

文章编号:1671-1637(2016)03-0116-09

海上不规则波浪扰动对船舶运动的影响

钱小斌,尹 勇,张秀凤,李 业

(大连海事大学 航海学院,辽宁 大连 116026)

摘 要:针对动力定位船舶高精度六自由度运动数学模型的需求,研究了不规则海浪扰动的建模方法及其对船舶运动的影响,对比了长峰波与短峰波的波面形状及其产生的波浪力和力矩;基于傅汝德-克雷诺夫假设,将船舶近似为箱型船,建立了长峰和短峰不规则波对动力定位船舶产生的扰动时域模型;基于微幅波假设和线性叠加原理,采用中国沿海的频率谱和国际拖曳水池会议推荐的扩散函数,建立了长峰和短峰不规则波的三维波面模型,并对一艘动力定位船舶进行了主浪向角为 90° 、 135° 和 180° 的仿真验证。仿真结果表明:长峰波和短峰波所产生的一阶波浪力均呈高频振动变化;当主浪向角为 90° 时,长峰波产生的一阶波浪纵向力、纵摇力矩、横摇力矩接近于0;当主浪向角为 180° 时,长峰波产生的一阶波浪横向力、艏摇力矩、横摇力矩接近于0;长峰波产生的二阶波浪力和力矩比短峰波大19.2%;短峰波较长峰波在形状上更具有不规则性和不对称性,短峰不规则波可对船舶在波浪中的运动产生较大影响。

关键词:船舶工程;动力定位模拟器;线性叠加;短峰波;长峰波;扰动

中图分类号:U666.158

文献标志码:A

Influence of irregular disturbance of sea wave on ship motion

QIAN Xiao-bin, YIN Yong, ZHANG Xiu-feng, LI Ye

(School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the demand of high-precision motion mathematical model with six degrees of freedom for dynamic positioning ship, the modeling method of irregular wave disturbance and its influence on ship motion were studied, and the shape, forces and moments of short-crested waves and long-crested waves were compared. Based on Froude-Krylov hypothesis, the ship was regarded as a box type ship, and the time-domain models of long-crested and short-crested irregular wave disturbance were built. Base on slight wave hypothesis and linear superposition principle, the three-dimensional models of long-crested and short-crested irregular waves were built by using Chinese coastal frequency spectra and the spreading function recommended by International Towing Tank Conference (ITTC). The simulation for a dynamic positioning ship was carried out with main wave direction angles of 90° , 135° and 180° respectively. Simulation result shows that the first-order wave forces generated by long-crested and short-crested waves show high frequency vibration changes. When main wave direction angle is 90° , the first-order wave surge force, roll moment and pitch moment of long-crested wave are close to zero. When main wave direction angle is 180° , the first-order wave sway force, yaw moment and pitch moment of long-crested wave are close to zero. The second-order forces and moments of long-

收稿日期:2015-12-21

基金项目:863 计划项目(2015AA016404);中央高校基本科研业务费专项资金项目(313204330);国家海洋公益性行业科研项目(201505017-4)

作者简介:钱小斌(1989-),男,浙江绍兴人,大连海事大学工学博士研究生,从事航海仿真与虚拟现实技术研究。

导师简介:尹 勇(1969-),男,湖北郧县人,大连海事大学教授,工学博士。

crested wave are larger 19.2% than those of short-crested waves. The short-crested waves are more irregular and asymmetry than long-crested waves in shape, and the short-crested irregular waves can have greater impact on ship motion in wave. 1 tab, 10 figs, 26 refs.

Key words: ship engineering; dynamic positioning simulator; linear superposition; short-crested wave; long-crested wave; disturbance

Author resumes: QIAN Xiao-bin(1989-), male, doctoral student, +86-411-84723925, qianxiaobin0617@126.com; YIN Yong(1969-), male, professor, PhD, +86-411-84723925, bushyin@163.com.

0 引言

动力定位船舶为通过推进器推力能够自动地保持位置或预设轨迹的船舶^[1],而动力定位模拟器主要用于动力定位操作员的培训,其通过虚拟现实技术逼真地模拟动力定位操作员的工作环境。虚拟的动力定位船舶受到风浪流等海洋环境的扰动而改变自身的运动姿态,而动力定位系统通过先进的控制算法克服外界扰动以达到预期的位置和航向,同时视景能够实时显示虚拟的船舶和逼真的海洋环境。目前,中国动力定位模拟器主要依赖于进口,国内尚未有具有自主知识产权的、功能完善且满足挪威船级社要求的船舶动力定位模拟器。

海浪是海洋环境中最为复杂的自然现象,可分为长峰波和短峰波,长峰波通常沿着一个固定方向传播,涌浪是长峰波的一种,而短峰波会向多个方向传播,风生浪通常为短峰波^[2]。海浪对动力定位船舶的干扰力和力矩往往是不可测的,且有较强的随机性,通常采用近似的方法模拟海浪对船舶的干扰。波浪对船舶的扰动可分为一阶波浪力和二阶波浪力^[3],一阶波浪力是零均值振荡运动的高频力,船舶的响应主要表现为六自由度的高频振荡;而二阶波浪力是变化缓慢的低频力,主要对船舶的水平位置和航向产生影响^[4]。

动力定位模拟器是航海模拟器的一种,目前航海模拟器中海洋场景的绘制采用了短峰波理论^[5-10],但船舶运动数学模型中仍主要考虑规则波或长峰不规则波对船舶的影响^[11-16]。张秀凤等建立了船舶在规则波和长峰不规则波中六自由度的运动数学模型^[14-15],而实际的海面由于风的随机性和风向的多变性,多呈现为短峰不规则波或三维方向波,波浪的传播是多方向的;李海波等采用短峰波理论和谱分析法对转塔式单点系泊的浮式生产储油装置的耐波性进行了理论研究和计算^[17];郑文涛等通过船模试验和数值模拟研究表明船舶在长峰与短峰不

规则波中运动响应是有差别的^[18];陈京普等建立了船舶在长峰、短峰不规则波中运动的三维时域数值模拟方法,结果表明短峰不规则波可对运动产生较大影响^[19];王艳霞等研究了长峰与短峰不规则波对船舶失速的影响,表明长峰与短峰不规则波对船舶增阻是有差别的^[20]。

本文以动力定位船舶为研究对象,采用中国沿海的波浪频率谱和国际拖曳水池会议(International Towing Tank Conference, ITTC)推荐的扩散谱函数,建立了长峰和短峰不规则波的三维波面模型,基于傅汝德-克雷诺夫假设,将船舶近似为箱型船,建立了长峰和短峰不规则波对动力定位船舶的干扰力和力矩的时域模型,并进行了仿真验证,比较了长峰和短峰不规则波对动力定位船舶运动的影响。

1 坐标系的建立

为描述动力定位船舶在波浪中的运动情况,采用2种常用的坐标系,即固定于地球表面的空间固定坐标系和以船舶重心为原点的随船运动坐标系。船舶状态见图1, O 为随船运动坐标系的原点;向量 $\eta = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^T$ 表示船舶在空间固定坐标系下的移动位置和旋转角度,即纵向位置 x 、横向位置 y 、垂向位置 z 、横摇角度 φ 、纵摇角度 θ 、艏摇角度 ψ ;向量 $\sigma = (u, v, w, p, q, r)^T$ 表示船舶在随船运动坐标系下的平移速度和旋转角速度,即纵荡速度 u 、横

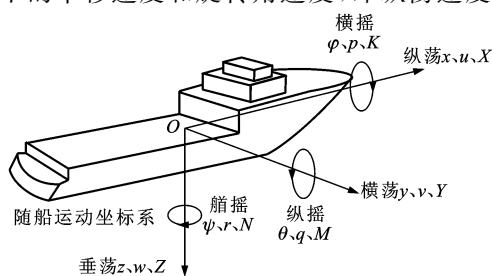


图1 船舶状态
Fig. 1 Ship state

荡速度 v 、垂荡速度 w 、横摇角速度 p 、纵摇角速度 q 、艏摇角速度 r ；向量 $\tau = (X, Y, Z, K, M, N)^T$ 表示船舶在随船运动坐标系下船舶所受到的力和力矩，即纵向力 X 、横向力 Y 、垂向力 Z 、横摇力矩 K 、纵摇力矩 M 、艏摇力矩 N 。动力定位船舶在波浪中运动的非线性六自由度的数学模型^[21]为

$$\dot{\eta} = J(\eta)\sigma \quad (1)$$

$$M\dot{\sigma} + G(\sigma)\sigma + I(\sigma)\sigma + g(\eta) = \alpha + \beta \quad (2)$$

式中： $J(\eta)$ 为旋转矩阵； M 为含附加质量的惯性矩阵； $G(\sigma)$ 为科氏向心力矩阵； $I(\sigma)$ 为阻尼矩阵； $g(\eta)$ 为重力/浮力的回复力和力矩向量； α 为船舶自身（推进器、舵等）产生的力和力矩向量； β 为波浪对动力定位船舶的扰动力和力矩向量。

2 波浪扰动数学模型

2.1 随机海浪模型

波浪可分为规则波和不规则波，规则波可视为由单一频率波组成的简谐曲线，即可用正弦或余弦形式表达，而不规则波往往具有较强的随机性，其波面形状较为复杂。海浪由于风的影响呈现不规则形状，属于不规则波。同时由于风速和风向的变化，造成海浪的波面形状极其复杂，因而直接描述不规则波非常困难。为描述海面波浪的形状，将波浪高度的分布视为一个平稳和历经各态的多变量随机过程，通常由一个波谱函数 $R(\omega, \chi)$ 来描述，其由频率谱函数 $S(\omega)$ 和扩散函数 D 组成^[22]，即

$$R(\omega, \chi) = S(\omega)D \quad (3)$$

式中： ω 为波浪的角频率； χ 为波浪的扩散方向。

对所有角频率 ω 和扩散方向 χ 进行积分得到该海况下的总能量 Q 为

$$Q = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} R(\omega, \chi) d\chi d\omega = \int_0^\infty S(\omega) d\omega \quad (4)$$

频率谱函数 $S(\omega)$ 描述当前海况下不同频率的能量分布，其通过大量的观测数据，对海浪的各种统计值和谱密度进行分析。频率谱密度函数公式是在一定海域观察、记录、分析和在某些假设条件下推导出来的，是半经验半理论的结果。为此，许多学者提出了不同的海浪频率谱函数，主要有纽曼波能谱、P-M 波能谱、ITTC 单/双参数波能谱、JONSWAP 波能谱，而在计算机图形学中，绘制海浪选择的是 Phillips 谱^[23]。国家海洋局根据中国沿海的统计分析提出了海浪的频率谱函数^[24]为

$$S(\omega) = 0.74\omega^{-5} \exp\left(-\frac{g^2}{U^2\omega^2}\right) \quad (5)$$

式中： g 为重力加速度， $g=9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ； U 为风速，若有义波高为 H ，可通过 $U=6.28\sqrt{H}$ 近似换算。

有义波高为 3 m 时，不同波能谱能量分布的比较见图 2。可以看出，角频率 ω 小于 0.3 或大于 3 时，能量接近于 0。因此，实际计算的角频率范围应该为 0.3~3。

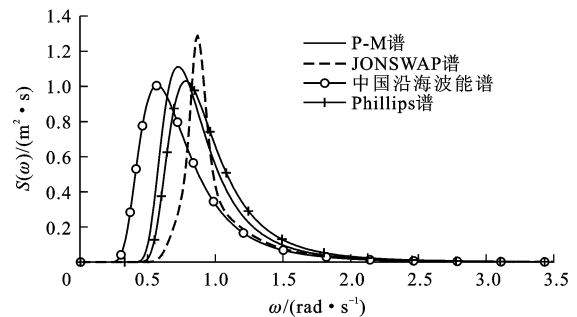


图2 不同波能谱的比较

Fig. 2 Comparison of different wave energy spectra

扩散函数表示波能在不同方向上的分布，通常表示为^[22]

$$D = \begin{cases} \frac{2^{2s-1}s!(s-1)!}{\pi(2s-1)!} \cos^{2s}(\Delta\gamma) & |\Delta\gamma| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta\gamma = \chi - \chi_0 \quad (7)$$

式中： χ_0 为平均波浪方向，即主浪向角； $\Delta\gamma$ 为各个波浪传播方向角与主浪向角的差值； s 为波浪的扩散因子，是一个整数，ITTC 推荐 $s=1$ ，国际船舶与海洋结构大会（International Ship and Offshore Structures Congress, ISSC）推荐 $s=2$ 。

扩散函数示例见图 3，可知 s 值越大，能量在平均波浪方向越集中，因此，在实际应用中，为减少计算量，扩散方向 χ 的计算区间为 $(\chi_0 - 65^\circ, \chi_0 + 65^\circ)$ 。

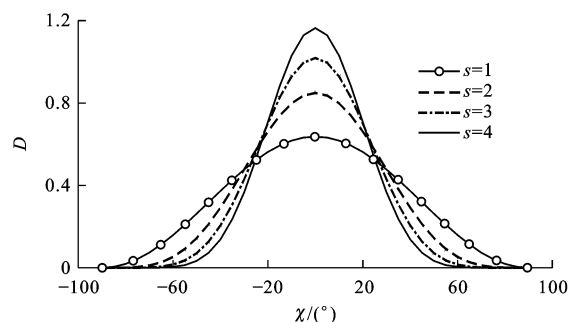


图3 扩散函数

Fig. 3 Spreading function

根据微幅波假设，规则波的波形可近似为简谐曲线，其波面高度 ζ 与时间 t 的关系为^[25]

$$\zeta = \zeta_1 \cos(\omega t + \epsilon) \quad (8)$$

式中： ζ_1 为波幅； ϵ 为波在 $[0, 2\pi]$ 之间的初始相位。

式(8)表示波浪的能量向同一个方向传播,为求得在海面上不同位置的波面高度,需对所有波浪频率和扩散方向进行积分。由于直接进行积分较为困难,在实际应用中,通过多个规则波进行叠加得到,因此,在惯性坐标系下,长峰波的波面高度 ζ_2 与短峰波的波面高度 ζ_3 可分别表示为^[26]

$$\zeta_2 = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \cos\left\{\omega_i t + \epsilon_i - k_i[x\cos(\chi_0) + y\sin(\chi_0)]\right\} \quad (9)$$

$$\zeta_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{2R(\omega_i, \chi_i)\Delta\omega\Delta\chi} \cos\left\{\omega_i t + \epsilon_{i,j} - k_i[x\cos(\chi_j) + y\sin(\chi_j)]\right\} \quad (10)$$

式中: χ_j 为第 j 个扩散浪向角; $\Delta\omega$ 、 $\Delta\chi$ 分别为采样的波浪角频率和扩散方向的间隔; n 、 m 分别为采样频率和扩散方向的数量; ω_i 为采样的第 i 个角频率; ϵ_i 为第 i 个角频率相应的相位; $\epsilon_{i,j}$ 为第 i 个角频率第 j 个扩散浪向角相应的相位; k_i 为第 i 个角频率对应的波数,在深海中 $k_i = \sqrt{\omega_i^2/g}$ 。

由于式(9)、(10)在时间 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 之后重复,因而需要大量的单元波,通常做法是在 $(\omega_i - \Delta\omega/2, \omega_i + \Delta\omega/2)$ 角频率段内随机选择单元波的角频率,而式(10)中的扩散方向在 $(\chi_i - \Delta\chi/2, \chi_i + \Delta\chi/2)$ 方向角段内随机选择^[25]。

2.2 波浪遭遇角与遭遇角频率

波浪传播的方向和角频率是在固定坐标系下定义的,而船舶运动速度和航向是变化的,因而需要对波浪在随船运动坐标系下的传播方向和角频率进行转换。在随船运动坐标系中遭遇角 a 的定义见图4,波浪向船首方向为 0° ,即顺浪,按顺时针旋转,向船右舷方向传播为 90° ,即右横浪,因此,在随船运动坐标系中,遭遇角 a 为

$$a = \chi - \psi \quad (11)$$

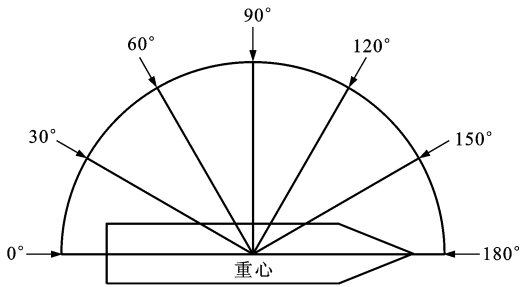


图4 遭遇角的定义

Fig. 4 Definition of encountered angle

船舶与波浪的相对运动导致船舶遭遇的波浪角

频率发生变化,遭遇角频率 b 表示为

$$b = \left| \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} A \cos(a) \right| = \left| \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} [u \cos(a) + v \sin(a)] \right| \quad (12)$$

式中: ω_0 为初始波浪角频率; A 为船舶运动合速度。

对于动力定位船舶,其运动速度较低,可忽略船舶自身的运动速度对波浪遭遇角频率的影响,即 $b \approx \omega_0$ 。

2.3 波浪干扰力和力矩计算

波浪对动力定位船舶的力和力矩 β 可分为一阶波浪力/力矩 β_1 和二阶波浪力/力矩 β_2 ,在仿真计算的过程中通过将两者进行线性叠加得到。

为计算船舶在规则波中运动时受到的一阶波浪力和力矩,本文将规则波近似为微幅谐振波,在随船运动坐标系下,在船体上坐标为 (e, f, h) 某一点的动压力 P 为^[14]

$$P = -\rho g \zeta_1 e^{-kh} \cos[kc \cos(a) - kf \sin(a) - bt + \epsilon] \quad (13)$$

式中: ρ 为海水密度; k 为波数。

应用傅汝德-克雷诺夫假设,将船体简化为箱体船,可得到规则波中六自由度波浪力和力矩为^[14]

$$\beta_1 = \rho g \zeta_1 e^{-kd} \sin(EB) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2d}{E} \sin(FL) \sin(bt + \epsilon) \\ -\frac{2dl}{FB} \sin(FL) \sin(bt + \epsilon) \\ \frac{kd}{Eq} \sin(FL) \cos(bt + \epsilon) \\ \frac{d^2}{FB} \sin(FL) \sin(bt + \epsilon) \\ \frac{d}{2EF^2} [\sin(FL) - Fl \cos(FL)] \sin(bt + \epsilon) \\ \frac{d}{kF^2} [\sin(FL) - FL \cos(FL)] \cos(bt + \epsilon) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$E = k \sin(a)/2$$

$$F = k \cos(a)/2$$

$$l = \sqrt{CL}$$

式中: L 为船长; l 为等效船长; C 为方型系数; B 为船宽; d 为吃水。

一阶波浪力引起船舶的高频运动,但对船舶的横向和纵向位置以及艏摇角的影响较小,而二阶波浪力是一种慢变的波浪力,又称为波浪漂移力,影响动力定位船舶的位置和航向。动力定位系统对船舶的控制主要克服的是二阶波浪力对船舶的影响,不考虑一阶波浪力。二阶波浪力和力矩的理论计算十分复杂,且由于其计算效率问题而难以应用于动力

定位模拟器中。本文将二阶波浪力视为一个恒定的值,可得

$$\beta_2 = \frac{\rho g \zeta^2}{2} \begin{bmatrix} Lc_1 \cos(a) \\ Lc_2 \sin(a) \\ L^2 c_3 \sin(a) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$c_1 = 0.05 - 0.20 \frac{\lambda}{L} + 0.75 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 - 0.51 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^3 \quad (16)$$

$$c_2 = 0.46 + 6.83 \frac{\lambda}{L} - 15.65 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 + 8.44 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^3 \quad (17)$$

$$c_3 = -0.11 + 0.68 \frac{\lambda}{L} - 0.79 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 + 0.21 \left(\frac{\lambda}{L} \right)^3 \quad (18)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 分别为波浪的纵向、横向、垂向漂移力系数; λ 为波长。

基于微幅波的假设,长峰和短峰不规则波可看作多个规则波的线性叠加,动力定位船舶在不规则波作用下受到的力和力矩可认为是船舶在不同频率和幅值的规则波中受到的波浪力和力矩的线性叠加,其表达式分别为

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^n (\tau_{1,i} + \tau_{2,i}) \quad (19)$$

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\tau_{1,i,j} + \tau_{2,i,j}) \quad (20)$$

式中: τ_1 、 τ_2 分别为船舶受到的长峰、短峰不规则波的力和力矩; $\tau_{1,i}$ 、 $\tau_{2,i}$ 分别为第 i 个角频率相应的一、二阶波浪力和力矩; $\tau_{1,i,j}$ 、 $\tau_{2,i,j}$ 分别为第 i 个角频率第 j 个扩散浪向角相应的一、二阶波浪力和力矩。

3 仿真结果

3.1 海面三维仿真

为比较式(9)、(10)所模拟的长峰不规则波和短峰不规则波在形状上的区别,设置有义波高为 2.5 m,相当于 5 级海况,采用中国沿海的波浪频率谱和 ITTC 推荐的扩散函数,设置海面面积为 100 m×100 m,分别对主浪向角为 90°、135°和 180°三种情况进行了三维海面仿真,仿真结果见图 5~7。可以看出:在相同主浪向角条件下,长峰不规则波和短峰不规则波的三维海面在形状上有明显的差别,短峰波波面形状的随机性更强,而长峰波的形状在传播方向上左右对称;在不同主浪向角条件下,长峰波的传播方向较短峰波更为明显,这是短峰波能量的扩散造成的。由此可见,长峰不规则波和短峰不规则波在波面形状上有着明显的区别。

3.2 波浪干扰力和力矩仿真

为验证所建立的动力定位模拟器中不规则波扰

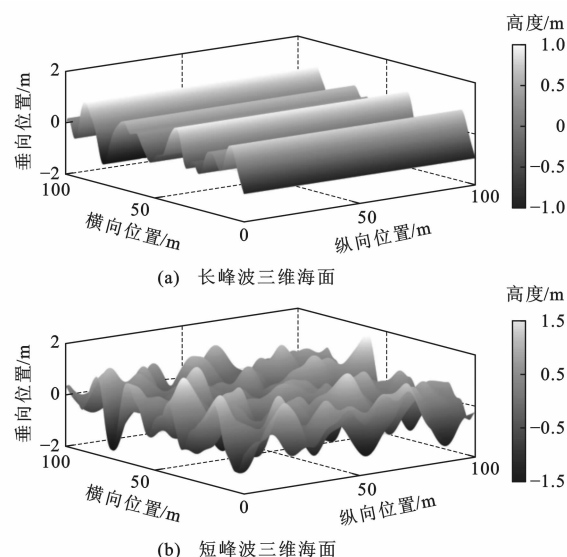


图 5 浪向角为 90°时的三维海面

Fig. 5 Three-dimensional sea surfaces when wave direction angle is 90°

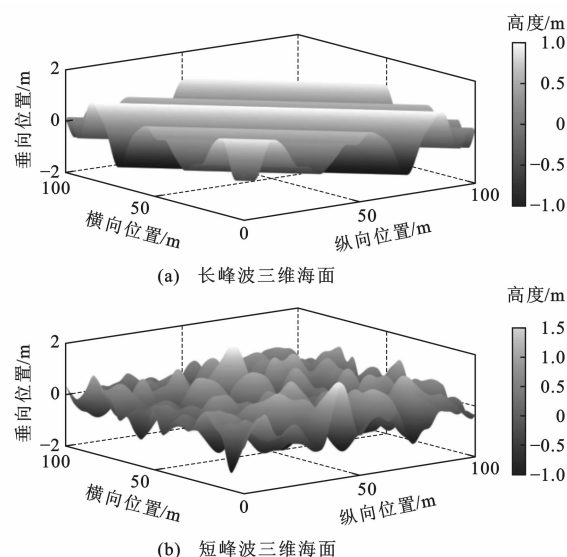


图 6 浪向角为 135°时的三维海面

Fig. 6 Three-dimensional sea surfaces when wave direction angle is 135°

动的有效性,选择一艘动力定位船舶进行仿真研究。船舶总长为 90.0 m,型宽为 20.0 m,设计吃水为 5.6 m,型深为 8.8 m,排水量为 6 675 t,方形系数为 0.662 2。假设船舶位置和航向保持不变,其中航向为 0°。设置有义波高为 2.5 m,相当于 5 级海况,分别对主浪向角为 90°、135°和 180°三种情况进行仿真,仿真时间为 100 s,仿真结果分别见图 8~10 和表 1。仿真结果表明:长峰波与短峰波对动力定位船舶所产生的一阶波浪力和力矩均随时间不规则变化,但变化幅度有较大的差别;二阶波浪力和力矩不随时间变化,长峰波产生的二阶波浪力和力矩在各

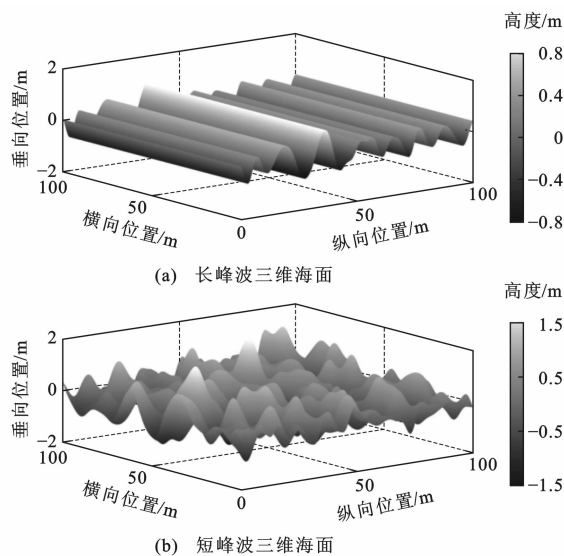


图 7 浪向角为 180°时的三维海面
Fig. 7 Three-dimensional sea surfaces when wave direction angle is 180°

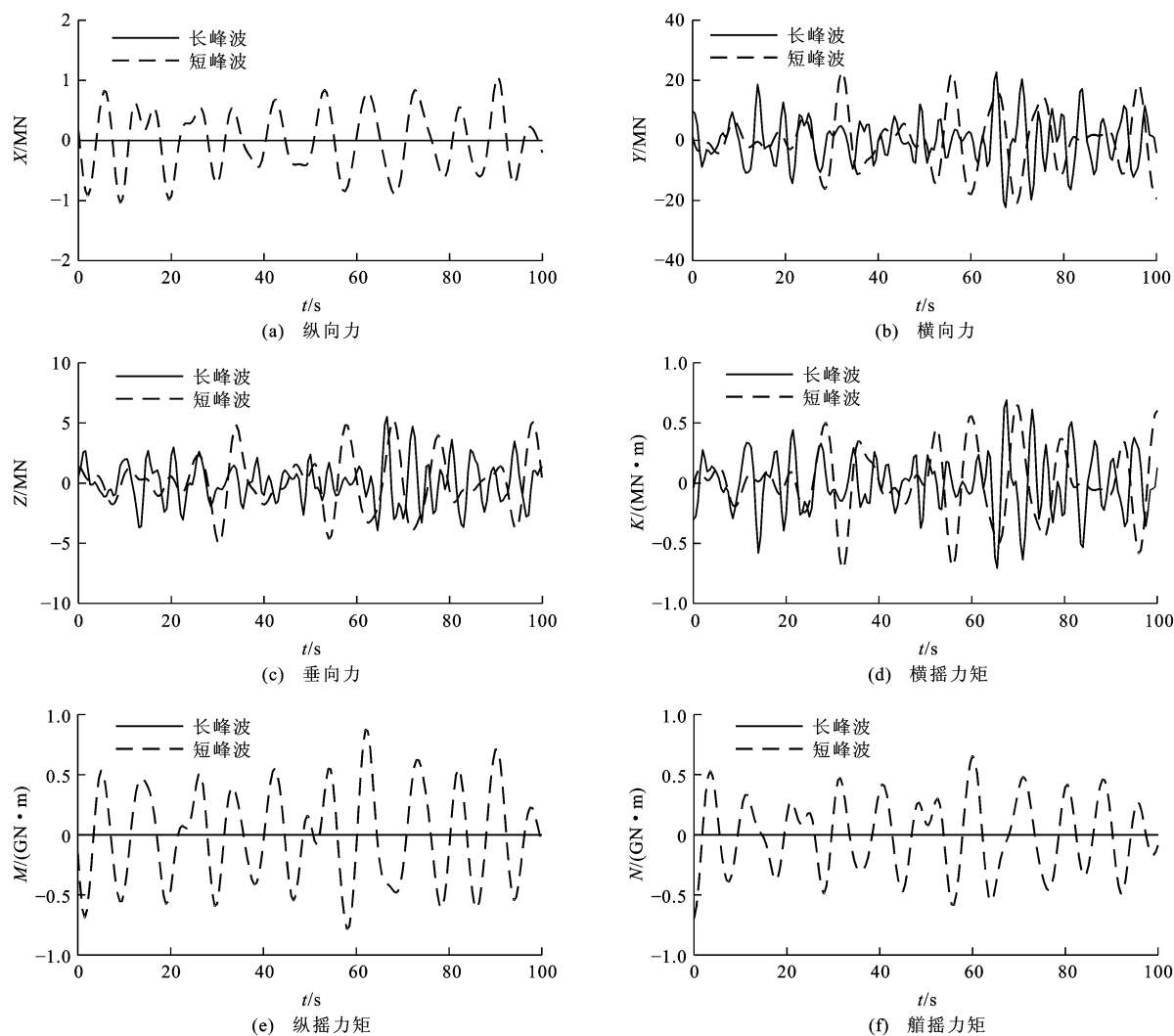


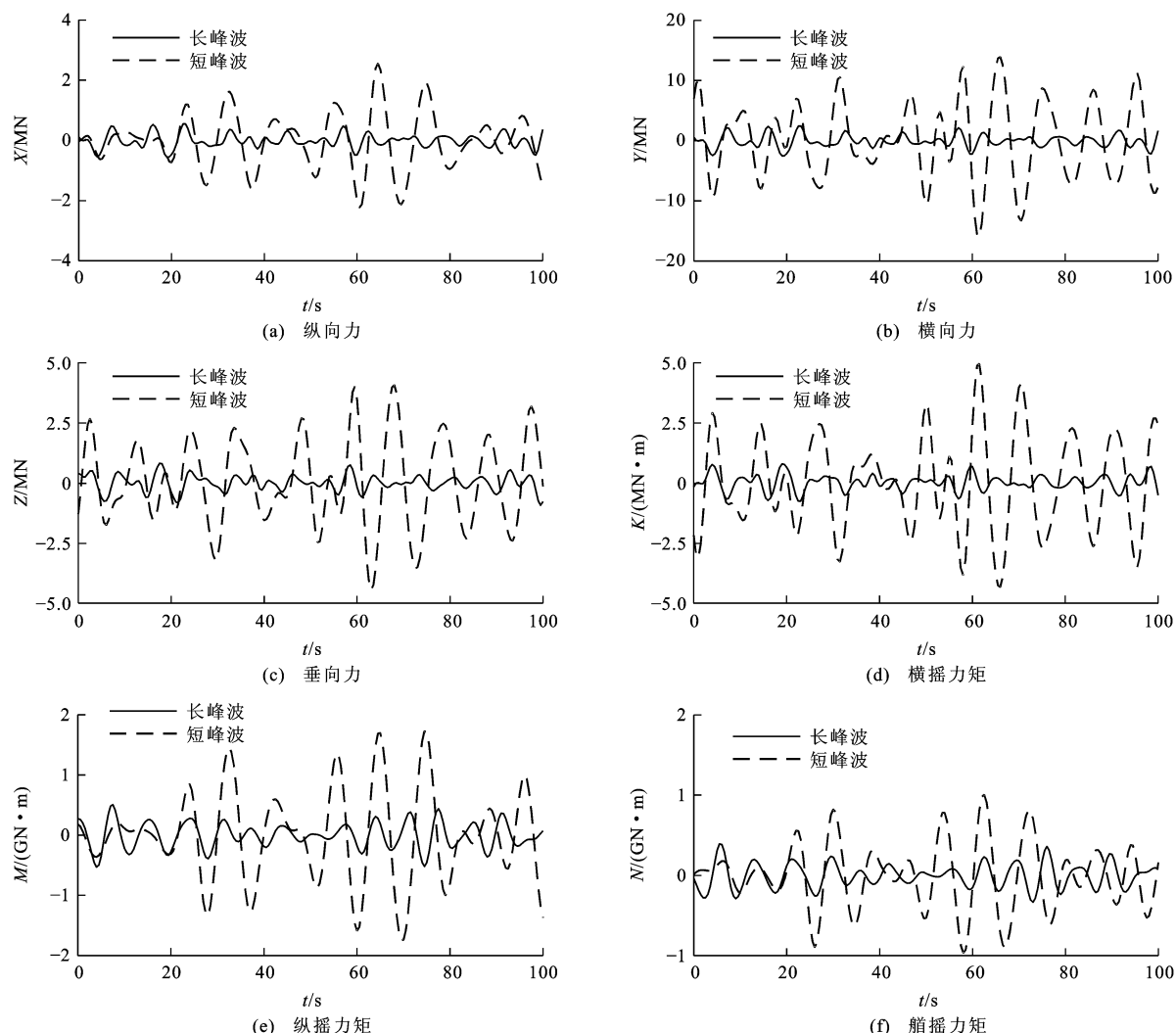
图 8 浪向角为 90°时的一阶波浪力和力矩
Fig. 8 First-order wave forces and moments when wave direction angle is 90°

个方向上均比短峰波大 19.2%。一阶波浪力和力矩各个分量的变化规律如下。

表 1 二阶波浪力和力矩的比较

| Tab. 1 Comparison of second-order wave forces and moments | | | | |
|---|------|-------|---------|----------|
| 浪向角 | 波浪类型 | X/kN | Y/kN | N/(kN·m) |
| 90° | 长峰波 | 0.0 | 5 852.9 | 16 054.0 |
| | 短峰波 | 0.0 | 4 911.0 | 13 471.0 |
| 135° | 长峰波 | 605.2 | 4 138.6 | 11 352.0 |
| | 短峰波 | 507.8 | 3 472.6 | 9 525.3 |
| 180° | 长峰波 | 855.9 | 0.0 | 0.0 |
| | 短峰波 | 718.1 | 0.0 | 0.0 |

(1)纵向力:主浪向角为 90°时,短峰波纵向力的幅值大于长峰波,长峰波纵向力的幅值接近于 0;主浪向角为 135°时,短峰波纵向力的平均幅值大于长峰波;主浪向角为 180°时,短峰波纵向力的幅值大于长峰波。

图9 浪向角为 135° 时的一阶波浪力和力矩Fig. 9 First-order wave forces and moments when wave direction angle is 135°

(2)横向力:主浪向角为 90° 时,短峰波横向力的平均幅值小于长峰波;主浪向角为 135° 时,短峰波横向力的平均幅值大于长峰波;主浪向角为 180° 时,短峰波横向力的幅值大于长峰波,长峰波横向力的幅值接近于0。

(3)垂向力:主浪向角为 90° 时,短峰波垂向力的平均幅值小于长峰波;主浪向角为 135° 和 180° 时,短峰波垂向力的平均幅值大于长峰波。

(4)横摇力矩:主浪向角为 90° 时,短峰波横摇力矩的平均幅值小于长峰波;主浪向角为 135° 时,短峰波横摇力矩的平均幅值大于长峰波;主浪向角为 180° 时,短峰波横摇力矩的平均幅值大于长峰波,长峰波横摇力矩的平均幅值接近于0。

(5)纵摇力矩:主浪向角为 90° 时,短峰波纵摇力矩的平均幅值大于长峰波,长峰波纵摇力矩的平均幅值接近于0;主浪向角为 135° 和 180° 时,短峰波

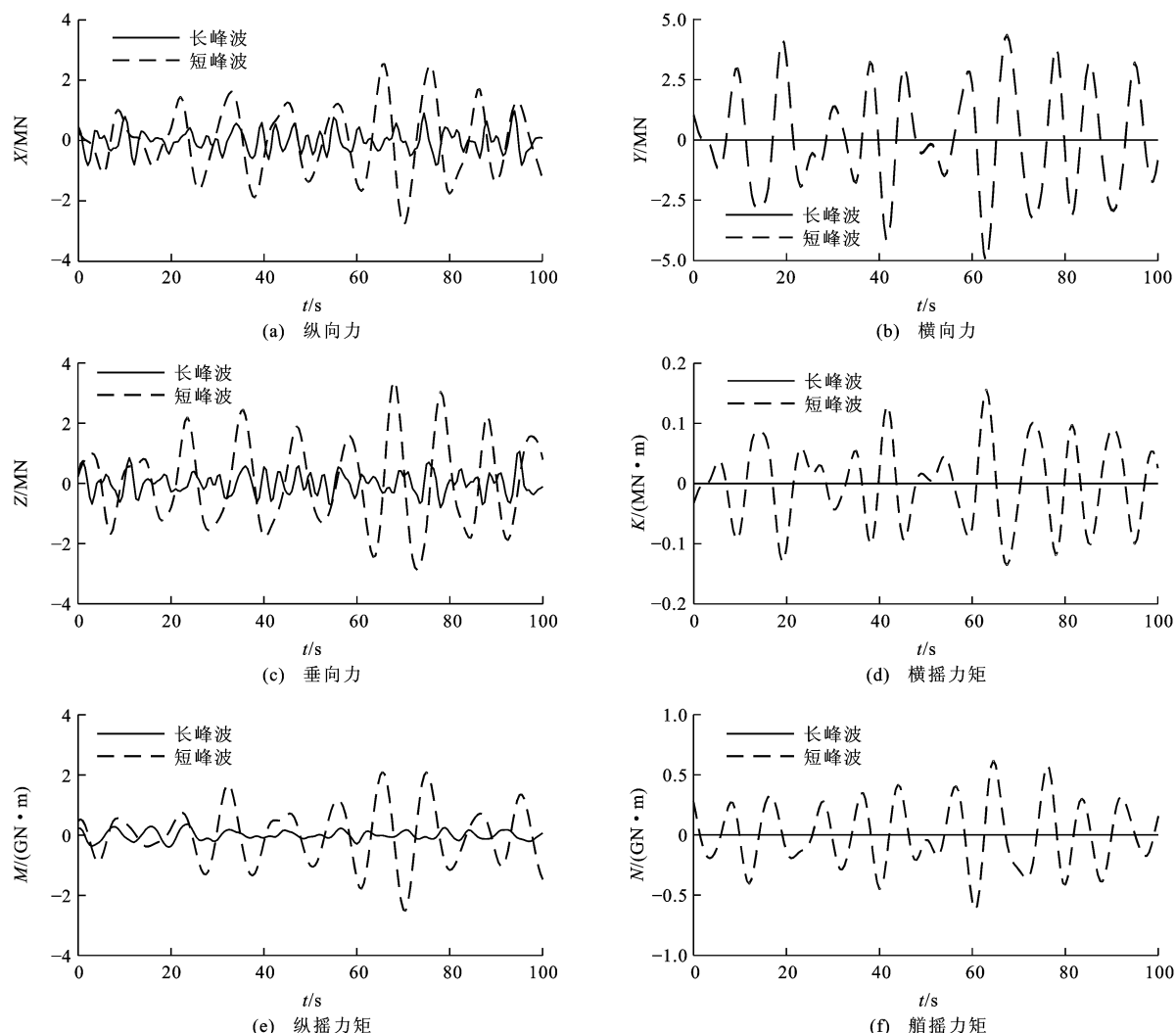
纵摇力矩的平均幅值与长峰波差别不大。

(6)艏摇力矩:主浪向角为 90° 和 180° 时,短峰波艏摇力矩的平均幅值大于长峰波,长峰波艏摇力矩的平均幅值接近于0;主浪向角为 135° 时,短峰波艏摇力矩的平均幅值大于长峰波。

由此可见,由于短峰波能量的扩散导致其波面形状较长峰波更具有不规则性,从而对动力定位船舶的运动有较大影响。

4 结 语

针对在动力定位模拟器中高精度六自由度船舶运动数学模型的需求,研究了不规则海浪扰动的建模方法及对动力定位船舶运动的影响,建立了长峰和短峰不规则波的三维模型并比较了两者形状的不同点。通过将规则波浪力和力矩的线性叠加,建立了不规则波对动力定位船舶的力和力矩的时域模

图10 浪向角为 180° 时的一阶波浪力和力矩Fig. 10 First-order wave forces and moments when wave direction angle is 180°

型,并对一艘动力定位船舶进行了仿真研究。仿真结果表明由于短峰波的扩散性,其产生的波浪力与长峰波有较大的差别,尤其在横浪、顺浪或顶浪时,长峰波产生的一阶波浪力和力矩部分分量接近于0,而短峰波仍对船舶的运动有较大影响。将短峰不规则波应用于动力定位模拟器可打破长久以来在模拟器中虚拟船舶在横浪、顺浪或顶浪时受到的部分一阶波浪力或力矩接近于0的情况,提高了模拟器的行为真实感。本文所得结果也可用于验证动力定位控制算法的可靠性和鲁棒性。

参考文献:

References:

- [1] SØRENSEN J. A survey of dynamic positioning control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2011, 35(1): 123-136.
- [2] MYRHAUG D, HOLMEDAL L E. Bottom friction and erosion beneath long-crested and short-crested nonlinear random waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17/18): 2015-2022.
- [3] SHI Xiao-cheng, SUN Xing-yan, FU Ming-yu, et al. An unscented Kalman filter based wave filtering algorithm for dynamic ship positioning[C]// IEEE. Proceedings of the 5th International Conference on Automation and Logistics. New York: IEEE, 2011: 399-404.
- [4] FOSSEN T I, TRISTAN P. Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs: estimating the effects of waves, wind, and current[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(6): 32-46.
- [5] 陈丽宁,金一丞,任鸿翔,等.使用波数谱绘制海浪波幅畸变的校正[J].计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(9): 1617-1624.
CHEN Li-ning, JIN Yi-cheng, REN Hong-xiang, et al. Correcting the amplitude malformation of ocean wave rendering with wave number spectrum[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2015, 27(9): 1617-1624. (in Chinese)

- [6] DARLES E, CRESPIB B, GHASANFARPOUR D, et al. A survey of ocean simulation and rendering techniques in computer graphics[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 30(1): 43-60.
- [7] WEERASINGHE M, SANDARUWAN D, KEPPIYAGAMA C, et al. A novel approach to simulate wind-driven ocean waves in the deep ocean[C]//IEEE. 2013 International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions. New York: IEEE, 2013: 28-37.
- [8] FAN Nai-mei, ZHANG Na. Simulation method of random ocean waves based on fractal interpolation[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2013, 6(6): 411-420.
- [9] PRACHUMRAK K, KANCHANAPORNCHAI T. Real-time interactive ocean wave simulation using multithread[J]. International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering, 2011, 5(8): 1117-1120.
- [10] IGLESIAS A. Computer graphics for water modeling and rendering; a survey[J]. Future Generation Computer Systems, 2004, 20(8): 1355-1374.
- [11] FANG M C, LUO J H, LEE M L. A nonlinear mathematical model for ship turning circle simulation in wave[J]. Journal of Ship Research, 2005, 49(2): 69-79.
- [12] SEO M G, KIM Y. Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17/18): 1934-1945.
- [13] SUBRAMANIAN R, BECK R F. A time-domain strip theory approach to maneuvering in a seaway[J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 107-118.
- [14] 张秀凤,尹 勇,金一丞. 规则波中船舶运动六自由度数学模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 40-43.
ZHANG Xiu-feng, YIN Yong, JIN Yi-cheng. Ship motion mathematical model with six degrees of freedom in regular wave[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 40-43. (in Chinese)
- [15] 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.
ZHANG Xiu-feng. Study on the ship mathematical model with six degrees of freedom applied in marine simulator[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [16] WOOLLISCROFT M O, MAKI K J. A fast-running CFD formulation for unsteady ship maneuvering performance prediction[J]. Ocean Engineering, 2016, 117: 154-162.
- [17] 李海波,温宝贵. 用短峰波理论预报南海浮式生产储油装置运动响应[J]. 中国海上油气, 2007, 19(5): 346-349.
LI Hai-bo, WEN Bao-gui. Predicting movement behavior of Nanhai FPSO by short-crested wave theory[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(5): 346-349. (in Chinese)
- [18] 郑文涛,匡晓峰,缪泉明,等. 船舶在长峰波和短峰波中运动响应的模型试验研究[C]//吴有生,刘 桦,许唯临,等. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 359-364.
- ZHENG Wen-tao, KUANG Xiao-feng, MIAO Quan-ming, et al. Model test study of ship motions in long-crested and short-crested irregular waves[C]//WU You-sheng, LIU Hua, XU Wei-lin, et al. Proceedings of the 9th National Congress on Hydrodynamics and the 22nd National Conference on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2009: 359-364. (in Chinese)
- [19] 陈京普,魏锦芳,朱德祥. 船舶在长峰和短峰不规则波中运动的三维时域数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(5): 589-596.
CHEN Jing-pu, WEI Jin-fang, ZHU De-xiang. Numerical simulations of ship motions in long-crested and short-crested irregular waves by a 3D time domain method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 589-596. (in Chinese)
- [20] 王艳霞,陈京普,魏锦芳. 长峰不规则波与短峰不规则波对船舶失速影响的分析[J]. 中国造船, 2012, 53(增 1): 13-18.
WANG Yan-xia, CHEN Jing-pu, WEI Jin-fang. Analysis of decrease of ship speed in long-crested and short-crested irregular waves[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(S1): 13-18. (in Chinese)
- [21] FOSSEN T I, FJELLSTAD O E. Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom [J]. Journal of Mathematical Modelling of Systems, 1995, 1(1): 17-27.
- [22] LEE C, JUNG J S, HALLER M C. Asymmetry in directional spreading function of sea waves due to refraction[C]//ASME. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME, 2009: 1-9.
- [23] 陈丽宁,金一丞,任鸿翔,等. 不规则海浪实时绘制中波浪谱的比较与选择[J]. 山东大学学报: 工学版, 2013, 43(6): 47-52.
CHEN Li-ning, JIN Yi-cheng, REN Hong-xiang, et al. On comparison and selection of the wave spectrum in real-time rendering of the irregular ocean wave[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2013, 43(6): 47-52. (in Chinese)
- [24] 张龙杰,谢晓方,孙 涛,等. 舰艇摇摆对小口径舰炮射击精度的影响分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(1): 11-16.
ZHANG Long-jie, XIE Xiao-fang, SUN Tao, et al. Analysis about influence of warship rocking on firing accuracy of small caliber naval gun[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2013(1): 11-16. (in Chinese)
- [25] 莫 建. 波浪中船舶六自由度操纵运动数值仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
MO Jian. Numerical simulation of ship manoeuvring motion with six degrees of freedom in waves[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [26] SANDARUWAN D, KODIKARA N, ROSA R, et al. Modeling and simulation of environmental disturbances for six degrees of freedom ocean surface vehicle[J]. Sri Lankan Journal of Physics, 2009, 10: 39-57.