

河口海岸 数值模拟可视化编程

罗小峰 王登婷 著



HEKOU HAI'AN
SHUZHI MONI
KESHIHUA
BIANCHENG



海洋出版社

河口海岸数值模拟

可视化编程

罗小峰 王登婷 著

海洋出版社

2012年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

河口海岸数值模拟可视化编程 / 罗小峰, 王登婷著. — 北京: 海洋出版社, 2012. 11

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8432 - 4

I. ①河… II. ①罗… ②王… III. ①河口 - 泥沙运动 - 数值模拟 - 研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 252010 号

责任编辑: 赵娟

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 9.25

字数: 160 千字 定价: 42.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

河口海岸地区的自然资源丰富，人口众多，经济发达。河口海岸水域的水流运动及泥沙输移是人类开发利用河口海岸各种自然资源、从事生产活动所面临的基础问题之一。研究其水流泥沙运动问题的主要手段有三种：现场观测分析研究；物理模型试验研究；数值模拟研究。随着计算机及计算技术的发展，数值模拟研究表现出越来越多的优越性。

本书针对近年来编著者从事的若干河口海岸工程问题，对数值模拟可视化和集成方法进行了研究和应用，自主开发了一套更适用于大型河口和复杂海岸的数值模拟可视化系统。该数值模拟可视化系统的形成过程大致包括以下四个阶段。

1999—2002年，受国家电力公司基金项目“滨海、河口电厂取排水口冲淤变化数学模型研究”资助，辛文杰、罗小峰等人开发完成“滨海河口电厂取排水口冲淤变化数学模型软件包”，该项目通过国家电力公司组织的鉴定验收。

2003—2007年，受水利部创新项目“河口水土资源综合利用和水环境保护关键技术研究”资助，辛文杰、罗小峰、何杰等人进一步完善了河口潮流、波浪、泥沙、盐度及河床变形综合数值模拟技术，并编制完成“河口海岸数值模拟系统”。

2007—2009年，受南京水利科学研究院院基金“河口海岸数值模拟软件开发”项目资助，辛文杰、罗小峰、何杰、路川藤等人针对数值模拟可视化和集成方法进行了研究和应用，进一步完善适用于大型河口和复杂海岸的数值模拟可视化系统。

2010年以来，受国家自然科学基金青年基金项目“径流及地形变异条件下长江河口段潮波传播过程的响应研究”的支持，辛文杰、罗小峰、王登婷、何杰、路川藤等人进一步发展和完善该数值模拟系统。

在此，对国家电力公司基金项目“滨海、河口电厂取排水口冲淤变化数学模型研究”、水利部创新项目“河口水土资源综合利用和水环境保护关键技术研究（SCX200303）”、南京水利科学研究院基金“河口海岸数值模拟软件开发”、国家自然科学基金青年基金项目“径流及地形变异条件下长江河口段潮波传播过程的响应研究（No. 51009095）”等的资助一并表示感谢。

数值模拟研究技术发展很快，有关这方面的研究也在不断深入，书中的一些观点和方法还需在实际应用中进一步检验和完善。由于编著者水平有限、时间仓促，书中可能存在这样和那样的不足，敬请读者批评指正。

本书由南京水利科学研究院专著出版基金资助出版，谨此表示感谢。

罗小峰 王登婷

2012年11月于南京水利科学研究院

目 次

第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国外数值模拟系统研究现状	2
1.2.1 河口海岸数值模拟软件	3
1.2.2 CFD 数值模拟软件	7
1.2.3 国外研究现状小结	7
1.3 国内数值模拟系统研究现状	7
1.3.1 可视化研究	8
1.3.2 数值模拟系统研究	12
1.3.3 国内研究现状小结	14
1.4 小结	14
第二章 河口海岸数值模拟系统简介	16
2.1 基本思想	16
2.2 编程开发工具	17
2.3 系统基本功能	17
2.3.1 建模模块	17
2.3.2 计算模块	18
2.3.3 演示模块	19
2.4 系统编制的关键技术	20
2.4.1 数据结构	20

2.4.2	图形处理	21
2.4.3	动画技术	21
2.4.4	输出技术	22
2.5	小结	23
第三章	数值模拟系统界面编程	24
3.1	系统主界面	24
3.1.1	CJLibrary 安装	24
3.1.2	CJLibrary 调用	25
3.2	全屏模式的实现	28
3.3	多视图切换管理	30
第四章	地形数据处理及可视化	34
4.1	地形数据来源	34
4.1.1	地形数据分类	34
4.1.2	地形数据的数字化	35
4.1.3	地形数据文件格式	35
4.2	散点地形数据处理	35
4.2.1	XYZ 文件读取	35
4.2.2	DXF 文件读取	36
4.2.3	DXF 文件输出为 XYZ 文件	42
4.2.4	DXF 文件的输出	42
4.3	格点地形数据处理	44
4.3.1	Surfer 格网文件读取	45
4.3.2	ARCGIS 的格网文件读取	46
4.3.3	数字高程模型 (DEM) 文件读取	47
4.4	地形数据插值处理	48

4.4.1	散点插值方法	48
4.4.2	改进的反距离加权插值法	51
4.4.3	象限内插法	53
4.4.4	格点插值中的缺值处理	56
4.4.5	矩形网格与三角形网格数据转换	61
4.5	等值线追踪方法	63
4.5.1	三角形网格等值线追踪方法	64
4.5.2	矩形网格等值线追踪方法	69
4.5.3	等值线封闭问题	77
4.6	地形数据可视化	78
4.6.1	地形二维可视化	78
4.6.2	地形三维可视化	82
4.6.3	剖面地形图	88
4.6.4	地形的配色	88
第五章	三角形网格剖分	89
5.1	三角形网格剖分算法	89
5.1.1	Delaunay 三角形网的基本概念	89
5.1.2	Delaunay 三角形网的生成算法	90
5.2	基本结构体定义	91
5.3	三角形网格剖分程序实现	93
5.3.1	基本准备函数	93
5.3.2	搜索并插入新的节点	95
第六章	标量场和矢量场可视化	101
6.1	标量场	101
6.1.1	标量场可视化	101

6.1.2	二维标量场可视化	102
6.1.3	三维标量场可视化	110
6.2	流场可视化	115
6.2.1	二维流场可视化	115
6.2.2	三维流场可视化	117
6.2.3	质点运移可视化	119
6.3	叠加水位透明处理	120
第七章	图片及动画	123
7.1	内存绘图	123
7.1.1	刷屏闪烁的产生原因与解决方法	123
7.1.2	VC 内存绘图	124
7.1.3	内存绘图实现	125
7.2	图片保存	127
7.2.1	复制到剪贴板	127
7.2.2	保存图片文件	128
7.3	动画	132
7.3.1	动画的实现	132
7.3.2	动画文件保存	133
参考文献	135

第一章 绪 论

1.1 研究意义

河口海岸地区的自然资源丰富,人口众多,经济发达。河口海岸水域的水流运动及泥沙输移是人类开发利用河口海岸各种自然资源、从事生产活动所面临的基础问题之一。研究其水流泥沙运动问题的主要手段有三种:现场观测分析研究、物理模型试验研究、数值模拟研究。随着计算机及计算技术的发展,数值模拟研究表现出越来越多的优越性。本书针对近年来本人从事的若干河口海岸工程问题,对数值模拟可视化和集成方法进行了研究和应用,自主开发了一套更适用于大型河口和复杂海岸的数值模拟可视化系统。

随着河口海岸动力理论以及计算技术的不断发展,数值模拟先后经历了从一维到三维的历程。作为一门先进的模拟技术,数值模拟逐渐发展成以水动力学和泥沙运动力学理论为基础,并结合工程应用研究的一门新兴实用的专业方向科学。文献可以查到的第一个数学模型是 Isaacson 和 Twesch 于 1952—1954 年首次建立的俄亥俄河和密西西比河的部分河段数学模型。20 世纪 70 年代数值模拟得到了快速的发展,从早期的一维潮流模型,发展到二维潮流数学模型,并且能够模拟水流、泥沙、盐度、污染物等在潮流作用下的物质输运过程。20 世纪 80 年代以来,三维数学模型的建立和发展,极大地拓展了人们研究河口海岸动力及物质输移的手段,三维数学模型可以详细地模拟河口海岸水动力的三维空间结构,对人们认识泥沙输移、盐度分布、河口混合过程起到了重要作用。

进入 20 世纪 90 年代以后,在计算机技术支持下,多媒体技术、大型关系数据库技术、图像处理技术、GIS/GPS/RS 技术等发展迅速,它们与新的计算技术相结合,为数学模型提供了更加广阔的发展空间。国内外很多科研机构投入了大量的研究人员进行水动力应用软件的开发工作,先后涌现出很

多价值和性能很高的商用软件。

国外数值模拟系统中具有代表性的有荷兰 Delft 水力研究所的 Delft3D, 丹麦水工研究所的 MIKE 系统, 美国 Brigham Young University 等单位联合推出的 SMS, 另外, 英国 Wallinford HR 水力研究所、美国水道试验站(WES) 等也推出了各自的数值模拟系统。这些数值模拟系统各有特色, 共同点是建模、计算和演示集成为一个有机的系统。

国内则主要以软件包的形式, 将建模、计算和演示分开, 其中较为成功的有天津水运工程科学研究所的 TK-2D 河口海岸多功能数学模型软件包, 其特点是可以解决海岸河口涉及的波浪、潮流、盐度、悬沙浓度及地形冲淤等实际工程问题。针对目前国内数学模型计算系统的松散耦合现象, 叶清华利用组件技术开发了组件式海岸工程数学模型集成系统, 辛文杰、罗小峰等开发了滨海河口波浪水流泥沙数学模型系统。

上述现有的河口海岸数值模拟系统存在以下问题:

(1) 国外的数值模拟系统大部分为商业软件, 由于其应用的方程、公式的选用、参数的选取范围完全集成在程序之中, 应用到国内的河口海岸工程研究中尚存在不少问题;

(2) 国内的数值模拟大部分以程序集或软件包的形式存在, 可视化程度不高, 缺少集成性好的数值模拟系统。

针对上述研究现状, 研制开发完整的河口海岸数值模拟系统不仅具有一定的理论意义, 而且具有很高的推广应用价值。

1.2 国外数值模拟系统研究现状

近年来, 国外投入了大量的研究人员进行水动力应用软件的开发工作, 当前比较通用的商用软件有 Delft3D、Mike、SMS、Fluent、CFX、Phoenics 等。这些软件又可以分为河口海岸数值模拟软件和 CFD 数值模拟软件两大类, 下面主要介绍这些数值模拟软件在数值计算以及可视化处理方面的特点。

1.2.1 河口海岸数值模拟软件

Delft3D 是荷兰 Delft 水力研究所开发的商用软件,适用于河流、河口及海岸的水流泥沙计算,可以用来模拟计算水流、水质生态、泥沙输移、波浪和地形演变等过程,如图 1.1 所示。Delft3D 是一个多维(二维和三维)的水动力和泥沙模拟计算软件,可以计算非恒定流体和泥沙输移。

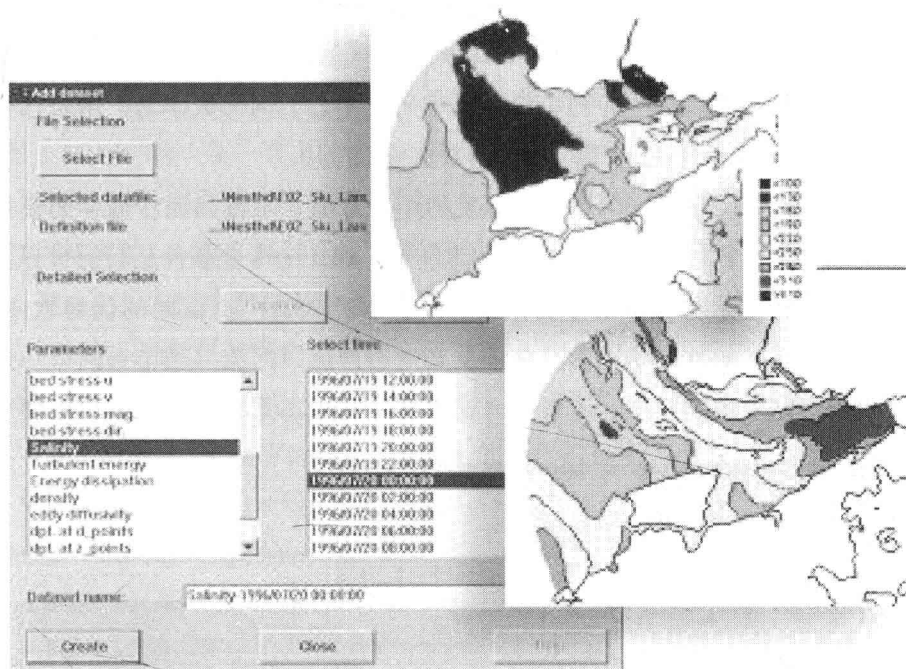


图 1.1 Delft3D 操作界面

Delft3D 采用直角坐标、柱面坐标及正交曲线坐标系,在三维计算中,垂向采用 Sigma 坐标。采用的计算模块基于有限差分法,基本方程求解采用 ADI 法,变量布置采用交错网格。Delft3D 实现了计算过程的模拟显示,其后处理模块采用 Delft - GPP,是一款具有优秀通用性和系统性的水动力学计算模拟可视化软件。

Delft3D 有以下主要特点:

- (1) 应用正交曲线网格坐标,使计算域能够更好地模拟复杂岸线;
- (2) 采用 ADI 计算方法,计算稳定性好;

- (3)应用干湿动边界处理技术,能准确模拟潮间带的露滩和淹没过程;
 (4)具有很强大的前后处理功能。

Delft3D 系统在国际上应用得更为广泛,如荷兰、俄罗斯、波兰、德国、新西兰、新加坡、马来西亚等,尤其是美国军方已经有很长的应用历史。中国香港地区从 20 世纪 70 年代中期就开始使用 Delft3D 系统,已经成为香港环境署的标准应用软件。Delft3D 从 80 年代中期开始在内陆也有越来越多的应用,如长江口、杭州湾、渤海湾、滇池。同样,Delft3D 也是很多国际著名公司的可靠工具。目前国内引进 Delft3D 软件的单位主要有华东师范大学、上海水利勘测设计研究院、上海河口海岸科学研究中心、河海大学等。申宏伟专题探讨了 Delft3D 软件在水利工程中的数值模拟应用。

MIKE 系列软件是由 DHI 公司开发的用于水流、水质和泥沙输移的模拟计算的软件包,软件包整合在 MIKEZERO 中。DHI 的专业软件是目前世界上领先,经过实际工程验证最多的,被水资源研究人员广泛认同的优秀软件,如图 1.2 所示。软件的功能涉及范围从降雨→产流→河流→城市→河口→近海→深海,从一维到三维,从水动力到水环境和生态系统,从流域大范围水

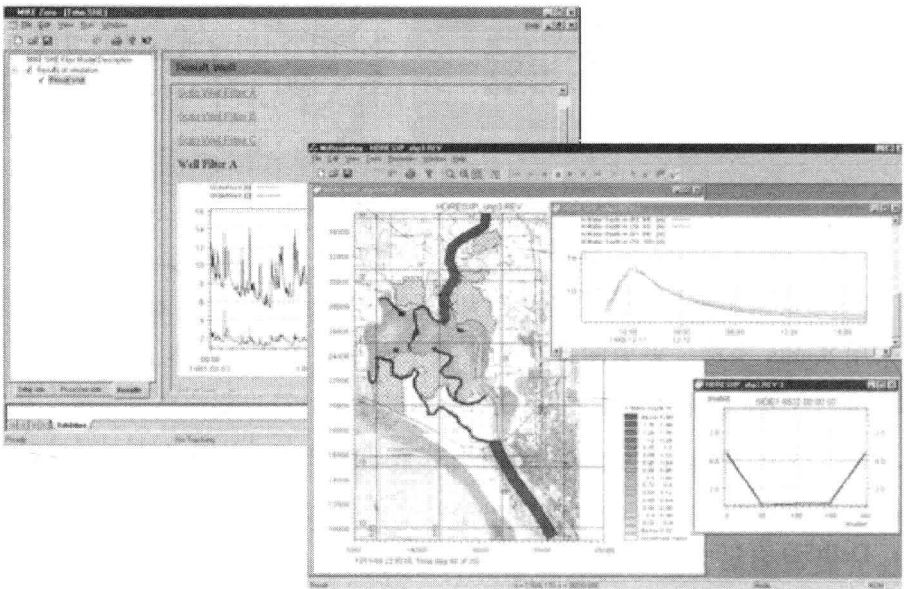


图 1.2 DHI 的 MIKE 操作界面

资源评估和管理的 MIKEBASIN, 到地下水与地表水联合的 MIKESHE, 一维河网的 MIKE11, 城市供水系统的 MIKENET 和城市排水系统的 MIKE-MOUSE, 二维河口和地表水体的 MIKE21, 近海的沿岸流 LITPACK, 直到深海的三维 MIKE3。其中 MIKE11 为一维水流模型, 主要用于河口、河流、灌渠及其他水体的水流、水质和泥沙的计算; MIKE21 为二维水流模型, 主要用于湖泊、河口、海岸及其他水体的水流、水质、波浪和泥沙输移计算, 计算中采用直角坐标网格及正交曲线网格等; MIKE3 为三维水流模型, 由水动力模型、紊流模型和泥沙输移模型三个模块组成, 主要用于自由表面水体的水动力计算, 适合于模拟河流、湖泊、河口、海岸等水体的水流、水质和泥沙输移; MIKEFlood 是一维、二维动态耦合的洪水模块。

MIKE 的计算模块也是基于有限差分法, 基本方程求解用 ADI 法, 采用交错网格离散。MIKE 提供了较为强大的后处理模块, 将数据与图形捆绑在一起, 可以更为方便地根据图形查找数据或者通过更改数据来实时修改图形。

MIKE 系列软件是国内引进相对较早且应用较多的数值模拟软件之一, 应用单位有浙江河口研究院、大连理工大学、河海大学、上海交通大学等。

SMS 是由 Brigham Young University 的环保模拟研究实验室 (Environmental Modeling Research Laboratory), 美国水道试验站 (U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station) 和美国联邦高速公路 (U. S. Federal Highway Administration) 联合开发, 如图 1.3 所示。

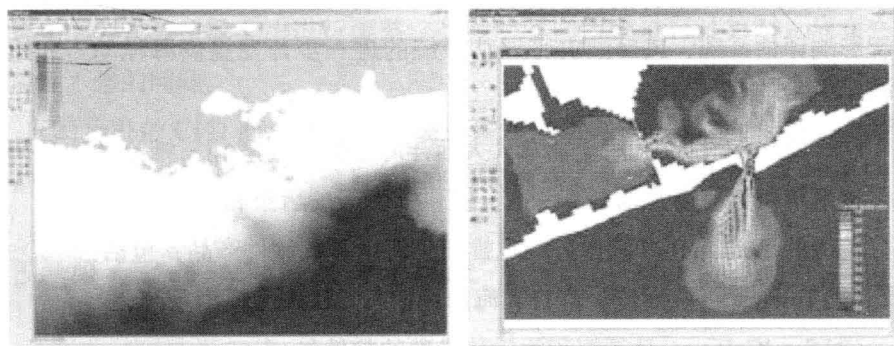


图 1.3 SMS 操作界面

SMS 是 Surface Water Modeling System 的缩写, 包括自由表面水流模型的前、后处理软件, 有二维和三维的有限元和有限差分模型以及一维水流模型, 包括水动力模型、波浪模型以及污染物和泥沙输移模型等, 适合任意形状的大小、复杂的网格的构建。

该软件计算模块相对较多, 用户可以根据实际情况选择不同的计算模块, 最为特别的是, 可以使用用户自定义的计算模块。

国内在杭州湾潮流数值模拟等项目中应用过该系统。

DALCOAST 河口海岸预报系统是加拿大达尔豪斯大学 (Dalhousie University) 海洋系科研人员最新的研究成果。该系统适用于沿海的风暴潮以及三维流场的数值模拟和预测预报。DALCOAST 是在 POM (Princeton Ocean Model) 数值模型基础上研究开发的, 由硬件系统和软件系统两部分组成。DALCOAST 在下列四方面优于其他同类的技术产品。

(1) DALCOAST 采用二元嵌套模式, 由低分辨率的元系统和高分辨率的子系统组成。低分辨率的元系统将提供全海域风暴潮的数值模拟和预测预报。高分辨率的子系统将提供局部海域风暴潮以及三维流场和温、盐场的数值模拟和预测预报。

(2) DALCOAST 有一套完整的输入资料和输出数据的可视化处理。

(3) DALCOAST 还采用了“季节性轻推 (Seasonal Nudging)”方法, 以减少数值模型的漂移。

(4) DALCOAST 特别适合系统的二次开发与应用, 为河口波浪掀沙和对工程影响评估系统、风暴潮灾害评估系统的进一步开发提供海洋动力和边界条件。

DALCOAST 目前已用于加拿大大西洋海域的风暴潮和三维流场的预测预报。该系统每天凌晨自动运算一次, 提供前一天的后报和后两天的预报。

英国的 Wallingford 软件公司也推出了海岸系统软件产品, 包括:

(1) Telemac——河流、河口和海岸的 2D、3D 水力模型系统;

(2) SandCalc——计算沉积物输移参数的软件包;

(3) FloodWorks——为流域和感潮地区提供实时灾情模拟预报的通用、模块化的系统软件。

1.2.2 CFD 数值模拟软件

Fluent 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件, 由 Gambit 和 Fluent 两部分组成, 主要用于流体、热传递以及化学反应的分析模拟等。Fluent 软件针对各种复杂流动的物理现象, 采用不同的离散格式和数值方法, 以期在特定的领域内使计算的速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合, 从而有效地解决各个领域的复杂流动问题。

CFX 是由英国 AEA 公司开发的一种实用流体工程分析软件, 用于模拟流体运动、传热、多相流、化学反应、燃烧等问题, 其优势在于处理流动物理现象简单而几何形状复杂的问题。

Phoenics 是由英国 CHAM 公司开发的模拟传热、流动、化学反应、燃烧过程的通用 CFD 软件, 网格系统包括直角、圆柱、曲面、多重网格及精密网格等, Phoenics 的开放性很好, 提供对软件现有模型进行修改、增加新模型的功能和接口, 可以用高级语言进行二次开发。

1.2.3 国外研究现状小结

以上简要介绍了一些国外较为成熟的河口海岸数值模拟软件以及通用的 CFD 软件, 这类软件均已经在不同程度上完成了模拟及可视化系统的集成, 具有操作界面友好、可视化程度高等优点, 且均有很好的应用。同时也存在以下问题。

(1) 国外河口海岸数值模拟软件只提供可执行软件, 不提供源程序。由于其选用的公式和参数无法进行调整, 当针对不同情况进行计算时, 尚存在着适应性不强的问题。

(2) 国外的 CFD 商业软件在解决一些水力学基本问题方面虽然很成功, 但是难以很好地应用到国内较为复杂的河口海岸工程实际问题中。

1.3 国内数值模拟系统研究现状

国内数值模拟系统的研究起步稍晚, 20 世纪 50 年代末已经开始对一些中小河流及其潮汐河口进行一维水流、泥沙和冲淤计算, 并着手进行计算方法

的研究。到 70 年代中期，国人发现本专业与国际先进水平的差距被拉大，于是奋起直追。近年来，随着计算机的高速发展，很多科研人员逐渐开始研究前后处理可视化及仿真，前后处理一般借助图形图像处理软件，但总体来看，集成性较好的数值模拟系统相对较少。本文主要探讨数值模拟可视化系统，下面就不过多地描述数值模拟算法的现状，而是从数值模拟可视化和数值模拟系统两个方面介绍研究现状。

1.3.1 可视化研究

刘晓波等对计算流体力学的可视化技术及其研究进展进行了综述，并指出计算流体力学的可视化内容主要有计算域的显示、计算过程及计算结果的显示与分析等。可视化技术具体可以分为对于标量场、矢量场及张量场的可视化，其中又分别包含了多种显示技术。矢量场的可视化技术包括三维流场表示方法、实时动态显示以及三维交互技术，这是当前研究的重点。计算流场显示技术及可视化模型的软件化研究也处在迅速的发展中。

在水动力数值模拟方面，目前关心较多的还是前后处理可视化研究，又分为前处理可视化和后处理可视化。从前处理来说，主要有网格剖分及其可视化，地形等值线及三维地形的渲染表达等内容，该部分一般通过商业图形软件(例如 Tecplot、Surfer、Grapher 等)或者通过简单的编程均可以实现，因此不是研究的重点内容。

大量的科研人员研究重点落在后处理的可视化，也就是通常提到的科学计算可视化，对于数值模拟产生的计算结果进行可视化处理。后处理的可视化研究开始于 20 世纪 90 年代，主要关心的内容有水流可视化、波浪可视化、泥沙可视化等，下面从四个方面进行介绍。

1.3.1.1 地形可视化

吕秋灵等(2002)介绍了可视化及其实时显示中数据简化方面的典型方法：层次细节方法、多分辨率模型方法，并进一步对三维地形的真实性研究作了阐述。

许家帅(2003)介绍了如何通过微软 VB 开发平台实现地形表面的三维可