

# 仿真水墨扩散效果的元胞自动机改进模型

陈锋<sup>1)</sup> 张文俊<sup>2)</sup> 余颖<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072) <sup>2)</sup>(上海大学影视艺术学院, 上海 200072)

<sup>3)</sup>(上海文广新闻传媒集团技术运营中心, 上海 200041)

**摘要** 从水墨动态扩散机理分析着手,对元胞自动机模型进行了改进,融入了能真实表征水墨扩散效果的特性因素。首次引入了纤维元的容墨和积墨状态,并采用量化方法简化和建立了墨粒子迁移和水蒸发演变规则。实验结果表明,本文所改进的元胞自动机模型大大增强了水墨扩散的随机性和动态性,仿真效果更趋真实。同时,对水墨扩散效果的仿真具有普适性,借助3维建模与笔法的建立,可进行各种3维水墨效果与笔法的数字实现。

**关键词** 水墨扩散机理 元胞自动机 水墨仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)04-0740-06

## An Improved Cellular Automata Model for Simulation of Ink-wash Diffusion Effect

CHEN Feng<sup>1)</sup>, ZHANG Wen-jun<sup>2)</sup>, YU Ying<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

<sup>2)</sup>(School of Film Arts and Technology, Shanghai University, Shanghai 200072)

<sup>3)</sup>(Center of Technique, Shanghai Media Group, Shanghai 200041)

**Abstract** Beginning with the analysis of the ink-wash dynamic diffusion mechanism, an improved Cellular Automata(CA) model based on the characteristic factors that can reflect the effect of ink-wash diffusion more naturally is presented in this paper. The ink-accommodating and ink-adhering concept for the ink status of the fiber cell is introduced for the first time. The evolvement rules of the ink-particle movement and the water evaporating are simplified and established by the quantizing status. The simulation results show that the randomness and motility of the ink-wash diffusion are visibly enhanced by this CA model and the simulated effect is more real than former models. At the same time, the widespread applicability for the simulated effect of ink-wash diffusion is provided by this CA method. The various 3D and styles of ink-wash brush effect will be digitally realized by 3D modeling and writing brush models.

**Keywords** ink-wash diffusion mechanism, cellular automata, ink-wash simulation

## 1 引言

随着数字媒体技术和数字内容创意产业的快速发展,中国水墨艺术表现形式的数字实现方法的研究不仅能拓展其在数字内容中的艺术表现力度与空间,创建和充实中国水墨艺术的数字化语言,同时提供了更具民族特色的数字内容制作与设计手段。水

墨效果数字实现所涉及的研究内容广泛,主要有水墨动态扩散模型的研究,水墨墨迹轮廓提取技术,水墨扩散不规则边缘的优化,以及实时渲染技术和交互控制等等。其中,对水墨动态扩散的机理分析及其仿真研究是关键。

元胞自动机理论首先在西方绘画艺术的计算机仿真中得到了应用。20世纪90年代初,元胞自动机理论率先应用于水彩画的仿真<sup>[1]</sup>,并将纸纤维建

基金项目:上海市教委重点项目(04AA02)

收稿日期:2005-09-15; 改回日期:2005-12-05

第一作者简介:陈锋(1979~),男,现为上海大学通信与信息工程学院信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向是数字媒体、计算机图形学、图像处理。E-mail: cscf@263.net

模成随机分布的网格的纸结构模型<sup>[2]</sup>。20世纪90年代末,在原先模型的基础上,提出了一个以浅水层、颜料沉淀层、毛细作用层为核心的改进模型,简称浅水流动的仿真模型<sup>[3]</sup>。这些成果在水彩扩散仿真上取得了不错的视觉效果。

水墨效果的计算机仿真领域的研究起步相对较晚,但近几年借鉴元胞自动机模型和西方绘画数字实现已有的研究成果,在水墨扩散的仿真上也取得了一些突破。如,在水彩画仿真的浅水流动模型上,构建的2维纸纤维结构的流体仿真模型,能基本上实现水墨画的扩散效果,但扩散边缘过于平滑,扩散效果规律性太强,无法体现水墨在宣纸上扩散后产生的丰富多变的艺术效果<sup>[4]</sup>。之后,提出的用做“伪布朗运动”的粒子系统来模拟水墨粒子在纤维元中的运动,也取得了不错的仿真效果,但计算量也随之增大<sup>[5]</sup>。

以往利用元胞自动机理论建立起来的水墨扩散模型主要着眼于水墨效果的实现结果,虽然其中有些模型的仿真效果不错,但是由于只是从水墨扩散效果的表象着手,使得模型的通用性欠佳。同时,由于没有全面考虑从水墨扩散机理上来建立能表征水墨扩散效果的元胞状态和演变规则,也往往不能真实地反映水墨扩散的特征和效果。

本文在对水墨扩散机理深入分析的基础上,提出了依据水墨扩散的机理,对元胞自动机模型的元胞状态及演变规则进行修正,更有效地融入水墨扩散机理的特性因素,建立一种能突出水墨扩散的动态性和不规则性特点,又具有普适性的扩散仿真模型,从而使水墨扩散的仿真效果和特征更趋合理与真实,应用的范围更广。

## 2 元胞自动机模型

元胞自动机 (cellular automata, 简称 CA), 又称细胞自动机, 是定义在一个由状态有限的元胞组成的离散元胞空间上, 并按照一定局部规则, 在离散的时间维上演化的动力学系统<sup>[6]</sup>, 具有表现动力系统行为的能力。元胞自动机最基本的组成是元胞、元胞空间、邻居及规则4部分, 如图1所示。

假设,  $i$  表示元胞编号,  $S$  表示元胞状态,  $t$  表示离散化的时间值,  $D_i$  表示元胞  $i$  的邻居元胞集,  $S_i^t$  表示在  $t$  时刻元胞  $i$  的状态,  $f(\cdot)$  表示1维局部规则算法, 则有

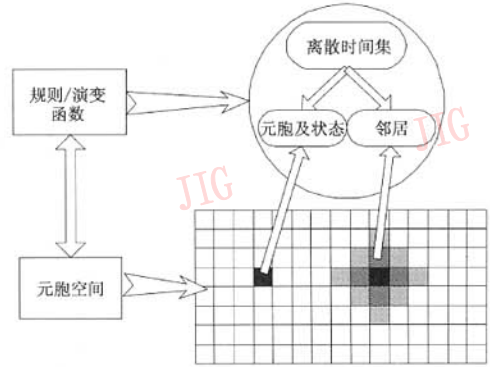


图1 元胞自动机的组成示意  
Fig.1 The constitution of a CA model

$$S_{i+1}^i = f(S_i^i, S_{D_i}^i)$$

若用  $r$  表示  $D_i$  的邻居半径, 当  $r=1$  时, 则有

$$S_{i+1}^i = f(S_i^i, S_{i-1}^i, S_{i+1}^i)$$

即  $t+1$  时刻的元胞  $i$  状态由  $t$  时刻的元胞  $i$ , 元胞  $i-1$ , 元胞  $i+1$  的状态和具体算法  $f(\cdot)$  决定<sup>[6]</sup>。类似地, 可以推导出3维的元胞自动机

$$S_{i+1}^{ijk} = \phi(S_i^{ijk}, S_{D_{ijk}}^{ijk})$$

其中,  $\phi(\cdot)$  表示3维的局部规则算法,  $S_{i+1}^{ijk}$  表示  $t$  时刻元胞  $(i, j, k)$  的状态,  $D_{ijk}$  是其邻居元胞集。

当所有元胞都从  $t$  时刻演变成了  $t+1$  时刻, 则整个系统完成了一次演变, 这样继续遵循局部规则进行演变, 直到系统达到平衡, 演变才告结束。

不同于一般的动力学模型, 元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定, 而是由一系列模型构造的规则构成的。它的特点是时间、空间、状态都离散, 每个变量只取有限多个状态, 且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的。因此, 建立一个元胞自动机模型需完成元胞空间离散化, 元胞状态离散化, 时间离散化, 以及演变规则算法的设计。

## 3 水墨扩散的机理

综合分析水墨扩散机理, 提取主要影响水墨扩散效果的基本特性因素, 以较充分和正确的表征水墨扩散机理, 是本文改进元胞自动机模型的依据。水、墨、纸三者是水墨扩散主体和直接参与者, 水墨的动态扩散现象是这三者相互作用的结果。具体而言, 毛细现象所产生的吸收作用, 是水分子在纸纤维空隙之间向外扩散动力来源, 作用力的大小由所含

微粒的多少决定。墨粒子主要成分是不溶于水的悬浮颗粒,它的动力来自于水分子流动所带来的动能。另外,墨粒子还受到纸对其的吸附作用,所产生的吸附力就成为了墨粒子自由移动的阻力。表 1 总结了水、墨、纸三者相互作用的主要关系。

表 1 水、墨、纸的相互关系表

Tab.1 The relations among water, ink and paper

关系	作用
纸→水	纸具有吸水性,是水获得扩散动力的来源
纸→墨	纸具有吸墨性,使墨获得了吸附阻力
水→墨	水的流动是墨获得扩散动力的来源
水的蒸发	水在空间具有自然蒸发性

从表 1 中可以看出,在水墨的动态扩散现象中,表征其扩散现象的特性因素主要有:纸纤维的吸水性、纸纤维的吸墨性、水流动对墨粒子的推动力、水的蒸发等。而一些次要关系未列入其中,比如纸在吸水吸墨之后,会产生微小的结构变化,以及墨粒子间的互吸引力等等,对水墨扩散效果的影响极小,为了所建模型的简洁性和降低计算量可以忽略不计。所以通过描述水墨扩散中,3 个主体对象(水、墨、纸)之间的主要关系体现水墨扩散机理是充足和可行的。

## 4 模型的建立

基于上述建立的能表征水墨扩散机理的主要因素,对元胞自动机模型的元胞空间,元胞状态和演变算法作相应的改进和优化。

### 4.1 元胞空间离散化

水墨扩散的空间是宣纸,元胞空间离散化就是在结构上对宣纸进行特征提取和抽象。宣纸的微观结构是由很多纸纤维元素组成的,可以将纸纤维元素抽象成纤维团和纤维丝两个部分组成<sup>[4,7]</sup>。

纤维团的空间分布构成了元胞自动机系统中的元胞,称之为纤维元,主要的作用是吸水吸墨。纤维丝在系统中构建了纤维元之间的邻居关系,即纤维丝所连接的纤维元互为邻居,且只有邻居元胞之间才有可能发生水和墨粒子的迁移。纤维丝不能吸水吸墨,只是水和墨在纤维元之间迁移的虚拟路径。图 2 所示是纤维元和纤维丝的一种 3 维分布结构,图中每个纤维元的上、下、左、右、前、后纤维元就是

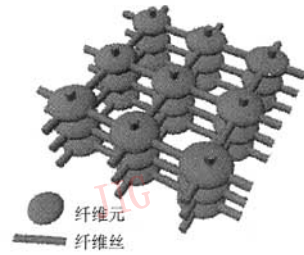


图 2 宣纸纤维的 3 维模型

Fig.2 A 3D model for a fibre structure of rice paper

当前纤维元的邻居。通过纤维丝的不同分布和纤维元状态的不同设置,可以灵活地表征不同宣纸的特性。同时,该模型也将宣纸拓展到 3 维空间,可以实现 3 维水墨扩散效果的仿真。

### 4.2 元胞状态离散化

纤维元在水墨扩散中的状态就是其吸水 and 吸墨能力,并用所含水、墨粒子的数量来表征,且状态有限,易于实现。另外,为了更充分地描述纸的吸墨特性,首次将宣纸的吸墨作用分解成容墨和积墨两个部分。因此,纤维元的状态应该由吸水、容墨和积墨状态来表征与描述。

#### (1) 吸水状态

吸水性是宣纸毛细作用的结果,纤维元的吸水状态表现为可吸水、吸水临界饱和、吸水超饱和 3 种状态。

假设,  $W_{abs}$  表示纤维元的最多可吸水的数量,  $W_{all}$  表示纤维元  $t$  时刻的含水量,  $W_{act}$  表示纤维元  $t$  时刻的活动水分子数。对于某一纤维元来说,  $W_{abs}$  值是固定不变的,在初始化时设定,而  $W_{all}$  和  $W_{act}$  是随时间的变化而变化的。则有

$$W_{act} = \begin{cases} 0 & W_{all} < W_{abs} & \text{可吸水状态} \\ 0 & W_{all} = W_{abs} & \text{吸水临界饱和} \\ W_{all} - W_{abs} & W_{all} > W_{abs} & \text{吸水超饱和} \end{cases}$$

可见,  $W_{abs}$  就好像是纤维元中可容纳水分子的空间数量,在可吸水状态下,纤维元仍有吸水空间;而在饱和状态下,吸水空间已被占满,故而此时元胞也没有了吸水能力。  $W_{act}$  只在超饱和和状态时存在,这些水分子可以在相邻纤维元之间,按照一定迁移规则移动,所以称其为活动水分子。

#### (2) 容墨状态和积墨状态

与吸水性类似,针对容墨和积墨特性,纤维元的容墨状态可表现为可容墨、容墨临界饱和、容墨超饱

和状态。相应地,假设变量  $C_{abs}$ ,  $C_{all}$  和  $C_{act}$  分别表示纤维元的最多容墨数,  $t$  时刻墨含量和  $t$  时刻活动墨粒子数量。同样有

$$C_{act} = \begin{cases} 0 & C_{all} < C_{abs} \quad \text{可容墨状态} \\ 0 & C_{all} = C_{abs} \quad \text{容墨临界饱和} \\ C_{all} - C_{abs} & C_{all} > C_{abs} \quad \text{容墨超饱和} \end{cases}$$

与吸水性不同的是,由于墨粒子是不溶于水的细小微粒,纸对墨粒子除了有容墨性之外,还会产生墨粒子堆积在纤维元上的现象,即积墨性。当纤维元的容墨数量已经处于超饱和状态时,纤维元仍然对活动墨粒子具有一定的吸附力(或称黏附力),阻碍其移动。活动墨粒子只有在克服此力的情况下,才可能出现迁移,否则将堆积在纤维元周围,形成积墨现象。

图3所示是宣纸模型中构建的纤维元的吸水性与容墨性的示意图,把吸水与容墨能力以空穴的形式抽象表示。比如,图中所示纤维元的水空穴数为  $W_{abs} = 13$ , 墨空穴数为  $C_{abs} = 8$ ; 若该纤维元某时刻的  $W_{all} = 15$ ,  $C_{all} = 5$ , 则其  $W_{act} = 2$ ,  $C_{act} = 0$ , 这说明该纤维元当前处于吸水超饱和状态和可容墨状态,具有2个活动水分子和3个可容墨空间。

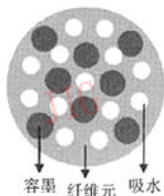


图3 纤维元的容墨与吸水模型

Fig.3 A fibre cell model to indicate the capability of water absorption and ink acceptance

## 5 演变规则的建立

综上所述,依据水墨扩散机理建立的纤维元的空间分布、纤维元的有限状态和相关邻居关系,可以建立起能表征水墨扩散效果的演变规则。

### 5.1 水分子的迁移规则

根据上述对纤维元吸水能力的分析与描述可知,水分子在纤维元之间发生迁移,必须满足两个条件:一是当前纤维元必须处于吸水的超饱和状态,即存在活动水分子;二是当前纤维元与邻居的含水量之间存在浓度顺差,也就是在当前纤维元的邻居中

存在一个或多个纤维元,其所含的水分子在数量上小于当前纤维元,这些元胞即为水分子迁移的目标纤维元。归结起来,可以用下面两个关系式来表示:

$$gridpre. W_{act} > 0$$

$$gridpre. W_{all} > griddes. W_{all}$$

其中,  $gridpre$  表示当前纤维元,  $griddes$  表示目标纤维元,  $gridpre. W_{act}$  表示当前纤维元中活动水分子的数量。

满足上述条件的纤维元中活动水分子则会发生迁移现象,主要有两种情况:一是当前纤维元处于水墨扩散边缘,即邻居中存在一个或多个元胞处于含水量为零或极少的可吸水状态。此时,当前纤维元中的活动水分子优先迁移至这些邻居中,直至将其可吸水空间占满为止,即使其处于临界饱和状态;二是当前纤维元处于水墨扩散的中心,即邻居均已处于饱和状态。此时,可根据水含量比值  $gridpre. W_{all} / griddes. W_{all}$  的大小,计算出迁移水分子的不同数量,然后直接将这些水分子迁移至目标纤维元中。

可设置扩散门限来进一步控制水分子的迁移。扩散门限( $difgate$ )可定义为

$$difgate = \frac{gridpre. W_{act} - griddes. W_{act}}{griddes. W_{act}}$$

且仅当  $difgate > 1$  时表示可扩散。

当然,也可以根据水含量比值的大小,给活动水分子施加一个指向目标纤维元不同大小的作用力,使其向目标纤维元移动。

### 5.2 墨粒子的迁移规则

墨粒子的迁移会受到来自纸纤维结构和水两方面作用的影响,比水分子的扩散复杂一些。具体来说,当纤维元处于容墨超饱和状态时,活动墨粒子的迁移力主要来自两个方面,一是由于纤维元的积墨作用所产生的吸附力,二是水迁移对活动墨粒子所产生的推动力。只有当推动力大于吸附力时,活动墨粒子才会有迁移的可能。

要对活动墨粒子的这两种作用力进行精确计算与描述是非常困难的。但是,通过对机理的分析可予以简化,本文对活动墨粒子所受的迁移力进行了量化,实验结果表明,这样的量化已能充分反映水墨动态扩散的特性。本文采用的量化方式是,利用当前纤维元的  $C_{act} / C_{abs}$  比值来量化吸附力级别  $f$ , 利用  $W_{act} / W_{abs}$  来量化推动力级别  $F$ , 然后依据对两者的级别数的比对结果来判断墨粒子的受力状况。

由上述分析及建立的方法可得,墨粒子在纤维

元之间发生迁移的条件与水分子的发生迁移条件相似,即为:一是当前纤维元处于容墨超饱和状态;二是当前纤维元与邻居的墨粒子含量之间存在浓度顺差。所不同的是,还必须考虑墨粒子受力的比条件,也就是当前纤维元中的活动墨粒子的推动力等级  $F$  必须大于吸附力等级  $f$ ,即  $F > f$ 。

### 5.3 水蒸发的演变规则

水蒸发现象对水墨扩散效果有着显著的影响。水在空间中具有蒸发的特点,而且由于水表面的分子作用力是以引力为主的,所以在水分子多的地方,蒸发速度相对较慢,而在水分子较少的地方,蒸发速度相对较快,即处于可吸水状态元胞中的水比处于饱和状态元胞中的水蒸发要快。当水分子蒸发完或蒸发得差不多时,墨粒子也无法获得迁移动力。

由此可见,为了更真实地表征水墨扩散的效果,在演变规则中必须考虑水蒸发现象,即在模型中必须标记水分子是否存在,一旦蒸发,即为水分子消失或死亡。对于不同的元胞状态,需要设定不同的蒸发率,以反映水蒸发的快慢。本文采用了量化方法来表征水的蒸发现象,即根据当前纤维元  $W_{all}/W_{abs}$  比值的大小,量化出不同的蒸发率,来描述水蒸发效果。

## 6 实验结果

在 Maya 平台上,就上述所建立的水墨扩散效果仿真的元胞自动机模型进行了仿真与验证实验。利用 Maya 的 API 接口,通过 VC 编程,编译连接生成 mll 动态链接文件,然后将 mll 文件链接到 Maya 的场景中,作为场景的一个节点来控制粒子系统<sup>[8]</sup>。

吸附力和推动力的量化等级数的多少决定了墨粒子迁移的多变性,本文在实验仿真中采用了作用力的 4 级量化,即将吸附力和推动力量化成可控的 4 个等级,实验结果表明已能表征墨粒子扩散特征效果。

本文在实验仿真中对水分子的蒸发率采用了三级量化(见表 2)。当然,也可以进一步细化量化级数和蒸发率,以增加水分子蒸发的多变性。但实验结果表明已能较真实地反映水蒸发对水墨扩散效果的影响。考虑到水蒸发是个相对缓慢的过程,不必在每一时刻都进行演变,另外,频繁的就水蒸发进行计算会增加系统的负担。因此,在仿真实验中将水

蒸发的计算频率设定为 1/4 时间主频,实验结果也表明其并不会影响到最终的仿真效果。

表 2 水蒸发率的量化

Tab. 2 Quantization of water evaporation

条件	量化的蒸发率
$W_{all}/W_{abs} \geq 10$	0.05
$1 \leq W_{all}/W_{abs} < 10$	0.1
$W_{all}/W_{abs} < 1$	0.3

图 4 是应用本文方法模拟的水墨团扩散和简单文字的仿真效果,尤其是从放大的水墨团的边缘体现了不规则性,且每次扩散的效果都不同。图 5 是 3 维空间中一条随意画出的螺旋线的水墨扩散实验仿真结果。为了能够充分反映水墨扩散的动态性与不规则性,所有的水墨扩散效果的图示均截取自原始场景,未经过任何特殊的渲染和优化处理,墨迹边缘的粗糙轮廓较好地反映了本文建立的水墨扩散仿真模型的动态性和不规则性。



图 4 墨点和简单文字的扩散效果

Fig. 4 The diffusion effect of ink-dot and simple Chinese characters

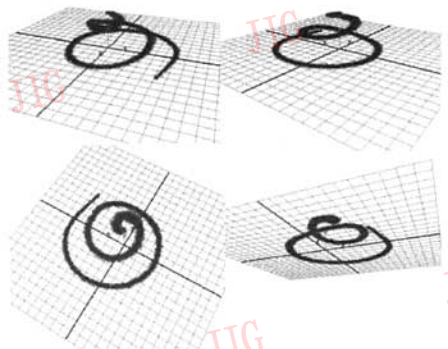


图 5 3 维随意螺旋线的不同视角的水墨扩散效果

Fig. 5 3D some view of the ink-wash diffusion effect of a random Helix line from different orientation

## 7 结论

本文从水墨动态扩散机理的分析着手,将影响

水墨扩散的因素表征成水、墨、纸的相互作用,对元胞自动机模型进行了改进,融入了能真实表征水墨扩散效果的特性因素。首次引入了更能反映水墨扩散真实性的纤维元的容墨和积墨状态,采用量化方法简化和建立了墨粒子迁移和水蒸发演变规则。实验结果表明,本文所改进的元胞自动机在原有的基础上大大增强了水墨扩散的随机性和动态性,仿真效果更趋真实。

“用笔使墨、用意使笔”是水墨的特征。本文所建的水墨扩散模型是以水墨扩散机理为依据的,对水墨扩散效果的仿真具有普适性。因此,借助于笔法的研究与建立,入笔生墨,水墨扩散,为各种水墨效果及笔法(包括泼墨、飞白等)的数字实现提供了一种有效途径和思路。同时,通过3维建模,可以实现3维的水墨效果。

#### 参考文献 (References)

- 1 Small D. Simulating watercolor by modeling diffusion, pigment and paper fibers [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Image Handling and Reproduction Systems Integration [C], Washington, 1991, 1460: 140 ~ 146.
- 2 Guo Q, Kunii T L. Modeling the diffuse painting of “sumie” [A]. In: Proceedings of the IFTP WG 5110 Working Conference [C], Tokyo, 1991: 329 ~ 338.
- 3 Cassidy J Curtis, Sean E Anderson, Joshua E Seims, et al. Computer-generated watercolor [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'97 [C], Los Angeles, California, 1997: 421 ~ 430.
- 4 Wang Xiu-jin, Sun Ji-zhou, Jiao Jing-shan. Graphical simulator for Chinese ink wash drawing [J]. Transactions of Tianjin University, 2002, 8(1): 1 ~ 7.
- 5 Qi Ya-feng, Sun Ji-zhou, Shang Yi. Basic art characters and graphical simulation for Chinese ink wash drawing [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(5): 562 ~ 566. [齐亚峰, 孙济洲, 商毅. 中国水墨画的基本艺术特征及其计算机仿真实现 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(5): 562 ~ 566.]
- 6 Xie Hui-min. Complexity and Dynamical System [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1994: 151 ~ 184. [谢惠民著. 复杂性与动力系统 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994: 151 ~ 184.]
- 7 Shi Yong-shuo, Sun Ji-zhou. Graphical simulation algorithm for Chinese ink wash drawing by particle system [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(6): 667 ~ 672. [石永鑫, 孙济洲. 基于粒子系统的中国水墨画仿真算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(6): 667 ~ 672.]
- 8 David A D Gould. Complete MAYA Programming [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 201 ~ 311.