

创新简史

——打开人类进步的黑匣子

赵炎 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

人类为什么能够演化成今天这样？是什么驱动人类社会的进步？什么是创新？创新到底需要什么特质，规避什么风险？本书采用“记叙+议论”的体裁，纵观整个人类历史，从技术、科学、体制、产业、文化等方面，用丰富的故事细节为公众展示人类创新的过程，并分析其中的各种问题，也有对一些经典问题如“钱学森之问”“李约瑟难题”、中国产业创新“七宗罪”的思考和他分析，既给人以趣味，又引人思考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目（CIP）数据

创新简史：打开人类进步的黑匣子 / 赵炎著. —北京：清华大学出版社，2019
ISBN 978-7-302-53041-1

I. ①创… II. ①赵… III. ①技术革新—技术史—世界 IV. ①N091

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 094450 号

责任编辑：高晓蔚

封面设计：李伯骥

版式设计：方加青

责任校对：王荣静

责任印制：丛怀宇

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市龙大印装有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：170mm×240mm 印 张：14.25 字 数：230 千字

版 次：2019 年 6 月第 1 版 印 次：2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价：58.00 元

产品编号：082894-01

序 1

应赵炎教授之约为其新著《创新简史：打开人类进步的黑匣子》作序，主要是出于两点考虑。一是支持赵炎教授这样潜心向学的青年才俊从事创新知识普及和文化传播；二是认同出版这本书的社会价值，也希望创新研究学界同人致力于“让社会公众理解创新”的伟大事业中去。

改革开放 40 年，中国科学技术发展能力、产业创新发展能力、社会创新发展能力和环境创新发展能力显著提升，航空航天、高速铁路、新能源、智能汽车等战略性新兴产业取得了重大突破，培育出了华为、海尔、大疆、阿里巴巴、腾讯等一大批具有世界影响力的创新型企业。但是，中国的前瞻基础研究、前沿引领技术开放和颠覆性创新与主要发达国家相比仍然存在较大差距，迫切需要弘扬创新精神，加大创新投入，优化创新教育培训，讲好中国创新故事。

事实上，从熊彼特发端的创新研究到中国决策实施国家创新驱动发展战略的 100 年里，创新战略、政策和管理问题已经引起社会各界的高度关注，一切问题从创新出发去思考、去行动、去评价已经日益普遍。但是，什么是创新？为什么要创新？有什么创新？如何创新？对于大多数社会公众来说，创新仍然是雾里看花、水中望月。学校教科书中讲的理论力学、电磁学、量子力学、热力学和统计力学等往往聚焦理论阐述，少有创新案例教学，缺乏创新对人类社会影响的深入思考。科学家和创新实践者忙于学术研究、发表论文和创新创业，无暇做大众普及，畅销书作家则受制于学科基础知识壁垒，难以涉足创新历史案例研究。

在历史课本里，历史学家对人类历史上那些血腥的战争、黑暗的动荡或者胜利者的丰功伟绩情有独钟，创新则常常被轻描淡写地一笔带过，鲜有浓墨重彩的介绍，以至于社会公众对创新的理解往往仅停留在概念上，除了关注创新带来的光彩夺目的奖项和花环之外，难以对创新过程的复杂性和艰巨性有深入的了解，难以从思考青史留名的创新故事中获得创新启迪。当今社会需要崇尚创新、宽容失败的创新意识，更需要一批“创新网红”潜心创新故事开发，让创新的知识更加通俗易懂，让创新故事更加有血有肉，让创新的艰辛更加鲜活逼真，启迪创新创业者，培育社会创新意识。

赵炎教授本科和研究生毕业于中国科技大学，不仅与我是校友，而且有理科转人文社科的类似经历。赵炎教授秉承中国科技大学“红专并进，理实交融”的校训，注重理论与实践的结合，近年来学术研究硕果累累，热心组织学术活动，积极承办中国科学学与科技政策研究会主办的学术年会，对创新的社会意义也给予了有深度、有价值的思考。例如，他对飞机的发明、DNA 双螺旋结构的发现、人工智能发展等名垂史册的创新案例进行了深入研究，用放大镜来审视创新，尝试从新的视角详细描述一系列有独到见解的创新故事，对于著名的“钱学森之问”和“李约瑟难题”进行了系统思考，相信读者能从中看到以前从来没有看过，甚至没有想过的东西。

创新，并不是神秘的空中楼阁，并不是科学家、工程师的烟雾缭绕的专属领地，而是社会公众都可以理解并且去体验的领域。希望赵炎教授的《创新简史：打开人类进步的黑匣子》这本书，有助于把创新这个概念从学术研究的小天地推向广阔的社会公众，引起全社会对创新故事背后深层次影响因素的思考，并且燃起社会公众攀登世界高峰和大众创业万众创新的激情。

中国科学学与科技政策研究会
中国科学院科技战略咨询研究院
中国科学院大学公共政策与管理学院
穆荣平

2019年3月18日

序 2

在 21 世纪的今天，人类已经进入了知识经济、知识社会。我们国家的大众科学素养还需要提升，科学精神还需要加强。一方面，电视里的五花八门的娱乐节目是无法做到这件事的；另一方面，我们虽然已经有了获得雨果奖的科幻作家刘慈欣，有了科幻大片《流浪地球》，但是这仍然属于流行文化，很难得到学术界的认可（刘慈欣的《三体》和《流浪地球》都曾被职业科学家拿来进行“科学性挑刺”）。然而，中国的学术圈一方面拿着放大镜来对流行文化“挑刺”，另一方面又不屑于做这种“下里巴人”的事情，更多地仍然是在自己的“阳春白雪”天地里自娱自乐。

今天的中国学术界，非常强调“论文导向”“学术导向”。姑且不论这种导向对不对，实际情况是：几乎没有多少学者关心科学精神的大众普及。毫无疑问，这对于创新型国家的建设是非常不利的。我们缺少像写出《人类简史》《未来简史》《今日简史》的尤瓦尔·赫拉利，缺少写出《时间简史》的霍金。虽然他们是学者，但是他们把大众普及作为一项重要的工作，而且以此为乐、以此为荣。

显然，上海大学赵炎教授的这一本《创新简史：打开人类进步的黑匣子》打破了这个现状。从这个意义上讲，赵炎也做了一次不折不扣的创新。

我拿到书稿，发现赵炎把创新分为技术、科学、体制、产业四个方面。这是颇有新意的。并且，书中对许多创新过程的细节描写很精彩。这也是我们创新管理的学者们往往忽视的。事实上，那些历史上的经典创新案例能够给我们的启示，往往蕴藏在丰富的细节中。如果要做到完美主义的创新，就

必须懂得“魔鬼在细节中”的道理。否则，我们可能就永远也无法真正做到颠覆性创新、革命性创新。

赵炎还深入浅出地探讨了创新的相关问题，例如创新的双刃剑效应、创新与竞争的关系、中国产业创新的七宗罪、专业教育是否适合于创新、粗放式创新与集约式创新，等等。有些观点属于学术领域的一家之言，但是角度独特却是毋庸置疑的。最重要的是，他用通俗的语言，把学术界的不同观点、学术研究的前沿问题，展示给普通大众，这就为提升大众对创新的认知水平作出了很大的贡献。

尤其值得一提的是，在书的最后一章，赵炎对创新的基本概念进行了回顾和反思，指出“创新的最终目的是要提升人类的福祉，而这种福祉并不局限于在市场上以金钱衡量的价值，而是包括了体制的优化、社会的进步、人类道德水平和治理水平的提升、科学认识的进步和突破、产业结构的升级等”。这就对创新的内涵进行了升华。对于熟知“熊彼特范式”的创新管理学者来说，我们的确应当把创新的概念进行重新审视。今天的中国，不仅满足于建设一个创新型国家，而且要怀揣建设人类命运共同体的更加宏大的梦想。毫无疑问，创新学者需要在这个伟大的历史进程中扮演重要的角色。为此，我们一方面应当对创新的概念进行重新梳理，建立新的创新理论体系，将之付诸实践，推动社会和经济的进步；另一方面，我们也需要更多地意识到并承担普及科学精神的责任，为提高全民族的创新意识而努力。时至今日，这后一项工作显得越来越重要、越来越迫切。

清华大学经管学院创新创业与战略系

清华大学技术创新研究中心

陈 劲

2019年3月20日

序 3

我与赵炎教授相识是因为我们同在中国科技大学管理学院讲 MBA 课，但是在两个不同的专业领域，他讲“创新创业管理”，我讲“证券投资学”。当赵炎教授请我为《创新简史：打开人类进步的黑匣子》作序的时候，我还有点意外：我对创新管理这个学术领域没有做过专门研究，何以作序？

不过，看完书稿，我感到很大的满足和兴奋，也非常乐于为之作序。

“产业的变革：用价值去征服”这一章，选取了瓦特蒸汽机这个案例，浓墨重彩，讲了很多过去鲜为人知的细节。瓦特先是与罗巴克合作，然后认识了博尔顿。博尔顿的冒险精神、创业精神，成为瓦特蒸汽机从构想变成现实的道路上的重要推动力。尽管一度穷困潦倒，甚至四面楚歌，但是博尔顿的经营头脑、敏锐眼光使他敢于对这么一个充满未知的技术进行长期、持续的大量投资。最终，峰回路转，柳暗花明，他们的勇气和嗅觉获得了回报，瓦特蒸汽机成了工业革命的代名词。这个案例，其实就是今天我们资本市场中的风险投资的雏形。从天使投资人罗巴克，到 A 轮、B 轮、C 轮……的投资者博尔顿，瓦特这位高技术创业者走过了一条曲曲折折、荆棘遍布的道路，最终实现了创新成果的产业化和个人价值的实现。

在今天，风险投资的体系已经高度发达。创新者如果有真正闪光的创意，那就有可能获得资本市场的青睐，在短时间内“从 0 到 100”，迅速做大做强，并且迅速占领市场。在北京、上海、深圳、杭州乃至全国各地，千千万万的创业者怀揣着激情，走在高技术创新创业的道路上，梦想有一天成为中国的瓦特、乔布斯、扎克伯格。但是，今天的创业者已经不再是当年的瓦特，私

募股权投资公司也不再是当年的博尔顿。大家的想法、诉求都有了很大的进步，需要在更高的水平上进行合作。

金融是经济体系的润滑剂，也是创新的催化剂。为什么美国的硅谷能够成为创新者的天堂？一个重要的原因就是美国高度发达的风险投资体系为高科技创业企业提供了充足的动力。这种动力并不仅仅是金钱上的，包括IDG、红杉资本等风险投资公司的经理们，在产品研发、营销渠道、公共关系等方面对高科技企业给予了充足的支持。这种“增值服务”，既是雪中送炭，也是锦上添花。它大大缩短了创新成果产业化的时间。

中国的资本市场已经建立了自己的创业板，科技创新板的首批拟上市企业名单也刚刚出炉，整个国家都处在兴奋和热切的盼望中。中国在创新型国家建设的道路上走得越来越自信、越来越矫健。我们期待着，中国的资本市场能够给高科技企业插上腾飞的翅膀，为创新型国家的建设添砖加瓦。

这本书给我的最大启示是：推动人类社会进步的首先是在科学、技术、产业、体制创新方面作出杰出贡献的发明家、科学家，其次是那些将发明家、科学家的创新成果产业化并造福于人类的企业家，再次是敢于将资本投资于创新型企业从而加速创新成果产业化的金融家。

这本书文笔流畅，我会推荐给我的不同年龄、不同行业的朋友都来阅读。特别希望青少年朋友也来阅读。

海通创新证券投资有限公司董事长

时建龙博士

2019年3月20日

前言

写《创新简史：打开人类进步的黑匣子》这么一本书，有来自三方面的灵感，或者说渊源。

从 2004 年开始，我就进行技术创新、创新网络、创新联盟和集群的研究。十多年的教学、研究和社会服务生涯，令我越来越感觉到，我们这个国家需要创新。但是，在创新的理念，尤其是基本概念的内涵和外延方面，有很多需要梳理的地方。2012 年，出版了《创新管理》教材之后，不少学校、课程班采用了这本教材，但是也有很多人问我：“创新只在技术、科学上才有吗？在商业或者其他领域中，难道就没有创新了？创新过程中到底有什么问题是我们值得注意的？”为创新正本清源，让这个社会对创新的概念更加清晰，我感觉这个责任越来越重。但是，要解决这个问题，接下来另一个问题就冒出来了——怎么做？如果还是用我们学术研究的套路，出教材、出学术专著，进行观点的阐述，能有好的效果吗？我很怀疑。不讳言地说，科学精神在我们的民众中还是匮乏的，普通老百姓对于科学、技术、文化、体制、产业这些基本领域的了解还远远不够。虽然我们的大学毕业生数量已经突破了每年 800 万人，但是高学历并不意味着就懂得和发扬科学精神了——就拿我带的硕士生、博士生来说，很多对科学研究的基本方法、框架、思想都是一无所知的，需要重新进行逻辑思维、整合思维、批判性思维、问题导向思维的培训，而这种情况在中国高校并不鲜见；往大了说，在产业界、政界，甚至学术界，我们的一些“精英”所做的事情都是不科学甚至反科学、伪科学

的。所以我觉得，在目前这个时期，用学术灌输、说教的方法，不太容易取得好的效果。怎么办？

2015年，读了尤瓦尔·赫拉利的《人类简史》，我怦然心动。这本书是非常“异类”的一本历史书，它对于人类历史作出了令人匪夷所思的阐述，然而掩卷沉思，又令人不得不对其中大胆的想象力和自洽的逻辑而赞赏。尤其是对于“科学—资本主义—帝国”三者的相互增强的关系的探讨，让我这个从小就对世界史感兴趣的人有了一种醍醐灌顶般的对诸多史实的全新角度思考。用这种科普的文笔来进行历史知识的传授，或者说进行个人观点的营销，是很巧妙的，而且也是需要很深功力的（顺便说一句，《人类简史》中有关“科学”“技术”“科技”的概念没有梳理清楚。当然，我们也没有必要对作者求全责备）。并且，由于参与了中国科协的一些工作，我了解到科协近年来越来越强调科普、科幻的工作。因此，我渐渐意识到，用一种类似于科普的笔法来撰写这么一本书，应该是有可能得到大众承认的。

第三个方面的渊源，应该说是自己的一点私心——一颗未曾泯灭的当作家的心。虽然当一名大学教师是很忙碌的（绝不像大多数人想象的那样悠闲自在），而且在中国的高校做老师实在是压力山大，各种考核指标、会议、表格、评估满天飞——然而这也让我有了足够的动力，保持对新鲜知识的饥饿感。尤其是我们做创新管理的研究，更需要“不务正业”，要博采百家之长。近几年，三位作家的书籍让我大呼过瘾。

本书初稿完成之际，《流浪地球》电影还未上映，但是科幻作家刘慈欣的《三体》早已声名鹊起。建立在费米悖论“Where is everybody（大家都去哪儿了）”的基础上，并通过逻辑推理（虽然经过中科大校友的分析，逻辑并不完全严密）建立了“黑暗森林”法则，我认为这个套路是我看过的所有科幻小说中最为逻辑自洽的，因此也是最“接近真实”的科幻小说；并且书中还推出了诸如“飞刃”“智子”“水滴”“曲率驱动飞船”“二向箔”等令人目眩的“黑科技”，还对“黑暗森林”的末世场景进行了正面强攻，这种写作内容和技法上的创新也是技术上难度极高的。可以说令人脑洞大开，大呼过瘾。弗·福赛斯的间谍惊悚小说则仿佛教科书一般，不厌其烦地把间谍工作中的每个环节、每个动作都从头到尾进行详细刻画，细节描绘的丰富简直到了外科手术般令人发指的程度，让人看着他的小说几乎就可以依

样画葫芦地去做一个间谍。马伯庸的《风起陇西》和《三国机密》，用一种全新的视角解读了三国历史，看上去似乎荒诞不经，但是仔细推敲却不无道理，而且历史的这种可能性是不能绝对排除的，并且这种解读是建立在作者对正史深刻透彻的参悟基础上的，如果没有对正史的每一个细节的深刻理解和反复推敲，是不可能写出这种作品的。在我看来，这三位畅销书作家不仅在各自的领域做了出色的创新工作，而且还在无形之中培养了公众的科学意识、创新意识、想象力、逻辑思维和批判性思维。他们做到的，正是我们这些创新研究学者日日夜夜梦寐以求的。

所以，有这三个因素，我便决定用这种科普而不是学术的笔法来进行创新概念的推广。虽然这本书不属于严格意义上的科普书籍，但是行文是异曲同工的。

我们的公众对于创新往往只知大概，不求甚解。例如技术领域的晶体管的诞生、科学领域的电磁学理论的发展等。创新到底需要什么特质？需要注意什么问题？需要规避什么风险？每个细节都是值得推敲的。因此，我尝试用丰富的细节来为公众展示创新过程，并分析其中的各种问题，引发大家的思考。在第一章中，关于发现 DNA 双螺旋结构的故事就是一个非常引人深思的案例。希望通过这样的案例，能让热衷于“创新”的全社会都冷静下来，多思考一些创新的相关问题。若能如此，则心意足矣。

创新是一个非常宽泛的话题，涉及方方面面。因此，书中也有对一些经典问题的思考和分析，例如“钱学森之问”“李约瑟难题”，还有对中国产业创新的“七宗罪”的拷问。

创新的概念是外国人提出的，学术研究的理论也大多是翻炒国外的理论。本书在最后尝试着提出“集约式创新”和“粗放式创新”的概念，并且用“精致式创新”去对应学术界已有的“朴素式创新”，试图总结和提炼出适合中国情境的创新模式。本书还用“情趣式创新”来概括在中国比较普及的、群众喜闻乐见的创新。

感谢清华大学出版社高晓蔚编辑的大力支持。本书终于即将付梓，这与高编辑的努力是分不开的。经过千日的酝酿和数易其稿，希望这次创新性的尝试也能体现出笔者期待的价值。如果没有，那当然不是读者的错，也不是笔者的错，因为创新的本意就是 trial and error（试错），不断地犯错、不断

X | 创新简史：打开人类进步的黑匣子

地纠错。反反复复，寻寻觅觅，有错则改，无错加勉，砥砺前行，才能像生物进化树那样，一次又一次地证明某一条道路走不通，到最后只剩下那一条走得通的道路，那就是我们最终要走的路。

赵炎
于上海大学管理学院
2019 年 3 月 12 日

目录

第一章 历史上的创新

- 第一节 创新：推动人类演化的力量 / 002
- 第二节 世界历史上的创新案例 / 006

第二章 技术的进步：从刀耕火种到数字化生存

- 第一节 解放体力：石器，火 / 032
- 第二节 解放脑力：四大发明 / 036
- 第三节 拥抱世界：电 / 047
- 第四节 信息革命的发端：晶体管的诞生 / 051
- 第五节 技术创新的归宿 / 057

第三章 科学的脚步：暗夜中舞动的精灵

- 第一节 科学启蒙：走出中世纪的黑暗 / 062

- 第二节 爆发前的地火：电磁学 / 069
- 第三节 加速的轨道：人工智能 / 075
- 第四节 科学创新的驱动力 / 084
- 第五节 知识就是力量？——创新的双刃剑效应 / 086
- 第六节 科学创新与竞争 / 094
- 第七节 知识就是力量？——李约瑟难题的科学解 / 097

第四章

体制的力量：笑看风云起天涯

- 第一节 资本主义登上舞台 / 103
- 第二节 站在成功的边缘：洋务运动 / 108
- 第三节 历史的必然：改革开放 / 115
- 第四节 体制创新中的领导 / 118
- 第五节 体制竞争：创新的温床，还是绞架？ / 119
- 第六节 李约瑟难题的体制解 / 124

第五章

产业的变革：用价值去征服

- 第一节 第二次浪潮 / 128
- 第二节 第三次浪潮 / 135
- 第三节 中国产业创新的七宗罪 / 138
- 第四节 产业创新的两大困境 / 148
- 第五节 产业创新的推动力 / 154

第六章

创新可以被教出来吗？

第一节 钱学森之问与李约瑟难题的教育解 / 170

第二节 专业很重要？ / 174

第三节 创新从何而来？ / 176

第七章

创新与文化的纠葛

第一节 创新：孤独，还是合作？ / 180

第二节 文化大融合：创新的福音？ / 182

第三节 李约瑟难题的文化解 / 185

第八章

创新：回到概念的本源

第一节 创新与价值创造 / 190

第二节 集约式创新与粗放式创新 / 191

第三节 精致式创新与朴素式创新 / 195

第四节 情趣式创新 / 199

第五节 中国创新在世界上的地位 / 201

The background features several 3D wireframe geometric shapes, including cylinders and cubes, rendered in a light gray color. These shapes are arranged in a way that creates a sense of depth and perspective, with some appearing to recede into the distance. The overall aesthetic is clean and modern, typical of a book cover design.

第一章 历史上的创新

第一节

创新：推动人类演化的力量

一、人类的演化

人类为什么能够演化成今天这样？人类社会为什么能够进步到今天这个程度？对于今天忙忙碌碌的人们来说，这两个问题实在是毫无意义。但是，仔细思考起来，又有谁能够一句话说得清楚？

6 亿～7 亿年前，动物在地球上出现。从那以后，动物界的演化基本上是靠无意识（或者说自发的）行为而进行的。不论蚯蚓在土壤里挖掘，还是海豚在大洋中嬉戏，不论雄鹰在万米高空中翱翔，还是猎豹在广袤草原上捕食，它们的行为大都不是自觉的。生命的演化速度也处于一个相对较为缓慢的水平。

距今 10 万～15 万年以前，在东非生活的现代人类的祖先——智人，刚刚开始学会生火，开始宣称这个世界上存在神灵。他们看起来是那么顽冥不化，似乎再过 100 万年、1000 万年，他们的生存状态也不会有什么大不了的改善。

然而，就是从那时候开始，智人逐步从东非向这个星球的各个区域挺进，开始征服地球。从那以来，智人以及随后的人类开始有意识地运用自己的四肢和头脑，并且是越来越多地依靠头脑，来开展日常的生产和生活。在此过程中，人类的智力水平大大地提升了，行为的主动性大大地增强了。

2000 年前，人类所能从事的复杂的、称得上有技术含量的活动，不过是制作弓箭、战车，或者耕种小麦、玉米，或者像阿基米德提出杠杆原理和浮力原理，或者像李冰主持修筑都江堰水利工程。

500年前，人类所能做的最复杂的事情，可能达到了制造大型帆船、原始火箭的水平，或者推导出地球围绕太阳旋转的模型，或者进行超过上万公里的横跨欧亚大陆的远程贸易，或者像王安石那样推行新法、像英格兰那样推出《权利法案》，或者像达·芬奇、米开朗琪罗那样在文化领域大有建树。

200年前，人类有了缝纫机、动力织布机，提出了概率和微积分，发明了煤气灯，创作出了《马赛曲》，证明了牛痘的预防效果，用载人氢气球进行空中侦察。卡文迪许测量了万有引力常数，伏打发明了干电池，瓦特的蒸汽机开始被大规模运用于经济领域，英国政府实施了单一金本位制。

50年前，美国已经能够发射金星探测器和地球同步轨道通信卫星，IBM的民用计算机开始使用集成电路，苏联航天员实现了太空行走，日本的高速铁路新干线的时速超过200千米。

今天，一个毫不起眼的普通人所做的任何一件平淡无奇的事情，例如在办公室敲击电脑键盘和发送Email，乘坐民用飞机做长途旅行，或者在家里用遥控器打开电视机和空调，用电饭煲做饭，在我们的远古亲戚的眼中都越来越显得不可思议。他们一定会认为，眼前的这个怪物究竟在做一些什么事情？看上去这么奇怪，甚至不可理解！

在人类社会进步的过程中，人类的认知能力、技术能力、组织能力、沟通能力越来越强大。与其说是越来越多地改造地球，不如说是越来越深刻地改造人类自身。随着仿生学、人工智能、计算机网络的迅猛发展，人类也在自我进化，而且这个进程就像奔驰在高速铁路上的列车，越来越快，停不下来。^①当然，这个过程也伴随着问题：人究竟会变成什么？我们究竟希望自己变成什么？“人”的定义最后会变成什么？人在各方面能力的强化，终将把我们引向何处？^②人类社会将走向何方？

二、创新的各个领域

从智人开始，我们就在不断强化自己的各方面能力。技术的进步从未中

① 尤瓦尔·赫拉利. 人类简史 [M]. 林俊宏, 译. 北京: 中信出版社, 2014.

② 有的科幻小说和电影就揭示了这样的前景，就是“人”最终脱离了有形的躯体而存在，例如《黑客帝国》和《时间移民》。

断。技术方面的创新一直是创新的主战场。^① 最早的石器工具（石刀、石斧）赋予了原始人十倍甚至百倍于自己双手的力量，使得更有效率的采摘、更加精巧的制作生活用品，甚至更加大胆的猎杀狮虎豹等活动成为可能。火的应用使人类掌握了强大的自然力量。车轮的发明使长距离快速移动成为可能。时至今日，技术的进步使我们在更多的领域做得更好、更快、更精细、更有效，使生活更加丰富和便捷。如果技术演化的加速原理的确存在的话（正如到目前为止所显示出来的那样），^② 我们地球人类的科学认知将迅速增强，而且很可能呈一种指数增长的趋势。有可能在不远的将来，我们就会进入技术大爆炸的时代，今天新出现的技术到了明天早上就会变得一文不值。然而，就像克隆、转基因、原子能、大型水坝等技术引起广泛的争论、质疑甚至声讨一样，技术进步给人类带来的问题往往并不比福利少。对此我们应当保持清醒和谨慎，甚至提前保持一点杞人忧天的态度也未尝不可，至少比狂妄自大的人类中心主义和人类沙文主义强。

人类是有好奇心的。最早的人就有仰望星空的本能（尽管随着互联网和智能手机的泛滥，这种本能似乎正在迅速退化）。科学发现作为好奇心的产物，一直在人类社会的演进中扮演重要的、基础性角色。从哥白尼到伽利略，从牛顿到爱因斯坦，从达尔文到史蒂芬·霍金，人类运用自己的聪明才智，一步步加深对现实世界的认识。每一个科学上的发现，都意味着人类对现实世界的认知又加深了一层。这种科学认知的加深，为人类在其他领域的前进提供了关键知识。尽管我们这种认识和宇宙中更高级的智慧和文明相比，可能还无法相提并论，但是这毕竟是我们人类可以自我选择的进程。

为了彻底地摆脱原始部落那种靠山吃山靠水吃水、男人外出捕猎和采集野果、女人饲养牲畜和操持家务的生活方式，人类不断地扩大生产规模，升级生产方式。先是畜牧业从农业中分离出来，形成了第一次社会大分工；接下来，手工业脱离了农业；再后来，商品生产、货币也开始出现；此后，机器化大生产、大规模生产的实现，极大地提高了人类的生产能力，也极大地改善了我们的生活；互联网的出现、信息化的进展、个性化定制，为人类再

① 事实上，创新领域的研究主要就是从技术方面起源的，包括约瑟夫·熊彼特、切萨布鲁夫、克里斯滕森、许庆瑞等学者都是技术创新研究的重要学者。

② 刘慈欣. 三体 [M]. 重庆：重庆出版社，2007.

一次实现生产能力的跳跃式发展注入了原动力。产业方面的创新，一直以来都是人类文明社会中的主战场。归根结底，创新不能停留在论文纸面或者专利证书的层面，实现商业价值和社会价值是必由之路，而这就必须归结到生产活动——也就是产业。

仓廩实而知礼节。人类在填饱肚皮、仰望天空之余，也创造了愉悦自我的活动。有的人拿起了小提琴和风笛，用各式各样的旋律去追求情人；有的人拿起了颜料和毛笔，用时而狂放不羁、时而细致入微的笔墨来刻画现实世界或者理想中的天国；有的人则用榔头和剪刀来抒发自己的情感；甚至当人们围坐在酒桌或者茶壶前，觥筹交错或者坐而论道之际，也诞生了形形色色的酒文化和茶文化。历史上，文化方面的创新层出不穷，把人塑造成了今天这样拥有复杂情感、强调丰富体验的样子。如果没有这些文化活动，人不过是会拿起工具做出一个桌子、让自己能够吃饭睡觉活下去、没有任何情感、不会享受生活的行尸走肉罢了。时至今日，文化上的新生事物越来越复杂，门类也越来越多。今天，很多人在选择变换国籍的时候，文化方面的考虑事实上扮演着关键的角色——你究竟喜欢交响乐还是广场舞，更愿意品尝香槟葡萄酒还是茅台五粮液？

一个有争议的创新领域，可能是人为了生产生活而进行的组织管理方式。一个原始部落内部的主要活动概括起来可能只有5~6种工作，只要依靠一个白发苍苍、经验丰富的族长的权威进行管理，就能确保所有人（或者大多数人）相安无事地和平共处下去。农业社会中的见多识广的村长、城邦中的聪明睿智的元老、游牧民族中的能征善战的首领，都是特定条件下诞生的组织管理的领袖。然而，生产的社会化大分工越来越精细，社会的组成部分越来越多样化，数量越来越庞大。今天的一家数百人规模的软件公司，其中的分工种类数量可能就超过了《清明上河图》所刻画的宋代都城的分工种类数量。社会这台机器越来越复杂和难以驾驭，人类社会也相应地创造了不可谓不丰富多样的制度，对这种大规模群体的组织模式和管理方法提供解决方案。两党制和多党制，议会制和君主立宪制，大陆法系和英美法系，资本主义和社会主义……人类社会的体制创新方面所展现出的创造力从来都不逊色于科学和技术领域。

在人类历史上，涌现了无穷无尽的创新。事实上，在人类演化的历史长河中，创新就是一个一个的脚印，每一次创新活动和创新成果，都引导人类

向更聪明、更智慧、更灵活、更强大的方向前进，也引导人类社会向着更复杂、更精确、更有弹性的方向进步。毫不夸张地说，人之所以是今天的人，就是因为历史上成千上万的创新活动，一点一点地把我们塑造成了今天这个样子。人类为什么能够演化成今天这样？人类社会为什么能够进步到今天这个程度？关于这些问题，答案就隐藏在创新这个黑匣子中。

第二节

世界历史上的创新案例

一、科学创新：DNA双螺旋结构

1953年4月25日，美国遗传学家沃森（James Watson）和英国物理学家克里克（Francis Crick）在英国《自然》（*Nature*）杂志发表了一篇合著的论文，提出DNA双螺旋结构模型。这个发现宣告了分子生物学的诞生，在生命科学史上翻开了划时代的一页，给人类社会带来了巨大的影响。

1 过程

20世纪50年代前后，有一批物理学家和化学家采用X线衍射技术研究DNA分子结构，包括著名的伦敦皇家学院的威尔金斯实验室，还有加州理工学院的鲍林实验室。而真正的发现者，则是个非正式的研究小组，事实上他们可以说是不务正业。

1951年，23岁的沃森既是一位遗传学者又是一位野鸟观察家，他15岁时进入芝加哥大学，那时还是个早熟而无礼的青年。他于1951年从美国到剑桥大学卡文迪许实验室做博士后时，虽然其真实意图是要研究DNA分子结构，挂着的课题项目却是研究烟草花叶病毒。比他年长12岁的克里克是一位晶体学家，他认为自己在30岁左右时就已经相当出色了。当时他正在

做博士学位论文，论文题目是“多肽和蛋白质：X 射线研究”。沃森说服与他分享同一个办公室的克里克一起研究 DNA 分子模型。他们从 1951 年 10 月开始拼凑模型。

1951 年，他们俩都是名不见经传的小人物，35 岁的克里克连博士学位还没有拿到。受到前人的影响，他们原来按照三股螺旋的思路进行了很长时间的的工作，可是既构建不出合理模型，也遭到结晶学专家的强烈反对，工作陷入僵局。1953 年 2 月，他们看到了威尔金斯（Maurice Wilkins）等人拍摄的 DNA 晶体的 X 射线衍射照片。^① 根据照片，整日焦虑于 DNA 结构的沃森和克里克立即领悟到了——两条以磷酸为骨架的链相互缠绕形成了双螺旋结构，氢键把它们连接在一起。分别代表腺嘌呤、胞嘧啶、胸腺嘧啶和鸟嘌呤的 A、C、T、G 按照一定的次序排列于双链上，A 与 T 相对应，C 与 G 相对应。知道一条 DNA 链上的字母顺序，另一条链也自然得到了确认。DNA 的双螺旋链不断盘绕，加上蛋白质，就形成了存在于每个细胞核内的染色体。

利用从剑桥的五金行里取得的零件，沃森逐渐收集了大量用作 DNA 成分的部件，并在克里克的帮助下将它们组合在了一起。这些部件的组合一旦完成，沃森与克里克便如同蓄势待发的飞行员，跑道上的指示牌、旗帜以及指示灯已经一一到位，只等他们完美地起飞。几经尝试，他们终于在 1953 年 3 月获得了正确的模型。最终制成的模型清晰明了、精美而令人印象深刻，最重要的是，通过碱基互补配对原理，它让人们了解了遗传机制的关键。任何一个见到该模型的人，无疑都会重复沃森与克里克激动的话语“如此漂亮的结构必须存在”！

2 启示

■ 挑战权威才能创新

在科学界经常遇到的是年轻人对权威无原则地屈服，甚至沃森在得知鲍

^① 威尔金斯的同事，一位女晶体学家富兰克林（Rosalind Franklin）在其中扮演了重要角色。事实上，是她成功地拍摄了 DNA 晶体的 X 射线衍射照片。后来，威尔金斯在富兰克林不知情的情况下把这那张照片拿给沃森和克里克看了，从而给了他们关键性的启发。这三位男性获得了 1962 年诺贝尔生理学或医学奖，而富兰克林则已经在 1958 年因为卵巢癌而去世。为她鸣不平的大有人在，尤其是有人质疑威尔金斯获奖的公正性。

林提出的是三螺旋模型的一刹那，也曾后悔几个月前放弃了自己按三螺旋思路进行的工作。不过两位年轻科学家并没有盲目迷信，而是最终选择了向权威挑战，这需要勇气，更需要严肃认真的实验工作和深厚的科学功底。他们为了赢得时间，加快了工作。因为他们相信这是鲍林的智者千虑之一失，很快本人就会发现错误并迅速得出正确结论。事实证明，他们的大胆取得了回报。

■ 跨界往往通向创新

推断出 DNA 是双螺旋结构的，不是生物学家，而是一群物理学家和化学家。威尔金斯虽然在 1950 年最早研究 DNA 的晶体结构，当时却对 DNA 究竟在细胞中干什么一无所知，在 1951 年才觉得 DNA 可能参与了核蛋白所控制的遗传。富兰克林也不了解 DNA 在生物细胞中的重要性。作为一个化学家，鲍林研究 DNA 分子则纯属偶然——他在 1951 年 11 月的《美国化学学会杂志》上看到一篇核酸结构的论文，觉得荒唐可笑，为了反驳这篇论文，才着手建立 DNA 分子模型。克里克从事的是蛋白和多肽的 X 射线晶体衍射研究。外加唯一一个遗传学家，当时年仅 23 岁的沃森。正是由于学科交叉，这些科学家才有可能破解 DNA 双螺旋结构的密码。

■ 学术交流推动创新

在探索 DNA 分子结构的开始，卡文迪许实验室的沃森和克里克远远地落后于他们的竞争者——伦敦皇家学院的富兰克林和威尔金斯。然而，伦敦皇家学院研究小组由于成员之间的沟通不畅，无法有效地工作。富兰克林开始负责实验室的 DNA 项目时，有好几个月没有人干活。威尔金斯不喜欢她进入自己的研究领域，但他在研究上却又离不开她。威尔金斯把富兰克林看做搞技术的副手，后者却认为自己与前者地位同等，两人的私交恶劣到几乎不讲话。在那时，对女科学家的歧视处处存在，女性甚至不被准许在高级休息室里用午餐。她们无形中被排除在科学家间的联系网络之外，而这种联系对了解新的研究动态、交换新理念、触发灵感极为重要。

与此相对的，早在 20 世纪初，卡文迪许实验室就形成了一个“茶歇”（tea break）的习惯，每天上午和下午，都有一个聚在一起喝茶的时间，有时是海阔天空的议论，有时是为某个具体实验设计的争论，不分长幼，不论地位，彼此可以毫无顾忌地展开辩论和批评。这种不拘一格、学科交叉的氛围确实有利于学术进步，所以这种习惯已经被国外许多大学和研究机构仿效，在国际学术会议的日程安排中，茶歇这个环节也已经成为通行的惯例。

3 深远的影响

■ 医学和医药

DNA 双螺旋结构模型的提出，引发了今天以基因工程为核心的生物技术。1977 年，美国科学家第一次用大肠杆菌生产出人脑激素——生长激素释放抑制素。这是基因工程研究的首次重大突破。自此以后，仅美国批准的上市治疗疑难病（包括遗传病、心血管系统疾病、免疫系统疾病、肿瘤及传染病等）的基因工程药品就超过 120 种，有近 400 多种处于各期临床研究阶段，约 3000 多种处于临床前研究开发阶段，2000 年产值和销售额已超过 200 亿美元。

DNA 双螺旋结构模型的提出，使基因疗法成为可能，为目前尚无理想治疗手段的遗传病、恶性肿瘤、心血管病、传染病等的治疗展示了广阔的前景。

在 DNA 双螺旋结构模型的基础上，“人类基因组计划”于 1990 年开始实施。2000 年 6 月 26 日，参加“人类基因组计划”工作的 6 个国家共同发表声明，完成了人类基因组计划的 DNA 框架图。凭着这张人体细胞 DNA 中所有碱基排列顺序的地图，医学有可能实现“先知先卜”。当一个人还没有症状时，通过 DNA 检测就能知道他未来会不会患心脏病、老年痴呆症、癌症等，从而可以提前预防，杜绝疾病的发生。在进行“人类基因测序”工程的同时，科学家们也正在进行人类功能基因组研究，也就是对人类基因的功能进行深入研究，这将对人类的健康保障和医药产业产生更深远的影响。

■ 农业

基于对 DNA、基因、遗传学方面的认识不断加深，转基因技术在植物品种改良的研究方面取得了巨大的进展，包括以下几个方面：抗除草剂、抗病毒、抗虫、抗细菌、抗真菌的转基因植物已进入大田试验，有的已推广；对抗盐、碱、抗寒、抗旱、抗涝的转基因植物研究已初见成效，有的已进入大田试验；在研究农作物蛋白质、脂肪、淀粉含量和品质改良方面的转基因植物有的已告成功，有的已进入大田试验；延缓成熟、耐储藏、能保鲜的转基因番茄已商品化；改变纤维颜色的转基因棉花的研究有的已成功；等等。^①

^① 张树庸 .DNA 双螺旋结构模型对人类社会的影响 [J]. 实验动物科学与管理, 2003, 20 (3): 33-36.

但是，转基因研究和转基因产业在全球范围内引起的广泛争议表明，相当多的人对这一领域的潜在问题和巨大风险仍然保持清醒。在进一步的研究揭示更多情况之前，保持谨慎或许是对人类自身更加负责的一种态度。

■ 工业

利用基因工程的方法构建工程菌，可以对工厂排出的废水、废料和残渣进行净化处理，一方面可以治理环境，另一方面也可以获取食用和饲料用的单细胞蛋白。

微生物发酵法可以生产许多化工原料，如乙醇、丁醇、乙酸、乳酸、柠檬酸、苹果酸等。用转基因的方法构建工程菌，可以大大改进产品质量并提高产量等。

利用转基因的方法构建工程菌可以生产制造塑料的原料——聚羟基丁酸，这种产品可以被微生物分解，从而消除白色污染，没有毒害。

利用基因工程的方法，还能为缓解能源危机带来新的机遇。地球上的化石燃料终将枯竭，代之而起的是生物能。微生物发酵法用甘蔗、木薯粉、玉米渣等生产酒精。科学家还在研究通过转基因的方法创造多功能的超级工程菌，使之分解纤维素和木质素，以便利用稻草、木屑、植物秸秆、食物的下脚料等生产酒精。

■ 总结

可见，DNA 双螺旋结构的发现，对医学和医药、农业、工业的发展产生了巨大的影响，大量的病人得以治愈，更多更优良的农作物（粮食、蔬菜、水果、经济作物等）得以生产，更多更好的工业产品得以制造。巨大的经济效益和社会效益，使这一发现毫无争议地成为人类科学史上一大重要的创新。

二、技术创新：飞机的发明

1903 年 12 月 17 日，威尔伯·莱特 (Wilbur Wright) 和奥维尔·莱特 (Orville Wright) 兄弟二人先后驾驶他们自己设计的“飞行者一号”飞机，成功地升空飞行。这一天，他们的最好成绩是留空 59 秒，飞行距离 260 米。他们成功地实现了人类第一次载人动力飞行。飞机是 20 世纪最伟大的发明之一。经过 100 多年的努力，民用航空、通用航空和军用航空等领域都得到了高度

的发展，对社会、经济、科技、文化和军事等领域，都产生了巨大而深远的影响。

1 过程

两千多年前中国人就已发明了风筝。19 世纪末，滑翔机和蒸汽机都已经成熟，许多先驱者开始研究动力飞行。

威尔伯·莱特和奥维尔·莱特兄弟俩自幼喜欢机械，喜欢航空。1896 年 8 月 9 日，两兄弟听到德国航空先驱李林塔尔（Otto Lilienthal）在一次滑翔飞行中不幸遇难的消息，受到极大的刺激和感动。与此同时，熟悉机械装置的莱特兄弟认定，人类进行动力飞行的基础实际上已经足够成熟，李林塔尔的问题在于他还没有来得及发现操纵飞机的诀窍。于是，莱特兄弟满怀激情地投入了对动力飞行的钻研。

这时候，莱特兄弟开着一家自行车商店。他们一边干活挣钱，一边研究飞行资料。3 年后，他们掌握了大量有关航空方面的知识，决定仿制一架滑翔机。他们首先观察老鹰在空中飞行的动作，为此，他们常常仰面朝天躺在地上，一连几个小时仔细观察鹰在空中的飞行，研究和思索它们起飞、升降和盘旋的机理。然后一张又一张地画下来，之后才着手设计滑翔机。

1900 年 10 月，莱特兄弟终于制成了他们的第一架滑翔机，并把它带到吉蒂霍克海边，这里十分偏僻，周围既没有树木也没有民房，而且这里风力很大，非常适宜放飞滑翔机。兄弟俩用了一个星期的时间，把滑翔机装好，先把它系上绳索，像风筝那样放飞，结果成功了。然后威尔伯坐上去进行试验，虽然飞了起来，但只有 1 米多高。第二年，兄弟俩在上次制作的基础上，经过多次改进，又制成了一架滑翔机。这年秋天，他们又来到吉蒂霍克海边，一试验，飞行高度一下达到 180 米。

他们非常高兴，但并不满足。他们在想：能否制造一种不用风力也能飞行的机器？兄弟俩反复思考，把有关飞行的资料集中起来，反复研究，始终想不到用什么动力，把庞大的滑翔机和人运到空中。有一天，车行门前停了一辆汽车，司机向他们借一把工具，来修理一下汽车的发动机。弟兄俩灵机一动，开始思考能不能用汽车的发动机来推动飞行。从这以后，弟兄俩围绕发动机动开了脑筋。他们首先测出滑翔机的最大运载能力是 90 千克，于是，他们向工厂定制一个重量不超过 90 千克的发动机。但当时最轻的发动

机是 190 千克，工厂无法制造出这么轻的发动机。在机械师泰勒（Charles Taylor）的帮助下，莱特兄弟动手制造了一台功率约 12 马力、重 77.2 千克的活塞式 4 缸直列式水冷发动机。他们还制作了螺旋桨，并将带螺旋桨和发动机的飞机模型，放到自制风洞中进行了模拟测试。他们很快便着手研究怎样利用发动机来推动滑翔机飞行。经过无数次的试验，他们终于在滑翔机上安装了螺旋桨，由发动机来推动螺旋桨旋转，带动滑翔机飞行。

又经过多次试验，反复思考，严格检查，借鉴他人的经验教训，莱特兄弟已经到了成功的边缘。1903 年 12 月 17 日，莱特兄弟带着他们装有发动机的飞机再次来到吉蒂霍克海边试飞。10 时 35 分，一切准备就绪。为了能够率先登机试飞，兄弟俩决定以掷硬币的方式确定谁先登机，结果弟弟奥维尔赢了。奥维尔爬上“飞行者 1 号”的下机翼，俯卧于操纵杆后面的位置上，手中紧紧握着木制操纵杆，威尔伯则开动发动机并推动它滑行。在飞机达到一定速度后，威尔伯松开手，飞机像小鸟一样离地飞上了天空。虽然“飞行者 1 号”飞得很不平稳，但是它毕竟在空中飞行了 12 秒共 36.5 米，才落在沙滩上。接着，他们又轮换着进行了 3 次飞行。在当天的最后一次飞行中，威尔伯在 30 千米/秒的风速下，用 59 秒的时间，飞行了 260 米。人们梦寐以求的载人空中持续动力飞行终于成功。人类动力航空史就此拉开了帷幕。

2 启示

■ 继承他人的研究成果^①

李林塔尔在 1896 年试飞中不幸遇难逝世的消息，促使莱特兄弟开始关注航空和飞行的问题。在头两三年，他们主要是进行一些航空入门，阅读有关书籍以加深对于航空的了解。此时，他们的航空研究仍属于业余状态，并没有立志进行飞机研究。

在他们开始认真对待飞行问题后，就感到不那么简单，问题成堆。但他们不是闭门造车，自己闷头研究，而是首先求助科研机构。1899 年 5 月，威尔伯·莱特给著名的科学机构史密斯研究院写信求助，向他们索取与航空有关的资料。研究院给他们提供了一份清单，其中有查纽特的《飞行机器的发展》、兰利的《空气动力学试验》、李林塔尔的《作为航空基础的鸟类飞

^① 刘家冈，李俊清，王本楠. 莱特兄弟发明飞机成功的创造学启示 [J]. 物理与工程，2012，22（4）：37-40.

行》以及 1895 年、1896 年和 1897 年的《航空年鉴》。在仔细地阅读了这些文献之后，他们“惊奇地发现，在人的飞行问题上，已经花费了大量时间和金钱，而且有那么多杰出的科学家和发明家都在这方面进行过研究，包括达·芬奇、乔治·凯利博士、兰利教授、贝尔博士（电话发明人）、马克辛（机枪发明者）、查纽特、帕察斯（蒸汽涡轮发明者）、托马斯·爱迪生、李林塔尔、阿尔代、菲利普斯先生和许多其他人。”这些文献对他们帮助最大的是《航空年鉴》和《飞行机器的发展》。

看过这些资料之后，他们深深感到自己原来对航空知识的了解竟然是那样的少。通过研究这些资料，他们获得了重大教益。一是学到了许多基本的、系统的航空知识，特别是设计飞机所必须的基本部件和空气动力学知识，这使他们从一开始就有了较高的起点，避免了走很多的弯路；二是他们认识到飞机研制面临的重重困难，认识到前人存在的不足从而想到飞机研制应该采取正确的方法。

当时，一位名叫兰莱的发明家，受美国政府的委托，制造了一架带有汽油发动机的飞机，在试飞中坠入大海。莱特兄弟得知这个消息，便前去调查，并从兰莱的失败中吸取了教训，获得了很多经验，他们对飞机的每一部件进行了严格的检查，制定了严格的操作规定。

这是莱特兄弟与其他飞机研究者的不同之处。在他们之前，制造动力飞机的人很多，但很少有人认真研究并充分吸取前人或同时代人失败的教训。

■ 强调观察和实验的重要性

莱特兄弟对鸟类的飞行进行了大量观察。他们常常仰面朝天躺在地上，一连几个小时仔细观察鹰在空中的飞行，研究和思索它们起飞、升降和盘旋的机理。当年他们提出的许多新颖想法，都在以后的航空工业中得到了应用。例如，他们发现鸽子的翼尖沿着一个横向轴摆动，这样就可以控制它的横向平衡。莱特兄弟把这种方法成功地用于飞机设计上，就是所谓“翼尖曲翘”的控制方法。为了研究飞机的稳定控制性，1899 年莱特兄弟首先制作了一个 1.5 米宽的滑翔机，实际上有点像一只大风筝。目的是试验证明他们发现的保持平衡的翼尖曲翘方法的有效性。试验结果是肯定的，这给予他们极大的信心。

于是在 1900—1902 年间，莱特兄弟又先后制作了 3 架试验用的全尺寸滑翔机。用它们进行了无数次试验飞行，分别对展弦比、翼面积、翼面弯曲

度进行了调整，对水平安定面和垂直安定面进行了改装，使滑翔机的稳定性和操控性得到很大改善，升力也得到较大提高。在经历了多次失败和挫折后，到1902年9月末，用第3号滑翔机试飞，威尔伯·莱特的最好成绩达到26秒内滑翔190米，奥威尔·莱特的最好成绩达到21秒内滑翔188米。这个巨大的成功使得莱特兄弟极度兴奋，他们感到给飞机加装发动机的时机到了，决定向动力飞行进行最后的冲刺。

在此期间，为了获得设计飞机所需要的可靠的数据，莱特兄弟还进行了多次空气动力学的实验。特别值得一提的是，他们自制了一个小型的风洞，风扇功率1.5kW，长约1.5m，口径56cm×56cm，风速27km/h。他们用它进行了几千次实验，研究了200多种不同翼型，获得了大量数据，为他们以后的成功打下了坚实的基础。

在他们的动力飞机“飞行者1号”试飞取得具有巨大历史意义的成功后，莱特兄弟并没有满足，他们又设计制造了“飞行者2号”和“飞行者3号”，反复试验，不断改进飞机的性能，克服了快速转弯时的失速、失控的问题，使之能够做转弯和圆周飞行、倾斜飞行、8字飞行、重复起降。到1904年10月5日，飞行者3号的最好纪录是在38分2秒内飞行了38.6km。飞行者3号被看作世界上第一架实用动力飞机。

可以说，没有这些试验和实验，就没有莱特兄弟设计制造飞机的伟大成功。

3 影响

■ 20 世纪初

莱特兄弟在实现飞机发展的突破后，于1908年创建了世界第一家飞机制造企业——莱特飞机公司，并获得美国陆军订货，这标志着航空工业的诞生。紧随莱特飞机公司之后，美国和欧洲迅速出现了其他一些飞机制造企业。在这一时期，这些企业的规模一般都比较小，近似于作坊。很多企业和个人在世界飞机制造业发展进程中发挥了重要作用。有些企业发展延续到现在，如洛克希德公司和罗罗公司等；有些企业是经过整合后发展，如布雷盖公司和英国的几家飞机公司；也有很多企业消失。

第一次世界大战使航空工业实现第一次大发展。全世界的企业数量达到约200家，航空发动机厂80家，战争期间生产的飞机和发动机数量分别为

20 多万架和 23 万多台。在飞机发展方面，欧洲企业领先于美国，“一战”中的优秀作战飞机多是欧洲企业的产品。“一战”时期美国军用飞机发展相对滞后的原因主要是美国不是主要参战国，不像参战的欧洲国家那样全力发展军用飞机。还有一个原因是莱特兄弟提起飞机专利诉讼，阻碍了美国寇蒂斯等其他航空先驱的飞机产业发展。尽管欧洲个别企业也受此影响，但影响相对较小。

由于对航空意义和价值认识的不断提升，应用领域不断拓展，人们将更多的创造力和资源投入飞机制造和航空产业发展。材料与工艺、飞机发动机、导航仪表与操纵系统、仿真训练设备等技术发明与创新不断取得进展。第二次世界大战中，交战双方为制空权进行了激烈竞争，更刺激了航空技术与飞机制造产业的快速发展。至第二次世界大战结束，飞机发动机功率已从不到 10 kW 增加到 2500 kW，最大平飞时速已近 800 km/h，俯冲速度已近音速。^①

■ 飞机制造业的战略地位

自从飞机发明后，日益成为当代不可或缺的运载工具，改变和促进了人类文明进程。飞机制造业是国家战略性产业，对国家军事安全有重大影响，对经济和科技发展有重大推动作用，配装航空武器系统的空中力量对战争胜负具有关键性甚至决定性的作用。在民用领域，航空运输是目前最快捷、最高效的交通运输系统，随着经济全球化的进一步深入以及社会进步和技术发展，航空运输将有更大的扩展空间。军民用飞机的市场需求巨大，其价值和附加值极高，对经济发展有着重大贡献。而且航空科技高度复杂，其发展能够有力推动相关科技的发展和突破。^②

因此，尽管飞机制造业已有百年的发展历史，其地位和作用不但没有减弱，反而不断提升，未来前景更加广阔。

■ 飞机制造业的规模

目前，美国飞机制造业直接从业人员 40 万～45 万人，年产值 2500 亿～3000 亿美元。欧盟 27 国飞机制造业直接从业人员 35 万～40 万人，年产值 2000 亿～2500 亿美元。加拿大飞机制造业直接从业人员约 8 万人，年产值约 300 亿美元。日本飞机制造业直接从业人员约 3 万人，年产值约

① 路甬祥. 从航空航天先驱得到的感悟 [J]. 科技导报, 2014, 32 (11): 15-20.

② 赵长辉, 段洪伟. 从莱特兄弟突破到跨国整合: 飞机制造业百年简史 [J]. 中国工业评论, 2015, (8): 94-103.

120 亿美元。巴西飞机制造业直接从业人员约 3 万人，年产值约 100 亿美元。中国飞机制造业直接从业人员约 40 万人，年产值约 400 亿美元。

三、产业创新：福特公司的T型车

福特公司的 T 型车是世界上第一条流水线上装配而成的汽车。福特通过改变生产方式，提高 T 型车产量，从而使价格不断降低成为了现实。全新的 T 型车被称为“便宜小汽车”，走入寻常百姓家，获得了前所未有的销售量。从此以后，人类的生活方式和思维方式发生了天翻地覆的变化，汽车时代到来了。称 T 型车为 20 世纪最重要的汽车产业创新毫不为过。

1 过程

19 世纪末 20 世纪初，内燃机已经被发明与使用，并成功运用在汽车上。圆转炉提高了铸铁的效率，之后，更加先进的平炉炼钢工艺迅速成为美国钢铁生产的主要方法。把铁矿石炼成钢铁的鼓风炉越造越大，1860 年每周只能生产 100 吨，到第一次世界大战时的日产量已达到 1000 吨。1900 年随着美国南部石油油田不断发现，石油产量取得很大的提升，从而其价格大幅度降低，大部分工业和家庭开始选择石油作为其动力和取暖原料，使用石油成为众多交通工具的动力选择。20 世纪初，美国一跃成为全球最大的经济体。1900 年，美国的人均收入比英国多 100 美元，是法国的近 2 倍，是日本的近 10 倍。国民收入远高于其他国家，实现了国家富裕，大众富裕。购买汽车成为美国民众潜在的主要消费方式。

1895 年，杜里埃兄弟建立了美国第一家制造汽油引擎的汽车工厂。然而，直到 20 世纪初，汽车仍然停留在奢侈品的层面，只有富人买得起。

亨利·福特（Henry Ford）发誓要“制造一辆为大众服务的汽车”。在威尔斯（Childe Harold Wills）的协助下，1908 年 3 月，福特终于成功地推出了设计简洁、价格低廉、耗油量小的 T 型车。T 型车是一种简化了的厢式小轿车，全部黑色。T 型车的推出，迅速打开了市场，在其持续的 20 年里，外观没有太大变化。1913 年，T 型车的销量达到 168 220 辆，供不应求。新的生产方式势在必行。

从 1913 年年初开始，福特汽车公司摒弃了旧式的静态组装法，首创一

种动态的生产组织方式：在工厂上部完成各个零件的加工制造之后，通过传送机、管道等方式，运送到下部的各个楼层的生产车间。这些零部件及所有的必需品，全部提前堆放在沿线选定的位置上。将汽车车身和底盘一排 60 个依次摆开，分别安放在“木马”上，“木马”被放在传送轨道或传送带上，由卷扬机钢索缓缓牵动。受过训练的组装工，每个人只需完成一项简单的任务，随工件移动，时而行走，时而“乘坐”，按程序进行整车的装配。而汽车零部件则按领班和管理人员控制的速度送给工人。这就是如今尽人皆知的“流水线”。在当时，这可是独树一帜。

福特聘请了当时最著名的建筑设计师艾伯特·卡恩，专门设计并建造了高地公园（High-land Park）工厂。经过不断地试错，1913 年 8 月，“流水线”大批量生产方式正式投入运行。装配一辆 T 型车整车所耗费的时间就从原来的约 12.5 小时缩短为 5 小时，1925 年 10 月又降至惊人的 10 秒钟。流水线生产方式使福特公司的汽车产量从 1908 年的 6 158 辆猛增到 1917 年的 815 931 辆，10 年间增长 130 倍。

每辆 T 型车的成本和售价也相应地大幅下降，售价从 1910 年的 780 美元，降至次年的 690 美元，到 1914 年已降至 360 美元。1923 年，一辆 T 型车售价降到了 265 美元。这个价格已经够低的了，已经在很多人的购买力之内。

然而，福特还不满足。1914 年，他把自己工人的薪酬提高了一倍，在福特公司实行 5 美元/日的工资制。这在很广的范围内带动了一次加薪风潮。与此同时，另外一个效果显现出来——想想看，只要花费 3～4 个月的工资，就可以买一辆全新的 T 型车！事实上，相当大的一部分增发的薪酬，又以购买 T 型车的方式，回到了福特的腰包。狡猾的福特用这一招“欲擒故纵”，为汽车的大众消费运动起了推波助澜的作用。T 型车真正做到了走入寻常百姓家。

1921 年，T 型车产量已占到世界汽车产量的一半以上。从 1908 年第一辆 T 型车面世到 1927 年停产，T 型车的销售数量多达 1500 万辆。福特流水线成为标准化产品的机械化生产的代名词。

2 启示

■ 个性决定创新

在创新的研究中，创新者的个性往往被忽视了。然而，创新在很大程度上

上是一种创新者的心理活动，是个性的结果。在 T 型车的创新过程中，福特的个性扮演了重要角色。甚至可以说 T 型车的创新在一定程度上就是福特个性的体现。福特的个性表现在节俭、朴素、实用、大众化等方面。他生于农家，长期做工，具有百分之百的当时普通人的价值观念。恰恰是这种价值观孕育出了福特颇合时宜的汽车创新理念。这就是汽车要造得“更多、更好、更便宜”。福特曾不止一次表述他的这一理念：“我将为广大的民众生产汽车。它将大得足以供家庭使用，同时又小得足以让一个人驾驶和保管。它将用最好的材料制造，由最好的工人制造，根据现代机械能提供的最简单的设计制造……但它的价格将如此低廉，让任何一个有一份好工作的人都能拥有一辆，并和他的家庭在上帝展示的巨大空间里享受美好的时光。”最终，他造出了“让农夫们不再存有戒心的车子（就在几年前，乡下人还会设置路障，不让汽车通过）”。他还建立了一个遍布各地的经销商网络，“让即使边远地区的美国人也能像买双雨靴那样容易地买到 T 型车”。

个性决定创新的例子，在产业界一而再再而三地出现。在中国，史玉柱的巨人王朝、马云的阿里帝国都是他们个人性格的外在体现。在外国，百年老店的诞生也往往和创始人的性格息息相关。对此，我们不能不对产业革命中的典型人物的性格进行深入研究，以更加准确地揭示这一过程中创新活动的内涵。

■ 产业创新需要突破性思维

在产业层面的创新，需要原始思维模式的突破性，这往往需要在原理、技术、方法等某个或多个方面实现重大变革。当其他厂家依然靠手工生产汽车时，福特创造性地将“流水线”的概念付诸实施，改革了工业生产方式。他用动态模式取代了静态模式，把连续生产和自动化、专业化生产集中在一起，形成流水线的装配作业。这既降低了成本，也推动了汽车产业的进步，美国进入了汽车普及时代。

3 影响

■ 工业生产方式的变革

流水线装配模式被称为“福特生产方式”或“福特主义”。流水线装配模式的方法对美国乃至全世界的商业规范产生了地震般的冲击，迅速席卷了工业化世界。T 型车为汽车工业的技术发展选定了模式。福特让汽车从“贵

族”变成了“平民”，这是制造业中的伟大变革，是从手工作坊工业向机器工业迈进过程中关键的一步。“福特制”的汽车生产模式不仅给公司自身创造出了滚滚利润，更重要的是为年幼的工业经济开辟了一条大规模生产的新路，改变了整个社会的经济结构和产业形态。美国借助于汽车产业的技术创新，开始建立现代化的工业大生产方式，并在最短的时间内把最新的科学技术转变为关联产业广、工业技术波及范围大的综合性工业，同时又在生产过程中不断创新、发明和改进。

■ 汽车市场的大众化需求觉醒

T型车成了真正的大众消费品。^①在对经济结构和产业形态带来重大变革的影响上，福特汽车公司创造了一个巨大的永久性汽车市场，带动了全球汽车产业的发展。1999年第11期《财富》评选亨利·福特为“世纪商业巨人”，并称“他是我们所见到的最伟大的企业家。他创造了一个巨大的市场，并且知道如何满足这个市场的需求。”福特公司直接造就了千千万万的有车阶级，促进了美国中产阶级数量的不断膨胀。他创造了一个大众消费的社会，这在当时还是一个全新的观念，而在今天，已经成为美国经济的一个突出特点。

四、文化创新

文艺复兴是发生在公元14世纪到16世纪、起源于意大利、后来遍及欧洲的一次重大的新文化运动。在这一时期，欧洲的古典学术得以复兴，文学、哲学、艺术等领域再一次达到难以企及的高峰，并创造出令人惊叹的成就。与此同时，欧洲的生活水平得到大幅提升，教育得到重大的发展，自然科学也产生巨大的进步。

1 过程

西欧的中世纪是个特别黑暗的时代。天主教教会成为当时封建社会的精神支柱，它建立了一套严格的等级制度，把上帝当作绝对的权威。什么文学、什么艺术、什么哲学，一切都得按照基督教的经典《圣经》的教义，谁都不可违背，否则，宗教法庭就要对他制裁，甚至处以极刑。在教会的管制下，

^① 曹东溟，关士续. 美国汽车产业技术创新史上的三个案例 [J]. 科学技术与辩证法，2005，22（2）：105-108.

中世纪的文学艺术死气沉沉，万马齐喑，科学技术也没有什么进展。黑死病在欧洲的蔓延，加剧了人们心中的恐慌，使得人们开始怀疑宗教神学的绝对权威。

在中世纪的后期，资本主义萌芽在多种条件的促生下，于欧洲的意大利首先出现。资本主义萌芽的出现为思想运动的兴起提供了可能。城市经济的繁荣，使事业成功、财富巨大的富商、作坊主和银行家等更加相信个人的价值和力量，更加充满创新进取、冒险求胜的精神，多才多艺、高雅博学之士受到人们的普遍尊重。这为文艺复兴的发生提供了深厚的物质基础和适宜的社会环境。人们开始追求文学艺术的繁荣昌盛。

14 世纪末，由于信仰伊斯兰教的奥斯曼帝国的入侵，东罗马的许多学者带着大批的古希腊和古罗马的艺术珍品和文学、历史、哲学等书籍，纷纷逃往西欧避难。后来，一些东罗马的学者在意大利的佛罗伦萨办了一所叫“希腊学院”的学校，讲授希腊辉煌的历史文明和文化等。这种辉煌的成绩与资本主义萌芽产生后人们追求的精神境界是一致的。在古希腊和古罗马，文学艺术的成就很高，人们也可以自由地发表各种学术思想，这与黑暗的中世纪形成了鲜明的对比。于是，许多西欧的学者要求恢复古希腊和古罗马的文化和艺术。这种要求就像春风，慢慢吹遍整个西欧。文艺复兴运动由此在各个领域兴起。

在文学领域，各地的作家都开始使用自己的方言而非拉丁语进行文学创作，带动了大众文学，各种语言注入大量文学作品，包括小说、诗歌、散文、民谣和戏剧等。在意大利，文艺复兴前期出现了“文坛三杰”。但丁一生写下了许多学术著作和诗歌，其中最著名的是《新生》和《神曲》。彼特拉克是人文主义的鼻祖，被誉为“人文主义之父”。他第一个发出复兴古典文化的号召，提出以“人学”反对“神学”。彼特拉克主要创作了许多优美的诗篇，代表作是抒情十四行诗诗集《歌集》。薄伽丘是意大利民族文学的奠基者，短篇小说集《十日谈》是他的代表作。在法国，文艺复兴运动明显地形成两派，一是以“七星诗社”为代表的贵族派，二是以拉伯雷为代表的民主派。拉伯雷是继薄伽丘之后杰出的人文主义作家，他用 20 年时间创作的《巨人传》是一部现实与幻想交织的现实主义作品，在欧洲文学史和教育史上占有重要地位。在英国，代表人物有托马斯·莫尔和莎士比亚。托马斯·莫尔是著名的人文主义思想家，也是空想社会主义的奠基人。1516 年他用拉丁

文写成的《乌托邦》是空想社会主义的第一部作品。莎士比亚是天才的戏剧家和诗人，他同荷马、但丁、歌德一起，被誉为欧洲划时代的四大作家。他的作品结构完整，情节生动，语言丰富精练，人物个性突出，集中地代表了文艺复兴时期文学的最高成就，对欧洲现实主义文学的发展有深远的影响。在西班牙，最杰出的代表人物是塞万提斯和维加。塞万提斯是现实主义作家、戏剧家和诗人。他创作了大量的诗歌、戏剧和小说，其中以长篇讽刺小说《堂吉珂德》最著名，它对欧洲文学的发展产生了重大影响。

达·芬奇是意大利文艺复兴时期的一位多项领域博学者，他同时是建筑师、解剖学者、艺术家、工程师、数学家、发明家，他无穷的好奇与创意使得他成为文艺复兴时期典型的艺术家，而且也是历史上最著名的画家之一。同时，他也是意大利文艺复兴时期最负盛名的美术家、雕塑家、地理学家、科学家、文艺理论家、大哲学家、诗人、音乐家和发明家。正因为他是一个全才，所以他也被称为“文艺复兴时期最完美的代表人物”。壁画《最后的晚餐》、祭坛画《岩间圣母》和肖像画《蒙娜丽莎》是他在绘画领域的三大杰作。此外，米开朗琪罗的《创世记》和《末日审判》也是杰出的代表。

基于对中世纪神权至上的批判和对人道主义的肯定，建筑师希望借助古典的比例来重新塑造理想中古典社会的协调秩序。所以，一般而言，文艺复兴的建筑是讲究秩序和比例的，拥有严谨的立面和平面构图以及从古典建筑中继承下来的柱式系统。作为其中的杰出代表，米开朗琪罗并不是一个专业的建筑师，而是一个伟大的雕塑家。而正因为这一点，他避免了过分纠缠于比例之中的弊端，而从一个雕塑家独特的三维视角来提炼建筑。他利用各种手法，比如破坏均衡，或者是利用狭长的走道或者柱廊，来达到一种感动人心的建筑效果，而对于是否符合严格的古典比例却不是很有在意。例如，用于圣彼得大教堂的巨柱，便是他将普通柱式拔高几倍而得到的。此外，他的《哀悼基督》和《大卫》也是举世闻名的雕塑作品。

在其他的领域，复兴运动也在广泛地发生。

在天文学领域，波兰天文学家哥白尼出版了《天体运行论》，在其中提出了与托勒密的地心说体系不同的日心说体系。意大利思想家布鲁诺在《论无限性、宇宙和诸世界》《论原因、本原和统一》等书中宣称，宇宙在空间与时间上都是无限的，太阳只是太阳系而非宇宙的中心。伽利略发明了天文望远镜，出版了《星界信使》《关于托勒密和哥白尼两大世界体

系的对话》。德国天文学家开普勒通过对其老师、丹麦天文学家第谷的观测数据的研究，在《新天文学》和《世界的和谐》中提出了行星运动的三大定律，判定行星绕太阳运转是沿着椭圆形轨道进行的，而且这样的运动是不等速的。

代数学在文艺复兴时期也取得了重要发展。意大利人卡尔达诺在他的著作《大术》中发表了三次方程的求根公式，但这一公式的发现实应归功于另一学者塔尔塔利亚。四次方程的解法由卡尔达诺的学生费拉里发现，在《大术》中也有记载。三角学在文艺复兴时期也获得了较大的发展。

在物理学方面，伽利略通过多次实验，发现了落体、抛物体和振摆三大定律，使人对宇宙有了新的认识。他的学生托里切利经过实验证明了空气压力，发明了水银柱气压计。法国科学家帕斯卡发现了液体和气体中压力的传播定律。英国科学家波义耳发现了气体压力定律。

此外，在生理学、医学、地理学、印刷术等领域，欧洲都取得了长足的进步。

2 启示

■ 创新必须要有传承

文艺复兴所取得的成就是建立在对古希腊、古罗马文化的继承和发扬的基础上的。正如牛顿所说：“如果说我看得更远一点的话，那是因为我站在巨人肩膀上的缘故。”任何创新，都需要继承前人的成果——这包括科学发现、技术进步、产业变革、制度革新，当然，也包括文化艺术领域的进步。

人类已经有超过五千年的文明史，不论是东方的四大文明古国，还是西方的古希腊、古罗马、迦太基文明，以及美洲大陆的印加、玛雅、阿兹特克文明，都创造并积累了灿烂、丰富的文化。文艺复兴名义上倡导的是恢复古希腊、古罗马的荣光，可实际情况是，当时的资产阶级还没有自己的一套文化体系与教会抗衡，而古希腊、古罗马文化中的一些崇尚自由、理性的思想也被新兴资产阶级所认可，所以他们以复兴古希腊、古罗马文化为旗号，实际上宣扬资产阶级的文化主张，指出应以人为中心而不是以神为中心，肯定人的价值和尊严，倡导个性解放，反对愚昧迷信的神学思想。这就是以继承为基础的文化创新。其中，在绘画、雕塑、建筑、文学等人文社会科学领域，

都产生了大量的延续性创新，甚至突破性创新。而在医学、生理学、地理学等自然科学领域，颠覆式创新更是层出不穷。

作为一次以复兴传统的名义进行创新的运动，文艺复兴并不是第一次，肯定也不是最后一次。然而，为什么要这样？为什么不能直截了当、旗帜鲜明地打出“文艺创新”甚至“文艺革命”的旗号？在人类的发展史上，我们总是能看到阻挡进步的力量——反对先进，反对民主，反对自由，甚至反对文明本身。很多时候，要想和这些力量硬碰硬、掰手腕是不明智的。最好的办法就是走迂回路线，以“回归传统”的名义，开展实质上的创新。这种方法本身也算是一种创新。

■ 文化领域的颠覆式创新更需要人的个体的创新思维

文化活动和其他领域的活动的一个重要区别在于，文化活动更多地依赖于从业者的个体脑力活动，跟创意紧密地结合起来。相比而言，科学、技术、产业、制度领域的创新活动更多地依赖物质资源的投入，例如仪器仪表、机械设备、工具方法、大规模流水线，等等。因此，文化领域的创新也就更依赖人的个体的创新思维，包括创造性思维、批判性思维、整合性思维。

在达·芬奇创造《蒙娜丽莎的微笑》的时候，那一抹神秘的微笑究竟从何而来？最初的灵感究竟是如何生成的？在历史上，从来没有一个绘画作品能给大众展示这么摄人心魄的微笑。这一创新的来源是什么？其过程又是怎样的？这种创新的基础——作者的神经活动——究竟是怎么样的？这一切问题，最终都指向创新者的个体思维。

牛顿提出万有引力定律，据说是由于坐在苹果树下，被一个熟透了的苹果掉下来砸到脑袋的缘故。这一说法究竟是否属实姑且不论，这个故事的内涵的确是引人深思的。创新者的灵感的来源，永远是值得研究的问题。

■ 创新需要百花齐放

在人类历史上，有过若干次的思想大碰撞、文化大发展的时代。在西方，古希腊时代见证了哲学思想的大跃进，文艺复兴时代见证了人文艺术以及自然科学的大发展；在东方，春秋战国时期也出现了诸子百家彼此诘难、相互争鸣的盛况空前的局面。越是在这样的多样化思想盛行、争论遍地开花的时期，思想的碰撞才越发地直击要害，才越有可能迸发出突破式创新的绚烂火花，包括亚里士多德的原始的唯物主义思想、达·芬奇的蒙娜丽莎的微笑，以及孔子的仁义礼智信。

3 影响

■ 构建了一种新文化^①

一场伟大的思想文化运动在思想领域里的重大意义，莫过于构建一种新的文化并促进当时社会的发展。文艺复兴是人类历史上文化领域从没有经历过的最伟大的、进步的创新。文艺复兴首次充分地展现了自我，其所提倡的“人”的因素构成了欧洲近代思想的基础。文艺复兴的仁人志士以各种文学艺术和科学研究的形式，赞美人生和世俗生活，主张放弃追求虚幻的天堂，蔑视来世主义和禁欲主义，以人道反对神道，以人性反对神性，进而推翻了中世纪神权与封建制度的权威，开始解除中世纪宗教或者上帝对个人绝对自由的约束，建设一种以个人主义为基准的追求理性、平等、自由的新文化，为现代意义的“人”的诞生提供了前提。

■ 促进了欧洲主要国家社会制度的转变

在社会面临生存困境的大转折时期，能否正确地认识“人”直接关系到社会发展的方向。文艺复兴从人的角度出发来阐释政治信仰，为新兴的资产阶级革命提供了理论学说；提倡探索人和自然界的奥秘，追求科学真理，也为近代自然科学的大发展打下了坚实的基础；否定封建贵族特权，鄙视门第，讥讽和抨击教会僧侣的愚昧无知，实现了思想文化领域的伟大变革，为资产阶级登上政治舞台作了思想文化上的准备。欧洲主要国家的社会制度由封建主义转入资本主义时代，文艺复兴的启蒙精神在此前作出了不可估量的重大贡献。

■ 推动了社会生活方式的变革

文艺复兴时期，意大利人摒弃了传统文化中那种克制己欲、希冀来世、崇信教会的生活观，树立起新的社会生活观念。他们蔑视教会，怀疑宗教说教，否认门资，重视教育，强调个性发展，肯定财富和职业成就，极力追求尘世的幸福。人们的生活方式和价值观念都经历了急剧的变革，这使得整个社会的风气、风尚、生活方式、个人行为举止有了很大的改变。一方面，城市生活呈现出一种充满活力的新风貌。城市居民对现世美好生活表现出了极大的热情，富裕的城市工商业者在城市政治生活与文化生活中发挥了主导作用，他们为了现世的利益和享乐而勤奋劳动着，而不是像中世纪那样为了灵

^① 杨贺男，唐伟. 文艺复兴启蒙精神及其历史定位 [J]. 江西社会科学，2010，（7）：167-170.

魂的得救和来世的幸福才劳动。另一方面，文艺复兴时期的家庭生活发生了变化。教育从被压制转化成由权威来进行，婚姻观念被男子的个人成功奋斗和晚婚观念所取代。这一切都是在启蒙精神引领下表现出的社会生活的诸多崭新特性。人类的社会生活也由此进入了一个新纪元。

五、体制创新

1688年，英格兰的资产阶级和新贵族迎立信奉新教的詹姆士二世长女玛丽和女婿威廉（William III）（奥伦治亲王）为英国的女王和国王。1689年，英国议会通过具有重大影响的《权利法案》，实现了资产阶级和新贵族长期追求限制王权、议会至上的目标，使政权的重心在保留君主的表象下转向议会。这标志着英国确立了君主立宪的政体，实现了传统政体向现代政体的转变。这在当时深刻地影响了英国乃至世界的政治制度现代化发展趋势，是体制上的一大创新。

1 过程

英格兰的君主立宪制的建立有着非常深厚的政治、社会和经济背景。

西罗马帝国灭亡之后，整个西欧在很长一段时期里，频繁地遭到外族的入侵，“这个时候，人们会热烈希望出现一个平息天下的君主。”^① 恩格斯曾说：“在这种普遍混乱的状态中，王权是进步的因素。”^② 英国王权就是在这种普遍混乱的状态中建立起来的。自诺曼征服以来，英王就一直保持对全体居民的直接权力和对地方的有效控制。特别是经历了中世纪的政府机构改革，王权得到极大的加强，国王在议会中占据主要地位。然而，随着资本主义的发展和资产阶级新贵族参政意识的增强，下院的独立意识逐渐加强，王权尽量限制议会，而议会则力图挣脱一切限制，议会与王权的斗争开始展开。

伊丽莎白统治晚期，王权已有衰落趋势。詹姆士一世（James I）即位后，不能容忍资产阶级的日益壮大和独立性的增强。但是詹姆斯一世却长期被财

① 基佐. 欧洲文明史 [M]. 北京: 商务印书馆, 199: 52-53.

② 马克思恩格斯全集: 21 卷 [M]. 北京: 人民出版社, 1965: 453.

政问题所困扰，只能召开议会，要求批准增加新税。议员们无视国王的征税要求，着重讨论议会特权问题，批评国王的内外政策，导致詹姆斯一世两度解散议会。查理一世（Charles I）即位后，专制统治有增无减，屡次解散议会。议会为了维护自己的合法权益，于1628年向国王提出《权利请愿书》。为了换取议会拨款，查理一世被迫签署该法令。可是，1629年他又下令解散议会。1640年4月，为筹集军费对付苏格兰人民起义，查理一世再次召开了长期关闭的议会。但议会没有满足国王的要求，反而大肆抨击政府暴政，国王无奈在5月立即解散议会（史称“短期议会”）。随着苏格兰军队的再次进攻，英格兰军队的节节败退，查理一世进退维谷，在1640年11月重新召集议会（史称“长期议会”）。这一次，议会显示了空前的革命性，决议处死查理一世的两个宠臣，向国王公开挑战，王权受到严重的削弱。查理一世不甘心失去权力，率领卫队闯入下院，首先用武力对付议会。国王与议会的斗争开始诉诸武力。

随着议会与王权矛盾尖锐化，内战终于爆发。议会形成了三大派别：代表大资产阶级和大贵族利益的长老派，代表中等资产阶级和新贵族利益的独立派，以及代表城乡小资产阶级利益的平等派。内战初期，长老派控制了议会军的领导权，他们态度暧昧，希望能在国王做出让步的情况下与其言和，致使战场上议会军处处被动。议会军广大官兵对长老派妥协的态度极为愤慨，较为激进的独立派和平等派与长老派展开了一系列斗争。1645年，议会通过《自抑法》改组军队，组建“新模范军”，克伦威尔（Oliver Cromwell）拥有实际上的指挥权。通过纳斯比荒原战役打败了王党主力，取得了第一次内战的胜利。

第二次内战期间，长老派仍坚持同查理一世谈判，要他在接受条件后复位，士兵和下层人士对此强烈不满。通过“普莱德清洗”，克伦威尔控制了议会。在平等派的推动下，1649年，克伦威尔采取了断然措施，把国王作为“暴君、叛徒、杀人犯和我国善良人民的敌人”送上断头台。之后，又宣布废除上院，实行一院制，以法律的形式宣告英吉利共和国的成立，旧的上层建筑被推翻，新的资产阶级上层建筑得以建立。

共和国建立后，克伦威尔自封为护国公，实行军事独裁，居于统治地位的独立派开始扼杀革命的发展。克伦威尔死后，英国各种势力处于对抗状态。各阶级阶层和利益集团围绕着王权的归属展开了激烈的斗争。资产阶级和新

贵族渴望建立一个强有力的政权，遏制人民的斗争和保护他们既得的利益。在这种情形下，1660年，资产阶级和新贵族与国王达成了妥协——斯图亚特王朝复辟。重新上台的詹姆士二世非常反动，他不仅要恢复旧制度，并要恢复早为亨利八世抛弃了的天主教。

新贵族与资产阶级为了既除掉詹姆士二世，又避免一场新的群众斗争，便与部分封建土地所有者妥协，发动了1688年政变（即“光荣革命”），迎立詹姆士二世的女儿玛利及其丈夫、荷兰的执政奥伦治亲王威廉，实行双王统治，即玛利二世和威廉三世。随后，1689年议会通过《权利法案》，规定了议会的权力和国王的权限，如未经议会同意，国王不得任意下令废止法律，不得任意征税，不得任意招募军队、维持常备军等。可见，它对国王服从宪法、依法而治以及由资产阶级掌握立法权方面，规定是明确、完备而且系统的，毫无妥协的余地。在立宪制度下，君权被大大削弱。这样，终于确立了国会至上的原则，国王手中只剩下了行政权，而且这种权力越来越多地交给日益完备的内阁。

这样，1688年的政变就在英国确立了有限制的君主制，威廉三世和玛利二世就成了英国历史上最早的立宪君主。王权逐渐受到议会的制约，议会高于王权的原则也逐渐得到了确立。

2 启示

■ 体制创新必须适应经济基础

英国革命最终以君主立宪制的确立而告终，是由当时的经济基础决定的，是合理选择的结果。英国资产阶级革命爆发前，资本主义生产关系已深入英国农村，商品经济有了很大发展。但是，不能过分夸大当时英国工业的发展水平。一般来说，在资本主义手工工场发展阶段和工业革命初期阶段，在经济上，资产阶级主要是剥削绝对剩余价值。那时还没有先进的技术及科学的管理制度。工人与资产阶级矛盾加剧，再加上资产阶级本身力量有限，因此，资产阶级在政治上倾向于立宪。也就是说，英国实行君主立宪制，是由当时的经济基础决定的。如果超越了这种经济基础，其选择结果是不会长久的。所以，英国政体几经反复，经历了共和政体、军事专制、王权复辟，最后确立了君主立宪制，其中共和制只存在了近十年便面临危机，其中的原因之一就是这种共和制缺乏足够的社会经济基础。旧式君主制和共和制失败

之后，英国的政体沿着“否定之否定”的逻辑走向了君主立宪。

君主制的保留是由英国当时的客观实际决定的。君主立宪制符合 17 世纪英国的国情，代表了社会各阶层的利益，具有最好的经济基础。

■ 体制创新必须适应历史文化传统

君主立宪制在英国的确立，受民族心理二重性冲突的影响很大。英国的封建制度是“一切从头做起的”，是从盎格鲁－撒克逊的氏族公社制度直接过渡来的。早期国王都几乎仅是军事酋长，只是随着封建制度的确立，“部族的私人的王权才渐渐地发展成领域的系统的王权”。与法国不同，英国的法律基础不是古代的罗马法，而是日耳曼人的习惯法。习惯法是民众的惯例，要在法庭中宣布，并代代传下去。因此英国法律具有广泛的民众性。尽管盎格鲁－撒克逊时期诸王国也曾编定法典，但它不是由国王单独制定的，而是与贵族议会共同讨论制定的，或只是收集前人各种法律经讨论加以整理，然后颁布施行。这是英国“王在法下”或法律高于一切的根源和发端。威廉一世不得不入乡随俗，在 1066 年加冕礼中宣誓尊重英国的古老法律。后来的亨利二世注重法治，使英国人尊重法律，使法治观念深入人心。约翰王也被迫签署了“大宪章”，体现了英国习惯法的法治传统，君主与臣民都要受习惯法的约束。

与后来的法国资产阶级革命、美国的独立战争不同，英国国会从早期从属于王权，到后来限制、监督王权以致最后《权利法案》中议会高于王权的原则，经历了几百年的演变过程。英国国民尤其是资产阶级和新贵族的利益，尽管长期受到封建统治的侵害，但由于与王权长期的联盟关系，形成了很深的王权政治观念，仍然强烈的“依恋着君主制和旧的宪政传统”。这种历史传统使上至达官贵人，下至平民百姓，几乎人人都有“君主至上”的思想，同时又根深蒂固地树立起君主要受法律约束与议会限制的观念。这正是 17 世纪革命中，资产阶级和新贵族的种种宪政尝试失败后选择君主立宪制结局的历史渊源。这种符合实际情况的选择，与当时人民的承受力相称，从此“在英国才开始了资产阶级社会的巨大发展和改造”。用法国革命彻底的民主共和结局、美国独立战争的联邦共和结局来强求英国革命，是不切实际的。与其他领域的创新相比，必须更加紧密的符合社会、文化、传统等实际情况，这是体制 / 制度创新的一大特点。

事实上，革命开始时，资产阶级的各个阶层和派别，基本上都是君主立

宪派，几乎没有人从一开始就提出共和制，只不过随着斗争的激化，到了不废除王权就不能保卫自己取得的革命成果时，共和国的口号才真正被提上日程，并得到一部分人的支持。而当这个“没有国王和上院”的一院制共和国在“还没有形成一个能起领导作用的有效政府的轮廓”时就过早诞生的时候，它与社会和时代的不相适应性很快表现出来，共和政体难以维系。从当时的社会反应来看，真正仇视君主立宪制的只有冥顽不化的封建派，而主张立宪的人却得到了广大人民群众的支持。

英国民族的心理是实行君主立宪制不容忽视的因素。到革命后期，一方面，人人心中逐步形成一种想法，那就是：议会执掌无所不包的权力，这是合乎法律的，而且是所必需的；另一方面，一个贤明善良的君主仍被认为是人民的幸福。英国曾流行这样的名言：“当国王在白金汉宫时，全国人民睡得更安静更和平。”英国资产阶级也是如此，在一般情况下，他们是十分尊敬国王的。“没有国王就没有议会”的传统思想颇为顽强。只有当其侵犯他们的财产时，他们才会奋起反对。这种尊崇王室的心理在欧洲各国也是普遍的。

国王依法统治国家，以民族利益的代表行使权力，而人民在尊重法治的传统下服从国王统治；当社会经济发展，人们从中得到实惠时，人民很容易将此视为皇室的恩泽，使得忠君思想具有更加浓厚的精神基础。君主制的保留是由英国传统决定的。君主立宪制考虑了当时英国人民的心理承受力。因可以说，君主立宪制是英国资产阶级和新贵族在当时的历史条件下做出的最佳选择。

3 影响

■ 英国的国家实力增强

英国王室在实现民族意志、维护国家统一、发展社会经济等方面做出过杰出贡献。在君主立宪制确立之后，英国社会长期动荡不安的局势就稳定下来。此后，英国再也没有发生过革命。政局稳定成为近代英国的一个重要特征。英国的国家实力迅速增强。随着政治制度的完善，在不久以后的18世纪中叶，英国就率先发生了工业革命。科学技术的革新推动了生产力的发展。

“英国的优势地位在18世纪归于优越的政治制度”。君主立宪制使英国在世界工业化的过程中独领风骚，取得了辉煌的成就。英国从此以后凭借强大

的舰队和雄厚的经济实力疯狂对外扩张，投入的战争包括第一次鸦片战争、第二次鸦片战争、八国联军侵华等。到 20 世纪初，英国的势力范围已扩展到占全球陆地面积的 1/4 和世界人口的 1/4，成为不可一世的“日不落帝国”。

■ 君主的偶像作用确立

英王作为国家元首，终身任职，王位由皇家内部自主延续。国王不属于政党，不偏向任何党派。君主虽高居权力之巅，但只是一个偶像，英王极少卷入政治党派争权夺利的斗争。英王是“政治体制中扎根很深的遏制机器的组成部分”，“能在出现冲突和危机的情况下发挥巨大的影响”。按照英国政治学家的权威性表述，女王有被咨询权、鼓励权和警告权。当政治斗争发展到引起政府危机时，英王能够充当仲裁人，起到恢复民主程序、稳定政局的作用。而在对外扩张的时候，英王又扮演着偶像的角色，成为英国海外军队这部庞大机器投入战争的巨大推动力和精神支柱，“为女王陛下而战”成为英国军人至高无上的荣誉。

■ 对各国社会变革的示范作用

17 世纪率先发生于英国的资产阶级革命，是人类社会上一次重要变革。其建立的君主立宪制，是人类历史上政治体制的一次重要创新。自此，法国、美国等西方国家资产阶级革命相继展开，建立了各种形式的资本主义民主国家。在亚洲，日本面对西方列强的侵略，效仿英国建立了一个二元制的君主立宪国家，使其迅速成长为资本主义强国。英国的君主立宪制对西方国家的社会变革起到了极大的推动作用。对于清末中国这样的第三世界国家，英国用坚船利炮打开中国国门，促使忧国忧民的中国士大夫开始重新审视清政府，对中国社会变革产生了巨大的影响。清末出现了两次立宪高潮，即“戊戌变法”和“清末新政”。

The background features several 3D wireframe geometric shapes, including cylinders and cubes, rendered in a light gray color. These shapes are arranged in a way that creates a sense of depth and perspective, with some appearing to recede into the distance. The overall aesthetic is clean and modern, typical of a technical or digital theme.

第二章

技术的进步： 从刀耕火种到数字化生存

今天的人在谈论创新的时候，往往指的是那些能够提高产品质量或者改善生产工艺的活动，而这又会必然导致社会福利的提升。今天的企业或个人在面对创新的技术的时候，往往抱着一种想法：这个技术能否投入生产活动、并且带来价值？如果是，那么这种创新的技术就很有可能受到关注（往往是投资）。

不过，对于几百、几千甚至几万年前的我们的祖先来说，他们的生产活动可能还没有跟生活活动那样泾渭分明，也就难以把一种创新的技术投入所谓的“产业化”。更多地，他们依靠的是自己的本能——一开始是生物的本能，后来则是社会活动的本能。

第一节

解放体力：石器，火

一、石器的出现——最早的技术创新

很久以前，东非的古猿还在茹毛饮血，过着平静的生活。平时的食物主要是野果、树叶。虽然靠这些花花草草来填饱肚皮是绰绰有余的，然而这些古猿更向往的还是羚羊、角马的肉，那可是难得的美味。靠狮子捕猎留下的残羹冷炙尽管是有可能的，但毕竟不那么现实。要依靠自己族群的力量，捉到和杀死一头羚羊或角马，那可是一件很伤脑筋的事情，往往要出动整个族群的古猿，花上半天的时间，而且大多数时候还是劳而无功。就算运气好，

终于能够享受一顿饕餮盛宴，但是这些珍贵的肉常常紧紧地贴在骨头上，或者被夹在骨头之间的细细的缝隙中。弄到一头猎物毕竟是很不容易的。古猿们总是希望用指尖把每一块肉都抠出来，失去耐心的时候就会用拳头狠狠地砸那些坚硬的骨头，希望获得每一块肉，还有骨头里的妙不可言的骨髓。然而，古猿毕竟不是狮子，没有那么锋利的爪子，也没有那么强有力的下颌骨和咀嚼肌。不论多么努力，有时还把手弄得骨折了，可还是有很多肉、骨头明明摆在那里，却就是没法够着。宝贵的佳肴就这么被浪费了。

大约数百万年前的一天，一个古猿（姑且称之为甲）在偶然间发现，对付这些难啃的骨头，不光可以用自己的手，而且还可以找到帮手——石头。没错，遍地都有的石头。一开始，古猿在使用石块的时候很可能是没有方向性的，只要用石头的任何一个部位往下砸，把相连的两块骨头敲开或者把一块骨头砸裂就行了。到后来（可能是数十万年或数百万年之后），另一个古猿乙在偶然间发现，有锋利边缘的石块或石片更好用，用它们的边缘来砍或者切骨头会省力得多，事情也就变得更加容易。这时候，生物的本能发挥作用，这些古猿（甲或乙）觉得这样做似乎没什么不好，于是坚持这样做了下去，并且把这种做法告诉了更多的古猿：“嘿，你们看，这样做真的很省力！”通过这样原始的技术扩散活动，越来越多的古猿逐渐学会了这种办法。就这样，石器时代终于到来了。

在今天的人眼里看来这么简单的一件事，在数百万年前的古猿界可是一件开天辟地的大事。这意味着古猿通过“创新”，学会了使用工具，也在技术上比过去更加先进。今天的学术界用“技术创新”（technological innovation）来描述新产品、新过程、新系统和新服务的首次应用。对于创新的研究主要是从技术开始的。古猿运用石头，本质上就是通过一定的技术手段帮助他们更加有效地摄取肉和骨髓，方便他们的生活，提高生存的概率。这就是最早的技术创新。

但是，究竟是古猿甲还是乙，是那只实施了最早的技术创新的古猿，从而开创了伟大的石器时代？这一点仍然存在疑问。考古学家已经发现了后者的蛛丝马迹。它们在 340 万年前的动物骨头上发现了石刃砍凿的痕迹，于是宣称这是石器时代的起点。然而这是很可疑的。在我看来，进入石器时代的标志不应该是使用薄薄的精巧的石片，而是使用那些看上去更粗糙的、笨拙的、没有锋利边缘的石块。毕竟，不论看起来比石片多么的笨拙和粗陋，只

要它具有一定的功能（砍、砸），可以满足古猿的需求（解决骨头和肉的问题），石块都足以被称为最早的工具，也就是最早的人类技术创新的成果。只不过，在今天的我们看来，一个很大的问题就是，使用这样的石块，在动物骨头上很难留下什么容易辨识的痕迹。一只强壮的古猿，用尽力气把这么一个石块砸下去，把羚羊的腿骨砸成两段，在今天的考古学家看来，这根腿骨就是不幸的羚羊在急速奔跑中不小心自己折断的，很难说有什么考古学意义上的新发现。相比较而言，石片砍凿容易留下一个一个的凹痕，因而是更容易辨认的，更具有考古学意义。

问题就在于，现在的考古学家们还能找到当初被古猿使用的一个一个的没有棱角的粗糙石块吗？显然，在广袤的东非大草原和壮观的大裂谷，这样的石块俯首皆是，数以亿计。难道把每一个石块都做一次科学检查和鉴定，看看上面是否残留了古猿的毛发或者羚羊的血液？显然不可能。当然还有一种办法，就是把搜索范围缩小到古猿的洞穴、居住地，看看能不能发现这样的石块。然而到目前为止，学者们的运气也还不够好，或者说，还很少有学者愿意把这种石块列入关注对象的范围。

于是乎，学者们只能把最早的工具，锁定在相对容易锁定的对象——石片，或者说，有锋利边缘的石块了。客观地说，这是有失公允的。由于研究的原始资料（没有锋利边缘的石块）的可获得性太低（不是因为太少，而恰恰是因为数量过于巨大，难以筛选），我们不得不把自己祖先的出现年代推迟了数十万年、甚至可能数百万年。

在亚瑟·克拉克（Arthur Charles Clarke）的《2001 太空漫游》（2001: *A Space Odyssey*）中，最早的工具不是石块或者石片，而是一根长长的动物骨头。古猿在黑色石板的启示下，用这根骨头开始了改变自身的历程。在历史上，真实的一幕究竟是什么？最早的工具是石头，还是动物的骨头，或者是一根树枝？我们已经很难得知。另外，是否有这么一块黑色石板还不好说。不过可以确定的是，不论是石头、骨头还是树枝，从那一刻起，古猿开始有意识地寻找、制造和使用工具，这就是最早的技术创新。

一方面，为了更好地使用工具，掌握工具运用的方法（包括力量、角度、距离等参数），古猿的双手开始变得灵巧，逐渐能够做更加精细的工作；另一方面，工具运用方法的改进过程，也就是古猿对自身大脑的开发过程，大脑逐渐学会了有意识的思考，对各种参数进行分析（那时候几乎不可能

有系统性的预测行为，更可能的是不断的尝试和纠错），积累经验（怎么做更省力、更快），总结教训（不再把手划伤），提高效率，从而慢慢地找到在某一情境下某种工具的最佳使用方法（也就是今天所说的最佳实践，best practice）。这就是今天的创新理论所说的“干中学”“用中学”（learning by doing, learning by using）。“十指连心”，双手运用得越频繁，大脑也就开发得越深入，而这又进一步促进了双手活动的灵活性和精确性。由此及彼，相互促进，人（Homo）这个生物学中的“属”终于逐渐浮现出来。从这个意义上说，技术创新不仅仅是人类社会发展的动力之一，而且石器工具这一技术创新就是从古猿到原始人的生物演化迈出的那关键一步的原动力。

二、火——人类进化史上的重大变革

原始人的食物包括果实、树叶、肉类等。和其他大型哺乳动物一样，原始人只能茹毛饮血，依靠自己的牙齿、咀嚼肌和强大的肠胃来对付这些食物。他们没有办法对这些食物进行进一步加工——也没有人想到过这么做。直到有一天，跳动的火苗进入了人类的视野。

火得到原始人的关注，可能有很多原因。在寒冷的时候，靠近火堆或在太阳光下，身体比较舒服；被火烧熟的动物肉，吃起来比生肉少了一股难闻的腥味，而且口感较好、胃觉舒服；有火的地方，豺狼虎豹都被吓跑了，安全性极大的提高；火光也使漆黑的夜晚不那么可怕，使夜间活动有了更多的依靠和指引。生物的本能再次发挥作用，原始人“跟着感觉走”，采用这种使自己觉得方便、舒服的方式，改善自己的衣、食、住、行各个方面，使自己的日子过得越来越舒坦。

从产品创新的角度来看，火这个产品进入原始人的视野是具有戏剧性的。一种说法是火山爆发产生火；另一种说法是打雷闪电的时候树林或草丛被点燃起火；在中国古代传说中，燧人氏看到有鸟啄燧木时产生火苗，受到启发。无论如何，已经尝到火的甜头的原始人开始琢磨着怎样才能把自然界产生的火种保存下来，或者自己想办法生火，以便今后使用。

从工艺创新的角度来看，原始人对人工取火的方法进行了艰难的探索。经过千万次试验（同样的“干中学”“用中学”），尝试了千万种不同的材料、力量、角度、风向、程序，原始人终于找到了钻木取火与击石点火两种

方法，从而最终熟练地掌握了取火技术。尽管这两种方法还很原始，操作起来非常困难，原始人还是不辞劳苦地重复这两种方法，并为此欢欣鼓舞。

火的使用可以说是一个划时代的技术创新。尽管不了解火的化学原理，但是这丝毫也不妨碍人类将这种技术付诸实施。由于火的使用，原始人开始吃熟食，熟食易于消化，更富有营养，因而大大促进了人类体质的发展；火给人类带来了温暖，使人类不仅生活在温暖地带，并且可以前进到寒冷地区；火给人类带来了光明，即使在黑夜，人类也能看见四周的环境、从而自由地行动了；火还增强了人类的攻守能力，使人类再也不惧怕猛兽的威胁了。总之，火的使用使原始人获得了新的知识、新的力量。恩格斯说：“摩擦生火第一次使人支配了一种自然力，从而最后与动物界分开。”如果要列出人类历史上最具有划时代意义的变革性创新的话，火的使用毫无疑问可以位列三甲。

石器和火这两种技术被人类掌握，意味着人类逐渐具备了比自身体力更为强大的力量。石器使人能够砍树、切菜、杀死大型猛兽、制作各种生活用品，火使人能够制作熟食、烧制器皿、在寒冬取暖、甚至用放火的方法围捕猎物、开垦田地。这两种技术上的创新，使人类掌握了前所未有的力量，极大地拓展了自己的活动范围，也在很大程度上加强了人脑的活动——智力活动，为人类进一步从动物界脱离出来、成为凌驾于其他动物之上的智慧生物创造了条件。

第二节

解放脑力：四大发明

一、造纸术

在纸发明以前，人类主要靠龟甲、兽骨、金石、竹简、木牍、绵帛记事。然而，甲骨不易得到，金石笨重，简牍占有大量空间，绵帛昂贵，都不便使

用。随着科学文化的发展，人类迫切需要一种廉价简便的新型书写材料。

在中国的东汉时期，公元63年，蔡伦生于桂阳郡治城南，也就是今天湖南省耒阳市城南蔡子池。公元105年，蔡伦继承和发扬了前人的造纸方法，制造出质优价廉的纸张，人们称之为“蔡侯纸”。^①

蔡伦造纸的创新之处主要有以下三个方面。

首先，是造纸的方法和程序。

第一是“选”，选择“树肤、麻头及敝布、渔网”为原料。蔡伦抛弃了丝絮等动物纤维，纯用植物纤维。古代麻织品总称为布，丝织品总称为帛。渔网和敝布都是大麻和苧麻，原产地都是中国，所以原材料非常丰富。（“选”料工艺）

第二是“剉”，将原料切短、碾碎。（“剉”料工艺）

第三是“煮”，将已剉好的原料加以蒸煮，使纤维间粘结质分解。《诗经·陈风》说：“东门之池，可以沤麻。”即用于纺织的麻原料可以在朝东的有阳光照射的池水中沤浸，因水温提高可以加快其发酵脱除木素与果胶，但古代用葛纺织就要先经过水煮。（“煮”料工艺或“沤”料工艺）

第四是“捣”，将经过蒸煮的原料放入臼内进行舂捣（用棍子的一端撞击），用现代的造纸语叫打浆叩解，使纤维帚化。这是使纤维能相互缔结成纸页的关键工序，其作用是将初生壁的纤维外壳打破（压溃、劈裂、脱水），以露出其内的微细纤维并使之纵裂帚化，在水中形成相当大的丝状表面积，使纤维素分子结构上的氢或羧基暴露于纤维表面，相邻纤维上的这类基团在水中形成水键，经脱水干燥后产生氢键，相互拉紧，形成具有强度的纸张。这是构成纸页的关键，也是蔡伦造纸工艺的一大创新之处。今天，我们鉴别出土类纸物是麻絮还是纸张，首先就要看它是否经过打浆。（“捣”料工艺或“打”料工艺）

第五是“抄”，即将经过舂捣打浆的纤维均匀悬浮于水中，用抄纸帘过滤成湿纸页（包括“笞”或“簣”），干燥后即成纸张。这是古代纸页成型的方法，它包括“抄纸法”和“浇纸法”。（“抄”料工艺）

“蔡侯纸”经过以上五道工序就制成了，后世的造纸工序比这更多更复杂，但这五道工序是最基本的。蔡伦最伟大的创新之处，就在于确立了造纸

^① 李玉华. 蔡伦发明的是“造纸术”[J]. 博览群书, 2008, (3): 8-11.

的基本工序和方法，这一工艺创新也为现代造纸工艺树立了典范。

其次，蔡伦还发明和应用了纸药，这是一大产品创新。“纸药”是指抄纸时在纸浆悬浮液中加入的植物黏胶液，俗称“滑水”或“胶水”。它在造纸过程中具有非常重要的作用，突破了湿纸压榨后难以揭分的最后难关，从而造出了可大量生产、均匀完整平直的书写用纸。具体说，它有三种作用：一是悬浮分散，使纸均匀成型；二是保护压榨，使湿纸免于“压花”；三是防止纤维互粘，使湿纸易于揭分。蔡伦在公元 105 年发明纸药后，一整套完善实用的造纸术才得以形成，蔡侯纸才大功告成。^①

再次，蔡伦还创造性地选用树肤、麻头、敝布、渔网等植物纤维原料造纸，尤其用树皮做原料，这在造纸术中是一大原材料创新。树皮、麻料都属于韧皮纤维，所含的木质素和杂细胞都很少，水溶性物质较多，有机杂质易于分解溶出，便于提取纤维制浆造纸，对工艺技术和工具的要求都不高，符合当时的技术条件。他还首创“废物利用，化废为宝”，麻头、敝布、渔网既易于“捣”碎成浆，又具有经济价值。天然生长的植物纤维原料，资源丰富，分布面广，随处可得，取之不尽，用之不竭，成本低廉，为大批量生产提供了可能性。

这样，蔡侯纸从原料到成品实现了“三新”：新工艺、新产品、新原料，在人类创新史上写下了不可磨灭的一笔。他发明的造纸术，很快产生了深远的影响。

造纸术在中国得到迅速的推广，公元 3—4 世纪纸在国内取代了绵帛、竹简，并于公元 6 世纪传入朝鲜、越南、日本，8 世纪传入中亚、阿拉伯，12 世纪由阿拉伯传入非洲、欧洲，16 世纪传入美洲并在欧洲广泛流行，从而取代了或昂贵，或笨重，或松脆，不适合大量推广的印度的白树皮和贝叶、埃及的莎草纸、阿拉伯和欧洲的羊皮，蔡侯纸逐渐被世界各地的人们采用为书写材料。在 18 世纪以前，世界各国一直沿用蔡侯纸技术生产纸张。纸对后来西方文明整个进程产生了极其巨大的影响。中世纪的欧洲要写一部书，就要用数十张羊皮，如《圣经》，需要用羊皮 300 张之多。成本高昂的书籍不是一般平民百姓买得起的，因而限制了欧洲文化的普及和发展。造纸术的传播，促进了西方文化的内部交流，为欧洲的教育、政治、商业的活动提供

^① 钟志云. 关于蔡伦及其造纸术的若干问题探讨 [D]. 华南师范大学, 2007.

了极为有利的条件，从而使文艺复兴成为可能。德国亚可布说：“希腊罗马的人，从来没有想到纸的发明，我们还是靠中国人蔡伦的智慧，才能享受现在的这种便利。”蔡伦的造纸术对文化的普及和世界科学文化传播交流作出了不可磨灭的贡献。

二、活字印刷术

中国的雕版印刷术大约起于隋唐，成于五代，盛于两宋。雕版印刷较之手写有无比的优越性，它可以雕一版而印无穷，且能妥善保管，多次印刷，经久耐用。所以任何一种书稿，只要按照一定的行格款式雕刻一套版，便可以随需刷印、广为流传。这对知识信息的传播和文化影响的拓展是有利的。但雕版印刷也有不可克服的缺点，这就是它只能是一种书刻一套版，一套版印一种书。它只能在同一种书的部数上随需刷印，却不能在品种上随意生新，若生新就只能再雕一套版。如果刻一部大书，要花费很多时间和木材，不仅费用浩大，而且储存版片要占用很多空间，管理起来也有一定的困难。这种劳师费时、工料俱奢的弱点，雕版印刷术越是极盛，暴露得也就越明显。

北宋仁宗庆历年间（1041—1048年），平民毕昇在世界上第一个发明活字印刷术，这比德国的古腾堡早了400年。简言之，活字印刷术就是预先制成单个活字，然后按照付印的稿件，检出所需要的字，排成一版而施行印刷的方法。采用活字印刷，一书印完之后，版可拆散，单字仍可再用来排其他的书版。

具体而言，沈括在《梦溪笔谈》卷十八“技艺门”中较详细地记载了毕昇的胶泥活字印刷法：^①

（1）制字：用胶泥刻字，活字薄如钱唇，一字一印，用火烧使其坚固，实际已是陶质活字。每一字都有数个活字，用以处理在文稿里的字重复出现的情况。还有两种情况，排版中经常遇到：一是常用字如“之”“也”等，每字有二十余个活字，以备一版内有更多重复者；二是文稿中出现的生僻字原所制活字中没有，当下补刻，用草火烧成坚固的活字，马上可以排版。

① 肖东发. 活字印刷术的发明及其在宋元时代的发展与传播 [J]. 北京大学学报（哲学社会科学版），2000，37（6）：96-104.

(2) 置范：先备一块铁板，上放松脂、蜡和纸灰之类，再放一铁范于铁板上，以承容和固定活字。

(3) 排版：在板上紧密排布字印，满铁范为一版。

(4) 固版：以火给铁板加热，使药熔化，再以一平板按印面，使字面平整、固定。

(5) 印刷：固版后就可以上墨铺纸印刷了。为了印刷方便和快捷，通常用两块铁板，一块板印刷时，另一块板在排字，印完一块板，另外一块板已经排好，交错使用，能提高效率。

(6) 拆版：印完后再用火为铁板加热，使药熔化，用手指落活字，并不沾污。

(7) 储字：活字不用时则以纸贴之，每韵为一贴，储藏于木格之中。

毕昇的胶泥活字印刷术，具有新原料、新工艺、新产品三个方面的创新点。

在原料创新方面，毕昇扬弃了木活字而创制了泥活字。的确，木活字容易做，要么是锯镏已雕字的板片，要么是一个一个地雕刻木字，在当时雕版印刷盛行的情况下，都是轻而易举的事情。并且，这样跟雕版印刷一样，易着水墨，容易成功。为了满足外部急迫的批量印刷需要，毕昇从锯雕版直接成本活字排版印刷入手。然而，当时排版固字技术尚不过关，使得用木活字排出来的版面，因木理疏密不同，频着水墨印刷后，便会出现涨版而使版面高低不平的情况。并且当时排版固字技术只是用松脂蜡和纸灰的溶凝原理，根本无固力阻止木字因涨版而凸起，加之印刷完成木活字易与蜡灰相粘，脱字较难，且易相互污染，所以最终被毕昇放弃。毕昇转而研制了胶泥活字印刷术。^①

在工艺创新方面，毕昇制造的泥活字，“每字为一印，火烧令坚”。泥活字刻字时胶泥当是干的，这样易刻，笔画交叉处也不易出现断笔，出现了也容易填补。刻完一批字就应“火烧令坚”，否则就可能磨损，影响质量。每字皆刻数个，如“之”“也”等常用字，则刻有二十余个，以备一版之内

^① 刘崇民.论毕昇的身份及其发明活字印刷术的动因和过程[J].理论学习与探索,2013,(5):85-87.

重复使用。有些生僻奇字刻字时未行备刻，则在排版时随需随雕刻，并以草火烧之，瞬息可成。可见毕昇在制字上已经想得十分周密了。

在产品创新方面，毕昇设一铁板，铁板上均匀地铺撒一层松脂蜡和纸灰。打算印刷时，先将一铁范放置在铁板上。这个铁范当与当时通行的雕版印刷的版面高矮宽窄相似，以便形成活字的围圈和版面的四周栏线，铁范中便可依行布字，满范为止。然后持着排满字的铁板到火上灼煬，待蜡稍熔，便以一平板按压字面，则字深嵌入蜡中，版面则字平如砥。且常做两块铁板，一板在印刷，另一板在排字。一板印刷完，另一板已排好版。如此交替用之，瞬息便可印出许多。不印的时候，其活字便依韵归类，并在字身背头贴上该字所属之韵，储藏于事先做好的木格箱中，每格则以写好的韵头之字贴之，以便再印时拣字方便快捷。^①

近一千年前毕昇创制的胶泥活字印刷术，从制字、排版、固版、印刷到储字等工序上，都有了切实的实践，并且取得了成功。在效率方面，若只印两三本，则不算简易；若印数十百千本，则显得极为神速。用今天科学的眼光来审视它，除了略显古朴外，其活字印刷术的基本原理，与后世人类共同使用的铅排技术已没有本质的不同了。

毕昇首创的胶泥活字印刷术是具有深远影响的技术革命。法国斯丹尼斯拉斯·茹莲认为：“印刷术中最重要改良，都不及宋代的活字术”。从工艺原理上看，近代的铅字排版与胶泥活字印刷是完全一致的。活字印刷术发明后不久，即经西域传到波斯、埃及等国，旋又传入欧洲。

约在 1444—1448 年间，德国美因茨的古腾堡仿照中国活字印刷的原理，初步制成了一种以铜、锑、锡合金的欧洲拼音文字的活字，用于印刷，这比毕昇发明活字印刷术的时间晚约 400 年。中国活字印刷术为古腾堡的发明奠定了基础，从这个角度说，近代机械印刷技术只是一种“技术改良”或“集成创新”。

在活字印刷术以前，文化的传播主要靠手抄的书籍，既慢，易错，也大大限制了一般民众对文化的需求。活字印刷术传到欧洲后，改变了过去只有僧侣、贵族才能读书受教育的状况，为文艺复兴运动的出现提供了重要的物质条件。另外，由于《圣经》等宗教著作被大量印刷，基督教文明开始在世

① 李致忠. 活字印刷术的发明及其制字材料的演进 [J]. 文献, 1998, (10): 114-137.

界范围内传播。活字印刷术间接地推动了欧洲的宗教革命和文艺复兴，它以催化剂的角色推动了欧洲科学、文化的迅猛发展，也为资本主义的产生创造了重要的物质条件。

三、火药

火药的发明是人类文化史上的伟大创新之一。它的起源和炼丹术有密切的联系。中国古代黑火药是硝石、硫黄、木炭以及辅料砷化合物、油脂等的粉状均匀混合物。这些成分都是中国炼丹家的常用配料。把这种混合物叫作药，也揭示着它和中医学的渊源关系。

火药之所以成为火药，起决定性作用的是硝石（硝酸钾）的引入。至少自公元前 2 世纪，中国已经广泛使用成分为硝酸钾的“硝石”于医药和炼丹了。硝酸钾是当时的强氧化剂，尤其是在火法熔盐反应中。所以硝石（硝酸钾为主）成为古代东西方化学发展的控制因素。没有硝石，就谈不到火药的发明。

秦汉以后，炼丹术盛行，其目的是制造金银和修炼丹药以求得长生不老。炼丹家们希望夺造化之功，使自然变化人为地在丹炉中完成，于是将各种药物彼此配合在炉中用火炼。在火法炼丹过程中，为了防止药物加热后逃逸，采用密封的丹鼎。这种做法在初期是摸索性的，具有很大盲目性，当然失败多于成功。在密封的丹鼎中炼丹时，如果药物加热后发生激烈的反应就会发生炸鼎事故，也就是《真元妙道要略》中记载的“祸事”。

经过长期实践，炼丹家认识到某些药物不能贸然在密封的丹鼎中合炼。炼丹家所用的药物是多种多样的，主要有五金、八石、三黄，还有特殊的药物就是汞和硝石。其中，三黄是雄黄、雌黄和硫黄。硫黄与汞化合成丹砂是炼丹家们的成功之作，也是他们研究得最多的。不过，三黄若是与硝石共同用火炼，却会着火和爆炸，这就导致了火药的发明。

公元 4 世纪初的《抱朴子内篇·仙药》记载：以硝石、松脂、猪肠、雄黄共炼，会在 $350^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 起火爆炸。这可能是人类史上关于火药的最早记载。因此原火药起源可以上溯到公元 4 世纪。

炼丹家如何对待偶然发现的能爆炸或剧烈燃烧的混合物？一是利用来做戏，进行恶作剧，最后贡献给军事；二是在火法炼丹过程中避免使用这类药

物，以保证不出意外事故。经过多次实践积累了经验后，炼丹家还发现，要炼好丹，必须先使某些药物“伏”于控制，也就是“伏火”。

根据问世于公元686—741年的《龙虎还丹诀》记载：硝硫合炼的两组分伏硫黄法祖方已经是一种火药成分，这可以说是中国原火药发明的可靠年代。其中，硝、硫的摩尔比为略低于1：3，所以可称之为“原火药”。它不是用于灭火，而是用于发火，在一定条件下是会爆炸的。

火药发明的过程中的创新，包括原料创新、过程创新。

在原料创新方面，尽管今天的黑火药的成分主要是硝、硫和碳，但是原火药并不一定具备这三种成分。火药之所以成为火药不是因为含有可燃物——硫和碳，而是由于含有氧化剂——硝石。碳和硫是可燃的，但它们在密封的炼丹炉中隔绝了空气后，既不会着火也不会爆炸。但是，当炼丹家将硝石进行火法炼制时，只要有可燃物同时存在，不论密封与否都会发生激烈的燃烧甚至爆炸。而可燃物也不局限于硫黄和木炭，雄黄、雌黄、松脂等与硝石共同烧炼也会导致原始火药的发明。可能原始火药开始是两成分的，只有硝、硫，以后才发展为多成分的。^①事实上，硝硫合炼的两组分伏硫黄法祖方，在增添第三组分的发展中，出现了两种以上的配方，它们也都叫伏硫黄法，其硝硫重量比都是1:1。一种是《孙真人丹经》记载的“内伏硫黄法”，第三组分是硃砂（氯化铁），由硝石、硫黄、硃砂组成；另一种是《诸家神品丹法》记载的“伏火硫黄法”，第三组分是烧存性的皂角子，由硝石、硫黄、皂角子组成。^②

在过程创新方面，炼丹家们主要是采用将各种药物彼此配合在密封的丹鼎中用火炼。并且，他们还设法使某些药物“伏”于控制，也就是“伏火”。这都是火药制备过程中的工艺创新。

大约在公元10世纪初的唐代末年，火药开始在战争中使用。公元904年（唐哀宗天祐元年），郑璠进攻豫章时曾经“发机飞火”，可能是最早记载的进攻性热兵器。火药被引入军事，成为具有巨大威力的新型武器，并引起了战略、战术、军事科技的重大变革。初期的火药武器，爆炸性能不佳，

① 郭正谊. 火药发明史的新探讨 [J]. 中国历史博物馆馆刊, 1985, (6): 72-77.

② 孟乃昌. 火药发明探源 [J]. 自然科学史研究, 1989, 8 (2): 147-157.

主要是用来纵火。随着工艺的改进，火药的爆炸性能加强，新型火器不断出现。在宋代，火药在军事上更得到了广泛使用。北宋为了抵抗辽、西夏和金的进攻，很重视火药和火药武器的试验和生产。

火药由商人传入印度。在 13 世纪，火药武器通过战争传到阿拉伯国家，成吉思汗西征，蒙古军队使用了火药兵器。公元 1260 年，元世祖的军队在与叙利亚作战中被击溃，阿拉伯人缴获了火箭、毒火罐、火炮、震天雷等火药武器，从而掌握了火药武器的制造和使用。另一方面，希腊人通过翻译阿拉伯人的书籍知道了火药。并且，阿拉伯人与欧洲的一些国家进行了长期的战争，在战争中阿拉伯人使用了火药兵器，例如阿拉伯人进攻西班牙的八沙城时就使用过火药兵器。在与阿拉伯国家的战争中，欧洲人逐步掌握了制造火药和火药兵器的技术。恩格斯在《反杜林论》中指出：“以前一直攻不破的贵族城堡的石墙抵不住市民的大炮，市民的子弹射穿了骑士的盔甲。贵族的统治与身穿铠甲的贵族骑兵同归于尽了。随着资本主义的发展，新的精锐的火炮在欧洲的工厂中制造出来，装备着威力强大的舰队，扬帆出航，去征服新的殖民地……”

四、指南针

指南针的发明不是突然发生的，而是中国人在战国以来确定方位的近千年实践中不断探索的产物，与中国方位文化的发展演变密切相关。在中国的方位文化中大体经历了从天文学方法定位，再以磁学方法制成司南，最后由司南演变成指南针的三个阶段。

上古时期，黄帝曾与蚩尤进行过几次大规模的战争。蚩尤铜头铁额，神勇无比，而且还会使用妖术。同黄帝作战时，蚩尤降下漫天大雾，黄帝的军队都失去了方向。危急关头，在仙女的帮助之下，黄帝造出了指南车，借助于指南车，黄帝率领军队冲出了重重迷雾的阻挡，最终打败了蚩尤，赢得了战争的胜利。

如果说黄帝的故事还只是传说，那么从战国时期开始，在《山海经·北山经》《管子》《吕氏春秋》《淮南子》等著作中，就出现了关于磁石的各种记载，这些对磁石的认识，是我国磁学的基础，在此基础上，发现了磁石的吸铁性、指向性，进而发明了司南、指南针及至后来的罗盘。

至迟在战国时，华夏民族就制造出了最初的指南针——司南。在公元前3世纪末年的《韩非子·有度》中就有司南的记载。根据后来东汉时期王充的《论衡》描述，司南是用天然磁石雕琢而成，这是一种以四氧化三铁为主要成分的磁石。司南的形状像一把勺子，底部圆滑，可以放置在平滑的“地盘”中自由旋转。地盘的形状为方形，也叫罗经盘，四周刻有八干、十二支以及四维，一共24个方向。使用的时候，先把“地盘”放置平稳，把司南放在上面，轻轻一拨，司南就转动起来，等停下来时勺头指向的就是北方，勺柄指向的就是南方。^①

汉朝的“司南”也被用于风水和占卜，术士用它在占卜板上旋转来推测“凶吉”，一个常见的用途是堪舆（相墓相宅的风水术）。然而，制造司南需要的天然磁石非常少见；而且在雕琢过程中，要准确的找出极向也不是一件易事，琢磨的成品率低，磁性较弱；加上转动司南时其与地盘接触产生的摩擦阻力较大，准确性因而受到很大影响。所以，司南的应用和流传都受到了一定的限制，后来逐渐被淘汰了。由于堪舆术的发展，需对山川地形和方位进行大规模测定，海外贸易所必需的域外航海又需要有效的导航手段，这都促进了对司南的改变。

根据北宋初年由曾公亮主编的《武经总要》记载，人们把一片薄铁皮剪成约7厘米长、1.5厘米宽的鱼形，放在炭火中烧得通红，此时的温度通常高于铁磁质的居里点，这样，铁鱼内部的分子运动加速，被烧得处于活动状态的磁畴就会瓦解，成为顺磁体。趁热将其取出，用钳子夹着鱼头，让鱼尾正对着地球磁场方向（北方），让磁畴重新形成，并顺着地球磁场方向整齐排列。然后把磁化后的铁鱼迅速浸入冷水中，磁畴的规则排列就马上固定下来，形成永磁铁。这样，一个“指南鱼”就做成了，对着北方的鱼尾被磁化而成指北极。使用时，在一只碗内盛满水，放入指南鱼，利用水的表面张力使指南鱼浮于水面。待水面平静后，鱼头指向的是北方，鱼尾指向的是南方。指南鱼比司南更为灵巧，便于携带，水的阻力也要比司南与地盘的摩擦力小得多，准确性因而大为提高。并且，《武经总要》还指出，应当让铁片朝北下倾数分，这样可以更接近地磁场的方向，使铁片鱼的磁化效果更好。从这里可以清楚地看到一个事实，这就是中国人早在公元11世纪以前就发现了

① 欧阳军. 指南针发明轶事 [J]. 发明与创新, 2009, (7): 48-49.

地磁倾角的存在，并且在指南仪器的制作过程中加以利用。^①

随着时间的推移，人们发现其实并不一定要制造成鱼的外形，使用磁针会更方便。于是，指南“针”诞生了。沈括在《梦溪笔谈》中就记载了这种指南针的制造方法，就是拿一根小钢针在磁石上反复摩擦，使其磁化，便是指南针了。指南针不仅在外形上要比指南鱼更为简便，而且体积更小，被磁化的程度更强，使用方法也更为多样，可以将它放在指甲背上或者是碗口边沿上，使其平衡，指南针就会自动旋转，停止下来的时候，所指的就是南北方向。事实上，沈括提出了四种放置指南针的方法：水浮法，碗唇旋定法，指甲旋定法，缕悬法。但是在漂泊不定的船上，将指南针放在指甲背上或者碗口上都不方便，因此沈括建议采用缕悬法，也就是在指南针的中部用少许蜡粘上一根细线，于无风处悬挂起来。这样，即使在航海的过程中也可以使用。并且，沈括也发现“常微偏东，不全南也”，也提示了地磁偏角的存在。

磁针的出现，是司南向指南针过渡中具有决定性的一步。铁针的磁性是通过与磁石摩擦产生的，和现在磁针的形状极为相似。在19世纪现代电磁铁出现之前，几乎所有的指南针都是以这种人工磁化法制成的。

指南针的发明历程中，有原材料创新和过程创新。

首先，古人选用以四氧化三铁为主要成分的天然磁石制作司南，巧妙地利用了磁石的吸铁性、指向性，解决了方向辨识的问题。这毫无疑问是一大原料创新。

其次，过程创新方面，古人采用“烧红一对向一冷却”的工艺，制作指南鱼。这样，就通过合理的过程，巧妙地实现了磁畴的瓦解、重新形成并固定下来，从而解决了磁化的问题。后来，又采用将小钢针在磁石上反复摩擦的方法制作指南针，也是一大工艺创新。

指南针的出现具有重大意义，尤其是在航海方面，指南针更是不可缺少的工具。最初，指南针只是作为天文导航的辅助工具，只有在阴雨天气才拿出来使用。随着人们对指南针性质以及功能的认识不断加深，它也逐渐成为主要的导航仪器。航海者特地在船上设置放置指南针的场所，称为“针房”，并交给有经验的船员专门掌管。到了元代，指南针已经成了航海的基本装备

^① 王仙洲. 论指南针的发明 [J]. 青岛大学学报, 2000, 13 (3): 120-122.

之一。12 世纪末 13 世纪初，指南针由海路传入阿拉伯，又由阿拉伯人传到西方。欧洲人对指南针加以改造，把磁针用钉子支在重心处，尽量使支点的摩擦力减少，让磁针自由转动。这种经过改造的指南针就更加适宜于航海的需要。大约在明代后期，这种指南针又传回我国。

指南针投入应用之后，人类才具备全天候的航行能力，真正走向宽广的海洋，这开创了人类航海的新纪元。人类第一次能在茫茫无际的浩瀚海洋上自由驰骋，指南针也因此被喻为“水手的眼睛”，成为航海家的必备之物。郑和七下西洋，哥伦布对美洲大陆的发现和麦哲伦的环球航行，都与指南针的应用密不可分。

培根曾说：“印刷术、火药和磁石这三项发明已经在世界范围内把事物的全部面貌和情况改变了，并由此又引出了难以数计的变化。”马克思在《机器、自然力和科学应用》中也指出：“火药、指南针、印刷术——这是预告资产阶级社会到来的三大发明。火药把骑士阶层炸得粉碎，指南针打开了世界市场并建立了殖民地，而印刷术则变成了新教的工具，总的来说变成科学复兴的手段，变成对精神发展创造必要前提的强大的杠杆。”这三项与造纸术一起，并称中国古代的四大发明，为人类的脑力活动开创了更大的空间，尤其是使人的知识传播、远洋航行、探索未知的能力得到了质的提升。

第三节 拥抱世界：电

今天，人类社会的运行可以说是建立在电的基础上的。没有电，就没法看电视、听广播，没法打电话、用电脑，没法用洗衣机、电冰箱、空调，没法开动汽车、轮船、飞机、火箭，没法启动机器机床、仪器设备……总之，没有电，人们将寸步难行，人类将无法生存。电的发现和应用，可以说是人类历史上最伟大的创新之一。

事实上，电从地球出现的时候就有了。很多年前，人们就已经知道发电鱼会发出电击。根据公元前 2750 年撰写的古埃及书籍，这些鱼被称为“尼罗河的雷使者”，是所有其他鱼的保护者。古罗马医生 Scribonius Largus 在他的著作中建议，患有像痛风或头疼一类病痛的病人去触摸电鳐，也许强力的电击会治愈他们的疾病。

公元前 600 年左右，古希腊的塞利斯（Thales）做了一系列关于静电的观察。他发现，琥珀用毛皮去摩擦之后，能吸引一些像绒毛、麦秆等轻小的东西。那时候的人们认为琥珀中存在一种特殊神力——“电”。中国古代一些文章也对类似现象做过记载。西晋张华记述了梳子与丝绸摩擦起电引起的放电及发声现象：“今人梳头，脱著衣时，有随梳、解结有光者，亦有咤声。”唐代段成式描述了黑暗中摩擦黑猫皮起电：“猫黑者，暗中逆循其毛，即若火星”。公元 1600 年，当时英国女王伊丽莎白一世和后来詹姆斯一世国王的御医吉尔伯特（Gilbert）发现，用摩擦的方法不但可以使琥珀具有吸引轻小物体的性质，而且还可以使不少别的物体如玻璃棒、硫黄、瓷、松香等具有吸引轻小物体的性质。他把这种吸引力称为“电力”。这些现象说明了人类一早就认识了电，但是还不能运用。

1734 年，法国人杜伐发现两种不同性质的电。一种是把玻璃棒用丝绸摩擦，然后将这根玻璃棒用丝线悬挂起来，再将另一根与丝绸摩擦过的玻璃棒靠近它，发现这两根棒相互排斥，于是他就把玻璃棒带的电称为“玻璃电”（即正电）；另一种是把松香用毛皮摩擦，然后把这块松香靠近用丝绸摩擦过的玻璃棒，发现两者相互吸引，于是他称松香所带的电为“松香电”（即负电）。这就是人们所讲的同性电相互排斥、异性电相互吸引的现象。杜伐发现了这些现象，也做了最早的理论解释。

1746 年，荷兰人莱顿（Leiden）做出了莱顿瓶。这是一个玻璃瓶，瓶的内外表面均贴上像纸一样的银箔，把摩擦起电装置所产生的电用导线引到瓶内的银箔上面，而把瓶外壁的银箔接地，这样就可以使电在瓶内聚集起来。如果用一根导线把瓶内表面的银箔和外表面的银箔连接起来，就会产生放电现象，发出电火花和响声，并伴随着一种气味。

在电的创新的道路上，一个关键人物是本杰明·富兰克林（Benjamin Franklin）。富兰克林的第一个重大贡献，就是发现了“电流”。他在 1747 年给朋友的一封信中提出关于电的“单流说”。他认为电是一种没有重量的

流体，存在于所有的物体之中。如果一个物体得到了比它正常的分量更多的电，它就被称之为带正电（或“阳电”）。如果一个物体少于它正常分量的电，它就被称之为带负电（或“阴电”）。

富兰克林对电学的另一个重大贡献，就是通过 1752 年著名的风筝实验，“捕捉天电”，证明天空中的闪电和地面上的电是一回事。他用金属丝把一个很大的风筝放到云层里。金属丝的下端接了一段绳子，另外金属丝上还挂了一串钥匙。富兰克林一手拉住绳子，用另一手轻轻触及钥匙。于是他立即感到一阵猛烈的冲击（电击），同时还看到手指和钥匙之间产生了小火花。然而，据传，并没有实际证据证明富兰克林做过这个实验，这个实验可能仅仅是一个“思想实验”。

但是，无论如何，这个实验表明：被雨水湿透了的风筝的金属线变成了导体，把空中闪电的电荷引到手指与钥匙之间。这在当时是一件轰动一时的大事。很多人都在重复富兰克林的这一实验。为什么？因为当时社会上对于雷电有一种恐惧心理，大多数人认为雷电是“上帝之火”，是天神发怒的表现。富兰克林的实验惊动了教会，他们斥责他冒犯天威，是对上帝和雷公的大逆不道。然而，他仍然坚持不懈，而且在一年后制造出世界上第一个避雷针，终于制服了天电。由于教堂高高耸立的塔尖常被雷电所击，教会为了保护教堂，最终也不得不采用了这个“冒犯天威”的装置。以前电一直被人们当作一种娱乐手段，从此总算找到了实际的应用价值，从而为电的实际应用开启了大门。

富兰克林的这个实验不仅在美国有很大的影响，还影响到世界其他国家。1753 年，俄国科学家里希曼（Richmann）在屋顶上装了一根导线通到实验室，想用验电器来观察雷电现象。那时正逢雷雨交加，一个火球从上面传了下来，结果里希曼遭雷击而死亡。因此，富兰克林的风筝实验的影响，足以使每个电学家避免这种无谓的牺牲。

1800 年春季，伏打（Volta）发明了著名的“伏打电池”。这种电池是由一系列圆形锌片和银片相互交叠而成的装置，在每一对银片和锌片之间，用一种在盐水或其他导电溶液中浸过的纸板或抹布隔开。银片和锌片是两种不同的金属，盐水或其他导电溶液作为电解液，它们构成了电流回路。现在看来，这只是一种比较原始的电池，是由很多锌电池连接而成为电池组。但在当时，伏打的发明使人们第一次获得了可以人为控制的持续电流，为今后

电流现象的研究提供了物质基础，为电的应用开创了前景。伏打虽然发明了电池装置，但并不了解这种装置的原理。英国的化学家戴维（Davy）阐明了这种装置的原理，指出这类电池的电流来自化学作用，奠定了电离理论基础，并进而促使他的助手法拉第（Faraday）建立了电解定律。

1821年，英国人法拉第完成了一项重大的发明。在这之前的1820年，丹麦人奥斯特（Oersted）已发现如果电路中有电流通过，它附近的普通罗盘的磁针就会发生偏移。法拉第从中得到启发，认为假如磁铁固定，线圈就可能会运动。根据这种设想，他成功地发明了一种简单的装置。在装置内，只要有电流通过线路，线路就会绕着一块磁铁不停地转动。事实上，法拉第发明的是世界上第一台电动机，是第一台使用电流使物体运动的装置。虽然装置简陋，但它却是今天世界上使用的所有电动机的祖先。

1831年，法拉第发现，当一块磁铁穿过一个闭合线路时，线路内就会有电流产生，这个效应叫电磁感应。一般认为，法拉第的电磁感应定律是他的最伟大的贡献。据此，1831年10月28日，他造出了世界上第一台发电机——圆盘发电机。

过去，人类在探索自然界的道路上也取得了很多的成就，力量越来越超出自己肉体的限度。但是，人类掌握的力量大多是肉眼可见的，例如鲜红的火焰、巨大的抛石机、火药爆炸的威力，等等。换句话说，人类可以运用的能量形式，包括了热能、机械能、化学能。然而，这几种能量的使用，相比而言仍然是小规模，人的力量可以被放大数十倍、数百倍，甚至数千倍，然而指数级的放大效应是难以产生的。

电动机和发电机的出现，是电的应用道路上的两个关键性的创新。借助电能，人类的力量取得了突飞猛进的增强。今天的普通人终于可以不费吹灰之力的实现过去梦寐以求的愿望了。例如，在深夜点灯看书，用电力实现大规模流水线生产，用电驱动火车、轮船、飞机，用电热炉做饭，用电话进行沟通，以及用电视机、收音机、录音机、照相机、虚拟现实和互联网把我们的生活变得丰富多彩。事实上，电成了一根力量巨大的杠杆，我们可以用它来发光、发热、生产、出行、通信、上网……人类的手中多出来一根变幻无穷的魔法棒。从此，人类终于掌握了过去只有“天神”“上帝”才具有的能力，为电气化时代的到来彻底扫清了障碍。

第四节

信息革命的发端：晶体管的诞生

今天，我们的生活被电脑、智能手机、互联网充斥着。但是这一切的基础——晶体管，却极不起眼，以至于往往被人们忽视了。事实上，半导体时代的开启，乃至信息时代的降临，完全依赖于晶体管的诞生。晶体管的发明，可以说是 20 世纪物理学发展史上最重要的事件之一。

晶体管的发明是科学家长期探索的结晶。1833 年法拉第 (M. Faraday) 惊奇地发现硫化银的电阻率随温度升高而迅速降低，这成为半导体效应的先声。1883 年，美国发明家弗利兹 (C. E. Fritts) 制成第一个实用的硒整流器。1904 年，英国的弗莱明 (J. A. Fleming) 制造出检测电子用的第一支真空二极管。1906 年，美国发明家德福雷斯特 (L. D. Forest) 发明了第一支真空三极管 (电子管)。电子管一经发明出来，就被广泛应用在各种电子设备上。但是，随着电子管的广泛使用，其体积大、寿命短、价格昂贵、耗能多、易破碎等许多难以克服的缺点逐渐暴露出来，这直接影响了有关行业的发展。例如，1946 年美国宾夕法尼亚大学研制成的世界上第一台数字式电子计算机 ENIAC，它使用了约 18000 个电子管、1500 个继电器，耗电量达 150kW，占地面积 167 平方米，重量约 30 吨。

19 世纪 20 年代，量子力学的诞生使经典物理理论发生了根本性的变革。1931 年威尔逊 (A. H. Wilson) 进一步发展了布洛赫的能带理论，用能带理论解释了导体、绝缘体和半导体的行为特征，其中包括半导体电阻的负温度系数效应和光电导现象。后来，他又提出杂质能级概念，对掺杂半导体的导电机理做出了说明。

1945 年，第二次世界大战结束。美国的贝尔实验室决定重建原有的固体物理研究小组。其宗旨就是要在固体物理理论的指导下，“寻找物理和化学方法，以控制构成固体的原子和电子的排列和行为，以产生新的有用的性质”。1946 年 1 月，贝尔实验室固体物理研究小组正式成立，小组最初的

七位专家分别来自理论物理、实验物理、物理化学、线路、冶金、工程等各方面，都是各自领域的精英，群英荟萃，集各方面人才于一堂，称得上是一组黄金搭配。而且，他们又善于吸取前人的经验，善于学习同时代别人的优点。与此同时，他们内部开展学术民主，“有新想法，有问题，就召集全组讨论，这是习惯。”他们根据各自在30年代中期之后的经验，从刚成立时起就把重点放在了硅和锗这两种半导体材料的研究上。

杰出的理论物理学家巴丁（John Bardeen）加盟贝尔实验室后不久，肖克莱（W B Shockley）便带着困惑同他谈起了自己的“场效应放大器”实验。巴丁对上司肖克莱早期的空间场效应思想未得到确证的问题颇感兴趣，经过一段时间的苦思冥想后，提出了“表面态理论”。巴丁认为，在肖克莱使用N型半导体进行的空间场效应实验中，由于半导体内部自由的额外电子来到表面时被捕获，形成了严密的屏蔽层，致使电场难以穿透到半导体内部，从而使半导体内部的电荷载流子的行为免受影响，而负电荷载流子被紧紧地束缚在半导体表面上的结果是，肖克莱预言的电场中的半导体导电性会增强的现象观测不到。听取巴丁汇报完自己的猜想后，早年曾从事过表面态问题研究的肖克莱鼓励他对表面态问题进行深入探索。于是，此后的一段时期，半导体研究小组将研究重点由场效应放大器的研制转向了半导体基础理论问题——表面态的研究。一是利用表面态这个新理论，进行一系列新实验；二是验证这个理论是否正确。巴丁同实验物理学家布拉顿和皮尔逊紧密协作，表面态的存在随后被实验加以证实。^①

1947年9月，研究小组确认表面态效应确实存在。进一步研究后发现，在电极板与硅晶体表面之间注入诸如水之类的含有正负离子的液体，加压后会使得表面态效应获得增强或减弱。因为在电极的作用下，正离子或负离子会向硅晶体表面迁移，进而增强或减弱那里的电荷载流子的浓度。当给电极施加足够的负电压后，硅晶体表面被束缚的负电荷就会同电解质中的正离子发生中和，这样，外加电场便可对硅晶体内部产生作用。表面态效应长期以来一直是导致场效应放大器实验失败的主要原因，其作用机理被阐明之后，设计、试制半导体放大器的一个重大障碍便被排除了。

① 周程. 晶体管发明者肖克莱引发的科技管理问题思考 [J]. 科学学研究, 2008, 26 (2): 274-281.

1947年11月21日，巴丁向布拉顿（W Brattain）提出了着手进行半导体放大器研制实验的建议。巴丁的实验设想是，将一涂有绝缘层的金属的尖端刺到硅片上，形成点接触，并在其周围注满电解质，然后通过调节加在电解质上的电压来改变点接触下方硅晶体的导电性能（即电阻），从而控制流经硅片与金属的电流。巴丁后来回忆，他建议“使用点接触完全是出于便利的考虑”。二人当天便按此思路进行了实验，并在输出回路中观测到了微弱的放大电流信号。实验初步达到了预期效果。

接下来的一周，巴丁和布拉顿就多个设计方案进行试验，如用锗晶体代替硅晶体，用金丝代替钨丝，用漆代替固定接触点的石蜡，并接受同事的建议，用硼酸醋作为电解质。然而，12月初，小组在实验中遇到了难题：一方面，放大装置几乎没有电压增益；另一方面，测试装置只能在不超过约8赫兹的超低频范围内工作，这远低于人类的听觉范围，而放大器的输入信号频率要求达到数千赫兹。

12月8日，肖克莱与巴丁、布拉顿等人开会就实验中所遇问题的解决方案进行了讨论。巴丁提议用耐高反向电压的锗晶体取代硅晶体试一试。这种锗晶体是一种掺锡的半导体材料，普渡大学物理系的研究小组已经对这种材料做了开拓性的研究，并用于检波器生产。当天下午，巴丁与布拉顿使用锗晶体进行实验时发现，随着给硼酸醋液滴施加的负电压值的增大，电路中的反向电流也随之明显增大，而且他们还观察到输出信号的电压也随之成倍增加。两天后，布拉顿用一个特制的耐高反向电压的锗晶体做重复实验时发现，功放系数虽有较大程度的提升，但响应频率并没有获得改善。布拉顿认为，这也许是因为电解质的响应频率具有滞后性之故。因此，接下来需要做的就是如何摆脱电解质的滞后影响了。

1947年12月11日，吉布尼（R. Gibney）提供了一个表面生成了氧化层（旨在替代电解质）的N型锗片，吉布尼在氧化层上面沉积了5个小金粒。布拉顿在金粒上面打了一个小洞，用钨丝穿过小洞和氧化层插入锗晶体作为一个电极，希望通过改变金粒块和锗晶体之间的电压以改变钨丝电极与锗晶体之间的导电率。布拉顿在做实验时，发现金粒与锗晶体之间的电阻很小，二者几乎形成短路，即氧化层没有起到绝缘的作用。而当布拉顿在金粒和钨丝电极加上负电压后，发现没有任何输出信号。在操作过程中，布拉顿不小心将钨丝和金粒短路，致使第一个金粒烧毁。

12月12日，布拉顿在分析实验失败的原因时意识到，可能是由于沉积金粒前曾用水冲洗过锗晶片，致使锗晶体上面的氧化膜一起被冲走，从而造成金粒与锗晶体之间的短路。不过，此时已是星期五的周末时间了。

12月15日是星期一。布拉顿决定在抛弃只剩下四个金粒的锗片前再试一试。他将钨丝电极移到金粒的旁边，碰巧在钨丝上加了负电压，在金粒上加了正电压，没有料到在输出端出现了和输入端变化相反的信号。初步测试的结果是：电压放大倍数为2，上限频率可达10千赫。这意味着无须在锗晶体表面特意制作一层氧化膜，简单地让金粒和锗晶体表面直接接触就可获得良好的响应频率。

理论物理学家巴丁敏锐地意识到金粒与锗晶体的接触界面上已经出现了一种新的，与加电解质完全不同的物理现象。巴丁认为，在金粒电极加正电压后，注入锗晶体表面的应该是空穴，而此时流经钨丝与锗晶体之间的电流是反向的，那么随着钨丝触点与金属电极之间距离的缩小，流经钨丝与锗晶体之间的电流应该会相应增大。

据布拉顿回忆，他与巴丁讨论之后，认为“当务之急就是使分布在锗晶体表面上的钨丝触点与金属电极尽可能靠得近一些。按巴丁的简单推算，两者之间的距离不得超过0.002英寸”。这相当于一张普通纸的厚度。最后，实验物理学家布拉顿巧妙地采用了一种不用导线而在两个金电极间狭小的空隙中实现目的的方法。他请技师切削了一个小塑料楔，将一条金箔贴于楔的两个边缘，然后小心地用刀片切开塑料楔顶端的金箔，形成一条狭缝，将这个塑料楔置于一根弹簧上，再将塑料楔压到锗晶片上。金箔狭缝两边与锗晶体表面接触，两个点接触之间的间距小于0.002英寸。在12月16日进行的实验中，布拉顿用导线将新装置同电池相连接，构成工作回路。巴丁与布拉顿在其中一个接触点加上1伏正电压，在另一个接触点加上10伏负电压，此次实验就获得了1.3倍的输出功率增益，同时电压放大了15倍。在接下来的实验中发现，当输出电压放大系数下降到4时，输出功率的功放系数高达450%，奇迹出现了！

一周后的12月23日，肖克莱领导的半导体研究小组使用含有这种新发明的固体放大器的实验装置为贝尔的主管领导演示了音频放大实验。这是一次没有使用电子管的音频放大实验。实验一如人们所期待的那样获得了成功。次日，又做了把点接触型晶体管当作振荡器的实验。后来，布拉顿和

另一位小组成员皮尔斯将这种固体放大器命名为“transistor”。由于这种晶体管主要由两根金属丝与半导体进行点接触而构成，故被称作点接触晶体管。

由于没有被列入点接触晶体管专利发明人名单，肖克莱受到很大刺激。经过一段时间的思考之后，肖克莱于1948年1月23日想出了在半导体中加一个调节阀的方法。也就是说，设计一种类似于三明治结构的晶体管，这种晶体管最外两层使用性质相同的半导体材料，中间夹层使用性质完全相反的半导体材料，三根导线分别与各层相连。这样，人们便有可能通过给中间薄层施加不同的电压来调控由其中的一个外层流向另一个外层的电子或空穴的流量。由于这个中间薄层的功能与自来水管中的阀门相似，故肖克莱把这种器件称作“半导体阀”。显然，这个中间薄层的功能与肖克莱的“场效应放大器”中的电极板相似，只是一个被平行地置于半导体表面之外，一个被拦腰置于半导体之中罢了。这种“半导体阀”的一个明显优点是：三根导线和半导体层都采用结连接。因此，可以克服点接触晶体管所具有的对震动过于敏感、性能不稳定等缺点。又经过了几年的研究和多次失败，1951年7月4日，贝尔实验室为结型晶体管的发明举行了新闻发布会。“正是结型晶体管这个肖克莱在理论上革命性的发明，带来了半导体革命，引发了硅时代”。巴丁、布拉顿和肖克莱三人由于在晶体管的发现过程中在理论和实验方面发挥的不同作用，共同分享了1956年的诺贝尔物理学奖。

晶体管从无到有，这是重大发明。如果考虑更长的链条，即包括晶体管的设计、发明、生产到应用以及材料制备、制造工艺等，这些环节的组合就成为创新。^① 鉴于许多环节以前都不曾有过，因而晶体管的横空出世可称为“根本性创新”或“突破式创新”。

贝尔实验室1925年成立后，便把研发的目标从电话转移到更广阔的通信领域。公司负责人和科技人员认识到，传统的电子管存在先天缺陷，无论怎么改进也难以承担未来的通信使命。根据当时的科技发展状况和通信技术积累的经验，他们认为，重视固体物理研究，着眼于新兴的半导体材料，可能会有大突破。开始这只是一种意向，要实现，必须要有大量切实的理论和

① 戴吾三. 晶体管诞生记 [J]. 科学, 2015, 67 (1): 13-17.

实验研究，而且人员配备、资金投入都必不可少。正是具有战略眼光和气魄，加之雄厚的科研基础，使贝尔实验室与其他电话公司、电气公司的研发机构具有本质区别。贝尔实验室由此成为晶体管的发源地和世界半导体研发的主要中心。可见，立足专业领域、布局原始创新，应当是那些卓越的企业（组织）考虑的问题。实际上，这是需要莫大的勇气的，因为这种原始创新可能意味着对该企业自身原有技术、产业的颠覆。勇于成为自己的掘墓人，才能避免诺基亚、柯达那样被破坏性技术所颠覆的命运。

半导体研究从带有风险性的攻关课题组开始，在第二次世界大战后发展成为攻坚的团队，实施多学科专业、人才合理配对的组织协作。团队有半导体组与材料冶金组配对；半导体组内有理论物理学家与实验物理学家配对，材料冶金组内有化学家与冶金学家配对；从整体而言，还有基础研究与新产品开发应用的配对。按贝尔实验室首任总裁朱厄特（F. B. Jewett）的说法，将这些配对相互“搭焊”起来，让信息双向顺利流通，从而形成一个组织化的攻坚团队。贝尔实验室的团队模式是一种组织创新，后来对美国乃至其他国家的科研机构都有重要影响。团队及配对之间难免会有差异或矛盾，这就需要在管理上加以沟通和协调，关键是上层要营造出创新环境，激励大家一起向大目标努力。贝尔实验室制定了大学式的研究环境政策，科研人员获得发明专利后的成果都允许在一定范围内的刊物上发表或在学术会议上交流。贝尔实验室的房间设计专门采用了可调节和组合的间壁结构，以便按研究需要调整房间的结构和大小。正是有了如此适于创新的环境，围绕晶体管的创意才层出不穷，成果不断涌现。可见，团队配对协作、营造创新环境，这是创新所必不可少的条件。

晶体管发明之后，贝尔实验室并没有因为已达到既定目标而减慢步伐，而是加快研究晶体管在通信和控制系统中的用途，并对单晶材料及制造工艺的研究加大投入，以期实现质优价廉的批量生产，以及进一步向其他方面（集成电路、光通信元器件等）扩展。可以说，没有半导体材料的提纯和生长单晶以及掺入杂质的技术，高性能的晶体管就不可能诞生；没有硅氧化物掩膜、电路图印刷、蚀刻和扩散技术，平面式晶体管和集成电路也不可能实现，微电子技术的发展更无从谈起。为加快晶体管的推广应用，贝尔实验室又开发了导线和引线的热压接合技术、外延生长技术和分子束外延技术等。之后，贝尔实验室研制成功世界上第一台晶体管计算机，而模拟式通信向数字化通

信的转变也在此起航。这一进程向世人展示了产研密切结合的重要性。而事实上，单纯的研究导向的组织（如大学、基础型的科研院所）大多以基础研究、应用性基础研究为主要业务，很难像贝尔实验室那样对应用和开发研究做如此大规模投入。而产业化导向的研究型组织（如企业附属的研究院所、独立的产业化研究院所）往往能够将纯理论和纯实践进行结合，将技术发明推向大规模产业化。

第五节 技术创新的归宿

技术创新究竟能够给人类社会带来什么样的福音？对于这个问题，有学者是持怀疑态度的。姑且不论那些看起来就让普通人心生厌恶甚至避之不及的技术创新成果，例如原子弹、机关枪、毒药，就是那些第一眼看起来让人愉快的创新成果，也有可能事实上束缚了人类的手脚，而不是赋予人类更大的自由。

例如，农业革命使人类获得了小麦、水稻、土豆等稳定的食物来源，然而人却因此被束缚在了固定的土地上，并且原本多样化的食物来源变得单一化。有学者认为，这导致了人类的健康状况不是改善而是恶化。因此，这种技术创新实际上降低了人类的幸福指数。^①

另一个例子就是电脑、互联网和智能手机。信息化时代极大地丰富了我们的体验，使人类获取知识、生产知识和运用知识的能力取得了前所未有的爆炸式的增长。然而，另一方面，走在马路上的低头族（埋头看手机的人）越来越多，颈椎病、腰椎间盘突出、视力下降的现象也前所未有的普遍起来。我在上海大学的同事就有好几个因为离不开电脑和手机而患上腱鞘炎、颈椎病，不得不求助于上海最好的医院的顶级专家，有的甚至还做了手术。

^① 尤瓦尔·赫拉利. 人类简史 [M]. 北京：中信出版社，2014.

这样看来，那些持“技术创新实际上弊大于利”观点的学者所提出的论据似乎无可辩驳。

然而，与之相对地，我们可以发现，正是由于接踵出现的技术创新，人的经历比起过去显得越来越多样化。由于纺织技术的进步，我们可以在盛夏的海边穿上清凉的短裤和比基尼，而在大雪纷飞的寒冬穿上轻便透气的羽绒服。由于饲养、耕作和食品制作技术的发展，我们可以尝到麻辣的川菜、清爽的寿司、丰盛的火鸡宴。由于建筑材料和工程技术的飞跃，我们可以住在冬暖夏凉的日子里。由于机械制造、材料、电子通信、计算机等多种技术的升级，我们如今拥有了更适合出行的 SUV（运动型实用汽车）、高速火车、大型超音速飞机和邮轮（未来可能还有商用火箭和商用宇宙飞船）。人类的经历变得前所未有的丰富。一个小孩在三岁之前所看到、听到、用到的物品数量，可能是一个唐朝皇帝一辈子经历过的十倍甚至百倍。因此，我们可以说，由于技术的发展，用生理学指标（比如多巴胺浓度）衡量的人的精神愉悦程度比我们的原始祖先的确是可能降低了，但是人的体验却极大地丰富了。

正因如此，当我们把“生活在原始社会还是生活在现代社会”这道选择题放在现代人面前的时候，不用怀疑几乎所有人的选择会是后者。尽管生活在现代社会可能让人每天都会因缴纳水电煤气费、面对上司的高压冷眼和同事的钩心斗角而心烦不已，人类还是愿意忍受这一切，并在一个无所事事的夜晚，捧着爆米花和可口可乐，像“葛优躺”一般地半躺在席梦思床上，看着对面 52 英寸液晶电视里面的喜剧明星傻乐。

当我们把技术创新的成果与马斯洛的需求层次理论进行对照的时候，我们就会发现：第一层面的需求，也就是生理需求，已经在人类的解放体力的创新浪潮中基本上满足了。石器和火的出现，基本上解决了人的生存问题，使人在酷热的夏天和严寒的冬季能够获得足够的食物和水。从第二层面往上的需求主要是精神需求，人们用以四大发明、光和电、半导体等为代表的技术创新来满足这些需求。不可否认的是，人类社会——至少是具有相当发展水平的人类社会——已经摆脱了食不果腹、衣不蔽体的阶段，更多地考虑精神层面的需求。

人类早已脱离了农业社会阶段，依次进入工业社会、后工业社会、信息社会。后来的技术创新，不论是飞机、火箭，还是彩电、冰箱，都是为了更

多地满足人的精神需求（冰箱的功能主要是为了满足人们在炎炎夏日也能吃上雪糕这个精神需求而不是活下去的生理需求）。甚至新近出现的性爱机器人，也是为了满足人的猎奇心理，而不是真正要去满足基本的性生理需求。

从这个意义上说，人的体验主要是精神层面的，而非物质层面的。正是五花八门的技术创新成果满足了人们的多种多样的精神需求，从而丰富了人的体验，为人类登上新的阶梯而铺平了道路。

今天，人的工作、生活节奏越来越快，大脑使用的频率和强度都越来越超出四肢和躯干。有人类学家认为，这是生物进化的丧钟。有朝一日，人类的外表看起来就像是一个加强版的外星人 E.T. 一个硕大的脑袋，加上一个豆芽菜般的躯干。也有可能，在不久的将来，芯片植入大脑就将变成现实，就像电影《黑客帝国》（*Matrix*）所描述的那样，人脑的功能得到了极大的加强。

更进一步，有朝一日，或许人会实现虚拟的存在，就像科幻小说《时间移民》所描述的那样，每个人成为网络中的一个信号、一个脉冲，不再有躯干四肢，不再有眼睛耳朵，连大脑都不需要了。为什么会有人选择虚拟的存在？真实的、有血有肉的存在不是更好吗？或许，虚拟存在的体验是压倒现有的真实存在的所有体验的。正因如此，有可能人类——或者是一部分人——会做出那样的选择。至于那种选择有什么风险，可能产生什么糟糕的后果，那就不是我们现在能够考虑清楚的了。但是我们应当相信——或者说愿意相信，那时的人类能够做出全方位的正确的评估和选择。最终，人类会不会只剩下意识，漫游在空间和时间，就像阿瑟·克拉克的《太空漫游》所描述的那样？我们不得而知。在这条通往未来的道路上，有太多的可能，太多的不确定性。每一次创新，都有可能把我们引向一个未卜的前途。

The background features several 3D wireframe geometric shapes, including cylinders and cubes, rendered in a light gray color. These shapes are arranged in a way that creates a sense of depth and perspective, with some appearing to recede into the distance. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on geometric forms.

第三章

**科学的脚步：
暗夜中舞动的精灵**

第一节

科学启蒙：走出中世纪的黑暗

总的来说，创新的科学时代比技术时代来得晚一些。人类学会用石斧、石刀是几百万年前的事，学会用火也是在几万年前。然而，为什么石斧、石刀能够产生比手掌、手臂更大的力量？为什么火能够把东西加热、烤熟乃至烧焦？这些问题都太理论化，远没有实用效果来得重要。

人是实用主义的动物，也就意味着功利性始终占据着我们的内心。时至今日，企业家也总是把一句话挂在嘴上：“不要跟我谈什么理论，我只关心结果。”不过，实际情况是：如果不去思考理论问题，那么很多事情就压根儿没法完成。而理论问题的阐明，恰恰是科学的任务。

在人类文明的早期，大多数人的确不关心理论问题，对科学研究缺少兴趣，也没什么概念。不过，在 2000 多年前的古希腊文明时代，经济生活高度繁荣，科学和技术一度达到相当发达的水平。就有那么一些人，对于纯理论问题情有独钟。那一时期的科学和技术很难分开，事实上，科学、技术问题和哲学问题相当紧密地联系在一起。很多问题，既是科学问题，又是哲学问题。当时的哲学家柏拉图（Plato）写下的哲学对话录，就既包括了获得知识的方法，也包括了伦理学、形而上学、推理等概括的观点。在他看来，知识只能通过沉思、冥想、推理而获得。

柏拉图的学生亚里士多德（Aristotle）认为分析学或逻辑学是一切科学的工具。他是形式逻辑学的奠基人，他力图把思维形式和存在联系起来，并按照客观实际来阐明逻辑的范畴。亚里士多德研究了推理，认为推理是通过前提得出必然结论的逻辑形式。他提出的直言三段论是一个比较完整的演绎推理理论，是一个初级的公理化系统。亚里士多德把他的发现运用到科学理论上来。作为例证，他选择了数学学科，特别是几何学，因为几何学当时已

经发展到了具有比较完备的演绎形式的阶段。亚里士多德还曾提出许多数学和物理学的概念，如极限、无穷数、力的合成等。

实际上，古希腊涌现了不少杰出的数学家，例如丢番图、欧几里得、阿基米德。而数学的发展在很大程度上确实是依靠推导、冥想。想想看，“直角三角形的两条直角边的平方和等于斜边的平方”，这样的理论创新并不是来源于工匠们的长期实践，而是根据直角三角形固有的特性，运用数学原理而推演出来的。这样看来，柏拉图和苏格拉底的观点至少在那个时代是正确的。实际上，古希腊的确成为演绎几何学、形式逻辑和第一原理的形而上学的发源地，这也使其成为现代科学思想的发祥地。

然而，与柏拉图相比，亚里士多德更像一个经验主义者。柏拉图认为理念是实物的原型，它不依赖于实物而独立存在；亚里士多德则认为实物本身包含着本质。柏拉图断言感觉不可能是真实知识的源泉；亚里士多德却认为知识起源于感觉。此外，他还发现，通过系统的实验，可以找出事物的因果关系。因此，他很重视从感观获得知识。所以，我们称亚里士多德为一个早期的唯物主义者也不为过。

不幸的是，漫长而黑暗的中世纪，消磨了人们的意志，古希腊、古罗马时代遗留下来的科学精神损失殆尽。“科学只是教会的恭顺的婢女，它不得超越宗教所规定的界限。”为数不多的科学家遭到了基督教教廷的迫害。哥白尼，布鲁诺，希帕提娅，赛尔维特，西克尔……宗教的压制，使得科学上的创新几乎丧失了所有的可能性。“学术研究已经在我们中间死去”。在这个黑暗沉闷的时代，尽管在生产生活的各个领域，技术进步仍然或多或少地发生，然而科学却受到宗教强有力的束缚，几乎陷入停滞不前的境地。

不过，即使是在那样的黑暗日子里，人类的科学创新也并不是一无所获。在数学领域，意大利人斐波那契（Leonardoda Fibonacci）在他的以翻译阿拉伯人的作品为主要内容的《算盘书》中，向欧洲人介绍了印度——阿拉伯数字，也就是印度的计数体系（阿拉伯数字其实是来源于印度，因此更加准确的说法应该叫印度数字）。尽管与希腊的计数体系产生了竞争，印度体系还是占据了上风，并被许多数学家所广泛采用。可见，“引进—消化—吸收”的创新模式，早在中世纪也已经被欧洲人采用了。

在历法方面，1582年，罗马教皇格里高利十三世把儒略历1582年10

月4日的下一天定为10月15日，中间消去了10天。同时规定：凡公元年数能被4整除的是闰年，但当公元年数后边是带两个“0”的“世纪年”时，必须能被400整除的年才是闰年。这样一来，基本上把自恺撒、屋大维以来采用的历法所积累的误差消除了。历法的这一创新，对人类的生产生活产生了重大的影响。至少，大家对什么时候举办新年音乐会、什么时候放小长假、什么时候亲朋好友过生日、什么时候参加中考高考都没有异议了。

炼金术（Alchemy）是中世纪的一种化学哲学的思想和始祖，是当代化学的雏形。炼金术是起于12世纪欧洲的一个名字。到公元8世纪，炼金术真正开始了。炼金术士相信，炼金术的精馏和提纯贱金属，是一道经由死亡、复活而完善的过程。西方的不少国王，如英国国王亨利六世、法国国王查理七世等，也跟中国古代的秦始皇、汉武帝一样，一心希望通过炼金术使自己达到长寿永生。然而，这一技术逐渐演化为一门独立的学科，还是要拜许多学者所赐。例如，罗杰·培根（Roger Bacon）就宣称：“炼金术是诸多认识世界的方法之一。”还有后来的艾萨克·牛顿（Isaac Newton）、罗伯特·波义耳（Robert Boyle），逐渐去除了炼金术中的神秘学思想，指出：“化学，……必须像物理学那样，立足于严密的实验基础之上。”化学，作为炼金术的不断创新的结果，逐渐浮出了水面。

谈到牛顿，就不能不提到他在光学领域的成就。他用三棱镜研究日光，得出结论：白光是由不同颜色的光混合而成的，不同波长的光有不同的折射率。在可见光中，红光波长最长，折射率最小；紫光波长最短，折射率最大。这一重要发现成为光谱分析的基础。在他的著作《光学》一书中，他还详细阐述了光的粒子理论，成为光的粒子理论的创立者。然而，早在牛顿之前近100年，近代光学的奠基者，德国人开普勒（Johannes Kepler），就已经研究过光的折射问题，提出了光线和光束的表示法，并阐述了近代望远镜理论。他甚至发明了开普勒望远镜。公平地说，牛顿的光学研究成就，在很大程度上是建立在开普勒等人研究的基础上的。

在那样黑暗的日子里，最重要的科学创新来自于天文学、力学。在1515年以前撰写的一份手稿中，波兰的哥白尼（Nicolaus Copernicus）就指出：太阳是宇宙的中心，地球绕自转轴自转，并与五大行星一起绕太阳公转；只有月球绕地球运转。然而，作为一个虔诚的天主教徒，他深知自己

的理论与基督教义、托勒密的地心说理论格格不入，因此迟迟不能下决心把研究成果公之于众。直到 1543 年，他在弥留之际，在朋友的劝导下，他才把《天体运行论》付梓。1543 年 5 月 24 日，他在病榻上收到出版商从纽伦堡寄来的《天体运行论》样书，他只摸了摸书的封面，便与世长辞。能够公布这一科学创新的成果，却又是这么晚的时间点，这是他的不幸，却也是世界的万幸。接下来，意大利的布鲁诺（Giordano Bruno）被罗马的宗教裁判所裁定为“异端”，烧死在罗马的鲜花广场。他也因此常常被人们看作近代科学兴起的先驱者、一位捍卫科学真理并为此献身的殉道士。^①

后来，开普勒发现了行星运动的三大定律：轨道定律、面积定律和周期定律。意大利人伽利略（Galileo Galilei）则用望远镜观察天体，得到了大量的成果。他发现所见恒星的数目随着望远镜倍率的增大而增加；银河是由无数单个的恒星组成的；月球表面有崎岖不平的现象；木星有四个卫星（其实是众多木卫中的最大的四个）。他还发现了太阳黑子，并且认为黑子是日面上的现象。根据他的观测结果，他反驳了托勒密的地心体系，有力地支持了哥白尼的日心学说。伽利略既是勤奋的科学家，又是虔诚的天主教徒，深信科学家的任务是探索自然规律，而教会的职能是管理人们的灵魂，不应互相侵犯。事实上，他多次前往罗马，拜见教皇，力图说明日心说可以与基督教教义相协调，说“圣经是教人如何进天国，而不是教人知道天体是如何运转的”；并且试图以此说服一些大主教。可惜他的努力毫无效果。教皇保罗五世在 1616 年下达了著名的“1616 年禁令”，禁止他以口头的或文字的形式保持、传授或捍卫日心说。可伽利略是不屈服的。1632 年，他的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系对话》一书面世，笔调诙谐，对教皇和教会进行了调侃。这激怒了教会。宗教法庭把伽利略传到法庭，宣判他有罪，并责令他忏悔，放弃自己证明了的学说，禁止《对话》流传。直到 300 多年后的 1979 年，罗马教皇才不得不在公开集会上宣布：对伽利略的宣判是不公正的。

可见，自从有了人类历史以来，在宗教、信仰、权威的面前，创新，尤其是科学的创新之路总是那么艰难。相比于技术创新，科学创新往往从更深层面撼动了传统的意识观念、社会形态，从而可能对既有的社会阶层、利益

① 这件事目前还存在争议。例如，有人指出，布鲁诺并不是因为哥白尼的日心说而死的，一个证据是，在他被烧死时，罗马教会根本还没有查禁哥白尼的《天球运行论》。

分配、权力系统产生影响甚至是颠覆，因此也更容易遭到既得利益者的抵制甚至迫害。时至今日，在不同的场合，不同的背景，各种权威（包括学术权威、政治权威）也总是以这样那样的名义对科技创新进行压制。尽管如此，地火在地下的奔突、运行是不容易被完全阻止的。科学创新的脚步从来都不会被权威所羁绊。

15 世纪末 16 世纪初，意大利的列奥纳多·达·芬奇（Leonardo di ser Piero da Vinci）在工程技术、物理学、生理学、天文学方面的思想都具有划时代的意义。他提出了连通器原理，发现了惯性原理；他得出了摩擦力的定义，发现了杠杆的基本原理，重新证明了阿基米德所得到的学过流体静力学结论；它设计了水下呼吸装置、风速计、陀螺仪、飞行器，甚至机器人的雏形；他还认为地球只是一颗绕太阳运转的行星，太阳本身是不运动的。达·芬奇可以说是古代科技创新和技术创新的一位集大成者。事实上，经过许多科学家的努力，到 16 世纪，在天文学和力学方面，人类已经积累了丰富的资料。

接下来，伽利略最早对动力学进行了定量研究。他对物体的自由下落运动做了细致的观察，并且在比萨斜塔上做了那个著名的自由落体实验。在今天的人看来，拿起两个大小不一样的铅球（或者别的任何不一样质量的东西）让它们从高处落下来，似乎没什么大不了的。然而在伽利略那个时代，这意味着对原有认知的彻底颠覆，完全称得上是颠覆式创新。伽利略对实验的重视，恰好继承了亚里士多德的衣钵，打破了宗教对人们思想的禁锢。正是由于他第一个把实验引进力学研究，并且深入的研究了重力、速度、加速度等基本概念，经典力学的基础才得以奠定。具有讽刺意味的是，正是对亚里士多德的实验主义的继承和发扬，伽利略的研究成果——重力加速度对所有物体是恒定的——推翻了亚里士多德的“重物比轻物下落快”的理论。

作为同时代的人，伽利略和开普勒分别发现了地上物体运动的三个力学定律和天体运动的三个力学定律。得益于此，并综合了哥白尼等人的成果，艾萨克·牛顿实现了天上力学和地上力学的综合，形成了统一的力学体系。在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》一书中，他阐述了其后 200 年间都被视作真理的三大运动定律。牛顿把天体和地球统一起来，结束了自古以来的无休止的宇宙学争论，向人们展示了一个崭新的世界。此外，在开普勒、雷恩、胡克、惠更斯等科学家研究的基础上，牛顿还得出万有引力定律，哈雷彗星的发现、地球扁平形状的发现、天王星和海王星的发现，都证明了

万有引力定律的正确性。

有人评价牛顿是有史以来最伟大的科学家，没有之一。牛顿自己却说：“我好像是一个在海边玩耍的孩子，不时为拾到比通常更光滑的石子或更美丽的贝壳而欢欣鼓舞，而展现在我面前的是完全未探明的真理之海。”在今天的大多数人看来，牛顿几乎是凭借一己之力，做出了近代力学史上最大的科学创新。不过事实并非如此。牛顿自己也说：“如果我看得更远一点的话，是因为我站在巨人的肩膀上。”他的科学创新，包括数学方面的微积分的发明、力学三大定律的发现、光的色散现象和光的粒子理论，都是建立在前人的成果的基础上的。因此，可以说是渐进式创新，而不是突破式创新。即便如此，牛顿作为科学巨人的地位也是无法撼动的。由此可见，渐进式创新并非无关紧要。恰恰相反，一次小小的渐进式创新，也很有可能给人们带来一场认识、理念上的根本性的革命。

中世纪末期，封建制度逐步解体。在意大利的商业贸易中心佛罗伦萨，最早兴起了以弘扬人文主义为核心的文艺复兴运动。文艺复兴不只是一场复兴古典文化的运动，更是一场新时代的启蒙运动。在绘画、文学、雕塑、建筑等各个领域，歌颂人性、倡导自由、弘扬人权的新思想、新潮流不断涌现。

与此同时，新时代日益深入人心的人文主义思想，力图将人从神的统治下解放出来。在1517年，德国教士马丁·路德（Martin Luther）提出了新教学说，主张信仰高于一切。唯有心中信仰，才能得救。路德以宗教的语言，表达了那个时代人们心中自由、平等的观念，在基督教世界播撒着人文主义精神的种子。

从1271年，意大利人马可·波罗（Marco Polo）跟着父亲和叔叔沿陆路去东方旅行开始，欧洲商人就陷入了对东方文明、东方财富的狂热追逐。出生于意大利热那亚的克里斯托弗·哥伦布（Christopher Columbus）在葡萄牙碰壁，甚至妻子都离开了他。但是他坚持不懈，终于得到西班牙王室的资助，于1492年开始西航计划，共进行四次，发现了北美大陆和南美大陆，但他至死都始终认为自己找到了亚洲大陆。虽然哥伦布的西航没有达到其功利性的目的，但是空前的激发了欧洲人的探险精神和想象力。后来的意大利探险家亚美利哥·维斯普奇到达美洲大陆，作了详细考察，并且向世界宣布了新大陆的概念，一下子冲垮了中世纪西方地理学的绝对权威普多列米制定

的地球结构体系。后来，新大陆也以他的名字命名。1497年，葡萄牙人瓦斯科·达·伽马（Vasco da Gama）率领四艘船离开里斯本，开始探索由非洲到印度的航路，并成功的到达印度西海岸。像哥伦布一样，在葡萄牙郁郁不得志的费迪南德·麦哲伦（Ferdinand Magellan）于1517年来到西班牙，立志完成哥伦布当年没能完成的事业：从西面达到真正的东方。1521年，麦哲伦船队横渡了太平洋，来到菲律宾。尽管麦哲伦试图征服这里的土著居民，并最终客死他乡，但是最终仍然有18名船员驾驶着一艘“维多利亚”号返回了欧洲。地理大发现的这些先行者们，不管他们的利益动机是什么，客观上都极大地推动了人们对客观世界认识的加深，并促使欧洲人重新审视自己传统的世界观，从而对原有的以天主教为主导的世界体系重新认识。

在以上这些因素的驱使下，以牛顿为代表的科学家们，从数学、力学、光学、天文学等领域对传统理论发起了冲击。尽管在今天看来，他们的理论平淡无奇，其中许多理论甚至已经是顽童们的常识，但是在他们那个时代就像晴天霹雳。科学研究的先行者们，就这么一步一步缓慢地、然而坚定地向前推进。每一点微小的进步，都意味着与真理更接近了一步。量变引起质变，直到最后捅破窗户纸的那一个理论出现。从理论发展的沿革来看，最后那一步只能称得上是渐进式创新；但是从效果来看，却无疑是一大革命。

牛顿、开普勒、伽利略、达·芬奇等人都是不折不扣的知识渊博的智者。据说牛顿的智商达到290（可是他性格腼腆，羞于向女孩表白，终身未婚未育）。他们不仅术业有专攻，而且涉猎广泛，可以称得上是真正的博学之士。

人类文明发展的进程是如此之快，仅仅300多年过去，学科的细分就已经达到相当的程度。不光是数学、物理学、光学、天文学之间鸿沟高深，就算在纯物理学内部，也产生了经典力学、热力学和统计力学、电磁学、相对论、量子力学等分支。在今天的大学校园里，一个电磁学专家碰到一位经典力学高手，两个人就一个问题展开讨论，就已经很难碰撞出高山流水那样的心有戚戚焉的感觉，更有可能的，彼此会觉得是对牛弹琴。小学科尚且如此，能够跨越大学科、通晓多门学问的真正的“博士”就更难出现了。因此，今天的科学创新，已经越来越深入到各个小学科的内部。试图横跨多学科的大范围意义上的创新，已经是难上加难。举例来说，物理学界长期以来试图建立统一场论，可是到目前为止还看不到取得突破的希望。诚然，要在多个细

分学科都具有相当高深的造诣，对一个学者的要求比他在 300 年前的前辈要高得多。人的时间和精力是有限的。尽管人的智力水平也在不断地刷新纪录，仍然难以赶上学科深奥程度的迅速增加。如果我们用一个分式来表示博学者出现的可能性：人的智力水平 / 学科深奥程度，那么也许我们能更明显的体会，分子的增加速度远远赶不上分母的增加速度。这也使得博学者的出现在今天变得越来越难。

中世纪的中后期到文艺复兴的早期，见证了人类认识自然历史的第一次大飞跃和理论大综合。阿拉伯数字的引入和微积分的创立，光的色散的发现，化学研究的进步，牛顿经典力学定律的横空出世，日心说的一波三折的确立……所有这些新发现，都不断刷新着人们的认识。大量的科学创新不断涌现，使人们的思维经历着一次又一次天翻地覆的革命。头脑中已有的曾经貌似坚不可摧的大厦一次又一次的崩塌、重建、崩塌、重建……一个新的时代得以开辟，并对科学发展的进程以及后代科学家们的思维方式产生了深远的影响。

第二节

爆发前的地火：电磁学

电磁学的进步，在科学发展史上具有突出的典型性。18 世纪的欧洲，经历了文艺复兴的热潮，刚刚走出中世纪的蒙昧，世界迫切的呼唤着思维方式的新突破。电磁学方面的进步来得正是时候。

1733 年，法国人杜菲（Charles Francois de Cisternay du Fay）就发现电有两种：松香电和玻璃电。而且，这两种电是同性相斥、异性相吸的。之后不久，莱顿瓶——一种简单的电容器被发明出来。这样一来，电学研究者总算有了可靠的能够储存电荷的装置了。借助莱顿瓶，美国人富兰克林用著名的风筝实验证明了天上的电与人间的电是一回事，并且发明了避雷针。

1777年，法国物理学家库仑（Charles-Augustin de Coulomb）通过研究毛发和金属丝的扭转弹性而发明了扭秤。后来，他用扭秤推导出了两个静止电荷间相互作用力与距离的平方成反比的规律，后来被称为库仑定律，而具有特殊意味的是，这一发现是从牛顿的万有引力定律得到启发的。从数学公式的表达上就可以看出来，这两个定律长得就像孪生兄弟。

事实上，这种“模仿式创新”不仅发生在技术创新领域，在科学创新领域也屡见不鲜。库仑可以把力学、电磁学之间的边界打通，牛顿把力学与天文学之间的边界打通，都得到了举世瞩目的成果。进一步推广，在科学幻想领域，类比的方法可以应用的范畴就更广泛得多了。刘慈欣，一位中国的科幻作家，尝试着把天文学与社会学之间的边界打通，把“Where is everybody？”这个费米悖论用社会学和博弈论进行解释，从内心深处撼动了无数的科幻读者。这种通过严密的推导获得的科幻成果，可以说是当之无愧的突破性的创新，也帮助刘慈欣获得了雨果奖。

正如何晓阳所说：“我们人类现在科学越来越发达，但是学科的分类也越来越垂直，很少有人能够从更高的高度去描述学科之间的联系，在学科与学科之间的交界处，出现了明显的断层，有些还有明显的不相容。”因此，今天的科学研究，迫切的需要跨界创新、交叉创新、模仿创新。

1780年，意大利的一位医生伽伐尼（Luigi Galvani）在解剖青蛙时，把蛙腿剥了皮。当他用刀尖碰到蛙腿上外露的神经时，蛙腿剧烈地痉挛，同时出现了电火花。死蛙运动！1800年，另外一个意大利人伏打（Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta）发明了电堆。电堆能产生持续、稳定的电流，它的强度的数量级比从静电起电机能得到的电流大，这也是世界上第一个真正的电池。一场真正的电学革命因此得以开始。

到目前为止，电学的发展还是在孤单的轨道上独自前行。磁学这一孪生兄弟只是偶尔插队进来做做鬼脸，还没有正式地加入这一行列。尤其是，自从库仑提出电和磁有本质上的区别以来，很少有人再去考虑它们之间的联系。可是，丹麦人奥斯特（Hans Christian Oersted）一直相信电、磁、光等现象相互存在内在的联系，尤其是富兰克林曾经发现莱顿瓶放电能使钢针磁化，更坚定了他的观点。

在1820年4月奥斯特进行的一次讲座中，当伽伐尼电池与铂丝相连时，