

随机海浪的数值仿真与频谱分析

许景波^{1,2}, 边信黔³, 付明玉³

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

1.哈尔滨工程大学 控制科学与工程博士后流动站, 哈尔滨 150001

2.哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 哈尔滨 150080

3.哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001

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

2.College of Measure-control Technology & Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

3.Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

E-mail: hitxjb@126.com

XU Jing-bo, BIAN Xin-qian, FU Ming-yu. Simulation and spectral analysis of random sea wave. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(36): 226-229.

Abstract: This paper deals with the method of simulating sea wave for decreasing its disturbance in the watercraft navigating. Firstly the ITTC two-parameter spectrum is selected as the power spectrum of sea wave. Secondly the selected power spectrum is aided by energy in part, and the frequency of harmonic wave is determined by calculating the mass center of each section. All harmonic waves are synthesized on the basis of the Longuet-Higgins model in time domain. Finally, the simulation algorithm based on energy in part is presented and the simulated sea wave with time and space is determined. The simulation accuracy arrives at 1.6% compared with the ideal wave frequency spectrum by the spectral analysis of the simulated sea wave in Welch. That testifies the validity of this method and provides the vessel motion parameters filtering with reliable exciting signals.

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

摘要: 针对船舶航行抑制海浪干扰的需要, 研究了海浪波形的建立方法。选取ITTC双参数谱作为海浪谱, 通过能量等分法对其进行频率分割, 计算分割频段重心频率作为谐波频率, 根据长峰波海浪模型, 将各次谐波进行时域合成。给出了基于能量等分法的海浪仿真算法, 得出了时间和空间海浪仿真波形。采用Welch法对仿真海浪进行频谱分析, 与理想海浪谱对比, 仿真精度达到了1.6%, 验证了该方法的有效性, 为船舶航行运动参数的有效滤波提供了可靠的扰动信号。

关键词: 海浪仿真; 能量等分法; 谱估计

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.36.063 文章编号: 1002-8331(2010)36-0226-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391

1 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。

对于海浪的模拟与仿真, 通常有三种方法^[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, 但其从较新的角度对频率采用等能量分割。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。能量等分法较频率等分法更为合理, 避免了确定海浪振幅和频率的困难, 是一种工程上实用方法, 本文也正是采用该方法进行海浪模拟与仿真。

2 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

作者简介: 许景波 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 船舶航行运动参数预测与滤波; 边信黔, 教授; 付明玉, 教授。

收稿日期: 2010-05-20 修回日期: 2010-07-08

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- $\zeta\eta$,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 $\zeta=f(\zeta, \eta, t)$ 。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:

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

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:

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} \quad (3)$$

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} = \frac{\omega_i^2}{g} \quad (4)$$

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

3 能量等分法

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。能量等分法从能量分割的角度出发,使各频率间隔的能量相等,即谱密度曲线下的子面积相等,从而确定相应的谐波频率 ω_{eci} ,如图1所示。

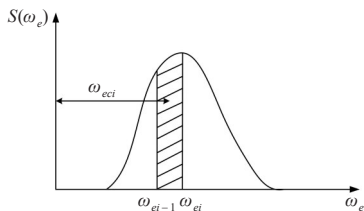


图1 能量等分法原理图

$$\int_{\omega_{e0}}^{\omega_{e1}} S(\omega_e) d\omega_e = \int_{\omega_{e1}}^{\omega_{e2}} S(\omega_e) d\omega_e = \dots = \int_{\omega_{en-1}}^{\omega_{en}} S(\omega_e) d\omega_e \quad (5)$$

ω_{eci} 可由海浪谱的一阶矩和零阶矩比值求得:

$$\omega_{eci} = \frac{\int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} \omega_e \cdot S(\omega_e) d\omega_e}{\int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} S(\omega_e) d\omega_e} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

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:

$$a_i = \sqrt{2 \int_{\omega_{ei-1}}^{\omega_{ei}} S(\omega_e) d\omega_e} \quad (7)$$

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。

4 ITTC双参数海浪谱

从前面论述可以看出,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。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,其描述如下^[3]:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (8)$$

其中: $A = \frac{173\zeta_{1/3}^2}{T_1^4}$, $B = \frac{691}{T_1^4}$, $\zeta_{1/3}$ 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2所示。

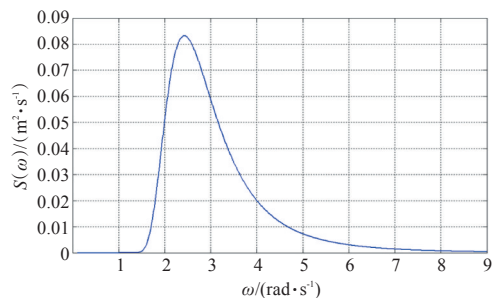


图2 ITTC双参数谱

5 建模与仿真

从理论上,海浪谱的频率范围为 $0 \sim +\infty$,而对于仿真来说,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。这里选择上述海浪谱的仿真频段为 $1.5 \sim 8.5\text{ rad/s}$,在此频段内海浪谱的能量占总能量的99%以上,足以满足仿真的要求。

在整个海浪数值仿真算法中,主要分为三大部分:海浪谱等能量分割频段确定、分割频段中谐波频率的计算和各次谐波的合成。对于分割频段的确定采用频段搜索方法,比较搜索频段能量与等分能量,修正搜索步长,直至满足等能量分割要求;在已确定分割频段基础上,由式(6)计算各频段谐波频率;根据谐波频率计算各次谐波参数,由式(2)对各次谐波进行时域合成,得出海浪数值仿真波形。整个算法如图3所示。

采用上述算法对频段 $1.5 \sim 8.5\text{ rad/s}$ 进行等能量分割,分割份数为50,得到的分割频段见表1。

在各分割频段上分别计算 ω_{eci} ,从而确定谐波频率,结果见表2。

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4、图5所示。

6 频谱分析

采用Welch法对得到的海浪波形进行频谱估计^[4],以检验

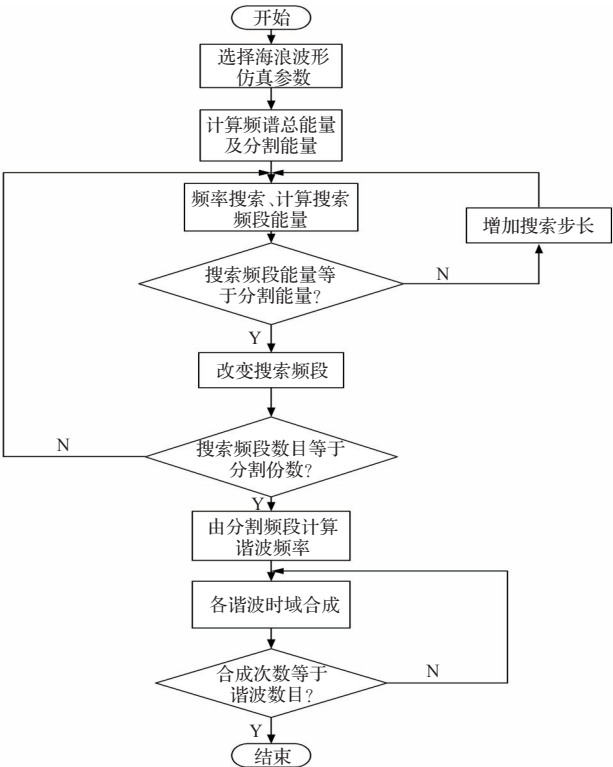


图3 海浪仿真算法流程图

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,分别对海浪谱20等分、35等分和50等分几种情况所产生的海浪仿真波形进行频谱估计,得到结果如图6~图8所示。

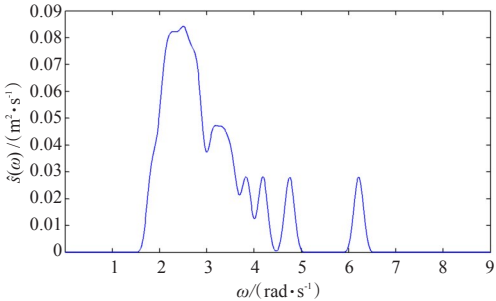


图6 海浪谱20等分仿真波形谱估计

从图中可以看出,仿真海浪频谱大体反映了理想海浪谱形状,如图2所示。随着海浪谱分割频段的细化,仿真海浪频谱越接近理想海浪谱。

设仿真海浪频谱估计为 $\hat{s}(\omega)$,理想海浪谱为 $s(\omega)$,根据

表1 海浪谱等能量分割频段

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
分割频段/(rad·s ⁻¹)	1.5~1.823	1.823~1.913	1.913~1.978	1.978~2.032	2.032~2.080	2.080~2.123	2.123~2.163	2.163~2.201	2.201~2.238	2.238~2.273
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
分割频段/(rad·s ⁻¹)	2.273~2.308	2.308~2.342	2.342~2.376	2.376~2.409	2.409~2.443	2.443~2.476	2.476~2.510	2.510~2.544	2.544~2.579	2.579~2.614
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
分割频段/(rad·s ⁻¹)	2.614~2.649	2.649~2.686	2.686~2.723	2.723~2.761	2.761~2.800	2.800~2.841	2.841~2.883	2.883~2.926	2.926~2.972	2.972~3.019
序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
分割频段/(rad·s ⁻¹)	3.019~3.068	3.068~3.121	3.121~3.176	3.176~3.234	3.234~3.296	3.296~3.363	3.363~3.435	3.435~3.513	3.513~3.598	3.598~3.692
序号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
分割频段/(rad·s ⁻¹)	3.692~3.798	3.798~3.917	3.917~4.053	4.053~4.214	4.214~4.407	4.407~4.648	4.648~4.966	4.966~5.423	5.423~6.195	6.195~8.5

表2 海浪谱各频段谐波频率

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
谐波频率/(rad·s ⁻¹)	1.734	1.871	1.947	2.006	2.056	2.101	2.143	2.182	2.219	2.255
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
谐波频率/(rad·s ⁻¹)	2.290	2.325	2.359	2.393	2.426	2.460	2.493	2.527	2.562	2.596
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
谐波频率/(rad·s ⁻¹)	2.632	2.668	2.704	2.742	2.781	2.821	2.862	2.904	2.949	2.995
序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
谐波频率/(rad·s ⁻¹)	3.043	3.094	3.148	3.204	3.265	3.329	3.398	3.473	3.555	3.644
序号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
谐波频率/(rad·s ⁻¹)	3.744	3.856	3.983	4.131	4.307	4.522	4.799	5.178	5.768	7.056

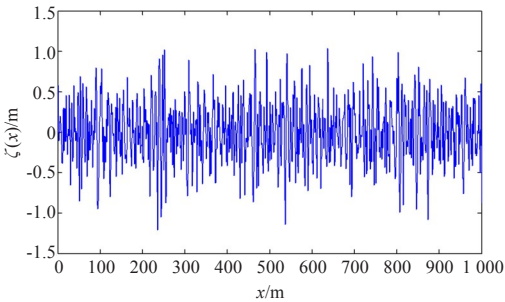


图4 固定时间点海浪仿真波形

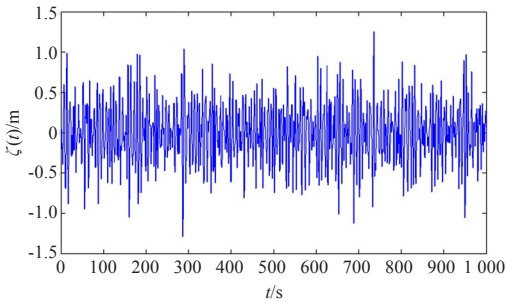


图5 固定空间点海浪仿真波形

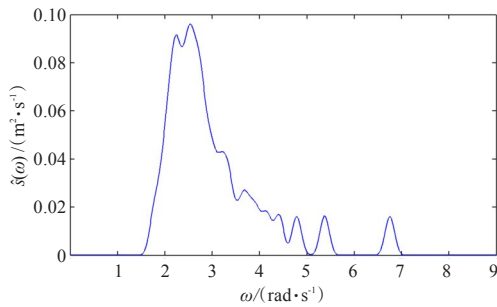


图7 海浪谱35等分仿真波形谱估计

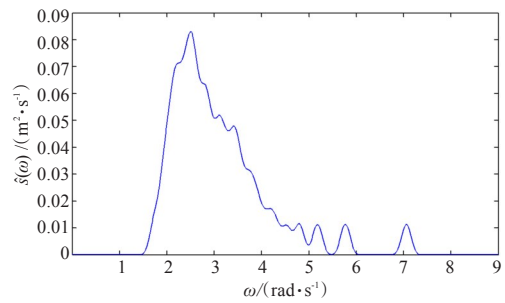


图8 海浪谱50等分仿真波形谱估计

仿真精度估计指标,对海浪谱50等分情况进行计算,得到精度为1.6%,说明得出的海浪波形以高精度满足了仿真要求。

$$\sigma = \frac{\left| \int_{\omega_1}^{\omega_n} (\hat{s}(\omega) - s(\omega)) d\omega \right|}{\int_{\omega_1}^{\omega_n} s(\omega) d\omega} = 1.6\% \quad (9)$$

7 结论

不失一般性,本文描述了基于能量等分法进行海浪数值仿真的过程,首先确定海浪谱,其次进行海浪谱等能量分割,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] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 杨惠珍,康凤举,褚彦军,等.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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 侯学隆,黄启来,沈培志.基于FFT的海浪实时仿真方法[J].计算机工程,2009,35(22):256-259.

(上接153页)

[3] Li S, Zhang J, Huang X, et al. Semantic computation in a Chinese question-answering system[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(6): 933-939.

[4] 车万翔,刘挺,秦兵.基于改进编辑距离的中文相似句子检索[J].高技术通讯,2004,14(7):15-19.

[5] 潘谦红,史忠植.基于属性论的文本相似度计算[J].计算机学报,1999,22(6):651-655.

[6] Chatterjee N. A statistical approach for similarity measurement between sentences for EBMT[C]//Proc of Symposium on Translation Support Systems. [S.l.]: IEEE Press, 1999.

[7] 李彬,刘挺,秦兵,等.基于语义依存的汉语句子相似度计算[J].计算机应用研究,2003,20(12):15-19.

[8] 赵妍妍,秦兵,刘挺,等.基于多特征融合的句子相似度计算[C]//全国第八届计算语言学联合学术会议(JSCL-2005)论文集,2005.

[9] Islam A, Inkpen D. Semantic text similarity using corpus-based word similarity and string similarity[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery Data, 2008, 2(2): 1-25.

[10] 邱明.语义相似性度量及其在设计管理系统中的应用[D].杭州:浙江大学,2006.

[11] 宋玲,郭家义,张冬梅,等.概念与文档的语义相似度计算[J].计算机工程与应用,2008,44(35):163-167.

[12] Cross V. Fuzzy semantic distance measures between ontological concepts[C]//IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information, 2004: 635-640.

[13] Bulskov H, Knappe R, Andreasen T. On measuring similarity for conceptual querying[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Flexible Query Answering Systems. [S.l.]: Springer-Verlag, 2002: 100-111.

[14] Song Ling, Ma Jun, Lei Jingsheng, et al. A fuzzy approach for measuring the semantic similarity between words in WordNet[J]. Journal of Information & Computational Science, 2009, 6(3): 1673-1680.

[15] Li Y, Mclean D, Bandar Z A, et al. Sentence similarity based on semantic nets and corpus statistics[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(8): 1138-1150.