

G K J H D G C M X S Y

高等学校教材

港口及航道 工程模型试验

吴宋仁 陈永宽 主编

人民交通出版社

S0023

高等学校教材

U 656.109
9600017

Ganghang Gongcheng Moxing Shiyan

港口及航道工程模型试验

吴宋仁

主编

陈永宽



人民交通出版社

(京)新登字091号

内 容 提 要

本书主要介绍港口及航道工程实物模型试验。全书共分三部分：第一部分（第一、二章）介绍港航工程模型试验的相似理论基础；第二部分（第三、四、五、六章）介绍河工模型、通航枢纽模型、海港及海岸工程模型和结构模型试验；第三部分（第七、八、九章）介绍港航工程模型试验的基本设备、量测技术和数据采集与分析。

经高等学校港口及航道工程专业教学指导委员会1990年12月在重庆召开的审稿会议同意，本书作为高等学校港口及航道工程专业本科教材，并可作为专科和研究生参考教材，同时推荐作为港航工程专业和有关专业工程技术人员和科学研究人员的参考书。

高等学校教材

港口及航道工程模型试验

吴宋仁 陈永宽 主编

插图设计：赵跃华

正文设计：崔凤莲

责任校对：戴瑞平

人民交通出版社出版

（100013北京和平里东街10号）

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京四季青印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：17 字数：435千

1993年9月 第1版

1993年9月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2500册 定价：8.00元

ISBN 7-114-01641-7

U · 01090

前 言

1988年12月在长沙召开的全国高等学校港口及航道工程专业教材编审委员会(1990年4月更名为教学指导委员会)全体会议,根据本专业教学需要,决定组织编写本教材,作为港口及航道工程专业本科教材和专科及研究生的参考书。

本书由三部分组成:第一部分(第一、二章)介绍港航工程模型试验的相似理论和因次分析基础;第二部分(第三、四、五、六章)介绍河工模型、通航枢纽模型、海港及海岸工程模型及结构模型试验;第三部分(第七、八、九章)介绍港航工程模型试验的基本设备、量测技术和数据采集与分析。

绪论及第一、二章由吴宋仁执笔,第三章由陈永宽执笔,第四章由刘晓平、周美林执笔,第五、八、九章由任佐皋执笔,第六章由朱秀峰执笔,第七章由张文周执笔。

吴宋仁、陈永宽担任本书主编,吴宋仁负责全书统稿。

大连理工大学李玉成教授受聘担任主审,在本书编写和审稿过程中提出了许多宝贵意见在此谨致以诚挚的谢忱。

编 者
1991.6

目 录

绪论.....	1
第一章 港航工程模型试验理论基础.....	5
第一节 相似的一般概念.....	5
第二节 模型相似准则.....	9
第三节 相似理论的基本定理及其应用.....	20
第四节 模型相似定理应用的限制条件.....	26
第二章 因次分析与 π 定理.....	31
第一节 物理量的因次、量度单位和因次式.....	31
第二节 因次和谐原理和因次分析方法.....	35
第三节 π 定理及其应用.....	39
第三章 河工模型试验.....	49
第一节 概述.....	49
第二节 正态定床河工模型.....	52
第三节 变态定床河工模型.....	58
第四节 动床河工模型.....	66
第五节 推移质动床模型.....	72
第六节 悬移质动床模型.....	78
第七节 全沙模型.....	83
第八节 河工模型试验的其它问题.....	88
第四章 通航枢纽水工模型试验.....	94
第一节 通航枢纽整体模型试验.....	94
第二节 船闸水力模型试验.....	97
第三节 港航工程水力模型相似的几个问题.....	111
第五章 海港与海岸工程模型试验.....	116
第一节 港口冲淤试验.....	116
第二节 港口防浪掩护整体试验.....	126
第三节 系泊船舶的泊稳试验.....	132
第四节 防波堤断面试验.....	137
第五节 桩柱上波流试验.....	144
第六节 不规则波试验.....	148
第六章 港航工程结构模型试验.....	153
第一节 概述.....	153
第二节 结构静力模型试验.....	155

第三节 结构动力模型试验.....	175
第七章 港航工程模型试验设备及模型制作技术.....	179
第一节 港航工程实验室.....	179
第二节 供、回水系统.....	180
第三节 港航工程试验专用设备.....	185
第四节 港航工程模型制作.....	195
第八章 量测技术.....	199
第一节 概述.....	199
第二节 电阻应变测量.....	201
第三节 压力测量.....	206
第四节 水位和波面测量.....	208
第五节 流速和流量测量.....	211
第六节 含沙量和地形测量.....	216
第七节 测量数据的采集与记录.....	220
第八节 流场显示技术.....	224
第九章 试验数据的处理.....	230
第一节 概述.....	230
第二节 试验数据的误差分析.....	230
第三节 试验数据的统计检验.....	236
第四节 经验公式的拟合.....	239
第五节 随机数据处理概述.....	249
主要参考书目.....	265

绪 论

一、港航工程模型试验的重要意义

随着港口及航道工程建设事业的迅速发展,越来越多的工程技术问题需要人们去认识、研究和解决。例如,为了适应大吨位(数万吨至数十万吨)船舶靠泊及装卸货物的需要,人们开始设计和建造水深为20~30m以上的外海深水码头和深水防波堤;为了防洪、发电和通航的需要,人们在通航河流中设计和建造了高度在100m以上的高坝和通航建筑物,如我国拟建的长江三峡枢纽,坝高达175m,总水头为113m;新近建成的巴西巴拉那河的伊泰普坝,坝高为196m,总水头达130m;为了使大吨位船舶能进入内河港口,扩大江海联运,发展内陆交通,需要进行大规模的河口治理。这些高、大、深的建筑物的建造和河口治理措施耗资巨大、技术复杂,一旦失事,其损失将无法估量,甚至引发灾难。因此,人们需要开发一系列新技术,采用新的设计理论以确定安全、可靠、合理可行的工程方案并付诸实践。

诚然,通过大量实践和试验研究,人们已经认识和掌握了许多有关港航工程的自然现象和规律,提出了不少成熟的理论和符合实际的设计计算方法。然而,由于港航工程的复杂性和面临的种种新问题,也有许多自然现象及其内在机理,例如,河流和海岸在修建建筑物后的演变规律,人们至今尚未充分认识和掌握。因而在现阶段,港航工程师们仍不得不凭借试验手段来解决某些实际工程问题,特别在重大工程中,试验研究更被认为是不可缺少的环节。例如长江三峡枢纽工程,单就泥沙淤积问题,就投入了大量人力、物力,在南京水利科学研究院、清华大学、长江科学研究院、天津水运工程科学研究所等单位进行了不同类型、不同比尺的模型试验。

港航工程试验研究有两个基本方面:第一是原型观测,即通过对现场自然条件或对已建成或正在建造的工程原型进行现场观测,藉此更好地认识自然和检验设计计算理论、方法和成果的可靠性。近年来,国内外对于原型观测研究愈来愈加以重视,有些观测研究规模十分庞大。例如美国近岸输沙研究(NSTS)、潮汐通道综合调查(GITI)、北欧的北海联合波浪计划(JONSWAP)等,都是联合了许多部门甚至许多国家,耗费巨大的人力物力联合进行的。原型观测避免了实验室研究中因尺度效应而影响精度等问题,实现了所谓7:1的实物模型研究,因而可以获取较可靠的观测数据。但是原型观测不仅消耗巨大,同时还存在着观测上的种种困难,例如大风大浪条件下就较难进行观测和取得可靠的数据,而这些资料恰恰正是人们最期望取得的;此外,原型观测中各种因素掺合在一起,十分复杂,不容易把人们感兴趣的因素分离出来。所以尽管某些原型观测已经取得重大进展,但目前仍有许多原型观测无论在观测手段和数据处理方面都不够成熟,根据观测资料得出的成果差异也较大。与港航工程有关的许多工程实际问题目前大都依赖第二个方面,即试验室实物模型(Physical Model)试验进行研究。

所谓实物模型是指按一定的相似定律,以某种合适的比例由实物(或称原型)缩制而成的模型。在设计模型时,常常可把原型的特性抽象化,并只保持所研究的现象中主要的特性

相似,例如,在进行船闸灌泄水特性、闸室内船舶泊稳条件及波浪、水流与建筑物相互作用等水力学问题试验时,可以不考虑模型建筑物的材料强度,如钢筋混凝土的原型结构物可以用木料、石蜡、有机玻璃等易于成型的材料制作模型。在某些情况下,可舍去一些次要的相似条件,只按必不可少的相似条件设计,有时甚至在几何形态上作变态处理,例如在进行大型河工模型试验或潮汐现象模型试验时,常常采用不同的平面和垂直比尺来缩制模型。总而言之,实物模型往往可以做得比较简单和理想化,使之既方便易行,又能达到试验研究的基本要求。显然,在缩小了尺寸的模型上进行试验研究,使试验研究的困难和工作量大为减轻,例如在确定港内泊稳条件试验研究中,原型观测非常繁杂,需要花费大量人力物力,观测设备一般也都很昂贵,而且难以观测到大风大浪时的极端情况,而在缩小的实物模型中就简单得多,用跟踪式自记水位仪在短时间内便可同步测出各种波况下港内不同位置的波高,并由计算机采集和绘制出波高等值线图,供设计选用,省时省事。又如在航道整治设计中,往往要预估航道整治实施后河床的变化,而利用动床模型试验即可演示出若干年后河床变形情况。由于模型缩小了空间尺寸,时间也相应缩短了,几天或几小时就可显示原型几年的变化,从而大大缩短人们认识自然的周期。

此外,利用模型还可方便地修改结构设计,而不必等到工程实施后才发现设计的缺陷和提出修改方案。同时,利用模型也容易模拟极端情况,预演自然现象以观察工程可靠度。

二、港航工程模型试验发展状况

早在2000多年前,水力学创始人之一阿基米德通过试验研究发现了著名的静水力学定理。1686年,牛顿发现了流体内摩擦的基本规律,同时提出了动力相似的普遍定律,奠定了模型试验的理论基础。1870年,弗汝德进行了船舶模型试验并提出了著名的弗汝德定律,其后法格(Fargue)利用河道模型试验来改善航道1885年,运用弗汝德相似定律进行了默塞(Mersey)河模型试验以研究潮汐河口的水流状况。1898年,恩格斯(Engles)在德国的德累斯顿科技大学创建了世界第一个河流水力学试验室,其后世界各国陆续建立了不少水工实验室或实验站。我国第一个水工实验室建于1933年。中华人民共和国建国后,为适应大规模水利建设和港航工程建设需要,我国港航工程试验研究机构如雨后春笋,规模越来越大,试验设施和测试技术越来越先进,试验研究队伍也越来越壮大。目前国内专门从事港航工程试验研究的机构有:南京水利科学研究院、天津水运工程科学研究所、西南水运工程科学研究所、交通部第一、二、三和四航务工程局的科研所等。许多院校如大连理工大学、天津大学、河海大学、重庆交通学院等也先后建造了先进的港航工程、海岸动力和海岸工程等试验室。这些试验研究基地为解决港航工程实际技术问题提供了许多极有价值的试验成果,为发展我国港航工程的基础理论和设计方法作出了巨大贡献,促进了港航工程的科技进步。第二次世界大战以后,世界各国对港航工程试验研究也都十分重视,建设了许多规模宏大、设备先进的试验室,如荷兰的德尔夫特水力试验室的新建部分,丹麦的水力研究所(DHI),美国陆军工程兵团水道试验站(WES)和海岸研究中心(CERC),日本的港湾技术研究所(PHRI),英国的铁林福特水力研究公司(HRLtd)和加拿大国家研究委员会(NRC)水力实验室等。

随着科学技术的进步,港航工程试验研究中的量测技术也飞速发展,电子技术、激光技术、自动控制 and 计算机的引入,使量测设备越来越电子化、自动化,量测精度也越来越高。例如许多国家(包括我国)已建造了具有不规则波造波机的港池,可以模拟二维甚至三维的

不规则波,使波浪研究前进了一大步。激光测速仪,激光全息照相和质点迹线测速(PIV)等技术的应用使得港航工程试验研究工作者可以清晰地获得空间流场图象及其内部结构,从而使流场显示技术出现一次飞跃。大存贮量、高速运算的计算机的出现以及计算方法的创新,一方面使许多问题可以通过“数学模型”(Mathematical Model)来解决,另一方面又使实物模型试验得以深化。现在国内外正致力于发展将“数学模型”与“实物模型”结合在一起的所谓“复合模型”。

三、港航工程模型试验的分类

港航工程模型试验依据不同的试验研究目的、要求,可分为下述几种类型:

1. 根据试验范围:

1) 河工模型

a) 定床河工模型;

b) 动床河工模型

(i) 自然河工模型;

(ii) 系列河工模型

c) 定床加沙淤积模型;

d) 气流模型。

2) 水工建筑物模型

a) 港工建筑物模型;

b) 通航枢纽建筑物模型;

c) 电模拟模型。

2. 根据模型范围:

1) 整体模型;

2) 半整体模型;

3) 局部模型;

4) 断面模型。

3. 根据模型河床结构组成:

1) 定床模型

a) 定床河工模型;

b) 局部定床模型。

2) 动床模型

a) 动床河工模型;

b) 局部动床模型。

4. 根据模型试验的不同对象:

1) 波浪模型;

2) 潮汐模型;

3) 异重流模型;

4) 结构模型

a) 静力试验;

- b) 动力试验。
- 5. 根据模型比尺:
 - 1) 正态模型;
 - 2) 变态模型
 - a) 一维变态;
 - b) 二维变态。
- 6. 根据模型所采用的试验流体,
 - 1) 水流模型;
 - 2) 气流模型;
 - 3) 其它液流模型。

第一章 港航工程模型试验理论基础

港口及航道工程中的许多技术问题,如波浪作用下码头上的船舶撞击力,码头周围局部冲淤变化等,到目前为止,人们还不能单纯用数学分析方法直接或很好地解决。由于客观条件和技术经济上的限制,现场观测也往往会遇到很多困难,甚至无法实现。这时,常通过模型试验方法来解决。大量实验表明,在现阶段模型试验仍不失为解决港航工程中许多技术问题的一种行之有效的手段。例如在港口及通航枢纽工程中,常通过模型试验确定通航枢纽、港口水域等的合理布置;拟定各单项建筑物如船闸、码头、防波堤等的合理型式,尺寸和位置;预报建筑物修建后上、下游河段或周围海域的河床或海床的演变及治理措施。在航道整治工程中,也往往要通过模型试验确定经济、可行的合理整治方案;确定整治建筑物的布置、型式和尺寸以及预报整治后的河床演变情况等。

港航工程模型,因场地、设备等条件的限制,大都要缩小几倍、几十甚至成百上千倍,从而产生模型和原型的相似问题。只有根据相似理论,使模型与原型准确相似后,才能使原型上的物理现象在模型中重演。

相似理论是近百年来发展起来的一门新学科,以相似理论为基础的模型试验方法,已在许多学科中获得广泛的应用。了解和掌握必要的相似理论知识,是进行港航模型试验的前提条件。

第一节 相似的一般概念

自然界中,存在着各种各样相似的物理现象。所谓物理现象相似,指的是两个物理体系的形态和某种变化过程相似,即它们不仅静态相似,动态也相似;形式相似,内容也相似。

通常所说的相似,大致有三种含意:①相似、或称同类相似(Similitude);②模拟或异类相似(Analogy);③差似或变态相似(Affinity)。

本书主要讨论第一种相似,即在具有几何相似的诸体系中,进行着同一物理性质的变化过程,而且各体系中对对应点上同名物理量之间具有某一固定的比值。

要求两种物理现象严格的相似,必须保证这两种现象具有同一的物理性质:例如,一种机械运动与另一种机械运动相似;一种热传导过程与另一种热传导过程相似;一种流体运动与另一种流体运动相似;与某一流体层流状态下运动相似的流体也必须处于层流运动状态,紊流运动也只能与紊流运动相似。

如果两个物理体系的物理性质不同,但它们的变化过程遵循同一的数学规律,如人们熟悉的渗流场与电场,扩散与热传导等,它们之间也存在着广义的相似。通过对一种物理现象(如电场)的研究去了解与其变化的数学规律相同而物理性质不同的另一种物理现象(如渗流场),称为“模拟”。例如渗流场可用电场来模拟,即用电场试验来确定渗流规律。

港航工程模型试验主要是探求各种动力因素作用下港航工程结构物应力、应变或结构物

周围水域水流、河床变化等问题，一般都属第一类相似。为了获得原型和模型中的物理现象相似，首先必须满足下述三个相似条件，即几何相似、运动相似和动力相似。

一、几何相似

几何相似的概念起源于初等几何学，例如两个三角形 $\triangle ABC$ 和 $\triangle A'B'C'$ ，如果它们的对应边成同一比例，或对应角相等(图1-1)，即

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C'} = \frac{AC}{A'C'} = \lambda_l \quad (1-1)$$

或

$$\angle A = \angle A' \quad \angle B = \angle B' \quad \angle C = \angle C' \quad (1-2)$$

则这两个三角形相似。式(1-1)中， λ 表示比例常数或相似比尺； λ_l 称为长度比例常数或长度比尺，又常称为几何相似比尺。

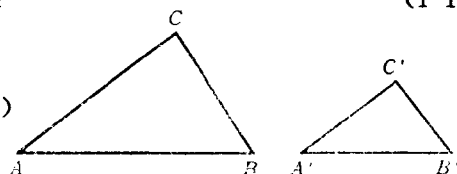


图1-1 相似三角形

本书所说的几何相似，系指两个体系（通常一个是实际的物理现象，称为原型；另一个是在试验中进行重演或预演的同类物理现象，称为模型）彼此所占据的空间的对应尺寸之比为同一比例常数。例如在两个空间体系 xyz 和 $x'y'z'$ 中，空间对应尺寸之比：

$$\begin{aligned} \frac{x_1 x_2}{x'_1 x'_2} &= \lambda_x \\ \frac{y_1 y_2}{y'_1 y'_2} &= \lambda_y \\ \frac{z_1 z_2}{z'_1 z'_2} &= \lambda_z \end{aligned} \quad (1-3)$$

若 $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_l$ ，则两空间体系严格几何相似，或称“正态相似”，如大小不同的两个圆球体就是正态相似的。若 $\lambda_x = \lambda_y \neq \lambda_z$ ，则该两体系就不是正态相似，而是“差似”或“变态相似”，例如圆球体与椭圆柱体。

在正态相似体系中，面积比尺为

$$\lambda_A = \frac{\triangle ABC}{\triangle A'B'C'} = \frac{\frac{1}{2}(AB) \times h}{\frac{1}{2}(A'B') \times h'} = \lambda_l^2 \quad (1-4)$$

不难得到任意形状物体的面积比尺也是 λ_l^2 ，同样容易证明体积比尺为

$$\lambda_w = \lambda_l^3 \quad (1-5)$$

理论上，几何比尺愈小，模型的相似性愈好。事实上，由于实验条件等限制，几何比尺往往不能取得过小，港航工程结构模型的几何比尺一般为10左右；防波堤、码头断面试验及船闸水力学试验等，模型比尺为数十；整体模型试验，如通航枢纽布置等，模型比尺为数百；河口潮流试验，模型比尺可达数百甚至上千。

从模型相似性看，一般应尽可能采用正态模型作试验，但有时，如大范围港口、河口航道等整体模型试验，水平方向与垂直方向往往不能采用同一比尺，否则在有限试验场地内，因比尺太大，势必导致模型水深太浅、波高太小等缺陷，从而可能改变模型中的流态和波态等性质。此时，可采用平面方向和垂直方向比尺不同的办法，即运用所谓“差似”或“变态相

似”，这种模型称为“变态模型”。两个不同方向的几何比尺之比，即：

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_z} = \eta \quad (1-6)$$

称为变态率，简称变率。显然，变率越大，几何相似性越差，一般以变率不超过10为宜。

二、运动相似

运动相似是指两个几何相似体系的速度场也几何相似，亦即在运动相似条件下，两体系中对应的两个质点沿着几何相似的轨迹运动，在互成一定比例的时间内通过一段几何相似的路程（如图1-2），也就是说，在相应空间和时间内，质点运动速度和加速度方向一致，大小成同一比例。

在数学上，运动相似可表示为

$$\begin{aligned} \vec{l} &= \lambda_l \vec{l}' & t &= \lambda_t t' \\ \vec{V} &= \lambda_v \vec{V}' & \vec{a} &= \lambda_a \vec{a}' \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中： $\vec{l}$ 、 $\vec{l}'$ ——两相似体系中对长度矢量；

t 、 t' ——两相似体系中对时间；

$\vec{V}$ 、 $\vec{V}'$ ——两相似体系中对质点的速度矢量；

$\vec{a}$ 、 $\vec{a}'$ ——两相似体系中对质点加速度矢量；

λ_l 、 λ_t 、 λ_v 、 λ_a ——分别为长度、时间、速度和加速度比例常数或比尺。

在图1-2中，或(1-7)式分别表示为

$$\frac{l_{01}}{l'_{01}} = \frac{l_{12}}{l'_{12}} = \dots = \lambda_l$$

$$\frac{t_{01}}{t'_{01}} = \frac{t_{12}}{t'_{12}} = \dots = \lambda_t$$

$$\frac{v_{01}}{v'_{01}} = \frac{v_{12}}{v'_{12}} = \dots = \lambda_v$$

$$\frac{a_{01}}{a'_{01}} = \frac{a_{12}}{a'_{12}} = \dots = \lambda_a$$

相似两体系中，它们对应位置上的几何比尺和运动量比尺始终保持某一固定常数，但这些常数不一定相同，例如几何比尺为100，而速度比尺可能10，这是由现象本身规律所决定的，所以这些比例常数不能全部任意指定。图1-2中，粗略地有：

$$V_{01} = \frac{l_{01}}{t_{01}} \quad V'_{01} = \frac{l'_{01}}{t'_{01}}$$

由于 $V_{01} = \lambda_v V'_{01}$ ， $l_{01} = \lambda_l l'_{01}$ ， $t_{01} = \lambda_t t'_{01}$ ，代入上式得

$$\lambda_v V'_{01} = \frac{\lambda_l l'_{01}}{\lambda_t t'_{01}} \text{ 或 } \frac{\lambda_v \lambda_t}{\lambda_l} V'_{01} = \frac{l'_{01}}{t'_{01}}$$

于是有：

$$\frac{\lambda_v \lambda_t}{\lambda_l} = 1 \quad (1-8)$$

或

$$\lambda_v = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} \quad (1-9)$$

可见如两体系运动相似，则各物理量的比例常数之间必须保持某一关系，不能都任意

指定。如式 (1-9), 一旦 λ_l 和 λ_t 确定, λ_v 也就确定。 $\frac{\lambda_v \lambda_t}{\lambda_l}$ 称为两相似体系运动的“相似指标”或“相似判据”。相似指标等于 1 是两体系运动相似的必要条件。

在研究自然现象相似时, 往往要探求各种物理量的微小增量之间的关系, 例如研究某一变速运动, 速度 $V = \frac{ds}{dt}$, 这种以微分形式出现的物理量, 其比例常数之间关系与一般量之间关系相同。证明如下:

设 l_1, l_2 和 l'_1, l'_2 分别为两相似体系中对长度在相应微小时段 Δt 内的微小变化, 则应有:

$$\frac{l_1}{l'_1} = \frac{l_2}{l'_2} = \lambda_l \quad \frac{l_1 - l_2}{l'_1 - l'_2} = \frac{\Delta l}{\Delta l'} = \frac{\lambda_l (l'_1 - l'_2)}{l'_1 - l'_2} = \lambda_l$$

即两增量之比也是常数。两增量的极限, 即两变量的微分之比也仍等于这个常数, 亦即

$$\frac{dl}{dl'} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{l_1 - l_2}{l'_1 - l'_2} = \lambda_l$$

同理

$$\frac{dt}{dt'} = \lambda_t$$

于是

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} = \frac{dl'}{dt'} \quad \text{或} \quad \frac{V}{V'} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t}$$

式中 $\frac{\lambda_l}{\lambda_t}$ 即为速度比尺 λ_v 。

类似地, 可写出加速度比尺:

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2} \quad (1-10)$$

三、动力相似

一个运动现象, 可能有一个或几个动力作用。若两个几何相似体系中, 对应点上的所有作用力方向相互平行, 大小成同一比例, 即

$$\frac{F}{F'} = \lambda_F \quad (1-11)$$

则它们是动力相似的。式中 λ_F 称为力的比尺。

在港航工程中, 可能遇到的作用力有惯性力 F_I 、重力 F_G 、粘滞力 F_μ 、摩阻力 F_D 、表面张力 F_σ 和弹性力 F_e 等。在动力相似体系中, 所有这些对应的力的方向应相互平行, 大小成同一比例, 亦即

$$\lambda_{F_I} = \lambda_{F_G} = \lambda_{F_\mu} = \lambda_{F_D} = \lambda_{F_\sigma} = \lambda_{F_e} = \lambda_F \quad (1-12)$$

上述就是某一物理现象相似所必须满足的三个基本条件。在港航工程模型试验中, 往往会遇到泥沙运动和河床冲淤变化等问题, 要保证原型和模型泥沙运动规律相似, 除必须满足上述相似条件外, 还须满足泥沙运动相似, 冲淤变化相似, 其中包括泥沙颗粒相似、重度相似、起动特性相似、含沙量和分布规律相似以及冲淤时间、冲淤量相似等等。有关泥沙运动

相似问题将在第三章详细阐述。

模型试验的目的在于通过模型试验尽可能准确模拟某一原型物理现象，以便将试验中获得的可靠结果推广应用于原型。要使模型模拟的物理现象与原型达到完全相似，上述要求还不够，还必须使物理现象运动规律完全相似，以及初始条件和边界条件等也都相似。

第二节 模型相似准则

一、相似准则概念

物理力学现象常很复杂，要研究某一物理现象力学相似，必须从这类现象共同遵守的力学规律或其微分方程出发。因为一个具体的运动现象遵循着某些固有的规律，而模型研究的是原型中的某一具体的运动现象，因此原型和模型均应遵循同一的具体规律或微分方程。力学现象（指经典力学范畴内的现象）的最一般规律是牛顿定律，其中具体规定了量的关系的是牛顿第二定律，即

$$\vec{F} = M\vec{a} = M \frac{d\vec{V}}{dt}$$

对于原型，应有

$$\vec{F}_p = M_p \frac{d\vec{V}_p}{dt_p} \quad (1-13-1)$$

对于模型，应为

$$\vec{F}_m = M_m \frac{d\vec{V}_m}{dt_m} \quad (1-13-2)$$

令各同名物理量之间的相似比尺分别为

$$\lambda_F = \frac{\vec{F}_p}{\vec{F}_m} \quad \lambda_M = \frac{M_p}{M_m} \quad \lambda_v = \frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_m} \quad \lambda_t = \frac{t_p}{t_m}$$

将它们代入式(1-13-1)，得：

$$\lambda_F \vec{F}_m = \lambda_M M_m \frac{\lambda_v d\vec{V}_m}{\lambda_t dt_m}$$

整理后得：

$$\frac{\lambda_F \lambda_t}{\lambda_M \lambda_v} \vec{F}_m = M_m \frac{d\vec{V}_m}{dt_m}$$

对比式(1-13-2)可知，上式左端的系数项应等于1，即

$$\frac{\lambda_F \lambda_t}{\lambda_M \lambda_v} = 1 \quad (1-14)$$

式中 $\frac{\lambda_F \lambda_t}{\lambda_M \lambda_v}$ 称为相似指标。该式表明，仅当这一相似指标为1时，原型和模型才都遵循牛顿第二定律。因此，各物理量的相似比尺，不能都任意指定，它们之间存在一定的内在关系。

式(1-14)可以进一步改写为

$$\left(\frac{Ft}{MV} \right)_p = \left(\frac{Ft}{MV} \right)_m = \text{idem} = K \quad (1-15)$$

式中综合量群 $\left(\frac{Fl}{MV}\right)_p$ 和 $\left(\frac{Fl}{MV}\right)_m$ 均为无因次数,称为相似准数或相似判据。该式表明,原型和模型的相似准数是同等的(idem),并等于某一常数 K 。

若将上式中的质量 M 用 ρW (W 为体积)代换,则可得到

$$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_W = \lambda_\rho \lambda_l^3 \quad (1-16)$$

代入式(1-14),得

$$\frac{\lambda_F}{\lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2} = 1 \quad (1-17)$$

或

$$\left(\frac{F}{\rho l^2 V^2}\right)_p = \left(\frac{F}{\rho l^2 V^2}\right)_m = \text{idem} = N_e \quad (1-18)$$

式中: N_e 称为牛顿相似准数。

牛顿准数表明,在原型和模型中,对应的力之间的比尺与密度比尺一次方和长度比尺平方及速度比尺的平方的乘积相等,或者说作用在原型或模型上的力与其密度一次方、长度平方和速度的平方乘积之比等于同一常数。广义地说,如果两个几何相似体系达成运动规律相似,它们的牛顿准数应相等,反之如果两个几何体系的牛顿准数相等,那么它们之间是运动规律相似的。这就是牛顿相似律。

牛顿相似律是判别两个运动现象运动规律相似的普遍定律。这个相似律对作用于某一运动体系上任何不同性质的动力都是普遍适用的。港航工程中,作用于流体或建筑物上的外力是多种多样的,诸如重力、粘滞阻力、形体阻力、压力、表面张力、弹性力等等。不同的外力,可导出不同的相似准数,因此相似准数也是多种多样的。如前所述,研究某一物理现象相似,必须从这类现象共同遵循的基本规律或微分方程出发。港航工程中,某一现象的微分方程式,实际上往往就是上述各种力之间的平衡关系式。因此,要使原型和模型同时满足该方程式,就应使方程中各种外力保持相似。也就是使各种相似准数都相等。但实际上,无论哪一个模型,都难以同时满足所有的外力作用均相似,一般只能根据不同的试验目的和要求,选择一、二种对某一物理现象起主要作用的外力,使其满足相似条件,亦即一、二个相似准数相等,忽略其它次要的作用力的相似。

确定相似准数的方法通常有如下三种:

1. 方程分析法

该方法的要点是:首先找出或建立描述相似运动体系必须共同遵守的运动规律或基本微分方程式及其相应的定解条件,然后进行相似变换,从而找出其应满足的相似准数。例如,若进行一悬臂梁受力状况的模型试验,就可采用方程分析法来寻求试验需要满足的相似准数。

设一长度为 L 的悬臂梁,其末端作用有一个集中力 P (如图1-3所示)。在 x 截面处,其弯矩为

$$M = Px \quad (1)$$

该截面处端点正应力为

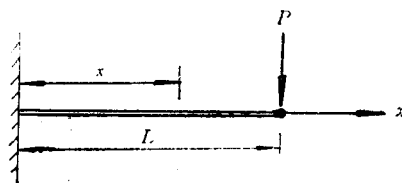


图1-3 悬臂梁受力图

$$\sigma = \frac{Px}{W} \quad (2)$$

对小变形弹性梁，其挠度方程为

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = Px \quad (3)$$

挠度为

$$y = \frac{P}{6EJ} (2L^3 - 3L^2x + x^3) \quad (4)$$

式中： J ——截面惯性矩；

W ——截面模量；

E ——弹性模量。

若原型和模型梁几何相似，则有

$$\lambda_x = \lambda_l, \quad \lambda_w = \lambda_l^3, \quad \lambda_J = \lambda_l^4$$

$$\text{令 } M_p = (Px)_p \quad (5)$$

$$M_m = (Px)_m \quad (6)$$

$$\lambda_M = \frac{M_p}{M_m}, \quad \lambda = \frac{P_p}{P_m}$$

进行相似变换，得：

$$\lambda_M M_m = \lambda_F \lambda_l (Px)_m \quad (7)$$

由于两相似现象应为文字上相同方程式所描述，比较式(7)与式(6)可知，此两个方程式在文字上全同的条件是

$$\lambda_M = \lambda_F \lambda_l \quad (8-1)$$

或

$$\frac{\lambda_M}{\lambda_F \lambda_l} = 1 \quad (8-2)$$

同理可得到

$$\lambda_\sigma = \frac{\lambda_F}{\lambda_l^2} \text{ 或 } \frac{\lambda_\sigma \lambda_l^2}{\lambda_F} = 1 \quad (9)$$

$$\lambda_y = \frac{\lambda_F}{\lambda_E \lambda_l} \quad \frac{\lambda_y \lambda_E \lambda_l}{\lambda_F} = 1 \quad (10)$$

式(8)、(9)和(10)就是进行悬臂梁模型试验应遵循的相似判据或相似准数。

在模型试验中，相似指标 $\frac{\lambda_M}{\lambda_F \lambda_l} = 1$ 和 $\frac{\lambda_\sigma \lambda_l^2}{\lambda_F} = 1$ 是容易满足的。但要使挠度相似，即保证

$\lambda_y = \lambda_l$ ，则应使 $\lambda_E = \frac{\lambda_F}{\lambda_l^2}$ ，也就是力的比尺 λ_F 与弹性模量比尺 λ_E 之间必须保持一定的关系，即二者之比应等于几何比尺 λ_l 的平方。这样，模型材料的选择就受到了限制，不能任意确定。如果模型材料与原型相同，即 $\lambda_E = 1$ ，此时 $\lambda_F = \lambda_l^2$ ，因此一旦几何比尺确定后，力的比尺就确定了。

2. 因次分析法

当某一物理现象尚未建立起微分方程时，可借助因次分析方法，研究该体系中各物理量