

基于流场的爆炸分裂效果模拟

陈长波, 熊岳山

(国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

摘 要: 通过分析冲击波气流的运动特点, 对 Navier-Stokes 方程进行合理简化。根据简化后的方程所反映出的气流速度变化规律, 提出描述冲击波气流运动的扩散模型。基于该模型所定义的流场, 对碎片的运动进行控制, 实现对冲击波作用下物体碎片飞散效果的模拟。实验结果表明, 该方法具有较强的真实感, 能够满足实时性要求。

关键词: 爆炸模拟; 扩散方程; 碎片运动

Simulation of Explosion Fragmentation Effect Based on Flow Field

CHEN Chang-bo, XIONG Yue-shan

(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 Through analyzing the motion of blast wave, the Navier-Stokes equations are reasonably simplified. According to the main properties of blast wave, which is revealed by the simplified Navier-Stokes equations, a diffusion model is proposed to describe the motion of blast wave. The impact of blast wave is simulated by controlling the motion of fragments propelled by the blast wave based on the diffusion model. Experimental results show the method can achieve strong sense of reality and meet the real-time requirements.

【Key words】 explosion simulation; diffusion equation; fragment motion

1 概述

目前, 虚拟现实(Virtual Reality, VR)作为一门新兴的综合信息技术, 已广泛应用于军事、航空航天、娱乐、医学、教育、工业等诸多领域。其中, 有很多应用需要模拟爆炸现象, 如战场仿真、飞行游戏、3D 电影等。爆炸广义上指一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程, 而通常所说的爆炸指化学爆炸, 如炸药爆炸、粉尘爆炸。这类爆炸由物质化学反应引起, 发生时不仅形成强冲击波向四周传播, 还往往伴随有火焰、浓烟、尘云等后果产生。虚拟现实中对爆炸的模拟主要是要逼真再现爆炸过程中的各种可见现象, 生成令人信服的视觉效果。这些可见现象除了包括可统称为爆炸云的火球、浓烟和尘云外, 还包括冲击波作用下的周围物体的运动、变形和破碎。由于爆炸过程极其复杂, 无法找到一个简单的模型来描述它, 因此在模拟爆炸时, 主流的方法大多是基于物理的方法, 即基于较为精确描述爆炸物理过程的流体模型, 借助 NS(Navier-Stokes)方程来主导外在现象的表现。这类方法最大的优点是可以获得非常逼真的模拟效果, 但往往模拟速度较慢。

对于爆炸云的模拟, 典型的方法是对 NS 方程进行不可压和无粘性简化, 然后结合粒子系统来渲染。采用 GPU 加速策略, 此类方法基本可以做到实时模拟^[1]。而对于物体运动、变形以及破碎的模拟, 涉及到冲击波作用过程的刻画, 模拟速度的瓶颈在于描述冲击波运动的 NS 方程的求解。文献[2]采用显式积分方法, 以致必须使用极小的时间步长来保证稳定性。文献[3]使用经过 BFECC 改进的半拉格朗日方法, 从而可用较大时间步长来加快模拟速度。文献[4]用有限体积法, 模拟速度相比文献[2]有了数量级的提高。但由于 NS 方程本身的复杂性, 使得求解仍过于耗时。最快速的方法^[3-4]渲染一帧仍需要几秒钟, 难以满足虚拟现实应用对实时性的

要求。另一类模拟方法基于理想球形波压强变化的经验曲线。文献[5]将物体表示为相互连接的体元, 通过计算物体在球形波径向上的受力来驱动物体运动或断开体元的连接形成碎片。该方法只能在体元数目较少的情况下达到实时, 真实感比较有限。

本文针对虚拟现实应用的特点, 选取冲击波作用效果中最直观的物体碎片的运动进行模拟。通过简化 NS 方程, 建立了描述气流速度变化的扩散模型。基于该模型定义的流场对碎片运动进行控制, 从而使模拟满足实时性要求, 具有较强真实感。

2 简化的爆炸流场模型

由于爆炸反应速度极快, 几乎瞬间完成, 因此可近似地将爆炸过程分为 2 个独立阶段。第 1 阶段里爆炸物质发生反应, 释放出巨大的热量并生成大量气体产物。第 2 阶段, 反应完成, 暂时存在于有限空间内的高温高压气体急剧向外膨胀, 冲击周围物体制造破坏, 并燃烧产生火焰烟尘。虚拟现实中的爆炸模拟主要针对第 2 阶段进行。根据计算流体力学理论, 气体膨胀运动可由 NS 方程描述:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = \rho \mathbf{f} - \nabla P + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (1)$$

其中, ρ 为气体密度; $\mathbf{V}$ 为速度向量; $\mathbf{f}$ 为作用于气体的外力; P 为压强; μ 为粘性系数。

该方程完整揭示了气流运动的规律, 是爆炸模拟中常采用的精确物理模型。然而其解析解难以获得, 数值求解又如

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773022); 国家“863”计划基金资助项目(2007AA01Z313)

作者简介: 陈长波(1980—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机图形学; 熊岳山, 教授、博士生导师

收稿日期: 2009-12-12 **E-mail:** chenbcbs@gmail.com

概述部分所说的太过耗时,因此,它不能直接用在需要实时模拟的场合。

考察整个爆炸过程可知,对于爆炸作用范围内的一点,冲击波到达时(时刻 t_0)会使该点处压强产生一个非连续的阶跃,达到最大值,如图 1 所示。同时使该处空气质点瞬间获得一个沿冲击波传播方向的最大速度。根据爆炸力学,压强超过大气压的部分称为超压,气流高速运动所产生的冲击压力称为动压。冲击波对物体的破坏主要是通过这 2 种压力实施。随着冲击波逐渐扫过该处,超压和动压迅速降低,最终消失。

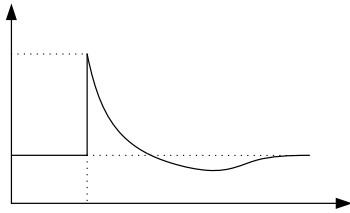


图 1 理想冲击波压强变化曲线

由于冲击波阵面上的超压和动压最大,因此可认为物体受力破裂并形成碎片主要发生在波阵面抵达物体表面后的一小段时间里,而后续气流的冲击就导致了本文所要模拟的碎片的运动。这里假设碎片是刚体,不会发生变形。

分析波阵面后面气流的运动特点可发现,在被冲击波俘获的空气质点中,波阵面上的质点具有最大速度,后面质点的速度在此基础上随着离阵面距离的增大而迅速减小。结合冲击波在传播过程中强度的衰减规律,可知波阵面后面速度的对流并不显著。因此,在描述这部分气流的运动时可去掉式(1)中的对流项 $\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}$ 。同时,密度和体积的变化并不是影响后续气流速度的主要因素,从而可假定密度 ρ 恒为常数,气流体积保持不变,即

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

将上述条件代入方程(1),整理后可得:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{f} - \frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3)$$

这就是简化的后续气流的运动控制方程,它反映了速度各分量所满足的主要数量关系。可以看出,波阵面后面质点速度的变化服从扩散过程。

本文忽略重力等因素影响,假定爆炸产生的冲击波为理想球形波。波阵面以爆炸点为球心,径向地向外推进。由对称性可知,波阵面后面处在同一球面上的空气质点将具有相同的速率。由于沿坐标轴运动的空气质点其速率满足式(3)的数量形式,且该数量形式本身也具有对称性,因此在对压强梯度作模为常数处理,即认为波阵面后面压强呈线性降低后,本文直接对冲击波气流的运动速率建立如下模型:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c + a \nabla^2 v \quad (4)$$

其中, v 为空气质点的运动速率; c, a 为对应式(3)相应项的常数。在此基础上,定义速度方向为速率梯度的反方向。这样就建立了本文用来描述冲击波气流运动的简化流场模型。

对于式(4)的求解,可简单采用有限差分方法。本文选用的是 Douglas 差分格式。

$$\left(1 - \frac{a\lambda}{2} \delta_x^2\right) \frac{v_{j+1,k,m}^{n+1} - v_{j,k,m}^n}{\tau} = \frac{a}{h^2} (\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2) v_{j,k,m}^n + c \quad (5)$$

$$\frac{v_{j+1,k,m}^{n+1} - v_{j,k,m}^n}{\tau/2} = \frac{a}{h^2} \delta_y^2 \left(v_{j,k,m}^{n+1/2} - v_{j,k,m}^n \right) \quad (6)$$

$$\frac{v_{j,k,m}^{n+1} - v_{j,k,m}^{n+1/2}}{\tau/2} = \frac{a}{h^2} \delta_z^2 (v_{j,k,m}^{n+1} - v_{j,k,m}^n) \quad (7)$$

这里省略了空间变量下标,以 v^n 表示 $v_{j,k,m}^n$ 。 τ 为时间步长, h 为空间步长。 $\lambda = \frac{\tau}{h^2}$, $\delta_\eta^2, \eta \in \{x, y, z\}$ 为二阶差分算子。

如 $\delta_x^2 v_{jkm}^n = v_{j+1,k,m}^n - 2v_{j,k,m}^n + v_{j-1,k,m}^n$ 。

通过将式(6)、式(7)代入式(5)易知,该差分格式的截断误差阶为 $O(\tau^2 + h^2)$,并且是无条件稳定的。应用该格式计算时,在每个时间步上需要分别沿 3 个坐标轴向解线性方程组。由于此类方程组具有三对角系数矩阵,因此可以用追赶法快速求解。

3 基于流场的碎片运动模拟

在爆炸事件中,碎片的运动是一个复杂的过程,影响的因素很多。全面表现碎片的运动行为是一件困难和耗时的事情。而在虚拟现实系统中,用户注意到的往往是它主要的运动特点。显然,碎片在冲击波气流推动下的飞散、翻转是其最显著的运动形式。因此,本文着重表现这些特点。

现实的爆炸中冲击波会发生反射、绕射等现象,导致气流运动很复杂。同时,由于碎片的几何不规则性,气流对碎片作用过程本身也难以精确描述。所以,在模拟碎片运动时,基于前一节建立的简化流场模型,采用了用流场来引导碎片运动的思想。具体算法如下:

Step1 建立碎片相关几何和物理描述。输入碎片的几何模型后,算法首先为每块碎片建立属性信息。这些属性包括初始位置、中心点坐标、主法线方向、与爆炸点的距离、碎片质量等。

Step2 定义流场,离散求解域。选定以爆炸点为中心的有限空间作为气流运动区域,沿坐标轴建立规则立方体网格以用于差分计算。网格的构建须保证其中心网格点与爆炸点重合,并以该点为原点定义其他网格点的坐标。

Step3 设定初始条件和边界条件。本文考虑的冲击波为理想球形波,气流向各个方向运动的速率相等。因此,为保持对称性,将初始条件设为

$$v(x, y, z, 0) = \begin{cases} u & \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq R \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{Time}$$

其中, u 为气流初始速率; R 为爆炸源半径。在流场边界上,可认为空气质点已经停止运动,气流速度为 0。所以,边界条件取为

$$v(\pm S_x, y, z, t) = 0$$

其中, S_x 为网格在 x 轴向上尺寸的一半。其他轴向的边界类似处理。

Step4 触发爆炸,进入模拟循环。当设定的事件发生后,便开始执行爆炸过程。在循环迭代中,通过式(4)控制流场的演化,并使碎片跟随流场同步运动。主要操作如下所示。根据需要或当相关条件满足时,例如碎片全部飞出视野,结束循环。算法如下:

```

模拟循环
while 模拟未被终止
do 把波阵面向前推进一个合理的距离
for 每块碎片 x

```

do if STATE[x] = STILL 而且波阵面已到达
then 确定翻转运动的相关参数
STATE[x] = MOVING

求解方程(4), 将流场演化推进一个时间步
计算所有网格点处的速率梯度

for 每块碎片 x

do if STATE[x] = MOVING

then 对碎片 x 当前位置处的速率和梯度插值

更新碎片 x 的位置和翻转角度

碎片运动可分解为 2 种方式: 平动和翻转。平动是碎片在气流冲击方向上的直线运动, 而翻转是碎片力矩不平衡导致的旋转。本文按如下方式定义这 2 种运动:

(1)平动: 在每个时间步上, 通过三线性插值得到碎片当前位置处流场的速率和梯度后, 取梯度的反方向作为气流对碎片推力的方向。然后由下列式子确定速度和位移:

$$\begin{aligned} F_r &= k v_c^2 \\ F_a &= \alpha(s/g) - F_r + G \\ a_c &= F_a/m \\ D_c &= v_c \tau + a_c \tau^2 / 2 \\ v_n &= v_c + a_c \tau \end{aligned}$$

其中, F_r 为空气阻力; k, α 为系数; v_c 为碎片当前速度; F_a 为碎片受到的外力; g 为内插梯度的模; s 为内插的速率; G 为碎片重力; a_c 为碎片当前加速度; m 为碎片质量; D_c 为碎片当前时间步上的位移; v_n 为经当前时间步后碎片的速度。

(2)翻转: 由于碎片上各处的受力主要与离爆炸点的距离有关, 因此碎片上的合力矩可简单定义为

$$T = b(d_f - d_n)/l$$

其中, T 为力矩大小; b 为系数; d_f 和 d_n 分别为碎片的顶点与爆炸点距离的最大值和最小值; l 为取得最值的两顶点之间的距离。力矩的方向垂直于过两顶点的直线和主法线决定的平面。当波阵面到达碎片中心点时, 计算此时冲击波的径向 r_b 和碎片主法线 n_d 所在平面的法线 n_1 , 如图 2 所示。

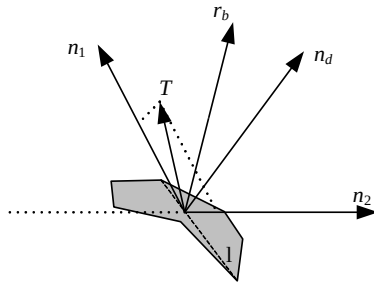


图 2 碎片翻转运动参数的确定

确定垂直于 n_1 和 n_d 的直线 n_2 。 n_1 和 n_2 定义为碎片的主旋转轴。将力矩投影到主旋转轴即可得转动角速率:

$$r_1 = T \cdot n_2$$

$$r_2 = T \cdot n_1$$

其中, r_1, r_2 分别是碎片绕主轴 n_1, n_2 转动的角速率。

4 模拟结果与分析

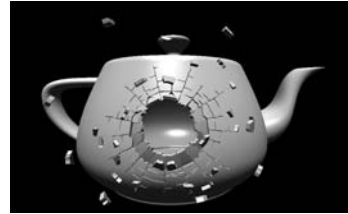
本文的实验环境为 Intel Core2 Duo 2.4 GHz, 1 GB RAM, 显卡是 NVIDIA Quadro FX 570 MB。操作系统为 Windows XP, 实现基于 VC++6.0 和 OpenGL1.2 图形库。

实验选用了茶壶模型, 用来模拟薄壳型物体碎片的运动, 如图 3 所示。假定茶壶是质地均匀的, 所以, 根据常识对其应用了比较规则的碎片分割方案。爆炸点定在茶壶内部正

对缺口中心, 靠近茶壶内壁的位置。模拟的时间步长为 0.01 s。



(a) $t=0.14$ s



(b) $t=0.28$ s



(c) $t=0.45$ s

图 3 实验模拟效果截图

从图 3 可以看出, 对于真实爆炸中碎片的运动特点, 模拟过程都能给予充分体现。这包括碎片沿冲击波径向的飞散、翻转、运动速度的变化以及重力作用下呈现的逐渐下落趋势。另外, 模拟对冲击波造成的物体裂缝也进行了表现。

本实验场景的面片数目为 124 008, 碎片数目为 86, 网格规模为 $20 \times 20 \times 20$, 帧率稳定在 56 帧/s 以上, 可见本文方法具有完全的实时性。

5 结束语

本文通过分析爆炸中冲击波气流的运动特点, 对精确流体模型 NS 方程进行了合理简化, 发现气流速度的变化主要体现扩散规律, 提出一个扩散模型来代替 NS 方程对气流运动进行描述。基于该模型本文实现了对爆炸中碎片飞散效果的模拟。实验表明, 本文方法能充分表现碎片的运动特点, 具有较强真实感, 同时计算开销小, 完全满足虚拟现实对实时性的要求。由于速度模型的求解具有天然的并行性, 碎片的运动控制也彼此独立, 因此基于 GPU 来实现本文的方法是下一步工作。

参考文献

- [1] Lars A. Animating Physically Based on Explosions in Real-time[C]// Proc. of the 5th International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualization and Interaction. Afrigraph, South Africa: [s. n.], 2007.
- [2] Gary D. Animating Explosions[C]//Proc. of ACM SIGGRAPH'00. [S. l.]: ACM Press, 2000.
- [3] Abhinav G. Explosion Simulation Using Compressible Fluids[C]// Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2008.
- [4] Jason S. Visual Simulation of Shockwaves[J]. Graphical Models, 2009, 71(4): 126-138.
- [5] Claude M. Animating Real-time Explosions[J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2002, 13(2): 133-145.

编辑 陈 文