



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 分布式能量系统

杨勇平 主编

Distributed Energy System



化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助

# 分布式能量系统

杨勇平 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从能源和电力工业可持续发展的角度出发,重点介绍分布式能量系统在国内外的发展状况及趋势,揭示分布式能量系统的本质特征,对用于分布式能量系统中的原动机技术、制冷及热泵等技术做了全面的阐述,并介绍了不同类型的分布式能量系统,包括分布式风力发电、太阳能发电、生物质发电系统、冷热电联产系统以及双源供暖(空调)等系统。另外,还介绍了影响分布式能量系统发展的主要因素以及典型的分布式能量系统案例。

本书内容丰富,涵盖范围广,可作为高等学校能源动力工程专业本科生及研究生的专业课教材,也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

分布式能量系统/杨勇平主编.  
出版社, 2010.7

ISBN 978-7-122-08630-3

I. 分… II. 杨… III. 热能 IV. TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 094079 号

---

责任编辑:郑宇印 戴燕红  
责任校对:周梦华

文字编辑:孙思晨  
装帧设计:张辉

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数438千字 2011年2月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:59.00元

版权所有 违者必究

## 《分布式能量系统》编写人员

主 编 杨勇平

编写人员 杨勇平 段立强 宋之平 杜小泽 徐二树

董长青 刘永前 李 季 侯宏娟 韩 爽

王 锡 毕庆生



## 前 言

20 世纪是人类物质文明最发达的时代，也是地球生态环境和自然资源遭到破坏最为严重的时期。为了兼顾当代和后代人的利益，人类必须遵循新的发展理念——可持续发展，它是人类生存与发展的必由之路。实施可持续发展战略，能源的生产和利用是一个关键因素，大量化石燃料的燃烧是使全球气候变暖、地球生态环境恶化的主要因素。在有限的资源和环保要求的制约下，如何合理调整能源结构，进一步提高能源利用效率，改善能源产业的安全性，解决环境污染，是实现可持续发展战略的关键所在。分布式能量系统就是在这一背景下产生的，被认为是能够解决当前能源与社会经济发展、能源生产利用与环境保护等矛盾的一种新型能量系统，它与大电网的合理结合被认为是 21 世纪电力工业的发展方向。

能源是一个国家赖以生存的命脉，没有能源，任何现代文明都将无从谈起。就人均资源占有量而言，我国的一次能源非常匮乏。我国是世界最大的燃煤国，但煤炭的探明储量仅占世界的 11%，而人口却占了世界的 21%，全球煤炭探明储量可开采 227 年，而我国仅能用 90 年。我国的石油探明储量仅占世界的 2.4%，全球可开采 40 年，我国只能用 22 年。因此，开发利用新兴能源，提高资源综合利用效率，是我国能源工业能否持续支撑国家现代化建设的关键所在。

传统的电力工业是中央规划、决策、垂直一体化管理的企业，自 20 世纪初以来，电力工业的发展方向是“大机组、大电厂和大电网”。随着经济的发展、社会的进步，人类对能源的需求量越来越多，由大电厂、大电网构成的单一化能量系统显示了其不足之处。在世界形势复杂多变的今天，能源供应的安全性是关系国家安全、社会稳定的大事，在恐怖活动猖獗的今天，大电网集中供电方式存在致命的弱点，世界范围内的“大停电”就是最好的证明。但美国、加拿大的“大停电”也给我们带来了启示，在美国、加拿大“大停电”的黑暗之中，却闪烁着一个光明的“孤岛”，那些拥有分布式能量系统的企业、单位和机构依然享受着光明，即使是位于停电事故中心区域内的麻省理工学院、纽约州立大学、新泽西 Rutgers 大学和普林斯顿大学等高校，都因为拥有分布式能量系统，保证了正常的运行和生活。

21 世纪，我国将面临能源短缺、环境污染、温室气体排放、农村能源结构调整和能源安全等诸多问题，这些问题的解决直接关系到我国可持续发展战略的实施，关系到我国经济能否持续快速发展。分布式能量系统是位于或临近负荷中心、不以大规模、远距离输送电力为目的，满足环保要求的发电系统或有电能生产的多联产系统。在提高能源利用率、合理有

效地利用各种能源资源、减少环境污染、减少温室气体排放、调整能源结构方面有着自身独特的优势,是综合解决我国 21 世纪面临能源问题的重要途径。

总之,分布式能量系统是世界能源工业发展的重要趋势,是人类可持续发展的一个重要组成部分,无论是中国的“拉闸限电”,还是世界各地的“大停电”,都说明人类需要一个崭新的能源系统,分布式能量系统以其自身独有的特点将带来世界能源工业革命性的变化,它将像蒸汽机一样牵引着一个新时代的到来。

本书由华北电力大学杨勇平主编,宋之平和徐二树编写第 2 章和第 10 章,杜小泽、李季和董长青编写第 3 章,段立强编写第 6 和第 8 章,刘永前编写第 9 章,侯宏娟和韩爽编写第 4 章,王锡编写第 5 章,长春工程学院毕庆生编写第 7 章,其他由杨勇平编写并最终统稿。

本书在编写过程中得到了中科院工程热物理研究所徐建中院士、唐大伟研究员以及金红光研究员的指导并提供了大量宝贵的意见,在编写过程中还参考了大量相关文献与文章,在此谨向诸位老师和同仁表示感谢。本书得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助,还得到了国家自然科学基金项目(No. 50476069 和 No. 50606010)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(No. 2009CB219801)、教育部重大项目(No. 306004)和重点项目(No. 107119)、北京市自然科学基金项目(No. 3053019)以及北京市教育委员会共建项目专项资助项目的帮助,在此一并表示感谢!

由于编者的理论水平和实践经验有限,书中疏漏与不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者  
2010 年 7 月



# 目 录

## 1 能源与可持续发展

1.1 新世纪能源应具有的本质特征：可持续性 .....	1
1.1.1 能源结构与可持续发展 .....	2
1.1.2 电力是步入 21 世纪和可持续发展未来的桥梁 .....	5
1.1.3 21 世纪电力工业发展的方向 .....	6
1.2 电力系统 .....	6
1.2.1 电力系统的组成 .....	6
1.2.2 电力系统负荷 .....	7
1.2.3 电力系统的运行 .....	8
1.2.4 传统电力系统面临的问题 .....	8

## 2 分布式能量系统

2.1 分布式能量系统定义 .....	11
2.2 分布式能量系统发展的现状 .....	14
2.2.1 国外发展现状 .....	14
2.2.2 国内发展现状 .....	17
2.2.3 当前分布式能量系统的发展动态 .....	22
2.3 分布式能量系统的本质 .....	23
2.4 分布式能量系统的优点 .....	24
2.5 分布式能量系统带来的利益 .....	25
2.5.1 用户利益 .....	25
2.5.2 电力企业的利益 .....	25
2.5.3 国家利益 .....	26
2.6 发展分布式能量系统的原因 .....	26
2.7 分布式能量系统在我国战略地位 .....	30

### 3 分布式能量系统的发电技术

3.1 内燃机分布式发电技术	34
3.1.1 内燃机发电历史简介	34
3.1.2 内燃机的分类	35
3.1.3 发电用内燃机的特征	35
3.1.4 发电用内燃机的系统组成	36
3.1.5 发电用内燃机的工作原理简介	39
3.1.6 发电用内燃机的性能指标	39
3.1.7 内燃发电机组的经济性能指标	40
3.1.8 康明斯 GGHF 内燃发电机组介绍	41
3.1.9 内燃机分布式发电形式	44
3.1.10 内燃机分布式发电技术在我国需要解决的问题	46
3.2 燃气轮机分布式发电	47
3.2.1 燃气轮机	47
3.2.2 提高简单燃气轮机循环性能的途径	53
3.2.3 燃气轮机分布式能量系统	55
3.2.4 燃气轮机热电联产实例	58
3.3 燃料电池	60
3.3.1 燃料电池技术的发展	60
3.3.2 燃料电池的工作原理及分类	61
3.3.3 燃料电池分布式发电系统	64
3.3.4 存在问题及前景展望	67
3.4 斯特林机	68
3.4.1 斯特林机	68
3.4.2 斯特林机与生物质	72
3.4.3 斯特林太阳能发电	74
3.4.4 斯特林机冷热电联产	75

### 4 可再生能源分布式能量系统技术

4.1 分布式风力发电	78
4.1.1 离网型	78
4.1.2 并网型	84
4.2 太阳能发电技术	97
4.2.1 太阳能概述	97
4.2.2 太阳能热发电	99
4.3 可再生能源分布式发电技术	110
4.3.1 生物质定义	111
4.3.2 生物质的分类	111



4.3.3	生物质能的特点	112
4.3.4	生物质能分布式发电技术	112
4.3.5	典型的生物质分布式能量系统	116
4.3.6	生物质能和天然气互补的分布式能量系统	116
4.3.7	沼气式分布式能量系统	117

## 5 制冷与热泵

5.1	概述	119
5.1.1	制冷与热泵技术的概念	119
5.1.2	制冷与热泵技术的发展	119
5.1.3	制冷与热泵技术的应用	120
5.2	制冷与热泵技术的分类	121
5.2.1	按循环方式分类	121
5.2.2	按驱动能源分类	126
5.2.3	按环境热源分类	127
5.2.4	按在建筑物中的用途分类	127
5.3	制冷与热泵技术的评价方式	127
5.4	制冷与热泵循环的工质	129
5.4.1	制冷剂	129
5.4.2	工质对	130
5.5	制冷与热泵技术在空调和供热工程中的应用	130
5.5.1	空气源热泵空调系统	131
5.5.2	水源热泵空调系统	132
5.5.3	地源(土壤源)热泵空调系统	138
5.5.4	太阳能空调/热泵系统	139

## 6 冷热电联产

6.1	概述	142
6.1.1	冷热电联产的概念	143
6.1.2	冷热电联产的特点	143
6.2	冷热电联产的类型	145
6.2.1	冷热电联产系统的组成	145
6.2.2	冷热电联产系统的分类	146
6.2.3	分布式冷热电联产系统及其主要方式	147
6.2.4	分布式冷热电联产实例	150
6.3	冷热电联产节能的实质	152
6.4	冷热电联产的经济性分析	154
6.5	冷热电联产的主要热经济指标	154

6.5.1	能量利用系数 (总能源利用率)	155
6.5.2	烟效率、烟损率、烟耗率	155
6.5.3	经济烟效率	156
6.5.4	节能率	156
6.5.5	折合发电效率	157

## 7 双源供暖 (空调) 系统

7.1	概述	158
7.2	双源供暖 (空调) 系统简介	159
7.3	双源供暖 (空调) 系统的热力学性能	159
7.3.1	双源供暖 (空调) 系统在供暖工况下的性能	159
7.3.2	双源供暖 (空调) 系统的当量热力系数 $\xi_s$	162
7.4	双源供暖 (空调) 系统的案例	164
7.4.1	案例概述	164
7.4.2	热负荷的确定	165
7.4.3	联合循环双源供暖 (空调) 系统装机方案的选择	167
7.4.4	园区联合循环双源供暖 (空调) 系统经济性分析	171

## 8 分布式能量系统集成准则、性能评价及新系统探索

8.1	概述	176
8.2	分布式能量系统集成准则	177
8.2.1	分布式能量系统的本质特征	177
8.2.2	用于分布式能量系统集成的主要设备和技术	178
8.2.3	分布式能量系统集成的原则思路	179
8.2.4	分布式能量系统典型集成案例	184
8.3	分布式能量系统性能综合评价	187
8.3.1	分布式能量系统综合评价指标	187
8.3.2	模糊识别模型	187
8.3.3	实例分析	188
8.3.4	敏感性分析	189
8.4	改进的 SOFC/MGT 复合动力分布式能量系统	190
8.4.1	顶层循环复合发电系统改进方案	190
8.4.2	数学模型与参数说明	191
8.4.3	系统参数说明	192
8.4.4	系统改进效果分析	193
8.4.5	系统改进前后的烟分析对比	194
8.5	压缩空气蓄能系统集成及性能计算	195
8.5.1	典型 CAES 系统集成方案	196
8.5.2	关键设备及某些重要数据的选取	198

8.5.3	性能计算 .....	198
8.5.4	不同评价标准分析 .....	200
8.5.5	小结 .....	201
8.6	改进的冷热电联产系统 .....	202
8.6.1	微型燃气轮机冷热电联产系统变工况调节方法 .....	202
8.6.2	回注蒸汽在微型燃气轮机冷热电联产系统中的应用 .....	208
8.6.3	进气冷却技术在微型燃气轮机冷热电联产系统中的应用 .....	213
8.6.4	集成化的多功能高效微型燃气轮机冷热电联产系统及运行方式 .....	219

## 9 影响分布式能源发展的因素

9.1	能源政策对分布式能源发展的影响 .....	221
9.1.1	发达国家：大力发展分布式能源 .....	222
9.1.2	中国对于分布式能源的政策现状和差距 .....	223
9.2	电力市场对分布式能源发展的影响 .....	226
9.2.1	世界各国对分布式能源发展的市场激励机制 .....	226
9.2.2	市场因素对分布式能源的影响 .....	227
9.2.3	发电成本的计算 .....	229
9.2.4	分布式能源产业发展构想 .....	231
9.3	技术发展对分布式能量系统的影响 .....	232

## 10 分布式能源的应用案例

10.1	办公大楼分布式能源应用案例 .....	240
10.1.1	现有的能量系统 .....	240
10.1.2	能量需求的数据分析 .....	241
10.1.3	分布式能量系统 .....	244
10.1.4	分布式能量系统经济性评价 .....	246
10.1.5	分布式能量系统的经济性 .....	247
10.1.6	分布式能量系统与电网结合方案的经济性 .....	251
10.1.7	结论 .....	253
10.2	北京燃气集团控制中心大楼热电冷联产能源岛 .....	253
10.3	中国科技促进大厦案例 .....	258
10.4	校园分布式能源案例 .....	261
10.4.1	案例一：北京某大学与奥运会某羽毛球馆分布式能源站 .....	261
10.4.2	案例二：北京某大学 8000m <sup>2</sup> 建筑分布式热电冷联产综合研究示范工程 .....	265
10.5	燃气轮机热电联产实例 .....	270
10.5.1	燃气轮机分布式冷热电联供系统的应用 .....	270
10.5.2	应用实例 .....	271

## 参考文献

# 1 能源与可持续发展



## 1.1 新世纪能源应具有的本质特征：可持续性

人类社会已经历了三个能源时代，即薪柴时期、煤炭时期、石油时期，能源消费结构发生了两次大的转变。蒸汽机的发明促使能源消费结构发生了一次历史性的转变，即主要能源消费由薪柴转向煤炭。第二次转变是以煤炭为主导转向以石油为主导，1967年世界原油年产18亿吨，在一次能源消费结构中的比例达40.4%，超过煤炭年产量38.8%，标志着人类社会进入了石油时代，这是能源结构又一次历史性的转变。煤炭、石油为人类历史的进步做出了巨大贡献，但它们的利用带来了严重的环境污染和生态环境的破坏，已对人类生存与发展构成了严重威胁，以天然气为代表的清洁能源愈来愈为人们所重视和追求，能源消费结构面临着新的历史性转变。新的能源消费结构将以天然气、水合物为主，核能、太阳能、风能、石油、煤炭为辅的多种一次能源并存的能源消费模式。

表 1-1 世界和中国的主要能源概况<sup>[1]</sup>

项 目		石 油	天 然 气	煤 炭
证实储量	世界	1421 亿吨	150.19 万亿立方米	9842.11 亿吨标油当量
	中国	33 亿吨	1.37 万亿立方米	1145 亿吨标油当量
	亚洲	60 亿吨	10.33 万亿立方米	2923.45 亿吨标油当量
	美国	37 亿吨	4.74 万亿立方米	2466.43 亿吨标油当量
中国储量占世界的比例		2.3%	0.9%	11.6%
世界可采年限		39.9 年	61.0 年	227 年
中国开采年限		20.2 年	49.3 年	116 年
产量	世界	35.896 亿吨	24223 万亿立方米	21.374 亿吨标油当量
	中国	1.623 亿吨	227 万亿立方米	4.98 亿吨标油当量
	亚洲	3.802 亿吨	2654 万亿立方米	9.24 亿吨标油当量
	美国	3.535 亿吨	5556 万亿立方米	5.70 亿吨标油当量
中国产量占世界的比例		4.5%	1.1%	23.3%

在 20 世纪中，人类能源的总消耗量增长了 10 倍。21 世纪是全球经济大发展时期，也必将是能源消耗大增长时期。预计到 2025 年世界能源总消耗量将是 1990 年的 2 倍；2050

年将接近 2.4 倍；而 2100 年将是 1990 年的 3.2 倍。也就是说，今后 100 年能源消费还要大幅度增长。表 1-1 给出了世界和中国的主要能源概况，从表 1-1 可以看出世界上石油的可采年限只有 39.9 年，天然气的可采年限只有 61 年，煤炭的可采年限是 227 年。随着人口的增多、经济的发展，对能源的需求将大幅度增加，世界面临能源紧缺的问题。为了人类的可持续发展，严酷的现实使得人类不得不冷静地进行反思，21 世纪的能源应遵循怎样的原则才不致重蹈 20 世纪的覆辙。能源问题是可持续发展战略提出的主要依据之一，可持续发展是新世纪能源战略的核心。不论以什么样的方式解决能源问题，离开这一大战略就是不够好的，甚至是错误的、不可行的。那么在能源问题上如何体现可持续发展战略？这里有几个重要的问题。

## 1.1.1 能源结构与可持续发展

### 1.1.1.1 清洁能源与可再生能源

就能源的组成结构来说，一次能源分为三大范畴：第一类是可再生的或清洁的能源，如水力、生物质能、太阳能、地热能、风能、海洋能；第二类是核能；第三类是化石燃料。

在 1880 年以前，人类使用的能源本来以生物质为主。在实施可持续发展战略的今天，可再生或清洁能源本应力求居于主导地位，但事实上迄今在经济发达的地区或国家中，以生物质能、太阳能、地热能、风能、海洋能为主导能源的几乎没有，按我国的情况，在相当长的时期内也不具备这样的条件。不过，这类能源具有战略的重要性，坚持不懈地研究和探索这类能源在技术和经济上的可行性，应是新世纪能源战略的重要组成部分。随着可持续发展战略的深入发展和科学技术的进步，相信这类能源将占到越来越大的比重。

在可再生能源中，水能占有不同的地位，根据地区情况，它在目前就有可能在能源结构中起到主导或重大作用。我国是世界上水力资源最丰富的国家，水电的总蕴藏量居世界第一，可能开发的水力资源达到 3.78 亿千瓦。所以为了实施可持续发展战略，我国采取了优先开发水力资源政策。我国建设的三峡电力工程、西部大开发工程、“西电东送”工程正是这一政策的体现。大型水电，属于集中式能量系统，它的开发建设，明显地改变了我国的能源结构。到 2020 年，我国水电的装机总量将接近 2 亿千瓦，届时我国的水电开发率将达到 50% 以上，与发达国家水电开发率相近。

就我国的情况而言，小水电资源十分丰富，技术可开发量达 7000 多万千瓦，在全国 2400 多个县中有 1500 多个山区县有水电。到 20 世纪末已建成小水电站 4 万多座，装机近 2400 万千瓦，是投资主体多元化、产权形式多元化的分布式能量系统。20 世纪末，全国小水电发电 720 多亿度，相当于 3400 万~4400 万吨标煤，免除了 85 万吨烟尘、90 万吨二氧化硫，11000 万吨二氧化碳，等于少烧了 400 万~500 万立方米的木材，使生态环境得到了有效的保护。可见，坚持促进小水电的发展，无疑是推进可持续发展战略的一项重要内容。

核能的地位有些特殊，它是目前技术成熟并可以大规模替代化石燃料以减排有害物质的唯一能源。面对应用化石燃料的资源问题和所引起的环境问题，在经济发达、能源缺少的沿海地区发展核能，不失为一个良好的选择。到 2009 年底我国的核电装机容量只有 870 万千瓦，占电力装机容量的比例为 1.45%，预计到 2020 年可达到 7000 万千瓦左右。

不过从宏观和长远来看，核裂变也不能算是完全清洁的，因为它的后处理问题迄今未能

解决。核聚变才是真正清洁的，也是无限的，但其实现尚需时日。

### 1.1.1.2 化石燃料

综上所述可知，优先开发利用可再生能源和清洁能源，特别是水力资源，对实施可持续发展战略无疑是重要的。以我国而论，12个大型水电基地规划总的建设规模为2.2亿千瓦左右，但是即使这么大的规模也只能满足我国经济建设需要的1/4，其他3/4的能源需求仍要由化石燃料来满足。可见在今后相当长的时期内，化石燃料仍是能源结构中的主角。在我国是如此，在世界上多数的国家和地区也是如此。尽管核能在近10多年出现了较大幅度的增长，但迄今在发达国家利用煤炭、石油以及天然气等化石燃料发电的比例依然高达60%以上。这一比例同10年前相比没有多大变化。

在化石燃料中，因其资源量的不同和消费量的不同，其价值和意义也有所不同。就储量而言，目前全世界石油剩余可采储量约为1430亿吨，中国为33亿吨，占世界的2.3%，排名世界第11位；天然气的剩余可采储量约为143万亿立方米，中国为1.37万亿立方米，占世界的0.9%，排名世界第18位；煤炭的剩余可采储量约为984453Mt（兆吨），中国为114500Mt，占世界的11.6%，列在世界的第3位。可见我国是个多煤、少油、贫气的国家，这将对我国的能源消费结构产生重大的影响。

天然气主要成分中85%~95%为甲烷（ $\text{CH}_4$ ）。与煤炭、石油等黑色能源相比，天然气燃烧过程中，所产生的影响人类呼吸系统健康的氮氧化物、一氧化碳、可吸入悬浮微粒极少，几乎不产生导致酸雨的二氧化硫，而产生导致地球温室效应的二氧化碳的排放为煤的40%左右，燃烧之后也没有废渣、废水。由于天然气具有转换效率高、环境代价低、投资省和建设周期短等优势，近年来世界上天然气的消费总量和相对量均有大幅度增长，2001年世界天然气的总消费量达到 $2404.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，主要集中在北美和前苏联地区，占天然气总消费量的一半以上。天然气资源的用途主要有两个方面：一是能源行业，主要有三种用途：发电、生活燃料（采暖和做饭）以及工业燃料；二是化工行业原料，以生产化肥及合成纤维类为主。将天然气单纯作为居民生活燃料和工业燃料，不仅是资源的严重浪费。同时，也造成燃气成本过高使企业无法承受，同时管网用气在冬夏季的峰谷差过大，迫使增加管网的调峰配套投资，从而陷入进一步增大供气成本的恶性循环。但发展以燃气蒸汽联合循环为基础的分布式能量系统，热电联产，或冷热电联供等系统燃用天然气，使能量得到充分的梯级利用，则是天然气利用的理想方案之一。就我国的情况而论，当前天然气的年消费量不到300亿立方米，仅占世界的1.2%，在我国的能源结构中的比例仅为2%左右。预计到2010年，把陆上和海上的生产能力以及从周边国家进口的管道和液化天然气统计算在内，也只能达到650亿~800亿立方米，天然气在我国的能源结构中也仅能占到6%左右。因此，在我国大量建设以天然气为燃料的能量系统是不切实际的。如果把天然气这类清洁燃料作为分布式能量系统的一个本质特征，实际上会降低这类系统在我国的发展空间。

石油是战略物资，2001年世界的总消费量约为35亿吨，其中美国消费最多，达总消费量的1/4，我国为2.3亿吨，占世界的6.6%。预计近年我国石油消费量将大幅增长，但是我国石油产量不可能大幅增长，到2020年产量预计为1.8亿~2.0亿吨，然后将逐渐下降。但那时的石油消费量最少也要4.5亿吨，届时中国石油供应的一大半将依赖国际资源，石油的对外依存度有可能接近60%，与目前美国的水平相当。所以，能源安全尤其是石油安全问题越来越重要。

在所有化石能源中，煤炭是最便宜的一种能源，同等的发热量，用煤的成本只相当于用

油的 30%，用天然气的 40%。据预测，到 2010 年使用石油、天然气的成本将是煤炭的 8 倍，甚至更高。目前，煤消耗占世界一次能源消耗的 25%，世界发电量的 45%。煤炭在我国一次性能源结构中处于绝对主要位置，20 世纪 50 年代的比例曾高达 90%。随着大庆油田、渤海油田的发现和开发，一次能源结构才有了一定程度的改变，但煤仍然占到 70% 以上。2002 年中国能源生产总量为 13.9 亿吨标煤，其中 71% 来源于煤炭，煤炭消费总量为 13.7 亿吨，占同期世界煤炭消费总量的 27.7%，预计到 2050 年，煤炭所占比例不会低于 50%。也就是说，在未来几十年内煤炭仍将是我国的主要能源和重要的战略物资，具有不可替代性。

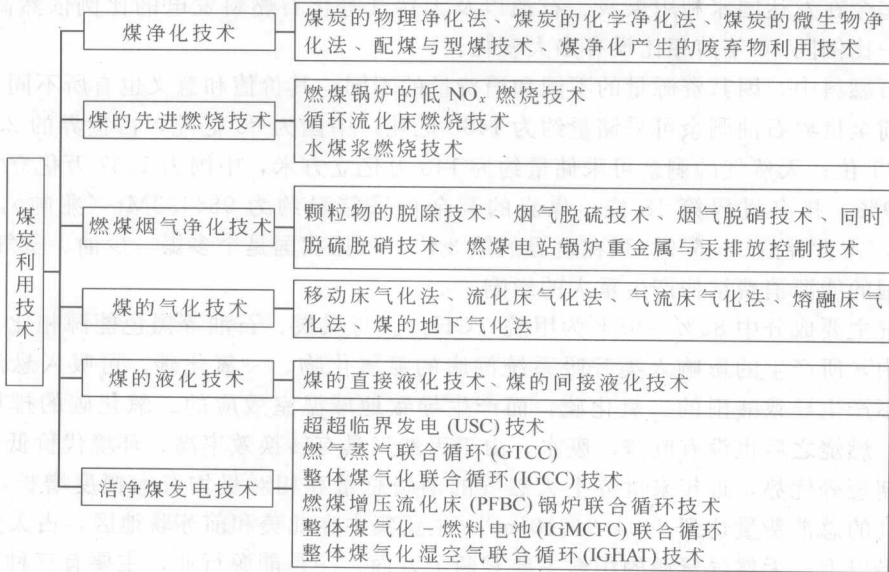


图 1-1 煤炭利用技术

为解决化石能源开发利用中存在的环境污染、利用效率低下等问题，出现了很多提高煤炭等化石能源利用效率的技术，比如煤的净化技术、煤的先进燃烧技术、燃煤烟气净化技术、煤的气化技术，煤的液化技术，洁净煤燃烧发电技术等，如图 1-1 所示。

### 1.1.1.3 核能

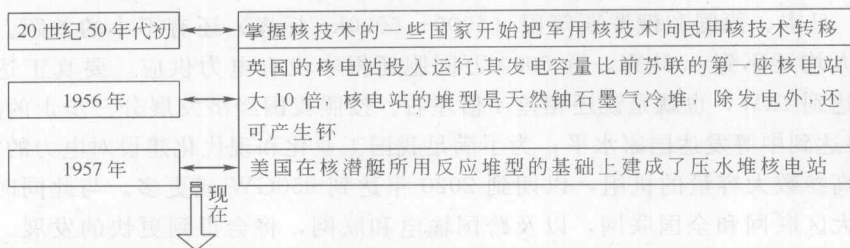
从 20 世纪 50 年代第一座核电站建成以来，核能越来越受到人们的重视。许多国家先后建造了核电站，特别是 20 世纪 70 年代世界发生能源危机时核电发展更快，30 多年的时间几乎走完了常规电站 100 多年的历程。核反应堆技术已从第一代发展到第四代。第一代为早期原型堆；第二代为目前运行的商业核电站；第三代为近年来设计先进的轻水堆和带有固定安全特点的反应堆；第四代为即将设计并在 20 年后建造的下一代核系统，具体见表 1-2 所示。

### 1.1.1.4 能源结构与可持续发展

能源结构与可持续发展的关系，关键体现在化石燃料的使用上。

首先是化石燃料对环境的污染。煤炭对中国来说无疑是两难选择，一方面它是能源的主要提供者，另一方面又是大气污染的主要污染源。中国的大气环境污染以煤烟型为主，燃煤所排放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 以及粉尘污染物分别占这些污染物在全国总排放量的 87%、67% 和 60%。2002 年，中国二氧化硫排放总量为 1927 万吨，居世界第一位。

表 1-2 核能利用技术—反应堆的发展过程



普遍采用	轻水堆	在世界全部发电反应堆中占主导地位，其装机容量约占全部核电站总容量的 80%
	重水堆	利用重水作减速剂
	石墨气冷堆	用石墨作减速剂，用气体作冷却剂
	压水堆	世界上采用最广泛、安全性较好的反应堆。用水作慢化剂，不隐藏着火危险
研究试验	快中子增殖堆	增殖反应堆可分为热中子反应堆和快中子增殖堆。快中子增殖堆可以提高铀的潜在能量的利用率，比轻水堆优点多。同等数量的铀，快中子增殖堆比轻水堆可获得多几十倍的能量，与轻水堆的主要区别是冷却剂不用水而用液态钠

排放温室气体，造成的全球气候变化是化石燃料对可持续发展更大的威胁。工业革命以前大气中 CO<sub>2</sub> 的含量约为 270~290 μL/L，到 1990 年已达 355 μL/L，使大气温度平均提高了 0.5℃，当时的世界 CO<sub>2</sub> 排放量折成碳为 58.3 亿吨。到了 20 世纪末已达 61 亿吨，预计到 2020 年将达 98.5 亿吨。目前我国 CO<sub>2</sub> 排放量已位居世界第一，甲烷、氧化亚氮等温室气体的排放量也居世界前列。

面对这一现实，能源领域中实施可持续发展战略，除了继续优化能源结构和提高化石燃料清洁化处理技术外，关键是节约能源，提高能源利用效率。这是实施可持续发展战略的客观需要。理论和实践均会证明，时至今日，节能的潜力仍是不可低估的。

### 1.1.2 电力是步入 21 世纪和可持续发展未来的桥梁

人类文明史发展到 19 世纪 70 年代，科学技术促进生产力极大发展的划时代成就之一就是电力的生产和日益广泛的应用。电力是步入 21 世纪和可持续发展未来的桥梁。对于这一论断不一定所有的人都能正确地理解，主要是受先入为主的传统效率概念影响。传统的效率概念，不是从熵产或熵损上看待问题，有时会产生误解，认为电力（或动力，下同）生产的效率不过在 30%~40% 的范围，把电力与能源的低效率利用联系起来。其实，从科学的角度，电力和电力技术的水平乃是文明用能的重要标志。把一次能源转换为电力的形式熵产最小，不仅如此，电力还可以大小不同规模地生产，可以远近不同距离地输送，可以无限地划分并高效地转换不同形式的能量。电力占终端用能的比例越大，单位产值的能耗越低，从而使可持续发展战略得以更好地实现。

电力发展有其自身的规律。世界上许多国家的电力以基于化石燃料的火力发电为主，我国更是这样。经过了百余年的进步发展，今日的火力发电与昔日大不相同，其特点主要表现为普遍采用高参数、大容量机组，并依靠计算机技术、信息技术、控制技术、电力电子技术和高电压技术将以高效、可靠和开放的大电网甚至超大电网中各机组连接起来，从而使供电效率日益提高，发电成本和单位千瓦投资日益降低。在发达国家中，从小机组到大机组的过渡，从低参数到超临界参数和超超临界参数的过渡，从局部电网到大电网和跨国电网的过渡业已完成或基本完成，从而保证了这些国家高的用能水平。在发展中国家中迄今尚未达到



现代社会应有的用能水平。以我国而论,人均用能约每年 1000kg 标煤,比起美国(11000kg 标煤)、日本、德国和俄罗斯等国(5000~6000kg 标煤)还有不小的差距。在装机容量上,我国人均还不到 0.3kW,近 6000 万同胞还根本没有电力供应。要真正达到小康,人均至少要达到 1kW,也就是说还相差 4 倍左右。按照我国经济发展分三步走的战略,到 21 世纪中期要达到中等发达国家水平;为了满足我国工业化和现代化建设对电力的需要,我国将大力发展高参数大容量的机组,以期到 2020 年达到 950GW 或更多。与此同时,电网互联,包括跨大区联网和全国联网,以及跨国输电和联网,将会得到更快的发展。大机组,尤其是燃煤大机组与大污染不一定有必然的联系,关键在于发展路线。只要路线正确,由于高效和单位成本低等优势,集中燃煤发电比分散燃煤机组更便于保证低污染。可以断言,发展高参数、大机组、大电网乃是走向小康和富裕的过程中不可逾越的阶段。

### 1.1.3 21 世纪电力工业发展的方向

目前世界能源产业面临亟待解决的四大问题是:合理调整能源结构,进一步提高能源利用效率,改善能源产业的安全性,解决环境污染。对电力工业来说,单一的大电网集中供电解决上述问题存在困难,而分布式能量系统恰好在提高能源利用率、改善安全性、解决环境污染方面可以做出突出贡献,因此,大电网与分布式能量系统的合理结合,被全球能源、电力专家认为是投资省、能耗低、可靠性高的能量供应系统,将成为 21 世纪电力工业发展的方向。

我国的能源结构与世界能源结构差别很大,以煤炭为主的一次能源结构和丰富的水力资源决定了我国的电力工业要以“大机组、大电网”的集中式供电作为主要发展方向。由于以煤炭为能源的电力生产造成了严重的环境污染问题,为了实施可持续发展战略,我国应加大水力发电、风力发电、太阳能电池的开发力度,充分利用我国丰富的可再生能源资源,积极开展资源综合利用,提高能源利用率,节约能源。这是保障国家经济安全和长远发展的重大战略措施。节约能源,努力提高能源利用率,首先在于努力提高电力在终端用能的比重,分布式能量系统位于用户附近,易于实现热电联产。热电联产实现了能量的梯级利用,提高了能源的利用率,节约了能源,减少了用能对环境的污染,同时也有利于提高电力在终端用能中的比重。因此,分布式能量系统是我国“大电厂、大电网”集中式供电方式不可缺少的重要补充,是解决我国能源利用效率低下的有效手段,是减少环境污染的重要途径,在实施可持续发展战略中具有相当重要的地位。

## 1.2 电力系统

### 1.2.1 电力系统的组成

电力系统的组成如图 1-2 所示。电力系统是由发电、变电、输电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费系统。它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置(火电机组、水电机组、核电机组或风电机组等)转化成电能,再经输、变电系统及配电系统将电能供应到各负荷中心。由于电源点与负荷中心多数处于不同地区,电能无法大量储存,电能生产必须时刻保持与消费平衡。因此,电能的集中开发与分散使用,以及电能的连续供应与负荷的随机变化,就制约了电力系统的结构和运行。据此,电力系统要实现其功能,就需在各个环