

TEXTBOOK SERIES FOR THE CULTIVATION OF GRADUATE INNOVATIVE TALENTS

研究生创新人才培养系列教材

# 水力模型设计与实践

DESIGN AND PRACTICE OF HYDRAULIC MODELS

高学平 著

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

TEXTBOOK SERIES FOR THE CULTIVATION OF GRADUATE INNOVATIVE TALENTS

研究生创新人才培养系列教材

# 水力模型设计与实践

DESIGN AND PRACTICE OF HYDRAULIC MODELS

高学平 著

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

全书共分10章,内容包括模型相似理论基础、水利枢纽水力模型试验、进水口水力模型试验、进/出水口双向水流模型试验、水电站引水尾水系统模型试验、泄洪洞水力模型试验、船坞灌排水模型试验、结构物水弹模型试验、泥沙模型试验、水库水温模型试验。除第1章外,其余9章分别对应实际工程中不同类型的水力问题,其水力模型设计和试验均是作者多年研究成果的归纳和总结,这些实际工程均是我国已建或在建的工程。

本书在介绍水力模型相似理论的基础上,尝试针对不同类型的水力模型,结合实际工程,从工程概况、试验内容、模型设计、模型制作、试验方法、成果总结以及注意事项等方向进行全面介绍,向读者展现每一类水力模型设计及试验研究的全过程,便于读者掌握水力模型设计和试验研究方法,直接服务于实际工程问题的研究。

本书可作为水利工程学科硕士研究生的教材,亦可供相关专业工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力模型设计与实践 / 高学平著. — 天津: 天津大学出版社, 2017.4

研究生创新人才培养系列教材

ISBN 978-7-5618-5789-2

I. ①水… II. ①高… III. ①水力模型-设计-研究生-教材 IV. ①TV222

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 070311 号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm × 260mm

印 张 13

字 数 325 千

版 次 2017 年 4 月第 1 版

印 次 2017 年 4 月第 1 次

定 价 49.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究



## 前言

不论从学科的范畴,还是研究方法,水利工程学科都在不断地发展和完善。作为传统的研究方法——水力模型试验,始终发挥着不可替代的作用,而且也在不断地发展和完善。

对于重要的水利工程或复杂的水利工程,进行某类水力模型试验是必不可少的。通过水力模型试验,可以检验工程设计的合理性、揭示复杂的水力现象、提出改进措施、优化工程设计,等等。

在水利工程学科众多的研究方法中,水力模型试验是一个看似简单实则复杂的研究方法。说它简单,是因为它直观、可控,想看什么工况的水流现象都能实现,而且易于实现。说它复杂,是因为它的过程复杂,从模型设计、模型制作、试验量测、数据分析直至得出结论性成果等,而且涉及的人员较多,既有专业研究人员,又有模型制作人员,同时还要有先进的实验设备和量测仪器。

做好水力模型试验不是一件容易的事情,同样的研究对象,同样的研究手段,不同研究者获得的研究成果或许不尽相同,模型设计、量测仪器、试验技巧、试验经验等都将对试验成果的水平产生影响。

进行模型试验是一件很有意思的事情,对于新类型的模型试验,相似理论和模型设计还有待发展和完善;对于复杂的水力现象,利用试验手段进一步揭示其水流现象将具有挑战性;对于大型水利工程,通过模型试验检验设计方案的合理性,优化设计方案,提出满足水力条件的推荐方案,为工程设计提供技术支撑。

对于水利工程学科的研究生,求学期间参与水力模型试验研究应该是一件幸运的事情,因为针对实际工程的水力模型试验研究并不是总有的。对于研究生来说,参与水力模型试验,将对学生的综合能力有很好的锻炼,若认真参与过一个完整的试验研究过程,将使自身的综合能力得到很大提高,既有理论——模型设计,又有实践——试验观测。锻炼了交流和沟通能力,与不同的人员——模型制作人员、设计人员交流;锻炼了组织能力,从熟悉实际工程、模型设计、模型制作、试验量测到数据分析、成果总结、报告撰写、成果汇报以及试验过程的讨论等。巩固基本理论、培养动手能力、掌握试验方法、学会综合分析,这是参与水力模型试验的基本收获。

本书的撰写及出版得到天津大学研究生创新人才培养项目资助。在撰写本书过程中参考了有关书籍,汲取了其精华,在此向有关作者和出版社表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处,恳切希望广大读者及专家批评、指正。

高学平  
2017年1月

# 目 录

Contents

第 1 章 模型相似理论基础 .....	(1)
1.1 流动相似 .....	(1)
1.2 模型相似准则 .....	(2)
1.3 模型设计理论 .....	(5)
1.4 本章总结 .....	(8)
第 2 章 水利枢纽水力模型试验 .....	(10)
2.1 工程概况 .....	(10)
2.2 试验所需资料 .....	(13)
2.3 研究内容 .....	(13)
2.4 模型设计与制作 .....	(14)
2.5 试验方法 .....	(15)
2.6 试验成果 .....	(18)
2.7 本章总结 .....	(31)
第 3 章 进水口水力模型试验 .....	(33)
3.1 工程概况 .....	(33)
3.2 试验所需资料 .....	(36)
3.3 试验内容 .....	(36)
3.4 模型设计与制作 .....	(37)
3.5 试验方法 .....	(40)
3.6 试验成果 .....	(40)
3.7 本章总结 .....	(52)
第 4 章 进/出水口双向水流模型试验 .....	(53)
4.1 工程概况 .....	(53)
4.2 试验所需资料 .....	(54)
4.3 试验内容 .....	(55)
4.4 模型设计与制作 .....	(56)
4.5 试验方法 .....	(59)
4.6 试验成果 .....	(60)
4.7 本章总结 .....	(78)
第 5 章 水电站引水尾水系统模型试验 .....	(79)
5.1 工程概况 .....	(79)

5.2	试验所需资料 .....	(79)
5.3	试验内容 .....	(80)
5.4	模型设计与制作 .....	(82)
5.5	试验方法 .....	(87)
5.6	试验成果 .....	(88)
5.7	本章总结 .....	(95)
<b>第6章</b>	<b>泄洪洞水力模型试验 .....</b>	<b>(97)</b>
6.1	工程概况 .....	(97)
6.2	试验所需资料 .....	(98)
6.3	试验内容 .....	(98)
6.4	模型设计与制作 .....	(99)
6.5	试验方法 .....	(101)
6.6	试验成果 .....	(101)
6.7	本章总结 .....	(112)
<b>第7章</b>	<b>船坞灌排水模型试验 .....</b>	<b>(114)</b>
7.1	工程概况 .....	(114)
7.2	试验所需资料 .....	(115)
7.3	试验内容 .....	(116)
7.4	模型设计与制作 .....	(117)
7.5	试验方法 .....	(117)
7.6	试验成果 .....	(119)
7.7	本章总结 .....	(134)
<b>第8章</b>	<b>结构物水弹模型试验 .....</b>	<b>(136)</b>
8.1	工程概况 .....	(136)
8.2	试验所需资料 .....	(139)
8.3	试验内容 .....	(140)
8.4	模型设计与制作 .....	(140)
8.5	试验方法 .....	(143)
8.6	试验成果 .....	(144)
8.7	本章总结 .....	(157)
<b>第9章</b>	<b>泥沙模型试验 .....</b>	<b>(159)</b>
9.1	工程概况 .....	(159)
9.2	试验所需资料 .....	(162)
9.3	试验内容 .....	(162)
9.4	模型设计与制作 .....	(162)
9.5	试验方法 .....	(172)
9.6	试验成果 .....	(173)

---

9.7 本章总结 .....	(178)
<b>第10章 水库水温模型试验 .....</b>	<b>(180)</b>
10.1 工程概况 .....	(180)
10.2 试验所需资料 .....	(183)
10.3 试验内容 .....	(183)
10.4 模型设计与制作 .....	(184)
10.5 试验方法 .....	(185)
10.6 试验成果 .....	(187)
10.7 本章总结 .....	(195)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(196)</b>



# 第 1 章 模型相似理论基础

模型试验方法是研究流体运动的重要手段之一。水力模型试验的实质,就是针对要研究的水流现象,依据工程设计或实际工程(原型)按一定比例缩小制作成模型,在模型上模拟水流现象,进行试验量测,得出试验数据,总结分析,最后再换算成实际工程的成果。

设计和制作的模型,应保证模型与原型的水流现象相似,模型中的试验成果需换算为原型成果,这些均须借助于模型相似理论。

## 1.1 流动相似

要做到模型与原型的水流现象相似,并且把模型试验结果换算至原型,则模型与原型须做到几何相似、运动相似及动力相似,初始条件及边界条件亦应相似。在下面的叙述中,原型中的物理量注以下标 p,模型中的物理量注以下标 m。

### 1.1.1 几何相似

几何相似是指原型和模型的线性变量间存在着固定的比例关系,即对应的线性长度的比值相等。设  $l_p$  为原型的线性长度,  $l_m$  为模型的线性长度,则长度比尺(或线性比尺)为

$$\lambda_l = \frac{l_p}{l_m} \quad (1-1)$$

由此可推导出面积比尺和体积比尺,即

$$\lambda_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{l_p^2}{l_m^2} = \lambda_l^2 \quad (1-2)$$

$$\lambda_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{l_p^3}{l_m^3} = \lambda_l^3 \quad (1-3)$$

### 1.1.2 运动相似

运动相似是指原型和模型两个流动中的相应质点沿着几何相似的轨迹运动,而且运动相应距离的相应时间比值相等。或者说,当两个流动的速度场(或加速度场)几何相似时,则两个流动就运动相似。因此,时间比尺、速度比尺、加速度比尺分别表示为

$$\lambda_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (1-4)$$

$$\lambda_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{l_p/t_p}{l_m/t_m} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} \quad (1-5)$$

$$\lambda_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{v_p/t_p}{v_m/t_m} = \frac{\lambda_v}{\lambda_t} = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2} \quad (1-6)$$

### 1.1.3 动力相似

动力相似是指原型和模型相应点处流体质点所受的同名力的方向相同且具有同一比值。

当动力相似时,模型与原型相应点处质点的同名力  $F$  (如重力  $G$ ,黏滞力  $T$ ,压力  $P$ ,表面张力  $S$ ,弹性力  $E$ ,惯性力  $I$ ) 的比尺相等,则力的比尺表示为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{G_p}{G_m} = \frac{T_p}{T_m} = \frac{P_p}{P_m} = \frac{S_p}{S_m} = \frac{E_p}{E_m} = \frac{I_p}{I_m} \quad (1-7)$$

或

$$\lambda_F = \lambda_G = \lambda_T = \lambda_P = \lambda_S = \lambda_E = \lambda_I \quad (1-8)$$

以上三种相似是模型和原型两流动保持完全相似的重要特征。几何相似是运动相似和动力相似的前提,动力相似是决定模型和原型流动相似的主导因素,运动相似是几何相似和动力相似的具体表现。

### 1.1.4 初始条件和边界条件的相似

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、密度、温度等运动要素是否随时间变化对其后的流动过程起重要作用,因此要使模型与原型中的流动相似,就应使其初始状态的运动要素相似。在非恒定流中,必须保证流动各运动要素初始条件的相似;在恒定流中,无须考虑初始条件。

边界条件同样是影响流动过程的重要因素。边界条件是指模型和原型中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,则模型中对应的部分也应是固体壁面;原型中是自由液面,则模型中对应部分也应是自由液面。

## 1.2 模型相似准则

### 1.2.1 一般相似准则

对于相似流动,各比尺 ( $\lambda_l, \lambda_t, \lambda_v, \dots$ ) 的选择并不是任意的,它们之间存在着确定的关系,可以通过牛顿相似定律表述。

作用于流体中任一质点上诸力的合力可以用质量和加速度的乘积来表示,即牛顿第二定律  $F = ma$ 。于是,力的比尺可表示为

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{(ma)_p}{(ma)_m} = \frac{(\rho Va)_p}{(\rho Va)_m} = \lambda_\rho \lambda_l^3 \lambda_t \lambda_v^{-2} = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$$

或写为

$$\frac{\lambda_F}{\lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2} = 1 \quad (1-9)$$

式(1-9)也可改写为

$$\frac{F_p}{\rho_p l_p^2 v_p^2} = \frac{F_m}{\rho_m l_m^2 v_m^2} \quad (1-10)$$

式中,  $\frac{F}{\rho l^2 v^2}$  为无量纲数, 称为牛顿数(或牛顿相似准数), 以  $Ne$  表示。式(1-10)表明, 两流动的动力相似, 归结为牛顿数相等, 即

$$(Ne)_p = (Ne)_m \quad (1-11)$$

上式称为牛顿相似准则, 它是流动相似的一般准则。

自然界的水流运动一般都受到多种力的作用(如重力、黏滞力……), 但在不同的流动现象中, 这些力的影响程度有所不同。要使流动完全满足牛顿相似准则, 就要求作用在相应点上各种同名力具有相同比尺。但由于各种力的性质不同, 影响它们的因素不同, 实际上很难做到这一点。在某一具体流动中占主导地位的力往往只有一种, 因此在模型试验中只要让这种力满足相似条件即可。这种相似虽然是近似的, 但实践证明, 结果是令人满意的。下面分别介绍只考虑一种主要作用力的相似准则。

### 1.2.2 重力相似准则(弗劳德准则)

当作用在流体上的外力主要为重力时, 只要将重力代替牛顿相似准则中的  $F$ , 就可求出只考虑重力作用的流动相似准则。

因重力  $G = mg = \rho g V$ , 作用于模型和原型的两流动相应质点的重力成比例, 则

$$\lambda_G = \frac{G_p}{G_m} = \frac{m_p g_p}{m_m g_m} = \frac{\rho_p l_p^3 g_p}{\rho_m l_m^3 g_m} = \lambda_\rho \lambda_l^3 \lambda_g$$

根据式(1-8)  $\lambda_F = \lambda_G$  和式(1-9), 则

$$\lambda_\rho \lambda_l^3 \lambda_g = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$$

即

$$\frac{\lambda_v^2}{\lambda_g \lambda_l} = 1 \quad (1-12)$$

或 
$$\frac{v_p^2}{g_p l_p} = \frac{v_m^2}{g_m l_m}$$

开方后有

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} \quad (1-13)$$

式中,  $\frac{v}{\sqrt{gl}}$  为无量纲数, 称为弗劳德数, 以  $Fr$  表示, 即

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$$

式(1-13)用弗劳德数表示, 即

$$(Fr)_p = (Fr)_m \quad (1-14)$$

式(1-14)表明, 在仅考虑重力作用的相似系统, 其弗劳德数应相等, 称为重力相似准则, 或称弗

劳德准则。

### 1.2.3 黏滞力相似准则(雷诺准则)

当作用力主要为黏滞力时,则作用于模型和原型的两流动相应的黏滞力成比例,根据牛顿内摩擦定律,黏滞力  $T = \mu A \frac{dv}{dy}$ ,考虑液体动力黏滞系数  $\mu$  和运动黏滞系数  $\nu$  的关系  $\mu = \rho\nu$ ,则

$$\lambda_T = \frac{T_p}{T_m} = \lambda_\rho \lambda_\nu \lambda_l^2 \lambda_v \lambda_l^{-1} = \lambda_\rho \lambda_\nu \lambda_l \lambda_v$$

根据式(1-8)  $\lambda_F = \lambda_T$  和式(1-9),则  $\lambda_\rho \lambda_\nu \lambda_l \lambda_v = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$ ,即

$$\frac{\lambda_\nu \lambda_l}{\lambda_v} = 1 \quad (1-15)$$

或写成

$$\frac{v_p l_p}{\nu_p} = \frac{v_m l_m}{\nu_m}$$

式中,  $\frac{vl}{\nu}$  为无量纲数,称为雷诺数,以  $Re$  表示,即

$$(Re)_p = (Re)_m \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,在仅考虑黏滞力作用的相似系统,其雷诺数应相等,称为黏滞力相似准则,或称雷诺准则。

### 1.2.4 欧拉准则

当作用力主要为压力时,作用于模型和原型的相应质点上的动水压力成比例。压力  $P = pA$ ,  $p$  为压强,  $A$  为面积。所以

$$\lambda_P = \frac{P_p A_p}{P_m A_m} = \lambda_p \lambda_l^2$$

根据式(1-8)  $\lambda_F = \lambda_P$  和式(1-9),则  $\lambda_p \lambda_l^2 = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$ ,即

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

或写成

$$\frac{P_p}{v_p^2 \rho_p} = \frac{P_m}{v_m^2 \rho_m}$$

式中,  $\frac{P}{v^2 \rho}$  为无量纲数,称为欧拉数,以  $Eu$  表示,则

$$(Eu)_p = (Eu)_m \quad (1-18)$$

式(1-18)表明,在仅考虑动水压力作用的相似系统,其欧拉数应相等,称为欧拉准则。

### 1.2.5 表面张力相似准则(韦伯准则)

当作用力主要为表面张力时,根据表面张力  $S = \sigma l$ ,  $\sigma$  为单位长度的表面张力,则力比尺

写为

$$\lambda_S = \lambda_\sigma \lambda_l$$

根据式(1-8)  $\lambda_F = \lambda_S$  和式(1-9), 则  $\lambda_\sigma \lambda_l = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$ , 即

$$\frac{\lambda_\rho \lambda_l \lambda_v^2}{\lambda_\sigma} = 1 \quad (1-19)$$

或写为

$$\frac{\rho_p l_p v_p^2}{\sigma_p} = \frac{\rho_m l_m v_m^2}{\sigma_m}$$

式中, 韦伯数  $We = \frac{\rho l v^2}{\sigma}$ , 所以

$$(We)_p = (We)_m \quad (1-20)$$

式(1-20)表明, 在仅考虑表面张力作用的相似系统, 其韦伯数相等, 称为韦伯准则。

### 1.2.6 弹性力相似准则(柯西准则)

当作用力主要为弹性力时, 因弹性力  $E$  可表示为  $E = Kl^2$ ,  $K$  为体积弹性系数, 则

$$\lambda_E = \lambda_K \lambda_l^2$$

根据式(1-8)  $\lambda_F = \lambda_E$  和式(1-9), 则  $\lambda_K \lambda_l^2 = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2$ , 即

$$\frac{\lambda_\rho \lambda_l^2}{\lambda_K} = 1 \quad (1-21)$$

或写成

$$\frac{\rho_p v_p^2}{K_p} = \frac{\rho_m v_m^2}{K_m}$$

式中, 柯西数  $Ca = \frac{\rho v^2}{K}$ , 所以

$$(Ca)_p = (Ca)_m \quad (1-22)$$

式(1-22)表明, 在仅考虑弹性力作用的相似系统, 其柯西数应相等, 称为柯西准则。

## 1.3 模型设计理论

在进行水力模型试验之前, 应首先依据相似理论进行模型设计, 计算模型各物理量的比尺。当长度比尺确定后, 根据占主导地位的作用力去选择相应的相似准则, 确定模型中各物理量的比尺。例如, 当重力为主时, 选择弗劳德准则设计模型; 当黏滞力为主时, 选择雷诺准则设计模型。

### 1.3.1 重力起主导作用的水力模型

对于重力起主导作用的流动, 应保证模型和原型的弗劳德数相等, 即按弗劳德准则设计模型。由式(1-12)

$$\frac{\lambda_v^2}{\lambda_g \lambda_l} = 1$$

可得出流速比尺

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_g \lambda_l}$$

通常重力加速度比尺  $\lambda_g = 1$ , 所以

$$\lambda_v = \lambda_l^{1/2} \quad (1-23)$$

流量比尺

$$\lambda_Q = \lambda_A \lambda_v = \lambda_l^2 \lambda_l^{1/2} = \lambda_l^{5/2} \quad (1-24)$$

时间比尺

$$\lambda_t = \lambda_l / \lambda_v = \lambda_l / \lambda_l^{1/2} = \lambda_l^{1/2} \quad (1-25)$$

力的比尺

$$\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_l^2 \lambda_v^2 = \lambda_\rho \lambda_l^2 (\lambda_l^{1/2})^2 = \lambda_\rho \lambda_l^3 \quad (1-26)$$

当模型和原型的流体相同时,  $\lambda_\rho = 1$ , 则上式为  $\lambda_F = \lambda_l^3$ 。

其他量的比尺列于表 1-1。

表 1-1 各相似准则的模型比尺关系 ( $\lambda_\rho = 1, \lambda_v = 1$ )

名称	比尺			
	弗劳德准则(重力)	雷诺准则(黏滞力)	韦伯准则(表面张力)	柯西准则(弹性力)
线性比尺 $\lambda_l$	$\lambda_l$	$\lambda_l$	$\lambda_l$	$\lambda_l$
面积比尺 $\lambda_A$	$\lambda_l^2$	$\lambda_l^2$	$\lambda_l^2$	$\lambda_l^2$
体积比尺 $\lambda_V$	$\lambda_l^3$	$\lambda_l^3$	$\lambda_l^3$	$\lambda_l^3$
流速比尺 $\lambda_v$	$\lambda_l^{1/2}$	$\lambda_l^{-1}$	$\lambda_\sigma^{1/2} \lambda_l^{-1/2}$	$\lambda_K^{1/2}$
流量比尺 $\lambda_Q$	$\lambda_l^{5/2}$	$\lambda_l$	$\lambda_\sigma^{1/2} \lambda_l^{2/3}$	$\lambda_K^{1/2} \lambda_l^2$
时间比尺 $\lambda_t$	$\lambda_l^{1/2}$	$\lambda_l^2$	$\lambda_\sigma^{1/2} \lambda_l^{2/3}$	$\lambda_K^{-1/2} \lambda_l$
力的比尺 $\lambda_F$	$\lambda_l^3$	$\lambda_l^0 = 1$	$\lambda_\sigma \lambda_l$	$\lambda_K \lambda_l^2$
压强比尺 $\lambda_p$	$\lambda_l$	$\lambda_l^{-2}$	$\lambda_\sigma \lambda_l^{-1}$	$\lambda_K$
功的比尺 $\lambda_W$	$\lambda_l^4$	$\lambda_l$	$\lambda_\sigma \lambda_l^2$	$\lambda_K \lambda_l^3$
功率比尺 $\lambda_N$	$\lambda_l^{3.5}$	$\lambda_l^{-1}$	$\lambda_\sigma^{3/2} \lambda_l^{1/2}$	$\lambda_K^{3/2} \lambda_l^2$

### 1.3.2 黏滞力起主导作用的水力模型

对于黏滞力起主导作用的流动, 应保证模型和原型的雷诺数相等, 即按雷诺相似准则设计模型。由式(1-15)

$$\frac{\lambda_v \lambda_l}{\lambda_\nu} = 1$$

可得流速比尺为

$$\lambda_v = \lambda_\nu \lambda_l^{-1} \quad (1-27)$$

流量比尺、时间比尺和力的比尺分别为

$$\lambda_Q = \lambda_v \lambda_l \quad (1-28)$$

$$\lambda_t = \lambda_l^2 \lambda_v^{-1} \quad (1-29)$$

$$\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_v^2 \quad (1-30)$$

若试验时模型采用与原型相同的流动介质,  $\lambda_v = 1, \lambda_\rho = 1$ , 则

$$\lambda_v = \lambda_l^{-1}, \lambda_Q = \lambda_l, \lambda_t = \lambda_l^2, \lambda_F = 1, \dots$$

其他量的比尺列于表 1-1。

### 1.3.3 同时考虑重力和黏滞力的水力模型

对于重力和黏滞力同时起主要作用的水流运动,若保证模型和原型中的重力和黏滞力同时相似,应同时满足弗劳德准则和雷诺准则。

由弗劳德准则,重力作用要求流速比尺  $\lambda_v = \lambda_l^{1/2}$ ;由雷诺准则,黏滞力作用要求流速比尺  $\lambda_v = \lambda_\rho \lambda_l^{-1}$ 。重力和黏滞力同时作用,上述流速比尺必须同时成立,则有

$$\lambda_l^{1/2} = \lambda_\rho \lambda_l^{-1}$$

或写为

$$\lambda_v = \lambda_l^{1.5} \quad \text{或} \quad \nu_m = \frac{\nu_p}{\lambda_l^{1.5}} \quad (1-31)$$

上式表明,要实现重力与黏滞力同时相似,则要求模型中液体运动黏滞系数  $\nu_m$  是原型运动黏滞系数  $\nu_p$  的  $1/\lambda_l^{1.5}$ ,这显然是难于实现或很不经济的。若模型与原型为同一介质,即  $\lambda_\rho = 1$ ,只有当  $\lambda_l = 1$  时,式(1-31)才能满足,即为原型。因此,一般说来,同时满足上述两个相似准则的模型是不易做到的。

但在水流处于紊流阻力平方区时,情况则有所不同。我们知道,雷诺数  $Re$  是判别流动形态的标准, $Re$  不同,流动形态就不同。不同的流动形态,黏滞力对流动阻力的影响不同。当  $Re$  超过某一数值后进入紊流阻力平方区,阻力系数就不再随  $Re$  而变化。也就是,在一定的  $Re$  范围内,阻力的大小与  $Re$  无关,这个流动范围称为自模区。在这种情况下,只要维持模型水流处于阻力平方区,就只需保持重力相似( $Fr$  相等),即可获得相似的水流运动。

许多实际流动通常属于自模区,在这个区的阻力相似就不必要求  $Re$  相等。明渠流动大都属于自模区,因此河流模型一般按弗劳德准则设计,同时只要求模型水流进入自模区,不要求  $Re$  相等。

### 1.3.4 模型设计应注意的问题

在进行水力模型试验时,首先确定该水力现象中起主要作用的力,选定相似准则,在确定几何比尺后进而计算模型各物理量的比尺。选择几何比尺,除了考虑试验期限、经费、占用场地、实验室供水能力及量测技术精度等,还应注意以下事项。

(1)流态相似。大多数水力模型试验采用弗劳德准则。当按弗劳德准则设计模型时,模型几何比尺的选择要确保模型水流流态与原型水流流态相似,否则就不能保证水流相似。

(2) 糙率相似。在水力模型试验的许多情况中(例如研究溢流坝的流量系数、上下游水流的衔接形式及消能工的效果等),由于结构物纵向长度较短(高溢流坝除外),局部阻力起主导作用,保证模型的几何相似即可近似达到阻力相似(因素流中局部阻力主要与几何形状有关)。此外,在港工模型试验中,由于在波浪运动中黏滞力的影响较小,通常可不考虑。在以上所提到的情况中,重力起主要作用,因此按弗劳德准则设计的模型可以适当放宽糙率相似的要求,对水力模型试验的结果不致产生太大的影响。

但是,在河工模型、高坝溢流及船闸输水廊道等的试验中,则必须考虑沿程阻力的影响,即在模型中应当保证模型过流面粗糙的相似。

欲实现水流的阻力相似,须使模型与原型中的水流阻力系数相等。在紊流中的阻力系数,根据曼宁公式

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

即

$$\lambda_C = \lambda_n^{-1} \lambda_R^{1/6}$$

对正态模型,  $\lambda_R = \lambda_l$ , 则上式变为

$$\lambda_C = \lambda_n^{-1} \lambda_l^{1/6}$$

若保证相似,则  $\lambda_C = 1$ , 故

$$\lambda_n = \lambda_l^{1/6} \quad (1-32)$$

或

$$n_m = \frac{n_p}{\lambda_l^{1/6}} \quad (1-33)$$

式(1-32)或式(1-33)说明,欲使模型与原型的过流面粗糙保持相似,则模型糙率  $n_m$  应是原型糙率  $n_p$  的  $1/\lambda_l^{1/6}$ , 此时要求模型过流面很光滑,但由于模型材料或技术条件的限制,在有些情况下是不易做到的。

因此,在确定模型几何比尺的过程中,应当考虑糙率比尺的限制。

(3) 对主导作用力为重力的流动,采用按弗劳德准则设计模型,忽略黏性力。但实际上黏性力确实存在,它对试验结果有一定影响,故在模型设计时必须考虑。一般要求模型中雷诺数达到某一定值,以保证模型流动在阻力平方区把黏性力的影响限制在可忽略的范围,这也是几何比尺选择的限制条件。

(4) 在确定模型几何比尺时,应尽量保证模型水深不能过小,否则流动受表面张力的影响。例如,模型水深  $h_m > 0.05 \text{ m}$ 。

(5) 试验时,应遵守相关的模型试验规范。

## 1.4 本章总结

模型相似理论是进行模型设计和模型试验的基础。本章介绍的模型相似理论是进行一般



水力模型试验的基础,但是对于某些具有交叉学科性质的模型试验,还缺乏成熟的模型相似关系,应针对不同情况,从理论上完善模型相似关系。对于一般水利工程,因水流运动受重力主导,因此其水力模型按弗劳德准则进行设计。