

北京工业大学

硕士学位论文

基于OpenMI的城市排水系统模拟技术研究

姓名：王永

申请学位级别：硕士

专业：市政工程

指导教师：周玉文

20090501

摘 要

城市排水管网系统是重要的城市基础设施,其任务是收集与输送城市污水和城市降雨、融雪产生的径流,它具有保护环境和城市减灾双重功能。随着城市建设步伐的加快,市政排水事业也得到了迅速的发展。随着计算机技术、网络技术和通信技术等信息技术的飞速发展,给城市排水管网信息化、现代化管理带来了新的机遇和挑战。排水管网系统模拟技术的发展与应用是市政排水事业发展的趋势与方向,为城镇公共事业发展的科学化、现代化和系统化提供了基础,以提高人们的生活水平与质量。

排水管网水力模拟技术是排水管网系统模型的核心与基础。而非恒定流模拟技术在城市排水管网的设计、运行管理以及排水系统水量水质模拟等方面有着重要的辅助作用。国外许多发达国家都把非恒定流模拟作为管网设计、运行管理的基础和依据。由美国环保署开发暴雨管理模型(SWMM)在排水管网非恒定流模拟方面有着广泛的应用。欧洲水环境系统模拟软件公共接口技术(Open modelling interface-OpenMI)是水力模型软件计算引擎之间接口的一个新标准,该标准有利于建立集成模型系统,目前在欧美国家有了初步的应用。

首先,介绍了非恒定流模拟技术的发展与应用,重点阐述了一维非恒定流浅水方程及其数值解。对于计算机模型在排水管网中的应用作了系统概况与总结。然后,对OpenMI技术进行了系统的介绍,包括其来源,历史与发展。该标准的作用与意义。紧接着,以一维排水管网模拟软件(SWMM)及河道模型(ISIS)的计算引擎为例,研究如何开发OpenMI标准所规定的兼容计算引擎,概述了国外使用该技术建立排水系统模型的实例。

最后,以石景山老山奥运赛区排水系统模拟为实例,运用SWMM软件建立排水管网水力模型,结合OpenMI技术对SWMM软件进行二次开发;建立简单的河道及二维地表漫流水力模型;在OpenMI技术接口平台上与SWMM管网模拟系统集成,进而综合评估场馆区在极端降雨条件下的洪涝险情分析。

关键词 排水管网; 暴雨管理模型(SWMM); OpenMI

ABSTRACT

Urban drainage system is an important infrastructure to a city. It is to collect and deliver the urban waste water and runoff cause by rainfall and snowmelt, which has the dual functionality of environmental protection and disaster migration. With the speedy development of the computation technology, internet technology, information and communication technology (ICT), opportunity and challenges had been given to the innovation and modernization for the management of the drainage system using new ICTs technology. Implementation and application of urban drainage modelling technology is the trend for municipal urban drainage development. It contributes to the modernization of the city's public utilities and thus to improve peoples living standards.

Hydraulic modeling technology of the drainage network is the key to urban drainage modeling. Unsteady simulation technology is of great help to the design of the drainage network, operation and management of the network system and modeling of the water quantity and quality. It is regarded as the base for the design and management of the network in some developed countries. Storm water management model system (SWMM) development by US-EPA has its wide application in this area. Open Modelling Interface (OpenMI) technology development by European countries is a new standard for modeling linking among computational engine in water domain; it is well accepted by EU and USA scientists.

Firstly, introduction on unsteady hydraulics modeling's application and development is given, specifically discussed 1D shallow water equation and its numerical solutions, followed by a summary on computer models in urban drainage areas. Then, it describes the open modeling interface technology including its source, development, history and objectives for assisting modelers in water engineering domain. Base on the SWMM's computational engine, migration of the SWMM engine towards OpenMI compliant is included in this paper. Some examples of using OpenMI to build integrated urban drainage models are later on summarized.

Lastly, based on the modeling drainage system in Beijing Olympic center in ShijingShan district Beijing city, build sewer network model in SWMM, develop the OpenMI component for SWMM computational engine and use the migrated SWMM OpenMI component to link the Sewer model to a simple river model built in ISIS on the OpenMI platform to evaluate the flood risks in the area.

KEY WORDS Drainage network system, Storm Water Management Model (SWMM), Open modeling interface(OpenMI)

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名: 王永 日期: 2009.6.4

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名: 王永 导师签名: 周秋 日期: 2009.6.4

第1章 绪论

1.1 课题背景和研究意义

城市排水管网系统是重要的城市基础设施,其任务是收集和与输送城市污水和城市降雨、融雪产生的径流,它具有保护环境和城市减灾双重功能。随着城市建设步伐的加快,市政排水事业也得到了迅速的发展^[1]。

在我国传统的城市排水管网设计和管理过程中,均采用恒定流水力学理论计算管网的汇流过程。采用恒定流水力学理论进行城市,排水管网水力计算的优点在于其简单,但是,也有很多实际问题难以解决。城市雨水管网中的水流和城市合流制管网降雨期间的水流是非恒定流,并具有突涨突落的特点,城市污水管网中的水流也是非恒定流,但随着排水用户的增加会趋于恒定,在需要考虑排水管网内部水流的真实流动过程时,也应按非恒定流考虑^[2]。

非恒定流模拟技术在城市雨水管网设计、运行管理以及排水系统水量水质模拟等方面有着重要的辅助作用。国外许多发达国家都把非恒定流模拟作为管网设计、运行管理的基础和依据。我国在该方面技术的研究起步较晚,应该借鉴吸收国外先进的技术经验,为国内的市政排水事业的发展添砖加瓦。

然而,市政排水系统只是城市水循环圈的一部分,直接与排水系统相连的有:降雨径流系统和城市河道或水渠等。排水管网系统收集降雨所产生的地表径流并排入收纳水体—河道或水渠等。因此对城市水文(降雨径流)、城市排水系统和城市河网系统综合管理是维护水循环健康的重要保障,同时也是城市防洪减灾工作必备基础。

随着计算机软件、硬件技术、信息科学以及数值计算技术的飞速发展,大量的商业水环境系统模拟软件纷纷问世,城市水环境工作者有了有利的工具来模拟水循环的各个过程行为。合理的计算机模型为管理者提供坚实的科学依据。然而,传统的计算机模型是比较单一的模块性质的模型,比如城市水文降雨径流模型单纯模拟降雨径流模块,河网水力模型单纯模拟河网动态,城市排水系统,地下水模型等等都是单一模块。但是事实上这些模型组成了一个有机的城市水环境系统,而且各个模块自己都有着密切的联系与动态的相互作用。单一的模型可以做到局部的最优化,但是局部的最优化并不等于全局的最优化。必然的趋势是把各个模块有机的统一起来,这样的模型系统会大大的加强科技工作者付出行之有效的综合水环境系统管理。在上个世纪八十年代,国外就有研究学者把综合水域管理模型的概念付之实际科研并开发了相应的计算机模型软件把不同模块的计算机模型有机的整合在一起^[3]。

国内外有很多种关于水环境系统的模拟软件（参见1.2.1），每种软件可以模拟不同的水环境现象。然而，这些众多的软件之间没有统一的公共接口，各个软件的数据格式输入输出都不尽相同，各软件之间共享与交流困难，这样不利于建模者根据自己的需要来选择最合适的软件并把用不同的软件建立的水环境模型结合集成组成一个系统。而且很容易造成资源的浪费和重复开发。

在系统集成模拟的驱动下，2001年在欧盟第五框架资助下，由英国生态与水文研究中心牵头，三家欧洲知名水信息系统模型软件提供商：丹麦水利研究所（DHI），英国的沃灵福德水力研究所（Wallingford）及荷兰的代尔夫特水力研究所（Delft Hydraulics）作为技术领头，欧洲七国十四家研究所、大学历时7年共同研发出了欧洲水环境模拟软件公共接口技术（Open Modelling Interface, 简称OpenMI）。目前OpenMI渐渐成为水环境模拟软件的一个标准，符合此标准的模型软件可以在不用任何二次开发的情况下，在模型运行同时相互之间交换数据。为不同类型的模型耦合，建立系统集成模型系统创造了条件^[4]。

本论文将对OpenMI技术进行深入消化吸收，并在此基础上，研究城市排水系统非恒定流水力模拟技术。对美国环保署（SWMM）的开源一维非恒定流模拟软件SWMM进行二次开发，使其接入OpenMI标准。这样借鉴欧美先进的技术来模拟城市排水系统，为城市水环境系统以及城市防洪减灾工作做出一点研究，以抛砖引玉。

1.2 国内外研究现状

本节就国内外排水系统水力模拟技术发展、OpenMI技术及SWMM模型进行介绍。

1.2.1 排水系统水力模型的发展及应用

20世纪60年代开始，一些基于计算机开发的水文、水力模型在国外陆续推出。1969至1971年由美国环境保护署（EPA）资助，梅特-卡夫-埃迪公司（M&E）美国水资源公司（WRE）和佛罗里达大学（UoF）等联合开发了SWMM模型。随后，伊利诺城市排水区域模拟模型（ILLUDAS）、辛辛那提大学城市径流模型（UCURM）、STORM等模型也相继问世。此后，国外研究者还开发了许多城市雨洪过程线模型和城市雨洪模拟模型，伊利诺雨水管道系统模拟模型（ISS）、水文计算模型（HSP）等^[43]。

我国在城市排水管网模型的研究方面起步较晚，但是近年来在消化吸收国外研究成果的基础上，也出现了一些结合我国国情的试验性研究成果。1993年，岑国平、詹道江建立了雨水管道径流计算和设计模型—城市雨水管道计算模型^[11]

(SSCM), 它由暴雨、地表产流、地表汇流、管网汇流和雨水管道设计等子模型组成。该模型主要用于雨水管道系统的设计和校核, 也可作为城市雨洪模拟模型, 用于城市雨洪的控制和雨水污染防治等。1998年, 周玉文建立了城市排水管网非恒定流模拟模型(CSPSM)^[12], 将非恒定流模拟技术应用于我国城市排水系统的规划设计和运行管理中, 为后续的排水系统动态模拟奠定了基础。1998年, 徐向阳提出了一个适合平原城市水文过程模拟的数学模型^[13], 由地表产流、地表汇流、管网汇流、河网汇流个子模型组成, 并对北京市太平湖排水小区雨洪过程模拟的验证表明, 结果是可靠和合理的。

近年来, 基于GIS的城市排水管网模型商业化软件在国内外发展迅速。丹麦水力研究所(DHI, Denmark Hydraulic Institution)先后推出了MOUSE和MIKE URBAN^[14], 提供了一个集成化的工作环境, 能够方便快捷的对给排水管网的数据进行管理, 提供了给水管网模拟计算的EPANET引擎和雨污水管网模拟计算的SWMM引擎。美国奔特力(Bentley)公司的SewerGEMS^[15]是全动态、多平台(GIS、CAD和Stand-Alone)市政排水系统综合模型, 可以对雨水系统、污水系统以及合流制系统进行全面完整的技术分析, 并且在执行这些分析时可以选用美国环境保护署SWMM水力模型或奔特力公司先进的圣唯南方程隐式解水力模型。英国Wallingford公司的InfoWorks CS具有自己的计算引擎^[16], 能够用于对城市完整水循环的水文模拟, 包括城市污水泛滥及污染情况的预测以及水质模拟和沉积物在管网中的转移情况。荷兰代尔夫特水力研究所的SOBEK软件^[17] (包括一维及二维)集成GIS技术平台, 模拟河流河口地区、灌溉排水系统以及排污、排雨系统的各种管理问题。可以综合考虑封闭管道流、明渠流、河流、地表漫流等一系列水力、水文和环境过程。

然而, 前面所述的各个公司所生产的模拟软件仍然处于一种“各自为政”的局面。这些众多的软件之间没有统一的公共接口, 各个软件的数据格式输入输出都不尽相同, 各软件之间共享与交流困难, 而且很容易造成资源的浪费和重复开发。更重要的是后来开发的软件不能直接跟已有的软件结合起来把优势最大化。这样就造成建好的模型的移植性很差, 运行及维护起来很不方便, 建好的容易变成废弃模型或者死模型。

1.2.2 欧洲水环境模拟软件公共接口 (OpenMI)

2001至2005年, 在欧盟第五框架科研资助下, 由英国水文与生态研究中心(Centre for Ecology and Hydrology)牵头^[18], 三家欧洲知名水环境系统模型软件提供商: 丹麦水力研究所(DHI), 英国的Wallingford水力研究所及荷兰的代尔夫特水力研究所(Delft Hydraulics)作为技术领头, 共有欧洲七国十四家研究所、大学与公司参与了研发了欧洲水环境模拟软件公共接口技术(OpenMI), 目前

OpenMI 已经逐渐形成水环境模拟软件技术引擎之间接口的一个行业标准, 被世界范围内的科研院所、大学、公司乃至环保部门所认可。2007 年 12 月, OpenMI 委员会正式成立, 提供 OpenMI 技术支持, 维护并利用该技术进行开展实际的水环境系统模拟项目, 在全球范围内推广该技术。

目前 OpenMI 技术已经得到水环境系统建模者的诸多应用。斯凯尔特河流域综合管理项目 (Scheldt river basin) 是基于 OpenMI 技术平台来实现的^[19]。其中包括了: 排水系统模型与河流水质模型的耦合, 河网动力学模型与河流水质模型耦合, 一维河流动力学模型与二维模型之间耦合等。除了 OpenMI 技术委员会的建模应用以为, 许多水环境系统建模科研工作者也积极尝试使用 OpenMI 技术综合解决水环境系统所存在的问题。Rose 和 Ian Joynes 曾利用 OpenMI 连接排水管网模型和河网模型来进行综合洪水风险评价评估模拟^[22]; Jamie Margetts 曾利用 OpenMI 技术链接排水管网模型, 水质模型, 河网模型以及污水处理系统在线控制模型来综合评估河流水质^[22]。Gijssbers 等人讨论了如何利用 OpenMI 技术建立河网与地下水系统交互模拟^[31]。F Reußner 等人讨论了计算引擎的 OpenMI 兼容转化, Fortran 与 Microsoft dot net 混合编程以及 OpenMI 技术用于连接河网, 排水系统和污水处理系统模型等^[30]。

我国对于该技术的研究起步较晚, 对于 OpenMI 技术的发展及运用有待进一步研究, 结合我国国情运用西方先进的模拟技术来加速国内排水事业的飞速发展。本论文的目的之一就是消化吸收 OpenMI 技术, 并借鉴运用尝试用于排水管网水力模型建模之中。

1.2.3 暴雨管理模型(SWMM)模型

暴雨管理模型 (SWMM) 是一个面向城市区域的雨水径流量和水质分析的综合性计算机模型。能够模拟汇水区域、管道、检查井等水文、水力和水质要素的时空分布^[10]。

SWMM 模型能够对以下管网汇流过程进行模拟: 各种规模的管网控制模拟; 模拟来自地表径流、地下中间流、降雨入渗流、旱季污水流量和用户定义入流流量的外部入流在排水系统中的流动过程线; 提供各种类型的闭合管道、明渠及天然河道形式模拟专门的排水系统成分, 如蓄水单元、处理单元、分流器、水泵、堰口和孔口等; 模拟多种水流特征, 如回水、超载、逆向流等。

SWMM 可用于城市区域暴雨径流、合流制管道、污水管道和其它排水系统的规划、分析和设计等环节, 也可应用于非城市区域。SWMM 模型主要应用于以下领域: 设计为控制洪灾而建的排水系统各设施; 制定最小的合流制溢流策略; 评估入流和入渗对生活污水管溢流的影响, 用于非点源污染研究, 评估减少雨季

污染负荷的最佳管理措施。

SWMM 模型为美国环保总局研制开发，并且模型软件的源代码对外开放。所以在世界范围内得到了广泛的传播与认可。近些年来，SWMM 模型也在中国得到很好的应用与推广。董欣等将 SWMM 模型应用到深圳河湾地区的排水系统规划中^[24]；丛翔宇等运用 SWMM 模型对强降雨对北京城区的影响进行了分析^[25]；刘兴坡运用 SWMM 模型对镇江市的排水管网建立了模型并进行了分析^[26]；此外，刘俊、章程分别运用 SWMM 模型在上海和桂林建立了排水管网水力模型^[27]。

1.3 课题的来源和内容

1.3.4 本课题的来源

本研究课题来源于“十一五”国家科技支撑计划“城市市政管网规划建设与运营管理关键技术研究及示范（2006BAJ16B04）”的子课题“城市市政管网信息管理系统及可视化动态管理系统研究”，本文主要研究市政排水管网信息管理系统部分。

同时，本课题也是在读研究生期间参与欧盟水信息与水管理项目的重要组成部分。

1.3.5 主要研究内容

本课题主要研究城市排水系统非恒定流模拟技术理论基础，以及欧洲水环境系统模拟软件接口技术（OpenMI）的数据接口模式。并在此接口技术的基础上研究与城市排水管网水力模型的结合，为城市河道明渠水力模型以及二维地表漫流淹没模型之间的耦合技术做初步研究。并以石景山老山奥运场馆区排水系统模拟为实例，在 OpenMI 接口技术标准下，运用 SWMM 软件计算引擎，并对 SWMM 软件进行二次开发，建立排水管网水力模型；在 OpenMI 技术接口平台上建立简单的河道及二维地表漫流水力模型与 SWMM 管网模拟系统集成，进而综合评估奥运中心区在极端降雨条件下的洪涝险情分析。

第2章 水信息学与非恒定流模拟技术

2.1 水信息学简介

水信息学 (Hydroinformatics) 是一门新兴交叉学科。它集数学、计算机科学、计算流体力学以及传统的水环境科学和工程学的方法于一体, 综合解决人类所生存的水环境系统的问题 (水资源管理、防洪减灾及水环境污染等), 其应用领域极其广泛。我国学者李树平曾介绍该门学科的来源发展及其应用^[5]。M.B.Abbott 教授于20世纪80年代末首次提出“Hydroinformatics”一词。Price等人归纳并详细讨论了水信息学这门学科的定义和范畴, 提出简短的定义: “用于水管理的信息技术” (information technology for managing water) ^[28-29]。

欧美等发达国家的水信息系统高等教育体系起步较早, 我国高等教育体系中该学科为工学水利工程一级学科下属二级学科, 河海大学等有该学科专业设置及人才培养。水信息系统的计算机模型可以说是该门学科的核心。利用高速发展的计算机科学技术, 信息与通讯技术等来辅助解决传统水环境中的问题。水信息系统计算机模型已经成功应用于诸多水环境问题中, 例如: 海岸和河口污染扩散的过程分析、水资源流域管理、城市防洪减灾评估, 城市给水排水基础设施管理^[5]。

水信息系统的模拟商业软件在欧美等发达国家已经得到成熟应用, 比较知名的水信息系统解决方案有: 丹麦水力研究所 (DHI) 的Mike系列, 英国 Wallingford 水力研究所的 Infoworks 系列, 以及美国 Heastad Method Inc. 的 WaterCAD, SewerCAD, StormCAD 等。除大型商业软件解决方案外, 一批开源软件也得到了广泛的应用比如美国环保署的 EPANET, SWMM, 美国 USGS 的 HEC-RAS, Modflow 系列。本论文重点介绍的 OpenMI 技术也系属开源软件系列^[14-18]。

水信息学出现于20世纪80年代初期, 直到1989年, 才出现 Hydroinformatics 的名称。1991年 M.B.Abbott 教授的专著《Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment》的出版标志了水信息学的正式诞生^[28]。到目前为止, 水信息学已在亚洲、欧洲和北美的众多所大学讲授。水信息学具有自己的专门期刊《Journal of Hydroinformatics》(1999年创刊, 由 IWA 和 IAHR 联合出版), 以及两年一次的国际学术会议“International Conference on Hydroinformatics”。目前已召开了8次有关水信息学的国际学术会议, 它们分别是: 1994年9月19日~23日在荷兰代夫特、1996年9月9日~13日在瑞士苏黎世, 1998年8月24日~26日在丹麦哥本哈根, 2000年7月23日~27日在美国衣阿华, 2002年7月1日到5日在英国卡迪夫, 2004年6月21日~24日在新加坡, 2006年9月4日~8日在法国尼斯, 2009

年1月12日~16日在智利的Concepción。而第九次国际会议将会于2010年9月7日~11日在中国天津举行。

一般意义上,水信息学是研究与水环境相关数据的收集、处理、存储、传布、分析和图形显示等的学科,它通过综合数学、计算机科学和传统水环境科学和工程学的方法,来揭示大量复杂的水环境科技奥秘,解决水环境科技难题。水信息学的研究和应用领域极为广泛,内容非常丰富,包括数据的获取和分析(例如SCADA、遥感、遥测、数据模型、数据管理和数据库技术)、先进的数值分析方法和技术(例如一维、二维和三维计算机水力、水质和水生生态模型,参数估计和过程识别)、控制技术和决策支持(例如基于模型控制、不确定性处理、决策支持系统、分布影响评价和决策)、标准软件的开发(例如海岸和河口污染扩散的过程分析、水资源的流域管理、城市给水排水系统、计算机辅助教学软件),以及最近出现的新技术的应用(例如进化算法、神经网络、模糊逻辑、分布和扩散模型、面向对象和代理)等^[5]。

对水信息学科的系统理论介绍超出了本论文的研究范围,请参阅相关科技文献。

2.2 非恒定流模拟技术简介

采用非恒定流模拟技术作为城市雨水管网设计水力计算的基础,是对传统的城市排水管网设计方法的一种改进。一般包括设计降雨模型、地表径流模型、管内汇流过程计算、确定设计流量的方法和管网设计等五个部分。设计过程以流量过程线为核心,计算每一个设计过水断面的流量过程线。

采用非恒定流模拟技术进行城市雨水管网设计的优点在于,在设计阶段就可以计算出每一设计断面和各个径流调节设施处的流量过程线,增加了管网设计、调节池设计和泵站设计的科学性。设计状态与管网实际运行状态较为吻合,提高了管网设计的可靠性。

其中,排水管网内雨、污水的回流过程计算是非恒定流模拟的核心内容。而主导水流过程的理论基础是流体力学非恒定流理论。即一维(或二维)浅水方程。本节一下内容将重点介绍一维浅水方程及其数值解^[38];并简单介绍二维浅水方程及其数值解。

2.2.1 一维浅水方程及其数值解

2.2.1.1. 控制方程

描述一维非恒定流运动的方程为明渠非恒定流片微分方程—圣维南方程(De Saint Venant Equations)。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i_b \right) + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \quad (2-2)$$

其中 x ——一维空间变量 (m);

T ——时间变量 (s);

Q ——流量 (m^3/s);

H ——水位 (m);

b_s ——水面宽度 (m);

A ——水流断面面积 (m^2);

β ——Bousinesque 系数;

g ——重力加速度 ($9.81 m/s^2$);

i_b ——底坡;

K ——流量模数 conveyance (m^2/s $K=AC\sqrt{R}$, C 为谢才系数, R 为水力半径)。

圣维南方程是一维无压非恒定流的描述方程, 一维非恒定流模拟软件都是以此方程为理论基础。例如河道与排水管网等模型的控制方程, 但是由于排水管网的特殊性(有有压流情况出现, 管网拓扑结构远复杂与河流等), 河流模拟软件包和管网模拟软件包绝大部分是分开的, 如丹麦水力研究所的(DHI)系列软件 MIKE11为一维河流模型, MOUSE为雨水管网模型。

1977年Ponce提出洪水波理论把圣维南方程的动量方程又分为了3种波: 动力波、扩散波和运动波, 表2-1是各种波所代表的意义。

动力波: 动量方程的所有项都包括在内, 基本可以模拟河道或管网中的水的真实流动情况。此波可以模拟河道回流, 及管网回水现象。在河道底坡较缓、摩擦阻力较小的河道比较实用于动力波模拟。

扩散波: 不包括惯性量(当地加速度和位变加速度), 涵盖压力、重力和摩擦力。由于压力项的存在, 该波的数值解考虑到下游边界条件和回水作用。该波适用于底坡和沿程阻力主导而当地加速度和位变加速度可以忽略不计的流体流动。绝大部分的排水管网内水流动状况模拟计算软件都是运用扩散波模拟的 (Infoworks CS, SWMM, MOUSE)。

运动波: 该波只包含了重力和摩擦力的影响。该波发生在底坡比降远大于惯性项

与其它附加比项之和的水流中。水位流量关系单一，仅向下游传播。不受下游边界条件影响，因此该波无法模拟河道回水和管道回流现象。

表2-1 水波种类与各项在动量方程中的含义

Table2-1 Meanings of different terms and wave approximations in the momentum equation

| 方程 | 意义 | 动力波 | 扩散波 | 运动波 |
|--|-------|-----|-----|-----|
| $\frac{\partial Q}{\partial t}$ | 当地加速度 | √ | × | × |
| $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)$ | 位变加速度 | √ | × | × |
| $gA \frac{\partial h}{\partial x}$ | 压力 | √ | √ | × |
| $gA i_b$ | 重力 | √ | √ | √ |
| $gA \frac{ Q Q}{K^2}$ | 摩擦力 | √ | √ | √ |

基本假定：建立圣维南方程组的基本假定是：①流速沿整个过水断面（一维情形）或垂线（二维情形）均匀分布，可用其平均值代替。不考虑水流垂直方向的交换和垂直加速度，从而可假设水压力呈静水压力分布，即与水深成正比；②河床比降小，其倾角的正切与正弦值近似相等；③水流为渐变流动，水面曲线近似水平。此外，在计算不恒定的摩阻损失 H_f 时，常假设可近似采用恒定流的有关公式，如曼宁公式（见河水运动）；④流体为不可压缩流体，流体密度为常量。

除特殊情况外，很难用解析方法求得圣维南方程组的解析解。一般只能通过数值计算获得个别情况的近似解。常用的数值计算方法主要有以下三类：①有限差分法。将所计算的水体按照一定的网格划分，每个网格点处的微分形式的圣维南方程组，用某种形式的差分方程组来逼近。边界条件也写成差分形式。然后逐时段地求解差分方程组，得出各网格点（如断面）处的水深及流速。根据所采用的差分计算方法的不同，对每一计算时段来说，或可逐个算出各网格点处的水力要素，或是必须联立求解各网点处的水力要素。前者称为显式差分法，后者称为隐式差分法。克莱茨提出的瞬态法就属于一种简化的显式差分法。②特征法。把圣维南方程组由偏微分方程组变换为在所谓“特征”上成立的常微分方程组，通常称为特征方程组。在空间为一维的情况下，“特征”的几何表示称为特征线，而在二维则为特征面。不恒定水流中的波动和干扰是沿“特征”传播的。用有限差分法联立求解表达“特征”几何位置的方程和特征方程组，即可求得所需的数值解。③有限单元法。把水体划分成几何形状简单的单元（如一维的直线段，二维的矩形、直边或曲边三角形等），在每一单元内，解用数学处理比较简单的内插函数来逼近。把圣维南方程组应用于每个单元，变换为积分形式，并根据某种准则（如逼近的残差最小）来确定内插函数中的待定系数便可定解。常用的

是伽辽金半离散有限单元法。

本节一下内容将对目前最常用的数值解法—有限差分法进行系统阐述。

2.2.1.2. 数值解法与差分格式

一维非恒定流模拟软件绝大部分都是用有限差分法求解圣维南方程。而目前主流商业软件所使用的差分格式都是上世纪六、七十年代所发明的。其中最为著名的是 Abbott-Ionescu 和 Preissmann 差分格式 [38] (如图 2-1 所示)。其中 Abbott-Ionescu 格式为交叉格式, 一个点求流量下一个点求水位, MOUSE 使用此格式。Preissmann 格式为非交叉格式, 在每一个点都求出流量和水位, HR Wallingford 的 INFOWORK RS 使用此格式。

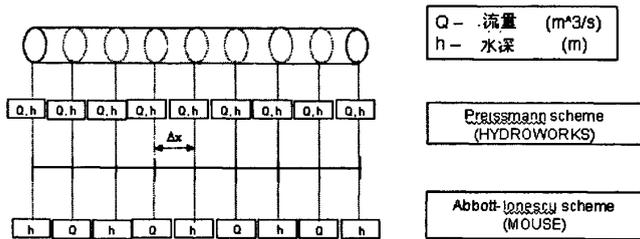


图2-1 Abbott-Ionescu和Preissmann差分格式

Fig.2-1 comparison between Abbott-Ionescu and Preissmann scheme

本文将系统介绍采用Preissmann 差分格式求解圣维南方程的具体过程, Preissmann 差分格式求又称四点、非中心、隐式有限差分格式, 其图形如图2-2: j代表空间(x, m), j=0,1,2,...jj。n代表时间(t, s), n=0,1,2,...nn。

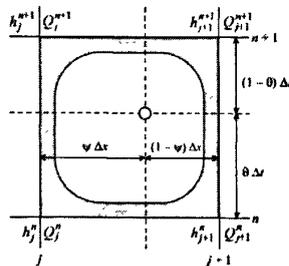


图2-2 Preissmann差分格式

Fig.2-2 Preissmann finite difference scheme

用此格式对圣维南方程近似替代并化简, 可得到一组线形方程组, 解此线形方程组可得到圣维南方程的数值解。下面为近似替代化简过程。

对于连续性方程 (2-1)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \theta \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1-\theta) \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right) \quad (2-3)$$

$$b_s \frac{\partial h}{\partial t} \approx \psi b_{s_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{h_{j+1}^{n+1} - h_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + (1-\psi) b_{s_j}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \right) \quad (2-4)$$

将(2-3)和(2-4)带入到连续性方程1.1中并化简可得

$$\begin{aligned} (1-\psi) b_{s_j}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_j^{n+1} + \frac{-\theta}{\Delta x} Q_j^{n+1} + \psi b_{s_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_{j+1}^{n+1} + \frac{\theta}{\Delta x} Q_{j+1}^{n+1} = \\ \psi b_{s_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_{j+1}^n + (1-\psi) b_{s_j}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_j^n - (1-\theta) \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (2-5)$$

方程(2.5)可以写成以下形式

$$A1_j h_j^{n+1} + B1_j Q_j^{n+1} + C1_j h_{j+1}^{n+1} + D1_j Q_{j+1}^{n+1} = E1_j \quad (2-6)$$

其中

$$A1_j = (1-\psi) b_{s_j}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t}$$

$$B1_j = \frac{-\theta}{\Delta x}$$

$$C1_j = \psi b_{s_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t}$$

$$D1_j = \frac{\theta}{\Delta x}$$

$$E1_j = \psi b_{s_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_{j+1}^n + (1-\psi) b_{s_j}^{n+\frac{1}{2}} \frac{1}{\Delta t} h_j^n - (1-\theta) \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right)$$

对于动量方程(2-2)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx (1-\psi) \left(\frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} \right) + \psi \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n}{\Delta t} \right) \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) \approx \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\beta_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} Q_{j+1}^{n+1} Q_{j+1}^n - \frac{\beta_j^{n+\frac{1}{2}}}{A_j^{n+\frac{1}{2}}} Q_j^{n+1} Q_j^n \right) \quad (2-8)$$

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} \approx gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\theta}{\Delta x} (h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{\Delta x} (h_{j+1}^n - h_j^n) \right) \quad (2-9)$$

$$gA \frac{|Q|Q}{K^2} \approx \frac{g}{2} \left(\frac{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{(K^2)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} |Q_{j+1}^n| Q_{j+1}^{n+1} + \frac{A_j^{n+\frac{1}{2}}}{(K^2)_j^{n+\frac{1}{2}}} |Q_j^n| Q_j^{n+1} \right) \quad (2-10)$$

(1.8)和(1.0)中的二次项 Q^2 用已知时刻的 Q 乘以下一时刻的 Q 近似代替,这样可以使得最后化简得线性方程组全部为一次线性方程,如果出现高次项对解线性方程组带来麻烦。将近似值(1.7~1.10)带入动量方程并化简可得到一下方程:

是开发者有时不知道计算的次数，会导致计算机无限循环（有些程序规定了迭代
的次数，这样会降低所求解的精度）。

由于此线性方程组所组成的矩阵为五对角矩阵（penta-diagonal matrix），本
文介绍消元法解此线性方程组的常用方法—双扫法(double-sweep method)。双扫
法是高斯消元法的一种，专门针对于对角矩阵的消元法，此方法的计算次数最少。
双扫法分两步进行：消元和回代。消元过程是把五对角矩阵消成上三角矩阵，回
代过程是求解方程的根。

(1) 消元过程

用归纳法推出消元的公式，如图03所示，假设从上一部的动量方程我们得到

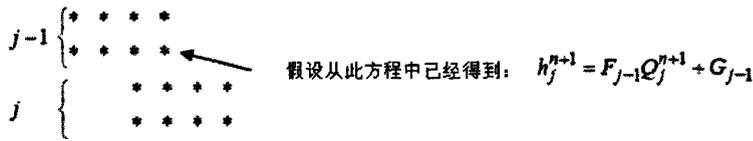


图2-3 双扫法示意图

Fig. 2-3 double sweep method

$$h_j^{n+1} = F_{j-1}Q_j^{n+1} + G_{j-1}$$

将此方程代入到下一个连续性方程里面

$$A1_j(F_{j-1}Q_j^{n+1} + G_{j-1}) + B1_jQ_j^{n+1} + C1_jh_{j+1}^{n+1} + D1_jQ_{j+1}^{n+1} = E1_j$$

整理得到 Q_j^{n+1} 的表达式

$$Q_j^{n+1} = \frac{-C1_j}{A1_jF_{j-1} + B1_j}h_{j+1}^{n+1} + \frac{-D1_j}{A1_jF_{j-1} + B1_j}Q_{j+1}^{n+1} + \frac{E1_j - A1_jG_{j-1}}{A1_jF_{j-1} + B1_j}$$

Q_j^{n+1} 的表达式可以写成如下形式

$$Q_j^{n+1} = H_jh_{j+1}^{n+1} + I_jQ_{j+1}^{n+1} + J_j$$

其中

$$H_j = \frac{-C1_j}{A1_jF_{j-1} + B1_j}$$

$$I_j = \frac{-D1_j}{A1_jF_{j-1} + B1_j}$$

$$J_j = \frac{E1_j - A1_jG_{j-1}}{A1_jF_{j-1} + B1_j}$$

把求出的 h_j^{n+1} 和 Q_j^{n+1} 的表达式代入下一个动量方程并化简可得

$$A2_j h_j^{n+1} + B2_j Q_j^{n+1} + C2_j h_{j+1}^{n+1} + D2_j Q_{j+1}^{n+1} = E2_j$$

$$h_j^{n+1} = F_{j-1} Q_j^{n+1} + G_{j-1} \quad Q_j^{n+1} = H_j h_{j+1}^{n+1} + I_j Q_{j+1}^{n+1} + J_j$$

$$h_{j+1}^{n+1} = -\frac{(A2_j F_{j-1} + B2_j) I_j + D2_j}{(A2_j F_{j-1} + B2_j) H_j + C2_j} Q_{j+1}^{n+1} + \frac{E2_j - A2_j G_{j-1} - (A2_j F_{j-1} + B2_j) J_j}{(A2_j F_{j-1} + B2_j) H_j + C2_j}$$

至此可得出 F_j 和 G_j 的递推公式

$$\begin{aligned} F_j &= -\frac{(A2_j F_{j-1} + B2_j) I_j + D2_j}{(A2_j F_{j-1} + B2_j) H_j + C2_j} \\ G_j &= \frac{E2_j - A2_j G_{j-1} - (A2_j F_{j-1} + B2_j) J_j}{(A2_j F_{j-1} + B2_j) H_j + C2_j} \end{aligned} \quad (2-13)$$

其中 F_0 和 G_0 的值需要由边界条件推出，我们从线性方程组的前三个方程着手

$$\begin{aligned} \alpha_1 h_0^{n+1} + \beta_1 Q_0^{n+1} &= \gamma_1 \\ A1_1 h_0^{n+1} + B1_1 Q_0^{n+1} + C1_1 h_1^{n+1} + D1_1 Q_1^{n+1} &= E1_1 \\ A2_1 h_0^{n+1} + B2_1 Q_0^{n+1} + C2_1 h_1^{n+1} + D2_1 Q_1^{n+1} &= E2_1 \end{aligned}$$

边界条件可以是给出已知的水位或者已知的流量。如果边界条件给出的是已知流量， $Q_0^{n+1} = Q_{given}$ ，用第二个方程乘以 $A2_1$ 减第三个方程乘以 $A1_1$ 消去水位并整理可得

$$h_1^{n+1} = -\frac{(A2_1 D1_1 - A1_1 D2_1)}{(A2_1 C1_1 - A1_1 C2_1)} Q_1^{n+1} + \frac{A2_1 E1_1 - A1_1 E2_1 - (A2_1 B1_1 - A1_1 B2_1) Q_{given}}{(A2_1 C1_1 - A1_1 C2_1)}$$

由此可得出流量为边界条件的情况下的 F_0 和 G_0 的值：

$$\begin{aligned} F_0 &= -\frac{(B2_1 D1_1 - B1_1 D2_1)}{(B2_1 C1_1 - B1_1 C2_1)} \\ G_0 &= \frac{B2_1 E1_1 - B1_1 E2_1 - (B2_1 A1_1 - B1_1 A2_1) h_{given}}{(B2_1 C1_1 - B1_1 C2_1)} \end{aligned}$$

有了 F_0 和 G_0 就可以算出 H_1 , I_1 和 J_1 ，然后计算 F_1 和 G_1 ，然后计算 H_2 , I_2 和 J_2 ，依次类推，算到 $jj-1$ ，最后两个方程的形式如下：

$$\begin{aligned} Q_{jj-1}^{n+1} &= H_{jj-1} h_{jj}^{n+1} + I_{jj-1} Q_{jj}^{n+1} + J_{jj-1} \\ h_{jj}^{n+1} &= F_{jj-1} Q_{jj}^{n+1} + G_{jj-1} \end{aligned}$$

(2) 回代过程

采用上面介绍的方法解决单段河道的一维圣维南方程解法实例，见附录。该实例使用 Microsoft Excel Visual basic for applications 来编写并测试。

2.2.1.5. 树状与环状管网求解

前面所介绍的单段河道或管道所推出的线性方程组是典型的规则五角矩阵，运用双扫法来消元。但是对于树状或者环状的河网或管网所推出的线性方程组矩阵形式就不是那么规则了。图2-5是树、环状管网矩阵与单管段所推出矩阵之对比。

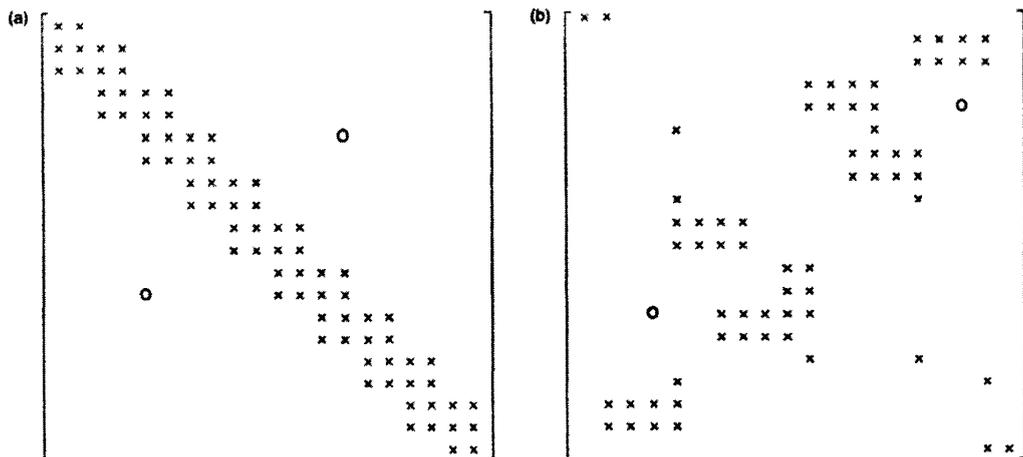


图 3-5 单管段与树环管网矩阵对比

Figure 3-5 comparison of matrix structures (a) simple channel and (b) looped branched networks

可见，该类矩阵是典型的稀疏矩阵，对于稀疏矩阵方程的求解，计算科学中早已有很多软件或程序来高效求解。一维浅水方程的数值求解程序通常步骤是：读取边界条件；生成稀疏矩阵系数；利用辅助程序求解矩阵；输出计算结果。对于非线性项，采取迭代的方法来求解。

2.2.2 二维浅水方程及其数值解简介

随着数值方法的发展，以及电脑计算速度与容量的提升，二维计算水力学得到了长足的发展与应用。

描述流体在二维流场中运动规律的方程是二维圣维南方程，也通常叫做二维浅水方程（two-dimensional shallow water equations）。二维浅水方程是由三维不可压缩流体的纳维斯托克斯方程（Navier-Stokes equations）推导出来。

连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2-14)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(\beta q_x^2/h)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2 q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}} - \nu \left[2 \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial x \partial y} \right] = 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta q_y^2/h)}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial y} + \frac{gn^2 q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}} - \nu \left[\frac{\partial^2 q_y}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x \partial y} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2-15)$$

其中 q_x 和 q_y —— X 方向和 Y 方向单宽流量;

H —— 水深;

z —— 地面标高;

$[x, y, t]$ —— X, Y 坐标和时间项;

B —— Boussinesq 系数;

G —— 重力加速度;

N —— 曼宁阻力系数;

ν —— 水的运动粘性系数 (kinematic eddy viscosity)。

基本假定: 二维浅水方程的基本假定与一维类似: ① 流速沿整个过水断面(一维情形)或垂线(二维情形)均匀分布, 可用其平均值代替。不考虑水流垂直方向的交换和垂直加速度, 从而可假设水压力呈静水压力分布, 即与水深成正比; ② 垂流速分布接近均匀; ③ 模拟范围的程度和宽度要远大于水深和流速的值; ④ 流体为不可压缩流体, 流体密度为常量。

在过去的几十年, 国内外有大量的学者在研究二维浅水方程的数值解法。数值解大致分为: (1) 有限差分法; (2) 有限元法; (3) 有限体积法。其中使用和测试最多的数值解方法就是 ADI (Alternating Direction Implicit) 格式有限差分法。ADI 格式在模拟突变水流的时有所欠缺, 比如无法准确的模拟水跃现象等。最近几年所出现的 TVD (Total Variation Diminishing) 格式克服了 ADI 格式的缺点, 可以更好的模拟水流的突变现象。但是 TVD 格式是显示计算, 其稳定性约束较大, 而且计算时间较长。但是高频率计算速度的计算机以及并行计算的出现使得这类方法得以长足的发展。

系统的二维浅水方程求解阐述超出了本文章的研究范围, 请参阅相关科技文

献。

2.3 计算机模型在排水系统中的应用

2.3.3 排水管网水力模型

排水管网水力模型指的是根据圣维南方程组、曼宁公式、推求面平均降雨量的泰森多边形法、等流时线法、单位线法、瞬时单位线法、霍顿下渗公式等一系列水文学、水力学的理论公式抽象出的有关降雨、地表径流、管网汇流的一整套的数学模型。模型代表流域中某一水流变化过程的数学描述,它将现实状况中的物理概念、状态方程等概化为一个数学计算式,按照现象的时序关系空间关联,建立起有序的、逻辑协调的计算模式,模型必须表现为一个逻辑上严密完整的计算系统。城市排水管网系统模型包括三部分:水文模拟、水力模拟和水质模拟。

20世纪60年代开始,一些基于计算机开发的水文水力模型陆续推出,以下介绍世界上比较著名的几个模型^[12]。

(1) STORM 模型

STORM模型是美国工程师协会水文工程中心的蓄水、处理、溢流、径流模型,能够模拟城市流域的径流和污染负荷,适用于规划阶段对排水流域长期径流过程的模拟。这是一个运用小时时间步长的连续模型,同时也可以用于单一事件模拟,某个流域的径流仅仅是上游子流域径流的累积,不能演算该流域的径流过程线,用小时降雨资料来模拟七个暴雨管理组成成分:降雨、径流、旱季流量、污染物累积和冲刷、地表腐蚀处理率和截流蓄水。

STORM模型是一个准动态模型,应用修正推理公式法进行水文计算,提供三种径流计算方法:系数方法、土壤综合覆盖法和单位过程线法。该模型有三个主要功能:计算污染负荷和污染浓度、模拟地表腐蚀、辅助设计蓄水和处理设施,但是其参数与观测水文过程线校准很困难,往往不容易收集模拟所需要大量基础资料。

(2) 公路研究所模型(TRRL)

该模型由英国的Watkins于1962年发表。它是英国公路研究所的科学工业研究部综合研究计划中的一个城市汇水区域模型,通常称为TRRL。该模型在美国称为RRL。自发布之日起,该模型在英国获得了广泛地应用。

TRRL以城市区域的降雨过程作为输入,根据时间—面积径流演算方法(等流时线)计算地表径流过程线。该模型可以用于连续模拟,但更多的是作为基于降雨事件的模拟模型使用。该模型的一个缺点是它假设对地表径流有贡献的排水区域面积仅仅是与管道系统直接相连的不透水区域。因此,该模型对于峰值流量

和径流总量的估计可能会偏低。但的一个重要特点是它能够很容易地应用到尚未城市化的排水流域。

(3) MOUSE 模型

MOUSE (Modeling of Urban Sewer) 是丹麦水力学研究所 (DHI) 开发的排水管网模拟软件包。MOUSE 拥有多种模块, 可用来计算雨水径流、实现实时监控和 SCADA 系统的在线分析等。MOUSE 的主要模块包括降雨入渗流模块、地表径流模块、管流模块、长期统计模块、实时控制模块等一系列独立模块。

(4) 沃林福特模型 (Wallingford Model)

沃林福特模型早期于 1987 年由英国沃林福特水力学研究机构开发, 包括降雨径流模型、简单管道演算模型和完整管道演算模型以及水质模拟模块, 模型可以模拟暴雨和污水系统或者雨污合流污水系统时间步长为 15 分钟, 早年就广泛应用于暴雨设施的运行、设计和规划中。Wallingford 模型应用相当广泛, 成立软件公司以来用户遍及世界的各个水力公司, 地方权威机构, 咨询公司和学术机构。

(5) 暴雨管理 (SWMM) 模型

该模型已经在第一章, 第二节做过详细的介绍, 这里将不再赘述。

2.3.4 地理信息系统在排水系统中的运用

Geographic information system (GIS), 即地理信息系统。它是将计算机硬件、软件、地理数据以及系统管理人员组织而成的对任一形式的地理信息进行高效获取、存储、更新、操作、分析及显示的集成。是融地理学、几何学、计算机科学及各类应用对象为一体的综合性高新技术。利用 GIS 技术建立排水管网管理信息系统已经成为排水管网管理的一个新的发展趋势。

近些年来, GIS 技术也逐步应用到排水行业的管理当中。国内外一些研究者认为, 利用地理信息系统 (GIS) 技术, 建立城市管网信息系统是一条行之有效的途径。欧美发达国家对城市排水系统的管理工作进行了一些研究, 很多城市已经建立了较为完善的信息管理系统。近年, GIS 技术在我国很多城市的排水管网的信息化管理中得到了应用。

对于强大的 GIS 功能进行二次开发, 来满足排水管网信息化管理的需求是目前排水管网信息化的一个走向, 许多专家学者对该方面都有了深入的研究并付诸城市排水信息化的实际并取得了很好的效果。2004 年, 郑一江^[6]基于 MapInfo 开发了排水管网地理信息系统 PSNetGIS。2006 年, 上海市建立了上海城市排水管线地理信息系统。王淑莹^[7]等人通过 VB6.0 二次开发 TopMap 建立了大庆市给水排水管网 GIS 系统。王瑞^[8]等人通过 VB6.0 二次开发 MapX, 结合 Access2002 开发了鞍山市排水地下管网地理信息系统。陈勇民^[9]二次开发 MapInfo 建立了城

市排水管网 GIS 系统，并把该系统应用到城市排水管网的规划与管理中。

2.4 本章小结

本章主要介绍水信息科学这门交叉科学的起源，发展与应用。重点讲述排水管网非恒定流模拟技术，对一维浅水方程及其数值解进行了详细的探讨，简单介绍了二维浅水方程。对于计算机模型在排水中的应用做了总结。

第3章 OpenMI 技术

Open Modeling Interface 简称 OpenMI (开放式模型公共接口) 标准是一个水信息系统模型软件计算引擎之间的接口协议。符合此标准的模型计算引擎可以在不经过任何二次开发的情况下, 与其它模型的计算引擎完全耦合 (多个计算引擎同时运行并且相互之间交换数据)。这个开放式公共接口犹如一个独立于各种模型软件之外的统一的合同框架。在这个标准框架下的各种软件之间有共同的接口。这就意味着, 在这个标准的平台上, 各种模型可以以组件形式相互耦合组成一个模型系统, 对于水信息系统的集成模拟有重要的意义。建模专家可以根据实际的需要选择复合解决具体问题的最合适的模型, 然后通过此平台链接在一起, 对于解决复杂水域系统问题提供了另外一个思路^[18-21]。

此标准平台支持各种计算引擎的双向动态链接。而且考虑到了不同模型的时间步长差异, 空间维数的不同 (一维、二维、三维等), 如图 3-1 所示^[4]。

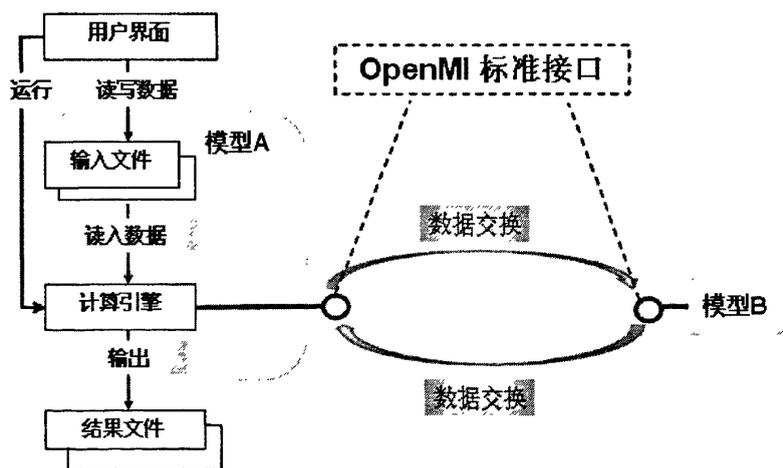


图 3-1 OpenMI 标准作用示意图

Fig.3-1 Illustration of the usage of OpenMI standard

典型的水信息系统软件由三部分组成：用户界面，计算引擎和输入输出。用户可以通过界面来输入模型参数，然后生成输入文件，计算引擎读入输入文件进行计算并写出计算结果。如果模型 A 与模型 B 的计算引擎都是 OpenMI 兼容，有共同的接口，则模型 A 在进行计算的同时可以通过特定接口调用模型 B 的数据及计算状态，反之亦然。这样就达到了动态链接的目的。模型 A 与模型 B 可由完全不同的软件在建立。

本章的以下篇幅将就 OpenMI 技术的历史，发展，作用，以及对我国水环

境领域的计算机模型建模人员的借鉴意义等几个方面进行阐述。

3.1 OpenMI 开源软件项目来源、发展与历史

OpenMI 技术源于欧盟第五框架资助项目 HarmonIT, 该项目起初目的是开发一个有利于水信息系统模型耦合的开放式公共接口, 来更好的建立综合水域系统管理计算机模型。其长远目标是建立欧洲以至于世界范围内的环境领域中计算机模型软件的接口标准。该项目由英国水文与生态研究中心 (Centre for Ecology and Hydrology) 牵头, 三家欧洲知名水信息系统模型软件提供商: 丹麦 DHI, 英国的 Wallingford 及荷兰的 WL Delft Hydraulics 作为技术领头在共同研发 OpenMI 技术。共有欧洲七国十四家研究所、大学与公司参与了该标准的研发、测试、使用、与鉴定工作。该项目历时 4 年完成 (2002~2006), 首个版本的 OpenMI 标准 (1.2.0) 与 2005 年 12 月发布^[19]。

在 HarmonIT 项目结束后, 2006 年 10 月该项目组成员又紧接着开始与 OpenMI 技术使用有关的另一个项目: OpenMI-life, 该项目是在欧盟 LIFE 资助的框架下, LIFE 资助旨在改善欧洲自然与环境保护, LIEF 总共资助欧洲各国 2750 多个环保项目出资多达 13.5 亿欧元^[20]。

OpenMI-Life 项目服务于旨在保护与管理欧洲水资源的欧盟水框架导则 (EU Water Framework Directive)。该项目的直接目的是转化 HarmonIT 阶段的科研成果, 利用 OpenMI 技术解决人民实际生活中的水环境问题^[20]。

2007 年 OpenMI 委员会成立, 提供 OpenMI 技术支持, 维护并利用该技术进行开展实际的水环境系统模拟项目, 在全球范围内推广该技术。同年 12 月 OpenMI 标准版本 1.4.0 发布。OpenMI-life 项目目前还在进行中, 与 2009 年底结束。先后两个项目欧盟总共资助该研究组七百万欧元^[18]。

OpenMI 技术自发布以来就受到欧洲乃至世界各国的科研院所、环保部门乃至政府的重视。在 HarmonIT 和 OpenMI-Life 项目进行过程中, OpenMI 委员会组织数十次研讨会向水环境领域科研工作者们阐述 OpenMI 技术。其中也有大量的文献公开发表。OpenMI 技术也进入了欧美大学的讲台。更值得一提的是目前全球数十家水信息系统模型软件提供商都把自己软件计算引擎不同程度的接入了 OpenMI 标准接口, 成为 OpenMI 兼容软件, (OpenMI 兼容性定义见下文)。部分 OpenMI 兼容软件如下表^[18]。

更多的兼容软件清单请见:

<http://www.OpenMI.org/reloaded/users/compliant-software.php>

OpenMI 是一个开源项目, 许多资源、项目成果都可以免费获取, 以下列举有关 OpenMI 技术的网站。

(1) OpenMI 委员会官方网站: <http://www.OpenMI.org>, 发布最新标准信息, 研讨会信息, OpenMI 资源下载。

(2) 源代码下载及技术讨论网站: <https://sourceforge.net/projects/OpenMI/> 提供最新的源代码下载及技术讨论。

(3) OpenMI Wiki 网站: <http://wiki.www.OpenMI.org> 在线 OpenMI 技术文件共享, OpenMI 用户以及开发者的平台。

表 3-1 OpenMI 兼容软件及其描述

Table 3-1 OpenMI compliant software and description

| 公司/组织 | 国家 | 兼容软件 | 软件类型描述 |
|-----------------------------------|----|----------------|--------------------|
| DHI software | 丹麦 | MIKE 11 | 1 维河道、河网综合模拟软件 |
| | | MIKE SHE | 3 维地下水、地表水综合规划管理软件 |
| | | MIKE URBAN | 1 维城市排水系统综合模拟软件 |
| Delft Hydraulics Software | 荷兰 | Sobek 1DFlow | 1 维排水/河网综合模型软件 |
| | | Delft3D | 2/3 维水力模型软件 |
| | | DelftFEWS | 洪水预测软件 |
| Wallingford Software | 英国 | Info Works RS | 1/2 维河道、河网综合模拟软件 |
| | | Info Works CS | 1/2 维城市排水系统综合模拟软件 |
| | | SULIS | 3 维湖泊河口模型 |
| The Hydrologic Engineering Center | 美国 | HEC-RAS | 1 维河道、河网综合模拟软件 |
| WRc Plc | 英国 | STOAT | 污水处理系统模拟软件 |
| Schlumberger Water Services | 美国 | Visual Modflow | 2/3 维地下水系统模拟软件 |

3.2 OpenMI 技术的作用与意义

OpenMI 技术可以通过系统整体模拟的手段来帮助水环境系统的管理者及决策者更加深入地了解及模拟整个环境、社会已经经济的交互过程。这样可以较大地提高计划、决策、管理的效率。OpenMI 技术可以通过选择同类型的 OpenMI 兼容模型软件来简化模型建模过程中的敏感性及不确定性分析。有了 OpenMI 技术并且有大量的不同领域范围内的兼容软件的支持, 可以较快的选择最合适解决具体问题的具体软件然后通过 OpenMI 平台搭建, 形成一个系统的决策支持系统 [18]。

对于商业的水信息系统模型软件提供商来讲 OpenMI 技术可以使商家的软件更具吸引力。由于商家的软件 OpenMI 兼容，这也是风险也降低。而且也可以给小型的软件开发者们提供了一条组件式开发的思路。

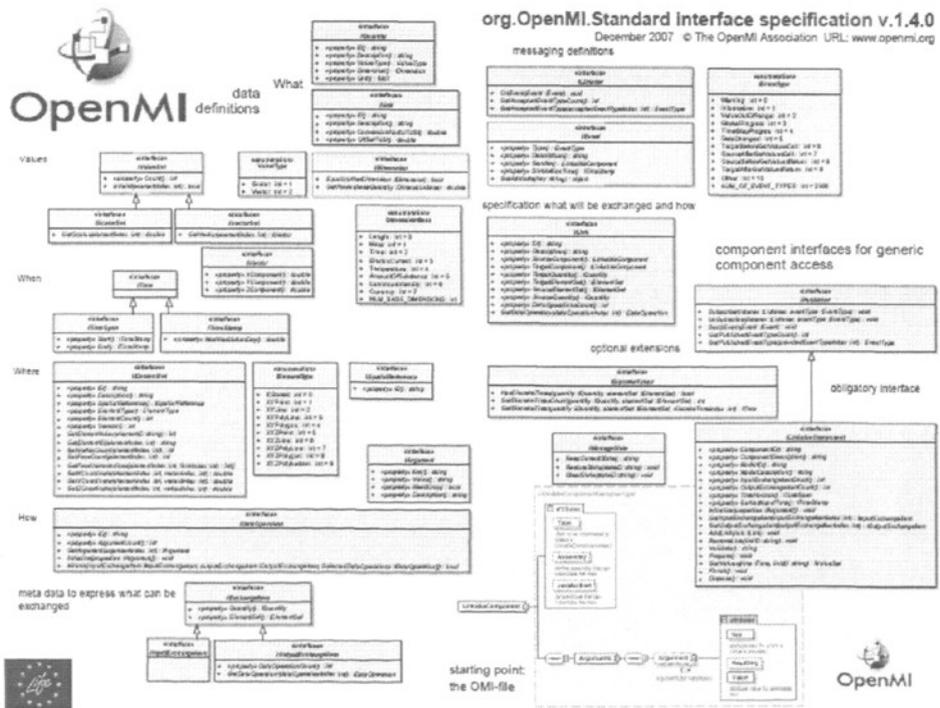
对于科研工作者来讲，OpenMI 技术可以使他们在科研院所、高校以及研究单位所开发的某特定软件与市场上大部分的同类软件进行无缝接轨。减轻了自行开发系统的付出，也更容易的使科研成果较快的转化为生产力。

3.3 OpenMI 技术浅析

该部分将就 OpenMI 技术规范、版本、兼容性定义，技术资源汇总，如何把计算引擎转换为 OpenMI 兼容及利用 OpenMI 建立复杂模型系统等逐步介绍。

3.3.1 OpenMI 技术规范、版本及兼容性规定

OpenMI 标准的核心内容是一系列软件接口规范的定义。如图 3-4 所示。



注：interface-接口，是面向对象程序设计中的一个概念，不在本文的探讨范围之内。具体请参看面向对象程序设计书籍。

图 3-2 OpenMI 标准规范

Fig. 3-2 OpenMI standard interface specification

图 3-4 即为 OpenMI 标准的技术规范，其中规定了一系列的软件接口定义。该计算机接口技术规范中最重要一个接口为：连接组件（ILinkableComponent），该标准把每一个兼容软件的计算引擎称之为一个连接组件，众多连接组件结合起来就可以组成一个模型系统。

这些接口定义只是面向对象程序中的一个概念，可以有任何一种现象对象编程语言来编写这些接口定义。OpenMI 的标准技术接口有两个版本，分别由 Java 和 Microsoft dot net C# 编写。目前后者的使用量占大多数（90%），而且 OpenMI 委员会只对 Microsoft dot net C# 版本的 OpenMI 标准接口提供技术支持和更新。

Dot Net 版本的 OpenMI 兼容必须遵循 Microsoft dot net C#版本的链接组件接口定义文件中的注释规定（ILinkableComponent.cs）。而 Java 版本的兼容必须遵循 Java 版本的链接组件接口定义文件中的注释规定（ILinkableComponent.java）（具体注释请参阅两个文件）。

3.3.2 OpenMI 技术资源汇总

OpenMI 项目是由欧盟出资资助的开源项目，所以项目成果全部向社会公开，以下是有关 OpenMI 技术的资源汇总。

OpenMI 标准接口定义，由 OpenMI 委员会官方发布。目前使用版本 Version1.4.0（2007 年 12 月发布）

OpenMI 软件开发工具包（The OpenMI Software Development Kit，简称 OpenMI SDK），由 OpenMI 委员会下属技术委员会发布，开源免费软件（GPL License 框架）。用户可以在官方网站或 sourceforge 网站下载。OpenMI 软件开发助手对于想要了解 OpenMI 技术水信息系统软件开发者极为重要。该 SDK 涵盖了 OpenMI 标准接口定义蓝图实现，各类实用软件包，OpenMI 兼容软件举例等（有简单的降雨径流模型，河网模型以及地下水模型等）。

OpenMI 用户界面程序，由 OpenMI 委员会下属技术委员会发布，属开源免费软件（GPL License 框架）。该程序是建模者使用 OpenMI 技术建立耦合模型的平台。

OpenMI 技术文件，OpenMI 委员会发布。在发布标准，SDK 基于用户界面程序的同时，该委员会花费了大量的精力由项目组成员专家撰写了大量的技术件（文档语言：英文），这些文件都是免费提供给用户。目的在于推广该技术。技术文件由以下八部分组成：

- A_OpenMI_Scope;
- B_Guidelines;
- C_org.OpenMI.standard_specification;
- D_org.OpenMI.Backbone technical documentation for the OpenMI;
- E_org.OpenMI.DevelopmentSupport technical documentationOpenMI;

F_org.OpenMI.Utilities technical documentation for the OpenMI;

H- Designs for additional OpenMI Tools

The OpenMI standard in a_nutshell

另外，该委员会同时把这一系列文件做成网络在线的 WIKI 系统，这样可以做到时时更新，更加便于用户使用。详见：<http://wiki.www.OpenMI.org>。

3.3.3 计算引擎如何转变为 OpenMI 接口兼容

到目前为止，数十种各类的水信息系统模拟软件都转变为了 OpenMI 兼容软件（主要是计算引擎）。许多软件提供商或者研究者们也在从事着把他们所提供的软件转变为 OpenMI 兼容软件。这一小节简要介绍如何把软件的计算引擎接入 OpenMI 标准^[37]。

OpenMI 标准接口有 Java 和 Microsoft dot net C# 两个版本，如果目标软件的计算引擎恰好是由 Java 或 Microsoft dot net C#语言编写，该计算引擎可以直接继承标准中所规定的接口规范。

然而，有很多已经成型的软件的计算引擎是由其他计算机语言编写，比如 FORTRAN, C, C++, VB 等。OpenMI 委员会建议使用 C#语言包装其他计算机语言所编译的计算引擎。这就要求所编译的引擎一定是动态链接库（DLL）而不是可执行文件（EXE）。OpenMI 技术委员会在所著文献中相信介绍了计算引擎转换 OpenMI 标准兼容步骤。简要总结大体步骤如下：

(1) 确保计算引擎编译为动态链接库而不是可执行文件（EXE）（否则 C#语言无法调用）；

(2) 确保计算引擎动态链接库含有 OpenMI 标准里的连接组件规定的所需方程（如：初始化，计算单步，结束计算等 initialization, Perform time step, and finalization）；

(3) 确保计算引擎动态链接库的所以导出方程都可以使用 Microsoft dot net [Dllimport]调用并且返回正确的值；

(4) C#语言包装编写 OpenMI 标准定义的所有计算引擎接口方程；

(5) 使用 OpenMI 技术委员会所提供的 SDK 并编写连接组件所规定的方程，完成包装。

详细介绍和具体实例请见：OpenMI 技术文件 B-Guidlines 部分的第四本书第四章或者在线 WIKI 系统。计算引擎的转变过程还涉及到混合编程等问题，请参考相关文献。本论文的第四章将结合实例讲述如何把现有的计算引擎转变为 OpenMI 兼容。

3.3.4 如何使用 OpenMI 技术建立系统集成模型

正如前面所述，建模者可以使用 OpenMI 技术建立模型系统。建立 OpenMI 模型系统的步骤如下^[21]：

(1) 把要解决的复杂问题分解成一系列小单元，每个单元选择最佳的模型软件来模拟。比如要总体评价某城市洪水灾害影响：大致可分为：气候情况，降雨径流，城市地下排水系统，灌渠河网洪水受体等。每个过程单元都可以找到相应 OpenMI 兼容的计算机模型软件来模拟（或自行开发）；

(2) 基于每个小单元，选择最合适的计算机模拟软件来建立相应的计算机模型，并且校核验证；

(3) 把已经校核验证完的各个单元移植到 OpenMI 平台上（由于模拟软件都是 OpenMI 兼容软件，需要极少的额外工作）；

(4) 利用 OpenMI 软件平台搭建复杂的模型系统，（使用 OpenMI 用户界面程序）。在这个平台上，各个单元可以有机地联系在一起，相互作用。比如，气候模型的结果，可以作为降雨径流模型的输入，降雨径流模型计算结果又是地下排水系统的输入，而地下排水系统又与灌渠河网双向影响。这些交互作用可以使用 OpenMI 技术完美实现；

(5) 运行整个模型系统。此时，多个独立的单元系统同时运行，并且运行过程中各个单元之间动态互动；

(6) 校核验证整个模型系统，为决策者提供科学精细的计算机模型技术支持。

计算机模型以及在解决实际水环境问题的应用在我国已经有了初步发展，利用模拟技术作为管理决策乃至系统设计也是必然趋势。综合水域信息管理更是有效解决水危机及水环境所存在的组多问题的有利工具。OpenMI 技术目的出现给综合水域模拟提供了很好的基础。广大的计算机建模者们可以利用 OpenMI 技术以及市场上所存在的兼容软件在建立计算机模型解决人民实际生活中的水环境问题。更重要的一点是，国内的建模软件的开发者们可以自主开发适合我国特定环境的模拟软件并使之 OpenMI 兼容这样可以更好的利用已经存在的资源，而且自我开发的软件可以与世界上大多数的模拟软件相结合。加快自主创新步伐。

3.4 本章小结

本章系统介绍了 OpenMI 标准。就其项目来源，发展，作用与意义一一探讨，并介绍了把现有软件转变为 OpenMI 兼容的基本步骤，以及如何在 OpenMI 的平台之上建立系统模型。

第4章 OpenMI 接口开发实例

上一章系统介绍了 OpenMI 技术，本章将重点介绍如何把现有模拟软件的计算引擎变成 OpenMI 兼容，这样一来就可以和市场上其他的 OpenMI 兼容软件进行无缝接合组成系统集成式模型，有利于建模者更好的模拟实际工程情况。本文将以一维排水管网模拟软件 SWMM 为例，首先介绍典型的此类软件计算引擎的组成。然后详细阐述如何将此类软件的计算引擎转变为 OpenMI 接口兼容，包括设计，开发与测试。最后将以国外某排水管网建模为实例，介绍在 OpenMI 平台上建立系统集成式模型。

4.1 模拟软件计算引擎

计算引擎是该类软件的核心，建模者通过软件的用户界面来完成模型数据的输入和预处理，计算引擎读取输入数据进行数学计算，得出结果后再由界面来显示结果。时间变量 (t) 和空间变量 $f(x,y,z)$ 是计算引擎所要解决的主要问题。

典型的计算引擎有以下几部分组成：

(1) 初始化 (initialise)

在计算引擎初始化的过程中，计算机把输入数据读入内存，初始化所设置的计算变量，安排数组，指针等，并打开输入及输出文件。准备计算第一个时间步长内的所以未知量。

(2) 计算单个时间步长 (perform time step)

在一个时间步长内，计算出空间各个未知量的值。完成一个时间步长计算后，输出该时间点的所有计算结果。继续下一个时间步长的计算，直到完成所有计算。为了减少计算所有时间，有的计算引擎为弹性步长 (adaptive time step)，这样需要每技术一步后输出当前模拟时间。还有的计算引擎在单步技术后需要迭代求解。整个迭代过程算为一个时间步长。

(3) 完成计算 (finish)

完成计算主要是输出计算结果至文件，释放计算机内存（消除在初始化阶段所设立的变量数值等）。

在 OpenMI 标准中，把每个软件的计算引擎定义为一个链接组件；并规定了该链接组件必须所具有公共属性。这样如果各个计算引擎都继承该规定，他们只就有了“共同语言”，可以在公共的平台上相互“交流沟通”。这样为不同的软件

所建立的模型之间的集成耦合创造了很好的条件。

图 4-1 为 OpenMI 标准中链接组件接口的定义^[18]。

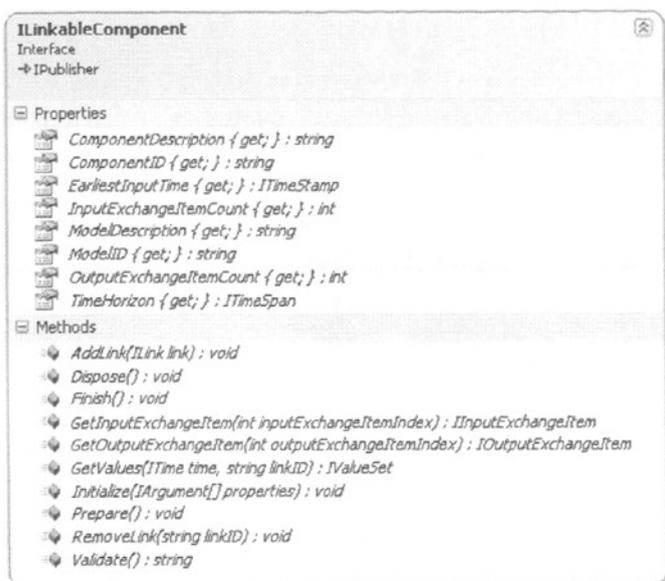


图 4-1 链接组件接口定义

Figure 4-1 The linkable component interface

其中，链接组件所具有的属性（property）为：

ComponentID: 一个字符串来简单描述链接组件的含义，比如：“ModFlow”，“ISISID”，“Mike11”，“InforWorksCS”。

Component description: 简单一句或几句话来解释该组件的作用，例如：“二维有限差分地下水流模型”，“一维有限差分河工模型”。

EarliestInputTime: 本链接组件可以开始计算并交换数据所处的最早时间。通常情况这是模型模拟初始时间，是一个特定的时间点。比如：2008 年 2 月 12 日，12: 00: 00，OpenMI 标准规定以儒略日（Julian day 公元前 4713 年 1 月 1 日）为起点算起。

InputExchangeItmeCount: 本链接组件可以接受其他链接组件的数据类型个数。比如：一维管网模型可以接受水文模型的径流量输入。而数目的大小根据实际模型的大小种类而异。

OutputExchangeItmeCount: 本链接组件所能提供给其他链接组件的数据类型及个数。例如一维管网水力模型可以在每个时间段提供每个节点的流量计压力。而数目的大小也根据实际模型的大小种类而异。

ModelDescription: 一句或几句话来描述一个实际的模型（这里的模型是指链接组件的计算引擎加上实际模型的输入输出数据等）。例如：“在泰晤士河水动力模型，1996 年 5 月 4 日大雨”。

ModelID: 一个词语来描述实际模型。比如：“黄河”

TimeHorizon: 本来就组件有效时间段，通常是指该模型的模型时间区间。比如从 2000 年 8 月 14 日，12:00:00 比如从 2000 年 8 月 14 日，18:00:00。

链接组件所具有的行为 (method):

Initialize(初始化): 与计算引擎的初始化过程类似，这是计算引擎最先调用的一个函数。每个链接组件都必须有初始化的过程。在初始化的过程中，计算引擎会读入模型的输入数据，打开输入输出文件，初始化变量与数组等。在计算引擎完成初始化以后，该链接组件的属性数据都必须赋值。但是此时并没有真正的开始计算。

GetInputExchangeItem: 此函数主要用来获取本链接组件的输入交换数据值。只有在模型初始化以后此函数才可以使用。

GetOutputExchangeItem: 此函数主要用来获取本链接组件的输出交换数据值。只有在模型初始化以后此函数才可以使用。

Validate: 此函数拥有校核链接组件是一个合理的 OpenMI 兼容组件。此函数只有在计算引擎初始化以后才能使用。

AddLink: 此函数用来在两个连接组件之间添加一个链接，其实际意义为在两个同时运行的模型之间建立关系，为相互交换数据打基础。

RemoveLink: 此函数删除两个链接组件之间所建立的链接。

GetValues: 次函数是这个 OpenMI 标准中的核心方法。其他的链接组件可以调用此函数来获取本链接组件的数据信息，时间意义为一个模型通过调用其他模型的 GetValues 函数来获取其他模型的数据。通过此函数可以获取任何时间点与任何空间点的组合的所需数据。OpenMI 采用的是‘获取数据’的机制 (pulling data mechanism), 所要方模型向被要方模型要什么数据样的数据，被要方必须提供该数据，如果是时间或空间上不能吻合，则采用时间或空间上的插值来提供。

Prepare: (准备就绪) 该函数在计算引擎初始化完毕，在调用 GetValues 函数之间调用。为数据交换做好准备。

Finish and dispose: 在模型计算结束后，调用这两个函数以结束模拟。包括，消除内存使用，推出计算程序等等。

4.2 OpenMI 接口开发过程实例

上节讲述了典型计算引擎的结构以及，OpenMI 标准中的链接组件的属性与行为。本节将以 SWMM 为例子系统介绍如何将已经存在的计算引擎包装转换为 OpenMI 接口兼容。将从系统设计与测试方法，OpenMI 软件开发助手，Fortran, C 与 C#混合编程已经接口代码编写与测试几个方面展开来阐述。

4.2.1 系统功能设计与测试方法

在编写任何计算机代码之前,首先要把软件所要实现的功能进行详尽的计划,并且对代码的测试要有系统的安排。本文以一维排水水管网模型 SWMM 为例,对与二次开发使其计算引擎与 OpenMI 接口兼容。

与 SWMM 类似,ISIS 计算引擎也是经过 30 几年的开发,其计算引擎已经经过系统的测试,在一维非恒定流模型有着广泛的应用。(ISIS 计算引擎是英国 Wallingford 水力研究所与 Halcrow 公司联合开发,在英国及世界范围内河流建模、城市防洪减灾及综合流域管理中有着广泛的应用)。

对于 SWMM 及 ISIS 计算引擎的 OpenMI 链接组件所要具备的最基本的功能如下(需求定义分析):

(1) 该链接组件能够接受降雨径流模型的输入流量,包括上下游的边界条件如流和各个节点的旁侧如流(boundary condition and lateral inflow)。

(2) 该链接组件能够完成与其他一维模型进行耦合。包括由其他软件建立的一维河道模型或者是排水管网模型。该链接组件能够接受其他一维模型所提供的水深、流量,并能够像其他模型输出水深、流量等。

ISIS 与 SWMM 计算引擎的连接组件功能设计时,两者之间的链接是首先要考虑到的,SWMM 的管网模型的下游出水口的出水流量可以作为 ISIS 河道模型的点入流或者旁侧入流,反过来河道模型的水位值可以作为 SWMM 下游的边界条件。另外 SWMM 的检查井溢出水量可以作为二维模型的点出流。

链接组件在使用之前必须经过系统的测试,软件的测试分为下面几种:

(1) 单元测试(unit testing): 又称作模块测试,是针对程序模块(软件设计的最小单位)来进行正确性检验的测试工作。单元测试主要是用来检验程式的内部逻辑,也称为个体测试、结构测试或逻辑驱动测试。

(2) 集成测试(Integration testing): 又称组装测试,即对程序模块采用一次性或增殖方式组装起来,对系统的接口进行正确性检验的测试工作。集成测试一般在单元测试之后、系统测试之前进行。

(3) 系统测试(Integration testing): 是将需测试的软件,作为整个基于计算机系统的一个元素,与计算机硬件、外设、某些支持软件、数据和人员等其他系统元素及环境结合在一起测试。该测试也称之为 alpha 测试。

(4) 现场测试(Site acceptance testing): 是软件安装在终端用户电脑上的最后一步测试,通常是由用户来参与测试并报告软件在用户终端的使用情况,即使修改相关组件等。该测试也称为 beta。

在编写 SWMM 与 ISIS 链接组件的过程中,对源代码的测试采用单元测试,

对于链接组件功能测试采用集成测试方法。对于链接组件的发布及交付终端用户时采用系统和现场测试。

链接组件是在 Microsoft dot net 框架下，使用 C-sharp 语言编写，因为 OpenMI 标准接口有 C-sharp 和 java 两种语言来完成的，而 C-sharp 版本的标准接口是 OpenMI 技术委员会所支持和推荐的版本。然而 ISIS 的计算引擎是由 FORTRAN 语言编写，SWMM 计算引擎是由 C 语言编写，所要编写的链接组件是采用对原有的计算引擎进行封装的办法，使其具有 OpenMI 标准中所规定行为和属性。在这个前提下，原有的计算引擎必须是以 Windoww 动态链接库的形式（dynamic link library）而不是通常的可执行文件(EXE 文件)。

根据 OpenMI 技术手册中如何开发链接组件部分的建议，图 4-3 所示的链接组件开发模式被采用（以 ISIS 计算引擎为例）。

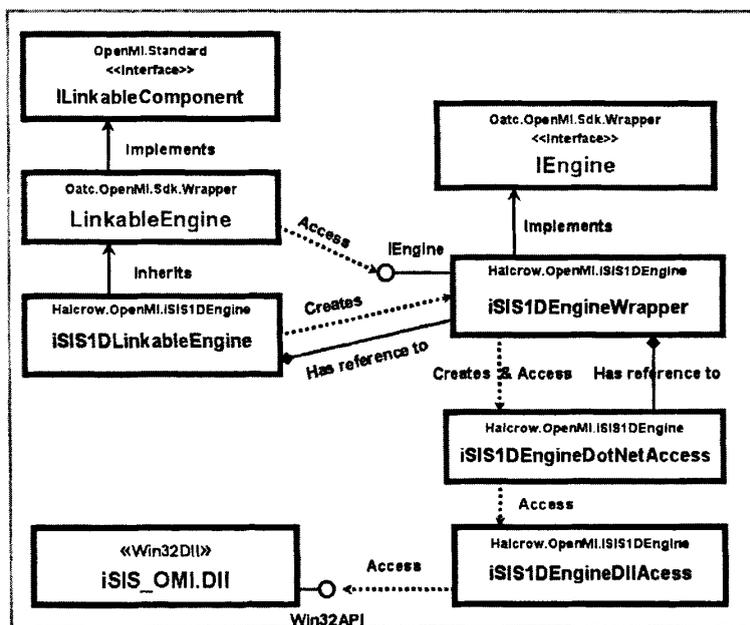


图 4-3 C-sharp 语言封装计算引擎

Figure 4-3 C# Wrapper classes and relationships

左下角的 ISIS_OMI.Dll 即为 ISIS 的计算引擎，而左上角是 OpenMI 标准中所规定的链接组件。采用 C#语言经过一系列的封装与包裹使其满足 OpenMI 标准接口所规定属性。图 4-3 中黄色背景的几个类是开发人员需要编写的（分别为：iSIS1DEngineDIIAccess，iSIS1DEngineDotNetAccess，iSIS1DEngineWrapper，iSIS1DLinkableEngine），而橙色背景的两个类是 OpenMI 软件开发助手中所具备的(IEngine 和 LinkableEngine)。

4.2.2 OpenMI 软件开发工具包 (SDK)

OpenMI 技术委员会向用户免费发布了基于 OpenMI 的软件开发工具包 (OpenMI Software Development Kit)。该工具包提供很多已经编译好的类共软件开发者使用, 这样可以减轻在转换已有的计算引擎中所需要的时间和精力。而 OpenMI SDK 中也有现成的实例共开发者参考。在进行开发自己的 OpenMI 链接组件时有必要仔细阅读其技术。

图 4-4 为 OpenMI 标准与软件开发工具包的系统构架 (版本 1.4)。

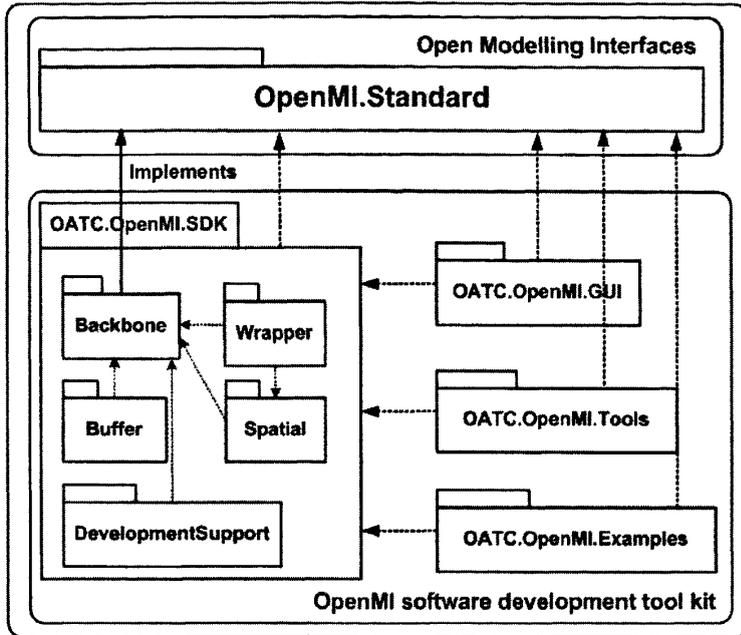


图 4-4 OpenMI 标准与软件开发工具包的系统构架

Figure 4-4 Namespaces in the OpenMI architecture

其中, OpenMI.Standard 即为 OpenMI 标准, 该标准是一系列的软件接口定义 (interface definition)。是 OpenMI 标准的核心。下面的 OATC.OpenMI.SDK 即为 OpenMI 软件开发工具包。该工具包中包含了大量的已经编写并经过系统测试的代码、实例等供开发者借鉴使用。具体细节请参考 OpenMI 技术委员会提供的相关文献。

4.2.3 Fortran, C 与 C# 混合编程

正如前面所提到的, ISIS 的计算引擎是由 FORTRAN 语言编写, SWMM 计算引擎是由 C 语言编写。而将要开发的链接组件是由 C# 语言来完成。FORTRAN 和 C 都是很常用的科学计算中计算机程序所选择的语言, 其特点是计算速度较

快。而 C#是在 FORTRAN, C 之后出现的面向对象程序语言,其特点是功能结合近代软件开发方法较紧密,而且简单易学。不可避免地,OpenMI 链接组件的开发需要用到混合语言编程。主要是用 C#来调用由 FORTRAN, C 等语言编写的 Windows 动态链接库 (DLL)。本小节将对 C#调用 DLL 所出现的常见问题进行总结。

参数传递: FORTRAN 语言所编写的函数,其参数的传递全部是通过参数的地址来传递,这也是计算速度较快的一个原因。C 语言所编写的函数其中带有指针的参数也是通过地址来传递的。而在 C#语言中参数是传递的实际值。例如,整数,单精度和双精度的实数及字符串等。及在使用 C#语言来调用 Fortran 或 C 语言所编写的函数时需要在传递参数前附件取地址符号关键字 **【ref】**,下面是一个使用 C#语言调用 ISIS 计算引擎 DLL 函数,整数为传递参数的例子:

```
DllImport(@"ISIS_omi.dll",
    EntryPoint = "GetCurrentTimeStepNumber",
    SetLastError = true,
    ExactSpelling = true,
    CallingConvention = CallingConvention.Cdecl)]
public static extern bool GetCurrentTimeStepNumber(ref int
currentstepnumber);
```

数组: FORTRAN 语言的数组下标从 1 开始,而 C 语言和 C#语言的数组小标都从 0 开始,这一点在数组传递过程中要注意。FORTRAN 的多维数组是按先列后行在内存中存储的,而 C 语言及 C#语言的多维数组是按先行后列在内存中存储的。比如一个 A(m,n)数组在 Fortran 的编译工程中下标是安装如下顺序: A₁₁, A₂₁, A₃₁ ... A_{n1}, A₁₂, A₂₂, A₃₂ ... A_{nm}; 但在 C 或 C#语言中的顺序为: A₀₁, A₀₂ ... A_{0,m-1}, A₁₀, A₁₁, A₁₂ ... A_{m-1,n-1};因此多维数组在混合语言编程中要时刻注意。

字符串: Fortran, C 以及 C# 语言处理字符串的方式不尽相同。在处理参数调用是应该时刻注意,下面是用 C#语言调用 ISIS 计算引擎中含有字符串参数的函数的例子 (ModelId 为字符串类型):

```
[DllImport(@"ISIS_omi.dll",
    EntryPoint = "GetModelID",
    SetLastError = true,
    ExactSpelling = true,
    CallingConvention = CallingConvention.Cdecl)]
public static extern bool GetModelID([MarshalAs
(UnmanagedType.LPStr)] StringBuilder modelId, uint length);
```

4.2.4 接口代码编写与测试

OpenMI 技术委员会技术文献: OpenMI 导则第四部分现有计算引擎链接组件

开发过程，以通用实例比较详细介绍了，如何把已有的计算引擎进行包装使之成为 OpenMI 兼容的链接组件。通用实例的代码编写过程以及测试都有介绍，实际的编写根据已有计算引擎的复杂程度会有所不同，但是这个链接组件软件开发的框架是一致的。在第三章，简介介绍了转换过程的 5 个步骤。这里以 SWMM 计算引擎的转换为例具体讲解每个步骤：

(1) 确保计算引擎编译为动态链接库而不是可执行文件：SWMM 模型本身就是用户界面和计算引擎相互分离的，用户界面为一个可执行文件，该可执行文件调用 SWMM 的计算引擎（Windows 动态链接库 SWMM.dll）这就相对减轻了转换工作。图 4-5 为 SWMM 计算引擎动态链接库里面所含有方程：

```
int DLLEXPORT swmm_open(char* f1, char* f2, char* f3);
int DLLEXPORT swmm_start(int saveFlag);
int DLLEXPORT swmm_step(double* elapsedTime);
int DLLEXPORT swmm_end(void);
int DLLEXPORT swmm_report(void);
int DLLEXPORT swmm_getMassBalErr(float* runoffErr, float* flowErr,
float* qualErr);
int DLLEXPORT swmm_close(void);
int DLLEXPORT swmm_getVersion(void);
```

图 4-5 SWMM 计算引擎已有方程

Figure 4-5 functions in SWMM computational engine dll

其中，swmm_open 函数是打开并读写输入文件，输入文件有用户界面根据用户建立的模型而生成的 ASCII 文档文件（文件后缀为 inp）。相当于前面所提的的计算引擎初始化。swmm_start 函数为开始计算（准备就绪但还没有正式计算）。swmm_step 函数为分步计算，每调用一次计算一个时间步长。swmm_end 函数为结束计算。swmm_report 函数为输出计算结果。swmm_getMassBalErr 函数为输出计算所产生的误差。swmm_close 函数为关闭计算程序。swmm_getVersion 函数为输出该计算引擎的版本。

(2) 确保计算引擎动态链接库含有 OpenMI 标准里的连接组件规定的所需方程：初始化，计算单步，结束计算等函数在原有的计算引擎里面已经含有，但是仅用这些函数是不够的，在软件的需求定义中我们想要完成的功能中有，得到每个节点的压力和水量，得出出水口的流量，设置下游的边界条件，得出检查井溢水量等函数。这些都需要进行二次开发。有些功能是在 C# 封装类里面实现但有些功能必须在 SWMM 计算引擎内部实现。具体函数的编写请参考附件。

(3) 确保计算引擎动态链接库的所以导出方程都可以使用 Microsoft dot net [DllImport]调用并且返回正确的值：即编写 DLLACCESS 类，下面的一小段代码显示了如何用 C#语言调用 SWMM 计算引擎内部的方程。

```

public class SwmmEngineDllAccess
{
    [DllImport("swmm5.dll",
        EntryPoint = "swmm_open",
        SetLastError = true,
        ExactSpelling = true,
        CallingConvention = CallingConvention.Cdecl)]
    public static extern int swmm_open(string inpFile, string
rptFile, string outFile);
    ...
}

```

(4) C#语言包装编写 OpenMI 标准定义的所有计算引擎接口方程：请参考附件代码。

(5)使用 OpenMI 技术委员会所提供的 SDK 并编写连接组件所规定的方程，完成包装：请参看附件代码。

4.3 基于 OpenMI 技术建模实例

上一节比较详细的介绍了如何把典型的水环境领域模拟软件的计算引擎转换为 OpenMI 兼容。本节内容将以 ISIS 的 OpenMI 链接组件来建立与其他模型结合的系统联动模型。一下内容将介绍如何建立 ISIS 河道模型，Infoworks CS 排水管网模型，以及如何在 OpenMI 的平台上是两者相互耦合。Infoworks CS 是英国 Wallingford 水力研究所的排水管网模型，该模型的计算引擎已经是 OpenMI 兼容。

4.3.1 模型项目背景

城市排水集成模拟系统---该项目其中一个研究目的就是评估 OpenMI 技术在综合排水建模中的应用。其中排水管网建模采用的是 Infoworks CS 软件，河道模型建模采用 ISIS 软件。（河道模型 ISIS 软件计算引擎已经是 OpenMI 兼容软件）。

该项目以英国西约克某个小城镇为例，研究其的洪水风险评估（研究区域面积大约为 1 平方公里），下图显示的是该镇的规划图^[40]。

图 4-6 所示，其中中下部分红色标识的是排水管网的汇水区域划分，红色区域内的蓝线是模型中的排水管道。上半部分的蓝线所示为经过该小镇的一条小河（也可称作天然排水渠）。排水管道的出水口在图中右上部分与河道相交。管网的出水直接排入河中，根据季节与降雨量的不同，排水管网的出水口时而自由出流，时而淹没出流。在雨季，淹没出流时河流的水位对排水管道的下游有着相

互的影响,有可能发生河水回灌现象,而小镇的排水管道的上游在历史记录以来有过发生局部洪涝的现象,影响了居民的正常生活,造成了经济损失。使用 OpenMI 技术可以模拟排水管道与河道水位的交互作用,从而更好的模拟现实,可以为决策者做出合理的决定提供坚实的基础。



图 4-6 研究区域规划图

Figure 4-6 target study catchment

4.3.2 模型耦合分析

该项目的 ISIS 河流模型以及 Infoworks CS 排水管道模型分别由专业建模者建立并校核完毕。在此基础上,把两个模型整合到 OpenMI 的平台上,使两个模型同时运行并相互之间交换数据。如图 4-7 所示,管道的下游出水作为河道的旁侧如流,而河道的水位又是管道下游的边界条件,两者相互制约。如果没有 OpenMI 平台的存在,这种动态的相互制约关系很难模拟。ISIS 是河道建模软件无法模拟管网中的水量,而 Infoworks CS 是管网建模软件对管网中的水流现象又无法模拟。OpenMI 的存在可以使两者结合起来,组成一个集成模拟系统。这样对问题的解决提供了新的思路。



图 4-7 管网与河流联动模型示意

Figure 4-7 Aerial plan of the coupled model

ISIS 模型的输入降雨历时线由英国暴雨评估手册推出。具体模型数据等请参看附件中的 ISIS 模型。

河道模型建立，校核完毕后，为模型添加一个 OMI 文件对模型进行封装描述完后就可以在 OpenMI 用户界面程序中使用并运行该程序。OpenMI 用户界面（OpenMI Configuration Editor）是建模者用来建立以 OpenMI 为基础的基础模型系统的平台。ISIS 模型的 OMI 封装文件是一个 XML（可扩展标识语言）文件，它是 OpenMI 用户界面调用的一个接口文件，主要描述了模型数据、计算引擎以及链接组件的位置。图 4-8 为 ISIS 模型 OMI 封装文件示意。

```

1 <?xml version="1.0"?> <!-- Important: date time format for the simulation start and simulation end time: [yy,mm,dd,hh,mm,ss] -->
2 <LinkableComponent Type="Halcrow.OpenMI.ISIS1DEngine.Wrapper.ISIS1DLinkableComponent"
  Assembly="C:\isis\bin\Halcrow.OpenMI.ISIS1DEngine.Wrapper.dll" xmlns=
  "http://www.openmi.org/LinkableComponent.xsd">
3 <Arguments>
4   <Argument Key="FilePath"      ReadOnly="true" Value="my_model.ief"/>
5   <Argument Key="simulationStart"  ReadOnly="true" Value="2008,09,19,00,00,00" />
6   <Argument Key="simulationEnd"    ReadOnly="true" Value="2008,09,19,15,00,00" />
7 </Arguments>
8 </LinkableComponent>

```

图 4-8 ISIS 模型 OMI 封装文件

Figure 4-8 sample ISIS OMI file

而由 Infoworks CS 建立的管道模型也有同样的一个 OMI 包装文件。图 4-9 为两个模型同时在 OpenMI 用户界面程序中。

其中，右上角黄色方框内的“CSSimID77”为 Infoworks CS 河道模型，“ISIS River_100c_Flanshawln_v2.ief”为河道模型，两者之间的双向箭头则表示了两个模型相互耦合链接。“Data Monitor”为模型运行过程中作为数据监测只用，可以

随时看到两个模型之间数据的交换。而“Oatc.OpenMI.Gui.Trigger”是 OpenMI 界面程序自带的控制模型运行的一个组件。

通过对耦合模型的运行及其结果分析显示了，在 OpenMI 的平台上，两者能够较好的互动运行，并且得出比单个模型更具有说服力的结果。OpenMI 技术是一个很好的综合模拟评估复杂系统的有力工具。

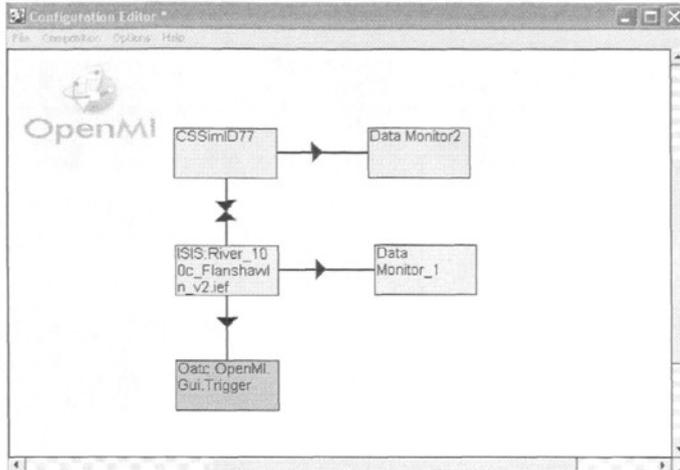


图 4-9 排水管网模型与河道模型在 OpenMI 平台上耦合示意

Figure 4-9 Coupled Sewer and River model in OpenMI

4.4 本章小结

本章主要介绍了如何把现有的模型软件的计算引擎转换为 OpenMI 兼容。首先概述了一个典型的计算引擎的组成部分，然后分析了 OpenMI 标准中规定的链接组件所具备的属性与行为。接着以 ISIS 和 SWMM 计算引擎为例，详细阐述了 OpenMI 链接组件的开发过程。最后，以实际建模实例介绍了 OpenMI 技术的应用。

第5章 基于 OpenMI 的水力模型集成技术应用

上一章以暴雨管理模型 SWMM 计算引擎为例,系统介绍了如何把已有的软件转变为 OpenMI 平台所兼容的软件。并对 SWMM 的计算引擎进行了简单的二次开发使之符合 OpenMI 标准的规定以及建立耦合联动模型的需要。本章将以北京市石景山老山奥运场馆区的排水系统模型为实例,利用 OpenMI 平台,所完成二次开发后的 SWMM 软件,以及其他一维河流模拟软件,二维地表漫流模拟软件等,尝试建立集成式模型系统,来更好的模拟整个排水系统,为奥运中心区排水系统的管理与防汛减灾工作提供坚实的模型数据支持。

5.1 项目背景资料

北京地处中纬度,属为温带大陆性季风气候。降雨量年内分配很不均匀,一般年份汛期(6~9月)雨量约占全年降水量的85%,丰水年汛期雨量可占90%以上,其中最大三天雨量可占全年30%左右。这样的特点造成北京市汛期洪水大,洪涝灾害严重,城市道路(特别是立交桥区)积水问题严重。特别是近年来局地极端天气状况时有发生,如2005年7月10日暴雨造成莲花桥等地大面积积水,2007年8月1日和8月6日两次暴雨,造成了安华桥的大面积积水,严重影响了交通。2007年7月31日,46毫米降雨造成八宝山地铁进水以及老山东小街路面沥青受损。城市化和全球气候变化造成近年来北京城区多次大面积、长时间、大水深城市内涝灾害,极端天气造成的灾害严重影响市内交通和城市形象。作为中国的首都、作为一个致力于建设国际大都市的城市来说,在城市市民生活质量方面,还存在明显的差距,还有许多工作需要完善。

为了提高石景山区市民的生活质量,区政府改变管理思路,变防汛为迎汛。为此,石景山区政府与北京工业大学合作进行“北京市石景山区迎汛排水数字化监控系统研究”,联合进行科技攻关,研究开发适合北京市可持续发展的科学化管理技术。

2008年8月8日奥运会在北京召开。为了保证奥运会的顺利召开,石景山区政府对建设在石景山区的2个奥林匹克比赛场馆区域的建设非常重视,新建和改建了雨水排水系统,其中雨水干线标准为1年一遇。

此外，在理论分析的基础上，通过成熟先进的雨水系统模拟软件对石景山区雨水系统进行模拟分析，验证理论分析的结果，模拟在不同强度暴雨条件下石景山区雨水管道的抗洪标准和能力，以及石景山区可能出现的积水点的积水深、积水时间，并以此为依据提出积水应对预案建议是十分必要的。经检索，本项研究在国内未见报道。坚持“以科技助奥运，以奥运促科技”的方针，从奥运保障需求出发，集成国内外城市防洪科技成果，有效满足奥运会对科技防洪的需求，使科技创新成为“绿色奥运、科技奥运、人文奥运”三大理念的动力和保障，引进、消化、吸收国际先进技术，促进北京的科技防洪事业跨越式发展。同时，以奥运为契机，提高北京科技创新能力和科技服务于经济、社会发展的水平。

本章的以下内容将对石景山老山奥运场馆区排水系统水力模型的建立，重点介绍一维管网SWMM模型的建立过程，并粗略简介一维河道模型以及二维地表漫流模型的建立过程。在OpenMI技术的平台上，尝试建立集成式模型，河道与排水管网的集成，排水管网、河道与二维模型的集成等。由此来探讨防洪减灾模型模拟新技术。

5.2 水力模型建立步骤

本节重点介绍石景山老山奥运场馆区的排水管网 SWMM 模型的建立过程，并简单介绍其配套的示意排水渠模型及二维地表漫流模型的建立。

5.2.1 SWMM 一维排水管网模型的建立

建立排水管网模型，首先要抽象化在现实中存在的检查井、管段、汇水区等，使之在SWMM模型中表达为对应的点、线、面。然后根据规划图纸、设计图纸、竣工图纸等获取模型中检查井、管段、汇水区等需要的各种数据。最后，设置好动态的排水、雨量数据，一个排水管网模型就建立起来了。

5.2.1.1 管网图形的抽象化

排水管网图形的抽象化指根据排水管网的现状与信息数据，分析排水管网的拓扑结构和空间结构，并把排水管网中的各类实体抽象为在地图上可以表达、在数据库中能够存储的各类元素，并转换生成能够输入系统的文件。

在 SWMM 模型中，地图由点、线、面三种元素组合而成，三者通过特定的

结构存储并表达。在管网模型中，管段与节点相互关联，即管段的两端为节点，节点之间通过管段连通。城市排水管网由管线、检查井、跌水井、出水口等构成。

一个城市排水管网往往由多个流域组成，采用图论的方法可以把其抽象化为由多棵有向多叉树组成的森林。若在整个城市排水区域内只有一个排水流域，则其可以抽象化为典型的有向多叉树结构。

排水管网系统也可以抽象为点、线、面三种元素实体。在数据存储结构中，将汇水区抽象为面，将管线抽象化为线（树枝），把检查井、跌水井、出水口等抽象化为节点，分别存储于各自的表中。

5.2.1.2 模型数据的来源

在建立排水管网 SWMM 地图之前，排水管理部门往往只有纸质的图纸或电子版的 CAD 管网竣工图。可根据需求将纸质图纸以及 BMP、JPG 等格式的光栅图形进行矢量化，矢量化采用数字化仪或数字化软件；将档案资料以及各种文本电子化；整理现状排水管网基础数据。

在排水管网竣工年代比较久远的地区可能没有资料可循，此时要组织人力对这部分的排水设施进行实测，获取该地区的排水管网测绘图和调查图。

在管网的测绘、调查中主要获取以下信息：

(1) 管段

管径、管材、敷设日期、管道长度、管道埋深（起点、终点）、水力坡度、流向、所在道路名称及路两侧主要建筑物的名称、附属设施、管线两侧与其交叉的其它非排水管线（电力、燃力、给水及通讯电缆）等。

(2) 检查井

详细地理位置（X、Y 坐标）、井类型、井面标高、井底标高、所在道路名称等。

(3) 排水口

详细地理位置（X、Y 坐标）、所在道路名称等。

获取了排水管网信息后，还要将排水管网叠加到城市的电子地图上，表现排水管网的平面位置。城市电子地图可向城市测绘部门获取或由城市的纸质图纸矢量化后拼接而成，在拼接的过程中还应将城市地图分成若干个图层，分别代表各种地物特征。

5.2.1.3 SWMM模型的数据组织与数据流

根据城市排水设施日常管理和水力计算、模拟的需要,结合系统图形数据库的设计要求,建立数据库。数据库把大量的数据按一定的模型组织起来,提供了存储、维护、检索数据的功能,使用户可以方便、及时、准确地从数据库中获得所需的信息。

数据库分为管网系统的静态信息和动态模拟时的动态信息。在数据库中应存储以下两方面的数据:

(1) 静态数据

包括管网节点(检查井、出水口等)、管段、汇水区等的静态数据。包含管段的长度、管径等,检查井的地面标高、井深等,汇水区的面积、地面坡度等在水力计算模拟中数据值保持不变的数据。这部分数据将单独存储于各自的表中。

(2) 动态数据

动态数据包括气象数据和管网各个构筑物上 SCADA 实测和水力计算模拟得到的各个时刻上每个构筑物的水力属性值。气象数据存储研究范围内各个雨量站的雨量情况,在水力计算模拟时作为输入。SCADA 实测数据包含在各个监测点各构筑物的水力属性值。同时,动态数据还包含在水力模拟后得到的各个构筑物上各个时刻的水力属性值。并在各个构筑物上将 SCADA 实测数据与水力模拟的值进行比较、对比。

数据库具体包含以下内容:

(1) 气象数据

应当建立管理区域内的雨量数据收集处理系统^[38]。由于在整个管理区域内降雨的强度有很大的不同,所以在区域内应建立若干个雨量站,将雨量站的雨量数据收集并处理。例如,北京市现有市级雨量站点 125 个,区县自建站点 183 个。

(2) SCADA 数据

在给排水 SCADA 中常用的传感器主要有水位、压力、流量、温度、湿度、浊度、BOD、COD、电压、电流、功率、电度、 $\cos\varphi$ 、流动电流仪以及接近开关、限位开关、水位开关、继电器等^[39]。排水系统中,主要将传感器设置在汇水区末端进入雨水口的地方监测汇水区的流量过程线;在检查井中监测检查井的水深、流量等;在管段中监测管段的流速、水深、流量等。

(3) 管网数据

由管网图形数据和属性数据组成。当系统中管网的图形数据和属性数据一致时,将管网的静态数据和改扩建等的动态数据输入。

(4) 模拟计算结果数据

经过水力计算模拟后,在每个节点、管段、汇水区中都会产生各个构筑物上每个模拟步长的水力模拟结果。建立各个构筑物的表,将模拟结果存在其中。点、

线、面状构筑物模拟结果的动态数据包含报告数据和记录数据。点、线、面状构筑物的报告数据包括在整个降雨过程中各构筑物水力元素的综合报告，点、线、面状构筑物的记录数据包括在整个降雨过程中每个步长水力元素的结果。

数据库表的整体结构见图 5-1，数据库中主要表的关系见图 5-2。图 5-3 为在 SWMM 软件中建好的石景山老山奥运场馆区雨水管网模型。

其中，降雨过程流量线有北京市暴雨强度公式推求所得，模型汇水区采用的泰森多边形进行划分。节点数据和管段数据是设计施工图结合现场测量所得。

第四章介绍了 SWMM 计算引擎的 OpenMI 标准化，已经对 SWMM 计算引擎进行了二次开发，这就意味着，该模型既可以在 SWMM 软件的用户界面运行，也可以在 OpenMI 平台上运行。在 OpenMI 平台上运行时，需要经过二次开发的 SWMM 计算引擎动态链接库（SWMM engine DLL），OpenMI 封装动态链接库（SWMM Wrapper.dll），以及封装 OMI 文件，该模型的 OMI 文件如图 5-4 所示。

有了 SWMM 模型数据，二次开发后的计算引擎，OpenMI 封装动态链接库已经封装文件以后，该模型就可以在 OpenMI 平台上运行并为与其他模型进行耦合作出了充分的准备。图 5-5 为石景山老山奥运场馆区的雨水管网模型在 OpenMI 的平台上运行示意图。

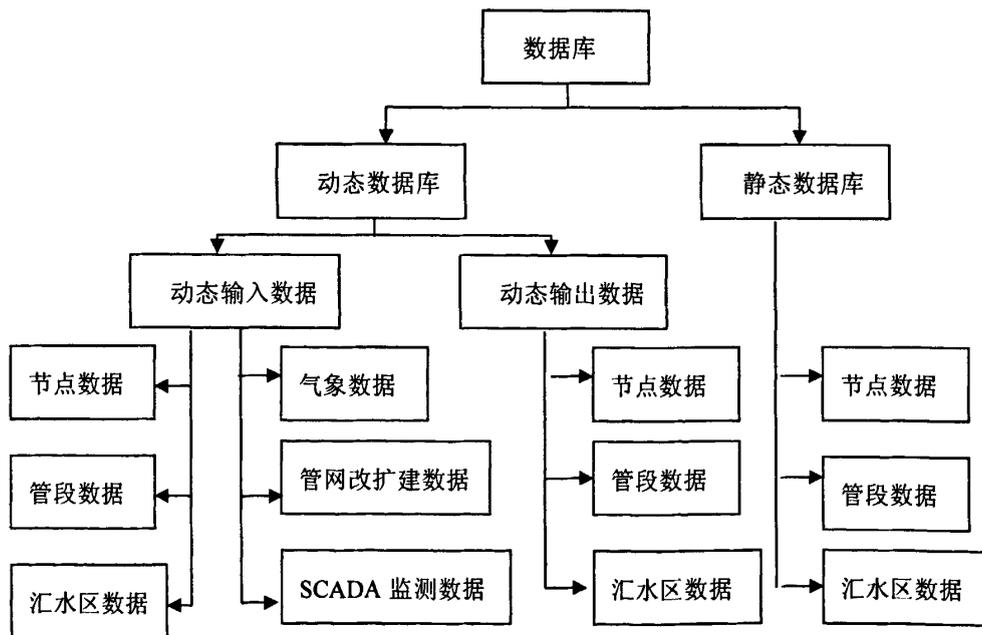


图 5-1 数据库表整体结构
Fig. 5-1 Structure of the database

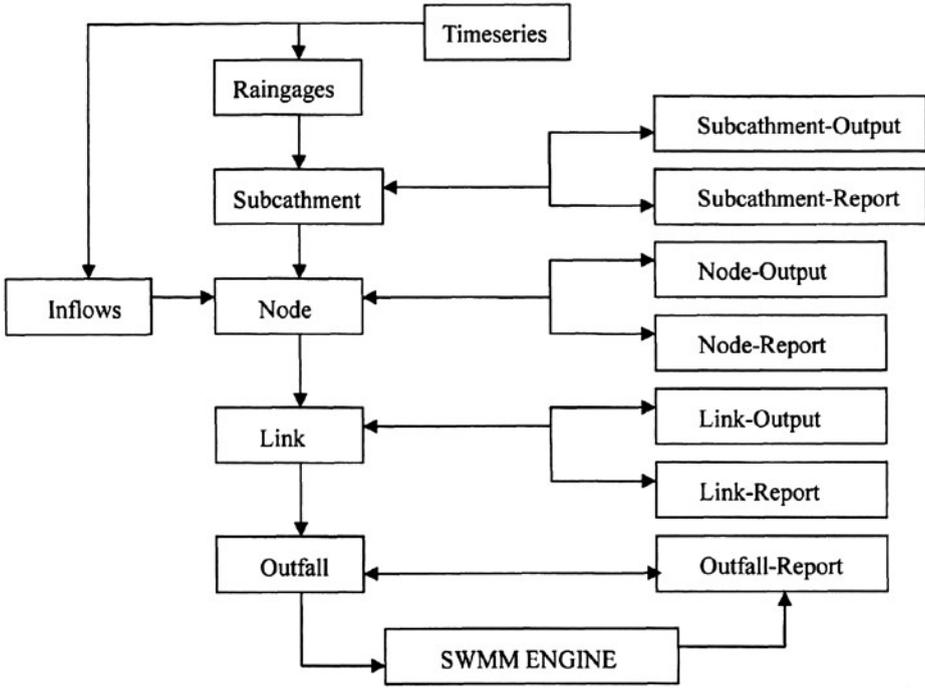


图 5-2 数据库各表之间的关系

Fig. 5-2 The relationship between the database tables

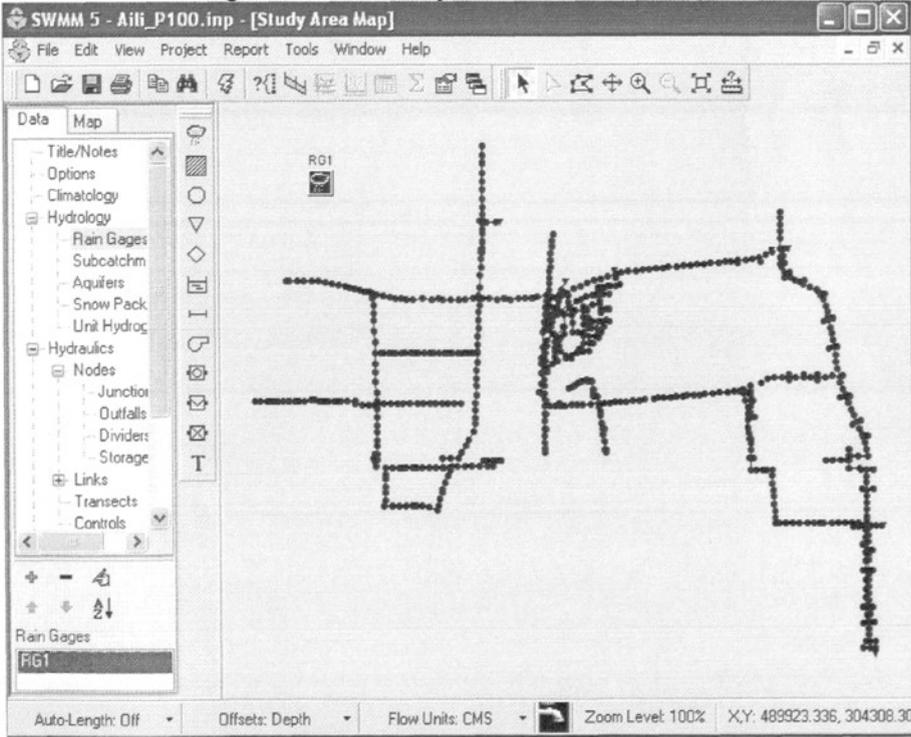


图 5-3 石景山奥运雨水管网 SWMM 模型

Figure 5-3 shijingshan Olympic center SWMM model overview

```

1 <?xml version="1.0"?>
2 <LinkableComponent Type="Swmn.Wrapper.SwmnOpenMIComponent" Assembly="Swmn.Wrapper.dll">
3   <Arguments>
4     <Argument Key="modelID"      ReadOnly="true" Value="Sewer Model" />
5     <Argument Key="simulationStart"  ReadOnly="true" Value="1990,1,1,0,0,0" />
6     <Argument Key="simulationEnd"    ReadOnly="true" Value="1990,1,1,0,30,20" />
7     <Argument Key="inpFile"         ReadOnly="true" Value="shijingshan.inp" />
8   </Arguments>
9 </LinkableComponent>

```

图 5-4 石景山老山奥运场馆区雨水管网 SWMM 模型 OMI 封装文件
Figure 5-4 OMI file for shijingshan Olympic center sewer SWMM model

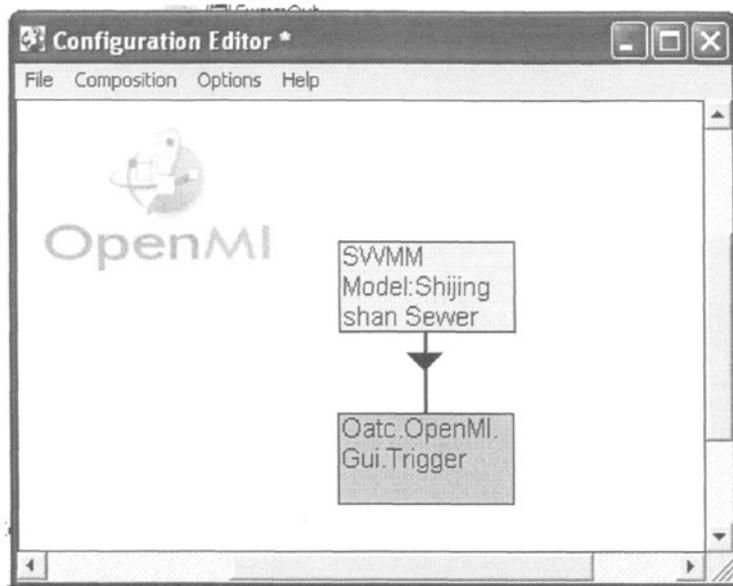


图 5-5 在 OpenMI 平台上的雨水管网模型

Figure 5-5 SWMM model running in OpenMI platform

经过测试，改模型在 OpenMI 平台上运行计算，运行稳定，计算结果与在 SWMM 用户界面下运行结果一致，但是，其他的水力模型如河道模型，二维模型等也可以在同一个 OpenMI 的平台上同时运行并相互之间交换数据。本章接下来的内容就简单介绍一维河道模型、二维地表漫流模型的建立过程。并尝试并探讨三者在 OpenMI 平台上的集成耦合，相互交换数据，模拟整体排水系统，对局部洪涝灾害、淹没水深等作出预测，为科学的管理作出坚实的模型数据基础。

5.2.2 一维河道模型的建立

老山区域的排水管网出水口链接下游的一个排水渠，正常情况排水管网的出口为自由出流，但是极端天气状况下，比如百年一遇的暴雨情况时，排水渠水位

上涨，雨水管网的出水口则可能会是淹没出流，这时排水渠的水位就会影响到整个排水管网水的流动状态。为了综合评估排水渠与排水管网直接的动态影响，建立一个简单的一维河道模型，与所建好的排水管网模型在 OpenMI 的平台上进行耦合动态链接，并评估其运行结果。

排水渠的实际数据暂缺，根据设计图纸和现场观察，排水渠断面大致为矩形断面。断面宽度约为 20m，底坡较为平坦，认定为 0.001，总长度为 3500m。排水渠断面底部标高为假设值。

图 5-6 为排水渠在 ISIS 软件模型中的纵抛面图。

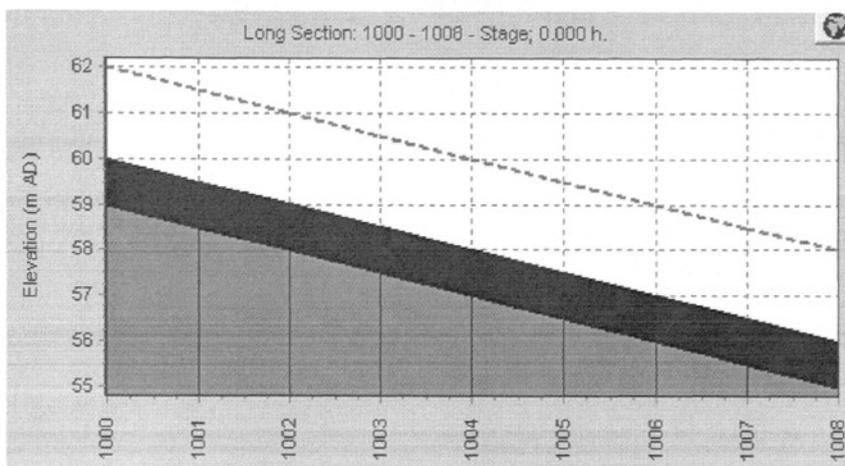


图 5-6 排水渠模型纵抛面图

Figure 5-6 long profile plot of the channel

该排水渠的上游边界条件为一个水量时间序列，由于缺乏排水渠的数据。其边界条件的值为假设值。该单段管道的非恒定流模型作为与 SWMM 模型耦合的一个实例。

5.2.3 二维地表漫流淹没模型的建立

为了更好的评估奥运中心区的洪水风险，需要建立二维的地面漫流模型来模拟局部水流淹没情况以及水流流速。

二维模型所需如下数据：

地表高程数据 (Digital Elevation Model): 该数据是二维非恒定流计算引擎计算水位及流速的关键。其精确度直接影响着二维模型的计算结果。石景山老山奥运场馆区的地表高程数据由 GPS 测量所得，测量的栅格大小为 10m。地表高程模型运用 ASCII 文件格式来表述，图 5-7 显示了石景山老山奥运场馆区的地表高程图：其范围为：4.6km×2.48km，高程数据格栅的单宽为 10m。左下角的 X,Y

坐标为 (485523, 303246)。

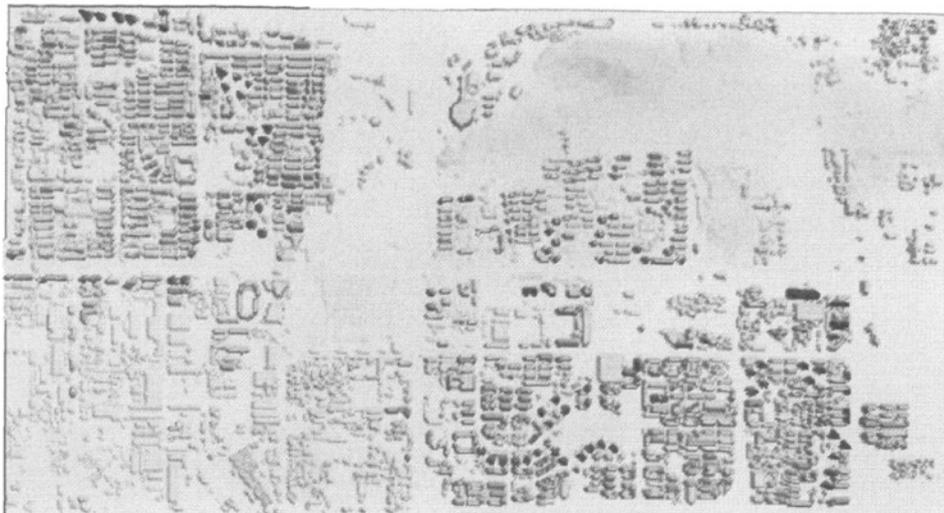


图 5-7 石景山老山奥运场馆区地表高程图

Figure 5-7 shijingshan Olympic center DEM

气象降雨数据: 根据暴雨强度公式, 推求出 10, 50 及 100 年一遇降雨历时线, 作为降雨量输入。

地表摩阻系数: 通常为曼宁系数 (Manning's n), 根据地表粗糙率的不同, 曼宁系数不同, 由于地面材质数据的缺乏, 整个二维内使用同一个曼宁系数。这样也进一步简化了模型。

边界条件: 二维模型的边界条件为雨水管网中检查井的溢出水量。有两种方法可以获得: (1) 运行一维雨水管网 SWMM 模型, 从结果中提取出检查井的位置以及溢出水量的时间序列值, 然后放入到二维地表漫流模型中作为边界条件进行计算, 从而得出洪水的淹没面积以及水在个点的流速, 进而可绘出灾害等级地图。(2) 可以尝试在 OpenMI 的平台上, 一维的 SWMM 模型与二维的地表漫流模型进行集成耦合。每计算一步, 一维模型把个检查井的溢出水量传递给二维模型, 二维模型进行计算得出个点的水位计流速, 再反馈给一维模型, 这样地表的水位又作为一维管网模型的边界条件, 两个模型相互影响, 可以真实模拟动态交互过程。但在技术层面上, 该方法比较困难。

二维模型及数据见附件, 建好的模型同样需要 OpenMI 的封装才能在其平台上运行, 由于时间关系, 二维模型的 OpenMI 组件开发尚未完成, 与二维模型的耦合将在今后的研究工作中进行。

5.3 模型集成技术应用及结果分析

上一节详细阐述了石景山排水管网模型的建立, 并简单介绍了简化的一维河

道模型和二维地表漫流模型的建立过程。本节将对三个模型相互耦合进行探讨。

首先讨论石景山雨水管网模型与河道模型在 OpenMI 平台上的耦合与联动。图 5-8 显示了所建立好的 SWMM 模型与河道模型在 OpenMI 平台上的耦合，左上飞黄色矩形框 (SWMM model: shijingshan-laoshan) 所代表的是石景山老山奥运场馆区的雨水管网模型，下方的黄矩形框 (ISIS:river_h.ief) 代表的是一维河道模型。而 Data Monitor 用来在两个模型运行过程中时时检测其数据的交换。最下方的蓝色背景的矩形框是 OpenMI 平台内部控制耦合模型运行的工具。

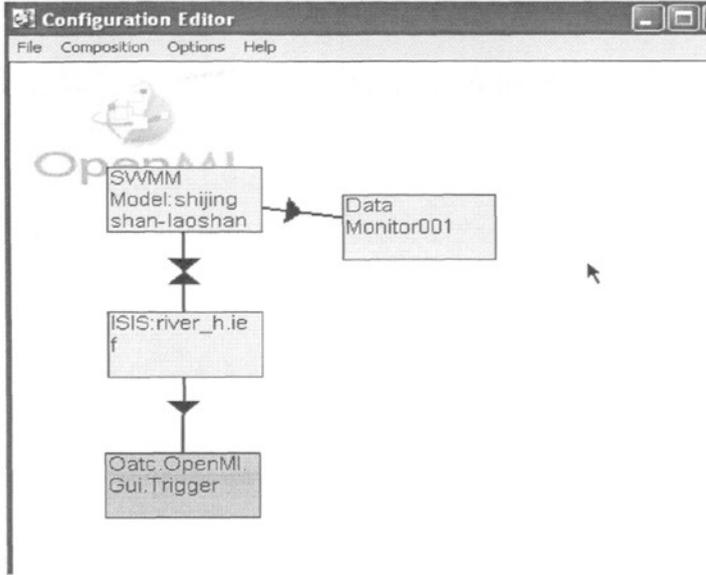


图 5-8 雨水管网与河道模型在 OpenMI 平台上耦合

Figure 5-8 Sewer and river model running in OpenMI

在配置两个模型的链接点时，需要手动链接。石景山雨水管网有 8 个排水口 (outfall)，实际上只有一个排水口是与排水渠相连的。为了增加两个模型相互影响的程度，现将四个雨水管网的出水口与排水渠相连。

通过分析耦合的模型运行结果显示，运用 OpenMI 技术可以更加准确地模拟雨水管网与排水渠直接的动态影响，集成耦合式模拟对于事实的模拟更有说服力。为评估极端天气情况下的，城市洪涝风险提供了有力的工具。

5.4 本章小结

本章以北京市石景山老山奥运场馆区的排水系统模型为实例，详细介绍了 SWMM 雨水管网模型的建立过程与步骤，并在 OpenMI 的平台之上建立集成式模型系统，实现了一维管网模型，河道模型与二维模型之间的数据交换。分析了该方法的可行性与对综合排水系统管理的作用与意义。

结 论

本文研究了基于 OpenMI 技术的排水管网系统模拟技术研究,探讨了如何建立系统集成模型来综合评估城镇排水管网运行状态及城镇洪水险情。本轮课题研究取得了以下几方面的创新性成果:

阐述了排水管网一维非恒定流模拟技术,对一维浅水方程及其数值解和二维浅水方程的数值解及其应用进行了探讨,

系统地研究了欧洲水环境系统模型软件开放式公共接口技术 (OpenMI),对其在国外排水系统建模中的实际应用进行了消化吸收;

在 OpenMI 标准的基础之上,对暴雨管理模型 (SWMM) 计算引擎进行了二次开发,使之与 OpenMI 标准兼容;

以老山奥运赛区为例,建立了该地区的排水管网水力模型、一维排水渠模型以及二维地表漫流模型,并在 OpenMI 的平台上将不同的模型相互耦合,动态链接后能更好的模型实际情景;

系统集成试模拟技术的提出,为城市排水系统运行与管理、防洪减灾以及整个水环境系统的综合管理提供了新的思路。

由于时间限制,论文的研究不可能面面俱到,有很多的方面需要更加深入的研究,以下几点是今后努力的方向:

一维非恒定流模拟软件计算引擎的系统开发与测试,二维非恒定流模拟以及模拟软件计算引擎的开发与应用。推广排水系统非恒定流模拟技术;

深入探讨 OpenMI 技术,包括链接不同领域之间的模型,以及在运行 OpenMI 模型时所遇到的问题 (如多个模型的质量守恒问题等);

应更加细致研究 SWMM 中水力模拟中各参数的选择、滤定方法,确定符合中国实际的参数选择范围和获取方式,对 SWMM 计算引擎进一步二次开发,使之更加合理的运用与排水管网建模中;

排水系统水力模型建立所需数据准确及精确度的保证,水力模型与地理信息系统的无缝结合等方面有待进一步研究;

模型的校核技术及不确定性分析有待进一步研究。

参考文献

- 1 周玉文. 城市排水管网事业面临的新挑. 给水排水. 2003, 29(2): 卷首语
- 2 周玉文. 城市排水系统非恒定流模拟模型研究. 北京工业大学学报. 2001, 27(1)
- 3 Abbott, M. B. , Bathurst, J. C , Cunge, J. A. , O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986a) An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen "SHE". 1: History and philosophy of a physically based distributed modelling system. J. Hydrol. 87,45-59.
- 4 J. B. Gregersen, P.J.A. Gijbbers, S.J.P. Westen, OpenMI: Open modelling interface, Journal of hydroinformatics, 09.3, 2007.
- 5 李树平. 水信息学概述. 给水排水. 2002, 28(4)
- 6 郑一江. 基于 MapInfo 技术排水管网地理信息系统构建与应用. 北京工业大学硕士毕业论文. 2004
- 7 王淑莹. GIS 在城市给水排水管网信息管理系统中的应用. 哈尔滨工业大学学报. 2005, 37(1): 123~126
- 8 王瑞. 鞍山市排水地下管网地理信息系统设计. 鞍山科技大学学报. 2005, 28(5): 372~380
- 9 陈勇民, 陈治安. 基于 GIS 的排水管网规划管理系统的开发及应用. 浙江科技学院学报. 2005, 17(3): 200~203
- 10 LewisA. Rossman. STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL Version 5.0 . 2006
- 11 岑国平, 詹道江. 城市雨水管道计算模型. 中国给水排水. 1993, 9(1): 37~40
- 12 周玉文. 城市排水系统非恒定流模拟技术研究. 哈尔滨建筑大学博士学位论文. 1998
- 13 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟. 水利学报. 1998, 8
- 14 <http://www.dhi-cn.com>
- 15 <http://www.bentley.com/zh-CN/>
- 16 <http://www.wallingfordsoftware.com.cn/>
- 17 <http://www.wldelft.nl/>
- 18 OpenMI association official website: <http://www.openmi.org>: last visit: 2008,11,20
- 19 HarmonIT website: <http://www.harmonit.org/> : last visit: 2008,11,10
- 20 OpenMI-life website: <http://www.openmi-life.org/> : last visit: 2008,11,20
- 21 OpenMI WIKI: <http://www.wiki.openmi.org> : last visit: 2008,11,20
- 22 OpenMI around the World: Available at: <http://www.openmi.org/reloaded/users/openmi-around-the-world.php>: last visit: 2008,11,24.

- 23 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算. 中国建筑工业出版社. 2000: 197~220
- 24 董欣, 陈吉宁. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用. 给水排水. 2006, 32(5): 106~109
- 25 丛翔宇, 倪广恒等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析. 水利水电技术. 2006, 37(4): 64~67
- 26 刘兴坡, 刘遂庆等. 基于 SWMM 的排水管网系统模拟分析技术. 给水排水. 2007, 33(4): 105~108
- 27 刘俊, 郭亮辉等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程. 中国给水排水. 2006, 22(21): 64~70
- 28 M.B.Abbott, Hyroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment[M], Avebury Technical, Aldershot, U.K., 1991
- 29 2. Price R.K., Ahmad K., Holz K.--P. Hydroinformatic Concepts, Chapter 2 in Hydroinformatics Tools Ed. Marsalek et al., NATO ASI Series 2: Environment -- Vol. 44, Kluwer Academic Publishers, 1998
- 30 F. Reußner et. al, OpenMI Based Basin Wide Integrated Modelling Considering Multiple Urban Areas, 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- 31 11.P.J.A. Gijsbers, J. B. Gregersen, et, al. OpenMI design patterns for river-groundwater interaction. Modflow and More 2008 Conference, organised by IGWMC, held at Golden, Colorado, US, 19th-21st May 2008
- 32 Dudley, J. W Daniels, PJA Gijsbers, el, al. Applying the Open Modelling Interface (OpenMI). proceedings of the 7th, Hydroinformatic conference, 4~7, Spetember, 2006, Nice, FR.
- 33 Gregersen J. B., P. Gijsbers, S. Westen, M. Blind (2005) OpenMI: the essential concepts and their implications for legacy software. Adv. in Geosciences (2005) 4:37-44
- 34 P. Gijsbers, J.E.WIEN, P.VERWEIJ, R.KNAPEN, Advances in the OpenMI, .proceedings of the 7th, Hydroinformatic conference, 4~7, Spetember, 2006, Nice, FR.
- 35 Gijsbers, P.J.A., J.B.Gregersen (2005) OpenMI: a glue for model integration. In Zerger, A. & Argent, R.M. (eds) MODSIM 2005, MSSANZ, pp. 648-654
- 36 E.P. Evans, J.M.Wicks, et, al. The evolution of a river modelling system: Proceedings of ICE, 2006, UK.
- 37 Tindall, I., Gijsbers, P., Gregersen, J., Westen, S., Dirksen, F., Gavardinas, C. & Blind, M. 2007 OpenMI Document Series: Part B Guidelines for the OpenMI (version 1.4). Available at:<http://www.OpenMI.org>.
- 38 Cunge J.A., et, al, practical aspects of computational hydraulics. Pitman, London, 1980
- 39 Peter Schade, OpenMI compliant Import of Initial and Boundary Data into

- Delft3D, Bundesanstalt fuer Wasserbau, 2007
- 40 Anna Bozhko, Ali Cotton, benchmarking Integrated Urban Drainage Modelling Methods, WaPUG Spring Conference, Coventry, 3rd, June 2008
- 41 林国勇,董洵等.在.Net平台下C#和Fortran的混合语言编程.实践经验.2003, 9: 58~60
- 42 陈江宁,王和平. Fortran 与 VC++混合编程研究及其应用. 微计算机应用. 2007, 28(6): 645~548
- 43 章程,蒋勇军等.利用SWMM模型模拟岩溶峰丛洼地系统降雨径流过程—以桂林丫吉试验场为例.水文地质工程地质. 2007, 3: 10~14
- 44 Willam James. Best modeling practices for urban water system(Monograph 10).CHI. 2002

附录

SWMM 计算引擎 OpenMI组件部分代码:

```

public class SwmmEngineDotNetAccess
{
    IntPtr _FortranDllHandle;
    int dummy;
    double _currentTime;
    double _timeStep;

    /// <summary>
    /// Open the inp file using swmm_open
    /// </summary>
    /// <param name="inpfilePath"></param>
    public void Initialize(string inpfilePath)
    {
        _FortranDllHandle = Kernel32Wrapper.LoadLibrary(@"swmm5.dll");

        string curDir = System.IO.Directory.GetCurrentDirectory();
        // _FortranDllHandle = Kernel32Wrapper.LoadLibrary(@"SimpleRiverFortranEngined.dll");

        this.dummy = SwmmEngineDllAccess.swmm_open(inpfilePath, "SwmmOut", "SwmmRpt");
        _currentTime = 0;
        // this.swmm_start(1);
    }

    public void swmm_open(string inpFile, string rptFile, string outFile)
    {
        this.dummy = SwmmEngineDllAccess.swmm_open(inpFile, rptFile, outFile);
    }

    //swmm_open(string inpFile,string rptFile, string outFile);
    public void swmm_start(int saveFlag)
    {
        SwmmEngineDllAccess.swmm_start(saveFlag);
    }

    public int swmm_step()
    {
        double[] esliptime = new double[10];
        for (int i = 0; i < esliptime.Length; i++)
            esliptime[i] = 0.1;
        for (; )
        {
            this.dummy = SwmmEngineDllAccess.swmm_step(esliptime);
            if (dummy > 0.0 || esliptime[0] == 0.0)
                break;
        }
        return this.dummy;
    }

    public void swmm_report()
    {
        SwmmEngineDllAccess.swmm_report();
    }
}

```

```
public void swmm_close()
{
    SwmmEngineDllAccess.swmm_close();
}

public int swmm_getversion()
{
    int version=-9999;
    version = SwmmEngineDllAccess.swmm_getVersion();

    return version;
}

public int get_outletQ(StringBuilder outlet_index, double[] outlet_outflow)
{
    int dummy = -9999;
    uint ll = (uint)outlet_index.Length;
    string tt = outlet_index.ToString();
    dummy = SwmmEngineDllAccess.get_outletQ(outlet_index, outlet_outflow);

    return dummy ;
}

public void set_outleth(double[] outleth, int n)
{
    int dummy;

    dummy = SwmmEngineDllAccess.set_outleth(outleth, n);
}
}
```

攻读硕士学位期间所发表的学术论文

发表的论文

1 周玉文, 王永, 王磊. 基于 OpenMI 技术平台的排水系统模拟技术研究. 给水排水. 2009, (8) (已录用)

参与的科研项目

1 参与“十一五”国家科技支撑计划“城市市政管网规划建设与运营管理关键技术研究示范(2006BAJ16B04)”的子课题“城市市政管网信息管理系统及可视化动态管理系统研究”;

2 参与“北京市石景山区迎汛排水数字化监控系统”研究;

3 参与欧盟水信息与水管理项目 (Euroaque hydroinformatics and water management)。

致 谢

本文得到了我的导师周玉文教授悉心的指导，周老师渊博的知识、严谨的治学态度深深地影响了我，本文从选题、研究、撰写、审稿、定稿每一个环节都渗透着周老师的心血，在这里我向他表示衷心的感谢。在我四年的研究生学习生涯中，周玉文老师和曹丽虹老师从生活上、学习上给予了我谆谆教诲和细致关怀，在此，我要向我的老师和师母致以崇高的敬意！

另外，衷心感谢市政工程学科部的所有老师对我的帮助，使我在研究生四年的学习生活中增长了知识，开阔了视野，使我受益匪浅。

同时，我要感谢实验室汪明明、谢善斌、王磊、刁克功、沈宏观、王新庆、张红旗、王峰、陶贤成、李骥以及其他的兄弟姐妹们。

最后，感谢我生我养我的父母，没有他们的支持就没有我今天的成就！

王永

2009年5月于北京工业大学