

无人船运动模型建立及仿真实验

潘文鑫, 罗 昊, 陈亚楠, 刘潘宇

江苏海洋大学海洋工程学院, 江苏 连云港

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年11月14日

摘 要

船舶运动数学模型是船舶运动仿真和控制的核心。当前, 船舶运动数学模型主要分为整体结构模型与分离结构模型。本文采用分离结构模型研究船舶回转运动, 选取实船作为测试模型目标, 利用MATLAB中的Simulink模型在软件中建立了运动模型, 进行仿真, 得到船舶运动参数。研究成果为无人船实际应用提供技术支持和理论指导, 为船舶运动控制和仿真研究提供新思路。

关键词

无人船, 船舶运动模型, 仿真实验

Establishment of Unmanned Ship Motion Model and Simulation Experiments

Wenxin Pan, Hao Luo, Yanan Chen, Panyu Liu

College of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang Jiangsu

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 8th, 2024; published: Nov. 14th, 2024

Abstract

The mathematical model of ship motion is the core of ship motion simulation and control. Currently, mathematical models of ship motion are mainly divided into integral structural models and separated structural models. This article uses a separated structure model to study the ship's turning motion, with a 13,000 T bulk carrier as the test model target. A motion model is established in the software using Simulink in MATLAB for simulation, and the ship's motion parameters are obtained. The research results provide technical support and theoretical guidance for the practical application of unmanned ships, and offer new ideas for ship motion control and simulation research.

Keywords

Unmanned Ships, Ship Motion Model, Simulation Experiment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着时代发展,无人船作为被广泛运用的功能性船舶,在国内外得到了越来越多的关注。相较于有人船,无人船技术的安全性更高,适应性更强,且成本更加低廉,因此无人船可以前往更危险的海域进行探索任务。无人船技术路线主要分为船舶模型和算法研究,国内的一些高校及研究所在船舶动力学等方面进行了深入的研究,利用 Matlab/Simulink、ADAMS、MARECS 等软件建立了无人船模型,并通过 PID、模糊 PID、神经网络等多种算法进行控制研究[1],使无人船技术逐步与人工智能、大数据、云计算、物联网等尖端科技深度融合,实现了更为卓越的自主导航、环境感知、决策生成等执行能力。

国外相关研究聚焦于针对无人船的船体运动模型和算法研究方面。在船体运动模型的深入研究主要包括非线性动力学模型、利用神经网络及算法建立船舶体运动模型。在自主控制算法方面取得了基于模型预测控制的实时优化控制算法、基于自适应控制的无人船控制算法等。还利用了如 MATLAB、Simulink、ADAMS 等多种仿真软件进入无人船的动力学仿真模型,并进行了实践证明,以保证无人船控制系统的安全性和可靠性。

通过相关船体集群的排列特点进行分析,形成一种多平台的规模化无人船集群,面对复杂环境依然能够自主进行规避航行[2],并且国外还将无人船用于水下考古、海上救援、海洋工程等多个方面,并且在军事领域也日益受到重视。

2. 设计方案

船舶线性数学模型通常有两种方法,一种是以 Abkowitz 为代表的整体结构模型,将船舶的水动力和力矩进行泰勒级数展开,然后取一阶项进行重排和重写,最终建立数学模型。但是,由于整体建模法所需的水动力导数数据不够充分,响应模型参数计算会受到一定限制。因此我们选择另一种方法,日本拖船委员会(JTTC)提出的分离结构模型(MMG 模型),基于船舶运动线性化的思路,通过计算船型参数的水动力导数,建立船舶线性运动数学模型,描述船舶的线性运动特性。简化后的船舶运动的数学线性模型,根据船型参数直接计算水动力导数。利用 MMG 分离建模的优点,更方便地计算响应模型参数,同时充分利用船舶运动的特性进行线性化处理[3]。与整体建模法相比,该方法在模型参数计算方面受到的限制更少,能够更加准确地描述船舶的线性运动特性,为后续仿真和控制设计提供更可靠的数学基础。

以 MATLAB R2023a 软件为例,建立船体运动模型。我们选择使用 Simulink 工具帮助建立模型,我们可以通过将不同的图块相互连接形成输入位移,从而将系统建立起来。在 Simulink 环境中,用户能够轻松的连接这些块,以构造完整的反馈控制系统、数字信号处理器、数字通信系统或其他复杂的物理建模系统。在 Simulink 库模块浏览器中,用户可以浏览各种可用的模块库,例如数学运算、信号生成、状态空间等,并选择所需的模块,通过拖放模块建立仿真模型,可以进行模型设置和仿真操作。通过运行仿真来观察仿真结果,使用工具绘图、分析和调试仿真结果。

3. 设计方案实施

3.1. 建立流体动力模型

在软件中分别添加源与数字模块，设置参数并更改注释(V, u, n)。将 Divide1 设置为三输入，根据箭头指示方向将信号线与模块之间进行连接，其中包括 Gain 与 Divide 的分支连接，确保输入输出的正确配置。如图 1 所示。

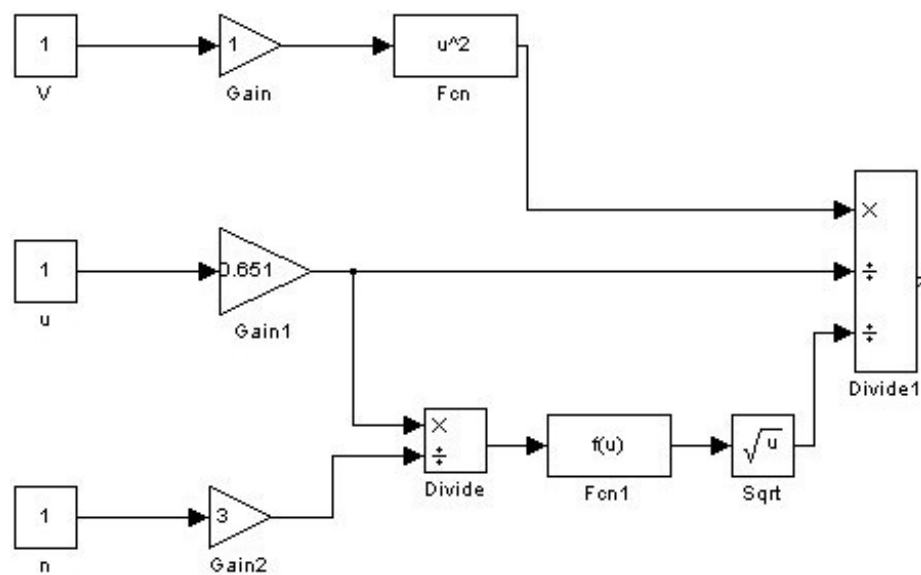


Figure 1. Simulink model diagram
图 1. Simulink 模型图

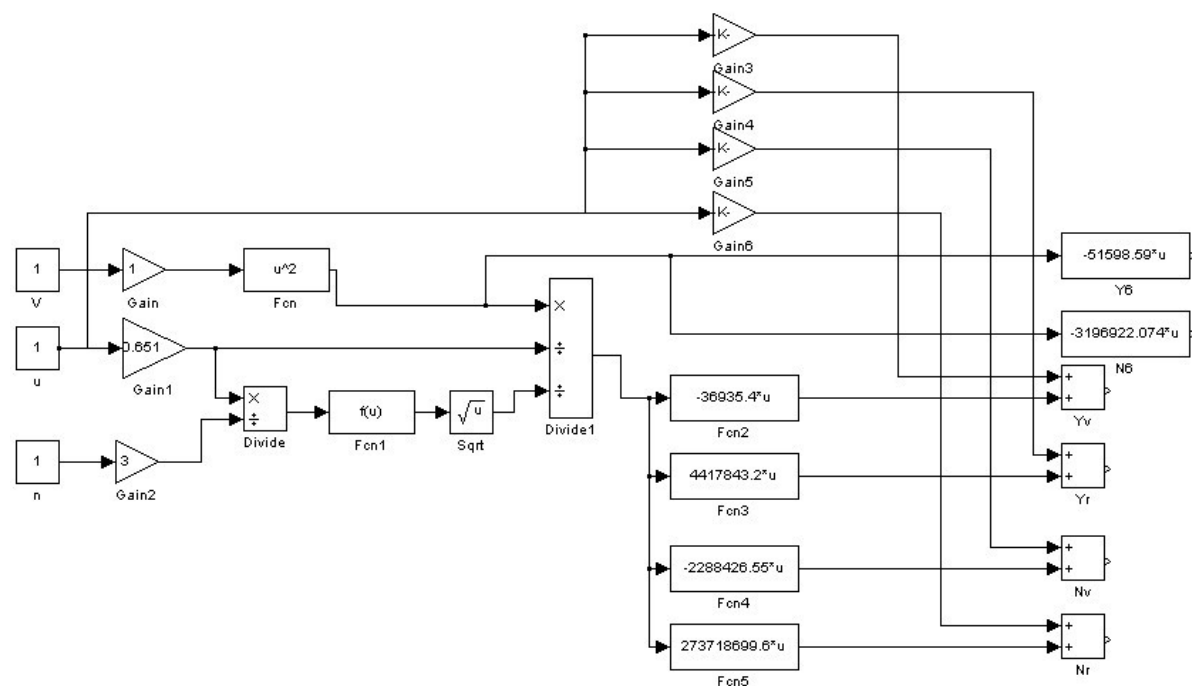


Figure 2. Fluid dynamics model
图 2. 流体动力模型

而流体动力模型根据公式将需要的模块拖动到模型窗口中，设置各模块的参数值，并更改模块的标签，最后连接模块，如图2所示。

3.2. 建立操作性指数 K、T 模型

基于流体动力模型，可以建立与截面的流体动力、质量和转动惯量相关的 K 和 T 的模型。这个过程与建立流体动力模型的方法相似。

- 1) 将模块库中需要的模块添加到模型窗口中
- 2) 修改模块参数和标签名称
- 3) 连接模块。如图3所示。

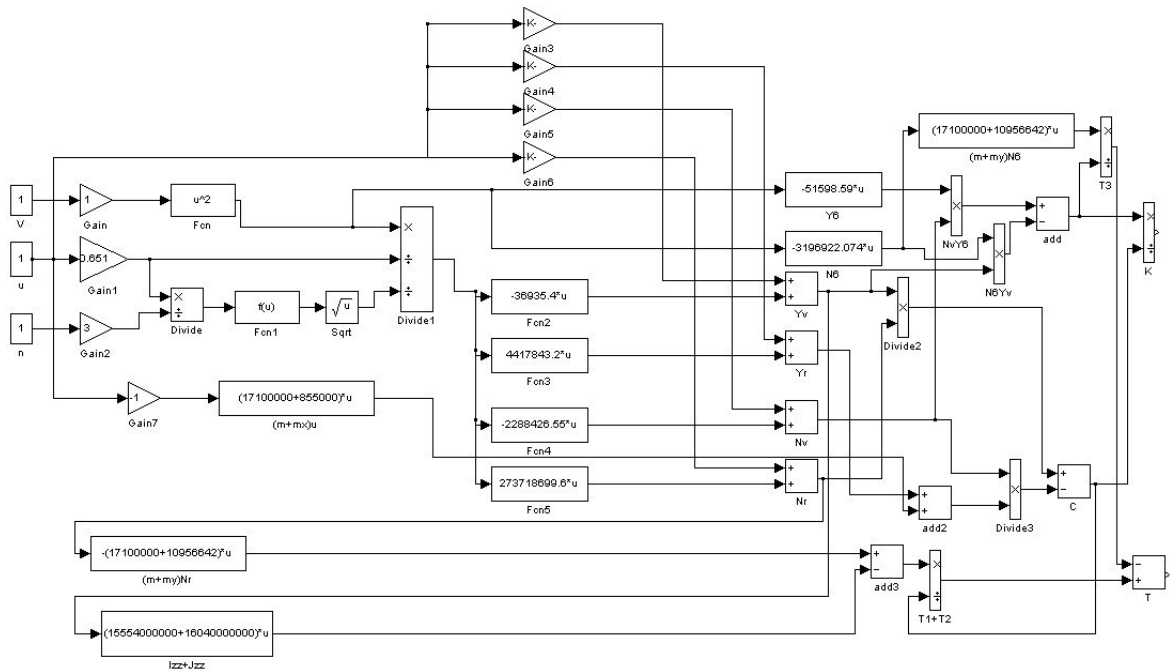


Figure 3. Operational index K, T model

图3. 操作性指数 K、T 模型

3.3. 建立线性响应型船舶运动模型

建立如式(1)的模型，即计算机动性指标 N 的模型，前提是 K 和 T 的模型已建立，实现以舵角为输入，转首角 φ 为输出的响应型船舶运动模型。

$$\varphi(t) = K\delta \left(t - T + Te^{(-t/T)} \right) \quad (1)$$

一阶转首响应方程为 $T\ddot{r} + \dot{r} = K\delta$ (其中 $r = \dot{\varphi}$)，将该方程积分求解后可得 $r = K\delta(1 - e^{-t/T})$ 然后在建立的模型 r 上再次进行积分就能求出转首角 φ 的变化。在 Simulink 中添加积分器，仿真时间表，示波器模块，选择需要的内部模块，设置好参数，标签，按照要求连接模块来监视航行轨迹与变量变化，接着，设置模型的参数，如果仿真过程在执行结束后没有出现任何错误和异常报告，则可以初步判断建立的模型在基础的结构和功能上是没有错误的，但是为了确保模拟的准确性以及可行性，需要进一步地进行包括参数敏感性分析和边界条件测试在内的检查，反复比较无误后基本上可以确定模型的正确建立。

建立附加舵角 $\Delta\delta$ 模型式(2)，建立线性响应型船舶运动模型时，将 v_R 视为常数输入。

$$\Delta\delta = \arcsin\left[4(M_a + M_R) / (58.85gA_Rv_R^2L)\right] / 2 \tag{2}$$

3.4. 模型整合

在构建复杂模型的过程中，随着子系统数量的增加，模型的可读性和管理难度也随之提升。为简化模型结构，提高其可维护性，Simulink 提供了压缩子系统的功能，通过将多个模块整合为单一的子系统模块，实现模型的模块化设计。

将整合压缩后的子系统至主模型中，通过合理布局，构建一个紧凑、高效的完整模型架构，模型的组合使管理与调整更加便捷。同时，对子系统进行微调，确保输入输出的清晰可见，优化后的船舶运动模型更易于理解 and 操作。此外，对模型中可能存在的除法运算零项问题进行修正，避免系统在特定输入条件下出现错误，微调后的模型在精度方面影响微乎其微。Simulink 所提供的仿真结果基于数学模型，可帮助设计者了解系统的性能，从而在完整的系统级设计过程中自动进行分析。Simulink 用户也能够进行更深入的设计和分析，包括特定环境测试、模拟不同运行条件下的建模系统性能、以及构建一个系统级仿真平台以整合其他设计过程。

4. 仿真回转实验

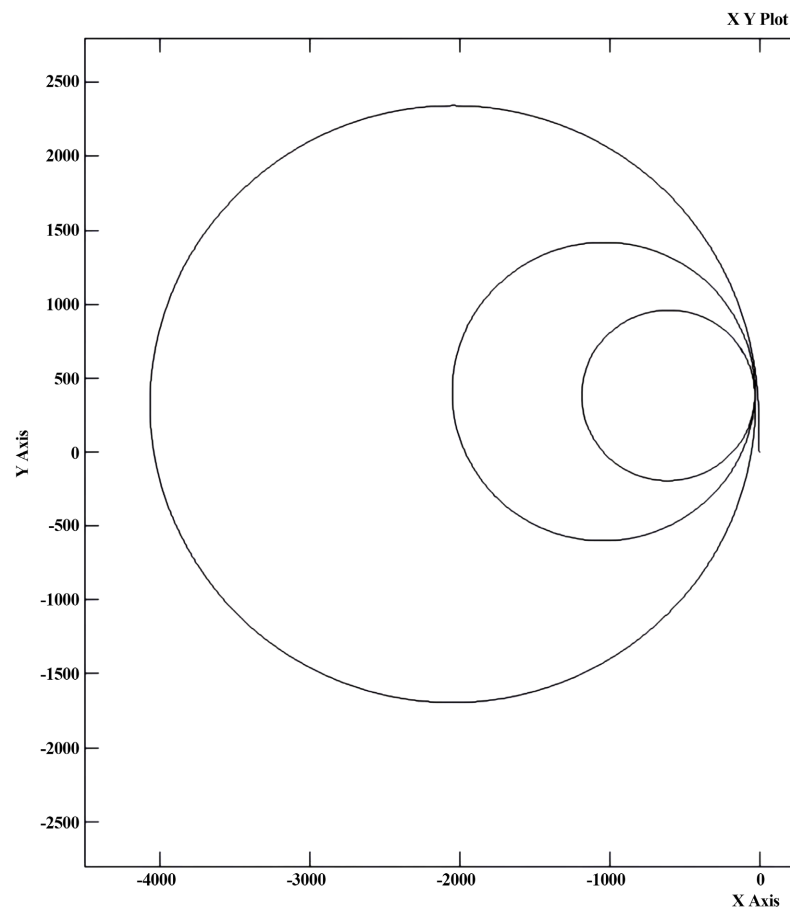


Figure 4. Ship turning circle test diagram
图 4. 船舶回转性试验图

建立船舶运动数学模型时，需要进行大量简化和假设，所以得到的模拟结果只能是一种近似。但是，

我们并不能单纯依靠这种方法来证明其近似程度,因此需要进行一系列典型试验来对其进行分析和比较,故设计相关典型试验来验证模型的准确性,并以 13,000 T 散货船为研究目标,利用船舶的线路响应模型,进行操作验证。

回转圈是船舶转向运动时重心 G 的运动轨迹,转弯圈试验可评估船舶操纵性能,包括转弯速度和水的尺寸。船舶在满舵时所达到的最小稳定转弯直径被视为评估其转弯性能的重要参考指标,称为最小转弯直径。稳定转弯直径与船舶长度之比,也常被用作衡量船舶转弯性能的相对指标。为了检验该模型是否符合基本的操纵要求,我们进行了船舶回转性能实验。

船舶回转性能是重要的船舶操纵性能指标之一,回转性能良好的船舶在海上航行时,易于转向操纵,便于绕过其他船舶或者障碍物,避免碰撞海损事故的发生,对船舶航行安全意义重大。海上航行试验中,各型油船的回转试验都是按照规格书要求在设计吃水下进行的,而 MSC.Res.137(76)国际船舶操纵性能标准要求回转试验数据需要在满载吃水下得到[4],不同吃水时的回转性能存在差异[5]。

设置船速和柴油速度(均按额定),保持不变;设舵角 δ 为 10° ,不考虑风、流的影响。将模块启动运行后,在船舶回转一圈时,立刻将 δ 变为 20° ;接着等待船舶再次绕一圈后,将舵角 δ 变为 35° 。

如图 4 所示,船舶回转圈操舵从最大到中间再到最小,依次为 10° 、 20° 、 35° 所划轨迹。计算可知 35° 时相对回转直径为 8.25,而普通大型货船的相对转弯直径通常在 3.5 至 7.5 之间。相对转弯直径越小,船舶的转弯性能越好,即操纵性越好。

5. 总结

本文通过运用 MMG 模型来研究 13,000 T 散货船的回转运动,通过计算船舶的主要参数,建立了线路响应模型,还利用 MATLAB 中的 Simulink 模型进行仿真实验,用来深入了解船舶的运动特性。通过使用 Simulink 中建立的仿真模型,可以得到船舶的运动特性。另外,本文还利用了 OSG 虚拟仿真技术对船舶回转运动进行了视觉上的仿真,有效地验证了所建立的船舶运动模型的有效性和可靠性。与普通的同类型船舶相比,该模型的 D/L 值范围更大,这表明在计算过程中该模型的一些参数可能存在偏差。

本文对无人船的船体运动模型和运动控制算法进行了建立和验证。通过数值仿真实验,验证了船体运动模型。虽然每艘船变化程度不同,基本规则相同。转弯能力不同,但轨迹为圆形。通过该模型的仿真,可以发现该模型基本上是正确的,因为通过模拟可以看出它是可以旋转的。通过深入探究无人船的运动特性与行为规则,可以为智能化控制和路径规划提供更全面、精确的理论指导,从而显著提升无人船的性能与效率,为我国海洋科技的持续进步与海洋资源的可持续利用做出重要贡献。鉴于其重要性,这一领域的研究将对推动社会科技发展产生重大影响,值得我们持续关注和深入探索。

基金项目

江苏海洋大学大学生创新创业项目支持。

参考文献

- [1] 佚名. 国内首款海洋测量专用无人船平台研制成功[J]. 军民两用技术与产品, 2016(13): 1.
- [2] 冯炜, 崔东华, 夏天冰, 闫昭琨, 王鸿东. 国外无人船集群运用特点分析及其应对启示[J]. 中国舰船研究, 2023(1): 1-12.
- [3] 董早鹏. 基于非对称模型的欠驱动 USA 运动控制技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [4] 海上安全委员会 MSC.Res.137(76). 国际船舶操纵性能标准[S]. 伦敦: 国际海事组织海上安全委员会, 2002.
- [5] 吴兆阳. 船舶回转性能分析[J]. 船舶与海洋工程, 2013(4): 14-18.