非定常风作用下极端波浪统计特性初探

张子檀¹, 徐文涛¹, 唐天宁², 郑小波¹, 曲文海¹, 章丽骏¹, 李晔^{1,3,4*}

1. 上海交通大学多功能拖曳水池实验室, 上海 200240;

2. 牛津大学工程科学系, 牛津 OX1 3PJ, 英国;

3. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

4. 上海交通大学水动力学教育部重点实验室, 上海 200240

*联系人, E-mail: ye.li@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-10; 接受日期: 2021-02-03; 网络出版日期: 2021-05-13

国家自然科学基金(编号: 51761135012, 11872248)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFE0132000)和国家重点研发计划(编号: 2019YFE0102500)

资助项目

摘要 为探究风对极端波浪产生的影响, 基于波浪的Benjamin-Feir不稳定性, 在二维海洋工程水池中开展实验, 对非定常风作用下具有随机相位的波场进行了长时间的模拟. 本文通过对波浪有效波高、峰度及偏度的统计, 分析了风对波浪演化过程中统计特征的影响, 并进一步研究了波浪能量谱对风的响应. 实验结果表明, 具有较大Benjamin-Feir指数的波浪, 在非定常风作用下常伴有破碎现象, 导致波浪有效波高显著下降, 峰度则呈现增大趋势. 通过对波浪能量谱的分析得到, 波浪破碎导致能量谱峰值的下降, 波浪从风中所获得的能量主要集中在波浪的高频部分. 本研究旨在通过对极端波浪的统计学研究, 为海上浮式结构物的设计、建造及极端波浪的预报提供依据, 降低极端波浪所造成的危害.

关键词 极端波浪, Benjamin-Feir不稳定性, 风浪实验, 统计特性, 谱分析

PACS: 47.35.Bb, 47.50.Gj, 47.11.Kb, 47.35.-i

1 引言

随着南海油气资源的勘探及海洋强国战略的提出, 人们对自然资源的关注由陆地转向海洋, 由近岸转向深海. 目前, 对海洋资源的开发利用主要通过海上浮式结构物(船舶、平台、无人航行器)来实现. 但海洋工程结构物在实际运营中, 会受到极端风、浪、流及其相互作用的影响. 现阶段, 极端海洋环境的预测及其与海洋结构物的流体动力相互作用等诸

多问题有待解决^[1].

极端波浪作为一种发生概率低、破坏力大的超级巨浪, 通常在没有预警的情况下突然发生, 并迅速消失, 最早由Draper^[2]提出. 在1995年首次观测到极端波浪之后, 越来越多的报道表明, 海洋中许多结构物的故障和破坏的发生都与突发的极端波浪事件有密切关系^[3]. 现阶段对极端波浪产生机理的研究已成为水动力学领域的热点问题.

近些年来, 对极端波浪产生机理的研究主要

引用格式: 张子檀, 徐文涛, 唐天宁, 等. 非定常风作用下极端波浪统计特性初探. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 084711

Zhang Z T, Xu W T, Tang T N, et al. Preliminary investigation on statistical properties of extreme waves under unsteady wind (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 084711, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0438](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0438)

集中在时空聚焦、空间聚焦、波流的相互作用及Benjamin-Feir不稳定性等方面. 早期出于线性波浪的考虑, 主要利用波能聚焦的原理来产生极端波浪, Baldock等人^[4]、Johannessen^[5]、赵西增等人^[6]通过调整波群中组成波的初始相位, 使每个组成波在指定位置和时刻达到最大值, 从而获得极端波浪. Kriebel和Alsina^[7]利用基本波列和瞬态波列线性叠加的方法模拟波面, 产生了包含较大波浪的波列.

实际海洋中的波浪表现为非线性, 而对非线性系统的研究已在许多领域取得了新的进展^[8-10], 尤其是海浪和非线性光脉冲之间存在共同点^[11], 所以极端波浪产生的非线性机理受到广泛关注. 最早, Benjamin和Feir^[12]从理论上证明Stokes波在微弱的边带扰动下是不稳定的, 边带分量随时间速率呈指数增长, 该速率取决于载波与不稳定边带之间的无量纲频率差及初始波陡, 这种性质被称为Benjamin-Feir不稳定性. 基于波浪的Benjamin-Feir不稳定性, 许多学者^[13-15]对极端波浪的产生及其演化规律进行研究. 最近, Zakharov和Shamin^[16]研究了宽谱条件下重力波的非线性演化过程及极端波浪的产生. Mori和Janssen^[17]的研究结果表明, 由非线性四波相互作用所引起的峰度增加会显著增大极端波浪发生的概率. Onorato等人^[18-20]在给定北海联合海浪计划(Joint North Sea Wave Project, JONSWAP)谱和随机初相位的基础上, 在实验室二维水池中对随机的海面重力波进行长时间的模拟, 获得极端波浪, 并进一步讨论分析波浪演化过程中统计特征的变化. 实验结果指出, Benjamin-Feir指数(Benjamin-Feir Index, BFI)是反映极端波浪生成的重要参数, 较大的BFI值会使随机波列中极端波浪的产生概率增加.

尽管在良好的天气条件下, 海面偶尔会出现极端波浪, 但极端波浪产生通常会伴随着强风. 风作为一种随机过程, 突然出现而后消失, 在对极端波浪模拟和预测过程中最为复杂, 在这种瞬态变化的影响下, 极端波浪可能会表现出异常的统计特性. Kharif等人^[21]、Touboul等人^[22,23]通过理论和实验研究风对聚焦波群的影响. Zou等人^[24]通过实验室模拟对顺风 and 逆风作用下的极端波浪聚焦位置、聚焦持续时间及波幅进行研究. 结果表明, 顺风会增加

聚焦的时间, 进一步增大极端波浪的峰值波幅, 同时会将聚焦点向下游方向推移.

国内方面, Hu等人^[25]通过数值研究极端波浪的形成机理、水动力特性以及波浪与结构物相互作用. Ning等人^[26]基于Jeffreys遮蔽理论, 研究风压及风生流对极端波浪的影响. 赵扩等人^[27]采用非静压二维自由表面流模型模拟深水条件下重力波的进动共振现象. 最近, Tang等人^[28]在上海交通大学拖曳水池进行极端波浪实验, 探究单向随机波峰度的空间演化过程.

综上所述, 尽管在极端波浪的产生机理及风作用下波群的聚焦过程等方面已有许多成果报道, 但对于非定常风作用下的随机波浪演化过程尚未获得更加深入的认识, 由于波浪演化及极端波浪产生的机理尚不明确, 同时存在很强的随机性, 现有理论的方法和数值模型均建立在一定的假设下, 受到诸多因素的制约, 不能真实地反映实际海洋中波浪的演化过程. 为进一步探索波浪演化过程中的统计特征, 本文基于波浪的Benjamin-Feir不稳定性, 在实验室对随机波浪进行长时间的模拟, 同时引入非定常风, 研究分析风对波浪演化过程中的统计特性的影响及其能量谱的响应.

2 实验概况

2.1 实验水池

本实验在上海交通大学多功能拖曳水池中进行, 该水池长度为300 m, 宽度为16 m, 深度为7.5 m. 实验布置如图1(a), (b)所示. 水池一端为40片摇板所构成的造波装置, 如图1(c)所示, 通过电脑程序对波浪参数进行控制, 另一侧设置有消波滩, 同时配备主动消波系统及侧壁消波系统以减小反射波浪所带来的影响, 经前期实验测试, 波浪的波高反射率小于5%, 符合ITTC规范^[29]. 实验期间工作水深为7.5 m, 距造波机78.5 m处安装由15台轴流式风机所构成的风机阵列, 如图1(d)所示. 由于波浪传播至距造波机20–30倍波长处, 波浪的峰度将会达到最大而后减小^[20], 同时出于风场品质的考虑, 为研究风对波浪演化的影响, 从风机阵列下游5 m开始, 沿水池方向每间隔5 m对称布置2个波高仪, 共计6个波高

图 1 (网络版彩图)实验装置图及波高仪布置. 实验示意图的俯视图(a)和侧视图(b); (c) 多功能造波系统; (d) 风机阵列

Figure 1 (Color online) Sketch of the wave tank facility and location of wave probes. Vertical view (a) and end view (b) of the experimental schematic; (c) multifunctional wave generating system; (d) wind turbines.

仪, 采样频率为100 Hz, 用以测量波浪高程的时间序列, 波高仪在实验前均经过严格标定及测试, 满足实验要求.

2.2 造波信号

本实验中所采用的海浪谱为JONSWAP谱, 其表达式由式(1)给出:

$$S_J(f) = \alpha_J g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \gamma^{\exp\left(-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma_J^2 f_p^2}\right)}, \quad (1)$$

式中, γ 为谱峰因子, σ_J 为峰形参数, 当 $f \leq f_p$ 时, $\sigma_J = 0.07$; 当 $f > f_p$ 时, $\sigma_J = 0.09$, α_J 为菲利普斯常数. 本实验中, 谱峰因子取值为1和6, 分别对应宽带频谱及窄带频谱, 同时为了减小波浪周期对实验结果所带来的影响, 本实验中波浪的谱峰周期均为 $T_p = 1.5$ s.

2.3 实验风场

本实验中所需的非定常风由风机阵列产生, 风场长度为沿水池方向0–80 m, 高度为距水面平衡位置0–1.6 m. 风机出口处风速为5 m/s, 并且在距风机阵列20 m处减弱至3 m/s, 当到风机阵列距离大于80 m时, 风速与环境风速趋近于一致.

2.4 实验工况设置

出于对波浪非线性的考虑, Jassen^[30]通过使用BFI作为描述Benjamin-Feir不稳定性的参数, BFI可由式(2)得到

$$\text{BFI} = \frac{\sqrt{2}\varepsilon}{2\Delta f/f_p}. \quad (2)$$

BFI被定义为波陡和谱宽的比值, 用以描述波浪的非线性. 不同BFI值可通过改变频谱宽度及有效波高来获得. 本实验中所使用的波浪参数如表1所示.

为了获得大量、准确的数据, 对每个工况进行了具有三种不同随机种子(随机相位和波幅)的实验, 每个实验的持续时间为32 min, 非定常风作用时间为32 min, 每个波高仪所记录的波高时序中大约包括7680个波.

表 1 实验波浪参数设置

Table 1 Wave parameters of the experiments

实验工况	波浪参数			
	H_s (m)	γ	ε	BFI
无风I	0.11	1	0.098	0.24
无风II	0.15	6	0.134	1.27
非定常风I	0.11	1	0.098	0.24
非定常风II	0.15	6	0.134	1.27

3 实验结果分析

3.1 极端波浪的产生

由于波浪在实际海洋中的传播表现为非线性, 随着波浪的不断演化, 会有极端波浪的产生. 本实验通过对随机波浪的长时间模拟, 基于Benjamin-Feir不稳定性, 在海洋工程水池中产生得到极端波浪, 以此来模拟实际海上环境. 经过长时间的模拟, 可以从时间序列上观察到极端波浪的产生, 图2显示的是无风II工况, BFI=1.27的情况下, 沿水池方向不同位置: $X/L=23.9$, $X/L=25.3$, $X/L=26.7$ 处所测量得到的时间序列, 其中 X 为波高仪与造波机之间的距离, L 为谱峰频率所对应的波浪波长, 为了更清晰地展现, 将波高仪测量得到的时间序列递增30 cm. 如图所示, 在 $X/L=23.9$ 处的波高仪上测量到了极端波浪, 并且在波浪进一步的传播演化过程中, 极端波浪逐渐消失在背景波中, 这符合极端波浪持续时间短、突发性的特点.

不同于以往聚焦波或随机波列叠加的方法, 本实验中的极端波浪是在随机波的背景中产生的, 所以产生的极端波浪与真实海洋中的极端波浪更为一致, 为了显示实验所产生极端波浪的真实性, 与在北海所测得的“新年波”^[31]进行对比. 结果表明, 实验所产生的极端波浪在形态上与北海“新年波”相类似, 如图3所示, 波高均大于当前海况下有效波高的两倍, 满足对极端波浪的定义, 其中“新年波”为 $H/H_s=2.15$, 无风II工况为 $H/H_s=2.28$, 实验结果略大于“新年波”.

3.2 无风条件下波浪统计特性分析

由于波浪的非线性作用, 波浪在沿水池方向传播的过程中, 其统计特性会发生变化. 图4展示的是无风条件下波浪有效波高沿传播方向的变化, 本文中波浪波高均为向上过零统计获得, 图中横坐标为到造波机的距离, 并通过波浪波长进行标准化处理. 如图所示, 在无风条件下, 波浪的有效波高基本保持稳定. 在实验中观察到少量波浪的破碎, 但对波浪整体的统计特性并无较大影响.

对于理想的正态随机过程, 其分布可看作正态

分布. 波浪在线性条件下符合正态随机过程, 但事实上由于受到非线性的影响, 实际的波高分布与正态分布有所偏差, 偏差程度可用偏度(Skewness)和峰度(Kurtosis)来描述, 其表达式由式(3)–(5)给出:

$$\text{Skewness} = \frac{1}{\eta_{\text{rms}}^3 N} \sum_{n=1}^N (\eta_n - \bar{\eta})^3, \quad (3)$$

图2 (网络版彩图)无风II工况沿水池方向不同位置的波浪时间序列

Figure 2 (Color online) Time series recorded at different locations along the wave flume for No-Wind II.

图3 (网络版彩图)实验产生的极端波浪与北海“新年波”比较. (a) “新年波”; (b) 无风II工况

Figure 3 (Color online) Comparison of the freak wave generated in the experiment with the “New Year Wave” measured in the North Sea. (a) “New Year Wave”; (b) No-Wind II.

图 4 无风条件下波浪有效波高沿水池方向的变化

Figure 4 Variations of the significant wave height along the wave flume under no-wind condition.

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{\eta_{\text{rms}}^4 N} \sum_{n=1}^N (\eta_n - \bar{\eta})^4, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \cdots + \eta_N^2}}{N}, \quad (5)$$

其中, η_n 为波面高程, $\bar{\eta}$ 为波面均值, η_{rms} 为波面均方根。

图 5 展示的是无风条件下波浪的峰度沿水池方向的变化。由于波浪的非线性作用, 波浪的峰度大于 3, 这表明波浪表面不再符合高斯分布。峰度值与波陡和谱宽有关, 即与 BFI 密切相关。在深水中, 具有大波陡、窄谱的单向波, 会产生准共振作用。Onorato 等人 [20] 的实验结果表明, 在波浪传播至距离造波机 20–30 倍波长处, 波浪的峰度会达到最大值, 并随后下降, 本实验中, 在波浪在到达波高仪之前, 其峰度已经达到峰值, 在测量的区域范围处于平稳下降的阶段。

图 6 展示的是无风条件下波浪偏度沿传播方向的变化。如图所示, 波浪的偏度均大于 0, 表现为左偏态, 这说明波浪具有峰谷不对称性、波峰高瘦、波谷平坦, 同时表明在分布的右侧存在厚尾现象, 即与正态分布相比, 会有更多的大波高波浪产生。偏度的大小取决于波浪的陡度, 陡度越大, 其偏度越大, 说明在波浪的传播过程中, 陡度也有所增加。

波浪在传播过程中, 由于非线性的作用, 波浪组成波间能量会相互传递, 通过对波浪能量谱的分析,

解释波浪异常的统计特性。本实验中通过快速傅里叶变换并进行适当光滑后得到波浪的能量谱。在进行光滑处理时, 各组次采取相同的平滑点数, 从而保证光滑处理不会影响谱的结果。

图 7 展示的是无风条件下波浪在不同位置处: $X/L=23.9$, $X/L=25.3$, $X/L=26.7$ 的能量谱, 为了更清楚地反映能量谱之间的变化情况, 采用双对数坐标。如图 7(a) 所示, 对于 $\text{BFI}=0.24$ 的情况, 波浪能量谱在波浪传播过程中基本保持不变。如图 7(b) 所示, 对于 $\text{BFI}=1.27$ 的情况, 波浪能量谱在高频部分出现了一定程度的下降, 这是由于波浪在传播的过程中, 能量的耗散作用所造成。

图 5 无风条件下波浪峰度沿水池方向的变化

Figure 5 Variations of the kurtosis along the wave flume under no-wind condition.

图 6 无风条件下波浪偏度沿水池方向的变化

Figure 6 Variations of the skewness along the wave flume under no-wind condition.

图 7 (网络版彩图)无风条件下波浪能量谱沿水池方向的变化. (a) BFI=0.24; (b) BFI=1.27

Figure 7 (Color online) Variations of the energy spectra along the wave flume under no-wind condition. (a) BFI=0.24; (b) BFI=1.27.

3.3 非定常风作用下波浪统计特性分析

波浪是海洋和近海工程中最常见、最重要的环境载荷之一,其运动机理非常复杂,受到诸多条件的制约,对海上建筑结构、船舶和港口的安全运营有着的深远影响.在实际海洋中,波浪不可避免地会受到风的作用,在非定常风作用下波浪的统计特性更为复杂,所以本实验通过风机阵列产生的非定常风,模拟实际海上波浪所受到的风的作用,以此进一步分析理解波浪统计特性及能量谱对风的响应.

由无风的情况可知,波浪的峰度在波高仪前已经达到峰值,在测量的区域内为平稳下降的状态,这

消除了因为Benjamin-Feir不稳定性而导致的波浪峰度的进一步增加.图 8 展示的是在非定常风作用下波浪的峰度沿水池方向的变化.在风的作用下,对于BFI=0.24的情况,波浪的峰度基本保持不变,与无风情况下保持一致.对于BFI=1.27的情况,波浪的峰度出现了增长.峰度作为衡量BFI的一个重要参数,峰度的增加会导致BFI的增加,进一步增大极端波浪出现的概率.

图 9 展示的是在非定常风作用下波浪偏度沿水池方向的变化.如图所示,在 $X/L=23.9$ 处,波浪的初始偏度发生了变化,而偏度的大小取决于波浪陡度的大小.本实验中,波浪的周期均为 $T_p=1.5$ s,所以波浪的陡度取决于波浪的有效波高.

图 10 展示的是非定常风作用下波浪有效波高沿水池方向的变化.如图所示,对于BFI=0.24的情况,波浪的有效波高保持不变;对于BFI=1.27的情况,波浪的有效波高出现了较大幅度的下降,这主要是因为波浪传播到风机阵列处,存在高压区域,受到风的作用,水气界面不稳定,波浪发生了破碎,导致了能量的损失.在波浪继续传播的过程中,一方面因为风力减弱,另一方面由于波浪能量的损失,陡度下降,波浪破碎现象减少,波浪有效波高在传播过程中基本保持不变.在传播过程中,对于BFI=0.24的情况,波浪的偏度保持平稳,有轻微的波动;对于BFI=1.27的情况,偏度有所下降,这主要是波浪破碎的原因.

图 8 (网络版彩图)非定常风作用下波浪峰度沿水池方向的变化

Figure 8 (Color online) Variations of the kurtosis along the wave flume under unsteady wind condition.

图 9 (网络版彩图)非定常风作用下波浪偏度沿水池方向的变化

Figure 9 (Color online) Variations of the skewness along the wave flume under unsteady wind condition.

图 10 (网络版彩图)非定常风作用下波浪有效波高沿水池方向的变化

Figure 10 (Color online) Variations of the significant wave height along the wave flume under unsteady wind condition.

图 11 展示的是无风情况及非定常风作用下波浪在不同位置处: $X/L=23.9$, $X/L=25.3$, $X/L=26.7$ 的能量谱, 其中虚线表示无风条件下的波浪能量谱, 实线表示受非定常风作用的波浪频谱. 如图 11(a) 所示, 对于 $BFI=0.24$ 的情况, 波浪能量谱在波浪传播过程中基本保持不变, 略有减小, 主要是因为波浪传播过程中能量的耗散. 值得注意的是, 如图 11(b) 所示, 对于 $BFI=1.27$ 的情况, 波浪能量谱的高频部分出现了不同程度的增加, 随着波浪的传播增加量更大, 可以解释为波浪从非定常风中获得了能量, 而这部分能量主要集中在高频部分. 同时发现, 对于 $Hs=0.15$

图 11 (网络版彩图)非定常风作用下波浪能量谱沿水池方向的变化. (a) $BFI=0.24$; (b) $BFI=1.27$

Figure 11 (Color online) Variations of the energy spectra along the wave flume under unsteady wind condition. (a) $BFI=0.24$; (b) $BFI=1.27$.

的情况, 非定常风作用下的能量谱在峰值处低于无风的情况, 可进一步解释波浪有效波高下降是因为能量的损失.

4 结论

本文基于波浪的 Benjamin-Feir 不稳定性, 开展实验室模拟, 研究了在非定常风作用下波浪的统计特性, 并进一步探索了波浪能谱的响应, 主要结论如下:

(1) 经过长时间的随机波浪模拟, 可以产生得到

极端波浪,并在形态上与北海“新年波”相类似,表现为瞬态性、非线性.

(2) 在非定常风的作用下,波浪的偏度基本保持不变,稍有下降.而具有较大BFI的波浪,其有效波高因为波浪的破碎而显著下降,由于极端波浪被定义为当前海况下有效波高的两倍,所以在实验中更容易观测到极端波浪的产生.另一方面,具有较大BFI的波浪,其峰度受到非定常风的影响而增长,峰度作为衡量BFI的一个重要参数,峰度的增

加可能会极大地影响极端波浪出现的概率,对于较小BFI的情况,波浪的峰度则变化不大.

(3) 在对波浪能量谱的分析,波浪从风中所获得的能量主要集中在能量谱的高频部分.对于较大BFI的情况,由于更容易发生波浪的破碎,导致能量的损失,在波浪能量谱上表现为峰值的降低.

(4) BFI作为一个影响极端波浪产生的重要参数,对于极端波浪的预测具有重要意义.同时非定常风在对极端波浪的模拟及预测中也应该被考虑到.

参考文献

- Li J C. Introduction: Ocean engineering hydrodynamics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 111 [李家春. 前言: 海洋工程水动力学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 111]
- Draper L. Freak wave. *Marine Observ*, 1965, 35: 193–195
- Lawton G. Monsters of the deep (The perfect wave). *New Sci*, 2001, 170: 28–32
- Baldock T E, Swan C. Extreme waves in shallow and intermediate water depths. *Coast Eng*, 1996, 27: 21–46
- Johannessen T B. The Effect of Directionality on the Nonlinear Behaviour of Extreme Transient Ocean Waves. Dissertation for Doctoral Degree. London: University of London, 1997
- Zhao X Z, Sun Z C, Liang S X. Focusing model for generating 3-D freak waves based on HOS method (in Chinese). *The Ocean Eng*, 2009, 27: 33–39 [赵西增, 孙昭晨, 梁书秀. 高阶谱方法建立三维畸形波聚焦模拟模型. 海洋工程, 2009, 27: 33–39]
- Kriebel D L, Alsina M V. Simulation of extreme waves in a background random sea. In: *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle, 2000. 31–37
- Liu M, Zhang Z. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for modeling fluid-structure interactions. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 984701
- Jiang S Y, Fu S. Numerical investigation of separation-induced transition in a low-pressure turbine cascade in a low-disturbance environment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 264711
- Hu Y W, Wang J S, Wang J J, et al. Flow-structure interaction of an inverted flag in a water tunnel. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 124711
- Dudley J M, Genty G, Mussot A, et al. Rogue waves and analogies in optics and oceanography. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 675–689
- Benjamin T B, Feir J E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory. *J Fluid Mech*, 1967, 27: 417–430
- Chalikov D. Statistical properties of nonlinear one-dimensional wave fields. *Nonlin Proc Geophys*, 2005, 12: 671–689
- Toffoli A, Onorato M, Bitner-Gregersen E, et al. Surface gravity waves from direct numerical simulations of the Euler equations: A comparison with second-order theory. *Ocean Eng*, 2008, 35: 367–379
- Xiao W, Liu Y, Wu G, et al. Rogue wave occurrence and dynamics by direct simulations of nonlinear wave-field evolution. *J Fluid Mech*, 2013, 720: 357–392
- Zakharov V E, Shamin R V. Probability of the occurrence of freak waves. *Jetp Lett*, 2010, 91: 62–65
- Mori N, Janssen P A E M. On kurtosis and occurrence probability of freak waves. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 1471–1483
- Onorato M, Osborne A R, Serio M, et al. Freak waves in random oceanic sea states. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 5831–5834
- Onorato M, Osborne A R, Serio M, et al. Extreme waves, modulational instability and second order theory: Wave flume experiments on irregular waves. *Eur J Mech-B/Fluids*, 2006, 25: 586–601
- Onorato M, Waseda T, Toffoli A, et al. Statistical properties of directional ocean waves: The role of the modulational instability in the formation of extreme events. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 114502
- Kharif C, Giovanangeli J P, Touboul J, et al. Influence of wind on extreme wave events: Experimental and numerical approaches. *J Fluid Mech*, 2008, 594: 209–247
- Touboul J, Kharif C, Pelinovsky E, et al. On the interaction of wind and steep gravity wave groups using Miles' and Jeffreys' mechanisms. *Nonlin Proc Geophys*, 2008, 15: 1023–1031

- 23 Touboul J. On the influence of wind on extreme wave events. [Nat Hazards Earth Syst Sci](#), 2007, 7: 123–128
- 24 Zou Q, Chen H. Wind and current effects on extreme wave formation and breaking. [J Phys Oceanogr](#), 2017, 47: 1817–1841
- 25 Hu H H, Ma N. The nonlinear evolution of rogue waves generated by means of wave focusing technique. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2011, 54: 35–41
- 26 Ning D, Du J, Bai W, et al. Numerical modelling of nonlinear extreme waves in presence of wind. [Acta Oceanol Sin](#), 2018, 37: 90–98
- 27 Zhao K, Ma X Z, Ma Y X, et al. Numerical simulation of precession resonance in deep water waves (in Chinese). *Ocean Eng*, 2018, 36: 103–111
[赵扩, 马小舟, 马玉祥, 等. 深水波中进动共振的数值模拟研究. *海洋工程*, 2018, 36: 103–111]
- 28 Tang T, Xu W, Barratt D, et al. Spatial evolution of the kurtosis of steep unidirectional random waves. [J Fluid Mech](#), 2021, 908: A3
- 29 ITTC. Laboratory Modelling of Waves: Regular, Irregular and Extreme Events. ITTC-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-07-01.2, 2017
- 30 Janssen P A E M. Nonlinear four-wave interactions and freak waves. [J Phys Oceanogr](#), 2003, 33: 863–884
- 31 Haver S. A possible freak wave event measured at the Draupner jacket January 1 1995. In: *Rogue Waves 2004: Proceedings of a Workshop*. Buleisite: IFREMER, 2004. 1–8

Preliminary investigation on statistical properties of extreme waves under unsteady wind

ZHANG ZiTan¹, XU WenTao¹, TANG TianNing², ZHENG XiaoBo¹, QU WenHai¹,
ZHANG LiJun¹ & LI Ye^{1,3,4*}

¹Laboratory of Multifunctional Towing Tank, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford OX1 3PJ, UK;

³State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

⁴MOE Key Laboratory of Hydrodynamics of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Freak waves have the properties of strong nonlinearity and suddenness, which are often accompanied by extreme weather conditions. As an important environmental load, wind has a significant transient characteristic and plays an important role in the generation of freak waves. In order to understand the statistical properties of waves under the action of wind, especially the influence of wind on freak waves, laboratory experiments were carried out. In this paper, based on the Benjamin-Feir instability, long time series of wave field under unsteady wind are simulated by Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) spectra with random phases in a two-dimensional wave tank. The freak waves generated in the experiment are similar in shape to those measured at sea, and are more than twice the significant wave height of the sea state. Through the statistical analysis of wave significant wave height, kurtosis and skewness, the influence of unsteady wind on the statistical properties of wave evolution is analyzed, and the response of wave energy spectrum is further investigated. The results of experiment show that the waves with larger Benjamin-Feir index are often broken under the unsteady wind, resulting in the loss of wave energy and the significant decrease of wave significant wave height. The skewness of waves depends on the steepness and decreases slightly during wave evolution. It is worth noting that the wave kurtosis increases under the unsteady wind. As an important parameter to measure Benjamin-Feir index, kurtosis will play an important role in the generation of freak waves. The increase of kurtosis will increase the probability of freak waves. Through the analysis of wave energy spectrum, it is found that there is energy dissipation in the process of wave evolution. The wave breaking under the unsteady wind leads to the decrease of the peak value of energy spectrum, and the energy obtained by the wave from the wind is mainly concentrated in the high frequency part of the wave.

freak wave, Benjamin-Feir instability, wind wave experiment, statistical properties, spectrum analysis

PACS: 47.35.Bb, 47.50.Gj, 47.11.Kb, 47.35.-i

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0438](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0438)