

引用格式:孙庆杰,任俊生,李晴昊.基于三参数单纯形法的船舶操纵 Norrbin 模型参数辨识[J].大连海事大学学报,2026,52(1):1-11.

基于三参数单纯形法的船舶操纵 Norrbin 模型参数辨识

孙庆杰^{1a,1b},任俊生^{*1a,1b},李晴昊²

(1.大连海事大学 a.航海学院;b.水路交通控制全国重点实验室,辽宁 大连 116026;
2.西北工业大学 航海学院,西安 710129)

摘要:为有效估计船舶操纵运动模型参数,本文提出一种基于三参数单纯形法(SA)的非线性辨识方法。该方法以试验数据为基础构建精度指标函数,确立模型输出与试验数据之间的差异评判准则;通过在三维参数空间中执行反射、扩张、收缩等几何操作,对参数进行迭代寻优。算法经不断迭代直至满足收敛准则,最终获得使指标函数最小化的全局最优参数组合。应用该 SA 算法对 Mariner 船的 Norrbin 模型参数进行辨识,并分别采用支持向量机(SVM)与扩展卡尔曼滤波(EKF)算法作为对比方法,系统开展了辨识性能的对比分析。通过计算各方法参数的相对误差可知,SA 算法的辨识精度显著优于其他两种方法:其参数相对误差均为 0.022%,最大误差不超过 0.041%;EKF 算法的参数相对误差范围为 8.150%~32.068%,而 SVM 算法的参数相对误差均为 11.2%,部分参数误差甚至超过 20%。结果表明,采用 SA 算法辨识得到的模型更符合船舶的实际操纵性能。此外,在算法结构方面,SA 方法相较于 SVM 与 EKF 算法更为简洁,所需预设参数更少,因而具备更好的实用性与工程适用性。

关键词:船舶操纵性;Norrbin 模型;参数辨识;单纯形法(SA)

中图分类号:U661.33 文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2026)01-0001-11

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.001

Parameter identification of Norrbin model for ship maneuvering based on three-parameter simplex method

SUN Qingjie^{1a,1b},REN Junsheng^{*1a,1b},LI Qinghao²

(1a. Navigation College;1b.State Key Laboratory of Maritime

Technology and Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract:To effectively estimate the parameters of ship maneuvering motion models, this paper proposes a nonlinear identification method based on the three-parameter simplex algorithm (SA). A precision indicator function is constructed based on experimental data to establish a discrepancy criterion between model outputs and experimental data. It performs geometric operations such as reflection, expansion, and contraction in a three-dimensional parameter space to achieve iterative optimization of parameters. The algorithm undergoes continuous iteration until it meets the convergence criterion, ultimately obtaining the globally optimal parameter combination that minimizes the indicator function. The proposed SA algorithm is applied to identify the parameters of the Norrbin model for the Mariner ship, and support vector machine (SVM) and extended Kalman filter (EKF) algorithms are used as comparison methods to systematically analyze identification performance. It can be seen from the calculation of the relative errors of the parameters obtained by each method that the identification accuracy of the SA algorithm is significantly superior to that of the other two methods: the relative error of its parameters is 0.022% for all cases, with the maximum error not exceeding 0.041%; the relative error of the EKF algorithm ranges from 8.150% to 32.068%, while the relative error of the SVM algorithm is 11.2% for all parameters, and the error of some parameters even exceeds 20%. The results show that the model identified by the SA algorithm is more consistent with the actual maneuvering performance of the ship. Further-

收稿日期:2025-07-26;修回日期:2025-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779029;61976033;51939001);国家重点研发计划项目(2022YFB4301402)

作者简介:孙庆杰(2002—),男,硕士生;任俊生*(1976—),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:jsren@dlnu.edu.cn

more, in terms of algorithm structure, the SA method is more concise than the SVM and EKF algorithms, requires fewer preset parameters, and therefore exhibits better practicality and engineering applicability.

Key words: ship maneuverability; Norrbinn model; parameter identification; simplex algorithm(SA)

0 引言

船舶操纵运动模型辨识技术是船舶运动建模与控制领域的关键问题之一^[1]。系统辨识方法因其具有实用性、实验可重复性及快速辨识能力,已成为动态系统参数辨识中最具工程应用价值的方法之一^[2]。

目前,常见的船舶操纵运动模型参数辨识方法主要包括:群智能算法^[3-5]、支持向量机算法^[6-10](SVM)及卡尔曼滤波算法^[11-12](KF)等。文献[3]采用差分进化算法处理一阶和二阶非线性响应模型,并利用其强大的全局寻优能力,有效提升了参数辨识精度。文献[4]引入果蝇优化算法优化模型结构参数,在收敛速度与规避局部最优方面均表现突出。文献[5]使用多种群体智能算法分别优化船舶动力学非线性数学模型的参数并进行了比较。文献[6]采用支持向量回归机对船舶操纵运动响应模型参数进行在线辨识,并通过 Z 形试验进行仿真以验证可行性。文献[7]提出一种基于 SVM 估计水动力系数的方法。文献[8]基于支持向量回归(SVR),成功辨识出分离型模型的水动力导数。文献[9]在最小二乘支持向量机的回归框架下,通过极小化正则化损失函数,对船舶操纵运动模型参数进行求解。文献[10]通过递推最小二乘算法获得模型参数的初始辨识值,并引入粒子群算法对该结果进行优化,以提升参数精度。文献[11]提出了一种改进的多新息扩展卡尔曼滤波船舶响应模型参数辨识方法。文献[12]提出一种基于均方根容积卡尔曼滤波(SRCKF)的船舶运动模型参数辨识算法,并对船舶的二阶非线性响应模型参数进行了高精度辨识。文献[13]提出一种基于平方根无迹卡尔曼滤波的二阶非线性响应模型的参数辨识方法,并在“育鲲”轮上验证了该方法的可行性。

SVM 算法实现较为复杂,且通常依赖于 Mat-

lab 工具箱。此外,SVM 与扩展卡尔曼滤波方法均存在对初始状态参数敏感的问题^[14]。相比之下,单纯形法是一种在多维空间中寻找函数最优解的数值方法,仅需计算精度指标函数值,无需求导。其优点在于几何概念清晰、计算简单、实现不依赖 Matlab 工具箱,且对初始值的依赖性较弱。文献[15]应用二维参数空间的单纯形法优化关键水动力参数,实现了仿真精度的提升,并利用实船试验数据库证实了分离型模型的有效性。但其方法受限于二维参数空间的几何约束,仅适用于两个参数的辨识。

本文提出一种基于三参数单纯形法非线性船舶操纵运动 Norrbinn 模型参数辨识方法。该方法通过在三维参数空间中进行迭代,逼近参数最优值,避免了 SVM 算法中超参数的复杂设定。单纯形法仅需初始化多面体顶点,并根据目标函数值依次迭代,逐步逼近参数最优值,可实现三个参数的同时寻优,具有较高的辨识效率。

1 船舶操纵运动 Norrbinn 模型

船舶操纵运动 Norrbinn 模型主要应用于船舶航向控制中。该模型将船舶视为一个动态系统,以舵角作为系统输入、以艏角或艏摇角速度作为系统输出,由此建立的坐标系如图 1 所示。

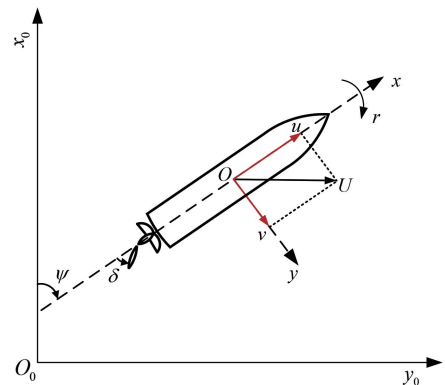


图 1 船舶坐标系

Fig.1 Ship coordinate system

图 1 中, u 为纵荡速度, v 为横荡速度, r 为艏摇角速度, ψ 为艏角, U 为船模设计航速, δ 为舵角。

Norrbinn 模型^[16]可表示为:

$$\begin{cases} T\dot{r} + H_N(r) = K\delta \\ H_N(r) = n_3 r^3 + n_2 r^2 + n_1 r + n_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H_N(r)$ 为包含了船舶操纵特性的非线性函数。其中, n_i 为模型系数。由于船体具有对称性, 且需要一定舵角来补偿恒定的稳态风力与洋流作用力, 因此偏差项 n_0 可视为额外的舵偏移量^[17]。基于此, 通常可取 $H_N(r) = \alpha_1 r + \alpha r^3$, 则可得一阶非线性野本方程:

$$T\dot{r} + \alpha_1 r + \alpha r^3 = K\delta \quad (2)$$

式中: 对于具有稳定航向的船舶, $\alpha_1 = +1$, 而对于不具有航向稳定性的船舶, $\alpha_1 = -1$; α 为非线性修正系数, 可由螺旋试验确定; T 为追随性指数; K 为回转性指数。

$$\begin{cases} \dot{r} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (3)$$

通过四阶龙格-库塔法求解式(3), 得到船舶操纵试验数据, 并基于单纯形法在非线形优化问题中的全局搜索能力, 构建参数顶点迭代寻优机制, 从而实现参数 K 、 T 、 α 的多维度辨识。

2 单纯形法

单纯形法是一种用于在多维空间中寻找函数最优解的数值方法。其主要思想为: 在三维参数空间中构建一个以参数坐标为顶点的凸多面体(即单纯形), 计算各顶点处的精度指标函数值, 通过比较确定最大值点及函数值下降的方向; 随后寻找新点来替换当前的最差点(最大值点), 形成新的单纯形。该过程不断重复, 使单纯形逐渐逼近最优解, 经多次迭代后可找到满足收敛条件的最优解。在此寻优过程中, 调整单纯形顶点的主要几何操作包括反射、扩张与收缩。

2.1 精度指标函数

本文采用最小二乘法构建精度指标函数。该函数通过计算预测值与实际值之间的差异来衡量模型精度。试验结果表明, 模型参数对船舶的旋回轨迹与艏向角具有显著影响。由于实际值是由一系列时间上不连续的点构成, 例如一个旋回试验的试验数据通常仅包含 15 个点, 因此, 需利用计算机仿真获取相应时刻的预测值, 将这些预测值与对应时刻的位置轨迹和艏向角测量值进行比较, 计算其差值的平方和作为精度指标函数, 其表达式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [(x_{Gi} - X_i)^2 + (y_{Gi} - Y_i)^2 + a(\psi_{Oi} - \psi_i)^2] \quad (4)$$

式中: x_{Gi} 、 y_{Gi} 、 ψ_{Oi} 为各时刻的预报值; X_i 、 Y_i 、 ψ_i 为对应时刻的测量值。本文取 $a = 1$ 。

2.2 解算原理

在三维参数空间中, 单纯形应具有四个顶点, 即构成一个四面体。设定 $\mathbf{x} = [K \ T \ \alpha]^T$, 给定初始单纯形, 其顶点为 $\{\mathbf{x}_i \mid i = 1, 2, 3, 4\}$, 将每组参数代入式(3)解算数据, 并基于结果计算式(4)中的目标函数值 $f(\mathbf{x})$, 进而确定函数值最高顶点 \mathbf{x}_h 、次高顶点 \mathbf{x}_g 和最低顶点 \mathbf{x}_l , 使得:

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}_h) = \max \{f(\mathbf{x}_i)\} \\ f(\mathbf{x}_g) = \max \{f(\mathbf{x}_i) \mid \mathbf{x}_i \neq \mathbf{x}_h\} \\ f(\mathbf{x}_l) = \min \{f(\mathbf{x}_i)\} \end{cases} \quad (5)$$

计算除 \mathbf{x}_h 以外, 其余三个点的形心 $\bar{\mathbf{x}}$:

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_h \right] \quad (6)$$

计算出 $f(\bar{\mathbf{x}})$ 后, 进行反射操作:

$$\mathbf{x}_5 = \bar{\mathbf{x}} + (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_h) \quad (7)$$

式中: \mathbf{x}_5 称为 \mathbf{x}_h 关于 $\bar{\mathbf{x}}$ 的反射点。计算 $f(\mathbf{x}_5)$, 可能出现以下几种情形:

$$(1) f(\mathbf{x}_5) < f(\mathbf{x}_l)$$

该情形表明搜索方向正确, 可以进一步扩展效果, 设 \mathbf{x}_6 为扩张点, γ 为扩张系数, $\gamma = 1.2 \sim 2.0$, 令

$$\mathbf{x}_6 = \bar{\mathbf{x}} + \gamma(\mathbf{x}_5 - \bar{\mathbf{x}}) \quad (8)$$

如果 $f(\mathbf{x}_6) < f(\mathbf{x}_5)$, 表明扩张有利, 则

$$\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_6, \quad f(\mathbf{x}_h) = f(\mathbf{x}_6) \quad (9)$$

以点 \mathbf{x}_6 代替点 \mathbf{x}_h (设 $\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_4$) 构成新的单纯形 $\{\mathbf{x}_6, \mathbf{x}_i \mid i = 1, 2, 3\}$, 此时最优参数为 $\mathbf{x}_6 = [K \ T \ \alpha]^T$, 转步骤(5)进行收敛性检验。

如果 $f(\mathbf{x}_6) > f(\mathbf{x}_5)$, 表明扩张不利, 则舍去 \mathbf{x}_6 , 此时,

$$\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_5, \quad f(\mathbf{x}_h) = f(\mathbf{x}_5) \quad (10)$$

以点 \mathbf{x}_5 代替点 \mathbf{x}_h (设 $\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_4$) 构成新的单纯形 $\{\mathbf{x}_5, \mathbf{x}_i \mid i = 1, 2, 3\}$, 此时最优参数为 $\mathbf{x}_5 = [K \ T \ \alpha]^T$, 转步骤(5)进行收敛性检验。

$$(2) f(\mathbf{x}_l) < f(\mathbf{x}_5) < f(\mathbf{x}_g)$$

该情形表明搜索方向正确, 但无须扩张, 则

$$\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_5, f(\mathbf{x}_h) = f(\mathbf{x}_5) \quad (11)$$

以点 \mathbf{x}_5 代替点 \mathbf{x}_h (设 $\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_4$) 构成新的单纯形 $\{\mathbf{x}_5, \mathbf{x}_i \mid i = 1, 2, 3\}$, 此时最优参数为 $\mathbf{x}_L = [K \ T \ \alpha]^T$, 转步骤(5)进行收敛性检验。

$$(3) f(\mathbf{x}_g) < f(\mathbf{x}_5)$$

该情形即指 \mathbf{x}_5 点走得太远, 则进行收缩。以 β 表示收缩因子, 令

$$f(\mathbf{x}_h') = \min\{f(\mathbf{x}_h), f(\mathbf{x}_5)\} \quad (12)$$

\mathbf{x}_7 为收缩点, β 为收缩系数, 令

$$\mathbf{x}_7 = \bar{\mathbf{x}} + \beta(\mathbf{x}_h - \bar{\mathbf{x}}) \quad (13)$$

计算 $f(\mathbf{x}_7)$, 转步骤(4)。

$$(4) f(\mathbf{x}_7) < f(\mathbf{x}_h')$$

$$\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_7, f(\mathbf{x}_h) = f(\mathbf{x}_7) \quad (14)$$

以点 \mathbf{x}_7 代替点 \mathbf{x}_h (设 $\mathbf{x}_h = \mathbf{x}_4$) 构成新的单纯形 $\{\mathbf{x}_7, \mathbf{x}_i \mid i = 1, 2, 3\}$, 此时最优参数为 $\mathbf{x}_L = [K \ T \ \alpha]^T$, 转步骤(5)进行收敛性检验; 否则, 进行压缩, 令

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \frac{1}{2}(\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_i) \quad (15)$$

计算 $f(\mathbf{x}_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 进行步骤(5)。

(5) 收敛性检验

在每次迭代中, 均会生成一个新的单纯形, 需要对其进行收敛性检验, 若满足收敛标准, 迭代过程就会停止, \mathbf{x}_L 可作为最优值的近似值; 否则, 返回式(6)继续迭代。通常使用的收敛标准为:

$$\left\{ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [f(\mathbf{x}_i) - f(\bar{\mathbf{x}})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} < \varepsilon \quad (16)$$

式中: ε 为允许误差, 是一个预先设定的、非常小的正数, 代表优化停止时所允许的目标函数值波动范围的上限。

文献[15]中的方法局限于二维坐标平面, 仅能对两个参数进行几何寻优。本文提出的方法则拓展至三维参数空间, 实现了对三个参数的同时优化。相应地, 由参数构成的单纯形(凸多面体)从二维的三角形升维为三维的四面体, 顶点数量增至四个。在每次迭代中, 算法需计算并比较所有顶点处的函数值, 从而确定最差点、次差点和最

佳点, 随后执行反射、扩张和收缩等几何操作, 进而更新单纯形。

图2为三维坐标系下单纯形法寻优过程。该图直观展示了三维坐标系下四面体顶点的反射、扩张和收缩操作。坐标轴由参数 α 、 T 、 K 构成, 四面体顶点 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4\}$ 构成初始单纯形。此时, $\mathbf{x}_4 = [K \ T \ \alpha]^T$ 为远离参数真实值的顶点, 即为最差点。在单纯形法中, 通过几何操作生成新顶点以替代原有顶点 \mathbf{x}_4 , 该过程依次为: 经反射生成一个新的顶点 \mathbf{x}_5 替代 \mathbf{x}_4 , 形成新单纯形 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_5\}$; 经扩张生成新顶点 \mathbf{x}_6 替代 \mathbf{x}_4 , 形成新单纯形 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_6\}$; 经收缩生成新顶点 \mathbf{x}_7 替代 \mathbf{x}_4 , 形成新单纯形 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_7\}$ 。

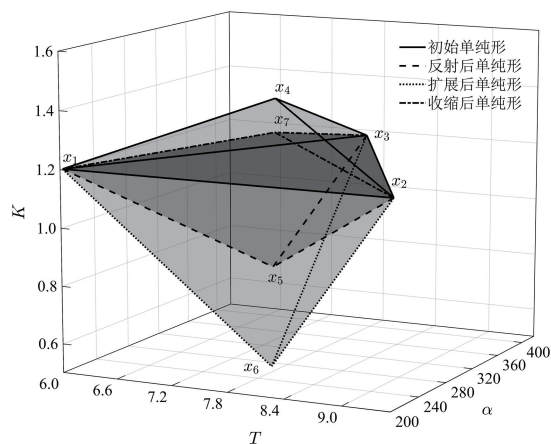


图2 三维坐标系下单纯形法寻优过程图

Fig.2 Optimization process diagram of the simplex method in a three-dimensional coordinate system

图3为基于单纯形优化算法的船舶操纵运动模型参数辨识流程。首先, 构建一个包含四个顶点的初始单纯形, 每个顶点代表一组候选参数组合。通过四阶龙格-库塔法求解式(3), 模拟生成船舶操纵试验数据, 并利用式(4)定义的精度指标函数评估各参数组合的拟合优度。随后, 依据单纯形法的迭代规则, 对顶点执行反射、扩张与收缩等几何操作, 持续更新单纯形结构, 使其向更优解方向收敛。该优化过程旨在求解船舶操纵响应模型中的关键参数: 回转性指数 (K)、追随性指数 (T) 和非线性修正系数 (α)。

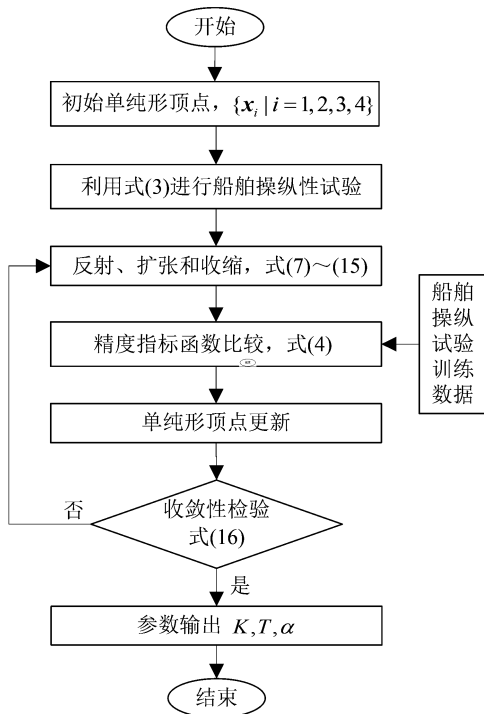


图 3 基于单纯形优化算法的船舶操纵运动模型参数辨识流程

Fig.3 Parameter identification process for ship maneuvering motion model based on simplex optimization algorithm

3 仿真与分析

本文采用 Mariner 船模水池实验获得的船舶操纵性指数^[17],相关参数如表 1 所示。在模型辨识过程中,量测数据的纵坐标 x_G 、横坐标 y_G 及艏向角 ψ 通过四阶龙格-库塔法求解式(3)所示的一阶非线性野本方程获得。仿真实验包括 35° 旋回试验和 20°/20°Z 形试验。旋回试验仿真时长设为 50 s,Z 形试验设为 120 s,两者的仿真时间步长均为 0.1 s,仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。初始化设置单纯形法中凸多面体的顶点 $\{x_i | i = 1,2,3,4\}$,通过试验仿真数据对参数 $\mathbf{x} = [K \ T \ \alpha]^T$ 进行辨识。

表 1 Mariner 模型参数

Tab.1 Mariner model parameters

参数	真实值
K	0.8613
T	7.2318
α	246.8670

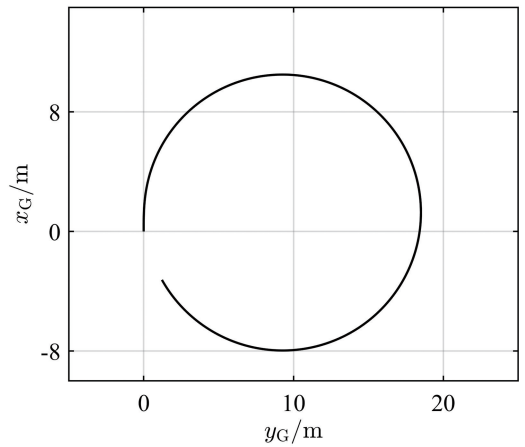


图 4 35°旋回试验船舶轨迹

Fig.4 Ship trajectory in 35° turning test

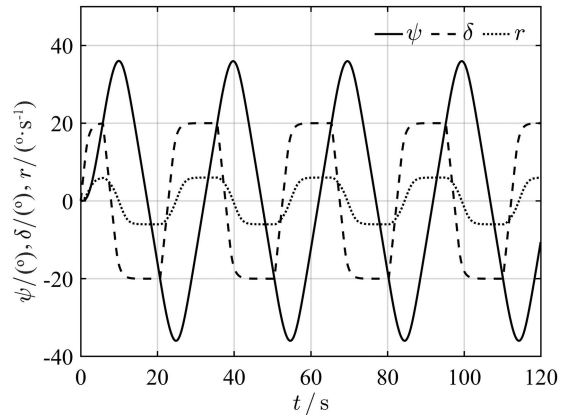


图 5 Mariner 船模 20°/20°Z 形试验

Fig.5 Mariner ship model 20°/20° zigzag test

3.1 旋回试验

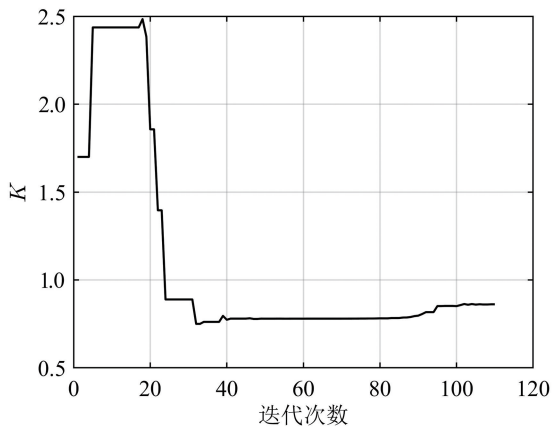
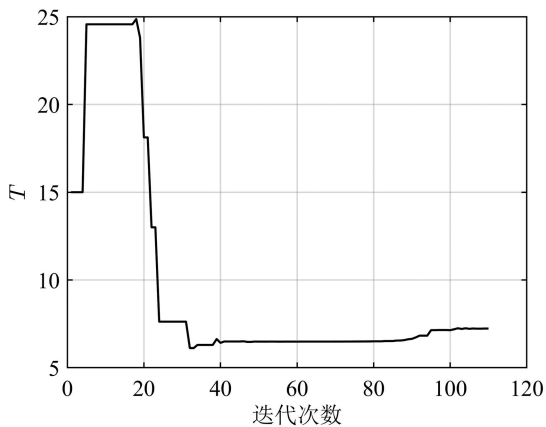
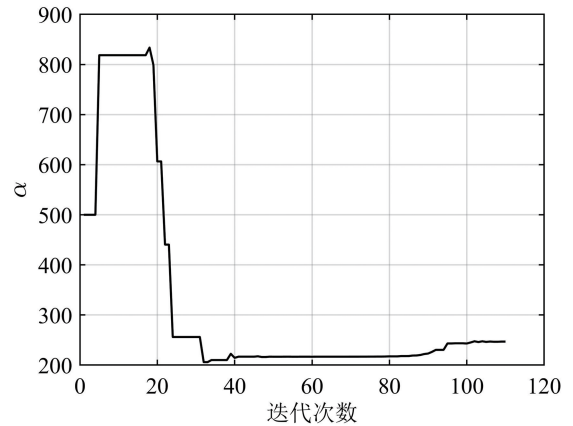
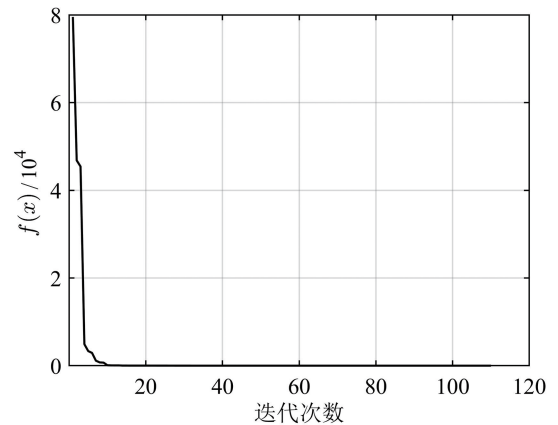
单纯形法在辨识前需对待辨识参数 $\mathbf{x} = [K \ T \ \alpha]^T$ 进行初始化。算法采用迭代寻优策略,其收敛性能对初始值较为敏感。数值仿真结果表明,初始值不同会导致收敛速率存在差异,但辨识结果的数值稳定性具有显著鲁棒性,初始值对最终参数估计精度的影响可忽略不计。

船舶处于无风、流环境中,设定舵角为 35°,试验起始点设定为坐标原点(0,0),以全速执行右旋回操作。收敛标准中允许误差 ε 不仅会影响单纯形算法的收敛速度,还可通过合理调整其量级,有效控制迭代过程的终止条件。旋回试验中取 $\varepsilon = 1 \times 10^{-8}$,在三维参数空间中通过单纯形算法对参数 K 、 T 和 α 开展迭代寻优。如表 2 所示,设置三组不同的初始参数值开展试验,所得寻优结果最终均能稳定收敛至最优值附近。

表 2 旋回试验下 K 、 T 和 α 不同初始值的寻优结果Tab.2 Optimization results of different initial values for K 、 T and α under turning test

初始 K	初始 T	初始 α	寻优后 K	寻优后 T	寻优后 α	寻优次数 n	寻优后 $f(x)$ 值
1.3	10.8	400	0.8597	7.2169	246.2725	69	7×10^{-7}
1.7	15.0	500	0.8610	7.2293	246.7650	111	2×10^{-8}
0.4	3.0	120	0.8599	7.2188	246.3393	109	5×10^{-7}

为清晰展示收敛过程,本文以表 2 中的第二组数据为例,其辨识过程与精度指标函数变化过程分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,参数在迭代约 30 次后即迅速逼近真实值,并在其邻域内微幅波动;当迭代次数达到 111 时,满足预设允许误差条件而终止迭代。整个过程平稳且收敛趋势明显,最终结果可靠且接近理论最优值,验证了本文方法在三维空间中的有效性与稳定性。图 7 精度指标函数 $f(x)$ 的变化趋势与该迭代过程相一致。

(a) K 变化曲线(b) T 变化曲线(c) α 变化曲线图 6 旋回试验下船舶 Norrbinn 模型参数 K 、 T 和 α 辨识过程Fig.6 Ship Norrbinn model parameters K 、 T and α identification process under turning test图 7 旋回试验下精度指标函数 $f(x)$ 变化过程Fig.7 The variation process of the accuracy index function $f(x)$ under turning test表 3 为 35° 旋回试验初始单纯形顶点参数。
表 3 35° 旋回试验初始单纯形顶点参数

i	x_i	$f(x)$
1	[1.7, 15.0, 500]	1.1×10^3
2	[0.5, 10.0, 300]	8.0×10^4
3	[0.3, 3.8, 100]	4.5×10^4
4	[1.2, 5.0, 200]	4.7×10^4

为评估收敛标准中允许误差 ϵ 对该方法参数辨识结果的影响,本文开展了敏感性分析研究,固定其他条件不变,选取多组收敛标准开展辨识计算。表 4 为旋回试验下不同预设允许误差的结果对比。由表 4 可知,迭代次数随 ϵ 的减小呈增加趋势,这印证了 ϵ 对计算效率具有显著影响。同时,参数 K 、 T 、 α 的辨识值在不同 ϵ 下变化甚微,尤其在 ϵ 从 1×10^{-8} 进一步收紧至 1×10^{-9} 时,各参数辨识值的波动范围极小,仅迭代次数相应增

加。这表明所提辨识算法已收敛至稳定的解区域,其辨识结果的可靠性不受 ϵ 进一步收紧的影响。

3.2 Z 形试验

在相同条件下,将基于三参数单纯形法的非线性辨识方法进一步应用于船舶 Z 形试验。通过四阶龙格-库塔法求解式(3),开展 $20^\circ/20^\circ$ Z 形试验数值仿真,仿真时长设为 120 s,时间步长为 0.1 s,收敛标准中 $\epsilon = 1 \times 10^{-5}$ 。在三维参数空间下,通过单纯形算法对参数 K 、 T 、 α 进行迭代寻优。表 5 为 Z 形试验下 K 、 T 、 α 不同初始值的寻优结果。由表 5 可知,每组数据均能一致收敛,体现了算法的良好鲁棒性。

表 4 旋回试验下不同预设允许误差对比结果

Tab.4 Comparison of results with different preset allowable errors under turning test

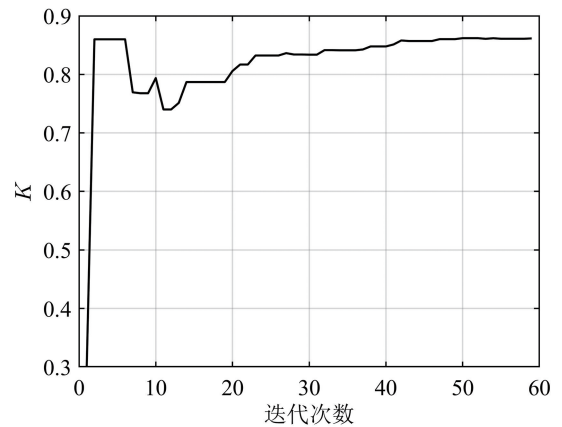
允许误差	K	T	α	n	$f(x)$
$\epsilon = 1 \times 10^{-6}$	0.8594	7.2148	246.1760	90	1×10^{-6}
$\epsilon = 1 \times 10^{-8}$	0.8610	7.2293	246.7650	111	2×10^{-8}
$\epsilon = 1 \times 10^{-9}$	0.8611	7.2302	246.8028	146	3×10^{-9}

表 5 Z 形试验下 K 、 T 和 α 不同初始值的寻优结果

Tab.5 Optimization results of different initial values for K , T and α under zigzag test

初始 K	初始 T	初始 α	寻优后 K	寻优后 T	寻优后 α	寻优次数 n	寻优后 $f(x)$ 值
1.95	5.2	180.2	0.8604	7.2273	246.5139	119	5×10^{-4}
0.30	1.0	200.9	0.8612	7.2311	246.8562	59	2×10^{-5}
1.00	10.0	450.0	0.8613	7.2318	246.8261	65	2×10^{-4}

以表 5 中的第二组数据为例,其辨识过程与精度指标函数变化过程分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知,尽管参数在迭代初期有一定的波动,但算法在 59 次迭代内即实现了多参数协同收敛与精度稳定。该算法在船舶参数寻优中通过迭代满足预设收敛条件,收敛效果良好,验证了算法的有效性。结果表明,不同操纵性试验的数据结构对参数辨识过程具有显著影响。在本文试验中,Z 形试验在设定更大允许误差时,仍表现出多参数协同收敛与更快的收敛速度,且辨识精度相对旋回试验更高。这表明,Z 形试验的数据结构更有利于提高参数辨识的稳定性和效率,参数收敛轨迹平滑、趋势稳定。



(a) K 变化曲线

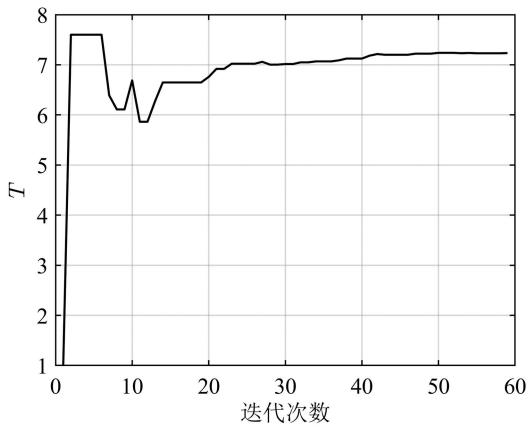
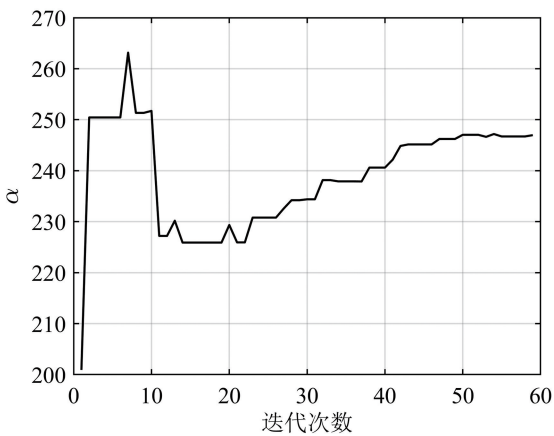
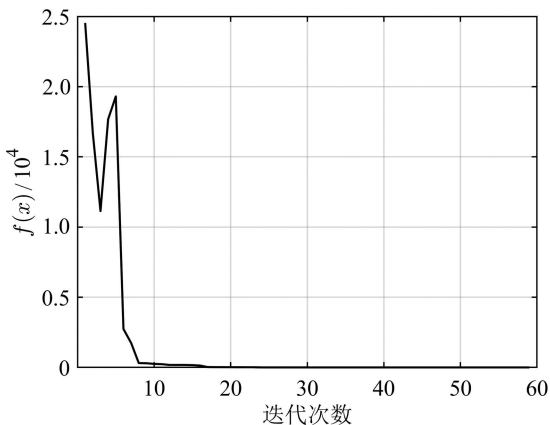
(b) T 变化曲线(c) α 变化曲线图 8 Z 形试验下船舶 Norrbinn 模型参数 K 、 T 和 α 辨识过程Fig.8 Ship Norrbinn model parameters K , T and α identification process under zigzag test图 9 Z 形试验下精度指标函数 $f(x)$ 变化过程Fig.9 The variation process of the accuracy index function $f(x)$ under zigzag test

表 6 为 $20^\circ/20^\circ Z$ 形试验初始单纯形顶点参数。

表 6 $20^\circ/20^\circ Z$ 形试验初始单纯形顶点参数Tab.6 Initial simplex vertex for the $20^\circ/20^\circ$ zigzag test

i	x_i	$f(x)$
1	[0.3,1,200.9]	5.6×10^3
2	[0.5,10,450.5]	1.6×10^4
3	[1.0,12,150.3]	2.4×10^4
4	[1.5,3,300.2]	1.1×10^4

表 7 为 Z 形试验下,不同预设允许误差的对比结果。由表 7 可知,该试验规律与旋回试验一致。这表明,在所选用的阈值 ε 附近,阈值取值虽会影响迭代效率,但对最终辨识参数的精度与稳定性影响较小。因此,基于 $\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$ (Z 形)与 $\varepsilon = 1 \times 10^{-8}$ (旋回)得出的关于两种试验收敛特性与辨识精度的对比结论是可靠的。

表 7 Z 形试验下不同预设允许误差对比结果

Tab.7 Comparison results of different preset allowable errors under the zigzag test

允许误差	K	T	α	n	$f(x)$
$\varepsilon = 1 \times 10^{-4}$	0.8616	7.2357	246.9988	62	1×10^{-4}
$\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$	0.8612	7.2311	246.8562	59	2×10^{-5}
$\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$	0.8612	7.2314	246.8432	86	7×10^{-7}

3.3 与其他算法的对比试验

基于四阶龙格-库塔法对式(3)的一阶非线性野本方程进行数值求解,分别生成 35° 旋回试验与 $20^\circ/20^\circ Z$ 形试验的仿真数据。随后,分别采用 SVM^[6]、EKF 及单纯形法对仿真数据进行参数辨识,结果如表 8 和表 9 所示。由表 8 和表 9 可知,单纯形法在参数辨识精度方面显著优于 SVM 与 EKF 算法。具体而言,SVM 算法辨识结果的相对误差范围为 0.977%~33.986%,EKF 算法为 8.150%~32.068%,而单纯形法的相对误差仅为 0.004%~0.041%。结果表明,在本文的辨识任务中,单纯形法表现出更高的辨识精度与鲁棒性。将辨识得到的参数代入式(3),即可构建基于不同算法的船舶运动模型。其中,位置轨迹由以下公式计算:

$$\begin{cases} \dot{x}_G = U_{\text{model}} \cos \psi \\ \dot{y}_G = U_{\text{model}} \sin \psi \end{cases} \quad (17)$$

表 8 旋回试验数据辨识参数对比结果

Tab.8 Comparison results of identifying parameters for turning test data

参数	EKF		SVM		单纯形法	
	辨识值	误差/%	辨识值	误差/%	辨识值	误差/%
K	0.6471	24.869	0.8395	2.531	0.8610	0.035
T	5.3988	25.346	5.2864	26.901	7.2293	0.035
α	167.7020	32.068	162.9660	33.986	246.7650	0.041

表 9 Z 形试验数据辨识参数对比结果

Tab.9 Comparison results of identifying parameters for zigzag test data

参数	EKF		SVM		单纯形法	
	辨识值	误差/%	辨识值	误差/%	辨识值	误差/%
K	0.7911	8.150	0.8476	1.591	0.8612	0.012
T	6.6442	8.125	7.1189	1.561	7.2311	0.010
α	218.2500	11.592	244.4550	0.977	246.8562	0.004

图 10 为 15° 旋回试验位置轨迹对比。由图 10 可知:在初始阶段,三种算法的辨识模型仿真结果与真实值均吻合良好;随着仿真时间的增加,SVM 算法的辨识模型出现明显的误差累积,导致轨迹预报精度显著下降;EKF 算法虽优于 SVM 算法,但其预报轨迹仍逐渐偏离真实值;相比之下,基于单纯形法的辨识模型在整个仿真过程中始终与真实轨迹保持高度一致,展现出更优的预报精度、稳定性与可靠性。

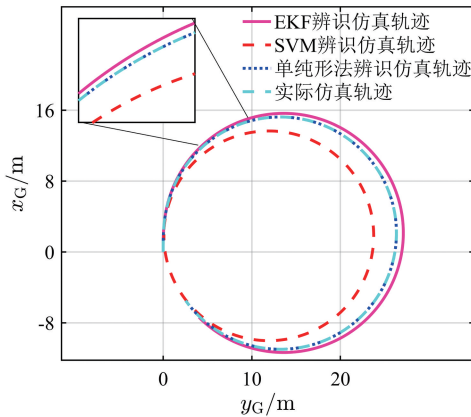


图 10 15°旋回试验位置轨迹对比

Fig.10 Comparison of position trajectories for 15° turning test

为定量评估不同辨识模型的精度,本文计算了各模型仿真结果与真实值之间的均方根误差 (RMSE) 并进行了对比分析。旋回试验结果表明:单纯形法辨识模型在 x_G 位置轨迹与 y_G 位置

轨迹上的 RMSE 分别为 0.0010 m 和 0.0009 m; SVM 算法辨识模型对应的 RMSE 分别为 2.8406 m 和 2.6124 m; EKF 算法辨识模型对应的 RMSE 分别为 0.7805 m 和 0.6224 m。

综上所述,通过对船舶运动轨迹与参数辨识试验数据的定量分析可知,单纯形法不仅相比 SVM 和 EKF 两种算法具有更高的拟合精度,且结构更为简洁,仅通过对几何顶点的迭代与比较即可实现参数搜索,从而显著降低了计算复杂度与实现难度。

3.4 传统单纯形法对比试验

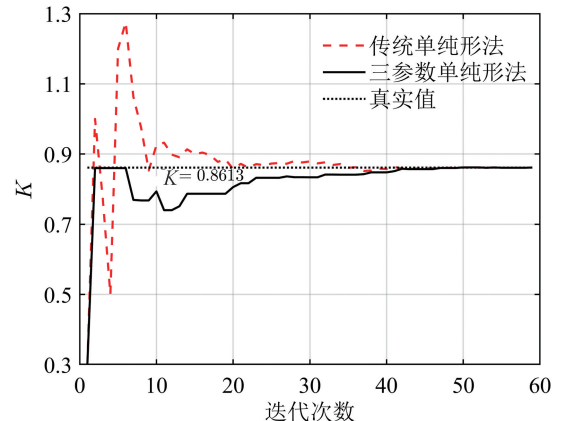
在二维参数空间中,设有两个寻优变量,给定初始单纯形,其顶点为 $\{x_i | i = 1, 2, 3\}$, 以 20°/20°Z 形试验为例,按照表 6 中数据选取初始参数,并将参数 T 设为定值,即表 1 中 Mariner 模型参数值 $T = 7.2318$ 。表 10 为不同维度单纯形算法辨识参数结果对比结果。由表 10 可知,相比传统单纯形法,三参数单纯形法在保持相近辨识精度的基础上,实现了对三个模型参数的同步优化。

表 10 不同维度单纯形算法辨识参数对比结果

Tab.10 Comparison of identification parameters for the simplex algorithm with different dimensions

参数	真实值	传统单纯形法		三参数单纯形法	
		辨识值	误差/%	辨识值	误差/%
K	0.8613	0.8612	0.012	0.8612	0.012
α	246.8670	246.8720	0.002	246.8562	0.004

图 11 为 20°/20°Z 形试验下,不同维度单纯形算法辨识过程。由图 11 可知,两种方法最终均收敛至真实值附近。该结果验证了本文方法从二维扩展至三维后,仍具备良好的收敛稳定性与参数协同辨识能力。



(a) K 变化曲线

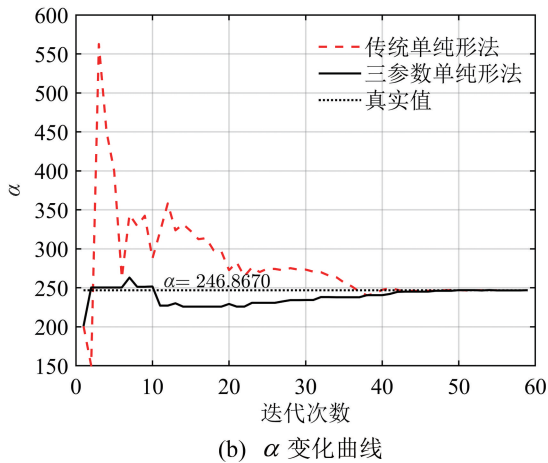


图 11 20°/20°Z 形试验下不同维度单纯形算法辨识过程

Fig.11 Identification process of simplex algorithm with different dimensions in the 20°/20° zigzag test

对比试验结果表明,三参数单纯形法在保持与传统单纯形法相近辨识精度的基础上,表现出更优的收敛效率与稳定性。该方法在迭代过程中振荡更小、收敛更快,能够同步实现三个参数的协同寻优,有效避免了分步寻优中常见的误差累积与效率下降问题,从而在保障精度的同时,提升了整体优化性能。

4 结 语

本文基于三维参数空间,采用单纯形法对船舶运动 Norrbin 模型进行参数辨识,成功实现了三个参数的同时寻优。首先,本文改进了传统单纯形法,提出三参数单纯形优化方法。该方法在保持相近辨识精度的同时,提高了收敛效率与稳定性,实现了多参数同步协同优化,有效避免了分步优化中的误差传递问题。其次,在辨识精度方面,单纯形法(SA)优于支持向量机(SVM)与扩展卡尔曼滤波(EKF)方法。研究表明:SA 算法的参数相对误差均为 0.022%,最大误差不超过 0.041%;EKF 算法的参数相对误差范围为 8.150%~32.068%;SVM 算法的误差显著较大,其相对误差约为 11.2%,部分参数误差甚至超过 20%,这充分体现了 SA 算法在参数辨识中的显著精度优势。最后,在算法鲁棒性方面,SVM 性能高度依赖核函数与惩罚系数等超参数,误差波动可超 15%;EKF 算法对模型噪声统计特性较为敏感,在实际应用中调参较为复杂;相比之下,SA 算

法结构简单、初始参数少,在不同初始条件下均表现出稳定的收敛性能,具备更好的工程适用性与鲁棒性。综上,本文研究不仅验证了单纯形法在船舶运动参数辨识中的有效性和优越性,也为多参数耦合系统的辨识问题提供了可行的解决方案。

参考文献 (References):

- [1] 张炜灵,蔡烽,霍龙. 船舶操纵响应模型参数辨识的发展趋势分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 4-5.
ZHANG W L, CAI F, HUO L. Development trend of parameter identification of ship maneuvering response equation[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(11): 4-5. (in Chinese)
- [2] 朱曼,文元桥,孙吴强,等. 船舶运动模型参数辨识研究综述[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(5): 1-11.
ZHU M, WEN Y Q, SUN W Q, et al. A review of parameter identification methods for ship dynamic models[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(5): 1-11. (in Chinese)
- [3] 郑文龙,肖昌润. 船舶操纵非线性 KT 方程参数的辨识[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(17): 129-132.
ZHENG W L, XIAO C R. The parameter identification of KT equations on ship maneuverability[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(17): 129-132. (in Chinese)
- [4] 王雪刚,邹早建. 基于果蝇优化算法的船舶操纵响应模型的辨识[J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(3): 1-4.
WANG X G, ZOU Z J. Identification of ship manoeuvring response model based on fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2012, 38(3): 1-4. (in Chinese)
- [5] TOMERA M. Swarm intelligence applied to identification of nonlinear ship steering model[C]//2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF). Gdynia:IEEE, 2015: 133-139.
- [6] 张心光,邹早建. 基于支持向量回归机的船舶操纵响应模型辨识[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4): 501-504.
ZHANG X G, ZOU Z J. Identification of response models of ship manoeuvring motion using support vector regression[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(4): 501-504. (in Chinese)
- [7] LUO W L, ZOU Z J. Parametric identification of ship maneuvering models by using support vector machine[J]. Journal of Ship Research. 2009, 53: 19-30.

- [8] 宋利飞,王毓清,彭伟,等.基于 SVR 的船舶简化分离型模型水动力系数辨识研究[J].中国舰船研究,2025,20(1):65-75.
SONG L F, WANG Y Q, PENG W, et al. Hydrodynamic coefficients identification of ship simplified modular model based on support vector regression[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025,20(1):65-75. (in Chinese).
- [9] 祝添权,初秀民,田国昊,等.基于 LS-SVM 的船舶操纵响应模型参数辨识及应用[J].武汉理工大学学报,2021,43(12):28-36.
ZHU T Q, CHU X M, TIAN G H, et al. Parameter identification and application of ship maneuvering response model based on LS-SVM[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021,43(12):28-36. (in Chinese)
- [10] 褚式新,俞剑,姜文,等.基于遗传算法的水面无人艇操纵响应模型参数辨识仿真研究[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(10):930-935.
CHU S X, YU J, JIANG W, et al. Simulation research of parameter identification of maneuvering response model of unmanned surface vessel based on genetic algorithms[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2023, 18(10):930-935. (in Chinese)
- [11] 谢朔,陈德山,初秀民,等.改进多新息卡尔曼滤波法辨识船舶响应模型[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(2):282-289.
XIE S, CHEN D S, CHU X M, et al. Identification of ship response model based on improved multi-innovation extended Kalman filter[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018,39(2):282-289. (in Chinese)
- [12] 李晴昊,任俊生,华焱.基于均方根容积卡尔曼滤波的船舶操纵运动响应模型参数辨识[J].系统仿真学报,2024,36(8):1790-1799.
LI Q H, REN J S, HUA Y. Parametric identification of ship maneuvering motion response model based on square root cubature Kalman filtering[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(8):1790-1799. (in Chinese)
- [13] MENG Y, ZHANG X K, ZHANG X F, et al. Maneuverability indices estimation of nonlinear response model based on full-scale trial data and square root unscented Kalman filter[J]. Ocean Engineering, 2023, 286:115699.
- [14] MENG Y, ZHANG X F, ZHU J X. Parameter identification of ship motion mathematical model based on full-scale trial data[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2022, 14:100437.
- [15] 黄小斌,杨盐生.船舶操纵运动数学模型预报精度的研究[J].大连海事大学学报,1997,23(2):27-31.
HUANG X B, YANG Y S. Improvement on precise prediction of ship manoeuvring mathematical model[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1997, 23(2):27-31. (in Chinese)
- [16] 任俊生.船舶运动与控制[M].大连:大连海事大学出版社,2021.
REN J S. Ship motion and control[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2021. (in Chinese)
- [17] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. John Wiley & Sons, 2011.