

# 内倾船波浪中复原力试验和计算研究

王田华, 顾民, 曾柯, 鲁江, 祈江涛

(中国船舶科学研究中心, 水动力学重点实验室, 江苏 无锡, 214082, Email: [tianhua\\_wang@126.com](mailto:tianhua_wang@126.com))

**摘要:** 目前国际海事组织第二代完整稳性衡准正在制定中, 参数横摇和纯稳性丧失被列入 5 种稳性失效模式中, 波浪中复原力丧失是参数横摇和纯稳性丧失薄弱性衡准和稳性直接评估的关键因素。本研究以一艘内倾船为对象, 分别对波浪着不同波长波陡条件下的复原力丧失进行了试验测量, 得到了不同横摇角度时的复原力变化曲线, 分析了不同波浪条件下复原力的变化规律; 同时开发波浪中复原力计算方法和程序, 对波浪中船舶复原力变化进行了计算分析, 并和试验结果进行了对比, 有效验证了计算方法的准确性和有效性, 为参数横摇和纯稳性丧失稳性直接评估方法的实现奠定了基础, 为船舶第二代完整稳性衡准的建立提供了技术支撑。

**关键词:** 内倾船; 复原力; 规则波; 直接稳性评估; 二代完整稳性

## 1 引言

目前国际海事组织第二代完整稳性衡准正在制定中, 参数横摇和纯稳性丧失被列入 5 种稳性失效模式之一。参数横摇是波浪中船舶复原力周期性变化引起的伴随着显著垂荡、纵摇运动的非线性横摇现象, 纯稳性丧失主要是指随浪航行时由于船舶稳性力臂减少而导致倾覆的稳性失效模式, 横摇复原力变化是影响参数横摇衡准和纯稳性丧失衡准评估的关键因素。而内倾船型由于其船型特点为折角线以上内倾设计和穿浪型舰艏, 这些船型特点使得其稳性性能和常规船型相比差别很大, 其内倾设计导致船体倾斜时复原力矩较常规船型明显减少, 尤其是大倾角时的复原力矩。因此内倾船型的倾覆危险会明显大于常规船型, 稳性问题已成为制约内倾船型实际应用的关键。为确认参数横摇和纯稳性丧失薄弱性衡准提案中利用静平衡法求解内倾船型横摇复原力的可靠性, 并在稳性直接评估中提出可靠的计算横摇复原力的方法, 以提高数值预报的精度, 本研究以 IMO 第二代完整稳性衡准通信组提供的 ONR 内倾船为研究对象, 通过约束模型试验和数值计算开展了规则波中横摇复原

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目 ([2017]614): 二代完整稳性直接评估方法与实船操作指南研究

作者简介: 王田华 (1986-), 女, 中国船舶科学研究中心高级工程师, Email:[tianhua\\_wang@126.com](mailto:tianhua_wang@126.com)

顾民 (1962-), 男, 中国船舶科学研究中心研究员

力研究。

## 2 船舶横摇复原力计算方法

基于 Froude 假设, 规则波中的横摇复原力计算公式如下:

$$W \cdot GZ_{FK} = \rho g \int_L y'_{B(x)} \cdot A(x) dx + \rho g \sin \chi \int_L z'_{B(x)} \cdot F(x) \cdot A(x) \cdot \sin(\zeta_G + x \cdot \cos \chi) dx \quad (1)$$

$$F(x) = \zeta_a k \frac{\sin(k \sin \chi B(x) / 2)}{k \sin \chi B(x) / 2} e^{-kd(x)} \quad (2)$$

其中,  $W$  为船舶重量;  $GZ_{FK}$  为基于 Froude 假设的横摇复原力臂;  $L$  为船长;  $A(x)$  为各横剖面的浸水面面积;  $y'_{B(x)}$ ,  $z'_{B(x)}$  为参考坐标系下浸水横剖面的形心坐标;  $\zeta_G$  为船舶重心在波浪行进方向到第一个波谷的距离;  $x$  为剖面到船舶重心的距离;  $\zeta_a$  为波幅;  $k$  为波数;  $\chi$  为航向角;  $B(x)$  为剖面宽度;  $d(x)$  为剖面吃水;  $\rho$  为水密度;  $g$  为重力加速度。

规则波中, 当船舶横倾某一角度时, 可以通过排水体积相等, 纵倾力矩为零的静平衡条件求出此时的升沉和纵倾, 如公式所示:

$$W - \rho g \int_L A(x) dx + \rho g \cdot \int_L F(x) \cdot A(x) \cdot \cos(\zeta_G + x \cdot \cos \chi) dx = 0 \quad (3)$$

$$\rho g \int_L x A(x) dx + \rho g \cdot \int_L x F(x) \cdot A(x) \cdot \cos(\zeta_G + x \cdot \cos \chi) dx = 0 \quad (4)$$

垂荡、纵摇运动也可通过切片法求解, 如公式所示:

$$(M + A_{33})\zeta + B_{33}\zeta + C_{33}\zeta + A_{35}\theta + B_{35}\theta + C_{35}\theta = F_Z \quad (5)$$

$$A_{53}\zeta + B_{53}\zeta + C_{53}\zeta + (I_{yy} + A_{55})\theta + B_{55}\theta + C_{55}\theta = M_\theta \quad (6)$$

通过以下公式考虑波浪中辐射力和绕射力对复原力变化的影响:

$$GZ_{R\&D} = -M_X / W \quad (7)$$

$$M_X = K - (KG - D)Y \quad (8)$$

$$M_X(X_G, t) = M_{Xa} \cos(\omega t - kX_G \cos \chi + \delta_{MX}) \quad (9)$$

$$Y = F_Y - (A_{23}\zeta + B_{23}\zeta + C_{23}\zeta + A_{25}\theta + B_{25}\theta + C_{25}\theta) \quad (10)$$

$$K = M_\phi - (A_{43}\zeta + B_{43}\zeta + C_{43}\zeta + A_{45}\theta + B_{45}\theta + C_{45}\theta) \quad (11)$$

其中,  $KG$  为重心到基线距离;  $D$  为吃水;  $M_{Xa}$  为复原力变化振幅;  $M_X$  为复原力变化的初始相位。各水动力系数表达式, 波浪力  $F_Z$ 、 $F_Y$  以及波浪力矩  $M_\theta$ 、 $M_\phi$  的求解参见文献。

### 3 波浪中复原力试验和计算结果

复原力模型试验在中国船舶科学研究中心耐波性水池中进行,水池主尺度:长 69m、宽 46m、深 4m,该水池可进行任意浪向下的波浪模型试验。水池相邻两边安装了从荷兰引进的世界上最先进的由伺服电机驱动的三维造波系统,可模拟规则波、不规则波和短峰波。配置了从日本引进的浪高仪。试验采用 ONR 内倾船,模型缩尺比为 1:40.526,具体参数见表 1,模型照片如图 1 所示。试验采用中国船舶科学研究中心自主研发的船模波浪中稳性试验装置中的水动力性能测量机构测量波浪中船模横摇复原力变化和垂荡、纵摇运动。

表 1 内倾船参数

名称	符号	单位	实船	模型
垂线间长	$L_{PP}$	m	154	3.8
型宽	$B$	m	18.8	0.464
设计吃水	$T$	m	5.494	0.136
排水体积	$\Delta$	$m^3$	8507	0.1278
横摇周期	$T_\phi$	s	14.0	2.200
初稳性高	GM	m	1.5	0.037



图 1 内倾船复原力试验照片

波浪中基于Froude-Krylov假设,分别上述方法计算横摇复原力,即垂荡和纵倾通过求解水动力系数和波浪力求出。试验时设定横倾角分别为 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ ,但实际测量结果分别为 $8^\circ$ 和 $18^\circ$ ,以试验测量结果为准。固定横倾角为 $8^\circ$ , $\lambda/L=0.8$ , $H/\lambda=0.03$ 时,零航速下横摇复原力变化结果和试验比对见图2,试验值为虚线,计算值为实线,可看出计算结果和试验值吻合较好。固定横倾角为 $18^\circ$ , $\lambda/L=0.8$ , $H/\lambda=0.04$ 时,零航速下横摇复原力变化结果和试验比对见图3,可看出计算结果略小于试验结果,二者变化规律一致,但计算复原力幅值小于试验值。

当 $\lambda/L=1.0$ ,固定横倾角分别为 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 时,波陡对横摇复原力影响计算结果见图4和5所示,可看出复原力变化幅值随波陡增大而增大,复原力最大值跟波陡成正比,最小值跟波陡成反比;不同船波位置处复原力变化呈规律振荡,波峰在船中时复原力最小。 $\lambda/L=1.0$ 时,不同船波位置处横摇复原力变化计算结果见图6所示, $H/\lambda=0.01$ 时复原力随船波位置变化较为缓和,即复原力变化幅值较小,随波陡增大,横摇复原力变化幅度增加,横摇消失角变小,船舶安全性降低。波浪中基于Froude-Krylov假设,采用切片法计算横摇复原力的变化,进而预报船舶二代稳性衡准是可行的,但在波陡较高时计算模型还需进一步改进。

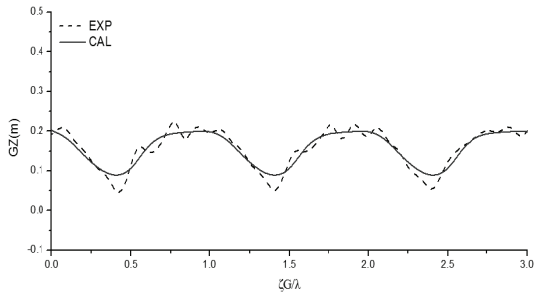


图2 顶浪零航速复原力计算和试验比对 ( $\lambda/L_{pp}=0.8$ ,  $H/L_{pp}=0.03$ ,  $\varphi=8^\circ$ )

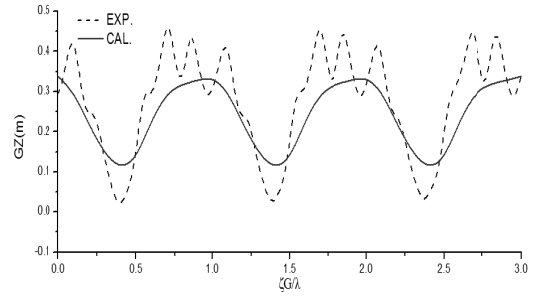


图3 顶浪零航速复原力计算和试验比对 ( $\lambda/L_{pp}=0.8$ ,  $H/L_{pp}=0.04$ ,  $\varphi=18^\circ$ )

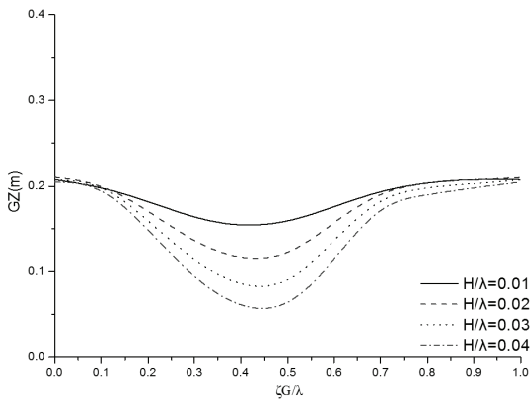


图4 横倾10度时波陡对横摇复原力影响 ( $\lambda/L=1.0$ )

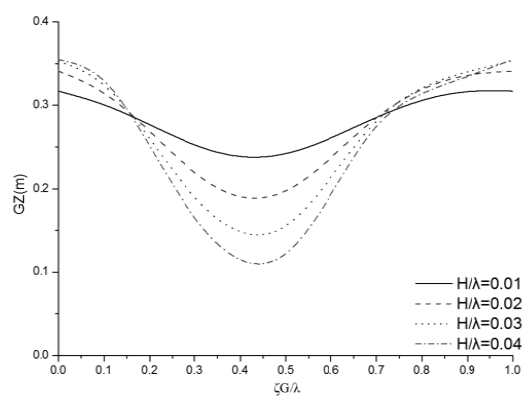


图5 横倾20度时波陡对横摇复原力影响 ( $\lambda/L=1.0$ )

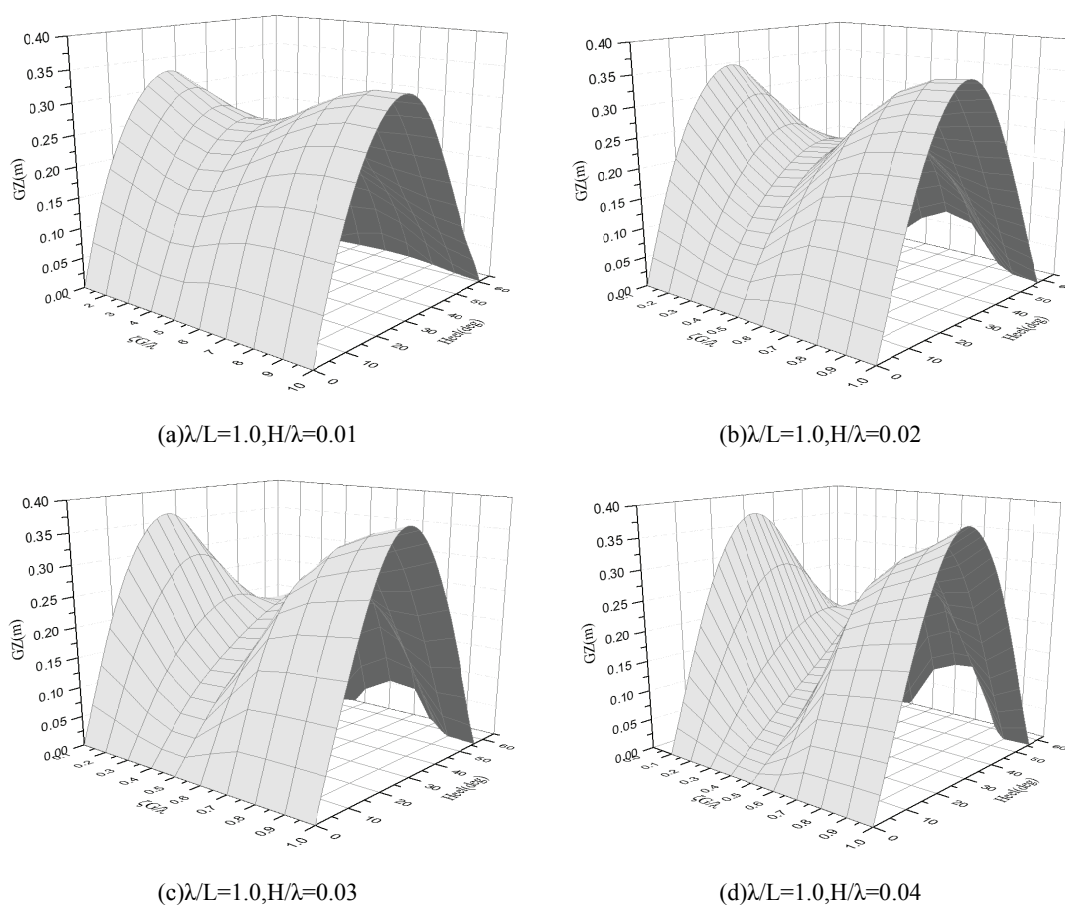


图6 不同船波位置处横摇复原力变化

## 4 结论

本研究采用一艘内倾船型，通过试验和数值方法研究了随浪中横摇复原力的变化，得出如下结论：①该船在零航速时波浪复原力计算结果和试验吻合较好；复原力变化幅值随波陡增大而增大；②不同船波位置处复原力变化呈规律振荡，波峰在船中时复原力最小，随波陡增大横摇消失角变小，船舶安全性降低；③基于 Froude-Krylov 假设，采用切片法计算横摇复原力的变化，进而预报内倾船第二代稳性衡准是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 IMO SDC 2/WP.4.Development of Second Generation Intact Stability Criteria[R]. 2015.
- 2 IMO SDC 4/5/1 .Report of the correspondence group (part 1) [R]. 2017.
- 3 IMO SDC 6/WP.6. Report of the Experts' Group on Intact Stability[R]. 2019.
- 4 顾民, 王田华, 鲁江, 曾柯.随浪中船舶复原力计算和试验研究[J].水动力学研究与进展, 2017.
- 5 鲁江, 马坤, 黄武刚.规则波中船舶复原力和参数横摇研究[J]. 海洋工程, 2011,29(1):61-67.
- 6 Wang Tianhua, Gu Min,Lu Jiang .Application assessment on vulnerability criteria of the pure loss of stability[C]. Proceedings of the 5th International Maritime Conference on Design for Safety and 4<sup>th</sup> Workshop on Risk-based Approaches in the Marine Industrie,Shanghai, 2013.
- 7 Jiang Lu, Min Gu. Experimental and numerical study on several crucial elements for predicting parametric roll in regular head seas.JMST,2017.
- 8 Hirotsada Hashimoto, Naoya Umeda, Yasuhiro Sogawa.Parametric Roll of a Tumblehome Hull in Head Seas. Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference,pp717-721,Osaka, Japan, June 21-26, 2009.
- 9 Hamid Sadat-Hosseini, Frederick Stern, Angelo Olivieri et.al. Head-wave parametric rolling of a surface combatant. Ocean Engineering, 2010, (37):859 - 878.

### Experimental and numerical study on restoring force of a tumblehome hull in waves

WANG Tian-hua, GU Min, ZENG Ke , LU Jiang, QI Jiang-tao

(China Ship Scientific Research Center, National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, Wuxi 214082, Email: [tianhua\\_wang@126.com](mailto:tianhua_wang@126.com))

**Abstract:** The vulnerability criteria on parametric roll and pure loss of stability are now under development by the International Maritime Organization (IMO) in the second generation intact stability criteria. Roll restoring force variation in waves is a key factor for both vulnerability criteria and direct stability assessment for them. Model experiments are conducted to study the roll restoring variation in waves using a tumblehome hull. Firstly, captive model experiments with different wave length and slope were conducted to measure roll restoring variation in waves and the effect of waves on it was obtained. Secondly, one numerical method with heave and pitch motions by strip method is carried out to calculate roll restoring variation. Finally,the rule of roll restoring variation in waves is confirmed by experiments and simulations and the numerical methods are also validated through the comparisons between the model experiments and the simulations, which protected energetically support for numerical method of direct stability assessment for parametric roll and pure loss of stability and the IMO second generation intact stability criteria.

**Key words:** Tumblehome hull; Roll restoring variation; Regular waves; Direct stability assessment; Second generation intact stability.