

高等学校土木工程专业系列教材

工程流体力学 实验指导

● 沈小雄 主编

GONGCHENG
LIUTILIXUE
SHIYAN ZHIDAO



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

工程流体力学实验指导

主 编 沈小雄
副主编 贺 晖 王西峰 陈 文
参 编 李梦成 韩振英 易 文

中南大学出版社

www.csupress.com.cn

正文卷

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学实验指导/沈小雄主编. —长沙:中南大学出版社, 2009. 1

高等学校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-81105-900-7

I. 工... II. 沈... III. 工程力学:流体力学-实验-高等学校-教学参考资料 IV. TB126-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 009203 号

工程流体力学实验指导

主编 沈小雄

-
- 责任编辑 胡业民
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
 印 装 国防科技大学印刷厂
-

- 开 本 787 × 1092 1/16 印张 5 字数 116 千字
 版 次 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
 书 号 ISBN 978-7-81105-900-7
 定 价 15.00 元
-

图书出现印装问题,请与出版社调换

高等学校土木工程系列教材 编审委员会

主任 刘宝琛 院士

副主任 曾庆元 院士

委员(以姓氏笔画排序):

方理刚	王桂尧	刘宝琛	刘 杰
刘朝晖	刘锡军	刘 静	吕 昀
任伯帜	阮 波	李九苏	余志武
何旭辉	陈秀方	杨建军	杨伟军
杨晓华	周志刚	周建普	周殿铭
赵建三	钟新谷	贺跃光	郭少华
徐林荣	高文毅	唐依民	桂 岚
黄立奎	曾庆元	彭立敏	谭海洋
戴公连	戴 伟		

前 言

工程流体力学(水力学)是高等学校土木、水利类各专业的必修课程,工程流体力学实验在学科的发展以及教学中起着重要的和不可替代的作用。将工程流体力学实验单独设课,把实验教学放在与理论课教学同等重要的地位,对于培养学生科学实验的严谨作风、分析问题和解决问题的能力、自主设计实验的能力和创新能力具有更加重要的作用。

本书结合编者多年来的教学改革成果,以培养学生动手能力、分析问题解决问题能力和创新能力为编写的指导思想,从模型实验的基本原理出发,着重介绍了实验设计方法和实验数据处理等内容,可为学生进行设计性实验提供理论指导,并紧密联系工程实际,结合土木、水利各学科专业特点,努力拓展目前已有的验证性实验的内涵,力图结合已有实验仪器,将验证性实验发展为综合性实验和设计性实验。全书共包括四章,第1章为工程流体实验设计指导,第2章为基本水力要素的测量,第3章为工程流体基础实验,第4章为设计研究型实验。本书可作为工程流体力学(水力学)课程的配套教材,也适用于单独开设的工程流体力学实验课,可根据不同专业的教学大纲选用相应的实验项目。

本书采用集体讨论、分工执笔的方式进行,参加本书编写的有长沙理工大学沈小雄、贺晖、李梦成、韩振英,湖南科技大学王西峰和中南林业科技大学易文、陈文等,全书由沈小雄、贺晖统编审定。

由于水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者指正。

编者

2009年1月

目 录

第 1 章 工程流体实验设计指导	(1)
1.1 模型实验设计的理论基础	(1)
1.2 模型实验分类	(4)
1.3 模型设计方法简述	(6)
1.4 实验数据处理与分析	(9)
1.5 概化模型实例——波流共同作用下圆柱基底的局部冲刷研究	(16)
第 2 章 基本水流参数的测量	(19)
2.1 水位测量	(19)
2.2 流速测量	(20)
2.3 流量测量	(22)
2.4 压力测量	(23)
第 3 章 工程流体基础实验	(27)
3.1 静水压强实验	(27)
3.2 不可压缩流体恒定流能量方程实验	(30)
3.3 毕托管测速实验	(32)
3.4 动量方程实验	(35)
3.5 雷诺实验	(39)
3.6 沿程水头损失实验	(42)
3.7 局部水头损失实验	(45)
3.8 孔口管嘴实验	(48)
3.9 虹吸管观测实验	(50)
3.10 明渠水面曲线演示实验	(52)
3.11 堰流与水跃观测实验	(55)
3.12 达西渗流实验	(59)
3.13 渗流的水电比拟法实验	(60)
第 4 章 设计研究型实验	(63)
4.1 桥墩局部冲刷深度实验	(63)
4.2 小桥涵过流水力特性实验研究	(64)

4.3 自组复杂管路系统阻力系数测定实验 (64)

4.4 泄水建筑物过流能力实验研究 (65)

4.5 水跃与泄水建筑物下游水流衔接实验 (65)

4.6 泄流堰面压力实验 (66)

4.7 砂土及粘土土样渗透系数测定 (66)

4.8 土(砂石)坝砂槽模型渗流实验 (67)

4.9 明渠综合糙率测定实验 (67)

4.10 弯道水流实验 (68)

参考文献 (69)

(1) 流体力学实验指导 1

(2) 流体力学实验指导 1

(3) 流体力学实验指导 1

(4) 流体力学实验指导 1

(5) 流体力学实验指导 1

(6) 流体力学实验指导 1

(7) 流体力学实验指导 1

(8) 流体力学实验指导 1

(9) 流体力学实验指导 1

(10) 流体力学实验指导 1

(11) 流体力学实验指导 1

(12) 流体力学实验指导 1

(13) 流体力学实验指导 1

(14) 流体力学实验指导 1

(15) 流体力学实验指导 1

(16) 流体力学实验指导 1

(17) 流体力学实验指导 1

(18) 流体力学实验指导 1

(19) 流体力学实验指导 1

(20) 流体力学实验指导 1

(21) 流体力学实验指导 1

(22) 流体力学实验指导 1

(23) 流体力学实验指导 1

(24) 流体力学实验指导 1

(25) 流体力学实验指导 1

(26) 流体力学实验指导 1

(27) 流体力学实验指导 1

(28) 流体力学实验指导 1

(29) 流体力学实验指导 1

(30) 流体力学实验指导 1

(31) 流体力学实验指导 1

(32) 流体力学实验指导 1

(33) 流体力学实验指导 1

(34) 流体力学实验指导 1

(35) 流体力学实验指导 1

(36) 流体力学实验指导 1

(37) 流体力学实验指导 1

(38) 流体力学实验指导 1

(39) 流体力学实验指导 1

(40) 流体力学实验指导 1

第1章 工程流体实验设计指导

工程流体力学的实验研究,主要是在流体运动的现场或实验室的水槽、水池、风洞、水电比拟等实验设备中进行原型观测或模型实验。工程流体力学发展史上有许多通过实验了解水流现象、寻求水流运动规律的例子,如著名的雷诺实验、尼古拉兹实验等。虽然用理论方法所建立的连续性方程、能量方程和动量方程可以求解一些工程流体力学的简单问题,对于大多数实际工程中所涉及的流体问题,其内在机理人们至今尚未充分认识和掌握,用纯理论的方程进行求解有一定的局限性,研究这些未知问题的最主要手段就是模型实验。在国内一些重大工程中,模型实验研究是不可缺少的环节。

然而,对一个复杂的流动现象进行实验研究,可变因素很多,另外还受到实验条件的限制。因此在进行一项实验时,就会碰到这样一些问题:如何更有效地设计和组织实验,如何正确地处理实验数据,如何把模型实验结果推广到原型等。要妥善地解决这些问题,需要有模型实验理论的指导。因次分析和相似原理就是指导模型实验的理论基础。

1.1 模型实验设计的理论基础

1.1.1 因次分析

1. 基本因次与导出因次

在流体力学中经常遇到的物理量有长度、时间、质量、速度、加速度、力、粘度等,这些物理量按其性质不同而分为不同类别。人们把表征物理量的种类通称为“因次”或称为“量纲”。由于许多物理量的因次之间有一定联系,所以把物理量的因次分为两大类,一类是基本因次,即它们彼此相互独立,任何基本因次不能从其他基本因次推导出来。工程流体力学中常选择长度(以 $[L]$ 表示)、时间(以 $[T]$ 表示)和质量(以 $[M]$ 表示,有时为力 $[F]$)作为基本因次;另一类因次称为导出因次,这类因次可由基本因次推导出来。如速度因次 $[V] = [L]/[T] = [LT^{-1}]$,力的因次 $[F] = [M] \cdot [a] = [MLT^{-2}]$ 。

2. 因次和谐原理

凡是能正确反映某一物理现象变化规律的完整的物理方程,其各项因次都必须是一致的,称为因次和谐原理。对于因次和谐的方程,都可以用方程中任一项因次去除其他各项,得到一个新的无因次方程。因次分析就是利用因次和谐原理,通过一系列换算,将原来含有较多物理量的方程,转化成由数量较少的无因次数组成的新的方程,从而减少了方程的变量,相应的实验也可以得到简化。

3. π 定理(也称为白金汉定理)

π 定理可以表述为:任何一个物理过程,若有 n 个物理量参与作用,其物理过程可表示为函数关系

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-1)$$

当这些参变量中包括 m 个因次独立的基本物理量, 则经过处理, 这一物理过程可由包含 $n - m$ 个由这些物理量组成的无因次数 π 的函数关系式来表示

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (1-2)$$

其中各个 π 项可表示为

$$\pi_i = x_{m+1}^{\alpha_i} x_1^{\beta_i} \dots x_m^{\gamma_i} \quad (1-3)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n - m$; K 一般取为 1 或 -1 ; $\alpha_i, \beta_i, \dots, \gamma_i$ 分别为基本量 x_1, x_2, \dots, x_m 的待定指数, 根据因次和谐原理确定。式(1-2)仍然表达了原问题的物理关系。工程流体问题中, 一般基本量个数取 3 个, 即 $m = 3$, 通常几何学、运动学、动力学各取 1 个。

工程流体力学中常见的无因次数有雷诺(Reynolds)数 $Re = \frac{ul}{\nu}$, 欧拉(Euler)数 $Eu = \frac{P}{\rho u^2}$, 佛汝德(Froude)数 $Fr = \frac{u^2}{gl}$, 韦伯(Weber)数 $We = \frac{u^2 l \rho}{\sigma}$, 马赫(Mach)数 $Ma = \frac{u}{c}$ 等。

因次分析法是解决工程流体力学问题的一种有效研究手段。通过因次和谐原理, 可以校核由理论推导出的或由实验分析出的物理方程式的正确性, 甚至可以借助因次分析方法求出各变量之间的某些联系, 从而建立正确的、结构简单的物理方程式; 对于一些不能完全用数学方法求解的工程流体力学问题, 可以借助因次分析方法确定模型实验的相似条件, 为模型实验的设计和观测提供依据。

必须指出的是, 因次分析方法具有一定的缺陷和局限性。因次分析法本身对变量的选取不能提供任何指导和启示, 如果漏选或多选了重要的变量, 将得到错误的物理方程; 因次分析也没有给出所研究问题的最终解, 它只提供了方程的基本结构, 还需要借助实验手段确定函数的数值关系。

1.1.2 相似原理

1. 流动相似的概念

自然界中物理现象的相似, 是指两个物理体系(通常一个是实际的物理现象, 称为原型; 另一个是在实验中进行重演或预演的同类物理现象, 称为模型)的形态和某种变化过程相似。若两个物理体系相似, 则必然能用相同的数学物理方程来进行描述, 并同时满足几何相似、运动相似、动力相似和边界条件、初始条件相似。

(1) 几何相似: 指原型和模型两个流场中, 所有相应线段的长度都维持一定的比例关系, 即长度比尺为 $\lambda_l = \frac{l_p}{l_m}$, 下标 p 和 m 分别代表原型和模型(下同)。若各个方向的 λ_l 均相同, 则称为正态相似; 若有某个方向的 λ_l 不能取得一致, 则原型和模型就是变态相似, 两个不同方向的几何比尺之比称为变率 η 。若以水平比尺 λ_l 和垂直比尺 λ_n 之比表示变率, 即 $\eta = \frac{\lambda_l}{\lambda_n}$, 则变率越大, 几何相似性越差。

(2) 运动相似: 指原型和模型两个流场中各对应点的速度(加速度)的方向相同, 大小维持一定的比例关系。对应的比例常数有时间比尺 λ_t 、速度比尺 λ_v 、加速度比尺 λ_a 等。物理现象本身的规律决定了这些比例常数之间存在一定的制约关系。如时间比尺 λ_t 、速度比尺 λ_v , 几何比尺 λ_l 之间应该满足 $\frac{\lambda_v \lambda_l}{\lambda_t} = 1$ 。因此在模型设计中, 各种比尺不能全部任意指定。

(3) 动力相似: 指作用于原型和模型两个流场相应点上的各种作用力的方向对应一致, 大小维持统一比例关系, 也称力的作用相似, 即力的比尺为 λ_F 。一个物理体系, 可能同时存在多个动力作用。工程流体力学中常遇到的作用力包括惯性力 F_I 、重力 F_g 、粘滞力 F_μ 、摩阻力 F_D 、表面张力 F_a 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, 即等于 λ_F 。

(4) 初始条件和边界条件相似

任何流动过程的发展都受到初始状态的影响。如初始时刻的流速、加速度等物理参数是否随时间变化对其后的流动发展与变化有重要的作用。因此, 对于非恒定流, 要使两个流动相似, 应使其初始状态的物理参数相似。边界条件同样是影响流动过程的重要因素, 要使两个流体力学相似, 则应使其对应的边界的性质相同, 几何尺度成比例, 如原型中是固体壁面, 则模型中对应部分也应该是固体壁面, 原型中是自由液面, 则模型中对应部分也应是自由液面。

2. 流体模型实验中常用的相似准则

表示物理力学体系起主导作用的物理力的相似条件, 叫做相似准则, 也称为相似律。在经典力学范畴内最普遍的相似律就是牛顿相似律, 即

$$\left(\frac{F}{\rho l^2 u^2}\right)_p = \left(\frac{F}{\rho l^2 u^2}\right)_m = Ne \quad (1-4)$$

式(1-4)中, Ne 称为牛顿准数, 它表明: 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三者乘积之比值等于同一常数。原型和模型欲满足惯性力作用下动力相似, 它们的牛顿准数 Ne 应相等, 这称为牛顿相似准则。

原型和模型只有满足相似准数相等, 现象才能够相似, 因此相似准数是进行模型设计的依据。相似准数可以通过分析两相似体系共同遵守的物理方程式及其相应的定解条件来获得; 当某一物理现象尚未建立起微分方程时, 也可借助因次分析方法来获得; 还可利用力学相似体系中各种力的比尺应相等这一条件, 求得使各种力保持相似的相似准数。

由上述方法可求得流体模型实验中常用的相似准则有:

(1) 重力相似准则(佛汝德相似准则): 在原型和模型之间, 如满足重力作用下动力相似, 它们的佛汝德数 Fr 应相等, 即

$$\left(\frac{u^2}{gl}\right)_p = \left(\frac{u^2}{gl}\right)_m = Fr \quad (1-5)$$

由于惯性力和重力都是决定流体运动最重要的力, 因此, 这个相似律也是流体模型实验中最重要相似律。

(2) 阻力相似准则

① 层流粘滞力相似准则(雷诺准则): 在原型和模型之间, 欲满足粘滞力作用下获得动力相似, 则它们的雷诺数应保持同一常数, 即

$$\left(\frac{ul}{\nu}\right)_p = \left(\frac{ul}{\nu}\right)_m = Re \quad (1-6)$$

② 紊流阻力相似准则: 如果原型和模型均满足紊流阻力作用下的动力相似, 则它们的沿程阻力系数 f 或谢齐系数 C 相等, 即

$$f_p = f_m \quad (1-7)$$

或

$$C_p = C_m \quad (1-8)$$

对于一般的工程流体模型,雷诺相似律并不要求严格满足,只要保证模型与原型是同一流态即可。由于大部分的情况下,工程流体实验的模型水流都处在紊流的阻力平方区,此时紊流阻力系数只取决于边壁的相对糙率,而与 Re 无关,因此,只要使得模型边壁满足糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_l^{1/6}$ 的要求,即能达到阻力系数相等,阻力相似也就自动满足。

(3)压力相似准则(欧拉准则):当原型和模型间满足压力为主的动力相似时,则它们之间的欧拉数必须相等,即

$$\left(\frac{p}{\rho u^2}\right)_p = \left(\frac{p}{\rho u^2}\right)_m = Eu \quad (1-9)$$

式中: p 为压强, Eu 称为压力相似准数,也称为欧拉(Euler)数。

与阻力相似准则类似,在几何边界条件相似的基础上,对层流和阻力平方区的自动模型区,可得到流速场分布的相似,则压力场也能相似,也就是说此时欧拉准则自动满足。

此外,工程流体模型实验中用到的相似准则还有非恒定流相似准则(斯特鲁哈准则)、表面张力相似准则(韦伯准则)、弹性力相似准则(柯西准则或马赫准则),等等。这些准则只有在某些特殊的实验条件下才予以采用。例如,只要保证水流运动相似,则非恒定流相似准则便能自动满足。又如在一一般流体模型中,当流体表面流速大于 0.23 m/s ,水深大于 1.5 cm 时,表面张力影响可以忽略,因此模型设计时只须控制好这一条件,而不必严格遵守韦伯准则;至于柯西准则或马赫准则,多应用于空气动力学研究中。

3. 相似原理在流体模型实验中的应用

根据相似理论进行流体模型实验的主要步骤可归纳为如下几点:

(1)导出及分析有关相似准则:通过方程分析、因次分析等方法推导出有关的相似准则后,判断哪些相似准则是主要的,哪些是次要的,甚至可以忽略的。如前面介绍的以水流作用为主要研究对象的水流模型中,重力和阻力相似是主要的,而反映表面张力相似的韦伯相似准则等则可以忽略。

(2)根据主要相似准则设计和组织实验:包括选择合理的模型比尺、实验设备及实验条件,选择模型实验中的工作介质,确定运动状态等。

(3)确定实验中要测量的物理量及整理实验结果:实验中应测量各相似准数和无因次因变量所包含的一切物理量,并把测量结果整理成相似准数或其他无因次数来表达的实验曲线或函数关系式。

(4)实验结果的换算和推广:根据相似理论,将实验结果按设计的比尺换算到实物系统中去。应该牢记,模型实验的结果只能在相似现象之间应用和推广。

1.2 模型实验分类

生产实践中需要通过流体模型实验解决的问题是多种多样的,因而提出的实验任务也就各不相同。按实验内容和要求的不同,或受场地条件的限制,实验中可采取不同类型的模型。常用的模型分类方法有以下几种:

1.2.1 按模型模拟的范围分类

1. 整体模型

整体模型是包括整个水工建筑物或整个被研究对象的模型。模型范围一般包括研究对象及其上下游和左右边界的一定范围。例如,当研究桥位河段通航水流问题时,需要按一定的比例将桥梁及上下游一定河段缩制成模型进行实验,称为整体模型。

2. 半整体模型

当建筑物较宽、结构对称,水流情况也对称,由于实验场地或供水流量等条件限制而不能制作整体模型时,有时也可沿对称轴线取其一半来代替整体制成模型,称为半整体模型。

3. 断面模型

当建筑物较宽,沿其宽度方向水流情况相近,这时可按平面问题进行处理,即在其宽度方向取出一小段制成模型,这种模型称为断面模型。如研究泄水建筑物下游水流衔接与消能及下游局部冲刷等问题时,一般截取枢纽坝轴线的一段制成模型,安装在玻璃水槽中开展实验研究。

1.2.2 按床面的性质分类

1. 定床模型

在实验过程中河床边界固定不变的模型称为定床模型。研究一般水流运动状态时常采用此类模型。

2. 动床模型

为研究河床的冲淤演变、消能段的冲刷深度、范围,这时需要采用河床边界随水流运动不断改变的模型,称为动床模型。动床模型需要同时研究水、沙运动,既要求水流运动相似又要求河床泥沙运动相似。如研究桥梁墩台的一般冲刷和局部冲刷、水工建筑物下游局部冲刷等问题,需按照相似条件将模型床面做成活动河床进行研究。

1.2.3 按模型的几何相似分类

1. 正态模型

将原型在空间三个方向采用相同的长度比尺缩制成的模型称为正态模型。如实验室条件允许,应尽可能采用正态模型。当研究水利枢纽上下游水流、溢洪道泄流和显著弯曲的河渠问题等,一般均采用正态模型。

2. 变态模型

受各种条件的限制,如糙率、水流流态、场地条件等限制时,在空间三个方向采用不同长度比尺的模型称为变态模型。一般有两种情况,第一种情况是采用的长度比尺与宽度、深度比尺不同,也就是纵向与横向、垂向比尺不同的变态模型。第二种情况是长度、宽度比尺大于深度比尺,即纵向、横向与垂直方向比尺不同的变态模型。

1.2.4 按模型的共性和个性分类

1. 概化模型

概化模型是对类型相同、大小不等的多条河段,进行水力要素与河床因素的概化或典型

化,选取各相关因素的代表值进行相似模型设计,并按相似水流条件开展系统实验,取得该类型河段的一般性实验结果,它泛指某一类工程问题,即在实验室中模拟多条河流的一些共性问题或者这些河流桥梁存在的共同问题。例如弯道水流实验、桥墩冲刷实验等。

2. 相似模型

相似模型是针对具体工程具体河段的水流泥沙模型,把原型水流及其河道边界特征按照相似准则及相似比尺缩制成模型,预演或重演天然水流现象,进行观测分析,再把实验结果按照相似比尺换算到原型水流,一个模型只解决该具体河段上存在的具体问题,也称为比尺模型,如碍航滩险、桥渡模型等。

此外,按照模拟的方法还可分为物理模型、数学模型和复合模型等。

1.3 模型设计方法简述

1.3.1 概化模型设计方法

为了在众多类型相同的河段中选定典型河段进行模型设计和实验,研究这类河段的水流运动的共性,需要将河段水流要素和河床地形典型化。例如,对于一般平原河流,具有宽广的河漫滩,河床纵、横向坡度均很平缓,可以把河滩概化成高程等于滩面平均高程、坡度等于滩地平均坡度的平坦斜面。概化模型实验常用于基础理论研究,用以补充纯理论难以解决的问题或提供检验理论正确性的基础资料。下面说明概化模型设计的基本步骤和方法。

1. 选题

结合工程实际或学习中遇到的尚未解决的问题,选择题目。例如,在河道中修建桥墩后,桥墩对水流的阻碍,引起桥墩周围水流结构的剧烈变化,在墩头前缘形成一种下降水流,冲刷床面泥沙,在墩前形成一个漏斗状的冲刷坑,称为桥墩局部冲刷(如图1-1)。由床面起算的冲刷坑最大深度,称为桥墩局部冲刷深度。桥墩局部冲刷实验大致包括如下内容:桥墩附近的水流结构、局部冲刷水流现象观察与分析、局部冲刷的发展过程及其稳定时间、桥墩最大局部冲刷深度等。

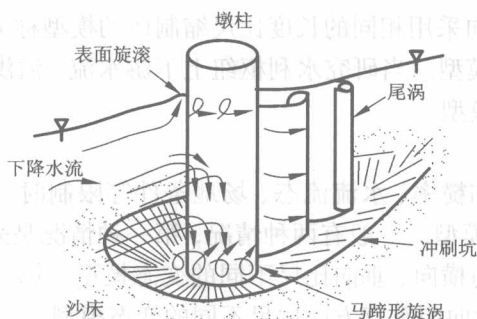


图 1-1 桥墩局部冲刷示意图

2. 收集相关资料, 查阅资料并分析前人所做的研究成果

在模型实验前, 首先应根据研究内容, 查阅相关资料, 对所研究问题的国内外研究现状进行分析, 了解前人的研究工作, 做到心中有数。具体分析时, 应着重了解以下几点: ①是否有人做过同样的或类似的工作, 是从哪些角度开展研究工作的, 存在什么问题; ②其他研究者是如何整理实验资料的, 得到了什么规律; ③研究的建筑物形状、尺寸如何; ④水流参数的范围; ⑤泥沙特性, 如粒径、级配等。

3. 模型设计及布置

根据实验目的和选定的实验内容, 进行模型设计, 推导模型实验应遵循的主要相似准则, 确定采用定床还是动床模型, 采用正态还是变态模型。进行模型布置, 绘制模型平面布置图, 图中应标明建筑物模型以及水位测针等在概化水槽中安装位置, 确定进口断面、流速测量、出口断面等的位置, 还应在图中标明供水系统位置以及回水廊道位置等。对于建筑物附近的局部冲刷实验, 还需要根据相似准则选择模型沙。最后, 确定实验室条件能否满足要求, 如果不能满足, 则修改实验设计。

4. 模型制作及设备安装调试

模型制作包括水工建筑物模型、桥梁模型、河道地形等的制作及安装。了解量水堰、尾门等控制设备的位置及安装, 水位、流速、波浪、压力等量测仪器的检验和安装, 并注意这些仪器的参数是否需要重新率定。

5. 预备实验及模型检验

通过预备实验, 检验模型的流速分布、局部流态、水面线、河床变形等是否符合实验要求, 必要时需做模型沙的起动流速、沉速等预备性实验。

6. 确定实验方案

一个复杂的物理过程常常有几个显著的影响因素, 这个物理过程的变化, 又有可能是非线性的。所以, 在确定实验方案时, 应该以研究内容为基础, 确定实验中采用的流速、流量以及水深等实验参数的范围, 进行分组安排。

如果实验安排得合理, 实验次数不多, 就能得到满意的结果; 若实验安排得不合理, 实验次数多, 结果还往往不能令人满意。实验次数过多, 既浪费大量的人力物力, 有时还会由于时间拖得很长, 使实验条件发生变化而导致实验失败。因此如何合理安排实验方案是值得研究的一个重要问题。一项科学合理的实验安排应该能做到以下三点: ①实验次数尽可能少; ②实验组数应尽可能涵盖物理规律的全过程; ③便于分析和处理数据; ④能得到满意的结果。

7. 模型实验

按照分组计划, 进行放水实验, 详细测量各水力、变形等要素, 观察流态, 获取系统的实验数据、图像等资料。

8. 结果分析和总结

对采集的数据进行分析、总结和提炼, 绘制相关图表, 应解决以下几个问题: ①分清哪些因素是主要影响因素, 哪些是次要影响因素; ②各个单因素变化时所研究对象的变化规律; ③复合因素变化时研究指标随之变化的规律和趋势; ④如有可能, 分析研究对象与影响因素的关系, 拟合出经验公式。

最后, 提出结论性成果, 编写实验报告。

1.3.2 相似模型设计方法

相似模型主要是针对工程实际,对某个水利水电、港口航道、通航建筑物等工程进行具体研究,模型实验结果的准确性、真实性以及实验结果实际应用的成效,在很大程度上取决于模型设计的合理性和科学性,整体制作及每个环节的精确性和相似性,甚至每个细节都对实验结果具有较大影响。从项目委托到成果的实际应用,通常需经过以下主要过程。

(1)了解研究任务。详细了解项目的研究内容,分析研究的重点和难点,明确关键技术,如有必要,对研究内容提出必要的改进建议。

(2)收集资料。针对研究任务,全面收集地质、地形、水文泥沙、设计方案、结构细部构造等模型设计、模型实验需要的基础性资料。

(3)模型设计。确定模型需要遵守的主要相似准则,判定采用动床、定床或正态、变态等模型类型,根据实验任务、实验场地、供水供电条件等,拟定模型的几何比尺,确定实验范围,选择模型沙等。模型实验河段纵向长度应根据实验目的和要求,并结合水流、河道情况和工程建筑物对上下游河道影响范围确定。模型进口水流调节段可取8~12m,模型出口水流调节段可取6~10m,当模型进口段为弯道时,制模范围应延长至弯道以上。

(4)模型制作。河道模型的平面、断面控制及安装,河道地形的塑造,水工建筑物及桥梁等其他特殊建筑物的精细加工和安装。

(5)设备安装和准备。量水、尾水等控制设备的建造和安装,水位、流速、波浪、压力等量测仪器的选择、检验和准备。

(6)模型验证实验。模型制作完成后,进行放水实验。依据原型实测资料,检验是否满足几何相似、重力相似、阻力相似、流态相似,验证模型的流速分布、局部流态、水面线、河床变形等与原型的符合程度,对于动床模型,必要时需做模型沙的起动流速、沉速等预备性实验。

(7)实验方案、工况的制定。以研究任务、研究内容为基础,考虑制定水文条件、工程方案的全面性和代表性,组合多种工况的符合实际又切实可行的实验方案,为实验有条不紊进行、按期完成打好基础。

(8)模型正式实验。针对制定好的实验工况,进行放水实验,详细实测各水力、变形等要素,获取系统的实验数据、图像等资料,并按不同的方案和组次及时整理好实验资料。根据实验目的和要求,实验资料可整理成图表或经验公式。

(9)结果分析和总结。实验结果的表达要力求简单明了,依据实验结果资料进行分析、总结和提炼,除必要的文字说明外,要充分利用表格、曲线及变量之间的函数关系,要绘制相关图表,图表中要有编号、名称、必要的注释和所用符号的意义与计量单位。要回答工程上的问题,提出改进和完善工程措施意见,提出结论性成果,编写模型实验研究报告。

成果表达方式一般有以下几种:①列表。一般适用于同一实验内容有多组实验资料或一组实验资料有几个参数的情况,例如对于实验数据中的水位与水面线资料,可按实验组次列表表示;②绘图。适用于一组实验资料中的两个变量互为函数关系的情况,例如对于冲刷实验,可绘制冲淤平面图以及冲坑的纵剖面 and 横剖面图,对于流场资料,可绘制流速垂线分布图,垂线平均流速沿横断面分布图,等等;③经验公式。实验组次较多时用于表达变量之间的函数关系,例如对于泄流能力实验,可绘制成相应的流量系数曲线或建立相关的经验公

式；④照片或录像。

(10)项目鉴定和验收。实验报告编写完成后，需要相关部门组织同行专家对实验结果进行鉴定、验收，以保证研究成果的可靠性、可信度以及适用性，再提交研究成果。

(11)应用反馈实验。对于实验结果马上需要实施的工程，在施工过程中可能遇到某些具体问题，方案需要改变或优化，则还需根据工程的反馈要求做进一步实验。

1.4 实验数据处理与分析

1.4.1 误差的基本概念

在工程流体力学中，各种水力要素的量测是很重要的，工程流体力学的发展过程也证明，水力要素的量测对促进工程流体力学学科的发展起了很重要的作用。水力要素的量测工作分为直接测量和间接测量两大类。直接测量是用仪器直接对某一未知量进行测量得出该物理量的数值，例如用测针测量水位，体积法测量流量等。间接测量是通过直接量测得出数据，再按照一定的函数关系，通过计算得到的物理量的数值。例如通过毕托管测压差后计算得到流速值。当直接测量不方便，或者缺乏测量仪器时，常采用间接测量。

此外，按被测量的物理量是否在测量过程中随时间变化，可把量测工作分为静态测量和动态测量。在量测过程中，被测物理量不随时间而变化，或者变化缓慢，这种量测工作为静态测量。若量测过程中，被测物理量随时间作不规则变化或周期性变化，则为动态测量。

在工程流体力学实验中，不论是静态测量还是动态测量，直接测量还是间接测量，所测得的数据都包含误差。无论误差的大小如何，都会影响实验结果的精度。

误差是指实验测量值与真值之间的差别。它是量测仪器本身的误差以及量测的辅助设备、量测方法、外界环境、操作技术等带来误差的诸因素共同作用的结果。根据误差的性质和产生的原因，可将误差分为三类。

(1) 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量时误差的数值保持恒定，或按照某种已知的函数规律变化的误差。系统误差产生的原因有：①测量仪器不良，如刻度不准，仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等；②周围环境的改变，如温度、压力、湿度等偏离校准值；③实验人员的习惯和偏向，如读数偏高或偏低等引起的误差，等等。针对仪器的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向，经过精确的校正后，系统误差是可以清除的。

(2) 随机误差

随机误差也称为偶然误差，它具有随机变量的一切特点，是在一定条件下服从统计规律的误差。随机误差由一些不易控制的因素引起，如测量值的波动、实验人员熟练程度及感官误差、外界条件的变动、肉眼观察欠准确等一系列问题，无法控制。

(3) 过失误差

过失误差是一种显然与事实不符的误差，它往往是由于实验人员粗心大意、过度疲劳和操作不正确等原因引起的。此类误差无规则可寻，只要加强责任感和细心操作是可以避免的。这类误差往往与正常值相差很大，应在整理数据时加以剔除。

可用测量误差的大小来估计测量的精确度。表示误差的方法有如下几种。

(1) 绝对误差

某物理量在一系列测量中,测量值与其真值之差称绝对误差。真值是在某一时间和空间状态中体现某一物理量的客观值。真值一般是不知道的,实际工作中常以数学方法推导的理论公式计算值代替真值,如平面三角形的内角和为 180° 。

(2) 相对误差

绝对误差与被测量物理量真值之比称为相对误差,也可近似地用绝对误差与测量值之比作为相对误差。即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}}$$

相对误差是无量纲值,通常以百分数表示。

(3) 算术平均误差

算术平均误差是一系列测量值的误差绝对值的算术平均值。

(4) 标准误差

标准误差亦称为均方根误差,表示测量值对其算术平均值的离散程度。用 σ 表示,在有限次测量工作中,其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

σ 值愈小,说明每一次测量值对其算术平均值分散度愈小,测量的精度就高。

此外还有最大残差法、最大误差法、极差法等表示随机误差的方法。

1.4.2 实验数据处理

实验数据处理是流体模型实验的重要环节,通过对实验数据的处理和理论分析,得到所研究的流体物理现象的规律。

1. 有效数字

在实验中对量测得到的数据进行处理时,对被测的量用几位数字来表示其大小是很重要的。那种认为小数点后面的数字越多就越准确的想法是不正确的。数据中小数点的位置与所用单位大小有关,数值准确度与测量仪表的精度有关,实验中从测量仪表上所读数值的最后一位数字往往是仪表精度所决定的估计数字。如某测量液面标尺的最小分度为 1mm ,则读数可以读到 0.1mm 。如液面高为 524.5mm ,即前三位是直接读出的,是准确的,最后一位是估计的,是欠准的或可疑的,称该数据为4位有效数。如液面恰好在 524mm 刻度上,则数据应记作 524.0mm 。

实际测量的数据需要经过运算,运算后保留几位有效数字,应遵守如下规则。

(1) 记录测量数值时,只保留一位可疑数字。

(2) 当有效数字位数确定后,其余数字一律按四舍五入法舍弃。末位有效数字后边第一位等于5时,前一位为奇数,则进1为偶数,前一位为偶数,则舍弃不计。

(3) 在加减计算中,以小数点最小位数为准,其余各数所保留的位数比该数多一位。例如将 24.65 , 0.0082 , 1.632 三个数字相加时,应写为 $24.65 + 0.008 + 1.632 = 26.29$ 。但做减法运算时,当相减的数非常接近,则应尽量多保留有效位数。

(4) 在乘除运算中,以有效数字位数最少的为准,其余各数所保留的位数比该数多一位。