发动机羽流作用下的实时月尘运动仿真

傅晓晶 王 成 戴树岭

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 月尘运动是月球探测器软着陆过程中不可或缺的重要环节,针对发动机羽流作用下月尘运动真实感不强和月尘颗粒运动模型过于简单的问题,提出了一种逼真的实时月尘运动仿真方法. 通过计算流体动力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)和二次谢别德插值(Quadratic Shepard)方法,分析和计算单个月尘颗粒的运动学模型,得到一定初始条件下粒子运动的二维轨迹曲线;通过分析粒子的数量、初始位置、初始速度、生命周期等参数对粒子运动学的影响和变化规律,抽象出月尘系统的粒子集;建立基于月尘粒子集的月尘运动模型. 实验结果显示:该运动模型逼真的模拟了发动机羽流作用下月尘腾起、飞溅、弥漫、消散等运动过程,视觉真实感和实时性能良好,对研究真空环境中的月尘运动及月球软着陆等相关领域具有一定的参考意义. 目前该方法已应用于北航虚拟现实国家重点实验室月球软着陆仿真系统.

关 键 词: 月尘; 粒子系统; 运动学模型; 月球表面; 羽流

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)08-1096-05

Real time simulation for lunar dust blown by engine exhaust plume

Fu Xiaojing Wang Cheng Dai Shuling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The spray of lunar dust at a lunar landing site is necessary for lunar soft landing simulation. For the model that predicted trajectories of lunar dust blown by the engine exhaust is too simple and the 3D visualization is not strong sense of reality, a physics-based simulation for real-time movement of lunar dust was presented. Using computational fluid dynamics(CFD) and Quadratic Shepard's interpolation, the lunar dust particle trajectory path was simulated by analyzing and computing the ballistics model. A set of particles in the lunar particle system was extracted by analyzing number of particles, initial position, initial velocity, life cycle and other parameters on particle kinematics and variation. Lunar dust particle system based on the particle set was built. The results show lunar dust particles propelled by engine exhaust including jumping, splashing, diffusing and dissipating with visual realism and good real-time. This method has a certain significance for studying trajectories of lunar dust in a vacuum and other related fields. The method has been successfully applied in simulation system of a lunar soft landing.

Key words: lunar dust; particle system; kinematics model; lunar surface; plume

月球探测器到达预定着陆区上空时,发动机喷射出垂直于月表的燃气羽流将与月尘发生相互作用,使得月尘被扬起. 在月球软着陆过程仿真中,月尘的动态效果是必不可少的,它能给予设计者直观和具有真实感的反馈. 因此,如何建立恰当的月尘运动学模型,生成具有真实感的月尘运动效果,是需要研究和解决的问题,也是本文研究的重点.

收稿日期: 2011-04-22; **网络出版时间**: 2012-08-23 14:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120823.1455.013.html

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA01Z333)

作者简介: 傅晓晶(1987 -),女,福建三明人,硕士生,fxj0330@126.com.

目前,国内外对月尘的研究有很多,如:文献[1]对月尘静电浮扬特性进行研究,并讨论其影响因素;文献[2]对月尘的物理特性以及月尘激扬对航天器的影响进行分析;文献[3-4]对月尘环境进行模拟,并研究月球表面的防尘除尘措施.但是,这些方法对在高真空环境下月尘颗粒的物理模型和运动学分析过于简单,月尘运动轨迹单一,模拟的月尘效果真实感不强,影响了仿真系统对视觉真实感方面的要求.

在此背景下,本文提出一种基于发动机羽流作用下月尘颗粒运动学模型和粒子系统的月尘运动仿真方法,逼真地模拟探测器软着陆过程中的月尘运动效果.

1　月尘颗粒运动学模型

1.1　模型分析

月球表面的尘土,在月球探测器发动机喷出的高速羽流作用下,会沿着一定的轨迹运动.基于牛顿运动定律,假设粒子水平运动速度为常值,垂直加速度为水平位移的指数函数,并忽略太阳光压,空气阻力及月面粘附力等作用,得到受羽流冲击月面上任一颗月尘颗粒的运动学模型[5]表示为

$$x(y) = [x_0 + s_0(y - y_0)] + (bx_0 - s_0y_0)\left(\frac{y - y_0}{y_0} - \ln\frac{y}{y_0}\right) - \frac{g(y - y_0)^2}{2v_0^2} \tag{1}$$

式中,x 为月尘颗粒的垂直高度;y 为月尘颗粒的水平位移;x_0 和 y_0 为月尘颗粒的初始位置;s_0 为由 x_0 和 y_0 得到的派生量,即 $s_0 = s(x_0) = \mathrm{d}x(y)/\mathrm{d}y|_{y=y_0}$;$bx_0/y_0$ 为月尘颗粒在重力作用下下落前的轨迹角;v_0 为月尘颗粒的水平速度;g 为月球表面的重力加速度.

式(1)描述的是一个时不变运动方程.式(1)右边由 3 部分组成:$x_0 + s_0(y - y_0)$ 表示的是一条经过(x_0, y_0),斜率为 s_0 的直线,描述的是当月尘颗粒发射后不受任何力作用时,在高真空中的运动轨迹;$(bx_0 - s_0y_0)\left(\frac{y - y_0}{y_0} - \ln\frac{y}{y_0}\right)$表示月尘颗粒运动过程中的垂直加速度,可能为正值,也可能为负值;$\frac{g(y - y_0)^2}{2v_0^2}$表示月球上的重力对月尘颗粒运动轨迹的影响,它使速度小于逃逸速度 $v_E = \sqrt{2gR} \approx 2.37$ km/s($g = 1.622$ m/s^2, $R = 1\,737$ km)的月尘颗粒最终落回到月球表面.

图 1 表示由式(1)生成的月尘颗粒运动轨迹曲线,参数取值分别为:$b = 10$, $x_0 = 0.02$ m, $y_0 = 1.0$ m, $s_0 = 0.2$, $v_0 = 10$ m/s. 图中 x 为垂直于月面的方向,y 为水平方向,原点(0,0)为月球探测器发动机羽流中心在月面上的投影点.

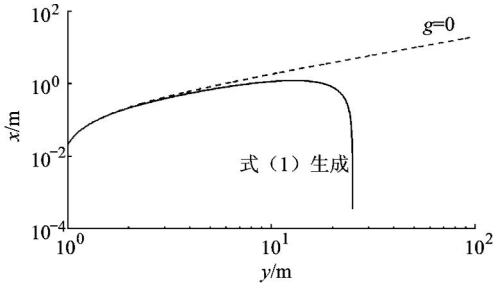


图 1　单个月尘颗粒运动轨迹曲线

1.2　模型计算

如何根据月尘颗粒的大小及初始位置求解式(1)中的参数 s_0, b 和 v_0,进而获得月尘颗粒的运动轨迹,需要一套行之有效的方法.本文采用文献[5-6]研究的一套包括流体动力学、Shepard 插值算法的综合仿真方法求解模型参数.其基本要点简述如下:

1) 通过 CFD(Computational Fluid Dynamics)方法对月球探测器发动机在高真空环境中喷出的燃气喷流(羽流)进行仿真,输出结果为羽流的密度 ρ、速度 v 和温度 T;

2) 利用 CFD 的输出,通过 Quadratic Shepard 插值计算发动机羽流对直径为 D,初始位置为(x_0, y_0)的月尘颗粒的作用力,然后用分步积分法求解粒子运动微分方程,获得粒子运动的二维轨迹曲线;

3) 式(1)为基于物理的月尘颗粒运动轨迹模型,其中,x_0, y_0, b, s 和 v_0 为输入参数.对于不同的(x_0, y_0)调整参数 b, s 和 v_0,使物理模型与步骤 2)中输出的轨迹曲线相重合,获得基于物理模型的粒子运动轨迹曲线;

4) 插值计算.定义:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} D \\ x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} b \\ s \\ v_0 \end{bmatrix}$$

通过步骤 3)得到 N 组值,即

$$\boldsymbol{M}_i = \begin{bmatrix} D_i \\ x_{0i} \\ y_{0i} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{X}_i = \begin{bmatrix} b_i \\ s_i \\ v_{0i} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \cdots, N$$

根据已有的 N 组数据,对于任一输入 $\boldsymbol{M}$,可以通过 Shepard 插值算法求出 $\boldsymbol{X}$. Shepard 插值算法如下所示:

$$\boldsymbol{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \boldsymbol{X}_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \tag{2}$$

其中

$$w_i = \frac{1}{[(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{M}_i)(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{M}_i)]^{\mu}} \tag{3}$$

在本文的应用中,$\mu = 3$ 较为合适.

因此,利用月尘颗粒的运动学模型,通过以上4个步骤,可以得到任意大小、任意初始位置的月尘颗粒的运动轨迹.

2 月尘运动的粒子系统

2.1 月尘粒子系统定义

定义1 月尘粒子定义为包含空间位置 P、运动速度 V、加速度 A、生命周期 T、颜色 C、形状 S、大小 F 这些元素的实数域上的向量 $\mathbf{R}^n$ ($n = 7$). $\mathbf{R}^n$ 是组成月尘系统的基本粒子,表示为

$$\mathbf{R}^n = \{P, V, A, T, C, S, F\} \quad n = 7$$

定义2 月尘粒子集定义为上述月尘粒子的有限集合,其中每个粒子具有一个索引,表示为 I 到 $\mathbf{R}^n$ ($n = 7$) 的映射,表示月尘在某一时刻的性质及状态:

$$P = \{I \rightarrow R^n \mid n = 7\}$$

对于索引为 i 的月尘粒子,$P(i) = \mathbf{R}^n$ 表示该粒子的性质和状态.

定义3 月尘粒子系统为月尘粒子集的有限集合,表示为

$$Q = \{P_t : I_t \rightarrow R_n \mid n = 7, t \in \{t_0, t_1, \cdots, t_m\}, I_t \in J\}$$

式中,P_{t_k} 为月尘系统在时刻 t_k 的状态;P_{t_0} 为初始时刻月尘的状态;Q 为一系列与时间相关的状态的集合,表示一个动态的月尘[7].

2.2 月尘粒子运动学

2.2.1 粒子的生成

1) 粒子数量. 要在给定的屏幕显示区域内产生一定数量的月尘粒子,粒子数量很关键,它决定了月尘的密度. 粒子一般由可控的随机过程产生,每一帧进入系统的粒子由用户直接指定的基准粒子和一般随机过程定义的变动粒子组成:

$$N = N_{\mathrm{b}} + \mathrm{int}[d(\cdot) N_{\mathrm{v}}] \tag{4}$$

式中,N 为生成粒子数;N_{b} 为基准粒子数;N_{v} 为变动粒子数,$d(\cdot)$ 为一个随机函数,其返回值在 $[-1.0, 1.0]$ 间呈均匀分布.

2) 粒子的初始位置. 初始位置反应月尘粒子的分布及初始形状,由羽流的位置和大小决定. 假设月尘厚度为 h,探测器中心在月球坐标系下的坐标为 $(X_{\mathrm{t}}, Y_{\mathrm{t}}, Z_{\mathrm{t}})$,发动机羽流中心在月面上的投影点坐标为 $(X_{\mathrm{t}}, h, Z_{\mathrm{t}})$. 由于发动机羽流中心部分气流强大,假设在初始时刻月尘颗粒分布在以 $(X_{\mathrm{t}}, h, Z_{\mathrm{t}})$ 为中心,内圈半径为 r,外圈半径为 R 的圆环上,且在半径为 $R_0 = \frac{R + r}{2}$ 的圆圈上粒子密集,边界稀疏,呈正态分布. 其中,圆环宽度为 $w = \frac{R - r}{2}$.

初始粒子的位置为

$$P = \{X_i(t_0), Y_i(t_0), Z_i(t_0)\} \quad 1 \leqslant i \leqslant \mathrm{Num}$$

则月尘粒子的密度分布为

$$\left.\begin{aligned} X_i(t_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}w} \exp\left[-\frac{(x_i - R_0)^2}{2w^2}\right] \\ Y_i(t_0) &= h \\ Z_i(t_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}w} \exp\left[-\frac{(z_i - R_0)^2}{2w^2}\right] \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

3) 粒子的初始速度. 对于月尘粒子系统而言,被发射出的月尘粒子,在真空中仅受月球重力的作用. 初始时刻第 i 个粒子的速度为 $[V_{ix}(t_0), V_{iy}(t_0), V_{iz}(t_0)]$,根据式(1),已知 V_{i0} 为第 i 个粒子的水平速度,S_{i0} 为派生量,即

$$V_{ix}(t_0) = V_{iz}(t_0) = V_{i0} \tag{6}$$

$$V_{iy}(t_0) = V_{i0} S_{i0} \tag{7}$$

第 i 个月尘粒子初始速度大小为

$$V_i(t_0) = \sqrt{V_{ix}(t_0)^2 + V_{iy}(t_0)^2 + V_{iz}(t_0)^2} \tag{8}$$

第 i 个月尘粒子初始速度方向,即偏离 Y 轴角度为

$$\theta_{iy} = \arctan S_{i0} \tag{9}$$

月尘粒子的最大初始速度为

$$V_{\mathrm{m}} = \max\{V_i(t_0) \mid i = 1, 2, 3\cdots\} \tag{10}$$

月尘粒子的最小初始速度为

$$V_{\mathrm{n}} = \min\{V_i(t_0) \mid i = 1, 2, 3\cdots\} \tag{11}$$

速度变动范围为

$$V_{\mathrm{v}} = \max\{|V_{\mathrm{m}} - V_{\mathrm{n}}|, |V_{\mathrm{n}} - V_{\mathrm{m}}|\} \tag{12}$$

式中,V_{b} 为基准速度,$d(\cdot)$ 为一个随机函数,其返回值在 $[-1.0, 1.0]$ 间呈均匀分布,月尘粒子的速度为

$$V = V_{\mathrm{b}} + d(\cdot) V_{\mathrm{v}} \tag{13}$$

4) 粒子的生命周期. 月尘粒子的生命周期表示其在屏幕上的停留的时间. 在绝对真空和失重环境下,月尘粒子的上升时间与下降时间相等. 假设粒子完成一个循环的基准时间为 T_{b},Y 方向的初始速度为 v_{y_0},考虑 Y 方向上的运动方程,有

$$\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = -g \tag{14}$$

$$\int_{v_{y0}}^{0} \mathrm{d}v_y = \int_{0}^{\frac{1}{2}T_b} (-g)\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

$$T_b = 2\frac{v_{y0}}{g} \tag{16}$$

月球上存在引力,上升时间和下降时间存在误差 T_v. $d(\cdot)$ 是一个随机函数,其返回值在 $[-1.0,1.0]$ 间呈均匀分布. 粒子的生命周期为

$$T = T_b + d(\cdot)T_v \tag{17}$$

2.2.2　粒子的消亡

月尘粒子系统中,粒子的生存期通常以秒为单位. 在粒子的运动过程中,其生存期不断缩短,当其生存期至零时,该粒子即消亡[8].

2.2.3　粒子运动学

一旦粒子有了初始速度,它们遵从运动学原则,在三维空间中运动. 在 t 时刻,粒子在空间中的位置:

$$x = x_0 + v_x t \tag{18}$$

$$y = y_0 + v_{y0}t - \frac{1}{2}gt^2 \tag{19}$$

$$z = z_0 + v_z t \tag{20}$$

式中,(x_0,y_0,z_0) 为初始位置. 在 t 时刻,y 方向的速度为

$$v_y = v_{y0} - gt \tag{21}$$

3　仿真结果

实现的初始参数为:月球探测器距月表高度为 $H=5$ 英尺时月尘被触发,发动机推力 $T=67$ kN,月尘颗粒的粒子数目为 1 500 个,粒子大小在 1 ~ 1 000 μm 之间随机分布,粒子密度呈正态分布在内径 $r=1.0$ m,外径 $R=3.0$ m 的圆环上,且距月面垂直高度 $h=0.1$ m. 实现时硬件:PC 机 CPU 为 Intel Core2-2.8GHz,显卡为 nVidia-450GTS,硬盘 120G. 运行平台为 WindowsXP. 软件工具有:Visual Studio C/C++ 2005,OpenGL 的 glut 库,Cg,3dsmax9.0.

表 1 是 $D=1$ μm 和 $D=1\,000$ μm,$x_0=0.01$ m,y_0 取值在 1 ~ 3 m 之间月尘粒子的运动学模型参数.

图 2 是由表 1 中的参数生成的轨迹曲线.

图 3 是月尘运动过程三维效果图.

图 4 是从侧视、俯视两种不同角度下观察的月尘效果图.

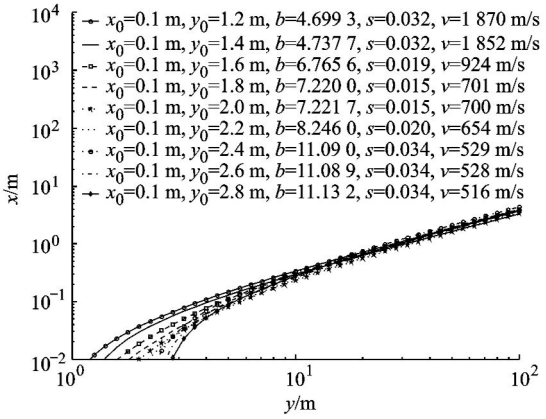
表 2 是在月尘粒子系统中采用不同粒子数、不同粒子生命周期时的帧速率. 其中,月球探测器在软着陆阶段,月球大地形中的顶点个数为 26 300个,探测器模型顶点个数为 13 500 个.

实验结果显示,当粒子个数达到 10 000 时,系统帧速率仍保持在 31 帧/s,系统实时性良好.

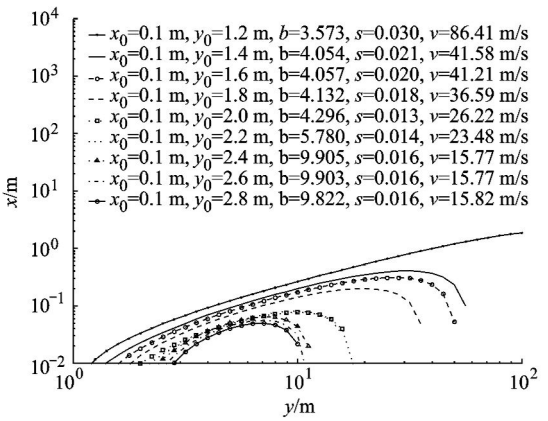
本文算法已应用于北航虚拟现实国家重点实验室的月球软着陆仿真系统.

表 1　月尘颗粒的运动模型参数

D/μm	x_0/m	y_0/m	b	s	v_0/(m·s^{-1})
1	0.01	1.2	4.700	0.032	1 870
1	0.01	1.4	4.740	0.032	1 852
1	0.01	1.6	6.770	0.019	924
1	0.01	1.8	7.220	0.015	701
1	0.01	2.0	7.220	0.015	700
1	0.01	2.2	8.250	0.020	654
1	0.01	2.4	11.09	0.034	529
1	0.01	2.6	11.09	0.033	528
1	0.01	2.8	11.13	0.034	516
1 000	0.01	1.2	3.573	0.030	86.41
1 000	0.01	1.4	4.054	0.020	41.57
1 000	0.01	1.6	4.057	0.020	41.21
1 000	0.01	1.8	4.132	0.018	36.59
1 000	0.01	2.0	4.296	0.013	26.22
1 000	0.01	2.2	5.780	0.014	23.48
1 000	0.01	2.4	9.905	0.016	15.77
1 000	0.01	2.6	9.903	0.016	15.78
1 000	0.01	2.8	9.822	0.016	15.82

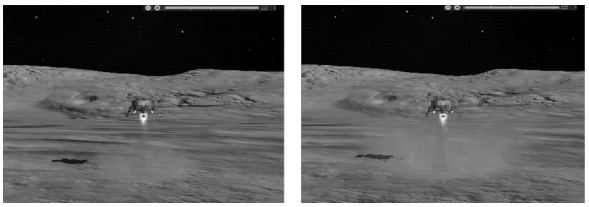


a　$D=1$ μm

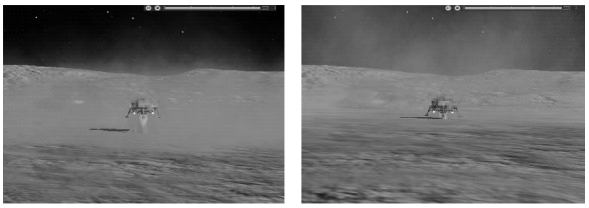


b　$D=1\,000$ μm

图 2　月尘颗粒的运动轨迹曲线

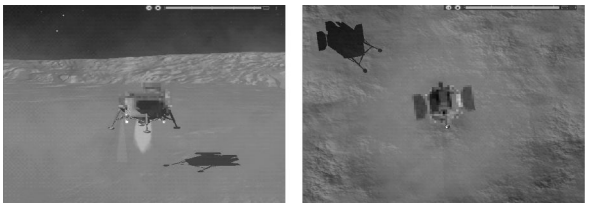


a 月尘腾起 b 月尘飞溅



c 月尘弥漫 d 月尘消散

图 3 月尘运动过程效果图



a 侧视图 b 俯视图

图 4 从不同角度拍摄月尘效果图

表 2 帧速率测试方案 帧/s

粒子数/个	粒子生命周期/s			
	10	20	40	80
500	240	182	143	128
1 000	147	113	92	72
2 000	121	90	71	55
5 000	86	72	57	47
10 000	51	43	35	31

4 结 论

本文提出了一种模拟发动机羽流作用下的月尘运动的仿真方法. 实验结果显示:本文方法真实地模拟了发动机羽流作用下月尘腾起、飞溅、弥漫,消散的运动效果,具有较强的视觉真实感,实时性能良好,其仿真结果对研究真空环境下的月尘运动及月球软着陆等相关领域具有一定的参考价值.

参考文献(References)

[1] 李雯,崔燚,王浚,等. 月球受光面上月尘静电浮扬特性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(10):1199 - 1202
Li Wen, Cui Yi, Wang Jun, et al. Analysis on electrostatic levitation of lunar dust on the moon's light side [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(10): 1199 - 1202(in Chinese)

[2] 陈磊,李飞,任德鹏,等. 月面与近月空间环境以及影响[J]. 航天器工程,2010,19(5):76 - 81
Chen Lei, Li Fei, Ren Depeng, et al. Lunar surface and near lunar space environments and their effects [J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 76 - 81(in Chinese)

[3] Masami N, Juan H. The moon as a beach of fine powders[J]. Lunar Regolith Simulant Materials Workshop, 2005, 7(1): 66 - 71

[4] Wilson T L, Wilson K B. Regolith sintering: a solution to lunar dust mitigation[C]// 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: NASA Press, 2005: 14 - 18

[5] Lane J E, Metzger P T. Ballistics model for particles on a horizontal plane in a vacuum propelled by a vertically impinging gas jet [R]. KSC-2010-164, 2010

[6] Lane J E, Metzger P T, Carlson J W. Lunar dust particles blown by lander engine exhaust in rarefied and compressible Flow [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments. Honolulu: ASCE Press, 2010: 14 - 17

[7] 张芹,吴慧中,谢隽毅,等. 基于粒子系统的火焰模型及其生成方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(1):78 - 82
Zhang Qin, Wu Huizhong, Xie Juanyi, et al. Study of particle system based flame modeling and realization [J]. Journal of Computer-aided Design&Computer Graphics, 2001, 13(1): 78 - 82 (in Chinese)

[8] 万华根,金小刚,彭群生. 基于物理模型的实时喷泉水流运动模拟[J]. 计算机学报,1998,21(9):774 - 779
Wan Huagen, Jin Xiaogang, Peng Qunsheng. Physically based real time fountain simulation [J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(9): 774 - 779(in Chinese)

(编 辑:刘登敏)