

《技术的本质：它是什么以及如何演化》

技术的本质

它是什么以及如何演化

W·布莱恩·阿瑟



ALLEN LANE

企鹅图书的印记

企鹅图书

ALLEN LANE

企鹅集团出版

英国企鹅图书有限公司，伦敦WC2R 0RL海滨街80号

美国企鹅集团公司，纽约州纽约市哈德逊街375号，邮编10014

加拿大企鹅集团，安大略省多伦多市爱格林顿大道东90号700室，邮编M4P 2Y3
(皮尔逊企鹅加拿大公司分部)

爱尔兰企鹅，都柏林2区圣斯蒂芬绿地25号（企鹅图书有限公司分部）

澳大利亚企鹅集团，维多利亚州坎伯韦尔路250号，
坎伯韦尔3124 (皮尔逊澳大利亚集团私人有限公司分部)

印度企鹅图书私人有限公司，新德里潘奇希尔公园11号社区中心，
邮编110017

新西兰企鹅集团，北岸罗斯代尔阿波罗大道67号，邮编0632
(皮尔逊新西兰有限公司分部)

南非企鹅图书（私人）有限公司，约翰内斯堡罗斯班克斯特迪大道24号，
邮编2196

企鹅图书有限公司注册办事处：英国伦敦WC2R 0RL海滨街80号

www.penguin.com

2009年首次在美国由自由出版社（西蒙与舒斯特公司分部）出版

2009年首次在英国由Allen Lane出版

版权所有 © W·布莱恩·阿瑟，2009

作者的道德权利已得到确认

保留所有权利

在不限制上述版权保留权利的情况下，未经版权所有者和本书上述出版商的事先书面许可，不得以任何形式或方式
(电子、机械、复印、录制或其他方式) 复制、存储或引入检索系统，或传播本出版物的任何部分

本书的CIP目录记录可从英国图书馆获得

ISBN: 978-0-14-195768-5

目录

前言

1. 问题

2. 组合与结构

3. 现象

4. 领域，或为了能够完成什么而进入的世界

5. 工程学及其解决方案

6. 技术的起源

7. 结构深化

8. 革命与重新领域化

9. 演化机制

10. 经济随其技术演化而演化

11. 我们与我们的创造处于何种关系？

注释

参考文献

致谢

索引

前言

我们在晚年常常被那些在青少年时期无法解决的问题所困扰。作为一个相当年轻的本科生——我开始上学时才刚满17岁——我接受的是电气工程师的训练，尽管我在考试中能够得高分，但那只是意味着我有数学天赋。我隐约意识到自己并没有真正理解所学内容的本质：技术的真正本质是什么。我们的教授们告诉我们，技术有各种不同的定义：技术是科学的应用；技术是对经济中使用的机械和方法的研究；技术是社会对工业过程的知识；技术是工程实践。但这些定义似乎都不令人满意。它们似乎都没有以任何方式触及技术的“技术性”，我的问题仍然没有得到解答。

后来在研究生院，当我从工程学转换专业时，我开始迷恋于经济如何发展和建设。对我来说很清楚的是，经济在很大程度上是由其技术生成的。毕竟，从某种意义上说，经济无非是技术的巧妙组织，以提供我们所需要的东西。因此，它会随着其技术的演化而演化。但如果是这样的话，那么技术是如何演化的，它们是从哪里产生的？经济如何孕育其技术？技术到底是什么？我又回到了同样的问题。

多年来我很少思考这个问题。但在1980年代初期，当我在探索经济中的递增收益时，我的注意力又被拉回到技术上。技术，以新技术产品和工艺的形式——想想早期的汽车——随着使用和采用而改进，这导致了进一步的使用和采用，创造了正反馈或采用的递增收益。递增收益给经济学带来了一个问题。如果两个具有递增收益的产品（或在我的情况下是技术）竞争，领先的那个可能会进一步领先，从而主导市场。但胜利者可能是任何一个：存在多种可能的结果。那么其中一个是如何被选中的呢？我开发的方法允许随机事件，通过固有的正反馈放大，可能随着时间的推移概率性地选择结果。如果我们将递增收益情况视为（部分）随机过程，我们就可以分析它们。这个想法奏效了。

为了找到好的例子，我从1981年开始研究特定的技术及其发展过程。这些研究证实了我的理论。但吸引我注意的是一些与递增收益没有直接关系的东西，起初看起来很模糊。我意识到新技术并不是凭空而来的“发明”。我所研究的所有例子都是从先前存在的技术中创造、构建、组装而成的。换句话说，技术由其他技术组成，它们是其他技术的组合而产生的。这个观察很简单，起初似乎并不特别重要。但我意识到，如果新技术是由现有技术构建的，那么从集体角度来看，技术创造了它自身。后来我接触到Francisco Varela和Humberto Maturana关于自产生系统的工作，我可以很impressive地告诉人们技术是自创生的（或自我创造的）。但在20世纪80年代中期，我还不了解Varela和Maturana。我所能做的就是凝视这个自我创造物体的宇宙，并思考这种自我创造的后果。

慢慢地，我开始清楚组合可能是理解技术发明和进化现实机制的关键，这些问题在以前的技术思考中没有得到令人满意的处理。一些机制在20世纪90年代得以确立——我在1994年发表了结构深化的想法——我隐约意识到还有其他机制。

在20世纪90年代，我被其他问题所困扰，主要是经济中的复杂性和认知问题。直到2000年左右，我才开始系统地重新思考技术以及它是如何产生的。我再次慢慢意识到，除了组合之外，还有其他原理在起作用。技术由部件组成——组件和子组件——它们本身就是技术。所以技术具有递归结构。我意识到，每一项技术都基于某种现象，基于它所利用的某种效应，通常是几种。因此，技术的集体进步是通过捕获现象并加以利用来实现的。我也开始看到，经济并不像我被潜移默化教导的那样，是其技术的容器。经济产生于其技术。它产生于我们用来满足需求的生产方法以及法律和组织安排。因此，它源于所有这些现象的捕获和随后的组合。

追踪这些想法让我走进了Stanford的图书馆书库，浏览关于技术的著作。起初，这些工作的数量似乎很大。但经过反思，我意识到它们很少，奇怪地少，考虑到技术的集合体和经济或法律系统一样庞大、复杂和有趣。有很多著作

——以及大量教科书——关于特定技术，特别是那些与时髦技术相关的，如计算或生物技术。但关于技术的本质、创新以及技术的后续进化，我几乎找不到什么。我找到了工程师和法国哲学家对技术的沉思，关于技术采用和扩散的研究，关于社会如何影响技术以及技术如何影响社会的理论，以及关于技术如何设计和后续发展的观察。但我在追踪更深层的东西。我想要讨论技术背后的原理，某种能够构建技术并决定其方式和进步的共同逻辑，但我找不到这些。没有技术的整体理论。

在这本书中，我将借鉴我能找到的关于技术的讨论。这些讨论由一小群包括哲学家、工程师、社会科学家和历史学家在内的思想家产生。所有这些都很有用。但那些最有用的是历史学家关于特定技术如何产生的详细而美丽的案例研究。我困惑为什么历史学家对技术的方式、本质及其创新有最多的见解。后来我明白了，世界从其技术中涌现出来的东西比从其战争和条约中涌现的要多得多，而历史学家自然对世界如何形成自身感兴趣。因此，他们对技术如何产生感兴趣。

这本书是关于技术是什么以及它如何进化的论证。它源于我做的两组讲座：1998年在Santa Fe Institute关于“数字化与经济”的Stanislaw Ulam纪念讲座；以及2000年在National University of Ireland, Galway关于“高技术与经济”的Cairnes讲座。它使用了两个系列的材料，但主要建立在Cairnes讲座的基础上。

在写这本书时，我不得不做出一些决定。首先，我决定用简明的英语来写它（或者我希望是简明的英语）。我在职业和天性上都是一个理论家，所以我必须承认这让我有些恐惧。为普通读者写一本关于严肃思想的书在一百多年前很常见，但今天这会让你面临不严肃的指责。当然，在我最了解的领域——经济学和工程学——你通过用专业和深奥的术语表达理论来显示你的能力（这是我过去经常做的事情）。

尽管如此，写一本既严肃又能让普通读者理解的书这个想法最终胜出，原因有几个。一是简单的诚实要求如此：这个主题以前并没有被详细思考过，所以不需要专业的秘传知识。另一个原因是我相信技术太重要了，不能只留给专家，普通读者需要被引入其中。而且不容忽视的是，我想激起人们对这个我认为具有巨大美感的主题的广泛兴趣，我相信它背后有着自然的逻辑。

早期我发现词汇在技术领域是个问题。许多使用最频繁的词汇——“技术(technology)”本身、“创新(innovation)”、“技巧(technique)”——都有重叠且经常相互矛盾的含义。“技术(Technology)”至少有六种主要含义，其中几种是相互冲突的。其他词汇则带有情感色彩。“发明(Invention)”让人联想到孤独的发明家与困难斗争的画面，这助长了一种流行观念，即新技术是从非凡天才的头脑中涌现出来的，而不是来自任何特定的传承。我开始意识到，思考技术的许多困难源于词汇使用的不精确。因此，随着论证的发展，我发现自己几乎像数学家那样工作，精确地定义术语，然后推导出从这些定义中逻辑上得出的结果和性质。结果，正如读者将看到的，这本书持续地——也是必要地——关注词汇以及它们在技术中是如何使用的。同样必要的是引入一些新术语。我希望避免这样做，但论证需要一些新术语，它们悄然出现了。

我还必须决定举例的问题，我从广泛的范围中选择了它们。坚持使用一套狭窄的例子来说明我要说的内容可能会更方便。一位潜在的出版商建议我坚持使用简单的东西，比如铅笔。但我的观点是，技术存在一种适用于各种情况的逻辑：计算机算法和啤酒酿造，发电站和铅笔，手持设备和DNA测序技术。所以例子遍布各个领域。为了使它们易于理解并节省不必要的解释，我试图选择读者可能熟悉的技术。

我想说一两句关于这本书不是什么的话。它不是关于技术对社会和环境未来的承诺和威胁。这些很重要，但不是我论证的一部分。它不是关于特定技术，也不是关于即将出现的新技术。它不是工程过程的全面概述；这个话题以前已经被充分讨论过了。它也不是关于创造技术的人文方面的讨论。创造技术的每个步骤都需要人的参与；但我专注于驱动这些过程的逻辑，而不是参与其中的人类。我早期就决定只讨论与我的论证直接相关的话题。所以几个有价值的话题除了顺带提及外都没有涉及：发明的社会学，技术的采用和传播，成本推动和需求拉动的思想，机构和学术团体的作用，技术史。这些都很重要，但在这里没有涉及。

这本书也不是技术文献的综述，尽管它肯定会涉及其他人工作。我经常把这样的研究看作是刘易斯和克拉克的探险。这些探险从众所周知的领域开始，很快进入新的土地，然后不时地偶然发现以前被占据的地域。这次探索也不例外。我们会遇到以前来过这里的旅行者——在这个领域海德格尔留下了痕迹，熊彼特的足迹无处不在。当我们遇到他们时，我会提及这些。但我主要把对以前文献的讨论留给注释。对于在这个领域旅行过而我遗漏的探索者们，我表示歉意。

最后一个免责声明。因为我写了一本关于技术的书，读者不应该认为我特别赞成技术。肿瘤学家可能写关于癌症的文章，但这并不意味着他们希望人们患癌症。我对技术及其后果持怀疑态度。但我必须承认一些事情。我对科学有激情，我被技术的魅力所迷住。我承认我喜欢飞机。还有老式的无线电电子设备。

W. Brian Arthur
新墨西哥州圣菲研究所；
以及加利福尼亚州帕洛阿尔托PARC智能系统实验室。

[1]

问题

我对技术有很多态度。我使用它并认为它理所当然。我享受它，偶尔也会因它而沮丧。我对它正在对我们生活产生的影响隐约感到怀疑。但我也被对技术的惊奇所捕获，对我们人类所创造的东西的惊奇。最近，匹兹堡大学的研究人员开发了一种技术，允许一只在大脑中植入微小电极的猴子控制机械臂。猴子不是通过抽搐或眨眼或做任何轻微的动作来做到这一点，而是仅仅通过它的思想。

这项技术背后的工作原理并不复杂。它们由电子学和机器人学领域的标准部件组成：检测猴子大脑信号的电路、将这些信号转换为机械运动的处理器和机械执行器，以及将触觉反馈给猴子大脑的其他电路。真正的成就是在于理解“意图”运动的神经回路，并适当地利用这些回路，使猴子能够使用这些回路来移动手臂。这项技术对残疾人士显然很有前景。但这并不是让我感到惊奇的原因。我惊奇的是，我们能够将电路和机械连接组合在一起——归根结底，是硅片和铜线、金属条和小齿轮——使得机械装置仅仅响应思想，仅仅响应思想就能运动。

我对我们能做的其他事情感到惊奇。我们将金属合金和化石燃料组合在一起，使我们以接近音速的速度在天空中飞驰；我们组织来自原子核自旋的微小信号，制作出我们大脑内神经回路的图像；我们组织生物物体——酶——从DNA中切下分子的微小片段，并将它们粘贴到细菌细胞中。两三个世纪前，我们无法想象这些能力。我发现它们，以及我们如何获得它们，令人惊奇。

我们大多数人不会停下来思考技术。我们发现它很有用，但它会淡化到我们世界的背景中。然而——这是我惊奇的另一个原因——这个淡化到我们世界背景中的东西也创造了那个世界。它创造了我们生活栖息的领域。如果你某天早上醒来，发现通过某种奇特的魔法，过去六百年来出现的技术突然消失了：如果你发现你的厕所、炉子、电脑和汽车都消失了，连同这些一起消失的还有钢铁和混凝土建筑、大规模生产、公共卫生、蒸汽机、现代农业、股份公司和印刷机，你会发现我们的现代世界也消失了。你——或者我们，如果这种奇怪的事情降临到我们所有人身上——仍然会拥有我们的思想和文化，拥有我们的孩子和配偶。我们仍然会拥有技术。我们会有水车、铸造厂和牛车；粗麻布、连帽斗篷，以及建造大教堂的精密技术。但我们将再次回到中世纪。

技术是将我们与中世纪分开的东西；实际上，它是将我们与50,000年或更久以前的生活方式分开的东西。技术比任何其他东西都更能创造我们的世界。它创造了我们的财富、我们的经济、我们存在的方式。

那么，这个如此重要的东西是什么？技术的本质是什么，它最深层的本质是什么？它来自哪里？它是如何进化的？

这些是我将在本书中提出的问题。

也许我们可以简单地接受技术，而不太关心其背后更深层的问题。但我相信——实际上我坚信——理解技术是什么以及它是如何产生的很重要。这不仅仅是因为技术创造了我们世界的大部分。这是因为在我历史的这个阶段，技术对我们产生了压力，无论我们是否关注它，它都影响着我们的关切。当然，技术使我们的孩子能够在以前可能死亡的地方生存下来；它延长了我们自己的生命，使我们的生活比仅仅两三个世纪前的祖先舒适得多；它给我们带来了繁荣。但它也给我们带来了深刻的不安。

这种不安不仅仅来自对技术在解决每个问题的同时会造成新问题的恐惧。它也来自更深层、更无意识的源头。我们将希望寄托在技术上。我们希望技术能让我们的生活更美好，解决我们的问题，让我们摆脱困境，为我们自己和我们的孩子提供我们想要的未来。然而，作为人类，我们适应的不是我们寄予希望的这个东西——不是技术——而是

不同的东西。在我们存在的最深处，我们适应的是自然，适应我们最初的环境和我们作为人类的最初状态。我们对自然有一种熟悉感，对它的依赖来自三百万年与它的和谐相处。我们信任自然。当我们遇到干细胞再生疗法(stem cell regenerative therapy)这样的技术时，我们体验到希望。但我们也立即询问这项技术有多自然。因此，我们被两种巨大而无意识的力量夹在中间：作为人类，我们最深的希望在于技术；但我们最深的信任在于自然。这些力量就像地壳板块在一次漫长、缓慢的碰撞中不可阻挡地相互碾压。

这种碰撞并不新鲜，但它比任何其他东西都更能定义我们的时代。技术正在稳定地创造我们时代的主导问题和动荡。我们正在从机器增强自然的时代——加速我们的运动、节省我们的汗水、缝制我们的衣服——转向一个带来类似或替代自然的技术的时代——基因工程、人工智能、植入我们体内的医疗设备。当我们学会使用这些技术时，我们正在从利用自然转向直接干预自然。因此，本世纪的故事将是关于技术提供的东西与我们感到舒适的东西之间的冲突。没有人声称技术的本质和运作是简单的；没有理由认为它们比经济或法律的本质和运作更简单。但它们决定着我们的未来和我们对未来的焦虑。

这本书不是关于技术的好处或坏处，有其他书籍探讨这些。这是一次理解这个创造了我们世界如此多内容并给我们带来如此多无意识不安的东西的尝试。

这又把我们带回到同样的问题。什么是技术？从其本质的最深层意义来说，它是什么？它的特性和原理是什么？它从何而来——它如何产生？它如何发展？又如何演化？

缺失的：“技术的”学科”

一个好的起点是问我们对技术真正了解什么。读者可能期望这里的答案是直截了当的，但实际上并非如此。事实上，这几乎是矛盾的：我们对技术了解很多，但又知之甚少。我们对个体意义上的技术了解很多，但对技术的一般性理解却少得多。我们知道关于我们使用的各种方法、实践和机械的所有细节——至少某些人，这些技术的设计者，是知道的。我们知道计算机微处理器生产的每一个步骤，处理器的每一个部分，以及每个部分的每一个组成部分。我们确切地知道处理器如何运作，以及其内部电子的所有路径。我们知道处理器如何与计算机中的其他组件配合，如何与BIOS芯片和中断控制器接口。我们确切地知道这些事情——确切地知道每项技术内部的构成——因为我们将它们的所有细节都放置在那里。事实上，技术是人类经验中最完全已知的部分之一。然而，对于其本质——其存在的深层本性——我们知之甚少。

这种已知内容与不太了解的原理之间的对比并不罕见。大约两个世纪前，在法国动物学家乔治·居维叶(Georges Cuvier)的时代，生物学（或当时称为自然史）是关于个体物种及其比较解剖学和相互关系的庞大知识体系。“今天，”他在1798年写道，“比较解剖学已经达到如此完善的程度，仅仅检查一块骨头，人们往往就能确定它所属动物的类别，有时甚至是属。”居维叶只是略微夸张了一点。博物学家确实拥有详细的知识，他们对动物之间的家族关系有着深刻的认识。但他们缺乏将所有这些知识结合在一起的原理。他们不清楚动物是如何产生的；没有进化——如果它存在的话——可以运作的机制；没有明确的概念来说明动物是否能改变其部位或这如何发生。所有这些都是后来发现原理时才出现的。

我们在技术方面也处于同样的位置。我们有关于个别技术历史及其产生过程的详细研究。我们有对设计过程的分析；关于经济因素如何影响技术设计、采用过程如何运作以及技术如何在经济中扩散的出色研究。我们有关于社会如何塑造技术以及技术如何塑造社会的分析。我们还有关于技术意义的思考，以及关于技术是否决定——或不决定——人类历史的思考。但对我们“技术”一词的含义没有一致的认识，没有关于技术如何产生的整体理论，对“创新”的构成没有深刻理解，也没有技术演化理论。缺失的是一套能给这个学科提供逻辑结构的整体原理，这种结构有助于填补这些空白。

换句话说，缺失的是一个技术理论——技术的“学科”。

为什么会这样，没有明确的原因。但我强烈怀疑，因为技术处在其更具声望的姊妹学科——科学——的阴影之下，我们对它的重视程度较低——因此研究也较少。我怀疑，因为我们感觉技术是我们世界中许多不和谐的原因，在某种无意识层面上，我们感觉它在智识上是令人反感的——也许不值得深入研究。我们还模糊地感觉到，因为我们创造了技术，我们已经理解了它。

还有另一个原因。那些对技术的一般性问题思考最深入的人主要是社会科学家和哲学家，可以理解的是，他们倾向于从外部将技术视为独立的对象。有蒸汽机、铁路、贝塞麦炼钢法(Bessemer process)、发电机，每一个都是一个封装的对象，没有可见的内部——用经济史学家内森·罗森伯格(Nathan Rosenberg)的术语来说，是一个黑盒子。从外部这样看待技术，如果我们想知道技术如何进入经济并在其中传播，这样做效果很好。但对于我们感兴趣的基本问题，这样做效果不佳。这就像将动物王国视为一系列独立的黑盒物种：狐猴、猕猴、斑马、鸭嘴兽。如果这些之间没有明显的关系，也没有内部解剖结构可以比较，就很难看出它们作为物种是如何相关的，它们最初是如何起源的，以及它们随后是如何进化的。技术也是如此。如果我们想知道它们彼此之间的关系，以及它们如何起源并随后演化，我们需要打开它们并观察它们的内部解剖结构。

我想对我在这里所说的话保持公正。社会科学家们意识到技术有内部组件，在许多情况下他们很清楚这些组件是如何协同工作产生技术的。一些历史学家已经深入研究技术，详细了解它们是如何起源和随时间变化的。但大部分这种“内部思维”关注的是特定技术——收音机、雷达、互联网——而不是技术的一般意义。如果工程师是技术的主要思考者，情况可能会有所不同；他们天然地从内部看待技术。我曾经问过杰出的技术专家沃尔特·温森蒂(Walter Vincenti)，为什么如此少的工程师试图为他们的领域奠定理论基础。他告诉我：“工程师喜欢他们能解决的问题。”

技术进化

我想要解决的问题之一，确实是关于技术更深层的问题之一，是它如何进化。或者，我应该说，它是否进化，因为在没有论证的情况下，技术是否进化根本不清楚。“进化”一词有两个一般含义。一个是某事物的渐进发展，如芭蕾舞或英国牧歌的“进化”。我将称这为狭义的进化，或者更常称为“发展”。另一个是一个过程，通过这个过程，某类所有对象都通过与早期对象集合的共同祖先关系联系起来。这是完整意义上的进化，也是我所说的进化。

对我来说，技术如何进化是技术中的核心问题。为什么我相信这一点？没有进化——没有共同相关性的感觉——技术似乎是独立诞生和独立改进的。每一个都必须来自某种无法解释的心理过程，某种形式的“创造力”或“跳出框架思考”，使其存在并单独发展它。有了进化（如果我们能找到它的工作原理），新技术将以某种精确的方式从以前的技术中诞生，尽管需要大量的心理助产，并通过某种可理解的适应过程发展。换句话说，如果我们能理解进化，我们就能理解那个最神秘的过程：创新。

技术进化的想法绝不是新的。达尔文《物种起源》发表后仅仅四年，塞缪尔·巴特勒(Samuel Butler)就在呼吁建立“机械王国”理论，解释“自然选择在动物和植物王国中所发挥的作用在机器中的那一部分……”他的文章《机器中的达尔文》充满了那个时代的热情：“我们这个迷恋的种族最渴望看到的莫过于两台蒸汽机之间的丰硕结合；确实，机械甚至到现在就被用于繁殖机械，成为经常按照自己种类的机器的父母，但调情、求爱和结婚的日子似乎还很遥远。“当然，这是夸张。不过，如果我认真对待这篇文章，我不能避免感觉巴特勒试图将技术硬塞进一个框架——达尔文的生物进化——这个框架可能不适合它。

从历史记录中清楚的是，某些特定技术的现代版本确实来自早期形式。巴特勒之后大约七十年，社会学家S.科鲁姆·吉尔菲兰(S. Colum Gilfillan)追踪了船舶从独木舟到帆船再到他那个时代现代汽轮的血统。吉尔菲兰是美国一小批历史学家和社会学家学派的成员，该学派在20世纪20和30年代对技术和发明深感兴趣。他对船舶很有知识；他曾是芝加哥科学与工业博物馆的航运策展人。1935年，他详细追踪了每一个“发明”的历史细节——船板、肋骨、紧固件、龙骨、三角帆和方帆是如何产生的（仅桅帆的起源他就用了四页）；这些如何逐渐将最原始的浮动物体转变为帆船；

以及进一步的发明如何将帆船蜕变为现代汽轮。这不是完整意义上的进化。这是狭义的”进化”渐进发展：形式的血统。吉尔菲兰展示的是，对于某些技术，特别是船舶，我们可以追踪详细的血统线。

对于完整的进化理论，我们需要更多东西。我们需要一个论证，证明所有技术，而不仅仅是一些技术，都来源于早期技术，以及这种情况发生的明确机制。提供这种论证的尝试很少，且不成功。大多数，如巴特勒的，更多是提议而不是理论，所有的推理都完全基于达尔文的理论。核心思想是这样工作的。给定的技术，比如说铁路机车，在特定时间以许多变体存在。这是因为它有不同的目的要实现，不同的环境要运行（如果你愿意，不同的”栖息地”要适应），以及使用不同想法的不同设计师。从这些变化中，一些表现更好并被选择用于进一步使用和发展；它们将自己的小差异传递给未来的设计。然后我们可以跟随达尔文说”正是通过自然选择对这种差异的稳定积累，当对个体有益时，产生了结构的所有更重要的修改。“以这种方式，技术进化。

这个论证听起来很合理，但很快就遇到了困难。一些技术——激光、喷气发动机、雷达、快速排序计算机算法、铁路机车本身——似乎是突然出现的，或者至少看起来是突然出现的，与新生物物种不同，它们并不是早期物体的版本。喷气发动机不是内燃机或任何先前存在事物的变体，它也不是通过其前身的小变化稳步积累而产生的。因此，“解释”新颖性”，即突然的根本新颖性，成为技术进化论者的主要障碍。根本新颖技术的出现——相当于生物学中新物种的出现——无法得到解释。

一种出路，虽然相当极端，是更加依赖达尔文理论，认为如果不同的设计者提出技术的不同变体，其中一些变体及其背后的思想可能是根本性的。因此，变化可以是根本的和突然的，也可以是渐进的。这听起来似乎合理，但如果你深入了解任何根本创新在实践中需要什么，它就站不住脚了。雷达”源于”无线电。但是你可以随意改变1930年代的无线电电路，改变得多么激进都行，你永远不会得到雷达。即使你随意改变关于无线电电路的想法，你仍然不会得到雷达。雷达需要与无线电不同的原理。

我不想否定技术中的变异和选择。当然，技术存在多个版本，当然会选择性能更优的版本，因此后来的形式确实可以通过这种方式从早期形式发展而来。但是当我们面对根本新颖技术如何起源这一关键问题时——相当于达尔文关于生物学中新物种如何起源的问题——我们被难住了。达尔文的机制不起作用。

组合进化

有一种理解技术如何进化的方法，但要达到那里我们需要转变思维。我们真正应该寻找的不是达尔文机制如何在技术中产生根本新颖性，而是“遗传”在技术中如何运作。如果进化在其最完整的意义上适用于技术，那么所有技术，包括新技术，都必须以某种方式从先前的技术发展而来。这意味着它们必须与——被某些先前技术“繁殖”——联系起来。换句话说，进化需要一种“遗传”机制，某种将现在与过去联系起来的详细连接。从外部看，不可能看到这种机制——作为一个黑盒设备，很难说激光是如何从以前的技术中产生的。

如果我们观察技术内部会怎样？我们会看到任何能告诉我们技术中新颖性如何运作的东西吗？我们会看到任何能够产生技术进化理论的东西吗？

如果你打开一个喷气发动机（或航空燃气轮机动力装置，用其专业名称），你会发现内部有组件——压缩机、涡轮机、燃烧系统。如果你打开在它之前存在的其他技术，你会发现一些相同的组件。在二十世纪初的电力发电系统内部有涡轮机和燃烧系统；在同一时期的工业鼓风机装置内部有压缩机。技术从先前的技术中继承部件，因此将这些部件组合在一起——结合它们——必须与技术如何产生有很大关系。这使得根本新颖技术的突然出现突然看起来不那么突然了。技术必须以某种方式作为现有事物的新组合而产生。

到目前为止，这只是我们可以用来解释新颖性的一个暗示。但是如果适当地建立起来，它将成为我论证的核心。新技术必须以某种方式通过现有技术的组合而产生。

实际上，这个想法，就像进化本身一样，绝不是新的。它已经被各种人讨论了100多年，其中包括奥地利经济学家约瑟夫·熊彼特（Joseph Schumpeter）。1910年熊彼特二十七岁，他关注的不是直接的组合和技术，而是经济中的组合。他说：“生产，意味着在我们力所能及的范围内组合材料和力量……生产其他东西，或用不同方法生产相同的东西，意味着以不同方式组合这些材料和力量。”经济中的变化来自“生产手段的新组合”。用现代语言来说，我们会说它来自技术的新组合。

熊彼特得出这个想法是因为他一直在问一个看似简单的问题：经济如何发展？（用现代语言我们会说，它如何在结构上改变？）外部因素当然可以改变经济：如果它发现新的原材料来源，或开始与新的外国伙伴贸易，或开辟新的领土，其结构就会改变。但熊彼特问的是经济是否可以在没有外部因素的情况下自我改变——纯粹从内部——如果可以的话，如何改变。当时的主流学说，均衡经济学，认为它不能。没有外部干扰，经济会稳定在静态模式或均衡状态，围绕这个状态波动，并停留在那里。然而，熊彼特意识到“在经济系统内部有一个能量源，它本身会破坏任何可能达到的均衡”。这个来源就是组合。经济通过组合旧的事物不断创造新的事物，在这样做的过程中，它从内部不断地破坏自己。

熊彼特的著作直到1934年才出现英文版，而在此之前，20年代和30年代的其他人已经得出了同样的结论：组合推动变化——至少是技术创新。历史学家阿博特·佩森·厄舍（Abbott Payson Usher）在1929年说——他是美国学派的另一位成员——发明来自“将已有元素建构性地同化为新的综合体”。吉尔菲兰本人表述得更加简洁：发明是“现有技术的新组合”。在那之后，这个观点渐渐被搁置，偶尔被提及但很少被引用，部分原因是没有人——不是熊彼特，不是厄舍，不是吉尔菲兰，也不是其他任何人——解释了这种组合如何能够产生新发明。说喷气发动机是其发明者弗兰克·惠特尔（Frank Whittle）和汉斯·冯·奥海因（Hans von Ohain）可用零件的组合还算容易，但要解释这种组合如何在惠特尔或冯·奥海因的头脑中发生就不容易了。

组合至少暗示了技术中新颖性产生的一种方式。但这仅仅是将个别的新技术与之前存在的特定技术联系起来。它还没有给我们一种整体技术从先前基础上构建的感觉。为此，我们需要在论证中加入第二个要素。如果新技术确实是

先前技术的组合，那么现有技术储备必须以某种方式为组合提供零件。因此，早期技术的积累本身就产生了进一步的积累。

这个观点也有其历史。熊彼特的一位近代同时代人，美国人威廉·菲尔丁·奥格本(William Fielding Ogburn)在1922年指出了这一点。奥格本是一位社会学家，同样也是美国学派的重要成员。他对社会变化的成因(或用他的话说，物质文化的变化)着迷。和熊彼特一样，他将先前技术的组合——发明——视为变化的源泉。但他还看到了其他东西：发明从早期发明中累积性地构建。“似乎物质文化装备越大，发明的数量就越多。有越多东西可以用来发明，发明的数量就越大。”这解释了为什么更“原始”的社会无法发明我们的现代技术；它们不具备必要的成分和如何使用这些成分的知识。“有轨电车不可能从上一个冰河期存在的物质文化中被发明出来。蒸汽动力的发现和当时存在的机械技术使大量发明成为可能。”这里的洞察是绝妙的。但遗憾的是，就此止步了。奥格本没有用它来构建任何技术理论或其演化理论，而他本来很容易做到这一点。

如果我们将这两个要素结合起来，即新技术通过现有技术的组合而产生，并且(因此)现有技术产生进一步的技术，我们能否找到技术演化的机制？我的答案是肯定的。用几句话来说，这将如下运作。早期技术使用现有的原始技术作为组件形成。这些新技术随着时间推移成为可能的组件——构建模块——用于构造进一步的新技术。其中一些继而成为创造更新技术的可能构建模块。通过这种方式，随着时间慢慢推移，许多技术从最初的少数几种形成，更复杂的技术使用更简单的技术作为组件形成。整个技术集合从少数到多数、从简单到复杂地自我提升。我们可以说技术从自身中创造自身。

我将称这种机制为组合演化，或更简洁地说，组合演化。

当然，我所陈述的论证并不完全完整。组合不可能是技术演化背后的唯一机制。如果是这样，像雷达或磁共振成像(医院使用的MRI)这样的现代技术就会从弓钻和陶器烧制技术，或者我们认为在技术时代开始时存在的任何其他东西中创造出来。而且我们在指定这个技术时代的开始时会遇到问题。如果弓钻和陶器烧制技术本身是通过早期技术的组合形成的，那么这些原始技术从何而来？我们陷入了无限倒退的困境。必定还有其他东西，超越单纯组合的东西，在创造新技术方面发挥作用。

我认为，这个其他东西就是对新自然现象的持续捕获以及将这些现象用于特定目的的利用。在雷达和MRI的情况下，被利用的现象是电磁波的反射和核磁共振，目的是探测飞机和身体的诊断成像。技术不仅从已有事物的组合中构建，还从对自然现象的持续捕获和利用中构建。在技术时代的最开始，我们直接拾取和使用现象：火的热量、燧石片的锋利、运动中石头的动量。我们此后所取得的一切都来自对这些和其他现象的利用，以及对由此产生的部件的组合。

在这种基本形式下，这个论点很容易陈述，但要使其精确，需要解决许多细节问题。我必须明确说明新技术作为现有技术的“组合”究竟意味着什么。技术并不是作为现有组件的随机组合而拼凑在一起的，所以我must提供组合如何运作的详细机制——比如说，涡轮喷气发动机如何作为现有事物的组合而产生。这意味着，要往回追溯一步，我们必须研究技术是如何在逻辑上构建的，因为组合——无论它如何发生——都必须按照这种结构进行。我们必须研究人类，特别是他们的思维，在这个组合过程中发挥的重要作用；新技术在物理构建之前首先在思维中构建，这个思维过程需要仔细研究。我们必须关注为什么技术会存在：人类需求如何促使新技术的创造。我们必须明确技术产生进一步技术的含义——新技术从现有技术的集合中涌现出来。而要回到根本问题，我们必须清楚地定义我们所说的“技术”是什么意思。

本书的主题

这本书是关于技术是什么以及它如何演化的论证。它试图构建一个技术理论，“一组连贯的一般命题”，我们可以用来解释技术的行为。特别是，它试图为技术创建一个演化理论。

我的计划是从完全空白的状态开始，不把关于技术的任何东西视为理所当然。我将基于三个基本原理逐步构建论证。第一个就是我一直在谈论的：技术，所有技术，都是组合。这简单地意味着个体技术是由手边的组件、组件集合或子系统构建或组装——组合——而成的。第二个是技术的每个组件本身在微观上也是一种技术。这听起来很奇怪，我必须为此辩护，但现在可以理解为，因为组件执行特定目的，就像整体技术一样，它们也符合技术的条件。第三个基本原理是所有技术都利用和开发某种效应或现象，通常是几种。

随着我们的深入，我会更多地谈论这些核心原理。但请注意，它们立即给了我们从内部看待技术的视角。如果技术是组合，它们立即就有了内部：它们由部件和部件群组装而成以满足其目的。这种内部结构由本身就是技术的部件和子系统组成。我们可以开始看到，新技术通过将现有技术拼接在一起而产生，当然还通过捕获现象。我们可以看到技术通过改变这些内部部件，通过换入改善其性能的更好部件而发展。我们可以看到不同的技术拥有从先前技术继承的共同内部部件。从这个角度看，技术开始获得“遗传学”特征。当然，不等同于DNA或其细胞运作机制，也不像那样美妙有序。但仍然是一个丰富的相互关联的祖先系谱。

所有这些听起来都很有机——非常有机——实际上我们将得出的观点既是生物学的也是机械的。当然，技术不是生物有机体，它们几乎按定义就是机械论的：无论是排序算法还是原子钟，它们都有以可预测方式相互作用的部件。但一旦我们将它们展示为可以组合成进一步组合的组合体，我们开始看到它们不再是单个的钟表装置，而是与其他复合体相互作用形成新复合体的工作过程的复合体。我们看到一个世界，其中技术的整体集合体从现有元素中形成新元素——新技术。技术从自身有机地构建自身，这将是本书的主题之一。

我提出的视觉转变，从将技术视为各自具有固定目的的独立对象转变为将其视为可以形成无穷新组合的对象，不仅仅是抽象的。它反映在目前正在发生的技术特征的广泛转变中。那种以制造经济为特征的旧工业过程技术——炼钢的平炉工艺、原油精炼的裂化工艺——确实在很大程度上是固定的。它们只做一件事，并且在固定的地方做：它们将特定的原材料输入处理成特定的工业输出，主要在独立的单独工厂中进行。但现在这些相对独立的处理技术正在让位于不同类型的技术。这些技术可以很容易地组合，形成可以一次又一次使用的构建块。全球定位技术提供直接定位，但很少单独存在。它作为一个元素与其他元素组合使用，用于导航飞机和船舶，帮助测量领土，管理农业。它就像化学中高度反应性的构建块——比如氢氧离子——本身作用很小，但出现在许多不同的组合中。数字革命的其他元素也是如此：算法、交换机、路由器、中继器、web服务。我们也可以对构成现代基因工程或纳米技术的元素这样说。这些可以以无穷的组合方式组装在一起，可以根据条件需求为不同目的即时配置和重新配置。这些也形成了可供持续组合的构建块。

现代技术不仅仅是一个由或多或少独立的生产手段组成的集合。相反，它正在成为一种开放的语言，用于在经济中创造结构和功能。我们正在缓慢地，以几十年为单位的速度，从生产固定物理产出的技术转向主要特征是可以无限组合和配置以实现新目的技术。

技术，曾经是生产手段，正在成为一种化学。

在试图提出技术理论时，我们面临的第一个挑战是看看我们是否能对此说些一般性的东西。先验地看，我们能否做到这一点并不清楚。水力发电、塑料注塑成型工艺和养蜂业，随机选择三种技术，似乎毫无共同之处。但我们将

下一章看到，技术在组合方式上确实共享着共同的逻辑。这将告诉我们很多关于组合必须如何工作、技术如何产生、它们随后如何发展以及如何演化的信息。

但在此之前，我们必须解决一个更根本的问题。到底什么是技术？

[2]

组合与结构

当我们谈论“技术”时，我们在说什么？什么是技术？

无论我们查阅词典还是技术思想家的著作，答案都令人恼火地不清楚。我们被告知，技术是一个知识分支，或者是科学的应用，或者是技术的研究，或者是一种实践，甚至是一种活动。《牛津英语词典》以一种可爱的拘谨声明技术是“可供文化用来使其经济和社会运作的机械艺术的集合”。大概“机械艺术”是文化用来使事物运作的方法、实践和装置。

所有这些实际上可能都没问题；词汇往往承载多重含义。但如果我们接受这一点，技术真的能同时既是知识又是应用科学又是对某事物的研究又是实践又是集合吗？所有这些同时存在？定义很重要，因为我们如何思考技术将决定我们如何思考它的产生。如果技术是知识，它必须以某种方式作为知识起源；如果是实践，它必须通过实践产生；如果是应用科学，它必须以某种方式源于科学。如果这些定义表明了我们对技术的理解，那么至少它们被糟糕地融合在一起，甚至可能是矛盾的。

我们需要理清混乱。为此，我将回到第一原理，从头开始定义技术。

我将给技术三个定义，我们将在整本书中使用。

第一个也是最基本的定义是，技术是实现人类目的的手段。对于某些技术——石油精炼——目的是明确的。对于其他技术——计算机——目的可能是模糊的、多重的和变化的。作为手段，技术可能是方法、过程或设备：特定的语言识别算法、化学工程中的过滤过程或柴油发动机。它可能很简单：滚珠轴承。或者它可能很复杂：波分复用器。它可能是物质的：发电机。或者它可能是非物质的：数字压缩算法。无论它是什么，它始终是执行人类目的的手段。

我允许的第二个定义是复数形式：技术作为实践和组件的集合。这涵盖了诸如电子学或生物技术等技术，它们是单个技术和实践的集合或工具箱。严格来说，我们应该称这些为技术体。但这种复数用法很普遍，所以我在这里允许它。

我还允许第三种含义。这是技术作为文化可用的设备和工程实践的整个集合。在这里我们回到了《牛津》的机械艺术集合，或者如《韦伯斯特》所说，“人民用来为自己提供物质文化对象的手段的总和”。当我们指责“技术”加速了我们的生活，或谈论“技术”作为人类的希望时，我们使用这种集体含义。有时这种含义延伸到技术作为集体活动，如“技术就是硅谷的全部”。我也允许这作为技术集体含义的变体。技术思想家凯文·凯利(Kevin Kelly)称这种总体为“technium”，我喜欢这个词。但在这本书中，我更喜欢简单地使用“技术”来表示这一点，因为这反映了常见用法。

我们需要三种含义的原因是，每种都指向不同意义、不同类别的技术。每个类别以不同方式产生并以不同方式演化。单数技术——蒸汽机——作为新概念起源并通过修改其内部部件而发展。复数技术——电子学——通过围绕某些现象和组件构建而产生，并通过改变其部件和实践而发展。而一般技术，即过去和现在曾经存在的所有技术的整个集合，源自对自然现象的使用，并通过新元素从旧元素的组合中形成而有机地建构起来。

在接下来的章节中，我将对技术的第二和第三类别有更多论述，特别是关于技术集体如何演化。但因为单数技术——个体技术——构成了这个集体，我想在本章的其余部分专注于它们。我们需要弄清楚它们到底是什么以及它们共享什么共同逻辑。

一项技术，我说过，是实现目的的手段：一种设备、方法或过程。技术做某些事情。它执行一个目的。为了强调这一点，我有时会将技术称为可执行体。这里我们遇到了一点麻烦。将铆钉机视为可执行体很容易理解：它被直接激活来执行特定任务。但是那些我们认为会被“激活”的技术呢？桥梁呢？桥梁是可执行体吗？或者大坝？我的答案是，每一个都有一个持续的任务或一系列任务要执行。桥梁承载交通；大坝储存水或供应能量。如果不失效，每一个都在工作。从这个意义上说，每一个都在执行，因此每一个都是可执行体。

还有一个词我会在全书中频繁使用：技术提供功能性。这就是它执行的通用任务。GPS（全球定位系统）定位——这就是它的功能性。GPS有许多具体目的：飞机导航、地面定位和测量。但当我们需要定位这一通用目的时，GPS就是提供该功能性的手段。

很好。但人们对技术的定义仍然不够整洁。实现目的的手段可能是设备、方法或过程，这些似乎很不相同，所以我们似乎在谈论非常不同的东西。情况真的如此吗？当然，方法和过程都通过一系列阶段或步骤来转换某些东西，所以我们可以将这些归为逻辑上相似的类别。但设备和过程——比如说无线电接收器和石油精炼——似乎是不同的东西。设备似乎是一件硬件，完全不像过程。但这只是表象。设备总是处理某些东西；它从头到尾对那个东西进行加工以完成所需的任务。飞机将乘客或货物从一个地点“处理”到另一个地点，而锤子——如果我们想推进这个想法的话——“处理”钉子。

无线电接收器也在处理。它接收无线电信号并将其转换为输入天线中的微小电压差。然后它使用谐振电路从信号中提取特定频率（对应特定电台）；将结果通过一系列放大阶段；然后分离出语音或音乐（声学）信息，再次放大结果，并将此输出馈送到扬声器或耳机。无线电处理信号，我的意思是字面上的，而不是比喻。它从空气中提取信号，净化它们，并将它们转换为声音。它是一个微型提取过程，一个如今可以握在手掌中的小工厂。所有设备实际上都在处理某些东西。毕竟，这就是为什么经济学家将技术称为生产手段。

对应关系在另一个方向上成立吗？我们能将方法和过程视为设备吗？答案是肯定的。过程和方法——想想石油精炼或排序算法——是操作序列。但要执行，它们总是需要一些硬件，某种执行操作的物理设备。我们可以将这种物理设备视为形成执行这一操作序列的“设备”。在石油精炼的情况下，这将是一个相当大的设备。但要点是有效的。如果我们包括执行它们的设备，过程就是设备。从这个意义上说，石油精炼与无线电接收器没有什么不同。两者都在“处理”，但一个使用大规模工程设备，另一个使用小规模电子元件。

有一种更一般的方法来看待设备和过程不是不同的类别。技术体现了一系列操作；我们可以称之为“软件”。这些操作需要物理设备来执行；我们可以称之为技术的“硬件”。如果我们强调“软件”，我们看到的是过程或方法。如果我们强调“硬件”，我们看到的是物理设备。技术由两者组成，但强调其中一个而非另一个使它们似乎属于两个不同的类别：设备和过程。这两个类别只是观察技术的不同方式。

最后一个想法——更像是一个问题。当我们谈论一项技术——比如斜拉桥——我们是在谈论它作为特定设备或方法的实例（比如法国的诺曼底桥），还是作为该设备或方法的想法（斜拉桥的概念）？如果我们意识到这个问题在我们抽象和标记事物的任何地方都会出现，我们就能回答这个问题。如果我们谈论黑腹滨鹬，有时我们指的是一只实际的鸟——那只在海滩上沿着水线奔跑的鸟；有时我们指的是一类鸟，鸟类物种的概念（在这种情况下是*pluvialis squatarola*）。在这些情况下，根据上下文需要在物理实例和概念之间切换是完全正常的。

我们可以对技术做同样的事情。我们可以谈论德国克雷费尔德附近特定氯厂中的哈伯法，或者作为该技术想法或概念的哈伯法，我们可以根据需要在具体和抽象之间来回切换。这产生了一个好处。如果我们接受某物作为抽象概念，我们可以轻松地在概念上放大和缩小。我们可以将“波音787”作为一项技术来谈论，将“客机”作为更一般的术语，将“飞机”作为更加一般的技术。严格来说，“飞机”当然不存在。但我们发现抽象概念是有用的，因为飞机有某些我们可以期待和谈论的共同部件和架构。

技术是如何构建的

现在我想回到上一章末尾提出的问题。技术——单独的技术——是否具有共同的逻辑？特别是，它们在组织方式上是否具有共同的结构？

正如我所说，答案看起来并不乐观。然而，我们很快就会看到，技术确实具有共同的解剖结构。在这方面，技术就像某一类动物——比如脊椎动物。脊椎动物在解剖结构和外观上差异很大；河马看起来一点也不像蛇。但它们都具有分段脊柱的结构，以及诸如多腔心脏、肝脏、成对肾脏和神经系统等器官。所有脊椎动物都具有双侧对称性，最终都由细胞构成。技术的共同结构不是它们包含相同的器官。但无论是什么，这种结构对我们的论证都是核心的，因为它约束了技术如何组合在一起和形成，就像俳句的结构（一首必须有十七个音节，分布在五、七、五音节的三行中的诗）约束着这些诗句如何组合在一起和形成一样。

那么，这种共同的解剖结构是什么呢？

首先，我们可以说技术是由组件部件或组合体拼接或组合而成的。因此，技术是为了某种目的而组合的组件。这种**组合原理**是我在上一章提到的技术三原理中的第一个。水力发电机组合了几个主要组件：储水水库、带有控制闸门和称为压力管道的进水管的进水系统、由高能水流驱动的涡轮机、由涡轮机驱动的发电机、将功率输出转换为更高电压的变压器，以及排放水的流出系统或尾水道。这些组合体、子系统或子技术（在工艺技术的情况下是阶段）是基本自包含且与其他组合体基本分离的组件群。当然，一些非常基础的技术——比如铆钉——可能只有一个部件。我们可以将这样的基本技术视为“组合”，就像数学家允许只有一个成员的集合一样。（严格来说，我们应该允许零组件且无目的的技术。毫无疑问，这样的技术已经被想到过。）

那么，我们的第一个结构要素是技术由部件组成。如果我们观察到技术总是围绕一个中心**概念或原理**组织的，我们可以看到更多的结构：即“事物的方法”，或允许其工作的基本思想。时钟的原理是计数某种稳定频率的节拍。雷达的原理——其基本思想——是发射高频无线电波，通过分析这些信号从物体表面的反射来探测远距离物体。激光打印机的原理是使用计算机控制的激光在复印鼓上“写入”图像。与基本静电复印一样，碳粉颗粒然后粘附到鼓上已被静电写入的部分，并从那里熔融到纸上。

要将原理带入物理现实，需要以物理组件的形式表达出来。在实践中，这意味着技术由主要组合体组成：执行其基本原理的装置或方法的整体骨架。这个骨架由其他组合体支持，以处理其工作、调节其功能、为其提供能量，并执行其他辅助任务。因此，技术的主要结构包括执行其基本功能的主要组合体，加上支持这个功能的一套子组合体。

让我们以这种方式来看喷气发动机。原理很简单：在加压空气的恒定流动中燃烧燃料，并向后排出产生的高速气体。（根据牛顿第三定律，这产生一个相等且相反的向前力。）为了实现这一点，发动机使用由五个主要系统组成的主要组合体：进气、压缩机、燃烧室、涡轮和排气喷嘴。空气进入进气口并流入压缩机组合体——本质上是一系列大型风扇——工作以增加其压力。现在的高压气流进入燃烧室，在那里与燃料混合并点燃。产生的高温气体转动一组涡轮，涡轮驱动压缩机，然后高速通过喷嘴部分膨胀以产生推力。（现代涡扇发动机前面有一个大风扇，也由涡轮驱动，提供大部分推力。）

这些部件形成中央组合体。悬挂在此之上，并使事情大大复杂化的是许多支持其主要功能的子系统：燃料供应系统、压缩机防失速系统、涡轮叶片冷却系统、发动机仪表系统、电气系统等等。所有这些组合体和子系统相互通信：燃料供应系统的输出成为燃烧系统的输入；压缩机向仪表系统报告其性能。为了促进这一点，组合体通过复杂的管道和电线迷宫连接，这些管道和电线充当传递其功能供其他系统使用的桥梁。

在计算机程序中，设置并没有什么不同。同样使用一个基本原理——程序背后的核心概念或逻辑。这通过一套主要的指令构建块或函数来实现——在某些计算机语言中恰当地称为“Main”。这些调用其他子函数或子程序来支持它们的工作。一个在计算机显示屏上设置图形窗口的程序会调用子函数来创建窗口、设置其大小、设置其位置、显示其标题、获取其内容、将其带到其他窗口前面，以及在完成时删除它。如果满足某些条件，这些子函数会调用或使用彼此，因此程序的各个子部分处于持续的交互中——持续的对话中——就像喷气发动机中的情况一样。从物理上讲，喷气发动机和计算机程序是非常不同的东西。一个是一套物质部件，另一个是一套逻辑指令。但每个都有相同的结构。每个都是连接的构建块的排列，由执行基本原理的中央组件以及交互支持这一点的其他组件或组件系统组成。

无论在喷气发动机内还是在计算机程序中，所有部分都必须仔细平衡。每个部分都必须能够在其交互的其他部分设定的约束——温度范围、流速、负载、电压、数据类型、协议——内执行。而每个部分反过来也必须为依赖于它的组件设置合适的工作环境。在实践中，这意味着必须做出困难的权衡。每个模块或组件都必须提供恰到好处的功率、大小、强度、重量、性能或数据结构来适应其余部分。因此，每个部分都必须设计成以平衡的方式与其他部分配合。

这些各种模块及其连接共同形成一个工作的架构。理解一项技术意味着理解其原理，以及这如何转化为工作架构。

为什么要模块化？

我们现在已经为技术建立了一个通用结构。它们由组织成组件系统或模块的部分组成。其中一些形成中央组件，其他具有支持功能，这些本身可能有子组件和子部分。当然，没有法律规定技术的组件必须聚集成组件，聚集成功能分组。我们可以很容易地想象一种完全由单个组件组装的技术。然而，除了非常简单的技术之外，我不知道有这样的技术。

为什么会这样？为什么技术应该由组件和单个部分组织？

几年前，Herbert Simon讲了一个关于两个钟表匠的经典寓言。每个人都组装1000个部件的手表。名为Tempus的钟表匠用单个零件做这个，但如果他被打断或掉落了一个未完成的手表，他必须重新开始。相比之下，Hora从10个组件组装他的手表，每个组件由10个子组件组成，每个子组件由10个部分组成。如果他暂停或被打断，他只损失一小部分工作。Simon的观点是，将部件分组到组件中可以更好地防止意外冲击，更容易构造，更容易修复。我们可以扩展这一点并说，分组部件还允许单独改进技术的组件器官：这些可以从整体中分离出来进行专门的关注和修改。它允许对工作功能进行单独测试和单独分析：它们的组件可以“滑出”以便单独探测或替换，而无需拆卸技术的其余部分。它允许技术的快速重新配置以适应不同的目的：不同的组件可以在需要时切换进出。

将技术分离成功能分组也简化了设计过程。如果设计师要处理数万个单个部件，他们会淹没在细节的海洋中。但如果他们将技术分割成不同的构建块——计算机的算术处理元件、存储器系统、电源系统——他们可以在脑海中保持这些，分别专注于它们，并更容易地看到这些更大的部分如何组合在一起为整体的工作做出贡献。将技术分割成分组或模块对应于认知心理学中的“分块”，即我们将任何复杂的东西（比如第二次世界大战）分解为更高级别的部分或分块（战争的导火索、战争的爆发、对苏联的入侵、太平洋战争等），我们可以更容易地理解和操纵。

将技术的组件分割成单独的功能单元需要付出代价——至少是心理努力。因此，只有当它们被重复使用时——只有当有足够的使用量时，才值得将技术分成这样的模块。这里与Adam Smith关于劳动分工所说的有相似之处。Smith指出，将工厂的工作分成专门的工作是值得的，但只有在有足够的生产量时才值得。我们可以说，模块化对技术经济来说就像劳动分工对制造业一样；随着给定技术的使用增加，因此随着经济的扩张而增加。或者，用良好的史密斯语言表达同样的事情，技术的分割随着市场的扩大而增加。

功能单元的组织方式也会随着使用增加而发生变化。一个模块或组件通常开始时是松散组合的各个部分，这些部分共同执行某种特定功能。在其生命周期的后期，这种组合会固化成专门构造的单元。DNA扩增（DNA amplification，一个从少量DNA样本中创造数十亿份拷贝的过程）在最初阶段是松散组合的实验室技术的结合体。如今，它已经被封装在专门构造的机器中。这是一个普遍规律：开始时松散串联的一系列部分，如果使用足够频繁，就会凝聚成一个自包含的单元。技术模块随着时间的推移会成为标准化单元。

递归性及其后果

现在我们在技术中看到了相当多的结构。但我们还没有完全完成。结构还有另一个方面。根据我们的组合原理，一项技术由组成部分构成：组件、系统、单个部件。因此，我们可以从概念上将一项技术分解为其功能组件（忽略这些是支撑性的还是核心性的），从顶部开始向下分解。这样做会给我们整体技术、主要组件、子组件、子子组件等等，直到我们到达基本部件。

以这种方式形成的层次结构是树状的：整体技术是树干，主要组件是主要分支，它们的子组件是子分支，依此类推，基本部件是最远的细枝。（当然这不是一个完美的树：分支和子分支——组件和子组件——在不同层次上相互作用和交叉连接。）这个层次结构的深度是从树干到某个代表性细枝的分支数量。对于Tempus的技术来说是两层：整体手表和基本部件。对于Hora来说是四层：手表、主要组件、子组件和基本部件。现实世界的技术可以从两层到十层或更多层深度；技术越复杂和模块化，层次结构就越深。

到目前为止，这并没有告诉我们关于结构的任何非常一般性的信息，除了它是分层的。但我们可以说得更多。每个组件或子组件或部件都有要执行的任务。如果没有，它就不会在那里。因此每个都是达到目的的手段。因此，根据我之前的定义，每个都是一项技术。这意味着组件、子组件和单个部件都是可执行的——都是技术。由此可见，一项技术由作为技术的构建块组成，这些构建块由进一步的构建块组成，这些构建块也是技术，这些又由更进一步的构建块组成，这些构建块也是技术，这种模式一直重复到基本组件的基础层次。换句话说，技术具有递归结构。它们由技术内的技术组成，一直向下到基本部件。

递归性将是我们要使用的第二个原理。在数学、物理学和计算机科学之外，这不是一个非常熟悉的概念，在这些领域中，它意味着结构由在某种程度上与自身相似的组件组成。当然，在我们的语境中，它并不意味着喷气发动机由作为小型喷气发动机的系统和部件组成。那将是荒谬的。它简单地意味着喷气发动机（或更一般地说，任何技术）由同样是技术的组件构建块组成，而这些由同样是技术的子部件组成，形成一种重复（或循环）的模式。

因此，技术是由技术的层次结构构建的，这对我们应该如何思考它们有影响，正如我们很快会看到的。这也意味着我们能够总体上说的关于单一技术的任何东西也必须适用于较低层次的组件或子系统。特别是，因为一项技术由主要组件和支撑组件组成，每个组件或子系统也必须以这种方式组织。

到目前为止，递归性听起来很抽象。但当我们看到它的实际应用时，它变得完全具体。考虑一项复杂的技术：F-35闪电II战斗机（F-35 Lightning II aircraft）。（军事例子很有用，因为它们提供了深层次的层次结构。）F-35是一种战斗机，有常规型、短距起降垂直降落型和舰载型变体。我想到的版本是海军舰载型F-35C。它是单发、超音速和隐形的，意味着它具有非常小的雷达信号特征，使其难以被探测。F-35C具有隐形飞机典型的倾斜表面外观。然而它是一个流线型设计，机翼相对于机身较大，尾部或尾翼向后伸出两段，承载垂直成V形倾斜的稳定器。

这些特殊设计的原因是F-35C需要实现一系列相互冲突的设计目标。它需要在结构上足够坚固和重量足够，以承受舰载机起飞和尾钩阻拦降落的高力量，但仍保持高机动性和远程燃油性能。它需要为舰载机降落提供出色的低速控制，但能够以超过1.6倍音速的速度飞行。它需要具有使其几乎无法被雷达探测的倾斜表面，但仍能正常飞行。

F-35C具有多重目的：提供近距离空中支援、拦截敌方飞机、压制敌方雷达防御，以及摧毁地面目标。因此它是一种手段，一项技术——一个可执行体。

如果我们沿着F-35C的层次树向外延伸到同一根枝条，我们会看到什么？我们可以将F-35C的主要组件分解为：机翼和尾翼；动力装置（或发动机）；航电套件（或飞机电子系统）；起落架；飞行控制系统；液压系统；等等。如果

我们挑出动力装置（在这种情况下是Pratt & Whitney F135涡扇发动机），我们可以将其分解为通常的喷气发动机子系统：进气系统、压缩机系统、燃烧系统、涡轮系统、喷嘴系统。如果我们跟踪进气系统，它由两个安装在机身两侧、机翼前方的箱状超音速进气道组成。超音速进气道调节进气速度，使发动机在起飞速度或1.6马赫时体验相似的条件。为了做到这一点，普通的超音速进气道使用可移动板的内部组件。F-35C则使用了一个巧妙设计的、位于进气道前方机身上的突起，称为DSI（无隔板超音速进气道）凸起，它预先调节气流并帮助控制激波。我们可以进一步跟踪：DSI凸起组件由某些金属合金子结构组成。其中一个…

但我们也已经到达了层次结构的底部，到达了可执行单元的基本层面。注意，在各个组件的术语之下，有一个反复出现的主题：由系统组成的系统，相互连接、相互作用、相互平衡。由可执行单元组成的可执行单元，或由技术组成的技术，层次化地排列到单个元素的层面。

我们也可以向上跟踪可执行单元的层次结构。F-35C是一个更大系统——舰载机联队中的可执行单元。它由几个战斗机中队以及其他支援飞机组成，其目的是提供打击力量和电子战能力。机联队是更大系统的一部分；它部署在航母上。航母也是一个可执行单元：它的目的是（除其他外）储存、发射和回收飞机。它反过来通常会是更大系统——航母战斗群中的可执行单元。顾名思义，这是围绕航母组织的舰船组合——导弹巡洋舰和护卫舰，驱逐舰，护航舰和补给舰，以及核潜艇。它有不同的目的（军事术语中的任务）：展示存在、投射力量、护航商船。因此航母群也是一个可执行单元。它反过来可能是更大系统的一部分，一个战区分组：由陆基空中单位、空中加油机、海军侦察办公室卫星、地面监视单位和海军陆战队航空单位支持的航母群。这个更大层面的战区分组可能是流动和变化的，但它也是一种手段——它执行海军任务。所以它也是一个可执行单元。如果我们愿意这样看待它，它也是一种技术。

因此，我描述的整个战区系统是一个运行中的“技术”层次结构。它有九层或更多层深。我们可以在任何层面——任何组件系统——进入这个层次结构，并发现它也是一个运行中的可执行单元层次结构。这个系统是自相似的。当然，不同层面的可执行单元在类型、主题、外观和目的上有所不同。进气系统不是F-35C的微型版本。但在任何层面，每个系统和子系统都是一种技术。每个都是一种手段，一个可执行单元。鉴于此，自相似性在一个多层次的递归层次结构中上下延续。

我们可以从这个例子中得出一些一般性的教训。

标准观点——我说的是大多数技术思想家所采取的观点——将技术视为在结构上基本自给自足和固定的东西，但偶尔会有创新。但这只有在我们抽象地思考技术时才是真的，可以说是在实验室中隔离地思考。“在野外”——意思是在现实世界中——技术很少是固定的。它不断改变其架构，随着目的的改变和改进的发生而适应和重新配置。航母的喷气式战斗机某天可能作为或多或少独立的组件行动。第二天它们可能被分配保护雷达监视飞机，成为新的临时分组的一部分。新的结构、新的架构，在任何层面都可以根据需要快速轻松地形成。在现实世界中，技术是高度可重新配置的；它们是流动的东西，从不静态，从不完成，从不完美。

我们也倾向于认为技术存在于经济世界的某个特定规模上。如果技术是传统的加工技术（生产钢铁的碱性氧气工艺），这主要是工厂的规模；如果它是一个设备（手机），这主要是产品的规模。但在我们的例子中，整个战区群是一种技术，其中一个飞机控制系统内最小的晶体管也是如此，介于两者之间的所有组件也是如此。技术没有特征性的规模。

这并不意味着在技术中没有“更高”和“更低”的概念。较高层面的技术指导或“编程”（如在计算机程序中）较低层面的技术；它们组织它们来执行自己的目的。航母“编程”其飞机来执行其目的。较低层面的元素（技术）决定了较高层面能够完成什么。战区分组受到其组成航母能够实现的限制；航母受到其飞机能够实现的限制。

我们还可以看到，每项技术都准备好了，至少在潜在意义上，成为更高层次进一步技术的组成部分。从原理上讲，F-35C战斗机可以作为执行单一任务的单架飞机独立存在。但在实际操作中，它很大程度上是一个更大系统的一部分——航母上航空联队的一部分，它在这个更大的背景下执行其目的。这为我们的断言提供了支持：所有技术都准备好被用作其他新技术中的潜在组件。

递归性还带来了更深层的含义。在技术世界中，一个层次的变化往往必须通过不同层次的变化来适应。F-35C提供了与其前身F/A-18“大黄蜂”战斗机不同的能力集合。这意味着控制和部署它的更高层次的航母系统也必须改变其组织方式。技术中的改变需要在不同层次进行改变这一主题，我们将在后续章节中看到更多。它贯穿于整个技术领域。

在本章中，我一直在谈论技术的逻辑结构，但我不想夸大技术的共同点。航母战斗群是一项技术，但它与威士忌蒸馏工艺等截然不同。然而，尽管技术具有各自独特的特征，它们确实共享着共同的解剖学组织结构。每项技术都源于一个中心原理，并有一个中心组件——执行这一原理的设备或方法的整体骨架——加上附加在其上的其他组件，使其可行并调节其功能。这些组件中的每一个本身就是一项技术，因此本身就有中心骨架和附加在其上的其他子组件。这种结构是递归的。这种结构的存在对我们具有重要意义。组合不仅仅是将目的与匹配它的概念或原理结合起来。它必须提供一套主要的组件或模块来执行这个中心思想。它必须用进一步的组件来支持这一点，这些组件又用进一步的组件来支持它们。所有这些部件和组件都必须协调一致地运行。组合必须是一个高度规范的过程。

当我们研究技术是如何产生和发展的时候，所有这些都将在后面有用。但在此之前，我们仍需要回答上一章的一些更深层次的问题。是什么让技术首先成为技术？技术在其存在的最深层本质上是什么？换句话说，技术的本质是什么？是什么赋予特定技术以力量？当然不能完全是它的原理；毕竟，那只是一个想法。它必须是别的东西。

正如我们将看到的，这些问题可以通过思考现象以及技术如何利用这些现象来回答。这就是我们将在下一章要做的。

3

现象

考古学家想要确定特定遗址的年代时，可以使用多种技术。如果他们发现有机材料，比如动物骨骼，他们可以使用放射性碳定年法。如果他们发现木结构的遗迹，比如柱子或门楣，他们可以使用树木年代学或树轮定年法。如果他们发现火坑，他们可以使用考古磁性定年法。

放射性碳定年法的工作原理是：当生物体活着时，它从空气中或通过食物链摄取碳；碳含有少量的放射性同位素碳-14，它以恒定速率衰变为非放射性的标准碳；当生物体死亡时，它停止摄取碳，因此其遗骸中碳-14的比例稳步衰减。测量碳-14含量的相对量因此可以为标本确定相当准确的日期。

树木年代学的工作原理是：树轮的宽度根据季节降雨量而变化，因此在给定气候区域和历史时期生长的树木显示出相似的环宽模式。将环模式与已知和已确定日期的当地环模式进行比较，可以确切确定结构中木材生长的年份。

考古磁性定年法的工作原理是：地球磁场随时间以已知方式逐渐改变方向。火坑中的粘土或其他材料在被烧制和冷却时，保留了与地球磁场对齐的微弱磁性，这为火坑的最后使用确定了大致日期。

还有其他技术：钾-氩定年法、热释光定年法、水化定年法、裂变径迹定年法。但我希望读者注意到的是，每一种技术都依赖于某些特定的自然效应集合。

技术依赖于某种效应是普遍的。技术总是基于某种可以被利用并用于目的的自然现象或自然法则。我说“总是”的简单原因是，不利用任何东西的技术无法实现任何东西。这是我提出的三个原理中的第三个，它与其他两个——组合和递归性——对我的论证同样重要。这个原理说，如果你检查任何技术，你总会在其中心发现它使用的某种效应。石油精炼基于这样的现象：汽化原油的不同组分或馏分在不同温度下冷凝。一个简陋的锤子依赖于动量传递的现象（在这种情况下，从运动物体——锤子——到静止物体——钉子）。

通常这种效应是显而易见的。但有时很难看出来，特别是当我们对技术非常熟悉时。卡车使用了什么现象？卡车似乎不是基于任何特定的自然法则。然而它确实使用了一个现象——或者，我应该说，两个。卡车本质上是一个自供电且可以轻松移动的平台。其自供电的核心是某些化学物质（比如柴油）燃烧时产生能量的现象；而其易于运动的核心是物体滚动时比滑动摩擦力极小的“现象”（当然这用于车轮和轴承中）。这最后一个“现象”很难算是自然法则；它只是一个可用的——且平凡的——自然效应。但它仍然是强大的，在任何使用车轮或滚动部件的地方都被利用。

现象是所有技术产生的不可缺少的源泉。所有技术，无论多么简单或复杂，都是对某种效应——或者更常见的是多种效应——使用的包装版本。

说服自己相信这一点的一种方法是想象你必须测量一些不容易测量的东西。假设你在零重力的太空中，必须测量一个小金属部件的质量。你不能把它放在秤上，或用它作为摆锤，或在弹簧上振荡它——所有这些都需要重力。你可能会想到让它在两个弹簧之间振荡，或以某种方式加速它并测量所需的力：你可以通过这种方式间接测量质量。但注意你在寻找的是某种现象，某种效应，它随着你试图测量的东西而变化。与所有技术一样，你需要某种可靠的效果来构建你的方法。

这样的例子听起来有点像传统上用于本科考试的物理难题，那种需要你用气压计、一团绳子、一支铅笔和封蜡来测量建筑物高度的问题。这里有一个同样具有物理难题风味的例子，因为它从一个问题开始，逐步找到可用于解决它的效应。这是一项依赖于四种基础效应的现实世界技术。

问题是如何探测围绕遥远恒星运行的行星（被称为系外行星），我将描述的技术是由天文学家Geoffrey Marcy和Paul Butler在1990年代开发的。直到最近，没有现存的望远镜能够直接看到系外行星——它们太遥远了。所以天文学家被迫寻找它们的间接证据。Marcy和Butler从一个简单但微妙的现象开始。将恒星想象为漂浮在太空中，距离许多光年。行星对它们围绕运行的恒星提供微弱的引力拖拽，这导致恒星以规律重复的方式来回移动。恒星的振荡很轻微，每秒几米。而且很慢；它发生在行星数月和数年的轨道周期内。但如果天文学家能够探测到它，他们就能推断出行星的存在。

但如何探测这种缓慢的振荡（或天文学家称之为摆动）？现在进入两个进一步的效应。来自恒星的光可以被分解成具有其独特颜色带（或光频率）的光谱；如果恒星相对于我们移动，这些线会稍微移动（著名的多普勒效应）。将这两种效应结合起来，Marcy和Butler可以将望远镜指向选定的恒星，将其光分解成光谱，并试图通过寻找其光谱线在数月或数年期间的来回移动来测量任何摆动。这听起来很直接，但有一个困难。这在恒星光谱中引起的移动是微小的。如果你将光谱中的特定频率线想象为对应于音乐音阶上的中央C，Marcy和Butler正在寻找相当于C和C#之间距离的1/100百万分之一的移动。你如何测量光谱中如此无穷小的移动？

Marcy和Butler——这是他们的关键贡献——使用第四种效应来做到这一点。他们安排恒星的光通过碘气池。通过气池的光在该气体特有的特定频率处被吸收，所以恒星的光谱显示出黑色的“吸收带”，不像叠加在其上的超市条形码。碘池不移动，所以其带子起到类似固定尺子的作用，可以用来辨别恒星光谱线在向观察者靠近或远离时的微小移动。该技术需要大量的改进——Marcy和Butler花了九年时间来完善它。但它足够敏感，可以测量恒星每秒10米左右的运动，这足以推断系外行星的存在。

这种技术更像是一个拼凑起来的物理实验——这正是它的本质——而不是高度复杂的商业装置。但它说明了将效应组合起来实现目的的使用。在这种情况下有四种效应：恒星摆动是由行星的存在引起的；恒星的光可以被分解成光谱线；如果恒星相对于我们移动（摆动），这些光谱线会移动；通过气体的光产生固定的吸收线（可以作为恒星光谱中任何移动的基准）。被正确捕获并组织成有效的技术后，这些效应已经发现了大约150颗新的系外行星。

我之前说过，技术基于某个概念或原理。这与技术基于现象如何相符？原理和现象是同一回事吗？答案是否定的——至少按我使用“原理”这个词的方式不是。技术建立在某种原理之上，即“事物的某种方法”，这构成了其工作的基本理念；而这个原理反过来利用某种效应（或多个效应）来实现这一点。原理和现象是不同的。某些物体——摆或石英晶体——以稳定的给定频率振荡，这是一种现象。利用这种现象进行计时构成了一个原理，并由此产生了时钟。高频无线电信号在金属物体存在时显示干扰或回波，这是一种现象。利用这种现象通过发送信号并检测其回波来探测飞机构成了一个原理，并产生了雷达。现象仅仅是自然效应，因此它们独立于人类和技术而存在。它们没有附加的“用途”。相比之下，原理是为某种目的利用现象的想法，它确实存在于人类和使用的世界中。

在实践中，在现象能够用于技术之前，必须对其进行利用和设置以使其正常工作。现象很少能以原始形式使用。它们可能需要被引导和调整才能令人满意地运行，并且它们可能只在狭窄的条件范围内工作。因此，必须找到正确的支持手段组合来为预期目的设置它们。

这就是我在上一章中提到的支持技术发挥作用的地方。正如我所说，其中许多技术是为了支持基本原理，为其提供能量，管理和调节它。但许多技术也是为了支持所使用的现象，并安排它们适当地执行所需的功能。Marcy和Butler的碘池必须保持在正好50摄氏度；需要一个加热装置来安排这一点。恒星的光谱在光谱仪内部会轻微模糊；需要计算机方法来纠正这一点。地球本身在太空中运动；需要进一步的基于数据的算法来纠正这一点。恒星的光可能显示强度爆发；还需要更多的计算机方法来筛选出真正的偏移。所有这些需求都需要自己的组件和部件。加热装置需要绝缘和温度控制组件。计算机方法需要专门编写的软件。使现象工作需要大量的组件和支持技术。

这为技术由模块组成提供了比我之前提到的为了设计或装配方便而进行“分块”更深层的原因。用于使现象可用于特定目的的子系统本身就是技术，它们依赖于自己的现象。因此，实用技术由许多现象协同工作组成。无线电接收

器不仅仅是零件的集合。它也不仅仅是一个微型信号处理工厂。它是现象集合的协调——电感、电子吸引和排斥、电子发射、电阻上的电压降、频率共振——所有这些都被召集并设置为特定目的协同工作。

几乎总是需要设置这些现象并通过将它们分配到不同的模块来分离它们。在电子技术中，你不希望将电感器放置在电容器附近（这可能导致不需要的振荡）。在飞机动力装置中，你不希望将燃烧放置在测量（比如）压力降的设备附近。因此你将这些现象分配到不同的模块中。

技术的本质

我们现在对技术有了比说它是达到目的的手段更直接的描述。技术是被捕获并投入使用的现象。或者更准确地说，我应该说它是被捕获并投入使用的现象集合。我在这里使用“捕获”这个词，但许多其他词也同样适用。我可以说现象被利用、抓住、获得、使用、采用、加以利用或为某种目的而开发。但在我看来，“捕获并投入使用”最好地表达了我的意思。

这个观察使我们回到我在本书开始时提出的问题：技术的本质是什么？技术在其最深层本质上是什么？对我来说，答案就是我们刚刚得出的：技术是被捕获并投入使用的现象。或者更通常地说，是被捕获并投入使用的现象集合。这之所以是核心的原因在于，技术的基本概念——使技术完全工作的东西——总是使用某种核心效应或多种效应。在其本质上，技术由为某种目的而编程的某些现象组成。我在这里故意使用“编程”这个词来表示使技术工作的现象是以有计划的方式组织的；它们为使用而被协调。

这给了我们另一种表述技术本质的方式。技术是为我们的目的而对现象进行的编程。

这种编程不必是明显的。如果我们从外部观察技术，它也不必是可见的。如果我们从外部观察喷气发动机(jet engine)，我们所能看到的只是它提供动力。相当大的动力。在这个层面上，动力装置只是一种手段——一个提供推力的设备——也许是一个非凡的设备，但我们仍然可以认为它是理所当然的。如果我们更深入地观察它，比如说当它的整流罩被拆除进行维护时，我们可以看到它是一个部件的集合——一团管道、系统、线路和叶片的缠结。现在发动机明显是可执行组件的组合。这更令人印象深刻，但仍然是我们可以认为理所当然的东西。但再深入观察，这次看看可见部分之下的东西。动力装置实际上是一个被“编程”协同工作的现象集合，是现象协同工作的编排。

这些现象没有一个是特别深奥的；大多数都是相当基本的物理效应。让我列举其中一些（括号中是使用它们的系统）：当能量传递给流体时，流体流动的速度和压力会发生改变（用于压缩机compressor）；某些碳基分子与氧气结合并加热到高温时会释放能量（燃烧系统）；热源和热汇之间温度差越大，热效率越高（仍然是燃烧系统）；某些分子的薄膜使材料能够轻松地相互滑动（润滑系统）；撞击在可移动表面上的流体流动可以产生“功”（涡轮turbine）；载荷力使材料发生偏转（某些压力测量装置）；载荷力可以通过物理结构传递（承载轴承和结构组件）；流体运动增加会导致压力下降（伯努利效应Bernoulli effect，用于流量测量仪器）；以某种速度排出的质量产生相等且相反的反作用力（风扇和排气推进系统）。我们还可以添加许多其他机械现象。然后我们可以添加电气和电子现象，这些是发动机控制、传感和仪表系统的基础。我们还可以添加其他现象，例如光学现象。每个这些系统都利用某种现象，而且由于系统具有分形重复性，我们正在检查的整个设备一直到其基本部件都在利用现象。

所有这些现象——数十种——都被捕获、封装在大量设备中，并被复制，其中一些在成千上万个相同组件中被复制成千上万次。所有这些现象都在完全正确的温度、压力和气流条件下被捕获、控制并被驱使并行工作；所有这些都以完全正确的时机协调执行；所有这些都在极端的振动、热量和应力下持续存在；所有这些协同工作以产生数万磅的推力，这不是理所当然的。这是一个奇迹。

从这个角度来看，运行中的技术——在这种情况下是喷气发动机——不再是一个简单的工作对象。它变成了一个新陈代谢。这不是观察任何技术的熟悉方式。但我的意思是，技术变成了一个交互过程的复合体——一个被捕获现象

的复合体——相互支撑、相互使用、相互”对话”、相互”调用”，就像计算机程序中的子程序相互调用一样。这里的”调用”不必像在计算中那样按某种顺序触发。它是持续的和连续交互的。一些组件开启，一些关闭；一些连续运行。一些按顺序运行；一些并行运行。一些只在异常条件下才启动。

对于设备技术，如我们的飞机动力装置，这种调用更可能在时间上是连续的和并行的，比如说当燃烧系统”要求”或在连续供应高压缩空气用于燃烧的条件下执行时。这更像是计算机算法的并发运行，它们相互”对话”，总是开启的，并且连续交互。对于方法技术——工业过程或算法——调用更倾向于按顺序进行。它更像标准顺序操作计算机程序的运行，但仍然是一个交互的动态过程——一个新陈代谢。

从这个角度来看，技术不仅仅是一种手段。它是为了目的而对现象的编程。技术是现象为我们所用的编排。

这有一个后果。我在[[第1章]]中说过，技术没有整齐的遗传学。这是真的，但这并不意味着技术不具备类似基因的东西。我提出，现象是技术的”基因”。当然，这种相似性并不完全准确，但我仍然发现这样思考很有帮助。我们知道生物学通过激活基因来创造其结构——蛋白质、细胞、激素等。在人类的情况下，大约有21,000个这样的基因，这个数字在果蝇和人类之间，或人类和大象之间变化不大。单个基因并不对应特定的结构；没有单一基因创造眼睛甚至眼睛颜色。相反，现代生物学理解基因集体充当创造巨大多样性形状和形式的编程语言的元素。它们的运作很像固定的音调、节奏和乐句集合充当创造非常不同音乐结构的编程语言。生物体通过使用基本相同的基因集合”编程”以不同序列激活，以许多不同的形状和物种创造自己。

技术也是如此。它通过以多种不同方式”编程”一组固定的现象来创造其结构——各种技术。当然，新现象——新的技术”基因”——随着时间推移会添加到这个固定集合中。现象不是直接组合的；首先它们被捕获并表达为技术元素，然后再进行组合。使用中的现象可能比生物基因少，但类比仍然适用。生物学将基因编程为无数结构，技术将现象编程为无数用途。

[目的性系统]

这里正好可以处理读者可能已经想到的一个问题。我将技术定义为实现目的的手段。但实现目的的手段有很多，其中一些根本不像技术。商业组织、法律系统、货币系统和合同都是实现目的的手段，所以我的定义使它们成为技术。此外，它们的子部分——比如组织的细分部门和部门——也是实现目的的手段，所以它们似乎也具有技术的属性。但从某种意义上说，它们缺乏技术的”技术性”。那么，我们该如何处理它们呢？如果我们不承认它们是技术，那么我将技术定义为实现目的的手段就是无效的。但如果我们将它们视为技术，我们又在哪里划界呢？马勒交响乐是技术吗？它也是实现目的的手段——比如提供感官体验——而且它也有组成部分，这些部分反过来也实现目的。那么马勒是工程师吗？他的第二交响乐——如果你能原谅这个双关语——是现象向目的的orchestration(编排)吗？

当我遇到这个问题时，我倾向于忽略它，将技术限制在作为设备和方法的手段上。但我不想这样做。如果我们能够接受所有手段——货币系统、合同、交响乐和法律条文，以及物理方法和设备——都是技术这一观念，那么技术逻辑将适用于比我之前讨论的设备和方法更广泛的事物类别，这将大大扩展我们论证的范围。

所以让我们首先看看为什么有些技术不像标准技术。货币是实现交换目的的手段，因此符合技术的条件。(我这里说的是货币系统，不是我们携带的硬币和纸币。)它的原理是任何稀缺物品类别都可以作为交换媒介：黄金、政府发行的纸币，或者当这些失效时，香烟和尼龙袜。货币系统利用了这样一个”现象”：只要我们相信其他人信任某种媒介有价值，并且我们相信这种信任在未来会持续，我们就信任这种媒介有价值。注意这里的现象是行为性的，而不是物理性的。这解释了为什么货币满足技术的要求但不像技术。它不是基于物理现象的。我上面列出的其他不像技术的技术也是如此。如果我们检查它们，会发现它们也是基于行为或组织”效应”，而不是物理效应。

所以我们可以这样说：传统技术，如雷达和发电，“感觉像”技术是因为它们基于物理现象。非传统的技术，如合同和法律系统，不像技术是因为它们基于“非物理”效应——组织或行为效应，或者在算法的情况下甚至是逻辑或数学效应。标准技术的特征——使我们认识到某物是技术的特征——是它基于物理效应。

到目前为止还不错。但这仍然没有告诉我们应该如何处理这些非基于物理的技术。我们当然可以在本书的论证中承认它们是技术，我也会这样做。但我们也可以认识到，在日常生活中我们通常不把它们看作技术。马勒交响乐通常只是一种美学体验，软件公司通常只是一个组织。但我们应该记住，如果我们选择这样看待它们，这些也是“技术”。马勒非常刻意地在“编程”我们大脑中的现象。具体来说，他在安排我们的耳蜗核、脑干、小脑和听觉皮层中的反应。至少在这个意义上，马勒是一个工程师。

我们可以通过采用一个简单的策略使这一切变得更舒适。我们可以认识到，在整本书中我们实际上一直在谈论一类系统：我称之为目的性系统的一类。这是所有实现目的的手段的类别，无论是基于物理还是非物理的。一些手段——雷达、激光、MRI——我们可以更愿意将其视为传统意义上的技术。其他的——交响乐和组织——我们可以更愿意将其视为目的性系统，更像技术的表亲，即使正式上它们符合技术的条件。这样我们就可以在大部分讨论中谈论更狭窄的物理技术，但当我们想要时也可以扩展到非物理的目的性系统。

这一切似乎是题外话。但它确实确立了我们所讨论内容的范围。我们可以将音乐结构、货币、法律条文、机构和组织——实际上是所有手段或目的性系统——纳入论证，即使它们不依赖于物理效应。通过适当的修改，我正在阐述的逻辑也适用于它们。

[捕获现象]

我在本章中一直在论证现象是所有技术的源泉，技术的本质在于编排它们以实现目的。这提出了一个明显的问题：我们如何首先发现现象并捕获它们以供使用？

我喜欢把现象想象成隐藏在地下，直到被发现和挖掘出来才能获得。当然，它们在地下并不是随意散布的，而是聚集成相关的族群，每个族群形成一条可用效应的矿脉或矿藏——光学现象、化学现象、电学现象、量子现象等等——这些群体的成员一块块地被发掘出来，缓慢而随机地，在漫长的时期内。更接近地表的效应，比如木头相互摩擦产生热量从而生火，通过意外或随意的探索被偶然发现，并在最早的时代就被利用。更深层的是化学效应等矿脉。其中一些被早期专家发现，但它们的完全发掘需要系统性的研究。最深层隐藏现象的发现，如核磁共振(nuclear magnetic resonance)或隧道效应(tunneling)或受激发射(stimulated emission)的量子效应，需要知识的积累和现代技术才能显现。它们需要现代的发现和开采方法——换句话说，它们需要现代科学。

那么科学是如何发现新效应的呢？当然，科学不能直接着手发现新效应；那是不可能的——新效应根据定义是未知的。科学通过捕捉某些与预期不同运作方式的蛛丝马迹来发现效应。调查者在这里注意到某些东西，实验室在那里忽略了某些东西但后来发现了踪迹。伦琴(Röntgen)偶然发现了X射线，他观察到当操作克鲁克斯管(Crooke's tube)（本质上是阴极射线管）时，几英尺外涂有氯亚铂酸钡(barium platinocyanide)的纸板屏幕微妙地发光。有时线索是通过理论推理捕获的。普朗克(Planck)通过理论尝试解释黑体辐射光谱“发现”了量子（或更准确地说，引入了能量是量子化的概念）。新效应总是作为某种努力的副产品宣告自己的存在。DNA中互补碱基配对现象（化学碱基A与T配对，C与G配对），这是所有基因技术的核心，是沃森(Watson)和克里克(Crick)在试图建模DNA物理结构的过程中作为副产品发现的。

这让科学看起来像是一块块地发现新效应，每个都是独立的。实际上，情况并非完全如此。在特定现象族群内较早发现的效应导致后续效应的发现。1831年法拉第(Faraday)发现了电磁感应。他拿了一个铁环，在一侧缠绕铜线，当他将电池连接到线圈时，这在环中建立了强大的磁场。他在环周围缠绕了第二根线圈，注意到当他打开磁场时，这在

第二个线圈中”感应”了电流，他可以用磁罗盘检测到：“立即对指针产生明显效果。”当他断开电池时指针也移动了。法拉第发现了变化的磁场在附近导体中感应电流。

我们可以说法拉第运用了科学洞察和实验来做到这一点，这当然是对的。但如果我们更仔细地观察，我们看到他使用从较早发现的效应中发展出来的仪器和理解来发现感应。电池利用了较早发现的电化学效应。线圈在铁等磁性材料周围缠绕时产生更强磁场的效应最近被乌特勒支的格里特·莫尔(Gerrit Moll)发现。他的电流检测装置利用了奥斯特(Ørsted)十一年前的发现，即电流使磁针偏转。法拉第的发现之所以可能，是因为较早的效应已被利用成现有的方法和理解。

这对现象来说是普遍的。当一个现象族群被挖掘时，较早发现的效应开始创造方法和理解，帮助发现后续效应。一个效应导致另一个，然后又一个，直到最终整条相关现象的矿脉被挖掘。一个效应族群形成一套由矿脉和通道连接的洞室，一个通向另一个。这还不是全部。一个地方的洞室——一个效应族群——通过通道通向别处的洞室——不同的族群。量子现象如果没有事先发现电学现象就无法被发现。现象形成一个由挖掘的洞室和通道组成的连接系统。地下的整个系统是相连的。

一旦现象被挖掘出来，它们如何转化为技术？这是我们稍后将详细探讨的内容。现在，让我只说现象从本质上确实做某些事情，当有人注意到它们所做的事情的潜在用途时，它们开始被利用——看到变化磁场感应电流的现象如何转化为发电手段并不是一个巨大的步骤。

当然，并非每个现象都可以被利用，但当一个现象族群被发现时，一连串的技术随之而来。主要的电学现象在1750年到1875年间被发现——静电效应、电流作用、电场和磁场对电荷的偏转、感应、电磁辐射和辉光放电。随着这些被捕获和利用，一系列方法和设备随之而来——电池、电容器和电感器、变压器、电报、发电机和电动机、电话、无线电报、阴极射线管、真空管。

这种建构过程是缓慢发生的，因为早期以仪器和设备形式出现的效应帮助发现了后来的效应。通过这种方式，现象的发现自我构建而成。现象通过自助式推进的方式累积发展：效应被捕获，利用这些效应的设备被制造出来，进而发现更多的效应。

技术与科学

当然，所有这些都需要理解，或者至少需要对效应及其工作方式的知识。那么这种知识在其中处于什么位置呢？很明显，知识——信息、事实、真理、一般原理——对于我们一直在观察的所有现象都是必需的。所以让我们问一个更尖锐的相同问题。关于现象的正式知识——科学——在其中处于什么位置？科学如何与现象的使用相关联？就此而言，科学如何与技术本身相关联？

科学对于发掘现代现象、更深层隐藏的效应群集以及从这些效应中形成技术是必需的。它提供了观察效应的手段；与效应打交道所需的理解；预测效应行为的理论；以及通常捕获效应供使用的方法。因此，它对于我们与现代现象的所有打交道都是必需的。这很好——甚至是无可争议的。但这直接将我们引入了争议领域。科学似乎发现新颖的效应，而技术利用这些效应，所以看起来科学发现而技术应用。

这是否意味着技术是应用科学？这个观点确实有其支持者。已故的杰出工程学教授约翰·G·特鲁萨尔(John G. Truxal)宣称：“技术仅仅是应用科学知识来实现特定人类目的的应用。”

技术真的是科学的应用吗？仅仅如此？我认为不是，或者至少真相比这复杂得多。一方面，在过去许多技术——动力飞行就是一个例子——几乎没有任何科学就产生了。实际上，只是从1800年代中期开始，技术才大规模地从科学中借鉴。科学大约在这个时候进入技术的原因不仅仅是它提供了更多的洞察和更好的结果预测。而是因为当时开始被利用的现象家族——例如电现象和化学现象——在一个尺度上或在一个没有科学的方法和仪器就无法直接人类观察的世界中起作用。建立用拿破仑时代的大型木制双臂信号装置发送消息的手段仅仅需要常识；建立用电力发送消息的手段（以某种形式的电报）需要对电现象的系统知识。技术专家使用科学是因为这是我们理解更深层次现象如何工作的唯一方式。

但这仍然不意味着技术专家深入科学思想并简单地应用它们。技术专家使用科学思想很像政治家使用已故政治哲学家的思想。他们日复一日地利用这些思想，而对其起源的细节没有太多意识。这不是因为无知。而是因为起源于科学的思想随着时间的推移被消化到技术本身的主体中——进入电子学或生物技术。它们在这些领域与经验和特殊应用融合，创造出自己的本土理论和实践。所以说技术“应用”科学是天真的。更好的说法是它既从科学也从自身经验中构建。这两者累积在一起，当这种情况发生时，科学有机地成为技术的一部分。科学深深地编织到技术中。

但同样深刻地，技术也编织到科学中。科学通过观察和推理获得洞察，但使这些成为可能的是它对方法和设备的使用。科学在很大程度上是通过仪器和方法——通过技术——对自然的探测。望远镜创造了现代天文学，就像哥白尼和牛顿的推理一样。沃森和克里克如果没有X射线衍射的方法和设备以及DNA提取和纯化所必需的生化方法，就无法发现DNA的结构（因此无法发现互补碱基配对现象）。没有观察和理解现象的仪器——没有显微镜、化学分析方法、光谱学、云室、测量磁和电效应的仪器、X射线衍射方法以及大量其他模式——现代科学根本就不会存在。所有这些都是技术，尽管我们通常不这样认为它们。科学从这些中构建其理解。

科学实验呢？它们也与技术有关吗？当然，有些仅仅是希望幸运发现的勘探。但严肃的实验是对自然运作的系统探测，总是带着明确的目的进行的。因此它们是实现人类目的的手段；它们是方法技术，封装或体现在物理装置中。当罗伯特·密立根(Robert Millikan)在1910年和1911年进行他著名的油滴实验时，他的目的是测量电子上的电荷。他构造——组装——了一种方法来做到这一点。这个想法，基本概念，是将很少数量的电子附着到一个微小的油滴上。使用已知强度的电场，他可以控制带电液滴的运动（带电粒子在电场中被吸引或排斥），使其悬浮在重力作用下漂浮或在两个十字线之间缓慢上下移动。通过测量液滴在已知电场中的运动（并单独计算其大小），密立根可以计算出电子上的电荷。

密立根花费了五年时间来完善他的方案。他对自己的方法进行了几个版本的改进。在他进行决定性测量所基于的版本中，他使用雾化器产生微观油滴，并安排负电荷（电子）附着在这些油滴上。然后他可以通过水平显微镜观察，选出特定的油滴，让它在重力作用下（没有电场）在两条水平发丝线之间下落。通过计时油滴在空气中的运动，使用斯托克斯流体运动方程，后来可以确定其大小。然后他可以打开正电场。这会使带负电的油滴向上漂移或保持静止，与重力平衡。从油滴的运动速度（或保持其静止所需的电压）以及已知的大小，他可以计算出其电荷。通过这种方式观察数十个油滴，密立根发现它们的电荷以整数倍变化，对应于附着在它们上面的电子数量。最小的整数值就是单个电子的电荷。

像所有美妙的实验一样，密立根的实验具有优雅和简洁性。但注意它的真正本质。它是达到目的的手段：一种技术或方法技术（注意其中的各个阶段）。这些阶段在组件部件的构造中进行——雾化器、腔室、充电板、电池、离子源、观察显微镜——这些本身就是达到目的的手段。事实上，密立根工作的突出之处在于他对构造的关注。他在五年中不断改进测量的努力是技术性的：他需要不断改进其装置的部件——组件——一件一件地。密立根在研究一种现象，他以完全科学的方式进行。但他构建了一种方法来做到这一点：一种技术。

科学正是以这种方式进行探索的。它使用仪器和实验形式的技术来回答具体问题。但当然，它建立在比这些更多的基础上。它从科学解释、从关于世界如何运作的推理和理论中建立自己的理解。当然，我们可以说，至少这些远离技术。

嗯，不完全是这样。解释确实不像技术。但它们是有目的的构造。它们的目的是阐明世界某些观察到的特征的运作，它们的组件是根据公认规则组合的概念元素。所有解释都是由更简单的部分构造的。当牛顿“解释”行星轨道时，他从更简单的部分，从质量的基本概念和质量间作用的重力以及他的运动定律，构造了一个概念版本。如果你愿意，他构造了一个关于行星如何轨道运行的数学“故事”，使用公认的组件和规则。称牛顿的解释或其他解释理论为技术可能有些牵强。我们可以更舒适地将它们再次视为有目的的系统——技术的形式或技术的近亲。

由此可以得出，科学不仅使用技术，它还从技术中建立自身。当然，不是桥梁、钢铁生产方法和运输等标准技术集合。科学从它使用的仪器、方法、实验和概念构造中建立自身。这不应该令人惊讶。毕竟，科学是一种方法：一种理解、探索、解释的方法。一种由许多子方法组成的方法。剥离到核心结构，科学是技术的一种形式。

最后这个想法可能会困扰——可能会震惊——我的科学读者。所以让我明确我在说什么和不在说什么。我说科学由技术形成：由仪器、方法、实验和解释形成。这些是科学的筋络。我不是在说——绝对不是——科学与技术相同。科学本身就是美的事物。超越的美。它远不止是仪器、实验和解释的核心结构。它是一套道德理念：自然本质上是可知的，可以被探索，原因可以被分离出来，如果以高度控制的方式探索现象及其含义，就能获得理解。它是一套实践和思维方式，包括理论化、想象和推测。它是一套知识——从过去的观察和思考中积累的理解。它是一种文化：信念和实践、友谊和思想交流、观点和信念、竞争和相互帮助。

这些都不能简化为标准技术。实际上，可以想象没有技术的科学——没有望远镜、显微镜、计算机、测量仪器的科学——仅基于思想和推测的科学。但这种想法正好证实了我的观点。没有技术的科学将是薄弱的科学。它将只不过是希腊人基于思想的科学。

这一切把我们引向何处？我们可以这样说。技术通过利用主要由科学发现的现象而建立。同样，科学从技术中建立——或者更好地说，从其技术中形成——从它开发的仪器、方法和实验的使用中形成。科学和技术在共生关系中共同进化。每一个都参与对方的持续创造，并且在这样做时，吸收、消化和使用对方；在这样做时与对方完全融合。两者不能分离，它们完全依赖彼此。科学对于发现和理解深埋的现象是必要的，技术对于推进科学是必要的。

最近，经济史学家Joel Mokyr指出，技术随着人类知识的获得而涌现。他说，在过去四百年中艰难积累起来的知识，连同促进和帮助传播这些知识的社会和科学机构，为工业革命和现代技术奠定了基础。

我相信这一点。事实上，我与Mokyr一样相信，知识的重要性几乎无法夸大。如果没有关于气流通过翼型面（在这种情况下是涡轮和压缩机叶片）的知识，你无法正确设计现代喷气发动机。但我会用不同的方式表达Mokyr的观察。随着现象被发现和探索，它们开始被关于其工作原理的理解半影所包围。这些理解——这些理论和知识——对从中开发技术有很大帮助。事实上，现在它们是不可缺少的。这是因为技术中使用的现象现在在一个尺度和范围内工作，而随意观察和常识无法接触到。过去常识可以为纺织编织生产新设备的地方，现在只有详细的、系统的、成文的、理论知识才能在基因工程或微波传输中产生新技术。或者在寻找系外行星方面，就此而言。但这只是故事的一半。新的仪器和方法从这些被发现和理解的现象中形成。这些技术帮助构建更进一步的知识和理解，并帮助发现更进一步的现象。知识和技术以这种方式一起累积。

在本章中，我一直在谈论现象以及技术如何从中产生。这对技术随时间的发展说明了什么？

大自然拥有很多现象集合，几个世纪以来我们为了自己的目的开采了这些：史前时期的火和金属加工，十七世纪的光学，十八和十九世纪的化学和电力，二十世纪的量子现象，以及二十世纪后期的遗传效应。其中一些效应已被捕获并以技术形式投入使用。这些反过来成为创造更进一步技术的潜在构建块。一些技术（以科学仪器和方法的形式）帮助发现更进一步的现象。这里有一个很好的因果循环。我们可以说新现象提供新技术来发现新现象；或者新技术发现新现象从而导致进一步的技术。无论哪种方式，技术集合和已知现象集合都在齐头并进。

这些都不应该被理解为技术总是直接从现象中产生。大多数技术是由构建块组件创建的，这些组件距离任何对效应的直接利用都有几个步骤。火星探测器由驱动马达、数字电路、通信系统、转向伺服、摄像头和轮子组装而成，而没有对这些背后效应的任何直接认识。大多数技术都是如此。尽管如此，值得记住的是所有技术，甚至是行星载具，最终都来源于现象。所有技术最终都是现象的编排。

最后一点。现在应该清楚的是，没有现象就不能存在技术。但反过来却不成立。现象纯粹就其本身而言与技术毫无关系。它们只是存在于我们的世界中（至少物理现象是这样），我们对它们的形式和存在完全无法控制。我们所能做的就是在可用的地方使用它们。如果我们的物种出生在一个具有不同现象的宇宙中，我们就会开发出不同的技术。如果我们在历史时期以不同的顺序发现现象，我们就会开发出不同的技术。如果我们发现宇宙的某个部分，在那里我们正常的现象不起作用，那么我们的技术就不会起作用，我们只能通过字面上发明我们的方式来探索宇宙的这个部分。这听起来像科幻小说的情节，但当我们试图在只缺少一种效应的太空中运行时，它在更接近地球的小规模上发生：重力。即使是最简单的事情——例如饮水——的方法也必须重新思考。

4

领域，或为了能在其中完成什么而进入的世界

随着现象族——化学现象、电现象、量子现象——被开采和利用，它们产生了自然协作的技术群体。与电子及其效应一起工作的设备和方法——电容器、电感器、晶体管、运算放大器——自然地组合成电子学；它们与电子媒介一起工作，因此可以轻松地相互“对话”。处理光及其传输的组件——激光器、光纤电缆、光放大器、光开关——组合成光子学；它们将光子，即光能单位，传递给彼此以进行不同的操作。这样的分组形成了我在第2章中谈到的技术复数，我现在想更多地谈论它们。特别是，我将论证每个分组形成一种语言，在这种语言中，特定的技术——特定的设备和方法——被组合为该语言中的表达式。

为什么各种技术会聚集成群体？共享一系列效应是一个原因，但这不是唯一的原因。具有共同目的的元素会聚集在一起：斜拉桥的缆索需要锚固装置，而这些装置又需要某些重型螺栓；因此缆索、锚固件和螺栓组件自然地组合在一起。具有共同物理强度和规模特征的元素会聚集：梁、桁架、柱子、钢梁和混凝土板在强度、规模和用途上相匹配；因此它们构成了结构工程的构建模块。而那些反复形成有用组合子部件的元素也会聚集。在基因工程中，DNA纯化、DNA扩增、放射性标记、测序、通过限制性内切酶切割、克隆片段和筛选表达基因等方法，形成了一个自然的构建模块工具箱，特定的程序由此组合而成。

有时元素聚集是因为它们共享一个共同的理论。统计软件包的组件——汇总和分析数据以及执行统计测试的操作——通常假设样本总体呈正态分布，因此在关于它们所处理数据性质的共同假设下协同工作。划分技术集群的总是某种形式的共性，组件协同工作的某种共享和自然能力。

我将称这样的集群——这样的技术体——为domains(领域)。领域将是任何为了形成设备或方法而提取的组件集群，连同其实践和知识的集合、其组合规则以及相关的思维方式。

如果我们想要在后面关于技术如何产生和演化的问题上保持明确，那么保持个体技术和领域之间的区别对我们来说将是至关重要的。有时这种差异看起来很模糊：radar（个体系统）和radar technology（工程实践）听起来非常相似。但它们不是。

一个技术（即个体技术）完成一项工作；它实现一个目的——通常是一个非常特定的目的。一个领域（复数的技术）不完成工作；它仅仅作为一个有用组件的工具箱存在，供提取使用，是一套可使用的实践。技术定义产品或过程。领域不定义产品；它形成技术的星座——一个相互支持的集合——当这些由生产它们的公司代表时，它定义了一个行业。技术是被发明的；它由某人组合在一起。领域——比如整个无线电工程——不是被发明的；它从其个体部分逐片涌现。技术——比如一台个体计算机——给拥有它的人某种能力。领域——数字技术——给整个经济以潜力，这种潜力可以随时间转化为未来的财富和政治权力。

还有另一个区别。技术拥有组件、子组件和部件的层次结构；领域拥有子领域，在这些子领域内还有进一步的子-子领域。在电子学内部存在模拟电子学和数字电子学的子领域，在这些内部存在固态半导体器件的子-子领域；在这个内部又存在砷化镓和硅器件的子-子-子领域。

表述这种区别的一种方式是说，个体技术之于技术体，就如同计算机程序之于编程语言。

Domaining(领域化)

工程中的设计始于选择一个领域，即选择一个合适的组件群体来构建设备。当建筑师设计一座新的办公楼时，出于视觉和结构原因，他们可能会选择玻璃钢组件而不是花岗岩砌体组件。也就是说，他们可能在不同的特征组件调色板之间进行选择，我们也会称这些为领域。通常这种选择——我将称之为设备的domaining(领域化)——是自动的。海洋radar设计师会不假思索地将主振荡器领域化在我们称为电子学的组件群体内，仅仅因为没有其他领域是合适的。

但选择往往需要思考。如今组装计算机操作系统的设计师需要考虑将其领域化在Linux与Windows功能集合之间。当然，任何规模重大的技术都是由几个领域组合而成的。电力发电站是由来自建筑施工、液压、重型电气和电子领域的组件系统构建的。

在艺术中，领域的选择很大程度上是风格问题：作曲家会让主题进入和离开管弦乐队的不同领域，号角部分或弦乐部分，以实现某些感觉和对比。在技术内部，领域的选择决定的不是情绪或感觉，而是组件的便利性和有效性，它能完成什么，如何轻松地与其他组件连接，以及成本如何。技术中的领域化是一项实际业务。

随着时间的推移，特定用途的域选择会发生变化。在数字化到来之前，飞机设计师将控制机翼和稳定面的系统归入机械和液压技术领域。他们使用推杆、拉杆、钢缆、滑轮和其他机械连接装置，将飞行员操纵杆和方向舵的动作与移动飞机控制面的液压机械连接起来。然后在1970年代，他们开始以数字方式重新定义飞机控制域，采用了一种名为fly-by-wire(电传飞控)的新技术复合体。新系统感知飞行员的操作和飞机当前的运动状态，并将这些信息作为信号通过电线传输到数字计算机进行处理。然后计算机再次通过电线将所需的调整指令传输给快速液压执行器，以移动控制面。

Fly-by-wire使飞机控制系统比之前的重型机械系统更轻、更可靠。它们也更快：新控制系统能在几分之一秒内响应变化。而且它们是“智能的”。Fly-by-wire可以使用计算机比人类更准确地设置控制，甚至可以覆盖不当的飞行员决策。

事实上，新的域使得设计本质上不稳定的新一代军用飞机成为可能（用技术术语说，具有“放宽静稳定性”）。这带来了优势。就像你操控不稳定的自行车比操控稳定的三轮车更容易一样，你操控本质上不稳定的飞机比操控稳定飞机更容易。新的控制系统可以稳定飞机，就像骑车人通过反向运动来抵消不稳定性从而稳定自行车一样。人类飞行员的反应速度不够快，无法做到这一点；在早期的手动技术下，本质上不稳定的飞机将无法飞行。

我们可以说在这种情况下，飞机控制经历了一次“创新”。确实如此。但更准确地说，我们应该说飞机控制被不同地域化了——重新域化。这种区别很重要。历史上的创新可能往往是给定技术的改进——建造穹顶的更好方法，更高效的蒸汽机。但重要的创新是新的域化。它们是用不同的组件集合来表达给定的目的，就像动力供应从水轮技术表达转变为蒸汽技术表达一样。

这种重新域化之所以强大，不仅仅是因为它们提供了执行目的的全新且更高效的方式。它们带来了新的可能性。在1930年代，穿越英吉利海峡接近英国的飞机可以被高达十五英尺或更高的大型混凝土声学镜检测到。这些装置可以聚焦来自二十英里外的声音，由听力极其敏锐的监听员操作。到第二次世界大战爆发时，同样的目的由雷达来执行，其有效范围要大得多。我们可以说飞机探测采用了（或者确实开创了）雷达。但我更愿意说它利用了一个新的强大域——无线电工程，这个域正在席卷世界，其组件正在找到许多用途。

域的变化是技术进步的主要方式。

当一个新域出现时，它可能没有直接的重要性。早期的无线电主要局限于无线电报——在没有电报线的情况下发送消息，通常是从船只到海岸。尽管如此，新域的出现构成的不是能做什么，而是更重要的，能做什么的潜力。它激发了那个时代技术专家的思想。1821年，查尔斯·巴贝奇和他的朋友、天文学家约翰·赫歇尔正在为天文学会准备数学表。两人在比较同一数学表的两个先前版本，每个都是单独手工计算的，巴贝奇对他们发现的高频率错误感到恼火。“我希望上帝，”他说，“这些计算是用蒸汽执行的。”巴贝奇的宣言现在听起来很古怪，最终他设计的计算设备不是由蒸汽驱动，而是由手摇齿轮和杠杆驱动。但请注意，他的诉求不是针对新设备，而是针对新域。针对他那个时代的奇迹域。1820年代的蒸汽定义了一个新的可能世界。

任何时期的域实际上不仅定义了什么是可能的，还定义了那个时期的风格。想想你在维多利亚晚期科幻小说中发现的太空船旅行插图。我这里想到的是一本特定的书，儒勒·凡尔纳的《从地球到月球》及其1860年代的法国原版插图。如果你在这本书中看到太空船及其发射装置的插图，你立即认出这些属于儒勒·凡尔纳的时代，不是因为它们的形状或设计。这些是特定的。你认出它们是1800年代中期的，是因为它们所依赖的组件集合：飞行器的铁板包层；将其投射到太空的火炮；容纳这一事业的砖石和锻铁结构。这样的组件集合及其使用方式不仅反映了时代的风格，它们定义了时代的风格。

一个时代不仅创造技术。技术创造时代。因此，技术史不仅是个别发现和个别技术的编年史：印刷机、蒸汽机、贝塞麦工艺、无线电、计算机。它也是时代——整个时期——的编年史，这些时期由其目的如何组合在一起来定义。

你可以看到这一点——或者我应该说，感受到这一点——如果你走进一个精心设计的博物馆展示。博物馆经常有一个特殊的房间，或几个房间，专门用来重现历史的特定时刻。Los Alamos历史博物馆就有这样的展示，展示着战争年代的文物和技术。你会看到化学蒸馏器、计算尺、曼哈顿计划身份证件、穿着军警制服的人体模型、汽油配给卡、老卡车和吉普车的场景。所有这些都与当时执行日常任务所使用的特征性手段——技术——有关。而所有这些，比其他任何东西都更能定义它们所描述的时代。Los Alamos展览本身很朴素，只有两三个房间，但走进其中就像走进了那个时代。

域(Domains)不仅定义了时代，也定义了时代的影响范围。想象一下，试图用Babbage时代的域从地震数据绘制地质图。这需要一个Babbage本人那样的劳动者来设计装置，组装一个能从爆炸回声中绘制地图的地震分析仪。由此产生的机器将是一个奇迹——可能有一个听音器，以及相应的枪色齿轮、杠杆、刻度盘和墨水绘图笔。它会很慢。而且复杂。而且它只适用于地震勘探。Babbage时代的域——机器、铁路、早期工业化学——影响范围有限；它们只允许狭窄的可能性集合。我们这个时代的域呈现出更广泛的可能性。事实上，一个域的有效性有一半在于其影响范围——它开启的可能性；另一半在于为不同目的重复使用相似的组合。这些作用有点像老式排字工人手边保留的常用表达的预制块(法国18世纪的印刷工人称之为clichés)，只不过它们是概念性的，不一定是预制的。

设计作为语言中的表达

一个新的设备或方法是由域的可用组件——可用词汇——组合而成的。从这个意义上说，域形成了一种语言；而由域的组件构建的新技术产物是在域语言中的一种表达。这使得技术作为一个整体成为几种语言的集合，因为每个新产物可能从几个域中汲取。这意味着技术中的关键活动——工程设计——是一种构成形式。它是在一种语言(或几种语言)中的表达。

这不是看待设计的熟悉方式。但请考虑。在语言中有清晰和不清晰的表达；设计也是如此。在语言中有合适和不合适的选择；设计也是如此。语言中有简洁性；设计也是如此。在语言中表达的内容有复杂程度的差异；设计也是如此。在语言中表达的想法可以简单，用一个句子表达；或者可能需要整本书，有一个中心主题和支持这一主题的子主题。设计也是如此。在语言中，对于任何有意的表达目的，都有许多表达选择；同样，在技术中，对于任何目的，都有广泛的构成选择。正如语言中的表达必须按照该语言的规则组合一样，设计也必须按照域中允许组合的规则来构建。

我将称这些规则为语法(grammar)。将语法视为域的“化学”，可以说——决定其允许组合的原则。我在这里使用“语法”一词的常见含义之一。Henry James谈到“绘画的语法”，生物化学家Erwin Chargaff在谈到他1949年在DNA化学中的发现时说：“我在黑暗的轮廓中看到了生物学语法的开端。”James和Chargaff指的不是绘画或分子生物学的属性，而是绘画或生物学的元素如何相互关联、相互作用和结合以产生结构。

域的语法决定了其元素如何结合以及它们在什么条件下结合。它决定了什么“有效”。从这个意义上说，存在电子学、液压学和基因工程的语法。与这些更精细的域相对应的是子语法和子子语法。

这些语法从何而来？当然，最终来自自然。电子学语法背后是电子运动的物理学和电现象的定律。DNA操作语法背后是核苷酸的固有属性和与DNA一起工作的酶。语法在很大程度上反映了我们对自然如何在特定域中工作的理解。但这种理解不仅来自理论。它还来自随经验积累的实用处方：工作温度和压力参数、所用机器和仪器的设置、工艺时间、材料强度、装配的间隙距离——构成该技艺“烹饪法”的一千零一个小知识片段。

有时这种知识可以简化为经验法则。飞机设计界从多年经验中了解到“对于成功的jet airplanes，引擎推力与载荷飞机重量的比值总是在0.2到0.3之间。”但知识往往无法提炼成这样的规则。技术在这方面与艺术并无不同。正如巴黎的Cordon Bleu烹饪无法简化为一套书面原则，专业的electronic design也是如此。烹饪和工程中的语法不仅仅作为规则存在，而且作为一套被视为理所当然的不成文实践，一种可能无法完全用语言表达的实用知识。语法包含了一种经验文化，一种使用技艺。因此，它们更多地存在于从业者的头脑中和他们的共同文化中，而不是在教科书里。它们可能以规则开始，但最终成为概念化技术的方式，一种思维方式。

事实上，正如口语中的清晰表达不仅仅依赖于语法（它依赖于对语言中的词汇及其文化联想的深度了解），技术中的清晰表达也不仅仅依赖于语法。技术中的清晰表达需要对相关领域的深度了解：对所使用组件词汇的流利掌握；对标准模块、以往设计、标准材料、紧固技术的熟悉；对该领域文化中什么是自然和被接受的“洞察力”。直觉知识、交叉沟通、感觉、过往使用、想象力、品味——所有这些都很重要。

技术专家James Newcomb在谈到提供energy efficiency services业务时说：“做好这件事需要了解数千种个别技术，同时具备在特定应用中吸收和优化组合这些技术的能力，要考虑交互效应、控制系统、工艺影响以及能源和需求节约的差异经济学。这是master chef的技能，不是杂货店采购员的技能。”

好的设计实际上就像好的诗歌。不是在任何崇高意义上，而是在于从每个部分的众多可能中做出正确选择的纯粹性。每个部分都必须紧密配合，必须准确工作，必须符合其余部分的相互作用。好设计的美在于恰当性，在于为所达成目标付出最少努力。它源于一种感觉：所有就位的东西都恰当地就位，没有一个部分可以重新安排，没有任何多余。技术中的美并不完全需要原创性。在技术中，形式和词句都大量借鉴自其他表达，所以从这个意义上说，我们可以说，讽刺的是，设计通过组合和操纵陈词滥调来发挥作用。尽管如此，美丽的设计总是包含一些意想不到的组合，以其恰当性令我们震惊。

在技术中，就像在写作或演讲——或 *haute cuisine* 中一样——存在着不同程度的流利性、清晰性和自我表达。建筑学的初学者，就像外语初学者一样，会反复使用相同的基本组合——相同的短语——即使不太合适。有经验的建筑师，深谙该领域的艺术，会摒弃语法作为纯粹规则的任何概念，而会使用对什么组合在一起的直觉知识。而真正的大师会突破界限，会在该领域写诗，会在使用的习惯组合中留下他或她的“签名”。

掌握一项技术实际上是困难的，因为 *technology grammars* 与语言语法不同，变化迅速。*Technology grammars* 起初是原始的和模糊感知的；随着构成它们的基础知识的增长而加深；随着发现良好工作的新组合以及工作设计的日常使用揭示困难而演变。它们永远不会结束。因此，即使是专家也永远无法完全跟上其领域中的所有组合原则。

这种在一个领域的大量投资的一个结果是，设计师很少会从所有可用领域的考虑中将技术组合在一起。艺术家适应自己，Paul Klee 说，适应他的颜料盒的内容。“画家...不是让颜料适应世界。他让自己适应颜料。”在艺术中如此，在技术中也是如此。设计师从他们了解的领域中构建。

[世界的进入]

正如我所说，一个域或技术体系提供了一种表达语言，一个设计师可以从中汲取的组件和实践词汇。*Computation*（或 *digital technology*）是一个集合——一个极其庞大的词汇——由各种部件和零件组成：*hardware*、*software*、传输网络、协议、语言、*very large scale integrated circuits*、*algorithms*，以及属于这些的所有组件和实践。所以我们可以将 *computation*——或任何领域——视为一个准备用于特定用途的元素仓库。

我们可以将这个仓库视为一个工具箱，包含可供使用的元素或功能。但我更愿意将其视为一个领域，一个可以完成某些事情的世界。一个为了能在那完成什么而进入的世界。

域是一个想象中的领域，设计师可以在其中心理构想可以做什么——一个可能性的领域或世界。电子设计师知道他们可以放大信号、改变其频率、从中减去噪声、调制载波、设置定时电路，并利用其他一百种可靠的操作。他们从电子世界中可以实现的角度来思考。更重要的是，如果他们是专家，他们对自己的世界如此熟悉，以至于可以几乎自动地组合操作并预想结果。物理学家查尔斯·汤斯(Charles Townes)发明了激微波器(maser)（激光器的微波前身），他花了数年时间研究与波和原子共振相关的操作和设备：通过场分离离子、共振腔、敏感的高频接收器和检测器、微波光谱学。后来他在发明中使用了这个世界的功能。专家们在域世界中“迷失”自己；他们在心理上消失在其中，就像我们写信时消失在英语世界中一样。他们从目标的角度思考，并将这些目标反推到他们心理世界中的个别操作，就像作曲家将音乐主题反推到表达它的器乐部分一样。

域在另一种意义上也是一个世界。它是一个其用户（不一定是设计师）可以进入执行日常任务的领域，一个可能进行某些操作的世界。使用程序总是相同的。某个对象（或活动或业务流程）被物理地输入到一个世界中。图像处理专家通过将图像扫描到计算机中或数字拍摄，字面上将图像输入到“数字世界”中。一旦到达那里，对象就从一个操作传递到另一个操作，被处理、转换，有时与该世界内的其他活动和对象结合。在数字世界中，图像变成数值数据，因此可以进行对应于色彩校正、锐化、去饱和度、扭曲以产生广角镜头效果、添加背景的数学操作。当完成操作后，对象再次以处理后的形式被带出，用于物理世界。处理过的图像作为被操作的数据，再次转换回显示在计算机屏幕上或存储或打印的真实世界视觉图像。

无论域或其世界如何，这种操作构成了域的真正有用性。我们可以将其视为将某物“向下”输入到特定世界中，在那里以各种方式操作它，然后再次将其“向上拉出”以供使用。现场交响乐可以通过麦克风设备被“带下”到电子世界中，在那里被操作——比如电子处理和录制——然后当它再次进入物理世界被播放为声音时再次“向上带出”。

每个域中可以完成的事情对该域的世界来说是独特的。一些世界提供特别丰富的可能性集合。数字世界可以操作任何可以简化为数值符号的东西，无论是建筑设计、摄影图像还是飞机的控制设置。它提供大量的算术操作或算术和逻辑步骤序列。这些操作可以迅速执行：操作以数字电路的超快开关速度工作。

其他域世界更受限制，在它们能做的事情上更有限。然而它们可以极其有效。18世纪后期的运河提供了一个世界，在其中大宗商品——煤炭、谷物、木材、石灰石，甚至牲畜——可以在载货驳船上便宜且容易地运输。大宗货物的物理运输可以进入运河世界，以实现在那里可以完成的事情。这意味着货物字面上离开了道路和干燥土地的域，进入了一个由驳船马、船夫、船闸和纤道组成的水世界，一个事物移动缓慢但移动仍然流畅且按照以前的标准毫不费力的世界。在这个世界中，货物可以被转移到不同方向——切换到延伸到整个土地的回水和侧向水道上。部分货物可以在中途卸载以为进一步装载腾出空间。当到达目的地时，货物可以再次进入道路和马车运输的域——它开始的物理世界。

运河世界——现在是历史性的世界——缺乏多样性；它实际上只提供一种功能，即材料的运输，甚至这种功能也只在挖掘了运河的地方才可用。但其狭窄性通过其成本效益得到弥补。在运河到达之前，内陆运输只能通过笨重的牛拉车在未铺设的道路上缓慢行进。随着运河在19世纪初在英国变得普遍，煤炭运输成本下降了85%。

在某个领域的世界中能够轻松完成的事情构成了该领域的能力。只要你能将某件事情简化为数值描述以进行数学操作，计算就能很好地工作。只要你能将一项活动简化为可以用驳船装载和运输的东西，运河世界就能很好地工作。电子学（非数字类型）只要活动能以某种方式表示为电子的运动，就能很好地工作。这些领域各自擅长某些操作。当然，原则上你可以在许多不同的世界中完成同样的任务，但效果会有所不同。你可以在数字世界中轻松地对客户列表进行排序。但你也可以将其输入到电子世界中并在那里进行排序。你需要以某种方式安排不同的字母用不同的电压来表示，并提供电路来感知这些电压并按幅度顺序输出它们。这是可行的，但很笨拙。你甚至可以勉强将客户列表输入到运河世界中并在那里进行排序。每艘驳船都可以标记为一个客户，当字母表被慢慢念出时，相应的驳船就会被拉向前方。这会奏效，但这不是运河世界最有效的用途。

正如我所说，不同的世界提供不同的可能性，各有所长。每个世界都提供自己一套容易完成的操作。因此，要处理的对象或商业活动被带入多个世界以利用每个世界能够完成的功能，这是很自然的。光数据传输提供了一个世界——称之为光子学世界——在这里消息可以通过光纤网络发送。这里的主力是光子包（或光量子）。它们可以轻松携带消息并以极快的速度移动，接近真空中的光速。但有一个问题：与电子不同，光子不带电荷，它们是中性的存在，因此难以操控。而且消息每隔几英里就会衰减——光纤电缆中的一些光总是会被吸收——所以它们必须在进一步传输之前被“中继”或放大。这意味着光子流必须被适当地重新成形和调整大小。

在早期，光子学世界没有直接的方法来做到这一点，消息必须不断地离开光子世界进入电子世界，后者可以轻松地重新对齐、放大和切换它们。但电子世界要慢得多；它必须依赖电子响应电场和磁场的运动，这绝不是瞬时的。所以直到适当的光子放大器在1980年代末到来（掺铒光纤放大器，或EDFA），这就像每隔几英里就把消息从高速公路上取下来，放到辅路上进行电子操作，然后再把它放回高速公路上。这个系统是有效的，但不断地离开和重新进入光子学世界是昂贵的，并且拖慢了速度。

这里有一个普遍的教训。在任何活动离开一个世界进入另一个世界的地方，成本都会累积。海运货物集装箱并不昂贵，但将货物从铁路运输领域转移到航运“集装箱世界”需要繁重而昂贵的技术：铁路货场、码头、集装箱装卸起重机和码头装卸工作。这种“桥接技术”通常是一个领域最笨拙的方面。它们造成延误和瓶颈，因此推高了成本。

但它们是必要的，因为它们使领域变得可用，并控制什么可以进入和离开它的世界。我们可以将一个领域视为包含少数几个简化和廉价的核心操作——比如海运集装箱运输。但在领域的外围边缘围绕着这些操作的是较慢且更笨拙的技术，它们允许活动进入其世界并在完成后离开——那个世界的码头和龙门起重机。这些通常是昂贵的。

我之前说过领域反映了它们创造的世界的能力。但它们也反映了其局限性。将设计工作数字化的建筑师几乎可以瞬间产生他们想法的变化，并在设计过程中自动计算材料成本。但数字领域对能够完成的事情施加了自己微妙的偏见。只有现实世界的可量化方面才能被映射到数字世界中并在那里成功地进行处理。因此，数字建筑可以轻松产生以优美数学曲线弯曲和俯冲的几何表面，但正如建筑评论家Paul Goldberger所说，它“对funkiness、随意性、不完整性几乎没有耐心。”“表面是可量化的；funkiness不是。或者，我应该说，funkiness还不能量化。如果有一天它能够——如果有一天你能在屏幕上移动滑块来产生你想要的funkiness程度——那么这个领域就会扩展。但目前这是不可能的。在一个世界中无法完成的事情成为那个世界的局限性。

我将在[[第8章]]中回到领域（或复数意义上的技术）的话题，探索它们如何产生并随时间发展。目前让我们简单地认识到，当我们理论化技术时，我们必须认识到技术的这个中间层——这些技术体——在不同的规则下运作，不同于单个技术。这些技术体或领域决定了给定时代什么是可能的；它们产生了一个时代的特色产业；它们为工程师们提供了可以进入并在其中完成工作的世界。

这些世界没有什么是静态的。随着一个领域的演进和其现象基础的扩展，能够实现的事物不断变化。一个含义是，创新并不是发明的游行队伍，随后被采用：计算机、运河或DNA微阵列的到达和采用。而是在新的可能性世界中，对旧任务的不断重新表达或重新领域化——会计、运输或医疗诊断。

[5]

工程及其解决方案

到目前为止，我们一直在探索技术的本质：它遵循什么原则运作，以及它在最深层意义上是什么。我们已经使用这些原则发展出一套技术逻辑，一个告诉我们技术如何构建以及如何在世界中运作的框架。现在，在本书的第二部分，我们将使用这个逻辑来探索技术是如何产生的，以及技术是如何演进的。

但在开始之前，我想对迄今为止大部分推理背后的某些东西说几句话。我们一直将技术视为不是独立存在的整体对象，而是具有内部解剖结构的事物。确实，一旦我们接受技术是构造物——组件和装配的组合——我们就被迫以这种方式看待它们。这种内部视角会改变我们看待技术的方式吗？

我认为确实如此，在两个重要方面。第一个与技术在其生命周期内如何自我修改有关。如果我们从外部将技术视为独立对象，那么个别的技术——计算机、基因测序、蒸汽机——似乎是相对固定的事物。它们可能在不同版本之间有所不同——计算机从Atanasoff-Berry机器，到Eckert和Mauchly的ENIAC，再到EDVAC——以这种方式它们可能断断续续地变化。但当我们从内部观察时，我们看到技术的内部组件一直在变化，因为更好的零件被替换，材料得到改进，构造方法发生变化，技术基于的现象被更好地理解，以及随着其母领域的发展，新元素变得可用。所以技术不是时不时产生一些变体或更新的固定事物。它是一个流动的事物，动态的、活的、高度可配置的，并且随时间高度可变的。

第二个差异在于我们如何看待技术的可能性（我现在谈论的是集体意义上的技术）。从外部看，集体中的每项技术似乎都满足某些目的，而不是更多。如果我们想要测量，我们有测量方法；如果我们想要导航，我们有全球定位系统。我们可以用测量做特定的事情，用GPS做其他特定的事情。但这是对技术本质的有限看法。技术不仅仅提供一组有限的功能，它提供了一个元素词汇表，可以以无穷新颖的方式组合在一起——编程——用于无穷新颖的目的。

以这种方式看待技术有很大不同。想象未来某个时候计算机已经丢失的文化。其考古学家挖掘出一台1980年代的计算机，一台破旧的老Macintosh。他们急忙将它带回实验室，插上电源，这台古老的机器闪烁着复活了。他们立即发现可以执行的现成功能：一个MacWrite文字处理程序，用于图像制作的MacPaint，一个旧的电子表格。这些独立的功能很有用，它们可以执行特定任务并且做得很好，研究人员长期使用这台机器执行这些分离的任务。

但Macintosh提供的不止这些。在它深处隐藏着Macintosh工具箱，一组可以为通用目的编程的内部命令或函数。这些命令可以以某些规定的方式组合来创建新的未想到的命令和函数。这些新命令本身可以被命名并用作其他组合的组件。经过一段时间在旧档案中搜寻Macintosh知识后，研究人员了解了这一点并获得了内部命令的访问权限。他们发现如何获取这些个别命令并将它们组合在一起做新的事情，并将它们用作新命令的构建块。此时整个事业起飞了。研究人员发现他们可以编程Macintosh：他们可以使用一个小的基本命令集合在其中进行组合，这些命令可以以无穷新颖的方式组合，并且可以从更简单的命令构建复杂的命令。

这台机器不再是提供几个独立功能的东西。它现在提供一种表达语言。一个可能性的世界已经打开。

这两个主题，技术通过改变其内部零件来适应以及通过新鲜组合产生新颖结构，将在本书第二部分中不断重复。但记住，我们的主要主题是技术通过组合现有技术来产生进一步的技术，以及通过使用现有技术来利用成为技术的效应而演进。这究竟是如何发生的，是我想要探索的，特别是在第9章中。

在我们进行过程中，我们将想要关注在关于技术的著作中不断出现的两个附带问题。一个是Darwin机制适用于技术的程度：技术中的“新”物种”在多大程度上以某种方式从旧物种的变异和适者生存的选择中产生？另一个是Thomas Kuhn的思想在多大程度上适用于技术。Kuhn论证说，被接受的科学范式随时间精化，遇到异常，并被新的范式取代。这对技术也是如此吗？

我们还需要关注另一个重要方面：创新(innovation)。“Innovation”是技术领域中另一个容易引起歧义的词汇。在通俗理解中，无论多么微不足道，只要有某种改进付诸实践或尝试某种新想法，就会被称为“innovation”。熊彼特也使用了这个词（在我看来容易引起混淆）来表示发明被纳入商业使用的过程。我将在其通俗意义上使用这个词，即技术上的新颖性。但正如我们将看到的，这种新颖性有多种形式：既定技术中的新解决方案、新技术本身、新的技术体系，以及添加到技术集合中的新元素。与其直接探讨“innovation”——这个概念太分散、太模糊，无法发挥作用——我将在接下来的章节中探讨这些类型的新颖性或创新。

开始我们探索的第二部分的一个好地方是一个关键问题，这个问题足够重要，需要我们用这一章和下一章来处理它。进化通过新技术从现有技术中形成而运作，现有技术充当构建块。这种“形成”究竟是如何发生的？新技术通过什么机制产生；或者更确切地说，用于创建新技术的构建块通过什么机制产生？显而易见的答案是通过某种根本性创新过程——如果你愿意称之为发明的话——我们稍后会探讨这一点。但新的构建块元素也来自标准的日常engineering。这起初可能令人惊讶，所以我想在本章中探讨这是如何发生的。

首先让我澄清一下我所说的标准日常engineering是什么。

标准Engineering

工程师在日常活动中究竟做什么？一般来说，他们设计和构建产品。他们还开发方法，建造测试设施，并进行研究以了解材料在实践中的表现或解决方案的工作方式。他们推进对所处理主题的理解，通常在专门的研究所和实验室内部进行。他们调查故障并寻找修复方法。他们管理、就法律事务提供建议、咨询并担任咨询委员会成员。他们思考问题——看似无穷无尽的问题——他们谈论、思考并为之担忧。

所有这些活动都占据着工程师的时间。但我想重点关注并称之为标准engineering的核心活动是执行新项目，在已知和公认的原则下将方法和设备组合在一起。有时这被称为设计和建造，有时被称为设计和制造。无论哪种方式，它都是对已知技术新实例的规划、测试和组装；不是斜拉桥或飞机的“发明”，而是斜拉桥新版本的设计和建造，比如日本的多多罗大桥；或空客的新版本。为方便起见，我将简单地称这种活动为“设计”。

几乎所有设计项目都是这种类型——规划和构建已知技术的新版本——正如几乎所有科学活动都是将已知概念和方法应用于给定问题一样。但这并不意味着标准engineering是简单的。存在一个难度谱系：从使用惯常做法和标准组件的传统项目，到需要实验性做法和部件的项目，再到具有真正难度边缘并带来某些特殊挑战的项目。在接下来的例子中，我将把难度设置在这个谱系的更具挑战性的一端。

标准engineering——设计项目中究竟涉及什么？基本任务是找到一种形式，一套架构组装体，来实现一系列目的。这意味着将目的与某种能够满足它的结构概念相匹配，并组合一系列组装体来将这种结构变为现实。这是一个过程，通常是漫长的过程。教科书通常指出其中的三个阶段。设计从整体概念开始，到实现这一概念的组装体和部件的详细设计，再到它们的制造或建造（在这些阶段之间还有一些必要的反馈）。我们可以引入递归性并说标准engineering从整体概念向下层次进行，到各个组装体，到它们的子组装体，再到它们的各个部件，依次为每个部件重复设计过程。

粗略地说，事情确实是这样运作的。但只是粗略地说。这个过程既从一系列理想特征（或需求）向外进行，也在层次结构中向下进行。目的本身决定了整体概念的要求。这决定了中央组装体的要求，进而决定了其支持组装体的要求，再决定了它们的要求。“我们想要设计一架350座的飞机，”1960年代末波音747的engineering总监约瑟夫·萨特说，“在构思了宽体单层甲板后，我们知道在经济舱部分可以达到九排或十排并排座位。这基本上确定了机身的长度。我们试图优化机翼，为飞机提供我们想要的升力能力、航程和燃油效率。[机翼]翼展首先由空气动力学要求决定，即将起飞重量升到空中，达到良好的初始巡航高度，并最终获得合理的进近速度，以便飞行员能够轻松着陆飞机。”

注意这里的顺序。要求从飞机的关键目的——载运350名乘客——开始，然后向外进行，一个组装体的需求决定下一个组装体的需求。每个层级的组装体必须相互匹配和支持。

我们可以想象这个过程井然有序地进行，按照预先计划一步一步向前推进。对于某些项目确实如此。但在具有挑战性的项目中，这个过程很少是整齐有序的。通常会提出几个概念——整体设计思路——而不仅仅是一个，其中一些可能会进入测试阶段，甚至进入详细设计阶段，然后才被认为是不可行的。即使选定了一个概念，也必须将其转化为组件和工作部件，其中许多必须进行专门设计。设计师无法总是提前准确预测这些部件的性能表现。早期版本可能出现意想不到的故障：它们可能无法按预期工作；可能完全无法工作；或者可能使用比预想更多的重量、能源或成本。因此，必须寻求更好的解决方案或材料来修复这些问题。由于各个组件必须相互平衡以确保整体正常运行，一个组件中的意外缺陷必须通过其他组件的调整来补偿。设计就是一系列妥协的结果。

让事物正常工作需要大量这样的反复试验，因为需要测试和平衡各种想法、组件和单个部件，并揭示其中的困难。如果关键组件无法工作，可能需要重新开始整个项目。如果项目特别复杂——想想登月太空计划——可能需要将其分解为多个步骤，用不同的实验性技术版本作为里程碑，每个版本都建立在从前一个版本中学到的经验基础上。

当项目探索未知领域时，故障几乎是不可避免的。当波音747在1965年被构想出来时，其更大的重量需要比当时使用的发动机更强大得多的动力。这不仅需要标准涡扇发动机的放大版本，还需要转向具有更高涵道比的发动机（接近6:1而不是风扇吹出的空气与核心涡轮喷气发动机空气比例的1:1）。普惠公司(Pratt & Whitney)正在为此目的重新设计其JT9D发动机，这是一个大型涡扇发动机，其中多达77%的推力来自安装在压缩机前面的八英尺直径风扇组件。这种新的动力装置承诺在性能上实现飞跃，但其创新特性造成了反复的困难。其可变导叶(variable stators)（帮助控制通过压缩机叶片的气流）由可移动连杆控制，但这些连杆会周期性地卡住（解决方案是大量使用WD-40润滑剂）。其更高的燃烧温度需要更好的涡轮冷却方式。

最严重的问题之一是发动机安装在机翼上的方式。当发动机运行到高推力时，会向前推动其安装座并“弯曲”，导致其外壳轻微椭圆化。“问题是发动机太大太重，在起飞时会弯曲，” JT9D项目经理罗伯特·罗萨蒂(Robert Rosati)说。偏转不大，大约是百分之四英寸，但这足以导致高压压缩机叶片在外壳底部摩擦。这种问题并不危险；一定程度的摩擦可以容忍而不会造成损害。但它造成了效率和可靠性的不可接受的损失。普惠公司尝试了几种修复方法——加固外壳，使用能够承受磨损的预椭圆化密封件——都没有成功。最终的解决方案是倒Y形框架安装——本质上是一种将推力传递到造成较少弯曲的位置的方法。偏转减少了80%，足以满足目的，但这个挫折延迟了整个747的发布。这样的挫折在像这样的前沿项目中并不罕见。

在747的时代，产生新设计需要手工计算，成千上万次，以及详细的图纸和模型。如今计算机已经接管了这项工作。计算机几乎可以立即将设计理念转换为详细图纸和零件需求，可以创建虚拟模型，有时甚至可以直接指导零件制造。但即使有计算机辅助设计和制造，人工输入仍然很重要。让事物正常工作需要不能留给机器的决策。设计师必须对概念、架构和材料行使判断；以及适当的强度、额定值和容量。在项目的多个层面匹配所有这些需要人工协调。

项目的庞大规模本身就会使协调变得具有挑战性。不同的组件可能由不同的团队设计——甚至是不同的公司——这些需要平衡。一个团队的解决方案可能为另一个团队创造障碍，协调这些可能需要大量的迭代讨论。在这种规模下，标准工程成为一种社会组织形式，完全没有什么整齐有序可言。历史学家托马斯·休斯(Thomas Hughes)强调，一个新项目是否成功——意味着它产生了一个完整可行的设计——在很大程度上取决于围绕它的更大的利益网络：它的工程支持者、资助官僚机构、赞助商和其他从完成的工作中获得或失去权力、安全或声望的参与者。设计和开发是一个非常人性化的组织和行动过程。

工程作为问题解决

之前我说过工程师花费大量时间——有时几乎所有时间——解决问题。为什么会这样？教师教学，法官审判，那么为什么工程师不只是进行工程工作？为什么他们要花这么多时间解决问题？

从我们所看到的情况来看，遭遇厄运似乎是解释的原因——遇到了我们在747项目中看到的那种意外挫折，以及试图协调项目中具有不同利益的众多方面时产生的挫败感。挫折和人为困难当然很重要，但它们并不是主要因素。工程和问题解决出于更系统性的原因而密切相关。

标准工程，正如我所定义的，处理已知技术。这使得每个设计都成为一个新版本——已知事物的新实例（JT9D是喷气发动机的新实例）。但是新实例、新设计项目，只有在技术的某个方面需要有所不同时才需要（如果不是这种情况，已知的标准设计就可以直接取用，然后进行建造）。可能需要新的性能水平（如JT9D的情况）；或者可能需要为不同的物理环境进行设计；或者可能出现了性能更好的零件和材料；或者市场可能已经发生变化，需要该技术的新版本。不管是哪种情况，新设计项目只有在必须为某些不同的东西进行设计时才会启动。

这意味着新项目总是提出新问题。而整体响应——完成的项目——总是一个解决方案：一个想法，一个具体的想法，即将执行给定任务的组件的适当组合。我们可以说，完成的设计是特定工程问题的特定解决方案。

实际上，我们可以说得更多。因为整体解决方案必须满足新条件，其在每个层级选择的组件都需要重新思考——并重新设计以符合要求。当然，一些组件和模块可以直接取用并修改，但一般来说，当构建现有技术的新版本时，每个层级和每个层级的每个模块都必须重新思考，如果它不符合其余部分或不能如预期工作，就必须重新设计。每一次重新设计都提出了自己的问题。因此，更准确地说，我们可以说完成的设计是一组问题的一组解决方案。

这样说并不意味着每个解决方案都是令人满意的。糟糕的解决方案可能导致持续的问题。Boeing 737受到方向舵故障（用行话说是异常）的困扰，这导致了至少一次坠机事故，并花费了相当长的时间来理解和修复。实际上，设计问题往往在技术的生命周期内没有完全解决。为给定飞机提供适当控制系统的问题从Wright Brothers的飞行器一直持续到现代F-35喷气战斗机。电传飞控（计算机控制）作为解决方案被引入，但它本身也是一个随着使用它的每种新飞机类型而进步和发展的解决方案。

组合与解决方案

所有这些告诉我们，为什么在光谱更具挑战性一端的工程本质上是一种问题解决形式，以及为什么工程师不断思考问题。

但这提出了一个新问题。如果工程是关于问题的，那么问题的“解决方案”或一组解决方案究竟是什么？我随意地说解决方案是执行给定任务的适当组合。工程中的任何创造都是为了某种目的的构造——元素的组合。所以我们可以这样重新提出我们的问题：工程中的解决方案如何是一种构造，这究竟如何涉及组合？

实际上，这对我们来说是一个核心问题。在整本书中，我们一直在将技术视为组合——这使得设计成为一个组合过程。在设计中组合究竟如何工作？

当然，工程师选择适当的零件并将它们组装在一起——他们将它们组合——以共同工作。但这并不意味着他们有意识地着手组合任何东西，甚至意识到他们在组合事物。工程师认为自己只是在履行某种目的或满足某些规格要求，以及解决这些问题。当然，这个心理部分需要选择，选择的组件一起形成组合。但组合不是工程创造过程的目标。它是这些选择的结果，是为技术的新实例将元素组合在一起的结果。组合是副产品。

这类似于你表达思想的方式。现代心理学和哲学都告诉我们，思考的初始部分不是用词语进行的。我们从某种无意识层面提取我们的想法——思想——然后找到词语和短语的组合来表达它们。思想存在，其在词语中的表达随之而来。

如果你会说多种语言，你可以看到这一点，或者我应该说感受到这一点。假设你的公司在莫斯科做生意，与你围坐在桌子旁的一些人只说俄语，一些人只说英语。你有话要说，你用俄语表达那个思想；片刻后你用英语表达同样的思想。“思想”以某种方式独立于你如何用词语表达它而存在。你有说某些话的意图，并通过某种潜意识过程找到词语来表达它。结果是话语。它可以是简短和自发的，如在对话中；或者是冗长的，逐片组合的，如你正在准备的演讲。无论哪种方式，它都是为了某种目的而联系在一起的想法和概念的组合，用句子和短语表达，最终用词语表达。你没有意识到创造组合，但你确实做到了。

技术也是如此。设计师意图某些东西，选择一个工具箱或表达语言，在他或她的“心眼”中构想实现所需的概念和功能，然后找到合适的组件组合来实现它。这种构想可以在某个时候多少自发地发生。或者可以是拖拉的，分部分组合，经过大量修改。我们将在下一章更详细地探讨这种创造是如何运作的。但现在请注意，与语言一样，意图先行，实现意图的手段——组件的适当组合——紧随其后。设计就是表达。

这对工程及其作为创造性领域的地位有着重要含义。工程常被认为不如其他设计重要的领域那样具有创造性——例如建筑或音乐。工程当然可能是平凡的，但建筑也是如此。工程中的设计过程在原则上与建筑、时装或音乐中的设计过程并无不同。它是一种组合形式，一种表达形式，因此对我们与这些领域相关联的所有创造力都是开放的。

工程被认为不如其他创造性领域受人尊敬的原因是，与音乐或建筑不同，公众没有受过训练来欣赏一件特别精良的技术作品。计算机科学家C. A. R. (Tony) Hoare在1960年创造了快速排序算法(Quicksort algorithm)，这是一个真正美丽的创造，但没有卡内基音乐厅来表演算法以赞扬他的作品。还有另一个原因。技术作品很大程度上是隐藏的。它们往往位于内部——谁能看到手机设计师是如何解决特定问题的——隐藏在某些外壳内，或在算法代码行中，或在某些工业过程中，对未受过训练的人来说完全不可见。

偶尔创造力是可见的。在二十世纪的前几十年，瑞士工程师Robert Maillart创造了一系列桥梁，这些桥梁作为通用技术并不新颖，但却像Le Corbusier或Mies van der Rohe的任何创作一样具有创新性。在桥梁用装饰品点缀并用厚重砌石建造的时代，Maillart的桥梁显得优雅。即使在今天，它们看起来仍然大胆现代。土木工程师David Billington将Maillart 1933年在瑞士伯尔尼附近的Schwandbach桥描述为“有史以来建造的两三座最美丽的混凝土桥梁之一”。它似乎不是跨越峡谷，而是漂浮在峡谷上方，一个几乎鲁莽纤细的物体，极其创新。

然而作为一个建筑，Schwandbach没有使用新的形式：它仍然只是一个由拱顶上的垂直构件支撑的桥面，这是Maillart 时代广泛接受的标准形式。它没有使用新材料：钢筋混凝土自1890年代中期以来就一直在使用。它也没有使用新部件。Maillart通过几乎平凡的手段实现了他表达的优雅。经过大量几何分析——他在数学方面并非天赋异禀——他学会了大大加强桥面刚度。这有助于将重载荷（一端的卡车）均匀分布到整座桥梁上。想象一下桥梁的物理模型，其中支撑拱是一条金属带，牢固地固定在两个端块之间并在它们之间弯曲。现在在顶部放一个桥面——一条平坦的表面带——由固定在拱上并锚定在每端块上的垂直杆支撑。在一端加载桥面会向下压在该侧的拱上，并使其在另一侧向上推。如果桥面是软的，它会弯曲，所有这些向下的力将不理想地集中在一个地方，即拱的受载一侧。但如果桥面是硬的，它的坚固性会抵消拱未受载一侧的向上推力，并作为反作用向下压。因此负载将更均匀地分布到整座桥梁上。

正是这个“解决方案”允许拱和桥面的轻盈而不牺牲强度——这就是优雅所在。轻盈还允许从最少的脚手架进行施工，这些脚手架可以从地面向上建造。Maillart还学会了熟练地使用钢筋混凝土这种新媒介，这使他摆脱了厚重的石砌。他摒弃了装饰，这在很大程度上是他的结构今天仍然看起来现代的原因。这种形式既有效又经济。而且创新。然而它之所以成功，是因为它不仅仅是这些。各个部分和材料结合起来给整体带来了流动性和和谐性。完成的物体是一件技术作品，但它很大程度上也是一件艺术品。

我不想浪漫化标准工程或其大师级从业者。你在Maillart桥梁中发现的那种精湛技艺并非出自“天才”。它更多地来自多年慢慢积累的知识和专业技能，这正是Maillart所拥有的。并非所有标准技术实例都与Maillart的作品属于同一类别。大多数项目包括将标准解决方案应用于标准问题。所需的尺寸或规格有所改变，但除了从某些标准模板进行重新计算和重新设计外，不需要更多。尽管如此，即使是最平凡的项目也是问题的解决方案，或一系列问题的一系列解决方案，因此对创造力是开放的。

这会产生一个后果。设计是选择解决方案的问题。因此它是一个选择的问题。看起来选择是受限的，因为技术的所有部分都受到重量、性能和成本等因素的严格约束。但约束更多时候会使正在解决的问题复杂化，因此需要更多的部件来完成工作。对于复杂的项目，表达的选择——解决方案和解决方案内的解决方案（子解决方案）的数量——是巨大的。任何技术的新版本都可能成为大量不同配置的源泉。

实际上，配置的数量会少于可能的数量，因为工程师倾向于重复他们之前使用过的解决方案——短语和表达——并且他们倾向于在可能的情况下使用现成的组件。所以单个从业者的新项目通常包含很少的新颖内容。但许多不同的设计师并行工作会产生新颖的解决方案：在用于实现特定目的的概念中；在领域的选择中；在组件组合中；在材料、架构和制造技术中。所有这些累积起来推动现有技术及其领域向前发展。通过这种方式，不同解决方案和子解决方案的经验稳步累积，技术随时间变化和改进。结果就是创新。

经济史学家Nathan Rosenberg谈到了这种小改进的累积影响。“这种修改是通过不起眼的设计和工程活动实现的，但它们构成了工业经济中大部分生产力改进和消费者福利增加的实质内容。”标准工程为创新做出了重要贡献。

标准工程学习。

解决方案成为构建模块

标准工程还做了其他事情。它促进了技术的演进。读者可能已经从我所说的内容中预见到了这一点。大部分时候，工程问题的解决方案是特定的，不会加入整个技术的repertoire(技能组合)。但偶尔一些解决方案被重复使用足够多次，成为独立的对象，它们继续成为用于构建进一步技术的新元素。

如果你查看任何工程手册，你会看到标准问题的大量解决方案。我拥有一本这样的书，机械装置和机械设备源册，展示了“连接旋转轴的十九种方法”和“十五种不同的凸轮机构”。另一本电子学书籍，说明了五种类型的振荡电路：Armstrong振荡器、Colpitts、Clapp、Hartley、Vackar。这些手册为反复出现的问题提供标准解决方案，可以针对特定用途进行修改的设计。有时这些解决方案作为正式的发明出现，是对未解决问题正式寻求的答案。但更多时候，它们通过从业者找到新方法、现有组件和方法的新巧妙组合来解决标准问题而产生。如果由此产生的设计特别有用，它就会被其他人采用，开始在社区中传播，并得到普遍使用。它成为一个新的构建模块。

这个过程很像Richard Dawkins的meme(模因)理论。正如Dawkins最初构想的那样，模因是文化表达的单位，如信念、流行语或服装时尚。它们被复制和重复，并在社会中传播。工程中成功的解决方案和想法以这种方式表现。它们也被复制和重复，并在从业者中传播。它们成为准备用于组合的元素。

实际上，如果使用得足够频繁，一个解决方案——一个成功的组合——就会成为一个模块。它获得自己的名称，并被封装在设备或方法中作为可供标准使用的模块。它本身成为一种技术。这在语言中有一个相似之处，当一个新术语总结了一些复杂的思想群体并成为词汇的新部分时。“Watergate”或“Munich”这些词开始时是总结一套复杂的特定政府不当行为或谈判的构造。现在后缀“-gate”和词语“Munich”已经固化为词汇片段，可用于表示任何政府不当行为或政治绥靖。它们已经成为语言中的构建模块，增加了英语中可用于构造的元素repertoire(技能组合)。

这种解决方案生成构建模块的机制是达尔文式的吗？嗯，正如我所描述的，它听起来是达尔文式的。工程问题的解决方案是变化的，更好的被选择并传播自己。但我们在那里需要小心。新解决方案不是通过增量的逐步变化产生的，就像生物变化被迫要做的那样。它们是可以立即组合在一起的组合，它们来自有目的的问题解决。

我们能够准确说的是这样。工程中解决问题的过程以一种突然的方式产生新颖的解决方案——新颖的组合——这种方式不符合达尔文缓慢的变化累积。然后从这些中，更好的被选择，然后通过工程实践传播，就像达尔文理论一样。其中一些成为构建进一步技术的元素。生成构建模块的主要机制是组合；达尔文机制稍后介入，在只有一些这些解决方案存活下来的筛选过程中。

顺便说一下，这种筛选过程并不意味着在技术领域中，最好的——或最适合的——解决方案总是能够生存下来。当工程中出现几种解决特定问题的方法时，我们可以将这些方法视为在竞争使用权，竞争被工程设计师采用。随着一种解决方案变得更加普遍，它变得更加显眼，因此更有可能被其他设计师采用和改进。一些小的偶然事件——谁在什么时候与谁交谈，谁的方法在行业期刊上被提及，谁推广了什么——可能会在早期推动其中一种方法向前发展。因此，它获得了其他设计师的进一步采用，并可能继续在其领域内“锁定”实践。当然，占主导地位的解决方案必须有其优点，但不一定是竞争者中最好的。它可能主要是因为机缘而获胜的。

这种偶然事件、普及度建立更多普及度和锁定的过程，是我之前广泛写过的内容，所以我不会在这里进一步详述。只需说明，获得普及的技术（或解决方案）往往会获得进一步的优势并锁定，因此在技术的“选择”过程中存在正反馈过程。

你可以在核反应堆发电站设计的案例中看到这种正反馈。这里的主要问题之一是选择将热量从反应堆堆芯传递到涡轮机的冷却材料；另一个是选择调节剂(moderator)，它控制堆芯中中子的能量水平。在核电的早期，人们提出了许多解决方案——一位工程师说，啤酒是唯一没有尝试过的调节剂。三种解决方案得到了广泛开发：轻水(light water, H₂O)同时用作冷却剂和调节剂；重水(heavy water, D₂O)同时用作两者；以及气体（通常是氦气或二氧化碳）用作冷却剂，石墨(graphite)用作调节剂。

不同的国家和不同的公司正在试验这些方案。加拿大偏爱重水，因为它有制造重水的水电基础，而英国人正在试验气体-石墨方案。但没有单一解决方案占主导地位。美国有几个实验系统在进行中。但特别是美国海军，在海曼·里科弗(Hyman Rickover)海军上将的领导下，一直在开发核潜艇项目。里科弗为他的潜艇选择了轻水冷却，尽管钠会更高效、更不占空间，因为在潜艇中钠泄漏的想法让他担心。钠在水中会爆炸，暴露在空气中会起火。此外，工程师们在加压水方面有悠久的历史，而液钠系统则更未经试验。

然后在1949年，苏联爆炸了它的第一颗原子弹。美国的一个反应是通过展示它拥有一个运行中的核反应堆——任何核反应堆——来宣示其核优势。因此，美国原子能委员会(U.S. Atomic Energy Commission)在里科弗的建议下，拿了一个原本用于航空母舰的反应堆，重新设计用于宾夕法尼亚州希平港(Shippingport)的陆基反应堆。这个新反应堆，如同其海军前身一样，使用轻水。西屋公司(Westinghouse)和通用电气公司(General Electric)的后续反应堆都借鉴了这一设计和其他轻水经验；历史学家马克·赫茨加德(Mark Hertsgaard)说，这“给了轻水模型一个领先优势和动力，其他模型从未能够匹敌，并导致该行业将其商业未来建立在一个一些专家后来认为在经济和技术上都较差的反应堆设计上。”

到1986年，全世界(苏联以外)正在建设的101个反应堆中，有81个是轻水反应堆。轻水解决方案已经占据主导地位。它通过小的、几乎是“偶然的”事件在早期领先，并继续主导未来的设计。普及度筛选出了几种可能“解决方案”中的一种。但正如后来的研究所论证的，它不一定是最好的。

在我深入思考“标准工程”之前，我没有预期它会对技术的创新或演进做出很大贡献。但正如你从本章中可以看到的，我现在持有不同看法。标准工程中的每个项目都提出一系列问题，每个完成的结果都是对这些问题的一套解决方案。有用的解决方案会积累并在从业者中传播。其中一些继续成为技术词汇表的补充；它们继续成为可以在进一步技术中使用的元素或构建块。标准工程对创新和演进都贡献良多。

在下一章中，我想转向一个不同的问题：真正的新技术是如何产生的（相对于已知技术的新版本而言）。换句话说，发明是如何运作的。在我研究这个问题之前，我想澄清一点。许多有目的的系统——贸易惯例、侵权法、工会、货币系统——都是新颖的：它们不是之前某种东西的版本。但它们也不总是被有意发明的，所以它们介于标准工程和发明之间。我们需要决定如何处理这一类别。

我们可以注意到，这样的系统只是随着时间的推移以类似于解决方案在标准工程中出现的过程而出现。工会不是被“发明”的。它们是从中世纪发展起来的熟练工匠协会——盟约(covins)和兄弟会(brotherhoods)——演变而来的，目的是提供相互帮助。从一些早期记录中，你几乎可以看到它们正在形成：

剪毛工（负责剪羊毛布绒毛的人）“习惯去找城内同行业的所有学徒(vadletts)，然后，通过他们之间达成的密约和阴谋，他们会规定他们中间任何人都不得工作，或为自己的师傅服务，直到所述师傅和他的仆人或学徒达成协议。”

在这里我们看到了工会的初始结晶形态（内引文来自14世纪）。几个世纪以来，最初作为社会实践的东西逐渐发展、巩固、传播，并根据环境需要采取了不同形式。

这种非刻意的形成过程并不罕见。但我不会在这里详述。我们只需要注意到，为了我们的论证，新的目的性系统可以作为实践或惯例、作为经济或社会某个问题的解决方案而非刻意地产生；如果有用，它们可以继续成为更广泛系统中的组成部分。但我们的主要关注点是刻意创造的新技术——发明。那么让我们问问这些是如何产生的。

6

技术的起源

达尔文的生物进化论需要回答的核心问题是新物种如何产生。我们理论的等同问题是根本性的新技术如何产生。正如我所说，达尔文的解决方案在技术上不起作用。喷气发动机不是通过自然选择偏爱的先前发动机的微小变化累积而产生的。它也不是通过简单的组合，在精神上或物理上以某种混乱的方式将现有部件组合在一起而产生的。“无论你愿意连续增加多少辆马车，”熊彼特说，“你永远不会因此得到一条铁路。”这并不排除组合，但这意味着它必须以某种比纯粹随机性更有序的方式进行。

那么新技术是如何产生的呢？

我们实际上是在问发明是如何发生的。奇怪的是，鉴于其重要性，在现代技术思维中对此没有令人满意的答案。理论化发明的最后一次重大尝试是在1930年代，但这个主题在随后的几十年里失去了时尚，很大程度上是因为被认为处于其核心的“创造性行为”被认为是不可思议的。因此，今天发明在技术中占据的位置就像心理学中的“心智”或“意识”；人们愿意谈论它，但不会真正解释它是什么。教科书提到它，但很快匆匆跳过，以避免解释它是如何工作的。

我们确实知道关于新技术如何产生的几件事。我们知道，主要来自社会学研究，新技术是由社会需求塑造的；它们通常来自在其应用的标准领域之外获得的经验；它们更多地源于支持风险的条件；它们在知识交流中更好地产生；它们经常被同事网络催化。毫无疑问，这些发现是正确的。但它们没有解释新技术是如何产生的，就像指出合适的土壤不能解释种子是如何发芽的一样。

因此，在技术产生的核心，在几十年来产生经济结构和我们福祉基础的过程的核心，存在着一个谜团。那么，构成经济的设备、方法和产品是从什么过程中——从什么来源——产生的呢？这就是我们的问题。

什么符合新技术的条件?

首先让我们明确什么使一项技术成为发明。什么符合根本性新技术的条件，即在某种深层意义上偏离以前技术的技术？我将根本性新技术定义为使用对手头目的来说新的或不同的原理的技术。记住，原理是某物运作的方法，某物工作的基础方式。

这与我们通常认为的发明相符吗？考虑：在1970年代，计算机打印是由行式打印机完成的，本质上是一台带有一套固定字符的电子打字机。随着激光打印机的出现，计算机通过引导激光在静电复印鼓上“绘制”文本来打印，这是一个不同的原理。在1920年代，飞机由活塞-螺旋桨装置驱动。随着涡轮喷气发动机的出现，它们由使用反应推力的燃气涡轮发动机驱动，这是一个不同的原理。在1940年代，算术计算是通过机电手段完成的。随着计算机的出现，它通过电子继电器电路完成，这是一个不同的原理。在所有这些情况下，一项新技术——激光打印机、涡轮喷气发动机、计算机——从一个新的或不同的基础原理中产生。

原理的改变将发明——根本性新技术产生的过程——与标准工程区分开来。它还允许我们在单纯改进和真正创新之间做出关键区别。我们可以说波音747是707技术的发展，而不是发明。它改进了现有技术，但没有使用全新的原理。我们可以说瓦特的蒸汽机是纽科门蒸汽机的改进。它提供了一个新组件——独立的冷凝器——但没有使用新原理。（有时改进在商业上比纯粹的创新更重要。）在每种情况下，我们只需要判断是否有一个新的和不同的基础原理在为手头的目的工作。这适当地允许灰色区域。Maillart的加强甲板是改进的组件，还是新颖的原理？它同时是两者。根据基础原理的新颖程度，在标准工程和根本性新颖之间存在一个连续统一体。

到目前为止，这还没有给我们一个关于新技术如何产生的实际理论，但我们现在有了一个什么符合“新颖”条件的工作标准，为我们指明了道路。

那么新技术是如何产生的呢？

我们想要建立的理念是，新颖的技术——发明——使用新的原理。回想一下，原理是一个概念，是某种效应或现象在使用中的理念。因此，建立在新原理基础上的技术实际上是建立在某种效应或多种效应的新颖或不同用途之上的。这为我们提供了关于新颖技术来源的重要线索。它们源于在概念上和物理形式上将某种目的的需求与可利用的效应（或一组效应）联系起来。我们可以说，发明就是将需求与某种效应联系起来，以令人满意地实现该需求。（当然，要符合超越标准工程的条件，这种效应的原理或使用对于该目的必须是新的。）

我发现将这种联系描绘成一条链条很有用。链条的一端是要实现的需求或目的；另一端是将被利用来满足它的基础效应。连接两者的是整体解决方案、新原理，或用于完成该目的的效应概念。但是要让原理正常工作会产生挑战，这些挑战需要自己的解决手段，通常以使解决方案成为可能的系统和组件的形式出现。我们可以将这些视为构成整体解决方案的链条环节。

但这个比喻还没有完全完成。这些环节中的每一个都有自己要执行的任务，因此可能面临自己的挑战；它可能需要自己的子环节，或子子解决方案。这条链条毫不意外地是递归的：它由环节——解决方案——组成，这些环节需要子环节——进一步的解决方案。而这些可能需要自己的进一步解决方案或发明。我们可以将发明视为将这条链条组合起来的过程。这是一个持续的过程，直到每个问题和子问题都解决为可以物理处理的问题——直到链条完全到位。

在现实世界中，这种联系过程差异很大。一些发明来自独自工作的个人，其他来自分别工作的团队。一些源于巨大的计划投资，其他来自私人的微薄努力。一些从多年的试验中出现，并以一系列未能完全实现目标的中间版本为标

志，其他则完整地出现，仿佛来自虚无。

但无论其变化如何，发明都属于两种广泛的模式。它可能从链条的一端开始，从给定的目的或需求开始，并找到实现这一点的原理。或者，它可能从另一端开始，从现象或效应开始，通常是新发现的现象或效应，并在其中设想某种使用原理。在任一模式中，过程都不完整，直到原理被转化为工作部件。

这两种模式重叠很大，因此没有必要详细描述两者。我将主要探讨从感知到的需求开始的发明过程。稍后我将简要提及另一种模式，即发明从现象开始的情况。

寻找基础原理

那么，让我们假设发明从一个目的开始，寻找某种感知需求的解决方案。需求可能源于经济机会，也许是对于潜在有利可图市场的认识；或源于经济环境的变化；或源于社会挑战；或源于军事挑战。

通常需求不是源于外部刺激，而是源于技术本身内部。在1920年代，飞机设计师意识到他们可以在高海拔的稀薄空气中获得更高的速度。但在这些海拔高度，往复式发动机即使在增压空气泵入压力的情况下，也难以吸入足够的氧气，“螺旋桨的”咬合力”也较小。需要的是与活塞-螺旋桨原理不同的原理。

通常这样的需求会存在一段时间，至少有一些从业者意识到它，但没有人看到明显的解决方案。如果说有的话，标准技术就足够了。因此这个问题在定义上就是具有挑战性的。那些确实接受挑战的人可能将情况遇到为需要实现的需求或需要克服的限制，但他们很快将其简化为一套要求——一个要解决的技术问题。喷气发动机的创始人（“发明家”一词有孤独怪人工作的含义，所以我将避免使用），Frank Whittle和Hans von Ohain，都意识到旧的活塞和螺旋桨原理的局限性以及对不同原理的需求。但他们将这些重新表达为技术问题——一套要满足的要求。Whittle寻求一个轻便高效的动力装置，能够补偿高海拔稀薄空气，并且如果可能的话可以免去螺旋桨。而von Ohain寻求一个“稳定的空气热力学流动过程”，注意到“导入这样一个系统的空气可以在到达任何马赫数敏感的发动机组件之前减速。

“需求变成了一个明确规定的问题。

现在问题向前出现，可以说是在寻找合适的解决方案。思维（目前我将创始人视为单一思维，但通常有几个思维在工作）专注于问题。它扫描可能通过进一步发展满足需求的possibilities。这种搜索是概念性的、广泛的，往往是强迫性的。Newton有句名言评论说，他“通过持续思考”得出了他的引力轨道理论。这种持续的思考允许潜意识工作，可能从过去的经验中回忆起效应或概念，并提供潜意识的警觉性，这样当候选原理或定义问题的不同方式出现时，门口的低语就会被听到。

在这个阶段所寻求的不是完整的设计。正如我之前所说，所寻求的是一个基础概念：某种效应（或效应组合）在实际应用中能够满足问题要求的想法，以及实现这一目标的某种手段的构想。

每个候选原理在经过认真考虑时，都会带来其特有的困难，这些困难构成了新的概念性子问题。新的障碍缩小并重新定义了需要解决的问题，因为头脑意识到如果某个部分能够实现，解决方案的更大部分就会跟着实现，或者至少更容易落实到位。这个过程在不同层次之间来回进行，在一个层次上测试原理的可行性，并试图在更低层次上处理这些原理所引发的问题。

这里的过过程类似于规划登上一座未曾攀登过的山峰的路线。到达山顶就是解决问题。而设想一个基础原理就是假设一条有前途的总体路线或路线的主要部分，并有一个给定的起点。山上有各种障碍：冰瀑、艰难的横切、绝壁、容易发生雪崩和落石的路段。每个新原理或总体攀登计划都会遇到必须克服的困难路段。这里出现了递归性，因为每个障碍路段都成为它自己的子问题，需要自己的解决方案（在我们的情况下是子原理或子技术）。只有当山脚的某个起点以可达到的方式与山顶连接起来时，才能实现总体解决方案。当然，山的某些路段可能以前被攀登过——在我们的语境中，某些子技术可能是可用的，解决方案会倾向于使用这些。所以这个过程可能更像是将已知部分缝合在一起，而不是从头开拓一条完整的路线。这个过程部分是递归的，整体成为各部分的连接，各路段的组合。它形成一个前进计划，或者在我们的情况下是技术的设想。

这些候选路线——这些原理——从何而来？

它们通过几种方式产生。有时一个原理是借用的——从其他用途或领域中挪用过来。Whittle在1928年考虑了许多可能性：火箭推进；使用旋转喷嘴的反应推进；使用螺旋桨的涡轮推进（涡桨发动机）；以及由活塞发动机驱动的导管风扇鼓风机（反应式喷气发动机）——同时思考这些方案会引发的子问题。这些可能性中的每一个都是从用于其他目的的技术中借用的。

有时，新的总体原理是通过结合以前的概念而产生的。1940年，英国的战争努力一直在寻找传输雷达微波的强大方法。物理学家John Randall和Henry Boot想到了空腔磁控管的原理——一种用于为雷达目的产生微波的圆柱形电子管，使用磁场来控制电子流。为此，他们结合了磁控管（其高功率输出）和速调管（一种使用谐振腔放大微波的装置）的积极方面。

有时一个原理是从过去回忆起来的，或者从同事的评论中获得的，或者由理论建议的。事实上，Randall曾在书店偶然遇到了Hertz的书《电波》的英译本。这向他暗示了圆柱形谐振腔的概念——基本上是Hertz在书中分析的线圈谐振器的三维版本。

有时原理——概念性解决方案——是由现有功能拼接而成的，每个功能都解决一个子问题。1929年，Ernest Lawrence一直在寻找某种方法来加速带电粒子进行高能原子碰撞。粒子可以通过电场加速；然而，当时流行的各种提案都被实现足够强大的场所需的极高电压问题所阻碍。一天晚上在大学图书馆浏览当前期刊时，Lawrence遇到了挪威工程师Rolf Wideröe的一篇文章。Wideröe的想法是通过使用相对较低的交流电压以重复冲击的方式加速粒子来避免高电压问题。他提议让粒子通过一系列首尾相连、彼此间有小间隙的管子。这些管子的排列使得粒子到达间隙时正好是这些间隙上的交流电压达到峰值时。但这意味着随着粒子运行得更快，管子需要变得更长。Lawrence看到了这个方案的美妙之处，但计算得出要达到他想要的能量，管子将延伸到他的实验室窗外很远。（现代版本可长达两英里。）对Lawrence来说，Wideröe的想法不实用。

但Lawrence知道，就像当时任何物理学家都知道的那样，磁场会使带电粒子沿圆形路径运动。“我问自己这样一个问题……通过某种适当的磁场安排，让正离子（粒子）在电极之间来回运动，是否可能反复使用两个电极（管子）。”换句话说，他可以通过采用两个管子，将它们弯曲形成由间隙分隔的圆的两半，并使用磁场迫使粒子在其中重复循环来节省空间。然后他可以在间隙上应用Wideröe的精确定时电压，粒子每次从一个管子穿越到另一个管子时都会加速。当它们循环时，它们会获得速度，螺旋向外，最终被引导出来用于高能用途。

这个原理后来成为了回旋加速器。注意这是通过转换问题而得出的——从追求极高电压的问题，到维德曼的子原理（使用低交流电压通过一系列管子），再到劳伦斯的子原理（使用磁场大大减少所需空间）。这里的原理是由现有的部分构建而成的——现有的功能。

在所有这些情况下，原理都是从已存在的事物中获得或受其启发，无论是其他设备、方法、理论或功能。它们从来不是凭空发明的。在发明的创造核心在于挪用，某种形式的心理借用，以半意识的建议形式出现。

有时原理来得很快，几乎不费心力。但更常见的是，整个问题停留在脑海深处，被某种困难所阻挠，看不到任何原理。这种情况可能持续数月，甚至数年。

解决方案出现时，可能来得很突然。“关键的启示来得很急促，”查尔斯·汤斯在谈到他对后来成为激光器的洞察时说道。怀特尔说：

当我在惠特林时，我突然想到用涡轮机来替代活塞发动机[来驱动压缩机]。这个改变意味着压缩机必须具有比我为活塞发动机方案设想的压缩比高得多的压力比。简而言之，我又回到了燃气涡轮，但这

次是产生推进喷射而不是驱动螺旋桨的类型。一旦这个想法成形，我花了这么长时间才想到一个已经变得非常明显和极其简单的概念，这似乎相当奇怪。我的计算让我确信它远优于我早期的提案。

洞察以消除阻碍的形式出现，往往是偶然发现的，要么作为一个可行的子原理组合的整体原理，要么作为为主要原理的使用扫清道路的子原理。它以连接的时刻出现，总是一种连接，因为它将问题与能够处理它的原理连接起来。奇怪的是，对于报告此类突破的人来说，洞察是完整地到达的，仿佛潜意识已经将各个部分组合在一起。它带着一种“知道”解决方案是正确的直觉——一种对其适当性、优雅性和非凡简洁性的感受。洞察来到个人身上，而不是团队，因为它总是从个人的潜意识中涌现。它不是在活动中或疯狂思考时到达，而是在静谧的时刻。

这种到达并不是过程的结束，它只是路途中的一个标记。概念仍然必须转化为技术的工作原型，才能完成整个过程。正如作曲家心中有一个主题但必须编排表达它的各个部分，发明者也必须编排表达主要概念的工作部件。

将概念体现为物理形式

将概念体现为物理形式的新阶段通常已经部分展开。设备或方法的某些组件通常已经在实验中构建，并且可能已经尝试了基本概念的物理试验。因此发明过程的第二阶段与第一阶段重叠。将概念完全变为现实意味着必须制定详细的架构；关键组件必须构建、平衡和建造；测量仪器必须获得；理论计算必须进行。所有这些都需要鼓励和资金支持。竞争在这个阶段有所帮助。事实上，如果竞争对手已经瞥见原理并正在开发它，竞争可能会很激烈。

将主要是想法的东西变为现实会产生许多挑战，这些挑战可能在心理上已经预见到，但现在必须在物理上处理。提出解决方案——然后失败；部件不工作；需要重新设计；必须进行测试。发明的第二阶段主要是为具有挑战性的子问题找到可行的解决方案，具有标准工程的最大特征。

挑战可能相当大。1960年代后期施乐公司的加里·斯塔克韦瑟一直在寻找直接打印数位的方法——计算机能够创建的任何图像或文本——而不是受限于当时完成这项工作的缓慢笨拙的行式打印机（本质上是大型打字机）。他很早就得出了核心概念，即使用激光在静电复印鼓上“绘制”图像的想法。但要使概念成为工作现实，他面临几个困难。其中两个特别需要激进的解决方案。为了使过程商业化，他必须能够在最多几秒钟内将一页书面文本扫描到复印机鼓上。如果要以高分辨率实现这一点，他计算激光束需要能够以每秒5000万次的速率被调制（开关）来在鼓上标记黑点或白点。在当时，以这种速率调制激光还是一个已解决的问题。此外，任何激光和透镜模块都太重了——惯性太大——无法像扫描线到鼓上所需的那样每秒机械地来回摆动数千次。在完成可工作的技术之前，这两个问题都需要解决。

Starkweather通过开发一个非常快速的快门装置解决了调制问题，该装置使用由压电单元驱动的偏振滤光器。他通过保持激光模块静止，仅移动激光束本身来解决惯性问题，使用旋转的多面镜。当镜子旋转时，每个镜面可以在鼓上扫描一条细线，就像灯塔的光束扫描地平线一样。但这个解决方案带来了自己的子子问题。Starkweather计算出，镜子的相邻面需要垂直对齐到极其严格的六弧秒公差；否则相邻扫描线将无法正确偏移，图像会失真。但加工到如此精确公差的成本将是令人望而却步的。一个精心设计的柱面透镜（Starkweather的主要专长是光学）解决了这个问题，确保即使镜面稍有偏差，相邻线条也能靠近。

当你阅读Starkweather对此的描述时，令人印象深刻的是他面临的选择。每个子问题都可能用几种方式解决。Starkweather在选择解决方案，测试它们的可行性，并试图将它们组合成一个连贯的整体。随着子问题和子子问题需要它们自己的创新，他在递归阶梯上向下移动，当这些问题得到解决或被放弃时，又向上移动。这里的进展几乎总是缓慢的。随着知识的获得和子技术挑战的连续解决，它成为跨越广阔前线的推进，始终朝着正常工作的版本前进。

第一个能够做到这一点的试验设备是一项成就。即使它的初始表现微弱，这一刻仍然是珍贵的。在所有创新的记述中，都会记住第一个粗糙装置闪烁生命并证明原理的时刻。设备工作了，里程碑已经通过，在场的人们欣喜若狂。

“在1954年4月初与我其他大部分学生的研讨会上，Jim Gordon冲了进来，” Townes说（谈到maser）。“他跳过了研讨会，为了完成开放端测试。它工作了！我们停止了研讨会，去实验室查看振荡的证据并庆祝。”

最初的演示可能确实很弱，但通过进一步的努力和临时修复——以及随后使用更好组件的版本——一个强大的工作版本出现了，新的基础原理进入了半可靠的存在状态。它已经采取了物理形式。所有这些都需要时间——考验支持者和监督者耐心的时间。在这段时间里，最必要的人类要素是意志，将原理作为一个工作实体带到生活中的意志。现在新设备或方法成为开发和商业使用的候选者。如果幸运的话，它可能作为创新进入经济。

作为一个过程，发明现在完成了。

从现象出发的发明

我承诺简要谈论第二种模式，即发明从现象出发。让我这样做。这种模式再次是将使用中的效果与目的联系起来，但现在过程从另一端开始——效果端。通常有人注意到一个效果，或在理论上假设它，这建议了一个使用的想法——一个原理。与从需求开始的主题一样，支持的部件和零件必须被制定出来，将原理转化为工作技术。

看起来这里的事情应该更简单；现象可能直接建议使用原理。通常确实如此。但同样经常原理并不明显。1928年，Alexander Fleming著名地注意到霉菌内的物质（结果是青霉菌孢子）抑制了葡萄球菌培养物生长的现象，并意识到这可能在治疗感染方面有用。回过头看，效果和用途之间的这种联系似乎是显而易见的。但其他人，1876年的John Tyndall和1920年代的André Gratia，在他之前就注意到了这种效果，但没有预见到它的医学用途。Fleming看到了原理，因为他曾是大战中的医生，对战场感染造成的损失感到震惊，所以他乐于看到似乎是虚假效果的目的。

即使清楚地看到使用原理，将其转化为工作技术也不一定容易。如果效果是新颖的，通常情况下，它可能被理解得很差，处理它的工具可能尚未开发。将青霉菌效果转化为工作疗法首先意味着分离和纯化青霉菌霉菌中的活性物质；然后必须确定其化学结构；然后必须在临床试验中证明其治疗能力；最后必须开发生产方法。这些驾驭步骤需要Fleming能力范围之外的高度专业的生化专业知识，最终由Oxford大学Dunn病理学院的Howard Florey和Ernst Chain领导的生化学家团队进行。从Fleming的发现到青霉素作为工作技术的到来，过去了十三年。

我曾经说过，发明要么始于需求，要么始于现象。但读者可能会反对说，许多案例两者都不是。莱特兄弟显然既不是从需求也不是从现象开始的。自主飞行的目的及其两个基本原理（通过轻量级内燃机推进和通过固定翼翼型产生升力）在莱特兄弟之前几年就已经被接受了。实际上，这种类型的案例一点也不罕见。很多时候，某项技术的基本原理以及对它的需求在某人找到将这些转化为子原理和零部件来完成工作的方法之前几十年就已经被看到了。莱特兄弟所做的是解决了阻碍这些原理成为可行技术的四个关键子问题。通过仔细的实验和多次尝试，他们提供了控制和稳定飞行的手段；找到了具有良好升力的机翼截面；构建了轻量级推进系统；并开发了高效率螺旋桨。他们1903年的动力飞行与其说是“一项发明”的演示，不如说是他们之前的其他人踏出的漫长道路上的一个里程碑。

这样的案例并不构成不同的模式。它们是我所描述的两种模式的变体。但在这里，基本原理要么自然出现，要么在某种程度上是显而易见的。困难在于让原理正常工作，有时这可能需要多年的努力。

发明的核心是什么？

我对发明进行了冗长的阐述。其核心在于看到一个合适的解决方案在起作用——看到一个能够完成工作的合适原理。其余的，允许一定程度的夸张，都是标准工程学。有时这个原理自然出现，作为显而易见或容易借用的东西。但在大多数情况下，它通过有意识的思考到达；它通过联想过程——心理联想——产生。

这种心理联想到底是如何发生的？

回到劳伦斯，注意他并没有想到他最终采用的解决方案：将电磁铁与两个D型容器之间振荡的射频电场结合起来。他从如何使用可实现的行动和可交付的效果——功能性——的组合来得出解决方案的角度思考。他看到了Wideröe小幅度加速粒子想法的前景，并通过使用磁场使粒子转圈而不是必须行进数百米来解决由此产生的空间问题。换句话说，他通过深入他的功能性储备并想象当某些功能性被组合时会发生什么，将问题与解决方案联系起来。

回过头看，劳伦斯的洞察力看起来很辉煌，但这只是因为他使用的功能性对我们来说并不熟悉。原则上，劳伦斯的问题与我们在日常生活中处理的平凡问题没有什么不同。如果我的车在修理厂时我需要上班，我可能会想：我可以坐火车，然后从那里叫出租车；或者如果我愿意早点去的话，我可以打电话给朋友搭便车；或者如果我能在书房里清理出一些空间的话，我可以在家工作。我正在深入我的日常功能性储备，选择一些进行组合，并查看每个“解决方案”带来的子问题。当我们看到这种推理应用于日常问题时，它并不神秘，发明中的推理也没有什么不同。它可能发生在我们不熟悉的领域，但它发生在发明者完全熟悉的领域。发明的核心是心理联想。

我一直在谈论的这种心理联想——劳伦斯的那种——使用功能性。创造者深入这些功能性的储备，想象当某些功能性被组合时会发生什么。但有时联想直接从原理本身形成。原理经常跨领域应用。或者，我应该说现象在各个领域都有回响。在有波的地方——声波、海浪、地震波、无线电波、光波、X射线、粒子波——就有干涉（两个或更多波可以通过叠加产生模式）；有频谱；有共振（系统以其自然频率振荡）；有折射（波在进入新介质时改变方向）；有多普勒效应（如果波源相对于我们移动，频率会发生感知变化）。所有这些都提供了有用的概念——原理。这些反过来可以从传统的使用领域借用并在新的领域中发挥作用。所以思考所需功能性的创造者——我如何测量运动？我如何在某个频率下创造稳定振荡？——从某个给定领域联想并从中借用原理。兰德尔借用了赫兹的线圈共振原理，并设想它以三维形式作为圆柱形共振腔工作。当创造者需要某种功能时，他们可以联想回到在他们了解的领域中产生相应功能的原理。这种机制的核心——称之为原理转移——是看到类比。这是心理联想的另一种形式。

通过说发明的核心是心理联想，我并不是在排除想象力。远非如此。创造者必须具有想象力，首先将问题视为重要，看到它可能是可以解决的，设想几种解决方案，看到每种方案所需的组件和架构，并解决不可避免出现的子问题。但这种类型的想象力并没有什么超凡脱俗的地方。创造者的共同点不是“天才”或特殊能力。事实上，我不相信存在天才这种东西。相反，它是拥有大量功能和原理的储备。创造者在他们将要使用的原理或现象的实践和理论中浸淫已久。惠特尔的父亲是一名机械师和发明家，惠特尔从小就熟悉涡轮机。

然而，创造者不仅仅是掌握功能并在他们的伟大创造中使用一次就完事。发明之前总是有一个漫长的积累功能和在小问题上进行实验的时期，就像五指练习一样。通常在这个使用功能的时期，你可以看到创造者将要使用什么的暗示。在他的启示出现五年前，查尔斯·汤斯在一份备忘录中论证说，“微波无线电”现在已经扩展到如此短的波长，以至于它重叠了一个富含分子共振的区域，在这里量子力学理论和光谱技术可以为无线电工程提供帮助。“分子共振正是他发明激微波器时要使用的原理。

你可以在创造者认为理所当然的东西中看到这种功能专业知识的积累。生物化学家凯里·穆利斯评论他的聚合酶链反应方案的简单性（该方案从样品中的特定DNA链制作大量副本）。“太简单了……涉及的每一步都已经做过了”

但穆利斯的“简单”解决方案是“通过两个引物的重复相互延伸来扩增DNA，这两个引物杂交到特定DNA序列的分离链上。”用通俗的话说，这意味着找到标记要复制的DNA片段开始和结束的短DNA片段（引物），并将DNA双螺旋分离成两条独立的链。一旦添加了引物，两条链就可以从这些引物开始构建（使用一种叫做聚合酶的酶）并获取互补组件形成两个新的双螺旋。一次又一次地重复这个过程，将新的双螺旋副本从2个增加到4个、8个、16个……无限制地增加。这在当时只对具有丰富DNA工作功能经验的从业者来说才是简单的——对穆利斯来说才是简单的。

因果金字塔

我在本章中将发明描述为一个微观过程，通过这个过程，一个人（或几个人）想出了做事的新方法。但这是在一个背景下发生的。一项新技术总是从已经存在的先前组件和功能的积累中出现。我们可以从这个观察中退一步，通过将新技术视为导致相关技术的先前设备、发明和理解的进展的顶点，用更广角的镜头来看待创新。

事实上，支撑任何新设备或方法的是一个导致它的因果金字塔：使用相关原理的其他技术；对解决方案有贡献的先行技术；使新技术成为可能的支撑原理和组件；使这些技术成为可能的曾经新颖的现象；新技术中使用的仪器、技术和制造工艺；先前的工艺和理解；所使用现象和所采用原理的语法；所描述的所有这些层面上人们之间的相互作用。

在这个因果金字塔中特别重要的是随时间积累的知识——无论是科学类型还是技术类型的知识。正如历史学家乔尔·莫基尔和埃德温·莱顿所指出的，这种知识包含在工程实践本身中，也包含在技术大学、学术协会、国家科学院和工程院、出版期刊中。所有这些构成了技术出现的极其重要的基础。

这种更广泛的视角并不否定我之前所说的。因果金字塔支撑发明的微观过程，就像后勤系统支撑战斗中的军队一样。事实上，我本可以用历史因果关系来解释发明，而不是采用我采用的个人方法。这就像从参战军团的历史、他们的军事文化、他们的训练和装备、他们以前的成就以及他们的供应线来解释滑铁卢战役一样。这些最终解释了战争的胜利，但通常我们关注的是军事交战尖端的行动和决策，那里是实际战斗发生的地方。

说新技术有因果历史并不意味着它们的出现是预先确定的。发明受制于新现象发现的变幻莫测和时机、新需求的出现，以及对这些做出反应的个人所获得的洞察力。尽管如此，所有发明都由因果金字塔支撑这一事实意味着，当发明所需的要素和对它的需求到位时，发明往往会出现。

这种时机上的粗略“成熟度”使得一项新技术很少是单一创始人的作品。通常，几组发明者在大致相同的时间设想了这一原理的运作，并尝试制作其工作版本。这种多重努力和关键部分的填补实际上使得很难说是“发明”，即成为第一个的意义。在大多数情况下，我们可以找到一些模糊的先前阐述或该原理的先前体现，也许理解得不好，但确实是先前的。几乎同样频繁地，我们发现由不同工作者制作的一系列原型版本，他们相互借鉴，随着改进的子技术被发现，设备或方法从粗糙的开始逐渐提高效果。计算机就是一个例子。它并不完全是“发明”的。我们可以说Claude Shannon看到了使用电子继电器电路执行算术运算的基本原理。然后，原理运作的各种版本建立起来，相互借鉴并添加连续的改进和组件。计算机不是在单一步骤中形成的。

在这种情况下分配发明是困难的，现代技术著作认识到这一点。计算先驱Michael Williams说：

在与人类发明相关的任何活动中，没有“第一”这样的事情。如果你在描述中添加足够的形容词，你总是可以声称你自己的最爱。例如，ENIAC经常被声称是“第一台电子、通用、大规模、数字计算机”，你确实必须添加所有这些形容词才能有一个正确的陈述。如果你省略其中任何一个，那么像

ABC、Colossus、Zuse的Z3和许多其他机器（有些甚至没有构建，如Babbage的分析引擎）就会成为“第一”的候选者。

Williams是正确的。原理发生在许多人身上的事实，以及存在原理运作的不同工作版本的事实，通常阻挠了将“第一”的功劳分配给单一个人或团体的努力。如果必须分配“发明”的功劳，它应该归属于首先对原理有清晰愿景、看到其潜力、为其接受而奋斗并将其充分投入令人满意使用的个人或团队。通常有几个这样的人。

实际上，即使有单一的创始人，人类互动和非正式的沟通网络也大大增强了我所描述的过程。它们让创始人沉浸在围绕问题和先前努力建立起来的知识中。它们提供在其他领域工作的原理建议，并提供设备和技术知识将概念带入物理现实。

科学和数学中的发明

我为发明制定的逻辑结构是否延伸到科学和数学中的起源？经过一些必要的改变，我的答案是肯定的。原因是无论在科学还是数学中的理论都是有目的的系统，就像技术一样。它们是从组件系统构建的，这些组件系统满足给定的目的，因此与技术相同的逻辑适用于它们。

让我在科学中用读者可能熟悉的案例非常简要地说明这一点。在Darwin从*Beagle*号航行返回后的一年左右，他正在寻找物种形成理论——对他在加拉帕戈斯群岛观察到的不同雀类物种是如何形成的解释。从他的阅读和经验中，他汇集了一组支持性事实和概念，这些可能帮助他找到支持性原理：进化的时间尺度对应于地质时间。个体应该是物种形成的中心要素。性状的变异在某种程度上是可遗传的。变异可以让物种在缓慢变化的环境中适应。个体生命期间获得的习惯可能以某种方式产生可遗传的变化。动物饲养者选择他们希望被遗传的有利性状。实际上，“我很快意识到，选择是人类在制造有用的动植物品种方面成功的关键。但选择如何应用于生活在自然状态下的有机体，在相当长的时间里对我来说仍然是一个谜。”Darwin正在努力了解这些各种候选组件如何共同构建物种形成的解释。

然后在1838年，“我碰巧为了消遣而阅读了Malthus的《人口论》，由于长期持续观察动植物习性而充分准备好欣赏到处进行的生存斗争，我立即意识到在这些情况下，有利的变异倾向于被保存，而不利的变异倾向于被摧毁。这样的结果将是新物种的形成。那么，我终于得到了一个可以工作的理论。”

用我的语言，Darwin没有从Malthus那里接受理论。他借用了一个子原理：“为稀缺资源的持续竞争”选择“种群中最适应的个体。他用这个使他的两个主要原理之一变得可行，即有利的适应性将被选择并可以累积产生新物种。另一个主要原理，即变异产生了选择可以作用的一系列性状，他无法简化为更精细的解释性组件，必须将其视为假设。但我们当然可以说，在将各部分作为解释性功能组合在一起时，他得到了一个可以工作的理论。到达他的基本原理花了他大约十五个月的艰苦思考。其余的，将他的基本原理详细转化为完整理论，所有支持部分和组件连接到他满意的程度，又花了他二十年。

科学理论中的创新，如同技术中的创新一样，本质上是一种链接——将问题的观察数据与大致提示这些数据的原理（概念洞察）相链接，最终与能够重现这些数据的完整原理集相链接。

数学中的创新又如何呢？这也是一种链接，但这次是将需要证明的内容——通常是一个定理——与某些概念形式或原理相链接，这些概念形式或原理将共同构建证明。将定理视为一个精心构建的逻辑论证。如果它能在公认的逻辑规则下，从数学的其他有效组成部分——其他定理、定义和引理（这些构成了数学中可用的部件和组件）中构建出来，那么它就是有效的。

通常数学家会“看到”或努力看到一两个总体原理：如果可证明的话，能提供解决方案总体路径的概念思想。要证明这些，必须从其他公认的子原理或定理中构建。每个部分都推进论证的一部分。Andrew Wiles对费马定理的证明使用了日本数学家Taniyama和Shimura的一个猜想作为基础原理，该猜想连接了他需要的两个主要结构：模形式和椭圆方程。

为了证明这个猜想并连接论证的各个组成部分，Wiles使用了许多子原理。数学家Kenneth Ribet说：“你翻到一页，会简短地出现Deligne的某个基础定理，然后你翻到另一页，会以某种偶然的方式出现Hellecourarch的一个定理——所有这些东西都被调用和使用片刻，然后继续下一个思想。”整体是原理——概念思想——的连接，被架构在一起以实现目标。每个组成原理或定理都源于某些早期的连接。每个原理，如同技术一样，提供某种通用功能——论证的某个关键部分——在整体结构中使用。

科学或数学中的创新与技术中的创新从根本上没有不同，这不应该令人惊讶。这些对应关系的存在并不是因为科学和数学与技术相同。它们存在是因为这三者都是目的性系统——广义解释的达成目的的手段——因此必须遵循相同的逻辑。这三者都是由形式或原理构建的：对于技术而言，是概念方法；对于科学而言，是解释结构；对于数学而言，是与基本公理一致的真理结构。因此，技术、科学解释和数学通过类似类型的启发式过程形成——根本上是问题与将满足它的形式之间的链接。

发明和新颖构建块

我们现在有了关键问题的答案：新颖技术是如何产生的。这种机制当然不是达尔文式的；技术中的新颖物种不是由小变化的累积产生的。它们产生于一个过程——一个人类的且通常漫长的过程——将需求与满足它的原理（某种效应的通用使用）相链接。这种链接从需求本身延伸到将被用来满足它的基础现象，通过支持解决方案和子解决方案。创建它定义了一个递归过程。这个过程重复进行，直到每个子问题解析为一个可以物理处理的问题。最终，问题必须用已存在的部件——组件——（或可以从已存在的部件创建的部件）来解决。发明某物就是在先前存在的事物中找到它。

我们现在可以理解为什么发明变化如此之大。特定情况可能是需求驱动的或现象驱动的；它可能有一个孤独的创始者或多个创始者；其原理可能难以构想，或可能自然出现；将该原理转化为物理组件可能是直接的，或可能在关键子问题得到解决时分步进行。但无论其特定历史如何，所有发明在底层都共享相同的机制：所有发明都将目的与将实现它的原理相链接，并且都必须将该原理转化为工作部件。

这告诉我们技术集合中的新颖构建块是如何形成的？结合本章的论证和上一章的论证，我们可以说新颖构建块以三种可能的方式产生：作为标准工程问题的解决方案（Armstrong振荡器）；作为非刻意发明（货币系统）；或作为真正的发明，使用新原理的根本新颖解决方案（喷气发动机）。无论哪种情况，所有发明都来自于现有技术——已存在元素——的组合，这些技术提供了使新元素工作所需的功能。

我们对个体技术还没有完全完成。新技术不是固定的东西；它会发展。我们可以说它在“进化”的狭义意义上进化；它开始以改进版本出现，因此建立了一个传承线。这种发展，如同发明本身，有其自己的特征阶段。这些阶段是什么，背后是什么？

结构深化

通常新技术的初始版本都很粗糙——在早期阶段，能够工作就已经足够了。它可能是从现有组件或从其他项目中解放出来的零件拼凑而成的；Lawrence的第一台回旋加速器使用了厨房椅子、衣架、窗玻璃、封蜡和黄铜配件。这项新兴技术现在必须基于合适的组件，变得可靠、得到改进、扩大规模，并有效地应用于不同目的。因此其支持者构建合适的零件并调整架构。他们测试更好的材料，发展理论，解决问题，并跟进死胡同。缓慢而实验性地，他们努力取得改进并获得进展。

这项技术开始了沿着发展路径的旅程。

实际上这个旅程通常已经开始了。在将基本概念转化为物理形式的过程中，不同的部分将被测试，并寻求改进。技术的起源和发展之间没有明确的分离。

无论发展如何开始，一旦开始进行，技术的不同工作版本就会出现。其中一些来自技术的创始人，一些来自被吸引到新领域的开发人员群体，一些可能来自为推进新技术而建立的实验室或小公司。每一个都有自己的概念版本。当新技术也开始专门化为适合不同目的和不同市场的不同形式时，还会出现其他版本。雷达在完成探测飞机这一基本目的后，分支为潜艇探测、空中和海上导航以及空中交通管制。

所有这些不同的版本和分支应用为技术问题提供了不同的解决方案。我们可以说，技术在其解决方案中显示出变异。它也显示（或受制于）选择；随着时间的推移，开发人员自由地从许多可用的解决方案中借用，并为他们的设计选择一些。这就是达尔文式变异和选择真正在技术中发挥作用的地方。技术的许多版本通过选择更好的解决方案来解决其内部设计问题，从而在小步骤中得到改进。

但设计师也通过自己的刻意努力来改进技术，援引达尔文并不能告诉我们他们是如何做到这一点的。它也没有解释开发过程中的一个谜题。技术在成熟过程中趋向于变得更加复杂——通常复杂得多。F-35C喷气式战斗机比Wright兄弟的飞行器复杂得多。说这是从Wright时代开始通过变异和选择发生的，这挑战了想象力。必须有超越纯粹变异和选择的东西在起作用。让我们重新审视开发过程，看看那是什么。

内部替换

当一项技术成为商业或军事命题时，其性能被“推进”：它被迫提供更多。其支持者寻找更好的组件，改进其架构，微调和平衡其部件，努力与竞争对手竞争。如果竞争激烈，即使是很小的优势也能带来丰厚的回报。

但一项技术（或更精确地说，其基本原理）只能被推进到某种程度，在某个时候其系统的某个部分会遇到限制它的障碍。因此开发人员努力使集成电路变得更密集，从而容纳更多组件；但在某个时候，生产它们的工艺——光刻技术，受到光波长的限制。他们在雷达早期努力以更高的频率传输，以实现更高的精度和对目标更好的区分；但在更高的频率下，给定的传输源在功率方面会衰减。一项技术只能被推进到某种程度，然后它会遇到某种限制。

这样的障碍对技术的支持者来说是令人恼火的。每一个都形成了一个瓶颈，必须解决才能实现进一步的进展。但尽管这令人沮丧，达到这样的极限是可取的。如果一个设计没有在接近极限的情况下运行，它就会效率低下，可以从中挤出进一步的性能。

开发人员通常可以通过简单地用更好的组件替换受阻的组件——本身就是一种子技术——来克服限制。这可能是使用更好设计的组件，也许是重新思考的解决方案，或者是从竞争对手群体中智力挪用的解决方案。另一种方法是使用不同的材料，比如允许单位重量更大强度的材料，或者在更高温度下熔化的材料。喷气发动机通过为其部件使用极其强大和更耐热的合金而发展了几十年。实际上，开发人员通常寻求的不是更好的部件，而是部件提供的现象的更尖锐版本。因此，大量的开发在于在化学上相似的材料中搜索所使用现象的更有效版本。实际上可以说，大部分材料科学都是关于通过理解产生这些现象的材料特性来寻求现象的改进。

当然，改进的组件将需要对其他部件进行调整以适应它；它将需要技术的重新平衡。它甚至可能需要重新思考技术的架构。当飞机的木制框架在1920年代和30年代被金属框架取代时，整个飞机设计本身都必须重新思考。

我所说的内容表明，这种通过内部替换进行改进的过程适用于整个技术。但根据我们的递归原理，它也适用于技术的所有组成部分：一项技术通过将更好的子部件和子子部件交换到其组件和子组件中而得到改进。这意味着我们需要将技术视为一个对象——更确切地说是一个有机体——它通过其组成部分和子部分在其层次结构的所有级别上同时改进而发展。

还有另一点。技术的发展不仅仅通过直接应用于它的努力。技术的许多部分被其他技术共享，因此大量发展会自动发生，因为组件在该技术“外部”的其他用途中得到改进。几十年来，飞机仪表和控制机制受益于电子组件的外部进步。技术搭载其组件的外部发展。

结构深化

内部替换为我们提供了技术在进步过程中变得更加复杂的部分解释；我们可以想象开发者平均交换进来的部件比它们替换的部件更复杂。但这不是主要解释。另一种发展机制在起作用。我将其称为结构深化。

开发者确实可以通过寻找更好的组件和更好的材料来解决障碍。但他们也可以通过添加一个组件或进一步的部件系统来处理它来解决障碍。在这里，呈现障碍的组件不会被不同的组件替换。它被保留。但是额外的组件和组件被添加到它上面以解决其限制。因此，当jet engines被推动在更高温度下运行，turbine blades在这些极端温度下开始软化时，开发者添加一个旁通气流系统来冷却叶片，或者一个在叶片内循环冷却材料的系统。或者，当早期雷达系统的接收回波与发射器信号重合并被淹没时，他们添加一套部件（统称为duplexer），在一小部分秒内关闭发射器，以便可以接收传入的回波。

通过添加子系统来解决这些限制，技术在演进过程中变得复杂。它们为其结构添加“深度”或设计复杂性。

它们变得更加复杂。

推动这种复杂化的力量不仅仅是技术整体性能的限制。技术不仅需要表现良好。它需要能够在外部条件变化时正常运行；能够执行一系列任务；并且安全可靠。任何这些方面都可能出现限制。因此我们可以说，为了克服限制，技术将添加子系统或组件，以便(a)增强其基本性能，(b)允许它监控并对变化或异常情况做出反应，(c)使其适应更广泛的任务范围，以及(d)增强其安全性和可靠性。

这个观察不仅适用于技术的整体层面。其子系统或组件本身就是技术，它们也发展——被推动——以增强整体性能。因此，再次通过递归，同样的过程适用于它们。设计师将被迫通过根据上述(a)-(d)添加子系统来突破它们的限制：增强性能，对变化的情况做出反应，适应更广泛的任务，以及增强可靠性。新添加的组件和子系统反过来将被推动，被迫在它们的性能极限下运行。设计师将添加进一步的子子系统来突破这些限制。这个过程继续进行，组件挂在主模式上以增强其工作，其他子组件挂在这些上面以增强它们的工作，还有其他组件挂在这些上面。性能在系统的所有级别都得到改善，在所有级别技术的结构都变得更加复杂。

我们可以看到这种结构深化在我们的燃气涡轮飞机发动机例子中递归地运作。Frank Whittle的原始原型有一个单一的压缩机，为燃料燃烧提供加压空气。它是一个径向流压缩机：它吸入空气并“旋转”它快速压缩它。Whittle熟悉这种类型的压缩机并使用它，因为它是最容易实现的设计。但随着要求更好的性能，设计师开始用一个优越的组件替换径向流压缩机：轴流压缩机。将其想象为一个巨大的风扇，其中气流平行于驱动轴。然而，单个轴流压缩机级只能提供约1.2:1比率的增压——这是一个限制。因此，设计师通过使用不是一个，而是几个这样的压缩机来实现优越的空气压缩性能。最终是这些的顺序组件。但这个压缩系统需要在高海拔稀薄空气和低海拔稠密空气以及不同空速下运行，因此设计师添加了一个导向叶片系统来调节进入的空气。系统变得复杂。导向叶片系统反过来需要一个控制组件来感知环境条件并相应地调整叶片。进一步的复杂化。但现在输出的高压压缩空气有时会在意外的压力激增中通过压缩机向后吹——这是一个主要障碍。因此压缩机系统配备了一个防喘振放气阀门系统来防范这种情况。更多的复杂化。防喘振系统反过来需要一个感应和控制系统。更多的复杂化。

通过这种方式，一项技术（在这种情况下是压缩机）在性能上得到了极大改善，扩大了其可操作的环境范围。但这是有代价的。随着时间推移，它会被各种系统和子组件所包围，这些组件被添加上去是为了使其正常工作、处理异常情况、扩展应用范围，并在故障时提供冗余。

在喷气发动机的案例中，随着技术的推进，其他附加装置改善了性能。为了在军用空战条件下提供额外推力，加装了加力燃烧器组件。为了处理发动机起火的可能性，增加了复杂的火警探测系统。为了防止进气区域结冰，添加了除冰组件。专门的燃油系统、润滑系统、可变排气喷嘴系统、发动机启动系统都被加入其中。所有这些反过来又需要控制、传感器以及仪表系统和子系统。性能确实得到了增强。现代航空发动机比惠特尔(Whittle)最初的喷气发动机强大30到50倍，但它们也复杂得多。惠特尔1936年的涡轮喷气原型机只有一个移动的压缩机-涡轮组合和几百个零件；而其现代等效产品拥有超过22,000个零件。

这种通过结构深化改进的过程是缓慢的。对于航空燃气轮机动力装置，这花费了数十年时间。原因在于，不仅必须构思出新的组件和变通方案，还必须对它们进行测试和验证，包含这些组件的新系统必须重新平衡和优化。这需要时间。

这个过程的经济性也控制着时机。如果来自其他开发者的竞争变得激烈，改进就会加速；如果没有竞争，改进就会放缓。开发者可能意识到明显的技术进步路线，但进行这些改进可能不划算。无论是否存在竞争压力，任何时候的改进集合仍将被仔细选择。技术上可实现的新改进可能会被推迟，直到推出整体重新设计变得有利可图。

通过这种方式，开发随着改进的引入而逐版本地向前跃进；随着限制阻碍道路而放缓。这个过程断断续续地进行，严重依赖于结构深化。

结构深化使技术能够改进，通常是相当大的改进。但随着时间推移，它会使新技术被为了卓越性能而需要的组件和子组件所包围。对于物理方法和设备，这可能并不重要。一旦开发成本得到摊销，成本可能只是所使用的材料、空间或增加的重量。但对于其他“非技术”目的的系统，负担可能相当大。诸如军事组织、法律安排、大学管理和文字处理软件等系统也可能通过添加子系统和子部件来获得改进的性能。想想仅仅一个法律安排——税法——复杂性的稳步增加。但这些“改进”的成本——以复杂化和官僚主义的形式——不会摊销。它是持续的，当环境不再需要时，这种开销可能很难摆脱。

锁定和适应性延伸

我描述的两种发展机制——内部替换和结构深化——适用于技术的整个生命周期。早期，新技术是有意识地、实验性地开发的。在其生命后期，它更多是随着其新实例为特定目的而设计时发展；它成为标准工程的一部分。当然，一直以来达尔文机制在起作用。它选择——通常是通过设计师借鉴前辈——从众多内部改进中选出更好的解决方案。

但最终会有这样的时候：组件替换和结构深化都不能为性能增加太多。技术达到成熟。如果寻求进一步进步，就需要新的原理。但不能指望新原理在需要时到达。即使它们确实出现，也可能不容易替换旧原理。旧设计、旧原理倾向于被锁定。

为什么？一个原因是，尽管复杂化很麻烦，但它们使成熟技术比其新兴竞争对手表现更好。这些新技术可能提供未来潜力，但在其幼稚状态下表现不如旧技术。它们无法直接竞争，因此旧技术持续的时间比应该的更长。

旧原理超越其时代持续存在还有另一个原因，一个经济原因。即使新原理确实被开发出来并且确实比旧原理表现更好，采用它可能意味着改变周围的结构和组织。这是昂贵的，因此可能不会发生。1955年，经济学家马文·弗兰克尔(Marvin Frankel)想知道为什么兰开夏郡的棉纺厂不采用美国同行更现代高效的机械。他发现新机械在英国环境下确实会更经济。但它很重，要安装它就必须拆除容纳旧机械的维多利亚时代砖结构建筑。因此“外部”组件或复杂化锁定了内部机械，兰开夏郡的工厂没有改变。

还有另一个原因是心理上的。旧原理继续存在是因为从业者对新技术的愿景——和承诺——感到不舒服。创新不仅仅是做事的新方法，而是看待事物的新方法。

新威胁出现了。它威胁要让旧的专业知识变得过时。事实上，通常新原理的某个版本已经被宣传过或已经存在，但被标准从业者们否定了，这不一定是因为缺乏想象力，而是因为它在新事物的潜力和旧事物的安全性之间产生了认知失调，一种情感上的不匹配。社会学家黛安·沃恩(Diane Vaughan)谈到了这种心理失调：

[在我们作为人类处理的情况下，我们使用]一个由综合的假设、期望和经验构建的参考框架。一切都基于这个框架来感知。这个框架变得自我证实，因为只要可能，我们倾向于将它强加于经验和事件上，创造符合它的事件和关系。我们倾向于忽视、误解或否认不符合它的事件。结果，它通常引导我们找到我们正在寻找的东西。这个参考框架不容易改变或拆除，因为我们看待世界的方式与我们如何在与世界的关系中看待和定义自己密切相关。因此，我们在维持一致性方面有既得利益，因为我们自己的身份面临风险。

新原理也是如此。新解决方案与被接受的解决方案之间的距离越大，这种对先前传统的锁定就越强。因此存在滞后现象——对变化的延迟反应。新事物因旧事物的成功而被延迟，使得技术转换既不容易也不顺畅。

这种对较老的成功原理的锁定导致了我称之为适应性延伸的现象。当新情况出现或对不同应用领域的需求到来时，更容易求助于旧技术——旧的基础原理——并通过“延伸”它来适应新情况。

在实践中，这意味着采用旧技术的标准组件并为新目的重新配置它们，或者为它们添加进一步的装配件以实现新目的。在1930年代，高速高空飞行本可以通过喷气发动机比实际提前几年实现。但设计师们还不熟悉燃气轮机原理。因此，当被迫让军用飞机以在较高海拔稀薄空气中最可实现的速度飞行时，他们适应并延伸了当时的技术，即飞机活塞发动机。这迫使活塞发动机面临限制。不仅在较高海拔氧气稀少，而且将氧气足够快地泵入气缸的能力本身也受

到氧气在四冲程系统内燃烧和处理速度的限制。增压器和其他系统深化被添加以高压更快地泵入空气。活塞-螺旋桨原理的活塞部分被精心制作，充满了巧思。它被延伸了。更难延伸的是螺旋桨。如果它在较高海拔阻力较小的空气中工作，它会失去咬合力。如果被迫以更高转速旋转，它会达到超音速。如果被放大以具有更大半径，其尖端会移动得更快，再次达到超音速。已经达到了根本限制。

这是典型的。在发展的某个阶段，旧原理变得越来越难以延伸。现在新原理获得立足点的道路开放了。旧原理当然会持续存在，但它变得专门用于某些目的。新原理开始精细化。

我在本章和前一章中描述的现象——新原理的起源、结构深化、锁定和适应性延伸——因此具有自然循环。新原理到来，开始发展，遇到限制，其结构精细化。周围的结构和专业熟悉度锁定了原理及其基础技术。新目的和变化的情况出现，它们通过延伸锁定的技术得到适应。进一步的精细化发生。最终，现在高度精细化的旧原理被拉伸超出其极限并让位于新原理。新的基础原理更简单，但它也会逐渐精细化。

因此循环重复，简单性的爆发有时会冲破不断增长的精细化。精细化和简单性在缓慢的来回舞蹈中交替，精细化通常随着时间推移占据优势。

读者可能已经注意到，我描述的整体循环类似于托马斯·库恩(Thomas Kuhn)为科学理论发展提出的循环。库恩的循环始于基于新原理工作的新理论模型(他称之为范式)取代旧模型。然后新范式被发展出来，应用于许多范例，被接受，并在库恩称为常规科学的过程中进一步精细化。随着时间推移，不符合基础范式的例子——异常——积累起来。范式被延伸以适应这些异常，但随着进一步异常的积累而变得越来越紧张。只有当更新、更令人满意的解释集合——更新的范式——到来时，它才会崩溃。

为了展示这种对应关系，我可以使用库恩的术语重新阐述技术循环。但更有趣的是用我在本章中讨论的术语来重新阐述库恩的理论。我们可以说，一个理论通过面对新事实和在新应用中被付诸实践而被“推动”。它的组成部分可能需要被替换——可能需要更准确的定义，某些构造可能需要重新完成。当面临限制时(用库恩的语言来说就是异常现象)，其他方面需要特殊情况——系统细化，这实际上是对感知限制的变通方法。理论通过增加子理论来处理困难和特殊情况而得到构建。(例如，达尔文理论必须添加子论证来解释为什么某些物种表现出利他行为。)

随着理论的发展，它变得复杂——它添加附录、进一步的定义、补充条款和特殊构造——所有这些都是为了考虑不同的特殊情况。如果特殊情况不太符合，理论就会被拉伸；它会添加相当于本轮(epicycles)的东西。最终，当面临足够多的异常现象时，它的“性能”会下降，人们就会寻求新的原理或范式。当前一个结构被拉伸并失败时，新的结构就会出现。库恩的循环重复进行。

让我重申一下，这种对应关系并不意味着科学与技术是相同的。它只是意味着，因为科学理论是有目的的系统，它们遵循与技术相同的逻辑。它们也会发展、遇到限制、精化，并在适当的时候被替换。无论在科学还是技术中，发展的逻辑都是相似的。

在本章中，我们一直在探索发展过程。但重要的是要记住，它适用于技术的所有部分。一项新技术被“推动”，遇到限制，并通过优越的部件和结构深化而改进。但同样的过程也适用于它的所有部分。发展很大程度上是一个内部过程。技术的整体及其所有部分同时并行发展。

革命与重新定义领域

前两章回答了我们关于单个技术如何产生和发展的问题。但技术群体又如何呢？它们是如何产生和发展的？在本章中，我想探讨这个并行的问题。

似乎这里需要说的很多内容已经说过了。我们可以认为技术群体（或我一直称之为的“领域”）由其组成技术和实践形成，并随着时间的推移添加这些技术和实践的更好版本。所以也许我们不需要在这里单独的一章中考虑它们。

但领域不仅仅是其各个技术的总和。它们是连贯的整体，是设备、方法和实践的家族，其产生和发展具有不同于单个技术的特征。它们不是被发明的；它们是涌现的，围绕一组现象或一项新的使能技术结晶，并从这些有机地构建。它们的发展不是以年为单位测量的时间尺度，而是以十年为单位测量的时间尺度——数字领域出现于1940年代，至今仍在构建中。它们不是由单个从业者或一小群从业者开发的，而是由大量相关方开发的。

领域对经济的影响也比单个技术更深刻。经济不会对1829年铁路机车的出现或1830年代的改进做出反应——至少不会有太大反应。但当构成铁路的技术领域出现时，经济确实会做出反应并发生显著变化。事实上，我要论证的一点是，经济不会采用新的技术群体；它遭遇它。经济对新群体的存在做出反应，在这样做的过程中改变其活动、其产业、其组织安排——其结构。如果经济中由此产生的变化足够重要，我们就称之为革命。

领域如何演化

让我们深入探讨本章的主要问题。领域究竟是如何产生并随后发展的？

如我所说，许多领域围绕中心技术凝聚。随着计算机的出现，支持技术——穿孔卡读取器、打印机、外部存储系统、编程语言——开始围绕它聚集。其他领域，特别是基于学科的宏大领域，围绕现象家族及其相关的理解和实践形成。电子学和无线电工程建立在对电子工作原理和电磁波的理解之上。

无论领域是围绕新技术结晶还是从现象家族构建，它们总是从某个既定领域中诞生。它们必须如此，因为它们必须从某个地方——从某个父领域——构建其原始部件和理解。计算不是从处理器或数据总线中出现的，而是在1940年代从真空管电子学的组件和实践中出现的。

一个新领域在其出现之初，几乎算不上是一个领域。它只不过是松散地聚集在一起的理解和方法的集群。它提供了多少，现有的经济活动很少使用它。它们蜻蜓点水般地深入其中，根据需要从中选择。由新领域及其父领域绘制的混合组合由此产生。在英国铁路的早期，斯托克顿-达灵顿快车是由马匹在铁轨上牵引的马车。通常新领域的组件被征募为旧领域的辅助设备。早期的蒸汽机被用来在低水位期间作为水车的后备，或作为泵来保持附近磨坊池塘的高水位。

在这个早期阶段，新兴领域仍然是其母体领域的一部分。基因工程始于分子生物学和生物化学这些母体领域的一个小分支。（我在这里考虑的是基因工程在医学应用方面：本质上是使用基因来生产或控制人体健康所必需的蛋白质。）它源于二十世纪中期科学家们努力理解细胞及其DNA制造蛋白质的机制。到1970年代初，生物学家们开始理解特定酶类（限制酶）如何在特定位置切割或切断DNA，其他酶类（连接酶）如何将DNA片段连接在一起，以及其他酶类如何控制DNA的复制过程。也就是说，他们开始理解细胞用来复制基因并指导其产生特定蛋白质的“自然技术”，并且慢慢开始掌握这些技术并在实验室中人工重现它们。生物学家们已经开发出执行以前只有自然界才能执行的任务的技术。

正是从这些组功能能中，一个新的领域开始出现。

任何领域的早期都有一种实验性的感觉。但在这个阶段，通常很少意识到正在出现一个新的技术体系。参与者认为自己是在解决其母体领域中的特定问题。但随着时间的推移，新的集群获得了自己的词汇和思维方式。其理解加深，实践得到巩固。其组成部分得到改进，因为每个部分都经历了我在上一章中谈到的发展过程的自己版本。新领域开始忘记其出身并独立发展，并且出现了一种意识，即一个新领域正在开始以自己的权利存在。

开始形成的是一个技术和实践的工具箱。但在其中，关键部分可能功能不佳或完全缺失。这些限制性地方吸引了参与者的注意（历史学家托马斯·休斯称它们为“反向突出部”，即尽管在相邻领域取得了进展，但该领域仍被阻碍的困难地方），努力集中在那里。通过足够的专注和一定程度的好运，该领域最终会取得突破。

如果突破是重要的，它可能成为一种使能技术：一种承诺重要商业应用或为构建进一步元素提供关键要素的目的手段。使基因工程获得生命并将其从生物学的一个分支转变为新兴技术领域的技术是斯坦利·科恩和赫伯特·博耶在1973年开发的重组DNA。科恩一直在研究质粒，即在细菌中发现的微小环形DNA单位。博耶一直在研究限制酶——可以将DNA切割成较短片段的“分子剪刀”。两人一起开发了一种方法，可以从一个生物体（在他们早期实验中是青蛙[Xenopus laevis]）中切出一个基因，并将其粘贴到质粒中。然后他们可以将质粒插入[E. coli]细菌中，该细菌可以快速繁殖，同时携带其外来基因。然后细菌将作为制造外来基因对应蛋白质的微型工厂。

重组DNA最初是原始的，并且由于其创造非自然生物体的潜力而引起争议。但无论是否有争议，它突破了阻碍基因技术发展的两个限制：从一个生物体中提取基因并将其放置在特定生物体内另一个生物体中的能力，以及为人类目的人工制造蛋白质的能力。

正是通过这样的使能技术，新兴领域达到了青春期，甚至可能是成年早期。它现在可能起飞。技术先驱开始涌入并组建小公司，随之而来的是大量改进，财富得以建立。一个行业开始增长，新领域变得令人兴奋，记者开始推广它。投资可能因为非凡利润的前景而大量涌入。基因泰克(Genentech)，第一家上市的基因技术公司，其股价在首次交易的二十分钟内从35美元的首次公开发行价格攀升至89美元的市场价格。在这个阶段，许多公司进入市场时除了想法之外没有太多可提供的。基因泰克在1980年上市，但直到两年后销售人工胰岛素时才提供真正的产品。

经济学家卡洛塔·佩雷斯研究了技术革命所经历的阶段，她指出这样的条件可能带来投资狂热——和崩溃。早期基因技术没有发生崩溃。但在过去，崩溃绝非罕见。在英国1840年代中期，对铁路的狂热——“这个国家是铁路疯子的庇护所”，苏格兰法官科克伯恩勋爵宣称——带来了不可避免的崩溃。到1845年，铁路狂热全面展开，胡同推销员出售股票认购权证(scrip)（被切成小块的股份），几乎每天都有从小城镇到其他小城镇的直达线路新方案推出。然后泡沫破裂了。1847年10月16日开始了经济恐怖周，铁路股票损失了其峰值的85%，许多银行被迫关闭，英国濒临经济崩溃的边缘。并非所有新兴领域都会带来金融崩溃。这些通常发生在有争夺空间感觉的时候——在曼彻斯特和利物浦之间，或在伦敦和伯明翰之间建设铁路线的机会只有那么多。

即使发生了崩溃，新领域依然存续。随着进一步成熟，它开始深入经济领域。最终进入稳定的增长期。早期的竞争狂热结束了，大多数小公司已经消失；幸存者成长为大型企业。新时期有着不同的氛围。这是一个清醒和努力工作的时期，充满信心和稳定增长。新技术找到了应有的位置，成为经济的基础组成部分。这个时期可以持续数十年，是技术稳步发展的阶段。英国铁路从泡沫顶峰时的2,148英里轨道扩展到六十五年后的21,000英里。在那段时间里，它们成为英国经济增长的引擎。

随着时间的推移，领域进入舒适的老年期。新专利仍在授予，但现在针对的是不太重要的想法，曾经光鲜的领域不再激发灵感。一些处于老年阶段的领域被更新的领域取代，并慢慢消亡——运河在铁路兴起时悄然死去。但大多数领域继续存在。它们成为老人，忠实的家臣，需要时可以执行任务，但很大程度上被视为理所当然。我们仍在使用桥梁和道路、下水道系统和电气照明，使用方式与一百年前基本相同。旧的安排持续存在，甚至可以展示出褪色的尊严，但我们在使用时不会注意到它们。

并非所有领域都会像我所描述的那样，整齐地经历青年、成年和老年的循环。有些通过重新发明自己来打破这个循环——每隔几年就改变自己的特征。它们会变形。

当某个领域的关键技术发生根本性变化时，该领域就会变形；当晶体管取代真空管时，电子学改变了特征。更常见的是，当主要应用领域发生变化时，领域会变形。在1940年代，计算主要是战时科学计算的辅助工具。到1960年代，大型机时代，它涉及商业和会计。到1980年代，这已转向个人电脑上的办公应用。到1990年代，计算大量参与互联网服务和商务。现在它正基于可称为网络智能的东西。廉价传感器网络现在可以看、听，并无线传递消息。当连接到卡车、货架上的产品或工厂中的机器时，这些可以“对话”并集体提供智能行动。正如我所写，计算正在再次变形。

每次这样的变形都建立在前一次的基础上，每次都迫使该领域的追随者改变对该领域本质的看法。但即使有如此根本的变化，一个领域的基本原理保持不变；计算在本质上仍然是对可以数字表示的对象的操作。就像同一个演员不时穿着不同的服装扮演不同角色登台一样。

除了变形，一个领域还会衍生出新的子领域。这些新的后代往往有多重血统。互联网和我们称为信息技术的更广泛领域，都是计算和电信的孩子。它们源于高速数据处理和高速数据传输的结合。母领域继续存在，但它们生育了独

立存在的事物，现在它们的大量能量流向新分支。这种变形和产生新子领域的趋势赋予技术体系以生命品质。它们不是固定的集合，而是微型生态系统——各部分和实践必须随时协调配合，随着新元素的进入而不断变化，并不时抛出具有不同特征的小殖民地。

所有这些意味着领域——以及任何技术体系——从来都不是明确定义的。它们增加和失去元素；从其他领域借用和交换部分；不断抛出新的子领域。即使当它们相对明确定义和固定时，它们的部分和实践也会因时间、地点，实际上因国家而异。硅谷的计算构成与日本的计算构成不同。

经济重新划分领域

当所有这些发生时——当技术体系出现和发展时——经济会发生什么？

就个别技术而言，经济学是明确的。一项新技术——比如生产钢铁的贝塞麦工艺——被采用，在钢铁生产商中传播，并改变了经济的商品和服务模式。贝塞麦工艺使钢铁比其前身坩埚钢便宜得多，因此钢铁在经济中被更大量使用。使用钢铁的行业——铁路、建筑、重型机械——直接受益，这反过来也导致它们的成本和能为消费者提供的产品发生变化。而使用这些行业的行业又受到影响。这种后果的扩散是典型的。就像拉动蜘蛛网的一根丝线会导致整个网伸展和重塑一样，新技术的到来会导致经济中价格和生产的网络在所有行业中伸展和重塑。

类似的过程也适用于技术体系。19世纪50年代铁路在美国的出现不仅使运输成本降低，还引起了依赖运输的经济部门的重新调整。在中西部，一些产品——从东海岸运输成本较高的进口商品和制成品——因为铁路而变得更便宜。其他产品如小麦和猪肉在中西部的价格上涨；它们的供应现在被抽调用于运往东部。为铁路提供服务的行业也发生了变化。美国的铁产量在1850年到1860年的十年间从38,000吨飙升到180,000吨，大幅增长的产量促进了大规模生产方法的采用。反过来，小麦、制成品和铁的价格和供应变化影响了依赖于这些的无数行业的生产和采购。因此我们可以说，技术体系像单项技术一样，在经济中引起一种蔓延性重新调整的模式。

这种看待事物的方式完全正确，但还不够完整。对于技术体系，发生的事情比重新调整更复杂。为了看清这一点，让我回到标准论证的起点。经济学假设新技术被“采用”；它们被经济中接纳和使用。这对于单项技术来说确实如此。钢铁制造商采用贝塞默工艺(Bessemer process)，他们的生产率相应地发生变化。但这并不能很好地描述技术复数——如计算或铁路——所发生的情况。我更愿意说经济要素——行业、企业、商业实践——与其说是“采用”新的技术体系，不如说是遭遇了它。从这种遭遇中，新工艺、新技术和新行业应运而生。

这是如何发生的？将新的技术体系想象为其方法、设备、理解和实践。将特定行业想象为由其组织和商业流程、生产方法和物理设备组成。所有这些都是我之前谈到的广义技术。这两个单项技术的集合——一个来自新领域，另一个来自特定行业——汇聚在一起并相互遭遇。结果形成了新的组合。

因此，当银行业在20世纪60年代遭遇计算时，我们可以粗略地说它为“簿记和会计活动”采用”了计算。但仔细观察，银行业并非仅仅采用计算。准确地说，从簿记中提取的一些活动（会计程序和流程）与从计算中提取的一些活动（特定的数据录入程序，以及某些数值和文本处理算法）合并，这些活动共同形成了新的功能——数字化会计。结果是银行程序与计算程序的融合，创造了由两者组合形成的新流程。顺便说一下，这种融合对所有“采用”都是真实的。仔细观察，采用总是采用领域的流程与新可能性领域的功能的合并。

实际上，如果以这种方式形成的新组合足够强大，它们可以创立一个新行业——或至少一个子行业。在银行业计算机化之前的几十年里，它可以设计简单的期权和期货：客户可以购买的合约，允许他们在未来以固定价格买卖某物。这种合约允许比如在爱荷华州种植大豆的农民在六个月后以每蒲式耳8.40美元的固定价格出售，无论未来那个时候的市场价格如何。如果价格高于8.40美元，农民可以在市场上出售；如果价格较低，他可以行使期权，从而以购买期权合约的成本锁定利润。“合约的价值”衍生”于实际市场价值——因此被称为衍生品(derivative)。

在20世纪60年代，为衍生品合约正确定价是一个未解决的问题。在经纪人中这是一种黑色艺术(black art)，这意味着投资者和银行在实践中都无法自信地使用这些工具。但在1973年，经济学家费舍尔·布莱克(Fischer Black)和迈伦·斯科尔斯(Myron Scholes)解决了期权定价的数学问题，这建立了行业可以依赖的标准。不久之后，芝加哥期货交易所(Chicago Board of Trade)创建了期权交易所(Options Exchange)，衍生品市场开始腾飞。

我们不能完全说衍生品交易“采用”了计算。那会使所发生的事情变得微不足道。严肃的衍生品交易是由计算促成的。在所有阶段——从快速变化的金融数据的收集和存储，到衍生品价格的算法计算，再到交易和合约的会计处理——计算都是必需的。因此更准确地说，我们可以说衍生品交易的要素遭遇了计算的要素并产生了新程序，这些构成了数字化衍生品交易。大规模衍生品交易因此起飞。

事实上，发生的甚至比这更多。银行业和计算机技术在相互遇见时共同创造的，不仅仅是一套新的活动和产品，而是一套全新的金融“编程”可能性——一个全新的工程可能性领域。在适当的时候，金融工程师开始将期权、掉期(swap)(交换一种现金流为另一种现金流的合约)、期货和其他基本衍生品组合起来，用于特定目的，比如对冲未来商品价格变化或外汇波动的风险。一套新的活动因此出现了。金融与计算机技术的相遇创造了一个新的行业——金融风险管理。

这里的过是一个创造性转换的过程。它在多年的时间里发生，因为金融风险管理领域的问题在计算机和数学领域内得到了解决。其结果是一种持续的创造性新颖性，在金融领域至今仍未结束，以及银行业金融部分在计算机领域内的重新定域(redomaining)。

从总体上看，重新定域的过程意味着行业适应新的技术体系，但它们不仅仅是通过采用它来做到这一点。它们从新的体系中汲取，选择它们想要的，并将它们的一些部分与新领域的一些部分结合起来，有时因此创造出子行业。当这种情况发生时，该领域当然也会适应。它添加新的功能，使其更好地适应使用它的行业。

经济中的这一整体过程绝不是统一的。它不均匀地展开，因为不同的行业、企业和组织以不同的方式和不同的速度遇到新技术并重新配置自己以作为回应。它从经济的小规模活动变化向外发展，到商业组织方式的变化，到制度的变化，到社会本身的变化。经济的新版本慢慢形成。领域和经济相互共同适应，相互创造新事物。

正是这种相互变化和相互创造的过程，我们称之为革命。经济中的每个时代都是一种模式，一套由当时主导领域建立的商业、工业和社会中或多或少自治的结构。当新的技术体系——铁路、电气化、大规模生产、信息技术——在经济中传播时，旧的结构崩溃，新的结构取而代之。曾经被视为理所当然的行业变得过时，新的行业应运而生。旧的工作方式、旧的做法、旧的职业开始显得古雅；工作和社会的安排被重新构建。经济中的许多事物保持不变，但许多永远不同了。

如果说革命只有在宏大的领域改变经济时才会发生，那就错了。当较小重要程度的领域——比如塑料注射成型——进入并在较小规模上引起变化时，它们也会发生。因此，在任何时候，许多革命都会重叠、相互作用并同时改变经济。当这些新的技术体系进入经济时，它们共同形成一套相互一致的结构，经济中一个大致一致的模式。每种模式可能突然出现，锁定一段时间，并及时成为下一个模式的基础设施。每个模式都像地质层一样铺设在之前的一切之上。

经济中的时间

所有这些新技术的展开和经济的重新调整都需要时间。大量的时间。这解释了经济学中的一个谜题。通常在带来新领域的使能技术(enabling technologies)到来和该领域的全面影响之间相隔几十年。电气化的使能技术，电动机和发电机，在1870年代到来，但它们对工业的全面效果直到1910年代和1920年代才被感受到。詹姆斯·瓦特(James Watt)的蒸汽机在1760年代被发明，但蒸汽动力直到1820年代才普遍使用。在更现代的时代，数字化的使能技术，微处理器和阿

帕网(Arpanet)（互联网的前身），在1970年代初就已经可用；但同样，它们在数字化经济中的影响仍未完全实现。如果你接受采用故事，这些延迟必须是由人们找出新的做事方式并决定它会改善他们的环境所花费的时间造成的。这样的时间滞后可能解释五年或十年。但不是三四十年。

谜题一旦我们承认所发生的不仅仅是一个简单的采用过程，而是我一直在谈论的领域与经济之间相互适应的更大过程，就会迎刃而解。仅仅是革命的基础技术变得可用是不够的。一场革命不会完全到来，直到我们围绕其技术来组织我们的活动——我们的业务和商业程序——并且直到这些技术适应我们自己。为了实现这一点，新领域必须聚集拥护者和声望。它必须找到目的和用途。其核心技术必须解决某些障碍并填补其组件集合中的某些空白。它必须开发支持它的技术并将其与使用它的技术连接起来。它必须理解其基础现象并发展这些现象背后的理论。必须找到市场，现有的经济结构必须重新架构以利用新领域。旧的体制必须认识新领域并熟悉其固有实践，这意味着掌握旧语法的执业工程师需要为新领域重新装备自己。他们不会轻易这样做。所有这一切都必须通过金融、机构、管理、政府政策以及新领域熟练人员的可用性来调解。

因此，这个过程的节奏不是由人们注意到不同做事方式并采用它所需的时间决定的，而是由现有经济结构重新架构自己以适应新领域所需的时间决定的。这个时间可能是几十年，而不是几年。在这段时间里，旧技术继续存在。尽管其劣势已被证实，它仍然持续存在。

1990年，经济史学家Paul David给出了这一过程的经典例子。在大约一个世纪前工厂电气化之前，它们由蒸汽机驱动。每个工厂都有一台发动机，一个巨大的嘶嘶作响和摇摆的装置，带有活塞和飞轮以及皮带和滑轮系统，转动建筑物几层楼的轴。这些轴反过来为工厂的所有机械提供动力。然后电动马达——新电气领域的组件技术——在1880年代变得可用。它们在能源使用方面更便宜，可以作为多个小型单独单元安装，每个都紧靠它所驱动的机器。它们可以单独控制，根据需要开关。它们是一种优越的技术。

那么为什么美国工厂花了近40年才采用它们？David发现，有效使用新技术需要与旧蒸汽机布局不同的工厂物理结构。它实际上要求工厂被重新架构。正如我们在Frankel案例中看到的，这不仅昂贵，而且工厂应该如何建造并不明显。理解新领域的电工不是建筑师，工厂建筑师也不是电工。因此需要相当长的时间——在这种情况下四十年或更长时间——来积累如何使工厂设计适应新技术的知识，并使这种知识传播开来。企业和人们适应新的技术体系是不够的。真正的收益在新技术适应他们时才会到来。

从某种意义上说，这些结构变化过程不仅在经济中消耗时间，它们还定义经济中的时间。让我解释一下我的意思。按惯例，时间是作为标准时钟时间来衡量的。但还有另一种衡量时间的方式，这就是通过新结构的“生成”。哲学家称之为关系时间。这意味着如果事物总是保持不变，就不会有变化来标记事物的流逝——没有变化来标记“时间”。从这个意义上说，时间会静止不动。根据同样的原理，如果结构发生变化，如果宇宙中的事物要移动并改变自己，“时间”就会出现。

在我们的情况下，变化——经济中的时间——通过经济的基础结构改变自身而出现。这发生在两个尺度上，一个快一个慢。较快的尺度，称之为快时间，是新个体技术的设计、测试和吸收进入经济创造了事物“生成”的节奏，新商业活动和新做事方式形成的节奏。在传统时间中，这将以月和年来衡量。较慢的尺度——慢时间——出现在变化由新技术体系的进入决定的地方。这些在经济和社会中创造了时代；它们因此在经济中创造了“时间”。在传统时间中，这个尺度将以年和十年来衡量。

在这两种意义上，时间不创造经济。经济，或其结构的变化，创造时间。

创新与国家竞争力

关于新技术体系建设的一个非常明显的事情是，它们的前沿高度集中在一个国家或地区，或者最多几个。纺织技术、蒸汽技术主要在1700年代的英国发展；化学技术在一个世纪后很大程度上在德国发展；在我们自己的时代，计算和生物技术在很大程度上在美国出现。为什么会这样？为什么技术体系会集中在特定位置而不是均匀分布在许多地方？

如果技术源于知识——技术和科学信息——那么理论上，任何拥有能干的工程师和科学家的国家都会和其他国家一样具有创新能力。毕竟，理论上每个国家都能获得相同的科学资料、相同的期刊——相同的知识。我不想贬低知识的作用。没有化学和量子物理学的详细知识，你无法推进纳米技术的发展。但先进技术的发展依赖的不仅仅是知识——事实、真理、想法和信息。

真正的先进技术——前沿尖端技术——并非源于知识，而是源于我所称的**深度工艺**。深度工艺不仅仅是知识，它是一套认知体系。知道什么可能有效，什么不会有效。知道使用什么方法，什么原理可能成功，在特定技术中使用什么参数值。知道走廊里该找谁来让事情运转起来，如何修复出错的地方，什么该忽略，该参考什么理论。这种工艺认知将科学视为理所当然，将纯粹的知识视为理所当然。它集体源于一种共享的信念文化，一种不言而喻的共同经验文化。

这也意味着知道如何操控新发现但理解不充分的现象，这种认知来自于在当地大学和工业实验室中建立起来的实际实验和研究。这种认知再次成为共享文化的一部分。在这个层面上，科学本身也是工艺。在二十世纪的前三十年里，剑桥大学的卡文迪许实验室是原子物理学发明的中心，它基于与原子现象相关的认知宝库来构建这些发明。科学作家布莱恩·卡斯卡特说：“在这个领域里已知的一切——技术、设备、数学工具，甚至理论——在那里的某个人都知道……而且不仅如此，这些都在学术讨论会和其他聚会中被讨论、质疑和检验。对于原子物理学中的任何问题或困难，在[卡文迪许实验室]里肯定能找到答案。”

这种认知扎根于当地的微文化中：在特定的公司里，在特定的建筑中，沿着特定的走廊。它们在特定的地点高度集中。这个观察并没有什么特别新颖之处。以下是阿尔弗雷德·马歇尔在1890年的论述：

当一个行业为自己选择了一个地点后，它很可能会长期留在那里：从事同样技能行业的人们彼此相邻所获得的优势是如此巨大。行业的奥秘不再是奥秘；而是仿佛弥漫在空气中，孩子们无意识地学会了其中的许多。好的工作得到正确的赞赏，机械、工艺流程和业务总体组织方面的发明和改进，其优点得到及时讨论：如果一个人提出新想法，其他人会接受并结合自己的建议；这样它就成为进一步新想法的源泉。很快，辅助行业在附近兴起，为其提供工具和材料，组织其贸易，并在许多方面促进其材料的经济性。

自马歇尔时代以来，情况并没有改变。如果说有什么不同的话，那就是行业的奥秘现在更加深奥了。这是因为它们更可能基于量子力学、计算或分子生物学。这些奥秘，或者说共享的认知，对于我一直在谈论的过程——发明、开发和技术体系的构建——是完全必要的。它们需要时间来建立，并且不容易转移到其他地方。而且它们无法完全写下来。工艺的正式版本最终会进入技术论文和教科书。但真正的专业知识主要存在于其创造、被视为理所当然、被分享但不言而喻的地方。

因此，一个地区——或者一个国家——一旦在某个先进技术领域取得领先地位，往往会进一步领先。成功带来成功，因此技术的区域集中存在正反馈或递增回报。一旦围绕某个新技术体系建立起一个小的企业集群，就会吸引更多企业。这就是为什么新的技术体系会以难以挑战的方式聚集在一两个特定区域。当然，其他地点也可以做出贡献。它们可以制造和改进技术，但它们不会大规模地引领技术，因为推动前沿所需的详细认知并不存在于那里。

当然，区域优势不会永远持续。一个地区可以开创某个技术体系，但当该技术不再突出时，这个地区可能会衰落和衰退。这可以通过将一个技术体系的专业知识转化为另一个技术体系的专业知识来避免。斯坦福大学周围被称为硅

谷的地区始于1910年左右的无线电报，在1930和40年代将其转化为电子学，孕育了大量的计算机行业，现在又转向生物技术和纳米技术。随着新领域从旧领域衍生出来或从大学研究中萌发，一个地区也可以在此基础上发展。

但那些在技术方面不是领导者的国家和地区并非没有希望。对初创公司的深思熟虑的激励措施以及对基础非定向科学的投资可以发挥很大作用。而且技术总是从某种种子活动中衍生出来，因此如果适当的种子到位，集群可以在意想不到的地方建立起来。在1980年代，俄亥俄州阿克伦的轮胎工业受到全球竞争和产品召回的困扰，大型轮胎公司——B.F.古德里奇、普利司通/火石轮胎和通用轮胎——都离开了该地区。但阿克伦从其橡胶时代就拥有聚合物化学（分子链化学）方面的强大专业知识，并且成功地将其转化为更通用的知识体系，即高科技聚合物制造。阿克伦现在是“聚合物谷”的中心，有400多家公司从事聚合物相关工作。一项技术的深度知识可以转化为另一项技术的深度知识。

当然，这一切都对国家竞争力产生了影响。技术源于对现象的深刻理解，这些理解作为深层次的共享知识体系嵌入人们心中，并在当地建立起来——并且随着时间的推移而增长。这就是为什么在科学方面领先的国家在技术方面也领先的原因。因此，如果一个国家想要在先进技术方面领先，它需要做的不仅仅是投资工业园区或模糊地促进“创新”。它需要建设基础科学，而不需要声明任何商业用途的目的。它需要在稳定的环境中培育这门科学，提供资金和鼓励，让科学在小型初创公司中进行商业播种，允许这些新兴企业在最少干预下成长和萌芽，并允许这门科学及其商业应用为新的革命播种。

这个过程不是能够轻易从上到下控制的。政府总是有追求具有特定商业目标的科学的诱惑。但这很少奏效。如果1920年代的量子物理学有明确的目的，它会被认为是失败的。然而量子物理学给了我们晶体管、激光器、纳米技术的基础，以及许多其他东西。建设先进技术的能力不像在社会主义经济中规划生产，而更像培育一个岩石花园。种植、浇水和除草比五年计划更合适。

从我在本章中所说的应该清楚，领域的发展方式与单个技术的发展方式不同。这个过程不太像喷气发动机的发展：专注、集中和理性。它更像法律条文体系的形成方式：缓慢、有机和累积。对于领域来说，产生的不是新的设备或方法，而是用于表达的新词汇——用于“编程”新功能的新语言。这通过缓慢的出现而发生。一个领域围绕一组松散理解的现象或围绕一项新颖的使能技术而结晶，并在支持这些的组件、实践和理解基础上有机地构建。随着新领域的到来，经济遇到它并因此改变自己。

这一切都是创新的另一个方面。事实上，我们可以将最后四章看作对创新的详细解释。没有单一的机制，相反有四个或多或少独立的机制。创新包括在标准工程中达成的新颖解决方案——成千上万的小进步和修复累积起来推动实践前进。它包括通过发明过程产生的根本性新颖技术。它包括这些新颖技术通过在结构深化过程中改变其内部部件或添加部件来发展。它包括整个技术体系的出现，随着时间的推移而建设，并创造性地改变遇到它们的行业。

这些类型的创新都很重要。每一种都是完全有形的。创新不是什么神秘的东西。当然，它不是模糊地唤起所谓“创造力”的问题。创新简单地说就是通过其他手段完成经济任务。

在我研究的案例中，我一次又一次地被震撼到，创新是在人们面临问题——特定的、明确指定的问题时出现的。它作为这些问题的解决方案而产生，由那些精通许多手段——许多功能——他们能够组合的人构思出来。它通过实现这一点的资金、无数功能的培训和经验、致力于研究特定问题的特殊项目和实验室的存在，以及培育深度工艺的当地文化而得到增强。但它不是单一地区、国家或民族的垄断。它在研究问题并且在将形成解决方案的组件方面存在足够背景的任何地方出现。

事实上，我们可以看到创新有两个主要主题。一个是从现有的组件和实践工具箱中持续寻找或组合新解决方案。另一个是行业持续将其实践和过程与从新到达的工具箱——新领域——中提取的功能相结合。第二个主题，像第一个一样，是关于创造新的过程和安排，新的目的手段。但它更重要。这是因为一个重要的新领域（想想数字领域）被

经济中的所有行业所遇到。当这发生时，该领域将其一些产品与许多行业固有的安排相结合。结果是新的过程和安排、新的做事方式，不仅仅在一个应用领域，而是遍及整个经济。

最后一点评论。在本章和前一章中，我一直在谈论技术的“发展”：个体技术和技术体系在成熟过程中都会经历可预测的阶段。我本可以说它们每一个都在“进化”。当然，它们确实在进化，因为每一个都建立了血统传承，伴随着分支成不同的“亚种”或不同的子领域。但我使用“发展”这个词，是因为我宁愿保留“进化”这个词来描述整个技术——社会可获得的人工制品和方法的集合——如何从已存在的元素中创造新元素，从而构建扩展。

这是本书的核心主题。现在我们已经收集了探索它所需的所有要素，所以让我们现在就开始吧。

[9]

[进化的机制]

[想象一下所有曾经存在过的技术的整个集合，包括过去和现在。也就是说，想象所有正在使用和曾经使用过的过程、设备、组件、模块、组织形式、方法和算法。如果我们要将这些列在目录中，它们的数量将是巨大的。]

这就是技术的集合体，我们现在想探索它是如何进化的。

我一直声称这个集合体通过自创造过程进化：新元素（技术）从已存在的元素中构建出来，这些新元素提供自己作为可能的构建块元素，用于构造更进一步的元素。现在我想阐明这种情况发生的机制。

如果你观察这个集合的某个小部分构建自身，你可以看到技术的这种自创造的缩影。在1900年代早期，Lee de Forest一直在实验改进无线电信号检测的方法，他在二极管真空管中插入了第三个电极来尝试这个目标。他一直希望他的三极管能够产生信号放大，考虑到当时微弱传输的无线电信号，这是非常需要的。但它没有做到。然后，几乎同时在1911年和1912年，几位工程师——其中包括de Forest——确实成功地将三极管与其他现有电路组件结合，制造出了可行的放大器。放大器电路与标准组件（线圈、电容器和电阻器）的稍微不同的组合产生了振荡器，这是一个能够产生当时高度追求的东西的电路：纯单频无线电波。这与其他标准组件的结合使现代无线电发射器和接收器成为可能。而这些与其他元素的结合使无线电广播成为可能。

这还不是全部。在稍微不同的电路组合中，三极管可以用作继电器：它可以作为一个开关，可以通过三极管栅极上的小控制电压来打开或关闭。如果打开，继电器可以表示0或逻辑值“假”；如果关闭，表示1或“真”。适当连线的继电器组合可以产生原始逻辑电路。逻辑电路，再次与其他逻辑电路和电子元件结合，使早期计算机成为可能。因此，在大约四十年的时间里，三极管真空管成为了一系列技术的关键构建元素，这些技术产生了无线电和现代计算。

技术就是这样从自身中创造自己的。它从现有技术的集合体中一片一片地构建自己。我想描述这如何发生的细节——技术如何进化。如何从如此简单的开始，技术给我们一个非常复杂的世界。

我一直随意地说技术是从现有技术（或可以从已存在的技术中创造的技术）中创造出来的。让我解释为什么这是真的。任何解决人类需求的方案——任何实现目的的新颖手段——只能使用该世界中已存在的方法和组件在物理世界中显现。因此，新颖技术是从某组现有技术中产生——成为可能的。总是如此。没有压缩机和燃气轮机，没有制造这些所需精度的机床，喷气发动机就不可能存在。聚合酶链反应是从分离DNA、分离其链条、附着引物和从分离链条重建双链的方法中组合而成的。它是已存在事物的组合。

读者可能会反对说有例外——青霉素似乎就是一个例外。它是一种治疗手段，因此是一项技术，但它似乎不是任何先前技术的组合。但考虑一下：从Fleming的基础效应创造出可行疗法需要一套非常明确的现有技术。它需要生化过程来分离霉菌中的活性物质，其他过程来纯化它，还有其他过程来生产和交付它。青霉素在这些手段和方法中有其血统。在不具备这样元素的社会中，它是不可能的。现有手段使青霉素成为可能。所有技术都从现有技术中诞生，在这种意义上，这些现有技术的组合直接使它们成为可能。

当然，使技术成为可能的元素超越了其单纯的物理组件；它们包括制造或组装它们所必需的元素。确定确切的“血统”可能并不简单：将青霉素带入存在的技术和方法很多——哪些应该算作父母？答案当然是重要的那些，但哪些是重要的在某种程度上是品味问题。不过，这种程度的模糊性并不影响我的核心观点。所有技术都从先前技术中诞生——成为可能。

这让我们得出什么结论？严格来说，我们应该说新颖的元素是由现有元素直接促成的。但更宽泛地说，我们可以说它们源于一组现有技术，源于现有技术的组合。正是在这个意义上，技术集合中的新颖元素得以产生——成为可能——从现有元素中产生，技术从自身创造自身。

当然，说技术创造自身并不意味着它具有任何意识，或者它以某种邪恶的方式利用人类来实现自己的目的。技术集合从自身构建自身，依靠人类发明家和开发者的作用，就像珊瑚礁通过小生物的活动从自身构建自身一样。因此，如果我们将人类活动放在括号内并将其视为既定事实，我们可以说技术集合是自我生产的——它从自身产生新技术。或者，我们可以采用Humberto Maturana和Francisco Varela创造的一个词来描述自我生产系统，说技术是自创生的(autopoietic)（希腊语中的“自我创造”或“自我产生”）。

自创生(Autopoiesis)可能看起来是一个抽象的特性，是最恰当地属于系统理论或哲学的东西。但实际上，它告诉我们很多。它告诉我们，每一项新技术都是从现有技术中创造出来的，因此每一项技术都建立在其他技术的金字塔之上，这些技术使其成为可能，这种延续可以追溯到人类最早捕获的现象。它告诉我们，所有未来的技术都将源于现在存在的技术（也许不是以明显的方式），因为这些是将形成进一步元素的元素，最终使这些未来技术成为可能。它告诉我们历史很重要：如果技术以不同的顺序偶然出现，从它们构建的技术就会不同；技术是历史的创造物。它还告诉我们，技术的价值不仅在于用它能做什么，还在于它将带来什么进一步的可能性。技术专家Andy Grove曾被问及互联网商务的投资回报率是多少。他回答说：“这就像哥伦布在新大陆。他的投资回报率是多少？”

自创生(Autopoiesis)给我们一种技术向未来扩展的感觉。它也给我们一种思考人类历史中技术的方式。通常这段历史被呈现为一组在不同时间发生的离散发明，技术之间有一些相互影响。如果我们从这种自我创造的角度以《创世记》的风格重新叙述这段历史，会是什么样子？这里是一个简略版本。

起初，第一批被利用的现象在自然界中直接可得。某些材料在削准时会剥落：于是从燧石或黑曜石制成的刀具出现了。重物在硬表面上敲击时会粉碎材料：于是出现了草药和种子的研磨。柔性材料弯曲时储存能量：于是从鹿角或幼树制成的弓出现了。这些现象可以说就躺在自然的地面上，使原始工具和技术成为可能。这些反过来又使其他的成为可能。火使烹饪、挖空原木制作原始独木舟、烧制陶器成为可能。它还开辟了其他现象——某些矿石在高温下产生可成形的金属：于是出现了武器、凿子、锄头和钉子。元素的组合开始出现：编织纤维制成的皮条或绳索被用来将金属绑定到木头上制作斧头。技术集群和实践工艺——染色、制陶、编织、采矿、金属锻造、造船——开始出现。风能和水能被利用来提供动力。杠杆、滑轮、曲柄、绳索和齿轮的组合出现了——早期机械——并被用于磨谷物、灌溉、建筑和计时。实践工艺围绕这些技术发展；有些从实验中受益，产生了对现象及其用途的粗浅理解。

随着时间推移，这些理解让位于对现象的密切观察，对这些现象的使用变得系统化——现代时代从这里开始——成为科学方法。化学、光学、热力学和电学现象开始被理解和捕获，使用为精确观察而构建的仪器——温度计、量热计、扭转天平。大型技术领域开始上线：热机、工业化学、电力、电子学。通过这些，更精细的现象被捕获：X射

线、无线电波传输、相干光。通过激光光学、无线电传输和逻辑电路元件的大量不同组合，现代电信和计算诞生了。

就这样，少数变成了多数，多数变得专业化，专业化发现了更多的现象，使对自然原理更精细的利用成为可能。因此现在，随着纳米技术的到来，被捕获的现象可以指导被捕获的现象移动和放置材料中的单个原子，用于进一步的特定用途。所有这些都源于对自然地球现象的利用。如果我们生活在一个具有不同现象的宇宙中，我们就会有不同的技术。就这样，在人类标准看来漫长但按进化标准看短暂的时间里，作为技术的集合体构建、深化、专业化并使自身复杂化。

我在这里所说的是简短的，我还没有谈到这种情况发生的机制。在本章的其余部分，我想阐述详细的步骤——实际的机制——这种进化是如何运作的。这些将构成我理论的核心。

让我首先谈论驱动技术演进的更大力量，然后深入其详细机制。一种力量无疑是组合，我们可以将其视为现有“集合体”供应”新技术的能力，无论是通过将现有部件和组件组合在一起，还是通过使用它们来捕获现象。另一种力量是实现目标的手段的”需求”，即对新技术的需要。这些供应和需求力量共同创造出新的元素。让我们依次来看每一种力量。

组合

我已经谈论了很多关于组合的内容。但作为新技术的潜在来源，它到底有多强大呢？

当然我们可以说，随着技术数量的增加，组合的可能性也会增加。威廉·奥格本(William Ogburn)实际上早在1922年就观察到了这一点：“发明的材料越多，发明的数量就越多。”事实上，他推测物质文化（技术）的增长显示出“与复利曲线的相似性”。如果他今天写作，他会说它呈指数增长。

奥格本没有给出理论推理来支持他的指数增长主张，但我们可以用一些简单的逻辑来提供一些支持。假设技术集合体仅由技术A、B、C、D和E组成。新的可行组合可能包括不同架构中的这些构建块（将这些视为组合AED和ADE，例如）。它们可能包含多次：可能存在冗余（例如ADDE和ADEEE）。但让我们保守一点，只有在它们包含或不包含构建块时才计算可能性。也就是说，没有不同的架构，也没有冗余。这将给我们双重组合的可能性，如AB、AE、BD；或三重组合，如CDE、ABE；或四重组合，BCDE、ACDE，等等。

这些类型的组合能有多少种？嗯，在给定的新组合中，每个技术A、B、C、D、E可能存在或不存在。这给了我们A或B或C或D或E存在或不存在——A的两种可能性（存在或不存在），然后这些乘以B存在或不存在的两种可能性。从A计算到E，这使得二乘二乘二乘二乘二，得到 2^5 或32种可能性。我们需要减去只有A、或B、或C存在的单一技术（这些不是组合），以及没有构建块存在的空技术。这样计算，如果我们有32减去原来的五个，减去空技术：26种可能性。一般来说，对于N个可能的基础元素，我们得到 $2^N - N - 1$ 种可能的技术。对于10个构建块元素，这给我们1013种组合可能性，对于20个给出1,048,555种可能性，对于30个给出1,073,741,793种，对于40个给出1,099,511,627,735种。可能的组合呈指数缩放（如2的N次方）。对于任何特定数量的构建块，可能的组合都是有限的，对于小数字，它们看起来并不大。但超越这些小数字，它们就会快速变得巨大。

当然，并非所有组合都有工程意义。许多可行的可能性可能包括处理芯片与GPS技术；较少会包括喷气发动机与鸡舍。但即使从给定的一组构建块中制造出有用构建块的机会是百万分之一，可能性仍然按 $(2^N - N - 1)/1,000,000$ 或大约 2^{N-20} 的比例缩放。它们仍然呈指数缩放。

这里的计算诚然粗糙，我们可以通过几种方式来完善它。我们可以允许许多组合可能没有经济意义，这意味着它们对于预期目的可能过于昂贵。有些，如激光器或蒸汽机，可能产生一连串从它们衍生的进一步设备和方法，而其他的则完全没有后代。我们可以允许相同的组件可以在不同架构中多次组合。仅仅一个电子元件——晶体管——与其自身的副本结合就可以创造出大量的逻辑电路。完善的方法很多。但我希望读者注意的是——这是我做这个练习的要点——即使这些粗糙的组合数学也表明，如果新技术导致进一步的新技术，那么一旦集合体中元素的数量超过某个粗略的阈值，组合的可能性就开始爆炸。用相对较少的构建块，可能性就变得巨大。

机会生态位

即使新技术可能通过现有技术的组合而被潜在地“供应”，它们只有在存在某种需要、某种对它们的“需求”时才会存在。实际上，需求并不是一个很好的词。在青霉素(penicillin)或磁共振成像(magnetic resonance imaging)出现之前，经济中并没有专门对它们的“需求”。所以最好谈论技术的机会——它们可以有用地占据的生态位。机会生态位的存在召唤新技术的存在。

到底是人类社会或经济中的什么产生了机会生态位？

显而易见的答案当然是人类需求。我们需要住所、食物、交通、良好的健康状况、衣物和娱乐。人们容易认为这些需求是固定的，就像是一个通用需求类别的清单，可能还有这些类别的细分。但是当你深入研究任何一个需求类别，比如住所需求时，你会发现它并不是固定的；它很大程度上取决于社会状态。我们在住所——住房——方面的需要很大程度上取决于谁住在什么地方、谁拥有什么、谁炫耀什么，翻阅一下*建筑文摘*的页面会证实这一点。此外，当基本需求得到满足，社会达到一定程度的繁荣时，这些“需求”开始以几乎血管式的扩张方式分化。在早期社会中通过公共表演和讲故事来满足的“娱乐”需求，现在需要各种体育、戏剧、电影、小说、音乐。当这些类别的基本需求得到满足时，这些需求会繁衍成子类型——我们对许多种音乐都有兴趣。

还有其他方面。人类需求不仅仅是由于技术带来繁荣而创造的，它们还直接由个别技术本身创造。一旦我们拥有了诊断糖尿病的手段，我们就产生了人类需求——一个机会利基——对控制糖尿病手段的需求。一旦我们拥有了火箭技术，我们就体验到了对太空探索的需求。

就像人类生活中的许多其他方面一样，我们的需求是精致的：它们微妙、愉悦且复杂地依赖于社会状态，并且随着社会的繁荣而发展。由于社会随着技术的构建而繁荣，我们的需求也随着技术的构建而增长。

但这仍然远不是全貌。绝大多数技术利基不是来自人类需求，而是来自技术本身的需求。原因有几个。首先，每项技术的存在本身就为更便宜或更高效地实现其目的建立了机会；因此对于每项技术来说，总是存在一个开放的机会。另外，每项技术都需要支持技术：制造它、组织其生产和分销、维护它，以及增强其性能。而这些反过来又需要它们自己的子支持技术。1900年的汽车创造了一系列辅助需求——机会利基——用于装配线制造、铺设道路和适当精炼的汽油、维修设施和加油站。汽油反过来又为炼油厂、原油进口和石油矿藏勘探设立了进一步的需求。

技术产生需求还有第三个原因。技术经常间接地造成问题，这产生了对解决方案的需求或机会。在1600年代，采矿业在整个欧洲扩张，随着容易开采的矿藏枯竭，矿井越挖越深。渗水成为一个问题，因此对高效排水手段的需求出现了。1698年，托马斯·萨弗里的“通过火力推进力提升水并为各种磨坊工作提供动力的新发明”（蒸汽机的原始版本）满足了这一需求（虽然不太成功）。

对于我们的论证，我们不需要一个关于人类和技术需求如何形成的完整理论。但我们确实需要意识到，系统不仅包括技术创造技术，还包括技术创造呼唤技术的机会利基。我们还需要意识到，技术的机会利基不是固定不变的，而是在很大程度上由技术本身产生的。机会利基随着技术集合的变化而变化；它们随着集合的增长而细化和数量增加。

{bold}核心机制

这些驱动力为我们提供了技术如何构建的宏观图景。现有技术的组合使用提供了新技术的可能性：它们的潜在供应。人类和技术需求创造了机会利基：对它们的需求。随着新技术的引入，进一步利用和进一步组合的新机会出现

了。整个系统自我提升。

这种自我提升通过什么确切的步骤——什么确切的机制——运作？

将集合想象为一个基于自身构建并有机向外增长的网络。在这个网络中，每项技术（我通常称之为元素）由一个点或节点表示。每个节点都有从其父节点（使其成为可能的技术）指向它的链接（有向箭头）。当然，不是所有技术在给定时间都在经济中被积极使用。我们可以想象{italic}正在活跃的元素或节点被点亮。我将称这些为技术的{italic}活跃集合：那些在经济上可行且目前在经济中使用的元素。其他的——过去时代的水轮和帆船——本质上已经死亡。它们已经从活跃集合中消失。它们可能在新颖组合中复活使用，但这很少发生。

新技术不时被添加到活跃集合中。但不是均匀地。在任何时候，活跃网络在某些地方快速增长，在其他地方则完全不增长。一些元素，通常是那些跟随最近捕获现象（如1960年的激光）的元素，正在快速产生进一步的元素。其他成熟和确立的元素，如生产碳酸钠的索尔维工艺(Solvay process)，则没有产生任何后代。活跃网络不均匀地构建。

随着技术的主动集合中元素的增加或消失，机会利基的集合也会发生变化。我们可以将这些需求想象成张贴在巨大公告板背景上的信息。（我们可以将工程师和企业家想象成在观察这个公告板并对其做出反应。）每个新颖的元素都必须至少满足公告板上的一个需求或目的。当新颖元素加入网络时，它们可能会使之前满足其目的的过时元素变得过时，或使不再经济的元素失效。它们的机会利基也会从公告板上消失。调节这一切的是经济。我们可以将其视为一个系统，它决定成本和价格，因此发出信号表明新颖元素需要满足的机会，并决定哪些候选技术将进入主动集合。（目前我将把经济的这些行为视为既定事实，将经济视为黑盒。我将在[[第10章]]中对此有更多阐述。）

让我们来问问技术的主动网络是如何构建的。它通过新技术可能性与当前机会利基之间的一系列遭遇而随时间演化。每次遭遇既是工程性的也是经济性的。候选解决方案必须在技术上”可行”才能被考虑用于手头的目的；其成本必须符合市场愿意为满足相关目的而支付的价格。满足这些条件的技术是手头目的的潜在”解决方案”。可能有几个这样的解决方案，其中一个最终会加入集合。

我们开始有一种感觉，不是技术的稳定积累，而是新颖元素和机会利基的形成过程，以及它们的替换和消失过程。这个过程是算法性的：它通过离散步骤运作。

让我们来看看这些步骤。我们可以假设出现了一个候选的新颖技术。它是由先前技术的组合使其成为可能，并在进入经济的竞争中击败了对手。然后发生六个事件或步骤。我们可以将这些视为在技术构建游戏中可以采取的合法行动。我将抽象地陈述它们，但读者可能会发现有一个示例技术（比如晶体管）在脑中会有帮助。

1. 新颖技术作为新颖元素进入主动集合。它成为主动集合中的一个新节点。
2. 新颖元素变得可用于替换现有技术和现有技术中的组件。
3. 新颖元素为支持技术和组织安排建立了进一步的”需求”或机会利基。
4. 如果被取代的旧技术从集合中消失，它们的辅助需求也会被放弃。它们提供的机会利基随之消失，而反过来填补这些利基的元素可能变得不活跃。
5. 新颖元素变得可用作进一步技术——进一步元素的潜在组件。
6. 经济——生产和消费的商品和服务模式——根据这些步骤进行重新调整。成本和价格（因此对新颖技术的激励）相应地发生变化。

因此，晶体管在1950年左右进入集合（步骤1）；在大多数应用中替换了真空管（步骤2）；建立了对硅器件制造的需求（步骤3）；使真空管工业萎缩（步骤4）；成为许多电子设备的关键组件（步骤5）；并使电子设备的价格和激励发生变化（步骤6）。

但这样列出事件使它们看起来过于整齐有序。在实践中，它们并不以整齐的方式相互跟随。通常它们并行运作。一项新技术一出现（步骤1）就立即成为潜在构建块（步骤5）——再次以晶体管为例。新机会（步骤3）几乎在新技术出现（步骤1）时就立即出现。当然，这些事件中的任何一个都需要时间来展开。技术需要时间通过经济扩散，而经济可能需要几年时间来适应新颖技术。

如果这些步骤按顺序一次发生一个，构建过程将是相当有条理的。每个新可能性都会添加一个元素，其他五个步骤会适时跟随。但更有趣的事情发生了。这些事件或步骤中的每一个都可能触发其他事件的级联。一项新颖技术可能引起技术集合的进一步添加序列（通过步骤3和5）。价格重新调整（步骤6）可能使一个被边缘化的候选技术突然变得可行并进入主动集合（步骤1）。因此这些步骤本身可能触发新一轮的集合添加。新技术的出现可能启动永不停止的事件。

这里还有另一种可能性。一个新元素可能不仅导致它所替换技术的崩溃（步骤2），还可能导致依赖于被替换技术需求的技术崩溃（步骤4）。随着这些劣质元素被替换，它们的依赖机会利基也会崩溃（步骤2和4），占据这些利基的技术也随之崩溃。1900年代初汽车的到来导致了马匹运输的替换。马匹运输的消亡消除了对铁匠铺和马车制造的需求。铁匠铺的崩溃反过来消除了对铁砧制造的需求。崩溃引起了向后继承的进一步崩溃。这与熊彼特的“创造性破坏之风”不太相同，后者是指新颖技术在整个经济中广泛地消灭特定的企业和工业。相反，这是一系列多米诺骨牌式的崩溃——如果你愿意这样称呼的话，是破坏的雪崩。

正如熊彼特所指出的，创造性的一面在于，新技术和新产业取代了那些衰落的技术和产业。我们可以补充说，新技术同样容易建立新的机会利基，供进一步的新技术占据，这些新技术又建立更多的利基，供更多的技术占据。还存在着雪崩效应——我们应该称之为风暴吗——机会创造的风暴。

所有这些活动同时在网络的许多点上进行。就像生物圈中物种的构建一样，这是一个并行过程，毫无秩序可言。

我所描述的是一个抽象的步骤序列，一个技术进化的算法。如果我们从几种原始技术开始，在我们的头脑中启动这个系统，我们会看到什么？我们看到的是否像我之前给出的技术进化历史描述？

好吧，如果我们让算法运行，起初进展缓慢。技术不仅数量少，而且正因为如此，机会也很少。偶尔会有一个目的通过利用某种简单现象得到满足——在我们自己的历史案例中，如火的使用，或某些藤蔓用于捆绑。但这些原始技术提供了机会，至少可以更好地完成它们的任务。随着机会得到匹配，其他原始技术出现，可能取代现有技术。技术库存不断增长，随之而来的是可用构建块的库存。这些构建块带来的机会利基库存也在增长。技术的新组合或融合开始成为可能。随着新构建块的形成，进一步组合的可能性扩大了。构建过程现在变得繁忙。组合开始从组合中形成，因此曾经简单的东西变得复杂。组合在其他组合中替代组件。机会利基开始成倍增加；随着新组合创造更多新组合，增长爆发开始在系统中涌现；随着被替代的组合带走它们对支持技术的利基，破坏雪崩开始级联，这导致满足这些利基的技术进一步消失，以及它们的支持利基。这些雪崩在规模和持续时间上各不相同：少数是大的，大多数是小的。技术的整体集合总是在增加。但活跃集合的规模有所变化，我们预期会显示出随时间的净增长。

这种进化一旦开始，没有理由会结束。

进化实验

我刚才给出的图景是想象的；这是一个关于技术进化机制应该如何在行动中工作的思想实验。如果我们能够在实验室中或在计算机上以某种方式实施这些步骤会更好——让某种技术模型进化，这样我们就可以在现实中观察这种进化。

那会很困难。技术类型差异很大，计算机很难判断某种组合，比如造纸术和哈伯工艺(Haber process)的组合是否有意义并能做一些有用的事情。但我们可能能够将自己限制在某个受限的技术世界中，某个可以在计算机上进化并供我们研究的世界。

最近，我的同事沃尔夫冈·波拉克(Wolfgang Polak)和我建立了一个人工世界（在计算机中表示的世界）来做这件事。在我们的模型世界中，技术是逻辑电路。对于不熟悉这些的读者，让我简单介绍一下。

将逻辑电路想象成带有输入和输出引脚的微型电子芯片。给定电路的输入可能是1和0二进制形式的数字。或者它们可能是真和假的某种组合，代表当前满足的某些情况集合。因此，飞机中逻辑电路的输入可能检查引擎条件A、C、D、H、K中哪些是真或假，例如代表燃料条件、温度或压力的状态；输出引脚可能指示某些开关Z、T、W和R应该“开启”（真）还是“关闭”（假）以相应地控制引擎。电路的功能各不相同，但对于每组输入值，给定电路安排特定的输出值集合出现在输出引脚上。用于计算的有趣电路对应于算术运算：例如加法，其中输出值是输入值的正确求和。或者它们对应于逻辑运算，例如3位AND（如果输入引脚1、2和3都显示真，输出引脚信号真；否则信号假）。

使用逻辑电路给波拉克和我带来了两个优势。逻辑电路的精确功能总是已知的；如果我们知道逻辑电路是如何连接在一起的，我们可以弄清楚（或计算机可以）它到底做什么。如果计算机组合两个逻辑电路——将它们连接在一起，使一个的输出成为另一个的输入——这给我们另一个逻辑电路，其精确功能我们也知道。所以我们总是知道组合如何执行，以及它们是否做一些有用的事情。

Polak和我想象我们在计算机中的人工世界里住着一些小逻辑学家和会计师，他们渴望在这个逻辑世界中计算和比较事物。开始时他们没有办法做到这一点，但他们有一个很长的愿望清单，需要特定的逻辑功能。他们希望拥有能够执行AND操作、Exclusive-OR、3位加法、4位EQUALS等操作的电路。（为了简单起见，我们假设这个长长的需求清单或机会利基清单是不变的。）我们计算机实验的目的是看看系统是否能够通过组合现有的技术来进化出新技术——逻辑电路——以满足清单上的利基需求，并研究这种进化过程。

正如我所说，在实验开始时，这些机会利基都没有得到满足。在技术方面，唯一可用的是一个NAND（Not AND）电路（可以把它想象成一个原始的电路元件，一个不比几个晶体管复杂多少的计算机芯片）。在实验的每一步中，都可以通过组合现有电路来创建新电路——以不同的配置随机连接它们。（开始时这些仅仅是NAND电路。）当然，大多数新的随机组合会无法满足任何需求，但偶尔可能会偶然产生一个符合列出需求的组合。然后计算机被指示将其封装为一个新技术本身，一个新的构建块元素。然后它就成为进一步连接和组合的构建块元素。

这个技术进化实验在Polak的计算机中自行运行；一旦我们按下回车键启动它，就没有人为干预。当然，它可以一次又一次地重复，以比较不同运行中发生的情况。

我们发现了什么？开始时只有NAND技术。但经过几十次和几百次组合步骤后，满足简单需求的逻辑电路开始出现。这些成为进一步组合的构建块元素，使用这些元素，满足更复杂需求的技术开始出现。大约经过25万个步骤（或20小时的机器时间）后，我们停止了进化并检查了结果。

我们发现，经过足够的时间后，系统进化出了相当复杂的电路：8位Exclusive OR、8位AND、4位Equals，以及其他逻辑功能。在几次运行中，系统进化出了8位加法器，这是简单计算器的基础。这可能看起来并不特别引人注目，但实际上令人震惊。8位加法器有16个输入引脚（两个相加数字各8个）和9个输出（8个用于结果，1个额外用于进位数字）。如果你再做一些简单的组合数学计算，结果表明有超过 $10^{177,554}$ 种可能的电路具有16个输入和9个输出，其中只有一个能正确相加。 $10^{177,554}$ 是一个非常大的数字。它远远大于宇宙中基本粒子的数量。实际上，如果我要把它写成一个数字，它将占用这本书将近一半的页面。因此，在25万个步骤中通过随机组合发现这样一个电路的概率是微不足道的。如果你不知道这种进化工作的过程，在实验结束时打开计算机发现它进化出了一个功能正确的8位加法器，尽管概率极其微小，你会理所当然地惊讶于如此复杂的东西竟然出现了。你可能不得不假设机器内部有一个智能设计师。

我们的过程能够到达这样复杂电路的原因是它首先创建了一系列垫脚石技术。它可以创建电路来满足更简单的需求，并将它们用作构建块来创建中等复杂度的电路。然后它可以使用这些来创建更复杂的电路，引导自己向满足复杂需求的方向前进。更复杂的电路只有在更简单的电路就位后才能构建。我们发现，当我们移除了对这些垫脚石技术的中间需求时，复杂需求就无法得到满足。

这表明在现实世界中，雷达可能不会在没有无线电的情况下发展——也不会在没有无线电通信需求的情况下发展。在生物学中有一个平行的观察。复杂的生物体特征，如人类的眼睛，如果没有中间结构（比如区分明暗的能力）和这些中间结构的“需求”或用途（区分明暗的有用性），就无法出现。

我们还发现了其他事情。当我们检查进化的详细历史时，我们发现有很长的时间间隔几乎什么都没有发生。然后我们看到一个关键电路（使能技术）的突然出现，并迅速将其用于进一步的技术。全加器电路可能在比如32,000步后出现；然后2位、3位和4位加法器相当快地随之出现。换句话说，我们发现了静止期，然后是快速进化的微型“寒武纪大爆发”。

我们还发现，毫不奇怪，进化是历史依赖的。在实验的不同运行中，相同的简单技术会出现，但顺序不同。因为更复杂的技术是由更简单的技术构建的，它们经常会由不同的构建块组合而成。（如果在现实世界中青铜出现在铁之前，许多文物都是青铜制成的；如果铁出现在青铜之前，相同的文物会是铁制的。）我们还发现，一些复杂的电路需求，如具有许多输入的加法器或比较器——每次都是不同的——根本无法得到满足。

我们发现了毁灭性的雪崩效应。优越的技术取代了之前还在运行的技术。这意味着那些仅用于这些现已过时技术的电路本身也不再需要，因此这些电路也被替换了。这产生了我们可以研究和测量的雪崩效应。

通过这些方式，我们能够观察技术进化的实际过程，这证实了我在本章前面讲述的故事。

一种不同形式的进化？

我想对本章描述的这种进化形式做一些评论。首先，它展开的确切顺序并没有预先确定。我们无法提前知道哪些现象会被发现并转化为新技术的基础。在组合可能性的浩瀚海洋中，我们也无法预知会创造出哪些组合。当这些组合得以实现时，我们也无法预知它们会带来什么机遇。由于这些不确定性，集合体的进化或展开在历史上是偶然的。它取决于历史中的小事件：谁遇到了谁，谁借鉴了什么想法，什么权威下达了什么法令。这些微小的差异不会随着时间推移而被平均化。它们被内置到集合体中，由于进入的技术依赖于现有技术，它们会进一步传播差异。如果我们重新“回放”历史，我们可能会得到一些类似的被捕获现象的集合，因此会有大致相似的技术。但它们出现的顺序和时机有所不同。因此，经济和社会历史也会不同。

这并不意味着技术进化是完全随机的。未来十年即将出现的技术管道是相当可预测的。当前技术有着或多或少可预测的未来改进路径。但总体而言，正如遥远未来的生物物种集合无法从当前集合中预测一样，经济未来的技术集合

体也无法预测。我们不仅无法预测会产生哪些组合，也无法预测会创造出哪些机遇利基。由于潜在组合呈指数增长，这种不确定性随着集合体的发展而增加。三千年前我们可以确信地说，一百年后使用的技术会类似于当时使用的技术，而现在我们几乎无法预测五十年后技术的形态。

另一个评论是，这种进化不会在时间上均匀地引起变化。有时这样的系统是静止的，机遇利基得到满足，其他利基静静地等待合适的组合，小创新在发生——这里出现一个新颖的组合，那里替换一个组合。在其他时候，系统在变化中沸腾。一个具有重大意义的新颖组合可能出现——比如蒸汽机——并引发一阵变化的爆发。新的利基形成，新的组合出现，大量重新安排发生。变化引发变化的浪潮，在这些浪潮之间，静止引发静止。

在这本书中，我反复说过技术集合体“进化”。我是字面意思。正如生物有机体已经进化并在数量和复杂性上构建起来，技术也是如此。因此，我们有了第二个在漫长时间内大规模进化的例子。我承认不是数万年，但仍然是人类存在的漫长时代。

技术进化与生物进化究竟如何比较？它有什么不同吗？

我们的机制——我一直称之为组合进化——是关于事物通过自身的组合创造新颖事物。在生物学中的纯粹等价物是选择一个在狐猴中证明特别有用的器官，再从鬣蜥那里选择另一个器官，再从猕猴那里选择另一个器官，然后将这些与其他器官结合使用来创造一个新生物。这似乎很荒谬，但生物学确实不时通过组合形成新颖结构。基因在某些原始细菌中通过一种称为水平基因转移的机制被交换和重组。基因调控网络（大致是决定生物体中基因开启顺序的“程序”）偶尔会通过组合添加部分。

更常见的是，在生物学中，更大的结构是作为更简单结构的组合而创建的。真核细胞作为更简单结构的组合出现，多细胞生物作为单细胞生物的组合出现。在生物体内，功能特性——例如连接鼓膜和听觉神经的小骨头组合形成的机制——可以从手边的各个部分形成。分子生物学家弗朗索瓦·雅各布说：“在我们的宇宙中，物质通过连续的整合被安排在结构的层次中。”这是正确的。组合进化在生物学中绝非缺席。

然而，在生物进化中，这些更大的组合结构的创造要比技术进化中罕见得多——罕见得多。它们不是每天都在发生，而是以数百万年为间隔的时期才出现。这是因为生物学中的组合必须通过达尔文瓶颈来进行。组合（至少对于高等生物体而言）不能从不同系统中选择片段并一次性将它们组合在一起。它受到遗传进化严格限制的约束：新的组合必须通过渐进步骤来创造；这些步骤必须在所有阶段都产生可存活的东西——某种活生物体；新结构必须从已经存在的组件中逐步构建出来。在生物学中，组合确实会形成，但并非常规性地且绝非经常性地，也不是通过我们在技术中看到的直接机制。变异和选择是最重要的，组合在非常偶然的间隔中发生，但往往产生惊人的结果。

相比之下，在技术中，组合是常态。每一项新技术和新解决方案都是一种组合，每一种现象的捕捉都使用了组合。在技术中，组合进化是最重要的，也是常规的。达尔文式的变异和选择绝非不存在，但它们紧随其后，作用于已经形成的结构上。

这种关于技术自我创造的描述应该给我们对技术带来不同的感受。我们开始获得一种血统感，一种由事物产生事物的庞大整体感，一种不断添加到集合中又从中消失的事物感。发生这种情况的过程既不均匀也不平滑；它显示出增长的爆发和替换的雪崩。它不断地探索未知，不断地发现新现象，不断地创造新颖性。而且它是有机的：新层在旧层之上形成，创造和替换在时间上重叠。从集体意义上讲，技术不仅仅是各个部分的目录。它是一种代谢化学，一个几乎无限的实体集合，这些实体相互作用产生新实体——以及进一步的需求。我们不应该忘记，需求推动技术进化的程度，与新组合的可能性和现象的发掘一样重要。没有未满足需求的存在，技术中就不会出现任何新颖的东西。

最后一个想法。我说技术是自我创造的。它是一个由自身编织而成的活体网络。我们能从这一点说，在某种意义上——某种字面意义上——技术是活着的吗？

“生命”没有正式定义。相反，我们通过询问某物是否满足特定标准来判断它是否“活着”。在系统语言中，我们可以问：这个实体是否具有自组织性（是否有简单的规则让它将自己组合在一起？），以及是否具有自创生性（autopoietic）（它是否自我产生？）。技术（集体）通过了这两项测试。用更平凡的语言，我们可以问：实体是否繁殖、生长、响应并适应其环境，以及是否吸收和释放能量来维持其存在？技术（再次是集体）也通过了这些测试。它在其个体元素（如生物体中的细胞）死亡和被替换的意义上繁殖自己。它的元素在生长——它们不断地生长。它密切适应其环境，无论是集体性地还是在其个体元素中。它与其环境交换能量：形成和运行每项技术所需的能量，以及每项技术回馈的物理能量。

按照这些标准，技术确实是一个活的有机体。但它只是在珊瑚礁活着的意义上才活着。至少在其发展的这个阶段——我个人对此感到庆幸——它仍然需要人类机构(human agency)来进行其构建和繁殖。

10

经济随其技术的进化而进化

在上一章中，我们非常直接地观察了技术的进化。还有一种感知这种进化的替代方式，那就是通过经济的视角。经济反映了其技术的变化，反映了我一直在谈论的增加和替换。它不仅仅是通过平滑地重新调整其生产和消费模式或通过创造新的组合来做到这一点，正如我们在第8章中看到的那样。它改变其结构——改变其安排方式——当其技术进化时，并且在所有时间和所有层面上都在这样做。

所以我想回到技术进化的步骤，看看它们在经济中是如何展现的。我们将看到的是经济中由我们刚刚深入研究的进化过程驱动的自然结构变化过程。为了探索这一点，我们首先需要以一种不同于标准方式的方式来思考经济。

经济作为其技术的表达

定义经济的标准方式——无论是在词典中还是经济学教科书中——是作为商品和服务的”生产、分配和消费系统”。我们将这个系统”经济”想象成某种本身存在的东西，作为其中发生的事件和调整的背景。以这种方式看，经济变成了类似于其技术的巨大容器，一个有许多模块或部分的巨大机器，这些模块或部分就是它的技术——它的生产手段。当一项新技术（比如用于运输的铁路）出现时，它为特定行业提供了一个新模块，一个新升级：它所替换的旧专门模块（运河）被取出，新的升级模块被滑入。机器的其余部分自动重新平衡，其张力和流动（价格，以及生产和消费的商品）相应地重新调整。

这种观点并非完全错误。这确实是我在研究生院学习时被教导的经济学思维方式，也是当今经济学教科书描绘经济的方式。但这也并非完全正确。为了探索结构性变化，我想以不同的方式来看待经济。

我将经济定义为 *社会满足其需求的一系列安排和活动*。（这使得经济学成为对此的研究。）这些安排究竟是什么呢？我们可以从维多利亚时代经济学家的”生产资料”开始，即经济核心的工业生产过程。实际上，我的定义不会让卡尔·马克思感到惊讶。马克思认为经济源于其”生产工具”，这在他那个时代包括大型磨坊和纺织机械。

但我想超越马克思的磨坊和机械。构成经济的安排包括所有无数的设备和方法，以及我们称之为技术的所有有目的的系统。它们包括医院和外科手术程序。还有市场和定价系统。以及贸易安排、分销系统、组织和企业。还有金融系统、银行、监管系统和法律系统。所有这些都是我们满足需求的安排，都是实现人类目的的手段。因此，根据我之前的标准，它们都是”技术”，或有目的的系统。我在[[第3章]]中谈到了这一点，所以这个想法应该不会太陌生。这意味着纽约证券交易所和合同法的专门条款与钢厂和纺织机械一样，都是实现人类目的的手段。从广义上讲，它们也是技术。

如果我们将所有这些”安排”都包含在技术的集合中，我们开始看到经济不是其技术的容器，而是由其技术构建的东西。经济是一套由其技术调节的——覆盖在其技术之上的——活动、行为和商品服务流动。因此，我一直在谈论的方法、过程和组织形式 *构成*了经济。

经济是其技术的表达。

我并不是说经济与其技术相同。经济还有更多内容。商业策略、投资、竞标和交易——这些都是活动，而不是有目的的系统。我 *要说*的是，经济的结构是由其技术形成的，如果你愿意的话，技术构成了经济的骨架结构。经济的其余部分——商业活动、游戏中各种参与者的策略和决策、由此产生的商品服务和投资流动——构成了经济体的肌肉、神经结构和血液。但这些部分围绕并被构成经济结构的技术集合——有目的的系统——所塑造。

我在这里提出的思维转变并不大；它是微妙的。这就像将心智视为不是其概念和习惯思维过程的容器，而是从这些中涌现出来的东西。或者将生态系统视为不是包含生物物种的集合，而是由其物种集合形成的。经济也是如此。经济为其技术形成了一个生态系统，它从技术中形成，这意味着它不能单独存在。就像生态系统一样，它为新技术形成机会壁龛(niche)，并随着新技术的出现填补这些壁龛。

这种思维方式带来了后果。它意味着经济从其技术中涌现——涌出。它意味着经济不仅仅是随着技术变化而重新调整，而是随着技术变化不断形成和重新形成。它意味着经济的特性——其形式和结构——随着技术的变化而变化。

总之，我们可以这样说：随着技术集合的构建，它创造了一个结构，在这个结构内进行决策、活动和商品服务流动。它创造了我们称之为“经济”的东西。经济以这种方式从其技术中涌现。它不断从其技术中创造自己，并决定哪些新技术将进入其中。注意这里起作用的循环因果关系。技术创造了经济的结构，而经济调节了新技术的创造（因此也调节了自身的创造）。通常我们看不到这种技术-创造-经济-创造-技术的过程。在一年左右的短期内，经济似乎是既定和固定的；它似乎是其活动的容器。只有当我们观察几十年时，我们才能看到构成经济的安排和过程的产生、相互作用和再次崩溃。只有在更长的时间跨度中，我们才能看到经济的这种持续创造和再创造。

{.bold} 结构性变化 {.bold}

当新技术进入这个由技术形成的系统时会发生什么？我们当然仍然会看到我在[[第8章]]中谈到的相同调整和新鲜组合；它们是完全有效的。但我们会看到更多：新技术的加入启动了对经济结构、对经济形成所围绕的安排集合的一系列变化。

我们现在进入了一个经济理论通常不会涉及的领域——结构变化的领域。但这并非空白领域，这里有历史学家居住，在我们的情况下是经济史学家。历史学家认为新技术的引入不仅仅是引起调整和增长，更是引起经济本身构成的变化——即其结构的变化。但他们大多数情况下是按照临时的、逐案分析的方式进行。相比之下，我们思考经济和技术的方式为我们提供了抽象思考结构变化的手段。

在实践中，一项新技术可能催生新的产业；它可能要求建立新的组织安排；它可能引起新的技术和社会问题，从而创造新的机会利基；所有这些本身又可能催生进一步的构成变化。如果我们借用前一章中技术演进的步骤，但现在通过经济的视角来看待它们，我们就能捕捉到这一变化序列。那么让我们这样做。

现在再次假设一项新技术进入经济体。它取代了执行相同目的的旧技术（并可能使依赖于这些技术的产业和其他技术变得过时）。当然，新技术引起了我之前提到的那种经济调整。（到目前为止，这些是前面的步骤1、2、4和6。）

但同样，如步骤5和3所示：

- 新技术提供了可以在其他技术内部使用的潜在新元素。因此它催生使用并适应它的其他技术。特别是它可能产生包含它的新颖组织。
- 新技术可能为进一步的技术建立机会利基。这种机会以各种方式出现，但特别是它们可能因新技术引起新颖的技术、经济或社会问题而出现。因此，新技术建立了对进一步技术的需求来解决这些问题。

我实际上只是用经济术语重新表述了形成技术集合演进机制的步骤。但现在重点不同了，因为我正在重新解释这些步骤来描述经济的新结构是如何形成的。当一项新颖技术进入经济体时，它催生新颖的安排——新颖的技术和组织形式。新技术或新安排反过来可能引起新问题。这些问题依次由进一步的新颖安排（或为此目的而修改的现有技术）来回答，这些安排依次可能开启对更多新颖技术的需求。整个过程在问题与解决方案——挑战与回应——的序列中向前推进，我们称这个序列为结构变化。通过这种方式，经济体在一阵阵变化中形成和重新形成自己，因为新颖性、适应这种新颖性的新安排，以及机会利基的开启相互跟随。

让我用一个具体例子来说明这一点。当可行的纺织机械在1760年代左右开始在英国出现时，它为当时基于村舍的方法提供了替代品，在那种方法中，羊毛和棉花在家中通过手工在外包系统中纺织和编织。但新机械起初只是部分成功；它需要比村舍手工工作更大规模的组织。因此它为一个更高层次的组织安排——纺织厂或工厂——提供了机会并成为其中的一个组件。工厂本身作为一种组织手段——一种技术——反过来需要一种手段来补充其机械：它需要工厂劳动力。劳动力当然已经存在于经济中，但它没有足够的数量来供应新的工厂系统。必要的数量主要从农业中抽取，这反过来需要在工厂附近提供住宿。因此提供了工人宿舍和工人住房，从工厂、工人及其住房的结合中，工

业城市开始增长。一套新的社会组织手段出现了——一套新的安排——随着这些，维多利亚工业经济的结构开始出现。通过这种方式，一个时代的特征——一套与工业机械的优越技术相兼容的安排——落实到位。

但一个时代从未完结。制造业劳动者，其中许多是儿童，经常在狄更斯式的条件下工作。这强烈地提出了改革的需要，不仅是“下层阶级的道德条件”的改革，也是他们安全的改革。最终法律系统用进一步的安排回应了这一点，即旨在防止最严重过度行为的劳动法。新的工人阶级开始要求工厂创造的财富的更大份额。他们利用了一种能够改善其条件的手段：工会。劳动力在工厂中比在孤立的村舍中更容易组织，在几十年的过程中它成为了一种政治力量。

通过这种方式，纺织机械的最初到来不仅取代了村舍手工制造，它还为更高层次的安排集合——工厂系统——建立了机会，在这个系统中机械仅仅成为一个组件。新的工厂系统反过来建立了一连串需求——对劳动力和住房的需求——其解决方案创造了进一步的需求，所有这些最终成为了维多利亚工业系统。这个过程花费了一百年或更长时间才达到接近完成的状态。

读者可能会反对说，这使得结构性变化显得过于简单化——过于机械化。技术A建立了对安排B的需求；技术C满足了这一点，但又建立了进一步的需求D和E；这些需求通过技术F和G得到解决。当然，这样的序列确实构成了结构性变化的基础，但其中并没有什么简单的东西。如果我们引入递归，这些新的安排和技术本身就需要子技术和子安排。工厂系统本身需要为新机器提供动力的手段，需要传输这种动力的绳索和滑轮系统，需要获取和跟踪材料的手段，需要记账的手段，需要管理的手段，需要产品交付的手段。而这些反过来又由其他组件构建，并且有它们自己的需求。结构性变化是分形的，它在较低层次上分支，就像胚胎动脉系统在发育成更小的动脉和毛细血管时会分支一样。

而一些响应根本不是经济性的。手工艺可以机械化的想法从纺织业传播到其他行业，并在那里产生了新的机械。再次从心理学角度来看，工厂不仅创造了一套新的组织安排，还需要一种新型的人。历史学家大卫·兰德斯说，“工厂纪律”需要并最终创造了一个新品种的工人……纺纱工再也不能在家里转动她的纺车，织工也不能在家里投掷他的梭子，不受监督，都按照自己的节奏。现在工作必须在工厂里完成，按照不知疲倦的无生命设备设定的节奏，作为一个大团队的一部分，必须统一开始、暂停和停止——所有这些都在监工的密切监视下，通过道德的、金钱的，有时甚至是身体强制的手段来强制勤奋。工厂是一种新型的监狱；时钟是一种新型的狱卒。“新技术不仅引起了经济变化，还引起了心理变化。

在谈论结构性变化时，我们需要承认这一系列变化可能并非都是有形的，也可能并非都是“安排”。我们需要记住，变化可能有多种原因和高度多样的效果。尽管如此，我想强调的是，我们可以用逻辑术语——如果你愿意的话，理论上——使用为技术演进所制定的步骤来思考结构性变化的过程。经济中的结构性变化不仅仅是新技术的添加和旧技术的替换，以及随之而来的经济调整。它是一个后果链，其中构成经济骨架结构的安排不断引发新的安排。

当然，对于落实到位并定义经济结构的安排，没有什么是不可避免的——没有什么是预先确定的。我们之前看到，非常多不同的组合、非常多的安排都可以解决技术提出的问题。选择哪些在很大程度上是历史小事件的问题：问题恰好被解决的顺序，个人的偏好和行动。换句话说，是偶然性的行动。技术决定了经济的结构，从而决定了由此出现的世界的很大一部分，但哪些技术会落实到位并不是预先确定的。

问题作为解决方案的答案

我已经谈到了这种结构的展开是对构成经济的安排的不断重塑；一套安排为下一套安排的到来创造了条件。一旦启动，这种重塑没有理由会结束。即使是一项新技术的后果——想想计算机或蒸汽机——也可以持续不断。

这反过来意味着经济从未完全处于静止状态。在任何时候，它的结构都可能处于某种高度的相互兼容性中，因此接近不变。但在这种静止状态中蕴含着自身破坏的种子，正如熊彼特在一百年前指出的那样。原因是新组合——新安排——的创造，或者对熊彼特来说是新的“商品、新的生产或运输方法、新的市场、新的工业组织形式”，这些建立了一个“工业突变”过程，“不断地从内部革命经济结构，不断地摧毁旧的结构，不断地创造新的结构。”

从内部来看，系统总是准备好改变。

但我给出的论证意味着更多——比熊彼特说的多得多。新技术的到来不仅仅通过找到更好版本的商品和方法的新组合来破坏现状。它建立了一系列技术适应和新问题，在这样做的过程中，它创造了新的机会利基，这些利基引发了新的组合，而这些组合反过来又引入了更多的技术——以及更多的问题。

因此，经济总是存在于变化的永恒开放性中——存在于永恒的新颖性中。它永远存在于自我创造的过程中。它总是不满足的。我们可以补充说，各种程度重要性的新技术随时都会相互伴随进入经济。结果不仅仅是熊彼特的平衡干扰，而是同时变化的持续翻滚，所有变化都重叠和相互作用并触发进一步的变化。结果是变化引发变化。

令人好奇的是，我们可能在任何时候都不会非常意识到这种持续不断的动荡。这是因为结构性变化的过程需要几十年而不是几个月的时间来展现。这更像是在我们脚下发生的缓慢地质变迁。在短期内，现有的结构具有高度的连续性；它是一套松散兼容的系统，在其中可以制定计划和开展活动。但这种结构始终在发生改变。经济永远在构建自身。

这种技术不断演进和经济重塑的过程会停止吗？原则上，这是可能的。但仅仅是原则上。只有在未来不再发现新的现象；或者进一步组合的可能性以某种方式耗尽的情况下，这才可能发生。或者我们的实际人类需求以某种方式被我们拥有的现有技术所满足。但这些可能性都不太可能出现。永无止境的需求和可能发现的新现象将足以永久推动技术发展，经济也随之发展。

停止发展还有另一个原因不太可能。我一直在强调，每个以新技术形式出现的解决方案都会带来一些新的挑战、新的问题。作为一般规律，每项技术都包含着问题的种子，通常是几个问题。这不是技术或经济的“定律”，更不是宇宙的定律。这只是从人类历史中得出的一个基于广泛经验的观察——一个令人遗憾的观察。碳基燃料技术的使用带来了全球变暖。原子能的使用，这种环境清洁的能源，带来了原子废料处理的问题。航空运输的使用带来了感染快速全球传播的可能性。在经济中，解决方案导致问题，问题导致进一步的解决方案，这种解决方案与问题之间的舞蹈在未来任何时候都不太可能改变。如果我们幸运，我们会体验到我们称之为进步的净收益。无论进步是否存在，这种舞蹈都注定技术——以及经济——持续变化。

我在本章中一直在谈论的实际上是从经济的眼光看到的技术演进。因为经济是其技术的表达，它是一套由构成不断演进的集合体的过程、组织、设备和制度规定形成的安排；它随着其技术的发展而发展。因为经济产生于其技术，它从技术那里继承了自我创造、永久开放和永久新颖性。因此，经济最终产生于创造技术的现象；它是为服务我们需求而组织的自然。

这个经济并不简单。安排是一个叠一个地建立的：法律系统的商业部分是建立在市场和合同存在的假设基础上的；市场和合同假设银行和投资机制存在。因此，经济不是一个同质的东西。它是一个结构——一个宏伟的结构——由相互作用、相互支持的安排构成，存在于许多层面，几个世纪以来从自身发展而成。它几乎是一个活的东西，或至少是一个演进的东西，随着其安排创造出进一步的可能性和问题而不断改变其结构，这些可能性和问题需要进一步的回应——更多的安排。

这种结构的演进是对构成经济的安排的持续重塑，一套安排为下一套安排的到来创造了条件。这与在给定安排或给定行业内的重新调整不同，也与经济增长不同。它是持续的、分形的和不可阻挡的。它带来了不断的变化。

结构性变化有什么恒定不变的吗？嗯，经济总是从相同的元素形成其模式——人类行为的偏好、会计的基本现实，以及购买的商品必须等于销售的商品这一不证自明的道理。这些潜在的基础”定律”始终保持不变。但表达它们的手段随时间而变化，它们形成的模式随时间变化和重新形成。每一个新模式、每一套新安排，然后为经济产生一个新结构，旧结构消逝，但形成它的潜在组成部分——基础定律——始终保持不变。

经济学作为一门学科经常受到批评，因为与物理学或化学这样的”硬科学”不同，它无法被固定为一套随时间不变的描述。但这不是一个失败，这是合适和自然的。经济不是一个简单的系统；它是一个演进的、复杂的系统，它形成的结构随时间不断变化。这意味着我们对经济的解释必须随时间不断变化。我有时把经济想象成夜晚的第一次世界大战战场。天很黑，在胸墙上看不到太多东西。从半英里左右的距离，在敌方领土那边，听到隆隆声，并产生了工事在移动、部队在重新部署的感觉。但对新配置的最佳猜测是对旧配置的推断。然后有人放起了照明弹，它在观察者的头脑中照亮了整个工事、配置、部队和战壕的模式，然后一切又陷入黑暗。经济就是如此。经济学中的伟大照明弹是像史密斯、李嘉图、马克思或凯恩斯这样的理论家的贡献。或者确实是熊彼特本人。它们照亮一段时间，但隆隆声和重新部署在黑暗中继续。我们确实可以观察经济，但我们的语言、标签和理解都被照亮现场的伟大照明弹冻结了，特别是被最后一组伟大的照明弹冻结了。

11

我们对这一创造处于何种立场？

我在开头说过，这本书的目的是创建一个技术理论——“一组连贯的一般命题”——为我们提供一个框架来理解技术是什么以及它如何在世界中运作。特别是，目的是创建一个适用于技术的进化理论，而不是从外部借用的。结果正如达尔文所说，是“一个长篇论证”。为了避免一些重复，让我在这里简要总结一下这个论证。

理论始于一般命题或原理，我们从三个原理开始：所有技术都是元素的组合；这些元素本身就是技术；所有技术都使用现象为某种目的服务。特别是第三个原理告诉我们，技术的本质是对自然的编程。它是对现象的捕获和对这些现象为人类目的的利用。“一项单独的技术”编程”许多现象；它协调这些现象以实现特定目的。

一旦新技术——个别技术——存在，它们就成为构建进一步新技术的潜在构建块。结果是一种进化形式，组合进化，其基本机制不同于标准的达尔文进化。新技术是由本身就是技术的构建块创造出来的，并成为构建进一步新技术的潜在构建块。推动这种进化的是对新现象的渐进捕获和利用，但这需要现有技术来进行捕获和利用。从最后两个陈述我们可以说，技术从自身创造自身。通过这种方式，一种文化可获得的机械技艺集合从少数构建块元素自我引导上升到许多元素，从简单元素到更复杂的元素。

这种进化形式看起来简单。但就像达尔文进化一样，它并不简单；有许多细节和机制。中心机制当然是根本性新技术起源的机制。技术中的新“物种”通过将某种需求与能够满足它的某种效应（或多种效应）联系起来而产生。这种联系是一个过程，一个漫长的构想概念的过程——对一组效应在行动中的想法——并找到能使概念成为可能的组件和装配的组合。这个过程是递归的。让概念发挥作用带来问题，这些问题的潜在解决方案又带来进一步的子问题。在完成之前，这个过程在不同层次的问题和解决方案之间来回进行。

组合，在心理上或物理上将合适的部分和功能放在一起形成解决方案，是这一过程的核心。但它不是推动技术进化的唯一力量。另一个力量是需求，对做事的新方法的需求。需求本身更多地来自技术本身而不是直接来自人类需要；它们主要来自技术本身遇到的限制和产生的问题。这些必须通过更多的技术来解决，因此在技术中，需求跟随解决方案就像解决方案跟随需求一样多。组合进化既关乎需求的构建，也关乎对这些需求的解决方案。

所有这些发生的整体过程既不均匀也不平滑。在任何时候，技术集合都在通过添加和放弃技术、为进一步的技术创造机会生态位以及发现新现象而进化。技术体系也在狭义上进化，即持续发展：它们出现，不断改变它们提供的“词汇”，并被吸收到经济的各个行业中。个别技术也在进化——发展。为了提供更好的性能，它们不断改变内部部件并添加更复杂的装配。

结果是各个层面的持续动荡。在所有层面，新的组合出现，新技术被添加，旧的消失。通过这种方式，技术不断探索未知，不断创造进一步的解决方案和进一步的需求，同时带来永恒的新颖性。这个过程是有机的：新层形成在旧层之上，创造和替换在时间上重叠。在其集体意义上，技术不仅仅是个别部分的目录。它是一种新陈代谢化学，一个几乎无限的实体集合，这些实体相互作用并从现有的东西构建以产生新实体——以及进一步的需求。

经济指导和调解这一切。它发出需求信号，测试商业可行性的想法，并为新版本的技术提供需求。但它不是技术的简单接受者，不是一台经常接收其部件升级的机器。经济是其技术的表达。它的骨架结构包括一套相互支撑的安排——企业、生产手段、机构和组织——这些本身在广义上就是技术。围绕这些，商业的活动和行动发生。这些“安排”为进一步的“安排”创造机会，它们相互跟随的序列构成了经济中的结构性变化。由此产生的经济继承了其技术的所有品质。它也在长期尺度上充满变化。像技术一样，它是开放的、历史依赖的、分层的、不确定的。并且永远在变化。

技术成为生物学——反之亦然

对我的论点可能存在一个反对意见。我在本书中给出的许多例子都是历史性的——来自二十世纪和十九世纪的技术。因此，当我们迈向未来时，我所提出的关于技术作为功能性化学的愿景——可为不同目的编程不同配置——可能不再有效。

实际上，情况恰恰相反。随着技术的进步，这一愿景变得越来越合适。数字化使功能性能够组合，即使它们来自不同的领域，因为一旦进入数字领域，它们就变成了同一类型的对象——数据字符串——因此可以用同样的方式进行操作。电信使这些数字元素能够远程组合，因此几乎任何地方的可执行程序都可以触发另一个程序。通过感应设备，系统现在可以感知其环境，尽管还很原始，并配置其行动。结果是将来自不同领域和相距甚远位置的功能性连接在一起，形成临时网络，连接起来的事物与事物对话的集合，感知环境并做出适当反应。因此，现代客机导航是一系列功能元素——机载陀螺系统、GPS系统、几个导航卫星和地面站、原子钟、自动驾驶仪和电传飞控系统、定位控制面的执行器——全部彼此“对话”，相互查询、相互触发、相互执行，就像计算机算法中的一组子程序相互查询、触发和执行一样。

代表性技术不再是具有固定架构执行固定功能的机器。它是一个系统，一个功能性网络——事物执行事物的新陈代谢——能够感知其环境并重新配置其行动以适当执行。

这样的事物执行事物网络可以自上而下设计，以感知环境并做出适当反应。但这很困难。当网络由数千个独立的相互作用部分组成，环境快速变化时，以任何可靠的方式进行自上而下的设计几乎变得不可能。因此，越来越多的网络被设计为从经验中“学习”，哪些简单的交互配置规则在不同环境中运作得最好。配备了这些规则，它们可以对感知到的内容做出适当反应。这是否构成某种形式的“智能”？在某种程度上确实如此。生物认知的一个简单定义——比如大肠杆菌细菌感知葡萄糖浓度增加并朝那个方向移动——就是能够感知环境并做出适当反应。因此，随着现代技术越来越多地组织成感知、配置和适当执行的部分网络，它显示出一定程度的认知。我们正在朝着“智能”系统发展。基因组学和纳米技术的到来将增强这一点。事实上，未来这些系统不仅将是自配置、自优化和认知的，它们还将是自组装、自愈合和自保护的。

我在这里的目的不是指向某个科幻未来，或讨论这些趋势的含义。其他人已经在别处做过这些。我想引起注意的是别的东西：诸如自配置、自愈合和认知这样的词汇不是我们过去会与技术联系在一起的。这些是生物学词汇。它们告诉我们，随着技术变得更加复杂，它正在变得更加生物化。这似乎是矛盾的。技术的本质当然是机械主义的；因此当然随着它变得更加复杂，它只是变得更加复杂地机械主义。那么技术怎么能变得更加生物化呢？

有两个答案。一个是所有技术在某种意义上同时是机械主义的和有机的。如果你自上而下地检查一项技术，你会看到它是连接部分的安排，相互作用和相互啮合以达到某种目的。在这个意义上，它成为一个钟表装置——它变得机械化。然而，如果你从心理上自下而上地检查它，从这些部分是如何组合在一起的角度，你会看到这些作为完整的部分——完整的器官——形成一个更高的、功能性的、有目的的整体。它成为一个功能性的身体——它变得有机化。因此一项技术是机械主义的还是有机的取决于你的观点。另一个答案纯粹是生物学的：技术正在获得我们与活体生物联系在一起的特性。当它们感知并对环境做出反应时，当它们变得自组装、自配置、自愈合和“认知”时，它们越来越像活体生物。技术变得越复杂和“高科技”，它们就越生物化。我们开始认识到技术既是新陈代谢也是机制。

这存在一个对称的方面。随着对生物学理解的加深，我们越来越把它视为机械化的。当然，生物有机体由相互连接的部分组成，这些部分像机器部件一样相互作用，这个想法并不新颖。它至少可以追溯到1620年代，那时Mersenne和

Descartes等哲学家开始将生物体视为可能的机器。真正新颖的是，我们现在理解了许多机制的工作细节。自1950年代以来，我们逐步解析了细胞内DNA和蛋白质制造的精细工作机制，一些复杂的基因表达控制，以及大脑各部分的功能。这项工作远未完成，但它揭示了有机体和细胞器是高度精密的技术系统。事实上，生物体让我们瞥见了技术还有多远的路要走。没有任何工程技术在其工作机制上能与细胞的复杂程度相提并论。

至少在概念上，生物学正在变成技术。而在物理上，技术正在变成生物学。这两者开始相互靠拢，事实上，随着我们深入genomics和nanotechnology领域，不仅如此，它们还开始相互融合。

生成性经济

如果技术正在变得更可配置、更生物化，那么经济是否在某种程度上反映了这一点？如果经济确实是技术的表达，那么它应该如此。事实上确实如此。

技术早已从维多利亚时代大宗材料加工的主导地位转移，现在它再次转变：从单一用途的固定流程或机器转向可以为不同目的以不同组合进行编程的原始功能性。反映这一点，经济——至少是其高科技部分——更多的是关于事物的组合，而不是固定操作的精炼。商业运营——商业银行、石油公司、保险公司——当然仍然反映大型固定技术的时代。但越来越多地，就像创办startup公司、venture capital、金融derivatives、数字化或combinatorial biology的运营一样，它们是关于为短期可重构目的组合功能性——行动和商业流程。

总而言之，经济正在变得生成性。它的焦点正在从优化固定操作转向创造新的组合、新的可配置产品。

对于在startup公司中创造这些新组合的企业家来说，很少有事情是清楚的。他通常不知道他的竞争对手会是谁。他不知道新技术的效果如何，或者会如何被接受。他不知道什么政府法规会适用。这就像他在一个赌场游戏中下注，而规则和回报要到下注之后才能明确。围绕新combinatorial business启动的环境不仅仅是不确定的；它的特定方面根本就是未知的。

这意味着高科技经济的决策“问题”没有得到很好的定义。因此（也许会让读者震惊），它们没有最优的“解决方案”。在这种情况下，管理的挑战不是理性地解决问题，而是对未定义的情况进行理解——“认知”它，或将其框架化为可以处理的情况——并相应地定位其产品。这里又是一个看似矛盾的现象。技术越是高科技化，处理它的商业就越不是纯粹理性的。先进技术中的企业家精神不仅仅是决策问题。它是对反复定义不清的情况强加认知秩序的问题。技术思想家John Seely Brown告诉我们，“管理已经从制造产品转向理解意义”。

在生成性经济中，管理层的竞争优势不是来自其资源储备及其将这些资源转化为成品的能力，而是来自其将深度专业知识储备转化为不断新的战略组合的能力。反映这一点，国家财富不是那么多地来自资源的所有权，而是来自专业科学技术专长的所有权。公司也从其技术专长的所有权中获得竞争优势。在组合新组合时，它们通常缺乏特定的专业知识，在竞争压力下，它们没有时间在内部开发这些专业知识。因此，它们收购小公司，或与确实拥有必要技能的其他公司形成战略联盟。这样的联盟通常为特定目的组建，然后重新配置或解散。因此我们看到公司层面的组合，表现为持续重新配置的松散联盟系列——短暂的，偶尔非常成功的。

因此，现代技术的本质带来了一系列新的转变：在企业管理中，从优化生产流程到创造新组合——新产品、新功能。从理性到理解意义；从基于商品的公司到基于技能的公司；从购买组件到形成联盟；从稳态操作到持续适应。这些转变都不是突然的，事实上新旧风格的元素在经济中共存：两个商业世界重叠并密切相关。但随着更技术化的经济走向前台，我们正在从二十世纪机器般的经济及其工厂节点和投入产出链接转向二十一世纪有机的、相互关联的经济。旧经济是一台机器，新经济是一种化学反应，总是以新的组合创造自己，总是在发现，总是在过程中。

经济学本身正开始回应这些变化，并反映出其研究对象不是一个处于平衡状态的系统，而是一个进化的复杂系统，其组成要素——消费者、投资者、企业、管理当局——对这些要素所创造的模式做出反应。其标准学说建立在可预测性、秩序、平衡和理性运作的基石原则之上；这适合于一个由年复一年基本保持不变的批量处理技术构成的经济体。但随着经济变得更加组合化，技术变得更加开放，新的原则正在进入经济学的基础。作为组织解释方式的秩序、封闭性和平衡正在让位于开放性、不确定性和永续新颖性的涌现。

纯粹秩序与混乱活力

不仅我们对经济的理解正在改变以反映更加开放、有机的观点。我们对世界的诠释也变得更加开放和有机；技术在这种转变中再次发挥了作用。在笛卡尔时代，我们开始根据技术的感知特质来诠释世界：其机械联系、正式秩序、动力、简单几何、光洁表面、精美的钟表机构精确性。这些特质作为用于解释和效仿的理想投射到文化和思想上——这种趋势因伽利略和牛顿科学中简单秩序和钟表机构精确性的发现而大大增强。这些给了我们一个世界观，认为世界由各部分组成，是理性的，由理性（在十八世纪大写，且为阴性）和简单性支配。借用建筑师Robert Venturi的话说，它们产生了纯粹秩序的拘谨梦想。

因此，牛顿之后的三个世纪成为对技术、机器和纯粹事物秩序梦想的漫长迷恋时期。二十世纪见证了这种机械论观点开始占主导地位的高度表达。在许多学术领域——例如心理学和经济学——机械论诠释使有洞察力的思想屈服于对技术的迷恋。在哲学中，它带来了理性哲学可以建立在——从逻辑要素以及后来的语言要素构建——的希望。在政治中，它带来了受控的、工程化社会的理想；随之而来的是社会主义、共产主义和各种形式法西斯主义的管理化、受控结构。在建筑中，它带来了Le Corbusier和包豪斯的严肃几何和光洁表面。但最终所有这些领域都扩展到超越任何试图容纳它们的系统，整个二十世纪基于纯粹秩序机械论梦想的运动都破产了。

取而代之的是一种日益增长的认识，即世界反映的不仅仅是其机制的总和。当然，机制仍然是核心。但我们现在意识到，当机制变得相互关联和复杂时，它们所揭示的世界是复杂的。它们是开放的、进化的，并产生无法从其部分预测的涌现特性。我们正在转向的观点不再是纯粹秩序的观点。它是整体性的观点，一种有机的整体性和不完美。Venturi再次谈到建筑时说道：

我喜欢混合而非“纯粹”的要素，妥协而非“干净”的，扭曲而非“直接”的，模糊而非“清晰表达”的，反常的同时也是非个人的，无聊的同时也是“有趣”的，传统的而非“设计的”，包容的而非排斥的，冗余的而非简单的，残存的同时也是创新的，不一致和模棱两可的而非直接和清晰的。我支持混乱的活力胜过明显的统一。我包含不连贯性并宣扬二元性。我支持意义的丰富性而非意义的清晰性；支持隐含功能以及显性功能。

混乱的活力，Venturi说；以及意义的丰富性。是的。我也全心全意支持这些。我们正在用整体性的形象替代完美的形象，在那种整体性中有着混乱的活力。这种思维转变与进化生物学的影响和简单机械论观点的耗尽关系更大，而不是与现代技术的任何影响有关。但它仍然得到现代技术特质的强化：其连接性、适应性、进化倾向、有机品质。其混乱的活力。

我们与技术的关系如何？

那么我们正在改变通过技术看世界的方式。但技术本身呢？我们如何看待它？我们与这个创造的关系如何？

我们当然对技术感到深深的矛盾情结，这种情结在持续增长。但这种矛盾情结并非直接来自我们与技术的关系；它来自我们与自然的关系。这应该不会完全令人惊讶。如果技术是为我们的目的而组织的自然，那么在很大程度上我们与这种自然使用方式的关系应该决定我们如何看待技术。

1955年，马丁·海德格尔发表了一篇题为《关于技术的问题》的演讲。他说，技术的本质绝不是任何技术性的东西。它是一种看待自然的方式，让自然中的一切都显现为我们人类可以使用的潜在资源。这是令人遗憾的。“自然变成了一个巨大的加油站”，我们将其视为可开发的资源，仅仅是为我们的目的而使用的“储备物”。技术，或者说希腊语中的techne（手艺或行动中的认知），不再是“将真理带入美的呈现”，就像古代银匠制作祭祀圣杯那样。技术不再适应世界，而是试图让世界适应自己。海德格尔并没有说问题在于技术本身，而在于技术带来的态度。曾经我们尊重——甚至崇敬——自然，现在我们却“攻击”自然，将其简化为仅仅为我们使用而存在的东西。

更糟糕的是，我们创造了一个不是主要响应人类需求，而是响应自身需求的东西——技术。海德格尔的翻译者转述他的话说：“技术绝不是人类制造或控制的工具。相反，它是那种从存在本身统治的现象，是决定整个西方历史的核心因素。”其他人——特别是法国社会学家雅克·埃吕尔——也表达了同样的观点，用词同样戏剧化。技术是指导人类生活的事物，是人类生活必须屈服和适应的事物，“一个趋向于封闭和自我决定的‘有机体’；它本身就是目的”。

然而——海德格尔也承认这一点——我们与这个事物（技术）的关系也很好地服务于我们。技术创造了我们的经济，以及我们所有的财富和安全。它为我们带来了比祖先更长寿的生活，幸福地摆脱了他们所面临的痛苦。

这两种观点——技术是指导我们生活的事物，同时又是幸福地服务于我们生活的事物——同时都是有效的。但它们共同造成了一种不安，一种持续的紧张感，这种紧张感在我们对技术的态度和围绕技术的政治中得到体现。

这种紧张感不仅来自技术导致我们开发自然以及它决定我们生活的大部分。正如我在[[第一章]]中所说，它的产生是因为在人类存在的整个过程中，我们一直在自然中安居乐业——我们信任自然，而不是技术。然而我们指望技术来照顾我们的未来——我们对技术抱有希望。所以我们对某个我们并不完全信任的东西抱有希望。这里有一个讽刺。正如我所说，技术是对自然的编程，是对自然现象的编排和利用。所以在其最深层的本质中，它是自然的，深深地自然的。但它感觉起来并不自然。

如果我们仅仅以原始形式使用自然现象，为水车提供动力或推动帆船，我们会对技术感到更自在，我们的信任和希望就不会如此矛盾。但现在，随着基因工程、机器智能、仿生学、气候工程的到来，我们开始使用技术——使用自然——直接干预自然内部。对于我们这个在树木、草地和其他动物栖息地中安居的灵长类物种来说，这感觉深深地不自然。这扰乱了我们深层的信任。

我们以许多方式无意识地对这种深深的不安做出反应。我们转向传统。我们转向环保主义。我们倾听家庭价值观。我们转向原教旨主义。我们抗议。在这些反应背后，无论是否合理，都潜伏着恐惧。我们害怕技术将我们与自然分离，破坏自然，破坏我们的本性。我们害怕这种不在我们控制之下的技术现象。我们害怕我们正在释放某种脱离实体行动的东西，它以某种方式获得了自己的生命，并以某种方式来控制我们。我们害怕技术作为一个活的东西会给我们带来死亡。不是虚无的死亡，而是更糟糕的死亡。没有自由的死亡。意志的死亡。

我们无意识地感知到这一点。我们时代的流行神话指向这一点。无论是在小说还是电影中，如果我们审视我们讲给自己的故事，我们会看到问题不在于我们是否应该拥有技术。而在于我们是否应该接受技术作为无面孔的、意志枯竭的，还是拥有技术作为有机的、生命增强的。在电影《星球大战》中，技术的恶性方面是死星。它是一个巨大的、与人性脱节的物体，将其客户简化为克隆人——可识别的人类，但都同样被机器奴役，都被抽干了色彩和意志。它的主角达斯·维达也不是一个完整的人类。他是被构造的——部分技术，部分人体。相比之下，英雄卢克·天行者和汉·索洛是完全的人类。他们有个性，有意志，他们与生物在一个叫做莫斯艾斯利酒吧的地方厮混——这些生物奇怪、扭曲、变态，但充满了混乱的活力。如果你看英雄们，他们也有技术。但他们的技术是不同的。它不是隐藏的和非人化的；他们的星舰是摇摇欲坠的、有机的，必须踢一脚才能运行。这很关键。他们的技术是人性的。它是他们本性的延伸，易错的、人性的、个体的，因此是仁慈的。他们没有用人性换取技术，也没有将意志交给技术。技术向他们投降了。通过这样做，它延伸了他们的自然性。

因此，我们对技术的反应——如在流行神话中无意识地体现的那样——并不排斥技术。没有技术就不成其为人类；技术是使我们成为人类的很大一部分。“佛陀，神性，既舒适地存在于数字计算机的电路中或自行车传动装置的齿轮中，也同样舒适地存在于山顶或花瓣中，”罗伯特·皮尔西格说道。技术是更深层次秩序的一部分。但我们的无意识区分了奴役我们本性的技术与延伸我们本性的技术。这是正确的区分。我们不应该接受使我们麻木的技术；我们也不应该总是将可能的等同于可取的。我们是人类，我们需要的不仅仅是经济上的舒适。我们需要挑战，我们需要意义，我们需要目标，我们需要与自然的协调。当技术将我们与这些分离时，它带来了一种死亡。但当它增强这些时，它肯定了生命。它肯定了我们的人性。

【注释】

前言

2 其他...组合中的技术：我在1987年与Stuart Kauffman讨论了这个想法。Kauffman此后在他的几篇著作中进一步阐述了关于技术自创造方面的思考。

4 美丽的案例研究...历史学家：特别参见Aitken、Constant、Hughes、Landes、Rhodes和Tomayko的研究。

第1章：问题

9 带有微小电极的猴子：Meel Velliste等人，“用于自主进食的假肢手臂的皮层控制”，《自然》，453期，

1098-101页，2008年6月19日。

13 Georges Cuvier：这段引文出自他的《动物自然史基础表》，Baudouin出版社，巴黎，1798年。

15 “进化”一词...一般含义：参见Stephen Jay Gould，“进化的三个方面”，收录于《科学、心智与宇宙》，J. Brockman和K. Matson编，Phoenix出版社，伦敦，1995年。

16 Gilfillan追溯了...船舶：Gilfillan，1935a。

17 突然的根本性新奇...进化论者：Basalla在其1988年的《技术的进化》中提出了迄今为止最完整的理论，但最终不得不承认（第210页）“我们无法解释新奇人工制品的出现”。

19 这个想法，像...人们：早期的例子是Robert Thurston的《蒸汽机发展史》，Kegan Paul, Trench, & Co出版社，伦敦，1883年，第3页。

20 没有外部干扰...稳定：Schumpeter 1912。Schumpeter最近拜访了均衡经济学的泰斗Léon Walras，后者在瑞士告诉他“当然，经济生活本质上是被动的，只是适应可能作用于它的自然和社会影响”。参见Richard Swedberg，《Schumpeter：传记》，普林斯顿大学出版社，1991年，第32页。

20 发明，历史学家说...Usher：Usher，第11页；另见Gilfillan，1935b，第6页；以及McGee。

20 William Fielding Ogburn：Ogburn，第104页。

23 “一组连贯的...命题”：这个“理论”的定义来自Dictionary.com未删节版（v 1.1）。Random House出版社，2008年访问。

第2章：组合与结构

27 什么是技术？：根据《美国大学词典》，技术是”处理工业技艺的知识分支”；或者根据《韦伯斯特词典》，是”将知识应用于实用目的的科学：应用科学”；或者根据《大英百科全书》，是”制造和做事技术的系统研究”。 “手段的总和”出自《韦伯斯特第三版新国际词典》，Merriam-Webster出版社，1986年。

27 技术真的能是知识吗：我不同意技术就是知识。知识对技术是必要的——如何构建它、思考它、处理它的知识——但这并不使技术等同于知识。我们可以说知识对数学也是必要的——定理、结构和方法的知识——但这并不使数学等同于知识。知识是对信息、事实、理解的拥有，而拥有关于某物的这些并不等同于那个某物本身。对我来说，技术也是可以执行的东西。如果你从飞机上跳下来，你想要的是降落伞，而不是如何制造降落伞的知识。

30 收音机处理信号：大多数现代收音机还包括一个外差级，将射频信号转换为固定的中频，后续电路经过优化来处理这个中频。

32 我们发现…有用的：尼采评论道：“每个概念都通过我们将不相等的东西等同而产生。没有一片叶子完全等同于另一片，‘叶子’这个概念是通过从个体差异中任意抽象、通过忘记区别而形成的；现在它产生了这样的想法，即在自然界中除了叶子之外可能还有某种东西是‘叶子’——某种原始形式，所有叶子都是按照它编织、标记、复制、着色、卷曲和绘制的，但由于不熟练的手，没有一个副本成为原始形式的正确、可靠和忠实的图像。”摘自“关于超道德意义上的真理与谎言”，《便携式尼采》，企鹅出版社，纽约，1976年，第46页。

“chunking”在认知心理学中：这个概念可以追溯到20世纪50年代；K. S. Lashley，“行为中序列顺序的问题”，载于L. A. Jeffress编，《行为中的脑机制》，Wiley出版社，纽约，1951；另见F. Gobet等，“人类学习中的chunking机制”，《认知科学趋势》第5卷，第6期：236-243页，2001年。

Adam Smith：Smith，《国富论》，1776年，第1章。

技术模块…单元：Baldwin和Clark表明模块化正在随时间递增。

形成的层次结构：Herbert Simon谈到了层次系统，但没有涉及递归性。

递归性将是…原理：相关的性质，即组件实体在某种意义上类似于更高层次的实体，被称为”自相似性”。当我说结构是fractal时，我的意思是松散的。严格来说，fractal是一个几何对象。

第3章：现象

现象是...来源：关于物理效应的汇编，见Joachim Schubert的《物理学中的效应和现象词典》，Wiley出版社，纽约，1987年。

天文学家Geoffrey...Butler：与Geoffrey Marcy的访谈，2008年2月20日。

1831年Faraday发现：James Hamilton，《Faraday传》，HarperCollins出版社，伦敦，2002年。

工程教授John G. Truxal：引语来自Truxal，“学会像工程师一样思考：为什么、什么以及如何？”《变革》第3卷，第2期：10-19页，1986年。

Millikan花了五年时间：Robert P. Crease，《棱镜与摆锤》，Random House出版社，纽约，2003年。

科学是...技术：“在枪口威胁下被迫在两个粗糙的误解之间选择，”技术哲学家Robert McGinn说（第27页），“人们不得不选择异端观念‘科学是应用技术’而非传统智慧‘技术是应用科学’。”

Mokyr指出了...技术：Mokyr。

第4章：领域，或为了能够在那完成的事情而进入的世界

一个领域将...集群：当然，领域遭受集合名词的常见问题。（究竟谁是保守派？什么确切构成文艺复兴建筑？）领域也可能重叠。滚轮轴承属于几个常用领域。

*Fly-by-wire*允许飞机控制系统：Tomayko。

1821年Charles Babbage：Joel Shurkin，《思维引擎》，Norton出版社，纽约，1996年，第42页；Doron Swade，《差分机》，Penguin Books出版社，纽约，2002年，第10页。

Jules Verne的：Dover1962年版的Verne《从地球到月球》收录了许多1860年代的法国原版插图。

“绘画的语法”：Henry James，“小说的艺术”，《朗文杂志》第4卷，1884年9月。

生物化学家Erwin Chargaff：引语来自他的“生物学语法前言”，《科学》第172卷，1971年5月14日。

这样的...从何而来？有时语法存在但没有明显的自然支撑。像C++这样的编程语言的语法是人工的，基于一套约定的原则。见Bjarne Stroustrup，《C++的设计与演化》，Addison-Wesley出版社，马萨诸塞州Reading，1994年。语法不一定源自我们对自然如何运作的“官方”理解，即科学。大多数较新的语法——比如nanotechnology或光学数据传输的语法——确实如此。但支配较老技术的原理，如金属冶炼或制革，主要来自实践，来自对自然的随意观察。

但这种理解...理论：飞机规则来自Vincenti，第218页。

“做好它...买家。”James Newcomb，“竞争环境中能源效率服务的未来”，战略问题论文，E Source，1994年，第17页。

良好设计中的美：见David Gelernter, 《机器之美：技术的优雅与核心》，Basic Books出版社，纽约，1998年。

Paul Klee说：引语和关于Klee的评论来自Annie Dillard, 《写作生活》，Harper & Row出版社，纽约，1989年。

数字建筑...表面：Paul Goldberger, “数字梦想”，《纽约客》，2001年3月12日。

第5章：工程及其解决方案

标准工程：Thomas Kuhn称常规科学为“正常科学”，Edward Constant跟随他，谈论正常工程。我不喜欢“正常”这个术语，因为它暗示与科学活动的相似性，而这种相似性可能并不存在。我更愿意称之为标准工程。

波音747在...1960年代：关于747的引语来自Peter Gilchrist，《波音747》，第3版，Ian Allen Publishing出版社，英国Shepperton，1999年；以及Guy Norris和Mark Wagner，《波音747：1969年以来的设计与演化》，MBI Publishing Co.出版社，威斯康星州Osceola，1997年；还有与波音公司Joseph Sutter的个人通信，2008年11月。

让事情运作需要：Ferguson，第37页。

[[98]] 构想概念和功能：Ferguson告诉我们这是在视觉上发生的。我不反对这一点，但我说的是发生在更无意识且不一定是视觉层面上的事情。

[[98]] Hoare创造了快速排序算法：关于快速排序的更多信息，参见Gelernter。

[[99]] Robert Maillart创造了...桥梁：Billington。

[[101]] “这样的修改...经济效益”：Rosenberg，第62页。

[[101]] 机构和机械装置：Neil Slater和Nicholas P. Chironis。机构和机械装置资料手册。第4版。McGraw-Hill，纽约，2007年。

[[102]] Richard Dawkins的模因：Dawkins，自私的基因，牛津大学出版社，纽约，1976年。

[[104]] 美国海军...Rickover：Richard Rhodes的个人通信。另见Theodore Rockwell，Rickover效应，海军学院出版社，马里兰州安纳波利斯，1992年。

[[105]] 轻水...占主导地位：Robin Cowan，“核动力反应堆：技术锁定研究”，经济史杂志 50，541–556，1990年；Mark Hertsgaard，核能公司：核能背后的人和资金，Pantheon图书公司，纽约，1983年。

[[106]] 剪毛工人(他们...协议: 引文来自Malcolm Chase, 第16页, 早期工会主义, Ashgate, 英国奥尔德肖特, 2000年。内部引文来自L. F. Salzmann, 中世纪英国工业, 第342 – 343页, 牛津大学出版社, 1923年。

第6章：技术的起源

[[107]] 技术的起源: 本章的大部分材料取自我的论文, “发明的结构”, 研究政策 36, 2:274–287, 2007年3月。

[[107]] “连续添加...由此” : Schumpeter, 1912年, 第64页。

[[111]] “稳定的气体热力学流动...组件。” : 引文来自Constant, 第196页。当然除了Whittle和von Ohain之外, 其他人也曾试验过早期版本的喷气发动机。

[[113]] Whittle在1928年沉思: Constant; Whittle。

[[113]] John Randall和...原理: Russell Burns, “空腔磁控管发展的背景”, 见Burns编, 雷达发展至1945年, Peter Peregrinus, 伦敦, 1988年; E. B. Callick, 从仪表到微波: 英国雷达系统有源器件发展1937-1944, Peter Peregrinus, 伦敦, 1990年; 以及Buderis。

[[114]] “我问自己...布置。” : Lawrence的引文来自他的诺贝尔演讲, “回旋加速器的演进”, 1951年12月11日。Wideröe的论文是“关于产生高电压的新原理”, 电工技术档案, XXI, 386–405, 1928年。

[[115]] 在所有这些...被采用: 偶尔原理可以通过系统性地调查各种可能性来获得。“因此我开始系统地检查所有可能的替代方法”, Francis W. Aston在描述他将导致质谱仪诞生的探索时如是说。Aston, “质谱和同位素”, 诺贝尔演讲, 1922年12月12日。

[[115]] “当我...提议。” : 引自Constant, 第183页。

[[117]] Starkweather解决了调制问题: 参见Gary Starkweather, “高速激光打印系统”, 见M. Ross和F. Aronowitz编, 激光应用(第4卷), 学术出版社, 纽约, 1980年; 以及Starkweather, “激光打印机回顾”, 见第50届年会: 庆祝所有成像技术, IS&T, 马萨诸塞州剑桥, 1997年。

[[118]] “在一次研讨会上...庆祝” : Townes, 第66页。

[[119]] 1928年, Alexander Fleming: 关于青霉素, 参见Ronald Hare, 青霉素的诞生, Allen and Unwin, 伦敦, 1970年; Trevor I. Williams, Howard Florey: 青霉素及其后, 牛津, 伦敦, 1984年; Eric Lax, Florey博士外套上的霉菌, Henry Holt, 纽约, 2005年; Ronald Clark, Ernst Chain的生平: 青霉素及其后, St. Martin's出版社, 纽约, 1985年; 以及Ernst Chain, “青霉素治疗三十年”, 伦敦皇家学会会报, B, 179, 293–319, 1971年。

[[121]] 创造性洞察...发生? : 关于创造性洞察背后的潜意识过程, 有越来越多的文献, 例如, Jonathan Schooler和Joseph Melcher, “洞察的不可言喻性”, 见Steven M. Smith等编, 创造性认知方法, MIT出版社, 马萨诸塞州剑桥, 1995年。

[[123]] 分子共振正是: 参见 Townes; M. Berlotti, 激射器和激光器: 历史方法, Hilger, 布里斯托尔, 1983年; 以及 Buderis。

[[123]] “这太...序列。” : Mullis, 在心灵场中裸体舞蹈。Vintage, 纽约, 1999年。

[[124]] 这种更广阔的视角: 技术作家称之为组合/积累观点。Constant很好地运用了这一观点来展示蒸汽轮机、涡轮空 气压缩机和燃气轮机的经验如何导致了涡轮喷气发动机的起源。

[[125]] prior embodiment of the principle: 参见 Charles Süsskind, “Radar as a Study in Simultaneous Invention,” in Blumtritt, Petzold, and Aspray, eds. Tracking the History of Radar, IEEE, Piscataway, NJ, 1994, pp. 237 – 45; Süsskind, “Who Invented Radar?”, in Burns, 1988, pp. 506 – 12; and Manfred Thumm, “Historical German Contributions to Physics and Applications of Electromagnetic Oscillations and Waves,” Proc. Int. Conf on Progress in Nonlinear Science, Nizhny Novgorod, Russia, Vol. II; Frontiers of Nonlin. Physics, 623 – 643, 2001.

[[126]] “There is no... ‘first.’ ” : 这句话引用自 M. R. Williams, “A Preview of Things to Come: Some Remarks on the First Generation of Computers,” in The First Computers—History and Architecture, Raul Rojas and Ulf Hashagen, eds., MIT Press, Cambridge, MA, 2000.

[[126]] human interaction and... communication: David Lane 和 Robert Maxfield 谈到 generative relationships, 这种关系”能够引发参与者对其世界观和行动方式的改变, 甚至产生新的实体, 如代理人、人工制品, 甚至制度。” Lane and Maxfield, “Foresight, Complexity, and Strategy,” in The Economy as an Evolving Complex System, W. B. Arthur, S. Durlauf, and D. A. Lane, eds., Addison-Wesley, Reading, MA, 1997. Aitken (1985, p. 547) 说” [要]理解[发明的]过程, 必须理解之前分离的信息流和知识存量如何汇聚产生新事物”

[[129]] says mathematician Kenneth Ribet: 引用自 Simon Singh, Fermat’s Last Theorem, Fourth Estate, London, 1997, p. 304.

第7章：结构深化

[[131]] path of development: 经济学家称之为技术轨迹。参见 Richard Nelson and Sidney Winter, “In Search of a Useful Theory of Innovation,” *Research Policy* 6, 36 – 76, 1977; G. Dosi, “Technological Paradigms and Technological Trajectories,” *Research Policy* 11, 146 – 62, 1982; and Dosi, *Innovation, Organization, and Economic Dynamics*, Edward Elgar, Aldershot, UK, 2000, p. 53. 经济学家在这方面有很多我没有讨论的内容。他们研究发展路径如何受到技术可用知识基础和周围科学的影响，受企业面临的激励措施影响，受不同技术体内改进搜索过程的差异影响，受围绕技术的专利系统和法律环境影响，受学习效应影响，以及受技术所适应行业结构的影响。

[[132]] the new technology... specialize: 用生物学的语言，我们会说技术radiates（辐射）。

[[132]] This is where... selection: 关于达尔文方法参见 Stanley Metcalfe, *Evolutionary Economics and Creative Destruction*, Routledge, London, 1998; Saviotti and Metcalfe; 另见 Joel Mokyr, “Punctuated Equilibria and Technological Progress,” *American Economic Assoc. Papers and Proceedings* 80, 2, 350 – 54, May 1990; Basalla.

[[133]] Such obstacles are exasperating: 参见 Robert Ayres, “Barriers and Breakthroughs: an ‘Expanding Frontiers’ Model of the Technology-Industry Life Cycle,” *Technovation* 7, 87 – 115, 1988.

[[133]] a bottleneck that... of: Constant 谈到”log-jams and forced inventions”（阻塞和强制发明）(p. 245)，以及”anomaly-induced”（异常引发的）技术变化(pp. 5, 244)。

[[134]] Structural Deepening: 关于这个话题的早期讨论，参见 Arthur, “On the Evolution of Complexity,” in *Complexity*, G. Cowan, D. Pines, D. Melzer, eds., Addison-Wesley Reading, MA, 1994; 另见 Arthur, “Why do Things Become More Complex?,” *Scientific American*, May 1993.

[[139]] In 1955 the... wondered: Frankel, “Obsolescence and Technological Change in a Maturing Economy,” *American Economic Review* 45, 3, 296 – 319, 1955.

[[139]] “In the situations... risk.” : Vaughan, *Uncoupling*, Oxford University Press, New York, 1986, p. 71.

[[140]] a phenomenon I... stretch: 生物学现象exaptation（外适应）与此相似。这是指将现有部分用于新目的：比如在手上加蹼形成飞行翅膀。适应性延伸略有不同，因为它更多涉及系统深化，而不是将现有部分挪用于不同目的。

[[140]] This forced piston engines: Samuel D. Heron, *History of the Aircraft Piston Engine*, Ethyl Corp., Detroit, 1961; Herschel Smith, *Aircraft Piston Engines*, Sunflower University Press, Manhattan, Kansas, 1986.

[[141]] resembles the cycle... proposed: 其他人（如 Dosi）也将技术轨迹与 Kuhn 的科学发展愿景进行了比较。

第8章：革命与重新定域

[[145]] They are not invented: 偶尔有例外。编程语言（肯定是指）是由个人或公司刻意组合而成的。

[[147]] I am thinking... here: 基因工程比我讨论的范围更广。它有许多农业应用，包括单克隆抗体生产等技术。关于其早期发展的一个很好的描述是 Horace F. Judson 的 “A History of the Science and Technology Behind Gene Mapping and Sequencing,” in *The Code of Codes*, Daniel J. Kevles and Leroy Hood, eds., Harvard University Press, Cambridge, MA, 1992.

[[149]] 经济学家卡洛塔·佩雷斯：参见佩雷斯。本节对技术建设的解释很大程度上是我个人的观点。

[[150]] 旧的体系依然存在：大卫·埃哲顿，《旧的冲击：1900年以来的技术与全球史》，牛津大学出版社，纽约，2006年。

[[150]] 一个领域发生变化：罗森伯格指出，一项技术的原始应用很少是它最终的应用。

[[152]]技术的到来：它也推动了经济增长。这种情况是如何发生的，是经济学中一个叫做内生增长理论的分支的研究主题。新技术的到来意味着经济在该目的上需要使用比以前更少的资源，从而释放了这些资源。新技术中固有的知识也可以溢出到其他行业。基于这两个原因，经济得以增长。

[[152]] 铁路的到来：关于其经济影响的更详细描述，参见罗伯特·W·福格尔，《铁路与美国经济增长》，约翰霍普金斯出版社，巴尔的摩，1964年；阿尔弗雷德·钱德勒，《铁路》，哈考特，布雷斯与世界出版社，纽约，1965年；以及阿尔伯特·菲什洛，《美国铁路与战前经济的转型》，哈佛大学出版社，剑桥，马萨诸塞州，1965年。

[[157]] 尽管.....劣势，它依然存在：在稍微不同的背景下，休斯谈到了“技术惯性”，在《技术推动历史吗？》，M·史密斯和L·马克思编，MIT出版社，剑桥，马萨诸塞州，1994年。

[[157]] 保罗·大卫给出了.....例子：大卫，“发电机与计算机”，《AEA论文与会议录》，80卷，2期，1990年5月。

[[159]] 这是一个.....认知：迈克尔·波兰尼很久以前就指出，人类的大部分知识都是隐性的，事实上这种知识是不可或缺的。“司机的技能无法通过对汽车理论的彻底学习来替代。”波兰尼，《隐性维度》，锚点图书，纽约，1966年，第20页。

[[160]] 它集体地源于.....信念：“开放式创新”，即专家可以通过互联网为创新做出贡献而无需物理聚集，似乎与专业知识聚集的趋势相反。它可能有用且重要。但它无法提供面对面的互动，或轻易形成一种文化，或提供可以通过走下走廊就能获取的本地资源库。另见约翰·西利·布朗和保罗·杜吉德，《信息的社会生活》，哈佛商业出版社，剑桥，马萨诸塞州，2000年。

[[160]] “无论.....[卡文迪什]知道什么”：引文来自布莱恩·卡斯卡特，《大教堂里的苍蝇：一群剑桥科学家如何赢得分裂原子的国际竞赛》，法拉，斯特劳斯与吉鲁出版社，纽约，2004年。

[[160]] “当一个行业.....材料。”：阿尔弗雷德·马歇尔，《经济学原理》，第271页，麦克米伦出版社，伦敦，第8版，1890年。

[[162]] 在1980年代.....行业：固特异留在了阿克伦。但1990年后，阿克伦停止为个人车辆制造轮胎。

[[162]] 所有这些……竞争力：参见约翰·P·穆尔曼，《知识与竞争优势》，剑桥大学出版社，英国剑桥，2003年。

[[163]] 所有这些都是……创新：关于经济学家的观点，参见多西，“创新的来源、程序和微观经济效应”，《经济文献杂志》，XXVI，1120-1171，1988年；以及R·纳尔逊和S·温特，前引书。

第9章：进化的机制

[[167]] 在早期……德·福雷斯特：关于早期广播的完整历史记述，参见艾特肯，1976年，1985年。

[[168]] 技术是由……技术创造的：这并不意味着新技术的所有组成部分都以前存在。原子弹的出现使用了分离可裂变同位素U235与化学性质相似的U238同位素的方法，这些方法以前并不存在。但这些方法是由现有方法组合而成的：离心机分离、电磁分离、气体屏障和液体热扩散。所以当我说技术是由以前存在的技术构造的时候，我的意思是简而言之，它们是由以前存在的技术或者可以从那些以前存在的技术通过一两步构造出来的技术构造的。

[[171]] 起初，……被利用：参见伊恩·麦克尼尔，“基本工具、设备和机制”，在《技术史百科全书》中，麦克尼尔编，劳特利奇出版社，伦敦，1990年。

[[172]] “越多……曲线：奥格本，第104页。

[[180]] “创造性破坏的狂风”：熊彼特，1942年，第82-85页。

[[181]] 进化实验：阿瑟和波拉克。

[[184]] 在生物学中有一个平行的观察：理查德·伦斯基等，“复杂特征的进化起源”，《自然》，423期，139-143页，2003年。

[[185]] 这产生了雪崩：波拉克和我发现这些崩溃的“沙堆”雪崩遵循幂律，从技术角度来说，这表明我们的技术系统存在于自组织临界性中。

[[187]] 更为人熟知的是，更大的……组合：另一个重要来源是基因和基因组复制。雅各布的引文来自他的《可能与现实》，万神殿出版社，纽约，1982年，第30页。

第10章：经济随其技术进化而进化

[[191]] 标准方式...经济：定义来自[Dictionary.com]。Word Net® 3.0，普林斯顿大学，2008年。

[[196]] 当可行的纺织...到达：关于工业革命的记述，特别参见David S. Landes, *The Unbound Prometheus*, 剑桥大学出版社，英国剑桥，1969年；Joel Mokyr, *The Lever of Riches*, 牛津大学出版社，纽约，1990年；以及T. S. Ashton, *The Industrial Revolution*, 牛津大学出版社，纽约，1968年。

[[197]] “道德条件...阶级”：引文来自M. E. Rose, “社会变迁与工业革命”，收录于The Economic History of Britain since 1700, 第1卷, R. Floud和D. McCloskey编, 剑桥大学出版社, 英国剑桥, 1981年。另见P. W. J. Bartrip和S. B. Burman, *The Wounded Soldiers of Industry*, Clarendon出版社, 英国牛津, 1983年。

[[197]] 劳工更加...组织：M. Chase, *Early Trade Unionism*, Ashgate, 英国阿尔德肖特, 2000年；以及W. H. Fraser, *A History of British Trade Unionism 1700 – 1998*, Macmillan, 伦敦, 1999年。

[[198]] “需要并最终...狱卒。”：Landes, op. cit., 第43页。

[[198]] 存在...不可避免：技术决定未来经济和未来社会关系的观念被称为技术决定论。马克思经常被指控持有这种观点。“手推磨给你封建领主的社会；蒸汽磨给你工业资本家的社会。”罗森伯格令人信服地论证了马克思过于微妙而不可能是决定论者。

[[199]] 问题如...解决方案：Friedrich Rapp顺带提及了这一点。参见他在Paul T. Durbin编辑的Philosophy of Technology中的文章, Kluwer学术出版社, 马萨诸塞州诺威尔, 1989年。

[[199]] 但在这个...破坏：熊彼特, 1912年。

[[199]] “商品、新的...一个。”：熊彼特, 1942年, 第82-85页。

第11章：我们对这个创造物的立场如何？

[[211]] 一个进化的、复杂系统：参见W. B. Arthur，“复杂性与经济”，Science 284, 107 – 9, 1999年4月2日。

[[212]] 这是一个...不完美：心理学家Robert Johnson说：“似乎进化的目的现在是用完整性或整体性的概念来取代完美的形象。完美暗示着某种纯粹的东西，没有瑕疵、黑点或可疑的区域。整体性包含了黑暗，但将其与光明元素结合成一个比任何理想都更真实、更完整的整体。这是一项令人敬畏的任务，摆在我们面前的问题是人类是否有能力进行这种努力和成长。无论是否准备好，我们都在这个过程中。” R. A. Johnson, He: Understanding Masculine Psychology, Harper and Row, 纽约, 1989年, 第64页。

[[212]] “我喜欢元素...功能。”：R. Venturi, Complexity and Contradiction in Architecture, 现代艺术博物馆, 纽约, 1966年, 第16页。

[[213]] “自然变成了...车站”：Martin Heidegger, Discourse on Thinking, John M. Anderson和E. Hans Freund译, Harper & Row, 1966年。

[[214]] “技术在...历史。”：Anderson和Heidegger, 海德格尔序言, 第xxix页。

[[214]] 技术是一个...生活：Ellul, 1980年, 第125页。

[[216]] “佛陀...花朵。”：Robert M. Pirsig, Zen and the Art of Motorcycle Maintenance, HarperCollins, 纽约, 1974年。

参考文献

并非所有这些作品都在正文中被引用，但我发现它们都很有用。

Abbate, Janet. *Inventing the Internet*. MIT Press, Cambridge, MA. 1999.

Aitken, Hugh G.J. *The Continuous Wave*. University Press, Princeton. 1985.

Aitken, Hugh G. J. *Syntony and Spark: The Origins of Modern Radio*. University Press, Princeton. 1976.

Arthur, W. Brian, and Wolfgang Polak. “The Evolution of Technology Within a Simple Computer Model.” *Complexity*, 11, 5. 2006.

Arthur, W. Brian. “Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Small Historical Events,” *Economic Journal* 99:116 – 131. 1989.

Arthur, W. Brian. *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1994.

Baldwin, Carliss Y., and Kim B. Clark. *Design Rules: The Power of Modularity*, Vol. 1. MIT Press, Cambridge, MA. 2000.

Basalla, George. *The Evolution of Technology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1988.

Bijker, Wiebe E., Thomas P. Hughes, and Trevor J. Pinch, eds. *The Social Construction of Technological Systems*. MIT Press, Cambridge, MA. 1993.

Billington, David, P. Robert Maillart’s Bridges. University Press, Princeton. 1979.

Buderi, Robert. *The Invention that Changed the World [Radar]* Simon & Schuster, New York. 1996.

Bugos, Glenn E. *Engineering the F-4 Phantom II*. Naval Institute Press, Annapolis. 1996.

Campbell-Kelly, Martin, and William Aspray. *Computer: A History of the Information Machine*. Basic Books, New York. 1996.

Castells, Manuel. *The Rise of the Network Society*. Wiley-Blackwell, New York. 1996.

Constant, Edward W. *The Origins of the Turbojet Revolution*. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1980.

David, Paul. *Technical Choice, Innovation, and Economic Growth*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1975.

Dosi, Giovanni, Christopher Freeman, Richard Nelson, Gerald Silverberg, and Luc Soete, eds. *技术变革与经济理论*. Pinter, London. 1988.

Ellul, Jacques. *技术社会*. Alfred A. Knopf, New York. 1967.

Ellul, Jacques. *技术系统*. Continuum, New York. 1980.

Ferguson, Eugene. *工程与心灵之眼*. MIT Press, Cambridge, MA. 1999.

- Foster, Richard. 创新. Summit Books, New York. 1986.
- Freeman, Christopher. 创新经济学. Edward Elgar Publishers, Aldershot, UK. 1990.
- Gilfillan, S. Colum. 发明船舶. Follett, Chicago. 1935.
- Gilfillan, S. Colum. 发明社会学. Follett, Chicago. 1935.
- Grübler, Arnulf. 技术与全球变化. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1998.
- Heidegger, Martin. 关于技术的问题. Harper and Row, New York. 1977.
- Hiltzik, Michael A. 闪电交易商：施乐PARC与计算机时代的黎明. HarperBusiness, New York. 1999.
- Hughes, Thomas P. 电力网络：西方社会的电气化，1880–1930. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1983.
- Hughes, Thomas P. 拯救普罗米修斯. Pantheon Books, New York. 1998.
- Jewkes, John, David Sawers, and Richard Stillerman. 发明的源泉. Norton, New York. 1969.
- Kaempffert, Waldemar. 发明与社会. 目标阅读系列第56号，美国图书馆协会，芝加哥。1930.
- Knox, Macgregor, and Williamson Murray. 军事革命的动力学，1300–2050. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2001.
- Kuhn, Thomas S. 科学革命的结构. University of Chicago Press, Chicago. 1962.
- Landes, David S. 时间革命. Belknap Press, Cambridge, MA. 1983.
- MacKenzie, Donald. 认识机器. MIT Press, Cambridge, MA. 1998.
- MacKenzie, Donald, and Judy Wajcman, eds. 技术的社会塑造. 第2版。Open University Press, Buckingham, UK. 1999.
- Martin, Henri-Jean. 书写的历历史与力量. University of Chicago Press, Chicago. 1988.
- McGee, David. “发明的早期社会学。” 技术与文化 36:4. 1995.
- McGinn, Robert. 科学、技术与社会. Prentice-Hall, New York. 1990.
- Mokyr, Joel. 雅典娜的礼物：知识经济的历史起源. University Press, Princeton. 2004.
- Ogburn, William F. 社会变迁. 1922. 重印版。Dell, New York. 1966.
- Otis, Charles. 航空器燃气涡轮动力装置. Jeppesen Sanderson Aviation, Englewood, Colorado. 1997.
- Perez, Carlota. 技术革命与金融资本. Edward Elgar, Aldershot, UK. 2002.
- Rhodes, Richard. 原子弹的制造. Simon & Schuster, New York. 1986.
- Riordan, Michael, and Lillian Hoddeson. 晶体之火：晶体管的发明与信息时代的诞生. W.W. Norton, New York. 1997.

- Rogers, G.F.C. 工程的本质：技术哲学. Palgrave Macmillan, London. 1983.
- Rosenberg, Nathan. 黑箱内部：技术与经济学. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1982.
- Saviotti, P. Paolo, and J. Stanley Metcalfe, eds. 经济与技术变革的进化理论. Harwood Academic Publishers, Newark, NJ. 1991.
- Schmookler, Jacob. 发明与经济增长. Harvard University Press, Cambridge. 1966.
- Schumpeter, Joseph. 经济发展理论. 1912. 重印版。Harvard University Press, Cambridge, MA. 1966. 1934.
- Schumpeter, Joseph. 资本主义、社会主义与民主. 1942. 重印版。Harper, New York. 1975.
- Simon, Herbert. 人工科学. MIT Press, Cambridge, MA. 1969.
- Simon, John. “从沙子到电路：微处理器起源调查”，载于从沙子到电路，John J. Simon Jr.编，Harvard University Press, Cambridge, MA. 1986.
- Susskind, Charles. “计算机断层扫描的发明”，载于技术史：第六年卷，A. Rupert Hall和Norman Smith编，Mansell Publishing, London. 1981.
- Tomayko, James E. 计算机起飞：NASA开创性数字飞行控制项目史. NASA, Washington, D.C. 2000.
- Townes, Charles H. 激光是如何发生的. Oxford University Press, New York. 1999.
- Usher, Abbott Payson. 机械发明史. 1929. 重印版。Dover, New York. 1988.
- Vincenti, Walter. 工程师知道什么以及他们如何知道. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1990.
- Waldrop, M. Mitchell. 梦想机器：J. C. R. Licklider与使计算个人化的革命. Viking, New York. 2001.
- Whittle, Frank. 喷气机：先驱者的故事. Frederick Muller, London. 1953.
- Winner, Langdon. 自主技术. MIT Press, Cambridge. 1977.

[致谢]

这个项目在几年中相当随意地发展壮大。它最初得到了Ernesto Illy的支持，发展成为1998年圣菲研究所的Stanislaw Ulam讲座和2000年爱尔兰国立大学戈尔韦分校的Cairnes讲座，并在2001年开始成书。我感谢我的母机构——圣菲研究所和PARC智能系统实验室——在研究和写作期间提供庇护，以及两地的同事们，特别是Geoffrey West和Markus Fromherz。奥地利国际应用系统分析研究所在写作期间的部分时间里接纳我为研究学者；IBM阿尔马登作为学院研究员提供了部分支持。我感谢圣菲的圣约翰学院图书馆允许我在那里安静地写作，以及斯坦福大学的Green图书馆（感谢图书馆员Michael Keller的礼遇）提供书库访问权限。整本书得到了Alfred P. Sloan基金会资助。

我很幸运拥有代理人John Brockman和编辑Emily Loose。我感谢他们两位，以及Emily的团队。许多人阅读了手稿并给了我有用的反馈。特别有价值的是Michael Heaney、Henry Lichstein、Jim Newcomb、Kate Parrot和Jim Spohrer。在各个节点上给予技术和定义建议的人员包括Giovanni Dosi、Doyne Farmer、Arnulf Grüber、John Holland、Kevin Kelly、Geoffrey Marcy、Nebojsa Nakicenovic、Richard Rhodes和Peter Schuster。波音工程师Mike Trestik和Joseph Sutter对飞机材

料部分提出了意见。我的儿子Ronan Arthur和Sean Arthur提供了急需的写作批评。Brid Arthur帮助我规划了本书的流程，Niamh Arthur帮助编辑了最终草稿。

这个项目的乐趣之一是朋友和同事们的陪伴，他们多年来提供了智力激励和精神支持。我特别感谢Cormac McCarthy和我在SFI的合作者David Lane；还有Kenneth Arrow、Jim Baker、John Seely Brown、Stuart Kauffman、Bill Miller、Michael Mauboussin、Richard Palmer、Wolfgang Polak、Nathan Rosenberg、Paul Saffo、Martin Shubik、Jan Vasbinder和Jitendra Singh。最重要的是，我深深感谢我的伴侣Runa Bouius，感谢她在写这本书期间的耐心和支持。

索引

会计, 85, 153, 197

农业, 10, 25, 154, 196

进气系统, 40, 41

空中客车, 91

飞机, 7, 10, 22, 182

设计, 72-73, 77, 91, 92-94, 108, 111-12, 120, 133, 136-37

探测, 22, 39, 49, 73-74, 132

导航和控制, 25, 30, 72-73, 93-94, 96, 108, 111-12, 132, 206

人员和货物处理, 30, 32, 92-94

活塞螺旋桨式, 108, 111, 113, 120, 140-41

推进, 108, 111-12, 120

雷达监视, 41

隐形, 39-42 另见 喷气发动机; 特定飞机

航空母舰, 39-42

空中交通管制, 132

算法, 6, 24, 25, 50, 53, 55, 80, 167, 178, 180-81, 206

数字压缩, 28

排序, 17, 30-31, 98

语音识别, 28

文本处理, 153

利他主义, 142

放大器, 69, 83, 167-68

模拟系统, 71

解剖学, 13, 14, 32, 43

动物, 9, 53

骨骼和器官, 13, 45, 187

属, 13

自然选择, 16 另见 脊椎动物; 特定动物

考古学, 45-46, 88

考古磁学定年法, 45

建筑文摘, 175

建筑, 10, 32, 35, 41-42, 71, 73, 79, 81, 84, 98, 101, 116, 212-13

算术, 81, 108, 125, 182

Armstrong振荡器, 102, 130

Arpanet, 156

人工智能, 12, 215

艺术, 15, 72, 77, 79 另见 音乐; 绘画; 诗歌

天文学会, 74

天文学, 47-50, 74

Atanasoff-Berry机器, 87

美国原子能委员会, 104

原子能, 10, 24, 80, 103-5, 114-15, 160, 200

汽车, 2, 10, 176, 180

自创生(autopoiesis), 2-3, 21, 24, 59, 167-70, 188

Babbage, Charles, 74, 75, 126

细菌, 10, 119, 148, 207

银行业务, 149, 153-55, 192, 201, 209

条形码, 48

驳船, 81-83

气压计, 47

电池, 58, 59, 63

包豪斯建筑, 212

养蜂, 25

伯努利效应, 52

贝塞麦炼钢法, 14, 75, 152, 153

生物化学, 61, 119-20, 123-24, 147

生物学, 10, 13, 16, 17, 18, 53, 54, 147-48, 187-88

进化论与, 13, 16, 107, 127-28, 188, 204

分子, 147, 161, 188

技术与, 28, 61, 206-8

BIOS芯片, 13

Black, Fischer, 154

黑腹滨鹬(*pluvialis squatarola*), 31

黑盒概念, 14, 18, 178

铁匠技艺, 180

波音737, 96

波音747, 92-94, 109

波音787, 32

骨骼, 13, 45, 187-88

Boot, Henry, 113

弓, 171

Boyer, Herbert, 148

大脑:

成像, 10

植入电极, 9

心理过程, 9, 23, 56, 97, 112, 121-22, 193

部位, 9, 10, 56, 208

桥梁, 29, 109, 150 斜拉桥, 31, 70, 91 混凝土桥, 99-100

桥接技术, 83-84

青铜, 185

Brown, John Seely, 210

建筑物, 47

设计和建造, 10, 71, 72

商业, 54, 148, 149, 192, 205

实践, 80-81, 83, 153, 157, 158-59, 209

Butler, Paul, 47-48, 49-50

Butler, Samuel, 16, 17

电缆, 31, 70, 91

光纤, 69, 83

计算设备, 74

运河, 81-83, 85, 150, 192

独木舟, 16, 171

电容器, 59, 69, 169

碳-14, 45

航母:

舰载机联队, 40, 42

战斗群, 40-41

Cathcart, Brian, 160

大教堂, 10

阴极射线管, 57, 59

卡文迪许实验室, 160

腔体磁控管， 113

Chain, Ernst, 120

Chargaff, Erwin, 77

化学, 25, 57, 66, 69, 159, 202, 205

工业化学, 75, 162, 171

聚合物化学, 162

芝加哥商品交易所, 156

“组块化”, 36-37, 50

时钟, 33, 36, 38, 49, 158, 198

原子钟, 24, 206

克隆, 70

云室, 61

煤炭, 82, 83

Cockburn勋爵, 149

Cohen, Stanley, 148

燃烧系统, 17, 19, 34, 50, 52, 53, 120

常识, 65

通信, 66, 78 [另见] 语言; 电信

压缩机, 18-19, 34, 51-52, 65, 136-37, 168

computers, [[10]], [[28]], [[33]], [[64]], [[71 – 73]], [[75]], [[80 – 81]], [[82]], [[85]], [[96]], [[153 – 55]], [[181 – 83]], [[203]]

演化, [[87]], [[108 – 9]], [[125 – 26]], [[146]], [[150 – 51]], [[159]], [[168 – 69]], [[171]]

内在能力， [[88 – 89]]

操作系统， [[12 – 13]], [[34 – 35]], [[36]], [[72 – 73]], [[79 – 80]], [[88]], [[108 – 9]], [[150]], [[156]]

编程， [[34 – 35]], [[53]], [[71]], [[88 – 89]] 另见 [[算法]]; [[互联网]]

计算机科学， [[38]], [[98]]

混凝土， [[10]], [[73]], [[99 – 100]]

合同， [[54]], [[55]], [[153 – 54]], [[193]], [[201]]

衍生品， [[154 – 55]], [[209]]

冷却系统， [[103 – 4]], [[134 – 35]]

哥白尼， 尼古拉斯， [[61]]

铜， [[9]], [[58]]

棉花， [[139]], [[196]]

克里克， 弗朗西斯， [[58]], [[61]]

克鲁克斯管， [[57]]

居维叶， 乔治， [[13]]

回旋加速器， [[115]], [[131]]

达尔文， 查尔斯， [[16]], [[17 – 18]], [[89]], [[102 – 3]], [[107]], [[127 – 28]], [[129]], [[132]], [[138]], [[142]], [[188]], [[203 – 4]]

《机器中的达尔文》（巴特勒）， [[16]]

达尔文机制， [[18]], [[89]], [[138]]

数据， [[50]], [[146]], [[153]]

处理， [[70]], [[80 – 81]], [[83]], [[151]]

年代测定技术， [[45 – 46]]

戴维，保罗，[[157 – 58]]

道金斯，理查德，[[102]]

深度工艺，[[159 – 60]], [[162]], [[164]]

德福雷斯特，李，[[167 – 68]]

德利涅，皮埃尔，[[129]]

树木年代学，[[45]]

笛卡尔，勒内，[[208]], [[211]]

糖尿病，[[175]]

狄更斯，查尔斯，[[197]]

数字技术，[[25]], [[28]], [[66]], [[71]], [[72]], [[79 – 80]], [[80 – 81]], [[82]], [[84]], [[117 – 18]], [[145]], [[154]], [[156]], [[206]]

《数字化与经济》（阿瑟），[[4]]

DNA，[[24]], [[77]], [[85]], [[169]], [[208]]

扩增，[[37]], [[70]], [[123 – 24]]

互补碱基配对，[[57 – 58]], [[61]], [[123 – 24]]

提取和纯化，[[61]], [[70]]

微阵列，[[85]]

重组，[[10]], [[148]]

复制，[[147]]

测序，[[6]], [[37]], [[70]], [[123 – 24]]

领域化，[[71 – 76]]

定义， [[71 – 72]]

重新领域化， [[72 – 74]], [[85]], [[151 – 56]]

领域， [[69 – 85]], [[103]], [[108]], [[145 – 65]], [[171]]

选择， [[71 – 73]], [[101]]

深度知识， [[78 – 79]]

定义， [[70]], [[80]], [[84]], [[145]]

基于学科的， [[146]]

经济与， [[149]], [[151 – 56]], [[163]]

有效性， [[75 – 76]], [[150]]

演化和发展， [[72]], [[84]], [[85]], [[88]], [[145 – 65]]

语言和语法， [[69]], [[76 – 80]], [[147]]

成熟的， [[149 – 50]], [[165]]

转变， [[150 – 51]]

新颖的， [[74 – 75]], [[152 – 53]]

定义的风格， [[74 – 76]]

子域和子子域， [[71]], [[151]], [[165]]

世界， [[80 – 85]]

多普勒效应， [[48]], [[122]]

发电机， [[14]]

埃克特， J. 普雷斯珀， [[87]]

大肠杆菌细菌， [[148]], [[207]]

经济：满足社会需求的安排， [[192 – 93]]

崩溃， [[149]], [[194]]

定义， [[1]], [[3]], [[191 – 92]], [[193]]

发展和增长， [[1]], [[3]], [[19 – 20]], [[37]], [[71]], [[145 – 50]], [[155 – 59]], [[191 – 202]], [[205]]

域和， [[149]], [[151 – 56]], [[163]]

平衡在， 20, [[200]], [[211]]

生成式， [[209 – 11]]

工业生产和社会， [[24]], [[37]], [[101]], [[191 – 92]], [[196 – 98]]

经济(cont.)秩序 vs. 活力在， [[211 – 13]]

问题作为解决方案的答案在，[[199 – 201]]

重新定域和，[[151 – 56]]

战略联盟在，[[210]]

结构的，[[19]], [[108]], [[157]], [[159]], [[194 – 99]], [[201 – 2]]

技术和，[[2]], [[3]], [[10]], [[13]], [[25]], [[37]], [[145 – 46]], [[156 – 59]], [[177 – 78]], [[186]], [[191 – 202]], [[205]], [[209 – 11]], [[214]]

时间和，[[156 – 59]], [[194]]

另见 [[银行业]]; [[市场]]; [[产品]]

EDVAC，[[87]]

电力，[[52]], [[57 – 60]], [[66]], [[69]], [[72]], [[157 – 58]], [[169]], [[171]]

发电，[[19]], [[28]], [[33]], [[55]], [[59]]

测量，[[61]], [[62 – 63]]

电场，[[62]], [[114]], [[121]]

电力，[[19]], [[25]], [[33]], [[72]]

电波 (Hertz)，[[114]]

电极，[[9]]

电磁系统，[[22]], [[58]], [[59]], [[108]], [[121]], [[146]]

电子学，[[7]], [[9]], [[28]], [[29]], [[50]], [[52]], [[61]], [[69]], [[71]], [[72]], [[80]], [[81]], [[82]], [[83]], [[101 – 2]], [[108 – 9]], [[113 – 14]], [[125 – 26]], [[146]], [[150]], [[168 – 69]], [[174]]

电子，[[12]], [[50]], [[62]], [[69]], [[82]], [[146]]

Ellul, Jacques, [[214]]

能量, [[29]], [[46]], [[49]], [[57]], [[69]], [[78]], [[171]]

释放, [[52]], [[151]] 另见 [[功率]]; 特定能源系统

工程学, [[1]], [[3]], [[4]], [[6]], [[15]], [[54]], [[56]], [[85]], [[87 – 106]], [[124]], [[177]], [[208]]

挑战和实验在, [[91 – 96]]

化学, [[28]]

土木, [[99]]

设计和建造在, [[91 – 101]]

电气, [[1]], [[157 – 58]]

金融, [[154 – 55]]

基因, [[12]], [[53 – 54]], [[65]], [[70]], [[87]], [[147 – 49]], [[187]]

问题解决和解决方案在, [[95 – 105]], [[117]]

无线电, [[71]], [[123]], [[146]]

标准, [[90 – 95]], [[101]], [[105]], [[109 – 10]], [[117]]

结构, [[31]], [[70]], [[91]], [[99 – 100]]

发动机, [[39]], [[51]], [[157 – 58]], [[182]]

柴油, [[16]], [[28]]

内燃, [[17]], [[120]]

活塞, [[108]], [[111]], [[113]], [[120]], [[140 – 41]] 另见 [[喷气发动机]]; [[蒸汽机]]

ENIAC, [[87]], [[126]]

企业家, [[177]], [[209]], [[210]]

环境, [[6]], [[17]], [[35]], [[95]], [[127]], [[206 – 7]], [[208]]

环保主义, [[215]]

酶, [[10]], [[70]], [[77]], [[123]], [[147]]

掺铒光纤放大器(EDFA), [[83]]

真核细胞, [[187]]

进化:

生物, [[13]], [[16]], [[107]], [[127 – 28]], [[188]], [[204]]

组合, [[18 – 23]], [[167 – 89]], [[204]]

定义, [[15]]

实验在, [[181 – 85]] 另见 [[技术进化]]; 特定系统

可执行文件, [[29]], [[38]], [[40 – 41]], [[51]]

系外行星, [[47 – 49]], [[65]]

眼睛, [[53]], [[185]]

F-35 Lightning II 飞机, [[39 – 42]], [[96]], [[132]]

F-35C Lightning II 飞机, [[39 – 42]]

F/A-18 Hornet 飞机, [[42]]

工厂, [[25]], [[37]], [[42]], [[157 – 58]], [[196 – 97]]

纪律和监管, [[198]]

劳动条件, [[197]], [[198]]

工人, [[196 – 97]], [[198]]

Faraday, Michael, [[58]]

Fermat, Pierre de, [[128]]

光纤, [[69]], [[83]]

金融风险管理, [[155]]

火, [[22]], [[57]], [[66]], [[171]], [[181]]

裂变径迹定年法, [[46]]

Fleming, Alexander, [[119 – 20]], [[169]]

Florey, Howard, [[120]]

流量测量仪器, [[52]]

线传飞行技术, [[72 – 73]], [[96]], [[206]]

化石燃料, [[10]]

铸造厂, [[10]]

Frankel, Marvin, [[139]], [[158]]

摩擦, [[46]]

From the Earth to the Moon (Verne), [[74 – 75]]

燃料, [[10]], [[34]], [[39]], [[46]], [[200]]

功能性, [[30]], [[80]]

原教旨主义, [[215]]

Galileo Galilei, [[211]]

神化镓, [[71]]

电流作用, [[59]]

齿轮, [[9]], [[74]], [[75]], [[171]]

Genentech, [[149]]

General Electric, [[104]]

发电机, [[19]], [[28]], [[33]], [[55]], [[59]], [[156]]

基因, [[70]], [[208]]

基因工程, [[12]], [[53 – 54]], [[65]], [[87]], [[147 – 49]], [[187]]

遗传学, [[24]], [[53 – 54]], [[58]], [[66]]

天才, [[5]], [[100]], [[123]]

基因组学, [[207]], [[208]]

几何学, [[99]], [[211]]

Gilfillan, S. Colum, [[16]], [[20]]

全球定位系统 (GPS), [[25]], [[30]], [[88]], [[173]], [[206]]

全球变暖, [[200]]

Goldberger, Paul, [[84]]

Gordon, Jim, [[118]]

Gratia, André, [[119]]

重力, [[47]], [[66]], [[112]]

Grove, Andy, [[170]]

Haber 工艺, [[31 – 32]], [[182]]

俳句, [[32]]

锤子, [[30]], [[46]]

硬件, [[31]], [[79]]

热, [[22]], [[50]], [[57]], [[103 – 4]], [[171]]

Heidegger, Martin, [[6]], [[213 – 14]]

Herschel, John, [[74]]

Hertsgaard, Mark, [[104]]

Hertz, Heinrich Rudolf, [[114]], [[122]]

“高技术与经济” (Arthur), [[4]]

历史学家, [[4]], [[14]], [[15]], [[16]], [[20]], [[194 – 95]]

Hoare, C. A. R. “Tony,” [[98]]

激素, [[53]]

医院, [[192]]

住房, [[175]], [[196]], [[197]]

Hughes, Thomas, [[94 – 95]], [[148]]

水合定年法, [[46]]

液压系统, [[72]]

水力发电, [[25]], [[33]], [[104]]

磁滞现象, [[140]]

图像处理, [[80 – 81]], [[117 – 18]] 另见 [[磁共振成像]]; [[静电复印技术]]

想象力, [[78]], [[80]], [[122 – 23]]

电感器, [[50]], [[58]], [[59]], [[69]]

工业革命, [[65]]

工业技术, [[1]], [[19]], [[24 – 25]], [[53]], [[75]], [[98]], [[155]], [[164]], [[192]]

创造的需求链, [[196 – 98]]

家庭作坊式, [[196]], [[197]], [[198]]

经济与, [[24]], [[37]], [[101]], [[191 – 92]], [[196 – 98]]

城市增长与, [[196]] 另见 [[工厂]]; [[机械]]; [[制造业]]; [[工厂]]

惯性, [[117 – 18]]

感染, [[119]], [[200]]

创新, [[5]], [[13]], [[15]], [[20]], [[73 – 74]], [[89 – 90]], [[105]], [[163 – 64]]

设计, [[99 – 101]]

本质和性质, [[3]], [[4]], [[85]]

国家竞争力与, [[159 – 63]]

创新的两个主题, [[164]] 另见 [[发明]]

机构, [[6]], [[56]], [[124]]

商业, 148, 149, 153

胰岛素, 人工, 149

Internet, 15, 150, 156, 170

发明, 2, 3, 5, 16, 80, 85, 91, 106 – 30, 163, 172

商业用途, 90, 117

定义, 20, 108

个人发明, 5, 110, 111, 112, 124

需求与效果的联系，109–16, 120, 129, 139, 204

数学发明，126–29

心理过程，23, 97, 121–23

新颖构建模块，129–30

物理形式，116–19, 126

原理和本质，106–24

科学发明，126–29

社会学，6, 174–76

要素综合，20, 21, 124–26 另见 创新

碘气电池，48–49

离子，25, 63, 80

铁，58, 74–75, 152, 185

James, Henry, 77

喷气发动机，17–20, 34, 35, 38–39, 40, 51–53, 65, 77, 93–96, 107, 113, 115, 133–37, 168, 173

Kelly, Kevin, 28

Keynes, John Maynard, 202

Klee, Paul, 79

速调管，113

知识, 27, 59 – 60, 108, 124, 159 – 60

累积性, 57, 65

直觉性, 78 – 79

Kuhn, Thomas, 89, 141 – 42

劳动力, 196 – 98

分工, 37 另见 工厂; 工会

Landes, David, 198

语言, 97, 114, 212

设计作为表达, 76 – 79, 89, 97 – 98

领域语言, 69, 76 – 80, 147

语法和词汇, 4 – 5, 76 – 78, 79, 102

编程语言, 71, 79, 146, 163

话语, 76, 78, 79, 97 – 98

激光光学, 171

激光打印机, 33, 108 – 9

激光器, 17, 33, 56, 69, 80, 117 – 18, 171, 174, 177

Lawrence, Ernest, 114 – 15, 121, 131

Layton, Edwin, 124

Le Corbusier, 99, 212

法律系统，3, 12, 54, 55, 56, 105, 192, 193, 197, 201, 202

狐猴，14, 187

杠杆，74, 75, 171

Lewis and Clark探险，6

生命，189

延长，11

技术作为生命增强，216

光，69, 83

暗与明，185, 202

电灯，150

恒星光，48 – 49, 50

机械肢体，9

逻辑电路，168, 171, 182 – 85

Los Alamos历史博物馆，75

润滑系统，52, 137

月球太空计划，93

机械，1, 16, 75, 139, 157 – 58, 168, 171, 192, 196, 197, 209

自然被机械增强，9, 11 – 12 另见 特定机器

Macintosh:

计算机, 88 – 89

工具箱, 88

磁场, 58, 59, 61, 83, 113 – 15, 121

磁共振成像(MRI), 22, 56, 57, 174

Mahler, Gustav, 54, 56

Maillart, Robert, 99 – 100, 109

Malthus, Thomas Robert, 127 – 28

Manhattan Project, 75

制造业, [[24]], [[37]], [[124]], [[152]], [[161]], [[168]], [[169]], [[175 – 76]]

地图, [[75]]

Marcy, Geoffrey, [[47 – 48]], [[49 – 50]]

海运集装箱运输, [[83 – 84]]

市场, [[37]], [[111]], [[154]], [[157]], [[192]], [[201]]

崩溃, [[149]]

金融, [[10]], [[149]], [[193]] 另见 [[产品]]

Marshall, Alfred, [[160 – 61]]

火星探测器, [[66]]

Marx, Karl, [[192]], [[202]]

maser, [[80]], [[115 – 16]], [[118]], [[123]]

大规模生产, [[10]], [[37]], [[152]], [[155]], [[176]]

数学, [[5]], [[33]], [[38]], [[55]], [[63]], [[74]], [[81]], [[91]], [[155]]

发明, [[126 – 29]]

Maturana, Humberto, [[2]], [[170]]

Mauchly, John, [[87]]

测量技术, [[47 – 50]], [[52]], [[61 – 64]], [[88]], [[116]]

机械工艺, [[16]], [[27]], [[28]]

机械王国, [[16]]

机构与机械装置, [[101 – 2]]

医疗技术, [[9]], [[12]], [[85]], [[192]]

模因(memes), [[102]]

存储系统, [[146]]

Mersenne, Marin, [[208]]

金属, [[9]], [[10]], [[49]], [[66]], [[171]] 另见 [[特定金属]]

微处理器, [[12 – 13]], [[156]]

显微镜, [[61]], [[62]], [[63]], [[64]]

微波技术, [[65]], [[80]], [[113 – 14]], [[123]]

中世纪, [[10]], [[105 – 6]]

Mies van der Rohe, Ludwig, [[99]]

Millikan, Robert, [[62 – 63]]

油滴实验, [[62 – 63]]

工厂:

纺织厂, [[139]], [[196]], [[197]]

水力磨坊, [[10]]

采矿业, [[176]]

反射镜, [[118]]

声学反射镜, [[73]]

移动电话, [[42]], [[98]]

模块, [[35 – 37]], [[50]], [[78]], [[96]], [[102]], [[192]]

Mokyr, Joel, [[65]], [[124]]

Moll, Gerrit, [[58]]

动量, [[22]], [[46]]

货币体系, [[54]], [[55]], [[56]], [[105]]

猴子, [[9]], [[14]], [[187]]

登山, [[112 – 13]]

Mullis, Kary, [[123 – 24]]

科学与工业博物馆(芝加哥), [[16]]

音乐, [[98]]

作曲与管弦乐, [[54]], [[56]], [[72]], [[80]], [[116]]

音调与节奏, [[48]], [[54]]

录音, [[81]] 另见 [[管弦乐队]]; [[交响乐]]

纳米技术, [[162]], [[163]], [[172]], [[207]], [[208]]

Napoleon, [[60]]

爱尔兰国立大学, 2000年Cairnes讲座, [[4]]

自然选择, [[16]], [[17]], [[18]], [[107]], [[128]]

自然, [[62]], [[64]], [[66]], [[213 – 15]]

技术与自然的冲突, [[11 – 12]], [[215]]

自然的增强, [[9]], [[11 – 12]], [[215]]

自然法则, [[46]]

自然界可用现象, [[171]]

对自然的依赖, [[11]]

自然的技术组织, [[203]]

海军侦察办公室卫星, [[41]]

美国海军, [[104]]

Newcomb, James, [[78]]

Newcomen, Thomas, [[109]]

Newton, Isaac, [[34]], [[61]], [[63]], [[112]], [[211 – 12]]

纽约证券交易所, [[193]]

核技术, [[22]], [[40]], [[57]], [[103 – 5]] 另见 [[原子能]]

黑曜石, [[22]]

Ogburn, William Fielding, [[20 – 21]], [[172 – 73]]

石油, [[209]]

原油, [[24]], [[46]], [[176]]

石油精炼, [[24]], [[28]], [[30 – 31]], [[46]], [[176]]

光学系统, [[52]], [[57]], [[66]], [[69]], [[83]], [[117 – 18]], [[171]]

管弦乐队，[[72]], [[80]], [[81]], [[116]]

组织，[[56]], [[90]], [[192]], [[195]], [[205]]

商业，[[54]], [[148]], [[149]], [[153]], [[210 – 11]]

器官，[[32]], [[187]]

物种起源（达尔文），[[16]]

奥斯特，汉斯·克里斯蒂安，[[58]]

振荡，[[47 – 50]], [[72]], [[101 – 2]], [[118]], [[121]], [[130]]

牛车，[[10]]

牛津英语词典（OED），[[27 – 28]]

牛津大学邓恩病理学院，[[120]]

绘画，[[77]], [[79]]

PARC（帕洛阿尔托研究中心），[[233]]

铅笔，[[5 – 6]], [[47]]

钟摆，[[47]], [[49]]

青霉素（青霉菌），[[119 – 20]], [[169]], [[174]]

压力管道，[[33]]

佩雷斯，卡洛塔，[[149]]

现象，[[29]], [[45 – 67]]

作为技术基础，[[3]], [[29]], [[43]], [[46 – 67]], [[110]], [[111]], [[119 – 21]], [[125]], [[130]], [[145]], [[146]]

行为现象，[[55]]

捕获和利用，[[3]], [[22]], [[23]], [[24]], [[46]], [[47 – 59]], [[60]], [[65 – 66]], [[69]], [[170 – 72]], [[186]], [[203]], [[204]], [[215]]

现象集群，[[50 – 53]], [[57 – 59]], [[60]], [[69]], [[146]]

定义，[[49]]

隐藏现象，[[57]], [[60]]

机械现象，[[51 – 52]]

自然现象，[[22]], [[29]], [[46]]

新现象，[[57 – 59]], [[60]], [[66]], [[188 – 89]], [[205]]

物理现象，[[55]], [[56]]

原理与现象，[[49]]

现象编程，[[51 – 54]], [[56]]

现象复制，[[52]]

哲学，[[4]], [[14]], [[61]], [[97]], [[158]], [[170]]

摄影，[[66]], [[80 – 81]]

光子学，[[69]], [[83]]

物理学，[[38]], [[202]]

原子物理学，[[10]], [[24]], [[80]], [[114 – 15]], [[160]]

物理难题，[[47 – 50]]

量子物理学, [[159]]

飞行员, [[72 – 73]], [[92]]

皮尔西格, 罗伯特, [[216]]

匹兹堡大学, [[9]]

普朗克, 马克斯, [[57]]

行星, [[47 – 49]], [[50]], [[65]], [[67]]

行星轨道, [[47]], [[63]]

塑料注射成型, [[25]], [[156]]

诗歌, [[32]], [[78]], [[79]]

波拉克, 沃尔夫冈, [[182 – 83]]

政治, [[61]], [[212]]

聚合酶链式反应, [[123]]

诺曼底大桥, [[31]]

钾-氩定年法, [[46]]

陶器烧制, [[22]], [[171]]

功率, [[51]], [[52]], [[71]], [[73]], [[171]], [[200]] 另见 [[能源]]; 特定能源

普拉特·惠特尼公司, [[40]], [[93]]

JT9D喷气发动机, [[93 – 94]]

压力测量设备, [[50]], [[52]]

印刷机, [[10]], [[75]]

产品, [[71]], [[210]]

物物交换, [[55]]

分销和运输，[[81 – 84]], [[192]], [[193]], [[194]]

市场主导地位，[[2]], [[152]]

价格和可用性，[[152]], [[154]], [[177]], [[179]], [[192]], [[202]]

另见 [[市场]]

推进系统，[[52]], [[108]], [[111 – 12]], [[120]]

蛋白质，[[53]], [[147]], [[148]], [[208]]

心理学，[[36]], [[97]], [[107]], [[212]]

目的性系统，[[54 – 56]], [[105 – 6]], [[138]], [[142]], [[192 – 93]]

量子现象，[[57]], [[59]], [[66]], [[69]]

量子理论，[[123]], [[159]], [[161]]

石英晶体，[[49]]

“关于技术的问题”（海德格尔），[[213 – 14]]

Quicksort计算机算法，[[17]], [[98]]

雷达，[[15]], [[17]], [[18]], [[22]], [[33]], [[39]], [[41]], [[49]], [[55]], [[56]], [[70]], [[72]], [[73 – 74]], [[113 – 14]], [[132]], [[135]], [[184]]

辐射：

黑体辐射，[[57]]

electromagnetic（电磁的），59, 121

radio（无线电），7, 15, 18, 74, 75, 184

components（组件），30, 50, 167 – 68

signals processed by (信号处理) , 30, 33, 49, 50, 122, 167 – 68, 171

radiocarbon dating (放射性碳定年法) , 45

radiolabeling (放射性标记) , 70

railroads (铁路) , 14, 75, 107, 147, 149 – 50, 152, 153, 155, 192

locomotives for (机车) , 17, 145 – 47

Randall, John (约翰 · 兰德尔) , 113 – 14, 122

random events (随机事件) , 2

raw materials (原材料) , 19, 24 – 25

recursiveness (递归性) , 37 – 39, 42, 46, 91, 113

resonant cavities (谐振腔) , 113 – 14, 122

Ribet, Kenneth (肯尼思 · 里贝) , 129

Ricardo, David (大卫 · 李嘉图) , 202

Rickover, Hyman (海曼 · 里科弗) , 104

riveting machines (铆接机) , 29

rivets (铆钉) , 33

robotics (机器人技术) , 9

rocket technology (火箭技术) , 113, 175

roller bearings (滚子轴承) , 28

Röntgen, Wilhelm Conrad (威廉 · 康拉德 · 伦琴) , 57

Rosati, Robert (罗伯特 · 罗萨蒂) , 94

Rosenberg, Nathan (内森 · 罗森伯格) , 14, 101

Santa Fe Institute, Stanislaw Ulam Memorial Lectures (圣菲研究所, 斯坦尼斯瓦夫 · 乌拉姆纪念讲座) , 4

satellites (卫星) , 41, 206

Savery, Thomas (托马斯 · 萨弗里) , 176

Scholes, Myron (迈伦·斯科尔斯), 154

Schumpeter, Joseph (约瑟夫·熊彼特), 6, 19–20, 90, 107, 180, 185, 199, 200, 202

Schwandbach bridge (施万德巴赫桥), 99–100

science (科学), 7, 14

application of (应用), 1, 27, 57–58, 60–61, 91, 162–63, 171

beauty of (美感), 64

definitions of (定义), 64

experiment and insight in (实验与洞察), 57–64

Greek thought-based (基于希腊思想的), 64

invention in (发明), 126–29

investment in (投资), 162, 170

modern (现代的), 57–58, 61–63

technology and (技术与), 29, 59–65

theoretical (理论的), 141–42

参见 特定科学学科

science fiction (科幻小说), 74–75, 207, 215–16

seismic analysis (地震分析), 75

semiconductors (半导体) , 71

sensing systems (传感系统) , 52, 72 – 74, 150

sewer systems (下水道系统) , 150

Shannon, Claude (克劳德 · 香农) , 125

Shimura, Goro (志村五郎) , 128

ships (船舶) : evolution of (演化) , 16

navigation of (导航) , 25

sailing (帆船) , 16, 177 参见 特定船舶

silicon (硅) , 9, 71, 179

Silicon Valley (硅谷) , 28, 151, 162

Simon, Herbert (赫伯特 · 西蒙) , 36

“smart” systems (“智能” 系统) , 12, 207, 215

Smith, Adam (亚当 · 斯密) , 37, 202

society (社会) , 106

ideas and culture of (思想与文化) , 10, 16, 88

influence of technology on (技术对其的影响) , 4, 6, 10 – 12, 13

primitive (原始的) , 21

sociology (社会学) , 4, 6, 14, 16, 21, 106

software (软件) , 31, 50, 56, 79

Solvay process (索尔维制碱法) , 177

space (太空) , 47 – 50, 74 – 75, 175 参见 行星; 恒星

species (物种) , 17, 18, 31, 66, 89

evolution of (进化) , 13, 16, 107, 127–28, 188, 204

interrelatedness of (相互关联性) , 13, 14, 32

origin of (起源) , 14, 127–28

spectroscopy (光谱学) , 50, 61, 80

Stanford University (斯坦福大学) , 3, 162

staphylococci bacteria (葡萄球菌) , 119

Starkweather, Gary (加里·斯塔克韦瑟) , 117–18

stars (恒星) , 47–50

light spectra of (光谱) , 48–49, 50

oscillation of (振荡) , 47–50

《星球大战》, 215–16

steam engines (蒸汽机) , 10, 14, 16, 29, 73, 75, 87, 109, 147, 156, 174, 176

steam technology (蒸汽技术) , 21, 74, 159

steel (钢铁) , 10

basic oxygen processing of (碱性氧气转炉炼钢法) , 42

open-hearth processing of (平炉炼钢法) , 24 参见 贝塞麦炼钢法

干细胞再生, [[11]]

Stockton and Darlington Express, [[147]]

炉具，[[10]]

有轨电车，[[21]]

结构深化，[[3]]，[[131 – 43]]，[[163]]

增压器，[[140]]

测量方法，[[25]]，[[30]]，[[88]]

Sutter, Joseph, [[92]]

交响乐，[[54]]，[[55]]，[[56]]

系统论，[[170]]

尾水渠，[[33]]

Taniyama, Yutaka, [[128]]

多多罗大桥，[[91]]

技术，[[5]]，[[6]]，[[27]]，[[65]]，[[169]]，[[212]]

实验室，[[6]]，[[37]]

现代，[[57 – 58]]

技术精进，[[48]]

复杂，[[10]] 另见 [[特定技术]]

技术领域，[[28]]

技术，[[1 – 7]]

抽象与具体视角，[[31 – 32]]，[[39]]，[[170]]

采用、使用和传播，[[2]]，[[4]]，[[6]]，[[9]]，[[11 – 12]]，[[13]]，[[17]]，[[59]]，[[89]]，[[152 – 53]]

组件和子组件, [[2]], [[3]], [[24]], [[28]], [[32–40]], [[43]], [[50]], [[53]], [[87]], [[90–94]], [[116]], [[134–35]], [[136–37]], [[139]], [[169]], [[172]], [[204]]

美感, [[5]], [[78–79]]

元素变化或切换, [[15]], [[24]], [[29]], [[36]], [[42]], [[81]], [[87–88]], [[132–34]], [[138]], [[209]]

崩溃和替换, [[147]], [[177]], [[180]], [[181]], [[185]], [[192]], [[195]]

集体, [[28–29]], [[69–85]], [[88]], [[167–89]], [[205]]

组合, [[2–3]], [[15–26]], [[29]], [[32–43]], [[46]], [[51–52]], [[81]], [[89]], [[91]], [[107]], [[167–89]]

竞争, [[2]], [[117]], [[138–39]], [[149]], [[159–63]]

复杂性和精密性, [[10]], [[21]], [[28]], [[34]], [[46]], [[132]], [[135]], [[159]], [[168]]

组成部分, [[14]], [[18–19]], [[21]], [[23–25]], [[28]], [[29–43]], [[50]], [[54]], [[63]], [[66]], [[69]], [[70]], [[72–73]], [[79–80]], [[87]], [[96–98]], [[130]], [[133–34]], [[157]], [[169]], [[181]], [[204]]

定义冲突, [[5]], [[27]]

内在约束, [[35]]

传统与非传统, [[55–56]]

核心机制, [[51]], [[176–78]]

创造, [[2 – 3]], [[6]], [[12]], [[14]], [[15]], [[19]], [[21]], [[23]], [[26]], [[27]], [[43]], [[57]], [[66]], [[87]], [[90]], [[98 – 99]], [[106 – 30]]

特征的当前转变, [[24 – 26]], [[209 – 11]]

定义, [[1]], [[5]], [[27 – 30]], [[38]], [[50 – 51]], [[53]], [[54]], [[60]], [[203]]

设计, [[4]], [[12]], [[13]], [[17]], [[36]], [[39]], [[50]], [[91 – 95]], [[99 – 100]]

世界的技术化呈现, [[4]], [[10]], [[11]], [[12]], [[171 – 72]]

演化, [[1 – 6]], [[12 – 26]], [[29]], [[43]], [[64 – 70]], [[87 – 90]], [[105 – 43]], [[145 – 65]], [[167 – 89]], [[191 – 202]], [[203]], [[204 – 5]]

熟悉, [[6]], [[46]]

恐惧, [[215 – 16]]

反馈, [[2]], [[91]], [[103 – 4]], [[161]]

隐藏, [[98]], [[216]]

层级, [[37 – 41]], [[92]]

高级与低级, [[42]]

历史, [[4]], [[6]], [[13]], [[16]], [[75]]

希望， [[11]], [[28]], [[215]]

人性与技术， [[216]]

改进和修改， [[2]], [[3]], [[4]], [[15]], [[16]], [[17]], [[24]], [[29]], [[36]], [[42]], [[73]], [[81]], [[87 – 88]], [[89 – 90]], [[93]], [[131 – 43]], [[146]], [[160 – 61]], [[185]], [[196]]

递增收益和， [[2]]

个体， [[29]], [[70 – 71]], [[75]], [[78]], [[85]], [[87]], [[107 – 43]], [[145]], [[153]], [[163]], [[203]]

内部视角， [[14 – 15]], [[18 – 19]], [[24]], [[87 – 88]]

相互关联性， [[2 – 3]], [[14]], [[15 – 26]], [[29]], [[32 – 43]]

文献， [[3 – 4]], [[6]], [[13]]

锁定和适应性延展， [[103]], [[138 – 41]]

魔力和奇迹， [[7]], [[9 – 10]], [[52]]

维护， [[175]]

手工， [[73]], [[74]]

成熟， [[138]], [[149 – 50]], [[165]], [[177]]

机制和方法， [[3]], [[12]], [[18]], [[19]], [[21 – 24]], [[27 – 28]], [[30 – 31]], [[51]], [[55]], [[90]], [[172 – 89]], [[207 – 8]]

中世纪， [[10]]

作为新陈代谢， [[52 – 53]], [[189]]

微型， [[23]], [[24]], [[71]]

现代， [[10]], [[12]], [[21]], [[22]], [[25]], [[65]], [[207]], [[213]]

本质和特性， [[4]], [[12]], [[13]], [[43]], [[50 – 54]], [[56]], [[87]]

非物理的， [[55 – 56]]

非技术类的， [[54 – 56]]

新颖， [[2]], [[5]], [[6]], [[15]], [[17 – 19]], [[20]], [[21]], [[22]], [[23]], [[24]], [[29]], [[66]], [[105]], [[106 – 30]], [[143]], [[145]], [[163 – 64]], [[168]], [[193]], [[196]], [[203 – 4]]

机会生态位， [[170]], [[174 – 76]], [[177 – 79]], [[180 – 81]], [[183]], [[187]], [[195]], [[199]]

组织和结构， [[1]], [[2]], [[14]], [[17]], [[22 – 23]], [[32 – 43]]

外部视角， [[51]], [[87]]

缺乏整体理论， [[4]], [[12 – 15]], [[21]]

分割， [[36 – 37]], [[54]]

现象，作为产品，[[3]], [[22]], [[24]], [[29]], [[43]], [[45 – 67]], [[69]], [[77]], [[85]], [[88]], [[122]], [[123]], [[124]], [[125]], [[133]], [[141]], [[145]], [[146]], [[157]], [[160]], [[162]], [[163]], [[170]], [[171 – 172]], [[177]], [[186]], [[188 – 189]], [[200]], [[201]], [[203]], [[204]], [[205]], [[215]]

原始，[[16]], [[21]], [[22]], [[171]], [[176]], [[180 – 81]]

原理和逻辑，[[4]], [[5 – 6]], [[12 – 15]], [[23 – 24]], [[25 – 26]], [[29]], [[32]], [[33]], [[46]], [[49]], [[55]], [[87]]

所提出的问题，[[11 – 12]], [[176]], [[197 – 201]], [[204]]

生产和分配，[[175]]

承诺和威胁，[[6]], [[9]], [[12]]

目的和功能，[[17]], [[24 – 25]], [[28 – 31]], [[37 – 39]], [[40 – 41]], [[43]], [[54]], [[71]], [[88 – 89]]

相关问题，[[1 – 3]], [[9 – 12]], [[15]], [[43]], [[59 – 60]], [[107 – 8]]

根本性新颖性，[[17 – 18]], [[19]], [[107 – 11]]

现实世界，[[38]], [[41 – 42]], [[47]], [[50]]

递归模式，[[3]], [[37]], [[38 – 43]], [[46]], [[91]], [[110]], [[113]], [[129 – 30]], [[135]], [[204]]

革命中的，65, 149, 157

自我创造的，2 – 3, 21, 24, 59, 167 – 170, 188

特征的, 55

简单的, 30, 33, 36, 47, 185

怀疑和质疑的, 7, 8, 11 – 12

专业化的, 171 – 72

研究的, 14 – 15, 18 – 19

供需关系的, 172, 174 – 76, 196 – 98

支持的, 175 – 76

术语的, 4 – 5

测试和分析的, 36, 93, 112, 117, 118, 120, 131

理论的, 2, 4, 13, 14, 16, 21, 23, 25, 107, 109, 172, 203

版本的, 17, 18, 88, 89, 92 – 93, 95, 100, 105, 131 – 34, 145, 161

构造板块, 11

电信, 150 – 51, 171, 206

电报, 59, 60, 74, 162

电话, 42, 59, 98

望远镜, 47, 48, 61, 64

纺织技术, 65, 139, 159, 171, 192, 193, 196, 197

战区系统，39–42

定理，128–129

热力学，171

热释光测年法，46

轮胎工业，162

厕所，10

工具，20, 46, 171

汤斯，查尔斯，80, 115, 118, 123

贸易，160–61, 192

衍生产品，154–55, 209

对外，19 另见经济；市场；产品

工会，105–6, 197

变压器，33, 59

晶体管，69, 174, 179

传输网络，79

运输，21, 85, 200

集装箱，83–84

马匹，82, 147, 180 另见飞机；汽车；船舶

年轮测年法，45

三轮车，73

三极真空管，168

卡车，46, 75, 99

信任, 55
特鲁克萨, 约翰·G., 60
涡轮机, 19, 33, 34, 52, 65, 93, 103–4, 115, 134–35, 168
涡轮喷气机, 22, 108–9, 137
廷德尔, 约翰, 119
排版, 76
厄舍, 阿博特·佩森, 20
真空, 83
真空管, 59, 146, 150, 167–68, 169, 179
瓦雷拉, 弗朗西斯科, 2, 170
变异与选择, 17, 18, 127, 128, 132, 188
沃恩, 黛安, 139–40
文丘里, 罗伯特, 212–13
凡尔纳, 儒勒, 74–75
脊椎动物, 32
文森蒂, 沃尔特, 15
冯·奥海因, 汉斯, 20, 111–12
钟表制作, 36, 38
水, 67, 171

流动, 33, 147, 176

重水(D_2O), 104

轻水(H_2O), 104–5

储存, 29, 33

滑铁卢战役, 125

水车, 10, 73, 147, 177

沃森, 詹姆斯, 58, 61

瓦特, 詹姆斯, 109, 156

波长分复用器, 28

波, 22, 33, 40, 80, 122, 146, 168, 171

WD-40, 93

财富, 10, 11, 71, 197, 210, 214

武器, 171

西屋公司, 104

轮子, 46, 66, 73

威士忌, 43

Whittle, Frank, [[20]], [[111]], [[113]], [[115 – 16]], [[136 – 37]]

Wideröe, Rolf, [[114 – 15]], [[121]]

Wiles, Andrew, [[128 – 29]]

Williams, Michael, [[126]]

木材, [[45]], [[57]]

第一次世界大战, [[119]], [[202]]

第二次世界大战, [[36 – 37]], [[73]], [[75]], [[113]]

Wright brothers, [[120]]

Wright Brothers' Flyer, [[96]], [[132]]

Xenopus laevis frog, [[148]]

xerography, [[33]], [[108]], [[117 – 18]]

Xerox, [[117]]

X射线, [[57]], [[61]], [[122]], [[171]]

[关于作者]

W. Brian Arthur 是技术、经济和复杂性科学领域的领军思想家。他曾担任Stanford大学经济学和人口研究Morrison教授，以及Santa Fe Institute的Citibank教授。目前在PARC（前Xerox Parc）担任研究员。Arthur是经济学Schumpeter奖和复杂性科学首届Lagrange奖的获得者。

[目录]

[封面]

[[扉页]]

[[版权页]]

[[目录]]

[[序言]]

[[技术的本质]]

[[1: 问题]]

[[2: 组合与结构]]

[[3: 现象]]

[[4: 领域, 或为实现目标而进入的世界]]

[[5: 工程及其解决方案]]

[[6: 技术的起源]]

[[7: 结构深化]]

[[8: 革命与重新领域化]]

[[9: 进化的机制]]

[[10: 经济随其技术进化而进化]]

[[11: 我们与我们的创造物处于何种关系?]]

[\[\[注释\]\]](#)

[\[\[参考文献\]\]](#)

[\[\[致谢\]\]](#)

[\[\[索引\]\]](#)

[\[\[关于作者\]\]](#)