

利用 DEM 的“环形”洪水淹没算法研究

孙 海¹ 王 乘¹

(1 华中科技大学数字化工程与仿真中心可视化所, 武汉市珞喻路 1037 号, 430074)

摘 要:以数字高程模型(DEM)为基础, 结合水流扩散的基本原理, 设计出一种新的“环形”淹没算法。本算法充分利用栅格 DEM 数据的特点和 GIS 的优势, 将二维分析技术和三维演示平台进行结合, 针对小区域范围的洪水演进过程, 更精细地模拟出洪水淹没的过程, 为科学地确定洪水淹没范围和水深分布、洪水风险图制作、防洪指挥调度和洪涝灾害的损失评估提供准确的评判依据。

关键词:GIS; 洪水淹没; “环形”算法; DEM

中图法分类号:P208

当前, 利用 GIS 和仿真技术进行洪水淹没的仿真预测是一项研究热点, 许多学者在这方面做过大量的工作。如丁志雄等人提出的基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法^[1], 刘仁义等人提出的基于 GIS 复杂地形洪水淹没区计算方法^[2], 葛小平等人尝试的 GIS 支持下的洪水淹没范围模拟^[3]等。针对不同的地形特点, 运用不同的方法来模拟预测了洪水演进的过程和结果, 并取得了一定的效果。其中的模型算法主要包括: 以流体力学为基础的物理模型; 也有针对淹没仿真算法的仿真模型, 如基于种子联通方式的投石问路算法^[2]、膨胀算法^[4]、三角网搜索等。

对于洪水淹没状况, 主要分为“无源淹没”和“有源淹没”^[2]两种。在“有源淹没”的条件下, 洪水的来水通常有一个起始点, 而且水的流动主要是根据地形变化而来。特别是在地势平坦的地区, 地形起伏并不明显, 由于水头的高度, 洪水的扩散往往呈“环形”扩散状况。由此, 在模拟洪水扩散的过程中, 主要考虑水流的方向、阻隔物、相关的地形条件等各方面的影响。

1 算法设计

根据对洪水发生现象的分析, 在现有的研究基础上, 依照洪水淹没过程的基本理论, 借鉴形态学中的膨胀算法来考虑, 针对“有缘淹没”状况, 以

洪水堤坝溃口为研究实例, 设计出一种新的洪水淹没算法——“环形”淹没算法。并且使用分布式水文模型的思想, 进行模型的设计与实现。

1.1 算法思想

本算法是根据洪水灾害发生时(如溃口、管涌等), 来水点往往是一个或几个固定发生点, 水体从事故发生点涌出, 若暂时抛开地形和初始能量的影响, 洪水淹没过程是以发生点为中心, 向四周各个方向均匀扩散的。若将时间分割为离散点, 那么在每个时间点, 洪水是一圈一圈向外扩散的, 而且扩散的水流方向根据下垫面的地形高低而定。这种水体运动方式也就是我们所提出的“环形”扩散方式(如图 1, 其中“发生点”表示洪水发生的位置, A、B、C 为阻水地物。)

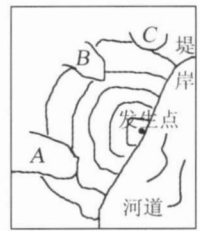


图 1 淹没示意图

Fig. 1 Sketch Map

洪水发生点作为起始点, 以矩形环的方式达到扩散的效果。如图 2, 搜索以起始点为中心, 第一环

($N=1$)应该是中心点的八邻域点, 第二环($N=2$)则是在第一环的基础上的相邻的所有外围点。这种环扩散依次下去, 每个点的遍历以顺时针方向为主, 这样的搜索方式既可以保证不遗漏每个栅格点, 又保证近似于圆形的环搜索下去。

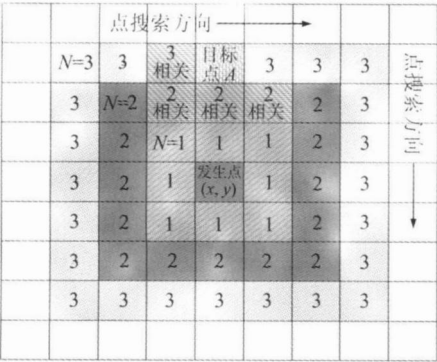


图 2 “环形”搜索方式
Fig. 2 Searching way of “Ring” Method

在实际淹没过程中, 由于水流的联通性, 判断当前点是否淹没, 主要是要看这个目标点周围是否有联通的淹没点以及目标点的地面高程是否在联通淹没点的水位之下。只有这两个基本条件达到后, 这个点才有可能被淹没。如图 2 所示, 假如目标点 A 要进行淹没判定, 必须首先获取其周围的 4 个相关联通点的淹没信息, 搜索判断这 4 个点中是否有点被淹没, 如果有, 则继续判断目标点的地面高程是否小于 4 个相关淹没点的最高水位 (也就是设定淹没水位高)。如果以上两个条件都满足, 就可以判断该目标点应该被淹没, 且水深 $H_{\text{水}}$ 等于设定水位值减去当前目标点 A 的地面高程 D_A , $H_{\text{水}} = Z_{\text{设定水位}} - D_A$ 。

1.2 初始值获取

1.2.1 水头位置确定

由于本文考虑的是“有源淹没”状况, 即水头从发生点开始, 向四周扩散, 需要计算的第一个参数, 即某时间段内水头到达的最远位置。得到最远的位置之后, 则以该位置到发生点的距离为半径所绘制的圆形, 为本次计算的最大范围。

流动基本方程是以经典的二维非恒定流方程 (浅水波) 和曼宁 (Robert Manning) 公式为基础, 计算在 DEM 数据基础上流水的扩散状况, 以栅格为单元进行分布式的流速计算。如果每个栅格的速度增量为 ΔV , 那么对于每个栅格的输入, 输出水流速度为 $V_{\text{出}} = V_{\text{入}} + \Delta V = V_{\text{max}} \sin\theta + \Delta V$, 其中 V_{max} 为联通区域点最大速度方向的速度, θ 为流入相邻点的方向与原有最大速度方向的夹角。

针对栅格数据实际计算的特点, 将每个 DEM

数据网格作为一个计算单元, 计算方便。以此公式为基础, 以起始点为中心, 以初始速度方向为主方向, 进行八邻域的流速计算。根据八个方向的地形坡度变化, 以及不同方向速度的分量, 得到最大的淹没范围, 再以此范围作为“环形”计算的区域参数:

$$V^{T+\Delta t} = V_T \sin\theta + h_j^{2/3} \left(\frac{|Z_2 - Z_1|}{\Delta L} \right)^{1/2} \frac{1}{n} \quad (1)$$

式中, ΔL 为空间步长, 指相邻网格形心距在通道法线方向的投影; h_j 为 j 通道上的平均水深; n 为相邻网格的糙率, 取决于网格内的地面覆盖 (主要区分农业用地、城市用地、砂石滩地和山区林地); Z 为搜索点水位。基于 DEM 数据的坡度计算和 DOM 数据的分类, 可以得到坡度数据和地面覆盖类型, 即获得坡度和不同区域的糙率值 n 。这样就能计算出某时段内水头流过每个栅格时的速度, 根据不同方向的速度变化, 也能得出该时段内水头的最远位置。

其中, 糙率值又称粗糙系数, 是综合反映粗糙面对水流影响的一个系数, 通常以 n 表示。其值一般由实验数据测得, 使用时可查表选用。在已有资料的情况下, 也可以由曼宁公式反求 n 值, 与查表所得的值相互验证而加以选定。本算法中的糙率值 n 是表示不同类别地面覆盖对水流造成的影响, 因此, 先使用遥感图像对地面覆盖进行分类, 然后再对不同类别地面覆盖进行实地采样实验来求得其糙率值, 再将其与地面覆盖分类图进行对照, 可获得算法所需的参数。

1.2.2 水深确定

水深的确定, 主要使用“体积法”。其基本思想是, 根据洪水由高向低流动的重力特性和地形起伏情况, 暂时不考虑土壤吸收和其他排水条件下 (若需考虑, 则要添加排水参数和排水模型), 用洪水来水总量与洪水淹没范围内总水量体积相等的原理来模拟洪水淹没水深和范围^[5], 即在洪水扩散的过程中, 总的体积和流入该区域的体积相等:

$$V_{\text{总}} = Q_{\text{来}} T = \iint_A [E_w(x, y) - E_g(x, y)] d\sigma \quad (2)$$

式中, $V_{\text{总}}$ 是 T 时段内总体水量; $Q_{\text{来}}$ 为来水量; A 为洪水淹没区, 即洪水淹没的区域; $d\sigma$ 为洪水淹没区面积微元; $(x, y) \in A$; $E_w(x, y)$ 为洪水水面高程; $E_g(x, y)$ 为地面高程。理论上, 洪水水面是一个复杂的曲面, 尤其对较大洪水波而言。为了便于分析, 一般要将水面简化为水平平面。在本

文研究中, 由于是基于栅格 DEM 数据进行计算的, 因此, 式(2)可以离散化为:

$$V_{\text{总}} = Q_{\text{来}} \times T = \sum_A (S_i \times (H_{\text{水}} - H_{\text{地}})) \tag{3}$$

式中, S_i 是每个 DEM 像元的面积, 由于 DEM 是栅格数据, 每个像元面积相等, 所以面积为该 DEM 数据分辨率的平方; $H_{\text{水}}$ 为当前点中淹没的水位; $H_{\text{地}}$ 为当前点的地面高程。将所有淹没点的水的体积和加起来, 则为来水总量。

结合“环形”算法的计算原理和特性, 在每圈扩散之前, 以体积法计算出该圈的平均水深, 作为下一轮扩散的依据。即在前一圈淹没时, 统计出淹没像素点的总数 n , 同时取出每个已淹没点的地面高程 $H_{\text{地}}$, 然后计算出平均淹没点地面高程 $H_{\text{地}}$ 作为参照。由于栅格像元面积相同, 因此, 可以算出 $H_{\text{水}}$:

$$H_{\text{水}} = V_{\text{总}} / (n \times S_i) + H_{\text{地}} \tag{4}$$

由此算法, 可以较准确地反映出在 T 时段内水位的变化和演进过程, 而且计算方便简洁, 对于小范围的淹没, 有较好的仿真模拟效果。

1.3 淹没算法实现

1.3.1 实现步骤

- 1) DEM 栅格数据数组和输入点位置的输入, 以及初始值的设置。
- 2) 以输入点为中心, 开始循环扩散, N 从 1 到最大淹没范围值。
- 3) 在第 N 圈的基础上, 开始遍历该圈上的每个像素, 并且获取前一圈淹没的水位高程数组, 作为联通淹没的判断依据。
- 4) 淹没点的确定。将当前循环点与其相邻点进行比较, 判断当前点是否被淹没。
- 5) 如上循环, 同时判断是否第 N 圈所有点都已经搜索完毕, 以此来判断是否跳出该循环。
- 6) 判断循环圈数 N 是不是在最大范围内, 以此来判断是不是应该进行下一轮循环。若要进入下次循环, 则按体积法计算本轮淹没的水位, 作为下一轮判断的参照水位。
- 7) 当圈数到达最大范围或者一整圈搜索都没有淹没点增加时, 结束循环, 完成搜索。

1.3.2 修正算法

由于“环形”算法本身的特点和搜索模式, 仅凭一次的环形算法, 通常会出现一些误差区域, 即本应该淹没却没有在计算结果里出现。针对这个问题, 在进行第一步淹没计算后, 还要进行修正计算。

- 1) 在最大淹没范围内, 对已经淹没的区域进行边界搜索, 提取边界点。所谓边界点, 就是该点本身未被淹没, 但八邻域范围内存在淹没点的点。
- 2) 找到边界点后, 对其八邻域的点进行判断, 若该点地面高程小于周围淹没点的水位高, 我们则将其作为问题点, 并以此问题点为中心点, 开始新的“环形”搜索。
- 3) 在修正计算过程中, 将最大淹没范围作为修正的边界。
- 4) 根据步骤 1~步骤 3), 对整个区域的边界点进行递归计算, 直到没有误差点。

经过修正处理的淹没结果, 能合理地显示水体绕过各种阻水物体进行有效合理的联通区域淹没, 达到淹没仿真的目的。

1.4 特点与优势

经过性能测试, 在同等数据条件下的 50 次反复实验中, 使用“投石问路”算法的运算次数平均比“环形”算法要多 18.3%。另外, “投石问路”算法是以先进后出的原则进行点搜索, 并不符合流水扩散的基本原理; 而“环形”算法正好在此方面有明显的改变, 它是以层层扩散原则进行搜索淹没的, 因此能够在模型计算的范围基础之上, 细化淹没过程, 使仿真结果更加细腻。

2 算法实现

根据以上的算法思想与实际的需要, 进行了洪水淹没的算法测试和实现, 设计开发了基于“环形”淹没算法的洪水淹没仿真系统。该系统基于 ArcEngine 组件在 MS.Net 2005 平台上开发实现, 以高精度的 DEM 和 DOM 数据作为基础, 在三维平台下进行洪水淹没仿真模拟计算, 并结合 GIS 功能在洪水演进过程中添加多种数据管理、查询、空间分析等空间数据管理分析功能。本系统实验数据区域是广东省佛山市佛山大堤奇石段, 地形属于平坦河滩区域, DEM 数据分辨率为 2 m, DOM 数据分辨率为 1 m。数据提供方为佛山市城市地理信息中心。

图 3~图 6 是使用本算法进行洪水淹没计算的 4 个不同阶段的结果, 可以明显看出淹没的过程。具体计算数据在表 1 中。此 4 个阶段是在预设流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下, 时间段分别是 5 s、10 s、15 s 以及 900 s 的状况下对洪水演进过程进行的淹没仿真, 可以明显地看出水体运动的过程和细节。

本算法在理论上是合理有效的, 而且有很多

种变化方式, 根据不同的场景、条件, 进行有效的改进和改变, 能衍生出适用于不同情况的、有针对性的淹没结果计算方式。但是在实用中, 也存在很多

问题需要去解决和完善, 特别是运用到特定的环境和条件下的模拟, 需要更多的改进和辅助算法的设计, 这个也是以后继续研究的方向和重点。



图 3 仿真结果(5 s)
Fig. 3 Simulation Result

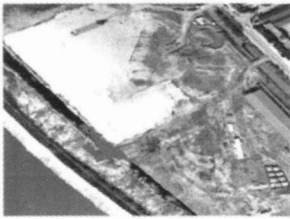


图 4 仿真结果(10 s)
Fig. 4 Simulation Result



图 5 仿真结果(15 s)
Fig. 5 Simulation Result



图 6 仿真结果(900 s)
Fig. 6 Simulation Result

表 1 实验数据计算结果
Tab. 1 Compute Result

初始值: 管涌流量 5 m ³ /s 管涌设计口径 2.46 m ²				
图号	时间段/s	总水量/ m ³	范围半径 /m	水头流速 /(m·s ⁻¹)
图 3	5	25	14.7	2.48
图 4	10	50	27.5	3.12
图 5	15	75	37.4	2.32
图 6	900	4 500	1358.4	1.05

参 考 文 献

[1] 丁志雄, 李纪人, 李琳. 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法[J]. 水利学报 2006(6): 56-59

[2] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 复杂地形洪水淹没区计算方法[J]. 地理学报, 2001, 56 (1): 1-6

[3] 葛小平, 许有鹏. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13 (2): 456-460

[4] 向素玉, 陈军. 基于 GIS 城市洪水淹没模拟分析

[J]. 中国地质大学学报, 1995, 9 (1): 575-578

[5] 刘小生, 黄玉生. “体积法”洪水淹没范围模拟计算[J]. 测绘通报, 2004(12): 47-51

[6] Toth E, Brath A, Montanari A. Comparison of Short-term Rainfall Prediction Models for Real-time Flood Forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2000 (239): 132-147

[7] 吴迪军, 孙海燕. 应急平台中一维洪水演进模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008 33(5): 542-545

[8] 颜辉武, 祝国瑞. 基于 Kriging 水文地质层的三维建模与可视化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(7): 611-613

第一作者简介: 孙海, 博士生, 主要研究领域: 空间信息科学与技术。
E-mail: sean0406@126.com

A “Ring” Method for Flood Submergence Based on DEM

SUN Hai¹ WANG Cheng¹

(1 Digital Engineering and Simulation Center, Huazhong University of Science and Technology, 1037 Luoyu Road, Wuhan 430074, China)

Abstract: Facing to the field of flood simulation, a new "Ring" method for flood has been introduced in the paper, which is based on the DEM data and flood's classical principle. Aim at the small region, the new method tries to combe the DEM data's characters and GIS' advantages to implement flood's simulation and forecasting. In succession, according to the new method, a 3D flood simulation and forecasting system have been design and implemented, which is used to supply exact and available information to make flood map, flood prevention and other interrelated works.

Key words: GIS; flood; ring method; DEM