

雨滴受风力影响的倾角仿真技术研究

王诗怡, 陈姚节, 徐 新

(武汉科技大学 计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430065)

摘要:对于天气现象的模拟在许多领域有广泛的运用,例如对云雾、雨电、风雪、海浪等自然场景的模拟,对这些自然场景的真实性的提升十分重要。其中雨的模拟仿真包括了对雨滴粒子的形状、大小、轴比、取向(又称倾角 β)等微物理特征的描述。天气雷达强度受雨滴倾角影响较大,因此雨滴倾角是天气雷达测量精确度的重要影响因素。文中通过研究雨滴的物理特性及其运动过程,得出了雨滴倾角与雨滴大小成反比,与风力大小成正比的结论。在 Unity3D 引擎中使用粒子系统模拟雨滴降落过程中受风力影响产生倾角。提出了联动了雨滴大小与风力的方法,结合图形用户界面,经实验实现了动态模拟不同雨滴大小与风力下的雨滴倾角动态变化。

关键词:粒子系统;降雨仿真;Unity3D;倾角;风力

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2021)09-0173-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.09.029

Research on Simulation Technology of Raindrop Inclination Affected by Wind

WANG Shi-yi, CHEN Yao-jie, XU Xin

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: The simulation of weather phenomena is widely used in many fields, such as the simulation of natural scenes such as fog, rain, snow, waves and so on, which is quite important to enhance the authenticity of these natural scenes. The simulation of rain includes the description of the shape, size, axial ratio, orientation (also known as dip angle) of raindrop particles. The intensity of weather radar is greatly affected by the angle of raindrops, so the angle of raindrops is an important factor affecting the accuracy of weather radar measurement. By studying the physical characteristics and motion process of raindrops, the conclusion is drawn that the angle of raindrops is inversely proportional to the size of raindrops and proportional to the size of wind. In Unity3D engine, the particle system is used to simulate the angle of raindrop due to the influence of wind. The method of linkage between raindrop size and wind force is proposed. Combined with the graphical user interface, the dynamic simulation of raindrop inclination under different raindrop sizes and wind forces is realized through experiments.

Key words: particle system; rainfall simulation; Unity3D; dip angle; wind power

0 引言

近年来使用计算机仿真技术模拟现实环境是一个热点话题。自然环境特效的模拟就是其中的一个应用,其中包括了自然灾害,比如洪水、雪崩,也有模拟自然风光,例如草原、瀑布。此中最常见的便是对气候的模拟,好比风、雨、雷、雪等。天气模拟在游戏、电影、广告等应用场景中占据着重要的地位。

近几年很多研究人员在雨滴降落模拟的真实性上取得了很大的进展。孙学金等人^[1]用 Runge—Kutta 法求解,验证出了雨滴降落的末速度,并且和 Gunn &

Kinzer 法的实测数值相比较吻合,结果更加准确。刘嘉瑞等人^[2]提出了一种基于 SPH 的模拟雨滴击打树枝等不规则物体边界的方法,使用一种吸引力模型来模拟水滴从物体表面的滑落,在模拟水滴的收缩、流动等特性上达到了比较真实的效果。李宁等人^[3]用 API 函数和粒子系统,在 OpenGL 中模拟了机场附近的雨雪雷电等自然天气特效。Marcos Slomp 等^[4]通过研究雨滴表面纹理变化进行实验,可以在粒子比较多的情况下模拟雨滴。唐玉蕾和袁赞^[5]改进了基于粒子系统的雨滴动态过程的模拟,增强降雨实现的逼真度。刘

收稿日期:2020-10-14

修回日期:2021-02-19

基金项目:国家自然科学基金(U1803262)

作者简介:王诗怡(1997-),女,在读研究生,研究方向为计算机仿真;陈姚节,硕士,在读博士,高级工程师,研究方向为计算机智能控制与仿真技术、船舶驾驶数字化仿真技术;徐 新,博导,教授,研究方向为计算机视觉、人工智能。

小玲等采用多幅雪花纹理与粒子随机组合,使雪花效果符合多样性和随机性。实验结果表明,该算法能在大规模场景中进行雨雪效果的实时渲染,并有较高的真实感^[6]。Kim^[7]将雨滴以及雨水流动模拟与基于粒子和栅格的区域融合的算法结合起来并且进行了改进。Huamin Wang 等人^[8]从物理建模的角度,研究了雨滴实际运动过程中的规律,对雨滴的形变过程进行建模。刘西川等人^[9]研究了基于粒子成像测速技术的雨滴微物理特性,研究出雨滴的速度与其直径成正比,雨滴的取向也受风力影响,统计得到受自然环境影响下,雨滴倾角的平均值为 2.1° ,标准偏差为 11.5° 。Rouseau^[10]通过研究雨滴的物理特性,将雨滴绘制的方法进行了改进,着重研究雨滴的外观。Tatarchuk^[11]把降雨场景结合了粒子系统和多细节层次并进行仿真实验,提升了逼真度,可是场景细节不够完善。陈华杰等^[12]将粒子系统与 LOD 技术结合研究,优化粒子发射器从而提高了利用的效率,实现了较为高效的对雨雪的模拟。

粒子系统是实现大规模场景降雨仿真的一种有效方法^[13]。但结合其物理运动规律可以更真实地模拟雨滴的降落过程,使模拟出的画面更接近真实的自然场景,可以提升用户的体验感。

文中在粒子系统的基础上,结合雨滴的物理特性以及其运动特性,通过分析雨滴从高空降至地面过程中的受力情况,判断其运动规律,提出了联动雨滴大小与风力的模拟方法,实现了动态模拟在不同雨滴大小与不同风力下的雨滴倾角动态变化,最终实现了一种较为真实的雨滴降落过程的自然场景。

1 雨滴的降落运动特性

1.1 雨滴降落特性

雨滴从高空自由下落期间呈现出不同的形状、大小、速度与倾角等物理特征,对于这些微物理特征的研究在自然场景仿真、电影特效绘制、天气雷达探测等方面都有重大意义。雨滴降落的运动过程复杂多变,其物理特性受环境影响,在不同时空下的雨滴状态也有很大差异。

雨滴的形成是由陆地和海洋表面的水蒸发变成水蒸气,当升腾的气流夹带着水蒸气和云凝结核抵达某一距离时,空气临近饱和状态或处于饱和状态,水蒸气遇冷上升到一定高度会凝结成小水滴、小冰晶,水蒸气会在云凝结核上发生冻结现象形成小液滴,随着气流升腾进一步冻结形成云滴。某些云滴相互靠近,会发生融合汇聚现象,由此形成更大的云滴,这被称为雨滴的碰并增长,某些较大的云滴重力若大过空气阻力,则会产生重力碰并现象。当云滴大到一定程度,所受

重力大于在空中受到的阻力便会从云层下落,在下落过程中和雨滴或者蒸腾的水蒸气继续融合汇聚,渐渐地就形成了雨滴。

雨滴在降落过程中受到重力、空气阻力和风力等因素的影响,具有不同的大小、速度、空间取向等多种物理特性。其中雨滴的大小、速度与空间取向在现实生活中可以直接被观测者用肉眼感知,表现得最为直观。研究表明,雨滴随体积增加,其形状会逐渐从球体变成椭球体,且半径不断改变,由于雨滴具有表面张力,半径较小的雨滴在降落过程中会持续球体形态,而半径较大的雨滴在重力和空气阻力等力的影响下,逐渐形变,而发展成近似椭球的形态。

由物理学知识可知,物体从高空下落时,将受到空气阻力作用^[14],雨滴受到的空气阻力与雨滴的大小、速度和状态等物理特性有关,且阻力与速度成正相关。雨滴的直径普遍在 0.5 mm 至 6 mm 之间。雨滴的一般形状是随着雨滴体积的增大,雨滴逐步变成下面平坦,上面圆润,表现出类似“馒头”的形态^[15]。而雨滴的生成并降落的高度也随季节改变,冬季在 $2\ 000\text{ m}$ 左右,夏季在 $5\ 000\text{ m}$ 左右。雨滴从云层开始下落时由于体积较小,忽略空气阻力可视为自由落体运动。在降落过程中会和其他雨滴进行汇聚融合,从而产生空气阻力,此时雨滴进行变加速的运动,其形状会由球形逐渐发展为椭球形。无数的实验已经表明,雨滴会随着体积的增大,而最终形成一个下面平坦,上面圆滑的半球形,雨滴在受力平衡后便匀速运动。

1.2 雨滴运动过程分析

雨滴由云层下落的过程中的速度是非常重要的物理特性之一。雨滴比较小的时候,自身重力较小,不容易克服空气的阻力,可能会浮在空中,直到和别的雨滴融合汇聚,且其重力可以克服空气阻力时开始降落。雨滴降落的过程当中,因为速度小,受到的空气阻力与速度成正比,则空气阻力随速度的改变而不断改变,雨滴速度变大的过程中,雨滴就会做变加速运动。

在距离地面高度 100 m 以上,雨滴所受重力大于所受的阻力,雨滴速度逐渐变大,且雨滴之间有汇聚现象,雨滴变大后所受阻力和重力不断改变,则雨滴做变加速运动。后期随着雨滴不断地融合汇聚及其速度的增大,受到的阻力增大加速度变小,直到阻力等于重力,此时雨滴做匀速运动。

由于雨滴在降落过程中受到的环境因素影响较大,雨滴的运动特性会特别繁杂,如果将所有因素都考虑,系统很难达到要求。为了方便对雨滴的降落过程进行建模,现做出以下假设:

(1) 雨滴从高空开始下落,在其下落过程中是独立的,不考虑雨滴的融合汇聚现象的影响。

(2)不考虑雨滴形变,视雨滴为球形。

雨滴降落过程中会受到三个力的影响,分别是重力、空气阻力和空气浮力。距地面大于 100 m 时,雨滴在垂直方向上运动过程有如下运动公式:

$$m \frac{dV_1}{dt} = mg(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) - F_{D1} \quad (1)$$

其中, m 表示雨滴的质量, V_1 表示雨滴垂直方向的下降速率, ρ_a 和 ρ_w 分别表示空气和水的密度, F_{D1} 表示雨滴在垂直方向上受到的空气阻力,它的一般形式如下:

$$F_{D1} = \frac{1}{2} C \rho_a S V_1^2 \quad (2)$$

公式(2)又叫牛顿曳力公式,其中 S 表示雨滴横截面积, C 是曳力系数,可将它看做常量。

对于半径为 R 的雨滴,其横截面积有以下公式:

$$S = \pi R^2 \quad (3)$$

在雨滴距地面一定距离时,雨滴重力等于空气阻力,视为匀速运动,此时有如下运动公式:

$$mg = F_{D1} \quad (4)$$

根据以上的分析,整理可得雨滴在垂直方向上的运动微分方程为:

$$\frac{dV_1}{dt} = g(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) - \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{V_1^2 C}{R} \quad (5)$$

雨滴在水平方向的运动过程中,会受到风力与空气阻力的影响,受力分析简化图如图 1 所示。

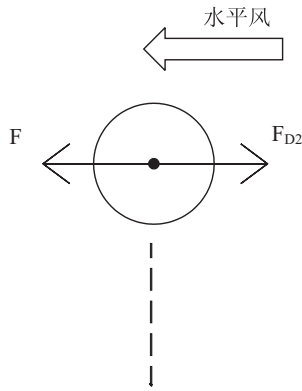


图 1 雨滴水平受力分析

F 为水平方向上所受到的风力,为水平方向上的空气阻力,则雨滴在水平方向上的运动方程如下:

$$m \frac{dV_2}{dt} = F - F_{D2} \quad (6)$$

其中, V_2 为雨滴在水平方向上的运动速率,则雨滴在水平方向的受力方程如下:

$$F = \rho_a (V - V_2)^2 S \quad (7)$$

其中, V 为水平方向上的风速。综合以上所述公式,可整理出雨滴在水平方向上的运动微分方程:

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_a (V - V_2)^2}{\rho_w R} - \frac{3}{8} \frac{\rho_a V_2^2 C}{\rho_w R} \quad (8)$$

雨滴在理想状态下,从高空降落的过程中在垂直方向和水平方向上的运动建模如上述公式所述,下面将会讨论雨滴在受一定风力影响时,不同半径的雨滴粒子产生的不同的倾角,以及雨滴粒子半径一定时,不同大小风力对雨滴倾角的影响。

2 雨滴受风力影响的倾角

2.1 雨滴倾角相关研究

雨滴倾角即雨滴的取向,指雨滴的对称轴与垂直方向上的夹角(倾斜角 β)。理想情况下风力为 0,雨滴倾角则为 0° 。但是自然环境中降雨受到风、湍流等多种因素的影响,雨滴的取向呈现不同的特征^[16]。Hendry 等^[17]利用线偏振 X 波段雷达探测强降雨发现,雨滴的平均倾斜角为 0° ,标准差为 6° 。Beard 等^[18]在均一各向同性湍动理论的基础上,预测平均倾斜角 β 应当为 0° ,标准差小于 4° ,这一预测与 Hendry 等^[17]的雷达观测结果一致。胡云涛等选取 2015 年 6 月 17 日南京地区降水微物理特征测量仪 (PMCS) 获取的有效雨滴,计算每个雨滴的倾斜角^[19]。分析得到雨滴倾角分布于 0° 两侧,大部分雨滴倾角在 -20° 到 20° 之间,平均值为 0.82° ,标准差为 15.9° 。研究表明,雨滴在降落过程中会受环境影响,形成不同大小的倾角,且基本服从高斯分布。

理论上,对于雨滴的倾角目前还没有确定模型,且实际情况较为复杂,受环境因素影响较大,暂没有准确的雨滴倾角建模,需更多实际测量以及理论推导。实验上,大多利用雷达探测和降水微物理特征测量仪等仪器来测量雨滴降落过程中展现的各种物理特征,测量结果是基于一段时间之内的雨滴测量,由于一段时间内风力的方向与大小会不停变化,雨滴的倾角会在垂直方向两侧均匀分布。

文中只考虑某时刻风往同一个方向吹的情况,模拟雨滴在风力大小和雨滴大小不同的时候形成的不同 F_{D2} 倾角。

2.2 雨滴倾角物理特性分析

为了更好地模拟雨滴粒子下降过程中倾角受风力影响的变化,现分析雨滴倾角的物理特性。

在雨滴降落的匀速运动阶段,在垂直方向上由公式(4)推导得到:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_w g = \frac{1}{2} C \rho_a \pi R^2 V_1^2 \quad (9)$$

则垂直方向上的速率 V_1 有如下公式:

$$V_1 = \sqrt{\frac{8Rg\rho_w}{3\rho_a C}} \quad (10)$$

雨滴在水平方向上也做匀速运动,受力公式如下:

$$F = \frac{1}{2} C \rho_a S V_2^2 \quad (11)$$

则雨滴在水平方向上的速率 V_2 有如下公式:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2F}{\rho_\alpha C \pi R^2}} \quad (12)$$

雨滴倾角 β 与速率分析如图 2 所示。

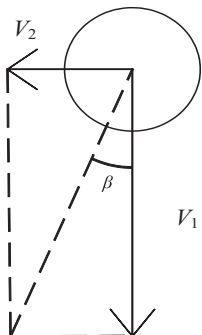


图 2 雨滴速率-倾角分析

倾角 β 可由以下公式表示:

$$\beta = \cot\left(\sqrt{\frac{3F}{4R^3 \pi \rho_\omega g}}\right) \quad (13)$$

雨滴质量有以下公式:

$$m = \frac{4}{3} \rho_\omega \pi R^3 g \quad (14)$$

可推断雨滴倾角 β 与风力 F 成正比,与半径 R 成反比。雨滴大小与雨滴半径成正比,在仿真实验中,只需控制雨滴大小即可反映半径 R 对雨滴倾角的影响。接下来讨论将雨滴粒子半径与雨滴粒子所受风力联动,动态模拟不同粒子半径以及不同风力大小时雨滴的倾角变化。

3 雨滴降落倾角模拟仿真实验

3.1 粒子系统

粒子系统是在计算机仿真、游戏动画和图形学中广泛使用的一项技术。对雨、雪、火焰等不规则物体的模拟,是计算机仿真中最难以突破的科研目标之一^[20]。在所有的研究方法中利用粒子系统进行模拟的方式是当前模拟效果最好并且应用最普遍的方法^[21]。

雨滴粒子很难用传统图形学相关技术渲染出来,文中利用粒子系统,高效模拟大量的、小而密的雨滴粒子,并且通过对粒子系统属性的设定,准确地控制每个粒子的运动状态,实现动态实时的渲染效果。

3.2 图形用户界面

图形用户界面 (graphical user interface, GUI) 可以满足用户在界面进行实时操作的需求。Unity3D 中有丰富的图形系统,包含通常使用到的按钮、图片、文本等控件。文中制作了控制雨滴大小与风力大小的动态 GUI 界面,如图 3 所示,运行过程中可调节滑条来动态控制雨滴的倾角。可以直观地模拟雨滴大小不同,风

力不变时,雨滴倾角与雨滴大小成反比;风力不同,雨滴大小不变时,雨滴倾角与风力大小成正比的雨滴倾角特性。



图 3 动态控制雨滴大小与风力大小界面

3.3 实验结果

文中在 CPU 为 1.6 GHz Intel Coare i5 的 PC 机上进行实验,在 Unity3D 和 Visual Studio. 2010 开发环境中,通过对雨滴运动过程中在垂直方向和水平方向上的运动建模,实现了三维场景降雨过程的模拟。图 4 和图 5 展示了风力不变,改变雨滴大小时倾角的变化,倾角与雨滴大小成反比。

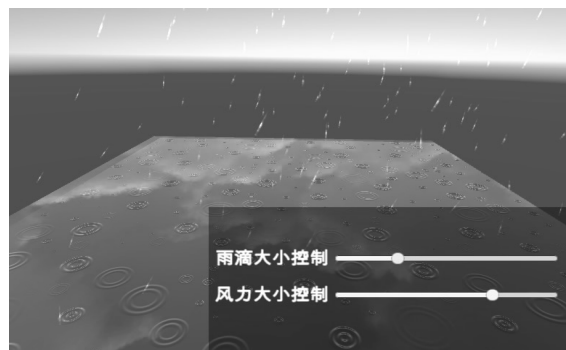


图 4 风力不变雨滴较小

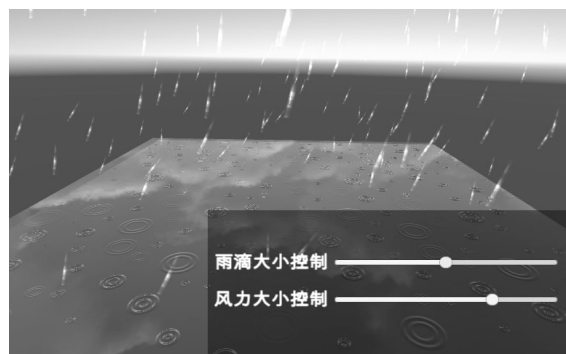


图 5 风力不变雨滴较大

图 6 ~ 图 8 展示了雨滴大小不变,风力大小改变时雨滴倾角的变化,倾角与风力成正比。

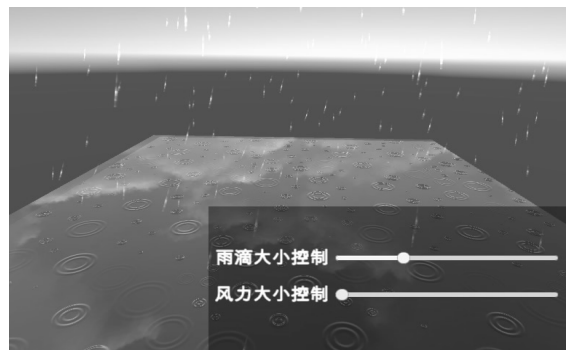


图 6 雨滴大小不变,风力为 0

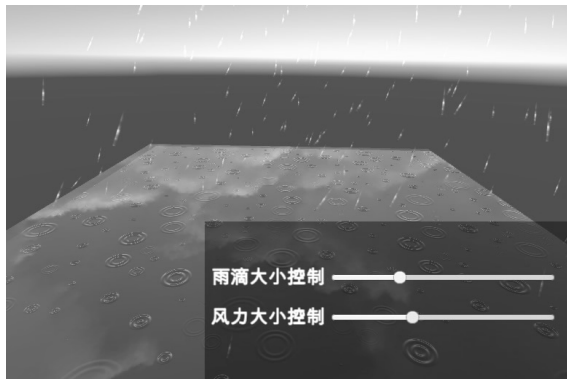


图7 雨滴大小不变,风力较小

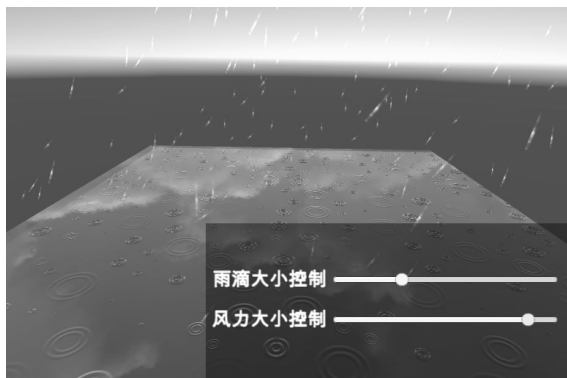


图8 雨滴大小不变,风力较大

在公式(13)的基础上,完成了雨滴大小与风力的动态控制仿真。模拟了在风力大小不变的情况下,雨滴变大,倾角变小;在雨滴大小不变的情况下,风速变大,雨滴倾角变大,效果较为真实。

4 结束语

文中使用粒子系统模拟雨滴降落仿真,从雨滴的特性出发,研究了雨滴的物理特性,如降落速度、形状和半径,和雨滴从云层开始下落至到达地面过程中的运动特性,研究了雨滴降落过程中所受的力以及加速度、速度的变化,从而更加真实地模拟雨滴降落的运动过程。并且提出了将雨滴大小与风力联动的方法,结合图形用户界面实现了动态控制雨滴大小和风力,模拟了雨滴大小不同以及风力不同的情况下雨滴倾角的变化,实验结果较为真实。

参考文献:

- [1] 孙学金,孙海洋,江志东.不同大气条件雨滴下落速度的数值仿真[J].计算机仿真,2011,28(12):402-406.
- [2] 刘嘉瑞,杨猛,吴佳泽,等.基于SPH的雨滴打击不规则边界的模拟方法[J].图学学报,2018,39(3):411-418.
- [3] 李宁,王立文,陈慕华.基于Vega的机场天气特效视景仿真研究[J].机床与液压,2008,36(10):170-173.
- [4] SLOMP M,JOHNSON M W,TAMAKI T,et al. Photorealistic real-time rendering of spherical raindrops with hierarchical reflective and refractive maps[J]. Computer Animation

and Virtual Worlds,2011,22(4):393-404.

- [5] 唐玉蕾,袁赞,吴志红.基于GPU雨场景的实时模拟[J].计算机工程与设计,2014,35(6):2188-2191.
- [6] 刘小玲,杨红雨,郭虎奇.基于GPU粒子系统的大规模雨雪场景实时模拟[J].计算机工程与设计,2012,33(6):2398-2401.
- [7] KIM B. Multi-phase fluid simulations using regional level sets[J]. ACM Transactions on Graphics,2010,29(6):81-95.
- [8] WANG H,MUCHA P J,TURK G. Water drops on surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics,2005,24(3):921-929.
- [9] 刘西川,高太长,刘磊,等.基于粒子成像测速技术的雨滴微物理特性研究[J].物理学报,2014,63(2):029203-1-029203-7.
- [10] ROUSSEAU P,JOLIVET V,GHAZANFARPOUR D. Realistic real-time rain rendering[J]. Computers & Graphics,2006,30(4):507-518.
- [11] TATARCHUK N. Artist-directable real-time rain rendering in city environments[C]//Proceedings of the Eurographics workshop on natural phenomena. Vienna, Austria:[s. n.],2006:23-64.
- [12] 陈华杰,余小清,唐经洲,等.基于粒子系统与LOD技术的实时雨雪效果模拟[J].计算机仿真,2008,25(4):194-197.
- [13] 陈姚节,方志.降雨仿真中粒子分布区域模型的优化[J].科学技术与工程,2018,18(19):250-255.
- [14] 徐利明,姜昱明.基于粒子系统与OpenGL的实时雨雪模拟[J].计算机仿真,2005,22(7):242-245.
- [15] 舒小健,高太长,刘西川,等.基于降水微物理特征测量仪的雨滴形状观测与分析[J].气象,2017,43(1):91-100.
- [16] HUANG G J,BRINGI V N,THURAI M. Orientation angle distributions of drops after an 80-m fall using a 2D video disdrometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2008,25(9):1717-1723.
- [17] HENDRY A,ANTAR Y M M,MCCORMICK G C. On the relationship between the degree of preferred orientation in precipitation and dual-polarization radar echo characteristics[J]. Radio Sciences,1987,22:37-50.
- [18] BEARD K V,JAMESON A R. Raindrop canting[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1983,40(3):448-454.
- [19] 胡云涛,刘西川,高太长,等.基于PMCS图像数据的雨滴微物理特征研究[J].气象与减灾研究,2018,41(4):285-292.
- [20] 张芹,谢隽毅,吴慧中,等.火焰、烟、云等不规则物体的建模方法研究综述[J].中国图象图形学报,2000,5(3):186-190.
- [21] 刘红霞.基于粒子系统的火焰模拟方法研究[D].邯郸:河北工程大学,2011.