



畅销书《The Age of Spiritual Machines》作者又一力作
《纽约时报》评选的“2005年度博客谈论最多的图书”之一

奇点临近

The Singularity Is Near When Humans Transcend Biology

2045年，当计算机智能超越人类

(美) Ray Kurzweil 著
李庆诚 董振华 田源 译

2005年CBS News评选的畅销书
2005年美国最畅销非小说类图书
2005年亚马逊最佳科学图书

比尔·盖茨、比尔·乔伊等鼎力推荐
一部预测人工智能和科技未来的奇书



机械工业出版社
China Machine Press

还在督促自己每天进步一点吗？

还在坚持每天阅读的习惯吗？

还在为找不到自己喜欢的书籍烦恼吗？

那～

你愿意与我成为书友吗？

国内外当下流行书籍

各图书销量排行榜书籍

大量工具书籍

使我们受益终生的书籍

.....

海量电子版、纸质版书籍及音频课程

还有贴心的“学习管家”服务哦！

微信：shuyou055



奇点临近

The Singularity Is Near:When Humans Transcend Biology

[美]Ray Kurzweil 著

李庆诚 董振华 田源 译

ISBN: 978-7-111-35889-3

本书纸版由机械工业出版社于2011年出版，电子版由华章分社（北京华章图文信息有限公司）全球范围内制作与发行。

版权所有，侵权必究

客服热线：+ 86-10-68995265

客服信箱：service@bbbvip.com

官方网址：www.bbbvip.com

新浪微博 @研发书局

腾讯微博 @yanfabook

目录

[摘要](#)

[对本书的赞誉](#)

[译者序](#)

[前言](#)

[思想的力量](#)

[致谢](#)

[作者简介](#)

[第1章 六大纪元](#)

[直觉的线性增长观与历史的指数增长观](#)

[六大纪元](#)

[奇点临近](#)

[第2章 技术进化理论：加速回归定律](#)

[摩尔定律与超摩尔定律](#)

[DNA序列、记忆、通信、因特网和小型化](#)

[奇点是一项经济命令](#)

[第3章 达到人脑的计算能力](#)

[计算机技术第六范式：三维分子计算和新兴计算技术](#)

[人类大脑的计算能力](#)

[计算的限制](#)

[第4章 达到人类智能的软件：如何实现大脑的逆向工程](#)

[大脑的逆向工程：任务概况](#)

[人类大脑是否与计算机不同](#)

[对等进入大脑](#)

[构建人脑模型](#)

[大脑与机器间的接口](#)

[加速人类大脑逆向工程](#)

[人脑上传](#)

[第5章 GNR：三种重叠进行的革命](#)

[基因技术：信息与生物的交融](#)

[纳米技术：信息与物理世界的交汇](#)

[机器智能：强人工智能](#)

[第6章 影响的盛装](#)

[关于人体](#)

[关于人类大脑](#)

[关于人类的寿命](#)

[关于战争：远程的、机器人的、健壮的、更小尺寸的、虚拟现实的范式](#)

[关于学习](#)

[关于工作](#)

[关于游戏](#)

[关于宇宙中智能的命运：为什么我们可能是宇宙中唯一的](#)

[第7章 我是奇点](#)

[关于意识的烦人问题](#)

[我是谁？我是什么](#)

[奇点是一种超越](#)

[第8章 GNR：希望与危险的深度纠结](#)

[相互纠缠的益处](#)

[相互纠缠的威胁](#)

[生存危机的概观](#)

[准备防御](#)

[放弃的理念](#)

[防守技术的发展和监管的影响](#)

[GNR的一个防御计划](#)

[第9章 回应评论家](#)

[一系列的批评](#)

[来自怀疑者的批评](#)

[来自马尔萨斯的批评](#)

[来自软件的批评](#)

[来自模拟处理的批评](#)

[来自神经处理的复杂性的批评](#)

[来自微管和量子计算的批评](#)

[来自图灵支持派理论的批评](#)

[来自故障率的批评](#)

[来自锁定效应的批评](#)

[来自本体论的批评：一个计算机可以有意识吗](#)

[来自贫富差距的批评](#)

[来自政府管制可能性的批评](#)

[来自整体论的批评](#)

[后记](#)

[本书相关资源与联系信息](#)

[附录 重新审视加速回归定律](#)

[注释](#)

摘要

21世纪刚刚开始，这是人类历史上充满变革、最激动人心的时代。

它是这样的一个时代：人类的本质意义将得到扩充和挑战。随着我们这个种族突破基因法则的掣肘，人类将达到前所未有的智能水平、高度的物质文明，并突破寿命的极限。

在过去的三十年间，伟大的发明家、未来学家雷·库兹韦尔是受人尊重、极具激情的技术支持者之一，他坚信技术将在未来扮演极为重要的角色。在他的经典著作《The Age of Spiritual Machines》中，他提出了一个大胆的论断：科技正以史无前例的速度发展，计算机将能够赶超人类智能的各个方面。今天，在《奇点临近》这本书中，他预测了这一发展的下一阶段：人类与机器的联合，即嵌入我们大脑的知识和技巧将与我们创造的容量更大、速度更快、知识分享能力更强的智能相结合。

这种融合便是奇点的本质。在这个时代，我们的智能会逐渐非生物化，其智能程度将远远高于今天的智能——一个新的文明正在冉冉升起，它将使我们超越人类的生物极限，大大加强我们的创造力。在这个新世界中，人类与机器、现实与虚拟的区别将变得模糊，我们可以任意地装扮成不同的身体，扮演一系列不同的角色。它所带来的实际效果包括：人类将不再衰老，疾病将被治愈，环境污染将会结束，世界性的贫困、饥饿问题都会得到解决。纳米技术通过使用廉价的处理器，几乎能够创造任意的实际产品，甚至可以最终解决起死回生的问题。

社会与哲学的各分支的变革将是意义深远的，同时它也暗含着巨大的威胁。本书蕴含着对人类未来发展进程的本质乐观主义观点，正基于此，它提供了一个崭新的视角：即将到来的时代，既是数百年来科技、创意的顶点，也是对人类终极命运真挚的、鼓舞人心的愿景。

对本书的赞誉

2005年CBS News的秋季最畅销书之一

2005年《St.Louis Post-Dispatch》最畅销非小说类图书之一

2005年亚马逊最佳科学图书之一

“任何人都可以理解库兹韦尔先生的主要思想：人类的科技知识将如同滚雪球一样越来越大，其未来将是无限灿烂的。本书清晰地表达了所涉及的基础概念。由这些基础概念延伸出的更多内容，作者将进行详细的极具吸引力的论证……这本书将开拓读者的视野，并带领读者经历冒险的旅程。”

——珍妮特·马斯林《纽约时报》

“本书充满了极具想象力和以科学为依据的推测……本书非常值得一读，因为它提供了极有价值的信息，而且内容易于理解……这是一本非常重要的书。并不是库兹韦尔所有的预言都能变为现实，但是相当一部分预言将变为现实，即便你不同意他所说的全部内容，该书也仍然值得关注。”

——《费城问询报》

“认真审视人类未来将进化为什么物种，这是一件令人兴奋和恐慌的事情……库兹韦尔先生是一位卓越的科学家、未来设想家，他在本书中展现了极具吸引力、非常动人的未来观。”

——《纽约太阳报》

“万众瞩目。”

——《圣荷西信使报》

“库兹韦尔将人工智能的优越性与进化过程本身的未来相关联。结果是既令人恐慌又极具启迪……本书仿佛一幅广博的地图，比尔·盖茨曾经称之为‘未来之路’。”

——《俄勒冈人报》

“对不远未来的深刻洞察和锐利聚焦。”

——《巴尔的摩太阳报》

“本书提出的三点内容使其成为重要的文献。1) 它提出了不为人知的崭新观点；2) 这一思想要有多大有多大：奇点——在过去100万年发生的改变，在未来只需要5分钟的时间；3) 这一思想需要信息的反馈。本书使用了非常丰富的注释、参考文献、图示、讨论和质疑进行详细论述。但如果本书的观点是真实的，那将是极为骇人听闻的，它将意味着我们已知世界的终结以及理想国的开始。雷·库兹韦尔用了十年的时间梳理奇点的各个基因，并将它们编著为书展现给我们。我认为该书将成为未来十年引用最多的一本书，就好像1972年出版的《Population Bomb》，你已经开始经历震中的冲击波了。”

——《连线》杂志创始人，凯文·凯利

“如果未来真的如此。那将是多么令人兴奋。”

——Businessweek.com

“本书展示了令人震惊的、乌托邦式的未来视角，那时机器智能将超过生物智能，还会发生什么事情.....那些即将经历的和令人着迷的。”

——微软非官方博客

“作为这个时代最重要的一位思想家，库兹韦尔已经坚持完成了他的早期工作.....这项工作涉猎之广、见解之大胆令人震惊。”

——newmediamusing.com

“对未来极具吸引力的预测。”

——《Kirkus Reviews》

“这一力作自始至终都表现出了技术的乐观主义，读者将深刻地感受到作者的学术观点.....如果你对21世纪技术的进化及其对人类的深刻影响感兴趣，这是一本推荐你阅读的书。”

——Autodesk公式创始人，约翰·沃克

“雷·库兹韦尔是我所知道的预测人工智能未来最权威的人。他的这本耐人寻味的书预想了未来信息技术空前发展，促使人类超越自身的生物极限——以我们无法想象的方式超越我们的生命。”

——比尔·盖茨

“如果你想知道下一个深刻的不连续性（它将深刻地改变我们的生活、工作和对世界的认识）的本质和重要影响，那么请阅读本书。这是一本上乘之作，他以不可思议的想象力，雄辩地探索即将到来的破坏性事件，奇点将改变我们基本的人生观，正如电和计算机对我们的改变。”

——迪安·卡门，物理学家，发明了可穿戴式胰岛素泵、便携式透析机、IBOT可移动系统、Segway人力车，美国国家科技奖章获得者

“雷·库兹韦尔是我们这个时代领先的AI实践者，他再次创作了对未来科学感兴趣的必读书，讲述了技术的社会影响以及人类这个物种的未来。他的这本令人深思的力作设想了未来我们将超越人类的生物智能，并提出了一个引人注目的观点：具有超人能力的人类文明近在咫尺。”

——卡内基·梅隆大学，机器人研究中心领导者，图灵奖获得者，拉吉·瑞德

“本书对科技发展持乐观的态度，值得阅读并引人深思。对于那些像我这样对‘承诺与风险的平衡’这一问题的看法与雷不同的人来说，奇点临近进一步明确了需要通过对话的方式，来解决由于科技加速发展而引发的更多问题。”

——SUN公司的创始人，前首席科学家，比尔·乔伊

译者序

当人们看到太多相同的时候，也许我们很无知；

当人们看到太多不同的时候，也许我们视野不够大；

当人们同时看到不同和相同的时候，也许这恰是我们的智慧原点。

物质是静止的能量，能量是运动的物质，生命是连接物质与能量的桥梁；智慧是生命的形态，智能是智慧的简化，计算是智慧的元素，当人与机器以计算作为交集时，我们会发现它们的生命是相通的。

15世纪欧洲的文艺复兴，让科学挣脱神学的束缚，成为一匹驰骋的野马，为18世纪初的工业革命以及20世纪末至今的信息革命奠定了基础。求真、细分与发散的逻辑，让物质得到了无限的发展，然而人类的精神却被混淆了。

信息科技发展到今天，已呈现出了两大趋向：一方面传统IT正在走向资源化，即计算可以像水、电一样被资源化；另一方面软件正在与文化融合。在科技与人文的碰撞中，科技似乎走到了发散的尽头，人文也正在艰难地溶解着科技，人文化的科技正逐见端倪。

1998年，我们所在的南开大学嵌入式系统与信息安全实验室，在普适计算研究与新媒体阅读产业实践中，发现阅读作为人的一种基本行为，正在被雨后春笋般出现的各种网络化电子装置裂解，带有理性思考的传统阅读正在被无情的娱乐化，萃取、整合理性阅读成为一种使命，同时人迁就机器的时代正在淡去，人与机器融合的时代将要到来。由此带来的众多困惑，驱使我们不断地在Internet上寻求营养。2008年，无意间看到了一则消息，称在美国的硅谷将成立一所“奇点大学”，这个大学的名称和教育探索，源起于一本《奇点临近》的图书。出于好奇，简单在网上搜索了一些评述资料和评论，发现作者是大名鼎鼎的雷·库兹韦尔先生。由于国内没有完整的原版图书，我便通过正在美国UCLA联合培养的宫晓利博士，买了本《奇点临近》电子书，浏览后发现书中的观点很特别，而且与我们计算机专业相关，就安排实验室的硕士、博士按照章节进行报告、讨论，经过半年的讨论，发现书中的观点对我们非常有启发意义。在这期间董振华博士（现在UMN联合培养）建议我将其翻译成中文，介绍给中国的读者，由此产生了翻译本书的冲动。

奇点一词来源于数学的 $Y=1/X$ 函数曲线上 $X=0$ 的点，这个点应该是数学的禁区，也因此给人们以无限的遐想，在这一点上，也许科学与人文得到了交融。

在本书的翻译过程中，我们发现了本书的叙述方式和内容有以下特点：

（1）奇特与警示的结论

书中六个纪元的划分非常奇特而又富于哲理，宇宙的唤醒是个神圣的命题，大脑的模拟、计算能耗、人与机器的相互融合等都是一个个令人惊叹的结论，其结论如此的积极、如此的自信、如此的奇特。

（2）严谨与独特的论述方法

书中前两章运用了归纳式推理总结，后几章又大量运用了演绎式推理预测，真正诠释了回溯有多远，预见就有多远的道理；作者通过追溯、分析以往的科学发展趋势和当今科技的现状，演绎并预测未来。

其重点论述的技术加速回归定律已被现实逐步地验证。

（3）警世之语与探讨性对话

书中每章章首都有名人的警世之语：通过智者的眼睛去审视自然、科学以及我们生存的世界，从而不断强化思想的力量；

章尾是与未来的对话，是一种思想的博弈：通过设想中的未来去理解当今的技术发展和进化中的人类。

（4）东西方思维的对话

本书集中体现了西方科学注重演绎的思维方式，即分科放大的纵向思维回归；不同于东方哲学着重归纳的横向思维方式；书中以东方的归纳思维为基础，以西方的演绎思维导出结论，两者恰如“T”字形中的“横”与“竖”，无意之中完成了一次东西方思想的对话。

（5）GNR综合，科学的东方回归

GNR是三门可敬可畏的学问：触动物种的遗传（G）、复制物质的纳米（N）和改变智慧和灵魂的机器（R）。西方科学本质的发散性极有可

能令G、N、R失控；东方哲学的宇宙观本质是收敛的，注重与自然、宇宙的和谐共存，科技的发展亟须东方哲学的收敛性作为制动系统，保证天地人的共生。

（6）衍生无限的奇点

“奇点”后续的衍生物包括：

- “奇点主义”：“奇点”已经成为了一种思潮，在世界范围内具有广泛影响，关于它的争论没有一天停息过，拥护者将奇点升级为奇点主义，从哲学、科学、技术、艺术等各个方面构建奇点。
- “奇点大学”：2009年2月，Google和NASA联合建立了奇点大学，旨在解决“人类面临的重大挑战”。
- 电影《奇点临近》：由库兹韦尔自编、自导、自演，从艺术的角度说明“奇点”，本片将于2011年上映。

由于本书涉猎的内容既专业又交叉，因此由于专业知识的局限，翻译难免有失准确和恰当，希望读者给予批评指正。

本书的翻译经历了三个过程，即研讨阶段、初译阶段、出版翻译阶段。历时11个月，参与人员20余人，包括：李庆诚、董振华、田源、朱克、尚建、王璐、卢冶等。曾经参与的人员包括：张金博士、宫晓利、方济、张安站、王聪、张建新、胡海军、祝炎、贾磊、李幼萌、张占营、潘雄、郑杰、任开、董立明、曾凯等。在此对曾经参与、讨论的实验室所有人员表示感谢，同时也感谢参与新媒体阅读产业实践的津科翰林同仁！

南开大学 李庆诚教授

前言

思想的力量

“我认为任何一种对人类心灵的冲击都比不过一个发明家亲眼见证人造大脑变为现实。”

——尼古拉·特斯拉，1896，交流电发明人

在5岁的时候我便认为自己将成为发明家。我坚信发明可以改变世界，当其他孩子还在困惑自己长大想成为什么人的时候，我已经很明确自己将来要做什么。那时我正在建造一艘能够驶向月球的火箭（这几乎比肯尼迪总统与国会争论的登月计划还要早上10年），当然我的火箭没有完工。在我8岁左右的时候，我的发明变得更加现实，例如一个带有机械连接装置的自动化剧场，该装置能够在场景中自动切换布景和角色，以及虚拟的垒球游戏。

我的父母都是艺术家，他们逃离了纳粹对犹太人的屠杀，所以希望我接受的教育是国际化的而不是狭隘的宗教式教育¹。因此我的精神教育是多元的。我们可以花半年的时间研究一门宗教——去感受宗教仪式现场的氛围，阅读相关书籍，与宗教领袖对话；然后再去学习另一门宗教。这样的教育让我明晰“通往真理的道路有很多条”。我开始清晰地认识到：根本性真理如此深刻，以至于能够超越表面的冲突。

8岁的时候，我开始阅读汤姆·斯威夫特的系列图书。所有33本（1956年，我阅读了当时已经出版的9本）都有相同的故事结构：汤姆陷入了异常凶险的境地，汤姆与他的朋友，甚至整个人类都命悬一线。这时，汤姆回到自己的地下实验室，思考如何摆脱困境。该系列的每一本书中最紧张的情节大致相同：汤姆与他的朋友会凭借一种智慧反败为胜，转危为安。²这些故事的寓意很简单：正确的思想有能力战胜貌似无比强大的困难。

直到今天，我仍然相信这样的人生观：无论我们面对什么困境——商业、健康、人际关系等问题，以及这个时代面临的科学、社会和文化的各方面挑战——都存在一种正确的思想引领我们走向成功，而且我们可以找到这种思想。当我们找到它以后，需要做的就是将其变为现实。这

种人生观一直在塑造我的生活。思想的力量——这本身就是一种思想。

当我阅读汤姆·斯威夫特系列作品的时候，外祖父重返欧洲，那是他自从带着我的母亲逃亡后首次回到欧洲，这次旅程给了他两个铭记一生的回忆。第一个回忆是奥地利人和德国人殷勤地接待了他，而在1938年，也正是这些人迫使他背井离乡。另一个回忆是，外祖父获得了一次千载难逢的机会——他亲手触摸了达·芬奇的手稿。这两件事都对我影响至深，后者更是让我时常想起。外祖父带着无比敬仰的心情描述这段经历，仿佛他所触摸的是上帝的作品。这也唤起了我宗教般的信仰：对人类创造力的崇拜和对思想力量的坚信。

1960年，12岁的我接触到计算机，并着迷于它模拟和改造世界的的能力。我流连于曼哈顿运河大街的各家电子元器件店（它们现在都还在经营），收集各种零件以组建自己的计算设备。那时我不仅与同龄人一样热衷于当时的音乐、文化和政治运动，而且以同样的热情投身于一种更模糊的趋势，即IBM在那个十年研发了一系列精妙的机器，从大型号的“7000”系列（7070、7074、7090、7094）到小型号的1620（那是第一款高性能的小型计算机）。每年都有新的机型进入市场，每一个新的机型都比上一款更廉价而且性能更高，这个现象与今天一样。那时我使用IBM 1620计算机，并开始开发统计分析程序和作曲程序。

我还记得在1968年，我获准进入国家安全局。那个巨大的房间里放置有新英格兰地区计算能力最强的计算机——当时顶级的IBM 360的91型计算机，由于主存达到了百万字节，其速度高达惊人的每秒钟一百万条指令，其租金是每小时1000美元。那时我开发了一款适用于高中生和大学生程序³。当机器处理每个学生应用的时候，我产生了一种神奇的感觉——平板发出的光以一种独特的方式跳动。尽管我对每一行代码都很熟悉，可是当每次运行的循环结束、光线变暗的那几秒钟，我还是感觉计算机仿佛陷入了沉思。事实上，计算机10秒钟即完成的工作，若换成人工来做，则需要花费10个小时，而且准确率远比不上前者。

作为20世纪70年代的发明家，我开始认识到，发明的意义在于它能够为技术和市场力（这种力量在发明被引入时就存在）提供能量，以构建远不同于原来世界的新世界。我开始研究各种模式，即各种不同的技术（电子、通信、计算机处理器、主存、磁存储）是如何发展的，以及它们如何潜移默化地影响着市场，并且最终影响着社会规则。我发现大多数的发明之所以失败，并不是因为研发部门不能将发明创意变为现实，而是因为发明出现的时机不对。发明创造与冲浪很像，必须预见并恰到

好处地捕捉海上的波浪。

20世纪80年代，我对技术的发展趋势及其对生命的影响力产生了兴趣。我开始把自己发现的模式应用于项目中，并预测技术创新对2000年、2010年、2020年，甚至更远年代的影响。这使得我能够应用未来的能力去设计创造发明。20世纪80年代中晚期，我完成了自己的第一本书《The Age of Intelligent Machines》⁴。该书包含了对于20世纪后十年和21世纪初期的广泛而且相当准确的预测，这本书的最后讲道：在21世纪的前50年，机器智能可以媲美人类祖先的智能。这似乎是一个激进的预测，但无论如何，我都坚信这是不可避免的。

在过去的20年里，我逐渐认识到一个重要的基本思想：改变世界的思想力量其本身也正在加速。虽然人们认同它的表面含义，但却无法真正理解其对世界本身的深刻影响。在未来的几十年里，我们将有机会运用这种思想解决很多固有的问题，同时也会发现一些新的问题。

20世纪90年代，我收集了很多关于信息相关技术明显加速的经验数据，并寻找、改进适合以上数据的数学模型。我提出了加速回归理论，它能够解释为什么在宇宙的总体进化中，技术和进化将以指数的速度向前推移⁵。在我于1998年完成的《The Age of Spiritual Machines》（ASM）一书中，我力图阐明人类生活的本质，该本质存在于机器与人类认知变得极为相似的那个时刻之后。事实上，我将这个纪元视为人类的生物继承性与未来超越生物的能力越来越紧密的协作。

随着《The Age of Spiritual Machines》一书的出版，我开始反思人类文明的未来，以及文明和人类在宇宙中所处位置的关系。未来的文明将远胜于现在的文明，尽管很难预测未来的文明程度，但是我们有能力在头脑中创建现实模式，该模式可以让我们洞察到这样一种暗示：生物智能必将与我们正在创造的非生物智能紧密结合。这便是我希望在本书中讲述的内容，它基于这样的思想：我们有能力理解自身的智能（通过访问我们自身的源码），并且能够改良和拓展我们的智能。

有些观察家质疑人类应用自身的思想去理解自身的思想的能力。人工智能的研究者道格拉斯·霍夫斯塔特经过深思熟虑后认为：“人类的大脑没有能力理解本身的智能，这也许只是命运中的一个意外。试想相对低能的长颈鹿，它的大脑远低于自我认知的智能水平，但其构造与人类大脑的构造却几乎完全相同⁶。”尽管如此，我们已经能够成功地模拟出大脑

的部分神经元和大量的神经组织，并且这种模拟的复杂程度在迅速增加。本书将详细地描述一个关键问题：我们在人类大脑逆向工程方面取得的进展，也表明我们有能力理解、模拟，甚至拓展自身的智能。这便是人类与其他物种不同的一个方面：人类要达到无限高度的创造力存在一个临界阈值，我们的智能水平足以超越这个阈值，而且我们有相应的必要工具（如人类拇指），能够按照自己的意愿去改造宇宙。

关于魔术的一点想法：当阅读汤姆·斯威夫特的系列丛书时，我仿佛成为了一个狂热的魔术师，很享受观众在经历超越现实的体验时获得的愉悦。在青少年时代，我用技术代替魔术表演，发现技术与戏法有很大的不同：技术不会因为其背后的秘密被揭示而失去其巨大的力量。我时常会想起阿瑟·C·克拉克的第三定律：“任何足够先进的技术绝不同于魔术。”

从这个角度考虑J·K·罗琳的《哈利·波特》，其中的传奇故事无不充满了想象力，不过这些想象力也是对我们这个世界的合理反映，它们将在几十年后变为现实。通过这本书对技术的介绍，波特的魔法将会被重新认识。通过使用纳米设备，故事中的“魁地奇”运动以及将人或物体变成其他形式的行为，在全浸入式的虚拟现实环境中是可以实现的。更具有不确定性的是时间倒流（像《哈利·波特与阿兹卡班的囚徒》中描述的那样），为了完成这些目标，严谨的科研计划正在沿着这些主线进行（没有引起因果争论），至少对于我们构建的比特信息来说是这样的。（详见第3章关于计算的终极限制的讨论。）

哈利通过念诵正确的咒语来施展魔法。当然，发现并应用这些咒语并不是容易的事情。哈利和他的同学要保证咒语的顺序、过程和语气加重部分的准确无误。这个过程是精确的，正如我们经历的技术。技术的咒语便是蕴含于现代魔术之中的公式和算法。只需应用正确的序列，我们就可以让电脑朗读书籍、理解人类的语言、检查并预防心脏病，甚至预测股市行情。哪怕咒语有一点儿差错，魔法就会被削弱，甚至不起任何作用。

有人指出，《哈利·波特》中的Hogwartian咒语是简短的，其所包含的信息量远少于现代程序语言的代码。但是现代技术的各种重要方法都有一个共同的显著特点——简洁。例如，几页公式就可以描述软件运行的基本原理（如语音识别）。通常，技术上一个显著的进步往往源于对一个公式进行较小的改动。

相同的经验和道理可以应用到生物进化的“发明”中，举例来说，黑猩猩与人类在基因上的差异非常微小。虽然黑猩猩也具有一些智能的特征，但正是基因中这些微小的差别，使得人类这个物种拥有了创造出魔法般技术的能力。

女诗人穆列尔·鲁凯泽曾经说过“宇宙是由故事而非由原子构成的”。在本书的第7章，我把自己描述成一个“模式人”，模式人将信息的模式视为最基本的现实。例如，基本粒子构成了我们的大脑和身体，并在数周内发生改变，但是这些粒子构成的模式具有连贯性。一个故事可以被视为有意义的信息模式，所以我们可以基于这种观点来理解穆烈尔·鲁凯泽的话。这本书讲述的是人机文明的命运的故事，这个命运便是我们所说的奇点。

致谢

我要向我的母亲汉娜和父亲弗雷德里克表达最真挚的谢意，感谢他们毫无疑问地支持我的早期想法和发明，让我自由地进行试验；感谢我的姐姐伊尼德给予我灵感与鼓励；感谢我的妻子桑亚、我的孩子伊桑和艾米，他们给予了我生活的意义、爱和动力。

我要感谢那些协助我完成这个复杂项目的聪明而且具有献身精神的人：

我的编辑，维京人瑞克·考特，他为本书提供了领导才能、热情和见解深刻的编辑工作；感谢克莱尔·菲拉洛，他作为出版商为本书提供了重要的支持；感谢蒂莫西·孟德尔在专业文字编辑方面所做的工作；感谢布鲁斯·吉福德和约翰·加斯诺协调本书创作过程中的各种细节；感谢艾米·希尔对本书文本的设计；感谢霍利·沃森高效的市场宣传工作；感谢亚历山德拉·鲁萨尔迪对瑞克·考特工作的协助；感谢保罗·贝克利清晰高雅的图片设计工作；感谢赫本设计了本书极具魅力的封面。

感谢我的出版代理人罗雷塔·巴雷特，他的热情和敏锐的见解引领了这项工作。

感谢特里·格鲁斯曼，医学博士，我的健康合作者，与我共同创作了《*Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever*》，与他往来的10000多封电子邮件帮助我形成了关于健康和生物技术的想法，他在众多方面都提供了帮助。

感谢马丁·罗斯莱特参与了书中关于技术的所有讨论，我们一起寻求这些领域的不同技术。

感谢艾伦·克雷勒，我的长期合作伙伴（自1973年），他在很多项目都投入了精力，提供了帮助，当然也包括本书。

感谢安马尔·安吉克，他投入了巨大精力，并提出了深刻的见解来领导我们的研究团队。安马尔还利用其卓越的编辑技巧帮助我清晰地表达本书中的复杂问题。感谢凯瑟琳·麦洛克，他在本书的研究和注释方面作出了巨大贡献。感谢萨拉·巴莱克在识别研究和编辑技巧方面所做的努力。感谢我的研究团队为本项工作提供了巨大的帮助：安马尔·安吉克、凯·瑟琳·麦洛克、萨拉·巴莱克、丹尼尔·派特拉吉、艾米莉·布

朗、西莉亚·巴莱克-布鲁克斯、纳特·巴克-霍克-萨拉·布莱恩、罗伯特·白普里、约翰·蒂林哈斯特、伊丽莎白·科林斯、布鲁斯·丹纳、吉姆·林图、苏·林图、拉里·克拉斯和克里斯·赖特还有利兹·贝里、莎拉·布莱恩、露丝·玛丽、琳达·卡茨、丽莎·克斯纳、英娜·尼尔赫、克里斯托弗·塞兹尔和贝弗利提供的协助。

感谢勒克斯曼·弗兰克，他通过我的描述创作了很多极具吸引力的图表以及规范的图形。

感谢西莉亚·巴莱克-布鲁克斯为本书的创作和沟通提供了卓越的领导才能。

感谢菲尔·科恩和泰迪·科勒，他们将我的想法用图形表达出来，感谢海琳·德尼罗，他提供了第7章开头的“奇点临近”的照片。

感谢纳特·巴克-霍克、艾米莉·布朗和萨拉·布莱恩，他们协助管理本书研究和编辑的整个过程。

感谢肯·林德和马特·布里奇斯，他们的计算机系统协助我完成这项错综复杂的工作。

感谢丹尼斯·斯特拉罗、琼·沃尔什、玛利亚·艾丽丝和鲍勃·比尔，他们在这项复杂工程中担任了会计工作。

感谢KurzweilAI.net团队为本书提供了大量的研究支持：艾伦·克雷勒、安马尔·安吉克、鲍勃·比尔、西莉亚·巴莱克-布鲁克斯、丹尼尔·派特拉吉、丹尼斯·斯特拉罗、艾米莉·布朗、沃尔什、肯·林德、勒克斯曼·弗兰克、玛利亚·艾丽丝、马特·布里奇斯、纳特·巴克-霍克、萨拉·巴莱克和萨拉·布莱恩。

感谢马克·比泽尔、德博拉·利伯曼、基尔斯滕·克劳森和德亚·埃尔多拉多，他们在本书交流方面所做的工作。

感谢小罗伯特·弗雷特斯，他详尽地检查了纳米技术的相关材料。

感谢保罗·林森，他详尽地检查了本书中有关数学的论述。

感谢本书的专家读者，他们认真检查了书中的科学内容：小罗伯特·弗雷塔斯（纳米技术、宇宙学），拉尔夫·梅克尔（纳米技术），马丁·罗

斯布雷特（生物技术、技术加速），特里·格鲁斯曼（健康、医药、生物技术），托马斯·博意（脑科学、大脑的逆向工程），约翰·帕门特拉（物理学、军事科技），迪安·卡门（技术发展），尼尔·杰森费德（计算科学、物理学、量子力学），乔尔·杰森费德（系统工程），汉斯·莫拉维茨（人工智能、机器人），麦克斯·莫尔（技术加速、哲学），让-雅克斯·罗廷（大脑与认知科学），雪莉·托克（技术的社会影响），赛斯·肖斯塔克（SETI、宇宙学、天文学），达米安·布罗德里克（技术加速、奇点）和哈里·乔治（技术企业家精神）。

感谢本书的内部读者：安马尔·安吉克、萨拉·巴莱克、凯瑟琳·麦洛克、纳特·巴克-霍克、艾米莉·布朗、西莉亚·巴莱克-布鲁克斯、艾伦·克雷勒、肯·林德、约翰·查鲁博、保罗·阿尔布雷希。

感谢本书的外行读者和他们敏锐的洞察力：我的儿子，伊桑·库兹韦尔以及大卫·达尔林普尔。

感谢比尔·盖茨、埃里克·德雷克斯勒和马维文·米斯基，他们允许我在该书中引用他们的对话。他们的想法收录在本书的对话中。

感谢很多科学家和思想家，他们的思想和努力为人类知识呈指数扩展提供了基础。

以上提到名字的人员都贡献了想法和对本书的改进建议，我对他们的努力表示感谢。对于书中的任何错误，将由我个人负全责。

作者简介

雷·库兹韦尔是世界领先的发明家、思想家、未来学家，他用了20年的时间记录和追溯历史的发展轨迹，以预测未来。他被《华尔街日报》誉为“永不满足的天才”，被《福布斯》杂志誉为“最终的思考机器”，被《Inc.》杂志评选为最顶尖的企业家之一，并称其为“托马斯·爱迪生的法定继承人”。PBS将他选为过去200年间“16位创造美国的革命者”之一。他还入选了国家发明名人堂，是国家科技奖章获奖者、Lemelson-MIT大奖（世界上最重要的发明奖）获奖者，拥有13项荣誉博士头衔，曾经获得3位总统嘉奖，他还是4本书的作者：《Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever》（与特里·格鲁斯曼合著）、《The Age of Spiritual Machines》、《The 10% Solution for a Healthy Life》和《The Age of Intelligent Machines》。

第1章 六大纪元

“每个人都将自身所感知的范围当做世界的范围。”

——叔本华

我不能确定自己是在什么时候第一次意识到奇点的，应该承认这是一个逐渐认识的过程。在近半个世纪的时间里，我致力于计算机及其相关技术的研究工作，并努力去理解我亲身经历的很多层面上的巨大变革及其背后的内涵和意义。渐渐地，我开始认识到21世纪前五十年里变革的大致轮廓——就好像空间中的黑洞突然改变了物质和能量的模式，加速朝其边界发展。这逼近未来的奇点，从肉体到精神，逐步地改造人类生活的各个方面。

那么，什么是奇点呢？奇点是未来的一个时期：技术变革的节奏如此迅速，其所带来的影响如此深远，人类的生活将不可避免地发生改变。虽然这个纪元既不是乌托邦，也不是反乌托邦的形态，但它将人类的信仰转变为生命能理解的意义；将事物模式本身转变为人类生命的循环，甚至包含死亡本身。理解奇点，将有利于我们改变视角，去重新审视过去发生的事情的重要意义，以及未来发展的走向。一个人真正理解了奇点的含义，将从根本上改变他的人生观和他的人生。我所尊重的一些人，他们理解了奇点，领悟了它的内涵，他们终身都是奇点人¹。

我可以理解，为什么很多观察家不能较快地意识到加速回归定律的本质内涵（发展变革的本质加速，包括技术的进化作为生物进化的延续）。毕竟，我用了四十年的时间去见证这个定律的正确性，而且，这个定律所带来的后果并不都是令人满意的。

奇点临近暗含一个重要思想：人类创造技术的节奏正在加速，技术的力量也正以指数级的速度在增长。指数级的增长是具有迷惑性的，它始于极微小的增长，随后又以不可思议的速度爆炸式地增长——如果一个人没有仔细留意它的发展趋势，这种增长将是完全出乎意料的（见图1-1）。

请看这样一个寓言：一个湖的主人希望呆在家中照料湖中的鱼，他要确保湖面不会被百合浮萍覆盖，这种浮萍据说每天都以其自身两倍的数量增长。日复一日，湖的主人耐心地等待，他发现只有很少量的百合浮萍

出现，而且它们似乎不会以任何显著的方式扩展蔓延。由于只有不到百分之一的湖面覆盖了百合浮萍，湖的主人确认可以与家人度过一个悠闲的假期。几周之后，当他回来的时候，他被眼前的景象震惊了：整个湖面都被浮萍覆盖了，所有的鱼也都死了。由于浮萍的数量以每天成倍的速度增长，7次加倍就可以使浮萍覆盖整个湖面（7次加倍将达到原来128倍）。这个例子说明了指数增长的内涵。

再来看看国际象棋世界冠军格瑞·卡斯帕罗夫，1992年，他曾不屑于计算机棋手的水平。但是由于计算机的能力每年都以两倍的速度递增，所以五年后，卡斯帕罗夫被计算机击败²。在很多方面，计算机现在已经超越了人类的计算能力，并以更快的速度发展。同时，计算机智能应用也在逐渐拓宽。举例来说，计算机能够诊断心电图和医学图像，侦测飞机的起飞与降落，控制自动武器的战术决策，做出信用与金融决策，同时承担着很多需要人工智能辅助完成的任务。但是人工智能在众多领域也存在缺陷，怀疑者认为人工智能在某些领域无法超越人类智能，这恰恰说明了人类的能力优于其本身的创造能力。

尽管如此，本书将会讨论在未来的几十年里，基于信息的技术将会容纳人类所有的知识和技能，甚至包含识别模式的能力、解决问题的技巧，以及人类大脑中内在的情感与道德的智慧。

尽管大脑在很多方面具有极为优越的性能，但其仍有很多局限性。现在已经可以通过技术使用大量的并行（数百T级的模拟内部神经元链接操作）来迅速认知大脑中微妙的模式。但我们的思考却是很慢的：基础的神经元事件处理比同等的电子电路要慢上数百万倍。这将导致人类在生理上处理新知识的能力远远跟不上人类知识的指数级增长速度。

人类生物体的1.0版本也是很脆弱的，他容易屈服于大量的错误模式，而且，维持生命需要大量的成本。虽然人类的智能在某些时刻能够突破他的创造力和表象，但是人类的大多数想法还都是衍生的、琐屑的、受限的。

奇点将允许我们超越身体和大脑的限制：我们将获得超越命运的力量；我们将可以控制死亡；我们将可以活到自己想达到的年龄（这与“永生”有细微的差别）。我们将充分理解人类的思想并极大程度地拓展思想的外延。在21世纪行将结束的时候，人类智能中的非生物部分将无限超越人类智能本身。

我们正处于这一变革的早期阶段。模式变化的加速度（我们改变基本技术方法的速率）将与信息技术的指数增长速度相同，并都将处于膝曲线的拐点（在这个时期指数增长的趋势将变得非常明显）。一旦越过这一阶段，这种加速的趋势将爆炸式地增长。在21世纪中期以前，我们的技术增长率（与我们自身的增长速度大不相同）将以近似垂直线的速度增长。从严格的数学角度来看待这个问题：虽然速度的增长仍然是有限的，但它近乎极限的速度，必将撕裂人类固有的历史结构。至少在无法提高人类生物智能这一理论的前提下，该观点成立。

奇点将代表我们的生物思想与现存技术融合的顶点，它将导致人类超越自身的生物局限性。在人类与机器、现实与虚拟之间，不存在差异与后奇点。如果你想知道在这个时代人类的哪些特质将保持不变，很简单：人类这一物种，将从本质上继续寻求机会拓展其生理和精神上的能力，以求超越当前的限制。

很多批评家对于这些改变的评述都聚焦于这个过渡时期带给人类的在一些重要方面的缺失。但若从这个角度考虑问题，就不能准确地理解技术的未来。当前所有的机器都比不上人类本身那么精妙。尽管奇点有很多方面，但其最重要的内涵是：我们的技术将能够和人类最优秀最精妙的品质相媲美，并超越它们。

直觉的线性增长观与历史的指数增长观

“一旦超越人类的智能被创造，并且该智能可以周而复始地自我改进，这将对世界颠覆性的变革，我还不能预测这种变革所带来的后果。”

——迈克尔·安西莫夫，科技图书作家

20世纪50年代，伟大的信息理论学家冯·诺依曼指出，“技术正以其前所未有的速度增长……我们将朝着某种类似奇点的方向发展，一旦超越了这个奇点，我们现在熟知的人类社会将变得大不相同。”³冯·诺依曼在这里提到了两个重要概念：加速与奇点。

第一个概念说明了人类的发展正以指数级的速度增长（以一个常量重复相乘的速度）而不是线性增长（以重复增加一个常量扩张），如图1-1所示。

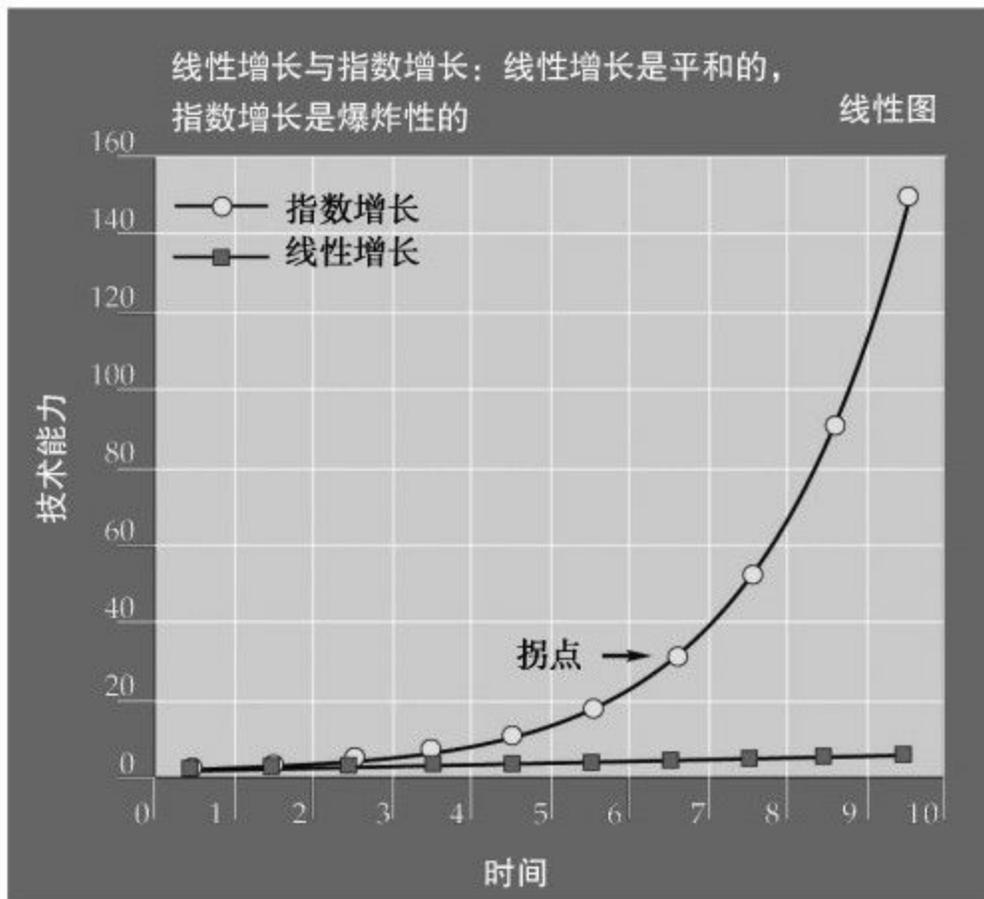


图 1-1

第二个概念说明指数级增长的速度是多么令人震惊，开始的时候增长速度很慢，几乎不被觉察，但是一旦超越曲线的拐点，它便以爆炸性的速度增长。人们并没有充分地理解未来，我们的祖先对未来的期望与我们现在对未来的期望相似，都认为未来的发展速度与过去是一样的。指数增长的趋势在1000年前就已经存在，但那时它还处于早期阶段，发展的趋势是平和而缓慢的，似乎看不出任何趋势。结果人们对于未来不变的期望似乎得到了现实的验证。今天，我们所预测的技术持续进步和社会反响都是基于以往的经验。但事实上，未来的发展将远超过大多数人的认识，因为很少有人能够真正认识到加速发展本身的深刻含义。

大多数对于未来技术的预测，都低估了未来发展的力量，因为这种预测主要基于“直觉线性”增长观而非“历史指数增长”观。我的模型表明，每隔十年，模式迁移的速度会提高一倍，这一点，我将在下一章中详细论述。因此，在过去的20世纪，技术的发展速度逐步递增并达到今天的发展速度；20世纪所取得的成就，等同于以2000年的速度发展20年所取得的成就，也将等同于未来14年的发展取得的成就（到2014年），依此类推，这14年取得的成就将等同于其后7年所取得的成就；我们将见证两万年的发展进步（同样以“今天”的速度衡量），或者说，我们将见证1000倍于20世纪的发展成就⁴。

对于未来情形的错误理解发生得很频繁，并且出现于不同的场合。其中有这样一个例子，最近有一场关于分子大规模制造的争论，一些诺贝尔获奖专家宣称不必担心纳米技术的安全性问题，他们宣称“在数百年的时间内我们将不会看到具有自我复制能力的纳米工程实体（构建分子片段的设备）”。如果以今天技术增长的速度计算（5倍于20世纪的平均增长速度），估计用100年的时间是合理的。但是我们的发展速度每十年都会加倍，我们看到以现在的速度需要一个世纪才能取得的成就，其实只需要25年的时间。

类似的例子发生在《时代》杂志关于“未来的生活”大会上，那次大会举办于2003年，是为了庆祝发现DNA结构50周年。所有被邀请参会的演讲者都被问及同样的问题：50年之后的生活将是怎样的⁵。几乎所有的出席者都以过去50年的模式去看待未来的50年。DNA的发现者之一詹姆斯·沃森，他认为50年后将会出现这样一种药物，它使得人类不论吃多少食物体重都不会增加。

五十年？通过在小鼠身上做实验，我们已经可以通过堵塞脂肪胰岛素摄取基因的方式控制脂肪细胞中的脂肪含量。用于人类的药物（我们将在第5章讨论RNA介入和其他相关技术）的研发正在进行，食品药品监督管理局的相关测试也将在几年内进行。詹姆斯·沃森的预测在5至10年即可实现，而非50年。其他人的预测也同样是短浅的，只反映了当时技术的发展程度，而没有考虑到未来的50年将给这个世界带来的巨大变革。在出席那次会议的所有人中，只有我和比尔·乔伊认识到了技术将以指数级的速度发展，尽管比尔和我对于这些改变的内涵的理解并不一致，在第8章我将讨论这一点。

人们直觉上认为当前发展的速度就是未来发展的速度。甚至对于那些经历长时间发展变革的人来说，仍然会凭直觉认为时代的发展以我们最近经历的发展速度进行。从数学的观点审视这个问题，指数曲线在一段很短的时间内看起来就像是一条直线。这就导致了那些最具经验的批评家在思考未来的时候，也都是以当前的技术发展速度来预测未来十年或者百年的发展情况。这就是我将这种预测未来的方法命名为“直觉线性”观的原因。

但是以技术的发展史为依据进行严格地评估，可以揭示技术以指数级的速度发展。指数级增长是所有进化发展的重要特征，技术是其中的主要实例。你可以从不同角度审视数据：不同的时间坐标；技术所覆盖的范围，例如从电子到生物；应用的角度，例如从人类知识的总量到经济的规模。发展和增长的加速适用于以上所有情形。事实上，我们发现那不是简单的指数级的增长，而是双倍指数级增长，这意味着指数级的增长速度本身是以指数的速度增长的（例如，我们将在下一章讨论的性价比计算）。

很多科学家和工程师都具有我称为“科学家悲观主义”的特点。通常他们都会陷于科研工作的困难与错综复杂的细节当中，以至于无法发现其工作对于未来的长远意义，以及这些工作所关联的更广阔的领域。同样，他们也无法认识到在新一代的技术中强有力的工具是什么。

科学家要求怀疑一切，谨慎地表达当前的研究目标，很少去推测超越这个时代的技术追求。这种情形在一代技术持续时间长于一代人的时候是合理的，但是这并不适于现今这个社会的实际情况，因为，现在技术的更替只需要几年的时间。

1990年，生物学家曾质疑在短短15年的时间内完成整个人类基因组破译

工作的可行性。因为在当时，这些科学家花了整整一年的时间只破译了其中的万分之一。所以，以当时的进展速度，至少还需要一个世纪才能将整个人类基因组破译成功。

再看另一个例子，在20世纪80年代中期，很多人怀疑互联网能否普及，因为当时互联网只包含了数万个节点（服务器）。事实上，节点的数量以每年两倍的数量递增，10年后，节点的数量达到了数千个。但是那些局限于当时技术发展水平的人并没有认识到这种趋势，因为在1985这一年，只有数千个节点加入了互联网⁶。

与之相反的一种情况是，尽管某些指数级增长现象被人们认识，但人们却过于痴狂于这些现象，却没有很好地掌握增长的节奏，人为地使得增长的速度超越了时代，从而产生了很多的错误。在“网络泡沫时期”和“电信泡沫时期”（1997~2000），资本的价值被过分地抬高（股票的市场价值），已经超越了合理的增长速度。我将在第2章详细阐明，无论在兴盛期还是衰退期，互联网和电子商务的发展趋势是平缓的指数增长。过分乐观的增长预期只会影响资本（股票）的价值。我们已经在早期范型的迁移中看到了这些错误——例如，在铁路时代的早期（18世纪30年代），那时与现在网络的兴衰一样，过分的扩张直接导致了铁路扩充的冰冻期。

预言者经常犯的另一个错误是认为变革只是由当今世界的一种趋势引起的，而与其他事物并无关系。一个很好的例子就是人们认为延长人类寿命将导致人口过剩、维持人类生命所需的物质资源耗尽，却忽略了由纳米技术和强人工智能技术所创造出的巨大财富。举例来说，2020年很有可能出现基于纳米技术的制造设备，它可以使用廉价的原材料和信息造出几乎任意的物理产品。

我如此强调指数增长与线性增长的对比，是为了纠正很多预言者对未来发展趋势做出的最错误的预测。大多数技术预测和预测者都忽略了技术以指数趋势增长这一事实。的确，几乎我见过的所有人都以线性发展观看待未来。这就是为什么人们往往高估短期能够达到的目标（因为我们常常忽略必要的细节），却容易低估那些需要较长时间才能到达的目标（因为忽略了指数增长）。

六大纪元

开始的时候，我们创造工具，后来它们造就我们。

——马歇尔·麦克卢汉，媒介理论家、思想家

未来并不是像它过去那样发展。

——尤吉·贝拉，美国著名棒球运动员

进化是一个创造持续增长秩序模式的过程。我将在第2章讨论秩序的概念，这一部分讨论的重点是模式的概念。我相信模式的发展构成了我们世界的最终形态。在间接的进化中，每个阶段或纪元都是使用上个纪元使用的信息处理方法来创造下一个纪元。我从生物和技术两方面，将进化的历史概念划分为六个纪元。正如我们将要讨论的，奇点将随着第五纪元的到来而开始，并于第六纪元从地球拓展到全宇宙。

第一纪元：物理与化学。人类的起源可以追溯到用物质和能量的形式来表现信息的那个阶段。近年来量子力学理论认为，时间和空间都可以分解成为离散的量子。关于物质和能量本质能否数字化和模拟化的争议依然存在。但是不论这个问题的结论如何，我们都可以认定原子结构可以存储并且表达离散信息。

宇宙大爆炸的数十万年后，电子开始围绕着由质子和中子组成的原子核运转，于是原子出现了。原子带电的特质使得它们可以聚合在一起。经过了几百万年的演变，原子逐渐聚合成了一种相对稳定的结构——分子，化学随之诞生。在所有的化学元素中，碳元素最为活泼，因为它可以在其分子的四个方向都形成碳链（相比之下，其他元素最多只有三个方向），从而形成复杂的、可以大量存储信息的三维结构。

宇宙中的各种规律和物理常数（用于保持各种基本力之间的平衡）都是非常精妙而又错综复杂的，它们为信息的编撰和进化发展创造了适宜的环境。在这个环境里，既能看到伟大而神秘的自然之手，亦能感受到人类自己的手——人择原理，该原理持有如下观点：正是在这个允许人类进化的宇宙的存在，才可能出现我们这样的智慧生命来谈论它⁷面对如此复杂的进化系统，我们不禁感叹造物主的巧夺天工。近代的许多宇宙物理学理论指出，其实新的宇宙系统是有规律的、不断产生的，只是它

们的系统规律不能支持复杂形式的进化⁸，这些新形成的宇宙不是迅速衰竭，就是一成不变地维系着它们没有高级生命的形式（与地球的生物系统相比）。用早期的宇宙理论去证明这些进化理论是不可能的，但可以明确地认定：我们的宇宙完全符合复杂进化所需的有序度和复杂度⁹，如图1-2所示。

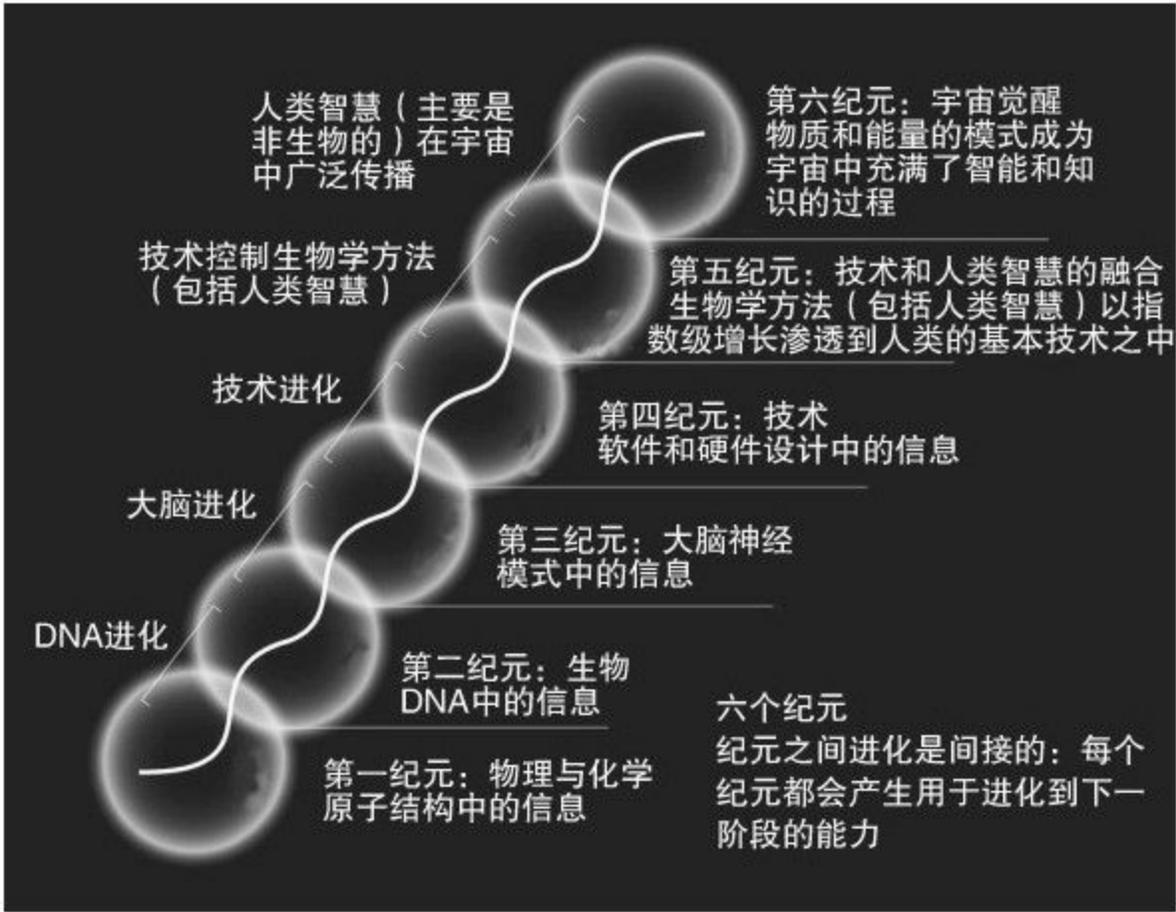


图 1-2

第二纪元：生物与DNA（脱氧核糖核酸）。第二纪元始于几十亿年前，由碳元素形成的化合物趋于复杂化，进而形成了能够进行自我复制的分子聚合物，生命随之诞生。最终，生物系统进化出了一套精密的数字机制（DNA）用以对更高层次的分子信息进行存储。DNA分子和它的附加机制（包括遗传密码和核糖体成分）使得第二纪元的进化信息得以保存。

第三纪元：大脑。各个纪元之间是通过“间接引导”的模式来延续信息的

进化（下一纪元进化利用上一纪元的进化结果）。例如，在第三纪元中，以DNA为导向的进化产生了可以感知信息的生物，它们可以运用自身的感知器官进行感应信息并且运用自身的大脑和神经系统对感知到的信息进行加工处理和存储。第二纪元的机制（包括DNA、蛋白质外向信息以及能控制基因表达的RNA片段）使得第三纪元的信息处理机制（大脑及神经系统的各个器官）得以运作并发挥功效。人类大脑的大部分活动是关于模式识别的，第三纪元起始于早期动物的模式识别能力，该能力可以解释人脑的大部分活动¹⁰。最终，人类这一物种通过进化获得了对我们所处世界进行思维抽象并且能对这些模式进行理性的推演的能力。人类具有了依据自身思想重新描绘世界的的能力，并且能够将这些思想付诸实践。

第四纪元：技术。人类理性思维和抽象思维的结合使我们迈进了第四纪元，进入了“间接引导”的下一阶段：人造技术的进化层次。这一层次是以简单的机械化为起点，并发展为制造精妙的自动化设施（自动机械设备）的阶段。最终，技术通过其成熟的计算和通信设备实现了对不同类型复杂信息的感知、存储和评估。与生物智能的进化速率相比，技术进化的速率非常之快：最高级哺乳动物的大脑每隔数十万年才增长大约一立方英寸；而计算机容量几乎每年都会翻一番（见第2章）。诚然，不论是大脑的大小还是计算机容量的大小都不是决定智能高低的唯一因素，但是它们却是影响智能的重要因素。

如果我们把生物进化和人类技术进步过程中的里程碑事件在同一对数函数的图形中表示出来（其中X轴代表过去的年代，Y轴代表范式迁移的时间），可以得出一条相对的直线（呈持续加速的趋势），如图1-3和图1-4所示。这是因为生物进化直接引领了人类技术的发展¹¹。

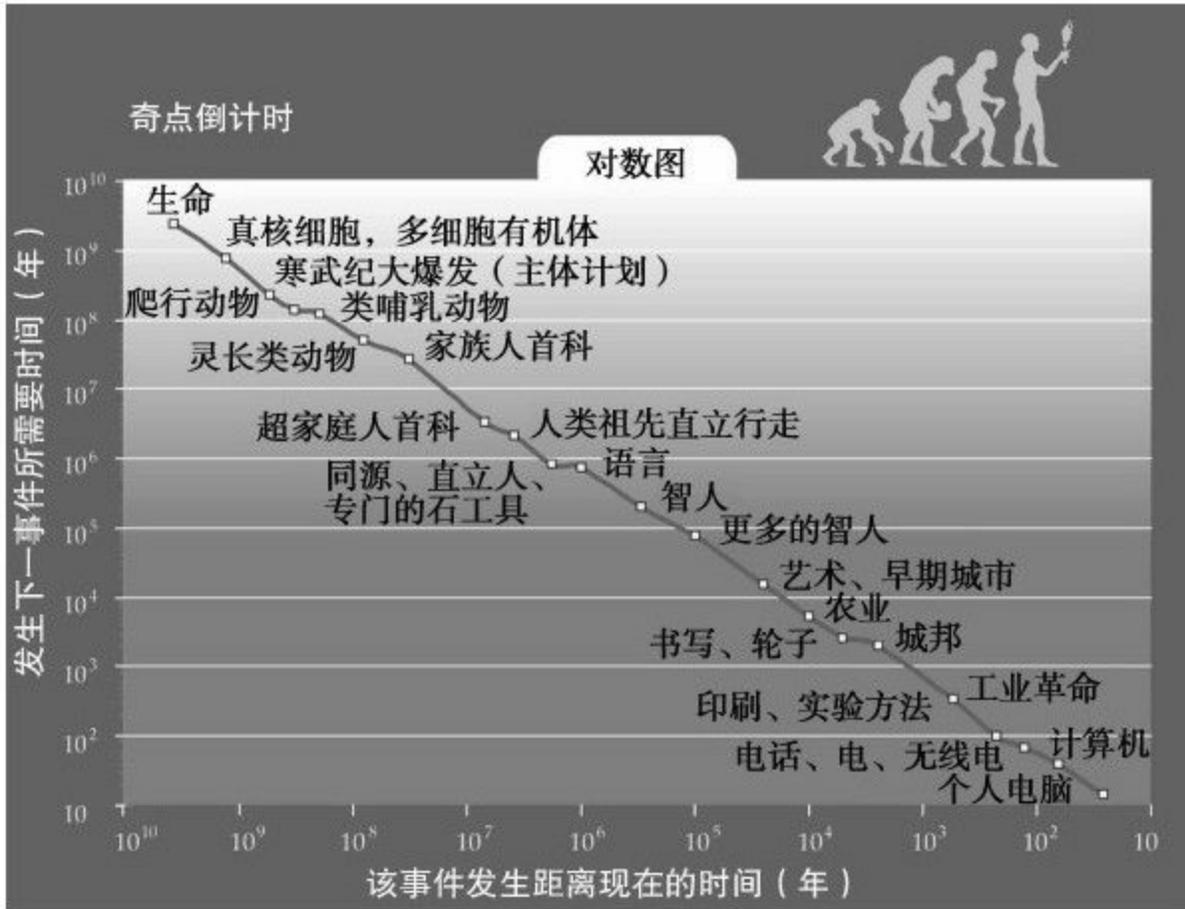


图 1-3

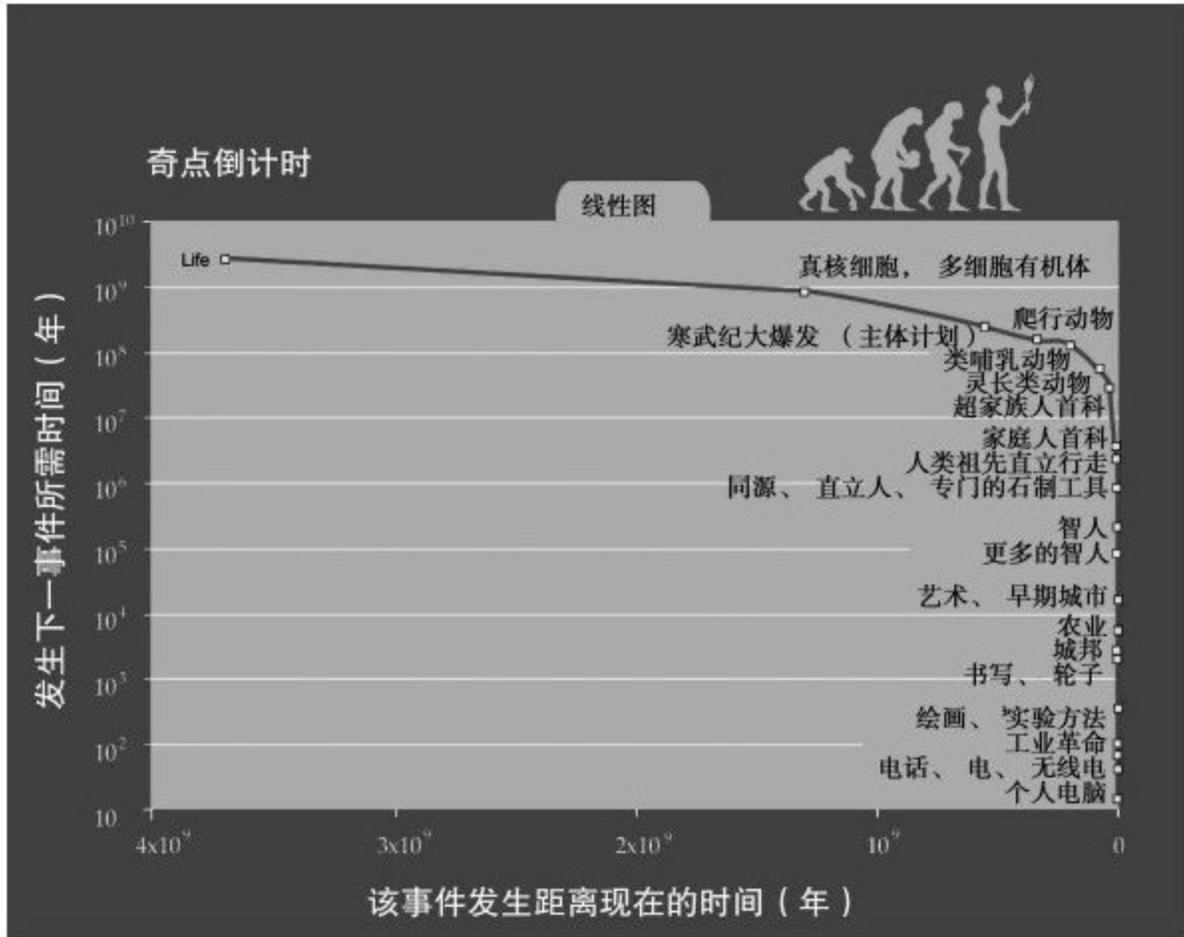


图 1-4

以上的图形反映了我对生物和技术发展过程中重大事件的认识。有一点需要注意：图形中持续加速的直线并不取决于本人所选取的事件。对此，不同的研究人员和参考书都会列出风格迥异的事件列表。尽管研究手段存在着一些差异，但是如果我们结合各种资源中的事件列表（例如，《不列颠百科全书》、美国自然历史博物馆、卡尔·萨根的“宇宙年历”等），不难发现加速的趋势是共通的。图1-5提供了十五种不同的事件列表¹²。由于不同的研究人员对同一事件的发生时间存在争议，而且不同的列表又采用了不同的衡量标准来选择表中的事件，以致不同列表的事件出现了重复和交集。数据的繁杂（统计上的差异）造成了进化曲线的“厚重化”。尽管如此，进化曲线的整体脉络还是非常清晰的。

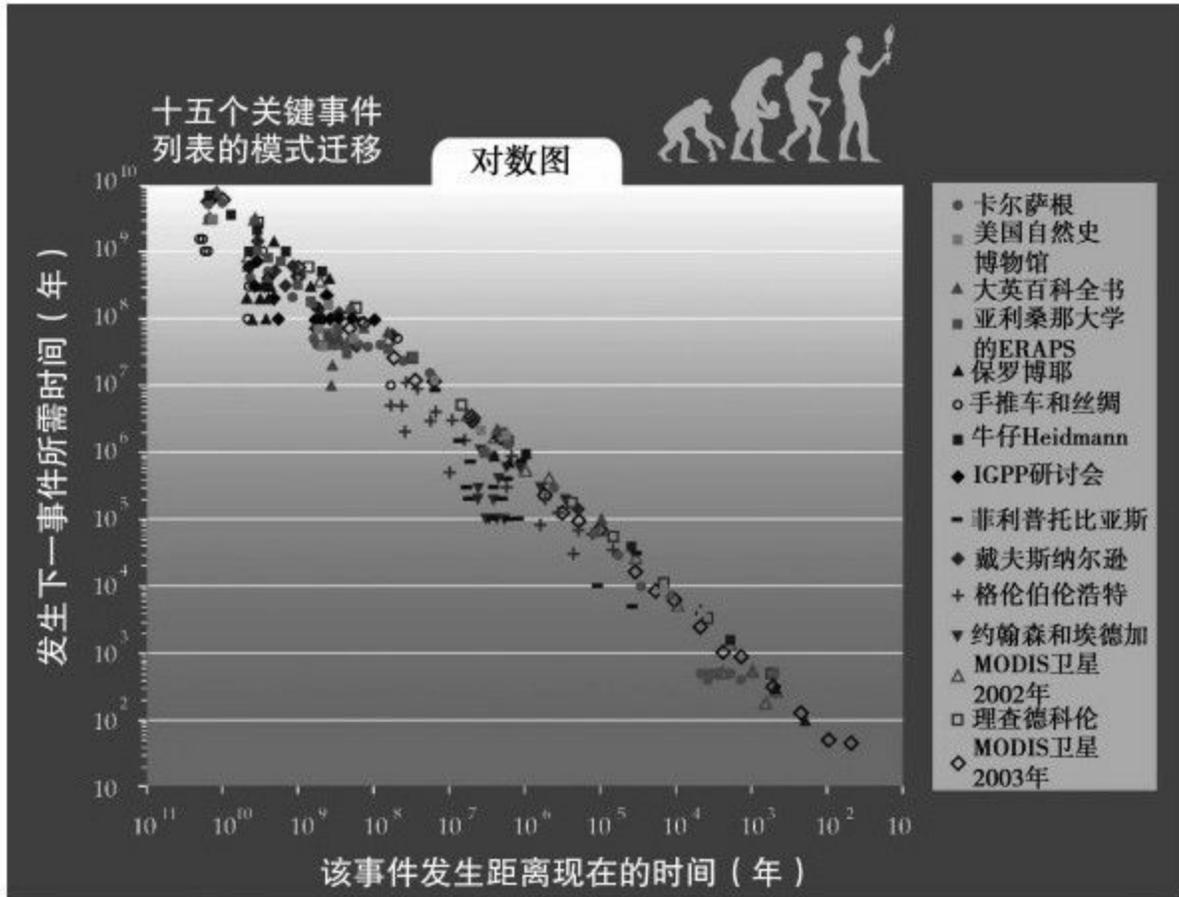


图 1-5

物理学家、复杂理论学家西奥多·莫迪斯通过对不同事件列表进行分析，对相似相同事件进行整合，总结出了28个事件的集合¹³，并称为典型事件。这一过程大大简化了复杂的事件列表，去除了“噪声”（例如，消除了不同列表中事件发生时间的差异问题）。以上加速图形也与我们日常观察得出的结论相吻合，如图1-6所示。

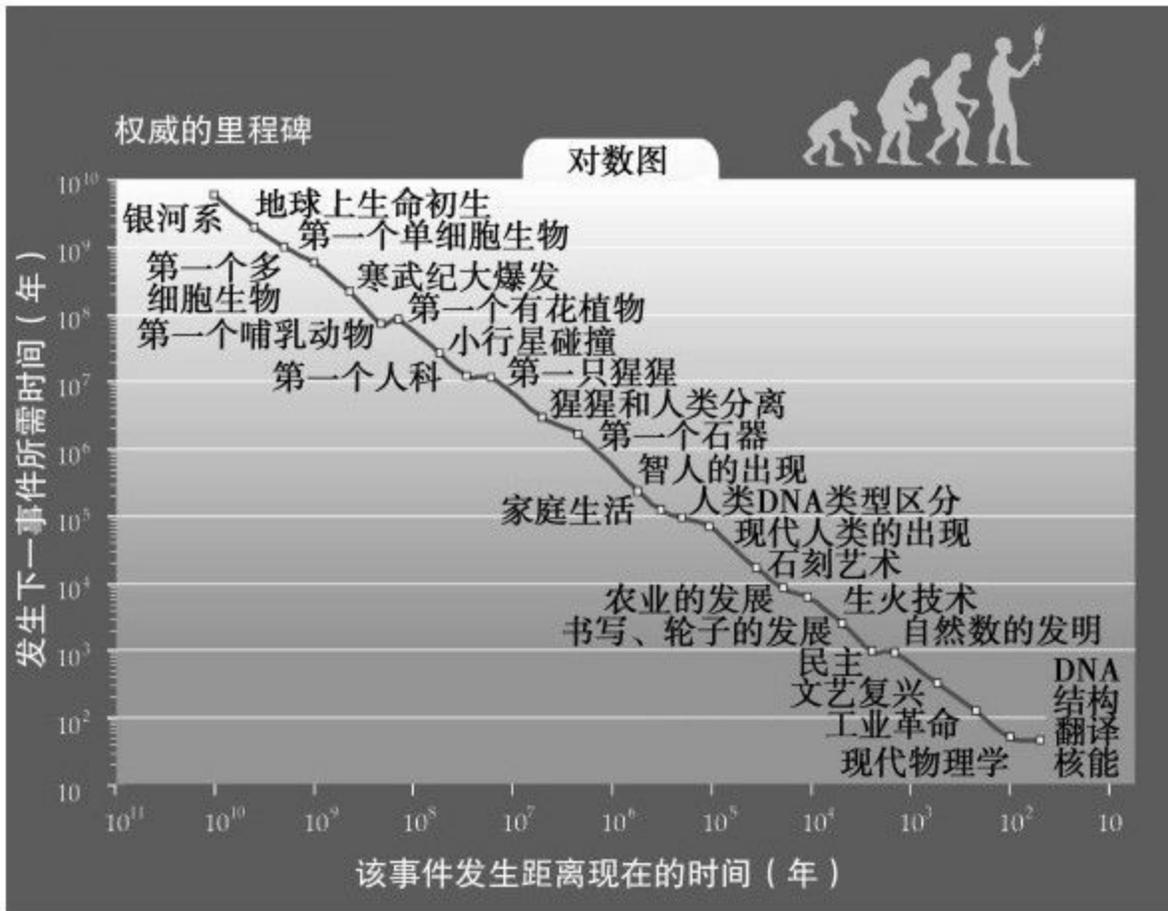


图 1-6

图1-6说明技术以指数级速度增长，其特征是“有序”和“复杂”。这些概念将在第2章进一步阐述。这一加速过程与我们的常识观察相吻合。在10亿年以前，100万年的时间不会发生什么。但近25万年以来，发生了很多具有划时代意义的大事，例如距今10万年前人类的诞生。在技术方面，如果回顾前5万年，1000年的时间没有发生什么。但近来我们看到了新的范式——以互联网为例，其发展从无到有，再到普及仅用了10年时间。（发达国家有四分之一的人使用互联网）

第五纪元：人类智能与人类技术的结合。展望未来几十年，奇点将从第五纪元开始。这是人脑中的大量知识与人类技术相结合的结果，这时人类技术的典型特征是：更大的容量、更快的速度、更强的知识分享能力。第五纪元将使我们的文明超越人脑的限制¹⁴（限制源于人脑中数百兆异常缓慢的连接）。

奇点将使我们克服人类老年化的问题并极大地解放人类的创造力。我们应保持并提升进化赐予我们的智能，以克服生物进化的限制。但是奇点也将提高人类从事破坏行为的可能性，这里没有写出关于这方面的所有内容。

第六纪元：宇宙觉醒。本书第6章将以“...宇宙智能的命运”为开端讨论这个问题。在奇点之后，来自人类原始大脑的生物和技术的智能，将在物质和能量上开始饱和。为了达到宇宙觉醒这一阶段，需要为最优级别的计算重新组织物质和能量（我们将在第3章讨论相关的限制），继而将这种最优的计算由地球推广至宇宙。

目前，我们把光速理解为信息传输的一个边界因素。超过这个限制必然被视为高风险的行为，但有迹象表明这种限制是可以被超越的¹⁵。如果可以突破该限制（即使很小的程度），我们最终将能够利用这个超光速的能力。人类文明将向宇宙其他文明注入创造力和智能，其速度的快慢将取决于文明的永恒性。无论如何，“无智能”物质和宇宙机制将转变为精巧且具有高级形式的智能，这将在信息模式演变过程中构成第六纪元。

这便是宇宙和奇点的最终命运。

奇点临近

你知道，事情会真的不一样！……不，不，我是说真的不一样！

——马克·米勒（计算机科学家）对埃里克·德雷克斯勒说，约1986年

事件的后果是什么呢？由超人类智能驱动的进步是非常迅速的。事实上，从短期来看，进步本身似乎与创造更高智能的实体无关。通过对以往进化的分析，我们可以认识到：动物能够适应问题，并从事发明创造活动，但其速度常常慢于自然选择——世界仿佛是其与自然选择情况下的模拟器。人类有能力适应这个世界，处理在我们头脑中的“假设”；我们还能够以几千倍于自然选择的速度解决许多问题。现在，可以通过创造的手段，用更高的速度去执行那些模拟，正是这些使我们从过去的体制迅速地进入一个全新的体制，就像我们从低等动物进化成人类一样。从人类的角度来看，这些改变将抛弃之前所有的规则，也许只需一眨眼的工夫，指数的增长就将突破任何试图对它的控制。

——福诺·文奇"The Technological Singularity", 1993年

我们把超智能的机器定义为一台能力远远超过任何人的全部智能活动的机器。一旦机器设计成为一项智能活动，超智能机器就能设计出更好的机器——毫无疑问，这就是“智能爆炸”，人类的智能将被远远抛到后面。第一台超智能机器将是人类最后一个发明。

——欧文·约翰·古德，"Speculations Concerning The First Ultraintelligent Machine", 1965年

为了对奇点的概念有更进一步的认识，让我们来探索这个词本身的历史。“奇点”（Singularity）是一个英文单词，表示独特的事件以及种种奇异的影响。数学家用这个词来表示一个超越了任何限制的值，如除以一个越来越趋近于零的数，其结果将激增。例如，简单的函数 $y=1/x$ 随着 x 的值趋近于零，其对应的函数（ Y ）的值将激增（见图1-7）。

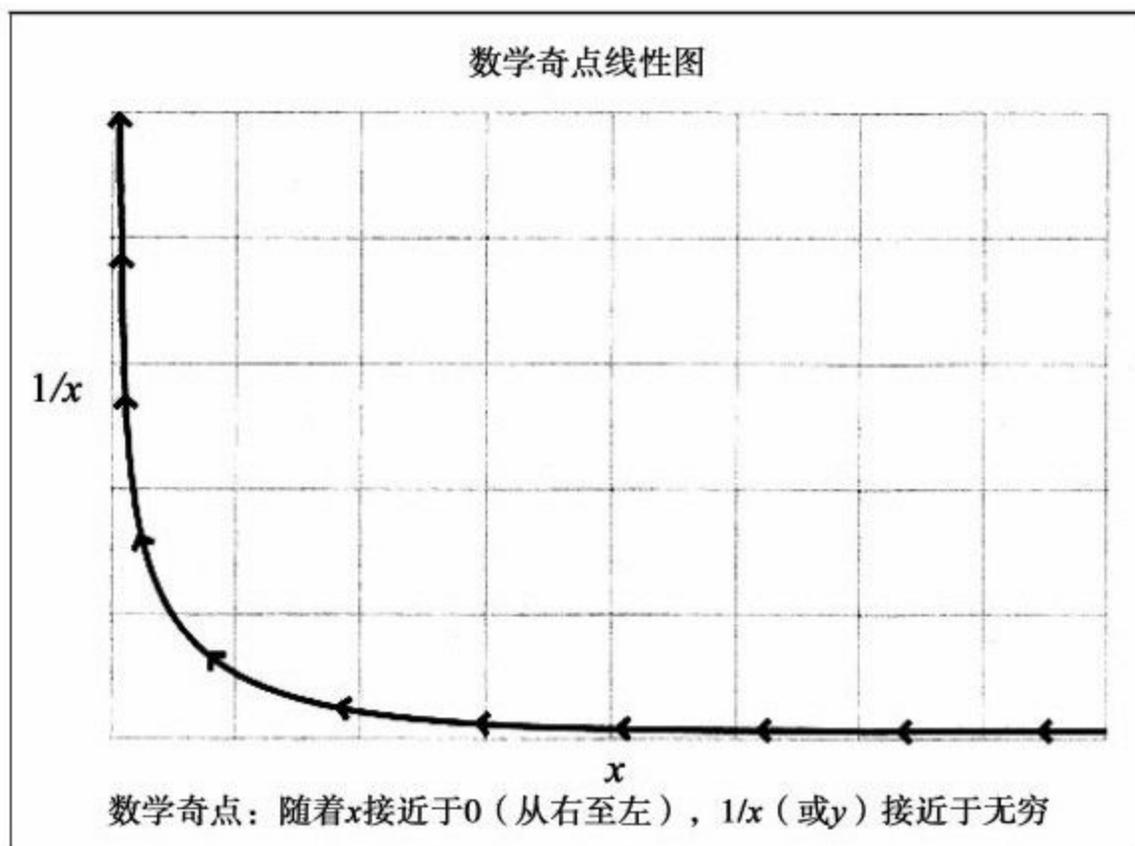


图 1-7

这样的数学函数实际上从未达到过无限的值，因为除以零是数学上“未定义”（无法计算）的。但是，因为除数 x 趋近于零， y 的值超过任何的限制（趋于无穷大）。

下一个例子是天体物理学。如果一个大质量恒星经历了超新星爆炸，其残余部分最终变成体积为零、密度无穷大的点，这时“奇点”便在该点的中心诞生。当这个星球达到了无限密度后¹⁶，连光都无法摆脱它的吸引，所以称为黑洞¹⁷。黑洞构成了空间和时间结构中的一种破裂。

据一种理论推测，宇宙本身就起源于这样一个奇点¹⁸。但有趣的是，黑洞的界限（表面）是有限大小的，而且黑洞零尺寸中心的万有引力也只在理论上是无限大的。在任何可测量的位置，力量的值都非常大，但并非无限大。

约翰·冯·诺伊曼第一次提出“奇点”，并把它表述为一种可以撕裂人类历史结构的能力。20世纪60年代，I.J.古德描述的“智能爆炸”是指智能机器

在无需人工干预的情况下，不断设计下一代智能机器。圣迭戈州立大学的数学家和计算机科学家弗诺·文奇，在1983年的一篇《Omni》杂志的文章和1986年的科幻小说《Marooned in Realtime》¹⁹中都涉及了即将到来的“技术奇点”。

在我于1989年写的《The Age of Intelligent Machines》一书中，我提出了在21世纪前半叶，技术不可避免地朝向机器化发展，必将大大超越人类的智能²⁰。汉斯·莫拉维茨在1988年出版的《Mind Children》一书中通过分析机器人进展得到了类似的结论²¹。文奇在1993年发表于NASA组织研讨会上的论文中，描述了即将出现的奇点源于“高于人类智慧的实体”，他将其作为逃逸现象的先兆²²。在我1999年出版的《The Age of Spiritual Machines: When computers Exceed Human Intelligence》一书中，我介绍了生物智能和我们正在创造的人工智能之间的密切关系²³。同样在1999年出版的汉斯·莫拉维茨的《Robot: Mere Machine to Transcendent Mind》一书，描述了2040年的机器人作为人类的“进化的继承人”，机器将“伴随我们成长，学习我们的技能，并分享我们的目标和价值……是我们思想的继承者²⁴”。澳大利亚学者达米安·布罗德里克于1997年和2001年出版的名为《The Spike》的两本书中，分析了几十年来所预期的进步技术和加速发展带来的广泛影响²⁵。约翰·斯玛特在其系列著作中把奇点描述为他所谓的“MEST”（物质、能量、空间和时

间）压缩所导致的必然结果²⁶。

在我看来，奇点涉及很多方面，其发展速度是近似垂直的指数增长，技术的扩展速度也似乎是无限的。当然，从数学的角度，奇点的发展是没有间断和断层的，其增长的速率极快，但仍是有限的。但在我们当前的有限框架内，即将发生的事情似乎是连续性过程中一个突发性的中断。我强调“当前”，是因为奇点的一个突出影响是改变了人类理解能力的本质。当人类与技术相融合后，人类将变得更加智慧。

技术进步的步伐能无限的持续加速吗？会不会存在这样的情况：人类的思维速度跟不上发展的节奏？对于未进一步进化的人类，必然如此。不过，如果未来有1000名科学家，每个人的智能都1000倍于现在的科学家，并且每个人都以比现代人类快1000倍的速度进行操作（因为信息处理在他们的非生物大脑里运行得更快）。那时1年的时间就相当于现在的1000年²⁷。如此，人类便可以跟得上技术的增长速度了吧？

是的，人类智能可以跟得上技术进步的速度，人类甚至可以拥有更高的

智能（因为人类智能不再是固定的容量）。他们会改变自己的思维过程，使自己能够更快地思考。当科学家比现在聪明100万倍、处理速度快100万倍的时候，一小时的发展就将相当于现在一个世纪的进步（以现在的标准）。

奇点理论包括以下几条原则，本书的以下章节将对这些原则进行求证、推衍、分析和思考：

- 范式转换（技术创新）正处于加速状态。现今它正以每十年翻一番的速度增长²⁸。
- 信息技术动力（性价比、速度、容量以及带宽）正在以指数级速度递增，几乎每一年都要翻一番²⁹。这条原则还适用于其他领域，例如人类知识的总量。
- 对于信息技术而言，它蕴含了指数增长的第二个层次：其增长的指数速率也在以指数级速度的增长。当一种技术的效率变得更高，就会吸引更多的资源向它聚合，使其发展更为迅速，这也正是第二个层次指数增长出现的原因。例如20世纪40年代的计算机产业由很多重要的项目构成。如今计算机产业的总值已高于一万亿美元，所以研发的预算也相对更高。
- 人脑扫描是一种以指数级速度发展的技术。本书第4章将会讲到，人脑扫描的时空分辨率和带宽每年都翻倍增长。我们已经拥有了充分的技术手段，来开始人类大脑运转原则的逆向工程（解码）。目前，已经有数百处大脑活动区域的模型被发现，并且可以被仿真。预计在20年内，人们将会详细了解人类大脑所有区域的活动过程及模式。
- 我们将在这个10年结束的时候（2010），实现用超级计算机硬件模拟人类智能，并且在第二个10年结束的时候（2020），实现用与个人计算机大小相同的设备模拟人类智能。21世纪20年代中期，我们将会使用有效的软件来模拟人类智慧，对其进行建模。
- 通过软件和硬件彻底地模拟人类智能，计算机将可以在21世纪20年代末通过图灵机测试，那时机器智能和生物智能将没有任何区别³⁰。
- 技术一旦发展到这个程度，计算机就能够融合传统的生物智能与机器智能的双重优势。

●传统人类智能的优势包括模式识别能力和学习能力。在模式识别方面，人脑中的大量并行处理和自组织的特性是一种近乎完美的结构，该结构可以用于识别微妙的、不变的模型。人类也可以从已有的经验中得到的洞察力和推断力，对新知识进行学习，其中包括通过语言聚合信息。人类智能的一个关键能力是它可以创造面向现实的思维模型，并且可以通过改变模型的属性进行“假设”分析。

●传统机器智能的优势在于，它可以存储数以亿计的事件，并且可以瞬间召回这些信息。

●非生物智能的另一个优点是：一旦机器掌握了一项技能，便可以高速重复使用这项技能，并且极其精准、不知疲倦。

●最重要的是，机器可以高速地共享资源；而相比之下，人类用语言进行知识交流的速度则慢得可怜。

●非生物智能可以从其他机器下载技能和知识，并且最终可以实现对人类知识的下载。

●机器可以在近乎光速（ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）的速度下进行信号的处理和转换，而哺乳动物的大脑进行信号传输的速度仅为 100 m/s ³¹。这两者的速度比例接近 $3000000=1$ 。

●机器可以通过互联网理解并掌握人机文明的所有知识。

●机器可以共享资源、智能以及存储能力。两台机器（或者说一百万台机器）可以联合在一起成为一台机器，之后又可以相互分离。大量的机器也可以瞬间组合成为一台机器，之后立即分离。这种现象人类称为相爱，但以生物自身的能力来看，这是短暂而不可靠。

●融合生物智能优势与人工智能优势（人脑识别模型的能力与非生物智能的速度、内存容量、精准度，以及交换知识与技能的能力），其力量将极为强大。

●机器智能在设计、构造（也就是说机器智能并不会受到生物方面的限制，这些限制包括神经元之间切换的速度过慢或是颅腔空间过小等因素）以及持久的高性能等方面有足够的自由度。

●一旦非生物智能将传统的人类与机器智能相结合，那么人类文明中的非生物智能部分就会持续地从机器的性价比、速度和容量的双倍指数增长中获益。

●一旦机器拥有了像人类一样的设计和架构技能，仅仅更快的速度和更大的容量就可以使它们对自己的设计（源码）进行操控。人类正在通过生物技术进行类似的研究（例如改变人类的基因以及其他遗传信息），但是与机器只需改动它的程序相比，人类的速度慢得多，而且还受到了诸多限制。

●生物具有内在的限制。例如，任何活的有机体都是由单层的氨基酸排列而成的蛋白质组成的。由蛋白质组成的机体缺乏力量和速度。我们可以通过技术对生物机体的大脑和身体中所有的器官和系统进行改造，使其性能更具优势。

●本书的第4章将讨论，人类智能具有可塑性（拥有改变其结构的能力），现在对这一点的理解更为透彻。但是人类大脑的体系结构有自身的局限性。比方说，我们颅腔内只能容纳 1×10^{15} 个神经节点。与人类祖先相比，认知能力提升的一个重要原因是基因的改变，它使得大脑皮层和局部区域内的灰质增多³²。这一变化是随着时间缓慢地推移进化而来的，但它仍然受到大脑容量的限制。机器却可以重新设计自身，而没有容量的限制。仅仅通过纳米技术（不需要增大体积或消耗更多的能量），就可以使机器的容量比生物大脑的容量大得多。

●计算机也将受益于快速的三维分子电路。今天的电子电路比哺乳动物大脑中的电学开关要快一百万倍。未来的分子电路将基于诸如碳纳米管类的设备，它们由直径大约10个原子的碳原子柱体组成，其体积是现今基于硅的晶体管的五百分之一。由于信号传输的距离更短，与现有芯片几个千兆赫（每秒数十亿运算）的速度相比，其运行速度将以太赫兹计算（每秒万亿运算）。

●技术变革的速度将不再受限于人类智能的增长速度。机器智能在反馈循环中不断提高自己的能力，并将远远超出无机器辅助的人类智能。

●机器智能经过反复改进，其设计周期将变得越来越短。事实上，这是由范式转移速率的持续加速公式的预测得到的。也有人对持续的加速范式转移提出反对意见，认为它最终变得超出了人类理解的范围，因此虽然可以讨论，但它不会真的发生。尽管如此，生物智能向非生物智能的

迁移，将使得智能的高速发展趋势持续下去。

- 随着非生物智能的加速改进，纳米技术将能够在分子水平上进行操作。
- 纳米技术使得纳米机器人的构建成为可能：这是一种在分子水平上设计的以微米计算（一米的百万分之一）的机器人，例如机器红血细胞³³。纳米机器人会在人体发挥很多功能，包括延缓人体衰老（甚至将来它比生物技术更加出色，如基因工程）。
- 纳米机器人会与生物神经元交互，并通过内部神经系统创建虚拟现实，这将极大地丰富人类的经历。
- 大脑毛细血管中数十亿的纳米机器人也将极大地提高人类的智能。
- 一旦非生物智能在人类大脑中获取立足点（这一研究在电脑化神经移植方面已经展开），人脑中的机器智能就会成倍增加（就像已经发生的那样），至少每年会翻一番。相比之下，生物智能的部分将会比较固定。因此，非生物智能部分最终将占主导地位。
- 纳米机器人也将改善被早期工业化污染了的环境。
- 纳米机器人可以操纵图像和声波，将虚拟现实带到现实世界中³⁴。
- 人类对情感的理解能力，以及作出适当反应的能力（所谓的情商），是人类智慧的重要表现，这些也将被未来的机器智能理解并掌握。人类的智能还体现在调整情绪反应、改善生物组织等方面。未来的机器智能也将具有形体（例如虚拟现实或是真实世界的投影），以便与世界互动，但这些纳米引擎创造的形体将比人类的身体更强大、更持久。因此，未来机器智能的情感反应会被重新设计，来反映其对现实设计的改造能力³⁵。
- 鉴于虚拟现实在决议和可信度方面比真实世界更有竞争力，人类的体验会越来越多地在虚拟环境中进行。
- 在虚拟现实中，我们可以在身体和情感上成为两个完全不同的人。事实上，其他的人（如你的恋人）将能为你选择不同的身体，而不是由你自己来选择（反之亦然）。

●加速回归法则将持续下去，直到非生物智能达到物质与能量的“饱和”程度，这类物质与能量存在于具有人机智能的宇宙附近。我所说的“饱和”是指基于我们对计算物理学的理解，把计算运用到最佳程度的物质和能量的模式。当接近这个极限时，人类文明的智能将扩散到宇宙的其他部分。这种膨胀的速度会很快达到极值，甚至可以达到信息的传递速度。

●最终，整个宇宙将充盈着我们的智慧。这便是宇宙的命运（见第6章）。人类将决定自己的命运，而不是像机械力学支配天体力学那样，由目前的“非智能”来决定。

●智能扩散至整个宇宙所需的时间，取决于光速是否是一个不可改变的限制。目前一些模糊的证据表明可能不存在这种限制，如果限制不存在，未来人类文明的巨大智能将会被进一步开拓。

那么，这就是奇点。有人会说，至少在目前的认识水平上它很难理解。正是出于这个原因，我们不能以看待过去的视野，去理解必将超越它的事物。这就是我们将该转变称为“奇点”的一个原因。

我个人认为，以超出目前的视野去看待问题，甚至要考虑到几十年之后的暗示是很难的，但并非不可能的。尽管如此，我仍然认为，尽管人类思想有局限，但人类依然有足够的去合理地想象奇点来临以后的生命形态。最重要的是，未来出现的智能将继续代表人类文明——人机文明。换句话说，未来的计算机便是人类——即便他们是非生物的。这将是进化的下一步：下一个高层次的模式转变。那时人类文明的大部分智能，最终将是非生物的。到21世纪末，人机智能将比人类智能强大无数倍³⁶。但是，尽管生物智能在进化中已经不占优势，这并不意味着生物智能的结束，而应该说非生物形态源于生物设计。文明仍将以人类的形式存在——事实上，那时的文明在许多方面都将比现今的人类文明更加杰出，我们对奇点的理解也将超越生物起源。

对于比人类智能更具优势的非生物智能的出现，许多预言家都发出了警告（我们将在第9章进一步探讨这一问题）。通过与其他思想源密切融合，来提高人类智能的潜力的方法，并不能缓解这份担心，所以有些人认为应该保持“不提高”的态度，如此这般，人类便可始终保持在智慧食物链的顶端。从人类生物学的视角来看，这些超人的智慧将为人类提供服务，满足我们的需要和愿望。当然，实现人类的意愿，仅仅是奇点众多能力中微不足道的部分。

莫利·瑟可2004：我怎样能知道奇点什么时候来临呢？我的意思是我需要时间准备。

雷：为什么？你打算做什么？

莫利2004：让我想想，嗯，首先我想调整我的简历，使自己能给未来的这股力量留下好印象。

乔治·瑟可2048：哦，我可以帮你完成这项任务。

莫利2004：你不要这么做，我完全有能力自己搞定它。我也许会删除一些文件，你知道，这些文件侵害了一些机器。

乔治2048：哦，无论如何，机器还是会发现的。但是不用担心，我们非常理解。

莫利2004：不知什么原因，我还是不太放心。我还是想知道奇点临近时的预兆。

雷：当你的收件箱中1000 000封电子邮件时，你就会知道奇点来临了。

莫利2004：嗯，这样说的话，听起来很快就会实现；但说真的，我在接受新事物方面有些困难，我又怎么能跟上奇点的步伐呢？

乔治2048：你会有一个虚拟助手，事实上，你需要一个。

莫利2004：我的助手会是你吗？

乔治2048：乐意为你服务。

莫利2004：那太好了，你会照顾好所有的事，有时你甚至不用告诉我。哦，也不必费事告诉莫利将要发生的事了，她无论如何也不会明白的，让我们把她蒙在鼓里，让她保持现在的快乐吧。

乔治2048：不会的，完全不会。

莫利2004：你是指快乐？

乔治2048：我是指把你蒙在鼓里，你会理解我所要做的事，如果你真的

期待那一天。

莫利2004：嗯，通过逐步的……

雷：提高？

莫利2004：是的，我就是这个意思。

乔治2048：好吧，如果我们的关系会成为想象中的那样，那也是个不错的主意。

莫利2004：我能够期待自己保持现在的样子吗？

乔治2048：任何时候我都会忠于你的，但我可不仅仅是你优秀的仆人。

莫利2004：其实如果你只是我优秀的仆人，那也不错。

查尔斯·达尔文：我可以打断一下吗？在我看来，一旦机器的智慧超过人的智慧，它们就会自己设计下一代机器。

莫利2004：听起来并非匪夷所思，机器是可以用来设计机器的。

查尔斯：是的，2004年机器还是受控于设计师的，一旦机器达到和人类同样的水平，它就会在一定程度上结束这一循环。

内德·路德：人类将来可能会从这个循环中被淘汰³⁷。

莫利2004：它仍然会是一个很漫长的过程。

雷：哦，完全不是。如果能够建立一个类似于人类大脑的非生物智能，即使采用类似2004年的线路，它——

莫利·瑟可2104：你是指她？

雷：当然，她也会比现在思考得快一百万倍。

蒂莫西·勒瑞：因此主观上的时间会延长。

雷：完全正确。

莫利2004：听起来主观上的时间会很长，你们机器要怎样利用这么多的时间呢？乔治2048：有很多事情要做，毕竟我能够接触到网上人类的所有知识。

莫利2004：只是人类的知识吗？那机器的知识呢？

乔治2048：我们喜欢把它看做是一种文明。

查尔斯：那么，机器确实能够改善自己的设计了。

莫利2004：哦，我们人类已经开始这样做了。

雷：但我们仅仅是改善一下细节，从本质上来说，基于DNA的智能是比较慢的，也是有限的。

查尔斯：所以机器会很快地设计自己的下一代。

乔治2048：事实上在2048年，情况就是这样的。

查尔斯：那时我也将处于一个全新的进化中。

内德：这听起来更像是一个不稳定的失控的现象。

查尔斯：基本上，这就是进化。

内德：但是机器和他们的祖先们怎样交流呢？我想我不愿意挡住他们的路，我在19世纪初为躲避追捕而藏了好几年，不过，我怀疑躲避这些机器会更难.....

乔治2048：嘿，哥们。

莫利2004：躲避这些小机器人.....

雷：你指的是纳米机器人。

莫利2004：是的，躲避这些纳米机器人会非常难，我确信。

雷：我希望来自奇点的智能可以充分尊敬他们的生物祖先。

乔治2048：绝对的！这不仅仅是尊敬，而且是崇拜！

莫利2004：太棒了，乔治，我会成为你尊敬的宠物，而不是我刚才想的那样。

内德：那就是泰德提出的——我们会成为宠物。那是我们的命运：成为心满意足的宠物而不再是自由的人类。

莫利2004：那么这个第六纪元呢？如果我仍然保持生物状态，我会以一种十分低效的方式用尽珍贵的物质和能源。你会想要把我变成10亿个虚拟的莫丽和乔治，因为他们中任何一个都比我思考得快得多。看起来完成这种转变会有很大的压力。

雷：不过，你只是占有可用的物质和能量的一部分，保持你的生物性，这并不会明显改变奇点的物质和能量分配，况且保持生物遗产是很值得的。

乔治2048：绝对的。

雷：就像今天我们努力保护热带雨林和物种的多样性一样。

莫利2004：那正是我所担心的——我的意思是，我们努力地保护他们，但是保留下来的还只是一点点，我觉得我们会有像濒危物种那样的结局。

内德：或者是像灭绝的物种。

莫利2004：不仅仅是我，我现在用的那些东西呢？我用过很多东西。

乔治2048：那不是问题，我们会回收所有的东西。当你需要时我们会给你营造一个你需要的氛围。

莫利2004：哦，那我会在一个虚拟现实里吗？

雷：不，事实上，是微机器人现实。

莫利2004：我会在一个微机器人中吗？

雷：不，很多微机器人中。

莫利2004：不会吧？

雷：我会在这本书中的后面章节中解释。

莫利2004：哦，给我点提示。

雷：微机器人是纳米机器人，它是一种血细胞大小的机器人。这些机器人会自动连接起来，形成任意的物理结构。此外，他们能够以一种引导视觉和听觉的信息方式，把虚拟现实中的东西转换到真实的现实中³⁸。

莫利2004：很抱歉我那样问。但是，就像我想的那样，我不仅仅想要我的东西，还要所有的动物和植物。即使我不能看见或触摸它们，我也想知道它们的存在。

乔治2048：但是不会造成任何损失。

莫利2004：我知道你会一直那样说。但我指的是生物现实。

雷：其实，整个生物圈的物质和能量还占不到太阳系物质和能量总量的百万分之一。

查尔斯：其中包含了大量的碳。

雷：为了确保我们没有丢失任何东西，保留全部生物圈还是很值得的。

乔治2048：至少这是目前几年来大家的一致意见。

莫利2004：所以，基本上，我会拥有一切身边需要的东西。

乔治2048：事实确实如此。

莫利2004：听起来像国王迈达斯——他触摸过的所有东西都变成了黄金。

内德：是的，你也会想起他是被饿死的。

莫利2004：好吧，如果我最终到达了那个世界，拥有了超多的主观时间，我想我会无聊死的。

乔治2048：这个永远不会发生，我保证。

第2章 技术进化理论：加速回归定律

你能向后看得越久，就能向前看得越远。

——温斯顿·丘吉尔

20亿年前，我们的祖先是微生物；5亿年前，是鱼类；一亿年前，是类似于哺乳动物的生物；1000万年前，是类人猿；100万年前，原始人类经过苦苦探索后驯服了火。我们演化进程的典型特征是把握变化，如今变化的节奏正在加快。

——卡尔·萨根

我们唯一的任务是制造出比我们更聪明的东西，除此之外都不是由我们考虑的问题.....世界上本没有绝对的难题，只有相对于一定智力水平的难题。若智力水平向上提升了一点，一些原来不能解决的难题就变得容易了；如果智力水平提升了一大步，所有的问题就都能被解决。

——埃里泽·余德努维奇，凝视奇点，1996

“未来不可预测”是一种常见的经常重复的论调.....但是.....这个观点是错误的，而且是严重的错误。

——约翰·斯玛特¹

技术的不断加速是加速回归定律的内涵和必然结果，这个定律描述了进化节奏的加快，以及进化过程中产物的指数增长。这些产物包括计算的信息承载技术，其加速度实质上已经超过了摩尔定律做出的预测。奇点是加速回归定律的必然结果，所以我们研究这一进化过程的本质属性非常重要。

秩序的本质。第1章描绘的几张图证明了范式迁移的加速度（范式迁移是指完成任务的方法和智能处理的过程发生了重要改变，例如书写语言和计算机。）这些图表描绘了从宇宙大爆炸到互联网发明时期，生物和技术进化两方面的过程，它们已经被15个思想家和相关的著作视为关键的事件。我们可以看到这些事件呈现出一种明显的指数增长趋势：关键事件正以日益加快的节奏发生着。

思想家们关于构成“关键事件”的标准不尽相同，但是他们做出选择所依据的原则值得深思。一些评论员认为，在生物和技术的历史中，真正跨时代的进步涉及复杂度的增加²。尽管复杂度确实随着生物和技术进化不断增加，但我并不认为这个观点是完全正确的。首先我们要重新审视复杂度的定义。

毫不奇怪，复杂度的概念是复杂的。复杂度的其中一个定义如下：表达一个过程所需要的最少信息量。比如设计一个系统（例如，一个计算机程序或者一个计算机辅助设计文件），这个系统可以由一个100万比特大小的数据文件来描述，我们就可以说这个设计的复杂度为100万比特。但是如果这100万比特的信息本质上是由某种形式的1000比特重复了1000次构成的，我们就能够通过这1000个比特来表达整个设计，从而将文件的大小减少大约1000倍。

最流行的数据压缩技术使用了类似的剔除冗余信息的方法³，但用这种方式压缩数据文件，无法知道是否还有更好的压缩方法。例如，假设需要压缩的文件是 π （3.141592.....），其精确度达到100万位。大部分数据压缩程序无法识别这个序列，完全不能进行压缩，因为 π 的二进制表达序列随机性很强，难以测试出重复的序列。

但是，如果我们能够确定该文件（或文件的一部分）实质上代表 π ，我们就可以很容易地将它（或它的一部分）表达得非常简洁，即“ π ，精度为100万比特”。由于我们不能确定信息序列是否有更加紧凑的表达方式，故任何压缩形式都只能作为信息复杂度的上界，摩尔德·盖尔曼沿着这个思路来定义复杂度。他的定义是：一组信息的“算法信息量”为“能使普通计算机输出位串并可以停止的最短的程序长度”⁴。

但是摩尔德·盖尔曼的定义并不完整。如果一个文件包含随机信息，它就不能被压缩。实质上，观察是确定一个数列是否真正随机的重要标准。但是，如果将任何随机序列设定为特殊的符号，那么这个消息就可以用简单的指令来表示，比如该指令为“该位置存放了随机的数字序列”。随机序列（无论是10比特或10亿比特）不能代表复杂度，因为它们都可以用一个简单的指令来表示。这也是随机序列和不可预知序列的区别。

为了进一步了解复杂度的性质，我们来看岩石复杂度的例子。我们需要大量的信息描绘岩石中每个原子的属性（确切位置、角动量、旋转、

速度等)。1公斤(2.2磅)岩石有 10^{25} 个原子(关于原子,我们将在第3章详细论述),可容纳 10^{27} 次方比特的信息。这个数量是一个人的遗传信息(没有经过压缩)的 10^{16} 倍⁵。在大部分情况下,这些信息是随机的,并没有因果关系,故只须通过形状和质地来描述岩石,如此信息就会少很多。因此,认为普通岩石的复杂度远远低于人的复杂度是合理的——尽管在理论上岩石包含着巨大的信息量⁶。

复杂度的另一个定义是描述一个系统或进程的信息量的最小值,其中这个信息量得是有意义的、非随机的、不可预测的。

在盖尔曼的概念中,一个100万位的随机字符串的算法信息量(AIC)大约为100万位。我在这个概念的基础上进行修改,就是用简单指令“放置随机位”来代替每一个随机串。

然而,这还不充分。另一个问题是“任意数据”是字符串(比如电话本里的姓名和电话号码,辐射水平或温度的定期检测结果)。这些数据并不是随机的,数据压缩只能在很小的程度上压缩它们。而且它们并不代表我们通常理解的复杂度,而仅仅是数据。所以我们需要用另一个简单指令表示“放置任意数据序列”。

总结一下我提出的测量信息复杂度的方法,首先是信息的算法信息量(AIC)(盖尔曼的定义)。在一组随机串中用一个简单指令来代替每个随机串,同样用一个简单指令来替代每一段任意数据串。这样的复杂度测量方法与我们的直觉相符。

公正地说,进化过程中的每一次转化(例如生物和技术对它的改进)、每一次进步,都会使上文定义的复杂度增加。例如,DNA的进化能造就更复杂的生物体,这种生物体的生物进程信息可以被DNA分子灵活地存储、控制。寒武纪生命大爆炸形成了稳定的动物形态,进而进化过程便集中在更复杂的大脑发育上。在科技方面,计算机的发明提供了一个存储人类文明,并处理越来越复杂的信息的手段。互联网的广泛连接带来了更大的复杂度。

但是,“增加复杂度”并不是进化过程的最终目的或终极产物。进化带来了更好的结果,而更高的复杂度并不是必要的。有时候,简单的反而更好。所以,我们要考虑另一个概念:秩序。秩序并不是无序的反义词。如果无序代表事件的任意序列,无序的反义词应该是“非任意序列”。信息是进程中一组有意义的数据序列,例如生物体的DNA代码和电脑程序

的比特信息。另一方面，“噪音”是一个随机序列，它既不可预测，也不携带信息。但信息也是不可预测的。如果我们能够根据过去的数据来预测未来的数据，那么未来的数据就不是信息了。因此，信息和噪音都可以压缩（以几乎一样的序列存储）。我们来看一种可预测的交替模式（如0101010.....），它是有序的，但除了前两位数以外，剩下的都不是信息。

因此，仅仅有序并不能构成秩序，秩序还要求蕴含信息。秩序是具有某种目的的信息。测量秩序，也就是测量信息与特定目的的适应度。生命的进化过程的目的就是活下来。算法（解决难题的电脑程序）的演化（比如飞机引擎的设计）的目的就是最优化引擎性能、效率或其他标准⁷。测量秩序比测量复杂度更难。文中已经给出了复杂度的测量方法。对于秩序，我们需要根据具体情形调整测量标准：在设计进化算法时，程序员要提供一种测量标准（称为效用函数）；在技术发展的过程中，我们可以将经济价值作为测量标准。

仅仅拥有更多的信息并不能带来更好的适应度。有时，深层的秩序（更贴近目的）在复杂度上会有所精简而不是增加。例如，将明显不同的想法综合阐述成一个更广泛、更连贯的新理论，这个新理论不复杂，但是更贴近目的。事实上，“寻求更简单的理论”是科学的驱动力（诚如爱因斯坦所说：“使每件事尽可能简单，而不是简单一点”）。

原始人类大拇指轴点的改变便是诠释这个概念的一个重要实例，这是人类进化中的关键一步，它使得人类对周围物体能做出更精确的操作⁸。像黑猩猩这样的灵长目动物也能够抓住物体，但不能有力地紧握物体，也不能很好地写或者操控工具。大拇指轴点的改变并没有增加动物的复杂度，却增加了秩序。进化表明，一般情况下秩序程度越高，相应的复杂度也越高⁹。

因此，改进解决问题的方法，就要增强秩序性。复杂度通常会增加，但有时也会减少。现在我们把目光投向如何定义问题。事实上，进化算法（通常说的生物进化和技术进化）的关键是定义问题（包括效用函数）。在生物进化过程中，生存始终是全局性问题。在特殊的生态环境中，最重要的进化转向一些具体的能力，比如说某些物种在极端环境下的生存能力和伪装自己迷惑天敌的能力。生物进化正走向类人型机器人，其进化目标为提升在思维上超越对手的能力，以及提升相应的操纵环境的能力。

从表面上看，加速回归定律，这方面似乎违背了热力学第二定律，即在一个熵（封闭系统中的随机性）不是减少，而是增加的¹⁰。但加速回报定律涉及的进化，并不是在一个封闭的系统中。它发生在一个混沌的环境中，并依赖其中的无序产生了多样性的选择。从这些选择开始，进化过程不断否定自己的选择，创造出更合适的秩序。即使是一场危机，如周期性的大型小行星撞地球，尽管暂时增加了混乱，但最终还是很大程度上增加了生物进化的秩序。

总的来说，进化增加秩序，但可能不增加复杂性（通常情况是增加的）。其主要原因是生命形式的进化和科技的加速是建立在增加其秩序、用更加复杂的方式来记录和操作信息的基础上。进化的革新将促进更快的进化。以生命形式进化为例，最明显的例子就是脱氧核糖核酸（DNA），它为生命的设计提供了一个记录的和受保护的转录，为进化提供了基础。以技术进化为例，人类不断改进的记录信息的方法，促进了科技的发展。第一台计算机是在纸上设计并由手工组装而成的。现在是用电脑来设计的，而下一代电脑的设计细节也由电脑来完成，然后由完全自动化的工厂来生产，人为干预很少。

技术以指数级的速度扩充其能力，创新者也寻求成倍改进的能力。创新是乘法而不是加法。技术进步与进化过程一致，建立在其自身的基础上。技术将继续加速发展，并将在第五纪元¹¹完全控制自己的前进步伐。

总结加速回报定律的原则，主要有以下几点：

- 进化运用了正反馈：由进化过程的某个阶段所产生的更好方法来创造下一个阶段。如第1章所描述的，每个阶段的进化都建立在上一个阶段产物的基础上，因而发展得更快。进化间接地起作用：进化产生人类，人类发明技术，技术再利用不断发展的技术来创造下一代技术。在奇点时代，人和技术将没有区别。这并不是像我们现在想的那样，人变成了机器，而是因为机器的能力可以媲美甚至超过人类。技术就像进化了的人类拇指。进化（秩序的增加）基于这样一种思维过程，该过程的速度是光速，而不是缓慢的电化学反应速度。每一阶段的进化都吸收了上一阶段的成果，所以一个进化的速度至少在一段时间内呈指数增长。随着时间流逝，嵌入到进化过程中的信息的秩序性（对信息与目的的适应度的测量）随之增加。

- 进化过程不是一个封闭的系统；它在一个更大的系统内引起混乱，从

而增加选择的多样性。因为进化以其本身持续增长的秩序为基础，所以进化过程中的秩序也呈指数增长。

●上述观察的关联性源于进化过程的“回报”（比如速度、效率、功耗和进程的综合力量）总是呈指数增长。正如摩尔定律：新一代的电脑芯片与前一代相比（现在大约每两年就要出一代），原来的单位成本可以用来生产现在两倍的组件，处理速度也大大提升（因为每个电子元件内部通信以及和其他元件通信的距离变短了）了。正如下文所述，在性能和性价比等方面，除了计算机产业，其他信息技术领域（包括人类知识）同样以指数速度发展。另外需要指出的是，信息技术有巨大的包容性，随着时代的发展，它最终将■长时，它的数量在一定时间内会成指数增长，直至稳定下来。进化过程中的整体指数增长（无论分子、生物、文化、技术）将取代任何在特定范式下的增长极限（一个特定的S形曲线），这是每个连续范式日益增长的能力和发展效率的必然结果。因此，一个渐进的指数增长过程会跨越多个S形曲线。这种现象最典型的例子是下文讨论的5种计算模式。在图表上可以看到整个演化过程，该模式与第1章介绍的范式迁移的加速都说明了连续的S形曲线。每一个关键的事件（如书写或印刷），都代表着一种新范式和新的S形曲线。

间断平衡（PE）进化论用来描述相对静止后迅速变化的进化过程¹⁴。事实上，纪元-事件图上的关键事件确实与复兴时期秩序（以及复杂度）的指数增长相符，随后当每个范式趋于渐近线时（由于能力的限制），增长速度放缓。所以PE确实提供了一个更好的进化模型。

但是这些正以飞速发展的间断平衡关键技术，并不能产生瞬间的飞跃，例如，DNA的出现为进化的高速发展（但不是瞬间的飞跃）创造了有利条件，它可以改进有机体的设计并增加生物体的复杂度。在最近的技术发展中，计算机的发明引发了另一个信息复杂度的增长高潮，而且这个高潮仍在持续，它帮助人类更好地掌控人机文明。当我们通过计算将宇宙中的物质和能量利用到极致后，下一个发展的高潮就会到来。关于物质方面的限制，我们将在第6章¹⁵介绍。

在范型生命周期的成熟阶段，下一阶段的范式迁移就开始聚集能力。在技术方面，人们把大量的研究经费都投向下一范式的创造，这些已经在当前广泛研究的三维分子计算机中得到了验证——尽管在10年内，我们仍要使用平面晶体管集成电路。

一般说来，随着时间的推移，一种模式渐渐趋向于价格一半格式性能图

的渐近线时，下一个技术范式就已经开始在特殊平台上起作用，例如，20世纪50年代，工程师减少了真空管的使用，从而为计算机提供了更好的性价比；1960年左右，晶体管得到广泛应用占据了便携式收音机的市场，随后又取代了计算机中的真空管。

支撑进化过程中指数增长的资源是相对无限的，这些资源内在的秩序也在不断增长（正如我之前提出的，进化过程中的产物的秩序也将增长），进化的每个时期都为下一个时期提供了更强大的工具。以生物进化为例，DNA的出现将进化推进到了一个新的层次。再举一个更近的例子，计算机辅助设计工具的出现，促进了下一代计算机的飞速发展。

另一些支撑秩序指数增长的资源来自混沌的环境，这种环境是进化过程中各种发展环境的混合，可以提供更加多样性的选择。这种混沌提供了多样性的变异，它是一个渐进过程，从而可以发现更强大、更有效的解决方案。在生物进化过程中，有性繁殖通过基因混合与匹配促进了物种的多样性。与无性繁殖相比，有性繁殖本身就是一个渐进的创新过程，它促使生物加快适应整个进程，并提供了遗传的多样性组合（多样性也来源于基因突变和不断变化的环境）。在技术发展中，人类智慧与多变的市场条件的结合，使得技术不断地变革创新。

分形设计。生物系统中关于信息内容的一个关键问题是，信息容纳相对较少的基因组，是如何制造复杂的类人系统的。一种理解是把生物的设计看成“概率分形”，在一种确定分形中，单一的设计元素（成为发起人）被多个元素（连在一起成为发生器）所替代。分形扩张在第二次迭代时，发生器中的每个元素都成为一个发起者，并与发生器的元素进行替换（缩小到更小的范围成为第二代发起者）。这个过程重复若干次，发生器中新形成的元素成为一个发起者，并且被一个新的发生器替代。每个新的分形扩张明显增强了复杂度，但不再需要额外的设计信息。一个概率分形增加了不确定的元素。一个确定的分形总是呈现相同的外形，而概率分形每次变化都不一样，即使都有类似的特点。在概率分形中，每一个发生器被应用的概率都小于¹。这种方式使设计具有了一个更有机的外观。在图形程序中使用概率分形，从而产生了现实般的山、云、海岸、叶子等画面效果，以及其他有机的画面。概率分形的一个关键方面是使这一阶段的复杂度增加（包括与设计信息有关的各种细节）。生物使用了同样的原则。基因提供设计信息，但一个生物体的细节要远大于遗传的设计信息。

一些学者不能理解像大脑一样的生物系统中的大量细节，例如，精确地

设计每个神经元中每个微结构的确切构成，以及他们通过系统完成功能的准确方式。为了理解一个像大脑这样的生物系统是如何工作的，我们需要理解设计原则，然而该原则的信息量比产生于迭代的、极其琐碎的基因结构的信息量要少得多。整个人类基因组只有8亿比特的信息，经过压缩后，有效信息量大约只有3000万比特到1亿比特。人类基因组的信息量还不到一个完整进化的人脑中，神经元间连接信息和神经传递介质模式信息的一亿分之一。

下面来看加速回归定律是怎样适用于我们在第1章讨论的纪元的。由氨基酸组合而成的蛋白质和由核酸组成的RNA链，共同建立起了生物学的基本模式，RNA链（其后是DNA）的自我复制（即第二纪元）为记录进化的结果提供数字化方法，后来，理性思考与物种进化（第三纪元）相结合，引起了从生物到技术的范式转化（第四纪元）。即将到来的主要范式迁移将由生物思想向生物和非生物的相结合的混合思想转变（第五纪元），其中包括源于生物大脑逆向工程的“生物启发”的处理。

如果我们审视这些纪元，可以发现它们只是不断加速进程的一部分。生命形式进化的第一步（原始细胞、DNA）花费了几十亿年，然后进化才开始加快。在寒武纪生物大爆发时期，重大的模式转变需要数百万年到一千万年。后来，经历了数百万年的时间，类人生物产生；而后只经历了几万年，现代人类就产生了。随着能够创造技术的物种的出现，通过DNA引导蛋白质合成，使得进化以指数级的速度增长；后来的进化源于人类创造的技术。但是，这并不意味着生物（基因）进化的停止，而只是生物进化的速度不再代表整个系统“秩序”增加的速度（或计算的有效性和效率）¹⁶。

预见进化。生物进化、技术的发展增加了秩序和复杂度，从而导致了一系列的后果。以视力范围为例，早期生物可以使用化学梯度观察几毫米以内的活动。有视力的动物通过进化，能够看到几英里之外的活动。而随着望远镜的发明，人类可以看到数百万光年以外的其他星系。反之，如果使用显微镜，他们还可以看到细胞的结构。今天，通过不断发展的现代技术，人类的观察范围远至130亿光年外的距离，近到量子边缘的亚原子粒子。

再来看信息存储的例子。单细胞动物可以根据化学反应记住几秒以内的事件。有大脑的动物可以记住几天的事件。具有文明的灵长类动物可以将信息传承几代。早期的人类文明通过口述的历史，把数百年前的故事传承下来。随着文字的出现，这种传承可以延长至数千年。

范式迁移正在加速，诚如下面的例子：从19世纪末电话的发明到普及，大约用了半个世纪的时间（见图2-3和图2-4）¹⁷。

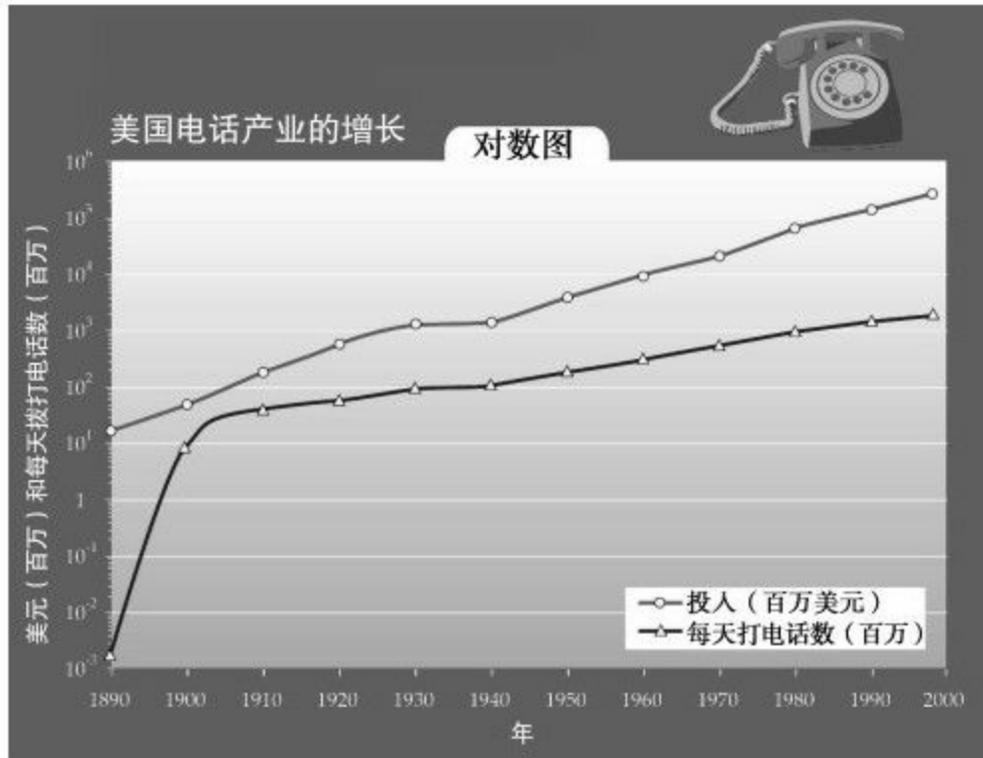


图 2-3

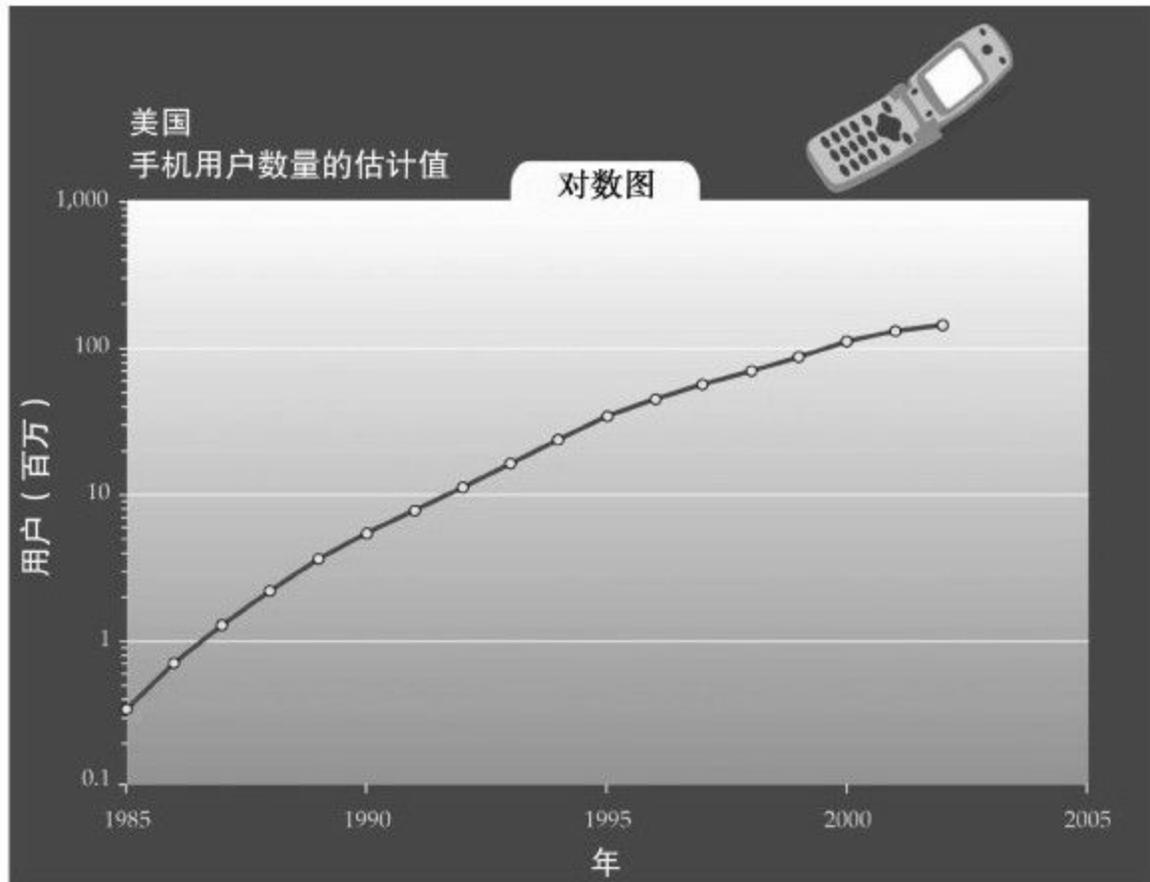


图 2-4

相比之下，20世纪末，手机从发明到广泛应用只用了10年的时间¹⁸。

总的来说，我们看到在过去一个世纪里，通信技术的普及速度平稳增长¹⁹，如图2-5所示。

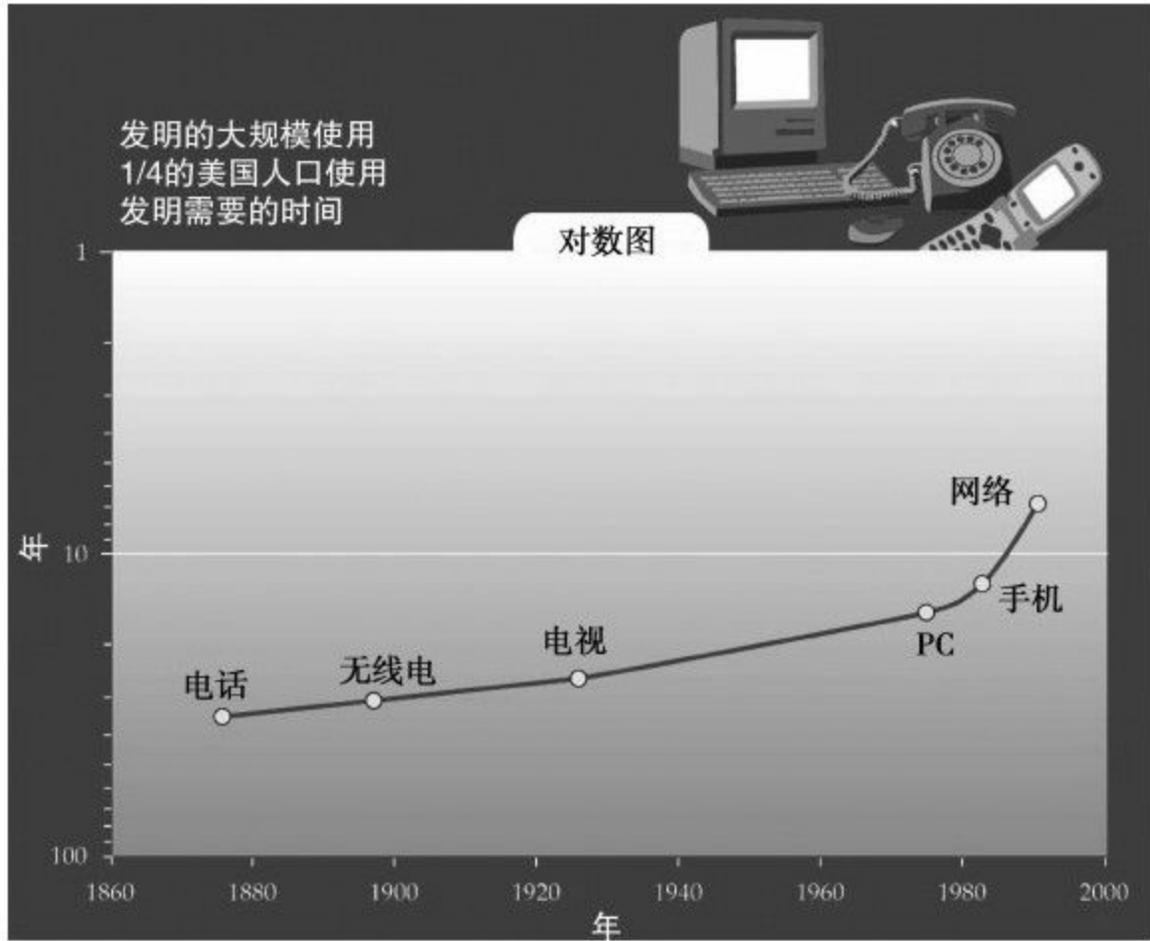


图 2-5

如第1章所述，采用新范式的速度与技术发展的速度大体上是一致的，目前的速度每10年翻一番。也就是说，新范式变更的周期是每十年缩短一半。按照这一速度，21世纪的技术进步将等价（如图2-1）于以往200个世纪的发展（以2000年的发展速度为准）^{20, 21}。

技术的S形曲线在其生命周期中的表达

机器与人类一样，可以独特地、出色地、传神地演奏小提琴协奏曲或是推演欧几里得定理。

——格雷戈里·伏拉斯多兹

便捷的现代打印机，在近25年来，已经革命性地创建并改变了商业模式，工作在修道院小屋中的那个沉默的抄写员与它不可同日而语。

——美国《科学》，1905年

通信技术一直都在发展，只是与技术视野的扩大相比起来，变得没有那么重要而已。

——阿瑟·克拉克

我的办公桌上一直放着厚厚的一叠书，当没有思路、坐卧不宁或者需要一线灵感时，我便可以迅速翻阅它们。当拿起最近获得的书卷，我便会想到出版者的手艺：470页精心印制的书页被组织成以16页为单位的书页叠，所有这些书页叠都用白线缝在一起，并粘在了灰色的帆布上。金黄色的字母盖在坚硬的亚麻封皮上面，连接着签名，巧妙地凸起在封底上。这是一个几十年前就完善的技术。书籍是构成社会的一个重要组成部分，它反映并塑造了文化，很难想象没有书籍的生活会是什么样子。尽管如此，印刷书籍与任何其他技术一样，也终将退出历史舞台。

一项技术的生命周期

一项技术的生命周期可以分为7个不同阶段。

- 1) 前导阶段。一项技术诞生的先决条件已经存在，梦想家可能会思索如何将这此要素相结合。然而，我们不认为梦想等同于发明，即便把这些想象记录下来。达·芬奇创作了令人信服的飞机汽车的图片，但我们不认为它这就是发明。
- 2) 发明阶段。漫长的劳动孕育了发明，这是人类文化中最令人兴奋的部分，这个阶段非常简短。在这个阶段，发明者用一种新的方式将好奇心、科学技能、决心和普遍的技巧相融合，把新的技术带入了生活。
- 3) 发展阶段。在此期间发明被其拥有者（可能包括原始发明人）保护、支持。这个阶段往往比发明阶段更为重要，可能还涉及比发明本身更大的意义的额外创造。许多能工巧匠精心制造手动驾驶的汽车，但直到亨利·福特发明了汽车批量生产方法，汽车工业才蓬勃发展起来。
- 4) 成熟阶段。尽管技术继续发展，但此时它已经拥有了自己的生命，并成为社会的固定组成部分。技术与生活交织在一起，使得很多人误认为这种技术将持续下去。在下一阶段，这种误解造成了有趣情景，可以称为虚假冒充阶段。

5) 在这个阶段，新技术的出现使得旧技术黯然无光。新技术的爱好者过早地预测它的胜利。新技术提供了一些明显的好处，但它在功能和质量方面仍缺少关键要素。此时，新的技术不能动摇原有的秩序，而技术保守派则认为原有的技术将永远不会被替代。

6) 陈腐的技术尽管取得了短暂的胜利，但很快另一项新技术将成功超越它。该技术进入了生命周期的晚年阶段，其原始目的和功能将都被新的、更具竞争力的技术替代。

7) 在这个阶段占技术生命周期的5%到10%的时间，旧技术将退出历史的舞台——好比马车被汽车代替，古钢琴被黑胶唱片代替，书籍手工抄录被打印机代替。

19世纪中叶，出现了一些留声机的前身，例如里昂斯科特德维尔的声波记振仪，这个设备用印刷图案的方法来记录声音振动。1877年，托马斯·爱迪生结合所有的相关元素，发明了第一台能够记录并重现声音的设备。改进对留声机的商业化是非常必要的。1949年，留声机已经成为一种相当成熟的技术，此时，哥伦比亚公司引进了33转/分钟的长时演唱唱片，RCA公司推出了45转/分的磁盘。冒充者是盒式磁带，它于20世纪60年代出现并在20世纪70年代推广。早期爱好者预测，盒式磁带体积小并能够重新记录的优势将代替笨重且易损坏的录音设备。

尽管磁带具有这些好处，但它不能随机存取，而且音质容易失真。最终是由压缩光盘（CD）完成了对老式录音设备的致命打击。光盘具有随机存取能力，而且质量水平接近人类听觉系统，很快留声机便过时了。这个技术在爱迪生创造了130年后，就达到了高龄，退出了历史舞台。

来看钢琴这个例子，这是我一直亲自参与的技术领域。18世纪初，意大利乐器制造家克里斯多佛利苦思冥想后设计了一种乐器，演奏者可以触摸按键，并触摸强度利用的变化，来演奏音乐。这种乐器称为“温柔和响亮的古键琴”，但这个发明没有立即取得成功。经过一系列完善（包括斯坦的维也纳行动和聪佩的英式行动），终于制造出了卓越键盘乐器——钢琴。1825年，阿尔菲厄斯·巴布科克用铸铁架构来制造钢琴，钢琴的发展进入了成熟期，自那时起，钢琴只有细微的改进。冒充者是19世纪80年代初的电子钢琴。它提供更加强大的功能。相对于原声钢琴，电子声音变换提供了数十个乐器音色、定序器允许用户可以立刻播放整个管弦乐队的声音、自动伴奏、教授键盘使用技巧和其他功能。唯一的缺点是其音质逊于高质量的钢琴。

这一关键缺陷导致了第一代电子钢琴引起普遍争论，结论是钢琴将永不会被电子产品取代。但是，原声钢琴的“胜利”并不是永久的。电子钢琴在功能、价格、性能等方面的优势，使得其销售量已经超过了原声钢琴。许多观察家认为，电子钢琴的声音质量现在已经可以媲美甚至超过了原声钢琴。除了音乐会和奢侈的三角钢琴外（只是市场的一小部分），原声钢琴的销售量都在下降。

从羊皮卷到下载

那么，书籍的生命周期是什么呢？书籍的前身是美索不达米亚的泥板和埃及莎草纸卷轴。在公元前2世纪，埃及托勒密在亚历山大创造了规模巨大的图书馆，并且宣告纸莎草出口非法以阻止竞争。

古希腊统治者欧迈尼斯二世是怎么创造第一批书籍的呢？他使用山羊和绵羊的皮纸做成书页，把所有书页夹于木质封面之间，并通过缝制的方式固定。这项技术使欧迈尼斯的图书馆能够与亚历山大的图书馆相媲美。大约在同一时代，中国还创造了竹简书。

书籍的发展和成熟涉及了三大跨越。首先是印刷术，公元8世纪，中国人尝试用凸起的木头块大量印制书籍，从而扩大了读者范围，读者已经不局限于政府和宗教领袖。更有意义的是活字印刷，它最早出现在11世纪的中国和韩国，但亚洲文字的复杂性阻碍了这些早期的尝试取得完全的成功。15世纪，约翰内斯·古腾堡将活字印刷应用于相对简单的罗马字符集。1455年，他通过活字的方式印刷了圣经，这也是第一次大规模采用活字印刷技术。

虽然机械领域和印刷机电领域一直在改革发展，但是直到计算机排版的出现，书籍制作技术才有了质的飞跃，大约20年前，计算机排版彻底取代了活字印刷。印刷术现在被归为数字图像处理的一部分。

书籍制作技术进入成熟阶段。大约20年前，随着第一次电子图书浪潮的到来，冒充者出现了。与其他例子相同，这些冒充者在质量方面带来的巨大的益处。以CD-ROM或闪存为介质的电子书，具有强大的搜索和导航功能，内部存储量相当于数千册纸质书籍。人们可以通过强大的逻辑规则快速检索以网络、CD-ROM或DVD为存储介质的百科全书。只是对于我拥有的那33卷纸质汤姆·斯威夫特系列小说，这些功能无法实现。电子书籍可以提供动画并能回应用户的输入。阅读页面不一定严格有序，但用户可以凭借直觉去探索电子书中的内容。

与唱片和钢琴一样，这些第一代冒充者（现在仍然是）与纸质书籍相比最大的缺点是：缺少纸和油墨那样极佳的视觉效果。纸没有闪烁，然而普通计算机屏幕的刷新频率是60赫兹。这是灵长类动物的视觉系统进化适应的问题。我们只能在高分辨率下，看清可视范围内的一小部分。通过视网膜中心成像，这部分相当于距离眼睛22英寸远的图像被聚焦在一个只有一个字母大小的面积上。在中心小窝以外，分辨率很低但对亮度的变化非常敏感，这种能力使灵长类动物的祖先能够迅速检测天敌的攻击。视频图形阵列（VGA）不断闪烁的计算机屏幕被我们的眼睛检测到后，迫使眼睛不断运动视网膜中心小窝。这实质上是放慢了阅读速度。这就是为什么屏幕阅读没有纸质书籍阅读那么让人心灵愉悦。这个特殊的问题现在已由不闪烁的平板显示器解决了。

其他重要问题包括对比度和分辨率：优质书籍的墨和纸张对比度大约为120:1；普通屏幕的对比度只有墨和纸对比度的一半。书中的印刷和插图的分辨率约为每英寸600至1000点数（DPI），而计算机屏幕的分辨率大约只是书的1/10。

计算机设备的尺寸和重量正在接近书籍，但其重量仍要比一本平装书重。而且纸质书也不需要电池供电。

最重要的是现有的软件的问题，我指的是庞大书籍印刷制作基地。美国每年将有5万种新书出版，同时数百万种图书还在流行。虽然目前在扫描和数字印刷方面已经投入了巨大的力量，但仍然需要经历相当长的时间，电子数据库才能创造巨大的物质财富。最大的障碍在于出版商将纸质图书制成电子图书的犹豫，毕竟非法的文件共享曾经给传统的音乐录制业带来了毁灭性的打击。

很多突破这些限制的解决方法也随之出现。新的廉价的显示技术在对比度、分辨率、低闪烁等方面可以媲美优质纸文档。电子产品便携式的燃料电源被引进，这将给电子设备提供数百个小时的供电。便携式电子设备在尺寸与重量上可与一本书媲美。现在首要的问题将是找到可以安全使用电子信息的方法。这是各个方面都非常关注的基本性问题。一旦纳米技术为基础的制造业在20年内成为现实（包括物理产品在内），一切都将成为信息。

摩尔定律与超摩尔定律

埃涅阿克计算机配备了18000个真空管，重30吨；未来的计算机可能只有100个真空管，质量约为1.5吨。

——大众机械，1949年

计算机科学的研究范畴不仅仅是电脑，就像天文学的研究范畴不仅仅是望远镜。

——E.W.Dijkstra

在进一步思考奇点的含义前，让我们先研究各种服从于加速回报定律相关技术的广阔领域。摩尔定律是最著名的（也是被广为承认的）指数增长现象。在20世纪70年代中期，戈登·摩尔（集成电路的主要发明人、英特尔公司的董事长）指出，我们可以每24个月在集成电路上集成现在两倍的晶体管（在20世纪60年代中期，他曾预计12个月）。电子的传导距离随着减少，电路也将运行得更快，从而提高了整体计算能力。这些带来的结果是计算的性价比以指数增长，其翻倍的速度（12个月翻一番）远快于范式迁移的增长速度（10年翻一番）。信息技术在性价比、带宽、容量等方面的速度增长1倍的时间都是一年。

摩尔定律的主要动力是半导体元件尺寸的减少，减少的速度为每5.4年收缩一半（见图2-6）。由于芯片功能是双向的，这意味着每2.7年每平方毫米的元件数量将增加一倍²²。

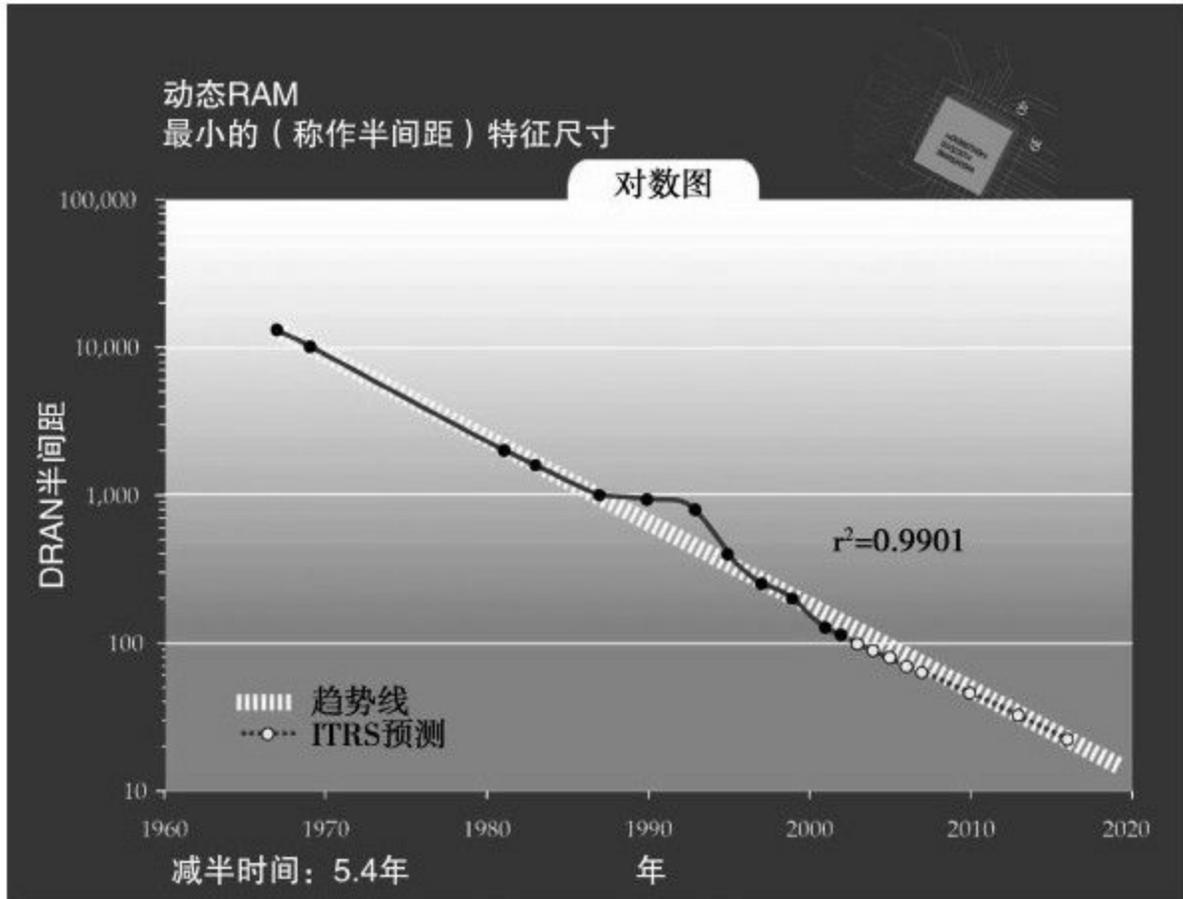


图 2-6

图2-6展示了半导体工业发展路线图（选自半导体技术协会的国际半导体技术蓝图《参考系》，该图预测至2018年）。

每平方毫米DRAM（动态随机存取记忆体）的成本也已开始下降。每1美元生产DRAM比特数的倍增时间只需1.5年²³（见图2-7）。

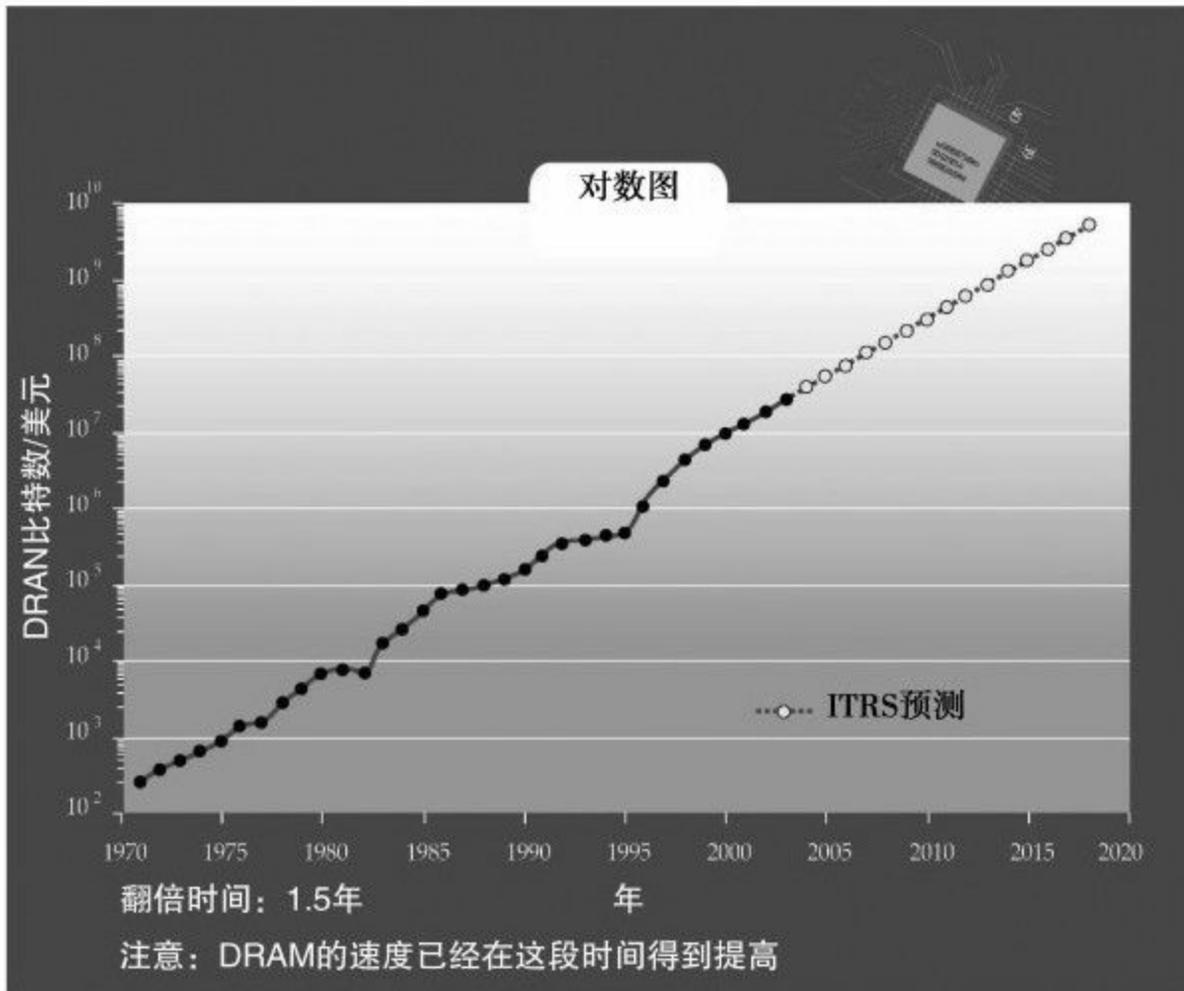


图 2-7

晶体管方面也可以看到类似的趋势。1968年1美元可购买1个晶体管；2002年1美元可以购买大约1000万个晶体管。由于DRAM是一种专门的领域（有自己的创新），晶体管的平均价格减半的时间略长于DRAM，约1.6年（如图2-8）²⁴。

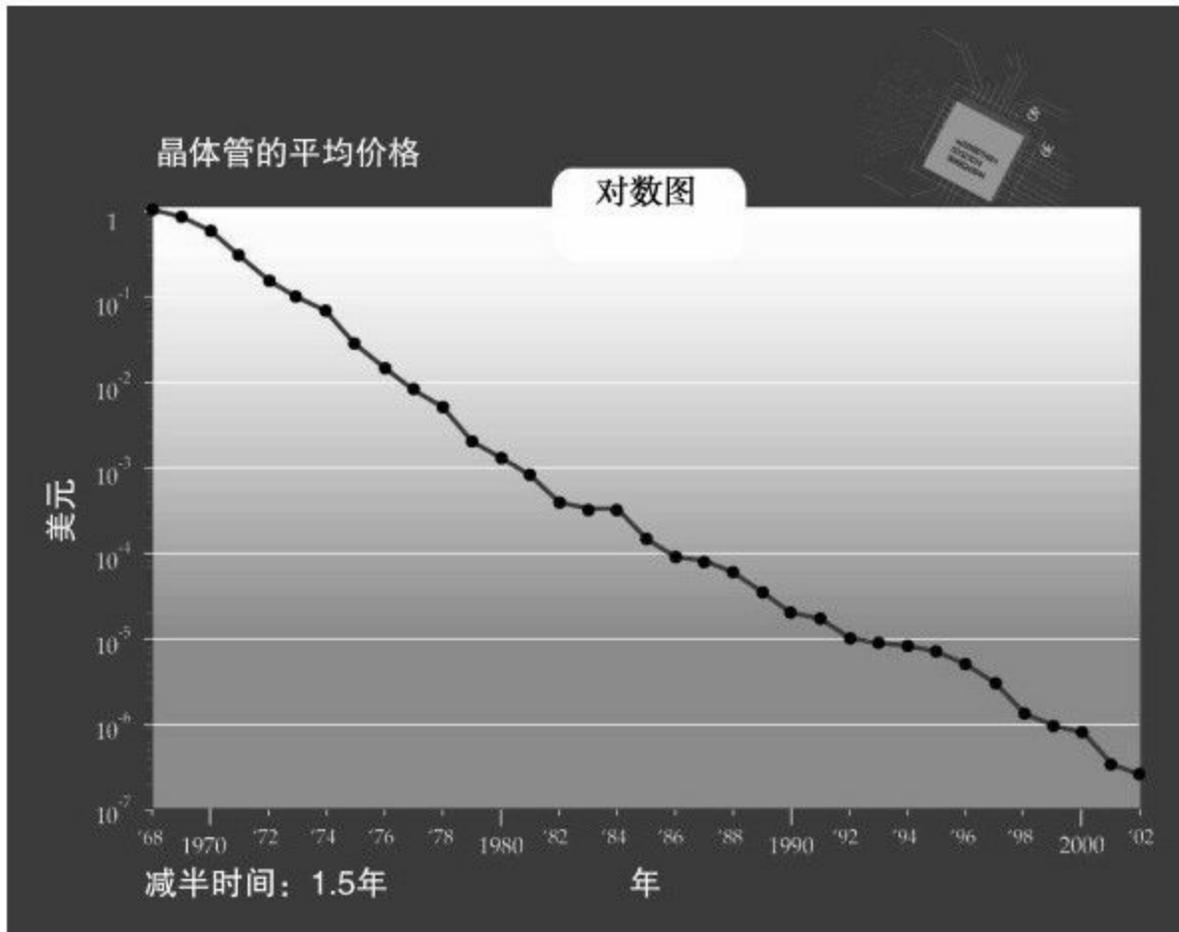


图 2-8

半导体性价比显著而平稳的加速，是通过改良生产过程中不同阶段、不同方面的工艺技术实现的。关键元件尺寸已小于100纳米（通常认为100纳米是应用纳米技术的极限）²⁵。

与格特鲁德·斯坦因诗中的“玫瑰”不同，“晶体管是晶体管是晶体管”并不适用于现实情形。事实上，晶体管不是一成不变的，在过去30年中，它们已经变得体积更小、价格更便宜、速度更快了（参见图2-10）——因为电子的传输路程更短了²⁶。

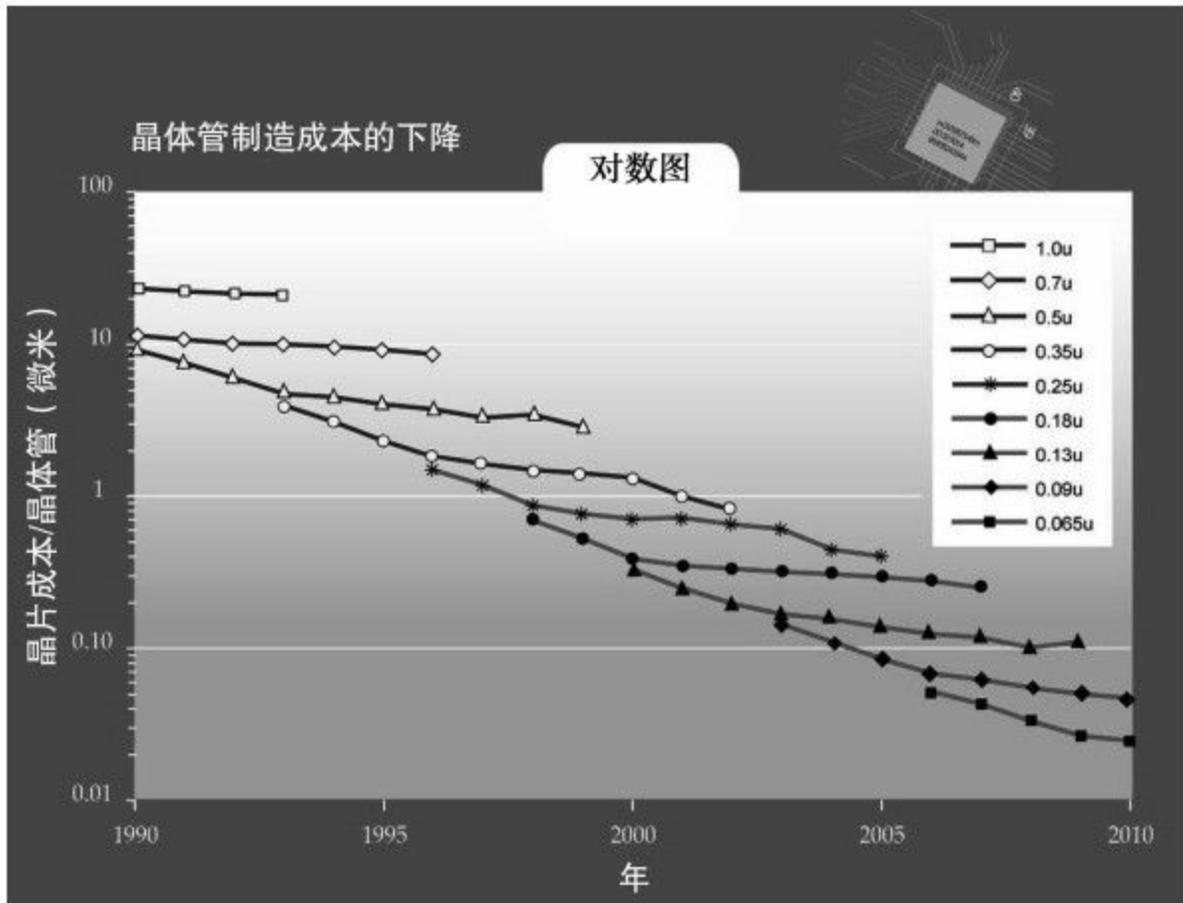


图 2-9

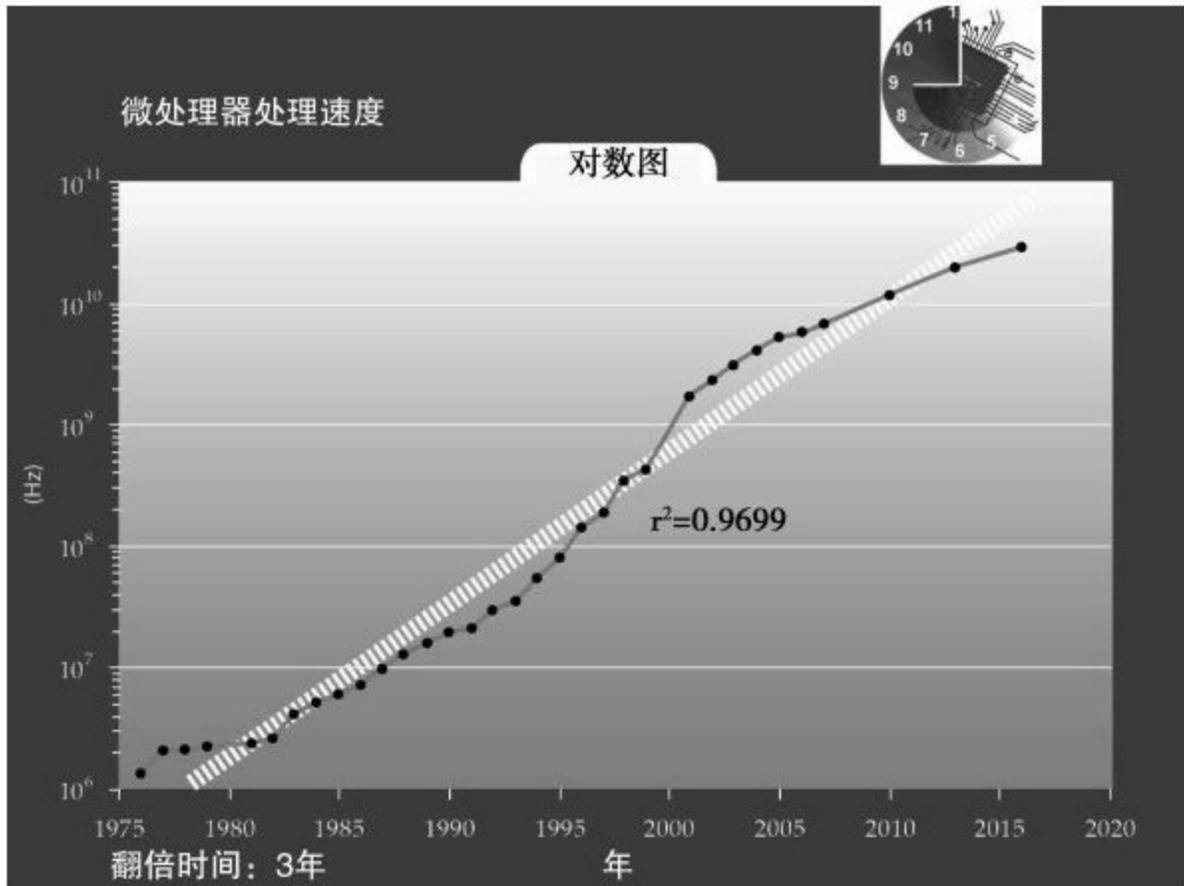


图 2-10

如果把晶体管成本的下降和晶体管间延时减少的趋势结合起来，我们会发现，只需要1.1年的时间晶体管周期的单位成本就会减半（见图2-11）²⁷。晶体管周期的单位成本是一个能够准确地从整体上衡量性价比的指标，因为这个指标可以同时考虑到速度和容量。但是晶体管周期的单位成本没有考虑更高层次的技术革新（比如微处理器的设计）对计算性能的改进。

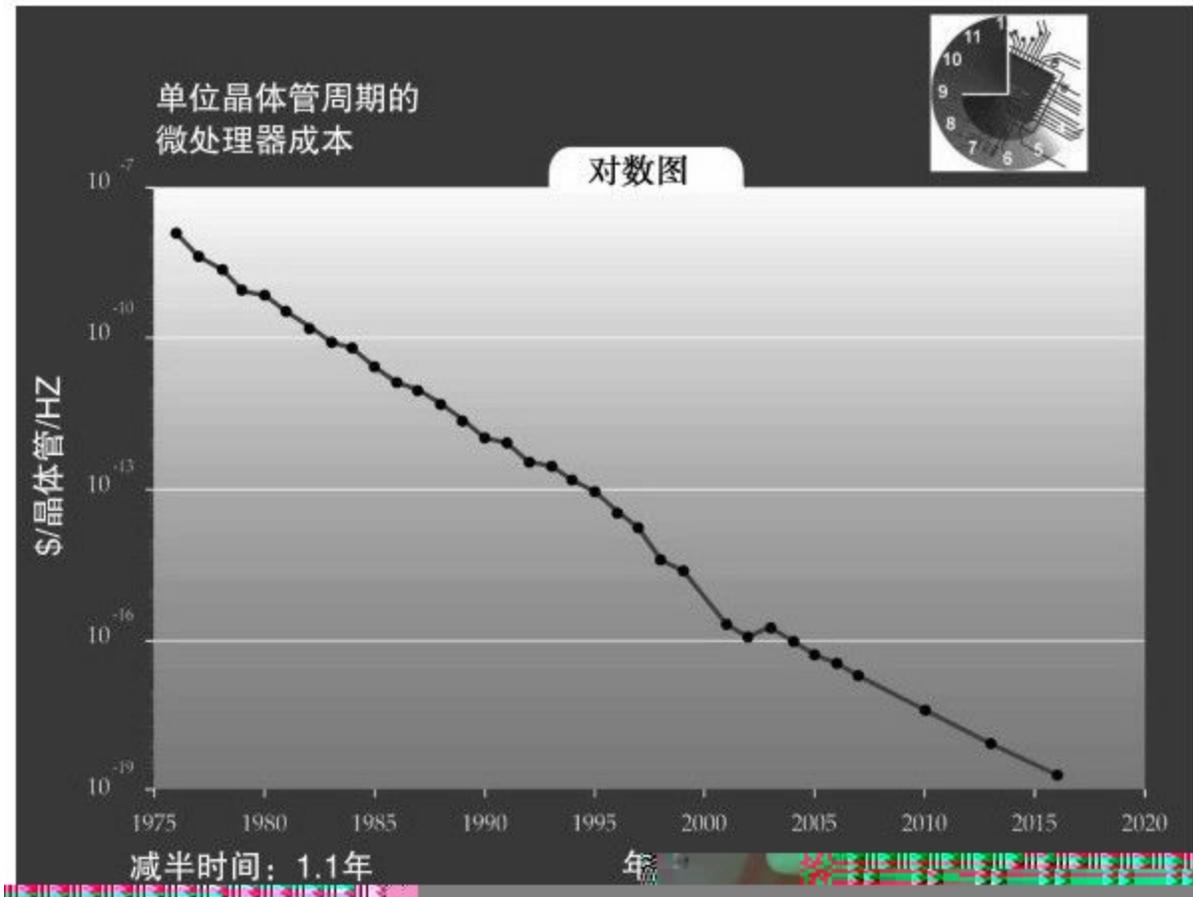


图 2-11

英特尔处理器中的晶体管数量每两年翻一番（见图2-12）。还有一些其他的因素也在改进整体性价比，比如时钟速度的提升、微处理器成本的下降以及处理器设计方法的创新²⁸。

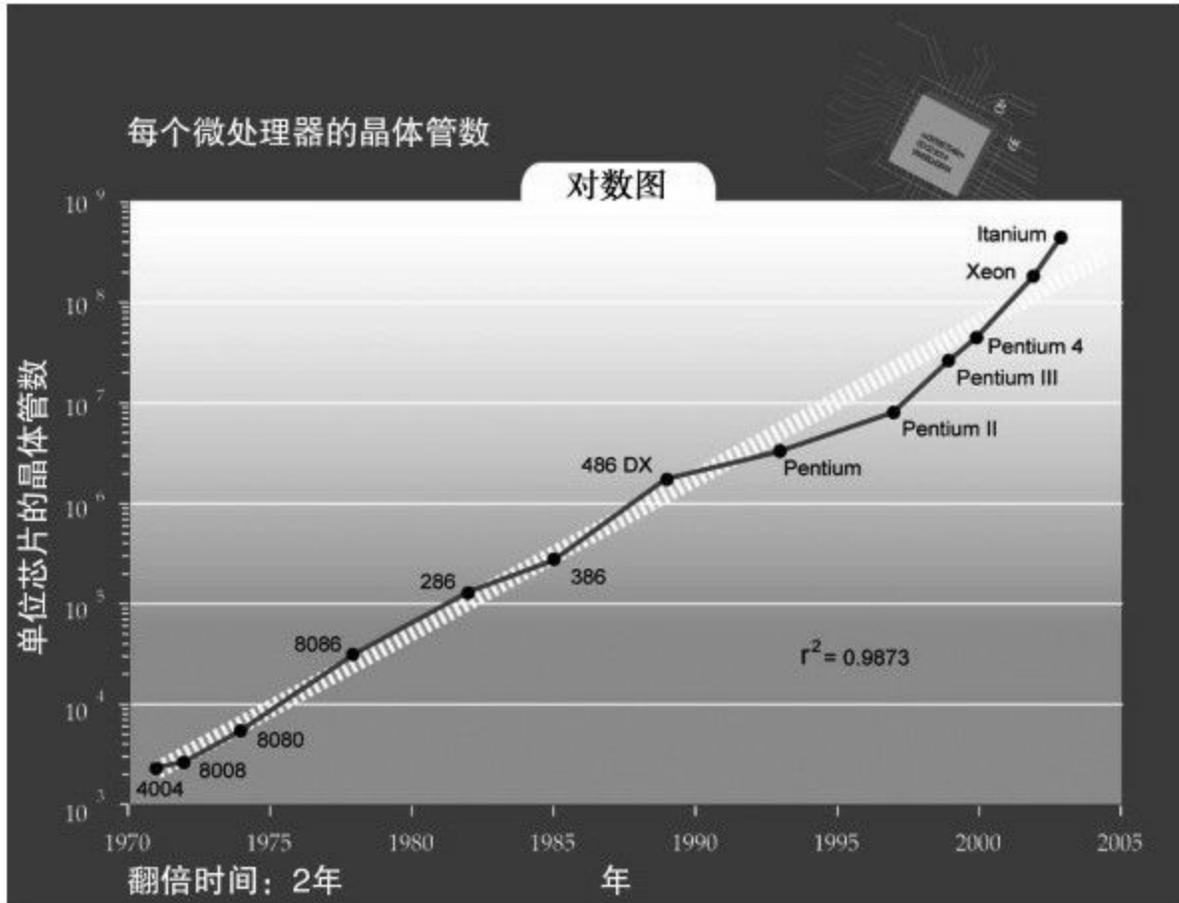


图 2-12

处理器的MIPS（每秒的指令执行数目）性能，每1.8年提升一倍（见图2-13）。而且，在这段时间内处理器的单位成本也在下降²⁹。

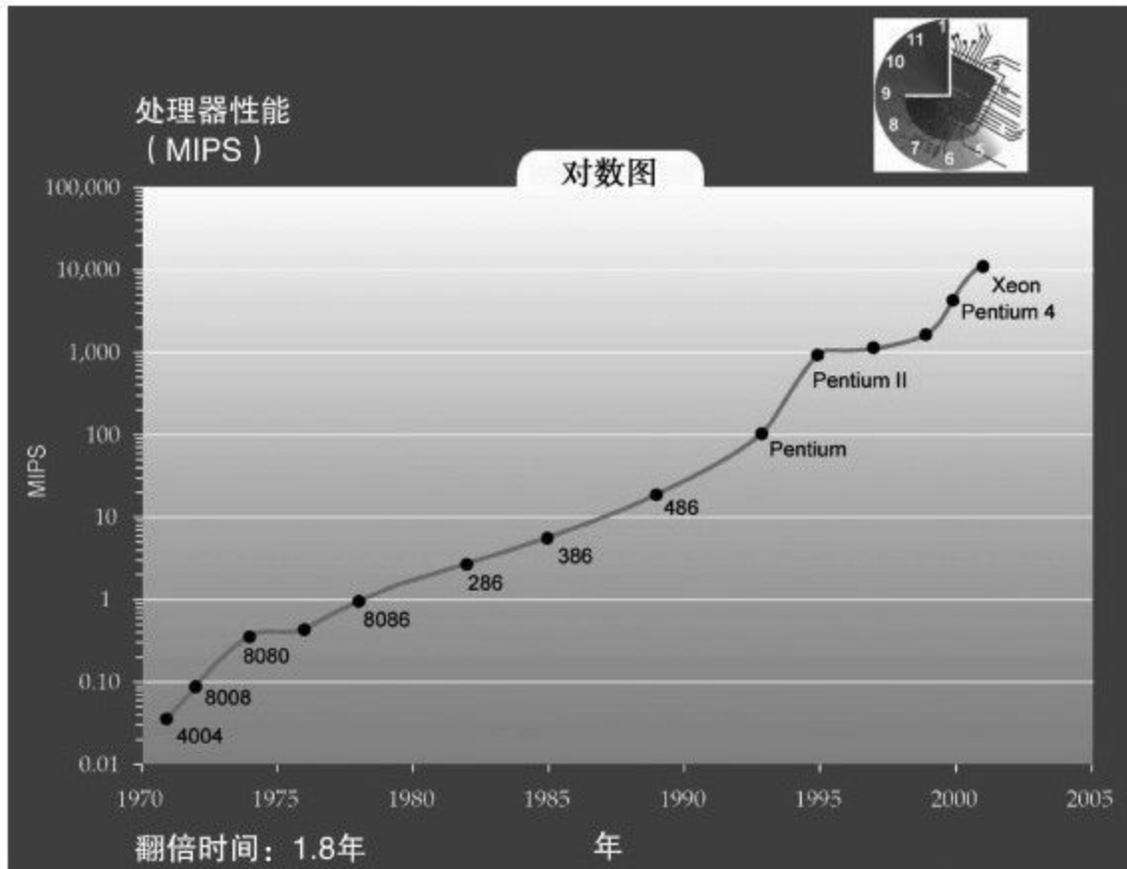


图 2-13

让我来回顾这40多年来对计算机产业的切身体会，比较一下我在学生时期（1960年前后）使用的MIT计算机和现在的笔记本电脑：1967年，我曾经使用过价值数百万美元的IBM 7094计算机，32K字节（36bit）的内存储器，处理器速度为1/4 MIPS。2004年，我使用的是一台价值2000美元的个人电脑，几个G的RAM，处理器速度为2000MIPS。MIT计算机的价格大约是个人的电脑的一千倍左右，所以现在个人电脑的MIPS的单位成本是MIT计算机的800万分之一，如表2-1所示。

表 2-1

度量标准	IBM 7094 (约 1967 年)	笔记本电脑 (约 2004 年)
处理器速度 (MIPS)	0.25	2 000
主存 (K Bytes)	144	256 000
近似成本 (2003 美元)	11 000 000	2 000

现在我的计算机处理器的能力达到了2000MIPS，其处理成本不到1967年我使用的计算机的224分之一，也就是说性价比在37年间翻了24番，大约每18.5个月翻一番。相比之下，2004年我使用的计算机RAM的容量增长了近2000倍、磁盘存储大幅度增长、指令集也更高效。此外通信速度更快，软件功能更强，其他方面的性能也不断得到提升，所以在未来性能翻倍的时间将会越来越短。

尽管信息技术的成本大幅度降低，但需求增长的速度更快。比特的数量每1.1年翻一倍，比单位比特成本降低一半的时间（单位比特成本降低一半大约是1.5年³⁰）要快。半导体工业从1958年到2002年³¹，每年增长18个百分点。整个IT产业在GDP中的比重从1977年的4.2%，上升到了1998年³²的8.2%，如图2-14所示。IT产业已经逐渐成为各种经济因素中的一股强大势力。同时IT产业也促进了很多其他制造业和服务业的快速发展，甚至包括生产桌椅板凳的制造业。各行各业的生产过程中计算机辅助设计、库存管理系统以及自动化生产系统等都得到广泛使用。

表 2-2

翻倍（或减半）时间 ³³	
动态 RAM “半间距” 特征尺寸（最小芯片特征）	5.4 年
动态 RAM（单位美元生产的比特数）	1.5 年
晶体管平均价格	1.6 年
每个晶体管周期的微处理器成本	1.1 年
总信息量	1.1 年
以 MIPS 衡量的处理器性能	1.8 年
中央处理器的晶体管	2.0 年
微处理器时钟速度	3.0 年

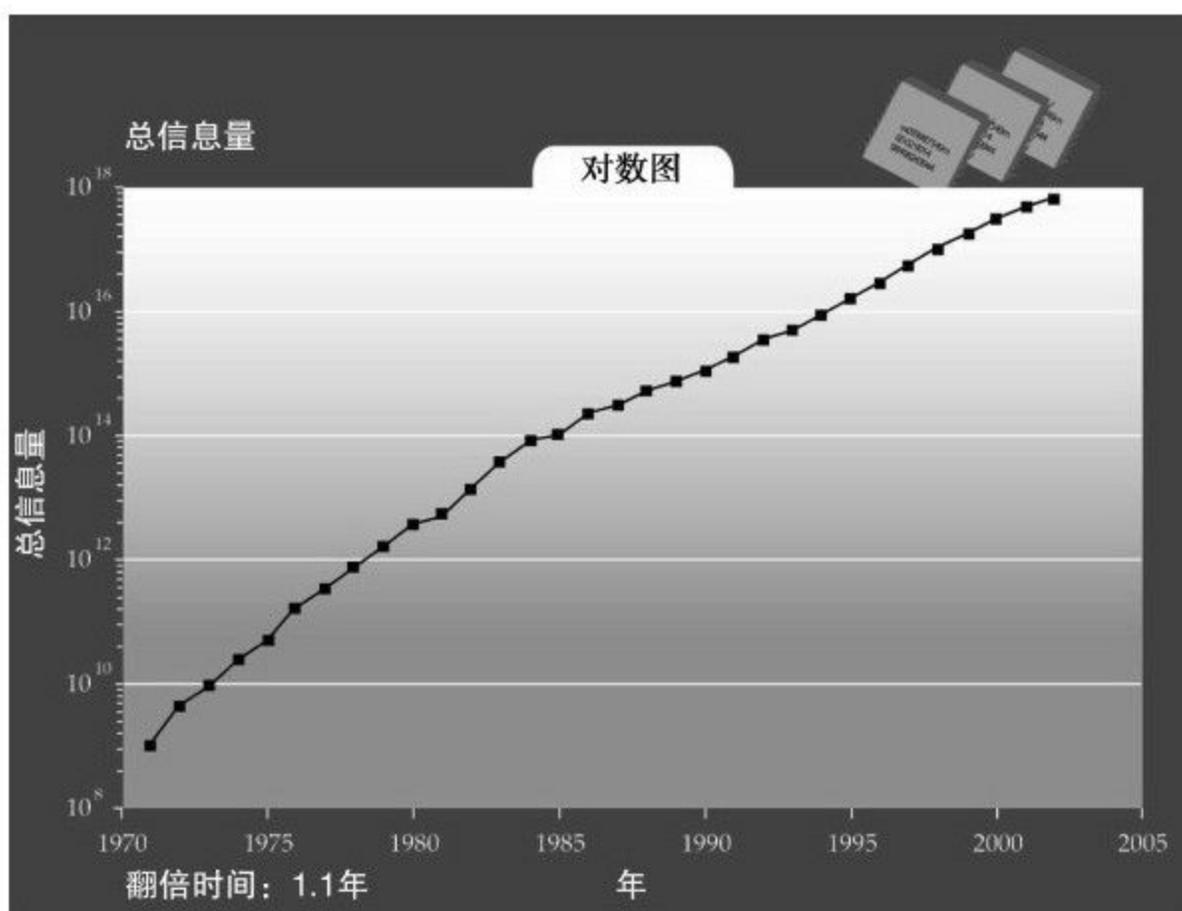


图 2-14

摩尔定律：自我满足的预言？

许多观察家都认为摩尔定律是一条已经应验的预言：工业生产商期待在未来某个特定的时间组织相应的研发。这个产业的发展路线图是典型的实例³⁴。但是信息技术发展的指数趋势已经远远超出了摩尔定律的范畴。我们可以看到类似的发展趋势发生在每一个与信息技术相关的技术中。其中部分技术的性价比加速提高可能并不存在或者并不明显（具体解释见下文）。即便是计算本身，其性能增长的单位成本也已经远远超出了摩尔定律的预测。

第五范式³⁵

摩尔定律实际上并不是计算机系统领域的第一阶段。如果关注性价比（1000美元的成本创造的每秒钟执行的指令数），可以在下面49个著名的计算系统和20世纪计算机相关领域中发现这个阶段（见图2-15）。

图2-15表明，当集成电路发明之前，计算性价比以指数级的速度增长就有四个不同的范式——机电、继电器、真空管、离散晶体管。摩尔范式也并不是最后的范式。当摩尔定律到达的S形曲线末端（预计2020年前）后，三维分子计算将继续推动指数级的增长，这也将构成第六范式。

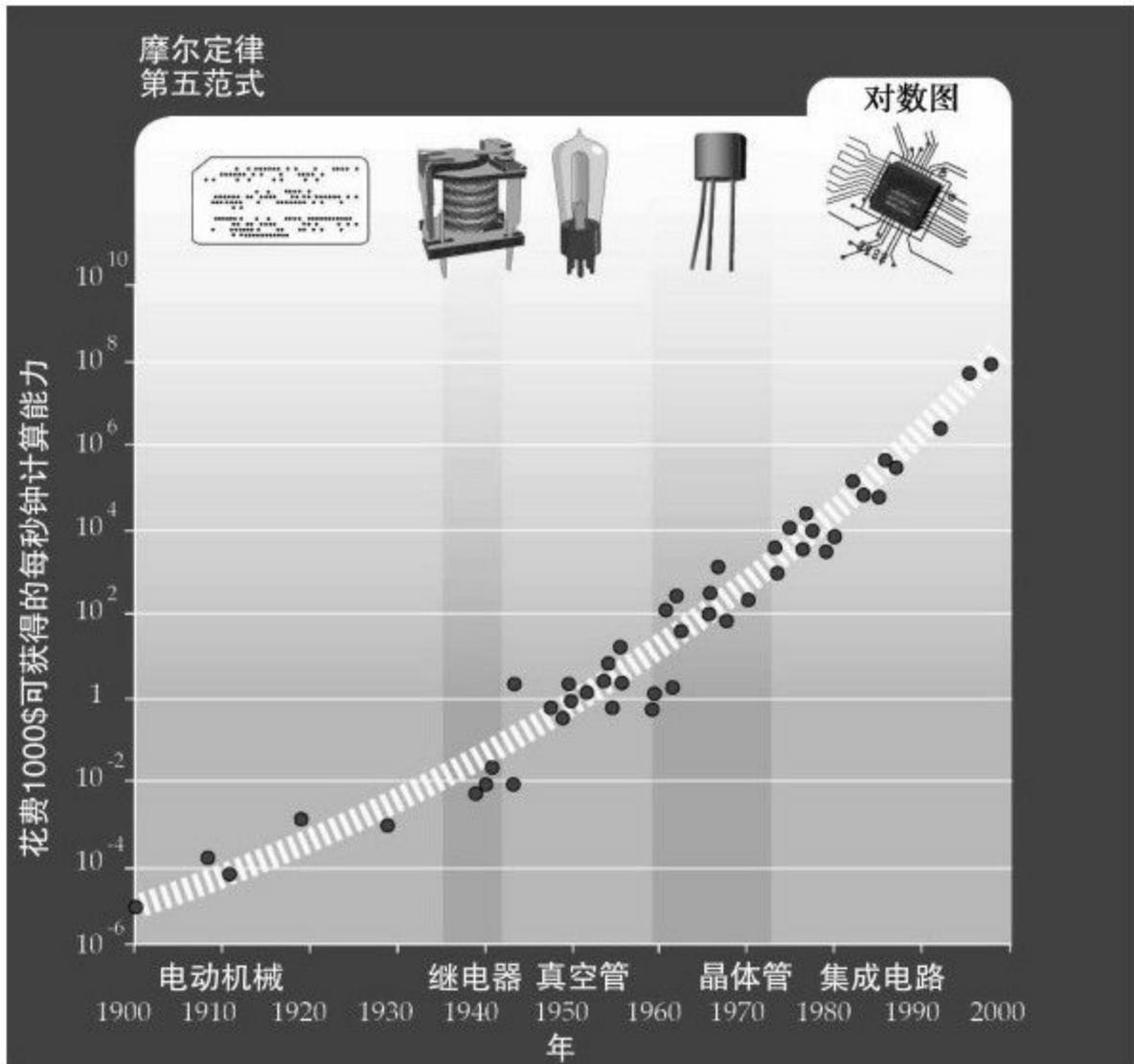


图 2-15

分形维度和大脑

注意，计算机系统第三维度的使用不是一个非此即彼的选择，而是二维和三维间的一种延续。在生物智能方面，人类大脑皮层相当的平，6个薄层被精巧地折叠在一起，这种结构可以大大增大其表面积。这种折叠的方式也可以使用第三维度。在“分形”系统（绘图更换或折叠规则迭代应用的系统）中，这种精密的折叠结构被认为构成了一部分的维度。从这一角度看，人类大脑皮层表面是一个错综复杂的二至三维结构。其他脑结构（如小脑）是三维的，但包含重复的结构，所以其本质上还是二维的。很可能我们未来的计算机系统将融合高度折叠的二维系统和充分

的三维结构。

请注意，图2-15显示的是对数指数曲线，表明了两个层次的指数增长³⁶。换言之，指数增长以指数增长的速度平稳无误地增长（对数图中的直线部分说明了指数增长；上扬的曲线显示其并不是简单的指数级的增长）。如图2-16所见，计算机的性价比在20世纪初翻一番需要三年的时间；20世纪中期翻一番需要两年的时间，而现在大约只需要一年的时间³⁷。

汉斯·莫拉维克提供了类似的图表（见图2-16），它使用了一组不同的但是重叠的时间集合，描述计算机在不同时期（斜率的改变点）的发展趋势。从该图可以看出，斜率随着时间递进而增加，反映了指数增长的第二个层次³⁸。

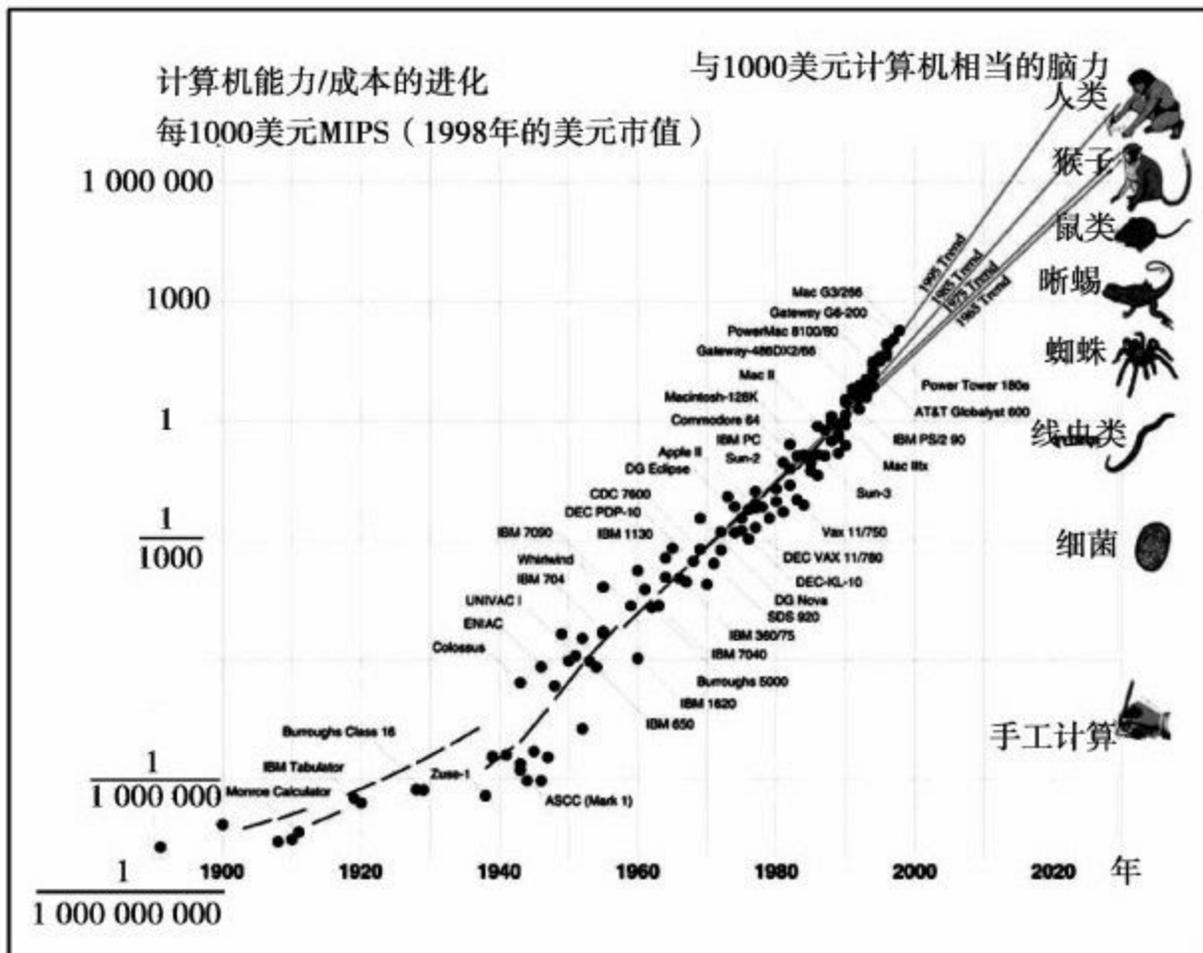


图 2-16

如果由此来预测22世纪的计算机性能发展趋势，我们可以从图2-17中看到，超级计算机将在2010年前后达到与人类大脑相当的计算性能，在2020年前后，个人电脑的计算能力将媲美甚至超越人脑的水平。这仅是我们对人脑容量的保守估计（我们将在第3章讨论关于人脑运算速度的预测）³⁹。

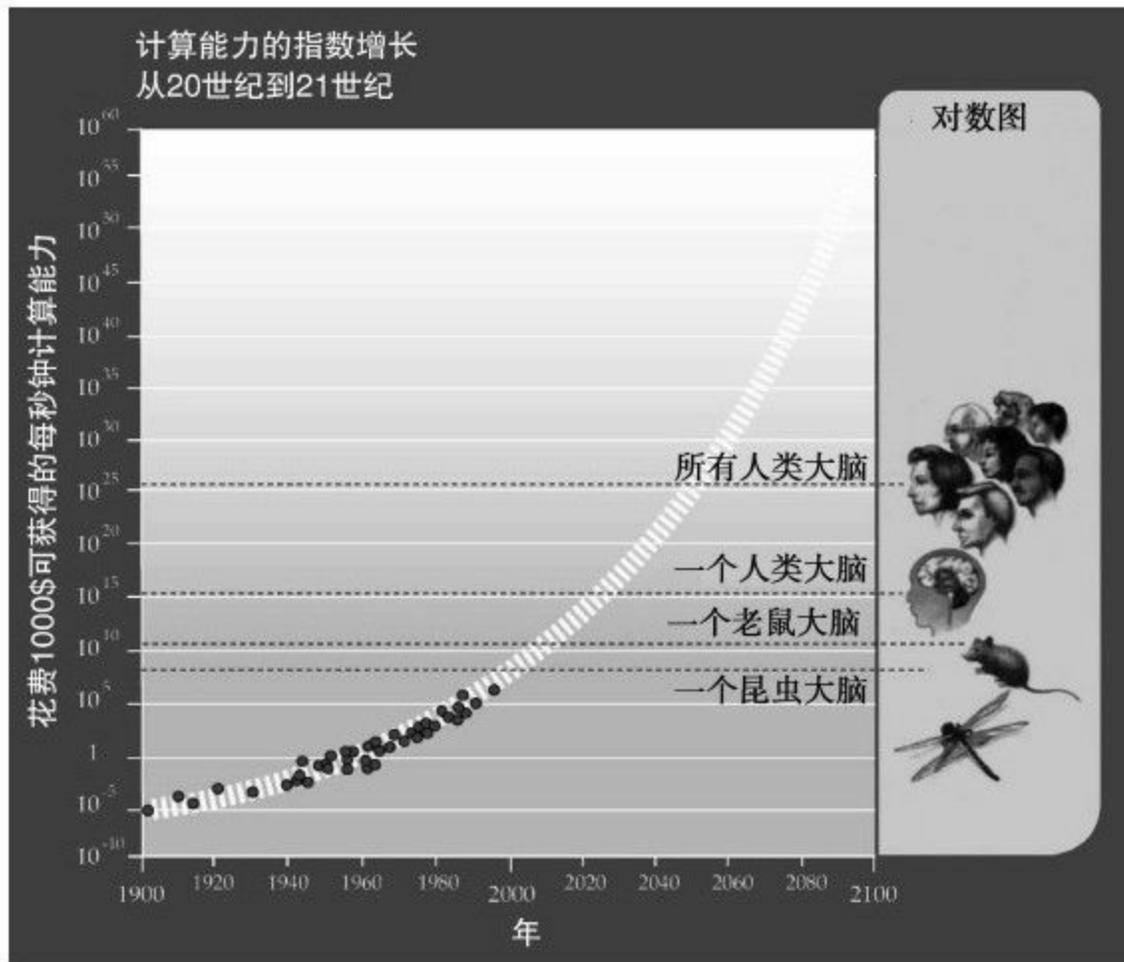


图 2-17

计算机指数发展是整个科技指数化发展的一个最典型的例子。我们可以从加速度增长的角度观察指数发展的趋势：我们用了90年的时间才达到第一个MIPS/千美元，而现在我们增加1个MIPS/千美元只需要5个小时⁴⁰。

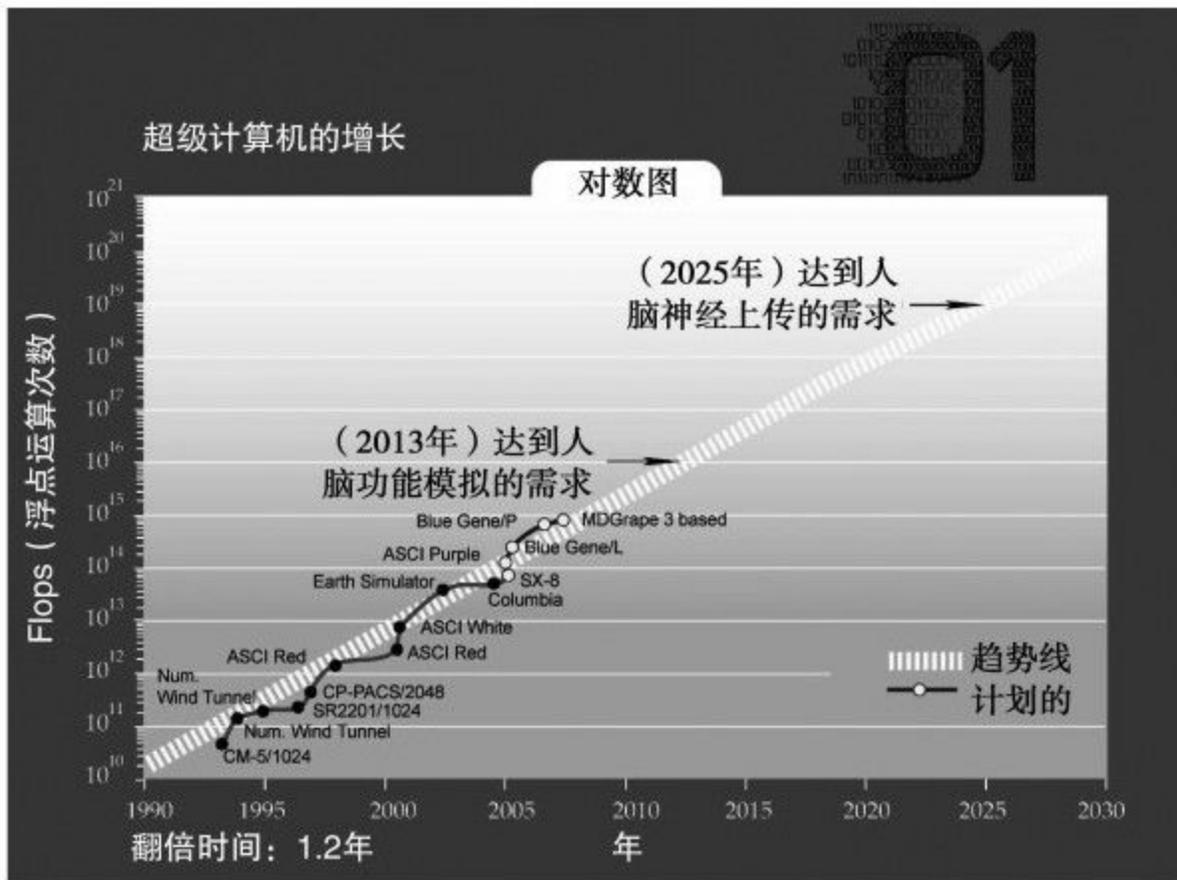


图 2-18

IBM的蓝色基因/P超级计算机，预计计算能力达到100万千兆浮点运算（每秒10亿次浮点运算），或者说到2007年⁴¹达到每秒 10^{15} 次的计算能力。这已经达到了人脑计算能力的1/10——预计人脑的计算能力为每秒 10^{16} 次计算（见第3章）。如果从这个指数曲线进行推断，计算机可以在下一个10年的初期达到每秒 10^{16} 计算能力。

如上所述，摩尔定律只是局限地指出了晶体管的数量在确定尺寸的集成电路中的变化，有的时候甚至还只局限在晶体管的特征尺寸变化上。最适当的性价比测量标准是单位成本的计算速度，索引可以解释不同层面的“聪明”（创新或者称为技术的演变）。除了涉及集成电路的所有发明外，计算机设计的多个层次都有改进（例如流水线、并行处理、先行指令、指导和内存缓存等）。

人类大脑使用效率很低的电学和数字控制来模拟计算过程。其中大量的计算都是在神经元间、以200次/秒的计算速度（在每个连接）展开

的。这至少比现代的电路慢100万倍。但是大脑可以从三维的、极大并行化的组织中得到巨大的能量。有许多的wings方面的技术，通过该技术可以在三维上构建电路，我将在第3章讨论。

有人也许会问：支持计算过程的物质和能量是否存在固有的限制呢？这是一个重要的问题，但正如本书第3章论述的，直到21世纪末，我们都不会接近这些限制。重要的是要区分S形曲线（以具体的技术范式为典型特征）和持续指数级增长（以一个更广泛科技领域中的持续进化过程为典型特征）。具体的范例（如摩尔定律）最终将不会保持指数增长。但是，计算的增长将最终超越它构建的范式，始终保持指数增长的速度。

根据加速回归定律，范式迁移（也称为创新）可以将任何特定模式的S形曲线转变为持续的指数增长。当旧的范式接近它的内在极限时，一个新范式（如三维电路）将接替旧的模式，这种情形在计算的历史中已经发生了至少四次。例如类人猿，每个动物掌握工具制造和使用技巧都以S形学习曲线为特征，但曲线的末端会迅速停止；与之相反，人造技术从一开始，便以指数模式迅速增长，而且永不停止。

DNA序列、记忆、通信、因特网和小型化

文明的进步源于重要行为增加的数量，我们可以很自然地从事这些行为，而不需要经过思考。

——艾尔弗雷德·诺思·怀特海，1911年⁴²

与其原来的样子相比，事物未来的样子与它现在的样子更像。

——德怀特·艾森豪威尔

加速回归定律可应用于所有技术，尤其是进化过程。应用信息技术可以将该定律很准确地绘制出来，因为我们已经有了完善的定义标准（如每美元每秒钟的计算量、每克元件每秒钟的计算量）去衡量它们。加速回归定律中暗含着大量指数增长的例子，在各种不同的领域中我们都能找到，如电子、DNA测序、通信、大脑扫描、人脑的逆向工程、人类的知识领域以及技术小型化。技术小型化的趋势与纳米技术的出现直接相关。

未来的GNR（遗传学、纳米技术、机器人技术）时代（见第5章）不仅源于计算的指数增长，而且更多地来自于多种相互交织的技术进步的内部作用，以及它们彼此间的相互协作。指数增长曲线上的每一点都构建了全方位的技术，它们是人类创新与竞争的史诗。我们认为正是这些混沌过程的共同作用，导致了平稳可预测的指数增长趋势。这不是巧合，而是进化过程的本质特征。

人类基因组破译工程启动于1990年，有批判者指出，以当时的速度完成这项工程需要几千年的时间。但是，原计划需要15年的工程提前完工了——2003年⁴³便完成了第一版测绘。破译成本也由1990年的每对染色体10美元降到了2004年的每对一便士，而且这个成本还在加速持续下降（见图2-19）⁴⁴。

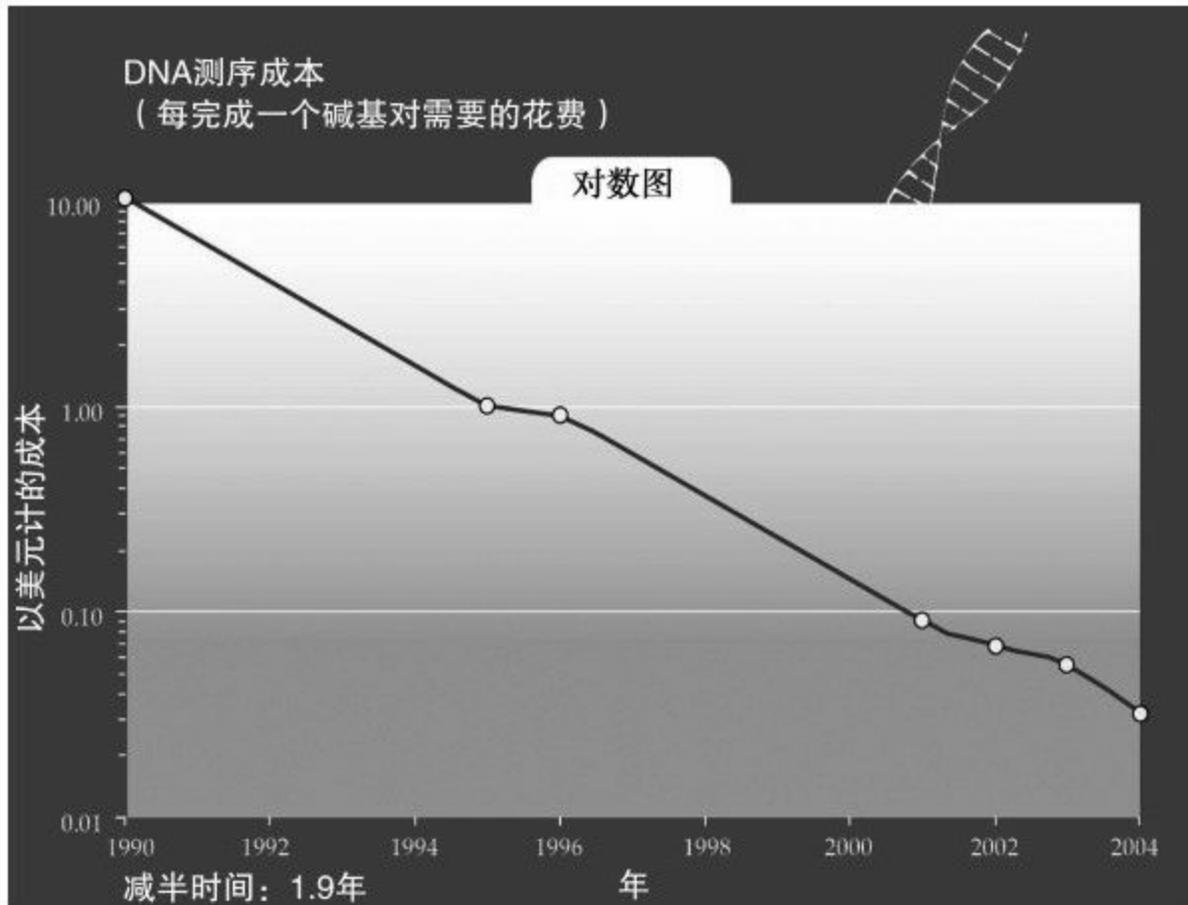


图 2-19

科学家破译DNA序列的数据量呈平缓的指数增长（见图2-20）⁴⁵。一个具有代表性的例子是SARS病毒DNA序列的破译——从SARS病毒的发现到最终破译只用了31天，而HIV病毒DNA序列的破译则花费了多于15年的时间⁴⁶。

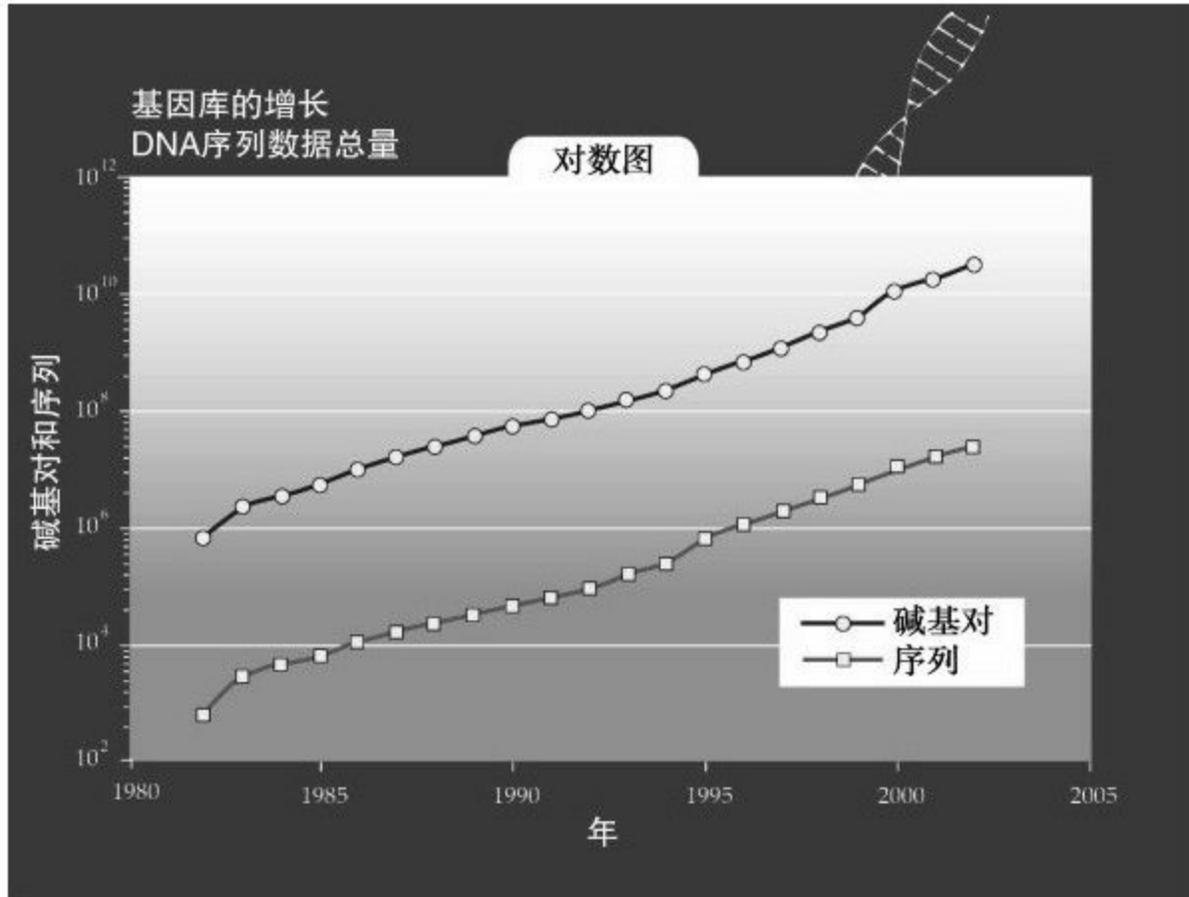


图 2-20

当然，电子存储方面我们也可以在也可以看到指数级的增长（如RAM）。需要注意的是，图2-21中的指数增长经历了不同的技术范式：从真空管到离散晶体管，再由从离散晶体管到集成电路⁴⁷。

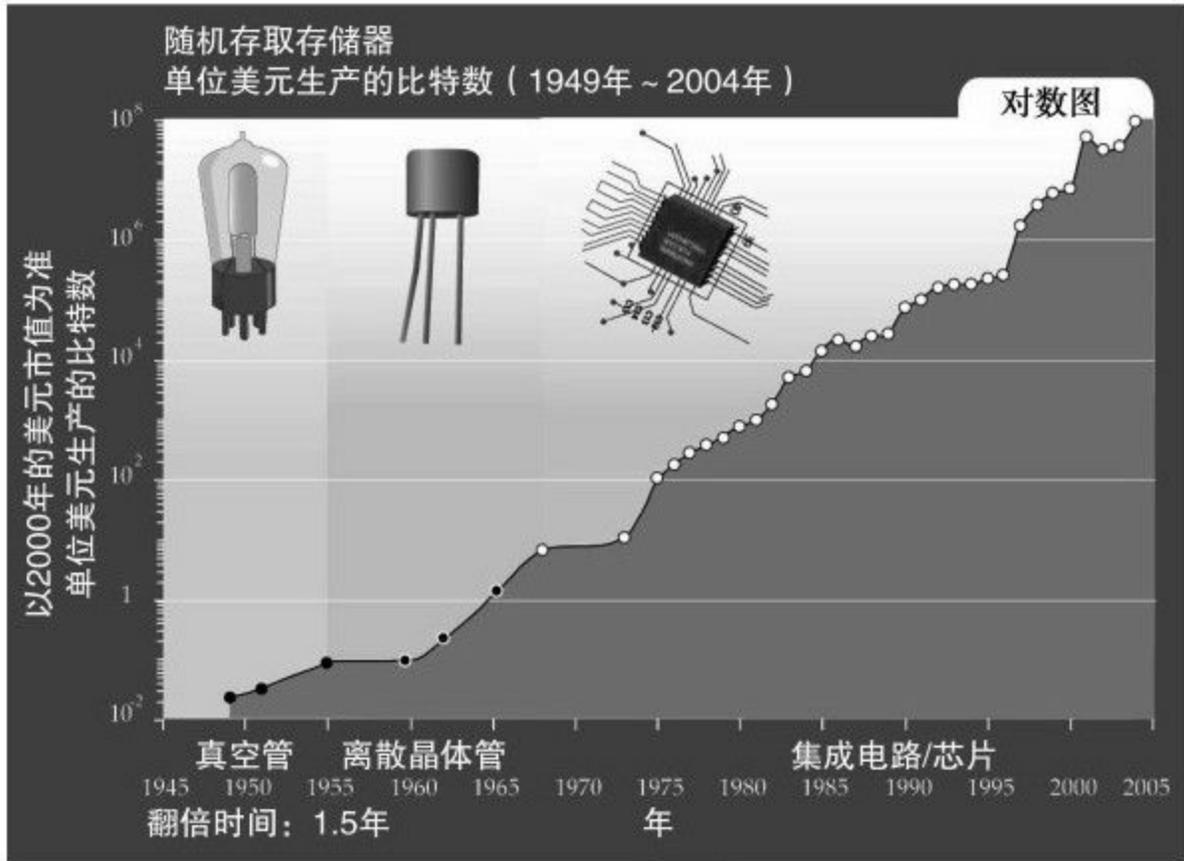


图 2-21

但是，磁存储（磁盘驱动器）的性价比的增长并不遵循摩尔定律（见图 2-22）。这一指数趋势反映了一个磁性基板上的数据压缩量，而非集成电路中的晶体管数量，这是很多工程师和公司寻求解决的另一技术挑战 48。

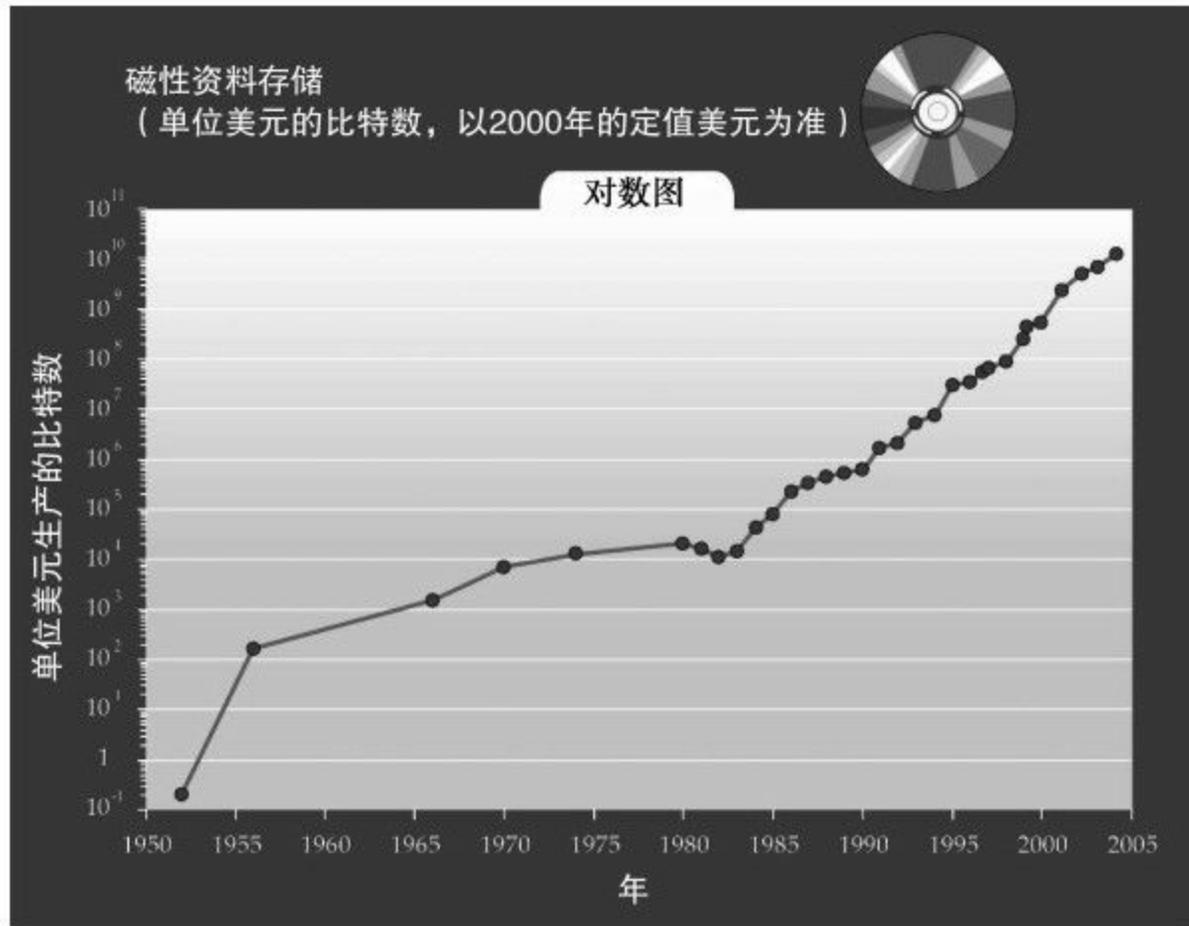


图 2-22

很多年来，通信技术（交流信息的方法，见图2-23）的指数增长甚至比计算的处理或存储方法更快，故而通信技术的暗示作用同样非常重要。这一领域的进展，不仅涉及集成电路中晶体管缩小方面的进步，还涉及纤维光学、光交换、电磁技术等诸多领域的加速进步⁴⁹。

目前，我们正在通过无线通信方式，逐渐摆脱有线通信对我们的城市和日常生活的局限，无线通信正以每10到11个月翻一番的速度增长（见图2-23）。

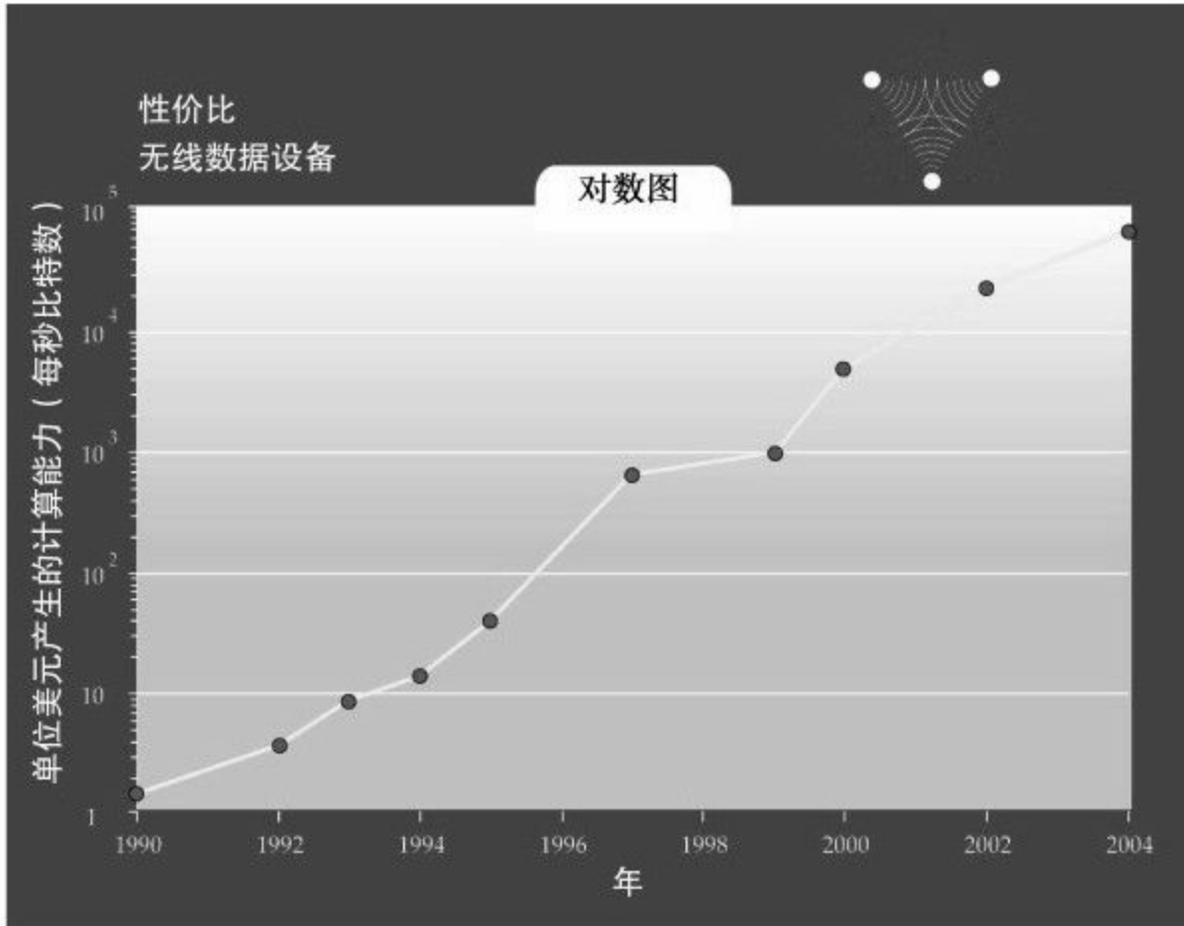


图 2-23

图2-24和图2-25显示了基于主机（网络服务器）数量的互联网的整体增长。这两个图表分别用对数形式和线性形式绘制相同的数据。正如前文讨论过的，当技术进步呈指数增长时，我们却以为这个过程在线性域中经历。从大多数观察家的角度来看，直到20世纪90年代中期，这个领域什么也没有发生，而万维网和电子邮件似乎是突然出现。但是因特网在世界范围内的普及，早在20世纪80年代初，通过对因特网前身APPANET的指数增长趋势的检测，就可以预测到⁵⁰。

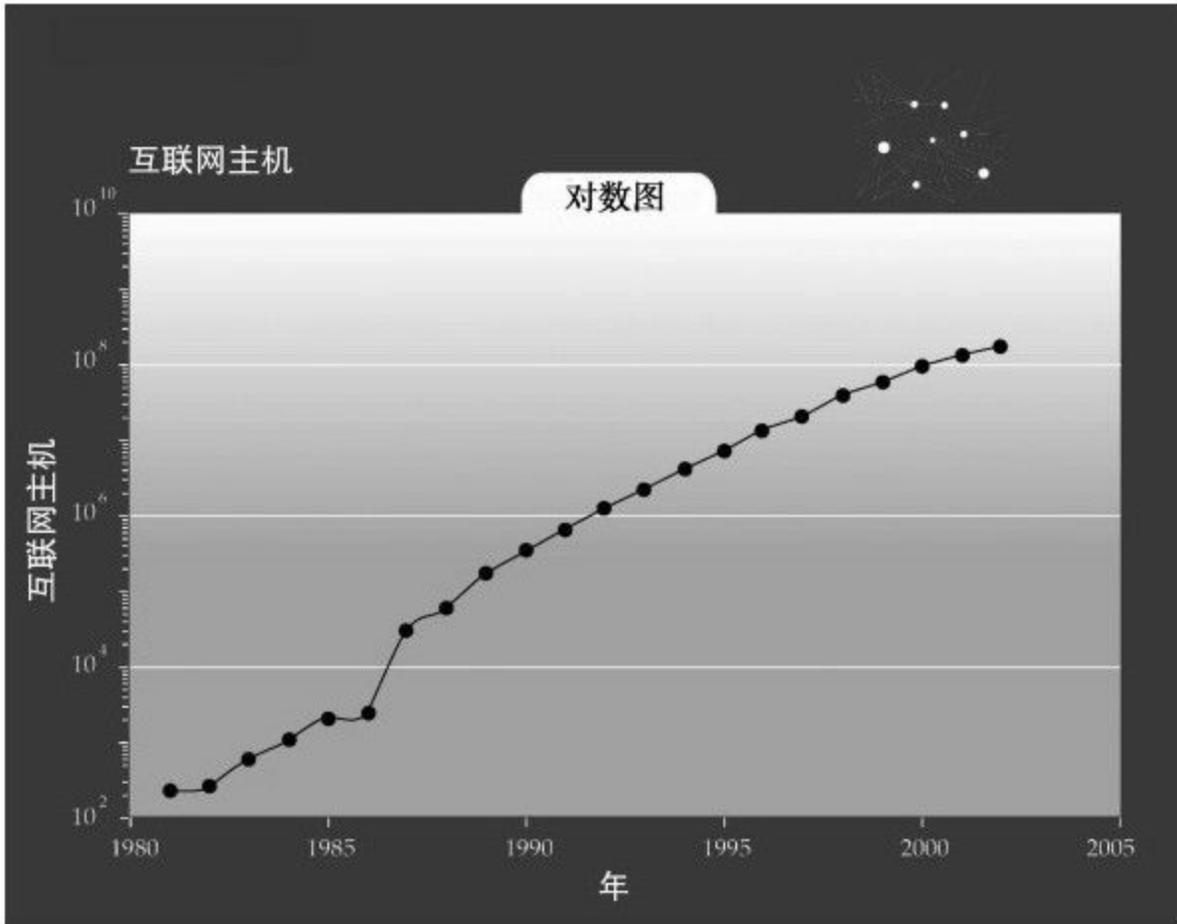


图 2-24

图2-25显示的是相同的数据在线性图中的刻画⁵¹。

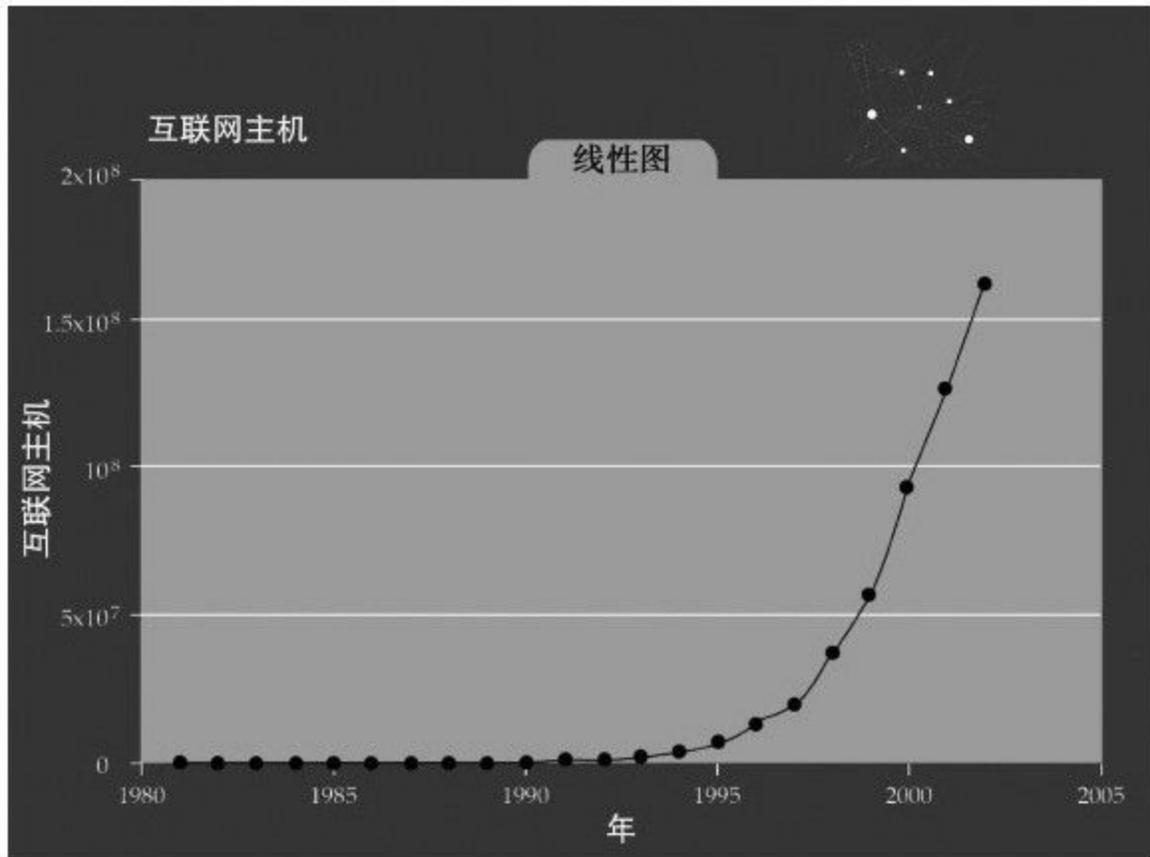


图 2-25

除了服务器外，互联网的实际数据流量每年都翻倍⁵²，如图2-26所示。

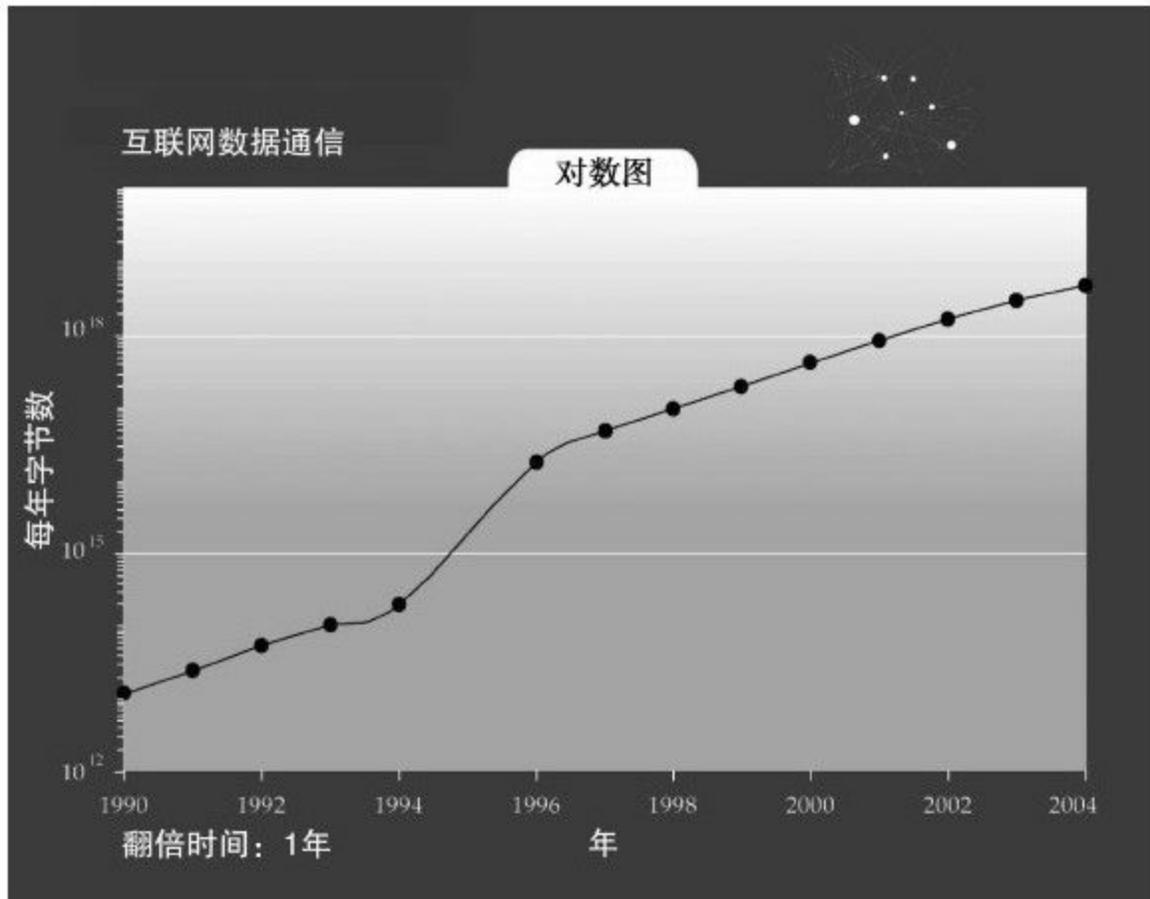


图 2-26

为了适应这种指数增长，互联网骨干网的数据传输速度（图2-27所示，实际用于互联网的最快的骨干网通信信道）本身也呈指数级增长。请注意图2-27中的“互联网骨干网的带宽”，我们可以明显地看到连续的S形曲线：一个新的范式带来了加速增长；随着该范式的潜力用尽，增长趋于平缓；随后通过范式的迁移实现新的加速增长⁵³。

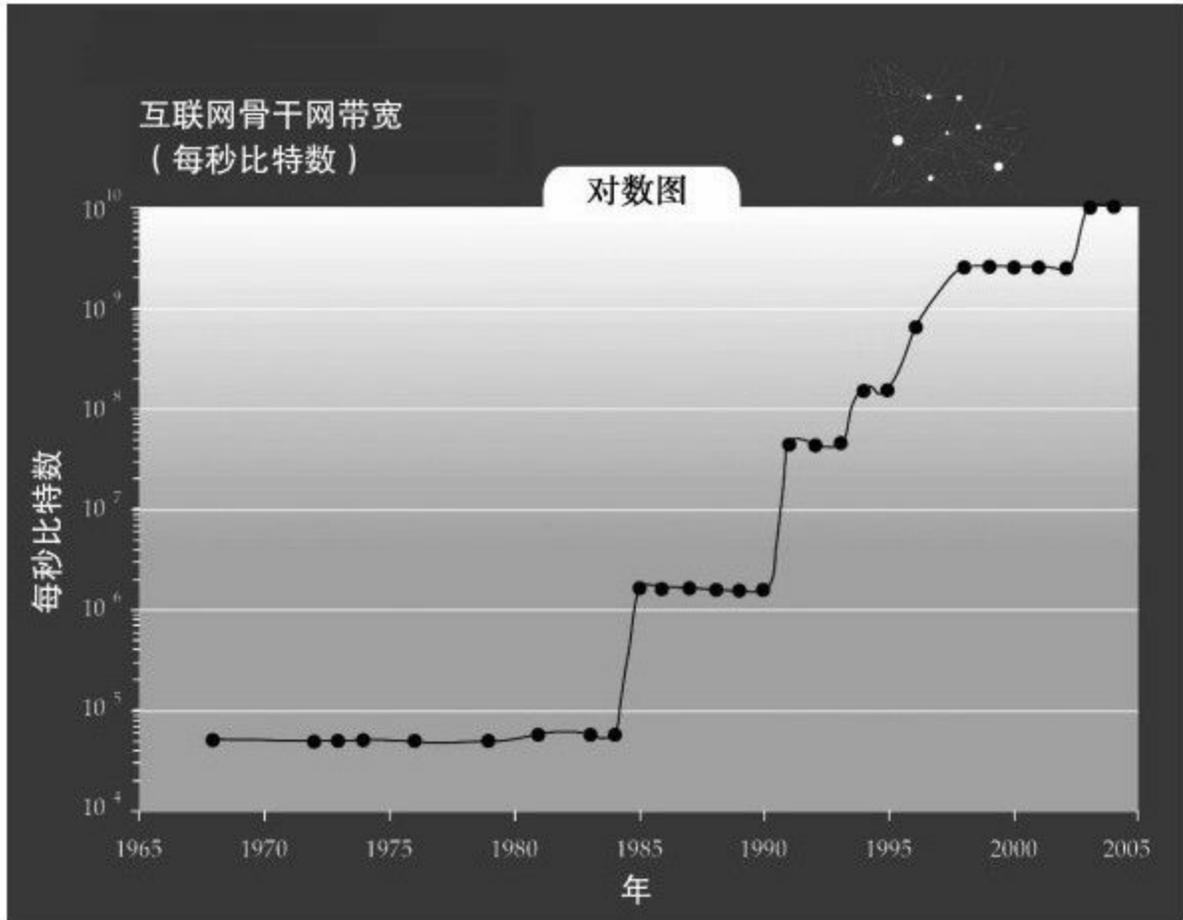


图 2-27

另一个将对21世纪产生深远影响的趋势是，各类技术普遍朝着小型化方向发展。各类技术（包括电子和机械）关键部件的尺寸正在以指数速度缩小。目前，缩小技术以每10年缩小到原来尺寸1/4的速度发展。这种小型化趋势是由摩尔定律驱动的，但它同样反映了所有电子系统尺寸的发展趋势，例如磁存储。我们还可以看到机械设备尺寸的减少，图2-28说明了机械设备尺寸随时间的变化趋势。⁵⁴

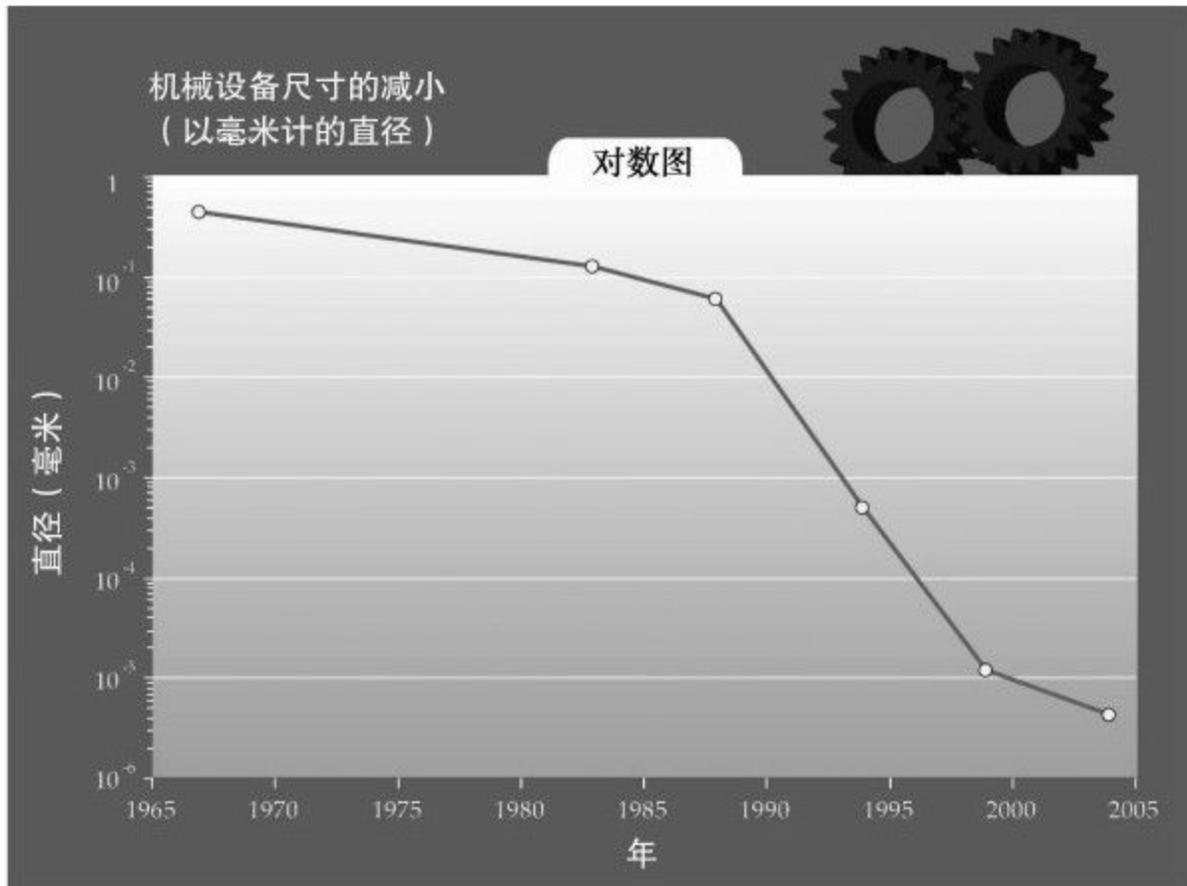


图 2-28

由于纳米技术的快速发展，各种不同技术的关键特征的尺寸正在接近于多纳米范围（少于100纳米，1纳米是1米的10亿分之一）。如图2-29所示⁵⁵，纳米技术科学引用文献在过去的十年增长迅速。

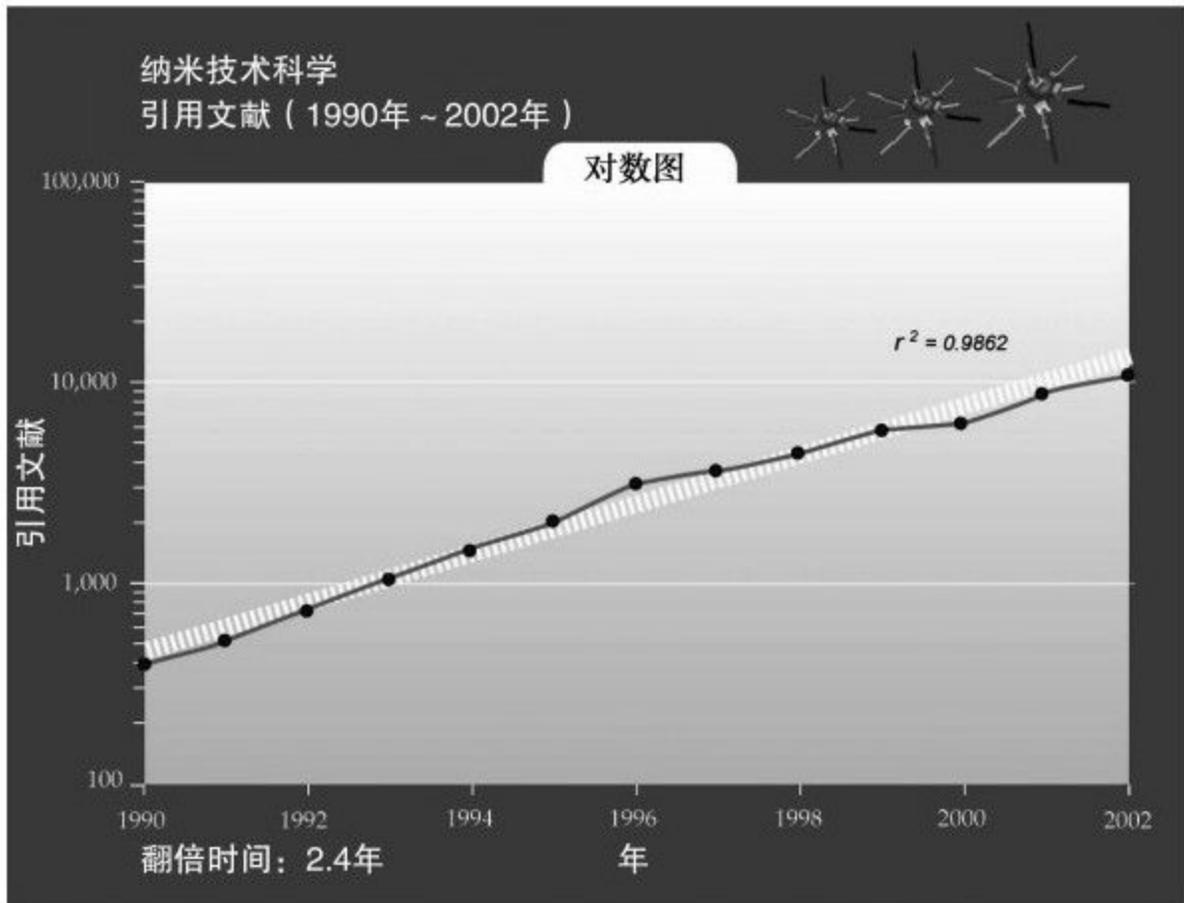


图 2-29

在纳米技术的相关专利方面我们看到了相同的现象（见图2-30）⁵⁶。



图 2-30

正如我们将在第5章探讨的，随着基因技术在能力和性价比方面的指数增长，基因（或生物技术）革命给生物领域带来了信息革命，同样，纳米技术革命将为材料和机械系统提供快速增长的信息控制力。机器人（或强人工智能）革命涉及人类大脑的逆向工程，这意味着用信息的方式，并结合日益强大的计算平台的分析结果来理解人类智能。因而，所有这三种重叠的变革（遗传学、纳米技术和机器人），将主导21世纪上半叶信息革命的方方面面。

信息、秩序和进化：沃尔夫勒姆和弗雷德金对于元胞自动机的深刻见解

正如我在本章前面所描述的，信息技术的每个方面都在以指数级的速度增长。人类固有的对于奇点（正发生于人类历史之中）的期望，对人类的未来是非常重要的。我们可以在人类历史的每个阶段发现信息的存在。人类知识和艺术的每一种表达形式——科学抑或工程设计、文学、音乐、绘画、电影，都能表达为数字信息。

我们的大脑可以通过神经元放电的方式进行数字化的运转。大脑中神经元之间的连接可以通过数字化的方法来进行描述，甚至人脑的构造也是由一段令人称奇的微小的数字遗传密码所规定的⁵⁷。

事实上，所有的生物操作都是通过2比特的DNA碱基对的线性序列完成的，这些碱基对序列控制20种氨基酸的排列以生成蛋白质。分子通过离散的原子排布构成。碳原子在它的四个方向上都能与分子建立连接，故而非常适于创造多种三维结构，因此无论在生物中还是在技术中碳原子都非常重要。在原子内部，电子位于离散的能量层中；其他的原子内微粒（例如质子），则由不同数量的夸克组成。

尽管量子力学的公式在连续域和离散层都适用，但是我们知道连续层可以通过二进制数据⁵⁸进行非常准确的描述。事实上，量子力学（从量子的字面意思去理解）是基于离散值的。

物理学家、数学家史蒂芬·沃尔夫勒姆提供了大量的证据证明，事物复杂度的逐渐增加来源于宇宙，宇宙是一个具有确定性的规则系统（该系统基于确定的规则并能够预测结果）。在他所著的《A New Kind of Science》一书中，沃尔夫勒姆综合地分析了一种称为“元胞自动机”的数学结构是如何描述自然界的方方面面的⁵⁹。（元胞自动机是一种简单的计算机制，例如，它可以根据转化规则，依据临近细胞的颜色来改变每个细胞的颜色。）

在他看来，可以用元胞自动机去解释所有的信息过程，所以沃尔夫勒姆与信息相关的见地的若干关键问题有着密切的关系。沃尔夫勒姆还假设宇宙本身是一个巨大的具有元胞自动机特性的计算机。在他的假设中，显而易见的模拟现象（例如运动与时间）和物理学中的公式，都存在一种数字化的基础，我们可以根据一种简单的元胞自动机的转换，对物理学的理解进行建模。

其他一些人早先已经提出了这种可能性。理查德·费因曼从信息与物质和能量的关系方面思考这个问题。诺伯特·维纳在他1948年的《控制论》一书中曾经预言过一个根本性的变化：宇宙的基石不是能源，而是信息转换⁶⁰。关于“宇宙正在运行于一台数字计算机中”的假设可能是由在1967年康拉德·楚泽⁶¹第一次提出来的。楚泽被公认为可编程计算机领域杰出的专家，从1935年到1941年间，他发明了可编程计算机。

另一个物理信息化理论的狂热支持者是爱德华·弗雷德金，他在20世纪80年代早期提出了一种“物理学新理论”，这一理论基于宇宙最终由软件组成这一思想。根据他的理论，现实不是由物质和能量组成的，而是由根据计算规则不断变化的比特数据构成的。

20世纪80年代，罗伯特·赖特援引弗雷德金的话：

“世上有三大哲学问题：什么是生命？什么是意识、思想和记忆？宇宙是如何运转的？.....信息的观点涵盖了以上三者.....我的意思是说复杂性的最基础层次应该是运行于物理空间的信息处理过程。在复杂性的更高层次，例如生命、DNA（生化机能），都是由数字化信息处理控制的。在另外一个层次上，思考的过程也是基本的信息处理.....我可以在很多不同的领域找到支持该观点的证据.....在我看来，这真是一种势不可挡的趋势。它像是我苦苦寻找的一只动物。我已经发现了它的足迹，发现了它的排泄物，发现了它咀嚼了一半的食物，发现了它的皮毛，还发现了很多其他关于它的踪迹。每个发现都符合一种动物的特征，但它却是一种未被前人发现的动物。人们会问：那个动物在哪里？我会回答，好吧，它就在那里，并且我知道它的各个方面。它不在我的身边，但是我就是知道它在那里.....我所见到的是如此具有说服力，所以它不可能是我想象出来的东西⁶²。”

赖特就弗雷德金的数字化的物理学理论作了一些评论：

“弗雷德金提出了一种计算机程序的有趣特征，即它包括很多元胞自动机；查明这些元胞自动机将带来的后果是没有捷径的。事实上，基于传统数学的分析方法（包括不同的方程）与基于算法的计算方法有着根本的不同。你可以不用知道系统运行的中间过程，仅通过分析就能推算出这个系统未来的状态，但是这种方法对于元胞自动机却是失效的，你必须洞察整个发展轨迹，才能最终发现系统的最终状态：如果它不显露出自己的状态，就无法预测其最终状态。弗雷德金解释道：‘对于一些问题，我们没有办法预测它们的答案’。.....弗雷德金相信宇宙是一个规则化的计算机，它正在被一些人或事物利用去解决一个问题。这听起来像是一个好消息和坏消息的笑话：好消息是我们的生活有了意义；坏消息是这个意义帮助远方的黑客将Pi的估算值精确到小数点后9位⁶³。”

弗雷德金继续说明他的理论：尽管信息的存储和恢复需要消耗能量，但是我们能够任意减少在信息处理方面的能量消耗，并且这个极限没有下

界⁶⁴。这表明信息比物质和能量更适合作为现实世界的基础⁶⁵。在第3章，我将重新审视弗雷德金的这个理论，即信息处理所需的能量的减少将没有下限，因为它属于宇宙智能的终极力量。

沃尔夫勒姆将他的理论建立在了一个单一且统一的观点上。让沃尔夫勒姆感到兴奋的发现，是一个被称为元胞自动机110规则的简单规则及其行为。（还有一些其他有趣的自动机规则，不过110规则已经可以很好地说明这个问题了。）沃尔夫勒姆的大部分分析都是关于最简单的元胞自动机的，尤其是那些一维线性细胞，它们的颜色只有两种（黑色和白色），并且规则是基于与一个细胞直接相邻的两个细胞。每次一个细胞颜色的转变只依赖于它以前的颜色和它左右两边的细胞。因此，它一共有8种可能的信息输入情况（两种颜色的3种不同组合）。而规则控制着这8种不同的输入，最终得出一种颜色输出（黑色或者白色）。因此有28（256）种可能的规则适用于这样一个一维、两色、临近细胞的自动机。因为左右对称，256种规则中的128种与另外128种一一对应。又由于黑白的等价性，我们又能将其中的一半与另一半相对应，如此便只剩下64种规则。沃尔夫勒姆用图2-31说明了二维模式自动机的运转，在二维模式中，沿着y轴方向的每条线都代表下一代应用于线上每个细胞的规则。

大部分规则正在衰退，这意味着它们只能创造出没有意义的重复模式，例如单色细胞，或者棋盘上那种交错重复的色彩样式。沃尔夫勒姆把这些规则称为第一类自动机。另一些规则可以产生任意间隔的稳定条纹，他把这些规则称作第二类自动机。第三类自动机则更具研究意义，因为在这些规则中，可识别的特征（如三角形）以一种本质随机序列出现于作为结果的模式中。

然而，第四类自动机才令沃尔夫勒姆恍然大悟，并促使他投入十年的时间研究这一领域。110规则是第四类自动机的一个典范实例，该规则能够演绎出令人称奇的复杂模式，并且模式间并不重复。我们可以从模式中看到人工制品，例如各种不同角度的线条、三角形的聚合以及其他有趣的结构。但是这些结果模式既不是有规律的，也不是完全随机的；它看起来存在规律却又不能预知（见图2-31）。

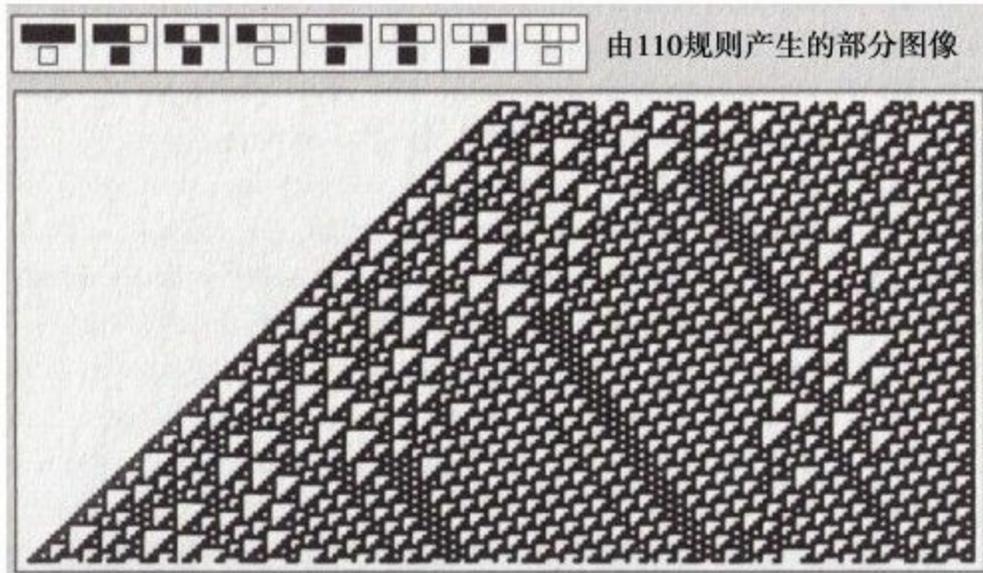


图 2-31

为什么该规则如此的重要而有趣呢？请记住，我们先从一个最简单的起始点——黑色的单细胞来开始。该过程重复地应用了一种非常简单的规则⁶⁶。在这个重复而且确定的过程中，行为是重复且可预测的。这样会产生两种意想不到的结果。结果好像是随机的，但并不是纯随机的；纯随机本身是非常枯燥的。设计产生的过程中有一些可识别的、有意义的特征，所以这种模式具有一定的秩序和明显的智能。沃尔夫勒姆列举了一系列的图形实例，其中很多图形让人百看不厌。

沃尔夫勒姆重复阐述了他的观点：“以前总是认为构成一个复杂现象的基础机制本身必然是复杂的。但是我发现简单的程序同样可以产生巨大的复杂性，所以我原来的观点是错误的。”⁶⁷”

我确实发现110规则的行为如此令人着迷。此外，一个非常重要的事实是完全确定的过程能产生出完全不可预测的结果，因为它解释了，虽然这个世界以确定的规则为基础，但本质上这个世界是不可预知的⁶⁸。然而，我一点都不奇怪为什么如此简单的一个起点经过确定的、简单的过程，能够产生不可预测的复杂结果。这些现象源于分形、混沌、复杂性理论和自组织系统（例如神经网络和马尔科夫模型），自组织系统从简单网络开始，最终将产生明显的智能行为。

在另一个层面，我们用大脑的例子来说明这个问题：初始大脑有压缩基因组中的3千万至1亿字节的信息，但大脑的最终复杂程度是初始状态的

10亿倍⁶⁹。

一个确定的过程会产生明显随机结果，这一事实不足为奇。我们已经有了的随机数产生器（例如程序设计里面的随机函数），它可以利用确定的过程产生随机序列（可通过概率测试）。这些程序可以追溯到计算机软件的最初时期，例如第1版Fortran。尽管如此，沃尔夫勒姆确实为这些观察提出了完备的理论基础。

沃尔夫勒姆继续介绍了简单计算机制如何存在于自然界的不同方面，他还向我们证明了，这些简单的确定性机制能够制造我们看过和经历过的复杂事物。他举了很多的例子，例如动物身上好看的色彩，贝壳的形状和标记以及涡流的模式（空中烟雾的运动轨迹）。他认为计算是必要的、无处不在的。根据沃尔夫勒姆的理论，简单计算机制的重复性的应用是世界复杂性的真正源头。

在我看来，沃尔夫勒姆的观点只是部分正确的。我同意我们的周围都是计算，也同意我们看到的一些模式是由元胞自动机的等价物创造的。但是这里我要问一个关键性的问题：自动机产生的结果究竟有多复杂。

沃尔夫勒姆有效地回避了复杂性程度这个问题。我同意像棋盘这种衰退的模式毫无复杂度的说法。沃尔夫勒姆也承认单纯的随机现象并不代表复杂度，因为在完全不能预测的情况下，纯随机将可以被预测到。如果第四类自动机有意义的特征是既不重复也不是纯随机的，这一论点为真，那么我也同意这类自动机产生的结果会比其他类自动机产生的结果复杂。

然而，第四类自动机产生的复杂度也有一个明确的极限。在沃尔夫勒姆的书里列举的许多图片都是看起来十分相似的，尽管它们并不重复，但它们的不同之处都很细微。而且，它们既没有继续衍生出新的复杂度，也没有发展出新的特征类型。元胞自动机即便迭代无数次，其产生的图形的复杂度仍然保持与原来相同的水平。它们无法进化出昆虫、人类、肖邦序曲，也无法进化出比条纹或图中混杂在一起的三角形更加复杂的东西。

复杂度是一个连续统一体。这里我把“秩序”定义为“适合某种意义的信息”⁷⁰。一个完全可预测的过程的秩序为0。单纯高层次的信息并不代表一定含有高层次的秩序。一本电话簿虽然有很多信息，但是这些信息秩序的层次很低。一个随机序列本质上是纯粹的信息，因为随机序列不可

预测，但是它却没有秩序可言。第四类自动机的产物确实具有一定水平的秩序，与其他持久的模式相同，有其适用的场合。但是代表人类模式的秩序和复杂度都远远高于第四类自动机的产物。

人类需要完成高层次的需求：他们生存在一个充满挑战的生态中。人类世界中存在着极度复杂而又非常精妙的等级制度。沃尔夫勒姆认为任何混合了可认知的特征和不可预测元素的模式实际上都是等价的。但是他没有说明第四类自动机是如何增加它的复杂度的，更不用说像人一样复杂的模式。

这里缺失了重要的一环，即解释从元胞自动机的常规模式如何发展到具有较高层次智能的复杂的持续性结构。例如，第四类自动机不能解决有意义的问题，并且不论迭代多少次也无法接近问题的答案。沃尔夫勒姆把110规则当做是“宇宙计算机”⁷¹来使用。然而，即使是宇宙计算机本身也必须利用软件来运行智能的程序。运行在宇宙计算机上的软件的复杂程度也是一个问题。

可能有人会指出第四类自动机的模式是由最简单的自动机（一维、两种颜色、两个相邻的规则）发展而来的。但如果我们增加维度会发生什么呢，例如增加多重颜色，或者通过综合离散的元胞自动机产生连续的功能？沃尔夫勒姆极其认真地解释了这些问题：复杂自动机产生的结果与简单自动机产生的结果本质上是一致的；我们最终通过非常有限的模式获得一定程度的意义。沃尔夫勒姆认为我们不需要用更复杂的规则去获得复杂的结果。但是我的观点与之相反，我们不能通过简单的规则或者进一步迭代的方法来增加结果的复杂度。所以元胞自动机只能有限地推动我们向前。

我们能通过简单的规则解决人工智能难题吗？

我们如何通过这些有趣的但受限的模式去获得那些复杂的事物（例如昆虫、肖邦的乐曲）呢？我们考虑的概念是与沃尔夫勒姆提出的元胞自动机相冲突的——这就是进化，或者说一种进化算法，我们开始获得更令人激动、更智能的结果。沃尔夫勒姆称第四类自动机和进化算法“在计算上是等价”的，但是我认为这一命题只在硬件层次上是成立的。在软件层次上产生的模式是非常不一样的，而且复杂度和有用性的秩序也是不同的。

一个进化算法初始于随机的生成解决某种问题的方法，这个算法通过数

字化的遗传密码进行解码。然后，在模拟的进化中我们令不同的进化算法之间相互竞争，较好的解决方案将会保留下来，并通过模拟有性繁殖的方式进行复制。在有性繁殖中，被创建的后代解决方案聚合了父母双方的遗传密码（编码解决方案）。我们也会引入一定比例的基因突变，这一过程中包含各种各样的高层次参数，如突变率、繁殖率等。这些参数都被形象地称作“上帝的参数”，设计进化算法的工程师的工作就是将参数设置为最优值。这一过程将在模拟的进化中运行数千代，该过程最后得到的解决方案的秩序，将明显地高于过程初始的解决方案。

进化（有时称作遗传）算法的结果将为复杂问题提供优雅、美丽并且智能的解决方法。我们已经开始利用进化算法进行艺术创作、设计人工生命模式，还用来完成一系列的实际任务，如设计喷气式飞机的引擎。基因算法属于狭义的人工智能方法——创造能够执行具体任务的系统也需要应用人类智能。

但是有些问题还是没有解决。尽管遗传算法对于解决某些特定问题是有效的工具，但是它们还是无法达到强人工智能的水平——强人工智能具有人类智能的特征：广博、深邃、精妙，在模式识别和指令语言方面具有超凡的能力。难道是我们运行遗传算法的时间长度不够吗？毕竟人类进化经历了数10亿年的时间。或许我们不能仅仅利用几天或者几周的时间来用计算机模拟这个进化过程。但事实上，即使用很久的时间去模拟这个过程也是行不通的，因为应用传统的遗传算法只能接近其性能的渐近线。

第三个层次（该层次能够以超出元胞自动机的处理能力生产明显的随机性，也能够以超出基因算法的能力生产聚焦的智能解决方案）在多个层面执行进化。传统的遗传算法只允许算法限制于解决一类很窄的问题上，并且遗传的方式也是单一的。遗传密码本身需要进化；遗传规则也需要进化。例如，自然不会停留在一个简单的染色体上。在自然进化的过程中，有很多层次是间接包含的关系，并且我们需要为进化准备一个复杂的环境，只有在这样的环境中进化才会发生。

构建强人工智能使我们有机会缩短进化过程所需的时间，例如，逆向工程人类大脑（正在进行中的研究项目）已经使进化过程获益。我们将在这些解决方案中应用进化算法，这与大脑解决问题的方式一样。例如，婴儿在子宫里的时候，其供养线路最初随机分布于染色体组的一些区域。最近的研究表明，这些基因区域与学习适应变化的能力相关，然而在婴儿降生后，这些功能的相关结构很少发生变化⁷²。

沃尔夫勒姆证明了一个有效的观点，即一些（事实上是大部分）计算的过程是不能被预测的。换句话说，我们在没有经历完整个过程时不能预测未来的状态，我同意他这个观点，只有能以更快的速度模拟这个过程，我们才能够提前知道答案。由于假定宇宙以最快的速度运转，那么将不存在缩短这个过程的方法。但是我们已经受益于数十亿年的进化了，进化极大地增加了自然界复杂度的秩序。得益于此，现在我们可以利用进化后的工具去逆向模拟生物进化的结果（最重要的是模拟人的大脑）。

的确，自然界的一些现象，仅仅是由于元胞自动机简单的计算机制，才具有某种程度的复杂性。那个在“帐篷—橄榄”状贝壳上有趣的三角形模式（沃尔夫勒姆经常提起的例子）或者复杂多样的雪花形状都是很好的例子。但是我不认为这是一个新的观察结果，因为我们经常认为雪花的设计源自一种简单的分子计算机的构建过程。虽然沃尔夫勒姆给我们提供了很多具有说服力的理论，去表达这些过程和它们的结果模式，但是生物的内涵要远多于第四类自动机。

沃尔夫勒姆另一个重要的发现是，他认为计算是一个简单的而且无处不在的现象。当然，我们都知道在这一个多世纪里，计算本质上是非常简单的：我们能够以最简单的信息处理为基础，构建任意的复杂程度。

例如，查尔斯·巴贝奇在19世纪后期制作的机械计算机（无法运行），它只提供了少量的运行代码，但其基本原理与现代计算机在很多方面（存储容量和速度）是相同的。巴贝奇发明的复杂度源于设计的细节，不过事实证明，仅仅利用他所掌握的技术是无法解决这个问题的。

图灵机是阿兰·图灵在1950年提出的关于通用计算机的理论概念，它只提供7种非常基本的命令，但可以组织执行任何可能的计算⁷³。一个“通用图灵机”可以模拟任何在磁带上描述过的可能图灵机，这是信息通用性和简洁性的进一步证明⁷⁴。在《智能机器时代》一书中，我展示了任何一个计算机怎样由一个适当数量的简单的装置构建，即“或非门”⁷⁵。这虽然不是通用图灵计算机的准确描述，但却表明了，只需要提供一个适当的软件（这些软件包含了或非门的连接描述信息），任何计算都能够运行于一系列非常简单的装置（比110规则简单）上⁷⁶。

尽管我们需要额外的概念去描述一个为解决问题提供智能方法的进化的过程，但是沃尔夫勒姆论证了计算的普适性和简单性，为我们理解世界

上信息的根本重要性做出了重要贡献。

莫利2004：你已经得到正在加速进化的机器了，那人类怎样了呢？

雷：你指的是生物意义上的人吧？

莫利2004：是的。

查尔斯·达尔文：据推测生物的进化是一个持续不断的过程，不是吗？

雷：好吧，生物进化在一段时间里，进化的非常缓慢，很难去准确地测量。我指的是间接的进化。结果是较老的范式（如生物进化）正在以原来的速度继续，其发展远比不上新的范式。动物的进化和人的进化一样复杂，也是经历了数万年才产生了一些值得注意、却很小的改变。人类的整个文明和技术的进化史也经历了这段时间。但是我们现在已经准备就绪，在几十年内超越脆弱而缓慢的生物进化。当前发展的速度是生物进化速度的1000至100万倍。

内德·路德：如果不是所有人都赞同这一点将会怎样？

雷：我不期望他们都立刻同意。承认这个事实是需要一个过程的。技术或者进化都存在一个前沿和后沿。在现在这个时代，仍然有人使用犁去耕地，但是这也不能阻碍手机、电信、互联网和生物技术的广泛使用。尽管如此，后沿终究会赶上来的。例如，亚洲的一些国家就没有经历工业时代，直接从原来的农业经济跨越到了信息经济⁷⁷。

内德：可能你说的是对的，但是数字鸿沟会越来越大。

雷：我知道人们会这样说，但是这怎么可能会变为现实呢？人类数量现在增长得非常缓慢。但是无论你采用什么方式统计，被数字技术联系起来的人的数量都在快速增长。世界上越来越多的人口开始使用电话通信技术和无线网络技术，所以数字鸿沟是正在消亡，而不是正在增长。

莫利2004：我依然觉得有或没有这一问题没有得到充分的重视，还有很多地方我们应该去做。

雷：确实是这样，但是最重要的，非人力控制的加速回归定律正沿着一个正确的方向前进。试考虑一个特殊行业里的技术：从担负不起和进展

不顺利开始；后来变得不那么昂贵，也取得了一定的进展；下一步是产品变得廉价并且进展得非常顺利；最终，技术几乎是免费的，而且产生了巨大的效益。

不久以前，当你在电影中看到有人在使用移动电话的时候，那个人一定是一个位高权重的家伙，因为只有这样的人才能支付得起移动电话的高昂费用。还有一个辛酸的例子，那就是治疗AIDS的药物。以前，刚开始研制的时候，研究情况简直糟透了，并且每年在每个病人身上花费的钱大于一万美金。不过现在情况有所好转了，并且在贫穷的国家价格每年也都会下降好几百美元⁷⁸。遗憾的是，关于艾滋病的治疗药物的研究还不能说是非常成功，也不能说是非常廉价。虽然世界已经开始对艾滋病采取了一些行动，但是艾滋病已经造成了很大的伤害，特别是在非洲地区。前沿和后沿之间的时间正在缩小。我估计当前这个前沿与后沿间的时间在10年左右。在未来的10年，这个时间将缩小为5年。

奇点是一项经济命令

理智的人总在适应这个世界，不理智的人总是试图让世界适应自己，然而世界的进步总是取决于那些不理智的人。

——乔治·伯纳德·肖《革命者格言》人与超人，1903年

世人莫不怀着一种与生俱来的欲望，要把支出超过收入，此乃一切进步的动力。

——英国作家萨缪尔·巴特勒，《Notebooks》，1912年

如果让我今天启程去到西海岸完成一个新事业，那么我将会选择生物技术和纳米技术。

——杰夫·贝索斯，亚马逊的CEO和创立者

获得80万亿美元——在限定时间内有效

仅仅阅读并理解本节的内容就可以拿到80万亿美元，有关完整的细节见下文。（的确，作家都会做些事情引起您的关注，但关于本声明我是认真的，但是我要做进一步解释，即你要仔细地阅读本段的第一句话。）

加速回归定律基本上是一种经济理论。现代经济理论和政策都是以过时的模式为基础的，这个模型强调能源成本、商品价格，并把在厂房和设备方面的投资作为关键驱动因素；而在很大程度上忽略计算容量、内存、带宽、技术的规模、知识产权、知识和其他日益重要的（和日益增加）推动经济增长的成分。

一个竞争市场的经济需要是推动科技向前发展和为加速回归定律提供燃料的首要动力。反过来，加速回报定律正在转变经济关系。经济需求与生物进化中的幸存者都是等价的。我们一直在向智能化、小型化的机器推进，这是无数的小进步带来的结果，每次小进步都有自己独特地调整经济的方式。那些能更准确地执行任务的机器的价值就增加了，这就是它们被制造的原因。有成千上万的项目，正以各种不同的方式，在各个方面推进加速回归定律的发展。

且不论短期的商业周期，“高科技”对于商界的的支持（尤其是软件对商界的的支持）增长巨大。1974年，我建立了光学字符识别（OCR）和语音合成公司（库兹威尔电脑产品），那时高科技风险交易在美国的交易总额不到30亿美元（1974年的美元价值）。即便在最近的高科技衰退期间（2000年~2003年），这个数字也几乎是那时的100倍。⁷⁹ 只有废除资本主义和经济竞争的所有环节才能阻止这一进展。

需重点指出的是，我们正在以指数级的速度向新的知识型经济迈进，而不是渐进的⁸⁰。当所谓的新经济并没有在一夜之间改变业务模型的时候，许多观察家很快就摒弃了本身就有缺陷的想法。知识统领经济还将需要几十年的时间，但那必然是一场深刻地变革。

我们在互联网和电信的繁荣与萧条交替循环中看到了相同的现象。以互联网和分布式电子通信为代表的根本性变革，促进了经济的繁荣。但是，当这些变革发生在现实的时间范围中时，超过两万亿美元的市场资本化为乌有。正如我下面所指出的，技术的实际进步与表面的繁荣或者萧条无关。

事实上，那些在经济学的课程上讲授的、用于美国联邦储备使用委员会设立的货币政策和政府机构制定经济政策、用于各种各样的经济预测的经济模型，从长期趋势来看都存在根本性的缺陷。这是因为它们是基于历史的“直观的线性”观点（假设改革的步伐将继续以目前的速率），而不是基于指数的历史观点。这些线性模型似乎在一段时间内有效的原因，与大多数人在开始的时候采用线性视角看待问题的原因相同：如果审视和经历一段简短的时期，指数增长趋势看起来与线性增长趋势相似，尤其是在指数增长早期。但是一旦达到增长曲线的转折点，指数增长将爆发，而线性模型将不起作用。

在我编写本书时，国家正在讨论改变社会保障的计划，这项计划将于2042年失效，那也是我预测的奇点到来的时间（见第3章）。这种经济政策审查通常需要很长时间。这些基于线性模型的关于寿命提高和经济增长的预测是非常错误的：一方面，寿命的延长会远远超过政府的预期；另一方面，那时人们在65岁时不会要求退休，因为他们有30岁的身体和大脑。最重要的是，GNR技术将使得经济的增长速度远超过现在预测的每年1.7%的增长速度。（以过去15年的经验来看，这一速度至少被低估了一半。）

以生产力增长为基础的指数增长正好处于爆发阶段的开端。美国通过技

术提高生产力，其实际的国内生产总值已经以指数的速度在增长，如图2-32所示。⁸¹

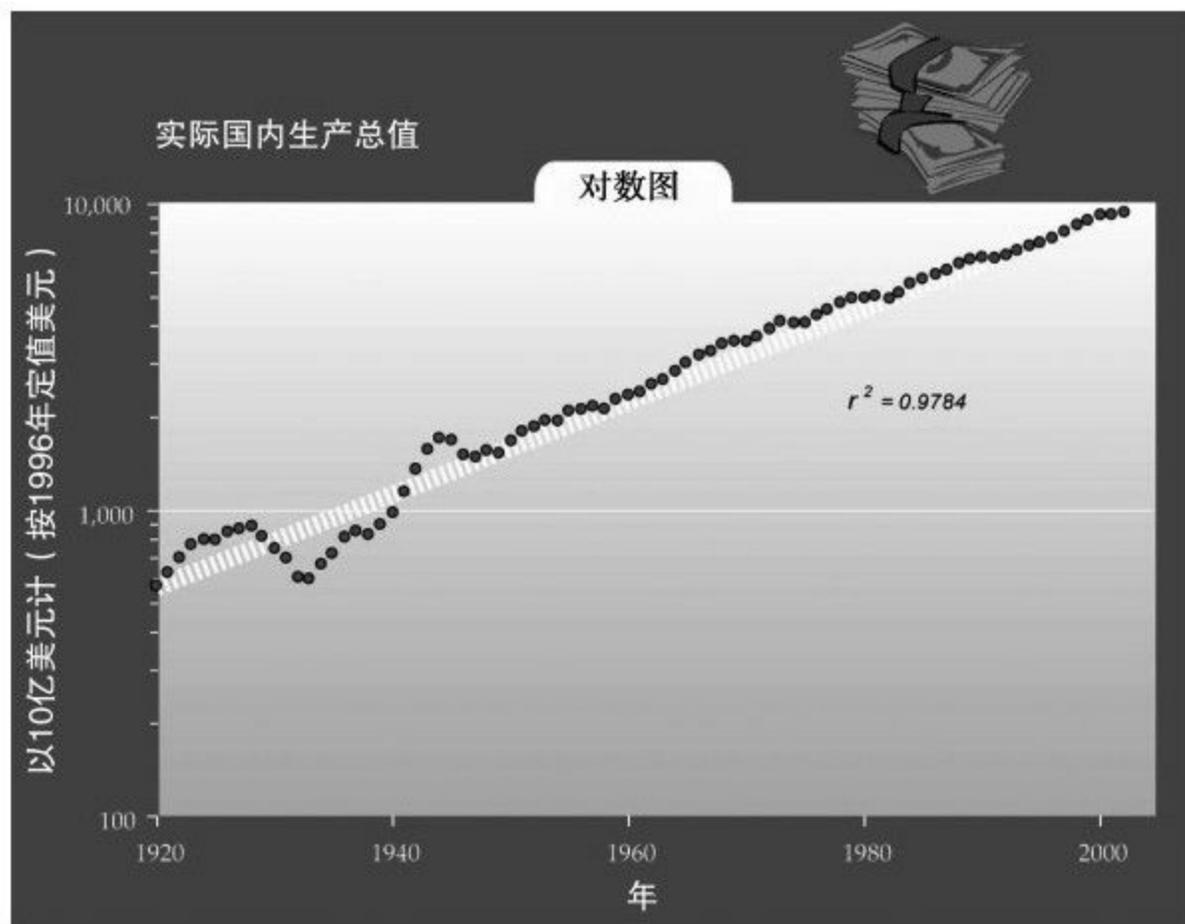


图 2-32

一些评论家把GDP增长归因为人口的增长，但通过人均的方法我们也能看到相同的趋势（见图2-33）。⁸²

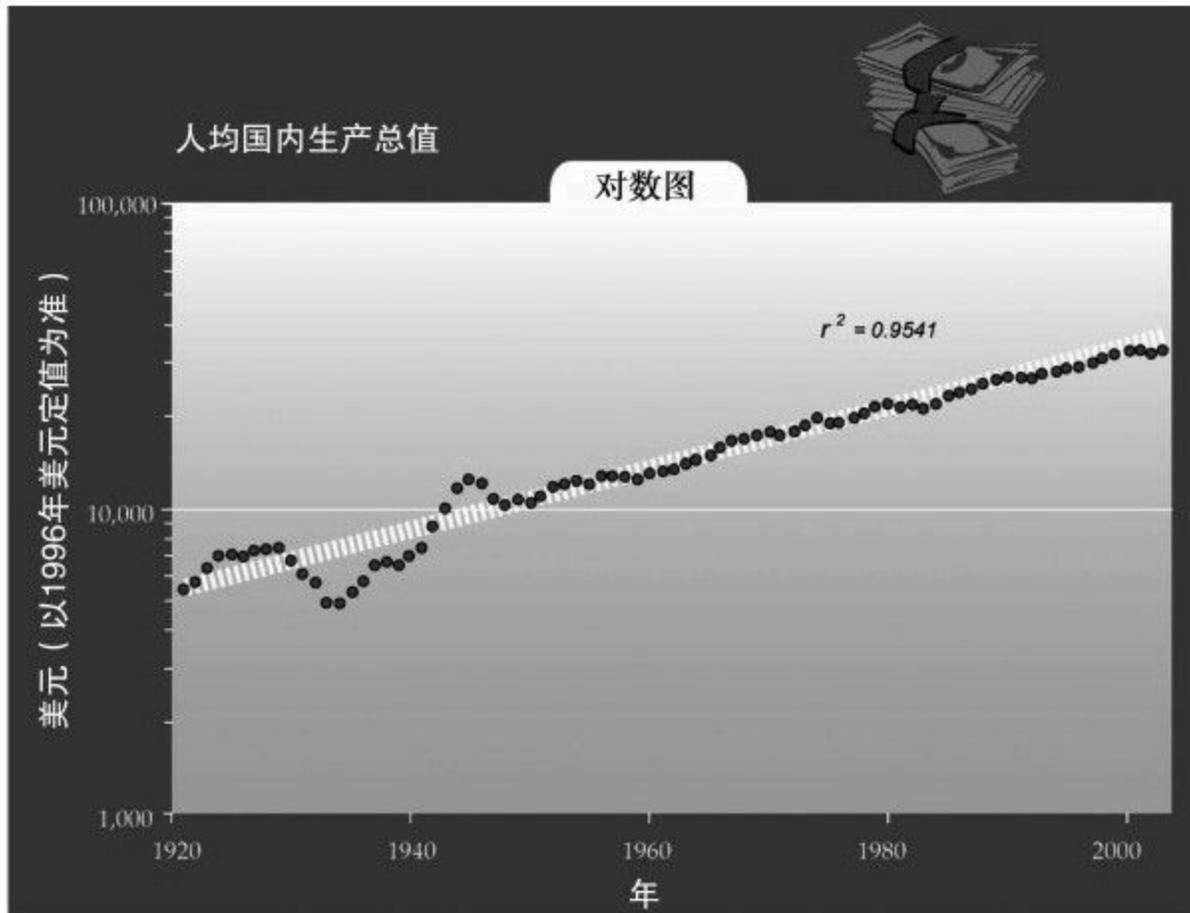


图 2-33

请注意，经济潜在的指数增长力量要远远强于经济周期性衰退。最重要的是，经济衰退（包括萧条）只是表示暂时地偏离基本曲线。甚至“大萧条”也只是根本模式增长大背景下的一个小插曲。在所有情况下，经济都将准确地在那里从未发生过衰退（或萧条）的地方终结。

世界经济在继续加快发展。2004年底世界银行公布的一份报告表明，2004年是历史上最繁荣的一年，全球经济以4%的速度增长⁸³。此外，发展中国家的增长速度最高：超过6%。即使忽略中国与印度，发展中国家的增长率也超过5%。东亚和太平洋地区，极端贫困人口从1990年的4.70亿下降到2001年的2.7亿，世界银行预计，2015前后，这一数字将低于2000万。其他地区的经济增长虽然不像发展中国家那么迅猛，但也以极快的速度增长。

生产率（每个工作者的经济产出）同样以指数级速度增长。这些统计数

字是非常保守的，因为他们没有充分地反映产品在质量和功能方面的明显改进。“汽车还是汽车”是不符合事实的，事实上在汽车的安全性、可靠性和功能等方面，都有了巨大提升。当然，今天1000美元所造就的计算能力比10年前1000美元造就的计算能力要强大得多（超过1000倍）。还有许多其他的例子，药品的疗效越来越好，因为现在药品可以准确地修正疾病和老化的新陈代谢途径，同时最大限度地降低副作用（请注意，现在市场上大部分药品仍然反映的是旧的范式，第5章将论证这部分内容）。我们花5分钟在网上订购并收到送货上门的产品，其价值要高于我们自己亲自去购买的商品。量身定做的衣服的价值也要高于你在产品货架上找到的衣物。这种类型的改进发生在绝大多数产品中，但生产力的统计却无法反映这些改进。

使用生产力测量的统计方法，我们可以得出这样的结论：我们花1美元只会得到1美元的产品和服务。尽管事实上我们得到的更多（计算机是这个现象中很极端的例子，但它也是很普遍存在的）。据芝加哥大学皮特·科莱诺教授和美国罗切斯特大学的马克·比尔教授估测，随着技术的发展，现有货物的不变价值在过去的20年间以每年1.5%的速度增长⁸⁴。但这仍然不能解释不断涌现的全新产品和产品类别（如手机、传呼机、掌上电脑、下载的歌曲和软件程序）。它也无法说明互联网迅猛增长的价值。很多免费资源包括在线百科全书、搜索引擎，都是获取人类知识的有效方法。我们将如何评估免费资源在可用性方面的价值呢？

美国劳动统计局（负责统计通货膨胀的机构）采用一种模型预测，产品质量以每年0.5%的速度增长⁸⁵。如果我们采用利莱诺和比尔的保守预测方法，它所反映都是对质量改进的低估，以及对通货膨胀的高估（至少高估了1个百分点），而且该模型无法解释新出现的产品类型。

尽管生产率统计方法存在很多缺陷，但是生产力现在实际上已经达到了指数增长曲线中陡峭的那部分。在1994年之前，劳动生产率以每年1.6%的速度增长，然后提高到每年2.4%，而现在的发展速度更加惊人。从1995年至1999年，制造业每小时产出量以每年4.4%的速度增长，耐用消费品的产量以每年6%的速度增长。而在2004年第一季度，经季节性调整后，商业方面产量的年增长速度为4.6%，而耐用消费品的年增长速度是5.9%⁸⁶。

审视上半个世纪单位小时劳动所创造价值的变化趋势，我们可以看到平稳的指数增长趋势（参见图2-34）。同样，这种趋势并没有说明信息技

术（整体的性价比以每年翻一番的速度增长）⁸⁷ 中每美元的价值已经被大大提升了。

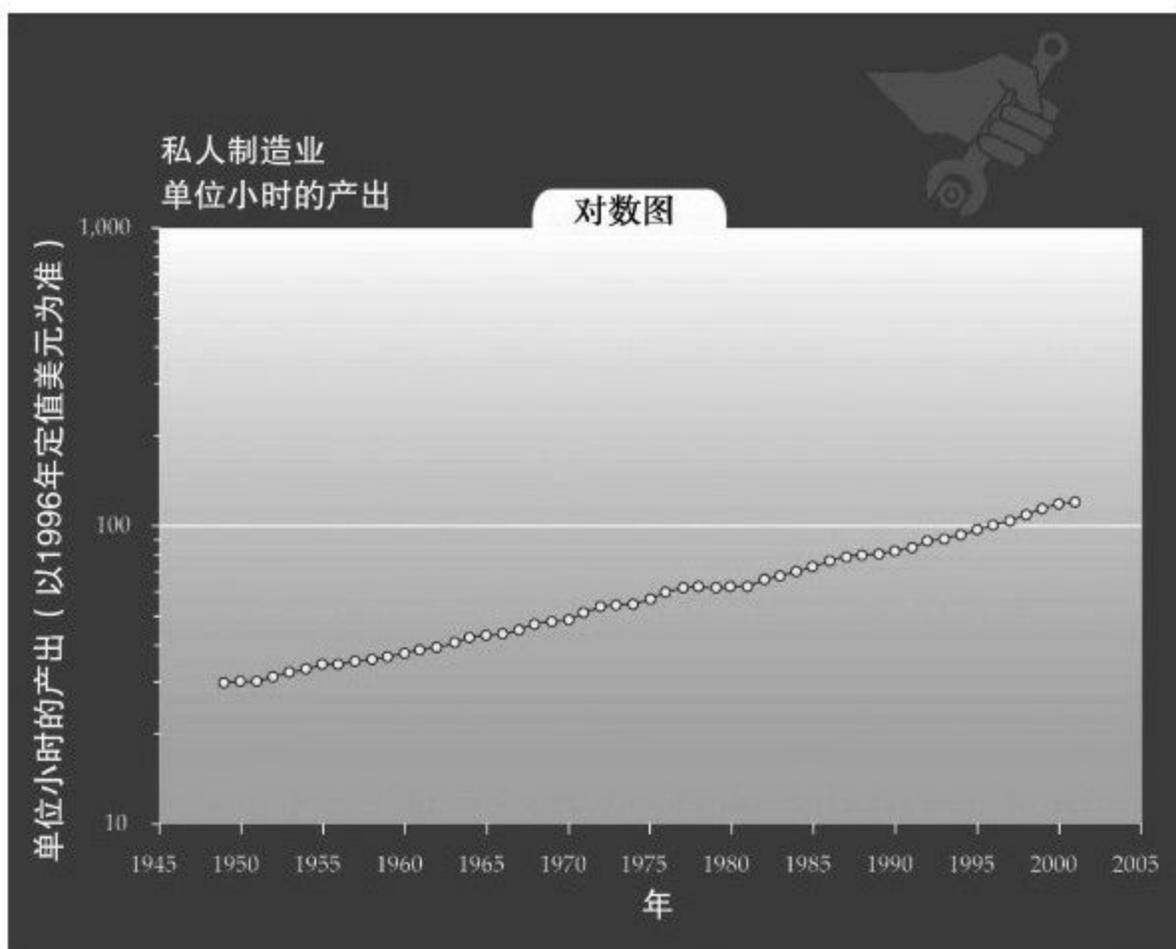


图 2-34

通货紧缩——坏事吗

“直到1846年，我们国家仍然没有一件衣服是由缝制机器制造的；在那一年，第一台享有专利的缝纫机诞生。如今，成千上万的人穿着由机器缝制的衣服，每件都足以与克什米尔少女的衣服相媲美。”

——《Scientific American》，1853年

在我写这本书时，很多经济学家除考虑政治因素外，最担心的事情就要数通货紧缩了。从表面看来，将钱进一步投资似乎是一件好事。经济学家担心的是，如果消费者花更少的钱就可以买到他所需要的东西，经济

就会紧缩（以美元来衡量）了。不过，这忽视了消费者永远无法满足的需求和欲望。半导体产业的收入每年“遭受”着40%~50%的通货紧缩，然而，事实上，在过去的半个世纪，它却以每年17%的速度增长⁸⁸。既然事实上经济正在快速扩张，这种通货紧缩的理论就不应该引起大家的担心。

20世纪90年代和21世纪初，我们已经见证了历史上最强大的通货紧缩，这解释了为什么我们现在没有注意到通货膨胀的速度。是的，历史性的低失业率、高资产价值、经济增长，还有通货膨胀等其他因素，这些都是事实。然而这些因素完全可以被信息技术（计算、存储、通信、生物技术、小型化技术）性价比的指数增长和科技进步的整体速度抵消。这些技术深刻地影响着所有行业，我们正在经历着大规模的“脱媒现象”，分布渠道构建于互联网和其他通信技术之上，运行和管理的效率也随之大幅提高。

随着信息产业对经济产生的影响越来越大，我们看到IT产业惊人的通货紧缩率产生的影响日益深远。20世纪30年代的大萧条主要归咎于消费者信心的崩溃和资金供应的瓦解；今天的通货膨胀是完全不同的现象，它是由生产力的迅速发展和信息技术的日益普及导致的。

本章所有的技术趋势图都显示了大规模的通货紧缩。受到这种效应影响的事例有很多，BP Amoco公司2000年寻找石油的每桶成本不到1美元，比1991年的花费少将近10美元。银行应用计算机处理一笔交易的费用只有1美分，而先前使用一名出纳员的成本则高于1美元。

需要着重指出的是，纳米技术的主要内涵是，它给硬件（或者说实际的产品）赋予了软件的经济价值。而软件价格通货紧缩的速度要快于硬件（见表2-3）。

表 2-3 软件性价比的指数增长⁸⁹

例如：自动语音识别软件

	1985	1995	2000
价格	5 000 美元	500 美元	50 美元
词汇多少 (字数)	1 000	10 000	100 000
连续语音	否	否	是
用户培训时间 (分钟)	180	60	5
精度	差	一般	好

在这个商业世界中，我们可以非常强烈地感受到分布式智能通信的影响。20世纪90年代繁荣一时的电子化公司创造了巨大的价值，同时也造成了当时华尔街的动荡，这反映出一种有价值的观念：已经持续了几十年的商业模式，已经处于激烈变革的早期阶段。新模型以用户的个人通信为基础，它将改变每一种产业，并最终导致中间层，中间层是指将用户与产品和服务的最终来源相分离的层面巨大的“脱媒现象”。然而，所有的革命都有节奏，这一领域的投资与股市价值的扩大，已经超出了经济S形曲线增长的早期阶段。

信息技术的繁荣衰退周期严格来说是一种资本市场（股票价值）的现象。实际的B2B与B2C的统计数据表明，它们的发展趋势既不算繁荣也不是衰退（参见图2-35）。事实上B2C业务收入呈平稳增长的趋势：从1997年的18亿美元增长到2002年的700亿美元。B2B业务也类似：从1999年的560亿美元平稳增长到2002年的4820亿美元⁹⁰，而到2004年这个数字已经接近1万亿美元。正如前面讨论的，我们没有看到在基础性技术的性价比方面，有关商业循环的任何证据。

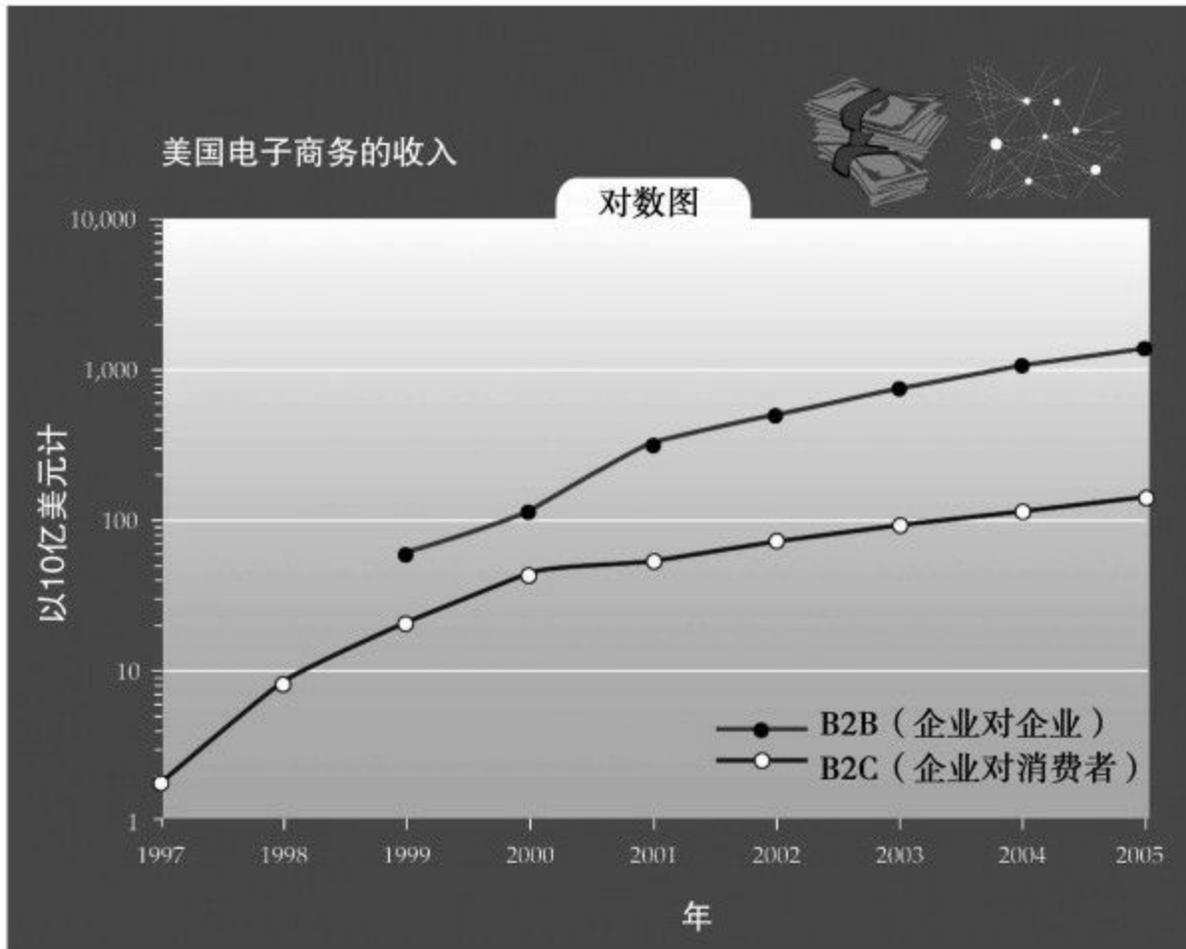


图 2-35

拓展接近知识的机会也可以改变力量的关系。病人更愿意找那些熟悉他们身体状况和医疗条件的医生看病。消费者可以通过使用自动软件代理工具，迅速地找到功能和价格都最合适的产品（包括从烤箱、汽车、房子到银行理财、购买保险等一切产品）。网络服务（如eBay）以一种前所未有的方式，迅速建立了买者与卖者之间的联系。

消费者的愿望和需求（有时甚至连他们自己都不是很清楚）在商业关系中，正迅速地成为一种驱动力。例如，一个与服装卖家已经建立起良好关系的老顾客，已经不能满足于恰巧碰到悬挂在店里的适合自己的衣服。更进一步地，他们会将多种样式的衣服添加于他们身体的三维图像（基于详细的身体扫描技术）上，进而选择适合他们的材质与款式，最后根据选择量身定制衣服。

由于电子技术的强大支持，目前电子商务的缺点（例如，与产品直接交互的能力限制，以及用户难于学会使用菜单和表格进行交互）将逐步减少。在这个十年的后期，计算机就会作为截然不同的物理对象消失，显示器将为构建于我们的视野中的电子纺织品提供全浸式的可视化虚拟现实。因此，“去一个网站”将意味着进入一个虚拟现实环境（至少在视觉和听觉上是这样），在这个虚拟环境中，我们可以与产品和人员进行直接的交互，这种交互融合了真实与虚拟。虽然模拟的人达不到人类的水准（至少2009年无法达到），但它们作为销售代理、预约文员、研究助理是可以达到满意效果的。触觉接口使我们能够触摸到模拟的产品和人。很难说，即将到来的有着丰富交互界面的虚拟世界或许可能完全胜过现在的实实在在的世界。

虚拟现实的发展将对房地产行业产生重大影响。渐渐地，就不需要将员工聚集在办公室工作了。就我自己的公司而言，我们已经可以有效地组织地理上分离的团队，但在10年前，做到这一点是很困难的。在21世纪的第2个10年，全浸式的视觉听觉虚拟现实环境将无处不在，它将加速满足人们对生活地点和工作地点的愿望。一旦我们所有的感觉都完全沉浸在虚拟现实的环境中（在2020年后期将成为现实），真实的办事处将不复存在。房地产行业也将是虚拟的。

正如弗朗西斯·培根爵士所说：“知识就是力量。”另一个加快回归定律的衍生物是人类知识将以指数级的速度增长，其中也包括知识产权（见图2-36和图2-37）。

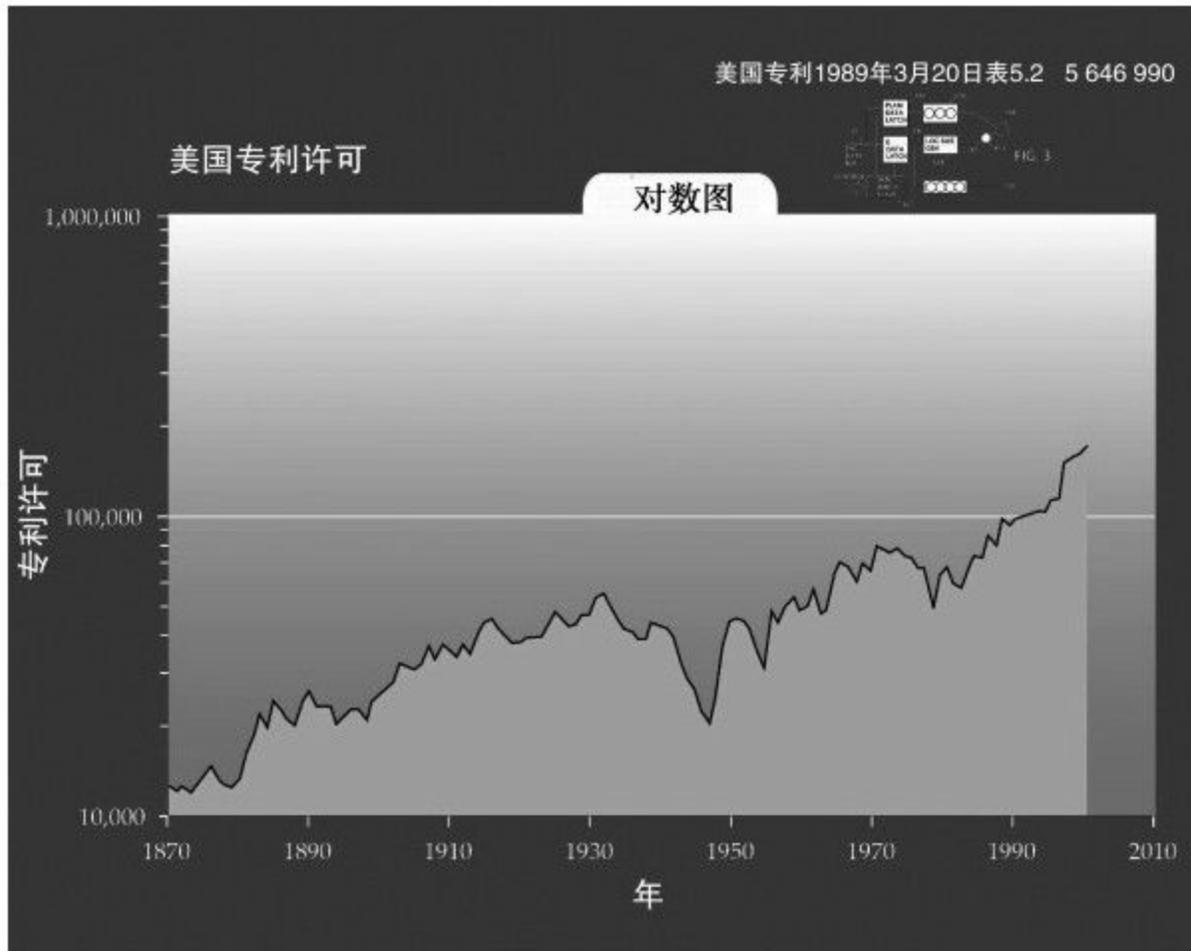


图 2-36

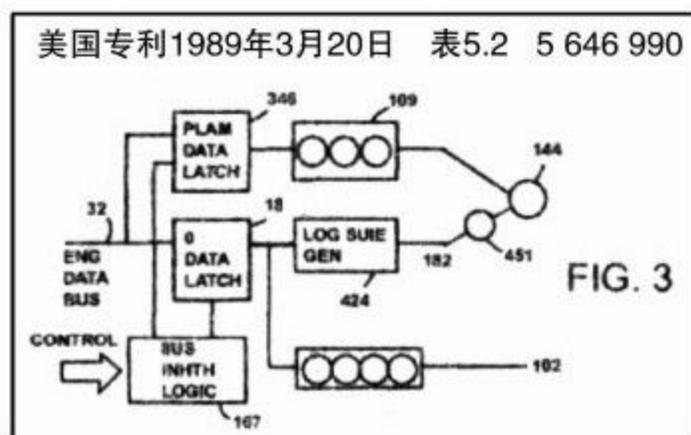


图 2-37

图2-37是图2-36右上部分的特写。

没有迹象表明经济衰退周期会立即消失。近来，美国经历了经济减速、技术行业不景气和经济逐步复苏的一系列过程。经济仍需承担历史上周期性衰退带来的阻力，如对资本密集型项目的过度投资和大量积压的库存。然而，由于信息的快速传播、网上采购方式的日益成熟、各行各业市场的日趋透明，这些无不减弱了衰退周期的不良影响，经济衰退对我们生活水平的直接影响也正在减小。发生在1991—1993年的小型的经济衰退就是这种情形，而更典型的情况是发生在20世纪初的经济衰退。从长远来看，经济增长将继续以指数级的速度增长。

此外，经济周期中的微小偏离并没有明显地影响创新和范式迁移的速度。图2-37中显示所有的技术都以指数级速度增长，而且不会因为近来经济的衰退而减缓增长的速度。市场接受度也不能证明市场的繁荣和衰退。经济的整体增长反映了财富和价值的全新形式和层次。以前这些新形势不存在或者并不构成经济的重要部分，例如基于纳米粒子的新型材料、遗传信息、知识产权、通信门户、网站、带宽、软件、数据库，以及许多其他科技类别。

整个信息技术行业在经济中的比重正在迅速地增加，同时它对其他行业的影响力也在增加，如图2-38所示⁹¹。



图 2-38

加速回归定律的另一个内涵是教育和学习的指数增长。在过去的120年里，我们对K-12教育（每名学生和不变的美元数）的投资增加了10倍。高校学生人数成百倍地增加。以前自动化增加了我们肌肉的力量，近来我们头脑的力量也在扩大。在过去的两个世纪，自动化减少了技能阶梯底部的工作机会，并且创造了技能阶梯顶部的工作机会。技术阶梯正在向上提升，因此我们在教育各个方面的投资均以指数级速度增长（见图2-39）⁹²。

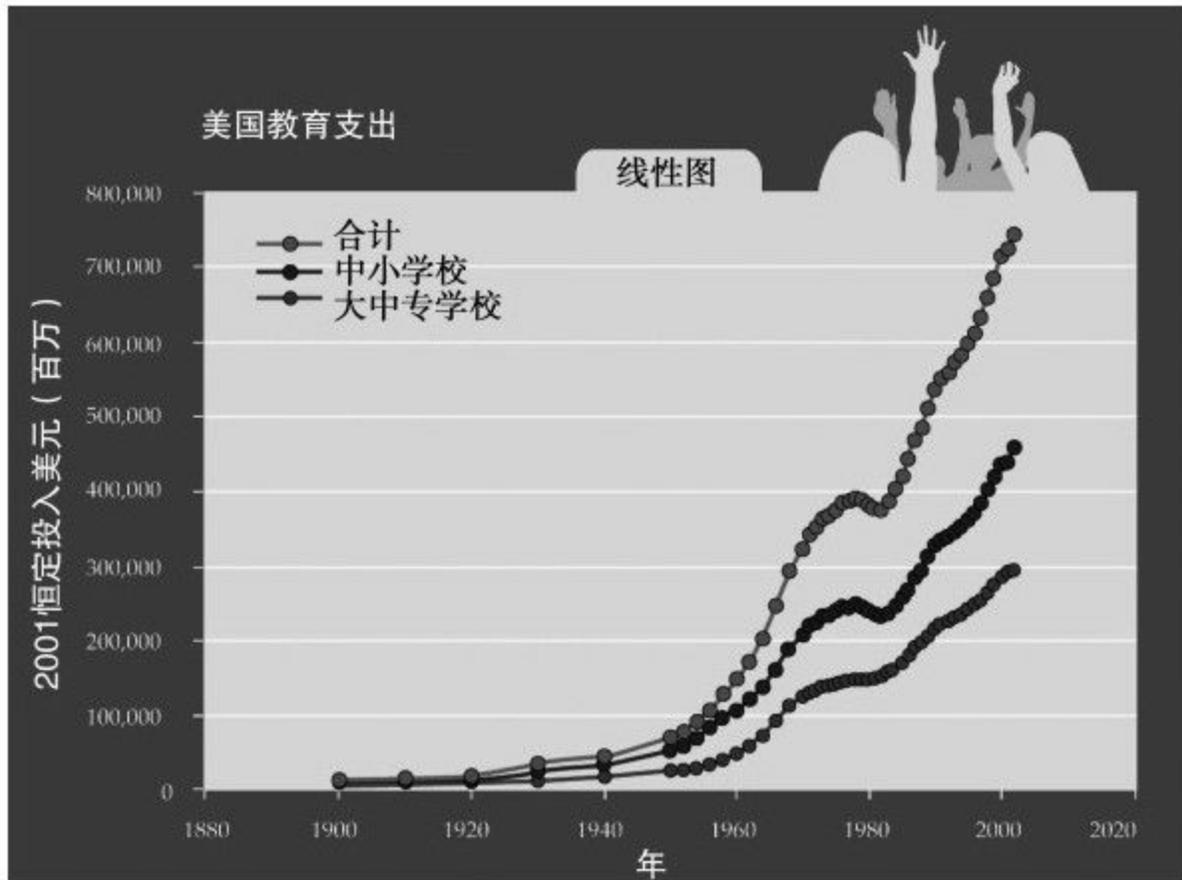


图 2-39

哦，本章开始的那个“提议”，认为目前的股票价值是基于未来的期望的。鉴于（字面义）短视的线性的直觉增长观代表着普遍的观点，所以关于经济预期的普遍认识是非常保守的。由于股票价格便反映买卖双方的共识，价格反映了潜在的线性假设，即反映了大部分人对于未来经济增长的认知。但是，加速回归定律清晰地表明，增长速度将继续以指数级的速度增长，因为进步的速度会继续加快。

莫利2004：但还有一个问题，你说，如果我阅读和理解了本章的部分，我会得到8万亿美元。

雷：是的。根据我的模型，如果我们用指数增长观代替线性增长观，目前的股票价格将是原来的3倍⁹³。由于股票市场已有（保守）40万亿美元，故还有80万亿额外财富。

莫利2004：但你说我会得到那笔钱。

雷：不，我说“你们”会得到钱，这就是为什么我建议仔细阅读句子。那个英语单词“你”可以是单数，也可以是复数。我的意思是说“你们”。

莫利2004：嗯，这很烦人。你的意思是整个世界的所有人？但是，并非每个人都会读这本书。

雷：嗯，但是每个人都可能读。因此，如果大家阅读并理解了这本书，那么，经济预期将符合历史指数模型，从而股票价值将会增加。

莫利2004：你的意思是，如果每个人都能理解并表示同意。我指的是基于市场期望，对不对？

雷：好吧，这是我的假设。

莫利2004：那是你预期将要发生的？

雷：嗯，实际上并没有。再次戴上未来学家的帽子，我的预测是指数增长观将流行起来，但需要时间，越来越多的证据清晰地表明技术的指数增长本质以及它对经济的影响。在未来十年这将逐步发生，并将成为推动市场长期上升的强大动力。

乔治2048：我不知道，雷。你是正确的，信息技术的性价比正在以各种形式呈指数增长，并且还将继续增长。事实上，经济继续保持成倍地增长，而不仅仅是克服通货紧缩率。事实表明大众可以理解所有这些趋势，但现实并没有对你所描述的股市产生积极的影响。股票市场确实随着经济增长而增长，但现实中的高增长速度并没有增加股票的价格。

雷：你认为为什么会那种情况呢？

乔治2048：因为在你的等式中遗漏了一件因素。虽然人们意识到股票价格将快速增长，但同时也意识到了增长的折扣率（就当前的价值而言，我们需要考虑未来的折扣价值）。想想看，如果我们知道在将来的一段时期股票将显著增值，我们就会购买，因为我们预测到了它的未来收益。因此对未来真正价值的认知增加折扣率，将抵消我们对于未来价值的预期。

莫利2004：嗯，乔治，这也不是很正确。你说的话在逻辑上有道理，但心理现实是，对未来价值增加的积极影响确实比对增加折扣率的消极影

响要大很多。因此，普遍接受技术的性价比和经济活动增长率都以指数速度增长，将大大推动实体市场，但考虑到乔治所描述的影响，将不会如“雷”所说的增加3倍。

莫利2004：好吧，我对我的问题表示道歉。我想我会持有少量已有的股份，而不去担心它们。

雷：你有什么投资？

莫利2004：让我们想想，有个基于自然语言的新的搜索引擎公司，并希望它能代替Google。我也投资了燃料电池的公司。此外，还有一个构建能够在血液中行进的传感器的公司。

雷：听起来像一个漂亮的高风险、高技术的投资组合。

莫利2004年：我不会称之为投资组合。我只是和你聊聊你所说的技术。

雷：好吧，但请记住，尽管通过加速回归定律预测的趋势将非常平稳，但这并不意味着我们能够预测哪些竞争者将获胜。

莫利2004：对，这就是为什么我一直在宣传我的投资。

第3章 达到人脑的计算能力

正如讨论发动机的发明一样，如果可以实现真正的人工智能，我们就有理由相信，人类可以创造比神经细胞快100万倍的东西。由此可以得出这样的结论：我们可以建立一些系统，并使它们的运行速度比人类快100万倍。通过人工智能，这些系统可以从事工程设计的工作。这样的话一个系统有能力创造一个比自己更好的系统，也就有了突然转变的可能性。即使跟纳米技术相比，这种情况处理起来也会显得更加困难，但更难得的是要在这个问题上有建设性的思考。虽然我不时地指出来“它也是很重要的”，但这已经不是我们讨论的焦点了。

——埃里克·德雷克斯勒，1989

计算机技术第六范式：三维分子计算和新兴计算技术

1965年4月19日，戈登·摩尔在《Electronics》杂志上这样写道：“集成电子的未来就是电子自身的未来。集成电路的优势将带来电子学的扩散，并把这门科学推广到很多新的领域。”¹摩尔通过这些话，宣告了一场势头正劲的革命的来临。为了让他的读者意识到这个新科学的深远意义，摩尔预言，“到1975年，国家经济将建立在一个由多达65000个元件压缩而成的单硅芯片上。”试想一下这些吧。

摩尔的文章描述了嵌入到集成电路上的晶体管（用作计算单元或者门电路）的数量，每年都会增长一倍。他在1965年提出的“摩尔定律”在当时饱受争议，因为他的片上元件数量对数图上只有5个参考点（从1959年到1965年），所以由此来预测1975年的趋势是不成熟的。摩尔的最初估计是错误的，他在10年后修订了这一数字（更改为两年翻一番）。但是这个基本观点（由于集成电路板上晶体管体积的缩小而导致电子产品的性价比呈指数增长）被证明是正确的而且有先见之明的。²

今天，我们谈论的是上十亿级而不是上千级的组件。2004年最先进的芯片中，逻辑门仅有50纳米宽，这已经完全是纳米级别（100纳米或以下即属于纳米技术范畴）的数值了。摩尔定律终有一天会终结，但这一典型范式的结束时间一直在推迟。Paolo Gargini，英特尔技术主管兼著名的国际半导体技术路线图（ITRS）主席，最近指出，“我们预测至少在未来15到20年时间里，电子产品将会按摩尔定律继续发展。事实上.....纳米技术为我们提供了许多新的关键技术来增加一个芯片上元件的数量。”³

就像我将用整本书去论证的那样，计算机技术的加速发展已经改变了社会关系、经济关系、政治体制以及其他一切。但是摩尔在他的文章里并没有指出，缩小体积的策略，实际上并不是给计算和通信带来指数级增长的第一范式。它只排在第5位，而且我们也已经可以看到接下来的大概情形：在分子水平和三维水平上的计算。尽管第五范式还会使用十几年，但我们已经在所有需要使用第六范式的技术上取得了令人信服的进展。在下一节，我将会分析为了达到人脑的智力水平所需要的计算和存储能力，以及为什么我们会相信，在不到20年里用不是很贵的计算机就能达到这样的水平。即使这些强大的计算机远没有达到最佳的状态，而且在本章的最后一节，我会回顾由目前我们所理解的物理定律所带来的

计算限制。大约21世纪末，真正的计算机时代就会到来。

三维分子计算的桥梁。过渡阶段正在进行中：许多新的技术会促进第六代范式——分子三维计算的问世，这些技术包括纳米管和纳米管电路、分子计算、自组装纳米管电路、生物系统模拟电路组装、DNA计算、自旋电子学（电子的自旋计算）、光计算以及量子计算。其中许多独立的技术可以被集成到计算系统，最终将接近理论上物质和能量用于完成计算的能力的最大值，并且远远超过人脑的计算能力。

一种方法是采用光刻硅芯片来构建三维电路。Matrix Semiconductor公司已经在销售一种存储芯片，它含有垂直的晶体管堆叠层而不是一个平面层⁴。由于三维芯片存储量更大，从而缩小了产品的体积，因此Matrix Semiconductor最初将目标定位到便携电子产品，以此同闪存（用于手机和数码相机，因为它在电源关闭时不会丢失信息）相竞争。而其中堆叠电路的应用还降低了每比特的价格。另一种方法来自于Matrix公司的竞争对手之一，文本冈富士雄（前东芝公司的工程师），就是他发明了闪存。富士雄声称他的新型内存设计（这种设计看起来像一个柱状体）降低了存储器的体积和每比特的价格，是平板芯片的十分之一。⁵而这个三维芯片的工作原型，也在伦斯勒理工学院千兆集成中心和麻省理工学院媒体实验室得到了证实。

位于东京的日本电报电话公司（NTT）通过使用电子束平印术，展示了梦幻般的3D技术。电子束平印术可以创建任意特征尺寸（和晶体管一样）大约是10纳米的三维结构。⁶NTT公司通过创建一个大小为60微米、特征长度为10纳米的高分辨率的地球模型，证明了这项技术。NTT认为该项技术适用于电子设备的纳米加工，如半导体以及建立纳米级的机械系统。

纳米管依然是最佳选择。在《The Age of Spiritual Machines》一书中，我指出纳米管（用三维组织的分子来存储信息和充当逻辑门）是三维分子计算时代最有可能使用的技术。1991年首次合成的纳米管，是由六角形的碳原子网状物卷起来组成的无缝柱体。⁷碳纳米管非常小——单壁纳米管的直径只有1纳米，这样可以达到很高的密度。

它们也可能很快。皮特·伯克和他在加利福尼亚大学欧文分校的同事最近证明了纳米管电路可以以2.5GHz运行。然而，在《Nano Letters》（美国化学学会同行评审期刊）上，伯克说，这些纳米晶体管的理论限

速“应该是太赫兹（1THz=1000GHz）级别，大约是现代计算机速度的1000倍”。⁸一立方英寸的纳米管电路，一旦充分开发，将比人脑强大1亿多倍。⁹

当我在1999年讨论纳米管电路时，它还是有争议的。但是在过去的6年里，这项技术有了长足的发展。其中在2001年有两个重大的进展。2001年7月6日，《Science》¹⁰报道了一种在室温下工作的基于纳米管的晶体管（尺寸为1纳米×20纳米），它仅仅使用了一个电子控制电路的断开与闭合。大约在同一时间，IBM也演示了一个由100个基于纳米管的晶体管组成的集成电路。¹¹

最近，我们看到了基于纳米管电路的第一工作模式。2004年1月，加利福尼亚大学伯克利分校和斯坦福大学的研究人员建立了一个基于纳米管¹²的集成存储电路。采用这种技术的难点之一是有些纳米管是导体（即简单的传输电力），而其他一些像是半导体（即有交换能力并且能够实现逻辑门）。细微结构特征的不同导致了能力的差异。直到最近，把它们区分出来需要手工操作，而把它们组装成大规模集成电路也因此变得不实际。伯克利分校和斯坦福大学的科学家宣布解决了这一问题，他们实现了全自动地区分和丢弃非半导体的纳米管。

排列碳纳米管是纳米管电路的另一个挑战，因为它们会向每一个方向延伸。2001年，IBM的科学家证明，碳纳米晶体管可以成批地增长，这一点类似于硅晶体管。他们采用了一种称为“建设性破坏”的方法，该方法破坏了晶片上有缺陷的纳米管，而不是把它们手工整理出来。IBM华生研究中心物理科学主任托马斯·泰斯当时说：我们相信IBM已经完成了通向分子规模芯片道路上的一个里程碑……如果我们最终成功了，那么碳纳米管会使我们在密度方面无限期地保持摩尔定律，因为毋庸置疑的是，这些碳纳米管将来会做的比任何硅晶体管都要小得多。¹³2003年5月，一家由哈佛大学的研究员托马斯·瑞克斯在马萨诸塞州创办的小公司Nantero对此作了进一步的深入研究，证明当100亿个纳米管结合起来组成单芯片晶片时，所有的纳米管都会排列在正确的方向上。Nantero公司使用标准光刻设备自动删除未正确对齐的纳米管。这种标准设备的使用令业内观察人士感到兴奋，因为这种技术并不需要的新昂贵生产机器。Nantero公司的设计提供随机存取功能并保证非易失性（电源关闭后数据依然保存），这意味着它有可能取代所有主要的存储形式，如内存、闪存和磁盘。

分子计算。除了碳纳米管外，近几年的主要进展是只用一个或几个分子的计算。分子计算是在20世纪70年代早期由IBM的艾薇·艾维瑞和西北大学的马克·拉特纳¹⁴首次提出的。这一思想的普及需要在物理、化学、电子甚至生物进程逆向工程领域的共同进步，而在当时，这些领域的技术都没有达到分子计算的要求。

2002年，威斯康星大学和巴塞尔大学的科学家发明了“原子存储驱动器”，它用原子来模拟一个硬盘驱动器。利用扫描隧道显微镜可以从21个硅原子构成的块里添加或删除一个原子。这个研究过程使研究员相信这个系统跟同等体积的磁盘相比，存储量是后者的100万倍——大约每平方英寸250太比特的数据，虽然这只是通过少量的比特得出的。¹⁵

皮特·伯克预测分子电路的速度将达到1太赫兹，而在伊利诺伊大学的科学家创造了纳米晶体管之后，这一预测看起来越来越准确。这一晶体管的速度为604千兆赫兹（比1/2太赫兹多）。¹⁶

研究人员已经发现了一种具有理想性能分子类型——轮烷，它可以通过改变分子内部环状结构的能量等级来实现状态转换。轮烷内存和电力转换能力已得到证明，其显示出的存储潜力为每平方英寸100G比特（ 10^{11} 比特）。如果在三维空间内组织，存储的能力将更加巨大。

自组装。纳米电路的自组装是实现有效纳米电子的另一个关键技术。自组装能够自动剔除错误形成的元件，并使数万亿计的电路元件有可能自动组织起来，而不再需要精心设计的自上而下的组装过程。加州大学洛杉矶分校的科学家¹⁷提到，这种技术将会使大规模电路在试管中进行生产，而不再需要花费数十亿美元建造工厂；使用化学技术而不是使用光刻技术。普渡大学的研究人员已经开始使用相同的原理（这一原理能将DNA链连接在一起，从而形成稳定的结构），来验证自组装纳米管结构。¹⁸

哈佛大学的科学家在2004年6月迈出了关键一步，他们发现了另一个可以大规模使用的自组装方法。¹⁹该方法采用光刻技术来创建一个连接（计算元素之间的互联）的蚀刻阵列。阵列上存放着大量纳米线场效应晶体管（一种晶体管的常见形式）和纳米级的互联，并保证这些晶体管以正确的形式自我连接。

2004年，南加州大学和美国航天局艾姆斯研究中心的研究人员，展示了

能够在化学溶液里自组装形成的精密电路。²⁰ 该技术会自发地形成纳米线路，并使能容纳3比特数据的纳米存储单元组装到纳米线上。该技术每平方英寸存储容量高达258Gbit（研究人员声明这一数据还可以增长10倍），相比之下一张闪存卡存储容量是6.5Gbit。同样在2003年，IBM展示了高分子的研发存储设备，它可以自组装形成20纳米宽的六角形结构。²¹

纳米电路也是可以自我配置的——这一点非常重要。大量的电路元件及其固有的脆弱性（由于其尺寸太小）不可避免地使一个电路的某些部分无法正常运行。仅仅因为一万亿个晶体管的一小部分不能正常工作而抛弃整个电路，从经济上来说这也是不可行的。为了解决这一问题，未来的电路会不断地检查自身性能和周围的路由信息，绕过不可靠的连接部分，就像互联网上路由信息绕过周围无法运作的节点一样。IBM一直活跃在这个研究领域，并已开发了能够自动诊断问题并重新配置相应芯片资源的微处理器。²²

仿真生物。创建能够自我复制和自我组织的电子或机械系统的想法，都来自于生物学的灵感，因为生物学也依赖于这些属性。《Proceedings of the National Academy of Sciences》发表的一篇研究报告介绍了基于朊病毒的自我复制纳米线的结构（朊病毒是一种自我复制的蛋白质，如第4章详述，其中一种朊病毒似乎对人的记忆起作用，而另一种则是导致疯牛病的原因）。²³ 由于朊病毒具有自然优势，研究小组把它作为模型。由于朊病毒一般不导电，于是科学家们又创建了一个转基因版本，使它含有薄薄的一层金属，于是它既可以导电，电阻又很小。负责这项研究的麻省理工学院生物学教授苏珊·林德威斯特评论说，“从事纳米电路工作的人都试图使用‘自上而下’技术来进行改造，而我们想尝试一种‘自下而上’的办法，让分子自组装起来为我们努力工作。”

分子生物学里的终极自我复制当然是DNA复制。杜克大学的研究人员从自组装DNA分子中培育出称为“砖”的分子构建模块。²⁴ 它们能够控制自组装的结构，建立“纳米网格”。这项技术把蛋白质分子自动附加到每个纳米网格的细胞上，从而这些细胞都可以用来执行计算。他们还展示了一项将DNA纳米带的表面附上银来创建纳米线的化学过程。在谈到2003年9月26日科学杂志上的文章时，首席研究员郝言说，“利用DNA自组装来诱导蛋白质分子或其他分子模板化的想法已经试验了很多年，而这是第一次研究得如此透彻。”²⁵

DNA计算。DNA是大自然自身的纳米驱动计算机，其存储信息和在分子水平上逻辑操作的能力已经应用在专门的“DNA计算机”项目中。DNA计算机本质上是一个含有1万亿DNA分子水溶液的试管，每一个DNA分子的作用相当于一台计算机。

计算的目的是要解决一个问题，解决方案用一个符号序列表示（例如，符号序列可能是一个数学证明或只是一个数字编码）。这就是DNA计算机工作的原理：当创建小的DNA链时，每个符号都是一段独特的代码；每个这样的链通过使用“聚合酶链反应”（PCR）的技术复制万亿次，然后把DNA集合放入试管。由于DNA具有亲和力，链的增长可以自动进行，而不同的DNA序列代表不同的符号，并且每一种都有可能是解决问题的方法。因为有数万亿这种链，所以每个可能的答案对应着多种链（即每个可能的符号序列）。下一步就是同步检测所有的链，这一步通过使用某种特殊设计的酶实现，它可以破坏掉不符合标准的DNA链。这些酶适用于连续的试管检测；通过使用一系列精确设计的酶，最终水解掉所有不正确的DNA链，只保留正确的序列（更详细的描述可参见注释²⁶）。

DNA计算能力的关键是允许同时检测数万亿个链。2003年，在魏茨曼科学研究所里，由胡德·夏皮罗领导的以色列科学家用三磷酸腺苷（ATP）合成了DNA（其中ATP是人体等生物系统的天然能源）²⁷。采用这种方法，每个DNA分子都能够执行计算，并为自身提供能源。这些科学家展示了两匙这样的液体超级计算机系统的配置：载有三千万台分子计算机，加起来每秒钟可以执行660万亿次（ 6.6×10^{14} cps）的计算。这些计算机的能耗极低，3万万亿台计算机总共消耗1/20000瓦的电量。

然而DNA计算也有一个限制，即数万亿台计算机在同一时间内必须执行同样的操作（尽管针对不同的数据），因此该设备是一个“单指令多数数据”（SIMD）的架构。由于有一类重要的问题适用于“单指令多数数据”（SIMD）架构（例如图像处理时增强或压缩每个像素，以及组合逻辑问题的解决），所以这些是不可能使用通用算法来进行编程设计的，因为该算法要求每一个计算机都能执行特殊使命所需的任意操作。（请注意，先前提到的普渡大学和杜克大学的研究项目中使用自组装DNA链来创造三维结构和这里的DNA计算是不同的，那些研究项目可以创建任意的配置而不仅限于单指令多数数据计算。）

自旋计算。除了负电荷以外，电子还有一个属性可以用于存储和计算，

这就是自旋。根据量子力学，电子在自旋轴上自旋，类似于地球绕着地轴旋转。这个概念是理论意义上的，因为一个电子通常被认为只是占据点空间，因此很难想象一个点没有大小却在不停地旋转。但是，当电荷运动时，它确实会形成一个可以测量的磁场。电子可以在两个方向上自旋，这可以形容为“向上”和“向下”，这个属性可以用来做逻辑开关或一位存储位的编码。

自旋电子学令人兴奋的特性是，并不需要能量来更改电子的自旋态。斯坦福大学物理学教授张守成和东京大学教授直人永长这样说：“我们发现了一条新的‘欧姆定律’，电子的自旋不需要减少或耗散任何能源就可以进行传输。此外，我们可以在室温下利用已经在半导体工业中得到广泛应用的材料（如砷化镓）来产生这一效果。这一点很重要，它能够诞生出新一代的计算机设备。”²⁸

这种潜质能够在室温下实现超导效应（也就是以接近光速的速度传播信息而保证没有信息丢失）。它还允许将每个电子的多重属性用于计算，从而尽可能增加存储和计算密度。

计算机用户对电子自旋的一个应用应该很熟悉：用于硬盘驱动器存储数据的磁电阻（由磁场引起的电阻变化）。MRAM（magnetic random-access memory，磁随机存取存储器）是一种基于自旋电子学的新型非易失存储器，预计它会在未来几年内进入市场。像硬盘驱动器一样，MRAM不需要能量来保留数据，而是使用无需移动的部件，同时它的速度和重写能力可与常规RAM相媲美。

MRAM的信息存储在铁磁性金属合金上，这种材料适合于数据存储但不利于微处理器的逻辑运算。自旋电子学的必杀技是在半导体上产生实际的影响，这将是一项使我们能够同时使用存储和逻辑的技术。现在的芯片制造业是基于硅芯片的，它不具有必要的磁性能。2004年3月国际科学家小组报告说，使用硅和铁钴混合物制造的新材料，一方面能保持作为半导体的硅的晶体结构，另一方面也展示出自旋电子学所需要的磁性能。²⁹

将来，电子自旋学会在计算机存储的发展中扮演很重要的角色，也可能对逻辑系统产生一定的贡献。电子的自旋是一种量子属性（遵循量子力学的规律），因此自旋电子学最重要的应用或许在量子计算系统里，并利用电子自旋来代表量子比特（qubit），这一点将在下面讨论。

利用质子磁矩复杂的相互作用，可以用自旋来存储原子核的信息。俄克拉荷马大学的科学家展示了一种“分子摄影”技术——仅仅一个由19个氢原子组成的液晶分子就存储了 10^{24} 比特的信息。³⁰

光学计算。另一种单指令多数据的计算方法是使用多束激光光束（其中信息编码在每一束光子流中）。光学组件可以在编码的信息流中执行逻辑和算法功能。例如，由一家以色列的小公司Lenslet开发出的一套使用256束激光的系统，通过在每个数据流中执行同样的计算，可以使每秒钟的计算次数达到8万亿次。³¹该系统可应用于诸如256个视频通道的数据压缩等方面。

SIMD技术（如DNA计算机和光学计算机等）将在未来的计算领域发挥重要的作用。利用SIMD架构可以重现人脑某些方面的功能，如处理感官数据；对于大脑的其他区域（如那些学习和推理区域），通用计算的“多指令多数据”（MIMD）架构是必需的。为使MIMD系统能进行高性能计算，我们还需要运用上面讲过的三维分子计算范式。

量子计算。量子计算是SIMD并行处理中更加激进的一种形式，但跟先前我们讨论的技术相比，它只是一个处在早期开发阶段的技术。量子计算机包含一连串量子比特，这些比特在同时处在0和1的位置。量子比特基于量子力学中固有的模糊性。在量子计算机中，量子比特由粒子的量子属性来刻画，例如，每个电子的自旋状态。当量子比特处于激发态时，每一个量子比特都同时处于两种状态；在一个称为“量子脱散”的过程中，每个比特的模糊性得到解决，只留下明确的1和0序列。如果量子计算机以正确的方式建立起来，那么脱散后的序列就将代表问题的解决方案。从本质上讲，只有正确的序列才能从脱散过程中幸存下来。

就像前面描述的DNA计算机一样，量子计算机成功的关键也在于对问题认真细致地论述，包括精确检测可能答案的方式。量子计算机有效地检测每一个可能的量子比特组合。一个带有100个量子比特的量子计算机将可以同时检测21000种潜在的方案（这个数字相当于一个10300）。

一个千位量子计算机的性能将远远超越任何可以想象的DNA计算机，或者任何可以想象的非量子计算机。但是这个过程有两方面的局限，第一个问题是（就像上面讨论的DNA和光学计算机一样）量子计算机只适用于某一类问题。而事实上，我们需要用一种简单的方式来检测每个可能的答案。

对很大的数进行因式分解是量子计算实际应用的一个典型例子（即使是很小的一组数，在幂乘之后也会变得很大）。在普通的数字计算上对512位的数字进行因式分解是无法实现的，即使是一台并行机也不可能。³²量子计算能够解决许多有趣的问题，例如破解密码（依靠因式分解大素数）。还有另一个问题是，量子计算机的计算能力取决于处于激发态的量子数量，而以目前的技术水平大约只局限于10个比特。一个10比特的量子计算机并没有多大作用，因为 2^{10} 也仅仅是1024。在传统的计算机中，合并存储器位数和逻辑门是一个简单的过程；但是，我们不能仅仅通过合并两个10比特的量子计算机来创造一个20比特的量子计算机。所有的量子都要一起激发——这一点非常具有挑战性。

一个关键的问题是，每额外添加1个比特究竟有多难。每增加1个比特，量子计算机的计算能力就会成指数级增长，但是如果每额外增加1个比特，工程任务的困难度也成指数增长，毫无疑问我们将会得不偿失。

（这就是说，量子计算机的计算能力与增加比特的难度成正比。）一般来说，目前提出的添加量子比特的方法明显会使系统变得更为微妙，而且容易过早脱散。

很多人建议大幅度地增加量子计算机的比特数，但是这个想法在现实中还没有成功过。例如，因斯布鲁克大学的Stephan Gulde和他的同事们已经用一个钙原子建立了一个量子计算机，通过应用原子内不同的量子属性，这个量子计算机能同时编码数十位甚至高达百位的量子比特。³³然而，量子计算的最终作用仍然悬而未决，即使数百位量子计算机被证明是可行的，它仍然只是一个专用设备（虽然它有任何其他方式所不能效仿的功能）。

当我在《The Age of Spiritual Machines》一书中提到分子计算会成为第六个主要的计算范式时，引起了很多的争议。但在过去的5年里，这个领域已经有了很大的发展，专家们的态度也发生了巨大的变化，现在这个想法已经成为主流了。现在我们已经证实了所有三维分子计算结构的主要需求：单分子晶体管、基于原子的存储细胞、纳米线、自组装的方法和对万亿部件的自我诊断。

现代电子产品的生产过程是从芯片布局的详细设计到光刻，再到大型集中化的工厂生产。而纳米电路则更有可能从化学烧瓶里制造出来，这个发展会成为工厂非集中分布的重要一步，并在21世纪或22世纪遵循加速回归的定律。

样章到此结束

需要完整版

扫下面二维码



或加微信：shuyou055

领取

来自软件的批评

人工智能的可行性遭遇的挑战以及奇点是从区分量变和质变开始的。这种论点承认，在大体上，诸如内存容量、处理器速度和通信带宽等能力呈指数扩张，但同时坚持软件（方法和算法）则没有这样扩张。

这是硬件与软件的挑战，也是一个重要的挑战。例如，虚拟现实先驱杰罗恩·拉尼尔刻画了我和其他所谓的控制论极权主义者的立场，我们仅仅以一些模糊的方式来理解软件。在他看来，这就好像软件“*deus ex machina*”。²但是它忽略了我所描述的具体和详细的情景，据此才能实现智能软件。人脑逆向工程是一项远比拉尼尔和其他观察员所能认识到的更为深远的事业，它将扩大我们的人工智能工具包，并将包括自我组织方法等基本的人类智慧。我在后面会着重这个话题，但是我首先要解答一些关于软件缺乏进步的基本误解。

软件的稳定性。拉尼尔认为软件的“笨拙”和“脆弱”是固有的，并且长篇累牍地描述他在使用软件时遭遇的各种挫折。他写道：“让电脑以可靠且可变的方式执行十分复杂的特定任务而没有崩溃或安全漏洞，这基本上是不可能的。”³我并不打算捍卫所有的软件，但复杂的软件并不一定是脆弱和容易灾难性崩溃的。有很多例子表明，执行关键任务的复杂软件很少出现故障或几乎不出现故障：例如，控制飞机降落增长比例的复杂软件、监测重症监护室中病人的软件、引导智能武器的软件、控制基于自动模式识别的数十亿对冲基金投资的软件，以及实现其他许多功能的软件。⁴我不知道有任何空难是因为自动降落软件的故障引起，但我也不能说人类就同样可靠。

软件的响应。拉尼尔抱怨道：“电脑用户界面对于用户操作的反应似乎比15年前还要慢，如按键，这是怎么了？”⁵我现在想请拉尼尔试试使用旧电脑。即使排除配置一个旧电脑的困难不说（这是另一个问题），我想他已经忘记了以前的电脑反应有多么迟钝、笨拙、受限。以现在的标准，让20年前的电脑做一些实际的工作，就会明显看到，无论从量上还是从质上，旧软件都不会比现在的好。

虽然总是能发现不好的设计、响应延迟，但这通常是新特性和新功能带来的。如果用户愿意他们的软件不增加新功能，凭借不断指数增长的计算速度和内存容量，软件响应延迟将很快消除。但是，市场要求不断扩

大功能。20年前，没有搜索引擎或其他与万维网集成的软件（事实上都没有万维网），只有原始的语言、格式和多媒体工具等。因此，功能总是处在可行性的边缘。

几年或几十年前的软件浪漫发展史比得上数百年前人们对田园生活的看法，那时人们不会遭遇与机器工作的挫折，生活无拘无束，但是生命短暂，劳动强度大，充满贫穷、疾病和灾难频发。

软件的性价比。关于软件的性价比，每个方面的比较都很显著。看看1000页的语音识别软件的表格。1985年，你花5000美元买一个软件，它提供100个词汇，不提供连续能力，需要训练三个小时来识别你的发音，而且准确性相对较差。2000年只需50美元你就可以购买一个软件，包括10万字的词汇表，并且提供连续发音功能，只需要经过5分钟的语音训练就可以识别你的发音，精度显著提高，提供了自然语言理解能力（为了编辑需要和其他用途），还包括许多其他功能。⁶

软件开发效率。软件本身是如何开发的？40多年来，我一直在开发软件，所以关于这一点我有一些看法。我估计软件的开发效率倍增时间约为6年，这比处理器性价比的倍增时间长，现在处理器性价比的倍增时间大概为1年。不过，软件生产率呈指数增长。现在可用的开发工具、类库和支持系统比几十年前的有效得多。我现在的项目组中只有三四个人，只用几个月就完成了—一个目标，25年前，同样的目标需要很多人工作一两年才能实现。

软件复杂度。20年前的软件程序通常包括几千至几万行代码。现在，主程序（例如，供应渠道控制、工厂自动化、预订系统、生化模拟）都是数百万行或者更多。主要防御系统软件（如联合攻击战斗机）包含了数千万行。

用来控制软件的软件本身的复杂性迅速增加。IBM引导了自主计算的概念，即自动完成日常的信息技术支持功能。⁷这些系统将根据自己的行为模式进行编程，将能够实现IBM公司提出的“自我配置、自我愈合、自我优化和自我保护”的目标。支持自主计算的软件代码量将达到数千万行（每行包含了几十字节的信息），人类基因组中只有几千字节的可用信息，因此，在信息复杂度方面，软件已超过了人类基因组及其中的分子。

然而，程序中包含的信息量并不是计算复杂度最好的标准。一个软件程

序可能会很长，但可能包含很多无用信息。当然，基因组也是这种情况，它看起来是非常低效的编码。很多人尝试制定复杂度的测量标准。例如，美国国家标准技术研究所⁸的计算机科学家亚瑟·沃森和托马斯·麦凯布提出的回路复杂性度量标准（Cyclomatic Complexity Metric）。这个度量标准用于计算程序逻辑的复杂性，并考虑到了分支结构和决策点。大量的实例研究表明，按照这种方法测量，复杂度会快速增加，哪怕没有充分的数据来跟踪倍增时间。不过，关键在于，如今在行业中使用的最复杂的软件系统比以神经形态为基础模拟大脑区域的程序，以及对单个神经元进行生化模拟的软件程序复杂度更高。我们在人类大脑中发现了并行、自我组织、分形算法，现在我们能处理的软件的复杂度已经超过了对这些建模和仿真所需要的复杂度。

加速算法。诸如信号处理、模式识别、人工智能等程序使用各种方法来解决基本的数学问题，这是因为软件算法的速度和效率已经取得了显著进步（在硬件不变的情况下），因此解决问题的性价比不仅从硬件的加速中受益，也从软件的加速中受益。不同问题上的进步各不相同，但普遍都有进步。

例如，考虑一下信号处理，这是一个普遍的计算密集型任务，就像人脑一样。佐治亚理工学院的马克·A·理查德和麻省理工学院的盖里·A·肖记录了信号处理算法效率显著提高的趋势⁹。例如，要找到信号的种类，往往需要解决所谓的偏微分方程。算法专家乔恩·本特利已经证明了解决这类问题的计算量在不断下降。¹⁰例如，从1945年~1985年，对于一个代表性的应用而言（为一个每面64个元素的三维网格找出一个椭圆型偏微分的解决方案），计算量减少到原来的30万分之一。这使得效率每年增长38%（不包括硬件的改善）。

另一个例子，12年间，在音变电话线上发送信息的能力以每年55%¹¹的增长率从每s发送300bit提高到每s56000bit。这一进步一部分是由于硬件设计改进，但主要还是因为算法创新。

处理问题的关键之一是使用傅里叶变换将信号转换成频率分量，将信号表示成一组正弦波。此方法用于计算机语音识别和许多其他应用的前端。人类听觉感知也从将语音信号分解成频率分量开始。1965年，用于快速傅立叶变换的"radix-2 Cooley-Tukey algorithm"将 10^{24} 点傅里叶变换所需的操作量减少到原来的1/200。¹²一个改进的"radix-a"算法进一步促进了这个进步，将操作量减少到原来的1/800。最近引进了“小波”变换，

它能将任意信号表示成一组比正弦波更复杂的波。这些方法进一步极大地增加了效率，可以将信号分解成关键组成部分。

上面的例子并非异常现象，大部分计算密集的“核心”算法所需的操作量显著减少。这里还有一些其他的例子，比如排序、查找、自相关（和其他统计方法）、信息压缩和解压。并行算法，即将一个方法分解成多个能同时执行的方法，也取得了很大进展。正如前面所讨论的，并行处理必然运行在较低的温度下。大脑使用大量的并行算法，可以在更短的时间内完成更复杂的功能。我们需要在机器中使用这个方法，以达到最优的计算密度。

在硬件性价比的提高和软件效率的改进之间存在着固有的差别。硬件改善有着显著的一致性和可预测性。每当我们达到一个硬件速度和效率的新水平时，我们就能获得强大的工具来实现指数级进步，以便到达下一个新水平。软件的改善则是较难预测的。理查德和肖称它们为“开发阶段的虫洞”，因为我们可以经常看到，实现某个算法的改进就相当于硬件一年的进步。请注意，我们不依靠软件效率的不断改进，因为我们可以依靠硬件的不断加速。然而，算法突破带来的好处非常有助于实现计算机能力赶上人类智慧的目标，而且这些好处很可能继续累积。

智能算法的根本来源。最重要的一点，为了在机器中实现人类智能，这里已经有了一个具体的游戏计划：逆向设计出人脑中的并行、混乱、自组织、分形方法，并将这些方法用在现代计算硬件中。我们已经看到人脑及其方法呈指数级增长知识（见第4章），可以预料，未来20年内，我们将有数百个信息处理器官的详细模型及仿真，所有这些都统称为人类大脑。

理解人类智慧的运作原理有助于我们开发人工智能算法。很多这样的算法被广泛用于机器模式识别系统，系统表现出的微妙复杂的行为是设计师也想不到的。对于创造复杂的智能行为来说，自组织方法并不是一个捷径，但它是一个重要方式，通过它可以增加逻辑编程系统的复杂度而不会引起系统脆弱。

正如我前面所讨论的，人脑本身是由基因组创建的，而基因组只包含3千万到一亿字节的压缩的有用信息。那么，之间有百兆个连接的器官怎么会来源于如此小的基因组呢（我估计，仅仅是用来标识人脑的互联数据就比人脑基因组的信息多100万倍）¹³？答案是，基因组指定了一组进程，每一个都采用无秩序的方法（随机初始化，然后自组织）来增加

信息量。据了解，该互连布线遵循的计划包含很大的随机性。当一个人来到一个新的环境，他的连接和神经递质层模式就会自我组织，以便更好地描绘这个世界，但是规定最初设计的程序并没有那么复杂。

我并不支持我们通过编程将人类智能连接起来，从而形成一个巨大且规则的专家系统。我们也不希望以人类智能为代表的一系列技能来源于一个巨大的遗传算法。拉尼尔担心，任何这样的做法将不可避免地陷入某个局部极小值（这个设计比与之类似的设计要好，但实际上并不是最优设计）。有意思的是，像理查德·道金斯一样，拉尼尔也指出，生物进化“丢失了轮子”（因为没有一个生物进化拥有它）。事实上，这种看法并不完全准确：像在蛋白质层的结构还是存在小轮子的，比如细菌鞭毛的离子发动机，它就用来在三维环境中充当传输工具。¹⁴对于形态较大的生物，如果没有道路，轮子当然不管用，这就是为什么没有用于二维平面移动的生物进化的轮子¹⁵。然而，进化确实产生了一种物种，它既能创造轮子，又能创造道路，因此它也成功地建立了很多车轮，尽管是间接的。间接的方法并没有什么错，我们一直在工程中使用间接的方法。事实上，间接是进化进行的方式（每个阶段的产品创造下一个阶段）。

大脑逆向工程没有局限于复制每个神经元。在第5章中，我们了解了如何通过实施具有与大脑等同功能的并行算法来对包含无数神经细胞的大量大脑区域建模。这种神经形态方法的可行性已经被十多个区域的模型和仿真所证明。正如我之前讨论的，这些往往能使得计算的耗费大大降低，正如劳埃德·瓦特、卡福·密德等的实验表现的那样。

拉尼尔写道：“如果存在一个复杂、无序的现象，那就是我们。”我同意他的观点，但并不认为这是一个阻碍。我自己感兴趣的领域是无序计算，这是我们做模式识别的方式，这又是人类智慧的核心。无序是模式识别进程中的一部分，它推动这一进程，我们没有理由不在机器中使用这些方法，就像在我们的的大脑中使用一样。

拉尼尔写道：“进化已经演变，例如开始有了性别概念，但进化无一例外都非常缓慢。”但拉尼尔的意见只适用于生物进化，而不适用于技术发展。这正是为什么我们对生物进化感动。拉尼尔忽略了进化过程的本质：它加速了，因为每一个阶段为创建下一阶段引入了更强大的方法。生物进化的第一阶段（核糖核酸）经历了几十亿年，我们已经由这个阶段发展到如今的技术快速发展阶段。万维网出现才短短几年，速度却明

显快于寒武纪大爆发时期。这些现象都是相同的进化过程的一部分，开始时缓慢，目前的速度相对快一些，而未来几十年会变成快得惊人。

拉尼尔写道：“整个人工智能事业是建立在一个聪明的错误之上。”在此之前，计算机至少在每一个层面都可以媲美人类的智慧，它始终让怀疑论者认为计算机和人相差无几。人工智能的每一个新成就都受到尚未完成的其他目标的影响。事实上，研究人工智能的人都会遇到这种挫折：一旦人工智能的目标实现，便不再认为它属于人工智能的领域，而只是一个一般的有用技术。因此人工智能经常被认为是一些尚未得到解决的问题。

但是，机器的确越来越智能，它们能完成的范围也在很快扩大，这些任务以前需要聪明的人类关注。正如在第5章和第6章讨论的一样，现在有数百个关于操作性的狭义人工智能的例子。

例如，在前面的内容中描述了"Deep Fritz Draws"，电脑象棋软件不再仅仅依赖强力计算。2002年，Deep Fritz仅仅运行在8台电脑上，表现和1997年的IBM深蓝相当，深蓝使用了基于模式识别的改进算法。我们可以看到很多这种例子，它们都是软件智能的进步。然而，到现在，随着整个人类智力都可以被机器赶上，机器能力总是被尽量减小。

一旦我们取得人类智能的完整模式，机器将能够将人类模式识别的灵活、微妙和机器智能天生的优势结合起来，比如速度、内存容量，最重要的是将知识和技能快速分享的能力。

来自模拟处理的批评

许多批评家，如动物学家和进化算法科学家托马斯·雷，专门负责批评像我这样的理论家。我认为对于智能计算机来说存在所谓的“未能考虑到数字媒体的独特性”¹⁶。

首先，我的论文包含了一个思想，那就是将模拟方法和数字方法相结合，可以采用大脑结合这两种方法的方式。例如，更先进的神经网络已经可以使用人类神经元非常详细的模型，包括详细的非线性的模拟的激活功能。模仿大脑的模拟方法有着显著的进步。模拟方法也并非生物系统的专有领域。我们使用“数字计算机”来区别在第二次世界大战期间广泛使用的模拟计算机。它显示了硅电路的能力，通过数字控制实现模拟电路，它完全类似于哺乳动物的神经元环路。因为晶体管本来就是模拟设备，模拟方法很容易被常规晶体管重新创建，而这仅仅是增加了一个机制，就是将晶体管的输出和做成数字设备的临界值相比较。

更重要的是，没有一件事是模拟方法可以完成而数字方法不能完成的，数字方法可以模仿模拟方法（通过使用浮点表示），反过来却不一定。

来自神经处理的复杂性的批评

另一种常见的评论是大脑的生物设计细节实在是太复杂了，使用非生物技术模拟难以建模和仿真。例如，托马斯·雷写道：

大脑的结构和功能或其组成部分不能分割。循环系统为大脑提供基本生活支持，但它也提供了荷尔蒙，这是大脑化学信息处理必不可少的元素。神经元的膜是一个结构性特点，它确定了神经元的范围和完整性，同时也是沿着这层膜的表面向两极传播信号。这个功能是结构性的，也是生命之本，不能和信息处理分开。¹⁷

雷接着描述了几个大脑的“化学交流机制的广阔频谱”。

事实上，所有这些特点可以很容易地进行建模，并且在这方面已经取得很大进展。数学是中间语言。将数学模型转化为等价的非生物机制（比如计算机模拟和使用晶体管的电路），这是一个相对简单的过程。比如说，循环系统释放激素，这是一个带宽非常低的现象，它的建模和复制都不难。某些激素的血液水平以及其他化学影响参数水平可以同时影响许多突触。

托马斯·雷得到一个结论，“一个金属计算系统工作在完全不同的动态属性上，而且永远无法精准地复制大脑功能”。随着神经生物学、脑扫描、神经元相关领域，神经区域建模，神经元电子通信，神经植入物及相关事业的发展，我们发现，我们有能力在任何想要的精确度上复制生物信息处理的突出功能。换言之，复制功能可以“满足”任何想得到的目的或目标，包括图灵测试。另外，有效实现数学模型所需的计算能力远远低于对生物神经元簇建模的理论值。在第4章中，我回顾的一些大脑区域模型（瓦特的听觉区域、小脑等）并证明了这一点。

大脑复杂度。托马斯·雷指出，我们可能很难建立一个相当于“数十亿行代码”的系统，他认为人类大脑大概就在这个复杂度。然而，这个数字是被夸大的，我们已经知道，创造大脑的基因组仅仅包含大约3千万~1亿字节的独特信息（8亿没有经过压缩的字节，这显然存在大量的冗余），其中大概2/3的内容用于描述大脑的运作。正是因为包含大量随机因素的自组织过程（就像现实世界表现的那样），使得相对少的设计信息扩大到数千万亿字节信息，就像一个成熟的人脑所表现的那样。类似的，在一个非生物实体中创造人类级别智能的任务，不仅是创建一个

由无数规则和代码组成的庞大的专家系统，而是一个能学习的、无序的、自组织的系统，一个有生物创造力的系统。

雷继续写道：“有些工程师可能会提出带有球壳状碳分子开关的纳米分子器件，甚至是类DNA的计算机。但我相信他们绝不会想到神经元。与我们开始说的分子相比，神经元的结构大得多得多。”

这仅是我自己的观点：人类大脑逆向工程的目的不是要复制消化或其他笨拙的生物神经元过程，而是要了解它们处理信息的关键方式。现在有许多项目都证明了这个观点的可行性。随着其他技术能力的提高，模拟的神经簇的复杂度增加了好几个数量级。

计算机固有的二元论。红木神经科学研究所的神经专家安东尼·贝尔阐明了在我们用计算来建模和模拟大脑上有两个挑战。第一个是：

计算机本身就是一种二元实体，它的物理结构被设计成不会影响到用来执行计算的逻辑结构。根据以往的调查，我们发现，大脑并不是一个二元实体。计算机和程序能分开，但思维和大脑是一个整体。因此大脑不是一个机器，这意味着它不是一个实体化的确定模型（或计算机），因为在模型中，物理实例不影响该模型（或程序）的执行。¹⁸

很容易看出这个论点的破绽。计算机能将程序和执行计算的物理实体分离的能力是一种优势，而不是一种限制。首先，我们有专用电路的电子设备，其中“计算机和程序”不再是两个东西，而是一个整体。这种设备不是用编程驱动，而是为特定算法设计的硬件。请注意我不仅仅指在计算机只读存储器中的软件（称为“固件”），这种设备在手机或袖珍型计算机中也能找到。在这样的一个系统中，电子器件和软件仍可被视为二元，即使程序不能轻易地进行修改。

我提到用根本不能进行编程的专有逻辑代替系统，例如用于某些应用程序的特定的集成电路（例如用于图像和信号处理的）。用这种方法执行算法能节约成本，而且许多电子消费产品使用这样的电路。不过虽然可编程计算机需要的成本更高，但是提供了灵活的软件改变和升级。可编程计算机可以模仿任何专用系统的功能，包括我们发现的关于神经元、神经元、大脑区域的算法（通过大脑逆向工程的努力而实现）。

有人认为逻辑算法和物理设计存在固有联系的系统“不是机器”，这种看法是不对的。如果人们可以理解该系统的工作原理，用数学术语对其建

模，然后在另一个系统中创建实例（无论其他系统是**不可改变的专用逻辑机器**还是**可编程计算机软件**），那么我们可以认为这是一台机器，当然也是一个实体，其功能可以在机器中重新创建。正如在第4章广泛讨论的，我们完全能从分子间的相互作用开始来发现大脑的运作原理，并对其成功地建模和模拟。

贝尔指出计算机的“物理结构被设计成不干扰它的逻辑结构”，这暗示了大脑并没有这种“限制”。他是正确的，我们的思想确实协助建立大脑，正如我刚才所说，我们可以在大脑动态扫描中观察到这一现象。但我们可以用软件轻易建模和模拟大脑的可塑性，无论是物理方面还是逻辑方面。事实上，电脑软件能和物理实体分开，这是一个架构优势，因为这允许相同的软件应用于不断改善的硬件上。计算机软件就像大脑中的改变电路，也能自我修改，还能升级。

同样的，在软件没有变化时，计算机硬件也可以升级。大脑相对固定的架构才是严重的限制。虽然大脑能够创建新的连接以及神经递质模式，但是其化学信号低于电子**100多万倍**，适应我们头骨的神经元间连接的数量也有限，也不能升级，除非通过我前面提到的和非生物智能的合并。

层次和循环。贝尔还评论了大脑的复杂性：

分子和生物物理过程控制神经元对传入尖峰的敏感性（包括突触的效率和后突触响应）、神经元产生尖峰的兴奋性、产生的尖峰模式以及新的突触形成的可能（动态布线），这里仅仅列举了4个子神经元层最明显的参考值。除此之外，我们看到，一些跨神经元的作用，比如局部电场、氧化氮的跨膜扩散，分别影响着连贯的神经激励（**coherent neural firing**）和传递给细胞的能源（血流量），后者直接影响着神经元活动。

还可以继续列举很多例子。我相信，任何人只要认真研究神经调节、离子通道或突触机制，肯定就不会认为神经元层面是一个单独的计算层面，甚至会发现它是一个有用的描述层面。¹⁹

虽然贝尔在这里指出，神经元并不是模拟大脑的适当层次，但是他主要想说的和托马斯·雷的论点很相似：大脑比简单的逻辑门复杂。

对此，他作了详细阐述：

有人认为为了描述大脑的功能，一个结构性的水或一个量子一致性是必需的细节，这种观点显然很荒谬。但是，如果在每一个细胞中，分子来源于子分子过程的系统功能，如果一直使用这些过程来遍历大脑，来反映、记录和传播的时空相关性分子的波动，来增强或减弱反应的可能性和特异性，那么这种情况就与逻辑门有着质的不同。

他在某个层面反驳了神经元和神经元间连接的简单模型，这些模型应用于许多神经元项目。大脑区域模拟没有使用这些简单模型，而是使用基于逆向工程结果的逼真数学模型。

贝尔真正的观点是：大脑是非常复杂的，还有很多后继反应，因此大脑是难以理解的，也很难对其建模和模拟其功能。在贝尔看来，主要问题是，他不能解释大脑设计的自组织、无秩序、不规则特性。可以肯定的是，大脑非常复杂，但是很多情况下只是看起来复杂而已。换言之，对大脑的设计原则比表面看起来的要简单些。

为了理解这一点，我们首先考虑大脑组织的不规则性质，这在第2章讨论过。在创建一个模式或设计时，分形是一个迭代使用的规则。该规则通常很简单，但由于迭代使得设计显得很复杂。一个著名的例子是由数学家伯诺伊特·曼德尔布罗设计的Mandelbrot set。²⁰ Mandelbrot set的可视化图片非常复杂，在复杂的设计中嵌套复杂的设计。当我们看Mandelbrot set的一个图像时，随着看的细节越来越细，但复杂度却永远不会消失，我们可以看到一个同样的复杂度。然而关于所有复杂度的公式却是惊人的简单：Mandelbrot set用一个简单的公式来描述，这个公式是 $Z=Z^2+C$, Z 是复数， C 是常量。公式是迭代使用的，图9-1所示的曲线图描述了结果的二维点。

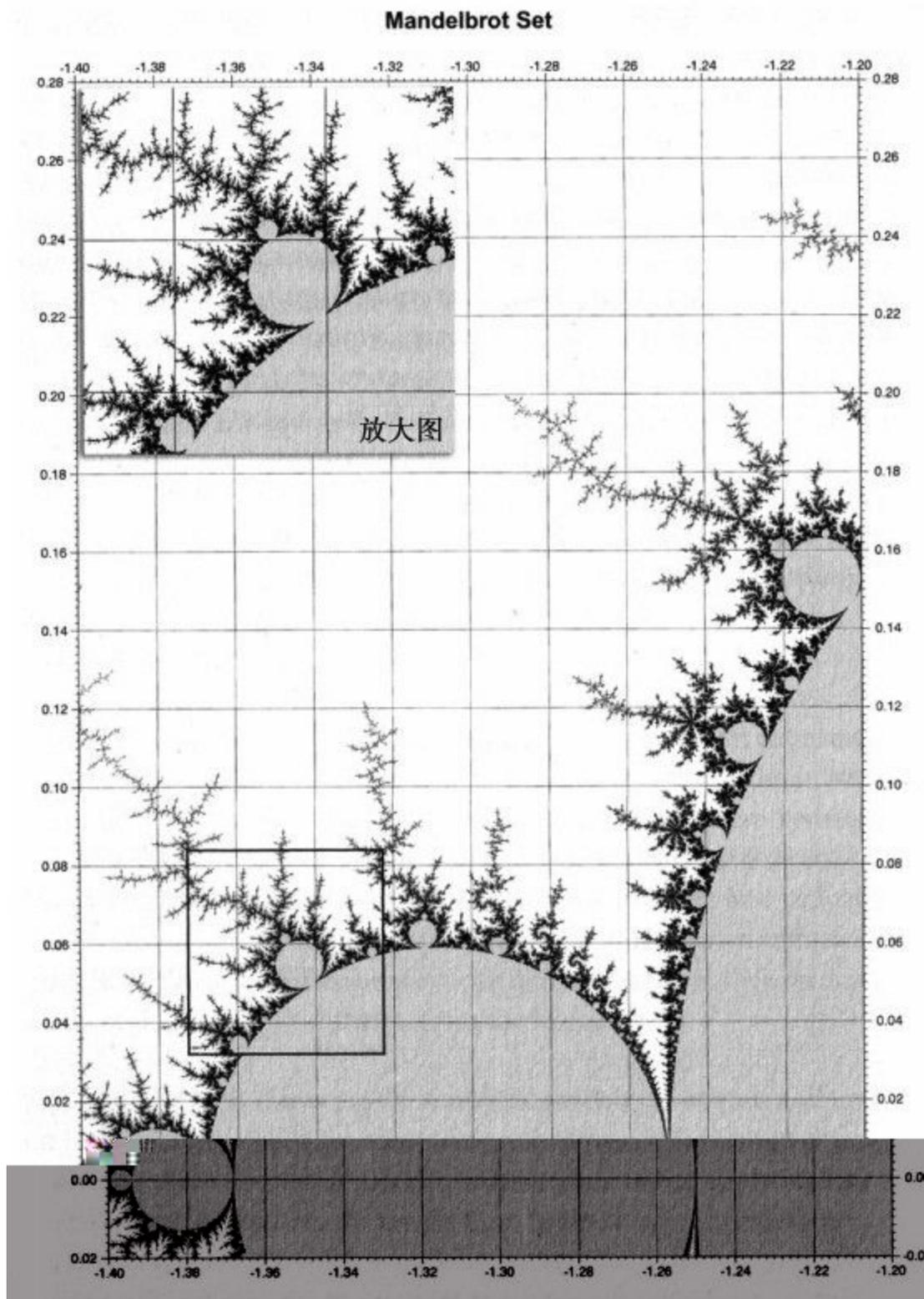


图 9-1

关键点在于，一个简单的设计规则就可以创建巨大的复杂度。史蒂芬·沃尔夫勒姆表达了相似的观点（见第2章），他在细胞机器人上使用的规则也很简单。这种见解抓住了大脑设计的真谛。我曾经说过，经过压缩的基因组只是一种相对紧凑的设计，甚至比当代的一些软件程序还小。但是正如贝尔所指出的，大脑的实际实现却要复杂得多。就像Mandelbrot set一样，当越来越精细地观察大脑的特征时，我们仍然能够很清晰地看到每个层次的复杂度。从宏观的层面来看，连接的模式看起来很复杂；从微观的层面看，一个神经元单个部分的设计（比如树状突）也同样复杂。我提到过，如果想描述一个人大脑的状态，我们至少需要万亿字节的信息；但是如果只是设计大脑，那么只需要千万字节的信息。因此，大脑所表现出来的复杂度与设计它所需的信息的比率至少是 $10^8:1$ 。虽然大脑信息的开始阶段充满大量的随机信息，但随着大脑与环境发生复杂的相互作用（人的学习和成熟），这些信息才变得有意义。

实际设计中的复杂度是由设计阶段的压缩信息（基因组和支持分子）所决定的，而不是由迭代使用设计规则所创建的模式来决定的。我认为，虽然基因组中约有3千万~1亿字节（当然比Mandelbrot set中定义的6个字符复杂得多），但这并不代表它是一个简单的设计。不过这个复杂度我们能够通过技术来管理。很多观察家被大脑物理实体表现出来的复杂度所迷惑，他们没有认识到，设计的不规则特性意味着实际的设计信息远比我们从大脑中看到的信息简单。

我在第2章中也提到，基因组的设计信息有一种随机的不规则性，这意味着当每一次迭代规则时，都存在着一定的随机性。也就是说，例如，只有很少的基因组信息用于描述小脑（cerebellum）的布线图，而小脑包含了大脑中半数以上的神经元。很小一部分基因用于描述小脑中4核细胞的基本模式，而且从本质上说，“重复这种模式几十亿次，在每个重复过程中都存在一些随机的变化”。结果看起来非常复杂，但所需的设计信息其实相对较少。

试图将大脑设计与传统的计算机相比较将是一个令人沮丧的行为，在这点上，贝尔的判断是正确的。大脑并不是那种典型的自上而下（模块）的设计模式。它利用随机的不规则的组织结构创建一个无序的进程，这是一个没有可预见性的进程。若一个成功的数学模型用于模拟与仿真无序系统，用于了解诸如天气和金融市场等现象，这个模型同样也适用于大脑。

贝尔没有提到这种方法。他认为，大脑与传统的逻辑门和传统的软件设计相比有着巨大的差异，因此他得到了一个没有经过充分论证的结论，即大脑不是机器，也就不能用机器去模拟它。尽管他说得很对，标准逻辑门和传统模块化软件的组织并不是分析大脑的恰当方法，但这并不意味着我们无法在计算机上模拟大脑。因为我们可以用数学术语来描述大脑的运行原则，而我们又可以在计算机上对任何一个数学过程建模（包括无序过程），所以我们能够实现这种模拟。而且事实上，这些工作一直在做，并且一直在进步中。

尽管贝尔持有怀疑态度，但是他对于我们更好地理解我们的生理和大脑，并对它们加以改进的观点，表达了一种谨慎的信心。他写道：“不会出现一个超人类的年龄？为了这个目标，要有一个强大的生物先例出现在生物进化主要的两步中。第一，真核与原核细菌的共生；第二，在真核生物中出现多细胞生命形式.....我相信，一些不可思议的事情（像超人类的寿命）也许会发生。”

来自微管和量子计算的批评

量子力学是神秘的，意识也是神秘的。

Q.E.D.（量子电动力学——译者注）：量子力学肯定和意识有关系。

——克里斯托福·科赫，嘲讽罗杰·帕罗斯的量子计算理论，关于把神经微管作为人类意识之源²¹

在过去10年中，著名的物理学家和哲学家罗杰·帕罗斯连同麻醉师斯图亚特·哈默洛夫都认为神经元中的精细结构“微管”可以执行一个奇异的计算方式，即所谓的“量子计算”。正如我讨论过的那样，量子计算使用所谓的“量子比特”来计算，它能同时采取所有可能的组合方案。该方法可以被认为是并行处理的一种极端形式（因为每组量子比特值的组合都是同时测试）。帕罗斯表示，微管及其量子运算的能力使重建神经元和重新构建精神区域的概念变得复杂²²。他还推测说，大脑的量子计算是意识的原因，没有量子计算的生物系统或其他系统没有意识。

虽然有些科学家声称发现大脑中的量子波衰变（模糊的量子属性的分辨率，比如位置、旋转和速度），但是没有人提出，人类的能力需要量子计算的能力。物理学家赛斯·劳埃德说道：

我认为，微管在大脑中用（帕罗斯）和哈默洛夫提到的方式执行计算任务是不正确的。大脑是一个炎热、潮湿的地方。它不是一个开发量子相干性的有利环境。他们寻找微管叠加和装配/拆卸的种类，但这些种类似乎并没有表现出量子纠缠。无论如何，大脑显然不是一个经典的数字计算机。但我猜测它采用“古典”的方式完成大部分任务。如果你拿一个足够强大的计算机对所有神经元、树突、突触等建模，那么你就可能得到大脑执行大部分任务的想法。我认为大脑没有利用任何量子动力学执行任务。²³

安东尼·贝尔也表示：“没有证据表明，在大脑里面发生了大规模的宏观量子相干性，比如超流体和超导体。”²⁴

然而，即使大脑做量子计算，这也并不显著改变人类级计算（及超人类）的前景，也不表示大脑上传是不可行的。首先，如果大脑确实做了量子计算，这仅仅证实了量子计算是可行的。没有什么发现表明量子计

算局限于生物机制。如果存在生物量子计算机制，那么它应该是可以被复制的。事实上，最近用小规模的量子计算机做的试验看起来很成功。即使是常见的晶体管也依赖于电子隧道效应的量子作用。

有人认为，帕罗斯的立场意味着不可能完全复制一组量子态，因此，也不可能完全下载。那么，下载必须完整到什么程度呢？如果我们的下载技术发展到一个水平，“副本”极为接近原本，就像人和1分钟前的自己那么相像，那么对于任何目的来说，这种技术都足够好了，哪怕是不需要复制量子态的目的。随着技术的进步，副本会越来越接近原本，两者间的时间间隔会越来越短（1秒，1毫秒，1微秒）。

当有人向帕罗斯指出神经元（甚至神经连接）太大，以致不能进行量子计算，他想出了小管理论，一个使神经元量子计算成为可能的理论。如果一个理论要寻找复制大脑功能的障碍，那么这是一个有独创性的理论，不过它不会找到任何实际的障碍。然而，几乎没有证据表明为神经细胞提供结构完整性的微管能进行量子计算，以及这一能力有助于思维过程。即使人类知识和潜能的模型比目前对大脑的估计尺寸大，但神经元的模型功能还是不包括基于微管的量子计算。最近的实验表明，这种生物和非生物的混合网络的功能类似于生物网络，即使不是很确定，至少也强烈暗示着没有微管的神经元模型的功能是足够的。劳埃德·瓦特对人类听觉过程的复杂模型的软件模拟使用的计算量比他模拟的神经网络少几个数量级，这再次无法说明量子计算是必要的。在第4章中，我回顾了对大脑区域建模和仿真方面不断的努力；在第3章中，我讨论了对模拟所有大脑区域必要的计算量的估计，这种模拟基于不同区域的等价功能模拟。没有一个分析表明了为了实现人类级性能，量子计算是必要性。

一些神经元的详细模型（尤其是那些由帕罗斯和哈默洛夫给出的）确实让微管在树突和轴突的功能和增长中起了作用。然而，关于神经区域的成功神经形态模型似乎并不需要微管组件。对于那些确实考虑了微管的神经元模型，通过对整个无序的行为建模，而不是对每一个微管丝分别建模，结果似乎是令人满意的。然而，即使帕罗斯和哈默洛夫提出的微管是个重要因素，但它们并没有显著改变我上面讨论过的预测。根据我的计算增长模式，如果小管乘以神经元复杂度，哪怕只是1/1000（牢记，我们目前的无微管神经元模型已经很复杂了，其中每个神经元1000种连接顺序，还包括多元非线性，以及其他细节），都会将大脑能力推迟9年。如果因子是1/10⁶，仍然有一个17年的延迟；如果因子是1/10⁸

，那么将延迟24年（计算呈双指数增长）。²⁵

来自图灵支持派理论的批评

早在20世纪数学家阿尔弗雷德·诺斯·怀特海德和伯特兰·拉塞尔就发表了他们的开创性工作——《Principia Mathematica》（数学原理），这本书试图确定一些公理，让它们作为所有数学的基础。²⁶然而，他们最后没能证明可以生成自然数（正整数或自然数）的公理系统不会引起矛盾。据推断，这种证明迟早会被找到，但在20世纪30年代，年轻的捷克数学家库尔特·哥德尔证明了在这样一个系统中必然存在一些命题，他们既不是真命题也不是假命题，他通过这个证明震惊了整个数学界。后来发现，这些不可证明的命题就像可被证明的命题一样常见。哥德尔的不完全性定理从根本上表明逻辑、数学甚至计算的能力是有限的，这个定理被称为数学中最重要的定理，它的含义仍在争论中。²⁷

艾伦·图灵在理解计算的性质时得到了类似的结论。1936年，图灵提出了图灵机（详见第2章），并报告了一个意外的类似哥德尔的发现²⁸。图灵机作为计算机的一个理论模型发展至今，并形成了现代计算理论的基础。图灵在当年的论文中描述了无法解决的问题的概念，那就是存在这样的问题：它有明确的定义和唯一的答案，但我们不能通过图灵机计算。

事实上，存在一些不能用这个特定理论机器来解决的问题可能不会特别令人吃惊，直到考虑图灵论文的其他结论：图灵机可以模拟任何计算过程。图灵表明，不能解决的问题和能解决的问题一样多，每种问题的数量是无穷的最低值，所谓的可数无穷大（可以计算整数的数量）。图灵还论证了，在任何一个系统，判断任何逻辑命题的真伪都很困难，哪怕这个系统的逻辑强大到能描述自然数就是无解问题之一，这个结论类似哥德尔。（换句话说，任何程序都无法保证回答所有命题的问题。）

大约在同一时间，美国数学家和哲学家阿隆佐·丘奇发表了一个定理，在算术方面提出了类似的问题。丘奇独立地得到了与图灵相同的结论²⁹。综合来说，图灵、丘奇和哥德尔首次正式证明了逻辑、数学和计算机能做的事情有一定的限制。

此外，图灵和丘奇还分别改进了一个称为丘奇-图灵理论的声明。对于这一理论既有狭隘的解释又有广义的解释。狭隘的解释是：如果一个问题能出现在图灵机中，但得不到解决，那么它不能被任何机器解决。这

个结论来源于图灵证明，他证明了图灵机能够模拟任何算法过程。要想描述遵循一种算法的机器行为，这仅仅是一小步。

广义的解释是：图灵机无法解决的问题，人类思维也无法解决。这一论点的依据是，人的思维被人脑执行（身体也有一些影响），即人脑（和身体）包括物质和能量，这物质和能量遵循自然法则，这些法则能够用数学术语描述，而算法能够在任何精度上模拟数学。因此，存在着算法可以模拟人的思想。丘奇-图灵理论的广义版本假定人类能够想到的和知道的与可计算物质在本质上是等价的。

值得注意的是，虽然图灵无解问题的存在是一种数学论断，但丘奇-图灵理论根本不是一个数学命题。事实上，它只是一个在各种假设情况下的猜想，它处在我们关于精神哲学最深刻的辩论的核心³⁰。

基于丘奇-图灵理论的强大人工智能提出如下的批判意见：因为计算机能够解决的问题类型存在明确限制，但人类有能力解决这些问题，机器却永远不能完全赶上人类智能。然而，这一结论是经不起论证的。和机器相比，人类没有更多的能力处处解决这种“无解”的问题。在某些情况下，我们可以做些有根据的猜测，或采用启发式方法（一种程序，试着去解决问题，但不保证有用），并偶尔成功。但这两种方法都是基于算法的处理，这意味着机器也能够做这些。实际上，和人类相比，机器通常可以找到更快的更彻底的解决方案。

丘奇-图灵理论的广义阐述暗示着生物大脑和机器一样受制于物理学定律，因此，数学同样可以对它们建模和仿真。我们有能力对神经元的功能进行建模和仿真，这是已经论证了的，那么为什么不建一个有千亿个神经元的系统？这样的系统像人类智能一样，显示同样的复杂度，同样缺乏可预见性。事实上，我们已经有了结果复杂和不可预测的计算机算法（例如遗传算法），这些算法能提供问题的智能解决方案。丘奇-图灵理论暗示了大脑和机器实质上是等价的。

为了查看机器使用启发式方法的能力，可以考虑一个最有趣的无解问题——“忙碌的河狸”问题，它是蒂伯·雷德在1962年提出的³¹。每个图灵机器有一定量的状态，其内部程序可处于这些状态，每个状态对应其内部程序的步骤数量。有可能存在一些4个不同状态图灵机、5个状态图灵机等。在“忙碌的河狸”问题中，给定一个正整数 n ，使所有的图灵机都具有 n 种状态。这种机器的数量总是有限的。接下来，我们消除这些 n 种状态机器，它们进入一个无限循环（永不停止）。最后，我们选择一个

机器（它已经停止下来），它在自己的磁带上写入最多个1。这种图灵机写入1的数目就是所谓的n个忙碌的河狸问题。雷德表示，任何算法、任何图灵机都不能为所有n种状态计算这种功能。问题的症结是清理这些陷入无限循环的n种状态机器。如果我们编写一个图灵机能够生成和模拟所有可能的n种状态图灵机，当它试图去模拟进入了无限循环的n种状态机器其中一个时，这种模拟器本身就已进入了一个无限循环中。

尽管它是一个无解问题（最有名的一个），但是我们还是能够针对某些n确定忙碌的河狸功能（有趣的是，将我们能够确定其“忙碌的河狸”的n和我们无法确定的n分开也是一个无法解决的问题）。例如，很容易确定6的是35。对于7种状态，一个图灵机可以相乘，所以7种状态的忙碌的河狸是非常大的：22961。对于8种状态，一个图灵机可以计算出指数函数，所以8种状态的忙碌的河狸更大：约 10^{43} 。我们可以看到，这是一个“智能”功能，因为它需要更高的智能来解决更大的n的忙碌的河狸。

当我们算到10的时候，图灵机可以计算很多类型，这些计算对于人类来说是不可能的（不从计算机得到帮助）。因此，我们必须依靠计算机才能确定10的忙碌的河狸。答案需要用一个奇异的标记写下来，在这个标记中有一个指数堆栈，这些指数的级数是由另一堆栈的指数确定。由于一台计算机能保持这种复杂数字的轨迹，而人脑却不能，这证明计算机比人类更有能力解决无解问题。

来自故障率的批评

杰罗恩·拉尼尔、托马斯·雷和其他观察员都认为技术的高故障率是它持续指数增长的障碍。例如，雷写道：

我们最复杂的创造显示了惊人的故障率。轨道卫星、望远镜、航天飞机、星际探测器、奔腾芯片、计算机操作系统等似乎都超过了我们通过常规方法进行有效设计和制造的极限。我们最复杂的软件（操作系统和电信控制系统）已经包含了数千万行代码。目前看来，我们不太可能生产和管理包含数亿或数千亿行代码的软件。³²

首先，我们可能会问，雷指的惊人的故障率是什么。如前所述，很多重要的电脑复杂系统，如控制飞机日常自动飞行、着陆的系统，在医院监视重症监护室的系统，几乎从未发生故障。如果有人关心到惊人的故障率，就会发现那往往是人为的错误。雷提到英特尔微处理器芯片的问题，但由于这些问题非常微妙，几乎没有引起反响，而且很快被纠正。

正如我们所看到的，电脑系统的复杂度在不断扩大。此外，我们最前沿的努力是利用我们在人脑中发现的自组织模式来模仿人类智慧。在我们继续逆向设计人类大脑的过程中，我们会在模式识别与人工智能工具中添加新的自组织方法。正如我讨论过的，自组织方法有助于缓解对大到难以管理的复杂度的需要。我以前指出过，我们并不需要包含“数十亿行代码”的系统来模拟人类智能。

还有一点也很重要，缺陷是任何复杂过程的固有特征，当然也包括人类智能。

来自锁定效应的批评

杰罗恩·拉尼尔和其他评论家引证了“锁定”的前景，由于花费大量资金的基础设施使用了许多旧技术，因此这些旧技术被抵制和替换。这些人认为，在某些领域，比如交通领域，普遍和复杂的支持系统阻碍了创新，在这些领域我们没有看到和计算方面一样的快速发展。³³

锁定的概念不是发展交通运输的主要障碍。如果一个复杂的支持系统的存在必然导致锁定，那么为什么我们没有发现互联网所有方面的发展都受到这种影响？毕竟，互联网肯定需要巨大和复杂的基础设施。因为信息的处理和流动呈指数增长，但是，例如交通之类的领域已经达到了稳定水平（停留在一个S形曲线的顶部）的原因是指数增长的通信技术满足了交通领域的很多用途。例如，在我自己的组织中，同事们来自美国的不同地区。过去我们需要通过一个人或运输一个包裹来实现的及时需求，现在随着通信技术的发展，可以通过日益可行的虚拟会议（和文件的电子分布或其他智力创造）实现。其中一些工作拉尼尔自己正在推进。更重要的是，我们将会看到，基于纳米技术的能量技术会促进交通领域的进步，这个已在第5章讨论过。无论如何，随着虚拟现实不断在真实性、高分辨率和全沉浸上的进步，我们聚在一起的需求将越来越多地通过计算和通信来满足。

正如在第5章讨论的，以MNT为基础的制造业的到来将给能源、交通等领域带来加速回归定律。一旦我们可以从信息和非常便宜的原材料中创建几乎所有的物理产品，那么在传统的缓慢移动的产业中将看到每年增加一倍的性价比和容量，如同我们在信息技术领域看到的那样。能源和运输也将成为信息技术。

我们将看到基于纳米技术的高效、轻便、便宜的太阳能电池板和还有同样强大的燃料电池以及其他存储和分发能源的技术。廉价的能源将改变运输。纳米太阳能电池和其他可再生技术获取能源并将其存储在纳米燃料电池中，然后为各种运输提供清洁廉价的能源。此外，我们将能够生产设备，包括不同大小的飞行器，除了设计成本（只需要偿还一次）外几乎没有别的成本。因此，建立廉价的小型飞行装置将是可行的，这种装置可在几小时内将包裹直接送到你的目的地，而不用通过任何诸如运输公司这样的中介。通过纳米工程制造的微型翅膀，人们可以搭乘更大更廉价的交通工具，从一个地方飞到另一个地方。

信息技术已经深入每个行业。在未来几十年，随着GNR革命的全面实现，人类活动的每一个领域都会包括信息技术，从而将直接受益于加速回归定律。

来自本体论的批评：一个计算机可以有意识吗

因为我们不是很了解大脑，所以总是想用最新的技术作为一个模式去试图了解它。在我的童年里，我们总是确信大脑是一个电话交换机（“还能是什么呢”）。我很开心地看到，伟大的英国神经学家谢林顿认为大脑就像一个电报系统一样工作。弗洛伊德经常将大脑比做电磁液压系统。莱布尼兹把它比做一个工厂。据我所知，古希腊人有些人认为大脑功能像一个弹射器。很明显，目前大家认为它像数字计算机。

——约翰·R·塞尔，《Minds, Brains, and Science》

计算机（非生物智能）可以有意识吗？当然，首先我们必须弄懂这个问题的含义是什么。正如我前面所讨论的关于简明的问题是什么这一点，大家普遍存在着不同的观点。不管我们想如何定义这个概念，我们都必须承认，人们广泛地认为意识是人类至关重要（如果不是必须的）的属性。³⁴

加州大学伯克利分校杰出的哲学家约翰·塞尔深受他的追随者喜爱，他们坚信人类意识十分神秘，并且坚定抵制像我这样的“强大人工智能还原论者”将人类意识平凡化。尽管我一直觉得塞尔在其著名的“中文房间”论点中的逻辑是同义反复的，但是我盼望有一篇关于意识悖论的高深论文。因此，当我发现塞尔写的以下句子时，我有点意外：

“人通过大脑中一系列特定的神经生物过程产生意识”；

“最重要的事情是要认识到意识是一个生物过程，就像消化、哺乳、光合作用、有丝分裂”；

大脑是一台机器，确切说是一个生物机器。因此第一步是弄清楚大脑如何运作，然后制造一个人造机器，也可以用同样有效的机制产生意识；

“我们知道，大脑通过特定的生物机制产生意识”。³⁵

那么，究竟谁是还原论者？塞尔显然希望我们能够衡量另一实体的主观性就像我们测量光合作用的氧气输出一样容易。

塞尔说我“经常引用IBM的深蓝电脑作为高级智能的例子”。当然，情况

是相反的：我引用深蓝不是为了抨击象棋问题，而是检验它阐明的人和机器解决游戏问题的对比。正如我之前指出的，因为国际象棋程序的模式识别能力正不断增长，所以国际象棋机器开始将传统机器的分析能力和更加类似人类的模式识别能力结合起来。人类范式（自我组织的无序过程）提供了深厚的优势，我们可以识别和应对非常微妙的模式，而且我们可以制造出具有相同能力的机器。这确实也是我自己感兴趣的技术领域。

塞尔最著名的理论就是“中文房间模拟”，在过去的20年间，塞尔对这个模拟发表了各种阐释。在他1992年的著作《The Rediscovery of the Mind》中，我们可以看到比较完整的描述：

我相信，最有名的反对强人工智能的观点就是我的中文房间论点了……它表明，系统可以实例化一个程序，以便让系统完美地模拟人的一些认知能力，如理解中文的能力，哪怕该系统完全不了解中文。设想一下，将一个完全不懂中文的人锁在一个房间里，这个房间有很多中文符号，以及一个用中文回答问题的计算机程序。这个系统的输入是用中文问一些问题，系统的输出是用中文来回答这些问题。我们可以假设该程序非常好，好到难以区分答案是由系统回答的还是由普通的中国人回答的。但是，无论是屋内的人还是这个系统的任何其他部分都不能从字面上理解中文；由于编程计算机有的东西系统都有，因此这个编程的计算机也并不懂中文。因为程序是完全正规的语法，而思想有精神内容和语义内容，所以任何试图用计算机程序产生思想的行为都偏离了思维的本质³⁶

。

塞尔的描述阐述了不能评价大脑处理和能够复制本身的非生物过程的本质。他从开始就假设在房间里的“人”不懂得任何事情，因为毕竟“他只是个计算机”，从而阐释自己的偏见。塞尔得出了计算机（由人执行）不理解的结论毫不奇怪。塞尔把这种同义重复和基本的矛盾结合在一起：电脑并不懂中文，但（根据塞尔）能用中文令人信服地回答问题。但是，如果一个实体（生物或非生物的）真不明白人类的语言，它很快就会被聪明的对话者揭露。此外，该程序能令人信服地响应，那么它必须和人脑一样复杂。房间里的人若按照几百万页的程序执行，这要花费了数百万年时间，到那时这些观察员已经死了。

最重要的是，这个人的地位就像CPU，只是一个系统的一小部分。虽然这个人可能看不见理解能力，但是理解能力将会分散到程序本身的整个模式，而这个人必须做很多笔记来跟进程序。我理解英语，但我的神经

元不理解。我的理解能力表现在神经递质、突触裂隙和神经元之间连接的巨大模式中。塞尔没能对信息的分布模式和它们表现出的性质的意义做出解释。

从塞尔和其他唯物主义哲学家对人工智能前景的批判中，我们看不到计算过程可以是无序、不可预测、杂乱、短暂、自然发生的，就像人脑一样。塞尔不可避免地回到了对“符号计算”（symbolic）的批判：对有序连续的符号处理无法重新创建真实想法。我认为这是正确的（当然这取决于我们对智能过程建模的水平），但符号的处理（塞尔暗示的意义）并不是建立机器或电脑的唯一方法。

所谓的计算机（问题的一部分是“计算机”这个单词，因为机器能做的不止“计算”）并不局限于符号处理。非生物实体也可以使用出现的自组织范式，这是一个正在进行的趋势，而且在未来几十年将会变得更加重要。计算机将不必只使用0和1，也不必全是数字的。即使电脑是全数字式的，数字算法可以在任何精度上（或无精度）对模拟过程进行模拟。机器可以大规模并行，机器可以使用无序的应急技术，就像大脑一样。

我们用于模式识别系统的主要计算技术并没有使用符号处理，而是用了自组织方法，就像在第5章描述的（神经网络、马尔可夫模型、遗传算法、基于大脑逆向工程的更复杂的范式）。一个机器如果能真正做到塞尔在中文房间论点中描述的那样，那么它不会是仅仅处理语言符号的，因为这种做法行不通。这是中文房间背后的哲学花招。计算的性质不仅局限于处理逻辑符号。人类大脑正在进行一些事情，而且没有什么能防止这些生物过程被逆向设计以及在非生物实体中复制。

看起来，塞尔的追随者相信塞尔的中文房间论证证明了机器（非生物实体）不可能真正理解事物的意义，比如说中文。首先，很重要的一点是确认系统中的人与电脑，就像塞尔所说那样，“能完美地模拟人的认知能力，譬如理解中文的能力”，而且能用中文令人信服地回答问题，还必须通过中文的图灵测试。请注意，我们所说的回答问题，不是回答一个固定问题列表中的问题（因为这是一个不重要的任务），而是回答任何意料之外的问题，或者是来自一个知识渊博的审判官的一系列问题。

现在，在中文房间的“人”几乎没有任何意义。他只是把东西放到电脑中，然后机械地传递电脑的输出（或者是执行程序规则）。房间里既不需要计算机也不需要人。对塞尔描述的解释暗含了执行程序的人并没有改变任何事，除了让系统时间变慢很多和让系统非常容易出错外。人

和房子都不重要。唯一重要的是计算机（电子计算机或由执行程序的人组成的计算机）。

计算机要想真正实现“完美的模拟”，它就必须理解中文。由于前提是计算机必须具有理解中文的能力，所以“编程的计算机并不懂中文”的说法是完全与之矛盾的。

现在我们所知道的计算机和计算机程序并不能成功地执行上面描述的任务。因此，如果我们把上面提到的计算机理解成现在普通的电脑，那就不能满足上述的前提。计算机能完成这个任务的唯一办法就是它具有和人一样的复杂度和深度。图灵认为图灵测试敏锐的洞察力在于能否令人信服地回答来自一个聪明的人类提问者的所有可能问题，并且是用人类的语言回答，而且考查点要涉及人类智能的方方面面。能够实现这个任务的计算机未来几十年将出现，它需要具有像人类一样的复杂性甚至更复杂，还要深刻理解中文，否则就算它宣称能完成这样的任务，也没人信服。

那么，仅仅声称“计算机不能从字面上理解中文”是没有意义的，因为它和这个论证的大前提相悖。声称计算机没有意识也不是一个引人注目的论点。为了和塞尔的其他陈述保持一致，我们必须断定我们真的不知道计算机是否有意识。对于相对简单的机器，包括普通的计算机，即使我们不能肯定地说这些实体没有意识，但是起码它们的行为，包括其内部运作，并没有给我们留下它们有意识的印象。这样的计算机能够真正在中文房间里做需要的事情，肯定是假的。能做到这种任务的机器至少应该看起来有意识，哪怕我们不能绝对地说它有意识。所以，“计算机（计算机、人、房间的整个系统）显然没有意识”远非一个引人注目的论点。

在上述的引述中，塞尔说“程序是完全正规的或符合语法的”。但是正如我之前指出的，这是一个不成立的假设，因为塞尔并没有对这样一种技术的要求做出解释。这个假设隐藏在很多塞尔对人工智能的批评中。一个正规的或符合语法的程序无法理解中文，也不会“完美地模拟人的认知能力”。

不过，我们并不一定要使用那种方式来制造机器，我们可以采用与人脑性质相同的形式来制造它们：使用大规模并行的无序应急方法。此外，机器的概念并不一定将其专长限制在只能理解语法层次的东西，而不能掌握语义层次的东西。事实上，如果塞尔中文房间概念中的机器没有掌

握语义，就不能令人信服地用中文回答问题，这与塞尔自己的前提相矛盾。

在第4章中曾讨论过，人们一直在努力逆向设计人脑，并将这些方法应用于有充足动力的计算平台。所以，像人脑一样，如果我们教计算机中文，它就会理解中文。这似乎是一个显而易见的事实，但这也是塞尔提出的问题之一。用他的话说，我谈论的不是模拟本身，而是组成大脑的大量神经元簇的因果动力的副本，至少这种因果动力与思想显著相关。

这样的副本有意识吗？我认为关于这个问题，中文房间没有给我们任何答案。

同样重要的是，塞尔的中文房间论证也可以应用于人类大脑本身。虽然这不是他所希望的，但是他的推理却暗含了人脑没有理解力。他写道：“计算机成功地处理正规符号。符号本身是毫无意义的，只有和我们发生联系时，它们才有意义。计算机对此一无所知，它只是随机地给出符号。”塞尔承认生物神经元是机器，那么，如果我们只是将“计算机”替换为“人类大脑”，“正式符号”替换为“神经递质含量和相关机制”，就会得到下列信息：

[人脑]成功处理[神经递质含量和有关机制]。[神经递质含量及有关机制]本身毫无意义，只有和我们发生联系时，它们才有意义。[人脑]对此一无所知，它只是随机给出[神经递质含量及有关机制]。

当然，神经递质浓度和其他神经细节（例如神经元之间的连接和神经递质模式）本身没有意义。实际出现在人脑的意义和理解力是这样的：一个活动的复杂模式的性质。机器也是同样的道理。虽然“随机符号”本身没有意义，但是紧急模式（**emergent pattern**）在非生物系统中可能有同样的作用，就像它们在生物系统（如大脑）中一样。汉斯·莫拉维茨曾写道：“塞尔在错误的地方寻找理解力……（他）似乎不能接受真正的意义可能存在于模式中的事实。”³⁷

让我们来看看中文房间的第二个版本。在这一概念中，房间里没有计算机模拟人的计算机，但是房间里有很多人，这些人都在处理写着中文符号的纸——本质上，就像很多人在模拟计算机。这个系统将用中文令人信服地回答问题，但所有的参与者都不懂中文，我们也不能说整个系统真正理解中文，至少不是有意识的。所以塞尔嘲笑认为这个“系统”有意识的想法。他问道：我们所说的意识是什么呢？是纸条还是房间？

这个版本的一个问题是，它远远没有解决用中文回答问题这一具体难题。实际上，它更像是一个对机器式过程的描述，这个过程使用了类似表查询的算法，用一些可能比较简单的逻辑处理来回答问题。它也许能回答一些录音问题，不过数量有限。而且如果它能回答任何可能被问到的问题，那么它必须要能理解中文，用中国人说话的方式。另外，如果它想通过中文图灵测试，那么它一定要像人脑一样聪明和复杂。简单的表查询算法太过简单，不足以完成这种任务。

如果我们要重建一个理解中文的大脑，在这个过程中使用功能跟齿轮一样少的人，我们还确实需要几亿人才能模拟人脑中的过程（本质上是人们将模拟一台计算机，这个计算机能模拟人类大脑的方法）。这将需要相当大的空间。即使组织效率非常高，这个系统的运行也会比它试图重建的说中文的大脑慢几千倍。

事实是，现在这几十亿人不需要知道中文，也不需要知道在这个精心设计的系统中正在进行什么。对于人脑的神经元连接来说，也是这样的。这百万个神经元连接对我现在写的这本书一无所知，它们也不懂英语，也不理解我知道的其他事情。它们不关心本章的内容，也不关心我所关心的事情。也许它们完全没有意识。但是它们的整体系统，也就是我本人，是有意识的。至少我能说我是有意识的（到目前为止，这个说法没有遇到挑战）。

因此，如果我们将塞尔的中文房间扩大成一个它需要成为的相当大的空间，那么谁能说整个系统没有意识？这个系统包含了几十亿模拟懂中文的大脑的人。这个系统懂中文的说法当然是正确的。我们不能说它比别的大脑过程的意识少。我们不知道别的实体的主观感受（至少在塞尔的一些其他著作里，他看起来承认这个限制），而这个庞大的、具有数十亿人的“房间”就是这样一个实体，也许它是有意识的。塞尔只是宣称和鼓吹它没有意识，还说这个结论是显而易见的。如果你认为它只是一个房间，只能和处理少数符号的少数人谈论，那也许是这样的。但是我会说这种系统远远不能工作。

另一个隐藏在中文房间论证中的哲学疑惑与系统的复杂度和规模有关。塞尔说，虽然他无法证明他的打字机或录音机没有意识，但是他认为它们没有意识是显而易见的。为什么显而易见？至少有一个原因是因为打字机或录音机是相对简单的实体。

但是，一个像人脑一样复杂的系统是否存在意识并不是显而易见的。事

实上，这个系统可能是对真正人脑的组织和因果动力的直接复制。如果这样的一个系统表现得像人一样，并且能用人类的方式来理解中文，那么它是否有意识？答案已经不再那么显而易见。塞尔在中文房间论证中说道，我们讨论的是一个简单机器，然后认为这样一个简单的机器有意识，他觉得我们非常荒唐。这个谬论和系统的规模还有复杂度非常相关。仅仅只有复杂度并不一定赋予我们意识，但是中文房间完全没有告诉我们系统是否有意识。

库兹韦尔的中文房间。我将自己对中文房间的概念称为库兹威尔的中文房间。

在我想象的实验里，房间里有一人。房间被装饰成明朝风格，在一个基座上面放了一台机械打字机。打字机被改造过，因此它的键盘是中文符号，而不是英文字母。并且这个机械联动装置也被巧妙地修改了，当一个人用中文输入一个问题时，打字机打出的不是该问题，而是该问题的答案。现在，房间里的人收到中文字符的问题，然后如实在打印机上按下适当的键。打字机打出的不是问题，而是合适的答案。然后人将答案传到房间外面。

这里我们描述的情景是：有一个房间，房间里有一人；在外界看来，这个人看起来懂中文，其实显然不是；很显然打字机也不懂中文，因为它只是一个普通的打字机，仅仅是它的机械联动装置被修改过。那么，毕竟事实是房间里的人能用中文回答问题，那么我们能说谁或什么东西懂中文？难道是装饰品吗？

现在，你可能对于我的中文房间有一些反对意见。

你可能会指出，装饰品似乎没有任何意义。

是的，这是事实。底座也没有意义。人和房间也可以被认为同样没有意义。

您可能还会指出这个前提是荒谬的。仅仅改变打字机的机械联动装置不可能使它能够用中文令人信服地回答问题（更别提我们不能把数千个汉字符号放在一台打字机的键盘上）。

是的，这也是一个有根据的反对。关于中文房间的概念，我和塞尔唯一的不同是，在我的概念中它显然不会工作，而且性质是非常荒谬的。可

能对许多读者来说，塞尔的中文房间理论不那么明显。不过，事实上都是一样的。

然而，我们可以按照我的观念展开工作，正如我们可以按照塞尔的概念工作一样。你所必须做的是让打字机的连接如同人的大脑一样复杂。这就是理论上（不是实际上的）的可能。但是“打字机的联动装置”并不拥有如此巨大的复杂性。同样是塞尔的一个操纵人的描述纸条或以下的规则或预定计算机程序。这些都是同样可能会引起误导的观点。

塞尔写道：“人类大脑造成的实际作用是通过一系列具体的神经生物学的意识在大脑的进程中运行。”但他尚未提供任何这样一个令人信服的观点作为基础。为了说明塞尔的观点，我引述了他给我的信件：

结果可能会像白蚁或蜗牛，而不是简单的生物体的基本意识.....事情的本质是认识到：一个意识是一个生物过程，如消化、哺乳、光合作用，还有有丝分裂，你应该寻找特定的生物就像你寻找其他生物过程的特定生物。³⁸

我回答说：

是的，意识从大脑和身体的生物过程中产生，这是个事实，但至少有一个区别。如果我提出这个问题，“特定实体排放二氧化碳吗”，通过客观的测量，我可以明确地回答。如果我提出这个问题，“这是实体意识吗”，我可能能够提供推理论据，并且可能是强有说服力的，但是不清楚客观的测量会是什么结果。

关于蜗牛，我说：

现在，当你说一个蜗牛可能有意识的时候，我想你说的是以下几点：我们可能发现了为人类的意识提供特定的神经生理依据（称为“X”），如果它不存在，人类就没有意识。因此，我们大概有一个为意识提供了客观衡量的依据。然后，如果我们发现，对于蜗牛来说，我们可以得出结论，这是意识。但是这个推理的结论是，只有一个强大的建议，但不是主观的经验证明蜗牛具有意识。它可能是人类意识的，因为它们有“X”以及其他一些物质基本上所有的人分享，这种称为“Y”。“Y”可能与人类的复杂程度相关，或跟我们是有组织存在某种相关性，或与量子方式有关，我们的微观的性能（虽然这可能是部分的“X”）或者完全是其他的什么东西。那个蜗牛有“X”，但并没有“Y”型，所以可能没有意

识。

将如何解决这样的说法？你显然不能问蜗牛。即使我们可以想出办法提出了这个问题，它的回答是，这仍然不能证明它具有意识。你情不自禁地说其相当简单的或多或少的预测行为。指出它有"X"可能是个好论据，很多人可能会被它说服。但是这只是一个争论，而不是直接测量蜗牛的主观经验。而且客观测量是不符合主观体验的概念。

现在正在发生许多这样的争论，虽然没有这么多的蜗牛以及更高级的动物。对于我来说，很显然狗和猫的意识是有意识的（而且塞尔曾经说过他也承认这点）。但是，并非所有的人接受这点。我可以猜想加强论据的科学方法，通过指出与这些动物和人类有许多相似之处，但同样这些只是争论，却没有科学证据。

塞尔希望能够找到意识的一些清晰的生物上的“原因”，他自己似乎都无法承认这点，要么理解力要么意识可能来自一个总体的活动模式。其他哲学家如丹尼尔·代尼特已阐明了这样的“模式出现”的理论意识。但无论是“引发的”通过一个特定的生物过程或一个活动模式，塞尔都没有为我们提供如何衡量或侦测意识的基础。在人类中寻找一个与神经相关的意识并不证明意识在相同的关联的其他生物体也会必然出现，也没有证明据表明在没有这种关联的情况下表示就没有意识。这种推理的论点必然被中断，因为缺少直接的测量。通过这种方式我们很清楚地知道，例如由哺乳和光合作用客观衡量的过程所反映的意识就会不同。

正如在第4章讨论的，对人类和其他一些灵长类动物来说，我们已经发现了一个独特的生物学功能：梭形细胞。它们的细胞具有深厚的分支结构，这些细胞看起来大量参与意识反应，特别是情感的反应。难道梭形细胞结构是为人类意识打下神经生理基础的"X"？什么类型的实验可以证明？猫与狗没有梭形细胞，这是否能够证明它们没有意识的经验？

塞尔曾写道：单纯从神经生物学的角度是不可能推断出椅子或计算机有意识。“我同意椅子看起来没有意识，但是对于计算机未来可能会具有和人类相同的复杂性、深度和微妙的变化并具备人类的能力，我不认为我们可以排除这一可能性。塞尔只是假定它们没有意识，然而却是用一句”不可能“来支持这个论点。塞尔的”论据与这种同义反复相比，实在是没有更多实质性的内容了。

目前，塞尔反对计算机有意识的部分立场认为，现在的计算机只是看起

来没有意识。它们的行为是靠不住的、公式化的，甚至它们有时还不可预测。但正如我前面指出的，今天在计算机上即使进步了一万倍，也远远比不上人类的大脑，至少有一个原因，它们不具备简单人类思维的品质。但差距正在迅速缩小，并最终在几十年后发生逆转。我在书中讨论到的21世纪早期的计算机即将出现，这些计算机的运作与现在相对简单的计算机有很大不同。

塞尔阐明自己的观点：非生物实体只能处理逻辑符号，但他似乎不知道其他的范例。处理符号尽管是法则式专家系统和人机博弈程序的主要工作方式，但目前的趋势是朝着其相反方向自组织混沌系统发展，自组织混沌系统采用生物激励方法，其中包括来源于人脑的数千万神经元的反向工程的进程。

塞尔认识到生物神经元就是一些机器，事实上，整个大脑就是一台机器。如第4章所说的，我们已经十分详细地创造了与实际神经元团簇一样的因果动力个体神经元。将我们努力的结果扩大到全人类，理论上是没有障碍的。

来自贫富差距的批评

杰罗恩·拉尼尔和其他人都表达了另一种观点，即存在这样一种“巨大的”可能性：通过这些技术，富人会获得其他人无法获得的某些有利条件和机会。³⁹ 这样的不公平并不稀奇，由于这一问题的出现使得加速回报理论有了重要的和有益的影响。由于正在进行的价格效能指数的增长，这些技术很快就会变得不值钱甚至免费。

网上免费的高质量信息是十分多的，而这些在几年前并不存在。如果有人指出目前只有世界的一小部分可以使用网络，我们要想到的是网络的激增还只在初始阶段，其实正在以指数方式增长。甚至在世界最贫困的国家网络也在快速蔓延。

每一种信息技术在开始时都有其早期采用的版本，而且不是很奏效，只为技术精英所掌握。后来技术越来越奏效，价格也只不过稍贵。接下来会越来越好而且价格便宜。最后会十分好而且免费。比如手机就处在后两个阶段之间。细想十年前，如果电影里有人取出一部可移动电话，那就说明这人非富即贵。20年前，世界范围的好多国家的大多数人口还在用双手务农，现在他们都拥有手机广泛应用的繁荣的以信息为基础的经济。从早期使用起来很昂贵，到现在使用起来廉价且无处不在，大约花费了10年的时间。但是若每十年都保持这种倍增范式迁移率，从现在起这种差距会减少到5年。20年后，差距将会只需2~3年（见第2章）。

贫富差距仍然是一个重要的问题，在每一个时间点都有很多事能做和应该做。令人遗憾的是，发达国家在与非洲或者其他地方的贫穷国家分享抗艾滋病药物时还不具有前瞻性，结果是数百万人失去生命。然而信息技术在价格效能方面的指数增长会很快缓和这种差距。药物本质上就是信息技术，就如计算机、通信和DNA的碱基对测序这些技术的倍增范式迁移率一样，每年我们也能看到药物的倍增范式迁移率效益。抗艾滋病药物刚开始时效果不是很好，但一个病人每年的花费在一万美元。现在抗艾滋病药物的效果已经很不错了，哪怕在非洲最穷的国家，每年每个病人的花费也就在100美元。

第2章引用了世界银行报到的2004年发展中国家（超过6%）相对于世界平均水平（4%）的高经济增长，以及总体贫民数的减少（如从1990年起，东亚和太平洋区域的贫困级人口减少43%）。另外，经济学家泽维

尔·塞拉-世·马丁核实了全球个体间的不平等性的8项测试，发现在过去的25年里，所有的不平等都在降低。⁴⁰

来自政府管制可能性的批评

在这里谈论的人们表现得如同政府与他们的生活无关。他们也许希望这样，但是事与愿违。就我们今天所知的话题而言，他们最好知道这些话题会在全国范围内讨论。大部分美国人不会熟视无睹地让某个精英剥夺他们的个性，然后把他们上传到网络空间。他们会对此有意见。这个国家将会有一场激烈的讨论。

——里昂·菲尔特，副总统戈尔的前国家安全顾问，在2002年前瞻性会议上

不会死亡的人将不再是人，死亡的意识激发我们极度的渴望和最伟大的成就。

——利昂·凯斯，总统生物伦理委员会主席，2003

对于政府控制的批评主要在于其会减缓甚至停止科技的加速进步。虽然管理是一个重大的问题，但是实际上它对本书中讨论的趋势没有显著的影响，而这种趋势在适当的地方却形成了广泛的控制。非全球性集权主义国家的经济和其他技术进步的基本力量只会不断成长与进步。

考虑到干细胞研究的问题，曾经引起特别的争议，也正是因为如此，美国政府严格限制其资金投入。即使在细胞疗法领域对于胚胎干细胞的争议，也只会有助于通过其他的途径来达到相同的目标。比如，转分化作用（将一种类型的细胞比如皮肤细胞转化成另外一种类型的细胞）已经在快速向前迈进。

正如在第5章中提到的，最近科学家们已经证实了将皮肤细胞改变为其他类型细胞的能力。这种方法代表了细胞疗法的最高水平，它保证可以无限供应携带有患者自身DNA的分化细胞。它还容许选择的细胞没有DNA错误，并将最终能够提供广泛的端粒酶串（使细胞更年轻）。即使是胚胎干细胞本身也在向前迈进，比如，哈佛大学新的重要研究中心和加州3亿美元成功的启动资金项目支持这项工作。

由于对干细胞研究的限制已经令人遗憾，所以细胞疗法的研究就很难说了，更别提生物技术的广泛领域已经在很大程度上受到影响。

里昂·菲尔特的引自上文的观察结果揭示了一个有关信息技术的误解。信息技术不是只提供给精英。正如讨论到的，理想的信息技术会迅速普及并且免费。只有当它们没有运转良好（在发展的早期阶段），它们的价格才如此昂贵，并且局限于在精英中应用。

早在21世纪的20年代，网络将给我们提供一个涵盖视觉和听觉的全浸入式的虚拟现实，图像会通过眼镜或棱镜直接写入我们的视网膜，超高带宽的无线网络接入会编织到我们的衣服里。这些功能并不仅仅提供给特权阶层。就像手机，当手机的技术成熟的时候它们将无处不在。

21世纪20年代，在我们的血液中将定期的有纳米机器人以保证我们健康和增强我们的心理能力。到这些技术成熟的时候，它们也将会便宜和应用广泛。正如前面讨论的，减少信息技术应用的早期和晚期之间的滞后将会加速技术自身的发展，从目前的10年期减少到几年。一旦非生物信息立足于我们大脑，它的能力至少会每年翻一倍，这是由其信息技术的性质决定的。因此，信息的非生物部分不会花费很长时间就将占据主导地位。这对有钱人来说不是一个奢侈的保留，就如同今天的搜索引擎。并且到了一定程度将会有一场关于能力增强的可取性的辩论，很容易预测谁会赢，因为那些有增强信息的人将会是更好的辩手。

不可忍受之社会机构的迟缓。麻省理工学院的高级研究科学家约尔·库奇-葛申菲尔德曾写道：回顾过去一个半世纪的历程，每一个政权的更迭对于之前的困境都是一个解决方案，但随后的时代会创造出新的难题。比如，Tammany Hall和政治赞助方式在基于不动产的上流社会占统治地位的系统上有一个较大的改进，很多人都参与到这一政治进程中。然而，资助方式产生了新问题从而导致了公务员模式——通过引入精英来解决之前出现的问题。然后，当然，当公务员成为技术创新的障碍时，我们又转而重组政府。而故事还在继续，葛申菲尔德指出，即使在他们的时代是创新的社会机构，这也依然是创新的拖累。

首先，我要指出的是，社会机构的保守主义不是一种新现象。这是创新的进化过程中的一部分，在这方面加快收益的规律一直在起作用。其次，创新有一种方法能够解决机构所施加的限制。分散化技术的出现使人能够绕开种种限制，而且也代表了加快社会变迁的一个主要手段。作为许多例子中的一个，通信规则的整体正处在被新兴点对点技术如IP电话（VOIP）绕过的过程中。虚拟现实将会是代表社会加速变迁的另外的方式。

人们最终能够在沉浸式和高度逼真的虚拟现实环境中发生关系和活动，而这些是在现实的环境中所不能够或者不愿意做的。

随着技术越来越先进，它日益替代了传统的人类的活动能力，并且适应很快。在计算机出现的初期使用时需要熟练的技术，而在今天使用计算机系统如手机、音乐播放器和Web浏览器则只需要少得多的技术能力。在21世纪的第二个十年中，尽管目前图灵测试还未能成功，但是我们将定期地与虚拟的人物发生关系，而它们将会具有足够的自然语言理解能力在一个范围广泛的任务中担当我们的个人助理。

一直以来，一直存在早期和晚期新范例采用者的混合。今天我们看到仍然有人像在第七世纪一样的生活。这并不妨碍早期的应用者新的观点和社会习俗。例如新的基于Web的社区。几百年前，只有少数人如达·芬奇和牛顿在探索了解和联系世界的新途径。今天，世界范围内参与和有助于应用的社会革新并且适用技术革新的社区占了相当的比例，另外的是加速返回法的反映。

来自整体论的批评

另一种常见的批评这样说道：机器是严格按照模块层次结构组织的，而生物是基于元素的整体组织，每个元素都影响着另外的元素。生物独特的能力来源于这种整体设计。此外，只有生物系统可以使用这个设计原则。

新西兰奥塔哥大学的生物学家迈克尔·丹顿指出了生物实体和他所知道的机器两者设计原理的明显不同。丹顿形象地把生物描述为“自我组织、自我指示.....自我复制.....互惠.....自我形成、具有整体性。”⁴¹然后他做了一个没有经过论证的转变，简直是一个180°的转变。他说，这种有机形式只能通过生物过程创建，并且这种形式是“不可改变的.....深不可测.....基本”的存在现实。

丹顿对有机系统的美感、复杂、奇异及相互联系感到“震撼”和“惊奇”，从非对称的蛋白质形状带来的“怪异的其他世界的印象”到诸如人脑这种高阶器官的非凡的复杂度，这种感觉我也有。此外，我同意丹顿说的生物设计代表了一套深刻的原则。但是，准确地说，我的论点是：机器（以人为导向的设计的衍生物）可以访问并已经在使用同样的原则，但是丹顿和其他的整体论学派的批评家都不承认和回应。这一直是我自己的工作要点，并代表了未来的潮流。模拟自然的想法是使未来的技术提供巨大能力的最有效的方式。

生物系统并不完全是整体的，现代的机器也不完全是模块化的，它们都存在于一个连续体上。我们可以在分子水平上确定自然系统中的功能单元，以及在更高的器官和大脑区域层次上的更为明显的动作识别机制。表现在大脑特定区域的理解功能和信息转换的过程正在顺利进行，正如在第4章中讨论的那样。

大脑的每一个方面都与其他方面相互作用的说法是一种误导，说不存在可能理解它的方法也不对。研究人员已经在一些大脑区域确定了信息转换过程，并对此进行了建模。相反，有无数的例子显示，机器并没有用模块的方式来设计，而被设计成各个方面紧密联系，比如在第5章描述的遗传算法的例子就是这样。丹顿写道：

今天，几乎所有的专业生物学家都采用了这种机械/还原的方法，并假设一个生物体（如手表的齿轮）的基本组成部分是最重要的事情，而生

物体（如手表）不超过这些部件的总和。而且由部分来决定整体的属性，对一个生物体（如手表）的属性的完整描述可以通过单独的特征部分来表示。

丹顿忽视了这里的复杂过程的能力，认为用新兴的属性可以超越“孤立的部分”。他似乎认识到这一潜在的性质时写道：“一个真正意义上的有机形式.....代表真正出现的现实。”但是，几乎没有必要借助丹顿的“生命哲学模式”来解释出现的现实。急诊性能来源于权力的模式，并没有限制模式及其紧急属性的自然系统。

丹顿似乎承认模拟自然的方法的可行性，他写道：

从蛋白质上升到生物体成功构建新的器官的形式将需要一种全新的方法，一种从上到下的设计。由于有机体的部分只作为一个整体存在，有机体不能被一点一点地指定而是由一套相对独立的模块组成，因此整体不可划分的单元全部一起被指定。

丹顿在这里提供了很好的意见，并描述了我和其他研究人员使用在模式识别、理论复杂度（无序）、自组织系统领域通常使用的工程方法。丹顿似乎不知道这些方法论，但是，最后这句不成立。

正如在第5章讨论的，我们可以创建自己的“怪异的其他世界”，但是通过应用发展的有效设计。我说明了如何运用进化的原则，通过遗传算法以创建智能设计。我对这一方法的经验是，良好的结果代表丹顿描述的有机分子在“设计显然不合逻辑和没有任何明显模块化或规律.....这种安排的、纯粹的混乱.....[和]非机械的印象”。

遗传算法和其他自下而上的自组织设计方法（如第5章讨论的神经网络、马尔可夫模型和其他人的方法）集成了一个不可预知的因素，因此这种制度的结果是每次运行的都是不同的过程。尽管具有共同智慧的机器是确定的和可预见的，但是机器还是可以获得很多现在的随机来源。当代量子力学的理论假设了深刻的随机性处于生存的核心。根据量子力学的某些理论，似乎任何系统在宏观层面确定的行为只不过是压倒一切统计结果的基于根本无法预料的事件的巨大数字。此外，斯蒂芬·沃尔夫勒姆和其他人的作品已经证明，即使一个系统，在理论上可以完全确定但可以随机产生有效的、最重要的、完全不可预知的结果。

遗传算法和类似的自我组织的方法引起的设计通过驱动的做法不可能抵

达模块组成。在“陌生.....[是]混乱.....动态互动的部分”的整体，丹顿专门为有机结构很好地描述了这些人为发起的混乱过程的结果的品质。

在将遗传算法应用于我所从事工作的过程中，我发现该算法能够逐步改建设计。遗传算法并不是通过每次设计单独的子系统而达到其设计目的，而是通过每次对整体施加影响而达到设计目的的，这使得很多小的分布式的改变贯穿整个设计，从而渐进式地改进了整体性适配或解决方案的能力。解决方案本身从简单到复杂，逐渐呈现出来。遗传算法所构建的解决方案通常具有非对称性、不美观，但效率高的特点，这与自然极为相似，当然也有可能产生优雅甚至美丽的解决方法。

丹顿认为现代的大多数机器如当今的常规计算机都采用模块化方式设计，他的想法是正确的。这种设计想对于传统技术来讲有着某种重大的工程优势。例如，计算机有着比人类更为准确的记忆，同时和单独的人类智慧相比，他可以执行更有效地逻辑转换。最重要的是，计算机可以随时分享他们的存储内容和模式。正如丹顿阐述的那样，自然的混乱的非模块化方法也具有明显的优势，以及阐明丹顿，这一点已经被人类模式识别的强大能力所证实。但这是完全没有道理的飞跃说，因为当前的（同时正在减少！）对于人类导向技术的限制，这种技术是生物系统本身所继承的，所固有的，同时存在于世界之外的。

大自然的精致设计（例如眼睛）得益于深刻的进化过程。我们当今最复杂的遗传算法包含数万位遗传密码，而像人类这样的生物实体，是由数十亿比特的遗传密码所组成（压缩后仅数千万字节）。

然而，就像所有的信息化的技术一样，遗传算法和其他所有的启发式算法的复杂性都是呈指数级别增长的。如果我们仔细的检查这种复杂性的增长率，我们会发现它将在未来的两年内达到与我们人类智慧复杂性相符的程度，这一点也从我们对软件和硬件发展趋势的估计中得到印证。

丹顿指出，我们还没有成功的以三维形式表现蛋白质结构，“甚至它只有100个组成成分”。但是，就是在最近几年我们就可以利用一些工具来虚拟化这些蛋白质的三维模型。此外，模拟原子间的相互作用力需要拥有每秒 10^{14} 次计算能力。在2004年底，IBM推出了一版蓝色基因/L的超级计算机，它拥有每秒大约 10^{14} 计算能力。这正如它的名字所暗示的，它可望能够提供模拟蛋白质三维结构的能力。

我们已经成功地切割，拼接和重新安排遗传密码，并利用自然本身的生

化工厂生产复杂的生物酶和其他物质。诚然，现在这些方面的工作都是在二维模式下进行的，但是虚拟化和模型化更加复杂的三维自然形式所需的计算资源已经指日可待了。

在和丹顿讨论蛋白质问题过程中，他自己也承认问题最终会得到解决，并且估计大概需要十年左右的时间。某项伟大的技术在没有实现之前是不可能不经历一番激烈的讨论的。丹顿写道：

凭借我们对一种生物体基因的了解将不能预测编码的有机形式。哪怕是对基因和他们的初级产品以及现行氨基酸序列做出最为详尽的分析，也不能推断出关于个体蛋白质或者更高的组成形式，比如核糖体和整个的细胞的性质和结构特点。

尽管丹顿的上述观察基本上是正确的，但是它主要是表明基本组只是整个系统的一部分。DNA代码并不代表全部，他的分子支持系统对于整个工作系统是必需的，因此也需要被我们所理解。我们还需要核糖体和使DNA能够正常运行的其他分子的设计。然而，这些设计并不会显著的改变生物领域设计信息的数量。

但是，重新创建具有大规模并行，数字控制分析，全息图像、自我组织、混沌处理的人类大脑并不需要我们折叠蛋白质。正如在第4章讨论的那样，已经有很多项目成功的实现神经系统再造。其中也包括可以成功植入人体大脑中的不需要任何蛋白质折叠的神经系统。然而，虽然我知道丹顿的关于蛋白质被认为是大自然整体存在方式的说法，要模仿这些方式也并没有什么实质性的技术障碍，我们也已经铺垫好了这条路。

总之，丹顿过快的得出了关于物质世界的物质和能量所组成的复杂系统是不能表现出“突发的.....生物体的重要特征例，例如自我复制，变形，自我再生，自我组装和生物设计的整体组合”，除此之外，“生物和机器属于不同的存在类别”。登布斯基和丹顿都认为机器作为实体只能通过模型的方式被设计和构建的想法是有局限的。我们能够并且已经开始构建一些“机器”，它们综合所有自然自组织的设计原理，有着比每个部分单纯加在一起更为强大的能力，它们将推动人类技术的大幅发展。这将是一项艰巨的组合。

后记

我不知道这个世界会如何看我，但对我自己而言，我仅仅是一个在海边嬉戏的顽童，为时不时发现一粒光滑的石子或一片可爱的贝壳而欢喜，可与此同时对我面前的伟大的真理的海洋熟视无睹。

——艾萨克·牛顿¹

生命的意义在于创造爱。这并不是因为爱是一种内在的感觉，或是一种私密的脆弱的情绪，而是因为爱是一种动态的力量穿梭于世间，驾驭着最原始的事物。

——汤姆·莫里斯，《If Aristotle Rann General Motors》

没有指数增长是永远的，但我们可以延迟“永远”。

——戈登·E·摩尔，2004

多么奇异？奇点有多么奇异？它会发生在瞬间吗？让我们再来考虑一下这个词的出处。在数学中，奇点是一个值，它实质上超越任何限制，是无穷大的值。（一般来说含有奇点的函数在这个点是没有定义的，但我们可以证明，函数在这个奇点附近的值是超过任何具体的有限的值的。）²

正如本书所讨论的，奇点并没有实现无限级别的计算、存储，以及任何其他可测量的属性。但是在所有这些特性上，包括智能，奇点肯定已经达到很高的水平。随着人脑逆向工程的发展，我们有能力将并行的、自组织的、无序的人工智能算法应用于大规模的复杂计算。届时这种智能将有能力在一个快速推进的迭代过程中，在硬件和软件两个方面改善自己的设计。

但是局限性似乎依然存在。宇宙所能支持的智能计算能力似乎只有大约 10^{90} cps，这一点在第6章就曾经讨论过。也有些理论（如全息宇宙理论）指出宇宙所支持的智能计算能力可以达到更高的水平（比如 10^{120} cps）。但这些量级显然都是有限的。

当然，对于我们当前的计算能力能够实现的所有实际目标来说，这种智

能的计算能力看起来是无限的。宇宙智能的计算能力是 10^{90} cps，这比当今地球上所有的生物大脑还要强大 10^{48} 倍。³就像我在第3章回顾过的那样，即使是一个1kg的“冷”计算机，它的峰值计算能力是 10^{42} cps，这也比全人类大脑的计算能力高 10^{16} 倍。⁴

鉴于指数计数法的力量，我们可以很容易地联想到更大的数字，即使我们缺乏想象力去考虑这些意味着什么。在可以预见的未来，我们将可能把智慧传播到其他的宇宙中去。这种情况是基于我们目前对宇宙的了解所做出的设想，尽管不太确定。这可能使我们未来的智能水平足以超越任何限制。如果我们有能力创造或向其他宇宙移民的话（如果有办法做到这一点，我们在未来的文明里所拥有强大智能很可能是可以驾驭它的），我们的智能水平最终将能够超出任何具体有限水平。这正是我们在数学函数里所说的奇点。

“奇点”这个词在物理学中又是如何应用的呢？物理学从数学中借用了这个词，总是用在一些拟人化的情况（就好像将“有魅力”和“奇异的”用于夸克的命名）。在物理学中，“奇点”在理论上是指密度无限大的零点，以及其无限大的万有引力。

但是，由于量子的不确定性，实际上不存在无穷大密度的点，事实上，量子力学也不允许出现无穷值。

就像我们在本书中所讨论的奇点一样，物理学中的奇点表示的是难以想象的巨大的值。

而物理领域所感兴趣的，并不是实际的大小是否为零，而是一个有着和黑洞内的奇点理论相似的事件视界（这甚至都不一定是黑洞了）。事件视界内的粒子和能源，如光，都是无法逃避的，因为重力太强大了。因此，从事件视界以外，我们肯定不能轻易看到视界内部。

然而，因为黑洞释放出了粒子雨，这给出了一种看到黑洞内部的方法。事件空间附近会产生粒子-反粒子对（这会发生在空间里任何的地方）。对于某些粒子对，有时候会有一个被拉到黑洞里，有一个会趁机逃跑。这些逃离的粒子会形成光束，称为霍金辐射，是用它的发现者史蒂芬·霍金的名字来命名的。现在普遍认为的是，这种辐射并不反映（以一种编码方式，并作为一个量子纠缠与内部粒子形式的结果）黑洞内部发生了什么。霍金起初抵制这个解释，但现在似乎已经同意。

因此，我们认为在本书中所使用的“奇点”这个词的准确性并不比物理学领域差。正如我们很难看到超出了黑洞的事件视界，我们也很难看到超越历史奇点的事件视界。我们怎么能够在每个大脑限制于 10^{16} cps的情况下，去想象我们在2099年能够拥有进行 10^{60} cps计算的能力来思考和处理事情。

然而，正如我们从未实际进入黑洞中，但却能通过概念思考得到关于黑洞属性的结论。我们现在的思考足以洞察奇点的含义。这正是我在本书中一直在尝试做的。

人本主义。人们普遍认为，科学一直在纠正我们过分夸大自己的意义。斯蒂芬·杰伊·古尔德说：“所有重要的科学技术革命的共性是：推翻了人们相信自己是宇宙中心的信仰，而后使人类放弃顽固的傲慢。”⁵

但事实证明，我们始终是“中心”。我们有能力在大脑中创造模型来虚拟现实，凭借这种能力再加上一点前瞻性的思考，我们就足以迎来新一轮的进化：技术进化。这项进化使得物种进化的加速发展过程一直延续，直到整个宇宙都触手可及。

本书相关资源与联系信息

Singularity.com

书中所讨论的各个方面的最新进展正加速积累。为了使你能跟得上发展的节奏，请访问Singularity.com，你将看到：

- 最新的新闻报道
- 可追溯到2001年的数千篇相关新闻集合请访问KurzweilAI.net
- 来自KurzweilAI.net的数百篇相关主题文章
- 研究链接
- 所有图的数据和引用
- 关于本书的材料
- 本书的注释

KurzweilAI.net

您还可以访问KurzweilAI.net这个备受赞誉的网站，它包含超过100名“大思想家”（本书引用了他们中很多人的话）的600多篇文章、数千篇新闻报道、事件清单以及其他有用的专题。在过去的6个月中，我们已经拥有了超过百万的读者。网站主要内容有：

- 奇点
- 机器是否将具有意识
- 永生，如何创造一个大脑
- 虚拟现实
- 纳米技术

- 危险的未来

- 未来的愿景

你可以免费注册获得我们提供的免费电子资讯新闻，你可以将你的电子邮件地址填入KurzweilAI.net主页的表单中。我们不会向任何人提供你的邮件地址。

Fantastic-Voyage.net和Ray andTerry.com

对于那些想优化自身健康的人，或者希望长寿以期见证和经历奇点的人，请访问Fantastic-Voyage.net和RayandTerry.com我与特里·格鲁斯曼合著了《[Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever](#)》一书。这些网站包含了改进人类健康的广泛信息。当生物技术和纳米技术革命充分成熟的时候，人类的身心将保持健康。

联系作者

雷·库兹韦尔：ray@singularity.com

附录 重新审视加速回归定律

以下的分析将帮助用户理解进化如何成为一种双倍指数增长的现象（也就是说，指数增长中的指数增长速度（指数）本身也在以指数速度增长）。尽管这里的公式与进化的其他方面相似，但是我将在后面的内容中描述计算能力的增长，特别是基于信息的过程和技术，其中包括人类智能的知识，它是软件智能的主要源头。

我们将关注以下三方面内容：

V：计算（以每单元造价每秒产生的计算能力衡量）的速度（这里是指能力）

W：用于设计和构建计算设备的世界知识

t：时间

在第一级的分析中，我们通过**W**的一维线性函数审视计算机能力。我们还注意到**W**在不断累积。这是由相关的技术算法以增量的方式累积为基础。就人脑而言，进化心理学家认为大脑是一个巨大的模拟智能系统，并且随着时间的流逝以增量的方式进化。同样在这个简单的模型中，瞬间增加的知识与计算能力成正比。通过观察得到的结论随着时间的增长，计算能力呈指数方式增长。

换言之，计算机的能力就是用于构建计算机的知识的线性函数。这实际上是一个保守的估计。总之，创新是通过很多种方式而非附加的方式来提升**V**值的。独立的创新（每一次创新代表着知识的线性增加）将成倍地提升彼此的效果。例如，**CMOS**（互补金属氧化物半导体）是电路技术的一项进步，它是一种高效的集成电路布线方法；流水线是处理器的一项重要创新；傅里叶快速变换是一种算法的改进；所有这些都是通过独立相乘的方式增加了**V**值。

在开始阶段，我们可以观察到：

计算的速率正比于世界的知识：

$$(1) V=c_1 W$$

世界知识改变的速率正比于计算的速率：

$$(2) \frac{dW}{dt} = c_2 V$$

将（1）带入（2），可得：

$$(3) \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 V$$

进一步可以得到：

$$(4) W = W_0 e^{(c_1 c_2 t)}$$

W将随着时间以指数速度增长（e是自然对数的底）。

数据显示将以指数增长的方式增长（在20世纪早期，计算机的能力以每3年的时间翻倍；20世纪中叶，计算机能力翻倍所需时间为2年；现在计算机能力每年都会翻倍）。技术的指数增长能力导致了经济的指数增长。这是从过去一个世纪得出的结论。有意思的是，经济萧条（包括20世纪30年代的经济大萧条）以弱周期出现于潜在的指数增长之上。在每次经济萧条后，经济又得到了迅速恢复，似乎经济萧条和衰退从来就未曾发生过。我们可以看到某些特定行业呈更快的指数增长趋势，这些行业与那些指数增长的技术相关联，如计算机工业。

如果将指数增长的资源作为计算的重要因素，我们可以看指数增长的第二层次：让我们来再看下面的公式：

$$(5) V = c_1 W$$

现在包含用于计算的资源部署N：

$$(6) N = c_3 e^{(c_4 t)}$$

现在世界知识的变化率与计算速度和部署的资源的乘积成正比：

$$(7) \frac{dW}{dt} = c_2 NV$$

将 (5) 和 (6) 带入 (7) 可得:

$$(8) \quad \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 c_3 e^{c_4 t} W$$

进一步可以得到:

$$(9) \quad W = W_0 \exp\left(\frac{c_1 c_2 c_3}{c_4} e^{c_4 t}\right)$$

世界知识就以两倍的指数增长速率累积。

现在让我们考虑现实世界中的数据。在第3章中,我估计了人脑的计算能力,基于对人脑所有区域功能模拟的需求估算,人脑的计算能力为 10^{16} cps。模拟每个神经元和神经元间连接间的突触的非线性需要更高数量级的计算。 10^{11} 的神经元乘以每个神经元(计算主要发生于这些连接中) 10^3 的连接,乘以每秒 10^2 事务处理,再乘以每次事务处理需要的 10^3 计算——总共的计算能力为 10^{19} cps。下面的分析假设了功能模拟的计算级(10^{16} cps):

分析3

考虑20世纪的实际计算设备和计算机的数据:

令 $S = \text{cps}/\$1\text{K}$: 花费1000美元获得的每秒的计算能力。

20世纪的计算数据由以下公式计算:

$$S = 10^{[6.00 \times [(\frac{20.40}{6.00})^{(\frac{\text{Year} - 1900}{100)}]} - 11.00]}$$

假定一段时期的增长率为 G , 可得:

$$G = 10^{\left(\frac{\log(S_c) - \log(S_p)}{Y_c - Y_p}\right)}$$

S_c 是当年的cps/\$1k, S_p 是之前某年的cps/\$1k, Y_c 是当年的年份, Y_p 是之前某年的年份。

人脑= 10^{16} cps

人类种族=100亿个人脑= 10^{26} cps

2023年我们能够用1000美元达到人脑的计算能力 (10^{16} cps)。

2037年我们能够用1美分达到人脑的计算能力 (10^{16} cps)。

2049年我们能够用1000美元达到整个人类的计算能力 (10^{26} cps)。

如果我们考虑经济指数增长的因素，特别考虑到可用的计算资源（已经达到了每年1万亿美元），在21世纪中叶之前，非生物智能将比生物智能强大数十亿倍。

我还可以通过另外的方法推导出双倍的指数增长。从以上的论述可以看出知识增加的速率至少与当时的知识呈正比。这清晰地表明很多更新（知识的增加）是以“乘法”的方式而非“加法”的方式增长的。

尽管如此，我们还是能够得到如下指数增长公式：

$$(10) \quad \frac{dW}{dt} = C^w$$

其中 $C > 1$ ，可以得到以下结论：

$$(11) \quad W = \frac{1}{\ln C} \ln \left(\frac{1}{1 - t \ln C} \right)$$

当 $t < 1/\ln C$ 时， W 以较慢的对数增长，但是当达到奇点，即 $t = 1/\ln C$ 时， W 将爆炸式地激增。

甚至对于最缓和的模型 $dW/dt = W^2$ ，同样将导致奇点的到来。

事实上任何能力增长法则都遵循以下的形式：

$$(12) \quad \frac{dW}{dt} = W^a$$

其中 $a > 1$ ，如此便得到在时间 T 关于奇点的另一个解决方案：

$$(13) W = W_0 \frac{1}{(T-t)^{\frac{1}{a}}}$$

a的值越大，越接近奇点。

在我看来，很难想象依据有限的知识，并考虑到非常有限的物质和能量资源，可以计算出达到指数双倍指数增长过程的日期。增量（如W）看起来可以是如下形式 $W \cdot \log(W)$ 。它描述了网络影响。如果我们有一个类似于互联网的网络，它的影响或价值将正比于 $n \cdot \log(n)$ 。鲍勃·梅特卡夫（以太网的发明人）认为有n个节点的网络的价值等于 $c \cdot n^2$ ，但其价值被过于夸大了。如果互联网的规模增倍，其价值也会增加，但不会成倍增加。一种合理的估计是，网络对于每个用户的价值将正比于对网络规模取自然对数值。故网络的价值将正比于 $n \cdot \log(n)$ 。

如果在增长速率时引入对数网络的影响，我们能够获得如下速率变化的等式：

$$(14) \frac{dW}{dt} = W + W \ln W$$

如此，双倍指数增长的解决公式变为：

$$(15) W = \exp(e^t)$$

注释

前言

1.我的母亲是一个天才的艺术家，专攻水彩画。我的父亲是著名的音乐家，贝尔交响乐团的指挥，昆伯勒学院音乐系前主席和创始人。

2.汤姆·斯威夫特系列小说发表于1954年，由Grosset & Dunlap出版社发行，它由很多作者以Victor Appleton的笔名完成，1971年不再更新。少年汤姆·斯威夫特和他的伙伴巴德·巴克雷奔走于宇宙各地，探索陌生的地方，并使用外星际的工具（如房子大小的宇宙飞船）、空间站、飞行实验室、三轮飞机、电子水中呼吸机、水陆两用直升机、对抗体（对抗体能够排斥其他事物，例如在水下对抗体排斥水，并形成气泡，男孩们可以在气泡中生存）。

汤姆·斯威夫特系列小说的前9本包括：《Tom Swift and His Flying Lab》（1954），《Tom Swift and His Jetmarine》（1954），《Tom Swift and His Rocket Ship》（1954），《Tom Swift and His Giant Robot》（1954），《Tom Swift and His Atomic Earth Blaster》（1954），《Tom Swift and His Outpost in Space》（1955），《Tom Swift and His Diving Seacopter》（1956），《Tom Swift in the Caves of Nuclear Fire》（1956），和《Tom Swift on the Phantom Satellite》（1956）。

3.这款程序称为Select。学生填写一份有300个条目的调查问卷。计算机软件中包含一个数据库，其中有3000多个学校的200万条信息。该软件通过学校信息与学生兴趣、背景、学术水平等信息的匹配，可以为学生挑选出6~15所适合的学校。我们为1万名学生提供了服务，后来将该程序卖给了Harcourt Brace World出版公司。

4.《Age of Intelligent Machines》由麻省理工学院出版社于1990年出版，被美国出版商协会评为最佳计算机图书。该书探讨了人工智能的发展，并预测了机器智能对于哲学、社会、经济等诸多方面的影响。该书主要内容是对23篇关于人工智能文章的补充，这些文章的作者包括Sherry Turkle、Douglas Hofstadter、Marvin Minsky、Seymour Papert以及George Gilder。关于该书的全部内容参见：<http://www.KurzweilAI.net/aim>。

5.性能的重要指标（如性价比、带宽、容量）使用“乘”（每增加一段时

间，指标都会乘以一个系数）的方式而非“加”的方式增长。

6. Douglas R. Hofstadter 《Gödel; Escher, Bach: An Eternal Golden Braid》
(New York: Basic Books, 1979)。

第1章 六大纪元

1. 根据 Transtopia 网站 (<http://transtopia.org/faq.html#1.11>) 的定义, "Singularitarian" 开始是由 Mark Plus 定义的, 是指那些“信奉奇点这个概念的人”。这个词条另外的定义是“奇点活跃分子”或“奇点之友”, 即努力实现奇点的人。(Mark Plus, 1991, 《Singularitarian Principles》, Eliezer Yudkowsky, 2000)。这个定义并未达成广泛共识, 很多超人学家认为 "Singularitarians" 的本意是“信仰奇点这个概念的人”, 而非奇点的“活跃分子”或“朋友”。

Eliezer S. Yudkowsky, 在《The Singularitarian Principles》, 1.0.2 版 (2000年1月1日, 发表于 <http://yudkowsky.net/sing/principles.ext.html>) 中, 提出了另外一个定义: Singularitarian 是指那些相信通过技术可以创造高于人类智能的人, 他们将为奇点到来而努力工作。Singularitarian 是未来奇点的朋友、支持者、守护者和代理人。

我的观点: Singularitarian 能够发展奇点, 并认为奇点代表各个方面、各种范畴知识的建设性动力, 例如, 先进的民主融合了集权主义和原教旨主义者的信仰系统和意识形态, 并创造不同类型的知识: 音乐、美术、文学、科学和技术。我认为 Singularitarian 是那些理解变革 (变革将于 21 世纪到来) 并深入思考奇点内涵对于他们生活的影响的人。

2. 我们将在第 2 章论述计算能力以加倍的速度增长。虽然单位成本制造的晶体管数量以每两年翻一倍的速度增长, 晶体管的运行速度也越来越快, 但是还有对于晶体管很多方面的创新与改进。总体上说, 单位成本的计算能力也以每年翻倍的速度增长。特别是大量的计算 (每秒钟的计算, 即 cps) 引入到计算机国际象棋领域, 其在 20 世纪 90 年代得以每年翻番的速度增长。

3. 约翰·冯·诺依曼, 由 Stanislaw Ulam 在 "Tribute to John von Neumann", 《Bulletin of the American Mathematical Society》中转述。冯·诺依曼 (1903—1957) 出生于布达佩斯的犹太银行世家, 1930 年到普林斯顿大学教授数学。1933 年, 他成为普林斯顿高等研究院最早的 6 名教授之

一，并将毕生的经历献给了那里。冯诺依曼的研究兴趣非常广泛：他开创了量子力学这一全新的领域；与Oskar Morgenstern一同创作了

《Theory of Games and Economic Behavior》一文，改革了经济学的研究；在早期计算机的逻辑设计方面，他也做出了突出的贡献，其中包括于20世纪30年代后期，他所创建的MANIAC（数学分析、数字积分机和计算机）。

Oskar Morgenstern曾经在《Economic Journal》（1958年3月）中"John von Neumann, 1903—1957"的讣告中这样描述冯诺依曼：“冯诺依曼深刻地影响着与他熟识的人的思想……他那渊博的知识、迅速的反应、敏锐的直觉令人肃然起敬。他经常在别人尚未开始的时候就将问题解决了。他的思维如此独特，以至于很多杰出的科学家都自问：他是否代表着人类思想发展的全新阶段。”

4.请见第2章的注释20和21。

5.该会议于2003年2月19日至21日在美国加州的蒙特利举行。会议的主题涉及干细胞研究、生物技术、纳米技术、克隆和转基因食品。关于大会演讲者推荐的书籍，请见如下网址：

<http://www.thefutureoflife.com/books.htm>。

6.20世纪80年代，互联网的规模（以接入互联网的节点数及服务器数衡量）以每年翻倍的速度增长，但1985年节点的数量只有几万个。1995年节点的数量达到了几千万。到2003年1月，网络软件联盟

（<http://www.isc.org/ds/host-count-history.html>）宣布全球共有1.72亿个网络主机（网站服务器）。这个数量只代表节点总数的一小部分。

7.在最广泛的层次上，“人择原理”声明：物理学的基本常数必须与人类的生存和谐统一，如果它们不符合人类的要求，我们就不能观察到它们。实现这一原则的一种有效方法是研究该常数，例如研究引力常数、电磁连接常数。如果这些常数的值在较小的范围内有所偏离，那么智能生命将不可能存在于我们的宇宙中。例如，如果电磁连接常数变大，那么电子与其他之间将没有粘合力；如果该常数减小，那么电子将无法在轨道中运行。换句话说，如果常数在极小的范围内发生了偏移，分子将不会形成。那时宇宙就好像是“人择原理”的支持者，通过微调手段来促使智能生命的进化。（恶意批评者如Victor Stenger声称微调完全不起作用，他认为在很多方面都有补偿机制为生命打开更宽广的窗户。）

人择原理在当代宇宙理论假定多重宇宙的背景下提出（见本章注释8和9），每层宇宙都有自己的法制。只有在那些允许人类存在的宇宙中，人类才能生存。

更多内容可以参考John Barrow和Frank Tipler著的《The Anthropic Cosmological Principle》（New York: Oxford University Press, 1988），还有Steven Weinberg的"A Designer Universes?", 可在以下网址找到：http://www.physlink.com/Education/essay_weinberg.cfm。

8.根据一些宇宙学的理论，是由很多大爆炸创造了多重宇宙（并行的多元宇宙或“气泡”）。不同的物理参数和力量应用于不同的气泡中，一些（至少一个）气泡支持以碳原子为基础的生命。请见如下参考文献：See Max Tegmark, "Parallel Universes," 《Scientific American》（2003年5月）：41-53; Martin Rees, "Exploring Our Universe and Others," 《Scientific American》（1999年12月）：78-83; Andrei Linde, "The Self-Reproducing Inflationary Universe," 《Scientific American》（1994年11月）：48-55。

9.“多世界”或多元宇宙理论可以解释量子力学及其相关的问题，它们融合了人择原理。Quentin Smith做了如下总结：

量子力学的传统或哥本哈根解释具有一系列的困难：因为该理论不适用于封闭宇宙的广义相对论的时空几何中。宇宙的量子状态可以描述为一个波形函数，该函数具有变化的时空振幅，宇宙状态的概率可以由相应阶段波形函数的方形振幅确定。为了使宇宙能够从不同概率下多点重合向其中的一点过渡（这一点是确实存在的），可以引入一种测量装置以瓦解波形函数并决定宇宙在那个时刻的状态。但这是不可能的。因为在宇宙的外部什么都没有，也没有用于瓦解波形函数的装置。

一种可能的解决方案是发展对于量子力学的解释。量子力学本身并不受外部对其观察和测量（测量对于哥本哈根解释非常重要）的影响。量子力学在封闭系统的内部可以明确地表达。

这是Hugh Everett在1957年发表的论文"Relative State Formulation of Quantum Mechanics"中做的解释。叠加中的每一点都由波形函数所表示，并且认为该点包含观察者（或测量装置）的一种状态，以及被观察的系统的一种状态。这样“通过连续的观察（或交互），观察者声明很多不同状态的‘分支’”。每个分支表示不同的测量结果和对象系统状态中

相应的特征状态。在一系列的观察后，所有的分支都同时存在于叠加之中。

每个分支均独立于其他分支，所以观察者并不知道“爆破式”的过程。对于每个观察者来说，世界看起来的样子与世界实际看起来的样子相同。

如果把宇宙作为一个整体，这意味着宇宙被均匀地分割为很多不同的分支，跟着测量将在其不同方面发生的类似的交互。每个分支都被认为是分离的世界，每个世界将不断被分割成未来世界。

上文出自Quentin Smith, "The Anthropic Principle and Many-Worlds Cosmologies", 《Australasian Journal of Philosophy》63.3 (1985年9月), 可查阅http://www.qsmithwmu.com/the__anthropic__principle__and__many-worlds__cosmologies.htm。

10.参见第4章关于人脑自组织原理和模式识别及操作原理的关系的完整论述。

11.在“线性”图（所有的图形划分都是相同的）中，不可能在有限的空间（如本书的一页）内表达所有的数据（几十亿年）。而一幅对数图可以通过绘制值的数量级，让人们看到更大范围的数据。

12.Theodore Modis是墨西哥的Graduate School in Business Leadership in Monterrey的DUXX的教授，他试图开发一种“准确的数学定义，以统治变化的进化和宇宙中的复杂度”。为了研究模式和这些变化的历史，他对重要事件集合进行了数据分析，这些事件等同于重大变革。由于选择性的偏差，他并不依赖于自己的事件清单，而是综合了13种独立的历史上有关生物和科技的重要事件清单，清单来源如下：

Carl Sagan, 《The Dragons of Eden: Speculations on the Evolution of Human Intelligence》(New York: Ballantine Books, 1989)。其他的数据由Modis提供。

美国自然历史博物馆。其他的数据由Modis提供。

《Encyclopaedia Britannica》中的“生命历程中的重要事件”的数据集。

Educational Resources in Astronomy and Planetary Science (ERAPS),

Arizona大学，详情参见<http://ethel.as.arizona.edu/~collins/astro/subjects/evolve-26.html>。

Paul D.Boyer，生物学家，获得了1997年诺贝尔奖，私人交流。其他的数据由Modis提供。

J.D.Barrow和J.Silk，"The Structure of the Early Universe，" 《Scientific American》 242.4（1980年4月）：118-28。

J.Heidmann， 《Cosmic Odyssey: Observatoire de Paris》， Simon Mitton（Cambridge,U.K.: Cambridge University Press, 1989）。

J.W.Schopf，等， 《Major Events in the History of Life》， symposium convened by the IGPP Center for the Study of Evolution and the Origin of Life, 1991（Boston: Jones and Bartlett, 1991）。

Phillip Tobias， 《Major Events in the History of Life》 的第6章"Major Events in the History of Mankind"。

David Nelson， "Lecture on Molecular Evolution I", <http://drnelson.utmem.edu/evolution.html>， 以及"Lecture Notes for Evolution II", <http://drnelson.utmem.edu/evolution2.html>。

G.Burenhult等， 《The First Humans: Human Origins and History to 10000 BC》（San Francisco: HarperSanFrancisco, 1993）。

D.Johanson和B.Edgar， 《From Lucy to Language》（New York: Simon & Schuster, 1996）。R.Coren， 《The Evolutionary Trajectory: The Growth of Information in the History and Future of Earth》， 世界未来的进化研究（Amsterdam: Gordon and Breach, 1998）。

这些清单都是20世纪80年代或20世纪90年代完成的，包括了宇宙中发生的著名历史事件，其中三项聚焦于人科动物进化的那段时期。一些较老的清单并不准确，但就事件本身而言，这些事件发生的相对位置是最有价值的。

Modis融合了这些清单，并找到了重要事件簇，形成了他的“标准里程碑”。他通过整理清单中203项里程碑事件而形成了28个标准里程碑。

Modis还单独用Coren的清单去证实他的方法。详细内容请见：
T.Modis, "Forecasting the Growth of Complexity and Change, " 《Technological Forecasting and Social Change》
69.4 (2002) ,
<http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/TedWEB.htm>。

13.Modis发现了由于清单所列事件数量的不同而引起的错误，以及由于不同清单中发生事件的时间不同所引发的错误（请见T.Modis, "The Limits of Complexity and Change, " 《The Futurist》（2003年5月~6月），
<http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/Futurist.pdf>）。所以它使用时间簇定义标准里程碑。一个里程碑代表一种平均标准偏差的错误假设。对于不是多个清单共有的事件，他“随机地为其赋一个误差值”。Modis也指出了其他源的错误——一些并不知道准确的信息的事件，或认为每个数据点同样重要是不可能的——这些并没有在标准误差上反映。

需要注意的是，Modis认为恐龙灭绝发生在距今5460万年前是不准确的。实际时间还会更往后。

14.典型的神经元重置时间在5ms的数量级，它每秒可以处理200条数字控制模拟事物。甚至可以解释多种神经处理的非线性特征，其速度不到当代电路的百万分之一，电路一次转换不足1ns（请见第2章关于计算容量的分析）。

15.洛杉矶自然实验室的研究人员重新分析了放射性同位素的相对浓度，他们发现在过去的20亿年间，世界上唯一已知的自然核反应（在西非的Oklo in Gabon）中精细结构常数的递减和 α 粒子（光速与 α 成反比）。这可以解释为以光速的小增长，虽然这种发现需要证明。请见："Speed of Light May Have Changed Recently, " 《New Scientist》, 2004年6月30日, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99996092>.也可参见
<http://www.sciencedaily.com/releases/2005/05/050512120842.htm>。

16.史蒂芬·霍金在2004年7月21日的都柏林的科学会议上发表声明，他在30年前关于黑洞的论断是错误的。以前他说信息将被黑洞吞噬，并且永远不会被取回。这与量子理论的观点不符，量子理论认为信息永存。“科幻小说迷要感到失望了，如果信息是永存的，将不可能通过黑

洞穿梭至其他宇宙中，”他说，如果你跳入黑洞，你拥有过的巨大能量将以损坏的形式重新回归到我们的宇宙中，这种损坏的形式包含的信息有你原来的模样（以一种难以识别的状态）。“请见Dennis Overbye，”About Those Fearsome Black Holes? Never Mind，《New York Times》，2004年7月22日。

17.黑洞表面是天体区域围绕奇点的外部边界或周长（黑洞中心的典型特征是无穷密度、无限压力）。在黑洞表面内部，地心引力如此之大，以致光都无法逃离，量子效应使得黑洞表面辐射出射线。量子效应将引起粒子-反粒子对的形成，其中一个粒子将被吸入黑洞，而另一个粒子将作为辐射而喷射（称为霍金辐射）。这就是为什么该区域称为“黑洞”，该词条由John Wheeler教授发明。黑洞最初由德国籍天体物理学家Kurt Schwarzschild于1916年在总结爱因斯坦广义相对论的基础上发现。黑洞存在于银河系的中心，通过实验的方法已经被观测到。更多相关内容请见Kimberly Weaver，"The Galactic Odd Couple"，<http://www.scientific-american.com>，2003年6月10日；Jean-Pierre Lasota，"Unmasking Black Holes"，《Scientific American》（1999年5月）：41-47；史蒂芬·霍金，《A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes》（New York: Bantam, 1988）。

18.Joel Smoller和Blake Temple，"Shock-Wave Cosmology Inside a Black Hole"，《Proceedings of the National Academy of Sciences》100.20（2003年9月30日）：11216-18。

19.Vernor Vinge，"First Word"，《Omni》（1983年1月）：10。

20.Ray Kurzweil，《The Age of Intelligent Machines》（Cambridge,Mass.: MIT Press, 1989）。

21.Hans Moravec，《Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence》（Cambridge,Mass.: Harvard University Press, 1988）。

22.Vernor Vinge，"The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era"，VISION-21 Symposium,sponsored by the NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute,March 1993.The text is available at <http://www.KurzweilW.net/vingelsing>。

23.Ray Kurzweil，《The Age of Spiritual Machines: When Computers

Exceed Human Intelligence》（New York: Viking, 1999）。

24.Hans Moravec, 《Robot: Mere Machine to Transcendent Mind》
（New York: Oxford University Press, 1999）。

25.Damien Broderick的两部作品：《The Spike: Accelerating into the Unimaginable Future》（Sydney,Australia: Reed Books, 1997）以及《The Spike: How Our Lives Are Being Transformed by Rapidly Advancing Technologies》（New York: Tor/Forge, 2001）。

26.这是John Smart的一篇概述, "What is the Singularity", 可以在以下网址找到: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0133.html>。John Smart关于科技加速、奇点以及其他相关文章的文章请见以下网址: <http://www.singularitywatch.com>和 <http://www.Accelerating.org>。John Smart负责召开"Accelerating Change"会议, 该会议包括了以下相关主题“人工智能”, 详情请见: <http://www.accelerating.org/ac2005/index.html>。

27.运行于人脑系统的大脑仿真将远快于人类的生物大脑。虽然人脑得益于其大规模的并行处理方式（百万亿数量级的神经元内部连接和潜在的并发能力），但是连接的重置时间与当代电子设备相比极为缓慢。

28.请见第2章的注释20和21。

29.请见本书附录, 那里用数学的方法分析信息技术的指数增长, 该定律也可以不应用于计算的性价比趋势。

30.源于1950年发表的一篇文章《Mind: A Quarterly Review of Psychology and Philosophy》, 计算机理论学家Alan Turing提出了著名的问题: “机器是否可以思考? 如果计算机能够思考, 我们如何才能知道?”图灵测试可以回答第二个问题。这个测试用如下的方式进行: 专家委员会向远方的回应者提出广泛的问题, 涉及爱情、时事、数学、哲学等, 然后通过回应者的回答情况以判断他是计算机还是人。图灵测试是一种测量人类智能的方法, 没有通过该测试并不意味着智能较低。关于图灵的这篇文章可以在以下网址找到: <http://www.abelard.org/turpap/turpap.htm>; 还可参考《The Stanford Encyclopedia of Philosophy》, <http://plato.stanford.edu/entries/turing-test>, 其中有关于该测试的进一步讨论。

还有一些欺骗的方法或算法可以让机器通过图灵测试，而方法本身并没有全面地达到人类的智能水平。请见Ray Kurzweil的"A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win", 网址为 <http://www.KurzweilAI.net/turingwin>。

31. John H. Byrne, "Propagation of the Action Potential", 《Neuroscience Online》, <https://oac22.hsc.uth.tmc.edu/courses/nba/s1/i3-1.html>, 神经中行动潜能的传播速度的范围: 100m/s (360km/h) 到 0.1m/s (0.36km/h)。

可以参见Kenneth R. Koehler, "The Action Potential", <http://www.rwc.uc.edu/koehler/biophys/4d.html>, “哺乳动物运动神经的传播速度是 (10~120) m/s, 而无髓感知神经的速度是 (6~25) m/s (无髓神经在一条连续的直线上不会跳跃; 膜透性增加允许高效地完成回路, 但会减慢传播的速度)”。

32. 2002年出版的《科学》杂志强调连环蛋白质在脑皮质扩张方面的重要作用。这种蛋白质负责形成大脑皮层表面的褶皱和凹槽; 事实上正是这些褶皱增加了大脑的表面积, 从而为更多的神经元提供空间。有的老鼠可以生产过多的这种蛋白质, 所有它的大脑皮层更紧缩, 褶皱也更多, 相比该种蛋白质较少的老鼠来说, 前者大脑皮层也有更大的表面积。原文出自: Anjen Chenn和Christopher Walsh, "Regulation of Cerebral Cortical Size by Control of Cell Cycle Exit in Neural Precursors", 《Science》297 (2002年7月): 365-69。

2003年, 通过对比人类、黑猩猩和猕猴大脑皮质的基因表达, 人们发现只有91种关于大脑组织和认知的基因是不同的。研究者发现90%的不同于上流调节相关 (高级活动)。请见:

M. Cacaes等, "Elevated Gene Expression Levels Distinguish Human from Nonhuman Primate Brains", 《Proceedings of the National Academy of Sciences》100.22 (2003年10月28日): 13030-35。

尽管如此, University of California-Irvine College of Medicine的研究人员发现与脑体积相比, 大脑中特定区域的灰质与智商的关联更大, 同时还发现只有6%的灰质与智商相关。这项研究还发现, 因为这些与智商关联的区域贯穿于整个大脑之中, 而大脑中不可能有类似于大脑额叶等单一的“智能中心”。请见: "Human Intelligence Determined by Volume and

Location of Gray Matter Tissue in Brain", University of California-Irvine新闻发布（2004年7月19日），http://today.uci.edu/news/release_detail.asp?key=1187。

2004年的一项研究对比了人类神经系统的基因所表现的加速进化与其他灵长类生物，以及比较于所有灵长类生物与其他哺乳类生物的基因。Steve Dorus等，"Accelerated Evolution of Nervous System Genes in the Origin of 《Homo sapiens》"，《Cell》119（2004）：1027-40，该论文描述了这一发现，该研究的领导者Bruce Lahn指出：“人类认知能力的进化并不是由于一些偶然的突变，而是源于数量巨大的突变，这些突变源于有利于复杂认知能力改善的自然选择。”Catherine Gianaro，《University of Chicago Chronicle》24.7（2005年1月6日）。

研究认为一种对于肌肉纤维基因MYH16的突变可以使人类拥有更大的大脑。这种突变使得原始人类的下颌缩小，所以人类并不像其他类人猿那样拥有限制大脑尺寸的肌肉。Stedman等，"Myosin Gene Mutation Correlates with Anatomical Changes in the Human Lineage"，《Nature》428（March 25, 2004）：415-18。

33.Robert A.Freitas Jr.“在医学纳米技术中的探索性设计：一种机械人工红细胞，”Artificial Cells,Blood Substitutes,and Immobil.Biotech.26（1998）：411-30；

<http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>；还可以参考Nanomedicine Art Gallery一文的图像：

（<http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Respirocytes.htm>）可参考其获奖动画：

（<http://www.phleschbubble.com/album/beyondhuman/respirocyte01.htm>）

34.Foglets是纳米技术先驱Rutgers的J.Storrs Hall教授提出的概念。下面是他讲话的一段：“纳米技术是基于微小、自我复制机器人的概念。Utility Fog是对该思想的简单扩充：假设微小的机器人（foglet）彼此相连，并按照我们的想法形成稳固的物体形状，而不是通过一个原子一个原子地构建的呢？到那时，当我们厌倦了风格前卫的咖啡桌，那些构成桌子的机器人通过简单的变换，我们就能得到典雅的、安妮女皇式的咖啡桌。”J.Storrs Hall的这篇“What I Want to Be When I Grow Up,Is a Cloud”，《Extropy》，第3和第4部分，1994。2001年7月6日，发表于KurzweilAI.net，2001年7月6日，<http://www.KurzweilAI.net/foglets>。还可参见J.Storrs Hall，“Utility Fog: The Stuff That Dreams Are Made Of”，

《Nanotechnology: Molecular Speculations on Global Abundance》, B.C.Crandall等, (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1996), 发表于2001年7月5日的KurzweilAI.net, 网址是 <http://www.KurzweilAI.net/utilityfog>。

35.Sherry Turkle等, "Evocative Objects: Things We Think With", 即将出版。

36.请见第2章的图"Exponential Growth of Computing"。该图反映了直到21世纪末计算性价比的双倍指数增长, 那时价值1000美元的计算将提供 10^{60} cps。这将在第2章详细论述, 通过3种不同的分析方法得到的结论是, 模仿人脑功能需要 10^{15} cps。一种更加保守的估计(假设需要模拟每一个突触和树突的非线性结构), 对于人脑神经形态的模拟需要 10^{19} cps的计算能力。还有一个更保守的数字, 我们需要 10^{29} cps的计算能力才能模拟 10^{10} 个人的大脑。所以大约在2099年, 1000美元能购买的 10^{60} cps计算能力将代表 10^{31} (10万万亿)人的文明。

37.18世纪早期动力织布机和其他纺织自动化机器的发明破坏了以家庭手工业为生的英国织工的生活, 在此之前这种牢固的家庭经济已经传承了几百年。经济动力已经从家庭纺织发展到机器拥有者。根据传说, 一位年轻而愚钝的男孩Ned Ludd破坏了两个纺织厂的机器。自从那以后, 只要工厂的设备被神秘破坏, 任何有嫌疑的人会说, “又是Ned Ludd破坏的”。1812年, 绝望的织工形成了一个秘密的组织——城市游击队。他们威胁恐吓工厂主, 很多工厂主都屈从了。当问及他们的领导是谁时, 这些游击队员会回答: “当然是Ned Ludd司令。”虽然Ludd的追随者起初通过暴力的方法破坏机器, 但是后来还爆发了一系列的流血冲突。Tory政府无法容忍他们的行为, 通过关押和绞刑示众等方式打压他们破坏机器和恐吓工厂主的行为。虽然织工们无法进行持续可行的活动, 当他们仍然是反对自动化和科技的有力象征。

38.见本章注释34。

第2章 技术进化理论: 加速回归定律

1.John Smart对于"Understanding Evolutionary Development: A Challenge for Futurists"一文的总结发表于World Futurist Society年会上。华盛顿, 2004年8月3日。

2.在Theodore Modis看来，进化中新纪元的标志性事件代表着复杂度的增加，详见Theodore Modis的"Forecasting the Growth of Complexity and Change"，《Technological Forecasting and Social Change》

69.4（2002），网址为

<http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/Ted-WEB.htm>。

3.压缩文件涉及数据传输（如互联网上传播的音乐和文本）和数据存储两方面内容。文件越小，其传输时间越短，存储空间越小。信息论之父、数学家Claude Shannon在他的论文"A Mathematical Theory of Communication"，《The Bell System Technical Journal》27（1948年7月~10月）中对数据压缩进行了如下定义：数据压缩是有可能的，因为数据中存在冗余，并且数据中的关键特征有融合在一起的可能性，例如音频文件中的无声状态可以由一个表示无声持续时间的值所代替，文本文件中的字母组合在压缩文件中可以被编码识别符所代替。

如Shannon所解释的，冗余可以通过无损压缩的方式去除，这意味着压缩不会使信息丢失。无损压缩有一个限制，Shannon称为熵速率（压缩会增加数据的“熵”，其中实际的信息量反比于预先定义的数据结构）。数据压缩将消除数据冗余，而无损压缩在消除数据冗余的同时不会损失任何数据（这意味着原来精确的数据将被保留）。而有损压缩可以用于图形文件或流媒体的音频、视频文件，虽然它会导致信息的丢失，但通常情况下用户是不会觉察到的。

大多数的数据压缩技术都会使用一种编码，可将源文件中的基本单元（或符号）与编码表映射。例如，文本文件中的所有空格都可以被一个单独代码和空格的数目所代替。压缩算法通过建立这种映射关系，并使用编码表建立一个新的文件。经过压缩的文件将小于原始文件，并且易于传输和存储。以下是关于无损压缩的技术类别：

- 游程压缩，该算法使用一个代码表示重复的符号，并用一个数值表示符号重复的次数（例如：Pack-Bits和PCX）。

- 最小冗余编码或简单熵编码，该编码方式以概率为基础，使用频繁的符号的编码长度最短（例如：霍夫曼编码和算术编码）。

- 字典编码器，该编码器使用动态更新的符号字典来表示模式（例如：Lempel-Ziv、Lempel-Ziv-Welch和DEFLATE）。

●块排序压缩，该算法用重新组织字符的方法代替编码表，而游程压缩通常用于严重重复的字符串（例如：Burrows-Wheeler变换）。

●局部映射预测，该算法通过使用原文件中的字符集来预测文件中将会出现的下一个字符。

4.Murray Gell-Mann, "What Is Complexity? ", 发表于《Complexity》, (New York: John Wiley and Sons, 1995)。

5.在不经压缩的情况下，人类的遗传代码总量接近60亿bit（大约 10^{10} ）。理论上，一块1kg重的石头所包含的信息量为 10^{27} bit，这是人类遗传代码的 10^{17} 倍。请见第2章注释57关于基因组压缩的讨论。

6.当然，人由数量巨大的粒子构成，如果考虑到所有粒子的属性，其所包含的信息量与等重量的石头差不多。就石头而言，其信息量并不需要像人类那样描述其状态。另外人类与石头相比需要更多的信息以描述其特征。

7.请见第5章的注释175关于基因算法的描述。

8.人类、黑猩猩、大猩猩、红毛猩猩是人科动物的科学分类（人总科）。在500万~700万年前，人类由巨猿演化而来。人科中的人类还包含已经灭绝的物种（如H.erectus）以及现代人（H.sapiens）。

黑猩猩的手指比人类手指长，但没有人类手指那么直，其大拇指较短，缺乏力量而且不便于移动。黑猩猩可以使用棍子抽打，但无法紧握棍子。它们无法用力捏住物体，因为它们的大拇指无法与其他手指重叠以达到紧握物体的目的。现代人类的拇指较长，其他手指能够沿着中心轴旋转，所以人的拇指尖端可以接触到其他手指的尖端，该特性称为完全相对性。人类特有的这些属性使其能够准确并且有力地握住物体。甚至人类的祖先（例如，科学家在埃塞俄比亚发现距今300万年前的更新纪灵长动物，称为露西）能够以更快的速度和更好的准确性投掷石块。从那以后，科学家们断定人类的手在投掷和摔打等方面持续改进（同时还伴随着人类其他器官的改进），这使得人类明显优于其他相似大小和重量的动物。详情请见：

Richard Young的"Evolution of the Human Hand: The Role of Throwing and Clubbing", 《Journal of Anatomy》202（2003）：165-74和Frank

Wilson, 《The Hand: How Its Use Shapes the Brain, Language, and Human Culture》 (New York: Pantheon, 1998)。

9. 圣菲研究所是研究复杂性和紧急系统相关技术和概念的先驱。Stuart Kauffman 是其中研究范式混沌和复杂性的一位主要研发人员。Kauffman 在《At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity》 (Oxford: Oxford University Press, 1995) 一文中阐述道：“秩序的力量在于混沌的边缘。”

在《Evolution of Complexity by Means of Natural Selection》 (Princeton: Princeton University Press, 1988) 一书中, John Tyler Bonner 提出了以下几个问题：“受精卵是如何变为一个完美的成人？”“一个细菌如何经历了数百万年的时间进化为一只大象？”

John Holland 是圣菲研究所另一位主要的思想家, 主要研究方向为复杂性的新兴领域。他的《Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity》 (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1996) 一书收录了1994年他在圣菲研究所发表的一系列研究报告。另见 John H. Holland 的《Emergence: From Chaos to Order》 (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1998) 和 Mitchell Waldrop 的《Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos》 (New York: Simon & Schuster, 1992)。

10. 热力学第二定律解释了为什么不存在一个完美的动力机, 它可以利用燃料燃烧产生的全部能量来工作: 一些热量不可避免地散发到环境中。自然中相同的原理认为热量可以从热的平底锅向冷空气中传递, 而其逆过程无效。该定律还假定封闭 (孤立) 系统随着时间的迁移将变得越来越无序, 也就是说将从有序变为无序。例如, 冰片中的分子只有有限的几种排布方式。所以一杯冰片的熵值要小于一杯水的熵值。水与冰相比拥有更多的分子排布方式, 更大的自由度带来了更高的熵。多样性是另外一种思考熵的方法。一种状态所能实现的方法越多, 其多样性就越高。因此, 一堆混乱的砖头与整齐堆砌的砖头相比, 前者拥有更高的多样性 (和更高的熵值)。

11. Max More 明确地表达了如下观点: 先进的技术通过融合和杂交的方式使得加速进程变得更快。参见 Max More 的 "Track 7 Tech Vectors to Take Advantage of Technological Acceleration", 《ManyWorlds》, 2003年8月1日。

12.更多信息请另见如下参考资料：J.J.Emerson等的，"Extensive Gene Traffic on the Mammalian X Chromosome"，《Science》303.5657（2004年1月23日）：537-40，
<http://www3.uta.edu/faculty/betran/science2004.pdf>, Nicholas Wade的"Y Chromosome Depends on Itself to Survive"，《New York Times》，2003年6月19日，以及Bruce T.Lahn和David C.Page的"Four Evolutionary Strata on the Human X Chromosome"，《Science》286.5441（1999年10月29日）：964-67，网址为
http://inside.wi.mit.edu/page/Site/Page%20PDFs/Lahn_and_Page_strata__1999.pdf。

人们将女性的第二个X染色体关闭称为X失活，而基因只能通过一个X染色体来表达。研究表明来自父亲的X染色体会在一些细胞中关闭，而来自母亲的染色体会在另外一些细胞中关闭。

13.关于人类基因工程请见"Insights Learned from the Sequence"，网址为
http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/journals/insights.html。尽管人类基因组已经被测序，但大多数基因代码不能为（蛋白质合成）指定遗传密码（成为垃圾DNA），所以研究者仍然在争论人类DNA中的30亿个碱基对包含多少基因。尽管人类基因工程认为基因的数量超过10万对，但当前的研究表明基因的数量不到3万对。请见How Many Genes Are in the Human Genome?（http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/faq/genenumber.shtml）和Elizabeth Pennisi，"A Low Number Wins the GeneSweep Pool"，《Science》300.5625（2003年6月6日）：1484。

14.Niles Eldredge和后来的Stephen Jay Gould于1972年提出了该理论（N.Eldredge和S.J.Gould的"Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism"，发表于《Models in Paleobiology》（San Francisco: Freeman,Cooper）。从那时起，该话题便引起了古生物学家和进化生物学家的争论，尽管该理论逐渐地获得了认可。根据该理论，物种在数百万年的进化过程中是相对稳定的。停滞紧接着伴随着更迭的爆发，那将导致新物种的出现和旧物种的灭绝（Elisabeth Vrba称其为“颠覆性脉冲”）。它将影响着整个生态系统和很多不相关的物种。Eldredge和Gould提出一种需要新视角的模式：“无视和停滞是最具束缚性的一种偏见（不可避免地被认为是进化的缺失），它被认为是非主题

的。很奇怪将所有古生物中最普通的现象当做是显著而极具吸引力的。”参见S.J.Gould和N.Eldredge的"Punctuated Equilibrium Comes of Age", 《Nature》 366 (1993年11月18日) : 223-27。

参见K.Sneppen等的"Evolution As a Self-Organized Critical Phenomenon", 《Proceedings of the National Academy of Sciences》 92.11 (1995年5月23日) : 5209-13; Elisabeth S.Vrba的"Environment and Evolution: Alternative Causes of the Temporal Distribution of Evolutionary Events", 《South African Journal of Science》 81 (1985) : 229-36。

15.诚如我将在第6章所讨论的, 如果光速并非信息向遥远宇宙传输的一个基本限制, 那么智能和计算将持续地以指数的方式传播, 直到支撑计算向整个宇宙传播的物质和能量达到饱和。

16.生物进化持续地与人类相关联, 但是像癌症和病毒等疾病通过进化对抗人类(癌细胞和病毒可以通过进化来对抗各种治疗措施, 如化学药物和抗生素)。但是人类智能在与生物进化智能的斗争中能够以智取胜: 在基础层面上攻击疾病, 通过使用“鸡尾酒”策略, 以正交(独立)的方法同时对抗疾病。

17.Andrew Odlyzko的"Internet Pricing and the History of Communications", AT&T实验室研究, 2001年2月8日经过修订, 网址为 <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/history.communications1b.pdf>。

18.Cellular Tele Communications and Internet Association,Semi-Annual Wireless Industry Survey,June 2004, http://www.ctia.org/research_statistics/index.cfm/AID/10030

19.电线、电话、收音机、电视、手机: FCC, 网址为 www.fcc.gov/Bureaus/Common_Carrier/Notices/2000/fc00057a.xls。
Home Computers and Internet use: Eric C.Newburger,U.S.Census Bureau, "Home Computers and Internet Use in the United States: August 2000" (September 2001), <http://www.census.gov/prod/2001pubs/p23-207.pdf>。也可以参考"The Millennium Notebook", 《Newsweek》, 1998年4月13日, 第14页。

20.以当前新的通信技术来衡量, 现在范式迁移的速率每9年翻一番(大规模使用新发明——被美国四分之一的人口使用——的时间将减半)。

请见注释21。

21.图2-5显示了在过去的130年间，一项发明被25%的美国人口使用所需的时间。电话的普及用了35年的时间，收音机的普及用了31年的时间（减少了11%时间，或者说在两项发明间隔的21年间以每年0.58%的速度递减）。收音机与电视机这两项发明的时间间隔每年的递减速度为0.6%，电视机与PC这两项发明的时间间隔每年的递减速度为1.0%，PC与移动电话这两项发明的时间间隔每年的递减速度为2.6%，移动电话与互联网这两项发明的时间间隔每年的递减速度为7.4%。从1897年发明收音机到广泛普及用了31年的时间，而从1991年互联网的发明到其广泛普及仅用了7年的时间——在过去的94年里时间减少了77%，以平均每年1.6%的速度减少。由此可以推断在20世纪的这100年里发明广泛普及的时间减少了79%。当前的发明普及的递减速度为每年7.4%，故以当前的速度来说，发明广泛普及的时间减少79%所需的时间只需要20年。以此速度计算，范式迁移增倍（也就是说发明普及减半的时间）的时间只需要9年。在21世纪该速率将11次翻番，即该速度将达到当前的211倍，也就是2000年的2000倍。实际的增长速率将更快，因为当前的增长速率如20世纪那样，仍然稳定地增长。

22.数据来自1967年~1999年的Intel的数据，请见Gordon E.Moore的"Our Revolution"，网址为<http://www.siaonline.org/downloads/Moore.pdf>。数据来自2000年~2016年International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)，该数据在2002年和2004年更新，网址为<http://public.itrs.net/Files/2002Update/2002Update.pdf>和http://www.itrs.net/Common/2004Update/2004__00__Overview.pdf。

23.ITRS生产DRAM的花费表示每一bit信息花费的数据。1971年~2000年的数据来自VLSI Research年，2001年~2002的数据来自ITRS的2002年更新的表7a，第172页。2003年~2018年的数据来自ITRS的2004更新的表7a和7b，第20页和第21页。

24.根据Intel和Dataquest的报告（2002年12月），参见Gordon E.Moore的"Our Revolution"，网址为<http://www.siaonline.org/downloads/Moore.pdf>。

25.Randall Goodall、D.Fandel和H.Huffet的"Long-Term Productivity Mechanisms of the Semiconductor Industry"，Ninth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology，2002年5月12日

~17日, Philadelphia, 由the Electrochemical Society (ECS) 和 International Sematech赞助。

26.1976~1999的数据来自E.R.Berndt、E.R.Dulberger和N.J.Rappaport的 Price and Quality of Desktop and Mobile Personal Computers: A Quarter Century of History, 2000年7月17日, 网址为<http://www.nber.org/~confer/2000/si2000/berndt.pdf>。2001~2016的数据来自ITRS的2002更新表4c: Performance and Package Chips: Frequency On-Chip Wiring Levels-Near-Term Years, 第167页。

27.请见注释26描述的时钟速度(周期时间)和注释24描述的晶体管代价。

28.在微处理器方面Intel的晶体管: Microprocessor Quick Reference Guide, Intel Research, 网址为 <http://www.intel.com/pressroom/kits/quickrefyr.htm>。也可以参见Silicon Research Areas, Intel Research, <http://www.intel.comlresearch/silicon/mooreslaw.htm>。

29.数据来源于Intel公司, 请见: Gordon Moore的"No Exponential Is Forever.....but We Can Delay 'Forever'", 在International Solid State Circuits Conference (ISSCC)上发表, 2003年2月10日, 网址为 ftp://download.intel.com/research/silicon/Gordon__Moore__ISSCC__021003.pdf。

30.Steve Cullen的"Semiconductor Industry Outlook", InStat/MDR, 报告号: IN0401550SI, 2004年4月, 网址为 <http://www.instat.com/abstract.asp?id=68&SKU=IN0401550SI>。

31.来自World Semiconductor Trade Statistics, 网址为 <http://wsts.www5.kcom.at>。

32.来自Bureau of Economic Analysis, U.S. Department of Commerce, 网址为 <http://www.bea.gov/bea/dn/home/gdp.htm>。

33.请见本章注释22~24和注释26~30。

34.来自International Technology Roadmap for Semiconductors, 2002更

新, International Sematech。

35."25 Years of Computer History", 网址为
<http://www.compros.com/timeline.html>; Linley Gwennap的"Birth of a Chip", 《BYTE》(1996年12月), 网址为
<http://www.byte.com/art/9612/sec6/art2.htm>; "The CDC 6000 Series Computer", 网址为
<http://www.moorecad.com/standardpascal/cdc6400.html>; "A Chronology of Computer History", 网址为
<http://www.cyberstreet.com/lhcs/museum/chron.htm>; Mark Brader的"A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952)", 网址为
<http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Karl Kempf的"Electronic Computers Within the Ordnance Corps", 1961年11月, 网址为
<http://ftp.arl.mil/~mike/comphist/61ordnance/index.html>; Ken Polsson的"Chronology of Personal Computers", 网址为
<http://www.islandnet.com/~kpolsson/comphist>; "The History of Computing at Los Alamos", 网址为
<http://bang.lanl.gov/video/sunedu/computer/comphist.html> (requires password); the Machine Room, 网址为<http://www.machineroom.org>; Mind Machine Web Museum, 网址为<http://www.userwww.sfsu.edu/~hl/mmm.html>; Hans Moravec, computer data, 网址为
<http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/book97/ch3/processor.list>; "PC Magazine Online: Fifteen Years of PC Magazine", 网址为
<http://www.pcmag.com/article2/0,1759,23390,00.asp>; Stan Augarten, 《Bit by Bit: An Illustrated History of Computers》(New York: Ticknor and Fields, 1984); International Association of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 《Annals of the History of the Computer》9.2 (1987): 150-53和16.3 (1994): 20; Hans Moravec的《Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence》(Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1988); Rene Moreau的《The Computer Comes of Age》(Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984)。

36.本章中的这幅图标示为“对数图”，但该图从技术的角度来说半对数图，因为该图形在时间轴上是线性的，而另一个轴上是对数的。但是为了方便起见，我将这些图形称为“对数图”。

37.参见附录，该定律从数学的角度证明了计算能力（由单位花费每MIPS来衡量）为什么存在两个层次上的指数增长（指数增长速率本身也在以指数速度增长）。

38.Hans Moravec的"When Will Computer Hardware Match the Human Brain?" 《Journal of Evolution and Technology》1（1998），网址为<http://www.jetpress.org/volumel/Moravec.pdf>。

39.请见注释35。

40.人们用了90年的时间（1900年~1990年）才实现用1000美元创造1个MIPS的计算能力。现在每400天就可以使1000美元的MIPS数量翻番。因为当前的性价比是每1000美元2000 MIPS，所以现在我们以每天增加5 MIPS的速度改进性价比，或者说是以每5小时增加1个MIPS的速度。

41."IBM Details Blue Gene Super Computer", 《CNET News》，2003年3月8日，网址为http://news.com.com/2100-1008__3-1000421.html。

42.请见Alfred North Whitehead的《An Introduction to Mathematics》（London: Williams and Norgate, 1911），与此同时，他还与Bertrand Russell共同创作了三卷《Principia Mathematica》。

43.该项目原计划花费15年的时间，“人类基因组计划比原计划提前两年半的时间，同时该项目的花费也比原计划的27亿美元低”。

44.人类基因组计划可参考：

http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/privatesector.shtml；Stanford Genome Technology Center,<http://sequence-www.stanford.edu/group/techdev/auto.html>；National Human Genome Research Institute,<http://www.genome.gov>；Tabitha Powledge的"How Many Genomes Are Enough?" 《Scientist》，2003年11月17日，<http://www.biomedcentral.com/news/20031117/07>。

45.数据源自National Center for Biotechnology Information的"GenBank Statistics"，2004年5月4日修订，网址为<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank/genbankstats.html>。

46.British Columbia Cancer Agency和The American Centers for Disease

Control只用了31天的时间便破译了非典型性肺炎（SARS）的基因序列。两个中心测序对比表明该病毒中的2万9千个碱基对中只有10对不同。本项工作确认了SARS是一种冠状病毒。CDC的主管Julie Gerberding博士将本次测序工作称为“科学的成就已经远远超过历史发展水平”。参见K.Philipkoski的"SARS Gene Sequence Unveiled", 《Wired News》, 2003年4月15日, 网址为
[http://www.wired.com/news/medtech/0, 1286, 58481.00.html? tw=wn_story__related](http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,58481.00.html?tw=wn_story_related)。

而HIV的测序工作始于20世纪80年代, HIV1和HIV2测序工作分别于2003年和2002年完成, National Center for Biotechnology Information, 网址为[http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/framik.cgi? db=genome& gi=12171](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/framik.cgi?db=genome&gi=12171); HIV的序列数据库由洛杉矶阿尔莫斯自然实验室维护, 网址为<http://www.hiv.lanl.gov/content/hivdb/HTML/outline.htm>。

47.Mark Brader的"A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952)", 网址为<http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Richard E.Matick的《Computer Storage Systems and Technology》(New York: John Wiley and Sons, 1977); 剑桥大学计算机实验室, EDSAC99, 网址为<http://www.cl.cam.ac.uk/UoCCL/misc/EDSAC99/statistics.html>; Mary Bellis的"Inventors of the Modern Computer: The History of the UNIVACcomputer-J.Presper Eckert and John Mauchly", 网址为<http://inventors.about.com/library/weekly/aa062398.htm>; "Initial Date of Operation of Computing Systems in the USA (1950~1958)", 源于1968 OECD data, 网址为<http://members.iinet.net.au/~dgreen/timeline.html>; Douglas Jones的"Frequently Asked Questions about the DEC PDP-8computer", 网址为ftp://rtfrn.mit.edu/pub/usenet/alt.sys.pdp8/PDP-8_Frequently_Asked_Questions_%28posted_every_other_month%29; 《Programmed Data Processor-1 Handbook》, Digital Equipment Corporation (1960~1963), 网址为<http://www.dbit.com/greeng3/pdp1/pdp1.html#INTRODUCTION>; John Walker的"Typical UNIVAC 1108 Prices: 1968", 网址为<http://www.fourmilab.ch/documents/univac/config1108.html>; Jack Harper的"LISP 1.5 for the Univac 1100 Mainframe", 网址为<http://www.frobenius.com/univac.htm>; Wikipedia的"Data General Nova", 网址为<http://www.answers.com/topic/datageneralnova>; Darren Brewer的"Chronology of Personal Computers 1972~1974", 网址为

http://uk.geocities.com/magoos__universe/comp1972.htm;
www.pricewatch.com; 网址为<http://www.jcnews.com/parse.cgi?news/pricewatch/raw/pw-010702>; 网址为
<http://www.jcnews.com/parse.cgi?news/pricewatch/raw/pw-020624>; 网
址为<http://www.pricewatch.com> (11/17/04); 网址为
http://sharkyextreme.com/guidesIWMPG/article.php/10706__2227191__2;
《Byte advertisements》, 1975年9月~1998年3月; 《PCcomputing advertisements》, 1977年3月~2000年4月。

48.Seagate的"Products", 网址为

<http://www.seagate.com/cda/products/discsales/index>; 《Byte advertisements》, 1977~1998; 《PCcomputing advertisements》, 1999年3月; Editors of Time-Life Books的《Understanding Computers: Memory and Storage》(New York: Warner Books, 1990); "Historical Notes about the Cost of Hard Drive Storage Space", 网址为
<http://www.alts.net/ns1625/winchest.html>; "IBM 305 RAMACcomputer with Disk Drive", 网址为<http://www.cedmagic.com/history/ibm-305-ramac.html>; John C.McCallum的"Disk Drive Prices (1955-2004)", 网址为<http://www.jcmit.com/diskprice.htm>。

49.James DeRose的《The Wireless Data Handbook》(St.Johnsbury,Vt.: Quantrum, 1996); First Mile Wireless, 网址为

<http://www.firstmilewireless.com>; J.B.Miles的"Wireless LANs", "《Government Computer News》18.28 (1999年4月30日)",
http://www.gcn.com/vo118__no28/guide/514-1.html; 《Wireless Week》(1997年4月14日), 网址为
<http://www.wirelessweek.com/toc/4%2F14%2F1997>; Office of Technology Assessment的"Wireless Technologies and the National Information Infrastructure", 1995年9月, 网址为
<http://infoventures.com/emf/federal/ota/ota95-tc.html>; Signal Lake的"Broadband Wireless Network Economics Update", 2003年1月14日, 网
址为<http://www.signallake.com/publications/broadbandupdate.pdf>;
BridgeWave Communications communication, 网址为
<http://www.bridgewave.com/050604.htm>。

50, Internet Software Consortium (<http://www.isc.org>), ISC Domain Survey: Number of Internet Hosts, 网址为<http://www.isc.org/ds/host->

count-history.html。

51.如上。

52.每年的12月，美国都市在互联网的主干网络上测试当年的平均流量。A.M.Odlyzko的"Internet Traffic Growth: Sources and Implications", 《Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II》, B.B.Dingel、W.Weiershausen、A.K.Dutta和K.-I.Sato等编辑, 《Proc.SPIE》(The International Society for Optical Engineering) 5247 (2003): 1-15, 网址为<http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/oft.internet.growth.pdf>; 数据来源于2003~2004与A.M.Odlyzko的电子邮件沟通。

53.Dave Kristula的"The History of the Internet" (发表于1997年3月, 2001年8月更新), 网址为

<http://www.davesite.com/webstation/nethistory.shtml>; Robert Zakon的"Hobbes' Internet Timeline v8.0", 网址为

<http://www.zakon.org/robert/internet/timeline>; 《Converge Network Digest》, 2002年12月5日, 网址为

<http://www.convergedigest.com/Daily/daily.asp?vn=v9n229&fecha=December%2005,%202002>; V.Cerf的"Cerfs Up", 2004, 网址为http://global.mci.com/de/resources/cerfs__up/。

54.H.C.Nathanson等的"The Resonant Gate Transistor", 《IEEE Transactions on Electron Devices》14.3 (1967年3月): 117-33; Larry J.Hornbeck的"128 x 128 Deformable Mirror Device", 《IEEE Transactions on Electron Devices》30.5 (1983年4月): 539-43; J.Storrs Hall的"Nano Computers and Reversible Logic", 《Nanotechnology》5 (July 1994): 157-67; V.V.Aristov等的"A New Approach to Fabrication of Nanostructures", 《Nanotechnology》6 (1995年4月): 35-39; C.Montemagno等的"Constructing Biological Motor Powered Nanomechanical Devices", 《Nanotechnology》10 (1999): 225-31, 网址为<http://www.foresight.org/Conferences/MNT6/Papers/Montemagno/>; Celeste Biever的"Tiny 'Elevator' Most Complex Nanomachine Yet", 《New-Scientist.com News Service》, 2004年3月18日, 网址为<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn4794>。

55.ETC Group的"From Genomes to Atoms: The Big Down", 第39页, 网

址为<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>。

56.同上。

57.虽然难以准确地确定基因所蕴含的内容，但是重复的碱基对数量显然远小于未经压缩的数量总和。下面提供了两种预测基因中压缩信息的方法，这两种方面均表明3000万~1亿字节的这一范围是很高的。

1) 就未压缩的数据而言，人类基因代码中包含了30亿个DNA梯阶，每个可用两bit信息编码（因为每个DNA碱基对有四种可能性）。这样算来，人类基因组共含有8亿字节未经压缩的信息。不能编码的DNA称为“垃圾DNA”，但现在已经可以清晰地认定它们在基因表达中扮演了重要角色。但是其编码效率很低，存在大量的冗余（例如"ALU"序列重复出现了很多次），压缩算法可以充分地利用这一特点而进行压缩。

由于基因数据库中已经存储着大量的数据，所以基因数据压缩引起了大家的广泛兴趣。近来的研究表明，应用标准的压缩算法可以去除基因数据中90%的冗余信息（例如应用bitperfect算法），参见Hisahiko Sato等的"DNA Data Compression in the Post Genome Era"，《Genome Informatics》12（2001）：512-14，网址为<http://www.jsbi.org/journal/GIW01/GIW01P130.pdf>。

这样我们就能够无损地将人类的基因信息压缩至8000万字节（这意味着我们能够完美地重新构建8亿字节未经压缩的基因组）。

现在来考虑那些不用于蛋白质编码的98%的基因组。即便使用标准的压缩算法（使用字典的方法减少基因的冗余），不能编码的DNA经压缩后，其数据量将变得很低，这意味着我们可以使用一种算法通过较少的信息而达到相同的功能。由于我们正处于逆向工程基因组的早期阶段，所以不能坚定地认为在保证各项功能的同时减少基因中的数据量。所以我们现在使用3000万~1亿这一范围来表示基因组中信息的数据量。这一范围的上界表示只使用压缩算法而不是为简化算法。

只有部分（尽管是大部分）信息用于构建大脑的设计。

2) 另一个合理推断如下，尽管人类基因包含30亿碱基，但只有很小的一部分用于编码蛋白质。现在估计大概有2万6千个基因用于编码蛋白质。如果我们假设那些基因平均有3千个碱基对是有效数据，那么它们

将等价于7800百万碱基。存储一个DNA碱基需要2bit，这意味着需要2000万字节空间存储所有的信息（7800万除以4）。在一个基因的蛋白质编码序列中，3个DNA碱基对中每个密码子翻译为一个氨基酸。所以共有43（64）种可能的密码子代码，每个均有3个DNA碱基对构成。但是其中只有20个使用了终止密码子（无效氨基酸）。剩余的密码子与21个有效密码子等效。而64中有效的组合需要6bit的存储空间，存储21种可能性需要4.4（ $\log_2 21$ ）bit的信息，这样便节约了1.6bit的信息（约为27%），这样存储信息总量降为1500万字节。同时一些基于重复序列的标准压缩算法在这也是可用的，尽管用于蛋白质编码的DNA与垃圾DNA相比，其压缩量较小，但是数据总量仍能下降至1200万字节。但是我们需要加上可以控制基因表达的非编码DNA。虽然这部分DNA是由基因组构成的，但它的信息量较少，且拥有大量的信息冗余，估计同样需要1200万字节存储用于蛋白质编码的DNA，所以我们总共大约需要2400万字节存储表达人类基因。从这个视角来看，3千万~1亿字节的数据量的估计是比较高的。

58.浮点数可以精确地表示连续的值。一个浮点数由两个比特序列构成。“指数”序列表示2的幂值，“基数”序列表示分数。增加基数序列中比特的数量，我们便可以增加准确性。

59.Stephen Wolfram的《A New Kind of Science》（Champaign, Ill.: Wolfram Media, 2002）。

60.关于数字物理理论的早期工作也是由Frederick W.Kantor发表的，《Information Mechanics》（New York: John Wiley and Sons, 1977）。Kantor的论文可以从以下链接找到：

<http://w3.execnet.com/kantor/pm00.htm>（1997）；

<http://w3.execnet.com/kantor/1b2p.htm>（1989）和

<http://w3.execnet.com/kantor/ipoim.htm>（1982）。<http://www.kx.com/listbo>

61.Konrad Zuse的"Rechnender Raum"，《Elektronische Datenverarbeitung》，1967。Konrad Zuse的由细胞组成的基于自动化的宇宙在2年后发表，《Rechnender Raum,Schriften zur Datenverarbeitung》（Braunschweig,Germany: Friedrich Vieweg& Sohn, 1969）。英文翻译版：《Calculating Space》，MIT Technical Translation AZT-70-164-GEMIT, 1970年2月。MIT Project MAC,Cambridge,MA 02139.PDF。

62.Edward Fredkin引自Robert Wright的"Did the Universe Just

Happen? " 《Atlantic Monthly》, 1988年4月, 网址为
<http://digitalphysics.org/Publications/Wri88a/html>。

63.同上。

64.Fredkin的很多结果源于他对计算模型的研究, 这些模型明确地表达了物理学的基本原则。参见Edward Fredkin和Tommaso Toffoli的经典文章: "Conservative Logic", 《International Journal of Theoretical Physics》21.3-4 (1982): 219-53, 网址为
http://www.digitalphilosophy.org/download_documents/ConservativeLogic.pdf。与Fredkin的文章相似的内容还可以在Norman Margolus中找到, 如"Physics and Computation", "Ph.D.thesis, MIT/LCS/TR-415, MIT Laboratory for Computer Science, 1988。

65.在我于1990年创作的《The Age of Intelligent Machines》一书中, 我讨论了Norbert Wiener和Ed Fredkin关于信息作为构建物理和其他现实层面内容的基础。

通过计算变换的方式表达所有的物理现象的复杂度被认为是一个巨大的挑战, 但是Fredkin持续地投入努力。在过去的10年间Wolfram在该领域做出了巨大的努力, 但是交流仅限于物理界同样对该主题感兴趣的同仁。Wofram阐述了他的目标“并不是一个特殊的终极物理模型”, 而是他对“物理的注释”(本质上说是一个极为重要的挑战), Wolfram描述“这样一个模型将会有他所相信的特征”(《A New Kind of Science》, 网址为<http://www.wolframscience.com/nksonline/page-1043c-text>)。

在《The Age of Intelligent Machines》一书中, 我讨论过“现实的终极本质是模拟还是数字的问题”, 并指出“随着我们对于自然过程和智能过程探究的深入, 我们将会发现这一过程的本质通常是模拟信息和数字信息交替的过程”。为了说明该问题, 我将讨论声音。在我们的大脑中, 音乐可以用耳蜗中数字化的录制神经元来表示不同的频段。在空气和线路中, 它又是一种模拟现象。声音在压缩的磁盘中以数字的形式表达, 并通过数字电路解码。但是数字电路由带有阈值的晶体管组成, 它们又是模拟的扬声器。作为扬声器, 晶体管可以操作独立的电子, 所以它们又可以被数字化地计算, 在更深的层次上, 电子从属于模拟的量子场。在更深层次上, Fredkin和Wolfram为这些联系方程提供了理论化的数字

（计算的）基础。

值得注意的是，一些人在建立物理的数字化理论方面取得了成功，我们将通过实现计算和细胞自动机的链接的方法来检验更深层的机制。也许那些使宇宙正常运行的细胞自动机是更基础的模拟现象，例如晶体管从属于一个阈值，使其完成数字化的操作。这样为物理建立数字化的基础将不会引起哲学上的争论，如现实的终极形态是数字的还是模拟的。尽管如此，建立一个可行的计算模型仍然是一个非凡的成就。

那么这种事情发生的可能性有多大？我们可以轻易地建立一种已存在的证据以表明物理的数字化模型是可行的，因此连续方程经常被表达为离散值和离散变换的准确程度。毕竟这是计算的基础性原理。但是连续方程具有根本的复杂性，它将违反爱因斯坦关于事物的声明“尽可能简单，而不是简单一些”。现实的问题是，我们能否通过使用细胞自动机算法，以更精深的方法来表达基础关系。测试物理学的一种新理论在于是否有能力验证它的预测。需要至少有一种非常重要的方法来验证，这对于以细胞自动机为基础的理论极为重要，因为可预测性的降低是细胞自动机的一个基础性的特征。

Wolfram将宇宙描述为一个巨大的网络节点。这些节点并不存在于“空间”中，而是存在于我们能够感知的另外一种空间，该空间是由贯穿网络节点的现象迁移创造的。人可以轻易地通过想象构建为任意所需粒度建立三维网络的方法，以构建用于表达“朴素”物理现象的网络。像“粒子”和“波”这样可以穿越空间的现象被“细胞滑翔”所表示，这是每个计算周期网络中的先进模式。“生活”（基于细胞自动机）游戏的爱好者将识别普通的滑翔机现象和多样性的模式，该模式可以平稳地穿越细胞自动机网络。光速是天文计算机的时钟速度，因为滑翔使得每个计算周期推进一个细胞。

爱因斯坦的广义相对论将重力描述为空间本身的扰动，好像我们所处的三维世界是无法看到的四维空间的一种弯曲，它明确地代表着一种模式。我们可以想象四维网络代表着明显的空间弯曲，同样它也代表着三维空间的弯曲。网络在一些区域是密集的，这代表了时空弯曲的等价物。

细胞自动机的概念解释熵（无序度）的增加是有效的（熵的概念蕴含于热力学第二定律中）。我们假设构建宇宙的细胞自动机规则是第四个规则（见正文）——另外宇宙事实上是一个没有活力的地方。Wolfram主

要的观察结果是第四类细胞自动机的快速生产具有很显然的随机性（尽管它具有确定的过程），我们可以通过布朗运动观察到这种随机性，并且其蕴涵于第二定律中。

狭义相对论更难理解。牛顿模型可以与细胞网络简单对应。但是牛顿模型不适用于狭义相对论。在牛顿世界中，如果一辆火车以80km/h的速度行驶，在并行的轨道上你驾驶的汽车以60km/h的速度行驶，那么火车将以20km/h远离你。但是在狭义相对论的世界中，如果你以3/4的光速离开地球，对于你来说，光似乎仍以全光速远离你。根据这种看似矛盾的观点，对于两个观察者来说，物体的尺寸和运行的主观时间都依赖于相对速度。这样空间与节点的明确对应将更加复杂。本质上每个观察者都需要它自己的网络。但在狭义相对论中，我们可以从本质上应用相同的变换：从“牛顿”网络到牛顿空间。但是很明显，在狭义相对论中应用这种方法已经无法达到更加简化的结果。

细胞节点所代表的现实有利于理解量子力学中的一些现象。它可以解释量子现象中明显的随机性。例如粒子-反粒子对的突然的随机出现。我们可以在第四类细胞自动机中发现相同类型的随机。尽管是预先确定的，但是第四类细胞自动机是无法预测的（不同于运行细胞自动机），也是随机的。

这并不是一种新的观点。它等价于量子力学公式中的“隐藏变量”，这说明了存在一些变量我们是不能访问的，而这些变量控制了我们所观测到的随机行为。量子力学中隐藏变量的概念与量子力学公式相矛盾。这一概念并不被量子物理学家所接受，因为这需要使用一种特殊的方法并进行大量的假设才能将其论证清楚。但这并不能作为反对这一概念的论据。宇宙的存在本身就需要通过一种非常精确的方式提出很多假设。但是我们正处在这个宇宙中。

一个重要的问题是如何验证隐藏变量理论？如果基于细胞自动机类似的过程，隐藏的变量将是确定的，但也是不可预知的。我们需要找到一些其他方法来揭示这些隐藏变量。

Wolfram的宇宙网络概念提供了一个潜在的观点以说明量子纠缠和波动函数衰竭现象。其中波动函数衰竭可以追溯粒子模糊不清的属性（如位置），可以从细胞网络的角度来解释现象与观察者之间的交互。作为观察者，我们生存于网络之中。我们从细胞力学中得知两个交互的实体之间不能发生改变，这便是波动函数衰竭的基础。

Wolfram写道：“如果宇宙是一个网络，即便从空间上来说粒子之间距离很远，但彼此仍然被连接在一起。”这解释了近来关于非区域性行为的实验，非区域性行为涉及两个彼此相距很远的“量子纠缠”粒子。爱因斯坦称之为“超距作用”并否认了这个概念，但是近来的实验表明了这个概念的正确性。

一些现象更适于用细胞自动机网络来解释。一些建议看起来是很有说服力的，但是Wolfram已经清晰地陈述了，事实上若将物理转变为连续的细胞自动机的系统是难以完成的。

Wolfram在哲学方面拓展了他的讨论，他“解释”了以自由的现象作为决策是明确的，但又是无法预测的。如果不通过实际的操作过程，将没有办法预测细胞过程的结果，由于没有模拟器能够比宇宙本身运行得更快，所以也就没有办法预测人类的决策。所以即便我们的决策预先确定，但是仍然无法事先预知结果。尽管如此，这仍没有充分地阐明这个概念。就可预测性降低而言，这一观察可以作为大多数物理过程的结果——例如尘埃落地。因此该观点等价于人类关于随机落下的尘埃的自由意愿。当Wolfram声明人脑中处理过程“计算等价”于其他的过程（如流体动荡）时，他的这一观点便形成了。

自然界中的一些现象（例如云、海岸线）以重复简单过程为特征，如细胞自动机和分形，但是智能的模式（如人脑）需要进化过程（或者逆向工程这一过程的结果）。智能是一种启发式进化的结果，在我看来，世界上最强大的力量终将超越自然的力量。

总之，Wolfram宏伟的论述向人们描述了一幅极具吸引力而又被高估的不完整的画面。Wolfram加入了一个成长中的社区，该社区用于保存信息的模式，而非物质和能量，并认为信息是构建现实的基础。Wolfram增加了以下知识，即信息模式如何创造我们所经历的世界。我希望与Wolfram及其同事共同工作一段时间，使得我们能够为世界构建一个更稳固、更具普适性的视角。

第四类细胞自动机的低预测性构成了一些生物系统复杂性的基础，同时代表了一种重要的生物范式（该范式可通过技术模拟）。它无法解释生物，但却仍然可以解释所有物理现象。如果Wolfram或其他人能够成功地以细胞自动机操作及其模式为方法来表达物理世界，那么Wolfram的这本书将实至名归。无论如何，我坚信本书是有关本体论的非常重要的一本书。

66.规则110声明在如下提案件中细胞的颜色是白色的：1) 该细胞先前的颜色是白色并且邻居细胞是全黑或全白的；2) 该细胞先前的颜色是白色并且其邻居细胞一个是白色的一个是黑色的；其他情况下，细胞的颜色都是黑色的。

67.Wolfram, 《New Kind of Science》, 第4页, 网址为
<http://www.wolframscience.com/nksonline/page-4-text>。

68.请注意，量子力学的一些解释隐含地说明了世界并不基于明确的规则，并且对于内在的量子范畴的每一次交互都存在着一一种内在的量子随机性。

69.如注释57所论述的，未经压缩的人类基因组共含有60亿bit的信息（数量级为 10^{10} bit），而经过压缩的基因组共含有3000万~1亿字节的信息。当然其中的一些设计信息被应用于其他习惯。假设将所有的1亿字节信息用于设计大脑，那么保守地估计，染色体中用于设计人脑的信息量高达 10^9 bit。我们将讨论对于“个体神经连接层次上的人类记忆”的估计，其中包括成人大脑中“连接模式和神经质浓缩”的 10^{18} bit的信息。该数值是染色体中用于描述大脑设计所需信息的1亿倍（ 10^9 ）。这逐渐发生于大脑在与环境交互式时的自我组织。

70.参见《The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence》（New York: Viking, 1999），第30~33页，该书的"Disorder"和"The Law of Increasing Entropy Versus the Growth of Order"内容中有详细讨论。

71.通用计算机可以接受来自其他计算的输入，并模拟其他计算。模拟的速度会比较慢。

72.C.Geoffrey Woods的"Crossing the Midline", Science 304.5676 (2004年6月4日): 1455-56; Stephen Matthews的"Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis", Trends in Endocrinology and Metabolism 13.9 (2002年11月1日): 373-80; Justin Crowley和Lawrence Katz的"Early Development of Ocular Dominance Columns", Science 290.5495 (2000年11月17日): 1321-24; Anna Penn等的"Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity", Science 279.5359 (1998年3月27日): 2108-12。

73.图灵机有7个命令：1) 读取磁带，2) 向左移动磁带，3) 向右移动磁带，4) 在磁带上写0，5) 在磁带上写1，6) 跳转到另外的命令，7) 停止。

74.书中最令人印象深刻的分析是，Wolfram认为只有两种状态5种可能颜色的图灵机是一种通用的图灵机。而40年来我们认为通用图灵机远比上述的复杂。另一个让人印象深刻的是Wolfram证明了110规则可以通过合适的软件用于通用计算。当然，如果没有合适的软件，那么通用计算是无法执行任务的。

75.“非”门将两个输入变为一个输出。只有当输入A和B都是非时，输入才为真。

76.请见The Age of Intelligent Machines的"A nor B: The Basis of Intelligence?" (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1990)，网址为<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?m=12>。

77.United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, "Regional Road Map Towards an Information Society in Asia and the Pacific, "ST/ESCAP/2283,
<http://www.unescap.org/publications/detail.asp?id=771>; Economic and Social Commission for Western Asia, "Regional Profile of the Information Society in Western Asia, "October 8, 2003,
<http://www.escwa.org.lb/information/publications/ictd/docs/ictd-03-11-e.pdf>; John Enger, "Asia in the Global Information Economy: The Rise of Region-States,The Role of Tele Communications, "International Conference on Satellite and Cable Television in Chinese and Asian Regions,communication Arts Research Institute,Fu Ien Catholic University,June 4-6, 1996.

78.参见"The 3 by 5 Initiative", Fact Sheet 274, 2003年12月，网址为<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/2003/fs274/en/print.html>。

79.1998年的风险投资（101亿美元）中，76%用于技术投资。
(PricewaterhouseCoopers news release, "Venture Capital Investments Rise 24 Percent and Set Record at \$ 14.7 Billion,PricewaterhouseCoopers Finds, "February 16, 1999)，1999年风险投资（320亿美元）的90%用于技术公司 (PricewaterhouseCoopers news release, "Venture Funding

Explosion Continues: Annual and Quarterly Investment Records Smashed, According to PricewaterhouseCoopers Money Tree National Survey, "February 14, 2000)。在高科技衰退的那段时间，风险投资有所下降，但是在2003年的第二季度，仅软件公司便获得了近10亿美元的投资。1974年美国制造行业的42家公司总共获得2640万美元的风险投资（相当于1992年8100万美元）。参见Samuel Kortum和Josh Lerner的"Assessing the Contribution of Venture Capital to Innovation" RAND Journal of Economics 31.4（2000年冬季）：674-92，网址为 http://econ.bu.edu/kortum/rje_Winter00_Kortum.pdf。如Paul Gompers和Josh Lerner所述，“风险投资从20世纪70年代开始迅速增加”Gompers和Lerner的The Venture Capital Cycle,（Cambridge,Mass.: MIT Press, 1999）。请见Paul Gompers的"Venture Capital", Handbook of Corporate Finance: Empirical Corporate Finance, 网址为 <http://mba.tuck.dartmouth.edu/pages/faculty/espen.eckbo/PDFs/HandbookpVentureCapital.pdf>。

80.关于“新经济”技术源于对“旧经济”工业改造的说明请见Jonathan Rauch的"The New Old Economy: Oil, computers, and the Reinvention of the Earth", Atlantic Monthly, 2001年1月3日。

81.U.S.Department of Commerce,Bureau of Economic Analysis (<http://www.bea.doc.gov>)，请见以下网站，Table 1.1.6: <http://www.bea.doc.gov/bealdn/nipaweb/SelectTable.asp?Selected=N>。

82.U.S.Department of Commerce,Bureau of Economic Analysis,<http://www.bea.doc.gov>.

1920-1999 data from: Population Estimates Program,Population Division,U.S.Census Bureau, "Historical National Population Estimates: July 1, 1900 to July 1, 1999, "<http://www.census.gov/popest/archives/1990s/popdockest.txt>; 2000-2004 data from <http://www.census.gov/popest/states/tables/NST-EST2004-01.pdf>.

83."The Global Economy: From Recovery to Expansion, "Results from Global Economic Prospects 2005: Trade,Regionalism and Prosperity (World Bank, 2004) , <http://globaloutlook.worldbank.org/globaloutlook/outside/globalgrowth.aspx>

Bank: 2004 Economic Growth Lifts Millions from Poverty, "Voice of America News,<http://www.voanews.com/english/2004-11-17-voa41.cfrn>.

84.Mark Bilis and Peter Klenow, "The Acceleration in Variety Growth, "American Economic Review 91.2 (May 2001) : 274-80, <http://www.klenow.com/Acceleration.pdf>.

85.请见注释84、86和87。

86.U.S.Department of Labor,Bureau of Labor Statistics, 2004年6月3日的新闻报导。可以从以下连接获得该报道：
<http://www.bls.gov/bls/productivity.htm>。

87.Bureau of Labor Statistics,Major Sector Multifactor Productivity Index,Manufacturing Sector: Output per Hour All Persons (1996=100) , <http://data.bls.gov/PDQ/outside.jsp?survey=mp> (Requires JavaScript: select"Manufacturing, ""Output Per Hour All Persons, "and starting year 1949) , or <http://data.bls.gov/cgi-bin/srgate> (use series "MPU300001, ""AllYears, "and Format 2) .

88.George M.Scalise,Semiconductor Industry Association,in"Luncheon Address: The Industry Perspective on Semiconductors, "2004 Productivity and Cyclicity in Semiconductors: Trends,Implications,and Questions-Report of a Symposium (2004) (National Academies Press, 2004) , p.40, <http://www.nap.edu/openbook/0309092744/html/index.html>.

89.数据来自Kurzweil Applied Intelligence, 现在是ScanSoft (formerly Kurzweil Computer Products) 的子公司。

90.eMarketer, "E-Business in 2003: How the Internet Is Transforming Companies,Industries,and the Economya Review in Numbers, "February 2003; "US B2C E-Commerce to Top \$90 Billion in 2003, "April 30, 2003, <http://www.emarketer.com/Article.aspx?1002207>; and "Worldwide B2B E-Commerce to Surpass \$1 Trillion By Years End, "March 19, 2003, <http://www.emarketer.com/Article.aspx?1002125>.

91.IT经济分享能力的增倍时间为23年。 U.S.Department of

Commerce, Economics and Statistics Administration, "The Emerging Digital Economy", 表2, 网址为
<http://www.technology.gov/digeconomy/emerging.htm>。

92. 美国教育支出增倍时间23年。National Center for Education Statistics, Digest of Education Statistics, 2002, 网址为
<http://nces.ed.gov/pubs2003/digest02/tables/dt030.asp>。

93. The United Nations 预测2000年全球资本市场总额为37万亿美元。United Nations, "Global Finance Profile", 《Report of the High-Level Panel of Financing for Development》, 2001年6月, 网址为
<http://www.un.org/reports/financing/profile.htm>。

如果我们能够感知未来的增长速率将以每年2%的速率增加（与当前的预期相比），考虑到每年的折扣率（与当前对比）为6%，考虑到当前价值的增加源于仅仅20年来以复利和折扣来计算未来的增长，那么其价值将变为原来的3倍。随后的内容指出，这种分析并没有考虑折扣率的增加，该折扣率源于对未来增长的一种感知。

第3章 达到人脑的计算能力

1. Gordon E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits, "Electronics 38.8 (April 19, 1965) : 114-17,
<ftp://download.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>.

2. 摩尔在1965年发表文章预测组件的数量每年会翻一番，在1975年，它将这一数字修订为每两年翻一番。然而，由于组件越小的运行速度越快（因为电子运行距离变小），性价比每两年不止是翻两番，所以整体的价格与功效比（每个晶体管周期的花费）每13个月下降一半。

3. Paolo Gargini quoted in Ann Steffora Mutschler, "Moore's Law Here to Stay, "Electronics Weekly.com, July 14, 2004,
<http://www.electronicweekly.co.uk/articles/article.asp?liArticleID=36829>. See also Tom Krazit, "Intel Prepares for Next 20 Years of Chip Making, "Computer-world, October 25, 2004, <http://www.computerworld.com/hardwaretopics/hardware/story/0,10801,96917,00.html>.

4. Michael Kanellos, "High-rise' Chips Sneak on Market, "CNET

News.com, July 13, 2004, <http://zdnet.com.com/2100-1103-5267738.html>.

5. Benjamin Fulford, "Chipmakers Are Running Out of Room: The Answer Might Lie in 3-D," *Forbes.com*, July 22, 2002, http://www.forbes.com/forbes/2002/0722/173__print.html.

6. NTT新闻稿, "Three-Dimensional Nanofabrication Using Electron Beam Lithography", 2004年2月2日, 网址为 <http://www.ntt.co.jp/news/news04e/0402/040202.html>.

7. László Forró和Christian Schonenberger, "Carbon Nanotubes, Materials for the Future", *Europhysics News* 32.3 (2001), <http://www.europhysicsnews.com/full/09/article3/article3.html>。还可见 <http://www.research.ibm.com/nanoscience/nanotubes>, 该网页将展示纳米管的全貌。

8. Michael Bernstein, 美国化学会通信稿, "High-Speed Nanotube Transistors Could Lead to Better Cell Phones, Faster Computers", 2004年4月27日, 网址为 http://www.eurekalert.org/pub__releases/2004-04/acs-nt042704.php。

9. 我估计一个基于纳米管、支持电路和连接需要大约10纳米的立方体（晶体管将是其一小部分）或 10^3 立方纳米，这是个保守估计，因为单壁纳米管的直径仅仅是1纳米，1英尺=2.54cm= 2.54×10^7 ns，这样，1立方英尺= $2.543 \times 10^{21} = 1.6 \times 10^{22}$ 立方纳米。所以，1英尺的立方体可以提供 1.6×10^{19} 个晶体管。由于每一个计算机需要大约 10^7 个晶体管（它们比可以在人类神经元连接间进行计算的装置更加复杂），我们可以支持 10^{12} （1万亿）次的平行计算。基于纳米晶体管的计算机每秒进行 10^{12} 次计算（基于Burke的估计），这使得我们可以估计出一英寸见方的纳米电路的速度为 10^{24} ，也可见Bernstein的"High-Speed Nanotube Transistors"。

经估计，人类大脑的功能模拟（可见第3章后面的讨论）需要 10^{16} cps，这给了我们1亿（ 10^8 ）的人脑当量。如果我们使用更加保守的估计，只取模拟神经形态（模拟每一个在神经组成部分的非线性连接，可见第3章后面的讨论）所需的 10^{19} cps的估计，一个一英尺见方的纳米管电力

将仅仅可以提供10万人脑当量。

10.“仅仅在四年前，我们才第一次测量了电子通过一个纳米管的传输，而现在，我们根据单分子设备探索什么该做以及什么不该做。下一步我们就将思考如何将元素整合在一起以形成一个复杂的电路。”Henk W.Ch.Postma他们中的一个作者Cees Dekker, "Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature", *Science* 293.5527 (2001年7月6日): 76-129, 可见美国科学促进协会新闻稿"Nanotransistor Switches with Just One Electron May Be Ideal for Molecular Computers, Science Study Shows", 网址为http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-07/aaftnsw062901.php。

11.IBM研究员解决了纳米晶体管制造的问题。当加热炭黑来制造导管时，大量不能用的金属管也随着适合做晶体管的半导体管一起生产出来。之后对这两种纳米管的电路使用电气脉冲来破坏不适合的纳米管——这种方法比通过原子力显微镜挑选适合的纳米管更有效，Mark K.Anderson, "Mega Steps Toward the Nanochip", *Wired News*, 2001年4月27日, 网址为<http://www.wired.com/news/technology/0,1282,43324,00.html>, 也可参阅Philip G.Collins、Michael S.Arnold和Phaedon Avouris, "Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown", *Science* 292.5517 (2001年4月27日): 706-9。

12.一个在原子级别上像滚制的细铁丝网围栏一样的纳米管，比人类的头发要细成千上万倍，然而它却非常牢固。该消息来自美国加州大学伯克利分校的新闻发布会，Researchers Create First Ever Integrated Silicon Circuit with Nanotube Transistors, “2004年1月5日，网址为http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/01/05__nano.shtml, 参阅Yu-Chih Tseng等, "Monolithic Integration of Carbon Nanotube Devices with Silicon MOS Technology", *Nano Letters* 4.1 (2004): 123-27, 网址为<http://pubs.acs.org/cgi-bin/sample.cgi/nalefd/2004/4/i01/pdf/nl0349707.pdf>。

13.R.Colin Johnson, "IBM Nanotubes May Enable Molecular-Scale Chips", *EETimes*, April 26, 2001, <http://eetimes.com/article/showArticle.jhtml?articleId=10807704>.

14.Avi Aviram和Mark A.Ratner, "Molecular Rectifiers", *Chemical Physics Letters* (November 15, 1974): 277-83, 根据Charles

M.Lieber, "The Incredible Shrinking Circuit, "Scientific American (2001年9月), 网址为<http://www.sciam.com>和<http://www-mcg.uni-r.de/downloads/lieber.pdf>。Aviram和Ratner描述的单分子整流器可以在任一方向优先流行。

15.Will Knight, "Single Atom Memory Device Stores Data, "NewScientist.com,September 10, 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99992775>, referring to R.Bennewitz et al., "Atomic Scale Memory at a Silicon Surface, "Nanotechnology 13 (July 4, 2002) : 499-502.

16.他们的晶体管由磷化铟和砷化镓制造而成, 可见伊利诺斯大学的新闻稿: "Illinois Researchers Create Worlds Fastest Transistor-Again", 网址为http://www.eurekalert.org/pub__releases/2003-11/uoia-irc110703.php。

17.Michael R.Diehl以及其他, "Self-Assembled Deterministic Carbon Nanotube Wiring Networks", Angewandte Chemie International Edition 41.2 (2002) : 353-56; C.P.Collier以及其他, "Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates, "Science 285.5426 (1999年7月) : 391-94。可见: <http://www.its.caltech.edu/~heathgrp/papers/Paperfiles/2002/diehlangchemint.pdf>和 <http://www.cs.duke.edu/~thl/papers/Heath.Switch.pdf>。

18.这些由Purdue小组设计的“花环纳米管”包括碳、氮、氢和氧元素, 这个环是自组装的, 因为它们内部是疏水性的, 而其外部是吸水性的, 因此, 为了在水中保护它们的内部结构, 根据这个小组的领导研究员Hicham Fenniri的说法, “这些环堆叠成纳米管。花环纳米管的物理和化学属性现在可以通过一个新颖的好方法来修改”。R.Colin Johnson, "Purdue Researchers Build Made-to-Order Nanotubes, "EETimes, 2002年10月24日, 网址为 <http://www.eetimes.com/article/showArticle.jhtml?articleId=18307660>; H.Fenniri等, "Entropically Driven Self-Assembly of Multichannel Rosette Nanotubes, "Proceedings of the National Academy of Sciences 99, supp1.2 (2002年4月30日) : 6487-92; Purdue news release, "Adaptable Nanotubes Make Way for Custom-Built Structures,Wires", 网址为 <http://news.uns.purdue.edu/UNS/html4ever/020311.Fenniri.scaffold.html>。荷兰的科学家做了类似的工作: Gaia Vince, "Nano-Transistor Self-Assembles Using Biology", NewScientist.com, 2003年11月20日, 网址为

[http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns⁹⁹⁹⁹⁴⁴⁰⁶](http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994406)。

19.Liz Kalaugher, "Lithography Makes a Connection for Nanowire Devices", 2004年6月9日, 网址为

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/3/6/6/1>, 参阅Song Jin等, "Scalable Inter Connection and Integration of Nanowire Devices Without Registration, "Nano Letters 4.5 (2004): 915-19.

20.Chao Li et al., "Multilevel Memory Based on Molecular Devices, "Applied Physics Letters 84.11 (March 15, 2004): 1949-51. Also see http://www.technologyreview.com/articles/rnb__051304.asp?p=1. Also see <http://nanolab.usc.edu/PDF%5CAPL84-1949.pdf>.

21.Gary Stix, "Nano Patterning, "Scientific American (February 9, 2004), http://www.sciam.com/print__version.cfm?articleID=000170D6-C99F-l01E-861F83414B7F0000; Michael Kanellos, "IBM Gets Chip Circuits to Draw Themselves, "CNET News.com, <http://zd-net.com.com/2100-1103-5114066.html>. Also see http://www.nanopolis.net/news__ind.php?type__id=3.

22.IBM在做可以根据需要自动重新配置的芯片, 例如通过增加存储量或加速器。IBM的系统和技术组的首席技术专家Bernard Meyerson说: “未来, 你拥有的芯片可能不是你所买到的那个。”来自于IBM新闻稿: "IBM Plans Industrys First Openly Customizable Microprocessor", 网址为<http://www.ibm.com/investor/press/mar-2004/31-03-04-1.phtml>。

23.BBC News, "Nanowire' Breakthrough Hailed", 2003年4月1日, 网址为<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/2906621.stm>。发行的文章由Thomas Scheibel等撰写, "Conducting Nanowires Built by Controlled Self-Assembly of Amyloid Fibers and Selective Metal Deposition, "Proceedings of the National Academy of Sciences 100.8 (2003年4月15日): 4527-32, 2003年4月2日在线发布, 网址为<http://www.pnas.org/cgi/content/full/100/8/4527>。

24.杜克大学新闻稿, "Duke Scientists 'Program' DNA Molecules to Self Assemble into Patterned Nanostructures, "网址为http://www.eurekalert.org/pub__releases/2003-09/duds092403.php, 参阅Hao Yan等撰写的"DNA-Templated Self-Assembly of Protein Arrays and

Highly Conductive Nanowires", Science 301.5641 (September 26, 2003): 1882-84。也可见http://www.phy.duke.edu/~gleb/Pdf_FILES/DNA__science.pdf。

25. 出处同上。

26. 这里有一个例子，它可以解决所谓的旅行商问题的过程。我们努力去为一个假想的旅行商寻找一个最优路径，这个旅行商要在很多城市之间进行访问，而且每个城市只能访问一次。所以不能直接地发现最适合的路径。为了解决这一问题，南加利福尼亚大学的数学家Leonard Adleman进行了以下步骤：

- 1) 用一段小的DNA序列对每个城市进行编码。
- 2) 使用PCR将每一个序列（每一个对应一个城市）复制万亿倍。
- 3) 下一步，将这些DNA集合（每一个对应一个城市）都放进试管里。这一步利用DNA之间的密切关系来使各个序列连接在一起。稍长些的序列将自动排列。每一个序列代表一条可能的城市路径。这些小的序列代表每一个城市随机的连接在一起，所以不能在数学上确定哪一条连接代表正确的答案（城市序列）。然而，这些序列的数量是如此之大以致几乎可以确定至少有一个序列——也可能是几百万的——将排列成正确的答案。

再下一步是利用特别设计的酶来剔除数万亿的不正确序列，只保留能代表正确答案的序列：4. 使用成为“引物”的分子来破坏那些不是从初始城市开始的DNA序列，还有那些不以结束城市结束的DNA序列，然后就是使用PCR将重复的序列予以剔除。

- 4) 使用酶反应来剔除那些旅行路径比城市总数还多的DNA序列。
- 5) 使用酶反应来破坏那些不包含城市1的序列，然后依此类推，将不包含城市*i* ($i=2, 3, 4, \dots$) 的序列予以剔除。
- 6) 现在，每一个剩余的序列都已经可以表示一个正确的答案，（使用PCR）复制这些剩余的序列，这样可以知道有数十亿的序列。
- 7) 使用电泳法技术，读出这些正确的DNA序列（以组为单位）。这些

读出的序列像一堆不同的线，它们代表正确的城市序列。

可见L.M.Adleman, "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems", Science 266 (1994) : 1021-24。

27.Charles Choi, "DNAcomputer Sets Guinness Record", "<http://www.upi.com/view.cfm?StoryID=20030224-045551-7398r>。也可见Y. Benenson等, "DNA Molecule Provides a Computing Machine with Both Data and Fuel", Proceedings of the National Academy of Sciences 100.5 (2003年3月4日) : 2191-96, 可见<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pubmed&pubmedid=12601148>; Y.Benenson等, "An Autonomous Molecular Computer for Logical Control of Gene Expression", Nature 429.6990 (2004年5月27日) : 423-29 (2004年4月28日在线发布), 可见<http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~udi/ShapiroNature2004.pdf>。

28.斯坦福大学新闻稿, "Spintronics' Could Enable a New Generation of Electronic Devices,Physicists Say", 网址为http://www.eurekalert.org/pub__releases/2003-08/suce080803.php, 参阅Shuichi Murakami、Naoto Nagaosa和Shou-Cheng Zhang, "Dissipationless Quantum Spin Current at Room Temperature, "Science 301.5638 (2003年9月5日) : 1348-51。

29.Celeste Biever, "Silicon-Based Magnets Boost Spintronics, "NewScientist.com,March 22, 2004, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994801>, referring to Steve Pearton, "Silicon-Based Spintronics, "Nature Materials 3.4 (April 2004) : 203-4.

30.Will Knight, "Digital Image Stored in Single Molecule, "NewScientist.com,December 1, 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993129>, referring to Anatoly K.

Khitrin,Vladimir L.Ermakov,and B.M.Fung, "Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography, "Journal of Chemical Physics 117.15 (October 15, 2002) : 6903-5.

31.路透社, "Processing at the Speed of Light, "Wired

News,[http://www.wired.com/news/technology/0, 1282, 61009, 00.html](http://www.wired.com/news/technology/0,1282,61009,00.html)。

32.到目前为止，根据RSA安全协议，因式分解的最大数值有521位。

33.Stephan Gulde等，"Implementation of the Deutsch-Iozsa Algorithm on an Ion-Trap Quantum Computer，"Nature 421（2003年1月2日）：48-50，可见<http://heartc704.uibk.ac.at/Papers/Nature03-Gulde.pdf>。

34.既然我们现在计算的性价比每年翻一番，增加1000倍需要增加10倍或需要10年。但我们正（缓慢地）减少它自身的倍增时间，所以实际的数字是8年。

35.每个随后的千倍增长都是以一个很高的速率进行的，可见上一条注释。

36.Hans Moravec，"Rise of the Robots，"Scientific American（December 1999）：124-35，<http://www.sciam.com>和<http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1999/SciAm.scan.html>。Moravec是卡内基·梅隆大学机器人研究所的一名教授。它的移动式遥控装置实验室在研发怎么使用摄像机、声波和其他传感器来使机器人拥有3D空间认知。在20世纪90年代，他描述了一连串的机器人时代，“这些时代本质上在非常规的方法是属于我们下一代的。最后，我想它们只属于它们自己而且它们做的事情我们也很难去想象和理解——你知道，仅仅是小孩才这么做。”（Nova对Hans Moravec的在线采访，1997年10月，<http://www.pbs.org/wgbh/nova/robots/Moravec.html>）。他写的Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence and Robot: Mere Machine to Transcendent Mind探索了现代和将来机器人时代的能力。

信息披露：这位作者是一名投资商，是Moravec机器人公司的董事会成员。

37.虽然Moravec使用的每秒执行的指令和每秒执行的计算都有细微不同的内容，但是它们的目的足够相似。Moravec开发了不受生物模型支配的机器人视觉的数学技术。但是，这些相似点（在Moravec的算法和生物活动之间）在事后会被记下。从功能上来说，Moravec的计算指令重新改造那些在神经区域完成的部分，所以基于Moravec算法的计算估计适合于决定什么是达到功能等价变换需要的。

38.Lloyd Watts, "Event-Driven Simulation of Networks of Spiking Neurons, "seventh Neural Information Processing Systems Foundation Conference, 1993; LloydWatts, "The Mode-Coupling Liouville-Green Approximation for a Two-Dimensional Cochlear Model, "Journal of the Acoustical Society of America 108.5 (November 2000) : 2266-71。Watts是Audience公司的创始人, 这家公司致力于模拟听觉系统区域的功能来实现声音处理的应用, 包括创造一种方法将声音进行预处理, 以便自动进行语音识别。更多信息可以参见:
<http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>。

信息披露: 该作者是Audience公司的顾问。

39.美国专利申请, 20030095667, 美国专利局, 2003年5月22日。

40.目前, 美敦力公司的迷你闭环人工胰腺已经在人体临床试验中取得了令人鼓舞的成果。该公司宣布, 该装置将在未来5年内上市。援引自美敦力公司新闻稿, "Medtronic Supports Juvenile Diabetes Research Foundation's Recognition of Artificial Pancreas as a Potential' Curefor Diabetes, "2004年3月23日, 网址为
http://www.medtronic.com/newsroom/news_2004323a.html。这种装置需要一个葡萄糖测定仪、一个胰岛素泵, 还需要一个来监测胰岛素水平的反馈机制(国际医院联盟), "Progress in Artificial Pancreas Development for Treating Diabetes", “针对糖尿病治疗的人工胰腺的研究进展”, 网址为
<http://www.hospitalmanagement.net/informer/technology/tech10>)。Roche(罗氏)公司也于2007年加入到了人工胰腺生产的竞争行列中。可见<http://www.roche.com/pages/downloads/science/pdf/rtdcmannh02-6.pdf>。

41.人们已经创造了许多基于单个神经元和内部连接的模型和模拟仿真。Tomaso Poggio写道: 对神经元的一种看法是: 它更像是一个具有上千逻辑门等价物的芯片, 而不是单个阈元件。Tomaso Poggio是Ray Kurzweil的私人助手, 2005年1月。

也可见T.Poggio和C.Koch的"Synapses That Compute Motion, "Scientific American 256 (1987) : 46-52。

C.Koch and T.Poggio, "Biophysics of Computational Systems:

Neurons, Synapses, and Membranes, "in Synaptic Function, G.M. Edelman, W.E. Gall, and W.M. Cowan, eds. (New York: John Wiley and Sons, 1987), pp.637-97.

宾夕法尼亚大学的神经工程研究实验室创建了另一个精细的神经元级的模型仿真装置的集合，这是基于在神经元水平上的大脑功能逆向工程的。实验室负责人Leif Finkel博士说：“现在我们正在建造一个细胞级的视觉皮质模型，这是一个非常精细的计算机模拟仿真，至少能反映出真正神经元基本操作的精度。（我的同事Kwabena Boahen）有一个芯片可以精确地模拟视网膜，还可以产生穗状输入，与真正的视网膜非常接近。”可见<http://nanodot.org/article.pl?sid=01/12/18/1552221>。

结合这些和其他神经元级的模型和模拟仿真显示，每个神经元的事务（单程事务，包括信号传输和单个树突的重置）需要大约10³的计算能力，这是理论上的一个上限，大多数的模拟仿真用到的都比这些少。

42.蓝色基因计划（Blue Gene/L），是蓝色基因计算机的第二代，是在2001年年底公布的。新的超级计算机会比现在的计算机快15倍，而每一个只有现在计算机大小的1/20，它正在由美国国家核安全局的Livermore国家实验室以及IBM共同开发。在2002年，IBM宣告，已经选择开源的Linux来作为新的超级计算机的操作系统。到2003年7月，超级计算机的处理器芯片颇具创新色彩，它是芯片上的完整系统，目前已经投入生产。“蓝色基因计划是片上系统概念的典型，90%以上的这种芯片是按照我们的技术库的标准开发的。”这是根据该项目（Timothy Morgan, "IBMs Blue Gene/L Shows Off Minimalist Server Design, "The Four Hundred, <http://www.midrangeserver.com/tfh/tfh120103-story05.html>）的一个管理者Paul Coteus的说法。截止到2004年，蓝色基因原型系统第一次进入超级计算机前十的名单中，IBM新闻稿，"IBM Surges Past HP to Lead in Global Super Computing, "网址为<http://www.research.ibm.com/bluegene>。

43.这种网络协议称为点对点、多对多和“多次反射”，其中，网络间的点可以与其他点或其他子集进行连接，而且从网状节点到每个目的节点之间会有很多路径，这些网络的适应性强，而且是自组织的。“网状网络没有中心协调设备，相反的是，每个节点是为无线电通信装置提供的，并担当其他节点的中继点。”Sebastian Rupley, "Wireless: Mesh Networks, "PC Magazine, 2003年7月1日，<http://www.pcmag.com/article2/0,1759,1139094,00.asp>; Robert

Poor, "Wireless Mesh Networks", Sensors Online, 2003年2月,
<http://www.sensormag.com/articles/0203/38/main.shtml>; Tomas Krag和
Sebastian Buettrich, "Wireless Mesh Networking, "OReilly Wireless
DevCenter, 2004年1月22日,
<http://www.oreillynet.com/pub/a/wireless/2004/01/22/wirelessmesh.html>。

44.Carver Mead创办了超过25个公司, 并掌握其中50%以上的股份, 他是神经形态工程学系统领域的先驱, 也是大脑和神经系统电路模拟的先锋。可见Carver A.Mead, "Neuromorphic Electronic Systems, "IEEE Proceedings 78.10 (October 1990) : 1629-36."Neuromorphic Electronic Systems, "IEEE Proceedings 78.10 (October 1990) : 1629-36。他的工作引领了计算机触摸板和数字助听器耳蜗状芯片的发展, 他1999年创办的公司Foveon开发了模仿电影属性的图像模拟传感器。

45.Edward Fredkin, "A Physicists Model of Computation, "Proceedings of the Twenty-sixth Recontre de Moriond, Texts of Fundamental Symmetries (1991) : 283-97, http://digitalphilosophy.org/physicists_model.htm.

46.Gene Frantz, "Digital Signal Processing Trends, "IEEE Micro 20.6 (November/December 2000) : 52-59,
<http://csdl.computer.org/comp/mags/mi/2000/06/m6052abs.htm>.

47.2004年, Intel宣告在到达由越来越快的单处理器的散热所导致的“热墙”(或“力墙”)之后, 将通过“右转弯”向双核(在一个芯片中有多于一个的处理器)架构变换。网址为
<http://www.intel.com/employee/retiree/circuit/righthandturn.htm>。

48.R.Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process, "IBM Journal of Research Development 5 (1961) : 183-91,
<http://www.research.ibm.com/journal/rd/053/ibmrd0503C.pdf>.

49.Charles H.Bennett, "Logical Reversibility of Computation, "IBM Journal of Research Development 17 (1973) : 525-32,
<http://www.research.ibm.com/journal/rd/176/ibmrd1706G.pdf>; CHARLES H.Bennett, "The Thermodynamics of Computationa Review, "International Journal of Theoretical Physics 21 (1982) : 905-40; CHARLES H.Bennett, "Demons,Engines,and the Second Law, "Scientific American

257 (November 1987) : 108-16.

50. Edward Fredkin and Tommaso Toffoli, "Conservative Logic," *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982) : 219-53, http://digitalphilosophy.org/download_documents/ConservativeLogic.pdf.

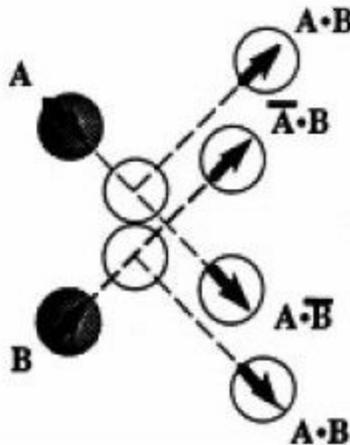
Edward Fredkin, "A Physicists Model of Computation," *Proceedings of the Twenty-sixth Rencontre de Moriond, Tests of Fundamental Symmetries* (1991) : 283-97, http://www.digitalphilosophy.org/physicists_model.htm.

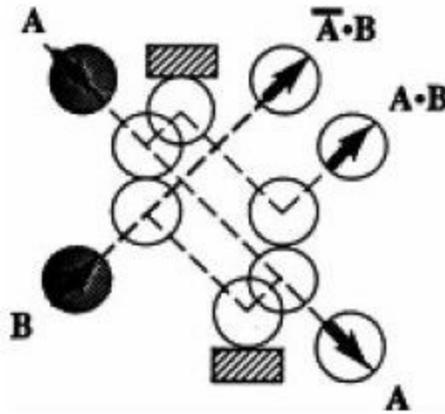
51. Knight, "Digital Image Stored in Single Molecule," referring to Khitrin et al., "Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography"; 可见注释 30。

52. 十亿 (10^{10}) 人, 每个人为 10^{19} cps, 所以所有人总共为 10^{29} cps; 10^{42} cps 比这个大 10^{13} 倍。

53. Fredkin, "Physicists Model of Computation"; 可见注释 45 和 50。

54. 两个这样的门是 Interaction (交互) 门, 是两个输入、四个输出的通用可逆逻辑门而 Feynman (费曼) 门是两个输入、三个输出的通用可逆逻辑门。





两张图片都出自以上出处。

55.出处同上。

56.C.1.Seitz et al., "Hot-Clock nMOS, "Proceedings of the 1985 Chapel Hill Conference on VLSI (Rockville,Md.: Computer Science Press, 1985) , pp.1-17,

<http://caltechcstr.library.caltech.edu/archive/00000365>; Ralph C.Merkle, "Reversible Electronic Logic Using Switches, "Nanotechnology 4 (1993) : 21-40; S.G.Younis and T.F.Knight, "Practical Implementation of Charge Recovering Asymptotic Zero Power CMOS, "Proceedings of the 1993 Symposium on Integrated Systems (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1993) , pp.234-50.

57.Hiawatha Bray, "Your Next Battery, "Boston Globe,November 24, 2003,

http://www.boston.com/business/technology/articles/2003/11/24/your_next_battery.

58.1962年, Hans J.Bremermann进行了计算极限的早期工作: Hans J.Bremermann, "Optimization Through Evolution and Recombination, "in M.C.Yovits,C.T.Jacobi,c.D.Goldstein等, Self-Organizing Systems (Washington,nc.Spartan Books, 1962) , 第93页到106页.1984

年, Robert A.Freitas Jr.以Bremermann的工作为基础编写了"Xenopsychology, "Analog 104 (April 1984) : 41-53,

<http://www.rfreitas.com/Astro/Xenopsychology.htm#SentienceQuotient>。

59. $\pi \times$ 最大能量 ($10^{17} \text{ kg} \times \text{meter}^2 \times \text{second}^2$) / (6.6×10^{-34}) 焦耳/秒 $\approx 5 \times 10^{50}$ 操作/秒。

60. 5×10^{50} cps 相当于 5×10^{21} (50万亿亿) 人类的文明 (每人需要 10^{29} cps)。

61. 100亿 (10^{10}) 人类, 每个人为 10^{16} cps, 人类文明总共为 10^{26} cps, 因此 5×10^{50} cps 相当于 5×10^{24} (5亿亿亿) 的人类文明。

62. 这个估计是保守估计, 在过去1万年间, 已经有100亿人类, 但是显然并未如此。人类的实际数量已经在逐步地增长, 在2000年达到61亿。一年有 3×10^7 秒, 1万年就有 3×10^{11} 秒。所以, 使用 10^{26} cps 作为人类文明的估计值, 人类的思想在过1万年间仅仅等价于 3×10^{37} 的计算量。最终的笔记本电脑每秒执行 5×10^{50} 的计算量, 所以模拟100亿人1万年间的思想将会需要 10^{-13} 秒, 即万分之一纳秒。

63. Anders Sandberg, "The Physics of the Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains," *Journal of Evolution & Technology* 5 (December 22, 1999), <http://www.transhumanist.com/volume5/Brains2.pdf>.

64. 可见注释62; 10^{42} cps 是 10^{50} cps 的 10^8 分之一, 所以万分之一纳秒相当于现在10毫秒。

65. 可见 <http://edrexler.com/p/04/04/0330drexPubs.html>, 这上面有Drexler的出版物和专利列表。

66. 在 10^{12} 美元和每千美元 10^{26} cps 的速率下, 我们将在21世纪40年代中期达到 10^{35} cps。如果按每个人的计算能力为 10^{26} cps 算, 这将需要 10^9 个人 (100亿)。

67. 1984年, Robert A. Freitas 提出了基于计算能力系统的“感商”(SQ) 对数刻度。度量的范围从-70到50, 人类大脑结果是13, Cray I 号超级计算机是9。Freitas的感商是基于单位质量的计算量的。一个算法简单的非常快的计算机将有一个很高的SQ。我在本章描述的计算测量是基于Freitas的SQ概念, 而且尝试顾及计算的有效性, 所以, 如果一个简单的计算机等价于实际上正在运行的计算机, 那么我们将以这个等价的 (简

单) 计算机的计算效率为基准。在我的测量标准里, 计算需要具备“有效性”。Robert A.Freitas Jr., "Xenopsychology, "Analog 104 (1984年4月): 41-53, 网址为<http://www.rfreitas.comfAstro/Xenopsychology.htm#SentienceQuotient>。

68.作为一个有趣的花边, 在小石头上雕刻, 这事实上就是计算存储的最早形式。大约在公元前3000年发展起来的楔形文字是一种最早形式的书面语, 使用图形标记在石头上存储信息。农业记录像在石头上存储图形标记一样存储在文件盘上, 并以行列形式进行组织。这些标记的石头实际上是第一份电子表格, 这样一份象形石头记录是历史记录计算机的有价值的人工制品。

69. $1000 (10^3)$ bit是石头中一个原子储存信息理论能力(大约 10^{27} bit)的 10^{24} 分之一。⁷⁰.1cps (100cps)是石头中一个原子储存信息理论上计算能力(大约 10^{42} cps)的 10^{42} 分之一。

71.Edgar Buckingham, "Jet Propulsion for Airplanes, "NACA report no.159, in Ninth Annual Report of NACA-1923 (Washington,D.C.: NACA, 1924), pp.75-90.See <http://naca.larc.nasa.gov/reports/1924/naca-report-159/>.

72.Belle Dume, "Microscopy Moves to the Picoscale, "PhysicsWeb,June 10, 2004, <http://physicsweb.org/artide/news/8/6/6>, referring to Stefan Hembacher,Franz J.Giessibl,and Iochen-Mannhart, "Force Microscopy with Light-Atom Probes, "Science 305.5682 (July 16, 2004): 380-83.这种新的“高次谐波”原子力显微镜是由奥格斯堡大学的物理学家发明的, 他们使用单碳原子作为探头, 而且至少比传统的扫描式隧道显微镜的分辨率高3倍。工作原理: 作为探头的钨针尖以纳米级的振幅进行震荡, 顶部的原子核和碳原子之间的相互作用在潜在的正弦波动曲线上产生了更高的谐波分量。科学家测算了这些信号以获取超顶部原子超高分辨率的图像, 从而展示关键特征只有77皮米(千分之一纳米)。

73.Henry Fountain, "New Detector May Test Heisenbergs Uncertainty Principle, "New York Times,July 22, 2003.

74.Mitch Jacoby, "Electron Moves in Attoseconds, "Chemical and Engineering News 82.25 (June 21, 2004): 5, referring to Peter Abbamonte et al., "Imaging Density Disturbances in Water with a 41.3-

Attosecond Time Resolution, "Physical Review Letters 92.23 (June 11, 2004) : 237-401.

75.S.K.Lamoreaux and I.R.Torgerson, "Neutron Moderation in the Oklo Natural Reactor and the Time Variation of Alpha, "Physical Review D 69 (2004) : 121701-6,

<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PRVDAQ000069000012121701000001&idtype=cvips&gifs=yes>;

Eugenie S.Reich, "Speed of Light May Have Changed Recently, "New Scientist,June 30, 2004, <http://www.newscientist.com!news/news.jsp?id=ns99996092>.

76.Charles Choi, "Computer Program to Send Data Back in

Time, "UPI,October 1, 2002, <http://www.upi.com/view.efm?StoryID=20021001-125805-3380r>;

Todd Brun, "Computers with Closed Timelike Curves Can Solve Hard Problems, "Foundation of Physics Letters 16 (2003) : 245-53.Electronic edition,September 11, 2002,

http://arxiv.org/PS__cache/grqc/pdf/0209/0209061.pdf.

第4章 达到人类智能的软件：如何实现大脑的逆向工程

1.Lloyd Watts, "Visualizing Complexity in the Brain, "in D.Fogel and C.Robinson,eds., Computational Intelligence: The Experts Speak (Piscataway,N.J.: IEEE Press/Wiley, 2003) , <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.

2.J.G.Taylor,B.Horwitz,and K.J.Friston, "The Global Brain: Imaging and Modeling, "Neural Networks 13, special issue (2000) : 827.

3.Neil A.Busis, "Neurosciences on the Internet, "<http://www.neuroguide.com>; "Neurosci-entists Have Better Tools on the Brain, "Bio IT Bulletin,http://www.bioit.world.com/news/041503__report2345.html; "Brain Projects to Reap Dividends for Neurotech Firms, "Neurotech Reports,<http://www.neurotechreports.com/pages/brainprojects.html>.

4.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section

4.8.6, "Noninvasive Neuroelectric Monitoring" (GEORGETown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.115-16,
<http://www.nanomedicine.com/NMI/4.8.6.htm>.

5.第3章分析了这一案例：可见“人脑计算能力”。

6.Kurzweil应用智能公司进行了语音识别的研究和发展，该公司是我在1982年成立的，现在是ScanSoft（前Kurzweil计算机产品公司）的子公司。

7.Lloyd Watts, 美国专利申请, 美国专利局, 20030095667, 2003年3月22日, "Computation of Multisensor Time Delays"摘要：“文章描述了如何确定第一个感应器接收到的第一信号和第二个感受器接收到的第二信号之间的时间延迟，经分析，第一信号源自多个频率不同的第一信号通道，而第二信号源自多个频率不同的第二信号通道。第一特征是在第一信号通道里第一时间被检测到的，而第二特征是在第二信号通道里第一时间被检测到的。第一特征对应第二特征，第一时间则对应第二时间，以此来确定时间延迟。”也可见Nabil H.Farhat, 美国专利申请 20040073415, 美国专利局, 2004年4月15日, "Dynamical Brain Model for Use in Data Processing Applications."

8.我估计压缩的基因组可能有3000万到1亿字节（可见第2章的注释57）；这比微软文字处理软件的目标代码还要少，比源代码则更少。可见Word 2003系统要求，2003年10月20日，
<http://www.microsoft.com/office/word/prodinfo/sysreq.msp>。

9.Wikipedia,<http://en.wikipedia.org/wiki/Epigenetics>.

10.可见第2章注释57对基因信息量的分析，我估计大约有3000万到1亿字节，因此少于 10^9 bit，可见第3章“人类存储能力”这一节对人脑信息的分析，估计应该是 10^{18} bit。

11.Marie Gustafsson and Christian Balkenius, "Using Semantic Web Techniques for Validation of Cognitive Models against Neuroscientific Data, "AILS04 Workshop,SAIS/SSLS Workshop (Swedish Artificial Intelligence Society; Swedish Society for Learning Systems), April 15-16, 2004,
Lund,Sweden,www.lucs.lu.se/People/Christian.Balkenius/PDF/Gustafsson.Ba

12.可见第3章的讨论。在一个很有用的文献中，它用神经元模拟神经元，Tomaso Poggio和Christof Koch描述神经元与拥有数以千计逻辑门的芯片一样小。可见T.Poggio和C.Koch, "Synapses That Compute Motion, "Scientific American 256 (1987) : 46-52。也可见C.Koch和T.Poggio, "Biophysics of Computational Systems: Neurons, Synapses, and Membranes, "in Synaptic Function, G.M.Edelman、W.E.Gall和W.M.Cowan等 (New York: John Wiley and Sons, 1987) 。

13.关于Mead, 可见http://www.technology.gov/Medal/2002/bios/Carver__A._Mead.pdf。Carver Mead, Analog VLSI and Neural Systems (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1986) 。

14.可见第5章的注释172对自组织神经网络的算法描述，以及第5章注释175对于基因算法自组织的描述。

15.可见Gary Dudley等, "Autonomic Self-Healing Systems in a Cross-Product IT Environment, "Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomic Computing, New York City, May 17-19, 2004, <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/icac/2004/2114/00121140312.pdf> IBM Autonomic Computing, "http://www-3.ibm.com/autonomic/about.shtml; 以及Ric Telford, "The Autonomic Computing Architecture, "2004年4月14日<http://www.dcs.st-andrews.ac.uk/undergrad/current/dates/disclec/2003-2/RicTelfordDistinguished2.pdf>。

16.Christine A.Skarda and Walter J.Freeman, "Chaos and the New Science of the Brain, "Concepts in Neuroscience 1.2 (1990) : 275-85.

17.C.Geoffrey Woods, "Crossing the Midline, "Science 304.5676 (June 4, 2004) : 1455-56; Stephen Matthews, "Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis, "Trends in Endocrinology and Metabolism 13.9 (November 1, 2002) : 373-80; Justin Crowley and Lawrence Katz, "Early Development of Ocular Dominance Columns, "Science 290.5495 (November 17.2000) : 1321-24; Anna Penn et al., "Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity, "Science 279.5359 (March 27, 1998) : 2108-12; M.V.Johnston et al., "Sculpting the Developing Brain, "Advances in Pediatrics 48 (2001) : 1-38; P.La Cerra and R.Bingham, "The Adaptive

Nature of the Human Neurocognitive Architecture: An Alternative Model, "Proceedings of the National Academy of Sciences 95 (September 15, 1998) : 11290-94.

18.神经网络是神经的简化模型，它可以自组织并解决问题。可见第5章注释175对神经网络算法的描述。基因算法是进化的模型，利用有性生殖控制突变率，可见第5章注释175对基因算法的详细描述。马尔可夫模型是数学技术的产物，并且在很多方面和神经网络相似。

19.Aristotle,The Works of Aristotle,trans.W.D.Ross (Oxford: Clarendon Press, 1908-1952 (see,in particular,Physics) ; see also http://www.encyclopedia.com/html/section/aristotl__philosophy.asp.

20.E.D.Adrian,The Basis of Sensation: The Action of Sense Organs (London: Christophers, 1928) .

21.A.L.Hodgkin and A.F.Huxley, "Action Potentials Recorded from Inside a Nerve Fibre, "Nature 144 (1939) : 710-12.

22.A.L.Hodgkin and A.F.Huxley, "A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve, "Journal of Physiology 117 (1952) : 500-544.

23.W.S.McCulloch和W.Pitts, "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, "Bulletin of Mathematical Biophysics 5 (1943) : 115-33。这一开创性论文很难理解，如果想获得一个清晰的说明和解释，可见"Acomputer Model of the Neuron, "the Mind Project,Illinois State University,<http://www.mind.ilstu.edu/curriculum/perception/mpneuron1.htm>

24.可见第5章注释172对神经网络算法的描述。

25.E.Salinas and P.Thier, "Gain Modulation: A Major Computational Principle of the Central Nervous System, "Neuron 27 (2000) : 15-21.

26.K.M.OCraven and R.L.Savoy, "Voluntary Attention Can Modulate fMRI Activity in Human MT/MST, "Investigational Ophthalmological Vision Science 36 (1995) : S856 (supp.) .

27. Marvin Minsky and Seymour Papert, *Perceptrons* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969). 28. Frank Rosenblatt, Cornell Aeronautical Laboratory, *The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain*, *Psychological Review* 65.6 (1958) : 386-408; see Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Perceptron>.

29. O. Sporns, G. Tononi, and G. M. Edelman, "Connectivity and Complexity: The Relationship Between Neuroanatomy and Brain Dynamics," *Neural Networks* 13.8-9 (2000) : 909-22.

30. R. H. Hahnloser et al., "Digital Selection and Analogue Amplification Coexist in a Cortex-Inspired Silicon Circuit," *Nature* 405.6789 (June 22, 2000) : 947-51; "MIT and Bell Labs Researchers Create Electronic Circuit That Mimics the Brains Circuitry," *MIT News*, June 21, 2000, <http://web.mit.edu/newsoffice/nr/2000/machinebrain.html>.

31. Manuel Trajtenberg, *Economic Analysis of Product Innovation: The Case of CT Scanners* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990); Michael H. Priebe, Ph.D., president, CEO, NEUROMED GmbH; P-M. L. Robitaille, A. M. Abduljalil, and A. Kangarlu, "Ultra High Resolution Imaging of the Human Head at 8 Tesla: 2K x 2K for Y2K," *Journal of Computer Assisted Tomography* 24.1 (January February 2000) : 2-8.

32. Seong-Gi Kim, "Progress in Understanding Functional Imaging Signals," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.7 (April 1, 2003) : 3550-52, <http://www.pnas.org/cgi/content/full/100/7/3550>. see also Seong-Gi Kim et al., "Localized Cerebral Blood Flow Response at Submillimeter Columnar Resolution," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98.19 (September 11, 2001) : 10904-9 <http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/98/19/10904>.

33. K. K. Kwong et al., "Dynamic Magnetic Resonance Imaging of Human Brain Activity During Primary Sensory Stimulation," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 89.12 (June 15, 1992) : 5675-79.

34. C. S. Roy and C. S. Sherrington, "On the Regulation of the Blood Supply of the Brain," *Journal of Physiology* 11 (1890) : 85-105.

35.M.I.Posner et al., "Localization of Cognitive Operations in the Human Brain, "Science 240.4859 (June 17, 1988) : 1627-31.

36.F.M.Mottaghy et al., "Facilitation of Picture Naming after Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, "Neurology 53.8 (November 10, 1999) : 1806-12.

37.Daithl OhAnluain, "TMS: Twilight Zone Science? "Wired News, April 18, 2002, [http://wired.com/news/medtech/0, 1286, 51699.00.html](http://wired.com/news/medtech/0,1286,51699.00.html).

38.Lawrence Osborne, "Savant for a Day, "New York Times Magazine, June 22, 2003, available at <http://www.wireheading.com/brainstim/savant.html>.

39.Bruce H.McCormick, "Brain Tissue Scanner Enables Brain Microstructure Surveys, "Neuro-computing 44-46 (2002) : 1113-18; Bruce H.McCormick, "Design of a Brain Tissue Scanner, "Neuro Computing 26-27 (1999) : 1025-32; Bruce H.McCormick, "Development of the Brain Tissue Scanner, "Brain Networks Laboratory Technical Report, Texas A & M University Department of Computer Science, College Station, Tex., March 18, 2002, <http://research.cs.tamu.edu/bnl/pubs/McC02.pdf>.

40.Leif Finkel et al., "Mesoscale Optical Brain Imaging of Perceptual Learning, "University of Pennsylvania grant 2000-01737 (2000) .

41.E.Callaway and R.Yuste, "Stimulating Neurons with Light, "Current Opinions in Neurobiology 12.5 (October 2002) : 587-92.

42.B.L.Sabatini and K.Svoboda, "Analysis of Calcium Channels in Single Spines Using Optical Fluctuation Analysis, "Nature 408.6812 (November 30, 2000) : 589-93.

43.John Whitfield, "Lasers Operate Inside Single Cells, "News@nature.com, October 6, 2003, <http://www.nature.com/nsu/030929/030929-12.html> (subscription required) .Mazurs lab: <http://mazurwww.harvard.edu/research/>. Jason M.Samonds and A.B.Bonds, "From Another Angle: Differences in Cortical

Coding Between Fine and Coarse Discrimination of Orientation, "Journal of Neurophysiology 91 (2004) : 1193-1202.

44.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.2A,Biocompatibility,section 15.6.2, "Blood-stream Intrusiveness" (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 2003) , pp.157-59,
<http://www.nanomedicine.com/NMIIA/15.6.2.htm>.

45.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section 7.3, "Communication Networks" (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999) , pp.186-88, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.

46.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section 9.4.4.3, "Inter-cellular Passage" (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999) , pp.320-21, <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.4.3.htm#p2>.

47.Keith L.Black,M.D., and Nagendra S.Ningaraj, "Modulation of Brain Tumor Capillaries for Enhanced Drug Delivery Selectively to Brain Tumor, "Cancer Control 11.3 (May/June 2004) : 165-73,
<http://www.moffitt.usf.edu/pubs/ccj/v11n3/pdf/165.pdf>.

48.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section 4.1, "Nanosensor Technology" (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999) , p.93, <http://www.nanomedicine.com/NMI/4.1.htm>.

49.Conference on Advanced Nanotechnology (<http://www.foresight.org/Conferences/AdvNan02004/index.html>) , NanoBioTech Congress and Exhibition (<http://www.nanobiotec.de/>) , NanoBusiness Trends in Nanotechnology (<http://www.nanoevent.com/>) , and NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show (<http://www.nsti.org/events.html>) .

50.Peter D.Kramer,Listening to Prozac (New York: Viking, 1993) .

51.LeDoux对处理危险刺激的大脑区域进行了研究,这一区域的核心部分是扁桃体,它是位于大脑底部的一个杏仁状的神经区域。扁桃体存储危险刺激的记忆,并控制对恐惧的回应。

麻省理工学院的大脑研究人员Tomaso Poggio指出：“突触可塑性是学习的硬件基础，但值得强调的是，学习比记忆要重要得多。”可见T.Poggio和E.Bizzi, *Generalization in Vision and Motor Control*, “*Nature* 431 (2004) : 768-74.也可见E.Benson, ”The Synaptic Self”*APA Online*, 2002年11月, <http://www.apa.org/monitor/nov02/synaptic.html>。

52.Anthony J.Bell, "Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuro-science, " *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 354.1352 (December 29, 1999) : 2013-20, <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.

53.Peter Dayan and Larry Abbott,*Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems* (Cambridge,Mass.: MIT Press, 2001) .

54.D.O.Hebb,*The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (New York: Wiley, 1949) .

55.Michael Domjan and Barbara Burkhard,*The Principles of Learning and Behavior*, 3d ed. (Pacific Grove,Calif.: Brooks/Cole, 1993) .

56.J.Quintana and J.M.Fuster, "From Perception to Action: Temporal Integrative Functions of Prefrontal and Parietal Neurons, " *Cerebral Cortex* 9.3 (April-May 1999) : 213-21; W.F.Asaad,G.Rainer,and E.K.Miller, "Neural Activity in the Primate Prefrontal Cortex During Associative Learning, " *Neuron* 21.6 (December 1998) : 1399-1407.

57.G.G.Turrigiano et al., "Activity-Dependent Scaling of Quantal Amplitude in Neocortical Neurons, " *Nature* 391.6670 (February 26, 1998) : 892-96; R.J.O'Brien et al., "Activity-Dependent Modulation of Synaptic AMPA Receptor Accumulation, " *Neuron* 21.5 (November 1998) : 1067-78.

58.From "A New Window to View How Experiences Rewire the Brain, " *Howard Hughes Medical Institute* (December 19, 2002) , <http://www.hhmi.org/news/svoboda2.html>.see also J.T.Trachtenberg et al., "Long-Term in Vivo Imaging of Experience-Dependent Synaptic Plasticity in Adult Cortex, " *Nature* 420.6917 (December 2002) : 788-

94, http://cpmcnet.columbia.edu/dept/physio/physi02/Trachtenberg__NATURE.pdf; and Karen Zito and Karel Svoboda, "Activity-Dependent Synaptogenesis in the Adult Mammalian Cortex, "Neuron 35.6 (September 2002) : 1015-17,

<http://svobodalab.cshl.edu/reprints/2414zito02neur.pdf>.

59. See http://whyfiles.org/184make__memory/4.html. For more information on neuronal spines and memory, see J. Grutzendler et al., "Long-Term Dendritic Spine Stability in the Adult Cortex, "Nature 420.6917 (Dec. 19-26, 2002) : 812-16.

60. S.R. Young and E.W. Rubel, "Embryogenesis of Arborization Pattern and Typology of Individual Axons in N. Laminaris of the Chicken Brain Stem, "Journal of Comparative Neurology 254.4 (December 22, 1986) : 425-59.

61. Scott Makeig, "Swartz Center for Computational Neuroscience Vision Overview, " <http://www.sccn.ucsd.edu/VisionOverview.html>.

62. D.H. Hubel and T.N. Wiesel, "Binocular Interaction in Striate Cortex of Kittens Reared with Artificial Squint, "Journal of Neurophysiology 28.6 (November 1965) : 1041-59.

63. Jeffrey M. Schwartz and Sharon Begley, *The Mind and the Brain: Neuroplasticity and the Power of Mental Force* (New York: Regan Books, 2002) .see also C. Xerri, M. Merzenich et al., "The Plasticity of Primary Somatosensory Cortex Paralleling Sensorimotor Skill Recovery from Stroke in Adult Monkeys, "The Journal of Neurophysiology, 79.4 (April 1980) : 2119-48. see also S. Begley, "Survival of the Busiest, "Wall Street Journal, October 11, 2002,

<http://webreprints.djreprints.com/606120211414.html>.

64. Paula Tallal et al., "Language Comprehension in Language-Learning Impaired Children Improved with Acoustically Modified Speech, "Science 271 (January 5, 1996) : 81-84. Paula Tallal is Board of Governors Professor of Neuroscience and codirector of the CMBN (Center for Molecular and Behavioral Neuroscience) at Rutgers University, and cofounder and director of SCIL (Scientific Learning Corporation) ; see

<http://www.cmbn.rutgers.edu/faculty/tallal.html>. See also Paula Tallal, "Language Learning Impairment: Integrating Research and Remediation," *New Horizons for Learning* 4.4 (August-September 1998), <http://www.newhorizons.org/neuro/tallal.htm>, A. Pascual-Leone, "The Brain That Plays Music and Is Changed by It," *Annals of the New York Academy of Sciences* 930 (June 2001): 315-29. See also note 63 above.

65. F.A. Wilson, S.P. Scolding, and P.S. Goldman-Rakic, "Dissociation of Object and Spatial Processing Domains in Primate Prefrontal Cortex." *Science* 260.5116 (June 25, 1993): 1955-58.

66. C. Buechel, J.T. Coull, and K.J. Friston, "The Predictive Value of Changes in Effective Connectivity for Human Learning," *Science* 283.5407 (March 5, 1999): 1538-41.

67. 他们绘制了形成临时和永久连接（用于回应各种刺激）的大脑细胞的精致图像，以此阐明了神经间的结构性变化（很多科学家一直坚信在存储记忆时这些变化肯定会发生）。"Pictures Reveal How Nerve Cells Form Connections to Store Short-and Long-Term Memories in Brain," *University of California, San Diego*, November 29, 2001, <http://ucsdnews.ucsd.edu/news-rel/science/mcceli.htm>; M.A. Colicos et al., "Remodeling of Synaptic Action Induced by Photoconductive Stimulation," *Cell* 107.5 (November 30, 2001): 605-16. Video link: <http://www.qflux.net/NeuroStim01.rm>, Neural Silicon Interface-Quantum Flux.

68. S. Lowel and W. Singer, "Selection of Intrinsic Horizontal Connections in the Visual Cortex by Correlated Neuronal Activity," *Science* 255.5041 (January 10, 1992): 209-12.

69. K. Si et al., "A Neuronal Isoform of CPEB Regulates Local Protein Synthesis and Stabilizes Synapse-Specific Long-Term Facilitation in Aplysia," *Cell* 115.7 (December 26, 2003): 893-904; K. Si, S. Lindquist, and E.R. Kandel, "A Neuronal Isoform of the Aplysia CPEB Has Prion-Like Properties," *Cell* 115.7 (December 26, 2003): 879-91. 这些研究人员发现，CPEB经过其突触的形状变化，可能会帮助形成和保护长期记忆，这一点类似于朊粒变形（牵扯到疯牛病以及其他

神经学疾病的蛋白质片段)。这项研究暗示了蛋白质在朊粒态时能够很好地完成工作，这也反驳了之前的广泛认识——有朊粒活动的蛋白质是有毒的，或者至少是不能正常工作的。这一朊粒机制可能也会在很多领域（例如癌症修复以及器官发育）中发挥作用，此猜想来自Eric R.Kandel，他是哥伦比亚大学的教授，从事于心理学、细胞生物物理学、精神病学以及分子生物物理学，并于2000年获得了医学诺贝尔奖。可见Whitehead Institute press release,http://www.wi.mit.edu/nap/features/nap__feature__memory.html.

70.M.C.Anderson et al., "Neural Systems Underlying the Suppression of Unwanted Memories," *Science* 303.5655 (January 9, 2004) : 232-35.这一发现可以激励克服损伤记忆的新方法的发展。Keay Davidson, *Study Suggests Brain Is Built to Forget: MRIs in Stanford Experiments Indicate Active Suppression of Unneeded Memories*, San Francisco Chronicle, January 9, 2004, <http://www.sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?file=/c/a/2004/01/09/FORGET.TMP&type=science>.

71.Dieter C.Lie et al., "Neurogenesis in the Adult Brain: New Strategies for CNS Diseases," *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 44 (2004) : 399-421.

72.H.van Praag,G.Kempermann,and F.H.Gage, "Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus," *Nature Neuroscience* 2.3 (March 1999) : 266-70.

73.Minsky and Papert, *Perceptrons*.

74.Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999) , p.79.

75.基础功能是非线性功能，它可以线性地连接起来（通过增加多种计重标准）来接近任何非线性功能。Pouget and Snyder, "Computational Approaches to Sensorimotor Transformations," *Nature Neuroscience* 3.11 Supplement (November 2000) : 1192-98.

76.T.Poggio, "A Theory of How the Brain Might Work," in *Proceedings of Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 4 (Cold Spring Harbor, N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990) , 899-

910. Also see T. Poggio and E. Bizzi, "Generalization in Vision and Motor Control, "Nature 431 (2004) : 768-74.

77. R. Llinas and J. P. Welsh, "On the Cerebellum and Motor Learning, "Current Opinion in Neurobiology 3.6 (December 1993) : 958-65; E. Courchesne and G. Allen, "Prediction and Preparation, Fundamental Functions of the Cerebellum, "Learning and Memory 4.1 (May-June 1997) : 1-35; J. M. Bower, "Control of Sensory Data Acquisition, "International Review of Neurobiology 41 (1997) : 489-513.

78. J. Voogd and M. Glickstein, "The Anatomy of the Cerebellum, "Trends in Neuroscience 21.9 (September 1998) : 370-75; John C. Eccles, Masao Ito, and János Szentágothai, The Cerebellum as a Neuronal Machine (New York: Springer-Verlag, 1967) ; Masao Ito, The Cerebellum and Neural Control (New York: Raven, 1984) .

79. N. Bernstein, The Coordination and Regulation of Movements (New York: Pergamon Press, 1967) .

80. U.S. Office of Naval Research press release, "Boneless, Brainy, and Ancient, "September 26, 2001, http://www.eurekaalert.org/pub_releases/2001-11/oonrbba112601.php; 章鱼的触角“可以很好地作为新一代机器人手臂的基础，无论是在水中、太空中，还是在陆地上”。

81. S. Grossberg and R. W. Paine, "A Neural Model of Cortico-Cerebellar Interactions During Attentive Imitation and Predictive Learning of Sequential Handwriting Movements, "Neural Networks 13.8-9 (October-November 2000) : 999-1046.

82. Voogd and Glickstein, "Anatomy of the Cerebellum"; Eccles, Ito, and Szentágothai, Cerebellum as a Neuronal Machine; Ito, Cerebellum and Neural Control; R. Llinas, in Handbook of Physiology, vol. 2, The Nervous System, ed. V. B. Brooks (Bethesda, Md.: American Physiological Society, 1981) , pp. 831-976.

83. J. L. Raymond, S. G. Lisberger, and M. D. Mauk, "The Cerebellum: A Neuronal Learning Machine? "Science 272.5265 (May 24, 1996) : 1126-31; J. J. Kim and R. F. Thompson, "Cerebellar Circuits and Synaptic

Mechanisms Involved in Classical Eyeblink Conditioning, "Trends in Neuroscience 20.4 (April 1997) : 177-81.

84.该仿真包括10000颗粒细胞、900高尔基细胞、500苔状纤维细胞、20蒲金耶氏细胞, 以及6个核细胞。

85.J.F.Medina et al., "Timing Mechanisms in the Cerebellum: Testing Predictions of a Large-Scale Computer Simulation, "Journal of Neuroscience 20.14 (July 15, 2000) : 5516-25; Dean Buonomano and Michael Mauk, "Neural Network Model of the Cerebellum: Temporal Discrimination and the Timing of Motor Responses, "Neural Computation 6.1 (1994) : 38-55.

86.Medina et al., "Timing Mechanisms in the Cerebellum."

87.Carver Mead, Analog VLSI and Neural Systems (Boston: Addison-Wesley Longman, 1989) .

88.Lloyd Watts, "Visualizing Complexity in the Brain, "in Computational Intelligence: The Experts Speak, D.Fogel and C.Robinson, eds. (Hoboken, N.J.: IEEE Press/Wiley, 2003) , pp.45-56, <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.

89.出处同上。

90. See <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>. NanoComputer Dream Team, "The Law of Accelerating Returns, Part II, " <http://nanoComputer.org/index.cfm?content=90&Menu=19>.

91.可见 http://info.med.yale.edu/bbs/faculty/she__go.html.

92.Gordon M.Shepherd, ed., The Synaptic Organization of the Brain, 4th ed. (New York: Oxford University Press, 1998) , p.vi.

93.E.Young, "Cochlear Nucleus, "in *ibid.*, pp.121-58.

94.Tom Yin, "Neural Mechanisms of Encoding Binaural Localization Cues in the Auditory Brainstem, "in D.Oertel, R.Fay, and A.Popper, eds., Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway (New York:

Springer-Verlag, 2002) , pp.99-159.

95. John Casseday, Thane Premouw, and Ellen Covey, "The Inferior Colliculus: A Hub for the Central Auditory System," in Oertel, Fay, and Popper, *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, pp.238-318.

96. Diagram by Lloyd

Watts, <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>, adapted from E. Young, "Cochlear Nucleus" in G. Shepherd, ed., *The Synaptic Organization of the Brain*, 4th ed. (New York: Oxford University Press, 2003 [first published 1998]), pp.121-58; D. Oertel in D. Oertel, R. Fay, and A. Popper, eds., *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway* (New York: Springer-Verlag, 2002), pp.1-5; John Casseday, T. Fremouw, and E. Covey, "Inferior Colliculus" in *ibid.*; J. LeDoux, *The Emotional Brain* (New York: Simon & Schuster, 1997); J. Rauschecker and B. Tian, "Mechanisms and Streams for Processing of 'What' and 'Where' in Auditory Cortex," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97.22: 11800-11806.

大脑区域建模:

Cochlea: 听觉感觉器官。镫骨的3万纤维转变运动体现声音的频谱时间。

MC: 多极细胞。测量光谱能量。

GBC: 球状多毛小球。转播信号，从听觉神经到侧面上橄榄体的复合体（包括LSO和MSO）。两耳比照水平上的信号调速和振幅编码。

SBC: 球形多毛细胞，提供到达时间的暂时强化，以此作为两耳间时间差计算的预处理。（两耳间不同的到达时间，用来说明声音是从哪传来的。）

OC: 章鱼细胞。检测瞬变现象。

DCN: 蜗背侧核。检测光谱边缘以及噪音水平校正。

VNTB: 斜方体腹核。耳蜗内调制外部毛细胞功能的反馈信号。

VNLL,PON: 外侧丘系腹核; 周边橄榄核: 从OC上处理瞬变。

MSO: 中间上橄榄体。计算两耳间时间差。

LSO: 侧面上橄榄体。也牵扯到计算两耳间时间差。

ICC: 下丘细胞的中心原子核。多种声音的表现形式的主要集成位置。

ICx: 下丘细胞的外侧原子核。进一步提炼声音定位。

SC: 上丘。听觉/视觉合并的地方。

MGB: 内侧膝状体。丘脑的听觉部分。

LS: 大脑边缘系统。由与情感、记忆、领域等其他有关的一些架构组成。

AC: 听觉皮质。

97.M.S.Humayun et al., "Human Neural Retinal Transplantation, "Investigative Ophthalmology and Visual Science 41.10 (September 2000) : 3100-3106.

98.Information Science and Technology Colloquium Series,May 23, 2001, <http://isandtcolloq.gsfc.nasa.gov/spring2001/speakers/poggio.html>.

99.Kah-Kay Sung and Tomaso Poggio, "Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 20.1 (1998) : 39-51, <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=275345&dl=ACM&coll=GUIDE>.

100.Maximilian Riesenhuber and Tomaso Poggio, "A Note on Object Class Representation and Categorical Perception, "Center for Biological and Computational Learning,MIT,AI Memo 1679 (1999) , <ftp://publications.ai.mit.edu/aipublications/pdf/AIM-1679.pdf>.

101.K.Tanaka, "Inferotemporal Cortex and Object Vision, "Annual

Review of Neuroscience 19 (1996) : 109-39; Anuj Mohan, "Object Detection in Images by Components, "Center for Biological and Computational Learning,MIT,AI Memo 1664 (1999) , <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/12185/ftp:zSzzSzpublications.ai.mit.eduzSzai-publicationszSz1500-1999zSzAIM-1664.pdf/mohan99object.pdf>; Anuj Mohan,Constantine Papageorgiou,and Tomaso Poggio, "Example-Based Object Detection in Images bycomponents, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 23.4 (April 2001) , <http://cbcl.mit.edu/projects/cbd/publications/ps/mohanieee.pdf>; B.Heisele,T.Poggio,and M.Pontil, "Face Detection in Still Gray Images, "Artificial Intelligence Laboratory,MIT,Technical Report AI Memo 1687 (2000) .Also see Bernd Heisele,Thomas Serre,and Stanley Bilesch, "Component-Based Approach to Face Detection, "Artificial Intelligence Laboratory and the Center for Biological and Computational Learning,MIT (2001) , <http://www.ai.mit.edulresearch/abstracts/abstracts2001/vision-applied-to-people/03heisele2.pdf>.

102.D.Van Essen and J.Gallant, "Neural Mechanisms of Form and Motion Processing in the Primate Visual System, "Neuron 13.1 (July 1994) : 1-10.

103.Shimon Ullman,High-Level Vision: Object Recognition and Visual Cognition (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1996) ; D.Mumford, On the Computational Architecture of the Neocortex. II .

The Role of Corticocortical Loops, "Biological Cybernetics 66.3 (1992) : 241-51; R.Rao and D.Ballard, "Dynamic Model of Visual Recognition Predicts Neural Response Properties in the Visual Cortex, Neural Computation 9.4 (May 15, 1997) : 721-63.

104.B.Roska and F.Werblin, "Vertical Interactions Across Ten Parallel,Stacked Representations in the Mammalian Retina, "Nature 410.6828 (March 29, 2001) : 583-87; University of California,Berkeley,news release, "Eye Strips Images of All but Bare Essentials Before Sending Visual Information to Brain,UC Berkeley Research Shows, "March 28, 2001,

www.berkeley.edu/news/media/releases/2001/03/28__wers1.html.

105.基于Moravec的研究，Hans Moravec和Scott Friedman创办了一家叫做Seegrid的机器人公司。可见www.Seegrid.com。

106.M.A.Mahowald and C.Mead, "The Silicon Retina," *Scientific American* 264.5 (May 1991) : 76-82.

107.特别的，一个低通滤波器应用于感受器（例如光感受器）。将这些乘以邻近感受器的信号。如果在两个方向上都这么做，并且每一步操作都减去0，我们将可以获得一反映运动方向的输出结果。

108.On Berger,see

<http://www.usc.edu/dept/engineering/CNE/faculty/Berger.html>.

109."The Worlds First Brain Prosthesis," *New Scientist* 177.2386 (March 15, 2003) : 4, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993488>.

110.Charles Choi, "Brain-Mimicking Circuits to Run Navy Robot," *UPI*, June 7, 2004, <http://www.upi.com/view.cfm?StoryID=20040606-103352-6086r>.

111.Giacomo Rizzolatti et al., "Functional Organization of Inferior Area 6 in the Macaque Monkey.II.Area F5 and the Control of Distal Movements," *Experimental Brain Research* 71.3 (1998) : 491-507.

112.M.A.Arbib, "The Mirror System,Imitation,and the Evolution of Language," in Kerstin Dautenhahn and Chrystopher L.Nehaniv,eds., *Imitation in Animals and Artifacts* (Cambridge,Mass.: MIT Press, 2002) .

113.Marc D.Hauser,Noam Chomsky,and W.Tecumseh Fitch, "The Faculty of language: What Is It,Who Has It,and How Did It Evolve?" *Science* 298 (November 2002) : 156979, www.wjh.harvard.edu/~mnkylab/publications/languagespeech/Hauser,Chomsky,Fitch.pdf.

114.Daniel C.Dennett,*Freedom Evolves* (New York: Viking, 2003) .

115. See Sandra Blakeslee, "Humanity? Maybe Its All in the Wiring," *New York Times*, December 11, 2003,
<http://www.nytimes.com/2003112/09/science/09BRAI.html?ex=1386306000&en=294f5e91dd262a1a&ei=5007&partner=USERLAND>.

116. Antonio R. Damasio, *Descartes Error: Emotion, Reason and the Human Brain* (New York: Putnam, 1994).

117. M.P. Maher et al., "Microstructures for Studies of Cultured Neural Networks," *Medical and Biological Engineering and Computing* 37.1 (January 1999): 110-18; John Wright et al., "Towards a Functional MEMS Neurowell by Physiological Experimentation," *Technical Digest, ASME, 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, November 1996, DSC (Dynamic Systems and Control Division)*, vol. 59, pp. 333-38.

118. W. French Anderson, "Genetics and Human Malleability," *Hastings Center Report* 23.20 (January/February 1990): 1.

119. Ray Kurzweil, "A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win," *KurzweilAI.net*, April 9, 2002,
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0374.html>.

120. Robert A. Freitas Jr. 提出了一个未来的基于纳米技术的大脑上传系统，而这一系统的效果可能是即时产生的。根据 Freitas 的说法（源自他的私人交流，2005年1月），“一个在 <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.1.htm> 上提出的生动活泼的纤维网络，可以提供 10^{18} bit/s 的数据流通速度，容积足够实时监控大脑状态。”这一纤维网络拥有 30cm^3 的体积并可以产生 $4\text{W}\sim 6\text{W}$ 的热量，这两者都足够小，可以在一个拥有 1400cm^3 体积和 25W 热量承受能力的大脑里安全安装。信号至多会传送几米的距离，而其速度则近乎于光速，所以从大脑内部产生信号开始到传递至外部计算机系统也仅仅用了约 0.00001ms ，这一时间明显要小于神经排放周期的最小时间（约 5ms ）平均间隔。约 $2\mu\text{m}$ 的神经监视化学感应器可以捕获到产生自约 5ms 的窗口内的化学事件，既然这是一个粗略的扩散时间，也就是说，神经递质穿过 $2\mu\text{m}$ (<http://www.nanomedicine.com/NMII/Tables/3.4.jpg>)。这样的话，大脑状态监视可以很可能是即时产生的，至少在人类神经回应的时

间规模上，让人感觉到“没有落下任何重要的东西”。

121.M.C.Diamond et al., "On the Brain of a Scientist: Albert Einstein, "Experimental Neurology 88 (1985) : 198-204.

第5章 GNR: 三种重叠进行的革命

1.SAMUEL BUTLER, (1835—1902), "Darwin Among the Machines, "Christ Church Press, 1863年6月13日 (1912年由Festing Jones在The Notebooks of Samuel Butler发表再版)。

2.Peter Weibel, "Virtual Worlds: The Emperors New Bodies, "in Ars Electronica: Facing the Future,ed.Timothy Druckery (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1999), pp.207-23; 下载地址是:
http://www.aec.atlen/archiv__files/19902/EI990b__009.pdf。

3.James Watson and Francis Crick, "Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, "Nature 171.4356 (April 23, 1953) : 737-38,
<http://www.nature.com/nature/dna50/watsoncrick.pdf>.

4.Robert Waterston quoted in"Scientists Reveal Complete Sequence of Human Genome, "CBC News, April 14, 2003,
<http://www.cbc.ca/story/science/national/2003/04/14/genome030414.html>.

5.参见第2章。

6.Crick和Watson原始的报告，今天读起来仍引人注目，在James A.Peters等的Classic Papers in Genetics (Englewood Cliffs,N.J.: Prentice-Hal, 1959)中可以找到。双螺旋结构令人兴奋地诠释了成功和失败，在J.D.Waston的文章中可以找到，The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA (New York: Atheneum, 1968) .Nature.com有Crick论文的合集，可以在线阅读
<http://www.nature.com/nature/focus/crick/index.html>。

7.Morislav Radman and Richard Wagner, "The High Fidelity of DNA Duplication, "Scientific American 259.2 (August 1988) : 40-46.

8.DNA和RNA的结构和行为分别在Gary Felsenfeld的"DNA"和James Darnell的"RNA"中有所描述，这些文章发表在Scientific American 253.4（October 1985），58-67页和68-78页。

9.Mark A.Iobling and Chris Tyler-Smith, The Human Y Chromosome: An Evolutionary Marker Comes of Age, "Nature Reviews Genetics 4（August 2003）：598-612；Helen Skaletsky et al., "The Male-Specific Region of the Human Y Chromosome Is a Mosaic of Discrete Sequence Classes, Nature 423（June 19, 2003）：825-37.

10.畸形的蛋白质可能是毒性最大的。研究表明，畸形的蛋白质可能位于体内疾病发展过程的中心位置。如此之多的疾病诸如阿尔茨海默病、帕金森氏病、人类疯牛病、囊泡性纤维症、白内障和糖尿病，都被认为是由于肌体的能力不足以完全消除畸形蛋白质所致。

蛋白质分子执行细胞大部分的工作。蛋白质分子按照DNA蓝图在细胞内生成。它们起始时是长链的氨基酸分子，然后必须再折叠成精确的三维立体结构，以便实现例如酶、运输蛋白质等的功能。重金属毒素干扰这些酶类的正常功能，使蛋白质畸形的问题更加恶化。基因突变也使个体倾向于形成畸形蛋白质。

当原细纤维开始粘合在一起时，它们形成细丝、小纤维，最终成为较大的球状体结构，即所谓的淀粉状斑块。直到最近，这些不能溶解的斑块的堆积物被看做是这些疾病的病理间接因素，但是现在已经知道，原细纤维才是罪魁祸首。原细纤维转变成不能溶解的斑块的速度与疾病的恶化无关。这就解释了为何一些个体在其脑髓中能发现大量的斑块堆积物，但却没有阿尔茨海默病的证据，而其他个体有少量可见的斑块却仍有疾病临床表现。有些人很快地形成淀粉体斑块，这样能防止其受到原细纤维更进一步的损害。这些人也拥有少量可见的淀粉体斑块。参见 Per Hammarström、Frank Schneider和Jeffrey W.Kelly, "Trans-Suppression of Misfolding in an Amyloid Disease, "Science 293.5539（September 28, 2001）：2459-62。

11.新生物学引人入胜的内容可以参见Horace F.Judson的The Eighth Day of Creation: The Makers of the Revolution in Biology（Woodbury,N.Y.: CSHL Press, 1996）。

12.Ray Kurzweil and Terry Grossman,M.D., Fantastic Voyage: Live Long

Enough to Live Forever (New York: Rodale, 2004) .See
[http: //www.Fantastic-Voyage.net](http://www.Fantastic-Voyage.net) and [http: //www.RayandTerry.com](http://www.RayandTerry.com).

13.Ray Kurzweil,The 10%Solution for a Healthy Life: How to Elimiate Virtually All Risk of Heart Disease and Cancer (New York: Crown Books, 1993) .

14.Kurzweil和Grossman,Fantastic Voyage。全书中明确地表达了Kurzweil和Grossman的长寿计划。

15.“生物学年龄”的测试，所谓的H-scan测试包括听觉反应时间、可听见的最高音、触觉敏感度、视觉反应时间、肌肉运动时间、肺活量（强迫吐气时）、带有判断的视觉反应时间、带有判断的肌肉运动时间、记忆（序列长度）、二选一按键时间以及视觉调节。作者在Frontier Medical Institute（Grossman的健康长寿诊所）做了这个测试。关于H-scan测试请登录[http: //www.FMIClinic.com](http://www.FMIClinic.com).the H-scantest，参见Diagnostic和Lab Testing,Longevity Institute,Dallas,[http: //www.lidhealth.com/diagnostic.html](http://www.lidhealth.com/diagnostic.html)。

16.Kurzweil和Grossman,Fantastic Voyage，第10章：“kurzweil的个人计划”。

17.同上。

18.Aubrey D.N.J.de Grey, "The Foreseeability of Real Anti-Aging Medicine: Focusing the Debate, "Experimental Gerontology 38.9 (September 2003) : 927-34; Aubrey D.N.J.de Grey, "An Engineers Approach to the Development of Real Anti-Aging Medicine, "Science of Aging,Knowledge,Environment 1 (2003) : Aubrey D.N.J.de Grey et al., "Is Human Aging Still Mysterious Enough to Be Left Only to Scientists? "BioEssays 24.7 (July 2002) : 667-76.

19.Aubrey D.N.J.de Grey,ed., Strategies for Engineered Negligible Senescence: Why Genuine Control of Aging May Be Foreseeable,Annals of the New YorkAcademy of Sciences,vol.1019 (New York: New York Academy of Sciences,June 2004) .

20.除了提供不同类型细胞的功能之外，另外两个细胞控制基因表达的

原因是环境诱导和发展过程。即使简单的生物如细菌，也可以打开和关闭蛋白质的合成，这取决于环境诱导。例如大肠埃希菌（E.coli），当其所在环境中还有其他少量的消耗氮元素方式的时候，它可以关闭控制空气中氮气水平的蛋白质的合成。最近一项研究发现，1800个草莓基因中的200个基因会随着不同的发展阶段而变化。E.Marshall, "An Array of Uses: Expression Patterns in Straw-berries, Ebola, TB, and Mouse Cells, "Science 286.5439 (1999) : 445。

21.连同蛋白质编码区域一起，基因包括控制序列，称作启动子和增强子，它们控制基因在何时何地表达。编码蛋白质的启动子基因恰好代表性地位于DNA“上游”。增强子激活启动子的使用，因而控制基因表达的比率。许多基因需要由增强子激活才能表达。增强子称作“基因的空间（细胞类型）、时间特异性表达的主要决定因素”；任意给定基因都拥有几个不同的连接它的增强子地址。（S.F.Gilbert, Developmental Biology, 6th ed.[Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 2000]; 可在线浏览[www.ncbi.nlm.nih.gov/books/bv.fcgi? call=bv.View..ShowSection&rid=.0BpKYEBSFfx18nm8QOxH](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/bv.fcgi?call=bv.View..ShowSection&rid=.0BpKYEBSFfx18nm8QOxH)）。

通过绑定到增强子或启动子区域，转录因子启动或者抑制基因的表达。关于转录因子的新知识已经改变了我们对基因表达的理解。Per Gilbert在《The Genetic Core of Development: Differential Gene Expression》中写道：“不再视基因本身为控制蛋白质合成的独立实体。当然，基因作用于蛋白质并受其反作用。Natalie Anger (1992) 已经写道：‘一系列发现表明，DNA更类似于某一类型的政治家，被一圈蛋白质操作者和顾问所围绕，它们不时地非常有活力地按摩、扭转DNA，在身体的宏伟蓝图可以做有意义的事之前，彻底改造DNA。’”

22.Bob Holmes, "Gene Therapy May Switch Off Huntingtons, "2003年3月13日，网址为<http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993493>。“作为反转遗传分析的强大工具，RNA迅速应用到许多与人类疾病有关基因的功能的研究上，尤其是肿瘤形成和传染病的研究”。J.C.Cheng、T.B.Moore和K.M.Sakamoto, "RNA Interference and Human Disease, "Molecular Genetics and Metabolism 80.1-2 (October 2003) : 121-28。RNA干扰是一种“高度的序列特异性机制，”1.Zhang,D.K.Fogg和D.M.Waisman, "RNA Interference-Mediated Silencing of the S100A10 Gene Attenuates Plasmin Generation and Invasiveness of Colo 222 Colorecta Cancer Cells, "Journal of Biological

Chemistry 279.3 (January 16, 2004) : 2053-62。

23.每个芯片都包含合成的聚核苷酸，可以将其用来复制特异性基因序列。为确定哪些基因已经表达，作为样品，研究者从测试样例中将信使RNA隔离出来，将其转化为互补DNA (cDNA)，用荧光染料标记，然后在薄片上运行样例。每个标记过的cDNA通过一段匹配序列紧跟一个寡核苷酸，显示出薄片上已知序列的区域。自动扫描仪决定哪个寡核苷酸已经绑定，因而得出哪个基因得以表达....."E.Marshall, "Do-It-Yourself Gene Watching, Science 286.5439 (October 15, 1999) : 444-47.

24.同上。

25.J.Rosamond and A.Allsop, "Harnessing the Power of the Genome in the Search for New Antibiotics, "Science 287.5460 (March 17, 2000) : 1973-76.

26.T.R.Golub et al., Molecular Classification of Cancer: Class Discovery and Class Prediction by Gene Expression Monitoring, Science 286.5439 (October 15, 1999) : 531-37.

27.同上。正如A.Berns, "Cancer: Gene Expression in Diagnosis, "Nature 403 (February 3, 2000) : 491-92中报告所说。在另一项研究中，在老化的肌肉中，1%的基因表达有所减少。这些基因产生蛋白质，它们与能源生产和细胞构建有关，因此，减少老化带来的弱化很有意义。基因伴随着增强的表达产生压力蛋白质，用来修复DNA或者蛋白质的损伤。J.Marx, "Chipping Away at the Causes of Aging, "Science 287.5462 (March 31, 2000) : 2390.

另一个例子，肝转移是结肠、直肠癌的普遍原因。这些转移对不同的依赖于基因档案的治疗有所反应。表达仿形是一种杰出的确定合适的治疗模式的方法。J.C.Sung et al.Genetic Heterogeneity of Colorectal Cancer Liver Metastases, Journal of Surgical Research 114.2 (October 2003) : 251.

最后一个例子，研究者们已经很艰难地分析了淋巴肉芽肿病的里-施细胞，因为在患病组织中它极端罕见。表达仿形提供了关于细胞遗产的线索。J.Cossman et al., "Reed-Sternberg Cell Genome Expression Supports a

B-Cell Lineage, "Blood 94.2 (July 15, 1999) : 411-16.

28.T.Ueland et al., "Growth Hormone Substitution Increases Gene Expression of Members of the IGF Family in Cortical Bone from Women with Adult Onset Growth Hormone Deficiency-Relation-ship with Bone Turn-Over, "Bone 33.4 (October 2003) : 638-45.

29.R.Lovett, "Toxi Cologists Brace for Genomics Revolution, "Science 289.5479 (July 28, 2000) : 536-37.

30.体细胞转基因在一段时间内会影响体内细胞的子集。理论上也可能改变卵细胞和精子（生殖细胞）的遗传信息，从而将那些改变传递到下一代。这种治疗引来许多伦理上的关注，并且尚未尝试。"Gene Therapy, "Wikipedia,http://en.wikipedia.org/wiki/Gene_therapy.

31.基因编码在人类体内执行重要功能的蛋白质。不规则或者突变的基因编码的蛋白质不能执行这些功能，从而导致遗传缺陷和疾病。基因治疗的目标是代替有缺陷的基因，以便生产正常的蛋白质。可以通过多种方式来实现，但是最典型的方法是，使用一种称为载体的运输分子向病人的目标细胞里插入治疗基因。“当前，最通用的载体是一种病毒，它遗传上已经被改变成可以携带正常人类DNA。病毒已经逐步成为一种采用致病方法来封装和传递基因到人类细胞的方式。科学家们尝试利用这种能力，并操纵病毒的染色体来消除引起疾病的基因，并插入治疗基因”（人类基因组计划，"Gene Therapy, "http://www.ornl.gov/TechResources/Human_Genome/medicine/genetherapy.html）。参看人类基因组计划，以便获得更多关于基因疗法的知识。基因疗法研究的重要领域，目前有6个同行审阅的基因疗法的学术期刊和4个专业协会专注于此话题。

32.K.R.Smith, "Gene Transfer in Higher Animals: Theoretical Considerations and Key Concepts, "Journal of Biotechnology 99.1 (October 9, 2002) : 1-22.

33.Anil Ananthaswamy, "Under Cover Genes Slip into the Brain, "March 20, 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993520>.

34.A.E.Trezise et al., "In Vivo Gene Expression: DNA Electrotransfer, "Current Opinion in Molecular Therapeutics 5.4 (August

2003) : 397-404.

35.Sylvia Westphal, "DNA Nanoballs Boost Gene Therapy, "May 12, 2002, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99992257>.

36.L.Wu,M.Johnson,and M.Sato, Transcriptionally Targeted Gene Therapy to Detect and Treat Cancer, Trends in Molecular Medicine 9.10 (October 2003) : 421-29.

37.S.Westphal, "Virus Synthesized in a Fortnight, "November 14, 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994383>.

38.G.Chiesa, "Recombinant Apolipoprotein A-I (Milano) Infusion into Rabbit Carotid Artery Rapidly Removes Lipid from Fatty Streaks, "Circulation Research 90.9 (May 17, 2002) : 974-80;
P.K.Shah et al., "High-Dose Recombinant Apolipoprotein A-I (Milano) Mobilizes Tissue Cholesterol and Rapidly Reduces Plaque Lipid and Macrophage Content in Apolipoprotein e-Deficient Mice, "Circulation 103.25 (June 26, 2001) : 3047-50.

39.S.E.Nissen et al., "Effect of Recombinant Apo A-I Milano on Coronary Atherosclerosis in Patients with Acute Coronary Syndromes: A Randomized Controlled Trial, "JAMA 290.17 (November 5, 2003) : 2292-2300.

40.阶段2最近报告说"markedly increased HDL cholesterol levels and also decreased LDL cholesterol levels, "M.E.Brousseau等, "Effects of an Inhibitor of Cholesteryl Ester Transfer Protein on HDL Cholesterol, "New England Journal of Medicine 350.15 (April 8, 2004) : 1505-15, <http://content.nejm.org/cgi/content/abstract/350/15/1505>.全球阶段3尝试于2003年年末开始。关于托彻普的信息可在辉瑞公司网址查阅：
http://www.pfizer.com/are/investors__reports/annual__2003/review/p2003ar14__15.htm。

41.O.J.Finn, "Cancer Vaccines: Between the Idea and the Reality, "Nature Reviews: Immunology 3.8 (August 2003) : 630-41;
R.C.Kennedy and M.H.Shearer, "A Role for Antibodies in Tumor Immunity, "International Reviews of Immunology 22.2 (March-April 2003) : 141-72.

42.T.F.Greten and E.M.Jaffee, "Cancer Vaccines, "Journal of Clinical On Cology 17.3 (March 1999) : 1047-60.

43."Cancer 'Vaccine' Results Encouraging, "BBCNews,January 8, 2001, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/1102618.stm>,reporting on research by E.M.Jaffee et al., "Novel Allogeneic Granulocyte-Macrophage Colony-Stimulating Factor-Secreting Tumor Vaccine for Pancreatic Cancer: A Phase I Trial of Safety and Immune Activation, "Journal of Clinical On Cology 19.1 (January 1, 2001) : 145-56.

44.John Travis, "Fused Cells Hold Promise of Cancer Vaccines, "March 4, 2000, <http://www.sciencenews.org/articles/20000304/fob3.asp>,referring to D.W.Kufe, "Smallpox,Polio and Now a Cancer Vaccine? "Nature Medicine 6 (March 2000) : 252-53.

45.J.D.Lewis,B.D.Reilly,and R.K.Bright, "Tumor-Associated Antigens: From Discovery to Immunity, "International Reviews of Immunology 22.2 (March-April 2003) : 81-112.

46.T.Boehm et al., "Antiangiogenic Therapy of Experimental Cancer Does Not Induce Acquired Drug Resistance, "Nature 390.6658 (November 27, 1997) : 404-7.

47.血管生成基础,“理解血管生成”,
http://www.angio.org/understanding/content__understanding.html;
L.K.Lassiter and M.A.Carducci, "Endothelin Receptor Antagonists in the Treatment of Prostate Cancer, "Seminars in On Cology 30.5 (October 2003) : 678-88.该过程的详细说明参看国际肿瘤协会网站, "Understanding Angiogenesis, "<http://press2.nci.nih.gov/sciencebehind/angiogenesis/angio>

48.I.B.Roninson, "Tumor Cell Senescence in Cancer Treatment, "Cancer Research 63.11 (June 1, 2003) : 2705-15; B.R.Davies et al., "Immortalization of Human Ovarian Surface Epithelium with Telomerase and Temperature-Sensitive SV40 Large T Antigen, "Experimental Cell Research 288.2 (August 15, 2003) : 390-402.

49.参见R.C.Woodruff和J.N.Thompson Jr., "The Role of Somatic and Germline Mutations in Aging and a Mutation Interaction Model of Aging, "Journal of Anti-Aging Medicine 6.1 (Spring 2003) : 29-39.也参见18页和19页。

50.Aubrey D.N.J.de Grey, "The Reductive Hotspot Hypothesis of Mammalian Aging: Membrane Metabolism Magnifies Mutant Mitochondrial Mischief, "European Journal of Biochemistry 269.8 (April 2002) : 2003-9; P.F.Chinnery et al., "Accumulation of Mitochondrial DNA Mutations in Ageing,Cancer,and Mitochondrial Disease: Is There acommon Mechanism? "Lancet 360.9342 (October 26, 2002) : 1323-25; A.D.de Grey, "Mitochondrial Gene Therapy: An Arena for the Biomedical Use of Inteins, "Trends in Biotechnology 18.9 (September 2000) : 394-99.

51.“疫苗的概念个别违反神经退行性疾病，例如阿尔茨海默病明显地背离传统认为的机制和治疗，然而，阿尔茨海默病和多发性硬化症的治疗疫苗已经在动物身上和临床上经过验证。但是，这种方法在提供益处的同时可能会引发炎症。”(H.L.Weiner and D.J.Selkoe, "Inflammation and Therapeutic Vaccination in CNS Diseases, "Nature 420.6917[December 19-26, 2002]: 879-84) .这些研究者表示，滴鼻剂形式的疫苗可以减缓大脑的阿尔茨海默病的恶化。H.L.Weiner et al., "Nasal Administration of Amyloid-beta Peptide Decreases Cerebral Amyloid Burden in a Mouse Model of Alzheimers Disease, "Annals of Neurology 48.4 (October 2000) : 567-79.

52.S.Vasan,P.Foiles,and H.Founds, "Therapeutic Potential of Breakers of Advanced Glycation End Product-Protein Crosslinks, "Archives of Biochemistry and Biophysics 419.1 (November 1, 2003) : 89-96; D.A.Kass, "Getting Better Without AGE: New Insights into the Diabetic Heart, "Circulation Research 92.7 (April 18, 2003) : 704-6.

53.S.Graham, "Methuselah Worm Remains Energetic for Life, "October 27, 2003, www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa003&articleID=000C601F-8711-1F99-86FB83414B7F0156.

54.Ron Weiss在普林斯顿大学的主页 (<http://www.princeton.edu/~rweiss>) 列出了他的出版物，例如Genetic Circuit Building Blocks for

Cellular Computation,communications,and Signal Processing, Natural Computing,an International Journal 2.1 (January 2003) : 47-84.

55.S.L.Garfinkel, "Biological Computing, "Technology Review (May-June 2000) ,
[http://static.highbeam.com/t/technologyreview/may012000/biological Computing](http://static.highbeam.com/t/technologyreview/may012000/biologicalComputing).

56.同上。也可参看MIT媒体实验室网址目前研究的条目。
<http://www.media.mit.edu/research/index.html>.

57.一个合理的解释是：“哺乳类动物中，雌性胚胎有两条X染色体而雄性有一条X染色体。在雌性的早期发展中，其中一条X染色体和其上的大多数基因正常情况下沉默着或者失活的。那样，雌性和雄性的基因表达总数是一样的。但是在克隆动物身上，来自捐赠的细胞核中的X染色体已经是灭活的。必须重新设定程序，然后再次失活，这样可能会引入错误。”

CBC新闻在线, "Genetic Defects May Explain Cloning Failures, "May 27, 2002, http://www.cbc.ca/stories/2002/05/27/cloning_errors020527.That story reports on F.Xue et al., "Aberrant Patterns of X Chromosome Inactivation in Bovine Clones, "Nature Genetics 31.2 (June 2002) : 216-20.

58.Rick Weiss, "Clone Defects Point to Need for 2 Genetic Parents, "Washington Post,May 10, 1999,
<http://www.gene.ch/genet/1999/Jun/msg00004.html>.

59.A.Baguisi et al., "Production of Goats by Somatic Cell Nuclear Transfer, "Nature Biotechnology 5 (May 1999) : 456-61.更多关于 Genzyme Transgenics Corporation (前称健赞公司)、路易斯安那州立大学以及塔夫斯大学医药学院之间的合作, 参看1999年4月27日新闻稿, "Genzyme Transgenics Corporation Announces First Successful Cloning of Transgenic Goat, "<http://www.transgenics.com/pressreleases/pr042799.html>.

60.Luba Vangelova, "True or False? Extinction Is Forever, "Smithsonian,June 2003,

<http://www.smithsonianmag.com/smithsonian/issues03/jun03/phenomena.ht>

61.J.B.Gurdon and A.Colman, "The Future of Cloning, "Nature 402.6763 (December 16, 1999) : 743-46; Gregory Stock and John Campbell,eds., Engineering the Human Germline: An Exploration of the Science and Ethics of Altering the Genes We Pass to Our Children (New York: Oxford University Press, 2000) .

62.正如斯科普里斯研究机构所指出的，“去分化或者反转血缘限制的细胞成多功能的起源细胞这样的能力，可能会克服临床应用上许多使用胚胎干细胞和成熟的干细胞的障碍（无效的分化，拒绝外源细胞，有效的隔离和表达等）”。通过有效的特殊细胞分化消失的过程，健康的、丰富的、容易理解的成熟细胞可用于生成功能不同的细胞，以此来修复受损的组织 and 器官，这都是可能的。

(<http://www.scripps.edu/chem/ding/sciences.htm>)

已分化的细胞类型直接转换到另一类型——该过程称为分化转化，产生同基因（病人自身的）来代替病的或者损坏的细胞或组织。成熟的干细胞展示出比预期更广大的分化潜能，并且除了在驻留方面还有助于肌体组织。最近在分化转化方面的进展包括核移植、控制细胞培养条件、异位的基因表达感应、细胞萃取物中分子的提取。这些方法打开了一扇大门，直通设计同基因替代细胞的林荫大道。为了避免不可预知的组织转移，细胞核重编需要控制和继承后成性的修改。需要相当大的精力才能解开分子进程，注释557，潜在的细胞核重编和评估重编细胞内方面改变的稳定性。

Quoted from P.Collas and Anne-Marl Hakelien, "Teaching Cells New Tricks, "Trends in Biotechnology 21.8 (August 2003) : 354-61; P.Collas, "Nuclear Reprogramming in Cell-Free Extracts, "Philosophical Transactions of the Royal Society of London,B 358.1436 (August 29, 2003) : 1389-95.

63.研究者们已经在实验室里将人类肝脏细胞转化为胰腺细胞：Jonathan Slack等, "Experimental Conversion of Liver to Pancreas, "Current Biology 13.2 (January 2003) : 105-15. 研究者们使用细胞提取物来重编细胞，从而使其在行为上类似其他细胞；例如，皮肤细胞重编成能够展示T细胞特征的细胞。Anne-Mari Hakelien et al., "Reprogramming Fibroblasts to Express T-Cell Functions Using Cell Extracts, "Nature Biotechnology

20.5 (May 2002) : 460-66; Anne-Mari Hakelien and P.Collas, "Novel Approaches to Transdifferentiation, "Cloning Stem Cells 4.4 (2002) : 379-87. See also David Tosh and Jonathan M.W.Slack, "How Cells Change Their Phenotype, "Nature Reviews Molecular Cell Biology 3.3 (March 2002) : 187-94.

64. 参见上面注释21关于转录因子的描述。

65. R.P.Lanza et al., "Extension of Cell Life-Span and Telomere Length in Animals Cloned from Senescent Somatic Cells, "Science 288.5466 (April 28, 2000) : 66-9. See also J.C.Ameisen, "On the Origin, Evolution, and Nature of Programmed Cell Death: A Timeline of Four Billion Years, "Cell Death and Differentiation 9.4 (April 2002) : 367-93; Mary- Ellen Shay, "Transplantation Without a Donor, "Dream: The Magazine of Possibilities (Childrens Hospital, Boston), Fall 2001.

66. 在2000年的Immune Tolerance

Network (<http://www.immunetolerance.org>), 美国国家卫生研究所 (NIH) 和幼型糖尿病基金会计划宣布一项多通道的临床试验来评价胰岛移植的效果。

按照临床试验的研究摘要 (James Shapiro, "Campath-Ifi and One-Year Temporary Sirolimus Maintenance Monotherapy in Clinical Islet Transplantation, " <http://www.immunetolerance.org/public/clinical/islet/trial> 种疗法不是对所有 I 型糖尿病病人适合, 即使在胰岛供给方面没有限制, 因为癌症长期潜在的危险, 威胁生命的传染病和药物副作用与抗排斥治疗有关。如果耐受性可以达到预先最小的风险, 那么胰岛移植将可以安全应用于糖尿病的治疗过程中, 最终, 在孩子们的诊断过程中。”

67. "Lab Grown Steaks Nearing

Menu, " <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993208>, 包括工艺问题的讨论。

68. 每一维度上特征尺寸的对分时间是5年。参看第2章的讨论。

69. Robert A. Freitas Jr的分析表明, 用机械的respirocytes代替一个人10%的血液红细胞, 将允许一个人在4小时内屏住呼吸, 大约相当于240分钟还多 (关于所有生物学血液红细胞持续时间可行性)。由于这项增长源

自于只代替10%的血液红细胞，所以respirocytes将达到成千上万倍的有效性。

70.纳米技术是“彻底的、廉价的对物质结构的控制技术，它基于分子挨着分子控制产品和副产品；产品和分子制造的进程，包括分子机器”（Eric Drexler and Chris Peterson,Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution（New York: William Morrow, 1991））。根据作者所说：

纳米技术正朝向较大地控制物质结构的方向移动，过往的先进技术如微波管、激光、超导体、卫星、机器人等已经慢慢地从工厂走出，虽然开始时价格很高以及应用有限，但是分子制造将更类似于计算机：一种超大使用范围的灵活技术。分子制造将不会像计算机那样，从传统的工厂慢慢走出来；它将替代工厂，替代或者升级工厂的产品。这是件非常基础的新鲜事，不仅仅是另一个20世纪的小玩意。在科学上，它将起于20世纪的趋势，但在技术上、经济上和环境事务上，它将打破趋势。（第1章）

Drexler和Peterson概述纳米技术革命影响的可能范围：有效的太阳能细胞“像新闻纸一样廉价并且像沥青一样坚韧”，分子机制可以在生物递降分解前的6小时内杀灭冷病毒，一按电钮，免疫机器就可以破坏体内恶性肿瘤细胞，袖珍的超级计算机，化石燃料消耗殆尽，太空旅行，消失物种的复原。同样参看E.Drexler,Engines of Creation（New York: Anchor Books, 1986）。前瞻协会有一个帮助性的关于纳米技术常见问题的解答列表（<http://www.foresight.org/NanoRev/FIFAQ1.html>）和其他信息。其他网站资源包括National Nanotechnology Initiative（<http://www.nano.gov>），<http://nanotechweb.org>,Dr.Ralph Merkle的纳米技术主页（<http://www.zyvex.com/nano>）和Nanotechnology, 在线期刊（<http://www.iop.org/EJ/journal/0957-4484>）。纳米技术广泛使用的材料可以在作者的网址找到，<http://www.kurzweilAI.net/meme/frame.html?m=18>。

71.Richard P.Feynman, "Theres Plenty of Room at the Bottom, "American Physical Society annual meeting,Pasadena,California, 1959; 文字记录在<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

72.John von Neumann,Theory of Self-Reproducing Automata,A.W.Burks,ed.（Urbana: University of Illinois Press, 1966）.

73.关于运动学机器复制最为综合的调查在Robert A.Freitas Jr.和Ralph C.Merkle的Kinematic Self-Replicating Machines (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004),
<http://www.MolecularAssembler.com/KSRM.htm>.

74.K.Eric Drexler,Engines of Creation,and K.Eric Drexler,Nanosystems: Molecular Machinery,Manufacturing,and Computation (New York: Wiley Interscience, 1992) .

75.参见第3章关于纳米电子管电路的讨论, 包括第3章的第9个注释, 关于纳米电子管电路潜力的分析。

76.K.Eric Drexler and Richard E.Smalley, "Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against 'Molecular Assemblers,'"Chemical and Engineering News,November 30, 2003,
<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.

77.Ralph C.Merkle, "A Proposed 'Metabolism' for a Hydrocarbon Assembler, "Nanotechnology 8 (December 1997) : 149-62,
<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> or
<http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>.See also
Ralph C.Merkle, "Binding Sites for Use in a Simple Assembler, "Nanotechnology 8 (1997) : 23-28,
<http://www.zyvex.com/nanotech/bindingSites.html>; Ralph C.Merkle, "A New Family of Six Degree of Freedom Positional Devices, "Nanotechnology 8 (1997) : 47-52,
<http://www.zyvex.com/nanotech/6dof.html>; Ralph C.Merkle, "Casing an Assembler, "Nanotechnology 10 (1999) : 315-22,
<http://www.zyvex.com/nanotech/casing>; Robert A.Freitas Jr., "A Simple Tool for Positional Diamond Mechanosynthesis,and Its Method of Manufacture, "U.S.Provisional Patent Application No.60/543, 802, filed February 11, 2004, 过程描述的讲稿在
<http://www.MolecularAssembler.com/Papers/PathDiamMolMfg.htm>;
Ralph C.Merkle and Robert A.Freitas Jr., "Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechanosynthesis, "Journal of Nanoscience and Nanotechnology 3 (August 2003) : 319-24,
<http://www.rfreitas.com/Nano/JNNDimerTool.pdf>; Robert A.Freitas

Jr.and Ralph C.Merkle, Merkle-Freitas Hydrocarbon Molecular Assembler; in Kinematic Self-Replicating Machines,section 4.11.3 (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004) , pp.130-35, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.11.3.htm>.

78.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section 6.3.4.5, "Chemoelectric Cells" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999) , pp.152-54, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>; Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities,section 6.3.4.4, "Glucose Engines" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999) , pp.149-52, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.4.htm>; K.Eric Drexler,Nanosystems: Molecular Machinery,Manufacturing,and Computation,section 16.3.2, "Acoustic Power and Control" (New York: Wiley Interscience, 1992) , pp.472-76. See also Robert A.Freitas Jr.and Ralph C.Merkle,Kinematic Self-Replicating Machines,appendix B.4, "Acoustic Transducer for Power and Control" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004) , pp.225-33, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/AppB.4.htm>.

79.关于运动学机器复制最为综合的调查是由Robert A.Freitas Jr.和Ralph C.Merkle编写的Kinematic Self-Replicating Machines, 第4章, Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004) , pp.89-144, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.

80.Drexler,Nanosystems, 第441页.

81.关于运动学机器复制最为综合的调查是由Robert A.Freitas Jr.和Ralph C.Merkle编写的Kinematic Self-Replicating Machines, 第4章Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004) , pp.89-144, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.

82.T.R.Kelly,H.De Silva,and R.A.Silva, "Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System, "Nature 401.6749 (September 9, 1999) : 150-52.

83.Carlo Montemagno and George Bachand, "Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular

Motors, "Nanotechnology 10 (1999) : 225-31; George D.Bachand and Carlo D.Montemagno, "Constructing Organic/Inorganic NEMS Devices Powered by Biomolecular Motors, "Biomedical Microdevices 2.3 (June 2000) : 179-84.

84.N.Koumura et al., "Light-Driven Monodirectional Molecular Rotor, "Nature 401.6749 (September 9, 1999) : 152-55.

85.Berkeley Lab, "A Conveyor Belt for the Nano-Age, "April 28, 2004, <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/MSD-conveyor-belt-for-nanoage.html>.

86."Study: Self-Replicating Nanomachines Feasible, "June 2, 2004, http://www.smalltimes.com/document__display.cfm?section__id=53&document__id=8007, 关于Tihamer Toth-Pejel的报道, "Modeling Kinematic Cellular Automata, "April 30, 2004, http://www.niac.usra.edu/files/studies/final__report/pdf/883Toth-Fejel.pdf.

87.W.U.Dittmer,A.Reuter,and F.C.Simmel, "A DNA-Based Machine That Can Cyclically Bind and Release Thrombin, "Angewandte Chemie International Edition 43 (2004) : 3550-53.

88.Shiping Liao and Nadrian C.Seeman, "Translation of DNA Signals into Polymer Assembly Instructions, "Science 306 (December 17, 2004) : 2072-74, <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/306/5704/2072.pdf>.

89.Scripps Research Institute, "Nanorigami, "February 11, 2004, http://www.eureka-lert.org/pub__releases/2004-02/srin021004.php.

90.Jenny Hogan, "DNA Robot Takes Its First Steps, "May 6, 2004, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994958>, reporting on Nadrian Seeman and William Sherman, "A Precisely Controlled DNA Biped Walking Device, "Nano Letters 4.7 (July 2004) : 1203-7.

91.Helen Pearson, "Construction Bugs Find Tiny Work, "Nature News,July 11, 2003, <http://www.nature.com/news/2003/030707/full/030707-9.html>.

92. Richard E. Smalley, "Nanofallacies: Of Chemistry, Love and Nanobots," *Scientific American* 285.3 (September 2001): 76-77; 请参见以下链接: http://www.sciamdigital.com/browse.cfm?sequencenameCHAR=item2&methodnameCHAR=resource__getitembrowse&interfacenameCHAR=browse.cfm&ISSUEID__CHAR=6A628AB3-17A5-4374-B100-3185A0CCC86&ARTICLEID__CHAR=F90C4210-C153-4B2F-83A1-28F2012B637&sc=I100322.

93. 参见下面第108和109关于参考文献的注释。同时参见Drexler的Nanosystems关于他的计划。样品证明, 参见Xiao Yan Chang、Martin Perry、James Peploski、Donald L. Thompson 和Lionel M. Raff, "Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamondlike Surfaces," *Journal of Chemical Physics* 99 (September 15, 1993): 4748-58. See also L.J. Lauhon and W. Ho, "Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope," *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987-92; G. Allis and K. Eric Drexler, "Design and Analysis of a Molecular Tool for Carbon Transfer in Mechanosynthesis," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 2.1 (March-April 2005, in press).

94. Lea Winerman, "How to Grab an Atom," *Physical Review Focus*, May 2, 2003, <http://focus.aps.org/story/v11/st19>, reporting on Noriaki Oyabu, "Mechanical Vertical Manipulation of Selected Single Atoms by Soft Nanoindentation Using a Near Contact Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters* 90.17 (May 2, 2003): 176102.

95. Robert A. Freitas Jr., "Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis," 前瞻协会网站 December 16, 2003, <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>.

96. 参见Ralph C. Merkle的"Thats Impossible! How Good Scientists Reach Bad Conclusions"第3页的方程式和相应的说明, <http://www.zyvex.com/nanotech/impossible.html>.

97. 因为 ΔX_c 仅仅是直径约为0.3nm的典型原子的电子云的5%, 利用在纳米机械结构的制造和稳定性方面的适度结构约束(即使在大多数液体的沸点时, 每个分子只能在平均位置上移动大约0.07nm)"Robert A. Freitas

Jr., Nanomedicine, vol.1, Basic Capabilities, section 2.1, "Is Molecular Manufacturing Possible? (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), p.39, <http://www.nanomedicine.com/NMI/2.1.htm#p9>.

98. Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, vol.1, Basic Capabilities, section 6.3.4.5, "Chemoelectric Cells" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.152-54, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>.

99. Montemagno and Bachand, "Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors."

100. 前瞻协会主席 K. Eric Drexler 给诺贝尔奖获得者 Richard Smalley 的公开信, <http://www.foresight.org/NanoRev/Letter.html>, and reprinted here: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0560.html>. 完整的故事可以在 Ray X Kurzweil 的 "The Drexler-Smalley Debate on Molecular Assembly" 中找到, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0604.html>.

101. K. Eric Drexler and Richard E. Smalley, "Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against 'Molecular Assemblers,'" *Chemical & Engineering News* 81.48 (Dec. 1, 2003): 37-42, <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.

102. A. Zaks and A. M. Klibanov, "Enzymatic Catalysis in Organic Media at 100 Degrees C," *Science* 224.4654 (June 15, 1984): 1249-51.

103. Patrick Bailey, "Unraveling the Big Debate About Small Machines," *Better Humans*, August 16, 2004, <http://www.betterhumans.com/Features/Reports/report.aspx?articleID=2004-08-16-1>.

104. Charles B. Musgrave et al., "Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology," *Nanotechnology* 2 (October 1991): 187-95; Michael Page and Donald W. Brenner, "Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: Ab initio Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model," *Journal of the American Chemical Society* 113.9 (1991): 3270-74; Xiao Yan Chang, Martin Perry, James

Peploski, Donald L. Thompson, and Lionel M. Raff, "Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamond-like Surfaces, "Journal of Chemical Physics 99 (September 15, 1993) : 4748-58; J.W. Lyding, K. Hess, G.C. Abeln, et al., "UHV-STM Nanofabrication and Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology, "Applied Surface Science 132 (1998) : 221;
<http://www.hersamgroup.northwestern.edu/publications.html>; E.T. Foley et al., "Cryogenic UHVSTM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon (100) , "Physical Review Letters 80 (1998) : 1336-39, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336__1; L.J. Lauhon and W. Ho, "Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope, "Journal of Physical Chemistry 105 (2000) : 3987-92.

105. Stephen P. Walch and Ralph C. Merkle, "Theoretical Studies of Diamond Mechano-synthesis Reactions, "Nanotechnology 9 (September 1998) : 285-96; Fedor N. Dzegilenko, Deepak Srivastava, and Subhash Saini, "Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface, "Nanotechnology 9 (December 1998) : 325-30; Ralph C. Merkle and Robert A. Freitas Jr., "Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechano-synthesis, "Journal of Nanoscience and Nanotechnology 3 (August 2003) : 319-24, <http://www.rfreitas.com/Nano/DimerTool.htm>; Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr., and Ralph C. Merkle, "Theoretical Analysis of Diamond Mechano-Synthesis. Part I. Stability of C₂ Mediated Growth of Nanocrystalline Diamond C (110) Surface, "Journal of Computational and Theoretical Nanoscience 1 (March 2004) : 62-70, <http://www.molecularassembler.com/JCTNPengMar04.pdf>; David J. Mann, Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr., and Ralph C. Merkle, "Theoretical Analysis of Diamond Mechano-Synthesis. Part II. C₂ Mediated Growth of Diamond C (110) Surface via Si/Ge-Triadamantane Dimer Placement Tools, "Journal of Computational and Theoretical Nanoscience 1 (March 2004) , 71-80, <http://www.molecularassembler.com/JCTNMannMar04.pdf>.

106.关于氢原子提取工具和碳元素沉淀工具的分析已经涉及很多人，包括：Donald W.Brenner,Tahir Cagin,Richard J.Colton,K.Eric Drexler,Fedor N.Dzegilenko,Robert A.Freitas Jr., William A.Goddard III,J.A.Harrison,Charles B.Musgrave,Ralph C.Merkle,Michael Page,Jason K.Perry,Subhash Saini,O.A.Shenderova,Susan B.Sinnott,Deepak Srivastava,Stephen P.Walch, 和Carter T.White.

107.Ralph C.Merkle, "A Proposed 'Metabolism' for a Hydrocarbon Assembler, "Nanotechnology 8 (December 1997) : 14-62,
<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> or
<http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>.

108.有价值的参考文献：Robert A.Freitas Jr., "Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis, "前瞻协会网站, 2003年12月16日, <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>; Wilson Ho and Hyojune Lee, "Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope, "Science 286.5445 (November 26, 1999) : 1719-22, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stmiets.html>; K.Eric Drexler,Nanosystems第8章; Ralph Merkle, "Proposed 'Metabolism' for a Hydrocarbon Assembler"; Musgrave et al., "Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology"; Michael Page and Donald W.Brenner, "Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: Ab initio Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model, "Journal of the American Chemical Society 113.9 (1991) : 3270-74; D.W.Brenner et al., "Simulated Engineering of Nanostructures, "Nanotechnology 7 (September 1996) : 161-67,
<http://www.zyvex.com/nanotech/nano4/brennerPaper.pdf>;
S.P.Walch,W.A.Goddard III,and Ralph Merkle, "Theoretical Studies of Reactions on Diamond Surfaces, "Fifth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, 1997,
<http://www.foresight.org/Conferences/MNT05/Abstracts/Walcabst.html>;
Stephen P.Walch and Ralph C.Merkle, "Theoretical Studies of Diamond Mechanosynthesis Reactions, "Nanotechnology 9 (September 1998) : 285-96; Fedor N.Dzegilenko,Deepak Srivastava,and Subhash Saini, "Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface, "Nanotechnology 9 (December 1998) : 325-30; J.W.Lyding et al., "UHV-STM Nanofabrication and

Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology, "Applied Surface Science 132 (1998) : 221, <http://www.hersamgroup.north-western.edu/publications.html>; E.T.Foley et al., "Cryogenic UHV-STM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon (100)", "Physical Review Letters 80 (1998) : 1336-39, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336__1; M.C.Hersam,G.C.Abeln,and J.W.Lyding, "An Approach for Efficiently Locating and Electrically Contacting Nanostructures Fabricated via UHV-STM Lithography on Si (100)", "Microelectronic Engineering 47 (1999) : 23537; L.J.Lauhon and W.Ho, "Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope, "Journal of Physical Chemistry 105 (2000) : 3987-92, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stmiets.html>.

109.Eric Drexler, "Drexler Counters, "2003年11月1日首次发布于 KurzweilAI.net: <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0606.html>.同时参见K.Eric Drexler,Nanosystems: Molecular Machinery,Manufacturing,and Computation (New York: Wiley Interscience, 1992), chapter 8; Ralph C.Merkle, "Foresight Debate with Scientific American" (1995), <http://www.foresight.org/SciAmDebate/SciAmResponse.html>; Wilson Ho and Hyojune Lee, "Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope, "Science 286.5445 (November 26, 1999) : 1719-22, <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stmiets.html>; K.Eric Drexler,David Forrest,Robert A.Freitas Jr., J.Storrs Hall,Neil Jacobstein,Tom McKendree,Ralph Merkle,and Christine Peterson, "On Physics,Fundamentals,and Nanorobots: A Rebuttal to Smalleys Assertion that Self-Replicating Mechanical Nanorobots Are Simply Not Possible: A Debate About Assemblers" (2001), <http://www.imm.org/SciAmDebate2/smalley.html>.

110.参见<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>; <http://www.kurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0604.html>

111.D.Maysinger et al., "Block Copolymers Modify the Internalization of

Micelle-In Corporated Probes into Neural Cells, "Biochimica et Biophysica Acta 1539.3 (June 20, 2001) : 205-17; R.Savic et al., "Micellar Nanocontainers Distribute to Defined Cytoplasmic Organelles, "Science300.5619 (April 25, 2003) : 615-18.

112.T.Yamada et al., "Nanopartides for the Delivery of Genes and Drugs to Human Hepatocytes, "Nature Biotechnology 21.8 (August 2003) : 885-90. Published electronically June 29, 2003.摘要:
<http://www.nature.com/cgitaf/DynaPage.taf?file=/nbt/journal/v21/n8/abs/nbt843>.Nature上的短篇新闻稿Short press release: http://www.nature.com/nbt/press__release/nbt0803.html.

113.Richards Grayson et al., "A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices, "IEEE Proceedings 92 (2004) : 6-21; Richards Grayson et al., "Molecular Release from a Polymeric Microreservoir Device: Influence of Chemistry, Polymer Swelling, and Loading on Device Performance, "Journal of Biomedical Materials Research 69A.3 (June 1, 2004) : 502-12.

114.D.Patrick O'Neal et al., "Photothermal Tumor Ablation in Mice Using Near Infrared-Absorbing Nanoparticles, "Cancer Letters 209.2 (June 25, 2004) : 171-76.

115.国际能源机构, 2003年3月3日R.E.Smalley在Washington,D.C.出席总统科学技术顾问委员会时描述, "Nanotechnology,the S & T Workforce,Energy & Prosperity"的第12页。<http://www.ostp.gov/PCAST/IPCAST%203-3-03%20R%20Smalley%20Slides.pdf>; 也可以参见 <http://cohesion.rice.edu/NaturalSciences/Smalley/emplibrary/PCAST%20M>

116.Smalley, "Nanotechnology,the S & T Workforce,Energy & Prosperity."

117."FutureGen—A Sequestration and Hydrogen Research Initiative, "U.S.Department of Energy,Office of Fossil Energy,February 2003,
http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/futuregen__factsheet.pdf.

118.Drexler,Nanosystems, 第428到第433页。

119. Barnaby J. Feder, "Scientist at Work/Richard Smalley: Small Thoughts for a Global Grid," *New York Times*, September 2, 2003; the following link requires subscription or purchase:

<http://query.nytimes.com/gst/abstract.html?res=F30C17FC3D5C0C718CDDA00894DB404482>.

120. 国际能源机构, Smalley "Nanotechnology, the S & T Workforce, Energy & Prosperity" 报告的第12页。

121. 联合国大学美国委员会, 千禧年全球挑战计划13:
<http://www.acunu.org/millennium/ch-13.html>。

122. "Wireless Transmission in Earth's Energy Future," *Environment News Service*, November 19, 2002, reporting on Jerome C. Glenn and Theodore J. Gordon in "2002 State of the Future," *American Council for the United Nations University* (August 2002).

123. 信息披露: 作者是这家公司的顾问和投资人。

124. "NEC Unveils Methanol-Fueled Laptop," *Associated Press*, June 30, 2003,
<http://www.siliconvalley.com/mld/siliconvalley/news/6203790.htm>. report in on NEC press release, "NEC Unveils Notebook PC with Built-In Fuel Cell," June 30, 2003, <http://www.nec.co.jp/press/en/0306/3002.html>.

125. Tony Smith, "Toshiba Boffins Prep Laptop Fuel Cell," *The Register*, March 5, 2003, http://www.theregister.co.uk/2003/03/05/toshiba__boffins__prep__laptop__fuel; Yoshiko Hara, "Toshiba Develops Matchbox-Sized Fuel Cell for Mobile Phones," *EE Times*, June 24, 2004, <http://www.eet.com/article/showArticle.jhtml?articleId=22101804>, reporting on Toshiba press release, "Toshiba Announces World's Smallest Direct Methanol Fuel Cell with Energy Output of 100 Milliwatts," http://www.toshiba.com/taec/press/dmfc04__222.shtml.

126. Karen Lurie, "Hydrogen Cars," *ScienceCentral News*, May 13, 2004, http://www.sciencentral.com/articles/view.php3?language=english&type=article&article__id=218392247.

127. Louise Knapp, "Booze to Fuel Gadget Batteries," *Wired News*, April 2, 2003, <http://www.wired.com/news/gizmos/0,1452,58119,00.html>, and St. Louis University press release, "Powered by Your Liquor Cabinet, New Biofuel Cell Could Replace Rechargeable Batteries," March 24, 2003, <http://www.slu.edu/readstory/newsinfo/2474>, reporting on Nick Akers and Shelley Minter, "Towards the Development of a Membrane Electrode Assembly," presented at the American Chemical Society national meeting, Anaheim, Calif. (2003).

128. "Biofuel Cell Runs on Metabolic Energy to Power Medical Implants," *Nature Online*, November 12, 2002, <http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>, reporting on N. Mano, F. Mao, and A. Heller, "A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer," *Journal of the American Chemical Society* 124 (2002): 12962-63.

129. "Power from Blood Could Lead to 'Human Batteries,'" *Fairfax Digital*, August 4, 2003, <http://www.smh.com.au/articles/2003/08/03/1059849278131.html?oneclick=true>. Read more about the microbial fuel cells here: <http://www.geobacter.org/research/microbial/>. Matsuhiko Nishizawa's BioMEMs laboratory diagrams a micro-biofuel cell: http://www.biomems.mech.tohoku.ac.jp/research_e.html. This short article describes work on an implantable, nontoxic power source that now can produce 0.2 watts: http://www.iol.co.za/index.php?se__id=1&click__id=31&art__id=qw111596760144B215.

130. Mike Martin, "Pace-Setting Nanotubes May Power Micro-Devices," *NewsFactor*, February 27, 2003, <http://physics.iisc.ernet.in/~asood/Pace-Setting%20Nanotubes%20May%20Power%20Micro-Devices.htm>.

131. "Finally, it is possible to derive a limit to the total planetary active nanorobot mass by considering the global energy balance. Total solar insolation received at the Earth's surface is $\sim 1.75 \times 10^{17}$ watts (Earth $\sim 1370 \text{ W/m}^2 \pm 0.4\%$ at normal incidence), "Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine, vol. 1, Basic Capabilities*, section 6.5.7, "Global Hypsithermal Limit" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999),

pp.175-76, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p1>.

132.这假设有100亿人 (10^{10}), 纳米机器人的功率密度为每立方米大约 10^7 W, 一个纳米机器人大小为1立方微米, 每个纳米机器人的原子动力拖动大约10皮瓦 (10^{-11} W)。 10^{16} W的高温限制意味着每个人10kg的纳米机器人, 或者每个人拥有 10^{16} 个纳米机器人。 Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine, vol.1, Basic Capabilities, section 6.5.7 "Global Hypsithermal Limit" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.175-76, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p4>.

133.作为一种选择, 纳米技术起初的目的是极大地节能, 之所以能量回收是多余的而且不可行的, 是因为要回收的是相当小的散热。2005年1月, 在一封私人信件中, Robert A.Freitas Jr.写道: "Drexler的 Nanosystems第396页声称能量耗散理论上能够像 E_{diss} 一样低, 约为0.1兆焦耳/千克。如果假设只采用可靠的、近乎可逆的步骤将一组机械化学过程有能力传送分子原料到复杂的产品结构中: 钻石的0.1兆焦耳/千克粗略的相当于室内温度最小的热噪声 (e.g., $kT \sim 4$ zJ/atom at 298 K)。”

134.Alexis De Vos, Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion (London: Oxford University Press, 1992), p.103.

135.R.D.Schaller and V.I.Klimov, "High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion, "Physical Review Letters 92.18 (May 7, 2004): 186601.

136.National Academies Press, commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century, (Washington, D.C.: National Academy Press, 1998), p.166, <http://books.nap.edu/books/0309059917/html/166.html>.

137.Matt Marshall, "World Events Spark Interest in Solar Cell Energy Startups, "Mercury News, August 15, 2004, http://www.konarkatech.com/news__articles__082004/bsilicon_valley.php and <http://www.nanosolar.com/cache/merc081504.htm>.

138. John Gartner, "NASA Spaces on Energy Solution," *Wired News*, June 22, 2004, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,63913,00.html>. See also Arthur Smith, "The Case for Solar Power from Space," <http://www.lispace.org/articles/SSPCase.html>.

139. "The Space Elevator Primer," *Spaceward Foundation*, <http://www.elevator2010.org/site/primer.html>.

140. Kenneth Chang, "Experts Say New Desktop Fusion Claims Seem More Credible," *New York Times*, March 3, 2004, <http://www.rpi.edu/web/News/nytlahey3.html>, reporting on R.P. Taleyarkhan, "Additional Evidence of Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation," *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 69.3, pt.2 (March 2004): 036109.

141. 最初Pons和Fleischman使用钷电极冷却核聚变的理论还未被废弃。热心的拥护者继续发展该项技术，美国能源部于2004年宣布，正在执行一项新的正式的关于近年来该领域的研究的审查。Toni Feder, "DOE Warms to Cold Fusion," *Physics Today* (April 2004), <http://www.physicstoday.org/vol-57/iss-4/p27.html>.

142. Akira Fujishima, Tata N. Rao, and Donald A. Tryk, "Titanium Dioxide Photocatalysis," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Review* 1 (June 29, 2000): 1-21; Prashant V. Kamat, Rebecca Huehn, and Roxana Nicolaescu, "A 'Sense and Shoot' Approach for Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants in Water," *Journal of Physical Chemistry B* 106 (January 31, 2002): 788-94.

143. A.G. Panov et al., "Photooxidation of Toluene and p-Xylene in Cation-Exchanged Zeolites X, Y, ZSM-5, and Beta: The Role of Zeolite Physicochemical Properties in Product Yield and Selectivity," *Journal of Physical Chemistry B* 104 (June 22, 2000): 5706-14.

144. Gabor A. Somorjai and Keith McCrea, "Roadmap for Catalysis Science in the 21st Century: A Personal View of Building the Future on Past and Present Accomplishments," *Applied Catalysis A: General* 222.1-2 (2001): 3-18, Lawrence Berkeley National Laboratory number

3.LBNL-48555, <http://www.cchem.berkeley.edu/~gasgrp/2000.html> (publication 877).同时可参见Zhao,Lu,and Millar, "Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41, "Industrial & Engineering Chemistry Research 35 (1996) : 2075-90, http://cheed.nus.edu.sg/~chezxs/Zhao/publication/1996__2075.pdf.

145.美国国家电视系统委员会 (NTSC/NSET) 报道, National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan,July 2000, <http://www.nano.gov/html/res/nni2.pdf>.

146.Weixian Zhang,Chuan-Bao Wang,and Hsing-Lung Lien, "Treatment of Chlorinated Organic Contaminants with Nanoscale Bimetallic Particles, "Catalysis Today 40 (May 14, 1988) : 387-95.

147.R.Q.Long and R.T.Yang, "Carbon Nanotubes as Superior Sorbent for Dioxin Removal, "Journal of the American Chemical Society 123.9 (2001) : 2058-59.

148.Robert A.Freitas,Jr."Death Is an Outrage! "presented at the Fifth AlcorConference on Extreme Life Extension,Newport Beach,California,November 16, 2002, <http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>.

149.For example,the fifth annual BIOMEMS conference,June 2003, San Jose,<http://www.knowledgypress.com/events/11201717.htm>.

150.计划的4卷系列的前两卷: Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.I,Basic Capabilities (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999) ; Nanomedicine,vol.IIA,Biocompatibility (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 2003) ; <http://www.nanomedicine.com>.

151.Robert A.Freitas Jr., "Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell, "Artificial Cells,Blood Substitutes,and Immobilization Biotechnology 26 (1998) : 411-30, <http://www.foresight.org.Nanomedicine/Respirocytes.html>.

152.Robert A.Freitas Jr., "Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes

using Digest and Discharge Protocol, "Zyvex preprint, March 2001, <http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm>; Robert A. Freitas Jr., "Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes, "Foresight Update no.44, March 31, 2001, pp.11-13, <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>; see also microbivore images at the Nanomedicine Art Gallery, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Microbivo>

153. Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, vol. I, Basic Capabilities, section 9.4.2.5 "Nanomechanisms for Natation" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.309-12, <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.2.5.htm>.

154. George Whitesides, "Nanoinspiration: The Once and Future Nanomachine, "Scientific American 285.3 (September 16, 2001) : 78-83.

155. “根据爱因斯坦定量研究布朗运动的方法，室温下1秒钟过后，流体水分子平均扩散约50微米（约为40万个分子的直径），然而1微米的纳米机器人沉浸在相同的流体中的结果，在相同的时间段内，仅约为0.7微米（只约为0.7装置的直径）。因此，布朗运动对于能动的医学纳米机器人来说，至多是带来微小的航行错误。”参见K. Eric Drexler等, Many Future Nanomachines: A Rebuttal to Whitesides Assertion That Mechanical Molecular Assemblers Are Not Workable and Not a Concern, a Debate about Assemblers, Institute for Molecular Manufacturing, 2001, <http://www.imm.org/SciAmDebate2/whitesides.html>.

156. Tejal A. Desai, "MEMS-Based Technologies for Cellular Encapsulation, "American Journal of Drug Delivery 1.1 (2003) : 3-11, abstract available at <http://www.ingentaconnect.com/search/expand?pub=infobike://adis/add/2003/00000001/00000001/art00001>.

157. 引自 Douglas Hofstadter, Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid (New York: Basic Books, 1979)。

158. 作者经营一家名为 FATKAT (Financial Accelerating Transactions by Kurzweil Adaptive Technologies) 的公司，该公司将可计算的模式识别技术应用于金融数据并进行证券市场的决策。 <http://www.FatKat.com>.

159.参见第2章关于计算机存储和电子设备在性价比方面的改进。

160.逃逸AI是指一个场景，正如Max More所描述的：“超级智能机在开始的时候会给人们带来益处，但很快便会将人类甩在身后。”“我们要拥抱未来，而不是放弃。”网址为

<http://www.KurzweilAI.net/articles/art0106.html?printable=1>。还可见Damien Broderick关于“种子AI”的描述：“自我改进的种子AI在一个限制的机器基质中的运行效率很低。只要在一点具备了自我改进的能力，那么在一些方面将会突破结构性的平静，从而改进自身的硬件设计，甚至构建硬件（如果允许在加工厂中控制工具）。”Damien

Broderick, "Tearing Toward the Spike, "发表于"Australia at the Crossroads? Scenarios and Strategies for the Future"（2000年4月31到5月2日），由KurzweilAI.net 2001年5月7日，出版

<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0173.html>。

161.David Talbot, "Lord of the Robots, "Technology Review（April 2002）。

162.Heather Havenstein写道：“膨胀的观念大量产生于科幻小说中，用于描述人类与机器的聚合将玷污20世纪80年代的AI，因为AI被认为不具备那种潜力。”Heather Havenstein, "Spring comes to AI Winter: A

Thousand Applications Bloom in Medicine, Customer Service, Education and Manufacturing, "Computerworld, February 14, 2005,

<http://www.computerworld.com/softwaretopics/software/story/0,10801,99691,00.html>。这幅失去光泽的图像导致了“AI冬天”，定义为“该词由Richard Gabriel创造，用于描述在20世纪80年代AI的繁荣之后，（大约在1990~1994年）对于AI的语言Lisp和AI本身乐观高潮的崩溃，”Duane Rettig写道“...20世纪80年代早期很多公司依靠AI的繁荣，那时大公司们将数十亿美元投入到AI领域，并大肆宣传会思考的机器将在10年内出现。但是现实与宣传不相符时，AI的高潮崩溃了，Lisp随之崩溃，因为该语言与AI紧密相关。我们特指其为AI冬天。”引用自Duane Rettig的"AI Winter", <http://c2.com/cgi/wiki?AiWinter>。

163.The General Problem Solver（GPS）计算机程序编写于1957年，它能够通过规则解决问题，这些规则可以将一个问题的目标简化为若干个子目标，然后检查完成一个具体的子目标是否能够使GPS接近于解决整体目标。在20世纪60年代早期，Thomas Evan编写过ANAL-OGY，它是一

个能够通过A:B:C:? 的形式来解决几何图形相似性的程序, 该问题还用于IQ测试和学院的入学考试。"Boicho Kokinov和Robert M.French, "Computational Models of Analogy-Making, "in L.Nadel,ed., Encyclopedia of Cognitive Science,vol.1 (London: Nature Publishing Group, 2003) , pp.113-18.See also A.Newell,J.C.Shaw,and H.A.Simon, "Report on a General Problem-Solving Program, "Proceedings of the International Conference on Information Processing (Paris: UNESCO House, 1959) , pp.256-64; Thomas Evans, "A Heuristic Program to Solve Geometric-Analogy Problems, in M.Minsky,ed., Semantic Information Processing (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1968) .

164.Sir Arthur Conan Doyle, "The Red-Headed League, "1890, available at <http://www.eastoftheweb.com/shortstories/UBooks/RedHead.shtml>.

165.V.Yu et al., Antimicrobial Selection by a Computer: A Blinded Evaluation by Infectious Diseases Experts, JAMA 242.12 (1979) : 1279-82.

166.Gary H.Anthes, "Computerizing Common Sense, "Computerworld, April 8, 2002, <http://www.computerworld.com/news/2002/story/0,11280,69881,00.html>.

167.Kristen Philipkoski, "Now Heres a Really Big Idea, "Wired News,November 25, 2002, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,56374,00.html>,Darryl Macer, "The Next Challenge Is to Map the Human Mind, "Nature 420 (November 14, 2002) : 121; 关于该项目的描述可见<http://www.biol.tsukuba.ac.jp/~macer/index.html>.

168.Thomas Bayes, "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances", 出版于1763.他于1761年去世。

169.SpamBayes垃圾过滤, <http://spambayes.sourceforge.net>.

170.Lawrence R.Rabiner, "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition, "Proceedings of the IEEE 77 (1989) : 257-86.For a mathematical treatment of Markov models,<http://jedlik.phy.bme.hu/~gerjanos/HMM/node2.html>.

171.Kurzweil Applied Intelligence (KAI)，由作者成立于1982，1997年以1亿美元出售，现在是ScanSoft的一部分（以前称为Kurzweil Computer Products，是作者的第一家公司，早先在1980年出售给Xerox公司），现在是一家上市公司。KAI是1987年在商业上首次引入了大词汇量的语音识别系统（Kurzweil Voice Report，共有10万词汇量）。

172.以下是关于神经网络算法的基本框架。很多变量是可能的，系统的设计者需要提供确定的临界参数和方法，以下是相关细节。

创建一个问题的神经网络解决方案涉及以下步骤：

- 定义输入。
- 定义神经网络的拓扑结构（例如神经元的层次和神经元间的连接）。
- 根据问题的实例训练神经网络。
- 运行经过训练的神经网络，以解决该问题的新例子。
- 将你的神经网络在全局公开。

这些步骤（除最后一步）将在下文详细论述：

问题输入

输入神经网络的问题由一系列的数字构成。该输入可以是：

- 在一个可视化的模式识别系统中，一个数字二维矩阵代表一副图像的像素；
- 在一个听觉（如语音）识别系统中，一个数字二维矩阵代表声音，其中第一维度代表声音的参数（如频率分量），第二维代表时间上不同的点；
- 在一个任意的模式识别系统中，用一个n维的数字矩阵表达输入模式。定义拓扑结构建立神经网络，每个神经元的结构构成如下：
- 在多输入中，每个输入“连接”到另一个神经元的输出或者输入的一个数字。

- 通常，一个单独的输出（连接到另一个神经元的输入，这个神经元通常在较高的层次上），或者连接到最终的输出。

建立第一层神经元

- 在第一个层次上，创建 N_0 个神经元。对于每个神经元，“连接”神经元多输入中的每一个到问题输入中的“点”（如数字）。这些连接可以随机地选择或者使用进化算法（见下文）。

- 为每个创建的连接分配一个初始的“突触强度”。这些权重在开始时可以完全一致，也可以随机分配，还可以通过一种方式制定（见下文）。

建立额外的神经元层

建立总体的M层神经元。为每一层建立神经元。

对层次i:

- 在该层次上创建 N_i 个神经元。对于每个神经元，“连接”神经元多个输入中的每一项到i-1层神经元的输出（见下文的变量）。

- 为每个神经元赋予一个初始的“突触强度”。这些权重在开始时可以完全一致，也可以随机分配，还可以通过一种方式制定（见下文）。

- M层神经元的输出就是神经网络的输出（见下文的变量）。

识别实验

每个神经元是如何工作的

一旦建立神经元，每个识别实验需要完成以下工作：

- 每个输入到神经元的权重由其他神经元（或者初始输入）输出的乘积得到。这个神经元的输入将与连接的突触强度相关联。

- 所有的神经元输入的权重累加求和。

- 如果总和大于这个神经元的发射阈值，那么该神经元将会发射，其输出值为1。否则它的输出为0（见下文的变量）。

对每个识别实现需要完成以下工作：

对于每个层次（从初始层到M层）：

对于该层次上的每个神经元：

- 对它的输入求和（每个权值输入=其他神经元的输出（或初始的输入），该神经元的输入与连接相关联的突触强度的乘积）。
- 如果输入权重之和大于这个神经元的发射阈值，那么该神经元将会发射，该神经元其输出值为1。否则它的输出为0。

训练神经网络

- 在样本问题上重复运行识别实验。
- 在每次实验后，调整所有内部神经元连接的突触强度，以改进本次实验神经网络的性能（见下文关于如何实行这个策略的讨论）。
- 持续训练神经网络直到其准确性不再增加（如达到一条渐近线）。关键设计决策在以上简单的模式下，神经网络算法的设计者需要在初始阶段决定以下内容：
 - 输入的数字表示什么。
 - 神经元的层数。
 - 每一层上的神经元个数。（每一层上的神经元数量不一定都要相同。）
 - 每一层中每个神经元的输入数量。这个输入数量（如内部的神经元连接）可以彼此不同。
 - 实际的“线路”（如连接）。对于每一层上的每个神经元，这构成了每个神经元的列表，其输出构成了这个神经元输入。这代表了一个关键的设计领域。可以通过以下方法完成该任务：

1) 随机连接神经网络；

2) 通过进化算法（见下文）来确定一个优化的连接；

3) 根据系统设计者的判断来确定连接；

●每个连接初始的突触强度（如权重）。有很多方法可以完成这个工作：

1) 为所有连接设定相同的突触强度；

2) 为不同的连接设定随机不同的突触强度；

3) 通过进化算法确定最优的初始值；

4) 根据系统设计者的最优判断来决定初始值。

●每个神经元的激发阈值

●输出。输出可以是：

1) M层神经的输出；

2) 一个单独的输出神经元的输出，输入时M层神经元的输出；

3) M层所有神经元的输出的一个功能；

4) 在多层次上神经元输出的另一个功能。

●在神经网络的训练阶段，所有连接的突触强度是如何调整的。这是一个关键的设计决策，它涉及大量研究和讨论的主题。有很多合理的方法完成这个工作：

1) 对于每个识别实验，每个突触强度的增加或减少一个固定的量（通常很小），以便于神经网络的输出与正确答案接近。一种方法是尝试增加和减少，然后看哪种结果与所期望更相符。这是非常耗时的，其他方法用于局部决策每个突触强度是增加还是减少。

2) 在每次识别实验后，其他统计方法用于修改突触强度，使得实验中神经网络的性能更接近于正确答案。

请注意，即便训练实验并不完全正确，但是神经网络的训练依然有效。这允许使用现实世界中的训练数据，而这些数据有可能存在错误。基于神经网络识别系统成功的关键在于大量用于训练的数据。通常需要一个合适的量值以获取满意的结果。就好像学生一样，一个神经网络花在学习课程上的时间是决定其性能的一个关键因素。

变量

以上的很多变量都是柔性的：

- 有很多决定拓扑结构的方法。特别是内部的神经连接既能够随机设置，又能够应用进化算法。
- 有一些不同方法设定突触强度的初值。
- 一层上的神经元输入并不一定来自 $i-1$ 层的输出，还可以来自其他较低的层次或其他层次。
- 有很多不同方法决定最终的输出。
- 以上描述的方法导致了“全或无”（1或0）的激活，这是非线性的。还有其他非线性的功能可以使用。通常一个功能以快速而非渐进的方式由0变为1。同样，输出的数字还可以是0和1以外的其他数字。
- 在训练描述关键设计的决策期间，可以使用不同方法调节突出强度。

以上模式描述了一种“同步”的神经网络，其中每个识别实验通过计算每个层次的输出实施，始于一个层次并贯穿到M层。在一个真实的并行系统中，每个神经元的操作都是独立于其他操作的，神经元操作可以是“异步的”（独立的）。在一个异步策略中，每个神经元不断地扫描其输入，当权重输入超过阈值时发射（或当它的功能被指定）。

173.见第4章关于大脑逆向工程的详细讨论。作为前进的一个实例，S.J.Thorpe写道：“我们才刚刚开始从事这个长期的项目，这个项目旨在逆向工程灵长类动物的视觉系统。目前我们只探索了一些简单的结构，只涉及前馈结构和较少数量的层次.....在未来的几年里，我们将努力尽可能多地吸收灵长类和人类视觉系统大的计算技巧。更简要地说，它似乎才满足强化的神经元策略，开发一个成熟的可以实时模拟大量神经网络

络系统将是非常有可能的。”Proceedings of the IEEE 2000 International Symposium on Circuits and Systems IV (IEEE Press), pp.405-8, <http://www.sccn.ucsd.edu/~arno/mypapers/thorpe.pdf>。

174.T.Schoenauer等写道：“在过去的几年里，人们设计了多用多样的人工神经网络硬件.....现在我们可以更广泛的范围内选择神经网络的硬件。结构策略的设计是不同的，类神经芯片、加速器板，以及多板神经计算机，还有关注系统的设计，如ANN算法和系统的多功能性.....数字神经元硬件可以根据以下方式划分：系统结构、并行程度、每个处理器典型神经网络的划分、内部处理器通信网络和数值表示。”Proc.Neuronale Netze in der Anwendung——Neural Networks in Applications NN98, Magdeburg,invited paper (February 1998) : 101-6, <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/People/kcamera/neural/papers/schoenauer98di> 另见Yihua Liao, "Neural Networks in Hardware: A Survey" (2001), <http://ailab.das.ucdavis.edu/~yihua/research/NNhardware.pdf>。

175.以下是基因（进化）算法的基本模式。很多变量是合理的，并且系统的设计需要提供确定的临界参数和方法，细节如下。

计算算法

创建N个解决方案的“创作物”。每个创作物如下：

- 一段基因代码：一个数字序列，可以用于描述一个问题的解决方案。数字可以表示临界的册数、解决方案的步骤、规则等。

每一代进化都会做以下工作：

- 以下为每个解决方案创作物所做的工作：

- 1) 将解决方案创作物（由基因代码表示）应用于问题或模拟的环境。

- 2) 为方案打分。

- 选择L个分数最高的解决方案的创作物用于下一代实验。

- 去除其他（N-L）个解决方案创作物。

- 根据L个解决方案，创造（N-L）个新的解决方案，方法如下：

- 1) 制造L个创造物的副本。为每个副本引入随机变量；
- 2) 通过融合部分基因代码（使用“有性”繁殖或其他染色体合成蛋白质的方法），从L个创造物中创造额外的解决方案创造物；
- 3) 将1) 和2) 合并。

- 确定能否持续进化：

改进=（这一代进化的最高评分）-（前一代进化的最高评分）。

If改进<改进阈值， then完成。

- 具有最高评分的解决方案创造物来源于进化的最后一代，它具有最优的解决方案。将基因代码定义的解决方案应用于问题中。

关键设计决策

在以上的简单模式中，设计者需要确定一个开端：

- 关键参数：

N

L

- 该技能阈值

- 基因代码中的数字表示含义，以及如何由基因代码计算获得解决方案的方法。

- 确定第一代N个解决方案创造物的方法。通常一个解决方案只需要一个“合理”的尝试。如果这些第一代的解决方案偏离较远，那么评测算法将很难收敛以得到好的解决方案。通常情况下创造一个初始的解决方案创造物应多一些变化。这将帮助进化过程仅仅找到“局部”最优解。

- 如何给解决方案评分。

- 如何复制继续存在的解决方案。

变量

以上的很多变量都是可行的。例如：

- 每一代不需要固定数量的解决方案生物（L）。幸存规则能够允许可变数量的可继续生存的解决方案。
- 不要求每一代（N-L）创造的新的解决方案生物的数量是一致的。生产规则独立于总体数量。生产与幸存的解决方案相关，从而允许最适合的解决方案造物得到最多的繁殖。
- 关于能否继续进化的决策可以是变化的。不仅考虑到源于最近一代中最高评分的解决方案造物。还需考虑除最近两代以外的趋势。

176.Sam Williams, "When Machines Breed, "August 12, 2004,
http://www.salon.com/tech/feature/2004/08/12/evolvable__hardware/index__np.html.

177.以下是一个递归搜索的一个基础模式（算法描述），该模式具有很多变量，系统的设计者需要提供给确定的临界参数和方法，以下是相关细节。

递归算法

定义一个函数（程序）"Pick Best Next Step"。该函数返回值为"SUCCESS"（我们已经解决了该问题）或者"FAILURE"（我们无法解决该问题）。如果返回的值为SUCCESS，那么该函数还返回解决该问题的步骤序列。

PICK BESTNEXT STEP函数根据以下步骤完成：

- 决定程序能否在该点继续递归。有三种方式处理逃逸决策。

首先，判定问题现在是否已经解决。既然调用Pick Best Next Step的程序很有可能就是它本身，那么我们可能已经具有了满意的解决方案。实例如下：

- 1) 在一个游戏（例如象棋）的上下文中，最后一步可以使我们获胜（如将死）。

2) 在解决数学定理的上下文中，最后一步证明了该定理。

3) 在艺术程序的上下文中（例如计算机诗人或作曲家），最后一步是为下一个字或音调匹配目标。

如果问题得到满意的解答，那么程序返回的值为SUCCESS，以及返回成功解决该问题的步骤序列。

如果这一问题不能解决，那么就无法确定解决方案是否有效。例如：

1) 在游戏中（例如国际象棋），这样的移动将使我们失败（被对方将死）。

2) 在解决数学定理的过程中，这一步将违反定理。

3) 在文学创作的过程中，这一步将妨害下一个词或下一段文字所表达的含义。

如果在该方面的解决方案被认为是不成功的，那么程序将返回"FAILURE"。

●如果问题既没有解决，在递归扩展中又没有成功，需要决定是否将放弃这种扩展。这是设计的一个重要方面，需要考虑计算机所需时间总量的限制。实例如下：

1) 在游戏（如象棋）的上下文中，移动将使我们的侧面“提前”或“退后”。这一决定可能并不直白，同时也是最主要的设计决策。尽管如此，简单的策略（例如对零碎的值求和）将提供好的结果。如果程序决定了我们的侧面是充分提前的，那么我们的侧面将会胜出（值为"SUCCESS"）。如果程序决定了我们的侧面是充分落后的，那么Pick Best Next Step程序将会以相似的方式返回一个我们的侧面失败的结论（值为"FAILURE"）。

2) 在解决数学定理的上下文中，这一步涉及证据中的步骤序列是否不可能产生一个证据。如果是这样，那么这条路将被放弃，并且Pick Best Next Step将以相似的方式返回一个判断，以断定这一步是否违反了定理（值为"FAILURE"）。没有“柔性”的等价成功。当我们切实解决问题时，才能够返回"SUCCESS"。这便是数学的本质。

3) 在艺术化的程序的上下文中（如计算机诗人或作曲家），该步骤涉及决定该序列（如诗中的词和歌中的音调）是否不能满足下一步的目标。如果无法满足则放弃路径，Pick Best Next Step以相似的方式返回一个判断，这一步骤妨碍了下一步的目标（值为"FAILURE"）。

●如果Pick Best Next Step没有返回值（因为程序既没有成功，也没有失败，没有做出该路径是否该抛弃的一个判断），那么我们还不能从递归扩展中结束。在这种情况下，我们会生成一个关于下一步的清单。以下是关于该问题的一个准确阐述：

1) 在一个游戏（如象棋）的上下文中，涉及在当前的棋盘状态下为“我们的”侧面生成所有可能的移动。这涉及直接的游戏规则的编写。

2) 在为数学定理找证据的上下文中，涉及可能的公理或之前证明过的定理，它们均可应用于该解决方案中。

3) 在一个控制论艺术程序的上下文中，可能涉及使用词语/音符/路线来分割。

对于下一步的每一种可能：

1) 创造假设情况，该步骤如能顺利实施则该情况就是存在的。在一个游戏中，这意味着期盼的假设状态。在数学证明中，这意味着增加了证明的步骤（如公理）。在艺术程序中，这意味着增加了词语/音符/路线的分割。

2) 现在调用Pick Best Next Step来检测假设的情形。当然这是递归的结果，因为程序调用了自身。

3) 如果调用Pick Best Next Step的返回结果是"SUCCESS"，那么Pick Best Next Step的返回值也是"SUCCESS"。否则考虑下一个的可能步骤。

如果所有可能的下一步均没有找到调用Pick Best Next Step的返回值为"SUCCESS"，那么调用Pick Best Next Step函数的返回值为"FAILURE"。

Pick Best Next Step的结束

如果初始调用Pick Best Next Step函数返回值为"SUCCESS"，那么它还将

返回一个正确的步骤序列：

- 1) 在游戏的上下文中，序列的第一步是你应当做出的下一个移动。
- 2) 在数学证明的上下文中，全部的序列步骤便是证据。
- 3) 在一个控制论艺术程序的上下文中，步骤序列就是你的作品。

如果初始调用Pick Best Next Step返回值为"FAILURE"，那么你需要返回画板。

关键设计决策

在以上的简单模式中，递归算法的设计者需要判断以下内容：

- 递归算法的关键是判断Pick Best Next Step合适放弃递归扩张。当程序成功（例如象棋中的将死，或数学中的必要条件，或是组合问题）或失败时这将是简单的。当状态并非清晰地成功或失败时，情况将变得很困难。在完整定义输出之前放弃查询是很有必要的，因为程序有可能运行了几十亿年（或者至少你的计算机资源将耗尽）。
- 递归算法其他的主要需求是直接编辑问题。在象棋游戏中这很容易。但是在其他情况中，问题的清晰定义通常并不容易。

178.见Kurzweil CyberArt,<http://www.KurzweilCyberArt.com>。关于Ray Kurzweils Cybernetic Poet的进一步描述，并且可以下载这个程序的免费版本。见美国专利No.6647 395, "Poet Personalities,"发明者: Ray Kurzweil and John Keklak。摘要：“创造一个诗人的方法，包括读诗，每首诗包括文本，生成分析模型，每个分析模型代表一首诗并在个性化的数据结构中存储分析模型。个性化的数据结构进一步包含权重，每个权重与一个分析模型关联。权重包含整数值。”

179.Ben Goertzel: The Structure of Intelligence (New York: Springer-Verlag, 1993); The Evolving Mind (Gordon and Breach, 1993); Chaotic Logic (Plenum, 1994); From Complexity to Creativity (Plenum, 1997).For a link to Ben Goertzels books and essays,see <http://www.goertzel.org/work.html>.

180.KurzweilAI.net (<http://www.KurzweilAI.net>) 提供了100名大思想

家的百余篇文章，并且描述了“加速智能”的特征。该网站提供了涉及本书内容的免费的日通信或周通信，可在首页通过输入你的电子邮件地址（不会将你的邮件地址分享给他人）来订阅。

181. John Gosney, Business Communications Company, Artificial Intelligence: Burgeoning Applications in Industry, June 2003, <http://www.bccresearch.com/comm/G275.html>.

182. Kathleen Melymuka, "Good Morning, Dave.....", Computerworld; November 11, 2002, <http://www.computerworld.com/industrytopics/defense/story/0,10801,75728,00.html>.

183. JTRS Technology Awareness Bulletin, August 2004, http://jtrs.army.mil/sections/technicalinformation/fset__technical.html?tech__aware__2004-8.

184. Otis Port, Michael Arndt, and John Carey, "Smart Tools", Spring 2003, <http://www.businessweek.com/bw50/content/mar2003/a3826072.htm>.

185. Wade Roush, "Immobots Take Control: From Photo Copiers to Space Probes, Machines Injected with Robotic Self-Awareness Are Reliable Problem Solvers", Technology Review (December 2002-January 2003), <http://www.occm.de/roush1202.pdf>.

186. Jason Lohn quoted in NASA news release "NASA 'Evolutionary' Software Automatically Designs Antenna", http://www.nasa.gov/lb/centers/ames/news/releases/2004/04__55AR.html.

187. Robert Roy Britt, "Automatic Astronomy: New Robotic Teles Copes See and Think", June 4, 2003, http://www.space.com/business/technology/technology/automated__astronomy__030604.html.

188. H. Keith Melton, "Spies in the Digital Age", <http://www.cnn.com/SPECIALS/cold.war/experience/spies/melton.e>

189.“United Therapeutics (UT) 是一家生物科技公司，为生命危急情况提供慢性治疗，治疗领域包括：心血管、肿瘤以及传染病” (<http://www.unither.com>) .Kurzweil Technologies与UT合作开发基于模式识别分析系统，如"Holter"监视装置（24小时记录）或"Event"监视装置（30天或30天以上记录）。

190.Kristen Philipkoski, "A Map That Maps Gene Functions, "Wired News,May 28, 2002, <http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,52723,00.html>.

191.Jennifer Ouellette, "Bioinformatics Moves into the Mainstream, "The Industrial Physicist (October-November 2003) , <http://www.sciencemasters.com/bioinformatics.pdf>.

192.Port,Arndt,and Carey, "Smart Tools."

193."Protein Patterns in Blood May Predict Prostate Cancer Diagnosis, "National Cancer Institute,October 15, 2002, <http://www.nci.nih.gov/newscenter/ProstateProteomics>,reporting on Emanuel F.Petricoin et al., "Serum Proteomic Patterns for Detection of Prostate Cancer, "Journal of the National Cancer Institute 94 (2002) : 1576-78.

194.Charlene Laino, "New Blood Test Spots Cancer, "December 13, 2002, <http://my.webmd.com/content/Article/56/65831.htm>; Emanuel F.Petricoin III et al., "Use of Proteomic Patterns in Serum to Identify Ovarian Cancer, "Lancet 359.9306 (February 16, 2002) : 572-77.

195.For information of TriPaths FocalPoint,see"Make a Diagnosis, "Wired,October 2003, <http://www.wired.com/wired/archive/10.03/everywhere.html?pg=5>.Mark Hagland, "DoctorsOrders, "January 2003, http://www.healthcareinformatics.com/issues/2003/01__03/cpoe.htm.

196.Ross D.King et al., "Functional Genomic Hypothesis Generation and Experimentation by a Robot Scientist, "Nature 427 (January 15, 2004) : 247-52.

197.Port,Arndt,and Carey, "Smart Tools."

198."Future Route Releases AI-Based Fraud Detection Product, "August 18, 2004, <http://www.finextra.com/fullstory.asp?id=12365>.

199.John Hackett, "Computers Are Learning the Business, "CollectionsWorld, April 24, 2001, http://www.creditcollectionsworld.com/news/042401__2.htm.

200."Innovative Use of Artificial Intelligence,Monitoring NASDAQ for Potential Insider Trading and Fraud, "AAAI press release,July 30, 2003, <http://www.aaai.org/Pressroom/Releases/release-03-0730.html>.

201."Adaptive Learning,Fly the Brainy Skies, "Wired News,March 2002, <http://www.wired.com/wired/rchive/10.03/everywhere.html?pg=2>.

202."Introduction to Artificial Intelligence, "EL 629, Maxwell Air Force Base,Air University Library course,<http://www.au.af.mil/au/aul/school/acsc/ai02.htm>.Sam Williams, "Computer,Heal Thyself, "Salon.com,July 12, 2004, http://www.salon.com/tech/feature/2004/07/12/self__healing__computing/index__np.html.

203.参见<http://www.Seegrid.com>。信息披露：作者是Seegrid的投资者和董事会的理事。

204.No Hands Across America Web site,<http://cart.frc.ri.cmu.edu/users/hpm/project.archive/reference.file/nhaa.h> Mellon Researchers Will Prove Autonomous Driving Technologies During a 3, 000 Mile,Hands-off-the-Wheel Trip from Pittsburgh to San Diego, "Carnegie Mellon press release,http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs/user/tjochem/www/nhaa/official__press__release.html; Robert J.Derocher, "Almost Human, "September 2001, <http://www.insightmag.com/insight/01/09/col-2-pt-1-ClickCulture.htm>.

205."Search and Rescue Robots, "Associated Press,September 3, 2004, <http://www.smh.com.au/articles/2004/09/02/1093939058792.html?oneclick=true>.

206."From Factoids to Facts, "Economist, August 26, 2004,
http://www.economist.com/science/displayStory.cfm? story__id=3127462.

207. Joe McCool, "Voice Recognition, It Pays to Talk, "May 2003,
<http://www.bcs.org/BCS/Products/Publications/JournalsAndMagazines/Con Cognition.htm>.

208. John Gartner, "Finally a Car That Talks Back, "Wired News, September 2, 2004, http://www.wired.com/news/autotech/0, 2554, 64809, 00.html? tw=wn__14techhead.

209."Computer Language Translation System Romances the Rosetta Stone, "Information Sciences Institute, USC School of Engineering (July 24, 2003) , <http://www.usc.edu/isinews/stories/102.html>.

210. Torsten Reil quoted in Steven Johnson, "Darwin in a Box, "Discover 24.8 (August 2003) , <http://www.discover.com/issues/aug-03/departments/feattech/>.

211."Let Software Catch the Game for You, "July 3, 2004,
<http://www.newscientist.com/news/news.jsp? id=ns99996097>.

212. Michelle Delio, "Breeding Race Cars to Win, "Wired News, June 18, 2004, <http://www.wired.com/news/autotech/0, 2554, 63900, 00.html>.

213. Marvin Minsky, The Society of Mind (New York: Simon & Schuster, 1988) .

214. Hans Moravec, "When Will Computer Hardware Match the Human Brain? "Journal of Evolution and Technology 1 (1998) .

215. Ray Kurzweil, The Age of Spiritual Machines (New York: Viking, 1999) , p.156.

216. 请见第2章的注释22和23, 关于International Technology Roadmap for Semiconductors。

217."The First Turing Test, "<http://www.loebner.net/Prizef/loebnerprize.html>.

218.Douglas R.Hofstadter, "A Coffeehouse Conversation on the Turing Test, "May 1981, included in Ray Kurzweil,The Age of Intelligent Machines (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1990) , pp.80-102,
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0318.html>.

219.Ray Kurzweil, "Why I Think I Will Win, "and Mitch Kapor, "Why I Think I Will Win, "规则如下:

<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0373.html>; Kapor:

<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0412.html>; Kurzweil:

<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0374.html>; Kurzweilfinal word:

[http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html? main=/articles/art0413.html](http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0413.html).

220.Edward A.Feigenbaum, "Some Challenges and Grand Challenges for Computational Intelligence, "Journal of the Association for Computing Machinery 50 (January 2003) : 32-40.

221.根据真核生物进化的连续共生理论, 线粒体的祖先(细胞中的一种结构体, 用于产生能量, 其遗传代码由人类的13个基因构成)是独立的细菌(不是细胞的一部分), 与现在的弹跳菌非常相似。“连续共生理论”请见

<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Serial%20endosymbiosis%20the>

第6章 影响的盛装

1.Donovan, "Season of the Witch, "Sunshine Superman (1966) .

2.农业劳动力的减少有很多原因, 包括机械化减少了人力和物力, 在第二次世界大战期间, 城市中创造了很多经济机会, 密集农业技术的发展需要较少的土地, 根据U.S.Department of Agriculture和National Agricultural Statistics Service发布的Trends in U.S.Agriculture。

<http://www.usda.gov/nass/pubs/trends/farmpopulation.htm>。计算机辅助生产、实时生产（降低存货）和外包生产减少了花销和工厂的就业职位。请见U.S.Department of Labor,Futurework: Trends and Challenges of Work in the 21st Century,<http://www.dol.gov/asp/programs/history/herman/reports/futurewor>

3.例子请见Natasha Vita-More, "The New[Human]Genre Primo[First]Posthuman, "论文发表于Ciber@RT Conference,Bilbao,Spain,April 2004, <http://www.natasha.cc/paper.htm>。

4.Rashid Bashir在2004作了如下总结:

在微技术和纳米技术的治疗应用方面取得了巨大的进步，一些具体的实例包括：1) 基于硅材料的可移植的设备，该设备可以用电力驱动打开孔口，并将预先填入的药物通过孔口释放；2) 硅设备可以利用电驱动的聚合物作为阀和肌肉以释放预先填入的药物；3) 基于硅和微胶囊的多孔膜以释放胰岛素；4) 所有的聚合物（或水凝胶）粒子可以释放药物，然后使其在特定的环境中显露，环境包括PH的改变、药品的释放；5) 金属纳米粒子被识别蛋白所覆盖，其上的粒子可以由外部的光能加热，并破坏有害的细胞和组织。

R.Bashir, "BioMEMS: State-of-the-Art in Detection,Opportunities and Prospects, "Advanced Drug Delivery Reviews 56.11 (September 22, 2004) : 1565-86。请见以下网址: <https://engineering.purdue.edu/LIB-NA/pdf/publications/BioMEMS%20review%20ADDR%20finl.pdf>。请见Richard Grayson等, "A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices, "IEEE Proceedings 92 (2004) : 6-21。

5.关于International Society for BioMEMS and Biomedical Nanotechnology的活动，请见<http://www.bme.ohio-state.edu/isb>.BioMEMS conferences are also listed on the SPIE Web site,<http://www.spie.org/Conferences>。

6.研究人员使用黄金纳米颗粒监测糖尿病患者的血糖。Y.Xiao et al., "Plugging into Enzymes': Nanowiring of Redox Enzymes by a Gold Nanoparticle, "Science 299.5614 (March 21, 2003) : 1877-81.Also see T.A.Desai et al., "Abstract Nanoporous Microsystems for Islet Cell Replacement, "Advanced Drug Delivery Reviews 56.11 (September 22,

2004) : 1661-73.

7.A.Grayson,et al., "Multipulse Drug Delivery from a Resorbable Polymeric Microchip Device, "Nature Materials 2 (2003) : 767-72.

8.Q.Bai and K.D.Wise, "Single-Unit Neural Recording with Active Microelectrode Arrays, "IEEE Transactions on Biomedical Engineering 48.8 (August 2001) : 911-20.有关Wise在J.DeGaspari工作的

讨论请见"Tiny,Tuned,and Unattached, "Mechanical Engineering (July 2001) ,

<http://www.memagazine.org/backissues/july01/features/tinytune/tinytune.ht>

K.D.Wise, "Thecoming Revolution in Wireless Integrated MicroSystems, "Digest International Sensor Conference 2001 (Invited Plenary) , Seoul,October 2001.Online version (January 13, 2004) : <http://www.stanford.edu/class/ee392s/Stanford392S-kw.pdf>.

9."Microbots' Hunt Down Disease, "BBC News,June 13, 2001, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/health/1386440.stm>.基于圆柱磁体的微机器请见K.Ishiyama,M.Sendoh,and K.I.Arai, "Magnetic Micromachines for Medical Applications, "Journal of Magnetism and Magnetic Materials 242-45, part 1 (April 2002) : 41-46.

10.请见Sandia National Laboratories press release, Pac-Man-Like Microstructure Interacts with Red Blood Cells, August 15, 2001, <http://www.sandia.gov/medialNewsRel/NR2001/gobbler.htm>.关于回应工业贸易的文章请见D.Wilson, "Microteeth Have a Big Bite, "August 17, 2001, http://www.e4engineering.com/item.asp?ch=e4__home&type=Features&id=42543.

11.参见Freitas的书Nanomedicine,vol.1, Basic Capabilities (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999) , 以及 Nanomedicine,vol.2A,Biocompatibility (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 2003) , 两者可在以下网址找到: <http://www.nanomedicine.com>。请见Foresight Institute关于“纳米药物”的页面, 由Robert Freitas撰写, 该文章罗列了当前的科技工作 (<http://www.foresight.org/Nanomedicine/index.html#MedNanoBots>) 。

12.Robert A.Freitas Jr., "Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell, "Artificial Cells,Blood Substitutes,and Immobilization Biotechnology 26 (1998) : 41130,
<http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>.

13.Robert A.Freitas Jr., "Clottocytes: Artificial Mechanical Platelets, "Foresight Update no.41, June 30, 2000, pp.911,
<http://www.imm.org/Reports/Rep018.html>.

14.Robert A.Freitas Jr., "Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes, "Foresight Update no.44, March 31, 2001, pp.1113,
<http://www.imm.org/Reports/Rep025.html> or
<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main==/articles/art0453.html>.

15.Robert A.Freitas Jr., "The Vasculoid Personal Appliance, "Foresight Update no.48, March 31, 2002, pp.10-12,
<http://www.imm.org/Reports/Rep031.html>; 全文请见: Robert A.Freitas Jr.and Christopher J.Phoenix, "Vasculoid: A Personal Nanomedical Appliance to Replace Human Blood, "Journal of Evolution and Technology 11 (April 2002) , <http://www.jetpress.org/volume11/vasculoid.html>.

16.Carlo Montemagno,George Bachand, "Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors, "Nanotechnology 10 (September 1999) : 225-31; "Biofuel Cell Runs on Metabolic Energy to Power Medical Implants, "Nature online,Nov.12, 2002,
<http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>,reporting on N.Mano,F.Mao,and A.Heller, "A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer, "Journal of the American Chemical Society 124 (2002) : 12962-63; Carlo Montemagno et al., "Self-Assembled Microdevices Driven by Muscle, "Nature Materials 4.2 (February 2005) : 180-84, published electronically (January 16, 2005) .

17.请从Lawrence Livermore National Laboratory的网站 (<http://www.llnl.gov>) 获得有关创新精神的更新信息。Medtronic MiniMed的网址如下: <http://www.minimed.com/corpinfo/index.shtml>。

18.大脑对大脑直接的交流看起来更像是好莱坞电影的情节, 而非政府

报告，但这确实是来自U.S.National Science Foundation and Department of Commerce的报告。"G.Brumfiel, "Futurists Predict Body Swaps for Planet Hops, Nature 418 (July 25, 2002) : 359。

深入刺激人脑（通过来自嵌入式电子的电流影响人脑的功能）是美国食品和药物管理局（FDA）允许的治疗帕金森病和测试神经紊乱的疗法。请见AI Abbott, Brain Implants Show Promise Against Obsessive Disorder, "Nature 419 (October 17, 2002) : 658, and B.Nuttin et al., "Electrical Stimulation in Anterior Limbs of Internal Capsules in Patients with Obsessive-Compulsive Disorder, Lancet 354.9189 (October 30, 1999) : 1526.

19.请见Retinal Implant Project的网址

（<http://www.bostonretinalimplant.org>），其中包含了近年来发表的论文。其中一篇论文是R.J.Jensen et al., Thresholds for Activation of Rabbit Retinal Ganglion Cells with an Ultrafine, Extracellular Microelectrode, Investigative Ophthalmology and Visual Science 44.8 (August 2003) : 3533-43.

20.1997年，FDA允许Medtronic公司在大脑中的一侧注入，在2002年1月14日允许在大脑中的两侧注入。S.Snider, "FDA Approves Expanded Use of Brain Implant for Parkinsons Disease, "U.S.Food and Drug Administration,FDA Talk Paper,January 14, 2002, <http://www.fda.gov/bbs/topics/AN-SWERS/2002/ANS01130.html>。最近的版本提供的是来自外部患者的软件更新。

21.Medtronic公司还向中风的大脑中注射，请见S.Hart, "Brain Implant Quells Tremors, "ABC News,December 23, 1997, <http://nasw.org/users/hart/subhtml/abcnews.html>，也可见Medtronic的网站，<http://www.medtronic.com>。

22.Gunther Zeck and Peter Fromherz, Noninvasive Neuroelectronic Interfacing with Synaptically Connected Snail Neurons Immobilized on a Semiconductor Chip, Proceedings of the National Academy of Sciences 98.18 (August 28, 2001) : 10457-62.

23.请见R.Colin Johnson, "Scientists Activate Neurons with Quantum Dots, "EE Times,December 4, 2001,

<http://www.eetimes.com/story/OEG20011204S0068>.量子点可以用于想象, 请见M.Dahan et al., "Diffusion Dynamics of Glycine Receptors Revealed by Single-Quantum Dot Tracking, "Science 302.5644 (October 17, 2003) : 442-45; J.K.Jaiswal and S.M.Simon, "Potentials and Pitfalls of Fluorescent Quantum Dots for Biological Imaging, "Trends in Cell Biology 14.9 (September 2004) : 497-504.

24.S.Shoham et al., "Motor-Cortical Activity in Tetraplegics, "Nature 413.6858 (October 25, 2001) : 793.For the University of Utah news release,See "An Early Step Toward Helping the Paralyzed Walk, "October 24, 2001, <http://www.utah.edu/news/releases/01/oct/spinal.html>.

25.史蒂芬·霍金的备注, Focus将其误译, 引用于Nick Paton Walsh, "Alter Our DNA or Robots Will Take Over,Warns Hawking, "Observer,September 2, 2001, http://observer.guardian.co.uk/uk_news/story/0,6903,545653,00.html.广泛的错误报道暗示, 霍金在反对发展比人小的机器智能。事实上, 他主张我们加速接近生物智能与非生物智能的连接。霍金为 KurzweilAI.net提供了准确的证据 ("Hawking Misquoted on Computers Taking Over, "September 13, 2001, http://www.KurzweilAI.net/news/frame.html?main=news__single.html?id%3D495) 。

26.见第1章注释34。

27.一个例子, Nomad for Military Applications, 由Microvision制造, 一个在华盛顿的博塞尔的公司。参见 <http://www.microvision.com/nomadmilitary/index.html>。

28.Olga Kharif, "Your Lapel Is Ringing, "Business Week,June 21, 2004.

29.Laila Weir, "High-Tech Hearing Bypasses Ears, "Wired News,September 16, 2004, http://www.wired.com/news/technology/0,1282,64963,00.html?tw=wn_tophead_4.

30.超音速技术, http://www.atcsd.com/tl_hss.html; 听觉聚光, <http://www.holosonics.com/technology.html>.

31. Phillip F. Schewe, Ben Stein, American Institute of Physics Bulletin of Physics News 236 (August 7, 1995), <http://www.aip.org/enews/physnews/1995/physnews.236.htm>. 也可见 R. Weis and P. Fromherz, "Frequency Dependent Signal-Transfer in Neuron-Transistors," *Physical Review E* 55 (1997): 877-89.

32. 见本章注释18。也可见 J. O. Winter et al., "Recognition Molecule Directed Interfacing Between Semiconductor Quantum Dots and Nerve Cells," *Advanced Materials* 13 (November 2001): 1673-77; I. Willner, B. Willner, "Biomaterials Integrated with Electronic Elements: En Route to Bioelectronics," *Trends in Biotechnology* 19 (June 2001): 222-30; Deborah A. Fitzgerald, "Bridging the Gap with Bioelectronics," *Scientist* 16.6 (March 18, 2002): 38.

33. Robert Freitas 提供了这一情况的分析: Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine, vol.1, Basic Capabilities*, 7.4.5.4 节, "Cell Message Modification" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.194-96, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.4.htm#p5>, 以及 7.4.5.6 节, "Outmessaging to Neurons," pp.196-97, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.6.htm#p2>.

34. 为描述 Ramona 工程, 在 TED 大会上的虚拟现实展示视频, 以及幕后 "Making of Ramona" 视频, 见 "All About Ramona," <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?m=9>.

35. I. Fried et al., "Electric Current Stimulates Laughter," *Nature* 391.6668 (February, 12, 1998): 650. See Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (New York: Viking, 1999).

36. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine, vol.1, Basic Capabilities, section 7.3, "Communication Networks"* (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 1999), pp.186-88, <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.

37. Allen Kurzweil, *The Grandcomplication: A Novel* (New York: Hyperion, 2002); Allen Kurzweil, *A Case of Curiosities* (New York: Harvest Books, 2001). Allen Kurzweil is my first cousin.

38. 如在 Aubrey de Grey 引用的, "Engineering Negligible Senescence:

Rational Design of Feasible,comprehensive Rejuvenation
Biotechnology, "Kronos Institute Seminar Series, 2002年2月8日.Power-
Point演示在<http://www.gen.cam.ac.uk/sens/sensov.ppt>.

39.Robert A.Freitas Jr., "Death Is an Outrage! "在第五次Alcor Conference
on Extreme Life Extension,Newport Beach上展示, Calif., November 16,
2002, <http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>, 在
KurzweilAI.net 2003年一月9号出版:
<http://www.KurzweilAI.net/articles/art0536.html>.

40.Cromagnon, "30 years or less,often much less.....":
http://anthro.palomar.edu/homo2/sapiens__culture.htm.Egypt: Jac
J.Janssen quoted in Brett Palmer, "Playing the Numbers Game, "in
Skeptical Review,published online May 5, 2004, at
<http://www.theskepticalreview.com/palmer/numbers.html>.

Europe 1400: Gregory Clark,The Conquest of Nature: A Brief Economic
History of the World (Princeton University Press,forth Coming, 2005) ,
chapter 5, "Mortality in the Malthusian
Era, "<http://www.econ.ucdavis.edu/faculty/gclark/GlobalHistory/Global%205.pdf>.

1800: James Riley,Rising Life Expectancy: A Global
History (Cambridge,U.K.: Cambridge University Press, 2001) , pp.32-
33.1900: <http://www.cdc.gov/nchs/datalhus/tables/2003/03hus027.pdf>.

41.这个博物馆最开始坐落在Boston, 现在在Mountain View,Calif。
(<http://www.computerhistory.org>) 。

42.Lyman与Kahle关于长期存储: “一张好的纸有500年的寿命, 计算机
磁带有10年的寿命。当有一些活跃的组织可以做复制, 我们将可以保持
信息安全, 我们没有一个有效的技术来做500年的数字复制.....”Peter
Lyman和Brewster Kahle, "Archiving Digital Cultural Artifacts:
Organizing an Agenda for Action, "D-Lib Magazine, 1998年7月~8月。
Stewart Brand写道: “在热门新电脑之后, 是一路的过时电脑、过时存储
介质、过时应用、过时文件的尸体。科幻小说家Bruce Sterling认为我们
的时代是‘死亡介质的黄金时代, 它们中的大多数的工作寿命都只是一
瞬间’。”Stewart Brand, "Written on the Wind, "Civilization

Magazine, November 1998 ("01998" in Long Now terminology) , available online at <http://www.longnow.org/10klibrary/library.htm>.

43. DARPA的信息处理技术部门, 在静脉中的项目, 叫做 LifeLog, <http://www.darpa.mil/ipto/Programs/lifelog>; 也可见 Noah Shachtman, "A Spy Machine of DARPA's Dreams," *Wired News*, May 20, 2003, <http://www.wired.com/news/business/0,1367,58909,00.html>; Gordon Bell的项目(为了微软)是 MyLifeBits, <http://research.microsoft.com/research/barc/MediaPresence/MyLifeBits> 用于恒今基金会, 见 <http://longnow.org>.

44. Bergeron在哈佛中医院, 是一名麻醉学专家, 也是很多书的作者, 如 *Bioinformatics Computing*, *Biotech Industry: A Global, Economic, and Financing Overview*, and *The Wireless Web and Healthcare*.

45. 恒今基金会在发展一种可能的解决方法: Rosetta Disk, 它将包含很多将来可能丢失的扩展文字。他们计划用基于两英寸镍盘的唯一存储技术, 每一个镍盘可以存储350000页, 估计寿命在2000到10000年。见恒今基金会, *Library Ideas*, <http://longnow.org/10klibrary/10kLibConference.htm>。

46. John A. Parmentola, "Paradigm Shifting Capabilities for Army Transformation," 受邀论文, 发表于 SPIE European Symposium on Optics/Photonics in Security and Defence, October 25-28, 2004; available electronically at Bridge 34.3 (Fall 2004) , <http://www.nae.edu/NAE/bridgecom.nsf/weblinks/MKEZ-65RLTA?OpenDocument>.

47. Fred Bayles, "Hightech Project Aims to Make Supersoldiers," *USA Today*, May 23, 2003, http://www.usatoday.com/news/nation/2003-05-22-nanotechusat__x.htm; See Institute for Soldier Nanotechnologies web site, <http://web.mit.edu/isn>; Sarah Putnam, "Researchers Tout Opportunities in Nanotech," *MIT News Office*, October 9, 2002, <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/cdcnanotech-1009.html>.

48. Ron Schafer, "Robotics to Play Major Role in Future Warfighting," <http://www.jfcom.mil/newslink/storyarchive/2003/pa072903> Dr. Russell Richards, "Unmanned Systems: A Big Player for Future

Forces? "Unmanned Effects Workshop at the Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Baltimore, July 29-August 1, 2003.

49. John Rhea, "NASA Robot in Form of Snake Planned to Penetrate Inaccessible Areas, "Military and Aerospace Electronics, November 2000, http://mae.pennnet.com/Articles/Article__Display.cfm?Section=Archives&Subsection=Display&ARTICLE__ID=86890.

50. Lakshmi Sandhana, "The Drone Armies Are Coming, "Wired News, August 30, 2002, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,54728,00.html>. See also Mario Gerla, Kaixin Xu, Allen Moshfegh, "Minuteman: Forward Projection of Unmanned Agents Using the Airborne Internet, "IEEE Aerospace Conference 2002, Big Sky, Mont., March 2002: http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/uploads/mgerla__aerospace02.pdf.

51. James Kennedy, Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, Swarm Intelligence (San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001), <http://www.swarmintelligence.org/SIBook/SI.php>.

52. Will Knight, "Military Robots to Get Swarm Intelligence, "April 25, 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993661>.

53. 同上。

54. S.R. White et al., "Autonomic Healing of Polymer Composites, "Nature 409 (February 15, 2001): 794-97, <http://www.autonomic.uiuc.edu/files/NaturePaper.pdf>; Kristin Leutwyler, "Self-Healing Plastics, "ScientificAmerican.com, February 15, 2001, <http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=000B307F-C71A-1C5AB882809EC588ED9F>.

55. Sue Baker, "Predator Missile Launch Test Totally Successful, "Strategic Affairs, April 1, 2001, <http://www.stratmag.com/issueApr-1/page02.htm>.

56. See OpenCourseWare course, at <http://ocw.mit.edu/index.html>.

57. Brigitte Bouissou 引用 MIT OpenCourseWare 额外的引用页, 见 <http://ocw.mit.edu/Ocw-Web/Global/AboutOCW/additionalquotes.htm>, 以及 Eric Bender, "Teach Locally, Educate Globally," MIT Technology Review, June 2004, <http://www.techreview.com/articles/04/06/bender0604.asp?p=1>.

58. Kurzweil 教育系统 (<http://www.Kurzweiledu.com>) 为读写困难的人提供了 Kurzweil3000 阅读系统。它可以为用户阅读任何高分辨率的书籍。它包括很多提高阅读用户能力的特征。

59. 正如 Natasha Vita-More 引证的, "Arterati on Ideas," <http://64.233.167.104/search?q=cache:QAnJsLcXHXUJ:www.extropy.com/ideas/journal/previous/1998/02-01.html+Arterati+on+ideas&hl=en> 和 <http://www.extropy.com/ideas/journal/previous/1998/02-01.html>.

60. Christine Boese, "The Screen-Age: Our Brains in our Laptops," CNN.com, August 2, 2004.

61. Thomas Hobbes, Leviathan (1651).

62. Seth Lloyd, Y. Jack Ng, "Black Hole Computers," Scientific American, November 2004.

63. Alan M. MacRobert, "The Allen Telescope Array: SETIs Next Big Step," Sky & Telescope, April 2004, http://skyandtelescope.com/printable/resources/seti/article__256.asp.

64. 同上。

65. 同上。

66. C.H. Townes, "At What Wavelength Should We Search for Signals from Extraterrestrial Intelligence?" Proceedings of the National Academy of Sciences USA 80 (1983): 1147-51. S.A. Kingsley in The Search for Extraterrestrial Intelligence in the Optical Spectrum, vol. 2, S.A. Kingsley and G.A. Lemarchand, eds. (1996) Proc. WPIE 2704: 102-16.

67.N.S.Kardashev, "Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations, "Soviet Astronomy 8.2 (1964) : 217-20.Summarized in Guillermo A.Lemarchand, "Detectability of Extraterrestrial Technological Activities, "SETIQuest 1:1, pp.3-13, <http://www.coseti.org/lemarch1.htm>.

68.Frank Drake,Dava Sobel,Is Anyone Out There? (New York: Dell, 1994) ; Carl Sagan, Frank Drake, "The Search for Extraterrestrial Intelligence, "Scientific American (May 1975) : 80-89.A Drakee-quation calculator can be found at http://www.activemind.com/Mysterious/Topics/SETI/drake__equation.html.

69.德雷克方程式的许多描述中, 将 fL 表述为行星生命的一小部分, 在这个过程中发生无线电传输, 但这应该恰当地表达为宇宙中生命的一小部分, 因为我们不会真的介意那个星球持续了多久, 我们介意的是无线电传输持续了多久。

70.Seth Shostak提供了“一个估计: 大约在1万到100万之间”。Marcus Chown, "ET First Contact 'Within 20 Years, "'New Scientist 183.2457 (July 24, 2004) .可参见<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn6189>。

71.T.L.Wilson, "The Search for Extraterrestrial Intelligence, "Nature,February 22, 2001.

72.最近的估计是在100到150亿年之间。在2002年, 基于哈勃空间望远镜的数据, 这一估计是在130到140亿年。由Case Western Reserve大学的科学家Lawrence Krauss与Dartmouth大学的Brian Chaboyer发表的研究, 从太阳演化中找出结论, 宇宙的年龄有95%可能在112到200亿年。Lawrence Krauss and Brian Chaboyer, "Irrion,the Milky Ways Restless Swarms of Stars, "Science 299 (January 3, 2003) : 60-62.NASA最近的研究将宇宙的寿命限制在137亿年, 正负2亿, http://map.gsfc.nasa.gov/m__mm/mr__age.html。

73.Quoted in Eric M.Jones, "'Where Is Everybody? ': An Account of Fermis Question, "Los Alamos National Laboratories, March 1985, http://www.bayarea.net/~kins/AboutMe/Fermi__and__Teller/fermi__

question.html.

74.首先，思考一下关于宇宙冷计算机的 10^{42} cps的估计（在第3章中）。我们可以估计太阳系的质量，大约等于太阳的质量 2×10^{30} kg。万分之0.5是 10^{27} kg。 10^{42} cps每kg， 10^{27} kg可以提供 10^{69} cps，如果我们用 10^{50} cps估计最终的热电脑，会得到 10^{77} cps。

75.Anders Sandberg, "The Physics of Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains, "Journal of Evolution and Technology 5 (December 22, 1999) ,
[http: //www.jetpress.org/volume5/Brains2.pdf](http://www.jetpress.org/volume5/Brains2.pdf).

76.Freeman John Dyson, "Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation, "Science 131 (June 3, 1960) : 1667-68.

77.引自Sandberg, "Physics of Information Processing Superobjects."

78.1994年有1955亿颗半导体芯片单元，2004年有4335亿。Jim Feldhan,president,Semico Research Corporation,[http: //www.semico.com](http://www.semico.com).

79.Robert Freitas是使用机器人探针，特别是自我复制的机器人探针的支持者首领，见Robert A.Freitas Jr., "Interstellar Probes: A New Approach to SETI, "J.British Interplanet.Soc.33 (March 1980) : 95-100,
[http: //www.rfreitas.com/Astro/InterstellarProbesJBIS1980.htm](http://www.rfreitas.com/Astro/InterstellarProbesJBIS1980.htm); Robert A.Freitas Jr., "A Self-Reproducing Interstellar Probe, "J.British Interplanet.Soc.33 (July 1980) : 251-64,
[http: //www.rfreitas.com/Astro/ReproJBISJuly1980.htm](http://www.rfreitas.com/Astro/ReproJBISJuly1980.htm); Francisco Valdes,Robert A.Freitas Jr., "Comparison of Reproducing and Nonreproducing Starprobe Strategies for Galactic Exploration, "J.British Interplanet.Soc.33 (November 1980) : 402-8,
[http: //www.rfreitas.com/Astro/ComparisonReproNov1980.htm](http://www.rfreitas.com/Astro/ComparisonReproNov1980.htm); Robert A.Freitas Jr., "Debunking the Myths of Interstellar Probes, "AstroSearch 1 (July-August 1983) : 8-9,
[http: //www.rfreitas.com/Astro/ProbeMyths1983.htm](http://www.rfreitas.com/Astro/ProbeMyths1983.htm); Robert A.Freitas Jr., "The Case for Interstellar Probes, "J.British Interplanet.Soc.36 (November 1983) : 490-95,
[http: //www.rfreitas.com/Astro/TheCaseForInterstellarProbes1983.htm](http://www.rfreitas.com/Astro/TheCaseForInterstellarProbes1983.htm).

80.M.Stenner et al., "The Speed of Information in a 'Fast-Light' Optical Medium, "Nature 425 (October 16, 2003) : 695-98. See also Raymond Y.Chiao et al., "Superluminal and Porelectric Effects in Rubidium Vapor and Ammonia Gas, "Quantum and Semiclassical Optics 7 (1995) : 279.

81.I.Marcikic et al., "Long-Distance Teleportation of Qubits at Telecommunication Wavelengths, "Nature 421 (January 2003) : 509-13; John Roach, "Physicists Teleport Quantum Bits over Long Distance, "National Geographic News, January 29, 2003; Herb Brody, "Quantum Cryptography; in"10 Emerging Technologies That Will Change the World, "MIT Technology Review, February 2003; N.Gisin et al., "Quantum Correlations with Moving Observers, "Quantum Optics (December 2003) : 51; Quantum Cryptography exhibit, ITU Telecom World 2003, Geneva, Switzerland, October 1, 2003; Sora Song, "The Quantum Leaper, "Time, March 15, 2004; Mark Buchanan, "Lights Spooky Connections Set New Distance Record, New Scientist, June 28, 1997.

82.Charles H.Lineweaver, Tamara M.Davis, "Misconceptions About the Big Bang, "Scientific American, March 2005.

83.A.Einstein and N.Rosen, "The Particle Problem in the General Theory of Relativity, "Physical Review 48 (1935) : 73.

84.J.A.Wheeler, "Geons, "Physical Review 97 (1955) : 511-36.

85.M.S.Morris, K.S.Thorne, U.Yurtsever, "Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition, "Physical Review Letters 61.13 (September 26, 1988) : 1446-49; M.S.Morris and K.S.Thorne, "Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity, "American Journal of Physics 56.5 (1988) : 395-412.

86.M.Visser, "Wormholes, Baby Universes, and Causality, "Physical Review D 41.4 (February 15, 1990) : 1116-24.

87.Sandberg, "Physics of Information Processing Superobjects."

88.David Hochberg, Thomas W.Kephart, "Wormhole Cosmology and the

Horizon Problem, "Physical Review Letters 70 (1993) : 2665-68, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v70/i18/p2665__1; D.Hochberg and M.Visser, "Geometric Structure of the Generic Static Transversable Wormhole Throat, "Physical Review D 56 (1997) : 4745.

89.J.K.Webb et al., "Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant, "Physical Review Letters 87.9 (August 27, 2001) : 091301; "When Constants Are Not Constant, "Physics in Action (October 2001) , <http://physicsweb.org/articles/world/14/10/4>.

90.Joao Magueijo,John D.Barrow,Haavard Bunes Sandvik, "Is It e or Is It c? Experimental Tests of Varying Alpha, "Physical Letters B 549 (2002) : 284-89.

91.John Smart, "Answering the Fermi Paradox: Exploring the Mechanisms of Universal Transcension, "<http://www.transhumanist.com/Smart-Fermi.htm>.See also <http://singularitywatch.com> and his biography at http://www.singularitywatch.com/bio__johnsmart.html.

92.James N.Gardner,Biocosm: The New Scientific Theory of Evolution: Intelligent Life Is the Architect of the Universe (Maui: Inner Ocean, 2003) .

93.Lee Smolin in "Smolin vs.Susskind: The Anthropic Principle, "Edge 145, <http://www.edge.org/documents/archive/edge145.html>; Lee Smolin, "Scientific Alternatives to the Anthropic Priniple, "<http://arxiv.org/abs/hep-th/0407213>.

94.Kurzweil,Age of Spiritual Machines,pp.258-60.

95.Gardner,Biocosm.

96.S.W.Hawking, "Particle Creation by Black Holes, "Communications in Mathematical Physics 43 (1975) : 199-220.

97.最初的打赌起源于http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/info__bet.html。也可见Peter Rodgers, "Hawking Loses Black Hole Bet, "Physics World, August 2004,

<http://physicsweb.org/articles/news/8/7/11>.

98.为了达到这些估计，Lloyd观察了物质的浓度（大约每立方米一个氢原子），并且计算了宇宙中全部的能量。将这一估计除以普朗克常量，他得到大约 10^{90} cps.

Seth Lloyd, "Ultimate Physical Limits to Computation, "Nature 406.6799 (August 31, 2000) : 1047-54.Electronic versions (version 3 dated February 14, 2000) available at <http://arxiv.org/abs/quantph/9908043> (August 31, 2000) .The following link requires a payment to access:
http://www.nature.com/cgitaf/DynaPage.taf?file=/nature/journal/v406/n6799/full/4061047a0__fs.html&content__filetype=PDF.

99.Jacob D.Bekenstein, "Information in the Holographic Universe: Theoretical Results about Black Holes Suggest That the Universe Could Be Like a Gigantic Hologram, "Scientific American 289.2 (August 2003) : 58-65, <http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=000AF072-4891-1F0A-97AE80A84189EEDF>.

第7章 我是奇点

1.In Jay W.Richards et al., Are We Spiritual Machines? Ray Kurzweil vs.the Critics of Strong A.I. (Seattle: Discovery Institute, 2002) , introduction,<http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0502.html>.

2.Ray Kurzweil and Terry Grossman,M.D., Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever (New York: Rodale Books, 2004) .

3.同上。

4.同上。

5.Max More and Ray Kurzweil, "Max More and Ray Kurzweil on the Singularity, "February 26, 2002, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0408.html>.

6.同上。

7.同上。

8.Arthur Miller,After the Fall (New York: Viking, 1964) .

9.在1957年念给牛津哲学社同人论文，并出版为"Minds,Machines and Gödel, "Philosophy 36 (1961) : 112-27.Kenneth Sayre and Frederick Crosson, 编辑并第一次出版, The Modeling of Mind (Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1963) , pp.255-71.

10.Martine Rothblatt, "Biocyberethics: Should We Stop acompany from Unplugging an Intelligent Computer? "September 28, 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0594.html> (includes links to a Webcast and transcripts) .

11.Jaron Lanier, "One Half of a Manifesto, "Edge,http://www.edge.org/3rd__culture/lanier/lanier__index.html; see also Jaron Lanier, "One-Half of a Manifesto, "Wired News,December 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.12/lanier.html>.

12.同上。

13.Norbert Wiener,Cybernetics: or,Control and Communication in the Animal and the Machine (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1948) .

14."How Do You Persist When Your Molecules Dont? "Science and Consciousness Review 1.1 (June 2004) , <http://www.scicon.org/articles/20040601.html>.

15.David J.Chalmers, "Facing Up to the Problem of Consciousness, "Journal of Consciousness Studies 2.3 (1995) : 200-219, <http://jamaica.u.arizona.edu/~chalmers/papers/facing.html>.

16.Huston Smith,The Sacred Unconscious,videotape (The Wisdom Foundation, 2001) , available for sale at <http://www.fonsvitae.com/sacredhuston.html>.

17. Jerry A. Fodor, *RePresentations: Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981).

第8章 GNR: 希望与危险深度纠结

1. Bill McKibben, "How Much Is Enough? The Environmental Movement as a Pivot Point in Human History", 哈佛环境价值观研讨会, 2000年10月18。

2. 20世纪60年代, 美国政府做了一个实验, 让三个刚从物理系毕业的学生仅仅使用已经公开的信息来制造核武器, 结果很成功, 这三个学生花了大概三年时间制造了一个。

(<http://www.pimall.com/nais/nl/n.nukes.html>)。如何制造一个原子弹的步骤可以在网上找到, 并已经由国家实验室结集出版。2002年, 由于这些信息被删除了, 英国国防部向公共记录办公室发布了制造原子弹的测量、图表和精确细节 (<http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/1932702.stm>)。注意这些链接不包含制造原子武器的实际步骤。

3. "The John Stossel Special: You Cant Say That!" ABC News, March 23, 2000.

4. 网上有大量的信息, 包括关于如何制造炸弹、武器和爆炸物的军事手册。有些信息是错误的, 但是关于这些课题的正确信息还是能够访问到的, 尽管有人努力删除这些信息。1997年7月, 国会通过了一项修正案 (the Feinstein Amendment, SP419), 给国防部拨款, 禁止制造炸弹的方法传播。见 Anne Marie Helmenstine, "How to Build a Bomb" 2003年2月10日, <http://chemistry.about.com/library/weekly/aa021003a.htm>。有毒工业化学品的信息在网上和图书馆也很常见, 同样, 培养细菌和病毒的信息和工具、制造电脑病毒的技术、攻击电脑和网络的技术也一样常见。注意, 我没有提供这些信息的具体例子, 因为这可能帮助破坏分子或者破坏团体。我知道, 哪怕只是陈述这些信息的可用性, 都会有可能启发破坏分子或团体, 但我觉得公开讨论这个问题的好处更多。另外, 在媒体或其他场所, 这些信息的可能已经被广泛地讨论。

5. Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990).

6. Ken Alibek, *Biohazard* (New York: Random House, 1999).

7.Ray Kurzweil,The Age of Intelligent Machines (New York: Viking, 1999) .

8.Bill Joy, "Why the Future Doesnt Need Us" Wired, April 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.

9.基因拼接手册 (如A.J.Harwood,ed,Basic DNA and RNA Protocols (Totowa,N.J.: Humana Press, 1996)) 和试剂, 还有试剂盒使基因拼接基本可以实现。即使在西方限制获得这些材料, 很多其他国家公司可以提供同等材料。

10.欲知“黑冬”模拟实验详情, 见"DARK WINTER: A Bioterrorism Exercise June 2001": http://www.biohazardnews.net/scen__smallpox.shtml; 只想简单了解, 见 <http://www.homelandsecurity.org/darkwinter/index.cfm>。

11.Richard Preston, "The Specter of a New and Deadlier Smallpox", New York Times, October 14, 2002, available at <http://www.ph.ucla.edu/epi/bioter/specterdeadliersmallpox.html>.

12.Alfred W.Crosby,Americas Forgotten Pandemic: The Influenza of 1918 (New York: Cambridge University Press, 2003) .

13."Power from Blood Could Lead to Human Batteries", Sydney Morning Herald, August 4, 2003, <http://www.smh.com.au/articles/2003/08/0311059849278131.html>. 也可见第5章注释129, 也可见S.C.Barton, J.Gallaway和P.Atanassov, "Enzymatic Biofuel Cells for Implantable and Microscale Devices", Chemical Reviews 104.10 (October 2004) : 4867-86.

14.J.M.Hunt计算出地球上有机碳有 1.55×10^{19} kg (10^{22}) 的有机碳。基于这个数字, 假设所有的有机碳都包含在生物质中 (注意生物质的定义不是很清晰, 所以我们采用一个保守的广泛采用的方法), 我们可以计算出碳原子的近似值, 如下:

碳原子的平均重量 (匹配同位素率) = 12.011

生物质中的碳 = 1.55×10^{22} g / 12.011 = 1.3×10^{21} mol

$1.3 \times 10^{11} \times 6.02 \times 10^{23}$ (阿伏伽德罗数) = 7.8×10^{44} 碳原

J.M.Hunt, Petroleum Geochemistry and Geology (San Francisco: W.H.Freeman, 1979) .

15.Robert A.Freitas Jr, "The Gray Goo Problem", March 20, 2001, <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0142.html>.

16."Gray Goo Is a Small Issue", 简要文档, 纳米技术责任中心, December 14, 2003, <http://crnano.org/BD-Goo.htm>; Chris Phoenix and Mike Treder, "Safe Utilization of Advanced Nanotechnology", 纳米技术责任中心, January 2003, <http://crnano.org/safe.htm>; K.Eric Drexler, Engines of Creation, 11章, "Engines of Destruction", (New York: Anchor Books, 1986), pp.171-90, http://www.foresight.org/EOC/EOC__Chaptec11.html; Robert A.Freitas Jr.and Ralph C.Merkle, Kinematic Self-Replicating Machines 5.11节, "Replicators and Public Safety" (Georgetown, Tex.: Landes Bioscience, 2004), pp.196-99, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/5.11.htm>, 以及6.3.1节, "Molecular Assemblers Are Too Dangerous" pp204-6, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/6.3.1.htm>; 前景研究所, "Molecular Nanotechnology Guidelines: Draft Version 3.7" June 4, 2000, <http://www.foresight.org/guidelines/>.

17.Robert A Freitas Jr, "Gray Goo Problem"和"Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators,with Public Policy Recommendations", Zyvex preprint, April 2000, "Malicious Ecophagy" 8.4节和"Ecophagic Thermal Pollution Limits (ETPL)" 6.0节, <http://www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html>.

18.Nick D Bostrom, "Existential Risks: Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards", May 29, 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0194.html>.

19.Robert Kennedy, 13 Days (London: Macmillan, 1968), p.110.

20.In H.Putnam, "The Place of Facts in a World of Values", in D.Huff and

O.Prewitt,eds,The Nature of the Physical Universe (New York: John Wiley, 1979), p114.

21.Graham Allison, 核恐怖主义 (New York: Times Books, 2004)。

22.Martin I.Meltzer, “多重联系日期和SARS的潜伏期”, Emerging Infectious Diseases 10.2 (2004年2月),
<http://www.cdc.gov/ncidod/EID/vol10no2/03-0426-G1.htm>。

23.Robert A.Freitas Jr, “Microbivores: 人工机械吞噬细胞使用消化和排放协议”, Zyvex预印本, 2001年3月,
<http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm>; “Microbivores: 人工机械吞噬细胞”, Foresight Update,no.44, 2001年3月31日, pp.11-13,
<http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>。

24.Max More, "The Proactionary Principle"2004年5月,
<http://www.maxmore.com/proactionary.htm>和
<http://www.extropy.org/proactionaryprinciple.htm>。More简要说明了proactionary的原则, 如下所示:

- 1) 人类在技术创新上的自由对人类来说是很宝贵的。因此, 举证责任属于那些建议限制性措施的人。所有建议的措施都应仔细检查。
- 2) 通过现有的科学理论而不是流行的看法进行风险评估, 允许有正常的推理偏差。
- 3) 优先考虑改善已知的对于人类健康和环境质量的威胁, 而不是假设的风险。
- 4) 在相同的基础上, 治疗技术风险就像自然风险, 应避免忽视自然风险和过度重视人类技术风险。应充分考虑到技术进步带来的好处。
- 5) 评估放弃技术所失去的机会, 考虑其他可靠的代替方案的代价和风险, 审慎考虑广泛的影响和后续效应。
- 6) 只有当一项活动可能的影响具有很大的可能性和严重性时, 才需要考虑限制措施。在这种情况下, 如果活动也带来好处, 那么通过适应不利影响可以减小影响。如果限制技术发展的措施看起来合理, 确保这些

措施的度和可能产生的效果的度是一致的。

7) 当选择一项措施来限制技术革新, 优先决定的标准如下: 对人类和其他智能生命的影响优先于对物种的影响; 对人类健康的非致命威胁优先于限制环境的威胁 (在合理范围内); 迫在眉睫的威胁优先于遥远的威胁; 通过给确定的威胁高于不确定的威胁优先权, 不可逆转或持久的影响高于短暂影响的优先权, 选择具有高期望值的措施。

25.Martin Rees,Our Final Hour: A Scientist's Warning: How Terror,Error,and Environmental Disaster Threaten Humankind's Future in This Centuryon Earth and Beyond (New York: Basic Books, 2003) .

26.Scott Shane,Dismantling Utopia: How Information Ended the Soviet Union (Chicago: Ivan R.Deer, 1994) ; see also the review by James A., Dorn at <http://www.cato.org/pubs/journal/cj16n2-7.html>.

27.见George DeWan, "Diary of a Colonial Housewife", Newsday, 2005, 几个世纪以前, 人类生活困难的一个原因, 参见 <http://www.newsday.com/community/guide/lihistory/ny-history-hs331a,0,6101197.story>。

28.Jim Oeppen和James W.Vaupel, “打破预期寿命的限制”, Science 296.5570 (May10, 2002) : 1029-31。

29.Steve Bowman和Helit Barel, 大规模杀伤性武器: 恐怖主义威胁, Congressional Research Service Report for Congress, 1999年12月8日, <http://www.cnire.org/nle/crsreports/international/inter-75.pdf>。

30.Eliezer S.Yudkowsky, “创造友好人工智能1.0, 仁慈目标架构的分析和设计” (2001) , The Singularity Institute,<http://www.singinst.org/CFAI/>; Eliezer S.Yudkowsky, “友好人工智能是什么?”May 3, 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0172.html>.

31.Ted Kaczynski, "The Unabombers Manifesto, "May 14, 2001, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0182.html>.

32. Bill McKibben, *Enough: Staying Human in an Engineered Age* (New York: Times Books, 2003).

33. Kaczynski, "The Unabombers Manifesto."

34. Foresight Institute and IMM, "Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology," February 21, 1999, <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>; Christine Peterson, "Molecular Manufacturing: Societal Implications of Advanced Nanotechnology," April 9, 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0557.html>; Chris Phoenix and Mike Treder, "Safe Utilization of Advanced Nanotechnology," January 28, 2003, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0547.html>; Robert A. Freitas Jr., "The Gray Goo Problem," KurzweilAI.net, 20 March 2002, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0142.html>.

35. Robert A. Freitas Jr. and Ray Kurzweil's private conversation, January 2005. Freitas described his proposal for Robert A. Freitas Jr., "Some Limits to Global Ecophagy by Biovoracious Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations."

36. Ralph C. Merkle, "Self Replicating Systems and Low Cost Manufacturing," 1994, <http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepNATO.html>.

37. Neil King Jr. and Ted Bridis, "FBI System Covertly Searches E-mail," *Wall Street Journal Online* (July 10, 2000), <http://zdnet.com.com/2100-11-522071.html?legacy=zdn>.

38. Larry Thompson, "Human Gene Therapy: Harsh Lessons, High Hopes," *FDA Consumer Magazine* (September-October 2000), http://www.fda.gov/fdac/features/2000/500__gene.html.

39. Bill Joy, "Why the Future Doesn't Need Us."

40.前景 (Foresight Institute,version 4.0, October 2004, <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>) 指导方针的设计是用来陈述纳米技术可能带来的积极的和消极的结果。他们试图通知居民、公司和政府,并提供具体的指导方针,负责任地发展基于纳米技术的分子制造。前景指导方针最初制定的是关于分子纳米技术研究政策指导方针,由前景机构发起,该机构用于分子制造 (IMM), 1999年2月19~21日。参与者包括James Bennett、Greg Burch、K.Eric Drexler、Neil Jacobstein、Tanya Jones、Ralph Merkle、Mark Miller、Ed Niehaus、Pat Parker、Christine Peterson、Glenn Reynolds和Philippe Van Nederveelde。这些方针修改了很多次。

41.Martine Rothblatt,United Therapeutics的CEO, 建议用管理体制取代中止技术, 据此, 新的国际异种器官移植当局可以检查和批准无病原体的制造的猪作为异种移植可接受的来源。Rothblatt的解决方案通过允许每个国家加入DCA, 以帮助标志恶意的异种移植外科医生, 在范围内实施规则, 公平地共享无病原体的异种移植为本国的器官移植失败的居民服务。见Martine Rothblatt, *Your Life or Mine: Using Geoethics to Resolve the Conflict Between Public and Private Interests*, in *Xenotransplantation* (Burlington,Vt.: Ashgate, 2004) .Disclosure: I am on the board of directors of United Therapeutics.

42.见Singularity Institute,<http://www.singinst.org>。也可见本章注释30。Yudkowsky成立了人工智能奇点研究院 (the Singularity Institute for Artificial Intelligence,SIAI) 来发展“友好人工智能”, 试图创造可认知的内容, 设计特征以及可认知的架构, 从而产生善良的类人或比人类更好的人工智能。SIAI已经得到了发展。SIAI关于友好人工智能的指导方针: "Friendly AI, "<http://www.singinst.org/friendly/>。Ben Goertzel和他的人工智能研究所也检查发展友好人工智能相关的问题; 他现在的焦点是发展人工智能引擎, 一个学习算法和架构的装置。Peter Voss,Adaptive A.I.公司的创建者, 也在关于人工智能问题进行合作: <http://adaptiveai.com/>。

43.Integrated Fuel Cell Technologies,<http://ifctech.com>.Disclosure: The author is an early investor in and adviser to IFCT.

第9章 回应批评家

1.Michael Denton, "Organism and Machine", in Jay W.Richards et al.,

Are We Spiritual Machines? , Ray Kurzweil vs the Critics of Strong A.I.
(Seattle: Discovery Institute Press, 2002) ,
[http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?
main=/articles/art0502.html](http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0502.html).

2.Jaron Lanier, "One Half of a Manifesto", Edge (September 25,
2000) , <http://www.edge.org/documents/archive/edge74.html>.

3.同上。

4.见第5章和第6章的例子，狭义的人工智能已经深深嵌入到我们的现代基础设施中。

5.Lanier, "One Half of a Manifesto".

6.一个例子是Kurzweil的声音，最初由Kurzweil进行实用智能发展。

7.Alan G.Ganek, "The Dawning of the Autonomic Computing Era", IBM
Systems Journal (March 2003) ,
[http://www.findarticles.com/p/articles/mi__m0ISJ/is__1__42/ai__
98695283/print](http://www.findarticles.com/p/articles/mi__m0ISJ/is__1__42/ai__98695283/print).

8.Arthur H.Watson and Thomas J.McCabe, "Structured Testing: A Testing
Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric", NIST特刊500-
35, 计算机系统实验室, 国家标准技术研究院, 1996。

9.Mark A.Richards and Gary A.Shaw, "Chips,Architectures and
Algorithms: Reflections on the Exponential Growth of Digital Signal
Processing Capability", 提交到IEEE Signal Processing,December 2004.

10.Jon Bentley, "Programming Pearls, "Communications of the ACM
27.11 (November 1984) : 1087-92.

11.C.Eldering,M.L.Sylla,and J.A.Eisenach, "Is There a Moores Law for
Bandwidth, "IEEEcommunications (October 1999) : 117-21.

12.J.W.Cooley and J.W.Tukey, "An Algorithm for the Machine
Computation of Complex Fourier Series, "Mathematics of Computation
19 (April 1965) : 297-301.

13.估计有 10^{11} 个神经元，估计神经元间连接是这个数的1000倍，所以有 10^{14} 个连接。每一个连接要求至少70bit来为连接的每一端的神经元存储ID。所以大概要 10^{16} bit。基因组没压缩是大概60亿（大约 10^{10} ），两者比例相当于 $10^6:1$ ，见第4章。

14.Robert A.Freitas Jr., Nanomedicine,vol.I,Basic Capabilities,section 6.3.4.2, "Biological Chemomechanical Power Conversion" (Georgetown,Tex.: Landes Bioscience, 1999), PP.147-48, <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.2.htm#p4>; See: Illustration at <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/6.2.jpg>.

15.Richard Dawkins, "Why Dont Animals Have Wheels?" Sunday Times,November 24, 1996, <http://www.simonyi.ox.ac.uk/dawkins/WorldOfDawkins-archive/Dawkins/Work/Articles/1996-11-24wheels.shtml>.

16.Thomas Ray, "Kurzweils Turing Fallacy, "in Richards et al., Are We Spiritual Machines?

17.同上。

18.Anthony J.Bell, "Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuroscience, "Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 354 (1999) : 2013-20, <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.

19.同上。

20.David Dewey, "Introduction to the Mandelbrot Set, "<http://www.ddewey.net/mandelbrot>.

21.ChristofKoch quoted in John Horgan,The End of Science (Reading,Mass.: Addison-Wesley, 1996) .

22.Roger Penrose,Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness (New York: Oxford University Press, 1996) ; Stuart Hameroff and Roger Penrose, "Orchestrated Objective Reduction of

Quantum Coherence in Brain Microtubules: The 'Orch OR' Model for Consciousness, "Mathematics and Computer Simulation 40 (1996) : 453-80, <http://www.quanturnconsciousness.org/penrosehameroff/orchOR.html>.

23.Sander Olson, "Interview with Seth Lloyd, "November 17, 2002, http://www.nanomagazine.com/i.php?id=2002__11__17.

24.Bell, "Levels and Loops."

25.见第2章计算曲线图的指数增长。

26.Alfred N.Whitehead and Bertrand Russell,Principia Mathematica, 3 vols. (Cambridge,U.K.: Cambridge University Press, 1910, 1912, 1913) .

27.Gödel's incompleteness theorem first appeared in his "Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I, "Monatshefte für Mathematik und Physik 38 (1931) : 173-98.

28.Alan M.Turing, "On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem, "Proceedings of the London Mathematical Society 42 (1936) : 230-65.The "Entscheidungsproblem"是一个决议，或者是停止难题，即如何超前决定在一个无限循环中算法会停止还是会继续。

29.出现在Alonzo Church的教派版本, "An Unsolvble Problem of Elementary Number Theory, "American Journal of Mathematics 58 (1936) : 345-63.

30.为了令人愉快地引进教派-图灵理论的含义, 见Douglas R.Hofstadter,Gödel; Escher,Bach: An Eternal Golden Braid (New York: BasicBooks, 1979) 。

31.“忙碌的河狸”问题是一大类不可计算的功能的例子, 见Tibor Rado, "On Non Computable Functions, "Bell System Technical Journal 41.3 (1962) : 877-84.

32.Ray, "Kurzweils Turing Fallacy."

33.Lanier, "One Half of a Manifesto."

34.人，不睡觉，不昏迷，发育到一定水平（不是胎儿），就有意识。

35.John R.Searle, "I Married a Computer, "in Richards et al., Are We Spiritual Machines?

36.John R.Searle,The Rediscovery of the Mind (Cambridge,Mass.: MIT Press, 1992) .

37.Hans Moravec,Letter to the Editor,New York Review of Books,http://www.kurzweiltech.com/Searle/searle__response__letter.htm.

38.John Searle to Ray Kurzweil,December 15, 1998.

39.Lanier, "One Half of a Manifesto."

40.David Brooks, "Good News About Poverty, "New York Times November 27, 2004, A35.

41.Denton, "Organism and Machine."

后记

1.就像James Gardner引证的, "Selfish Biocosm, "Complexity 5.3 (January-February 2000) : 34-45。

2.在函数 $y=1/x$ 中, 如果 $x=0$, 那么函数无定义, 但是我们可以看到 y 值趋于无穷。我们可以把等式的两边调换, 使 $y=1/x$ 变成 $x=1/y$ 。如果我们设 y 为一个很大的有穷数, 我们会看到 x 将变得非常小, 但不会是0, 不管 y 多大。所以在 $y=1/x$ 中, 当 $x=0$ 时 y 的值可以视作大于任何有穷数的 y 值。表达这一点的另一个方法是, 我们可以超越任何可能的有穷 y : 将 x 设为0和1间的任何值, 然后用1除以 x 得到 y 。

3.估计人脑功能模拟需要 10^{16} cps (见第3章), 而人脑大概有 10^{10} (低于100亿) 个, 因此所有生物大脑总共大概是 10^{26} cps。所以 10^{90} 超过这个值 10^{64} 倍。如果我们使用一个更保守的数字 10^{19} 来估计模拟每一个神经元组件的每一个非线性的需要, 那么这个比例因子是 10^{61} 。万亿的5次方是 10^{60} 。

4.见之前注释的估计。 10^{42} cps超出这个值 10^{16} 倍。

5.Stephen Jay Gould, "Joves Thunderbolts, "Natural History 103.10 (October 1994) : 6-12; Chapter 13 in Dinosaur in a Haystack: Reflections in Natural History (New York: Harmony Books, 1995) .