

# 实验水槽常规流速模拟的缩尺方法

姜静波, 倪佐涛, 李思忍

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 提出了一种实验室水槽中流速模拟的方法, 该方法可根据需要提供合适的模型缩尺比, 用来完成相关海洋工程的模型水动力性能实验, 可以近似地模拟出实际设备在水中的工作状态, 为在实验水槽中模拟水流动力参数提供有效的参考, 方便水槽中的科学实验的开展。

**关键词:** 实验水槽; 缩尺比; 模拟

**中图分类号:** TP212.9 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2013)05-0077-04

波浪、海流和风是典型的海洋动力环境的影响因子, 由波浪、海流和风形成的极端海况, 极大地影响了海洋监测仪器设备的正常工作, 甚至损坏或毁坏监测仪器设备<sup>[1]</sup>。

海洋监测仪器设备动力环境实验平台是采用物理模拟的技术手段, 在实验室一定规格的水槽内再现浪、流、风等海洋环境。因此, 要在水槽中完成常规海流的模拟, 首先需要研究我国沿海海流的特征以及对监测仪器设备的影响与危害程度, 完成适用于海洋监测仪器设备的动力环境设计, 从而根据实验水槽的实际尺寸确定其造流参数<sup>[2-6]</sup>。文章主要针对目前科研用实验水槽的水流生成技术, 提供对应的缩尺方案, 并给出了实验论证。

## 1 海洋环境条件模拟

### 1.1 模型缩尺比的选择

正确选定一个合适的模型缩尺比是海洋工程进行模型水动力性能实验的首要问题, 如果考虑不周, 会影响实验研究任务的顺利完成。相似理论是指导模型实验研究以及预报实体动力性能的基本理论。模型和实体两个系统应该满足几何、运动和动力相似<sup>[7-9]</sup>。由于海洋监测仪器设备种类繁多、功能各异, 其重量和主尺度差别较大, 因此需要合适范围的缩尺比。

设计模型时严格遵循有关的相似理论, 才能在模型上重现原型结构的力学现象, 取得可靠的试验成果。在建立相似关系时, 相似现象的同一物理量之比, 称为相似比或相似常数; 所有相似常数之间, 存在着某种关系, 称为相似指标; 与此对应, 相似现象

各物理量之间也存在某种关系, 称为相似准则或相似判据。建立相似准则或相似判据是以相似定理为依据的。相似定理有以下 3 条: (1) 相似第一定理, 指出描述原型与模型两个相似现象的数学方程式相同。彼此相似的现象的相似指标等于 1, 其相似准则为一不变量; (2) 相似第二定理, 又称白金汉 (Buckingham) 二定理, 指出当不能用数学方程式描述所研究的物理现象时, 可用量纲分析的方法建立各有关物理量之间的相似准则; (3) 相似第三定理, 又称单值条件相似律。所谓单值条件相似系指物体的几何特性、介质特性(即物理参数)、边界条件和运动初始条件的相似。

目前, 海洋行业尚没有颁布模型实验相关规程、规范和标准。国际海洋工程界一般公认的最佳模型缩尺比范围为 60~80<sup>[10-12]</sup>。然而, 在实际选择模型的缩尺比时, 应综合考虑实际任务要求和实验水槽本身的功能。因此, 参照交通部发布的《波浪模型实验规程》要求, 模型实验时断面物理模型长度比尺 1:1~1:80, 整体物理模型长度比尺 ≤150。

### 1.2 选择模型缩尺比时需要考虑的问题

#### 1.2.1 模型的大小

模型大小是考虑模型缩尺比的首要因素。模型过小会造成尺度效应问题突出, 模型制作和模拟的

收稿日期: 2012-03-21; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201005027); 国家自然科学基金(41106084)

作者简介: 姜静波(1979—), 男, 山东青岛人, 助理研究员, 主要从事海洋环境监测仪器的研究, 电话: 0532—82898736, E-mail: jiangjingbo@qdio.ac.cn

相对精度降低, 以及实验测量数据的相对误差增大; 模型过大则会受到水槽槽壁效应的影响, 造成水槽中过量的波浪反射而干扰正常实验结果<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 海洋工程水槽的主要尺度

根据海洋结构物设计的工作水深以及水槽能够调节的最大水深, 从水深的模拟要求可以得到模型缩尺比的上限。根据海洋结构物实体在海上系泊系统的布置以及水槽的长度和宽度, 从系泊系统伸展范围的模拟要求可以得到模型缩尺比的上限。上述各项都是与模型缩尺比成线性关系, 因而从水槽主尺度的角度可以初步确定模型缩尺比的上限。

### 1.2.3 海洋工程水槽模拟风、浪、流的能力

水槽中配置的造风、造流系统的功能都有一定的极限, 即能够产生稳定的最大风速和流速。对照实验任务中实际要求的最高风速和流速, 注意到实体与模型速度之间的比尺是缩尺比的开方, 即可以从水槽造风、造流系统的功能初步确定模型缩尺比的上限。海洋工程水槽的造风能力一般都能满足模型实验的要求, 而造流系统的能力有时会成为缩尺比的重要限制因素。水槽中配置的造波机功能是指能够产生的最大波高和能够造波的波长范围。各种类型造波机的功能都有上下限, 即能够产生最长的波和最短的波。按照实验任务中实际要求的最高波浪, 对照水槽造波机能够产生的最大波高, 从两者之间的比值即可初步确定模型缩尺比的上限。另一方面, 造波机高频造波的能力, 又确定了缩尺比的下限。因为浮式海洋结构物的模型实验主要是在不规则波中进行的, 而表征不规则波性质的是波谱, 它覆盖了相当宽广的波频范围。造波机的机械和控制属性往往限制高频造波性能, 因此实验中模拟不规则波谱时总是要做一定程度的高频截断, 缩尺比越大, 截断造成的实验误差就越大。因此, 在选择缩尺比时应应对任务书中规定的不规则波谱和水槽造波机的功能进行对比分析, 注意到实体的波浪频率与模型的波浪频率之间有缩尺比开倒数平方的关系, 即可选取恰当的模型缩尺比, 以便保证在水槽中能够模拟合乎要求的不规则波浪。

### 1.2.4 海洋工程水槽各类仪器的测量功能

进行实验时需要测量的内容很多, 诸如风速、流速、浪高、平台模型六个自由度的运动、各根锚链线的受力、平台指定位置处的加速度、甲板上浪及受到的冲击力等。对于有多个浮体系泊组成的系统,

还要求测量多个浮体之间的相对运动, 系泊缆的受力及靠泊力等。由于实验室一般都具备有量程大小不同的各类测量仪器, 仪器的测量功能通常不是选择模型缩尺比的决定因素, 但也应予以考虑。一方面注意到是否有某一仪器的量程上限不能满足测量要求, 更重要的是在于选用量程合适的仪器, 以保证模型实验中能够正确测得各项数据。

## 2 缩尺比在海流模拟中的应用

在模拟流和浪之前, 应先调节好水槽中的试验水深, 这也是海洋环境条件模拟中的一个重要方面, 只是由于问题比较简单, 一般不作专门讨论。根据海洋结构物实体的工作水深按缩尺比算出试验水深, 调节水槽中假底高度, 当测得的水深达到要求便完成了试验水深的模拟。

海洋工程水槽中流的模拟是由专门的造流系统来实现的。造流原理比较简单, 用高压水泵将水吸入管中并均匀喷射, 使水槽中的水按一定方向流动, 即形成流的模拟。但要形成均匀、稳定的流场, 需采取整流和循环等措施。

在许多试验研究中, 常采取整体造流和局部造流相结合的方法, 以满足流场模拟的需要。高压喷水整体造流系统采取内循环方式, 大功率水泵通过管路吸取水槽中的水, 经水泵加压后从安装在池墙另一端下部三排管子的喷嘴中喷出高压水流, 由于每排管子在沿池宽方向均匀布置了很多喷嘴, 因而喷射出的水流以及带动周围的水流比较均匀, 再经过绕假底循环, 从而在假底上部形成了均匀稳定的水流。流速的调节由控制水泵电机的转速来实现。整体造流系统的优点是模拟的水流场比较均匀稳定, 其局限性是: (1)造流能力有限, 能够产生的最大流速一般在 0.2 m/s 左右; (2)只能生成均匀流, 不能模拟流速随水深按一定规律分布的流场; (3)难以任意调节流向和浪向之间的夹角。

局部造流系统是通过控制潜水泵电机的转速来调节水流速度, 在水槽中的局部范围产生一定的流向和流速的水流。局部造流系统的优点是: (1)具有产生较高流速的能力, 最大流速可达 0.5 m/s; (2)布置比较灵活, 能够任意调节流向和浪向之间的夹角; (3)采用多层局部造流的喷管进行分层控制, 可以模拟流速随水深按一定规律分布的流场。其不足之处是: (1)产生的水流速度均匀性和稳定性较差; (2)受到区域的限制, 往往需要进行测试调整。

在模型试验中要求模拟的流场有: (1)均匀流, 规定表层流速和流向; (2)分层流, 规定流速及随水深而变的流速分布和流向。

要求模拟的流向通常以与浪向的夹角来表示。整体造流系统的流向与浪向的夹角范围可在  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  范围内调节, 局部造流的流向则可任意调节。至于要求模拟的流速  $V_{Cm}$ , 可从规定的实体平均流速  $V_{Cs}$  按下式求得:

$$V_{Cm} = \frac{V_{Cs}}{\sqrt{\lambda}}$$

式中,  $\lambda$  为模型的缩尺比。

在流速测量方面, 如果只要求平均流速, 则一般采用叶轮式流速仪读取平均数值即可。如需考察流速的稳定程度和要求实时测量数据, 则需要采用高灵敏度的流速仪进行测量, 通过 AD 转换可得到流速随时间的变化规律和某一指定时刻的瞬时流速。

对于均匀流的模拟, 一般只需要测量模型试验区某一指定位置处的平均流速。如果测得的平均流速大于(或小于)要求模拟的流速(目标值), 则调节水泵电机的转速, 使测得的平均流速满足要求。测得的平均流速与目标值之间的误差一般要求小于 10%。

对于重要的试验研究项目, 常需要测量试验区域内流场情况, 包括在同一水平面上流向(纵向)和垂直流向(横向)若干点处的流速以及流速随水深的分布情况, 借以反映所模拟的水流在试验区域的均匀程度。此外还需测量某一代表点处规定的在试验持续时间内流速随时间的变化情况, 以反映所模拟水流的时间稳定性。这种高要求的流速模拟, 需要花费较多的调节、测量和分析时间才能完成。图 1、图 2 给出了模拟流场的实例。

从模拟实验看出, 图 1 给出在水槽中流速为 17.7 cm/s 的流速情况下, 顺向流可在纵向 14 m 距离内保持相对稳定, 而垂直流只可在穿越点的前后 4 m, 共 8 m 的距离内保持相对稳定。图 2 给出某点在持续时间内流速随时间的变化情况, 反映所模拟水流的时间稳定性。对于合乎要求的模拟流场, 在均匀性和稳定性方面通常都有限定的误差指标; 在试验区域内沿流向和垂直流向各点所测得的平均流速与目标值的误差应小于 10%(均匀性指标); 在某一代表点处测得的流速随时间的变化, 其流速的均方差与平均流速的比值应小于 10%。

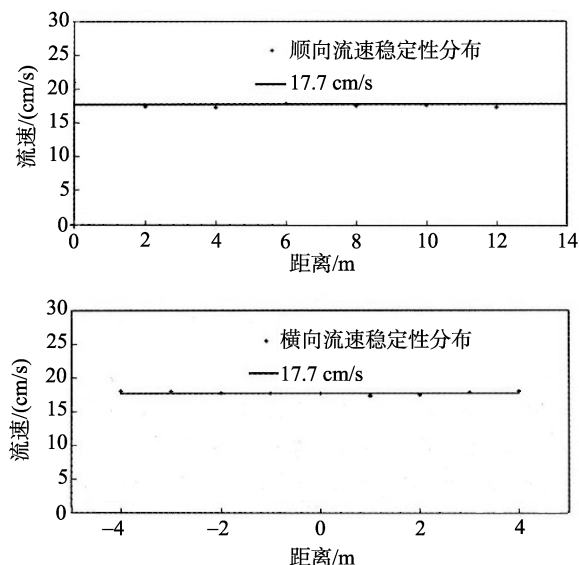


图 1 模拟流场的结果

Fig. 1 Stability simulation of flow field

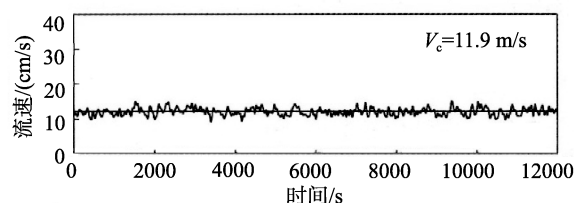


图 2 流速稳定性模拟

Fig. 2 Stability simulation of current velocity

### 3 结束语

通过本文中提到的流速模拟的缩尺方法, 可以结合动力水槽的实际尺度, 确定实际海洋、江河流场环境定量参数在实验水槽中模拟参考值, 作为动力环境实验平台的设计参数, 同时给出海洋行业相关模型实验的规范和标准的参考方法。

参考文献:

- [1] 高健. 室外小型实验水槽的设计及其应用[J]. 渔业机械仪器, 1992, 2: 6-8.
- [2] 尤小华, 曹惠林. 海洋实验水槽设计方案的研究[J]. 山东科学, 2000, 3: 54-56.
- [3] 徐肇廷, 王景明. 小型内波实验水槽及其供水、造波与量测系统[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1988, 7: 95-102.
- [4] 陈谟. 如何使用 CFD 来确定风洞实验模型的缩尺比例——风洞试验模型设计准则从感性到理性的飞跃

- [J]. 宇航学报, 2007, 5: 594-596.
- [5] 高学平, 杜敏, 宋慧芳. 水电站进水口漩涡缩尺效应[J]. 天津大学学报, 2008, 9: 1116-1119.
- [6] 刘岩, 张晓排, 孙云华, 等. 声屏障缩尺模型试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2009, 2: 103-105.
- [7] 任旭虎, 杨磊, 綦耀光, 等. 基于相似理论的大型构造物理模拟装置的设计与研究[J]. 机械设计与制造, 2010, 4: 24-26.
- [8] 刘月琴, 尹尚先. 实验室造波设备及波浪模拟技术的探讨[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 6: 105-109.
- [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, 10: 40-42.
- [10] 杨志国. 国内外水池造波设备与造波技术的发展现状[J]. 黑龙江科技信息, 2003, 9: 99.
- [11] 王项南, 路宽, 李彦, 等. 基于海洋仪器设备的动力环境实验模拟[J]. 海洋技术, 2011, 30(4): 1-5.
- [12] 毛丞弘, 杨建民, 彭涛, 等. 海洋深水试验池造流系统整流装置数值计算与分析[J]. 水力学研究与进展, 2007, 22(4): 483-490.
- [13] 徐剑. 试论海洋工程水池工艺设计的基本原理[J]. 造船技术, 2008, 1: 32-35.

## A current velocity simulation method for experimental tank

JIANG Jing-bo, Ni Zuo-tao, Li Si-ren

(Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Mar., 21, 2012

**Key words:** experimental tank; scale; simulation

**Abstract:** A current velocity simulation method for experimental tank was referred in this paper. The method was designed to provide an appropriate reduced-scale model according to user requirements to carry out the hydrodynamic performance experiments of marine engineering model. The working stance of equipments in water can be simulated, and hydrodynamic parameters of experimental tank can also be determined.

(本文编辑: 刘珊珊)