

长峰波海浪的数值模拟仿真与频谱估计

许景波^{1,2}, 边信黔³, 付明玉³

(1. 哈尔滨工程大学 控制科学与工程博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对船舶航行抑制海浪干扰需要,研究了海浪波形的建立方法.选取 ITTC 双参数谱作为海浪谱,通过频率等分法对其进行频率分割,计算重心频率作为谐波频率,根据长峰波海浪模型进行仿真,得出了时间和空间海浪仿真波形.采用 Welch 法进行频谱分析,仿真精确度达到了 1.65%.该方法不失一般性,是一种工程实用方法,对船舶运动参数的预报和滤波,海浪预报、船舶动力定位等方面的研究具有重要意义.

关键词: 海浪仿真; 频率等分法; 谱估计

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1007-2683(2010)04-0030-04

Simulation of Sea Wave of Long-crested Wave and Spectral Estimation

XU Jing-bo^{1,2}, BIAN Xin-qian³, FU Ming-yu³

(1. Postdoctoral Research Station of Control Science & Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Measure-control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology,

Harbin 150080, China; 3. Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper deals with the method of simulating sea wave to decrease its disturbance in the watercraft navigating. Firstly the ITTC two-parameter spectrum is selected as the power spectrum of sea wave to be simulated. Secondly the selected power spectrum is parted on a prescription composed of drugs of equal amount frequency, and the frequency of harmonic wave is determined by calculating the mass center of each section. Finally the simulated sea wave with time and space are determined on the basis of Longuet-Higgins model. The simulation accuracy arrives at 1.65% is drawn by the spectral analyzing of he simulated sea wave in Welch. Without loss of generality, this method is practical in engineering and important for the prediction and filtering for the operating parameters of watercraft, the prediction of sea wave and marine dynamic positioning.

Key words: sea wave simulation; frequency in part; spectral estimation

0 引 言

船舶在海上航行时,经常受到海浪的干扰,影响船舶航行运动参数,给船舶的控制和性能带来了诸

多不便.海浪扰动的频带一般都在船舶舵机伺服系统的带宽内,而通过舵机来补偿海浪扰动将引起太多的无效控制作用,增加舵机的机械磨损,而且比较耗能.通过船舶运动参数的预报和滤波,能有效地抑制海浪干扰,而这就需要建立海浪模型,产生海浪信

收稿日期: 2010-05-19

作者简介: 许景波(1973—),男,博士后,副教授, E-mail: hitxjb@126.com;

边信黔(1949—),男,教授.

号,从而为后续研究奠定基础.并且对海浪信号的仿真研究对海浪预报、船舶动力定位等方面也具有重要意义.

对于海浪的模拟与仿真,通常有3种方法^[1]:频率等分法、有理谱法和能量等分法.频率等分法是基于海浪的功率谱密度函数,对频率进行等份分割,然后根据分割频谱确立海浪各次谐波幅值,建立海浪仿真模型.有理谱法是基于有理谱理论,用有理函数逼近海浪频谱,然后在白噪声激励下即可求出形成滤波器的传递函数,即海浪成型模型.能量等分法也是基于海浪的功率谱密度函数,但其从能量等分的角度对频率分割.有理谱法采用逼近理论,因此会有一定的误差,并且实际中使用的白噪声是有限带宽的白噪声,因而用它作激励时,得到的海浪波形也存在一定的误差.能量等分法由于需要计算分割能量,从而逐级计算分割频率,算法繁琐.而频率等分法是一种工程实用方法,本文也正是采用该方法进行海浪模拟与仿真.

1 Longuet-Higgins 海浪模型

海面上最常见的是人们常说的由风形成的海浪,由于风的随机性和风向的多变性,风浪不但会向一个方向传播,而且还会向其他方向传播.设地面坐标系为 $E-\xi\eta$,与海平面重合,则风浪的起伏高度在此坐标系内随时间的变化可用一个三元函数来表示 $\zeta=f(\xi,\eta,t)$.此海浪为“三元不规则波”,或称“短峰波”.根据海浪理论^[2], $\zeta(t)$ 可以看成由无数个不同波幅和波长的余弦波叠加而成,可以表示为

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

其中, $a_i, k_i, \omega_i, \varepsilon_i$ 分别为第 i 次谐波的波幅、波数、角频率、初相位.

如果海浪沿着一个固定方向 ξ 传播,那么其波峰和波谷线彼此平行并垂直于前进方向,此时波面起伏高度可以简化为 $\zeta=f(\xi,t)$,而在 η 方向,其值为常数,这种海浪被称作“二元不规则波”,或称长峰波,其可表示成为

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(k_i \xi - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (2)$$

其中 ω_i 和 k_i 的关系为

$$\omega_i = 2\pi/T_i \quad (3)$$

$$k_i = 2\pi/\lambda_i = \omega_i^2/g \quad (4)$$

能够对船舶航行运动参数产生较大影响的正是长峰波,本文将对其进行建模与仿真,为船舶运动海浪滤波器设计奠定基础.

2 频率等分法

从海浪模型可以看出,海浪函数可以表示成各次谐波之和,那么如果确定了各次谐波的频率、谐波幅值和初相位也就能够建立海浪模型.首先对于谐波频率,需要根据海浪的功率谱函数 $S(\omega_e)$,进行频率分割,分割部分的重心频率代表了谐波频率.频率等分法从频率分割的角度出发,使各频率间隔 $\Delta\omega_{ei} = \omega_{ei} - \omega_{ei-1}$ 相等,从而确定相应的谐波频率 ω_{eci} . ω_{eci} 可由海浪谱的一阶矩和零阶矩比值求得

$$\omega_{eci} = \frac{\int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} \omega_e S(\omega_e) d\omega_e}{\int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} S(\omega_e) d\omega_e} \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

其次,根据幅值与能量的关系,对于各次谐波的幅值,可由下式确定:

$$a_i = \sqrt{2 \int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} S(\omega_e) d\omega_e} \quad (6)$$

最后,对于 ε_i ,它表示初始相位,是一个随机数,可由随机函数产生.

3 ITTC 双参数海浪谱

从以上论述可以看出,如果确定了海浪的功率谱函数,也就能够对海浪进行有效建模.国际上描述海浪的谱密度公式有多种,如达布歇布波谱、BTTP波谱、斯考特波谱、劳曼波谱、PM波谱、ISSC波谱、JONSWAP波谱和沃奇六参数波谱等.本文采用ITTC双参数谱,它是PM波谱的派生形式,适用于充分发展的海浪,以有义波高和海浪特征周期为谱参量,以充分的海浪观测资料为依据,谱结构简单,第十一届国际船模水池会议将该谱定为标准海浪谱^[3].其描述如下:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (7)$$

其中: $A = \frac{173\zeta_{1/3}^2}{T_1^4}$; $B = \frac{691}{T_1^4}$; $\zeta_{1/3}^2$ 为有义波高; T_1 为海

浪特征周期; ω 为海浪角频率. 在 $\zeta_{1/3} = 1.5\text{m}$, $T_1 = 2\text{s}$ 的条件下, ITTC 双参数海浪谱如图 1 所示.

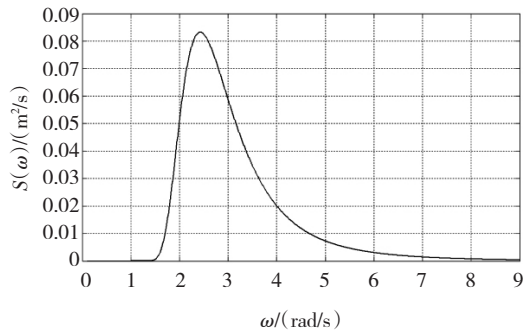


图1 ITTC 双参数谱

4 建模与仿真

从理论上, 海浪谱的频率范围为 $0 \sim +\infty$, 但由于海浪谱的能量大部分集中在某一频率范围内, 其余部分可以忽略不计, 这样可以避免一些无效计算, 提高仿真速度. 这里我们选择上述海浪谱的仿真频段为 $1.5 \sim 8.5$ (rad/s), 在此频段内海浪谱的能量占总能量的 99% 以上, 足以满足仿真要求. 对该频段进行 50 份等频率分割, 根据式 (5), 在各分割频段上分别计算 ω_{eci} , 从而确定各次谐波频率, 结果见表 1.

表1 海浪谱各频段谐波频率

序号	谐波频率/(rad/s)	序号	谐波频率/(rad/s)	序号	谐波频率/(rad/s)	序号	谐波频率/(rad/s)	序号	谐波频率/(rad/s)
1	1.592	11	2.969	21	4.368	31	5.769	41	7.169
2	1.724	12	3.108	22	4.508	32	5.909	42	7.309
3	1.859	13	3.248	23	4.648	33	6.049	43	7.449
4	1.995	14	3.388	24	4.788	34	6.189	44	7.589
5	2.133	15	3.528	25	4.928	35	6.329	45	7.729
6	2.271	16	3.668	26	5.069	36	6.469	46	7.869
7	2.410	17	3.808	27	5.209	37	6.609	47	8.009
8	2.549	18	3.948	28	5.349	38	6.749	48	8.149
9	2.689	19	4.088	29	5.489	39	6.889	49	8.289
10	2.829	20	4.228	30	5.629	40	7.029	50	8.429

在空间采样间隔 $X = 1\text{m}$, 时间采样间隔 $T = 1\text{s}$, 采样点数为 $n = 1000$ 的条件下, 采用上述方法, 分固定时间、等间隔空间点和固定空间点、等间隔时间点两种情况, 对海浪进行数值仿真, 结果如图 2、3 所示.

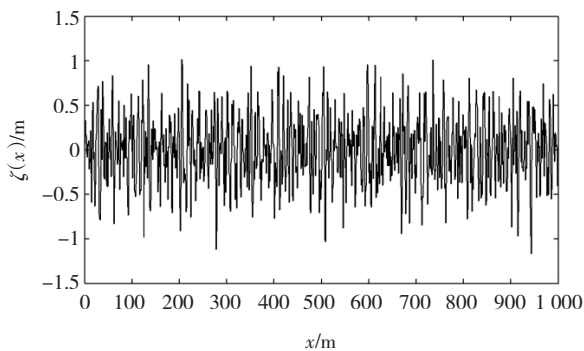


图2 固定时间点海浪仿真波形

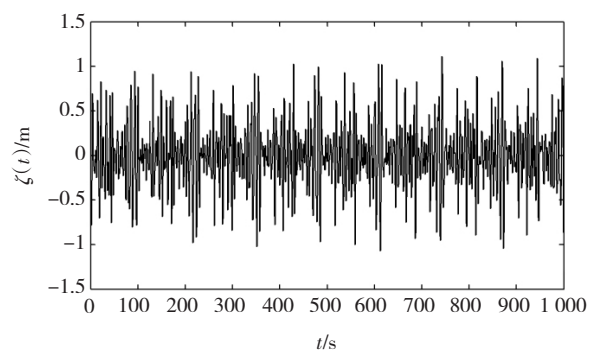


图3 固定空间点海浪仿真波形

5 频谱分析

采用 Welch 法对得到的海浪波形进行频谱估计, 以检验仿真过程是否满足要求. Welch 法优点在

于它允许分段数据样本的重叠,从而进一步减小估计的功率谱密度的方差.再则,通过窗函数加权,减小相邻样本段之间的相关性,改善边瓣效应引起的谱失真.所以 Welch 法可以更好地控制功率谱密度估计的方差特性.

采用汉明窗作为 Welch 法窗函数,对上述频率 50 等分情况所产生的海浪仿真波形进行频谱估计,得到结果如图 4 所示.

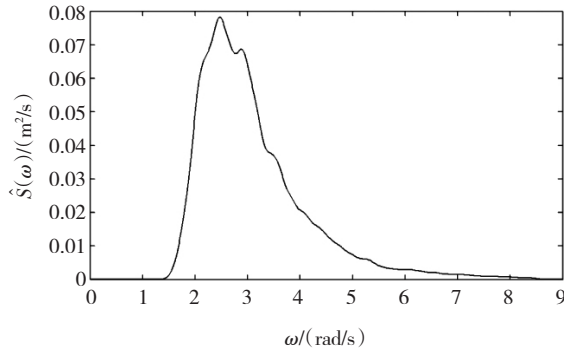


图4 海浪谱仿真波形谱估计

从上图可以看出,仿真海浪频谱大体反映了理想海浪谱形状,如图 1 所示.两图略有差别,这是由于分割频段选取有限而形成的,随着分割频段的增加,仿真海浪频谱将更接近理想海浪谱.

设仿真海浪频谱估计为 $\hat{s}(\omega)$,理想海浪谱为 $s(\omega)$,根据仿真精确度估计指标:

$$\frac{\left| \int_{\omega_1}^{\omega_h} \hat{s}(\omega) - s(\omega) d\omega \right|}{\int_{\omega_1}^{\omega_h} s(\omega) d\omega} = \sigma \quad (8)$$

对海浪谱 50 等分情况进行计算,得到精确度为 1.65%,说明得出的海浪波形以高精度满足了仿真要求.

6 结 语

不失一般性,本文描述了基于频率等分法进行海浪数值仿真的过程,首先确定海浪谱,其次进行海浪谱等频率间隔分割,确定谐波频率,再次根据采样时间间隔、采样空间间隔将各次谐波合成海浪仿真波形,最后对仿真波形进行了频谱分析,验证了该方法的有效性.本过程同样适于由海浪遭遇谱进行的波形仿真.对船舶运动控制和海浪预报具有重要意义,是一种工程实用方法.

参 考 文 献:

- [1] 马杰,田金文,彭复员. 海浪的数值模拟及其仿真[J]. 华中理工大学学报,2000,28(4):63-65.
- [2] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985.
- [3] 金鸡章. 长峰波随机海浪的实时仿真和频谱分析[J]. 船舶工程,1987,1:24-32.
- [4] 王丽慧,刘维亭,赖志昌. 海浪扰动信号的仿真方法[J]. 船舶工程,2002,4:23-27.
- [5] 邱宏安. 随机海浪模型的建立及仿真分析[J]. 系统仿真学报,2000,12(3):226-228.
- [6] 杨惠珍,康凤举,褚彦军,聂卫东. 基于海浪谱的随机海浪仿真及验证[J]. 系统仿真学报,2005,17(10):2324-2326.
- [7] 黄世涛,宋继良,刘美娟,等. 海浪信号的实时仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报,2001,6(5):53-56.
- [8] 杜岩,张晓宇,李文秀. 虚拟现实场景中海浪形态的计算机模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2001,22(3):26-30.
- [9] 陈虹丽,李爱军,贾红宇. 海浪信号的实时仿真和谱估计[J]. 电机与控制学报,2007,11(1):93-96.
- [10] 徐利明,姜昱明. 基于谱分析的实时波浪模拟[J]. 系统仿真学报,2005,17(9):2092-2095.
- [11] 何子述,夏威. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

(编辑:王 萍)