

# 基于 LBM 动态动画真实感绘制

黄 瑞

(华北水利水电学院 信息工程学院, 河南 郑州 450011)

**摘 要** 提出一种基于 LBM 的高效建模和绘制方法。通过潜水方程的 LBM 模型进行流体建模和表面高度场的计算,成功地模拟出水坝崩溃现象。简化了速度场方程组和添加浓度场方程组,结合两者对烟雾物理模型进行了改进,通过 GPU 加速技术实现了烟雾真实感的绘制。

**关键词** Lattice Boltzmann 方法; 浅水方程; 自由表面; 流体模拟

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2013)03-108-04

## Dynamic Animation Realistic Rendering Based on Lattice Boltzmann Method

HUANG Rui

(College of Information Engineering, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract** This paper presents a highly effective method of modeling and rendering based on LBM (Lattice Boltzmann method). Firstly, the LBM model based on shallow water equations is adopted to model the fluid volume and calculate the surface height field, and we simulate the Dam Break successfully. In addition, the Velocity field Equations are reduced and Denseness field Equations are added to improve the model of smoke, after which the GPU acceleration technology is adopted to achieve realistic rendering of smoke.

**Keywords** Lattice Boltzmann method; shallow water equation; free surface; fluid simulation

自然景物模拟一直是计算机图形学中最具挑战性的问题之一。关于流体现象的模拟,在计算机动画游戏、影视特效、虚拟仿真等方面有着重要的应用。简单的粒子系统方法<sup>[1]</sup>很难满足真实感的要求,而遵循流体真实运动规律的、基于物理的模拟方法无疑是最能满足真实性要求的。

基于物理的流体模拟主要依据是计算机流体力学原理。目前通过求解经典 N-S (Navier-Stokes) 方程的模拟方法,国内外学者已经做了大量的研究。但由于 N-S 方程是基于连续介质假设,因此对自由表面流体的离散和扩展存在困难。

文中主要采用 LBM (Lattice Boltzmann Method) 方法对流体和烟雾进行模拟。Kass<sup>[2]</sup>最早提出浅水方程的思想,将流体高度假设为各个点的宏观密度,再基于高度生成水面;Zhou<sup>[3]</sup>等在 LBM 的 D2Q9 网格中求解浅水方程,完成了溃坝模型的数值模拟;Liu<sup>[4]</sup>等还提出了在多重网格下来实现潜水方程,即在需要更多细节的地方人为地划定密集的网格,从而在小运算量下得到较好的表现效果。另外,基于粒子系统和 Lagrange 方法的光滑粒子流体力学方法也是比较流行的方法,

它具有容易实现、善于表现细节的优点,缺点是表面构建困难,平滑核函数难以选取。

在 2002 年,Wei<sup>[5]</sup>将 LBM 方法引入流体图形仿真并首先模拟了火焰,随后又模拟了空气中的烟雾<sup>[6]</sup>;Zhao<sup>[7]</sup>基于 LBM 模拟了固体的融化现象和基于热流体的蜃景。LBM 方法能够方便地处理复杂边界与障碍物的流体<sup>[8]</sup>,也可以用来模拟多相流体<sup>[9]</sup>。

## 1 LBM 方法相关理论

近年来,流行于计算机流体领域的 LBM 方法,提供了另一种流体力学表现方法。其主要思想是基于大量时空离散的微观粒子之间的碰撞迁移,并利用这些微观粒子运动的统计平均结果来反映流体现象的宏观特征。该方法具有物理图像清晰,边界条件容易处理,并行性能好等优点。目前,LBM 在多相流、化学反应扩散、多孔渗流、粒子悬浮流、磁流体学等相关领域也得到了成功的应用。

在 LBM 模型中,每个格点有 9 个不同方向的平衡分布函数,如图 1 所示。微观粒子会根据特定运动规则在离散格子上进行迁移和碰撞,而迁移过程表示的是通过粒子运动的统计平均就能得到流体的宏观运动特征。

收稿日期: 2012-09-28

作者简介: 黄瑞(1987—),男,硕士研究生。研究方向:图形图像处理。E-mail: 411416182@qq.com

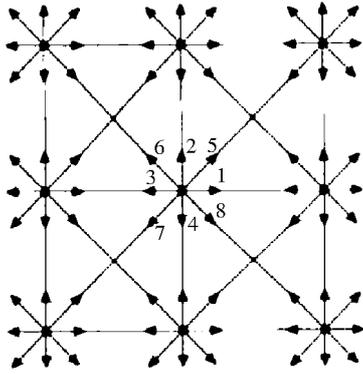


图1 方格上的 D2Q9 模型

一般 LB 方程可以分解为两个部分:

(1) 碰撞项

$$f_i^*(x, t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

(2) 迁移项

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i^*(x - c_i \Delta t, t) \quad (2)$$

粒子的平衡态分布函数为

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega \rho \left[ 1 + \frac{c_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(c_i \cdot u)^2}{2c_s^4} + \frac{u \cdot u}{2c_s^2} \right] \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为弛豫时间, 反应非平衡态趋于平衡态的快慢;  $f_i^{eq}$  为平衡分布函数;  $\rho$  为介质的宏观速度;  $u$  为宏观速度;  $i$  为粒子的不同离散速度的方向。

宏观方程和宏观速度为

$$\rho = \sum_i f_i, \rho u = \sum_i c_i f_i \quad (4)$$

LBM 方法可以容易地处理边界。在边界处的格点上, 密度分布中速度方向指向边界的是不能穿过边界的, 因此需要定义一种边界条件来处理所有处于边界格点的平流速度。常见的边界处理格式有启发格式、动力学格式、外推格式和复杂边界处理格式。

LBM 的计算流程: (1) 设置初始条件如每个格子的密度、速度、压强等, 选择合适的弛豫时间。(2) 对每个格子用式(4)计算其宏观密度和速度。(3) 用式(3)计算平衡态分布函数。(4) 把格子分布函数和平衡态分布函数代入式(1)。(5) 根据步骤(4)的结果, 对各个相邻格子进行相应的调整。(6) 根据边界条件来调整分布函数。(7) 返回步骤(2)进行循环, 直到流场达到收敛要求。

## 2 基于 LBM 的建模

### 2.1 基于 LBM 的洪水演变

浅水动力学方程组与普通二维流体力学方程不同<sup>[10]</sup>。它考虑对象为均质不可压缩流体, 因此方程中不出现密度, 取而代之的是自由表面高度  $h$ , 如图 2 所示。侧面压力项是由于流体质量水平分布不均匀的重力效果

造成的, 因此形式上也不同于普通流体力学方程中的压强。所以必须重新构造适合于模拟浅水运动的模型。

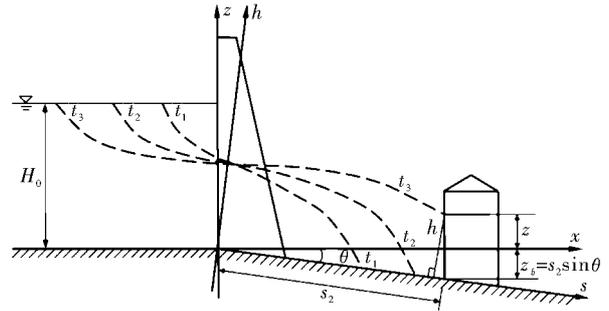


图2 溃坝波形示意图

经典的二维浅水方程可以表示为

$$\begin{cases} B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + g \frac{\partial u^2}{CR} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $B$  为水面宽度;  $u$  为断面平均流速;  $z$  为水位;  $C$  为谢力系数;  $R$  为水力半径。

文中模拟了二维水坝溃决, 模拟区域为  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ , 中间用拦水坝分成相同的两部分, 采用上游水位为  $8 \text{ m}$ , 下游水位为  $4 \text{ m}$ , 不考虑摩擦、坡度等外力因素。初始时刻的速度为零, 假设水坝突然完全崩溃, 上、下游水位出现突变, 从而激发出一个向下游推进的水激波, 在波前是未扰动的静止流体, 波后流体才有速度, 但流速远小于波速。固壁边界采用无滑的边界条件。在  $10 \sim 25 \text{ m}$  处发生溃坝的模拟结果如图 3 所示。

### 2.2 基于 LBM 的烟雾模拟

烟雾同其他无规则的物体如云和火焰一样, 具有实时多变性和无规则性。由于其外观形状极不规则、又没有光滑的表面, 使得经典的欧几里得几何学很难对它进行描述。近几十年来不同学者已经提出了很多烟雾模拟的方法, 其中的一些模型正趋于成熟, 应用的领域也在不断延伸。但由于种种原因, 目前普遍认为比较满意的使用方法还比较有限, 通用性都或多或少地受到一定限制, 很难说哪种方法更适合人们的要求。因此对于计算机工作人员, 特别是图形图像处理的研究者来说, 不断探索和改进目前的模拟理论和方法, 发展出新的更便于使用的模拟方法, 把现有各种方法的优点结合起来, 更好地满足时代发展的需要, 仍是重要课题, 也是人们长期进行探索的重要方向。

烟雾是一种气固混合物, 因此需要建立模拟气固两相流的格子 Boltzmann 模型, 该模型中使用一种新型的耦合格子 Boltzmann 模型来刻画烟雾流体中气相与颗粒间的作用力。此模型需要加入烟雾流场的计算。

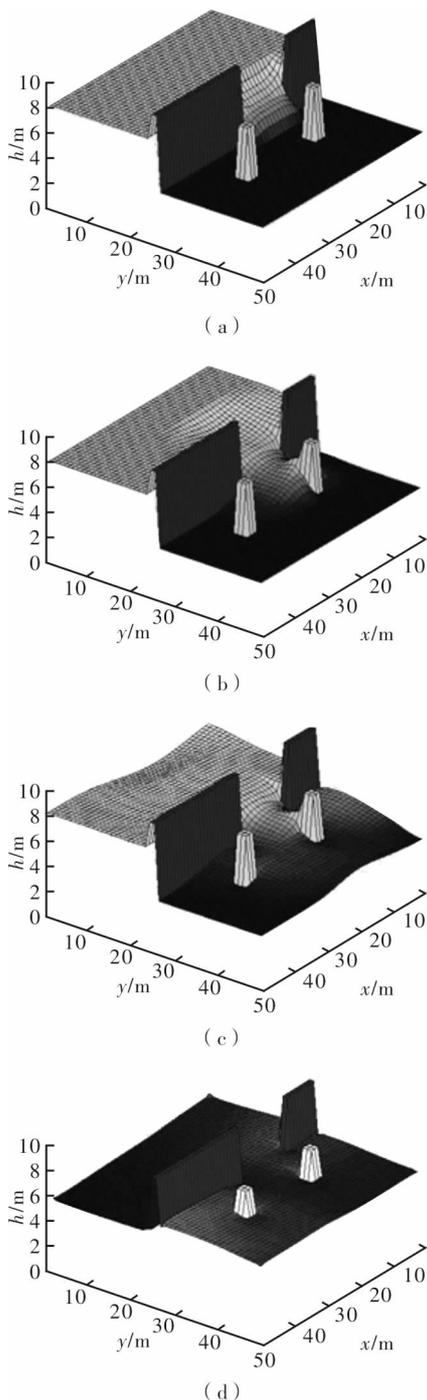


图3 洪水演变模拟

故此模型的演化方程变为

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^e(i, t)] + F_i \Delta t \quad (6)$$

其中,  $F_i$  的表达式为

$$F_i = 3\omega_i e_i \left( -\rho V_r \sum_{p=1}^M \frac{d_{up}}{d_t} \right) / c \quad (7)$$

$\rho$  是颗粒相的密度与流相密度之比, 试验中假设其值为 10,  $M$  为控制体内颗粒的数目。采用非平衡外推格式进行边界处理, 进而生成基于 LBM 的烟雾模

拟, 在 WindowsXP 环境下和 VS2010 + OpenGL 平台上实现了简单的烟雾模拟系统。采用光线投射算法绘制密度, 得到了较逼真的表现效果, 如图 4 所示。

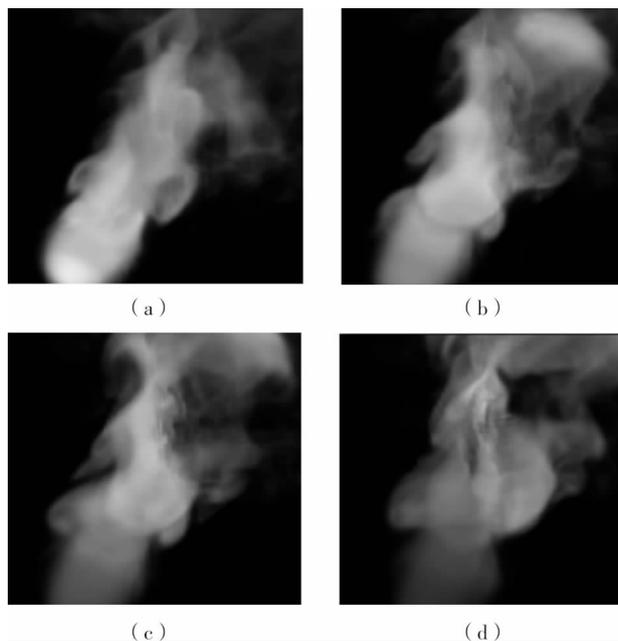


图4 烟雾模拟

### 3 实例分析

基于 LBM 方法并结合浅水方程对流体建模, 实现了洪水演变的真实感绘制。文中的方法能够处理外力的相互作用, 使用范围比较广, 模拟速度也比较快。模型适用于并行计算, 加之算法具有结构简单, 容易编程实现, 易于修改和移植等优点, 因而在海洋湖泊和环境污染等领域有着广泛的应用前景。动态烟雾的成功模拟, 对计算机动画游戏、影视特效、虚拟仿真等有着重要的应用。

通过流体建模和表面高度场的计算, 得到了较为真实的洪水演变模拟; 简化了速度场方程组并添加了浓度场方程组, 结合这两者对烟雾运动物理模型进行了改进。

### 4 结束语

过去计算机图形业一直专注于制造烟雾、燃烧、流水等自然现象的真实效果, 而目前开始转向设计创作面部表情、毛发和衣服运动的真实模拟<sup>[10]</sup>。但对于无规则物体和常见自然现象的模拟, 业内还在不断研究, 设计开发出一种真实、实时、高效、交互性和通用性的烟雾模拟方法和实用软件, 是人们的目标。可以说, 要用计算机来有效地模拟自然景物, 还有很多问题值得更加深入细致地研究。

(下转第 115 页)

## 参考文献

- [1] RICARDO R, JOÃO S. Fatty liver characterization and classification by ultrasound [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, 55(24):354-361.
- [2] 赵金惠,赵真,赵庆春,等. 肝脏相对回声强度在脂肪肝超声诊断中的价值[J]. *河北职工医学院学报*, 2007(3):6-7.
- [3] ASCHKENASY Y, SCHLOMO V J. Unsupervised image classification of medical ultrasound data by multiresolution elastic registration [J]. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 2006, 32(3):1047-1054.
- [4] 耿帅,王希常. 一种基于中值滤波的图像去噪算法[J]. *计算机与现代化*, 2011(11):90-93.
- [5] 陈菲. 神经网络在超声脂肪肝图像识别中的应用研究[J]. *微计算机信息*, 2007(4):302-303.
- [6] WANG Daxi, FANG Yuan, HUANG Sheng. An algorithm for medical imaging identification based on edge detection and seed filling [C]. *Kunming: ICCASM, IEEE*, 2010.
- [7] WANG Daxi, FANG Yuan, HU Bo, et al. B-scan image feature extraction of fatty liver [C]. *Beijing: ICICSE, IEEE*, 2012.
- [8] 王大溪,方园,胡波,等. 基于多级灰度差的脂肪肝 B 超图像识别方法 [J]. *计算机工程与设计*, 2012(5):1899-1903.
- [9] 张文媛,马琳. 脂肪肝的超声诊断进展[J]. *中国煤炭工业医学杂志*, 2008, 11(2):280-281.
- [10] 张建炜,汪天富,殷杰,等. 基于 B 超图像多重分形谱的脂肪肝严重程度识别 [J]. *中国医学影像技术*, 2009(7):1289-1292.
- [11] 闵志方,宋恩民,金人超,等. 用于脂肪肝量化分级的 B 超图像特征提取 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009(6):752-757.
- [12] 朱福珍,吴斌. 基于灰度共生矩阵的脂肪肝 B 超图像特征提取 [J]. *中国医学影像技术*, 2006, 22(2):287-289.
- [13] 王娇. 基于复杂性分析的脂肪肝计算机辅助诊断 [D]. 成都:四川大学, 2006.
- [14] SVEC F, MARTIN C, SARA W, et al. On reproducibility of ultrasound image classification [C]. *Soul: Lecture Notes in Computer Science. Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference*, 2005:439-446.
- [15] 辛月兰. 一种快速并行中值滤波算法 [J]. *微型电脑应用*, 2011(8):50-53.

.....

(上接第 107 页)

## 参考文献

- [1] ZHU S Y, QIAN L Q, SU W M. *Software engineering technology conspectus* [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 徐玮,尹宝林,李昭原. 企业信息系统业务构件设计研究 [J]. *软件学报*, 2003(7):2-3.
- [3] 孟凡超,战德臣,徐晓飞. 基于领域业务模型的可重用构件设计方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2006(12):98-101.
- [4] 张路,谢冰,梅宏,等. 基于构件的软件配置管理技术研究 [J]. *电子学报*, 2001, 29(1):267-276.
- [5] 张涌,王渊峰,钱乐秋. 一个集成式的软件构件描述框架 [J]. *计算机学报*, 2002, 25(6):212-218.

.....

(上接第 110 页)

## 参考文献

- [1] 费少梅,彭艳莹,陆国栋,等. 基于粒子的湍流燃烧火焰的可视化研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(3):461-466.
- [2] KASS M, MILLER G. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics [J]. *Computer Graphics*, 1990, 24(4):49-55.
- [3] ZHOU J G. A lattice boltzmann model for the shallow water equations [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191(32):3527-3539.
- [4] LIU H F, ZHOU J G, BURROWS R. Multi-block lattice boltzmann simulation of subcritical flow in open channel junctions [J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(6):1108-1117.
- [5] WEI X M, LI W, MUELLER K. Simulating fire with texture splats [C]. *Washington D C: Proceedings of the Conference Visualization, IEEE Computer Society Press*, 2002:227-234.
- [6] WEI X M, LI W, MUELLER K. The lattice boltzmann method for simulating gaseous phenomenon [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, 10(2):164-176.
- [7] ZHAO Y. Modeling natural phenomena with lattice boltzmann method [D]. *New York: State University of New York*, 2006.
- [8] MEI R W, LUO L S, SHYY W. An accurate curved boundary treatment in the lattice boltzmann method [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 155(2):307-330.
- [9] 朱红斌,刘学慧,柳有权,等. 基于 Lattice Boltzmann 模型的液-液混合流模拟 [J]. *计算机学报*, 2006, 9(12):2071-2079.
- [10] 肖诗云,王晓庆. 洪水演进模型及冲击荷载数值分析 [J]. *工程力学*, 2010, 27(9):35-40.