

# 由模拟波面分析双峰谱型海浪的统计特征

潘玉萍<sup>1, 2</sup>, 葛苏放<sup>1</sup>, 沙文钰<sup>3</sup>, 申双和<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学, 南京 210044; 2. 南京军区空军气象中心, 南京 210018; 3. 解放军理工大学气象学院军事海洋系, 南京 211101)

**摘要:** 采用目前国际上最新的随机波分析方法, 由协方差矩阵的循环嵌套技术, 对美国国家浮标 44008 站 2002 年 6 月一典型的双峰海浪谱资料进行谱分析。以实测平均谱为靶谱, 对随机波面进行模拟。得到模拟波面估计谱与实测谱极为相近, 谱峰及谱峰频率都基本一致。说明利用模拟波面研究海浪具有代表性, 它可以反映实测海浪的特征。利用实测海浪谱密度, 统计波特征量的周期概率分布, 得到理论周期概率密度与估计周期概率密度分布相符较好, 且与模拟波面的波周期分布也较好的一致。利用 Longuet-Higgins(1983)模型计算了波高-周期联合概率密度分布。得到变换高斯过程计算的波高与周期联合分布与实测情况基本相同, 更好地描述了波高-周期联合概率密度分布。

**关键字:** 双峰型海浪谱; 循环嵌套技术; 模拟波面; 波高-周期联合密度分布

**中图分类号:** P731.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4193(2009)04-0013-09

## 1 引言

海浪是一种复杂的三维随机运动, 它是对海岸工程、海洋工程起控制作用的环境条件, 随着海工建设向深水、大型、复杂化发展, 人们对海浪的统计特征, 频域特征和方向谱等要求更全面深入地了解。海上的波浪观测资料统计表明, 纯风浪和纯涌浪的出现机会比较少, 大部分是以混合浪形式出现。混合浪是指海面上同时存在风浪和涌浪的情形, 或者当风向骤然改变后的浪况。混合浪的频谱结构非常复杂、多样化, 除少数情况频谱仍呈现单峰外, 多数为双峰或多峰。自 20 世纪 80 年代以来, 海洋学者对双峰谱型海浪作了大量的观测和研究<sup>[1-10]</sup>。隋世峰<sup>[1]</sup>用规则的单峰海浪频谱表示混合浪的频谱。黄培基等<sup>[2-3]</sup>提出了一个含 6 参量的双峰海浪频谱, 用优化方法来确定这些参数, 并对不同海区收集的实测双峰谱型海浪资料进行统计分析, 讨论了双

峰谱型波高和周期的统计分布及其联合概率密度分布。管长龙等<sup>[4]</sup>解释了以往双峰海浪频谱在高频部分过高估计的问题, 并提出了一种叠代算法予以解决。本文针对双峰谱型海浪过程资料, 采用目前国际上最先进的随机波分析方法, 根据协方差矩阵的循环嵌套技术<sup>[11]</sup>, 快速、精确模拟高斯过程, 研究双峰型海浪波高和周期的联合概率密度分布, 这在海岸工程、海洋工程的应用中都具有重要意义。

## 2 方法与资料

### 2.1 WAFO 方法

WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) 是 Matlab 中第三代对随机波及随机荷载模拟与统计分析的工具箱, 它能高效准确的模拟和分析任意谱型的随机波, 计算观测谱与理论谱的波的特征与统计分布。本文采用的是其最新版本 (V2.0.02), WAFO 包含许多最新的数值计算方

收稿日期: 2008-06-10; 修订日期: 2009-04-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40775016)。

作者简介: 潘玉萍 (1973—), 女, 黑龙江省北安市人, 博士, 从事物理海洋学与海气相互作用方面研究。E-mail: pypnanjing@163.com

法,在计算速度与准确度方面有了显著的提高,其模块化的结构,可方便使用者针对所研究的问题自行调用或改写程序。在算法上 WAFO 还包含了许多最新的研究成果,使其能够解决大量复杂的数理问题。如 Lindgren<sup>[12]</sup> 和 Rychlik<sup>[13]</sup> 利用近似回归算法由随机波模式计算随机波特征分布;Rychlik<sup>[14]</sup> 利用变换高斯过程实现对海洋波动的模拟与统计分析;Podgórski 等<sup>[15]</sup> 2000 年实现对不规则波动外观特征的精确模拟;Brodtkorb 等<sup>[16]</sup> 1999 年利用重组资料得到波高与周期的联合概率密度分布等。本文主要应用 Dietrich 和 Newsam<sup>[11]</sup> 提出的协方差矩阵的循环嵌套方法,快速、精确模拟美国国家浮标 44008 站 2002 年 6 月一典型双峰谱型的混合浪过程。通过对混合浪过程的模拟研究,进一步验证循环嵌套方法是实现随机波面模拟的行之有效的方法,WAFO 是海洋工程与随机过程统计分析的高效、准确的工具。

## 2.2 变换高斯过程

众所周知,高斯过程能很好的描述诸如海浪这种随机过程,假定波面服从高斯分布,我们可以很容易获得波的频谱密度以及波的各种特征分布,并且利用高斯分布我们可以准确的得到波长及振幅的概率密度分布。但是,对于波高的概率密度分布,高斯过程则很难得到满意的结果。针对该情况 Rychlik<sup>[14]</sup> 做了一简单的变换,这种变换后的高斯过程能够很好地近似波高的密度分布。现简述如下:

如果海浪波动模型  $x(t)$  用随机过程  $X(t)$  表示,且  $X(t)$  是高斯分布随机过程  $\tilde{X}(t)$  的函数,即

$$X(t) = G(\tilde{X}(t)), \quad (1)$$

其中,  $G$  是正定的连续可微函数。随机过程  $X(t)$  的海浪谱用  $S$  表示,  $\tilde{X}(t)$  的海浪谱用  $\tilde{S}$  表示。  $\tilde{X}(t)$  总是满足数学期望为 0, 方差为 1, 即  $\tilde{S}$  的一阶谱矩为 1。由式(1)可知,随机过程  $X(t)$  是对一系列的高斯分布过程作简单的运算,只要  $\tilde{X}(t)$  的波高、波谷、振幅与波长的分布已知,对变换函数  $G$  求逆变化用  $g$  表示,  $g = G^{-1}$ , 相应的  $X(t)$  的波高、波谷、振幅与波长的分布即可获得。利用上述关系可得  $\tilde{x} = g(x(t))$ , 其中,  $x(t)$  为实际海面波动,  $\tilde{x}$  为变换后海面波动,  $\tilde{x}(t)$  符合高斯分布。选取变换函数  $g$  有多种方法,最简单的是直接对资料进行参数或非参数化平均估计变换函数,或者基于非线性波近似理论,借

鉴文献中提出的参数化函数,本文利用的是 Winterstein 给出的变换函数,  $g$  是单调的 3 次 Hermite 多项式形式<sup>[17]</sup>。这两种方法都是利用  $X(t)$  的谱矩计算变换函数,随机过程  $X(t)$  的谱矩可由站点资料、实验室观测资料或者借助于物理模式得到。

## 2.3 循环嵌套方法

以往的研究中,海浪模拟主要是基于:(1)功率谱密度方法,这种方法较为繁琐,且不宜确定海浪的振幅和频率。(2)能量等分法,是基于海浪的功率谱密度,对频率采用等能量分割来模拟海浪,只要分割的频率适中,就能较准确地按给定的海浪谱密度模拟海浪。不足之处是模拟海浪的精度取决于频率分割的程度,因此,若要得到较为准确的海浪模型,就需要将频率分割得密集些,使计算量增大。(3)有理谱法,它是基于有理谱理论模拟海浪,便于用现代控制理论的方法完成控制系统在海浪干扰情况下的最优控制的设计。不足之处是,认为海浪是平稳的随机过程,且采用有理谱逼近海浪功率谱,有一定的误差。本文采用的是协方差矩阵的循环嵌套方法,该方法最初由 Davies 与 Harte 提出, Dietrich 与 Newsam, Tilmann 等<sup>[18]</sup> 对该方法进一步改进,使其通过快速傅氏变换方法实现对高斯过程或变换高斯过程快速、准确的模拟。

假定实测资料  $U_0, U_1, \dots, U_{M-1}$  为零平均值平稳高斯过程  $\{U_t\}$  的一次现实,协方差序列为  $\{S_{U,\tau}\}$ , 即

$$S_{U,\tau} \equiv \text{cov}\{U_t, U_{t+\tau}\} = E\{U_t, U_{t+\tau}\}, \quad (2)$$

$E\{U_t\}$  为随机变量  $U_t$  的数学期望。由协方差序列  $\{S_{U,\tau}\}$ , 可以计算谱密度函数  $S_k$ :

$$S_k \equiv \sum_{\tau=0}^M S_{U,\tau} e^{-i2\pi f_k \tau} + \sum_{\tau=M+1}^{2M-1} S_{U,2M-\tau} e^{-i2\pi f_k \tau}, \quad k = 0, 1, \dots, M \quad (3)$$

其中,  $f_k \equiv k/2M$ 。  $M+1$  值是对下述  $2M$  时间序列的离散傅氏变换得来。

$$S_{U,0}, S_{U,1}, \dots, S_{U,M-2}, S_{U,M-1}, S_{U,M}, S_{U,M-1}, S_{U,M-2}, \dots, S_{U,1}, S_{U,0} \quad (4)$$

循环嵌套方法需要  $S_k \geq 0, k = 0, 1, \dots, M$ , 以保证过程的平稳性。假定  $S_k \geq 0, Z_0, Z_1, \dots, Z_{2M-1}$  代表  $2M$  个独立、标准高斯过程随机变量(即每个  $Z_k$  都具有零均值及单位方差), 得到如下复数序列:

$$v_k \equiv \begin{cases} Z_0 \sqrt{2MS_0}, & k = 0; \\ (Z_{2k-1} + iZ_{2k}) \sqrt{MS_k}, & 1 \leq k \leq M; \\ Z_{2M-1} \sqrt{2MS_M}, & k = M; \\ v_{2M-k}^*, & M < k \leq 2M-1; \end{cases} \quad (5)$$

然后,我们通过离散傅氏逆变换导出序列实值。

$$V_t = \frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{2M-1} v_k e^{i2\pi f_k t}, \quad t = 0, 1, \dots, 2M-1, \quad (6)$$

构建的矢量  $V_0, V_1, \dots, V_{M-1}$  与矢量  $U$  具有相同的多元高斯分布。因此我们可以将  $V_t$  序列看作是  $U_0, U_1, \dots, U_{M-1}$  的一次现实。具体详见文献[11]。

2.4 资料

本文采用有代表性的美国国家浮标站(44008) 2002 年 6 月 5 日 12 时至 6 月 6 日 03 时的表面气象资料及海浪谱资料进行研究。所选期间风速在 6~9 m/s 之间,变化趋势较平缓,只是在 6 月 5 日 16 时之后风速略增加至 8.5 m/s 左右,风向以偏南风为主;海平面气压在 6 月 5 日 16 时之后稍微下降,但变化不大,在 1 014~1 021 hPa 之间;有效波高在 0.95~1.63 m 之间平稳升高,平均有效波高为 1.3 m;有效波周期在 6 月 5 日 16 时略微下降,由最初的 9.09 s 下降到 4.35 s,平均有效波周期为 6.3 s。

图 1 为文中所选期间的部分海浪谱的实测资料,由图可以清楚地看出海浪谱的变化过程。如图

1a,6 月 3 日至 6 月 5 日风速一直在 2~4 m/s 之间,至 5 日 10 时,在风速为 5.9 m/s 的微风条件下,海浪谱形为单峰的涌浪谱;随着风速的缓慢增加超过了 6 m/s,至 6 月 5 日 13 时,海浪谱形变为双峰的以涌浪为主的混合浪谱;随着风速的继续缓慢增加,混合浪中风浪部分迅速的成长,如图 6 月 5 日 14 时海浪谱形;至 6 月 5 日 16 时,风速为 6.3 m/s,混合浪中风浪和涌浪强度相当,但涌浪能量略超过风浪能量。如图 1b,6 月 5 日 17 时,风速增至 7.9 m/s,混合浪中风浪和涌浪强度相当;6 月 5 日 18 时,风速为 8.8 m/s,混合浪中风浪和涌浪强度相当,但风浪能量已明显超过涌浪能量;随着风速继续升高至 9.3 m/s,至 6 月 5 日 21 时,海浪谱形变为以风浪为主的混合浪,至 6 月 6 日 02 时,涌浪部分已很小,基本转化为单峰形式风浪谱。文中选择 6 月 5 日 13 时的海浪谱代表为以涌浪为主的混合浪,6 月 5 日 16 时的海浪谱代表为风浪和涌浪强度相当的混合浪,6 月 5 日 21 时的海浪谱代表为以风浪为主的混合浪,分别研究这 3 种形式的混合浪及其统计特征。

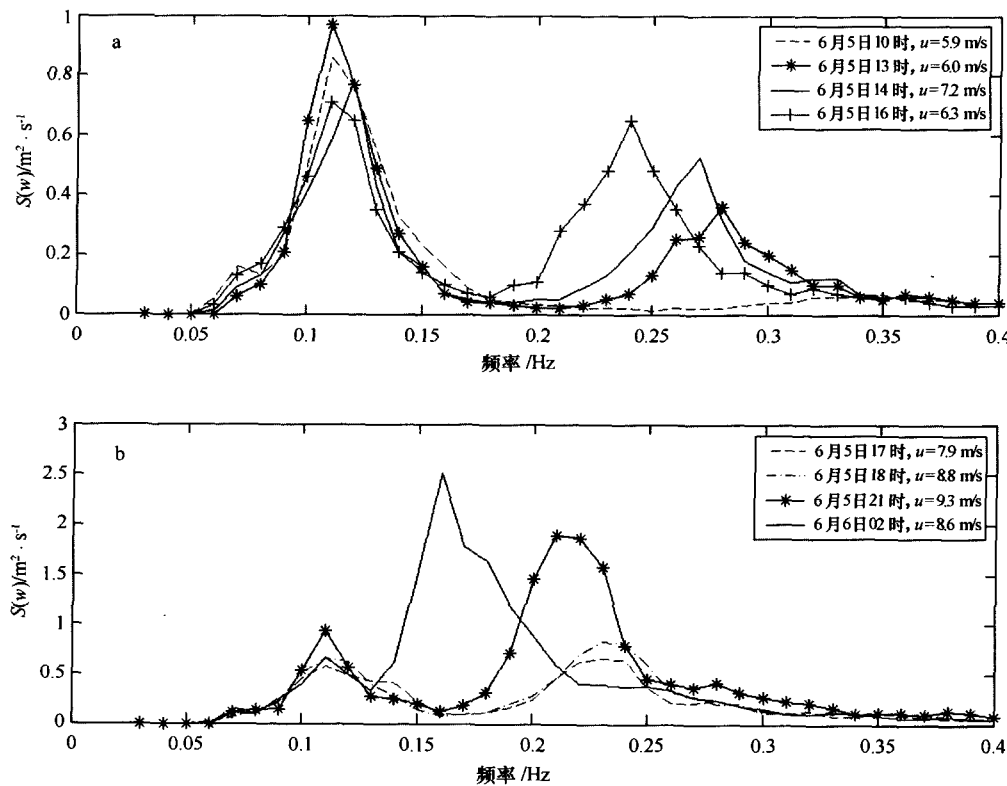


图 1 混合浪的成长变化

3 随机波面模拟

文中采用协方差矩阵的循环嵌套技术,以实测谱为靶谱,快速、精确模拟混合浪随机波面。取样时间为 200 s,取样频率 10 Hz,如图 2。图 2a—c 分别

为以涌浪为主的混合浪波面,风浪和涌浪强度相当的混合浪波面,以及以风浪为主的混合浪波面。利用实测谱模拟波面资料进行谱估计,记录时间为 20 min,取样间隔 0.25 s,与原实测谱比较,如图 3。由图 3 可知,模拟波面估计谱与实测谱谱形极为相

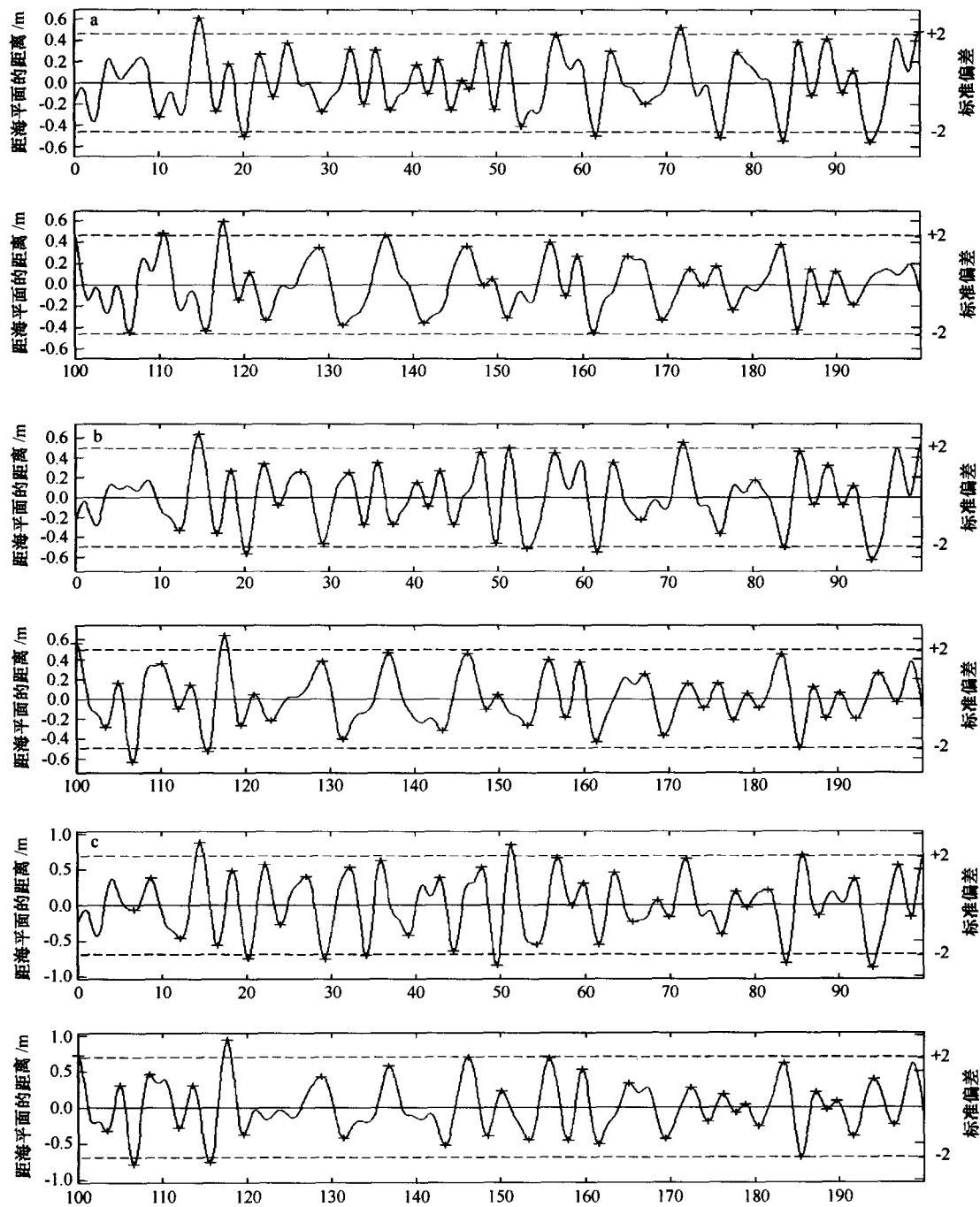


图 2 由实测谱模拟的混合浪波面  
a. 以涌浪为主, b. 风浪和涌浪强度相当, c. 以风浪为主的混合浪波面

近,在以涌浪为主的混合浪谱中谱峰频率及风浪部分谱峰都非常一致,只不过涌浪部分实测谱峰略高于模拟谱峰;在风浪和涌浪强度相当的混合浪谱中,涌浪部分谱峰频率模拟谱与实测谱相同,但谱峰略低于实测谱,风浪部分谱峰频率模拟谱略小于实测谱,而谱峰略高于实测谱;在以风浪为主的混合浪谱

中,涌浪谱部分峰频率模拟谱与实测谱相近,但谱峰略低于实测谱,风浪部分谱峰频率模拟谱略大于实测谱,谱峰明显高于实测谱;总体来说,模拟谱能较好的代表实测谱,只不过实测谱的谱形更光滑。因此利用模拟波面研究双峰谱型的混合浪是可行的,它可以反映实测海浪的特征。

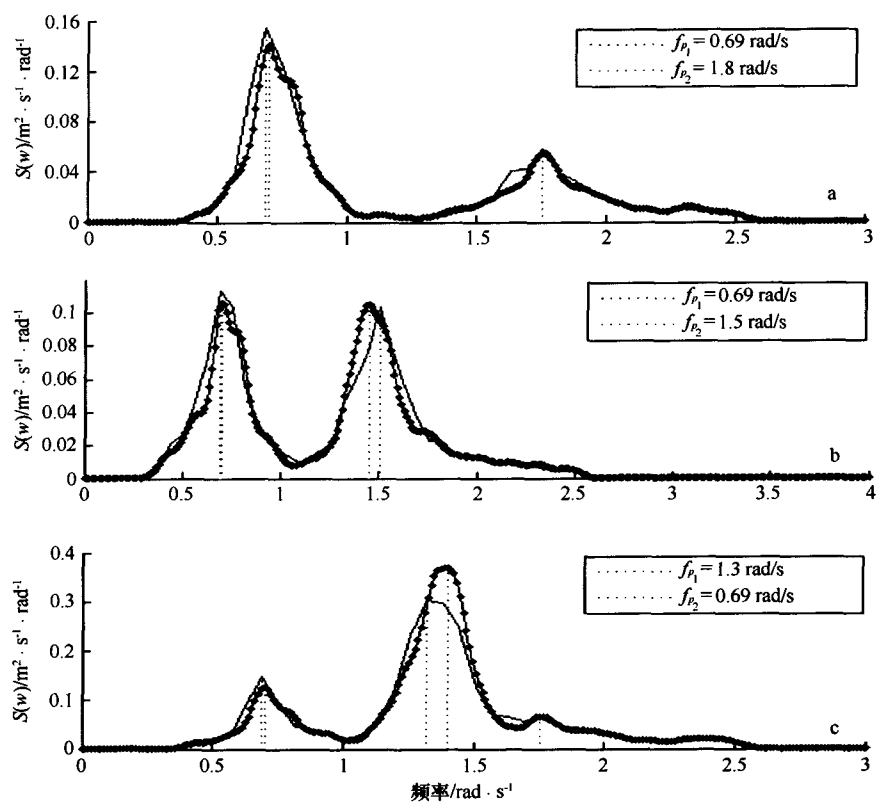


图 3 由模拟波面得到的估计谱  
记录时间 20 min, 取样间隔 0.25 s, 细实线为实测谱, 粗点划线为模拟谱。  
a. 以涌浪为主, b. 风浪和涌浪强度相当, c. 以风浪为主的混合浪波面

4 模拟波面的统计分析

4.1 极值波

一般情况下,在讨论随机波统计特征之前,首先要对实测波面资料进行客观分析,除去波面资料中一些不真实的信息,再对波面资料进行重组,分析波面的各种统计特征。采用如下经验标准:

- (1)  $x'(t) < 5 \text{ m/s}$ , 高斯波动的上升速度很少会超过 5 m/s;
- (2)  $x''(t) < 4.905 \text{ m/s}^2$ , 加速度小于 Stokes 波的最大加速度;

如果数据信号在某个时间段内为常数,那么海

浪谱的高频部分就会增加。

找到这些错误信息后,就要去掉这些错误信息或趋势,通常这种趋势是由潮或大气压的变化而引起的波面变化,再找出单个极值波,或是波高最大,或是波陡最大,记录极值波序号,显示与分析极值波,如图 4。

图 4 是以涌浪为主的模拟波面中的极值波。由图可知,模拟波面资料中 75 号波波高与波陡均最大。最大波高为 0.878 6 m,最大波陡为 0.906 0。对于实测波面资料,我们往往要考虑图中的极值波是否是真正意义上的极值波,因此要

对资料进行检验。首先我们对资料进行重组,假设原序列中的极值波各点资料未知,根据其余的资料拟和变换高斯过程,模拟得到极值波各点资料。比较实际观测资料与重组资料及其置信区间,以验证极值波的存在。如图 4b,实线为重组的

极值波,“+”号为模拟波面中的极值波,虚线为重组波的置信区间。由于文中缺少波面实测资料,而使用模拟波面资料进行研究,因此可以看到重组的极值波略低于模拟波面中的极值波,但对于实测波面资料,可能会有较大差异。

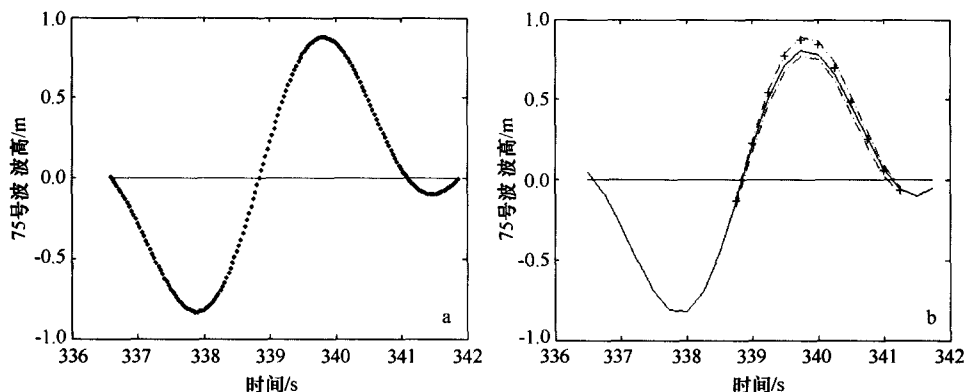


图 4 模拟波面资料中的极值波

a. 波高、波陡最大, b. 重组的极值波(实线)。“+”号为模拟波面中的极值波,虚线为重组波的置信区间

## 4.2 周期的概率分布

根据实测的海浪谱密度,统计波特征量的周期概率分布。本文使用的周期为波峰周期,即上跨零点至下跨零点间的时间长度,为半周期,这种定义的周期便于计算。

周期的理论分布采用 Longuet-Higgins<sup>[19]</sup>在线性和窄谱条件下导出的公式:

$$f(\tau) = \frac{v^2}{2[v^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}}, \quad (7)$$

式中,  $\tau = T/\bar{T}$ ;  $v^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1$ 。上式在周期为零时,其概率密度值不为零,可能是由窄谱假定所致,但上述

理论周期概率密度在一定的程度内与观测符合较好。

波周期概率密度分布如图 5,其中的柱状图是由模拟波面得到的波周期。由实测谱计算的周期概率密度称为理论密度,由模拟波面的估计谱计算的周期概率密度称为估计密度,由图 5 可知,实测理论周期概率密度分布与估计周期概率密度分布相符较好,且与模拟波面的波周期分布也较好的一致,尤其是以涌浪为主和以风浪为主的混合浪情况。由图 a 可知,以涌浪为主的混合浪其周期分布也呈双峰形式;图 b、图 c 中风浪和涌浪强度相当及以风浪为主的混合浪,周期分布呈单峰形式。

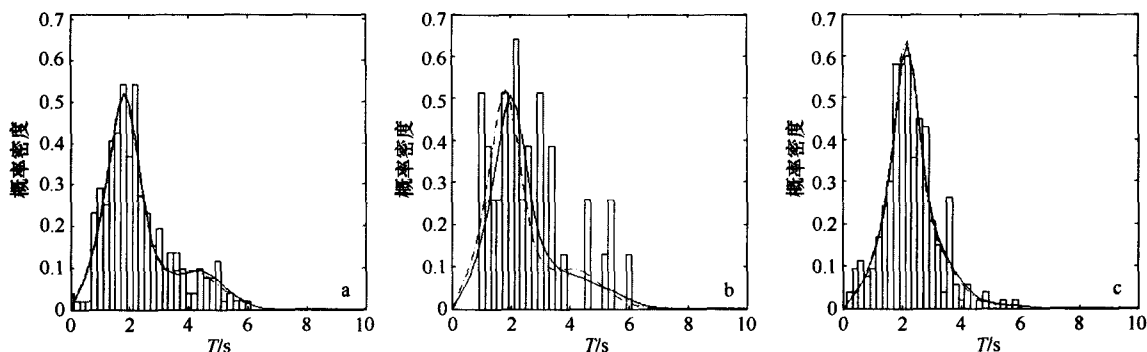


图 5 理论周期概率密度与估计密度

实线为理论概率密度分布,点划线为估计概率密度分布,柱状图为由模拟波面得到的波周期分布。

a. 涌浪为主, b. 风浪和涌浪强度相当, c. 风浪为主

### 4.3 波高-周期的联合分布

根据实测的海浪谱密度,海浪波高与周期的联合分布,采用 Longuet-Higgins(1983)模型<sup>[20]</sup>进行统计分析。无因次波高  $h = \rho / (2m_0)^{1/2} = H / H_{ms}$  与无因次周期  $t = T / \bar{T}$  非对称性的联合分布为:

$$f(h, t) = \frac{2}{\pi^{1/2} v} \cdot \frac{h^2}{t^2} \exp\{-h^2[1 + (1 - \frac{1}{t})^2 / v^2]\} L(v), \quad (8)$$

式中,  $L(v)$  为正则因子,  $L(v) = 2/[1 + (1 + v^2)^{1/2}]$ , 当  $v$  值很小时,  $L(v) = 1 + v^2/4$ ;  $\bar{T} = 2\pi m_0 / m_1$ 。

波高-周期联合概率密度分布如图 6, 其中, 统计区间间隔为  $\Delta H = 0.06 \text{ m}$ ,  $\Delta T = 0.15 \text{ s}$ 。图中给出了概率密度为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.95 和 0.99 的等概率密度曲线。图 6a—c 是正态高斯过程下的概率密度分布; 图 6d—f 是变换高斯过程下的概率密度分布。由图可以看出, 两种情形下波高一周期联合概率密度分布图形在外观上很相似。图中在波高  $H < 0.3$  的范围, 其波高与周期联合分布等概率密度线均呈向左下方漂移的趋势, 联合概

率密度最大值也向坐标原点迁移。显著高概率密度区的变化范围也大致相同, 分别为  $1.740 \leq T \leq 2.532$ ,  $0.230 \leq H \leq 0.428$  (实测),  $1.701 \leq T \leq 2.319$ ,  $0.223 \leq H \leq 0.413$  (模拟, 图 6a);  $1.972 \leq T \leq 2.630$ ,  $0.281 \leq H \leq 0.457$  (实测),  $1.701 \leq T \leq 2.473$ ,  $0.223 \leq H \leq 0.413$  (模拟, 图 6b);  $2.044 \leq T \leq 2.358$ ,  $0.420 \leq H \leq 0.682$  (实测),  $2.002 \leq T \leq 2.309$ ,  $0.414 \leq H \leq 0.673$  (模拟, 图 6c);  $1.899 \leq T \leq 2.373$ ,  $0.243 \leq H \leq 0.417$  (实测),  $1.701 \leq T \leq 2.319$ ,  $0.243 \leq H \leq 0.417$  (模拟, 图 6d);  $1.972 \leq T \leq 2.465$ ,  $0.244 \leq H \leq 0.418$  (实测),  $1.701 \leq T \leq 2.319$ ,  $0.244 \leq H \leq 0.418$  (模拟, 图 6e);  $2.044 \leq T \leq 2.358$ ,  $0.256 \leq H \leq 0.439$  (实测),  $2.001 \leq T \leq 2.309$ ,  $0.256 \leq H \leq 0.439$  (模拟, 图 6f)。只不过在变换高斯过程情况下, 大波对应的等概率密度的波高分布偏高。由图也可以看出, 变换高斯过程计算的混合浪各种情况下的波高-周期联合概率密度分布略高于高斯过程下的概率密度分布, 且与实测的波高一周期联合概率密度分布更一致。说明利用变换高斯过程计算模拟波面的统计特征更接近实际情况。

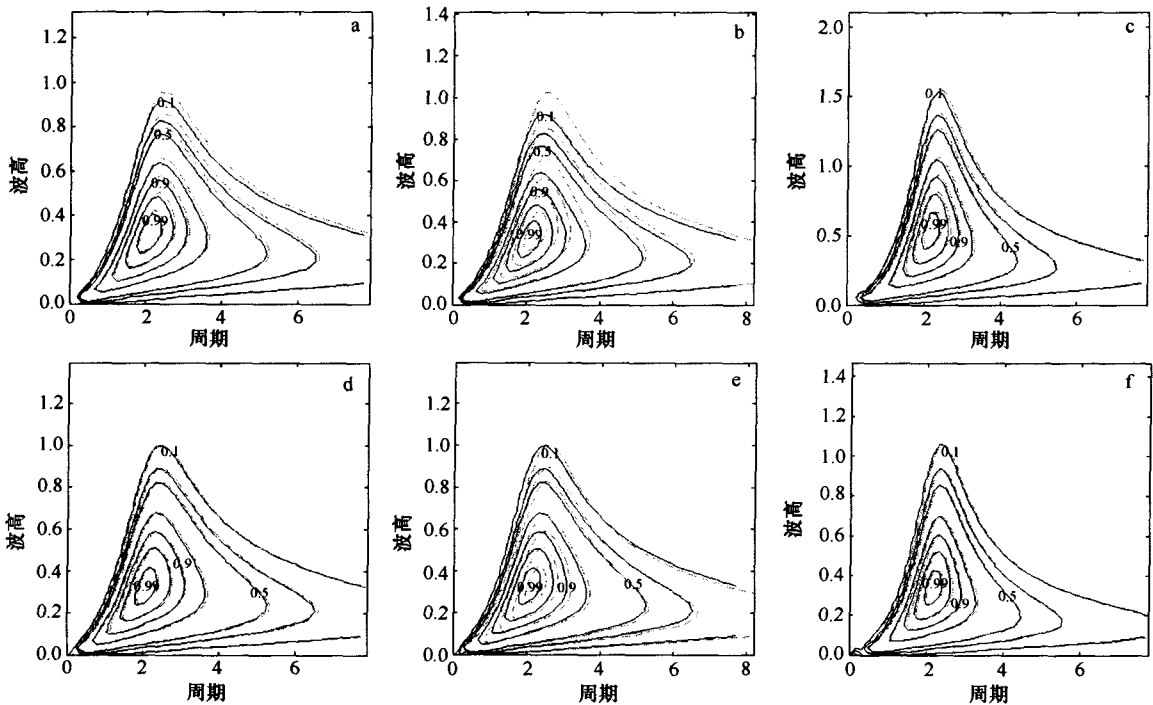


图 6 波高-周期联合概率密度分布的 Longuet-Higgins(1983)模型(虚线为实测的波高-周期联合分布)

图 a—c 为线性高斯过程, 图 d—f 为变换高斯过程。a, d. 涌浪为主; b, e. 风浪和涌浪强度相当; c, f. 风浪为主

## 5 结论

本文采用目前国际上最新的随机波分析方法,由协方差矩阵的循环嵌套技术,对美国国家浮标 44008 站 2002 年 6 月一典型的双峰海浪谱资料进行谱分析。以实测海浪谱为靶谱,对随机波面进行模拟。得到以下结论:

(1)由模拟波面得到的估计谱与实测谱极为相近,谱峰及谱峰频率都基本一致。说明利用模拟波面研究海浪具有代表性,它可以反映实测海浪的特征。

(2)对实测波面资料进行客观分析,去除波面资料中一些不真实的信息,再对波面资料进行重组,提高波面资料的可靠性。

(3)由实测海浪谱密度,统计波特征量的周期概率分布,得到理论周期概率密度分布与估计周期概率密度分布相符较好,且与模拟波面的波周期分布也较好的一致。

(4)利用 Longuet-Higgins(1983)模型计算波高-周期联合概率密度分布,得到变换高斯过程计算的波高与周期联合分布与实测情况基本相同,更好地描述了波高一周期联合概率密度分布。

## 参考文献:

- [1] 隋世峰. 规则海浪谱和海浪谱的叠加分析方法 [J]. 热带海洋, 1984, 3(3): 1—9.
- [2] 黄培基, 胡泽建. 胶州湾双峰海浪频谱的表示 [J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 531—537.
- [3] 黄培基, 陈雪英, 胡泽建. 双峰谱型海浪的统计性质 [J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 1—9.
- [4] 管长龙, 张大错, 关世义. 双峰海浪频谱的一种表示 [J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(2): 151—156.
- [5] 赵栋梁, 管长龙, 吴克俭, 等. 海浪方向谱估计方法的比较 [J]. 海洋学报, 1999, 21(3): 119—125.
- [6] 管长龙, 文圣常, 张大错. 分析海浪方向谱的扩展本征矢方法: I. 方法的导出 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 58—62.
- [7] 管长龙, 文圣常, 张大错. 分析海浪方向谱的扩展本征矢方法: II. 方法的验证、比较和应用 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(3): 241—246.
- [8] 孙孚. 海浪周期与波高的联合分布 [J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 10—15.
- [9] 丁平兴, 孙孚, 孔亚珍, 等. 风浪统计性质的实验研究: I. 波高与周期的联合统计分布 [J]. 海洋学报, 1995, 17(5): 1—9.
- [10] 黎满球, 陈俊昌. 由模拟波面统计分析波高-周期联合分布 [J]. 热带海洋, 1996, 15(3): 36—43.
- [11] DIETRICH C R, NEWSAM G N. Fast and exact simulation of stationary Gaussian process through circulant embedding of the Covariance matrix [J]. SIAM J Sci Comp, 1997, 18: 1088—1107.
- [12] LINDGREN G, RYCHLIK I. Slepian models and regression approximations in crossings and extreme value theory [J]. International Statistical Review, 1991, 59: 195—225.
- [13] RYCHLIK I, LINDGREN G. CROSSREG—A computer package for extreme value and wave analysis, with reliability applications [J]. Probability in the Engineering and Information Sciences, 1993, 7: 125—148.
- [14] RYCHLIK I, JOHANNESSON P, LEADBETTER M R. Modelling and statistical analysis of ocean-wave data using transformed Gaussian processes [J]. Marine Structures, 1997, 10: 13—47.
- [15] Podgórski K, RYCHLIK I, MACHADO U E B. Exact distributions for apparent waves in Irregular Seas [J]. Ocean Engng, 2000, 27(9): 979—1016.
- [16] BRODTKORB P A, MYRHAUG D, RUE H. Joint distribution of wave height and wave crest velocity from reconstructed data [G]// Proceedings of the 9th ISOPE Conference, Brest, 1999, Vol. III: 66—73.
- [17] WINTERSTEIN S R, UDE T C, KLEIVEN G. Springing and slow drift responses: predicted extremes and fatigue vs. simulation [G]// Proc. 7th International Behaviour of Offshore Structures, (BOSS) 3. Massachusetts Institute of Technology, 1994: 1—15.
- [18] TILMANN Gneiting, HANA Sevckova, DONALD B. Fast and exact simulation of large Gaussian lattice systems in R2: Exploring the limits [R]. Department of Statistics University of Washington, 2005.
- [19] LONGUET-HIGGINS M S. On the joint distribution wave periods and amplitudes of seawaves [J]. J Geophys Res, 1975, 80: 2 688—2 694.
- [20] LONGUET-HIGGINS M S. On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field [J]. Proc R Soc Lond, 1983, A389: 241—258.



## An analysis on the statistical characteristic of sea waves with double-peaked spectrum

PAN Yu-ping<sup>1,2</sup>, GE Su-fang<sup>1</sup>, SHA Wen-yu<sup>3</sup>, SHEN Shuang-he<sup>1</sup>

(1. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*; 2. *The Air Force Meteorological Center of the Nanjing Military Region, Nanjing 210018, China*; 3. *Military Marine Department, Meteorological School of the PLA University of Science and Technology, Nanjing 21110, China*)

**Abstract:** A typical double-peaked wave spectrum data, collected at the American National Data Buoy 44008 from June, 2002. Using WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) method, it represents the latest developments. Taking the measured spectrum as the target spectrum, fast and exact simulate stationary Gaussian process through circulate embedding of the Covariance matrix. We find the estimate spectrum is very closing the measured spectrum, and peak frequency almost same. It is a feasible method based on simulated wave surface, which can reflect the wave characteristics. Using observed wave spectrum data, we analyze sea wave characteristics. We can see that the theoretical density and the estimated density are in good agreement with the original spectrum. Using Longuet-Higgins(1983) model, we calculate joint pdf of crest height and crest period. We conclude that joint probability density function of crest height and crest period calculated on the transform Gaussian sea is very closing the joint pdf of crest height and crest period derived by the measured data.

**Key words:** double-peaked wave spectrum; circulate embedding method; simulated wave surface; joint pdf of crest height and crest period