

水工实时耦合复合模型的实现 ——以淮河入海水道模型为例

苏杭丽,张东生

(河海大学交通与海洋工程学院,江苏南京 210098)

摘要:以概化的淮河入海水道为例研究复合模型的实现.通过对原型的总体分析确定复合边界的位置,对复合边界划分的两个部分分别建立物理模型和数学模型.为实现数、物模的耦合,数学模型采用菱形差分网格.为了提高耦合的精度,在数学模型中加入了复合边界处水位变化的预判断.对影响复合模型运行的一些因素进行了分析,强调复合模型实时耦合中参数的匹配问题,给出了模型的运行情况,其精度满足工程需要,实现了实时耦合的复合模型.

关键词:实时耦合;复合模型;模拟技术;入海水道

中图分类号:U617 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2002)06-0095-04

复合模型是工程水力学中一种新的模拟手段,它将数学模型和物理模型的优点结合起来,拓宽了模型的研究范围,提高了模拟精度.但是,由于复合模型要求其数模和物模部分的信息实时交换,技术难度较大.作者尝试对概化的淮河入海河道建立实时耦合的复合模型,并成功地完成了模型的运行.

1 模型的总体设计

淮河入海水道是解决淮河问题的重要工程技术措施.淮河原注入洪泽湖,现开挖入海水道,使其直接流入南黄海,入海口位于江苏滨海县岸段.在入海水道的海口处拟建泄洪闸,其作用是挡潮御卤,汛期泄洪排涝.在进行泄洪闸设计时,需要根据上游的设计引洪量和下游的潮汐特性确定闸底板高程、闸门型式、闸门宽度等设计参数,以及闸下冲刷深度之类与设计密切有关的数据.这些数据用当前常用的一维和平面二维河道数学模型是无法求得的,在实用中多是用物理模型试验进行确定.但是物理模型受模型比尺的制约.比尺大时,虽能模拟闸的特性和闸址近区的流态特性,但受试验场地的制约,模拟的范围不可能很大,无法确定闸下的雍水范围;比尺小时,虽能模拟较大范围,但因变率率大,对工程近区的模拟过于粗化,往往达不到预期的要求.因此,对这样一个问题最好采用复合模型.

将淮河入海水道概化为一明渠,取入海口 2km 长的河段为复合模型的模拟范围.水面宽 340 m,中间为深泓,深泓底宽 173 m,深泓两侧有行洪滩地,滩面高程 1.5 m,明渠下游端为海口,泄洪闸拟建在海口向上游 500 m 处(图 1).泄洪闸上下游深泓两侧边坡均为 1:3,闸上渠底高程 -3.0 m,闸下渠底高程 -4.0 m,下游水位受潮汐影响.把泄潮闸及闸下流态复杂的部分做成物理模型,闸上游是顺直段,建立一维的河道数学模型.综合考虑流态及地形的因素后,复合边界定在闸上 300 m 处(图 1).

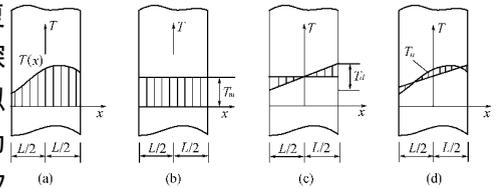


图 1 复合模型原型示意图

Fig.1 Prototype of hybrid model

2 数模的实现

复合模型是物理模型和数学模型的耦合模型,复合模型正是通过物模与数模之间实时交换数据使得两个部分耦合成一个整体(图 2).在复合模型中,复合边界的交换变量为水位和流量,数模上边界已知条件为

流量,数模采用菱形网格差分^[1].数模程序完成任务的先后次序为(a)在程序开始时接受物模传过来的水位值 H_{i+1}^n (b)计算上一个断面的水位 H_{i-1}^n (c)根据 H_{i+1}^n 和 H_{i-1}^n 计算出下一个时间层的边界流量 Q_i^{n+1} (d)将该流量传给工控机 (e)计算出本时间层所有断面的水位及流量.

由以上的计算顺序可以注意到,复合模型中的数模在得到复合边界的水位后首先计算出复合边界的流量并输出,然后再计算同一时间层的其他变量值,而不是像一般的一维数模,先逐个断面计算出同一时间层的水位和流量值后再计算复合边界的流量.这样做一方面因为该流量是下一时间层的量,在理论意义上,下一时刻采样的水位值与该流量对应,如果不提前送出去,有可能流量还没到达期望值就开始对水位采样,此时的水位与数模输出的流量值是不对应的;另一方面是为了让控制时间延长,避免流量突然改变引起水流扰动,影响下一个水位的采样量.

由图2中的复合模型网格图可以看出,数模提供给物模控制流量 Q_i^{n+1} ,需要根据 H_{i+1}^n 和 H_{i-1}^n 进行差分计算. Q_i^{n+1} 由物模的量测值给出, H_{i-1}^n 则要由数模本身算出.在数模计算中,对于矩形和梯形的明渠断面, H_{i-1}^n 的计算精度可以得到保证,但当明渠具有像入海水道这样的复式断面时,计算中就需要考虑水流的漫滩处理.当水位上升或下降至滩面时,首先需要对明渠的断面面积进行判断.判断的方法是进行试算.例如,当物模复合边界处水位 H_{i+1}^n 处于滩面上,则根据上滩后的断面面积计算 H_{i-1}^n ,如果计算得出的 H_{i-1}^n 小于上滩水位,则再根据未上滩的断面面积计算方法来计算 H_{i-1}^n .用两次计算出的 H_{i-1}^n 反复迭代,求出值 H_{i-1}^n .同理,当 H_{i+1}^n 处于滩面下,利用试算的方法计算 H_{i-1}^n .

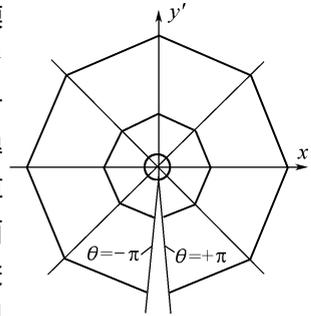


图2 复合模型网格示意图

Fig.2 Grid of hybrid model

数模中 H_{i-1}^n 的计算准确性直接影响到复合边界流量的计算.复合边界流量计算的准确度又直接影响到复合模型的精度.图3A是数模部分断面面积经过漫滩处理前后,得到的复合边界流量时变曲线.见图3(a),在流量为 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 上下出现一些尖峰,其原因就是由于数模在上下滩前后断面面积没有处理好.在水流将要上滩或下滩的临界状态时,程序中加入判别试算.经过试算处理后,复合边界的流量就是一条光滑的曲线了(见图3(b)).



图3 恒定流时,复合边界处流量时间变化曲线

Fig.3 Flow rate of constant flux at hybrid boundary

3 复合模型物模部分的实现

3.1 模型范围及地形

物模部分研究的纵向范围:自闸上游300m起,至闸下游500m长的河道顺直泄洪段,海口外150m长倒坡段以及450m长外海滩地挖槽段,闸下游实验段总长1100m,物模的河道总长为1400m.物模部分的河道宽度340m,底宽173m,泄洪闸上下游深泓两侧边坡均为1:3,闸上底部高程-3.0m,深泓两侧为行洪滩地,滩面高程1.5m,河宽340m.泄洪闸下游深泓底部浚深到-4m,底宽仍为173m,至海口由150m长、1:50倒坡过渡段联接,与海口滩面-1m地形沟通入海.

3.2 模型设计比尺

为准确模拟泄洪闸的泄流流态,模型设计为正态,取几何比尺 Δ_L 为50.根据水流运动方程,必须满足模

型水流与天然水流运动相似原则,并以此为基础来推导各项相似比尺^[2],模型采用的各比尺值见表 1。

表 1 模型比尺

Table 1 Model scale

| 比尺 | 几何 Δ_L | 流速 Δ_U | 流量 Δ_Q | 糙率 Δ_n | Δ_t |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| 设计采用值 | 50 | 7.07 | 17 678 | 1.919 | 7.07 |

3.3 测控点的布置

水位测点:在复合边界处需要有一个水位测点,设立该测点的目的是测量边界处的水位提供给数模进行计算,该水位测点距离复合边界 6 m。在物模的下边界处需要有一个水位测点,设立该测点的目的是跟踪物模下边界的水位变化,以便于模型的控制部分根据该测点测得的水位决定对下边界的水位进行控制。在闸上 0.6 m 处设置一个水位测点,设立的目的是测量闸上水位变化,同时可以将测得的结果传送给数模部分,数模部分进行显示,以便于对比观察复合模型整体的实时水面变化。

流速测点:在物理模型闸上、闸下 0.6 m 处,各设立一排流速仪,测量流速的变化情况。

流量控点:在复合边界处设置流量的控制,控制是根据数模计算的复合边界处流量值进行的。

水位控点:在物理模型下边界设置水位控点,水位是根据给出的下边界水位资料进行控制的。

4 试验运行

概化的淮河入海水道泄洪闸试验成功地进行了物理模型和数学模型的实时耦合运行,模型中数、物模的信息逐时步长进行实时交换,恒定流与非恒定流实时跟踪控制误差小于 $\pm 1 \text{ L/s}$ 。下面对试验过程中不同实验参数、条件下的试验结果加以分析。

4.1 信息交换周期对模型运行的影响

图 4 给出了交换周期 T 为 1 s、2 s 和 3 s 时复合边界处的流量值。如前所述,模型的上游来水量为恒定流量 $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$,在不考虑沿程损失的情况下,在复合边界处的流量也应该是 $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 4(a)显示,当模型运行 100 s 左右时,复合边界的流量达到 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$,之后就一直维持在 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,由此可以认为,取 $T = 1 \text{ s}$ 是成功的。



图 4 复合边界流量曲线

Fig.4 Flow rate at hybrid boundary

而当 $T = 2 \text{ s}$ 时(图 4(b)),在起初的 50 s 内,流量超过 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$,之后虽然降至 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$,但在 300 s 以后,流量出现扰动。当 T 取为 3 s 时(图 4(c)),只在不足 100 s 的时间内流量基本控制在 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$,之后,则出现大幅度的振荡。与 $T = 2 \text{ s}$ 的情况相比,情况有所恶化,流量出现扰动的提前,振幅加大。图 4 说明控制步长 T 的选取对于复合模型至关重要,选择适当的控制步长是试验成功的基础,控制步长 T 的理论值等于

每个时间层中复合边界的水位开始采样时间一直到复合边界的流量控制结束的一段时间。

4.2 数模计算时步长与信息交换周期之间的匹配

为了直观地显示复合模型模拟的整体情况,在数模界面中实时显示了复合模型的沿程水面线。试验中的信息交换周期 $T = 1\text{ s}$, 数模时步长 $\Delta t = 7\sqrt{\Delta t = T \times a_i = 1 \times \sqrt{50}}$ 。当 T 与 Δt 不匹配时,在模拟的水面线中,物模与数模交接处出现不平滑。

4.3 数模中底摩擦项与物模部分的底摩擦的匹配

当数模的底摩擦系数选择不当时,会导致物模与数模模拟的流态变化不一致,在水面线的复合边界处出现明显的折断现象,连接不光滑。当数模的底摩擦阻明显偏大时,物模中的一些流态变化缓慢向数模传递,当变化积累到一定程度后,复合模型的物模与数模不再匹配,整个模型失控;当数模的摩擦阻明显偏小时,数模的计算不够稳定,物模中有一个小的干扰时,数模会很快地传递干扰,很容易导致数模的计算溢出,最终复合模型不能正常运行。

4.4 数模与物模的初始条件的匹配

复合模型运行后,如果物模与数模的初始条件不一致,就会在复合边界处出现不光滑连接,从而导致复合模型的整体运行不匹配。试验的精度也就比较差。

5 结 论

到目前为止,应用比较广泛的是非实时耦合的复合模型,它也是物模与数模的结合,但不要求实时性,因而制作难度大大降低。实时耦合复合模型是在非实时耦合的基础上建立的,对实时性要求很高,因而制作难度较大。淮河入海水道泄洪闸河段复合模型的试验结果表明,数模部分与物模部分实时相互传递数据,耦合过程稳定。流量实时控制,控制结果与数模提供的流量之差小于 $\pm 1\text{ L/s}$ 。潮汐水位实时跟踪控制,误差小于 1 mm 。结果表明在当前的计算机控制技术和量测技术下,实时耦合复合模型是完全可以实现的。复合模型的实现可以在非实时耦合的基础上进一步缩小物模的范围,把物模只局限在工程近区极小的范围内,从而可以降低模型的运作费用,提高模拟精度。

参考文献:

- [1] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 26~30.
[2] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984. 14~46.

Realization of a real-time coupling hydraulic hybrid model —Taking Huaihe River Channel as an example

SU Hang-li, ZHANG Dong-sheng

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: With a generalized Huaihe River outfall waterway as an example, a study is performed on the realization of a hybrid model. The position of the hybrid boundary is determined by a general prototype analysis, and a physical model and a mathematical model are developed for two parts divided by the hybrid boundary. For realization of the coupling between the physical model and the mathematical model, rhombic differential grids are adopted in the mathematical model, and a prediction of the water level variation at the hybrid boundary is added to the mathematical model, which may help improve the precision of coupling. Besides, some factors influencing the operation of the hybrid model are analyzed with emphasis placed on the parameter matching in real-time coupling of the hybrid model. The operating results of the model are presented, the precision of which satisfies the engineering requirements.

Key words: real-time coupling; hybrid model; simulating technique; outfall waterway