

DHI MIKE FLOOD
HONGSHUI MONI JISHU
YINGYONG YU YANJIU

DHI MIKE FLOOD
洪水模拟技术应用与研究

衣秀勇 关春曼 果有娜 王成言 吕红波 李志华 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

DHI MIKE FLOOD

洪水模拟技术应用与研究

衣秀勇 关春曼 果有娜 王成言 吕红波 李志华 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

我国是世界上河流最多的国家之一，流域面积在 100km² 以上的河流有 5 万多条，大部分河流沿岸人口密集，经济发达，因此如何准确模拟洪水，为防洪减灾提供技术支撑，是水利工作者一直研究的课题。丹麦 DHI 公司的 Mike Flood 软件将零维、一维、二维耦合，是一种功能较为强大的商业软件，本书详细介绍了该软件进行洪水模拟的基本原理、使用方法、二次开发和应用案例，读者在系统学习本书后，能够熟练使用该软件来完成宏观复杂河网及蓄滞洪区联合运用的洪水模拟及微观建筑物的模拟等工作。

本书可供水利水电、水生态、水环境等专业的规划、设计、管理、科研和教学人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

DHI MIKE FLOOD洪水模拟技术应用与研究 / 衣秀勇
等编著. — 北京：中国水利水电出版社，2014. 10
ISBN 978-7-5170-2638-9

I. ①D… II. ①衣… III. ①洪水—水流模拟—研究
IV. ①P331.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244725号

书 名	DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究
作 者	衣秀勇 关春曼 果有娜 王成言 吕红波 李志华 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	210mm×297mm 16 开本 22.25 印张 689 千字
版 次	2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷
印 数	001—500 册
定 价	98.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国河流众多，气象复杂，自然灾害危害最大的即是洪水。频繁的洪水灾害对于中华民族的生存和发展一直是一个重要课题。新中国成立以来，国家一直把水利建设放在重要位置，基本形成以堤防、防洪控制性枢纽工程等为主的防洪体系。然而，中小河流和蓄滞洪区仍然是防洪体系中的薄弱环节，多数中小河流仍处于“大雨大灾、小雨小灾”的局面。特别是近年来极端天气事件增多，常发生局部地区的集中暴雨，对我国城乡尤其重要城镇和农业主产区防洪安全构成了严重威胁。2008年中央1号文件明确指出“各地要加快编制重点地区中小河流治理规划，增加建设投入”。2009年中央1号文件又提出“加强大江大河和重点中小河流治理”。2009年10月，水利部、财政部联合下发了《全国重点地区中小河流近期治理建设规划》。2010年汛期，全国先后出现多次强降雨过程，近百条中小河流发生大洪水，洪涝灾害严重问题再次引起党中央、国务院的高度重视，2011年4月6日经国务院常务会议审议通过了《全国中小河流治理和病险水库除险加固、山洪地质灾害防御和综合治理总体规划》，进而全面开展了防洪工程建设。

防洪工程是一个系统工程，从宏观上应统筹协调上下游、左右岸、干支流、河道与蓄滞洪区、城市河段与农村河段、河道内的主槽与滩地等关系，从微观上应对防洪体系进行科学合理的安排。为此，工程设计、治理效果评估等工作都需要使用能覆盖流域的河网数学模型，对洪水进行模拟。丹麦DHI公司的Mike Flood即是一个能满足上述要求，且目前在国际上比较流行的商业洪水模拟软件，已应用于国内外很多项目，众多学生和设计、咨询、科研工作者和专家都在学习和使用该软件，发表的学术论文日渐增多，但至今未见一本系统的、具有实用和可操作性的应用手册问世。

本书的作者来自于设计、咨询部门，熟稔Mike Flood的原理与应用，此次编纂本书，全因他们对技术推广的强烈热情。书中全面介绍了使用Mike Flood进行洪水模拟的基本原理、使用方法和应用案例，内容十分新颖。本书的问世，将帮助更多的学生、工程技术人员和科研人员掌握洪水模拟的知识和方法，并运用于水利建设事业的教学、生产、科研工作中，对我国的江河治理也将产生积极作用。

李学军

2014年8月于北京

前言

我国是世界上河流最多的国家之一,据统计,流域面积在 100km^2 以上的河流有 5 万多条,其中流域面积在 1000km^2 以上的有 1700 多条、大于 10000km^2 的有 79 条,河流沿岸人口密集,分布着众多的城镇、工矿区、经济区和粮食主产区。新中国成立以来,国家组织开展了大规模的防洪建设,对主要江河进行了不同程度的治理,以堤防、防洪控制性枢纽工程等为主的防洪体系框架基本形成。然而,仍有很多河流和蓄滞洪区只在 20 世纪 50~80 年代通过群众投劳进行过一些治理,目前的防洪标准仅 3~5 年一遇,有的甚至没有设防,常遇洪水下就可能发生较大洪涝灾害。特别是近年来极端天气事件增多,小流域常发生集中暴雨,对我国城乡尤其重要城镇和农业主产区防洪安全构成了严重威胁。同时经济社会的快速发展也对防洪保安提出了更高的要求。

如何准确模拟洪水,为防洪减灾、城市和城镇化建设、交通工程建设提供技术支撑,是水利工作者一直研究的课题。DHI Mike 是目前国际上比较流行的商业洪水模拟软件,其中的 Mike Flood 集合了广泛使用的 Mike11 和 Mike21,可以模拟一维河网水动力学系统以及二维的洪泛区和沿海区,适用于宏观上的流域性工程布局论证分析和流域洪水调度研究以及微观水流模拟等领域。由于 Mike Flood 软件体系庞大、功能繁多,掌握并能熟练使用该软件非一日之功,但若有一本合适的参考书,无疑能够起到事半功倍的作用,为此我们撰写了本书,以期帮助读者能尽快掌握 Mike Flood 软件,锻造解决实际问题的能力,促进河网水系治理更加科学、合理、可靠。

本书共分 5 篇 30 章。第 1 章至第 2 章为 Mike Flood 的总体介绍篇,包括基本原理和 Mike Zero 的介绍;第 3 章至第 14 章为 Mike11 篇,第 15 章至第 23 章为 Mike21 篇,第 24 章至第 28 章为 Mike Flood 篇,这三篇分别介绍了 Mike11、Mike21 及 Mike Flood 的建模方法和前后处理工具的使用;第 29 章至第 30 章为开发与应用案例篇,介绍了 Mike 的二次开发技术和部分应用案例。

本书各章撰写分工如下:第 1~4 章由果有娜、衣秀勇编写,第 5~7 章由关春曼、王成言编写,第 8~11 章由王成言、果有娜编写,第 12~18 章由吕红波、李志华编写,第 19~23 章由李志华、吕红波编写,第 24~30 章由衣秀勇、关春曼编写。全书由衣秀勇统稿。

书中参阅了大量的文献资料,引用了文献中的部分研究成果,中水北方勘测设计研究有限责任公司规划处对本书的出版给予了极大地支持,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 8 月

目 录

序

前言

第一篇 Mike Flood 总体介绍	1
1 Mike Flood 基本原理	3
1.1 洪水模拟软件介绍	3
1.2 DHI Mike 软件简介	3
1.3 Mike11 基本原理	4
1.4 Mike21 基本原理	8
2 Mike Zero	13
2.1 创建新文件和新项目	13
2.2 常用文件格式	14
2.3 数据文件编辑程序 (Data Utility)	18
2.4 版本控制接口 (Version Control Interface)	20
2.5 基本数值单位 (Unit Base Groups)	20
2.6 地图投影 (Map Projection)	20
2.7 基面转换 (Datum Converter)	23
2.8 用户设置 (User Settings)	25
2.9 项目特性 (Project Properties)	26
2.10 项目资源管理器窗口 (Project Explorer)	27
2.11 项目地图窗口 (Project Map)	28
2.12 起始页 (Start Page)	29
2.13 模拟历史 (Simulation History)	30
第二篇 Mike11	31
3 模拟编辑器 (Simulation Editor)	33
3.1 模块选项卡 (Models)	33
3.2 输入选项卡 (Input)	33
3.3 模拟选项卡 (Simulation)	34
3.4 结果选项卡 (Results)	37
3.5 启动选项卡 (Start)	37
3.6 选择 Mike1D 还是 Mike11	37
3.7 水量平衡汇总表	38
3.8 批量模拟编辑器 (Batch Simulation Editor)	39

4 河网编辑器 (River Network Editor)	40
4.1 Mike 软件关于河网的定义	40
4.2 图形视图 (Graphical View)	42
4.3 列表视图 (Tabular View)	49
5 河网编辑器-建筑物 (Structure)	55
5.1 概述	56
5.2 堰 (Weirs)	59
5.3 涵 (Culverts)	62
5.4 泵 (Pumps)	65
5.5 可控建筑物 (Control Str.)	66
5.6 溃堤/坝建筑物 (Dambreak Str.)	78
5.7 列表建筑物 (Tabulated Structure)	84
5.8 能量损失 (Energy Loss)	84
5.9 桥梁 (Bridges)	85
5.10 组合建筑物 (Composite Structures definition)	98
6 横断面编辑器 (Cross Section Editor)	98
6.1 原始数据视图 (Raw data View)	99
6.2 预处理数据视图 (Processed data View)	106
6.3 主菜单	109
7 边界条件编辑器 (Boundary Editor)	116
7.1 最上部窗口-边界条件表格	116
7.2 中下窗口-边界条件定义	119
7.3 主菜单	122
8 HD 参数编辑器 (Hydrodynamic Parameters Editor)	124
8.1 初始 (Initial)	124
8.2 风 (Wind)	125
8.3 河床阻力 (Bed Resistance)	125
8.4 河床阻力工具箱 (Bed Resistance Toolbox)	126
8.5 波近似 (Wave Approx)	127
8.6 默认值 (Default Values)	128
8.7 准稳态 (Quasi Steady)	130
8.8 层流 (Stratification)	133
8.9 时间序列输出 (Time Series Output)	134
8.10 地图 (Maps)	135
8.11 地下水渗漏 (Groundwater Leakage)	138
8.12 流程长度 (Reach Lengths)	138
8.13 附加输出 (Add. Output)	139
8.14 滩地阻力 (Flood Plain Resistance)	140
8.15 用户定义标记 (User Def. Marks)	140
8.16 侵占 (Encroachment)	141
9 时间序列编辑器 (Time Series Editor)	144
9.1 简介	144
9.2 新建时间序列文件	144
9.3 窗口	148

9.4	主菜单	150
9.5	Mike zero 工具箱——时间序列	152
10	Mike View	156
10.1	Mike View 简介	156
10.2	平面图窗口	158
10.3	纵剖面图	162
10.4	时间序列图	165
10.5	$Q-H$ 曲线	172
10.6	动画 (Animation)	173
10.7	工具	173
10.8	Mike View 设置	177
11	转换模拟结果至文本文件 (Res11Read)	178
12	Mike11. ini 文件介绍	179
12.1	Mike11 GIS 连接	180
12.2	Mike11 HD 设置	180
12.3	关于 Mike1D 的设置	182
13	Mike11 Gis	182
13.1	Mike11 GIS 主菜单	183
13.2	工具条	186
14	Mike HYDRO—河流模块	188
14.1	建模环境	189
14.2	建模设置	191
14.3	工具 (Tools)	192
第三篇	Mike21	195
15	剖面序列编辑器 (Profile Series Editor)	197
15.1	创建剖面序列文件	197
15.2	窗口	199
15.3	工具	200
16	网格序列编辑器 (Grid Series Editor)	200
16.1	创建新网格序列文件	201
16.2	编辑 (Edit)	201
16.3	视图 (View)	202
16.4	工具 (Tools)	203
16.5	数据叠加 (Data Overlay)	205
17	矩形网格编辑器 (Bathymetry Editor)	205
17.1	新建矩形网格文件	205
17.2	主菜单	206
17.3	地形图描绘	209
17.4	创建地形文件的典型步骤	210
18	非结构化网格生成器 (Mesh Generator)	210
18.1	简介	210
18.2	建立新非结构化网格文件	212
18.3	主菜单	212

18.4	工具栏	218
18.5	生成非结构化网格的主要步骤	222
18.6	mesh 文件	222
19	Mike21	223
19.1	简介	223
19.2	基本参数 (Basic Parameter)	223
19.3	水动力参数	227
19.4	Mike21 工具箱: 水动力学	234
20	Mike21 FM	235
20.1	简介	235
20.2	基本参数	236
20.3	水动力模块设置	237
20.4	水动力模块——建筑物	248
20.5	温/盐模块	251
21	数据管理器 (Data Manager)	253
21.1	启动数据管理器	254
21.2	主窗口	255
21.3	主菜单	256
22	非结构化数据提取 (Data Extraction FM)	258
22.1	输入 (Input)	258
22.2	输出 (Output)	258
23	数据浏览器 (Data Viewer)	260
23.1	简介	260
23.2	主菜单	260
23.3	时间序列的快捷菜单	264
23.4	工具栏	264
第四篇	Mike Flood	267
24	Mike Flood	269
24.1	简介	269
24.2	模型之间的连接	269
24.3	主窗口	272
24.4	图形视图的快捷菜单	280
24.5	主菜单	283
24.6	模拟结果	287
24.7	堤防决口生成器 (Levee Breach Generation)	287
25	结果浏览器 (Result Viewer)	288
25.1	主菜单	289
25.2	工具栏	290
26	图纸设计器 (Plot Composer)	291
26.1	主菜单	292
26.2	快捷菜单	293
26.3	曲线图共有特性	294
26.4	平面图共有特性	294

26.5	各图形对象的专有特性	296
26.6	视频生成	298
26.7	批处理命令 (Batch Command)	298
27	Mike 动画 (Mike Animator Plus)	299
27.1	用户界面	299
27.2	主菜单	300
27.3	特性设置	301
27.4	布局视图窗口	309
27.5	场景视图窗口	310
27.6	工具栏	311
28	Mike Zero 工具	311
28.1	提取工具	311
28.2	统计工具- dfs 数据文件统计 (TxStat)	312
28.3	变换工具-插值和旋转 2D 数据文件 (Rotate Grid)	313
28.4	GIS 工具	314
28.5	合并工具- TxConc	314
28.6	地理信息图像文件转换工具	315
28.7	网格文件转换 (Mesh Converter) 工具	315
28.8	图像校正编辑器 (Image Rectifier)	316
28.9	运行模拟引擎 (Launch Simulation Engine)	317
28.10	Mike 到 Google 地球 (Mike to Google Earth)	318
第五篇	开发与应用	321
29	Mike.net 开发	323
29.1	DFS.net API	323
29.2	PFS.net API	326
29.3	其他 .net API	326
29.4	创建 .net 应用程序	326
29.5	DHI MATLAB 工具箱	327
30	应用案例	330
30.1	Mike11 在河道控制性工程调度中的应用	330
30.2	复式河道的非结构化网格模型	333
30.3	DHI Mike Flood 设置技巧	337
30.4	使用 .net 在 AutoCAD 中绘制流场图	339
参考文献		343



第一篇

Mike Flood 总体介绍

Mike Flood 是 DHI Mike 软件包中进行洪水模拟的组件，Mike Flood 需要使用 Mike 软件包中的建模平台组件 Mike Zero，一维模拟组件 Mike11、二维模拟组件 Mike21 以及 Mike Flood 本身。

Mike Zero 提供了建模需要的开发平台。

Mike11 采用 6 点中心 Abbott - Ionescu 格式对圣维南方程组进行离散化，使用双扫描法求解离散方程。

Mike21 和 Mike21 FM 中的 HD 模块分别采用矩形网格有限差分法和非结构化网格有限体积法求解二维浅水方程。



1 Mike Flood 基本原理

1.1 洪水模拟软件介绍

目前国际上比较流行的占有一定市场份额的商业洪水模拟软件有 Mike Flood、Fluent、Delft3d、Sms 等, 以上软件的特点和主要功能简单介绍如下。

Mike Flood: 丹麦 DHI 公司研发的 DHI Mike 软件包中进行洪水模拟的组件, 是一、二维动态耦合的洪水模拟软件, 集合了目前广泛使用的 Mike11 和 Mike21。Mike11 模型可对各种复杂的建筑物做单独或者联合调度, Mike21 有多种网格剖分型式包括最常用的为非正交的矩形网格和三角网格等非结构化网格, 保证了很高的灵活性。Mike Flood 可以模拟一维河网水动力学系统以及二维的洪泛区和沿海区, 可实现一维与二维区域之间自由的水体交换。适用于宏观上的流域控制性工程规模论证分析和流域洪水调度研究以及微观水流模拟等领域。

Fluent: 世界领先的 CFD 软件, 目前已被美国 Ansys 公司收购。CFD 是计算流体动力学的简写 (Computational Fluid Dynamics), 主要应用于水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动、洪水波及河口潮流计算、河流中污染物的扩散和航空及细菌运移等领域。

Delft3d: 荷兰 Delft 大学研发的用于完全三维水动力—水质研究的模型系统, 唯一支持曲面网格的商业软件, 可进行大尺度的水流、水动力、波浪、泥沙、水质和生态计算。在进行河道洪水演算时, 应用该系统中的水流模块, 该模块基于有限差分法对方程组进行离散, 应用 ADI 法求解, 变量布置为交错网格, 可用于模拟二维或三维浅水非恒定流, 应用该系统时可以考虑大气压力、密度变化 (水温及盐度引起)、波浪、潮汐、风力和紊流等因素。

Sms: 美国陆军工程兵团和美国伯明翰大学联合开发的二维或三维商业软件, 可用来模拟地表水体的流场和浓度场, 能够在三维的环境中模拟水质。其网格剖分工具比较强大, 可进行渐变的网格剖分设计。

以上软件各有所长, 本书将详细介绍其中的 DHI Mike Flood。

1.2 DHI Mike 软件简介

DHI 公司是一个独立的国际咨询及科研机构, 公司总部位于丹麦哥本哈根, 目前拥有员工超过 1000 人, 公司的目标是促进水、环境及健康领域的技术发展和能力建设。DHI 被世界卫生组织、联合国环境规划署指定为合作中心, 并且作为全球水合作中心的咨询机构。DHI 目前的用户包括: 企业、咨询工程师、承包商、基础设施及交通领域的公司, 政府企业以及合作方, 政府公共部门, 开发机构以及金融机构。

DHI 公司的主要软件为 DHI Mike (Mike by DHI), 该软件包含了进行水模拟所需要的大部分工具, 如河渠、行蓄洪区的洪水模拟、河口、海岸、海洋模拟、城市排水模拟、水资源模拟、水质模拟、泥沙模拟等全系列工具, 这些工具分为 Mike Zero、Mike Urban、Mike C - MAP、WEST 和 FEFLOW。Mike Urban 基于 GIS 模拟城市排水、收集和分配系统。Mike C - MAP 是基于 C - MAP (Jeppesen 的全球电子海图数据库) 创建海洋地形和潮汐信息的工具。WEST 用于模拟污水处理系统。FEFLOW 用来模拟地下水流、多孔介质中污染物或热传输问题。

Mike Zero 主要用来进行地表水模拟, 其中又包含很多单独组件。Mike Zero 与大名鼎鼎的 Microsoft Visual Studio 非常相似, 本身只提供一个开发平台和共用功能, 具体的功能由各组件来完成。目前, 在 Mike Zero 中包含的组件包括:

Mike11: 河渠水流、水质、泥沙的一维模拟系统。

Mike21: 河渠、行蓄洪区、河口、近海、海洋的水流、水质、泥沙的二维模拟系统。

Mike3: 深海、河口、近海的三维模拟系统。



Mike21/3: 二维和三维耦合模型。

DHI Mike Flood: 一维和二维耦合模型。

LITPACK: 海岸动力学模型。

Mike SHE: 分布式水文模型。

Mike HYDRO: 水资源模拟的通用平台, 其中包括流域水资源规划与管理的 Basin 和河流一维模拟系统。

因此, 研究 DHI Mike Flood 实际上还必须研究 Mike Zero、Mike11 和 Mike21。

1.3 Mike11 基本原理

Mike11 软件包由水动力、对流~扩散、水质、降雨~径流、洪水预报等模块组成, 核心模块为水动力模块。Mike11 水动力模块采用 6 点 Abbott~Ionescu 有限差分格式对圣维南方程组求解。

1.3.1 圣维南方程组

1. 基本要素与假设条件

Mike11 模型基于以下三个要素: 反映有关物理定律的微分方程组; 对微分方程组进行线性化的有限差分格式; 求解线性方程组的算法。并基于以下几个假定: 流体为不可压缩、均质流体; 一维流态; 坡降小、纵向断面变化幅度小; 符合静水压力假设。

2. 圣维南方程组

圣维南方程是反映有关物理定律的微分方程, 包括连续方程 (质量守恒定律) 和动量方程 (牛顿第二定律):

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ |Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; q 为侧向入流, m^3/s ; A 为过水面积, m^2 ; h 为水位, m ; R 为水力半径, m ; C 为谢才系数; α 为动量修正系数。

1.3.2 方程离散

圣维南方程中的连续性方程和动量方程通过有限差分法进行离散, 计算网格由流量点和水位点组成,

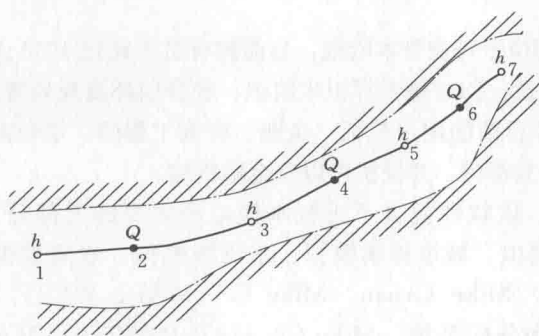


图 1.3-1 河道断面计算网格

其中流量点和水位点在同一时间步长下分别进行计算, 见图 1.3-1。计算网格由模型自动生成, 水位点是横断面所在的位置, 相邻水位点之间的距离可能不同, 流量点位于两个相邻的水位点之间。计算网格点的分布遵循以下规则: ①河段上下游端点为计算水位点; ②支流入流点为计算水位点; ③实测断面资料点为计算水位点; ④模型根据 $\max \Delta x$ 值自动插入的点为计算水位点; ⑤建筑物点为计算水位点; ⑥两个水位点之间只存在一个计算流量点。

Mike11 所用的有限差分格式为 6 点中心 Abbott-Ionescu 格式, 见图 1.3-2 和图 1.3-3。

1. 连续方程

在连续方程中, 引入蓄存宽度 b_s :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = b_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.3-1)$$

从而连续方程转变为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (1.3-2)$$



由公式可以看出仅流量 Q 与 x 有关, 方程很容易得到以 h 点为中心 6 点隐式格式见图 1.3-2。
应用该离散格式, 则连续方程变为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{\frac{Q_{j+1}^{n+1} + Q_{j+1}^n}{2} - \frac{Q_{j-1}^{n+1} + Q_{j-1}^n}{2}}{\Delta 2x_j} \quad (1.3-3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \quad (1.3-4)$$

$$b_s \text{ 近似等于 } b_s = \frac{A_{o,j} + A_{o,j+1}}{\Delta 2x_j} \quad (1.3-5)$$

式中: $A_{o,j}$ 为网格点 $j-1$ 与 j 之间的水面面积; $A_{o,j+1}$ 为网格点 j 与 $j+1$ 之间的水面面积; $\Delta 2x_j$ 为网格点 $j-1$ 与 $j+1$ 之间的距离。

将式 (1.3-3)、式 (1.3-4) 代入方程 (1.3-2) 变为:

$$\frac{\frac{Q_{j+1}^{n+1} + Q_{j+1}^n}{2} - \frac{Q_{j-1}^{n+1} + Q_{j-1}^n}{2}}{\Delta 2x_j} + b_s \frac{(h_j^{n+1} - h_j^n)}{\Delta t} = q_j$$

该方程可以简化为:

$$\alpha_j Q_{j-1}^{n+1} + \beta_j h_j^{n+1} + \gamma_j Q_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (1.3-6)$$

式中: α 、 β 、 γ 为 b 和 δ 的函数, 其值决定于 h 点在时间 n 处及 Q 点在时间 $n+1/2$ 处的值。

2. 动量方程

动量方程集中在流量点, 其网格形式为以 Q 点为中心点的差分格式见图 1.3-3。

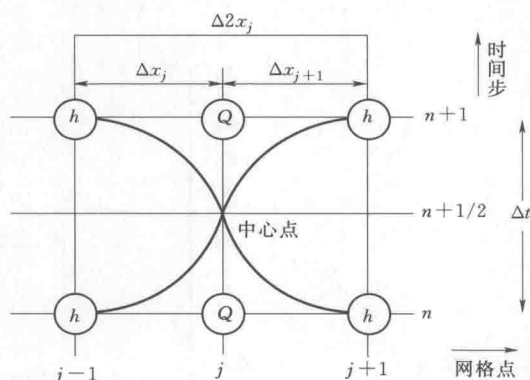


图 1.3-3 动量方程的 6 点中心
Abbott-Ionescu 差分计算

依据 6 点中心 Abbott-Ionescu 差分法, 动量方程可以表示如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} \quad (1.3-7)$$

$$\frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} \approx \frac{\left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right]_{j+1}^{n+1/2} - \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right]_{j-1}^{n+1/2}}{\Delta 2x_j} \quad (1.3-8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} \approx \frac{\frac{h_{j+1}^{n+1} + h_{j+1}^n}{2} - \frac{h_{j-1}^{n+1} + h_{j-1}^n}{2}}{\Delta 2x_j} \quad (1.3-9)$$

对公式 (1.3-8) 中的二次项, 引入以下公式:

$$Q^2 \approx \theta Q_j^{n+1} Q_j^n - (\theta - 1) Q_j^n Q_j^n \quad (1.3-10)$$

式中: θ 角的值通过 HD 参数文件“默认值”中的

“THETA”系数来给定, 默认值为 1。

由上, 动量方程可以表达为:

$$\alpha_j h_{j-1}^{n+1} + \beta_j Q_j^{n+1} + \gamma_j h_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (1.3-11)$$

其中 $\alpha_j = f(A)$

$$\beta_j = f(Q_j^n, \Delta t, \Delta x, C, A, R)$$

$$\gamma_j = f(A)$$

$$\delta_j = f(A, \Delta x, \Delta t, \alpha, q, v, \theta, h_{j-1}^n, Q_{j-1}^{n+1/2}, Q_j^n, h_{j+1}^n, Q_{j+1}^{n+1/2})$$

在默认的条件下, 软件在一个时间步长里用两次迭代来对这些方程进行求解。初次迭代起始于第一个时间步长, 第二次迭代采用第一次计算值的中心差值来进行计算。迭代次数可以通过 NoITER 系数来进行修改。



1.3.3 离散方程组求解

方程求解采用追赶法（双扫描法）。

1. 河道方程

根据水流连续方程和运动方程整理后的最终形式 [式 (1.3-6) 和式 (1.3-11)]，河道内某一水力变量 Z_j （水位 h_j 或流量 Q_j ）与相邻差分格点的水力参数的关系可以表示为一线性方程：

$$\alpha_j Z_{j-1}^{n+1} + \beta_j Z_j^{n+1} + \gamma_j Z_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (1.3-12)$$

假设某河道由 n 个差分格点离散化，由于河道首末计算断面均为水位点，所以 n 为奇数。对于河道的所有差分格点写出式 (1.3-12)，可以得到 n 个线性方程：

$$\begin{aligned} \alpha_1 H_{us}^{n+1} + \beta_1 h_1^{n+1} + \gamma_1 Q_2^{n+1} &= \delta_1 \\ \alpha_2 h_1^{n+1} + \beta_2 Q_2^{n+1} + \gamma_2 h_3^{n+1} &= \delta_2 \\ \alpha_3 Q_2^{n+1} + \beta_3 h_3^{n+1} + \gamma_3 Q_4^{n+1} &= \delta_3 \\ \alpha_4 h_3^{n+1} + \beta_4 Q_4^{n+1} + \gamma_4 h_5^{n+1} &= \delta_4 \\ \alpha_5 Q_4^{n+1} + \beta_5 h_5^{n+1} + \gamma_5 Q_6^{n+1} &= \delta_5 \\ \vdots &\vdots \\ \alpha_{n-2} Q_{n-3}^{n+1} + \beta_{n-2} h_{n-2}^{n+1} + \gamma_{n-2} Q_{n-1}^{n+1} &= \delta_{n-2} \\ \alpha_{n-1} h_{n-2}^{n+1} + \beta_{n-1} Q_{n-1}^{n+1} + \gamma_{n-1} h_n^{n+1} &= \delta_{n-1} \\ \alpha_n Q_{n-1}^{n+1} + \beta_n h_n^{n+1} + \gamma_n H_{ds}^{n+1} &= \delta_n \end{aligned} \quad (1.3-13)$$

这样方程就多出 2 个未知量。第一个方程中的 H_{us} 和最后一个方程中的 H_{ds} 分别代表上下游节点的水位。某一河道第一个网格点的水位等于与之相连河段上游节点的水位： $h_1 = H_{us}$ ，即： $\alpha_1 = -1$ ， $\beta_1 = 1$ ， $\gamma_1 = 0$ ， $\delta_1 = 0$ 。同样， $h_n = H_{ds}$ ，即： $\alpha_n = 0$ ， $\beta_n = 1$ ， $\gamma_n = -1$ ， $\delta_n = 0$ 。

对于单一河道，只要给出上下游水位边界，即 H_{us} 和 H_{ds} 为已知，就可用消元法求解方程组 (1.3-13) 了。

对于河网，方程组 (1.3-13) 用矩阵的形式表示为：

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & & & & & & & \\ & \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & & & & & & \\ & & \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & & & & & \\ & & & \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & & & & \\ & & & & \alpha_5 & \beta_5 & \gamma_5 & & & \\ & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & & & & \alpha_{n-2} & \beta_{n-2} & \gamma_{n-2} \\ & & & & & & & & \alpha_{n-1} & \beta_{n-1} & \gamma_{n-1} \\ & & & & & & & & & \alpha_n & \beta_n & \gamma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{n-2} \\ \delta_{n-1} \\ \delta_n \end{bmatrix}$$

用消元方法矩阵变为：

$$\begin{bmatrix} a_1 & 1 & & & & & & & & b_1 & c_1 \\ & a_2 & 1 & & & & & & & b_2 & c_2 \\ & & a_3 & 1 & & & & & & b_3 & c_3 \\ & & & a_4 & 1 & & & & & b_4 & c_4 \\ & & & & a_5 & 1 & & & & b_5 & c_5 \\ & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & a_{n-2} & 1 & & b_{n-2} & c_{n-2} \\ & & & & & & & & a_{n-1} & 1 & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & & & & & & & a_n & 1 & b_n & c_n \end{bmatrix}$$



由此便能将河道内任意点的水力变量 Z_j (水位或流量) 表示为上下游节点的水位函数:

$$Z_j^{n+1} = c_j - a_j H_{us}^{n+1} - b_j H_{ds}^{n+1} \quad (1.3-14)$$

在求解过程中首先求出河道中各节点的水位值, 之后便可应用式 (1.3-14) 求解任一河段, 任一差分格点的水力参数。

2. 节点方程

如图 1.3-4 所示, 围绕节点的控制体连续性方程为:

$$\frac{H^{n+1} - H^n}{\Delta t} A_{fl} = \frac{1}{2} (Q_{A,n-1}^n + Q_{B,n-1}^n - Q_{C,2}^n) + \frac{1}{2} (Q_{A,n-1}^{n+1} + Q_{B,n-1}^{n+1} - Q_{C,2}^{n+1})$$

将上述方程中右边第 2 式的 3 项分别以式 (1.3-14) 替代, 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{H^{n+1} - H^n}{\Delta t} A_{fl} = & \frac{1}{2} (Q_A^n + Q_B^n - Q_C^n) + \frac{1}{2} (c_{A,n-1} - a_{A,n-1} H_{A,us}^{n+1} - b_{A,n-1} H^{n+1}) + c_{B,n-1} \\ & - a_{B,n-1} H_{B,us}^{n+1} - b_{B,n-1} H^{n+1} + c_{C,2} - a_{C,2} H^{n+1} - b_{C,2} H_{C,ds}^{n+1} \end{aligned} \quad (1.3-15)$$

式中: H 为该节点的水位, $H_{A,us}$ 、 $H_{B,us}$ 分别为支流 A、B 上游端节点水位, $H_{C,ds}$ 为支流 C 下游端节点水位。

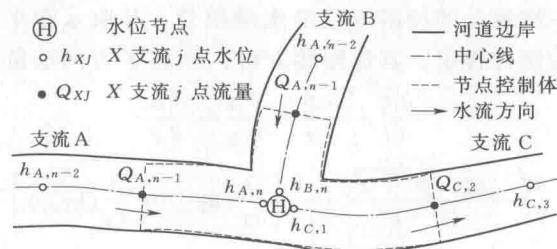


图 1.3-4 河道节点方程示意图 (以三节点为例)

在式 (1.3-15) 中, 将某个节点的水位表示为与之直接相连的河道节点水位的线性函数。同样, 对于河网所有节点 (假设为 N 个), 可以得到 N 个类似的方程 (节点方程组)。在边界水位或流量为已知的情况下, 可以利用高斯消元法直接求解节点方程组, 得到各个节点的水位, 进而回代式 (1.3-15) 求解任意河道任意网格点的水位或流量。

原则上节点可以任意编码, 但对于大型复杂河网, 这样得到的节点方程组的系数矩阵将是一个阶数很高的稀疏矩阵, 存储量大, 运算非常耗时。大型稀疏矩阵求解计算时间主要取决于矩阵主对角线非零元素的宽度。可以通过对河网节点进行优化编码的方法来降低节点方程组系数矩阵的带宽, 使之成为主对角线元素占优的矩阵, 从而方便方程组的求解, 并大大减少计算耗时。

3. 边界条件

若在河道边界节点上给出水位的时间变化过程: $h = h(t)$ 。此时, 边界上的节点方程为 (假设边界所在河道编号为 j):

$$h_{j,1}^{n+1} = H_{us}^{n+1}, \text{ 或 } h_{j,n}^{n+1} = H_{ds}^{n+1}$$

若在河道边界节点上给出流量的时间变化过程: $Q = Q(t)$ 。对控制体应用连续方程可以得到:

$$\frac{H^{n+1} - H^n}{\Delta t} A_{fl} = \frac{1}{2} (Q_b^n - Q_2^n) + \frac{1}{2} (Q_b^{n+1} - Q_2^{n+1})$$

将上式中的 Q_2^{n+1} 代入, 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{H^{n+1} - H^n}{\Delta t} A_{fl} = & \frac{1}{2} (Q_b^n - Q_2^n) \\ & + \frac{1}{2} (Q_b^{n+1} - c_2 + a_2 H^{n+1} + b_2 H_{ds}^{n+1}) \end{aligned} \quad (1.3-16)$$

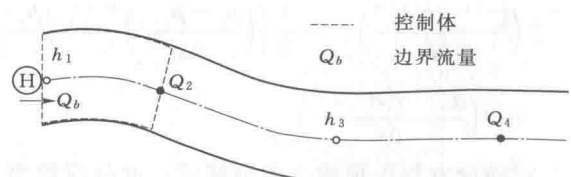


图 1.3-5 流量边界示意图