

文章编号: 1007-7294(2024)03-0328-13

基于横摇衰减数据的横摇阻尼 估算方法对比研究

章东^{1,2}, 王文涛^{1,2}, 卜淑霞^{1,2}, 刘伟^{1,2}

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 水动力学重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 基于自由横摇衰减曲线估算船舶横摇阻尼是一种常用工程手段, 由于衰减曲线估算阻尼的方法众多, 导致阻尼估算结果存在差异。为实现获取高精度阻尼预报方法的目的, 本文首先对近年来出现的基于衰减曲线估算横摇阻尼的方法原理进行详细分析, 扩展其适用范围, 按照原理将方法分为基于分段线性假设与基于参数识别两类。其次利用标准模型(DTC)的横摇数据, 验证并比较不同方法的特点, 分析阻尼系数估算的误差来源。结果表明, 横摇阻尼估算精度与使用的方法强相关, 推荐物理意义明确、误差来源少、对测量噪声与误差 insensitive 的 Froude 能量法作为初步阻尼评估方法, 若能找到足够精确的阻尼模型, 则可进一步使用具有内在的噪声抑制机制、不需要预估阻尼系数初值、存在唯一解的 Prony-SS 方法以提高识别精度。

关键词: 横摇阻尼估算; 横摇衰减曲线; 消灭曲线法; 阻尼模型

中图分类号: U661.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.03.002

Estimation methods of roll damping based on roll decay data

ZHANG Dong^{1,2}, WANG Wen-tao^{1,2}, BU Shu-xia^{1,2}, LIU Wei^{1,2}

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, Wuxi 214082, China)

Abstract: Ship roll damping estimation based on roll decay curves is very common in engineering. There are many methods to estimate damping from roll decay curves, which lead to difference in damping estimation results. In order to achieve the purpose of obtaining high-precision damping prediction methods, the principle of estimation of roll damping based on roll decay curves in recent years was analyzed in detail first in this paper and then its scope of application was expanded. The methods were divided into two categories according to the principle, namely, one based on piecewise linear assumption and the other based on parameter identification. The data of standard model (DTC) were used to verify and compare the characteristics of different methods, and the error sources of damping coefficient estimation were analyzed. The results show the accuracy of estimation is strongly related to the used method. The Froude energy method with clear physical meaning, few error sources, and insensitivity to measurement noise and error is recommended as the preliminary estimation method. If a damping model with sufficient accuracy can be found, estimation based on the Prony-SS method, which has an inherent noise suppression mechanism and a unique solution, can be further done to improve the accuracy.

收稿日期: 2023-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001285)

作者简介: 章东(1992-), 男, 硕士研究生, E-mail: zhangdongwuxi@163.com;

王文涛(1982-), 男, 研究员, 硕士生导师。

Key words: estimation of roll damping; roll decay curve; extinction curve method; damping model

0 引 言

横摇是船舶在波浪中6个自由度运动中最难理解和显示的复杂现象^[1],其运动阻尼是船舶耐波性与波浪稳性预测精度的决定性因素。一般来说,船舶运动阻尼主要由船体辐射出的重力波所致,然而相比于其他自由度,船舶横摇受流体粘性影响大。横摇阻尼是由波浪、旋涡、升力、摩擦等因素共同产生,这导致基于势流理论的边界元方法(BEM)预测横摇运动精度过低。针对此难题,ITTC(国际拖曳水池会议)的波浪稳性委员会与耐波性委员会开展了大量工作^[2-5]。目前横摇阻尼估算方法主要包括三类:模型试验、CFD计算、经验公式。中国船舶科学研究中心顾民等^[6-8]将模型试验与CFD计算结合,对一系列标准模型做了深入研究。模型试验与CFD计算结果都需要通过数据处理以获得阻尼值,其中自由衰减试验具有试验难度小、成本低的特点,该方法被广泛采用。

从横摇衰减曲线估算横摇阻尼的方法众多,自1872年Froude^[9]的工作开始,人们在该领域做了大量工作。目前除经典的线性方法(消灭曲线法)、Froude能量法^[11]外,意大利的Bulian等^[10]、德国的Wassermann等^[11]在对数衰减法方面做了深入研究,英国的Roberts^[12]提出的能量方法、国际海事组织推荐的最小二乘法^[13]、上海交通大学曾智华^[14]的粒子群方法、香港城市大学Chan等^[15]的渐近方法、韩国的Kim等^[16]的Hilbert变换方法、中国船舶及海洋工程设计研究院封培元等^[17]的改进型消灭曲线法、中国海洋大学孙金伟等^[18]的Prony-SS方法、随机减量法^[19]等方法均成功用于横摇阻尼估算。其中随机减量法是从波浪中船舶横摇运动数据中提取横摇衰减运动的方法,该方法能从非规则波和规则波船舶横摇运动中提取横摇衰减曲线。

船舶横摇运动特别是大角度横摇运动非线性强,基于此特点,从横摇衰减曲线估算横摇阻尼的方法主要分为两类:一是基于分段线性假设,将横摇衰减曲线分成多段,分别处理各小段拟线性运动的阻尼关系;二是从横摇运动微分方程出发,先假设阻尼模型及复原力臂模型(未知时),后通过渐近方法、数值方法等手段经计算机迭代识别出阻尼模型参数,该类方法称为参数识别技术(parameter identification technique, PIT)。本文的目的是针对这两类方法进行分析,以获取高精度阻尼预报方法。

1 横摇运动数学模型

横摇运动时,粘性项与波浪项产生的阻尼量级相当,直接求解船体周围流体速度场以预报船舶横摇运动难度大且精度低,现阶段一般通过弹簧阻尼滑块模型来模化横摇运动。解耦并归一化单自由度横摇运动方程^[3]如下:

$$\ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + c_{44} = k \quad (1)$$

$$d(\dot{\varphi}) = \frac{B(\dot{\varphi})}{(I_{44} + \partial I_{44})}, c_{44} = \frac{C_{44}}{(I_{44} + \partial I_{44})}, k = \frac{K}{(I_{44} + \partial I_{44})} \quad (2)$$

式中, φ 为横摇角, I_{44} 为船的惯性矩, ∂I_{44} 为附加惯性矩, $B(\dot{\varphi})$ 为阻尼力矩, C_{44} 为复原力矩, K 为外部激励力矩。

对于横摇衰减试验,式(1)中外部激励项 $k=0$,阻尼项 $d(\dot{\varphi})$ 与复原力项 c_{44} 未知。一般来说,阻尼项 $d(\dot{\varphi})$ 与复原力项 c_{44} 都呈现非线性,通常都表示为级数形式^[13]。不同学者经过长期研究,提出了大量的阻尼模型,最经典的阻尼模型为线性-平方-立方阻尼模型,如式(3)所示。一般情况下,船舶关于中线面对称,复原力模型(如式(4))通常都表示为奇级数形式:

$$d(\dot{\varphi}) = 2\mu\dot{\varphi} + \beta\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + \delta\dot{\varphi}^3 \quad (3)$$

$$c_{44} = \omega_x^2 \frac{\overline{GZ}(\varphi)}{\overline{GM}} = \omega_x^2 r(\varphi), \quad r(\varphi) = \sum_{n=1,3,5,\dots} \gamma_n \varphi^n \quad (4)$$

式中, ω_x 为无阻尼横摇自然频率, $\overline{GZ}(\varphi)$ 为横摇复原力臂, \overline{GM} 为横稳性高, 复原力臂的非线性与对称性导致了 $r(\varphi)$ 的奇级数形式。当结合式(1)、式(3)~(4)可以发现, 横摇运动方程无精确解析解, 暂无直接提取阻尼的手段。基于该特点, 人们通过研究阻尼与其他项的能量关系、运动关系开发了一系列间接估算横摇阻尼方法, 按照方法原理可作如表 1 的分类。

表 1 横摇阻尼估算方法分类
Tab.1 Classification of roll damping estimation methods

基于分段线性假设	基于参数识别
消灭曲线法	最小二乘法
改进型消灭曲线法	粒子群方法
对数衰减法	渐近方法
Hilbert 变换方法	Prony-SS 方法
Froude 能量法	
Roberts 能量法	

2 基于分段线性假设的横摇阻尼估算方法

该类方法的基本思想是分段研究每个周期内横摇, 假设每单个周期内的运动均为正弦(或余弦)运动, 再按如图 1 所示流程估算横摇阻尼。除消灭曲线法与改进型消灭曲线法外, 基于分段线性假设的其他方法, 都要引入一个重要概念: 等效线性阻尼系数 B_{eq} 及其归一化形式 μ_{eq} , 某一时间段内式(1)中的阻尼项 $d(\dot{\varphi})$ 表示如下^[13]:

$$\begin{cases} d(\dot{\varphi}) = 2\mu_{eq}\dot{\varphi} \\ \mu_{eq} = \frac{B_{eq}}{2(I_{44} + \partial I_{44})} \\ \dot{\varphi} = \varphi_a \omega_E \sin(\omega_E t) \end{cases} \quad (5)$$

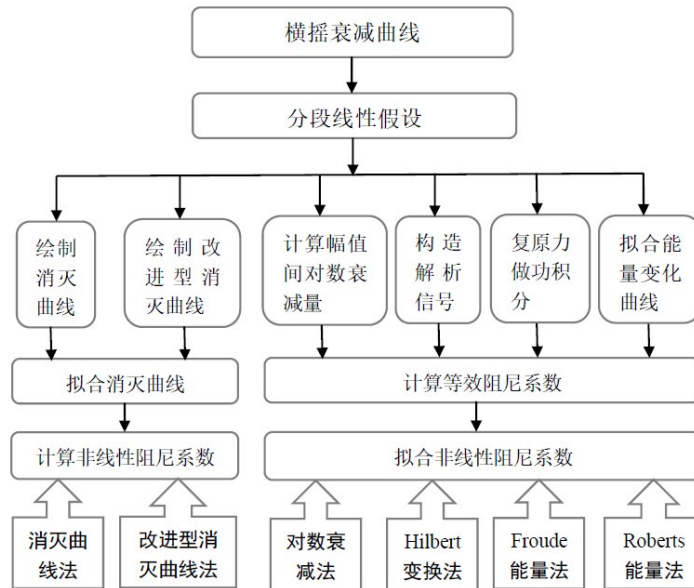


图 1 基于分段线性假设的横摇阻尼估算流程图

Fig.1 Procedure of roll damping estimation based on piecewise linear assumption

式中, μ_{eq} 为该时间段内等效阻尼系数, φ_a 为该周期内横摇角幅值, ω_E 为该周期内横摇圆频率。获得等效阻尼 μ_{eq} 后, 由能量关系可推导出非线性阻尼模型(如式(3))系数与等效阻尼的关系^[10]:

$$\int_0^{2\pi/\omega_E} 2\mu_{eq} \dot{\varphi}^2 dt = \int_0^{2\pi/\omega_E} d(\dot{\varphi}) \dot{\varphi} dt \quad (6)$$

$$\mu_{eq}(\varphi_a) = \mu + \frac{4}{3\pi} \beta(\omega_E \varphi_a) + \frac{3}{8} \delta(\omega_E \varphi_a)^2 \quad (7)$$

$$\omega_E(\varphi_a) = \sqrt{\omega_{x,eq}^2(\varphi_a) - \mu_{eq}^2(\varphi_a)} \tag{8}$$

式中, $\omega_{x,eq}$ 为该周期内等效无阻尼自然频率。为便于比较, 后文中试验数据验证时, 非线性阻尼模型都采用下式:

$$d(\dot{\varphi}) = b_1\dot{\varphi} + b_2\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + b_3\dot{\varphi}^3 \tag{9}$$

上式系数与式(3)系数的关系为

$$b_1 = 2\mu, b_2 = \beta, b_3 = \delta \tag{10}$$

2.1 消灭曲线法

假定横摇复原力臂 $\overline{GZ}(\varphi)$ 为线性的情况下, 横摇衰减运动由下式控制:

$$\ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_x^2\varphi = 0 \tag{11}$$

船舶从一个幅值 φ_i 运动到下一个幅值 φ_{i+1} 时(该方法幅值都取绝对值), 记 $\varphi_m = \frac{\varphi_{i+1} + \varphi_i}{2}$, $\Delta\varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i$, 假设横摇角表达式为

$$\varphi(t) = \varphi_m \cos(\omega_x t) \tag{12}$$

则势能做功为

$$E_R = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \omega_x^2 \varphi d\varphi = \frac{\omega_x^2}{2} (\varphi_{i+1}^2 - \varphi_i^2) = \omega_x^2 \cdot \Delta\varphi \cdot \varphi_m \tag{13}$$

阻尼做功为

$$E_D = \int_0^{\pi/\omega_x} d(\dot{\varphi}) \dot{\varphi} dt = \left(\frac{1}{2} \pi b_1 \omega_x \varphi_m + \frac{4}{3} b_2 \omega_x^2 \varphi_m^2 + \frac{3}{8} \pi b_3 \omega_x^3 \varphi_m^3 \right) \varphi_m \tag{14}$$

二者相等后有如下关系:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\pi}{2\omega_x} b_1 \varphi_m + \frac{4}{3} b_2 \varphi_m^2 + \frac{3\pi}{8} b_3 \omega_x \varphi_m^3 \right) \tag{15}$$

需要在时历曲线的三个不同位置分别取值, 获得三个三元一次方程以求解式(15)中的三个非线性阻尼模型系数 b_1, b_2, b_3 。

2.2 改进型消灭曲线法

封培元等^[17]提出了复原力臂 $\overline{GZ}(\varphi)$ 为3阶模型、阻尼模型为2项情况下的改进型消灭曲线法:

$$\left(1 + \varepsilon \frac{\varphi_{i+1}^2 + \varphi_i^2}{2} \right) \Delta\varphi = \left(\frac{\pi}{2\omega_x} b_1 \varphi_m + \frac{4}{3} b_2 \varphi_m^2 \right) \tag{16}$$

该模型中复原力臂曲线为3阶模型, 为了增加该方法的普适性, 本文将该方法拓展到了5阶模型。考虑阻尼模型为式(3), 复原力臂 $\overline{GZ}(\varphi)$ 为5阶模型的情况:

$$c_{44} = \omega_x^2 \varphi (1 + \varepsilon_1 \varphi^2 + \varepsilon_2 \varphi^4) \tag{17}$$

船舶从一个幅值 θ_i 运动到下一个幅值 θ_{i+1} 时势能做功为

$$E_R = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \omega_x^2 \varphi (1 + \varepsilon_1 \varphi^2 + \varepsilon_2 \varphi^4) d\varphi = \omega_x^2 \left(1 + \varepsilon_1 \frac{\varphi_{i+1}^2 + \varphi_i^2}{2} + \varepsilon_2 \frac{\varphi_{i+1}^4 + \varphi_{i+1}^2 \varphi_i^2 + \varphi_i^4}{3} \right) \cdot \Delta\varphi \cdot \varphi_m \tag{18}$$

阻尼做功同式(14), 二者相等有:

$$\begin{cases} A\Delta\varphi = \left(\frac{\pi}{2\omega_x} b_1 \varphi_m + \frac{4}{3} b_2 \varphi_m^2 + \frac{3\pi}{8} b_3 \omega_x \varphi_m^3 \right) \\ A = \left(1 + \varepsilon_1 \frac{\varphi_{i+1}^2 + \varphi_i^2}{2} + \varepsilon_2 \frac{\varphi_{i+1}^4 + \varphi_{i+1}^2 \varphi_i^2 + \varphi_i^4}{3} \right) \end{cases} \tag{19}$$

式(19)即扩展的改进型消灭曲线关系, 其系数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, b_1, b_2, b_3$ 均可不为0, 与文献[17]相比能适应更多复原力臂模型与阻尼模型。

2.3 对数衰减法

对数衰减法 (Bulian)^[10] 将相邻峰值时间段 $[t_{i+1} - t_i]$ 内横摇衰减运动类比为二阶线性系统振动过程:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu_{\text{eq}} \dot{\varphi} + \omega_{x,\text{eq}}^2 \varphi = 0 \quad (20)$$

根据线性系统振动理论易得

$$\mu_{\text{eq},i} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \ln \left| \frac{\varphi_i}{\varphi_{i+1}} \right|, \omega_E = \frac{\pi}{t_{i+1} - t_i}, \varphi_a = \frac{|\varphi_i| + |\varphi_{i+1}|}{2} \quad (21)$$

若复原力臂曲线为 $\overline{GZ}(\varphi)$, 则 $C_{44} = mg \overline{GZ}(\varphi)$, m 为排水质量, g 为重力加速度。Wassermann 等^[11] 对该方法做了修改以利用复原力臂曲线, 记双幅值对数衰减量为 Λ , 由线性系统振动理论:

$$\Lambda = \ln \left(\frac{\varphi_{D,i}}{\varphi_{D,i+2}} \right), \varphi_{D,i} = |\varphi_i - \varphi_{i+1}|, \varphi_a = \frac{\varphi_{D,i} + \varphi_{D,i+2}}{4} \quad (22)$$

$$\omega_x^2(\varphi_a) = \frac{C_{44}}{(I_{44} + \partial I_{44}) \varphi_a} = \frac{mg \overline{GZ}(\varphi_a)}{(I_{44} + \partial I_{44}) \varphi_a} \quad (23)$$

$$\frac{\mu_{\text{eq}}}{\omega_E} = \frac{B_{\text{eq}}}{2(I_{44} + \partial I_{44}) \omega_E} = \frac{\Lambda}{2\pi} \quad (24)$$

最终等效阻尼系数为

$$B_{\text{eq}} = \frac{mg \overline{GZ}(\varphi_a) \omega_E}{\pi \varphi_a} \frac{\omega_E}{\omega_x^2} \ln \left(\frac{\varphi_{D,i}}{\varphi_{D,i+2}} \right) \quad (25)$$

$$\mu_{\text{eq}} = \frac{B_{\text{eq}} \omega_x^2 \varphi_a}{2mg \overline{GZ}(\varphi_a)} \quad (26)$$

若式(25)~(26)中无阻尼自然横摇频率 ω_x 未知, 可利用式(27)代入横稳性高 \overline{GM} 与船宽 B_{WL} 估算,

$$\omega_x = \sqrt{\frac{g \overline{GM}}{(0.4B_{\text{WL}})^2}} \quad (27)$$

2.4 Hilbert 变换法

Hilbert 变换相当于 90° 移相^[16], 记横摇衰减信号 $\varphi(t)$ 的 Hilbert 变换为 $\hat{\varphi}(t)$, 则可以构造复平面内解析信号:

$$z(t) = \varphi(t) + i\hat{\varphi}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (28)$$

式中, $A(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的包络^[16], $\theta(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的相位角, 有如下关系:

$$\omega_E(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (29)$$

一般非线性横摇衰减运动方程可以写为以下形式:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu_{\text{eq}}(t)\dot{\varphi} + \omega_x^2(t)\varphi = 0 \quad (30)$$

式中, $\mu_{\text{eq}}(t)$ 为随时间变化的等效阻尼项, $\omega_x^2(t)$ 为随时间变化的横摇自然频率项。将式(28)代入式(30)可得以下关系:

$$\omega_x^2(t) = \omega_E^2(t) - \frac{\ddot{A}(t)}{A(t)} + 2 \frac{\dot{A}(t)^2}{A(t)^2} + \frac{\dot{A}(t)\dot{\omega}_E(t)}{A(t)\omega_E(t)} \quad (31)$$

$$\mu_{\text{eq}}(t) = -\frac{\dot{A}(t)}{A(t)} - \frac{\dot{\omega}_E(t)}{2\omega_E(t)} \quad (32)$$

根据式(31)与式(32), 只要从横摇衰减曲线中拟合出 $A(t)$ 与 $\omega_E(t)$, 即可获得等效阻尼随时间的变化关系, 进而得到每个横摇周期的等效阻尼 μ_{eq} 。

2.5 Froude 能量法

根据系统做功能量关系,相邻横摇幅值间阻尼做功应等于系统势能的变化量。当从横摇幅值 φ_i 运动到 φ_{i+2} 时,系统势能变化量与阻尼耗散的能量分别为

$$E_R = mg \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+2}} \overline{GZ}(\varphi) d\varphi \quad (33)$$

$$E_D = \int_0^{2\pi/\omega_E} B_{eq} \dot{\varphi} dt = \pi B_{eq} \omega_E \varphi_a^2, \quad \varphi_a = \left| \frac{\varphi_i + \varphi_{i+2}}{2} \right| \quad (34)$$

令式(33)与式(34)相等,可得

$$B_{eq}(\varphi_a) = \frac{mg}{\pi \omega_E \varphi_a^2} \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+2}} \overline{GZ}(\varphi) d\varphi \quad (35)$$

归一化的等效阻尼系数 μ_{eq} 的估算同式(26)。

2.6 Roberts 能量法

系统机械能 E_c 的耗散率应等于阻尼做功的功率。

$$E_c = \frac{1}{2} [I_{44} + \partial I_{44}] \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \int_0^\varphi C_{44} d\varphi \quad (36)$$

横摇运动到幅值 φ_i 时,角速度为0,式(36)右侧第一项为0。

$$E_c = \int_0^\varphi C_{44} d\varphi = mg \int_0^\varphi \overline{GZ}(\varphi) d\varphi \quad (37)$$

根据式(37)可求得幅值 φ_i 处的 E_c 值,拟合 E_c 与时间关系曲线,再求导并结合式(22)可得

$$B_{eq}(\varphi_a) = \frac{mg \overline{GZ}(\varphi_a)}{\omega_s^2 \varphi_a} \frac{dE_c}{dt} \frac{1}{E_c} \quad (38)$$

归一化的等效阻尼系数 μ_{eq} 的估算同式(26)。

3 基于参数识别的横摇阻尼估算方法

该类方法需预设未知项的模型,一般根据经验选择合适的阻尼和复原力臂模型,得到有待定参数的二阶常微分方程,再通过数学手段寻找最接近实验数据的解的模型参数。

3.1 最小二乘法与粒子群方法

以采用式(9)所示阻尼模型为例。

步骤一:先猜测一组初始参数如 b_1, b_2, b_3 。

步骤二:利用数值方法(如 Runge-Kutta 法)或解析方法求解横摇运动方程,生成解曲线。

步骤三:定义优化目标函数,如式(39),利用最优化方法(非线性最小二乘优化中的 Levenberg-Marquardt 优化、粒子群优化^[14]等方法均被成功应用于横摇阻尼识别)寻找使得该式最小的一组参数:

$$\chi^2(b_1, b_2, b_3) = \sum (\varphi_i - \varphi_{exp,i})^2 \quad (39)$$

式中, φ_i 为计算所得横摇角数据, $\varphi_{exp,i}$ 为试验横摇角数据,既可采用整条衰减曲线数据也可只选用幅值数据。为减少计算量,一般采用幅值数据。

3.2 Prony-SS 方法与渐近方法

Prony-SS 方法最先应用于信号处理领域,对于给定横摇衰减曲线,利用 Prony-SS 方法重构出衰减曲线的近似表达式^[18],后通过矩阵运算获得阻尼参数值。Prony-SS 方法能提取出横摇信号中的主要成分,具有内在的噪声抑制机制。

渐近方法是求解非线性微分方程的有力手段,对于利用衰减曲线估算横摇阻尼,该方法^[15]先利用摄动方法求解出横摇衰减运动方程的渐近解表达式,再通过曲线拟合获得表达式系数,利用消灭曲线反复迭代优化阻尼系数值。

4 横摇阻尼估算-研究结果与讨论

4.1 研究对象及数据简介

为验证并比较上述方法的特点,本文采用标模 DTC^[20]的横摇衰减试验数据估算横摇阻尼, DTC 标模是德国杜伊斯堡埃森大学按照超巴拿马型集装箱船体以 1: 59.407 的比例设计建造的, 船体剖面如图 2 所示。船模数据如表 2 所示, 采用压载 (ballast)、满载 (full condition) 两种工况下的无航速自由横摇衰减数据 (如图 3 所示) 作为样本, 其复原力臂曲线如图 4 所示, 从图中可以看出, 在试验横摇数据范围内, 复原力臂曲线拟合效果良好。采用 Wassermann^[11]文中推荐的 Froude 能量法复现其阻尼估算结果后, 利用本文中所述方法处理该数据并进行结果对比。

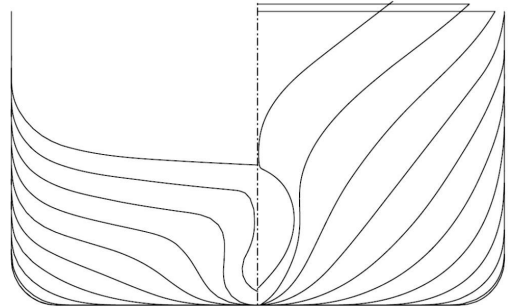


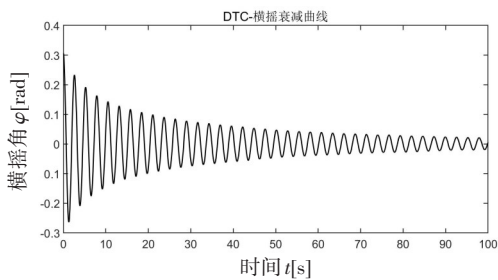
图 2 DTC 标模剖面图^[20]

Fig.2 Hull sections of DTC^[20]

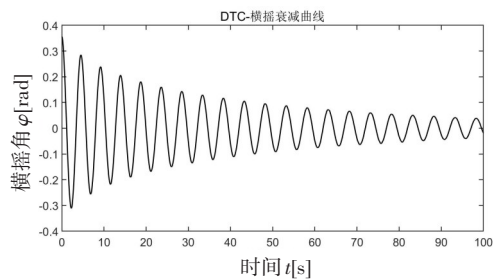
表 2 DTC 标模参数^[20]

Tab.2 Calculation parameters of the DTC model^[20]

名称	符号/单位	压载	满载	名称	符号/单位	压载	满载
船长	L_{WL}/m	5.9391	6.0691	排水体积	∇/m^3	0.6496	0.7887
船宽	B_{WL}/m	0.8576	0.8576	横稳性高	\overline{GM}/m	0.0768	0.023
吃水	D/m	0.2018	0.2345				



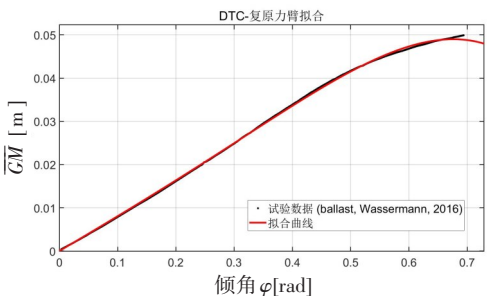
(a) 压载 ($D=0.2018\text{ m}$), 无航速



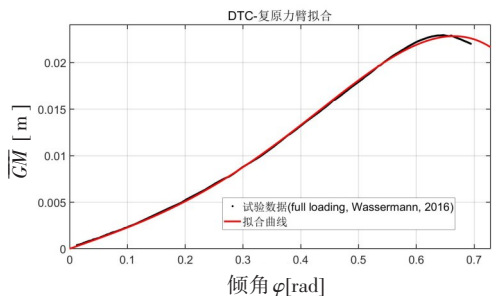
(b) 满载 ($D=0.2354\text{ m}$), 无航速

图 3 横摇衰减曲线

Fig.3 Roll decay curve^[20]



(a) 压载 ($D=0.2018\text{ m}$)



(b) 满载 ($D=0.2354\text{ m}$)

图 4 采用 5 阶级数拟合的 \overline{GZ} 曲线^[11]

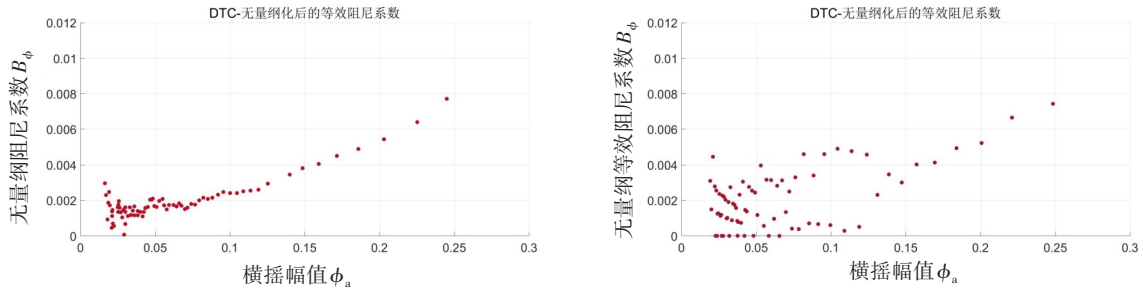
Fig.4 Fitting curve of \overline{GZ} based on 5th order series^[11]

4.2 基于分段线性假设的横摇阻尼估算结果

图 5(a)为 Wassermann^[11]对图 3(a)所示的横摇衰减曲线先进行滤波处理后再基于 Froude 能量法获

得的无量纲阻尼系数结果,图 5(b)为作者对图 3(a)所示的横摇衰减曲线直接使用 Froude 能量法后获得的无量纲阻尼系数结果,二者的大振幅结果基本一致,小振幅结果振荡大,这与 Wassermann 对数据进行了滤波^[11]操作有关。图中无量纲阻尼系数由下式得到:

$$B_{\varphi} = \frac{B_{eq}}{mB_{WL}^2} \sqrt{\frac{B_{WL}}{2g}} \quad (40)$$



(a) Wassermann^[11]对数据滤波后的无量纲阻尼系数结果 (b) 数据无滤波操作时无量纲阻尼系数结果

图 5 不同横摇幅值下的无量纲阻尼(压载(D=0.2018 m),无航速)

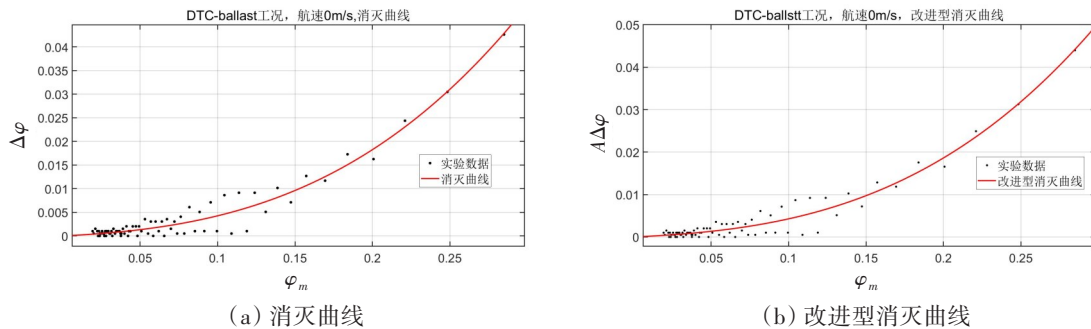
Fig.5 Non-dimensional roll damping with different amplitudes, ballast condition(D=0.2018 m), without forward speed

按照图 1 所示流程分别处理图 3 所示的横摇衰减曲线,阻尼模型采用式(9)。表 3 及图 6~9 展示了压载工况下各方法(为方便比较对方法进行了编号)的结果,表 4 展示了满载工况下非线性阻尼系数的拟合结果。图 6~8 中数据点振荡均较大,这与图 3(a)的数据尤其是相邻正负幅值的振荡密切相关,说明实验数据质量对基于该类方法的阻尼系数估算有影响。

表 3 非线性阻尼系数拟合结果,压载(D=0.2018 m),无航速

Tab.3 Results of nonlinear damping coefficients fitting, ballast condition(D=0.2018 m)

方法编号	方法	b_1	b_2	b_3
1	消灭曲线法	0.026 549	0.111 15	0.378 934
2	改进型消灭曲线法	0.027 29	0.1014	0.411 827
3	对数衰减法(Bulian)	0.030 74	0.080 653	0.376 267
4	对数衰减法(Wassermann)	0.031 92	0.052 71	0.478 93
5	Hilbert 变换方法	0.028 06	0.125 727	0.277 87
6	Froude 能量法	0.0357	0.086 68	0.449 87
7	Roberts 能量法	0.050 94	-0.032 63	0.560 27



(a) 消灭曲线 (b) 改进型消灭曲线

图 6 采用式(15)拟合的消灭曲线与采用式(19)拟合的改进型消灭曲线

Fig.6 Fitting curve of extinction curve method based on Eq. (15) and enhanced extinction curve method based on Eq. (19), ballast condition (D=0.2010 m), without forward speed

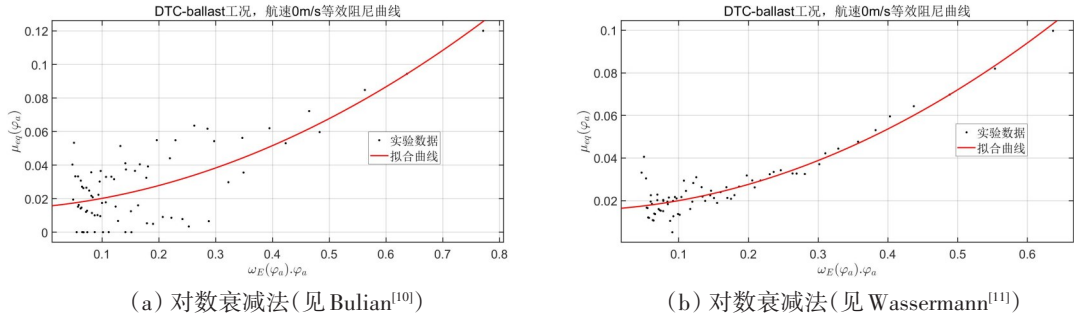


图 7 基于式(7)的等效阻尼拟合,压载($D=0.2018\text{ m}$),无航速

Fig.7 Curve fitting of equivalent linear damping coefficients based on Eq. (7), ballast condition ($D=0.2018\text{ m}$), without forward speed

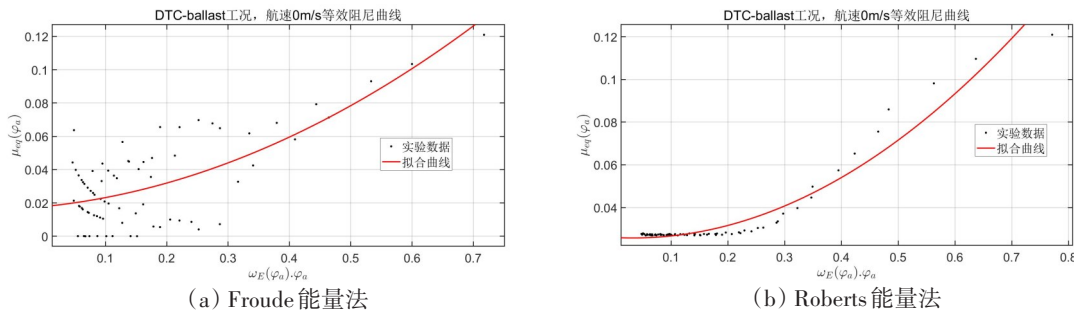


图 8 基于式(7)的等效阻尼拟合,压载($D=0.2018\text{ m}$),无航速

Fig.8 Fitting curve of equivalent linear damping coefficients based on Eq. (7), ballast condition ($D=0.2018\text{ m}$), without forward speed

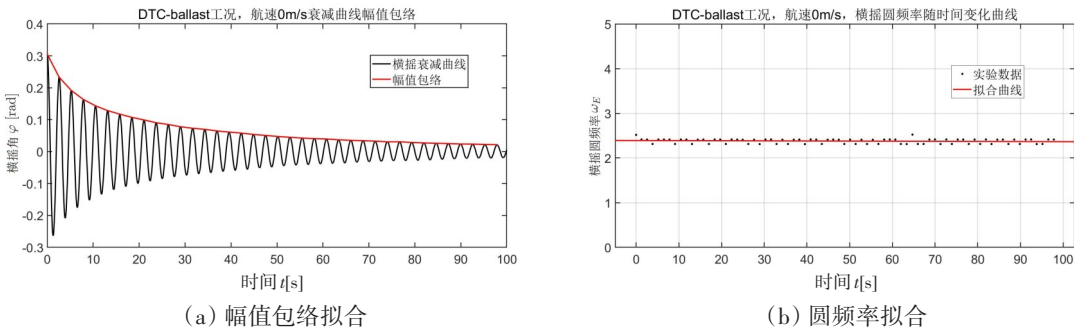


图 9 幅值与频率随时间的关系曲线拟合-Hilbert 变换方法,压载($D=0.2018\text{ m}$),无航速

Fig.9 Fitting curve of amplitudes and frequency with time-Hilbert transform method, ballast condition ($D=0.2018\text{ m}$), without forward speed

表 4 非线性阻尼系数拟合结果,满载($D=0.2354\text{ m}$),无航速

Tab.4 Results of nonlinear damping coefficients fitting, full loading condition ($D=0.2354\text{ m}$)

方法编号	方法	b_1	b_2	b_3
1	消灭曲线法	0.051 393	-0.191 63	0.886 246
2	改进型消灭曲线法	0.061 8508	-0.334 13	1.438 234
3	对数衰减法(Bulian)	0.035 26	-0.035 25	0.521 07
4	对数衰减法(Wassermann)	0.036 76	-0.043 14	0.5376
5	Hilbert 变换方法	0.036 84	-0.033 81	0.528 27
6	Froude 能量法	0.042 88	-0.023 87	0.4648
7	Roberts 能量法	0.048 86	-0.142 08	0.861 33

4.3 基于参数识别的横摇阻尼估算方法结果

利用参数识别方法(PIT)估算横摇阻尼需要先预设阻尼模型和复原力模型(未知时),为便于对比分析,本文中复原力采用图4所示的拟合模型,阻尼模型选用式(9)形式。所得归一化的自由横摇运动微分方程形式如下:

$$\ddot{\varphi} + b_1\dot{\varphi} + b_2\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + b_3\dot{\varphi}^3 + \omega_x^2(\varphi + \varepsilon_1\varphi^3 + \varepsilon_2\varphi^5) = 0 \tag{41}$$

根据图4拟合结果,式(41)中 ε_1 、 ε_2 已知, ω_x 使用式(27)估算。根据文献[11]可知,式(27)估算结果偏差不超过1%,则上式中未知参数有 b_1 、 b_2 、 b_3 ,本文选取最小二乘法、粒子群算法和Prony-SS方法(为方便比较对方法进行了编号)识别上述参数。图10和表5展示了部分识别过程及非线性阻尼系数识别结果。

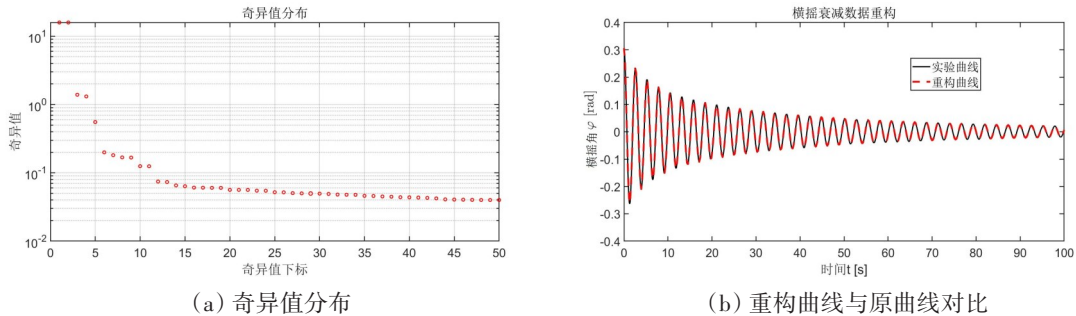


图10 基于Prony-SS方法的横摇衰减曲线重构,压载($D=0.2018\text{ m}$),无航速

Fig.10 Reconstruction of roll decay curves based on Prony-SS method, ballast condition ($D=0.2018\text{ m}$), without forward speed

最小二乘法参数初值采用 $[0;0;0]$,粒子群算法的参数采用默认设置。图10(a)展示了使用Prony-SS方法时对横摇衰减数据构成的Hankel矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition)后获得的奇异值量级分布。根据奇异值量级大小可判断重构的衰减曲线近似表达式的主要项,图10(b)为取前11个奇异值对应的项重构出的近似表达式与实验数据的对比,可见重构精度良好。

表5中的非线性阻尼系数识别结果为未经调试检验的结果,均与基于分段线性假设的方法识别结果存在较大差异,说明基于参数识别的方法可能存在多解的现象。该类方法结果受识别过程中参数设置的影响,为排除多解和得到足够精度的阻尼系数,既要经验也需要根据每条实验数据反复比对调试。

表5 非线性阻尼系数参数识别结果

Tab.5 Results of nonlinear damping coefficients based on PIT

方法编号	方法	b_1	b_2	b_3	工况
8	最小二乘法 (Levenberg-Marquardt方法)	2.353 12	-2.569 92	-0.580 83	压载
9	Prony-SS方法	0.0135	0.4120	-0.0892	压载
10	粒子群优化(PSO)	-5.297 867	36.485 36	-27.988 35	压载
8	最小二乘法 (Levenberg-Marquardt方法)	0.146 14	-1.0798	6.7171	满载
9	Prony-SS方法	0.1099	-0.6188	1.7578	满载
10	粒子群优化(PSO)	-1722.981	-512.729	410.039	满载

5 横摇阻尼估算方法特点对比

横摇阻尼评估是船舶横摇运动预报简化的重要步骤,由于流动的复杂性、船舶各自由度运动的耦

合,式(1)形式的运动方程只是对真实横摇运动的近似。好的评估结果应能提取出横摇阻尼的内在特性,即真实的横摇运动应为该特性叠加上各种随机因素的耦合结果。从表3~5的阻尼参数拟合结果来看,基于分段线性假设的方法一致性较好,基于参数识别的方法结果差别较大,显示横摇阻尼估算结果准确度与使用的方法强相关。

5.1 横摇阻尼评估效果

为评估各方法的阻尼估算效果,参照式(39)定义误差 R ,表达式如下:

$$R = \sqrt{\sum(\varphi_i - \varphi_{exp,i})^2} \tag{42}$$

式中, φ_i 为评估得到的阻尼模型参数代入横摇运动微分方程后,使用四阶 Runge-Kutta 法求得的横摇曲线衰减数据(本文取横摇幅值数据), $\varphi_{exp,i}$ 为对应实验数据。各方法的 R 值见图 11,可见 R 值均不为 0。 R 不为 0 有三方面原因:存在测量误差及噪声,阻尼模型不够精确,方法自身引入误差。

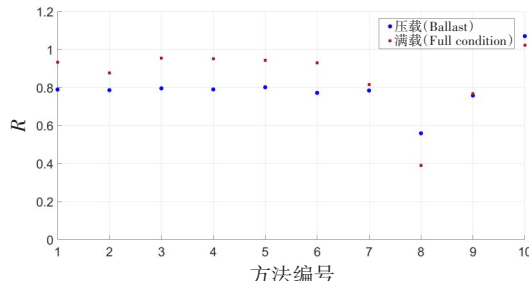


图 11 DTC 标模不同数据处理方法的误差 R

Fig.11 Comparison of roll prediction errors by roll damping of DTC model from different estimation methods

5.2 基于自由横摇衰减曲线的横摇阻尼评估方法误差来源

对于从自由衰减曲线估算横摇阻尼而言,有效横摇周期越多越有利于获取准确的横摇阻尼信息。然而,一般小振幅横摇测量噪声与误差占比大,大幅度横摇运动衰减太快,有效横摇周期少,如图 5 所示。为尽可能提高横摇阻尼评估精度,需要选择对测量噪声与误差不敏感且评估过程误差引入少的方法。

基于分段线性假设的估算方法涉及的曲线拟合、求导过程都会产生误差,表 6 所示为各方法曲线拟合与求导状况。对于消灭曲线法与改进型消灭曲线法,分段线性假设后,为了能实现消灭曲线拟合(如式(12)),一般假设所有周期频率都为横摇自然频率,然而,如图 9(b)所示,真实的横摇频率会随时间不断变化,即式(15)、式(16)与式(19)都是近似等式,引入了额外误差。

表 6 基于分段线性假设的估算方法涉及的曲线拟合及求导次数

Tab.6 Times of curve fitting and derivation of estimation methods based on piecewise linear assumption

方法	(改进型) 消灭曲线法	对数衰减法	Hilbert 变换方法	Froude 能量法	Roberts 能量法
曲线拟合次数	1	1	3	1	2
求导次数	0	0	2	0	1

基于参数识别的估算方法涉及的阻尼模型选择同样会引入误差,根据最优化理论,非线性最小二乘法、粒子群对测量误差与噪声敏感且寻优结果可能为局部最小,即不一定是真实结果,且参数设置对结果影响大(如表 5 所示)。Prony-SS 方法重构曲线后,求解阻尼参数的线性方程组为超定方程组,解该类方程组用到线性最小二乘法,存在唯一解,不存在该问题,但只有阻尼模型足够精确其参数识别结果才可信(作者使用自定义阻尼参数生成衰减曲线后,使用 Prony-SS 方法验证后得出此结论)。

6 结 论

本文以获取高精度阻尼预报方法为目标,对 9 种(渐近方法未考虑,其阻尼估算过程复杂,自身误差项多)横摇阻尼评估方法的原理进行分析并利用 DTC 标模横摇衰减数据进行验证后,得出以下结论:

(1) 基于分段线性假设的横摇阻尼估算方法物理意义明确, 不需预设阻尼模型, 但涉及的曲线拟合与求导过程易引入额外误差; 除消灭曲线法外, 其他方法均能将非线性横摇力臂纳入考虑; 真实的横摇频率随时间不断变化, 消灭曲线关系式(15)、改进型消灭曲线关系式(16)和式(19)只是近似成立; Froude 能量法对测量噪声与误差不敏感, 自身引入误差最少, 具有良好性能。

(2) 基于参数识别的横摇阻尼估算方法直接从微分方程与实现数据出发, 原理清晰, 但需预设阻尼模型且识别过程为黑箱子; 非线性最小二乘优化、粒子群优化迭代参数对寻优结果影响大即可能为局部最小; Prony-SS 方法存在唯一解, 但只有阻尼模型足够精确其参数识别结果才可信。

(3) 推荐使用对测量噪声与误差不敏感^[11], 只有一次曲线拟合、无求导、物理意义明确、识别过程简洁的 Froude 能量法拟合出等效阻尼曲线, 若能找出足够精确的阻尼模型, 再利用 Prony-SS 方法获得更精确的阻尼模型参数。

横摇阻尼估算是一项复杂的工作, 本文主要研究了基于衰减曲线估算横摇阻尼的方法, 并未对不同影响因素下(航速、船型参数、尺度效应、流动记忆效应等)获得的自由衰减曲线是否能提供足够的信息、是否反映了横摇的本质进行讨论, 因此使用以上方法估算横摇阻尼时应予以考虑。

参 考 文 献:

- [1] Falzarano J, Somayajula A, Seah R. An overview of the prediction methods for roll damping of ships[J]. *Ocean Systems Engineering*, 2015, 5(2): 55-76.
- [2] ITTC . Recommended procedures and guidelines: Numerical estimation of roll damping, 7.5-02-07-04.5[R]. ITTC: Boulder, CO, USA, 2011.
- [3] ITTC. Recommended procedures and guidelines: Estimation of roll damping. 7.5-02-07-04.5[R]. ITTC-Recommended Procedures, 2021.
- [4] Procedures I R. Guidelines: Practical guidelines for ship CFD applications[C]//Proceedings of the 27th International Towing Tank Conference (ITTC), Copenhagen, Denmark, 2014.
- [5] ITTC. Recommended procedures and guidelines: Seakeeping experiments. 7.5-02-07-02.1[R]. ITTC-Recommended Procedures, 2021.
- [6] Gu M, Lu J, Bu S, et al. Numerical simulation of the ship roll damping[C]//Proceedings of STAB, 2015.
- [7] Gu M, Bu S, Qiu G, et al. Validation of CFD simulation for ship roll damping using one pure car carrier and one standard model[C]//Proceedings of the 15th International Ship Stability Workshop, Stockholm, 2016.
- [8] Gu M, Bu S, Wu C, et al. Numerical study on the scale effect of ship roll damping[C]//Proc. of the 13th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Kobe, Japan, 2018.
- [9] Froude W. On the influence of resistance upon the rolling of ships[J]. *Naval Science*, 1872: 411-429.
- [10] Bulian G, Francescutto A, Fucile F. Determination of relevant parameters for the alternative assessment of intact stability weather criterion on experimental basis[M]. Trieste: University of Trieste, 2009.
- [11] Wassermann S, Feder D F, Abdel-Maksoud M. Estimation of ship roll damping—A comparison of the decay and the harmonic excited roll motion technique for a post panamax container ship[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 120: 371-382.
- [12] Roberts J B. Estimation of nonlinear ship roll damping from free-decay data[J]. *Journal of Ship Research*, 1985, 29(02): 127-138.
- [13] Iqbal K S, Bulian G, Hasegawa K, et al. Interim guidelines for alternative assessment of the weather criterion[J]. *J. Mar. Sci. Technol*, 2008, 13: 282-290.
- [14] 曾智华, 姜宜辰, 邹早建. 基于 PSO 算法的船舶横摇阻尼与回复力矩系数估算[J]. *中国造船*, 2018, 59(03): 89-97.
Zeng Zhihua, Jiang Yichen, Zou Zaojian. Estimation of ship's roll damping and restoring moment coefficients based on PSO algorithm[J]. *Shipbuilding of China*, 2018, 59(03): 89-97. (in Chinese)
- [15] Chan H S Y, Xu Z, Huang W L. Estimation of nonlinear damping coefficients from large-amplitude ship rolling motions[J]. *Applied Ocean Research*, 1995, 17(4): 217-224.

-
- [16] Kim Y, Park M J. Identification of the nonlinear roll damping and restoring moment of a FPSO using Hilbert transform[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 381–388.
- [17] Feng P Y, Fan S M. Enhanced extinction curve method for roll damping estimation[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(12): 1489–1496.
- [18] Sun J, Hu S L J, Li H. Nonlinear roll damping parameter identification using free-decay data[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108425.
- [19] Wu X, Tao L, Li Y. Nonlinear roll damping of ship motions in waves[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005, 127(3): 205–211.
- [20] Moctar O, Shigunov V, Zorn T. Duisburg test case: Post-panamax container ship for benchmarking[J]. *Ship Technology Research*, 2012, 59(3): 50–64.