

“十三五”国家重点图书
Springer 精选翻译图书

分子通信与纳米网络： 基础理论与应用

Molecular Communications and Nanonetworks:
From Nature to Practical Systems

[土耳其] Barış Atakan 著
韩 帅 孟维晓 彭木根 译

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十三五”国家重点图书
Springer 精选翻译图书

分子通信与纳米网络： 基础理论与应用

Molecular Communications and Nanonetworks:
From Nature to Practical Systems

[土耳其] Barış Atakan

韩帅 孟维晓 彭木根



内 容 简 介

本书从通信理论的角度介绍分子通信和纳米网络的原理和技术,主要探讨发射纳米机器(TN)和接收纳米机器(RN)两个节点的分子通信。根据信息分子如何被引导和传输至接收纳米机器,发射纳米机器和接收纳米机器之间的分子通信分为两种类型:第一种类型称为被动分子通信(PMC),第二种类型称为主动分子通信(AMC)。在被动分子通信中,分子从发射纳米机器被动扩散至接收纳米机器,不需要一个中间系统来引导和传输分子。在主动分子通信中,当分子被发射纳米机器发出后,需要一个中间系统来引导并传输至接收纳米机器。

本书可作为高等院校信息、通信、化学和生物学等学科的本科生和研究生教材,也可作为相关行业工程师和研究人员的参考书。

黑版贸审字 08-2017-061 号

Translation from English language edition:

Molecular Communications and Nanonetworks: From Nature To Practical-Systems
by Barış Atakan

Copyright © 2014 Springer Science+Business Media New York

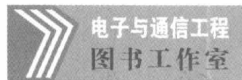
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

分子通信与纳米网络:基础理论与应用/(土)巴里斯·阿塔坎(Baris Atakan)著;韩帅,孟维晓,彭木根译. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018.4
ISBN 978-7-5603-6567-1

I. ①分… II. ①巴… ②韩… ③孟… ④彭… III. ①通信网-研究 IV. ①TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 062767 号



策划编辑	许雅莹 杨 桦 张秀华
责任编辑	李长波 庞 雪
封面设计	高永利
出版发行	哈尔滨工业大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真	0451-86414749
网 址	http://hitpress.hit.edu.cn
印 刷	哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本	660mm×980mm 1/16 印张 12 字数 210 千字
版 次	2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5603-6567-1
定 价	40.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

译者序

分子通信与纳米网络是电子与通信领域的一个重要新兴研究领域,同时也是与医学和生命科学密切交叉的学科方向。本书是本领域国内首部译著。

基于分子通信的纳米网络在生物医学、工业和环境等诸多领域具有广阔的应用前景。例如,在生物医学领域,由于在组件体积、生物兼容性和生物稳定性等方面具有突出的优点,因此基于分子通信的纳米网络能够为医学领域提供低侵入性的微创医疗技术;在农业环境领域,生物启发的纳米网络可以解决许多目前技术无法解决的环境问题,如生物降解、生物多样性控制和空气污染监控等;尤其在军事领域,基于分子通信的纳米网络能够被应用于核生化(NBC)的监测与防御,或被应用于设计与制造先进的伪装设备和军用服装装备(如自调节温度或检测士兵伤情)等用途。

本书的出版将补齐黑龙江省甚至是我国在分子通信与纳米网络领域相关书籍缺少的短板。紧跟国际学术和科学前沿领域,抓住分子通信与纳米网络发展的契机,以期在产业升级的浪潮中,以精准的科研方向和新科学技术助力经济的发展。

《分子通信与纳米网络:基础理论与应用》这本书中文版能够出版,还要追溯到2010年底。当时,译者一边准备着博士毕业答辩,一边还在准备一个科研项目的结题验收。另外,虽然已经做好心理准备将来留在哈尔滨工业大学(简称“哈工大”)继续从事科研和教学工作,但是对于自己能否胜任并成为一名合格的高校教师,还是比较忐忑。幸运的是,孟维晓教授一直鼓励我、鞭策我,使我能够不断前行。就在此时,孟教授把国际知名的 Hsiao-Hwa Chen 教授请到哈工大,与电子与信息工程学院(简称“电信院”)的师生进行交流。受 Hsiao-Hwa Chen 教授的启发,我跳出了一个博士生的思维。当我开始以一名从事教育的科研人员的角度思考时,真真切切地感受到需要开辟思路,要敢于探索甚至引领一个未知的方向,这是我下决心翻译本书的起因。

2011年,我以一名在职教师的身份,前往加拿大纽芬兰纪念大学进行博士后研修,与 Cheng Li 教授、Hsiao-Hwa Chen 教授以及其他国际学者有了更深层次的沟通。期间,了解到美国佐治亚理工学院 Ian F. Akyildiz 教授正在进行分子通信的研究,这是我首次真正地注意到分子通信。恰巧,2012年受哈工大国际合作与交流基金的资助,经 Hsiao-Hwa Chen 教授的引荐,孟维晓教授邀请 Ian F. Akyildiz 教授到哈工大访问。虽然,我因为身在加拿大无法在现场聆听讲座,但是通过网络了解了讲座相关的情况。2013年初,我完成了博士后的工作回到哈工大,心中依然想是否可以让分子通信为更多人所了解。2014年,终于见到此书出版,于是机缘已到,遂完成此愿。

本书的翻译能够顺利完成,首先要感谢为此付出时间和经历的团队成员,包括张宇、岳晋、刘霞靓、邓雪菲、张毅、李殊勋、周永康、黄毅腾、高辞源等同学。特别感谢电信院通信所沙学军教授和哈工大科学技术研究院王晓红教授对分子通信方向的关注和支持。另外,对学院和通信所各位领导和同事的鼓励一并表示感谢。最后,之所以能有时间和精力完成翻译工作,是由于我的父母、妻子和岳母帮扶我分担了家里本应由我来操持的繁重家务,庆幸有你们的理解和支持。

译者

丁酉年正月初二

于哈工大科学园

前 言

分子通信是地球上最古老和最普遍的通信机制之一。它是包括单细胞生物体、多细胞的动物和植物在内的所有生物体为了保持其重要的生命功能所必需的机制。例如,许多细菌会响应其邻近细菌分泌的信号分子,这个过程被称为群体感应,使得细菌能够调节自己的行为,包括蠕动、抗生素的产生、孢子形成和性接合。信号分子(如信息素)被广泛应用在大量动物种群中,从昆虫到灵长类动物都使用它来传输和接收信息以完成许多行为功能。例如,信息素可以由个体释放来指导其他个体去合适的食物地点或通知他人捕食者的存在,或其他各种行为的功能。此外,细胞使用信号分子来通信以构成多细胞生物体(如人类)。例如,在神经系统中,电脉冲(即动作电位)和神经递质(如信号转导分子)被神经元细胞一起使用来与靶细胞进行通信。在内分泌系统中,内分泌细胞释放激素分子(即信号分子)到血液中与远处的靶细胞进行通信。此外,间隙连接通道使相邻细胞利用细胞内的小信号分子(如钙)进行通信,并且这种细胞间隙通道通信能调节许多细胞活动。

除了自然界中这些迷人的分子通信机制,近年来在纳米和生物技术领域的研究揭示了分子通信将成为微小仿生机器或众所周知的纳米机器(如工程细胞和生物纳米机器人)等领域中一种很有前途的方案。这些纳米机器之间的互联(即纳米网络)有望应用在复杂的医疗、工业和环境中。在这些应用中,纳米机器之间的分子通信可以保证可靠性和可控性。更为重要的是,分子通信能够协调不同的纳米机器种类,以实现高复杂度的行为,增加设计的可实现性。例如,一组不进行通信的工程细胞相互之间是异步的,不能合作完成一个预定的任务。通信的工程细胞可以克服异步行为问题和协调细胞群体来完成工程中的应用。此外,分子通信也可能应用于复杂的应用程序,以有效地收集和输入关联感觉进而做出决策。

本书从通信理论的角度介绍了分子通信和纳米网络的概念,主要探讨发射纳米机器(TN)和接收纳米机器(RN)两个节点间的分子通信。根据信息分子如何被引导和传输至接收纳米机器,发射纳米机器和接收纳米机器之间的分子通信可以分为两种主要类型:第一种类型称为被动分子通信(PMC),第

二种类型称为主动分子通信(AMC)。

在被动分子通信中,分子从发射纳米机器自由扩散至接收纳米机器,不需要一个中间系统来引导和传输分子。根据接收纳米机器接收信息分子的方式,PMC分为两种类型:使用吸收剂的PMC和使用配体-受体结合方式的PMC。在使用吸收剂的PMC中,接收纳米机器被假定为一个吸收者,能够吸收在任何时刻到达其表面的分子。在配体-受体结合方式的PMC中,接收纳米机器假定有表面受体来通过配体-受体结合机制,以接收在其附近的分子。

在主动分子通信中,当分子被发射纳米机器发出后,需要一个中间系统来引导、传输至接收纳米机器。在AMC方式中,主要有4种不同的中间系统。在第一种系统中,使用分子马达携带分子在发射纳米机器和接收纳米机器之间传输。在第二种系统中,假定发射纳米机器和接收纳米机器是相联系的,两者之间的间隙连接通道引导分子的扩散。在第三种系统中,信息分子在发射纳米机器中被注入运动的细菌中,然后承载分子的细菌按照接收纳米机器发出的引导分子向接收纳米机器运动。如果细菌到达接收纳米机器,信息分子便由接收纳米机器接收。在第四种系统中,发射纳米机器和接收纳米机器被假定为运动的。信息分子附着在接收纳米机器的表面上,每当发射纳米机器和接收纳米机器发生碰撞时,信息分子与接收纳米机器表面上的受体相互作用来传递承载的信息。关于PMC和AMC的具体原理,在本书中会进行详细介绍。

本书第1章介绍分子通信和纳米网络的相关概念。现有的和假想的纳米机器、纳米机器人和基因工程机器第一次被讨论。然后,对分子通信范例(包括自然产生的分子通信机制)进行分类和简要介绍。

第2章介绍使用吸收剂方式的被动分子通信。在本章中,接收纳米机器被假设为一个吸收器。在发射纳米机器的分子发射过程被讨论后,通过假定随机漫步和扩散现象中的细节,对发射分子的扩散进行了详细的阐述。然后,通过接收纳米机器导出的接收速率和浓度检测、梯度感知技术对接收纳米机器的分子接收过程进行详细讨论。通过结合发射、扩散和接收的数学模型,介绍PMC方式下的统一模型。最后,对采用吸收剂的PMC方式下设计的分子通信理论和技术进行介绍。

第3章分析了配体-受体结合方式的PMC方式。在本章中,接收纳米机器被假定在其表面存在表面受体,通过配体-受体结合机制来接收附近的分子。配体-受体结合的确定性和概率性模型被首次提出。然后,讨论了基因调控网络中的PMC,并提出了结合分子扩散和配体-受体结合的统一模

型。结合浓度和梯度检测的配体—受体结合精度也被详细讨论。最后,本章给出了配体—受体结合模式下的 PMC 通信理论和技术。

第 4 章讨论了 4 种中间系统的 AMC 方式。首先,通过讨论在活细胞中进行货物运输的马达蛋白的物理特性,提出了使用分子马达的 AMC 方式。然后,通过讨论间隙连接通道的交互信号,介绍使用间隙连接通道的 AMC 方式。其次,讨论了细菌的游动行为和使用运动细菌的 AMC 的相关概念。最后,基于接触依赖的细胞间信号,提出了移动纳米机器中的 AMC 方式。

致谢

我要感谢我的妻子和儿子,因为他们给了我很大的激励。我深深感激我的妻子和她无尽的爱。我也要衷心地感谢我的父母、岳母岳父以及兄弟姐妹所给予我的无数支持。

巴里斯·阿塔坎
于土耳其伊兹密尔

目 录

第 1 章 纳米机器间的分子通信	1
1.1 纳米机器、纳米机器人和基因工程机器	1
1.1.1 纳米机器和分子机器	1
1.1.2 纳米机器人	3
1.1.3 基于合成生物学的基因工程机器	5
1.2 自然界中细胞间的分子通信	7
1.3 纳米机器间的分子通信	14
1.4 分子通信的架构	16
1.5 本书的组织结构	20
本章参考文献	20
第 2 章 基于吸收器的被动分子通信	28
2.1 PMC 的通信架构	28
2.2 分子的发射	29
2.3 分子的扩散	31
2.3.1 随机游走	32
2.3.2 随机游走的统计特征	35
2.3.3 菲克方程	36
2.3.4 扩散方程的解决方案示例	40
2.4 分子的接收	45
2.4.1 完美吸收器的分子接收速率	46
2.4.2 完美吸收器的分子捕获概率	48
2.4.3 平均捕获时间	49
2.4.4 完美吸收球体和完美监控球体的浓度感知精度	51
2.4.5 完美吸收和完美监控球体的梯度感知精度	53
2.5 基于完美吸收器的 PMC 统一模型	58
2.5.1 基于反应-速率方程的统一模型	59

2.5.2 基于反应—扩散方程的统一模型	65
2.6 基于吸收器的 PMC 通信理论和技术	68
2.6.1 基于吸收器的 PMC 通信速率	68
2.6.2 基于吸收器的 PMC 浓度信道的通信速率	68
2.6.3 基于吸收器的 PMC 时间信道的通信速率	72
2.6.4 基于吸收器的 PMC 二进制调制	75
2.6.5 基于单分子的二进制调制	75
2.6.6 基于多分子的二进制调制	81
2.6.7 基于不同分子类型的 M 进制调制	84
2.6.8 基于分子阵列的二进制调制	90
本章参考文献	99
第 3 章 基于配体—受体结合机制的被动分子通信	103
3.1 被动分子通信架构	103
3.1.1 基于表面受体的分子接收	104
3.1.2 配体—受体结合的概率问题	108
3.1.3 PMC 配体—受体结合中的一种改进的扩散方程	111
3.1.4 扩散对配体—受体结合的影响	112
3.1.5 表面受体的浓度感知精度	116
3.1.6 表面受体的梯度感知精度	121
3.1.7 基因调控网络中的 PMC	123
3.1.8 通过表面受体的 PMC 调制技术	127
3.1.9 PMC 梯度方向估计	133
3.1.10 基因调控网络中的 PMC 速率	135
本章参考文献	136
第 4 章 主动分子通信	139
4.1 基于分子马达的主动分子通信	139
4.2 第一情景的建模方法	140
4.2.1 信使分子	141
4.2.2 接口分子	141
4.2.3 引导和运输分子	141
4.2.4 分子马达沿着纤维运载货物的连续棘齿模型	142
4.2.5 分子马达沿着纤维运载货物的离散随机模型	143

4.3 第二情景的建模方法	145
4.4 基于分子马达的主动分子通信的通信理论和技术	148
4.5 基于间隙连接通道的主动分子通信	152
4.6 基于运动细菌的主动分子通信	156
4.6.1 编码和释放阶段	157
4.6.2 传播阶段	158
4.6.3 接收和译码阶段	166
4.7 通过纳米机器联系的主动分子通信	166
4.7.1 纳米机器的碰撞	167
4.7.2 纳米机器的黏合	168
本章参考文献	169
名词索引	174

第 1 章 纳米机器间的分子通信

本章首先介绍分子通信和纳米网络的概念^[1]。在简要回顾了现有的和未来的纳米机器、纳米机器人和基因工程机器之后,本章描述了为什么这些机器需要通信和互连来组成先进的纳米和生物技术应用中的纳米网络。然后,介绍了可被用于设计纳米网络的分子通信模式(包括自然界中的分子通信机制)。这些分子的通信模式主要分为两种类型,即被动分子通信(PMC)和主动分子通信(AMC)。最后,给出了本书介绍的 PMC 和 AMC 的组织结构。

1.1 纳米机器、纳米机器人和基因工程机器

本节首先介绍纳米机器和分子机器的概念。然后,讨论纳米机器人和基因工程机器。本节的目标在于提供一个对纳米机器的概述,并强调为什么纳米机器需要通信和相互合作才得以实现复杂的系统和应用。

1.1.1 纳米机器和分子机器

设备或机器可以定义为用于实现特定功能组件的一种组合,对有用设备的设计和建造是科技的主要精髓所在。尺寸是一个设备最与众不同的特点之一。毫无疑问,在 1959 年富有远见的物理学家理查德·费恩曼于加州理工学院发表讲话后,对于设备大小的展望就发生了根本性的改变,费恩曼认为“底层有着充足的空间”。他创造了一个尺寸小于 $1/64$ in(英寸, $1\text{ in} = 2.54\text{ cm}$)的设备,并表明设备的小型化不仅仅是降低尺寸,同时也开启了通向新技术的道路。其中最为突出的技术之一就是现在的纳米技术^[2,3]。

在 19 世纪 80 年代中期,费恩曼的远见促进了微机电系统(MEMS)的发展,由此发展的微电机体积的数量级甚至小于费恩曼所预见的,大量出色的产品因此被生产出来,如由数百万电驱动微型镜所组成的数字投影仪和具有微动传感器的安全气囊。伴随着微机电系统的发展,人们发明了扫描隧道显微

镜 (STM) 和更广义的扫描探针显微镜 (SPM) 以及更高分辨率的 SPM, 即原子力显微镜 (AFM)。这些使得对单个分子、原子和化学键的工程操作成为可能。事实上, 这些发明被视为对纳米技术最大的推动。

在上述发明和发展的基础上, 微机电系统的进一步小型化最终推动了纳米机电系统 (NEMS) 的产生, 它们被称为是最小的机器、传感器和计算机的世界^[3,4]。NEMS 有望显著地影响许多技术和科学领域, 并最终取代 MEMS。事实上, 第一个大规模集成 (VLSI) 的 NEMS 设备已经被来自 IBM 的研究学者所研制^[5]。此外, 2007 年的国际半导体技术蓝图 (ITRS) 吸纳了 NEMS 存储作为设备新兴研究中的一部分。

NEMS 技术的发展也促进了纳米机器和分子机器术语的产生^[6]。纳米机器和分子机器的概念非常接近, 在相关文献中可以找到不同的替代定义。纳米机器可以被定义为依赖纳米级部件的人工装置, 分子机器可以定义为使用纳米级组件和分子结构来执行有用功能的装置^[7]。由于纳米机器和分子机器间在概念上的相似性, 因此本章中纳米机器和分子机器的术语可以交换使用来形容这种机器。

两种研究这些装置构造和小型化的方法, 有自上而下法和自下而上法。自上而下法使用传统的微细加工的方法, 通过使用光学和电子束光刻等合适的技术逐步操作越来越细小的部件。然而, 由于摩尔定律预测芯片的 50 nm 特征尺寸, 目前尚不清楚是否可以通过使用自上向下的方法来制造更小的系统。此外, 自上向下的方法随着纳米计算机部件更接近纳米尺度, 会有成本急剧提高的限制。另一方面, 自下而上的方法在构造先进的纳米机器时, 遵循着一个更为吸引人的策略: 自下而上的方法意味着从尺寸、形状、表面结构和化学功能, 是在纳米尺寸模块的自组装上完成^[2,3]。

事实上, 考虑到自然产生的纳米机器通过难以置信的自组装过程构造, 可以看出自下而上的方法比自上而下的方法有许多优势。例如, 在植物细胞中的叶绿体是一种纳米机器, 它包含用于吸收和转化太阳能的分子阵列作为光学调谐天线。线粒体可以被设想为控制有机分子氧化以产生三磷酸腺苷 (ATP) 的纳米机器, 并为细胞活动提供能量。附着在许多细菌膜上的鞭毛马达是一种用于提供细胞运动的高度结构化的蛋白质的组合^[8]。此外, 生物分子马达和机器是自然界中最典型的纳米机器, 它们在细胞质和细胞运输中负

责生物化学物质的制造和传输^[3]。这些纳米机器通常被称为自然制造的生物纳米机器。

从自然制造的生物纳米机器中得到启发,进而制造新的人工生物纳米机器和纳米材料。例如,受细菌旋转鞭毛马达的启发,一种混合的生物纳米化学装置从 ATP 的合成和镍推进器中组装出来^[9]。此外,一些基于蛋白质并依赖 ATP 的纳米马达也被研究出来^[10,11]。文献[12]介绍了一种基于 DNA 构建的分子行驶马达的实验。文献[13]中基于 DNA 的纳米镊子被开发出来。

除了人工制造的生物纳米机器,也有许多不包含人工制造的生物纳米机器部件和受这些机器启发及改造的人工制造的纳米机器(即全合成)。一些人工制造的纳米机器是以碳纳米管、金属或者半导体纳米天线为基础设计的。例如,使用单壁碳纳米管将热能转化为液态镓的扩张,从而研制出一种纳米级的温度计^[14]。利用悬浮束碳纳米管和两个电极之间的硅纳米板,纳米转子可以将电能转化为转动动能^[15]。

所有上述列举的纳米机器都是通过来自不同学科的科学家的协作努力而设计和构建的,其中包括物理学、化学、生物学、生物医学工程和生物工程等。每一个学科能够从本学科的知识出发,为纳米机器的设计和构造提供其独特的发展和贡献。然而,在这些学科中,机器人学界通过引入纳米机器人的概念而显著影响纳米机器和分子机器的理念,在下面章节将对此加以阐述。

1.1.2 纳米机器人

纳米机器人是指能够在纳米级范围内执行任务的机器人设备。在纳米机器人领域,研究纳米机器人系统的设计、制造、编程和控制^[16-19]。事实上,纳米机器人的术语被科学界广泛使用,它包含任何形式的能够完成驱动、传感、控制、推进、信号、信息处理、智能和群体行为这些功能之一的纳米级活性机构。现有的纳米机器人系统可以分为以下4类。

第1类纳米机器人系统是纳米机械手。事实上,具备纳米定位功能但却不是纳米级装置的 STM 和 SPM 就可以被看作纳米机械手的首选范例。通过推动扫描隧道显微镜(STM)和扫描探针显微镜(SPM)的研究,研究机器人的相关人员推出了具有更多功能的机器人操作系统。这些新的系统被称为纳米机器人操纵器(NRM),它们有着更高的末端执行器自由度、更高的末端执

行器灵活度、更高的定位精度和更高的末端执行器工具的可能性^[20,21]。

第2类纳米机器人系统包括生物纳米机器人系统(基于DNA和蛋白质的纳米机器人系统)。生物纳米机器人的术语用来表示所有包含基于生物元素(DNA和蛋白质)的纳米组件的纳米机器人系统^[22-24]。生物纳米机器人的主要目标是利用各种生物元素执行其预先设定的生物学功能(如促进形成细胞级的运动、力或化学信号)来响应外部刺激。例如,蛋白质和DNA可以用作马达、机械接头、传输元件或传感器。这些生物元素的组件构成了纳米机器人设备,并能够在纳米级介质中施加力、操纵对象、传输以及接收信号。例如,使用逻辑门的基于DNA并能够响应特定刺激的纳米机器人已经被开发出来,并用于细胞间的有效载荷的传输和递送^[25]。事实上,之前提到的生物纳米机器人和生物纳米机器人在概念上非常相似。然而,生物纳米机器人的设计、制造、控制和规划不包括机器人科学和工程。因此,机器人领域认为生物纳米机器人和生物纳米机器人存在一定差异。例如,机器人领域最近推出了各种基于机器人科学和工程而设计的生物纳米机器人。这些设计的实例包含基于病毒性纳米马达^[26]和基于蛋白质的纳米手^[27]。

第3类纳米机器人系统包括磁性引导纳米机器人系统。这些纳米机器人系统比其他两类(纳米机械手和生物纳米机器人)简单了许多。然而,由于具有纳米尺寸并通过人工纳米组件构成,它们是完全人造的纳米级机器人系统。事实上,磁性引导纳米机器人是一个简单的包含通过外磁场来启动和推进以完成特定任务(人体内的治疗任务)的铁磁材料的纳米粒子。文献^[28]中介绍了更多关于磁性引导纳米机器人系统的信息。

第4类纳米机器人系统包括基于细菌的纳米机器人。这类系统同样可以被看作生物纳米机器人系统。然而,由于其在设计、控制和引导方面的独特,基于细菌的纳米机器人系统被看作一个独立的纳米机器人系统^[29]。基于细菌的纳米机器人的开发包括两种不同的方法。第一种方法采用活细菌作为在流体环境中运动的纳米机器人系统,并操作流体环境中的对象。例如,在这种方法中,从机器人的角度看,一队细菌可以被用于推动流体环境中的小物体(如小珠子),这需要控制细菌的方向和位移^[30]。第2种方法旨在开发人造纳米机器人,如使用一个外部磁场作为动力的细菌。例如,受精子运动的启发,一种具有薄顺磁性细丝的微型游泳机器人被制造出来。通过施加一个振荡磁

场,微型游泳机器人像真核生物的鞭毛那样通过长丝连续变形来推动细胞^[31]。

除了对以上四类纳米机器人系统进行设计和制造,纳米机器人领域也关注纳米机器人的控制、编程和协调以完成预定的目标^[32]。宏观机器人完全通过计算机来进行控制。对于纳米机器人,由于它们的大小,几乎不可能通过此类计算机来控制。一些基于新兴的纳米电子技术的基本控制系统可以用于纳米机器人的控制。例如,使用光传感器和马达,纳米机器人可以被引向光源^[33]。许多自然界中的控制系统也为简单控制系统的设计提供了许多例子。例如,在细菌的菌落中,个体使用其传感器数值以改变对营养源的朝向。这一机制为使用细菌的简单高效控制系统的开发提供了很大的启发。除了对每个纳米机器人的控制,纳米机器人之间的自组织和协调性为执行特定任务的纳米机器人团体提供了较强的鲁棒性和稳定性。显然,可以通过通信手段来实现纳米机器人之间的合作。有关这种通信的细节会在接下来的章节中进行介绍。

综上,各种学科使用许多不同的生物部分、机制和实体来设计和制造新的纳米机器和纳米机器人。然而,除了这些学科,合成生物学领域通过生物实体的基因工程,为新的纳米和微型机器人的研制开辟了新的途径。接下来,我们将对基于生物合成的基因工程机器做简要介绍。

1.1.3 基于合成生物学的基因工程机器

20世纪60年代基因调控中数理逻辑的发现^[34]和20世纪70年代基因工程的进步(如DNA重组技术)为今天的合成生物学铺平了道路。合成生物学可以定义为一个结合了生物学的调查性与工程学的建设性的研究领域。传统的基因工程方法通常集中在调整一个或几个基因来解决复杂的问题,而合成生物学从一个新的更复杂的工程驱动的角度解决这些问题。合成生物学在很大程度上一直关注基因设备和由之构成的小模块的创造和完善。考虑把细胞作为“可编程实体”,合成生物学的目的是制定有效的策略把设备组装并模块化到更大规模的复杂系统中。

合成生物学也有很大的潜力改变我们如何与环境交互以及如何对待人类健康,如通过制造实用生物体来清理人迹罕至地方的危险废弃物^[35],探查化

学物质并做出相应的反应^[36,37],以高效和可持续的方式生产清洁燃料^[38],或者识别和消灭肿瘤^[38,39]。为了以层状结构对合成生物学的目标和方法进行概念化,计算机工程和合成生物学在层次上可以进行类比,如图 1.1 所示。

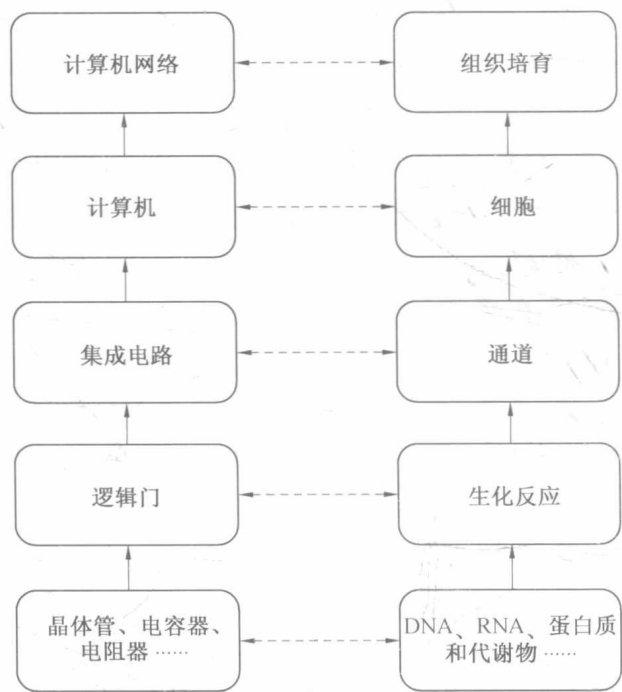


图 1.1 计算机工程和合成生物学的类比

① 在合成生物学层次结构底部包含生物建筑块,如 DNA、RNA、蛋白质和代谢物(脂质和碳水化合物、氨基酸和核苷酸)。这些生物组件和计算机工程的层次结构中的晶体管、电容器和电阻器的组成物理层类似。

② 上一层包含规范信息流和控制生理过程的生化反应。这些生化反应和计算机中执行计算的逻辑门相似。

③ 在接下来的层中,合成生物学家使用含有多样化生物装置的数据库合成复杂的路径,这可以认为是在一台计算机上的集成电路。

④ 这些复杂途径的彼此连接和到宿主细胞的整合允许合成生物学家以编程的方式扩展或修改细胞行为。可编程细胞的概念激发研究人员为目前尚未解决的问题设计出创新的解决方案。例如,细菌可作为活体的计算治疗工具来破坏肿瘤^[38]。在使用双输入逻辑与门同时检测两个条件后,工程细菌侵