doi:10.11887/j.cn.201704025　　http://journal.nudt.edu.cn

小水线面双体船波浪中纵向运动性能模型试验研究*

孙小帅,姚朝帮,叶　青
(海军工程大学 舰船工程系,湖北 武汉　430033)

摘　要:在拖曳水池里开展了小水线面双体船顶浪规则波中纵向运动模型试验,研究了航速和拖点垂向位置对船体纵向运动性能的影响。试验结果表明:不同航速下,船体的垂荡响应算子和纵摇响应算子均随着波长变化呈现出双极值;航速对垂荡响应算子极值的影响较小,对纵向响应算子极值的影响较大;除了短波中的共振区附近,拖点在重心时的运动响应算子与拖点在推力轴线时的运动响应算子相比有所减小。

关键词:小水线面双体船;耐波性;拖点;稳定鳍
中图分类号: U661.1　　**文献标志码**: A　　**文章编号**:1001-2486(2017)04-161-07

Experimental investigation on the seakeeping performance of small waterplane area twin hull in head waves

SUN Xiaoshuai, *YAO Chaobang*, *YE Qing*
(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A SWATH (small waterplane area twin hull) in head regular waves was investigated by experimental method. The influences of speed and vertical position of towing point on the seakeeping performance of SWATH were analyzed. The experimental results illustrate that: the transfer functions of both heave and pitch modes depict two peak values with the increase of wave length under different speeds; with the increase of advancing speed, the peak value of transfer functions of heave mode remains almost constant, while the peak value of pitch mode changes moderately; the motion responses with the towing point at center of gravity are slightly smaller than those with the towing point at the thrust axis during all wave lengths except the resonant zone at short waves.

Key words: small waterplane area twin hull; seakeeping; towing point; stabilizing fins

小水线面双体船(Small Waterplane Area Twin Hull,SWATH)由深置于水下的两个细长下体、连接上体和下体的小水线面支柱和宽敞的上船体三部分组成[1]。与排水量相当的常规单体船和双体船相比,其具有较大排水体积的下体深置于水中,因而所受的波浪干扰力小,在大风浪中的失速、运动响应幅值和运动加速度幅值均较小,具有较好的稳定性和优良的耐波性。由于支柱的水线面面积较小,其纵摇和横摇固有运动周期较大,在斜浪中不会发生谐摇,海上作业时人员晕船率低、舒适度高[2-3]。因此,SWATH 适合在各种海况下执行多样化任务,在海上交通、水文测量、水声监测等商业和军事领域得到广泛应用[4]。

与单体船相比,SWATH 耐波性的理论计算较为复杂,其难点主要体现在:两片体之间的兴波干扰、黏性阻尼的影响和稳定鳍的影响[5]。众多学者针对 SWATH 的耐波性进行了大量数值研究,如 Lee[5-6]、Hong[7]、McCreight[8-9]、李向群[10]、董祖舜[11]、刘志华[12]、毛筱菲[13]等。上述学者的计算方法均基于二维切片法,采用半经验的方法来计入黏性和稳定鳍的影响。虽然得到了满足工程使用的结果,但存在理论上的缺陷,如忽视了流体的三维流动、高速时预报结果失真、计算结果受黏性系数的影响等。三维势流理论可以计入两片体之间的水动力干扰,但仍然无法准确地计入黏性阻尼和稳定鳍的影响。三维计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法理论上可以较好地处理黏性和非线性的问题,适用于 SWATH 的耐波性求解。Qian 等[14]基于 RANS 方程,分析了具有内倾式支柱的 SWATH 在波浪中的运动响应,发现其运动响应呈现出强烈的非线性,运动周期大于波浪遭遇周期。

* **收稿日期**:2016-04-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879090,51509256);水动力重点基金资助项目(9140A1403071251311044)
作者简介:孙小帅(1990—),男,河南洛阳人,博士研究生,E-mail:hglastshadow@163.com;
姚朝帮(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:hgycb2004111@163.com

由此可见,SWATH 耐波性数值计算方法虽然取得了一系列进展,但由于 SWATH 船型的特殊性,要从理论上准确计入黏性和稳定鳍的影响是比较困难的。因此,模型试验仍是进行 SWATH 耐波性研究的重要手段。试验结果既可评估 SWATH 的耐波性能,又可验证数值计算方法。Qian[14]、Lee[15]、Fein[16]、Numata[17]、Hart[18-19]、Pollack[20]等针对 SWATH 的静水阻力、水动力系数、波浪中运动、波浪增阻等开展了试验研究。

SWATH 的推力轴线一般位于下体的中心,距重心高度较远;由于其水线面面积较小,因而船体姿态对外力变化较为敏感。在进行试验时,若拖点垂向高度位于重心,则与其位于推力轴线时相比,相当于增加了一个埋首力矩,改变了船体位于平衡位置时的姿态,造成船体的水动力性能发生改变,进而影响试验测量结果。冯大奎[21]、高峰[22]等的试验研究表明拖点垂向位置对 SWATH 静水阻力的影响不大。史一鸣[23]开展了全约束状态下 SWATH 水动力测量,发现在中低速范围内,不同纵倾角时的阻力大小差别不大。夏向东等[24]研究了拖点纵向位置变化对 SWATH 静水阻力和纵倾角的影响,结果表明模型速度大于 3 m/s时,拖点位置位于艏部会限制模型的纵倾角,增加阻力。上述研究均是关于拖点位置对 SWATH 静水性能的影响,而关于拖点位置对 SWATH 耐波性影响的研究尚不多见。

1 试验模型及测试设备

1.1 试验模型

试验模型为木模,将其命名为 SWATH-M,其主要参数见表 1。图 1 给出了模型水线以下部分的侧视图和横剖图。可以看出,模型的支柱垂直且连续,下体剖面为类似大象腿的形状。

表 1 SWATH-M 主要参数

Tab. 1 General properties of SWATH-M

主要参数	数值
排水量体积 Δ/m^3	0.200
设计水线长 L_{WL}/m	2.867
下体长度 L/m	2.800
支柱水线宽 B_S/m	0.107
片体中心距 Dy/m	0.753
设计吃水 T/m	0.250
重心纵向位置到下体首端距离/m	1.433
重心垂向位置到基线距离/m	0.360
横向惯性半径 K_{xx}/m	0.390
纵向惯性半径 K_{yy}/m	0.830



图 1 模型示意图

Fig. 1 SWATH-M model

模型首尾安装有稳定鳍,表 2 给出了稳定鳍的主要参数,其中纵向位置以船中为参考,+表示为船首方向。

表 2 稳定鳍主要参数

Tab. 2 General properties of stabilizing fins

	前鳍	后鳍
纵向位置/m	+1.233	−1.2
弦长/m	0.093	0.114
展长/m	0.089	0.110
最大厚度/m	0.015	0.018
水平面投影面积/m^2	0.006 7	0.010 0

1.2 拖曳装置

为研究拖点垂向高度对模型耐波性的影响,分别设计加工了新的拖曳装置,可以将拖点的垂向位置分别置于推力轴线高度和重心高度。该装置可释放模型的升沉、纵摇,约束其他运动自由度。图 2 和图 3 分别给出了拖点在推力轴线和拖点在重心时的拖曳装置示意图。

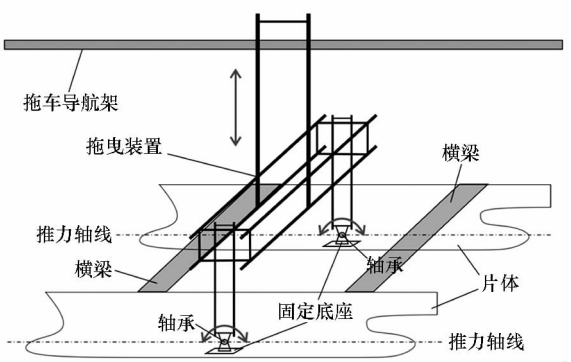


图 2 拖点在推力轴线时的模型

Fig. 2 Experimental setup with the towing point at the axis of thrust

1.3 测试设备

试验在中国特种飞行器研究所高速拖曳水池里完成。试验水池长 510 m,宽 6.5 m,水深 5 m。波浪由 16 片摇板式造波机产生,波高由固定式浪高仪测量,浪高仪固定在造波机前方 60 m 处。运动加速度测量采用 FML-A 加速度传感器,量程为 $\pm 5g$,误差小于 0.5%。纵摇测量采用 TC-11A 型垂直陀螺仪,测量误差小于 0.1°。升沉及垂荡测量采用拉线式位移传感器测量,误差小于 1%。

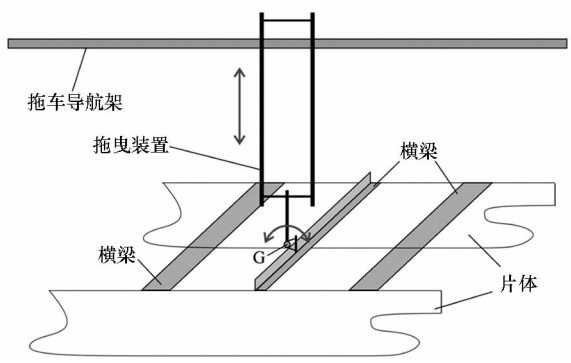


图 3　拖点在重心时的模型

Fig. 3　Experimental setup with the towing point at the point of gravity

2　数据处理

船体在波浪中的运动响应为低频,且具有窄频带的特点。为了过滤测量数据中的杂波、提取出船体响应的频谱信息,采用 FFT-FS 频谱细化技术对试验测得的运动响应时历曲线进行处理。FFT-FS 相比其他频域分析方法,具有运算效率高、分析精度高且受信号本身信噪比影响小等优点[25]。

对于试验测得的 SWATH 在波浪中的运动响应时历信号,所关注的仅为船体遭遇频率附近的频段,其傅里叶级数展开式为:

$$\begin{cases} a(\omega) = \dfrac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)\cos(n\omega/f_s) \\ b(\omega) = \dfrac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)\sin(n\omega/f_s) \end{cases} \quad \omega \in [\omega_1 \quad \omega_2]$$

式中,$x(n)$ 为船体在波浪中的响应时历信号,N 为采样点数,f_s 为采样频率,ω_1 和 ω_2 分别为分析频段的上界和下界,ω 处的幅值为 $a(\omega) + jb(\omega)$,其大小为 $A(\omega) = [a^2(\omega) + b^2(\omega)]^{1/2}$。

为了便于描述和比较试验结果,对试验测量得到的垂荡响应幅值 Z_a 和纵摇响应幅值 θ_a 进行无因次化处理。无因次化公式见表 3。

表 3　运动响应无因次化定义

Tab. 3　Definition of non-dimensional ship responses

	垂荡响应算子 TF_3	纵摇响应算子 TF_5
无因次化公式	Z_a/ζ_a	$\theta_a/(k\zeta_a)$

表中,ζ_a 为入射波波幅,k 为波数。$k = 2\pi/\lambda$,λ 为入射波波长。

3　试验结果及分析

3.1　试验工况

试验工况包括顶浪规则波中不同航速下的耐波性试验,拖点垂向位置分别位于推力轴线和重心。表 4 给出了试验工况。模型航速 V_m 为 0.282 ~ 1.127 m/s,对应的弗劳德数 Fr 为 0.054 ~ 0.215($Fr = V_m/\sqrt{gL}$)。波长 λ 为 3 ~ 23 m,对应的无因次波长(波长与下体长度之比) λ/L 为 1.071 ~ 8.214。

表 4　试验工况

Tab. 4　Experimental cases

航速 V_m/(m/s)	弗劳德数 Fr	波长 λ/m	波高 h_w/mm	拖点垂向位置
0.282 ~ 1.127	0.054 ~ 0.215	3 ~ 23	50	推力轴线
0.563 ~ 1.127	0.108 ~ 0.215	5.5 ~ 19	50	重心

3.2　实测波高

图 4 给出了波长 6 m 时的一段波幅时历曲线,可见实测波浪的波幅较为稳定,表明波浪品质良好。图 5 给出了不同试验工况时的实测波高统计值。

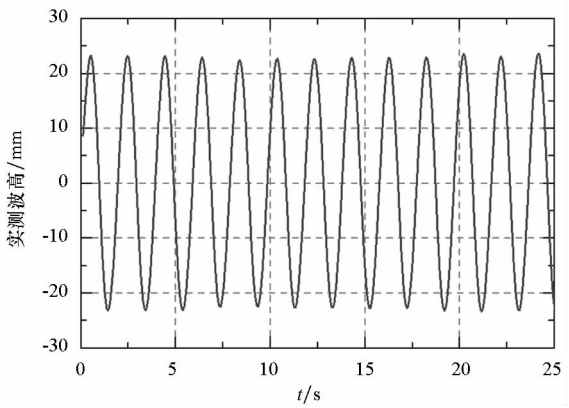


图 4　λ = 6 m 时波幅时历曲线

Fig. 4　Time history of wave amplitude (λ = 6 m)

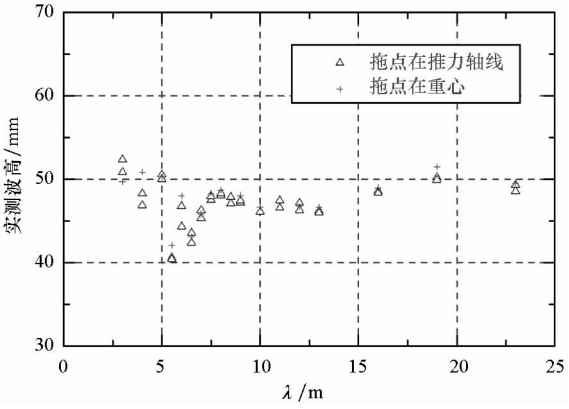


图 5　试验实测波高

Fig. 5　Wave height of measurement

综合图 4 和图 5 可知,受限于造波机性能,虽然不同波长的实测波幅较为稳定,但实测波高与

目标波高存在一定的误差。大部分规则波的波高误差在 5% 以内,个别规则波的波高误差超过 10%。因此,在对试验结果进行分析时,必须以实测波高对测量结果进行无因次化处理。

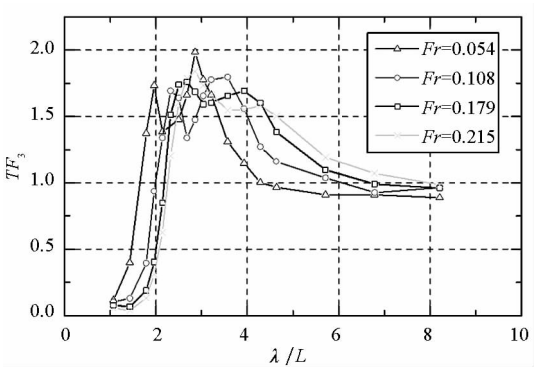
3.3 航速的影响

图 6 和图 7 给出了拖点垂向高度在推力轴线时,不同航速下模型的运动响应算子。为了便于分析,图中的横坐标分别为无因次波长 λ/L 和波浪遭遇频率 ω_e($\omega_e = (2\pi g/\lambda)^{1/2} + 2\pi V_m/\lambda$)。可以看出,不同航速下,船体的垂荡响应算子 TF_3 和纵摇响应算子 TF_5 均随着波长变化呈现出双极值。在长波中,垂荡响应算子趋近于 1,符合船体在长波中"随波逐流"的一般规律。

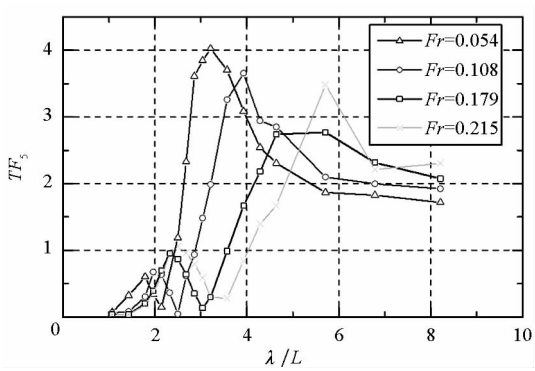
定义短波中的极值为第一个极值(peak Ⅰ),长波中的为第二个极值(peak Ⅱ)。相同航速,垂荡响应算子的两个极值大小较为接近;纵摇响应算子的两个极值大小差别较大,第二个极值明显大于第一个极值,至少为第一个极值的 2.9 倍。

从图 7 可知,当横坐标为波浪遭遇频率时,不同航速的垂荡响应算子的两个极值分别出现在大致相同的两个波浪遭遇频率,分别约为 2.898 和 3.652。纵摇响应算子短波中的极值对应波浪遭遇频率大致相同,约为 3.956;而纵摇响应算子最大值对应的波浪遭遇频率差别明显,受航速的影响较大。

船体的垂荡响应算子和纵摇响应算子随波长增加呈现出双极值应该是由两片体之间的兴波干扰造成的。在后期将通过数值计算方法对不同片体间距的 SWATH 耐波性进行分析,对形成此现象的原因进行更加深入的探讨。



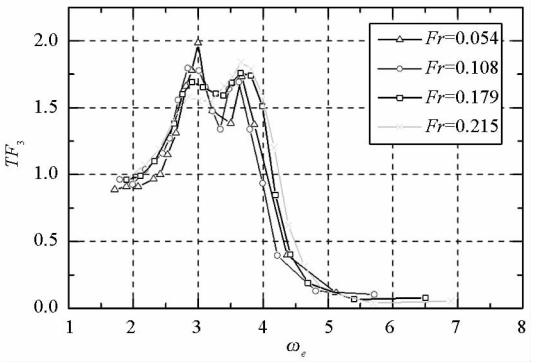
(a) TF_3



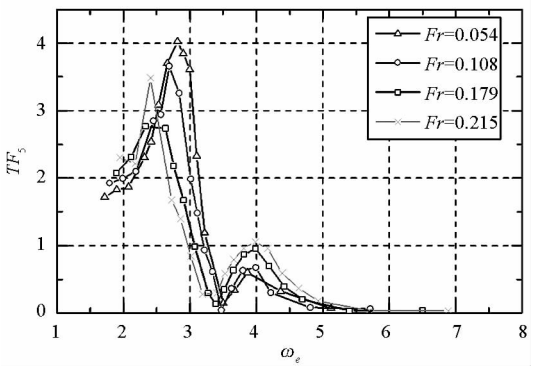
(b) TF_5

图 6 不同航速时运动响应算子随无因次波长的变化

Fig. 6 Transfer functions of motion responses at different speed versus non-dimensional wave length



(a) TF_3



(b) TF_5

图 7 不同航速时运动响应算子随波浪遭遇频率的变化

Fig. 7 Transfer functions of motion responses at different speed versus non-dimensional wave encounter frequency

图 8 ~ 10 给出了不同航速时的运动响应算子极值以及对应的波浪遭遇频率和无因次波长。

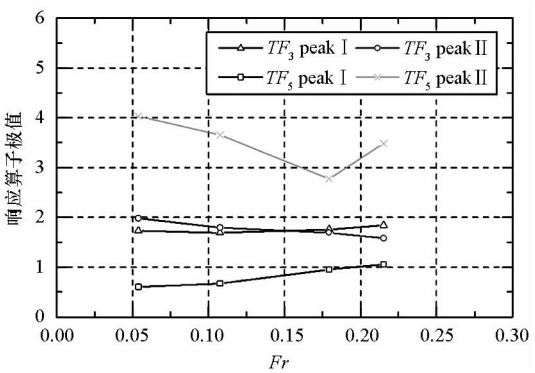


图 8 不同航速时的运动响应算子极值

Fig. 8 Peak values of motion responses at different speed

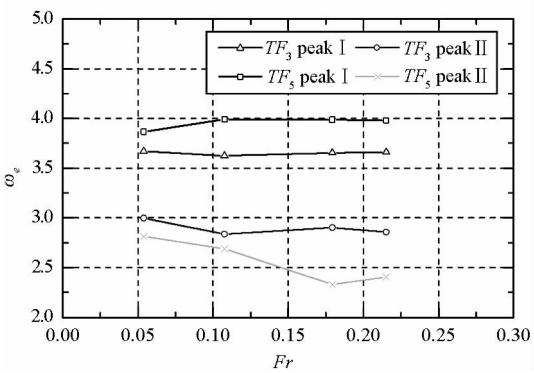


图 9　运动响应算子极值对应的波浪遭遇频率

Fig. 9　Wave encounter frequency of maximum responses

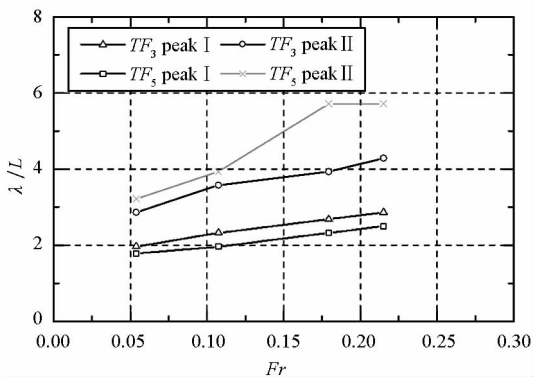


图 10　运动响应算子极值对应的无因次波长

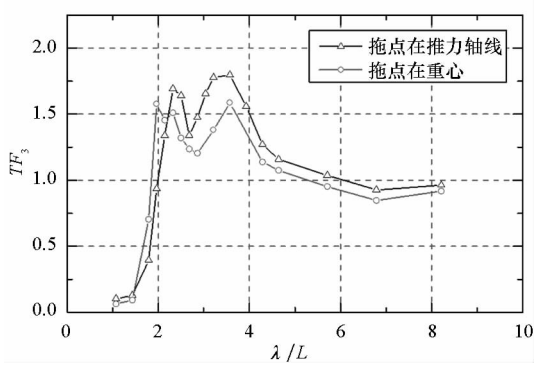
Fig. 10　Non-dimensional wave length of maximum responses

由图 8 可知,垂荡响应算子的两个极值随航速的变化较为平缓,表明航速对垂荡响应算子极值大小的影响较小;纵摇响应算子的第一个极值随着航速增加而增大,第二个极值随着航速增加先减小后增大。通过图 9 可以发现,模型的垂荡响应和纵摇响应并非在同一波浪遭遇频率下达到极值;纵摇响应算子长波中的极值对应的波浪遭遇频率随着航速的增加先降低后又有所上升。由图 10 可以看出,随着速度增加,垂荡响应算子极值和纵摇响应算子极值对应的波长均增大。

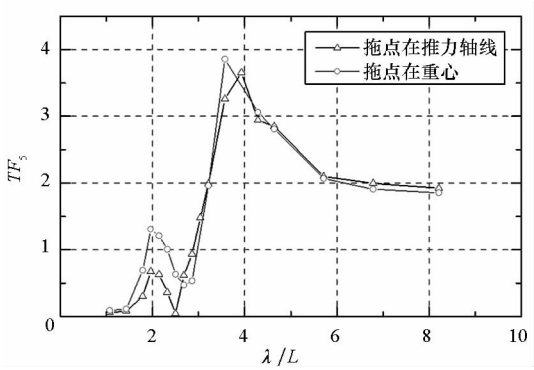
3.4　拖点垂向位置的影响

图 11 和图 12 给出了拖点垂向位置分别在推力轴线和重心时的模型运动响应算子。通过对比可以发现在不同航速下,当波长小于第一个垂荡响应算子极值对应的波长时,拖点在不同位置时的垂荡响应算子差别不大;波长继续增加时,拖点在重心处的垂荡响应算子较小。拖点在不同垂向位置时的纵摇响应算子在第一个共振区附近差别明显,拖点在重心时的数值相对较大;在长波中,拖点在重心位置时的纵向响应算子略有降低。

总体来看,在第一个共振区附近,拖点在不同



(a) TF_3



(b) TF_5

图 11　不同拖点垂向位置时的运动响应算子对比($Fr=0.108$)

Fig. 11　Transfer functions of motion responses at different towing point ($Fr=0.108$)

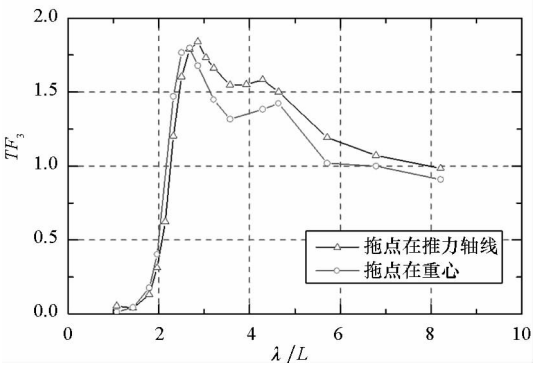
垂向位置时的垂荡响应算子大小变化很小,而拖点在重心时的纵摇响应算子较大;当波长继续增加时,拖点在重心时的垂荡响应算子和纵摇响应算子相对较小一点。

开展船模耐波性试验时,一般要求模型与实船之间满足几何相似和弗劳德数相似,则由船模试验测得的运动响应算子结果可直接用于实船运动预报。针对本文提出的两种拖点垂向位置,由于拖点垂向高度位于推力轴线时模型的受力状态与实船更为接近,因此拖点垂向高度位于推力轴线时的试验结果可直接用于实船运动预报。

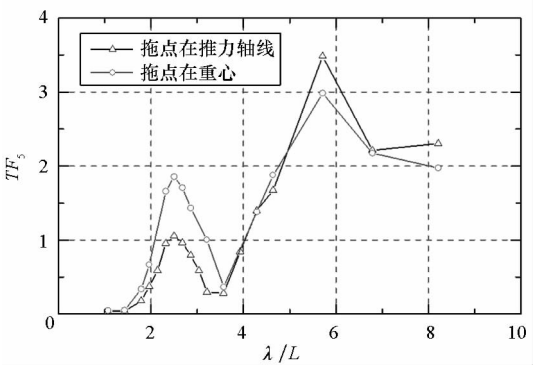
4　结论

本文针对一条安装有稳定鳍的小水线面双体船 SWATH-M,在拖曳水池开展了顶浪规则波中模型试验,研究了航速和拖点垂向位置变化对 SWATH-M 纵向运动性能的影响。主要得到以下结论:

1)不同航速下,船体的垂荡响应算子和纵摇响应算子均随着波长变化呈现出双极值。航速对垂荡响应算子极值的影响较小,而纵摇响应算子



(a) TF_3



(b) TF_5

图 12 不同拖点垂向位置时的运动响应算子对比($Fr=0.215$)

Fig. 12 Transfer functions of motion responses at different towing point ($Fr=0.215$)

短波中的极值随着航速增加而增大,长波中的极值随着航速增加先减小后增大。

2)同一航速,垂荡响应算子的两个极值大小较为接近,而纵摇响应算子在长波中的极值明显大于短波中的极值。

3)在不同航速,垂荡响应算子的两个极值和纵向响应算子在短波中的极值分别对应三个不同的波浪遭遇频率。而纵摇响应算子长波中的极值对应的波浪遭遇频率随着航速的增加先降低后又有所上升。

4)除了短波中的共振区附近,拖点垂向位置在重心时的运动响应算子与拖点在推力轴线时的运动响应算子相比有所减小。

参考文献(References)

[1] Brizzolara S, Vernengo G. Automatic optimization computational method for unconventional SWATH ships resistance[J]. International Journal of Mathe-matical Models and Methods in Applied Sciences, 2011, 5(5): 882 - 889.

[2] Lang T G, Sloggett J E. SWATH developments and performance comparisons with other craft [C]//Proceedings of International Conference on SWATH Ships and Advanced Multi-hulled Vessels, 1985.

[3] Kos S, Brčić D, Frančić V. Comparative analysis of conventional and SWATH passenger catamaran [C]//Proceedings of 12th International Conference on Transport Science (ICTS 2009), 2009.

[4] Beena V I, Subramanian V A. Parametric studies on seaworthiness of SWATH ships [J]. Ocean Engineering, 2003, 30(9): 1077 - 1106.

[5] Lee C M. Theoretical prediction of motion of small waterplane area, twin-hull (SWATH) ships in waves: SPD-76-0046 [R]. DTNSRDC Report, 1976.

[6] Lee C M, Curphey R M. Prediction of motion, stability, and wave load of small waterplane area twin-hull ships [J]. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1977, 85: 94 - 130.

[7] Hong Y S. Improvements in the prediction of heave and pitch motions for SWATH ships: SDR - 0928 - 02 [R]. DTNSRDC Report, 1980.

[8] McCreight K K, Stahl R. Vertical plane motions of SWATH ships in regular waves: SPD - 1076 - 01 [R]. DTNSRDC Report, 1983.

[9] McCreight K K. Predicting the motions of SWATH ships in waves—a validated mathematical model: CRDKNSWC/HD - 1350 - 03 [R]. Naval Surface Warfare Center Carderock Division Hydromechanics Directorate Research and Development Report, 1995.

[10] 李向群. SWATH 船型的耐波性研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 1988(2): 41 - 46.
LI Xiangqun. A study on the seakeeping ability of SWATH [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 1988(2): 41 - 46. (in Chinese)

[11] 董祖舜, 董文才. 小水线面双体船纵向运动稳定性的简化判据及分析 [J]. 中国造船, 1994 (4): 36 - 48.
DONG Zushun, DONG Wencai. A simplified criterion and an analysis of some influence factors on longitudinal motion stability of small waterplane area twin-hull ships [J]. Shipbuilding of China, 1994(4): 36 - 48. (in Chinese)

[12] 刘志华, 董文才, 熊鹰. 小型高速 SWATH 船下体型线研究 [J]. 船舶工程, 2004, 26(6): 4 - 8.
LIU Zhihua, DONG Wencai, XIONG Ying. Study on lines of lower hull of small-sized high-speed SWATH ship [J]. Ship Engineering, 2004, 26(6): 4 - 8. (in Chinese)

[13] 毛筱菲. 小水线面双体船在波浪中的运动响应预报 [J]. 船海工程, 2005(4): 13 - 15.
MAO Xiaofei. Numerical study of the motion response prediction of SWATH ship in waves [J]. Ship & Ocean Engineering, 2005(4): 13 - 15. (in Chinese)

[14] Qian P, Yi H, Li Y H. Numerical and experimental studies on hydrodynamic performance of a small-waterplane-area-twin-hull (SWATH) vehicle with inclined struts [J]. Ocean Engineering, 2015, 96: 181 - 191.

[15] Lee C M, Murray L O. Experimental investigation of hydrodynamic coefficients of a small-waterplane area, twin-hull model: SPD 747 - 01 [R]. DTNSRDC Report, 1977.

[16] Fein J A, Stahl R. Head and following wave exciting force experiments on two SWATH configurations: SPD - 0928 - 0 [R]. DTNSRDC Report, 1980.

[17] Numata E. Experimental study of SWATH model rolling in beam waves: SIT-DL - 81 - 9 - 2200 [R]. NSRDC Report, 1981.

[18] Hart C J, Kiesow R O. Vertical plane oscillation experiments on a series of two-dimensional SWATH demi-hull sections:

DTRC – 87/SHD – 1253 – 01[R]. David Taylor Research Center Ship Hydromechanics Department Research and Development Report, 1988.

[19] Hart C J, Waters R T, Hickok J. Rotating arm experiment for an extended strut SWATH ship as represented by SWATH-6E:SPD – 0698 – 03[R]. DTNSRDC Report, 1983.

[20] Pollack J G. Motion comparison between a 64-foot SWATH and a 65-foot monohull: NBDL – 85R001 [R]. Naval Biodynamics Laboratory Report, 1985.

[21] 冯大奎, 程尔升. SWATH 阻力的数值计算方法及其性能试验[J]. 船海工程, 2004(2): 7 – 9.
FENG Dakui, CHENG Ersheng. Numerical and experimental study on the resistance of SWATH [J]. Ship & Ocean Engineering, 2004(2): 7 – 9. (in Chinese)

[22] 高峰. 基于拖曳和自航模试验的小水线面双体船水动力性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(11): 1154 – 1159.
GAO Feng. Analysis of hydrodynamic performance of a small-waterplane-area-twin-hull ship using towing and self-powered model test [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(11): 1154 – 1159. (in Chinese)

[23] 史一鸣. 小水线面船水动力特性试验研究[J]. 船舶设计通讯, 2005(1): 21 – 26.
SHI Yiming. SWATH hydrodynamic property research by model test [J]. Journal of Ship Design, 2005(1): 21 – 26. (in Chinese)

[24] 夏向东, 谢宜. 高速小水线面双体船减阻试验[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(6): 96 – 100.
XIA Xiangdong, XIE Yi. Experimental investigation on resistance reduction of high-speed SWATH ship [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(6): 96 – 100. (in Chinese)

[25] 许勇, 董文才, 欧勇鹏. 基于 FFT-FS 频谱细化技术的船模耐波性试验测量信号分析方法研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(5): 497 – 503.
XU Yong, DONG Wencai, OU Yongpeng. Study on the analytical method of measured signal based on FFT-FS spectrum subdivision technique of seakeeping test for ship model [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(5): 497 – 503. (in Chinese)