

# 航道整治工程中长河段复合模型方法研究\*

刘林<sup>1</sup>, 刘丰阳<sup>1</sup>, 黄成涛<sup>1</sup>, 高凯春<sup>2</sup>

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北武汉 430011; 2. 长江航道局, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 鉴于数学模型在解决水沙运动及河床冲淤变化三维性较强的局部工程问题时存在一定的局限, 以及物理模型在模拟长河段时受时间变态影响较为严重的问题, 提出综合物理模型和数学模型优点的长河段复合模型。综述国内外复合模型的发展情况、优缺点及发展趋势, 结合物理模型和数学模型在航道整治工程中的应用, 提出航道整治工程中长河段复合模型研究思路与方法。

**关键词:** 长河段; 航道整治; 复合模型; 设计思路

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0046-05

## On hybrid model of long river reach in waterway regulation engineering

LIU Lin<sup>1</sup>, LIU Feng-yang<sup>1</sup>, HUANG Cheng-tao<sup>1</sup>, GAO Kai-chun<sup>2</sup>

(1. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China;

2. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Since there are some limitations when we solve some engineering problems by the mathematical model and physical model, we propose a long river reach hybrid model synthesizing the advantages of the physical model and mathematical model, summarize the development situation and the advantages and disadvantages of the model at home and abroad. Combining with the applications of the physical model and mathematical model in waterway regulation engineering, we put forward the research idea and method of long river reach hybrid model in the waterway regulation engineering.

**Keywords:** long river reach; waterway regulation; hybrid model; design idea

模型试验作为河床演变机理分析及航道整治方案效果研究的重要手段之一, 在研究提升航道通过能力方面发挥着重要作用。以往长江航道整治工程前期研究中, 为研究工程方案效果开展了大量重点碍航浅滩河段的物理模型及数学模型研究工作, 应用较多的是单滩物理模型与长河段平面二维数学模型相结合的方法: 单滩物理模型主要是研究单滩方案效果, 却不能完全反映上下游关联性; 长河段数学模型主要研究上下游河段演变关联性、整治工程方案相互影响, 以弥补单滩物理模型的不足, 但在急弯、

放宽分汊及工程局部位位置等水流三维性较强的局部河段模拟上还有困难, 模拟精度受到了限制。因此, 鉴于物理模型和数学模型自身的局限性, 本文提出融合物理模型和数学模型优点的长河段复合模型, 为提升航道尺度可行性、研究航道整治方案效果、揭示水沙运动机理等方面提供科学依据, 以满足实际需要。

### 1 航道整治模型试验存在的问题

目前, 数学模型和物理模型已被越来越多地应用于航道整治的研究工作中。一维、二维泥沙

收稿日期: 2014-10-10

\*基金项目: 交通运输部 2013 年重大专项 (2013-364-548-200)

作者简介: 刘林 (1982—), 男, 高级工程师, 从事河流动力学及航道整治研究。

数学模型技术发展已经比较完善, 能够较好地满足工程需要, 并广泛应用于长河段、长时间河床变形的研究; 短河段的单滩水道物理模型在内河航道整治研究工作中也得到了广泛应用, 并得到了业内专家的认可。但是, 类似于长江这种河道较长、上下游关联性密切、滩槽冲淤调整复杂的河段, 数学模型在解决水沙运动及河床冲淤变化三维性较强的局部工程问题时还存在一定的局限。同样地, 短河段物理模型在解决其水道上下游关联性变化问题上也存在一定的局限。

### 1.1 长河段物理模型存在的问题

物理模型的发展从弗洛德在 1870 年进行船舶模型试验起, 已有 140 年历史<sup>[1]</sup>。物理模型的优点在于直观性强、对工程结构附近区域的模拟准确度高, 而且同一模型能够复演多种现象, 诸如泥沙淤积、盐水入侵、污染物扩散等。近年来物理模型作为一项重要的技术手段在航道整治工程中发挥着重要的作用, 特别是短河段的单滩水道模型在长江干线航道整治乃至国内外内河航道整治上已得到了非常广泛的应用, 如长江航道规划设计研究院对长江干线重点碍航浅滩水道枝江—江口河段、太平口水道、周天河段、藕池口水道、窑监河段等分别开展了单滩水道的物理模型试验研究。

对于长河段而言, 动床物理模型在模型沙选取、时间变态问题解决方法等方面还存在一些问题<sup>[2]</sup>。动床物理模型试验的主要目的是模拟河床的变形, 但模型试验既要保证水流运动相似, 也要保证泥沙运动相似。对占河流输沙总量的绝大部分悬移质泥沙来说, 所要遵循的相似准则有悬移相似、起动相似、挟沙相似、河床变形相似等。为满足悬浮相似, 模型沙必须磨得极细, 而过细的模型沙的粘结力作用往往比较显著, 起动流速较大, 难以满足起动相似的要求, 须选用轻质沙。但轻质沙依然会造成模型相似上的一些问题, 使得根据河床变形相似得出的河床变形时间比尺远大于根据水流连续相似得出的水流连续时间比尺, 这就造成了时间变态问题。且泥沙模型通常将原

型非恒定水沙过程概化为一系列恒定子过程, 但尽管如此, 在相邻恒定子过程过渡时模型仍存在非恒定水沙运动。当水流大致为恒定流时, 模型中的水力因素基本不因而时变, 时间变态造成的影响不明显; 但当水流为不恒定流或水流状态改变时, 时间变态使得流量、水位过程线受到歪曲, 河道槽蓄量不能满足相似要求, 泥沙浓度过程不相似, 从而导致河床变形的不相似。总体来说, 模型沙的比重越小, 时间变态越严重, 河床变形相似愈难; 流量、水位变化愈频繁, 水流不恒定性越强, 时间变态影响越大; 模型长度越长, 槽蓄作用越大, 时间变态的影响越大。

另外, 除时间变态问题外, 物理模型还存在比尺问题, 只能照顾某一方面为主, 不能把各种现象都正确复演; 需要较大的试验场地, 模拟周期较长, 所需经费多; 物理模型虽然以相似论为理论依据, 但其模拟精度却极大地受到测量设备及手段的制约。

### 1.2 数值模拟存在的问题

数学模型的应用始于 20 世纪 50 年代, 苏联的罗辛斯基和库兹明使用了一维数学模型对水库修建后上下游的河床变形进行了计算<sup>[3]</sup>。随着计算机技术的发展, 数学模型被越来越多地应用于河流演变的模拟预测中。目前, 一维、二维数学模型已经能够较好地满足工程需要, 并广泛地应用于长河段、长时间河床变形的研究; 三维数学模型也取得了一定的应用价值。数学模型的优点在于: 不存在比尺问题, 重复模拟可以获得完全一致的结果; 不需要占用试验场地, 试验周期短, 费用低; 数学模型更加灵活, 可以非常方便地调整工程设计方案或者修改边界条件。

然而, 数学模型也存在相应的缺点: 比如在一维模型中, 各变量是取沿河长方向的平均值, 在实际应用中, 如想了解局部河段的河床变形的情况, 水工和河工建筑物附近的冲淤变化等, 一维数学模型就显得无能为力; 平面二维水沙数学模型以垂线平均的水流及泥沙因素作为研究对象, 研究它们在平面上的变化规律, 可用于河床细部

变化问题的研究,但是在模拟航道整治建筑物(护滩、坝体等)时,需要对原型中的复杂地形和工程建筑物进行一定的概化,而到目前为止,尚不能对工程局部地形、整治建筑物具体结构形式以及近区流态问题有较精确的模拟;三维模型在研究这种复杂边界条件下的水沙运动特性时,与实际比较接近,但三维泥沙问题很复杂,在基本理论及计算方法上还很不完善,因此应用也比较局限<sup>[4]</sup>。比如长江荆江河段蜿蜒曲折,河道内急弯、分汊、放宽等局部河段的三维水沙运动剧烈,弯道水流具有很强的三维紊动特征,弯道环流直接导致横向输沙不平衡,在分汊口,江心洲的壅水作用及汊道阻力形成的水面横比降和横向环流及局部放宽形成的回流区,也使得其水流结构具有复杂三维特征,直接影响到水流以及泥沙在各汊道的分配。

因此,如何结合长河段水沙数学模型及局部河段动床物理模型优点,建立既能够反映河段自身冲淤调整、又可反映上下游之间联动规律的长河段复合模型尤为必要。

## 2 复合模型的提出

鉴于物理模型与数学模型的优缺点具有互补性,如果把这两种模型结合起来,近区(局部)用物理模型,远区(大范围)用数学模型来研究,吸取物理模型与数学模型各自的优点,则既能直观地解决生产实际问题,又能节约场地、经费和人力物力。20世纪70年代后期,复合模型作为流体力学试验中的一项试验新技术逐渐发展起来<sup>[5]</sup>。根据物理模型与数学模型是否同步,复合模型分为非实时耦合复合模型及实时耦合复合模型两大类。

实时耦合复合模型包括数学模型、物理模型及两者复合边界3部分。复合边界部分是数学模型与物理模型相连接的桥梁。在每一个时间间隔内,物理模型与数学模型通过复合边界对水位、流量进行修正,从而保证数学模型和物理模型的模拟平稳过渡。实时耦合复合模型雏形由西德汉

诺威工业大学的 Holz 于 1976 年提出,并建立了世界上第一个用于模拟实际河道的复合模型——圣劳伦斯河口复合模型<sup>[6]</sup>。该河口模型天然总长度为 550 km,下游 330 km 及上游 220 km 分别采用物理模型及数学模型模拟,两个模型接口处(复合边界)的水位流量信息交换与 Holz 所提出模型对应的方法一致。随后,陆续提出了缅因-芬地湾模型与塞内加尔港口模型。于此同时,西德也对易北河河口建立了复合模型,并且证明了复合模型的优势,特别是可以在有限的试验场地,放大模型比尺,详细研究模型中复杂的三维问题。除西德外,荷兰 Delft 水工试验所、法国夏都研究所、英国威灵福研究所也进行了类似的试验。在国内,苏杭丽应用实时耦合复合模型模拟了淮河入海口水流运动<sup>[7]</sup>。

非实时耦合复合模型的特点是由一种模型(如数模)向另一种模型(如物模)单向提供边界条件,使对方模型正常运转。由于不必双向互补边界条件,因此这类模型不需要将物理模型和数学模型同步运转,结合方式也可多种多样<sup>[8]</sup>。美国水道试验站于 1980 年建立了哥伦比亚河口模型,包括一个水力模型和一个综合数值模拟系统 TABS2。该复合模型的运作过程为:先由数学模型计算出物理模型边界上的水力要素,然后运行水力模型获得该地区的潮流特性,最后将这些数据代入数学模型,完成河口泥沙及河床演变的模拟。河海大学在 1986 年建立了大亚湾核电站温排放海域的复合模型,模型的东、南、西三边为开边界,开边界采用沿水深平均的二维潮流数学模型确定<sup>[9]</sup>。李国臣<sup>[10]</sup>应用物理模型成功复演了灌河口复杂的旋转潮流,其边界条件也由数学模型计算获得。贾少燕等<sup>[11]</sup>也做了这类研究,即模型大范围采用数学模型计算,局部采用物理模型模拟。实际上,还有一种数学模型与数学模型相结合的复合模型,可以对大范围区域进行模拟。

整体来看,复合模型作为实验流体力学的一类延伸,它综合了物理模型和数学模型的优点,

在模拟原型时受到的限制小、制作灵活、精度更高, 具有很重要的研究意义及应用价值。然而, 目前关于复合模型的已有应用经验还并不多, 而且其研制需要多方面人员、技术的合作, 对设备也有较高的要求, 因此应用及推广也相对迟缓。

### 3 复合模型研究存在的问题

目前, 在航道整治研究过程中, 均会采用物理模型和数学模型这两种技术手段。一方面, 可以利用两种技术手段相互验证以确保成果合理性; 另一方面, 通过数学模型为物理模型提供边界条件。这实际上是一种初步的单向复合模型, 即没有两种模型之间的反馈, 相应也存在一些局限, 如长河段二维水沙数学模型难以准确模拟水沙运动三维特性较强的局部河段冲淤变形的问题依然存在, 且一旦这种误差积累放大后, 会造成提供给物理模型的水沙边界条件存在较大误差, 进而影响局部物理模型模拟的精度, 且有可能影响整个模拟结果的合理性。另外, 现有通过人工方式来进行两种模型间的数据交换也极大地影响了复合模型的运行效率。类似于长江这种河型众多、水沙条件变化复杂的长河段, 其对复合模型应用的难度会更大。

### 4 长河段复合模型设计思路

结合长河段航道整治工程实际情况, 充分考虑上下游之间的联系, 提出新的模型复合模式, 将长河段水沙数学模型及局部河段动床物理模型进行实时耦合, 相互校正, 改进模型数据传输方式, 研究既能够反映河段自身冲淤调整, 又可反映上下游之间联动规律的长河段复合模型系统。针对研究和应用的需要, 采用如下两种模式对模型进行复合:

#### 1) 并行模式。

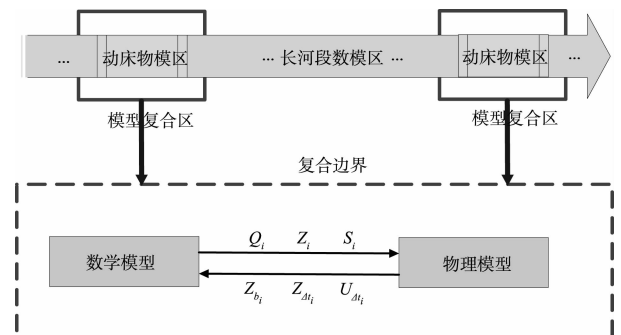
分别采用物理模型和数学模型两种手段并行研究航道水沙运动特性和河床冲淤特性, 数学模型和物理模型两者试验成果相互验证以保证成果合理性, 为河床演变机理分析提供支撑资料:

①采用数学模型和物理模型并行开展洪、中、枯水流量下水流结构和泥沙运动在平面上的分布规律的试验研究;

②采用数学模型和物理模型并行开展大、中、小水典型年条件下河道冲淤变化的试验研究。

#### 2) 嵌套模式。

结合长系列年长河段河床冲淤变化趋势及航道整治方案效果研究的实际情况, 为了充分发挥两种技术手段的各自优势, 采用长河段水沙数学模型和多个局部物理模型的循环嵌套模式(图 1、2), 即:



注:  $Q_i$ 、 $S_i$ 、 $Z_i$  为数模计算的流量、含沙量、水位值, 作为物模试验的边界条件;  $Z_{b_i}$  为物模试验时段末地形值, 用于数模地形修正;  $Z_{\Delta t_i}$ 、 $U_{\Delta t_i}$  为物理模型测得的水位、流速, 用于数模关键参数的修正。

图 1 嵌套模式模型复合

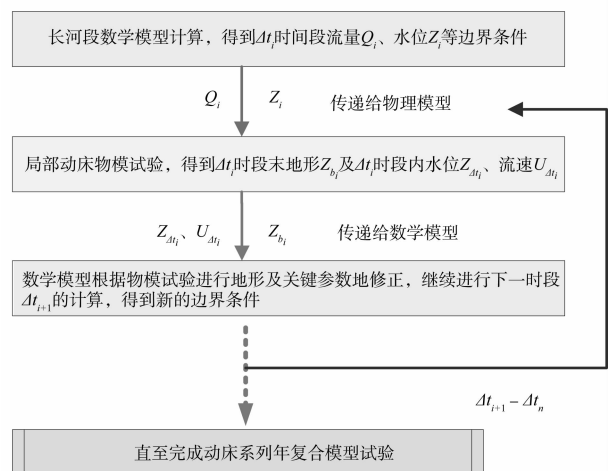


图 2 复合模型嵌套模式运行流程

第一阶段: 首先利用水沙数学模型进行  $\Delta t_i$  时间段内长河段的数值计算 ( $\Delta t_i$  将根据模型操作便捷性及模型精度要求确定, 可以取一年、一个月

或者一个概化流量级时间), 将数学模型计算得到的  $\Delta t_i$  时间段内的进口流量、流速、含沙量以及出口水位, 通过复合边界传递给局部河段物理模型, 作为物理模型初始试验的边界条件;

第二阶段: 物理模型根据复合边界传递过来的边界条件进行试验, 并将试验得到的  $\Delta t_i$  时段末的局部河段地形及  $\Delta t_i$  时段内测得的水文数据传递给数学模型, 数学模型根据试验结果对模型计算关键参数和地形进行修正;

第三阶段: 经过局部地形及关键参数修正后的数学模型继续进行下一时段  $\Delta t_{i+1}$  的计算, 并将得到的边界条件再传递给物理模型。如此反复, 实现复合模型中物模和数模的耦合, 完成动床系列年的试验研究。

采用这样的运行方式, 发挥长河段二维水沙数学模型和局部物理模型各自的优势。通过这样反复地修正、验证, 从而提高整个复合模型模拟的精度。

### 5 结语

针对目前航道整治工程前期研究中长河段物理模型、水沙数学模型及现有复合模型研究中存在的问题, 提出新的模型复合方法和运行模式, 将长河段水沙数学模型及局部河段动床物理模型实时耦合, 采取并行模式和嵌套模式两种方式运行, 相互校正, 既能够反映局部河段的自身冲淤调整规律, 又可以反映长河段间上下游河床变化的联动关系。随着模型试验在航道整治工程中应

用的普遍与发展, 该方法可在长河段水沙运动机理分析、河床演变趋势预测、航道整治方案效果比选等方面发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 李发政, 孙贵洲, 渠庚. 长河段河工模型时间变态影响及水沙过程控制方式研究[J]. 长江科学院院报, 2011 (3): 75-79.
- [3] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [4] 曹祖德, 孔令双, 李蓓, 等. 海岸河口水动力数值模拟的研究方向[J]. 中国港湾建设, 2002 (8): 15-18.
- [5] 罗肇森. 复合模型——一种试验新技术[J]. 水利水运科学研究, 1985(2): 109-115.
- [6] Holz K P. Analysis of time conditions for hybrid tidal models[C]//Proe 15th Conf Coastal Engineering, 1976(32): 121-125.
- [7] 苏杭丽. 一种新型水工模拟技术的研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [8] 苏杭丽, 张东升. 复合模型中实时耦合问题的探讨[J]. 河海大学学报, 2003(3): 119-122.
- [9] 河海大学. 广东核电站温排放物理模型试验报告[R]. 南京: 河海大学, 1987.
- [10] 李国臣, 周浩祥, 徐金环. 灌河口外拦门沙治理物理模型试验研究[J]. 河海大学学报, 1992(7): 15-22.
- [11] 曹兵, 刘士和, 罗秋实. 旁侧入流对绕体流动与河床冲淤变形的影响[J]. 水利学报, 2009(11): 1 381-1 385.

(本文编辑 郭雪珍)

## 征订通知

2015年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 订阅方式请登录《水运工程》杂志社官方网站: [www.sygc.com.cn](http://www.sygc.com.cn), 首页下载中心下载2015年《水运工程》征订通知单, 有关要求和反馈信息一应俱全。