

# 随机海浪的列率谱分析研究\*

孙 孚

(青岛海洋大学物理海洋实验室 青岛 266003)

张 书 文

(青岛大学 青岛 266071)

(海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061)

**提要** 首次将列率谱分析的方法引入到随机海浪的研究。根据不同环境条件下实验室资料,对列率谱与频率谱进行了比较。结果表明,列率频对频率谱高频部分有明显改善,特别对二倍频含能段的分辨具有明显的优越性。另外,列率谱具有计算速度快、简单易行、分辨率高等优点。

**关键词** 非线性随机海浪,列率谱,频率谱

**中图分类号** P731.22

近年来随着海洋非线性科学的发展,特别是海洋遥感测量技术和现代军事海洋学的发展,海浪的非线性效应日益受到海洋学家们的关注(袁业立等,1993;余宙文等,1993;侯一筠等,1994;吴克俭等,1998;刘新安等,1997;管长龙,1998;魏恩泊等,2000;张书文等,2000;Allender *et al.*, 1985; Tayfun, 1980; Hung *et al.*, 1976; Barrick, 1978; Ding *et al.*, 1994; 丁平兴等,1993)。如何获取海浪的非线性耦合信息,已成为海浪谱方法研究中需要解决的迫切问题。本文首次将列率谱分析方法引入到海浪的研究,旨在开拓海浪谱研究的新途径,丰富海浪谱研究的方法。

## 1 谱估计方法

列率谱分析是 70 年代发展起来的一门新的谱估计方法(Hamuth, 1977),广泛应用于电磁学、地震测量、地质勘探、数字信号、雷达等研究领域。该方法以具有间断正交脉冲特性的完备的 Walsh 函数系为基底,以描述在单位时间内跨零点呈非均匀分布,同时又不是周期性波动的系统的能量分布。本文将侧重于与海浪频谱估计方法的比较研究。设定点波面记录的离散数据序列为:

$$\{ \zeta(0) = \zeta(t_0), \zeta(1) = \zeta(t_1), \dots, \zeta(N-1) = \zeta(t_{N-1}) \} \quad (1)$$

其中,  $t_1 = t_0 + \Delta t$ ;  $t_k = t_0 + k \Delta t$  ( $k = 1, \dots, N-1$ ,  $N = 2^p$ ,  $p$  为正整数),  $t_0$  为观测的起始时间,  $\Delta t$  为取样间隔,  $N$  为样本容量。数据序列  $\zeta(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ) 的物理相关和并矢相关定义为:

\* 国家自然科学基金资助项目,49776285 号;山东省教委资助项目。孙 孚,男,出生于 1941 年 7 月,博士生导师,教授, Fax: 0086-0532-2032362

$$R_1(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{\nu=0}^{N-\tau-1} \zeta(\nu) \zeta(\nu+\tau), \tau = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$R_2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{\nu=0}^{N-1} \zeta(\nu) \zeta(\nu \oplus \tau), \tau = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中,  $R_1(\tau)$ 、 $R_2(\tau)$  分别表示定点波面记录的物理相关和并矢相关;  $\oplus$  表示并矢相加。波面记录的频谱和列率谱可分别定义如下:

$$P_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{n-1} R_1(\tau) e^{-i\pi\tau n/N} \quad (n = 0, 1, \dots, N/2) \quad (4)$$

$$P_2(n) = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{n-1} R_2(\tau) \text{Wal}(n, \tau) \quad (n = 0, 1, \dots, N/2) \quad (5)$$

式中,  $\text{Wal}(n, \tau)$  为离散的 Walsh 函数。设离散数据序列  $\{\zeta(n)\}$  的离散 Fourier 变换和离散 Walsh 变换分别记为  $S(n)$ 、 $E(n)$ , 则应有

$$P_1(n) = |S(n)|^2, P_2(n) = E^2(n) \quad (6)$$

可以证明:  $S(N/2+l) = S^*(N/2-l)$ , ( $l = 0, 1, \dots, N/2$ ) (7)

式中  $S^*$  为  $S$  的共轭。

$$P_2(0) = E^2(0), P_2(N/2) = E^2(N-1),$$

$$P_2(l) = E^2(2l-1) + E^2(2l), \quad (l = 1, 2, \dots, N/2-1) \quad (8)$$

## 2 结果和讨论

为了与海浪频谱进行比较, 利用实验室风浪资料和靶谱造波底坡资料。风浪实验选用 2 组风速 ( $U = 6.07\text{m/s}, 13.45\text{m/s}$ ), 2 组风区 ( $F = 7\text{m}, 10\text{m}$ )。靶谱造波底坡实验选用一种波要素 ( $\bar{H} = 0.13, T = 1.50\text{s}$ ), 几何比例尺为 1/20, 1 组坡度 (1:40), 1 个测点 (测点水深  $h = 0.28\text{m}$ )。利用实验室资料及 (1) — (8) 式, 直接估计波面的列率谱与频率谱, 比较结果见图 1(a, b, c) 所示。

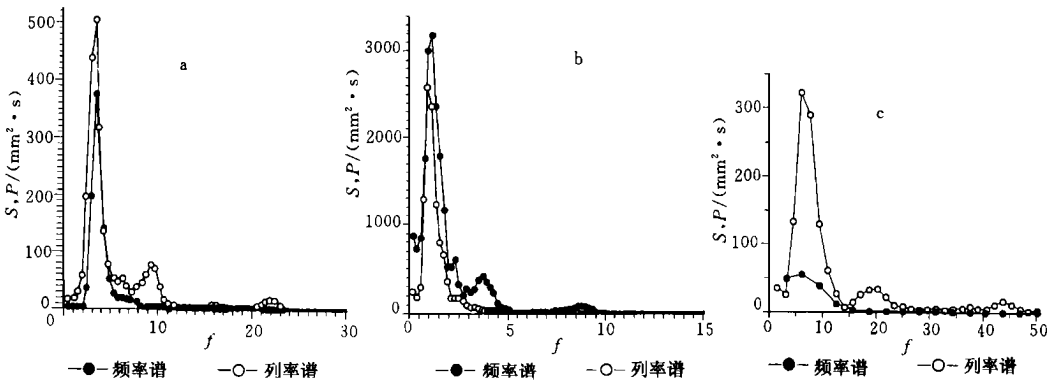


图 1 实验室资料的列率谱与频率谱的比较

Fig. 1 Sequence spectrum compared with frequency spectrum

a. 风浪资料的列率谱与频谱的比较; b. 坡底资料的列率谱与频谱的比较;

c. 短数据序列资料的列率谱与频谱的比较

由图 1a, b 看出, 在海浪谱的含能部分, 两种谱估计方法间存在差异不大, 列率谱值略

比频率谱大。但在高频段,特别在二倍峰频附近,差异非常显著。依据文献(Ding *et al*, 1994)对二阶谱的推导,可以看出在二倍峰频处,二阶谱取值最大。二阶功率谱是海浪二阶非线性效应的反映,这一效应几乎都反映在二倍峰频附近。列率谱对二倍峰频的反映明显优于频谱结果。图 1c 为短数据序列的列率谱与频率谱的比较。列率谱对较短的数据序列仍能反映出海浪谱的基本特征,而频率谱已不能显示海浪谱的基本谱形,说明列率谱比频率谱具有较高的分辨率。另外,对比频率谱估计方法,列率谱还具有计算速度快,简单易行等优点。

### 3 结语

利用不同环境条件下的实验资料,对列率谱和频率谱初步研究表明,列率谱不仅可以反应海浪谱形的基本特征,而且对高频信息的分辨优于传统频谱方法。这为进一步研究海浪的非线性效应提供了一种可行的研究途径。

### 参 考 文 献

- 丁平兴,孙 孚,余宙文,1993. 二阶谱理论在波浪研究中的应用 II. 估计方法与应用. 海洋与湖沼, 24(6): 649—655
- 管长龙,1998. 二阶非线性随机波浪波面高度和波面垂直速度的联合分布. 海洋与湖沼, 28(5): 503—508
- 侯一筠,李 炜,王新生,1994. 层结流体中的非线性惯性重力波. 海洋与湖沼, 25(5): 539—545
- 魏恩泊,宋 谦,覃正才等,2000. 局部非线性直接预测方法在监测混沌和噪音中的应用. 海洋与湖沼, 31(1): 71—77
- 吴克俭,宋金宝,楼顺里,1998. 论风浪的局域结构 I. 风浪的局域结构与局域小波能谱. 海洋与湖沼, 29(4): 403—409
- 吴克俭,宋金宝,楼顺里,1998. 论风浪的局域结构 II. 风浪局域小波能谱的性质及应用. 海洋与湖沼, 29(5): 488—493
- 刘新安,黄培基,1997. 非线性随机波浪模型的一种新形式. 海洋与湖沼, 28(3): 310—314
- 余宙文,丁平兴,孙 孚,1993. 二阶谱理论在波浪研究中的应用 I. 二阶谱的性质. 海洋与湖沼, 24(5): 553—559
- 袁业立,华 锋, Huang N E, 1993. 一个新的破碎波统计模式. 海洋与湖沼, 24(6): 577—584
- 张书文,孙 孚,管长龙,2000. 高阶非线性波浪波面斜率统计分布. 海洋与湖沼, 31(1): 67—71
- Allender J H, Barnett T P, Bertotti L *et al*, 1985. Sea wave modelling project (SWAMP), An intercomparison study of wind wave prediction models, Part 1: Principal results and conclusions, Ocean Wave Modelling. New York: Plenum Press, 256—384
- Barrick D E, 1978. HF radio oceanography —— a review. Boundary Layer Meteorology, 13: 23—43
- Ding Pingxing, Sun Fu, Yu Zhouwen, 1994. Study of the second-order nonlinear characteristics of ocean waves. Science in China (series B), 37(5): 625—633
- Hung N E, Tung C C, 1976. The dispersion relation for nonlinear random gravity wave field. J Fluid Mechanics, 75: 337—345
- Hamuth, 1977. Sequency theory. London, New York, San Francisco: Acad Press, 1—98
- Tayfun, M A, 1980. Narrow band nonlinear sea water. J Geophys Res, 85(a): 1548—1560

## STUDY OF SEQUENCY SPECTRAL ANALYSIS OF RANDOM SEA WAVES

SUN Fu

(*Physical Oceanography Laboratory, University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

ZHANG Shu- Wen

(*Qingdao University, Qingdao, 266071*)

(*Key laboratory of Marine Environment Science and Modelling, State Ocean Administration, Qingdao, 266061*)

**Abstract** Up to now, a large number of sea wave spectra, especially the wind generated sea wave spectra, have been obtained. Several were derived from the observed wave factors based upon some assumptions, but most were obtained through the correlation function by means of the discrete Fourier transform using wave records. The latter, as the main method to obtain the sea wave spectrum, does well in describing the main part of the spectral energy, whereas some drawbacks exist when dealing with nonlinear random sea wave. In our study, the sequency spectral method for nonlinear random wave is introduced to describe the high frequency nonlinear effect.

Experiment were conducted in the wind- wave flume laboratory of Ocean University of Qingdao. Using two kinds of different wind speeds and two fetches in the wind- wave experiment, and a kind of wave essential factor, a group of slope and an array of wave gauge were also used in the bottom slope experimental arrangement.

Calculated frequency spectra are compared with the sequency spectra to the basis of different observation data sets. The difference between these two spectra is less significant over the band of the predominant wave energy, but rather significant within higher frequencies, especially near the twice peak frequency. Furthermore, compared with frequency spectral analysis, the sequency spectrum method has many advantages including faster calculating speed, convenient use and high distinguishability.

**Key words** Nonlinear random sea wave, Sequency spectra, Frequency spectra