

基于生物细胞的 膜计算模型研究

罗跃国
刘楚川
戴大伟

著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



基于生物细胞的 膜计算模型研究

罗跃国 刘楚川 戴大伟 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

膜计算旨在从生物细胞中抽象计算模型,具有良好的分布式结构和强大的并行性。本书是基于生物学中的细胞进化机制,以形式语言与自动机理论为基础,重点研究建立更加符合生物实际的新模型,最终实现建立容错性能更好的鲁棒计算系统。主要内容包括基于促进剂的时间活性膜 P 系统、膜上带蛋白的时间膜系统、基于细胞分裂的类组织时间膜系统、内稳态类组织膜系统以及基于活性膜 P 系统的 CNSMO 算法。本书可供计算机科学、控制工程专业高年级本科生、硕士研究生和博士研究生以及相关学科领域的科技工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于生物细胞的膜计算模型研究 / 罗跃国, 刘楚川, 戴大伟著. —上海: 上海交通大学出版社, 2022.11
ISBN 978 - 7 - 313 - 27658 - 2

I. ①基… II. ①罗… ②刘… ③戴… III. ①细胞生物学—生物膜—计算模型—研究 IV. ①Q73 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 203176 号

基于生物细胞的膜计算模型研究

JIYU SHENGWU XIBAO DE MOJISUAN MOXING YANJIU

著 者: 罗跃国 刘楚川 戴大伟

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 上海万卷印刷股份有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 134 千字

版 次: 2022 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978 - 7 - 313 - 27658 - 2

定 价: 45.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021 - 64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 8.25

印 次: 2022 年 11 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021 - 56928178

Preface | 前 言

膜系统也称为 P 系统,是一类分布式并行计算模型,由欧洲科学院院士 Gheorghe Păun 于 1998 年提出,正式论文于 2000 年发表。2003 年,美国科学情报研究所将膜计算作为计算机科学的前沿领域,使得该领域得到广泛的关注。膜计算最基本的理论框架主要受生物细胞、组织以及器官功能与结构的启发而形成。相关研究成果已经证明,基于膜系统的计算能力与图灵机是等价的,从理论上讲可作为理想的计算机器。

迄今为止,膜计算领域已经取得了丰硕的成果。例如,相关研究已经提出的若干膜系统作为产生语言、产生数以及计算函数等的计算设备都是图灵机通用的,并能在多项式时间甚至线性时间内求解 NP 难问题。从理论上讲,膜系统的计算效率会高于当前的电子计算机。通过对该领域的研究,可以深入理解细胞体信息处理能力并获得对这种能力的有效操控,为生物系统的建模与仿真提供新的工具。因此,膜计算对于计算机科学、生物学、医学等学科有着深远的影响。

对于标准膜系统,以往通常假定每条规则的执行时间为一个单位时间。但是这种假设过于理想化,实际的生化反应通常受到多种因素的影响,其执行时间往往难以预知。本书基于生物实际,主要研究时间无关模式下 P 系统的计算能力、计算有效性以及计算效率等性能。从某种程度上讲,排除了生化反应中多种因素的影响,时间无关模式下系统会有更好的容错能力。因此,本书对现有膜系统研究范围进行扩展建立了相应的时间膜系统,从而获得了鲁棒性能更好的计算系统。

在本书的编写过程中,得到了长江师范学院大数据与智能工程学院的多方面支持,以及重庆邮电大学计算机科学与技术学院夏书银副教授的鼎力帮助,在此一并致谢。最后,深深地感谢为本书出版给予帮助的所有人。

鉴于作者水平有限,书中若有纰漏错误,敬请读者批评指正。

第 1 章 绪论	001
1.1 概述	001
1.2 研究进展	003
1.2.1 膜计算简介	003
1.2.2 膜计算模型介绍	005
1.3 膜计算中的相关定义及概念	012
1.3.1 形式语言与注册机	012
1.3.2 时间无关模式	013
1.3.3 时间无关模式下求解 NP 难问题	015
1.4 计算复杂性	016
1.5 膜算法	017
参考文献	018
第 2 章 基于促进剂的时间活性膜 P 系统	022
2.1 基于促进剂的时间活性膜 P 系统构建	023
2.2 基于促进剂的时间活性膜 P 系统求解 SAT 问题半统一解	025
2.3 基于促进剂的时间活性膜 P 系统求解 SAT 问题统一解	030
2.4 系统计算效率分析	038
2.4.1 半统一方法	038

- 2.4.2 统一方法 039
- 2.5 基于促进剂的时间活性膜 P 系统通用性证明 040
- 参考文献..... 043

- 第 3 章 膜上带蛋白的时间膜系统** 045

 - 3.1 膜上带蛋白的时间膜系统模型 046
 - 3.2 膜上带蛋白的时间膜系统求解 SAT 问题 047
 - 3.3 触发型膜上带蛋白的时间膜系统求解 SAT 问题 053
 - 参考文献..... 059

- 第 4 章 基于细胞分裂的类组织时间膜系统计算效率**..... 061

 - 4.1 具有细胞分裂的类组织时间膜系统 062
 - 4.2 具有细胞分裂的类组织时间膜系统求解 SAT 问题 063
 - 4.3 计算效率分析 071
 - 参考文献..... 072

- 第 5 章 内稳态类组织膜系统** 074

 - 5.1 内稳态类组织膜系统构建 074
 - 5.2 HTP - OEP 的计算能力以及计算效率 080
 - 5.2.1 HTP - OEP 的通用性证明 080
 - 5.2.2 基于 HTP - OEP 系统求解 SAT 问题 082
 - 5.3 HTP - OE 的计算能力以及计算效率 086
 - 5.3.1 HTP - OE 的通用性证明 086
 - 5.3.2 基于 HTP - OE 系统求解三着色问题和 SAT 问题..... 090
 - 5.4 HTP - ES/A 的计算能力以及计算效率 097
 - 5.4.1 HTP - ES/A 的通用性证明 097
 - 5.4.2 基于 HTP - ES/A 系统求解 SAT 问题 099
 - 参考文献..... 104

第 6 章 基于活性膜 P 系统的 CNSMO 算法	106
6.1 基于分类噪声检测的序列最小优化算法	106
6.1.1 SVM 基本模型	107
6.1.2 基于分类噪声检测的 CNSMO	108
6.2 基于活性膜 P 系统的 CNSMO 算法设计	111
6.2.1 活性膜 P 系统基本框架以及进化规则设计	111
6.2.2 基于活性膜 P 系统的 CNSMO 算法设计	113
6.3 仿真实验分析	115
参考文献	120
索引	122

第 1 章

绪 论

本章首先从实现计算机的计算模型出发,概述膜计算研究背景、意义,包括膜计算的国内外研究现状以及本书涉及的几类膜计算模型。接着,对膜计算中的相关定义和概念等内容进行梳理,并对计算复杂性进行说明。最后对膜算法做简单的回顾。通过本章内容,读者可对膜计算领域有初步的认识,并对全书涉及的理论基础能整体地把握。

1.1 概述

人类在漫长的历史中不断寻找一种智能的机器来实现计算。最早,人们使用手工计算,例如古代罗马人使用石子来计数;在我国,上千年前就发明了算盘作为计算工具,用该工具计算时主要包括算具(硬件)、算法(规则)两个方面;直到近代才出现了机械计算。1642年,法国数学家帕斯卡利用齿轮转动,发明了世界上第一台机械计算机。虽然该计算机器功能简单,但是其思想对后来计算机的发展产生了重大影响。

1937年,阿兰·图灵发表的一篇著名的论文中首次提出了图灵机(Turing machine)模型^[1]。随后冯·诺依曼基于图灵机这一抽象的计算模型,设计出了计算机的实现方案。1946年第一台数字电子计算机在冯·诺依曼体系下问世。计算机作为科学发展史上最重要的技术发明之一,将人类带入了信息社会时代。在过去的70多年里,虽然计算机技术发展迅速,但目前仍使用冯·诺依曼体系结构,指令串行的顺序执行极大地限制了计算速度。从20世纪

70年代初开始,微电子工业按摩尔定律发展,计算机处理器的复杂性随时间的推进呈几何级数不断增长,计算机芯片载体技术的发展也将趋于极限。因此,亟待寻求一种新的计算模型来解决传统计算机的瓶颈问题。因此,生物计算机、光计算机和量子计算机逐渐进入全世界科学家的研究视野中。其中,生物计算主要包括膜计算和DNA计算。膜计算因其具有良好的分布式结构和强大的并行性而成为生物计算中最具有代表性的一个分支。

DNA计算作为生物计算中较早研究的领域,其构想始于20世纪70年代。1973年,Bennett首次从理论上通过DNA分子和RNA分子,模拟了生物过程进行计算操作,构建出的生物分子计算装置与图灵机是等价的^[2]。1987年,Head应用形式化语言将DNA中一系列生化反应操作使用文法中的产生式来表示,在此基础上提出了剪接系统,并对其计算能力进行了研究^[3]。DNA计算真正进入生物实现阶段是在1994年,美国南加州大学的Adleman教授在*Science*期刊上发表了篇名为*Molecular computation of solutions to combinatorial problems*的论文中提到,通过DNA分子和一些生化反应操作在试管内成功地求解了具有7个顶点的有向哈密尔顿路径问题^[4]。这项工作迅速引起了各个领域学者,包括计算机学家、生物学家、数学家的广泛关注。受这篇论文的启发,Lipton教授利用DNA分子成功解决了“可满足性问题”即(SAT问题)^[5]。这些实验结果表明,相较于传统的电子计算机,利用DNA分子在求解NP难(NP-hard)问题时的计算效率更为高效。

近年来,膜计算作为计算机科学与生物学交叉产生的前沿研究领域,由欧洲科学院院士Gheorghe Păun创立于1998年。基于Gheorghe Păun院士的开创性工作,膜系统通常也称为P系统。膜系统是一个高度并行的计算系统。最近,Roy等科学家在*Nature*杂志上发表了题为*Towards spike-based machine intelligence with neuromorphic computing*的论文。该论文受到膜计算中的脉冲神经膜系统的启发,从生物计算的角度研究了一类新的神经计算系统,并研究了算法设计和硬件系统的实现^[6]。

从理论上讲,膜系统的计算效率会高于当前的电子计算机,而如何研制基于膜计算模型的生物计算机是一个重要的研究课题。并且通过对该领域的深入研究,可为实际的生化系统的建模与仿真提供技术支撑。另外,膜计算涉及计算机科学、数学以及生物学等多个学科相关的交叉研究领域,该领域对生物学、计算机科学、医学等多个学科会产生重要的影响。

1.2 研究进展

本节从膜计算发展历程出发,简单介绍膜计算的研究现状,对相关膜计算模型进行重点说明和具体描述。

1.2.1 膜计算简介

人体的构造是非常奇妙的,即使通过最先进的科技手段,也未能完全了解其中的奥秘。但人类机体活动又具有复杂而协调的动作:头脑作为总部的办公处,传达着各种复杂的命令;皮肤的微循环、生化物质进化处理等对体温的调节有重要作用,使体温恒定在 37°C 左右。生物实际细胞是生命的基石,因而考虑将细胞作为一类生物特征和生物实际抽象出相应计算模型的想法是很自然的。P系统是从活细胞处理化学物质、能量和信息的方式中得到启发而建立的一类分布式并行计算模型^[7]。在亿万年生物演化进程中,细胞控制着生化反应完成各种处理过程。受到生物体内活细胞的生物特征和生物实际启发,通过从单一细胞和复杂细胞(如细胞、组织以及人脑)的结构和功能中抽象出计算模型,最终形成了膜计算的理论模型框架。目前主要提出了三种基本类型的膜系统,即类细胞膜系统(cell-like P systems)^[8]、类组织膜系统(tissue-like P systems)^[9]、类神经膜系统(neural-like P systems)^[10]。目前,膜计算中文方面的专著主要有如译著《膜计算导论》^[11]、《膜计算:理论与应用》^[12]等。其中,《膜计算导论》是由潘林强教授等基于2002年出版的*Membrane Computing: An Introduction*翻译而成的。该专著详细介绍了膜计算研究领域的一些基本概念与相关重要结论,如关于基本膜系统计算能力与计算效率的介绍,一系列膜计算领域目前尚未解决的公开问题,以及今后值得探索的一些研究主题。《膜计算:理论与应用》一书除了向读者介绍膜计算基本原理和膜计算应用外,重点介绍了膜计算在电力系统故障诊断、移动机器人、控制工程优化和生态系统数据建模等领域中的实际应用,具体地反映了膜计算的应用研究现状和前沿进展。

自2000年篇名为*Computing with membranes*^[8]的论文发表后,膜计算在很多领域的广泛应用价值受到广大科学研究者的关注。在国外,西班牙塞维利亚大学、英国谢菲尔德大学、荷兰莱顿大学等都有从事膜计算研究的团

队。在国内,不少高校和研究机构都开始关注该领域的研究,并取得了一定的研究成果。目前膜计算已经成为具有极大潜力的研究领域,它的研究成果为生物分子计算提供了丰富的框架。

据统计,截至目前已发表学术论文 2 000 多篇,其中还包括 30 余篇英文博士学位论文、10 余篇中文博士学位论文。每年关于膜计算的两个代表性的专题国际会议包括开始于 2000 年的膜计算会议(Conference on Membrane Computing)以及从 2003 年开始每年在西班牙塞尔维亚举行的膜计算集体讨论会。从 2012 年开始,亚洲膜计算会议(Asian Conference on Membrane Computing)每年在亚洲地区举办一次。经过近 20 年的研究,膜计算在理论和实际应用方面都取得了丰硕的成果。在理论研究方面,膜系统的许多不同变体已被证明具有与图灵机等价的计算能力。受到一些生物事实的启发,目前主要有三种方法可以在活细胞中产生新膜:膜(细胞)分裂^[13]、膜产生^[14]和细胞分割^[15]。研究膜系统有效性主要是分析系统能否在可行时间范围内求解 NP 难问题。在脉冲神经膜系统研究方面,潘林强教授的团队开展了大量工作,并取得了丰硕的成果。另外,在算术运算 P 系统方面的研究主要如下:2001 年,Atanasiu 首次提出了算术 P 系统来实现算术运算^[16];2006 年,Alhazov 等^[17]讨论了算术运算 P 系统中的多种编码方式。基于类细胞膜系统的算术运算研究取得了一定的进展^[18]。在应用研究方面,膜计算理论在多个领域也显示了重要的应用价值,许多电子计算机无法求解的问题有望通过膜计算来实现。由此表明,细胞、组织以及神经都可以作为强大的“计算机”。更多理论方面的研究进展可以查看综述文献[19-20]。

在电子实现方面,有研究人员利用图形处理器(graphics processing unit, GPU)构建 P 系统求解了 NP 难问题,并对生物系统进行了建模,开发了相关软件对这些计算过程进行模拟。作为自然计算一个新的研究方向,膜计算本身有很多引人注目的计算优势,例如并行性。从理论上讲,这可以突破传统计算机的计算瓶颈。另外,膜计算可以提供强有力的建模方法,用于解决工程中的实际问题。关于膜计算的仿真和模拟软件可通过网站 <http://ppage.psystems.eu/> 下载。

综上所述,膜计算是一个充满挑战的新兴领域,其应用前景不可估量。虽然目前已经有许多相关的膜计算模型研究较为成熟,但是还有不少公开问题亟待解决。

1.2.2 膜计算模型介绍

下面就本书涉及的两类膜系统(类细胞膜系统和类组织膜系统)做简单介绍。

1.2.2.1 类细胞膜系统

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。转移 P 系统的主要特点是在各个膜内单独使用多重集重写规则模拟生化反应。文献[21]首次提出了转运 P 系统,其中物质可以在各个膜之间进出完成计算,但是这些物质并不发生改变。这类系统中的规则主要有两类:共运输和逆运输。这两种规则的差异主要体现在两个对象在穿过细胞膜时方向不同。活性膜 P 系统是一类极其重要的类细胞膜系统,其规则包括膜溶解、膜分裂、膜创建等。

在类细胞膜系统中,细胞膜按嵌套分层的方式划分为若干个区域,每个区域称为一个膜,膜中对象通过相应的规则实现计算。皮肤膜外部区域称为环境。一个膜结构中膜的数目表示该膜结构的度。图 1-1(a)展示了生物细胞膜的真实结构,图 1-1(b)展示了抽象形成的类细胞膜系统的膜结构。对于该膜结构,最外层膜称为皮肤膜,膜标签为 2、3、5、7、8、9 的膜为基本膜(分别简称为膜 2、膜 3、膜 5、膜 7、膜 8、膜 9)。在一个类细胞膜系统中,对象的多重集被放置在由膜结构所限定的区域内。对象可以进化,并可穿过相邻的细胞膜。简单地说,该结构采用分层排列并用膜标签来标识这些膜,每个膜内可以包含

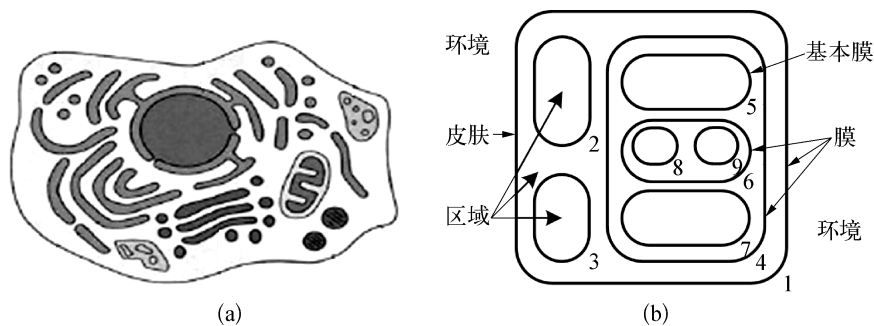


图 1-1 类细胞膜系统的膜结构^[22]

(a) 细胞膜;(b) 膜结构

对象的多重集。由此,所获得的计算装置是一个分布式并行系统,对象的多重集(化学物质)放置在区域(树结点)以及通过一些规则(生化反应)进行处理。可以把 P 系统看作是一个计算机器,从初始状态(用对象的多重集和膜结构表示)开始,通过应用膜结构中的进化规则编码的程序完成计算。

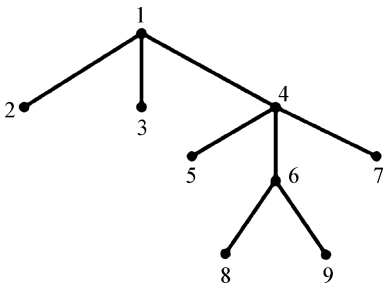


图 1-2 膜结构的树形结构

除了图 1-1(b)所示的膜结构外,膜结构还可以用广义表和树形结构表示:广义表是用“[]”来表示一个膜,“[]”的下标表示膜的序号,如基本膜 i 用 $[]_i$ 表示,膜 j 中嵌套膜 i 可表示为 $[[]_i]_j$ 。图 1-1(b)用广义表表示为 $[[]_2 []_3 [[]_5 [[]_8 []_9]_6 []_7]_4]_1$ 。图 1-1(b)也可以用树形结构表示,如图 1-2 所示。

受不同生物特性和生物实际的启发,许多类细胞原始模型的变体先后被提出。下面仅介绍两类与本书有关的模型:活性膜 P 系统模型和膜上带蛋白的 P 系统模型。

1) 基于活性膜的 P 系统模型

作为类细胞膜系统中一类重要模型,基于活性膜的 P 系统由 G. Păun 院士于 2001 首次提出^[23]。该膜系统中每个细胞膜上都带有电荷,即“+”(正电荷)、“-”(负电荷)和“0”(中性)。通过使用规则,这些膜上的电荷属性可以发生改变,比如从中性变为正电荷等。当然,膜上的电荷也可以保持不变。另外,这类膜系统的一个重要特点是,通过使用一些规则(如分裂规则、溶解规则等),膜结构可随着计算发生改变。基于活性膜 P 系统中的膜结构可以用广义表来表示,例如 $[[ab]_2^+ [bc^3]_3^-]_1^0$ 。

定义 1.1: 一个度为 $m (m \geq 1)$ 的活性膜 P 系统可定义为

$$\Pi = (O, H, \mu, \omega_1, \dots, \omega_m, R, i_{out}),$$

其中, O 是对象字母表; H 是膜标签的有限集合; μ 表示膜结构,包含 m 个膜,每个膜的标签号是集合 H 中的元素; $\omega_1, \dots, \omega_m$ 表示 O 上的字符串,用来表示各个膜内初始状态的对象多重集; i_{out} 是输出区域,用来保存最后的计算结果; R 为规则的有限集合,这些规则包含下面几种类型。

- (1) 对象进化规则: $[a \rightarrow b]_h^\partial, h \in H, \partial \in \{+, -, 0\}, a \in O, b \in O^*$ 。

如果对象 a 出现在膜标签为 h 的膜中,则该规则可以应用于当前格局中。通过应用此规则,对象 a 进化为多重集 b 。

(2) 通信规则 1: $a []_h^{\partial_1} \rightarrow [b]_h^{\partial_2}$, $h \in H$, $\partial_1, \partial_2 \in \{+, -, 0\}$, $a, b \in O$ 。

对象 a 进入膜中并且在该过程中这个对象可以发生改变。同时,膜上电荷也可以改变,但是膜标签保持不变。

(3) 通信规则 2: $[a]_h^{\partial_1} \rightarrow []_h^{\partial_2} b$, $h \in H$, $\partial_1, \partial_2 \in \{+, -, 0\}$, $a, b \in O$ 。

对象 a 被发送到膜外并且可以发生改变。同时,膜上电荷可以改变,但是膜标签保持不变。

(4) 溶解规则: $[a]_h^{\partial} \rightarrow b$, $h \in H$, $\partial \in \{+, -, 0\}$, $a, b \in O$ 。

在膜中对象 a 的影响下,膜可以溶解。溶解的同时,该膜中的对象 a 可以发生改变。

(5) 基本膜分裂规则: $[a]_h^{\partial_1} \rightarrow [b]_h^{\partial_2} [c]_h^{\partial_3}$, $h \in H$, $\partial_1, \partial_2, \partial_3 \in \{+, -, 0\}$, $a, b, c \in O$ 。

在膜中对象 a 的影响下,该规则将原始膜分裂为两个具有与之相同膜标签的新膜。在产生的两个新膜中,分别产生对象 b 和 c 。膜 h 内剩余物质分别复制到这两个新膜中。

(6) 规则(5)的扩展规则: 其形式如下。

非基本膜分裂规则: $[a]_{h_1}^{\partial_1} \rightarrow [b]_{h_2}^{\partial_2} [c]_{h_3}^{\partial_3}$, $h_1, h_2, h_3 \in H$, $\partial_1, \partial_2, \partial_3 \in \{+, -, 0\}$, $a, b, c \in O$ 。

与规则类型(5)不同的是,分裂产生的新膜与初始膜可以具有不同的膜标签号。

系统初始格局为 $(\omega_1, \dots, \omega_m, \mu)$,即由放置在相应膜中的多重集 $\omega_1, \dots, \omega_m$ 来表示。在膜系统的工作过程中,由每个膜中相应的对象多重集以及膜结构来描述当前格局。

膜计算理论研究受到各种生物实际启发的模型计算能力以及计算效率。对于计算能力,一般是研究系统的计算通用性。已经证明,活性膜 P 系统是计算通用的^[23]。此外有文献也对活性膜 P 系统中规则的类型、膜的数目等方面的变化对系统通用性的影响进行了研究^[24]。

通过使用活性膜 P 系统中的膜分裂规则创建新膜,可以在线性时间内产生指数级的计算空间。利用空间换时间,使得在有效时间内求解 NP 难问题成为可能。因此,活性膜 P 系统可以用于求解 NP 难问题,例如 SAT 问题^[25]、

子集和问题^[26]等。但这些研究仅针对标准膜系统,即系统中每条规则的执行时间为一个单位时间。然而,由于很多不可控制的因素,不同生化反应所需时间是无法控制的,从而难以建立鲁棒性较好的膜系统。

2) 基于膜上带蛋白膜的 P 系统模型

对于实际动物细胞的细胞膜,其组成物质中一半以上为生物蛋白。此外,还包括如水分子以及少量碳水化合物等其他的成分^[27]。膜上蛋白质可分为两类,分别为膜间蛋白和膜内蛋白。它们之间的差异在于膜间蛋白既可以作用于膜内的物质,也可以作用于膜外的物质,而膜内蛋白只能够作用于膜内的物质。膜具有双层结构,外层膜称为膜上,内层膜称为膜内。蛋白质位于膜上区域,其他物质位于内层膜中。因此,生化反应的发生主要受到膜上蛋白质的作用而完成。

A. Păun 与 B. Păun 于 2006 年提出了类细胞膜系统的一种变体,即为膜上带蛋白膜系统^[28]。在该系统中,细胞膜上和膜内分别含有蛋白质和物质,这与生物体中的实际情况相一致。与以往类细胞系统不同的是,这类系统中规则是在膜上蛋白质的控制下完成的。膜上的蛋白质在计算过程中一直保留在该细胞上,不会离开该细胞膜。因此,在引入蛋白质控制生化反应的机理后,膜内对象的进化不再仅依赖膜内对象,还需要考虑膜上蛋白质的控制因素。

在膜上带蛋白膜系统中,如果蛋白质 p 在一个膜标签为 h 的细胞膜上,记为 $[p |]_h$ 。例如,对于一个细胞膜 h ,在该细胞膜上有蛋白质多重集 pq ,细胞膜内含对象多重集 abc^2 ,可以记为 $[pq | abc^2]_h$ 。

定义 1.2: 使用膜分裂的膜上带蛋白膜系统表示为

$$\Pi = (O, P, \mu, \omega_1/z_1, \dots, \omega_m/z_m, E, R_1, \dots, R_m, i_{\text{out}})$$

其中, O 表示对象的字母表; P 表示膜上蛋白质的字母表 ($O \cap P = \emptyset$); μ 表示初始膜结构,分别用 $1, \dots, m$ 进行标记; $\omega_i (1 \leq i \leq m)$ 表示在初始膜结构中相应膜 i 中的对象多重集; $z_i (1 \leq i \leq m)$ 表示在初始膜结构中相应膜 i 上蛋白质的多重集; $E \subseteq O$ 表示环境中的对象; i_{out} 表示输出区域,该区域保存最后的计算结果; R_1, \dots, R_m 表示区域 $1, \dots, m$ 中规则的有限集,这些规则包含下面几种类型。

(1) 进化规则 1:

$$[p | a]_h \rightarrow [p | b]_h, [p | a]_h \rightarrow [p' | b]_h, p, p' \in P, a, b \in O, 1 \leq$$

$h \leq m$ 。

当某个对象 a 出现在膜 h 中时,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响,该对象进化为另一个对象 b 。在此过程中蛋白质可能发生改变,也可能保持不变。

(2) 进化规则 2:

$a[p \mid]_h \rightarrow b[p \mid]_h, a[p \mid]_h \rightarrow b[p' \mid]_h, p, p' \in P, a, b \in O, 1 \leq h \leq m$ 。当某个对象 a 出现在膜 h 外时,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响,该对象进化为另一个对象 b 。在此过程中蛋白质可能发生改变,也可能保持不变。

(3) 进化规则 3:

$[p \mid a]_h \rightarrow b[p \mid]_h, [p \mid a]_h \rightarrow b[p' \mid]_h, p, p' \in P, a, b \in O, 1 \leq h \leq m$ 。

当某个对象 a 出现在膜 h 内时,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响,该对象被发送到膜 h 外。在此过程中蛋白质和该对象可能发生改变,也可能保持不变。

(4) 进化规则 4:

$a[p \mid]_h \rightarrow [p \mid b]_h, a[p \mid]_h \rightarrow [p' \mid b]_h, p, p' \in P, a, b \in O, 1 \leq h \leq m$ 。

当某个对象 a 出现在膜 h 外时,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响,该对象被发送到膜 h 内。在此过程中蛋白质和该对象可能发生改变,也可能保持不变。

(5) 进化规则 5:

$a[p \mid b]_h \rightarrow c[p \mid d]_h, a[p \mid b]_h \rightarrow c[p' \mid d]_h, p, p' \in P, a, b, c, d \in O, 1 \leq h \leq m$ 。

当某个对象 a 出现在膜 h 外时,对象 b 出现在膜 h 中,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响,膜外对象被送到膜 h 内,同时膜内对象被送到膜外。在此过程中蛋白质和发生移动的所有对象均可能发生改变,也可能保持不变。

(6) 分裂规则:

$[p \mid]_h \rightarrow [p' \mid]_h [p'' \mid]_h, p, p', p'' \in P, 1 \leq h \leq m$ 。

该原始膜不能为皮肤膜。膜 h 可以为基本膜,也可以为非基本膜,受到膜 h 上蛋白质 p 的影响分裂为两个具有相同标签的膜。在此过程中原始膜上的蛋白质可能发生改变,同时,膜内的其他物质都将被复制到新产生的两个膜内。

初始格局为 $(w_1/z_1, \dots, w_m/z_m, \mu)$,即通过放置在相应膜中的对象多重集 w_1, \dots, w_m ,以及放置在相应膜上的蛋白质多重集 z_1, \dots, z_m 来表示。系统通过使用以上规则,可以得到连续而有限的格局。这些格局之间的转移