

基于MFC的船舶运动视景仿真

刘丽桑

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 采用P-M谱对长峰波海浪进行仿真,并给出船舶在风浪中的摇荡数学模型,同时利用MultiGen-Creator/Vega软件,设计出船舶运动视景仿真平台,并在VC++中设置人机交互界面,实现可视化控制仿真。仿真效果表明此仿真系统能很好地模拟船舶航行运动过程,为船舶减摇研究提供直观的事实根据,在虚拟训练等方面有一定的应用价值。

关键词: 海浪; 船舶; 摇荡; 视景仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)04-0376-05

Visual simulation of ship's motion based on MFC

Liu Lisang

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: P-M wave spectrum was employed to simulate random waves, and a mathematic model of ship oscillation was presented. A visual simulation platform of ship movement was developed by MultiGen-Creator/Vega and a human-machine interface was designed by VC++, which realizes visual simulation. The simulation results indicate that the simulation system can simulate the ship motion in the sea to provide data for lowering ship rolling and pitching and can be extended to virtual training.

Keywords: sea wave; ship; oscillation; visual simulation

研究船舶在随机海浪环境中的摇荡,不仅是研究船舶耐波性的必要前提,也是船舶动力定位的必需。特别在动力定位船舶研究中,需要运动仿真系统作为调试平台。因此,需要建立海浪模型,产生海浪信号,从而为后续研究奠定基础。对海浪信号的仿真研究还对海浪预报、船舶动力定位等方面具有重要意义^[1]。在海浪仿真中,二维不规则长峰波海浪的实时仿真在许多船舶控制系统的研究和设计中得到了广泛的应用,也对模拟海域中的成熟海浪及其对船舶结构物的作用奠定了基础。本文主要采取计算机仿真及视景仿真技术研究船舶在海浪中的运动情况。首先,确定长峰波海浪模型并进行频谱分析,然后建立船舶摇

荡的数学模型,并进行数值仿真,最后在软件中实现了人机交互界面,满足了可视化控制的需求。

1 长峰波海浪

海浪的仿真是一个比较复杂的问题。如果用规则波研究这个问题,则与实际的海浪相差甚远,不能取得令人满意的效果。自上世纪50年代以来,许多海洋工作者对随机海浪做了大量的观察与研究,从大量数据中分析海浪的各种统计值,研究结果表明海浪属于窄带谱的正态随机过程,海浪幅值服从雷利分布^[2]。本文采用的Longuet-Higgins模型就是基于谱分析的描述长峰波海浪的模型。

收稿日期: 2015-08-12

基金项目: 福建工程学院科研发展预研基金项目(GY-Z13018)

作者简介: 刘丽桑(1984-),女,福建莆田人,讲师,博士,研究方向:工业自动化、预测算法及仿真。

1.1 Longuet-Higgins 模型

Longuet-Higgins 模型把长峰波随机海浪视为无数个不同波幅和波长的微幅余弦波叠加而成,其数学表达式为:

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \zeta_{ai} \cos(k_i \xi \cos \mu + k_i \eta \sin \mu - \omega_i t + \varepsilon_i)$$
 (1)

式中, ζ_{ai} 、 k_i 、 ω_i 分别为第 i 次谐波的波幅、波数、角频率, ε_i 为在 $0 \sim 2\pi$ 间均匀分布的初相位。考虑到实际应用, 可以忽略高次谐波, 则定点 ($\xi = 0, \eta = 0$) 长峰波海浪方程为:

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N \zeta_{ai} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i)$$
 (2)

1.2 频谱分析

目前, 在船舶运动控制研究中应用较多的海浪谱密度有 P-M 谱、ITTC 双参数波谱 (ISSC 波谱)、JONS WAP 波谱等。P-M 谱能很好地代表实际充分成长的随机海浪谱, 在海洋工程和船舶工程中得到了广泛的应用^[2]。其表达式为:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp \left[-0.74 \left(\frac{g}{v\omega} \right)^4 \right]$$
 (3)

式中, v 为海面上 19.5 m 高度处的风速, 单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $S_{\zeta}(\omega)$ 单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

按表 1 所列的参数在 Matlab 中进行仿真, 可得到如图 1 所示的结果。

表 1 不同海情的仿真频段和频率增量
Tab.1 Simulating frequency ranges (zones) and increments (additions) under different sea conditions

| $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $w/(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}$ | $\Delta w/(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}$ |
|----------------------------------|------------------------------------|---|
| <8 | 0.4 ~ 3.4 | 0.1 |
| 8 ~ 12 | 0.35 ~ 2.75 | 0.08 |
| 12 ~ 16 | 0.2 ~ 2.0 | 0.06 |
| >16 | 0.1 ~ 1.3 | 0.04 |

为了检验所仿真的海浪是否符合要求的海浪频谱, 首先根据等间隔法对频谱进行离散化, 然后确定各种特定频率下的各种谐波的幅值, 以及根据各谐波初相位的分布确定各个谐波。将谐波叠加后得到的长峰波随机波浪进行离散化并利用快速傅里叶变换 (FFT) 进行频谱分析。根据频谱分析得到的所仿真的海浪频谱同要求的海浪频谱进行比较, 分析误差, 直至误差满足要求。图 2 给出

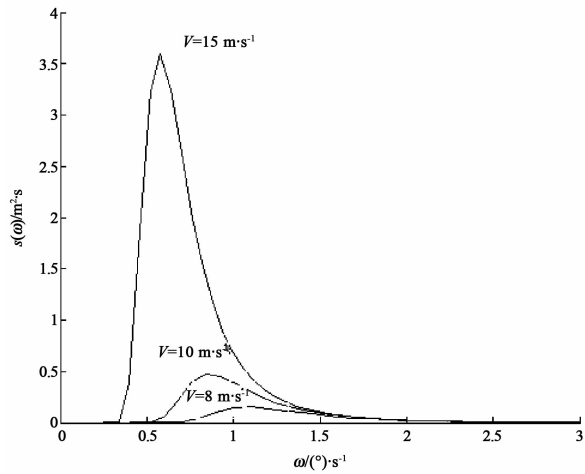


图 1 不同风速下的 P-M 谱
Fig.1 P-M spectrum under different wind speeds

了风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的频谱误差。可以看出, 仿真误差在 ± 0.02 左右。

1.3 波倾角仿真

在对船舶的运动控制系统进行研究时, 必须考虑海浪波倾角 α_{ω} 的影响, 同时, 还必须考虑船舶自身的航速和航向及几何尺寸对海浪的影响。因此, 可以用有效波倾角 α_{ω_e} 来代替波倾角 α_{ω} 。有效波倾角频谱的计算可按下式计算:

$$S_{\alpha\omega}(\omega) = k_b^2 k_t^2 \frac{\omega^2}{g^2} S_{\zeta}(\omega_e)$$
 (4)

其中, k_b 和 k_t 是修正因子, 受船舶船宽和吃水的影响; $S_{\zeta}(\omega_e)$ 是有效遭遇频率下的海浪频谱, 关系为: $S_{\zeta}(\omega_e) = \frac{S_{\zeta}(\omega_e)}{1 - \frac{2\omega}{g} V \cos \mu}$, 式中 V 为船

速, μ 为航向角。

则空间上某一点的波倾角仿真模型为:

$$\alpha_{\omega}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{ei}}{g} \sqrt{2S_{\zeta}(\omega_{ei}) \Delta\omega} \cos(\omega_{ei} t + \varepsilon_i)$$
 (5)

2 船舶摇荡

船舶在不规则波中的摇荡可视为由无数不同频率的规则波各自线形变换所得的相应不同频率的规则摇荡分量的叠加^[3]。若设波能谱密度函数为 $S_x(\omega)$, 船舶摇荡能谱密度函数为 $S_y(\omega)$, 则根据随机过程理论, 对于平稳随机过程的系统, 有 $S_y(\omega) = |W(i\omega)|^2 S_x(\omega)$, 其中, $|W(i\omega)|$ 是船

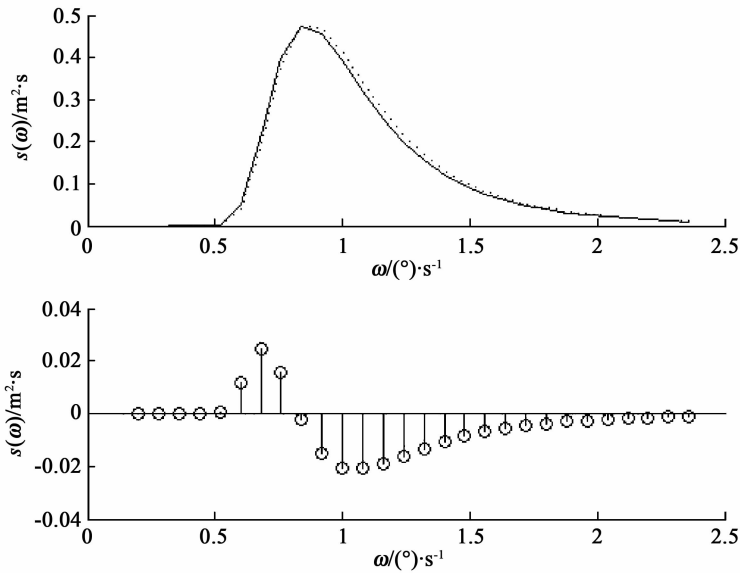


图 2 风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的频谱误差

Fig. 2 Frequency spectrum error when wind speed is $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

的幅频响应函数,可以通过船在规则波中的理论计算求得。

2.1 规则波中横摇频率响应函数

设横摇角为 ϕ , 则船舶线性横摇可以表示为:

$$(I_x + \Delta I_x) \ddot{\phi} + 2N_\phi \dot{\phi} + Dh\phi = -X_\phi(\Delta I_x \ddot{\alpha}_\omega + 2N_\mu \dot{\alpha}_\omega + Dh\alpha_\omega) \quad (6)$$

其中, I_x 和 ΔI_x 分别为纵轴惯量和附加惯量, $2N_\phi$ 为船舶阻尼力矩, D 为排水量, h 为横稳心高, α_ω 为有效波倾角, X_ϕ 为波面角修正因子。实验证明, 等号右边的前两项比第三项要小得多, 所以又可写成: $(I_x + \Delta I_x) \ddot{\phi} + 2N_\phi \dot{\phi} + Dh\phi = -DhX_\phi \alpha_\omega$ 。进行拉氏变换得:

$$W_\phi(s) = \frac{\phi(s)}{\alpha_\omega(s)} = \frac{X_\phi}{T_\phi^2 s^2 + 2T_\phi n_\mu s + 1} \quad (7)$$

(7) 式即为船舶横摇传递函数。其中, T_ϕ 为船舶的固有横摇周期, $T_\phi = 1/\phi$, μ_ϕ 为无因次阻尼衰减系数, 且有 $\omega_\phi = \sqrt{Dh/(I_x + \Delta I_x)}$, $\mu_\phi = N_\phi/(I_x + \Delta I_x)\omega_\phi$ 。设 $\Lambda = \omega/\omega_\phi$, 即波浪频率与横摇固有频率之比, 可得横摇幅频特性为:

$$|W_\phi(i\omega)| = \frac{X_\phi}{\sqrt{(1 - \Lambda^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \Lambda^2}} \quad (8)$$

2.2 规则波中升沉频率响应函数

设升沉量为 z , 迎浪时独立的升沉运动方程为:

$$\ddot{z} + 2v_z \dot{z} + n_z^2 z = \frac{F_{zz}}{D/g + \lambda_{zz}} \quad (9)$$

其中 F_{zz} 为升沉扰动力, $F_{zz} = \rho g \zeta_\alpha X_z S_e \cos \omega t$, X_z 为修正因子, S_e 为水线面面积。类似求解横摇频率响应的方法, 记 $\Lambda = \omega/\omega_z$, 可得:

$$W_x(i\omega) = \frac{\omega_z^2 X_z}{-\omega^2 + 2iv_z \omega + \omega_z^2} = \frac{X_z}{(1 - \Lambda^2) + 2i\mu_z \Lambda} \quad (10)$$

那么幅频响应函数即为:

$$|W_z(i\omega)| = -\frac{X_z}{\sqrt{(1 - \Lambda^2)^2 + 4\mu_z^2 \Lambda^2}} \quad (11)$$

2.3 规则波中纵摇频率响应函数

类似升沉运动, 设纵摇角为 θ , 迎浪时独立的升沉运动方程为:

$$\ddot{\theta} + 2v_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 \theta = \frac{F_{\theta\theta}}{J_{\theta\theta} + \lambda_{\theta\theta}} \quad (12)$$

其中 $F_{\theta\theta}$ 为升沉扰动力, $F_{\theta\theta} = \omega_\theta^2 \zeta_\alpha X_\theta \sin \omega t$, X_θ 为修正因子。类似以上求解方法, 记 $\Lambda = \omega/\omega_\theta$, 可得:

$$W_\theta(i\omega) = \frac{\omega_\theta^2 X_\theta}{-\omega^2 + 2iv_\theta \omega + \omega_\theta^2} = \frac{X_\theta}{(1 - \Lambda^2) + 2i\mu_\theta \Lambda} \quad (13)$$

那么幅频响应函数即为:

$$|W_{\theta}(i\omega)| = \frac{X_{\theta}}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4\mu_{\theta}^2\Lambda^2}} \quad (14)$$

3 仿真结果

仿真实验在惠普工作站上完成。
前台可视化仿真采用 Vega 软件, Matlab 作为后台计算工具,并在 VC++ 中设计了人机对话界面,通过 Matcom 工具调用 Matlab,实现了交互式控制。
某船在风浪中航行的仿真输入参数如下:风

速 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 船速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 船与浪向之间夹角为 0 , 即迎浪航行。其中船舶有关参数为:船长 98 m , 船宽 10.2 m , 正常排水量 $1\,457.26\text{ t}$, 平均吃水 3.1 m , 初稳心高 1.15 m 。
从仿真图 3 中可以看到,迎浪航行时,波浪遭遇周期减小,趋近于船升沉和纵摇固有周期,且纵摇和升沉运动幅值随航速增加而增大,除非特别高航速例外;纵摇和升沉周期相当,而横摇周期约为纵摇和升沉周期的两倍。

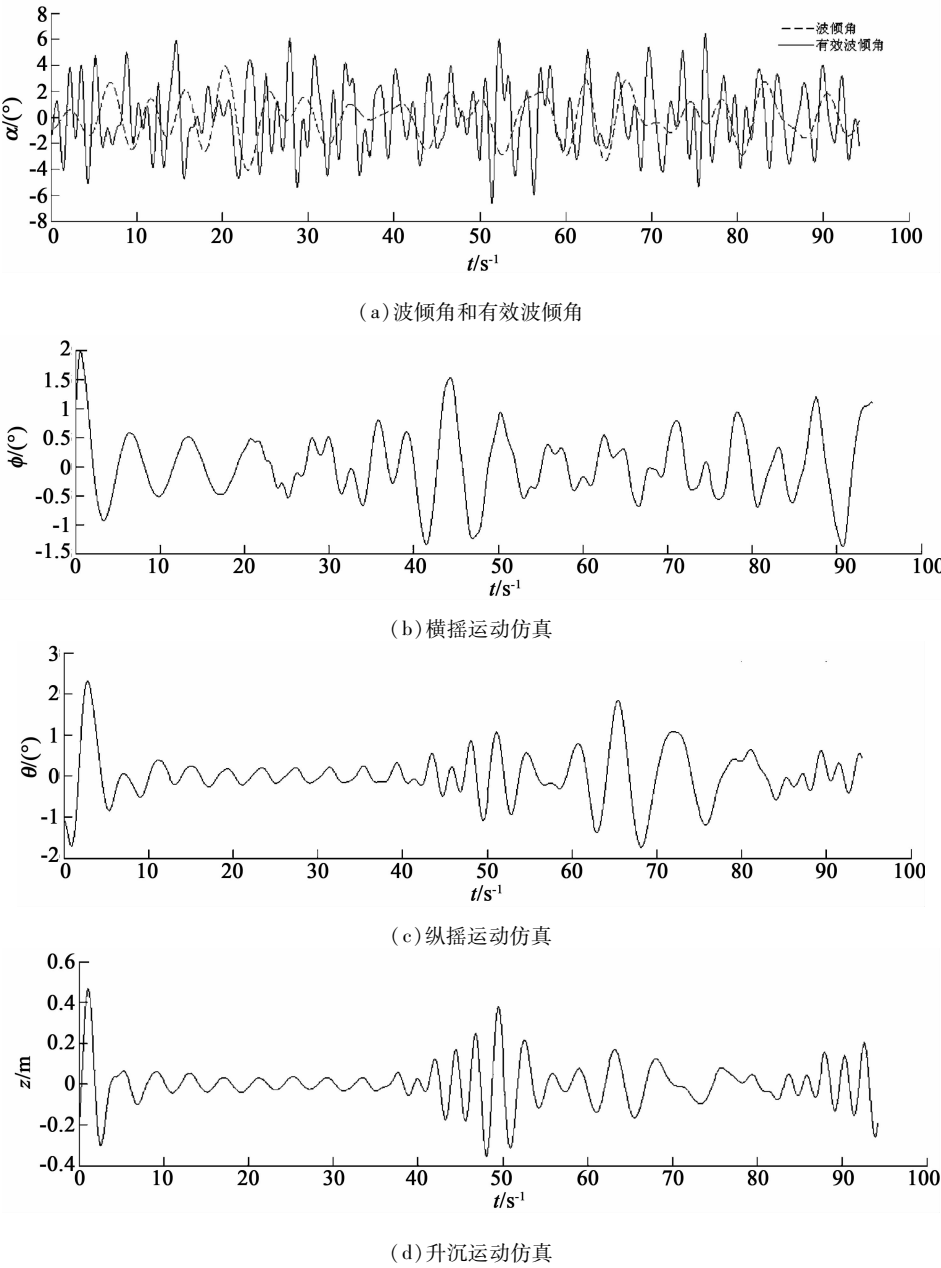
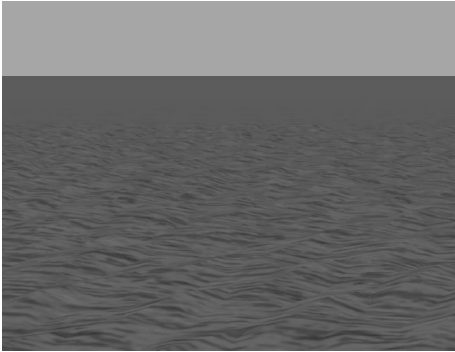


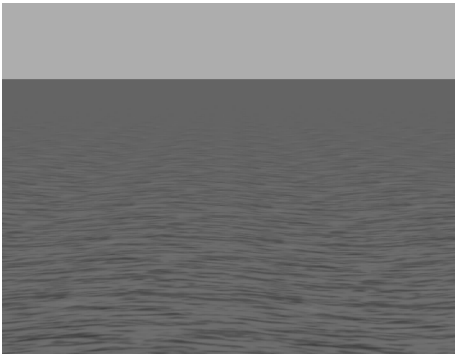
图 3 船舶运动仿真结果

Fig. 3 Visual simulation of sea waves under different wind speeds

图 4 所示的海浪仿真图分别模拟的是 2 级海况和 1 级海况时的海面情况。Vega 中的各级海况由 10 个规则波组成,可分别对每个规则波的特征参数进行设置,如波长、周期、幅值、相位等。



(a) 2 级海况



(b) 1 级海况

图 4 不同风速下的海浪视景仿真
Fig. 4 Visual simulation of sea waves under different wind speeds

船舶运动视景仿真平台中,可以设置船舶和海洋环境的相关参数,如航速、航向、海况等级等,并通过 Matcom 调用 Matlab 的源文件计算出船舶的六自由度位姿并加以可视化显示。图 5 为某舰无航速时在横浪上的随浪运动截图。



图 5 人机对话界面
Fig. 5 Human-machine interface

4 结论

基于 MFC 开发平台并利用 Vega 视景仿真软件实现了船舶运动视景仿真,有良好的操纵性和可视性。但是本文所作的研究仍有局限性,今后需要改进的方面为:1) 基于微幅海浪的假设,本文的船舶摇荡为线性摇荡,未考虑大风浪下的非线性大幅摇荡;2) 本文在长峰波基础上进行海浪及船舶的动态仿真,而实际中常遇到多向不规则波,因此还须加强短峰波对船舶摇荡作用的研究;3) 在长峰波对船舶运动作用的研究中,忽略了运动耦合的影响,因此频率响应函数的形式及精度有待进一步改善。

参考文献:

[1] 许景波,边信黔,付明玉. 随机海浪的数值仿真与频谱分析[J]. 计算机工程与应用,2010,46(36):226-229.
[2] 俞聿修,格淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2011.
[3] 梁霄,李巍. 船舶操纵性与耐波性[M]. 大连:大连海事大学出版社,2012.

(责任编辑:肖锡湘)