

基于 FLUENT 的海洋畸形波数值模拟研究

黄友龙, 胡金鹏, 刘师辉

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

摘要: 近年来, 由畸形波引起的海上船只遇难事件相继被报道, 其越来越引起人们的关注, 已成为船舶与海洋工程领域的一大热点。借助高效的相位调制畸形波模拟方法, 基于 FLUENT 强大的建模功能和二次开发功能, 建立可定时定点再现海洋实测畸形波现象的波浪数值水槽, 通过对数值计算结果的时域统计分析和频域谱分析, 发现数值结果不仅在波浪历时上能够很好地吻合目标波列, 而且计算波浪谱也保持了目标谱的真实结构, 说明了该畸形波数值水槽的有效性, 为进一步研究畸形波与海上结构物之间的相互作用打下了基础。

关键词: 畸形波; 数值模拟; 波浪谱; 相位调制

中图分类号: P731.22

文献标识码: A

Numerical Simulation of Oceanic Freak Waves Based on FLUENT

HUANG Youlong, HU Jinpeng, LIU Shihui

(South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Because shipwreck events caused by freak wave in recent years have been reported, freak wave has attracted more and more attention and has become a hotspot in the field of ship and ocean engineering. With the help of efficient phase modulation method for simulating freak waves, a numerical wave tank based on powerful modeling and secondary development function of FLUENT was established, by which the freak waves could occur at the assigned time and place. After analyzing the numerical calculation results in time domain and frequency domain, it is found that the results not only match the target wave train, but also keep the real structure of the target spectrum, it shows the effectiveness of the numerical wave tank and laying the foundation for further research of interaction between freak waves and structure of coastal and offshore engineering.

Key words: Freak wave; Numerical simulation; Wave spectra; Phase modulation

1 前言

畸形波是一种波高极大, 出现和消失都很突然的强非线性波浪。1965 年, Draper^[1]首次提出了“畸形波”概念, 之后随着海洋工程技术的不断发展和由畸形波引起的海上船只遇难和工程事故相继被报道, 这种破坏力巨大的强非线性波浪越来越得到重视。

对于畸形波的模拟可分为物理模型实验模拟和数值模拟, 由于物理模型实验存在容易受场地限制、经费限制、比尺效应等缺点, 且实验室研究中畸形波的生成技术还不够成熟, 所以随着计算机技术的飞速发展, 数值模拟得到了越来越多专家学者的青睐。目前, 对畸形波的数值模拟方法可分为线性方法和非线性方

法: 在线性理论方面, 海浪可以看作是由大量的具有不同周期和不同随机初相位的余弦波叠加而成, 大量的具有合适相位的余弦波的局部叠加可以产生极端大波; 非线性方面的数值模拟主要通过浅水 KdV 方程、Kp 方程, 深水非线性薛定谔方程以及完全非线性方程等演化方程来实现。由于非线性方法计算量大, 不易工程应用, 且很难应用于实验室模拟造波, 而基于 Longuet-Higgins 模型的线性叠加方法能够定时定点的生成满足畸形波定义的极端大波, 所以成为在实验室水槽和数值水槽中模拟畸形波的常用手段。

Kribel^[2]提出了双波列叠加模型, 即假设畸形波波列由随机波列和瞬态波列两部分组成, 将能量分为两

基金项目: 国家自然科学基金 (10902039, 41106031); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室研究基金 (1215)

作者简介: 黄友龙 (1990-), 男, 硕士研究生。主要从事波浪与结构物相互作用研究。

胡金鹏 (1975-), 男, 副教授。主要从事海洋工程水动力学研究。

收稿日期: 2016-11-03

部分,一部分用于产生随机波列,另一部分用于产生瞬态波列;国内裴玉国^[3]对双波列叠加模型的能量配比关系进行了研究,并进一步将瞬态波列分解为两个瞬态波列,即首先令两个瞬态波列的聚焦时刻和空间一致,然后再和随机波列叠加来模拟包含畸形波的波浪序列,称之为“三波列叠加模型”;赵西增^[4-5]则通过调制聚焦理论来模拟生成畸形波,包括相位角分布范围调制聚焦模型和部分组成波聚焦模型两种;刘赞强^[6-7]等总结并分析了上述模型,指出无论是随机波加瞬态波模型还是调制聚焦模型都存在缺点和不足,最后提出了一种模拟畸形波的相位调制新方法,该方法能更精确、更高效地模拟生成畸形波。因此本文将借助刘赞强等的这种新的理论模型,并基于 FLUENT 软件的二次开发,建立数值波浪水槽,通过数值模拟再现畸形波。

2 数值模型

2.1 畸形波模拟方法

本文的目标波谱为 JONSWAP 谱,有义波高为 0.1 m、谱峰周期为 1.8 s、水槽水深为 4 m。按等分频率法^[8]将波谱等分 100 份,得到 100 个组成波,频率区间为 [0.3, 2.108],略去超高频和超低频部分,对应的重复周期约为 83 s (即 100 个组成波的周期和),所以波浪的模拟时长应大于 83 s 才能满足波浪的统计特性和谱的真实结构。

指定各组成波的聚焦地点 $x_c=10$ m、聚焦时间 $t_c=30$ s,然后根据刘赞强^[6-7]的相位调制新模型生成畸形波,即调制部分组成波的初相位 θ_i ,使其满足在预定位置 $x_c=10$ m 和 $t_c=30$ s 时波面 $\eta_i(x_c, t_c)$ 为正,则该部分组成波在此叠加形成大波。具体方法如下:

令组成波数 $M=M_1+M_2$,则合成波的波面为:

$$\eta(x,t)=\sum_{i=1}^{M_1} a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \theta_i) + \sum_{i=M_1+1}^M a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \theta_i) \quad (1)$$

式中: M 为组成波数; $\eta(x,t)$ 为组成波的波动水面相对于静水面的瞬时高度; a_i 、 k_i 、 ω_i 为第 i 个组成波的振幅、波数和圆频率; θ_i 为第 i 个组成波的初相位。

常规随机波浪模拟时,组成波的初相位是在 $(0, 2\pi)$ 范围内均匀分布的随机数,令

$$\eta_1(x,t)=\sum_{i=1}^{M_1} a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \theta_i) \quad (2)$$

$$\eta_2(x,t)=\sum_{i=M_1+1}^M a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \theta_i) \quad (3)$$

在此,令最后 M_2 个组成波的合成波面 $\eta_2(x, t)$ 在预定位置和时间聚焦出现大波,则需要调制后 M_2 个组成波的初相位 θ_i ,使其满足 $\eta_i(x_c, t_c) > 0$ 。调制方法如下:

(1) 当 $k_i x_c - \omega_i t_c < 0$ 时,令整数 $N = \text{int}[(k_i x_c - \omega_i t_c) / 2\pi] < 0$,式(3)可写为:

$$\eta_2(x_c, t_c) = \sum_{i=M_1+1}^M a_i \cos(k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi + \theta_i) \quad (4)$$

调制 θ_i ($0 < \theta_i < 2\pi$),使其满足不等式 $-\pi/2 < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi + \theta_i < \pi/2$,这样可得到 $\cos(k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi + \theta_i) > 0$,亦即 $\eta_1(x_c, t_c) > 0$, $\eta_2(x_c, t_c) > 0$ 。

由于 $-2\pi < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi < 0$, θ_i 的调制方法按以下条件进行:

- ① 如果 $-\pi/2 < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi < 0$,则 $0 < \theta_i < \pi/2$, θ_i 在此区间内随机选取;
- ② 如果 $-\pi < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi < -\pi/2$,则 $\pi/2 < \theta_i < \pi$, θ_i 在此区间内随机选取;
- ③ 如果 $-3\pi/2 < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi < -\pi$,则 $\pi < \theta_i < 3\pi/2$, θ_i 在此区间内随机选取;
- ④ 如果 $-2\pi < k_i x_c - \omega_i t_c - 2N\pi < -3\pi/2$,则 $3\pi/2 < \theta_i < 2\pi$, θ_i 在此区间内随机选取。

(2) 当 $k_i x_c - \omega_i t_c \geq 0$ 时,令整数 $N = \text{int}[(k_i x_c - \omega_i t_c) / 2\pi] \geq 0$,式(3)可写为:

$$\eta_2(x_c, t_c) = \sum_{i=M_1+1}^M a_i \cos(k_i x_c - \omega_i t_c - 2(N+1)\pi + \theta_i) \quad (5)$$

调制 θ_i ($0 < \theta_i < 2\pi$),使其满足不等式 $-\pi/2 < k_i x_c - \omega_i t_c - 2(N+1)\pi + \theta_i < \pi/2$,这样可得到 $\cos(k_i x_c - \omega_i t_c - 2(N+1)\pi + \theta_i) > 0$,亦即 $\eta_1(x_c, t_c) > 0$, $\eta_2(x_c, t_c) > 0$ 。 θ_i 的取值方法与前面一样,在此不重复。

为了获得更好的理论波形,通过多次尝试,确定本文模型的 M_2 为 100,即调制全部组成波。

2.2 造波板的运动规律

根据上述畸形波模拟方法,我们已知合成波的波面方程(1)式,令 $x=0$,则可得到造波板位置处的波面:

$$\eta(0,t)=\sum_{i=1}^{M_1} a_i \cos(-\omega_i t + \theta_i) + \sum_{i=M_1+1}^M a_i \cos(-\omega_i t + \theta_i) \quad (6)$$

孙昭晨^[9]根据势流理论推导出不同周期时板前的波浪振幅 a 和造波板振幅 e 的关系,即水力传递函数 Tr ,对于推板造波:

$$Tr = \frac{4s\hbar k_i d}{2k_i d + s\hbar 2k_i d} \quad (7)$$

式中: Tr_i 为第 i 个组成波的水力传递函数; d 为水深; 其余变量同上。

由此, 可得造波板的速度信号 $u(0, t)$:

$$u(0, t) = \sum_{i=1}^{M_1} \frac{a_i \omega_i}{Tr_i} \cos(-\omega_i t + \theta_i) + \sum_{i=M_1+1}^M \frac{a_i \omega_i}{Tr_i} \cos(-\omega_i t + \theta_i) \quad (8)$$

2.3 几何模型

采用 ICEM CFD 建立计算所需的几何模型, 如图 1。水槽尺寸为 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、水深 4 m 、消波区长 5 m , 组成波聚焦位置 $x_c=10 \text{ m}$ 。水槽网格划分如图 2 所示, 整个计算域均采用结构网格, 自由液面附近加密网格以提高计算精度, 消波区处使用渐变网格以利于消波, 网格总数约为 68 900。

2.4 边界条件及求解方法

本文采用推板方式造波, 所以左边界为动边界, 顶部为压力入口边界, 其余边界均为固壁边界。消波区域采用阻尼消波的方式, 其中动边界的运动方程和阻尼消波源项用 FLUENT 的用户自定义函数 UDF 激活。流场采用 $k-\varepsilon$ 模型求解, 用 VOF 模块捕捉自由表面, 自由面重构采用几何重构方法, 压力-速度项采用 PISO 算法进行迭代计算。造波板附近采用动网格模块中的铺层功能进行网格更新。

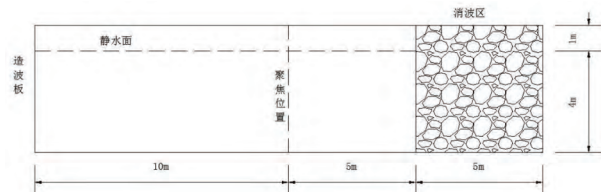


图 1 数值水槽几何简图



图 2 数值水槽网格划分图

3 计算结果与分析

3.1 波浪时历

按照上述数值模型和计算方法进行畸形波模拟, 模拟的时间步长为 0.005 s , 总的模拟时间为重复周期时长 83 s 。图 3 给出了数值水槽中不同位置浪高仪所测得的波浪时历。从图 3 可以看出: 在到达聚焦位置 ($x=10 \text{ m}$) 前, 各组成波能量较为分散, 波峰较小; 随着畸形波向前发展, 各组成波逐渐聚焦, 在 $x=10 \text{ m}$ 处达到最大; 从时间轴上看, 波浪也是在 $t=30 \text{ s}$ (聚焦

时刻) 时能量最集中, 从而实现定时定点生成畸形波。

目前关于畸形波的定义还存在分歧, 但大多数学者认可 Klinting and sand^[10] 在 1987 年提出的畸形波应满足以下 3 个条件: (1) 畸形波的波高是有义波高的 2 倍以上, 设为 $a \geq 2.0$; (2) 畸形波的波峰高是畸形波波高的 0.65 倍以上, 设为 $b \geq 0.65$; (3) 畸形波的波高是前一波高和后一波高的 2 倍以上, 设为 $c \geq 2.0$ 和 $d \geq 2.0$ 。

图 4 为 $x=10 \text{ m}$ 处 (即波浪聚焦位置) 畸形波的数值模拟波浪时历和基于相位调制新方法得到的理论波浪时历对比图。从图 4 可以看出本文模型的模拟值与理论值拟合较好, 且通过对本文模型的模拟值进行统计分析得到的四个畸形波特征参数分别为 $a=3.07$ 、 $b=0.62$ 、 $c=2.92$ 、 $d=2.76$, 可知本文模型所生成的畸形波基本满足上述定义。

但是, 通过对比数值模拟值与理论值的特征参数 (见表 1), 发现畸形波波峰值和波高值与理论值有一定的差距, 这是因为本文理论值是按线性叠加理论得到的, 而软件中得到的模拟值存在组成波间的非线性作用和数值模拟不可避免的数值损耗问题。

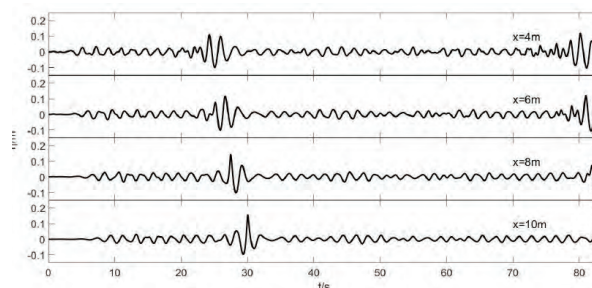


图 3 各位置波浪时历

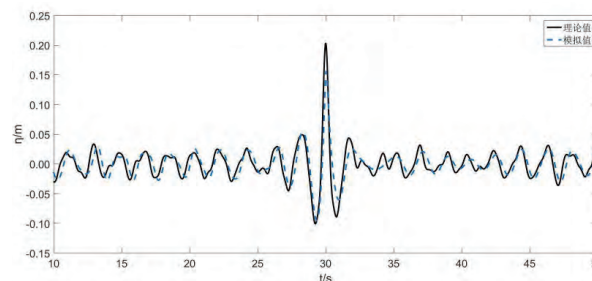


图 4 波浪时历对比图

表 1 畸形波模拟值与理论值特征参数对比

	最大波高 (m)	波峰高度 (m)	a	b	c	d
模拟值	0.25	0.16	3.07	0.62	2.92	2.76
理论值	0.30	0.20	3.03	0.67	3.19	2.28
误差	16.7%	20.0%	1.3%	7.5%	8.5%	21.1%

3.2 波浪谱

上述波浪时历的统计分析只能反映其外在特性,而波浪谱则可以描述其内部结构。通过对 $x=10\text{ m}$ 处的波浪时历进行谱分析可以得到模拟谱。表 2 为谱参数的目标值与模拟值的对比,图 4 则给出了模拟谱与目标谱的对比图,从中可以看出模拟谱较好的保持了目标谱的结构。

表 2 谱参数对比

	有义波高	谱峰周期
目标值	0.1	1.8
模拟值	0.084	1.876

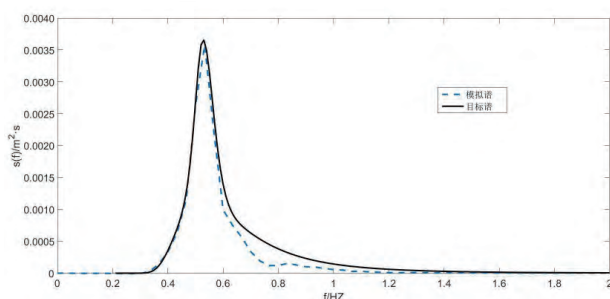


图 5 模拟谱与目标谱的对比

4 总结与展望

本文借助 FLUENT 软件的二次开发功能,通过其用户自定义函数 (UDF) 模拟实际造波机功能和水槽末端消波功能,建立了数值波浪水槽,然后运用模拟

畸形波的相位调制新方法,实现了在数值水槽中定时定点聚焦生成畸形波。模拟结果不仅与理论值吻合良好,基本满足了畸形波的严格定义,而且保持了目标谱的真实结构,从而说明本文所建立的数值波浪水槽可以较有效地模拟畸形波。

但是,本文模型所生成的畸形波波峰值与目标值还是存在一些差距,需要后续研究来进一步完善。此外,鉴于畸形波对结构有巨大的破坏作用,且目前对其的研究尚有待深入,所以本文的数值波浪水槽还可进一步运用于畸形波与海上结构物的相互作用研究。

参考文献

- [1] DRAPER L. Freak wave[J]. Marine Observer, 1965(2).
- [2] KRIEBEL D L. Efficient simulation of extreme waves in a random sea. In: Rogue waves 2000 Workshop, Brest, 2000.
- [3] 裴玉国. 畸形波的生成及基本特性研究 [D]. 大连理工大学港口、海岸及近海工程, 2007.
- [4] 赵西增, 孙昭晨, 梁书秀. 模拟畸形波的聚焦波浪模型 [J]. 力学学报, 2008, 40(4).
- [5] 赵西增. 畸形波实验研究和数值模拟 [D]. 大连理工大学, 2009.
- [6] 刘赞强, 张宁川, 俞聿修等. 改进的相位调制法模拟畸形波: I - 理论模型与验证 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(3).
- [7] 刘赞强. 畸形波模拟及其与核电取水构筑物作用研究 [D]. 大连理工大学, 2011.
- [8] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用 [M]. 大连理工大学出版社, 2003.
- [9] 孙昭晨. 推播混合式造波机理论曲线 [J]. 港口工程, 1988, 4.
- [10] KLINTING P, SAND S. Analysis of prototype freak waves: Coastal Hydrodynamics, ASCE, 1987[C].

(下接第 61 页)

心点及中心轴线——全站仪确定筒体两端面数据及余量——孔位中心点及参考点定位——孔位切割——孔位切割后处理及无损检测——检验并记录。

孔位切割评定及现场施工见图 8。



图 8 孔位切割评定及现场施工

6 检验

6.1 表面检验

所有工件制作后必须进行表面检查,结果须符合 AWS D1.1 及 ABS MODU 2012 规定要求。筒体外表面纵横焊缝余高须磨平。

6.2 无损检验

筒体及孔位所有热工部位都须进行表面无损探伤 (MT or PT)。筒体重要纵横对接焊缝,焊缝消氢处理结束 48 小时后,进行内外无损检测。内部 UT 采用 45° 、 60° 及 70° 探头检测;焊缝磨平位置增加 0° 探头检测;结果满足标准 AWS D1.1 及 ABS MODU 2012 规定的要求。

7 结语

通过工程精心组织施工,现场仔细监控、检验,确保了自升式平台 AGOSTO-12 项目大模数、高强度、桩腿筒节、分段及现场的制作质量,为平台顺利建造及交付打下了基础。