

10-30-2023

A Hybrid Empirical Method for Fast Modeling of Ship Manoeuvring Motion

Peng Wu

Guizhou Waterway Bureau, Guiyang 550000, China, 331851134@qq.com

Zongmo Yang

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering M. O. T. , Tianjin 300456, China, 1187291403@qq.com

Qianfeng Jing

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Yulin Li

Guizhou Waterway Bureau, Guiyang 550000, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering M. O. T. , Tianjin 300456, China

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.

A Hybrid Empirical Method for Fast Modeling of Ship Manoeuvring Motion

Abstract

Abstract: Simulation testing is an important means to verify the functions of intelligent ships. Ship maneuvering motion modeling and simulation is the key theoretical basis for the intelligent collision avoidance of multiple vessels in complex sea areas. To address the problem that the calculation of the hydrodynamic coefficients required for ship maneuvering modeling is complex and difficult to obtain, a hybrid empirical method is proposed, a combination method of the existing regression methods is established, the comprehensive performance indicators are constructed, the optimal hydrodynamic coefficients groups are selected by simulated maneuvering experiments, and a rapid modeling program code is developed based on MATLAB. The results show that, under limited ship parameters the proposed method can efficiently, conveniently, and automatically generate the maneuvering motion model of a given ship. The method is of important engineering practical significance for the simulation testing and verification of intelligent ships.

Keywords

intelligent ships, simulation testing, ship motion modeling, rapid simulation, hybrid empirical method

Recommended Citation

Wu Peng, Yang Zongmo, Jing Qianfeng, et al. A Hybrid Empirical Method for Fast Modeling of Ship Manoeuvring Motion[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2150-2160.

一种用于船舶操纵运动快速建模的混合经验法

吴鹏¹, 杨宗默^{2*}, 景乾峰³, 李玉林¹(1. 贵州省航务管理局, 贵州 贵阳 550000; 2. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
3. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 仿真测试是验证智能船舶各项功能的重要手段, 船舶操纵运动建模与仿真是实现复杂海域下多船智能避碰的关键理论基础。针对现阶段船舶操纵运动建模所需的水动力系数计算复杂且难以获取的问题, 提出一种混合经验法, 建立了现有回归公式的组合方法, 构建了综合性能指标, 通过仿真操纵试验对水动力系数组选优, 并基于 MATLAB 研发了快速建模程序代码。结果表明: 该方法能够在有限的船型参数下实现高效、便捷、自动化地生成给定船舶的操纵性运动模型, 对智能船舶的仿真测试验证具有重要的工程实践意义。

关键词: 智能船舶; 仿真测试; 船舶运动建模; 快速仿真; 混和经验法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)10-2150-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-FZ0793

引用格式: 吴鹏, 杨宗默, 景乾峰, 等. 一种用于船舶操纵运动快速建模的混合经验法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2150-2160.

Reference format: Wu Peng, Yang Zongmo, Jing Qianfeng, et al. A Hybrid Empirical Method for Fast Modeling of Ship Manoeuvring Motion[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2150-2160.

A Hybrid Empirical Method for Fast Modeling of Ship Manoeuvring Motion

Wu Peng¹, Yang Zongmo^{2*}, Jing Qianfeng³, Li Yulin¹(1. Guizhou Waterway Bureau, Guiyang 550000, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering M. O. T.,
Tianjin 300456, China; 3. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Simulation testing is an important means to verify the functions of intelligent ships. Ship maneuvering motion modeling and simulation is the key theoretical basis for the intelligent collision avoidance of multiple vessels in complex sea areas. To address the problem that the calculation of the hydrodynamic coefficients required for ship maneuvering modeling is complex and difficult to obtain, a hybrid empirical method is proposed, a combination method of the existing regression methods is established, the comprehensive performance indicators are constructed, the optimal hydrodynamic coefficients groups are selected by simulated maneuvering experiments, and a rapid modeling program code is developed based on MATLAB. The results show that, under limited ship parameters the proposed method can efficiently, conveniently, and automatically generate the maneuvering motion model of a given ship. The method is of important engineering practical significance for the simulation testing and verification of intelligent ships.

Keywords: intelligent ships; simulation testing; ship motion modeling; rapid simulation; hybrid empirical method

收稿日期: 2023-07-01

修回日期: 2023-08-23

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2022-221-007)

第一作者: 吴鹏(1976-), 男, 工程师, 学士, 研究方向为港口及航道工程。E-mail: 331851134@qq.com

通讯作者: 杨宗默(1989-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为通航安全。E-mail: 1187291403@qq.com

0 引言

随着智能船舶各项功能的不断发展,对智能化功能的验证需求不断增加。然而,实船实验难以充分覆盖各类复杂场景和极端态势,测试场景数据冗余性高、完备性低、耗时长、成本高。因此,虚拟仿真及虚实融合测试已成为智能船舶测试验证的必备手段^[1]。在虚实融合测试中,对船舶进行运动建模仿真是关键理论基础之一^[2],特别是在验证船舶智能避碰算法验证中,对目标船舶的操纵运动特性进行快速、便捷地水动力学建模已成为亟待解决的问题。

船舶在操纵运动中所受到的黏性流体动力/力矩的计算方法主要有实船/模型实验、CFD和回归公式3种方法^[3]。模型实验的优势在于得到的水动力系数精确,但每艘船舶都需要进行一系列实验,且物理实验的代价十分高昂;随着CFD理论的迅速发展,CFD方法的计算精度也在逐渐提高,其优势是无需物理实验,可通过数值水池来进行模型实验,但其数值求解和网格剖分较为复杂,需要人工优化和高性能算力基础;回归公式的优势在于,利用大量船舶模型或实船实验数据进行回归的函数对类似的船舶具有一定的普适性,且计算方便,对算力要求较低,在实验数据极其有限的情况下也能够提供较好的初始系数^[3]。

针对智能航行功能测试验证中的目标船操纵性建模,存在船舶详细水动力系数获取困难,缺少模型实验结果,操纵性指标较简略等问题,如何平衡建模精度和效率已成为目前的研究难点。为高效、便捷、自动化地生成给定船舶的操纵性水动力系数,提出一种结合模型实验、操纵运动仿真和回归方法的混合经验法,并基于MATLAB编制了水动力系数计算程序代码。该方法利用回归公式生成系数,并基于批量仿真实验结果和性能指标选取最优操纵水动力系数组。

1 船舶操纵运动建模

1.1 操纵水动力系数定义

为便于混合经验法中对系数组选优时进行矩阵运算,本节对操纵性水动力系数进行了统一矢量化处理,船舶运动建模仍采用模块化的设计理念,考虑船舶在常速域航行中受到船体“Hull”、螺旋桨“Propeller”和舵“Rudder”的作用力分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_H^i(u, v, r, p) = [F_H^1, F_H^2, \dots, F_H^6]^T \\ \mathbf{F}_P^i(u, v, r, p) = [F_P^1, F_P^2, \dots, F_P^6]^T \\ \mathbf{F}_R^i(u, v, r, p) = [F_R^1, F_R^2, \dots, F_R^6]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 为六自由度运动模态。在操纵系数中,3项水动力仅考虑1-纵荡(surge)、2-横荡 sway)、4-横摇(roll)、6-艏摇(yaw)4个自由度下的低频运动。

式(1)中的船体水动力和水动力矩可由泰勒级数形式表达,其中各项偏导数又称作船体水动力导数,结合桨、舵的操纵性参数,本文一并称作操纵水动力系数。偏导数按泰勒级数的阶次可分为线性和非线性水动力系数,将水动力系数矢量化表达式为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial u} \\ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial v} \\ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial r} \\ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_u \\ \mathbf{F}_v \\ \mathbf{F}_r \\ \mathbf{F}_p \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial^2 u} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial u \partial r} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial u \partial p} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{uu} \\ \mathbf{F}_{ur} \\ \mathbf{F}_{up} \\ \dots \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{\partial^3 \mathbf{F}}{\partial^3 u} \\ \frac{\partial^3 \mathbf{F}}{\partial^3 v} \\ \frac{\partial^3 \mathbf{F}}{\partial u \partial v \partial r} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{uuu} \\ \mathbf{F}_{vvv} \\ \mathbf{F}_{uvr} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

本文从线性和非线性2个方向对现有文献中的船体水动力系数回归方法进行梳理。操纵运动中模态 $i=1, 2, 4, 6$ 的船体水动力的组成为

$$\begin{bmatrix} F_H^1 \\ F_H^2 \\ F_H^4 \\ F_H^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{H,NL}^1(v, \beta, r) + R_T(u) \\ F_{H,L}^2(v, \beta, r) + F_{H,NL}^2(v, \beta, r) \\ F_{H,L}^4(\phi, p) + F_{H,NL}^4(p) + f(F_H^2, F_R^2) \\ F_{H,L}^6(v, \beta, r) + F_{H,NL}^6(v, \beta, r) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R_T(u)$ 为船体的直航阻力,即与纵向速度 u

相关的船体水动力； $f(F_H^2, F_R^2)$ 为由船体横向力和舵的横向力引起的横摆力矩。

以上水动力系数一般为状态量 (u, v, r, ϕ, p) 的函数，在相当一部分文献中，水动力系数是状态量 (u, β, r, ϕ, p) 的函数。其中， β 为漂角，与分速度 u, v 的关系如式(4)所示。实际使用中可以根据该式进行状态量的转换。

$$\begin{cases} |U| = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \tan \beta = \frac{-v}{u}, \sin \beta = \frac{-v}{|U|}, \cos \beta = \frac{u}{|U|} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 直航阻力计算

船体直航阻力 $R_T(u)$ 的计算方法主要基于实验结果或图谱回归分析，例如，BSRA回归公式^[4]和Holtrop的系列研究^[5]。2019年，Nikolopoulos等对Holtrop的方法进行了全面的参数化研究，提出了针对该方法的标定及修正，同时也证明了该方法的精度和可扩展性^[6]。因此，本文采用文献[5]中的方法计算直航阻力

$$R_T(u) = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (5)$$

式中： R_F 为摩擦阻力； k_1 为船体黏性阻力的形状因子； R_{APP} 为船舶附体阻力； R_W 为船舶兴波阻力； R_B 为船舶球鼻艏引起的阻力； R_{TR} 为浸入式船艏引起的阻力； R_A 为模型实验修正系数。

1.3 桨/舵控制力计算

螺旋桨的纵向推力 F_P^1 的计算式为

$$\begin{cases} \beta_p = \beta - x'_p r' + z'_p p' \\ w_p = w_{p0} [1 - (1 - \cos^2 \beta_p)(1 - |\beta_p|)] \\ u_p = u(1 - w_p), J_p = \frac{u_p}{nD_p} \\ K_T(J_p) = k_2 J_p^2 + k_1 J_p + k_0 \\ F_P^1 = (1 - t_{p0}) T_p = (1 - t_{p0}) \rho n^2 D_p^4 K_T(J_p) \end{cases} \quad (6)$$

式中： β_p 为操纵运动中螺旋桨的几何流入角； x'_p 为螺旋桨位置的无量纲纵向坐标； z'_p 为螺旋桨位置的无量纲垂向坐标； w_{p0} 为初始伴流系数； w_p 为瞬时伴流系数； J_p 为进速比； D_p 为螺旋桨直径； u_p 为流入速度；推力系数 $K_T(J_p)$ 由 J_p 和 k_i 的二阶

多项式构成； t_{p0} 为推力减额因子； n 为螺旋桨转速； T_p 为螺旋桨推力。

舵的水动力和力矩 F_R^i 的计算式为

$$\begin{cases} U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}, v_R = U \gamma_R (\beta - l'_R r') \\ u_R = \varepsilon_R u_p \sqrt{\left\{ 1 + \kappa_R \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_p^2}} - 1 \right) \right\}^2 + \left(1 - \frac{D_p}{H_R} \right)} \\ F_N = 0.5 \rho A_R U_R^2 f_a \sin \left(\delta - \arctan \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \right) \\ f_a = \frac{6.13A}{A + 2.25} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_R^1 = -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ F_R^2 = -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ F_R^4 = -z_R (1 + a_H) F_N \cos \delta \\ F_R^6 = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{cases} \quad (8)$$

式中： U_R 为舵流入合速度，对应的分量为 u_R, v_R ； l'_R 为舵位置的无量纲有效纵向坐标； ε_R 为桨舵位置下的伴流系数之比； κ_R 为实验常数； H_R 为舵高； F_N 为舵正压力； A_R 为舵叶面积； f_a 为舵正压力梯度系数； A 为舵展弦比； t_R 为转向阻力减免系数； a_H 为舵力增加系数； z_R 为舵位置垂向坐标； x_R 为舵位置实际纵向坐标； x_H 为转向引起的附加横向力分量作用点的纵向坐标。

在上述水动力系数计算中，上标符号“ $'$ ”表示无量纲化后的值。

1.4 操纵运动模型

基于模块化理念构建船舶四自由度操纵运动模型为

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) v_m r - m x_G r^2 + m z_G r \dot{\phi} = \\ F_H^1 + F_R^1 + F_P^1 \\ (m + m_y) \dot{v}_m - (m + m_x) u r + x_G m r = F_H^2 + F_R^2 \\ (I_x + J_x + m z_G^2) \dot{p} - m z_G (\dot{v}_m + x_G \dot{r} + u r) = F_H^4 + F_R^4 \\ (I_z + J_z + m x_G^2) \dot{r} + m x_G (\dot{v}_m - z_G \dot{p} + u r) = F_H^6 + F_R^6 \end{aligned} \quad (9)$$

式中： m_x, m_y 为附加质量系数； I_x, I_z 为船体惯性矩； J_x, J_z 为船体附加惯性矩，在没有模型实验数据的情况下可根据文献[7]近似计算； x_G, z_G 分别为船舶重心的纵向和垂向坐标。

2 混合经验法

为高效、便捷、快速地建立给定船舶的操纵性模型, 本文提出一种结合模型实验、操纵运动仿真和回归公式的混合经验法, 并基于 MATLAB 实现了水动力系数计算程序代码。

2.1 计算流程

混合经验法的整体流程如图 1 所示, 在开始计算前需准备 3 部分数据: 船舶实验系数, 即已有的模型、实船实验获取的水动力系数; 船舶参数, 即表 1 所列的参数; 操纵性指标, 即能搜集到的所有直航、旋回、Z 形实验等指标数据。在 MATLAB 中分别构造基础参数矩阵 “ship.mat” 和静态系数矩阵 “shatic.mat”, 然后利用上述矩阵计算船体水动力系数, 并进行组合, 最后对不同系数组进行批量仿真实验, 根据性能指标选择最优系数组构建船舶操纵性模型。

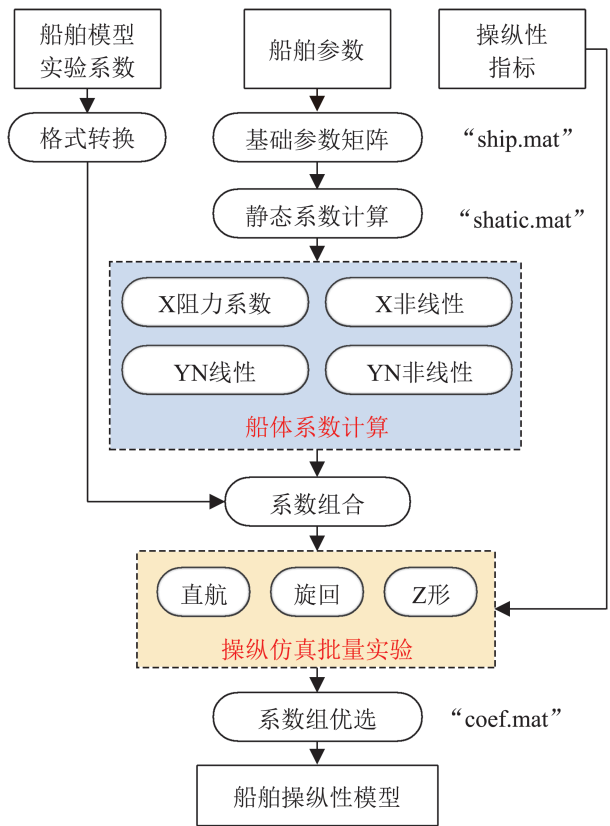


图 1 混合经验法流程图

Fig. 1 Flowchart of hybrid empirical method

表 1 船舶基本参数

Table 1 Basic ship parameters

基础参数	含义	基础参数	含义
Δ/t	排水量	C_b	方型系数
L_{pp}/m	垂线间长	C_p	菱形系数
L_{OA}/m	全长	C_w	水线面系数
B_M/m	型宽	D_p/m	桨直径
D_M/m	型深	H_R/m	舵高
d_A/m	艏吃水	A_R/m^2	舵叶面积
d_F/m	艉吃水		

2.2 水动力系数组合

在对水动力系数进行组合之前, 需要构造给定船舶的基础参数矩阵和静态系数矩阵, 在此基础上根据不同回归公式计算线性、非线性船体水动力系数, 并对不同系数进行组合。

2.2.1 基础参数矩阵

用于构造基础参数矩阵 “ship.mat” 的参数主要包括基本参数和常用系数两部分, 在搜集到表 1 中的基本参数后, 可根据表 2 中的定义, 对后续步骤所需的常用系数预先进行计算, 其中, d_A, d_F 表示船艏和船艉吃水; ∇_A 表示船体最大排水体积; A_X 表示船体最大横剖面面积; C_{pa} 表示船尾菱形系数; C_{wa} 表示船尾水线面系数, 这些系数用于后续回归公式的计算, 最终将两部分参数组成基础参数矩阵。

表 2 常用系数定义

Table 2 Commonly used coefficients definitions

符号	计算方法
d_M	$d_M = (d_A + d_F)/2$
τ	$\tau = (d_A - d_F)/d_M$
λ_H	$\lambda_H = 2d_M/L_{pp}$
l_β	$l_\beta = \lambda_H / \left(0.5\pi\lambda + 1.4C_b \left(\frac{B}{L_{pp}} \right) \right)$
C_{pa}	$C_{pa} = \nabla_A / (A_X L_{pp}/2)$
C_{wa}	$C_{wa} = A_{WA} / (BL_{pp}/2)$
e_a	$e_a = (L_{pp}/B)(1 - C_{pa})$
e'_a	$e'_a = e_a / \sqrt{0.25 + \left(1 / \left(\frac{B}{d_M} \right)^2 \right)}$
σ_a	$\sigma_a = (1 - C_{wa}) / (1 - C_{pa})$
k_β	$k_\beta = \left(\frac{1}{e'_a} + \frac{1.5B}{L_{pp}} - 0.33 \right) (0.95\sigma_a + 0.4)$

2.2.2 静态系数计算

由于桨、舵相关的部分水动力系数在常速域航行的场景下可近似为不随船舶运动状态实时变化。表 3 梳理了桨舵静态系数的计算方法，共涉及 11 项系数，最终根据表 1~2 中的基础参数计算后构造静态系数矩阵“static.mat”。

表 3 桨舵水动力系数
Table 3 Coefficients of propeller and rudder

系数	文献出处	系数	文献出处
w_{p0}	[8-11]	a_H	[9, 14, 20]
κ_R	[12-15]	l_R	[9, 14-15]
t_{p0}	[5, 8-11]	z_R, z_P	[22]
x_H	[14, 16-19]	ε_R	[9, 23-24]
γ_R	[9, 14, 20-21]	l_R	[9, 20, 25]

2.2.3 船体系数计算

船体系数计算主要包含 $i=1, 2, 6$ 运动模态上的线性和非线性水动力系数。在混合经验法中，式 (9) 中船体的水动力/力矩 $F_{H,L}^i$ 由线性和非线性系数组成的高阶多项式 $F_{H,L}^i$ 和 $F_{H,NL}^i$ 组成。在 $i=1$ 方向上的船体线性系数即阻力按式 (5) 计算，非线性系数与对应的模型结构如表 4 所示。其中，共有 5 种系数计算方法和 4 种模型结构。

表 4 非线性系数 ($i=1$)
Table 4 Nonlinear coefficients ($i=1$)

序号	水动力系数模型
1 ^[26]	$F_{H,NL}^1 = X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{vvv}v^4$
2 ^[27]	同上
3 ^[9]	$F_{H,NL}^1 = X_{\beta\beta}r\sin\beta$
4 ^[18]	$F_{H,NL}^1 = X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2$
5 ^[28]	$F_{H,NL}^1 = (ax2 \cdot \sin^2\beta + ax4 \cdot \sin^2(2\beta)) \cdot \cos\beta + bx1 \cdot r \sin\beta + bx2 \cdot r\sin(2\beta) + \text{sign}(\cos\beta)$

与 $i=2, 6$ 模态相关的船体线性水动力系数及模型结构如表 5 所示，非线性系数及模型结构如表 6 所示。

表 5 线性系数 ($i=2, 6$)
Table 5 Linear coefficients ($i=2, 6$)

序号	水动力系数模型
1 ^[29] , 2 ^[9] , 3 ^[30] , 4 ^[17] , 5 ^[15]	$\begin{cases} F_{H,L}^2 = Y_{\beta}\beta + Y_r r \\ F_{H,L}^6 = N_{\beta}\beta - N_r r \end{cases}$
6 ^[31] , 7 ^[32] , 8 ^[33] , 9 ^[18] , 10 ^[34]	$\begin{cases} F_{H,L}^2 = Y_v v + Y_r r \\ F_{H,L}^6 = N_v v + N_r r \end{cases}$

表 6 非线性系数 ($i=2, 6$)

Table 6 Nonlinear coefficients ($i=2, 6$)

序号	水动力系数模型
1 ^[35] , 2 ^[36] , 3 ^[18]	$\begin{cases} F_{H,NL}^2 = Y_{vv}v^2 + Y_{vr}vr + Y_{rr}r^2 \\ F_{H,NL}^6 = N_{rr}r^2 + N_{vrr}vr^2 + N_{vvv}v^2r \end{cases}$
4 ^[7] , 5 ^[9]	$F_{H,NL}^2 = Y_{\beta\beta} \beta \beta + Y_{\beta r} \beta r + Y_{rr}r r$
6 ^[30] , 7 ^[17]	$F_{H,NL}^6 = N_{rr} r r + N_{\beta rr}\beta r^2 + N_{\beta\beta r}\beta^2r$
8 ^[28]	$\begin{cases} F_{H,NL}^2 = (ay1 + cy1 \cdot r^2)\sin\beta + ay3 \times \sin3\beta + ay5 \times \sin5\beta + (dy1 \times r + ey1 \times r^3)\cos\beta \\ F_{H,NL}^6 = (an2 + cn2 \times r^2)\sin2\beta + an4 \times \sin4\beta + dn0 \times r + en0 \times r^3 + dn2 \cdot r \cdot \cos2\beta \end{cases}$

船体的横摇力矩 F_H^4 计算式为

$$\begin{cases} F_H^4(\phi, p) = F_{H,L}^4(\phi, p) + F_{H,NL}^4(p) + f(F_H^2, F_R^2) \\ F_{H,L}^4(\phi, p) = -mgGM_T\phi + K_p p \\ F_{H,NL}^4(p) = K_{pp}p|p| \\ \frac{z_H}{d_M} \approx 0.285, \frac{z_R}{d_M} \approx 0.57 \\ f(F_H^2, F_R^2) = -z_H F_H^2 - z_R F_R^2 \\ K_p = -(2a/\pi) \sqrt{mgGM_T(I_x + J_x)} \\ K_{pp} = -0.75b(180/\pi)(I_x + J_x) \end{cases} \quad (10)$$

式中： z_H 为船体横向力 F_H^2 的作用点垂向坐标； z_R 为舵横向力 F_R^2 的作用点垂向坐标；系数 a, b 为从船舶横摇激励曲线中获取的系数，在没有实验数据的情况下，可利用近似船型的系数代替。

2.2.4 系数组合方法

根据上述系数计算方法及模型结构，对式 (9) 中的线性、非线性力和力矩进行所有回归方法的计算，对所有可选的系数及对应的模型结构进行排列组合，生成用于批量仿真实验的系数组矩阵。例如 $i=1, 2, 6$ 运动模态的系数全部采用序号为 1 (表 4~6) 的计算方法及模型结构，可形成一组系数，其余系数组依此类推。

2.3 水动力系数选优

混合经验法的特色之一是在有限的船型参数下，尽可能利用已有的操纵性指标来计算合理的水动力系数。对不同系数组建立的模型进行仿真操纵实验，并设计性能指标对不同系数组进行选优，最终获得当前有限参数条件下较优的操纵性

模型。

2.3.1 操纵仿真实验

基于大量水动力系数组建立的操纵性模型进行3类批量化仿真实验, 分别为快速性、旋回和Z形实验, 主要的操纵性指标如表7所示。

表7 常用操纵性指标

Table 7 Commonly used maneuverability indices	
操纵性指标	指标含义
$A_D(\pm\delta, n)$	左/右旋回进距
$T_R(\pm\delta, n)$	左/右旋回横距
$T_D(\pm\delta, n)$	左/右旋回初径
$OSA_{1st}(\pm\delta/\delta, n)$	第一超越角
$OSA_{2nd}(\pm\delta/\delta, n)$	第二超越角
$v(n)$	船舶设计航速

注: $\pm\delta$ 表示实验中的左右舵角数值; n 表示在何种桨转速工况下的指标。

2.3.2 选优性能指标

在系数选优过程中, 对每组系数中的各项实验指标求取均方根误差, 并对不同组间的误差进行对比, 选取最小误差组作为最优系数。

某组水动力系数的均方根误差为

$$E_{RMS,i} = \sqrt{\frac{1}{N_{sim}} \sum_i^{N_{sim}} e_i^2} \quad (11)$$

$$e_i = |I_i^{sim} - I_{exp}| / I_{exp},$$

$$I_i = (A_D, T_D, OSA_{1st}, OSA_{2nd}, v, \dots), i = 1 \sim N_{sim}$$

式中: e_i 为单个操纵性实验结果中与操纵性指标的相对误差; N_{sim} 为对于一组系数进行的操纵性实验个数; I_i 为某个具体的操纵性指标, 例如, 旋回进距等。

3 验证实例及分析

为验证混合经验法的有效性, 计算了一艘散货船的不同水动力系数组合, 该散货船基本参数如表8所示。根据2.2节描述, 本文方法共计算出 $5 \times 10 \times 8 = 400$ 组水动力系数, 为清晰展示计算结果, 对上述系数组的批量化仿真实验进行过滤, 剔除了未能完成所有仿真实验的系数组, 最

终给出前7组结果, 如表9所示。在参数选优过程中, 该船具有5种转速工况($n=122$ 、90、80、58、42)下的航速、2种转速工况($n=122$ 、90)下的满舵左右旋回指标(进距、横距、初径)、1种转速工况下($n=122$)的2组不同舵角($\pm 20^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$)Z形实验指标(第一、第二超越角)。

表8 散货船基本参数

Table 8 Basic parameters of bulk carrier			
基础参数	数值	基础参数	数值
Δ/t	34 757	C_b	0.790 6
L_{pp}/m	160.4	C_p	0.798 7
L_{OA}/m	169.37	C_w	0.884 7
B_M/m	27.2	D_p/m	5.25
D_M/m	13.6	H_R/m	7.29
d_A/m	10.5	A_R/m^2	26.4
d_F/m	9.82		

表9 水动力系数组

Table 9 Hydrodynamic coefficients groups			
组号	$F_{H,NL}^1$	$F_{H,L}^{2,6}, F_{H,L}^6$	$F_{H,NL}^{2,6}, F_{H,NL}^6$
1	No.5		No.8
2	No.1	No.10	No.4
3	No.1	No.5	No.1
4	No.1	No.8	No.2
5	No.1	No.1	No.5
6	No.1	No.6	No.7
7	No.1	No.3	No.6

注: No.1~No.10对应表4~6中的序号。

3.1 快速性实验

在快速性实验中, 由于船舶仅做单自由度运动, 横向和转艏速度近似为零, 仅需计算 $i=1$ 运动模态下的桨推力 F_p^1 和 F_H^1 中的直航阻力 $R_T(u)$, 仿真实验结果与实船指标对比如图2所示。

3.2 旋回实验

在旋回实验中, 实船不同桨转速 n 下完成整个旋回的时间均在200 s以内, 初始状态为两档固定转速下的直航, 环境近似为静水, 风、海流和海浪忽略不计。因此, 仿真实验与实船实验保持一致, 仿真时长设置为300 s。在 n 为122 r/min 和

90 r/min 下的左右 35° 舵角旋回仿真轨迹如图 3~4 所示。其中, 每组系数对应的仿真轨迹 “Sim-x” 用不同颜色和符号标识, 船舶初始沿 x 轴航行, 初始艏向为 0, 利用船舶符号标注了 90° 和 180° 艏向时的位置, 仿真实验中的旋回进距、横距、旋回初径根据上述 2 个位置的横、纵坐标获得。

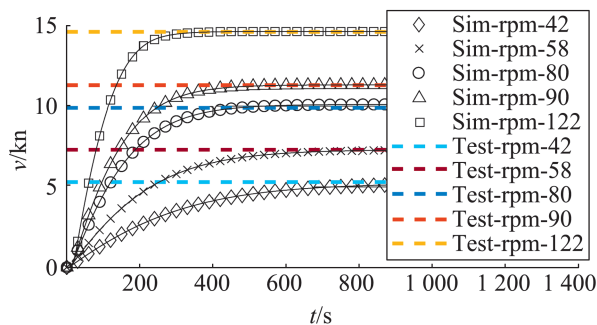
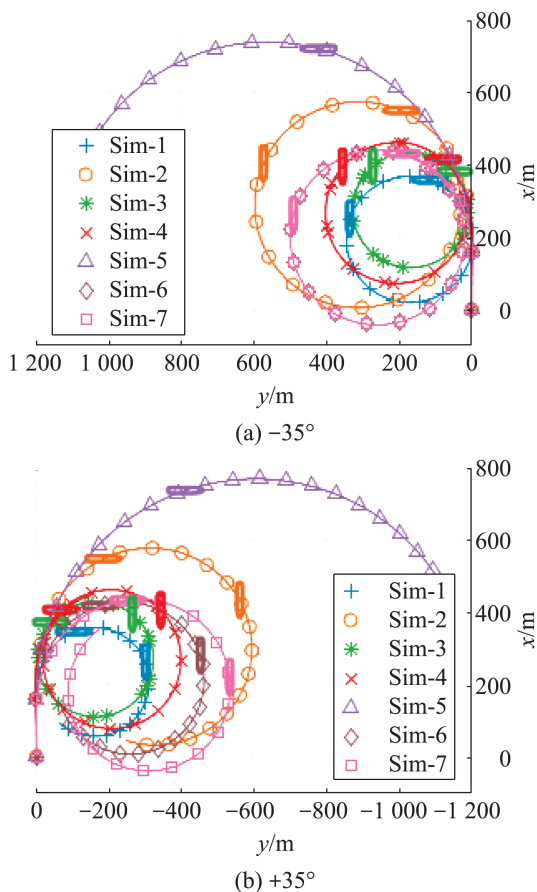
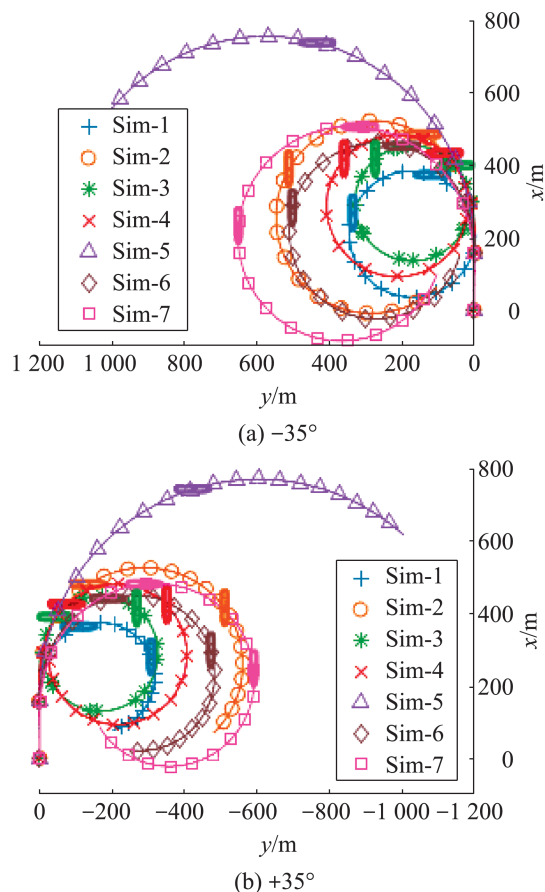


图2 船舶快速性实验指标对比

Fig. 2 Comparison of ship resistance experiment indices

图3 旋回实验对比($n=122$ r/min)Fig. 3 Comparison of turning experiment ($n=122$ r/min)图4 旋回实验对比($n=90$ r/min)Fig. 4 Comparison of turning experiment ($n=90$ r/min)

从旋回实验的完成度来看, 系数组 Sim-5 在两档 n 下的右旋回实验均未在给定时间内完成。从操纵性指标来看, 该船在 n 为 122 r/min 下的实船旋回初径为 590 m (左旋回) 和 536 m (右旋回), 从图 3 可以看出, 系数组 Sim-2 和 Sim-7 下的左、右旋回初径最接近实船指标; 该船在 n 为 90 r/min 下的实船旋回初径为 472 m (左旋回) 和 517 m (右旋回), 图 4 显示出系数组 Sim-2 和 Sim-6 与实船性能指标最为接近。

3.3 Z形实验

Z形实验包括固定转速 $n=122$ r/min 下的 $\pm 10^\circ/10^\circ$ 和 $\pm 20^\circ/20^\circ$ 共 4 组结果, 如图 5 和图 6 所示, 其中每组曲线的符号与图 3 和图 4 中保持一致。舵角和艏向对比中可以看出, 7 组系数下的 Z 形实验中第一超越角出现的时机差异较小, 而第一超越角

的值差距较大; 第二超越角的出现时机和值的组间差异均较大; 与旋回仿真实验的结果类似, 不同系数组对应的操纵性指标差异较大, 这是由于不同系数组对应了不同的水动力建模和计算方法, 使仿真过程中船舶所受的水动力计算值不同, 并最终导致性能指标的差异。

3.4 结果分析

上述 7 组系数共 8 次仿真实验(4 次旋回、4 次 Z 形)所得到的共 12 个指标的对比如表 10 所示。表 10 给出了每项指标对应的实船参考值。根据式(11)计算所有单项指标的均方根误差 $E_{RMS,i}$, 最终 7 号系

数组为最优系数组, 5 号系数组未能在指定时间内完成 2 档转速下的右旋回实验, 因此对应的 T_D 为“Nan”无效值。一旦某组系数中某单项指标出现无效值, 则该组系数最终将不计入选优过程。从表 10 可以看出, 1 号、3 号和 4 号系数组下的任意单项指标都未占据最优, 这说明了对于当前船舶而言, 这 3 组系数相较于其他组合的精度较差, 对该船舶并不适用; 2 号和 6 号系数组中有部分单项指标达到最优, 但整体的均方根误差仍小于 7 号系数组。综合来看, 在这 7 组系数中, 7 号系数组中的水动力系数对该船舶操纵性的描述最为符合。

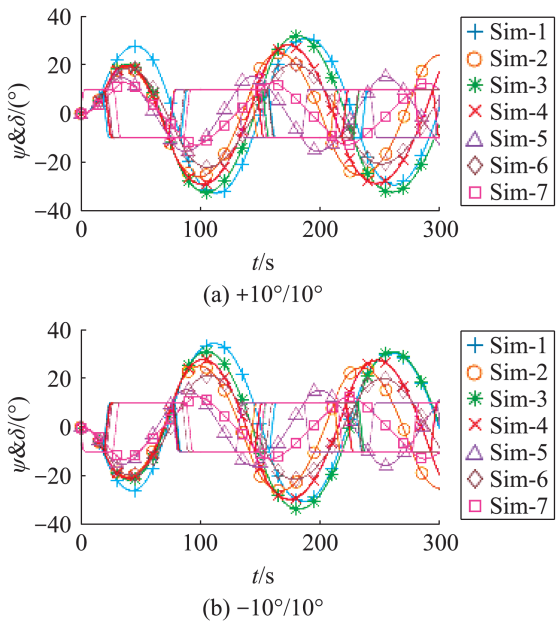


图 5 Z 形实验对比(±10°/10°)
Fig. 5 Comparison of zigzag experiment (±10°/10°)

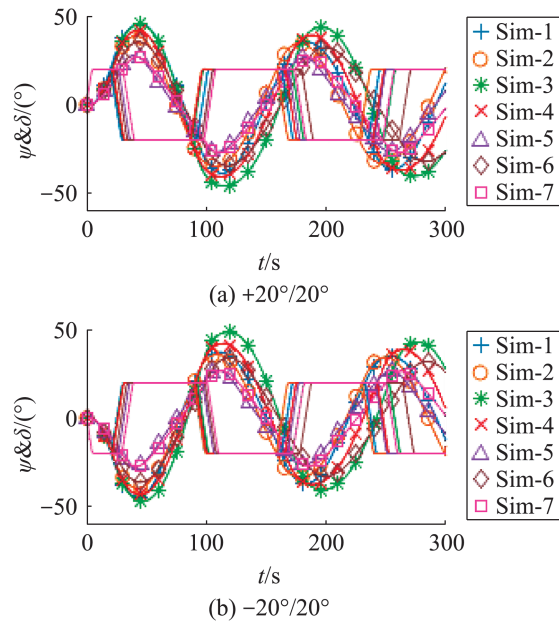


图 6 Z 形实验对比(±20°/20°)
Fig. 6 Comparison of zigzag experiment (±20°/20°)

表 10 水动力系数组误差
Table 10 Hydrodynamic coefficients groups

指标	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	实船
$A_D(+35^\circ, 122)$	0.235	0.175	0.185	0.113	0.541	0.078	0.078	468 m
$T_R(+35^\circ, 122)$	0.520	0.196	0.790	0.669	0.737	0.206	0.206	244 m
$T_D(+35^\circ, 122)$	0.373	0.071	0.492	0.336	1.053	0.083	0.083	536 m
$A_D(-35^\circ, 122)$	0.284	0.134	0.230	0.158	0.525	0.136	0.102	483 m
$T_R(-35^\circ, 122)$	0.583	0.261	0.832	0.723	0.629	0.295	0.008	253 m
$T_D(-35^\circ, 122)$	0.489	0.049	0.551	0.418	Nan	0.233	0.096	590 m
$A_D(+35^\circ, 90)$	0.187	0.056	0.131	0.056	0.607	0.014	0.100	458 m
$T_R(+35^\circ, 90)$	0.516	0.410	0.784	0.660	0.783	0.173	0.296	244 m

续表

指标	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	实船
$T_D(+35^\circ, 90)$	0.351	0.010	0.471	0.305	1.150	0.028	0.260	517 m
$A_D(-35^\circ, 90) A_D(-35^\circ, 90)$	0.219	0.033	0.161	0.085	0.597	0.052	0.034	465 m
$T_R(-35^\circ, 90)$	0.580	0.479	0.821	0.710	0.623	0.271	0.112	262 m
$T_D(-35^\circ, 90)$	0.349	0.083	0.432	0.255	Nan	0.003	0.255	472 m
$OSA_{1st}(+20^\circ/20^\circ)$	2.124	1.272	2.078	1.668	0.076	0.869	0.166	8.2°
$OSA_{2nd}(+20^\circ/20^\circ)$	1.406	0.904	2.350	1.661	0.146	0.856	0.087	7.7°
$OSA_{1st}(-20^\circ/20^\circ)$	2.153	1.486	2.442	1.956	0.016	1.061	0.066	7.8°
$OSA_{2nd}(-20^\circ/20^\circ)$	1.023	0.870	2.389	1.614	0.198	0.650	0.218	8.4°
$OSA_{1st}(+10^\circ/10^\circ)$	5.508	2.396	2.743	2.552	0.903	2.206	0.028	2.7°
$OSA_{2nd}(+10^\circ/10^\circ)$	4.268	2.706	4.154	3.405	0.277	1.773	0.351	4.3°
$OSA_{1st}(-10^\circ/10^\circ)$	3.000	1.589	1.887	1.727	0.394	1.408	0.273	3.9°
$OSA_{2nd}(-10^\circ/10^\circ)$	4.489	2.390	3.689	3.013	0.182	1.528	0.417	4.4°
$E_{RMS,i}$	28.658	15.569	27.612	22.083	Nan	11.926	3.234	\

4 结论

随着智能船舶的快速发展,船舶操纵运动建模已成为船舶数字孪生应用^[37-38]的关键技术。本文提出了一种用于船舶操纵运动快速建模的混合经验法,该方法的一个主要优点在于对大量不同计算方法排列组合进行选优,从一系列方法中综合考察各项指标,自动选择出潜在的最优组合。由于造船企业的数据隐私问题,详细的实船实验结果一般难以获取,取而代之的是一系列操纵性指标。而混合经验法的另一个优点是,在实船实验结果非常有限的情况下,也能提供较为准确的水动力系数,这得益于选优过程中对多项指标的综合考量。除表 7 中列出的常用操纵性指标之外,还有最大横距、最大进距、稳定旋回直径、第三超越角,以及到达每个指标的时间节点等更多指标信息。从误差角度来看,能够提供的操纵指标越多,最终选优出来的系数组也更可靠。在船舶操纵性领域,模型实验仍然是现阶段获取操纵水动力系数较为直接、精确的方式。在具备一部分模型实验结果的情况下,混合经验法也可以对部分未能提供的系数进行有效补充。

本文的验证实例为常速域航行的单桨单舵排水商船,为智能船舶测实验证中的常见船舶类型。

验证结果说明,在没有该船舶模型实验系数的情况下,混合经验法能够便捷地建立船舶操纵性模型。尽管本文仅用该类型船舶进行了验证,但混合经验法并不局限于某种船型。针对其他船型诸如双桨双舵或小水线面双体船等,应用本方法的计算流程和指标不变,需进一步归纳相关船型的水动力系数回归方法,并对当前 Matlab 代码进行扩充,以增强本方法的适应性。

目前选优采用直接遍历所有可能的水动力系数组来实现,未来可考虑遗传算法等启发式方法与选优过程的结合,在回归方法提供的有效参数区间内,找到更适合当前船舶的参数。船舶水动力系数众多,非线性较强,系数之间有耦合效应会互相影响,为获得准确的操纵特性而人为调试参数耗时耗力,混合经验法通过自动化的系数生成和选优过程,能够在充分利用已有回归方法的基础上,为船舶操纵运动快速建模提供一种便捷高效的思路。

参考文献:

- [1] 杨帆,刘佳伦,于淳,等.虚实融合的船舶智能航行测试技术[J].中国航海,2022,45(3):113-122.
Yang Fan, Liu Jialun, Yu Chun, et al. Test Technology for Intelligent Navigation With Mix of Virtual and Actual Reality[J]. Navigation of China, 2022, 45(3): 113-122.

- [2] 胡一鹏, 闫昭琨, 刘佳仑, 等. 智能船艇虚实融合测试验证技术现状与展望[J]. 船舶工程, 2022, 44(4): 4-13.
- [3] 张秀凤, 王晓雪, 孟耀, 等. 船舶运动建模与仿真研究进展及未来发展趋势[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 1-8.
- Zhang Xiufeng, Wang Xiaoxue, Meng Yao, et al. Research Progress and Future Development Trend of Ship Motion Modeling and Simulation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 1-8.
- [4] Shaher Sabit A. Regression Analysis of the Resistance Results of the B. S. R. A. Series[J]. International Shipbuilding Progress, 1971, 18(197): 3-17.
- [5] Holtrop J, Mennen G G J. An Approximate Power Prediction Method[J]. International Shipbuilding Progress, 1982, 29(335): 166-170.
- [6] Nikolopoulos L, Boulougouris E. A Study on the Statistical Calibration of the Holtrop and Mennen Approximate Power Prediction Method for Full Hull Form, Low Froude Number Vessels[J]. Journal of Ship Production and Design, 2019, 35(1): 41-68.
- [7] 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 of Multipurpose Cargo Ship [J]. Ship Engineering, 1983(6): 21-29, 36.
- [8] Kristensen H O, Lützen M. Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships[J]. Clean Shipping Currents, 2012, 1(6): 1-52.
- [9] Kijima K, Katsuno T, Nakiri Y, et al. On the Manoeuvring Performance of a Ship With Theparameter of Loading Condition[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1990, 1990(168): 141-148.
- [10] Harvald S A. Resistance and Propulsion of Ships[M]. Malabar, FL, USA: Krieger Publishing Company, 1992.
- [11] Kulczyk J. Propeller-hull Interaction in Inland Navigation Vessel[J]. WIT Transactions on The Built Environment, 1995, 12: 10298.
- [12] Yoshimura Y, Nomoto K. Modeling of Manoeuvring Behaviour of Ships With a Propeller Idling, Boosting and Reversing[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1978, 1978(144): 57-69.
- [13] Yasukawa H, Yoshimura Y. Introduction of MMG Standard Method for Ship Maneuvering Predictions[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(1): 37-52.
- [14] Yoshimura Y, Masumoto Y. Hydrodynamic Database and Manoeuvring Prediction Method With Medium High-speed Merchant Ships and Fishing Vessels[C]// International MARSIM Conference. [S.l.]: [s.n.], 2012: 1-9.
- [15] Yoshimura Y, Ma Ning. Manoeuvring Prediction of Fishing Vessels[C]//MARSIM'03 Conference Proceedings. Tokyo: The Society of Naval Architects of Japan, 2003: pRC-29-1-10.
- [16] Khanfir S, Hasegawa K, Nagarajan V, et al. Manoeuvring Characteristics of Twin-rudder Systems: Rudder-hull Interaction Effect on the Manoeuvrability of Twin-rudder Ships[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 16(4): 472-490.
- [17] Kijima K. On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvring Characteristics[J]. Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, 2002: 21-31.
- [18] Lee T. On an Empirical Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Modern Ship Hulls[J]. Proceedings of MARSIM 2003, 2003: RC-1-1-RC-1-8.
- [19] Khanfir S, Hasegawa K, Lee S K, et al. Mathematical Model for Maneuverability and Estimation of Hydrodynamic Coefficients of Twin-propeller Twin-rudder Ship[C]//Conference Proceedings. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. Tokyo: The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2008: 57-60.
- [20] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型-机理建模与辨识建模[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [21] Ankudinov V, Kaplan P, Jacobsen B, et al. Assessment and Principal Structure of the Modular Mathematical Model for Ship Maneuverability Prediction and Real-time Maneuvering Simulations[C]//International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability. Tolado: AMO, 1993: 661-662.
- [22] Yasukawa H, Sakuno R, Yoshimura Y. Practical Maneuvering Simulation Method of Ships Considering the Roll-coupling Effect[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24(4): 1280-1296.
- [23] 张秀凤. 航海模拟器中六自由度船舶运动数学模型的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [24] Fujii H, Tsuda T. Experimental Researches on Rudder Performance (3)[J]. Journal of Zosen Kiokai, 1962, 1962 (111): 51-58.
- [25] Aoki I, Kijima K, Furukawa Y, et al. On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship[J]. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2006, 3: 157-165.
- [26] Hasegawa K. On a Performance Criterion of Autopilot Navigation[J]. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, 1980, 178: 93-103.
- [27] Matsumoto N, Suemitsu K. Interference Effects between the Hull, Propeller and Rudder of a Hydrodynamic

- Mathematical Model in Maneuvering Motion[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 1984, 22: 114-126.
- [28] Kang D, Hasegawa K. Prediction Method of Hydrodynamic Forces Acting on the Hull of a Blunt-body Ship in the Even Keel Condition[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2007, 12(1): 1-14.
- [29] Inoue S, Hirano M, Kijima K, et al. A Practical Calculation Method of Ship Maneuvering Motion[J]. International Shipbuilding Progress, 1981, 28(325): 207-222.
- [30] Matsunaga M. Method of Predicting Ship Manoeuvrability in Deep and Shallow Waters as a Function of Loading Condition[J]. Technical Bulletin of Nippon Kaiji Kyokai, 1993, 11: 51-59.
- [31] Norrbin N H. Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters[C]//Proceedings of the 8th Symposium on Naval Hydrodynamics. Göteborg, Sweden: Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, 1971: 807-905.
- [32] Smitt L W, Chislett M S. Course Stability While Stopping [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1972, 14 (7): 181-185.
- [33] Clarke D. The Application of Manoeuvring Criteria in Hull Design Using Linear Theory[J]. Trans RINA, 1983, 125: 45-68.
- [34] Ankudinov V, Jakobsen B. Physically Based Maneuvering Model for Simulations and Test Evaluations [C]//International conference on marine simulation and ship maneuverability (MARSIM'06). Terschelling, The Netherlands: [s.n.], 2006: M-4-1-M-4-16.
- [35] Lewis G D W. A Computer Program to Predict Ship Maneuvering in the Horizontal Plane: Ship Science Report SS 2201[R]. Southampton, United Kingdom: University of Southampton, 1985: 1-15.
- [36] 刘正江. 倒车停船性能实用预报的研究[J]. 大连海运学院学报, 1987, 13(3): 55-64.
- Liu Zhengjiang. Practical Prediction of Ship Stopping by Reversing Propeller[J]. Journal of Dalian Marine College, 1987, 13(3): 55-64.
- [37] 景乾峰, 神和龙, 尹勇. 一种基于虚拟现实系统的船舶数字孪生框架[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(5): 117-124.
- Jing Qianfeng, Shen Helong, Yin Yong. A Ship Digital Twin Framework Based on Virtual Reality System[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(5): 117-124.
- [38] Lee J H, Nam Y S, Kim Y, et al. Real-time Digital Twin for Ship Operation in Waves[J]. Ocean Engineering, 2022, 266, Part 2: 112867.