

波面位移非对称性对风浪成长状态的依赖性

葛 勇¹, 宋金宝², 田纪伟¹

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院物理海洋系, 山东 青岛 266003 ;2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要 :以二阶随机波动理论为基础,研究了刻画波面位移非对称性的偏度参量 λ_3 对风浪成长参量(反波龄 ω 和无因次风区 χ)的依赖性,得到了 λ_3 与 ω 和 λ_3 与 χ 的近似解析关系式,并利用实验室水槽风浪成长实验的实测数据对这些关系式进行了检验。

关键词 :偏度;反波龄;无因次风区

中图分类号 :P333.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-3096(2005)02-0049-04

大量的观测数据表明,风浪的峰谷不对称性使得波面起伏统计分布明显地偏离线性理论所描述的高斯分布。偏度是最为常用的用来描述波面位移非高斯特性,特别是波形峰谷不对称性的一个无因次参量,该参量与风浪成长参量的关系对合理地解释海面微波散射、波浪遥感信息提取和海洋模式中风浪的参数化问题等具有重要的意义。尽管许多作者研究了波面位移的非高斯统计特性(如,Longuet-Higgins^[1]; Huang and Long^[2]; Sun and Ding^[3]; Song^[4]等),但这些研究均未给出一个简单而实用的波面位移偏度与风浪成长参量的关系式。作者在 Song 等人^[4]研究工作的基础上,导出了波面位移偏度与风浪无因次成长参量(反波龄和无因次风区)的近似解析关系式,并用吕红民等^[5]由实验室风浪水

槽得到的实测数据对这些关系式进行了检验。

1 波面位移非对称性与风浪成长参量的关系

波面起伏记录 $\eta(t)$ 的非对称特性通常用它的三阶统计矩(偏度 λ_3)来描述。偏度定义为:

$$\lambda_3 = \frac{(\eta(t) - \bar{\eta}(t))^3}{\sigma^3} \quad (1)$$

这里 $\bar{\eta}(t)$ 代表统计平均。

最近, Song 等^[4]在二阶随机波动理论近似下得到了由海浪谱直接计算 λ_3 的公式:

$$\lambda_3 = 6D \quad (2)$$

其中:

$$D = \frac{1}{E^{3/2}} \iint F(k, k', \theta, \theta') k k' \varphi(k, \theta) \varphi(k', \theta') dk dk' d\theta d\theta' \quad (3)$$

$$F(k, k', \theta, \theta') = \frac{(\sqrt{R} - \sqrt{R'})D^- + (\sqrt{R} + \sqrt{R'})D^+ - 2k \cdot k'}{4\sqrt{RR'}} + \frac{1}{2}(R + R') \quad (4)$$

$$E = \iint \kappa \varphi(\kappa, \theta) d\kappa d\theta \quad (5)$$

收稿日期:2003-11-17;修回日期:2004-04-08

基金项目:国家863计划资助项目(2001AA633070)

作者简介:葛勇(1978-),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向:物理海洋学,电话:0532-2898516, E-mail: geyong@hotmail.com

$$D^-(\overline{\kappa\kappa'})_h = \frac{\sqrt{R'}(\kappa^2 - R^2) - \sqrt{R}(\kappa'^2 - R'^2) + 2\sqrt{R} - \sqrt{R'} \left(\overline{\kappa\kappa'} + RR' \right)}{(\sqrt{R} - \sqrt{R'})^2 - |\overline{\kappa\kappa'}| \tanh |\overline{\kappa\kappa'}| h} \quad (6)$$

$$D^+(\overline{\kappa\kappa'})_h = \frac{\sqrt{R'}(\kappa^2 - R^2) + \sqrt{R}(\kappa'^2 - R'^2) + 2\sqrt{R} + \sqrt{R'} \left(\overline{\kappa\kappa'} - RR' \right)}{(\sqrt{R} + \sqrt{R'})^2 - |\overline{\kappa\kappa'}| \tanh |\overline{\kappa\kappa'}| h} \quad (7)$$

$$R = \kappa \tanh \kappa h, R' = \kappa' \tanh \kappa' h, \overline{\kappa\kappa} = (\kappa \cos \vartheta, \kappa \sin \vartheta), \overline{\kappa'\kappa'} = (\kappa' \cos \vartheta', \kappa' \sin \vartheta') \quad (8)$$

这样,我们通过选取适当的海浪谱,由方程(2)便可直接计算偏度 λ_3 。为此,我们选用 JONSWAP 谱作为成长风浪谱:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left(-1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right) \gamma^{\exp \left(-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right)} \quad (9)$$

其中参数采用 Mitsuyasu^[6]用苜蓿叶测波仪在日本近海和东海测量后得到的经验关系: $\alpha = 8.17 \times 10^{-2} \chi^{-2/7}$, $\gamma = 7.0 \chi^{1/7}$, $\omega_p = \Omega \cdot g/U_{10}$, $\Omega = 18.3 \chi^{-1/2}$, $\sigma = \begin{cases} 0.07 & \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \omega > \omega_p \end{cases}$ 。这里,反波龄 Ω 为波龄的倒数,

定义为 $\Omega = U_{10}/C_p$; $C_p = \frac{\omega_p}{\kappa_p}$ 为主波波速; $\chi = gX/U_{10}^2$ 为无因次风区; X 为有因次风区,单位为 m; U_{10} 为水面上 10 m 的风速。反波龄 Ω 是一个表征风浪成长状态的参量,当海浪完全成长后, $\Omega = 0.84$,海浪越年轻,对应的反波龄 Ω 数值越大。

为了研究偏度 λ_3 与反波龄 Ω 及无因次风区 χ 的关系,利用 Youf^[7]所导出的波数与频率的关系式,将 JONSWAP 频谱转换为相应的波数谱,代入方程(2)并进行多项式拟合,得到:

$$\lambda_3 = 1.572 \times 10^{-6} \Omega^3 - 2.25 \times 10^{-4} \Omega^2 + 1.45 \times 10^{-2} \Omega + 2.175 \times 10^{-1} \quad (10)$$

$$\lambda_3 = 1.004 \times 10^{-6} \chi^4 - 1.091 \times 10^{-4} \chi^3 + 3.703 \times 10^{-3} \chi^2 - 4.3 \times 10^{-2} \chi + 0.4537 \quad (11)$$

λ_3 随 Ω 变化曲线(10)及 λ_3 随 χ 变化曲线(11)分别见图 2 和图 3。

2 实验数据分析与验证

作者选用吕红民等^[5]在中国海洋大学物理海洋实验室大型风浪水槽所做的风浪成长实验而获得的实测数据来进行分析。水槽全长 65 m,在末端设一消浪板,槽内宽 1.2 m,高 1.5 m,水深 0.74 m,沿风区方向的中轴线上布设 12 个测波点,测点间距 3 m,各测点对应的风区长度分别为 7,10,13,16,19,22,25,28,31,34,37,40 m,取水面上 0.35 m 的风速为参考风速,实验中使用了 7 种实验风速 2,4,6,8,10,12,14 m/s。共获得 84 组波面起伏数据,采样频率

50 Hz,采样周期为 5 min,每个测点采集 15 000 个数据,波面位移测量精度为 0.5 mm。

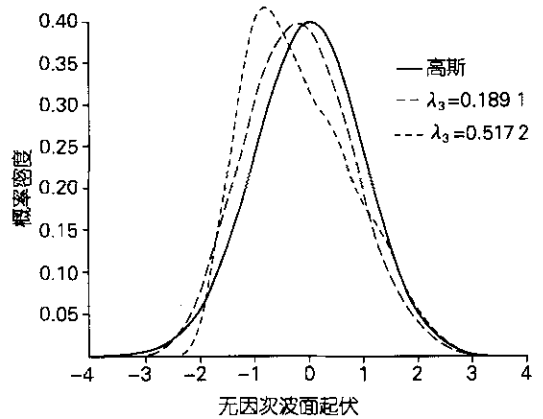


图 1 两组实测数据的分布与高斯分布的对比

Fig.1 Compare between two real data distribution and gauss distribution

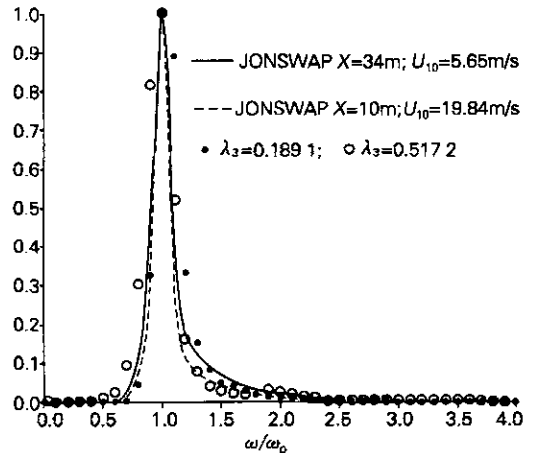


图 2 图 1 中两组数据对应的实测谱与相同参量的 JONSWAP 的对比

Fig.2 Compare between real spectrums and JONSWAP spectrum with same parameters

图 1 给出了两组典型的波面位移实测分布与高斯分布的对比,其中实线为高斯分布,虚线与高斯分

的对比,其中实线为高斯分布,虚线为风速 $U_{10} = 5.65 \text{ m/s}$ 在风区 $X = 34 \text{ m}$ 处实测波面位移的概率分布;点线为 λ_3 风速 $= 19.84 \text{ m/s}$ 在风区 $\lambda_3 = 10 \text{ m}$ 处实测波面位移的概率分布。这两组实测波面位移的偏度分别为和。从图 1 可以看出,随着偏度的增大,非线性影响逐渐显著,实测分布偏离高斯分布的程度增大。

上述两组数据对应的型如式(9)式的 JONSWAP 谱分别为图 2 中的实线和虚线。为了比较,我们将这两组数据经快速傅立叶变换得到的归一化的实测谱以离散点的形式同时绘于图 2。可以看出,实测海浪谱和对应的 JONSWAP 谱谱型非常相似,这说明我们用式(9)来代替真实的风浪成长谱是妥当的。

对每组实测数据,我们首先直接计算实测谱的主频 ω_p ,然后通过 You^[6]导出的频散关系算出主波数 κ_p ,进而得到按 $\Omega = U_{10}/C_p$, $C_p = \frac{\omega_p}{\kappa_p}$ 定义的 84 个反波龄。根据方程(1),用 Matlab 中的 skewness 命令得到对应于 84 组实测资料的偏度 λ_3 。

这 84 组 λ_3 随反波龄 Ω 的变化关系由图 3 中的离散点给出,这些离散点与图 3 中的实线(即关系式(10))的相关系数为 $R = 0.7953$,可见二者相关程度较好,可以将关系式(10)作为偏度与反波龄的近似解析关系式。

同样,偏度 λ_3 随无因次风区的变化关系由图 4 中的离散点给出,这些离散点与图 4 中的虚线(即关系式(11))的相关系数为 $R = 0.7752$,二者相关程度也较好,可以近似地将关系式(11)作为偏度与无因次风区的关系式。

由图 3 和图 4 可以看出,作者导出的解析关系式(10)和(11)与实测资料得到的 λ_3 随 Ω 、 $\bar{\chi}$ 的变化关系有一定的误差,其原因是从实测数据得到的 λ_3 依赖于风速和风区两个变量,应该用曲面作为二元函数对其进行拟合。尽管如此,我们导出的经验关系式仍然具有很高的相关系数,这表明近似解析关系式(10)和(11)具有一定适用性。

3 结语

随着现代海洋遥感技术的飞速发展,波面位移非线性特性对遥感反演模式的影响已越来越受到人

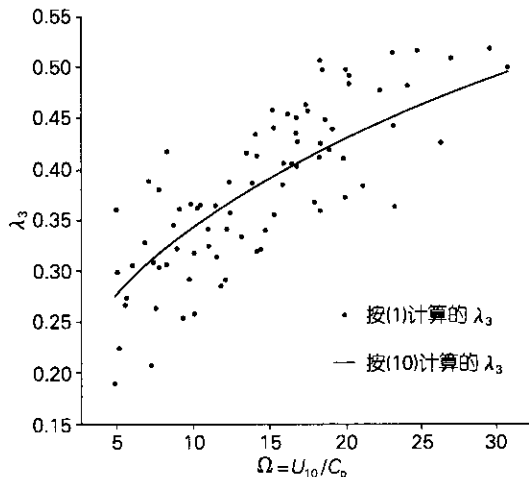


图 3 偏度随反应波龄的变化关系及近似解析关系式曲线

Fig.3 Plots of skewness exchange with inverse wave age and approximate analytic relation

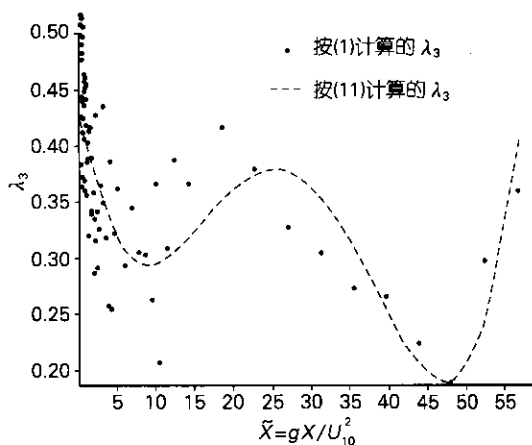


图 4 偏度随无因次风区的变化关系及近似解析关系式曲线

Fig.4 Plot of skewness exchange with dimensionless fetch and approximate analytic relation

们的重视。作者通过研究风浪成长状态参量对波面位移非对称性的影响,分别导出了波面位移偏度随反波龄 λ_3 及 Ω 无因次风区 $\bar{\chi}$ 变化的简单关系式,并通过实测数据进行了验证。这些关系式的导出,为直接而简洁地刻画波面位移的非线性特性及海洋遥感应用奠定了基础。

参考文献：

- [1] Longuet - Higgins , M S. The effect of non - linearities on statistical distributions in the theory of sea water[J]. **J Fluid Mech** , 1963 ,17 :459 - 480.
- [2] Norden E H ,Steven R. An Experimental study of the surface elevation probability distribution and statistics of wind - generated waves[J]. **J Fluid Mech** , 1980 , **101** (1) :179 - 200.
- [3] Sun F , Ding P X. A statistical distribution of surface elevation for nonlinear random sea waves and its physical explanation[J]. **Science in China(series B)** ,1994 , 37 : 1 401 - 1 408.
- [4] Jin - Bao Song , Yi - Jun Hou , Yi - Jun He , *et al* . Statistical distribution of wave - surface elevation for second - order random directional ocean waves in finite water depth[J]. **Coastal Engineering** 2002 , 46 :51 - 60.
- [5] 吕红民. 大型风浪水槽风浪成长的谱特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1998 , **28** (1) : 17 - 22.
- [6] 徐德伦 , 于定勇. 随机海浪理论[M]. 北京 : 高等教育出版社, 2001 . 200 - 203.
- [7] Zai - Jin You. Discussion of "Simple and explicit solution to the wave dispersion equation [J]. **Coastal Engineering** , 2003 , 48 :133 - 135.

The dependence of asymmetry of wave surface elevation on wind - wave growth state

GE Yong¹ , SONG Jin - bao² , TIAN Ji - wei¹

(1. Marine Environment College , Ocean University of China , Qingdao 266003 , China ; 2. Institute of Oceanology , the Chinese Academy of Science , Qingdao 266071 , China)

Received : Nov. , 17 , 2003

Key words : skewness ; inverse wave age ; dimensionless fetch

Abstract : Based on the second - order random wave theory , we studied the dependence of skewness λ_3 which characterizes asymmetry of wave surface elevation on the parameter of wind - wave growth state (inverse wave age Ω and dimensionless fetch $\tilde{\chi}$). Approximative analytic relations between λ_3 and Ω , and between λ_3 and $\tilde{\chi}$ are derived . Using the data from experiments in lab 's wind wave - current flume , we verified the applicability of these relations .

(本文编辑 刘珊珊)