

复合模型中实时耦合问题的探讨

苏杭丽¹ 张东生²

(1. 南京经济学院计算机系, 江苏 南京 210003 ; 2. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 通过分析实时耦合复合模型中物模(物理模型)与数模(数学模型)的连接过程, 指出: 复合模型中的物模部分与数模部分的关系是相互制约、相互依存的, 二者间的实时耦合以及耦合的精度是复合模型成功的关键, 耦合的时间和空间匹配条件保证了复合模型中物模与数模两个部分连接的时空连续性, 控制周期的大小、控制变量的选择以及控制的策略是影响复合模型耦合精度的主要因素, 复合模型各部分都应以满足这些因素为前提进行设计。

关键词 复合模型; 实时耦合; 模拟技术

中图分类号: TV131.61 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2003)02-0216-04

迄今为止, 水工和海工水流问题模拟的手段主要是物模(物理模型)和数模(数学模型)。尽管二者都是解决问题的主要手段, 但它们也都有着各自的局限性, 而且在有些情况下, 两者都不是很合适。特别是随着经济的发展, 大型水利、航运工程的规划和工程结构的设计不能仅单纯考虑对紧邻区域的影响, 还必须考虑该项工程对于整个区域, 甚至邻近区域的影响。在这种情况下, 需要一种能综合物模和数模优点于一体的模拟方法来研究问题。

20 世纪 70 年代, 有人提出了将物模和数模连接在一起进行模拟的方法, 即复合模型的思想。复合模型中的物模部分模拟近区(或细节)问题, 数模部分模拟远区问题, 因此, 复合模型综合了物模和数模的优点。随后有几个实时耦合的复合模型^[1~4]问世。但由于种种原因, 复合模型的进一步研究被搁置。我国也同时出现了非实时耦合复合模型的应用并延续至今。非实时耦合复合模型也是由物模和数模两部分组成的, 但数、物模的运行不同步。一般耦合边界的条件通过数模运算来获得, 因此通常耦合边界位于数模的研究区域内, 数模的研究范围与物模的部分重叠。这样, 首先通过数模运算得出耦合边界条件, 然后将该条件作为物模运行的边界条件。这里的物模和数模是单独运行的, 所以对实时性没有要求, 物模制作也就相对容易。

水工实时耦合复合模型是物模和数模的耦合模型。物模和数模都是应用较成熟的模拟方法, 因此, 复合模型的难点在于物模与数模之间的耦合。耦合不仅仅是耦合边界变量的连接, 还需要考虑物模部分与数模部分耦合后的整体是否能继续保持原型在时空上的连续性, 同时, 耦合的精度对复合模型的稳定性也有影响。因此, 耦合和耦合精度是影响复合模型成功的两个重要因素, 复合模型各部分的设计实现都应首先考虑满足这两个方面。本文分析了实时耦合复合模型中与耦合及耦合精度有关的问题。

1 复合模型的耦合

1.1 复合模型中的连接

复合模型的物模模拟区和数模模拟区之间有着一条公共边界, 即耦合边界(图 1)。由于耦合边界上的条件是未知的, 因此物模部分和数模部分之间没有联系, 是两个独立的部分。复合模型耦合的基本条件就是实现物模部分和数模部分之间的连接。

由于耦合边界同时存在于物模部分和数模部分, 因此, 在复合模型运行的任一时刻, 耦合边界在这两个

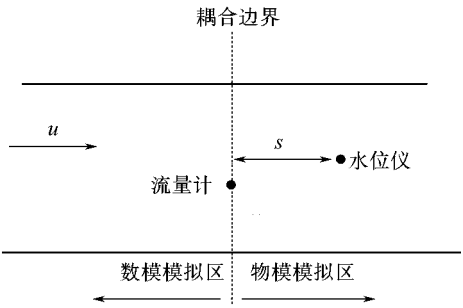


图 1 复合模型模拟的原型

Fig.1 Prototype of the hybrid model

部分中的所有物理量的值都应该是相同的.复合模型正是利用这一点将两个独立的部分连接起来的.但耦合边界上的任何物理量的值预先都是未知的,因此只能依靠数模和物模之间相互实时生成.例如,将物模采样的耦合边界的物理量(如水位)的值转换成原型值提供给数模,作为数模该时刻耦合边界的边界条件.数模据此进行计算,将数模计算出的耦合边界物理量(如流量)的值转换成模型值,提供给物模,作为物模在耦合边界的边界条件,以控制物模运行(以下的耦合边界连接变量均以水位和流量为例).

耦合边界变量的实时相互提供实现了物模部分和数模部分的动态连接,使得复合模型能够运行起来.但耦合边界相互提供的变量是否是物模或数模双方当时需要的数据以及数据的正确性,都需要进一步验证,因此,不能简单地认为,经过这样的连接,复合模型的制作就成功了.要保证连接的正确性,就需要耦合边界相互提供的变量在时间、空间及其他物理条件方面都相匹配.

1.2 耦合时间匹配条件

复合模型中物模与数模在时间上的过渡应该是连续的.尽管控制周期 T 大小的确定会影响复合模型,但只影响精度,而与时间连续性无关,因此需要找出与时间有关的所有量值,然后再分析它们之间的关系,从中得出保证时间匹配的条件.在复合模型中,流量和水位的连接是通过比尺转换实现的,时间的连接也应如此.现以流量为例,分析复合模型中耦合时间匹配问题.

当复合模型试验开始后(假设起始时间为零),数模部分每经过一定的时间(即控制周期 T),将耦合边界的流量值传送给物模部分.第 n 次传送数据时,数模计算的时间层所对应的原型时间为

$$t_1 = n\Delta t \quad (1)$$

式中: n ——控制周期数; Δt ——数模计算时间步长.

与数模运行时间相对应,物模部分每经过一定的时间(即控制周期 T),耦合边界的流量计根据数模计算的流量值进行一次控制.第 n 次控制时,物模所对应的原型时间为

$$t_2 = nT\lambda_T \quad (2)$$

式中 λ_T 为物模时间比尺.

在复合模型中,物模控制的耦合边界的流量与该控制周期中数模计算的耦合边界上的流量对应的是同一个原型时间,所以有 $t_1 = t_2$,即

$$n\Delta t = nT\lambda_T \quad (3)$$

整理后得

$$\Delta t = T\lambda_T \quad (4)$$

式中 T 和 λ_T 确定后, Δt 才能确定.在物模部分做好后, λ_T 就不可更改了; T 可以根据数模的计算时间(t')、完成控制需要的时间等因素来选择.

式(4)是一个时间的转换关系,它涉及数模中的时间步长、物模的时间比尺以及控制周期 T .由于数模中的时间步长对应的是原型时间,控制周期是模型试验中的时间,是时间的模型值,因此,式(4)是一个时间的比尺转换关系.它表明复合模型耦合时,时间的连续性是通过时间量的比尺转换关系来实现的.

复合模型中流量与水位的连接是通过耦合边界处每次数据交换时都进行相应的比尺转换来动态实现的.而时间的连接是不同的,时间的转换是在复合模型的设计阶段就实现的.当时间匹配关系中物模时间比尺 λ_T 、控制周期 T 确定后,数模的时间步长 Δt 才可以确定,因此,在时间的耦合中,物模对数模是有约束的.

1.3 耦合空间匹配条件

数模中还需要考虑模型差分格式和计算网格的问题.一维复合模型中的数模可采用菱形网格,如图 2 所示.由时间匹配条件确定时间步长后,再根据柯朗条件 $\Delta x/\Delta t \geq u + c$ 就可以确定数模计算的空间步长 Δx .

由图 2 计算网格可以看出,在数模与物模相互交换的变量中,水位和流量不位于同一个空间网格点上,相应地,在物模部分的耦合边界处,提供数模水位的水位仪与控制耦合边界流量的流量计之间也应有一定的距离(图 1).在数模网格中,水位与流量之间相距一个网格 Δx 的距离,因此,在耦合边界水位仪与流量计之间的距离应等于 Δx 的模型值,即 $s = \Delta x/\lambda_L$, λ_L 为物模的几何比尺.这个间距就是保证交换变量在空间上匹配的条件.耦合的空间匹配条件使得数模对物模也产生了约束.

复合模型中的物模和数模相互约束、相互提供耦合边界的变量,它们之间的这种关系使得二者可以完全耦合成一个整体,实际应用中也是成功的.复合模型在试验时还需要注意各部分(物模部分和数模部分)初始

条件、摩擦系数等保持一致。

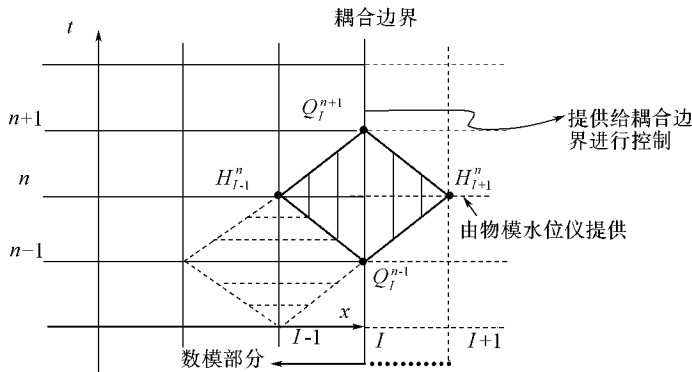


图 2 数模部分在耦合边界处的网格匹配
Fig.2 Grid matching on the coupling boundary of MM part

2 复合模型的耦合精度

耦合精度对复合模型的稳定性影响较大.影响耦合精度的因素主要有:耦合变量的选择及变量的精度;控制周期 T 的大小;控制的策略.

2.1 耦合变量选择及其精度问题

耦合变量的选择对耦合精度有影响,因此选择适当的耦合变量是很重要的.耦合变量的选择需要根据数模的计算格式和物模的控制采样仪器来确定.

耦合变量的精度与控制系统的采样和控制精度、数模计算精度、仪器分辨率、模型零点校验以及其他干扰都有关系.为保证变量的精度,需要对控制系统的软件和硬件加以处理.例如,软、硬件滤波;在每次试验前对采样控制仪器进行零点校验;消除耦合边界处水流的波动干扰,尤其是耦合边界处水位仪周围的波动干扰.

2.2 控制周期 T 的选择

复合模型控制的实时性很重要,实时性的实现主要从控制周期 T 方面去考虑.如果相邻两次控制的时间间隔较长,将会导致流体耦合变量值的震荡,因此,控制周期 T 不能太长.例如,为了让水位升高,计算出的控制流量增大,水位开始升高.但由于控制周期较长,在下一次控制到来之前,一直是这个较大的流量在起作用,水位也一直在升高,水位就有可能超过实际要增加的量值,甚至有可能增加得很大.在下一个控制周期内,水位又需要有一个较大的减小.如此反复的超调就可能导致模型的失控.

如前所述,与控制周期 T 有关的因素是采样时间、控制作用时间以及数模计算时间.控制周期 T 根据数模与控制系统是否位于同一台计算机而有所不同.当数模与控制系统位于不同的计算机时,控制周期 T 等于数模计算一个时间层的时间与控制采样时间两者中较大的一个;当数模与控制系统位于同一台计算机时,控制周期 T 等于数模计算一个时间层的时间与控制采样时间的和.

2.3 控制策略

不同的控制策略,则控制效果是不同的.复合模型对耦合变量的精度要求很高,因此控制精度必须很高才能保证采样值的精度.复合模型中采用流量控制,但流量控制过程有滞后特性,所以需根据实际情况采用合适的控制策略,如采用 PID 与 Smith 算法相结合的控制策略^[5],才能有效地解决控制滞后问题,使控制在较短时间内达到稳定.

3 结 论

实时耦合复合模型的制作必须要保证物模部分和数模部分耦合后的整体能够保持原型的连续.本文分析了物模与数模耦合时模型的控制周期 T ,数模的时空步长 Δt 和 Δx ,物模的时间比尺 λ_T ,空间比尺 λ_L 五者之间的关系.时间耦合关系以及空间的耦合关系从根本上保证了复合模型耦合的时空连续性.同时对影响复合模型稳定的耦合精度问题的讨论为复合模型的建立提供了参考.在建立实时耦合复合模型时,不论数模

为几维 ,这些问题的实质都是不变的.

由于复合模型要求数模部分相邻两次提供给耦合边界控制值的时间间隔不超过一个控制周期 ,而控制周期又不能太长 ,因此数模的计算速度形成了一个瓶颈 ,从而限制了复合模型的应用范围. 数模计算速度的改进除了依靠计算机的计算速度外 ,还可以从数模的计算格式以及分布式计算等方面去考虑. 一旦数模计算时间问题得到突破 ,复合模型将会得到广泛应用 ,因此复合模型还需进一步研究.

参考文献 :

[1] HOLZ K P. Analysis of time conditions for hybrid models[A]. In :Proceedings of 15th Coastal Engineering Conference[C]. New York : ASCE ,1976.3460—3470.

[2] FUNKE E R ,CROOKSHANK N L. A hybrid model of the St. Lawrence River Estuary[A]. In :Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference[C]. New York :ASCE ,1978.2855—2869.

[3] BARTHEL V ,CROOKSHANK N L. A hybrid model for the Senegal Estuary[A]. In : Proceeding of the 20th Coastal Engineering Conference[C]. New York :ASCE ,1987.1837—1851.

[4] BARTHEL V ,FUNKE E R. Hybrid modeling as applied to hydrodynamic research and testing[A]. In :MARTIRES R ,eds. Recent Advances in Hydrodynamic Research and Testing[C]. Kluwer : Academic Press ,1989.303—389.

[5] 苏杭丽 ,马洪蛟 ,张东生 ,等. 复合模型系统的控制策略[J]. 海洋工程 ,2002 ,20(2) 96—99.

Real-time coupling in hybrid model

SU Hang-li¹ , ZHANG Dong-sheng²

(1. Dept. of Computer , Nanjing Univ. of Economics , Nanjing 210003 , China ;
2. College of Traffic and Ocean Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on an analysis of the linking course between the physical model part and mathematical model part in the real-time coupling model , it is pointed out that the two parts are restricted by and depend on each other , and the real-time coupling and its precision are the keys to the hybrid model , that the conditions of time and space matching ensure the continuity of the coupling between the two parts , and that the control period , control variables , and control strategy are the main factors affecting the precision of coupling in the hybrid model. So the above factors should be considered when a hybrid model is built.

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