

Technical statuses and development trends  
of power generation forms

# 发电技术现状 与发展趋势

西安热工研究院有限公司 组编

杨倩鹏 林伟杰 王月明 何雅玲 编



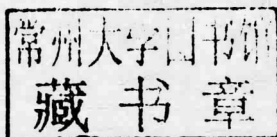
中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Technical statuses and development trends  
of power generation forms

# 发电技术现状 与发展趋势

西安热工研究院有限公司 组编

杨倩鹏 林伟杰 王月明 何雅玲 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书结合基础科学发展和工程技术应用等因素,将发电形式划分为传统能源发电和新型能源发电两大范围,并以“技术”为核心点和创新点,分析了传统能源发电和新型能源发电的技术现状和发展趋势;提出了传统能源发电技术的发展路线和政策建议,以及新型能源发电的前沿技术探索和产业开拓方向。

本书既可供从事能源发电领域制造、运行、检修、管理等相关工作的技术人员阅读使用,也可供从事能源发电相关研究工作的技术、管理人员及高校师生借鉴参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

发电技术现状与发展趋势/杨倩鹏等编;西安热工研究院有限公司组编.—北京:中国电力出版社,2018.2

ISBN 978-7-5198-1439-7

I. ①发… II. ①杨…②西… III. ①发电—技术 IV. ①TM6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第292748号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:赵鸣志 (010-63412385)

责任校对:朱丽芳

装帧设计:赵姗姗

责任印制:蔺义舟

---

印 刷:北京九天众诚印刷有限公司

版 次:2018年2月第一版

印 次:2018年2月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:26.5

字 数:437千字

印 数:0001—2000册

定 价:158.00元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

# 前 言

能源与人类社会发展息息相关，是人类生息繁衍和社会信息交互的基本资源和重要保障。回顾能源科技与人类社会的历史，可以发现能源革命与科技革命总是同时发生，共同推动着人类社会的不断进步。未来科技革命的到来，对于能源的利用水平提出了更高要求。电能，作为当今世界最重要的能源利用形式，未来将在世界范围的电气化水平提高和气候变化两大趋势推动下，占据一次能源消费和终端能源消费的更高比例，在能源领域的主导地位将进一步强化。

作为清洁、高效、安全、可控、便利的二次能源，电能的利用标志着人类文明的进步，是社会生产生活中使用的最重要、最普遍的能源形式，广泛应用于动力、照明、化学、纺织、通信等各个领域。电能的使用率是衡量一个国家经济发展水平的重要指标。随着生活水平的提高和电力技术的进步，越来越多的一次能源将作为发电能源使用，通过先进高效的发电技术转化为电能。电能作为优质的二次能源，也将在终端利用环节逐步替代煤炭、汽油、柴油、燃气等其他终端能源。

展望未来，发电技术将向着清洁、高效、低碳的方向不断发展，电能各个领域的应用将更加广泛和多样化。不同的发电形式和发电技术之间，也将不断展开相互竞争和替代更新，推动发电技术的革命和发电产业的发展。本书结合基础科学发展和工程技术应用等因素，将发电形式划分为传统能源发电和新型能源发电两大范围，并以“技术”为核心点和创新点，分析传统能源发电和新型能源发电的发展前景。

本书的具体分析方法，是通过系统归纳火电、水电等传统能源发电，以及核电、风电、光伏、光热等新型能源发电的产业发展现状和技术经济性指标，分析总结发电形式的技术现状和发展趋势这一核心问题。本书对

于各类发电形式的最新基础理论和前沿工程技术进行了讨论分析，围绕“技术”这一出发点和关键点分析了各种发电形式的发展前景。与从资金、产能、市场、政策等角度开展的发电形式短期预测相比，本书的分析方法有助于提供较为可靠的长期预测，这也是本书的创新之一。

本书还在整体对比传统能源发电与新型能源发电的技术指标和经济指标，以及资源、环境和社会评价的基础上，讨论传统能源发电与新型能源发电的竞争趋势和替代时间，并提出相应观点。本书给出了传统能源发电技术的发展路线和政策建议，以及新型能源发电的前沿技术探索和产业开拓方向，希望能为能源发电领域的战略研究人员提供参考和建议。

本书由中国华能集团香港有限公司林伟杰、西安热工研究院有限公司王月明、西安交通大学何雅玲院士指导编写并审核内容，西安热工研究院有限公司博士后工作站杨倩鹏负责各章节编写。限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请各位读者批评指正！

编者

2017年10月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章</b>	<b>能源重要性与能源发电形式划分</b> .....	1
第 1 节	能源与人类社会关系 .....	2
第 2 节	电能的开发历程与利用趋势 .....	10
第 3 节	能源发电形式划分 .....	18
第 4 节	本书主要内容 .....	21
	参考文献 .....	21
<b>第 2 章</b>	<b>中国能源消费与发电产业概况</b> .....	27
第 1 节	中国能源消费概况 .....	28
第 2 节	中国发电产业概况 .....	37
	参考文献 .....	41
<b>第 3 章</b>	<b>火力发电技术现状与发展趋势</b> .....	43
第 1 节	火力发电技术现状 .....	44
第 2 节	火力发电技术发展趋势 .....	58
第 3 节	火力发电产业展望与预测 .....	90
	参考文献 .....	110
<b>第 4 章</b>	<b>水力发电技术现状与发展趋势</b> .....	115
第 1 节	水力发电产业现状与技术现状 .....	116
第 2 节	水力发电前沿技术趋势 .....	127
第 3 节	水力发电产业预测与多能互补 .....	132
	参考文献 .....	141
<b>第 5 章</b>	<b>核电产业技术现状与发展趋势</b> .....	145
第 1 节	核电产业概况 .....	146
第 2 节	核能发电技术现状 .....	159
第 3 节	核电技术发展趋势 .....	169
第 4 节	核电发展趋势展望 .....	188
	参考文献 .....	194

<b>第6章</b>	<b>风力发电技术现状与发展趋势</b> .....	199
	第1节 风力发电产业概况 .....	200
	第2节 风力发电技术现状 .....	206
	第3节 风力发电前沿技术 .....	226
	第4节 风力发电产业趋势与技术路线 .....	234
	参考文献 .....	243
<b>第7章</b>	<b>太阳能发电技术现状与发展趋势</b> .....	247
	第1节 太阳能发电技术现状 .....	248
	第2节 太阳能发电发展趋势 .....	267
	参考文献 .....	296
<b>第8章</b>	<b>其他新型能源发电技术</b> .....	301
	第1节 海洋能发电技术 .....	302
	第2节 地热能发电技术 .....	309
	第3节 燃料电池技术 .....	313
	第4节 氢能技术 .....	324
	第5节 储能技术 .....	328
	第6节 能源互联网技术 .....	338
	参考文献 .....	348
<b>第9章</b>	<b>传统能源发电与新型能源发电对比分析</b> .....	353
	第1节 用电需求分析与资源环境社会评价 .....	354
	第2节 技术经济性对比 .....	367
	第3节 竞争趋势与替代时间分析 .....	373
	参考文献 .....	386
<b>第10章</b>	<b>发电技术发展路线与战略建议</b> .....	389
	第1节 传统能源发电技术发展路线 .....	390
	第2节 新型能源发电技术发展路线 .....	395
	第3节 产业发展战略建议 .....	399
	参考文献 .....	408
<b>索引</b>	.....	409
<b>后记</b>	.....	416

# 第 1 章

## 能源重要性与能源发电 形式划分

能源与人类社会发展息息相关，是人类生息繁衍和社会信息交互的基本资源和重要保障。本章将从能源与生命、能源与信息两方面，分析能源对于人类社会的决定性影响。另外，本章将通过回顾能源科技发展与人类社会进步的历史，总结能源发展与科技革命的关系，分析和展望未来能源科技与未来科技革命的前景，并讨论两者之间的密切关联。

电能，作为能源的重要利用形式，在未来人类社会发展中重要性将会进一步提升。本章通过分析电能的开发历程和利用趋势，阐述了电能和发电对未来人类社会的重要性。本章将划分传统能源发电和新型能源发电的范围，以便后续章节对比分析传统能源发电和新型能源发电的竞争趋势与替代时间。

本章最后一节简单介绍了本书的整体内容，主要包括传统能源发电技术现状与发展趋势、新型能源发电技术现状与发展趋势、传统能源发电与新型能源发电对比分析、能源发电未来发展路线等四部分内容。



# 第 1 节 能源与人类社会关系

## 一、能源与生命

生命的定义，一般指有机物和水构成的单细胞或多细胞、具有稳定的质量和能量代谢、能回应刺激和自身繁殖的半开放系统。其中，质量和能量的新陈代谢，即可以稳定地从外界获取质量和能量，并将体内产生的废物和多余热量排放到外界，是生命最重要的标志。

能量对于生命的存在至关重要。人类生命所需的能量，主要来源于食物中所蕴涵的糖类、脂肪和蛋白质。人类生命活动中，以葡萄糖为主的糖类是主要能源，三磷酸腺苷（ATP）水解产生的化学能是直接能源，而脂肪所含能量是储存能源。

光合作用所固定的太阳能，则是地球上绝大部分食物链范围内，生命活动的最终能源。由太阳能转化而来的生物质能和化学能，是生命维持和繁衍的最基本能源保障。

热能，则是生命保持系统内外热量平衡的重要能源形式。热能获得或排出的增加、减少或停止，会相应地造成生命系统的生长、停滞或死亡。光能，同样是影响生命活动的重要因素，植物光合作用和呼吸作用的切换，动物的昼行夜行和生命周期，人类的昼夜作息和健康成长，都与光能有密切的关联。

综上所述，能量与生命是密不可分的整体，人类生命必须时刻依赖于能量。因此，能量的来源即能源，对于人类具有极为重要的意义。

## 二、能源与信息

信息泛指音讯、语言、消息、文字、信件、网络等人类社会个体之间在交流中传播的一切内容。

信息学奠基人香农（C. E. Shannon）将信息定义为“用来消除随机不确定性的东

西”；控制论创始人维纳（Norbert Wiener）则将信息定义为“人类在适应外部世界，并使这种适应反作用于外部世界的过程中，同外部世界进行互相交换的内容和名称”。

信息与能量之间的根本关联，属于科学领域的前沿课题。对于信息是否必须依赖于能量，通过共同变化而传播，目前科学研究的结论是肯定的。

1961年，IBM公司物理学家罗夫兰道尔（Rolf Landauer）证明，重置1bit信息会释放出极少热量，即兰道尔极限，并且这一极限与环境温度成比例。量子计算机需要将量子元件冷却到接近绝对零度的温度，从而接近兰道尔极限，实现信息处理的能量最小化。

信息和能量总是共同存在和变化的，能量的传递可以传播信息，这一点显而易见。而信息能否产生能量，从热力学定律的角度来看答案是否定的，但科学领域仍然存在不同观点。

1871年，麦克斯韦提出了“麦克斯韦妖”的设想，即假设盒子中一道闸门边存在一个精灵，它允许速度快的微粒通过闸门到达盒子的一边，而速度慢的微粒则通过闸门到达盒子的另一边。一段时间后，盒子两边就会产生温差和热量。麦克斯韦妖是耗散结构的雏形，而“分子是热的还是冷的”这一信息，似乎产生了能量。

2010年，日本研究人员在《自然》杂志报道称，在实验室条件下让一个纳米级小球沿电场制造的“阶梯”向上爬动，其爬动所需的能量由该粒子在任何给定时间朝哪个方向运动这一信息转化而来。研究人员认为该实验初步验证了“麦克斯韦妖”设想，实现了从信息到能量的转化。

反对的意见中，匈牙利物理学家冯劳厄认为，“麦克斯韦妖”必须消耗能量（如光照等）来确定“分子是热的还是冷的”信息，能量仍然遵守热力学第二定律。而日本研究人员的实验中，目前要确定这一信息，需要通过摄像机消耗能量而实现。确认信息所消耗的能量，是否一定大于产生的能量，还有待进一步探索。

综上所述，信息和能源，并非两个完全独立的学科，而是存在着密切的关联。人类社会的信息发展历史，也与能源科技的进步密切相关。

科学研究发现，植物可以通过化学信息素（乙烯、芳香烃等）和电信号等传递信息；动物通过声音、气味和动作交流信息；人类的最初时期，也通过声音、气味、动作和简单的符号，与其他个体产生信息交流。

人类初期的信息传递，主要依赖于生物质能所产生的声音和动作，并且逐渐演

变为语言和文字。这一时期，人类个体之间因为有了信息的交流，逐渐形成了群体居住的特点，并逐步发展为初步的社会形态。由于人体能够产生的生物质能和机械能的限制，信息的传播受到明显限制。

进入农业社会后，人类传递信息的能量形式得到了一定的扩展。在生物质能和机械能方面，人类开始利用人力、马力、信鸽传递信息，并形成了初步的信件和驿站系统。此外，人类通过燃烧方式，利用产生的烽火、烟雾进行信息的远距离快速传播，但这种方式传递的信息内容非常有限。

印刷术和打字机的出现，标志着人类开始大规模利用机械能进行信息的大规模准确传播，使得新闻载体和出版物成为可能。印刷最初的机械能，由人力或水车产生，工业革命后开始由蒸汽机通过释放化石燃料的化学能，产生热能并转换为机械能。

电能的开发利用，显著拓宽了信息传播的深度和广度。依赖电能的电报、电话、传真、电视、电影等信息传播形式，深入影响人类社会。采用电磁波的无线电、手机、光纤、互联网等信息传播技术和形式的出现，又进一步丰富了人类社会的物质和精神生活。

随着光子计算机、量子通信等未来信息科技的发展，信息的传播将更加依赖于能量。量子通信是利用光子等粒子的量子纠缠原理进行信息传递的一种高效率 and 绝对安全的新型通信方式。量子通信和量子计算机的信息，仍然需要依赖光能等能量进行传播，而且对于能量的可靠性、稳定性等提出了更高的要求。

综上所述，能量与信息不可分割，信息技术的发展也依赖于能源技术的发展。人类个体之间正是因为信息交流才构成了社会，从信息角度来看，社会的稳定和发展离不开能源的保障。

### 三、能源科技与人类社会

人类社会的构成中，生命和信息是两个重要支柱。生命决定了人类个体的存活进步，信息决定了个体之间的交流发展，人类个体间的信息交流产生了社会。能源与生命、能源与信息密切关系，也说明了能源与人类社会息息相关。

#### 1. 从历史角度看能源与人类社会关系

能源发展历史与人类社会历史方面，人类最初时期的绝大部分生命活动依

赖于太阳能，以及太阳能转化得来的部分生物质能、化学能（食物）和机械能（人力）。

随着人类的进化，发现旧石器时代的人类留下的木炭、灰烬等痕迹，说明人类已经学会了钻木取火等利用火的能力，开启了主动利用能源的时代。新石器时代各类彩陶的出现，说明人类已经能成熟地利用木材、柴草作为燃料，烧烤食物和烧制陶器。这一时期，人类利用的能源已经有所扩展，由被动利用转变为主动利用太阳能及其各种转化形式。

人类主动利用能源的历史，由此开始可以分为五大阶段：①火的发现和利用。②畜力、风力、水力等自然动力的利用。③化石燃料的开发和热能的利用。④电的发现及开发利用。⑤核能的发现及开发利用。

火的利用，标志着人类已经能够将生物质能、化学能等，通过燃烧的方式转变为热能和光能，用于加工熟食、制作工具和照明用途。进入农业社会后，人类利用能源的来源主要还是太阳能，但利用的形式和方式都更加多样。

在农业社会，太阳能的直接利用包括太阳光的照明、太阳能的加热取暖和制盐。人类根据能源形式的不同特点制取不同用途的热能和光能时，能源形式的区分日益清晰，但利用方式仍然以燃烧为主。制取热能的能源形式包括木材、柴薪、动物粪便、沼气等，制取光能的能源形式包括动植物油、石蜡、煤油等。燃烧利用方式之外，还包括火山、地热、荧光等直接利用自然界的热能和光能的方式。

农业社会中，机械能的形式和利用方式得到了较为显著的发展，也成为人类利用能源第二阶段的主要标志。机械能的形式和方式包括了人力、畜力，以及有关的耕种灌溉农具、交通工具等利用方式；风能形式，以及有关的风车、帆船等利用方式；水能形式，以及有关的水车、汲水器等利用方式。

农业社会持续到18世纪前，人类仍然局限于天然能源的直接利用。天然能源，尤其是木材，在世界一次能源消费结构中长期占据首位。人类很早就认识到煤炭可以作为燃料。中国先秦时代出土的雕漆煤、汉代出土的煤块、魏晋时代的煤井，以及唐宋时代煤炭的广泛利用，都显著领先于西方。

但是由于古代煤炭开采技术原始、煤炭相比木材不易点燃、煤炭中硫和杂质较多、运输困难等缺点，人类普遍不倾向于使用煤炭。14~16世纪，木材的短缺已经严重威胁西欧和北欧人民的生活。1700年，英国首先决定以煤炭代替木材作为能源

基础，这种替代趋势随后逐渐扩展至其他国家，为 18 世纪的工业革命提供了能源条件。

从人类一次能源发展历程可知，人类社会一次能源有三次转换，分别为：①第一次是煤炭取代木材等成为主要能源。②第二次是石油取代煤炭，占据主导地位。③第三次是 20 世纪后半叶向多能源结构的转换。煤、石油和天然气等化石能源是现代的主要能源，因此也将从 1700 年起近 300 年或工业革命起 250 年，称为化石能源时代，区别于古代太阳能时代。

18 世纪末出现的以煤为燃料的蒸汽机，推动了机械化工厂逐渐代替手工业工厂。蒸汽机的出现加速了 18 世纪开始的工业革命，促进了煤炭的大规模开采。到 19 世纪下半叶，出现了人类社会第一次能源转换。1860 年，煤炭在世界一次能源消费结构中占 24%，到 1920 年则上升至 62%，成为化石能源时代中的煤炭时代。

19 世纪中叶，随着开采和化工技术的发展，人类开始开发石油。1859 年在美国宾夕法尼亚州钻探形成了第一口现代化的石油井，开发了第一个油田。19 世纪末，相继出现了采用汽油、柴油作为燃料的汽车、火车、轮船和飞机，还出现了采用柴油为燃料的火电厂。在 20 世纪，石油逐渐超过煤炭成为主要能源，天然气也开始作为重要能源受到重视。

1831 年，英国物理学家法拉第发现电磁感应现象，从而开辟了人类利用电能的时代。1832 年，法国人毕克西受电磁感应现象启发，发明了手摇式直流发电机。1866 年，德国的西门子发明了自励式直流发电机。1869 年，比利时的格拉姆发明了环形电枢发电机。1882 年第一座火力发电厂建成。从此，电力逐渐成为人类社会广泛使用的二次能源。电气化标志着人类进入能源利用的第四个阶段，也进一步推进了第二次能源转换。

当电力代替了蒸汽机，电气工业迅速发展，煤炭在世界一次能源消费结构中的比重逐渐下降。1965 年，石油首次取代煤炭占据一次能源首位。1979 年，世界一次能源消费结构的比重为：石油占 54%；煤炭和天然气各占 18%。石油替代了煤炭，第二次能源转换基本完成，人类社会进入化石能源时代中的石油时代。

然而，地球上煤炭和石油储量有限，石油的大量消费使能源供应趋于短缺。人类社会能源消费结构已经逐渐从石油为主向多元能源结构转变，即第三次能源转换。20 世纪 70 年代，世界上出现了两次石油危机。在石油危机和环境污染的双重压力之

下,开发新能源成为人类社会面临的重要课题。

新能源包括核能、太阳能、海洋能、风能、生物质能、地热等,其中核能是较有希望替代石油的一次能源。核能的发现及开发利用,也是人类主动利用能源历史的第五个阶段。人类在20世纪40年代发现核能,50年代建立了世界上第一座核电站。2015年核能已经占世界一次能源的4%,核电发电量占世界总发电量的11%左右。

通过回顾人类社会发展和能源发展历史,不难看出人类社会对于能源科技进步的依赖,以及能源科技水平对于人类社会形态的决定作用。

人类社会过程中,从人类学角度来看,空间、能源、物质、信息和生命等基本要素的需求都在不断增加;从心理学角度来看,生理、安全、情感、尊重和自我实现的要求也在逐渐提升。人类社会的这些变化,对于农业、纺织、交通、居住、医疗、信息、娱乐等各个方面都在不断提出新的要求,这些需求依赖于能源科技的进步来解决。

与之相应的,能源科技水平也决定着人类社会的形态和水平。仅依靠火的发现和利用,人类只能满足基本的生命维持,远距离交通和信息传播难以开展,社会形态只能停留在最初始的群体部落;化石燃料的开发和热能的广泛利用,改变了人类社会的交通和居住水平;电能的发现和广泛利用,促进了人类社会信息快速传播。上述情形说明只有现代化的能源科技水平,才能支撑现代化的人类社会;只有未来能源科技的不断发展,才能支撑不断进步的未来人类社会。

## 2. 数据角度看能源与人类社会关系

如表1-1所示,估计原始人类人均能耗约为 $8 \times 10^3$  kJ/d,石器时代人均能耗约为 $(1 \sim 2) \times 10^4$  kJ/d,农业社会的人均能耗约为 $5 \times 10^4$  kJ/d。实现工业化时,人均能耗达到 $3 \times 10^5$  kJ/d;实现信息化时,人均能耗将接近 $1 \times 10^6$  kJ/d。人类文明的进程,具有周期加速性,工具时代发展周期约为200万年,农业时代约为5000年,工业时代约为200年,而1970年开始的信息时代预计将持续100年左右。进入信息时代的50年期间,世界人均能耗又增加了接近1倍。

人类社会形态进步和人均能耗提升的同时,世界人口也在不断增长。原始社会的人口出生率和死亡率都维持在50%左右的高水平,人口增长基本停滞。100万年前世界人口约为1万~2万,10万年前约为2万~3万,千年人口增长率不足1%。

表 1-1

人类社会时代划分与能源关系

时代	时间点 (年)	世界人均能耗 (kJ/d)	世界人口	世界年总能耗 (kJ)
原始人类	100 000 B.C.	$8 \times 10^3$	$2.5 \times 10^4$	$7.3 \times 10^{10}$
石器时代	10 000 B.C.	$1 \times 10^4$	$4.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^{13}$
农业社会	3000 B.C.	$2 \times 10^4$	$1.4 \times 10^7$	$1.0 \times 10^{14}$
开始工业化	1600 A.D.	$5 \times 10^4$	$5.8 \times 10^8$	$1.1 \times 10^{16}$
开始信息化	1970 A.D.	$3 \times 10^5$	$3.7 \times 10^9$	$4.1 \times 10^{17}$
完成信息化	2100 A.D.	$1 \times 10^6$	$1.1 \times 10^{10}$	$4.0 \times 10^{18}$

新石器时代原始农业开始普及,世界人口第一次进入增长状态。如图 1-1 所示,公元前 10000 年,世界人口约为 400 万;公元前 5000 年,世界人口缓慢增长到 500 万;公元前 3000 年时达到 1400 万。

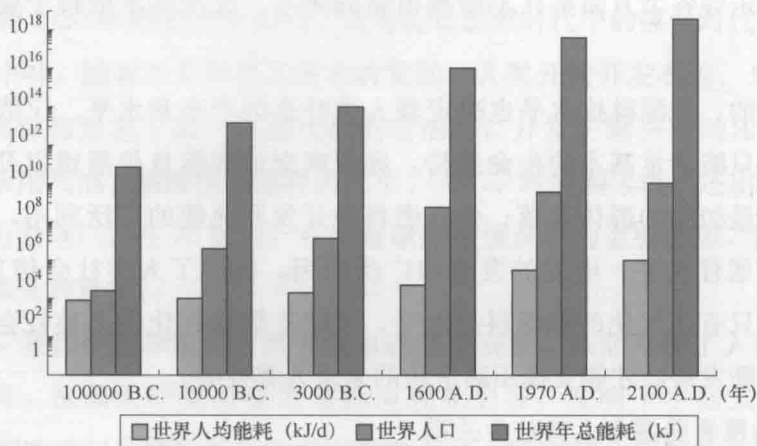


图 1-1 世界人均能耗、人口和年总能耗变化

数据来源: 维基百科。

公元前 3000 年,人类社会进入奴隶社会和封建社会,世界人口开始较为快速地增长,在 1600 年世界人口达到 5.8 亿。工业革命后,第二次人口增长浪潮来临,世界人口从 1800 年的 10.0 亿,增加至 1950 年的 25.3 亿。

第二次世界大战后,世界各国出现第三次人口浪潮。1960 年世界人口达到 30 亿,1974 年达到 40 亿,1987 年达到 50 亿,1999 年达到 60 亿,2012 年达到 70 亿。

由图 1-1 可以看出,对于不同的人人类社会时代,人均能耗相比上个时代增加 3~6 倍,而人口相比上个时代增加 3~10 倍,因此每年能耗总量相比上个时代增加 10~40 倍。农业社会发展至顶峰,每年能耗总量约为  $1.1 \times 10^{16}$  kJ,随后开始进入工业化。

工业化时代,平均每年能耗总量约为  $2.0 \times 10^{17}$  kJ,工业化完成时,每年能耗总量约为  $4.1 \times 10^{17}$  kJ。世界可用于作为燃料的木材每年约为 15 亿  $\text{m}^3$ ,能提供的能量约为  $1.3 \times 10^{16}$  kJ。世界每年煤炭产量约为 60 亿 t,能提供的能量约为  $1.8 \times 10^{17}$  kJ。

不难看出,仅仅依靠木材作为主要能源,人类社会只能停滞在农业社会末期,无法进入工业时代。这种情况下能源总量基本不变,当人口增加时,人均能源将出现下降,分配不均、能源短缺、生存危机将出现,最终引起争夺能源资源的战争;危机和战争后的人口减少,人均能源增加,社会发展人口再次增多,又陷入能源短缺的情况。因此,与农业和粮食情况相似,在人类社会的发展过程中,能源领域也存在马尔萨斯陷阱,必须依赖能源科技的进步走出陷阱。

煤炭的开发利用,能够基本满足工业化时代  $2.0 \times 10^{17}$  kJ 的能耗总量水平,而木材仅能满足这一水平的 6.5%。到达工业化后期,还需要通过石油、天然气等其他化石燃料的补充,才能满足工业化完成时每年  $4.1 \times 10^{17}$  kJ 的能耗总量水平。

由图 1-2 可知,世界人均能耗水平约为  $2 \times 10^5$  kJ/d。除少数已经完成工业化的国家(G8)外,大部分国家仍然处于工业化的过程中。但部分发达国家如美国,已经在 19 世纪末 20 世纪初完成工业化,人均能耗超过  $3 \times 10^5$  kJ/d,并且在 1970 年前后开始逐渐进入信息化,相应的能耗水平也反映了这一情况。中国在 1980 年之前,人均能耗水平处于  $(2 \sim 5) \times 10^4$  kJ/d,从能耗水平角度来看属于农业社会。随着改革开放的深入,2015 年中国人均能耗已经达到  $2.5 \times 10^5$  kJ/d,处于工业化进程的后期。



图 1-2 世界、美国和中国人均能耗变化

数据来源:世界银行、BP、UN、国家统计局。



## 四、未来科技革命与未来能源科技

如前所述,从2050年到2100年人类社会完成信息化,进入下一个时代之前,人均能耗将达到 $1 \times 10^6$  kJ/d,能耗总量将达到每年 $4.0 \times 10^{18}$  kJ,相当于完成工业化时的10倍,化石能源显然已经无法支撑如此庞大的能源需求。人类社会只有两条途径可以解决能源问题:一条途径是通过未来绿色科技革命减少人均能耗;另一条途径是通过开发未来能源科技,探索新能源。

科技革命的三个判断要素包括显著改变人类的生活观念、显著改变人类的生活和生产方式,以及影响超过半数的社会人口。21世纪预计将有三次科技革命:第五次科技革命即信息革命正在进行;第六次科技革命大约在2020~2050年;第七次科技革命大约在2050~2100年。

第六次科技革命即将来临,相关专家预计此次革命主要涉及三个方向,包括生命和再生工程、信息和仿生工程,以及纳米和仿生工程。最终,人类将获得三种新的生存形式,即网络人、仿生人和再生人。

网络人需要将人的认知和思维数字化,配合先进的网络科技,实现人的信息的网络化生存。其中,信息的转换、传递和存储,都需要更为先进、高效的能源系统支撑。仿生人主要包括各种仿生材料及机器人科学的发展,需要采用更先进的能源利用方式来进行制造,并且采用更科学的能源形式维持机器人运行。再生人是指操纵遗传物质、细胞等,通过先进的制造和3D打印技术,形成再生的人体部分,这一领域也需要更加绿色、小型化的能源科技进行支撑。

## 第2节 电能的开发历程与利用趋势

### 一、电能的开发历程

人类对于电的最早认识来自闪电,形成了希腊神话中的雷神宙斯、北欧神话中