场生命：作为相互作用化学场的 Particle Life

Iliya Zhechev索非亚大
学索非亚，保加利亚
iliya.zhechev@g
mail.com

arXiv:2611.32844v1 [nlin.CG] 24 Nov 2026

摘要—场生命是一种受 Particle Life 相互作用动力学启发的元胞自动机。在 Particle Life 中，每个粒子都有一种颜色，而相互作用矩阵设定每种颜色对其他各色的吸引或排斥强度。在场生命中，每种颜色是自动机的一个通道，每个元胞都包含各种颜色的浓度。规则的一步分为三个部分。每种颜色都与环形核进行卷积，以测量该颜色在元胞周围的分布量。相互作用矩阵将这些测量值组合起来，得出每种颜色受到的吸引力。随后，各种颜色的质量朝吸引力较高处移动，同时保持质量守恒。随机矩阵和随机初始状态通常就足以产生运动结构：滑行的主体、散出弥散云的主体，以及分裂成更小滑翔机的滑翔机。我们随机抽取规则，保留那些能够产生运动并形成结构的规则，并描述出现的图案：颜色分区聚集、颜色形成条纹，以及在网格上移动的紧凑主体。模拟程序和 120 条保存的规则（我们称之为世界）均已发布。

索引词—人工生命、元胞自动机、Particle Life、质量守恒、自组织

一、引言

Particle Life [1], [2]是一种粒子模拟，其中不同颜色的粒子彼此吸引或排斥。两个粒子靠得比某个较短距离更近时，就会相互推开。超过这一距离后，它们之间的力取决于各自的颜色：相互作用矩阵为每一对颜色的有序对指定一个带正负号的强度，因此红色可能吸引绿色，而绿色却排斥红色。通常，一个随机矩阵就足以产生彼此追逐、在平面上滑行的集群。

这种行为需要付出计算成本。在每一步中，每个粒子都必须找出其范围内的粒子。最简单的方法是测试每一对粒子，成本会随着粒子数量的平方增长；通常采用空间数据结构、分箱网格或邻居列表 [3], ，并且必须在粒子移动时维护这些结构。元胞自动机不需要进行这样的搜索。它是定义在晶格上的动力系统，通常使用方形网格。每个格点位置都是一个带有状态的元胞。在每个离散时间步中，局部规则根据元胞自身及其邻居更新每个元胞。这个值可以是二进制的，例如生命游戏中的元胞只有存活或死亡两种状态；也可以是实数向量，例如多通道 Lenia 和场生命，其中每个元胞为每种颜色保存一个浓度。元胞的邻居由晶格固定。场生命就是这样一种自动机：每个元胞都由同一规则更新，而该规则由使用固定核进行卷积以及在相邻元胞之间传递质量组成。

在场生命中，Particle Life 的每种颜色都变成网格上的浓度场，而相互作用矩阵保持不变。该矩阵定义了各种颜色之间的推拉作用；浓度在这些力的作用下移动，同时质量既不会产生，也不会消失。由于这些颜色像化学物质的浓度一样扩散和漂移，我们称它们为化学场。

这个模型中的随机规则会产生多种多样的行为。图1展示了十二个世界，每个世界都从一个混合颜色的圆盘开始：有些世界中，颜色分区聚集；有些世界中，一种颜色形成条纹；还有许多世界中，紧密的主体形成并移动。第五节将探讨这类主体；它们是生命游戏意义上的滑翔体，也就是作为整体在网格上移动的图案。这类主体可以从原来的世界中取出，单独运行；有些能持续移动数千步，有些则会分裂成更小的滑翔体。

我们研究的问题是，非互易相互作用和质量守恒如何共同塑造这类模型中的运动结构。本文有四项贡献。首先，定义了场生命（Field Life）：一种质量守恒自动机，其中相互作用矩阵作用于环形核势（第三节）。其次，探索了该模型的随机规则，并通过测量筛选出值得保留的规则（第四节）。然后，描述了出现的图案，并展示滑翔机需要非对称矩阵才能形成（第五节）。最后，发布了模拟程序、参考实现和 120 个世界。第二节回顾相关研究，第六节讨论该模型揭示了什么，以及
它有哪些不足。

可在浏览器中运行模拟：https://www.izhv.eu/field-life/paper-demo/；其中的世界和滑翔机均按照本文中的编号标注。与静态帧相比，运动更能清晰地展现其动力学。源代码、参考实现和 120 个世界可在 https://github.com/ichko/field-life 获取。

II. 相关工作

Clusters [1] 和 Particle Life [2] 是这样的模拟：两个彩色粒子之间的力取决于它们的颜色，并通过一个矩阵表示；在短距离内，所有粒子对之间都存在排斥力。它们属于群集模型的发展脉络，从 boids [4] 经过 Vicsek 模型 [5]延伸到群体化学 [6], ；在这些模型中，每个物种都有自己的运动参数。在 Clusters 和 Particle Life 中，群体之所以运动，是因为矩阵是不对称的：一种颜色会被另一种颜色吸引，而后者又会排斥前者。这些模型均没有经过同行评审的描述，因此我们引用作者的页面。

已获准在 2027年 IEEE 计算智能研讨会系列（SSCI 2027）上发表。© 2027 IEEE。允许个人使用本材料。其他任何用途均须事先获得 IEEE 的许可，无论是在现有还是未来的媒体中使用，包括为广告或宣传目的重印或再版本材料、创作新的合集、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护部分。

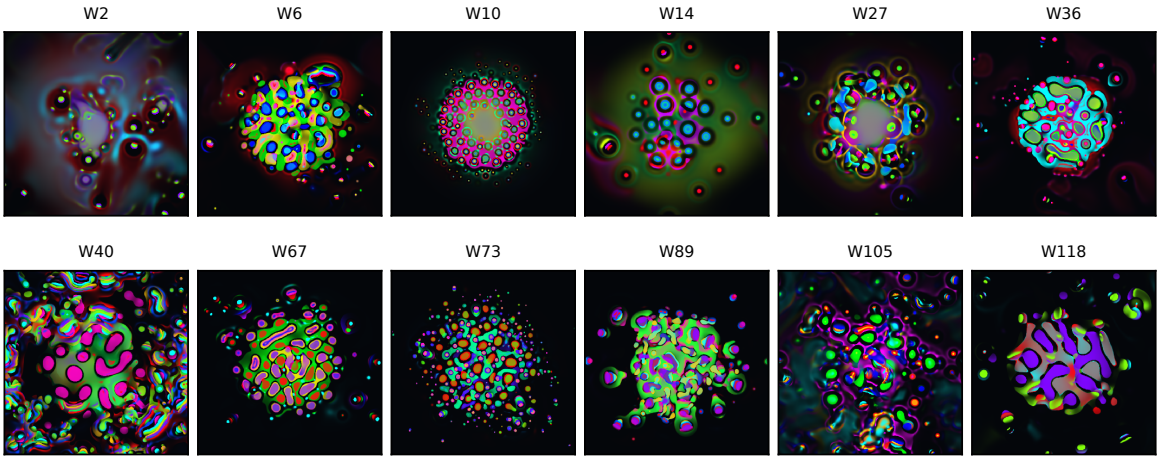

图1. 已发布的 120 个世界中，在经过 2000 步后选出的 12 个。每个世界都从空白 512×512 网格中央一个由混合颜色组成的圆盘开始（即第四节的圆盘初始状态）。亮度表示总浓度，色调则混合了其中存在的颜色。每个面板都标注了对应世界的编号。

移动是因为矩阵是不对称的：一种颜色会被另一种颜色吸引，而后者又会排斥前者。这两个模型都没有经过同行评审的描述，因此我们引用作者的页面。

SmoothLife [7] 将生命游戏 [8] 拓展到连续场中，而 Lenia [9]则通过平滑核和生长函数对其进行泛化。后续研究加入了多个核和通道 [10]、学习规则 [11]，以及具有感觉运动行为 [12]的生物。在这些系统中，生长项都会向元胞添加质量或将其移除。Flow-Lenia [13] 则让质量沿生长项的梯度移动，从而守恒质量。MaCE [14]是一种通用的质量守恒更新：每个元胞按亲和度的指数所决定的比例，将自身内容分配给邻居。场生命保留了这一更新方式，但替换了亲和度。多通道 Lenia 和 Flow-Lenia 也会用带符号权重对每个通道的环形核卷积进行加权，但随后会将总和输入生长函数。场生命没有生长函数，而是通过 MaCE 更新移动质量，并加入拥挤项；其创新之处在于这一整套构造及其所产生的行为。由于没有生长函数，矩阵会直接作用于这些卷积，因此每个矩阵元素都保留了它在 Particle Life 中的含义：一种颜色对另一种颜色的吸引强度。这使我们能够通过令矩阵对称来检验不对称性的作用（第五节）。Particle Lenia [15] 是 Lenia 的一种基于粒子的变体。

在聚集模型中，个体会在远距离相互吸引、近距离相互排斥，并形成团块和环 [16]–[17]。当一个物种或一种粒子对另一物种的响应方式不同于后者对它的响应方式时，这种相互作用就是非互易的。具有非互易相互作用的混合物会形成移动的图案；具有互易相互作用的混合物则会趋于静止 [18]–[23]。在场生命中，每种颜色代表一个物种，而非对称矩阵使相互作用变为非互易。

III. 模型

状态。 网格为正方形，包含 $L \times L$ 个元胞，并采用周期边界。共有 C 种颜色。每种颜色 i（从 1 到 C）都是一个场 ρ_i：每个元胞对应一个非负数，表示该元胞中颜色 i 的浓度。颜色 i 的质量是其在整个网格上的 ρ_i 之和。规则的一步会为每种颜色依次计算一个势、一个吸引力，然后进行移动（图2）。

势。 每种颜色 i 都有一个核 K_i，即以正在更新的元胞为中心的权重圆盘。该核呈环形：中心为负值，周围一圈为正值（图3）。颜色 i 的势是其场与核的卷积，

$$U_i = K_i * \rho_i. \tag{1}$$

在距离环带所处距离的位置，如果某种颜色 i 环绕某个元胞，则该元胞的势较高；如果某种颜色 i 占据某个元胞，则其势较低。

吸引力。 相互作用矩阵 M 为每个颜色有序对 M_{ij} 保存一个带符号权重：颜色 i如何响应颜色 j。颜色 i 在某个元胞处的吸引力为

$$A_i = F \sum_{j=1}^{C} M_{ij}\, U_j \;-\; \gamma\, n, \qquad n = \sum_{j=1}^{C} G_j * \rho_j, \tag{2}$$

其中，F 是力，是一个用于缩放整个矩阵项的数值；n 是拥挤度：元胞附近所有颜色的总质量，通过用窄高斯函数 G_j 模糊化各个场 ρ_j 并求和得到。拥挤度以权重γ（即排斥力）参与计算。正的 M_{ij} 会将颜色 i 拉向与颜色 j 相距环距离的元胞，并使其远离被颜色 j 占据的元胞；负的 M_{ij} 则作用相反。下文所说颜色 i 受到颜色 j的吸引或排斥，指的就是：被吸引到 j周围的环上，或被推离该环。拥挤度会将质量从已满的元胞中推出，不论其中是什么颜色；这就是 Particle Life 中的短程排斥力，它作用于每一对粒子之间。

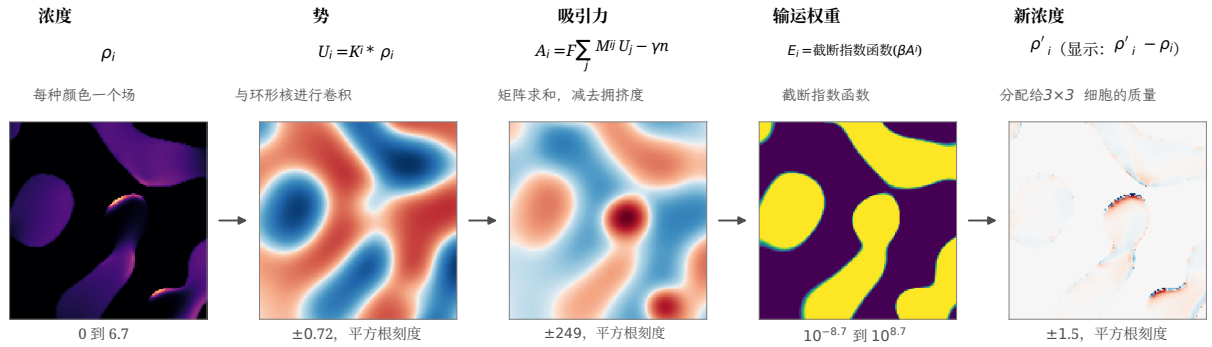

图2。规则的一步更新，以世界 W118 的一种颜色为例（图1），展示其经过 2000 步后在一个宽 128 个细胞的窗口中的状态。每个面板都标注了所示数量，以及由前一个面板通过何种运算得到。势 U_i 在该颜色区域内为负，在其周围一圈为正。吸引力 A_i 等于四种颜色的势的加权和减去拥挤项。输运权重 E_i 从 e^{-20} 变化到 e^{20}，相差十七个数量级；在区域内部，指数受到限制，因此权重保持平坦。变化量 $\rho'_i - \rho_i$ 的总和为零。带符号的面板采用平方根颜色标度；每个面板均标明其数值范围。

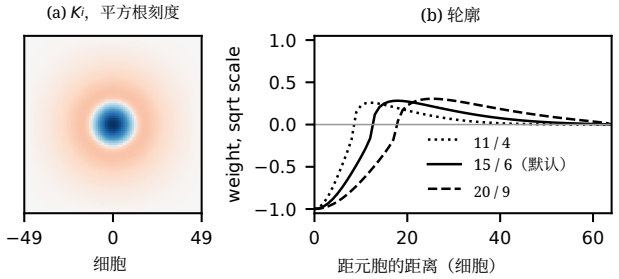

图3。环形核。(a) 默认宽度下的权重圆盘，宽度为 $\sigma_w = 15$ 和 $\sigma_n = 6$ 个细胞；红色表示正值，蓝色表示负值。(b) 权重随距元胞的距离变化曲线，分别对应窄环、默认环和宽环；每条曲线均除以其中心值的绝对值；标签给出以细胞为单位的 σ_w / σ_n。两个面板均采用平方根标度，以便看清外侧较弱的环。

运动。 质量通过 MaCE 更新 [14]流向吸引力更强的地方。每个元胞都有一个输运权重

$$E_i = \exp\big(\mathrm{clip}(\beta A_i, -20, 20)\big), \tag{3}$$

其中指数的限制在“实现”一节中有所说明，而 β 是锐度，MaCE 自有的参数：β 越大，元胞质量中分配给具有最大吸引力的邻居的部分就越多。每个元胞都会根据权重，将其质量分配给自身所在的九个元胞组成的 3×3 邻域 $\mathcal{N}$：

$$\rho'_i(x) = \sum_{y \in \mathcal{N}(x)} \rho_i(y) \frac{E_i(x)}{\sum_{z \in \mathcal{N}(y)} E_i(z)}. \tag{4}$$

分数表示元胞 y 的质量中流向元胞x的部分；其分母遍历发送元胞的邻域y。每个元胞的九个份额之和为一，因此离开元胞的每一单位质量都会到达相邻元胞中，并且每种颜色的质量在舍入误差范围内守恒。一个世界由矩阵 M、每种颜色对应的一个核，以及三个标量 F、γ 和 β确定。

实现。颜色 i 的核是标准差为 σ_w 的宽高斯函数减去标准差为 σ_n的窄高斯函数。每个高斯函数都在世界最大尺寸 σ_w的 3.2 倍处截断，并归一化为单位质量，因此差分的权重总和为零；随后对差分进行缩放，使其绝对值之和为一。 G_j 是进行该除法之前颜色 j 的单位质量窄高斯函数，因此颜色 j 的 σ_n 同时决定其核的核心和拥挤模糊。默认值为 $\sigma_w = 15$ 和 $\sigma_n = 6$ 元胞、 $F = 90$、 $\gamma = 6$ 和$\beta = 3$；我们通过观察模拟手动设定这些值。在公式 (3) 的指数运算之前， βA_i 被限制为 ± 20，从而使指数保持在 32 位浮点数的范围内；该值由我们手动设定。使用默认标量时，在主体的大部分区域内，指数都超出该范围，因此在主体内部，九个权重相等，质量均匀扩散；吸引力的符号作用于主体边缘，决定边缘是向前推进还是后退。世界大小为 512×512元胞。模拟通过 WebGL2 在网页浏览器中以显示器刷新率运行，即每秒 120 步，运行于 Apple M4 Max 笔记本电脑上。两个高斯函数具有可分离性，因此每次卷积都可以分解为两次一维模糊。使用 NumPy 实现公式 (1)–(4)，所得结果与浏览器实现的一步运算相符，每个元胞的误差仅为 10^{-6} 的舍入误差；运行 300 步后，两种实现中滑翔体的质心彼此相距不超过 10^{-3} 个元胞。采用 32 位算术时，300 步内总质量的相对漂移低于 10^{-5} ，采用 64 位时低于5×10^{-14} 。本文中的图像均根据模拟状态，并采用模拟的颜色映射进行渲染：亮度取自总浓度，色调取自存在的颜色；颜色 i 的色调位于色轮的 $(i-1)/C$ 分数处，因此在四种颜色下，颜色1至4分别为红色、绿色、青色和紫色。

IV. 探索参数空间

方法。 我们随机抽取一条规则，从随机初始状态开始运行 300 步；如果它会移动并形成结构，就保留它。测试使用三项测量，均基于总浓度场，也就是所有颜色之和计算。活性是从一步到下一步发生变化的质量比例，$\sum_x |\rho_t(x) - \rho_{t-1}(x)| / \sum_x \rho_t(x)$，并取整个运行过程的平均值；它

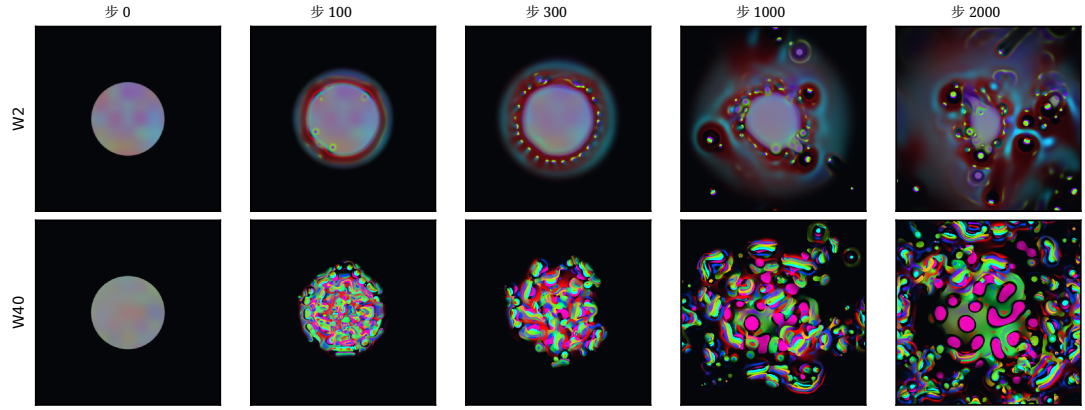

图4. 两个世界从一个混合颜色的圆盘开始演化，分别显示步 0、100、300、1000 和 2000 的状态。上：W2，混合核心仍然存在。下：W40，到步 1000 时圆盘已消失。在两者中，圆盘边缘先分化成单色图块，图块向外移动，分化过程逐渐向内推进；绘制方式如图1。

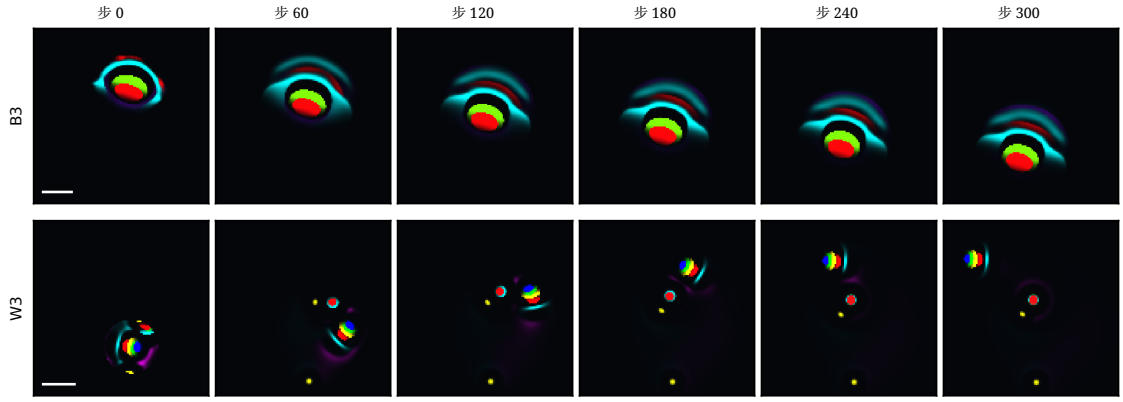

图5。在其母世界的规则下，两个主体分别单独位于空网格中，展示其在第0、60、120、180、240和300步时的状态。每一行的窗口均固定不动，因此主体会在其中移动；每行第一幅图中的标尺长度为20个元胞。上：B3沿直线移动并保持形状不变；颜色1至4分别以红色、绿色、青色和紫色绘制，颜色重叠处的色调会混合。下：从圆盘出发，在世界W3中经过1000步后截取出的一个主体，这是一个会在移动过程中发生变化的主体示例；它并不是表I中的七个滑翔体之一。它会在身后留下一串由单一颜色构成的点。两个母世界都可以在浏览器演示中观看。

表示世界仍在演化，而非静止不动。结构尺寸是最后一步中浓度高于峰值浓度十分之一的 4连通区域的典型范围，即这些区域中 $\sqrt{}$面积的质量加权中位数；它表示质量汇聚成主体，而非噪声或雾霭。局部位移是在场不重叠的 32×32图块上计算的。对于每个图块，它是最多四个元胞的位移，使该图块与前一步之间的绝对差之和最小；图块位移按各图块中发生变化的质量加权后取平均，并对整个运行过程取平均。它表示主体整体移动，而非原地翻腾。这些测量参考了 Lenia 的统计描述符 [9]，但并非相同的量。

详细信息。 本段中的所有数值、采样范围、初始状态和阈值均由人工选定：这些是模拟在我们看来较为有趣时所使用的设置，其中没有任何一项源于理论。该模型允许使用任意数量的颜色；浏览器实现支持最多 C 取值范围为 8；每个样本包含 C 种颜色，其中 C 取值范围为 4 到 8。 M 的各项从 $[-1, 1]$中均匀抽取。每种颜色对应一个环，其 σ_w 在 9 到 22 个元胞之间均匀抽取， σ_w/σ_n 在 1.7 到 5.7 之间均匀抽取；这些是模拟中核采样器的取值范围。在下方的计数运行中，这些标量保持默认值。120 个已发布世界的采样范围更广：两个宽度都乘以一个全局尺度，因此其 σ_w 范围为 6 到 33 个元胞；其中 52 个世界还对标量进行采样（F 为 37 到 188， γ 为 2 到 13， β 为 1.8 到 5.3）。初始状态可以是噪声或圆盘。噪声：每种颜色以质量为 $0.12\,L^2$的随机图块形式分布在整个网格上；已发布的代码给出了具体方法。圆盘：在空网格中央放置一个半径为 $0.2\,L$ 的圆盘，圆盘中的每个元胞都包含所有颜色，浓度介于 0.3 到 0.7 之间，并在元胞间平滑变化（每种颜色分别添加独立噪声，网格分别为 6 和 14 个点），边缘则在 6 个元胞的范围内渐隐至零。当样本的活性超过 0.02、结构尺寸超过 9 个元胞（这样零散的小点就不会被算作

表I 七种滑翔体：母世界、其颜色数量 C 和核宽度 σ_w （颜色范围内存在差异的部分），以及正文中定义的主体大小和速度。

Body	世界	C	σ_w （细胞）	大小（细胞）	速度（细胞/步）
B0	W1	4	16–21	12×8	0.89
B1	W33	6	13–25	12×7	0.33
B2	W36	4	14	105×73	0.23
B3	W49	4	15	25×18	0.16
B4	W39	8	12–26	37×33	0.14
B5	W16	4	17–22	39×29	0.06
B6	W71	6	21–23	15×16	0.04

结构），且位移超过每步 0.05 个元胞时，才保留该样本。每次运行持续 300 步；在我们尝试过的所有世界中，这足以让结构从噪声中形成。

结果。我们使用不同的随机种子（0 到 3）运行采样器四次，每次运行得到 12 条规则，共 48 条，均来自噪声。其中 44 条通过测试（每次运行分别有 12、11、10 和 11 条）。在这 44 条中，有 30 条（分别为 9、8、4 和 9 条）还通过了更严格的紧凑单色运动体测试；该测试是已发布采样器的一部分：每步位移超过 0.25 个细胞；被占据的细胞少于 40%，其中当某个细胞的总浓度超过峰值的十分之一时，该细胞即视为被占据；纯度高于 0.6，其中细胞的纯度为 $\sum_i \rho_i^2/(\sum_i \rho_i)^2$,：当细胞仅含一种颜色时，纯度等于 1；样本的纯度则为各细胞纯度的质量加权平均值。通过率取决于采样范围，而采样范围是人工设定的。我们在观看模拟时，凭目测从同类采样结果中选出了 120 个已发布世界。图1展示了其中的十二个。

V. 图案

从一个圆盘开始。我们从第四节中的圆盘开始：在一个空网格上，有一块圆形图块，其中每个元胞都以随机数量容纳所有颜色。如果没有随机性，圆盘将是均匀的，并且会一直保持均匀。当规则运行时，起初只有圆盘的边缘发生变化。在边缘处，容纳所有颜色的细胞开始只容纳一种颜色。这些单色斑块开始移动，其中一些会脱离并进入空白空间。相同的变化逐渐深入圆盘。在一些世界中，圆盘在大约一千步后消失，留下单色区域和运动体；在另一些世界中，混合核心会持续数千步，同时已排序边缘围绕它移动。图4展示了这两种情况各一个。

分选与条纹。圆盘会发生分选：原本含有多种颜色的元胞最终只保留一种颜色，世界也随之分成单色区域。许多已发布世界无论从圆盘还是从噪声开始，都会发生分选（图1中的W6、W14、W40、W105和W118）。条纹是第二种图样：一种颜色会排列成彼此间距相同的平行带，间距约等于环形核的半径。环形核对该距离处的质量赋予最高权重，而这种间距的条带会使每个元胞周围都同时在该距离处分布质量。少数已发布世界会形成这种图样（图1中的W14、W36、W73和W118）。反应–扩散系统中也会出现相同的条带 [24], [25]。

滑翔体。滑翔体是一个主体，或朝向一致的一组主体，它们会持续移动；移动过程中，其形状可能发生变化。为了测试一个主体，我们将其复制到一个空网格上，并在其所属世界的规则下运行300步；如果它在这300步中质心移动超过10个元胞，就算是滑翔体。我们找到了七个滑翔体，编号为B0至B6，各自来自不同的世界；其中速度最慢的也以2个元胞的余量通过了测试。表I列出了它们的母世界、颜色数量、核宽度、尺寸和速度。尺寸指第0步时，主体中浓度高于其峰值浓度十分之一的部分所占方框的宽度和高度，单位为网格元胞；速度指300步内质心每步移动的距离。图5在固定窗口中展示了B3的300步运动过程，并同时展示了以相同方式从世界W3中截取的一个主体。七个滑翔体几乎都沿直线移动，但并非都沿晶格方向：B1、B5和B6沿晶格轴前进，而B0、B3和B4相对于网格的 x 轴分别朝向约110°、105° 和 55° 。将B0或B3的初始主体旋转 45°后，其朝向会转过 48°–50°，因此运动方向由主体而非晶格决定。在三次运行中，若从每个元胞都加入 ±10%噪声的初始状态开始，每个滑翔体的速度变化至多为每步0.01个元胞，朝向变化至多为 2°；B2除外，它会散开。B3和B0在3000步内都能保持速度和尺寸。速度最慢的B6会将质量散入周围的淡云中；到第3000步时，散出的质量占其总质量的12%，而其核心仍继续前进。B0和B1都是一种颜色的新月形体，前方有一个第二种颜色的点；B3和B4都是一种颜色的壳层包围着第二种颜色的核心，后方还拖着第三种颜色；B5和B6是由两种颜色堆叠而成的穹顶，以平坦的一侧在前移动；B2则是一组松散的管状体和环，在移动时不断重新排列，同时保持共同的朝向；作为一个整体，它通过了测试。运行更长时间后，它会散开：到第500步时变成少数几个主体，到第1000步时则变成十几个各自独立移动的小型环形滑翔体（图6）。

不对称性。当将每个滑翔机的矩阵替换为其对称部分（$M + M^\top$）/2，使每一对颜色以相同的力度相互吸引或排斥，并让主体从其保存状态开始，在空网格上单独运行时，七个主体都在 150 步以内停止，并稳定成圆形、静止不动的图案；它们的速度从 0.04–0.89 个元胞每步降至低于 0.02 个元胞每步。当进一步为每种颜色都指定默认核时，也会发生同样的情况。这正是矩阵变为对称矩阵时 Particle Life 中发生的现象，也是非互易相互作用理论所预测的结果 [18]–[23]。在使用对称矩阵和一个共享核时，吸引力是能量导数，质量会朝降低能量的方向运动，系统随之弛豫；而当一种颜色被另一种颜色吸引、却又受到后者排斥时，这样的一对不存在对应的能量，因此可以无限运动。该论证只有在使用共享核时才是严格成立的，而七个滑翔机中有五个并不使用共享核；但它们仍然全部停止了。作为对照，我们保留每个矩阵的对称部分，并将反对称部分替换为一个具有相同元素绝对值均值的随机部分；每个滑翔机进行两次实验：14 次运行中有 8 次主体以高于 0.02 个元胞每步的速度运动，其中一次（B5）的速度高于使用其自身矩阵时的速度，另外 6 次则停止。不对称性是产生运动的必要条件，但给定的主体并不会在任意非对称

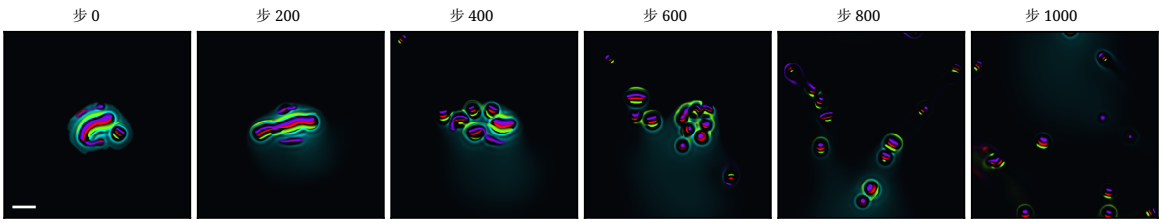

图6。滑翔体 B2 单独在空网格上运行 1000 步，显示在一个宽度为 360 个细胞、跟随质心移动的窗口中。该群体分裂成彼此分离的主体，而这些主体又分裂成能够自行运动的小型环形滑翔体。标尺长 40 个细胞。

矩阵下运动。B3 的矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} -0.27 & 0.16 & -0.90 & -0.88 \\ -0.61 & 0.09 & -0.29 & 0.65 \\ 0.84 & 0.00 & 0.65 & 0.16 \\ 0.49 & 0.70 & -0.04 & -0.16 \end{pmatrix},$$

图5 中将颜色 1 至 4 分别绘制为红色、绿色、青色和紫色。青色（颜色 3）被红色（颜色 1）吸引， $M_{31} = 0.84$，而红色受到青色排斥， $M_{13} = -0.90$：青色外壳稳定在红色核心后方的环距离处，核心离开该环，而外壳则跟随其后。紫色和绿色相互吸引， $M_{42} = 0.70$ 和 $M_{24} = 0.65$，保持在一起，并随主体运动。

第六节 讨论

对于构建此类模型的其他研究者而言，以下三个结果可能会有所帮助。首先，运动不需要生长项：质量守恒和非对称矩阵可以使随机规则产生滑翔体，而同一矩阵的对称部分会使其停止运动。其次，MaCE 权重指数的上限是动力学参数，而不仅仅是数值保护机制。单独运行 B3，并将上限设为 5、10、20、40 和 80 时，在上限为 20 之前，其速度始终保持为每步 0.16 个细胞；而 B0 的速度则随着上限降至 5，从每步 0.89 个细胞减慢至每步 0.67 个细胞。当上限超过 20 时，峰值浓度会增长：上限为 80 时，运行 300 步后达到初始值的 2.2–2.5 倍；随后 B3 加速，而 B0 分裂。第三， 3×3 输运本身并不会将运动限制在晶格上：旋转滑翔体也会旋转其朝向。

每种颜色都有自己的核，它决定其他颜色感知到的该颜色的势；同时也有自己在矩阵中的一行，决定它对每种其他颜色的吸引力。因此，每种颜色的行为都如同一个物种。滑翔体是物种集合。在 B3 中，一对颜色驱动着主体，其中一种被另一种吸引，而另一种则受到它的排斥；另一对彼此吸引的颜色随主体一起移动。

我们凭观察挑选了这120个已发布世界，而我们据以报告计数的48条规则样本数量较少，且取自手工选定的范围。在扰动后的初始状态下，滑翔体测量结果变化很小，但每个滑翔体都只是某个世界中的一个主体。输运被限制在 3×3 邻域内，因此没有主体会以每步超过一个元胞的速度移动；此外，该模型不存在 Lenia 所具有的那种连续极限。我们尚未将其动力学与使用相同矩阵的 Particle Life 的动力学进行比较，也尚未比较一步模拟的成本与粒子实现的成本。

VII. 结论

场生命将 Particle Life 的相互作用矩阵置于浓度场网格上，以环形核取代成对作用力，以质量守恒移动取代粒子运动。随机矩阵会产生有序区域、条纹和滑翔机；滑翔机沿直线运动，可以从各自的世界中提取出来，单独在空网格上运行。模拟和这120个世界均已发布；图7展示了其中另外六个。

致谢

本文在人工智能工具的协助下完成：Anthropic 的 Claude（多个模型版本） [26] 和 ClaudeCode 编码代理 [27],用于起草、语言润色、格式排版及代码辅助。作者审阅了所有由人工智能协助生成的文本和代码；实验结果、分析与结论均为作者本人的工作。

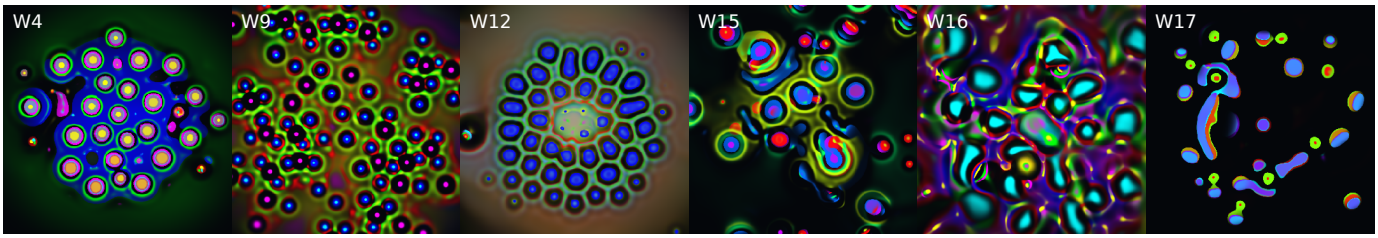

图7。另有六个已发布世界，用于展示该规则生成的图案范围；每个世界均以圆盘为初始状态运行2000步，并按照图1的方式绘制；每个面板都是世界中心周围的一个 384×384 窗口。全部120个世界均可在浏览器演示中运行。

参考文献

[1] J. Ventrella，“Clusters”，http://ventrella.com/Clusters/，2017，访问于2026年9月。[2] T. Mohr，“Particle Life”，https://particle-life.com，2022，访问于2026年9月。[3] L. Verlet，“关于经典流体的计算机‘实验’。I. Lennard-琼斯分子的热力学性质”，《物理评论》，第159卷，第1期，第98–103页，1967年。[4] C. W. Reynolds，“鸟群、兽群和鱼群：一种分布式行为模型”，ACM SIGGRAPH计算机图形学，第21卷，1987年，第25–34页。[5] T. Vicsek、A. Czir´ok、E. Ben-Jacob、I. Cohen 和 O. Shochet，“自驱动粒子系统中的新型相变”，《物理评论快报》，第75卷，第6期，第1226–1229页，1995年。[6] H. Sayama，“群体化学”，《人工生命》，第15卷，第1期，第105–114页，2009年。[7] S. Rafler，“将 Conway 的‘生命游戏’推广至连续域——SmoothLife”，2011年，arXiv:1111.1567。[8] M. Gardner，“数学游戏：John Conway 新版单人游戏‘生命’的奇妙组合”，《科学美国人》，第223卷，第4期，第120–123页，1970年。[9] B. W.-C. Chan，“Lenia：人工生命的生物学”，《复杂系统》，第28卷，第3期，第251–286页，2019年。[10] ——，“Lenia 与扩展宇宙”，载于《人工生命会议论文集》（ALIFE 2020）。麻省理工学院出版社，2020年，第221–229页。[11] A. Mordvintsev、E. Randazzo、E. Niklasson 和 M. Levin，“生长型神经元细胞自动机”，Distill，第5卷，第2期，2020年，doi:10.23915/distill.00023。[12] G. Hamon、M. Etcheverry、B. W.-C. Chan、C. Moulin-Frier 和 P.-Y. Oudeyer，“使用多样性搜索，在元胞自动机中发现感觉运动能动性”，《科学进展》，第11卷，第44期，2025年，文章编号 eadp0834。[13] E. Plantec、G. Hamon、M. Etcheverry、P.-Y. Oudeyer、C. Moulin-Frier 和 B. W.-C. Chan，“Flow-Lenia：通过质量守恒与参数局部化，迈向元胞自动机中的开放式进化”，载于《人工生命会议论文集》（ALIFE 2023）。麻省理工学院出版社，2023年。[14] V. Papadopoulos 和 E. Guichard，“MaCE：适用于元胞自动机的一般质量守恒动力学”，2025年，arXiv预印本 arXiv:2507.12306。[15] A. Mordvintsev、E. Niklasson 和 E. Randazzo，“Particle Lenia 与基于能量的表述”，Google Research 博客，https://google-research.github.io/self-organising-systems/particle-lenia/，2022年，访问于2026年9月。[16] C. M. Topaz、A. L. Bertozzi 和 M. A. Lewis，“生物聚集的非局域连续模型”，《数学生物学公报》，第68卷，第7期，第1601–1623页，2006年。[17] T. Kolokolnikov、H. Sun、D. Uminsky 和 A. L. Bertozzi，“二维粒子相互作用产生的环状图案的稳定性”，《物理评论E》，第84卷，文章编号015203，2011年。[18] A. V. Ivlev、J. Bartnick、M. Heinen、C.-R. Du、V. Nosenko 和 H. L¨owen，“牛顿第三定律不成立时的统计力学”，《物理评论X》，第5卷，文章编号011035，2015年。[19] J. Agudo-Canalejo 和 R. Golestanian，“化学相互作用粒子混合物中的活性相分离”，《物理评论快报》，第123卷，文章编号018101，2019年。[20] S. Saha、J. Agudo-Canalejo 和 R. Golestanian，“标量活性混合物：非互易 Cahn–Hilliard 模型”，《物理评论X》，第10卷，文章编号041009，2020年。[21] M. Fruchart、R. Hanai、P. B. Littlewood 和 V. Vitelli，“非互易相变”，《自然》，第592卷，第363–369页，2021年。[22] Z. You、A. Baskaran 和 M. C. Marchetti，“非互易性是产生行进态的一种普遍途径”，《美国国家科学院院刊》，第117卷，第33期，第19 767–19 772页，2020年。[23] F. Brauns 和 M. C. Marchetti，“守恒场的非互易图案形成”，《物理评论X》，第14卷，文章编号021014，2024年。[24] A. M. Turing，“形态发生的化学基础”，《伦敦皇家学会哲学汇刊B辑》，第237卷，第641期，第37–72页，1952年。[25] J. E. Pearson，“简单系统中的复杂图案”，《科学》，第261卷，第5118期，第189–192页，1993年。[26] Anthropic，“Claude”，https://www.anthropic.com/claude，2026年，访问于2026年11月。[27] ——，“Claude Code”，https://www.anthropic.com/claude-code，2026年，访问于2026年11月。