

两院院士联合打造"中国制造"
多名专家倾情奉献制造业蓝皮书

中

国

制造

全球化时代的

主 编 朱高峰
副主编 郭重庆 徐性初
胡启恒 李京文
李守仁

MADE IN CHINA
MADE IN CHINA
MADE IN CHINA

社会科学文献出版社



B0579975

F426.4

13

全球化时代的

中国制造

主 编
副主编

朱高峰
郭重庆
胡启恒
李守仁

徐性初
李京文



图书在版编目(CIP)数据

全球化时代的中国制造/朱高峰主编. —北京:社会科学文献出版社, 2003. 2

ISBN 7-80149-880-1

I. 全… II. 朱… III. 制造业—经济发展—研究—中国 IV. F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 101006 号

全球化时代的中国制造



主 编: 朱高峰

副 主 编: 郭重庆 徐性初 胡启恒 李京文 李守仁

责任编辑: 杨晓芳

责任校对: 郑厚今

责任印制: 同 非

出版发行: 社会科学文献出版社

(北京市东城区先农胡同 10 号 电话 65137751 邮编 100005)

网址: <http://www.ssdph.com.cn>

经 销: 新华书店总店北京发行所

排 版: 东远先行彩色图文中心

印 刷: 北京美通印刷有限公司

开 本: 787×1092 毫米 1/16 开

印 张: 24.25

字 数: 406 千字

版 次: 2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-80149-880-1/F·306

定价: 38.00 元

版权所有 翻印必究

编委会成员

主 编：朱高峰

副主编：郭重庆 徐性初 胡启恒 李京文 李守仁

成 员：李 平 李仁涵 屈贤明 郑家亨 尤建新

编辑组成员

组 长：李京文

成 员：李 平 郑家亨 李仁涵 任才方

宗 刚 潘凤湖 刘戈平

中国工程院《新世纪如何提高和发展我国制造业》 咨询项目研究组成员名单

顾 问：宋 健 袁宝华 何光远 马 洪
组 长：朱高峰
副组长：郭重庆 栾恩杰

第一课题《我国制造业的现状》研究组

徐性初 周勤之 柳百成 海锦涛 谢麟振 屈贤明 黄开亮
吕国英 李仁涵 张 威 叶 猛

第二课题《新时期我国制造业的作用、地位及发展趋势》研究组

胡启恒 李京文 姚福生 吴 澄 蒋亦元 郑家亨 李 平
李海舰 宗 刚 龚飞鸿 刘戈平

第三课题《新世纪振兴我国制造业的对策》研究组

李守仁 关 桥 顾冠群 陈先霖 饶芳权 施仲衡 马福邦
时铭显 俞忠钰 朱森弟 练元坚 宋天虎 海锦涛 屈贤明
李仁涵 吕 政 潘凤湖 艾国强 许承凯 史 丹

第四课题《企业深层次体制改革是制造业生存和发展的前提和关键》研究组

郭重庆 刘友梅 沈闻孙 朱英浩 温俊峰 黄崇祺 常 平
白玉良 唐登杰 聂阿新 胡茂元 吴光权 余宝庆 韩 斌
胡申伟 徐伟梧 尤建新 雷星晖 吴建伟 邱灿华 周文泳
陈守明 周 健

第五课题《军工制造业》研究组

栾恩杰 吴伟仁 吴复兴 宁汝新 田雨华 彭艳萍 闫 艳

项目办公室人员

李仁涵 安辉耀 王爱红 聂淑琴 王 纲

朱高峰：通信技术与专家、中国工程院院士；中国工程院前任副院长；清华大学、北京大学兼职教授。20 世纪六七十年代，主持通信载波传输系统总体设计与研制工作，负责总体设计的第一套中同轴电缆 1800 路载波通信系统是中国载波通信系统的重要组成部分，1978 年该项目获全国科学大会奖。20 世纪 80 年代倡议并组织建设全国长途自动电话网，提出网络运行可靠性总体设想，推动通信网络技术理论成为独立学科。90 年代组织制定了中国长途网络规划，为“八五”期间建设 22 条光缆主干线起了主导作用。近年来在紧密跟踪世界信息技术发展趋势的同时，对中国产业结构、技术创新和工程教育等方面问题进行了有益的探索，先后发表了多篇论文。



郭重庆：机械制造工艺与设备和设施规划与设计专家、中国工程院院士、中国工程设计大师；同济大学教授；长期从事工程项目设计，曾担任世界银行第一个工业项目（上海机床项目）总设计师，通过最终产品的合理集中和工艺、零部件的专业化生产，实施了行业整体改组、改造。主持中国工程咨询机构首次独立承担的世界银行沈阳工业改革项目的可行性研究，最早提出将企业制度的改革、生产合理化的改组及生产现代化的改造三结合同步实施的方案。并曾担任中国几个主要砂轮厂基建技改项目总设计师，组织完成了“扩大中国磨料出口的研究”，为中国跃居世界磨料生产及出口大国发挥了重要的倡导和积极实践的作用。



徐性初：精密机床设计及工艺专家、中国科学院院士（学部委员）；机械工业部科技委副主任、高级工程师；机械科学院名誉院长。长期从事精密计量及精密量仪研制和精密加工及超精密机床设计及制造工作。曾主持研制了



中国第一台一米纵动光电比长仪、以激光波长为基准的刻制一米光栅和磁栅母机。开发了超精密机床及超精密加工技术，先后研制成功超精密车床、超精密铣床及高精度圆度仪等新产品，其旋转精度优于 0.02 微米，加工镜面粗糙度小于 2.5 纳米，同时创造了一套低成本的关键制造技术。还主持了高效率超精密机床的研制工作。

胡启恒：自动控制技术专家、中国工程院院士、中国科学院研究员、中国科协副主席；乌克兰国家科学院外籍院士。曾任中国科学院副院长，中国计算机学会理事长，中国自动化学会理事长。中国模式识别与人工智能领域最早的探索者之一。从手写数字的识别开始，发展了识别算法和邮码识别样机。作为模式识别的应用项目，获 1978 年全国科学大会奖和中国科学院重大科技成果奖。研究了基于模式的信息分析和决策规则的归纳推断方法，领导建成了中国在模式识别领域的第一个国家重点实验室。致力于推进科技体制改革、科技与经济的结合、因特网在中国的发展以及在相应领域中的国际交流与合作。



李京文：著名经济学家、中国工程院院士、全国政协委员、中国社会科学院学术委员会委员、中国工程院工程管理学部常委，教授、博士生导师；俄罗斯科学院外籍院士、国际欧亚科学院院士、世界生产率科学院院士。长期致力于科技进步、生产率、经济形势分析与预测、工程项目技术经济评估、资源与环境、可持续发展和区域规划等领域的研究。主持了三峡工程、南水北调、京沪高速铁路等超大型工程的技术经济论证；主持了环渤海圈、中部五省、海南、深圳等地区经济发展战略的规划制订。获国家科技进步一、二、三等奖共 6 项，以及省部级科技进步奖、孙冶方经济学奖、“五个一”工程奖多项。发表论文 300 余篇；出版专著 36 部，主要有：《生产率与中美日经济增长》、《技术经济理论方法》、《跨世纪重大工程技术经济



论证》、《迎接知识经济新时代》、《中国经济：“十五”预测与 21 世纪展望》等；主编丛书多部，主要有：历年《经济形势分析与预测》（系列经济蓝皮书）、《中国经济运行丛书》、《挑战知识经济丛书》、《经济全球化中的大国战略丛书》等。

李守仁：全国政协委员、原机械工业部副部长。长期从事农机设计研究和农机科研管理工作，主持并参与的农机系列设计工作，提高了中国拖拉机配套农机的技术水平，并获得 1978 年全国科学大会奖。参与主持“国家十二个重要领域政策研究”项目中农业机械技术政策的研究工作，该项目获 1988 年国家科技进步一等奖。在担任国务院重大技术装备领导小组办公室主任期间，始终坚持自力更生与引进国外先进技术相结合，坚持制造部门与使用部门相结合，坚持质量第一、成套供货、成套服务。主持了 12 项国家重大技术装备的研制、攻关和国产化工作，积极促进相关政策的研讨、制定和实施，为国家重点建设工程提供了一批技术先进的装备。



KAJ 16/01

前 言

由于中国的工业化水平较低，20 世纪 80 年代中后期至 90 年代中后期，人们（特别是在青年人中间）有一个好的愿望，希望能够找到一条捷径，跨过工业化时代，直接使中国进入知识经济时代，赶上世界工业发达国家的水平。由此中国社会出现了把在工业化中与人们生活水平提高密切相关的、在经济发展过程中起重大作用的制造业比做“夕阳产业”，社会的主流开始热衷于进入“知识和信息的生产和分配，而不再是物质的生产和分配；由比特代替原子等理想主义”的状态。由此产生的后果是人们不重视中国的制造业提高和发展，制造业特别是装备制造业的水平日趋下降，进而成为世界进口大国，真正需要进口的关键装备则受到严格的限制，阻碍了现代化建设的步伐。

综观世界发展史以及制造业在各个国家的经济发展中地位和作用，特别是从美国和日本的制造业在 20 世纪 80 年代和 90 年代的变化中可以看出，制造业随着人类社会的发展，不断与新技术相结合，一直为人类创造着物质和精神财富，是一个国家经济发展和综合实力提高的支柱，是一个不朽的产业。在这种背景下，全国政协副主席、中国工程院前任院长宋健院士多次在不同场合和报刊，发表讲话和文章呼吁提高和发展中国制造业的重要性，为此中国工程院咨询工作委员会根据院士们的建议，于 2001 年批准成立《新世纪如何提高和发展我国制造业》咨询研究项目组，并由中国工程院前任副院长朱高峰院士任组长。

咨询项目组共组织了相关专业的 25 位中国工程院和中国科学院的院士以及 40 多位工程技术、社会科学和管理等方面的专家，经过 1 年多的工作，分别对《我国制造业发展现状》、《新时期我国制造业的作用、地位及发展趋势》、《新世纪振兴我国制造业的对策》、《企业深层次体制改革是制造业生存和发展的前提和关键》等方面进行了调查和研究，写出了专题研究报告，在此基础上，提出了《新世纪如何提高和发展我国制造业》咨询研究总报告。报告指出：制造业是为人类提供衣食住行的基本条件，是国

制造业与现代化（代序）

宋 健

由 15~16 世纪意大利艺术家和科学家们，达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452~1519）、拉斐尔（Raffaello Sanzio, 1483~1520）和米开朗其罗（Michelangelo Buonarroti, 1475~1564）等发起的文艺复兴，激起了人们对大自然的向往，点燃了 16~17 世纪欧洲的启蒙思潮，发起了人类历史上一场伟大的思想解放运动，打破了宗教神权的枷锁，开辟了人类理性思维的人文时代。先进知识界达成了共识，只有用观察、实验、比较、归纳、推理等理性的科学方法才能认识世界、改造世界，改善人类的生存条件，才能得到知识、自由和幸福。复兴人文主义（Humanism），探求一切知识，发展人的才能，知识就是力量（培根，Francis Bacon, 1561~1626）^①等，成为科学唯物论的战斗号角。此后 300 年，科技突破势如破竹，巨人辈出。哥白尼的天体运行论（1543）、牛顿力学（1687）、达尔文的进化论（1859）、麦克斯韦的电动力学（1865）等开启了人类的科学时代，为 19 世纪和 20 世纪科学技术的突飞猛进奠定了坚实基础。从哥白尼到牛顿力学的建立经历了 140 年。从 1733 年法国杜菲（Charles Francois de Cisternay Dufay, 1689~1739）发现电到麦克斯韦建立电动力学，经过了 120 年。1900 年普朗克（Max Planck, 1858~1947）提出量子论，到 1926 年薛定谔（Erwin Schrödinger, 1887~1961）建立量子波动方程和 1929 年海森堡（Werner Karl Heisenberg, 1901~1976）建立量子电动力学，只经历了 30 年。20 世纪以后，科学创造、技术发明日新月异。20 世纪下半叶微电子技术和信息产业的出现和迅速普及，使人类的生产活动、科学研究、技术开发和社会生活开始进入信息化和智能化时代，极大地减轻了体力劳动，延伸和增强了脑力功能，提高了社会劳动生产率。这

^① Edward O. Wilson. Consilience, *The unity of knowledge* (《知识大融通》), 梁锦鉴译, 天下远见出版公司, 台北, 2001。

一切都使人心旷神怡。

人类有理由为过去 400 多年的科技成就和文明进步自豪。文学家们用最高级形容词和最美的语言去颂扬成就。自由作家们激扬文字，放歌而贺。未来学家以其非凡的想像力，畅想着瑰丽的未来。科幻作家创作了引人入胜的神奇故事。科学技术界也有人把酒临风，逐流舞墨，为自由作家们的畅想提供证据。文学艺术的浪漫夸饰，生动活泼地介绍科技成就，提高了人们的科技意识，功不可没。导致欧洲知识界思想大解放的启蒙之火就是文艺复兴时代的艺术家们点燃的。科学和艺术都是理性的宁馨，气质相通，矢志相同，从同源出发，各选隘路攀向高峰。

然而，科学和艺术是有区别的。萌念和畅想能启发创新精神和创造力，但把艺术中的“超现实主义”和“浪漫主义”用到制定科学技术政策则要分外小心。科技工作者应该严格区分哪些是浪漫畅想和未经证实的假说，哪些是实际已经或可能达到的高度，从而制定合乎实际的政策和计划，倡导经过努力有可能实现的奋斗目标和方向。这就是坚持科学精神。

20 世纪 80 年代以来，最引人瞩目的浪漫是关于未来人类物质生产的遐想。有人讲知识对经济的重要性时，断言“所有创造财富的资源中，知识可以取代其他资源。”“知识是取代自然资源的替代品”，“取之不尽、用之不竭的知识是终极的替代品”，“目前有两种经济，一是朝阳经济，另一种是夕阳经济”，“多数传统产业已成夕阳，矿业、铁路、钢铁已被新技术革命所淘汰。”“现代经济的主要职能是知识和信息的生产和分配，而不再是物质的生产和分配。”“包括生产、消费和生活的各种经济活动过程都具有虚拟性，都不需要到现场进行，而是通过数字化的网络来完成。”于是“工业经济衰落”了^①，更有人畅想说，今后的生产对象主要是“比特”，而不是原子，将出现无物质生产的社会。如果生产、消费和生活都可以虚拟化，那么人类社会可以逐渐脱离人间烟火而升华至丹书符篆了。

这些默换主题的浪漫、豪放，对发达国家也未必准确，应用到中国则更应该慎重。特别对工业制造业的历史地位、现在的形势和未来发展趋势应该有符合实际的、科学的分析，从而正确把握自己工业化、现代化的建设方向，不至于随人短长，陷入迷津。这是本文不厌其烦辗转沉思的主题。

① Edward O. Wilson. Consilience, *The unity of knowledge* (《知识大融通》), 梁锦鉴译, 天下远见出版公司, 台北, 2001。

Alvin Toffle, 1990, *Powershift*, Chapt. 8. Bantam Books, New York.

阿尔温·托夫勒：《第三次浪潮》，三联书店，1983。

约翰·奈斯比特：《大趋势》，中国社会科学出版社，1984。

一 制造业创造了人类

追溯现代人的宗谱出身,都是从猿进化而来,科学界已没有争议^①。按林耐(Linnaeus Carolus, 1707~1778)建立的生物分类规则,现代人被列入动物界(Animalia, 含 32 个门),脊椎动物门(Vertebrata, 与鱼类、两栖类、爬虫、鸟类同门),哺乳纲(Mamalia, 与牛、马、鲸、海豚同纲),灵长目(Primates, 与 192 种猴、猿同目),人科(Hominoidae, 含南方古猿 Australopithecus),人属(Homo, 含能人 H.habilis、巨人 H.ergaster、直立人 H.erectus)的现代智人种(Homo sapiens)。灵长目的特征是有五指,拇指与其他四指相对,有锁骨,指甲扁平,嘴鼻缩短,视觉发达,一对乳房,通常一胎一子。灵长目中的猿科(Anthropomorphidae, 含长臂猿 Gibbon、大猩猩 Gorilla, 黑猩猩 Chimpanzee 等)中的黑猩猩与人的亲缘最近,基因序列有 98.8% 相同^②,大约 600 万年前与人分离^③。人与猿相分离,是由于人学会了双足行走和用手制造并使用工具,这是人类进化的关键一步。黑猩猩也能使用工具,用枝条掏蚂蚁,用石头砸坚果,但从未发现它会制造工具,也不能坚持双足走路^④。

1960 年,Jonathan Leakey 在坦桑尼亚 Victoria 湖东 Olduvai 峡谷发现了第一个 200 万年前的能人(Homo habilis)的头盖骨,脑容量为 650 毫升,比南方古猿大 50%。1972 年 Richard Leakey 在肯尼亚又发现了另一个 190 万年前的能人头盖骨化石,脑容量为 775 毫升。从 1960 到 1986 年已

① Micheal H.Day, 1993, Human Evolution, Encyclopaedia Britannica, vol.18, pp.803~883, London.

Richard Leakey, 1994, *The Origin of Humankind*, Phoenix.

Robert H.Dott, and Roger L.Batten, 1976, *Evolution of the Earth*, McGraw-Hill, New York.

Fujiyama A. Et al., 2002, Science 295, pp. 131-134.

Douglas J Futuyma, 1986, *Evolutionary Biology*, Sinauer Associates Inc.

Peter H.Raven, George B.Johnson, 1992, *Biology*, Mosby Year Book.

恩格斯:《自然辩证法》,载《马克思恩格斯选集》(第五卷),第 518、572 页。

黄慰文:《蓝田人》,中华书局,1982。

Richard Dawkins, 1986, *The Blind Watchmaker*, Penguin Books.

② Fujiyama A. Et al., 2002, Science 295, 131-134.

③ Douglas J Futuyma, 1986, *Evolutionary Biology*, Sinauer Associates Inc.

④ 黄慰文:《蓝田人》,中华书局,1982。

Richard Dawkins, 1986, *The Blind Watchmaker*, Penguin Books.

毛泽东:《毛泽东诗词选》,中央文献出版社,1996。

周一良、吴于廑:《世界通史(上古部分)》,人民出版社,1962。

发现能人化石 7 个。有证据表明他们都会制造和使用工具^①。古人类学的考古发现为人猿分界提供了客观的科学标志，从而把会制造工具的能人列入人属的第一个成员。后来发现的人属化石表明都能直立行走。所以从 150 万年到 20 万年前的人属化石都命名为直立人（Homo erectus）。

考古学有证据说明，随着狩猎和采集技术的改进，人们制造的工具日趋精细，种类越来越多，出现了有组织的石料开采和加工，形成了原始制造业。还有证据表明，中国的元谋人（170 万年前的南方古猿）、非洲人早在 160 万年前即开始用火。饮食的改善，有利于脑的发展。按生物学“用得多的器官进化快”原理^②，伴以营养的丰富，人类的脑容量逐步增大。200 万年前的能人脑容量约为 700 毫升，100 万年前的直立人脑容量约为 1000 毫升，50 万年前增加到 1200 毫升。裴文中先生于 1929 年发现的 57 万年前的北京（直立）人为 1050 毫升。现代人的脑容量平均为 1450 毫升^③。大猩猩为 700 毫升，黑猩猩为 800 毫升。脑容量增长的同时，大脑皮层褶皱面积也不断增大，现代人为 1700~2200 平方厘米，是黑猩猩的 3 倍。至于人类从采集狩猎转向耕作和畜牧，那已经很晚了，属 1 万~2 万年前新石器时代的事。

这就是人猿分道扬镳的简史。毛主席 1964 年有一首词《贺新郎·读史》，头几句是：

“人猿相揖别，只几个石头磨过，小儿时节。”^④

很贴切。使用工具、制造工具，即原始的制造技术和生产方式的改变引发了古猿进化的改辙，驱引他们用脑思维，脑容量增大，经选择遗传而与猿类分离，变成堂堂直立的人类，从而迈上了艰难漫长通向文明的进化之路。这已是古人类学、进化生物学、社会学等科学界的共识。恩格斯说得好：“直立和劳动创造了人类，而劳动是从制造工具开始的。动物所做到的最多是搜集，而人则从事生产。”^⑤

总之，原始的工具制造是人类社会制造业的最早萌芽。

① Micheal H. Day, 1993, *Human Evolution*, Encyclopaedia Britannica, vol. 18, pp. 803~883, London.

② Richard Dawkins, 1986, *The Blind Watchmaker*, Penguin Books.

③ Peter H. Raven, George B. Johnson, 1992, *Biology*, Mosby Year Book.

恩格斯：《自然辩证法》，载《马克思恩格斯选集》（第五卷），第 518、572 页。

黄慰文：《蓝田人》，中华书局，1982。

④ 毛泽东：《毛泽东诗词选》，中央文献出版社，1996。

⑤ 恩格斯：《自然辩证法》，载《马克思恩格斯选集》（第五卷），第 518、572 页。

二 制造业是产业革命的主力军

18 世纪的产业革命和接踵而来的电气化运动,从瓦特发明蒸汽机(1765 年)算起已延续了 240 年。这场波澜壮阔的工业革命使人类的生产和生活方式发生了不可逆转的伟大变化。在发达国家,水能、化石能和电力完全代替了人力、畜力,千万种机械代替了手工劳动,农业全面实现了机械化,批量制造生产资料和生活资料的大工业已成为社会生产的主导,极大地提高了社会劳动生产率和社会财富的积累速度和规模,形成了工业社会文明的主体。到 20 世纪上半叶这场革命已在—批工业发达国家中取得了辉煌的胜利。

牛顿力学,麦克斯韦电动力学和量子力学这些科学发现是人类文明史上最伟大的成就,对 18~20 世纪的基础科学、工程技术的进步和工业化进程都起到了根本性的指导作用。然而,历史记录也清楚表明,有悠久历史的制造业的进步是产业革命取得成功的主要因素,是推动产业革命的主力军,也为科学发现提供了最可靠的实验手段和知识源泉。

考古发现表明,早在 100 万~50 万年前的古石器时代就有用卵石、兽骨、牛角、象牙等制造的生产和生活用具如刀、斧、锯等。与北京猿人同时代地层中出土了 10 万多件砍刀、石铲、石斧、片状切刀等。5 万年前的中石器时代已有制造业分工,批量生产比较精致的木、角、骨制工具,刀、锥、凿、针、矛、镞等,还有批量生产的陶器^①。

地球最后一个冰期(玉木冰期,12.5 万~1 万年前)于 1 万年前消退,地球温度变暖,海平面上升,人类进入新石器时代。亚洲(中国和两河流域)出现了农业、畜牧业和建筑业(住房和村庄),批量制造复合工具(有柄的镰刀、刀、斧等),大批量生产陶器(江苏溧水神仙洞、江西万年仙人洞均出土了 1 万年前的陶器),7000 年前已有彩陶批量生产(陕西半坡出土)。秦始皇兵马俑和战车(2200 年前)无疑是由工场生产的。东汉的瓷器,唐代的唐三彩,宋朝的宜兴紫陶,广东、江苏的青瓷等曾大

① 周一良、吴于廑:《世界通史(上古部分)》,人民出版社,1962。

J. Mercader, M. Panger, C. Boesch, 2002, Excavation of a Chimpanzee Stone Tool Site in the African Rainforest, *Science*, 296, 24 May, 1452~1455.

Michael H. Day, 1993, *Human Evolution*, Encyclopaedia Britannica, vol.18, pp.803~854, London.

J. M. Roberts, 1982, *History of the World*, Penguin Books.

夏湘蓉、李仲均、王根元:《中国古代矿业开发史》,地质出版社,1980。

伊东俊太郎:《简明世界科学技术史年表》,哈尔滨大学出版社,1984。

量出口欧洲亚洲各国^①。这都是制造业。

毛主席在《贺新郎·读史》中提问：

“铜铁炉中翻火焰，为问何时猜得？不过几千寒热。”

考古发现的结论是，青铜时代开始于 5000 年前，炼铁技术开始于 4000 年前。中东发现了公元前 2500 年的炼铁炉。埃及发现过公元前 2000 年的锻制青铜器和公元前 1340 年的钢制短剑。河南偃师二里头的铜器工场遗迹出土了铜渣、坩埚、镞、凿、锥、鱼钩、铃、刀、铤、爵等器械，这是一个规模很大的铜器制造场，经鉴定为公元前 1900～公元前 1600 年，属夏代（2070BC～1600BC）的遗存^②。战国时代中国有铁制兵器（河南洛阳出土了含碳 2% 以上的铸铁，公元前 500 年），农业工具（河南辉县的魏墓中出土）铁耒、铁锄、铁铲、镰、斧等。辽宁抚顺燕国遗址出土的铁农具占全部农具的 90% 以上。《尚书·禹贡》和《山海经》中都记载了金、银、锡、铁、铅等金属矿产分布地点。汉代在河南荥阳建有大炼铁场，有两座炼铁炉，用的是含铁 48.39% 的赤铁矿石。欧洲的采矿和冶炼技术比中国晚 1000 多年^③。欧洲最早的炼铁高炉建于公元 1380 年（比利时）。德国于公元 970 年开始采铁矿，用煤冶铁是公元 1198 年。公元 1500 年意大利达·芬奇发明车床。可见，在产业革命以前，矿冶和制造技术在欧亚各国已相当发达。

产业革命的标志——瓦特蒸汽机的发明，是在前人很多发明和制造技术的基础上完成的。公元 1629 年意大利工程师布兰卡（Branca）发明用蒸汽推动风轮。1679 年法国人帕蓬（Denis Papin）建造了第一台蒸汽锅炉，在英国大量推广。1689 年英国人萨委瑞（Thomas Savery）用蒸汽机驱动水轮抽水。1700～1712 年英国工程师纽柯门（Thomas Newcomen）发明了活塞式蒸汽机，投入批量生产供应市场。1736 年，英国 J. 哈尔斯（Jonathan Hulls）制成蒸汽船，获专利。1765 年瓦特发明蒸汽冷凝器，使蒸汽出口温度降低，从而提高了热机效率，1769 年获专利。1788 年瓦特又发明了离心调速器，使蒸汽机更为完善，被称为历史上最伟大的发明之一。此前英国已有相当发达的纺织工业，用蒸汽机做动力。从 1720～1795

① 夏湘蓉、李仲均、王根元：《中国古代矿业开发史》，地质出版社，1980。

② 夏湘蓉、李仲均、王根元：《中国古代矿业开发史》，地质出版社，1980。

③ 伊东俊太郎：《简明世界科学技术史年表》，哈尔滨大学出版社，1984。

年,英国出口商品增长了4倍^①。可见,英国的制造业孕育和实现了瓦特的发明,后者又进一步推动了工业的进步,以后才传播到欧洲各国和英国殖民地美国。值得注意的是,瓦特并不知道热力学第一、第二定律,是凭技术经验懂得了蒸汽温度和压力越高,其能焔越大;出入口蒸汽温差越大,热机效率越高。关于卡诺循环(Dadi Carnot, 1796~1832, 法国工程师)的论文是50年后于1824年发表的。而热力学中确定气体温度、内能、焔之间关系的焦耳定律实验(James Prescott Joule, 1818~1889, 英国)是1840~1843年完成的。克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822~1888, 德国)发现的热力学第二定律“热能不可能自发地从低温处流向高温处”,以及关于熵的概念及计算公式的出现已是瓦特90年后的1850年^②。历史事件发生的次序说明,制造业和瓦特的技术发明推动了热力学理论的诞生,而不是相反。

工业革命的第二个高潮——电气化发生在19世纪后半叶和20世纪初。以透平机为动力的大型发电设施和电力网的建设开始于20世纪初^③。电力照亮了城市和农村,为工厂和矿山提供了方便灵活的强大动力,成为生产、交通运输、通讯等全面转向工业化的决定因素。因此,人们常称19~20世纪的电气化运动为第二次产业革命。追溯电气化运动的进程,可以看到与蒸汽机类似的经历。是制造技术和社会生产的需要肇始了电的应用,而后才有了伟大理论——麦克斯韦电动力学理论的诞生^④。

中国战国时代即发现磁石,发明指南针“司南”(《韩非子·有度》, 280BC~233BC),是中国古代四大发明之一。1733年杜菲发现玻璃和树脂摩擦产生的静电。1745年德国E. G. 冯克莱斯特发明并制成蓄电瓶。1750~1752年富兰克林(Benjamin Franklin, 1706~1790)发明避雷针。1772年卡文迪什(Henry Cavendish, 1731~1810)发现电力与距离平方反比定律。1800年英国尼科尔逊(William Nicholson, 1753~1815)和卡莱尔(Anthony Carlisle, 1779~1840)电解水成功。1805年英国人在铁上镀锌成功。1827年欧姆(George Simon Ohm, 1789~1854)建立欧姆定律。1829年美国J. 亨利(Joseph Henry, 1797~1878)设计和制造成最早的电动机,发现自感和变压器原理。1831年法拉第(Michael Farady, 1791~1867, 英国)发现电磁感应电流。1832年美国萨克斯顿(Joseph Saxton, 1799~1873)制成发电机。

① Louis Snyder, 1979, Industrial Revolution, Collier's Encyclopaedia, vol. 12, pp.755~774, Macmillan Co.

② 李洪芳:《热学》,复旦大学出版社,1994。

③ 宋健:《工程技术百年颂》,《中国工程科学》2002年第4期。

④ 伊东俊太郎:《简明世界科学技术史年表》,哈尔滨大学出版社,1984。

1835 年达文波特 (T. Davenport, 英国) 制成实用电动机, 获专利, 用于驱动印刷机。1837 年美国莫尔斯 (Samuel Finley Breese Morse, 1791~1872) 发明电报机和电码, 获专利; 1851 年美国铁路采用莫尔斯电报, 英美均建立电报公司。1855 年出现自激发电机, 德国西门子公司开始生产交流电机。1859 年美国法玛 (Moses Garrish Farmer) 制成白炽电灯。1863 年意大利帕奇诺蒂 (Antonio Pacinotti, 1841~1912) 制成发电、电动两用电机。1865 年麦克斯韦发表《电磁场动力原理》, 最终建立了电磁动力学的完整理论。

这么冗长的引证是想说明, 制造技术和科学实验呼唤和成就了电磁动力学的出世。磁、电、电池、电镀、电灯、电报、电动机、发电机、变压器等都是在电动力学系统理论出现以前就已经由工程师和科学家们制造出来了。是科学实验和包括冶金在内的制造技术为一个伟大理论的出世铺平了道路。麦克斯韦电动力学一旦出现并为人们所掌握, 对电磁技术进步产生了革命性的影响。20 世纪初开始的无线电技术, 微波测量, 雷达, 合成孔径, 微波成像, 卫星通讯、宇宙微波探测等等, 都已须臾离不开麦克斯韦方程。后来, 牛顿力学和电动力学又为量子力学的发展指引了道路, 导致了量子场论的创立^①。

1948 年美国贝尔实验室的巴丁 (John Barden)、布拉顿 (Walter H. Brattain, 1902~) 和肖克利 (William Shockley, 1910~) 发明了晶体管, 1958 年制成第一台固体元件计算机, 1959 年制成第一个集成电路, 1960 年研制成功 ALGOL 和 COBOL 计算机语言, 1964 年 IBM 公司用小规模集成电路建造了大型电子计算机序列 360, 以后出现了用大规模集成电路组成的微处理机 (1971)、个人计算机 (1977)、网络、多媒体、光通讯和微型机械。晶体管的发明和微电子制造技术的飞速发展, 开创了全新的信息时代。在短短的 50 年时间内, 信息技术使生产制造、科研开发、社会生活发生了质的变化, 全面转向信息化和智能化时代。信息产业的发展进程与过去两次有所不同, 一开始就在固体物理、量子力学的指导下, 器件设计和制造工艺并驾齐驱, 相辅而进。拉单晶、掺杂、扩散、离子注入、外延、溅射、化学沉积 (CVD)、光刻、表面贴装、自动化组装和纳米制造工艺等是制造业的伟大创造, 都是在微电子器件和集成电路研制和开发过程中创造并投入运行的。软件产业是在硬件的基础上发展起来

① 宋健:《工程技术百年颂》,《中国工程科学》2002 年第 4 期。

Lin C. S., Yau S. T. (丘成桐), Chen N. Y., 1995, *A Great Physicist of the Twentieth Century*, International Press.

Claude Itzykson, Jean-Bernard Zuber, 1980, *Quantum Field Theory*, McGraw-Hill Inc.