

基于 OpenMI 标准的模型耦合技术与应用

杨德全, 李光炽, 程闯闯

(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 开放式模型接口 (Open Model Interface, OpenMI) 为跨领域模型耦合提供了开放技术标准. 简要介绍并分析了 OpenMI 标准接口技术的工作原理, 以及采用该接口进行多领域耦合模型建模时各模型间接口的创建与实施模型耦合的关键技术, 将该技术应用于河网一维水力学模型与圩区零维模型耦合模拟, 计算结果令人满意, 验证了使用该技术进行模型耦合及复用已有模型的可行性和有效性. 最后对利用该技术进行模型耦合的意义和需要注意的问题进行了分析探讨.

关键词: OpenMI; 标准接口; 一维模型; 零维模型; 模型耦合

中图分类号: TV12; TV222.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2013)01-0076-05

利用数学模型对现实世界自然物理过程进行模拟是研究自然物理规律的一种基本方法. 对单一的某过程可采用特定的模型来实现, 如进行降雨产流模拟的水文模型、河道水流模拟的一维水流模型等. 但是, 对相互联系的过程, 如对平原区降雨产流与洪水演进问题及面源产污问题等进行研究, 则需要将模拟不同过程的模型进行耦合. 模型耦合从技术实现角度上看是不同模型之间的数据交互, 其实质是将被耦合的模型之间原本存在的自然物理过程联系进行还原. 目前, 模型耦合研究中一个主要的障碍是不同的模型在尺度与维数、时空特点及离散方法、模拟的物理量、数据处理机制、软件开发者的编程风格等导致的模型间数据交互困难^[1]. 开放式模型接口 (Open Model Interface, OpenMI), 亦称 OpenMI 标准接口技术, 为模型耦合提供了一种开放技术标准, 并提供了有力的工具, 在实践中, 已从水科学领域模型耦合模拟拓展到水-环境-经济等多领域模型耦合问题上^[2-3]. 本文将在对 OpenMI 做简要介绍的基础上, 分析采用 OpenMI 进行模型耦合的关键技术, 并采用该技术耦合圩区零维模型和河网一维水流模型, 最后对采用该技术进行模型耦合的意义和需要注意的问题进行了分析探讨.

1 OpenMI 简介

基于欧盟水框架指令 (WFD) 对集成水管理系统的需求, 即构建某种框架用以: (1) 连接不同领域的模型 (如水文、水力、生态、环境、经济); (2) 连接采用不同数学方法的模型 (如确定性、随机性模型等); (3) 连接不同维数的模型; (4) 连接不同时空尺度模型; (5) 对已有模型的复用等一系列要求, 由英国生态水文中心牵头, 丹麦水工所 (DHI), 英国 Wallingford 水力研究所以及荷兰 Delft 水力学研究所作为主要研发单位, 研制出一套开放式模型接口标准^[4] (Open Modeling Interface, 简称 OpenMI), 用于解决集成评估水问题所需的模型耦合问题.

OpenMI 为多个模型进行耦合时的数据定义、数据描述及数据传递制定了标准, 并提供了相应的软件工具, 允许基于时间序列的模型在运行时每个时间步长内交互数据^[5]. 当来自于不同领域及不同开发者的模型按此接口标准开发时, 在 OpenMI 提供的模型耦合平台上, 通过添加模型、添加连接、形成耦合体等步骤可实现操作层面的模型耦合. 其特点是增加了对已有模型复用的机会, 减少了模型耦合所需的代码重建代价.

收稿日期: 2012-05-15

作者简介: 杨德全 (1986-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事计算水力学与水文水资源研究. E-mail: ydqhu@163.com

OpenMI 的典型应用是 HarmonIT^[6], 在该项目完成后紧接着启动了旨在解决人们实际生活中的水环境问题的 OpenMI-Life 项目, 而后进一步改进推广。周玉文^[7]等按 OpenMI 标准, 对城市排水模型体系的架构作了探讨, 其以地理信息系统平台为基础, 独立开发降雨径流模型、管网汇流模型、河道受纳水体模型、地表积水模型, 然后在 OpenMI 环境中耦合, 形成城市暴雨洪水控制系统; W. Bauwens^[8]等根据 OpenMI 标准将 SWAT 模型接口进行改造, 将其与水力学模型(SWMM)、气候模型进行耦合, 并在 HydroDesktop 平台上构建了用于 Zenne 流域的综合模型 GESZ 模型; J. V. Assel 等^[9], 将其用于 Scheldt 流域的城市雨水管网模型与河流模型系统的耦合, 该耦合系统运行时同步双向交换水位与流量数据, 在多种情景下做了试验以验证独立的组件与耦合系统间的差异。

2 基于 OpenMI 标准接口技术的模型耦合关键技术

基于 OpenMI 标准接口技术的模型耦合工作原理见图 1^[12]。图中 A 和 B 表示按 OpenMI 技术要求标准化的模型组件, 运行过程中, 根据耦合的需要, 第 1 种情况是组件 A 单向地从组件 B 中请求数据, 如果 B 已完成对 A 所需数据的计算, 它将直接返回所需; 如果计算尚未完成, 提出需求的模型将等待所需数据的返回。第 2 种双向数据交互的情况是: 组件 A 需要从组件 B 中获得数据, 而组件 B 完成计算需从组件 A 中获取某种物理量数据。另外需要说明的是, 组件 A 请求的数据在时间与空间上与 B 模型的计算值

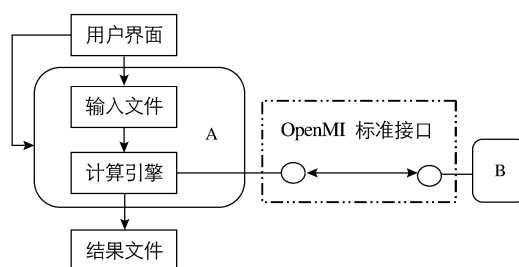


图1 基于 OpenMI 标准接口技术的模型原理

Fig. 1 Principle of coupling models works

不匹配的情况, 如一个模型时间步长为小时或分, 而另一模型时间步长为天, 这种情况下要求模型做相应处理后返回请求值, 对返回的数据在数据格式与科学语意上必须相匹配。OpenMI 充分考虑了这些因素, 采用“请求-响应”机制, 运行时根据预定义的交互模式实现模型组件间的数据请求与返回。其关键的功能函数 GetValues(time; Itime, linkID: string)、SetValues(time; Itime, linkID: string) 等对数据请求做出响应, 其中参数 linkID 指向数据所在的位置, 从而各模型组件得以连接和运行^[1]。

采用该技术进行耦合模型开发的关键步骤^[1]是: (1) 模型定义与模型组件开发。OpenMI 在制定接口标准的同时也提供了相应的软件工具, 可以用其开发新的模型, 也可以直接调用采用此接口的商业模型组件, 如 MIKE11, Info Works 等。(2) 模型接口修正, 形成模型组件文件。即分析模型间交换的物理量, 以及物理量交换的时间、空间位置, 修改已有模型的接口从而直接复用模型代码等。(3) 在 OpenMI 环境中创建模拟系统。模型组件经过(1)(2)两步处理之后即可在 OpenMI 环境中耦合运行。关键步骤为: 添加模型-添加连接-保存耦合体-运行。该文件是一个 XML 文件, 后缀为 .opr, 包含经上述步骤创建的模拟系统所含的模型信息、连接信息等。

3 基于 OpenMI 标准接口技术的模型耦合应用验证

将 OpenMI 标准接口技术应用于某平原河网地区河流与圩区相连的河网水流模拟。对河道水流采用一维水流模型进行模拟, 对圩区、湖荡等主要考虑其调蓄作用, 即与河道的水量交换, 采用零维模型模拟。而后将河道水流模型与圩区模型在 OpenMI 环境中耦合。河网水流模拟采用基于圣维南方程组的四点线性隐格式差分模型^[10], 描述河道水流运动的圣维南方程组为:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qV_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为旁侧入流; Q, A, B 和 Z 分别为河道断面流量、过水面积、水面宽和水位; V_x 为旁侧入流流速在水流方向上的分量; K 为流量模数; α 为动量校正系数。

圩区零维模型^[11] 为:
$$\sum Q = A(z) \partial Z / \partial t \quad (2)$$

式中: $A(z)$ 为蓄洪区内水面面积, 一般为水位的函数; Z 为水位; t 为时间。

方程(2) 离散为:
$$\sum Q_i = A(z) (Z - Z_0) / \Delta t \quad (3)$$

按上述方法进行离散后, 耦合模型在计算中交互的数据为圩区面积 A , 河道节点水位 Z , 河道与圩区连接处节点的追赶系数 PB 与 VB 的计算式为:

$$PB = -AZ/D_t, \quad VB = A/D_t$$

式中: D_t 为时间步长。

河道边界条件计算需要圩区的水面面积数据, 而面积计算又需要水位数据, 形成耦合。圩区与河道连接处的边界条件采用上述耦合方法给出, 其他边界处采用实测的水位(流量)资料。耦合框架及数据交互示意图 2。

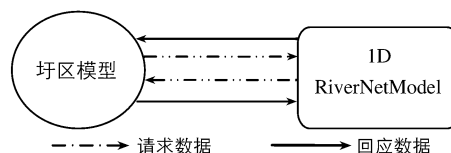


图2 模型耦合框架及数据交互

Fig. 2 Framework of models coupling and its data transfer

在每一个计算时间步长内, 河道一维模型向圩区模型提出水面面积数据请求, 圩区模型向河网模型提出水位数据请求。这种基于时间序列的数据请求符合 OpenMI 的设计理念, 因此可以采用该技术进行模型耦合。本文实现的步骤是: (1) 改进已有的圩区模型与一维水流模型, 改进步骤为: (a) 编译计算引擎代码为 DLL; (b) 创建 OpenMI 标准的 MyEngineDLLAccess 类, 调用(a)生成的 DLL 中相关函数, 使之成为 .NET 平台下的程序集; (c) 创建 MyEnginewrapper 类, 引用 MyEngineDLLAccess 类, 继承和实现 IEngAccess 接口; (d) 创建继承 LinkableEngine 类的 MyLinkableEngine 类, MyLinkableEngine 类中定义和使用 MyEnginewrapper 类的私有变量, 由于 LinkableEngine 类继承了 ILinkableComponet 接口, MyLinkableEngine 类即成为符合 OpenMI 标准的可连接的模型组件 LinkableEngineComponent; (2) 在 OpenMI 可视化环境中构建耦合体并运行。模型耦合运行界面见图 3。

计算结果验证见图 4。从图 4 可见, 模拟值与计算值偏差在允许范围内, 计算结果令人满意, 证实了采用该技术进行模型耦合的有效性以及对已有模型接口改造实现复用的可行性。

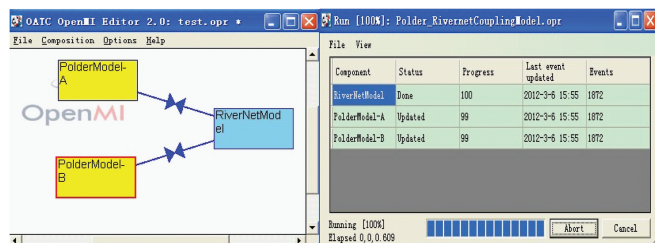


图3 模型耦合运行界面

Fig. 3 Coupling models running interface

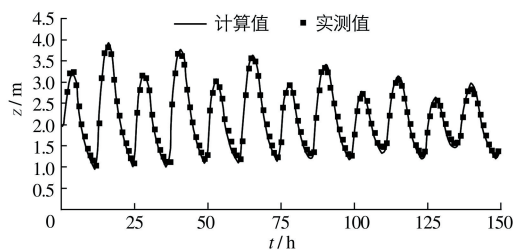


图4 计算结果对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured values

4 需要注意的问题

基于 OpenMI 标准接口技术的模型开发理念是将模型分为两个部分, 一是计算引擎, 二是数据。其中, 数据包括输入输出数据、参数、边界条件等。模型计算引擎按 OpenMI 标准接口开发后, 可以在 OpenMI 平台上实现操作层面的可视化耦合, 即通过添加模型间的连接(add connection) 形成耦合体, 从而完成耦合模型系统的建立。对于参与耦合的模型 A 和 B, 假设模型 A 的输出作为模型 B 的输入, 如实际应用中的水文模型与

水力学模型耦合形成洪水预报系统的实例,无论如何,A,B 模拟值都与实测值存在一定的偏差,在此情况下将模型 A 的输出用作模型 B 的输入后会存在误差传递的现象.因此,对于多个模型耦合形成的系统,组件的单独率定及系统的二次率定必须加以重视.值得借鉴的是 A. Voinov 等^[12]对模型耦合研究时提到,模型是计算引擎与数据的复合,应该重视数据在模型中的作用,该文作者给出了在模型连接处添加校正数据的方法,对模型系统进行校正^[12].

依据以上思路,考虑 OpenMI 标准接口技术下的模型耦合,在模型 A,B 以外添加一个“数据模型”,此数据模型可以是实测资料也可以是数据校正方法等,按 OpenMI 的技术要求及模型计算的需要按一定的方式组织,并接入到模型交互项中,对组件 A 的输出,即传递给组件 B 的数据进行监测、反馈,对组件 A 的相关参数进行实时修正,以防一些变化与扰动产生的影响在系统内传递,从而保持模型组件运行的独立性.

此外,应对采用 OpenMI 技术进行模型耦合后形成的模拟系统的运行效率进行考评.对于某些对运行效率要求较低的模拟系统,如为规划编制做参考的系统以及其他一些用来做效果评估的系统等,运行的效率不作为其关键的考评因素,但是对于某些对运行效率要求较高的模拟系统,如在线提供实时服务的系统、洪水预报系统等,准确高效运行,对及时做出决策意义重大.假设耦合系统应用的各模型结构正确、方法恰当、资料完备,高效与准确取决于计算速度与稳定性.基于 OpenMI 标准接口技术的模型耦合后,各模型组件之间不是通过某种格式的中间文件交换数据,而是根据其“请求-响应”机制,自动地进行单向或双向存取.因此将多个模型进行耦合后,各个组件的运行都提出了其相应的数据请求,此时计算顺序的复杂程度超过预先设想值,这对系统的稳定性提出了更高的要求.对此,一方面要求该耦合框架本身应是稳健的,这需要开发者不断地调试与完善;另一方面,用户应该对模型耦合的总体框架有深刻的理解,熟悉模型间需要交互的数据及其交换时间、位置等,并尽量简化模型间的数据请求-响应.而对于效率的问题,一方面由多个模型的计算引擎计算速度本身决定,这需要对引擎的算法加以优化;另一方面受模型颗粒度的影响,模型颗粒度小,功能单一,标准化程度高,模型的复用灵活方便,但是要实现一个复杂的物理过程模拟则需将更多的模型进行耦合,而多个模型之间频繁的数据交换会降低效率,因此需要对此做出权衡. OpenMI 定义了模型耦合时模型间数据交互的接口标准,但 OpenMI 在本质上与模型是独立的,因此对于模型研究者来说,可将精力放在自己领域的问题上,在开发模型时计算引擎完全可以按自己的方式编写,也可以重用已有的代码,只需将模型的输入输出接口标准化即可.随着全球数十家水环境系统模型软件供应商将计算引擎不同程度地兼容 OpenMI 接口,如丹麦水工所(DHI)研制的 MIKE 系列软件、荷兰 Delft 研制的 Sobek 1D Flow 和 Delft 3D 软件、英国 Wallingford 研制的 Info Works 系列等,并按 OpenMI 标准提供模型组件,其他模型开发者及模型用户可以在不经过任何二次开发的情况下根据研究的需要耦合这些模型,个体开发者按 OpenMI 标准开发的模型也可顺利耦合这些模型,提高了相互的价值.

5 结 语

OpenMI 提供的技术标准及其耦合框架为建立跨专业学科耦合模拟系统起到了桥梁与纽带的作用,使多个模型在代码重建较小的条件下实现了耦合,并提供了协同计算服务.

本文采用 OpenMI 标准接口技术进行耦合模拟的初步尝试表明,各模型计算引擎接口符合该标准是实现模型耦合的前提保证,对模型间交互的数据在时间、位置的理解是实现模型耦合的关键.

需进一步研究的工作包括:(1)加强容错处理和中断处理机制,减少耦合系统运行的不稳定因素影响,提高系统的可调适性.(2)扩展可视化的分析工具,丰富耦合系统人机交互界面,完善耦合系统计算结果的表达方式,为决策会商提供便利.

致谢:南京水利科学研究院水文水资源研究所刘九夫教授对本文给予了悉心指导,谨致谢意.

参 考 文 献:

- [1] 雷四华. 时序计算通用模型接口-OpenMI 开发技术及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社. (LEI Si-hua. OpenMI technology and its application[M]. Beijing: China WaterPower Press. (in Chinese))
- [2] VAN ITTERSUM M K, EWERT F, HECKELEI T, et al. Integrated assessment of agricultural systems-a component-based framework for the European Union (SEAMLESS)[J]. *Agricultural Systems*, 2008, 96(1/3): 150-165.
- [3] FOTOPOULOS F, MAKROPOULOS P, MIMIKOU M A. Flood forecasting in transboundary catchments using the open modeling interface[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25: 1640-1649.
- [4] ROGER V, MOORE, ISABELLA C, et al. An overview of the open modeling interface environment (the OpenMI) [J]. *Environment Science & Policy*, 2005, 8: 279-286.
- [5] GREGERSEN J B, GIJSBERS P J A, WESTEN S J P. OpenMI: open modeling interface[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2007 (9): 3.
- [6] BLIND M, GREGERSEN G B, REGERSEN. Towards an open modelling interface (OpenMI) the HarmonIT project [J]. *Advances in Geosciences*, 2005(4): 69-74.
- [7] 周玉文, 王永, 王磊. 基于 OpenMI 技术的城市排水模型体系架构介绍[J]. 给水排水, 2009, 35(3): 9. (ZHOU Yu-wen, WANG Yong, WANG Lei. A introduction of urabn sewerage model system model framework based on OpenMI[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(3): 9. (in Chinese))
- [8] BAUWENS W, SHRESTA N, TOLSEEA O, et al. Hydrological open source experiences using SWAT and OpenMI[OL]. hppt: //www.academia.edu/1468483/Hydrological_open_source_experience_using_SWAT_and_OpenMI
- [9] ASSEL J V, DEVROEDE N, RONSE Y, et al. Modelling bidirectional interactions between sewer and river systems using OpenMI-a case study in the Scheldt River Basin (Belgium) [OL]. http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/andle/2042/35709/31_702-032VAN.pdf?sequence=1
- [10] 王船海, 李光炽. 实用河网水流计算[M]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG Chuan-hai, LI Guang-chi. Practical river net flow simulation[M]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [11] 李光炽, 王船海. 流域洪水演进模型通用算法研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 11. (LI Guang-chi, WANG Chuan-hai. Universal algorithm for river basin flood routing model[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2005, 33(6): 11. (in Chinese))
- [12] VOINOV A, CERCO C. Model integration and the role of data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(8): 965-969.

OpenMI and its application to coupling models

YANG De-quan, LI Guang-chi, CHENG Chuang-chuang

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Open Model Interface (OpenMI) has provided an open technology standard for coupling models from variety domains. This paper gives a brief introduction of OpenMI technology. The working principle and key technologies of using the OpenMI for coupling models have been analysed. Then this technology has been used for coupling 1D river-net model and 0D polder model with satisfactory simulation results, which verifies that it is effective for coupling models and models' reuse. Finally, this paper discusses its utility and some problems that need special attention in the application.

Key words: OpenMI; standard interface; 1-D model; 0-D model; model coupling