

创 新 奇 迹 与 创 新 史 话

陈季香 王桂秋 邵 颖 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是一本以世界上著名的创新奇迹发展为创新案例和主线来介绍隐藏在这些创新奇迹背后的创新启迪的创新课程教材。本书介绍了航空母舰、火箭与飞船、空间站、北斗卫星导航、海上大桥、天文望远镜、三峡水坝、哥达基线隧道、巨无霸运输机、核动力潜艇、广州塔、希思罗机场、豪华邮轮、洋山港、海上风力发电、破冰船、核动力潜艇、蛟龙探海、深水钻井平台、巴拿马运河、中国高铁等一系列人造奇迹的创新故事，并着重介绍这些创新得以实现的历程、思维及其方法；此外也介绍了创新在科技和产业中发挥的作用。

本书可以作为创新课程的参考教材，也可以成为创新发明爱好者的启蒙手册，更是一本有关世界著名人造奇观精彩创新发展的系列故事书。

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。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

创新奇迹与创新史话 / 陈季香，王桂秋，邵颖主编. — 北京：清华大学出版社，2023.3
ISBN 978-7-302-62901-6

I. ①创… II. ①陈… ②王… ③邵… III. ①创新工程—教材 IV. ①T-0

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第037894号

责任编辑：朱红莲

封面设计：傅瑞学

责任校对：赵丽敏

责任印制：宋 林

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：010-83470000

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：三河市君旺印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：24.5

字 数：470千字

版 次：2023年3月第1版

印 次：2023年3月第1次印刷

定 价：77.00元

产品编号：098025-01

前言

创新改变世界，创新使世界更加精彩纷呈。创新是人类进步和现代文明的源泉，创新也是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力。人类社会发展的历史，就是一部创新的历史，就是一部创造性思维实践、创造力发挥的历史。创新思维对我们培养能力强、素质高的人才具有不可替代的作用。

创新是一种态度，它改变了我们的思维与生活方式。本着事事可创新，处处可创新的思想，本书设计的内容既深入浅出、通俗易懂，又蕴涵着丰富的创新思维和创新精神。在分析众多世界奇迹的创新启示中，采用讲故事的方式介绍了许多生动的创新案例。

本书是我校开设的五门创新课程的配套使用教材，这五门课程是：现代十大创新奇迹、航空母舰创新百年、海上奇观的创新启迪、航天与飞船创新史话、创新无限。在过去几年中，每学年选修这五门课程的学生总计都在千人以上。

目前全国已有 82% 的高校开设增加了创新创业课程。编写本书的目的是希望总结在讲授创新课程方面的教学内容与实践经验，并将在教学中所使用的笔记、讲义、习题等资料汇总在一起，满足这五门创新课程的使用。编者一直从事高校创新课程的讲授工作，积累了丰富的文字资料 and 教学素材，希望能够与同行分享交流在讲授创新课程中的经验和心得，也希望学习创新课程的广大青年学生受益。这些内容以不同专题或课程内容的形式编写出来，满足学习创新课程的需要。

本书具有以下主要特色：①内容选择注重实用性，不仅可以作为教材使用，也可以作为工具书进行查阅参考，为有志创新的年轻人提供理论和实践动力；②内容上深入浅出，案例生动丰富、通俗易懂；③以课程为依托，利用专题的形式进行编写，便于独立学习使用和查询。

本书共分为 5 章。第 1 章介绍了海上大桥、天文望远镜、三峡水坝、哥达基线隧道、巨无霸运输机、核动力潜艇、广州塔、空间站、希思罗国际机场的创新故事，并着重介绍这些创新得以实现的历程；第 2 章介绍了百年航母的起源、太平洋战争中的航母及美国、英国、法国、苏联和俄罗斯、日本、印度及中国航母的发展之路，着重介绍了航母发展史上的创新之举；第 3 章介绍了豪华邮轮、洋山深水港、海上风力发电、破冰船、核动力潜

艇、蛟龙探海、深水钻井平台、巴拿马运河等海上创新奇观带来的创新启迪；第4章介绍了航天科技中火箭的发明与发展、载人航天以及外太空探索的历史，着重介绍世界航天发展和我国神舟飞船的主要创新方法、创新途径和创新点；第5章介绍了创新点亮世界、专利对创新的保护、知识产权成为国际竞争中的制高点、世界知识产权（world intellectual property organization, WIPO）与专利合作协定（patent cooperation treaty, PCT）、PCT为企业带来的崛起与荣耀、创新的基石之科学精神与知识力量、创新土壤之大学的使命、创新环境之政府的责任、创新保障之创新的资本、创新的核心之创造者的力量，重点介绍创新在科技和产业中发挥的作用。在每章的最后，是该章对应的创新课程的选择题和创新简答题。

本书第1章由陈季香、李磊、王轶卓编写；第2章由陈季香、尹淑慧、刘大军编写；第3章由仲海洋、栾玲、张希珍编写；第4章由邵颖、车丽、薛晓红编写；第5章由王桂秋、孙敏、夏文文编写。

在本书的编写过程中，我们还参考了国内外出版物（见本书后面的“参考文献”）中的部分观点和内容，在此谨向这些编著者致以真诚的谢意。本书配套教学资源完善，选用本书开设创新课程的同行可以向出版社或编者索取相关教学资源。

创新其实不难，重要的是拥有创新的勇气、创新的意愿。本书就是一本以创新案例分析为主线的创新课程教材，一部世界著名人造奇观的精彩创新发展史话，一场欣赏人类创新发明创造之旅，一场充满创新启迪的创新思维与方法的盛宴。翻开本书，您就步入了创新的殿堂。从现在做起，从我做起，让创新改变世界。

编者

2022年10月

目 录

第 1 章 现代创新奇迹篇 / 1

- 1.1 创新改变世界 / 1
- 1.2 吊桥的创新奇迹 / 8
- 1.3 港珠澳大桥的创新奇迹 / 16
- 1.4 天文望远镜的创新奇迹 / 22
- 1.5 水库大坝的创新奇迹 / 28
- 1.6 隧道的创新奇迹 / 33
- 1.7 运输机的创新奇迹 / 41
- 1.8 电视塔的创新奇迹 / 48
- 1.9 空间站的创新奇迹 / 55
- 1.10 机场的创新奇迹 / 62
- 课程习题 / 71

第 2 章 航空母舰创新百年篇 / 82

- 2.1 航空母舰的起源 / 83
- 2.2 第二次世界大战中的航空母舰大海战 / 88
- 2.3 美国航空母舰的发展 / 97
- 2.4 英国航空母舰的发展 / 109
- 2.5 苏联和俄罗斯航空母舰的兴衰 / 116
- 2.6 独树一帜的法国航母 / 122
- 2.7 日本航空母舰的乔装发展 / 127
- 2.8 印度航空母舰的二手之路 / 133
- 2.9 中国的航母梦 / 140
- 2.10 辽宁舰的前世今生 / 143
- 2.11 国产航空母舰的发展 / 151
- 课程习题 / 159

第3章 海上奇观创新启迪篇 / 176

- 3.1 豪华邮轮 / 176
- 3.2 洋山深水港 / 181
- 3.3 海上风力发电 / 187
- 3.4 破冰船 / 192
- 3.5 核动力潜艇 / 197
- 3.6 蛟龙探海 / 203
- 3.7 深水钻井平台 / 209
- 3.8 巴拿马运河 / 214
- 课程习题 / 221

第4章 航天与飞船创新史话篇 / 236

- 4.1 苏美太空争霸 / 236
- 4.2 现代火箭的发展及其缔造者们 / 240
- 4.3 中国火箭与导弹的发展 / 245
- 4.4 苏美载人航天史 / 248
- 4.5 人类登月与空间站 / 252
- 4.6 中国载人航天工程 / 258
- 4.7 神舟飞天 / 262
- 4.8 神舟六号~七号 / 267
- 4.9 神舟八号与天宫一号 / 271
- 4.10 神舟九号~十号 / 275
- 4.11 神舟十一号~十三号与中国空间站 / 278
- 4.12 中国北斗走向世界 / 283
- 4.13 飞向月球 / 288
- 课程习题 / 296

第5章 创新无限篇 / 316

- 5.1 创新点亮世界 / 316
- 5.2 创新的保护——专利 / 321
- 5.3 知识产权——国际竞争的制高点 / 324
- 5.4 WIPO 与 PCT / 327
- 5.5 PCT 企业的崛起与荣耀 / 329
- 5.6 创新的基石——科学精神与知识力量 / 334

5.7 创新的土壤——大学使命 / 340

5.8 创新的环境——政府责任 / 348

5.9 创新的资本 / 352

5.10 创造者的力量 / 359

课程习题 / 363

参考文献 / 379

清华大学出版社

清华大学出版社

第 1 章

现代创新奇迹篇

英国著名哲学家、心理学家和经济学家约翰·穆勒曾经说过一句名言：“现在的一切美好事物，无一不是创新的结果。”如果你环顾一下周围的一切，你一定会发现，在如今的世界，创新无处不在。构筑我们这个世界的一切元素，无一不充满了人类的创造力。

创新是一个民族进步的灵魂，是人类发展的不竭动力。一个没有创新的民族，难以屹立于世界先进民族之林。因此，我们只有注重创新，才能让我们的人生不断向前迈进，才能让我们的民族拥有进步的灵魂，才能让我们的国家拥有兴旺发达的不竭动力。

中国的伟人邓小平曾经说过“创新是第一生产力”。

1.1 创新改变世界

自人类文明诞生以来，创新无处不在。

尤其人类近代文明进步的历史，就是一部关于创新的历史。在工业革命以前，英国的挖煤业完全依靠人力，不但效率低，而且容易造成安全事故。工业革命中发明了挖煤机后，煤炭产量上涨了 50 倍，成本也大为下降。拥有无数创新专利的英国，最终在 18 世纪称雄。

由此可见，创新对于一个国家是多么重要。依靠创新，一个小家也能拥有巨大的实力和伟大的成就；依靠创新，再大的困难面对知识的时候也会低头；依靠创新，再贫穷的社会也能创造出巨大的财富。

1876 年，英国的贝尔发明了电话，为人类缩短了通话的距离；1879 年，美国的爱迪生创新发明了电灯，为人类带来了光明；1886 年，德国卡尔本兹制造了第一辆汽车，使交通更加快捷；1903 年，莱特兄弟创新发明了飞机，使人类插上了翅膀翱翔蓝天；1942 年，

美国数学家埃克特·莫奇利创新发明了计算机，为以后的世界创造了数不胜数的科技奇迹；2007年，第一部苹果手机诞生……

在如今的世界，创新更是迸发出了巨大的能量。乔布斯的苹果公司曾经与微软是无法比拟的，无论是资金还是技术、人才都相差甚远，苹果公司的产品甚至遭到过微软公司的嘲笑。但在拥有了极有创新精神的领导者和公司文化后，他们的产品拥有了别具一格的外形和出类拔萃的性能，受到了很多人的喜爱。苹果公司在市值上超过了微软，销售额达到上千亿美金。拥有了创新精神的公司，生产出的不仅是销路好的商品，更是伟大的产品。拥有了创新意识的人，也能受到人们的尊重与敬佩。大到国家政府，小到公司个人都需要依靠创新来进步和发展。没有了创新也就没有了发展进步的源泉和动力。

中华民族具有悠久的创新历史。在中国的史书上更是记载了无数的创新发明。如今，中国的创新正方兴未艾。中国的高校积极开展创新创业教育，持续深化科教融合，推动创新创业教育融入人才培养全过程，目前有上千所高校开设了创新创业课程，参与创新创业训练计划的学生达50万人。

1.1.1 什么是创新

创新指的是以现有的思维模式提出有别于常规或常人思路的见解为导向，利用现有知识和物质，在特定环境中，本着理想化的需要或为满足社会需求，而改进或创造新的事物、方法、元素、路径、环境等，并且能获得一定有益效果的行为。

创新是以新思维、新发明和新描述等为特征的概念化过程。它起源于拉丁语，有三层含义：第一，更新；第二，创造新东西；第三，改变。

创新是人类所特有的认识能力和实践能力，它是人类主观能动性的高级表现，是推动民族进步和社会发展的不竭动力。一个民族要想走在世界前列，就一刻也不能没有创新思维，一刻也不能停止创新。本质上说，创新是创新思维蓝图的外化、物化。

由于创新中存在的不确定与风险性因素非常多，所以失败的可能性也很大，即使在一些知名的国际公司里，他们也承认其一半的产品或创新都失败了。如著名的吉列（Gillette）公司承认，每三个上市产品中只有一个能够取得市场成功，而这三个产品也是从100项前期技术研究中得到的。可见，创新的风险有多大。而且创新的不确定和风险性与创新主体的期望值成正比，期望值越高、规模越大，风险也就越大。正如现代管理学之父德鲁克所说，“绝大多数创新思想不会产生有意义的结果。创新思想正好像青蛙所产的卵一样，孵化1000个只能成熟一两个。因此，那些具有创新思想的人员应该仔细思考一下，为了把创新思想变成一种产品、一种生产程序、一项业务或一种工艺技术，需要做些什么工作。”

德鲁克这里提到的创新是指通常意义上的创新，他要求人们重视并探究创新过程。

1.1.2 创新思维

思维是指人脑利用已有知识，对记忆的信息进行分析、计算、比较、判断、推理、决策等的动态活动过程，它是获取和运用知识来求解问题的根本途径。

创新思维也称创造性思维，它是创造者利用已掌握的知识与经验，从某些事物中寻找新的关系、新的答案，创造新的成果的高级、综合、复杂的思维活动。它有三层涵义：第一层是创造性思维基础，即知识和经验；第二层是创造性思维的结果，即创新；第三层是创造性思维，它是一种高级的、综合的、复杂的思维活动。

1. 创新思维的特征

创新思维有五个特征，介绍如下。

(1) 对传统的突破性。第一，突破性体现为创造者突破原有的思维框架；第二，突破性还体现为突破已有的思维定势；第三，突破性也体现在超越人类既存物质文明和精神文明的成果上。注意：突破有风险，要有胆识、有勇气，甚至要有以付出生命为代价的准备。

(2) 思路上的新颖性。创新思维是以求异、新颖、独特为目标的。

(3) 程序上的非逻辑性。这指的是创造性思维往往是在超出逻辑思维，出人意料地违反常规的情形下才出现。它具有跳跃性，省略了逻辑推理的中间环节。

(4) 视角上的灵活性。表现为：视角能随条件的变化而转变，能摆脱思维定势对它的消极影响；善于变换视角看待同一问题，善于变通与转化，并重新解释信息。它反对一成不变的教条框架，会根据不同的对象和条件，具体情况具体对待，灵活运用各种思维方式。

(5) 内容上的综合性。创新活动并不是从头开始，也不是全部都是全新的成果，而是在前人的基础上进行，综合利用已有的成果。

2. 创新思维的障碍

创新思维有三大障碍，介绍如下。

(1) 思维固化。主要表现为钻牛角尖和从众心理，原因是我们不能跳出原来思维的框框，不敢去多想一步，结果让思维在原地打转，无法突破或者太容易受到其他人的观点影响，没有自己的主见，结果就是让自己也陷入其中。这种情况最好的解决办法是在工作与生活中细心观察，保持好奇心，不断拓宽自己的思路。

(2) 思维定势。主要表现为在解决问题时，一直采取此前惯用的思维逻辑，也就是用

老的经验来判断和解决新问题，往往达不到好的效果。最好的克服方法是先不去考虑以前是如何做的，而是看一看有没有新的解决办法，或者以原有经验为基础，以新的方式来解决。

（3）封闭思维。有这种障碍的人，往往听不进去别人的意见，自己也没思路，做事情顾虑重重，所以不能达成创新的结果。在创新活动中，要敢于去尝试，不要过多担心发生错误，有时候，创新就是一个试错的过程，如果不敢去做，又怎知效果好不好呢。

1.1.3 创新方法

创新方法一直为世界各国所重视，在美国它被称为创造力工程，在日本它被称为发明技术，在俄罗斯它被称为创造力技术或专家技术。我国学者则认为创新方法是科学思维、科学方法和科学工具的总称。其中，科学思维是一切科学研究和技术发展的起点，它始终贯穿于科学研究和技术发展的全过程中，是科学技术取得突破性、革命性进展之先决条件。科学方法是人类进行创新活动的创新思维、创新规律和创新机理，它是科学技术实现跨越式发展和提高自主创新能力的重要基础。科学工具则是开展科学研究和实现创新的必要手段和媒介，是最重要的科技资源。所以，创新方法既包含实现技术创新的方法，也包含实现管理创新的方法。

人类的创新活动有着悠久的历史，最早创新方法的出现可以追溯到公元 4 世纪的启发法。目前已有的创新方法据统计可以达到 300 多种。按发展的时间顺序，可以大体将其分为三个阶段：创新方法发展的远古阶段、近代阶段和现代阶段。创新方法发展的远古阶段是公元 4 世纪到 19 世纪，主要的创新方法为启发法。启发法的内涵实质上就是“单凭经验的方法”、有根据的推测、直觉的判断或者只是常识性的理解，典型的启发法就是试错法。创新方法发展的近代阶段是 20 世纪初到 20 世纪 50 年代，主要的创新方法有头脑风暴法、形态分析法、综摄法、检核表法、TRIZ 与属性列举法等。创新方法发展的现代阶段是指从 20 世纪 60 年代至今。主要的创新方法有中山正和法、信息交合法、六顶思考帽法、公理化设计法等。

创新方法虽然多达 300 多种，但概括来说，根据各阶段主要技术创新方法的特性和创新视角的分析可以总结为 8 种类型：基于经验的方法、基于智力交流激励的方法、基于组合的方法、基于类比的方法、基于设问的方法、基于解决矛盾的方法、基于变化思维角色的方法、基于公理的方法。本教材重点推荐的创新方法有如下 16 种。

（1）灵感创新发明法。哲学家说：灵感是大脑的一种特殊机理，是思维发展到最高阶段的产物，是人认识的一种质的飞跃。心理学家说：所谓灵感，是指人在进行创造性活动过程中显意识和潜意识相互通融、交互作用后所出现的心理高潮，并能使创新性活动产

生飞跃的独特的思维现象。灵感是灵感思维的结果，灵感思维是指人们长期思考某个问题不得其解时，由于某些偶然因素的激发，突然想出了解决办法的一种思维方式。灵感创新发明法就是利用灵感思维进行创新发明的方法。

(2) 移植组合创新发明法。移植组合创新法，就是将某一领域已见成效的发明原理、功能、方法、结构、材料等，部分或全部引进到其他领域再进行重新组合，或者在同一领域、行业中，把某一产品的原理、构造、材料、加工工艺和试验研究方法等，引用到新的发明创新或革新项目上，得到新成果的创新发明方法。

(3) 想象创新发明法。想象是指人在头脑中把已经获得的知识、经验和信息（记忆中的表象）等加以重新组合，产生新思想、新方案、新方法，即创造新形象的思维过程。其实整个创新发明的过程，我们都可以简单地认为是由想象过程和实现过程组成的。想象过程可称为一次创造过程，实现过程可称为二次创造过程。由此可见，创造发明过程中的想象步骤是成果实现的先导。没有发明想象这先导的一步，就不可能有发明成果。

(4) 问题创新发明法。有问题就会有创新和发明。创新和发明的过程就是质疑问题、发现问题、提出问题和解决问题，这其中关键是要有寻求问题、提出问题、解决问题的意识和方法。问题创新发明法是指人们在好奇心和求知欲的驱动之下，从对客观事物的观察中发现问题，提出问题，分析问题存在的原因，探求解决问题的过程和方法，继而最终实现创新发明的方法。

(5) 确定目标创新发明法。确定具有创新发明和创造价值的目标，从而集中精力和智慧向目标进攻，最终取得创新发明的成功。所谓确定目标创新发明法，就是从众多设想和思考所得到的新设想、新方法、新方案中，判断和确定具有发明和创造价值的目标，然后围绕这个确定的目标进行思考、构想、设计和试验等，最终获得有价值的创新发明成果。

(6) 类比推理创新发明法。类比是一种科学的推理方法，是指通过比较个体事物之间在某一方面存在相似性或类似性，进而做出它们在其他特征上也可能存在相似的结论。类比推理创新发明法是指将陌生事物与熟悉事物，或者未知事物与已知事物进行比较，从而推断出它们之间的异同点，然后采取模仿来解决问题的创新发明方法。

(7) 模拟创新发明法。人类通过模仿向大自然借鉴学习了许多东西。对于发明者来说，只要善于模仿，就可能从大自然中的各种事物或他人所创造的事物中找到发明的契机点。模拟创新发明法，是指通过模仿生物或其他事物的结构、特征或功能原理等而进行发明创新的发明方法，也称为模仿创新发明法。从模仿入手，进行再创造，这也是人类历史上流传最久、最古老的一种创造方法。

(8) 希望点列举创新发明法。希望是发明创新的最强大动力，世界上许多发明创新，

都是根据人的希望创造出来的。希望点列举创新发明法就是指发明创新者从个人愿望或广泛收集到的社会需求出发,通过把希望的事物应该具有的属性、功能、特点等逐一列举出来,以寻求新的创新目标、创新方向、确定发明创新项目的一种创新发明方法。

(9) 缺点列举创新发明法。找出已有事物的缺点,进而克服或改进这些缺点,这项活动就意味着发明创新。缺点列举创新发明法,就是抓住事物的缺点和不足(如不方便、不美观、不便宜、不安全、不实用、不省料、不轻巧、不环保、不节能等),将它们一一列举出来,从而针对这些缺点和不足确定发明创新的方向和目标,最终达到发明目的。

(10) 观察创新发明法。观察,就是审视、视察、察看,是指人们通过自身的感觉器官或借助其他科学仪器,有目的、有计划地感受客观事物或现象所产生的各种刺激,借此产生并形成对周围现象与事物的印象,从而获得有关观察事物知识信息的一种方法。在发明创新活动中,观察往往具有先决性和前提性,只要拥有思考的大脑和仔细观察的感官,善于把看和想有机地结合起来,就有可能实现发明与创新。

(11) 联想创新发明法。联想能够帮助我们将不同的事物联系起来,达到由此及彼,触类旁通,产生认识的飞跃,从而实现发明创新。联想创新发明法,是人们在头脑中把一种事物的形象与另外一种事物联系起来,或者由某一概念引起其他相关的概念,研究它们之间有无共同的或类似的规律,举一反三,从而实现创新与发明。

(12) 智慧激励创新发明法。智慧激励创新发明法是一种依靠集体的智慧和力量的创新发明方法,也被称为头脑风暴法、集体思考法、畅谈会法、互激设想法、头脑震荡法等。尽管其名称各异,但核心内容是一致的,那就是像刮风一样,使人的大脑处于一种激荡和奔放的氛围之中,把人的想象力激发到最为活跃的状态,从而激励出尽可能多的创意。

(13) 兴趣调动创新发明法。兴趣是由爱好而产生的愉悦情绪。从心理学角度看,人如果对某件事物产生了浓厚的兴趣,就会在大脑中形成强势兴奋中心,从而使注意力高度集中,并且能维持相当长的时间。因为探究的是自己心中向往和喜欢的东西,所以就会呈现情绪饱满、充满自信、联系丰富等这些最佳状态。通过激发发明创新的兴趣来进行创新活动,不仅是推动人们积极从事科技创新工作的驱动力,还能使人在艰辛、烦琐、枯燥的科学研究中,体会到享受的快乐,并乐此不疲,孜孜以求。

(14) 直觉创新发明法。直觉是指人脑对于突然出现的新事物、新现象、新问题,不经过必要烦琐的逻辑分析和逻辑推理,而是运用自己的直接经验,迅速把握其本质,做出整体合理的判断、猜想或领悟的思维方法。而所谓直觉创新发明法,就是利用直觉直接洞察出事物的本质与规律,从而迅速解决问题,最终实现发明创新。

(15) 逆向创新发明法。逆向思维是指人们沿事物的相反方向,用反向探索的方式对

产品、课题或方案等进行思考，从而提出新的设计或完成新创造的思维方法。而逆向创新发明法，就是发明者在发明创新过程中跳出常规框架，运用逆向思维从反面寻求解决问题的新方法和新思路，从而实现发明创新。

(16) 意外创新发明法。意外创新发明法是指通过对料想不到、意料之外的事物与现象的观察、分析中取得有价值的发现和发明创新的发明方法，又可称为偶然发明法或捕捉机遇法。

1.1.4 如何进行创新

关于如何创新，在此只做概括性的介绍，因为本书的主要内容就是通过创新案例来具体展示如何创新，在此暂不详细说明和展开。

1. 创新要有创造意识和科学思维

1) 强化创造意识

(1) 创造意识要在竞争中培养。

(2) 要敢于标新立异：第一要有创新精神；第二要有敏锐地发现问题的能力；第三要有敢于提出问题的勇气。

(3) 要善于大胆设想：第一要敢想；第二要会想。

(4) 创新的源泉：第一要有兴趣；第二要适合所从事的事业。

2) 确立科学思维

科学思维包括：相似联想、发散思维、逆向思维、侧向思维、动态思维。

2. 开拓创新要有坚定的信心和意志

(1) 坚定信心，不断进取。

(2) 坚定意志，顽强奋斗。

(3) 当创新活动误入歧途，需要调整方向时，能够强迫自己“转向”或“紧急刹车”。

在本书后边的章节中，我们会结合人类历史上曾经出现过的创新奇迹案例，来具体诠释该如何进行开拓创新。

我们将以世界上著名的创新奇迹发展为创新案例和主线，介绍隐藏在这些创新奇迹背后的创新点、创新思维和创新方法，希望读者在通过这些创新案例的分析和学习之后，为自己的创新思维掀开新的一页。同时也希望这些人类历史上的创新奇思妙想，为大家带来层出不穷的创新灵感，再结合自身实际情况的需求，选择适宜的创新方法，提高创新的成

功率，也为将来的创新探索和创新方法应用打下基础。

跟随我们，走进一个发现创新的旅程。在创新的时间隧道里，我们探索创新的普遍规律。

创新，塑造了人类文明；创新，带来繁荣与活力；创新，改变着人类的福祉；创新，决定着国家的战略与未来。

我们，就是未来。从这里开始，为你的头脑风暴找到创新灵感和出路。这就是创新的魅力，因为，创新改变世界，创新者既改变世界也改变人生。创新可以带来前所未有的改变，创新是成功的唯一途径。

1.2 吊桥的创新奇迹

明石海峡大桥是全球最繁忙的水路之一，它位于日本的神户和人口密集的地段之间，是贯穿神户—淡路—鸣门线路上的重要桥梁，也是本州四岛联络道路中的组成之一。明石海峡大桥建成后，极大地改善了神户市及淡路岛的交通运输状况，原来神户至淡路岛之间的航运需要 270 分钟，明石大桥通车后，运输时间缩短到 90 分钟，为原来的三分之一。

明石海峡大桥是全球最长的吊桥，为了打造这座足以跨越明石海峡这条鸿沟禁区的桥梁，日本人真正将科技创新发挥到了极限。明石海峡大桥的修建，为特大悬索桥的设计施工提供了宝贵的成功经验，其设计中采用的独特创新做法，对大跨径悬索桥的建设具有重要的指导作用。

明石海峡大桥是桥梁工程学的顶峰之作。它之所以能建造成功，得益于历史上 6 座地标性桥梁中的重大工程学的创新突破，而其中每一座都蕴含着重大的创新科技，使得工程师们建出的桥梁跨度日益升级。正是这独具匠心的七大创新突破，使桥梁规模不断扩大，最终成就了全球最长的吊桥——明石海峡大桥。

1.2.1 赛文河铁桥的创新：首次使用铸铁建造拱桥

位于英国什罗普郡的赛文河铁桥峡谷，作为工业革命的发源地而闻名于世。1986 年，赛文铁桥峡谷被收录为世界文化遗产，这是世界上第一例以工业遗产为主题的世界文化遗产。18 世纪的英国，见证了用一种全新建筑材料打造的长仅 30 米的赛文桥（图 1.2.1）。

1779 年的英国在工业革命的影响下进行着轰轰烈烈的变革。然而在什罗普郡，当地的发展却受到了赛文河的阻碍。出现的问题是：实业家的大部分工厂和原料分隔在深邃湍

急的赛文河两岸，当时的渡轮已经不足以应付两岸暴增的人货往来，切实可行的解决办法就是建一座桥，但这并不容易办到。虽然这条河只有 30 米宽，对当时的造桥者而言，却是难以跨越的距离。

在过去，跨越这样一条河的传统方式是建造一座石拱桥，这个古老方法源自罗马时代。但对石拱桥而言，30 米几乎就是

极限值。为了达到这样长的桥梁跨度，桥的拱要加宽，桥梁的高度也得增加。如果要保证桥梁的强度，桥拱必须达到一定的厚度，可是这样做的代价太大，因为桥拱的尺寸翻一倍，建桥所用的石材就得增加七倍，造成的结果就是桥拱承受的重量太大，桥梁注定会被自己的重量压垮。既要保证质量，又要提升桥梁的规模，最好的办法是找到新的建材，既具有石材的强度和承重力，而质量又轻，同时又容易处理的材料。

当时人们已经在制造厨具等小玩意儿时用到了—种颇具潜力的新型材料，即加热后融化成液体状的铁。把融化的金属倒进模子里，冷却后脱模就成形了。利用这个过程造出来的创新材料叫作铸铁。但这种铸铁并不适合造桥，因为送进火炉的焦炭含有杂质，烧出的铁太脆，容易折断。后来什罗普郡—家铸造厂发现，当地的焦炭质量好、炼出的铁强度高，用途很广泛，可以制造任何机器，例如蒸汽机等，所以用来造桥也没任何问题。

1779 年，全球第—座铸铁桥开始动工，这座桥由 1700 块预铸铁建造而成，其 30 米长的中央桥拱由 5 条半圆形的拱肋构成。由于铁格取代了石块，整座桥的质量仅为 380 吨。建成后人们将这座桥命名为铁桥，但看上去它更具有木桥的风范，结果令人惊艳。原因是它运用了典型的大规模细木工连接法，只不过这里是用铸铁取代了木材，取得了巨大的成功。赛文河铁桥的建造手法，在当今许多创纪录的结构中仍然能够见到。



图 1.2.1 英国赛文河铁桥

1.2.2 梅奈桥的创新：世界上第—座现代吊桥的杰作

19 世纪，威尔士的梅奈海峡是人们前往爱尔兰时最可怕的障碍。接受横越这条诡谲水道任务的工程师叫特尔福德，是一位 62 岁自学成才的苏格兰人。特尔福德到梅奈海峡勘察时已经有了英国最佳土木工程师的美誉，所以英国政府将改善英国和爱尔兰之间运输路线的艰巨任务交给他非常合适。

特尔福德最初考虑用铸铁建造这座拱桥，可是如果这样做的话，在施工过程中肯定会用到脚手架来支撑桥拱，几条繁忙水道的往来船只便会受到阻拦。政府不接受这个做法，

特尔福德只好从原始的桥梁设计中寻找创新灵感。绳桥自古就被当成过河的工具，任何形式的桥梁，最大的关键都是锚固点，少了这些锚固点，建造起来的桥梁就非倒不可。合理地绑住绳索就能形成一座坚固的大桥。但问题是这样的绳桥马车可绝对没法在上面跑。如果铺垫上厚木板来充当桥面，过桥就会容易得多；再换上铁链，桥梁的荷载力便能增加。可是尽管如此，桥面仍然处于下陷状态，要建造真正的现代吊桥，工程师必须设法将下陷的桥面拉平。

创新解决的办法是用石塔吊桥，将绳索往下拉，把桥面拉平。但问题是如何在两端固定铁链，因为如果能把铁链往下拉，铁链迟早会撑不住，除非锚固得很扎实，而这就是特尔福德的挑战。特尔福德不能把铁链固定在树上，必须锚固在海峡两端的岩岸深处。为了实现他这一创新的想法，工人们将岩石炸穿，炸出一个 18 米长的地道，在地道的末端架设好坚固的铁构架，把铁链的末端穿入地道，用 3 米长的螺栓固定在构架上，金属杆把螺栓和构架牢牢卡在洞穴底部，除非岩石松动，这个锚具才可能出问题。

特尔福德的创新方法奏效了，这座新桥使伦敦到都柏林的路程时间缩短了 9 小时。他设计的锚具使 177 米的大桥屹立不倒超过 180 年。如今每周仍有数千辆汽车往来其上，这座桥是现代吊桥的第一件杰作，也为未来的桥梁发展照亮了曙光。

1.2.3 尼加拉瀑布大桥的创新：利用铁丝构成的缆索来承重

特尔福德在梅奈海峡桥上用的大铁链看起来确实坚硬无比，但薄弱的环节也会令铁链强度变得有限。1845 年，在英格兰某城镇发生的一场意外，可以很好地证明这一点。当时，观看表演的 300 多名观众，为了争相观看在桥梁一侧的表演，全都蜂拥挤到了桥的一边，重量突然转移，造成铁链负荷过重，铁链一下子就断裂了，结果桥面坠到河里，造成 79 人溺水身亡的悲剧。

1851 年，美国工程师在修建一座吊桥来横跨尼加拉瀑布 250 米宽的峡谷时，面临更加巨大的困难。他们的吊桥必须能够承载一列 360 吨重的火车在桥上通过，因此桥梁的强度和长度一样重要，所以负责在尼加拉瀑布峡谷建桥的工程师需要比铁链更加坚固的材料来支撑桥面。他们想到如果将铁拉成一股细丝，强度就会增加。因为把物质拉长变成一条线，其内部的成分会排列成一条线。例如只是把棉球扯开，强度非常非常低。可是如果在制造过程中把棉花的成分拉成一条线，就可以做成棉线，强度就会大为增加。通过实验测试的结果显示，金属杆遭受大约 1500 牛顿的拉力就会断裂，而细丝则坚固得多，拉力达到 1900 牛顿才会断裂。

尼加拉瀑布大桥的工程师计算后得知大约 3500 条铁丝构成的缆索已足以承受住桥梁

和火车的重量了。可是工人们根本吊不起来 900 吨重的缆索，工程师想出了一次运送两股铁丝的办法，将一圈铁丝用滑轮拉到峡谷对岸，一到对岸就把铁丝拴在锚具上，然后把滑轮送回来，再挂上一圈铁丝。运送完 1820 趟后，一条铁缆才得以制成。每条铁缆由 3640 条铁丝构成，要 4 条铁缆才能吊住大桥。1855 年尼加拉大桥通车，第一辆美国通往加拿大的火车顺利通过。这座桥现在早就经历过翻新，可后人仍在继续沿用和效仿用缆索支承桥面的创新做法。

1.2.4 布鲁克林大桥的创新：利用沉箱进行水下施工

钢缆越强有力，工程师建造的桥梁单一跨度就越大。可是有的水路实在太宽，单跨桥梁不可能实现，支撑的索塔就得建到河中央，深入到河床中。

19 世纪的纽约是全美发展最快的城市之一，然而城市的快速扩张，受到了群岛地理特点的限制。1874 年，工程师计划兴建一座大桥，连接布鲁克林与曼哈顿。可是在桥下的激流中，锚固桥墩却是个大难题。必须盖一座横跨 600 米宽的桥梁。单跨桥梁根本跨不过去如此的长度，因此不得不在河中建桥墩。

这条湍急的河流在曼哈顿这边深达 9 米，岩床上方压着层层淤泥和污物，在污泥上兴建桥塔，塔基会很不稳定。为了穿过淤泥，凿开底下的岩床，工人必须 24 小时在水底工作。工程师想出了一个叫沉箱（沉箱法施工是我国土木工程师茅以升创新发明的，最早用于钱塘江大桥桥墩的建设。这种方法为中国几十年间的桥梁建设贡献巨大。它对机械化的程度要求低，而且不影响通航。）的创新解决方案，将以厚木板打造的翻转的巨大箱型结构坐落在河床上，为 125 位工人提供作业空间。箱型结构的壁面会往下逐渐变细，最下部的边缘非常锐利，专门用来切开淤泥。先在陆地上建好沉箱，再用强大的拖船将其拖入河中。工程师用数吨重的花岗岩砌块，让沉箱下沉到河底。但在工人进入沉箱施工之前，必须把沉箱里的水抽干，避免河水再度涌入。13 台巨大的压缩机为沉箱灌入空气，避免河水涌入。沉箱里的环境仍非常恶劣，工人们虽然可以呼吸，但在沉箱里施工的感觉并不好，经常处于炎热、潮湿的环境，工作非常辛苦。工人们一旦挖到了岩床，就会出来为沉箱灌注混凝土，这样一来沉箱就构成了上面巨塔的塔基。

1883 年 5 月 24 日，布鲁克林大桥建成了，当时构成纽约天际线的其他建筑，高度大多比不过这座桥的桥塔。这座连接曼哈顿与布鲁克林的大桥将大都会和它的劳动人口紧紧绑在了一起，并协助造就了现代的纽约市。每天有超过 14 万辆车经过布鲁克林大桥，数千名行人在桥上通行。这座大桥至今仍是一件工程系杰作，和 100 多年前相比，其重要性丝毫未减。

1.2.5 金门大桥的创新：钢材竖井蜂巢结构桥塔

沉箱挖得越深，桥梁就能建得越长，不过要横越 1.6 千米宽的金门海峡，连接旧金山市和邻近的玛林县，造桥者还得设法盖出更高的桥塔才行。海峡的恶劣气候使渡海的危险性很高，但人们仍然在想办法用渡轮把车子运到对岸。

第一次世界大战后的 10 年间，旧金山的交通流量暴增了 7 倍，渡轮已经无法应付暴涨的交通流量，于是工程师在 1934 年开始规划兴建全球最长的吊桥（图 1.2.2）。

吊桥要达到最佳平衡，缆索就必须形成某种弧度。为了维持这个形状，工程师要加长车道，桥塔的高度也得相应增加。从一座相对短的吊桥变成一座相对长的吊桥，桥塔增加的高度大约和桥长成正比，如果桥的长度是原先的两倍，桥塔大约也要升到两倍的高度，极其复杂的工程学挑战随之而来。



图 1.2.2 美国金门大桥

如果桥的跨度是 1280 米，工程师就得把缆索悬挂在桥面以上 152 米，而支撑的桥塔必须高达 227 米。如果利用石材建造桥塔，修长的石塔会被自己的重量压变形。另一个选择是把桥塔盖得厚实一些，可是任何能抗变形的石塔底部都至少宽 50 米，结果势必会阻碍船只的往来，也会影响桥梁的美观。无疑，这座桥的桥塔的建造需要更坚固、更轻盈的建材。造桥者最终没有选择石砌块，而是换成了钢板来建造桥塔。他们创新地把四块钢板结合，构成一个 11 米高的竖井，这样做成的建筑砌块既坚固，又比实心钢轻盈得多。将竖井拼在一起构成坚固的蜂巢结构，再用起重机将蜂巢结构吊定位，完成一段之后，起重机会自行提升，继续吊装。由于以空心的竖井取代了实心的石块，桥塔可以从头到尾保持修长。钢材增加了桥塔的柔韧度，使其不会被缆索压变形。

不过桥塔升高，建造的风险也随之增加，蜂巢结构要接合固定好，需要安装 100 多万枚铆钉。钢铁工人冒着死亡和重伤的风险，悬吊在桥塔之外施工，承受着强烈的太平洋暴风。这是造桥者有史以来第一次戴着安全帽、安全面罩、吊着安全索进行作业。尽管有种种预防措施，建造这座桥仍旧夺走了十几条人命。

1.2.6 维拉扎诺海峡大桥的创新：开放式格状钢结构箱型保护罩

建造更高的桥塔能让吊桥跨越更远的距离，但随着桥面加长，桥梁扭曲和折弯的风险也随之增加，因此桥梁的设计必须经受住大自然的某种摧毁力，即风的考验。

1940年，华盛顿州横跨塔科马海峡的新桥建成通车后，即使风势不大，桥面也会上下摆动，后来甚至开始发生扭曲，以至于最后整座桥都倒塌了。工程师分析了结构失灵的原因，即空气动力的不稳定性和风吹过桥梁时遭遇的结构形状息息相关。桥面平坦的侧边，会对风造成阻碍。当侧风吹向桥梁时，气流受到干扰，桥面上下就会产生旋涡。各个区域由于压力不同，会承受向上或向下的不同作用力，一旦桥面开始移动，桥梁也会随之弯曲。风和建筑结构的移动其实是相对作用，这是一种共振，一旦振幅达到某种程度，连塔科马大桥这样巨型的建筑也会被摧毁。

创新解决的方法是将桥面两侧的轮廓设计成流线型，这样风从中间被切开，会完全地吹向路面上下。1946年工程师考虑用这种设计建一座更长的新桥，新桥横跨纽约港1.6千米宽的入口，穿越维拉扎诺海峡。

由于预计往来车流会很大，设计的桥梁便包含了12条车道，分成上下两层桥面。但工程师深知双层桥的流线型边缘或许并不能安全引开风势，反而会造成气流相撞，产生进一步的干扰。因此他们决定为桥面加固防风屏障，以免桥面扭曲或弯折。最有效的加固方法是用一个大箱子来包裹桥面，但桥梁的钢缆绝对无法承受2千米长钢制箱型物的重量，于是工程师想到用纤细的钢杆组装成一个个的轻质钢骨架组件，再将75个组件接合成一个巨型的开放式格状钢结构，让风在桥梁里通行无阻。这个独特创新的设计，足以抵抗住强大的大西洋暴风，支撑12车道的车流也不成问题。

维拉扎诺海峡大桥是当时最长的也是最重的桥梁，标识出了纽约港的出入口，是纽约市的地标式建筑之一。维拉扎诺海峡大桥是美国造桥工程的一个伟大时代的巅峰之作，在1964年完工之初，成为全世界最长的悬索桥。

1.2.7 七大创新荟萃：明石海峡大桥

创新一：栅格状的预铸铁组件建成

日本工程师规划新建全球第一大吊桥时知道，必须尽量让桥梁保持轻盈。于是他们像当年的铁桥建造者一样，创新采用栅格状的预铸铁组件，建成了明石大桥。可是由于规模

巨大，桥梁仍然用了 25 万多吨的钢材，而且钢还有一个很大的缺点，会生锈。结构工程师很清楚这座桥的弱点。这里每年都有台风经过，由于位于海上，生锈变成了一个很大的问题。为了维护大桥的安全，专门有机器人看守员负责将桥上生锈的地方找出来，由机器人油漆工重新为这些受损部分刷好漆。桥下吊着三个龙门架，工人可以方便地在桥下展开维修，而车流也不会受到干扰。

创新二：金属构架固定厚重的桥梁钢缆

为明石海峡大桥进行锚固，日本工程师面临的挑战更为艰巨。明石大桥的悬索用的不是铁链，而是厚重的钢缆。和梅奈海峡不同，这里没有坚固的岩石可供固定，只能在海岸线上打造锚固点。他们先挖了一个巨大的洞来打造桥基，往里面灌了 23 万立方米的混凝土。接着又运来巨大的金属构架，这些构架必须牢牢固定住锚固桥梁的钢缆，所以必须用混凝土包裹。工人们分别浇灌了 5 个混凝土砌块，砌块之间的缝隙利于散热，避免混凝土龟裂。等凝固之后再进一步用混凝土填满空隙，最后浇筑的实心砌块高度超过了 50 米。

创新三：直升机把组成钢缆的钢丝运送到对岸

明石大桥缆索的强度承受 90 座尼加拉桥的重量绝无问题，明石大桥使用的一段钢缆，直径超过了 1 米，是由数千根钢丝组合而成。为了把钢丝运到对岸，日本工程师使用了直升机，由机上附带的导引绳将一捆捆钢丝拉到对岸。每捆钢丝有 127 根，一共运了 290 捆，厚实的钢缆才得以制成。每一条钢缆重约 25000 吨，用到的钢丝足以环绕地球 7 圈。

创新四：两层立面沉箱

日本明石海峡大桥（图 1.2.3）对索塔建造难度要求更高，必须在 60 米深的明石海峡中打造塔基。塔基由沉箱构成，沉箱有 70 米高、80 米宽，是由钢材而非木材制成的。由于体积太大，每只沉箱要动用 12 艘拖船，才能在挖开的海床上定位。沉箱创新采用外墙和内墙两层立面设计，墙壁间的缝隙构成充满空气的环形分隔舱，使沉箱得以浮在海面上。为了使沉箱下沉，工程师会逐渐把分隔舱里注入海水。一旦在海床上定位，中央密封层的海水便会立即排出，注入潮湿的混凝土，这种特制的混凝土在水中也能保持凝聚力。最后沉箱上做好混凝土加



图 1.2.3 日本明石海峡大桥

盖，整根墩柱就完成了，随时可以作为塔基使用。

创新五：在工厂焊接好组件，用螺栓在现场接合

如今全球最高的吊桥索塔非日本明石海峡大桥莫属，其高度达 300 米，比金门大桥的索塔都高出了 70 米，每座桥塔都由 30 段组件架构而成。工程师把所有组件的顶部和底部都打磨平坦了，当起重机把组件层层叠起，形成 100 层楼高的桥塔时，塔身仍百分之百垂直，蜂巢状结构使桥塔轻盈坚固。先在工厂里将这些钢板焊接好，然后再用螺栓现场接合，先进的机器人焊接技术和 150 万颗优质的老式螺栓，将桥塔牢牢地接合在一起。

创新六：开放式箱型格状结构防止弯曲

由于设计精良，工程师仍采用开放式箱型物来为明石海峡大桥的桥面加固。加固大梁基本上是三角形、由钢杆构成的格状结构，这样整座建筑很难发生弯曲。

创新七：通过吸收震动和 20 个巨大阻尼器来防震

日本为全球地震活动最频繁的地区之一，每年都会发生数百次地震。由于地质非常不稳定，工程师认为日本并不适合兴建全球最长的吊桥。如果吊桥下的地底因地震而摇晃，最严重的情况，整座桥塔都会倾倒，这样肯定会造成巨大的灾难。

明石海峡大桥应对地震的第一层防护就是桥塔本身。以钢材打造的桥塔十分柔韧，一旦发生地震，钢塔会随地面移动，吸收震动。第二层防护则在每座桥塔的内部，每座桥塔内部安装有 20 个巨大的摆锤，它们被称为阻尼器。10 吨重的阻尼器悬挂在支架上，如果地震使桥塔摇向一边，巨大的液压式阻尼器就会往反方向摆动，可抵消晃动的力量，防止桥塔倒塌。工程师安排了 100 多个工人，让他们同时移向一侧，模拟地震，在这场人造地震中，阻尼器的摆动维持了桥塔的稳定。

1995 年 1 月 17 日，这种防震技术受到了真正的考验。明石海峡大桥北岸的神户发生了一场里氏七级的大地震，地震造成 6000 多人死亡，十几万栋建筑物倒塌。但明石海峡大桥却靠阻尼器逃过了一劫，那不幸的一天留下的伤痕至今仍然存在。地震打开了桥梁正下方的海床断层线，造成地面和桥塔的位移，使桥梁裂开了一米多的大缝。工程师加铺了面板，填补了桥面的这段空隙，这场地震使全球最长的吊桥又加长了一小截。险恶的环境证明了明石海峡大桥创新设计的牢固程度，200 多年的创新和工程突破，在这里达到了最高峰。1998 年 4 月明石海峡大桥开始通车，至今这座桥仍是全球最长最高的吊桥。

1.3

港珠澳大桥的创新奇迹

港珠澳大桥是中国境内连接香港、广东珠海和澳门的桥隧工程，为珠江三角洲地区环线高速公路南环段。大桥于 2009 年 12 月 15 日开工建设；于 2017 年 7 月 7 日实现主体工程全线贯通；于 2018 年 2 月 6 日完成主体工程验收，同年 10 月 24 日开通运营。港珠澳大桥设计创新点包括：

（1）针对跨海工程低阻水率、水陆空立体交通线互不干扰、环境保护以及行车安全等苛刻要求，港珠澳大桥采用了桥、岛、隧“三位一体”的建筑形式。

（2）大桥全路段呈 S 形曲线，桥墩轴线方向和水流的流向大致取平，既能缓解司机驾驶疲劳，又能减少桥墩阻水率，同时还能提升建筑美观度。

（3）斜拉桥具有跨越能力大、造型优美、抗风性能好以及施工快捷方便、经济效益好等优点，往往是跨海大型桥梁优选的桥型之一。结合桥梁建设的经济性、美观性等诸多因素以及通航等级要求，港珠澳大桥主桥的三座通航孔桥全部采用斜拉索桥，由多条 8 ~ 23 吨重、具有 1860 兆帕超高强度的平行钢丝巨型斜拉缆索从约 3000 吨重主塔处张拉，承受约 7000 吨重的梁面。

（4）整座大桥具有跨径大、桥塔高、结构稳定性强等特点。

港珠澳大桥是世界上最长的跨海大桥，工程师共花费长达近 9 年的时间完成这座巨型建筑。其间他们每天要避开 4000 艘海船和 1800 多架航班的密集通行，共耗费 33 万吨钢材和 233 万吨钢筋混凝土，在深海水下打造世界上最长的沉管海底隧道，启用世界最大的巨型震锤来完成人工岛的建造。同时要全力抵抗台风和地震向大桥的挑战，对环境保护的苛刻要求也前所未有。所有这些努力都是为了完成一个几代人的梦想。

1.3.1 港珠澳大桥创新奇迹之一：修建海底隧道加跨海大桥设计方案

要建一座从香港横跨 30 多千米的南海伶仃洋水域、直接贯通到珠海和澳门的跨海大桥，需要解决很多问题。如果完全复制杭州湾的造桥经验要容易得多。但现实情况是，这里并不是杭州湾，这里是全球最重要的贸易航道，同时密集复杂的海床结构让施工难度大大增加。每年南海的台风几乎都经过这里，所以在这里修建大桥要做好足够的心理准备。除此之外，工程师还要面对一个不可超越的数字，即 10%。伶仃洋是一个典型的弱洋流水域，每年都会从珠江口夹杂着大量的泥沙涌入海洋。大桥的桥墩就像一个阻挡泥沙的篱笆，

超过 10% 的阻水率，泥沙就可能被阻挡、沉积，从而阻塞航道，让伶仃洋变成一片冲积平原。

伶仃洋水域靠近香港方向，有一个重要的深水航道——伶仃洋航道，它是大型运输船只在这片海域通行的唯一通道，所以这座大桥的修建将关系到这个重要航道的生死。对伶仃洋航道的通航等级的要求非常高，现在是 10 万吨，远期将考虑 30 万吨的油轮可以通行。要满足 30 万吨巨轮的通行，就必须修建一座桥面高度超过 80 米、桥塔高度达到 200 米的超级大桥，这给设计师出了很大的难题，因为这段深海航道不能够修建任何超级大桥，如果找不到解决的办法，那就只有选择停工。

一个疯狂又创新的想法，在即将陷入僵局时提了出来，这个想法非常大胆，那就是放弃在海面以上修建桥梁，而在海面以下修建一座超长的海底隧道。2009 年，在中国跨海大桥历史上最具想象与创新力的方案被批准实施。在这片海域上，将要建成一座 6.7 千米长的海底隧道和一条 22.9 千米长的跨海大桥。这是目前在中国修建的最大、最长也是最复杂的一座跨海大桥。这座大桥建成后，从珠海或澳门抵达香港的陆路交通时间由 4 小时缩短到 30 分钟。

1.3.2 港珠澳大桥创新奇迹之二：圆钢筒围岛和内胆定型进行拼接

虽然中国的工程师已经有了建造跨海大桥的经验，但还从来没有在海中修建过规模如此巨大的海底隧道，所以珠港澳大桥建设对他们来说无疑是一场史无前例的创新挑战。

摆在工程师面前的第一个难题就是要解决桥梁和海底隧道的贯通，就是找到一座岛屿，把它们连接在一起。但没有任何岛屿可以使用，唯一的办法是修建人工岛。在这片海床上建岛是一个难以想象的巨大工程，因为筑岛的地方下面有一层大约 15 ~ 20 米厚的淤泥。如果采用常规的方法在这片淤泥上施工的话，只要把抛石或者沉箱一放到淤泥上去，它在淤泥上无法站稳就会滑出去。常规的方法就是把这块淤泥挖掉，或者先用排水固结的方法使之变干，然后才能使抛石或者沉箱坐稳。如果把淤泥挖掉，超过 800 万立方米的淤泥将要被移走，相当于可以堆砌 3 座 146 米高的胡夫金字塔，这样的工程对海洋将是毁灭性的污染。

时间有限，建造工程必须按照计划在一年内完成，工程师要想出更好的创新办法。一个大胆的设计方案被提出来，那就是圆钢筒围岛的计划。这个方案非常巧妙，用一组巨型圆钢筒直接固定在海床上，然后在中间填土形成人工岛。这个计划将不用移走天文数字般的淤泥，对海洋环境来说也是最好的选择。120 个超级大的圆钢筒形成隧道两端的人工岛，

这在中国是史无前例的。每个圆钢筒的直径达到 22.5 米，几乎和篮球场一样大，高度 55 米，相当于 28 层楼的高度，重达 550 吨，相当于一架 A380 空中客车的重量（图 1.3.1）。



图 1.3.1 港珠澳大桥人工岛围护钢圆筒

第一个难题终于解决，但另一个非常棘手的问题又摆在设计团队的面前，那就是该如何在长达 6.7 千米的深海航道区修建海底隧道。工程师首先想到的就是采用盾构技术。中国的盾构技术已经非常成熟，最大的盾构机能够承担在 45 米深的地下挖掘 15 米直径的隧道。但在这里只能放弃这个成熟的技术，因为要面对 10% 阻水率的挑战。在 10% 阻水率的苛刻要求下，1000 米是不能接受的长度。唯一可以采取的就是沉管隧道技术，这样做直接的结果就是改变了人工岛的长度。从环境保护角度来看，每个人工岛减少近 400 米的长度，将大大改善对海洋环境的影响。但这项技术对工程难度提出巨大的挑战。每节沉管长 180 米、宽 33 米、高 11 米，由两个三车通道和两个工程通道组成，重达 76000 吨，相当于一艘航空母舰的重量。它们从西人工岛到东人工岛，依次沉入海床以下，并在海下进行无人对接。要一次成型长 180 米、重达 76000 吨的钢筋混凝土隧道是一个非常大的挑战，实际的施工难度远远超出工程师的想象。工程师采用了创新办法，把 180 米长的隧道再划分成 8 个小单元，然后将这些单元在工厂里拼接成一个整体。

模块化方案终于解决了沉管隧道制造的难题。开工第一步是制造出这些巨大的圆钢筒，这对中国的工程师来说还是第一次。这项任务被交给了中国最大的钢结构制造中心——上海振华，它位于距上海市中心 30 千米的长兴岛上。这座巨大的钢结构生产基地，每天吞吐数以万吨的钢材，为来自全球各地的建筑商打造属于他们梦想中的巨无霸。工人们必须在 8 个月完成 120 个圆钢筒，这并不是一件容易的事情，没有任何一个卷板机和模具能够一次完成这个巨大圆钢筒的制作，他们必须想出其他的新办法。最终圆钢筒被分解成 72 个单元，一组组拼装完成。但分解的数量越多，拼接误差就越大，而圆钢筒的制作要求误差不能超过 3 厘米，这对于一个 18 层楼高的庞然大物来说绝对是一个超级挑战。

工程师又想出了一个创新办法——内胆，一个能够控制圆钢筒外形的钢结构支架。在内胆的定型下进行拼接，误差终于降到了要求的范围内。

1.3.3 港珠澳大桥创新奇迹之三：自动化模板系统生产海底隧道沉管

建造一条 6.7 千米长的海底隧道，这是史无前例的，其消耗 33 万吨钢筋和 200 万吨混凝土，这些材料足以建造 8 座 828 米高的迪拜塔。建造一个迪拜塔花费 5 年的时间，但是沉管隧道不允许用那么长时间，工程计划必须要在一年半的时间里生产所有的沉管隧道（图 1.3.2）。



图 1.3.2 港珠澳大桥海底隧道沉管

这个难题让工程师必须要想出新的办法，最初他们打算采用世界级制造模板专家——德国工程师的建议。他们是欧洲最长的海底隧道纪录——欧雷松德大桥的制造者，经验非常丰富。他们建议是使用一种快速完成拼接的模板设备，其非常精密、自动化效率非常高，能够大大提高工程效率。这套设备可以确保模板在 20 分钟之内顺利就位，保证按时完工。

但购买一套模板设备的价格远远超出工程预算，别无选择，工程师需要自己来完成这个高难度模板的制作。中国的工程师再次接受了这个挑战，来完成世界上精度最高的自动化模板的制造。整个模板用钢量达到 3000 多吨，能够留给工人们的时间只有短短几个月，这对于一个从未制作过模板的团队来说是很大的挑战。

经过 6 个月的时间，最后一批钢模板构件已经在紧张的装配当中，工人们必须在 3 天的时间完成所有的组装和测试工作。3 天以后这块模板会被再次拆解，分装到运输船上，运往 1600 千米之外的沉管隧道制造工厂——桂山岛。这座超级工厂是在 100 天的时间里建造，它的任务是生产 33 根世界最长的海底沉管隧道。这一工程足足占用了 10 个足球场的面积，挖去 300 万立方米的土石，每个月能够生产两根 76000 吨重的沉管隧道。

与此同时，在 1900 千米之外的海滨城市大连进行了一项非常重要的实验，实验的结果告诉工程师如何顺利安装巨大的沉管隧道。实验模拟最恶劣环境下，洋流对沉管隧道运输和安装的影响。得到的数据告诉工程人员采用多大的钢板才能够安全地牵引重达 76000 吨的沉管隧道，实验数据必须是精确可行的，否则后果不堪设想。如果实验不够精确，一旦现场牵引沉管的钢管发生断裂，沉管隧道就有可能在巨大的洋流中倾覆而沉入海底，那是价值上亿元的沉管，甚至还有可能造成人员伤亡。最终 3 年多的努力终于有了成果，大连的实验有助于工程人员掌握采用何种方案才能够更加安全合理地控制体积庞大的沉管隧道。

1.3.4 港珠澳大桥创新奇迹之四：8个节段拼接成33个巨大的沉管

沉管预制厂内港珠澳大桥海底隧道两节180米长的标准管节预制完成，预制管节不仅尺寸刷新了世界之最，其生产工艺也是国内首创。每一个标准管节都是由8个长22.5米的小节段拼接而成。每一个小节段的钢筋笼重量超过了900吨，在浇筑完成之后，总质量超过了9000吨。港珠澳大桥海底隧道长6.7千米，最大水下深度达46米，是迄今为止世界上埋深最深、规模最大的海底公路沉管。整个隧道由33个管节组成，在管节制造工厂标准化预制，这是目前国内首例，世界第二例采用工厂流水线法进行海底隧道的管节预制。

面对两个这么巨大的沉管，怎么样把它们顶推到浅坞区，也是一大挑战，港珠澳大桥的建设者们自有创新妙招。他们利用先进的设备，巧妙地撼动了这两条500千克的巨龙。每个单个管节底下有192个千斤顶，安装在管节底部，然后在整个滑移梁上进行顶推，就相当于一艘大的轮船，循序渐进地往前顶推。工人们对这两个标准管节进行第一次舾装，将管节两端封闭，管内安装水箱，相当于将管节变成一个钢筋混凝土结构的巨型潜水艇。

经历了5天的施工，克服了天气变化莫测以及海况复杂等因素，港珠澳大桥海底隧道首节沉管成功实现对接。经过86小时连续施工，港珠澳大桥首节隧道沉管与新人工岛成功对接。整个沉管的安放完成是在2015年年底，为期3年，整个接头的贯通是在2016年年初。

工期比计划足足提前了1个月，它将再次刷新世界纪录。沉管预制的长度是22米，厚是11.94米，宽是37.95米，要求一次浇筑是24小时，养护3天然后顶推出去。

1.3.5 港珠澳大桥创新奇迹之五：高阻尼橡胶减震抵挡地震的威胁

伶仃洋蕴藏着强大的能量，台风巨浪，每一个力量都直接威胁港珠澳大桥的安全。其实，这里还隐藏着一种人们所无法看到的威胁。桥墩最大的威胁不全是来自风浪，还有一种看不见的危险——氯盐。于1987年就放在海边的一个钢筋混凝土试件，经过20多年之后，可以看到氯离子已经渗到了钢筋表面，引起了钢筋的锈蚀，如果时间再延长，那么整根钢筋都会锈蚀，造成膨胀，混凝土就会开裂，甚至剥落，这个结构就失效了。氯盐对于这座使用寿命长达120年的大桥来说是一个巨大的威胁。工程师和他的实验团队必须要找到一个好的创新办法抑制氯盐的锈蚀，这个问题的解决是解决港珠澳大桥120年使用寿命一个最重要的问题。20年的测试数据最终为桥梁如何抵抗氯盐找到一个好的创新方法，那就是一种高性能混凝土技术，它抵抗氯离子的能力比普通混凝土提高数倍以上。

港珠澳大桥是有史以来最大规模地使用钢材建造的桥梁，22 千米的桥梁使用了 50 万吨钢材，虽然全钢的桥梁比传统混凝土桥梁轻了很多，但它依然要面临一个严峻的挑战——地震。对于普通橡胶，自由落体以后它还会再弹起来，但是对于高阻尼的创新橡胶材料，它落下去以后的能量在分子之间的力中进行了消散。工程师在大桥正式开工之前找到了最佳的橡胶减震方案。

在港珠澳大桥横穿伶仃洋的水域，为保证每天 4000 多艘船只的顺利通行，除 6.7 千米的海底隧道之外，还设置了三座通航桥梁。从来没有一座桥横跨在三个国际机场的航线上，而且离得那么近，最危险的是离口岸最近的九洲大桥，其距离澳门机场仅有几米，飞机起飞不到一分钟就将飞越大桥的上空。在常规施工过程中，吊装设备要远高于桥塔本身，但这一经验却让工程师在这里无计可施。航空部门要求在大桥的整个建设期间，不能有任何设备的高度超过大桥桥塔，大桥的桥塔已经达到 120 米，设计师必须找到新的施工方案。一种创新的吊装方案被设计出来，这是一种富有创意的安装方法，工人们将桥梁的索塔直接在陆地上预制完成，然后通过底座上的连接轴进行连接，通过巨大的钢缆牵引，整座塔从水平到 90 度垂直一次完成。

新的桥塔施工方案让人新奇，但能否实施还需要通过另一个考验，那就是风。伶仃洋水域是台风多发地，每年超过 6 级以上风速的时间接近 200 天，韧性强的钢梁会在风力的作用下自然摆动，一旦频率相同，就会产生共振，后果不堪设想。上海同济大学通过一个关键的实验，试图利用风洞模型来找到解决共振的办法。他们发现了一些不利的涡振现象，这会对行人、驾驶员、坐在车上的人员造成不舒适的感觉，甚至于会导致桥梁结构的疲劳。解决涡振现象是这个实验的重点，必须让涡振消失。创新想法是加上 50 多厘米高、1 米宽的一个溢流板以后，可以使得原来在 7 级风作用下的 40 厘米大的振幅，降到只有 6 厘米。

1.3.6 港珠澳大桥创新奇迹之六：重新规划航道

30 千米长的海域却是世界上最繁忙的航道，港珠澳大桥一旦开始施工，每天 4000 多艘船只和工程船只的交叉通行将是巨大的麻烦。工程师必须想到办法来确保万无一失。他们和海上交通警察、海事局合作，在 30 千米的海面上重新规划航道，这是中国最大规模的一次航道改造工程。

将巨大的圆钢筒运送到远在 1600 千米之外的上海振华重工圆钢管施工现场，也并非想象中那么简单。开始的时候，5 名工人在高空中连续工作 10 小时，才能够将 8 根圆钢筒装到运输船上。这是一次对体力和耐力的挑战。一艘 7 万吨的运输船最多能够装载 8 根圆钢筒，4000 吨的圆钢筒对于 7 万吨的集装箱货轮来说似乎并不难，但高度 45 米的圆钢筒

直接挡在了驾驶室的正前方。有 20 年航海经验的船长也是第一次遇见这种困局，这是一次非常有挑战性的航行。他们须在船两边不停地来回穿插走动，才能从两侧看见一点点过往的船舶。最终振华号载着这 8 个巨大圆钢筒启航了，驶向南部 1600 千米之外的伶仃洋。

1.3.7 港珠澳大桥创新奇迹之七：GNSS 数据处理中心精确定位

这是一个极有挑战的工作，将 550 吨重、45 米高的巨型圆钢筒放置在规定坐标内的海床上，且允许的误差只有 2 厘米。

能胜任这个任务的是世界上最大的八向震锤，这是为了建造人工岛而定制的超级武器。它能够轻易吊起 1600 吨的重物。550 吨重的圆钢筒被吊起，但没有人知道误差只有 2 厘米的点在哪里。在 2 万千米的高空，GPS 卫星不断地传递数据，进入到大桥 GNSS 数据处理中心。这是大桥建立的一个 GPS 基站，任务就是确保在工程范围内的施工精度。GNSS 信号被传到了工程现场，550 吨重的圆钢筒逐渐下沉，它要穿透 37 米的海床，达到指定位置。

经历长达 28 年的准备，中国的工程师终于建造出世界上最长的跨海大桥。他们用超级大的圆钢筒来修建两座人工岛，生产 33 根航母般巨大的沉管来建造世界上最长的海底隧道，首次挑战地质复杂的海床，建立世界最长的钢铁大桥，并不断挑战新的工程极限。

1.4 天文望远镜的创新奇迹

400 多年前，当伽利略把他自制的望远镜指向天空的那一刻，人们就开始为探索宇宙而努力。现在，巨大望远镜早已存在，通过它们可以观测到光谱中人类肉眼所看不见的部分，从红外以下的低频无线电波到紫外以上的高频伽马射线。

然而，没有哪个传统光学望远镜可以与大型双筒望远镜（LBT）相提并论。它价值 6000 万英镑，是亚利桑那大学格雷厄姆山国际天文台最宝贵的明珠。2004 年架设至今已近 20 年，是继赫兹次毫米波望远镜和梵蒂冈尖端技术望远镜以来建于 10500 英尺高的格雷厄姆山顶上的第三台望远镜。

大型双筒望远镜的两个凹镜直径均达 8.4 米，总面积加起来达 110 平方米。两面凹镜片的表面加工精度非常高，它们安装在一个整体框架上，可以同时对准要观察的目标天体。借助光的干涉原理，所获图像的清晰度可与 23 米直径的镜片相当。它是一个单一整体，因此称为世界上最大的单个望远镜。而有些庞大的射电望远镜是由许多台小望远镜组成的