

[引用格式] 葛富康, 陈浩然, 扈喆, 等. 时序反转法的畸形波水槽造波实验和演化特征[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2026, 31(1): 46-58. DOI: 10.19715/j.jmuzr.2026.01.05.

时序反转法的畸形波水槽造波实验和演化特征

葛富康^{1,2}, 陈浩然^{1,2}, 扈喆^{1,2}, 张晓莹^{1,2}, 郭军^{1,2}, 蔡文鸿³

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市海上养殖装备重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361013)

[摘要] 鉴于传统色散聚焦法生成的畸形波非线性程度低、造波效率不足等问题, 以及时序反转法存在的造波细节缺失的技术瓶颈, 改进畸形反转法的造波逻辑, 提出一种高精度可控的畸形波生成方法。通过构建三重逻辑判断体系, 建立基于 Peregrine 呼吸子解的畸形波实验生成方法。基于该方法, 在波浪水槽中生成了4种不同载波波幅的畸形波, 实验结果与解析解吻合良好。通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 和小波分析对畸形波的时频特性、波能分布和时空演化规律进行了研究, 结果表明: 1) 畸形波发生时存在能量从基频向高频转移的现象; 2) 畸形波发生时广义能值是载波时段的两倍以上; 3) 畸形波汇聚形成过程与发散消退过程是非对称的, 汇聚形成速度慢于发散消退速度。

[关键词] 畸形波; Peregrine 呼吸子解波; 波浪水槽实验; 小波分析; 波能演化

[中图分类号] U 661.2 [文章编号] 1007-7405(2026)01-0046-13 DOI: 10.19715/j.jmuzr.2026.01.05

Wave-Making Experiment and Evolution Characteristics of Abnormal Wave Tank Based on Time Reversal Method

GE Fukang^{1,2}, CHEN Haoran^{1,2}, HU Zhe^{1,2}, ZHANG Xiaoying^{1,2}, GUO Jun^{1,2}, CAI Wenhong³

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Marine Aquaculture Equipment of Xiamen, Xiamen 361021, China;

3. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China)

Abstract: Given the low nonlinearity and inefficiency of traditional dispersive focusing methods in generating rogue waves, as well as the technical bottleneck of missing wave-making details in time-reversal methods, this study improved the wave-making logic of time-reversal methods and proposed a high-precision controllable rogue wave generation approach. By constructing a triple logical judgment system, an experimental generation method for rogue waves based on the Peregrine breather solution was established. Using this method, four types of freak waves with different carrier wave amplitudes were generated in a wave flume, showing good agreement with analytical solutions. The time-frequency characteristics, energy distribution, and spatiotemporal evolution of rogue waves were investigated through fast Fourier transform (FFT) and wavelet analysis. The results demon-

[收稿日期] 2024-12-13

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (52371321); 福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金项目 (FJHYF-L-2025-23); 福建省省属公益类科研院所基本科研专项 (2023R1012006)

[通信作者] 扈喆, 博士, 教授, 博导, 从事船舶流体力学及结构分析方向研究。E-mail: huzheok@126.com

strate that: 1) Energy transfers occurred from fundamental frequency to higher frequencies during rogue wave; 2) The generalized energy values during rogue wave events were more than twice those during carrier wave periods; 3) The convergence formation and divergence dissipation processes exhibited asymmetric characteristics, with slower convergence rates compared to dissipation speeds.

Keywords: freak wave; Peregrine breather wave; wave tank test; wavelet analysis; evolution of wave energy

0 引言

畸形波是一种广泛存在且具有突发性和强破坏性的异常大波高波浪。大量的实验表明^[1-2]，畸形波会引起海上结构物的波浪爬升和砰击等安全问题，带来极大的波浪载荷，严重威胁海洋结构物和航行船舶的安全。目前，已有大量关于畸形波造成海上结构物破坏及船舶失事的报道^[3-4]，因此，生成畸形波并研究其演化机理具有重要意义。

现有研究可将畸形波的生成机制分成线性机制和非线性机制 2 大类。在线性生成机制的研究中，裴玉国^[5]基于 Kriebel 的组合模型，提出了一个三波列组合模型，并在物理水池中分别基于双波列和三波列组合模型模拟畸形波；Hu 等^[6]基于概率分析研究了 Kriebel 组合模型下组成波数对畸形波模拟出现概率的影响，并在数值波浪水池中利用较小的瞬态波能量配比生成了畸形波；高宁波等^[7]提出了一种相位调制方法来提高模拟精度，将数值结果与物理实验结果进行了对比，证明该相位调制方法能够显著提高数值模拟精度。虽然线性机制可以产生畸形波，但它从本质上忽略了波面时空演化过程中非线性动力过程的重要作用，因此，越来越多的学者把研究重点转移到畸形波的非线性机理。Peregrine 呼吸子解作为目前畸形波非线性机理研究的主流模型，受到了研究人员的广泛关注。文献 [8-9] 基于时序反转法在波浪水槽产生了 1~5 阶的 Peregrine 呼吸子解畸形波，并且波浪高程与解析解具有良好的一致性；Hu 等^[10]在波浪数值水槽中实现了 Peregrine 呼吸子解畸形波的模拟，并对畸形波的时频能量特性进行了研究；Wang 等^[11]通过数值模拟和现场实测研究了 Peregrine 呼吸子解波在现实海洋环境中建模的适用性，并给出了畸形波的频谱带宽和陡度；Zhang 等^[12]基于非线性薛定谔方程（nonlinear Schrödinger equation, NLSE）的 Peregrine 呼吸解生成了畸形波，并在三维数值波浪水槽中采用 CFD 方法对固定船舶模型的上浪进行了数值研究；Zhang 等^[13]提出一种误差较小的实验造波方法，产生了一系列波高和波长的 Peregrine 呼吸子解波，并通过小波分析研究了波浪能量的分布与能量聚焦的持续时间。

综上所述，畸形波的非线性产生机理逐渐成为研究热点，研究人员从不同方面对 Peregrine 呼吸子解波进行研究。在畸形波模拟中，基于色散聚焦原理的传统造波方法产生的畸形波非线性程度较低且造波效率低下，难以满足 Peregrine 呼吸子解波的造波需求，而文献 [8-9] 提出的时序反转法虽然能产生符合要求的畸形波，但缺乏具体的造波细节，完整还原造波过程还有一定的挑战性。因此，本研究对时序反转法进行了改进，提出一种包含三重逻辑判断的造波方法。基于该方法，本文成功生成了 4 种不同参数的 Peregrine 呼吸子解波，通过快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）和小波分析等方法，研究了波浪能量在时域和频域上的分布特征。此外，本文还对畸形波演化

全过程的能量变化进行分析, 探讨其能量积累与耗散的非对称特性。

1 基本理论

1.1 基于 Peregrine 呼吸子解的畸形波

深水表面重力波的演化由方程

$$\eta_t + c_g \eta_x + \beta \eta_x + \alpha \eta \eta_x = 0 \quad (1)$$

来描述 (忽略黏性和表面张力)。其中: x, t 分别为空间和时间坐标; $\eta(x, t)$ 为表面高程; c_g 为波群速度; β 为色散系数; α 为非线性系数。深水色散关系式为 $\omega_0^2 = gk_0$, 则波群速度可写成 $c_g = \omega_0/(2k_0)$, $\beta = \omega_0 k_0^2/2$, $\alpha = \omega_0/(8k_0^2)$, ω_0 、 k_0 分别为载波圆频率和波数。

假设波包为缓慢调制的准单色波, 引入复数包络函数 $A(x, t)$ 为

$$\eta(x, t) = \text{Re}[A(x, t)e^{i(k_0 x - \omega_0 t)}] \quad (2)$$

通过多重尺度摄动法展开至三阶, 导出标准的 NLSE 为

$$i\partial A \partial x \partial t + (\beta/2)\partial^2 A / \partial x^2 + \alpha |A|^2 A = 0 \quad (3)$$

Peregrine 呼吸子是 NLSE 的一阶有理分式解, 具有时空局域性, 满足边界条件 $|A| \rightarrow A_0$ 。当 $|x|, |t| \rightarrow \infty$ 时, 其表达式^[14]为

$$A(x, t) = A_0 [1 - 4(1 + 2i\alpha A_0^2 t) / (1 + 2\alpha A_0^2 x^2 + 4\alpha^2 A_0^4 t^2)] e^{i\alpha A_0^2 t} \quad (4)$$

其中: A_0 是背景波的复数振幅, 表示在远离畸形波 (即 $|x|, |t| \rightarrow \infty$) 时波的包络幅值, $A_0 = 10^{-3} \sqrt{a_0^2/\varepsilon_0}$, ε_0 为载波波陡, a_0 为载波波幅。需要说明的是, 由于本次实验产生的波浪幅值很小, 为方便实验进行, a_0 使用的单位与其他长度单位不同。

将 Peregrine 呼吸子解代入包络表达式, 得到实际水波表面高程为

$$\eta(x, t) = \text{Re}[A(x, t)e^{i(k_0 x - \omega_0 t)}] \quad (5)$$

式 (5) 展开后为

$$\eta = A_0 \text{Re} \{ [1 - 4(1 + 2i\alpha A_0^2 t) / (1 + 2\alpha A_0^2 x^2 + 4\alpha^2 A_0^4 t^2)] e^{i(\alpha A_0^2 t + k_0 x - \omega_0 t)} \} \quad (6)$$

1.2 小波分析法

采用连续小波变换方法^[15]计算畸形波演化过程中波面高程时历信号的时频参量谱。需要说明的是, 在开展小波分析之前, 本文采用移动平均方法对波面高程时历信号进行了平滑处理。

选择 Morlet 小波函数作为小波变换的母函数, 其解析式为 $\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} e^{i\omega_0 t}$ 。其中: ω_0 为无量纲频率。对离散序列 x_n 的连续小波变换可写为 $W_n(s) = \sum_{n'}^{N-1} x_{n'} \psi^*[(n' - n)\delta_t/s]$ 。其中: “*” 表示复共轭; s 为小波尺度; n 为时间序列编号; δ_t 为时间间隔。

为了提高离散序列的连续小波计算效率, 根据卷积定理, 小波变换可以写成傅里叶逆变换 $W_n(s) = \sum_{m=0}^{N-1} \hat{x}_m \hat{\psi}^*(s\omega_m) e^{i\omega_m n \delta_t}$ 。其中: m 为频率标号; $\hat{\psi}^*(s\omega_m)$ 为傅里叶变换。

定义小波能谱的谱密度 $S(f, t)$ 为 $S(f, t) = |W(s, t)|^2$, 它可以同时在时域和频域范

畴内描述畸形波的能量变化。为了定量研究畸形波演化过程, 本文分别定义广义能值 $E(t)$ 和广义能量集中度 δ_E 两个参数^[16]。

1) 广义能值 $E(t)$ 。对畸形波波面高程时历信号任意 i 时刻的时频谱在频率内积分, 结果可类比为一种“广义能量”的时间变换过程。广义能值 $E(t)$ 的最大值记为 $E_{\max}$, 时均值为 E_{mean} , 在畸形波发生时刻 ($t = c$) 波面高程时历信号的各频率成分的广义能值记为 E_c , 它们的计算公式分别为

$$E(t) = \sum_j (S_{i,j} \times \Delta f_j), \tag{7}$$

$$E_{\text{mean}} = \sum_i \sum_j (S_{i,j} \times \Delta f_j) / \sum_i \Delta t_i, \tag{8}$$

$$E_c = \sum_j (S_{c,j} \times \Delta f_j). \tag{9}$$

2) 广义能量集中度 δ_E 。定义任意 i 时刻波面高程时历信号的“广义能量谱” $E(t)$ 与其时均值 E_{mean} 之比为该时历信号 i 时刻的广义能量集中度 δ_E 。在物理含义上, 广义能量集中度 δ_E 反映了波面高程时历信号的“广义能量”在某时刻集中的程度。在畸形波发生时刻 ($t = c$) 的可记为畸形波能量集中度 δ_c 。其计算公式分别为 $\delta_E = E(t)/E_{\text{mean}}$, $\delta_c = E_c/E_{\text{mean}}$ 。

2 实验设计

实验在集美大学波浪水槽实验室进行, 波浪水槽长为 30 m, 宽为 1.55 m, 水深为 0.7 m。在水槽的一端设置造波机, 造波机由计算机控制的伺服电机驱动, 通过输入传递函数信号, 推波板前后运动以产生指定波浪; 另一端设置有被动消波滩, 以吸收波浪并消除波浪反射。测量系统采用成都宇凡科技有限责任公司研发的 DS30LC 多通道浪高水位仪测量系统, 从造波机到消波滩沿的长度方向上, 在水中共布置 8 个采样频率为 100 Hz、精度为 0.1 mm 的波浪传感器, 用来记录波面高程时历信号。波浪水槽造波设备与实验布置分别如图 1、图 2 所示。实验共设计产生 4 种 Peregrine 呼吸子解波 (见表 1)。

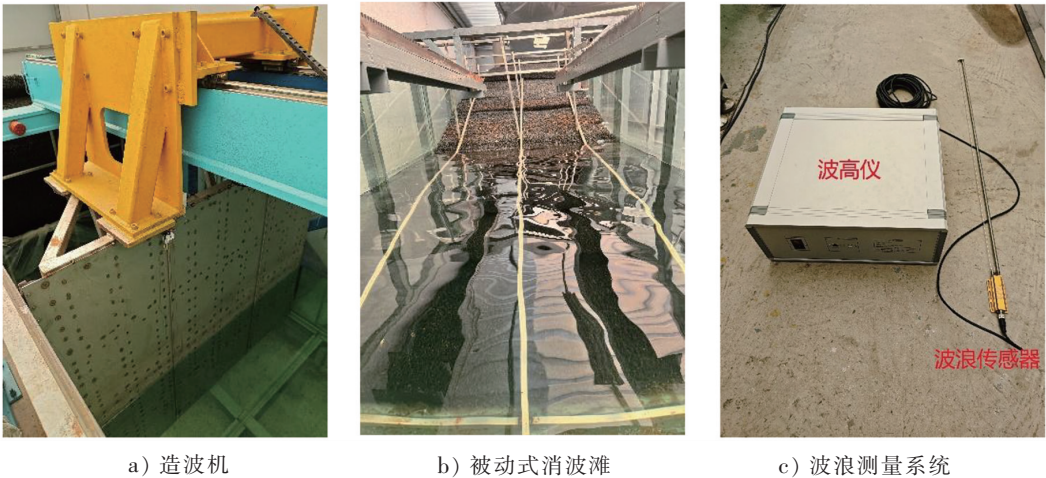


图 1 波浪水槽造波设备
Fig.1 Wave-making equipment for wave tanks

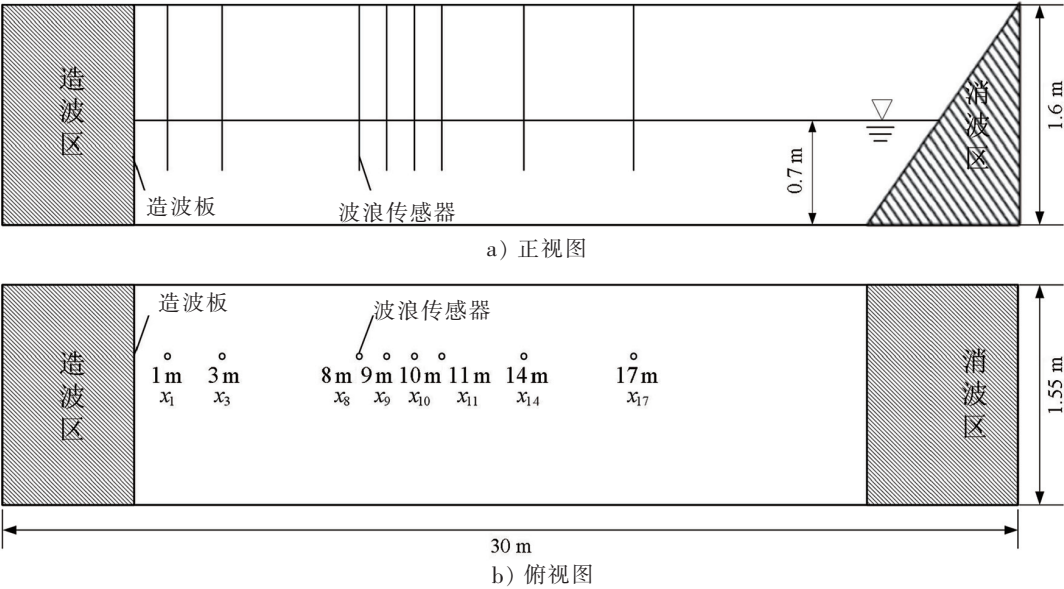


图 2 实验布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experiment setup

表 1 畸形波工况数据

Tab.1 Freak wave condition data

工况	载波波幅 a_0 /mm	波陡 ε_0	最大波峰/mm	最小波谷值/mm	最大波高/mm	聚焦倍数
L1	7	0.09	21	17	38	2.71
L2	8	0.09	24	19	43	2.68
L3	9	0.09	27	22	49	2.72
L4	10	0.09	30	24	54	2.70

3 造波方法

时序反转法的实施包含 2 轮造波，共分为 7 步，具体如图 3 所示。

第 1 步，确定波形参数波陡 ε_0 、载波波幅 a_0 、目标位置 $x = x_0$ 和发生时间 $t = t_0$ ，将这些参数代入式 (6)，得到初始的呼吸子解波形函数 $\eta_{x_0f}(t)$ 。参数的次级下标（如 f, s ）分别标记第 1 轮造波与第 2 轮造波阶段对应的参数变量。

第 2 步，在波浪生成中，不可直接使用呼吸子解波形 $\eta_{x_0f}(t)$ 作为造波机推板运动位置函数 $\eta_{if}(t)$ 。这里选取线性造波机传递函数作为初始造波传递函数，得到造波板运动位置，并生成所需的波浪^[17]，即 $\eta_{if}(t) = C_{ff}\eta_{x_0f}(t)$ 。其中： C_{ff} 为传递函数，其初值由 $C_{ff} = 4 \sinh^2(kh)/(\sinh(2kh) + 2kh)$ 确定^[18]。

第 3 步，判断 x_9 处产生波浪的幅值 a_{x_9} 是否符合 $|a_{x_9} - a_0|/a_0 < 5\%$ 的精度要求，若不符合，则调整 C_{ff} ，重复第 1 轮造波，直至符合要求。

第 4 步，如图 4 所示， x_9 处的波面时历信号共包含 4 个区域，分别为造波开始前和结束后的准静水区域（区域 1）、造波机启动和停机时产生的干扰区域（区域 2）、载波

段区域 (区域 3) 和畸形波演化区域 (区域 4)。区域 3 和区域 4 的划分十分重要, 需要避开区域 1 与区域 2 的影响, 同时, 该区域的长度不能过短。将区域 3 和区域 4 的时历信号 $\eta_{x_{gf}}(t)$ 通过 $\eta_{x_{gf}}^*(t) = \eta_{x_{gf}}(T - t)$ 得到反转信号 $\eta_{x_{gf}}^*(t)$ 。其中: T 为 $\eta_{x_{gf}}(t)$ 的时间长度。如图 5 所示, $\eta_{x_{gf}}(t)$ 和 $\eta_{x_{gf}}^*(t)$ 在时间轴上正好相反。

第 5 步, 取经过第 1 轮造波反复调整后的传递函数 C_{ff} 作为第 2 轮造波传递函数 C_{fs} 的初值, 代入 $\eta_{is}(t) = C_{fs}\eta_{x_{gf}}^*(t)$ 得到造波机响应函数 $\eta_{is}(t)$, 开展第 2 轮造波工作。

第 6 步, 判断 x_0 处产生波浪的幅值 a_{x_0} 是否符合 $|a_{x_0} - a_0|/a_0 < 5\%$ 的精度要求, 若不符合, 则调整 C_{fs} , 重复第 2 轮造波过程, 直至符合要求。在这一步中, 调整后的 C_{fs} 往往小于第 1 轮造波确定的 C_{ff} 。

第 7 步, 判断 x_0 处产生波形是否与解析波形相似, 否则, 调整 x_0 与 t_0 , 重复两轮造波过程, 直至产生的波浪波形与解析波形相近。

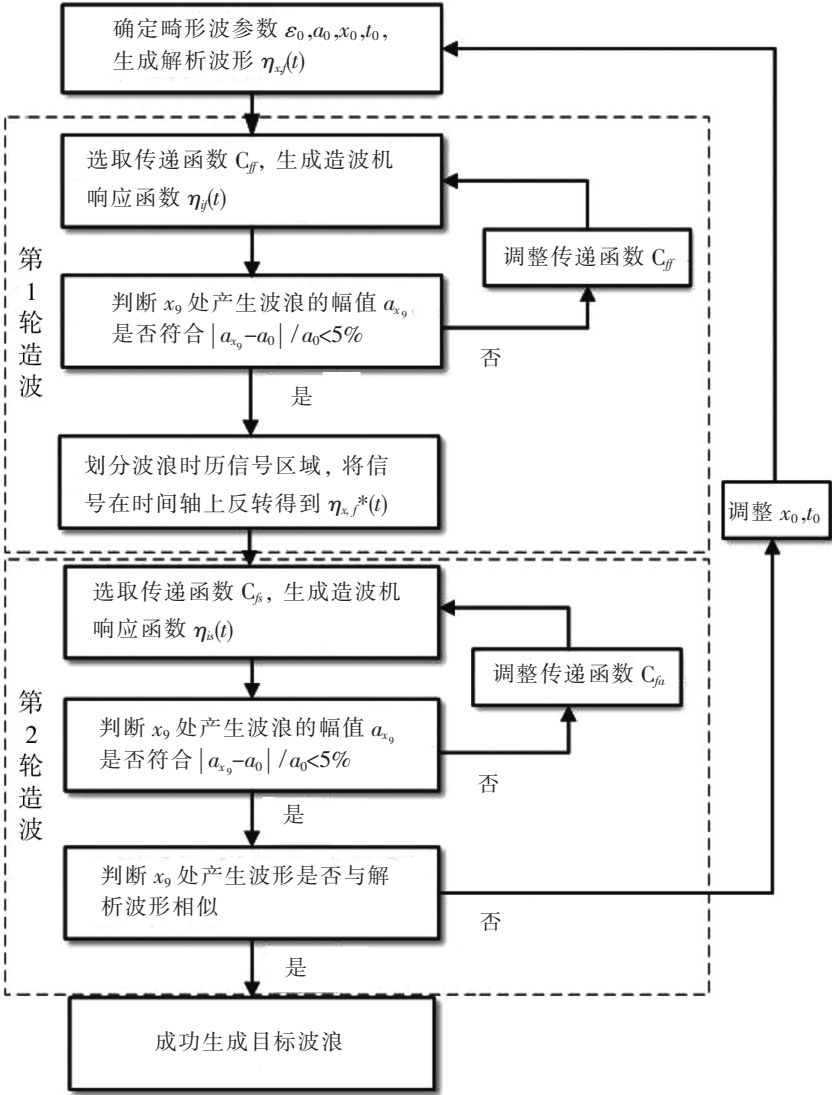


图 3 造波实验流程

Fig.3 Wave generation testing procedure

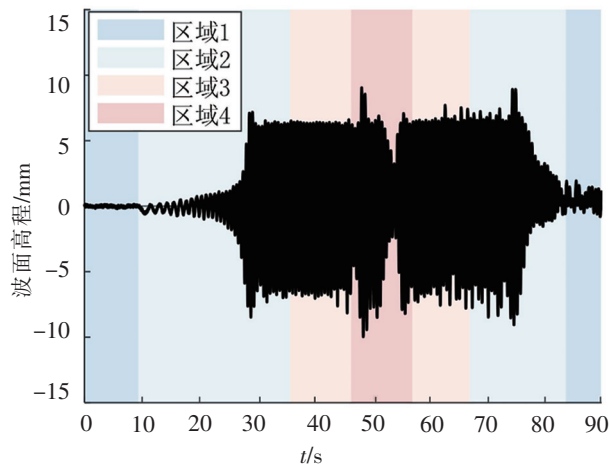


图 4 波面时历区域划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of wave surface temporal region division

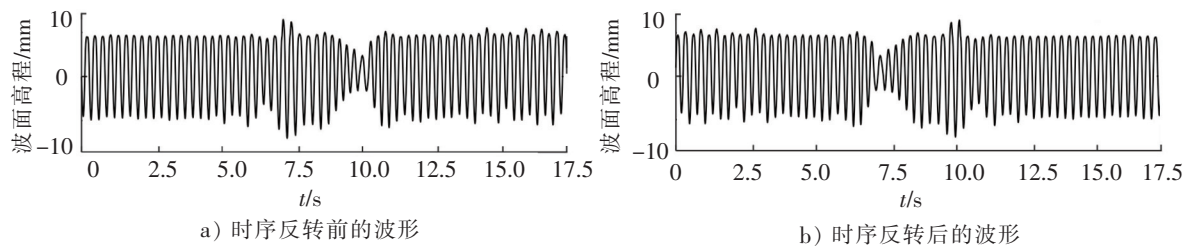


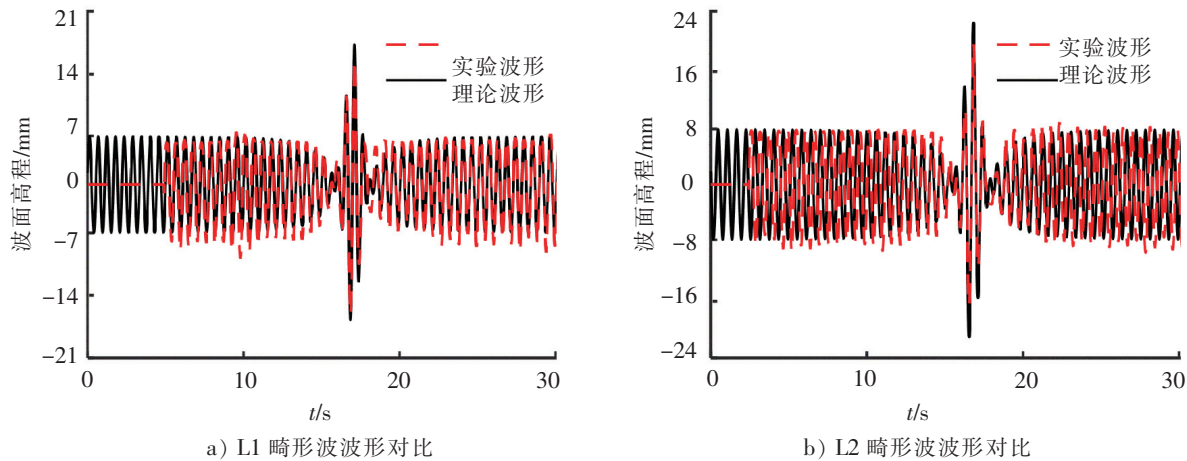
图 5 波浪信号的时序反转过程

Fig.5 Time-reversal process of wave signals

4 实验结果与分析

4.1 Peregrine 呼吸子解波的造波

如图 6 所示，采用完善后的时序反转法生成了 4 组 Peregrine 呼吸子解畸形波，结果表明，实验产生的畸形波波形与理论波形吻合。各工况下畸形波波形数据如表 2 所示。由于造波过程调整了理论聚焦位置 x_0 ，所以浪高仪所在的位置不一定是最大波高的发生位置，浪高仪位置的最大波幅解析结果可能小于 3 倍载波波幅。



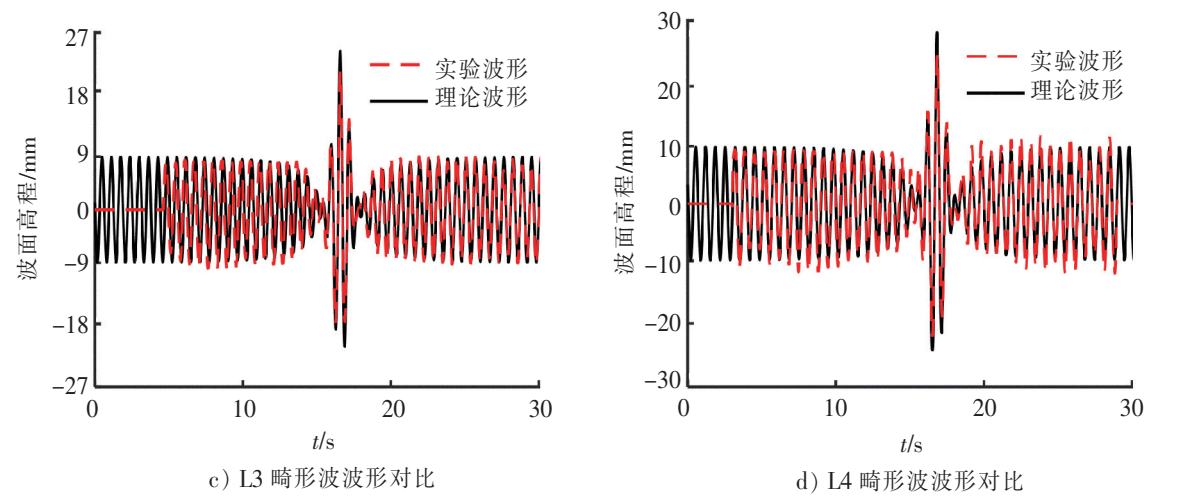


图 6 实验生成的各工况下畸形波波形曲线

Fig.6 The waveform curves of freak waves generated under various experimental conditions

表 2 各工况下畸形波波形数据

Tab.2 Freak wave shape data under various working conditions

工况	载波波幅 a_0 /mm	周期/s	最大波峰值 /mm	最小波谷值 /mm	最大波高 /mm	实验聚焦 倍数	理论聚焦 倍数	相对误差 /%
L1	7.08	0.559	18.71	-17.05	35.76	2.54	2.71	6.27
L2	7.98	0.577	20.09	-18.07	38.16	2.39	2.68	10.80
L3	9.02	0.631	24.95	-20.12	45.07	2.46	2.72	9.56
L4	10.35	0.664	25.52	-23.18	48.70	2.44	2.70	9.63

为研究畸形波演化过程中的时域特征，图 7 给出了 4 种工况下 Peregrine 呼吸子解波演化波形图。由图 7 可以看出，在畸形波产生初期， x_1 处波形趋近于规则波，没有明显波动；随着波浪的传播，逐渐发生波浪汇聚现象，在 x_8, x_9, x_{10}, x_{11} 处的时历中观察到明显的大波，意味着这段区域产生了畸形波；随着波浪的进一步传播，畸形波消散，在两侧载波段产生了“波包”现象。

4.2 Peregrine 呼吸子解畸形波的频域特性

为了研究畸形波的频域变化特征和能量组成，采用 FFT 的方法对畸形波波面高程时历进行分析。图 8 给出了 4 种工况下畸形波发生时波面高程时历的 FFT。由图 8 可以看出，实验结果与解析结果具有较好的吻合度；每种工况中均有一个明显的峰值，峰值频率与载波频率相同。与解析结果不同的是，实验结果在最大峰值外还存在 2 个较小的峰值，对应的频率分别为最大峰值频率的 2 倍和 3 倍。这意味着在畸形波模拟过程中，波能分为 3 部分，主要部分存在于载波波列，而剩余的两小部分存在于二阶和三阶 Stokes 成分波部分。

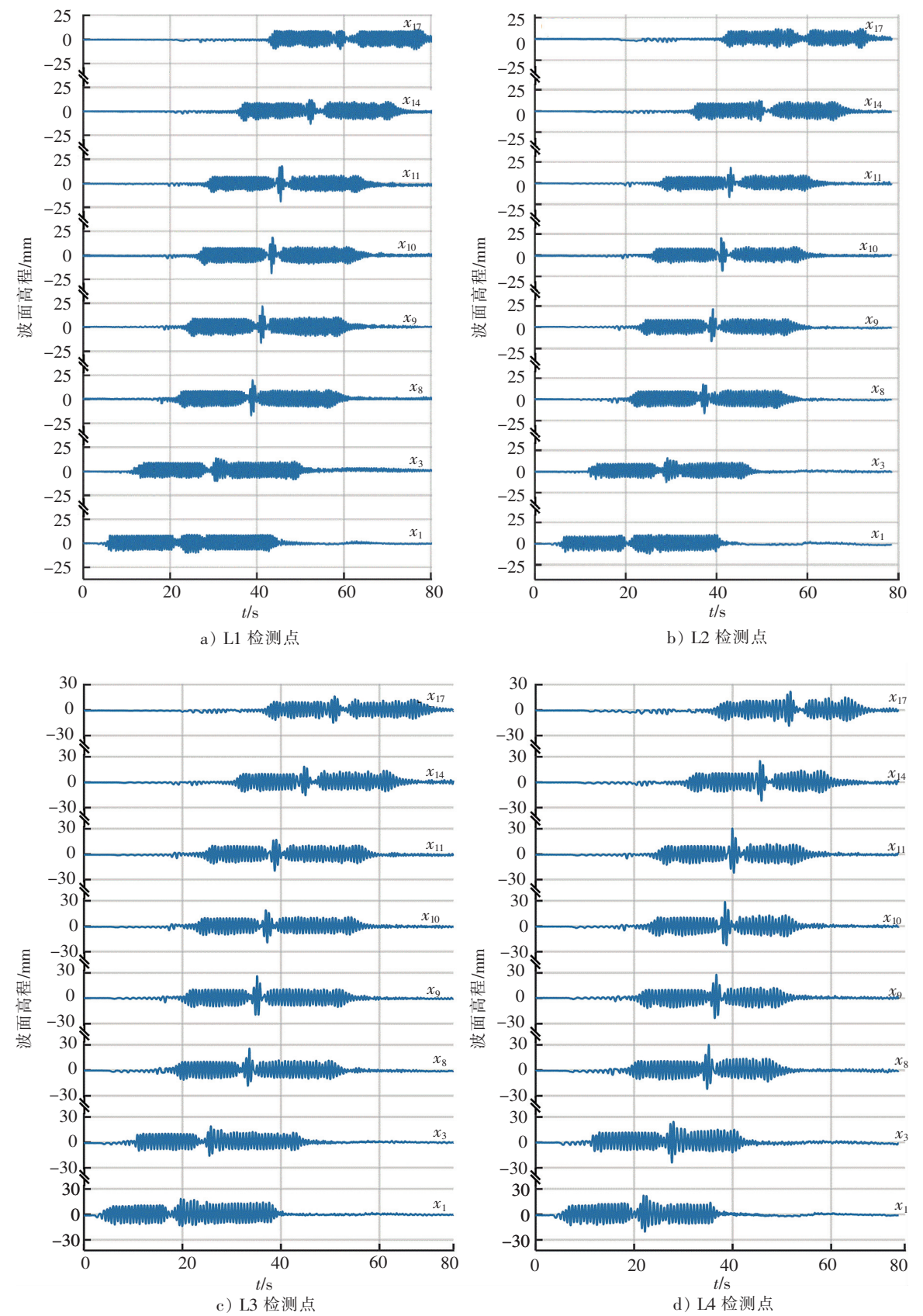


图 7 Peregrine 呼吸子解波面时历曲线

Fig.7 Temporal wave surface curve of the Peregrine breather solution

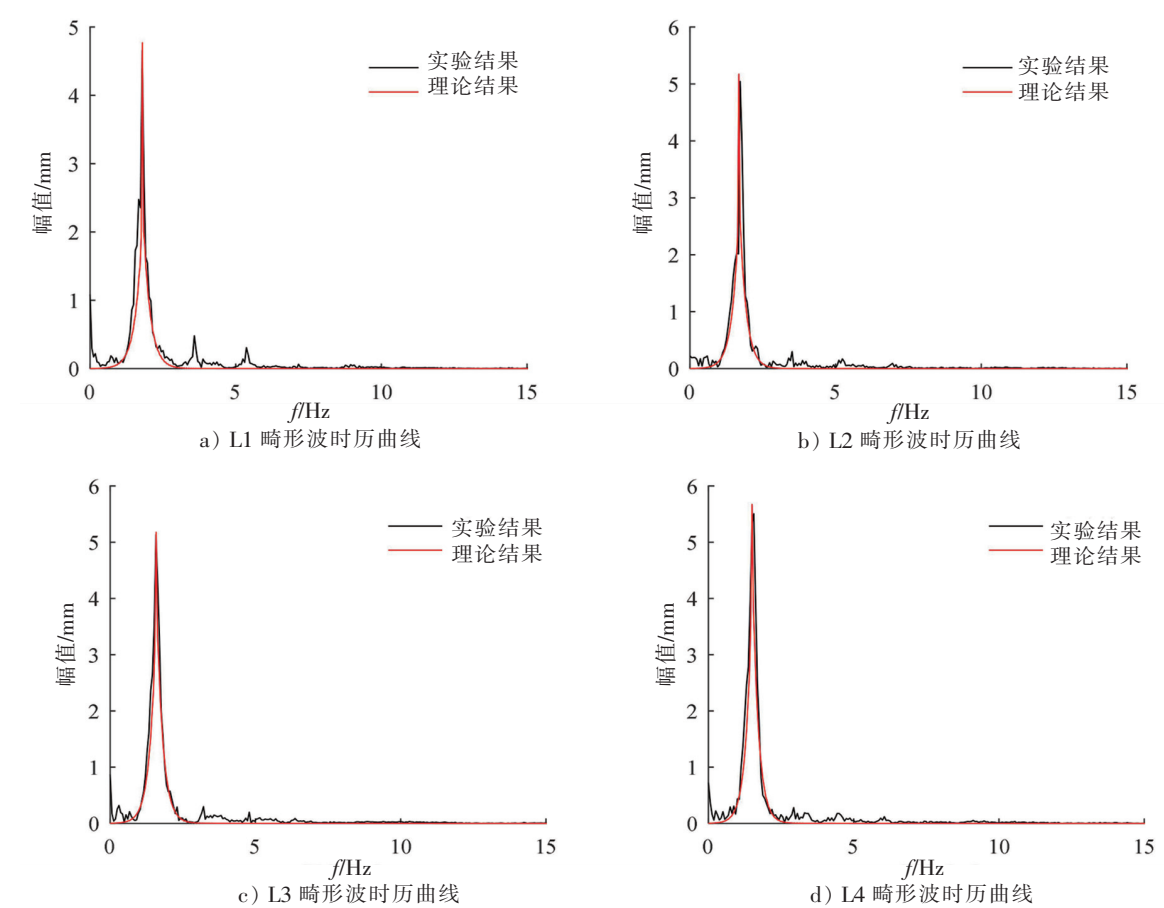
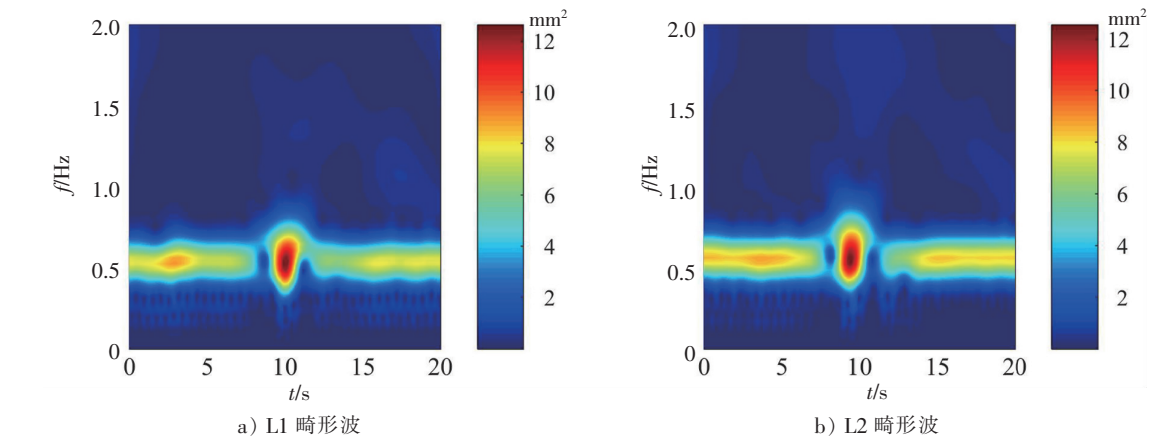


图8 各工况下畸形波时历曲线的FFT

Fig.8 FFT of freak wave temporal curves under various working conditions

4.3 Peregrine 呼吸子解畸形波时频特性与演化规律

为研究畸形波波能在时域和频域上的分布，精确描述畸形波发生与演化过程中的能量汇聚现象，采用小波变换的方法研究畸形波波面高程时历。图9给出了各工况下畸形波的时频谱。由图9可以看出，波能分布在载波频率附近，在畸形波发生前后，波能较低且没有发生明显波动，几乎与规则波相同；当畸形波发生时，波能急剧变大，频率范围变宽。在畸形波发生时刻前后，波能降低，出现明显的能量空隙，表明畸形波的出现伴随着能量聚集，能量由畸形波发生前后时刻转移至发生时刻。



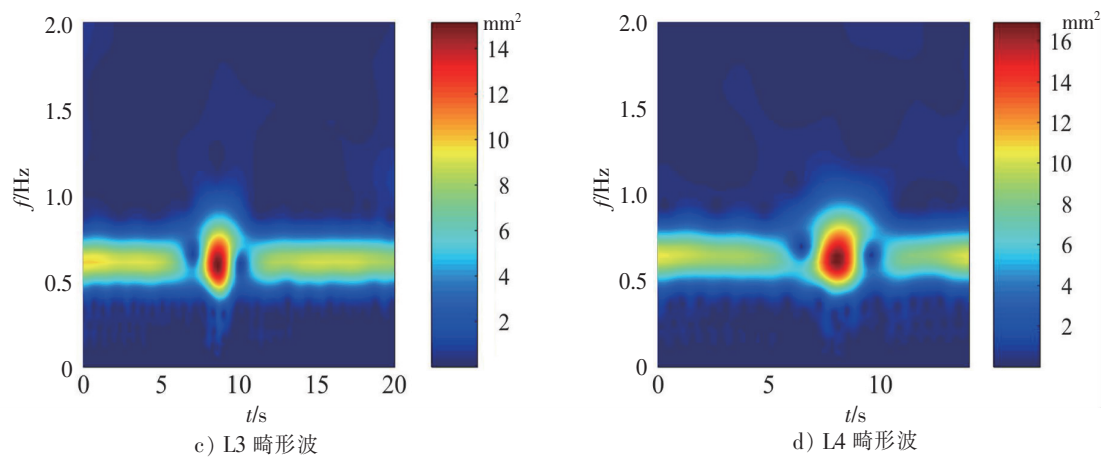


图 9 各工况下畸形波时历曲线的时频谱

Fig.9 Time-frequency spectrum of abnormal wave temporal curves under various working conditions

图 10 给出了各工况下畸形波的广义能值。可见，在畸形波发生的时刻，广义能值出现了急剧的上升，这一数值是载波时段广义能值的 2 倍以上。这表明，畸形波在形成时聚集了大量的能量，对海洋结构物的安全性构成极大威胁。在畸形波发生时刻前后，广义能值呈现下降趋势，有时甚至降至整个波段的最低点。通过对比 4 组工况的广义能值可见，随着载波波幅的增加，广义能值的最大值也随之增大，同时，畸形波发生时段的角度也有所延长。说明畸形波产生的总能量逐渐增大，对海洋结构物的破坏性也逐渐增强。

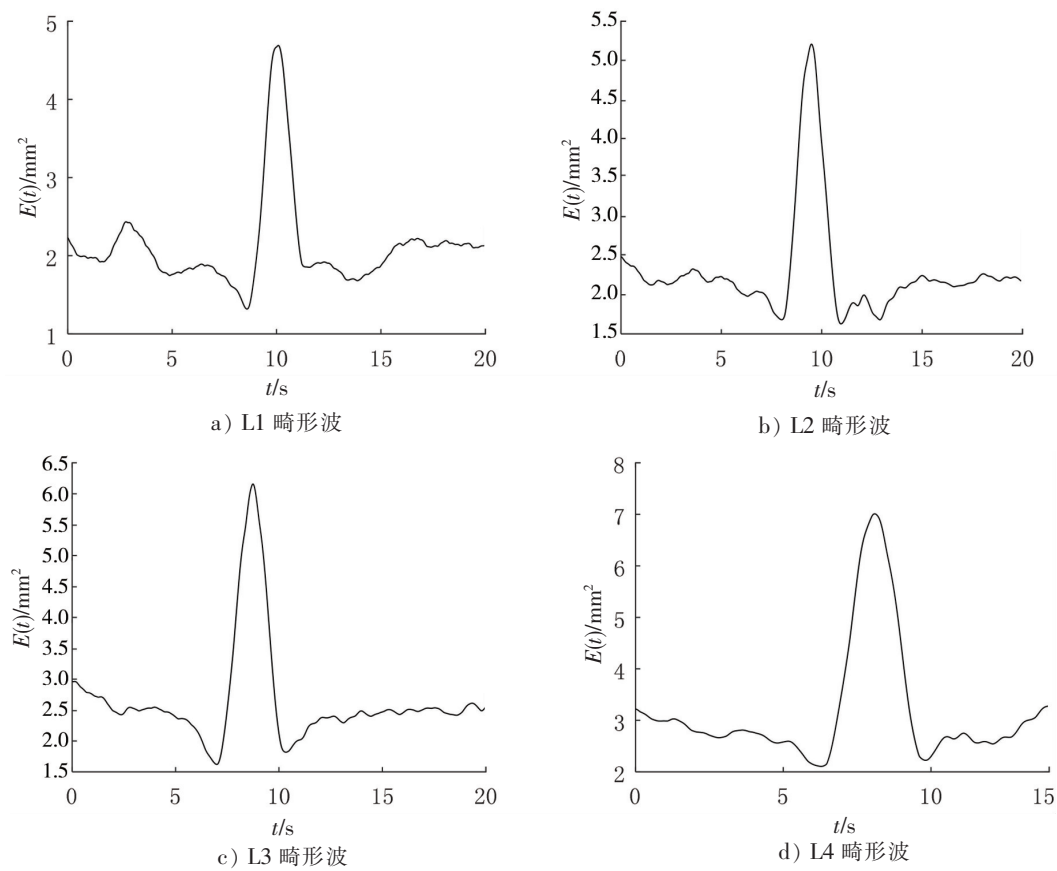


图 10 各工况下畸形波时历曲线的广义能值

Fig.10 Generalized energy spectrum of freak wave temporal curves under various working conditions

图 11 给出了畸形波能量集中度的空间分布。可见, 伴随着波浪的传播, 畸形波能量集中度先增加后降低, 在畸形波发生位置处达到峰值。这一现象表明, 在畸形波演化过程中, 波能经历了一个由发散到集中再到发散的演变过程。在波浪产生的初始阶段, 波浪能量呈现较为分散的状态, 随着波的传播, 能量逐渐集中, 在畸形波发生时, 能量集中度达到最高, 随着波的进一步传播, 波能再次分散。从图 11 中观察到, 在距离造波板 17 m 处的广义能量集中度比 1 m 处的偏大。这一现象揭示, 在畸形波发生后, 波能并非完全分散, 而是在一定程度上仍然保持了“汇聚”的特性。这种“汇聚”可能是由于畸形波在消散过程中其携带的波能的非线性相互作用, 形成了波包现象, 即波能从单一的大波转移到多个较小的波包中, 从而在一定程度上维持了能量的集中。在对波浪传播过程中畸形波能量集中度的演变进行细致分析时发现, 在畸形波形成之前, 能量集中度呈现逐渐增加的趋势; 而在畸形波发生之后, 能量集中度则表现为先快速下降, 随后逐渐趋于稳定。这揭示了畸形波在形成和消退过程中的非对称性, 即畸形波的汇聚形成过程慢于其发散消退过程。

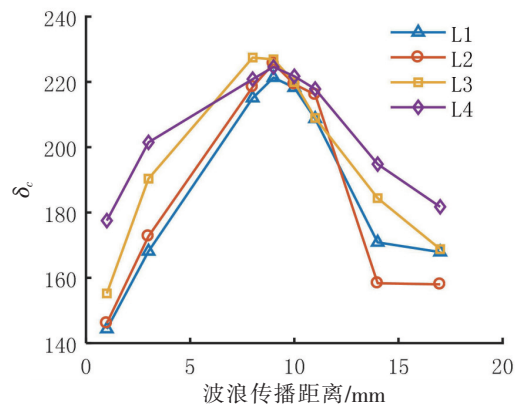


图 11 畸形波能量集中度的空间分布
Fig.11 Spatial distribution of energy concentration of freak waves

5 结论

本文提出基于时序反转法的 Peregrine 呼吸子解畸形波造波方法, 生成了 4 种不同载波波幅的畸形波, 且波形与解析结果高度一致。基于 FFT 研究了畸形波的频域变化特征和能量组成, 结果表明: 畸形波生成结果与理论解析解高度一致, 均出现与载波频率相同的显著峰值。此外, 实验还观察到 2 个较小的峰值, 分别位于载波频率的 2 倍和 3 倍处, 表明畸形波除了生成载波波列外, 还生成二阶和三阶 Stokes 成分波。同时, 基于小波变换方法研究了畸形波波能的时域和频域特征, 结果发现: 畸形波发生时波能显著增加, 频率范围扩大; 在畸形波出现前后, 能量出现空隙, 表明畸形波的形成伴随着能量的快速聚集和转移; 畸形波发生时广义能值是载波时段的 2 倍以上, 随着载波波幅的增大, 畸形波的能量和持续时间也增加; 畸形波消散后, 波能仍存在稍许集中, 可能是非线性相互作用导致了波包现象。畸形波形成和消退过程存在非对称性, 其汇聚速度慢于发散速度。本文成果不仅为深入研究 Peregrine 呼吸子解的非线性特性提供了可靠的实验手段, 还为畸形波与结构物相互作用、畸形波预测及海洋工程设计提供了重要技术支持。后续研究将聚焦于畸形波与浮式结构物的相互作用, 研究其运动响应特征, 并借助 PIV 等先进技术深入探究畸形波流场及生成机理。

[参考文献]

[1] ADCOCK T A A, TAYLOR P H, DRAPER S. Nonlinear dynamics of wave-groups in random seas: unexpected walls of water in the open ocean[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 471(2184): 20150660.

- [2] CHABCHOUB A. Tracking breather dynamics in irregular sea state conditions[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(14): 144103.
- [3] KIMURA A, OHTA T. Probability of the freak wave appearance in a 3-dimensional sea condition[C]//24th International Conference on Coastal Engineering. Kobe, Japan; American Society of Civil Engineers, 1995: 356-369.
- [4] DIDENKULOVA E. Catalogue of rogue waves occurred in the world ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 188: 105076.
- [5] 裴玉国. 畸形波的生成及基本特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [6] HU Z, TANG W Y, XUE H X. A probability-based superposition model of freak wave simulation[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 47: 284-290.
- [7] 高宁波, 张鸿, 杨建民, 等. 一种模拟特定畸形波列的相位调制方法[J]. *船舶力学*, 2019, 23(9): 1021-1033.
- [8] CHABCHOUB A, AKHMEDIEV N, HOFFMANN N P. Experimental study of spatiotemporally localized surface gravity water waves[J]. *Physical Review E*, 2012, 86(1): 016311.
- [9] CHABCHOUB A, FINK M. Time-reversal generation of rogue waves[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(12): 124101.
- [10] HU Z, TANG W Y, XUE H X, et al. Numerical study of Rogue waves as nonlinear Schrödinger breather solutions under finite water depth[J]. *Wave Motion*, 2015, 52: 81-90.
- [11] WANG J, MA Q W, YAN S, et al. Persistence of Peregrine breather in random sea states[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(1): 014016.
- [12] ZHANG H R, TANG W Y, YUAN Y C, et al. The three-dimensional green-water event study on a fixed simplified wall-sided ship under freak waves[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 251: 111096.
- [13] ZHANG H, WEI F Y, TANG W Y. Experimental generation and investigation of Peregrine breather waves in deep water[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2024, 19(4): 423-432.
- [14] CHABCHOUB A, HOFFMANN N P, AKHMEDIEV N. Rogue wave observation in a water wave tank[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(20): 204502.
- [15] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [16] PAN W B, LIANG C, ZHANG N C, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of a moored square cylinder under freak wave (II: frequency-domain study)[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108452.
- [17] CHABCHOUB A, HOFFMANN N, ONORATO M, et al. Observation of a hierarchy of up to fifth-order rogue waves in a water tank[J]. *Physical Review E*, 2012, 86(5): 056601.
- [18] 张忆, 陈玉龙, 柯贵喜. 推板式造波机的参数研究[J]. *水雷战与舰船防护*, 2017, 25(3): 56-60.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)