

潮流物理模型试验生潮控制时的复合模拟数据对接*

刘学海^{1,2}, 纪育强¹, 张强³, 王玉海³, 袁业立^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 根据几种不同情形探讨复合模拟中如何通过数值模拟为潮流物模试验提供开边界控制条件。对单边界物理模型, 可由数模的调和常数得到物模边界控制所需的时间序列数据, 实现单分潮、多分潮及大、中、小潮的模拟; 对于历时较长的试验, 可由数模得到长时间序列或周期性序列数据作为生潮的控制信号; 对多边界模型, 沿边界分为若干控制断面, 由数模给出各断面的流量变化, 对各断面分别进行流量控制; 差时的复合模拟可使物理模型和数值模型互相提供边界条件或模型参数修正。

关键词: 物模试验; 潮流; 数值模拟; 复合模拟

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2012)01-0001-08

随着计算技术的发展, 相比物理模型试验, 数值模拟在海洋研究和海洋工程中发挥着越来越重要的作用。尽管如此, 物模试验仍然是不可或缺甚至有时是不可替代的研究手段。如, 目前常见的海洋动力模式难以实现小尺度局部海域的模拟^[1], 工程引起的局部泥沙冲淤数值模拟也存在着诸多的困难^[2-3], 而这些问题可通过物理模型给以更好的解决。另外, 由于物理模型不能刻画出地转效应, 因此难以对较大海域进行模拟^[4]。

复合模型将数模和物模的优点结合起来, 拓宽了模型的研究范围^[5]。复合模型有耦合运转型和综合模拟型。耦合运转型是通过数模和物模之间的数据对接实现对系统的模拟, 要求两模型准同步运转。综合模拟型则综合数模和物模, 两模型不必同步运转, 数据对接要求不苛刻, 结合方式灵活, 如大范围内用数模而局部采用物模。综合模拟型是最常见的复合模拟类型, 典型的情况是, 对整体海域水动力的模拟采用数值模拟更佳, 而对局部海域特别是较小的区域如泥沙冲淤试验、温排水试验等^[6]经常需要进行物理模型试验。

物模试验的水动力过程是开边界处设备驱动水体产生的, 因此其仿真性很大程度上依赖于对开边界水动力条件的控制。本文将根据物理模型试验的若干情形, 探讨复合模拟(特别是多边界复杂流况下)的数模—物模的数据对接问题, 即如何通过数值模拟为物模试验合理地提供边界控制条件。

1 物模试验的生潮控制系统简介

潮流物理模型试验时, 生潮设备如尾门、双向泵等是受生潮控制计算机与控制器一起控制运转的, 而控制信号需要外部数据给出, 这些数据是流量或水位变化过程并按照一定的模型缩尺比(几何缩尺、时间缩尺、流速或流量缩尺)处理后输送给生潮控制计算机的。对复合模拟, 数学模型和物理模型之间的数据交换即为

* 收稿日期: 2010-04-28

资助项目: 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——较大海域潮流物模试验的理论可行性及复合模拟技术研究(2007G24); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目——胶州湾海湾水动力物理模拟实验研究(200705012), 海洋监测设备动力环境实验水槽关键技术研究; 浪、流、风等现场动力环境研究(201005027-5)

作者简介: 刘学海(1973-), 男, 山东东明人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋环境及生态动力学模型方面研究, E-mail: liuxh@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

复合模拟的数据对接^[7]。图 1 为潮流物模试验的控制示意图,由生潮控制流程可见,合理的数模—物模数据对接是良好实现物模试验的一个前提工作。以下对主要的数据对接方式进行探讨。

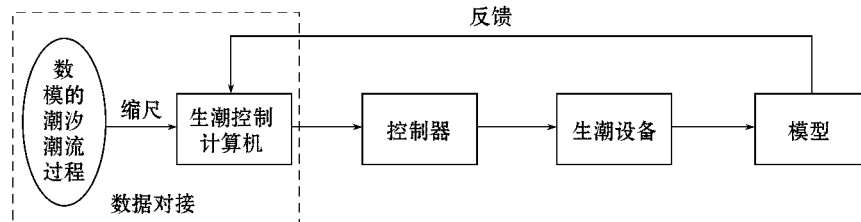


图 1 生潮控制系统示意图

Fig. 1 The controlling system of tide inducement

2 生潮控制的复合模拟数据对接方式

2.1 调和控制数据对接

1) 单个分潮模拟时的数据对接。仅需由数模计算的在开边界处该分潮的调和常数(振幅、周期、初位相)给出水位或流速过程的时序数据,经缩尺后传递给生潮控制设备。该情形下的水位或流速过程线为余弦过程。

如模拟域为单边界且边界处水动力分布较均匀,可仅由一个点的调和过程来控制;否则,需根据数模得到的水位或流速沿断面的分布,将边界划分为若干段,对每段分别实施控制。

现以模拟整个胶州湾主要分潮 M_2 为例。考虑胶州湾狭窄口门处基本为往复流,沿湾口南北的水位变化基本相同,物模试验可选取水位过程控制。取模型的垂直缩尺比为 70,水流时间比尺为 83.67。由在更大的海域通过数值模拟计算出 M_2 分潮的调和常数,从而得到湾口的水位变化过程,然后通过模型缩尺给出图 2 示的用以控制生潮尾门的水位时间序列信号(以平均水位为零水面),信号长度依据模拟的历经时间确定。要模拟胶州湾 M_2 分潮的潮汐潮流过程,仅由图 2 示的这一个数据信号控制即可。

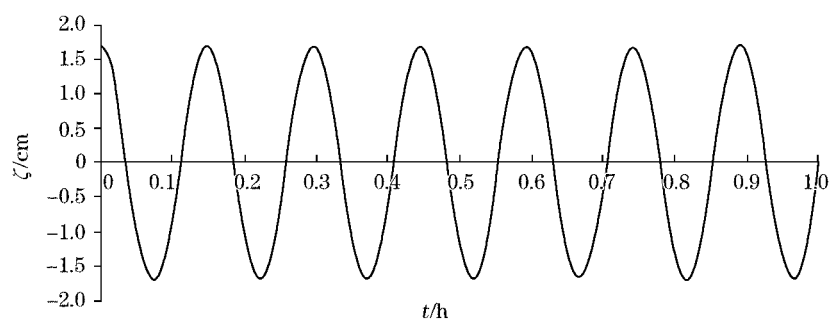


图 2 胶州湾整体 M_2 潮流物理模型的水位控制信号

Fig. 2 The water-level curve of tidal M_2 controlling for physical simulation of Jiaozhou Bay

2) 模拟潮况为大、中、小潮时的数据对接。该情况经常用于工程研究中。大域范围的数模结果给出潮汐调和常数,由式(1)~(3)分别得到开边界处大、中、小潮的水位变化过程。

$$\zeta_{\text{大}}(t) = (H_{M_2} + H_{S_2}) \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}) \quad (1)$$

$$\zeta_{\text{中}}(t) = H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}) \quad (2)$$

$$\zeta_{\text{小}}(t) = (H_{M_2} + H_{S_2}) \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}) \quad (3)$$

式中, H_{M_2} 、 H_{S_2} 分别为分潮 M_2 、 S_2 的水位调和振幅; σ_{M_2} 为 M_2 分潮角速度; g_{M_2} 为 M_2 分潮迟角; t 为时间。将由式(1)~(3)得到的时间序列数据按物理模型的几何比尺及时间比尺变换为生潮控制数据输入给生潮系统, 该情况下水位变化曲线仍为余弦过程。此外, 也可将开边界划分为若干段, 对每段分别控制。

3) 多分潮模拟时的数据对接。该情况基本反映了研究海域的真实潮况。根据在更大海域范围内的数值模拟结果给出开边界处的水位调和常数, 由式(4)得到开边界处的潮汐过程。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N f_i H_i \cos[\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (4)$$

式中, H_i 为第 i 个分潮的振幅; g_i 为迟角; f_i 为交点因子; $(V_0 + u)_i$ 为初相角。将按式(4)得到的时间序列按几何比尺及时间比尺变换为生潮控制数据送给物模生潮系统。根据需要, 物模的开边界也可分为若干断面, 对每段分别进行控制。

现以整个胶州湾的潮汐模拟为例, 物理模型仍选取水位过程控制, 垂直比尺和水流时间比尺仍为 70 和 83.67。对大域的数模结果调和并按式(4)得到如图 3 示湾口一段时间的水位过程曲线(由 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , M_4 , P_1 等分潮组成), 将该过程线的水位数据及历时按缩尺比转换为用以控制生潮尾门的水位时间序列信号, 信号长度依据要模拟的时间跨度确定。

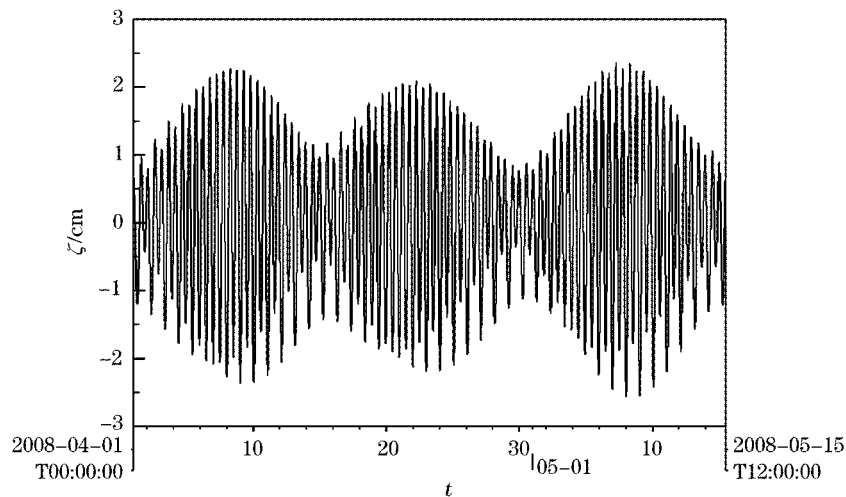


图 3 胶州湾物理模型的水位控制过程线(原型)

Fig. 3 The water level of tidal process controlled for physical simulation of Jiaozhou Bay

2.2 周期性及长时间序列数据对接

对于历经时间较长的试验, 如连续模拟数月甚至几年的潮汐潮流过程, 分两种情形讨论。

1) 对于周期性变化过程的模拟, 控制器只需重复一个周期的水位或流速流量数据序列。仍以胶州湾整体物理模型为例, 如图 4 示, 由数值模拟给出了物理模型湾口开边界处包含一个完整大、中、小潮的半月内水位变化过程, 该过程的数据序列经缩尺后, 作为一个周期性信号输入给物模试验的生潮控制计算机。

2) 若模拟的潮过程不具有周期性变化规律, 控制数据则需要根据物模的历时通过数值模拟给出一个长时间数据序列。以胶州湾整体物理模型为例, 假如模型要刻画出不同月份的差异, 如图 5 示, 由大域的数值模型给出了胶州湾口门处 2008-03-01—06 中旬的水位变化过程, 对该过程的时间序列进行模型缩尺后输入给生潮控制计算机, 作为该时间段的物模试验控制信号。

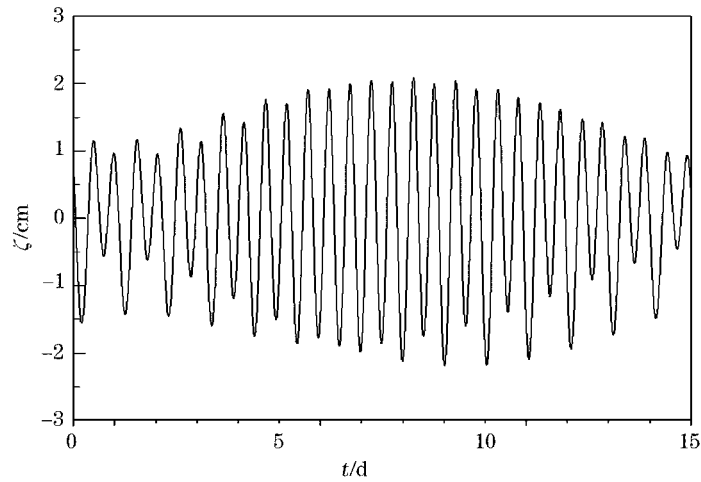


图4 胶州湾物模半月周期的水位控制过程(原型)

Fig. 4 The water level of half-month tidal process for physical simulation of Jiaozhou Bay

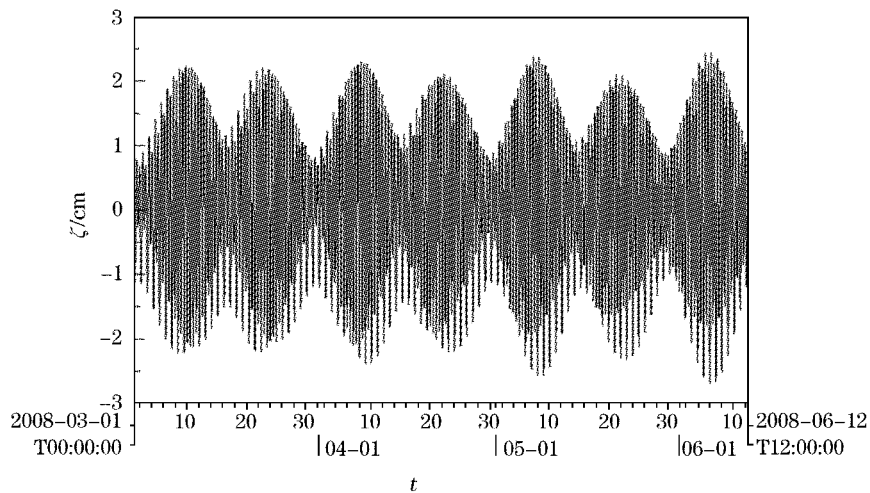


图5 胶州湾物模长时间序列的水位控制过程(原型)

Fig. 5 The water level of long-time tidal process for physical simulation of Jiaozhou Bay

2.3 多边界的时间序列数据对接

重点讨论多边界模型的数据对接。物理模型通常对较小尺度的局部海域进行模拟,而该情况下最常见的情形是模型具有多个开边界,因此相对单边界其控制条件较为复杂。多边界模型的模拟一般多采用流速控制和流速、水位结合控制两种生潮方式,根据数模结果将开边界划分为若干个控制段,对每段给出同一时间的水位或流速流量过程。一般是由生潮泵按需要流量供水产生模型水流,因此试验中,流速控制即是流量控制,需要给出断面的瞬时流量。

以胶州湾内的局部海域为例,图6给出数模和物模的模型区域。为物模试验提供接口的数值模型涵盖整个胶州湾,模型采用曲线正交网格,在物模区进行网格加密,计算采用 Delft3D 模式。物理模型为湾东部约 $9.5 \text{ km} \times 6.5 \text{ km}$ 的海域,为三开边界潮汐模型,开边界划分为 10 个断面通道(S1~S10)模拟潮流的进出,试验采用控制三边开边界中各分段的流量过程并同步监视水位的开环控制模式。依据潮流运动的相似理论^[8],确定模型的水平比尺为 $\lambda_l = 300$,垂直比尺为 $\lambda_h = 100$,流速比尺 $\lambda_u = 10$,水流时间比尺 $\lambda_t = 30$,流量比尺 $\lambda_q = 3.0 \times 10^5$ 。通过数值模拟给出 10 个断面的流量过程(图7示例给出其中 3 个断面 S2、S6 和 S9 半

个月内的流量时间过程),并按照以上的相似比尺转化为物理模型的流量后作为各分段的过程控制数据,通过控制各通道不同流量水泵个数变化实现进出水量改变(使用 106 台双向潜水泵),形成模拟水域的潮汐流动,同时自动监视水位实时过程,使潮汐的水位与给定潮位相符,以完成潮位模拟。图 8 给出了转化为原型后的物理模型试验结果,通过对监测点潮位(ζ)、流速(u)和流向(θ)的模拟与海上现场观测结果对比可见,该复合模型较好地实现了对研究海域的准真模拟。

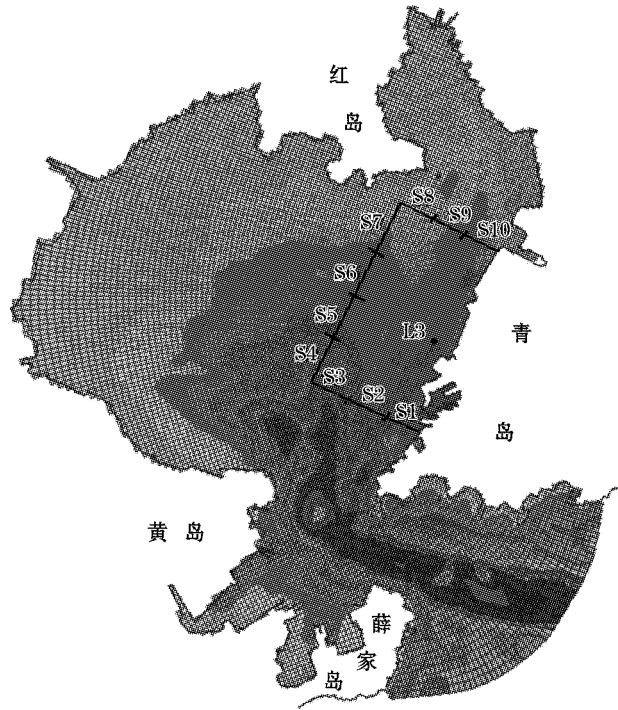


图 6 胶州湾数模区域、网格及局部物理模型的区域和开边界分段

Fig. 6 The area and grid for numerical model, and the area and open boundary sections for a local physical model

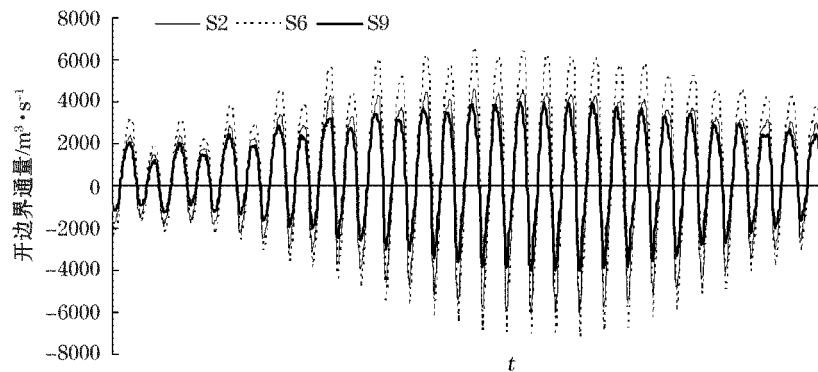


图 7 胶州湾局部物理模型沿其中 3 个控制断面 15 d 的流量过程

Fig. 7 Water fluxes at three boundary sections in 15 d controlled for a local physical model in Jiaozhou Bay

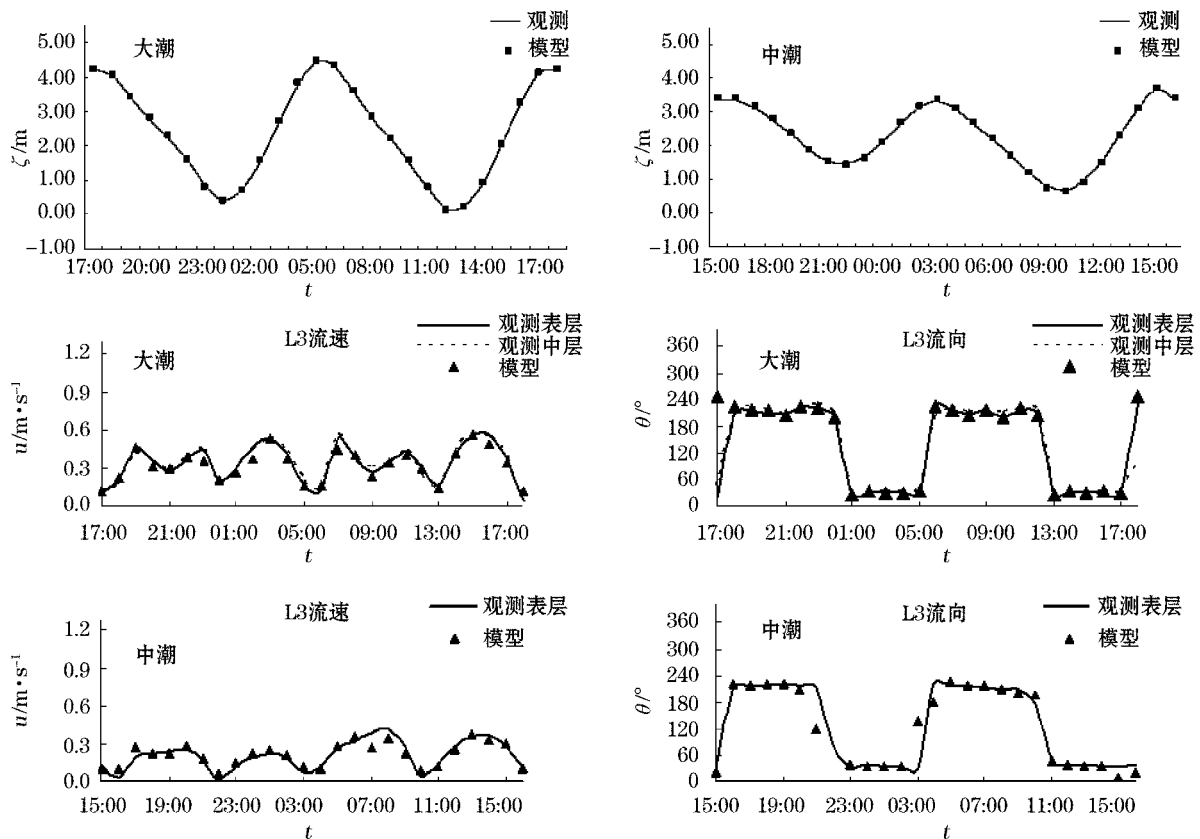


图 8 胶州湾局部物理模型的模拟结果(转化为原型)

Fig. 8 The results of a local physical model in Jiaozhou Bay after transformation to real process

2.4 适时控制的数据对接

适时控制是将数模在物模开边界处的结果适时地传递给生潮控制系统。该情况类似于数值模拟的多域嵌套模型(可同步并行计算也可差时单独计算),数值模拟和物理模型试验可同时或差时进行。

两不同类型的模型同时实施模拟,数值模拟进行完一个步长后将结果输入给物理模型,而物模完成一个时间步后反过来又为数模提供局部的水动力控制条件或参数,该情况基本同于耦合运转型,在海域的模拟中很少使用^[7,9]。

差时的复合模拟不要求物理模型和数值模拟同步进行,而是数值模拟先于物模进行,数值计算后将开边界处的结果可分时间段储存,并先后提供给物模试验,主要用于河道模型中,如淮河入海水道模型^[9]。物模试验结果也可作为参数反馈给数值模拟,例如,采用物理模型进行动床试验时,模拟到泥沙冲淤改变了数值模型和物理模型中的原始地形配置,打破了原有的动态平衡,这样需要物理模型结果反馈给数值模拟以进行配置上(地形、泥沙特性、底摩擦系数等)的修正,而后数值模拟又进一步地为物理模型提供新的控制信号。该复合模拟方式能同时提高物理模型和数值模型的仿真程度。对该方法的研究已有近 30 多年的历史^[5],但国内外的应用实例仍较少,而且主要体现在河道及河口模型中,如哥伦比亚河口模型,先由数模给出潮流、波浪要素,然后运转物理模型给出泥沙运动及河床演变,再进一步代入数值模拟系统计算潮流特性^[5];国内如溪洛渡水电枢纽工程上下游河道模型^[10]。目前,国内在潮流复合模型方面,还欠缺物模试验结果为数模提供模型边界或参数条件的研究和应用实例,今后应在工程应用和海洋研究中加强这方面的研究。

3 结 语

本文对数值模型—物理模型的复合模拟数据对接分不同情况进行了分析,探讨了数值模拟如何为潮流物模试验提供开边界控制条件。

对于边界条件相对简单的模型特别是整体模型,可由数值模拟所得的调和常数并转化为时间序列数据提供给物模试验,实现诸如单分潮、多分潮及大、中、小潮的良好模拟。

对于历时较长的潮流物模试验,可由数值模拟的长时间序列或周期性序列数据作为生潮的控制信号。

对于具有多个开边界的物理模型,一般开边界处流场分布不均匀,需要对开边界划分较多的控制断面,由数值模拟给出每个断面的瞬时流量变化过程,对各个断面进行流量控制。

适时控制主要分析差时的复合模拟,它适用于物理模型和数值模型互相提供边界条件或进行模型参数修正。

以上探讨有助于把握数值模拟和物理模型试验的结合方式,特别是对如何合理有效地实现数值模拟为物模服务并良好地实现物模试验有一定的实际参考意义。

参考文献(References):

- [1] XU X. Study on some issues relating xiamen bay physical model building of tidal current in xiamen harbour park project[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(4): 455-462. 徐啸. 厦门海港公园工程厦门湾潮汐水流物理模型馆有关问题研究[J]. 台湾海峡, 2005, 24(4): 455-462.
- [2] WAN Y Y, JIN Z W, HUANG R Y. Outlook and prospect on sedimentation model study[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(1): 48-52. 万远扬, 金中武, 黄仁勇. 泥沙模型研究综述与前景展望[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(1): 48-52.
- [3] LI M G. A review on mathematical models of sediment in coastal and estuarine waters[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1): 139-154. 李孟国. 海岸河口泥沙数学模型研究进展[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 139-154.
- [4] LIU X H, YUAN Y L. Scalar analysis and similarity conditions of marine environment physical simulation[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 285-291. 刘学海, 袁业立. 海洋环境动力学物理模拟的尺度分析及相似条件[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 285-291.
- [5] CAO Z D, LI Y B. The developing trend of numerical modeling of hydrodynamics[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(4): 142-148. 曹祖德, 李炎保. 水动力数值模拟的发展方向[J]. 海洋学报, 1995, 17(4): 142-148.
- [6] GU Z H, TANG H W, LI Y, et al. Discussion on problems of intelligentizing flow simulation [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 129-133. 顾正华, 唐洪武, 李云, 等. 水流模拟智能化问题的探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 129-133.
- [7] SU H L, ZHANG D S, XU J H, et al. Interface technology of hydraulic hybrid model[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(4): 89-92. 苏杭丽, 张东生, 徐金环, 等. 水工复合模型的接口技术[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 89-92.
- [8] JTJ/T 233—98 Technical regulation of modeling for tide-current and sediment on coastal and estuary[S]. Beijing: China Communications Press, 1999. JTJ/T 233—98 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [9] SU H L, ZHANG D S. Realization of a real time coupling hydraulic hybrid model-taking Huaihe River Channel as an example[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(6): 95-98. 苏杭丽, 张东生. 水工实时耦合复合模型的实现—以淮河入海水道模型为例[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 95-98.
- [10] LI T X, LIAO H S, YANG Y Q. Application of hybrid model to simulate flow field in river with complicated geometrics plunged by multiple jets[J]. Journal of Hydraulic, 2006, 37(4): 471-479. 李天翔, 廖华胜, 杨永全. 物理-数值复合模型在模拟多股水舌进入复杂河道的流场中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 471-479.

Data Interface of Hybrid Model for Tide-generation Controlling During Physical Simulation of Tidal Current

LIU Xue-hai^{1,2}, JI Yu-qiang¹, ZHANG Qiang³, WANG Yu-hai³, YUAN Ye-li^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China*; 3. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: According to the following cases in hybrid model, this paper examines how to provide open boundary controlling conditions for physical simulation of tidal process by means of numerical simulation. Firstly, for the physical models with only one boundary, harmonic constants obtained from numerical simulation are used to derive time-series data as boundary signals for experiment controlling, and physical simulation will be achieved for a single tidal constituent or several ones, and for the spring, moderate or neap tides. Secondly, for a case of a long-period experiment, a numerically modeled data sequence in longtime or in recycle can be set as an interface input for the tide-make controlling. Thirdly, for the physical model with several open boundaries, more sections are usually defined for boundary controlling by giving water fluxes along the sections from numerical modeling. As a last case, the hybrid model with a time-gap between numerical and physical simulation executions are used to provide boundary conditions or revise model parameters each other.

Key words: physical simulation; tidal current; similarity theory; hybrid model

Received: April 28, 2010