

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20120224. 2003. 013

# 虚拟流域环境中河道演变的整体自动建模及可视化分析

冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 王 浩

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 将三维虚拟仿真技术和科学计算可视化技术相结合应用于河道泥沙冲淤分布规律分析中, 提出了基于虚拟现实技术的泥沙冲淤过程三维可视化技术框架并构建了相应系统。提出并研究了河道边界自动识别、河道演变过程数据模型的自适应生成、动态河道与大范围场景的无缝嵌套建模、多层细节层次与无缝拼接、时空过程可视化与控制显示模式、动态河道的交互、基于局部插值的断面提取等系统中使用的关键技术。以三峡坝区河道为例, 研发了三峡坝区河道演变时空过程可视化表达系统, 证明了提出方法的实用性和可行性。

关键词: 数字流域; 虚拟现实技术; 河道演变; 整体自动建模; 可视化分析

中图分类号: TV143; TV147 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2012)02-0170-09

泥沙冲淤过程可视化仿真系统可从流域、区域全局或局部实现泥沙淤积过程的三维动态可视化, 将离散数据转化为直观的动态或静态画面, 有助于从纷繁复杂的数据中研究水沙运动规律, 从而为泥沙冲淤状况分布数据的进一步分析与解释提供便利<sup>[1]</sup>。这不但有利于计算结果的全局表达, 而且易于明晰冲淤变化过程, 有助于计算结果的分析研究。

数字流域仿真的研究重点是水体和泥沙。国内外研究主要集中于二维 GIS 在泥沙学科的应用研究, 如 Hans 等利用 GIS 对新西兰 Canterbury 海滩的冲刷进行了研究<sup>[2]</sup>, 吴泳锋基于 GIS 实现了水沙运动模拟信息的可视化<sup>[3]</sup>, 邓吉秋基于 GIS 的空间数据处理与空间分析, 提出了目平湖泥沙冲淤变化空间定量计算与分析的综合方法<sup>[4]</sup>。这种二维静态的表现手法不能有效地表达三维空间综合信息, 虚拟现实技术以其更加直观的视觉表现方式、更加便利的交互手段在水利领域有着广泛应用前景。虽然基于虚拟现实技术的大范围水体仿真研究已有一些成果<sup>[5-6]</sup>, 但是基于三维虚拟仿真平台大范围泥沙冲淤过程的三维可视化研究尚未有具体进展。

本文在泥沙冲淤过程动态仿真方面, 以三峡库区为例, 研究了河道边界的自动识别, 提高了边界提取精度和效率, 提出了虚拟仿真平台与计算结果或测量数据集成的统一网格体系结构, 实现了河道演变的三维动态建模, 并研究了动态河道与周围静态场景无缝嵌套建模的方法; 由于计算机技术的发展, 研究范围越来越大, 时空精度越来越高, 必须解决流域三维场景漫游中由于模拟范围太大和数据精度高而带来的视觉停滞、延缓等不能满足实时性要求的情况, 提出了采用 LOD 技术和无缝拼接技术以实现大范围河道泥沙冲淤过程的动态仿真, 采用流域三维场景与动态河道的嵌套建模以及动静河道互相切换来减少系统的渲染量和提高场景的实时性; 为了实现三维虚拟仿真平台能够为工程规划、论证和设计提供科学决策, 便于分析河道泥沙冲淤过程, 采用了颜色映射技术表达河道冲淤的时空分布; 提出了时空过程可视化与动态控制显示模式; 同时研发了基于局部插值的河道断面冲淤分析的功能。

收稿日期: 2011-06-21; 网络出版时间: 2012-02-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20120224.2003.013.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项经费资助项目(200901031; 201101026)

作者简介: 冶运涛(1983-), 男, 河南许昌人, 博士, 主要从事数字流域、河流动力学与水资源调度方面的研究。

E-mail: yeyuntao@gmail.com

### 1 泥沙冲淤过程三维可视化系统总体框架

系统总体框架如图 1 所示, 主要分为河道演变三维模型生成模块、流域三维场景建立模块、综合数据库模块、三维可视化引擎模块和系统专业功能模块五大部分。其中河道演变三维模型生成模块是本文研究重点, 主要提出并研发与原型观测数据、实体模型试验数据与数学模型计算结果数据相互交互的通用接口技术, 将河道的冲淤变化信息通过科学可视化技术展现于三维场景中, 完成科学性与艺术性的完美结合, 实现虚拟现实技术与科学计算可视化技术在水利专业领域的巧妙融合; 流域三维场景模块是实现研究区域地形地物场景的虚拟重构, 这些模型在一定的尺度内结构不会发生大的或者急剧变化, 属于静态实体模型的范畴; 综合数据库模块是系统的“大脑”, 是流域或者河流信息存储的数据仓库, 驱动流域自然水循环和社会水循环过程组成的二元模式在计算机中进行数字化存储与可视化表达; 三维可视化引擎是整个系统的“助推器”, 是系统面向专业人员或者非专业人员的窗口, 承担着计算机世界与人类世界的交流与沟通的任务; 系统专业功能模块是面向流域应用的, 与其它领域的仿真系统相比, 具有自己的专业特色, 它将各种处理信息封装起来, 只需用户简单的操作, 便能对各种规则数据快速挖掘与科学分析。图中着色框内容是本文研究重点。该研究是在笔者已开发的数字流域虚拟仿真平台<sup>[7]</sup>基础上进行的。

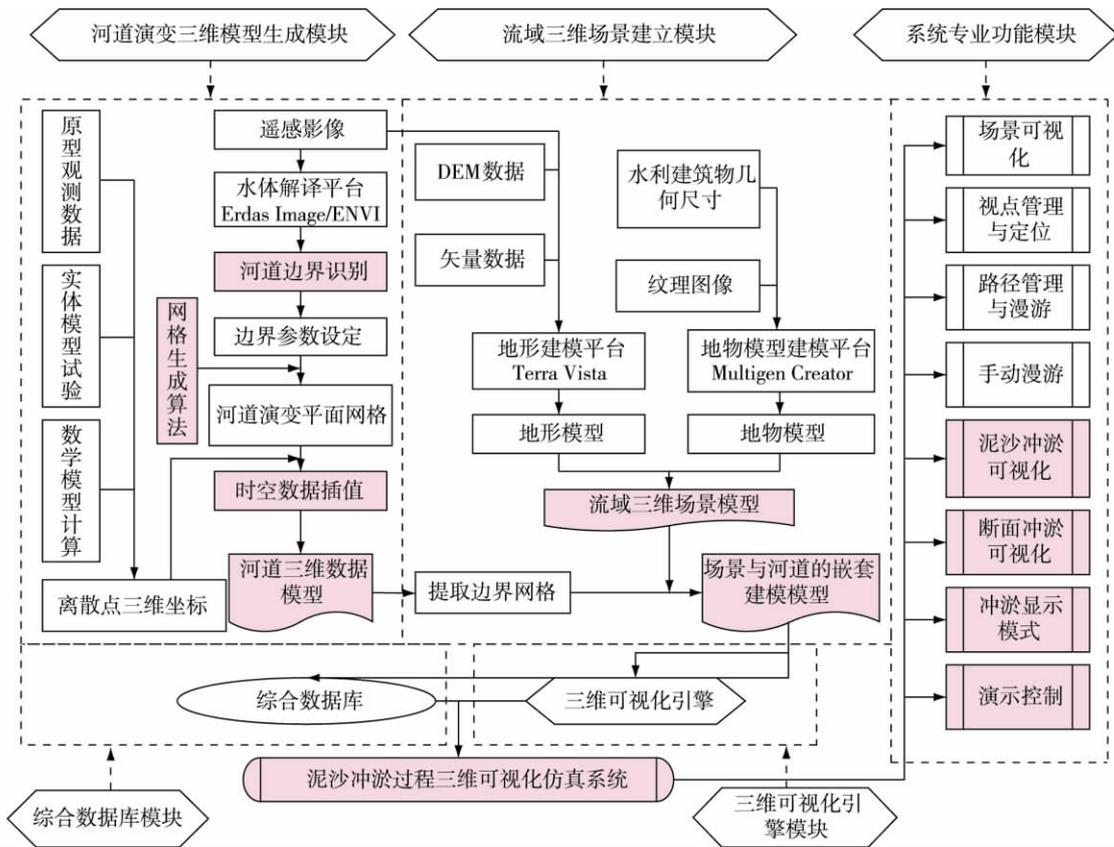


图 1 基于虚拟现实技术的泥沙冲淤过程三维可视化系统总体框架

Fig. 1 Overall framework of 3D visualization of fluvial process based on virtual reality technology

### 2 河道边界交互识别

河道边界交互识别的主要步骤: 首先选择遥感影像和三维地形相同的投影坐标系和参数, 建立高精度成像分辨率扫描遥感影像或者航拍图的坐标系; 其次利用遥感图像处理软件 ENVI 或者 ERDAS 对影像数据除

噪和假彩色合成,假彩色合成时选择能很好反应水体淹没区域红外波段;最后对影像增强处理和去噪后提取水体边界。以河道所在地区的地形图为背景,选择 5 个左右具有地物特征或者明显地形特征的控制点配准建立图像与地形之间的映射关系,确保提取的边界能精确地反映河道边界,在配准后的图像上沿着河道水域边界矢量化建立湖面边界矢量多边形<sup>[8]</sup>并保存为 GIS 常用的 Shapefile 类型,通过自主开发的读取接口将其保存为文本格式<sup>[7]</sup>,作为河道演变自动建模的边界约束。

### 3 河道演变自适应建模

#### 3.1 河道演变统一网格建模

考虑到河道演变数据模型既要进行泥沙冲淤信息的有效可视化表达,又能够与三维虚拟场景的无缝融合,首当其冲的就是建立统一的网格体系。该网格体系主要采用 Thompson 等提出的椭圆型偏微分方程生成网格的 TTM 法生成河道三维数据模型,控制方程的形式及离散、网格形状与疏密调整、边界修正和求解见文献[7]。

#### 3.2 基于面向对象语言的算法实现过程

在三维虚拟仿真平台上采用面向对象编程语言 C++ 将以上算法封装成类,为以后的应用和改进提供了灵活接口。网格生成的步骤如下:

(1) 边界离散 输入河岸两边系列坐标点,设定纵横网格数,等距离离散边界。

(2) 初始网格生成 根据离散后边界点插值生成初始网格。合适的插值方法能提高网格生成速度和精度,系统选用通用性较好的代数网格生成且生成初始网格质量高的无限插值法<sup>[9]</sup>自动生成内部点。

(3) 边界点修正 根据前文所述方法计算出边界点坐标的新值,并将其赋予相应边界点,即沿边界滑动边界点至与网格正交位置,从而满足边界点正交性要求。

(4) 控制方程求解 用松弛迭代法求解由椭圆型偏微分方程组成的网格生成控制方程<sup>[7]</sup>,求解关键是选择合适的松弛因子,便于加快求解速度。研究区域形状比较规则选择超松弛迭代法,就可以得到较快收敛速度,否则用欠松弛迭代法,保证迭代运算收敛。本文选用欠松弛迭代法,以适应具有复杂边界的天然河道网格生成,选取欠松弛因子为 0.5。

(5) 收敛条件判断 按照式(1)比较  $k$  次求解的坐标  $(x^k, y^k)$  与  $k+1$  次的坐标  $(x^{k+1}, y^{k+1})$  的最大相对误差是否满足给定误差值  $\varepsilon$ 。如果小于  $\varepsilon$  就停止计算,进入下一步;否则返回第(3)步,继续迭代求解,直至最大相对误差小于  $\varepsilon$  求解出满足精度要求的  $(x, y)$ 。

$$\max \left( \left| \frac{x^{k+1} - x^k}{x^k} \right|, \left| \frac{y^{k+1} - y^k}{y^k} \right| \right) \leq \varepsilon \quad (1)$$

(6) 网格及边界点的输出显示 程序生成的是结构性网格,节点之间拓扑关系明确,设置 OpenGL 绘制图元模式为四边形,已经生成节点坐标就可以实现在三维平台上的显示,若生成网格效果不好,可以调整参数重新生成。边界点输出是为研究动态河道与周围场景的无缝集成做准备。

#### 3.3 泥沙冲淤信息的批提取

泥沙冲淤信息的提取是从观测或模拟的时间系列数据中插值计算出上述网格节点的高程信息。泥沙冲淤时序信息或者以数据库方式存储,或者以文件方式存储。若以前者方式存储,直接调用 SQL(Structure Query Language) 语句从数据库表中查询满足条件的数据,就进行批处理;以文件方式存储又分为两类,一类是以单个文件存储,另一类是分多个文件存储。其中针对多个文件存储方式,通过建立存储对应各个时刻的多个文件相关简要信息的索引文件,保证泥沙冲淤信息提取的高效性;泥沙冲淤信息插值时,首先打开索引文件,逐条读取文件信息,然后依据索引得到的文件名称,打开对应该时刻的文件,再读取存储的泥沙冲淤信息,将其插值到河道平面网格上生成泥沙冲淤三维数据模型。论文利用已有的三峡坝区的模型试验资料,将三峡坝前河道冲淤试验数据作为源数据,选用已被证明能够有效地用于地学数据插值的反距离加权插值算

法<sup>[1]</sup>计算河道平面网格节点的高程值, 从而构建河道演变三维数据模型, 以便与其它空间信息的分布模式进行比较。

## 4 动态河道层次细节模型及其与场景无缝拼接

### 4.1 河道细节层次模型

系统在帧循环过程中, 要实时更新和渲染河道数据, 大范围高精度河道动态显示势必影响系统运行效率。由于河道形状狭长, 从高空漫游观察整个流域场景时, 无法看到河床冲淤变化, 可以选择静态水体纹理图片映射到河道网格, 满足视觉浏览即可; 近距离观察分析河床动态冲淤规律时, 视点观察范围有限, 只能局限于河道的部分区域, 就可以采用分块分层的方式解决大范围河道绘制显示的实时性问题。在视点实时调整过程中, 根据视点与河段代表点的距离选择对应的层次细节模型, 不同河段层次模型可能存在不一致的情况, 则需要研究无缝拼接技术, 详细算法参阅文献 [10]。

### 4.2 动态河道与场景无缝拼接

伴随水沙条件变化, 河道冲淤处于不断调整过程中, 这种动态变化带来了其与周围流域三维场景的融合问题, 即两者之间出现了裂缝, 破坏了三维场景的真实性和沉浸感。为解决该问题, 提出了动态河道与周围场景无缝拼接的方法, 即引入 GIS 领域中线目标缓冲区生成的思想自动生成动态河道边界与周围场景的公共带, 形成无缝嵌套建模结构, 如图 2 所示。

线目标缓冲区生成是以线状目标为参考轴线, 离开轴线向两侧或单侧沿着法线方向平移一定距离, 并在线端点处以光滑曲线连接, 所得到的点组成条状区域。线缓冲区生成主要包括分段叠加、凸角圆弧和角平分线等 3 种方法<sup>[11]</sup>。文中采用角平分线法实现动态河道与周围静态场景无缝集成。

如图 3 所示, 仍取河道边界上任意相邻 3 点依次为 A、B 和 C, 其相应坐标分别是  $(X_A, Y_A)$ 、 $(X_B, Y_B)$  和  $(X_C, Y_C)$ 。由于两边平行线的对称性, 不失一般性, 取边界左边平行线进行说明。河道边界距离平行线距离为  $h$ 。A 到 B 点的方向角为  $\alpha_1$ , B 到 C 点的方向角为  $\alpha_2$ ; 在 B 点前进方向的左角为  $\theta$ , B 到 B' 点的方向角为  $\beta$ , 令 B 到 B' 的距离为  $d$ , 则这些参数的数学关系为

$$\theta = \begin{cases} \alpha_1 - \alpha_2 + 180 & \text{当 } \alpha_1 - \alpha_2 + 180 < 0 \\ \alpha_1 - \alpha_2 + 180 + 360 & \text{当 } \alpha_1 - \alpha_2 + 180 > 360 \\ \alpha_1 - \alpha_2 + 180 - 360 & \text{当 } \alpha_1 - \alpha_2 + 180 > 360 \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} \alpha_2 + \theta/2 \\ \alpha_2 + \theta/2 - 360 & \text{当 } \alpha_2 + \theta/2 > 360 \end{cases} \quad (4)$$

$$d = \frac{h}{\sin(\theta/2)} \quad (5)$$

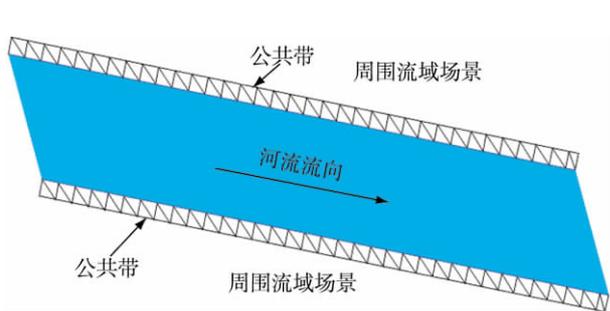


图 2 无缝嵌套建模示意图  
Fig. 2 Sketch of multilevel terrain

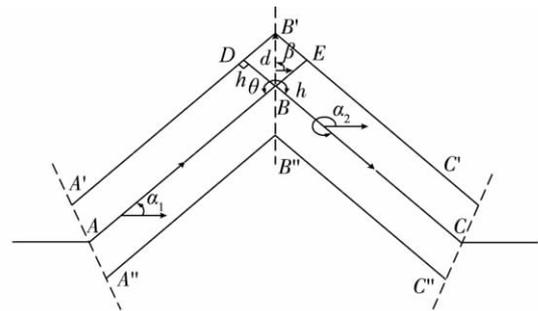


图 3 公共带生成原理  
Fig. 3 Sketch of public area generation

由图 3 所示各变量几何关系可知, 河道边界角平分线的转点  $B'$  的坐标计算公式为

$$\begin{cases} X_{B'} = X_B + \frac{h}{\sin(\theta/2)} \cos\beta \\ Y_{B'} = Y_B + \frac{h}{\sin(\theta/2)} \sin\beta \end{cases} \quad (6)$$

由对称性可知, 将上式中的  $h$  换作  $-h$  代入, 可以计算出右平行线转点  $B''$  的坐标。

$$\begin{cases} X_{B''} = X_B - \frac{h}{\sin(\theta/2)} \cos\beta \\ Y_{B''} = Y_B - \frac{h}{\sin(\theta/2)} \sin\beta \end{cases} \quad (7)$$

河道与场景的公共带的生成是位于河道外侧, 根据边界环绕方向的不同, 则外侧的定义显然不同, 如果边界点逆时针排序, 那么右侧是边界外, 则平行线的点坐标的求解采用式(7)进行计算; 对边界点按照顺时针排序的情况, 则组成外侧平行线的点的计算采用式(6)。在计算过程中, 河道属于大范围流域场景的一部分, 其边界是封闭的, 对于首尾点所对应的组成平行线的点坐标求解需要借助两者组成的矢量在空间的方位来计算。

## 5 泥沙时空过程四维可视化

### 5.1 河道泥沙冲淤时空过程虚拟表达

河道冲淤过程采用颜色映射技术表示, 顶点映射颜色值选择取决泥沙冲淤值大小, 用不同颜色渲染不同冲淤区域, 使用户对河床冲淤分布状况一目了然, 较之用单一颜色均匀着色的模型, 更具有立体感和真实性。以三维网格节点选取的颜色值为基础, 将网格点坐标与具有时间特性的泥沙冲淤数据结合起来, 建立对应时空维的三维泥沙冲淤场, 依据计算时刻推移, 就形成了动态三维泥沙冲淤场。河床动态性通过空间点位置垂直变化直观地表现, 而对应于不同时刻的泥沙冲淤值变化通过颜色差异等地图视觉变量逐一按时间显示, 从而表现泥沙冲淤值动态分布情况。

河道空间分布的高程差与周围的高山峻岭相比, 几乎反映不出其高程变化。常用的高程同比例拉伸法往往造成成倍放大的虚假的泥沙冲淤结果, 因此提出光照阴影方式强化三维显示效果, 反映高程差变化。由于视点位置移动与观察角度变换, 同一位置获取的光照强度不同, 就会显示出不同的轮廓效果, 河道高低走向趋势就会表现出来; 该种方式关键是计算三角面顶点法向量, 利用具有显式拓扑关系特点的结构性网格, 求解连接某顶点的所有三角形面的单位法向量, 然后加权求解该顶点的单位法向量。此处选用顶点单位法向量而不是三角形面单位法向量, 原因在于前者保证了面与面之间光照效果的连续性, 而不会出现“裂痕”。

颜色映射实现步骤如下: ①设计表达冲淤变化的颜色表。颜色表中一般采用由暗到亮的色系来表达冲淤值从小到大的变化, 并且表中每种颜色有一个入口值(标识值); ②按给定冲淤值间隔计算分带数; ③计算网格节点冲淤值所属带数; ④按照每个网格节点所属带数索引颜色表中的颜色号, 并据此颜色绘图; ⑤基于多边形各顶点颜色值线性内插出多边形内其余各点的颜色值, 使整个多边形颜色分布呈现为非常连续的变化。

以上步骤完成后, 接下来就要绘制三角形面。由 OpenGL 提供内置函数 `glBegin( GL_TRIANGLES)` 和 `glEnd` 的控制单个三角面绘制开始与结束, 采用内置函数 `glNormal3f`, `glColor3f`, `glVertex3f` 分别指定顶点对应的单位法向量、颜色值和空间坐标, 利用内置函数 `glPolygonMode` 设置 `GL_FILL` 或 `GL_LINES` 指定三角面以填充模式或者线框模式绘制, 之前要确定这种显示模式是用于物体前面、后面或者前面与后面(按逆时针方向绘制的三角形面, 默认为物体前面), 此处选择用于物体前面, 内置变量为 `GL_FRONT`。图 4 为某个时刻的泥沙冲淤分布三维可视化, 其中, 图 4(a) 为填充模式, 图 4(b) 为线框模式。

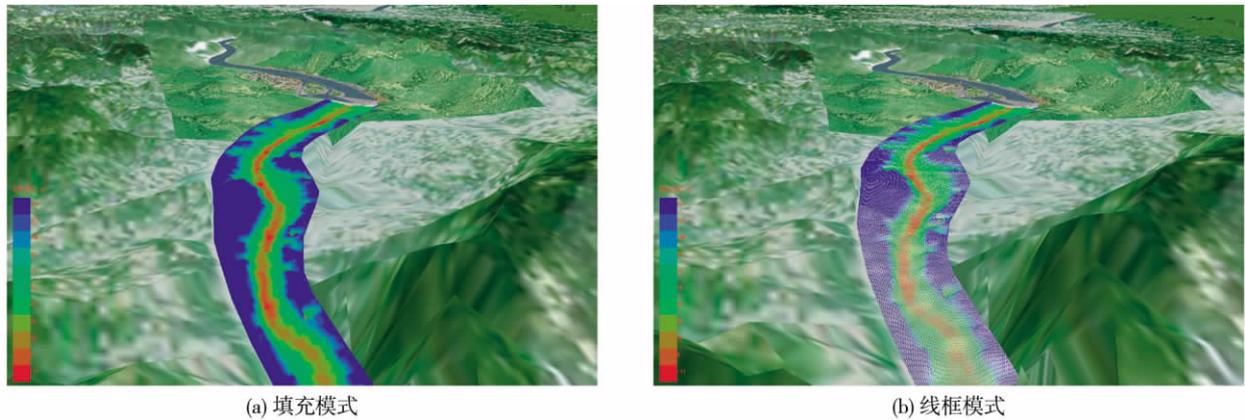


图 4 泥沙冲淤分布三维可视化

Fig. 4 3D visualization of spatial distribution of fluvial process

## 5.2 河道泥沙冲淤时空过程控制显示

泥沙冲淤三维可视化过程动态显示控制方式主要分为显示区域控制和冲淤过程控制两种。

显示区域控制目的是控制河道在窗口内的显示范围。系统提供了对场景浏览的灵活控制方式,对重点关注区域,移动至合适的位置,调整好最佳的观察角度后,将 6 个自由度参数存入数据库中,并定义其名称,保证在数据库记录的唯一性;当需要重新观察该区域时,直接从数据库中调入摄像机自由度参数,赋予摄像机即可,直接定位到关注区域,避免不必要的漫游调整过程。采用鼠标与键盘交互控制,可以实现上下、前后、左右方向的移动变换,从而全方位多角度的观察与比较分析河道冲淤状况。此外,利用鼠标与键盘的移动变换方式,选择系列的位置和视角参数作为关键帧视点数据存入数据库中形成一条固定路径,一般选择沿着河道走向;当选择该条路径观察河道泥沙冲淤状况,只需从数据库中调入这些参数即可,并选择适当的插值方式对相邻关键帧视点自由度参数进行插值,以保证相邻视点之间的光滑与平稳过渡,从而能直观认知沿河道水流方向的冲淤变化信息和分析典型洪水情景下的深泓线摆动情况。

冲淤过程控制分为播放速度控制、固定时刻冲淤信息控制显示、固定时间段冲淤信息控制显示、冲淤过程中的暂停/前进/重复演示。利用上述控制方式,有助于比较分析各个时刻的河道冲淤状况。

播放速度控制是指:采用时间步长控制可视化演示播放速度,当帧速一定时,时间步长越大,播放速度越快,反之,播放速度则慢。定义两个参数选择时间步长,分别为相邻关键帧时刻时间差的最小值  $\Delta T_{\min}$  和最大时间差  $\Delta T_{\max}$  与最小时间差的比值  $\Omega = \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min}$ ,  $\Omega$  值越接近于 1,表明相邻关键帧时间之差比较均匀,可以将  $\Delta T_{\min}$  作为时间步长,但是必须满足泥沙冲淤数据在相邻关键帧之间能平滑过渡,使河道冲淤过程动态显示不存在跳跃感;否则就确定比  $\Delta T_{\min}$  小的时间步长,若相邻时刻的河道冲淤变化幅度较大,时间步长要反复测试才能确定。若  $\Omega$  值远大于 1,可以将  $\Delta T_{\min}$  作为时间步长,否则就要重新选择小于  $\Delta T_{\min}$  的值作为时间步长  $\Delta T$ 。由于相邻关键帧时刻的时间差不是  $\Delta T$  的整数倍,假设整数部分记作  $T$ ,共有  $N$  个时间段,小数部分记作  $\Delta t$ ,将小数部分平均分配到  $N$  个时间段的值为  $\Delta t / N$ ,在该相邻关键帧时刻内,时间步长修正为  $\Delta T + \Delta t / N$ 。求出时间步长后,选择线性插值、双曲线插值等方法进行时间插值,文中选用线性插值方法。

固定时刻冲淤信息控制显示是指:选取特定时刻,将相应河道冲淤信息显示在屏幕上,无需从头播放,如果选择的是关键帧时刻,那么直接从数据库或从数据文件中提取相应信息进行可视化表达即可;如果输入时刻位于相邻关键帧时刻之间,就依据当前帧时刻距离前后关键帧时刻的时段长度的比例,确定插值权重,求解出当前帧的河道冲淤信息绘制显示。

固定时间段冲淤信息控制显示是指:输入时间段起始与终止时刻,如果起止时刻均位于相同两个关键帧时刻之间,按照“固定时刻冲淤信息控制显示”方式求出起止时刻河道冲淤信息,然后再以此起止时刻作

为准关键帧(即由关键帧时刻对应的冲淤信息插值得出的起止时刻的冲淤信息,选择的起止时刻及其插值出的冲淤信息作为准关键帧时刻及其相应信息)插值求解出位于其间的河道冲淤信息,并进行绘制显示;如果起止时刻内有多于一个关键帧时刻,首先判断起止时刻分别位于哪两个关键帧时刻之间,然后由关键帧时刻数据信息插值得出起止时刻河道冲淤信息,并将其作为准关键帧参与位于它们之间的关键帧时刻数据信息插值,进而实现整个数据信息可视化的推演过程;如果起止帧时刻位于某个关键帧两侧,就用该关键帧与前一关键帧时刻的数据信息插值得出起始帧时刻数据信息,与后一关键帧时刻数据插值得出终止帧时刻数据信息,将计算出的起止帧时刻数据作为准关键帧数据参与与关键帧时刻数据信息的插值;若起止时刻均对应于关键帧时刻,就直接使用关键帧时刻数据进行插值即可;若起止时刻中有一个位于两个关键帧时刻之间,另一个是关键帧时刻,就用非关键帧时刻前后相邻的两个关键帧时刻的数据插值出非关键帧时刻数据,将其作为准关键帧参与插值计算。

河道冲淤过程中的暂停/前进/重复演示:在程序实现中,演变过程的暂停是指:停止相邻时刻数据的插值,只需显示当前帧时刻的数据即可,这样便于用户多角度全方位观察某个时刻的河道冲淤空间分布情况,定量分析泥沙冲淤数据;演进过程的开始是指:在保证存储前后关键帧时刻数据的指针变量值没有发生变化的前提下,继续利用这两个关键帧时刻数据插值计算并绘制显示,而无须从头开始演示,实现连续观察整个时段过程信息变化情况;演变过程的重复演示是指:当一次甚至多次播放演示后,用户仍然无法直观认识整个时段的泥沙冲淤过程,就启动“重复”按钮进行观察再认识。

## 6 断面冲淤变化分析

### 6.1 动态河道的交互

流域大地形场景的存储格式为虚拟仿真领域的标准 OpenFlight, OpenGVS 支持该格式的三维地形地物模型载入时,将内置变量 geometry 赋值为 ON,即可自动创建几何数据库,用户可以利用内置函数与场景实体进行动态交互。而处于冲淤过程的三维河道是个动态实体,使用 OpenGL 三角形图元的方式实时绘制的,它是由时序数据驱动,不可能预先生成模型,采用上述方法无法满足与动态河道实时交互,有必要对动态实体的交互进行研究。

创建动态实体 GVS 几何数据库的步骤是:①打开几何数据库结点,并赋予其名称;②循环向几何数据库中填充几何面,其基本单元为三角形;具体实现过程是,首先用函数 GV\_geo\_face\_begin 启动当前三角面的填充,然后由函数 GV\_geo\_face\_add\_vertex 向面上添加顶点,最后利用 GV\_geo\_face\_end 结束当前面的填充;③所有网格单元填充完毕后,关闭几何数据库结点。

几何数据库生成完毕后,就可以使用 GVS 提供的两点相交探测函数 GV\_geo\_inq\_intersection 获取与场景中相交的信息,该信息通过数据结构 GV\_Geo\_isc\_data 进行存储。如果鼠标选中河道实体,则数据结构中的成员变量 isc\_point 将存储由鼠标点击引发的射线与河床交点的坐标。

### 6.2 断面冲淤可视化分析

纵断面与横断面冲淤变化分析实时动态查询是通过鼠标的选择与点击操作实现的,不需要切换场景画面。采用以下步骤完成:

(1) 确定断面在三维虚拟场景中的起止点坐标 确定鼠标在屏幕上拉线起止点对应于三维虚拟场景中的位置,转换为确定鼠标点击位置对应于流域空间坐标。根据内置函数 GV\_geo\_inq\_intersection 获得射线与场景相交点坐标,也是屏幕点所对应的空间坐标。由此得到查询断面的左右岸点坐标,并调用 OpenGL 直线图元函数绘制由左右岸点坐标组成的线段,在图 5 上可以看到断面在平面上的投影线段。

(2) 断面冲淤分析图生成 断面起止坐标点确定后,接着提取断面形状的提取。根据从实际应用和系统运行实时性的角度考虑,提出了基于局部插值的断面形状提取算法。基于局部插值的断面提取算法为:确定断面线与左右岸的交点坐标;断面内点的平面位置从左至右等间距选取;以断面所在线段向河道上下游各

移动一定距离得到两条直线; 依据这两条线之间的数据点采用反距离加权法插值计算断面内各点高程坐标; 对获取的断面形状进行光滑。利用该算法获取的内部点是非等间距的, 也可以选择系统提供的等间距处理方式, 将提取断面重采样后等间距插值。断面冲淤情况的可视化表达是采用非模式对话框方式, 在对话框中绘制出选定断面所对应的初始断面(基准断面)和冲淤变化后断面的绝对高程值的断面形状, 当泥沙运动导致河床高程发生变化时, 对话框会实时响应, 将对应该时刻的固定断面处冲淤信息进行绘制显示。为与基准断面比较断面冲淤变化情况, 对断面淤积部分填充红色; 断面冲刷部分填充绿色。从而可以分析和预测断面冲淤变化情况以及沿河道水流方向的坡降变化趋势。

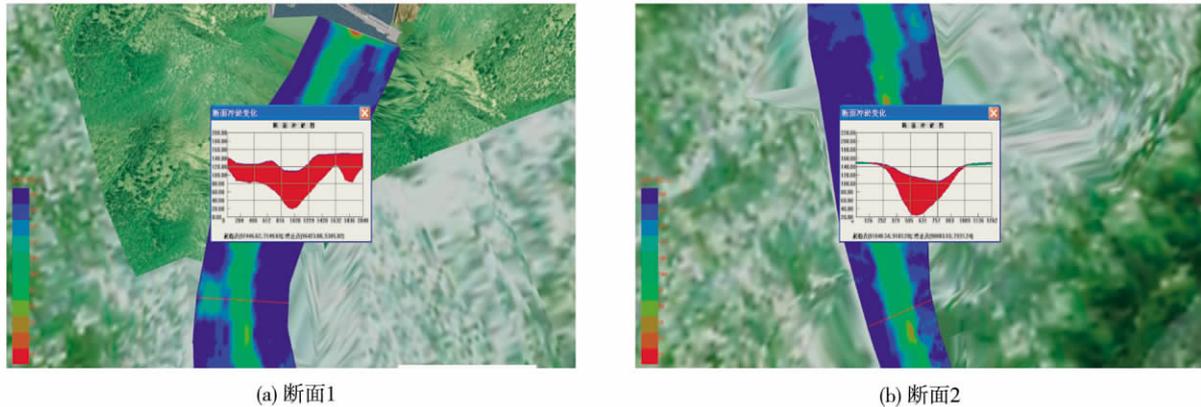


图 5 断面冲淤可视化分析

Fig. 5 Visual analysis of cross-section change

## 7 结 论

(1) 研究了贴体网格自动生成算法, 并应用于三峡坝前的河道地形生成, 与原型观测数据相结合, 提取了河道不同时间的网格节点高程值, 建立了河道演变的数据模型。

(2) 将 GIS 领域缓冲区生成算法引入到数字流域仿真研究中, 提出了动态河道与周围场景的无缝集成方法完成了流域三维场景的整体自动建模; 提出河道演变虚拟表达的 LOD 模型和无缝拼接技术, 提高了数字流域仿真平台的实时性和渲染效率, 实现了动态河道变化下的大范围流域场景的实时交互控制漫游。

(3) 利用颜色映射技术实现了河道冲淤时空分布的三维虚拟表达; 提出了利用光照阴影方法强化河道泥沙冲淤过程三维显示效果; 研究了虚拟流域环境下的河道动态变化时的实时交互方法以及河道泥沙冲淤过程的控制显示方式。

(4) 为了加快河道断面泥沙冲淤信息的快取提速及可视化显示, 提出了基于局部插值的冲淤断面的提取算法, 该算法避免了全局搜索定位带来的较长耗时, 能提高系统的实时性和交互效率。

需要继续深入研究基于虚拟流域环境的深泓线实时提取与动态可视化、河道泥沙冲淤信息的定量数据挖掘分析和时空插值算法对可视化效果的影响规律及优选等。

### 参考文献:

- [1] 冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽. 流域虚拟仿真中水沙模拟时空过程三维可视化[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 249-257. (YE Yun-tao, JIANG Yun-zhong, LIANG Li-li. Three-dimensional visualization of temporal and spatial processes of water and sediment simulation for digital river basins [J]. Advances in Water Science, 2011 22(2): 249-257. (in Chinese))
- [2] HANS S E, MAREE A H. A GIS approach to model sediment reduction susceptibility of mixed sand and gravel beaches[J]. Environmental Management, 2006, 37(6): 816-825.
- [3] 吴泳锋. 基于 GIS 的水沙运动模型信息可视化[D]. 北京: 清华大学, 2008. (WU Yong-feng. Visualization of water and sediment movement model information based on GIS[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))

- [4] 邓吉秋. 基于 GIS 的目平湖泥沙冲淤变化空间定量分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 1000-1006. (DENG Ji-qiu. GIS-based spatial quantitative analysis on change of sediment deposition and erosion in Muping Lake[J]. Journal Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 1000-1006. (in Chinese))
- [5] SHI Song-xin, YE Xiu-zi, DONG Zhao-xia, et al. Real-time simulation of large-scale dynamic river water[J]. Simulation Practice and Theory, 2007, 15(6): 635-646.
- [6] 冶运涛, 张尚弘, 王兴奎. 三峡库区洪水演进三维可视化仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4379-4382. (YE Yun-tao, ZHANG Shang-hong, WANG Xing-kui. 3-D simulation system platform for flood warning of Dongting Lake[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4379-4382. (in Chinese))
- [7] 冶运涛. 流域水沙过程虚拟仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (YE Yun-tao. Virtual simulation of water and sediment process in a river basin[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))
- [8] 于雪英, 江南. 基于 RS/GIS 技术的湖面变化信息提取与分析: 以艾比湖为例[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 14-17. (YU Xue-ying, JIANG Nan. Analyzing lake area change in Ebinur by integration of RS and GIS techniques [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(1): 14-17. (in Chinese))
- [9] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (REN Yu-xin, CHEN Hai-xin. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))
- [10] 冶运涛, 张尚弘, 王兴奎. 三峡库区河道泥沙冲淤过程动态仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4806-4810. (YE Yun-tao, ZHANG Shang-hong, WANG Xing-kui. Research on 3D visualization of sediment process simulation in Three Gorge Reservoir Area[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4806-4810. (in Chinese))
- [11] 王船海, 陈泰生. GIS 中矢量生成线目标缓冲区的实现[J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 187-189. (WANG Chuan-sheng, CHEN Tai-sheng. Generation of line vector buffer and its implementation in GIS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(5): 187-189. (in Chinese))

## Automatic modeling and visual analysis of fluvial evolution in virtual environment\*

YE Yun-tao, JIANG Yun-zhong, LIANG Li-li, WANG Hao

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The 3 D virtual simulation technology has changed the way to traditional sense of the world and provided a friendly and high degree of immersion for experts and scholars. It is introduced together with the scientific visualization technology into the sediment research to propose the overall framework of the 3 D visualization system of sediment erosion and deposition based on virtual reality technology. The system realizes the virtual representation of the real watershed, 4 D temporal and spatial changes of large-scale river erosion and deposition process in virtual environment and visual analysis of cross-section form change. Several techniques, including the river boundary identification, automatically adaptive modeling of river channel evolution, seamlessly nested modeling between dynamic river and the surrounding watershed scene, Levels of Detail (LOD) of river channel and seamlessly tiling of LOD patches, display mode and control mode for temporal and spatial visualization, interacting with dynamic river channel, extracting the section based on local interpolation, et al., used in the system are proposed and studied. These techniques are proved to be practicability and feasibility with the Three Gorges Project as an example.

**Key words:** digital river basin; virtual reality technology; fluvial process; automatic modeling; visual analysis

\* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 200901031; No. 201101026).