

风生破碎波统计特性的 实验研究

贾 复 徐 丰

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要 文中介绍了风波槽内对于风生破碎波统计特性的实验测量结果。测量的关键是根据如下的事实:单点波高测量时通过 Hilbert 变换可以提供丰富的波参数信息。考察的破碎波统计特性包括:破碎相位角、破碎波的时间尺度和水平长度尺度、破碎频率等与风速的关系。本实验结果表明,这项技术是可行而有效的。所获实验结果与前人在更大的设备上结果符合,这也表明这些统计特性对于吹程并不敏感。

关键词 破碎波,统计特性, Hilbert 变换

分类号 0353.2

1 引言

风生水波的破碎是一个普遍存在的现象,早为人们司空见惯,然而它的发生机制、动力学过程及后果,还远未被认识。破碎波引起人们持续的研究兴趣,在于它是大气向海洋传输能量、动量的重要渠道之一,同时它又是影响近岸环流及近岸结构物波载荷的重要因素。近年来又从两个方面给破碎波研究增加了推动力:

水气界面的气体传输率(很大程度上决定着全球大气中温室效应气体的收支)强烈依赖于界面的状态、水波的破碎及所产生的湍流,会大大加速气体传输率。

卫星载空间微波散射计,当前已成为对全球尺度海面风场探测的重要手段,而电磁波与风生短波及破碎产生的水面小尺度折皱的相互作用,决定着散射信号。因此海面风场遥感要求对风生波方向谱(特别是高波数段)及破碎波直接散射贡献的认识不断提高,而这两点的关键均在于对破碎波的认识。

风生水波及其破碎波是一个随机、瞬变、非线性过程,破碎动力学过程所造成的湍流、空气挟卷、水滴飞溅等,实验观测研究都相当困难。目前,对于破碎波的统计特征进行测量分析,似乎是更现实和迫切的要求。这方面已有许多工作,如 Snyder 等人^{[1][2]} 对海面“白帽”式破碎进行了观测、统计、分析,证实了 Ochi 等^[3]提出的破碎概率与波谱四阶矩有关等结论,这些都是重要的成果。

利用局部波参量的时间序列,提取破碎波信息,首先是 Longuet-Higgins 和 Smith^[4]开创,其后 Melville^[5], Hwang 等^[6]把这种从单点波高时序提取波参量的方法建立在比较完善的因素

本文于 1996 年 3 月 25 日收到 本刊编辑部 1998 年 3 月 10 日录用

果序列的 Hilbert 变换理论上。特别是 Hwang 等人^[6]的工作中,包含了实验室风浪水槽上对破碎波统计特征的较详细的测量结果。当然对于风生破碎波这样复杂过程的探索,需要大量不同条件下的观测和分析,本文中介绍的是在中科院力学所风浪水槽中进行的风生破碎波的测量与分析。

2 实验设备及数据分析

实验是在力学所风浪水槽中进行的。水槽尺寸为:长 15 米、高 1 米、宽 0.5 米;水槽常用水深为 0.6 米,其上 0.4 米为气流通道。风洞为上游直吹式,风扇转速连续可调,电机功率 11KW,风浪槽可资用风速为 1—15 米/秒。风浪槽全部侧壁及部分底板为玻璃材料,以利于观测及照明等需要。水槽顶部架设精密坐标架,它可以沿风浪槽的纵向与横向移动到所需位置固定;坐标架的探针臂在铅直方向由步进电动机驱动、电脑控制,位移精度达 0.1 毫米。实验中风速由 Pitot 管监测平均风速,该平均风速可与热线风速仪标定过的风场相对应。波高测量仪是由大连理工大学研制的。波高仪输出电压信号由 AD 板采集 386 微机记录。

实验在下述条件下进行:

测量断面(风程):距气流入口 10 米;风速:7、8、9、10、11、12、13、14(米/秒);波高数据采集频率:92 数据/秒;数据采集时间:160 秒。

3 风生破碎波特征及其测量

3.1 局部波参数的导出

在数字信号理论中,有一熟知的事实:对一具有因果性、线性平移不变序列,其 Hilbert 变换后所得到的序列在一定区域内可与之构成解析函数^[7]。对于某点处的波高时间序列 $\zeta(t)$ 可有经 Hilbert 变换后的 $\xi(t)$ 与之对应^[5],

$$\xi(t) \equiv \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta(t')}{t' - t} dt'$$

其中 P 代表积分在 $t' = t$ 处取 Cauchy 主值。从卷积定理有

$$F(\xi) = i \operatorname{sgn} s \cdot F(\zeta)$$

$$h(t) \equiv \zeta(t) - i\xi(t) = a(t)e^{i\varphi(t)}$$

其中 $a(t)$ 为振幅, $\varphi(t)$ 为相位角。

显然,对于离散时序可以方便地利用快速 Fourier 变换来进行上述工作。

对于原始数据实际处理时,首先还要进行滤波。我们采用 Yulewalk 数字滤波器进行 40Hz 低通滤波处理。根据 $h(t)$ 我们就可以导出相关的波参数^[6]:

$$\text{角频率 } \sigma(t) = \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$$

$$\text{相速度 } c(t) = (g/\sigma(t))(1 + (ak)^2)$$

$$\text{波数 } k(t) = \sigma^2/g$$

$$\text{波面水平速度 } u(t) = \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

$$\text{波面铅直速度 } w(t) = \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\text{局部波坡度 } \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial \xi / \partial t}{c}$$

3.2 破碎波判据及破碎波特征量

破碎判据,有几何学判据、运动学判据、动力学判据。根据 Hwang 等^[6]的经验,采用运动学

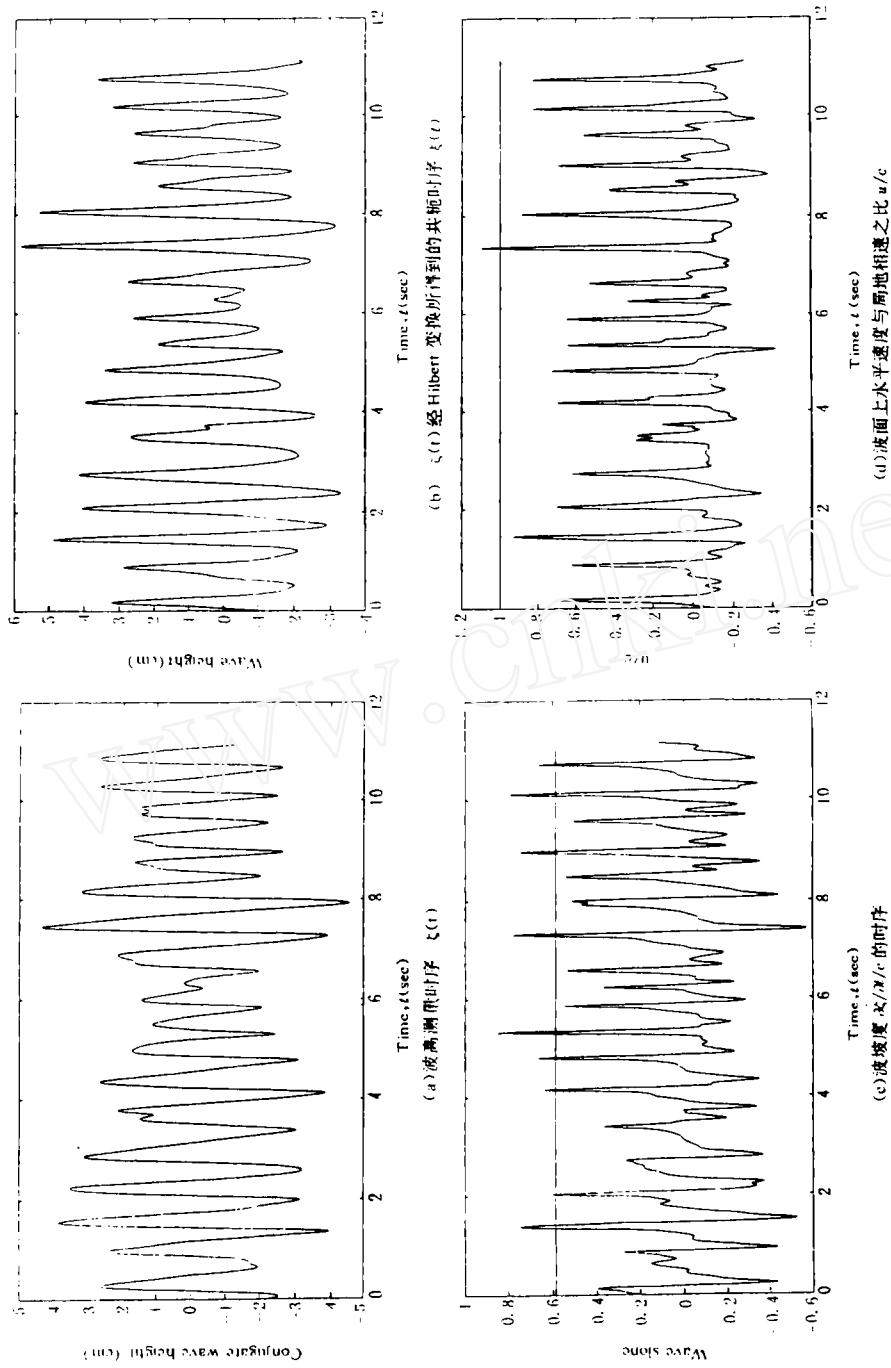


图 1 风速 $U_{\infty} = 14.5$ 米/秒时, 波高测量数据及信号处理所得波参数示样

和几何学波破碎判据, 数值处理误差较小。

几何学判据: 采用 Longuet-Higgins^[8]提出的判据当波坡度超过 30.37° 即认为破碎。

运动学破碎判据: 即波质点纵向速度超过相速, $u/c \geq 1$ 时为破碎。

有实际重要性的波破碎统计特征包括:

破碎发生的概率 P : 规定为观测时间内, 测到的破碎波数与总波数之比;

破碎频率 f : 规定为观测到的破碎波个数与观测时间之比;

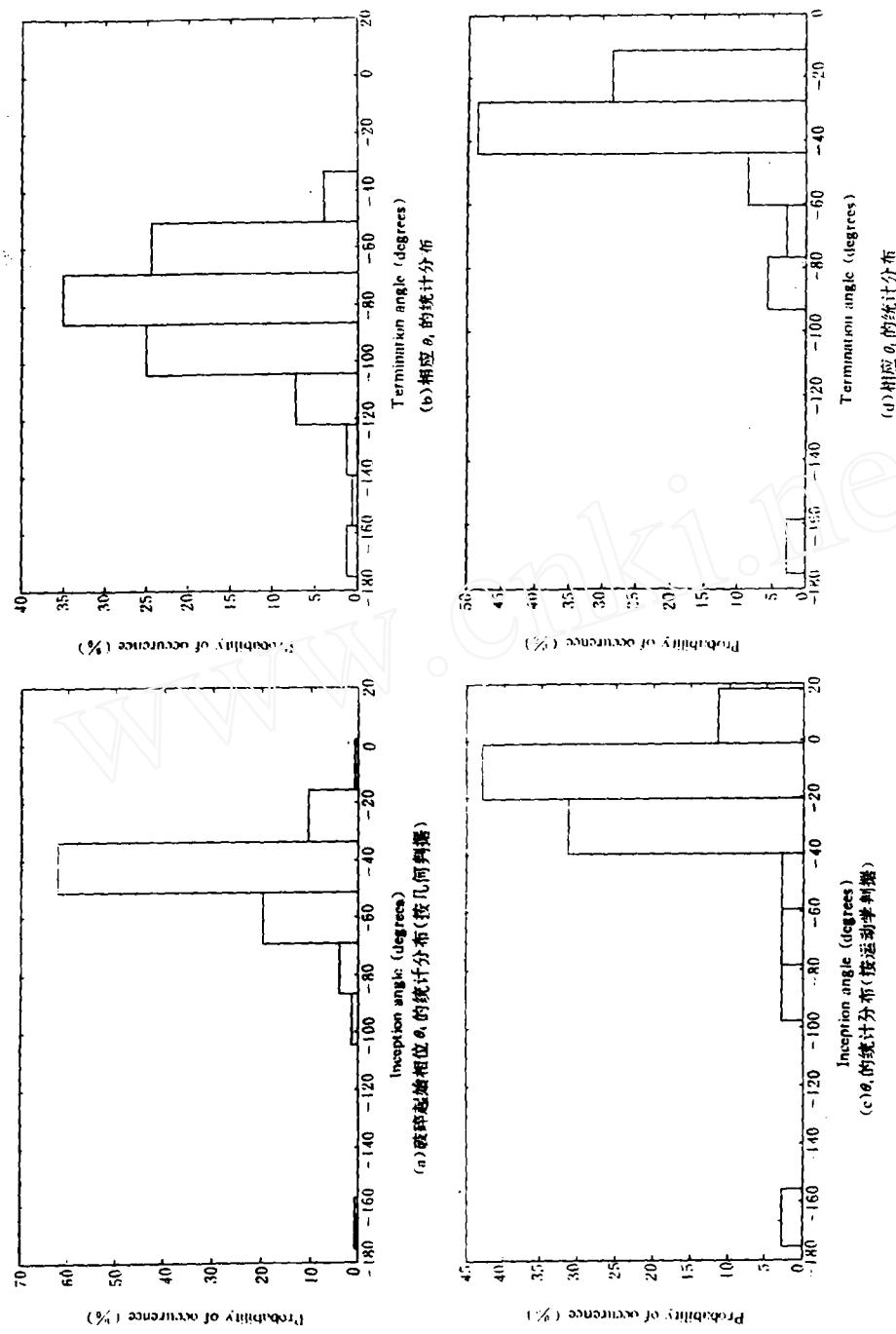


图2 破碎相位角 θ_i 及 θ_t , $U_i = U_{\infty} = 14.5$ 米/秒

破碎事件时间尺度 ΔT_b , 定义为波的波参数超越判据所持续的时间或其与波周期之比的统计平均。

破碎相位角: 规定为相对于波峰相位, 超越判据区间的波相位角范围起始角和结束角。

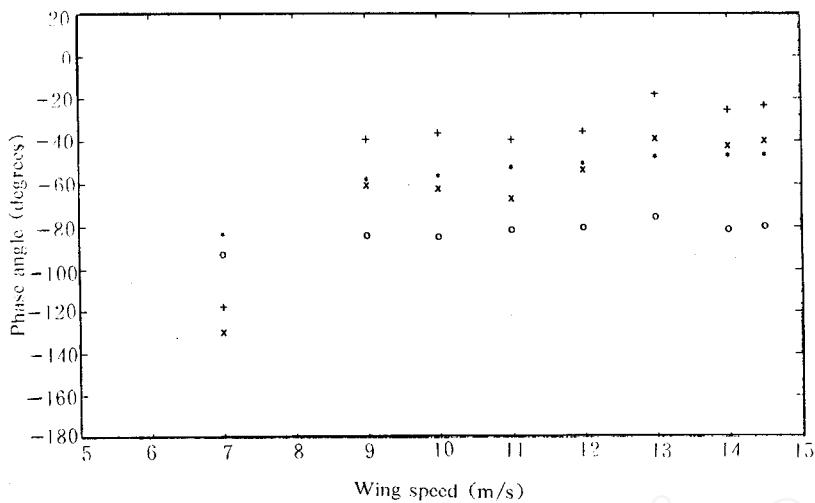


图3 破碎相位角与风速关系
(其中几何判据: + 为 θ_i , x 为 θ_e ; 运动学判据: * 为 θ_i , o 为 θ_e)

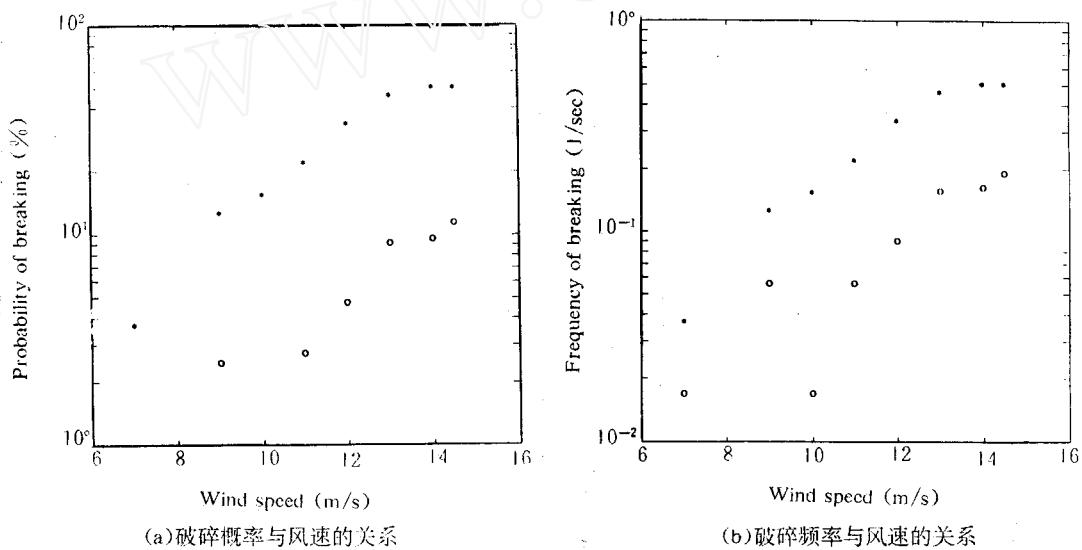


图4 * 为几何判据, o 为运动学判据

4 实验结果与初步讨论

对于8种风速,在风程10米处采集的波高时序数据,全部实时记录入计算机,其后对于这些数据进行了数值滤波、Hilbert变换等处理。从所得数据中对于波破碎位相角、破碎时间尺度、破碎水平尺度、破碎概率、频率等特征量进行了分析和统计。为便于直观,风速采用风洞入口 Pitot 管风速 U_∞ 读数,该风速与风摩擦速度 u^* 关系可用经验公式

$$u^* = 0.02U_\infty^{3/2}$$

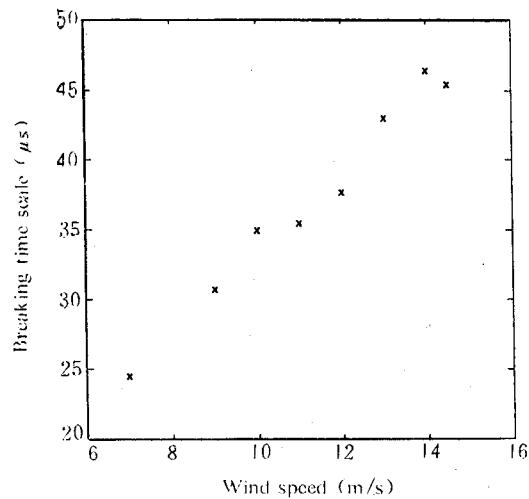


图 5 破碎波平均时间尺度与风速关系(几何判据) 图 6 破碎波平均水平尺度与风速关系(几何判据)
以米/秒为单位。

图 1(a)—(d) 分别示出风速 $U_\infty = 14.5$ 米/秒,若干波参数的测量及处理所得的数据示样。样本时间为 11 秒。(a) 为波高 $\zeta(t)$ 测量值,(b) 为 $\zeta(t)$ 的 Hilbert 变换值或称其轭波高 $\xi(t)$, (c) 为波坡度 $\frac{d\zeta}{dx} = \frac{\partial \zeta}{\partial x}/c$, (d) 为波面上水平速度与局部相速之比;在图 1(c) 和图 1(d) 中还示出上文中已述及的破碎判据值,并可看出破碎事件;两种判据所得结果不同的情形也很明显,这种久已存在的问题有待今后深入研究;下面示出两种判据下的统计结果。

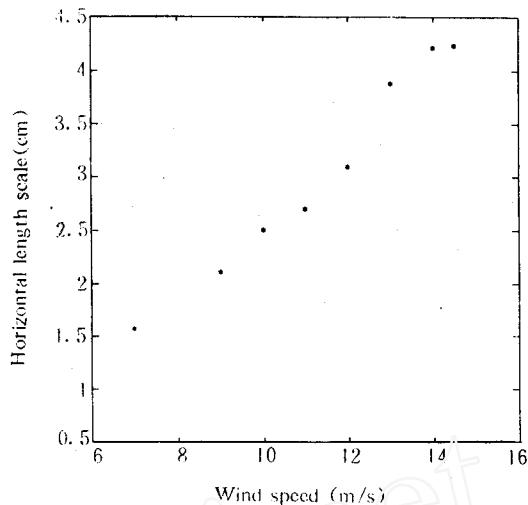
图 2(a)—(d) 示出破碎相位角(包括起始与终结)统计结果;破碎相位角对研究破碎机理是一个很值得重视的参数,对于几何判据而言,起始破碎相位角 θ_i 相对于波剖面开始可能出现不稳定的点,而终结相位角 θ_e 含有破碎波区域的信息;对于运动学判据, θ_i 与 θ_e 对应于其水平运动超越相速而可能脱出波面飞出的区域,故而 θ_i 与 θ_e 的统计特征,对破碎规则的认识是很重要的。既然单点波高测量可以方便地推断出近似的 θ_i 、 θ_e ,那么重要的问题就是去关联这样得到的 θ_i 、 θ_e 与通过图象等更直接观测到的破碎过程。在这方面 Longuet-Higgins^[8] 及 Snyder^[2],给出许多例证。图 2(a)、图 2(b) 示出按几何判据得到的破碎起始及终结相位角 θ_i 和 θ_e 的统计分布。几何判据得到的 θ_i 与 θ_e 比较更靠近波峰;两种判据的统计结果与 Hwang 等^[6] 的对应结果相比较均更向下游偏移,原因尚不清楚。但破碎发生在波峰下游,向下游沿伸,一直可能沿伸到波谷;在少数情形下,破碎也可能发生在远离波峰及至波谷处,这样的事实,在本实验中和在文献[6]的实验中均得到反映。

图 3 给出上述破碎相位角与风速的关系。明显的趋势是在考察风速范围内,诸相位角相对无大变化,亦即统计平均的破碎位置是相对固定的,而按两种判据所统计出的平均值在各种风速下普遍比 Hwang 等^[6] 向下游方向偏移 20° 。

图 4(a) 示出风生波破碎概率与风速关系;图 4(b) 为破碎频率与风速的关系。

这些结果中,按几何判据所得结果与[6]结果可协调一致,但按运动学判据结果似乎偏低;这需要在考察风程的影响等因素中来研究。

图 5 为破碎波的平均时间尺度与风速的关系;在考察风速范围,破碎事件发生在 25—50 毫秒间。而相对应的破碎区域水平尺度,示于图 6,呈单调上升,在 1—4.5 厘米区间变化。



在力学所风浪水槽内,在10米风程下对7—14.5米/秒风速范围对破碎波统计特征的初步研究进一步表明,通过单点波高测量及Hiblert变换处理的方法,可以提供丰富的破碎波信息。破碎波相位角,在不同风速下相对固定,破碎区对应的相位角范围($\theta_i - \theta_c$)约为40°,破碎发生在背风向10°~40°。破碎波时间尺度大约为5—45毫米,约占波周期的8%以下,因此是快速瞬变过程;破碎区水平尺度约为1—5厘米,探测到的破碎事件主要还是较长波的破碎,短波破碎按所用判据尚未统计进来;破碎概率波与风速的关系,本文所得结果与文献[6]的按几何判据统计的结果基本一致。这也说明这些重要的波参数,在10米风程测量数据与20米风程数据可以协调一致,风程变化不敏感。本文所得破碎相位角与文献[6]普遍有(-20°)偏差,是需进一步加以搞清的。需要进一步开展的工作还包括对短波破碎的探测,和把对流场可视化监视记录与按本方法探测实时同步进行,联合进行深入分析,才能对破碎波统计特性获得更多认识。

参 考 文 献

- 1 Snyder R L, Kennedy R M. On the Formation of Whitecaps by a Threshold Mechanism. Part I Basic Formalism. *J. Phys. Oceanogr.* 1983, 13: 1482-1492.
- 2 Snyder R L, Smith L & Kennedy R M. On the Formation of Whitecaps by a Threshold Mechanism. Part II Field Experiments and Comparison with Theory.
- 3 Ochi M K. & Tsai C H. Prediction of Occurrence of Breaking Waves in Deep Water. *J. Phys. Oceanogr.* 13: 2008-2019.
- 4 Longuet-Higgins M S, Smith N D. Measurement of Breaking by a Surface Jump Meter. *J. Geophys. Res.* 1983, 88.
- 5 Melville W K. Wave Modulation and Breakdown. *J. Fluid Mech* 128: 489-506.
- 6 Hwang P A, Xu D, Wu J. Breaking of Wind-generated Waves: Measurements and Characteristics. *J. Fluid Mech* 1989, 202: 177-200.
- 7 Oppenheim A V and Schale R W. Digital Signal Processing. Chap 7, Prentice-Hall Inc. 1975.
- 8 Longuet-Higgins M S. Breaking Waves-in Deep or Shallow Water. In 10th Symp. Naval Hydrodynamics 1974, 597-605.

Laboratory Studies on Statistical Characteristics of Wind Driven Breaking Waves

Jia Fu Qu Feng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Presented in this article are measurements of statistical characteristics of wind driven breaking waves in laboratory. The key measuring technique of the present study is based on the fact that valuable information of wave parameters can be extracted from wave height time series measured at a single point by means of Hilbert transformation. The parameters being looked at include phase angles of breaking, time scale and horizontal length scale of breaking waves, breaking frequency and respective relationships with wind speeds. The results show that the adopted measuring technique is feasible and effective for studies of breaking waves. The present results basically conform with those of previous researchers in larger facilities implying that the observed statistical characteristics of breaking waves, were not very sensitive to wind fetch.

Key words breaking waves, statistical characteristics, Hilbert trasformation.