

文章编号:1671-4229(2021)01-0034-10

带通道状态通讯膜系统的研究综述

宋勃升, 李艳艳, 曾湘祥*

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 膜计算是一种生物启发式计算,其来源于对活细胞组织或器官结构及其功能的抽象模拟. 细胞间最多建立一条链接,这条链接又称为突触,突触上有与其相关的通道状态. 因此,根据此生物现象,提出了一种新型的计算模型:带有通道状态的通讯膜系统. 这类膜系统是一类分布式并行计算模型,系统中细胞间的通讯主要依赖于细胞膜通道上同向/异向转运规则的使用,其中每个通道上的规则以一种串行的方式执行,且通道上的状态用来控制细胞间或细胞与环境间的通讯. 文章根据带通道状态的同向/异向转运规则对细胞型通讯膜系统、组织型通讯膜系统,带有细胞分裂和通道状态的细胞型识别通讯膜系统及带有细胞分裂和通道状态的组织型识别通讯膜系统的概念分别进行了介绍,并说明了这些系统的计算能力以及计算复杂性. 最后进行了总结并给出了未来展望.

关键词: 膜计算; 通道状态; 通讯膜系统; 同向/异向规则; 通用性

中图分类号: TP 301

文献标志码: A

A survey of communication membrane systems with channel states

SONG Bo-sheng, LI Yan-yan, ZENG Xiang-xiang*

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Membrane computing is a kind of biological heuristic computation, which is abstracted from the structure and function of the tissue or organ in living cells. Between two cells at most one link is established, also known as synapses. Synapses have channel states associated with them. Therefore, based on this biological phenomenon, a new type of computing model is proposed: A communication membrane system with channel states. Communication P systems with channel states are a class of distributed parallel computing models, the communication of this kind of P system mainly depends on the symport/antiport rules, where the rules on each channel are executed in a sequential manner, and the state on the channel is used to control the communication between two cells or between a cell and the environment. This work summarizes the conception of cell-like communication P systems, tissue-like communication P systems, cell-like recognizer communication P systems, tissue-like recognizer communication P systems according to the symport/antiport rule with channel states, and the computational power and computational complexity of this type of system are explained. Finally, a summary and a future outlook are given.

Key words: membrane computing; channel states; communication membrane systems; symport/antiport rules; universality

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61972138, 61872309); 中央高校基本科研业务费资助项目(531118010355); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4215); 长沙市重点研发计划资助项目(kq2004016).

作者简介: 宋勃升(1986—),男,副教授,博士. E-mail: boshengsong@hnu.edu.cn

* 通信作者. E-mail: xzeng@foxmail.com

引文格式: 宋勃升, 李艳艳, 曾湘祥. 带通道状态通讯膜系统的研究综述[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2021, 20(1): 34-43.

在生物启发式计算或者自然计算的领域内,存在一个快速发展的分支:膜计算,由欧洲科学院院士 Păun^[1] 于 1998 年在芬兰图尔库计算机科学中心访学时首次提出,它是从活细胞的组织和器官的结构以及功能中抽象出来的. 膜系统(又称为 P 系统)是膜计算研究中计算模型的统称,它们是分布式和并行计算设备. 根据活细胞内部的真实膜结构,许多类型的膜系统已经被提出^[2-5],主要有两类 P 系统:细胞型 P 系统^[1,4](一个细胞中的膜是以一个层次结构排列)和组织型 P 系统^[4,6],或者神经型 P 系统^[7](如一个组织或一个神经网络置于任意图节点中的膜结构). 根据生物活细胞具有不同的生物特征,研究者们又提出了许多新型的膜系统,例如,带催化剂的膜系统^[8]、带促进剂/抑制剂的膜系统^[9]和剪切膜系统^[10]等.

膜计算的研究课题主要聚焦在理论分析和现实生活问题的应用上. 一方面,随着各种 P 系统的引入,许多不同种类 P 系统的计算能力以及计算复杂性已经被深入地研究^[11-15]. 结合计算机科学中的基本概念,在理论推导中,学者们设计了各种不同的规则执行方式,例如,串行模式^[16]、极小并行模式^[17]、极大并行模式^[18]和扁平极大并行模式^[19]. 在理论分析方面,主要通过图灵机比较来证明多数膜系统是具有图灵完备性的,即这些 P 系统的计算能力与通用图灵机等价^[20-24]. 同时,受细胞膜的分离、分裂以及生成等生物活动的启发,膜系统中存在细胞分离^{[1]①}、细胞分裂^[25]以及细胞生成^[26]等规则,通过这些规则的使用,细胞可以生成指数多个细胞,通过以空间换取时间的方式有效地求解 NP 完全问题^[27-29]以及 PSPACE 完全问题^[30-34]. 另一方面,研究膜计算的实际应用也非常有趣^[35-37],例如,P 系统可以应用到生物系统和合成生物学^[38]中,可以改进人工智能算法^[39-43],还可以用于电路系统的设计以及生态系统的建模^[44-45]. 关于 P 系统的详细信息,读者可以查阅文献[46]. 更详尽的细节以及最新的参考资料可以在网址 <http://ppage.psyste.ms.eu>

上找到.

通讯 P 系统是一类受活细胞中物质跨膜移动的生物现象启发而得来的膜系统,最早提出是在文献[47]中. 这类 P 系统是一类通过使用同向/异向转运规则代替进化规则的计算模型,其中,同向转运规则的形式是 (u, in) 或者 (u, out) ,异向转运规则的形式是 $(u, out; v, in)$. 该类 P 系统的计算理论研究广泛,比如计算能力^[48-50],计算有效性^[51]和生成语言的能力^[52].

膜计算中有一类通讯 P 系统被提出并且得到了深入的研究,这里称为带有通道状态的通讯 P 系统,其中,通道上的状态用来控制细胞间的通讯以及细胞与环境间的通讯. 对于通讯,如果从不同的角度来看,那么会有两种情况:其一,细胞间会有与状态相关的链接,并且细胞会使用这些状态来控制细胞间的通讯;其二,通讯的完成通过同向/异向规则的使用. 本文主要围绕着带有通道状态的通讯 P 系统. 首先,对带有通道状态的细胞型通讯 P 系统,带有通道状态的组织型通讯 P 系统以及带有通道状态的识别通讯 P 系统的基本概念进行了简单的介绍;其次,对这两类通讯 P 系统的计算能力和计算复杂性分别进行了概述;最后,给出了对这类通讯 P 系统的总结以及对未来的展望.

1 带有通道状态通讯膜系统的基本概念

本节主要介绍带有通道状态的细胞型和组织型通讯 P 系统的概念,模型中涉及有关形式语言的知识,读者可以参考文献[53].

1.1 带有通道状态的通讯膜系统

带有通道状态的细胞型通讯膜系统是由 Song 等^[54]首次提出的,该模型使用的是带有通道状态的同向/异向转运规则,且规则以极大并行的方式执行,具体概念如下.

定义 1 一个度为 $q \geq 1$ 的带有通道状态的细胞型通讯膜系统是一个元组

① Sosík P, Cienciala L. Computational power of cell separation in tissue P systems[J]. Information Sciences, 2014, 279: 805-815.

$\Pi = (\Gamma, K, \varepsilon, \mu, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, s_1, \dots, s_q, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_q, i_{out})$,

其中:

- Γ 是一个有限字母表, $\varepsilon \subseteq \Gamma$;
- K 是一个状态字母表(与 Γ 的交集为空);
- μ 是一个含有 q 个节点的根树, 用 $1, \dots, q$ 来标记;
- $\mathcal{M}_i (1 \leq i \leq q)$ 是 Γ 上的有限多重集;
- $s_i (1 \leq i \leq q)$ 是通道状态;
- $\mathcal{R}_i (1 \leq i \leq q)$ 是具有如下形式的有限规则集合:
 - 同向规则: $(s, (u, out), s')$ 或 $(s, (u, in), s')$, $s, s' \in K, u \in \Gamma^+$;
 - 异向规则: $(s, (u, out; v, in), s')$, $s, s' \in K, u, v \in \Gamma^+$;
- $i_{out} \in \{0, 1, \dots, q\}$.

规则 $(u, out), (u, in)$ (或 $(u, out; v, in)$) 的长度定义为 $|u|$ (或 $|u| + |v|$).

笔者注意到一个非常重要的限制是两个相邻区域之间最多一个通道, 每个步骤的状态都来自于 K . 这个不会限制相邻区域间的通讯, 因为一个通道的两个方向上都允许物质的移动.

如果膜 i 和它的父区域 $p(i)$ 之间的通道状态为 s , 且膜 i 中包含多重集合 u , 那么此时在格局中应用一条同向规则 $(s, (u, out), s')$. 当这样一条同向转运规则被应用时, 多重集合 u 被发送到区域 $p(i)$, 且区域 i 和区域 $p(i)$ 之间的通道状态从 s 变为 s' .

如果膜 i 和它的父区域 $p(i)$ 之间的通道状态为 s , 且区域 $p(i)$ 中包含多重集合 u , 那么此时在一个格局中应用一条同向转运规则 $(s, (u, out), s')$. 当这样一条规则被应用时, 多重集合 u 将从区域 $p(i)$ 进入膜 i 中, 且区域 i 与区域 $p(i)$ 之间的通道状态由 s 变为 s' .

如果膜 i 和它的父区域 $p(i)$ 之间的通道状态为 s , 且膜 i 中包含多重集合 u , 同时膜 i 的父区域中包含多重集合 v , 那么此时在一个格局中应用一条反向转运规则 $(s, (u, out; v, in), s')$. 当使用这样一条规则时, 多重集合 u 从膜 i 发送到区域 $p(i)$, 同时, 多重集合 v 从区域 $p(i)$ 发送到膜 i , 且区域 i 与区域 $p(i)$ 之间的通道状态由 s 变为 s' .

已经证明了该类型 P 系统具有图灵通用性.

除此之外, 学者们还提出了具有细胞分裂的带有通道状态的细胞型 P 系统^[55], 同样已经证明具有图灵通用性, 且此类型膜系统还可以解决哈密顿回路问题.

带有通道状态的组织型通讯 P 系统是由 Freund 等^[56]首次提出的, 该模型使用的是带有通道状态的同向/异向转运规则, 且规则以极大并行的方式执行, 具体概念如下.

定义 2 一个度为 $q \geq 1$ 的带通道状态的组织型通讯膜系统是一个元组

$\Pi = (\Gamma, T, K, \varepsilon, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, ch, (s_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, (R_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, \mathcal{R}, i_{out})$,

其中:

- Γ 是一个有限字母;
- $T \subseteq \Gamma$ 是一个结束物质的字母表;
- K 是一个状态的字母表;
- $\varepsilon \subseteq \Gamma$ 是初始时刻位于环境中的物质集合, 所有可用的物质都有任意多的数量;
- $\mathcal{M}_i (1 \leq i \leq q)$ 是初始位于系统 q 个细胞中的对象多重集;
- $ch \subseteq \{(i, j) \mid i, j \in \{0, \dots, q\}, i \neq j\}$ 是细胞间通道或细胞与环境间通道的集合, 在 ch 中最多出现 $(i, j), (j, i)$ 其中之一(0 标记环境);
- $R_{(i,j)}$ 是具有如下形式的有限规则集合(与通道 $(i, j) \in ch$ 有关):
 - 同向规则: $(s, u/\lambda, s')$, $s, s' \in K, u \in \Gamma^+$;
 - 异向规则: $(s, u/v, s')$, $s, s' \in K, u, v \in \Gamma^+, |u| > 0, |v| > 0$;
- $i_{out} \in \{0, 1, \dots, q\}$.

笔者注意到一个重要的限制是两个已给细胞之间最多存在一条通道, 通道以有序对 (i, j) 的形式给出, 并且通道上有来自于 K 的状态. 这个不会限制两个细胞间或者细胞和环境之间的通讯, 因为通道上的两个方向都允许物质的移动. 规则 $(s, u/\lambda, s'), (s, \lambda/u, s')$ 或者 $(s, u/v, s')$ 的长度分别为 $|u|$ 和 $|u| + |v|$.

如果区域 i 和区域 j 之间通道的状态为 s , 且区域 i 包含对象的多重集合 u , (或者区域 j 包含对象的多重集合 u), 那么此时在一个格局中使用同向规则 $(s, u/\lambda, s') \in R_{i,j}$ (或 $(s, \lambda/u, s') \in R_{i,j}$). 当使用这样的规则时, 多重集合 u 被发送到区域 j

(或者区域 i), 且区域 i 和区域 j 之间的通道状态由 s 变为 s' .

如果区域 i 和区域 j 之间通道的状态为 s , 且区域 i 包含对象的多重集合 u , 同时区域 j 包含对象的多重集合 v , 那么此时在一个格局中使用异向规则 $(s, u/v, s') \in R_{i,j}$. 当使用这样的规则时, 多重集合 u 将从区域 i 发送到区域 j , 多重集合 v 将从区域 j 发送到区域 i , 且区域 i 和区域 j 之间的通道状态由 s 变为 s' .

已经证明该系统具有图灵通用性. 除此之外, 学者们还提出了带有细胞分裂的带通道状态的组织型通讯 P 系统, 单向^[57-59]带有细胞分裂带通道状态的组织型通讯 P 系统^[60], 它们不仅具有图灵通用性, 而且可以解决 NP 完全问题.

下面将介绍带有细胞分裂和通道状态的通讯 P 系统以及相应的识别 P 系统的基本概念.

1.2 带细胞分裂和通道状态的通讯膜系统

定义 3 一个度为 $q \geq 1$ 的带细胞分裂和通道状态的细胞型通讯膜系统是一个元组

$$\Pi = (\Gamma, K, \varepsilon, \mu, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, s_1, \dots, s_q, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_q, i_{out}),$$

其中:

- Γ 是一个物质 (或符号) 的字母表, 又称为一个有限非空集合;
- K 是一个通道状态的字母表, 表示一个有限非空集合且 $\Gamma \cap K = \emptyset$;
- ε 是 Γ 的一个子集, 代表初始位于 Π 环境中的物质集合;
- μ 是一个由 $1, \dots, q$ 标记的有 q 个节点的根树, 表示这个系统的框架;
- $\mathcal{M}_i, 1 \leq i \leq q$ 是 Γ 上物质的有限多重集合, 它们初始位于系统的区域 i ;
- $s_i, 1 \leq i \leq q$ 是 K 上的通道状态, 它们代表每个区域的初始状态;
- $R_i, 1 \leq i \leq q$ 是每个区域 i 中规则的有限集, 有下述的形式:

- 通讯规则:

- 同向规则: $(s, (u, out), s')$ 或 $(s, (u, in), s'), s, s' \in K, u \in \Gamma^+$;

- 异向规则: $(s, (u, out; v, in), s'), s, s' \in K, u, v \in \Gamma^+$;

- 分裂规则: $[a]_i \rightarrow [b]_i [c]_i, a, b, c \in \Gamma, i \in \{2, \dots, q\}, i \neq i_{out}$.

• $i_{out} \in \{0, 1, \dots, q\}$ 是输出区域.

定义 4 一个度为 $q \geq 1$ 的带细胞分裂和通道状态的组织型通讯膜系统是一个元组

$$\Pi = (\Gamma, T, K, \varepsilon, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, ch, (s_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, (R_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, i_{out}),$$

其中:

- Γ 是一个有限字母;
- $T \subseteq \Gamma$ 是一个终止字母表;
- K 是一个状态的字母表;
- $\varepsilon \subseteq \Gamma$ 是初始时刻位于环境中的物质集合, 所有可用的物质都有任意多的数量;
- $\mathcal{M}_i (1 \leq i \leq q)$ 是初始位于系统 q 个细胞中的对象多重集;
- $ch \subseteq \{(i, j) \mid i, j \in \{0, \dots, q\}, i \neq j\}$ 是细胞间通道或细胞与环境间通道的集合;
- $R_{(i,j)}$ 是具有如下形式的有限规则集合 (与通道 $(i, j) \in ch$ 有关):

- 通讯规则:

- 同向规则: $(s, u/\lambda, s'), s, s' \in K, u \in \Gamma^+$;

- 异向规则: $(s, u/v, s'), s, s' \in K, u, v \in \Gamma^+, |u| > 0, |v| > 0$;

- 分裂规则:

- $[a]_i \rightarrow [b]_i [c]_i, a, b, c \in \Gamma, i \in \{1, \dots, q\}, i \neq i_{out}$;

• $i_{out} \in \{0, 1, \dots, q\}$ 是输出区域.

1.3 带细胞分裂和通道状态的识别通讯膜系统

定义 5 一个度为 $q \geq 1$ 的带有细胞分裂和通道状态的细胞型识别通讯膜系统是一个元组

$$\Pi = (\Gamma, K, \varepsilon, \mu, \Sigma, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, s_1, \dots, s_q, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_q, i_{in}, i_{out}),$$

其中:

- $(\Gamma, K, \varepsilon, \mu, \Sigma, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, s_1, \dots, s_q, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_q, i_{out})$ 是一个度 $q \geq 1$ 的带有细胞分裂和通道状态的细胞型通讯膜系统;
- Γ 有两个不同的物质 yes 和 no ;
- Σ 是一个严格包含于 Γ 中的输入字母表, 使得 $\varepsilon \subseteq \Gamma \setminus \Sigma$;
- $\mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q$ 是 $\Gamma \setminus \Sigma$ 上的有限多重集合;
- $i_{in} \in \{1, \dots, q\}$ 是输入细胞, 且 $i_{out} = 0$;

- 所有的计算停止;
- 如果 C 是 Π 的一个计算,那么必须要有物质 *yes* 或者物质 *no* 释放到环境中,且这个动作只能发生在计算的最后一步.

在这个系统中,规则的集合中包含细胞分裂规则,即可以产生 2^n 个细胞,由此可见这个系统可以采用空间换时间的方式来解决 HPP 问题.

定义 6 一个度为 $q \geq 1$ 的带有细胞分裂和通道状态的组织型识别通讯膜系统是一个元组

$$\Pi = (\Gamma, T, K, \Sigma, \varepsilon, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, ch, (s_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, (R_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, i_{in}, i_{out}),$$

其中:

- $(\Gamma, T, K, \Sigma, \varepsilon, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, ch, (s_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, (R_{(i,j)})_{(i,j) \in ch}, i_{out})$ 是一个度 $q \geq 1$ 的带有细胞分裂和通道状态的组织型通讯膜系统;
- Γ 有两个不同的物质 *yes* 和 *no*;
- Σ 是一个严格包含于 Γ 中的输入字母表;
- $\mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q$ 是 $\Gamma \setminus \Sigma$ 上的有限多重集合;
- $i_{in} \in \{1, \dots, q\}$ 是输入细胞,且 $i_{out} = 0$;
- 所有的计算停止;
- 如果 C 是 Π 的一个计算,那么必须要有物质 *yes* 或者物质 *no* 释放到环境中,且这个动作只能发生在计算的最后一步.

在这个系统中,规则的集合中包含细胞分裂规则,即可以产生 2^n 个细胞,由此可见这个系统可以采取空间换时间的方式来解决 SAT 问题.

对于带有细胞分裂和通道状态的识别通讯膜系统来说,如果物质 *yes* 出现在与计算 C 停止状态相关的环境中,且在计算 C 的非停止状态中没有出现物质 *yes* 和 *no*,那么就称计算 C 为一个接受计算,否则,就称计算 C 为拒绝计算.

2 带通道状态通讯膜系统的计算能力和计算复杂性

本节首先介绍带有细胞分裂和通道状态的通讯 P 系统求解判定性问题的概念,然后再分析这些膜系统的计算能力,最后给出这些膜系统的计算复杂性.

接下来,根据文献[61],笔者定义用同向/异向规则的带有细胞分裂和通道状态的识别通讯膜

系统在统一模式下求解判定性问题.

定义 7 在多项式时间内可以由一族带有细胞分裂和通道状态的识别通讯膜系统 $\Pi = \{\Pi(n) \mid n \in \mathbb{N}\}$ 以一种统一的模式解决一个判定性问题 $X = (I_X, \theta_X)$, 如果满足下述的条件:

- 一族 Π 是通过图灵机在多项式时间内统一的,也就是说存在一个多项式时间内工作的确定性图灵机,且这个确定性图灵机可以构建系统 $\Pi(n)$ ($n \in \mathbb{N}$);

- 在 I_X 上存在一个多项式时间的计算函数对 (cod, s) , 使得

- 对于每一个例子 $u \in I_X$ 来说, $s(u)$ 是一个自然数, $cod(u)$ 是系统 $\Pi_{s(u)}$ 上的一个输入多重集;
- 对每个自然数 $n \in \mathbb{N}$ 来说, $s^{-1}(n)$ 是一个有限集合;

- 系统族 Π 是关于 (X, cod, s) 多项式有界的,也就是说存在一个多项式函数 $p(n)$, 使得对每一个 $u \in I_X$ 来说, 系统 $\Pi(s(u) + cod(u))$ 的每一个计算都在最多 $p(|u|)$ 步内停止;

- 系统族 Π 是关于 (X, cod, s) 充分的, 即对每一个 $u \in I_X$ 来说, 如果系统 $\Pi(s(u) + cod(u))$ 存在一个接受的计算, 那么 $\theta_X(u) = 1$;

- 系统族 Π 是关于 (X, cod, s) 完备的, 即对每一个 $u \in I_X$ 来说, 如果 $\theta_X(u) = 1$, 那么系统 $\Pi(s(u) + cod(u))$ 的每一个计算都是一个接受的计算.

2.1 带有通道状态的通讯膜系统的计算能力

本小节首先介绍带有通道状态的类细胞或类组织通讯膜系统的计算能力, 然后再分别介绍了带有细胞分裂和通道状态的类细胞或类组织通讯膜系统的计算复杂性问题.

在介绍定理之前, 首先给出各种符号的含义. 一般, $NFIN$ 表示正整数所有有限集的族, $NMAT$ 表示无外观检测矩阵文法产生的正整数集合的族, NRE 表示自然数递归可枚举集的族.

根据文献[54-55], 对于带有通道状态的细胞型通讯膜系统, 笔者有如下的定理展现其计算能力.

定理 1 根据文献[54], 对于带有通道状态, 使用同向/异向规则的细胞型通讯膜系统来说, 其具有如下的计算能力, 其中, $NOP_m(\mathbf{state}_k, \mathbf{sym}_{t_1}, \mathbf{anti}_{t_2})$ 表示该类膜系统计算的所有数字集合的族,

且该类膜系统有 m 个膜, k 个状态, 以及使用规则长度最长为 t_1 的同向规则和规则长度最长为 t_2 的异向规则. 如果在膜系统中只使用了同向规则 (或者异向规则), 那么由膜系统计算得来的所有数字集合的族简单地记为 $\text{NOP}_m(\text{state}_k, \text{sym}_{t_1})$ (或者 $\text{NOP}_m(\text{state}_k, \text{anti}_{t_2})$). 如果参数 m, k, t_1, t_2 没有限制, 那么它们可以用 $*$ 来代替.

- $\text{NOP}_*(\text{state}_*, \text{anti}_2) \subseteq \text{NFIN}$;
- $\text{NOP}_*(\text{state}_2, \text{sym}_1) \subseteq \text{NFIN}$;
- $\text{NOP}_1(\text{state}_1, \text{anti}_4) = \text{NOP}_1(\text{state}_*, \text{sym}_1, \text{anti}_2) = \text{NMAT}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_*, \text{sym}_1) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_4, \text{anti}_2) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_2, \text{anti}_3) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_1, \text{anti}_3) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_3, \text{sym}_1, \text{anti}_2) = \text{NRE}$.

定理 2 根据文献[55], 对于带有通道状态, 使用协同同向规则, 工作在扁平极大并行模式的细胞型通讯膜系统来说, 其具有如下的计算能力, 其中, $\text{NOP}_m(\text{state}_k, \text{sym}_t, \text{flat})$ 表示由 m 个膜, k 个状态, 只使用规则长度最长为 t 的同向规则组成且以扁平极大并行方式工作的膜系统计算的所有自然数集合的族. 如果参数 m, k, t 没有限制, 那么它们可以用 $*$ 来代替.

- $\text{NOP}_2(\text{state}_*, \text{sym}_1, \text{flat}) = \text{NOP}_2(\text{state}_4, \text{sym}_2, \text{flat}) = \text{NOP}_2(\text{state}_2, \text{sym}_3, \text{flat}) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_1(\text{state}_1, \text{sym}_3, \text{flat}) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_1(\text{state}_*, \text{sym}_2, \text{flat}) = \text{NRE}$;
- $\text{NOP}_2(\text{state}_3, \text{sym}_2, \text{flat}) = \text{NRE}$.

定理 3 根据文献[56], 对于带有通道状态的组织型通讯膜系统来说, 其具有如下的计算能力. 一般来说, 系统 Π 计算得来的所有向量的集合使用 $P_s(\Pi)$ 来表示. $\text{PsOtp}_m(\text{state}_k, \text{anti}_i)$ 表示系统计算的向量集合 $P_s(\Pi)$ 的族, 其中这个系统有 m 个细胞, k 个状态, 使用形式为 $(s, x/y, s')$ 的规则, $|x| \leq i, |y| \leq i$. 当参数 m, k, i 没有限制时, 可以使用 $*$ 来代替. MAT 表示矩阵文法生成的语言族且 $\text{PsCF} \subset \text{PsMAT} \subset \text{PsRE}$.

- $\text{PsMAT} \subseteq \text{PsOtp}_1(\text{state}_*, \text{anti}_1)$;
- $\text{PsMAT} \subseteq \text{PsOtp}_1(\text{state}_1, \text{anti}_2)$;
- $\text{PsOtp}_1(\text{state}_*, \text{anti}_*) \subseteq \text{PsMAT}$;

- $\text{PsMAT} = \text{PsOtp}_1(\text{state}_k, \text{anti}_i) = \text{PsOtp}_1(\text{state}_*, \text{anti}_j), k \geq 1, i \geq 2, j \geq 1$, 每个 k, i, j 也可以等于 $*$;

- $\text{PsRE} = \text{PsOtp}_m(\text{state}_*, \text{anti}_i), m \geq 2, i \geq 1$;
- $\text{PsRE} = \text{PsOtp}_m(\text{state}_k, \text{anti}_i), m \geq 2, k \geq 1, i \geq 2$;
- $\text{PsRE} = \text{PsOtp}_*(\text{state}_k, \text{anti}_i), k \geq 3, i \geq 1$.

定理 4 根据文献[59], 对于带有通道状态, 工作在扁平极大并行模式下的组织型通讯膜系统来说, 其具有如下的计算能力. 系统 Π 计算得来的所有向量的集合使用 $P_s(\Pi)$ 来表示. $\text{PsOtp}_m(\text{state}_k, \text{sym}_{t_1}, \text{anti}_{t_2}, \text{flat})$ 表示系统计算的向量集合的族, 其中, 这个系统有 m 个细胞, k 个状态, 使用规则长度最长为 t_1 的同向规则和规则长度最长为 t_2 的异向规则, flat 表示通道上的规则以扁平极大并行的方式使用. 当参数 m, k, i 没有限制时, 可以使用 $*$ 来代替.

- $\text{PsOtp}_*(\text{state}_*, \text{anti}_2, \text{flat}) \subseteq \text{PsFIN}$;
- $\text{PsOtp}_1(\text{state}_1, \text{sym}_3, \text{flat}) = \text{PsRE}$;
- $\text{PsOtp}_2(\text{state}_*, \text{sym}_1, \text{flat}) = \text{PsRE}$;
- $\text{PsOtp}_*(\text{state}_4, \text{sym}_1, \text{flat}) = \text{PsRE}$.

定理 5 根据文献[60], 对于带有通道状态, 单向的组织型通讯膜系统来说, 其具有如下的计算能力. $\text{NOtp}_d^m(\text{state}_k, \text{sym}_t)$ 表示膜系统计算的所有自然数集合的族, 其中这个系统有 d 个膜, k 个状态, 使用极大长度为 t 的同向规则. 如果参数 d, k, t 没有限制, 那么它们可以使用 $*$ 来代替.

- $\text{NOtp}_2^m(\text{state}_*, \text{sym}_1) = \text{NRE}$;
- $\text{NOtp}_2^m(\text{state}_4, \text{sym}_2) = \text{NRE}$;
- $\text{NOtp}_*^m(\text{state}_3, \text{sym}_1) = \text{NRE}$.

2.2 带有细胞分裂和通道状态的通讯膜系统的计算复杂性

定理 6 根据文献[55], 带有细胞分裂和通道状态的细胞型通讯膜系统可以解决哈密顿回路问题, 其计算复杂性如下, $\text{CCD}_c\text{P}(k)$ 表示一类带有细胞分裂和通道状态, 通讯规则长度最长为 k 的细胞型通讯膜系统, $\text{PMC}_{\text{CCD}_c\text{P}(k)}$ 表示由 $\text{CCD}_c\text{P}(k)$ 在多项式时间内解决的所有判定性问题的集合.

- $\text{HPP} \in \text{PMC}_{\text{CCD}_c\text{P}(1)}$;

• $NP \cup co - NP \subseteq PMC_{CCD_eP(1)}$.

定理 7 根据文献[59],带有细胞分裂和通道状态,工作在扁平极大并行模式下的组织型通讯膜系统可以解决 SAT 问题,其计算复杂性如下, $PMC_{T_{SDC}(k)}$ 来表示由带有细胞分裂和通道状态,通讯规则长度最长为 k 的组织型识别通讯膜系统在多项式时间内以统一的方式解决的所有判定性问题的集合.

• $SAT \in PMC_{T_{SDC}(1)}$;

• $NP \cup co - NP \subseteq PMC_{T_{SDC}(1)}$.

定理 8 根据文献[60],带有细胞分裂和通道状态,单向的组织型通讯膜系统可以解决 SAT 问题,其计算复杂性如下, $PMC_{T_{maxSDS}(k)}$ 表示单向组织型识别膜系统在多项式时间内,以统一的方式解决的所有判定性问题的集合,其中,这个膜系统带有细胞分裂和通道状态,每个通道使用规则长度最长为 k 的同向规则,且该系统工作在极大并行方式中.

• $SAT \in PMC_{T_{maxSDS}(1)}$.

3 结论与展望

本文主要介绍了带有通道状态的通讯膜系统,包括带有通道状态的细胞型通讯膜系统和带有通道状态的组织型通讯膜系统. 本文首先分别对这两类膜系统的基本概念做了简要的介绍;其次分别介绍了带有通道状态的通讯膜系统的一些变形:带细胞分裂和通道状态的组织型识别通讯膜系统,带细胞分裂和通道状态的组织型通讯膜系统,带细胞分裂和通道状态的细胞型识别通讯膜系统,以及带细胞分裂和通道状态的组织型通讯膜系统. 对于这些膜系统,它们具有解决判定性问题的能力,本文分析了这些模型的计算能力和计算复杂性. 至今为止,膜计算作为自然计算中的

一个分支,仍然是一个冉冉新生的计算模型,对于带通道状态的通讯膜系统来说,存在如下待解决的问题,且这些问题值得思考,具体如下.

(1)以串行方式工作的带通道状态,使用同向/异向规则的细胞型 P 系统已经在文献[52]中得以研究;以扁平极大并行方式工作,带有通道状态的通讯 P 系统的通用性也得到了研究,在这项工作中同时获得了 NP 完全问题的一个解. 然而值得关注的是在一些其他的操作策略中,如异步模式,无时间模式^[62-64],或者集合推导模式^[65]下带有细胞分裂和通道状态的 P 系统的计算能力或者计算效率.

(2)可以将膜分离(或裂变)作为一种生物现象纳入 P 系统中,它能够在多项式时间内产生大量的新细胞为计算提供一个指数级的工作空间,因此,有膜分离的各种形式的 P 系统可以解决 NP 完全问题^[66-67]. 在文献[68]中,HPP 问题可以由工作在极大并行模式,有活性膜和分离规则的 P 系统解决,然而,HPP 问题是否能由带细胞分离和通道状态的通讯 P 系统来解决值得思考.

(3)由于 PSPACE 问题,如 QSAT 问题可以由带有非基本膜分裂,使用通讯规则(同向/异向规则)的 P 系统高效地解决^[30]. 因此,假设带有非基本膜分裂和通道状态的通讯 P 系统也可以解决 PSPACE 问题,而如何解决仍然有待于思考.

(4)对于带通道状态的组织型通讯 P 系统来说,研究其工作在扁平极大并行模式下,且使用细胞分离规则的系统的计算能力和计算复杂性是一个有待于被解决的问题;

(5)依据各种生物活动特性,研究者们提出了串行模式、极小并行模式、极大并行模式以及扁平极大并行模式. 对于带有通道状态的通讯 P 系统来说,分别研究其不同模式下的计算能力和计算复杂性是一个有待于解决的问题.

参考文献:

- [1] Păun G. Computing with membranes[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 61(1): 108-143.
- [2] Dassow J, Păun G. On the power of membrane computing[J]. Journal of Universal Computer Science, 1999, 5(2): 33-49.
- [3] Gheorghe M, Păun G, Pérez-Jiménez M J, et al. Research frontiers of membrane computing: Open problems and research topics[J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2013, 24(5): 547-623.

- [4] Song B S, Li K L, Orellana-Martín D, et al. A survey of nature-inspired computing: Membrane computing[J]. *ACM Computing Surveys*, 2021, 54(1): 1-31.
- [5] 宋勃升,徐飞. 通讯膜计算系统研究综述[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(1): 34-40.
- [6] Martín-Vide C, Pazos J, Păun G, et al. Tissue P systems[J]. *Theoretical Computer Science*, 2003, 296(2): 295-326.
- [7] Ionescu M, Păun G, Yokomori T. Spiking neural P systems[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2006, 71(2): 279-308.
- [8] Ibarra O, Dang Z, Egecioglu O. Catalytic P systems, semilinear sets, and vector addition systems[J]. *Theoretical Computer Science*, 2004, 312(2/3): 379-399.
- [9] Bottoni P, Martín-Vide C, Păun G, et al. Membrane systems with promoters/inhibitors[J]. *Acta Informatica*, 2002, 38(10): 695-720.
- [10] Verlan S, Margenstern M. About splicing P systems with one membrane[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2005, 65(3): 279-290.
- [11] Păun G, Păun R. Membrane computing and economics: Numerical P systems[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2006, 73(1/2): 213-227.
- [12] Zhang X Y, Pan L Q, Păun A. On the universality of axon P systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, 26(1): 2816-2829.
- [13] Song T, Pan L Q. Spiking neural P systems with rules on synapses working in maximum spiking strategy[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2015, 14(4): 465-477.
- [14] Leporati A, Manzoni L, Mauri G, et al. Shallow non-confluent P systems[C]//*Proceedings of the 17th International Conference on Membrane Computing*. Cham: Springer, 2016: 307-316.
- [15] Song B S, Huang S Y, Zeng X X. The computational power of monodirectional tissue P systems with symport rules[J]. *Information and Computation*, 2021, doi: 10.1016/j.ic.2021.104751.
- [16] Freund R. Sequential P systems[J]. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 2001, 4(1): 77-88.
- [17] Ciobanu G, Pan L Q, Păun G, et al. P systems with minimal parallelism[J]. *Theoretical Computer Science*, 2007, 378(1): 117-130.
- [18] Ibarra O H, Yen H C, Dang Z. The power of maximal parallelism in P systems[C]//*International Conference on Developments in Language Theory*. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 212-224.
- [19] Pan L Q, Păun G, Song B S. Flat maximal parallelism in P systems with promoters[J]. *Theoretical Computer Science*, 2016, 623: 83-91.
- [20] Alhazov A, Freund R. Variants of small universal P systems with catalysts[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2015, 138(1/2): 227-250.
- [21] Song B S, Pan L Q, Pérez-Jiménez M J. Tissue P systems with protein on cells[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2016, 144(1): 77-107.
- [22] Pan L Q, Păun G, Zhang G X, et al. Spiking neural P systems with communication on request[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2017, 27(8): 1750042.
- [23] Freund R, Kari L, Oswald M, et al. Computationally universal P systems without priorities: Two catalysts are sufficient[J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 330(2): 251-266.
- [24] Pan L Q, Tao S. State-of-the-art in cell-based computing and its future[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(1): 115-123.
- [25] Ye L, Zheng J, Guo P, et al. Solving the 0-1 Knapsack problem by using tissue P system with cell division[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 66055-66067.
- [26] Song B S, Li K L, Orellana-Martín D, et al. Cell-like P systems with evolutionary symport/antiport rules and membrane creation[J]. *Information and Computation*, 2020, 275: 1-9.
- [27] Díaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A, Pérez-Jiménez M J, et al. A uniform family of tissue P system with cell division solving 3-COL in a linear time[J]. *Theoretical Computer Science*, 2008, 404(1/2): 76-87.
- [28] Díaz-Pernil D, Pérez-Jiménez M J, Riscos-Núñez A, et al. Computational efficiency of cellular division in tissue-like mem-

- brane systems[J]. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 2008, 11(3): 229-241.
- [29] Păun G, Pérez-Jiménez M J, Riscos-Núñez A. Tissue P systems with cell division[J]. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 2008, 3(3): 295-303.
- [30] Alhazov A, Martín-Vide C, Pan L Q. Solving a PSPACE-complete problem by recognizing P systems with restricted active membranes[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2003, 58(2): 67-77.
- [31] Song B S, Pérez-Jiménez M J, Pan L Q. Efficient solutions to hard computational problems by P systems with symport/antiport rules and membrane division[J]. *Biosystems*, 2015, 130: 51-58.
- [32] Sosík P, Rodríguez-Patón A. Membrane computing and complexity theory: A characterization of PSPACE[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2007, 73(1): 137-152.
- [33] Sosík P, Păun A, Rodríguez-Patón A. P systems with proteins on membranes characterize PSPACE[J]. *Theoretical Computer Science*, 2013, 488: 78-95.
- [34] 宋勃升, 赖乐珊, 李肯立. 膜计算系统求解计算困难问题综述[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(6): 25-34.
- [35] Zhang G, Pérez-Jiménez M J, Gheorghe M. *Real-life applications with membrane computing*[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [36] 付杰, 赵进慧, 虞乐丹. 自适应膜计算算法及在 ABS 系统中的应用[J]. *控制工程*, 2019, 26(1): 155-161.
- [37] 何伊妮, 曹伟, 韦昌福, 等. 基于膜计算和蚁群算法的电网云平台资源配置方法[J]. *电力工程技术*, 2020, 189(39): 110-116.
- [38] Ciobanu G, Păun G, Pérez-Jiménez M J. Applications of membrane computing[J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 287(1): 73-100.
- [39] Peng H, Wang J, Pérez-Jiménez M J, et al. An unsupervised learning algorithm for membrane computing[J]. *Information Science*, 2015, 304: 80-91.
- [40] Peng H, Wang J, Shi P, et al. An automatic clustering algorithm inspired by membrane computing[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 68: 34-40.
- [41] 陈东宁, 王跃颖, 姚成玉, 等. 膜计算多粒子群算法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 236-246.
- [42] 韩涛, 黄友锐, 周宁亚, 等. 基于膜计算粒子群优化的 FastSLAM 算法改进[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(2): 156-162.
- [43] 黄文成. 结合膜计算与人工蜂群算法的 K 均值算法[J]. *现代计算机(专业版)*, 2019(11): 39-44.
- [44] Wang J, Shi P, Peng H. Membrane computing model for IIR filter design[J]. *Information Science*, 2016, 329: 164-176.
- [45] Zhang G, Pérez-Jiménez M J, Gheorghe M. Data modeling with membrane systems: Applications to real ecosystems[J]. *Real-life Applications with Membrane Computing*, 2017, 25: 259-355.
- [46] Păun G, Rozenberg G, Salomaa A. *The Oxford handbook of membrane computing*[M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [47] Păun A, Păun G. The power of communication: P systems with symport/antiport[J]. *New Generation Computing*, 2002, 20(3): 295-305.
- [48] Alhazov A, Rogozhin Y. Towards a characterization of P systems with minimal symport/antiport and two membranes[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 436(1): 135-153.
- [49] Jiang S, Wang Y, Xu J, et al. The computational power of cell-like P systems with symport/antiport rules and promoters[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2019, 164: 2-3.
- [50] Song B S, Zhang C, Pan L Q. Tissue-like P systems with evolutionary symport/antiport rules[J]. *Information Sciences*, 2017, 378: 177-193.
- [51] Song B S, Pérez-Jiménez M J, Pan L Q. Efficient solutions to hard computational problems by P systems with symport/antiport rules and membrane division[J]. *Biosystems*, 2015, 130: 51-58.
- [52] Alhazov A, Rogozhin Y. Generating languages by P systems with minimal symport/antiport[J]. *Computer Science Journal of Moldova*, 2006, 14(42): 299-323.
- [53] Rozenberg G, Salomaa A. *Handbook of formal languages(3 vols)*[M]. Berlin: Springer, 1997.

- [54] Song B S, Pan L Q, Pérez-Jiménez M J. Cell-like P systems with channel states and symport/antiport rules[J]. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2016, 6(15): 555-566.
- [55] Jiang S X, Wang Y, Xu F, et al. Communication P systems with channel states working in flat maximally parallel manner[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2019, 168(1): 1-24.
- [56] Freund P, Păun G, Pérez-Jiménez M J. Tissue P systems with channel states[J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 330: 101-116.
- [57] Song B S, Zeng X X, Jiang M, et al. Monodirectional tissue P systems with promoters[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(1): 438-450.
- [58] Song B S, Li K L, Zeng X X. Monodirectional evolutionary symport tissue P systems with promoters and cell division[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2021, doi: 10.1109/TPDS.2021.3065397.
- [59] Song B S, Mario J, Pérez-Jiménez M J, et al. Tissue P systems with channel states working in the flat maximally parallel way[J]. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2016, 15(7): 645-656.
- [60] Song B S, Zeng X X, Rodríguez-Patón A. Monodirectional tissue P systems with channel states[J]. *Information Science*, 2021, 546: 206-219.
- [61] Pérez-Jiménez M J, Romero-Jiménez A, Sancho-Caparrinn F. Complexity classes in models of cellular computing with membranes[J]. *Natural Computing*, 2003, 2(3): 265-285.
- [62] Liu X R, Suo J, Leung S C H, et al. The power of time-free tissue P systems: Attacking NP-complete problems[J]. *NeuroComputing*, 2015, 159: 151-156.
- [63] Song B S, Pérez-Jiménez M J, Pan L Q. An efficient time-free solution to SAT problem by P systems with protein on membranes[J]. *Journal of Computer and System Science*, 2016, 82: 1090-1099.
- [64] Song B S, Song T, Pan L Q. A time-free uniform solution to subset sum problem by tissue P systems with cell division[J]. *Mathematical Structures in Computer Science*, 2017, 27(1): 17-32.
- [65] Alhazov A, Freund R, Verlan S. P systems working in set modes[C]//*Proceedings of the Workshop on Membrane Computing*. Manchester: The University of Bradford Institutional Repository, 2016: 4-15.
- [66] Macías-Ramos L F, Song B S, Valencia-Cabrera L, et al. Membrane fusion: A computational complexity perspective[J]. *Complexity*, 2015, 21(6): 321-334.
- [67] Valencia-Cabrera L, Song B S, Macías-Ramos L F, et al. Computational efficiency of P systems with symport/antiport rules and membrane separation[C]//*Proceedings of the 13th Brainstorming Week on Membrane Computing*. Sevilla: ETS de Ingeniería Informática, 2015: 325-370.
- [68] Pan L Q, Alhazov A. Solving HPP and SAT by P systems with active membranes and separation rules[J]. *Acta Informatica*, 2006, 43(2): 131-145.

【责任编辑: 陈 钢】