

付睿丽, 马玉祥, 董国海. 深水随机波列中畸形波统计特征的研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(10): 81–89, doi:10.12284/hyxb2021159  
Fu Ruili, Ma Yuxiang, Dong Guohai. Researches on statistical properties of freak waves in uni-directional random waves in deep water[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(10): 81–89, doi:10.12284/hyxb2021159

# 深水随机波列中畸形波统计特征的研究

付睿丽<sup>1</sup>, 马玉祥<sup>1\*</sup>, 董国海<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 本文基于 Longuet-Higgins 随机波浪模型和 JONSWAP 谱, 进行了大量深水随机波的模拟, 获取了畸形波发生概率稳定的随机波列, 并对随机波列中的畸形波进行了分析。结果表明, 畸形波发生的概率小于基于 Rayleigh 分布预测结果, 且随谱宽的减小而增大。在固定时间段内, 畸形波发生的频次服从泊松分布, 时间间隔服从指数分布, 且随着谱宽的增大, 畸形波的发生频次减小, 相邻畸形波的发生时间间隔增加。通过小波变换方法分离随机波中的波群, 研究了出现畸形波的波群特征, 发现一个波群中最多会出现 4 个畸形波, 但是在发生畸形波的波群中, 单个畸形波的概率最大。随着谱宽减小, 一个波群中包含多个畸形波的概率增加。另外, 出现畸形波的波群时间长度服从广义极值分布, 随着谱宽减小, 畸形波波群的时间跨度增加。

**关键词:** 畸形波; 波群; 波浪模型

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)10-0081-09

## 1 引言

畸形波, 也称突发巨浪、疯狗浪, 是指波高不小于 2 倍有效波高 ( $H \geq 2H_s$ ) 的波浪<sup>[1]</sup>。这类波浪因其波高巨大且发生突然, 可对海洋结构物和人类生命安全造成严重的威胁<sup>[2-6]</sup>。畸形波的统计特征和产生机理研究一直是海洋工程领域研究的热点问题。通过大量数据的统计分析是了解畸形波特征的关键, 然而由于畸形波的突发性, 现场观测得到的数据非常稀少, 这对揭示畸形波的特征带来了巨大的挑战。物理模型试验是研究畸形波的重要途径, 然而获取大量数据需要开展大量的物理模型试验, 导致成本极其高昂, 并且受到水池尺寸的限制, 数据不可避免受到水深和边壁反射的影响。

以往大量研究表明, Longuet-Higgins 随机波浪模

型<sup>[7]</sup>可以很好地描述波浪的统计特征, 广泛应用于海洋工程等领域的波浪要素统计、波浪荷载计算和结构安全设计等方面<sup>[8]</sup>。因此应用 Longuet-Higgins 随机波浪模型产生大量的数值仿真波浪是开展波浪统计特征研究的有效方法。Gemrich 和 Garrett<sup>[9]</sup>通过 Longuet-Higgins 随机波浪模型, 利用 WAFO 工具箱<sup>[10]</sup>, 分析了不同谱宽波况中畸形波的重现期, 发现畸形波的重现期仅与谱宽有关。与其他产生随机波浪时间序列的方法相比, 该工具箱可快速生成足够长时间的随机波浪时间序列, 且波面无重复。随后, Gemrich 和 Garrett<sup>[11]</sup>分析了有限水深中畸形波的重现期, 发现随着水深变浅, 该波的发生频率显著增加。Ghane 等<sup>[12]</sup>利用该模型推导了大于不同波高阈值的波浪持续时间和振幅的联合分布。潘玉萍等<sup>[13]</sup>利用 Longuet-Higgins 模型计算了波高-周期联合概率密度

收稿日期: 2020-07-28; 修订日期: 2020-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (51720105010, 51679031, 51979029); 辽宁省兴辽人才计划 (XLYC1807010); 中央高校基本科研业务费 (DUT2019TB02)。

作者简介: 付睿丽 (1993—), 女, 甘肃省定西市人, 主要从事波浪水动力研究。E-mail: frldlut@163.com

\* 通信作者: 马玉祥 (1981—), 男, 河南省驻马店市人, 教授, 主要从事非线性水波动力学理论和数值算法等研究。E-mail: yuxma@126.com

分布,并与美国浮标站实测的典型双峰海浪谱进行对比,发现计算的波高与周期联合分布与实测情况基本相同。基于 Longuet-Higgins 随机波浪模型,毛青等<sup>[14]</sup>进行了大量随机波的模拟,发现随机波列中出现的畸形波的波高、周期分布符合广义极值分布(GEV 分布),畸形波出现的时间间隔符合指数分布。在极端环境下,比如风暴过程,海况的参数是变化的,一般假定一个固定时间内,如 3 h,海浪的参数不变<sup>[15]</sup>。在这段时间内,畸形波的出现频率及间隔时间的分布尚不清楚。很多研究表明,畸形波并不是突然出现的,而大部分是从能量集中的波群中演化出来的<sup>[16-18]</sup>。因此,研究畸形波所在波群的形态特征和能量分布是深入了解畸形波的必要途径。Osborne 等<sup>[19]</sup>研究表明在巨大波峰前后都会形成深谷;Clauss<sup>[20]</sup>发现畸形波往往以波群形式出现,在巨浪出现前后也会出现连续的大波。崔成等<sup>[21]</sup>分析了畸形波群的内部能量,发现在畸形波生成前、后出现的过渡大波中也包含大量高频能量,内部结构和畸形波类似。很多原场观测资料表明<sup>[22-24]</sup>,一个波群中会有连续的两个甚至 3 个畸形波产生。然而到目前为止,对随机波列中出现畸形波波群的形态特征的分析仍然不明确,这制约着对畸形波群的生成机理、演化过程及内部结构等方面的研究。

本文采用 Longuet-Higgins 理论随机波浪模型,基于 JONSWAP 谱生成大量的随机波面序列,并分析了一定时间内畸形波的发生频率和时间间隔的分布特征,及谱宽对其分布的影响。随后基于小波能量谱分析波群的方法<sup>[24]</sup>,将随机时间序列分解成独立波群的组合,进而分析了畸形波群中包含不同畸形波个数的比例和畸形波群时间跨度的分布特征等。

## 2 波浪模型

### 2.1 理论随机波浪模型

Longuet-Higgins 理论随机波浪模型假设波面由很多单色波叠加而成,在二维波况下,波面表示为<sup>[7]</sup>

$$\eta(x, t) = \operatorname{Re} \left( \sum_n a_n e^{i(\omega_n t - k_n x + \varphi_n)} \right) \quad n \in N, \quad (1)$$

式中,  $a_n$ 、 $\omega_n$ 、 $k_n$ 、 $\varphi_n$  分别为第  $n$  个波浪元素的振幅、频率、波数和初始相位;  $N$  为总波浪元素个数。每个波浪元素的频率和波数满足色散关系

$$\omega_n = \sqrt{gk_n \tanh(k_n h)}, \quad (2)$$

式中,  $h$  为水深;  $g$  为重力加速度。

### 2.2 波浪参数选择

本文利用 WAFO 工具箱<sup>[10]</sup>,选择 JONSWAP 谱<sup>[25]</sup>

生成随机波面序列,谱峰升高因子  $\gamma$  从 1 到 7 变化,深水随机波浪选择南海 1 年一遇的波浪参数,即有效波高选择  $H_s=6$  m、谱峰周期为  $T_p=11$  s<sup>[26]</sup>。每组时间序列包含 150 万个波浪,时间间隔为  $dt=0.1$  s,在该波浪个数下,畸形波的发生概率已趋于稳定,每组波况包含 20 个样本。不同谱宽随机时间序列中,包含 150 万个波浪个数的时间序列长度  $T_0$  见表 1。

表 1 不同谱宽的时间序列长度<sup>[27]</sup>

Table 1 Time series lengths for different spectrum widths

$\gamma$	谱宽 $\nu$	时间序列 $T_0/s$	实际波数	波数相对误差/%	畸形波发生概率/%
1	0.381	11 988 695	1 499 724	0.018 4	0.007 5
2	0.367	12 565 184	1 499 739	0.017 4	0.009 3
3	0.355	12 959 049	1 499 760	0.016 0	0.010 7
4	0.343	13 257 563	1 499 719	0.018 7	0.012 1
5	0.333	13 496 085	1 499 696	0.020 2	0.013 3
6	0.324	13 693 145	1 499 821	0.011 9	0.014 3
7	0.315	13 859 826	1 499 880	0.008 0	0.015 2

在本文中,畸形波的定义为波高不小于 2 倍有效波高( $H \geq 2H_s$ )的波浪<sup>[1]</sup>,其中波高通过下跨零点法计算。

谱宽参数<sup>[28]</sup>为

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2}} - 1, \quad (3)$$

式中,  $m$  为谱的矩;谱的  $r$  阶矩为

$$m_r = \int_0^\infty \omega^r S(\omega) d\omega. \quad (4)$$

研究表明,不同谱宽的畸形波的发生概率小于基于 Rayleigh 的分布预测结果(0.033 3%)。与实测海况畸形波发生概率相比,当谱峰升高因子  $\gamma=1 \sim 3$  时,对应的畸形波发生概率与台湾岛的概率接近<sup>[29]</sup>,而当  $\gamma=7$  时,对应的畸形波发生概率与江苏海岸的概率接近<sup>[30]</sup>,这些波况的畸形波发生概率均小于北海、印度洋、大西洋等的畸形波发生概率<sup>[28, 31]</sup>。

## 3 畸形波统计特征分析

### 3.1 畸形波的发生频次

根据 Rayleigh 分布的统计结果,畸形波大约在 3 000 个波浪中出现 1 次<sup>[32]</sup>。但目前研究对畸形波发生频次分布的研究仍然较少。在实际海况中,一场风暴固定有效波高不变的时间一般为 3 h ( $T$ )<sup>[15]</sup>。因此,分析在 3 h 内,畸形波发生频次的分布非常重要。分析方法如下:

(1)将总时间为  $T_0$  s 的时间序列等分为  $n$  段时间长度为  $T$  (10 800 s) 的时间序列,即

$$\text{mod}(T_0, T) = n. \quad (5)$$

(2)分析在时间  $T$  内畸形波出现频次的分布特征,图1展示了  $\gamma=1, 3, 5, 7$  时,畸形波发生频次的概率密度曲线。经过  $\chi^2$  检验,该曲线符合泊松分布,且泊松分布参数  $\lambda$  与谱宽  $\nu$  呈线性关系(图2),随着谱宽增加,泊松分布参数线性降低,具体为

$$\lambda = -1.29\nu + 0.59. \quad (6)$$

因此,当  $\gamma=1\sim 7$  时,在  $T$ s 内,发生  $m$  次的畸形波的概率  $P(m)$  为

$$P(X = m) = \frac{(-1.29\nu + 0.59)^m}{m!} e^{-(1.29\nu - 0.59)}. \quad (7)$$

为验证公式(7)的准确性,选择谱峰因子为  $\gamma=2, 4, 6$  的时间序列进行测试。经检验,当  $\gamma=2, 4, 6$  时,时间  $T$  内畸形波的发生频次同样服从泊松分布。根据式(7)计算发生1次、2次畸形波的概率,并与 WAFO 工具箱生成的数值时间序列得到的概率值比较,相对

误差见表2,其中相对误差为

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{预测值} - \text{数值结果}|}{\text{数值结果}} \times 100\%. \quad (8)$$

由表2可见,式(7)计算得到的畸形波发生频次的概率与数值结果误差不超过2.2%,说明式(7)可以较准确地估算出深水条件下在3h内发生畸形波频次的概率。进一步地,改变时间  $T$ ,验证泊松分布参数的鲁棒性。分别分析了  $T=6$  h, 9 h, 12 h 内畸形波的发生频次,发现在不同时间段内畸形波的发生次数均服从泊松分布,且泊松分布系数  $\lambda$  保持不变,说明在理论随机波浪模型中,畸形波发生次数的概率分布较稳定,不随时间范围变化。

### 3.2 相邻畸形波的时间间隔

进一步分析相邻畸形波之间的时间间隔分布,其中畸形波的时间间隔根据畸形波对应的下跨0点的时间差确定。不同谱宽下,相邻畸形波的无量纲时间间隔(以谱峰周期  $T_p$  为标准)的概率分布见图3,红色

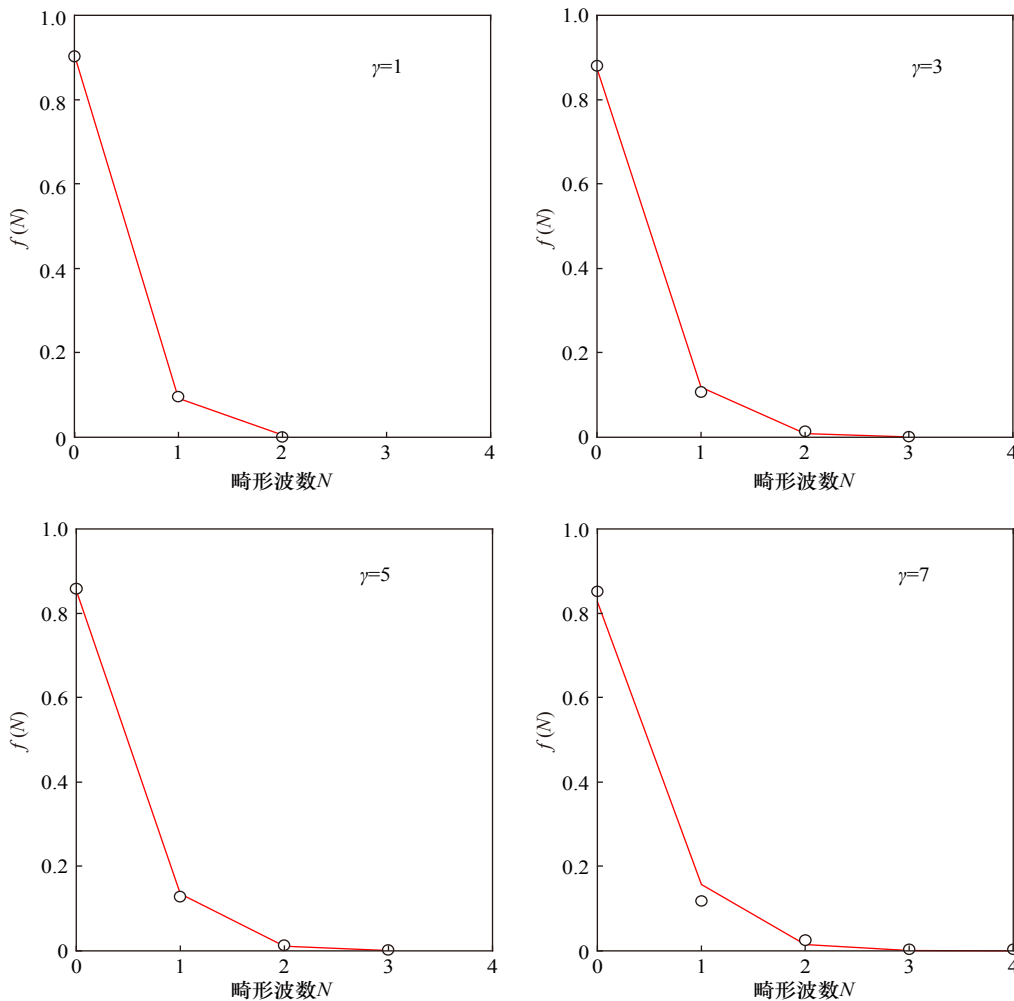


图1  $\gamma=1, 3, 5, 7$  时,时间  $T$  内畸形波发生频率的概率密度分布

Fig. 1 Probability distributions of frequency of freak waves for different peak enhancement factors ( $\gamma=1, 3, 5, 7$ )

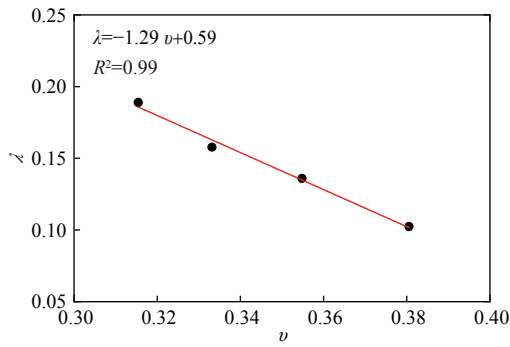


图 2 泊松分布参数  $\lambda$  与谱宽  $\nu$  的关系

Fig. 2 Relationships between Poisson distribution parameter  $\lambda$  and spectrum widths  $\nu$

实线表示指数分布拟合的曲线, 经过 K-S 检验, 相邻畸形波的时间间隔  $T_d$  服从指数分布, 即

$$f(T_d/T_p) = \frac{1}{\mu} e^{-(T_d/T_p)/\mu}, \quad (9)$$

式中,  $T_d$  为相邻畸形波的时间间隔;  $T_p$  为谱峰周期;  $\mu$  为指数分布参数。

不同谱宽的指数分布参数  $\mu$  与谱宽的关系见图 4, 随着谱宽  $\nu$  的增加, 指数分布参数  $\mu$  线性增加, 即随着谱宽的增加, 相邻畸形波的时间间隔逐渐增大。具体满足

$$\mu = 60\,012.86\nu - 13\,798.91. \quad (10)$$

表 2 不同谱宽下畸形波出现不同频次概率的预测值与数值结果对比

Table 2 Comparisons of the numerical and predicted values of possibility for frequencies of freak waves

$\gamma$	谱宽 $\nu$	出现 1 次畸形波的概率		相对误差/%	出现 2 次畸形波的概率		相对误差/%
		理论值	数值结果		理论值	数值结果	
2	0.367	0.103 4	0.103 3	0.10	0.006 0	0.006 0	0
4	0.343	0.126 9	0.125 5	1.12	0.009 3	0.009 1	2.20
6	0.324	0.144 9	0.146 5	1.09	0.012 5	0.012 7	1.57

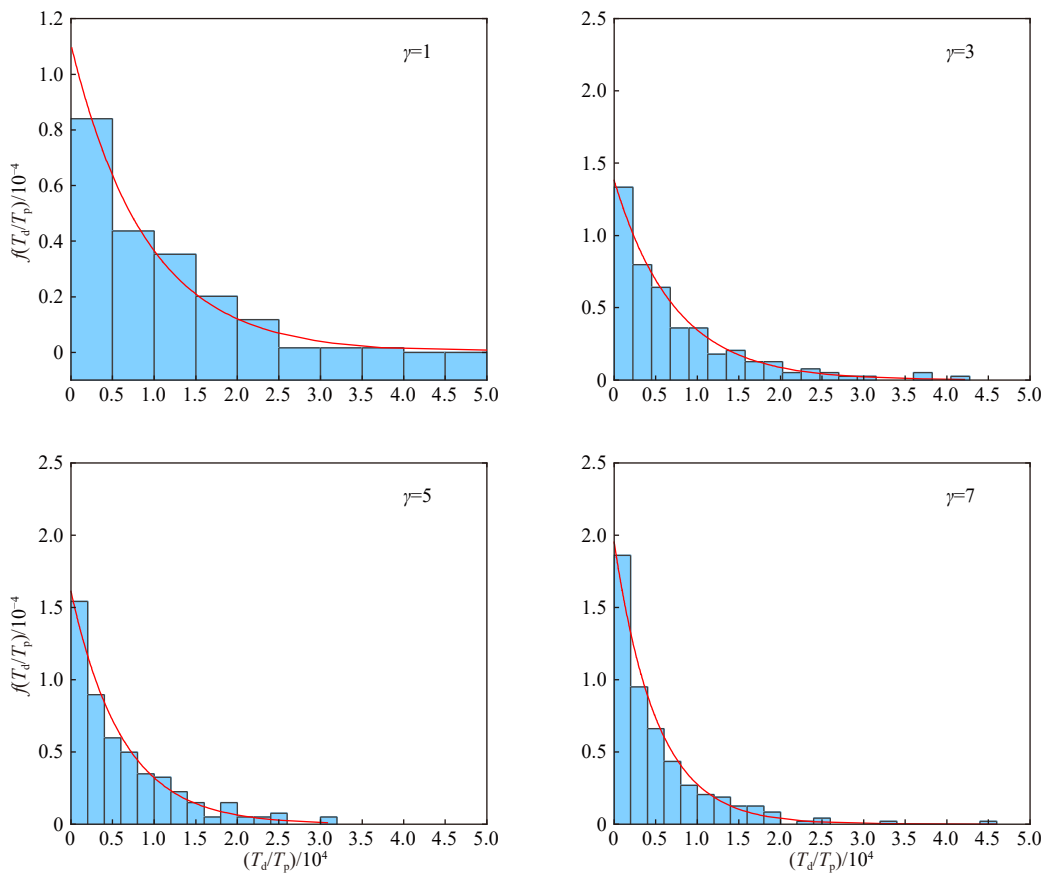


图 3  $\gamma=1, 3, 5, 7$  时, 畸形波出现时间间隔分布

Fig. 3 Probability distributions of time intervals of freak waves for different peak enhancement factors ( $\gamma=1, 3, 5, 7$ ).

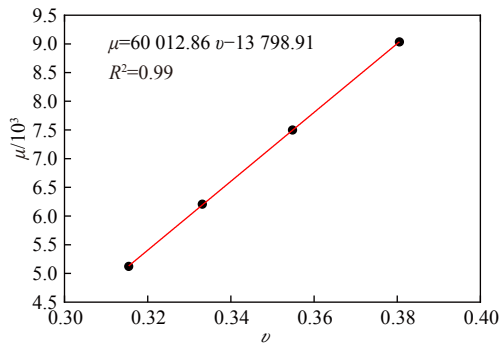


图4 指数分布参数  $\mu$  与谱宽  $\nu$  的关系

Fig. 4 Relationships between exponential distribution parameter  $\mu$  and spectrum widths  $\nu$

因此,相邻畸形波的时间间隔  $T_d$  的概率分布为

$$f(T_d/T_p) = \frac{1}{60\,012.86\nu - 13\,798.91} e^{-T_d/T_p / (60\,012.86\nu - 13\,798.91)} \quad (11)$$

为验证式(11)的准确性,选择  $\gamma=2, 4, 6$  的波况进行测试,根据式(11)分别计算相邻畸形波的出现时间间隔分别为  $T_d/T_p=0.5 \times 10^4, 1.5 \times 10^4$  的概率,并与数值统计结果进行对比,见表3。预测值与数值结果的误差在5%以内,说明式(11)可以准确地估算出  $\gamma=1 \sim 7$

时相邻畸形波的时间间隔。

### 3.3 畸形波群波形特征及时间跨度

畸形波发生突然且持续时间较短,对于单一畸形波特征的分析具有很大的不确定性,而畸形波往往产生于独立的波群中。因此,通过分析波群,可以更方便准确地分析包含畸形波的波群特征。

在本文中,根据小波能量谱,将时间序列分解成独立的波群<sup>[24]</sup>。根据波群中包含畸形波的数量,可以分为只有一个畸形波的波群和包含多个畸形波的波群。在本次分析中,发现一个畸形波群最多包含4个畸形波。对于单个畸形波的波群,畸形波同时具有最深波谷和最高波峰的比例最高。但也有些波群,最深波谷和最高波峰在畸形波附近出现。对于包含多个畸形波的波群,畸形波有可能连续出现,也有可能间断出现。具体畸形波群的特征总结见表4。

不同谱宽下各类不同特征畸形波群所占的比例如图5所示。可以看出,当  $\gamma=1$  时,只有一个畸形波的波群占99.33%,随着谱峰升高因子增加(谱宽变窄),畸形波群中包含多个畸形波的比例逐渐增加;当  $\gamma=7$  时,只有1个畸形波的波群占88.91%,包含2个畸形波的波群占9.32%,1个畸形波群中最多可以

表3 不同谱宽下相邻畸形波时间间隔预测值与数值结果对比

Table 3 Comparisons of the numerical and predicted values of intervals of adjacent freak waves

$\gamma$	谱宽 $\nu$	$T_d/T_p=0.5 \times 10^4$		相对误差/%	$T_d/T_p=1.5 \times 10^4$		相对误差/%
		预测值/ $10^{-4}$	数值结果/ $10^{-4}$		预测值/ $10^{-4}$	数值结果/ $10^{-4}$	
2	0.367	0.661	0.637	3.77	0.197	0.203	2.96
4	0.343	0.705	0.691	2.03	0.162	0.170	4.71
6	0.324	0.731	0.761	3.94	0.124	0.119	4.20

表4 波群中包含畸形波的类型

Table 4 Classifications of freak waves in wave groups

包含畸形波的个数	畸形波的特征和出现位置	命名
1	同时具有最高波峰和最深波谷	$On_a$
	只具有最高波峰或最深波谷	$On_b$
2	相邻	$Tw_a$
	间隔	$Tw_n$
3	相邻	$Th_a$
	间隔	$Th_n$
4	相邻	$FO_a$
	间隔	$FO_n$

包含4个畸形波,但概率非常小,最大仅为0.54%。对于只有1个畸形波的波群,畸形波同时具有最深波谷和最高波峰的概率最大,占64%以上。

随后,分析畸形波群的时间长度分布,不同谱峰因子下,畸形波群的无量纲时间长度概率分布见图6。

随着谱宽变窄,畸形波群的时间长度范围逐渐增加。当 $\gamma=1$ 时,畸形波群最有可能出现的无量纲时间长度为7个谱峰周期,而当 $\gamma=7$ 时,畸形波群的无量纲时间长度的众数为11个谱峰周期,且不同时间长度的概率分布逐渐均匀。通过K-S检验法,不同谱宽的畸

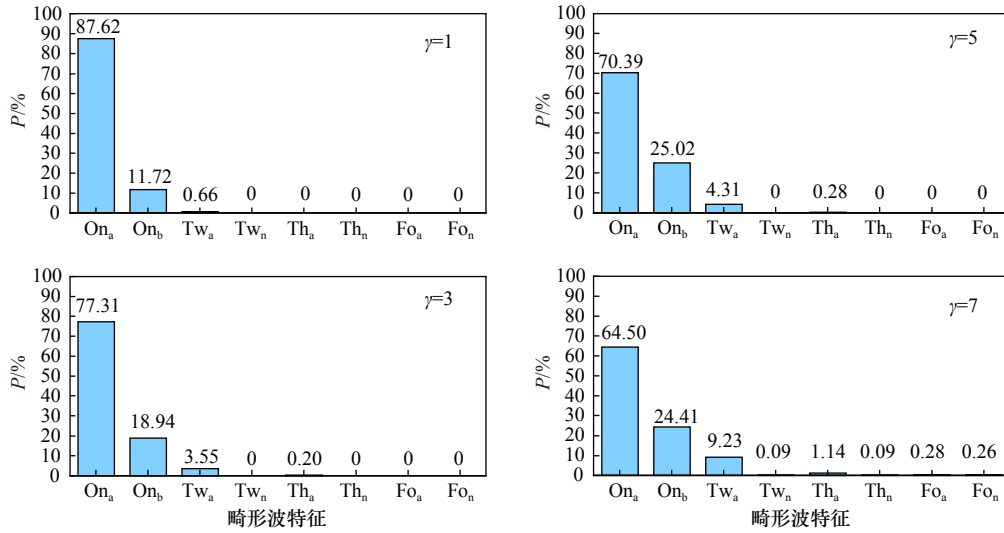


图5 不同谱峰因子下,不同畸形波特征所占比例

Fig. 5 Proportions of each characteristic of freak waves for different peak enhancement factors

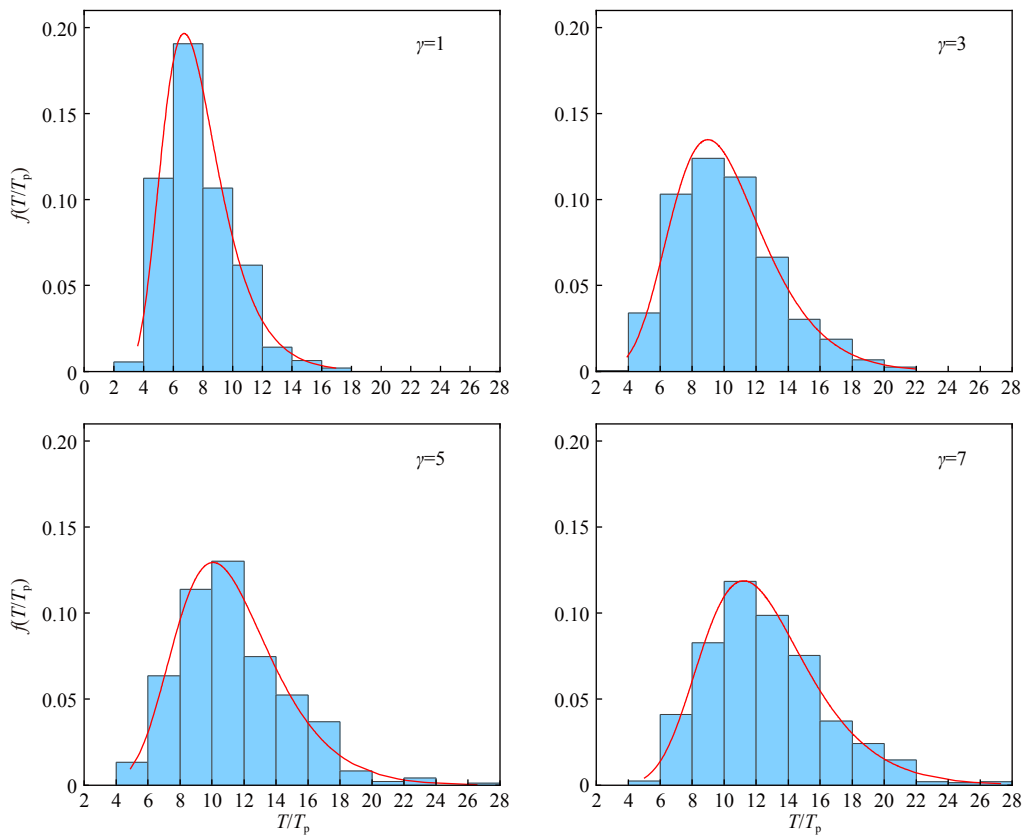


图6  $\gamma=1, 3, 5, 7$ 时,畸形波群无量纲时间长度概率分布

Fig. 6 Probability distributions of non-dimensional time lengths of freak wave groups for different peak enhancement factors ( $\gamma=1, 3, 5, 7$ )

形波无量纲时间长度可以较好的服从 GEV 分布。

在 GEV 分布中,包含 3 个参数:  $a, b, c$ 。因此,畸形波群无量纲时间长度可表示为

$$f(T/T_p) = \frac{1}{a} \left[ 1 - \frac{b(T/T_p - c)}{a} \right]^{\frac{1-b}{b}} e^{-\left[ 1 - \frac{b(T/T_p - c)}{a} \right]^{\frac{1}{b}}} \quad (12)$$

不同谱宽下,系数  $a, b, c$  的变化见图 7。随谱宽变窄,系数  $a, b$  呈指数增加,而  $c$  更符合线性增长。具体为

$$\begin{aligned} a &= -2.46 \times 10^{-33} e^{\nu/0.00526} + 0.07, \\ b &= -1.09 \times 10^{-4} e^{\nu/0.04} + 3.36, \\ c &= -65.06\nu + 31.53. \end{aligned} \quad (13)$$

为验证式(12)和式(13)的适用性,选择谱峰因子  $\gamma=2, 4, 6$  进行验证。根据式(12)和式(13)计算畸形波群无量纲时间跨度的众数,并与 WAFO 工具箱生成

波面的数值结果比较,见表 5。可以看出,式(12)和式(13)计算的畸形波群无量纲时间跨度与数值结果几乎完全一致,说明式(12)和式(13)能够较准确地计算出不同谱宽下畸形波群无量纲时间长度分布。

### 4 结论

本文基于 Longuet-Higgins 随机波浪模型,选择南海 1 年一遇的波浪参数(有效波高选择  $H_s=6$  m、谱峰周期为  $T_p=11$  s<sup>[26]</sup>),利用 WAFO 工具箱,模拟了畸形波发生概率稳定的不同谱宽 JONSWAP 谱的随机波列。研究表明,当畸形波定义为波高不小于 2 倍有效波高( $H \geq 2H_s$ )时,随机序列中畸形波的出现次数小于瑞利分布对应的概率值。在固定时间段内,畸形波出

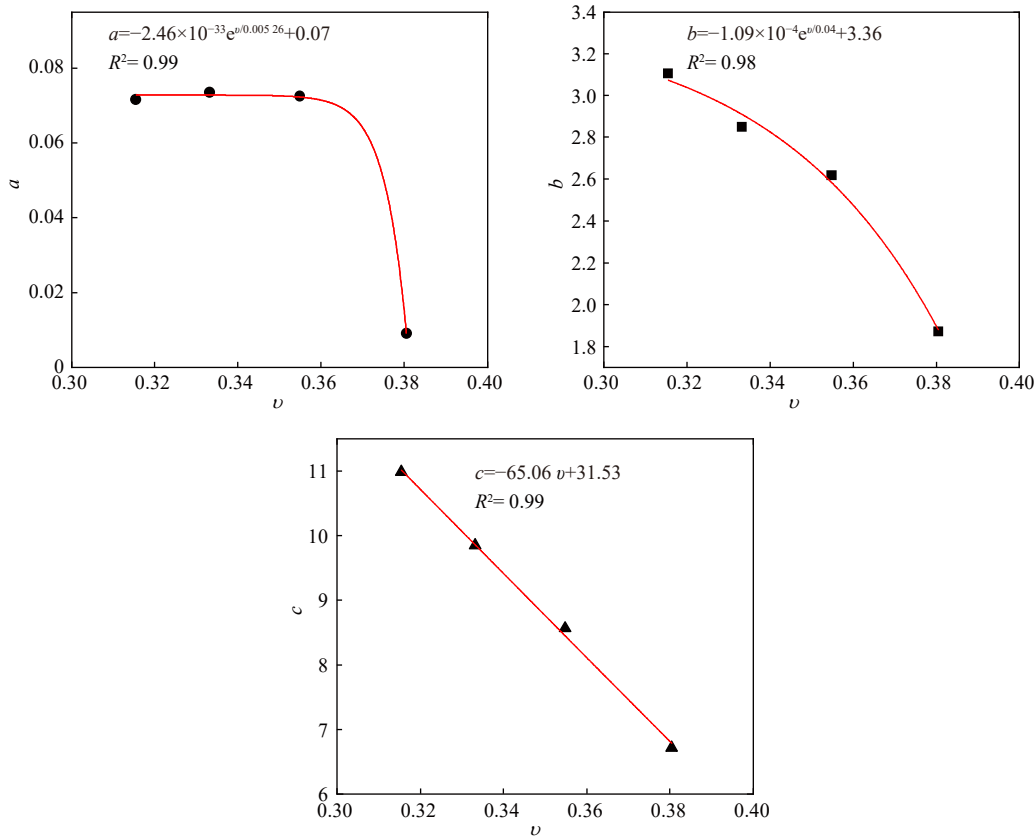


图 7 GEV 系数与谱宽  $\nu$  的关系

Fig. 7 Relationships between parameters of GEV distribution and spectrum widths  $\nu$

表 5 畸形波群无量纲时间长度众数预测值与数值结果对比

Table 5 Comparisons of the numerical and predicted modes of the non-dimensional lengths of freak wave groups

$\gamma$	谱宽 $\nu$	预测值	数值结果	相对误差/%
2	0.367	8.0	8.0	0
4	0.343	9.5	9.2	3.3
6	0.324	10.5	10.5	0

现的次数服从泊松分布, 而出现时间间隔服从指数分布, 且随着谱宽的增加, 畸形波在最有可能发生的频次线性减小, 而相邻畸形波出现的时间间隔相应增加。

此外, 基于小波变换方法分离出随机波中的波群<sup>[24]</sup>, 进而研究了出现畸形波的波群特征。发现在一个波群中, 最多可出现 4 个畸形波, 存在单个畸形波且该波同时具有最深波谷和最大波峰的可能性最大, 约

占 64% 以上; 一个波群中出现 2 个畸形波的概率最大为 9.32%, 3 个畸形波的概率最大为 1.23%, 4 个畸形波的概率最大为 0.54%。随着谱宽变窄, 一个波群中包含多个畸形波的概率增加, 而出现单个畸形波的概率相应减小。出现畸形波的波群时间长度服从 GEV 分布, 且随着谱宽变窄, 出现的畸形波群的时间跨度逐渐增加。

#### 参考文献:

- [1] Dysthe K, Krogstad H E, Müller P. Oceanic rogue waves[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40: 287–310.
- [2] Cherneva Z, Petrova P, Andreeva N, et al. Probability distributions of peaks, troughs and heights of wind waves measured in the black sea coastal zone[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(7): 599–615.
- [3] Haver S. A possible freak wave event measured at the Draupner Jacket January 1 1995[J]. *Proceedings of the Rogue Waves, 2004*: 1–8.
- [4] Kharif C, Pelinovskiĭ E N, Slunyaev A. Quasi-linear wave focusing[M]//Kharif C, Pelinovskiĭ E N, Slunyaev A. *Rogue Waves in the Ocean*. Berlin: Springer, 2009: 63–89.
- [5] Liu P C. A chronology of freak wave encounters[J]. *Geofizika*, 2007, 24(1): 57–70.
- [6] Waseda T. Rogue waves in the ocean[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2010, 91(11): 104.
- [7] Longuet-Higgins M S. On the statistical distribution of the heights of sea waves[J]. *Journal of Marine Research*, 1952, 11(5): 245–266.
- [8] 刘赞强, 张宁川. 基于Longuet-Higgins模型的畸形波模拟方法[J]. *水道港口*, 2010, 31(4): 236–241.  
Liu Zhanqiang, Zhang Ningchuan. Numerical methods for simulating freak waves based on the Longuet-Higgins wave model theory[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(4): 236–241.
- [9] Gemmrich J, Garrett C. Unexpected waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(10): 2330–2336.
- [10] Brodtkorb P A, Johannesson P, Lindgren G, et al. WAFO—a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads[C]//The Proceedings of the 10th (2000) International Offshore and Polar Engineering Conference v. 3. Seattle: WAFO, 2001: 343–350.
- [11] Gemmrich J, Garrett C. Unexpected waves: Intermediate depth simulations and comparison with observations[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(2/3): 262–267.
- [12] Ghane M, Gao Zhen, Blanke M, et al. On the joint distribution of excursion duration and amplitude of a narrow-band Gaussian process[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 15236–15248.
- [13] 潘玉萍, 葛苏放, 沙文钰, 等. 由模拟波面分析双峰谱型海浪的统计特征[J]. *海洋学报*, 2009, 31(4): 13–21.  
Pan Yuping, Ge Sufang, Sha Wenyu, et al. An analysis on the statistical characteristic of sea waves with double-peaked spectrum[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(4): 13–21.
- [14] 毛青, 马玉祥, 袁长富. 基于数值模拟的畸形波统计特性研究[C]//第二十九届全国水动力学研讨会论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2018: 485–495.  
Mao Qing, Ma Yuxiang, Yuan Changfu. Research on statistical properties of freak wave based on numerical simulation[C]//Proceedings of the 29th National Conference on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2018: 485–495.
- [15] Veritas N. Environmental Conditions and Environmental Loads[M]. Høvik: Det Norske Veritas, 2000.
- [16] Slunyaev A. Nonlinear analysis and simulations of measured freak wave time series[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2006, 25(5): 621–635.
- [17] Slunyaev A, Pelinovsky E, Soares C G. Modeling freak waves from the North Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 2005, 27(1): 12–22.
- [18] Trulsen K. Simulating the spatial evolution of a measured time series of a freak wave[C]//Proceedings of a Workshop. Brest: IFREMER, 2001: 265–273.
- [19] Osborne A R, Onorato M, Serio M. The nonlinear dynamics of rogue waves and holes in deep-water gravity wave trains[J]. *Physics Letters A*, 2000, 275(5/6): 386–393.
- [20] Clauss G F. Dramas of the sea: Episodic waves and their impact on offshore structures[J]. *Applied Ocean Research*, 2002, 24(3): 147–161.
- [21] 崔成, 张宁川. 畸形波生成、演化过程时频能量结构研究[J]. *海洋工程*, 2011, 29(3): 59–66.  
Cui Cheng, Zhang Ningchuan. Research on the time-frequency energy structure of generation and evolution of freak wave[J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(3): 59–66.
- [22] Onorato M, Proment D, Toffoli A. Triggering rogue waves in opposing currents[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(18): 184502.
- [23] Magnusson A K, Trulsen K, Aarnes O J, et al. “Three Sisters” measured as a triple rogue wave group[C]//ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow: ASME, 2019: 1–8.
- [24] Olagnon M. *Rogue Waves: Anatomy of a Monster*[M]. Taylor R D, trans. London: Adlard Coles Nautical, 2017.
- [25] Liu P C, Hawley N. Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes II[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(11): 1415–1425.

- [26] Hasselmann K F, Barnett T, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[M]. *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, 1973: 8–12.
- [27] Tao Aifeng, Qi Keren, Zheng Jinhai, et al. The occurrence probabilities of rogue waves in different nonlinear stages[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2014, 34: 1–6.
- [28] 翟钢军, 唐东洋, 刘琨, 等. 风浪联合作用下深水半潜式平台运动响应模型试验研究[J]. *中国海洋平台*, 2011, 26(6): 43–48.  
Zhai Gangjun, Tang Dongyang, Liu Kun, et al. Experimental analysis for the motion response of deep-water semi-submersible platform under wind and waves[J]. *China Offshore Platform*, 2011, 26(6): 43–48.
- [29] Longuet-Higgins M S. The statistical analysis of a random, moving surface[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1957, 249(966): 321–387.
- [30] Tao Aifeng, Peng Ji, Zheng Jinhai, et al. Discussions on the occurrence probabilities of observed freak waves[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, 23(6): 923–928.
- [31] Wang Y, Tao A F, Zheng J H, et al. A preliminary investigation of rogue waves off the Jiangsu coast, China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(9): 2521–2527.
- [32] 毛青. 基于数值模拟的海面突发巨浪统计特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
Mao Qing. Study on the statistical characteristics of sudden appearance huge waves using numerical simulations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [33] Kharif C, Pelinovsky E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2003, 22(6): 603–634.

## Researches on statistical properties of freak waves in uni-directional random waves in deep water

Fu Ruili<sup>1</sup>, Ma Yuxiang<sup>1</sup>, Dong Guohai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Numerous random wave trains are simulated based on the JONSWAP spectrum using the Longuet-Higgins wave model, and then extreme waves are investigated based on the wave trains with stable probabilities of freak waves. The probabilities of freak waves are smaller than those of based on Rayleigh distributions. With the spectra narrower, the probability of freak waves increases. During the fixed times, the frequency of freak waves obeys the Poisson distribution and time intervals satisfy exponential distribution. The most probable occurrence frequency of freak waves decrease and intervals of freak waves are longer with the spectra wider. Wave groups are discriminated based on wavelet spectra and their characteristics are analyzed. There are no more than four freak waves in wave groups. The probability of wave groups containing merely one freak wave is the largest. Numbers of freak waves in wave groups are increasing with the spectral narrower. Furthermore, time lengths of wave groups containing freak waves satisfy Generalized extreme value distribution (GEV distribution), and with spectra narrower, the most probable lengths of the wave groups increase.

**Key words:** freak waves; wave groups; wave models