

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



# Digital Design and Manufacturing

## 数字化设计与制造

第③版

苏春 主编



赠电子课件

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 数字化设计与制造

第3版

主 编 苏 春  
参 编 黄 卫 王海燕  
主 审 张红旗

机械工业出版社

本书系统地阐述了数字化设计与制造技术的产生背景、学科体系、理论方法、关键技术及其应用系统。全书内容包括：以四次工业革命为主线，回顾制造业发展历程，剖析制造业、产品数字化设计与制造技术的发展脉络及其演变规律；介绍制造系统运营的基本概念，分析现代制造业面临的挑战；系统地分析数字化设计技术、数字化仿真技术、数字化制造技术、逆向工程与增材制造技术、数字化管理技术和产品数字化开发集成技术，并介绍主流应用软件系统。

本书内容新颖、体系结构完整、系统性强，力求反映数字化设计与制造技术的全貌和学科前沿。全书注重对数字化设计与制造基本概念、理论和方法的阐述，提供了丰富的数字化设计与制造技术应用案例，并附有大量的思考题及习题，以便于教学和研讨。

本书可以作为高等学校机械工程、工业工程、管理科学与工程等专业相关课程的教材，也可供从事产品数字化开发、制造企业运营与管理、企业信息化规划设计等领域的工程技术人员和管理人员参考。

本书入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目（现代机械工程系系列精品教材）。

## 图书在版编目（CIP）数据

数字化设计与制造/苏春主编.—3版.—北京：机械工业出版社，2019.2  
“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
ISBN 978-7-111-62139-3

I. ①数… II. ①苏… III. ①数字技术—应用—工业产品—产品设计—研究②数字技术—应用—制造工业—研究 IV. ①TB47②F407.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 037454 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：裴 泱 责任编辑：裴 泱 王海霞 商红云

责任校对：肖 琳 封面设计：张 静

责任印制：张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2019 年 5 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·22 印张·560 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-62139-3

定价：54.90 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

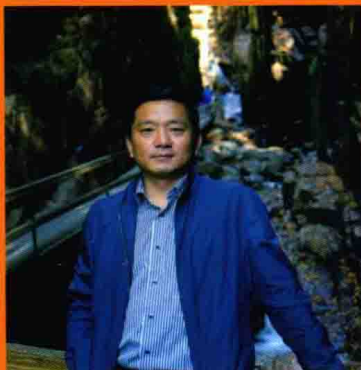
读者购书热线：010-68326294

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)



## 苏春

---

---

东南大学教授、博士生导师。  
1992年毕业于中国石油大学（华东）；1995年、2001年分别毕业于东南大学机械学、机械制造及其自动化专业，获得硕士和博士学位；1995~1998年在南京航空航天大学机电学院工作；2001年至今在东南大学机械工程学院工作。  
2003~2004年，公派赴瑞士日内瓦大学、欧洲核物理研究所工作，访问学者；2014~2015年，公派赴美国罗格斯大学，访问学者。主要研究方向为可靠性工程、生产系统工程、数字化设计与制造、制造系统建模与仿真等。主持完成国家自然科学基金项目3项，完成多项江苏省科技厅、江苏省教育厅、江苏省人力资源和社会保障厅、国防技术基础科研和企业委托项目；发表论文140余篇，其中SCI收录20余篇、EI收录60余篇，主编出版规划教材7本。

---

---



# Digital Design and Manufacturing



# 前 言


制造业是人类文明的重要基石，人类的文明史也是制造业的发展史与进步史。20世纪中叶以来，计算机、微电子、网络等信息技术的出现彻底改变了制造业的本来面貌，它们为制造业提供了崭新的技术手段，同时也对制造业的发展提出了重大挑战。目前，信息技术已经渗透到制造企业生产运营的各个层面，其理论研究、产品开发及工程应用水平已经成为衡量一个企业、一个地区乃至一个国家综合竞争力的重要标志。

经过几十年的发展，在传统的计算机图形学、计算机辅助设计和计算机辅助工程分析等技术的基础上，形成了产品数字化设计技术群；在数控加工、计算机辅助工艺规划、成组技术和增材制造等技术的基础上，形成了数字化制造技术群；在物料需求计划、制造资源计划、产品数据管理、产品全生命周期管理、企业资源计划和制造执行系统等技术的基础上，形成了数字化管理技术群。数字化设计、数字化制造与数字化管理技术相互交叉、融合和集成，构成产品数字化开发的集成环境与创新平台，成为提升产品研发能力和管理水平、推动制造业进步的不竭动力。

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。工业化国家都高度重视制造业的发展。近年来，大数据、人工智能、工业机器人、工业互联网和工业4.0风起云涌，以智能制造为主要特征的第四次工业革命轮廓初现，制造业开始进入“智能制造”时代，数字化设计与制造技术也将面临新的发展格局。

本书从产品数字化开发和企业数字化管理的角度出发，系统地阐述了数字化设计、数字化仿真、数字化制造和数字化管理的基础理论和应用方法。本书以四次工业革命为主线，简要回顾制造业发展历程，剖析制造技术的演变趋势和制造企业管理方法的变化规律；系统地论述数字化设计与制造技术的内涵及其学科体系，阐述数字化设计与制造的概念、原理和方法，涵盖产品数字化设计技术、数字化仿真技术、数字化制造技术、逆向工程与增材制造技术、数字化管理技术和产品数字化开发集成技术等内容。本书注重对基本概念、原理和方法的阐述，力求反映数字化设计与制造技术的全貌和最新发展动态，并提供了多个数字化设计与制造工程应用案例。

本书共分为9章，由东南大学苏春任主编，其中3.1~3.5节由东南大学黄卫编写，4.5节由东南大学王海燕编写，中国电子科技集团第38研究所的田富君、陈兴玉、程五四、陈帝江、魏一雄、周虹桥、张祥祥、胡祥涛等为3.7节、6.2.4节、7.6.2节的编写提供了资料，其余章节由苏春修订。中国



电子科技集团第38研究所张红旗研究员级高级工程师认真审阅全书并提出宝贵的修改意见。在本书编写过程中,南京汽车集团有限公司技术中心、安徽合力股份有限公司、E-works 数字化企业网等单位提供了相关资料,编者还参考了大量的文献资料,在此谨向原文献作者表示感谢。

本书入选东南大学2018年度校级规划教材,得到“江苏高校品牌专业建设工程项目(TAPP)”的资助,并入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

数字化设计与制造技术研究内容广泛、学科内涵丰富,并且仍然处于快速发展的过程之中,加之编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者



# 目 录

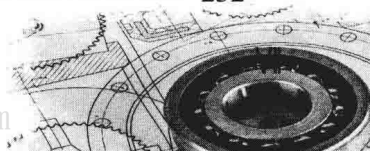
## 前 言

<b>第1章 引言</b> .....	1
1.1 工业革命与制造业变革 .....	1
1.1.1 第一次工业革命 .....	1
1.1.2 第二次工业革命 .....	3
1.1.3 第三次工业革命 .....	15
1.1.4 第四次工业革命 .....	29
1.2 制造与制造业 .....	35
1.2.1 制造与制造业的基本概念 .....	36
1.2.2 制造系统的组成与分类 .....	39
1.3 现代制造业面临的挑战及其发展趋势 .....	40
思考题及习题 .....	44
<b>第2章 数字化设计与制造技术概述</b> .....	48
2.1 数字化设计与制造技术的学科体系 .....	48
2.2 数字化设计与制造技术的特点 .....	53
2.3 数字化设计与制造技术的历史与发展趋势 .....	55
2.4 产品数字化设计与制造案例 .....	64
思考题及习题 .....	71
<b>第3章 产品数字化开发技术基础</b> .....	73
3.1 工程数据的类型及其数字化处理方法 .....	73
3.1.1 工程数据的类型 .....	73
3.1.2 工程数据的数字化处理方法 .....	75
3.2 数表的程序化处理 .....	75
3.2.1 简单数表的程序化处理 .....	75
3.2.2 列表函数数表的插值处理 .....	76
3.3 线图的程序化处理 .....	77
3.3.1 线图的表格化处理 .....	77
3.3.2 线图的公式化处理 .....	77



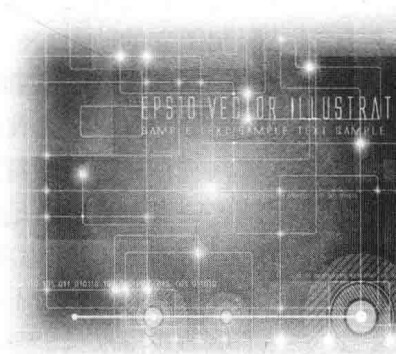
3.4 数据文件 .....	79
3.4.1 数据文件的生成与检索 .....	79
3.4.2 工程数据的文件化处理 .....	79
3.5 数据结构与数据库技术 .....	79
3.5.1 数据结构 .....	80
3.5.2 数据库技术 .....	83
3.6 曲线和曲面的表示 .....	85
3.6.1 曲线和曲面的基本概念 .....	86
3.6.2 曲线和曲面的参数化表示 .....	86
3.6.3 参数化曲线的表示及其几何特性 .....	88
3.6.4 常用的参数化曲线 .....	90
3.6.5 常用的参数化曲面 .....	94
3.7 工程数据数字化处理软件开发案例 .....	96
思考题及习题 .....	102
<b>第4章 产品数字化设计技术 .....</b>	<b>104</b>
4.1 数字化设计技术概述 .....	104
4.2 几何形体在计算机中的表示 .....	108
4.2.1 几何信息和拓扑信息 .....	108
4.2.2 形体的定义及表示形式 .....	109
4.3 产品造型技术 .....	111
4.3.1 线框造型 .....	111
4.3.2 曲面造型 .....	112
4.3.3 实体造型 .....	114
4.3.4 特征造型 .....	117
4.3.5 参数化造型 .....	119
4.3.6 参数化特征造型 .....	120
4.3.7 直接造型和同步造型 .....	124
4.3.8 基于模型的产品定义 .....	125
4.3.9 基于模型的企业 .....	134
4.4 数字化装配技术 .....	138
4.4.1 数字化装配的基本概念 .....	138
4.4.2 数字化装配的功能与操作 .....	139
4.5 几何形体渲染技术 .....	142
4.5.1 消隐 .....	143
4.5.2 光照 .....	143
4.5.3 纹理 .....	144
4.5.4 颜色 .....	145
4.6 主流数字化设计软件介绍 .....	145
思考题及习题 .....	148

<b>第5章 数字化仿真技术</b> .....	152
5.1 数字化仿真技术概述 .....	152
5.1.1 数字化仿真技术及其分类 .....	152
5.1.2 数字化仿真的基本步骤 .....	158
5.2 数字化仿真技术中的有限元法 .....	159
5.2.1 有限元法的基本概念 .....	159
5.2.2 有限元法的求解步骤 .....	160
5.2.3 有限元分析软件的模块组成和主流软件介绍 .....	164
5.2.4 数字化仿真应用案例 .....	167
5.3 虚拟样机技术 .....	173
5.3.1 虚拟样机技术概述 .....	173
5.3.2 主流虚拟样机解决方案 .....	176
思考题及习题 .....	185
<b>第6章 数字化制造技术</b> .....	186
6.1 数字化制造技术概述 .....	186
6.2 计算机辅助工艺规划技术 .....	188
6.2.1 计算机辅助工艺规划的基本概念 .....	188
6.2.2 计算机辅助工艺规划的功能模块 .....	191
6.2.3 计算机辅助工艺规划的类型 .....	192
6.2.4 基于三维模型的工艺规划与应用案例 .....	193
6.3 成组技术 .....	198
6.3.1 成组技术的基本概念 .....	198
6.3.2 零件的分类编码体系 .....	199
6.3.3 成组技术应用案例 .....	201
6.4 数控加工技术 .....	209
6.4.1 数控加工的基本概念 .....	209
6.4.2 数控机床的组成及分类 .....	209
6.4.3 数控编程技术 .....	214
思考题及习题 .....	235
<b>第7章 逆向工程与增材制造技术</b> .....	238
7.1 逆向工程技术概述 .....	238
7.2 逆向工程的类型与实施步骤 .....	239
7.3 实物逆向工程及其关键技术 .....	241
7.3.1 逆向对象的坐标数据测量 .....	242
7.3.2 实物逆向的数据处理与模型重构 .....	245
7.4 逆向工程技术应用案例 .....	248
7.5 常用逆向工程软件介绍 .....	250
7.6 增材制造技术 .....	252
7.6.1 增材制造技术概述 .....	252



7.6.2 典型的增材制造工艺与设备 .....	258
7.7 增材制造技术的发展趋势 .....	265
思考题及习题 .....	267
<b>第8章 数字化管理技术</b> .....	269
8.1 产品数据管理技术 .....	269
8.2 产品全生命周期管理技术 .....	273
8.3 企业资源计划 .....	281
8.4 制造执行系统 .....	288
思考题及习题 .....	292
<b>第9章 产品数字化开发集成技术</b> .....	293
9.1 概述 .....	293
9.2 柔性制造系统 .....	293
9.2.1 柔性制造系统概述 .....	293
9.2.2 柔性制造系统的组成与分类 .....	294
9.3 计算机集成制造系统 .....	299
9.3.1 计算机集成制造的定义 .....	299
9.3.2 计算机集成制造系统的分类 .....	303
9.3.3 计算机集成制造系统的开发模式与实施 .....	304
9.4 协同设计技术 .....	305
9.4.1 协同设计技术的发展及定义 .....	305
9.4.2 协同设计的关键技术 .....	307
9.4.3 协同设计的体系结构 .....	309
9.4.4 协同设计工具 .....	312
9.5 网络化制造技术 .....	314
9.5.1 网络化制造的定义 .....	314
9.5.2 网络化制造系统的体系结构 .....	316
9.5.3 网络化制造的基础技术 .....	321
9.6 并行工程 .....	322
9.6.1 并行工程的定义 .....	322
9.6.2 并行工程的特点 .....	323
9.6.3 并行工程的关键技术 .....	324
9.7 制造物联与工业互联网 .....	327
9.8 数字化企业 .....	333
9.8.1 数字化企业的定义 .....	333
9.8.2 数字化企业的构建 .....	335
9.8.3 数字化企业的案例分析 .....	337
思考题及习题 .....	341
<b>参考文献</b> .....	343

# 第1章 引 言



人类的文明史也是一部制造业的发展史与进步史。在石器时代，人类利用天然石料、动物骨骼以及植物纤维等制作简单的工具。在青铜器和铁器时代，人类开始采矿、冶金、铸锻工具、纺织成衣，利用作坊式手工生产方式打造工具、建造车船，实现了以农业为主、自给自足的自然经济。此后，金属农具的制造引发了农业革命（Agricultural Revolution）。17~18世纪，纺织业的发展促进了蒸汽机的发明、改进及其工程应用，引发了第一次工业革命（Industrial Revolution），人类开始由农业社会、作坊式手工生产进入以机器生产为特征的工业化社会。1870年前后，科学技术发展迅速，新技术、新发明层出不穷并迅速应用到工业生产中，发电机、电动机、内燃机以及电话、电报等相继出现，以零部件标准化和流水作业为特征的大规模生产方式极大地提升了生产力水平，由此引发第二次工业革命，人类由“蒸汽化时代”进入“电气化时代”。20世纪中叶，人类在原子能、电子计算机、微电子、航天以及生物工程等领域相继取得突破，以电子计算机、集成电路、可编程程序控制器（PLC）等为主要标志，引发第三次工业革命，人类开始进入“信息化时代”。21世纪以来，大数据（Big Data）、人工智能（Artificial Intelligence）、工业机器人（Industrial Robot）、智能制造（Intelligent Manufacturing）风起云涌，近年来美国政府提出国家制造业战略——《先进制造伙伴计划（Advanced Manufacturing Partnership, AMP）》、德国政府在《德国2020高技术战略》中提出“工业4.0”、中国政府提出制造强国战略第一个十年行动纲领——《中国制造2025》、日本政府通过《第五期科学技术基本计划（2016—2020）》，以智能制造为主要特征的第四次工业革命轮廓初现，人类开始进入“智能化时代”。

本章以四次工业革命为主线，简要回顾制造业的发展历程，分析制造技术及制造企业运营管理的演变过程，剖析制造业、数字化设计与制造技术的发展脉络；在此基础上，介绍制造业及制造系统运营的基本概念，并分析现代制造业面临的挑战及其发展趋势。



## 1.1 工业革命与制造业变革

### 1.1.1 第一次工业革命

17世纪以后，资本主义开始在英国、法国等国萌芽，商品的生产与流通成为社会关注的问题。随着煤炭、金属矿石需求量及开采量的不断增加，仅依靠人力和畜力已经难以满足生产需求，动力供应开始成为生产中的瓶颈环节。为此，英国人开始将纺织、磨粉等工场设在

河边，利用水轮驱动工作机械。但是，以水力驱动机械工作的生产方式受到很多因素的制约，限制了它的使用。

18世纪初，英国工程师托马斯·纽科门（Thomas Newcomen, 1663—1729）在前人工作的基础上发明了大气压力活塞式蒸汽机，用来抽取煤矿矿井中的积水（图1-1）。但是，这种蒸汽机存在消耗燃料多、热量损失大、工作效率低、体积庞大、只能做简单的往复式线性运动等缺点，难以满足纺织业、农产品加工业等领域的生产需求。

18世纪60~80年代，英国工程师詹姆斯·瓦特（James Watt, 1736—1819）针对当时蒸汽机存在的问题和不足，持续地改良了蒸汽机的工作原理、结构材料和制造工艺，先后发明了单动式蒸汽机、复式蒸汽机（也称万能蒸汽机）及高压蒸汽机，并取得相关发明专利。瓦特发明的蒸汽机耗煤量大幅度减少，系统效率和性能得到很大提升，煤燃烧的动力强度可控，有力地促进了蒸汽机的推广应用。图1-2所示为瓦特发明的蒸汽机。

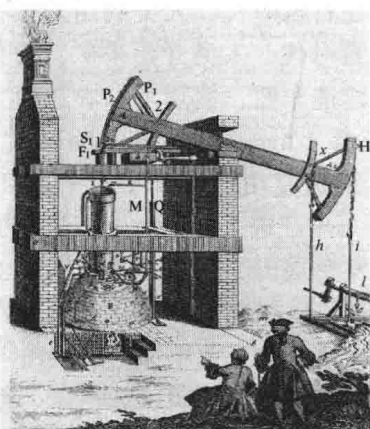


图 1-1 纽科门制造的蒸汽机示意图

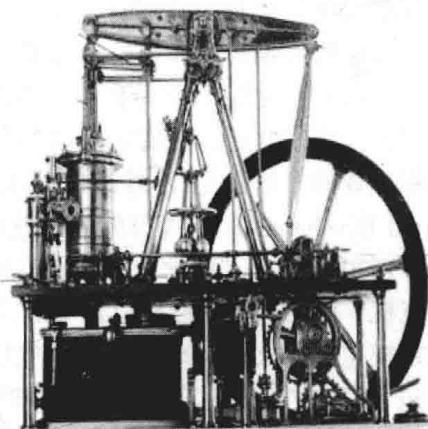


图 1-2 瓦特发明的蒸汽机

蒸汽机的发明开辟了人类能源开发与利用的新时代，部分地解决了工业生产中的动力问题，结束了人类对畜力、风力和水力由来已久的依赖。从此以后，人们将煤炭作为燃料驱动蒸汽机，可以根据需要建立工场，不再受河流等自然条件的制约，极大地改变了工场选址的限制及传统作业方式，拉开了第一次工业革命的序幕，人类开始进入“蒸汽时代”。为纪念瓦特这位伟大的发明家，后人将功率的单位定为“瓦特（W）”。

恩格斯曾经指出：“分工、水力，特别是以蒸汽为动力的机器的应用，是18世纪中叶起工业界用来摇撼旧世界基础的三个伟大的杠杆。”蒸汽机的发明极大地推动了煤炭、钢铁、纺织、机器制造、铁路和造船等制造业的发展。以英国为例，煤炭产量由1770年的600万t分别增长到1800年的1200万t、1861年的5700万t，铁的产量由1770年的5万t分别增长到1800年的25万t、1861年的380万t。因此，人类不仅进入了蒸汽时代，也跨入了钢铁时代。蒸汽机的广泛使用还推动了交通运输业的变革，速度更快、成本更加低廉、承载量更大的轮船和铁路机车相继出现。1803年，美国人罗伯特·富尔顿（Robert Fulton, 1765—1815）建造成功第一艘以蒸汽机为动力的商用汽船，被人们称为“现代轮船之父”。人类迎来了水上航行的机械化时代。1814年，英国工程师乔治·斯蒂芬森（George Stephenson, 1781—1848）发明了蒸汽机车，被称为“蒸汽机车之父”。1825年，英国建成世界上第一条铁路。之后，海洋和铁路运输业得到快速发展，全球范围内的贸易和经济交流日益频繁，商品流通的品种、范围和市场容量急剧扩大，整个世界都被纳入欧美等国的商品经济体系中。

1776年,英国哲学家和经济学家亚当·史密斯(Adam Smith, 1723—1790)出版了《国富论(The Wealth of Nations)》一书。该书阐述了欧洲产业增长和商业发展的历史,提出“劳动专业化分工”的概念,成为推动工业革命的重要力量。劳动专业化分工可以有效地提高工作效率和作业质量,并为流水线的出现和大规模生产创造了条件。此外,该书还首次提出“市场经济是由‘看不见的手’自行调节”的理论,奠定了资本主义自由经济的理论基础,成为现代经济学的开山之作,也使经济学成为一门独立的学科。与亚当·史密斯同时代的学者大卫·李嘉图(David Ricardo, 1772—1823)等对工厂制度、工资制度、利润理论等的建立起到了积极的推动作用。他们都是第一次工业革命中里程碑式的人物。

利用机器制造机器是工业化的起点。1797年,英国工程师亨利·莫兹利(Henry Maudslay, 1771—1831)以蒸汽机为动力,通过丝杠和导轨带动刀架移动,研制出刀具自动进给、可以车削出具有不同螺距的螺纹的车床,实现了机床结构的重大变革,极大地提高了机床的切削速度和加工精度,他因此被人们称为“机床之父”。1818年,美国人伊莱·惠特尼(Eli Whitney, 1765—1825)研制成功第一台卧式铣床。到19世纪40年代,机械制造业中的设备,如车床、钻床、铣床、刨床以及用于精确测量的千分尺、卡尺、卡钳、环规、量块等,相继被发明并不断得到改进,小型机械工厂开始出现,近代制造业体系初步形成。因此,卡尔·马克思(Karl Marx, 1818—1883)在《资本论》中指出:“大工业必须掌握它特有的生产资料,即机器本身,必须用机器来生产机器。这样大工业才能建立起与自己相应的技术基础,才得以自立”。

1798年,伊莱·惠特尼在制造枪支的过程中提出“互换性(Interchangeability)”的概念,通过规定零件的尺寸精度和公差范围实现零件的可互换,通过成批制造具有互换性的零件实现枪支的快速组装和大量生产。这种生产方式不仅满足了美国独立战争的需要,也显示了零件标准化与互换性的优越性。惠特尼的标准化方法和互换性奠定了零件制造合理化、专业化、简单化和标准化的理论基础,对制造业产生了深远影响,为大规模生产方式的普及做出了重要的技术准备。因此,惠特尼也被誉为“现代工业标准化之父”。

18世纪后期到19世纪前期,蒸汽机在欧洲和北美得到广泛使用。由此导致了深刻的社会变革,主要表现在:以机器生产逐步取代手工劳动,以工厂化生产取代个体手工生产,由工场手工业向机器大工业转变。高耸入云的烟囱、占地面积庞大的厂房和隆隆轰鸣的机器,打破了人类长久以来的田园生活,传统的农业社会开始向工业社会转变。

在自然经济和手工业生产方式中,人们主要凭经验管理生产。第一次工业革命之后,生产力得到解放,传统管理方法已难以满足社会需要。因此,工业革命不仅是一场科技和生产方式革命,也是一场深刻的生产组织和社会关系变革。

### 1.1.2 第二次工业革命

“科学(Science)”一词源于拉丁语 *scientia*,原意指“知识”,它在17世纪随着近代欧洲自然科学的兴起而逐步形成,并在19世纪得到普遍应用。狭义的科学特指自然科学,即人类认识自然的科学体系,包括物理学、化学、地理学、天文学、生物学等基础自然科学和工学、农学、医学等应用自然科学;广义的科学包括自然科学、社会科学和思维科学等。对中国人而言,“科学”是一个外来语。19世纪初,日本人用日文汉字创造出与“science”相对应的“科学”一词。19世纪末20世纪初,康有为(1858—1927)和梁启超(1873—1929)在翻译日文著作时引进“科学”一词。

“技术 (Technology)”一词源于希腊语 tech, 原意指技艺或技能。技术种类繁多, 遍及人类生产活动的各个领域。狭义的技术特指生产技术, 即人类改造自然、创造人工自然的相关方法和手段; 广义的技术包括生产技术和非生产技术。实际上, “技术”一词在我国古代就已经被人使用, 用来指专门的技艺和能力, 唐朝后该词被日本引入, 19 世纪末 20 世纪初又从日本传回我国, 并随工业革命的兴起而逐渐流行。

显然, 科学和技术是两个具有一定差异的概念, 它们反映了人类活动的不同领域。科学是人类的一种精神性活动, 与人类的思想状态有关, 其目的在于认识自然; 技术是人类的一种生产性、实践性活动, 其目的是改造自然。

解决机器对动力的需求问题是第一次工业革命的重要驱动力。在第一次工业革命期间, 发明创造多来自经验丰富的工匠和技术人员, 科学并未对工业进步产生太大影响。到 1870 年前后, 社会进步体现出两个重要趋势: 一是科学开始影响工业; 二是大批量生产技术不断得到改善, 并开始在生产中得到应用。此时, 有关工业问题的研究不再仅仅是在发明者的作坊中完成的, 训练有素的科学家开始在装备着昂贵仪器和装置的实验室里对特定的问题开展系统的研究工作。

通常, 将始于 19 世纪 70 年代止于 20 世纪初的工业革命称为第二次工业革命。在第二次工业革命期间, 科学技术的进步主要体现在以下三个方面: ①电力和石油等新能源的利用; ②内燃机的发明, 以及汽车、飞机等交通工具的创新; ③电报、电话等通信工具的发明。

1821 年, 英国科学家迈克尔·法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867) 发现了电磁转动原理, 首次证明可以将电力转变为旋转运动, 建立了电动机的原始模型。1831 年, 法拉第发现了电磁感应原理 (图 1-3)。法拉第的贡献在于: 使人类掌握了电场与磁场的相互转变、电磁运动与机械运动的相互转变、机械能与电能的相互转换的基本原理, 为发电机、电动机和变压器等的发明奠定了理论与技术基础。



图 1-3 法拉第的电磁感应实验

受法拉第电磁感应原理的启示, 1832 年法国人皮克希 (Hippolyte Pixii, 1808—1835) 以永久磁铁为转子, 制成最初的手摇磁石发电机。但是, 皮克希发明的发电机还存在一些不足。在随后的 30 多年间, 虽然有所改进, 但是人们始终未能研制出可供实用的直流发电机。1867 年, 德国人维尔纳·冯·西门子 (Ernst Werner von Siemens, 1816—1892) 对直流发电机的工作原理做出重大改进, 采用电磁铁代替永久磁铁, 产生了强大、稳定的电流, 发明了自激式直流发电机。1870 年, 比利时学者格拉姆 (Zénobe Théophile Gramme, 1826—1901) 因在西门子的电磁铁式发电机原理的基础上, 研制成功了性能更加优良的直流发电机, 而被人们誉为“发电机之父”。但是, 由于直流电的电压较难改变, 给电力的应用带来了困难, 而交流电的电压比较容易改变。1873 年, 德国西门子 (Siemens) 公司的工程师阿特涅采用与格拉姆发电机不同的线圈绕线方式, 研制成功性能良好的交流发电机。这些都是发电机制造历史上重要的里程碑。

根据法拉第电磁感应原理, 向发电机定子输入电流就可以驱动转子旋转, 从而把电力转变为旋转运动。1834 年, 德国物理学家雅可比 (Moritz Hermann von Jacobi, 1801—1874) 以

电磁铁为转子，研制成功第一台实用的直流电动机。在格拉姆发明发电机之后，基于类似结构的格拉姆型直流电动机被大量地制造出来，效率不断提高。1879年，德国西门子公司制造出由直流电动机驱动的电车，引起轰动。1888年，美国发明家特斯拉（Nikola Tesla, 1856—1943）发明了交流电动机。他发明的电动机根据电磁感应原理制成，又称感应电动机。这种电动机具有结构简单、使用交流电、无须整流等优点，得到广泛应用。

发电机和电动机的发明，实现了电能与机械能的相互转换。1882年，法国物理学家马赛尔·德普勒（Marcel Deprez, 1843—1918）通过提高电压成功地将1.5kW的电力输送到在57km之外，在人类历史上首次实现了电力的远距离输送。到19世纪末，直流及三相交流发电、变电、输送、分配等技术相继成熟，欧美各国先后建立远距离输电线路，为工业生产提供了安全、经济、可靠和方便的动力源。此后，电力开始用于驱动机器，成为补充并逐步取代蒸汽动力的新能源。19世纪80年代前后，无轨电车、电梯、电气火车、电钻、电焊机等电气产品和电器制造业迅速发展，由此人类跨入了电气时代。

在第二次工业革命中，美国发明家托马斯·阿尔瓦·爱迪生（Thomas Alva Edison, 1847—1931）做出了巨大贡献。爱迪生一生共有1000多项发明，包括电灯、留声机、电话、电报、电影放映机等，被人们称为“发明大王”。1879年，爱迪生发明了世界上第一盏有实用价值的电灯。为寻找合适的灯丝材料，爱迪生试验了1600多种耐热材料和6000多种植物纤维。经过反复试验，他用碳化后的竹子纤维做灯丝，使电灯灯泡的寿命达到了1200h（图1-4）。为给电灯提供电力，1882年爱迪生在美国纽约建成了当时世界上规模最大的电力系统。

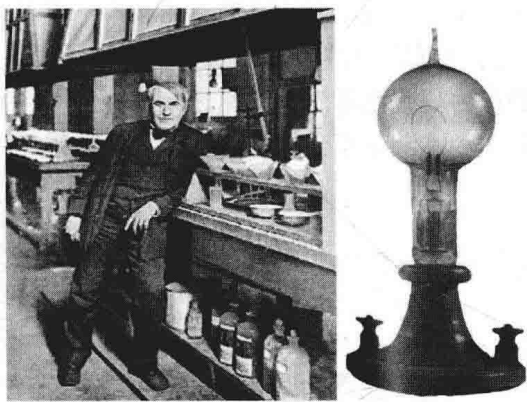


图1-4 “发明大王”爱迪生和他发明的电灯

1876年，美国人亚历山大·格雷厄姆·贝尔（Alexander Graham Bell, 1847—1922）发明了世界上第一台电话机，实现了人类通信方式的革命，他因此被誉为“电话之父”。之后他创建了贝尔（Bell）电话公司。西门子发明的发电机、贝尔发明的电话和爱迪生发明的电灯，被称为电力历史上的三大发明。

此外，1904年，英国物理学家弗莱明（John Ambrose Fleming, 1864—1945）发明了世界上第一只二极管（Electronic Tube）；1906年，美国人李·德弗雷斯特（Lee De Forest, 1873—1961）发明了三极管。这标志着人类开始进入电子时代。

蒸汽机的发明极大地提升了生产力水平。但是，蒸汽机仍存在笨重、热效率低和安全性差等难以克服的缺点，限制了它们的推广使用，也促使人们去研制新的动力装置。除电力之外，内燃机的发明和使用是第二次工业革命的另一成就。

18世纪末，英国人威廉·默多克（William Murdoch, 1754—1839）发现在用煤炼制焦炭的过程中有可燃气体生成，遂命名为煤气。1812年，默多克在伦敦建成了世界上第一座煤气制造工厂，他也因此被称为“煤气工业之父”。19世纪初，在欧洲国家，煤气开始广泛用于照明、取暖和工业生产中。

1859年，美国人德莱克（E L Drake, 1819—1880）在宾夕法尼亚州钻成第一口油井，成功地开采出石油，19世纪70年代，石油进入工业化生产阶段。在能够充分供应煤气和石油

的情况下，内燃机的发明成为可能。法国人路易斯·雷诺（Louis Renault，1877—1944）发明了第一台二冲程煤气机，并于1898年创建雷诺（Renault）汽车公司，首次采用带万向节的传动轴取代链条驱动后桥，并将直列式发动机与变速器连接，开创了现代汽车传动系的范例。1876年，德国人尼古拉·奥古斯特·奥托（Nikolaus August Otto，1832—1891）成功地制造出第一台活塞式四冲程实用汽油内燃机。汽油内燃机具有体积小、重量轻、转速快和效率高等优点，便于用作交通工具的发动机，它奠定了奥托作为内燃机行业开创者的地位。四冲程内燃机是继蒸汽机之后，人类在机械和动力工程领域取得的又一巨大成就。

1883年，德国工程师戈特利布·戴姆勒（Gottlieb Daimler，1834—1900）制成以汽油为燃料的内燃机，转速由原来的200r/min提高到800r/min。1885年，德国人卡尔·本茨（Karl Benz，1844—1929）成功地制造出第一辆由内燃机驱动的三轮汽车（图1-5），它具备现代汽车的基本特点，如火花点火、水冷循环、钢管车架、钢板弹簧悬架、后轮驱动和前轮转向等。卡尔·本茨于1886年获得世界上第一项汽车发明专利，并被称为“汽车之父”。后来，他又成立了本茨汽车制造公司。1886年，戴姆勒将自己研制的发动机安装在一辆四轮马车上，以“令人窒息”的18km/h的速度行驶。这是人类历史上第一辆四轮汽车（图1-6），奠定了戴姆勒作为现代汽车工业先驱之一的地位。1890年，戴姆勒汽车公司成立；1926年，戴姆勒汽车公司和本茨汽车公司合并，成立了戴姆勒-本茨（奔驰）汽车公司。

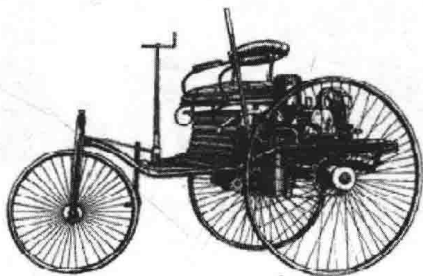


图1-5 本茨制造的汽车

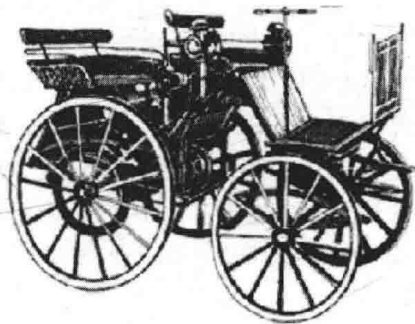


图1-6 戴姆勒制造的汽车

1899年，菲亚特（FIAT）汽车公司成立，后来发展成意大利最大的汽车制造公司。19世纪末，法国标致（Peugeot）和雷诺（Renault）公司开始生产汽车。1916年，法国雪铁龙（Citroen）汽车公司投产。至20世纪初期，德国、美国、法国、英国、意大利等国家相继建立起独立的汽车工业，开始批量生产汽车。

在四冲程煤气机和汽油机之后，四冲程柴油机、蒸汽涡轮机和燃气轮机被先后研制出来，为工业生产和交通工具提供了多种动力源。1903年，第一艘内燃机轮船建造成功。1908年，柴油机成为潜水艇的动力源。1910年，拖拉机开始批量生产，农业机械化进入新的发展阶段。1912年，第一艘由柴油机驱动的远洋货轮下水。1913年，以柴油机为动力的内燃机车投入运行，揭开了铁路运输的新篇章。随着内燃机的广泛使用，石油的开采量和炼制技术水平也迅速提高。1870年，全球石油产量约为80万t，1900年增加到约2000万t。

1903年，美国人威尔伯·莱特（Wilbur Wright，1867—1912）和奥维尔·莱特（Orville Wright，1871—1948）兄弟制造的世界第一架载人动力飞机“飞行者1号”，在美国北卡罗来纳州飞上蓝天，实现了人类翱翔蓝天的梦想。1927年，查尔斯·林德伯格（Charles Lindbergh，1902—1974）驾驶飞机从纽约直飞巴黎，成为世界上第一个独自、不着陆横越大