

基于结构化粒子模型的云可视化应用

王 畅^{1*}, 谢永华^{1,2}, 袁复兴¹

(1. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 江苏省网络监控中心, 南京 210044)

(* 通信作者电子邮箱 herow2012@126.com)

摘 要:云数据的三维可视化模拟一直是计算机图形学和气象科学领域的研究热点。提出了基于 WRF 模式数据的建模与渲染技术, 以实现真实云数据三维可视化模拟。针对粒子系统建模复杂、实时性差的问题, 首先通过计算云粒子之间的相互关系建立结构化粒子模型, 实现 WRF 云数据的建模; 然后利用光照模型和公告牌技术对建模粒子进行光照渲染和三维模拟, 同时结合 Imposter 技术提高纹理绘制速度和效果。实验仿真结果验证了该方法在提高云数据的建模与渲染速度, 提高云三维可视化的逼真度方面的有效性。

关键词:WRF 模式; 结构化粒子系统; 纹理映射; 公告牌技术; 三维可视化

中图分类号: TP317.4 **文献标志码:** A

Application on cloud visualization based on structured particle model

WANG Chang^{1*}, XIE Yonghua^{1,2}, YUAN Fuxing¹

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

2. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: The 3D virtualization of cloud data has always been the hotspot of computational graphics and meteorology. A method for data modeling and rendering based on Weather Research and Forecasting (WRF) was proposed to realize the 3D virtual simulation of real-world cloud data. Due to the complexity of particle system modeling and its poor real-time performance, a WRF cloud model was first set up, regarding the relationship between particles in the cloud system; further illumination rendering and 3D simulation were completed based on the illumination model and billboard technique; meanwhile, Imposter technique was introduced to speed up the texture mapping and improve the performance. The simulation results show that the proposed method owns the benefits of fast modeling and rendering of cloud data as well as good fidelity of the 3D virtualization model.

Key words: Weather Research and Forecasting (WRF) model; structured particle system; texture mapping; billboard technique; 3D virtualization

0 引言

近年来,通过计算机模型和图形算法模拟云、流水、大气、雨、雪等具有不规则的外形和丰富的表面细节的自然物体,是计算机图形学研究的热点和难点。其中云作为天气系统的一个组成部分,其复杂的视觉和物理特性引起了气象学家、物理学家的关注,具有模拟的重要性。WRF(Weather Research and Forecasting)模式云数据具有反映大气运动规律的云物理参数,对其进行模拟可以直观地获得云结构和特征。由于云的结构复杂、动力学特征变化不定以及光照效果特殊等原因,使得人们很难用精确的方法及模型去描述它,更加不容易真实地展示三维云场景。从图形学的角度看,云的无确定边界、无确定表面、复杂光照效果等特性,使传统的几何建模方法不适用于云的建模。因此,WRF云数据的模拟一直成为气象应用领域中最具有挑战性的研究方向之一。

1 相关研究

在计算机上模拟三维云,最重要的是模拟结果要有真实云的规律和特性。为了得到逼真的效果,研究学者们提出很多种建模方法,这些建模方法一般分为两类:基于个体生长的

方法和基于物理过程的方法。基于个体生长的方法没有考虑云生成的物理过程,主要是为了获得云的视觉特性,增强云的真实感。1983年,Reeves^[1]提出用粒子系统对云、火等模糊物体建模,取得了不错的视觉效果。1985年,Gardner^[2]引入简单的启发式方法,主要利用着色和纹理映射的平面和曲面建模,通过调整纹理函数的参数产生不同类型的纹理,并将其映射到椭球体上生成三维云图像。1993年,Nishita等^[3]提出了云的二维分形建模方法,通过映射分形图像描述云的密度分布,并将这些图像映射到一组不同高度的球面上实现模拟。1998年,Dobashi等^[4]完善Nagel提出细胞自动机模拟方法,成功地生成具有较好真实感的云。Perlin提出基于Perlin噪声的云模拟,通过对噪声的不同操作生成随机且连续的密度数据来填充云。这些建模方法虽然从视觉上模拟云的外观效果,但是动态云的细节方面难以实现。

基于物理过程的方法,是直接生成云的物理因素出发。云属于流体的一种,基于物理模拟流体运动,只需要更改控制方程的参数和模拟的初始条件等,并在此基础上考虑云的热力学规律和水平衡规律,就能产生较好的模拟效果。典型的有Jos Stam的流体模型,通过求解可压缩连续流体的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, NS)方程来模拟云和烟雾的动态变化

收稿日期:2013-05-14;修回日期:2013-07-17。 基金项目:国家863计划项目(2011AA7123032B)。

作者简介:王畅(1987-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:数据可视化、图像处理与分析; 谢永华(1976-),男,江苏靖江人,教授,主要研究方向:模式识别、基于内容的图像检索技术、气象数据三维可视化技术; 袁复兴(1989-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、三维可视化。

情况,并且可以交互式控制云或烟雾的变化情况^[5-6]。Miyazaki^[7]引入耦合映射网格(Couple Map Lattice)对方程进行简化,降低了计算代价。徐江斌等^[8]改进元胞自动机建模方法,模拟了水汽从聚集到凝结至相变的完整物理过程,并采用 GPU 技术提高建模速度。

通过分析以上建模方法及其存在的不足,为了提高云数据三维可视化的速度,本文通过计算云粒子之间的相互关系构建结构化粒子系统并用于数据建模,以提高建模速度;然后利用光照模型, Billboard 技术及 Imposter 技术实现云的色彩渲染和三维效果。实验结果验证了本文方法的有效性。

2 基于结构化粒子系统建模

2.1 结构化粒子系统

粒子系统的基本思想就是采用许多具有简单几何形状的粒子作为最基本的元素,每个粒子都有一个生命周期,分别为“产生”、“运动”、“生长”和“死亡”四个阶段,而且各自是随机分布的^[9]。但是粒子系统采用大量的、离散的粒子模拟物体,导致实验的实时性受到影响,实验速率和真实性之间的平衡很难把握,所以需要存储空间和计算时间进行优化。

为了解决以上问题,本文引入“结构化”的概念,通过计算粒子与粒子之间的相似性或相互关系,建立结构化粒子模型。其基本思想是:遍历所有粒子,查询与基准粒子具有相似关系的粒子,将这些粒子归为一类,作为一个结构化粒子,然后对结构化粒子组成的粒子系统进行渲染。为了表达粒子之间的相似关系,引入近似代数中的一些概念来完成“结构化”的定义。

首先,粒子相似关系的定义^[10]是:设 $R \neq \emptyset$ 是粒子系统的所有元素的集合,定义任意两个粒子之间的相似关系为 ω ,如果 ω 满足自反性和对称性,那么称粒子 x, y 在属性 $a \in A$ (A 为粒子系统的属性集)相似 $\Leftrightarrow \omega(a(x), a(y))$ 成立。为了更好地表示两个粒子之间的相互关系,本文设定度量函数 $\lambda_a: R \times R \rightarrow [0, 1]$ 进行度量,从而可以确定两个粒子之间的相似程度。但是对于各个不同的数值,可以根据属性的各自特征给出不同的定义,以更好地符合实际情况。下面是 3 种度量的方法。

1) 当 $a \in A$ 为连续值属性时:

$$\lambda_a(v_i, v_j) = 1 - \frac{|v_i - v_j|}{|\max(a) - \min(a)|} \quad (1)$$

2) 当 $a \in A$ 为离散的、有序的、有限个数的数值属性时,若 $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_t$, 则:

$$\lambda_a(v_i, v_j) = 1 - \frac{|i - j|}{t - 1} \quad (2)$$

3) 当 $a \in A$ 为非数值符号属性时:

$$\lambda_a(v_i, v_j) = 1 - \frac{\sum_k |P(a = v_i \wedge d = k) - P(a = v_j \wedge d = k)|}{P(d = k)} \quad (3)$$

其中 $P(a)$ 表示为某条件下的概率取值。

除了满足以上度量条件,还需要对粒子之间的关系有一定的约束,这里给出约束函数的定义^[10]:如果任意两个粒子对象 x, y 相似 $\omega_A(x, y) \Leftrightarrow h(A, \lambda_a(a(x), a(y)))$ 满足给定的约束条件,其中 $h()$ 为考虑 X 与 Y 的相似性,各个属性 $a \in A$ 所应满足的条件为相似的整体约束函数。对于整体约束函数 $h()$ 的定义应视实际情况而定,这里给出以下原则: $\forall a \in A$,

$\lambda_a(a(x), a(y)) \geq \sigma(a)$, 其中 $\sigma(a) \in [0, 1]$ 为属性 a 的取值被认为相似时所设定的最低阈值。

2.2 模型的构建

根据结构化粒子系统的基本步骤,生成云的主要流程如下:

1) 读取 WRF 云数据。从数据中获取云的位置、半径及边界分布情况。

2) 初始化粒子。根据云的物理特征为每一个粒子赋予相关属性,再按照 WRF 数据中云的边界分布对其进行填充。

3) 结构化粒子的生成。以第一个粒子开始作为基准遍历所有粒子,查找与第一个粒子具有相似关系的粒子并标记出来,将这些粒子归为一类,看作一个结构化粒子;然后从未标记的粒子中随机选取一个作为基准,在其余未标记的粒子中查找,生成结构化粒子。以此类推,最后生成由结构化粒子组成的结构化粒子系统。

4) 判断粒子的生命周期是否终结。如果粒子的生命周期结束,粒子回到初始化位置,重新对粒子初始化;否则进入下一步。

5) 保存现存的结构化粒子并根据下文讲述的渲染技术进行渲染,绘制出云的图形。

最终算法实现过程如图 1 所示。

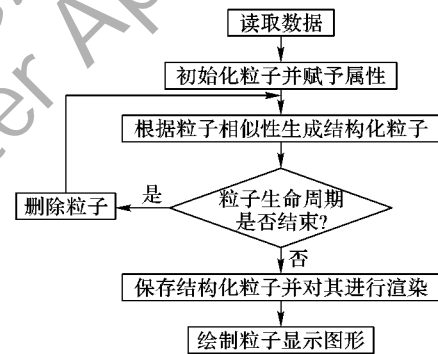


图 1 结构化粒子系统流程

3 云粒子渲染

3.1 光照模型

粒子系统建立了云的模型,但是云粒子的最终色彩还需要进一步处理。其中光照对云的颜色起到了关键性的作用。光照模型能够表现出云与光之间的物理过程,对整个模型的绘制后的真实性和渲染的速度方面影响很大。那么要增强模拟云的真实感,必须要考虑云与阳光之间的相互关系,要考虑光的吸收、散射以及消失。

因为云中的辐射传输方程式已知的,那么最直接的做法就是对这些方程进行数值求解,但是求解方程的计算非常复杂,而且直接求解方程还会影响到整个系统的实时性,所以要对其进行简化。针对云本身的特性,找出那些对最终的渲染效果没有影响或者影响不大的因素,并在模拟过程中忽略掉,以达到简化计算的目的。

Dobshi 等^[11]提出的光的单一散射光照模型,这个方法成功地简化了辐射传输方程。后来 Harris^[12]对其模型又进行了改进,提出了多重前向散射光照模型,即只计算发生在光源方向的散射,简化后的公式^[12]如式(4):

$$I_k = \begin{cases} g_{k+1} + T_{k-1}I_{k-1}, & 2 \leq k \leq N \\ I_0, & k = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $T_k = e^{-\tau_k}$ 表示粒子的透明度。本文采用式(4) 求解每个粒子的光强,取 $\tau_k = 80$,并且在计算光强 g_k 时采用文献[13] 提到的瑞利散射的相位函数,因为瑞利散射主要表示粒子非常小的散射现象,云粒子比较符合其特征。实验中根据计算出的每个粒子的光强度,并结合 OpenGL 的光照函数,将其显示出来。

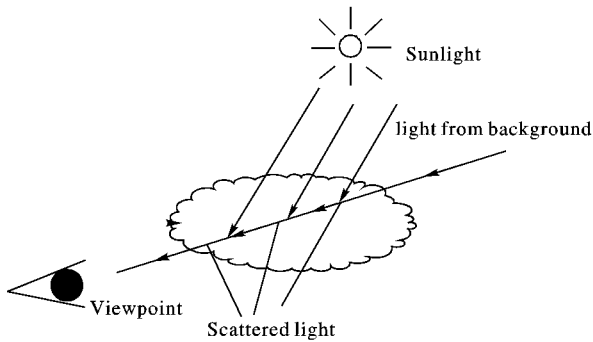


图 2 光在云中的传输

3.2 纹理映射和三维渲染

光照模型只是计算出粒子的光强,还不能得到逼真的图像。由于粒子表面过于光滑和单调,而云表面是有自己的纹理的,所以,本文还采用纹理映射技术,对粒子系统生成的云模型加上适当的纹理贴图,这样就可以提高整个图像的逼真程度。

首先使用插值函数来生成粒子的纹理^[14]:

$$\eta = (2t^3 - 3t^2 + 1) \times \eta_1 \quad (5)$$

其中 η_1 为一个常量,可以选择任意一个[0.1] 区间的数值来达到满意的效果,这里选取 $\eta_1 = 0.4$; t 为当前着色的像素点到纹理中心的距离,其范围为[-1,1]。本文将该纹理图像像素点的信息存储到缓冲区,然后使用 OpenGL 的纹理映射函数 `glGenTextures()`、`glBindTexture()`、`glTexImage2D()` 和 `glTexParameterf()` 等完成云层粒子表面的纹理。

一般情况下,纹理映射技术是二维的,所以当云发生移动或者观察视角发生变化的时候,可能会发生失真现象。为了弥补这方面的不足,本文采用 Billboard 技术(广告牌技术),即将生成的二维纹理通过纹理映射技术粘贴到设定的多边形上,这样从观察者的角度来看,模拟的真实性就大大增加。

采用 Billboard 技术可以使得云图始终面向观察者,但是不能很好地反映出云的物理变化。本文采用文献[15] 提到的 Imposter 技术解决这个问题,先求出云中心和视点之间的距离 D_{lc} ,然后读取云半径值,设置 Imposter 纹理使用标准 $dist_imposter$ 和云纹理使用标准 $dist_3D$,当 $D_{lc} < dist_3D$ 时,绘制粒子云纹理; $D_{lc} > dist_imposter$ 时,绘制 Imposter 云纹理。最后将纹理以 Billboard 的方式投影到二维区域中。如此就可以减少绘制时的像素数量,进一步提高渲染速率。

4 实验结果与分析

本实验使用的数据利用 WRF 模式(分辨率为 10 km,模拟区域格点数 11×11),采用一系列参数化方案进行模拟。实验在内存 2 GB,主频 2.66 GHz,显存 128 MB 的硬件环境下完成。

实验初始化时粒子数量控制在 2000 ~ 15000,发现随着粒子数的增多,每秒帧数(Frames Per Second, FPS)逐渐减少。为了验证本文建模方法的优越性,抽取 5 组数据进行统计分析,表 1 给出两种建模方法的模拟速率对照。

表 1 粒子系统和结构化粒子系统模拟速率对照

粒子数	模拟速率/FPS	
	粒子系统	结构化粒子系统
2600	25.4	26.3
4100	18.5	19.8
7800	8.7	10.6
10500	6.5	8.3
13000	5.2	6.9

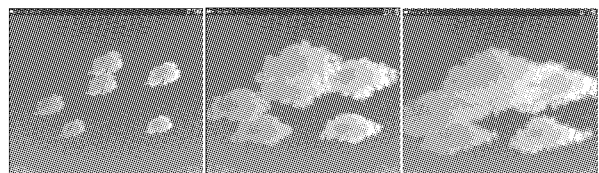
由表 1 可知,在粒子数量相同的情况下,采用结构化粒子系统进行建模拟拟云的每秒帧数比粒子系统有所提高,而且粒子数量越多,速率提高得越明显。优化后的速度平均提高 18.7%。

表 2 给出了文献[6]的建模方法与结构化粒子系统建模的速率比较。文献[6]的建模方法是基于物理过程的模拟,通过求解 NS 方程,得到云体密度分布并渲染出云图。由表 2 可知,结构化粒子系统建模与该方法相比,速度平均改进 55.7%。

表 2 物理建模与结构化粒子建模速率对照

云朵数	建模速率/FPS	
	物理建模	结构化粒子系统
1	21.3	34.3
3	19.2	32.5
5	15.6	27.6
8	10.4	23.4

图 3 给出采用粒子云纹理和 Imposter 纹理的三组实验结果,其中图(a)是完全使用 Imposter 纹理得到的云模拟,此时速率比较快,平均达到 317.2 FPS;图(b)是同时使用 Imposter 纹理和粒子云纹理的结果,平均速率在 18.9 FPS;图(c)是完全使用粒子云纹理得到的结果,平均速率为 4.1 FPS。综上所述,Imposter 纹理的引用提高了本实验的渲染速率,而且取得不错的渲染效果。



(a) 完全使用 Imposter 纹理 (b) 同时使用 Imposter 纹理和粒子云纹理 (c) 完全使用粒子云纹理

图 3 使用粒子云纹理和 Imposter 纹理实验效果

5 结语

本文使用结构化粒子系统的建模方法,并结合纹理映射, Billboard 技术以及 Imposter 技术实现三维云的仿真模拟。利用 C++ 完成数学模型的建立,三维可视化部分使用 OpenGL 的 API 函数以及 SDL 辅助完成。本实验使用的数据为 WRF 模式下的数值模拟气象数据,这样模拟的云本身就有实际的物理含义。针对粒子系统事实性差的问题取得一定的效果。但是最终生成云的逼真程度还有待提高。在以后的工作中,将引入光辐射参数来改进云的光照效果,进一步实现对云视觉特性的模拟。

参考文献:

[1] REEVES W T. Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects [J] ACM Transactions on Graphics, 1983, 17(3): 359 - 375. (下转第 3270 页)

效期,数据的流行性以及事务的优先级,更全面,因此,命中率相对来说更高。

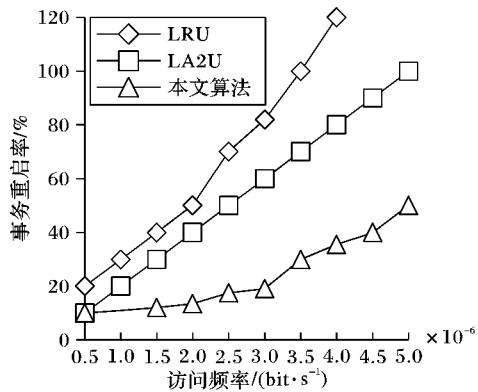


图2 3种算法的事务重启率比较

根据图2,事务的重启指的是移动用户对缓存进行操作,提交的事务中相关联的数据过期导致事务提交失败被迫重启,显然,LRU和LA2U都没有考虑到数据的有效期与事务的优先级,因此,事务重启率比本文提出的算法要高。

4 结语

本文针对移动数据库系统中经常断连的问题,设计了缓存模型,对缓存模型中的几个关键问题进行了分析与探讨,包括缓存的粒度、缓存同步、缓存的替换。将元组作为缓存粒度,能大大地提高缓存的命中率。基于消息摘要的同步策略通过比较移动客户端与服务器消息摘要表中消息摘要值,判断需要同步的行,再根据消息摘要表中标志位的比较,判断不一致的类型,从而完成缓存同步,维护移动客户端缓存与服务器数据的一致性。考虑到数据的时效性与事务的优先级,设计了一种基于价值函数的缓存替换算法。在该算法中,不仅考虑移动用户对缓存数据的访问频率和数据的大小,而且在价值函数中将数据的外部有效期纳入考虑,利用价值函数将缓存数据排序,值最小的排在最上面;再根据事务的优先级设计一个选择函数,选择函数值最低的数据作为替换数据。使用该算法能够提高缓存的命中率,同时可以降低事务的重启率,但是网络开销略有增加。

参考文献:

- [1] IMIELINSKI T, BADRINATH B R. Mobile wireless computing: challenges in data management [J]. *Communications of the ACM*, 2005, 37(10): 18-28.
- [2] KUMAR A, SARJE A K, MANOJ M. Prioritised predicted region based cache replacement policy for location dependent data in mobile environment [J]. *International Journal for Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2010, 5(1): 56-67.
- [3] MADHUKAR A, OZYER T, ALHAJJ R. Dynamic cache invalidation scheme for wireless mobile environments [J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(6): 727-740.
- [4] ANANDHARAJ G, ANITHA R. A distributed cache management architecture for mobile computing environments [C]// *IACC 2009: Proceedings of the 2009 IEEE International Advance Computing Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 642-648.
- [5] GRAY J, HELAND P, ONEIL P, *et al.* The danger if replication and a solution [C]// *Proceedings of the 1996 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM Press, 1996: 173-182.
- [6] WOLFSON O, JAODIA S, HUANG Y X. An adaptive data replication algorithm [J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1997, 22(2): 255-314.
- [7] 陈舒,姜宁康.基于多方面完整性检测的移动数据同步机制[J]. *计算机应用*, 2009, 29(6): 184-188.
- [8] ACHARYA S, FRANKLIN M, ZDONIK S. Dissemination-based data delivery using broadcast disks [J]. *IEEE Personal Communications*, 2007, 2(6): 122-127.
- [9] 李霖.移动数据库中数据广播与复制/缓存技术的研究[D].长沙:国防科学技术大学,1998.
- [10] ANANDHARAJ G, ANITHA R. A power-aware low-latency cache management architecture for mobile computing environments [J]. *International Journal of Computer Science and Network Science*, 2008, 8(10): 121-126.
- [11] 韩向春,边玮,沈峰,等.代理缓存替换一致性算法的研究[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(11): 2734-2736.
- [12] CHOI M Y, CHO E A, PARK D H, *et al.* A database synchronization algorithm for mobile devices [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 392-398.

(上接第3219页)

- [2] GARDNER G Y. Visual simulation of clouds [J]. *Computer Graphics*, 1985, 19(3): 279-303.
- [3] NISHITA T, SIRAI T, TADAMURA K, *et al.* Display of the earth taking into account atmospheric scattering [C]// *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1993: 175-182.
- [4] DOBASHI Y, NISHITA T, OKITA T. Animation of clouds using cellular automaton [C]// *Proceedings of Computer Graphics and Imaging'98*. New York: ACM Press, 1998: 251-256.
- [5] STAM J. Stable fluids [C]// *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1999: 121-128.
- [6] STAM J, FIUME E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes [C]// *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1995: 129-136.
- [7] MIYAZAKI R Y O, DOBASHI Y, NISHITA T. An efficient cloud visual simulation using adaptive grid method [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2004, 87(9): 1814-1822.
- [8] 徐江斌,赵健,杨超,等.真实感云的快速建模[J]. *小型微型计算机系统*, 2010, 31(8): 1590-1594.
- [9] 吴银霞,陈雷霆,何明耘. OpenGL中基于粒子系统雷达扫描实时模拟[J]. *计算机应用*, 2009, 29(1): 258-260.
- [10] 张芹,张健,闵建平.提高粒子系统实时性的方法研究[J]. *计算机工程*, 2003, 29(18): 46-48.
- [11] DOBASHI Y, KANEDA K, Y AMASHITA H, *et al.* A simple, efficient method for realistic animation of clouds [C]// *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 2000: 19-28.
- [12] HARRIS M J. Real-time cloud simulation and rendering [D]. Wilmington: University of North Carolina, 2003.
- [13] 何晓曦,陈雷霆,朱清新.一种简化的流体方法快速仿真大型三维云场景[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(6): 2357-2359.
- [14] 姜洪洲,黄会林.视景系统云层的特效模拟[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(7): 225-228.
- [15] 任威,梁晓辉,马上,等.大规模三维云实时模拟方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(4): 662-669.