



# 微型河工模型试验技术与理论基础初探

李文全

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

**摘要:**据Robert. D. Davinroy在美刊《土木工程》1999年7月发表的《微型河工模型技术在密西西比河工程中的运用》一文介绍, 美国陆军工程师团开发的一项新的微型河工模型试验技术已获得了专利。该技术采用大比尺大变率的物理模型模拟河流水流泥沙运动情况, 已在密西西比河、密苏里河等航道整治、鱼类和野生生物的生存环境等项目研究中得到成功运用。该技术在试验周期方面, 可与数学模型相媲美, 而且, 比数学模型更为直观; 在试验精度方面, 可与大型河工模型相比。由于文中对该试验关键技术及其理论基础未作详细介绍, 笔者对其进行初步探索, 以便能为我国目前正在进行的长江航道系统治理工程方案试验研究提供借鉴。

**关键词:** 微型河工模型; 关键技术; 理论基础

中图分类号: TV 83

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0069-05

## Preliminary study on basic principle of micro scale physical selection modeling (MICRO MODELING)

LI Wen-quan

(Changjiang Waterway Institute of Planning, Design and Research, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** In July 1997, Robert Davinroy published his paper *Application of Micro-scale River Engineering Model in Mississippi River* in the journal of *Civil Engineering*, in which he introduced a new patented technique for Micro Scale Physical Modeling. A physical model with relatively big scale and large variability was adapted to simulate hydrodynamics and sediment transport in rivers. This technique has been applied to many research projects successfully, such as channel regulation in Mississippi and Missouri, investigation of living environment of fish and wild animals. The experiment cycle is as short as numerical models and it's more intuitive. Besides it can also provide good accuracy even compared with those large scale river engineering models. Because there are not many details given in his article, we will continue to investigate this technique based on his introduction in order to provide reference for waterway regulation engineering projects of the Yangtze River.

**Key words:** micro scale physical selection modeling of river engineering; key technology; theoretical basis

2000年5月《水利水电快报》第9期报道了Robert D Davinroy<sup>[1]</sup>《微型河工模型技术在密西西比河工程中的应用》。该项模型试验新技术由美国陆军工程师团开发, 已经成功地应用于河床演变及整治工程中, 并于1997年获得了专利。据报道, 微型模型规模之小, 可以放在桌面上一个人进行操作; 其试验周期之短, 整个放水模拟过程

可以在几分钟内完成; 其试验精度之高, 完全可以同大型河工模型相比。微型模型不仅可与数学模型相媲美, 且能够将各类专家, 包括工程师、生物学家、船舶驾驶员、土地所有者、旅游业主或者其他关心河流问题的人们汇集到一起, 直接观察水流泥沙运动情况, 了解工程所产生的正面或负面的影响, 快速、经济地决定工程设计方案。

收稿日期: 2012-07-26

作者简介: 李文全(1966—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事航道整治研究。

由于这种微型河工模型试验技术为专利产品,其试验技术与方法、理论基础、试验中应该注意的问题等均未见详细介绍,本文试图从上述简单的报道中,探讨其理论基础和有关试验技术问题。

## 1 微型河工模型试验技术简介

微型河工模型试验技术早在1994年密西西比河狗牙湾河段(Dogtooth Bend Reach, Mississippi River)航道整治中采用,与当时在维克斯堡水道试验站(The Waterways Experiment Station in Vicksburg)的同河段大型动床模型试验成果相对比,二者精度基本相同。

自1994年以来,美国陆军工程师团圣路易斯分部已经成功地将微型河工模型试验技术推广运用于解决密西西比河航道整治设计、桥墩冲刷、船闸和大坝不利水流条件的改善、引水口的淤积、航道疏浚以及航道整治与鱼类和野生生物的生存环境等工程中。尽管应用实例有限,但是,每个微型模型试验,都有助于将泥沙运动理论和实践相结合,并增进了工程师与关心河流质量问题的其它团体之间的关系。

据介绍,已做微型模型的水平比尺为15 000~600,垂直比尺为1 200~100,变率为5~13。模型用现代复合材料(例如油基黏土、聚苯乙烯和聚丙烯等)制作,模型沙采用密度为 $1.23 \text{ g/cm}^3$ 的轻质塑料沙。自动化控制和高精度测量设备是这项技术的关键——进出口水位流量控制系统,能按任何给定的时间序列自动进行水文模拟,计算机软件用来协调进入模型的含沙水流的流量,用三维激光扫描仪采集模型水深、流速数据,并与原型比较。

与一般大型河工模型一样,模型制作完成后,首先需要进行验证试验。通过调整微型模型的河床纵比降、输沙量,甚至于流量,着重于河床变形相似性验证。一旦模型验证成功,便可以进行河床演变及整治工程方案的试验研究。

## 2 微型河工模型试验理论基础

Robert D Davinroy等认为,微型模型并未严格

遵守相似律,而是着重于模型河床变形与原型河床变形之间的相似性。事实上,模型试验是以相似理论为基础,微型模型与世界各地实验室所做的大型模型属于同一原理,也应在研究的主要问题方面,尽量满足相似论所规定的相似条件,因为模型中河床变形与原型河床变形的相似,是模型中挟沙水流运动规律和运动状态与原型相似的必然结果。

一般来说,按照模型的几何空间起始边界条件以及表达三度流或二度流(指纵剖面中的二度流)的主要运动规律的运动方程式和连续方程式的要求,模型只能做成正态,才能为保证模型与原型的完满相似提供条件,而不能做成变态。但是,由于原型河道的平面尺度往往较大,模型中的水深又不能太小,受种种条件的限制,不得不适当牺牲模型与原型的相似性而将模型做成变态。其实,微型河工模型即为几何变率较大的挟沙水流模型,为了在所研究的主要问题做到与原型的相似,有几个问题是需要认真对待的。

### 2.1 关于微型模型比尺的选择问题

微型模型平面比尺 $\lambda_L$ 和垂直比尺 $\lambda_H$ 的选择与一般大型模型一样,通常需视河道的具体情况而定,包括研究河段的规模、水流流态、研究问题的性质及试验条件等,并考虑其经济性和能否将微型模型放在试验平台上等因素。同时,模型的水深不能过小,以免受表面张力的影响,模型水流也必须与原型水流为同一物理方程式所描述。也就是说,微型模型也必须同时满足以下两个限制条件:

1) 紊流限制条件,模型中水流最小雷诺数 $R_{e_m} > 1\ 000 \sim 2\ 000$ ;

2) 表面张力限制条件,模型最小水深 $H_m > 1.5 \text{ cm}$ 。

关于模型变率 $\eta = \lambda_L / \lambda_H$ 的取值问题,亦即模型能否变态以及变率取多大比较合适,一直是河流动力学研究的老问题,过去有不少学者提出一些判别指标,具有一定应用价值的是,从河道水流二度性(指纵剖面二度性)的相似考虑,克劳斯根据亚林关于水流二度性的简化概念,提出表达河道水流比尺模型变率 $\eta$ 与原型宽深比的粗略关

系式：

$$\eta \leq 0.1 (B_p/H_p) \quad (1)$$

张瑞瑾<sup>[2]</sup>考虑到过水断面的水力半径 $R$ 对模型变态十分敏感，从变态模型水力半径偏离正态模型水力半径的程度考虑，建议采用下式表达水流二度性的模型变态指标

$$D_R = \frac{R_\eta}{R_l} = \frac{\frac{B_p}{H_p} + 2}{\frac{B_p}{H_p} + 2\eta} \quad (2)$$

式中： $R_l$ 为正态模型中的水力半径； $R_\eta$ 为垂向长度比尺与正态模型相等、变率为 $\eta$ 的模型中的水力半径。显然，当 $D_R=1$ 时，模型为正态；当 $D_R<1$ 时，模型为变态。 $D_R<1$ 的程度愈大，则模型偏离原型的程度也愈大。作为参考，笔者建议在模型设计中可考虑 $D_R$ 数据的几个不同区段：1)  $D_R=1.00\sim 0.95$ ，理想区段；2)  $D_R=0.95\sim 0.90$ ，良好区段；3)  $D_R=0.90\sim 0.85$ ，勉可区段。当 $D_R<0.75$ 时，模型是否尚具备与原型的基本相似，是值得怀疑的。

关于河道水流均匀性的模型变态指标，张瑞瑾考<sup>[2]</sup>虑到动能沿程变化对水流稳定性方面的作用，选择了如下表达式

$$D_v = \frac{2\eta H}{L} \left| \frac{v_2^2 - v_1^2}{v_2^2 + v_1^2} \right| \quad (3)$$

式中： $D_v$ 为关于河道水流均匀性的模型变态指标； $v_1$ 、 $v_2$ 分别为间距为 $L$ 的上下两过水断面的平均流速。 $D_v$ 值愈小，模型与原型的相似性愈大。作者初步建议， $D_v$ 值取 $(4\sim 6) \times 10^{-3}$ 可视为模型设计中可以采用的高限值。

对于微型河工模型来说，模型几何变率 $\eta$ 的取值也应该受上述条件的限制。例如，对于枯水河宽1 000 m，平均水深3 m左右的河段来说，若按照式(1)，模型变率最大可以达到30左右；若按照式(2)，当模型水流的二度性处于理想区段时，模型变率不宜超过10，当其相似性处于良好区段时，模型的变率不宜超过20。对此河段，若按上所述微型河工模型的变率取为5~13，是完全可以的。

## 2.2 关于微型模型水流阻力相似问题

一般变态模型在满足惯性力重力比相似条件

下，不能够做到严格满足阻力相似。所以说，变态模型只是一种近似模型，并未要求严格相似，而只要求这种近似无碍于对实际问题的解决。

对于尺度较大的定床模型来说，在模型设计时，在满足惯性力重力比相似的条件下，模型通过加糙或减糙措施，总能够比较满意地达到水面线相似和垂线平均流速沿河宽分布的相似。但对于动床模型来说，即使尺度较大的动床模型，当模型沙选定以后糙率达不到要求时，若模型需要减糙，简直是不可能做到的事情；若模型需要加糙，也是相当困难的。对此，一些科研工作者煞费苦心，寻求加糙方法，有人采取在动床模型床面上插竹木签，也有人采取在水流中拉铁丝等方法，以增加模型中的水流阻力系数，使流速降低，适应相似律的要求。但是，在模型床面上采取插竹木签或在水流中拉铁丝的方法对流场干扰较大，搅乱了模型中水流整体紊动结构和紊动源，对挟沙水流运动的相似性影响不可忽视。

变态模型的糙率 $n_m = n_p \eta^{2/3} / \eta_L^{1/6}$ ，假定原型河道糙率 $n_p = 0.025\sim 0.045$ （这是一般河道中常见的糙率，有的甚至于更大），若取微型模型的垂直比尺 $\lambda_v = 100$ ，水平比尺 $\lambda_L = 1\ 000$ ，模型变率 $\eta = 10$ ，则要求模型糙率 $n_m = 0.037\sim 0.066$ 。对于定床模型来说，这样大的糙率，想通过一般加糙措施达到水面线的相似是很难做到的；若对于动床微型河工模型来说，一般选用轻质塑料沙作模型沙，在床面产生沙波后，糙率大约在0.013~0.023，若不采取特殊措施，就不可能做到模型水流运动阻力的相似。

此处笔者注意到在《微型河工模型技术在密西西比河工程中的应用》一文中，提到微型模型制作完成后，首先需要进行验证试验。通过调整微型模型的河床纵比降、输沙量、甚至于流量，着重于河床变形相似性验证。这是微型模型调整河床水流阻力相似和河床变形相似的关键性技术。事实上，这种通过调整模型试验流量或河床比降以达到水流阻力相似的方法，在我国和世界其它各地的一些大型河工模型试验中早已使用过，并取得了较为满意的成果，前者称为流量变态法，后者称为比降变态法。

1) 流量变态法。

流量变态法，即当模型水流阻力达不到设计要求时，模型水面线便会产生偏离，为了达到水面线的相似，通过适当增加或减少试验流量的方法，可以做到水面线的相似。但是，这种做法，不仅使模型中水流运动的惯性力重力比相似产生了偏离，而且惯性力阻力比相似也产生了偏离。因为从相似理论上讲，按照曼宁流速公式模型糙率比尺可写为

$$\lambda_n = \frac{1}{\lambda_v} \frac{\lambda_L^{2/3}}{\eta^{7/6}} = \frac{n_p}{n_m} \tag{4}$$

式中： $n_p, n_m$ 分别为原型和模型的糙率。设模型中的流速和弗氏数分别为 $v_m$ 和 $F_{r_m}$ ，当适当改变试验流量后，可以使模型水面线达到相似，模型中的水深达到了理论值，但模型中的流速变为 $v'_m$ ，糙率变为 $n'_m$ ，弗氏数变为 $F'_{r_m}$ ，此时，模型实际糙率比尺为

$$\lambda'_n = \frac{1}{\lambda'_v} \frac{\lambda_L^{2/3}}{\eta^{7/6}} = \frac{n_p}{n'_m} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可得  $\frac{n'_m}{n_m} = \frac{\lambda'_v}{\lambda_v} = \frac{F_{r_m}}{F'_{r_m}}$ ，即

$$n'_m = n_m \frac{F_{r_m}}{F'_{r_m}} \tag{6}$$

由式(6)可以看出，若模型中增加试验流量，将会产生 $v'_m > v_m$ 和 $F'_{r_m} > F_{r_m}$ 的情况，这便得出 $n'_m < n_m$ 的结论。反之，若模型中减少试验流量，将会得出 $n'_m > n_m$ 的结论。显然，欲采用调整试验流量的办法满足水面线相似要求时，模型中惯性力阻力比相似和惯性力重力比相似同时发生了偏离，且惯性力阻力比相似随着惯性力重力比相似的偏大而相应偏小，随着惯性力重力比相似的偏小而偏大。

既然采用通过调整试验流量的办法解决水面线相似时存在以上问题，是否在模型试验中就不能运用此种方法呢？回答是否定的。因为前面已述，变态模型只是一种近似模型，并未要求严格相似，只要求这种近似无碍于对实际问题的解决。在模型设计和试验中，对于具体问题要具体分析，抓住主要矛盾，对属于次要矛盾的相似条件允许略有所偏离。例如，对于水流沿程变化剧烈或受建筑物干扰较大的河段，在水流动力平衡

方程式中，惯性力所占比重较大，不能忽略，而阻力形似条件允许有所偏离；相反，对于沿程水流要素的变化比较缓慢，受建筑物干扰较小的河段，阻力相似条件不能忽略，而惯性力相似条件允许有所偏离。关于允许偏离的程度，至今无人明确规定，某些实践经验表明，在平原河流中，当允许惯性力重力比相似偏离时，其偏离程度不应大于50%，同时，模型弗汝德数和原型弗汝德数应同为急流或缓流区内。至于阻力重力比相似的偏离，应尽可能使由这种偏离引起的水流要素的偏离处在观测精度范围之内，一般不超过5%。

2) 比降变态法<sup>[3-4]</sup>。

这里讲的比降变态法，不同于几何变态模型引起的比降变态。一般正态模型的比降等于原型比降，变率为 $\eta$ 的几何变态模型，其比降等于原型比降的 $\eta$ 倍。这里所述的比降变态法，无论是指在正态或变态模型试验中，在不改变模型垂直比尺和水平比尺的情况下，人为地将其比降进行调整，或者说，给模型另外附加一个比降，使模型水面线达到相似。

假定将模型比降调整 $m$ 倍，即有

$$\lambda_J = \frac{J_p}{J_m} = \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \frac{1}{m} = \frac{1}{\eta m}$$

或写为

$$J_m = J_p \eta m \tag{7}$$

显然， $m$ 取值的大小，可根据模型验证中水面线偏离的程度来决定。若模型水面线相似时，则不需要调整模型比降，即 $m=1$ ；当模型水面线偏高时，表明模型阻力偏大，流速偏小，此时需要加大模型比降，以增大模型流速，则取 $m>1$ 的值；相反，若模型水面线偏低时，表明模型阻力偏小，流速偏大，此时需要减小模型比降，以减小模型流速，则取 $m<1$ 的值。

在模型比降需要调整时，作为初步尝试， $m$ 值可由曼宁流速表达式导出

$$\lambda_u = \frac{1}{\lambda_n} \lambda_H^{2/3} \left( \frac{\lambda_H}{m \lambda_L} \right)^{1/2} \tag{8}$$

在满足惯性力重力比相似条件下

$$m = \frac{\lambda_H^{4/3}}{\lambda_L \lambda_n^2} \tag{9}$$

通过调整微型河工模型的河床比降来达到水

面线相似，是解决模型阻力相似问题的一种重要途径。微型河工模型建造在试验平台上，具备调整河床比降的条件，这是微型模型的优点，一般大型河工模型难以做到。但是，对于一般几何变态模型存在的问题，采用比降变态法后，依然存在。

采用比降变态法调整模型水流阻力的方法，其优点之一，有利于保持水流紊动源结构的相似性，这对挟沙水流运动的相似性至关重要。因为微型模型变率较大，模型的比降随变率而大幅度地增加，若采用一般在模型河底大量加糙的方法，将高流速区逼向水面，借以减小因模型几何变态造成的水面线和流速分布的不相似，但很容易破坏河床紊动源的相似性和泥沙运动的相似性。

采用比降变态法的另一个优点是，当模型几何比尺和模型沙选定之后，若模型沙不满足起动相似要求时，可以通过调整模型比降，达到起动相似要求。一般泥沙起动流速可用下式表达

$$u_c = k \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left( \frac{H}{d} \right)^{1/7}$$

$$\text{即 } \lambda_{u_c} = \lambda_k \lambda_{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}}^{1/2} \lambda_d^{1/2} \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_d} \right)^{1/7} \quad (10)$$

在满足惯性力重力比相似的条件下

$$\lambda_{u_c} = \lambda_u \quad (11)$$

当需要通过调整模型比降使模型沙达到起动相似和水流运动阻力相似时，可通过联解式(8)，(10)和(11)，得

$$m = \frac{\lambda_H^{43/21}}{\lambda_k^2 \lambda_{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}}^2 \lambda_L \lambda_d^{5/7} \lambda_{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}}} \quad (12)$$

这种做法，对于以推移质运动为主的河段来说，为模型同时满足水流运动与泥沙起动相似问题，提供了一种新的解决途径。

### 2.3 关于微型模型挟沙水流中泥沙运动相似问题

由于目前挟沙水流作为二相流的理论基础还未系统形成，所以，在处理挟沙水流运动问题

时，人们不得不将水流运动规律与泥沙运动规律分开考虑。迄今为止，所见到的泥沙运动基本方程式，绝大多数属于经验或半经验性质，基本上仅表达一度总流的运动情况。所以，在模型验证试验中，除了对水流运动相似性进行验证外，对于输沙率比尺、含沙量比尺、挟沙水流运动时间比尺等均需要进行验证，以期达到河床变形的相似。这种验证，无论对微型河工模型或大型河工模型都是必要的。

### 3 结语

美国陆军工程师团开发的微型河工模型试验技术，具有一定的创新性，其优点主要是能够方便、快捷、经济地解决河流或航道整治工程中所遇到的一些问题。其理论基础、试验方法和存在的问题，与一般大型河工模型没有本质的差别。微型河工模型能够通过调整模型纵比降达到水流阻力以及泥沙起动的相似，且容易保持水流紊动源结构的相似性和水流流场的相似性，这是一般大型河工模型试验难以做到的。但是，由于微型河工模型的尺度较小，为保证试验成果的精度，模型制作和试验自动化控制及高精度测量仪器设备是实现这项技术的关键。笔者认为，通过不断地实践，微型河工模型试验技术一定可以得到进一步完善和推广运用。

### 参考文献：

- [1] Robert D. D. 微型河工模型技术在密西西比河工程中的应用[J]. 马元珽, 译. 水利水电快报, 2000(9): 26-28.
- [2] 张瑞瑾. 张瑞瑾论文集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [4] 刘怀汉, 李文全. 推移质动床模型变率的选择与比降变态的研究[J]. 泥沙研究, 2007(2): 59-63.

(本文编辑 武亚庆)