河工模型试验

李昌华　金德春　著

人民交通出版社

河工模型试验

李昌华　金德春　著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书对河工模型试验作了比较全面的论述。作者根据相似理论及泥沙运动理论，全面探讨了河工模型试验相似律及其实现的条件，并通过实例详细阐述了定床及动床河工模型试验设计方法及试验方法。在后两章扼要论述了河工模型试验室的规划、仪器设备、模型制造以及模型延伸法。本书可作为大专院校教学参考书，亦可供水利、交通科技人员参考使用。

河 工 模 型 试 验

李昌华　金德春　著

人民交通出版社出版

（北京市安定门外和平里）

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

人民交通出版社印刷厂印

开本：850×1168 1/32　印张：8.125　字数：187 千

1 9 8 1 年12月　第 1 版

1 9 8 1 年12月　第 1 版　第 1 次印刷

印数：0001—1,700 册　定价：1.50元

前 言

本书是作者多年从事河工模型试验工作的总结。

全书共分五章。第一章阐述模型试验的理论基础，介绍了相似理论的基本原理及其在河工模型试验中的应用。关于相似的学说，从牛顿至今已有二百多年的历史，直到本世纪四十年代，由苏联学者基尔比切夫（М.В.Кирпичев）院士补充了相似第二定理后，其理论始臻完善。但自从1848年法国科学院院士别尔特兰（J.Bertrand）提出相似第一定理以来，这门学说就开始在方程分析及因次分析两个方向上发展。前一方向苏联领先，后一方向则欧洲走在前面。而最先把方程分析法应用于河工模型试验的是苏联学者蔡克士大（А.П.Зегжда）；在国内则早在五十年代本书作者就曾引用于长江南京段动床模型的设计。目前这个方法在国内已得到广泛应用，有力地推动了我国河工模型试验术的发展。鉴于基尔皮切夫院士的原著比较抽象，故作者在本章内根据自己的体会作了比较浅显的介绍，希望有助于这个理论的推广应用。

第二章根据相似理论及水动力学的现有成就全面探讨了定床河工模型的相似条件，详细研究了河工模型试验的各种限制条件及设计方法。最后并举二实例详细阐明了定床河工模型的设计及试验方法。

第三章根据相似理论及当代泥沙运动原理，评论了国内外动床河工模型律的得失，介绍了我们自己的动床模型律及试验方法，最后通过四个实例详细阐明动床河工模型设计及试验的全过程。这四个实例，是国内动床模型试验中比较成功的几个例子，概括了航运、水力发电以及灌溉工程等各个方面的问题。为了更

好的说明问题，我们把一些特殊处理方法以及在实际工作中累积的经验都放在实例中加以表述，是很有实用价值的，希望读者勿因实例太具体而加以忽视。

第四章论述动床模型延伸法的理论基础及试验方法。对于一般动床河工模型所不能解决的某些问题，延伸法提供了一种解决问题的补充手段。

第五章叙述河工模型试验室的规划设计、供水设备、测验仪器以及模型制造等有关问题；介绍了在模型制造以及试验工作中所累积的主要经验并择要讨论了最新仪器设备的优劣及其应用经验。这对于实际做试验以及新试验室的筹建等都有参考价值。

本书第一、第二及第三章由李昌华负责撰写，第四及第五章由金德春负责撰写，完成后在互相校阅的基础上统一全书。由于我们水平有限，疏漏错误在所难免，诚恳希望得到批评指正。

最后，作者对撰写本书时南京水利科研所领导上的支持以及协助编写工作的我们的同事们表示衷心的感谢。

作　者

1981年5月

目　录

第一章　模型试验的理论基础

第一节　相似的一般概念

相似的概念最初产生在初等几何学中。初等几何学中三角形相似的定义是：两个三角形，如果它们的对应角相等，对应边成比例，则是相似的，如图1-1，即

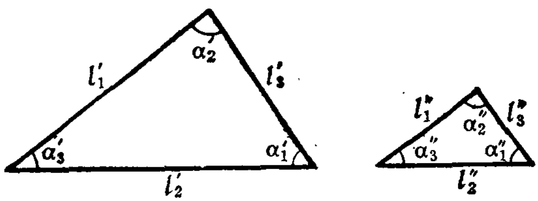

图　1-1

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{l_1'}{l_1''}=\dfrac{l_2'}{l_2''}=\dfrac{l_3'}{l_3''}=\alpha_l\\ \alpha_1'=\alpha_2'',\ \ \alpha_2'=\alpha_2'',\ \ \alpha_3'=\alpha_3''\end{array}\right\}\tag{1-1}$$

式中　α_l——比例常数。

由于任何物理相似在形式上都可以化为几何相似，因此上述几何相似概念也可推广到其他物理概念中去。例如：

时间相似：指对应的时间间隔成常数比例，水流流量过程线即其一例，如图1-2，即

$$\frac{t_1'}{t_1''}=\frac{t_2'}{t_2''}=\cdots\cdots=\frac{t'}{t''}=\alpha_t\tag{1-2}$$

式中　α_t——比例常数。

运动相似：运动相似系指速度场的几何相似。它表现为各对

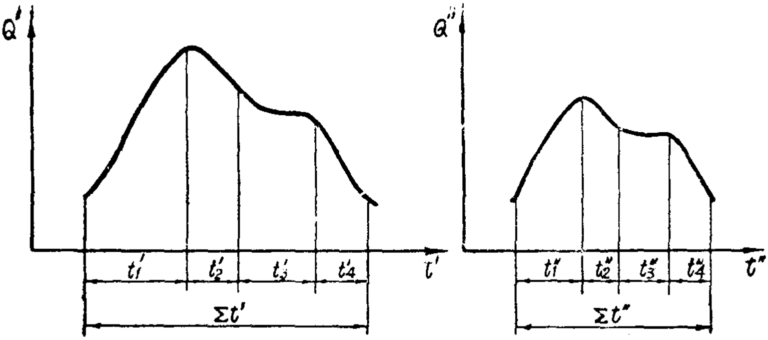

图 1-2

应点在对应时刻上速度的方向一致，大小成常数比例，如图1-3，即

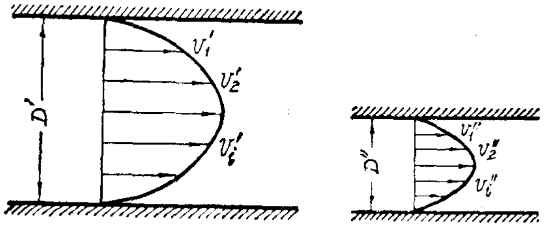

图 1-3

$$\frac{v_1'}{v_1''}=\frac{v_2'}{v_2''}=\cdots\cdots\frac{v_n'}{v_n''}=\alpha_v \qquad (1\text{-}3)$$

式中 α_v——比例常数。

动力相似：动力相似系指力场的几何相似。它表现为所有作用力都有相对应的方向，它们的大小相应地成比例。具有几何相似的两个明渠水流的作用力图（图1-4）即其一例，即

$$\frac{f_a'}{f_a''}=\frac{f_g'}{f_g''}=\frac{f_R'}{f_R''}=\frac{f_p'}{f_p''}=\alpha_f$$

式中 α_f——比例常数。

同理，如考虑到水流内部还作用有粘滞阻力，紊动阻力，表面张

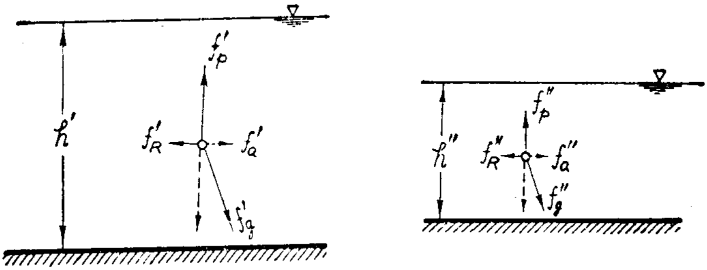

图 1-4

力等则有：

$$\frac{f'_a}{f''_a}=\frac{f'_g}{f''_g}=\frac{f'_\mu}{f''_\mu}=\frac{f'_\tau}{f''_\tau}=\frac{f'_\sigma}{f''_\sigma}=\alpha_f \qquad (1\text{-}4)$$

式中 f_a——惯性力；

f_g——重力；

f_μ——粘滞阻力；

f_τ——紊动阻力；

f_σ——表面张力；

f_R——总阻力。

含沙量场相似：含沙量场相似系指含沙量场的几何相似，见图1-5，它表现为各对应点上含沙量成常数比例。

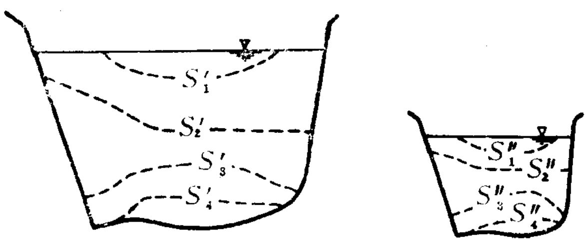

图 1-5

即

$$\frac{S'_1}{S''_1}=\frac{S'_2}{S''_2}=\cdots\cdots\frac{S'_i}{S''_i}=\alpha_s \qquad (1\text{-}5)$$

式中　α_s——比例常数。

由此可见，物理相似可以形式地归结为向量场及标量场的几何相似。

实际上，除了物理过程而外，相似的概念同样可推广到化学过程等其他自然现象中去。因此，在更普遍的意义上，相似的定义应表述为：在几何相似的物系中，进行同一类型的过程，当其中表征现象的同类量互成常数比例时，则这种物系称为互相相似的现象。

顺便指出，所谓同一类型的过程是指能用同样形式和同样内容的微分方程来描述的过程。

在数学上，相似的定义可表述为

$$\frac{l'}{l''}=\alpha_l \quad \frac{t'}{t''}=\alpha_t \quad \frac{v'}{v''}=\alpha_v \quad \frac{f'}{f''}=\alpha_f \quad \frac{S'}{S''}=\alpha_s \tag{1-6}$$

式中一撇与二撇依次表示第一和第二现象。比例系数（也可称比尺）α_l，α_t，α_v，α_s，α_f 等称为相似常数，对每一种量，相似常数有其独特的数值。在模拟物理现象时，相似常数就是模型的比尺，即：

α_l——几何比尺；　　α_f——力的比尺；

α_t——时间比尺；　　α_s——含沙量比尺。

α_v——速度比尺；

对相似的量在任何形式下的比例，相似常数都保持着自己的数值。例如，若 l' 及 l'' 为两相似系统的相应长度，则必成立下述等式

$$\frac{l'}{l''}=\frac{l'_1}{l''_1}=\frac{l'_2}{l''_2}=\frac{l'_0}{l''_0}=\frac{l'_2-l'_1}{l''_2-l''_1}=\frac{\Delta l'}{\Delta l''}=\alpha_L \tag{1-7}$$

对于微分形式的量，由于其性质仍可作为差数来研究，因此得

$$\frac{dl'}{dl''}=\frac{\Delta l'}{\Delta l''}=\alpha_L \tag{1-8}$$

一般说来，互相相似的现象，通常并不只有两个，而是有很多个。因此我们可以说，它们组成了相似现象的群。在相似现象群中，以某一现象做为标本，而将相似现象群中的所有现象与之比较时，可以看出：当相似于标本的一个现象依次转换到另一个现象时，其每次转换的常数都有不同的数值。这些数值，在相似于标本的那个系统的所有点上，是一个常数。

骤然看来，所有相似常数，好像是可以任意选择的，但实际上并非如此，它们不是互不相关而是存在着一定的联系。因为凡是自然界的任何现象，在许多情况下，可以用方程式的形式来描述，相似常数间的关系，应服从这个方程式，亦即应根据这组方程式来推求。这种关系的阐明，就是相似理论[1]的内容，这将在下面几节中加以叙述。

第二节 相似第一定理

相似第一定理是关于相似性质的学说，它讨论已经相似的现象，具有什么性质的问题。这些性质是：

（一）由于相似现象是服从于同一自然规律的现象，因此它们应为文字上完全相同的方程组（包括方程组的单值条件）所描述。

（二）在相似的物系中，用来表示现象特性的同类物理量之比是常数。

如第一现象的任一量用 ϕ' 表示，与其相似的第二个现象的同类量用 ϕ'' 表示，则有

$$\frac{\phi'}{\phi''}=\alpha_{\phi}$$

比例系数 α_{ϕ} 称为量 ϕ 的相似常数。α_{ϕ} 值与座标及时间均无关系。

要指出的是：所谓同类量之间成常数比例是指空间相对应的点在相应的时间而言。

（三）相似现象必发生在几何相似的对象里。这实际上是性质（二）的一个特例——边界上几何特性的相似：

$$\left(\frac{x'}{x''}\right)_{边}=\left(\frac{y'}{y''}\right)_{边}=\left(\frac{Z'}{Z''}\right)_{边}=\alpha_l \qquad (1-9)$$

（四）由于相似现象的同类量之间是成常数比例的（性质二），而由这些量组成的方程组又是相同的（性质一），故各量的比值（相似常数）不是任意的，而是彼此相约束的。下面以牛顿第二定律

$$f=m\frac{dv}{dt}$$

为例来加以说明。

把这个方程式应用到两个相似现象的对应部分。对第一现象的任何一个质点，可有

$$f'=m'\frac{dv'}{dt'} \qquad (1-10)$$

对第二现象的相似点，相应有

$$f''=m''\frac{dv''}{dt''} \qquad (1-11)$$

由于我们现讨论的现象是彼此相似的，故根据性质二可得

$$\left.\begin{aligned} f'&=\alpha_f f''\\ m'&=\alpha_m m''\\ v'&=\alpha_v v''\\ t'&=\alpha_t t'' \end{aligned}\right\} \qquad (1-12)$$

将式(1-12)代入式(1-10)得

$$\frac{\alpha_f\alpha_t}{\alpha_m\alpha_v}f''=m''\frac{dv''}{dt''} \qquad (1-13)$$

比较式(1-13)及(1-11)可见，只有相似常数间符合下述关系：

$$\frac{\alpha_f\alpha_t}{\alpha_m\alpha_v}=1 \qquad (1-14)$$

描述第一现象的方程式(1-13)才与描述第二现象的方程式(1-11)完全一致。

由式(1-14)可见，各相似常数不是任意的，而是为式(1-14)所约束的。否则，描述二个现象的方程就不可能完全一致。

这就是所要说明的各物理量的相似常数之间的约束关系，表示式

$$\alpha = \frac{\alpha_f \alpha_t}{\alpha_m \alpha_v} \tag{1-15}$$

称为相似指标，而式(1-14)则称为决定相似的等式或相似条件。对于相似的现象，相似指标等于1。这种性质，通常称之为“相似第一定理”或“相似正定理”。

这种约束关系，还可表示成另一种形式。将式(1-12)中的相似常数代入式(1-14)，整理之，可得

$$\frac{f't'}{m'v'} = \frac{f''t''}{m''v''}$$

这等式表明，对所有互相相似的现象，综合数群$\frac{ft}{mv}$的数值相同。

上式一般可写为

$$K = \frac{ft}{mv} = \text{idem（不变量）} \tag{1-16}$$

综合数群K称为相似不变量或相似判据。故相似第一定理亦可表述为：对相似的现象，其判据之数值相同。

应当学会很好区别“相似常数”与“相似不变量（判据）”的概念。相似常数在现象的所有点上，保持固定的数值，但当一对相似现象为另一对相似现象所代替时，它就变为另一个数值。而对相似不变量（相似判据）而言，则在系统的不同点上有着不同的数值，但当一个现象转变到与它相似的任何一个现象时，相似不变量（判据）是不改变的。换句话说，它在相似现象群的相

应点上，保持着同一个数值。

第三节 相似第二定理

相似第二定理是关于相似条件的理论，它讨论满足什么条件（必要而且充分）现象才能够相似的问题。这是进行模型试验所必须遵守的条件，因为我们必须使模型内出现的现象相似于原体中的现象。简单说来这些条件是：

（一）由于相似现象是服从同一规律的现象，故都被文字上完全相同的方程组所描述是现象相似的第一个必要条件。因为不然的话，如各个量的变化服从不同的数学关系，则即使开始时存在着相似，而后它也会遭到破坏。

（二）由于单值条件能够从服从同一自然规律的无数现象中区别出某一具体现象，因此若要使某一个具体现象，相似于另一个具体现象，单值条件的相似是第二个必要条件。单值条件决定现象的某一部分性能，假如在这一部分已不相似，则现象就不可能互相相似。

以粘性不可压缩流体的运动为例，其单值条件相似包括：介质物理性质的相似，边界条件（包括边界上的几何相似，出入口处流动图型，如流速分布）及起始条件的相似。

（三）但要确定现象的相似，上述第一及第二两条件还不是充分的。因为在根据关系方程式相同及单值条件相似所得的相似判据中，有一部分系完全由单值量（单值条件所给定的量）所组成；按照第一定理，对于相似的现象，这些判据必须具有同一个数值。因此，由单值量组成的相似判据不变是现象相似的第三个必要条件。相似第二定理认为：在条件（一）及（二）的基础上，再加上这个第（三）条件，就构成了现象相似的充分条件。

为了证明这一点，可以想像有一个第一现象，其性质为已知；而又有一现象，满足上述所有三个条件，这个现象我们称它为第二现象，要证明它相似于第一现象。

上面已经说明，有无数相似于第一现象的现象存在。所有这些现象具有与第一现象相似的单值条件，而其区别只是每个相似现象具有不同的相似常数。这些常数之值可以很不相同的选择，而仅有一个限制，即由之组成的相似指标必需等于1。在这许多相似现象中选择一个现象，其单值量的相似常数与第二现象的相同。

这样一个相似于第一现象的现象，我们称之为第三现象，它显然是存在的，因为它的单值量之相似常数，服从其所组成之相似指标等于1的要求，而其余不属于单值条件所包括的常数，则由其余的指标等于1的条件决定。

现比较第二现象与第三现象。它们的单值量相似常数是相同的，亦即它们的单值条件是相同的，所以它们是同一个现象，因为不可能有具有相同单值条件的不同现象。而由于第三现象相似于第一现象，故第二现象也相似于第一现象。

以粘性不可压缩液体的稳定流动为例，它共有九个相似判据，见第五节式(1-34)，即

$$\frac{gl}{v^2}=\mathrm{idem}$$

$$\frac{vl}{\nu}=\mathrm{idem}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2}=\mathrm{idem}$$

$$\frac{\overline{v_j' v_k'}}{v'^2}=\mathrm{idem}\quad (j,k=1,2,3)$$

但其完全由单值量所组成的相似判据只有下列八个

$$\left.\begin{aligned}&\frac{gl}{v^2}=\text{不变量 (idem)}\\&\frac{vl}{\nu}=\text{不变量 (idem)}\\&\frac{\overline{v_j' v_k'}}{v'^2}=\text{不变量 (idem)}\quad (j,k=1,2,3)\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}17)$$