



[美] 戴维 S. 古德塞尔 著
(David S. Goodsell)

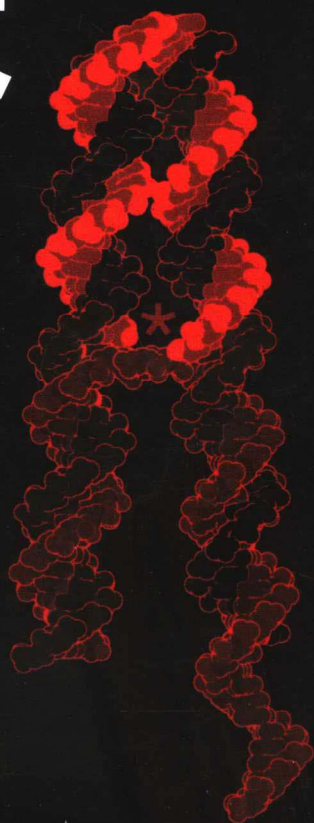
张文熊 张鹏 王文雅 等译

BIONANOTECHNOLOGY

lessons from nature

生物纳米技术

——来自自然的启示



化学工业出版社



[美] 戴维 S. 古德塞尔 著
(David S. Goodsell)

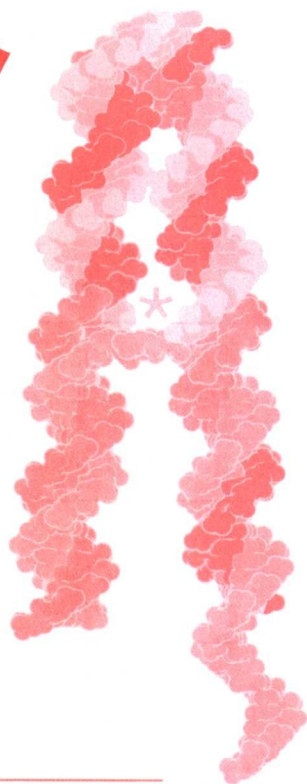
张文熊 张鹏 王文雅 等译

BIONANOTECHNOLOGY

lessons from nature

生物纳米技术

——来自自然的启示



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

生物纳米技术——来自自然的启示/[美] 古德塞尔 (Goodsell, D. S.) 著; 张文熊, 张鹏, 王文雅等译. 北京: 化学工业出版社, 2006. 11

书名原文: Bionanotechnology: Lessons From Nature

ISBN 978-7-5025-9418-3

I. 生… II. ①古…②张…③张…④王… III. 纳米材料-应用-生物技术 IV. Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 145913 号

Bionanotechnology: Lessons from Nature/by David S. Goodsell

ISBN 0-471-41719-X

Copyright©2004 by Wiley-Liss, Inc., Hoboken, New Jersey. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & sons. Inc.

本书中文简体字版由 John Wiley & sons. Inc. 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-2892

责任编辑: 孟 嘉 傅四周 莫小曼

文字编辑: 周 侗

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 郑小红

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司印刷

装 订: 三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 17 字数 279 千字 2007 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

译者的话

纳米技术是 20 世纪 80 年代末诞生并正在迅速发展的新技术，它的基本含义是在纳米尺度 ($10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}$) 范围内认识和改造自然，通过直接操作和安排原子、分子创造新物质。按照这个概念，细胞内的很多分子和结构都天然地属于纳米技术范畴，细胞构建了几千种运行着的纳米机器，可以被我们征用和修饰来执行特定的纳米技术任务。实际上，生物纳米技术正是作为纳米技术的一个重要分支在 20 世纪 90 年代崭露头角，今天，它的发展前途方兴未艾。生物纳米技术是在纳米尺度上认识生物分子的精细结构与其功能之间的联系，并在此基础上按研究者的意愿进行裁剪和嫁接，制造具有特性功能的生物分子。这使生命科学的研究上了一个新的台阶，必将在解决人类发展的一系列重大问题和促进纳米技术总体发展上起到非常重要的作用。

本书正是从结构生物学的角度在纳米水平上对生物纳米技术进行介绍。本书探讨的是纳米技术的另外一种方法，在今天对于任何一个拥有分子生物学实验室的人而言都可以实现，这就是生物纳米技术——纳米技术回到自然寻找它的起点。本书描述了很多源自生物学的东西以及它们如何应用于纳米技术。书中探讨了细胞中可以获得的纳米机器的性质，并对这个可以拿来为我们所用的天然纳米机器进行了简短的介绍，回顾了生物技术中已有的控制和修饰这些纳米机器的方法；介绍了用来构建功能性纳米机器的基本结构原理和基本功能原理；列举了一些目前处于研究阶段引人注目的生物纳米技术的应用并对生物纳米技术的未来进行了展望。

国内有关生物纳米技术的译著很少，希望本书能给该领域研究人员带来一些启示和帮助。在此书翻译过程中，北京工业大学井琦博士在紧张的学习之余投入了很大精力，对该书的基础翻译做了大量的工作；同时，译者对硕士研究生李欣、李程、王永光、旷云香所做的有益工作，予以感谢。

生物纳米技术是一个飞速发展的多学科交叉的领域，译者受自身专业背景和水平限制，译文难免有不当之处，敬请读者批评指正。

前 言

今天是纳米技术尤其是生物纳米技术发展得最激动人心的时代。化学、生物学、物理学已经将数不胜数的分子的结构和功能揭示出来，而我们利用它们进行原子水平工程。每天都有新的发现，聪明的人们正以每一种可想象到的（和不能想象到的）方式利用这些发现。

本书描述了很多源自生物学的东西以及它们如何应用于纳米技术。本书分为三大部分。第一部分探讨了细胞中可以获得的纳米机器的性质。其中第 1 章简述了对纳米技术的探索；第 2 章描述了不为人熟知的生物纳米机器世界并对这个可以为我们所用的天然纳米机器进行了简短的介绍；第 3 章回顾了生物技术中已有的控制和修饰这些纳米机器的方法。

第二部分展望了天然纳米机器用于指导构建我们自己的纳米机器的前景。通过纵览已知的生物分子，我们可以将用来构建功能性纳米机器的结构和功能的基本原理分开。其中第 4 章给出了生物纳米技术的基本结构原理；第 5 章描述了生物纳米技术的基本功能原理。

第三部分是关于应用的两章。其中第 6 章列举了一些目前处于研究阶段引人注目的生物纳米技术的应用；第 7 章展望未来，预测了我们可以期待的成果。

生物纳米技术是一个飞速发展的多学科交叉领域。本书难免有遗漏，并不可避免地带上作者本身喜好和作为一个结构生物学家背景的倾向。生物分子科学仍然有很多的奥秘要研究，在未来还将为生物纳米技术提供更多的素材。若读者想对生物纳米技术有进一步的了解，请系统地阅读生物纳米技术领域不断增长的文献。

在本书写作过程中 Arthur J. Olson 与笔者进行了许多有益的讨论，在此谨致谢意。

戴维 S. 古德塞尔
David S. Goodsell

目 录

第 1 章 探索纳米技术	1
1.1 生物技术和两周革命	3
1.2 从生物技术到生物纳米技术	3
1.3 什么是生物纳米技术	5
第 2 章 生物纳米机器在活动	7
2.1 陌生的生物纳米机器世界	8
2.1.1 纳米水平可忽略重力和惯性力	8
2.1.2 纳米机器的原子粒度	9
2.1.3 热运动是纳米水平上的一种重要作用力	9
2.1.4 生物纳米机器需要水环境	10
2.2 现代生物材料	11
2.2.1 大部分天然生物纳米机器由蛋白质组成	12
2.2.2 核酸携带信息	18
2.2.3 脂质用于细胞基础结构	19
2.2.4 多糖用于专门的结构功能	21
2.3 进化遗产	22
2.3.1 进化对天然生物分子性质的重要限制	25
2.4 天然生物纳米机器举例	25
第 3 章 生物分子设计和生物技术	35
3.1 重组 DNA 技术	36
3.1.1 利用商业化酶对 DNA 进行操作	38
3.1.2 定点突变使基因组发生特异性改变	42
3.1.3 具有两种功能的融合蛋白	43
3.2 单克隆抗体	45
3.3 生物分子结构的测定	47
3.3.1 X 射线晶体衍射法对原子结构的分析	47

3.3.2	可以使用核磁共振光谱仪导出原子结构	50
3.3.3	电子显微镜表征分子形态	50
3.3.4	原子力显微镜探测生物分子表面	53
3.4	制作分子模型	54
3.4.1	应用计算机图形学观测生物纳米机器	54
3.4.2	利用计算机建模预测生物分子的结构和功能	56
3.4.3	蛋白质折叠问题	56
3.4.4	分子对接模拟 (Docking Simulations) 预测生物分子间的相互 作用模式	58
3.4.5	计算机辅助分子设计开发新功能	60

第4章 生物纳米技术的结构原理 61

4.1	设计用于特定环境的天然生物纳米机器	61
4.2	构建纳米机器的分级策略	62
4.3	原料：生物分子的结构和稳定性	64
4.3.1	由共价键连接的原子组成分子	66
4.3.2	在近距离作用的分散力和排斥力	67
4.3.3	氢键提供稳定性和专一性	69
4.3.4	带电原子间形成静电相互作用	70
4.3.5	疏水效应稳定水中的生物分子	72
4.4	蛋白质的折叠	74
4.4.1	并非所有的蛋白质都采用稳定结构	74
4.4.2	球蛋白有分级结构	75
4.4.3	稳定的球状结构需要组合设计策略	77
4.4.4	分子伴侣为折叠提供最理想的环境	79
4.4.5	刚性可使蛋白质在高温下更加稳定	79
4.4.6	很多蛋白质利用无序性	81
4.5	自组装	83
4.5.1	对称性允许具有确定大小的稳定复合体进行自组装	84
4.5.2	准对称用来构建对理想对称而言过大的组装体	90
4.5.3	拥挤的条件促进自组装	92
4.6	自组织	93
4.6.1	脂质自组织形成双分子层	93
4.6.2	脂质双分子层是流动的	95
4.6.3	蛋白质可以按照脂质双分子层的自组织方式设计	95

4.7	分子识别	97
4.7.1	分子识别的 Crane 原则	97
4.7.2	原子数目限制结合部位公差	102
4.8	柔性	103
4.8.1	生物分子在各个水平上表现柔性	104
4.8.2	柔性为生物纳米机器设计带来了很大的挑战	106
第 5 章	生物纳米技术的功能原理	107
5.1	信息驱动的纳米装配	107
5.1.1	核酸携带遗传信息	108
5.1.2	核糖体合成蛋白质	111
5.1.3	信息以紧凑的形式存储	114
5.2	能量学	115
5.2.1	利用载体分子来传递化学能	115
5.2.2	专门的小分子捕获光能	118
5.2.3	蛋白质途径传递单一电子	118
5.2.4	在 DNA 中已经观察到电传导和电荷转移	123
5.2.5	跨越细胞膜的电化学梯度	124
5.3	化学转化	125
5.3.1	酶降低化学反应熵	130
5.3.2	酶创造一个使过渡态分子稳定的环境	130
5.3.3	酶借助化学工具完成反应	131
5.4	调节	133
5.4.1	变构运动可调节蛋白质活性	133
5.4.2	共价修饰调节蛋白质的作用	134
5.5	生物材料	138
5.5.1	亚基的螺旋装配形成原纤维和细纤丝	138
5.5.2	纤维成分构建微观基础结构	141
5.5.3	矿物质与生物材料结合满足特殊用途	144
5.5.4	弹性蛋白利用无序链	147
5.5.5	细胞制造的特殊和普通的黏合剂	149
5.6	生物分子马达	151
5.6.1	以 ATP 作为动力的直线马达	151
5.6.2	ATP 合成酶和鞭毛马达是旋转马达	155
5.6.3	布朗棘轮校正随机热运动	161

5.7 跨膜物质运输	163
5.7.1 钾通道利用选择透性	163
5.7.2 ABC 转运蛋白利用“滚翻”机制进行跨膜运输	165
5.7.3 细菌视红紫质利用光抽吸质子	167
5.8 生物分子传感	169
5.8.1 嗅觉和味觉检测特定分子	169
5.8.2 通过监测视黄醛中的光敏运动来感测光	170
5.8.3 机械感受器感受跨膜运动	170
5.8.4 细菌通过校正随机运动感测化学梯度	172
5.9 自复制	173
5.9.1 细胞是自发的自复制体	173
5.9.2 细胞的基本设计由进化过程确定	175
5.10 机器态生物纳米技术	176
5.10.1 肌肉肌原纤维节	177
5.10.2 神经	179

第 6 章 当今生物纳米技术

6.1 基本能力	181
6.1.1 简化天然蛋白质	181
6.1.2 从零开始设计蛋白质	183
6.1.3 蛋白质可以由非天然氨基酸构成	185
6.1.4 肽核酸为 DNA 和 RNA 提供稳定的选择性	187
6.2 今天的纳米医学	188
6.2.1 计算机辅助药物设计已经产生有效的抗艾滋病药物	190
6.2.2 免疫毒素是目标细胞的杀手	191
6.2.3 脂质体运输药物	192
6.2.4 人造血可以挽救生命	193
6.2.5 基因治疗纠正基因缺陷	195
6.2.6 通用医学走向个人化医学	196
6.3 各种水平的自组装	197
6.3.1 自组装的 DNA 支架已经构建	197
6.3.2 环肽形成纳米管	199
6.3.3 融合蛋白自组装成伸展结构	200
6.3.4 小的有机分子自组装成大的结构	200
6.3.5 大的物体可以自组装	202

6.4	利用分子马达	204
6.4.1	ATP 合成酶用作旋转马达	204
6.4.2	用 DNA 构建分子机器	206
6.5	DNA 计算机	207
6.5.1	第一个 DNA 计算机解决货郎担问题	209
6.5.2	用 DNA 计算机解决可满足性问题	210
6.5.3	DNA 制造图灵机	211
6.6	利用生物学选择进行分子设计	211
6.6.1	抗体可以转变成酶	212
6.6.2	利用噬菌体展示库筛选肽	215
6.6.3	可以选出具有新功能的核酸	216
6.6.4	功能性生物纳米机器人令人吃惊地普遍存在	219
6.7	人造生命	220
6.7.1	通过出芽繁殖人工原细胞	220
6.7.2	自复制分子是一个难以捉摸的目标	222
6.7.3	通过人工光合作用利用脂质体合成 ATP	223
6.7.4	只用一个遗传蓝图构建脊髓灰质炎病毒	224
6.8	杂交分子	226
6.8.1	利用 DNA 构建纳米金属导线	226
6.8.2	利用 DNA 形成金纳米颗粒的规则聚集	227
6.8.3	机械 DNA 杠杆	228
6.8.4	利用生物矿化作用	229
6.9	生物传感器	230
6.9.1	抗体广泛地用作生物传感器	230
6.9.2	生物传感器检测葡萄糖水平来控制糖尿病	231
6.9.3	设计纳米孔检测特定的 DNA 序列	232

第 7 章 生物纳米技术的未来 235

7.1	生物纳米技术的时间表	236
7.2	分子纳米技术的启示	237
7.3	三个实例研究	239
7.3.1	实例研究一：合成纳米管	239
7.3.2	实例研究二：普通纳米尺寸的装配体	242
7.3.3	实例研究三：纳米监测	244
7.4	伦理因素	246

7.4.1 尊重生命	247
7.4.2 潜在的危险	247
7.4.3 最后的思考	248
 参考文献	 249
 索引	 259

探索纳米技术

就我所见，物理学原理并不否定一个一个原子测量物质的可行性。它不是企图违反任何规则；在原理上，它是可以做到的；但实际上由于我们人类太大了，还没有做到。

——Richard Feynman^❶

今天，利用实验室和想象力，纳米技术对于任何人都触手可得。利用市面上出售的试剂或试剂盒可以制造定制的纳米机械。可以设计和建造纳米规格的装配器合成有趣的分子。可以建造微型机器将癌细胞找出来并杀死。还可以构建分子尺寸的传感器来检测光、酸度或痕量有毒金属。今天的纳米技术是真实的，用非常少的资源就可以得到。

什么是纳米技术？纳米技术是一次一个原子地构建和定形物质的能力。纳米技术的想法最早由物理学家 Richard Feynman 提出。在“Room at the Bottom”的演讲中，他揭示了在分子世界中可获得的可能性。他指出由于常规物质是由许许多多的原子构成的，其中有大量的空间可以用来构建。Richard Feynman 的远见孕育了纳米技术学科，今天正积聚各种技术使他的梦想成为现实。

但是原子是难以置信的小，其大小是人们熟悉的物体的百万分之一。它们的性质是完全陌生的，人们关于米尺度世界的直觉和知识无法应用于原子水平甚至会造成误导。怎样才能处理原子水平的工程化问题呢？

当人们第一次重建物质以满足需要时，采用了与纳米技术相反

❶ 各章开头的言论来自 Richard Feynman 1959 年在加州理工院所作的演讲，刊登在“CalTech's Engineering and Science”1960 年 2 月这一期上。

的方法。早期的工匠发明了一种自顶向下的方法，而不是一个一个原子从底部向上构建一个物体。他们使用工具来改变已有物质的形状和使它们成型。泥土、植物纤维和金属不断地被敲打、切割和定形做成容器、衣服和武器。随着技术不断的完善，人类利用这个方法制造了大量产品。人们仍然从地球上获取原料并把它们制成功能性产品。

在炼金术士播下现代化学科学的种子时，人类在中世纪之前还没有进行任何协同工作定形产品制造中的原子。在寻找永生和将铅转变成黄金的秘密过程中，他们发展起来随意的原子组合方法。化学反应、纯化和表征就是炼金术士的全部工具。今天，化学家构建确定形状和特定性质的分子，在原子水平了解和进行化学反应。可是，大多数化学反应仍然在群体水平进行；大量纯物质混合反应，从形成的混合分子中分离纯化出所要的产品。虽然如此，化学仍还是纳米技术——任意组合原子形成预期的分子。但它是群体水平的纳米技术，受统计力学控制而不是受纳米水平一个一个原子的控制。

现在正处在纳米技术第二次大革命的中期，科学家们正企图一次一个原子地修饰物质。

一些人将纳米技术想象成接近模仿宏观技术。因为其关注于一个一个原子分别地构建分子，已经将这个新的领域称为“分子纳米技术”。K. Eric Drexler 提出通过将原子强制压到一起形成预期分子形状的构建分子的方法，因为这个方法与宏观机械和工程相似而被称为“机械合成”。他设想通过直接将分开的原子键合以一种装配线方式利用简单原料构建物质，这个想法引人注目。工程师通过原子世界和宏观世界之间的物理连接对合成过程保持控制。

机械合成思想的核心就是制造一个“装配器”。这是一个纳米水平的机器，按照明确的指导一个一个原子地装配物体。纳米技术迷们已经设想仅仅制造一个简单的可以工作的装配器就会立即引起“两周革命”。他们说只要制造一个简单的装配器，纳米技术的所有梦想就将在几天内实现。研究者能够立即指导这第一个装配器制造新的装配器。这些装配器甚至能够创建大规模工厂，里面装满了一层用来构建宏观物体的装配器。纳米技术将蓬勃发展满足每一个需要并完全改变人们的生活方式。不幸的是，基于机械合成的装配器目前仍然只是一个想法。

本书所要探讨的是纳米技术的另外一种方法，在今天对于任何一个有一个适当装备的实验室的人而言都是可以实现的。这就是生物纳米技术，纳米技术回到自然寻找它的起点。现代细胞构建了几

千种运行着的纳米机器，可以被人们征用和修饰来执行特定的纳米技术的任务。现代细胞为人们提供了一个精确制作的、有效的分子机器系统，一个一个原子地重建物质，完全符合人们的要求。并且，利用经过良好检验的生物技术手段，通过修饰已有的或设计全新的生物分子纳米机器，人们可以扩展这些机器的功能用于自己的目标。

1.1 生物技术和两周革命

两周革命早已出现，尽管是持续了十几年而不是几周。生物技术利用在活细胞内可以得到的已经做好的装配器按照原子规格来构建几千种订制的分子，包括新装配器的构建。这已经在各方面得到应用，包括激素和药物的商业生产，感染性与遗传性疾病的诊断和治疗，用于诸如生物修复和抗病力这样特殊任务的器官工程。

生物技术用了数十年来聚集动量。最初的障碍主要是缺少生物分子过程和机制的基本知识。生物技术已经给了人们一个难以置信的分子机器的工具箱，现在人们仅仅是开始学会如何使用它。关键的可行技术是重组 DNA 技术，使人们能够使用细胞的天然蛋白质装配器。近几年在技术上得到了很大改进，产生了许多有关如何使用它的设想。

生物技术已经成长起来，并且伴随着分子生物学的每一个新的发现仍在发展之中。对病毒生物学的进一步研究使运送新的遗传材料的载体得到改进。剪切、切除、连接和复制 DNA 的酶激增，像有效的 DNA 化学合成技术一样，使人们可以创建复杂的新遗传构造。今天，如果一个研究者有毅力从零开始设计一个蛋白质，工程菌可以制造大量用于医药的天然蛋白、用于研究的突变蛋白、特殊用途的杂交嵌合蛋白以及所有的新蛋白。

1.2 从生物技术到生物纳米技术

现在人们随时准备将生物技术扩展成生物纳米技术。什么是生物纳米技术？与生物技术有什么不同？目前这两个术语具有一个重复的主题领域。在此将生物纳米技术定义为需要在纳米水平设计和构建的应用，而将不需纳米水平了解和设计的项目称为生物技术。生物技术从利用天然酶操作遗传密码，然后用来修饰整个有机体发展起来。今天，人们具有在一个更好的水平上进行工作的能力，有更详细的了解和控制水平。人们拥有按照自己的方案一个一个原子地创建生物机

器的工具。现在，必须将想象力和冒险精神用于这个未知领域。

生物纳米技术具有许多不同的表现，但都有一个中心概念：按照原子规格设计分子机器的能力。今天，可以设计和制造单独的生物纳米机器来执行特定的纳米水平任务，诸如癌细胞的定位或一个简单的计算任务。很多都是小问题，只是设计来检验人们对这些微型机器的了解和控制。随着生物纳米技术的成熟，研究者将为人类健康和技术进步重新设计细胞的生物分子机器来执行大规模任务。利用已有的生物分子装配器或使用生物安装模块可以按照原子精度建造宏观结构。可以从细胞中找到具有原子精度的分子尺寸马达、大梁、随机存取存储器、传感器以及其他很多有用的机械装置，这些全都可以被生物纳米技术所利用。而且，成批设计和建造这些机器的技术已经很好地解决并准备好应用在生物纳米技术中。

纳米医药将是最大的赢家。生物纳米机器在活细胞环境中运行最好，所以适合医药应用。能找出患病或癌细胞的复杂分子已经实现，用于诊断疾病状态的传感器正在研制。利用定做的分子，替换治疗被用来治疗糖尿病和生长激素缺乏症以及许多其他的应用。

生物材料是生物纳米技术的另一个主要的应用。人们已经广泛地使用生物材料。环顾房间并注意有多少木头用来建造住所和家具，又有多少棉花、羊毛和其他天然纤维用在衣服和书本中。生物材料引导了人们不断增长的生态学敏感性——生物材料坚固但可生物降解。生物材料也可以与活的组织完美地结合，所以是医学应用的理想材料。

混合机器生产，即一部分生物材料和一部分无机材料，是生物纳米技术研究的另一个活跃领域，将会产生巨大成果。光线传感器或抗体这样的生物纳米机器很容易与显微光刻法制作的硅器件结合。这些混合机器在生物纳米机器的纳米世界和计算机的宏观世界之间提供了一个连接，可以对纳米水平活动进行直接感应和控制。

最后，Drexler 和其他人已经看到生物分子作为一种途径能够达到他们使用纳米机器人进行机械合成的目标。的确，生物学为一个一个原子地构建物体提供了工具。也许随着人们理解的深入，将诱导生物纳米机器构建对生物学蓝图而言完全陌生的物体。

本书系统地阐述这些生物纳米机器：它们的性质、设计原理和人们应用它们的方式。一个呈指数增长的信息主体正在积聚，揭示单独的生物分子的结构和功能以及它们在活细胞内的相互作用。这个信息是理解生物纳米机器基本原理的一个关键资源：它的结构、功能以及它的任何纳米技术大的应用的综合。无论是直接根据生物

学构建人们自己的纳米技术还是完全从人们的想象构建，这些现有的运行着的纳米机器都为人们提供了重要的借鉴。

1.3 什么是生物纳米技术

纳米技术和生物纳米技术完全是新概念，在 20 世纪末才产生，生物技术也仅仅才发展了几十年，所以这些领域的范围仍待明确。有许多研究人员在纳米水平结构、构建和功能的各个方面进行研究，每天都有越过现有概念边界的新例子出现。在开始之前，值得花点时间对小尺度运行的众多技术进行比较并尝试确定目前生物纳米技术的范围(图 1-1)。

化学是对分子进行操作的第一门科学，开始于人类蒸煮食物。今天，化学家设计分子并进行广泛的可控合成。化学不同于生物纳米技术，因为它不能在单独的分子水平工作，在原子水平没有局限也没有能力标注单独的分子。作为大多数化学本质的一个结果，产生的分子一般限制在 100 个原子以下——较大分子合成受到来自竞争性杂质太多副反应的困扰。

光刻法广泛地用于计算机硬件的制造，不断发展的 MEMS 领域也将这些技术应用到微小机器的制造上。所有的信息和通讯技术都依赖这些方法。它依赖照相技术来减少比例以及原子在模板内的随机沉积。因此它是一个降低到最小极限的宏观技术。

生物技术应用生物学过程并将它们用于人们自己的应用中。在本书中，将把生物技术范围限制为不需要生物分子原子规格的应用。例如，研究人员例行公事地使用纯化酶来切割和粘贴遗传基因并转回到细胞内。原子细节的知识是不重要的，就像用于印刷的油墨的性质对于理解印在纸上的单词并不重要一样。

纳米技术已经被定义为在纳米水平具有原子精度的工程和制造。由 K. Eric Drexler 和 Foresight Institute 所普及的理论解释也许是最明显的例子，经常将这些进一步归类为分子纳米技术。由 IBM 研究人员在一个晶体表面进行的单独的氩原子排列是纳米技术一个成功的例子。

生物纳米技术是纳米技术的一个子集：用生物学单元作指导进行原子水平的工程和制造。它也和生物技术紧密相关，但增加了设计和修饰所构建物体原子细节的能力。按照原子规格设计生物纳米机器，执行一个确定的三维分子任务，并且在最好的应用中，包含埋在结构内的单独控制机构。

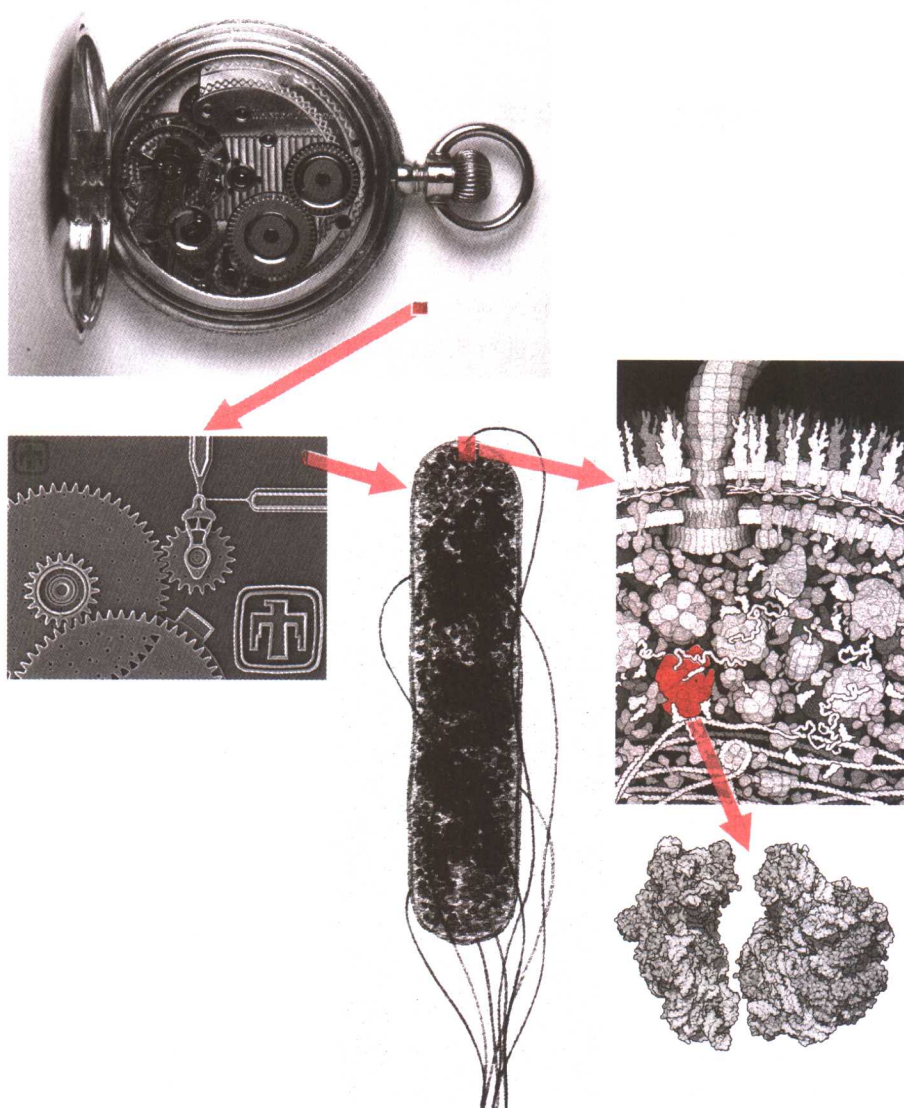


图 1-1 生物纳米技术有多广泛？工业革命以来，科学家和工程师们已经在更小水平上建造机器。人们熟悉世界里的机器都有毫米到米范围的运动机件。随着加工能力的改进，像精美手表一样运动的微型机器，将加工精度扩展到零点几毫米。为了改进性能而经常需要小型化的计算机技术已经促使在更小的范围建造微型结构，在微米水平建造电子元件和微型机器，就像这些在 Sandia National Laboratories 创建的微型齿轮一样。生物纳米技术在最小水平操作，机器大小在 10nm 范围内。图示细菌建造了几千个不同的生物纳米机器，包括一个正在工作的纳米装配器——核糖体（图右下角所示）。由于这些生物纳米机器由一个限定的、确定数目的原子组成，它们代表了机器小型化可能性的限制（MEMS 齿轮显微照相图片来自 <http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>）