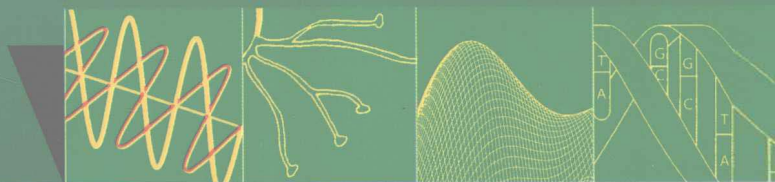




世界科技名著译丛

World-class Sci-tech Classics

 Springer



膜计算导论

Gheorghe Păun

著

潘林强

曾湘祥

宋弢

等译

Membrane Computing

An Introduction



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

世界科技经典

World-class Sci-tech Classics

膜计算导论

Gheorghe Păun 著

潘林强 曾湘祥 宋弢 等译

Membrane Computing

An Introduction



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Translation from the English language edition:
Membrane Computing. An Introduction by Păun, Gheorghe
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
Springer-Verlag is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved.
Original English language edition copyright © 2002 by Springer-Verlag
Berlin Heidelberg all rights reserved.
The Chinese translation edition copyright © 2012 by Huazhong University of
Science & Technology Press in arrangement with Springer-Verlag.

湖北省版权局著作权合同登记图字:17-2012-044 号

图书在版编目(CIP)数据

膜计算导论/Gheorghe Păun 著. 潘林强 曾湘祥 宋弢等译. —武汉:
华中科技大学出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-5609-7825-3

I. 膜… II. ①G… ②潘… ③曾… ④宋… III. 人工智能-计算 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 064131 号

膜计算导论

Gheorghe Păun 著
潘林强 曾湘祥 宋弢等译

策划编辑: 姜新祺 徐晓琦

责任编辑: 江 津

封面设计: 李 嫚

责任校对: 刘 竣

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)87557437

录 排: 武汉楚海文化传播有限公司

印 刷: 湖北新华印务有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 25.5 插页: 2

字 数: 572 千字

版 次: 2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 99.80 元



华中出版

本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

原 序

膜计算是自然计算的一个分支，它是从活细胞的结构和功能中抽象出来的计算模型。在基本模型中，膜系统（也称P系统）是一类分布式并行计算装置，细胞膜将细胞分割成多个区室，各区室同步处理对象的多重集。对象（对应于在细胞中不断进化的化合物）可以通过这样一个多层次结构的膜。膜可以消融、分裂和产生，它的渗透性也可以被改变。系统状态的一系列转移称为一个计算。一个停机计算的结果定义为计算终止时出现在特定膜（也称为输出膜）内对象的数目。对象可以有它们自己的结构，该结构可以用给定的基本分子的字母表上的字符串表示，在这种情况下，计算的结果是字符串的集合。膜系统的一个重要的变型是改变膜的层次结构（数学上对应于一棵树），而用类似组织的结构来代替（数学上对应一个图）。

这个计算模型（更准确地说，这类计算模型）于1998年末被提出，从那时起到本书手稿完成时，在短短4年时间内已发表了180多篇关于膜计算的论文，以及3篇博士论文（还有一些正在写作中）。因此要用一本专著介绍膜计算绝不是一件简单的事。特别是，新的概念正不断被引入，旧的结果被改进，新的结果被证明，研究的重点也随着需要发生着改变（从数学到实际），因此为这本专著选择核心的（持久的）概念和结果是件相当困难的事。

这就是为什么本书只是膜计算导论的原因，书中关于基本概念和结果的选择都带有作者的主观性。本书只是一个活跃的研究领域发展的缩影，目的是让更多的人见证和参与该领域的研究。只有在各位读者的关注和贡献下，本书才会有更多的后续版本出现。本书在形式上也极大地鼓励读者的参与，它尽可能地包含了所需的生物和计算机基础知识，并明确提出了许多待解决的公开问题，这些问题标记为Q1到Q39（本书末尾的表格列出了这些问题所在的页码）。

在本书结尾处还有另外一个表格，它列出了书中已证明的或提到的计算通用性结果，给出这个列表的目的是清晰地告诉读者已知的计算通用性结果，特别是不同参数（如膜的数目）在得到通用性中的作用。

对进一步的细节或者膜计算的当前发展感兴趣的读者，可以访问膜计算网站¹：
<http://bioinformatics.bio.disco.unimib.it/psystems>。

*

¹译者注，膜计算新网站：<http://ppage.psystems.eu>

本书是在过去4年中逐步完成的，写作中得到了许多来自不同国家的合作过的朋友们的帮助。在这里，我只列出他们的名字，希望没有遗漏：I. Ardelean, F. Arroyo, A. Atanasiu, A. Baranda, D. Besozzi, P. Bottoni, J. Castellanos, G. Ciobanu, E. Csuhaj-Varjú, J. Dassow, C. Ferretti, R. Freund, P. Frisco, T. Head, H.J. Hoogeboom, M. Ito, J. Kelemen, V. Manca, S. Marcus, M. Margenstern, C. Martín-Vide, A. Mateescu, G. Mauri, V. Mitrana, J. Pazos, A. Păun, M. Pérez-Jiménez, A. Rodríguez-Patón, Y. Rogozhin, G. Rozenberg, Y. Sakakibara, A. Salomaa, F. Sancho-Caparrini, Y. Suzuki, H. Tanaka, T. Yokomori, S. Yu, C. Zandron。其中一些朋友阅读过本书的手稿，并提出了有价值的意见。

在此对他们所有人致以衷心的感谢！

还要感谢每年举办的膜计算年会的与会者的巨大帮助，该会议开始于2000年，第一届在罗马尼亚Curtea de Arges举行。

特别感谢Claudio Zandron，他是前面提到的膜计算网站的管理员。

预先感谢那些将参与膜计算研究的读者、对本书内容发表评论的读者，以及可能对本书后续版本作出贡献的读者。

在本书写作期间，西班牙Tarragona的Rovira i Virgili大学数学语言学研究组提供了良好的工作条件。在那里，我作为西班牙科技部的Ramon y Cajal计划的研究人员从事研究工作。

最后，我需要提到的是与Springer-Verlag的愉快而高效的合作，特别向Ingeborg Mayer女士致以诚挚的谢意！

Gheorghe Păun

Tarragona, June 2002

译 者 序

1998年, Gheorghe Păun教授在芬兰访学时提出了膜计算的思想, 其目的是通过借鉴和模拟细胞、组织、器官或其他生物结构处理化学物质的方式, 建立具有良好计算性能的分布式并行计算模型。膜计算自提出后, 其计算模型已被证明具有等价于图灵机的计算能力, 并能有效地解决很多计算困难问题(如NP完全问题)。膜计算由于在计算机科学、经济学、语言学、图形学、系统生物学、组合优化、密码学等领域具有广泛应用价值, 因此受到许多学者的关注。2003年, 美国科学情报检索机构(Institute for Scientific Information, ISI)将膜计算列为计算科学中快速发展的前沿领域(<http://esi-topics.com/erf/october2003.html>)。

本书内容全面, 讲述深入浅出, 便于理解, 可用于课堂教学和自学, 是很好的膜计算入门书。本书作者Gheorghe Păun是罗马尼亚科学院院士, 欧洲科学院院士, 国际信息科学院院士, 多年来从事自然计算方面的研究。他曾两次来到中国, 并预言中国的科学研究将在未来世界的科学发展中扮演非常重要的角色。把本书翻译成中文, 以帮助中国读者更好地了解膜计算, 是Păun院士的一大心愿。时下正值Păun院士60岁生日。为此我们组织翻译、出版了这本优秀的膜计算入门书籍, 并以此作为Păun院士的60岁生日礼物。

本书的翻译和出版得到了国家自然科学基金委的资助(项目号: 61033003)。课题组成员张兴义、江赞、牛云云、卢春、江克勤、贺娟娟、王硕、刘雪明、高见、宋勃升等同学参与了本书的部分翻译工作。刘光武和刘向荣阅读和修改了部分译稿。

本书的出版得到了华中科技大学出版社姜新祺总编辑的支持和帮助, 在此致以诚挚的谢意!

由于译者的专业知识和外语水平有限, 书中错误在所难免, 敬请读者批评、指正。

译 者

2012年3月

目 录

第一章 绪论:膜计算—它是什么,它不是什么	1
第二章 预备知识	6
2.1 生物膜	6
2.1.1 质膜的结构	7
2.1.2 透膜运输	8
2.1.3 细胞分裂:有丝分裂	12
2.2 神经元	12
2.3 可计算性初步	14
2.3.1 基本概念和符号	14
2.3.2 串和语言的运算	15
2.3.3 Chomsky 文法	15
2.3.4 语言的刻画与必要条件	19
2.3.5 Lindenmayer 系统	20
2.3.6 有穷自动机与图灵机	22
2.3.7 受控重写	25
2.3.8 关于 CS 和 RE 的差异	34
2.3.9 通用图灵机和 0 型文法	35
2.3.10 剪接操作、插入-删除操作、上下文邻接操作	37
2.3.11 复杂性初步	39
2.3.12 多重集	42
2.4 文献注释	43
第三章 符号-对象膜系统	44
3.1 基本类型	44
3.2 两个例子	47
3.3 基本类型的计算能力	50
3.4 基本扩展	54
3.4.1 膜的溶解	54
3.4.2 进化规则的优先次序	59
3.4.3 两个例子	60

3.4.4 带规则优先次序的膜系统的计算能力	63
3.4.5 具有同步特性膜系统的计算能力	66
3.5 形式化定义	72
3.6 进一步扩展	78
3.6.1 弱目标命令	78
3.6.2 控制膜的渗透性	79
3.6.3 由浓度控制的通信	85
3.6.4 在计算过程中产生规则	87
3.6.5 使用促进剂或抵制剂	89
3.7 带外部输出的系统	98
3.8 文献注释	108
第四章 通信取化进化	111
4.1 同向/反向转运系统	111
4.2 计算通用性	114
4.3 控制规则使用	122
4.4 跟踪对象的轨迹	124
4.5 带载体的膜系统	131
4.6 文献注释	138
第五章 结构化对象	139
5.1 重写膜系统	140
5.2 若干变型系统及其计算能力	156
5.2.1 规则创建	156
5.2.2 条件重写	156
5.2.3 条件通信	161
5.2.4 复制重写	172
5.2.5 并行重写	180
5.3 剪接膜系统	183
5.4 上下文膜系统	194
5.5 插入-删除膜系统	196
5.6 文献注释	194
第六章 膜网络	204
6.1 剪接情形	205
6.2 使用同向/反向转运规则	206
6.3 类神经膜网络	216

6.3.1 定义和实例	216
6.3.2 计算能力	222
6.3.3 计算效率	233
6.4 文献注释	235
第七章 以空间换取时间	236
7.1 膜系统的复杂类	236
7.2 膜分裂法	238
7.2.1 线性时间内解决 SAT 问题	244
7.2.2 解决哈密尔顿路径问题	249
7.2.3 使用协作规则	252
7.2.4 膜分裂是否必要	260
7.3 膜生成法	262
7.3.1 解决 SAT 问题	270
7.3.2 解决 HPP 问题	275
7.3.3 字符串-对象	277
7.4 字符串复制	279
7.5 预计算资源的使用	281
7.6 文献注释	284
第八章 更多探究结果	286
8.1 判定性结果	286
8.2 一元系统	296
8.3 上下文无关语言的刻画	299
8.4 字符串-对象的评估	302
8.5 增强型膜处理系统	304
8.6 成果概览	307
8.6.1 广义串行膜系统	307
8.6.2 二维对象	309
8.6.3 膜系统与流 X-机	309
8.6.4 膜系统与环境演算	311
8.6.5 通用系统的直接构造	313
8.6.6 进一步的研究课题	315
第九章 从抽象再到现实	318
9.1 细胞中的能量	318
9.2 细胞的芽生	322

9.3 细胞的双层膜结构	324
9.4 在电子计算机上的实现	327
9.5 人工生命的应用	331
9.6 模拟光合作用	338
公开问题	343
通用性结论	344
参考文献	347
索引	367
附录 膜计算最新进展	371
F.1 前面章节中公开问题的跟踪研究	371
F.2 脉冲神经膜系统	376
F.2.1 非正式的介绍及例子	376
F.2.2 形式化定义	379
F.2.3 一些结果	381
F.3 分布式膜自动机	383
F.3.1 膜自动机计算能力的再研究	385
F.3.2 分布式膜自动机的计算能力	388
附录参考文献	391

第一章 绪论：膜计算——它是什么，它不是什么

对于算法（及计算）概念的形式化研究可以追溯到G.W. Leibniz (1646—1716)，那时人们致力于对人类所执行的计算进行建模，如银行职员的工作。直到20世纪前半叶，图灵[238]提出了形式化的自动机理论模型，这使人们对于算法与计算的形式化研究达到了顶峰。这些形式化理论模型是十分成功的，因为在20世纪40年代，正是由它们催生了第一台电子计算机的问世。算法概念形式化的研究中也成功地借鉴了一些来自生物科学的理念，比如，神经网络中神经元的机能（Kleene[106], McCulloch和Pitts[165]）。

20世纪后半叶，越来越多的人致力于研究自然界中存在的计算模式，并从这些自然计算模式中获得更好、更有效的算法，甚至是全新类型的计算机。比较经典的例子包括遗传算法（更一般地讲，进化算法）和人工神经网络，以及在近期研究中出现的源于分子生物学的DNA计算或生物分子计算。

所有这些领域（进化计算、神经计算和生物分子计算）都属于自然计算的新兴研究领域。自然计算关注的是自然界中进行的计算，或者受自然界启发而产生的计算方法。

膜计算是自然计算的一个分支，它的发展为生物分子计算提供了丰富的计算框架。在这一意义下，膜计算是更加接近“具有计算功能的细胞”概念的计算模型。膜计算的发展始于观察经过自然界数千年进化形成的令人惊讶的生命机制——细胞，它的体积微小但结构复杂，是最小的生命体。另外，细胞膜在细胞结构与细胞功能中发挥着重要的作用：细胞体借助质膜与环境分隔开来，并且细胞内各个细胞器之间也是靠内膜实现相互分离的。膜计算模型正是将活细胞这一特征形式化而得到的计算框架，故称为膜结构。

在生物化学领域的研究中，膜被用来定义生命现象，但膜的功能并没有受到足够的重视。在这里我们不再详细阐述膜结构的功能，仅仅简单回顾一下Kauffman[103]提出的论断：“生命的秘密，繁殖的源泉，不是在优美的Watson-Crick碱基配对原则中发现的，而是在具有催化作用的‘小闭包-细胞’中成就的”。同样，我们在文献[90]中读到：“如果真的存在细胞活动的支配者，那这个支配者就是细胞膜。从拓扑学研究

的角度出发，所有细胞的重要特性都与细胞膜有关。膜是多细胞生命体的基本组织者。”

在文献[144]中读者可以找到类似的对细胞膜功能的描述，在这里我们仅仅强调这样一个事实，即膜在活细胞中发挥着举足轻重的作用。膜结构的功能不仅在于它定义了细胞内部和外部的边界，使细胞体与其外部环境分离开，而且它还具有重要的生化作用，这也是本书感兴趣的研究点之一。细胞膜使细胞与环境分隔开来，并能保护细胞免受来自环境中有害物质的侵害。细胞内膜可以将细胞内部划分为若干个分隔开的区域，它们对细胞核内的遗传物质起到了一定的保护作用。膜也经常参与到许多在细胞器中发生的化学应当中，它们为细胞器之间以及细胞与环境之间的通信（即化学物质的转运）提供选择性通道。当我们进一步详细介绍细胞膜的结构与功能时，将重新探讨细胞膜的以上功能。

不难发现，许多计算机科学领域的突破性进展都来源于自然界的启发，这些进展不仅在理论上而且在实际应用中都引起了人们的广泛关注。对于一个数学工作者来说，他自然会思考以下问题：细胞可以作为计算机科学发展的一个启发源吗？我们能从活细胞的结构和功能中抽象出一个计算模型来吗？细胞是一个“计算机”吗？我们能通过活细胞实现计算，并最终得到“湿计算机”吗？或者说受细胞结构启发的模型能在现有的电子硬件上实现吗？图1.1给出了一个非正式的，但能够反映上面提到的自然计算（受自然启发的计算）的示意图。

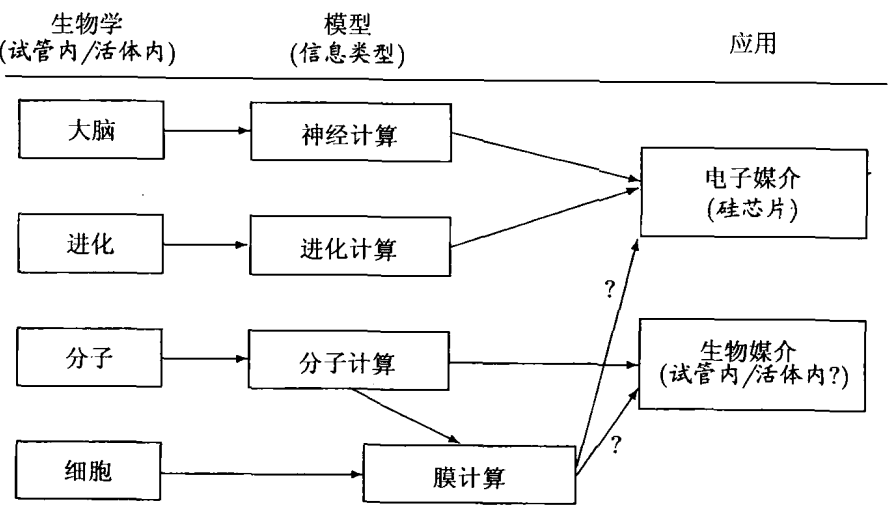


图 1.1 自然计算涉及的4个生物领域

尽管膜计算模型是受活细胞的结构启发得到的，但是本书研究膜计算的目的是提供计算模型，正如计算机科学中所研究的计算理论那样。

膜计算模型可以简单地概述如下。首先考虑膜结构，它由主膜（也称为表层膜）

及主膜内按层次结构排列的膜组成，这些膜将细胞内部划分为若干个区域（每个区域都被一个膜界定，如果存在某个最低层膜，其内部没有任何子膜的膜，则该膜被称为基本膜）。尽管人们经常使用平面的文氏图来描述膜的结构，但是膜结构其实是一种三维的囊泡形式。图1.2形象地描述了上述概念。

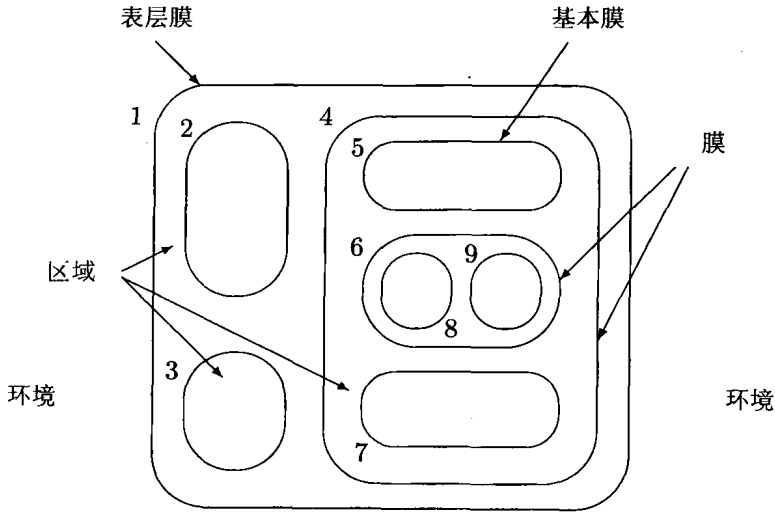


图 1.2 膜的结构

每个区域中都包含某些对象的多重集，在多重集中，同一对象是可以多次出现的（每个对象对应于细胞内的某种化学物质，而它的数量可以用一个非负整数表示）。对象可以用一个给定的字母表中的符号表示，并以此作为它们的名称。在语源学意义上，它们是原子，没有结构而且不可再分。对象可以根据所在膜内的进化规则实现进化，并且不同区域内的进化规则是不同的。由于膜与区域是一一对应的，因此每个膜内的进化规则也是不尽相同的。进化规则的使用是个非确定性的过程（使用的规则与进化的对象都是随机选取的）。极大并行的进化方式是指在每一步进化中，所有能够进化的对象都必须完成进化，而且对象也可以在区域之间进行通信。

细胞膜有消融、分裂或创建的功能，据此我们可以得到膜系统的格局以及格局之间转移的概念。我们假设存在一个全局时钟，使得每个区域内的时间单元是相同的，因此可以认为格局之间转移的过程是同步的。一系列格局之间转移构成一个计算。如果一个计算的最终格局中没有任何可以进化的对象及可以使用的进化规则，则称之为停机计算。对于一个停机计算指定输出膜中的对象数目就是系统计算的结果。

据此，可以这样定义膜系统的一个计算：它开始于膜系统的某个初始格局（包括初始的膜结构以及每个区域内的初始对象），计算可以随着格局的转移进行下去，直至输出膜中出现计算结果时停止。

在上述基本模型的基础上，我们又研究了膜计算模型的一些变型。例如，考虑规

则之间的优先次序, 改变膜的厚度与渗透性, 考虑有条件的使用规则(取决于促进剂/抑制剂的出现与否), 以及规则的消耗与再生(进化规则对应于细胞各区域内发生的许多化学反应都与酶有着密切的联系)等。

许多细胞内部的化学物质有内部结构, 可以用字符串(而不是单个字符)来表示(例如, DNA分子序列是由四种碱基构成的, 蛋白质是由20种氨基酸构成的), 因此我们需要使用串的进化规则。串的进化方式既可以是经典的重写操作, 也可以是一些特殊的操作, 如剪接操作、插入-删除操作、交叉操作, 以及复制操作, 等等。当膜系统使用串对象时, 计算结果是在停机计算状态下输出膜内串的集合, 因此计算的结果就是一个语言。另外一种变型是用多细胞结构取代单个细胞, 并研究类组织的(基本膜)膜系统的性质。

从字符对象转变为字符串对象是一个完美的类推。例如, 我们可以回顾一下文献[125]中提出的Lindenmayer系统(详见文献[89, 218]), 它是一个从多细胞组织中抽象出来的文法模型, 该模型将细胞视为基本的原子物质, 即没有任何结构的字符。在符号对象膜系统中, 假设我们进行“放大”, 则它能够显示出一个细胞的膜结构及出现在区域中的化学物质(分子), 由于这些化学物质是没有内部结构的“原子实体”, 因此我们使用单个符号来表示这些化学物质。如果我们再次进行“放大”, 也能辨别出这些化学物质的结构。由于细胞内许多分子的结构都可以用字符串表示, 因此我们考虑以字符串作为对象的膜系统。

显然, “放大”后的操作是对应于特定层次进行的。当我们只看到符号对象时, 操作是在这些物质的符号上进行的; 当我们看到物质的字符串结构时, 那么操作则是在字符串上进行的。

从计算能力的角度看, 膜系统具有两个相当吸引人的性质: 计算完备性(它们在计算能力上等价于图灵机)及计算高效性(它们以十分自然的方式在线性时间内产生出指数工作空间, 能够在多项式时间内解决NP完全问题)。

这里必须指出两点: 其一, 膜系统是有限的、离散的计算模型, 图灵机完全可以模拟它的工作过程, 因此膜系统没有突破图灵-丘奇屏障(Turing-Church barrier); 其二, 利用膜系统对NP完全问题所求得的“解”是在理想框架中得到的。例如, 为了在 n 步内得到 2^n 个“处理器”, 我们需要反复进行膜分裂, 即复制细胞的操作。细胞分裂是生物学领域中十分普遍的现象, 但是直到现在也没有在生物器件上实现膜系统模型的计算。目前, 我们还不知道如何在生物学中或者在电子计算机上找到具有实际意义的膜计算实现方式。因此现在探讨图1.1中的问题未免显得太早, 暂且不说是否能够回答它们, 至少我们在回答这些问题之前都必须认真地进行交叉学科的科学探究。

正如某些已经开展研究的领域一样, 新领域的研究能够或必须从不同的方向开展, 所寻找的计算模型应该在数学上尽可能优美, 计算能力尽可能强大, 计算效率尽可能高。正如M. Conrad在文献[43]中所指出的那样, 后两个标准有时可能是自相矛盾的。实际上, M. Conrad阐明了计算模型装置的三个期望指标的不相容性: 通用性/可编程性、效率、适应性/可进化性。最后, 还要求计算模型要尽可能地与生物现象一

致。这些目标看起来是互相矛盾的，但它们可以启发人们研究不同的计算模型，尝试研究各种要素的组合。

总之，膜计算是（理论）计算机科学的一个分支，是数学科学研究的一个新领域，但并不属于实际的计算应用领域。研究者可能已经开始探索膜计算在某些科学领域的应用前景了，因为源于膜计算的概念和结果可以被借鉴或转化到其他的研究领域——本书第九章提供了一些这方面的例子。

介绍一下膜计算不是什么（至少目前）也是很重要的：它不是为“实际”细胞建模，并最终获得生物知识而设计的计算框架。神经网络的一本经典专著[5]是这样开篇的：“虽然神经网络模型对于人们研究神经系统没有任何的实质性关系，但神经系统对于神经网络的研究是有帮助的。因为我们可以利用神经系统的大量思想、经验和事实来研究神经网络模型。”这段话同样适用于膜计算模型。膜计算模型源于对细胞结构和功能的抽象，其目的在于发现与可计算性理论有关的思想，但是抽象过程中我们却把生物现象远远地抛在了脑后。膜计算模型本身及其相关的结论都是与计算机科学有关的，并没有任何的模型或理论是以将其直接应用于（传统）生物学为目的的。当然，这并不意味着我们不能将一些有意义的信息返回到生物学中，相反，这是膜计算研究领域的一个非常可能的、重要的未来研究目标。而且，考虑到某些连续的数学模型在研究生物学时存在的不足，将膜计算中得到的结论返回到生物学中还是十分有必要的。可计算性研究的重要进展之一就是能够处理海量数据。这种计算模型已经成功地被应用到生物学中，这表明采用离散的计算机科学启发的模型建立一个生物数学化的新时代是十分有可能的。膜系统是离散的计算机科学模型，但寄希望于在它变得与生物学密切相关之前，将它回归到真实的“细胞”也是十分有必要的。

同时，膜计算研究领域要做的事情还很多，从阐明膜计算结构中的许多数学问题开始，到实现或应用于实际问题结束。膜计算框架是既一般又通用的：它是基于区域之间通信的计算模型，具有许多以不同方式通信的、相互分离的“处理器”，各“处理器”之间同步地、非确定地、并行地处理多重集（多重集是经常出现在计算机科学中的数据结构，但从没有被系统研究过）——这使膜计算模型的研究与其他计算分支模拟，以及与其他领域的协作发展成为可能。

总之，这就是膜计算，一个计算机理论学家要探索的新领域。

第二章 预备知识

膜计算的主要计算模式是受生物活细胞的结构与功能启发而得到的，通过将活细胞的结构与功能抽象为形式化的进程，并将各个进程进行综合，从而得到了膜计算的计算模式。为了使读者更深入地了解膜计算，本章首先简单介绍一些有关生物膜的知识，主要包括质膜的特性、细胞质的区域性划分、化学物质穿越细胞膜的现象，以及细胞之间的通信方式等。这些生物知识都来自于纯生物科学领域的著作，其中大部分源于文献[4]所列著作，也有一些源于文献[9, 127, 129, 237]等所列专著。由于本书面向的读者是计算机领域的科研工作者，因此对于生物科学知识的阐述将主要采用图和表的形式，这将有助于读者理解下面章节中定义的膜计算模型。随后，简要介绍了神经元细胞及其之间协同工作的机制。本章的最后一节将着重介绍可计算性方面的基本知识，包括本书涉及的形式语言与自动机，以及复杂性基本理论等。当然，熟悉这些理论的读者可以跳过本章的阅读，或者在需要的时候将本章作为查阅某些数学概念的参考（例如，可以查阅矩阵文法的概念，因为这个概念在整本书中会经常被提及）。

2.1 生物膜

细胞是生命活动的基本功能单元。活细胞具有复杂且有序的结构，细胞内部每时每刻都会有成千上万的化学反应发生。细胞可大致分为真核细胞与原核细胞两类。真核细胞有细胞核，并且它的结构较原核细胞要复杂得多，因此本书将真核细胞作为主要的研究对象。真核细胞由许多互不相同的细胞器组成，一般来说，细胞器都是由膜来限定界限的。

在众多组成细胞的重要结构中，本书将涉及：质膜（它是细胞的表层膜，将细胞与环境进行界定）、细胞核（细胞核主要用于存储以DNA或者RNA分子形式编码的遗传信息，存储RNA分子的核仁位于细胞核的中心，且细胞核外围绕着两层核膜）、线粒体（线粒体的功能是为细胞的活动提供能量，它的周围也有细胞膜）、高尔基体（复杂的蛋白质加工“工厂”，是细胞代谢的核心）、核糖体（与蛋白质合成有关）、内质网（是一个复杂的膜系统，主要用于细胞器之间的分子运输与通信），以及溶酶体（由膜包裹的小囊泡，主要与分子消化有关）。

需要强调的是，细胞由许多的细胞器组成，而这些细胞器是由膜隔离（或限定、

环绕、保护)而来的。所有的膜结构都具有两个主要的功能,即它们都是细胞质区域的划分工具和细胞器之间的通道,此外膜结构的第三个功能是它能为一些化学反应(使用催化剂、促进剂)提供良好的反应场所。这一功能从计算的观点来看也是十分重要的。

所有内膜的结构在本质上与质膜的结构都是相似的,这是我们回顾质膜的结构与功能的原因。同时,质膜的特性也与后续章节的理论发展有很大关联。

2.1.1 质膜的结构

不同物种质膜的结构虽不尽相同,但质膜的基本结构是大致相同的。目前,被人们广泛接受的质膜的结构是1972年由S. Singer和G. Nicolson[224]提出的液态镶嵌模型。根据液态镶嵌模型描述,膜是一种镶嵌有蛋白质分子及其他分子(如胆固醇、类固醇)的磷脂双层结构。嵌套的方式包括完全嵌套与部分嵌套两种。图2.1形象地表示了这两种结构。

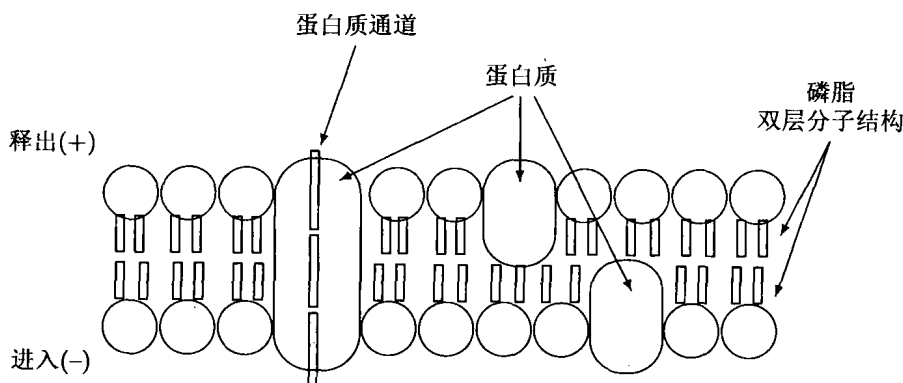


图 2.1 质膜结构示意图

磷脂分子主要由两个部分组成:极性头和非极性尾,其基本结构可以参照图2.2(a),而较详细的描述如图2.2(b)所示。极性头由磷酸盐组群与含氮组群两种结构组成,而非极性尾则由两条脂肪酸链组成。由于头尾之间是靠丙三醇(甘油)分子实现连接的,因此极性头分子的双层膜具有亲水性,而非极性尾分子则具有疏水性。这种分子结构的特性恰好可以解释极性头分子的布局使得细胞内外水溶性呈现出由内而外逐渐增强的现象。极性头使得膜内外呈现出两极化现象——外部显阳性,内部显阴性,这为阳性离子进入细胞膜与阴性离子释出细胞膜提供了便利的通道。极性头的极化现象、氢键的键连,以及来自细胞质与细胞外部环境水分子的静电影响都具有加固细胞膜的磷脂双层结构的作用。

由于极性头的极性以及化学与静电的作用,磷脂分子可以在质膜的双层结构中进行移动,并且它总是保持在双层结构的位面上进行移动。这就是为什么质膜的模型又