

基于对象进化规则的内稳态组织膜系统

罗跃国¹, 江 贇², 谭海军¹, 章 英¹, 范会联¹

(1. 长江师范学院计算机工程学院, 重庆 408100; 2. 重庆工商大学人工智能学院, 重庆 400067)

摘要: 膜系统通常也称为 P 系统, 是一类分布式并行计算模型. 本文提出了一种基于类组织膜系统的新变体——基于对象进化规则的内稳态组织膜系统. 在这类系统中, 去除了“环境中可以包含任意多份物质”这个条件, 并引入了对象进化规则. 通过模拟注册机, 证明了任何图灵可计算数都可通过该类膜系统产生. 为了建立容错性能更好的计算系统, 将时间无关的概念引入到这类系统中, 证明了在时间无关模式下, 构建的识别内稳态组织膜系统可以在线性时间内得到三着色问题统一解. 证明结果表明, 这类模型求解 NP 完全问题具有较好的计算效率.

关键词: 膜计算; 膜系统; 类组织膜系统; 时间无关; 内稳态

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)01-0100-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.013

Homeostasis Tissue P Systems with Object Evolutional Rules

LUO Yue-guo¹, JIANG Yun², TAN Hai-jun¹, ZHANG Ying¹, FAN Hui-lian¹

(1. College of Computer Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China;

2. School of Artificial Intelligence, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Membrane systems (also called P systems) are a class of distributed parallel computing models. In this work, a new variant of tissue P systems is proposed, called homeostasis tissue P systems with object evolutional rules, where there is no infinitely many objects in the environment. We prove that any Turing computable set of numbers can be generated by such a P system by simulating register machines. Moreover, we introduce the time-free method into such P systems and construct a time-free uniform solution in the framework of such recognizer P systems to solve the 3-coloring problem in linear time. It is proved that the system constructed in our work is effective to NP-complete problem.

Key words: membrane computing; P system; tissue P system; time-free; homeostasis

1 引言

作为自然计算的一个新分支以及迅速崛起的计算机科学研究领域, 膜计算由欧洲科学院院士 G Păun 创立于 1998 年. 膜系统中每个细胞都可以看成是一个独立的计算个体, 并且可以完成一些规定的计算. 因此, 从理论上讲, 膜系统是一个高度并行的计算系统. 研究表明, 膜系统的许多不同变体已被证明在计算数字、产生语言等方面是图灵通用的^[1-3]. 目前主要提出了三种基本类型的膜系统, 即类细胞膜系统、类组织膜系统和类神经 P 系统. 类细胞膜系统主要包括转移 P 系统、转运 P 系统和活性膜 P 系统等^[4]. 在类神经 P 系统方面, 现有的研究主要集中在脉冲神经膜系统 (简称 SNP 系统). 最近, 有学者提出了一些新的 SNP 系统计算模

型^[5,6]. 基于现有的 P 系统, 在算术运算应用方面也开展了不少工作^[7,8]. 对于膜系统, 其中一个重要工作就是研究膜系统的有效性, 分析系统能否在可行时间范围内求解 NP 难问题. 关于膜计算的基本介绍, 该领域的公开问题以及相关研究进展等可通过网站 <http://ppage.psystems.eu> 查看.

类组织膜系统是一类分布式并行的计算系统. 受到一些生物特征和生物现象的启发, 先后提出了一些类组织膜系统的变体^[9-11]. 在原始模型中, 对于环境中初始格局存在的对象, 在系统的运行过程中都假定每种对象的数量为无穷多. 这样, 环境可为细胞提供强大的物质能量支持. 因此, 环境在这类系统中发挥着十分重要的作用.

2 内稳态组织膜系统构建

从生物学角度来看,维持体内环境的稳定性是生物扩大环境耐受限度的一种主要机制.该机制称为“内稳态”^[12],即生物体减少对外界条件的依赖,使自身借助于内环境而相对独立于外界环境.受到该生物原理的启发,本文将“内稳态”引入类组织膜系统,去除了“环境中对象数量为无穷多”这个假设,细胞与环境之间尽量不发生物质交换.这样,整个组织系统减少了对环境的依赖,处于“内稳态”状态.于是,本文提出了一种类组织膜系统新的变体,称为基于对象进化规则的内稳态组织膜系统.另外,本文将使用促进剂的对象进化规则引入该模型中,单个对象可以在细胞内进化生成某些物质,从而为处于内稳态组织提供一定的物质能量.

定义 1 一个度为 m ($m \geq 1$) 的内稳态组织膜系统可表示如下

$$\Pi = (O, w_0, w_1, \dots, w_m, R, i_{\text{out}}),$$

其中:

O 为对象的字母表;

w_0 表示在初始状态出现在环境中的物质;

w_1, \dots, w_m 表示在初始状态下各个细胞内的对象多重集;

i_{out} 表示输出区域;

R 表示规则集合,这些规则包含 (a)、(b) 和 (c) 三种类型:

(1) (a) 类规则为通讯规则: $(i, u/v, j |_{\text{pro}})$, 其中 $i, j \in \{0, 1, \dots, m\}$, $i \neq j, u, v \in O^*$, $\text{pro} \in O, |uw| > 0, i$ 和 j 分别对应细胞 i 和细胞 j . 如果 $i=0$ 或者 $j=0$, 则对应的是环境. 当多重集 u 和促进剂 pro 同时出现在细胞 i 中, 而且多重集 v 出现在细胞 j 中, 这时, 多重集 u 从细胞 i 发送到细胞 j 中, 同时多重集 v 从细胞 j 发送到细胞 i 中. 如果没有促进剂的作用, 那么该规则可以表示为 $(i, u/v, j)$. 该类规则的长度为 $|u| + |v|$.

(2) (b) 类规则为对象进化规则: $[a \rightarrow b |_{\text{pro}}]_i$, 其中 $i \in \{1, \dots, m\}$, $a, \text{pro} \in O, b \in O^*$. 在促进剂 pro 的作用下, 一个对象会进化为一个多重集. 如果没有促进剂的作用, 可表示为 $[a \rightarrow b]_i$. 该类规则的长度为 $|a| + |b|$.

(3) (c) 类规则为细胞分裂规则: $[a]_i \rightarrow [b]_i [c]_i$, 其中 $i \in \{1, \dots, m\}$, $a, b, c \in O, i \neq i_{\text{out}}$. 该规则使原始细胞分裂为两个具有相同标签的细胞. 在这两个新产生的细胞中, 对象 a 被分别替换成对象 b 和 c , 同时原始细胞中的其它物质分别复制到新产生的细胞中.

对于一个度为 m 的内稳态组织膜系统, 可以看做由 m 个细胞作为图的顶点, 初始格局由细胞中的多重集 w_1, \dots, w_m 以及环境中的对象多重 (w_0) 来表示. 在膜

系统计算过程中, 各个细胞内以及环境中的对象多重集描述了当前格局. 系统从初始格局开始运行, 通过执行相应的规则, 系统格局将发生转移进而实现计算. 如果在某个时刻, 没有任何规则可应用于当前格局中的对象, 而且没有执行之中的规则, 则计算停止. 这时, 计算结果会出现在输出区域. 系统在每个区域中以非确定性极大并行的方式应用规则, 即在每个计算步, 通过非确定性方式应用最大的规则集合.

定义 2 一个识别内稳态时间组织膜系统可以定义成如下形式

$$\Pi = (O, \Sigma, w_0, w_1, \dots, w_m, R, e, i_{\text{in}}, i_{\text{out}}),$$

其中: Σ 表示输入字母表, $\Sigma \cap w_0 = \emptyset$; e 是规则有限集合中规则执行时间的映射; $i_{\text{in}} \in \{1, 2, \dots, m\}$ 表示输入细胞; i_{out} 是输出区域, 用来保存最后的计算结果. 工作字母表中包含两种物质 yes 和 no , 当系统停止时, 其中的一种物质必定会出现在输出区域 i_{out} 中. 对于该定义中的 $O, w_0, w_1, \dots, w_m, R$ 表示的内容与定义 1 相同.

对于输入字母 Σ 上的多重集 w , 具有输入 w 的系统从以下形式开始计算:

$$(w_0, w_1, \dots, (w_{i_{\text{in}}} + w), \dots, w_m)$$

时间膜系统是一类容错性能较好的计算系统, 其中每条规则的执行时间长短是任意的, 并用规则启动步 (rule starting step, 简称 RS 步) 来刻画系统的计算效率. 最近, 部分文献对各类膜系统在时间无关模式下求解 NP 难问题进行了研究^[13,14].

对于所有决策问题的集合, 用 $\text{PMC}_{\text{TF-HTPOER}(k)}$ 表示可以通过识别内稳态组织膜系统在多项式时间内得到其时间无关的统一解. 其中, 对象进化规则和通讯规则最大长度为 k .

3 内稳态时间组织膜系统求解三着色问题

3.1 在时间无关模式下构造三着色问题的统一解

定义 3 三着色问题可表述为: 对于一个无向图 $G = (V, E)$, 每个顶点用 $\{R, G, B\}$ 来表示颜色. 其中 R, G 和 B 分别代表红色, 绿色和蓝色. 用函数 $f(x)$ 表示图中顶点 x 的颜色, 如果对所有的边 $\{u, v\} \in E$ 都有 $f(u) \neq f(v)$, 则该图是可三着色的. 否则, 图中不存在一个有效的三着色, 则该图是不可三着色的.

定理 1 三着色问题可以在线性 RS 步内通过一族识别内稳态时间组织膜系统得到时间无关的统一解.

证明 考虑一个包含 n 个顶点 m 条边的无向图 $\gamma = (V, E)$, 其中, $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 表示该无向图中的顶点, $\{v_i, v_j\} \in E$ 表示图中的边.

构造的系统如下:

$$\Pi_{3\text{-COL}(m,n)} = (O, \Sigma, w_0, w_1, w_2, R, e, i_{\text{in}}, i_{\text{out}}),$$

其中

O 为字母表:

$$O = \Sigma \cup \{R_i, T_i, G_i, B_i, R'_i, R''_i, G'_i, G''_i, B'_i, B''_i, \\ P'_i, Q'_i, R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}, 1 \leq i \leq j \leq n\} \\ \cup \{A_i | 1 \leq i \leq n+1\} \cup \{C_k | 1 \leq k \leq m+1\} \\ \cup \{a_0, d, d', t, \text{yes}, \text{no}\}.$$

其中,对象 R_i 表示顶点为红色,对象 G_i 表示顶点为绿色,对象 B_i 表示顶点为蓝色; R_{ij} 用于检查顶点 v_i 和 v_j 是否都为红色(G_{ij} 和 B_{ij} 分别对应检查图中两个顶点是否为绿色和蓝色);

$\Sigma = \{D_{ij} | D_{ij} \in E, 1 \leq i \leq j \leq n\}$ 为在 O 内的输入字母表,其中总共有 m 条边;

$$w_0 = \lambda; w_1 = \text{yes}, \text{no}; w_2 = A, C, d;$$

$i_{\text{in}} = 2$ 是输入细胞; $i_{\text{out}} = 0$ 是输出区域;

R 是下面的规则集合:

产生阶段:

$$R_{1,i}: [A_i]_2 \rightarrow [R_i]_2 [T_i]_2, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{2,i}: [T_i]_2 \rightarrow [G_i]_2 [B_i]_2, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{3,i}: [R_i \rightarrow a_0 R'_i R''_i]_2, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{4,i}: [G_i \rightarrow a_0 G'_i G''_i]_2, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{5,i}: [B_i \rightarrow a_0 B'_i B''_i]_2, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{6,i}: (2, R'_i / \lambda, 1), 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{7,i}: (2, G'_i / \lambda, 1), 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{8,i}: (2, B'_i / \lambda, 1), 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{9,i}: [G'_i \rightarrow P'_i |_{R'_i}]_1, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{10,i}: [B'_i \rightarrow Q'_i |_{P'_i}]_1, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{11,i}: [Q'_i \rightarrow A_{i+1}^3]_1, 1 \leq i \leq n.$$

$$R_{12,i}: (2, a_0 / A_i, 1), 2 \leq i \leq n+1.$$

检测阶段:

$$R_{13,i,j}: [D_{ij} \rightarrow t R_{ij} B_{ij} G_{ij} |_{A_{i+1}}]_2, 1 \leq i \leq j \leq n.$$

$$R_{14,k}: [C_k \rightarrow C_{k+1} |_{t}]_2, 1 \leq k \leq m.$$

$$R_{15}: [t \rightarrow \lambda]_2.$$

$$R_{16}: (2, d / \lambda, 1 |_{C_{m+1}}).$$

$$R_{17,i,j}: (2, C_{m+1} R_{ij} R''_i R''_j / \lambda, 1), 1 \leq i \leq j \leq n.$$

$$R_{18,i,j}: (2, C_{m+1} G_{ij} G''_i G''_j / \lambda, 1), 1 \leq i \leq j \leq n.$$

$$R_{19,i,j}: (2, C_{m+1} B_{ij} B''_i B''_j / \lambda, 1), 1 \leq i \leq j \leq n.$$

$$R_{20}: [d \rightarrow d']_1.$$

$$R_{21}: (2, C_{m+1} / d', 1).$$

输出阶段:

$$R_{22}: (1, \text{no} / \lambda, 0).$$

$$R_{23}: (2, d' / \text{yes}, 1).$$

$$R_{24}: (2, \text{yes} / \text{no}, 0).$$

下面对以下三个计算过程做简要的分析.

(1) 产生阶段

对于给定的具有 n 个顶点 m 条边的无向图, 设第 i 个顶点用变量 x_i 表示, $1 \leq i \leq n$. 第一步, 系统开始运行, 在细胞 2 中对象 A_1 的作用下, 应用分裂规则 $R_{1,1}$ 将细胞

2 分裂为两个具有相同标签的新细胞, 并在这两个细胞中产生新的对象 R_1 和 T_1 . 在第一步, 除了应用规则 $R_{1,1}$ 之外, 规则 $R_{2,2}$ 也开始执行. 因此这个过程仅仅需一个 RS 步. 然后, 使用分裂规则 $R_{2,1}$ 再次将包含对象 T_1 的细胞 2 分裂并产生对象 G_1 和 B_1 . 这样, 就会产生 3 个细胞, 产生的对象 R_1, G_1 和 B_1 对应着图中顶点 x_1 三种可能的着色. 规则从 $R_{3,1}$ 到 $R_{5,1}$ 将产生的这三个对象分别进化为多重集 $a_0 R'_1 R''_1, a_0 G'_1 G''_1$ 和 $a_0 B'_1 B''_1$.

规则从 $R_{6,1}$ 到 $R_{8,1}$ 将细胞 2 中生成的对象 R'_1, G'_1 和 B'_1 分别送入细胞 1 中. 由于系统在时间无关模式下工作, 产生这三个对象的规则(从 $R_{3,1}$ 到 $R_{5,1}$) 可能不是同时执行结束的, 因此这里的规则从 $R_{6,1}$ 到 $R_{8,1}$ 并不是同时开始执行的, 总共需要 3 个 RS 步.

规则 $R_{9,1}$ 和 $R_{10,1}$ 在相关促进剂作用下才能执行. 最后, 如果生成了对象 Q'_1 , 则说明细胞 1 中出现了对象 R'_1, G'_1 和 B'_1 , 即规则从 $R_{6,1}$ 到 $R_{8,1}$ 已经全部执行结束. 因此, 规则 $R_{9,i}$ 和 $R_{10,i}$ 具有规则同步功能. 接下来, 通过执行规则 $R_{11,1}$, 对象 Q'_1 进化为三份对象 A_2 , 然后再使用规则 $R_{12,2}$. 在下一步系统执行规则 $R_{1,2}$, 开始了变量 x_i 的下次循环. 该系统以循环的方式执行上述过程, 直到所有顶点对应的变量循环计算过程执行结束. 对于第 i 次循环, 整个计算过程中规则的执行过程如图 1 所示.

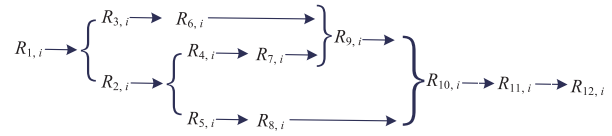


图1 每次循环中规则的执行过程

总的来说, 系统经过 $10n$ 个 RS 步后, 产生阶段将执行结束. 此时, 将会产生 3^n 份标签为 2 的细胞.

(2) 检测阶段

当对象 A_{n+1} 出现在标签为 2 的细胞中时, 说明产生阶段的所有规则已经执行结束. 这时, 在促进剂 A_{n+1} 的作用下, 规则 $R_{13,i,j}$ 开始执行. 该规则中的 D_{ij} 对应 m 条边, 由此可得出规则 $R_{13,i,j}$ 包含 m 条规则. 因此, 此时共有 m 条规则同时开始执行, 将对象 D_{ij} 进化为多重集 $tR_{ij} B_{ij} G_{ij}$. 每完成规则 $R_{13,i,j}$ 中的一条规则, 就会产生一份对象 t . 在对象 t 的作用下, 规则 $R_{14,k}$ 和 R_{15} 同时开始执行, 每次执行将实现 C_k 的下标加 1. 该过程循环执行, 最终细胞 2 中会产生对象 C_{m+1} , 从而使规则 R_{16} 以及规则 $R_{17,i,j}, R_{18,i,j}$ 和 $R_{19,i,j}$ 同时开始执行. 如果图中任何一条边上的两个顶点是同一种颜色(红色, 蓝色或者绿色), 对于每个细胞 2 中, 就会选择规则 $R_{17,i,j}, R_{18,i,j}$ 和 $R_{19,i,j}$ 中的某一条开始执行. 当规则 R_{16} 执行结束, 规则 R_{20} 开始执行, 将细胞 1 中的对象 d 进化为对象 d' . 此时, 如果任

何一个细胞 2 中存在对象 C_{m+1} , 则说明该细胞对应的解是一个有效解. 因此, 规则 R_{21} 开始执行, 使得细胞 2 中出现对象 d' . 总的来说, 整个检测阶段最多需要 $m+4$ 个 RS 步.

(3) 输出阶段

当检测阶段以及规则 R_{22} 执行结束时, 将会有以下两种情况.

肯定的答案: 图中存在一个有效三着色. 如果在任意一个细胞 2 中出现对象 d' , 则说明该细胞对应的解是一个有效解. 最终, 物质 yes 发送到环境中. 整个输出阶段最多需要 2 个 RS 步.

否定的答案: 图中不存在一个有效三着色. 在这种情况下, 规则 R_{23} 和 R_{24} 均不会执行. 最终, 当系统停止时, 对象 no 仍然在环境中, 该过程不需要 RS 步.

3.2 主要结论

对于具有 n 个顶点和 m 条边的三着色问题, 构造 $\Pi_{3\text{-COL}(m,n)}$ 的统一算法必要资源可以表示如下:

物质的数量: $4m + 13n + 8$;

初始细胞的数量: 2;

初始物质的数量: 5;

规则总数: $5m + 12n + 7$;

规则的最大长度: 5.

如果图中存在一个有效三着色, 则在最多 $10n + m + 6$ 个 RS 步后, P 系统将停止工作; 如果图中不存在一个有效三着色, 则在最多 $10n + m + 4$ 个 RS 步之后, P 系统将停止工作. 显然, 系统的整个计算是时间无关线性有界的, 三着色问题可以通过一族内稳态时间组织膜系统在线性 RS 步内以时间无关的方式解决.

定理 2 $3\text{-COLORING} \in \text{PMC}_{\text{TF-HTPOER}(5)}$.

4 内稳态组织膜系统的通用性证明

定理 3 $\text{NOP}_1((a), (b)) = \text{NRE}$.

证明 下面通过模拟注册机证明内稳态组织膜系统的通用性, 其中仅针对标准膜系统下使用规则类型为 (a) 和 (b) . NOP_n 表示系统产生的自然数集合族, 其中 n 表示初始细胞数量. 设有通用的带 m 个注册器的注册机 $M = (m, H, l_0, l_h, I)$, 产生的数存储在注册器 1 中. 另外, 假定注册器 1 中没有加法指令, 并且当计算结束的时候, 除注册器 1 外, 其它注册器均为空. 系统构造如下

$$\Pi = (O, w_0, w_1, R, i_{\text{out}}),$$

其中:

$$O = \{ a_r \mid 1 \leq r \leq m \} \cup \{ l, l', l^{(2)}, l^{(3)}, l^{(4)}, l^{(5)} \mid l \in H \};$$

$$w_0 = \lambda;$$

$$w_1 = \{ l^{(4)} \mid l \in H \};$$

$$i_{\text{out}} = 1.$$

下面将构造规则集合 R .

(1) 对于每条加法指令 $l_i: (\text{ADD}(r), l_j, l_k)$, 指令集合构造如下:

$$R_1: [l_i \rightarrow a_r l_j]_1.$$

$$R_2: [l_i \rightarrow a_r l_k]_1.$$

下面模拟加法指令 l_i . 系统在某一步, 系统非确定性地选择规则 R_1 或者规则 R_2 , 对象 l_i 进化为多重集 al_j 或 al_k , 将会在该细胞中生成一份对象 a , 使得对象 a 的数量加 1, 从而实现了加法指令 l_i 的要求. 同时, 随机生成了 l_j 或 l_k , 系统开始模拟下一条指令.

(2) 对于每条减法指令 $l_i: (\text{SUB}(r), l_j, l_k)$, 指令集合 I 构造如下:

$$R_3: [l_i \rightarrow l'_i]_1.$$

$$R_4: [l'_i \rightarrow l_i^{(2)} l_i^{(3)}]_1.$$

$$R_5: (1, l_i^{(4)} / \lambda, 0 | l'_i).$$

$$R_6: (1, l_i^{(2)} a_r / l_i^{(4)}, 0).$$

$$R_7: [l_i^{(3)} \rightarrow l_i^{(5)}]_1.$$

$$R_8: [l_i^{(4)} \rightarrow l_j | l_i^{(5)}]_1.$$

$$R_9: [l_i^{(2)} \rightarrow l_k | l_i^{(5)}]_1.$$

$$R_{10}: [l_i^{(5)} \rightarrow l_i^{(4)}]_1.$$

下面开始模拟减法指令 l_i . 系统在某一步, 通过应用规则 R_3 , 对象 l_i 进化为 l'_i , 然后应用规则 R_4 再进化为多重集 $l_i^{(2)} l_i^{(3)}$. 一旦系统中产生了对象 l'_i , 这时该对象作为促进剂, 规则 R_5 开始执行, 对象 $l_i^{(4)}$ 将出现在环境中. 这样, 将可能出现以下两种情况:

当对减法指令 l_i 开始模拟时, 在细胞 1 中至少存在一个对象 a . 在这种情况下, 规则 R_6 和 R_7 同时执行. 这样, 在细胞 1 中就会得到对象 $l_i^{(4)}$ 和 $l_i^{(5)}$. 因此, 在下一个计算步, 规则 R_8 就会开始执行: 在促进剂 $l_i^{(5)}$ 的作用下, 对象 $l_i^{(4)}$ 进化为 l_j . 同时, 通过执行规则 R_{10} , 促进剂 $l_i^{(5)}$ 消耗后进化为对象 $l_i^{(4)}$, 以保证下一次模拟中细胞 1 中存在对象 $l_i^{(4)}$. 这样, 系统开始模拟指令 l_j .

当对减法指令 l_i 开始模拟时, 在细胞 1 中没有对象 a . 在这种情况下, 规则 R_6 不会执行, 只执行规则 R_7 , 对象 $l_i^{(3)}$ 进化为 $l_i^{(5)}$. 因此, 在下一个计算步, 规则 R_9 就会开始执行: 在促进剂 $l_i^{(5)}$ 的作用下, 对象 $l_i^{(2)}$ 进化为 l_k . 同时, 通过执行规则 R_{10} , 促进剂 $l_i^{(5)}$ 消耗后进化为对象 $l_i^{(4)}$, 以保证下一次模拟中细胞 1 中存在对象 $l_i^{(4)}$. 这样, 系统开始模拟指令 l_k .

因此, 系统可以正确的模拟 M 中的加法指令和减法指令. 最后, 系统将停止计算. 这时, 对象 l_h 出现在细胞 1 中.

5 总结

本文提出了一种类组织膜系统新的变体, 该方法

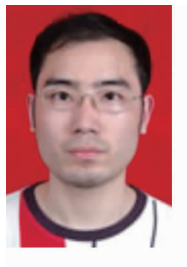
也可用于图论中其它类似问题的求解,例如哈密尔顿路径问题,顶点覆盖问题,最大团问题等等.

下面对今后的工作进行展望. 通过本文的模型,求解 PSPACE 完全问题的计算效率还有待进一步研究. 另外,是否能将内稳态的概念扩展到其它膜系统,例如脉冲神经膜系统,还值得进一步研究. 本文提出的内稳态组织膜系统包含了通讯规则和对象进化规则,同时还引入了促进剂. 如果该模型中没有促进剂的作用,其计算效率和计算能力还有待进一步研究,特别是在时间无关模式下求解一些 NP 完全问题还值得进一步研究.

参考文献

- [1] Pan L, Păun G. Spiking neural P systems with anti-spikes [J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2009, 4(3): 273 – 282.
- [2] Zeng X, Xu L, Liu X, et al. On languages generated by spiking neural P systems with weights [J]. *Information Sciences*, 2014, 278(10): 423 – 433.
- [3] Zeng X, Zhang X, Song T, et al. Spiking neural P systems with thresholds [J]. *Neural Computation*, 2014, 26(7): 1340 – 1361.
- [4] Păun G. Introduction to membrane computing [A]. *Proceedings of Brainstorming Workshop on Uncertainty in Membrane Computing* [C]. Palma de Mallorca, España, 2004. 1 – 42.
- [5] Cabarle F G C, Adorna H N, Jiang M, et al. Spiking neural P systems with scheduled synapses [J]. *IEEE Trans Nanobioscience*, 2017, doi: 10. 1109/TNB. 2017. 2762580.
- [6] Song T, Rodriguez-Paton A, Zheng P, et al. Spiking neural P systems with colored spikes [J]. *IEEE Transactions on Cognitive & Developmental Systems*, 2017, doi: 10. 1109/TCDS. 2017. 2785332.
- [7] Guo P, Chen H, Zheng H. Arithmetic expression evaluations with membranes [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 23(1): 55 – 60.
- [8] Liu X, Li Z, Liu J, et al. Implementation of arithmetic operations with time-free spiking neural P systems [J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2015, 14(6): 617 – 624.
- [9] Freund R, Păun G, Pérez-Jiménez M J. Tissue P systems with channel states [J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 330(1): 101 – 116.
- [10] Song B, Pan L, Pérez-Jiménez M J. Tissue P systems with protein on cells [J]. *Fundamenta Informaticae*, 2016, 144(1): 77 – 107.
- [11] Song B, Pan L. The computational power of tissue-like P systems with promoters [J]. *Theoretical Computer Science*, 2016, 641: 43 – 52.
- [12] Tamori Y, Deng W M. Compensatory cellular hypertrophy: the other strategy for tissue homeostasis [J]. *Trends in Cell Biology*, 2014, 24(4): 230 – 237.
- [13] Song T, Macias-Ramos L, Pan L. Time-free solution to SAT problem using P systems with active membranes [J]. *Theoretical Computer Science*, 2014, 529: 61 – 68.
- [14] Song B, Song T, Pan L. A time-free uniform solution to subset sum problem by tissue P systems with cell division [J]. *Mathematical Structures in Computer Science*, 2017, 27(01): 17 – 32.

作者简介



罗跃国(通信作者) 男, 1979 年生于四川古蔺, 计算机科学与技术专业博士, 现为长江师范学院计算机工程学院实验师. 研究方向为膜计算、数据挖掘.
E-mail: ygluo@cqu.edu.cn



江 贇 女, 1983 年生于湖北红安, 系统分析与集成专业博士, 现为重庆工商大学人工智能学院副教授. 长期从事膜计算、进化算法等方面的工作.