

■ 高等学校理工科土木工程类规划教材

港口、海岸工程水力模型实验教程

HARBOUR, COASTAL ENGINEERING HYDRAULIC EXPERIMENT

韩丽华 姜 萌 马震岳 编著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

■ 高等学校理工科土木工程类规划教材

图例(91C)目録

港口、海岸工程水力模型实验教程

ISBN 978-7-261-13232-8

HARBOUR, COASTAL ENGINEERING HYDRAULIC EXPERIMENT

编著 韩丽华 姜 萌 马震岳
主审 王凤龙



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

实验教学是高等教育人才培养计划中实践性教学的重要环节,也是培养研究型人才和应用型人才的必然要求。随着现代实验技术和信息技术的快速发展,建立系统化和信息化的实验教学体系与实验方法,有着更为积极的意义。本书旨在通过对实验理论、实验技术及实验过程加以详尽的论述,使学生在掌握实验基本理论的基础上,建立现代的实验理念,培养分析问题与解决问题的能力,锻炼实验动手能力。同时,通过实验,深化对港口航道与海岸工程领域专业知识的理解,达到能够基本掌握运用实验手段验证理论、认识规律、优化设计的目的。

本书是作者根据多年来从事科研教学活动所积累的专业知识,按照港口、海洋工程最新颁布实施的工程技术规范,以及港口、海洋工程中的新理论、新结构、新方法和新技术编写而成。全书涵盖了模型设计、量测技术、实验资料的统计分析等基本理论,并详细介绍了港口、海岸工程教学试验的若干重要实例,包括港内波况模型试验、斜坡式防波堤试验、直立堤试验、船舶泊稳模型试验以及波浪荷载对桩柱的作用力试验。同时对实验目的、实验原理、实验步骤与方法、实验资料整理与实验报告要求等,系统地加以归纳,便于学生掌握和运用。

本书第1章由马震岳教授编写,第2章、第3章和第6章中的第6.2~6.4节由韩丽华编写,第4章、第5章和第6

章中的第 6.1、6.5 节由姜萌编写,马震岳教授组织并指导全书的编写工作。王凤龙教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,使本书内容有较大改进。胡立万教授给予本书以热情的指导,并对部分章节提出了宝贵的修改意见。蔡守允教授为本书提供了宝贵的资料,在此一并表示感谢。

由于作者的水平有限,本书的缺点和不足在所难免,敬请相关专家学者指正,也请同学们在学习和使用中对需要完善和补充的地方提出切实的意见,以达到教学相长的目的。大家有任何意见或建议,请通过以下方式与我们联系:

邮箱 jclf@dutp.cn

电话 0411-84707962 84708947

作 者

2007 年 3 月

目 录

第 1 章 概 述 / 1

- 1.1 模型试验的目的 / 1
- 1.2 模型试验的种类 / 2
- 1.3 试验的主要设备 / 2

第 2 章 模型设计 / 5

- 2.1 波浪模型 / 5
- 2.2 水与结构物相互作用模型 / 6

第 3 章 量测技术 / 10

- 3.1 电测原理 / 10
- 3.2 水面波动的测量 / 12
- 3.3 力的测量 / 13
- 3.4 流速测量 / 19

第 4 章 实验资料的统计分析 / 21

- 4.1 误差分析 / 21
- 4.2 实验测值的统计分析 / 27
- 4.3 相关分析 / 29

第 5 章 海岸工程水力模型试验要求 / 41

- 5.1 整体模型试验的要求 / 41
- 5.2 斜坡堤断面模型试验的要求 / 41
- 5.3 直立堤断面模型试验的要求 / 42
- 5.4 桩、墩式建筑物模型试验的要求 / 43
- 5.5 浮式建筑物模型试验的要求 / 43

第 6 章 港口、海岸工程教学试验案例 / 46

6.1 港内波况模型试验 / 46

6.2 斜坡式防波堤试验 / 51

6.3 直立堤试验 / 58

6.4 船舶泊稳模型试验 / 63

6.5 波浪荷载对桩柱的作用力试验 / 74

参考文献 / 80

第1章 概述

港口、海洋工程建筑物一般位于近海地区,经常受到波浪、水流等海岸动力因素的作用。因此,在港口建设中规划其平面布置、设计各种海洋工程建筑物、防浪建筑物时,都必须掌握海洋动力因素的变化规律,预计可能发生的对建筑物的作用力。

研究解决此类问题,一般采用数学模型和物理模型两种方法。所谓数学模型是将描写原体各量关系的数学表达式,进行数学计算的一种方法,它与物理模型相比,具有设备简单,变换条件容易,节省人力和经费等优势;但由于有些实际工程问题,所涉及到的自然现象和边界条件比较复杂,由此带来的计算技术方面的问题是相当复杂的,有时甚至一时无法计算。而物理模型则不同,它是将原型有关的动力因素,根据相似原理,通过比尺的缩小,使原型有关现象在模型中复演,以便进行试验研究,比较直观,本文主要从港口、海洋工程建筑物水力模型的有关问题进行阐述。最后一章将介绍5个典型的港口、海岸工程水力模型试验。

1.1 模型试验的目的

港口、海洋工程设计时,常产生一些问题,因在理论研究时,不可能完全考虑复杂和多变的自然条件,所以在海岸建筑物的总体布置及建筑物的结构设计中,常用实验室和现场实验的方法对某些问题进行研究。通过模型试验可以解决下列问题:

1. 对于难以计算的问题,提供设计依据

生产、设计和科研中提出的一系列问题,有许多问题现在还不能用计算分析的方法解决,而必须用模型试验的方法,为设计提供依据。

2. 验证应用理论的正确性

港口、海洋工程中的某些问题,可用有关的理论来求解,但为了验证该理论在某问题中的应用是否合适,可以用模型试验来验证,以直观地看出是否合适。

3. 寻找规律,发现理论的解答

通过模型试验对自然界中所发生的各种现象进行研究,将各种试验资料累积总结,进一步掌握客观规律。如在防波堤等建筑物的波浪力计算中,所提供的半理论经验公式,就是通过大量的试验资料分析而得。

4. 配合数值计算解决问题

港口、海洋工程中的问题,有些可以应用计算机通过数值计算予以解决,但计算中的某些参数,有时又难以确定,这样可通过物理模型试验确定有关参数,供数值计算时应用。

另外,数值计算中的边界条件,可由物理模型试验提供,如各种边坡的反射系数等。在应用物理模型与数学模型共同解决某一问题时,也可由数值计算给物理模型试验提供边界条件。

总之,港口、海洋工程的模型试验为生产的发展和科学研究提供了依据,但我们也应看到模型试验也有它的局限性,如做较大海湾的整体模型试验,考虑到水本身的特性及比尺效应的影响,模型比尺不能取得太小,若取用合适比例则水池可能放不下,这时就要考虑与数值计算相配合来进行研究。因此有些问题的研究,需要物理模型、数值计算和现场观测相结合,才能使问题得到圆满解决。

1.2 模型试验的种类

根据试验任务不同,可选用不同的模型来满足这些要求。

1. 整体、半整体模型试验

当我们研究港内波浪状况时,需要把研究的港区地形、码头和防波堤等建筑物都按比例缩小,做成模型进行试验,这种模型试验叫整体模型试验。如果建筑物是对称的,我们就采用半整体进行模型试验,这种模型试验称半整体模型试验。

2. 断面模型试验

有些问题往往不需要整体模型,例如测防波堤上的波压力或块体的稳定性,模型比尺不能取得太小,此时只要沿防波堤轴线截取一段进行试验即可,这种模型试验叫断面模型试验。

3. 正态、变态模型试验

在一般问题的试验时,对原型的三个尺度都用相同的比例尺来缩小成模型,这样的模型试验叫正态模型试验。但有些情况因受一些条件的限制,正态模型不能满足试验要求,而采用变态模型,变态模型试验在竖向和水平方向的长度缩小倍数是不同的。

4. 动床、定床试验

另外还有根据试验模型底床的变化与否,分为动床试验和定床试验。定床试验是指在整个试验中底床始终不变;动床试验则与之相反,在研究泥沙运动时多用此方法进行试验。

1.3 试验的主要设备

港口、海洋工程建筑物的水力模型试验,主要设备是港池、水槽、造流系统及造波机。港池主要用于整体模型试验,水槽主要用于断面模型试验,它们的面积和高度,取决于研究的海岸区域范围大小、问题性质、选取的模型比尺以及测试要求的精度等。

造流系统包括在港池的前端、后端、侧端留有水流出口,并匹配加流设备(泵、阀门、管系)使水流方向与波浪方向成任意角度,用以模拟波流共同作用的试验研究。

波浪水槽加流系统只在水槽的前后端设出流口,只有与波浪方向相同或相反的流

向。

造波机安放在港池、水槽的前端,作为人工模拟波浪,进行港口平面布置、泊稳和海岸工程水工建筑物等试验必须具有的实验室基本设备。造波机分为规则波造波机和不规则波造波机两大类。

1. 规则波造波机

规则波造波机造出的波浪,其周期、波高、波长和方向都是不变的,波浪很有规则地一排排向前推进。规则波造波机按造波方式可分以下几种:

(1) 冲箱式造波机

冲箱式造波机通过机械传动机构,带动重锤冲头起落撞击水面而生波,冲头的截面形式有梯形、菱形、半圆形、其他曲线形或折线形。冲箱式造波机水下部件少,特别是冲箱在水面以上,这对波浪、水流和泥沙试验是有利的,冲箱可以不影响水、沙运动。它的缺点是波形随波高和周期而变,工作时震动较大,消耗功率较多,因此,难以产生长波,目前这种形式采用的不多。

(2) 推板式造波机

推板式造波机的造波板垂直于水底,上下边缘以相同振幅往复运动推动水体而生成波浪。它适合于产生浅水长波,且水分子运动速度在底部和表面均相同。

(3) 摇板式造波机

摇板式造波机的造波板围绕铰接机构来回转动,推动水体而生波,这种形式的造波机结构简单,制作方便,工作平稳,可以造出很光滑的波。它适合于产生深水短波,而水分子运动速度底部和表面是不相同的。

(4) 摇篮式造波机

摇篮式造波机的基本结构是造波板悬挂于互相铰接的柱子中间,其上下振幅可以调节,当上下两点振幅相等时,就成为推板式,当下面的振幅为零时就成为摇板式。因此它既适于造深水波,也适于造浅水波,波陡可随意调节,可造长波,也可造短波。它的缺点是结构复杂,加工和安装精度要求高,使用起来操作复杂,且耗费功率大。

(5) 其他形式造波机

上述为几种常用形式的造波机,此外,还有气压式造波机、柔板式造波机及改良形式的各种造波机,由于没有被普遍采用,因此不予以介绍。

2. 不规则波造波机

不规则波造波机的种类很多,它的造波物理过程与规则波基本相同,区别在于它有一套闭环或开环控制系统,它能使造波部件按一非规则的规律运动,而产生不规则波。

不规则波造波机通常由造波信号发生器、放大器、电动伺服机构、动力源、造波装置、监测装置、比较放大器、反馈控制装置和操作控制台等组成。

不规则波造波机控制信号的产生,主要是用电子计算机,在计算机上可以用程序得到满足谱分布的随机数,然后利用计算机的数模转换接口,将造波信号输出来,加以放大,去控制造波机的造波装置。

不规则波造波机造波过程是由闭环系统控制的,造波过程通常用的是逐次逼近的

技术。因此,使用者除给出作为目标谱的能量谱密度曲线外,还要给出总能量的容许误差。当容许误差定得较小时,逼近目标谱的时间就很长;当容许误差定得较大时,逼近目标谱的时间就较短,但相似性就较差。

造波机的动力源一般为直流电机或液压源。液压源设备比较复杂,操作、维护都比较麻烦,而电机比较简单,价格也低廉。直流电机调速调向要匹配一套整流装置,该装置由整流、测速比较和反馈放大部分组成,具有调速快、性能稳定、工作可靠等优点。

机械式造波机改变周期一般通过改变电机转速来实现,改变波高通过调偏心距或冲程来实现。液压式造波机一般利用电信号,通过改变一个或若干个阀门的开启过程,来改变液流的流量、流向、总量等,达到改变周期和波高的目的。

3. 主要性能

目前实验室使用的造波机是由其配套的造波控制软件、计算机形成造波控制系统。该系统能生成规则波、不规则波。并对试验数据进行分析,产生实验结果。配置功能如下:

(1) 规则波

- ① 波周期变化范围为 $0.4 \sim 5$ s;
- ② 波高变化范围为 $0.03 \sim 0.35$ m;
- ③ 水深为 $0.2 \sim 1.2$ m。

(2) 不规则波

将要生成的波谱(包括 P-M 谱、B 谱、J 谱、海港水文规范谱及自定义波谱)公式特征参数送入计算机,计算出推板运动信号,进而控制液压伺服系统驱动推板产生不规则波,得到期望谱。目标谱与实测谱之间的差值由程序进行自动迭代修正,也能由人为干预进行调整。经几次迭代,得到理想波谱。

(3) 造波控制软件

- ① 实验仪器标定程序;
- ② 规则波产生及迭代程序;
- ③ 不规则波产生及迭代程序;
- ④ 波谱分析程序;
- ⑤ 波浪特征统计分析;
- ⑥ 造波机产生孤立波控制软件;
- ⑦ 椭圆余弦波控制软件;
- ⑧ 叠加破碎波控制软件;
- ⑨ 波谱及波面过程线绘图程序;
- ⑩ AD/DA 接口板测试程序。

第2章 模型设计

2.1 波浪模型

水面产生的波浪是多种多样的。按其产生的原因分为风成波(即短波)、潮汐波(即长波)等。现主要讨论短波作用模型的相似关系与比尺的选择。在讨论模型设计时,由于波浪行经地点水深不同,波浪性质也有所不同,因此可分为深水波、浅水波和长波。将不同的波型用波长 L 、波高 H 、水深 d 三个波浪运动几何参量组成的两个无因次量来定义。当 $d/L > 1/2$ 时为深水波,当 $d/L < 1/2$ 时为浅水波,当 $d/L > 1/20$ 时为短波,当 $0 < d/L < 1/20$ 时为长波。

上述分类如图 2-1 所示。

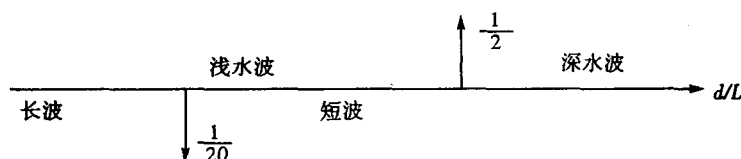


图 2-1 波浪分类图

当 H/L 视为无限小量时为微幅波,当 H/L 为有限值时为有限振幅波。

原型波周期约 2 ~ 20 s,定义为短周期波;周期约 20 s ~ 2 min,定义为中周期波;周期约 2 min ~ 1 h,定义为长周期波。

波浪模型和原型之间相似的比尺关系,可建立在动力学分析、因次分析和微分方程基础上。以流体力学为依据的这些比尺关系,可以保证模型中波浪与原型相似。下面仅以动力学法讨论模型与原型间的相似比尺关系和相似准则,作为设计模型的依据。

目前一般认为港口波浪模型试验,应尽量用正态模型。用重力相似准则设计,对于在波浪运动中其他的作用力,如表面张力、黏滞力及摩擦阻力也是必须考虑的因素,但模型中同时满足这些力的相似,有时是比较困难的,人们一般的处理方法是,在选定模型比尺大小上给以一定的限制,或通过分析与试验对有关测试数据加以修正。

按重力相似设计波浪模型和设计水流模型一样,原型与模型的弗劳德(Froude)数相等。在水流中 Froude 数为 $Fr = v^2/gd$;在波浪运动中 Froude 数与水流公式一样,只是速度 v 改用水表面质点最大轨迹速度 u ,以 Fu 表示波浪运动中 Froude 数,如用浅水

表面水质点速度 $u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{2\pi g}{L} \coth \frac{2\pi d}{L}}$ 来表示 Froude 数的流速, 故波浪运动中的 Froude 数为

$$Fu = \frac{H^2}{Ld} \cdot \frac{\pi}{2} \coth \frac{2\pi d}{L} \quad (2-1)$$

若满足重力相似, 则原型与模型之间的 Froude 数必须相等。即

$$\left(\frac{H^2}{Ld} \cdot \frac{\pi}{2} \coth \frac{2\pi d}{L} \right)_m = \left(\frac{H^2}{Ld} \cdot \frac{\pi}{2} \coth \frac{2\pi d}{L} \right)_p \quad (2-2)$$

式中 注脚“m”——模型值;

“p”——原型值。

由于原型与模型 Froude 数相等, 因此

$$\lambda \left(\frac{H^2}{Ld} \cdot \frac{\pi}{2} \coth \frac{2\pi d}{L} \right) = 1 \quad (2-3)$$

显然比值

$$\lambda \left(\frac{H}{d} \right) = \lambda \left(\frac{H}{L} \right) = \lambda \left(\frac{d}{L} \right) = 1 \quad (2-4)$$

故

$$\lambda_H = \lambda_d = \lambda_L$$

即采用重力相似准则设计浅水波浪模型, 其波长、波高和水深需采用同一比尺 λ 。

当原型与模型相似, Froude 数必相等, 故

$$\lambda \left(\frac{u^2}{gd} \right) = \lambda \left(\frac{H^2}{Ld} \cdot \frac{\pi}{2} \coth \frac{2\pi d}{L} \right) = 1$$

即

$$\begin{aligned} \lambda \left(\frac{u^2}{gd} \right) &= 1 \\ \lambda \left(\frac{u^2}{gd} \right) &= \lambda \left(\frac{H^2}{Ld} \right) \end{aligned} \quad (2-5)$$

原型中流体的重力加速度 g_p 与模型中流体的重力加速度 g_m 是一样的, 即 $\lambda_g = 1$, 代入式(2-5)得

$$\lambda_u = \sqrt{\lambda_H} = \sqrt{\lambda} \quad (2-6)$$

原型波周期 T_p 与模型波周期 T_m 的关系由式(2-6)得

$$\lambda_T = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda} \quad (2-7)$$

即

$$T_p = T_m \cdot \sqrt{\lambda} \quad (2-8)$$

式(2-8)说明原型波周期是模型波周期的 $\sqrt{\lambda}$ 倍。

2.2 水与结构物相互作用模型

在波动流体对海岸工程结构物的动力作用下, 不同形式的结构物呈现不同的动力

反应,此类试验中流体和结构物必须服从同一模型相似准则。如作用于刚性结构物、柔性结构物上的波浪荷载,波浪作用下浮式结构物的运动状态、系泊浮体上的弹性结构的弹性变形等。此处先对结构物在动力作用下的相似条件作一定的分析,然后以波浪对刚性结构物的作用力试验为例,说明结构物动力相似模型设计方法。

按微分方程确定结构物动力相似的比尺关系。设一结构物模型质量为 M , 它以弹性系数为 K 的弹簧与码头或其他固定建筑物相联,如图 2-2 所示。其动力方程为(不计阻尼力)

$$MX'' + KX = P(t) \quad (2-9)$$

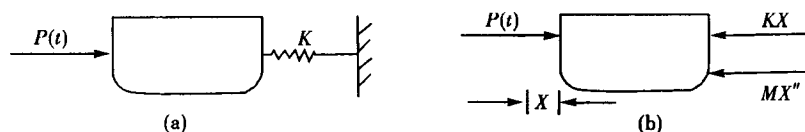


图 2-2 码头浮式结构物模型简化示意图

分析刚体 M 所受的外力 $P(t)$ 、刚体运动的惯性力以及弹性力。外力 $P(t)$ 是时间的函数,假设它按简谐周期变化(图 2-3),即

$$P(t) = P \sin \theta t \quad (2-10)$$

式中 θ ——作用力的频率。

初始条件 $X(0) = 0, \quad X'(0) = 0$

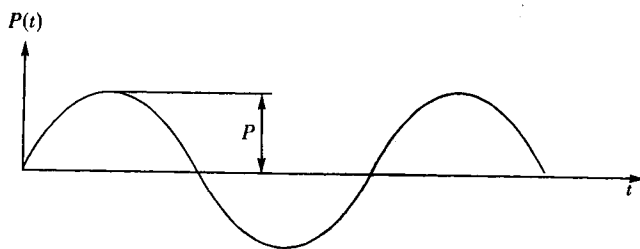


图 2-3 作用于码头浮式结构物的外力

分析上述动力方程,有五个与运动状态有关的参数。即摆动刚体的质量 M 、位移量 X 、弹簧系数 K 、外力 P 及时间 t 。为达到结构的动力相似,必须使其微分方程和初始条件服从相似条件。以 λ_x 表示位移量 X 的比尺,以 λ_m 表示质量 M 的比尺,以 λ_k 表示弹簧系数 K 的比尺,以 λ_t 表示时间的比尺,以 λ_p 表示作用力的比尺。

对于原型结构物的动力方程可写为

$$M_p \left(\frac{d^2 X}{dt^2} \right)_p + K_p X_p = P_p (\sin \theta t)_p \quad (2-11)$$

同时满足

$$\frac{dX_P}{dt_P} = 0, \quad X_P(0) = 0$$

当模型比尺 $\lambda = \frac{\text{模型量}}{\text{原型量}}$ 时, 对于模型中情况为

$$\frac{\lambda_M \lambda_X}{\lambda_t^2} \left(M \frac{d^2 X}{dt^2} \right)_P + \lambda_K \lambda_X (KX)_P = \lambda_P P_P \left(\sin \frac{2\pi}{T} t \right)_P \frac{\lambda_t}{\lambda_T} \quad (2-12)$$

将式(2-12)各项均除以 $\lambda_K \lambda_X$ 得

$$\frac{\lambda_M \lambda_X}{\lambda_t^2} \frac{1}{\lambda_K \lambda_X} \left(M \frac{d^2 X}{dt^2} \right)_P + (KX)_P = \frac{\lambda_P}{\lambda_K \lambda_X} P_P \left(\sin \frac{2\pi}{T} t \right)_P \frac{\lambda_t}{\lambda_T} \quad (2-13)$$

一般模型中 $\lambda_t = \lambda_T$, 故 $\lambda_t / \lambda_T = 1$, 则模型中结构物运动与原型中相似的条件是

$$\frac{\lambda_M}{\lambda_t^2 \lambda_K} = 1, \quad \frac{\lambda_P}{\lambda_K \lambda_X} = 1 \quad (2-14)$$

在模型设计中可以按照情况在四个比尺中先确定某两个比尺, 其他比尺相应可以确定。

下面再以波浪对直立式刚性结构物的作用力试验为例, 来说明动力相似的模型设计方法。当建筑物前波浪未破碎时, 波动水流的运动方程式为

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_0} = \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \frac{\partial X}{\partial X_0} + \left(g - \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial X_0} \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z_0} = - \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \frac{\partial X}{\partial Z_0} + \left(g - \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial Z_0} \end{cases} \quad (2-15)$$

式中 X_0, Z_0 ——某质点在水面静止状态时的初始坐标位置, Z 轴垂直向下;

X, Z ——分别为某质点随时间而改变的坐标位置。

在相似系统中必须满足式(2-15), 对于原型状态以下式表示

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z_0} \right)_P = - \left(\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \right)_P \left(\frac{\partial X}{\partial Z_0} \right)_P + \left(g - \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} \right)_P \left(\frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)_P \quad (2-16)$$

取模型比尺 $\lambda_X = \frac{X_m}{X_P}$, 则模型中波动水流满足下式

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_P}{\lambda_\rho \lambda_Z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z_0} \right)_P &= \frac{\lambda_X}{\lambda_t^2} \frac{\lambda_X}{\lambda_{Z_0}} \left(- \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \right)_P \left(\frac{\partial X}{\partial Z_0} \right)_P + \\ &\quad \lambda_g \frac{\lambda_Z}{\lambda_{Z_0}} \left(g \frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)_P - \frac{\lambda_Z}{\lambda_t^2} \frac{\lambda_Z}{\lambda_{Z_0}} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} \frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)_P \end{aligned} \quad (2-17)$$

对于几何相似的正态模型, 几何比尺 $\lambda_L = \lambda_X = \lambda_Z = \lambda_{Z_0}$, 并以 $\lambda_\rho = 1$ 的条件代入上式, 得

$$\frac{\lambda_P}{\lambda_\rho \lambda_Z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z_0} \right)_P = \frac{\lambda_L}{\lambda_t^2} \left(- \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \frac{\partial X}{\partial Z_0} - \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} \frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)_P + \lambda_g \left(g \frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)_P \quad (2-18)$$

用 λ_g 除等式各项,得

$$\frac{\lambda_P}{\lambda_v \lambda_L} = 1, \quad \frac{\lambda_L}{\lambda_v^2 \lambda_g} = 1 \quad (2-19)$$

因为时间比尺 $\lambda_T = \lambda_L / \lambda_v$, 将其代入上式中, 得出

$$\frac{\lambda_L}{\lambda_L^2 / \lambda_v^2 \cdot \lambda_g} = 1$$

即

$$\lambda \left(\frac{V^2}{gL} \right) = 1 \quad (2-20)$$

因为 $\frac{V^2}{gL}$ 为 Froude 数, 所以在波浪对结构物作用的模型中, 要求 Froude 数与原型相同,

也就是必须服从重力相似准则, 因为 $\lambda_g = 1$, 则速度比 $\lambda_v = \sqrt{\lambda_L}$, 作用于结构物的波浪压力强度比尺 $\lambda_P = \lambda_L$, 模型中波浪要素及建筑物尺度采用同一几何比尺 λ_L ; 波周期比尺 $\lambda_T = \sqrt{\lambda_L}$, 波速比尺 $\lambda_C = \sqrt{\lambda_L}$, 波浪对结构物的作用合力 R 的比尺 $\lambda_R = \lambda_L^3$ 。

在波浪作用下, 重力式结构物抗滑移稳定及抗倾覆稳定的模型中, 必须满足:

结构物自重比尺 $\lambda_G = \lambda_R = \lambda_L^3$;

结构物重心高度比尺 $\lambda_{hG} = \lambda_L$;

摩擦系数比尺 $\lambda_f = 1$ 。

第3章 量测技术

随着科学技术和电子工业的发展,海岸工程模型试验中的量测技术也在不断提高。本章主要介绍目前常使用的电测方法和仪器。首先介绍电测的基本原理,然后分别介绍应用该原理而进行的水面波动、力及流速的基本测量方法。

3.1 电测原理

在水力试验中,我们经常需要对波浪的波高、周期、流速、压强、波压力和撞击力等进行测量,试验中采用电测方法。进行电测就必须用传感器。传感器就是将试验中的各物理量转换为电量的转换器。

传感器按其所变换的物理量的物理性质区分为水位传感器、流速传感器和压力传感器等。

按电量形式及变化的方式可主要区分为下列三种形式的传感器。

1. 利用机械量与电量的物理关系组成传感器

如利用金属导线的应变效应,导线伸长或缩短时,导线的电阻值随之发生变化的原理所制成的传感器,就属这一种。

设一圆截面的导线,在变形前的电阻为 r

$$r = \rho \frac{l}{\omega} \quad (3-1)$$

式中 ρ ——金属材料的电阻率;

l ——导线长度;

ω ——导线截面积。

若导线受轴向拉力,其长度变化量为 Δl ,应变值 $\epsilon = \Delta l/l$,因 ϵ 值一般很小,通常以 10^{-6} 来计,如 $\epsilon = 0.01$ 时,即为 $10\,000 \times 10^{-6}$,称为 10 000 微应变或记为 $10\,000 \mu\epsilon$ 。

导线受轴向拉伸后的电阻变化值 ΔR 的推导如下:

由于 $r = \rho \frac{l}{\omega}$,微分后得

$$\begin{aligned} dr &= \frac{l}{\omega} d\rho + \frac{\rho}{\omega} dl - \rho l \frac{1}{\omega^2} d\omega \\ &= \frac{\rho}{\rho} \frac{l}{\omega} d\rho + \frac{l}{l} \frac{\rho}{\omega} dl - \frac{\rho l}{\omega} \frac{1}{\omega} d\omega \\ &= \frac{r}{\rho} d\rho + \frac{r}{l} dl - \frac{r}{\omega} d\omega \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{1}{\rho} d\rho + \frac{1}{l} dl - \frac{1}{\omega} d\omega$$

从材料力学中可知,对各种同性材料,受纵向拉压时,其面积变化率与长度变化率存在如下关系

$$\frac{d\omega}{\omega} = -2\mu' \frac{dl}{l} \quad (3-3)$$

式中 μ' ——导线材料的泊松比。

将式(3-3)代入式(3-2),得

$$\frac{dr}{r} = \frac{1}{\rho} d\rho + \frac{1}{l} dl + 2\mu' \frac{dl}{l}$$

两边除以 dl/l 得

$$\frac{dr/r}{dl/l} = 1 + 2\mu' + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (3-4)$$

其中, $\frac{d\rho/\rho}{dl/l}$ 、 μ' 都是随材料而异的常数,对同一种材料的 K_0 为一常数

$$\frac{dr/r}{\epsilon} = K_0 \quad (3-5)$$

式中 $\frac{dr/r}{\epsilon}$ ——单位应变的电阻变化率;

K_0 ——金属材料的灵敏度系数。

从式(3-5)可得电阻变化值

$$\Delta R = K_0 \cdot \epsilon \cdot r \quad (3-6)$$

将用金属材料做成的应变丝片贴附于预测的构件上,构件受拉或受压,则应变丝随之伸长或缩短,同时测得电阻的变化值 ΔR , 根据应力 σ 与应变 ϵ 之间的关系,即 $\sigma = E \cdot \epsilon$ (E 为弹性模量) 可求得构件应力 σ 的变化。

2. 发生式传感器

由机械量的变化而产生电量的传感器,称发生式传感器。测压力用的石英压力计就属于这种传感器。它利用晶体的压电效应,将晶体置于两导电电极片之间,在晶面受垂直向压力时,产生电荷 Q

$$Q = \delta_e \cdot \sigma \cdot \omega \quad (3-7)$$

式中 δ_e ——压电系数,对于石英晶体 $\delta_e = 2.3 \times 10^{-2} \text{C/N}$;

σ ——应力;

ω ——晶体表面积。

如压电晶体的两边的电容为 C , 而测定装置的静电容为 C_0 , 则电极间的电压为 $\sigma/(C + C_0)$ 伏特,为提高该传感器的灵敏度,可以将几片晶体并接于容器内,其输出电压为

$$V = \frac{n\sigma_e \cdot \sigma \cdot \omega}{n(C + C_0)} \text{ (V)} \quad (3-8)$$

式中 n ——压电晶体片数。

由式(3-8)可见,输出电压的大小,随应力的增加而加大。