

沙尘暴场景的参数化建模与实时绘制

王章野¹⁾, 官立山¹⁾, 施肖菁²⁾, 彭群生¹⁾

¹⁾(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

²⁾(温州大学物理与电子信息工程学院 温州 320035)

(zywang@cad.zju.edu.cn)

摘要: 沙尘暴是一种灾难性的自然景象,对沙尘暴的量化建模与实时绘制,在环境保护、灾难救援、城市交通及影视特技制作等领域有重要的应用价值.为此,提出了一种基于气象学原理的沙尘暴景象参数化建模方法,特别地,分析了上升气流与温度场的关系,并提供了模拟沙尘暴起沙和升流的简化模型.只需输入气压、气温、沙尘密度、场景类型等不同参数即可模拟出特定条件下的沙尘暴景象.在对沙尘暴景象进行实时绘制时,采用基于半角切片的前向多散射的体绘制模型,大大减少了整体散射模型的计算量.对沙漠和城市场景不同程度沙尘暴景象的实时模拟结果表明了文中方法的有效性;最后采用气象计算模型对所生成的沙尘暴景象的能见度进行了定量的评估分析.

关键词: 沙尘暴;自然景象模拟;参数化建模;气象学;体绘制;能见度评估

中图法分类号: TP391

Parametric Modeling and Real-time Rendering of Sandstorm Scenes

Wang Zhangye¹⁾, Gong Lishan¹⁾, Shi Xiaojing²⁾, and Peng Qunsheng¹⁾

¹⁾(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(College of Physics & Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 320035)

Abstract: Sandstorm is a catastrophic natural phenomenon. To quantitative modeling and realistic rendering of sandstorm are of great significance in environment protection, disaster rescue, urban traffic and special effects synthesis in films & TV, etc. This paper presents a parametric modeling method of sandstorm based meteorology. In particular, by analyzing the correlation between the up-flow and temperature field, we provide a simplified model to simulate the process of sand raising and flow. Different sandstorm under various circumstances can be simulated by specifying their corresponding parameters such as air pressure, temperature, dust density, the type of surroundings, etc. To real-time render the sandstorm scene, we adopt the half-angle slice based volume rendering method, which greatly reduces the computation cost. Our simulation results of different degree sandstorms in deserts and cities demonstrate the efficiency of the proposed approach. Finally, we employ the meteorological computing model to evaluate the air visibility of the synthesized sandstorm scenes.

Key words: sandstorm; natural scene simulation; parametric modeling; real-time rendering; meteorology; volume rendering; visibility evaluation

收稿日期:2012-06-06;修回日期:2012-12-17. 基金项目:国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2009CB320802);国家自然科学基金重点项目(60833007);国家自然科学基金面上项目(60970075). 王章野(1965—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机真实感图形、虚拟现实、红外成像仿真和可视化等;官立山(1985—),男,硕士,主要研究方向为自然场景模拟、虚拟现实;施肖菁(1970—),女,博士,讲师,主要研究方向为计算机图形学、图像处理;彭群生(1947—),男,博士,教授,博导,主要研究方向为计算机真实感图形、虚拟现实、视觉处理、生物计算、可视分析等.

沙尘暴也称沙暴或尘暴,是一种风与沙相互作用的灾害性天气现象.按其严重程度不同,又可分为4个等级:1)浮尘天气.尘土、细沙均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10 km;2)扬沙天气.风将地面沙尘吹起,使空气相当混浊,水平能见度在1~10 km;3)沙尘暴天气.强风将地面尘沙吹起使空气很混浊,水平能见度小于1 km;4)强沙尘暴天气.大风将地面尘沙吹起,使空气非常混浊,水平能见度小于500 m.

沙尘暴天气多发生在内陆沙漠地区,我国西北、华北地区由于其独特的地理环境,也是沙尘暴频繁发生的地区.沙尘暴危害严重,它会造成人畜死亡、建筑物倒塌;造成农田、渠道、村舍、铁路、草场等被大量流沙掩埋;导致农牧业减产;使道路能见度降低,对道路交通运输安全造成严重威胁;污染大气,使空气中微粒数量剧增,大大增加呼吸道疾病的发病概率.近5年来,我国仅西北地区累计遭受到的严重沙尘暴袭击就有20多次,造成经济损失12亿多元,死亡失踪人数超过200多人.

自然场景的真实感模拟一直是计算机图形学领域研究的热点.对沙尘暴景象进行参数化的建模与实时绘制,可以为沙尘暴的预测和防治提供可视化的手段,同时可以提高全民的环境保护意识,推广科普知识,并在影视特技制作、数字娱乐等行业有着广泛的应用前景.

在气象学及物理学界,已有不少对沙尘暴的研究工作,但他们的关注重点往往是沙尘暴的成因机制、数值模拟和分级研究等.其计算模型主要用于对沙尘暴进行分析预测,而这些模型太过复杂细致,不适合计算机图形学的实时模拟.本文的目标是基于沙尘暴的成因机制,提取对沙尘暴景象影响最大的主要气象因素,对沙尘暴场景进行参数化的建模,并对气象学界中的计算模拟模型进行合理简化,考虑沙尘暴和环境的相互作用机制,采用GPU加速技术,具有真实感地实时绘制出不同场合、不同程度的沙尘暴动态景象.

1 相关工作

沙尘暴是在我国及世界范围内多次出现的灾害性天气,它对自然生态环境的破坏和人类健康的影响使之成为气象学界的重要研究课题.现有的研究工作主要集中在沙尘暴的成因^[1]、沙尘暴的数值模拟^[2-4]、沙尘暴的分级及其危险度的研究^[5-7]上.其

中,数值模拟主要从沙尘暴的起沙机制和传输机制出发,对沙尘暴的浓度、沙粒半径等进行预测.但是,它们主要从大尺度观测角度来模拟沙尘暴,倾向于沙尘暴的预测,其计算模型过于复杂,无法达到实时模拟和绘制的要求.

在计算机图形学领域,基于物理的流体模拟方法是真实感自然景象模拟一种有效的方法.目前,基于物理的流体模拟主要有基于粒子的拉格朗日(Lagrangian)方法和基于网格的欧拉(Eule)方法.另外,还有基于统计的格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann method, LBM)^[8]等.拉格朗日方法,特别是SPH(光滑粒子流体动力学)方法^[9],其优点在于采用粒子易于表示流体,无需对整个空间进行处理,可以任意流动,且能保证质量守恒及控制;其缺点是动态流体场景的计算量会随着粒子数的增多而急剧增大.

欧拉方法采用网格来离散流体所在的空间,能很好地描述流体的速度、压强等属性,可方便地进行差分运算,且数值精度比拉格朗日方法高;其计算量只与采用的网格分辨率有关,对于大尺度场景,可采用多尺度的网格来提高运算速度.由于沙尘暴是一个大范围的运动,大风携带着大量的沙尘,同时在沙尘暴移动过程中会把地表的沙尘也卷入空中.若采用基于粒子的拉格朗日方法的话,则需要大量的粒子;而且在模拟过程中会不断有新的粒子加入,那么系统运行速度必然随着粒子数目的增加而越来越慢;若采用基于网格的欧拉方法,可采用密度来表示空中沙粒的多少,需要计算的数据量只与网格分辨力有关,不会因为需要新沙粒的加入而对性能产生显著的影响;故本文采用欧拉网格法来模拟沙尘暴的景象.

1996年Foster等提出了通过有限差分的方法在规则网格上求解三维Navier-Stokes(N-S)方程的算法,但其必须使用很小的时间步长才能保证系统稳定^[10],计算量较大.1999年Stam提出了著名的半拉格朗日稳定流体迭代求解模型^[11],之后的基于网格的流体模拟方法大多采用这个模型进行求解.2001年Fedkiw等^[12]针对欧拉法易导致较大能量耗费问题,通过引入湍涡力限制对其加以控制,并具有真实感地模拟了烟的运动;2003年Harris等考虑了浮力及水的蒸发冷凝机制,采用图形硬件加速技术,较逼真地绘制出云的动态效果^[13].

自然界中不少流体景象往往不仅由单相(气相、液相、固相)组成,而是由多相流体组成.2003年,

Mizuno 等^[14]把火山云考虑成气-固两相流体来模拟,分别计算固体尘埃部分和气体部分的质量,然后计算出火山云的密度,取得了不错的绘制效果.2007年,刘世光等^[15]提出采用气-固两相流模型来模拟龙卷风的动态景象,采用 Reynold 平均的 N-S 方程来模拟风场,并采用边界形状控制技术来模拟龙卷风形态的演变.同年在此基础上,刘世光等^[16]提出了沙尘暴的模拟方法,采用稳定的流体来模拟沙粒的运动,并考虑了沙粒和风场的交互作用,从而模拟出沙尘暴的运动.

若要绘制出多相流体的真实感景象,必须考虑流体与周围环境的相互作用. Max^[17]采用了一种体绘制光学模型,该模型充分考虑了体中的固相粒子对光线的吸收、发射、反射、单散射和多散射效应,大大提高了场景绘制的真实感效果.为提高散射计算的效率, Dobashi 等^[18]提出了一个硬件加速的各向同性的单散射绘制技术,达到了动态云的加速绘制效果. Harris 等^[19]改进了 Dobashi 的算法,提出了两步模拟的方法,首先采用多次前向散射模型计算云中粒子的光亮度,然后在视线方向采用单向散射计算散射到视点的光亮度,该方法绘制的场景更具真实感.

虽然文献^[16]考虑了沙粒和风场的交互作用,但并未把影响沙尘暴的各种主要因素考虑进去,故不能交互式地生成不同条件下的沙尘暴景象,且不能估算不同程度沙尘暴对道路交通能见度的影响.

要真实感地实时模拟不同地域、不同程度的沙尘暴景象,必须从气象学原理出发,并充分考虑到产生此灾害性天气现象的环境因素,提炼出影响沙尘暴景象的主要气象及环境参数,对计算模型进行合理简化,并采用最新图形硬件编程技术进行加速绘制.为此,本文提出了一种沙尘暴场景参数化建模与绘制方法.

2 沙尘暴景象的参数化建模

本节首先阐述沙尘暴产生的物理机制和影响沙尘暴的主要因素,以及气-固两相流模型及风场的初始化,并描述沙尘暴产生各个阶段的过程建模,最后说明主要参数的提取及模拟流程的实现.

2.1 沙尘暴的物理机制

国内外气象工作者对沙尘暴进行了大量的研究,并对其形成机理进行了总结和概括:沙尘暴是一个大尺度缓流系统变化导致的气候现象,要分析沙

尘暴的成因,必须从它所处的气象环境和地表植被环境入手.通过对沙尘暴发生时观测数据的研究,总结出了沙尘暴形成的物理机制及其影响因素.

下面本文介绍沙尘暴产生的物理机制.易于起沙的沙、尘源,有利于形成大风的天气环流系统以及局部不稳定的空气状态是沙尘暴或强沙尘暴形成的主要原因,具体定论如下:

1) 沙尘暴经常发生在沙漠、戈壁及其周围地区,与这些地区降水量偏少地表较干燥、地面植被稀疏、土壤风蚀严重等有直接的关系,这些为沙尘暴的形成提供了源源不断的沙尘,这是其形成的物质基础.

2) 我国的沙尘暴往往发生在冬季和春季,其间天气形势利于形成强风.春季沙尘暴往往是由于冷空气南下造成的.沙尘暴发生时,在高空一般存在几个高压中心和低压中心,由于气压梯度的存在形成了由高压中心流向低压中心的空气流动,进而形成大风.当冷空气南下时,冷空气侵占了原来热空气的位置,而低空的空气温度还是比较高,故形成较大的温度差,并导致上升气流的产生;上升气流携带地表沙尘进入空中,水平气流则可把空中沙尘进行远距离的传输,这样就形成了沙尘暴.

3) 沙尘暴在大风的作用下不断地移动,在其移动过程中由于上升气流的作用会不断地把地表的沙粒和尘埃卷入空中,从而形成大规模的沙尘暴景象.从沙尘暴的形成过程中,高空的天气形势促使冷空气南下,在冷空气南下的过程中,在低空形成了较强的水平气流和上升气流,为沙尘暴的起沙和传输提供了动力.

4) 沙漠地区易发生沙尘暴还与其低空的空气状况不稳定有关.沙漠地区地表温度和空气温度变化剧烈,空气极不稳定,容易在局部形成湍流,从而加剧了沙尘暴的发生几率.

通过以上分析,可得出影响沙尘暴的主要因素包括:1)地表植被状况;2)高空气压形势;3)低空的不稳定空气状态.地表植被状况通过影响起沙过程对沙尘暴最终的效果造成影响,可通过反映地表植被状况的参数来影响这一过程;高空气压形势有利于形成大风,可通过高空气压的分布状况来得出沙尘暴所处的风场,这是形成沙尘暴的至关重要的因素,对沙尘暴的运动有直接影响;对于不稳定的空气状态,需要考虑由于温度差异给沙尘暴造成的影响,温度的差异在形成上升气流的同时也会形成湍流的效果,这给沙尘暴带来了更多的细节,从而可极大地改进沙尘暴动态景象的视觉效果.

2.2 气-固两相流模型

由于沙尘暴的动力主要来自于大风或强风,而且沙尘粒子会和风场进行相互的作用,本文采用气-固两相流模型,以 Reynold 平均的 N-S 方程

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} - \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

来模拟风场^[15]. 其中为 $\mathbf{u}$ 为风速, ρ 为空气密度, p 为其压强, ν 为空气粘滞系数, $\boldsymbol{\tau}$ 为雷诺兹剪应力, $\mathbf{f}$ 为加在空气流场上的外力;式(1)中第二个方程表示空气为不可压缩的流体.

对于沙尘流场,需要知道场景空间中沙尘粒子的速度、温度和密度随时间变化的规律. 速度用于应用平流传输项来计算相应的温度和密度. 这里温度用于沙尘升流阶段的模拟,密度用于沙尘暴的散射效果的绘制. 对于速度场 $\mathbf{u}_d$ 的计算,本文采用相应的 N-S 方程,具体公式如

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}_d}{\partial t} = -\rho(\mathbf{u}_d \cdot \nabla)\mathbf{u}_d - \nabla p_d + \mathbf{f}_d \\ \nabla \cdot \mathbf{u}_d = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中各项的含义类同于式(1),只是对象改为沙尘粒子;式(2)中第一个方程右边第一项为平流传输项. 对于沙尘粒子的温度 T 和密度 ρ ,本文分别采用公式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u}_d \cdot \nabla)T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\mathbf{u}_d \cdot \nabla)\rho \quad (4)$$

进行计算. 采用基于网格的欧拉法来求解式(1)~(4),就可以得到风场与沙尘粒子相互作用效果及其随时间的演变.

2.3 风场初始化

在求解 N-S 方程流体方程组时,一般都假定已知流体状态量(如速度、压力等)的初始条件,再求得流体的状态如何随时间的变化而变化. 通常的做法是假定速度、压力值均为 0,通过增加外力等来驱动流体的运动. 但沙尘暴是一种复杂的天气现象,其初始化条件选择的准确与否,将直接影响随后景象的动态演变后果;而风场更是沙尘暴景象的直接驱动力,因此风场的初始化选择尤为重要. 若能根据沙尘暴发生时气象条件来初始化风场,则不但可以模拟沙尘暴真实感场景,还可以抽取相应的气象参数,为参数化建模生成不同程度的沙尘暴景象打好了基础.

从上述讨论沙尘暴的物理机制可以知道,沙尘暴的形成与高空存在高压中心和低压中心有密切关

系,高压中心和低压中心的存在容易形成气压梯度风,这是沙尘暴运动的主要动力. 为此,需要给出空间气压分布的情况,通过气压来计算出相应风场的初始速度. 根据气象学的原理,可以把气压的分布写成波动的形式,如

$$p = p_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma) \quad (5)$$

其中 p_0 表示不同高度上的气压的幅度值; k_x 和 k_y 分别是 x 和 y 方向上的波数,这里的 x 和 y 方向是指水平面上的 2 个方向; σ 是时间相位值. 具体实现中,若垂直方向的网格数为 n ,则可以根据气象学相关计算模型,预先计算给出 n 个该方向不同高度 p_0 的初始值,通过式(5)可计算出处于不同高度的所有网格的气压值,从而给出沙尘暴所处空间的气压分布. 可以根据实际情况,给出不同的 k_x 和 k_y 以及 σ 来调整气压的变化.

在知道气压分布之后,需要通过气压分布计算出初始化的速度场. 考虑到初始状况下可以把空气看作非粘滞的不可压缩的稳定流体,因此可以通过伯努利定律来计算速度,具体公式为

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{常数} \quad (6)$$

其中 ρ 是空气密度, g 为重力加速度, h 为流体处于的高度, p 为气压, v 为要求解的速度,等式右侧的常数可以根据实际情况进行设置. 通过式(6)可求出速度的大小;而由于风场的速度是因气压梯度造成的,其方向由高压指向低压,因此以根据气压的梯度来求解出速度的方向 $\mathbf{N}$ 公式为

$$\mathbf{N} = -\frac{\nabla p}{|\nabla p|}.$$

求得了速度的大小和方向后,本文将得到的速度场作为初始条件用于式(1)的求解.

2.4 沙尘暴各阶段的过程建模

根据沙尘暴景象发生的条件及次序,可将其分为升流、扬沙及浮尘这几个阶段.

2.4.1 升流建模

沙尘暴经常发生的沙漠及其边缘等地区,其地表和空气温度存在极大差异,空气极不稳定,而温度梯度的存在很容易产生上升气流. 沙尘暴中的上升气流是把地面的沙尘携带到空中的主要动力源,因此,要逼真地模拟沙尘暴景象,必须先模拟沙尘暴中的上升气流.

为模拟上升气流,首先需要用温度场来衡量空间的温度分布. 传统的方法很少涉及温度场的初始化问题,但是温度场的初始条件对上升气流的模拟

有很大影响,所以本文给出了初始化温度场的方法,然后阐述如何通过温度场求解出其对速度的影响。

类似于风场的初始化,根据气象学原理,本文也采用波动的形式来模拟温度的分布,具体公式如 $T = T_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma + \sigma_0)$, 其与式(5)基本类似,因气压槽和温度槽在高度上的倾斜性是沙尘暴形成的重要条件,其中多出的参数 σ_0 用来控制气压槽和温度槽之间的相位差. 对于参数 σ_0 的值,可以根据实际情况来设置, T_0 的数据可以参考沙尘暴发生时的气象数据进行设置。

在得出温度的初始条件之后,每一步模拟过程采用式(3)由速度对温度场进行平流传输,这是温度场模拟的整个过程. 引入温度场的主要目的是为计算由于温度差异对沙粒流动造成的影响,因此下面讨论如何通过温度场来计算出上升气流的速度。

根据 Waldmann 等的分子运动论^[20], 本文采用

$$V = -\frac{2\kappa\sigma}{2\kappa + \kappa_p} \frac{\kappa}{p} \nabla T \quad (7)$$

计算由于温度梯度产生的速度; 其中 V 为上升气流的速度, κ 是气体的热导率, κ_p 是粒子的热导率, σ 是调节系数, 本文取 $\sigma = 0.2$, p 是气压, T 是温度. 通过式(7), 可以得到上升气流速度的大小和方向. 不同于以往人为设置浮力方向为向上的做法, 这里上升气流的方向是根据温度梯度来决定的, 即由温度高的区域指向温度低的区域; 同时其大小跟温度梯度有关, 并考虑了气体和沙粒的热导率以及压强对其的影响, 因此更为全面合理。

2.4.2 扬沙建模

在沙尘暴运动的过程中, 上升气流会把地表的大量沙尘卷入到空中. 为模拟这一过程, 本文根据清晰风蚀物理学中的起沙(扬沙)模式^[4]进行起沙率计算, 并采用简化的计算公式

$$u^* = RHM u_0 \quad (8)$$

其中 u^* 表示临界摩擦速度, R , H 和 M 分别代表地表粗糙程度、土壤的含水量和土壤紧密度对 u_0 的影响, 其中 u_0 是单个粒子的临界摩擦速度. 可把反映土壤状况的 3 个参数合并为土壤干燥度, 与临界摩擦速度一起影响临界摩擦速度的值。

在得到临界摩擦速度后, 需要知道在现有速度下起沙量的大小. 张宏升等^[21]在分析近地面风速、摩擦速度与沙地地表起沙的关系时指出, 当地表摩擦速度超过临界摩擦速度时, 沙尘通量与摩擦速度(风速)的 n 次方成正比, 则最终的计算起沙量的公式为

$$F = \begin{cases} Cu^n, & u > u^* \\ 0, & u \leq u^* \end{cases} \quad (9)$$

其中 C 是比例系数, u 是地表的风速, u^* 表示临界摩擦速度, 由式(8)计算得到. 在模拟沙尘暴的每一步过程中, 本文把式(9)应用到近地表的几层网格上, 根据网格中的速度以及临界摩擦速度计算出是否起沙以及起沙量的大小。

2.4.3 浮尘建模

在远地或本地产生沙尘暴或起沙后, 沙尘粒子可被风和湍流带到高空. 在沙尘暴源地, 可以形成高数十米的沙尘暴墙, 使某些地方的大气中有极高的沙尘粒子浓度. 沙尘粒子若被高空气流传输到遥远的地方, 就形成了浮尘天气, 它是由沙尘等细粒浮游空中而形成, 俗称“落黄沙”. 近年来, 北京及其他北方城市就经常出现这种浮尘天气。

当风贴着地面刮过时, 沙尘粒的上面风速更大, 当这个力超过沙尘粒的重力时, 沙尘粒便被吹到空气中. 当沙尘粒在空中时, 会受到重力以及阻力的影响, 阻力是由于沙尘粒与风的相对速度造成的, 在阻力的作用下沙尘粒会随着风而运动, 呈现出扬尘景象。

假设沙尘粒是球形的, 在气流静止的条件下, 不考虑空气的浮力, 该沙尘粒下落时所受到的阻力^[22]为 $F = 6\pi\eta r v_0$; 其中 η 为空气的粘滞系数, r 为沙尘粒的半径, v_0 为沙尘粒相对于空气的速度. 沙尘粒所受的重力为

$$F_p = \frac{4}{3}\pi\rho_1 g r^3;$$

其中 ρ_1 为沙尘粒的密度, g 为重力加速度. 细小沙尘粒下落时, 作用在它上面的力最后应当达到平衡. 这是因为若重力大于阻力时, 粒子的速度就会增加; 反之若阻力大于重力时, 粒子的速度就会减小. 因此最后粒子总可以达到一个适当的不变速度; 该速度称为自由落体的极限速度. 当 $F = F_p$ 时, 则可得到沙尘粒下落的极限速度

$$v_f = \frac{2}{9}\rho_1 g \frac{r^2}{\eta} \quad (10)$$

若气温为 20°C 时, 则可取 $\eta = 1.82 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, $\rho_1 = 2.0 \text{ g/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 将这些常数代入式(10)可得

$$v_f = 2.4 \times 10^8 r^2 (\text{m/s}).$$

对于细小的尘埃粒子, 其半径可取 $r = 10^{-5} \text{ mm}$, 由式(10)计算可得 $v_f = 2.4 \times 10^{-5} (\text{mm/s})$. 若有一粒这样大小的尘埃在距地面 2 m 高的地方, 在气流静止时以这样的速度自然降落, 即使一个星期也达不到地面! 更不用说对于密度更小的沙尘粒, 由于

所受的重力要小得多,降落的速度要慢得多:这就是浮尘天气产生的原因.因此在这种情况下,无需考虑细小沙尘粒的具体运动,而只需考虑这些细小沙尘粒与环境的相互作用,即对环境光(太阳光及天空光)的散射吸收作用即可.

2.5 主要参数的选取

至此,本文已完成对沙尘暴产生各阶段的建模,要参数化地定量生成特定气象条件下的沙尘暴景象,必须选取 2.1~2.4 节计算模型中主要的气象环境参数.为此必须分析确定各阶段中关键的特征参数.

首先,在对风场的模拟时,风场的初始化是根据气压的分布、基于伯努利定律,通过设置不同高度上的气压值来计算风场速度的初始值;其次,在进行沙粒流场的模拟时,本文考虑了沙尘的成分参数,即沙尘粒的密度、沙尘粒主半径以及反映沙尘粒径分布的标准差;为了模拟升流,本文需要计算环境的温度分布;为模拟扬尘(起沙),本文采用了地表干燥度来反映不同土壤的扬沙(起沙)能力的不同;最后,由于沙尘暴发生的地点不同(如沙尘暴源产生地及沙尘粒子被高空气流传输到的城市),本文提供了一个场景类型的参数.沙漠中的沙尘暴主要表现为沙尘暴;而城市中的沙尘暴,沙粒总量较少,沙尘粒的主半径

也较小,以尘暴为主.

综上所述,本文抽取影响沙尘暴景象的主要参数为气压、气温、地表干燥度、沙尘粒主半径、标准差、沙尘粒密度和场景类型,并通过设置友好的参数界面进行交互操作,以生成不同的沙尘暴场景.

2.6 模拟流程及实现

本文采用了气-固两相流体模型来模拟沙尘暴景象,即分别对风场和沙粒流场进行模拟.风场需要计算的状态量是风的速度,沙粒流场需要计算的状态量主要包括沙粒的速度、密度和温度.程序开始时根据气压的分布进行风场的初始化,然后进行温度场的初始化,之后开始沙尘暴的模拟.在每一步模拟的过程中,分别对风场和沙粒流场进行计算.对于风场的模拟,经过平流传输、粒子对风的作用力、扩散、自适应漩涡约束力和投影等几个步骤;对于沙粒流场的模拟,经过平流、风对粒子的作用力、重力、热浮力、起沙模拟和投影等几个步骤.其中,进行平流传输项计算时,采用了精度更高的 MacCormack 方法^[19],投影计算时采用 Jacobi 迭代方法,迭代次数一般设置为 40,这样可以在计算的速度和精度之间取得平衡.在每一步模拟的最后,根据沙粒的密度信息进行绘制.图 1 所示为沙尘暴模拟的流程图.

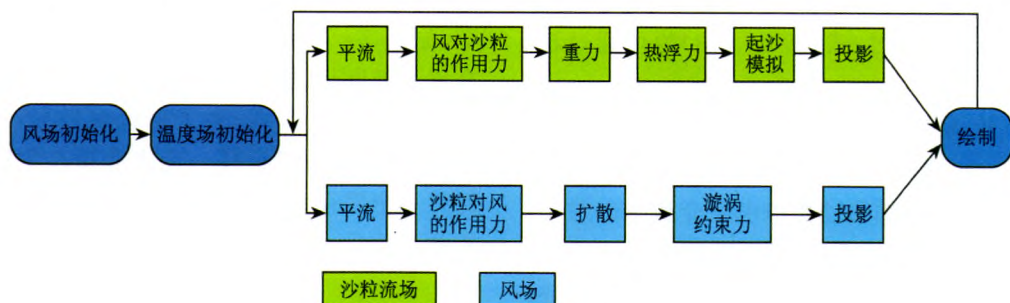


图 1 沙尘暴模拟的流程图

3 沙尘暴景象的真实感实时绘制

当光穿过含有大量粒子的介质时,介质中的粒子与光发生交互,如图 2 所示.粒子可以吸收一部分

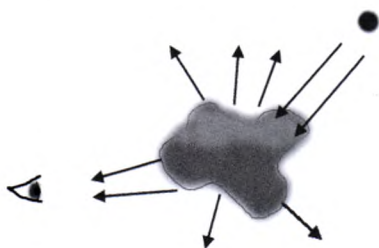


图 2 含有大量粒子的介质对入射光强的影响

的光,可以把一部分光散射到视线外,还可以把一部分光散射到视线方向.要进行沙尘暴景象真实感绘制,必须考虑沙尘粒子对光的吸收和散射;要达到实时绘制,则要考虑绘制的效率.

3.1 沙尘粒子对入射光的吸收和散射

对于单个沙尘粒子来说,一般可将其视为球形,且其半径比可见光的波长大得多,因此可采用 Mie 散射理论来确定单个粒子的消光效率因子和吸收效率因子,并采用文献[23]方法来进行计算.由于本文采用了基于网格的欧拉方法来模拟沙粒流场,得到的是网格中体素的密度信息.因此为了提高沙尘暴场景的绘制效率,本文采用以体素为单位考虑沙尘暴对光的吸收和散射.

在对沙尘粒流场进行建模时,假设沙尘粒子半径 D 服从对数正态分布 $N(D)$,因此可以通过

$$\beta_{ex} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} \sigma_{ex} N(D) dD \quad (11)$$

$$\beta_{sc} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} \sigma_{sc} N(D) dD \quad (12)$$

计算体素内的消光系数 $\beta_{ex}^{(\lambda)}$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$. 其中 λ 为光线的波长, σ_{ex} 和 σ_{sc} 分别为消光截面和散射截面. 式(11)中散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ 只给出了多少光亮度会被散射,并没有给出每个方向上的散射情况,故本文定义相位函数来反映把光线散射到不同方向上的概率. 一般球形介质的相位函数只与原方向和散射方向的夹角 θ 有关,因此可以把相位函数定义为 $\Phi(\theta)$:

$$\beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) = \beta_{sc}^{(\lambda)} \Phi(\theta) \quad (13)$$

它决定了粒子散射光的方向. 本文采用近似的 Henyey/Greenstein 相位函数^[21]来计算,即

$$\Phi(\theta) = \frac{(1-g)^2}{4\pi(1+g^2-2g\cos(\theta))^{3/2}}.$$

其中 g 是一个控制参数,可以控制相位函数的形状. 当 $g=0$ 时,相位函数值为常数 $1/4\pi$,即各向同性的散射;当 g 为负值时,大部分光线沿前向的方向散射;当 g 为正值时,大部分光线沿后向的方向散射. 在本文沙尘暴的模拟中,采用 g 为负值,即倾向于把光线沿前向散射;式(10)~(13)均可通过预计算得到.

若一条光线在介质中沿方向 ω 传播,起始光亮度为 $L_0^{(\lambda)}(\omega)$,经过一段距离 x 后的光亮度变为 $L^{(\lambda)}(x, \omega)$;则光在传播的过程中由于介质中的粒子的吸收和散射会发生衰减,同时会有别的光线不断地散射到这条光线中,则最终入射到视线方向的光亮度为

$$L^{(\lambda)}(x, \omega) = L_0^{(\lambda)} e^{-\int_0^x \beta_{ex}^{(\lambda)}(x') dx'} + \int_0^x g(x', \omega) e^{-\int_{x'}^x \beta_{ex}^{(\lambda)}(x'') dx''} dx' \quad (14)$$

其中, $g(x, \omega) = \int_{4\pi} L^{(\lambda)}(x, \omega') \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) d\omega'$, θ 为方向 ω 和 ω' 之间的夹角, $g(x, \omega)$ 表示空间中所有方向 ω' 上的光线在点 x 处散射到方向 ω 的光亮度. 但式(14)是一个非常复杂的公式,它同时考虑吸收和散射对光亮度的影响,包含多重积分. 由于多重积分计算非常耗时,因此难以达到实时绘制的要求. 为此,本文采用一种简化的多散射计算模型^[21],即只考虑在一个很小空间角范围内的前向多散射,可把积分公式简化为一个只包含简单的求和与连乘运算的公

式,而计算精度上并不会会有大的偏差,从而达到实时要求,即

$$L_V^{(\lambda)} = L_0^{(\lambda)} \prod_{j=1}^N e^{-\beta_{ex}^{(\lambda)} \cdot \Delta x} + \sum_{j=1}^N g_k^{(\lambda)} \prod_{k=j+1}^N e^{-\beta_{ex}^{(\lambda)} \cdot \Delta x}.$$

其中 $g_k^{(\lambda)} = \sum_{i=1}^M L_i^{(\lambda)} \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta)$, M 表示与当前体素相邻并且已被计算过的体素的个数,此式用来计算周围体素对当前体素的散射.

3.2 多散射半角切片法绘制

Ikits 等^[24]在介绍基于纹理的体绘制技术时,提出了针对三维纹理进行可视化的半角切片绘制方法. 当通过切片对体数据进行采样时,采用该方法的优点在于当分别以光源和视点 2 个角度进行光亮度累积时,可以使用相同的切片,从而减少了计算量. 对于各切片,从光源方向,总是按它离光源从近到远的方式进行计算;而从视点方向,则按离视点从近到远的方式进行计算.

但上述半角切片绘制方法没有考虑介质对光线的散射作用,因此真实感有所欠缺. 为提高场景绘制的真实感,本文提出了一个改进的多散射半角切片绘制方法,即将上面所描述的多散射机制与半角切片绘制法结果起来. 对于每一个切片,需要进行 2 个步骤计算:首先从视点方向计算,采样光源缓存得出介质对光源的衰减,累积衰减后的光亮度到视点缓存,如图 3a 所示;然后从视点方向计算,通过采样介质的密度信息,累积密度对光亮度的衰减到光源缓存,如图 3b 所示. 为了模拟多散射,本文使用 2 个光源缓存,通过采样一个光源缓存中的数据累积到另一个缓存中来模拟多散射的现象. 当计算完所有的切片后,也就得到了最终的图像. 经过如此处

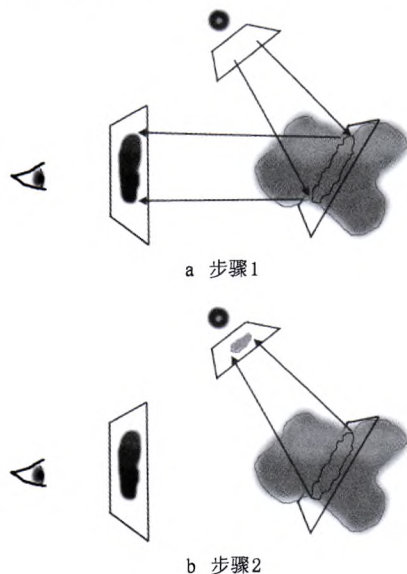


图 3 多散射半角切片法的两步计算

理,场景绘制的真实感得到了很大的提高.

3.3 能见度估算

由于沙尘暴中含有大量的沙尘粒子,它对可见光的吸收和散射会引起能见度的变化.能见度是一个复杂的物理量,主要取决于空气中的悬浮粒子引起的消光系数.根据 Koschmieder 定律^[25],其计算式如 $V = -\ln \epsilon / \sigma$;其中 V 是能见距离, ϵ 是视觉对比阈值,一般可取为 0.05, σ 为消光系数,它其实就是式(9)中的消光系数 β_x ,可见能见度的大小主要取决于消光系数 β_x 的值.对于单个沙尘粒子,其吸收截面和散射截面与入射光波长、粒子的粒径有关;而从体素角度考虑,其消光系数与其中粒子的分布以及粒子的密度有关.因此,当给定沙尘暴的沙尘密度和沙粒粒径分布后,可以预计算出 β_x 及其他体素光学特性因子,进而评估出沙尘暴对能见度的影响.采用预计算方法,可以大大提高系统的运行速度.对于沙尘暴场景,本文先采用基于物理的欧拉流体模拟方法计算出沙尘暴的密度分布,然后采用基于半角切片的简化多散射模型进行场景绘制.

本文基于 OpenGL 平台,采用 GLUT 处理和图

形界面相关的操作,使用 GLSL 语言编写在 GPU 上运行的程序.由于采用了基于网格的欧拉方法进行模拟,空间被划分成均匀的网格,每个网格中存储流体的各物理状态量,这类似于 GPU 中的 3D 纹理,因此本文通过 3D 纹理来存储速度、密度、温度等状态量.由于本文采用的是 GPGPU 技术,因此采用 FBO(frame buffer object)技术,通过把 3D 纹理绑定到 FBO 来实现纹理绘制,通过 OpenGL 相关的绘图指令完成对片段程序的调用.图 1 中模拟的每个步骤都有一个对应的片段程序,因此大部分的计算处理都是在 GPU 中完成的,CPU 只负责处理片段程序的参数的设置、程序的主逻辑的控制以及和用户的交互,从而大大提高了绘制的速度.

4 结 果

基于第 2.3 节所述模型,本文设计了沙漠和城市 2 个场景,模拟了不同程度沙尘暴动态景象的实时生成.图 4 展示了沙漠场景中沙尘暴由远到近而产生的运动过程.

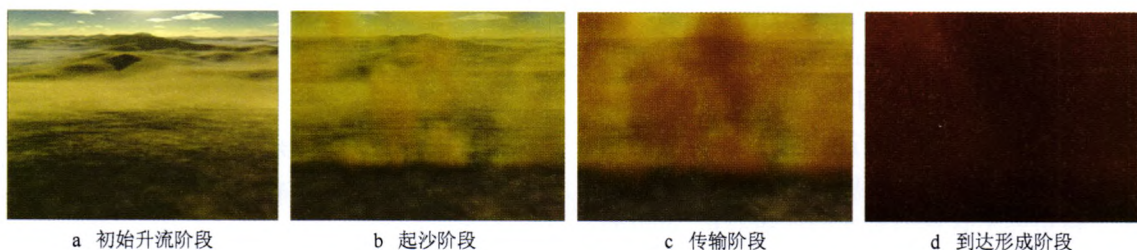


图 4 沙尘暴产生传输过程的场景图序列

图 5 所示为不同程度的沙漠沙尘暴景象,图 6 所示为不同程度的城市沙尘暴场景的绘制结果.从图

中可以看到,随着沙尘暴严重程度的加剧,其环境的能见度则依次降低;其中图 6 f 所展示景象往往发生

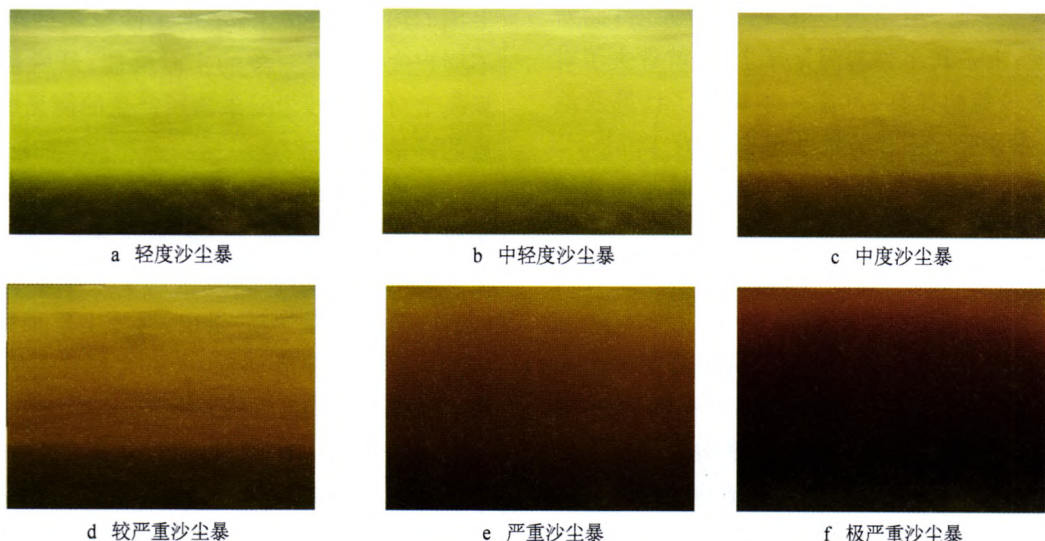


图 5 不同程度的沙漠场景沙尘暴景象

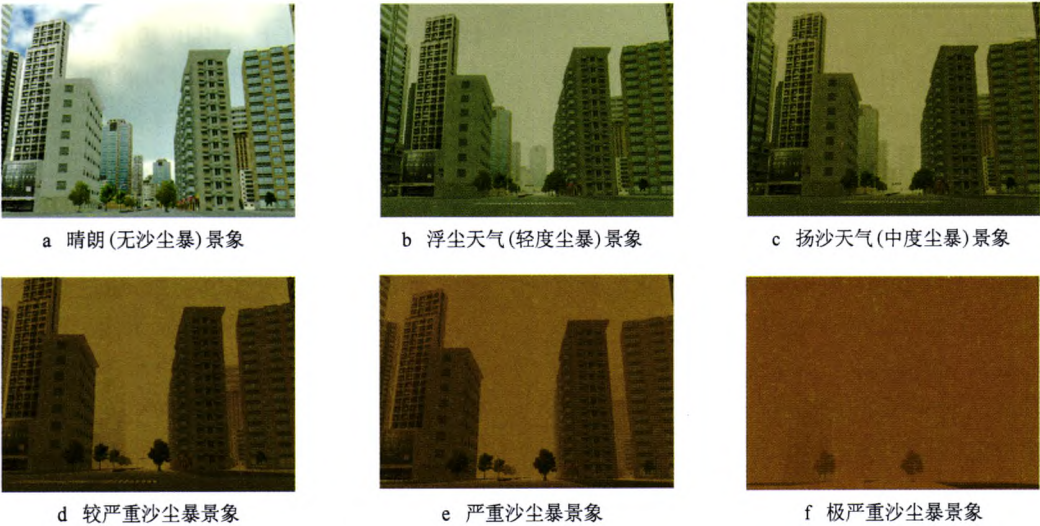


图 6 不同程度的城市场景沙尘暴景象

于沙漠附近的城市,其能见度不足 200 m.

欲了解更多详情,请观看本文所附的视频文件(DemoSandstorm. wmv,其大小约为 4.86 MB,可以通过访问以下网址来下载获取: <http://www.cad.zju.edu.cn/home/zywang/DemoSandstorm.wmv>),从中可以看出本文的实时绘制结果较具真实感.

本文的程序是在 Intel Core(TM) i5-2500 CPU, 3.30 GHz, 4 GB 内存, NVIDIA GeForce GTX 680 显卡配置的高档 PC 机上运行的. 有关沙尘暴场景的规模,不同的场景类型其尺度有所不同:对于沙漠场景,表 1 给出沙尘暴模拟算法的性能分析. 可以看出在网格分辨率为 $64\times64\times64$ 时,本文方法可以达到实时,在切片数为 64 时绘制速度达约 50 帧/s;在切片数为 128 时绘制速度达约 30 帧/s;绘制时切片的数量对绘制速度有一定影响. 当网格分辨率为 $128\times128\times128$ 时,绘制速度在 14 帧/s 左右;而对于城市场景,由于其主要起因是浮尘,这就省去了对起沙及升流步骤的计算,可进一步提高了计算及绘制的速度. 本文中,城市场景的范围在为 100 km^2 、场景复杂度达 120 万个面片,其平均绘制速度达到 45 帧/s.

关于算法的可伸展性,本文方法若应用于更大尺度的范围时,若能结合适当的 LOD (level of details) 算法及动态装卸技术,则仍可达到实时绘制的效果. 因目前本系统在沙漠场景($64\times64\times64$ 的网格分辨率)及城市场景(100 km^2)平均绘制速度能达 40 多帧/s 的性能,所以若加入其他应用场景的计算开销,仍有可能达到实时. 这就为本文方法在游戏及其他实时仿真领域的应用提供了较大的伸展性.

表 1 算法性能比较

网格分辨率	模拟帧率	场景绘制速度/(帧/s)	
		切片数 64	切片数 128
$64\times64\times64$	136.4	49.8	29.9
$128\times128\times128$	18.3	15.3	13.1

5 结 论

本文提出了一种基于气象学原理的沙尘暴景象参数化建模与实时绘制方法. 本文方法提供了模拟沙尘暴的起沙、升流和浮尘的方法,通过输入气压、气温、沙尘密度、场景类型等不同参数,就可模拟出特定条件下不同沙尘暴景象;并给出了沙尘暴景象的实时绘制算法;采用基于半角切片的前向多散射的体绘制模型,简化了整体散射模型的计算量,同时采用 GPU 加速技术,实现了沙漠和城市 2 种场景不同程度沙尘暴景象的实时绘制;最后采用气象计算模型对这些沙尘暴景象所产生的能见度进行了定量的评估分析.

相比现有的工作,本文的创新之处在于提供并实现了参数化(气压、气温、沙尘密度、场景类型等)输入的定量建模,并模拟实现了沙尘暴在不同阶段(起沙、升流和浮尘)的景象,对沙尘暴景象的能见度进行了定量的评估分析,在更大规模范围内实现了沙尘暴景象的实时生成.

在将来的工作中,将进一步深入研究沙尘暴与环境相互作用的机制,模拟不同强度的沙尘暴对城市环境所产生不同积尘厚度的效果;研制沙尘暴场景与物体交互作用的影视特技制作,并结合沙尘暴

的实际测量数据,完善参数化模型,以达到沙尘暴景象对环境影响的可视化预测及评估的目的。

参考文献(References):

- [1] Li Dongliang, Wang Tao, Zhong Hailin, *et al.* Climatic cause of sand-dust storm formation in northern China and its trend forecast [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(3): 376-379 (in Chinese)
(李栋梁, 王涛, 钟海玲, 等. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 376-379)
- [2] Li X S, Zhou J Q, Li Z, *et al.* A numerical simulation of "5.5" super-duststorm in northern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(1): 63-73
- [3] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3): 233-249
- [4] Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to north China and its applications [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(2): 125-143 (in Chinese)
(孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(2): 125-143)
- [5] Middleton N J. A geography of dust storms in south-west Asia [J]. *Journal of Climatology*, 1986, 6(2): 183-196
- [6] Wan Bentai, Kng Xiaofeng, Zhang Jianhui, *et al.* Research on classification of dust and sand storm basic on particular concentration [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2004, 20(3): 9-11 (in Chinese)
(万本太, 康晓风, 张建辉, 等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. *中国环境监测*, 2004, 20(3): 9-11)
- [7] Luo Jingning, Zheng Xinjiang, Zhu Fukang, *et al.* Meteorologically dangerous level of dust storm occurrence in China [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(1): 185-190 (in Chinese)
(罗敬宁, 郑新江, 朱福康, 等. 中国沙尘暴发生的气象危险度研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 185-190)
- [8] Thürey N, Rüd U, Stamminger M. Animation of open water phenomena with coupled shallow water and free surface simulation [C] // *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2006: 157-164
- [9] Stam J, Fiume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1995: 129-136
- [10] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1996, 58(5): 471-483
- [11] Stam J. Stable fluids [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1999: 121-128
- [12] Fedkiw R, Stam J, Jensen H W. Visual simulation of smoke [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2001: 15-22
- [13] Harris M J, Baxter W V, Scheuermann T, *et al.* Simulation of cloud dynamics on graphics hardware [C] // *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2003: 92-101
- [14] Mizuno R, Dobashi Y, Chen B Y, *et al.* Physics motivated modeling of volcanic clouds as a two fluids model [C] // *Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2003: 440-444
- [15] Liu S G, Wang Z Y, Gong Z, *et al.* Real time simulation of tornado [J]. *The Visual Computer*, 2007, 23(8): 559-567
- [16] Liu S G, Wang Z Y, Gong Z, *et al.* Physically based animation of sandstorm [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2007, 18(4/5): 259-269
- [17] Max N. Optical models for direct volume rendering [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, 1(2): 99-108
- [18] Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita H, *et al.* A simple, efficient method for realistic animation of clouds [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2000: 19-28
- [19] Harris M J, Lastra A. Real-time cloud rendering [J]. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(3): 76-85
- [20] Friedlander S K. Smoke, dust and haze: fundamentals of aerosol dynamics [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2000
- [21] Zhang Hongsheng, Zhu Hao, Peng Yan, *et al.* Experiment on dust flux during dust storm periods over sand desert area [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(5): 744-752 (in Chinese)
(张宏升, 朱好, 彭艳, 等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 744-752)
- [22] Marble F E. Dynamics of dusty gases [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1970, 2: 397-446
- [23] van de Hulst H C. Light Scattering by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1957
- [24] Ikits M, Kniss J, Lefohn A E, *et al.* Volume rendering techniques. Chapter 39 in *GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics* [M]. New Jersey: Addison Wesley Press, 2004: 667-692
- [25] Li Chunliang, Qu Laishi, Zhang Yong, *et al.* 100 Questions on visibility measurement technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009 (in Chinese)
(李春亮, 曲来世, 张勇, 等. 能见度测量技术 100 问[M]. 北京: 气象出版社, 2009)