

摘 要

当前主流农业非点源商业模型与 GIS 的结合大都是采用 ESRI 公司可编程控件系列中功能最为简单的 Arcview, 而功能最强的 ArcEngine 仍未有与模型结合的成果。本文基于 ESRI 公司功能强大的 3D 空间分析控件 ArcEngine, 采用经纬式系统结构设计方法及 COM 技术, 研发了水环境并行数值模拟系统。

当前主流并行平台 MPI, PVM 尚未实现进程迁移功能, 当进行并行计算时, 网络中某客户端异常退出计算将导致脏数据的产生; 本文自主开发了并行模型计算平台, 采用 CS 方式, 服务器端对网络环境进行监控和控制, 为模型计算提供数据交换及进程迁移等功能, 网络发生故障时实时将未完成计算的河道转移到其它客户端继续计算。同时, 为使资源达到最大的利用效率, 本文提出了应用蚂蚁算法进行任务调度的新方法, 提高了整个调度器的负载均衡能力。

河道一维圣维南方程组采用 Preissmann 四点隐格式有限差分方法求解, 采用任务主从型并行编程模型, 将迭代求解节点水位方程组系数进行并行求解。在求解节点水位方程组时, 结合“上海浦东新区调水改善水环境”项目, 根据机群负载平衡的调度方案, 制定了针对一维水量水质模型的通讯协议, 将河道按权重分配到各客户端进行节点水位求解; 河道二维浅水方程通过有限体积方法显式求解, 采用任务 SPMD 型并行编程模型, 将求解区域网格分成若干部分, 对每部分进行单独求解。模型成功应用于镇江内江水流数值模拟, 并得到较高的加速比和并行效率。

对一、二维分别进行并行数值模拟, 结果表明当河道(网格)数一定时, 存在一最优客户端数, 当客户端数小于最优客户端数时, 并行算法所需时间小于串行算法时间, 并随着客户端数增加, 所需时间也逐渐减少; 反之, 所需时间则逐渐增大;

关键词: ArcEngine; 并行计算; 蚂蚁算法; 任务调度; 有限体积法

Abstract

Most of non point source pollution model has integrated with arcview ,but arcview is the lowest platform of the series products of ESRI corporation. Using ESRI company's powerful 3D ActiveX control-ArcEngine, Design and implement water environment information parallel system on COM component technology and Longitude—Latitude Structure design method.

For MPI and PVM has not implemented process transference function ,so when the computing is processing, if one computer's network corrupt all at once, The result will be wrong. This article develops message parallel platform. The platform uses client-server structure. Server control the net environment and provides data exchange function in each computer.If the network has trouble, server could transfer computer task from out of order computer to in order computer. At the same time, in order to get the minimum computer time, this article uses ant colony algorithm to dispatch tasks to achieve wear leveling.

Based on the Saint-venant equations, a one-dimensional mathematical model have been solutioned by Preissman 4-point scheme. The model uses task master-slaver programme former. It adopts parallel method to solute coefficient of node-water equation and applies to PuDong rivernetwork. In order to implement parallelity, The model divides from rivers by ant colony algorithm and establishes corresponding message protocol. Based on the Saint-venant equations, 2D shallow water equations uses Single Program Multiple Data former. The model divides from triangles by ant colony algorithm and Solutions each regions independently. It applies to neijiang river and The numerical simulation results demonstratè that very high accuracy can be acquired few times of iteration, so that better parallel speed-up is obtained.

When applying one and two dimensional flow model to changjiang river of neijiang and pudong river network computation, the results indicate that if machines count is less than the oriental count, the consume time is increasing accord with adding machine count; vice versa.

Keywords: ArcEngine; Parallel Computing; Ant Algorithm; Task Scheduling; Finite Volume Method

前 言

随着社会经济的高速发展,“水多,水少,水脏”等问题已经引起了全社会的广泛重视,实现水资源可持续利用,已成为努力改善人类生存和经济社会条件的关键因素。当前,太湖流域水环境污染问题已日益严重,为改善水环境,通过调水来解决水脏问题是一种行之有效的办法,如引江济太、南水北调、博斯腾湖调水及黑河调水等都是意义重大的工程。

为了确定调水水量与河网内水质之间的关系,需要根据河网水体特征及其水文、水质同步监测资料,采用数值计算方法,建立河网水力水质数学模型。当前,对于河道水流和水质预测,为了减小数值计算误差,需要将计算网格划分得很细。同时由于河道流域规模一般都比较大,对于比较大的计算域进行模拟需要布置的网格节点也比较多。如果网格节点过多,计算工作量将成倍甚至成指数增长,对于计算机的计算速度要求比较高。

近几年来,随着微机运算速度大幅提高,价格低廉,同时局域网技术已十分成熟,高性能互联网的拓扑结构和处理器之间的距离已不再是影响并行机系统性能的关键因素,为利用微机组建并行计算集群提供了高性价比条件,从而被各阶层用户所接受,正逐步成为并行编程的主要平台。

本文针对以上需求,自主研制了基于 ArcEngine 组件的并行水动力数值模拟系统,论文主要的创新成果有:

- 1、分别对一、二维水量水质模型显、隐式求解方式进行并行化改造;自主开发了与模型配套的并行通信平台,并制定了相关通讯协议。并行模型采用 CS (Client-Server) 结构,服务器端对计算区域的划分采用蚂蚁智能算法对机群中的作业进行智能调度;并能实时监测网络状况,对已分配任务计算机网络突然中断,能迅速将所分配的任务转移到其它空闲计算机上,实现进程迁移功能;将并行模型与 ArcGIS 进行无缝集成,开发了水环境并行数值模拟系统。
- 2、一维水动力模型采用 Preissmann 四点隐格式求解圣维南方程组,针对每个时刻需要求解节点水位方程组来求出节点水位,进而推求节点流量的特点。采用任务主从型并行编程模型,将迭代求解节点水位方程组系数进行并行求解,服务器端将河道分成若干部分,发往各客户端,客户端求解完毕后将结果返回服务器端,服务器端再进行下一时段的计算。

3、二维水动力模型采用有限体积显式求解潜水方程，求解每个单元水位、流量等信息时需要用到相邻单元的水位、流量的数据，显式求解方式是采用上一个时刻相邻单元的水位、流量值来求解本时刻单元的水位和流量，这样就避免了求解方程组。针对显式求解的特点，采用任务 SPMD 型并行编程模型，将求解区域网格分成若干部分，对每部分进行单独求解。服务器端负责将每部分边界单元的数据在相应客户端进行交换，客户端接收到数据后进行本区域本时段的计算并且在每个时段末，交换一次边界上的计算数据直至计算完毕。

学位论文独创性声明:

本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。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。与我一同工作的同事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。如不实,本人负全部责任。

论文作者(签名): 左一鸣 2007年9月28日

学位论文使用授权说明

河海大学、中国科学技术信息研究所(含万方数据库)、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件或电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外,允许论文被查阅和借阅。论文全部或部分内容的公布(包括刊登)授权河海大学研究生院办理。

论文作者(签名): 左一鸣 2007年9月28日

第一章 绪论

1.1 选题的背景及目标

1.1.1 选题的背景

我国水资源总量大,人均占有量小,水资源时间、空间上分布不均衡;同时随着我国经济的持续发展,水环境污染问题日益严重,使我国水问题日趋严峻。目前,通过调水来解决水问题是一种行之有效的手段,如引江济太、南水北调、博斯腾湖调水及黑河调水等都是意义重大的工程。但是,通过这些工程可以缓解环境压力,工农业用水及人畜饮用水等问题到何种程度,需要根据数学模型来模拟。当前,对于河道水流和水质预测,为了减小数值计算误差,需要将计算网格划分得很细。同时由于河道流域规模一般都比较大,对于比较大的计算域进行模拟需要布置的网格节点也比较多。如果网格节点过多,计算工作量将成倍甚至成指数增长,对于计算机的计算速度要求比较高。为了追求计算能力的提高,从元器件到工艺,从大型高性能计算机到个人PC机,硬件的性能一直在高速发展着,但是同时由于受计算机元器件物理性能的限制,单机速度的提高也是具有其极限的^[1]。

现阶段,计算机系统结构的改进主要围绕着并行处理技术展开。高性能并行计算机的出现和发展使得大型科学与工程计算,特别是高维复杂问题的计算成为可能。当前高性能并行计算技术水平已经成为一个国家经济和科技实力的综合体现,为此一些国家都制定了相应的战略规划,其中最为著名的就是美国的“高性能计算和通信”(High Performance Computing and Communication,简称 HPCC)和“加速战略计算创新”(Accelerated Strategic Computing Initiative,简称 ASCI)^[2]。我国在 863 高科技研究发展计划和国家 973 基础研究计划重大项目中有对应项目,并设立有专门的国家高性能计算基金。并且近几年来,随着微机运算速度大幅提高,价格低廉,同时局域网技术已十分成熟,高性能互联网的拓扑结构和处理器之间的距离已不再是影响并行机系统性能的关键因素,为利用微机组建并行计算集群提供了高性价比条件,从而被各阶层用户所接受,正逐步成为并行编

程的主要平台^[13]。

并行计算所要解决的问题通常包括大量的复杂计算和数据通讯与处理,此类需求主要有:

(1) 计算密集 (Compute Intensive) 型应用,如大型科学与工程计算与数值模拟。

(2) 数据密集 (Date Intensive) 型应用,如数字图书馆、数据仓库、数据挖掘和计算可视化等;

(3) 网络密集 (Network Intensive) 型应用,如协同工作、遥控和远程医疗诊断等。

对于河道二维水动力及水质模拟属于计算密集应用问题,有限体积模型网格经常达到几万甚至几百万。但是采用单个 PC 机需要的时间长,内存容量易受限制。一般模型运行是在设定工况的条件下进行,运行过程中基本资料不能修改。在率定计算中,是在计算完成后整合计算结果,通过与实测资料的对比,进行修改参数。参数一但修改,再进行计算,如此往复,但一些大的计算模型运行一次就需要几天甚至几周时间,这样就给模型的率定带来了巨大的困难,从而使得分析人员不得不减小计算规模,将网格划分更粗,但这样将导致计算结果可靠性降低。当前黄河下游计算区域从花园口至利津,长约 660 km。若含滩区及滞洪区,则计算区域面积达 4000km² 左右。按主槽、滩地平均单元边长 50m 计算,网格量达 200 万个以上,即使采用显格式计算方法,单机计算下游洪水的演进过程,所需时间也远大于天然洪水的实际传播时间。也就是说,针对黄河下游的大区域平面一维计算,从洪水预报的角度来讲,单机计算是没有意义的。并行计算系统的大容量、高速度已经逐步成为多传质、大尺度、多维模型研究和应用的“助推器”。

众所周知,水动力模型计算所需要的参数是众多的。如每条河道的大断面资料、河道编号、首末节点号、糙率等。传统的数值模型是将这些数据存储于文本文件中,文件每行每个数据对应一个参数。这个文件一般人是看不懂的,因为里面只有一大堆的数据,也不知道每个数据的具体含义。因此,通常需要专门人员才能对这个文件进行编辑,而且由于没有数据检验功能,如果输错参数,计算结果全部无用,耗时耗力。出于传统数值模型的众多缺陷,当前国外的商业模型已

将模型与 GIS 紧密结合在一起,可以通过系统界面方便的进行参数设置,计算结果也能直观的在地图上显示出来,大大提高了模型的易用性。

1.1.2 选题的目标

当前环境水力学数值模拟差分求解格式可以分为显格式、隐格式、显隐交替格式等。本文以一、二维水力水质数值模拟为例,分别根据显格式、隐格式求解特点,探索各自并行求解思路及方法,为提高数值模拟计算速度提供技术支持。同时,将模型与 ArcGIS 紧密结合,并构建水环境数值模拟系统,由系统提供模型所需的参数,并将计算结果通过系统直观的表达出来。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 并行平台应用现状

(1) 并行计算与并行计算体系结构

并行计算^[3](Parallel Computing),就是在并行计算机上所作的计算,通常也可说成高性能计算(High Performance Computing)或超级计算(Super Computing),是将一项大的数据处理与数值计算任务(或任务的局部)分裂成为多个可相互独立、同时进行的子任务,并通过对这些子任务相互协调的运行和实现,从而达到快速、高效的对给定问题求解的处理方法^[14]。因为任何高性能计算和超级计算总离不开使用并行技术。随着计算机和计算方法的飞速发展,几乎所有的学科都走向了定量化和精确化,从而产生了一系列诸如计算物理、计算化学、计算生物学、计算地质学等计算类科学,逐渐形成了一门计算性的学科分支,即计算科学^[10,11]。如今,计算科学已经成为继理论科学及实验科学之后的第三门科学。计算科学的理论和方法,作为新的研究手段和新的设计与制造技术的理论基础,正推动着当代科学与技术向纵深发展。通常,针对计算科学中的复杂问题,传统的单机模式往往在完成时间和运行效果上无能为力,而并行计算则被认为是解决此类问题的唯一可行途径。

① 并行计算机的发展历程

并行计算机的发展,可分为四个阶段^[12]:

- i. 同步并行计算技术的预研期,并行机的研究大多属于概念性的范畴

(1972年以前)。

- ii. 同步并行计算实践期, 异步并行计算预研期(20世纪70年代), 1974年CDC STAR-100向量机在美国的Lawrence Livermore国家实验室投入使用; 1976年Cray研究公司推出的向量式并行处理机在Los Alamos实验室运转。1976年后, 控制数据公司的STAR-100改进为Cyber205, Cray-1改进为Cray-1s, 并投入批量生产。一批功能强大的并行机相继投入使用, 使并行机的研究从初期就呈现出一副欣欣向荣的局面。
- iii. 同步并行计算成熟期, 异步并行计算实践期(20世纪80年代), 各种规模的巨型机、超立体机和脉动机迅速问世, 并相继投入使用。例如, 日立公司的S-820/80巨型机, Intel公司的Ipsc簇超立体机, H. T. Kung研制的Warp脉动阵列机。
- iv. 异步并行计算技术成熟期(20世纪90年代以后)。NEC研制出第一台日本生产的超级并行向量处理机SX-3, 其每台机器含有4个处理器, 每个处理器含有4条数据流水线, 共有4G内存。

② 并行计算机结构

大型并行机系统的结构模型一般可分为6类^[8,9]:单指令多数据流机SIMD (Single-Instruction Multiple-Data);并行向量处理机PVP (Parallel Vector Processor);对称多处理机SMP (Symmetric Multiprocessor);大规模并行处理机MPP (Massively Parallel Processor);分布共享存储多处理机(Distributed Shared Memory);工作站机群(Cluster of Workstation)。

- i. SIMD:这种结构并行系统中, 处理机同步执行相同的指令流, 而同时执行不同的数据流。
- ii. PVP: 系统由专门设计的高带宽网络及定制的处理器组成, 一般采用共享存储方式。
- iii. MPP: 大型计算机系统, 处理节点采用商品微处理器, 采用分布式存储方式及专门设计的高带宽、低延迟网络。
- iv. SMP: 与MPP不同的是采用共享式存储方式, 每个处理机可等同的访问共享存储器和I/O设备。
- v. DSM:采用DIR用以支持分布在各结点中的局部存储器, 从而形成一个共

享的存储器。

- vi. COW: 是近年来发展势头很好的一种体系结构。这类机型的技术起点比较低, 用户甚至可以自己将一些服务器或微机通过以太网连接起来, 配以相应的管理、通讯软件来搭建Cluster。但是如果要构造高性能、结构合理并具有好的RAS特性的Cluster却不是一件容易的事情。它使用的是常见的硬件设备, 象普通PC、以太网卡和集线器, 很少使用特别定制的硬件和特殊的设备。几乎所有的国内、外计算机厂商都有自己的Cluster集群产品, 如IBM的Cluster1350、联想的深腾系列及曙光的天潮系列等。Cluster系统通常具有以下特点:

- 系统由多个独立的服务器(在Cluster概念下称为节点)通过交换机连接在一起。每个节点拥有各自的内存, 某个节点的CPU不能直接访问另外一个节点的内存;

- 每个节点拥有独立的操作系统;

- 需要一系列的集群软件来完成整个系统的管理与运行, 包括:

Cluster系统管理软件, 如IBM的CSM, xCat等;

消息传递库, 如MPI, PVM等;

作业管理与调度系统, 如LSF, PBS, LoadLeveler等;

并行文件系统, 如PVFS, GPFS等;

- 支持消息传递方式的并行模式, 如MPI, PVM等;

- 只能在单个节点内部支持共享内存方式的并行模式, 如OpenMP, pthreads等;

- 性能价格比好;

(2) 并行编程环境简介

要进行并行计算, 软件支撑平台是重要组成部分之一。廉价并行计算机的支撑环境按并行计算支撑平台可分为MPI(Message Passing Interface-消息传递接口)和PVM(Parallel Virtual Machine-并行虚拟机)以及Linda等;

① Linda^[4,5]

19世纪80年代中期Linda平台是美国Yale大学的David Gelernter开发的, 是第一个商业产品应用于VSM作为超级计算机和大规模工作站机群并行计算, 与机器无关的编程环境, 它是一个关联的、虚拟的共享存储系统。新版的Linda开发

语言支持C和Fortran,能支持共享内存多指令多数据流(MIMD)系统和分布式内存(MIMD)系统,网络机群等,有较强的稳定性和可扩展性。主要适合于一节点上具有多个处理进程,且进程间同步点较多和全局通信较频繁的应用场合^[6]。

② MPI

MPI是消息传递接口的简称,它实际上是一个消息传递函数库的标准说明,提供了一种与语言平台无关,可以被广泛使用的编写消息传递程序的标准^[17]。其标准化开始于1992年4月29日至30日在威吉尼亚的威廉姆斯堡召开的分布存储环境中消息传递标准的讨论会由Dongarra,Hempel,Hey和Walker建议的初始草案于1992年11月推出,并在1993年2月完成了修订版这就是MPI 1.0。1995年6月推出了MPI的新版本MPI1.1对原来的MPI作了进一步的修改完善和扩充,但是当初推出MPI标准时为了能够使它尽快实现并迅速被接受许多其它方面的重要但实现起来比较复杂的功能都没有定义比如并行I/O,当MPI被广为接受之后扩充并提高MPI功能的要求就越来越迫切了。于是在1997年的7月在对原来的MPI作了重大扩充的基础上又推出了MPI的扩充部分MPI-2,而把原来的MPI各种版本称为MPI-1。MPI-2的扩充很多但主要是三个方面并行I/O远程存储访问和动态进程管理^[18-21]。MPI以语言独立的形式来定义这个接口库,提供了与C, Fortran和C++语言的绑定。

③ PVM

PVM^[26,27]是并行虚拟机,由美国田纳西大学、Oak,Ridge国家实验室等研制的并行程序开发环境。它可以把多个异构的计算机组织起来成为一个易于管理的、可扩展的、易编程使用的并行计算资源。它围绕“虚拟机”的中心思想展开,即通过网络互联的一系列异构的主机在逻辑上对用户呈现为单一的并行计算机。由于PVM强调虚拟机的扩展性、异构性和容错能力,因此它把可移植性看得比性能更重要。它支持在异构网络中应用程序间的通信;含有动态的资源管理和进程控制功能;提供了容错的基本机制,当发生错误时,可以重新分配任务。

④ JAVA MPI

由于MPI只支持C、Fortran和C++语言的分布并行计算编程环境,这就存在MPI应用程序在不同系统间的二进制兼容的问题,将JAVA语言与MPI结合起来,提供MPI对JAVA语言的支持,使用JAVA语言编写的并行程序将具有跨平台的功能。

张晓军^[7]等人通过JAVA语言调用MPI的C语言函数库，将C语言的参数数据类型转换成JAVA支持的数据类型，调用MPI的库函数，从而将JAVA与MPI结合起来。

⑤ MPI 与 PVM 的比较

目前较为常用的并行编程环境为MPI与PVM。

- i. 移植性：基于MPI的并行应用程序可以几乎不作修改在不同型号的并行机之间转移，或转移到网络环境中运行^[16]。PVM的应用程序可以在两组不同的计算机群之间移植，而不可能把并行应用程序完全移植到单个的并行机上去运行。所以说，从可移植性上MPI相对于PVM有着无可比拟的优势。
- ii. 通信模式：MPI提供了点到点通信和集合通信。在点到点通信中，发送只有阻塞式发送，接收有阻塞和非阻塞两种，非阻塞通信机制可以在硬件设备的支持下，实现通信和计算的并行，而PVM没有这种功能。在集合通信中，MPI提供了更多的全局操作函数，支持广播、分散、收集、多收集、多对多等过程组内多进程数据通信操作，此外MPI还支持进程组内多进程数据运算操作^[23]。相比较而言，PVM虽然也提供了一些集体通信操作函数，但是在集体通信函数数量、功能以及对数据处理的复杂程度等方面远不如MPI。
- iii. 安全通信：MPI中提供了通信子（Communicator）的概念，所谓通信子就是点对点通信只能在属于同一通信子的节点机间进行，通信子对其起屏蔽作用。即使形式上完全相同的通信操作，只要其所属的通信子不同，MPI就视其为截然不同的两次操作。通信子的存在，保证了可靠安全的通信环境，避免了通信空间的出错，提供了可靠的通信接口^[24,25]。PVM类似于MPI，也提供了使一组任务获得唯一的上下文标签的函数。在PVM中，当属于一个任务组（具有唯一的上下文标签）的一个任务失败后，容许一个新的任务使用这个唯一的上下文，从而提供了容错的功能，但也引入了冲突的可能。例如当一个任务的失败导致了整个任务组失败，其拥有的唯一的上下文标签被释放，此时如果有一个具有此上下文的新任务生成，则将会引起冲突。
- iv. 进程管理：MPI-1完全是静态的，认为所有进程是事先静态初始化好了，

尽管MPI-2在此进行了改进,提供了增加一组进程组的函数及组内进程间发送控制信息的函数,可是并不支持对动态进程的查询。但MPI中对任务分配提供了笛卡尔拓扑和图拓扑来分配资源,有可能充分利用硬件的特性来达到简化设计,提高效率^[22]。PVM建立在虚拟机的概念上,有完全的资源管理功能。用户既可以增加或删除计算资源(即计算机结点),也可以把任务(通常表现为进程)从一个计算机结点转移到另一个计算机结点。同时,PVM提供了动态查询和管理虚拟机中各个任务及计算机结点状态的函数,从而使用户的应用程序可以通过与PVM 虚拟机的动态交互,管理自己的计算环境,为实现计算环境的负载平衡、任务迁移和容错提供了强有力的支持^[28]。

(3) 调度算法简介

在工作站网络(NOW)环境中,由于任务到达的随机性以及各节点处理能力上的差异,会造成某些节点分配的任务过多(重载),而另外一些节点却是空闲的(轻载或空载)。一方面使重载节点上的任务尽可能快地完成是当务之急;另一方面使某些节点空闲是一种浪费。负载均衡设法对已经分配的任务进行重新调度,并通过任务迁移使各节点负载大致相等,避免这种空闲和忙等待并存的情况,有效提高网格资源的利用率,减少任务的平均响应时间。

根据调度结点的数量,调度策略可分为集中式调度和分布式调度。集中式调度^[95]能够减少通信的开销,但是其调度的规模较大,易产生通讯瓶颈等问题。分布式调度^[96]信息实时性强,可靠性好,易扩充。但通信开销大,算法设计复杂,不易管理。

根据调度策略执行的时期,生产调度分为动态调度和静态调度两大类。Jackson^[33]于1957年对静态调度和动态调度的概念做了区分。静态调度是在已知调度环境和任务的前提下的所谓事前调度方案。动态调度是指在调度环境和任务存在着不可预测的扰动情况下的调度方案,它不仅依赖于事前调度环境和任务,而且与当前状态有关。静态任务调度算法要求事先知道完整的任务依赖关系和准确的任务执行时间。这些要求在实际应用中很难得到满足。因此,在集群系统的任务调度问题中,大多数的系统采用的是动态调度算法。

动态调度的概念出现较早,最初的研究主要采用最优化方法,Matsuura^[29]提出的重调度算法,首先用分支定界法产生一个调度,当工况发生变化时,再用调度

规则来分配工件。由于绝大多数调度问题已被证明是NP问题^[34]，随着调度问题规模的增大，上述方法的求解难度将急剧增加，因而最优化方法往往不能适应生产实际对实时性的要求。此外，该类方法大多基于某些理想化的假设，远不能充分反映实际生产环境的复杂性，而且要充分表达实际生产环境的随机性和动态性也极为困难，所以单独使用此类方法来解决动态调度问题是不现实的。

近年来，计算机技术的迅速发展以及人工智能、神经网络、遗传算法和仿真技术等新方法的产生和发展，为动态调度的研究开辟了新思路，也为生产调度的实用化奠定了基础。1996年，Kwok和Ahmad提出了一个动态关键路径(DCP)调度算法^[30]。1999年，张宏莉等人针对单并发任务簇提出了一个最优分配算法OPTA^[31]，而单并发任务簇就等同于Fork-Join任务图。DCP和OPTA是两个较好的调度算法。1998年，Darbha和Agrawal提出了一个基于任务复制(TDS)的调度算法^[32]。TDS算法在调度长度(schedule length)方面，基本上比在它以前出现的所有算法都优越，因为它通过任务复制减少了通信时间。但是，TDS算法没有考虑节省处理器个数的问题，这会降低算法的加速比。Sim等^[35]提出一种专家神经网络方法，该方法用16个神经网络分别从相应的训练样本集中获取调度知识，用专家系统确定各子网的输入。由于神经网络的训练由16个子网分担，并且各子网可以并行训练，从而减少了训练时间。Lee等^[36]用遗传算法和机器学习来解决单件车间的调度问题，用机器学习来产生将工件下发到车间层的知识库，而用遗传算法在各台机器上分配工件。

蚂蚁算法是由Dorigo^[37]提出的解决组合优化问题的一种多agent方法。其模拟自然界中蚂蚁觅食路径的搜索过程。蚂蚁在寻找食物时，能在其走过的路径上释放信息素(pheromone)，蚂蚁在觅食过程中能够感知信息素的存在和强度，并倾向于朝信息素强度高的方向移动。当大量蚂蚁不断地从蚁巢通往食物时，相同时间内相对较短路径上通过的蚂蚁较多，该路径上累积的信息素强度也较大，后来蚂蚁选择该路径的概率也相对较大，最终整个蚁群会找到最优路径。许智宏，孙济洲^[38]将蚂蚁算法应用到网格计算任务调度中，其将一组需调度的任务定义为一只蚂蚁，随机的分配到网络的各节点上，每只蚂蚁根据当前各资源的信息素值决定自己解域的下一任务分配给剩余各资源的概率，对每只蚂蚁的分配结果计算目标函数，选当前计算时间最小值为最佳解。将信息素恢复至本组任务调度前的

值,然后重复以上过程,到达终止步时,选得最优解作为本组任务的分配方案。

粒子群优化算法(PSO)是由James Kennedy 博士和R. C. Eberhart博士于1995年提出的。该算法源于对鸟群、鱼群觅食行为的模拟^[39]。在PSO 中,首先初始化一群随机粒子(随机解),然后通过迭代寻找最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己的速度和位置。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值,另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值。PSO算法简单易实现,不需要调整很多参数,主要应用有神经网络的训练、函数的优化问题等。刘志雄,王少梅^[40]将港口拖轮作业调度问题描述为一类带特殊工艺约束的并行多机调度问题,采用粒子群算法求解该类调度问题,提出了一种2维粒子表示方法,通过对粒子位置向量进行排序生成有效调度,并采用粒子位置向量多次交换的局部搜索方法来提高算法的搜索效率。

1.2.2 流体力学中常用的数值离散方法

(1) 有限差分(FDM)

有限差分方法(Finite Difference Method)是计算机数值模拟最早采用的方法,至今仍被广泛运用。该方法将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域。有限差分法以 Taylor 级数展开等方法,把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。该方法是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法,数学概念直观,表达简单,是发展较早且比较成熟的数值方法。对于有限差分格式,从格式的精度来划分,有一阶格式、二阶格式和高阶格式。从差分的空间形式来考虑,可分为中心格式和逆风格式。考虑时间因子的影响,差分格式还可以分为显格式、隐格式、显隐交替格式等。目前常见的差分格式,主要是上述几种形式的组合,不同的组合构成不同的差分格式。差分方法主要适用于有结构网格,网格的步长一般根据实际地形的情况和柯朗稳定条件来决定。

二维水流模拟时常采用交替方向隐式法(ADI)^[61],ADI法是将高维问题的计算逐层分解为若干绝对稳定的一维隐格式形式,该方法又包括多种不同的差分格式(如P-R格式、D格式、D-R格式等),其中,有些格式可以由二维扩展到三维,有些

则不能应用于三维计算.但ADI法不适用于含有混合偏导数的情况。

差分方法的计算精度较其它一些方法稍低,从理论上讲可以通过提高差分阶数来提高计算精度,但又会带来一些不便;差分方法的另一个弱点是,传统的矩形网格不能较好的适应复杂的边界.但近年来提出的梯形和三角形网格等以及边界拟合坐标法^[59,62],将会适当弥补差分方法的缺憾。

(2) 有限体积(FVM)

有限体积法 (Finite Volume Method) 又称为控制体积法^[68-70]。其基本思路是:将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积;将待解的微分方程对每一个控制体积分,便得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上的因变量的数值。为了求出控制体积的积分,必须假定值在网格点之间的变化规律,即假设值的分段的分布的分布剖面。从积分区域的选取方法看来,有限体积法属于加权剩余法中的子区域法;从未知解的近似方法看来,有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简言之,子区域法属于有限体积法的基本方法^[71]。

有限体积法的基本思路易于理解,并能得出直接的物理解释。离散方程的物理意义,就是因变量在有限大小的控制体积中的守恒原理,如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积中的守恒原理一样。有限体积法得出的离散方程,要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足,对整个计算区域,自然也得到满足。这是有限体积法吸引人的优点。有一些离散方法,例如有限差分法,仅当网格极其细密时,离散方程才满足积分守恒;而有限体积法即使在粗网格情况下,也显示出准确的积分守恒。就离散方法而言,有限体积法可视作有限单元法和有限差分法的中间物。有限单元法必须假定值在网格点之间的变化规律(既插值函数),并将其作为近似解。有限差分法只考虑网格点上的数值而不考虑值在网格点之间如何变化。有限体积法只寻求的结点值,这与有限差分法相类似;但有限体积法在寻求控制体积的积分时,必须假定值在网格点之间的分布,这又与有限单元法相类似。在有限体积法中,插值函数只用于计算控制体积的积分,得出离散方程之后,便可忘掉插值函数;如果需要的话,可以对微分方程中不同的项采取不同的插值函数。

针对采用不同的计算网格,控制体积法也派生出一些不同的方法,其中,使用较多的是四边形正交贴体网格。在采用四边形网格时,由于对控制体积积分时包

含了相间节点的压力差,可能使计算程序无法辨别均匀的合理压力场与不符合实际的、交错的波状压力场;同样,在离散连续性方程时,也可能出现满足连续方程,却不符合实际的波状速度场,从而导致不正确的结果。为此,往往采用交错网格,将不同的物理量布置在不同的节点上,交错网格可以解决波状压力场和速度场的问题,但采用交错网格时,要在计算前插值生成相应的副网格,对计算的最终结果还要进行插值转换,才能统一得到主网格上的各种变量值,因此,计算复杂程度和计算量都有所增加^[72]。此外,由于生成三维正交网格存在诸多困难,王晓建,张廷芳采用非正交贴体网格的控制体积法^[73]以及Alberto Carpinteri,Karutz H等人提出的无结构网格下的控制体积法^[74,75]也得到了应用。

(3) 有限元(FEM)

有限元方法(Finite Element Method)是于1983年Hughes T J R, Levit J, Winget J^[92]提出的,最初用于热传导问题的有限元分析中。其基础是变分原理和加权余量法,其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内,选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,借助于变分原理或加权余量法,将微分方程离散求解。采用不同的权函数和插值函数形式,便构成不同的有限元方法。根据所采用的权函数和插值函数的不同,有限元方法也分为多种计算格式。从权函数的选择来说,有配置法、矩量法、最小二乘法和伽辽金法,从计算单元网格的形状来划分,有三角形网格、四边形网格和多边形网格,从插值函数的精度来划分,又分为线性插值函数和高次插值函数等。不同的组合同样构成不同的有限元计算格式。对于权函数,伽辽金(Galerkin)法是将权函数取为逼近函数中的基函数;最小二乘法是令权函数等于余量本身,而内积的极小值则为对代求系数的平方误差最小;在配置法中,先在计算域内选取N个配置点。令近似解在选定的N个配置点上严格满足微分方程,即在配置点上令方程余量为0。插值函数一般由不同次幂的多项式组成,但也有采用三角函数或指数函数组成的乘积表示,但最常用的多项式插值函数。有限元插值函数分为两大类,一类只要求插值多项式本身在插值点取已知值,称为拉格朗日(Lagrange)多项式插值;另一种不仅要求插值多项式本身,还要求它的导数值在插值点取已知值,称为哈密特(Hermite)多项式插值。单元坐标有笛卡尔直角坐标系和无因

次自然坐标,有对称和不对称等。常采用的无因次坐标是一种局部坐标系,它的定义取决于单元的几何形状,一维看作长度比,二维看作面积比,三维看作体积比。在二维有限元中,三角形单元应用的最早,近来四边形等参元的应用也越来越广。对于二维三角形和四边形单元,常采用的插值函数为有Lagrange插值直角坐标系中的线性插值函数及二阶或更高阶插值函数、面积坐标系中的线性插值函数、二阶或更高阶插值函数等。

(4) 边界单元法(BEM)

边界单元法(Boundary Element Method)^[76]起源于应用数学,在21世纪计算水力学界受到越来越多的关注,并成为一种重要计算方法。与FDM及FEM相比,BEM是一种非常有效的求解偏微分方程(Partial Differential Equations)的方法。边界单元法是将区域的边界划分为一系列的单元,以微分方程的边值问题借助于微分方程的基本解化为边界积分方程,再在离散的边界上化为代数方程组求解。BEM的优势是只需在边界而FEM和FVM需要在整个计算域离散偏微分方程。非常遗憾的是用积分方法只能求解某一类偏微分方程,不像有限差分法和有限元方法能对所有的偏微分方程都适用。但是用边界单元法所能求解的偏微分方程,其相对于其它方法较易使用并有较高的计算效率。

(5) 各种方法的比较

- ① 有限差分法:直观,理论成熟,精度可选。但是不规则区域处理繁琐,虽然网格生成可以使FDM应用于不规则区域,但是对区域的连续性等要求较严。使用FDM的好处在于易于编程,易于并行。
- ② 有限元方法:适合处理复杂区域,精度可选。缺憾在于内存和计算量巨大。并行不如FDM和FVM直观。不过FEM的并行是当前和将来应用的一个不错的方向。
- ③ 有限容积法:适于流体计算,可以应用于不规则网格,适于并行。但是精度基本上只能是二阶了。FVM的优势正逐渐显现出来,FVM在应力应变,高频电磁场方面的特殊的优点正在被人重视。

上述各种方法并不是相互孤立、毫不相关的。它们之间有着一定的联系,一方面表现为解决问题思路的借鉴和改造,如有限体积法就吸收了有限差分法与有限单元法的思路。另一方面,在解决具体问题时,除了选择单一的方法外,还可以联合采用多种不同的方法,如区域分裂法^[63]、分步法^[64,65]和差分结合有限元法

[66,67]等。

1.2.3 非点源数值模型研究现状

概括地讲,水体的污染源可以划分为:点源、面源(也称为非点源)和内源。点源主要来自于工业和生活污水的集中排放,非点源污染的来源比较广泛,其中以来自农业的面源污染最为突出,内源主要指水系沉积物的释放。

随着点源污染控制能力的提高,面源污染的严重性逐渐显现出来。在美国即使达到零排放,仍然不能有效控制水体污染,从而认识到面源污染控制的重要性;我国对污染物排放实行总量控制,但这只对点源污染的控制有效,对面源污染的控制没有意义。在我国强化工业和生活污水排放与治理的同时,面源污染的控制也应积极开展和加强,否则水体污染不会得到根本性的好转。

农业面源是最为重要且分布最为广泛的面源污染,三峡大坝库区 1990 年的统计资料也表明,90%的悬浮物来自农田径流,N、P 大部分来源于农田径流;北方地区地下水污染严重。在 21 世纪,面对巨大的人口压力,我国农业土地资源的开发已接近超强度利用,化肥农药的施用成为提高土地产出水平的重要途径,因此,面源污染的控制关系到农业及区域社会经济的可持续发展。

目前,对农业非点源污染的研究方法主要有野外实地监测、人工模拟降雨和非点源污染模拟计算三种。在进行非点源污染的量化研究及影响评价和污染治理时,建立模拟数学模型,进行时间和空间序列的模拟是最为有效和直接的研究方法。随着人们对非点源污染研究的深入,理论的成熟,监测的完善,非点源污染数学模型取得了长足的进步,定量计算方法也日趋完善^[41]。

人类开始全面认识和研究水质模型的历史可分为三个阶段^[42]。

第一阶段:1925~1980年,模型研究对象仅是水体水质本身,被称为“自由体”阶段。也就是说,在这一阶段模型的内部规律只包括水体自身的各水质组分的相互作用,其它如污染源、底泥、边界等的作用和影响都是外部输入。

第二阶段:1980~1995年,这个阶段可以作为水质模型研究快速发展的第二阶段,这一阶段模型有如下的发展:(1)在状态变量(水质组分)数量上的增长;(2)在多维模型系统中纳入了水动力模型;(3)将底泥等作用纳入了模型内部;(4)与流域模型进行连接以使面污染源能被连入初始输入。

第三阶段:1995年至今,随着发达国家对面污染源控制的增强,面源污染减

少了。而大气中污染物质沉降的输入，如有机化合物、金属(如汞)和氮化合物等对河流水质的影响日显重要。虽然营养物和有毒化学物由于沉降直接进入水体表面已经被包含在模型框架内，但是，大气的沉降负荷不仅直接落在水体表面，也落在流域内，再通过流域转移到水体，这已成为日益重要的污染负荷要素。从管理的发展要求看，增加这个过程需要建立大气污染模型，即对一个给定的大气流域(控制区)，能将动态或静态的大气沉降连接到一个给定的水流域。所以，在模型发展的第三阶段，增加了大气污染模型，能够对沉降到水体中的大气污染负荷直接进行评估。

主要水质模型简介：

(1) Delft-3D

Delft-3D^[42]是目前世界上最为先进的完全的3维水动力—水质模型系统之一，尤其独一无二地支持曲面格式。系统能非常精确地进行大尺度的水流(Flow)、水动力(Hydrodynamics)、波浪(Waves)、泥沙(Morphology)、水质(Waq)和生态(Eco)的计算。Delft-3D采用Delft计算格式，快速而稳定，完全保证质量、动量和能量守恒；并通过与法国EDF合作，Delft-3D已经实现了类似TeleMac的有限单元法(Finite Element Method)计算格式供用户选择；系统自带丰富的水质和生态过程库(Processes Library)，能帮助用户快速建立起需要的模块。此外，在保证守恒的前提下，水质和生态模块采用了网格结合的方式，大幅度降低了运算成本。系统实现了与GIS的无缝链接，有强大的前后处理功能，并与Matlab环境结合，支持各种格式的图形、图像和动画仿真；

(2) AGWA(Automated Geospatial Watershed Assessment)

AGWA是由美国西南部流域农业研究中心和美国环保署联合开发的基于GIS接口农业非点源模型前处理软件^[46]。AGWA模型由过去的集中式水文模型改进为分布式水文模型。而一般的分布式模型所需的大量输入数据以及参数构建一直是使用这些复杂模型的障碍。AGWA的开发目的是：

- ① 为水文模型确定参数提供一个简单、直接、可重复利用的方法。
- ② 为了利用最基础的GIS数据。
- ③ 为了与其它基于GIS的流域环境模拟软件兼容。
- ④ 为了使得在将来的不同尺度模拟中可选择不同的模型进行模拟成为可能，提供一个基础平台。

AGWA包括两个现有模型即进行大流域长期模拟的模型SWAT和以小流域单降雨事件为基础的分布参数模型KINEROS2。AGWA提供基于GIS的框架来收集模型所需的空间分布数据，通过它来进行输入数据的前处理以及模拟结果的分析。

AGWA是ESRI（Environmental Systems Research Institute）公司Arcview的一个应用扩展软件，提供的GIS框架支持所有以地形数据为驱动的模型的输入数据及计算结果的基于GIS的空间分析与显示。而且AGWA能够与其它基于Arcview的模型如ATILA（U.S. Environmental Protection Agency's Analytical Tool Interface for Landscape Assessment）和BASINS（Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources）共享框架，从而使得可以将不同模型计算的结果在同一个平台中进行比较。AGWA还支持一个模型的数据输出作为另一个模型的输入，为将来的模型开发与模拟提供的便利。

（3）ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)& ANSWERS-2000

20世纪60年代晚期，Purdue大学的农业工程系开发研制了ANSWERS模型，它是一个以降雨事件为基础的分布式物理模型，其用来模拟流域管理措施或BMPs（Best Management practices）对减少泥沙和营养物在流域内的迁移以及通过设置过滤带来减少流域土壤中的氮向河流中转移而进行的数值模拟模型。

ANSWERS适合于缺资料地区进行数值模拟，其将流域划分成均匀的小于1公顷的方格，在方格内部参数都是相等的。ANSWERS用Holton产流理论来模拟水流在土壤中的流动，将来会将Green-Ampt模型加入进来。GRASS提供了基于GIS的接口，将来会提供对ArcView的支持。Beasley和Huggins^[47-49]在20世纪70年代对模型进行了改进和完善，使模型用以次降雨条件下的表面径流模拟和土壤侵蚀量的测算，并能模拟分析农业地区雨后及降雨期间流域水文特征的分布式模型。

ANSWERS模型的最新版本是ANSWERS-2000，在这个版本中，养分模块对入渗^[50]进行了校正与改进，并加入了土壤水分蒸发及渗漏过程与植物生长部分，可以进行多场降雨的连续模拟。ANSWERS-2000模拟了稳定性有机态氮、活性有机态氮、硝态氮和氨态氮等4个氮源的转化与相互作用。养分的转化包括模拟的氨化作用与硝化作用、化合物的矿化、反硝化作用、植物对铵与硝酸盐的吸收。ANSWERS模型的一个最基本的弱点是其侵蚀模块，该模块在很大程度上是经验性的而且仅模拟了总泥沙迁移过程^[51]。

(4) AGNPS(Agricultural NonPoint Source pollution model) & AnnAGNPS(Annualized AGNPS)

20世纪80年代初, 由美国农业研究局(ARS)和明尼苏达污染控制局和自然保护局(NRCS)共同研发的农业非点源模型AGNPS^[43,44]。早期的AGNPS是以单降雨事件为基础的(Event-based)分布参数模型, 后来作了许多改变, 在原来模拟一次降雨过程的基础上, 增加了长时间系列的模拟, 成为一个流域系统评估的管理决策工具, 并与ArcView GIS平台进行了集成。模型包括以下特点:

- ① 基于数据库单数据输入和编辑模块;
- ② 农业流域内年平均污染负荷模型(AnnAGNPS);
- ③ 计算结果格式化输出和分析模块;
- ④ CCHE 1D (计算机水科学与工程中心的一维河道模型)模块, 设计用于集成河道发育中的特征与丘陵地负荷影响的河流网络程序;
- ⑤ ConCEPTS (保持河道发育和污染传输系统模块) 模块, 设计用于预测和量化堤岸侵蚀的影响, 河床沉积及退化, 污染物的沉积或携带, 河岸边的植被形态和污染负荷等;
- ⑥ 溪流网络水体温度模块(SNTEMP)。其为水域规模的, 设计用于预测日平均, 最大和最小水温度的模块;
- ⑦ SIDO(沉积物的侵扰和溶解氧模块) 模块, 是专门为评价或量化污染负荷及其他一些威胁的因素对鲑科鱼产卵区、生活栖息地的影响而设计的一套鲑科鱼生命周期模型。

AGNPS模型可以模拟农业水域产生的径流量、泥沙的迁移和土壤的侵蚀, 也可以模拟农业污染物(如N、P、有机碳、农药)等的迁移及污染负荷。它主要由三部分组成: 径流子模型、产砂子模型和水质子模型。其中径流子模型采用SCS算法计算径流量; 产砂子模型采用通用土壤流失方程(USLE)模拟土壤侵蚀和泥沙迁移, 其最新的版本如AnnAGNPS已采用修订的通用土壤流失方程(RUSLE); 水质子模型又包括两个子模型: 作物养分模型和农药模型, 其中作物养分模型用于计算田块径流中溶解态及吸附态氮、磷的流失量, 农药模型则重点考虑了不同管理措施对农药污染的影响^[45]。

(5) KINEROS-2

KINEROS-2是1990年由Woolhiser研发的KINEROS农业非点源模型的改进版

本。KINEROS-2是面向事件的、以物理背景为基础的分布式水文模型。由于它未考虑多场降雨过程中前一场降雨对土壤湿度的影响以及土壤水分蒸发损失,因此该模型主要用于模拟小流域产流和土壤侵蚀过程。Smith^[52]建议流域面积小于1000英亩能获得较好的结果。产流机制采用Smith-Parlange^[53]于1978年提出的基于霍顿改进的下渗理论。KINEROS-2将流域水流划分成均匀的平原坡面流和明渠流单元。1维水流运动方程采用有限差分对圣维南方程进行数值离散。KINEROS-2模型土壤侵蚀率为降雨和河道水流对土壤冲刷率之和,最大侵蚀能力的计算采用Engelund-Hansen^[54]方程。模型在地表流中任何一点严格遵守质量守恒。模型参数包括饱和传导率(K_s),气孔分布系数(λ),气孔压力(ψ_b),静载荷载(G),多孔性(ϕ),土壤初始含水量(S_i),明渠糙率(n_{ch}),滩地糙率(n_p),传输系数(c_g),雨点冲刷系数(c_f)和平均粒径(d_{50})。Kalin and Hantush^[55]将KINEROS-2应用在W-2流域对模型参数进行了敏感性分析发现,土壤初始含水量(S_i)对分析结果有较大的影响,并且在土壤较干燥的条件下,模型对较多的参数敏感,因此率定较为困难。

(6) DWSM(Dynamic Watershed Simulation Model)

伊利诺斯州水文调查局开发的DWSM模型采用基于物理背景的控制方程来模拟地表和地下径流、洪水波的传播、农业非点源污染物在土壤中的迁移与转化。其支持多场降雨过程的模拟。DWSM主要包括以下模块:

- ① DWSM-Hydrology (Hydro): 流域水文模拟模块。产流机制采用Smith-Parlange下渗理论。运用谱方法(shock fitting solution)模拟坡面流。
- ② DWSM-Sediment (Sed): 土壤侵蚀和沉积物迁移模拟模块。土壤侵蚀包括降雨侵蚀和河道侵蚀两方面。沉积物迁移假设沉积物在到达水库后将不再移动。土壤和沉积物根据颗粒大小分为五类: 沙子(sand)、淤泥(silt)、黏土(clay)、细颗粒(small aggregate)和粗颗粒(large aggregate)。在迁移模拟过程中每一种颗粒被分别处理,最后的沉积物浓度和迁移量为五种类别之和。
- ③ DWSM-Agricultural chemical (Agchem): 农业非点源污染物(营养物和杀虫

剂)在土壤中的迁移转化模拟模块。模型假设污染物的吸附和溶解符合线性吸附等温线,运动波模拟时所有的加速度和压力梯度在动量方程中被忽略。土壤被细分为土层,每一层土中的参数被认为是一致的。当降雨产生时,污染物以溶解的形式在土层之间进行交换,残留的污染物以溶解的形式随地表径流和以吸附的形式随沉积物进行迁移。这个过程通过连续方程进行模拟。每个模块都使用基于物理背景的近似方程来模拟流域内水流、沉积物和污染物水力过程。模型主要特点如下:

- ① 流域农业非点源数值模拟。
- ② 分布式、降雨事件触发式模型。
- ③ 对于超渗产流机制中,地表水和地下水相互转化的动态模拟。
- ④ 土壤侵蚀和沉积物迁移模拟。
- ⑤ 污染物迁移和转化模拟。
- ⑥ 河道侵蚀和沉积,河道和水库中水流、沉积物和污染物的流动与迁移模拟。
- ⑦ 滞留池、地被植物、瓦管排水沟的滞水模拟。

模型的缺陷主要为:

- ① 只能进行降雨的单事件模拟。
- ② 只能进行流域农业非点源模拟。
- ③ 河道水流只能进行1维模拟。

(7) HOHY2

由于国外模型大多是对山丘型流域进行模拟,而我国太湖流域为大型平原感潮河网地区,在直接应用国外商业模型软件存在大量的问题和难题需要研究,在国外有关的文献中很难找到解决这些问题的理论和方法。1990年河海大学程文辉老师针对太湖流域研发的HOHY模型对太湖流域洪水模拟取得较好的效果。1994年起与荷兰DELFT水力学所共同承担了太湖流域世行贷款项目——“太湖流域三年水质研究”,其中太湖流域的水量模型是由河海大学负责开发。该研究于1997年底完成。通过三年多研究,太湖流域模型不仅覆盖了全流域,而且完成了大湖泊二维与河网一维计算的有机结合,在计算方法、计算精度及程序通用性方面有了很大改进。为了区别HOHY1,命名为HOHY2模型。与90年代初HOHY1相比,HOHY2主要有以下几方面的改进^[56-60]:

- ① 数值求解方法的改进,方程组中可以包含非线性方程,因此堰流公式不必线性化,减少了堰流公式线性化带来的误差。
- ② 根据瞬时水流条件来判断堰闸、泵站的运行方式,避免了由于根据时段初水流条件来判断堰闸、泵站的运行方式所带来的矛盾。
- ③ 节点可以自由编码,河道、断面和节点的编码可以不连续。因此用户可以方便地增加或删除河道或控制建筑物。
- ④ 控制建筑物的运行方式是用数据文件来控制的,可以考虑各种复杂的运行方式及按某种相关关系来启闭闸门;可以自动改变闸门开度来达到控制某节点的水位或某断面的流量,而不需要修改源程序。
- ⑤ 输出采用子程序模块,用户可以根据需要编写输出子程序。
- ⑥ 主程序比较复杂,但不需要用户了解和修改它。
- ⑦ 提出了河道和节点水量平衡处理的方法,使本模型适用于某些对水量平衡要求非常严格的水质模型。

为了更好地模拟洪水,在原来的 HOHY2 基础上又增加了以下两个功能:

- ① 模拟破圩或半高地淹没。
- ② 模拟外河道水位太高而引起河道两旁陆域面上的雨水不能全部排出,部分或全部滞蓄在面上,形成涝水,待河道水位消退到一定程度后,面上积蓄的涝水才能排出。

HOHY2 模型近二十年来在太湖流域平原水网地区的成功应用,预示着由我国自主开发的大型平原河网水动力学模型已具备国际领先的地位。

1.2.4 基于并行计算的应用简介

对于河道水流和水质预测,为了减小数值计算误差,需要将计算网格划分得很细。同时由于河道流域规模一般都比较大,对于比较大的计算域进行模拟需要布置的网格节点也比较多。如果网格节点过多,计算工作量将成倍甚至成指数增长,对于计算机的计算速度要求比较高。例如当前黄河下游基于GIS的二维水沙数学模型,计算区域从花园口至利津,长约660km。若含滩区及滞洪区,则计算区域面积达4 000km²左右。按主槽、滩地平均单元边长50m计算,网格量达200万个以上,即使采用显格式计算方法,单机计算下游洪水的演进过程,所需时间也远大于天然洪水的实际传播时间。也就是说,针对黄河下游的大区域平面二维计算,从洪水预报

的角度来讲,单机计算是没有意义的^[86]。为了解决流动的精细模拟,计算机并行计算技术得到了越来越广泛的应用。流动的并行计算在国外开展得比较早^[78,82-85],1987年,King R B等^[92,93]研究了基于有限元的并行算法程序。1993年,德国的Guy Lonsdal 和Anton Schüller^[87]用多重网格法对复杂流场模拟的三维Navier-Stokes方程进行并行计算,算法有较优的可扩展性,在32结点的Intel iPSC/ 860上,网格规模为 257×129 时的并行效率达到了74%。1994年,印度Jawahala Nehru先进科学研究中心的Amit J.Basu^[88]在有三个i386 Floslver MK3 上用谱方法对三维Navier-Stokes 方程组织并行计算,在网格规模为323和643 时的并行效率达到了87.2%。1995年,日本的T.Iwamiya等^[89]在分布存储的数值风洞NWT(Numerical Wind Tunnel) 上实现了三维层流Navier-Stokes方程的并行计算,虽有比较多的全局通信,并行效率仍然比较高。同年,Cray 研究中心的A. K. Stagge 等^[90]在nCUBE/2、Intel iS2PC/860、Intel Delta 等计算机上使用多种方法进行了三维Navier-Stokes方程的数值模拟并行计算,表明有较好的并行效率和可扩展性。1996年,法国的S.Lanteri^[91]在Intel Paragon、Cray T3D和IBM SP2 等MPP 机上实现了有限体积法和有限元法混合的四面体非结构网格程序N3S-MUSCL 求解喷气式飞机FALCON全机的并行计算,并行软件编程环境包括PVM、NX 和MPL,且比较重视了重叠网格与非重叠网格划分的并行效率,以及三种MPP 巨型机的综合性能。在国内河流动力学领域文献^[79,80]首次应用并行计算技术模拟河道流动,并对网格区域分解,求解联立代数方程组的并行迭代方法进行了深入的探讨。ZHANG Qinghai ,JIANG Chunbo^[77]在水流并行模拟的基础上,增加了污染物浓度场的并行计算,其采用伽辽金有限元格式对浅水和对流方程进行空间离散,在时间离散上采用显隐混合格式^[79]达到提高计算精度和数值稳定性的目的。王文恰^[81]提出基于并行算法的对流扩散方程修正的交替分组四点方法。余欣^[86]等人于2005年对黄河下游二维水沙数学模型进行了基于MPI的并行计算研究,以数据的分布存储作为区域划分的依据,实现了计算量的负载平衡;在全局网格和局部区域之间建立映射关系,并且在临界单元、进出口单元、共用节点通过规约等进行特殊处理,减少了通讯量并避免了消息的阻塞。2003年刘耀儒^[94]研究了三维有限元并行计算及其在水利工程中的应用。

1.3 本文主要研究内容及技术路线

1.3.1 并行非点源模型当前存在的问题

综上所述,当前主流农业非点源一维、二维商业模型尚未基于并行算法,计算速度取决于研究区域的河道数或网格数大小,且与GIS的结合大都是基于ESRI公司系列开发组件中功能最简单的Arcview,空间分析能力较弱,且基于DEM二次开发的系统不能脱离Arcview环境,给应用推广带来一定的困难。非商业模型对并行算法已有一定的研究,但是不支持进程迁移,计算时当有一个客户端非正常退出(如网络中断),将会导致计算无法继续。

1.3.2 主要研究内容

为实现一、二维环境水动力学数值模型并行化改造,针对以上需要解决的技术问题,本文分别从基于ESRI公司的ArcEngine控件为基础ArcInfo GIS平台搭建;以用户为中心,自行维护的机群调度系统设计,调度系统采用蚂蚁算法对任务进行分配,实现动态负载平衡;对基于FDM和FVM的一维和二维水量水质数值模型进行并行算法改进等四方面展开研究。主要包括:

第一章 绪论

介绍本论文的选题背景和研究意义。在综合分析国内外非点源污染模型的基础上,提出模型与GIS结合和模型并行化的必要性和可行性。同时针对目前研究的不足,提出了本文的研究内容和技术路线。

第二章 ArcGIS 平台的水环境分析系统设计

在分析水量水质模型输入输出需求的基础上,进行水环境信息管理系统的设计。采用目前国内外功能最为强大的ArcEngine COM控件,将水环境领域中的属性数据与空间位置相联系,进而进行空间统计分析,为管理部门规划与决策提供依据。

研究开发以用户为中心,自行维护的机群调度系统;实现对客户端机器的动态管理,负载信息的自动收集,并采用蚂蚁算法对计算任务进行调度,实现机群动态负载平衡。

第三章 感潮河网并行一维水量水质数学模型研制

应用计算数学、流体力学及环境水力学,计算机通信的基本理论与方法,结

合“上海浦东新区调水改善水环境”项目，对平原河网的水力、水质特性进行了一维耦合数值模拟，采用 FDM 算法、主从型编程模型，提取算法中的并行性，研发并行一维水量水质模型。

第四章 二维并行水量水质数学模型研制

应用守恒的二维非恒定流浅水方程组描述水流流动，并用二维对流-扩散方程描述污染物的输运扩散。应用有限体积法及黎曼近似解对耦合方程组进行数值求解，从而模拟出水体的水流过程和相应的污染物输运扩散过程。分析串行算法求解流程提取并行成分，采用任务 SPMD 型并行编程模型，将求解区域网格分成若干部分，对每部分进行单独求解。将型应用于镇江内江水流数值模拟，并加以验证。

第五章 结论与展望

总结论文的主要研究成果及创新点，并指出了存在的问题和进一步研究的课题。

1.3.3 论文技术路线

论文首先从业务需求中分析出水系规划、防洪安全评价、饮水水源地安全评价等需要用到环境水动力数值模型进行数值模拟计算。接着确定了系统的开发架构及开发平台。同时根据业务需求提炼出需要开发的子模块，并定义模块与模块之间交互的接口。最后，对系统模块进行集成和调试。系统技术路线图如图 1.1 所示。

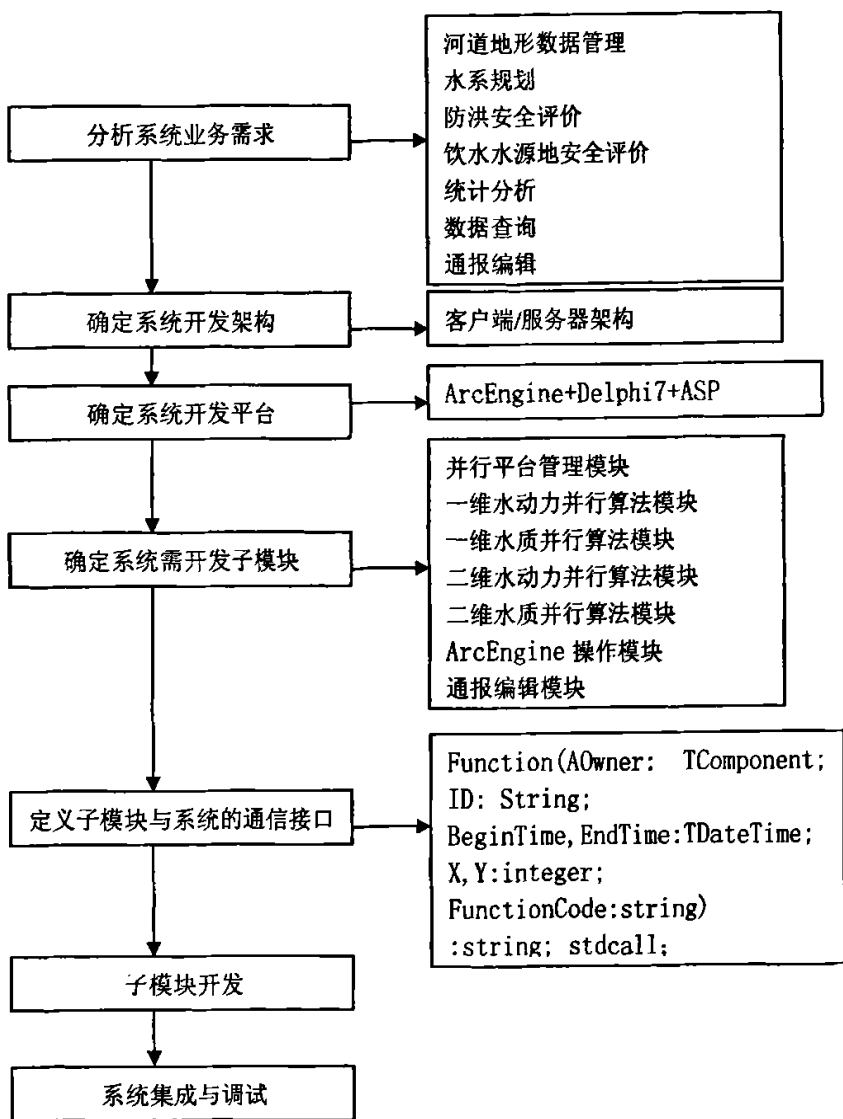


图 1.1 系统技术路线图

第二章 ArcGIS 平台水环境分析系统理论及功能

系统结合水量水质模型与 ArcGIS Engine 技术,从基于蚁群调度策略的并行通讯平台搭建、模型输入、可视化表达及数值模拟模块设计等方面较系统地研究 ArcGIS 平台下并行水环境分析系统的设计与集成。

2.1 系统总体设计

2.1.1 系统设计目标及原则

在系统总体设计时,遵从系统性、实用性、完备性、标准性、可靠性及可扩充性等原则。

系统性原则就是要使本系统的各个功能模块间能有机地结合成为统一的整体,各种数据参数间可以相互方便传输;

实用性原则就是要使本系统的数据组织更为灵活,可以满足本专业各层次应用水平的需要,解决用户切实关心的问题;

完备性原则就是使本系统各项功能尽量齐全,基本功能与专业功能均应完整;

标准性原则就是要使本系统设计符合 GIS 基本要求和标准,数据类型、编码及图式符号符合相应的国家标准及行业规范;

可靠性原则就是要使本系统运行既安全又能使数据精度及符号内容可靠且完整;

可扩充性原则就是要求系统应采用模块化结构设计,便于系统进行修改、扩充,使系统能一直处于一种不断的完善过程当中。

2.1.2 需求分析

(1) 数值模拟需求

河流是城市自然环境的重要构成因素之一,其水量和水质的变化是自然环境和人类活动长期相互作用的结果。一直以来,城市没有停止过对河流的依赖,但由于社会、经济的繁荣,城市对河流的干预和影响越来越严重。这些年来,沿海平原地区,尤其是城市感潮河网地区的水环境保护问题十分突出。

目前，河网水环境的保护方法有三个方面：一是减少污染源，控制污染物的排放，从根本上治理水环境；二是开展河道的综合整治，清除河道淤泥，降低底泥释放污染物的浓度；三是调控水资源，稀释水体，降低污染物的浓度，增加河网自净能力，解决水污染问题。目前许多地区把治污(包括管理)和调水相结合，作为河网水环境标本兼治的重要手段。但水污染严重的地区，要想达到治本的目的，削减污染源，恢复天然的水体，所需的资金投入大，而且时间很长。有资料表明，将严重污染的水体恢复到本底水平，所花的代价是其水资源收效的几倍到十倍，且耗时长达几十年，如投入不足，则需时更长。在长达几十年的治污过程中，在有条件的地方，配以调水工程改善环境，有很好的效果，特别是在开始治理的头几年，调水的作用更好。相比直接治理污染而言，调水具有投入少，收效快优势，并且能很快达到治标的目的。调水改善水环境，主要是激活水流，增加河流自净能力，稀释污染的水体。尽管调水改善水环境是治标的措施，但可为水环境治本增取时间，创造机遇。因此，通过河网调水，保护目前的水环境，具有十分重要的价值。

为了确定调水水量与河网内水质之间的关系，需要根据河网水体特征及其水文、水质同步监测资料，采用数值计算方法，建立河网水力水质数学模型，从而为水管部门利用现有水利工程条件，制定与检验多种调水方案，分析各种方案利弊，提供调水决策的技术支持。

(2) 并行计算需求

根据软件工程的观点：应用软件的开发需要需求定义，因为它是企业过程改进的重要步骤。需求分析的结果需要业务专家的检验，因为这是保证开发工作高效和产品质量的重要手段。

对于河道二维水动力及水质模拟问题，有限体积模型网格经常达到几万甚至几百万。但是采用单个 PC 机需要的时间长，内存容量的限制，一些大的计算模型需要几天甚至几周时间，这样就给模型的率定带来了巨大的困难，从而使得分析人员不得不减小计算规模，将网格划分更粗，但这样导致计算结果可靠性降低。采用并行有限元就可以很好解决这个问题，将在一台计算机上需要计算的工作量分摊到多台计算机上同时并行计算，这样就可以大大提高效率。

值得注意的是，近年来基于计算机集群系统的并行算法发展很快。计算机集

群是采用工作站或微机做计算节点,通过网络连接形成高性能并行计算平台,已成为并行计算机(MPP 工机)一个重要的体系结构,美国 IBM 公司的 SP 系列和我国的曙光 2000 等均采用这种结构。该系统目前主要采用 Ethernet, FDDI 等局域网。不久将来的光纤链路在计算机集群系统中的应用,将产生第一代光互连高性能并行计算机系统。

并行计算机作用的体现最终还是在软件上。从目前的发展来看,相对于并行计算机的硬件,其软件水平则显得落后,已经成为并行计算发展的一个瓶颈问题。并行软件主要是高性能并行算法。导致这种处境的原因是多方面的。首先,与串行应用软件相比,目前的并行软件既不成熟又很少;其次,并行软件的开发难度大,其算法比串型一件复杂得多。

任务调度和负载均衡是平行计算的核心问题。在工作站网络(NOW)环境中,由于任务到达的随机性以及各节点处理能力上的差异,会造成某些节点分配的任务过多(重载),而另外一些节点却是空闲的(轻载或空载)。一方面使重载节点上的任务尽可能快地完成是当务之急;另一方面使某些节点空闲是一种浪费。负载均衡设法对已经分配的任务进行重新调度,并通过任务迁移使各节点负载大致相等,避免这种空闲和忙等待并存的情况,有效提高网络资源的利用率,减少任务的平均响应时间。

(3) 与 GIS 结合的系统软件需求

在一个完备的水动力模型中,必须具备进行水、雨、工、灾情的信息管理、查询和分析,提供可视化的图形查询界面,丰富信息的表述方式。洪水的预测预报,为防洪规划提供依据,可以根据预告设定的前提条件,进行某一区域范围内的静态或者动态的模拟,为有效地设置拦洪设施的点位和选择分洪、泄洪措施提供辅助决策支持。在具体的水动力模型中,GIS 在以下几个方面的应用尤为突出。

① 基本河网编码的问题

河网水流的计算最终归结为节点水位方程的求解。节点水位方程的求解效率决定了河网计算的效率。而概化构建基本河网,对基本河网进行节点编码、河道编码、断面编码,又是节点方程求解所必要的的数据准备。

以往人工概化河网,必须为每一个节点,断面和河道进行手工编码,人工录入。处理的数据量大且繁杂且容易出错。因此,耗时太多且灵活性差。

另外在实际的工程运用中,人们往往希望将更多时间和精力去进行工程方案的设置和比选,而不是为基本河网的搭建花费大量的力气。因此,如何快捷便利的生成河网为GIS 提出了一个新课题。

② 数值模拟时的问题

计算机性能的提高为复杂河网的数值模拟提供了广阔的前景,随之而来的是另一矛盾的尖锐化,即用户如何能够分析、理解和掌握计算过程中产生的大量的数值结果并据此进行科学的决策。

由于河网数值模拟需要设定许多参数,输入大量的原始资料以及生成大量的计算结果,将河网数值模拟的全过程开发为用户界面友好、通用性好的模型软件包,无疑可以大大简化数据录入和结果整理等繁杂的工作。

③ 实时干预运行工况的问题

在水动力模型的验证计算中的参数率定过程中或是在整治方案中添加新的工况设施时,实时干预这个问题就变得非常重要。例如:率定计算往往需要验证计算相当长的时间段的洪水过程,计算量大,所需时间长。一般模型运行是在设定工况的条件下进行,运行过程中基本资料不能修改。在率定计算中,是在计算完成后整合计算结果,通过与实测资料的对比,进行修改参数。参数一旦修改,再进行计算,如此往复,工作效率不高。参数率定往往需要花费很长的时间。这就提出了:如何达到实时干预运行工况的问题。

④ 运行情况的模拟及完全实时的动态查询

对漫滩、溃堤、决口等运行情况进行模拟;在模型运行过程中,可以实时的给出流域内任一点的水位过程,行洪区内的水深、水流流速、淹没范围等流域内的点、线、面上的信息及其统计特征信息等,这些为决策和实时干预提供了良好的一个形象而直观的表达。它不仅需要根据实际运行工况,对运行情况进行模拟;对方案设置中的不确定的情况,也需要由实时修改内存的基本资料来模拟。

2.1.3 经纬结构设计方法

经纬式系统结构^[9]设计的指导思想将系统设计简化为二维几何设计,系统的业务功能与信息技术支持分成两个不同的设计维。纵向为经,横向为纬,纵向为系统的业务功能体系,横向为系统的信息技术支持层次,纵向体系与横向层次得到交叉点则构成了系统的功能模块,或子系统,此称节点模块。模块间的连线是

系统的信息流程线。节点模块是系统的基石与支柱，且与现代水利业务分工关联。整个系统则是一系列节点功能模块、按一定的信息经纬结构组建的复合性数字信息系统。因系统结构由纵横两组线构成的网状结构，纵向功能最终收敛系统决策与管理这个点上，网状结构如同地球的经纬网，故名经纬结构。

采用经纬结构设计方法，避免了相同功能模块的重复设计，使得系统的结构更为合理，且在系统功能需要扩充时，只要将功能模块进行扩充，所有调用此功能模块的系统功能都得到了扩充，采用这种设计方法设计的系统符合软件工程的设计思想。系统中的蚂蚁调动算法、一维及二维水流—水质数值模拟、地形数据管理、通报编辑和并行通信等模块均采用经纬结构的设计方法；

各个节点模块采用动态库开发，动态库放在服务器上，当系统启动时会自动向服务器要求加载动态库，并存入客户端内存中；模块之间通过系统接口来通信。

2.1.4 水环境系统的三层结构

水环境系统是基于三层架构的系统，为保证通信的畅通以及负载的平衡而搭建的平台。其负责底层的通信及调度。该通信平台内包括三层结构，第一层、人机界面层；第二层、通信平台层；第三层、业务服务层。如图 2.1：

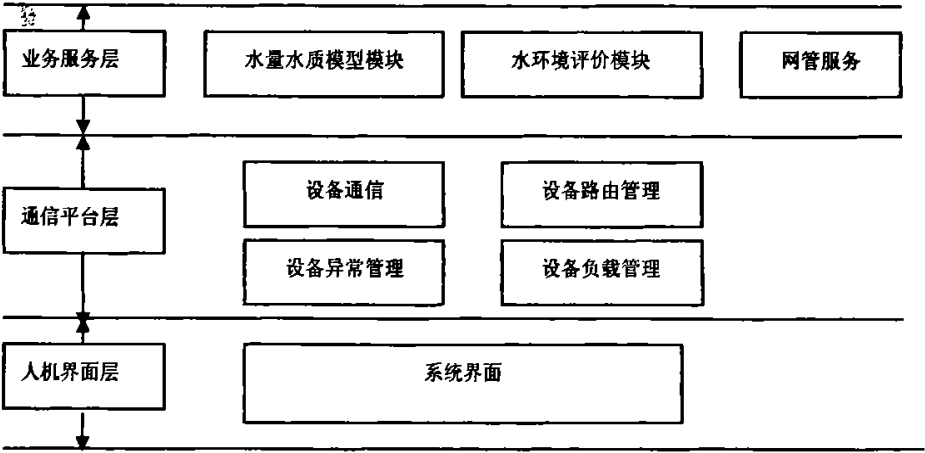


图 2.1 系统结构

系统采用经纬结构设计方法，经纬结构图如图 2.2 所示。横向的水系规划、防洪安全评价及饮水水源地安全评价等是系统的具体应用。纵向的并行通信模块、一二维并行水动力数值模拟模块等是为实现以上应用所需开发的功能。二者的交点即为功能模块。以并行通信模块为例在水系规划、引水冲污等四个应用中

都有用到，因此，只要单独开发一个通信模块保证其通用性使之在四个应用中都能使用，这样可以避免每个应用中单独开发通信模块造成的重复工作。

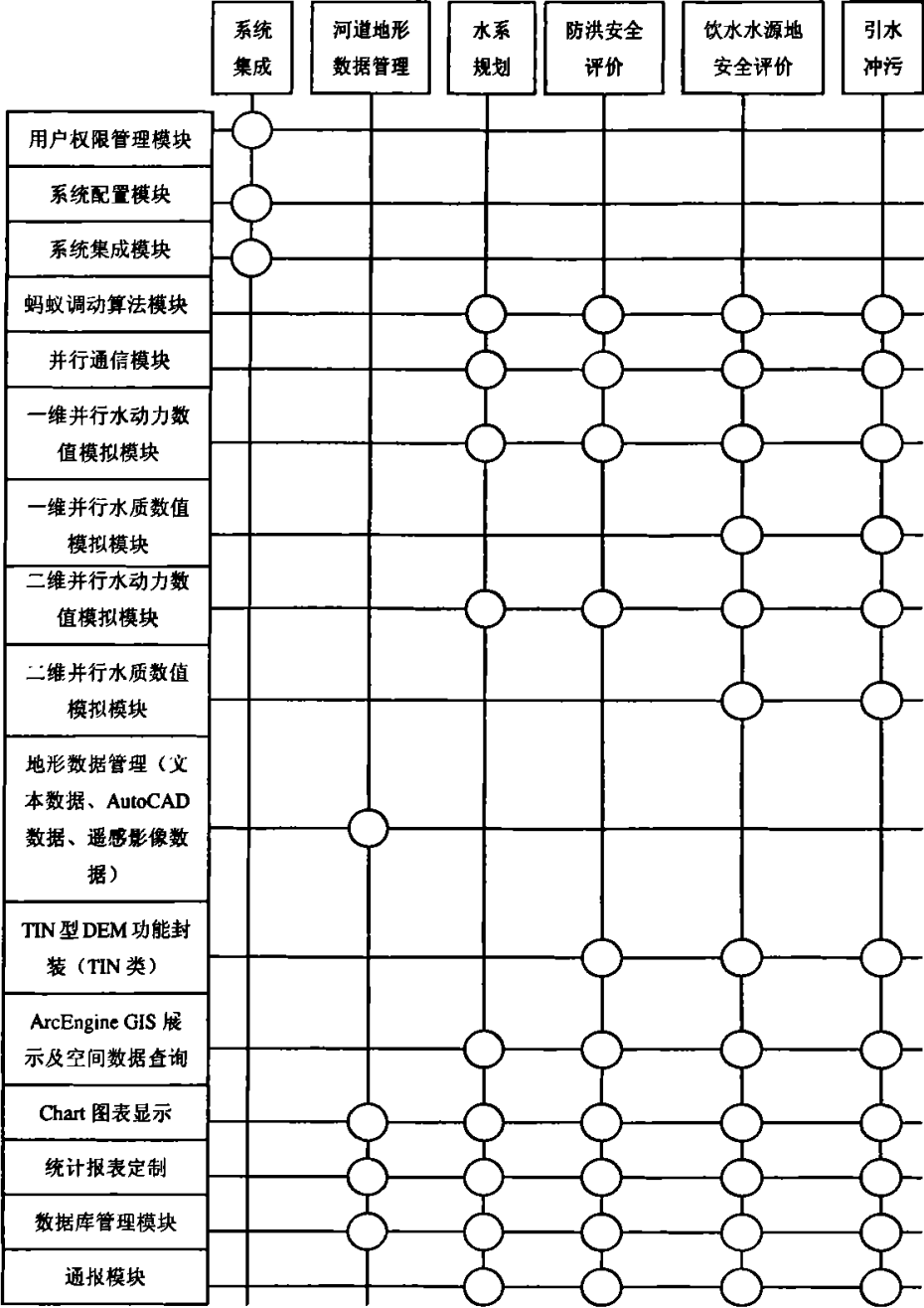


图 2.2 系统经纬结构图

2.1.5 系统流程图

系统流程图如图 2.3 所示：

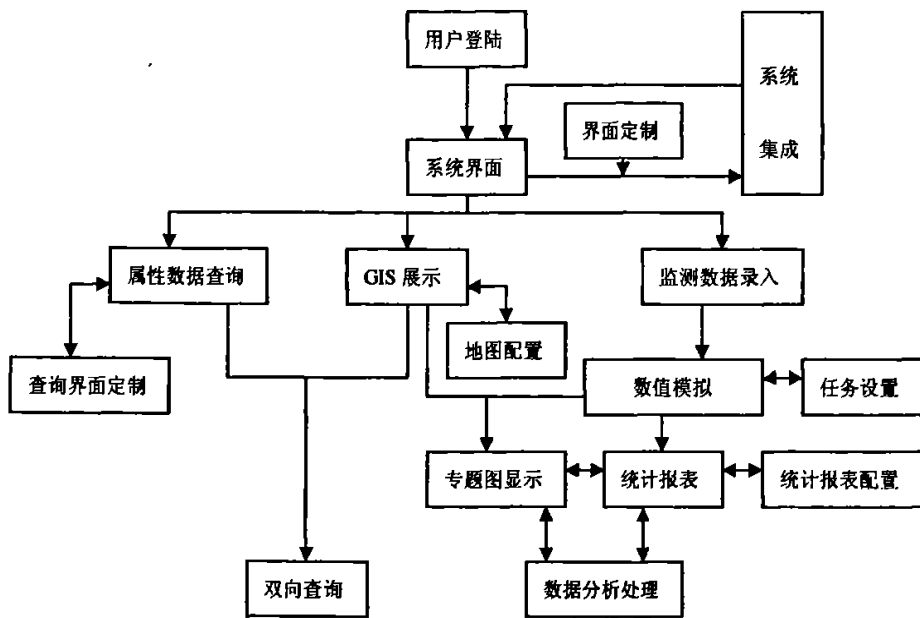


图 2.3 系统流程图

如图 2.3，根据不同的用户权限，每个用户登陆系统的系统菜单是不同的，系统特色在于所有的功能模块均提供了可定制功能，如查询界面、主菜单、GIS 地图、统计报表等等，模型通过 GIS 提供参数，计算完毕后通过专题图、统计报表等直观的表达出来。

2.2 并行平台搭建

2.2.1 并行编程模型分类

并行应用按任务粒度(Granularity)分解到各处理机运行，目的是为了提高处理机的效率。并行应用按粒度分类可分为指令层、数据层、控制层和任务层。前两层通常是由操作系统控制的，程序员负责后两层的并行。

并行程序常见的编程模型有以下几种：

(1) 任务主从型

这类模式中一般有两个实体，主任务和多个从任务，主任务分解出多个任务并负载收集计算结果，从任务分配到一组处理机上并行，处理机间可以进行负载平衡，这种模型可扩展性好，能获得较好的加速比，但主任务可能是瓶颈。如图 2.4 所示。

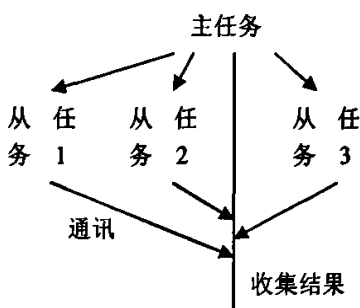


图 2.4 主-从型

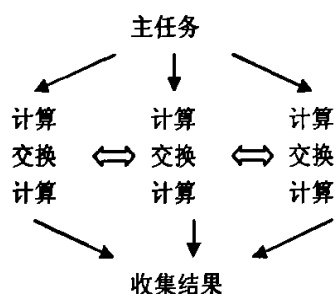


图 2.5 SPMD 型

(2) SPMD (Single Program Multiple Data)型

每个处理机执行相同的程序，但工作在不同的数据流上，一般运行在同构系统上，如果处理机能力不同，需要进行负载平衡工作。如图 2.5 所示。

(3) 数据管道

处理机被组织成管道模型，只和临近的处理机数据交换，任务的可并行部分分配在管道中各处理机上运行，通信是异步的，常用在数据压缩和图像处理。

(4) 分解和递归

一个问题被分解为若干独立的子问题，子问题又可以再分解，处理机之间没有通信，形成递归解决树，任务可以派生子任务又收集计算结果，再派生子任务，子任务还可分解出子任务，各子任务实际被叶节点进程执行，和主从方式不同的是任务的分解和分配都是动态完成的。

2.2.2 机群作业管理系统体系结构设计

系统结构如图 2.6 所示，当用户提交一个任务请求（包含任务的任务量，通信量，任务提交时间，时间限度等参数）时，这个任务就进入任务队列排队。仿真环境中设置了一个计时器，每隔一个信息交换周期，任务发送队列就从任务队列池中提取任务。任务发送队列是按照优先级排序的，可以根据不同用户的不同需求（用户等级，任务紧迫度等）对进入缓冲队列的任务进行排序。

服务器端的任务接收池负责接收系统中所有任务请求并转交给调度算法模型库，调度算法模型库是服务器端的核心部分，通过选择不同的调度算法，对系统实施负载平衡。通过资源发现探测器，可以从资源池中取得资源的各种信息，以及此时的网络通信速度。心跳测试负责实时测试网络联通工况，一旦发现某些资源不能联通，迅速将信息发给调度算法模型库并将该资源上分配的任务转交由

其它资源进行计算。

当任务缓冲队列不能从任务池得到任务时，表明所有任务都已经完成，将根据运行中得到的数据产生需要的统计结果。

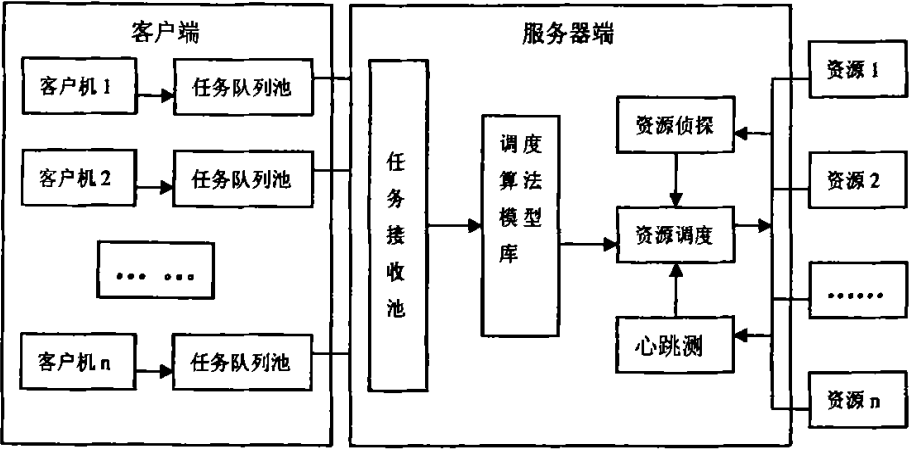


图 2.6 系统结构图

2.2.3 蚂蚁分配调度算法

(1) 蚂蚁算法简介

蚂蚁算法是由 Dorigo^[37]提出的解决组合优化问题的一种多 agent 方法。其模拟自然界中蚂蚁觅食路径的搜索过程。蚂蚁在寻找食物时，能在其走过的路径上释放信息素（pheromone），蚂蚁在觅食过程中能够感知信息素的存在和强度，并倾向于朝信息素强度高的方向移动。当大量蚂蚁不断地从蚁巢通往食物时，相同时间内相对较短路径上通过的蚂蚁较多，该路径上累积的信息素强度也较大，后来蚂蚁选择该路径的概率也相对较大，最终整个蚁群会找到最优路径。

蚂蚁算法能用群集智能来解决来解决组合优化的问题的典型例子。这种启发性智能算法具有以下优点：

- ① 通用性：其最初是用来解决旅行商问题（Traveling Salesman Problem, TSP）^[107]，但现在已扩展到非均匀旅行商问题（Asymmetric Traveling Salesman Problem, ATSP）。
- ② 可扩展性：其只需做较少的改变就能适用于作业安排调度、水库优化调度等 NP 完全问题。
- ③ 并行性：该算法具有较好的并行性。

(2) 基本原理

原理可大致描述如下：蚂蚁属于群居昆虫，个体行为极其简单，而群体行为却相当复杂。相互协作的一群蚂蚁很容易找到从蚁巢到食物源的最短路径，而单个蚂蚁则不能。此外，蚂蚁还能够适应环境的变化，例如在蚁群的运动路线上突然出现障碍物时，它们能够很快地重新找到最优路径。人们通过大量的研究发现，蚂蚁在寻找食物时，能在其走过的路径上释放信息素（pheromone）进行信息传递的。随后的蚂蚁能感知信息素的存在和强度，并倾向于朝信息素强度高的方向移动。信息素随着时间的推移会逐渐挥发掉，于是路径的长短及该路径上通过的蚂蚁的多少就对残余信息素的强度产生影响，反过来信息素的强弱又指导着其它蚂蚁的行动方向。因此，某一路径上走过的蚂蚁越多，则后来者选择该路径的概率就越大。这就构成了蚂蚁群体行为表现出的一种信息正反馈现象。蚂蚁个体之间就是通过这种信息交流达到最快捷搜索到食物源的目的。图1能更具体地说明蚁群系统的原理。

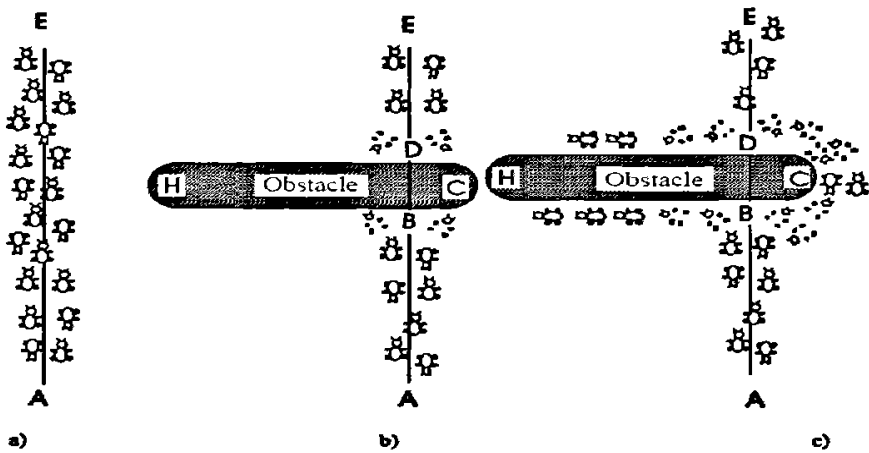


图 2.7 蚁群优化系统示意图

图中设A为蚁源，E为食物所在地，HC为障碍物的两个端点，如图2.7a)所示蚁群正在由蚁源到食物的路径上行走。突然在路径中出现一障碍物时，打断了由A到E的路径，这时蚂蚁需要考虑是从C还是从H到达E，如图2.7b)，当然这种选择是受路径上残留信息素影响的，信息素浓度高的路径对蚂蚁有较强的刺激，因此有较大的概率被选择。假设蚂蚁最初到达B（D）点时选择C和H的概率是相等的，由于BCD比BHD路径长度短，因此选择BCD路径将比选择BHD路径的蚂蚁先到达D点，如图2.7c)。因此，当蚂蚁由E点返回至D点时，BCD路径上的信息

素浓度将比BHD上的高，从而蚁群也将有较大的概率选择BCD路径返回。这样将导致BCD上信息素的浓度进一步提高，随着时间的推移和上述过程的重复，短路径上的信息量便以更快的速度增长，于是会有越来越多的蚂蚁选择这条短路径，以致最终完全选择这条短路径。

由上述可见，蚁群算法的核心有三条。第一，选择机制：信息素越多的路径，被选中的概率越大；第二，信息素更新机制：路径越短，迹增加越快；第三，协作机制：个体之间通过信息素进行交流。

(3) 机群调度问题的蚂蚁算法

蚁群已成功应用于机群调度问题，下面介绍其基本算法：

① 机群调度问题的描述

在分布式并行计算中，分配和调度问题是并程序区别于串程序的一个主要特征，它可研究如何把多个程序或一个程序的可并行部分在依据资源的当时处理能力以及资源的负载变化情况下，随时调整相关数据，使得任务的总体执行时间最小并尽量达到任务负载均衡的分布到各处理机。假定任务由 m 个模块组成，分配在 n 个处理机上执行， $E_{i,k}$ 表示模块 i 在处理机 k 上执行时间， $C_{i,j}$ 表示模块之间的数据通信量单位数， $W_{k,b}$ 表示 k 和 b 之间单位数据传输时间，则任务完成时间 P_t 为各模块执行时间和通信时间之和。

② 蚁群算法的描述

初始时将蚂蚁散布在各资源上，每只蚂蚁独立工作，求得一组任务调度方案。系统初始状态，所有资源需要提供处理机能力和通信能力等参数，可以据此建立资源的初始的信息素。通信能力用传输速度 (C/S_j) 计算，资源 j 的信息素初始化公式如下：

$$\tau_j(0) = W_j + C/S_j \quad t = 0 \quad (2-1)$$

t —调度周期计数器、 C —资源传送相关参数的数据量、 S_j —传输时间；

对每组任务进行调度时，对每种调度任务创建一只新蚂蚁，携带要求的计算和通信量，取总的执行时间最小作为优化目标，每只蚂蚁根据当前各资源的信息素值决定自己解域的下一任务分配给剩余各资源的概率：

$$P_j^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_j(t)]^\alpha * [\eta_j]^\beta}{\sum_{u_k} [\tau_u(t)]^\alpha * [\eta_u]^\beta} & j, u \in allowedresources \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2-2)$$

$\tau_j(t)$ 是时间 t 资源 j 的信息素浓度, η_j 表示资源的固有处理能力, 即 $\tau_j(0)$, α 表示信息素的重要性, β 表示资源固有属性的重要性。

每只蚂蚁将任务分配给某个资源时, 相应资源的信息素都会随之改变(资源选择概率也随之改变), 即

$$\tau_j^{new} = \rho * \tau_j^{old} + \Delta\tau_j \quad (2-3)$$

$$\Delta\tau_j = K * T \quad (2-4)$$

式中: ρ 表示信息素的持久性(取0.8), $1-\rho$ 表示信息素的挥发性。 K 是奖惩因子, 若任务从资源 j 成功返回时, K 取正值, 反之为负; T 是该任务的计算及通信量。

对每只蚂蚁的分配结果计算目标函数, 选当前最佳解。将信息素恢复至本组任务调度前的值, 然后重复以上过程, 到达终止步时, 选得最优解作为本组任务的分配方案。

③ 蚁群算法的流程

1) 初始化:

Set $t=0$; 循环计数器置零

Set $NC=0$; 迭代计算次数置零

系统收集各资源信息, 获取资源的CPU速度及内存容量, 建立每个资源的初始信息素。对新加入的资源设置初始信息素, 对恢复资源(因故障等原因掉线)设置启用标志, 对任务结束资源根据任务完成情况修改信息素(成功奖励, 失败惩罚), 对掉线资源作停用标记。

收集空闲处理机时, 采用绝对负载判别, 收集满足条件:

$$(U_i^{cpu}, L_i^{queue}, M_i') < (U_T^{cpu}, L_T^{queue}, M_T')$$

其中 U_T^{cpu} 、 L_T^{queue} 、 M_T' 分别是收集处理机时 CPU 利用率、运行队列长度和已请求内存的设定限值, 即收集处理机时对要加入机群的处理机是有严格性能

指标要求的。

将M只蚂蚁随机分配到N个资源上。

- 2) $s=1$; s 为资源列表 (tabu) 的索引

For $k=1$ to m do

将第 k 只蚂蚁的第一个任务分配的资源号记录在 $\text{Tabu}_k(s)$ 列表中 (m 为蚂蚁数)。

- 3) 每只蚂蚁重复本步骤直到tabu列表填满当前要调度的任务数项 (循环 $N-1$ 次, N 为任务数)。

Set $s=s+1$;

For $k=1$ to m do

根据信息素计算出的概率寻找下一个任务分配的节点,重复此步直至找够要执行的任务数个节点为止。

将资源调度方案记录于 $\text{Tabu}_k(s)$ 列表中。

- 4) For $k=1$ to m do

根据任务分配的反馈信息, 计算每个资源信息素的改变量 ($\Delta\tau_j$)。

- 5) 更新每个资源的信息素: $\tau_j^{\text{new}} = \rho * \tau_j^{\text{old}} + \Delta\tau_j$

Set $t = t + \Delta t$; Δt —时间步长

Set $NC=NC+1$;

每个资源的信息素改变量置零: $\Delta\tau_j = 0$

- 6) IF ($NC < NC_{\max}$) and (不是所有的蚂蚁选择同一条路径) then

清空tabu列表; 跳转到步骤2; 计算各蚂蚁选定资源组对当前任务组的最长执行时间, 记录当前的最好解;

Else

比较各只蚂蚁选择的一组资源对这组任务的执行时间,选取一组完成任务时间最短的资源组作为最优方案,修改各相关路径上的信息素。获得最小调度时间调度方案;

如果程序终止于 NC 次循环后, 这个算法的复杂度为 $O(NC \times n^2 \times m)$ 。实际上, 第一步的复杂度为 $O(n^2 + m)$, 第二步的复杂度为 $O(m)$, 第三步和第四步的复杂

度为 $O(n^2 \times m)$ ，第五步的复杂度为 $O(n^2)$ ，第六步的复杂度为 $O(n \times m)$ 。实验证明 m 一般取值与 n 为同一数量级。因此整个算法的复杂度为 $O(NC \times n^3)$ 。

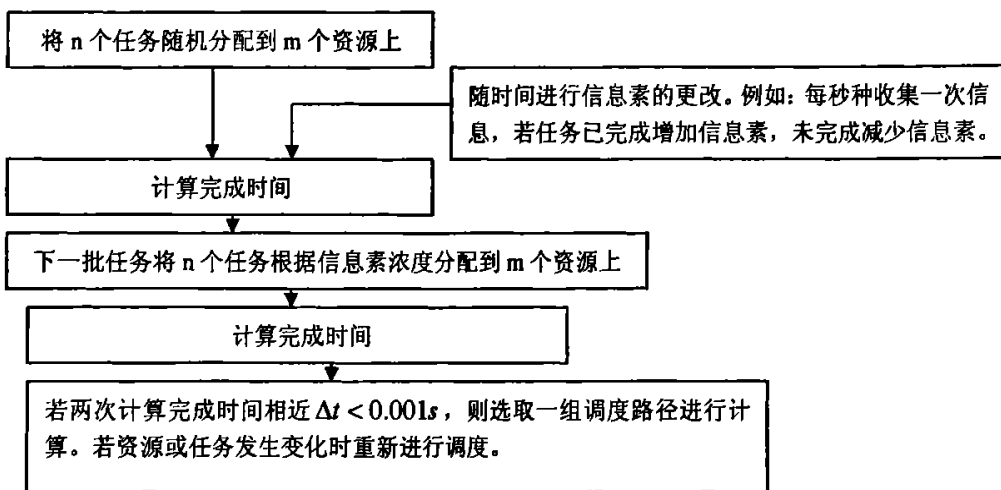


图 2.8 蚁群算法流程图

2.2.4 并行算法性能量度

并行计算的性能评测与并行计算机体系结构、并行算法和并行程序设计一道构成“并行计算”研究的四大分枝。研究并行算法度量的目的是为并行算法的设计和性能分析提供一个统一的衡量标准，指导并行算法达到最佳标准。

(1) 运行时间

所谓并行算法的运行时间，是指算法在具体并行机上求解一个问题所需的时间，即算法从开始执行到算法执行完毕的这段时间。它主要包括算法所需输入输出时间。计算 CPU 时间和并行开销和通信时间。执行时间是问题规模大小、处理器数、任务数以及其它因素的函数：

$$T = f(N, P, U, \dots)$$

同时，它是计算所花时间、通讯时间和闲置时间之和：

$$T = T_{\text{compute}} + T_{\text{communication}} + T_{\text{idle}}$$

从这个公式可以看出，为了减少计算时间，首先要减少通讯时间和闲置时间。具体来说，对于 cow 并行系统，尽量减少处理器之间的通信，同时保证各处理器计算量相同，以免有些处理器计算完成，而有些还有大量的计算，也就是负载均衡。在算法上还可以让计算和通讯同步进行。

(2) 算法的并行度

算法的并行度是指该算法中能用一个计算步完成的运算或操作的个数。它是仅与算法相关的概念，与具体并行机规模无关，是算法内在并行性的固有测量。与并行度有关的概念是粒度，大的粒度意味着能独立并行执行的是大任务，而小的粒度意味着能独立执行的是小任务。

(3) 并行的加速比

加速比是一个评价在并行系统上求解一个问题能获得多大利益的指标。设 T_s 用串行计算机求解某个计算问题所需的时间， T_p 用 P 个处理器求解该问题所需时间。则并行加速比可以简单定义为：

$$S_p = \frac{T_s}{T_p} \quad (2-5)$$

从上式可以看出，加速比是指对一个问题，并行算法的执行速度相对于串行算法的执行速度快了多少倍。对于加速比有 Amdahl 定律。

定义， P 是并行系统中处理器的个数， W 是问题总计算量； W_s 是其中串行部分计算量； W_p 是可并行化部分计算量； W_o 是额外开销； $f = W_s/W$ 是串行分量比例。其中的额外开销包括启动一个进程需要的时间、传递公共数据时间、保证同步所要的时间以及其它一些额外计算等。

Amdahl 定律：

$$S_p = \frac{W_s + W_p}{W_s + \frac{W_p}{P} + W_o} = \frac{W}{fW + \frac{W(1-f)}{P} + W_o} = \frac{P}{1 + f(p-1)W_o/W} \quad (2-6)$$

当 $p \rightarrow \infty$ 时，上式变为：

$$S_p = \frac{1}{f + W_o/W}$$

从这个定律可以知道，随着处理器数目的无限增大，并行系统具有一个加速比上限，同时串行分量和并行额外开销越大，加速比越小。通常 $S_p < p$ 。

(4) 并行效率

并行效率用来度量并行系统中处理器能力发挥程度。并行算法的效率定义为

加速比与处理器个数的比率:

$$E_p = \frac{S_p}{p} \quad (2-7)$$

显然, $0 \leq E_p \leq 1$ 对 P 个处理器来说, 最理想的情况是, 加速比为 P , 并行效率为 100%。

(5) 可扩展性

如果一个算法性能随着问题规模大小和处理器个数增多而按比例线性增加, 这说明这个算法具有很好的可扩展性, 进行可扩展性研究的一个重要目的就是, 对于运行在某种体系结构的并行机上的某个算法, 根据算法在小规模并行机上的运行性能, 预测该模型算法移植到大规模处理器上的性能。。或者当且仅当以下式子成立时, 一个算法才具有可扩展性:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{T_{\infty}(n)}{T_1(n)} = 0 \quad (2-7)$$

其中, T_1 : 串行部分所需时间, n 为处理器台数。

为了得到很好的可扩展性, 首先是尽量减少不同处理器进程之间的通讯, 增加局部通讯; 其次在算法设计上保证最大的并行度, 减少非并行计算量; 最后还要保证进程之间的联系简单而又高效。为了提高程序的扩展性, 需要减少通讯的数据量, 设计高效的数据分布策略, 尽量利用局部数据, 保持负载平衡同时使异步通讯代价最小。

2.3 基于 Delaunay 原理的网格生成系统

在GIS中, 2.5维的分析处理由DTM(数字地形模型)模型进行。DTM主要由栅格与TIN(不规则三角网)两种数据格式来表示, 而以后者更为重要。前者的优点是, 充分表现了高程的细节变化, 拓扑关系简单, 算法实现容易, 某些空间操纵及存储方便; 它的不足之处是, 占用巨大的存储空间, 不规则的地面特征与规则的数据表示之间的不协调。后者的优点是, 高效率的存储, 数据结构简单, 与不规则的地面特征和谐一致, 可以表示线性特征和迭加任意形状的区域边界, 易于更新, 可适应各种分布密度的数据等; 它的局限性是, 算法实现比较复杂和困难。在现今的GIS

系统中,基本上均支持以上两种数据格式,以TIN为主,栅格为辅,并提供相互转换功能。

2.3.1 Delaunay 方法基本原理

Delaunay 三角划分是计算几何(Computer Geometry)中的一个重要课题,在实际问题中有着广泛的应用。Voronoi 图是一个重要的几何结构。设 $\{P_i\}_{i=1}^n$ 为欧几里德平面上的一个点集, P 为该平面中的一点, 则每一个点 P_i 对应一区域:

$$V_i = \{P : PP - P_i \leq PP - P_j, \forall j \neq i\}$$

该区域称为点 P_i 的 Voronoi 区域, 各点的 Voronoi 多边形共同形成了 Voronoi 图。

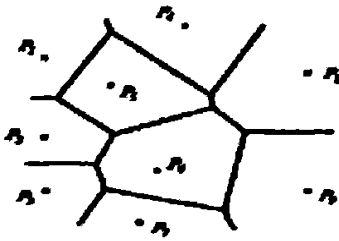


图 2.9 欧氏平面 9 点的 Voronoi 图

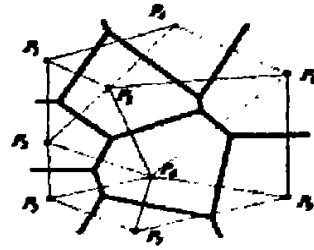


图 2.10 欧氏平面 9 点
Voronoi 图的对偶图

平面上的Delaunay图可以看成是点集 $\{P_i\}_{i=1}^n$ 中的每个点作为生长核, 以相同的速率向外扩张, 直到彼此相遇为止而在平面上形成的图形。除最外层的点形成开放的区域外, 其余每个点都形成一个凸多边形。

当 $\{P_i\}_{i=1}^n$ 为非共线点集时, 在其所形成的Voronoi图中, 若有两个形成点 P_i, P_j 的Voronoi区域有公共边时, 就连接这两个点, 以此类推遍历这 n 个点, 可以得到一个连接点集 $\{P_i\}_{i=1}^n$ 的网格, 称为Voronoi的直线对偶图。如图2.10所示。当点集 $\{P_i\}_{i=1}^n$ 中的点均不共线, 且任意四点不共圆的的情况下, 该网格是由三角形组成的, 而当存在四个或四个以上的Voronoi区域有公共顶点的情况时(该情形往往成为退化情形), 网格中含有多边形, 由于每个多边形可以沿其对角线化成若干个三角形, 因而整个网格最终也是可以化成三角形网格的。特别的, 当不存在退

化情形时，该三角网格还是唯一确定的。

Voronoi图的性质:

性质1: n 个点的点集 P 的Voronoi图至多有 $2n-5$ 个顶点和 $3n-6$ 条边。

性质2: 每个Voronoi点恰好是3条Voronoi边的交点。

性质3: Voronoi图的对偶图实际上是点集的一种三角剖分，该三角剖分就是Delaunay三角剖分。

性质3说明了可以用构造Voronoi图的方法来求平面点集的三角剖分，但实际上由于该方法的算法效率不高，这种方法较少使用。

2.3.2 Delaunay 三角网的定义及其特征

1934年，B.Delaunay由Voronoi图演化出更易于分析应用的Delaunay三角网。有公共边的Voronoi多边形称为相邻的Voronoi多边形。连接所有相邻的Voronoi多边形的生长中心所形成的三角网称为Delaunay三角网，即Voronoi图的对偶图。Delaunay三角网的外边界是一个凸多边形，它由连接Voronoi图中的凸集形成，通常称为凸壳。Delaunay三角网具有两个非常重要的性质。

空外接圆性质: 在由点集 V 所形成的Delaunay三角网中，其每个三角形的外接圆均不包含点集 V 中的其它任意点。如图2.11所示:

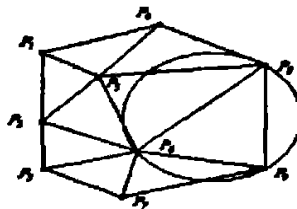


图 2.11 Delaunay 三角剖分的外接圆示意图

最大最小角度性质: 在由点集 V 所形成的Delaunay三角网中，Delaunay三角网中三角形的最小角度是最大的。如图2.12所示:

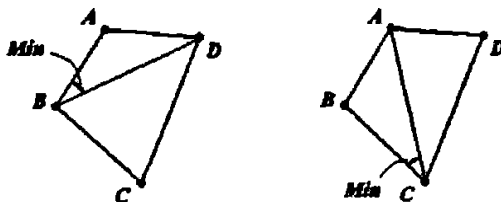


图 2.12 Delaunay 三角剖分的最小角原则

从图 2.12 可以清晰地看出, 左图三角形中的最小角 $ABD <$ 右图中三角形的最小角 ACB , 故在 Delaunay 三角剖分中, 右图为最优选择。

由于这两个特性, 决定了 Delaunay 三角网具有极大的应用价值。Miles 证明了 Delaunay 三角网是“好的”三角网; Lingas 进一步论证了“在一般情况下, Delaunay 三角网是最优的。以上定义及性质是建立 Delaunay 三角网的算法依据。

Tsai 根据实现过程, 把生成 Delaunay 三角网的各种算法分为三类: 分治算法; 逐点插入法; 三角网生长法。

(1) 分治算法

分治算法的基本步骤是:

把点集 V 以横坐标为主, 纵坐标为辅按升序排序, 然后递归地执行以下步骤:

把点集 V 分为近似相等的两个子集 V_L 和 V_R ;

在 V_L 和 V_R 中生成三角网;

用 Lawson 提出的局部优化算法 LOP 优化所生成的三角网, 使之成为 D -三角网;

找出连接 V_L 和 V_R 中两个凸壳的底线和顶线;

由底线至顶线合并 V_L 和 V_R 中两个三角网;

以上步骤显示, 分治算法的基本思路是使问题简化, 把点集划分到足够小, 使其易于生成三角网, 然后把子集中的三角网合并生成最终的三角网, 用 LOP 算法保证其成为 D -三角网。不同的实现方法可有不同的点集划分法、子三角网生成法及合并法。

(2) 逐点插入法

逐点插入算法的基本步骤是:

定义一个包含所有数据点的初始多边形;

在初始多边形中建立初始三角网, 然后迭代以下步骤, 直至所有数据点都被处理;

插入一个数据点 P , 在三角网中找出包含 P 的三角形 t , 把 P 与 t 的三个顶点相连, 生成三个新的三角形;

用 LOP 算法优化三角网。

从上述步骤可以看出, 逐点插入算法的思路非常简单, 先在包含所有数据点的一个多边形中建立初始三角网, 然后将余下的点逐一插入, 用 LOP 算法确保其成

为D-三角网。各种实现方法的差别在于其初始多边形的不同以及建立初始三角网的方法不同。

(3) 三角网生长法

三角网生长算法的基本步骤是：

以任一点为起始点；

找出与起始点最近的数据点相互连接形成D-三角形的一条边作为基线，按D-三角网的判别法则（即它的两个基本性质），找出与基线构成D-三角形的第三点；

基线的两个端点与第三点相连，成为新的基线；

迭代以上两步直至所有基线都被处理。

上述过程表明，三角网生长算法的思路是，先找出点集中相距最短的两点连接成为一条Delaunay边，然后按D-三角网的判别法则找出包含此边的D-三角形的另一端点，依次处理所有新生成的边，直至最终完成。各种不同的实现方法多在搜寻“第三点”上做文章。

综上所述，本文采用逐点插入算法构建三角网。

2.3.3 给定边界及内点集的 Delaunay 三角形剖分

对于给定的有序边界点集，按照逆时针生成NB个有向边界线段，记为 $((IB(I, J), J=1, 2), I=1, NB)$ 。对于内点集记为： $(NA(I), I=1, NO)$ 。为逐步生成三角形网，把计算区域及有向边界段集合看成动态的。任取这些有向边界段集合中一个，按照Delaunay三角形剖分原理由其它有向边界上的点及内点中找到与其相应的点构成一个三角形，计算区域去掉这一三角形构成一新的计算区域及边界，于是形成新的有向边界线段集合。继续下去，直到只有三个边界段形成最后一个三角形。

假定有边界有向线段 $pipj$ ，坐标是 (xi, yi) ， (xj, yj) ，要找点 $pk(xk, yk)$ 与它构成三角形，它应当满足如下三个条件：

pk 在边界有向线段 $pipj$ 的左侧；

pk 与 Pi 、 Pj 构成的三角形外接圆中无其他结点，即其外接圆心到 $pipj$ 有向距离最小；

$pipk, pjpk$ 与边界线段不相交。

为适应复杂区域生成三角形网格,研制的对于给定有向边界线段及内点生成三角形网格子程序。

2.4 一维水力水质数值系统功能

为进一步适应浦东河网地区新一轮开发开放的需要,适应经济快速发展和社会全面进步的需要,加强浦东新区水资源保护和管理,改善新区河道水质,已显得十分必要和紧迫。水环境综合整治的关键在于控制和治理各类污染源,但是在目前各类污染源还没有得到有效控制的情况下,在感潮河网地区,调水是最适用的方法。主要是可以通过调水增加河道内清水量来稀释河道内的污水,同时调水也是确保浦东防洪(潮)、除涝安全的需要,也是改善水环境、促进水体良性循环的需要。水量水质计算模块通过建立河网水量水质模型,对调水方案进行数值模拟。这样可以有效地减少调水的盲目性。

2.4.1 水量水质计算模块开发技术路线

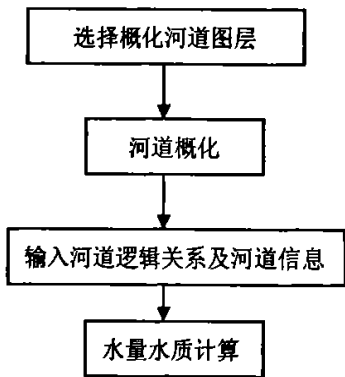


图 2.13 水量水质计算模块开发技术路线

2.4.2 基于 GIS 的河道概化

浦东系统中将河道概化与 GIS 相结合,可直接在地图上进行河道概化。并提供了将河道的逻辑关系和大断面资料数据输入界面,数据输入完毕,点击“送入数据库”按钮,将所有信息写入数据库。通过河道 ID 将地图数据与数据库关联在一起(图 2.15, 2.16),从而将模型与 GIS 紧密结合在一起。河道概化好后,如需增加内河道,只需重复以上步骤。



图 2.14 河道概化

RivID	RivComplex	BeginNode	EndNode	BeginCross	EndCross	Length	B	B+C	Width	Shape	Roughness
江镇河	1	7	55	1	2	4.5	4.5	-0.5	5	2	0.025
三林港塘	3	52	52	5	6	1.28	1.28	0	5	2	0.025
三林港塘	4	52	51	7	8	3.12	3.12	0	5	2	0.025
川杨河	9	42	9	17	18	0.05	0.05	0	5	2	0.025
川杨河	12	41	42	23	24	4.3	4.3	0	5	2	0.025
昌家浜	24	55	56	47	48	4.2	4.2	0	5	1.25	0.025
昌家浜	25	56	57	49	50	4.2	4.2	0	5	1.25	0.025
昌家浜	14	55	53	47	48	2.3	2.3	0	5	1.25	0.025
黄浦江	72	71	72	143	144	1.9	1.9	-14.4	140.9	2	0.025
黄浦江	73	72	69	145	146	3.1	3.1	-14.4	140.9	2	0.025
曹家浜	41	40	41	181	182	2.9	2.9	0	5	1.25	0.025
浦东山河	97	40	55	173	174	1.6	1.6	-0.5	5	2	0.025
小东塘	97	40	51	192	194	2.9	2.9	0.5	5	2	0.025
西彩塘	98	47	52	195	196	2.9	2.9	0	5	2	0.025
中彩塘	100	45	54	199	200	3.04	3.04	0	5	2	0.025
北彩塘塘浜	101	45	45	205	210	5.04	5.04	0.5	5	1.5	0.025
川杨河	13	42	43	25	26	3.3	3.3	0	5	2	0.025
川杨河	14	43	44	27	28	4.5	4.5	0	5	2	0.025

图 2.15 输入河道信息

2.4.3 水量水质计算

河道概化完后，可以通过水量水质计算界面进行率定。如图 2.17、图 2.18 所示，选择率定的起止时间，Chart 图表需显示的率定断面号，率定即可。经测试浦东地区 61 个节点（其中 7 个边界节点）、68 条（段）河道、136 个断面采用矩阵标识法的计算速度大大超过不减少零元素存储的计算速度。有关水量水质计算模型详情见第三章。

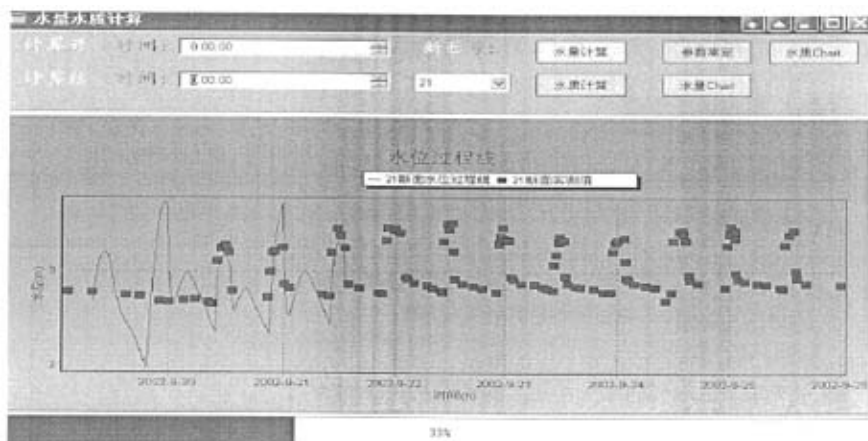


图 2.16 河网水量计算

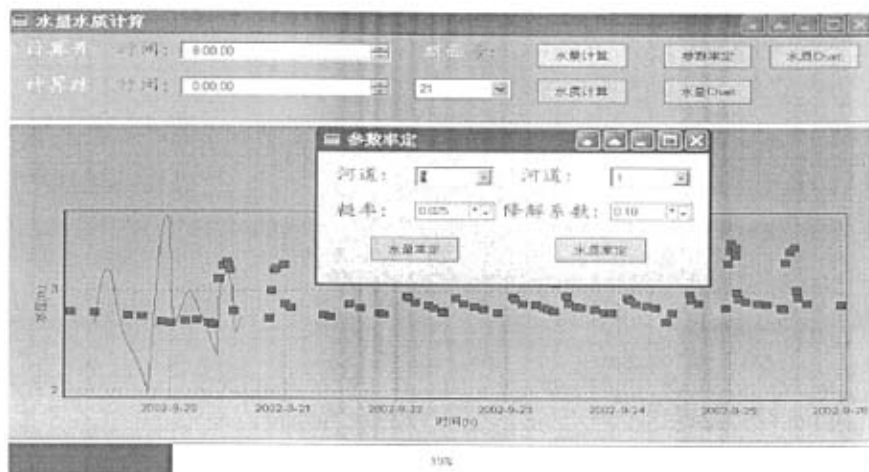


图 2.17 参数率定

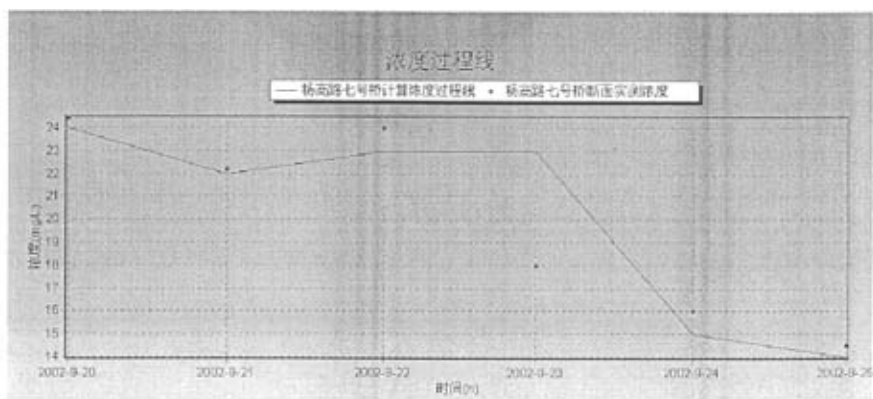


图 2.18 杨高路七号桥 COD 浓度过程线

2.5 二维水力水质数值系统功能

2.5.1 测点图层生成

由测点坐标生成 ArcGIS 图层

(1) 技术路线

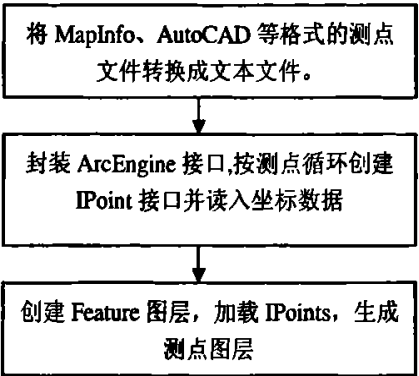


图 2.26 测点图层生成技术路线

(2) 模块界面

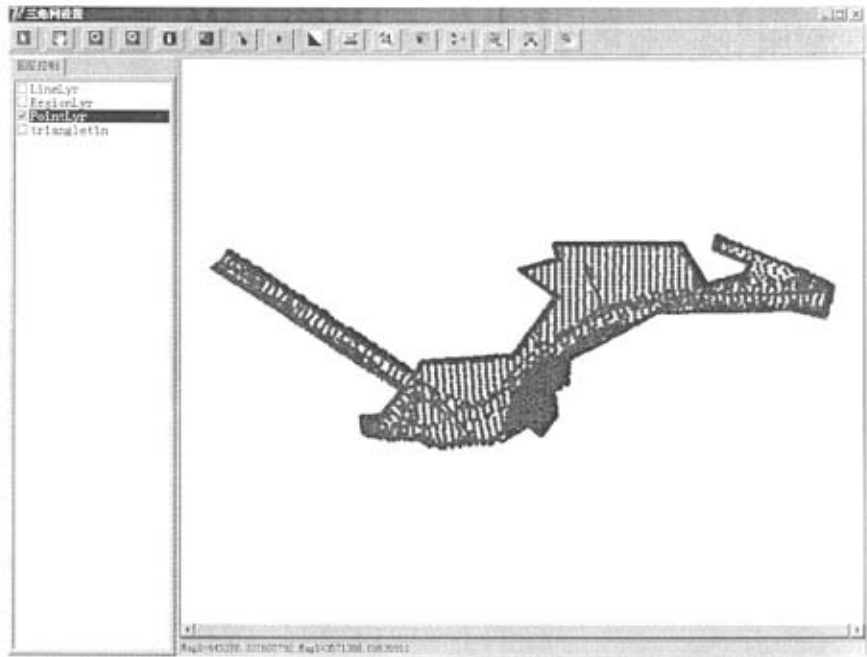


图 2.27 模块界面

2.5.2 Tin 三角网生成模块

由测点坐标生成 ArcGIS 图层

(1) 技术路线

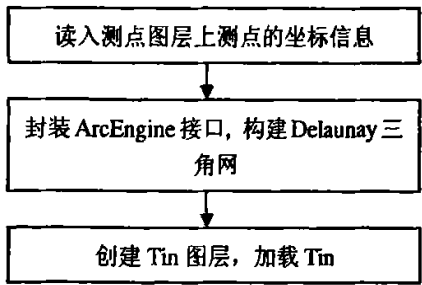


图 2.28 三角网图层生成技术路

(2) 模块界面

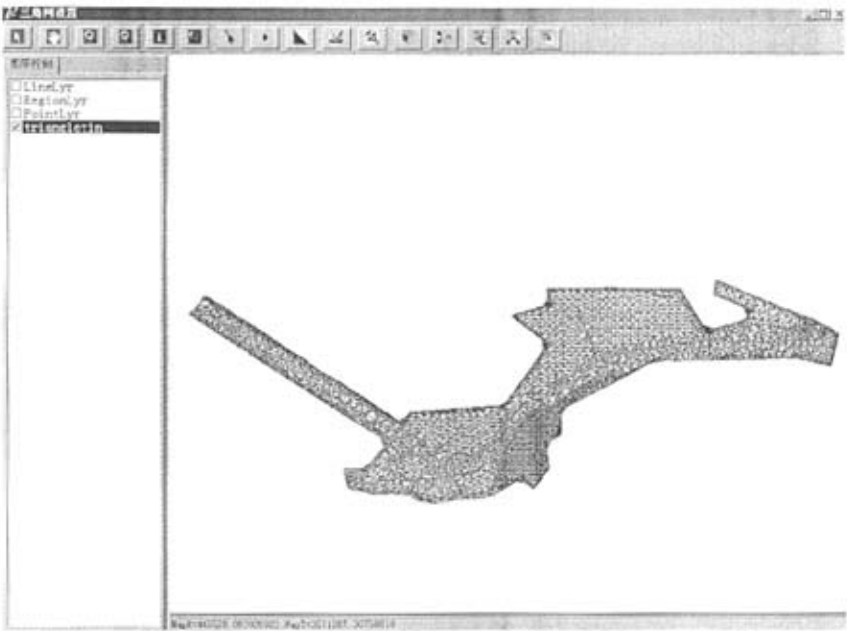


图 2.29 长江镇江段 Tin

2.5.3 Tin 三角网单元处理模块

由于 ArcEngine 生成的 Tin 是一个整体，不能对三角网中某一个或一些三角形单独操作，无法对计算区域进行内边界如堤、堰、闸、排污口等的设置，也无

量、旁侧入流、流速、泵站等属性。

(1) 技术路线

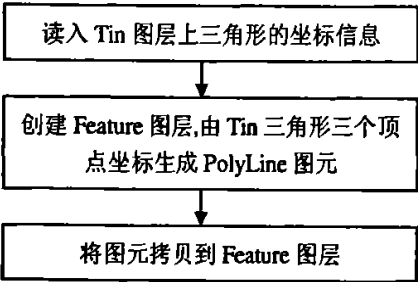


图 2.32 边界处理技术路线

(2) 模块界面

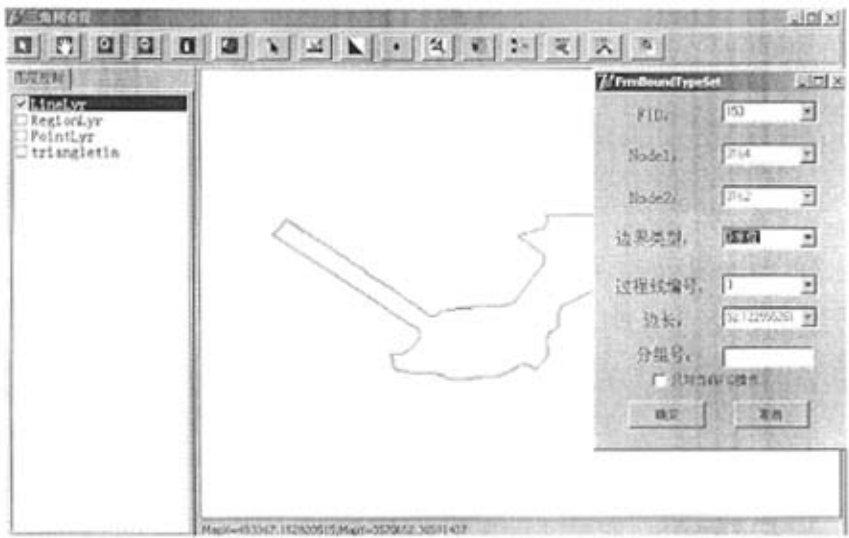


图 2.33 边界处理

2.5.5 并行模拟模块

采用有限体积法的二维水力水质数值模拟模块根据上下游边界条件及剖分好的网格地形资料，对网格进行水力水质数值模拟。

(1) 技术路线

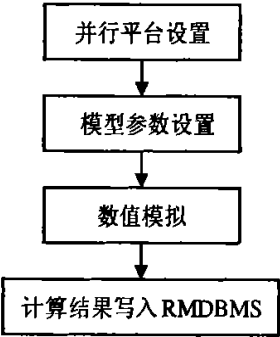


图 2.34 数值模拟技术路线

(2) 模型参数设置界面

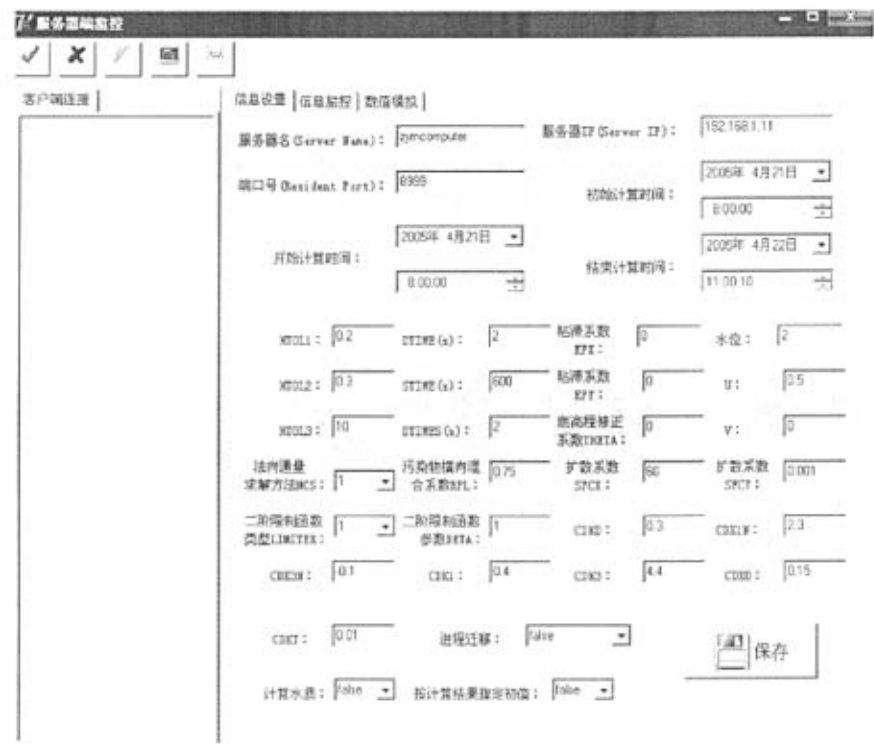


图 2.35 模型参数设置界

2.5.6 流场演示模块

流场演示模块根据模型计算的结果，在三角网上画出流场图。

(1) 技术路线

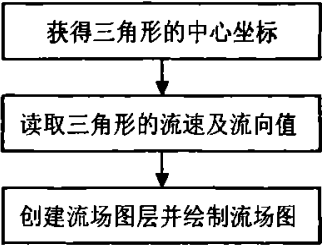


图 2.36 流场演示技术路线

(2) 模块界面

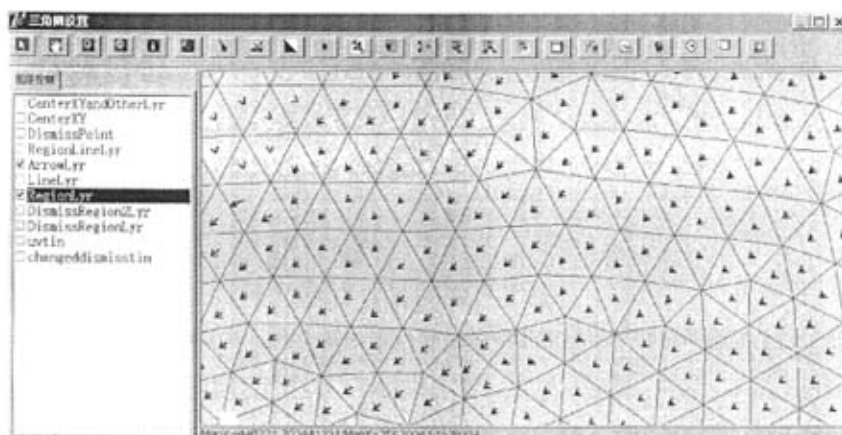


图 2.37 流场模拟设置界面

2.6 小结

对当前水环境信息系统的功能行比较和归纳，对其业务需求进行抽象概括，找出其功能上的共性，采用经纬式系统结构设计方法及COM技术，搭建了基于ArcGIS平台的水环境分析系统。主要工作内容如下：

- (1) 采用经纬结构设计方法对系统进行总体设计。
- (2) 网格环境中的资源情况和任务情况异常复杂，难以用实验测试各种资源管理和任务调度方法的有效性。本章提出了应用蚂蚁算法进行任务调度的新方法，同时通过增加负载均衡因子提高了整个调度器的负载均衡能力。
- (3) 自主开发了并行模型计算平台，采用CS方式，服务器端对网络环境进行监控和控制，为模型计算提供数据交换及进程迁移等功能。
- (4) 提出了符合COM标准的接口模式来建立水量水质模型的思路，并与ComGIS组件——ArcGIS的ArcObjects相结合，共同实现了模型与GIS的相互耦合嵌套，提高了模型的集成性，为模型与系统中的其它部分相互协作提供了必要的技术保障。
- (5) 针对一维水量水质模型输入输出需求，开发了河道概化模块，能动态的对河道进行增减，自动对河道及断面进行编码。模型采用面向对象的设计方法，河道

及水闸等水工建筑物均为一个对象，通过 GIS 对其进行属性设置，保证了模型与 GIS 的无缝结合。

(6) 针对二维水量水质模型输入输出需求，系统开发了 Tin 三角网生成模块，由实测点的地理坐标根据 Delaunay 方法实时生成三角网。通过边界处理模块对边界类型进行设置，模型计算完毕后，通过流场图对计算成果进行可视化表达。

第三章 一维并行水量水质数值模拟模块研制

本章应用计算数学、流体力学及环境水力学,计算机通信的基本理论与方法,结合“上海浦东新区调水改善水环境”项目,对平原河网的水力、水质特性进行了一维耦合数值模拟,为平原地区水体水环境治理提供了理论依据。

3.1 感潮河网水动力模型的建立

河网非稳态水量模型是定量描述河网水域中水流运动的规律的数学方程。应用河网非稳态水量模型,可对河网地区的防洪、排涝、灌溉、航运及水污染防治等项水资源开发利用、水灾害防治和水环境保护工作进行定量的研究。因此进行河网地区水量模型研究具有十分重要的意义。

3.1.1 基本方程组

Saint-Venant方程组中若以水位和流量为研究变量,其表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q_L \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - u^2 B) \frac{\partial Z}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z + gA \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

其中: t 为时间坐标, x 为空间坐标, Q 为流量, Z 为水位, u 为断面平均流速, n 为糙率, A 为过流断面面积, B 为主流断面面积, B_w 为水面宽度, (包括主流宽度 B 及仅起调蓄作用的附加宽度), R 为水力半径, q_L 为旁侧入流流量。

方程组 (3-1) 中 1 式为连续方程, 2 式为动力方程。其中在连续方程中考虑了沿程旁侧入流及主河槽两侧的滩地、水塘等的槽蓄作用。

(1) 河道控制方程的离散

若将 Saint-Venant 方程组中的偏导项系数中的未知量用时段初值表示。并将方程组 (3-1) 中动力方程的阻力项线性化, 则得到相应的线性偏微分方程组。采用四点线性隐式差分格式离散方程组。

离散格式(如图 3.1):

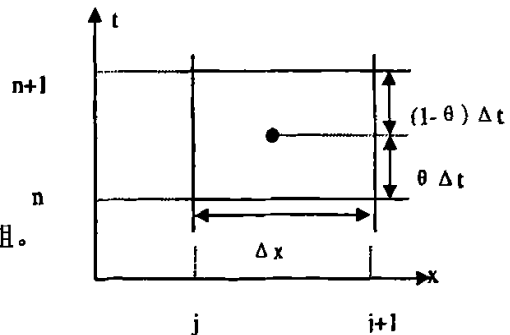


图 3.1 差分格式示意图

对任一变量 ξ :

$$\begin{aligned}\xi &= (\xi_i^j + \xi_{i+1}^j) / 2 \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} &= \frac{\theta(\xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^{j+1}) + (1-\theta)(\xi_{i+1}^j - \xi_i^j)}{\Delta x_i} \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} &= \frac{\xi_i^{j+1} + \xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^j - \xi_{i+1}^j}{2\Delta t}\end{aligned}\quad (3-2)$$

式中: 上标表示时间坐标, 下标表示空间坐标,

Δx_i - 第 i 单元河段长; Δt - 时段长; j - 时段序号;

θ - 权重系数 ($0 \leq \theta \leq 1.0$), 为了差分方程保持无条件稳定, 必须 $\theta \geq 0.5$

将 (3-2) 式代入方程组 (3-1) 中得连续方程的差分方程:

$$-Q_{i-1}^{j+1} + Q_i^{j+1} + C_i Z_{i-1}^{j+1} + C_i Z_i^{j+1} = D_i \quad (3-3)$$

式中:

$$C_i = \frac{\Delta x_i}{2\theta\Delta t} B_{w_{i+1/2}}^j \quad (3-4)$$

$$D_i = \frac{\Delta x_i}{\theta} q_i + \frac{1-\theta}{\theta} (Q_i^j - Q_{i+1}^j) + C_i (Z_i^j + Z_{i+1}^j) \quad (3-5)$$

同样将 (3-2) 式代入方程组 (3-1) 中得动量方程的差分方程:

$$E_i Q_{i-1}^{j+1} + G_i Q_i^{j+1} - F_i Z_{i-1}^{j+1} + F_i Z_i^{j+1} = \varphi_i \quad (3-6)$$

式中:

$$E_i = \frac{\Delta x_i}{2\theta\Delta t} - 2u_{i+1/2}^j + \frac{g}{2\theta} \left(\frac{n^2 |u|}{R^{4/3}} \right)_i^j \Delta x_i \quad (3-7)$$

$$F_i = (gA - Bu^2)_{i+1/2}^j \quad (3-8)$$

$$G_i = \frac{\Delta x_i}{2\theta\Delta t} + 2u_{i+1/2}^j + \frac{g}{2\theta} \left(\frac{n^2 |u|}{R^{4/3}} \right)_{i+1}^j \Delta x_i \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned}\varphi_i &= \frac{\Delta x_i}{2\theta\Delta t} (Q_{i-1}^j + Q_i^j) + \frac{2(1-\theta)}{\theta} u_{i-1/2}^j (Q_{i-1}^j - Q_i^j) + \\ &\quad \frac{1-\theta}{\theta} (gA - Bu^2)_{i-1/2}^j (Z_{i-1}^j - Z_i^j) + \frac{\Delta x_i}{\theta} \left(u^2 \frac{\partial A}{\partial Z} \right)_i^j\end{aligned}\quad (3-10)$$

对一条具有 $L_2 - L_1$ 各河道 (如图 3.2), 有 $2(L_2 - L_1)$ 个未知变量, 可以列

出 $2(L_2 - L_1)$ 个方程, 加上河道两端的边界条件, 形成封闭的代数方程组。由

此可唯一求解未知量 Q_j, Z_j ($j=L_1, L_1+1, \dots, L_2$)。

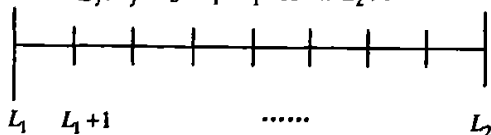


图 3.2 计算断面示意图

(2) 节点连接方程

水流运动在河段各节点上应满足质量守恒和能量守恒，即满足以下两个连接条件：

① 质量守恒条件：

质量守恒条件也称流量连接条件，根据质量守恒原理，进出某一节点的流量与该节点内水量蓄量的增减相平衡。

节点可分为调节节点和无调节节点。若节点汇合区容积与子河段容积相比可忽略不计，称无调节节点，否则为调节节点。

对调节节点，定量表示为：

$$\sum Q_i = A(Z_i^{n+1} - Z_i^n) / \Delta t \quad (3-11)$$

式中 i 表示汇集于同一节点的各河道的编号， w 为节点蓄量， Q_i 为第 i 条河道流入节点的流量（流入为正，流出为负）

对无调节节点，方程(3-12)可简化为：

$$\sum Q_i = 0 \quad (3-12)$$

② 能量守恒条件：

也称为动力连接条件，不计节点汇合处的能量损失，节点水位与汇集于节点的各河道相邻断面的水位之间满足能量守恒定律——Bernoulli 方程。由于与节点相邻的各断面水位变化不大，不存在水位突变，因而可近似表示为：

$$Z_i = Z_j = \bar{Z} \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3-13)$$

显然，对于一个有 m 个相邻河道的节点而言，方程(3-12)隐含了 $(m-1)$ 个独立的方程，再加一个质量守恒条件，得到 m 个相互独立的节点连接方程。

(3) 定解条件

非恒定问题的求解必须给出初始条件和边界条件。

① 初始条件：

$$Z(x,0) = Z_0 \quad (3-14)$$

$$Q(x,0) = Q_0 \quad (3-15)$$

② 边界条件:

对于河道的边界条件,有三种类型:

i. 水位边界条件:

即在边界河道上给定水位随时间的变化过程线:

$$Z = Z(t) \quad (3-16)$$

ii. 流量边界条件

即在边界河道上给定流量随时间的变化过程线:

$$Q = Q(t) \quad (3-17)$$

iii. 水位流量边界条件

即在边界河道上有水工构筑物(闸门、堰、堤坝等)时,通常给定水位流量关系过程线:

$$Q = Q(Z) \quad (3-18)$$

(4) 方程的求解

利用消元法将方程(3-3)和(3-7)消元,将其表示为以下的形式:

$$Q_i = \alpha_i + \beta_i Z_i + \gamma_i Z_{i+1} \quad (3-19)$$

$$Q_{i+1} = \xi_{i+1} + \zeta_{i+1} Z_{i+1} + \eta_{i+1} Z_i \quad (3-20)$$

在(3-19)式中:

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{Y_1(\varphi_i - G_i \alpha_{i+1}) - Y_2(D_i - \alpha_{i+1})}{Y_1 E_i + Y_2} \\ \beta_i = \frac{Y_2 C_i + Y_1 F_i}{Y_1 E_i + Y_2} \\ \gamma_i = \frac{\gamma_{i+1}(Y_2 - Y_1 G_i)}{Y_1 E_i + Y_2} \\ Y_1 = C_i + \beta_{i+1} \\ Y_2 = G_i \beta_{i+1} + F_i \end{cases} \quad i = n-1, n-2, \dots, 1 \quad (3-21)$$

对于 $i = n$ 有:

$$\begin{cases} \alpha_n = \frac{\varphi_n - G_n D_n}{E_n + G_n} \\ \beta_n = \frac{C_n G_n + F_n}{E_n + G_n} \\ \gamma_n = \frac{C_n G_n - F_n}{E_n + G_n} \end{cases} \quad (3-22)$$

在 (3-20) 式中:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{E_1 D_1 + \varphi_1}{E_1 + G_1} \\ \varsigma_1 = -\frac{C_1 E_1 + F_1}{E_1 + G_1} \\ \eta_1 = -\frac{C_1 E_1 - F_1}{E_1 + G_1} \\ Y_1 = \varsigma_1 - C \\ Y_2 = E_1 \varsigma_{1-1} - F \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3-23)$$

对于 $i = 1$ 有:

$$\begin{cases} \xi_{i+1} = \frac{Y_2(D_i + \xi_i) + Y_1(\varphi_i - E_i \xi_i)}{Y_2 + G_i Y_1} \\ \varsigma_{i+1} = \frac{-Y_2 C_i - Y_1 F_i}{Y_2 + G_i Y_1} \\ \eta_{i+1} = \frac{\eta_i(Y_2 - Y_1 E_i)}{Y_2 + G_i Y_1} \end{cases} \quad (3-24)$$

其中 (3-19) 式将各断面流量表示为该断面水位及末断面水位的函数, (3-20) 式将各断面流量表示为该断面水位及首断面水位的函数。

将上式代入节点连接方程 (3-11) 可整理得一个关于节点水位方程组:

$$f_i(Z_i, Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{ij}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3-25)$$

式中: m 为节点总数; n 为与第 i 个节点相连的河道数。

无论对何种类型的边界条件, 经适当变换后可增加一个水位方程, 封闭节点水位方程组 (3-25), 可解得各节点水位, 再返回单一河道方程, 利用追赶法可推

求出任一断面的水位和流量。

3.1.2 矩阵标识法

矩阵标识法^[110]求解的基本思想是:根据节点水位方程系数矩阵的高稀疏性,对矩阵非零元素进行代码标识。按照代码指示,把非零元素用一维数组存储,排除零元素,节约内存。求解时,由代码指示,只对非零元素进行计算,从而大大提高方程组求解计算的效率。

根据研究发现:矩阵 A 具有大型、高稀疏性和主对角占优等特点^[108]。根据矩阵 A 所具有的特性,可采用迭代法求解——超松弛迭代法 (SOR)^[109]。

把矩阵 A 分解为:

$$A = -C_v + D - C_L \quad (3-26)$$

式中:

$$C_v = \begin{bmatrix} 0 & -a_{12} & \dots & -a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & -a_{n-1n} \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & a_{n-1n-1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$C_L = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ -a_{21} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{n1} & \dots & -a_{nn-1} & 0 \end{bmatrix}$$

则 $AZ=R$ 的 SOR 法可写为:

$$\begin{aligned} Z^{(k+1)} &= L_w Z^{(k)} + Q_w^{-1} \bullet R \\ L_w &= (I - \omega D^{-1} C_L)^{-1} [\omega D^{-1} C_v + (1 - \omega)I] \\ Q_w &= \omega D^{-1} - C_L \end{aligned} \quad (3-27)$$

式中: ω 为实数,称为松弛因子。

若记 $L = D^{-1} C_L$, $U = D^{-1} C_v$, 则有:

$$L_w = (I - \omega L)^{-1} [\omega U + (1 - \omega)I] \quad (3-28)$$

其迭代计算公式为:

$$Z_i^{(k+1)} = Z_i^{(k)} - \frac{\omega}{a_{ii}} \left(\sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} Z_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n a_{ij} Z_j^{(k)} - r_i \right) \quad (3-29)$$

从式 (3-29) 可见, 如果能避免所有零元素参与运算, 则可提高求解运算的效率。对非零元素随机分布的稀疏矩阵 A , 按行将 A 的非零元素依次排列成一个元素序列 $\{b\} = \{b_1, b_2, \dots, b_t\}$, 并将其存放于一维系数数组 $B[1:t]$ 中; 对应的非零元素列标排成序列 $\{Dr\} = \{Dr_1, Dr_2, \dots, Dr_t\}$, 存放于标识代码数组 $Dr[1:t]$; 同时把每一行的第一个非零元素在 B 中的序号排成系列 $\{Ri\} = \{Ri_1, Ri_2, \dots, Ri_n\}$, 存放于行代码指示数组 $Ri = [1:n]$ 中, 其中 t 为矩阵 A 的非零元素的总个数, n 为矩阵 A 的阶。

利用矩阵标识代码数组 Dr , 行代码指示数组 Ri 和系数数组 B , 可将式 (3-29) 写成:

$$\begin{aligned} Z_e &= r_i - \sum_{j=Ri(i), Dr(j) \neq i}^{Ri(i+1)-1} b_j \tilde{Z}_{Dr(j)} \\ Z_i^{(k+1)} &= \omega Z_e + (1 - \omega) Z_i^{(k)} \\ \tilde{Z}_{Dr(j)} &= \begin{cases} Z_{Dr(j)}^{(k)} & Dr(j) > i \\ Z_{Dr(j)}^{(k+1)} & Dr(j) < i \end{cases} \end{aligned} \quad (3-30)$$

采用超松弛迭代法时, 通过对非零元素进行了标识, 因此在迭代计算中完全可以避免零元素参与计算, 从而大大提高了求解节点水位方程组的效率和减少了计算的工作量。求解过程与河网节点的编码无关, 只取决于河网的结构。因此, 采用这种方法求解河网时, 河道、节点的编码可以任意, 大大减少了工作量。

采用矩阵标识法的水量计算模块具有如下的特点:

- (1) 由于只存储非零元素, 节约计算机的内存资源。
- (2) 求解只对非零元素进行运算, 提高了计算效率。
- (3) 求解的工作量只取决于河网的结构, 与河网节点的编码无关。

以下程序是获得节点与河道的逻辑关系:

```
SetLength ( mnorid , knor + 1 );
```

```

L := 1 ;
For i := 1 To knor Do
Begin
    mm := Nodnor [ i ] ;
    mnorid [ i ] := L ;
    For j := 1 To KReach Do
    Begin
        If node_beg_reach [ j ] = mm Then L := L + 1 ;
        If node_end_reach [ j ] = mm Then L := L + 1 ;
    End ;                                //for reach
    For j := 1 To KGate Do
    Begin
        If node_beg_gate [ j ] = mm Then L := L + 1 ;
        If node_end_gate [ j ] = mm Then L := L + 1 ;
    End ;                                //for gate
    For j := 1 To Kbdq Do
        If Node_bdq [ j ] = mm Then L := L + 1 ;
    End ;                                //i
    SetLength ( mnorid , L + 1 ) ;
    SetLength ( mnorbr , L ) ;
    SetLength ( cbrty , L ) ;
    L := 1 ;
    For i := 1 To knor Do
    Begin
        mm := Nodnor [ i ] ;
        mnorid [ i ] := L ;
        For j := 1 To KReach Do
        Begin
            If node_beg_reach [ j ] = mm Then

```

```

Begin
    mnorbr [ L ] := j ;
    cbrty [ L ] := '1' ;
    L := L + 1 ;
End ;
If node_end_reach [ j ] = mm Then
Begin
    mnorbr [ L ] := j ;
    cbrty [ L ] := '2' ;
    L := L + 1 ;
End ;
End ;                                     //for reach
For j := 1 To KGate Do
Begin
    If node_beg_gate [ j ] = mm Then
    Begin
        mnorbr [ L ] := BrakeComputeID [ j ] ;
        cbrty [ L ] := '3' ;
        L := L + 1 ;
    End ;
    If node_end_gate [ j ] = mm Then
    Begin
        mnorbr [ L ] := BrakeComputeID [ j ] ;
        cbrty [ L ] := '4' ;
        L := L + 1 ;
    End ;
End ;                                     //for gate
For j := 1 To Kbdq Do
    If Node_bdq [ j ] = mm Then

```

```

Begin
    mnorbr [ L ] := j ;
    cbrty [ L ] := '0' ;
    L := L + 1 ;
End ;

End ;                                     //i

mnorid [ knor + 1 ] := L ;

```

3.1.3 内边界处理

(1) 闸门

流域洪水运动模拟由零维、一维模拟所组成，各部分模拟必须耦合联立才能求解，各部分模拟的耦合是通过“联系”来实现的。“联系”就是各种模拟区域的联接关系，主要是指流域中控制水流运动的堰、闸及行洪区口门等，联系的过流流量可以用水力学的方法来模拟。现以宽顶堰为例说明如下。

宽顶堰上的水流可分为关闸、自由出流、淹没出流两种流态，不同流态采用不同的计算公式：

对于关闸情况（ $Q_{\pm} = Q_{\mp} = 0$ ），可将闸上、闸下均作为单一河道处理。

$$\text{当出流为自由出流时： } Q = mbh\sqrt{2gh_0} \quad (3-31)$$

其中 $h_0 = Z_i - Z_d$ ，为上游水深， b 是闸孔净宽， h 为计算过流水深，孔流 $h = a$ ，堰流 $h = h_0$ ， m 为综合流量系数，一般取 0.325~0.385 之间。可见，闸（堰）上游流量 $Q_{\pm} = f(Z_{\pm})$ ， $Q_{\pm} = Q_{\mp}$ ，可类同关闸情况计算。所不同的是，关闸以 $Q_{\mp} = 0$ 作为上游河道的下边界，而自由出流以 $Q_{\mp} = f(z_{\pm})$ 作为下边界条件。

$$\text{当出流为淹没出流时： } Q = \phi b h \sqrt{2g(Z_i - Z_{i+1})} \quad (3-32)$$

其中： ϕ 为淹没出流系数，一般取 1.0~1.18 之间； Z_d 为闸（堰）下游水位；可见， $Q_{\pm} = f(Z_{\pm}, Z_{\mp})$ ， $Q_{\pm} = Q_{\mp}$ ，与上游流量或水位边界条件可联解。

(2) 集中旁侧入流

对于集中旁侧入流，可设一虚拟河段 $\Delta x_j = 0$ ，列如下方程：

$$Z_i = Z_{i+1} \quad (3-33)$$

$$Q_i + Q_f = Q_{i+1} \quad (3-34)$$

由式(3-33)，(3-34)替代式(3-3)，(3-6)，当上边界为水位边界条件时：

$$Z_i = P_i - V_i Q_i$$

$$Z_{i+1} = P_i + V_i Q_f - V_i Q_{i+1}$$

$$\text{故 } Q_i = Q_{i+1} - Q_f$$

$$\begin{cases} S_{i+1} = -Q_f \\ T_{i+1} = -1 \\ P_{i+1} = P_i + V_i Q_f \\ V_{i+1} = V_i \end{cases} \quad (3-35)$$

当上边界为流量时：

$$Q_i = P_i - V_i Z_i$$

$$Q_{i+1} = Q_i + Q_f = P_i - V_i Z_i + Q_f = P_i - V_i Z_{i+1} + Q_f$$

$$\begin{cases} S_{i+1} = 0 \\ T_{i+1} = -1 \\ P_{i+1} = P_i + Q_f \\ V_{i+1} = V_i \end{cases} \quad (3-36)$$

(3) 河道弯曲（断面突变）

当河道弯曲或过水断面突然放大的情况下，其相容条件是：

$$\begin{cases} Q_i = Q_{i+1} \\ Z_i + u_i^2 / 2g = Z_{i+1} + u_{i+1}^2 / 2g + \xi(u_i - u_{i+1})^2 / 2g \end{cases} \quad (3-37)$$

式中 ξ 是局部阻力系数，令：

$$\Delta h = u_{i+1}^2 / 2g - u_i^2 / 2g + \xi(u_i - u_{i+1})^2 / 2g$$

则：

$$\begin{cases} Q_i = Q_{i+1} \\ Z_{i+1} = Z_i - \Delta h \end{cases}$$

当上边界为水位边界时：

$$Z_i = P_i - V_i Q_i$$

$$Z_{i+1} = P_i - V_i Q_{i+1} - \Delta h$$

$$\begin{cases} S_{i+1} = 0 \\ T_{i+1} = -1 \\ P_{i+1} = P_i - \Delta h \\ V_{i+1} = V_i \end{cases} \quad (3-38)$$

当上边界为流量边界时:

$$Q_i = P_i - V_i Z_i$$

$$Q_{i+1} = Q_i + Q_f = P_i - V_i Z_i = P_i - V_i (Z_{i+1} + \Delta h)$$

$$Z_i = Z_{i+1} + \Delta h$$

$$\begin{cases} S_{i+1} = \Delta h \\ T_{i+1} = -1 \\ P_{i+1} = P_i - V_i \Delta h \\ V_{i+1} = V_i \end{cases} \quad (3-39)$$

(4) 湖泊

对于湖泊, 可设一虚拟河段 $\Delta x_j = 0$, 列如下方程:

$$Z_i = Z_{i+1} = Z_s$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_s$$

其中 Q_s 是河道流向湖泊的流量, 则湖泊的联系方程为

$$A_s dZ_s / dt = Q_s$$

$$A_s (Z_s - Z_s^0) / \Delta t = Q_s$$

$$\text{故} \begin{cases} Z_i = Z_{i+1} \\ Q_{i+1} = Q_i - A_s (Z_{i+1} - Z_{i+1}^0) / \Delta t \end{cases} \quad (3-40)$$

当上游是水位边界时:

$$Z_i = P_i - V_i Q_i$$

由式 (3-73) 得:

$$Q_i = ((A_s / \Delta t)(P_i - Z_i^0) + Q_{i+1}) / (1 + A_s V_i / \Delta t)$$

$$\begin{aligned}
Z_{i+1} &= (P_i + V_i A_s Z_i^0 / \Delta t - V_i Q_{i+1}) / (1 + A_s V_i / \Delta t) \\
\begin{cases} S_{i+1} = (A_s / \Delta t)(P_i - Z_i^0) / (1 + A_s V_i / \Delta t) \\ T_{i+1} = -1 / (1 + A_s V_i / \Delta t) \\ P_{i+1} = (V_i A_s Z_i^0 / \Delta t + P_i) / (1 + A_s V_i / \Delta t) \\ V_{i+1} = V_i / (1 + A_s V_i / \Delta t) \end{cases} & \quad (3-41)
\end{aligned}$$

当上游为流量边界时

$$Q_i = P_i - V_i Z_i$$

由式 (3-39) 可求得:

$$Z_i = Z_{i+1}$$

$$\begin{aligned}
Q_{i+1} &= P_i + A_s Z_{i+1}^0 - (V_i + A_s / \Delta t) Z_{i+1} \\
\begin{cases} S_{i+1} = 0 \\ T_{i+1} = -1 \\ P_{i+1} = P_i + A_s Z_{i+1}^0 / \Delta t \\ V_{i+1} = V_i + A_s / \Delta t \end{cases} & \quad (3-42)
\end{aligned}$$

3.2 河网水质模型的建立

水质模型是描述水体中污染物随时间及空间变化规律的一种数学模型, 是进行天然水体水质模拟的主要工具, 它可以为水质预测、水污染综合治理等提供理论依据。该河网地区污染主要为有机污染, 主要污染因子为化学需氧量。因此, 本研究选择代表有机污染的污染因子化学需氧量作为水质模拟的对象。

3.2.1 河道一维对流扩散方程及其求解

(1) 河道控制方程

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - K_c AC + S \quad (3-43)$$

式中, C 为污染物质的断面平均浓度, U 为断面平均流速, A 为断面面积, E_x 为纵向分散系数, S 为单位时间内、单位河长上的污染物质排放量, K 为污染物降解系数, x 为空间坐标, t 为时间坐标。

初始条件: $C(x, 0) = C_0$

边界条件: $C(0,t) = C$

(2) 河道控制方程的离散

对方程 (3-43) 进行离散, 空间差分采用隐式逆风差分格式。

顺流时 (从断面 i 流向 $i+1$) 有:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(AC)}{\partial t} &= \frac{(AC)_i^{n+1} - (AC)_i^n}{\Delta t} \\ \frac{\partial(AUC)}{\partial x} &= \frac{(QC)_i - (QC)_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} \\ \frac{\partial}{\partial x} (AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) &= \frac{1}{\Delta x_{i-1}} [(AE_x)_i \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta x_i} - (AE_x)_{i-1} \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}] \\ -KAC + S &= -K_{i-1} A_{i-1/2} C_i + S_{i-1}\end{aligned}$$

逆流时 (从断面 $i+1$ 流向 i) 有:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(AC)}{\partial t} &= \frac{(AC)_i^{n+1} - (AC)_i^n}{\Delta t} \\ \frac{\partial(AUC)}{\partial x} &= \frac{(QC)_{i+1} - (QC)_i}{\Delta x_i} \\ \frac{\partial}{\partial x} (AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) &= \frac{1}{\Delta x_i} [(AE_x)_i \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta x_i} - (AE_x)_{i-1} \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}] \\ -KAC + S &= -K_i A_{i+1/2} C_i + S_i\end{aligned}$$

考虑到流向顺逆变化的影响, 引入流向调节因子 r_c 及 r_d , 对于断面表示为:

$$\begin{cases} Q_w = (Q_i + Q_{i-1})/2 & Q_e = (Q_i + Q_{i-1})/2 \\ r_{cw} = (Q_w + |Q_w|)/2Q_w & r_{ce} = (Q_e + |Q_e|)/2Q_e \\ r_{dw} = (Q_w - |Q_w|)/2Q_w & r_{de} = (Q_e - |Q_e|)/2Q_e \\ r_c = r_d = 0, & (\text{当 } Q_w, Q_e = 0 \text{ 时}) \end{cases}$$

得到任意流向下, 统一形式的差分方程:

$$\alpha_i C_{i-1} + \beta_i C_i + \gamma_i C_{i+1} = Z_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (3-44)$$

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为系数; Z_i 为右端项; C_i 为 i 断面时段末的浓度; n 为某一河道

的断面数; 对于一般断面 ($i=2, 3, \dots, n-1$) 分别表示为:

$$\alpha_i = -[r_{cw}D_{ww} + r_{dw}D_{pw} + F_{cw}] \cdot \Delta t / V$$

$$\beta_i = -[r_{cw}D_{ww} + r_{dw}D_{pw} + r_{ce}D_{pp} + r_{de}D_{ep} + F_{cp} - F_{dp}] \cdot \Delta t / V + r_{cw}K_{i-1} + r_{de}K_i) \cdot \Delta t + 1.0$$

$$\gamma_i = -[r_{ce}D_{pp} + r_{de}D_{ep} - F_{de}] \cdot \Delta t / V$$

$$Z_i = -C_i^n + [r_{cw}S_{i-1} \cdot \frac{1}{A_{i-1/2}} + r_{de}S_i \cdot \frac{1}{A_{i+1/2}}] \cdot \Delta t$$

对于首断面 ($i=1$), 逆流时有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = 0 \\ \beta_i = [r_{de}D_{ep} - F_{dp}] \frac{\Delta t}{\Delta x_i A_{i+1/2}} + r_{de}K_i \Delta t + r_{de} \\ \gamma_1 = -[r_{de}D_{ep} - F_{de}] \frac{\Delta t}{\Delta x_i A_{i+1/2}} \\ Z_1 = C_1^n + r_{de}S_1 \frac{\Delta t}{A_{i+1/2}} \end{array} \right.$$

对于末断面 ($i=n$), 顺流时有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = -[r_{cw}D_{ww} + F_{cw}] \frac{\Delta t}{A_{n-1/2}} \\ \beta_i = [r_{cw}D_{ww} - F_{cp}] \frac{\Delta t}{\Delta x_{i-1} A_{i-1/2}} + r_{cw}K_{i-1} \Delta t + r_{cw} \\ \gamma_1 = 0 \\ Z_n = C_n^n + r_{cw}S_{n-1} \frac{\Delta t}{A_{i-1/2}} \end{array} \right.$$

式中,

$$A_{i-1/2} = (A_{i-1} + A_i) / 2, \quad A_{i+1/2} = (A_{i+1} + A_i) / 2$$

$$V_1 = A_{i-1/2} \cdot \Delta x_{i-1}, \quad V_2 = A_{i+1/2} \cdot \Delta x_i$$

$$V = r_{cw}V_1 + r_{de}V_2$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} D_{ww} = (AE_x)_{i-1} / \Delta x_{i-1} & D_{pp} = (AE_x)_i / \Delta x_i \\ D_{pw} = (AE_x)_i / \Delta x_{i-1} & D_{ep} = (AE_x)_{i+1} / \Delta x_i \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} F_{cw} = (Q_{i-1} + |Q_{i-1}|) / 2 & F_{cp} = (Q_i + |Q_i|) / 2 \\ F_{dp} = (Q_i - |Q_{i-1}|) / 2 & F_{de} = (Q_{i+1} - |Q_{i+1}|) / 2 \end{array} \right.$$

可将差分方程用向量形式表示:

$$A_c C_c = B_c \quad (3-45)$$

式中 A_c 为 $[(n-1) \times n]$ 阶的三对角系数矩阵, C_c 为河道断面平均浓度的 n 维列向量, B_c 为已知的 $(n-1)$ 维列向量。(3-44) 式中含 $(n-1)$ 个方程, n 个未知数, 需引入节点方程及边界条件方可求解此方程。

(3) 河网节点方程

根据质量守恒原理, 对于污染物充分混合的节点, 可得节点连接方程:

$$\sum_{i=1}^n (QC)_{i,j} = \frac{d(C\Omega)_j}{dt} - S_j \quad (3-46)$$

$$\sum_{i=1}^n (QC)_i + \left(\sum_{j=1, Q_j < 0}^m Q_j \right) C_j = \frac{d(C\Omega)_j}{dt} - S_j \quad (3-47)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; 表示与某节点相连的河道数;

$j = 1, 2, \dots, m$; 表示节点数;

C_i - i 断面浓度;

C_j - j 节点浓度;

Ω - 节点蓄量, 对于非调蓄节点, 节点调蓄可忽略, $\Omega = 0$;

S_j - 节点污染源加入项。

(4) 方程的求解

在流场已知条件下, 由 (3-46)、(3-47) 式再加上边界条件及初始条件, 构成封闭的代数方程组, 但未知量数目较多, 在河道规模较大时, 求解困难。采用三级联解法可有效地求解大型复杂河网, 可得单一河道首末断面浓度关系方程, 再代入节点方程组, 形成封闭的节点浓度代数方程组:

$$f_i(C_i, C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ij}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3-48)$$

从而解得节点浓度, 再由单一河道各断面浓度关系方程即可求得各断面浓度。

3.2.2 水质指标模拟

本文采用美国国家环保局开发的 WASP5 模型中关于营养物质、浮游植物、碳质物质和溶解氧的迁移转化的公式进行水质指标模拟。

(1) 五日生化需氧量BOD(C_b)

$$\frac{dC_b}{dt} = -K_b C_b \quad (3-49)$$

式中： K_b 为五日生化需氧量的综合降解系数， d^{-1} ；

K_b 受到水流条件和温度条件的影响，其取值变幅较大，而且必须利用当地水文水质监测数据进行率定和验证。

(2) 高锰酸盐指数 COD_{Mn} (C_c)

$$\frac{dC_c}{dt} = -K_c C_c \quad (3-50)$$

式中： K_c 为的高锰酸盐指数的综合降解系数， d^{-1} ；

K_c 受到水流条件和温度条件的影响，其取值变幅较大，而且必须利用当地水文水质监测数据进行率定和验证。

(3) 总磷TP(C_p)

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{\sigma_2}{A} - \sigma_4 C_p \quad (3-51)$$

式中： σ_2 —底泥释放磷的速率， d^{-1} ； σ_4 —磷沉降速率， d^{-1} ；

(4) 总氮TN(C_N)

$$\frac{dC_N}{dt} = \frac{\sigma_3}{A} - J_3 C_N \quad (3-52)$$

式中： σ_3 —底泥释放氮的速率， d^{-1} ； J_3 —脱氮速率常数， d^{-1} ；

(5) 溶解氧DO(C_o)

$$S = \begin{cases} -k_{b1}C_b + k_o(C_{ox} - C_o) - 4.571k_nC_N - \frac{S_{o1}}{h} & C_o > 1.0mg/L \\ -k_{b2}C_b + k_o(C_{ox} - C_o) - \frac{S_{o2}}{h} & 1.0 \geq C_o > 0.2mg/L \\ -k_{b3}C_b + k_o(C_{ox} - C_o) - \frac{S_{o2}}{h} & C_o \leq 0.2mg/L \end{cases} \quad (3-53)$$

式中: k_d —复氧系数, d^1 ; C_{or} —饱和溶解氧浓度, mg/L; C_o —溶解氧浓度, mg/L; h —断面平均水深, m; S_{o1} 、 S_{o2} —好氧及缺氧、厌氧条件下的底泥耗氧系数, $g/(m^3 \cdot d)$ 。

3.3 并行模型研制

3.3.1 串行模型流程

以下为串行模型流程的伪代码:

```

getRiverAttributeDB    //获得河道属性
getNodeToNodeRelation 获得每个节点与之相连节点的逻辑关系
getLakeRelation//获得调蓄节点附近逻辑关系
getRiverRelation//获得节点—河道逻辑关系
For time := BeginTime To EndTime Do
Begin
    getStillRainHeight//获得各平原分区静雨深
    CalNodeC//由断面浓度推求节点浓度（末断面推节点）
    CalBeginCrossC //将节点浓度赋予河道首断面（节点推首断面）
    Repeat
        CalCoefficientbyRiver//按河道循环求解节点水位方程系数矩阵;
        CalCoefficientbyLake//按湖泊循环求解节点水位方程系数矩阵;
        CalCoefficientbyBrake//按闸门循环求解节点水位方程系数矩阵;
        CalNodeZZ//求解节点水位
    Until ( d <= 0.0001 ) Or ( Loop > 100 );
    CalCrossZQ //由节点水位流量求解断面水位流量
    CorrectNodeWaterFlowBySlope //修正节点水量
    CalSingleRiverC//按河道计算断面污染物浓度（首断面推末断面）
End

```

3.3.2 并行可行性分析

通过以上流程伪代码,可以提取出模型的并行成分,采用分解和递归型并行

编程模型，如图 3.7 所示，每一层均可并发执行。每一层必须完全执行完毕，方可进行下一层的计算。模型计算流程为：

(1) 模型主线程创建 6 个子线程分别获取平原、山区、湖泊、闸门、分蓄洪区及河道的属性信息。

(2) 关闭以上六个线程并创建 3 个线程分别计算出节点与节点逻辑关系、调蓄节点附近逻辑关系及节点与河道逻辑关系。

(3) 关闭以上 3 个线程。按河道循环求解节点水位方程系数矩阵时，由公式 (3-3) — (3-25) 可知 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 ϕ 、 α 、 β 、 γ 、 ξ 、 ζ 、 η 等系数的求解只需用到本河道的相关属性，与其它河道无关。因此此处也可进行并行处理，湖泊与闸门同理亦可。

(4) 逐次超松弛迭代 (Successive OverRelaxation Method) 求解节点水位、由公式 (3-19)、(3-20) 可求解出断面水位流量。

(5) 由于存在计算误差，节点水量不能保持绝对平衡，处需进行节点水量修正。

(6) 返回步骤 3，求解下一时刻水位流量。

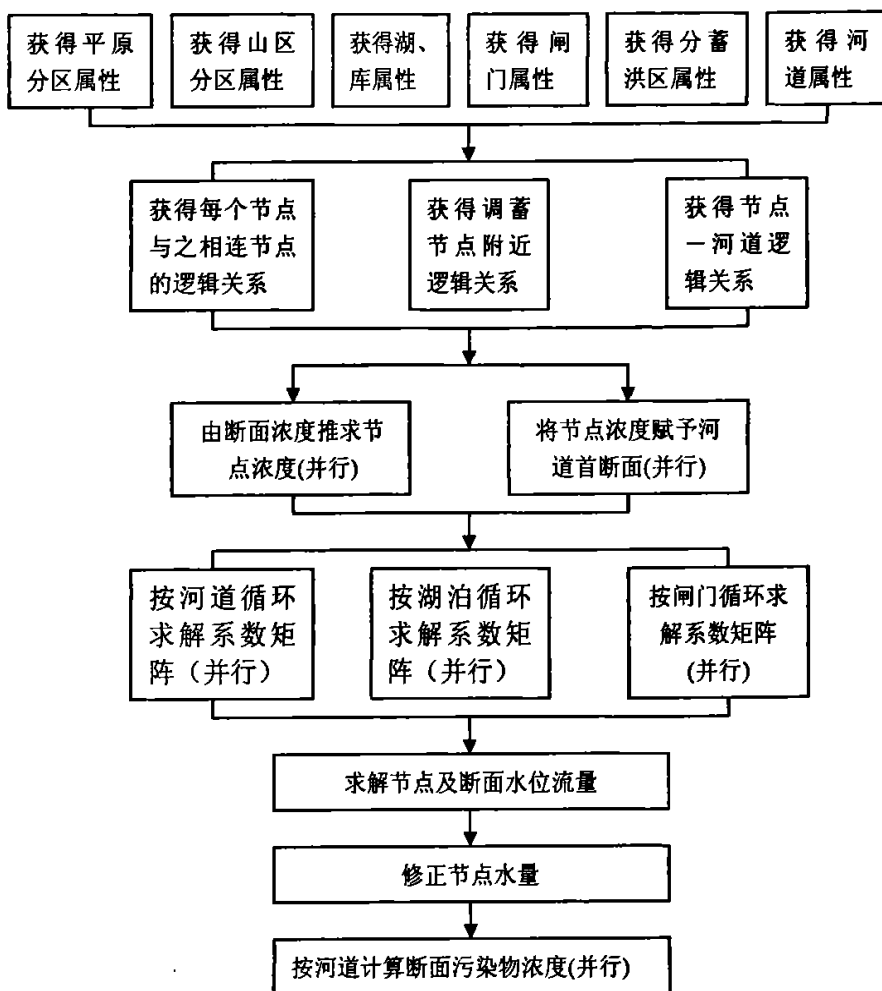


图 3.7 模型流程图

3.3.3 通讯协议

模型并行计算时，为使计算机之间能够正常通信，交换计算数据，特针对该模型制定了以下通讯协议。下以并行求解河道系数矩阵为例介绍并行模型的研制。

表 3-1 协议头

起始字节	字段		长度(字节)	类型	说明	
消息头						
1	消息长度		2	整型	消息的总长度(字节数)	
3	命令时间	年	1	整型	从 2000 年起算	命令序列号 (10 字节)
		月	1	整型		
		日	1	整型		
		时	1	整型		
		分	1	整型		

	秒	1	整型		
9	命令序号	4	整型	由源设备从 0 开始循环进位	
消息体					
13	源设备 IP	4*1	整型		
17	源设备 Port	2	整型		
19	目标设备 IP	4*1	整型		
23	命令 ID	1	整型	命令 ID	
24	命令体	...	...	命令体的具体内容	

- 命令序列号由源设备生成，由其唯一标识一个请求。命令序列号由由消息长度、命令时间和命令序号组成。目标设备在返回应答时，应答的序列号必须和相对应的命令的序列号相同。
- 以命令时间和命令序号为密钥，加密消息体。

表 3-2a 求解河道系数矩阵协议（命令 ID：01，服务器⇌客户端）

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
消息头				
23	命令 ID	1	整型	01H
24	河道首断面号	2	整型	
26	河道末断面号	2	整型	
28	河道首节点号	2	整型	
30	河道末节点号	2	整型	
32	空间步长	3	浮点型	
35	糙率	3	浮点型	
38	河道所属平原分区	1	整型	
39	圩外陆域宽度	3	浮点型	
42	圩内陆域宽度	3	浮点型	
45	河底高程	3	浮点型	
48	河底宽	3	浮点型	
51	两侧坡度和	3	浮点型	
54	mm1	3	浮点型	节点水位方程
57	mm2	3	浮点型	节点水位方程系数
60	mk1	3	浮点型	节点水位方程系数
63	mk2	3	浮点型	节点水位方程系数
66	旁侧入流	3	浮点型	
69	非圩区陆域宽度范围内的水面率	3	浮点型	
72	时间步长	2	整型	
74	Aa1	3	浮点型	节点水位方程系数
77	Aa2	3	浮点型	节点水位方程系数
80	河道 ID 号	2	整型	

82	水位	3	浮点型	重复 N (断面数) 次。
85	流量	3	浮点型	

表 3-2b 求解河道系数矩阵应答 (命令 ID: 81H, 客户端⇌服务器)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	81H
24	Mm1	2	整型	
26	Aa1	3	浮点型	
29	Mm2	2	整型	
31	Aa2	3	浮点型	
34	Mk1	2	整型	
36	Aa3	3	浮点型	
39	Mk2	2	整型	
41	Aa4	3	浮点型	
44	N1	2	整型	
46	Rh1	3	浮点型	
49	N2	2	整型	
51	Rh2	3	浮点型	
54	河道 ID 号	2	整型	
56	Amy	3	浮点型	重复 N 断面数 (n) 次。
59	bmy	3	浮点型	
62	cmy	3	浮点型	
65	hmy	3	浮点型	
68	xmy	3	浮点型	
71	ymy	3	浮点型	

表 3-2c 求解河道系数矩阵结果已获得应答 (命令 ID: 91, 服务器⇌客户端)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	91
24	已获计算结果	1	整型	

表 3-3a 获取机群负载 (命令 ID: 02H, 服务器⇌客户端)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	02H

表 3-3b 获取机群负载应答 (命令 ID: 82H, 客户端⇌服务器)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	82H
24	负载值	3	浮点型	

表 3-4a 通信心跳命令 (命令 ID: 03, 服务器→客户端)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	4

3.3.4 并行求解流程

由图 3.7 可知,在上一层信息计算完毕之前,不能进行下一层的计算,因此必须在程序中进行控制,使得数据保持同步。在河道系数求解时,服务器首先发送广播征求各客户端的负载信息(信息素),客户端收到此指令时,动态获得当前的内存使用率,CPU 使用率,线程数,以及机器性能参数等,采用蚂蚁算法计算出当前客户端的负载值,发给服务器。服务器根据收到的各客户端负载信息,将所需计算的河道数,按照权重分配到各客户端,并将计算所需要的数据打包发给客户端,此时服务器进入等待状态,直到所有的计算结果均已返回,再进行下一步的计算。客户端接收到数据后,开始解包、计算并将计算结果返回给服务器。此时,若客户端计算尚未完成时因某种原因如死机,误操作等导致不能继续计算,服务器根据心跳测试能实时检测到当前可用的客户端,然后将该客户端未计算完成的河道转移给其它可用的客户端计算。此进程迁移功能虽然需要较大的通信开销,但能保证数据的完整性和准确性,MPI 和 PVM 均不能提供此功能,为本模型独创。

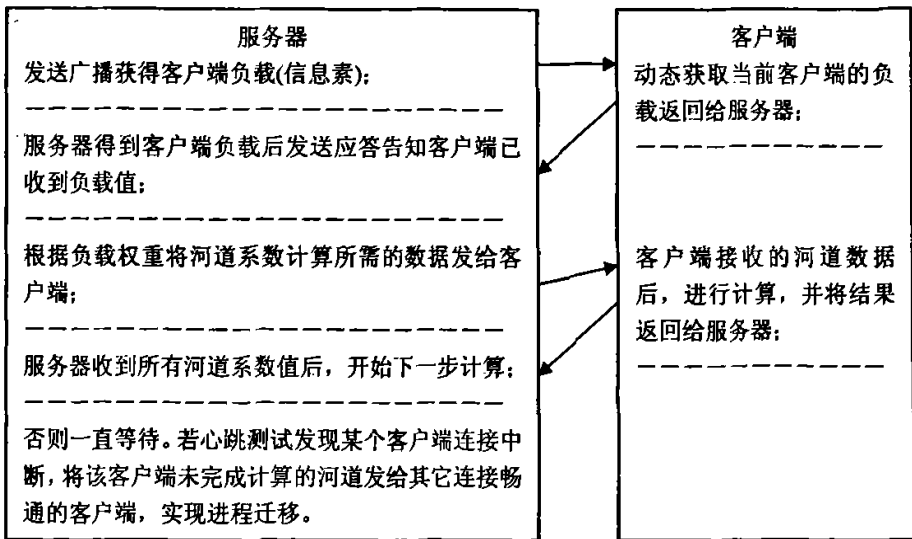


图 3.8 并行求解流程

3.4 算例一上海浦东新区调水改善水环境数值模拟

3.4.1 研究背景

浦东平原河网地处上海市东大门，东濒长江主航道出海口（长江口西南；东南端水域为长江与东海的交汇处。），西临黄浦江，沿江与宝山、杨浦、虹口、黄浦、南市、卢湾、徐汇等区毗邻，南与南汇县及闵行区接壤，是与上海市中心区仅一江之隔的一块三角形地区。新区市政中心地理座标北纬 $31^{\circ} 13'$ 东经 $121^{\circ} 32'$ 。浦东新区地层为长江冲积层，由长江夹带泥沙在江海波浪、潮汐、流速和人为的相互作用下不断堆积而成。地势东南高，西北低，地面高程一般为 $3.5 \sim 4.5\text{m}$ ，少数地区达 5m 以上，平均高程约 4m ，是坦荡低平的江海平原的一部分。新区土地面积 522.75 km^2 ，下属 10 个街道，26 个镇，见图 3.9。



图 3.9 浦东新区概况图



图 3.10 浦东河网水质监测站点分布图

浦东地区水环境污染源主要有企业污染源、生活污染源、面污染源等，浦东新区各类污染源产生的年污水总量高达 30171.0 万 t 。浦东河网地区的污染物以有机污染为主，其中进入河道的化学需氧量达 11.02 万 t/年 、生化需氧量达 3.34 万 t/年 、氨氮达 0.785 万 t/年 。浦东主要河道大部分监测断面化学需氧量值 $\geq 25\text{mg/L}$ ，水质监测断面化学需氧量评价劣于 V 类，化学需氧量超标严重，全区各级河道水体绝大部分已丧失自净能力。从空间分布情况来看，浦东河网形成了由北往南，由西向东，水污染由重到轻的状况，例如北部河网内严家港、高浦港等河道，西部河网内白莲泾、三林塘港等河道污染较为严重。从时间分布情况来看，水质污染的季节性差异正由非汛期重于汛期污染型转向汛期污染重于非汛期。同时，由于平原河网水流流速缓慢、顺逆不定、水体自净能力不强等特性，使得污

染物随水流回荡，水质恶化更加加剧。各河流断面分布见图 3.10。

3.4.2 调水可行性分析

(1) 河道情况和工程设施为引水提供了可能条件

浦东新区共有大小河道 4600 多条（黄浦江除外），总长度 2276.36km, 河网密度 4.35km/km²。区内河道纵横贯通，17 条骨干河道，也纵横交错，其中东西走向的河流有川杨河、高浦港、高桥港、外环运河、赵家沟、张家浜、白莲泾、吕家浜、江镇河，南北走向的河流有随塘河、浦东运河、曹家沟、马家浜、三八河，见图 3.10。

周边有水利工程控制设施：浦东新区自六十年代以来，相继在黄浦江支流上建造了三岔港、老黄浦、高桥、东沟、西沟、洋泾、张家浜、白莲泾、杨思、北港和三林等水闸；沿长江口建造了外高桥、五号沟、三甲港、张家浜等节制闸，形成水利大包围控制，使区内个河道水文要素受水闸控制，主要闸的分布情况如图 3.11 所示。新区现有水闸 28 座（不含浦东国际机场），总设计最大引水量 1275m³/s，总设计最大排水量 1870.9m³/s，受益面积为整个浦东新区和南汇部分地区。其中 12 座主要水闸总设计最大引水量 934m³/s，总设计最大排水量 1327m³/s(见表 2-6-1)，上述水闸的引排能力为调水创造了工程可行性条件。



图 3.11 浦东河道及水闸分布情况图

表 3-5 浦东新区主要水闸引排水量表

闸名	所在上游河道	最大设计 排水量 (m ³ /s)	最大设计 引水量 (m ³ /s)
高桥套闸	高桥港	75	98
东沟水利枢纽	赵家沟	65	50
白莲泾套闸	白莲泾	123	65
西沟水闸	马家浜	75	60
五好沟水闸	随塘河	98	60
张家浜水闸	张家浜	65	40
三甲港水闸	川杨河	345	177
洋泾套闸	三八河	70	50
杨思水利枢纽	川杨河	203	146
外高桥泵闸	外环运河	80	80
三林套闸	三林塘港	88	68
北港水闸	三林北港	40	40

(2) 河网的潮汐特性为引长江水提供了基本的水动力条件

长江口属非正规的浅海半日潮，每日有两次涨落。可以在高潮水位高于内河道水位时，开闸引清水，同时低潮水位低于内河道水位时，关闸将内河污水排出。因此可以充分利用感潮河网的潮汐水动力特性，发挥现有的水闸、水泵等水利工程的作用，实施人工调度。

(3) 周边长江、黄浦江水源是引水的有利条件

浦东新区特殊的地理位置，使其拥有丰富的过境流量。长江口水质一般为Ⅲ~Ⅳ类，COD_{Cr}浓度一般在 20mg/L 以下，黄浦江中上游水质一般为Ⅳ~Ⅴ，COD_{Cr}浓度一般在 25mg/L 以下，而浦东河网内东部 COD_{Cr}浓度一般在 20mg/L 以上，浦东河网内西部 COD_{Cr}浓度一般在 25mg/L 以上，长江、黄浦江水源水质都好于河网内部水质，因此浦东河网地区具备良好的引水水源。

通过合理的群闸联合引排水调度，使浦东新区主要骨干河道的水体由回荡不定向变为定向流动，并带动区内其他中小河道水体有序流动，以增加河网水体更换次数，达到稀释、削减污染总量，可有效改善区内河网水体水质现状和水环境质量，因此通过调水改善河网地区的水环境质量是可行的。

3.4.3 模型率定与验证

(1) 河道概化

由于计算工作量及资料的限制，模拟计算时采用的河网与真实的不可能完全

一致。模拟计算时采用的河网是在天然河网的基础上进行合并和概化的。概化的原则是使河网在输水能力与调蓄能力两个方面必须与天然河网相似。除此之外还应遵循以下原则：主要河道不要合并；对于一些次要的河道，可以将两条或者更多条平行河道用一条概化河道来代替；更小的基本上不起输水作用的河道作为河道上起调蓄作用的附加宽度来处理。在模型率定阶段，若发现这些参数不合理，则可做适当修改，使水流模拟得更切合实际情况。

由于浦东地区赵家沟以北水系赵家沟以南水系不通。本文根据以上原则将该河网概化为61个节点（其中7个边界节点）、68条（段）河道、136个断面，概化图如(3.12)所示。河道断面概化为梯形断面，由边坡、底高、底宽三个要素来表示。



图 3.12 河网概化图

(2) 水量模型的率定

水量模型中，河道的糙率为模型的待率定参数。糙率的精度直接影响着水量模型的计算精度。天然河道的糙率与很多因素有关，如河床沙、石粒径的大小和沙坡的形成或消失、河道弯曲程度、断面形状的不规则性、深槽中的潭坑、沙地上的草木、河槽的冲击以及整治河道的人工建筑物等。这些复杂的因素不仅沿河道的长度变化，而且在同一河段上也随水位的变化而不同。

计算边界采用三甲港水闸（闸外），三林套闸（闸外）2002 年实测水位过程。时间步长取 900 秒，采用试错法进行率定，即根据部分断面实测的水位资料或流量资料，调试各河道的糙率，使得计算水位或流量过程与实测水位或流量相吻合，得出浦东地区河道糙率为 0.022~0.028，模型率定的主要依据是 2002 年 9 月 19

日到 2002 年 9 月 25 日实测水位过程，水位率定的结果见图 3.13，3.14 和表 4。

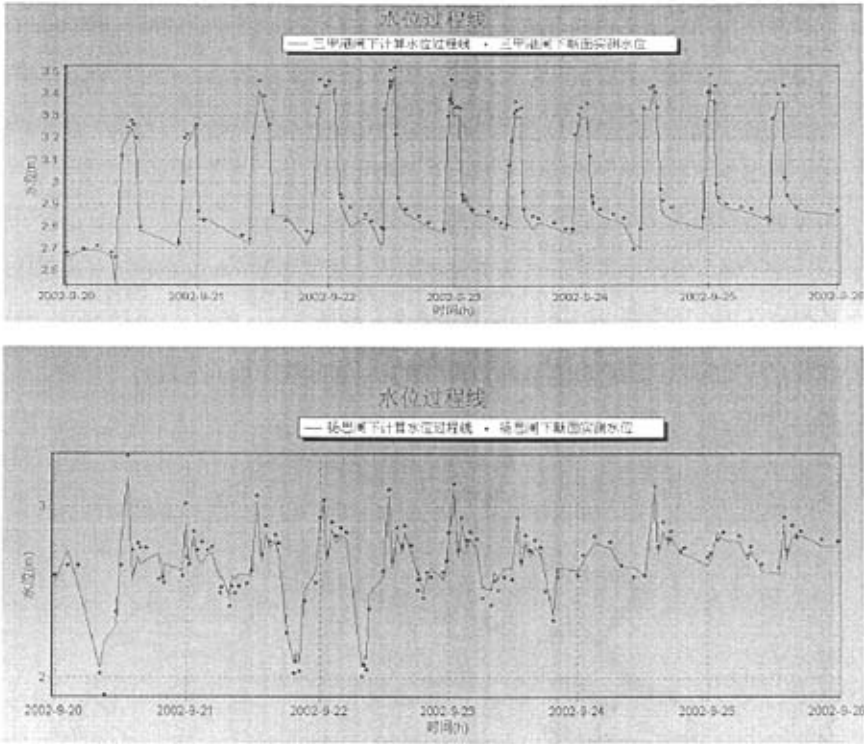


图 3.14 杨思（内河）水位率定图

在率定时出现过解节点水位方程组不收敛的情况，经过分析发现是没有将水闸的调度规则加入程序里，使得内河道‘干涸’（即水深为负值），导致方程组不收敛。在加入调度规则后，程序运行良好。

(3) 水量模拟误差分析

表 3-6 水位实测值与计算值统计表

站 名	时 间	实 测 值	计 算 值	绝对误差
三甲港闸下	20 日 10 时	3.12	3.29	0.17
三甲港闸下	21 日 16 时	2.83	2.95	0.12
三甲港闸下	24 日 13 时	3.43	3.33	-0.1
三甲港闸下	25 日 14 时	3.44	3.36	-0.08
杨思闸下	20 日 09 时	1.9	2.02	0.18
杨思闸下	21 日 18 时	2.27	2.35	0.08
杨思闸下	23 日 18 时	2.51	2.39	-0.12
杨思闸下	25 日 02 时	2.81	2.89	0.08

对水量模拟结果进行误差统计分析，结果表明，模拟结果能很好的反映实际

水流情况。分析误差产生的原因，概化的河道与实际河道之间存在一定的误差，对河道内小河流概化不够全面。同时，水闸工况调节在模拟过程中也会存在误差，这也是造成最终误差存在的原因之一。

(4) 感潮河网水质模型的率定与验证

计算条件：采用 2002 年 9 月 19 日~26 日的水流过程用水量模型进行水力计算，其结果作为水质计算的条件，然后根据已知断面 2002 年 9 月 19 日~26 日的 COD 浓度值反复调试 COD 降解系数 K_d ，直至计算值与监测值充分接近，率定结果见图 3. 15, 3. 16。

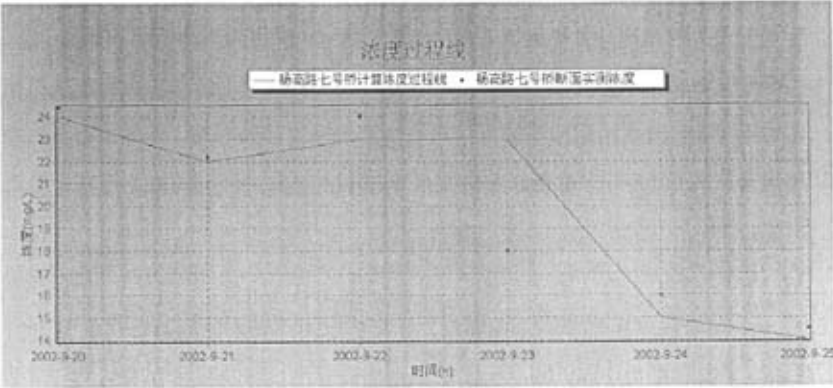


图 3. 15 杨高路 7 号桥断面 COD 计算与模拟比较图

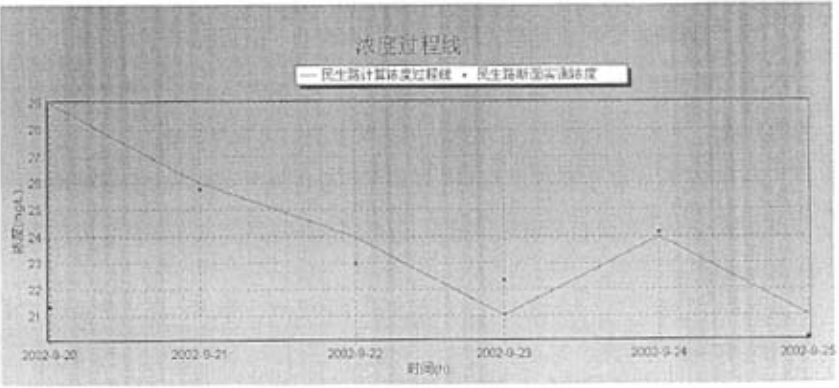


图 3. 16 民生路断面 COD 计算与模拟比较图

表 3-7 水质误差计算统计表

站 名	时 间	实 测 值	计 算 值	相对误差%
杨高路 7 号桥	09 月 20 日	24.0	24.4	1.7
杨高路 7 号桥	09 月 21 日	22.0	22.16	0.7

杨高路 7 号桥	09 月 22 日	23.0	24.0	4.3
杨高路 7 号桥	09 月 23 日	23.0	18.0	-21.7
杨高路 7 号桥	09 月 24 日	15	16	6.7
杨高路 7 号桥	09 月 25 日	14.0	14.5	3.6
民生路	09 月 19 日	22.0	21.36	-2.9
民生路	09 月 20 日	29.0	21.41	-7.59
民生路	9 月 21 日	26	25.78	-0.8
民生路	9 月 22 日	24.0	23.01	-4.1
民生路	9 月 23 日	21.0	22.36	6.5
民生路	9 月 24 日	24.0	24.15	0.6
民生路	9 月 25 日	21.0	20.36	-3

对水质模拟进行误差统计分析,结果表明,相对误差大部分在 30%以内。分析误差产生的原因,主要有以下几个方面,第一:掌握的污染源资料不足。第二:河网概化对水质模拟产生一些误差。第三:水量模拟产生的误差会对水质模拟产生影响。以上的原因造成了模拟结果与实际情况误差的存在,但是大部分控制点的误差在 30%以内,因此所建立的水质模型基本上能反映河网调水过程中的实际情况。

(5) 成果分析

① 综合各水闸的模拟运行情况,计算得出河网调水期间总引水量为 2661.3 万 m^3 ,总排水量为 2495.02 万 m^3 ,结果能够较好的反映出实际调水过程,模型的误差在允许范围内。

② 河网调水能形成理想的河网水流定向流动,引进清水排出污水,水质改善明显,调水结束后大部分水体 COD 达到 IV 类以上标准,达到了调水改善水环境的的目的,调水对黄浦江下游水质、川杨河水质均无不良影响。

③ 将河网水量水质模型与 GIS 技术相结合既能发挥河网数值模拟的作用,又能发挥 GIS 空间分析与表达的能力,为河网水环境决策管理提供更现代的信息技术支持。

3.4.4 并行效率分析

浦东地区 61 个节点(其中 7 个边界节点)、68 条(段)河道、136 个断面采用并行矩阵标识法的计算速度大大超过串行不减少零元素存储的计算速度。计算时间段为 2002-9-19 至 2002-9-25,时间步长为 900s。

表 3-8 计算耗时表

计算机台数	计算所需时间(s)
1	346
2	198
3	417

模型所花费的时间由模型计算所需的时间和通信开销的时间组成。当每增加一台计算机分担的单元数计算所节省的时间大于通信开销的时间,则能提高计算的速度;反之,则会延缓计算的速度。如上所示,当2台计算机并行计算时,计算时间成比例减少。一台Celon2.8GHz计算机求解所需时间为346秒,而2台计算机所需时间仅为198秒,相应加速比为1.75,并行效率达到了87.4%。而当计算机台数增加为3时,计算时间反而增大了,说明此时增加的一台计算机分担的单元数计算所节省的时间小于通信开销的时间,因此,在61个节点的矩阵标识模型计算时,2台计算机并行计算能取得最优效果。

3.5 小结

本章将构建的基于并行算法的一维水量水质模型应用于上海浦东新区河网水流数值模拟,并加以验证。模型主要特点如下:

- (1) 分析 Preissmann 四点隐格式的串行隐式求解算法流程,提取其并行成分,采用任务主从型并行编程模型,将迭代求解节点水位方程组进行并行求解。
- (2) 在求解节点水位方程组时,根据机群负载平衡的调度方案,制定了针对一维水量水质模型的通讯协议,将河道按权重分配到各客户端进行节点水位求解。
- (3) 当前主流并行平台 MPI, PVM 尚未实现进程迁移功能,当进行并行计算时,网络中某客户端由于突发情况(死机,非正常情况关机),异常退出计算将导致脏数据的产生;本模型实现了进程迁移,实时将未完成计算的河道转移到其它客户端继续计算。
- (4) 求解河网时,河道、节点的编码可以任意,使模型软件具有可扩充性,可移植性和通用性。
- (5) 动态数组来存储程序中的变量,节省了内存空间。
- (6) 河网中节点编码不影响计算速度和容量要求,因此节点编码任意。用户可以在任何地方修改河网,例如增加一条河或闸、泵站等,只需对修改的河道或节点予以新的编码,其它的河网节点和河道编码仍维持原状。

第四章 二维并行水量水质数值模拟模块研制

4.1 水环境数学模型建立

4.1.1 基本方程组

守恒型二维浅水方程与对流扩散方程耦合的矢量表达式为：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (4-1)$$

式中： $q = [h, hu, hv, hC_i]^T$ 为守恒量； $f(q) = \left[hu, hu^2 + \frac{gh^2}{2}, huv, huC_i \right]^T$ 为 x 向通量， $g(q) = \left[hv, huv, hv^2 + \frac{gh^2}{2}, hvC_i \right]^T$ 为 y 向通量； h 为水深； u 和 v 分别为 x 和 y 向垂线平均水平流速分量； g 是重力加速度； C_i 为污染物垂线平均浓度。源（或汇）项 $b(q)$ 为：

$$b(q) = [b_1, b_2, b_3, b_4]^T \quad (4-2)$$

其中， $b_1 = 0$ ； $b_2 = gh(S_{0x} - S_{fx})$ ； $b_3 = gh(S_{0y} - S_{fy})$ ；
 $b_4 = \nabla(D_i \nabla(hC_i)) - \mu_i hC_i + \mu_{i-1} hC_{i-1} + \mu_{i-2} hC_{i-2} + S_i$ (4-3)

式中： S_{0x} 和 S_{fx} 分别是 x 向的水底底坡和摩阻底坡； S_{0y} 和 S_{fy} 分别是 y 向的水底底坡和摩阻底坡。 D_i 为离散系数， ∇ 为拉普拉斯算子， μ_i 为污染物综合降解系数， S_i 为污染物的源汇项，其具体计算参见表 2-1。

表 4-1 污染物的综合降解系数及源汇项

I	污染物指标	C_i	μ_i	μ_{i-1}	μ_{i-2}	C_{i-1}	C_{i-2}	S_i
1	COD	C_1	k_d	0	0	0	0	C'_1
2	NBOD	C_2	$k_{1n} + k_{3n}$	0	0	0	0	C'_2
3	CBOD	C_3	$k_1 + k_3$	0	0	0	0	C'_3

4	DO	C_4	k_2	$-k_1$	$-k_{1n}$	C_3	C_2	$k_2 D_s h - SOD \cdot f$
5	ΔT	C_5	$k_s / \rho c_p h$	0	0	0	0	0
6	盐度	C_6	0	0	0	0	0	0

表中: k_d 为 COD 的降解系数, k_1 和 k_{1n} 分别为 CBOD 和 NBOD 的氧化系数, k_3 和 k_{3n} 为 CBOD 和 NBOD 的沉浮系数, k_2 为曝气系数, k_s 为水面热耗散的综合系数, ρ 为水的密度, c_p 为水的比热, D_s 为一定气压下饱和溶解氧的浓度, SOD 为底泥耗氧量, f 底泥占河床的面积比, C_1' 、 C_2' 和 C_3' 分别为 COD、NBOD 和 CBOD 的面污染负荷浓度。

六种污染物指标的对流-扩散方程表达如下:

$$\frac{\partial(hC_1)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_1)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_1)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_1}{\partial y}) - k_d h C_1 + h C_1' \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial(hC_2)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_2)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_2)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_2}{\partial y}) - (k_{1n} + k_{3n}) h C_2 + h C_2' \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial(hC_3)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_3)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_3)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_3}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_3}{\partial y}) - (k_1 + k_3) h C_3 + h C_3' \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial(hC_4)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_4)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_4)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_4}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_4}{\partial y}) + k_2(D_s - C_4) - k_1 h C_3 - k_n h C_2 - SOD \cdot f \quad (4-7)$$

$$\frac{\partial(hC_5)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_5)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_5)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_5}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_5}{\partial y}) - \frac{k_s}{\rho c_p} C_5 \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial(hC_6)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_6)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_6)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x h \frac{\partial C_6}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y h \frac{\partial C_6}{\partial y}) \quad (4-9)$$

解出 NBOD (C_2) 和 CBOD (C_3) 后, NH_4-N 和 BOD_5 的浓度依据下式计算:

$$C_{(NH_4-N)} = C_2 / 4.8 \quad (4-10)$$

及

$$C_{(BOD_5)} = C_3(1 - e^{-5k_1}) \quad (4-11)$$

4.1.2 有限体积法基本公式

应用散度定理对方程 (4-1) 在任意单元 Ω 上 (见图 4.1) 进行积分离散, 求得 FVM 的基本方程

$$\iint_{\Omega} q_i d\omega = - \int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \quad (4-12)$$

式中 n 为 $\partial\Omega$ 单元边外法向单位向量, $d\omega$ 和 dL 为面积分和线积分微元, $F(q) \cdot n$ 为

法向数值通量, $F(q) = [f(q), g(q)]^T$ 。公式表明法向通量的求解, 可将二维问题转换为一系列局部一维问题。

向量 q 为单元平均值, 对于一阶精度则假定为常数。据此对方程(4-12)离散求得 FVM 基本方程

$$A \frac{dq}{dt} = - \sum_{j=1}^m F_n^j(q) L^j + b_s(q) \quad (4-13)$$

$$b_s(q) = (A \cdot b_1, A \cdot b_2, A \cdot b_3, \sum D_i (\nabla h C_i)_n L^j - A \cdot (\mu_i h C_i - \mu_{i-1} h C_{i-1} - \mu_{i-2} h C_{i-2}) + A \cdot S_i)^T$$

式中 A 为单元 Ω 的面积。利用散度定理, 扩散通量项可表达为 $\sum D_i (\nabla h C_i)_n L$, $(\nabla h C_i)_n$ 为相邻单元法向 $h C_i$ 梯度。 m 为单元边总数, L^j 为单元中第 j 边的长度。 $b_s(q)$ 为源汇项。

单元边法向通量 $F_n^j(q)$ 简记为 $F_n(q)$, 其定义如下[Spekreijse 1988]:

$$F_n(q) = \cos \Phi \cdot f(q) + \sin \Phi \cdot g(q) \quad (4-14)$$

不难证明, $f(q)$ 和 $g(q)$ 具有坐标变换旋转不变性, 即满足

$$T(\Phi) F_n(q) = f[T(\Phi)q] = f(\bar{q}) \quad (4-15)$$

即

$$\begin{aligned} F_n(q) &= F(q) \cdot n = f(q)n_x + g(q)n_y \\ &= f(q) \frac{\Delta y}{\Delta s} - g(q) \frac{\Delta x}{\Delta s} = f(q) \cdot \cos \varphi + g(q) \cdot \sin \varphi \\ &= T^{-1}(\varphi) f[T(\varphi)q] = T(\varphi)^{-1} f(\bar{q}) \end{aligned} \quad (4-16)$$

式中, Φ 为法向向量 n 与 x 轴的夹角 (由 x 轴起逆时针计量)。 $T(\Phi)$ 和 $T(\Phi)^{-1}$ 分别为坐标旋转变换矩阵及其逆阵, 表达式为:

$$T(\Phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi & 0 \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T(\Phi)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & -\sin \Phi & 0 \\ 0 & \sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将(4-16)式代入方程(4-13), 可得

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L^j + b_s(q) \quad (4-17)$$

式中 $\bar{q}$ 由向量 q 变换而来, 其相应的流速分量分别为法向和切向。由公式

(4-17)可见，求解的核心是 $f(\bar{q})$ 的计算。通过上述散度定理和通量旋转不变性的应用，原二维问题已转换成一系列法向一维问题， $f(\bar{q})$ 可通过解局部一维问题求得。鉴于，两相邻单元的 q 值可以不同，该值在两单元的公共边处可能发生间断，模型采用黎曼问题来处理 $f(\bar{q})$ 的计算。

4.1.3 法向数值通量

局部一维黎曼问题是一个初值问题（见图 4.1）

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial f(\bar{q})}{\partial x} = 0 \quad , \quad (4-18)$$

$$\bar{q} = \bar{q}_L \quad (\bar{x} < 0, t = 0); \quad \bar{q} = \bar{q}_R \quad (\bar{x} > 0, t = 0)$$

式中变换后的向量 $q = (h, hu, hv)^T$ ， $\bar{q}_L$ 和 $\bar{q}_R$ 分别为向量 $\bar{q}$ 在单元界面左右的状态。通过解此黎曼问题，可以获得所需要的外法向数值通量，记为 $f_{LR}(q_L, q_R)$ ，从而得到方程（4-16）中的法向通量 $f(\bar{q})$ ，对其作逆矩阵变换 $T(\Phi)^{-1}$ ，就可以计算出原坐标系下的单元边通量 $F_n(q)$ 。以下为简洁起见，变换后的向量 $\bar{q}$ 和变量 $(\bar{u}, \bar{v})$ 上的短横线省略。

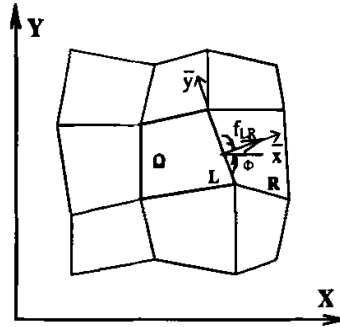


图 4.1 有限体积 Ω 示意图

与浅水方程组类似，方程（4-18）的特征方程为 $|J - \lambda I| = 0$ ，其中 I 为单位矩阵， J 为雅可比矩阵：

$$J = \frac{df}{dq} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - u^2 & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

式中: $c = (gh)^{1/2}$ 。特征方程的特征值为: $\lambda_1 = u - c$; $\lambda_2 = \lambda_3 = u$; $\lambda_4 = u + c$ 。

通过求解 $J \cdot \gamma_k = \lambda_k \cdot \gamma_k$ 得到相应的特征向量:

$$\gamma_1 = (1, u - c, v)^T; \quad \gamma_2 = (0, 0, 1)^T; \quad \gamma_3 = (0, 0, 1)^T; \quad \gamma_4 = (1, u + c, v)^T \quad (4-20)$$

沿特征值 λ_k 和特征向量 γ_k 相应的特征线 Γ_k , 黎曼不变量 $\Psi_k(q)$ 定义为:

$$\nabla \Psi_k(q) \gamma_k(q) = 0 \quad (4-21)$$

式中: $\nabla \Psi_k = \left(\frac{\partial \Psi_k}{\partial q_1}, \frac{\partial \Psi_k}{\partial q_2}, \frac{\partial \Psi_k}{\partial q_3}, \frac{\partial \Psi_k}{\partial q_4} \right)$ 。解方程 (5.3-4) 可得黎曼不变量的分量。

对 γ_1 : $\Psi_1^{(1)} = u + 2c, \Psi_1^{(2)} = v, \Psi_1^{(3)} = C$; 对 γ_2 : $\Psi_2^{(1)} = u, \Psi_2^{(2)} = h, \Psi_2^{(3)} = h$;

对 γ_3 : $\Psi_3^{(1)} = u, \Psi_3^{(2)} = h, \Psi_3^{(3)} = h$; 对 γ_4 : $\Psi_4^{(1)} = u - 2c, \Psi_4^{(2)} = v, \Psi_4^{(3)} = C$ 。(4-22)

根据特征值的符号, 通量 $f(q)$ 可分裂成:

$$f(q) = f^+(q) + f^-(q) \quad (4-23)$$

式中 $f^+(q)$ 和 $f^-(q)$ 分别为对应于 J 正负特征值的通量分量。黎曼问题的近似解为:

$$\begin{aligned} f_{LR}(q_L, q_R) &= f^+(q) + f^-(q) \\ &= f(q_L) + \int_{q_L}^{q_R} J^-(q) dq \\ &= f(q_R) - \int_{q_L}^{q_R} J^+(q) dq \end{aligned} \quad (4-24)$$

其中, $J^+(q)$ 和 $J^-(q)$ 为相应于 J 正负特征值的雅可比矩阵。

方程 (4-24) 中的积分项根据 Osher 格式沿连续的积分路径计算。设状态空间 q

中, 两个已知状态 q_L 和 q_R 由 4 条分段特征线 $\Gamma_k (k=1,2,3,4)$ 相连。由于特征向量 γ_2 和 γ_3 的线性退化, Spekreijse (1988) 证明 $f_{LR}(q_L, q_R)$ 与 Γ_2 和 Γ_3 的交点无关。因此可定义 q_L 和 q_A 由 Γ_1 连接, q_A 和 q_B 由 Γ_2 和 Γ_3 相连, q_B 和 q_R 由 Γ_4 连接。重新定义后的积分路径与浅水方程组积分路径类似。由黎曼不变量方程式 (4-22), 可得:

$$\begin{aligned}
u_L + 2c_L &= u_A + 2u_A & v_L &= v_A \\
u_A &= u_B & h_A &= h_B \\
u_R - 2c_R &= u_B - 2u_B & v_R &= v_B
\end{aligned}
\tag{4-25}$$

相应的状态变量 q_A 和 q_B 可根据方程(4-25)解得:

$$u_A = u_B = \frac{\Psi_L + \Psi_R}{2}, h_A = h_B = \frac{1}{g} \left(\frac{\Psi_L - \Psi_R}{4} \right)^2 \tag{4-26}$$

其中 $\Psi_L = u_L + 2c_L, \Psi_R = u_R - 2c_R$ 。

对于各段特征线, 根据 λ_k 的符号和格式的逆风性可获得方程(4-24)中积分项的近似。方程(4-24)中近似黎曼算子为:

$$f_{LR}(q_L, q_R) = \begin{cases} f(q[\zeta]) - f(q[s]) + f(q[0]) & \lambda_k(q[0]) > 0, \lambda_k(q[\zeta]) < 0 \\ f(q[s]) & \lambda_k(q[0]) < 0, \lambda_k(q[\zeta]) > 0 \\ f(q[0]) & \lambda_k(q[0]) \geq 0, \lambda_k(q[\zeta]) \geq 0 \\ f(q[\zeta]) & \lambda_k(q[0]) \leq 0, \lambda_k(q[\zeta]) \leq 0 \end{cases} \tag{4-27}$$

特征值 $\lambda_k(q[p])(k=1,2,3,4)$ 和状态变量 $q[0]$ 、 $q[\zeta]$ 取各段特征线两端点处的值。

$q[s]$ 为 λ 改变符号的“临界点”处的状态。对于已知水力变量(如 u 和 c)，法向数值通量 $f_{LR}(q_L, q_R)$ 有16种可能解。再利用方程(4-17)即可解算出水力变量和浓度。

表 4-2 浅水方程组 Osher 格式法向数值通量

F_{LR}	$u_L < c_L$ $u_R > -c_R$	$u_L > c_L$ $u_R > -c_R$	$u_L < c_L$ $u_R < -c_R$	$u_L > c_L$ $u_R < -c_R$
$c_A < u_A$	F_1	F_L	$F_1 - F_3 + F_R$	$F_L - F_3 + F_R$
$0 < u_A < c_A$	F_A	$F_L - F_1 + F_A$	$F_A - F_3 + F_R$	$F_L - F_1 + F_A - F_3 + F_R$
$-c_B < u_A < 0$	F_B	$F_L - F_1 + F_B$	$F_B - F_3 + F_R$	$F_L - F_1 + F_B - F_3 + F_R$
$u_A < -c_B$	F_3	$F_L - F_1 + F_3$	F_R	$F_L - F_1 + F_R$

4.1.4 边界条件

模型有五类水流边界和四类水质边界。水流边界为: 1) 陆地边界, 2) 缓流及急流的开边界, 3) 内边界, 4) 无水与有水单元转换的动边界, 以及 5) 湿地支流

边界。水质边界为：1) 开边界处的污染物浓度；2) 陆地边界处的点源污染；3) 通过内边界的污染物浓度；4) 面污染；上述边界条件，除面污染外，其他边界条件均给定在单元的某一边，并将在下列各节进行讨论。

(1) 陆地边界

陆地边界也称作闭边界。如果两单元之间的公共边没有水流通过则该边称为陆地边界。这类边界设定：

$$u_R = -u_L, \quad h_R = h_L \quad (4-28)$$

(2) 开边界

当单元边与计算域边界或物理边界一致时，必须求解边界黎曼问题。前述三种求解内部问题的黎曼近似解 Osher, FVS 和 FDS 均可使用。此时，边界处 q_L 为已知量，而 q_R 为要求的未知数。它可以根据局部流态类型（缓流或急流）和相容条件，通过选择外法向特征关系或根据指定的物理边界条件来确定。

缓流边界：

三种可能的边界条件为：

$$1、\text{给定水位过程时: } u_R = u_L + 2\sqrt{g}(\sqrt{h_L} - \sqrt{h_R}) \quad (4-29)$$

2、给定单宽流量 q_R 过程时，可通过联解 $q_R = u_R \cdot h_R$ 和方程 (4-29) 求得 h_R 和 u_R 。

3、给定水位-流量关系时，可根据该关系曲线及方程 (4-29) 求得 h_R 和 u_R 。

上述边界条件中均设定 $v_L = v_R$ 。

急流边界：

急流情况下，上述三种水流边界条件必须设定在计算域的某一边界（例如在一维情况下，这些边界条件只能设在上游）。

(3) 内边界

模型中水利设施处的水流、水质计算仍处于 FVM 框架之下，但是法向通量的计算不能应用黎曼近似解 Osher、FVS 和 FDS，而要采用与水利设施相应的出流公式。其通量公式概括如下：

$$f(\bar{q}) = \begin{bmatrix} Q_m \\ Q_m u_n + \frac{gh^2}{2} \\ Q_m v_r \\ Q_m C_i \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

式中：第一行是水流质量通量（即流量），第二、第三行是水流动量通量，第四行是污染物浓度通量。 C_i 为污染物浓度垂线平均值， Q_m 是水工建筑物出流， h 为水深， u_n 、 v_t 分别为法向及切向流速，满足 $u_n = u \cos \Phi + v \sin \Phi$ 和 $v_t = v \cos \Phi - u \sin \Phi$ ，其中 u 和 v 分别为 x - 和 y -方向的流速分量。具体计算叙述如下：

质量通量：

内边界处的质量通量实质上是通过对单元边为水工建筑物的单宽流量，流量计算公式由水工建筑物类型而定。模型中的水工建筑物主要为：堰、闸、堤、桥、涵。

堰：

$$Q_w = (C1_w \cdot \sqrt{DZ1} \cdot DZ1 + C2_w \cdot \sqrt{DZ2} \cdot DZ2) \cdot L_w \quad (4-31)$$

式中 $C1_w = C_w \cdot C_s \cdot R_w$ ， $C2_w = C_w \cdot C_s (1 - R_w)$ ， C_w 为流量系数，通常与上游水深及堰的高度有关。 C_s 淹没系数，取决于上下游水位差。 R_w 为堰顶缺口长度与堰顶长度之比。 $DZ1$ 是上游水位与堰顶高程之差。 $DZ2$ 上游水位与堰顶缺口高程之差。 L_w 为堰长。

模型中的堰可设定于计算域内部，也可位于计算域边界处。

闸：

$$Q_g = C \cdot N_g \cdot L_g \cdot H_e^{3/2} \quad (4-32)$$

式中 C 为无闸门控制自由出流的流量系数，是 H_e 的函数； H_e 为堰顶总水头， N_g 是总的闸门个数， L_g 是每个闸门的长度。

堤：

当水位低于堤顶高程时，堤防便作为陆地边界。当水位高于堤顶高程时，溢堤流量的公式与堰流公式相似。

动量通量

内边界两个动量分量（即 $f(\bar{q})$ 向量的第二、第三个元素）的计算简化为 (4-29) 式，不使用黎曼近似解。

(4) 动边界--干湿单元的转换

流域中部分地区（如子流域或某个单元）的干湿循环变化，可根据本单元及相邻单元的水力条件来计算。在单元变干的过程中，有水的单元通过流量（即单元边

质量通量)向四周邻近单元传输水量逐步变成半干单元,当单元内水深小于指定的极小阈值后成为完全的干旱单元。反之,在单元变湿的过程中,干旱单元由于周边邻近单元来水流量而逐步变成半干单元,当单元内水深大于另一指定的阈值后成为完全的湿单元。

当某一单元处于完全干旱状态,该单元不参加计算;当单元为半干旱状态,则根据水量平衡及简化的动量平衡方程进行计算;当单元为完全湿单元时,应用完整的黎曼近似解来求解方程组。用以确定单元为完全干旱、或半干旱、或完全湿的标准将在下面讨论。

完全湿单元

当本单元及其相邻单元的水深均大于预定的第二级阈值 HTOL2,则该单元称为湿单元,其水力变量用黎曼近似解 Osher 或 FVS 或 FDS 求解。

完全干单元

当本单元水深小于预定的第一级阈值 HTOL1,且单元所有边界均为陆地边界,则该单元称为完全干单元,不进行任何水力计算。陆地边界处无水流通过。通常,第一级水深阈值 HTOL1 非常小,大约为 0.001 m。

半干半湿单元

当本单元水深大于第一级水深阈值 HTOL1 但小于第二级阈值 HTOL2、或本单元水深小于第一级水深阈值 HTOL1 但单元的边界不全是陆地边界,则该单元称为半干半湿单元。此时,通过单元边的质量通量 Q_m (CQ) 根据水量平衡计算而动量通量按简化公式计算。可能的七类计算公式如下:

- ① 给定单元边流量时, CQ 等于该给定流量
- ② 给定单元边水位时, CQ 根据黎曼不变量公式计算:

$$CQ = F_{LR}(q_L, q_R) = h_R \cdot u_R \quad (4-33)$$

式中, h_R 是给定水深, u_R 是同时求解黎曼不变量公式 $\Psi_L = u_R + 2(gh_R)^{1/2}$ 和

$\Psi_L = u_L + 2(gh_L)^{1/2}$ 所得的流速。在本情况下, $u_L = 0$, 因而,

$u_R = 2\sqrt{g(\sqrt{h_L} - \sqrt{h_R})}$ 。该公式与 Osher 格式一致。

- ③ 给定水位流量关系时, CQ 根据该水位流量关系及单元水深确定。
- ④ 设定一水工建筑物时, CQ 按照相应的建筑物出流公式计算。
- ⑤ 陆地边界时, CQ 为零。

⑥ 内部单元时, CQ 应用相似于堰流的公式计算。

⑦ 当两相邻单元间底高程差大于预定参数 HTOL3 且一单元的底高程高于另一单元的水面时, 从底高程高的单元向低单元流的流量应用相似于临界流的公式计算。

(5) 湿地支流边界

模拟区内的湿地或支流入流可以设置在某一单元边上, 其流量计算为表 4.2 中 $u_L < c_L$ 且 $u_R > c_R$ 及 $c_A < u_A$ 的情况。若单元某边有调水时, 可按负的湿地或支流入流处理。

(6) 水质边界

模型有四类水质边界, 分别为: 1) 开边界: 污染物随着水流进出该边界, 通常, 在入流边界给定污染物浓度过程 $C_i(t)$, 而在出流边界处给以污染物浓度梯度 $d(C_i)/dn$; 2) 点源污染: 诸如工业废水和生活污水, 通常给出污水流量(kg/s)。该项在方程源汇项中计算; 3) 内边界: 当污染物随水流通过水工建筑物时, 相应的污染物浓度利用方程 (4-29) 进行计算; 4) 面污染: 由田间施肥或农药引起的污染, 通常由降雨径流带入河、湖, 其污染物浓度通过方程中各单元与净雨相应的源汇项来计算。

4.2 并行模型研制

4.2.1 串行模型流程

以下为串行模型流程的伪代码:

getEleNodeInfo; //获得单元节点号

getEleArea; //获得单元面积

getBoundType; //获得边界类型

For time := BeginTime To EndTime Do //时间段循环

Begin

GetCalBoundValue; //获得边界值

For I := 1 To NELEM Do //单元数循环

Begin

JudgeElementWetDryType; //判定单元干湿类型

```

For J:=1 To 3 Do //单元边循环
    Begin
        JudgeElementSideType; //判断是否为水工建筑物并计算其通量
        CalFlux; //应用 Osher, FVS, 或 FDS 格式算法向通量
    End;
    CalTimeEndValue; //计算各单元的水力变量及污染物浓度
End;
End;

```

4.2.2 程序运行次序

模型流程图见图 4.5。其运行次序简述如下：

- (1) 主程序先读入单元的各种几何要素，并计算单元的面积及单元边法向向量。
- (2) 模型采用显格式，其水流-水质模拟起始于时间循环运行，每一时间增量即为计算步长。在每一计算步长内，进行逐单元的空间循环运行。
- (3) 对各单元进行单元边的循环，计算通过各边的法向通量，并进而累计算得单元水量、动量、污染物浓度等的总通量。

各单元边法向通量计算时，单元干湿属性取决于本单元及相邻单元的水深，及预先设定的 HTOL1 和 HTOL2 阈值。

当单元边两侧单元的水深均大于 HTOL2 时，处于完全浸水（湿）的状态，主程序调用 WET 子程序。在 WET 子程序中，如该单元边不是水利枢纽，则调用子程序 OSHER 及 RIEMAN 或调用 FVS 也可调用 FDS 子程序。如果单元边为水利枢纽，这就是所谓的内边界，可根据水工建筑物的类型，调用子程序 WEIR、GATE、或 LEVEE 等算法向通量。若单元边位于计算区的周边且为开边界时，则调用 BOUND 子程序，求解边界黎曼问题。

当单元边两侧单元中有一侧的水深小于 HTOL2 时，处于半干半湿状态，主程序调用 WETDRY 子程序，计算过程与上述完全浸水情况相似。如该单元边不是水利枢纽，则应用简化公式计算水量、动量及污染物浓度法向通量。如果单元边为水利枢纽，即内边界，可根据水工建筑物的类型，调用子程序 WEIR、GATE、或 LEVEE 等算法向通量。若单元边位于计算区的周边且为开边界时，则利用 WET 子程序调用 BOUND 子程序，求解边界黎曼问题。

当单元边两侧单元的水深均小于 HTOL1 时, 处于完全干旱状态, 不参加计算。

- (4) 根据步骤 4 算得的总通量, 主程序计算各单元的水力变量(水深、流速)及污染物浓度。
- (5) 重复步骤 4 和 5 直至所有单元均已计算。此时, 单元循环结束。进入下一时段计算。
- (6) 在模拟计算期间, 根据用户设定的打印频率调用 OUTPUT 子程序, 输出计算成果。当各时段循环结束后, 打印出最后结果。

4.2.3 并行可行性分析

在计算每个单元的水力变量及污染物浓度时只需用到与之三条边相邻的单元的水力变量及污染物浓度信息。如果能将相邻单元的信息传给该单元则每个单元就能独立进行计算, 从而达到并行的效果。基于以上思路, 采用 SPMD 并行编程模型, 每个客户端运行相同的水量水质数值模型模拟不同的计算片区, 服务器端负责对计算片区进行划分, 并将划分结果发送给相应的客户端并将每个片区边界单元的信息传递给相邻的片区, 使之每个片区都能单独进行计算, 从而达到并行的效果。

4.2.4 通讯协议

模型并行计算时, 为使计算机之间能够正常通信, 交换计算数据, 特针对该模型制定了以下通讯协议。下为二维水量水质并行模型的主要通讯协议。

表 4.3a 服务器下发片区三角形索引

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
消息头				
23	命令 ID	1	整型	01
24	三角形索引列表		字符串	客户端分别接受该片区所有三角形索引、左边界三角形索引, 右边界三角形索引

表 4.3b 服务器下发片区三角形索引应答

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	81
24	应答类型	1	整型	0 已收到; 1 未收到;

表 4.4a 请求左侧三角形数据(客户端 2->客户端 1)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
------	----	--------	----	----

23	命令 ID	1	整型	4
24	计算时间	17	字符串	

表 4.4b 通信转发 (客户端 1->服务器)将右侧单元信息发给左侧三角形

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	84
24	单元 ID	2	整型	
26	水的密度	4	浮点型	
30	水深	4	浮点型	
34	X 向流速	4	浮点型	
38	Y 向流速	4	浮点型	

表 4.5a 进程迁移命令 (服务器->客户端)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	Int	9

表 4.5b 进程迁移命令应答 (客户端->服务器)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	Int	89

表 4.6a 计算参数下发指令(服务器->客户端)

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明	
消息头					
23	命令 ID	1	整型	10	
24	计算起止时间 及默认时间	年	1	整型	从 2000 年起算 各断面的初始水位
		月	1	整型	
		日	1	整型	
		时	1	整型	
		分	1	整型	
		秒	1	整型	
		年	1	整型	
		月	1	整型	
		日	1	整型	
		时	1	整型	
		分	1	整型	
		秒	1	整型	
		年	1	整型	
		月	1	整型	
		日	1	整型	
		时	1	整型	
		分	1	整型	
		秒	1	整型	
42	是否水质	1	整型	0—否 1—是	
43	是否默认值	1	整型	0—是 1—否	

44	Z	4	浮点型	各断面的初始水位
48	U	4	浮点型	各断面的初始 U
52	V	4	浮点型	各断面的初始 V
56	HTOL1	4	浮点型	第一级水深阈值
60	HTOL2	4	浮点型	第二级水深阈值
64	HTOL3	4	浮点型	第三级水深阈值
68	DTIME	1	整型	秒
69	STIME	1	整型	分钟
70	DTIMES	1	整型	秒
71	EFX	4	浮点型	X 方向粘滞系数
75	EFY	4	浮点型	Y 方向粘滞系数
79	MCS	1	整型	法向通量求解方法 1-Osher 2-FVS 3-FDS
80	THETA	4	浮点型	底高程修正系数
84	RPL	4	浮点型	点污染横向混和系数
88	SFCX	4	浮点型	污染物在 X 方向的扩散系数
92	SFCY	4	浮点型	污染物在 Y 方向的扩散系数
96	LIMITER	1	整型	是否使用二阶限制函数
97	BETA	1	整型	计算精度
98	CDKD	4	浮点型	COD 的降阶系数
102	CDK1N	4	浮点型	NBOD 的降阶系数
106	CDK3N	4	浮点型	NBOD 的沉浮系数
110	CDK1	4	浮点型	CBOD 的降阶系数
114	CDK3	4	浮点型	CBOD 的沉浮系数
118	CDKO	4	浮点型	DO 的大气复氧系数
122	CDKT	4	浮点型	水面综合散热系数

表 4.6b 计算参数下发指令应答（客户端→服务器）

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	70

表 4.7a 时段计算完毕指令（客户端→服务器）

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	11
24	计算时间	17	字符串	

表 4.7b 时段计算完毕指令应答（服务器→客户端）

起始字节	字段	长度(字节)	类型	说明
23	命令 ID	1	整型	71
24	计算时间	17	字符串	

4.2.5 并行求解流程

本模型分为服务器端和客户端两部分。

- (1) 服务器端首先收集参与并行计算的客户端计算机：向各客户端发送指令收集其负载(信息素)。然后根据各客户端当前负载将计算区域的网格按负载平衡策略进行分配。
- (2) 沿河道横向画 $N-1$ 条直线将三角网划分 N 部分 (N 为客户端数)，使得每部分的单元数近似等于按权重计算的单元数。
- (3) 将每部分的单元号、左右边界相邻单元号下发给相应的客户端。
- (4) 在每个计算时段初请求左右边界相邻单元号水力变量及污染物浓度信息。
- (5) 每个客户端进行该部分数值计算，计算流程如图 4 所示。
- (6) 重复步骤 4、5 直到所有计算时段计算完毕。

当计算尚未完毕时，若此时有客户端退出，分配给其的单元尚没有计算，则导致其它单元也无法获得其信息，从而不能计算下去。模型此时将由服务器向连接的各客户端发送本时段重新计算指令，客户端收到后立即停止当前计算，并等待重新接收计算网格信息。

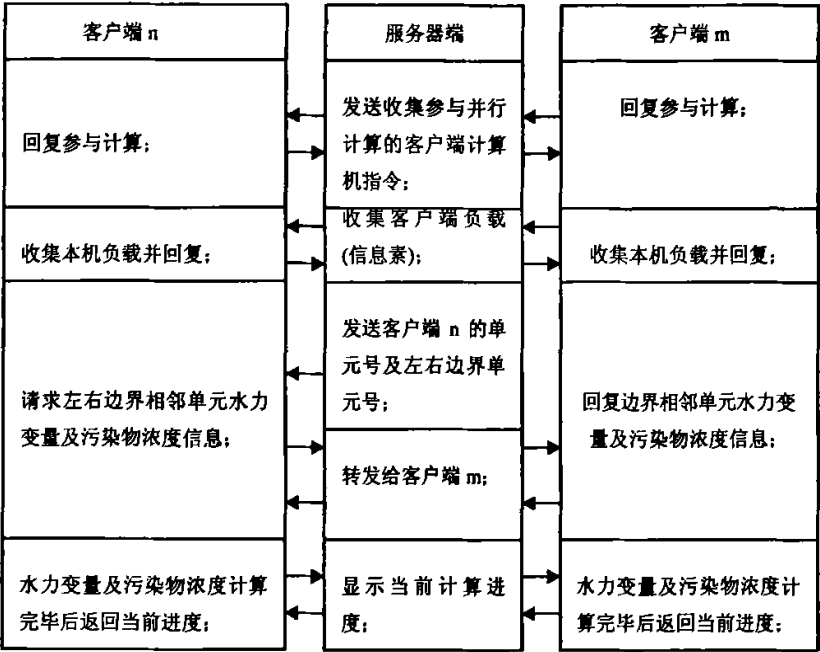


图 4.2 并行流程图

4.3 算例—镇江内江水流数值模拟研究

4.3.1 研究背景

镇江城市最大的水体是内江。内江处于城市主要河流古运河的上游，为古运河提供源水。同时，内江又是运粮河、虹桥港、试办引河的受纳水体，其水质变化与这几条入内江河流有紧密的关系。内江水环境的好坏，不但在一定程度上决定了古运河的水环境质量，同时也取决于运粮河等入内江河道的污染控制工程。只有内江的水环境质量得到明显得改善，镇江整个城市的水环境质量才能得到提高，因此，镇江城市水环境的核心问题是内江的问题。

内江长期以来作为镇江港的港池进行使用，为了解决航道淤积问题，曾于 50 年代开通了试办引河，但是这一工程并没有解决航道淤积的问题。1987 年开通了引航道，通过引航道和长江连通，在一段时间内保证了船舶的航行。80 年代开始，由于经济的发展，内江沿岸工业企业增加，加上港口码头的污染排放，内江的水质恶化加剧。近几年，根据城市规划的要求，许多污染企业搬迁出内江境内，另外由于内江淤积严重，镇江港已逐渐迁往长江，内江本身的污染在一定的



图 4.3 研究区域图

数值模拟为例，对模型加以验证。

程度上得到了一定的缓解。但是，内江的水质情况并没有得到根本的改善，目前在丰水期内江的水质基本上是 IV 类水，而枯水期为 V 类水，有时甚至达到劣 V 类的污染水平，水质恶化严重。

由于资料收集所限，本章以水动力

4.3.2 监测断面及监测点布设

垂直在引航道上、下断面、运粮河、焦南闸分别设立了 4 处观测断面，每个断面设 3 条垂线，此外，在内江水域布设 7 条测验垂线，具体水文、水质、泥沙监测断面及监测点布设如图 4.4 所示。

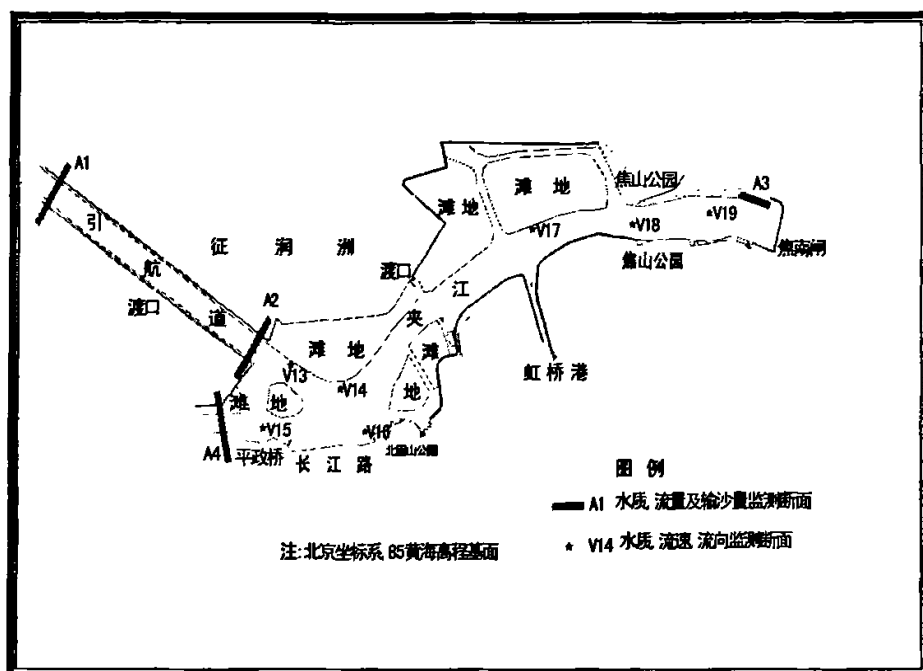


图 4.4 镇江内江段水环境质量监测采样断面(点)分布

4.3.3 模型率定与验证

模型按照确定的三个口门(引航道断面、运粮河断面及焦南闸断面)边界条件进行控制,模拟洪季大潮,观测全潮潮位过程与实测资料进行对比,并通过调整边界使模型中的潮位过程与原型相接近。

由于只有 28 小时的水位资料,故将前 14 个小时水位资料用来率定,后 14 个小时作为验证。结果如图 4.5,图 4.6 所示。

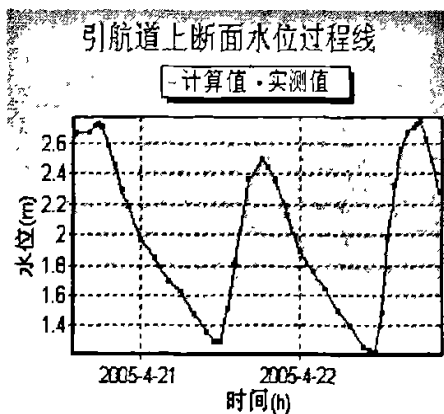


图 4.5 引航道上断面水位过程线

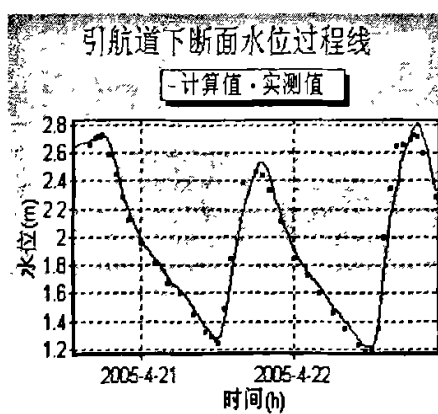


图 4.6 引航道下断面水位过程线

表 4-8 4 月水位验证结果

时间	引航道上断面			引航道下断面		
	原型	模型	差值	原型	模型	差值
2004-4-21 8:00	2.67	2.69	-0.02	2.66	2.68	-0.02
2004-4-21 9:00	2.71	2.74	-0.03	2.73	2.73	0.00
2004-4-21 10:00	2.46	2.49	-0.03	2.45	2.52	-0.07
2004-4-21 11:00	2.19	2.17	0.02	2.12	2.20	-0.08
2004-4-21 12:00	1.97	1.94	0.03	1.96	1.99	-0.03
2004-4-21 13:00	1.85	1.88	-0.03	1.82	1.85	0.03
2004-4-21 14:00	1.70	1.73	-0.03	1.68	1.72	-0.04
2004-4-21 15:00	1.63	1.61	0.02	1.60	1.63	-0.03
2004-4-21 16:00	1.48	1.47	0.01	1.45	1.50	-0.05
2004-4-21 17:00	1.36	1.31	0.05	1.33	1.37	-0.04
2004-4-21 18:00	1.30	1.26	0.04	1.25	1.28	-0.03
2004-4-21 19:00	1.82	1.8	-0.02	1.85	1.68	0.17
2004-4-21 20:00	2.37	2.4	-0.03	2.39	2.19	0.2
2004-4-21 21:00	2.50	2.53	-0.03	2.46	2.46	0.00
2004-4-21 22:00	2.37	2.39	-0.02	2.33	2.46	-0.13
2004-4-21 23:00	2.13	2.17	-0.04	2.11	2.16	-0.05
2004-4-22 0:00	1.89	1.9	-0.01	1.85	1.92	-0.07
2004-4-22 1:00	1.76	1.79	-0.03	1.73	1.76	-0.03
2004-4-22 2:00	1.64	1.67	-0.03	1.60	1.65	-0.05
2004-4-22 3:00	1.50	1.6	-0.1	1.47	1.51	-0.04
2004-4-22 4:00	1.40	1.47	-0.07	1.35	1.40	-0.05
2004-4-22 5:00	1.26	1.29	-0.03	1.24	1.28	-0.04
2004-4-22 6:00	1.23	1.24	-0.01	1.20	1.22	-0.02
2004-4-22 7:00	1.99	1.98	0.01	2.00	1.76	0.24
2004-4-22 8:00	2.57	2.54	0.03	2.65	2.35	0.3
2004-4-22 9:00	2.71	2.67	0.04	2.69	2.70	-0.01
2004-4-22 10:00	2.63	2.58	0.05	2.60	2.73	-0.13
2004-4-22 11:00	2.28	2.22	0.06	2.29	2.33	-0.04

糙率系数 n 根据地形取为 0.02~0.08, 其中深泓区为 0.025, 浅滩区由于有水生植物的滞流作用, 糙率取为 0.08; 紊动粘性系数取为 $0.2\text{m}^2/\text{s}$, 风拖曳系数取为 $C_D = 1.0 \times 10^{-3}$ 。

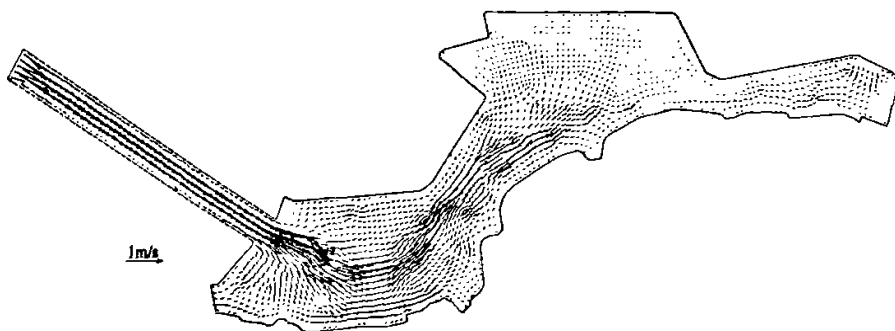


图 4.7 涨急流场图

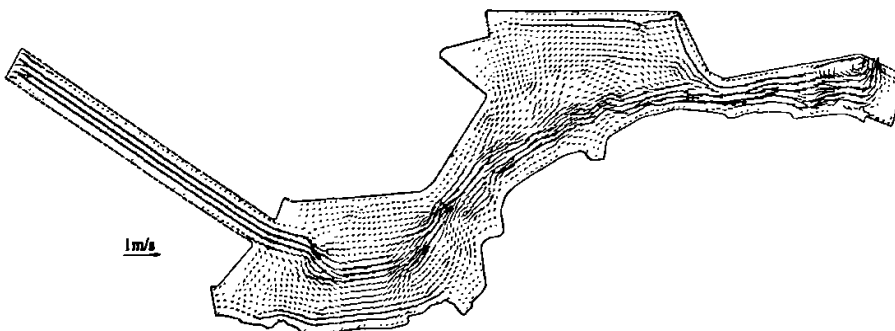


图 4.8 落急流场图

位于中泓的主流区流速较大，浅滩区由于植物的阻流作用，流速较小；涨潮时，水由引航道和焦南闸流入内江，落潮时，水由引航道流入内江后经焦南闸流出。涨急时引航道流速均达到了 0.65m/s 左右，引航道出口至虹桥港段的主流流速为 0.35m/s - 0.55m/s ，滩地流速为 0.2m/s 左右，焦南闸断面进水流速较小；落急时，两种模型得出的引航道至焦南闸的主流区流速为 0.3m/s - 0.45m/s ，滩地流速为 0.4m/s 左右。

由此可见，建立的内江水流数学模型较好地反映了内江水流运动特性，可应用于内江的水流模拟，同时也为内江的泥沙及污染物质输运模拟奠定了较好的基础。

4.3.4 并行效率验证

图 4.9 为有限体积网格模型，模型单元数目达到了近万个(8787)，为了进行并行计算，系统采用蚂蚁算法自动对计算区域进行剖分，剖分的子区域数为 2~4。计算时间段为 2005-4-21 7:00:00 至 2005-4-22 11:00:00，时间步长为 1s。表 4-9 是 1~4 个子区域时，在不同台数的计算机上进行计算所消耗的时间。并在此基础上

上计算出加速比和并行效率。

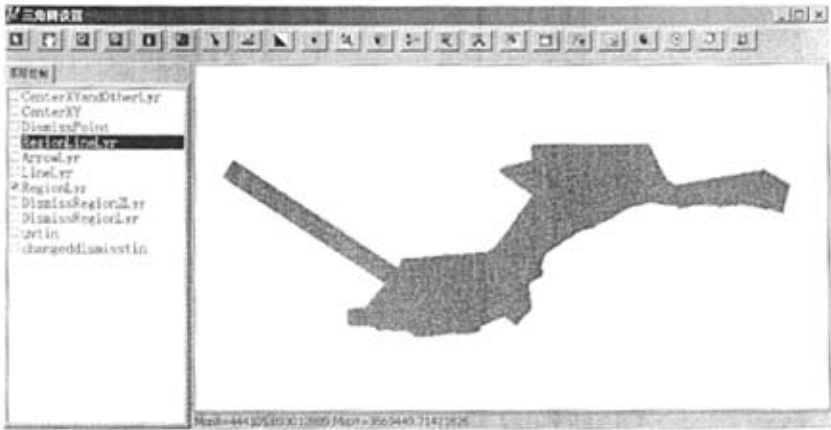


图 4.9 计算区域网格模型

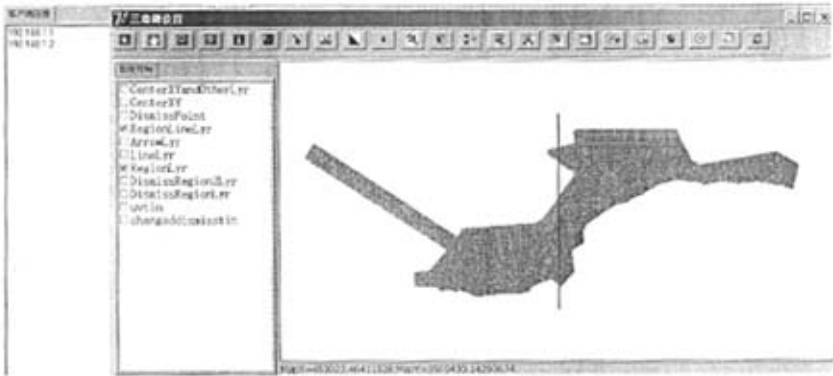


图 4.10 划分两个区域的网格剖分图

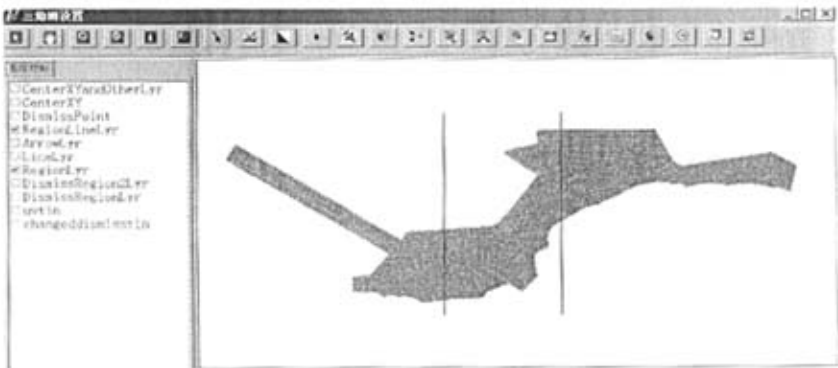


图 4.11 划分三个区域的网格

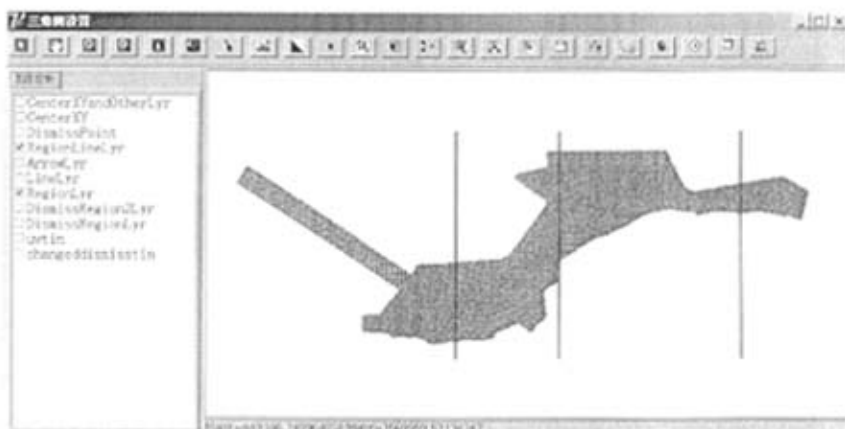


图 4.12 划分四个区域的网格剖分

表 4-9 计算耗时表

计算机台数	计算所需时间(s)
1	9962
2	5778
3	3386
4	6343

模型所花费的时间由模型计算所需的时间和通信开销的时间组成。当每增加一台计算机分担的单元数计算所节省的时间大于通信开销的时间，则能提高计算的速度；反之，则会延缓计算的速度。如上所示，对于单元数目8787的有限体积模型，当计算机台数由1增加到3，随着计算机台数增加，计算时间成比例减少。一台Celon2.8GHz计算机求解所需时间为9962秒，而3台相同配置计算机所需时间仅为3386秒，相应加速比为2.94，并行效率达到了73.5%。而当计算机台数增加为4时，计算时间反而增大了，说明此时增加的一台计算机分担的单元数计算所节省的时间小于通信开销的时间，因此，在8787个单元数的有限体积模型计算时，3台计算机并行计算能取得最优效果。

4.4 小结

本章构建的基于蚂蚁算法的二维并行水量水质模型应用于镇江内江水流数值模拟，并加以验证。主要工作如下：

- (1) 采用有限体积显式求解潜水方程，分析其求解流程提取并行成分，采用任务

SPMD 型并行编程模型, 将求解区域网格分成若干部分, 对每部分进行单独求解。

- (2) 在求解单元通量时需要用到相邻单元的属性信息, 而边界单元上其相邻单元有可能不在该区域内, 则需要将其数据传递过来, 由此制定了针对二维水量水质模型的通讯协议, 根据机群负载均衡的调度方案, 将网格按权重分配到各客户端进行单元通量求解。
- (3) 当前主流并行平台 MPI, PVM 尚未实现进程迁移功能, 当进行并行计算时, 网络中某客户端由于突发情况 (死机, 非正常情况关机), 异常退出计算将导致脏数据的产生; 本模型实现了进程迁移, 实时将未完成计算的网格转移到其它客户端继续计算, 保证了数据的正确性。
- (4) 模型为水平二维水流-水质数值计算模型, 适用于浅水水体的水流及水质模拟。模型应用守恒的二维非恒定流浅水方程组描述水流流动, 并用二维对流-扩散方程描述污染物的输运扩散。应用有限体积法及黎曼近似解对耦合方程组进行数值求解, 从而模拟出水体的水流过程和相应的污染物输运扩散过程。为此, 首先根据计算区域的天然地形并考虑已建或拟建水工建筑物及排污口的位置, 用无结构网格 (或结构网格) 使计算区域离散化。然后逐时段地用有限体积法对每一单元建立水量、动量和浓度平衡, 确保其守恒性, 用黎曼近似解计算跨单元的水量、动量和浓度的法向数值通量, 保证计算精度。模型设有 Osher、通量向量分裂 (FVS) 和通量差分裂 (FDS) 三种可选择的黎曼近似解。模型通过有限体积法的积分离散并利用通量的坐标旋转不变性把二维问题转化为一系列局部的一维问题进行解算。其无结构网格可由四边形、三角形、或两者的混合组成。

第五章 结语与展望

5.1 结语

河流水污染问题是由于人们对环境意识的增强和经济发展的要求而提出来的,它属于环境水力学的范畴。从1925年Streeter和Phelps在Ohio河上建立第一个河流污染水质模型以来,水环境数学模型的发展和求解是一个描述水环境的状态参数和空间维数不断增加、求解技术不断进步、涉及内容越来越广泛复杂、计算耗时越来越多的过程。为了提高计算的速度,一方面是从模型求解本身入手,从改进差分计算的格式、方程组非零元素的高效存储,以及数值求解算法等方面进行改进。另一方面,是探讨并行计算的可能性,将原来在一台计算机上计算的任务通过合理任务调度分配到多台计算机上协同计算,从而来提高模型计算的速度。

本文在总结前人研究成果的基础上,结合环境水力学,人工智能,计算机通信及GIS等学科,采用蚁群算法建立了自行维护的机群调度系统;对基于FDM和FVM的一维和二维水量水质模型分别就显式及隐式求解方式进行了并行求解方式的探讨,并成功开发了一、二维并行水量水质数值模拟模块;通过对当前已建成的水环境信息系统的功能进行分析、比较和归纳、对业务需求进行抽象概括,找出其功能上的共性,采用经纬式系统结构设计方法及COM技术,开发了基于ESRI公司的ArcEngine控件为基础的水环境分析系统;论文主要的研究内容如下:

- (1) 国外的水质模型已由纯粹的水质模型向基于GIS的水质模型系统转变;但大多是基于ArcView GIS平台,由于ArcView的空间分析能力与ArcEngine有较大差距,本文将人工智能的主要技术、在ArcEngine GIS的环境下、通过水量水质模型数值模拟方法,整合了一个完整的时空分析架构。
- (2) 商业并行编程平台PVM动态任务分配算法简单,没有考虑各处理机的性能和CPU负载情况,不能自动完成负载平衡。基于PVM以上缺点,本文采用基于蚂蚁算法的智能算法对系统进行任务分配,提供动态负载平衡机制。
- (3) 自主开发了并行模型计算平台,以用户为中心,自行维护的平行平台。它是灵活的根据用户的意愿,随用随建,用毕撤销的虚拟动态机群,也没有多用

户同时提交任务带来的竞争问题,系统崩溃可以方便的重建。平台采用 CS 方式,服务器端对网络环境进行监控和控制,为模型计算提供数据交换及进程迁移等功能。

- (4) 隐格式具有良好的稳定性,通常用于求解稀疏矩阵,但其并行求解比较困难,从原理上分析,可归结为对稀疏矩阵求解的并行算法。本文分析 Preissmann 四点隐格式的串行隐式求解算法流程,通过矩阵标识法存储节点水位方程组系数,采用任务主从型并行编程模型,将求解节点水位方程组系数进行并行求解。
- (5) 针对一维水量水质模型输入输出需求,开发了河道概化模块,能动态的对河道进行增减,自动对河道及断面进行编码,并应用于上海浦东新区调水改善水环境项目。模型采用面向对象的设计方法,河道及水闸等水工建筑物均为一个对象,通过 GIS 对其进行属性设置,保证了模型与 GIS 的无缝结合。最后,以网页的形式将实测数据和模型计算的成果动态生成水环境质量通报,向社会发布。
- (6) 用显格式求解二维浅水方程时,由于同一时刻各计算内点互不干涉,可以采用粗粒度任务级并行,将计算区域直接划分,映射到各处理器上,保证负载平衡,相对计算量而言,各进程间通信只发生在其相邻边界上,并行效率高,并且串、并行计算过程一致。对于非结构网格,重点解决进程间负载平衡问题,采用网格自动剖分技术,减少边界通信量。求解单元通量时需要用到相邻单元的通量值,而由于边界单元上其相邻单元有可能不在该区域内,则需要将其数据传递过来,根据机群负载平衡的调度方案,制定了针对二维水量水质模型的通讯协议,将网格按权重分配到各客户端进行单元通量求解。
- (7) 二维模型应用于镇江内江水流模拟,针对二维水量水质模型输入输出需求,系统开发了 Tin 三角网生成模块,由实测点的地理坐标根据 Delaunay 方法实时生成三角网,通过边界处理模块对边界类型进行设置。模型计算完毕后,通过流场图和 DEM 等方式对计算成果进行可视化表达。
- (8) 当前主流并行平台 MPI, PVM 尚未实现进程迁移功能,当进行并行计算时,网络中某客户端由于突发情况(死机,非正常情况关机),异常退出计算将导致脏数据的产生;本模型实现了进程迁移,实时将未完成计算的任务转移

到其它客户端继续计算。

- (9) 对一、二维分别进行并行数值模拟, 结果表明当河道(网格)数一定时, 存在一最优客户端数, 当客户端数小于最优客户端数时, 并行算法所需时间小于串行算法时间, 并随着客户端数增加, 所需时间也逐渐减少; 反之, 所需时间则逐渐增大;

5.2 主要创新点

- (1) 分别对一、二维水量水质模型显、隐式求解方式进行并行化改造; 自主开发了与模型配套的并行通信平台, 并制定了相关通讯协议。并行模型采用 CS (Client-Server) 结构, 服务器端对计算区域的划分采用蚂蚁智能算法对机群中的作业进行智能调度; 并能实时监测网络状况, 对已分配任务计算机网络突然中断, 能迅速将所分配的任务转移到其它空闲计算机上, 实现进程迁移功能; 将并行模型与 ArcGIS 进行无缝集成, 开发了水环境并行数值模拟系统。
- (2) 一维水动力模型采用 Preissmann 四点隐格式求解圣维南方程组, 针对每个时刻需要求解节点水位方程组来求出节点水位, 进而推求节点流量的特点。采用任务主从型并行编程模型, 将迭代求解节点水位方程组系数进行并行求解, 服务器端将河道分成若干部分, 发往各客户端, 客户端求解完毕后将结果返回服务器端, 服务器端再进行下一时段的计算。
- (3) 二维水动力模型采用有限体积显式求解浅水方程, 求解每个单元水位、流量等信息时需要用到相邻单元的水位、流量的数据, 显式求解方式是采用上一个时刻相邻单元的水位、流量值来求解本时刻单元的水位和流量, 这样就避免了求解方程组。针对显示求解的特点, 采用任务 SPMD 型并行编程模型, 将求解区域网格分成若干部分, 对每部分进行单独求解。服务器端负责将每部分边界单元的数据在相应客户端进行交换, 客户端接收到数据后进行本区域本时段的计算并且在每个时段末, 交换一次边界上的计算数据直至计算完毕。

5.3 认识与展望

论文完成的过程中, 虽然对河网地区水量水质模拟计算、Fortran 等编程语

言、以及 GIS 知识有了进一步的理解，但在写作论文的过程中，我认为有一些方面还需要进一步完善：

(1) 针对河网非恒定流水力、水质数值模拟问题不断追寻更精确更高效的数值计算方法。在单元网格上划分时，由于河床和水流的变化，可根据具体情况确定网格的间距和形状对网格的优化确定进行研究。

(2) 本文开发的并行通讯平台在客户端增加时通讯开销较大，今后可考虑对不同网络拓扑规则进行优化，进一步提高通信效率。

(3) 从理论上探讨最优客户端数确定的规律，以便于在模型计算时能获得最短的计算时间。

(4) 基于 Web GIS 的系统具有投资小，发布速度快、范围广、维护方便，数据来源广、分布存储，远程操作，较好安全性，直观、简单的优点。而水环境分析系统具有海量信息、决策的群体性、交互性、分布性的特征。随着 Internet/Intranet 技术和 GIS 技术的发展与应用的普及，为了更好地支持指挥决策，开展基于 Web GIS 技术的水环境分析系统研究将是未来研究主要方向之一。

参考文献

- [1]. 刘金水, 并行处理机技术及其挑战, 中国计算机用户, 1991(10): 2~5
- [2]. 周毓麟, 沈隆钧, 高性能计算的应用及战略地位, 中国科学院院刊, 1999(3): 184~187
- [3]. 陈国良, 并行计算—结构、算法、编程, 北京: 高等教育出版社, 2001: 3
- [4]. Leler W. Linda Meets Unix. Computer, 1990, 23(2): 43~54
- [5]. Linda User Guide, 2005, 9: 1~3
- [6]. 罗麟. 基于 PC 的廉价并行计算解决方案及一种非线性优化算法的并行化实现, 四川大学高速水力学国家重点实验室, 中国科技论文在线
- [7]. 张晓军、杨灿群、黄春, JAVA MPI 的实现, 微型机与应用, 2000, 3
- [8]. HwangK, XuZ, Scalable Parallel Computing: Technology, Architecture, Programming, WCB/Mc Graw-Hill, 1998: 16~27
- [9]. 陈国良, 遗传算法及其应用, 北京: 人民邮电出版社, 1996: 6: 138
- [10]. Trew A, Wilson G. A Survey of the Available Parallel Computer System[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [11]. Kumar V, Gupta A et al. Introduction to Parallel Computing: Design and Analysis of Algorithms[M]. Redwood city, CA: Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1994.
- [12]. 康立山, 陈毓屏. 并行算法简介[J]. 数值计算与计算机应用, 1988, 9(3): 169~177.
- [13]. 镇方雄. PC 集群的建立和 MPI 并行环境的实现与编程[J]. 咸宁学院学报, 2004, 6.
- [14]. 胡峰, 胡保生. 并行计算技术与并行算法综述[J]. 电脑与信息技术, 1999, 5.
- [15]. Anonymous, Message Passing Interface Forum. MPI: A Message-Passing Interface standard. The International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing, 1994, 8: 159~161.
- [16]. Gropp, William, Ewing Luck, and Anthony Skjellum. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.
- [17]. <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/> (MPI Forum).
- [18]. 安竹林, MPICH 并行程序设计环境简介[J], 合肥工业大学计算机与信息学院可视化与协同计算研究室.
- [19]. Message Passing Interface Forum. MPI: A message-passing interface standard. International Journal of Supercomputing Applications, 8(3/4), 1994.
- [20]. The MPI Forum. MPI: A message passing interface. In Proceedings of Supercomputing '93, pages 878–883, Los Alamitos, California, November 1993. IEEE computer Society Press.
- [21]. William Gropp, Ewing Lusk, and Anthony Skjellum. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface. MIT Press, 1994.
- [22]. William Gropp, Ewing Lusk, Dynamic Process Management in an MPI Setting. Mathematics and Computer Science Division Argonne National Laboratory.
- [23]. William L. George, John G. Hagedorn, Judith E. Devaney, Parallel Programming with Interoperable MPI, 1, 2005
- [24]. William George, John Hagedorn, and Judith Devaney. IMPI: Making MPI interoperable. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 105(3), 2000. May-June issue. Article includes the entire IMPI specification as an appendix. <http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/jres.htm>.
- [25]. Jeffrey M. Squyres, Andrew Lumsdaine, William L. George, John G. Hagedorn, and Judith E.

- Devaney. The interoperable message passing interface (IMPI) extensions to LAM/MPI. In Proceedings, MPIDC'2000, March 2000.
- [26].PVM[EB/OL]. <http://www.csm.ornl.gov/pvm/>
- [27].Al Geist, Adam Beguelin, Jack Dongarra, Weicheng Jiang, Robert Manchek, and Vaidy Sunderam. PVM: Parallel Virtual Machine: A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing. MIT Press, Cambridge, MA, 1994.
- [28].赵晨, 李仕锋, 许小刚, 王萃寒. 网络环境中 MPI 和 PVM 的分析与比较[J]. 计算机工程与应用. 2003, 3.
- [29].Matsuura H, T subone H, Kanezash iM. Sequencing,dispatching and switching in dynamic manufacturing environment [J]. Int J of P rod Res, 1993, 31 (7) : 1671~1688.
- [30].Kwok, Y.K., Ahmad, I. Dynamic critical-path scheduling: an effective technique for allocating task graphs to multiprocessors. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1996,7(5):506~521.
- [31].Zhang, Hong-li, Hu, Ming-zeng, Fang, Bin-xing, et al. A sub-optimal algorithm on allocating a single task cluster on NOWs. Journal of Computer Research and Development, 1999,36(9):1076~1079 (in Chinese) .
- [32].Darbha, S., Agrawal, D.P. Optimal scheduling algorithm for distributed-memory machines. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1998,9(1):87~95.
- [33].Jack son J R. Simulat ion research on job shop production [J]. Naval Res LogQuart, 1957, 4 (3) : 287~295.
- [34].Garey, M. R. and Johnson, D. S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York: W. H. Freeman, 1983.
- [35].Sim S K, Yeo K T , L eeW H. An expert neural network system for dynamic job shop scheduling[J]. Int Jof Prod Res, 1994, 32 (8) : 1759~1773.
- [36].Lee C Y, Piramuthu S, T sai Y K. Job shop scheduling with a genetic algorithm and machine learning[J].Int J of Prod Res, 1997, 35 (4) : 1171~1191.
- [37].Dorigo M, Maniezzo V , Colomi A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Transactions on Systems ,Man and Cybernetics , part B , 1996 , 26(1) : 29~41.
- [38].许智宏, 孙济洲. 基于蚂蚁算法的网格计算任务调度方法设计 [J]. 天津大学学报. 2004, 5.
- [39].Chaver D, Prieto M, Piñuel L, et al. Parallel Wavelet Transform for Large Scale Image Processing. International Parallel and Distributed Processing Symposium (Symposium Volume), Fort Lauderdale, California, 2002~04.
- [40].刘志雄, 王少梅. 基于粒子群算法的并行多机调度问题研究[J]. 计算机集成制造系统. 2006, 2.
- [41].吕唤春. 千岛湖流域农业非点源污染及其生态效应的研究[D], 浙江大学博士学位论文, 2002.
- [42].Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual December, 2005.
- [43].Young R A ,Onstad C A , Bosch D D. et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. J. Soil and Water Cons, 1989, 44 (2) : 168~173.
- [44].Yu Sujun. Generation of the Data Required by AGNPS[J]. J. Southwest Jiao tong University, 2003, 11 (1) : 53~57.

- [45].张宏华,李蜀庆,杜军,李劲松.农业面源污染模型 AGNPS 的应用现状及在我国应用的展望[J].重庆环境科学.2003,12.
- [46].I.S. Burns, S. Scott, L. Levick, M. Hernandez, and D.C. Goodrich, Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual, 2004, 11.
- [47].Huggins L F, E J Monke. The mathematical solution of the hydrology of small watersheds[R]. Technical Report No.1, West Lafayette: Water Resources Research Center, Purdue University, 1996.130.
- [48].Dillaha T A , Mary L W , A Shirmohammadi, et al. Florida: A SAFE ANSWERS- 2000[A]. International SAFE Meeting. in Orlando [C]. FL as Paper No. 1998, 2198~2199.
- [49].Montas H J , C A Madramootoo. Using the ANSWERS model to predict runoff and soil loss in southwestern Quebec[J]. Trans. A SAE, 1991, 34 (4): 1754~1762.
- [50].Green W H, Ampt G. Studies of soil physics, part I: the flow of air and water through soils[J]. J. Agri. Sci. 1991, 4: 1~24.
- [51].张玉斌,郑粉莉. ANSWERS 模型及其应用[J]. 水土保持研究. 2004, 12.
- [52].Smith, R.E., D.C. Goodrich, D.A. Woolhiser, and C.L. Unkrich. 1995. A Kinematic Runoff and Erosion Model. In V.J. Singh, ed., Computer Models of Watershed Hydrology, pp. 697-732, Water Resources Publication, Highlands Ranch, CO.
- [53].Smith, R.E., and J.Y. Parlange. 1978. A parameter efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research 14:553~538.
- [54].Engelund, F., and E. Hansen. 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen.
- [55].Kalin, L., and M. M. Hantush. 2003. Modeling of sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS-2. In J. D. Williams and D. W. Koplin, eds., American Water Resources Association 2003 Spring Specialty Conference on Agricultural Hydrology and Water Quality, Kansas City, MO. CD-ROM.
- [56].朱琰.太湖流域实时洪水预报调度系统研究[D].河海大学博士学位论文.2004,4:4~6.
- [57].朱琰.平原河网区域来水组成原理[J].水文.2003,2.
- [58].朱琰.线性扰动模型在洪水随机模拟中的应用[J].河海大学学报.1994,1.
- [59].程文辉;王船海.用正交曲线网格及“冻结”法计算河道流速场[J].水利学报.1988,6
- [60].王船海.河道二维非恒定流场计算方法研究[J].水利学报.1991,1.
- [61].周毓麟.一维非定常流体力学[M].北京:科学出版社,1998.
- [62].Thompson Joe F, Warsi Z U A , C Wayne Mastin. Numerical grid generation : foundations and applications[M] . New York :North-Holland , 1985.
- [63].何子干;孙传红.从区域分裂论三维问题的分层算法[J].水动力学研究与进展(A辑),1994,9 (5):507~514.
- [64].韩国其,汪德燿,许协庆.天然水流三维数值模拟的进展[J].河海大学科技情报,1989,9 (1): 13~22.
- [65].韩国其,汪德燿.宽浅型明渠非定常流的数值模拟[J].河海大学学报,1990,18 (3):40~46.
- [66].白玉川.海岸三维潮流数学模型的研究及应用[J].海洋学报,1998,20 (6):87~100.
- [67].董文军;李世森;白玉川.三维潮流和潮流输沙问题的一种混合数值模拟及其应用[J].海洋学报,1999,21 (2):108~114.
- [68].谭维炎.计算浅水动力学[M].北京:清华大学出版社,1998.

- [69].金忠青.N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社,1989:92~97,179~248,57~63.
- [70].陶文铨.数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.
- [71].TAN Wei-yan. Shallow-Water Hydrodynamics [M]. Water & Power Press (Beijing, China) and Elsevier (Amsterdam) , 1992.
- [72].董壮. 三维水流数值模拟研究进展[J]. 水利水运工程学报. 2002, 9.
- [73].王晓建,张廷芳. 非正交网格有限体积法在三维潮流场计算中的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑). 1997, 12(1):56~61.
- [74].Alberto Carpinteri , Giuseppe Ferro , Giulio Ventura. An Augement Lagrangian Elment-free (AL EF)Approach for Crack Discontinuities[J].Comput.Methods Appl. Mech. Engrg ,2001,191:941 ~ 957.
- [75].Karutz H , Chudoba R , Kratzig WB. Automatic Adaptive Generation of a Coupled Finite Element/ Element-free Galerkin Discretization[J].Finite Elements in Analysis and Design ,2002,38:1075 ~ 1091.
- [76].Stephen Kirkup.BEM for Laplace Problems.www.boundary-element-method.2004.
- [77].江春波,张黎明,陈立秋. 长江涪陵段污染物混合区并行数值模拟[J]. 水力发电学报. 2005, 6.
- [78].Kashiyama K,Saitoh K,Behr M,et al . Parallel finite element methods for large scale computation of storm surges and tidal flows[J] ,Int J for Numerical Methods in Fluids ,1997 ,(24) :1371 ~ 1389.
- [79].ZHANG Qinghai J IANG Chunbo. Implicit parallel FEM computation of shallow water equations [J] , International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics ,October 17 ~ 20 ,2000 Beijing ,422 ~ 428.
- [80].江春波,安晓谔,张庆海. 二维浅水流动的有限元并行数值模拟[J]. 水利学报. 2002, (5) :65~68.
- [81].王文治. 对流扩散方程修正的交替分组四点方法[J]. 高等学校计算数学学报 [J]. 2005, 3.
- [82].Evans D J,Abdullah A R B.A new explicit method for the diffusion-convection equation.Comp.Math.Appl.1985,11:145-154.
- [83].Yuan G W,Shen L J,Zhou Y L.Unconditional stability of alternating difference schemes with intrinsic parallelism for two-dimensional parabolic systems.Number Methods Partial Differential Equations,1999,15:625~636.
- [84].Lu J F,Zhang B L,Zuo F L.Modified AGE method for the convection-diffusion equation.Commun.Numer.METHODS Engin.1998,14:65~75
- [85].Evans D J,Abdullah A R B.Group explicit methods for parabolic equations.Internat.J.Comput,Math.1983,14:73~105.
- [86].余欣,杨明,王敏,姜恺,袁俊. 基于 MPI 的黄河下游二维水沙数学模型并行计算研究[J]. 人民黄河. 2005, 3.
- [87].GUY LONSDALE , ANTON SCHBLER. Multigrid efficiency for complex flow simulations on distributed memory machines[J],parallel computing 19(1993) :23 - 32.
- [88].BASU J . A parallel algorithmfor spectral solution of the three2dimensional Navier-Stokes Equations[J], Parallel Computing 1994 (20) :1191~204.
- [89].TWAMIYA T , FUKUDA M, NAKAMURA T , YOSHIDA M. On the numerical wind tunnel (NWT) program[M]. Parallel Computational Fluid Dynamics :New Trends and

- Advances , 1995 Elsevier Science B. V.
- [90].STAGGA K, CLINE D D ,CAREY G Y,SHADID J N. Parallel scalable parabolized Navier-stokes solver for large scale simulations[J], AIAA Journal , 1995 ,33(1).
 - [91].LANTERI S. Parallel solutions of compressible flow using overlapping and Non-overlapping mesh partitioning strategies[J], Paralle Computing 1996(22) : 943~968.
 - [92].Hughes T J R, Levit J, Winget J. Element-by-element implicit algorithms for heat conduction[J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1983,109(2):576~585.
 - [93].King R B, Sonnad V. Implementation of an element-by-element solution algorithm for the finite element method on a coarse-grained parallel computer[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1987,65(1):47~59.
 - [94].刘耀儒. 三维有限元并行计算及其在水利工程中的应用[D]. 清华大学博士学位论文, 2003.
 - [95].M.M Theimer,K A Lantz and D R Cheriton,Preemptable Remote Execution Facilities for V-System,10th Symposium on OS ACM,1985.
 - [96].P Krueger, R Chawla,The Stealth Distributed Scheduler, 11th ICDCS,1991.5.
 - [97].Platform Computing Inc, LSF Administrator's Guide, Third Edition,1996.2.
 - [98].Condor Version 6.1.17 Manual,2001,2.
 - [99].Ferrari D,Zhou S.A load index for dynamic load balancing.1986 Fall Joint Computer Conference,Nov.1986.
 - [100].Bonomi F,Fleming P J,Steinberg P.An adaptive join-the-biased-queue rule for load sharing on distributed compute system.28th Conferece On Decision and Control,Dec.1989.
 - [101].Mehra P,Wah B W,Automatic learning of workload measures for load balancing on a distributed system.Int'l Conf,on Parallel Processing,1993.
 - [102].Kunz T.The influence of different workload description on a heuristic load balancing scheme.IEEE Transaction On Software Engineering,July 1991,17(7).
 - [103].鞠八滨.使用资源利用率作为负载平衡系统的负载指标[J],软件学报.1996.4.
 - [104].胡凯. 网络并行计算系统体系结构及任务调度研究[D].北京航空航天大学博士学位论文.2001,4:67-74.
 - [105]. 骆志刚, 刘锦德.基于交易服务的一个动态负载平衡模型[J].小型微型计算机系统.2001,5.
 - [106]. Zhang X, Yan Y. Modeling and characterizing parallel computing performance on heterogeneous NOW (C).Proceedings of the seventh IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing. Oct.1995.25~24.
 - [107]. Dorigo M, Gambardella L M,Ant colony system:a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J].IEEE Trans on Evolutionary Computing,1997,1(1):53~56.
 - [108]. 李光炽、王船海,大型河网水流模拟的矩阵标识法[J],河海大学学报(自然科学版), 1995, 23 (1) :36~43.
 - [109]. 李庆杨、王能超、易大义,数值分析[M],北京:清华大学出版社、施普林格出版社, 2001:240~242.
 - [110]. 王船海,李光炽. 实用河网水流计算[M].河海大学出版社, 2002.

致 谢

本文是在导师崔广柏的悉心指导下进行的，从选题到最终完成倾注了导师大量的智慧和心血。在这三年的学习中，无论是在学习还是在做人做事方式上老师都给予我无私的指导和帮助。他严谨的治学态度，认真的工作作风，无私的奉献精神，丰富的专业知识深深的影响着我，是我终生的学习目标。值此论文完成之际，对恩师的谆谆教诲致以最真诚的感谢，并祝愿导师身体健康，万事如意！

感谢远在家乡的亲人，他们的关心和爱护给了我巨大的动力。有了他们给予我生活上和精神上的支持，我才能毫无牵挂的完成学业。祝他们身心健康，永远开心幸福！

感谢室友和同学一起分享这三年美好的学习生活；感谢师弟、师妹们的关心和帮助！祝大家前程似锦，工作顺利！

感谢所有关心我帮助我的老师、同学和朋友！

左一鸣

2007 年 3 月于南京

论文发表及录用情况

- 1、 左一鸣、夏光平、崔广柏. 基于 GIS 的平原河网非恒定流计算模型[J], 水利水运工程学报. 2005. 6.
- 2、 左一鸣、崔广柏、王振龙等. 我国水资源可持续利用探索[J], 人民黄河. 2005. 9.
- 3、 左一鸣、崔广柏、冯健. 太湖水质指标相关关系研究[J], 人民长江. 2005. 10.
- 4、 左一鸣、崔广柏、丁贤荣. 基于 COM 技术的水环境信息系统研发[J], 长江科学院院报. 2006. 2.
- 5、 左一鸣、崔广柏、顾令宇、冯健. 太湖水质指标因子分析[J], 辽宁工程技术大学学报. 2006. 4. (EI 检索).
- 6、 左一鸣、崔广柏. 二维水动力模型的并行化研究. 水科学进展。(已录用)
- 7、 徐志扬、丁贤荣、左一鸣、程立刚. 基于 MapX 构建 GIS 应用系统平台的研究[J], 计算机与数字工程. 2006. 3.
- 8、 黎春蕾、丁贤荣、徐志扬、左一鸣. 太湖流域水环境评价与管理系统的研制与开发[J]. 水利科技与经济. 2005. 10.
- 9、 易文林、丁贤荣、程立刚、左一鸣. 丘陵地带城市生活污水的生态处理研究[J]. 水利科技与经济. 2005. 8.