

# Feasibility of Micro Wave Tank for Ocean Engineering Experiments

Tianfeng Zhao, Gui Chu, Yang Yu

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing  
Email: [zhaotianfeng@sina.com](mailto:zhaotianfeng@sina.com)

Received: Apr. 20<sup>th</sup>, 2015; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2015; published: May 13<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

As offshore oil and gas explorations gradually go into deepwater, marine engineering pools tend to be larger and test cost continues to rise. Based on the reference significance of small-scale wave experiments, Micro Wave Tank concept was put forward. Micro Wave Tank has the same wave-making mechanism and control parameters as big pools, but the wave paddles and water area significantly shrink. In several important respects of hydrodynamic test, the experimental significance of Micro Wave Tank has been expected, and also the limitation and experimental verification methods of Micro Wave Tank are discussed. On the research aspects like oil spill diffusion, wave-front scene simulation, wave energy conversion and filtering conditions, Micro Wave Tank experiments are considered feasible.

## Keywords

Ocean Engineering Experiment, Hydrodynamic Test, Micro Wave Tank, Feasibility, Oil Spill Diffusion

---

# 微波浪水池开展海洋工程实验的可行性

赵天奉, 储 贵, 余 阳

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京  
Email: [zhaotianfeng@sina.com](mailto:zhaotianfeng@sina.com)

收稿日期: 2015年4月20日; 录用日期: 2015年5月10日; 发布日期: 2015年5月13日

## 摘要

随着海洋油气开发向深水推进，海洋工程水池趋于大型化，试验成本不断上升。考虑到小尺度波浪实验所具有的参考意义，微波浪水池概念得以提出。微波浪水池具有与大水池相同的造波机制和控制参数，仅是造波机构和实验水体大幅度缩小。在水力试验的几个重要方面，微波浪水池的实验意义得到预测和展望，同时也初步探讨了微波浪水池的局限性及其实验验证的方法。在溢油扩散研究、波面物理场景表现、波能转化、实验工况筛选方面，微波浪水池实验被认为是可行的。

## 关键词

海洋工程实验，水动力试验，微波浪水池，可行性，溢油

## 1. 引言

海洋工程水动力试验是在船模试验的基础上发展而来的。20 世纪 70 年代开始考虑建设专门用于海洋平台模型试验的海洋工程水池，20 世纪 80 年代初挪威率先建成这种水池，用于模拟风、浪、流等海洋环境条件。这个阶段世界上陆续建成的海洋工程水池的模型试验缩尺比在 60~80 范围内，模型以尽可能大为佳，其中包括我国上海交大的海洋工程水池。进入 21 世纪，随着深水油气勘探开发的推进，对深海平台进行合理的模型试验得到关注，荷兰、日本、巴西等国相继建成深水海洋工程水池，我国上海交大的深水水池亦于 2007 年投入使用。深水海洋工程水池部分地解决了深海平台模型试验研究问题，但水池的尺度总是有限的，要把深海平台及其系泊系统、立管系统全部布置在水池中仍然是不可能的。例如以工作水深 3000 m 的深海平台模型试验为例，若缩尺比定为 1/70，则水池深度要到达 43 m，通常系泊锚链的水平跨距约为 5 倍水深，因此水池尺度长宽深要分别达到 430 m，430 m 和 43 m，但目前尚未有国家有类似的超大水池建造计划。

水池造波技术发展至今，水池面积已呈现越造越大趋势，与此同时在大水池中做试验的成本也越来越高。现在世界上最大的水池—荷兰的 Marin 水池，由多个水池组成，长宽深分别为 220 m，15.8 m 和 1.1 m 的浅水实验水池，长宽深分别为 250 m，10.5 m 和 5.5 m 的深水拖拽实验水池，长宽深分别为 45 m，36 m 和 10.2 m 的海洋实验水池，长宽深分别为 200 m，4 m 和 4 m 的高速航行实验水池等。

水池越大，所造波浪的有效区域越大并且有效时间更长，海洋工程模型的试验结果自然可靠性更高。但利用这些超大水池做试验却始终回避不了成本高昂的问题，试验一天的费用有可能达到几十万元，对于重复性较高的试验和一些精度要求不高的工程验证来说，类似的水池试验往往因为费用问题而难以实施。另一方面，对于溢油模拟等具有污染性的试验，利用大水池做实验便会相当浪费，不仅成本高，同时污染了整个水池的水，更是得不偿失。因此，若能充分发挥小水池的试验功能，对海洋工程试验而言无疑能够降低其巨额试验成本，同时增加试验效率。

## 2. 微波浪水池

由于海洋平台模型试验的相似定律一般只能满足 Froude 数和 Strouhal 数相等，通常无法考虑粘性的影响，第 22 届和 23 届(1999 年和 2002 年)国际船模试验池会议提出用极小缩尺比模型试验(Ultra-small Scale Model Testing)研究深海平台。挪威 MARINTEK 水池为此专门进行了对比试验，Moxnes S 等[1]对某 FPSO 分别进行 1:55, 1:170 两个缩尺比的试验，发现两个平台模型在波浪试验中的响应曲线基本一致。Stansberg C T 等学者利用该水池完成了 1:55, 1:100, 1:150 三个缩尺比的半潜式平台模型对比试验[2]，

进一步验证了上述结论。MARINTEK 水池的试验研究认为若能解决测试精度等相关问题,采用极小缩尺比(1:150~1:170)试验是可行的。当然仍有一些意见认为,小模型的制作精度和模型试验数据测量的正确性得不到保证,试验结果难以可靠。但实际上,若基于现有的水池条件考虑,极小比尺模型试验仍有重要的意义,一是尽管精度不够,但仍有望获得完整模型(例如深水平台及其系泊系统)的试验结果;二是部分工程模拟试验,关注的重点是浮体的运动预报(例如一些下放安装的试验研究),此时试验中力测量的误差不是问题的关键。

既然极小比尺模型试验有意义,是不是也可以把水池尺度缩小,用小水池造出微小的波浪在有限范围内开展相关试验研究呢?我国《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234-2001) [3]曾指出,“模型的原始入射波,规则波波高不应小于 2 cm,波周期不应小于 0.5 s;不规则波有效波高不应小于 2 cm,谱峰值周期不应小于 0.8 s”,不妨认为“2 cm 波高”是针对表面张力影响所提出的限制条件。据此,本文提出了用于波浪试验的“微水池”概念,即将现有大水池及其造波机构(冲箱、推板或者摇板)同比尺缩比,但造波机构的运动控制却与原有水池保持一致,此时试验波浪的波高、波长是缩比的,而波周期和方向是不变的。采用相同数目的造波器后,同样得以造出不规则波浪场,而波浪谱和方向谱等统计特征参数仍可以作为输入数据得到研究。

除节省试验研究成本外,微波浪水池有望在以下几个方面发挥出相应作用:一是用于精度要求不高的浮体运动预报试验,对一些工程方案予以初步验证;二是配合大水池开展试验研究,利用微波浪水池对大量工况进行初步筛选,风险不高工况的结论能够首先在微水池试验中得出,这样就能够大幅度减少大水池的占用时间;三是与水下溢油相关的试验研究。

根据微波浪水池模型试验的基本思路,考虑到先进性、经济性与可靠性等因素,初步提出以下性能指标要求和水池设计布置参数。

## 2.1. 微波浪水池的主要性能指标

1) 水池几何尺寸:水池为半圆形,直径 6 m,与之连接的是长 6 m、宽 3 m 的矩形消波区,总占地面积 36 m<sup>2</sup>,水池深度 2.0 m,见图 1;

2) 造波方法:摇板式造波,共计 30 块造波板;

3) 波形:能造出不同周期和波高的规则波,能够输入波浪谱和方向谱造出不规则波场;

4) 波长:波长范围 0.02~1.0 m;

5) 波高:根据波长确定波高为 0~0.2 m;

6) 周期:规则波的周期范围为:0.4~1.0 s。

## 2.2. 微波浪水池的硬件系统

微波浪水池造波板的控制系统可包括以下几个部分(见图 2):

1) 应用软件,用于计算产生期望的摇板目标位置;

2) PLC 控制器,用于接受应用软件传来的目标位置,将其转换为电压信号传给电机的伺服驱动器;

3) 伺服驱动器,用于接收来自 PLC 控制器的电压信号,并将其转换为驱动电机需要的电流;

4) 电机:在伺服驱动器控制下提供足够的扭矩使造波摇板转动期望的角度;

5) 曲柄连杆和摇板:在电机扭矩作用下完成造波运动;

6) 反馈设备:对于伺服电机反馈设备通常是个积分编码器,用来感应电机的位置并通知 PLC 控制器,形成一个闭环的运动控制系统;

7) 采集系统:将实际信号传给上位机,利用应用软件进行信号处理。

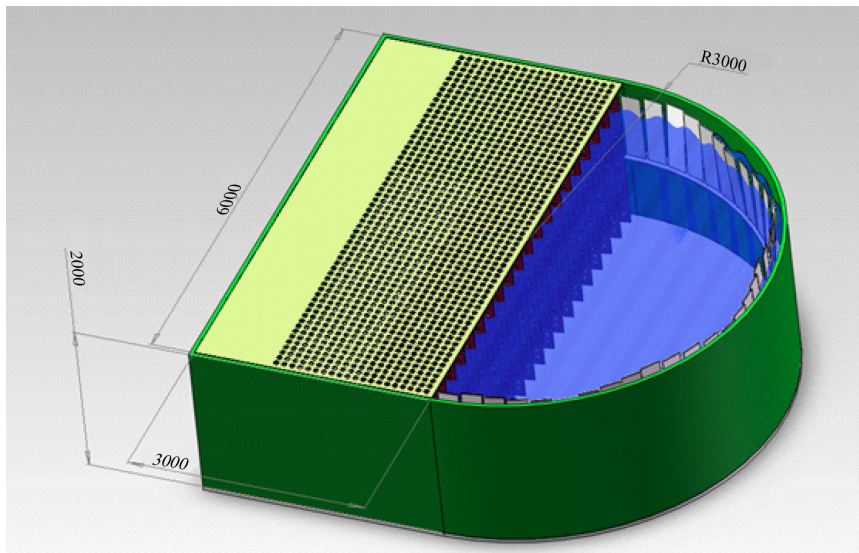


Figure 1. Overall layout of Micro Wave Tank  
图 1. 微波浪水池整体布置

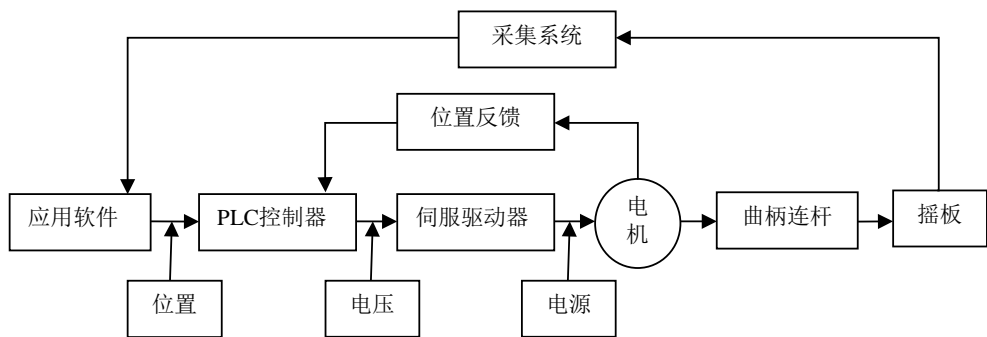


Figure 2. Controlling system of Micro Wave Tank  
图 2. 微波浪水池控制系统架构图

### 2.3. 微波浪水池的消波装置

水槽的直立边界会使波浪产生反射，干扰设计生成的波场，必须在水槽中安装消波装置，尽力消除反射波的影响，提高试验精度。为节约占地面积，考虑采用直立式消波装置，为楔形丝网阵。需要结合实际情况，具体调节楔形丝网层数、折叠间距和网眼密度，控制反射系数，并可以用规则波的反射波高与入射波高比值来反映反射系数的大小。

### 3. 微波浪水池的论证与验证

2014 年英国爱丁堡大学已经建造了类似的微水池，48 个造波板围绕设置在半径 9 m 的 1/4 圆弧上。该校学者 Istvan 等人[4]应用一阶边界元方法验证了几种曲线边界条件下该微水池的波面，取得了很好的结果。

由于微波浪水池造波板数目和运动控制与大水池完全一致，因此可以造出与大水池相同的波场，用于模拟复杂的海洋波浪环境，但尺度始终是水力实验的关键因素，因此有必要对微波浪水池进行理论与试验方面的论证和验证，并具体框定微波浪水池试验结果的可靠范围。

理论上水池主要用于四个方面的研究[5]：

- 1) 海洋波场环境的再现，例如水下溢油随波浪扩散的研究；
- 2) 浮体的运动预报研究，主要是测量试验中各种船、平台模型的运动，期待反映原型的响应特征，也包括下放安装等施工过程的响应特征；
- 3) 与浮体运动相关的力的研究，例如系泊缆张力的试验研究，深水立管与平台之间作用的研究(例如钻井隔水管应急解脱带来的反冲)等；
- 4) 与能量转换相关的试验研究，例如波浪发电装置的模型试验。

结合流体试验的尺度影响，可以判断，微波浪水池在第 1)、4)两个方面的试验结果会更与大水池接近，甚至在某些试验中可能替代大水池；在第 2)研究方面，即浮体的运动预报试验，微波浪水池试验与大水池试验相比，试验结果的差别可能主要集中在精度方面，类似挪威 MARINTEK 水池的比较试验，更小模型与更小波长、波高的试验至少会带来较大的测量误差以及可能的表面张力影响。

为精确定义微波浪水池的试验功能，除了可能的理论推导，与大水池试验结果对比将是最有说服力的验证手段。因此提出以下两项对比验证试验：

- 1) 正方六面体浮体在规则波中的运动测量试验，包括几个主要方向的规则波和不同的波浪参数；
- 2) 规则波场中管汇模型下放张力测量试验，不妨应用正方六面体浮体模拟安装船开展与大水池的对比试验。

#### 4. 依托微波浪水池的部分实验研究

微波浪水池由于规模小，投入低，使用便捷，试验耗能耗时也可以得到节约，因此适用于工况数量较多的初期筛选研究，水下溢油等污染性的水池试验，以及精度要求不高的运动预报研究、波浪发电装置转换效率研究和下放安装试验研究。具体包括下述几个方面的实验研究：

##### 4.1. 波浪环境模拟

微波浪水池在小范围内模拟出波面，由于其造波板的运动与大水池完全一致，因而同样能够输入波浪谱与方向谱，不得到不规则波场。如果单纯看波面，微波浪水池内的波面与大水池基本没有区别，当微水池波高在十几厘米时，其表面张力的影响也是可以忽略的。因此，在波场仿真方面，微波浪水池在一定程度上可以起到大水池的作用，例如水下、海面溢油扩散研究与视景仿真研究，微波浪水池同样可以提供不规则波场，而且具有成本优势。

对比现有的波浪水池实验结果，若用于模拟海洋环境，相比大水池，微水池的实验误差有望控制在 10% 以内。

##### 4.2. 浮体运动预报研究

浮体受到波浪力的作用而产生运动，甚至会产生碰撞、倾覆或抨击等物理现象，直接影响到浮体的稳定性和其上设备、人员的安全。预报浮体在波浪中的运动除了采用边界元等数值方法在频域和时域计算外，更主要采用模型试验的方法。

对于没有大面积系泊缆分布的系泊浮体，诸如塔架式单点系泊的 FPSO，微波浪水池在理论计算预报的验证和小模型的试验方面有一定作用。在忽略风和流荷载的前提下，微波浪水池也适用于精度要求不高的预报试验或者针对大量工况的筛选试验。例如 FPSO 与串靠或者旁靠穿梭油轮组成的多浮体系统，在研究多浮体之间可能的碰撞现象时，微波浪水池适用于前期的工况筛选。

##### 4.3. 波浪发电模型试验等有关波能转换的研究

海洋波浪蕴藏着巨大的能量，波浪发电装置可将波能转换为机械能、气压能或者液压能后驱动发电

机发电。全球有经济价值的波浪能开采量估计为 1~10 亿千瓦，中国波浪能的理论储量为 7000 万千瓦左右。随机性是波能发电最大的困难，无论是摆、浮子等一次能量捕获装置，还是能量转换装置，设计都需要考虑随机波浪对于发电装置的作用情况，模型试验是研究此问题的方法之一，利用微波浪水池模拟不规则波场，对发电装置模型的运动状态和波能转换效率展开研究，既有明显的成本优势，也能满足一定的精度要求。

#### 4.4. 系泊缆张力、安装下放绞车缆张力、隔水管应急解脱反冲等初步研究

在研究与浮体运动相关的作用力方面，受到尺度因素影响，微波浪水池一般不容易得到精确的试验结论，但多组试验的比较获得的试验结果具有一定的参考价值。

浮式平台系泊缆张力、安装下放绞车缆张力、隔水管应急解脱反冲三个试验是这方面有代表性的试验，均涉及到细长柔性体(缆或管)与浮体的相互作用、相互耦合的问题，在现阶段试验研究是最主要的研究手段。在对上述问题开展研究时，微波浪水池的试验结果有必要经过大水池试验的验证。

### 5. 结语

1) 尽管难以发挥大水池的全部功效，在“深水溢油集控油技术”、“深水井喷环境评价”、“深水管道溢油应急维修方法”等几个与海洋溢油相关的研究领域，利用微波浪水池实验是有利的。

2) 微波浪水池可以为水下机器人研发提供试验场地，研究水下机器人下放入水及其对海洋环境的适应性；可以完成波浪发电模型试验等与海洋能相关的新能源开发研究；可以为大水池试验做前期的筛选，但相比大水池试验，微水池试验的误差需要细致的对比试验才能具体确定。

3) 海洋工程半物理仿真视场场景要求“船-缆-体”构成的多体耦合运动与实际运动的误差不超过 15%，微波浪水池有助于实现低成本的验证实验。微波浪水池亦可以成为高校海洋环境、海洋工程相关课程的教学演示平台。

### 致 谢

感谢中海石油研究总院范模首席对本文的指导。

### 基金项目

教育部高校博士学科点基金(20120007120002)资助。

### 参考文献 (References)

- [1] Moxnes, S. and Larsen, K. (1998) Ultra small scale model testing of a FPSO ship. *17th International Conference, OMAE*, Lisbon, July 1998, Paper No. OMAE98-0381.
- [2] Stansberg, C.T., Oritsland, O. and Kleiven, G. (2002) VERIDEEP: Reliable methods for laboratory verification of mooring and station keeping in deep water. *Offshore Technology Conference*, Houston, 6-9 May 2002, OTC12087.
- [3] 中华人民共和国交通部 (2001) 波浪模型试验规程(中华人民共和国行业标准 JTJ/T 234-2001). 人民交通出版社, 北京.
- [4] Gyongy, I., Richon, J.-B., Bruce, T., et al. (2014) Validation of a hydrodynamic model for a curved, multi-paddle wave tank. *Applied Ocean Research*, **44**, 39-52.
- [5] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦 (2008) 海洋工程水动力学试验研究. 上海交通大学出版社, 上海.