

基于数值模拟的造波机设计与实现方法研究*

季念迎¹, 薛 钢², 刘延俊^{1, 2, 3}, 刘梦超³

(1. 山东大学机械工程学院 山东拓普液压气动有限公司 济南 250061; 2. 山东大学机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室 济南 250061; 3. 山东大学海洋研究院 济南 250100)

摘要:以摇板造波方式为例,推导出造波方程和消波方程,建立了造波板运动特性与波浪参数的对应关系。设计了垂向板造波模型和摇板造波模型,利用 Fluent 软件进行了波浪数值模拟,使用 UDF 控制造波板运动,在近壁面附加动量源消波,对比分析了两种造波方式的优劣。垂向板造波方式适用于小幅波,对动力源要求低;摇板造波方式适用于中幅波,波浪质量好。依据数值模拟数据,设计并研制了物理样机,开展了波高测量实验。基于数值模拟的造波机设计方法能够快速确定造波方式和关键技术参数,大大缩短了研制周期,降低了研制成本,对研制新型造波机具有重要的借鉴意义。

关键词:造波理论;动量源消波;数值模拟;造波机

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design and manufacture of wave generator based on numerical simulation

Ji Nianying¹, Xue Gang², Liu Yanjun^{1, 2, 3}, Liu Mengchao³

(1. Shandong Top Hydraulic & Pneumatic Co., Ltd., School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 3. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: The rocker-flap wave-maker method is taken as an example to derive the wave-maker equation and the wave-absorber equation. Then, the wave parameters are linked to the movement characteristics of wave-maker plate. The vertical-plate wave-maker model and rocker-flap wave-maker model are designed to achieve the numerical simulation with the Fluent software. In the simulation, the UDF is used to control the movement of wave-maker plate and additional momentum source is used near the wall to absorb wave. The advantages and disadvantages of the two methods are analyzed. The vertical-plate wave-maker method is suitable for small wave and has no special requirement for power source, while the rocker-flap wave-maker method is suitable for medium wave and the generated wave is better. According to the simulated data, the physical prototype is designed and manufactured, the wave height is measured in the experiments. The waver generator design method based on the numerical simulation can identify the wave-maker type and key parameters quickly to shorten the design cycle and reduce the development costs, which has important reference significance in developing novel wave generator.

Keywords: wave-maker theory; momentum source wave-absorber; numerical simulation; wave generator

0 引 言

波浪是最典型的海洋环境要素,波浪作用力会引起海底沉积物和承载力发生变化,进而导致海床液化,产生海底滑坡,同时也是影响海洋结构物可靠性的关键载荷。

对波浪作用影响的研究主要有现场观测、数值模拟和实验装置测试 3 种方法。现场观测方法能够直接掌握第一手波浪资料^[1],但成本高、耗时长。随着计算机技术的发展和加工手段的进步,对波浪的数值模拟和实验装置测试成为研究波浪作用载荷的重要方式。

波浪的数值模拟主要包括基于 N-S 方程的粘性数值

造波、基于势流理论的理想流体造波以及源函数造波3种方法^[2]。1997年,国际水利与环境工程学会明确要求波浪的数值模拟必须满足结构物在波浪中的时域分析,并能模拟有界区域内的波浪问题^[3];Martyr R. C. 等人^[4]基于非结构化三角网格建立了 SWAN (simulating wave nearshore) 和 ADCIRC (advanced circulation model for oceanic, coastal and estuarine waters) 波浪模型,并经过了实测资料验证;李雪临等人^[5]基于光滑粒子流体动力学及任意拉格朗日欧拉方法对二维波浪进行了数值模拟,认为该方法能够无衰减地模拟波浪传播,并可有效减小固边界附近的粒子压力振荡;朱志夏^[6]采用非结构化网格嵌套方法准确模拟了射阳河口航道和港池水域的波浪传播,与实测值吻合良好。经过多年的发展,波浪的数值模拟技术已较为成熟,并逐渐应用于海洋科学研究和工程装备研制等方面^[7-8]。

但是,由于波浪问题的复杂性,单纯数值模拟很难给出具有工程意义的设计方案,必须结合实验装置进行联合分析^[9]。美国和法国最早开展了波浪模拟实验装置的研究^[10],中国船舶科学研究中心建造了我国第一座大型耐波性池。相对于大型造波设备,小型造波装置对于验证数值模拟结果更为简便。其中,分段式造波机广泛应用于多向不规则波的模型实验^[11],垂向板造波机^[12]和摇板造波机^[13]更容易对波浪参数进行控制。目前,造波机已广泛应用于海洋水文参数测量系统^[14]、海洋能发电装置^[15]等海洋工程装备模型样机的陆地实验及海洋科学实验^[16]。

本文推导了波浪生成函数和消波函数,并借助 Fluent 对垂向板造波和摇板造波进行了数值模拟,对比了两种造波方式的优劣,归纳了各自的适用领域,依据数值模拟数据研制了物理样机,以应用于波浪荷载作用下海床沉积物(砂土、粉土等)的动力响应研究。基于数值模拟的造波机设计方法大大缩短了研制周期,降低了研制成本,对研制新型造波机具有重要的借鉴意义。

1 造波和消波理论

1.1 造波理论

以摇板造波为例,推导造波板的运动参数与波浪参数之间的关联关系。摇板造波原理如图1所示。

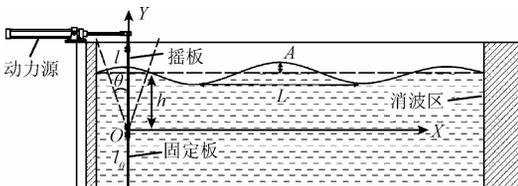


图1 摇板造波原理

Fig. 1 Schematic diagram of rocker-flap wave-maker

图1中,摇板与固定板铰连接,坐标原点O固定在铰接点上。摇板水面下垂直深度为h,摆动幅值为θ,摆动频率为f,所形成的波浪周期为T,波高为A,波长为L。

根据线性波理论和 Laplace 方程及其边界条件可以得到^[17-18]:

$$A(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

式中:k为波数,ω为波浪圆频率。

由波浪的弥散关系得:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{g(l_0 + h)} \quad (2)$$

摇板在半周期内的排水体积等于行进波波峰的体积,有:

$$h^2 \tan \theta = \frac{2A}{k} \quad (3)$$

摇板的运动方程为:

$$\omega(t) = \theta \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

在数值模型设置时,使用 Fluent 软件的用户自定义函数(user defined function, UDF)中的 DEFINE_CG_MOTION 宏写入摇板的运动方程。

在对波浪进行数值模拟时,采用雷诺时均 N-S 方程作为求解的基本方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (5)$$

式中:ρ为流体密度, u_i 为速度分量, u'_i 为速度脉动量, μ 为流体动力粘度, S_i 为源项。

同时,使用标准 k-ε 湍流模型对雷诺应力项进行计算,使流体控制方程封闭:

$$\frac{\partial k}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[u'_k \left(\frac{u'_i u'_i}{2} + \frac{p'}{\rho} \right) - v \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] - v \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} - 2 \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(C_\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式(6)为湍动能方程,式(7)为湍动能耗散率方程, C_ε = 0.07 ~ 0.09, C_{ε1} = 1.41 ~ 1.45, C_{ε2} = 1.91 ~ 1.92。

1.2 消波理论

对波浪进行数值模拟时,需要在沿波浪前进方向的前后壁面附近区域进行消波,消除反射波对入射波的影响^[19]。本文采用动量源消波的方式,通过在数值水槽壁面添加附加动量函数作为阻尼层,抵消反射波的作用。在 X 方向和 Y 方向的附加动量方程如式(8)和(9)所示。

$$S_x = \frac{\mu}{\alpha} u_1 - \rho \xi (u_1 - u_{10}) \quad (8)$$

$$S_y = \frac{\mu}{\alpha} u_2 - \rho \xi (u_2 - u_{20}) \quad (9)$$

式中： α 为常系数， ξ 为阻尼系数， u_{10} 、 u_{20} 为流体在无波浪时的速度分量，本文取值为0。式(8)和(9)的等号右端第1项为粘性损失项，第2项为惯性损失项，对于粘性较小的流体，只设置惯性损失项即可获得较好的消波效果。

在数值模拟时，使用 Fluent 软件 UDF 中的 DEFINE_SOURCE 宏将式(8)和(9)写入动量输运方程。

2 数值模拟

2.1 数值模拟模型

分别建立垂向板造波机和摇板造波机的二维数值模拟模型，并利用 ICEM 软件对其进行网格划分，如图2所示。

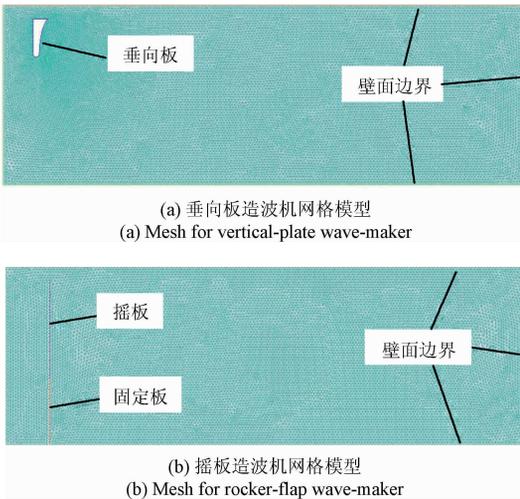


图2 造波机数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model of wave-maker

其中，垂向板的造波面曲线用5阶多项式拟合：

$$y = p_5 x^5 + p_4 x^4 + p_3 x^3 + p_2 x^2 + p_1 x + p_0 \quad (10)$$

式中： $p_5 = 1.08 \times 10^{-6}$ ， $p_4 = 1.049 \times 10^{-4}$ ， $p_3 = 3.445 \times 10^{-3}$ ， $p_2 = 1.04 \times 10^{-2}$ ， $p_1 = 8.791 \times 10^{-1}$ ， $p_0 = -5.556 \times 10^{-2}$ 。

采用非结构化网格，最大网格尺寸为数值水槽总长度的1/2 000，在靠近垂向板和摇板的区域对网格进行局部加密。

将网格模型导入到 Fluent 软件，设置多相流模型为 VOF 模型，主相为水，第2相为空气。采用弹簧近似光滑模型和局部重划模型对动网格进行控制，为保证网格质量，每5个迭代步更新一次网格。采用 SIMPLE 方法实现压力-速度耦合，采用二阶迎风格式对动量项进行空间

离散。设置监测点和监测面，获取垂向板和摇板的受力状态及波浪的波高数据。

2.2 数值模拟结果

便于分析，用密度场区分水相和空气相。垂向板造波机和摇板造波机的数值模拟结果如图3所示。

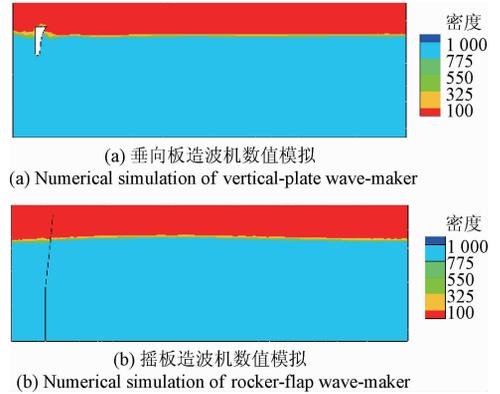


图3 造波机数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of wave-maker

数值模拟过程中，保持垂向板和摇板的运动幅值不变，分别设置往复运动频率为0.5、0.75和1 Hz，作用于垂向板和摇板上的水动力如图4所示。

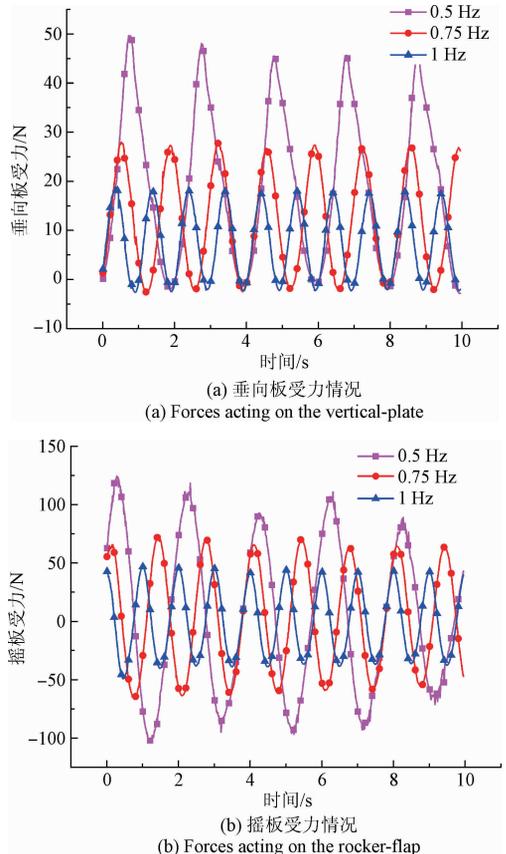
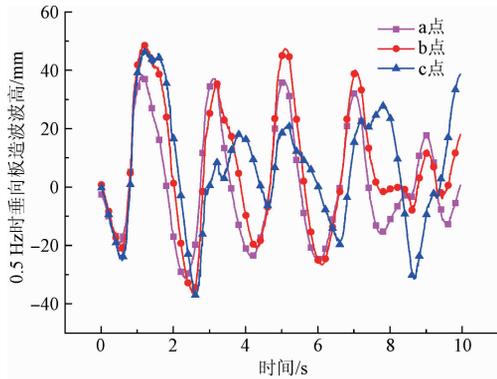


图4 造波板受力情况

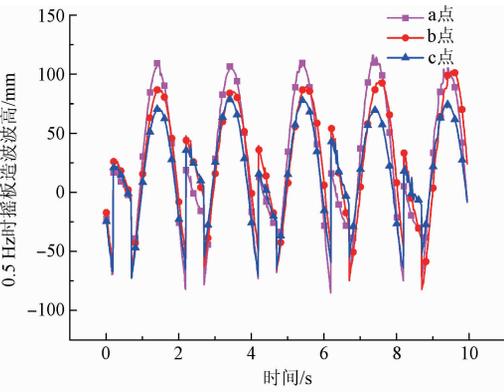
Fig. 4 Forces acting on the wave-maker

在相同运动频率下,垂向板受力明显小于摇板受力,且垂向板受力恒为正值,而摇板受力值以0为中心周期性变化。因此,摇板造波机对动力源要求更为苛刻。随着运动频率的增加,造波板受力值明显减小。

设置 a、b、c 3 个波高监测点,距造波板的水平距离分别为 0.2 倍、0.4 倍和 0.6 倍水槽长度,在不同运动频率下,波高如图 5~7 所示。

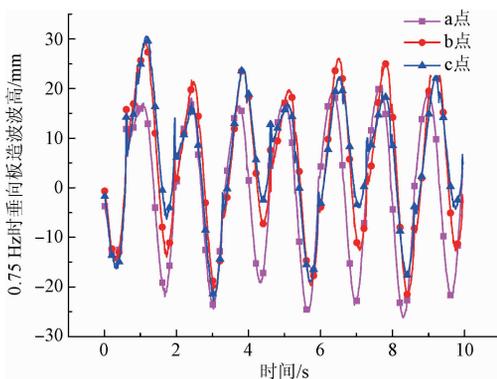


(a) Wave height of vertical-plate wave-maker at 0.5 Hz

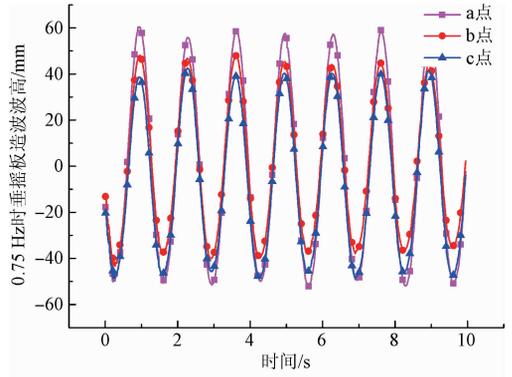


(b) Wave height of rocker-flap wave-maker at 0.5 Hz

图5 0.5 Hz 时造波波高
Fig. 5 Wave height at 0.5 Hz

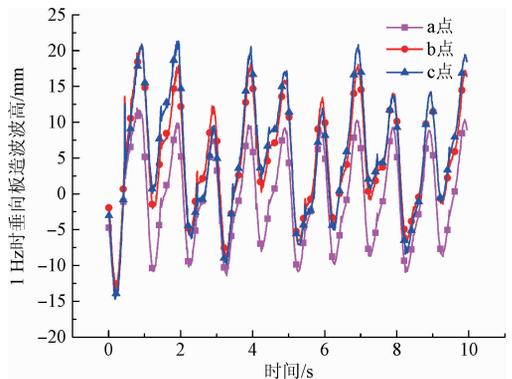


(a) Wave height of vertical-plate wave-maker at 0.75 Hz

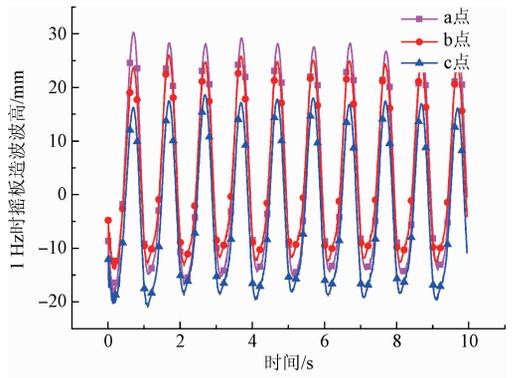


(b) 0.75 Hz 时摇板造波波高
(b) Wave height of rocker-flap wave-maker at 0.75 Hz

图6 0.75 Hz 时造波波高
Fig. 6 Wave height at 0.75 Hz



(a) Wave height of vertical-plate wave-maker at 1 Hz



(b) 1 Hz 时摇板造波波高
(b) Wave height of rocker-flap wave-maker at 1 Hz

图7 1 Hz 时造波波高
Fig. 7 Wave height at 1 Hz

随着造波板运动频率的提高,波浪周期缩短,波高也随之减小。在运动频率较低(0.5 Hz)时,垂向板所造波浪不规则性强,而摇板所造波浪产生了碎波。随着运动频率提高,摇板所造波浪质量有大幅改善。同一列波浪中,靠近造波板的波高大于远离造波板的波高,这是由于波浪在传递过程中发生能量耗散造成的。在相同运动频率下,摇

板所造波浪的波高明显大于垂向板所造波浪的波高。

2.3 两种造波方式对比

基于数值模拟数据,对两种造波方式进行对比,如表1所示。

表1 两种造波方式对比

Table 1 Comparison of the two types of wave-maker

造波方式	造波板参数		波高/ mm	适用 范围	对动力 源要求
	运动频率/Hz	受力/N			
垂向板 造波	0.5	0 ~ 50	50	小波高, 波浪 质量差	单向 驱动力
	0.75	0 ~ 30	30		
	1	0 ~ 20	20		
摇板造波	0.5	-110 ~ 110	110	中等尺寸 波高,波浪 质量好	往复 驱动力
	0.75	-75 ~ 75	60		
	1	-50 ~ 50	30		

从表1可以看出,垂向板造波对动力源性能要求低,因而结构简单,成本低;而摇板造波能满足对高质量波浪的要求。

在数值模拟过程中,按照缩比关系,不断优化造波机的结构参数,以满足波浪荷载作用下沉积物侵蚀、再悬浮等过程科学实验的要求,最终确定的关键结构尺寸如表2所示。

表2 两种造波机的关键结构尺寸参数

Table 2 Key structure parameters of the two types of wave-maker

参数	垂向板造波机	摇板造波机
水槽尺寸/mm	3 000 × 1 200 × 430	
最大水深/mm	800	
造波板尺寸/mm	255 × 410 × 100	640 × 420 × 5
造波板行程	400 mm	-18.65° ~ 19.14°
固定板高度/mm	—	458.5

3 物理样机实验及应用

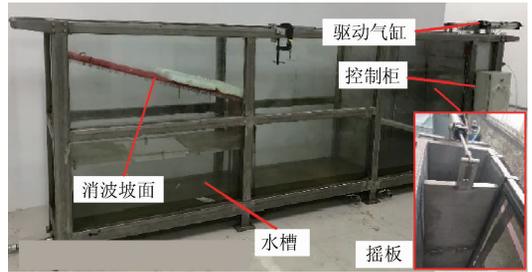
3.1 物理样机

依据数值模拟数据,采用气缸作为动力源,分别研制了垂向板造波机和摇板造波机的物理样机,并与中国海洋大学环境岩土实验室的波浪水槽进行对比^[20],如图8所示。



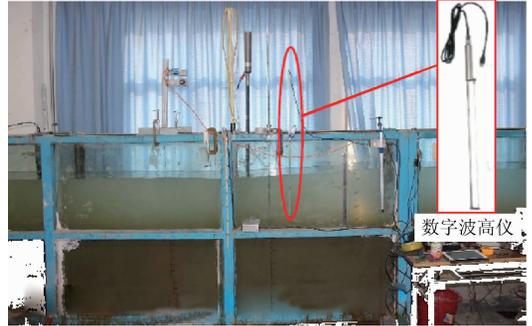
(a) 本文所研制的垂向板造波机

(a) The vertical-plate wave-maker made in this paper



(b) 本文所研制的摇板造波机

(b) The rocker-flap wave-maker made in this paper



(c) 中国海洋大学环境岩土实验室的波浪水槽
(c) The wave-maker in Environmental Geotechnical Laboratory of Ocean University of China

图8 物理样机

Fig. 8 Physical prototypes

其中,垂向板造波机采用亚德客的 SI-100 × 400-S-FA 型气缸驱动,前端面固定;摇板造波机采用 SI-63 × 500-S-TCM1 型气缸作为动力源,耳轴支架连接;中国海洋大学环境岩土实验室的波浪水槽长 14 m,高 0.7 m,宽 0.4 m,采用电机驱动摇板造波,现用于波浪荷载作用下海床沉积物的动力响应研究。

在物理样机研制过程中发现,与摇板造波机相比,垂向板造波机能够有效利用垂直空间,空间利用率高。为实现摇板摆动,安装于摇板造波机上的气缸也需要摆动一定角度。摇板摆角和气缸摆角的关系如图9所示。

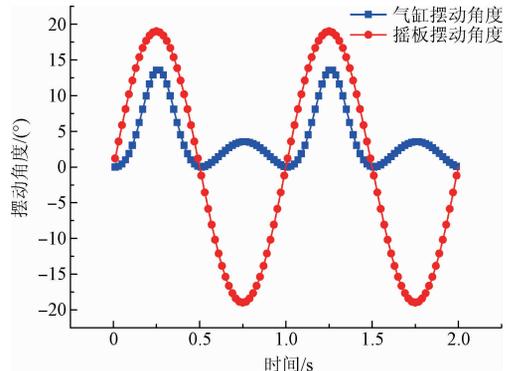


图9 摇板摆角和气缸摆角关系

Fig. 9 Relationship between the swinging angles of rocker-flap and air cylinder

摇板造波机结构复杂,研制成本高,相应的故障率也较高,但波浪质量较好。

3.2 波高实验数据对比及应用

将数字波高仪分别安装于距造波板 0.4 倍水槽长度处,设置数据采集频率为 100 Hz,分别对造波板运动频率为 1 Hz 时所产生波浪的波高进行实验测量,测量数据如图 10 所示。

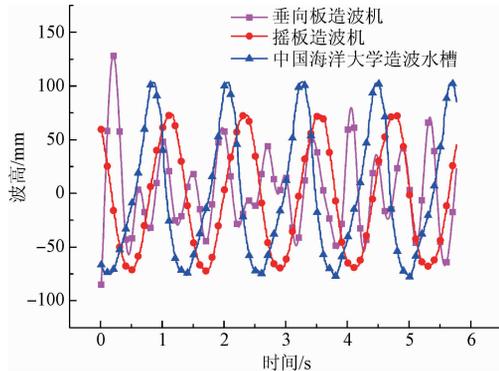


图 10 波高实验数据

Fig. 10 Experimental data of wave height

从图 10 可以看出,摇板造波机产生的波浪质量较好,与现有造波水槽相近,可用于波浪荷载作用下沉积物侵蚀、再悬浮等过程科学实验。而垂向板造波机所产生波浪质量较差,波高不稳定,推测与垂向板造波曲面形状和加工质量有关,在垂向板上下往复运动时产生了不同波幅的波浪,仍需对造波曲面做进一步优化。

4 结 论

本文以摇板造波方式为例,基于线性波理论建立了造波方程和消波方程,并利用 Fluent 软件进行了波浪数值模拟,基于数值模拟数据设计了造波机的结构参数,研制了垂向板造波机和摇板造波机,并与中国海洋大学环境岩土实验室的波浪水槽进行了对比实验。结果表明,在相同运动幅度下,造波板运动频率越高,所形成波浪的周期越短,波高越小,造波板受力越小;垂向板造波方式适用于小幅波,对动力源要求低;摇板造波方式适用于中幅波,波浪质量好;所研制的摇板造波机产生的波浪与现有大型造波水槽所产生的波浪较为相似,能够满足科学实验需求。本文针对波浪荷载作用下海床沉积物动力响应研究的需求,提出了基于数值模拟的造波机设计方法,能够快速确定造波方式和关键技术参数,研制了小型造波机,大大缩短了研制周期,通过优化动力源驱动方式和结构参数,减小了设备体积,在满足实验需求的前提下大幅降低了研制成本,对研制新型造波机具有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 左其华. 现场波浪观测技术发展和应用[J]. 海洋工程, 2008, 26(2):124-139.
ZUO Q H. Advances and applications of ocean wave measurement technology [J]. Ocean Engineering, 2008, 26(2):124-139.
- [2] 李宏伟. 造波理论与方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
LI H W. The research on theory and method of wave-generating technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [3] SKOURUP J, SCHÄFFER H A. Wave generation and active absorption in a numerical wave flume [J]. Genetics, 1997, 130(130):411-28.
- [4] MARTYR R C, DIETRICH J C, WESTERINK J J, et al. Simulating hurricane storm surge in the lower mississippi river under varying flow conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(5):492-501.
- [5] 李雪临, 路宽, 韩林生, 等. 基于 SPH-ALE 方法的波浪水槽数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6):39-43.
LI X L, LU K, HAN L SH, et al. Numerical simulation of wave flume based on SPH-ALE method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6):39-43.
- [6] 朱志夏. 非结构化网格嵌套波浪数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1):152-157.
ZHU ZH X. Nested wave numerical simulation of unstructured mesh [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(1):152-157.
- [7] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3):1-12.
CHA J J, WAN D CH. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM [J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3):1-12.
- [8] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(1):15-21.
DONG ZH, ZHAN J M. Comparison of existing methods for wave generating and absorbing in VOF-based numerical tank [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(1):15-21.
- [9] 张瑞波, 王收军, 朱国良. 伺服电机驱动式水槽造波机系统设计[J]. 机械设计, 2007, 24(10):40-42.
ZHANG R B, WANG SH J, ZHU G L. Design of wave-creator system in the servomotor driven typed flume [J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(10):40-42.

- [10] 刘毅,程少科,郑堤. 大功率造波机中驱动技术的研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 155-163.
LIU Y, CHENG SH K, ZHENG D. Research Status and Prospect of High Power Wave Generation Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 155-163.
- [11] OUTLAW D G. A portable directional irregular waves generator for wave basin [C]. Proceeding of Symposium on Description and Modelling of Directional, 1984(B3): 1-8.
- [12] HYUN J M. Theory for hinged wavemakers of finite draft in water of constant depth [J]. Journal of Hydraulics, 2015, 10(1):2-7.
- [13] MAKIN V K, BRANGER H, PEIRSON W L, et al. Stress above wind-plus-paddle waves: Modeling of a laboratory experiment [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 37(12):2824-2837.
- [14] 刘素花,龚德俊,徐永平,等. 海洋剖面要素测量系统波浪驱动自治的实现方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):603-609.
LIU S H, GONG D J, XU Y P, et al. Method to realize wave-powered autonomous system for marine profiling measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 603-609.
- [15] 张颖,吴成东,董再励. 基于多种群遗传算法的波能装置的优化设计及分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6):1231-1235.
ZHANG Y, WU CH D, DONG Z L. Optimum design and analysis of wave energy system based on multiple-population genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(6):1231-1235.
- [16] 陈永平,田万青,方家裕,等. 波浪环境下多孔射流水动力特性试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(4):569-578.
CHEN Y P, TIAN W Q, FANG J Y, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of multiple jets in wave environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4):569-578.
- [17] BASCO D R. Water wave mechanics for engineers and scientists [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1991, 66(24):490-491.
- [18] 郭丁,顾行发,余涛,等. 基于二尺度模型的星载 SAR 海面场景成像仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(1):81-88.
GUO D, GU X F, YU T, et al. Simulation of polarization SAR imaging of ocean surface based on the two-scale model [J]. Journal of Electronic Measurement

and Instrument, 2011, 25(1):81-88.

- [19] 姜海,郭海燕,张林,等. 基于 FLUENT 的内孤立波质量源造波方法[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(6): 1101-1106.
JIANG H, GUO H Y, ZHANG L, et al. A mass source method for numerical simulation on internal solitary waves based on the fluent [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2016,47(6):1101-1106.
- [20] 郑杰文. 现代黄河三角洲沉积物波浪动力响应过程对其再悬浮控制作用研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
ZHENG J W. The role of seabed dynamic response in sediment resuspension under waves in modern yellow river delta [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

作者简介



季念迎,1989年毕业于南京机械专科学校,现为山东拓普液压气动有限公司工程师,主要研究方向为液压系统设计、海洋装备开发。

E-mail:jinianying@sina.cn

Ji Nianying graduated from Nanjing Institute of Technology in 1989. Now he is an engineer in Shandong Top Hydraulic & Pneumatic Co., Ltd. His main research interests include hydraulic system design and ocean engineering equipment development.



薛钢(通讯作者),2013年于山东大学获得学士学位,现为山东大学博士研究生,主要研究方向为流体动力控制、自主式水下潜器、海洋工程装备。

E-mail:xuegangzb@163.com

Xue Gang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shandong University in 2013. Now he is a Ph.D. candidate in Shandong University. His main research interests include fluid power control, autonomous underwater vehicle and ocean engineering equipment.



刘延俊,1989年于山东工业大学获得硕士学位,2008年于山东大学获得博士学位,现为山东大学教授、博士生导师,主要研究方向为海洋可再生能源与深海探测技术及装备开发、流体动力控制、机械系统智能控制与动态检测。

E-mail:lyj111ky@163.com

Liu Yanjun received his M.Sc. degree from Shandong University of Technology in 1989, and his Ph.D. degree from Shandong University in 2008. Now he is a professor and doctoral supervisor in Shandong University. His main research interests include marine renewable energy and deep sea exploration technology and equipment development, fluid power control and intelligent control and dynamic detection of mechanical system.