

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.010

基于摇板运动分析的波浪产生方法研究^{*}

程少科¹, 王丁一¹, 陈俊华², 刘毅², 李越¹, 王登²

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;

2. 浙江大学宁波理工学院 机电与能源工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:针对试验水池中波浪产生方法的问题,对试验水池中摇板式造波机的摇板速度、角度和波浪高度产生机理之间的关系进行了分析,对国内外学者关于波浪高度产生机理的研究进行了归纳,提出了一种基于摇板运动分析的波浪高度产生方法的研究。利用流体力学的连续性方程中体积流量变化关系,建立了理论波浪高度产生与摇板运动参数之间的数学模型,并通过 Matlab 进行了理论曲线的研究。最后,通过搭建相应的试验平台进行了实验验证。研究结果表明,该方法适用于试验水池中波浪高度产生方法的研究,提高了波浪模拟的准确性,为海洋装置的设计开发提供了相关理论指导。

关键词:试验水池;摇板式造波机;摇板运动分析;波高公式;连续性方程

中图分类号:U661.74;TH69

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0694-05

Production method of wave rocker panels based on motion analysis

CHENG Shao-ke¹, WANG Ding-yi¹, CHEN Jun-hua², LIU Yi², LI Yue¹, WANG Deng²

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,

Taiyuan 030024, China; 2. College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Aiming at the problems of the wave generated method in test pool, wave tank test machine rocked plate's speed, angle and wave height, relevant mechanism were analyzed, the academic achievements of wave height mechanism both at home and abroad were summarized, a wave height generated method based on the motion analysis of rolling plate was presented. Based on principle of hydrodynamics, the continuity equation about the relation between volume and flow was used, a mathematical model about the relation between wave height generated in theory and rocking plate motion parameters was established, and studied the theoretical curve by Matlab. Finally, the corresponding test platform was set up to verify the experiment. The results indicate that the test method is effective to research the way of pool wave height generate, it can improve the accuracy of wave simulation and provide theory guidance for design and development of marine equipment.

Key words: testbasin; wave plate wave making machine; motion analysis of rolling plate; wave height formula; continuity equation

0 引 言

在海洋环境中,波浪对海洋工程建筑物产生巨大冲击力,是造成海洋工程建筑物破坏的主要因素。近几年,世界海洋石油勘探较为严重的10起平台事故,

其中多起事故原因属于波浪冲击破坏造成的。海洋工程平台事故频发,属于高危作业领域^[1-2]。因此对于波浪的研究非常重要,而造波机是一种用于对船舶、港口工程、波浪发电装置等进行波浪模拟试验的专用实验室设备,为海洋装备、港口工程和波浪能开发装置设计

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075362/E050603);国家海洋局专项资金资助项目(NBME2011CL02);宁波市重大科技攻关项目(2012C10041)

作者简介:程少科(1989-),男,山西孝义人,硕士研究生,主要从事海洋波浪模拟方面的研究。E-mail:779424130@qq.com

提供主要依据^[3-5]。

相关的造波理论的本质是势流理论中的基于 Fourier 方法求解边值问题。国外的学者 Rapp 和 Melville^[6]采用波浪聚焦的方法产生二维脉冲波浪,即通过不同频率组成波间相互调制,使波浪在指定位置和指定时刻的波峰达到最大。She 等^[7-8]利用单一频率不同方向和多频率不同方向的波浪聚焦波浪。Hiro-maru 等^[9]通过分析造波板处波浪的组成关系,推导了无反射造波方程。国内的学者柳淑学、俞聿修和洪起庸^[10-13]采用数值模拟和物理模拟方法产生了波浪,研究了波浪的特性及其对于工程结构物的作用。严汝建等^[14]利用 VOF 方法对深水池的造波系统进行了模拟,为试验水池中的造波机运动控制及波浪衰减的测量提供了依据。庞永杰等^[15]学者由谱分析和不规则波浪生成方法得出生成白噪声不规则波的摇板行程曲线。李木国^[16]利用多向不规则波数值模拟理论阐述了分段式造波机产生波浪的原理及方法。以上学者在数值模拟、物理模拟和波谱分析等方面做了大量研究,进一步促进了造波理论的发展。而在试验水池中,波浪的产生与摇板的运动关系方面研究的不够深入。

本研究在分析上述波浪模拟特点的基础上,结合摇板式造波机的工作原理,从摇板的运动规律和水体的运动过程出发,并应用流体力学的连续性方程理论,来研究试验水池中摇板式造波机波浪的产生原理。

1 波高公式分析

1.1 极限波陡的波高公式分析

Miche^[17]根据斯托克斯理论和波浪破碎的运动学条件(水质点水平分速 u 等于波速 c)提出有限水深和水平底坡条件下的极限波陡:

$$\delta_{\max} = \left(\frac{H}{\lambda} \right)_{\max} = 0.142 \tanh(kh) \quad (1)$$

式中: $\delta_{\max}$ —极限波陡; H —波高; λ —波长; h —水深; d —摇板垂直入水深度; k —波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

式(1)是目前试验水池造波计算波高的主要公式。该公式根据试验水池的相关要求,利用迭代法计算出波长,来得到最大波高。

式(1)是根据海上波浪的极限波陡与破碎指标得出的,其中波高只与波长和水深有关,然而在试验水池中应用具有一定的局限性。试验水池中的波高是由造波板的往复运动产生的,因此波高的产生和造波板的速度、加速度和运动状态等有关,波浪产生的频率和摇板的运动周期有关。

1.2 微幅波理论的波高公式分析

孙昭晨等^[18]根据微幅波理论和势流理论建立造波板运动行程与波高之间的关系(波高摇幅比),其中摇板式造波机的传递函数为:

$$\frac{H}{e} = \frac{4 \operatorname{sh}(kh)}{kh} \left[\frac{1 - \operatorname{ch}(kh) + kd \operatorname{sh}(kh)}{2kh + \operatorname{sh}(2kh)} \right] \quad (2)$$

该公式是根据微幅波理论得出的,但仅局限于波高很小的情况,故工程使用上受到限制。

在试验水池中,由于水池是封闭的环境,波浪的产生是由于摇板扰动水体引起的,波浪高度的产生和频率的变化与摇板的运动参数有关系,而该公式中只描述了波高和摇幅的关系。目前,对波浪产生和摇板运动状态之间的关系描述不够完善。

2 基于摇板运动的波浪产生数学模型建立

2.1 连续性方程

质量守恒是任何物质运动时必须遵守的一个法则。对于流场中任意选定的固定几何空间,单位时间内含于该空间内的流体质量的增加量必然等于同时间内通过该空间边界净流入其内部的流体质量。

在流场中取出一个微元六面体,如图1所示。

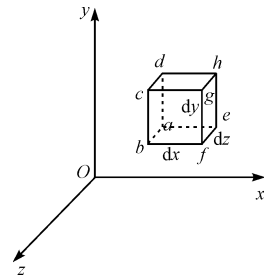


图1 微元六面体

六面体的边长分别: dx, dy, dz 。则在单位时间内微元六面体中所减少的流体质量为:

$$\left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (3)$$

式中: u_x, u_y, u_z —流体在 x, y, z 方向上的流体速度分量; ρ —流体的密度。

当 $\partial\rho/\partial t < 0$ 时,反映了密度在下降。由于密度的降低在单位时间内六面体中流体质量的减少量为:

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t} dx dy dz \quad (4)$$

根据质量守恒原理,有:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

其矢量形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (6)$$

对于不可压缩流体, $\rho = \text{const}$ 。上述连续方程式可以简化为:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (7)$$

式中: ∇ —速度散度, $\nabla \cdot \vec{u}$ —净流出单位体积控制体的体积流量。

从整个控制体流出的流体体积流量应计算为

$\int_{\tau} \nabla \cdot \vec{u} d\tau$, 于是有:

$$\int_{\tau} \nabla \cdot \vec{u} d\tau = \int_A \vec{u} \cdot \vec{n} dA \quad (8)$$

2.2 基于连续性方程的数学模型建立

试验水池是一个封闭的空间, 在摇板运动过程中, 假设水无粘性、不可压缩、无旋, 由于在摆动过程中摇板的摆幅并不大, 因此, 将摇板排开的水看作一整体, 这样做可以大大的降低计算的复杂度。实验证明这样做得出的结果是可以接受的。

摇板运动参数示意图如图 2 所示。

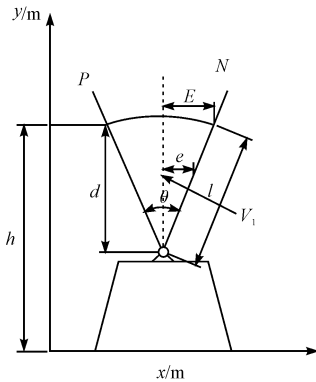


图 2 摇板运动参数示意图

2.2.1 V_1 的计算

摇板上不同水深处的摇板的摆幅:

$$e(y) = \begin{cases} 0 & 0 \leq y \leq (h-d) \\ \frac{E}{d}(y-h+d) & (h-d) \leq y \leq h \end{cases} \quad (9)$$

式中: E —水面处的摇幅。

摇板的水平位移:

$$x(t) = e(y) \sin(\omega t) \quad (10)$$

摇板的水平速度:

$$u(t) = \frac{dx}{dt} = \omega \cos(\omega t) \frac{E}{d}(y-h+d) \quad (11)$$

式中: ω —波浪的角频率, 即:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (12)$$

当摇板从 P 运动到 N 的过程中, 造波板处波浪的

速度为 $u(t)$, 因此:

$$V_1 = \int_{A_1} u(t) dA_1 \cdot t \quad (13)$$

式中: A_1 — V_1 的截面积, $A_1 = \theta l^2/2$; l —摇板入水深度。

2.2.2 V_2 的计算

波浪参数示意图如图 3 所示。

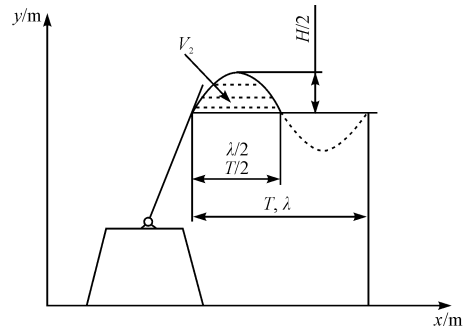


图 3 波浪参数示意图

由于摇板的扰动, 图 3 中 V_2 部分水体从静止开始运动, 由于 V_1 部分水的速度远大于 V_2 部分的水的速度, 使得 V_2 部分的水面爬高, 产生了波浪。

距离摇板底部不同高度处摇板的速度不同, 从摇板底铰链连接处以上, 不同高度的水流以不同的水平速度向右传播, 而且水面上的运动速度较快, 距离水面 d 深处的水运动速度较慢, 几乎接近于 0, 由于这部分水的体积较大, 速度较慢, 此时水流流动的速度即为波速, 即为 u_2 。这部分水向右传播带动后面的水体进行运动, 由于 u_1 远远大于 u_2 , 在试验水池中产生了波峰。因此:

$$V_2 = \int_{A_2} u_2 dA_2 \cdot t \quad (14)$$

式中: A_2 — V_2 的截面积; u_2 —波速, $u_2 = \lambda/T$ 。

此时的波面方程为 $\eta = \frac{H}{2} \cos(kx)$, 则:

$$A_2 = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \eta dx \quad (15)$$

由连续性方程式(7,8)可知整个控制体的体积流量相等, 即 $V_1 = V_2$, 即:

$$\int_{A_1} u(t) dA_1 \cdot t = \int_{A_2} u_2 dA_2 \cdot t \quad (16)$$

得:

$$H = \frac{8\pi^2 T \theta l^2 \omega \cos(\omega t)}{\left[g T^2 \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \right]} \cdot \frac{E}{d}(y-h+d) \quad (17)$$

式中: λ —波长, 由迭代法得来。

式(17)即为试验水池中的摇板运动下的波高公式。由上式可见, 波高 H 与摇板角度、摇板周期、摇幅、摇板入水深度和波长有关。

3 实验及结果分析

3.1 实验装置的搭建

为了验证理论的正确性,笔者在长宽高为 $80 \cdot 4 \cdot 2.5 \text{ m}^3$ 的造波水池中,一边装有 7 台造波机,在水池的尽头装有消波装置。如果消波充分,就不产生反射波,水池可以看作在一端是无限伸展的,摇板在其中做周期性往复振荡,在一个足够长的时间间隔后,摇板初始作用的影响已经消失,可以认为摇板运动和水池内的波浪运动已达到稳定。

大型试验水池如图 4 所示。

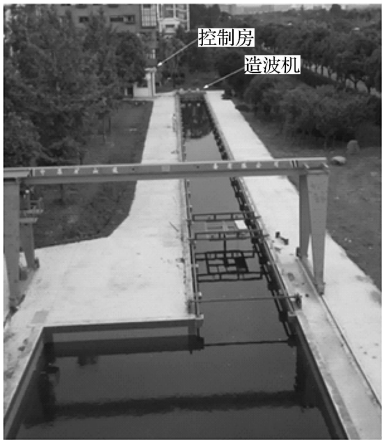


图 4 大型试验水池

摇板式造波机如图 5 所示。

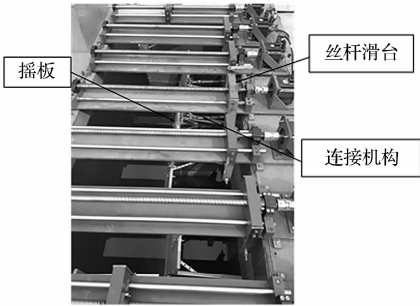


图 5 摇板式造波机

根据波浪理论^[19],如果摇板按某一固定的角速度做简谐振动,在一段时间后,在离开摇板的一段距离的水池中 will 产生二维规则波(正弦波)。所产生的二维规则波的周期与摇板简谐振动的周期相同,波高与摇板的摆幅有关。

在实验中,首先要根据目标谱(此处为正弦波),通过人机界面设定欲模拟波浪的相关参数,上位机根据系统的传递函数,利用反傅立叶变换计算出每块造波板运行的时间序列值控制信号,传送到相应的下位机,下位机接收到上位机的指令后,启动造波程序。同

时上位机通过内部的控制软件采集波高参数与实际波形的误差,以及实际周期与设计周期的偏差,并向下位机发送一个可以产生一定波高和周期所需要的电机转速,下位机采集电机的实际转速和电流信号并向驱动器和电机发出指令,电机转动并驱动丝杆,带动摇板前后摆动,生成实验所需要的波浪。

水池中的检测系统能实时将波浪的波高和周期反馈给上位机,形成一个闭环控制系统。每块造波板都设有零位检测和控制功能,造波机在调试、维护、维修期间,可以通过计算机或者手动控制按钮,精确定位造波板的位置。

3.2 实验结果分析

水池中的摇板入水深度是固定的,造波周期 $T=2 \text{ s}$, $h=2 \text{ m}$, $l=1.2 \text{ m}$,本研究根据已知参数,采用模块化编程编写波高的 Matlab 应用程序得出理论的波高曲线。

波高与摇板角度的理论曲线与根据输入的造波信号得出的实验曲线如图 6 所示。

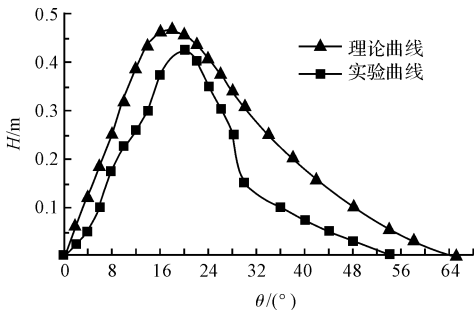


图 6 波高与摇板角度的曲线

从图 6 可以看出,试验曲线和理论曲线基本吻合,而波高的产生与摇板的运动角度有关,并且在一定范围内波高随着角度的增大而增大。当 $\theta=23^\circ$ 时,波高最高,为 0.4 m。但是,当角度继续增大时,波高就会减低,这是由于摇板的运动过程水的体积增大,影响了 V_1 部分水体的速度。

波高与摇板速度的曲线关系如图 7 所示。

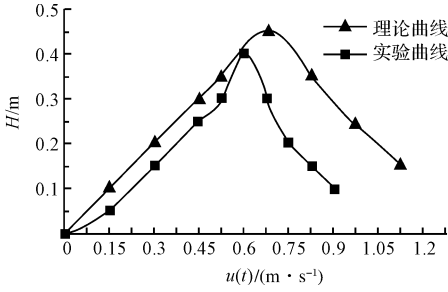


图 7 波高与摇板速度的曲线关系

从图 7 中可以看出,理论和试验曲线基本吻合,而摇板的速度影响了波浪高度的变化,初始时速度越快,

波高越大。当 $v = 0.82 \text{ m/s}$ 时,波高最大为 0.4 m 。但是摇板的速度继续增大后,波浪的高度降低,这是由于造波机驱动装置的性能、摇板的入水深度和电机的性能等影响的,因此摇板的速度不能无限增大;而且当摇板的速度大到一定值的时候,波浪会破碎,这时是不会有波高的。

4 结束语

本研究通过分析试验水池中摇板的运动和波浪产生之间的关系,建立了影响波高的摇板运动参数数学模型,并通过实验进行了验证,实验结果表明该方法有助于提高摇板式造波机波浪高度的计算,试验水池中波浪的产生与传播与摇板的运动参数有关,在一定范围内波高随着角度和速度的增大而增大。

通过上述理论及实验得到的结果,不仅可为进一步研究波浪的产生机理打下基础,也可海洋装置设计开发提供相关的理论指导。

参考文献 (References):

- [1] CUI L, XI J N, HE Y, et al. Fatigue Analysis on Key Components of Semi-submersible Platform [C]// 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai: ASME, 2010: 671-675.
- [2] XV J N, HE Y, CUI L, et al. Fatigue reliability analysis on key node of a deep water semi-submersible platform [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(8): 1329-1337.
- [3] 邓绍云. 数值造波技术发展现状与展望 [J]. *水利科技与经济*, 2015, 21(4): 5-7.
- [4] 苏凯凯, 刘阶萍, 王东兴, 等. 新型波浪发电装置的研究与开发 [J]. *机电工程*, 2011, 28(12): 1491-1494.
- [5] 黄学飞, 庞 茂. 基于模糊控制的气动造浪机节能技术研究 [J]. *机电工程技术*, 2014, 43(6): 74-76.
- [6] RAPP R J, MELVILLE W K. Laboratory Measurements of Deep-Water Break Waves [J]. *Phil Trans. R. Soc. Lond.*

A, 1990, 331(1622): 735-800.

- [7] SHE K, GREATER C A, EASSON W J. Experimental study of three dimensional breaking waves [J]. *Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1994, 120(1): 20-36.
- [8] SHE K, GREATER C A, EASSON W J. Experimental study of three dimensional breaking wave kinematics [J]. *Applied Ocean Research*, 1997, 19(5-6): 329-343.
- [9] HIROMARU H, RYOICHI K. Application of a piston-type absorbing wave-maker to irregular wave experiments [J]. *Coastal Engineering in Japan*, 1990, 33(1): 11-24.
- [10] 柳淑学, 洪起庸. 三维极限波的产生方法及特性 [J]. *海洋学报*, 2004, 26(6): 133-142.
- [11] 刘 思, 柳淑学, 俞聿修. 改进的海浪波包谱 [J]. *水道港口*, 2010, 31(4): 229-235.
- [12] LIU S, LIN S X, LI J X, et al. Physical simulation of multidirectional irregular wave groups [J]. *China Ocean Eng*, 2012, 26(3): 443-456.
- [13] 孙明光. 气动式造波机中的横向波 [J]. *中国造船*, 1985, 26(2): 26-36.
- [14] 严汝建, 庞永杰, 李宏伟, 等. 深水池造波系统数值造波仿真研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(1): 32-41.
- [15] 李宏伟, 庞永杰, 孙 哲, 等. 白噪声不规则波与聚焦波的水池模拟 [J]. *华中科技大学学报*, 2013, 41(1): 89-92.
- [16] 李木国, 柳淑学, 张 群, 等. 蛇形多向不规则波造波机波浪产生方法及特性 [J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(3): 354-361.
- [17] MICHE R. Mouvement Inducteur de la Mer, Ann. [M]. Portail des Ponts et Chaus, 1944.
- [18] 孙昭晨. 推摇混合式造波机理论曲线 [J]. *港口工程*, 1988, 8(4): 30-32.
- [19] 刘应中, 缪国平. 海洋工程水动力学基础 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

程少科, 王丁一, 陈俊华, 等. 基于摇板运动分析的波浪产生方法研究 [J]. *机电工程*, 2016, 33(6): 694-698.

CHENG Shao-ke, WANG Ding-yi, CHEN Jun-hua, et al. Production method of wave rocker panels based on motion analysis [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(6): 694-698.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>