



海洋科技书系

董 胜 张华昌 宁 萌 初新杰 编著

海岸工程模型试验



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

中国海洋大学教材建设基金资助

海岸工程模型试验

董 胜 张华昌 宁 萌 初新杰 编著

中国海洋大学出版社

• 青 岛 •

图书在版编目(CIP)数据

海岸工程模型试验 / 董胜等编著. —青岛: 中国
海洋大学出版社, 2016. 12

ISBN 979-7-5670-1193-9

I. ①海… II. ①董… III. ①海岸工程—模型试验
IV. ①P753-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320499 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	http://www.ouc-press.com	
电子信箱	coupljz@126.com	
订购电话	0532—82032573(传真)	
责任编辑	李建筑	电 话 0532—85902505
印 制	日照报业印刷有限公司	
版 次	2017 年 1 月第 1 版	
印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷	
成品尺寸	170 mm×230 mm	
印 张	17.5	
字 数	311 千	
印 数	1~1000	
定 价	32.00 元	

发现印装质量问题,请致电 0633—8221365,由印刷厂负责调换。

前 言

改革开放以来,我国海岸工程得到快速发展。模型试验作为海岸工程的一种重要研究手段,也获得迅速的发展。针对海岸工程实践的巨大需求,全国许多高等院校和研究机构增建了水池或水槽等实验设施,试验技术得到快速提高。

中国海洋大学动力海洋学实验室于 1964 年开始规划建设。1967 年,为配合交通部重大工程项目及援外项目进行水工模型试验的需要,应交通部设计院的要求,由交通部北海造船厂提供物资,交通部航务二处协助施工,海军工程部提供部分仪器设备,开始了实验室的建设工作。全体工作人员发扬艰苦创业、科学敬业精神,在建设实验室的同时开展科研试验工作,在较短的时间内建成了功能齐全、国内知名的动力海洋学实验室,创造了多项国内第一,并完成了 60 多项科学试验任务。为当时的许多国家重大工程作出了突出的贡献。课题组于 1978 年获首届全国科学大会重大贡献先进集体奖。

1980 年成立的海洋工程系是中国海洋大学工程学院的前身。1985 年学校党政联席会议研究决定:海岸工程专业划归海洋工程系建制,海岸工程研究室归属海洋工程系领导,物理海洋与海洋气象系的海洋工程动力教研室、实验室和海岸工程研究所归属海洋工程系。同年,海洋工程系招收海岸工程专业第一届本科学生。迄今,海岸工程实验室一直是工程学院的主要教学科研机构之一。

自从港口航道与海岸工程专业在中国海洋大学(原山东海洋学院)设立以来,《海岸工程模型试验》一直是专业课程的必修教学内容,也是港口、海岸及近海工程研究生的必修课程。本教材是在多年试验工作的基础上集成的。全书从海岸工程基本原理和实施方法入手,培养学生的工程实践意识,注重理论、试验与数值的结合,培养学生对工程问题的分析、动手和计算能力。

本书介绍海岸工程模型试验的基本原理和方法。全书共分 9 章,主要包括绪论、物理模型试验理论基础、物理模型试验的分类与流程、试验设备与测量仪器、模型比尺的确定、试验模型的模拟制作、依据波试验、物理模型试验、试验数

据的处理、数值模拟计算等内容。书后附有习题,用于帮助读者巩固和加深对内容的理解与掌握。

本书绪论,第1、2、8、9章,及第5章的第3节、第6章的第1~4节、第7章的第5~6节由董胜执笔;第4章,及第5章的第1~2节、第6章的第5~6节、第7章的第1~4节由张华昌执笔;第3章和习题由宁萌执笔;第7章的第7~8节由初新杰执笔。全书由董胜统稿、定稿。

在本书的出版过程中,作者得到中国海洋大学工程学院同事们的鼓励与支持;上海交通大学喻国良教授和天津大学杨树耕教授在百忙之中审阅了初稿,并提出了宝贵意见;博士研究生纪巧玲、陶山山、王南南、李雪、殷齐麟、翟金金、林逸凡,硕士研究生陈曦、吴亚楠、李静静、于龙基、李晨阳、董祥科、黄炜楠、姜逢源、段成林完成了部分初稿的文字录入、部分编程与绘图工作,在此表示衷心的感谢。在成书过程中,作者参阅了其他学者的论著,已列入书后的“参考文献”,在此对这些作者一并表示感谢。同时,也要感谢中国海洋大学教务处等有关部门对本书编撰工作的大力支持,还要感谢国家自然科学基金(51279186、51479183)、国家重点研发计划课题(2016YFC0802301、2016YFC0303401)、山东省研究生教育创新计划项目(SDYY12151)和山东省本科高校教学改革研究项目(2015Z022)对本书出版的资助。

本书可作为海洋、海岸、港航、水利、环境、土木等专业硕士研究生及高年级本科生的教材,亦可作为相关专业科研人员及工程技术人员的参考书。

随着海岸工程试验技术的迅速发展,新的方法与仪器设备不断涌现,由于作者从事该领域研究的时间短,水平有限,书中难免存在不足甚至错误之处,敬请读者批评指正。

作者

2017年1月

目 录

绪论	1
第 1 章 物理模型试验理论基础	6
1.1 量纲分析	6
1.2 相似原理	8
第 2 章 物理模型试验的分类与流程	13
2.1 物理模型试验的分类	13
2.2 物理模型试验的流程	15
第 3 章 试验设备与测量仪器	21
3.1 试验设备	21
3.1.1 试验水池	21
3.1.2 试验水槽	24
3.1.3 造波系统	29
3.1.4 造流系统	32
3.1.5 生风系统	33
3.1.6 生潮系统	34
3.2 测量仪器	36
3.2.1 波高仪	36
3.2.2 压力传感器	39
3.2.3 流速仪	41
第 4 章 模型比尺的确定	45
第 5 章 试验模型的模拟制作	48
5.1 水工建筑物模型的制作	48

5.1.1 斜坡式水工建筑物模型的制作	49
5.1.2 直立式水工建筑物模型的制作	52
5.2 地形的模型制作	55
5.3 海岸工程波浪物理模型试验中常用的块体	57
5.3.1 常用块体的结构图与立体图	57
5.3.2 常用块体的体积与基准尺寸的关系	61
5.3.3 常用护面块体的稳定重量及个数计算图	61
第 6 章 依据波试验	65
6.1 随机海面的描述	65
6.2 海浪谱的形式	68
6.3 频谱与海浪要素的关系	73
6.4 海浪的方向谱	79
6.5 依据波试验的基本要求	84
6.6 依据波试验的基本过程	86
第 7 章 物理模型试验实例	90
7.1 整体模型试验	90
7.2 断面模型试验——稳定和波压力测量试验	106
7.3 断面模型试验——越浪试验	112
7.4 断面模型试验——波浪顶托力测量试验	115
7.5 波群群高与周期分布试验	125
7.6 悬泥沉速试验	132
7.7 某海滨新区海岸泥沙运移	144
7.8 滩海采油平台防淘空试验	153
第 8 章 试验数据的处理	159
8.1 试验数据的误差分析	160
8.1.1 统计特征值	160
8.1.2 偶然误差的特征及分布	161
8.1.3 间接测量误差的估计	165
8.2 试验数据的统计检验	166
8.2.1 异常数据的发现与剔除	166

8.2.2	系统误差的检验与消除	168
8.2.3	统计分布形式的检验	169
8.3	经验公式的拟合	170
8.3.1	一元线性回归	171
8.3.2	一元非线性回归	176
8.3.3	多元线性回归	179
8.3.4	多项式回归	181
8.4	随机数据的谱分析	181
8.4.1	傅里叶分析方法	181
8.4.2	平稳随机过程的相关函数	182
8.4.3	功率谱密度	183
8.4.4	海浪频谱估计	186
8.4.5	交谱估计	192
8.4.6	方向谱估计	194
第 9 章	数值模拟计算	196
9.1	近岸浪-风暴潮耦合数值模拟	196
9.1.1	近岸浪-风暴潮耦合系统的建立	197
9.1.2	耦合系统的验证	200
9.1.3	结语	207
9.2	威海船厂港域泊稳计算	208
9.2.1	数值模型	208
9.2.2	物理模型试验	210
9.2.3	泊稳计算	212
9.2.4	结语	214
9.3	基于能量平衡方程的港池泊稳计算	215
9.3.1	能量平衡方程	216
9.3.2	有限差分方程的建立	217
9.3.3	绕射系数图的绘制	219
9.3.4	结语	220
9.4	直立式防波堤迎浪面波压力计算	224
9.4.1	数学模型	225
9.4.2	模型建立与网格划分	226

9.4.3	数值波浪水槽模型的验证	227
9.4.4	直墙防波堤的数值模拟	230
9.4.5	结语	234
9.5	芝罘湾航道疏浚工程悬沙扩散预测分析	234
9.5.1	模型基本方程	235
9.5.2	疏浚工程悬沙扩散分析	236
9.5.3	结语	243
习题		244
附录		248
参考文献		264

绪 论

波浪运动是一种非常复杂的自然现象。波浪与海洋建筑物的相互作用,至今仍是科学与工程界的重要研究课题。设计海岸与海洋建筑物时,理论分析、数值模拟及物理模型试验是研究波浪力的三种主要方法。实际运用时,各存在一定的局限性。理论分析在研究波浪与结构相互作用时,很难解决复杂的工程问题。数值模拟需要确定各种模型的系数,有时存在求解的困难。而物理模型试验可以根据工程实际模拟海洋建筑物不同的边界条件,准确反映波浪与海洋建筑物的作用规律,从而预演海洋建筑物在不同重现期波浪作用时的受力特点和稳定状态,因此较之其他研究方法更能直观、全面地反映工程实际情况。此外,试验方法还可以进一步提高理论分析水平,从而指导工程实践。

1. 相似现象

在各种物质体系中,存在着不同的物理变化过程。通常所说的物理现象相似,是指物理体系的形态或其变化过程的相似。

在两个几何相似的体系中,存在着具有同一物理性质的变化过程,而且在两个体系中的相应点上,各个物理量之间,具有固定的比值,这两个体系叫作同类相似。或者说,将某一给定现象的各物理量,乘以某一固定倍数,则可以得到与它相似的物理量。海岸工程中的波浪物理模型都属于此类。

如果两个体系的物理性质不同,但是都遵循相同的数学规律,通过对一种现象的研究,去了解与其变化规律相同而物理性质不同的另一现象,此相似称为异类相似。

本书涉及的研究对象,主要是同类相似。

2. 发展简史

关于相似理论,Newton(1687)在其著作中已有阐述。1848年,Bertrand首先确定了相似现象的基本性质,并提出了模型比尺分析方法。1870年,Froude进行了船舶模型试验,提出了Froude数,奠定了重力相似理论的基础。1885年,Reynold应用Froude数进行了Mersey河模型试验,研究了河口的水流现象。1886年,Vemon-Harcourt进行了莱茵河口模型试验。1898年,Engels在

德国首创河工实验室,从事河流的模型试验。之后,Freeman 创建了美国标准局水工实验室,从事水工建筑物的模型试验。此后,欧美各国物理模型实验室逐渐建立起来。

在物理模型的机理研究方面,Prandtl、Taylor 和 Karman 等学者在紊流和边界层的研究方面取得很大进展,Eisner、巴普洛夫斯基、尼古拉兹等在相似理论与实验技术方面都作出了重要贡献。

目前,国际著名的海岸工程物理模型实验室有美国陆军工程兵团水道实验室(WES),荷兰德尔夫特(Delft)水力研究所,丹麦水力研究所(DHI),日本港湾与空港研究所(PARI)等。

我国于 1933 年在天津建立第一水工试验所。1935 年在南京筹建中央水工试验所,即现在的南京水利科学研究院的前身。1956 年,水利部、电力工业部和中国科学院在北京成立了水利水电科学研究院,并陆续在其他高校、研究所建立了水利工程物理模型研究机构。大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室于 1986 年由国家计委批准筹建,1990 年通过国家验收后被批准对国内外开放,成为我国高等院校中港口、航道与海岸工程专业的试验研究领衔机构。

中国海洋大学也是国内较早建设海岸工程实验室并开展全国性海岸工程试验工作的国家重点本科院校。1964 年,山东海洋学院开始海洋动力学实验室的规划筹建工作,该实验室是目前中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室的雏形。海洋动力学实验室先后完成 60 多项试验任务,例如,“工字块体”和栅栏板护面防波堤试验,该成果后被收入国家港口工程技术规范(1982 年);“轴流式水泵集水池水力学模型试验研究”,成果列入交通部“干船坞设计规范”(1986 年);马耳他共和国港口防波堤模型试验研究(1976 年);日照港深水码头试验研究;试验推广了“管式防波堤”等。实验室创始人之一侯国本提出“黄河三角洲无潮区深水港港址可行性研究报告”。其间,逐步完善了海洋动力实验室,并形成了良好的师资队伍。先后建起长 30 m、宽 1 m、水深 0.8 m 的波浪水槽和长 60 m、宽 40 m、水深 0.8 m 的平面波浪水池。在此基础上,学校海洋系又在实验室开设了专门教学班,讲授海洋工程动力学课程。实验室还接受了交通部和石油部的进修生。

1993 年建立工程学院以来,实验室依托的港口、海岸及近海工程学科实现了跨越式发展。1980~1995 年期间,作为中国海洋大学物理海洋学的一个分支,“工程海洋学”共完成国家“八五”攻关项目及国家自然科学基金项目 30 余项。1996 年,经国务院学位委员会批准建立“港口、海岸及近海工程”硕士点,1998 年获准建立“港口、海岸及近海工程”博士点。2003 年获准设立水利工程

博士后流动站。2005 年获准设立水利工程一级学科硕士点,2007 年成为国家重点学科。依托中国海洋大学港口、海岸及近海工程国家重点学科,海洋动力学实验室 2008 年底通过山东省科技厅评审,成为山东省海洋工程重点实验室。

目前,实验室面积达 7 600 多平方米。2011 年启用了 6 000 m² 的海洋工程重点实验室实验大厅,建设有长 60 m、宽 3 m、深 1.5 m 的随机波波流耦合水槽和长 60 m、宽 36 m、水深 1.5~6.5 m、试验区宽 20 m 的平面随机波波流耦合水池。

波流水槽配有低惯性伺服电机推板式造波机,可模拟规则波、椭圆余弦波、叠加破碎波、孤立波、国内外常用的频谱以及自定义频谱描述的不规则波。工作水深 0.2~1.2 m,波周期变化范围 0.5~3.0 s,波高变化范围 0.03~0.3 m。配有双向造流系统,最大流量 2.0 m³·s⁻¹,最大流速不小于 0.6 m·s⁻¹(水深 1 m),中间局部设置长 3 m、宽 3 m、深 0.5 m 的沙池和 PIV 观测室。在试验区,可通过计算机控制模拟双向变速流场,如一个流速按正弦规律变化(潮流流)的流场。

波流水池配有长 33.75 m 的铰接推板式不规则波造波机,最大工作水深 1.2 m,波高变化范围 0.02~0.25 m,波周期变化范围 0.4~2.5 s,在合适周期范围内斜向规则波最大波向角 45°(最大有效波高 0.16 m),可模拟规则波以及自定义频谱描述的不规则波。池深分两部分,分别为长 30 m、宽 10 m、深 6 m 和长 60 m、宽 36 m、深 1.5 m,中间局部设置长 6 m、宽 6 m、深 3 m 的沙坑,深水部分可变底面并加盖板。配有双向造流泵,最大流量 4.9 m³·s⁻¹,水深 0.5 m 时,试验区最大流速 0.45 m·s⁻¹,可通过计算机控制模拟双向变速流场。

大厅还配有起重重量达 3 t 的天车以及主车车速达 2 m·s⁻¹、副车车速达 1.5 m·s⁻¹ 的 X-Y 拖曳行车,可满足各种工程和科研实验要求。

实验大厅的实验设施可进行海岸与近海(模拟实际水深 1 000 m 以内)波浪、潮流及相互作用复杂海况的海洋环境物理模拟,为海洋工程、港口工程、海洋地质和海洋水产及渔业工程科研实验提供有效手段。

3. 试验任务

物理模型试验就是根据相似准则,将工程原型缩小制作成模型,使模型重演与原型相似的自然情况,通过仪器设备,取得数据,获得结果,再按照相似准则反演到原型,从而获得原型的受力与变形。这是物理模型试验的基本任务。因此,采用物理模型试验的方法,可以论证工程设计中建筑物的安全性与合理性,从而预见原型可能发生的损伤或失稳现象,同时,根据试验结果可以验证设计所依据的理论的可行性。

4. 试验大纲

模型试验之前,应根据试验任务的要求编制试验大纲。以波浪模型试验为例,试验大纲应包括下列内容:

- (1)试验依据和遵守的技术标准;
- (2)项目概况,试验目的、内容和要求;
- (3)试验依据的基本资料,试验方法和实施方案;
- (4)试验设备和测量仪器;
- (5)主要试验人员、试验进度计划、预期的目标和试验结果。

5. 试验资料

设计与制作模型,需要翔实的海底地形资料和建筑物设计图纸。进行试验时,需要完备的波浪、潮汐、海流、泥沙、海底底质的资料及设计任务书。地形图的比例尺应根据试验研究的范围与模型比尺确定,不宜太小。建筑物的设计图纸,应包括平面图、三视图及各个部件的详图。水文泥沙地质资料应注意时效性,要求翔实准确。

6. 仪器设备

除了水池、水槽、造波系统、造流系统等固定设备,适用的测量仪器特别重要。其选择直接关系到试验结果的可靠性。

7. 试验实施

根据生产单位提出的试验任务书,考虑实验室的场地条件、试验能力、试验时间及项目经费等条件,以及模型相似的上限,通过计算比较,确定模型比尺。根据建筑物的设计详图,选择模型材料,制作模型。制作过程中,要注意检测尺寸,确保达到要求的精度。制作海底地形,安装模型,并进行校核测量。在试验水池或水槽中放水,检验模型运行情况,发现问题及时修补。开展与试验有关的率定工作,开展各种工况的试验工作。观测原有设计是否满足工程需要,分析发现的问题,及时与生产单位沟通。进行修改比较试验,确定优化的工程方案,收集观测数据,完成试验报告。试验过程中,要注意掌控试验进度。

随着计算机的快速发展,借助于数学模型进行数值求解,对于具有复杂边界的三维问题有显著的优势。因此,将物理模型试验与数值模拟计算紧密结合,优势互补,是全面解决工程问题的重要途径。

8. 撰写报告

试验报告可按下列格式编写(JTJ/T234—2001《波浪模型试验规程》,以下简称《试验规程》):

- (1)封面,包括试验成果的名称、承担单位、参加单位和编制日期。

(2)扉页,包括法定代表人、技术主管、项目负责人、报告编写人和试验参加人员。

(3)摘要,简述试验目的和方法及试验主要结论。

(4)目次,包括试验成果报告的章、节名称和起始页码。

(5)正文,包括以下内容:

1)引言,包括试验的背景、目的和采取的技术路线等;

2)试验依据的基本资料,包括工程概况、工程布置、建筑物结构、水位、波浪、地形及其他水文、气象、泥沙和地质等资料;

3)试验内容和技术要求;

4)模型设计或数值模拟方法,包括物理模型的相似条件、模型比尺的选择、模型的布置及试验设备和测量仪器等;数值模拟的基本控制方程、边界条件、求解方法、离散格式和参数的确定;

5)模型制作,包括图纸资料、边界和制作的精度;

6)试验结果分析;

7)结语,包括试验主要结果、存在的问题及建议。

(6)参考文献。

第 1 章 物理模型试验理论基础

1.1 量纲分析

在海岸工程研究中,经常采用密度、长度、时间、速度势、力及能量等物理量来描述波浪现象及其对结构物的作用,这些物理量按其性质的不同而分为多种类别,并用不同的量纲来标志,如长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 、质量 $[M]$ 、力 $[F]$ 等。

量纲可分为基本量纲和诱导量纲。基本量纲必须具有独立性,即一个基本量纲不能从其他基本量纲推导出来,也就是不依赖于其他基本量纲。由基本量纲推导出的其他物理量的量纲称为诱导量纲。例如, $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 是相互独立的量,故可以作为基本量纲,但 $[L]$ 、 $[T]$ 和速度量纲 $[v]$ 就不是相互独立的,因为 $[v]=[L/T]$ 。如果 $[L]$ 、 $[T]$ 取作基本量纲, $[v]$ 就不能作为基本量纲,它只能作为一个诱导量纲。

在力学问题中,任何一个力学量的量纲可以由 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 导出,故一般取长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 和质量 $[M]$ 为基本量纲。如果 x 为任一物理量,可用三个基本量纲的指数乘积形式来表示:

$$[x]=[L^\alpha][T^\beta][M^\gamma] \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)称为量纲公式。量 x 的物理性质可由量纲指数 α 、 β 、 γ 来反映,如果 α 、 β 、 γ 指数有一个不为零时,就可以说 x 为一有量纲的量。

从式(1.1.1)可得力学中常见的量纲有:

- (1)如 $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$, x 为一几何学的量。
- (2)如 $\beta \neq 0, \gamma = 0$, x 为一运动学的量。
- (3)如 $\gamma \neq 0$, x 为一动力学的量。

例如,动力黏滞系数 μ ,由牛顿摩擦定律知 $\mu = \tau / \frac{du}{dn}$,分子 τ 为切应力,其量纲为 $[F/L^2]$,力 $[F]=[MLT^{-2}]$,分母 $\frac{du}{dn}$ 为速度梯度,则 μ 的量纲公式为

$$[\mu] = [F/L^2]/[v/L] = [MLT^{-2}]/[LT^{-1}/L] = [ML^{-1}T^{-1}] \quad (1.1.2)$$

由 $[M]$ 量纲的指数为 $1(\neq 0)$,可以说动力黏滞系数为一动力学家量。

当式(1.1.1)中的 $\alpha=\beta=\gamma=0$ 时,即

$$[x] = [L^0][T^0][M^0] = [1] \quad (1.1.3)$$

我们称 $[x]$ 为无量纲量,它具有数值的特征。

例如,流体力学中已学到的摩阻无量纲雷诺数 $Re = vD\rho/\mu$ 。已知流速 v 的量纲为 $[LT^{-1}]$,有效尺度 D 的量纲为 $[L]$,黏滞系数 μ 的量纲为 $[ML^{-1}T^{-1}]$,水密度 ρ 的量纲为 $[ML^{-3}]$,则雷诺数的量纲

$$Re = [LT^{-1}] \cdot [L] \cdot [ML^{-3}]/[ML^{-1}T^{-1}] = [L^0][T^0][M^0] = [1] \quad (1.1.4)$$

为一无量纲量。

无量纲量具有如下特点:

无量纲量既无量又无单位,它的数值大小与所选用的单位无关。如果一流体状态的雷诺数 $Re=2\,000$,不论采用的是哪一种单位制,其数值保持不变,并且在模型和原型两种规模大小不同的运动现象中其无量纲是不变的。在模型试验中,为了模拟与原型状态相似的模型状态,常用相同的无量纲量作为相似判据,无量纲量在模型及原型的物理状态中应保持不变,这就是相似原理的基础之一,后面将详细介绍。

凡是能正确反映客观规律的物理方程,其各项的量纲都必须是一致的,这称为量纲的和谐原理。这是量纲分析的基本原理。例如,描述黏性流体运动的纳维—斯托克斯方程为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{X} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \rho + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1.1.5)$$

式中,各项的量纲均为 $[LT^{-2}]$,因而该式是满足量纲和谐原理的。

下面介绍一下量纲分析法中的普遍理论——布金汉 π 定理。

任何一个物理过程,如包含有 n 个物理量,而其涉及 m 个基本量纲(如力学问题涉及三个基本量纲),则这个物理过程可由 n 个物理量组成的 $(n-m)$ 个无量纲所表达的关系式来描述。因习惯用 π 来表示这些无量纲量,就把这个定理称为 π 定理。

设影响物理过程的 n 个物理量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,其数学表示为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1.1.6)$$

这几个物理量中,包含有 m 个基本量纲。根据 π 定理,这个物理过程可用 $(n-m)$ 个无量纲(取前 m 个量纲为基本量纲,我们可以通过调换物理量的次序

来达到)

$$\pi_s = \frac{x_m + s}{x_1^{y_{1s}} \cdot x_2^{y_{2s}} \cdot \dots \cdot x_m^{y_{ms}}} \quad (1.1.7)$$

式中, $s=1, 2, 3, \dots, n-m$; $y_{1s}, y_{2s}, \dots, y_{ms}$ 为 π_s 的各基本量纲的量纲指数。可用如下关系式来描述, 即

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (1.1.8)$$

1.2 相似原理

在波浪对海岸结构物的作用中, 有些问题不能单纯依靠理论分析求得解答, 而要依靠实验研究来解决。相似原理是实验的基本依据, 也是对海浪现象进行分析的一个重要手段。本书所涉及的海浪运动、结构物的作用、泥沙运动及浮力力学等方面, 都广泛应用模型实验来进行研究。相似原理就是模型实验的理论基础。

什么是相似呢? 两个物理现象的相应点上所有表征运动状况的物理量都维持各自的固定比例关系, 则这两个物理现象就是相似的, 表征物理现象的量具有不同的性质, 而表征波动现象的量主要有三种: 表征几何形状的、表征运动状况的以及表征动力的物理量。因此两个波动现象的相似, 可以用几何相似、运动相似和动力相似来描述。

对于模型实验来说, 几何相似是指原型和模型两个系统的几何形状相似。要求两系统中所有相应尺度都维持一定的比例关系, 即

$$\lambda_l = l_p / l_m \quad (1.2.1)$$

式中, l_p 代表原型某一部位的长度, l_m 代表模型相应部位的长度, λ_l 为长度比尺。

几何相似的结果必然使任何两个相应的面积 A 和体积 V 也都维持一定的比例关系, 即

$$\lambda_A = A_p / A_m = \lambda_l^2 \quad (1.2.2)$$

$$\lambda_V = V_p / V_m = \lambda_l^3 \quad (1.2.3)$$

可以看出, 几何相似是通过长度比尺 λ_l 来表达的, 只要任何一对相应长度都维持一定的比例关系 λ_l , 就保证两系统的几何相似。

运动相似是指质点的运动情况相似, 即相应质点在相应瞬间做相应的位移, 所以运动状态的相似要求原型和模型相应质点的速度和加速度相似。如以