

# 论风浪的局域结构\*

## II. 风浪局域小波能谱的性质及应用

吴克俭 宋金宝<sup>†</sup> 楼顺里<sup>†</sup>

(青岛海洋大学物理海洋研究所 青岛 266003)

<sup>†</sup>(青岛海洋大学物理海洋实验室 青岛 266003)

**提要** 引入了局域小波能谱的局域间歇性度量,分析了不同风速下的风浪资料,结果表明,局域小波能谱可依局域频率分为三部分。风浪的群性在三维局域小波能谱图像下显示得更为明显,与风浪有关的一切性质都是局域的,包括风浪的群性。讨论了局域小波谱峰值与谱峰频率的涨落,指出了前者在工程设计中的重要意义,并发现了后者与风浪破碎有关的两种非线性现象。

**关键词** 局域小波能谱 局域间歇性度量 涨落

**学科分类号** P731.22

在本文 I 的基础上(吴克俭等,1998),将通过局域小波能谱引入局域间歇性度量。通过实验室风浪资料,分析了不同风速下的局域小波能谱及间歇性度量。结果显示,即令定常风速下定态的风浪,其内部结构亦是充分局域化的。本文引入局域小波能谱并给出关于风浪研究的一系列推论和应用,与 Fourier 频谱相比较,局域小波能谱的优越性是显然的。

### 1 实测风浪资料的局域小波能谱

#### 1.1 实验条件

实验是在青岛海洋大学物理海洋实验室完成的,实验设备包括大型风浪水槽、风机及 5 个测波仪。测波仪距风口的距离分别为 19.14, 22.75, 27.8, 31.4, 34.7m, 平均风速由皮托管和压电转换器测量,在不同风速下待风浪达到定态后获取了 25 组风浪资料,数据记录时间长度为 10min,采样频率为 50Hz,每组数据包含 30 000 个点,本文分析时选取了记录正常区段的 25 000 个点。实验室测波探头的响应频率约为 5Hz,实测资料局域小波能谱的最高频率亦取到 5Hz。本文只分析了第 3 个测波仪的资料,局域小波能谱随风区的变化将另文研究。

#### 1.2 不同风速下的局域小波能谱

从图 1 中明显可以看出,风浪的能量分布是充分局域化的,不仅体现在风浪的高频成

\* 国家自然科学基金资助项目,49406064号;山东省自然科学基金资助项目,Y96E02078号。吴克俭,男,出生于 1966年7月,博士,副教授,Fax:0086-0532-2879091

收稿日期:1996-09-10,收修改稿日期:1997-11-18

分具有复杂的局域化特征, 在局域谱峰值附近, 能量亦有显著的涨落。图 1 中可以清楚地看出不同尺度或频率的成分互相交织在一起的现象, 在局域小波能谱的低频部分可以看出几乎没有局域化特征。这表明, 在低频部分, 组成波的概念是近乎成立的, 而不是完全成立的, Fourier 分析能刻画此部分的特征; 在谱峰及高频部分组成波的概念是不成立的。从图 1 还可得到结论, 三维局域小波能谱的主要含能部分是由一簇簇含“能”包串联起来的, 表现在外观特征上, 便为风浪的群性, 由各簇随时间的不同而不同即得到结论: 风浪的群性也是局域的。因而用 Fourier 谱参量来刻画风浪群性的观念需要改变。

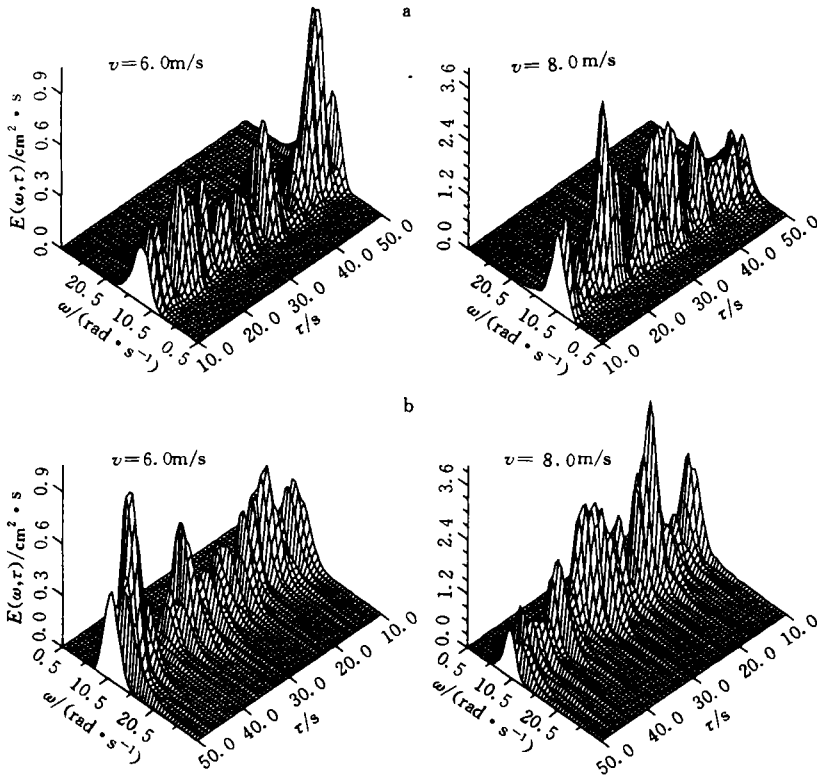


图1 局域小波能谱

Fig.1 Local wavelet energy spectra  
a. 视觉方向225° ; b. 视觉方向45°

## 2 局域小波能谱的局域间歇性度量

### 2.1 局域间歇性度量

为了刻画图 1 所示能量的局域结构及间歇性, 引入局域间歇性度量 (Farge, 1992):

$$I(\omega, \tau) = \frac{E(\omega, \tau)}{\langle E(\omega, \tau) \rangle T} \tag{1}$$

其中,  $E(\omega, \tau)$  为局域小波能谱;  $\langle \rangle$  为时间平均。  $I(\omega, \tau)$  本质上刻画了能量在小波空间中的间歇性强度, 如果  $I(\omega, \tau) \equiv 1$ , 则意味着没有间歇性或局域结构, 局域小波能谱同于通常的风浪频谱;  $I(\omega, \tau_0) = 10$  则意味着在尺度或局域频率  $\omega$  下点  $\tau_0$  处对 Fourier 能谱的贡

献,为  $T$  上平均量对 Fourier 能谱贡献的 10 倍。 $I(\omega, \tau_0)$  越大,代表那里的能量涨落愈大,或间歇性愈强。从图 2 可以看出,在局域高频部分能量间歇性最强,由其它风浪资料的间歇性度量亦可得到类似的结果。

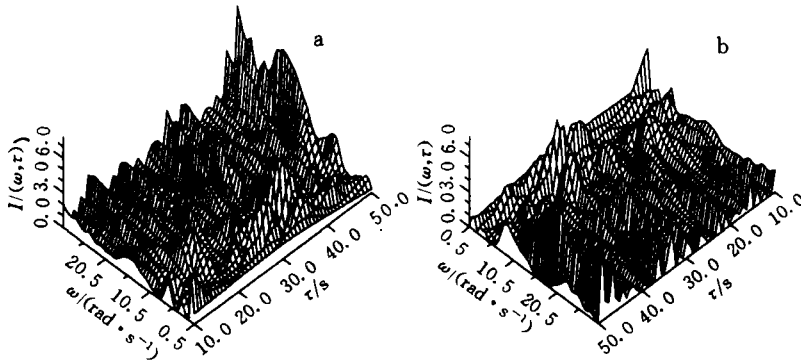


图 2 局域间歇性度量 ( $v = 6.0\text{m/s}$ )

Fig.2 Local intermittency measure ( $v = 6.0\text{m/s}$ )

a. 视觉方向  $225^\circ$ ; b. 视觉方向  $45^\circ$

### 2.2 局域小波能谱的划分

实测风浪的局域小波能谱的间歇性度量显示,对应于不同的局域频率或尺度,其间歇性强度是不同的,大致可分为三部分:(1)局域小波能谱的低频部分(即  $\omega \leq 0.9\omega_0$ ,  $\omega_0$  为平均主频),此部分的能量间歇性较弱,其反映的风浪内部结构与 Fourier 频谱几乎是等效的;(2)局域小波能谱的局域谱峰附近(即  $0.9\omega_0 \leq \omega \leq 1.2\omega_0$ ),此部分能量有显著的涨落,间歇性度量显示较大的数值。据此,通常意义下的主频是不存在的,只有在平均意义下才存在;(3)对应于风浪平衡域部分(即  $\omega \geq 1.2\omega_0$ ),此部分间歇性最强,且具有更丰富的动力学特征,它在能量的吸收与传递、波浪的破碎等方面起着重要作用。须指出,超高频部分尽管含能较小,但比起低频来说,其间歇性仍是非常强的。

### 3 局域小波能谱峰值与谱峰频率的涨落

在风浪频谱的描述中,谱零阶矩、谱峰频率及峰频率对应的谱峰值是三个最重要的参量,甚至有人直接应用这些参量或它们的组合导出风浪频谱(Wen *et al*, 1994)。经验表明,在谱估计中,谱零阶矩和谱峰频率是相对稳定的物理量,但谱峰值却极难精确地确定。谱估计方法的不同及平滑技术的差异,往往导致谱峰值相差甚远。考虑谱峰值对工程设计的安全性是特别重要的。目前人们在海洋工程设计中考虑工程构件的安全性及极限强度时往往特别关心海浪谱的谱峰值。局域小波能谱不但能使我们对此问题有非常清晰的认识,而且,对局域谱峰频率随时间的涨落也看得非常清楚。

$$\text{定义局域小波能谱峰值: } E(\omega_0, \tau) = \max_{\omega \in (0, \infty)} E(\omega, \tau) \tag{2}$$

相应的  $\omega_0$  定义为局域小波谱峰频率。从图 3a 中可看出,当风速为 6m/s,时间为 16.5, 34.5 及 47s 时,局域谱峰值有显著的极大值,此时的风浪具瞬时的显著能量。这种能量比起此段时间内 Fourier 频谱峰值所对应的能量来说,显然要大得多,而正是这种瞬时的巨大能

量对海上建筑物的破坏性才最大。既然主频的概念是不成立的,只是在平均的意义下才存在,故在工程设计中除了要考虑平均意义下的主波动能量外,还必须考虑局域谱峰值涨落方差的大小。

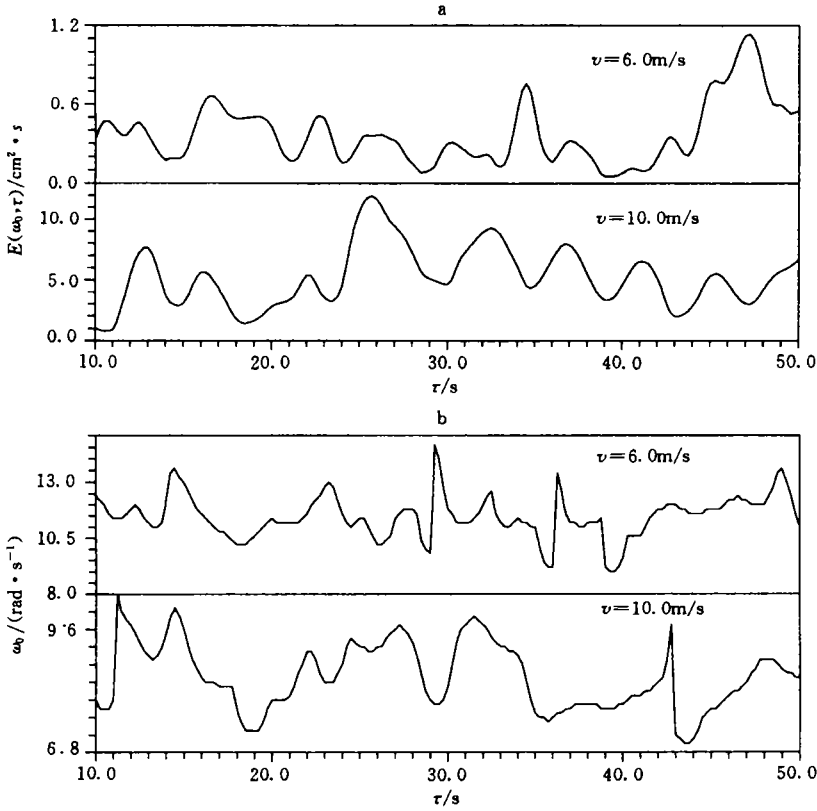


图 3 局域小波能谱峰值与谱峰频率的涨落

Fig.3 Fluctuations of local spectral peak and peak frequency

a. 局域谱峰值的涨落; b. 局域谱峰频率的涨落

无论是实验室还是外海风浪,当风速达到 6.0m/s时,风浪将出现破碎(Zakharov, 1991)。从不同风速下局域谱峰频率的涨落中可以发现,当风速低于 6.0m/s时,局域谱峰频率连续地涨落;当风速超过 6.0m/s时,局域谱峰频率开始出现一种奇怪的“停滞”现象,即局域谱峰频率在一段时间内保持不变,且时间可持续几秒钟,并伴随着突然的“跳跃”现象,即局域谱峰频率从一个值突然跳到另一个值,呈显出不连续性。当风速越大时,上述两种现象越明显,从图 3 可看出上述两种现象,尤其“停滞”现象是非常明显的。直观上,当风浪在风的持续作用下成长,破碎是抑制其成长的主要机制。风浪一旦破碎,风浪主波动出现暂时的稳定。当然,它们可能具更深层的涵义,目前还找不到一种机制来合理地解释这两种现象的发生。

### 4 结论

4.1 依据实测风浪的间歇性度量,局域小波能谱可划分为三部分,此三部分各有不同的

局域化特征。

4.2 局域小波能谱清楚地刻画了局域小波谱峰值与谱峰频率的涨落,因而对工程设计和通常的谱估计,均有重要意义。

4.3 无论是风浪的内部结构上,还是外观特征上,与风浪有关的一切性质都是局域的。其实,局域性如同混乱性和随机性一样,是自然界事物的一种普遍属性,风浪当然也不例外。

4.4 本文尽管只研究了风浪的时间局域结构,但已显示出局域小波能谱的应用潜力。局域小波能谱并不能解决风浪的所有问题,一旦涉及到风压力时,同样会碰到如同湍流一样的实质性困难。

## 参 考 文 献

吴克俭 宋金宝 楼顺理, 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—408

Farge M, 1992. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu Rev Fluid Mech*, 24: 395—457

Wen S C, Zhang D C, Sun S C *et al*, 1994. Form of deep water wind wave frequency spectrum, I. Derivation of spectrum. *Progress in Nature Science*, 4(4): 407—427

Zakharov V E, 1991. Invers and direct cascade in the wind-driven surface wave turbulence and wave breaking, *In Breaking waves* (eds. Banner M L), IUTAM symposium Sydney, Berlin: Springer-Verlag, 132—156

## LOCAL STRUCTURES OF WIND WAVES II. PROPERTIES OF LOCAL WAVELET ENERGY SPECTRUM AND ITS APPLICATIONS

WU Ke-jian, SONG Jin-bao<sup>†</sup>, LOU Shun-li<sup>†</sup>

(*Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

<sup>†</sup>(*Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

**Abstract** Local intermittency measure is introduced to study the properties of local wavelet energy spectrum and to analyze the wind wave data obtained in a wind wave channel. It is shown that local wavelet energy spectrum of wind waves can be divided into three sections: (1) the section whose local frequencies are lower than the local peak frequency; (2) the section whose local frequencies are close to the local peak frequencies. In this section the local intermittency measure has significant and irregular fluctuations which indicate that waves energy has strong intermittency; (3) the section whose local frequencies are higher than the local peak frequency. This section corresponds to the equilibrium range of the Fourier spectrum and has regular intermittency. Fluctuations of spectral peak energy and peak frequency are also discussed in the present paper. The authors point out that wind waves may have instantaneously remarkable energy, which is much more than the average over the time interval determined by the dominant wave component and may cause great damage to offshore structures. In engineering designs, the variance of the fluctuations of the local peak should also be taken into considerations besides the mean value of the fluctuations described by the Fourier spectrum. In the later fluctuations they found two interesting phenomena closely related to waves breaking. One is called "jump" wherein the peak frequency may jump abruptly from one value to another value, and the other one is called "stagnation" wherein the peak frequency remains constant, and may so over several sections.

**Key words** Local wavelet energy spectrum    Local intermittency measure    Fluctuation

**Subject classification number** P731.22