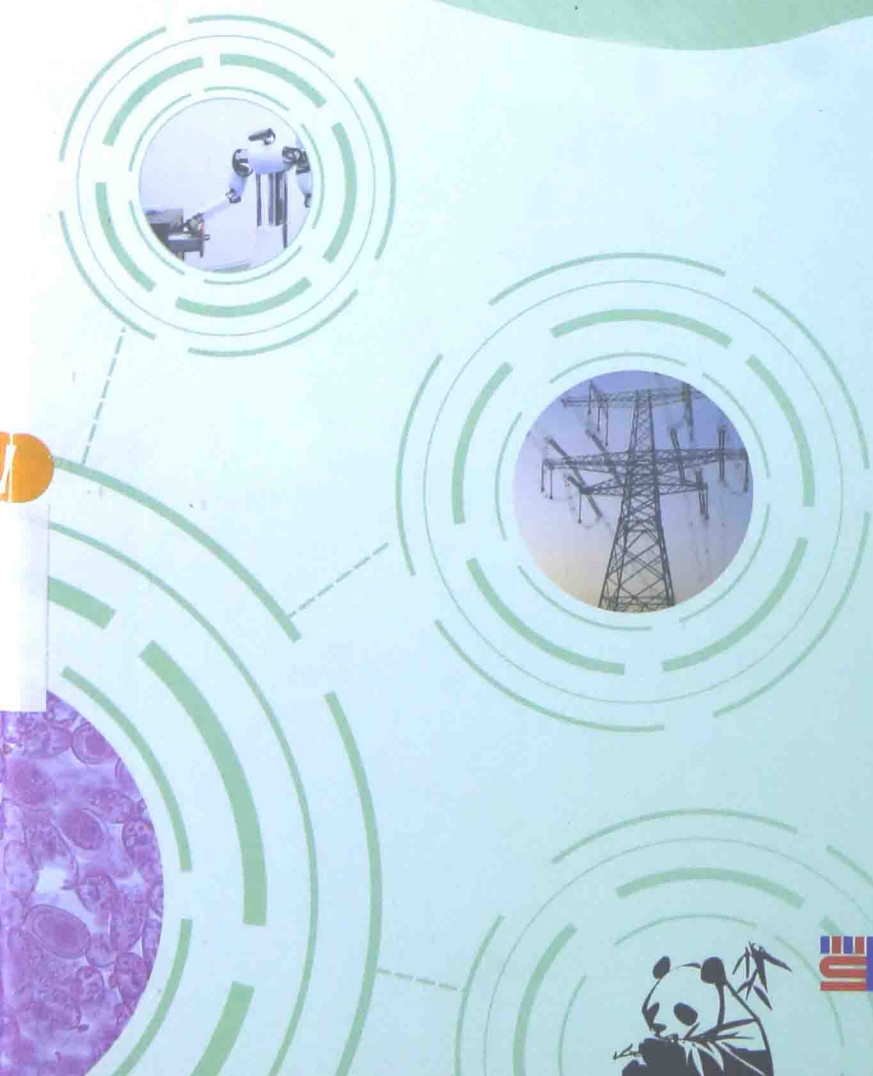


Membrane Computing: Theory and Applications

膜计算： 理论与应用

张葛祥 程吉祥 王 涛 王学渊 朱 杰 著



科学出版社

膜 计 算 : 理 论 与 应 用

Membrane Computing: Theory and Applications

张葛祥 程吉祥 王 涛 王学渊 朱 杰 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

膜计算是自然计算领域新兴的分支,旨在研究从生物细胞中抽象出的计算模型。全书共分6章,分别介绍膜计算概览、基础知识、膜控制器及数据处理膜系统、膜优化方法、基于膜计算的故障诊断方法和膜系统自动设计,重点阐述膜计算的实际应用。本书力图阐明膜计算的基本概念和基本原理,旨在向国内读者介绍膜计算这一新兴研究领域;书中内容取材于国、内外最新资料,并总结了作者近年来的研究成果,反映了膜计算应用的研究现状和最新水平。

本书可作为计算机科学、控制科学、电气工程、机器人学、生物信息学和生态学等专业高年级本科生、硕士生和博士生的学习参考用书,同时对相关学科领域的科技工作者和工程技术人员也有重要的使用和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

膜计算:理论与应用 / 张葛祥等著. —北京:科学出版社, 2014.12

ISBN 978-7-03-042866-0

I. ①膜… II. ①张… III. ①人工智能-计算
IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 305479 号

责任编辑:杨 岭 华宗琪 / 封面设计:墨创文化

责任校对:邓丽娜 贺江艳 / 责任印制:余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:300千字

定价:98.00元

Preface

Membrane computing was initiated as a theoretical branch of natural computing, inspired from the structure and the functioning of the biological cell. I was then after four years of intense research in DNA computing (among others, concluded with a monograph, Gh. Păun, G. Rozenberg, A. Salomaa: *DNA Computing—New Computing Paradigms*, Springer – Verlag, 1997, in 2002 also translated in Chinese). The feeling was that, in spite of the many theoretical results and of numerous experiments, DNA computing needs further basic ideas in order to make significant steps to practical computing, and the difficulty comes from the fact that “DNA behaves better in the cell”, in its natural environment. From here, the suggestion is immediate: Let’s go to the cell!

The question is then “what is a cell—seen through the glasses of a (theoretical) computer scientist?” Membranes, delimiting compartments, where a specific biochemistry takes place, making multisets of objects (from ions to macromolecules like DNA and RNA molecules) evolve, in a parallel manner, according to evolution rules of various kinds; also the membranes can evolve. Biology, computer science and mathematics suggest a series of types of rules, of membrane architectures, of strategies for the functioning of the obtained computing devices. Soon, a large variety of models (called P systems) were introduced, e. g. , passing from the single cell to populations of cells (tissues, organs, colonies of bacteria, etc.) and to neural like structures.

Everything developed initially at the intersection of natural computing and theoretical computer science, but soon started to appear applications. As it is natural, the first ones are in the area where membrane computing was originated—the biology and the biomedicine. However, as usual in science, when a model becomes abstract enough and developed enough, it starts to be applied in areas far from the initial one. This has been confirmed also for membrane computing: applications were reported in ecology, economics, computer graphics, cryptography, robot control. In parallel, programs to simulate P systems on the usual computers appeared, then implementations on parallel or dedicated hardware, also a specialized programming language, P-lingua, was released.

Biology needs tools, models, techniques. it was said that after the completion of the genome reading, the main challenge for biocomputing is the simulation of the cell. Membrane computing has several features which makes it a promising framework for such a modeling: understandability (it emerges directly from the cell biology), scalability, easy programmability, the discrete nature (is able to deal with multiplicities, as fundamental in biochemistry, even with relatively small

numbers, as specific to ecology, all these are opposed to the continuous nature of differential equations), emergent behavior.

It's been sixteen years after its initiation, membrane computing is a mature research area, with a large bibliography (including several monographs, over 50 PhD theses, a similar number of collective volumes, and a comprehensive Oxford handbook of membrane computing, published in 2010), many research groups, many and diverse applications, specialized conferences. Further details can be found at the domain web site: <http://ppage.psystems.eu>.

Personally, I am very happy to see the present book published. The Chinese researchers have remarkable contributions to membrane computing, from theory to applications. Just two examples—one from theory: spiking neural P systems, a topic where the University group in Wuhan (but not only from there) have numerous excellent results, and one from applications: membrane algorithms, a very promising and very popular in China research area of evolutionary computing. I am quite confident that the possibility to use the so-called numerical P systems, not only in robot control, but in other areas where numerical functions need to be fastly computed, will be explored with success.

I am also fully confident that the present book will have a great positive impact on the development of membrane computing in China. It is written by professionals, directly working in membrane computing (especially, but not only, in applications), but they have in mind the student reader—student in the general sense, as newcomer to membrane computing. Congratulations and thanks to the authors, congratulations and thanks to the publisher.

Gheorghe Păun

Member of the Romanian Academy and of Academia Europaea

October 2014

前 言

膜计算是自然计算的一个分支,主要研究从活细胞结构和功能中或从组织和器官等细胞群协作中抽象出的计算模型,包括数据结构及其操作方式、控制计算的方法和计算结构等。膜计算是由罗马尼亚科学院和欧洲科学院院士 Gheorghe Păun 于 1998 年在芬兰图尔库计算机科学中心提出的。2003 年,美国科学情报研究所(Institute of Scientific Information, ISI)将该领域列为计算机科学的前沿领域(<http://www.esi-topics.com>),同年,关于膜计算的首篇论文成为 ISI 快速突破的文章。

经过 16 年的发展,科学家们在膜计算方面已取得丰硕成果:在理论上,已提出若干种与图灵机等价或能在多项式时间内有效求解计算难问题的计算模型;在应用方面,已成功地将膜计算用于生物过程建模、计算机图形学、近似优化、机器人控制、故障诊断和数据建模等领域。国内学者最早于 2003 年开始研究膜计算,但到目前,尚无一本关于膜计算的中文专著出版。在国际上,仅有两本专著(*Membrane Computing—An Introduction*, 于 2002 年由 Springer 出版,简称为著一; *Computing with Cells—Advances in Membrane Computing*, 于 2009 年由牛津大学出版社出版,简称为著二)和 3 本编著(*Applications of Membrane Computing*, 于 2006 年由 Springer 出版,简称为著三; *The Oxford Handbook of Membrane Computing*, 于 2010 年由牛津大学出版社出版,简称为著四; *Applications of Membrane Computing in Systems and Synthetic Biology*, 于 2014 年由 Springer 出版,简称为著五)出版。著一、著二和著四侧重于膜计算理论,著一在国内已有译著;著三侧重于膜计算在语言、图形和计算机科学等方面的初步应用;著五侧重于膜计算在系统与合成生物学中的应用。至今,尚未有专门介绍膜计算实际应用成果的著作。另外,国内从事膜计算研究的人员还较少,迫切需要出版一本关于膜计算基本理论和实际应用的入门书,以将膜计算介绍给更多的研究人员,希望能够吸引更多的教师、博士生和硕士生等加入到这个新兴领域中来。

本书从膜计算的起源和基本概念开始,逐步介绍膜计算中的基本原理和理论,然后用大量内容重点介绍膜计算在优化、故障诊断、机器人和数据建模等方面的应用,并较为详细地给出了所需参考资料。

本书力求浅显易懂、由浅入深,选用简单实例来解释重要概念和原理,以供初学者阅读;同时,本书内容侧重于膜计算的的实际应用,以供膜计算领域专家和学者参考,本书也可作为介绍自然计算和生物计算新成员的重要资料。

本书在成稿过程中得到了膜计算提出者 Gheorghe Păun 院士,欧洲科学院院士、西班牙塞维利亚大学 Mario J. Pérez - Jiménez 教授,英国谢菲尔德大学 Marian Gheorghe 教授等的全力支持和鼓励。Gheorghe Păun 院士欣然为本书作序,在此表示由衷的感谢。在本书

所涉工作的研究过程中，西南交通大学电气工程学院领导给予了鼓励和支持，在此一并表达作者的谢意。另外，还特别感谢成都大熊猫繁育研究基地齐敦武副教授和陈鹏博士的全力支持，同时，还要感谢为本书作出贡献的博士生、硕士生。最后，感谢所有为本书出版给予帮助的人。

本书研究工作得到了国家自然科学基金(61170016, 61373047)和教育部新世纪优秀人才项目(NCET-11-0715)的鼎力资助。

鉴于作者水平有限，书中若存在瑕疵，请予谅解和批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 膜计算概述	1
1.2 膜计算研究进展	4
1.3 膜计算研究资源	7
1.4 本书写作思路和各章概要	10
参考文献	11
第 2 章 膜计算基础	14
2.1 膜计算起源	14
2.2 膜计算基本概念	15
2.3 细胞型膜系统	17
2.4 组织型膜系统	18
2.5 神经型膜系统	20
2.5.1 基本神经型膜系统	20
2.5.2 脉冲神经膜系统	20
2.6 本章小结	23
参考文献	23
第 3 章 膜计算模型直接应用	25
3.1 细胞型膜系统在机器人控制中的应用	25
3.1.1 数值膜系统	25
3.1.2 酶数值膜系统	29
3.1.3 移动机器人膜控制器概述	32
3.1.4 移动机器人膜控制器仿真平台	33
3.1.5 移动机器人膜控制器设计	39
3.1.6 移动机器人膜控制器实例	48
3.2 组织型膜系统在数据建模中的应用	52
3.2.1 概率膜系统	53
3.2.2 概率膜系统数据建模原理	55
3.2.3 概率膜系统数据建模软件平台	58

3.2.4 概率膜系统数据建模实例	61
3.3 神经型膜系统在优化中的应用	70
3.3.1 优化脉冲神经膜系统	71
3.3.2 应用实例	74
3.3.3 小结	75
3.4 本章小结	75
参考文献	76
 第4章 进化膜计算及其应用	78
4.1 进化膜计算概述	78
4.2 二进制编码膜算法及应用	82
4.2.1 遗传算法	82
4.2.2 遗传膜算法	83
4.3 实数编码膜算法及应用	86
4.3.1 差分进化算法	86
4.3.2 差分进化细胞型膜算法	87
4.3.3 差分进化组织型膜算法	91
4.4 量子比特编码膜算法及其应用	96
4.4.1 量子进化算法	96
4.4.2 量子进化细胞型膜算法	97
4.4.3 量子进化种群膜算法	101
4.5 序数编码膜算法及应用	106
4.5.1 蚁群优化算法	106
4.5.2 蚁群优化膜算法	108
4.6 膜算法动态行为分析	111
4.6.1 多样性分析	111
4.6.2 敛性分析	114
4.7 本章小结	117
参考文献	117
 第5章 模糊膜计算及其应用	121
5.1 模糊膜系统基础	121
5.2 模糊推理实数脉冲神经膜系统	125
5.2.1 模糊推理实数脉冲神经膜系统模型	125
5.2.2 模糊推理实数脉冲神经膜系统的模糊推理算法	129
5.3 模糊推理梯形模糊数脉冲神经膜系统	131
5.3.1 模糊推理梯形模糊数脉冲神经膜系统模型	131
5.3.2 模糊推理梯形模糊数脉冲神经膜系统的模糊推理算法	135

5.4 模糊推理脉冲神经膜系统电网故障诊断	137
5.4.1 电力系统故障诊断概述	137
5.4.2 故障诊断方法	138
5.5 电网故障诊断实例	142
5.6 本章小结	151
参考文献	152

第6章 膜计算模型自动设计	154
6.1 膜系统设计问题描述	154
6.2 膜系统设计软件平台	157
6.3 规则可变细胞型膜系统设计	161
6.4 规则和初始对象可变细胞型膜系统设计	166
6.4.1 基于 R_c 和 W 编码设计方法	166
6.4.2 基于 R 和 W 编码的设计方法	170
6.5 细胞型膜系统全设计	172
6.5.1 终止型膜系统设计	172
6.5.2 单项式膜系统设计	175
6.5.3 多项式膜系统设计	182
6.6 本章小结	183
参考文献	183

彩色图版

第1章 绪论

本章内容为：概述膜计算的提出、发展历程、代表类型和特点，总结膜计算在理论、应用、仿真和实现等方面的研究成果，简要介绍膜计算相关国际会议和主要参考资料，并给出本书各章内容概要，以供读者了解全书概貌。

1.1 膜计算概述

1. 膜计算提出

德国工程师、数字计算机之父 Konrad Zuse 和美国麻省理工学院计算机实验室前主任 Edward Fredkin 都认为：整个宇宙是一个不断更新规则的巨大元胞自动机^[1,2]。美国麻省理工学院 Keck 极限量子信息理论中心主任 Seth Lloyd 教授指出：整个宇宙是一个计算其自己行为的量子计算机^[3]。这两个论断都清楚地表明，计算机科学与自然之间有着十分密切的关联。元胞自动机和量子计算都是自然计算的重要分支。自然计算是连接计算机科学和自然科学的桥梁，是研究发生在自然中的计算和从自然中抽象出的计算方法的领域，具体而言，自然计算研究是从自然中抽象出来的模型、计算方法，并从信息处理角度理解周围的世界^[4,5]。自然计算已经成长为拥有若干个分支的宽广领域^[6]，如元胞自动机^[7,8]、神经计算^[9]、进化算法^[10]、群智能^[11]、人工免疫系统^[12]、膜计算^[13]、无定形计算^[14]、分形几何学^[15]、人工生命^[16]、DNA 计算^[17]和量子计算^[18,19]等。

膜计算是自然计算中最年轻的分支，由罗马尼亚科学院院士、欧洲科学院院士、国际数学化学科学院院士 Gheorghe Păun 在芬兰图尔库计算机科学中心访问期间于 1998 年 11 月在一篇名为 *Computing with Membranes* 的研究报告中提出^[20]，正式论文于 2000 年见刊发表^[13]。膜计算的发展为生物分子计算和非传统计算提供了丰富的计算框架，是接近“具有计算功能的细胞”概念的计算模型（称为膜系统或 P 系统，此处字母“P”来自 Păun）。同时，膜计算给计算机科学带来了一种有限的、离散的分布式并行分层或网状结构信息处理模型^[21-23]。

2. 膜计算发展史

膜计算自 1998 年被提出后，一直备受研究者的关注且充满着勃勃生机和活力。下面，回顾一下膜计算的发展历程。

1998 年：Gheorghe Păun 提出了转移膜系统^[20]，这是首个细胞型膜系统。

2000 年：首篇膜计算论文见刊发表^[13]；Gheorghe Păun 提出了活性膜 P 系统^[24,25]，它能成功求解计算难问题；同年起，开始举办一年一度的膜计算专题讨论会（Workshop

on Membrane Computing, WMC), 首届会议在罗马尼亚的阿尔杰什举行。

2001 年: 膜计算网站 <http://ppage.psyste.ms.eu/> 成功发布; 膜计算领域首位博士生 Shankara Narayanan Krishna(印度) 完成答辩。

2002 年: 国际著名出版社 Springer 出版了由 Gheorghe Păun 撰写的关于膜计算的第一本专著 *Membrane Computing – an Introduction*^[21]。该书列出了膜计算领域待求解的 40 个公开问题, 提出了共运输/逆运输膜系统^[26]和 P 自动机^[27], 并采用图灵机获得了膜计算模型的首个通用性结果^[28]。

2003 年: 美国科学情报研究所(Institute of Scientific Information, ISI)将膜计算列为计算机科学中的前沿研究领域(<http://www.esi-topics.com>), 关于膜计算的首篇论文成为 ISI 快速突破的文章, 也是当年被引用率最高的论文之一, 这标志着膜计算已经成为一个新兴研究领域; 同年, 相关人员建立了膜计算领域的计算复杂性理论^[29]; 关于组织型膜系统^[30]、概率型膜系统^[31]和膜计算优化方法^[32]等研究论文相继发表; 并开始举办第二个一年一度的膜计算专题讨论会(Brainstorming Week on Membrane Computing, BWMC), 首届 BWMC 在西班牙塔拉戈纳举行。

2004 年: Bernardini 和 Gheorghe 提出种群膜系统^[33]; Kelemen、Kelemenová 和 Păun 提出了 P 群^[34]; BWMC 移到了西班牙塞维利亚举行, 且该会议今后都在塞维利亚举行; 研究成果表明, 膜系统有望获得超越图灵机的计算能力^[35]。

2005 年: 膜计算开始用于生物信号建模^[36]。

2006 年: Gheorghe Păun 被选为欧洲科学院院士; 脉冲神经膜系统^[37]和数值膜系统^[38]见刊发表; 膜计算领域第二本著作 *Applications of Membrane Computing*^[39] 由国际著名出版社 Springer 出版; 中国举办了首个包含膜计算主题在内的生物计算理论与应用国际会议(International Conference on Bio-Inspired Computing: Theory and Applications, BIC-TA)。

2008 年: 西班牙塞维利亚大学 Mario J. Pérez-Jiménez 教授获得了由欧洲分子计算学会颁发的首个科学奖, 即“膜计算重要贡献奖”; 膜计算开始应用于研究实际生态系统的种群动态性^[40]; 发布了膜计算仿真软件 P-Lingua^[41]。

2009 年: 膜计算领域第三本著作 *Computing with cells – Aolvanace in Membrane Computing*^[42] 由国际著名的牛津大学出版社出版。

2010 年: 膜计算领域第四本著作 *The Oxford Handbook of Membrane Computing*^[22] 由国际著名的牛津大学出版社出版; WMC 改成国际膜计算会议(International Conference on Membrane Computing, CMC); 发布了膜计算建模、仿真、分析和验证虚拟环境软件 MeCoSim^[43]; 首篇分析膜算法性能的论文见刊发表^[44,45]。

2011 年: 西班牙塞维利亚大学 Mario J. Pérez-Jiménez 教授被选为欧洲科学院院士。

2012 年: 第三个一年一度的膜计算国际会议——亚洲膜计算国际会议(Asian Conference on Membrane Computing, ACMC)开始举办, 首届 ACMC 在中国武汉举行。

2013 年: 关于膜计算研究前沿的集体论文见刊发表, 列出了当前待解决的公开问题和前沿研究课题^[46], 建立了膜系统自动设计的新研究方向, 即膜系统所有要素都由算法自动产生^[47]。

2014年:膜计算领域第五本著作 *Applilation of Membrane Computing in Systems and Synthetic Biology*^[48] 在国际著名出版社 Springer 出版;膜计算优化脉冲神经网络膜系统^[49] 和进化膜计算综述论文^[50] 见刊发表。

3. 膜计算类型

截至目前,文献中涉及了若干种膜系统。根据不同分类方法,可以得到不同的分类结果。下面列出一些主要的分类方式^[22,51,52]。

(1)根据不同的膜结构构成方式,膜系统分为两类:细胞型(树形结构)膜系统和组织型(任意图形结构)膜系统;

(2)根据膜结构不同的变化特点,膜系统分为三类:静态膜系统、动态膜系统和预先计算(任意规模)膜系统;

(3)根据不同的对象类型,膜系统分为七类:字符型膜系统、字符串型膜系统、脉冲型膜系统、矩阵型膜系统、树形膜系统、数值型膜系统和混合型膜系统;

(4)根据不同的数据结构,膜系统分为四类:多重集膜系统、集合膜系统(字符串语言)、模糊集合膜系统和模糊多重集膜系统;

(5)根据不同的对象放置位置,膜系统分为三类:对象置于膜内的膜系统和对象置于膜上的膜系统、对象混合放置的膜系统;

(6)根据不同的规则类型,膜系统分为九类:多重集重写膜系统、共运输/逆运输膜系统、通信膜系统、界膜系统、活性膜膜系统、字符串重写膜系统、矩阵/树处理膜系统、脉冲处理膜系统和混合规则膜系统;

(7)根据不同的规则控制方式,膜系统分为七类:催化膜系统、规则排序膜系统、增强型膜系统、抑制型膜系统、激活型膜系统、顺序膜系统和能量膜系统;

(8)根据不同的规则执行方式,膜系统分为四类:最大并行膜系统、最小并行膜系统、有限并行膜系统和串行膜系统;

(9)根据不同的考虑时间方式,膜系统分为四类:同步膜系统、异步膜系统、局部同步膜系统和时间无关膜系统;

(10)根据不同的停机方式,膜系统分为四类:全局停止膜系统、局部停止膜系统、事件触发停止膜系统和非停止膜系统;

(11)根据不同的系统使用方式,膜系统分为四类:产生式膜系统、接受式膜系统、计算输入-输出函数型膜系统和判断型膜系统;

(12)根据不同的系统演化方式,膜系统分为四类:确定型膜系统、非确定型膜系统、汇合型膜系统和概率型膜系统;

(13)根据不同的输出方式,膜系统分为五类:内部输出膜系统、外部输出膜系统、跟踪膜系统、输出树形膜结构膜系统和脉冲串膜系统;

(14)根据不同的输出结果类型,膜系统分为五类:输出数集膜系统、输出数的向量集膜系统、产生语言膜系统、输出矩阵集膜系统和输出是或非膜系统。

4. 膜计算特点

作为首个受细胞启发研究计算模型的系统框架,膜计算具有适合理论探索和应用研

究的诸多显著特点,下面逐一列出并辅以解释。

(1)固有的区域分割特点。膜的作用之一是用于分隔膜系统各个区域,使各区域中的进化规则能够并行执行,由该特点就衍生出了四个特性:并行性、可扩展性、模块性和分布式。并行性来源于生物化学中生化反应的并行特点,在膜系统中,规则可以极大并行方式执行,而非串行方式执行。这虽是生物学中常识,但却是计算科学所追逐的梦想。可扩展性是指可以向膜系统添加新的膜或进化规则,而不会在本质上改变系统工作方式,这是生物学中采用微分方程难以突破的困难之一。模块性是指由膜分隔的各区域可形成子系统,通过一定方式可构成大系统。分布式是指膜系统分层结构中的各区域或网状结构中的各细胞可以在空间上分开,各自有自己的局部行为,并通过相互间通信规则形成一个系统。

(2)固有离散性。膜系统是对字符对象或对象的多重集进行操作,对象和操作都是离散的。连续数学,尤其是微分方程,在天文学、物理学和气象学等领域有着辉煌的应用历史,但在求解语言学和生物学中的问题时却遇到了阻碍,如由于生物过程的复杂性和不精确性,连续数学只能对少数局部过程建模。而膜计算在这些方面具有优势,恰好能形成互补。

(3)非确定性。该特点来源于生物化学中生化反应的非确定性。在膜系统中,进化规则和对象的选择是非确定性的,该特点有助于加速计算方法以探索超越图灵机计算能力的计算模型。

(4)可编程性。如图灵机或其他算法一样,膜系统是可计算模型,容易在计算机上仿真实现,如采用C语言集成产生系统(C Language Integrated Production System, CLIPS)等可将基于重写规则的膜计算模型转化成程序。

(5)透明性。多重集重写规则均抽象于化学或生物化学中的反应方程,因此,进化规则对于生化学家来说是完全透明的,很容易理解。

1.2 膜计算研究进展

经过16年的快速发展,膜计算已取得了大量研究成果,很难将其进行全面系统的归纳和概括。下面从理论、应用和实现三方面简述膜计算的主要研究成果^[23],给读者一个总体印象。

1. 理论研究进展

膜计算理论研究主要是讨论如何从细胞的结构和功能中,以及从组织、器官(包括脑)或其他细胞群(如细菌)等高级结构中建立计算模型,并分析其计算能力和计算效率^[22]。计算能力是指计算模型的通用性,以及能否计算图灵(Turing)可计算函数。计算效率是指计算模型能否以有效方式解决计算难问题。截至目前,主要有三种类型的膜计算模型:细胞型^[13]、组织型^[30]和神经型^[37]膜系统。下面逐步介绍三种膜系统及关于它们的计算能力和计算效率方面的研究工作。

细胞型膜计算模型是模仿细胞(包括真核细胞)的结构和功能,其基本组成要素包括膜结构、对象和规则。细胞型膜计算模型主要包括转移P系统^[13]、转运P系统^[26]和活

性膜 P 系统^[25]。转移 P 系统是最早引入和最基本的膜计算模型,主要采用多重集重写和通信规则完成计算,其使用规则采用非确定性和极大并行的方式。转移 P 系统中的规则来源于细胞(主要在隔间里)中发生的生化反应。但在细胞中,常常有物质(如蛋白质)穿过膜,为了模拟这一物质交换过程,文献[26]提出了转运 P 系统,采用字符在膜间穿梭来完成计算,其对象本身不发生变化。转运 P 系统的规则有两种类型:共运输和逆运输。前者指两个对象同时进入或退出膜,且方向相同,而后者指两个对象以相反方向同时穿过膜。转运 P 系统采用非确定性和极大并行方式使用运输规则。活性膜 P 系统^[25]也将膜作为规则处理对象,其规则包括膜的溶解、膜分裂、膜创建和膜合并等。采用活性膜 P 系统进行计算时,膜结构随着膜操作规则的执行而发生着变化。膜操作规则是以非确定性、极大并行方式进行的,通常可以在线性操作步内产生指数增长的空间,有助于在可行时间范围内(如线性、多项式时间)解决如 NP 难问题等计算问题。细胞型膜系统是最早的一种膜计算模型,其理论研究已较为完善。

组织型膜系统是细胞型膜系统的一种重要拓展模型,它将多个细胞自由放在同一环境中,细胞和环境中均可以包含对象,各细胞之间和细胞与环境之间采用转运规则进行通信。典型的组织型膜系统有三种:基本组织型 P 系统^[30]、种群 P 系统^[33]和 P 群^[34]。如果在组织型膜系统中需要通信的各细胞之间的通信通道是事先通过规则给定的(固定的),则此类膜系统称为基本组织型 P 系统。如果通信通道是在计算过程中采用规则动态建立的,既可以修改,也可以删除,则此类膜系统称为种群 P 系统,种群 P 系统主要是利用细胞间的动态特性来进行计算。如果环境中的细胞都是简单细胞(细菌群或蚁群等),且细胞中的对象和使用的规则都是有限的,则此种组织型膜系统称为 P 群。在 P 群中,细胞间不直接通信,且在初始状态时,细胞环境是一致的,仅有某一类符号,它主要依赖细胞间的合作完成计算。到目前,组织型膜系统仍有许多问题正待研究,详细情况可参考文献[46]。

神经型膜系统是新近提出的一种计算模型,是当前膜计算理论研究的热点。该膜系统中的细胞均采用神经元细胞,其思想来源于生物神经系统。神经型膜系统有两种类型:基本神经型膜系统和脉冲神经型膜系统^[37]。前者是在组织型 P 系统的基础上建立起来的,采用神经元代替了组织型 P 系统中的计算单元。关于神经型膜系统的研究主要集中在脉冲神经膜计算系统。这种膜计算模型主要受生物神经系统中神经元通过突触传递脉冲交换信息的机制的启发,模型中的对象只有一种,即脉冲。文献[53]系统介绍了脉冲神经膜计算系统的基本概念、简单实例、研究进展和需要进一步研究的问题。需要补充的是,有关神经型膜系统的研究问题,可参考文献[46]。

膜计算的理论研究重点是讨论和对比分析各种计算模型的计算能力和计算效率。研究膜计算模型的计算能力主要是将建立的膜系统与计算理论中的标准模型(特别是图灵机)进行比较,分析其通用性。从细胞的结构和功能中抽象出计算模型,并分析其计算能力是提出膜计算理论的初衷。大量研究成果表明,无论是细胞型膜计算模型、组织型膜计算模型,还是神经型膜计算模型,无论是符号对象膜系统,还是字符串对象膜系统,无论是产生模式还是识别模式下的膜系统,都具有图灵机的计算能力。由此表明,细胞或细胞组织都可以作为强大的“计算机”^[22]。研究膜计算模型的计算效率主要是分析膜

系统是否能在可行时间范围内解决计算难问题,如 NP 难问题、PSPACE 问题等。在膜计算的三种类型中,利用膜的分裂、溶解、创建、合并和串复制等操作规则,可产生指数增长的计算空间,因而可通过空间换时间,解决多种计算难问题,如可满足性问题、点着色问题等^[22]。

2. 应用研究进展

到目前,膜计算已在优化领域^[50]、系统与合成生物学^[48]、故障诊断^[54]、移动机器人控制^[55]、经济学^[38]、计算机图形学^[39]和语言学等领域^[39]有了一些成功应用。

膜计算应用研究中发展得最好且充满勃勃生机的领域是采用 P 系统设计近似优化算法(也称为膜算法,更准确的说法是膜进化算法^[50])求解实际应用中的问题。膜进化算法是将膜系统的膜结构和计算机制与元启发式方法相结合,设计出用于求解各类问题的优化算法。在膜进化算法研究中,主要考虑了具有分层结构的细胞型膜系统和具有网状结构的组织型膜系统。在细胞型膜系统中,研究了嵌套膜结构的 P 系统、单层膜结构的 P 系统、嵌套和单层膜结构混合的 P 系统及活性膜 P 系统等。在组织型膜系统中,主要研究了具有静态网状结构的基本组织 P 系统和具有动态网状结构的种群 P 系统。膜进化算法中的元启发式方法主要考虑了遗传算法、模拟退火算法、量子进化算法、粒子群算法、蚁群优化算法和差分进化算法等。采用膜进化算法求解的优化问题包括旅行商问题、背包问题、可满足性问题、函数优化问题、机器人路径规则问题、控制器优化设计问题、信号和图像稀疏分解问题以及图像分割问题等。在此方向上,有两个课题值得特别关注和深入研究:膜进化算法的性能分析^[45]和直接采用膜系统求解优化问题^[49]。关于膜进化算法的详细综述,请参考文献[50]。

文献[48]汇集了膜计算在系统与合成生物学中的各种应用,包括用于研究细胞和细胞间计算模型的仿真工具、周围蛋白膜系统的统计模型检验、动态种群系统的膜计算模型、基于膜计算的生化网络离散模型和系统生物学的代谢 P 系统等。膜计算在故障诊断中的应用研究刚刚起步,主要讨论将脉冲神经膜系统与模糊推理结合,从而有助于诊断电气设备、输电网和电力机车牵引网等的故障。采用膜系统设计移动机器人控制器,可用于研究移动机器人跟随、绕墙走和避障等行为。膜计算用于故障诊断和机器人控制都是目前正在开展的新兴方向。

总之,膜计算应用研究尚处于初步阶段,正期待着突破性进展和新领域的拓展,这一直是膜计算领域重要的关注点。

3. 实现研究进展

膜计算实现研究包括软件、硬件和生化实现方法。文献[39]介绍了2006年前开发的十余个细胞型膜系统仿真软件,文献[41]和文献[43]分别介绍了采用Java语言开发的P系统仿真软件P-Lingua和MeCoSim,用于膜计算模型的仿真和验证。MeCoSim软件是基于P-Lingua内核的图形化仿真软件。P-Lingua软件和MeCoSim软件功能较为强大,能仿真各种细胞型、组织型和神经型膜系统,包括活性膜P系统、数值膜系统和概率型膜系统等,是当前膜计算领域非常受欢迎的仿真工具。P-Lingua软件和MeCoSim软件都

开源,且可以免费下载,其网址是 <http://www.gcn.us.es/>。关于膜计算模型硬件实现的研究进展如下:文献[56]采用现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Arrays, FPGA)探讨了膜计算模型的硬件实现,给出了基于可重载硬件的并行、分布和非确定性P系统硬件实现方案和原型。另外,文献[57]采用连通U形管和培养液探讨了转移P系统的生化实现方案。目前,关于各种膜计算模型的硬件、软件和生化实现方案还正在研究和完善中,有待更多的研究成果。

1.3 膜计算研究资源

1. 膜计算国际会议

随着膜计算的迅速发展,越来越多国际会议将膜计算列入征稿范围。到2004年,已经发展到有3个膜计算专题国际会议和数十个包含膜计算主题的国际会议,下面列出部分作为参考。

(1)膜计算专题国际会议如下。

膜计算国际会议, International Conference on Membrane Computing(CMC),自2000年起每年举行1次;

膜计算集体讨论会, Brainstorming Week on Membrane Computing(BWMC),自2003年起每年举行1次;

亚洲膜计算国际会议, The Asian Conference on Membrane Computing(ACMC),自2012年起每年举行1次。

(2)下面以开始时间早晚的顺序列出了包含膜计算主题的主要国际会议。

自动机与形式语言国际会议, International Conference on Automata and Formal Languages(AFL),自1980年起每两年或者三年举行1次;

德国生物信息学会议, German Conference on Bioinformatics(GCB),自1985年起每年举行1次;

形式化方法国际讨论会, International Symposium on Formal Methods(FM),自1994年起每年举行1次;

DNA计算国际会议, The International Meeting on DNA Computing(DNA),自1995年起每年举行1次;

DNA计算与分子编程国际会议, International Conference on DNA Computing and Molecular Programming,自1995年起每年举行1次;

生物信息学研究与应用国际讨论会, International Symposium on Bioinformatics Research and Applications(ISBRA),自1995年起每年举行1次;

非传统计算与自然计算国际会议, International Conference on Unconventional Computation & Natural Computation(UCNC),自1998年起每年举行1次;

非传统计算国际会议, International Conference on Unconventional Computation(UC),自1998年起每两年举行1次;