且虚拟环境与车辆互动程度较弱。

在对两栖装甲动力学建模仿真方面, 文献[5]建立了 6 自由度的两栖车辆动力学模型。文献[6]完成了 7 自由度的装甲车辆的建模运动仿真。上述文献在研究两栖装甲运动时, 将装甲车看作单刚体的运动, 没有考虑火控系统对车体运动的影响。

在分析水上受力仿真方面, 文献[7]设计了无人艇的运动仿真并进行了运动学求解, 但其水动力建模较为粗糙, 不能准确反映出船体的水上运动受力情况。文献[8]运用虚拟技术构建了两栖装甲水上运动的动力学模型, 对水上动力学仿真采

用公式简算的方法, 计算精度低且没有考虑装甲车外形特征也会对水阻力产生影响。文献[9-11]采用 CFD 求解器与两栖车辆模型耦合的方法求解的两栖装甲水上运动仿真数据最为准确, 但是对于需要实时性的视景仿真平台不适用。

本文针对目前两栖装甲车视景仿真缺少火控系统验证平台, 以及装甲水动力学模型仿真缺少实时性计算方法的问题, 基于 MAK 视景仿真软件建立了装甲车水上运动仿真模型, 搭建了包含火控系统的多刚体动力学模型验证平台。

1 两栖装甲仿真平台框架

在装甲车视景仿真中, 逼真的视景环境和准确的水上运动受力分析是装甲车视景仿真的关键因素。对两栖装甲仿真平台进行受力分析和火控系统验证平台结构分析, 需要搭建两栖装甲仿真平台框架, 如图 1 所示。

(1) 装甲车多刚体动力学仿真

基于两栖装甲多刚体运动仿真及火控系统开发的运动分析与建模, 包括车体 6 自由度、火控系统 2 自由度。主要功能是分析两栖装甲仿真平台搭建的火控控制器输出, 求解两栖装甲角度变化时各关节受力, 验证仿真平台的有效性。

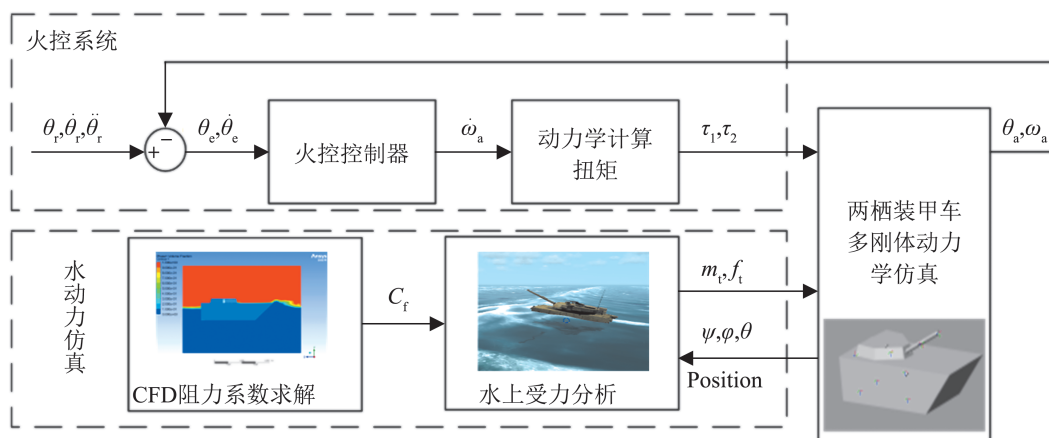


图 1 两栖装甲仿真平台框架
Fig. 1 Amphibious armor simulation platform framework

(2) 水动力仿真模块

两栖装甲水上运动过程中需要实时准确地计算两栖装甲车体受到的海浪作用。运用CFD求解方法可以准确求解两栖装甲水上受力，但是实时性较差，运用公式法能够实时地计算出两栖装甲水上受力，但是准确性较差。因此，本文运用CFD分析与公式计算相结合的方法，通过CFD仿真计算每 5° 俯仰姿态角变化下装甲车的阻力系数，根据装甲车的姿态状况将阻力系数代入水动力计算公式中求解两栖装甲的水上受力。

(3) 视景显示模块

在视景仿真软件中完成对仿真海域气象、海况、地形等环境的模型搭建，通过观察者视角的选择可以用二维或三维的视景形式呈现。根据信息传输端口接收动力学仿真模块的位姿信息，对

视景下的两栖装甲车位姿的显示状态进行更新。

2 两栖装甲仿真平台动力学结构框架

2.1 坐标系建立

研究装甲车水上运动就要建立合适的车体运动坐标系。两栖装甲仿真坐标系如图2所示。结合装甲车受力分析，在水动力学仿真模块中需要对浮力、阻力进行求解，求解结果与装甲车位姿相关，参考船舶常用的ITTC(international towing tank conference)坐标标准建立随体坐标系^[12]。在多刚体动力学仿真模块中需要对各个刚体自由度的角度变化，水动力模块计算的阻力、浮力和火控系统稳定时产生的力矩进行综合分析。因此，参考开链运动的建模方法建立连杆坐标系。

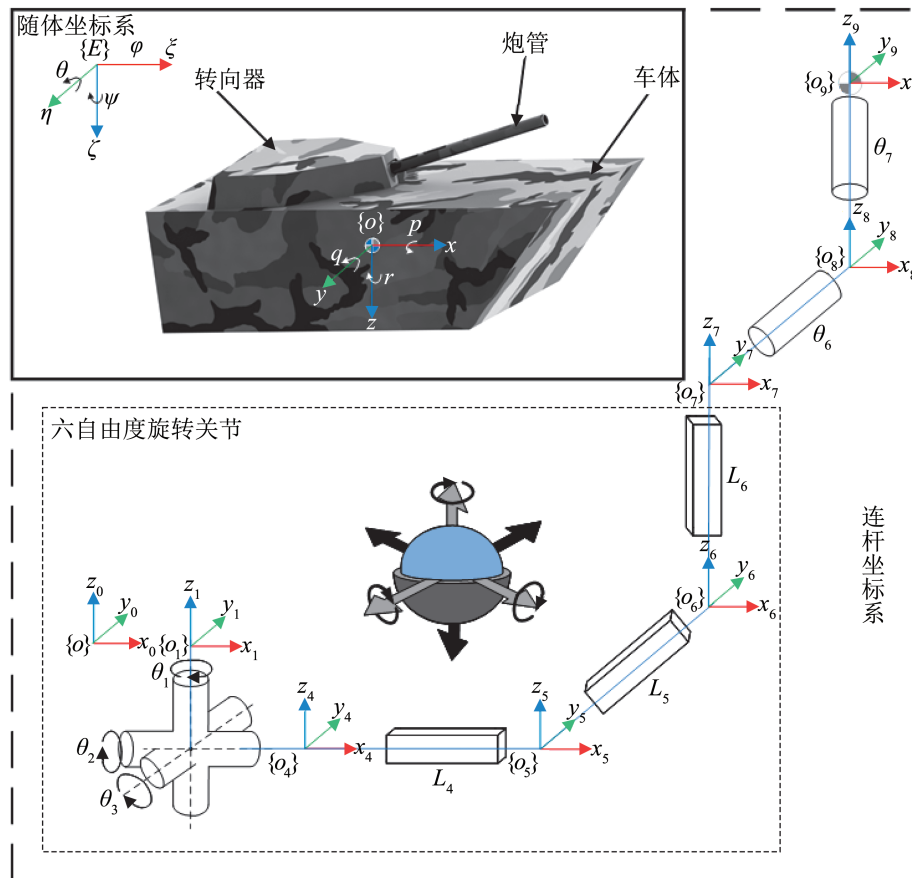


图2 仿真坐标系

Fig. 2 Simulation coordinate system

2.1.1 随体坐标系

在随体坐标系中选取大地坐标系 $\{E\}$ 为惯性坐标系, 将坐标系固定于地球, $\{O\}$ 为车体运动坐标系, 随车体一起运动, 坐标系原点分别固定在质心位置。两栖装甲绕轴 $z-y-x$ 旋转变换时车体坐标系 $\{O\}$ 与惯性坐标系 $\{E\}$ 的转换矩阵:

$${}^E R_{zyx}(\psi, \phi, \theta) = \begin{bmatrix} c\psi c\phi & c\psi s\phi s\theta - s\psi c\theta & c\psi s\phi c\theta + s\psi s\theta \\ s\psi c\phi & s\psi s\phi s\theta + c\psi c\theta & s\psi s\phi c\theta - c\psi s\theta \\ -s\phi & c\phi s\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (ψ, ϕ, θ) 为装甲车惯性坐标系下的姿态角; $c\psi = \cos \psi$; $s\psi = \sin \psi$ 。

2.1.2 连杆坐标系

对图2分析可得, 装甲车水上运动包括沿 $x-y-z$ 轴的平动、绕 $x-y-z$ 轴的转动、转向器绕 z 轴转动和炮管绕 y 轴的转动共8个自由度。坐标系 $\{O\}$ 为惯性坐标系作为运动系统的基座坐标系, 表示装甲车的绝对运动状态。坐标系 $\{O_7\}$ 、 $\{O_8\}$ 、 $\{O_9\}$ 分别固定到炮塔、转向器、车体的质心。坐标系 $\{O_7\}$ 其 x 轴方向与炮管发射方向一致, 相对于 $\{O_1\}$ 有6个关节自由度变化, 即3个转动关节自由度变化 θ 和3个平动关节自由度变化 L 。 $\{O_8\}$ 相对于 $\{O_7\}$ 有一个绕 y 轴转动关节自由度 θ_6 。 $\{O_9\}$ 为末端执行器坐标系, 其相对于 $\{O_8\}$ 有一个绕 z 轴转动关节自由度 θ_7 。

2.2 两栖装甲车多刚体动力学仿真模块

2.2.1 多体动力学

对于单刚体的运动, 可以通过牛顿-欧拉公式来表示。

$$\boldsymbol{\tau}_b = \mathbf{I}_b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b + [\boldsymbol{\omega}_b] \mathbf{I}_b \boldsymbol{\omega}_b \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_b = m \dot{\mathbf{v}}_b + m [\boldsymbol{\omega}_b] \mathbf{v}_b \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_b$ 为刚体受到的力矩; \mathbf{f}_b 为刚体受到的外力; \mathbf{I}_b 为刚体的转动惯量矩阵; $\boldsymbol{\omega}_b$ 为刚体的旋转角速度; \mathbf{v}_b 为刚体的速度; $\dot{\mathbf{v}}_b$ 为刚体的加速度; m 为刚体的质量; $[\boldsymbol{\omega}_b]$ 为 $\boldsymbol{\omega}_b$ 的斜对称形式。

将式(2)和(3)合并可简写为

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{I}_b \dot{\mathbf{V}}_b - [\mathbf{ad}_{\mathbf{V}_b}]^T \mathbf{I}_b \mathbf{V}_b \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_b = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_b \\ \mathbf{f}_b \end{bmatrix}$ 为环境作用于刚体上的力旋量;

$\mathbf{I}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_b & 0 \\ 0 & m\mathbf{E} \end{bmatrix}$ 为刚体的空间惯性矩阵, \mathbf{E} 为 3×3

的单位矩阵; $\mathbf{V}_b = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_b \\ \mathbf{v}_b \end{bmatrix}$ 为刚体的运动旋量;

$[\mathbf{ad}_{\mathbf{V}_b}] = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\omega}_b] & 0 \\ [\mathbf{v}_b] & [\boldsymbol{\omega}_b] \end{bmatrix}$ 为运动旋量 \mathbf{V}_b 的李括号。

对上述牛顿-欧拉法建立的单刚体动力学分析, 将式(4)推广到多个单自由度关节组成的连杆运动坐标系模型既为 Twist-Wrench 方法^[13], 运用递归的方法: 通过正向迭代将每个连杆关节运动产生的位置、速度、加速度变化由基座向末端执行器进行传递; 通过逆向迭代将每个连杆关节运动所受到的力和力矩由末端执行器向基座传递, 计算出不同关节处的力旋量和力矩。

正向迭代: 在连杆坐标系中连杆 $\{i\}$ 的运动向量是由连杆 $\{i-1\}$ 的运动旋量和该连杆运动产生的附加旋量共同作用产生的, 因此连杆 $\{i\}$ 的运动旋量为

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i \dot{\theta}_i + [\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}}] \mathbf{V}_{i-1} \quad (5)$$

式中: \mathbf{A}_i 为关节 i 在连杆坐标系 $\{i\}$ 的旋量轴;

$\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i,i-1} & 0 \\ [\mathbf{p}] \mathbf{R}_{i,i-1} & \mathbf{R}_{i,i-1} \end{bmatrix}$ 为 $T_{i,i-1}$ 的伴随矩阵,

$\mathbf{R}_{i,i-1}$ 为坐标系 $\{O_{i-1}\}$ 在坐标系 $\{O_i\}$ 下的旋转矩阵,

\mathbf{p} 为坐标系 $\{O_{i-1}\}$ 中原点坐标系 $\{O_i\}$ 的平移; $[\mathbf{p}]$ 为 \mathbf{p} 的斜对称矩阵。

对式(5)两边进行时间求导可得连杆 $\{i\}$ 的加速度:

$$\dot{\mathbf{V}}_i = \mathbf{A}_i \ddot{\theta}_i + [\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}}] \dot{\mathbf{V}}_{i-1} + \frac{d}{dt} ([\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}}]) \mathbf{V}_{i-1} \quad (6)$$

单独分析式(6)中 $\frac{d}{dt} ([\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}}]) \mathbf{V}_{i-1}$, 并对时间积分展开可得

$$\frac{d}{dt} ([\mathbf{Ad}_{T_{i,i-1}}]) \mathbf{V}_{i-1} = [\mathbf{ad}_{\mathbf{V}_i}] \mathbf{A}_i \dot{\theta}_i \quad (7)$$

将式(7)结果代入式(6)整理可得

$$\dot{V}_i = A_i \dot{\theta}_i + [Ad_{T_{i-1}}] \dot{V}_{i-1} + [ad_{V_i}] A_i \dot{\theta}_i \quad (8)$$

逆向迭代：通过正向迭代式(5)(8)得到各个连杆 $\{i\}$ 的运动旋量，代入式(4)可得坐标系各个连杆 $\{i\}$ 的力旋量。

$$F_i = Ad_{T_{i-1}}^T (F_{i+1}) + \Gamma_i \dot{V}_i - ad_{V_i}^T (\Gamma_i V_i) \quad (9)$$

将力旋量向关节转动轴方向投影即是作用在关节上的驱动力矩：

$$\tau_i = F_i^T A_i \quad (10)$$

2.2.2 重心求解

两栖装甲车可以看作3个刚体(车体、转向器、炮管)组成的动力学模型。当火控系统运动时，两栖装甲的重心位置会发生变化，因此，在计算两栖装甲力矩时需要重心位置求解。单个刚体的重心由Solidworks建模软件中的质量属性中获得。多刚体组合的重心可以通过式(11)计算每个刚体所占的质量权重来推算。

$$\begin{aligned} x &= \frac{(M_1 \times x_1 + M_2 \times x_2 + M_3 \times x_3)}{(M_1 + M_2 + M_3)} \\ y &= \frac{(M_1 \times y_1 + M_2 \times y_2 + M_3 \times y_3)}{(M_1 + M_2 + M_3)} \\ z &= \frac{(M_1 \times z_1 + M_2 \times z_2 + M_3 \times z_3)}{(M_1 + M_2 + M_3)} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： M_1 、 M_2 、 M_3 为车体、转向器、炮管的质量； x 、 y 、 z 为两栖装甲的重心位置坐标。

3 水动力学

3.1 浮力与浮力矩求解

为了保证仿真计算的精度，对装甲车的浮力计算需要对装甲车车体浸水面组成的曲面进行积分计算。将车体表面分割成多面体组合进行计算能大大增加浮力计算的准确性，沿着多面体外法线顺时针旋转方向为正，逆时针为负，通过这种方式在逆时针计算时会产生负体积，利用负体积可以清除装甲车体内部空腔的体积。

图3中对于单个多面体是否存在浮力，利用MAK 视景仿真软件类函数(DtTerrain类)来检测

多面体网络的组成点 p_1 、 p_2 、 p_3 是否在该点的垂直方向的海浪之下。如果都在海浪之下则认为该多面体存在浮力。

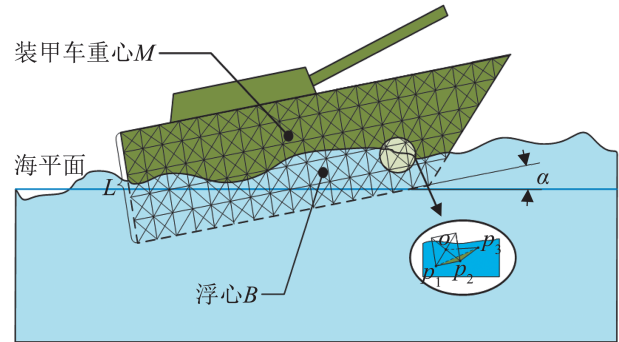


图3 浮力计算原理

Fig. 3 Principle of buoyancy calculation

浮力大小：

$$F_t = \rho g \sum V_i \quad (12)$$

式中： ρ 为流体的密度； g 为重力加速度。

浮心位置：

$$P_t = \frac{\sum p V_i}{\sum V_i} \quad (13)$$

式中： p 为第 i 个多面体 V_i 对应体心位置矢量。

浮力矩：

$$\tau_t = F_t H_t \quad (14)$$

式中： H_t 为浮力对装甲车重心的力臂。

3.2 阻力和CFD求解

3.2.1 阻力求解公式

装甲车在水上仿真运动过程会受到阻力影响，根据车辆航行阻力的不同机理可以将阻力分为摩擦阻力、兴波阻力、形状阻力。其中，兴波阻力垂直于装甲车表面；摩擦阻力为沿表面切线方向。本文装甲车与水面相对运动速度为低速(5 m/s)，摩擦阻力影响最大约占80%。兴波阻力和附加阻力影响较小分别约占15%和5%。

对于阻力的求解通过计算公式法在海浪流速和装甲姿态变化较小时较为准确，但是在随时发生变化的复杂海况下，两栖装甲的阻力求解步骤

就会变得复杂。为了使阻力系数更为准确, 采用CFD仿真软件求解阻力系数。

阻力计算公式为

$$F_f = \frac{1}{2} C_f \rho v^2 S \quad (15)$$

式中: C_f 为水阻力系数。

3.2.2 CFD求解公式

在CFD中计算两栖装甲阻力系数时, 流体对车体会产生影响^[14], 采用不可压缩流体运动方程求解流场信息:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_1}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{F} + \mu \nabla^2 \mathbf{v}_1 \quad (16)$$

式中: \mathbf{v}_1 为 t 时刻流体的速度; \mathbf{F} 为外力; p 为压力; μ 为动力粘度系数; ∇^2 为拉普拉斯算子。

CFD在水动力仿真求解中提供了许多湍流模型, 本文选择SST $k-\omega$ 模型。

湍动能 k 输运方程:

$$\frac{\partial(\rho_w k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_w U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho_w \beta^* k \omega \quad (17)$$

湍流比耗散率 ω 输运方程:

$$\frac{\partial(\rho_w \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_w U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho_w \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho_w \sigma_{\omega^2}}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (18)$$

湍动能生成项:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\rho_w k + \mu_t \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (19)$$

式中: t 为时间; F_1 为第一混合函数; x_i 、 x_j 、 x_k 为位置坐标; v_i 、 v_j 、 v_k 为速度分量; $\beta^*=0.09$; $\alpha=0.52$; $\beta=0.075$; $\sigma_k=1.176$; $\sigma_{\omega^2}=2$; $\rho_w=998 \text{ kg/m}^3$ 。

考虑到装甲车在水上运动时会对自由水产生扰动, 水相的体积分数会发生变化。因此, 运用VOF(volume of fluid)模型, 对装甲车区域以外的流体区域采用两相模型来跟踪自由面的变化, V_w 表示水相的区域, V_a 表示气相的区域, 水相的体积分数为

$$\alpha(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in V_w \\ 0, & \mathbf{x} \in V_a \end{cases} \quad (20)$$

对于水相和空气相接触的水气交界面组成的流域, $\alpha(\mathbf{x}, t)$ 满足:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \text{div} \alpha = 0 \quad (21)$$

式中: $\text{div} \alpha$ 为坐标分量; \mathbf{v}_i 为流域的速度分量。

$$\psi = \frac{1}{\Delta V} \int \alpha(\mathbf{x}, t) dV \quad (22)$$

式中: v 为体积分, 切分每个小网格下的体积。

其中 ψ 满足条件:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \text{div} \psi = 0 \quad (23)$$

当 $\psi=0$ 时, 表示该网格体积下为空气相; 当 $\psi=1$ 时, 表示该网格体积下为水相; 当 $0 < \psi < 1$ 时, 表示该网格体积为自由液面。

3.3 CFD仿真求解阻力系数

3.3.1 CFD仿真区域网格划分

为了使CFD仿真更为准确, 在ICEM软件中建立CFD流体模型需要对网格有更为精确的划分。因此, 对装甲车模型的网格划分采用混合网格形式, 远离装甲车的流体域采用结构化网格, 装甲车周围则采用非结构化网格。

仿真坐标系选取随体坐标系; 仿真流域大小为长度为车体长度的4倍; 流体入口距车体正向迎水面为2倍车体长(16 m), 出口距车尾1倍车体长(8 m), 控制区域底部与水汽交界面距离为5 m, 宽度设置为8 m; 装甲车不同姿态下的车辆自由边界面与车体的交线受车体重心位置以及吃水深度影响; 网格生成数量为80万网格。

3.3.2 CFD仿真初始化

CFD的仿真需要对边界和入口进行初始化。流体入口: 入口边界的速度、压力在初始时给定并需要满足狄利克雷条件, k 与 ω 按自由来流处理, 流体不可压缩; 流体出口: 压力出口边界; 对称边界: 为简化计算量, 可以将装甲车中轴剖面设为对称边界, 在对称面上法向速度为0; 壁

面：装甲车车体表面设为固壁边界，无滑移；数值计算方法：SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法。

3.3.3 CFD 仿真结果与分析

在装甲车仿真中，仿真入口水速和来流方向固定。装甲车体俯仰角在 -10° ~ 20° 变化中每隔 5° 建立一次仿真。装甲车俯仰角不同，装甲车静止在水中时浸水面积参考值也不同，装甲车仿真稳定时阻力大小不同。车体所受阻力如图4所示。

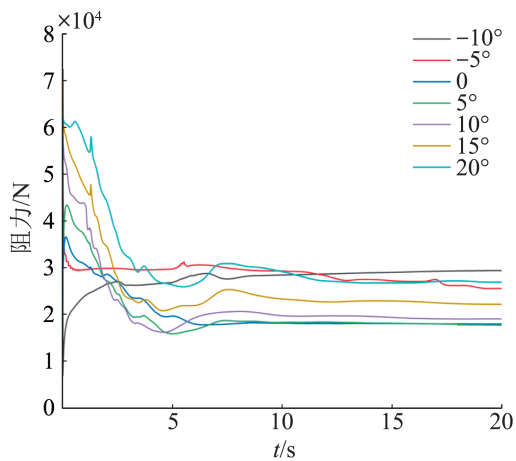


图4 车体不同姿态下阻力

Fig. 4 Resistance of armored vehicle in different postures

由图4可以看出，两栖装甲在不同姿态下的阻力变化的趋势基本上一致，在0 s时流域速度从无到有的产生会对装甲车的影响较大，所以应该舍去。在15 s左右增加装甲车所受阻力大小逐步趋向稳定。两栖装甲车在 -10° 姿态下的迎水面积最大受到的阻力最大， 5° 姿态下迎水面积最小，阻力也最小。随着迎水面积的增大，相同的来流速度对装甲车产生的阻力相对会增大，符合阻力公式。阻力系数的求解如表1所示。

对于每 5° 变化下的装甲车阻力系数可以根据表1得到，对于其他姿态角下的阻力系数可以运用插值计算法得到，最后将阻力系数代入到式(15)。通过上述方法可以得到装甲车在不同海况下阻力，进而进一步简化阻力系数的计算过程，并能够大大增加阻力求解的真实度。仿真结果如图

5~6所示。

表1 CFD 仿真阻力系数

Table 1 CFD simulated drag coefficient

迎水角度/ $^{\circ}$	迎水面积/ m^2	阻力大小/N	阻力系数
-10	8.1	29 391	0.290
-5	7.3	25 490	0.280
0	5.4	17 960	0.266
5	5.3	17 755	0.268
10	5.7	19 033	0.267
15	6.7	22 185	0.265
20	7.6	26 920	0.283

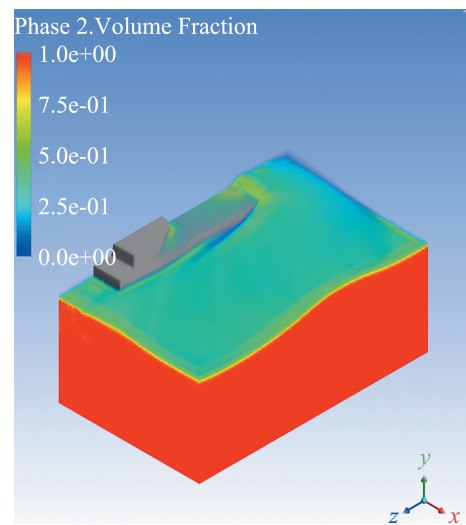


图5 两栖装甲水气两相图

Fig. 5 Water-air two phase diagram of amphibious vehicle

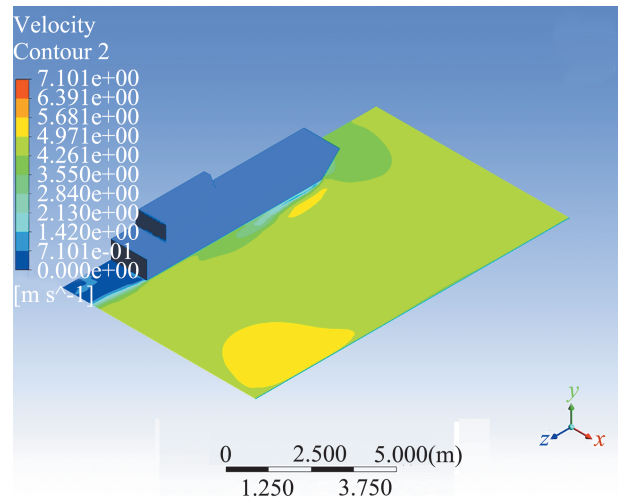


图6 两栖装甲速度矢量分布图

Fig. 6 Speed vector distribution of amphibious vehicles

图5~6分别为装甲车0°迎水角时自由液面的水气两相图和速度矢量图, 来流处引起波浪导致车首上水, 产生很大的阻力, 在车前和车两侧速度较大, 在装甲车尾流部分速度较小。

4 仿真结果

4.1 视景显示仿真

在装甲车视景仿真中, 仿真视景环境的细腻程度和装甲车水上运动受力分析的准确度是保证装甲车仿真逼真的关键因素。MAK视景仿真软件有着丰富的高质量模型材料库, 在MAK Stealth视景仿真软件中可以灵活地改变仿真环境, 例如, 云、雾、日光、风、动态海洋等。MAK视景仿真软件的基础架构是由C++进行编写, 用户可以通过软件自带的API函数库, 根据自己所需进行视景仿真程序的设计^[15]。本文视景仿真开发的MAK软件的视景程序主框架类结构如图7所示。

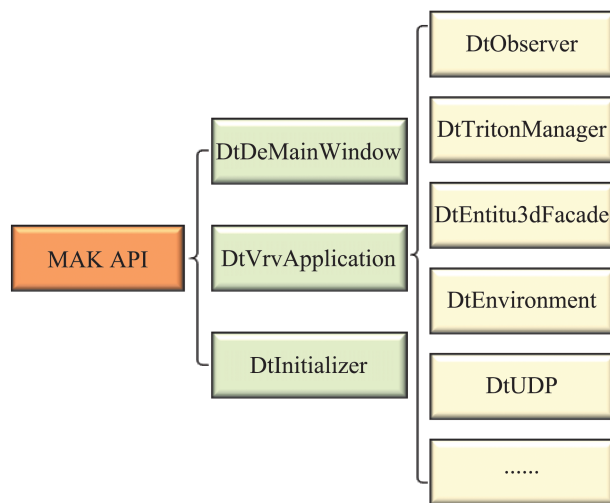


图7 MAK视景程序框架结构
Fig. 7 MAK visual program framework structure

MAK视景程序框架类结构主要分为3部分^[16]: DtDeMainWindow是配置视景显示页面窗口的类, 用于窗口的大小、窗口工具栏等元素编写; DtVrvApplication是实现仿真显示、实体信息输出等最为主要的类, 其中, 本文根据装甲车视景仿真需要获取到装甲车的浮力、装甲车姿态与位置、

UDP数据传输、模型和地形配置等仿真数据都是通过此类进行二次开发获得的。DtInitializer是配置仿真系统初始化的类, 用于初始化视景显示窗口。图8为两栖装甲仿真平台在MAK视景软件下的仿真效果图。

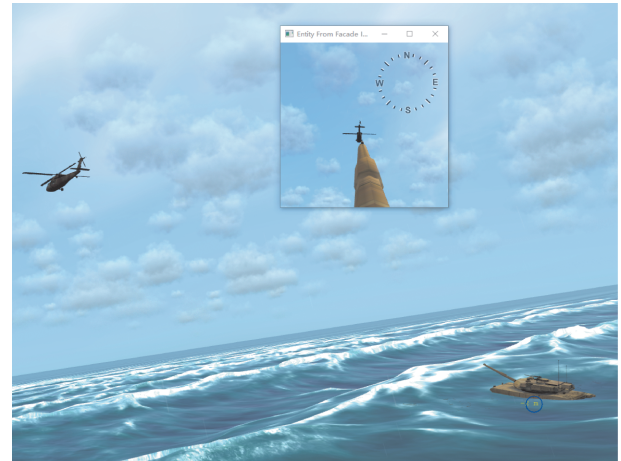


图8 视景仿真效果图
Fig. 8 Visual simulation results

4.2 两栖装甲仿真平台动力学仿真

4.2.1 仿真初始化

为了验证该仿真平台的有效性, 需要为火控系统添加火控控制器进行验证, 本文采用滑模控制作为火控系统控制器, 利用多刚体动力学和水上动力学计算两栖装甲车在MAK视景仿真软件下的受力与姿态变化。

4.2.2 火控系统滑模控制案例

滑模控制是一种鲁棒的控制方法, 具有调节参数少、响应速度快、对扰动不灵敏等特点被普遍使用^[17]。设 θ_r 为装甲车炮塔和炮管转向时的转动角度; θ 为实际的转动角度, 则滑模控制器的输入角度误差为

$$\theta_c = \theta_r - \theta \quad (24)$$

滑模控制器跟踪转向器与炮塔转角滑模面设计为

$$s = c\theta_c + \dot{\theta}_c \quad (25)$$

滑模趋近率采用指数趋近率:

$$\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sgn } s - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (26)$$

控制器输出为

$$\dot{\omega} = c\dot{\theta}_e + \ddot{\theta}_r + \varepsilon \cdot \text{sgn } s + ks \quad (27)$$

为了分析滑模控制器角度跟踪的稳定性，需要通过李雅普诺夫方程进行稳定性的验证：

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (28)$$

对函数 V 进行求导，并将式(26)代入可得

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = -\varepsilon |s| - ks^2, \quad k > 0, \varepsilon > 0 \quad (29)$$

得到正定函数 V 的时间导数为负定，即 $\dot{V} < 0$ ，因此，滑模收敛系统能达到稳定。

滑模控制器稳定角度为炮塔转角 θ_6 保持稳定在 2.09 rad，转向器转角 θ_7 稳定在 1.57 rad，如图9所示。

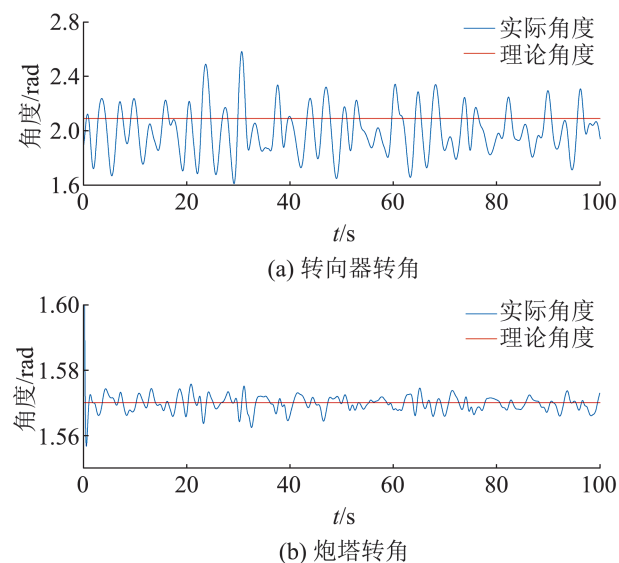


图9 转向器转角和炮塔转角
Fig. 9 Steering Angle and turret Angle

利用多刚体牛顿-欧拉迭代法和 Twist-Wrench 法可以求得转向器和炮塔角度变化时火控系统对两栖装甲车体产生的力矩，如图10所示。

结合火控系统稳定时产生的作用力对装甲车体的影响与装甲车体在三级海况下的水动力分析，在仿真模块中可以求出两栖视景仿真平台中车体的姿态角度变化，如图11所示。

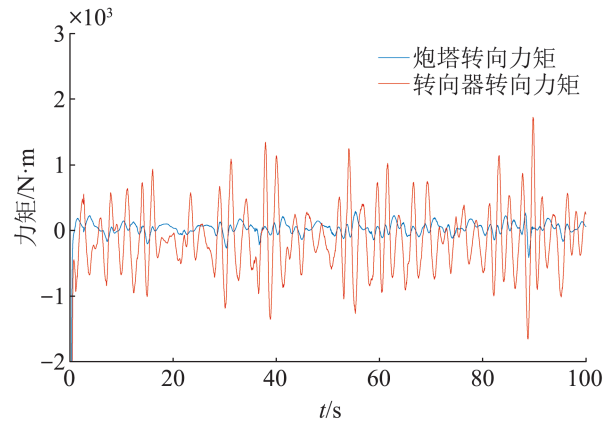


图10 转向器力矩和炮塔力矩
Fig. 10 Steering torque and turret torque

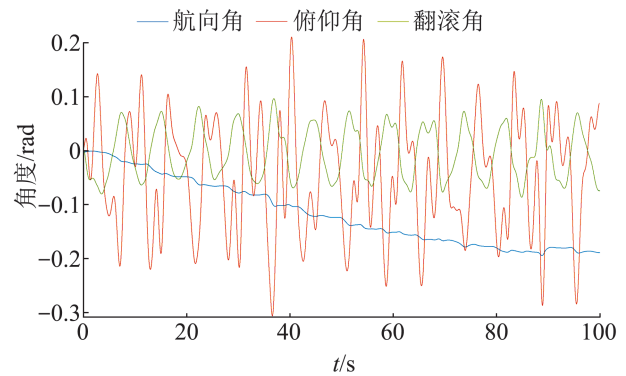


图11 装甲车姿态旋转角
Fig. 11 Armored vehicle attitude rotation angle

5 结论

针对目前的两栖装甲水上视景模拟仿真缺少对火控系统的验证开发平台，不能体现出火控系统在控制稳定时对两栖装甲姿态的影响；视景模拟仿真下水动力学模型仿真缺少实时性计算方法等问题，搭建了装甲车多刚体模型和车辆水上受力模型，在 MAK 视景仿真软件仿真下对装甲车水上运动过程进行建模仿真，以滑模控制为例验证两栖装甲水上运动仿真平台作为火控系统验证平台的有效性，得到火控系统在控制下的转角稳定角度和稳定力矩。通过浮力、阻力、火控力矩等驱动装甲车姿态变化。

上述方法可以运用在装甲车模拟器视景仿真中进行火控系统的开发验证，并且对舰船水上受

力分析有一定通用性。通过对该方法进行整合, 采用商业软件建立视景仿真模型能大大降低开发成本和开发周期。该方法也可作为今后开展大规模水上联合仿真的基础, 为创建统一场景下的多系统交互式仿真提供技术参考。

参考文献:

- [1] Monroe J G, Martin K, Ewing M, et al. Integrating Real-time Vehicle and Watercraft Modeling and Simulation Tools for Analysis of Amphibious Operations[C]// Modelling and Simulation for Autonomous Systems. Cham: Springer International Publishing, 2022: 113-126.
- [2] 谢云开, 孟祥辉, 张燕燕, 等. 两栖装甲车驾驶模拟器视景系统设计与实现[J]. 软件导刊, 2021, 20(10): 186-191.
Xie Yunkai, Meng Xianghui, Zhang Yanyan, et al. Design and Implementation of the Visual System of Amphibious Armored Vehicle Driving Simulator[J]. Software Guide, 2021, 20(10): 186-191.
- [3] 董志明, 郭齐胜, 宋敬华, 等. 海陆战场环境的实时视景仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1524-1526, 1532.
Dong Zhiming, Guo Qisheng, Song Jinghua, et al. Real Time Visual Simulation of Battlefield Environment of Foreshore[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1524-1526, 1532.
- [4] 郭立威, 王权, 高克斌, 等. 基于虚拟现实的装甲车辆运动仿真研究[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(6): 221-227.
Guo Liwei, Wang Quan, Gao Kebin, et al. Research on Armored Vehicle Motion Simulation Based on Virtual Reality[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(6): 221-227.
- [5] Zheng Shutao, Ye Zhengmao, Jin Jun, et al. 6-DOF Motion System of Amphibious Vehicle Driving Simulator Motion Parameter Design Research[J]. Key Engineering Materials, 2011, 460/461: 704-709.
- [6] Muhammad Akhimullah Bin Subari, Hudha K, Amer N H. Modeling and Verification of 7 DOF Armored Vehicle Model Considering Lateral Dynamics[J]. International Review on Modelling and Simulations, 2016, 9(4): 312-316.
- [7] 金建海, 周则兴, 张波, 等. 无人艇航行仿真关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(12): 2846-2853.
Jin Jianhai, Zhou Zexing, Zhang Bo, et al. Research on USV Navigation Simulation Key Technologies[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2846-2853.
- [8] Luo Jianhua, Song Chao, Li Ling. Navigation Stability Analysis of Amphibious Armored Vehicles by Computer Virtual Reality Technology[J]. Journal of Computers, 2020, 31(3): 289-302.
- [9] 王涛, 郭齐胜, 徐国英. 两栖车辆水上行驶流场的仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5130-5132, 5153.
Wang Tao, Guo Qisheng, Xu Guoying. Simulation for Flow Field Around Sailing Amphibious Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22): 5130-5132, 5153.
- [10] Yamashita H, Arnold A, Carrica P M, et al. Coupled Multibody Dynamics and Computational Fluid Dynamics Approach for Amphibious Vehicles in the Surf zone[J]. Ocean Engineering, 2022, 257: 111607.
- [11] Nakisa M, Maimun A, Ahmed Y M, et al. Numerical Estimation of Shallow Water Effect on Multipurpose Amphibious Vehicle Resistance[J]. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 2017, 14(1): 1-8.
- [12] Gao Shuang, He Bo, Yu Fei, et al. An Abnormal Motion Condition Monitoring Method Based on the Dynamic Model and Complex Network for AUV[J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109472.
- [13] Lynch K M, Park F C. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control[M]. New York: Cambridge University Press, 2017.
- [14] Peyret R, Taylor T D. Computational Methods for Fluid Flow[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] 赵金平, 杨任农, 王众, 等. 利用MAK Stealth进行视景仿真开发方法的研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(13): 3074-3076.
Zhao Jinping, Yang Rennong, Wang Zhong, et al. Research of Scene Simulation Developing Method with MAK Stealth[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(13): 3074-3076.
- [16] MAK Technologies Inc. VR-vantage 3.0 API Documentation[Z]. 2022.
- [17] Utkin V. Variable Structure Systems with Sliding Modes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.