

21 世纪

普通高等教育规划教材

第2版

数字化设计与制造

Digital Design and Manufacturing

苏 春 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育规划教材

数字化设计与制造

第 2 版

主编	苏 春	
参编	黄 卫	王海燕
主审	袁军堂	



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、关键技术以及主流应用系统。全书内容包括：近现代制造业的发展历程、制造技术进步的典型事件和关键人物；数字设计与制造技术产生的背景、发展历史、学科体系及其系统组成；产品数据在计算机中的表示与处理方法；产品数字化造型技术及其主流软件；数字化仿真、有限元分析和虚拟样机技术；计算机辅助工艺规划技术、成组技术以及数控加工技术；逆向工程与快速原型制造技术；产品数字化开发的集成技术。

本书内容新颖、体系结构完整、系统性强，力求反映产品数字化设计与制造技术的全貌和最新发展动态。全书注重基本概念、原理和方法的阐述，提供不少数字化设计与制造技术的应用案例，并附有一定数量的思考题和习题。

本书可作为高等学校机械工程、工业工程、机械电子工程、车辆工程等专业相关课程的教材，也可供从事产品数字化开发、生产运作与管理、企业发展规划与决策等领域的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字化设计与制造/苏春主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2009.11
21 世纪普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-28506-9

I. 数… II. 苏… III. ①数字技术-应用-机械设计-高等学校-教材②
数字技术-应用-机械制造工艺-高等学校-教材 IV. TH122 TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 184587 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: 张敬柱 责任编辑: 张敬柱 版式设计: 张世琴
封面设计: 张 静 责任校对: 樊钟英 责任印制: 洪汉军
三河市宏达印刷有限公司印刷
2009 年 12 月第 2 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 21.5 印张 · 534 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-28506-9
定价: 36.00 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

社服务中心: (010) 88361066 门户网: <http://www.cmpbook.com>
销售一部: (010) 68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>
销售二部: (010) 88379649
读者服务部: (010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

在人类社会的发展过程中,计算机的出现具有划时代的意义。计算机、网络和信息技术的飞速发展给人们的生产、生活以及生存方式带来了深远影响,成为推动人类社会由传统的工业文明进入信息时代的动力源。目前,信息技术的研发及其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指标。

制造业是人类文明的基石之一,是推动社会进步的重要力量。信息技术为制造业的变革提供了良好机遇,也对制造业的发展提出了严峻挑战。经过几十年的发展,在计算机图形学、计算机辅助设计以及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、成组技术以及快速原型制造等技术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、管理信息系统、产品数据管理、产品全生命周期管理以及企业资源计划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的交叉、融合和集成,形成了产品数字化开发的集成环境与平台,成为提升产品研发能力和管理水平、推动制造企业进步的重要动力。总之,数字化技术正在迅速而持续地改变着制造业的面貌。

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、数字化制造以及企业数字化管理的基本原理和方法。本书回顾了制造业的发展历程,以近现代制造业发展中的典型产品、核心技术、代表性企业和关键性人物为主线,剖析现代制造业的发展轨迹和企业管理方法的演化规律;系统地论述了数字化设计与制造技术产生的背景、内涵及其学科体系;着重阐明数字化设计与制造的基本概念、原理和方法,涵盖产品数据在计算机中的表示、数字化造型、数字化仿真、数字化制造以及产品数字化开发的集成技术等内容。本书注重相关概念、原理和方法的阐述,力求能反映产品数字化设计与制造技术的全貌和最新发展动态,其中提供了不少数字化设计与制造的应用案例。为了方便教学,本书还配有教学课件。

本书由东南大学苏春担任主编,黄卫、王海燕参加了教材的编写工作。全书共分9章,第4章4.1~4.5节、第7章7.2节由黄卫编写,第5章5.3节和5.7节由王海燕编写,其余章节由苏春编写。本书由南京理工大学袁军堂教授担任主审,袁军堂教授细致地审阅了全书,并提出不少有益的建议,在此表示由衷的谢意。教材的编写工作得到东南大学立项支持,南京汽车集团有限公司技术中心、e-works 中国制造业信息化门户网和安徽合力股份有限公司等单位提供了相关资料。在教材编写过程中,编者参考了大量文献资料,在此谨向原文献作者表示感谢。

数字化设计与制造技术研究内容广泛、学科内涵丰富,并处于快速发展的过程之中。由于编者水平所限,书中若有不妥之处,敬请读者批评、指正。

编者
于东南大学

目 录

前言

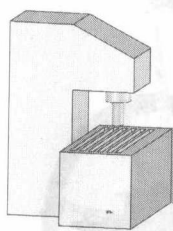
第 1 章 引论	1
1.1 第一次工业革命	1
1.2 第二次工业革命	3
1.3 信息革命	14
思考题及习题	31
第 2 章 数字化设计与制造概述	32
2.1 制造与制造业	32
2.1.1 制造与制造业的基本概念	32
2.1.2 制造系统的组成及其分类	34
2.2 现代制造业面临的挑战及其发展趋势	35
2.3 数字化设计与制造的内涵及学科体系	39
2.4 数字化设计与制造技术的特点	43
2.5 数字化设计与制造技术的发展	45
2.5.1 数字化设计与制造技术的发展史	45
2.5.2 数字化设计与制造技术的发展趋势	53
2.6 数字化设计与制造技术的应用案例	54
思考题及习题	61
第 3 章 数字化设计与制造系统的组成	62
3.1 数字化设计与制造系统的功能分析	62
3.2 数字化设计与制造系统的软硬件组成	65
3.2.1 数字化设计与制造系统的硬件组成	65
3.2.2 数字化设计与制造系统的软件组成	71
3.3 数字化设计与制造系统的建立	74
3.3.1 软件系统的开发流程	74
3.3.2 软硬件系统的选型	76
思考题及习题	78
第 4 章 产品数据在计算机中的表示与处理	79
4.1 工程数据的类型及其数字化处理方法	79
4.1.1 工程数据的类型	79

4.1.2 工程数据的数字化处理方法	80
4.2 数表的程序化处理	81
4.2.1 简单数表的程序化处理	81
4.2.2 列表函数数表的插值处理	82
4.3 线图的程序化处理	83
4.3.1 线图的表格化处理	84
4.3.2 线图的公式化处理	84
4.4 数据文件	85
4.4.1 数据文件的生成与检索	85
4.4.2 工程数据的文件化处理	86
4.5 数据结构与数据库技术	86
4.5.1 数据结构	86
4.5.2 数据库技术	90
4.6 曲线和曲面的表示	92
4.6.1 曲线和曲面的基本概念	92
4.6.2 曲线和曲面的参数化方程	93
4.6.3 参数曲线的代数形式和几何形式	94
4.6.4 参数化曲线	97
4.6.5 参数化曲面	100
4.7 产品数据交换标准	103
4.7.1 产品数据交换标准概述	103
4.7.2 常用的产品数据交换标准	104
思考题及习题	108
第5章 产品数字化造型技术	110
5.1 数字化造型技术概述	110
5.2 几何形体在计算机内部的表示	113
5.2.1 几何信息和拓扑信息	113
5.2.2 形体的定义及表示形式	114
5.3 计算机图形学的基本概念	116
5.3.1 计算机图形学概述	116
5.3.2 坐标系统	117
5.3.3 窗口与视口	118
5.3.4 图形变换	120
5.3.5 图形裁剪	123
5.4 线框、曲面和实体造型技术	124
5.4.1 线框造型	124
5.4.2 曲面造型	126
5.4.3 实体造型	128
5.5 特征造型和参数化造型技术	131
5.5.1 特征造型	131
5.5.2 参数化造型	132
5.5.3 参数化特征造型	134

5.6 数字化装配技术	137
5.6.1 数字化装配的基本概念	137
5.6.2 数字化装配的功能及操作	138
5.7 几何形体的渲染技术	142
5.7.1 消隐	142
5.7.2 光照	143
5.7.3 纹理	144
5.7.4 颜色	145
5.8 主流数字化造型软件介绍	146
思考题及习题	149
第6章 数字化仿真技术	152
6.1 数字化仿真技术概述	152
6.1.1 数字化仿真技术及其分类	152
6.1.2 数字化仿真的基本步骤	157
6.2 数字化仿真技术中的有限元法 (FEM)	158
6.2.1 有限元法的基本概念	158
6.2.2 有限元法的求解步骤	159
6.2.3 主流有限元分析软件介绍	162
6.2.4 有限元法的应用案例	166
6.3 虚拟样机技术	171
6.3.1 虚拟样机技术概述	171
6.3.2 主流虚拟样机解决方案	174
6.3.3 虚拟样机软件 ADAMS 介绍	179
思考题及习题	184
第7章 数字化制造技术	185
7.1 数字化制造技术概述	185
7.2 计算机辅助工艺规划 (CAPP) 技术	186
7.2.1 CAPP 的基本概念	186
7.2.2 CAPP 的功能与模块组成	187
7.2.3 CAPP 的类型	188
7.3 成组技术 (GT)	190
7.3.1 成组技术的基本概念	190
7.3.2 零件的分类编码体系	191
7.3.3 成组技术的应用案例	193
7.4 数控 (NC) 加工技术概述	201
7.4.1 数控加工的基本概念	201
7.4.2 数控机床的组成及其分类	202
7.5 数控 (NC) 编程技术	206
7.5.1 数控机床的坐标系统	206
7.5.2 数控编程的基本功能指令	211
7.5.3 数控编程的高级编程功能	222

7.5.4 数控编程的基本步骤	227
7.5.5 数控编程的后置处理	230
7.5.6 直接数字控制 (DNC) 技术	231
7.6 数控高速切削加工 (HSM) 技术	235
思考题及习题	239
第 8 章 逆向工程与快速原型制造技术	240
8.1 逆向工程技术概述	240
8.2 逆向工程的研究内容及基本步骤	240
8.3 实物逆向工程及其关键技术	243
8.3.1 逆向对象的坐标数据采集	244
8.3.2 实物逆向的数据处理及模型重构	247
8.4 逆向工程技术应用实例	251
8.5 逆向工程软件介绍	254
8.6 快速原型制造技术	257
8.6.1 快速原型制造技术概述	257
8.6.2 典型的快速原型制造工艺及设备	262
8.6.3 快速原型制造技术的发展趋势	269
8.6.4 基于逆向工程的快速原型制造	272
思考题及习题	273
第 9 章 产品数字化开发的集成技术	274
9.1 概述	274
9.2 柔性制造系统	274
9.2.1 柔性制造系统产生的背景	274
9.2.2 柔性制造系统的组成与分类	275
9.3 计算机集成制造系统	281
9.3.1 计算机集成制造产生的背景及其定义	281
9.3.2 计算机集成制造系统的分类	284
9.3.3 计算机集成制造系统的开发模式与实施	285
9.4 协同设计技术	286
9.4.1 协同设计技术的发展及定义	286
9.4.2 协同设计的关键技术	288
9.4.3 协同设计的体系结构	290
9.4.4 协同设计工具	293
9.5 网络化制造技术	295
9.5.1 网络化制造的定义及发展现状	295
9.5.2 网络化制造系统的体系结构	297
9.5.3 网络化制造的基础技术	302
9.6 并行工程	302
9.6.1 并行工程的产生和定义	302
9.6.2 并行工程的特点	304
9.6.3 并行工程的关键技术	306

9.6.4 并行工程的实施模式	310
9.7 产品数据管理技术	311
9.7.1 产品数据管理产生的背景和定义	311
9.7.2 产品数据管理系统的功能分析	312
9.7.3 产品数据管理系统的技术规范	315
9.8 产品全生命周期管理技术	317
9.8.1 产品全生命周期管理的定义	317
9.8.2 产品全生命周期管理的功能分析	319
9.8.3 主流产品全生命周期管理软件介绍	320
9.9 数字化企业	325
思考题及习题	332
参考文献	334



第1章 引 论

我们知道，物料（material）、能源（source of energy）和信息（information）是人类文明的三大支柱。综观人类历史，从制造第一把工具开始，直到今天的航空母舰、宇宙飞船和核电站等复杂系统，人类所有的文明和进步都离不开制造（manufacturing）。可以说，没有制造就没有人类。因此，杨叔子院士认为：除上述三大支柱外，制造应该是人类文明的第四根支柱。

人类的文明史就是一部制造业的进步史。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。进入青铜器和铁器时代，人类开始采矿、冶金、铸锻工具、纺织成衣，采取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），蒸汽机的制造引发了第一次工业革命（industrial revolution），电机的制造引发了第二次工业革命，而计算机、集成电路和网络设备的制造引发了信息革命（information revolution）。

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，商品生产与流通开始成为社会关注的问题。随着煤、金属矿石需求量和开采量的不断增加，仅依靠人力和畜力已不能满足生产需求，动力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，利用水轮来驱动工作机械。但是，水力驱动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，用来抽取矿井的积水（图 1-1）。但是，这种蒸汽机存在以下缺点：消耗燃料多、热量浪费大、工作效率低、体积庞大和只能作简单的往复式线性运动等，主要用于煤矿排水。

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，持续对蒸汽机的原理、结构、材料和工艺等进行改

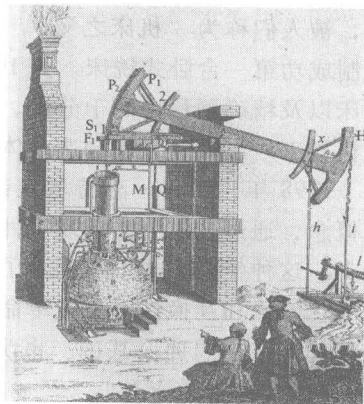


图 1-1 纽科门制造的蒸汽机示意图

良,先后发明了单动式蒸汽机、复式蒸汽机(也称万能蒸汽机)和高压蒸汽蒸汽机,并取得相关专利。瓦特发明的蒸汽机耗煤量少,功效得到很大提高。蒸汽机通过煤的燃烧获得大小可控的动力,极大地促进了机器的普及和工厂生产,使工业技术出现飞跃式发展。图1-2所示为瓦特发明的蒸汽机。

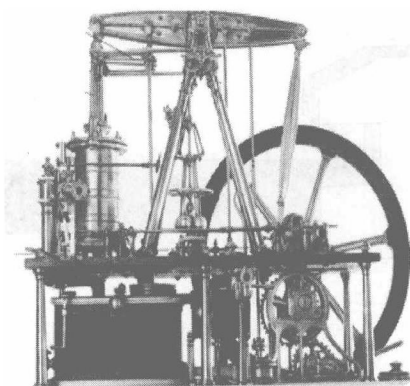


图1-2 瓦特发明的蒸汽机

蒸汽机的发明解决了工业发展中的动力问题,结束了人类对畜力、风力和水力由来已久的依赖。从此,只要以煤为燃料就能驱动蒸汽机,从而根据需求建立工厂,不再受河流等自然条件的限制。蒸汽机的发明是第一次工业革命的重要标志,人类开始进入蒸汽时代。

蒸汽机的发明推动了煤炭、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,煤的产量由1770年的600万t分别增长到1800年的1200万t和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和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、成本更低廉和承载量更大的铁路机车和轮船相继出现。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,海洋运输和铁路运输得到快速发展,世界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,整个世界都被纳入到欧美等国的商品经济体系中。

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,大工业才建立起与自己相应的技术基础,才得以自立”。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的移动,研制出刀具自动进给、可以车削出不同螺距螺纹的车床,极大地提高了切削速度和加工精度,被人们称为“机床之父”。1818年,美国人艾利·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、刨床以及精确测量用的千分尺、卡尺、卡钳、环规、块规等相继被发明并不断得到改进,小型机械工厂出现,近代制造业体系初步形成。

1798年,艾利·惠特尼在制造枪支的过程中,提出了零件互换性(interchangeability)的概念,通过规定公差实现零件的互换,通过成批制造具有互换性的零部件来快速组装大量枪支。这种生产方式不仅满足了美国独立战争的需要,也显示了互换性的优越性。惠特尼的标准化方法和互换性对工业革命产生了深远影响,它奠定了零部件制造合理化、专业化、简单化和标准化的理论基础,也为大规模生产作了重要的技术准备。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被广泛采用。由此导致深刻的社会变

革，主要表现在：以机器生产逐步取代手工劳动，以大规模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、体形庞大的厂房以及隆隆轰鸣的机器，打破了人类长久以来的田园生活，这些国家开始从传统的农业社会向现代工业社会转变。

第一次工业革命不仅是生产方式和科技的革命，也是一场深刻的社会关系和生产组织变革。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，传统的管理方法已难以满足社会需要。

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，提出了“劳动专业化分工”的概念，成为推动工业革命的重要力量。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、利润理论的建立起到积极的推动作用。他们都是第一次工业革命中里程碑式的人物。

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。”

1.2 第二次工业革命

“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。狭义的技术是指生产技术，即人类改造自然、创造人工自然的方法和手段；广义的技术则包括生产技术和非生产技术。实际上，“技术”一词在我国古代已经使用，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。

“科学（science）”一词源于拉丁语 scientia，原意指“知识”，17世纪随近代欧洲自然科学的兴起而逐步形成，在19世纪得到普遍应用。狭义的科学则特指自然科学，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”一词是纯粹的外来语。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）、梁启超（1873—1929）在翻译日文著作时引进“科学”一词。

因此，科学和技术是两个不同的概念，它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，它与人类的思想状态有关，其目的在于认识自然；而技术是人类的一种生产性、实践性活动，其目的是改造自然。

机器对动力的需求是第一次工业革命的重要驱动力，其间的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。1870年前后，社会进步体现出两个重要趋势——科学开始影响工业、大批量生产技术得到改善和应用。有关工业问题的研究不再仅仅是发明者的作坊，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进行系统研究。

一般将始于 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。其中,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内燃机的发明和汽车、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,首先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,为发电机的发明奠定了基础(图 1-3)。法拉第的贡献在于:他使人类掌握了电场与磁场相互转变、电磁运动与机械运动相互转变以及机械能与电能相互转换的方法,为发电机、电动机和变压器等技术奠定了重要的理论基础。

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)以永久磁铁做转子,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,但始终未能研制出可供实用的直流发电机。1867 年,德国人韦纳·冯·西门子(Ernst Werner von Siemens, 1816—1892)对直流发电机原理作出重大改进,用电磁铁代替永久磁铁,产生强大、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(Zenobe Theophile Gramme, 1826—1901)在采用西门子电磁铁式发电机原理的基础上研制成功性能更加优良的直流发电机,被人们誉为“发电机之父”。但是,直流电的电压较难改变,给电的应用带来困难,而交流电的电压很容易改变。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,成为发电机制造史上的重要里程碑。



图 1-3 法拉第的电磁感应实验

根据法拉第电磁感应原理,若向发电机定子输入电流,可以驱动转子旋转,从而把电能转变为旋转运动。1834 年,德国物理学家雅可比(Moritz Hermann von Jacobi, 1801—1874)用电磁铁做转子,制成了第一台实用直流电动机。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直流电动机驱动的“不冒烟”的电车,引起轰动。1888 年,美国发明家特斯拉(Nikola Tesla, 1857—1945)发明了交流电动机。交流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、无需整流等优点,开始得到广泛应用。

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,法国学者德普勒(M Deprez, 1843—1918)通过提高电压成功地将 1.5kW 的电能输送到在 57km 以外,在世界上首次实现远距离输电。到 19 世纪末,直流以及三相交流的发电、变电、输送、分配等技术相继成熟,欧美各国先后建立了远距离输电线路,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,成为补充和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,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·爱迪生(Thomas Alva Edison, 1847—1931)作出了巨大贡献。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”和“天才”。1879年，通过长期的反复试验，爱迪生发明了世界上第一盏有实用价值的电灯。为了寻找合适的灯丝材料，爱迪生试验了1600多种耐热材料和6000种植物纤维。经过反复实验，他用碳化后的竹子纤维做灯丝，使电灯寿命达到1200h（图1-4）。为了给电灯提供电力，1882年爱迪生在纽约建成了当时世界上最大规模的电力系统。实际上，爱迪生一生只在学校里念过三个月的书，他的成绩主要来自兴趣和勤奋，正如爱迪生曾经说过的那样：“天才就是百分之一的灵感加上百分之九十九的汗水。”

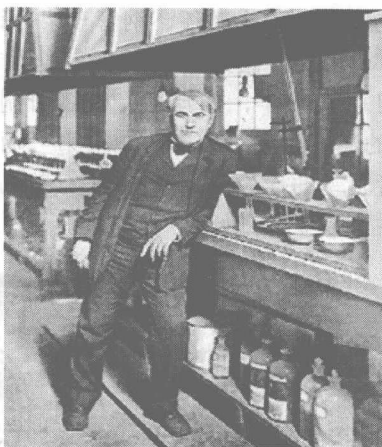


图1-4 “发明大王”爱迪生和他发明的电灯

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，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、贝尔发明的电话以及爱迪生发明的电灯，被称为电力历史上的三大发明。

1904年，英国物理学家弗莱明（John Ambrose Fleming, 1849—1945）发明了世界上第一只二极管（electronic tube），1906年美国人弗雷斯特（Lee De Forest, 1873—1961）发明了三极管。标志着人类开始进入电子时代。

蒸汽机极大地提升了生产力，但是蒸汽机存在笨重、热效率低和安全性差等难以克服的缺点，促使人们去研制新的动力装置。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，他也被称为“煤气工业之父”。19世纪初，煤气开始在欧洲国家广泛用于照明、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，成功地采出石油，19世纪70年代石油进入工业化生产阶段。在煤气和石油能够充分供应的情况下，内燃机的发明成为可能。法国人路易斯·雷诺（Louis Renault, 1877—1945）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箱联接，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，具有体积小、质量轻、转速快和效率高等优点，便于用作交通工具的发动机，奠定了他在内燃机行业开创者的地位。四冲程内燃机是继蒸汽机之后，人类机械史和动力工程领域的又一巨大成就。

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，将转速由原来的200r/min提高到800r/min。1885年，德国人卡尔·本茨（Karl Benz, 1844—1929）成功地制造了第一辆由内燃机驱动的三轮汽车，它具备了现代汽

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、后轮驱动以及前轮转向等(图1-5),并于1886年获得世界第一项汽车发明专利,被称为“汽车之父”。后来,本茨成立了汽车制造公司。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18km/h“令人窒息”的速度行驶,人类历史上第一辆四轮汽车诞生(图1-6),奠定了戴姆勒现代汽车工业先驱者之一的地位。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。

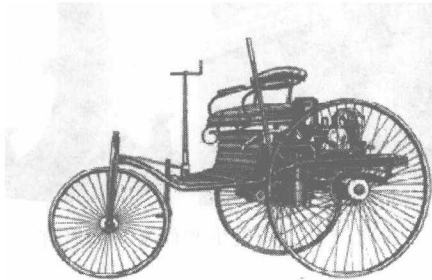


图 1-5 本茨制造的汽车

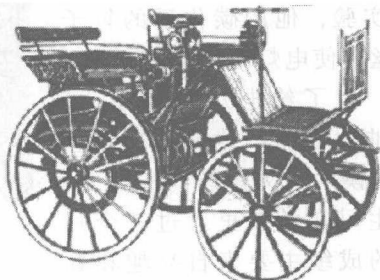


图 1-6 戴姆勒制造的汽车

1899年,意大利菲亚特(FIAT)汽车公司成立,后来成为意大利最大的汽车制造公司。19世纪末,法国的标致(Peugeot)和雷诺(Renault)汽车公司开始生产汽车,1916年雪铁龙(Citroen)汽车公司投产。至20世纪初期,德国、美国、法国等相继建立起自己的汽车工业,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,拖拉机开始大批量生产,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,石油的开采量和提炼技术也大大提高。1870年,全世界只生产了大约80万t石油,1900年已增加到2000万t。

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

在汽车工业的发展中,美国人亨利·福特(Henry Ford, 1863—1947)作出了重要贡献。福特早年在一家机械厂当学徒,后来曾在爱迪生电灯公司当机械工。在汽车刚问世之时,福特就意识到这种新型交通工具的优越性和未来的发展潜力。1892年,他研制成功第一辆由两缸汽油机驱动的四轮汽车。该车结构简单、装有四个自行车轮并有两个前进档,时速可达20km。该车问世后销售情况良好。1899年,福特等人合伙成立了底特律汽车公司,开始批量生产豪华轿车,每辆售价高达2700美元。但当时美国工人的工资大约为每天1~1.5美元,工薪阶层根本无力购买。由于价格过高,1902年该公司产品开始滞销。

福特认为:要扩大汽车生产,就要将汽车由奢侈品变为人们的必需品。为此,1903年他离开底特律汽车公司,创立了以生产廉价汽车为目的的福特(Ford)汽车公司。1905年,福特A型轿车年产量达到1700多辆。1908年,福特公司新研制的T型轿车(图1-7)投入

生产, 售价从 1000 多美元降至 950 美元。亨利·福特是第一个将小汽车正式命名为“轿车”的人。“舒服得像坐在家里, 好用的像一双鞋子”, 这是当时人们对 T 型轿车的评价。

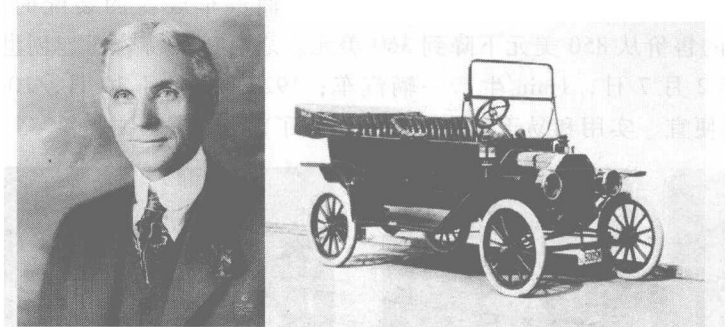


图 1-7 “流水装配线之父”亨利·福特和福特公司生产的 T 型轿车

由于该车价格低廉、使用方便、维护容易, 销售量迅速增加。1909 年, T 型轿车年产量超过 1 万辆。1914 年, T 型轿车年产量达到 30 万辆。1916 年, 每辆 T 型轿车售价降至 360 美元。1926 年, 在 T 型福特轿车停产前, 年产量达到 200 万辆, 售价仅 290 美元。20 年间, 福特公司共生产 1500 万辆 T 型轿车, 占当时世界汽车产量的一半。福特 T 型轿车也被称为“一款改变了世界的汽车”。福特开启了汽车的大众化时代, 使美国成为“车轮上的国家”, 他也因此获得“汽车大王”之美誉。

1908 年, 美国人杜兰特 (William Crapo Durant, 1861—1947) 在别克汽车公司的基础上组建了通用汽车公司 (General Motors Corporation, GM)。1925 年, 沃尔特·克莱斯勒 (Walter P Chrysler, 1875—1940) 脱离通用汽车公司, 成立克莱斯勒 (Chrysler) 汽车公司。之后, 通用、福特和克莱斯勒公司的汽车产量长期位居美国汽车公司前三名, 被称为美国汽车工业的“三巨头”。

福特在汽车的生产方式、生产技术、企业运作管理和商业模式等方面取得成功, 并在世界范围内掀起了大批量生产的产业革命。他为汽车产业和制造业的发展作出了巨大贡献, 主要表现在以下几个方面:

(1) 简单化设计和标准化生产。福特认为, 必须使汽车构造简单化。只有简单, 汽车才可能轻便, 才容易修理。此外, 简单的设计易于大批量生产。福特还认为, 当产量增大时, 生产成本就会降低, 汽车价格就可以更加低廉, 才会有更多的人购买。福特还将惠特尼的零件标准化和互换性的生产方法用于汽车制造中, 将 T 型轿车的主要零部件设计成统一规格, 实现零件的标准化和总成互换。

(2) 流水线生产方式。在福特之前, 汽车制造 (装配) 均是在固定工位上完成, 由一个工人完成从原材料到整车的所有组装工作, 作业效率低, 生产周期长, 生产组织困难。原始的组装技术根本无法满足大规模生产的需求, 并导致汽车价格居高不下。为此, 福特开始思考提高生产效率的方法。

有一天, 福特等在参观屠宰场时发现, 当牛被送进屠宰间后, 工人先用电将牛击昏, 之后放血, 再将牛悬挂到传送带上, 然后工人依次用锯、刀等工具完成开膛剖腹和分割等工作, 整个屠宰过程由多名工人共同完成, 每个工人只需进行最简单的操作。于是, 福特将这种具有连贯性和高效的流水作业方式运用到汽车制造中, 由机械传送装置运送零件和工具,

工人只需在各自工位上完成简单和规定的操作，从而极大地提高了汽车的生产效率。

1913 年，世界上第一条刚性汽车装配线（assembly line）在福特汽车公司诞生（图 1-8）。在采用流水线（flow line）生产方式后，每辆汽车底盘的装配时间从 12h 减少到 1.5h，T 型轿车的售价从 850 美元下降到 360 美元。之后，福特公司连创世界汽车工业的生产纪录：1920 年 2 月 7 日，1min 生产一辆汽车；1925 年 10 月 30 日，10s 生产一辆汽车。福特 T 型轿车因便宜、实用和易于操作，迅速占领了市场。

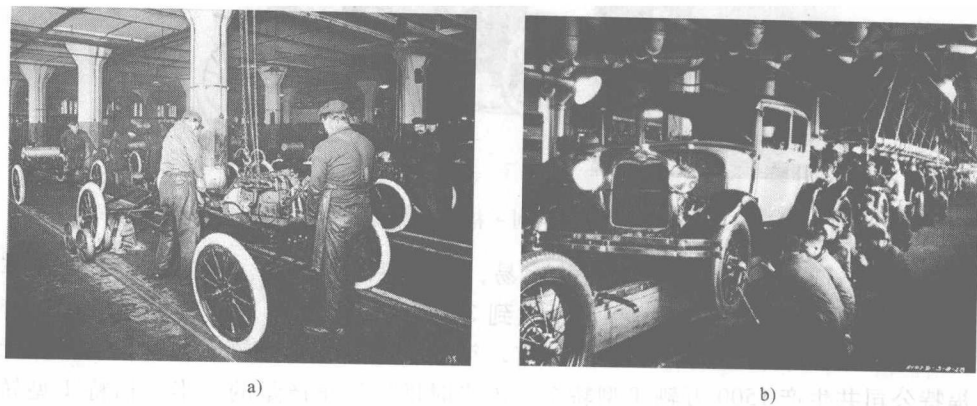


图 1-8 福特公司早期的汽车装配线

a) 装配线现场之一 b) 装配线现场之二

福特 T 型轿车是世界上第一种以大量通用零部件和大规模流水线装配作业方式生产的汽车。它首次实现了刚性流水生产，奠定了现代大规模生产的技术基础。福特也因此被称为现代“流水装配线之父”。

(3) 创新的营销策略和管理思想。福特在流水生产线中推行了定额管理思想；在产品销售中采用低价的销售策略，使大多数人都能购买得起；通过提供充足的零部件和及时的售后服务，消除用户的后顾之忧；通过向员工支付高薪（如由每天 1 美元提高到每天 5 美元），让员工能买得起自己所造的车，增加员工的自豪感，提高员工工作的积极性和工作效率。福特的改革起到了榜样作用，推进了美国社会的薪酬改革，引发了购买汽车的风潮，带动了整个汽车行业的发展。

在汽车制造企业存在着不同的生产组织方式。早期的福特公司采用全能型生产组织模式，汽车的全部零部件（甚至包括轮胎、蓄电池等）都由本公司生产。通用汽车（GM）公司则采用专业化分工的生产组织方式。它将一些汽车制造企业联合起来、分工协作，根据各个企业的条件，实行专业化生产。在很长一段时间，美国汽车企业的竞争也体现了这两种生产组织方式的竞争。

企业因市场而生，也只有及时适应市场变化才能不断发展、壮大。20 世纪初，福特以价格的低廉迅速占领汽车市场，使汽车成为美国人的代步工具，为汽车的大众化作出了重要贡献。到 20 世纪 20 年代，汽车业已是大众与精英并存的市场，汽车不只是消费者的交通工具，还体现了个人的品味与偏好。但此时的福特依然将主要的资金和精力投入到 T 型轿车中，产品品种和配置单一，甚至连汽车的颜色都只有黑色。福特曾说过：“只要汽车呈黑色，顾客总会称心如意”。此时，美国已形成了巨大的旧车市场，质量相当不错的二手车只