

# 洪水演进三维模拟仿真系统可视化研究

袁艳斌<sup>1,2</sup>, 袁晓辉<sup>1</sup>, 张勇传<sup>1</sup>, 刘吉平<sup>1</sup>, 侯国祥<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 洪水演进仿真系统的研制, 是实施“数字流域”工程的重要组成部分; 结合洪水演进可视化目标的分析, 基于 Visual C++ 系统开发平台, 融 GIS 技术和 OpenGL 开发技术, 采用三角形逼近、光滑处理和加入法向量以控制光照的方式, 实现了流域地形及河床的三维可视化仿真; 应用广度优先搜索算法确定了运动水体与流域河床形态的自适应与自相依的关系, 使流域洪水演进模拟具有真实自然的可视化效果。所研制的系统雏形, 可有效的模拟流域洪水的三维演进过程;

**关键词:** 数字流域; 洪水演进; 广度优先搜索; 模拟仿真; 可视化

**中图分类号:** P628.4

**文献标识码:** A

以数字形式处理一切流域数据的“数字流域”<sup>[1]</sup> 是未来流域信息资源的主体核心, “数字流域”提供的信息在流域、水利、农业、林业、交通、环境、资源(土地、森林、水等)、城市建设、人口等众多领域都将产生广阔的社会和经济效益。“数字流域”的最终目的是流域信息的数字化、分析应用和可视化。要利用“数字流域”中极为丰富的信息, 需要先进的虚拟现实技术、WEBGIS 技术、多媒体技术、三维可视化仿真技术、地理信息分析处理组件技术及“3S”<sup>[2]</sup>、“5S”<sup>[3]</sup> 甚至“多 S”<sup>[4]</sup> 技术等作支持。

洪水演进的推算水文预报的重要研究课题之一, 有效的防洪减灾策略, 必须深入科学地认识流域的洪水演进规律, 行洪过程是洪水演进的非恒定流动和泥沙冲淤以及与之相应的河床变形的综合结果。这一过程的仿真模拟, 涉及数字流域技术, 综合利用水文学、水力学的基本理论和原理等多个学科综合交叉的问题, 而依据它们寻求洪水演进过程水位、河床、泥沙之间相互作用的规律产生的边界条件和参数, 则是模拟仿真真实洪水演进技术中的难点和基础。随着流域信息化的深入和“数字流域”工程的逐步展开, 对洪水演进的模拟仿真首先必须解决计算机的可视化技术, 甚至三维可视化模拟仿真的高度, 在此基础上引入水文学、泥沙运动等边界条件, 形成完善的仿真系统。本文主要从洪水演进模

拟仿真的三维可视化计算机实现技术加以研究。

## 1 洪水演进仿真系统可视化目标分析

洪水演进仿真系统是在数字化技术基础上, 在计算机生成的虚拟环境中, 对洪水在现实河道里的推进情况及洪水对流域内区域的淹没情况进行的仿真模拟。任何复杂的数据如果以视觉的形式表现是最易理解的, 可视化技术使人能够在三维虚拟世界中对具有形体的信息进行操作和分析。三维可视化技术是洪水演进仿真系统研制中计算机实现的技术关键所在。

在广泛的用户调查, 深入的需求分析, 详细的系统设计和兼顾当前及未来流域信息资源需求的基础上, 确定系统的硬件平台和软件开发及运行平台<sup>[5]</sup>。具体的, 针对流域遥感遥测资料, 根据洪水演进三维模拟仿真的需求, 必须利用现行的地理信息系统(GIS)技术作为三维数字景观的支撑技术, 这样既可以很容易地生成流域三维地形地貌景观图, 也可以利用 GIS 强大的数据分析处理功能对遥感遥测资料予以处理生成所对应的矢量数据结构<sup>[6]</sup>, 为流域洪水演进与流域地理环境的自适应和自相依关系提供基础数据源。为了对洪水在虚拟三维数字景观背景上研制交互式的三维可视化和三维仿真技术, 必须

收稿日期: 2001-10-05。

作者简介: 袁艳斌(1970-), 男(土家族), 湖北恩施人, 中国地质大学(武汉)讲师, 2000 年获中国地质大学地球探测与信息技术博士学位, 现在华中科技大学进行博士后研究。目前主要从事地理信息系统和数字流域研究。联系电话: 027-87482363, E-mail: ybyuan@cug.edu.cn

研究洪水演进的三维计算机动态可视化模型,包括主次河道级别确定及河道边界的自搜索算法和洪水演进动态过程中复杂的曲面、峰面形态模拟模型。最后,在 visual c++ 系统开发平台上融 OpenGL 图形硬件接口编程技术和 GIS 技术于一体以实现洪水演进二维和三维目标对象帧缓冲的动态显示。

三维可视化仿真技术主要提供用户操作的界面与计算结果的可视化输出,它包括前处理和后处理两大模块。用户界面是前处理中人—机交互的窗口,用于指定计算用的数据源、设置仿真精度、初始条件、边界条件等控制数据。后处理包含两部分:一部分是漫游驱动,它提供了在后处理中人—机交互的工具,可以进行漫游、查看、缩放等功能的计算工作;第二部分是计算结果的绘制,主要是在 GIS 数据基础上真实地形的绘制与水面、波面和洪水演进情况的动态模拟绘制和立体显示漫游等。系统的三维可视化仿真技术的实现应能够:①根据遥感遥测数据,自动进行数据预处理,快速生成流域地理地貌三维景观图;②根据相关水文资料数据,能够在地理环境三维景观图基础上快速生成包括枯水期水体在内的流域三维立体图;③提供流域中洪水运动的动态三维模拟仿真,正演和反演洪水的推进运动轨迹和洪水水位上涨过程及立体仿真淹没的区域;④提供洪水演进在时空上行为变化的三维虚拟仿真及可能引发溃堤事件所影响的区域立体影像再现;⑤提供流域及洪水演进在空间不同角度和不同方位上的立体仿真,能够自由旋转,让用户从各个角度观察洪水行为及可能淹没的区域;⑥实时显示洪水的流速、流量,洪水淹没各时段的水位、所淹没区的面积等参数。

## 2 洪水演进仿真系统三维可视化技术实现

系统实现是在系统目标分析的基础上,针对具体的软硬件平台完成系统计算机模型的建立、编程与调试、模块组装等<sup>[7]</sup>。洪水演进仿真系统三维可视化技术包括对流域地形、河道和水体的色彩处理、光线处理、纹理映射、动画、雾化效果、透明处理等等,以期能实现描述流域地形、河道和水体的真实感实体。系统实现是一个融 visual c++ 编程与 OpenGL 技术和 GIS 技术于一体的复杂系统研制,该系统涉及多种复杂算法模型及其计算机程序设计实现。

### 2.1 流域真实地形的三维可视化

流域真实地形的三维可视化是采用 GIS 技术,对相应比例尺的地形底图进行数字化形成包含等高线信息的数字地图矢量数据文件,运用选定的 GIS 软件平台(如 MapGIS、Arc/Info 等)生成数字高程模型(或直接采用遥感遥测影像进行立体相对,交互式提取地形等高线),而后转换成包括 X、Y、Z 数据信息的数据文件,进而编写代码进行三角形网格化处理,生成由许多小网格,即多边形构成的有高低起伏的曲面地形。为了提高地形仿真效果,需要计算每一点的法向量以产生真实的光照效果。法向量的计算是每一个三角形顶点的两个向量的叉积向量,再将该向量单位化而来,一个与具体顶点相关联的法向量决定了该顶点所在的物体表面在三维空间中的方向,以及在转动时该点接受到的光量。下面是建立法向量的数学模型。

若曲面为显示方程

$$V(s, t) = V[X(s, t), Y(s, t), Z(s, t)],$$

式中  $s, t$  为曲面的参数,  $X, Y, Z$  为可微函数,  $\frac{\partial V}{\partial s} \times \frac{\partial V}{\partial t}$  为曲面法线。

若方程为隐式,法线矢量由函数梯度给出,则

$$\Delta F = \left[ \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial z} \right]$$

曲面由多边形近似得到,因此,法向量的计算也只能由多边形的数据得到,取每一个三角形的三个点,其叉积  $(V_1 - V_2) \times (V_2 - V_3)$  垂直于平面;为了避免相邻平面上平均法线某个值过大,必须对求得法线做归一化处理,归一化向量

$$\text{Length} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

并把所求得向量的每一个组成部分除以这个长度<sup>[7]</sup>。

在 visual c++ 语言环境下以上算法的实现函数如下

```
void CSimulateDoc::normalizedcross(double *u,
double *v, double *nn)
{
    double l; // u, v 为两个相交向量
    nn[1] = u[2] * v[3] - u[3] * v[2]; // nn[1]
    为法向量在 x 轴上的分量
    nn[2] = u[3] * v[1] - u[1] * v[3]; // nn[2]
    为法向量在 y 轴上的分量
    nn[3] = u[1] * v[2] - u[2] * v[1]; // nn[3]
```

为法向量在  $z$  轴上的分量

```
l=sqrt(nn[ 1] *nn[ 1] +nn[ 2] *nn[ 2] +nn[ 3] *
nn[ 3] );
nn[ 1] /=l; //归一化
nn[ 2] /=l;
nn[ 3] /=l;
}
```

在实际开发中, 为了增强流域三维地形的逼真度, 我们采用清江流域的遥感图片(TM、SPOT)和航拍照片, 经计算机图像处理作为地貌纹理。利用相似变换的原理, 采用人为指定对应标志点的实物映射方法将该区的 TM 图像贴到三维地形曲面上。该方法实现: 先在图像和上述生成的三维网格图形上找到几个对应的标志点, 例如地形的高点、河道的拐点和水系的交叉点等等, 这通常是很容易做到的; 在分别读取这些点的坐标后, 以图形上的对应点坐标为准, 改正图像上的对应点坐标以便使二者重合; 然后根据对应点坐标对图形和纹理各部分的坐标进行插值, 计算出图形上其它点的纹理坐标, 使物体空间坐标  $(x, y, z)$  与纹理空间坐标  $(u, v)$ <sup>[8]</sup> 实现整体对应。据此, 我们在进行清江流域洪水演进模拟仿真系统研究中, 生成了清江流域真实生动的地貌景观。

## 2.2 河道边界搜索模型的建立

洪水演进过程的动态三维可视化主要是模拟洪水在河道中的推进和淹没行为的时空状态, 对它的模拟必须在对流域真实地形仿真的基础上进行, 水流与(可动)河床构成一个对立的统一体, 相互作用, 双重反馈, 使得洪水与流域地形及河道在时空上呈现一种动态自适应的相依关系。为了反映洪水演进在空间上随流域地形和河道的瞬时变化, 建立河道边界的自搜索和自控制的计算机实现模型是首要的, 这样能更真实有效的再现洪水演进过程的空间行为。

### 2.1.1 边界搜索问题是无向图中寻找连通构件的问题

在建立河道边界搜索模型时, 考虑上述三维地形在二维平面上的投影, 将高程视为像元上的附属信息, 这样像元阵列可视为规则排列, 从而大大简化了模型的建立过程。边界搜索的判断依据为:

1. 三角形网格平均高程是否低于给定水位;
2. 其是否与已淹没三角形网格相邻。

由于二叉搜索树适合描述具备层次结构的对

象, 而地形数据不具备这种层次关系; 因此, 改用图来描述流域地形数据之间的关系。由图(graph)的定义<sup>[9]</sup>: 图  $G=(V, E)$  是一个  $V$  和  $E$  的有限集合, 元素  $V$  称为顶点(vertex), 元素  $E$  称为边(edge),  $E$  中的每一条边连接  $V$  中两个不同的顶点。图是一个用边连接在一起的顶点的集合。对应栅格地形数据, 每一三角形网格为一节点, 相邻三角形网格如在当前水位下满足前述边界搜索条件, 即视为邻接节点, 由无向边(undirected edge)所连接。因为图中所有的边都是无向边, 所以这是一个无向图(undirected graph)<sup>[9]</sup>。设  $G$  是一个无向图, 当且仅当  $G$  中每一对顶点之间有一条路径时, 可认为  $G$  是连通的。从顶点可到达的顶点的集合  $C$  与连接  $C$  中顶点的边称为连通构件(connected component)<sup>[9]</sup>。将投影后的地形视为一种结构特殊的图, 河道和洪水淹没区域为连通构件, 这样, 边界搜索的问题也就转化为在无向图中寻找连通构件并据此设计相应算法的问题。

一般意义上的图在任意两节点之间都可能边相连接, 故节点之间的关系可能很复杂, 在流域地形图的规模上, 这种连接边将是天文数字, 由计算机处理的时间过长而无法接受。为解决这个问题, 在程序编制过程中, 我们把网格地形作为一种特殊的无向图结构, 与通常的图有所不同: ①只考虑相邻节点之间的关系; ②相邻节点之间的边无权值; 这意味着只有空间上相邻的两节点之间才有边相连, 而不必考虑空间上不相邻的节点之间的联系, 为简单计, 我们把有相邻边的三角形视为相邻节点, 经过如此处理之后, 边的数量大大减少, 并可使用有限的数据来描述节点(三角形网格)的性质成为可能。

### 2.1.2 广度优先搜索算法模型的确定

为求出流域地形图的连通构件, 即要判断出河道, 我们采用广度优先搜索<sup>[10]</sup>。实现过程为以上游河道中一点为起始点, 由近至远, 依次访问和起始点有路径相通且路径长度为 1, 2, ... 的节点(此处以相邻且标高低于水位为有路径相通)。

如图 1 所示, 深色表示三角形网格的平均高程低于当前水位, 浅色表示三角形网格的平均高程高于当前水位。假定从 31 号网格开始进行广度优先搜索, 其搜索结果为 31→30→32→79→81→33→78→80→82→34→77→83→35→76→84→36→85。其中, 起始网格为 31, 与其有路径相通且路径长度为 1 的网格是 30、32, 路径长度为 2 的网格是 79、81、33, 路径长度为 3 的网格是 78、80、82、34, 路径长度为 4

的网格时 77、83、35，路径长度为 5 的网格是 76、84、36，网格 85 的路径长度为 6。可见，在起始点附近，随着路径长度的增加，与起始点有同一路径长度的节点数也是渐增的，但是，在搜索范围大到整个河道宽度后，其数量可望基本保持不变。广度优先遍历的计算机算法模型如下：

```
void CSimulateDoc::Guangdusearch()  
{  
    createaqueue; // 建立一个队列 queue  
    enQ(&node, queue, k); // 将第一个节点放入队列  
    while(1) // 开始遍历  
    {  
        if(p1->trianglenum%2 != 0) { // 当前点是奇数  
            if(三角形满足广度搜索条件){  
                enQ(&j, queue, p1->visitorder+1); // 将该节点加入队列  
            }  
            else { // 当前点是偶数  
                if(三角形满足广度搜索条件){  
                    enQ(&j, queue, p1->visitorder+1); // 将该节点加入队列  
                }  
            }  
        }  
    }  
}
```

2.3 洪水演进过程的动态三维可视化

洪水演进过程是指随时间的单调连续性变化导致不同时刻水位的振荡变化在地形高程上的动态反映，以三维地形和不同水位来综合演示洪水演进行为的时空变化及水体形态，侧重于对洪水在不同时刻演进状态的表达。通过对洪水演进过程的三维仿真可以分析在一定的水位下，流域地形淹没的状态，进而计算出当前水位下水体的势能及其他一些分析数据从而对于大坝的安全及防洪都可以进行精确的

仿真。

在编程实现时，定制一个计时器，每经过一段时间触发系统按新的要求重新绘制地形和淹没后的水面，水面的高度可以逐渐的上涨或下降。由于系统面对的是流域地形、影像、水文等海量数据，必须解决处理机在处理大数据量所导致的淹没行为演示的速度问题。为此，将地形的显示与洪水上涨的显示相分离，当洪水上涨的过程中，每一次重绘时不必重绘地形，当然如果出现的是对鼠标要求变换地形的消息响应时，应将地形也全部重绘。

应用本模块，可创建连续变化的洪水淹没层，可局部或全区域根据水面的高程来立体地观察淹没范围，对于局部洪水淹没地区可实时计算出某一高程洪水水面淹没的面积和水的体积，这对于洪水灾前预测非常方便。图 2 是模拟仿真清江流域洪水淹没（某一时刻水位）的演示效果。

3 结 论

在洪水演进三维仿真模拟系统的开发中，我们重点研究流域地形三维的可视化、特殊效果的生成、图形控制与视点切换技术、洪水淹没、洪水演进的计算机仿真模拟技术，这几项技术是洪水演进计算机模拟仿真实实现的基础。本系统具有技术先进、信息表达方式多样化、用户界面良好、操作简单等特点。但目前的系统离可靠、实用的洪水演进三维模拟仿真尚有较大距离，主要表现在天然冲积河流行洪过程的合理模拟，不是简单的计算机信息处理和数值模拟的技巧问题，而是与洪水运动过程的内在物理特性密不可分。若结合泥沙运动，以及将洪水的水文学和水力学模型结合起来，取得较为准确可控的边界条件，则模拟仿真效果更加理想，也可以获得更广泛和更精确的洪水演进演算数据。

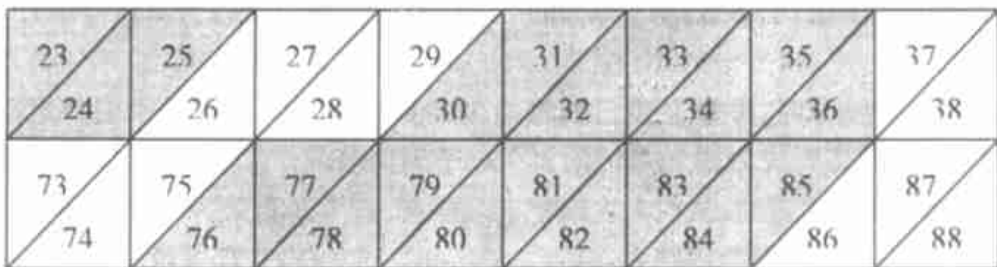


图 1 河道边界搜索示意图

Fig. 1 Illustrate for searching boundary of stream channel



图 2 清江流域洪水演进的三维可视化

Fig. 2 dimesional visualization of flood routing at Qingjiang valley

参考文献:

[ 1 ] 承继成, 林琿, 周成虎, 等. 数字地球导论[ M] . 北京: 科学出版社, 2000: 206 ~ 244

[ 2 ] 李德仁. 论 RS、GPS 与 GIS 集成的定义、理论与关键技术[ J] . 遥感学报, 1997, 1(1), 64 ~ 68

[ 3 ] 李德仁. 论全球定位系统(GPS)、数字摄影测量系统(DPS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和专家系统(ES)的结合[ J] . 测绘通报, 1994, (1): 3 ~ 8.

[ 4 ] 袁艳斌, 刘刚, 韩志军. “数字国土”在“数字地球”中的地位及其模型探讨[ J] . 地质科技情报, 1999 18(3): 90 ~ 94

[ 5 ] 邵维忠, 杨芙清. 面向对象的系统分析[ M] . 北京: 清华大学出版社, 1998. 1 ~ 41.

[ 6 ] MolenaarM. ATopologyfor3—DVectorMaps[ J] . ITC Journal, 1992, (1): 25 ~ 33

[ 7 ] 李薇, 徐国标, 李果, 等. OpenGL 3D 入门与提高[ M] . 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 470 ~ 472

[ 8 ] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学[ M] , 北京: 清华大学出版社, 1995 (第二版). 124 ~ 131.

[ 9 ] (美)SartaSahni(汪诗林, 孙晓东译). 数据结构、算法与应用——C++ 语言描述[ M] . 北京: 机械工业出版社, 1999. 365 ~ 397.

[ 10 ] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构[ M] . 北京: 清华大学出版社, 1997, 168 ~ 170

# The Study on the Visualization of Three-dimensional Simulation System of Flood Routing

YUAN Yan-bin<sup>1, 2</sup>, YUAN Xiao-hui<sup>1</sup>, ZHANG Yong-chuan<sup>1</sup>, LIU Ji-ping<sup>1</sup> and HOU Guo-xian<sup>1</sup>

(1. College of hydropower and information engineering, Huazhong University of science and technology, Wuhan 430074 China;  
2. Faculty of earth resources, China University of Geoscience, Wuhan 430074 China)

**Abstract:** The study and development of flood routing simulation system is an important component of “digital valley” engineering. According to the analysis of flood routing visualization aim, three—dimensional simulation of valley’s terrain and riverbed is realized, based on visual c++ programming platform, integrating GIS and OpenGL technology, applying triangular mesh, smooth processing and normal vector to control manner of illumination. The system can materialize the relation of self-adapting and dependence between flood and riverbed with breadth-first search arithmetic, and visual effect of flood routing is more natural. This rudimental system can simulate the course of flood routing effectively.

**Key words:** digital valley; flood routing; breadth-first search; simulation and emulation; visual technology