



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 新能源发电与控制技术

第2版

◎ 惠晶 主编 ◎ 方光辉 副主编

XINNENGYUAN FADIAN YU  
KONGZHI JISHU



免费电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 新能源发电与控制技术

第2版

主 编 惠 晶

副主编 方光辉

参 编 颜文旭

石晨曦



机械工业出版社

自本书第1版于2008年2月出版问世以来,有关的科学技术已取得显著进步,新能源发电的社会和经济价值在国际上获得广泛认可。本书针对这些技术的发展,对第1版进行了修订和补充,本书原名是《新能源转换与控制技术》,由于能源转换涉及面极为广泛,而本书的重点是介绍新能源发电及其控制技术,因此,借第1版修订之际,第2版更名为《新能源发电与控制技术》。

本书主要内容包括:新能源发电与控制技术导论,电源变换和控制技术基础知识,风能、风力发电与控制技术,太阳能、光伏发电与控制技术,水能、小水力发电与控制技术,生物质能发电与控制技术,分布式能源的利用与控制技术,核能发电与应用技术,其他形式新能源的发电与应用技术等,全书共九章。

本书可作为电力工程专业、电气工程及其自动化专业、自动化专业及其相关专业的本科生教材,对相关专业的研究生和从事新能源发电与控制技术的广大工程技术人员也是一本较为系统完整的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

新能源发电与控制技术/惠晶主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2012.9  
普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-39269-9

I. ①新… II. ①惠… III. ①新能源—发电—高等学校—教材 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第171651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:于苏华 责任编辑:于苏华 张利萍

版式设计:纪敬 责任校对:于新华

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·538千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39269-9

定价:42.00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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

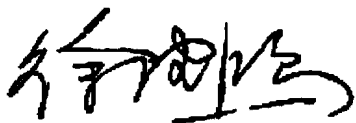
# 序

---

新能源是未来人类解决能源与环境问题的钥匙，21 世纪将是人类大规模开发利用新能源的关键期。我们可以预见，21 世纪也是围绕新能源的技术革命和产业高速发展期。新能源技术是一个涉及电气、动力、材料、控制、电子、计算机、信息等多个学科的交叉高新技术。为了推动新能源技术的发展，目前亟需加紧新能源技术的知识传播和相关人才的培养。国内外部分大学已将新能源技术作为工学学生的课程，这是一个很好的尝试。

惠晶教授主编的《新能源发电与控制技术（第 2 版）》一书，其特色是将新能源发电技术、电力电子技术和控制技术有机结合，从系统的角度加以阐述。该书以具有电气工程或自动化方面基础知识的读者为对象，比较系统、全面地介绍了新能源变换及其控制技术，包括风力发电、光伏发电、燃气发电、生物质能发电、小水电、海洋能发电等；书中深入浅出地介绍了几种重要新能源的存在形式，新能源的获取方法，能—电转换技术及其综合利用前景；分析了利用各种新能源发电的主要制约因素，并对书中叙述的几类新能源转换与发电应用作了经济技术性评价。该书是系统了解新能源发电技术的基础入门书。

感谢《新能源发电与控制技术（第 2 版）》一书的全体作者付出的辛勤劳动，面向国家和社会的需求，他们克服新能源涉及多学科交叉所遇到的困难，为大家奉献了一本很好的书籍。



徐德鸿  
浙江大学

## 第 2 版前言

本书第 1 版于 2008 年 2 月正式出版，原书名是《新能源转换与控制技术》，由于能源转换涉及面极其广泛，而本书内容主要涉及如何将一次能源转换成电能，重点介绍新能源的发电及其控制技术。因此，借本书第 1 版修订之际，更名为《新能源发电与控制技术》。本书修订的主要依据是：①自第 1 版问世以来，有关的科学技术已经取得很大进步，以功率 MOSFET 和 IGBT 为主的全控型器件和 PWM 控制在电力电子变换器中占据了统治地位；分布式发电系统和生物质能的利用与应用技术日趋成熟；虽然国际社会对核能发电的安全性争议不断，但核能发电依然是发达国家的重要电力补充和清洁能源。②新能源发电的社会和经济价值获得国际社会广泛认可，我国光伏发电的产能已居世界第一，在风力发电领域，我国的生产和应用规模发展惊人，增速已连续三年世界第一。③作者连续 4 届选择本书第 1 版作为本校电气工程本科专业的教材，亲身体会到原书有些内容和结构不够科学，在第 1 版中引用的一些经济技术数据已经过时，还发现个别错误需要勘正。基于上述三点，认为有必要对原书结构进行适当调整，对不合理之处加以修订和补充。本书第 2 版传承了第 1 版的体系和特色，将新能源发电与控制技术有机地结合起来，重点介绍了新能源发电的原理、电源变换及其控制技术。

新能源发电作为一门涉及多学科的新兴技术，已日益受到国际社会的青睐。据“21 世纪可再生能源政策网（REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century）”2011 年发布的全球状况报告（GSR2011）称：2010 年全球可再生能源快速增长，其中，风能发电能力增长 25%，并网的太阳能光伏（PV）能力增长 81%。2010 年，可再生能源产业为全球提供了约 350 万个就业岗位，年度总投资规模达 2110 亿美元，可再生能源的总发电总量（不含大水电）自 2005 年起增长了 1 倍，达到 312GW（1GW=10 亿 W），约占全球发电总容量的 6.6%。在 2005~2010 年的 5 年中，发展最迅速的可再生能源发电技术是并网光伏发电系统，年均增长 60%。其次，是并网风电系统，年均增长 27% 以上。至 2011 年初，全球已有 118 个国家制定了促进使用可再生能源的国家目标。随着我国《中华人民共和国可再生能源法》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020 年）》等法规和纲领性文献的相继执行，我国新能源利用在未来 20 年必将形成高潮。

目前，国内外虽已有多种版本的可再生能源利用的专著面世，但鉴于新能源利用涉及的能源种类繁多、应用规模和水平相对较低、许多技术尚不成熟的特点，缺少一本能够兼顾各类新能源发电与控制技术的综合性教材。随着高等教育课程体系改革的不断深入，在增加新技术课程、专业课时大幅度压缩的情况下，作者在教学实践中也切身感到十分需要一本较为系统全面、综合性、专业性强的相关教材，这些也是修订本书的初衷。

为了保证教学的延续性，提高本书的合理性与科学性，第 2 版保留了第 1 版经教学实践检验过的多数内容，对原书结构和章节做了适当调整与增补。首先，按可再生能源开发利用

的成熟度和发展前景,对第3~9章的内容按风力发电、光伏发电、小水力发电、生物质能发电、分布式能源发电、核能发电和其他能源发电的顺序重新编排。其次,考虑分布式能源系统和核电装置在新能源利用中占据重要的地位,将这两部分独立修编为第7章分布式能源的利用与控制技术和第8章核能发电与应用技术,同时删除了第1版的第6章天然气、燃气发电与控制技术和第8章海洋能利用与发电技术两章,将原书相关内容分别并入第2版的第7章和第9章中。

修订后,本书在总体结构和内容上与第1版基本一致,共分为9章。第1章新能源发电与控制技术导论,由于本章内容涉及大量国内外新能源发展状况的技术和经济数据,有较强的时效性,而第1版采用的能源状况数据均是2006年之前的,对本章的修编任务是更新过期的技术与经济数据,使本章具有科学性和实效性。为方便非电气工程类学生和广大专业爱好者阅读本书,特编写第2章电源变换和控制技术基础知识,重点介绍了不可控、半控和全控型三类电力电子器件及其驱动与保护电路,增加了PWM控制技术,归纳介绍了AC—DC、DC—DC、DC—AC、AC—AC四种典型变换电路,本章作为预备知识在教学中选用。第3章风能、风力发电与控制技术,重点介绍风的特性、风力发电机组及工作原理,风电机组的控制策略和并网技术,风电的经济技术性评价。第4章太阳能、光伏发电与控制技术,主要介绍了太阳的辐射与太阳能利用,光伏发电原理、独立式与并网式的光伏发电系统,光伏发电系统的控制策略和光伏发电的发展前景与经济技术评价。第5章水能、小水力发电与控制技术,介绍了水力资源及小水力发电机组的构成、工作原理,小水力发电机组的控制技术、并网运行的远程监控与SCADA系统和小水电的经济技术性评价。第6章生物质能发电与控制技术,介绍了生物质能的形式及开发利用,生物质能的制取与发电技术,生物质能并网发电技术以及对电网的影响和生物质能发电的经济技术性评价。由于分布式发电系统发展迅速、应用前景良好,故新增第7章分布式能源的利用与控制技术,重点介绍了分布式能源的特征及其应用,天然气、微小型燃气轮机发电机组工作原理与控制技术,氢能、氢燃料电池发电与控制技术,分布式能源的综合利用及经济技术评价。核能发电属于清洁能源利用的重要形式,在发达国家占有很大比重,第2版将核能发电与应用技术单列为第8章,介绍了核能及其利用、核反应堆与核能发电设备、核电站的运行监控系统和技术经济性评价。第9章其他形式新能源的发电与控制技术,分别介绍了有利用价值的海洋能、地热能的发电与制约因素、综合评价等。

为便于部分读者的学习,书中引入第1章新能源发电与控制技术导论,第2章电力电子技术基础知识,并在各章开始简略介绍了相关新能源的理化特性和应用前景,这些内容可以在课堂教学中根据不同对象取舍。本书所选内容以48学时为宜,如采用多媒体教学,可提高教学效率,建议安排44学时。

本书可作为高等院校电气信息类电力工程专业、电气工程及其自动化专业、自动化等专业的的新能源发电与控制技术选修课程及相近课程的教材或参考书。同时,本书也可以成为从事新能源发电、电力管理及规划的专业技术和管理人员获得所需专业知识的读本。

本书由惠晶担任主编,编写第1章和第2章,并负责全书的统稿工作;方光辉担任副主编,编写第5章和第6章;颜文旭编写第4章和第7章;石晨曦负责第3章、第8章和第9

章的编写。本书在编写过程中还得到沈锦飞教授的帮助，研究生张东峰、谢伟、王思杰、王探靖等人也参加了部分章节的资料收集和文字录入工作，在此对所有参编人员和审稿专家表示衷心感谢。同时，还要向书中所附参考文献的作者致以衷心感谢。

最后，特别感谢浙江大学徐德鸿教授在本书编写过程中提出的宝贵意见，徐教授还在百忙之中为本书审稿和作序，在此谨致深切的感谢！

由于时间仓促及水平有限，书稿虽在修编过程花了不少精力，但仍难免存在疏漏、错误，殷切期望广大读者批评指正。

**作 者**

**2012年7月于江南大学**

# 目 录

## 序

## 第 2 版前言

## 第 1 章 新能源发电与控制技术导论 ..... 1

- 1.1 能源储备与可持续发展战略 ..... 1
    - 1.1.1 我国的能源结构与储备 ..... 1
    - 1.1.2 我国的可持续发展战略 ..... 3
  - 1.2 能源的分类与基本特征 ..... 4
    - 1.2.1 能源的分类 ..... 4
    - 1.2.2 能源的基本特征 ..... 5
    - 1.2.3 新能源及主要特征 ..... 6
    - 1.2.4 分布式能源及主要特征 ..... 7
  - 1.3 新能源发电——能源转换的重要形式 ..... 9
    - 1.3.1 新能源发电技术的应用 ..... 9
    - 1.3.2 我国新能源发电的现状 ..... 10
    - 1.3.3 新能源发电及电源变换的主要形式 ..... 11
  - 1.4 新能源发电与控制技术的经济意义 ..... 22
    - 1.4.1 能源是经济发展的引擎 ..... 22
    - 1.4.2 新能源发电的经济意义 ..... 24
- 本章小结 ..... 27

## 第 2 章 电源变换和控制技术基础知识 ..... 28

- 2.1 常用电力电子器件及其分类 ..... 28
  - 2.1.1 电力电子器件的特征和分类 ..... 28
  - 2.1.2 不可控型器件——电力二极管 ..... 29
  - 2.1.3 半控型器件——晶闸管 ..... 30
  - 2.1.4 全控型器件——电力 MOSFET 和绝缘栅双极型晶体管 IGBT ..... 30
- 2.2 半导体功率器件的驱动与保护电路 ..... 33
  - 2.2.1 晶闸管触发驱动器 ..... 34
  - 2.2.2 IGBT 和 MOSFET 驱动器 ..... 34
  - 2.2.3 功率器件的保护电路 ..... 41
- 2.3 常用脉宽调制 (PWM) 控制技术 ..... 44
  - 2.3.1 直流 PWM 控制技术 ..... 44

- 2.3.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)

- 控制技术 ..... 46

- 2.3.3 SVPWM 与 CHBPWM 控制技术 ..... 48

## 2.4 AC—DC 变换电路 ..... 51

- 2.4.1 二极管整流器——不控整流 ..... 51
- 2.4.2 晶闸管整流器——相控整流 ..... 52
- 2.4.3 PWM 整流器——斩波整流 ..... 53

## 2.5 DC—DC 变换电路 ..... 55

- 2.5.1 单管非隔离式 DC—DC 变换器 ..... 55
- 2.5.2 隔离式 DC—DC 变换器 ..... 56

## 2.6 DC—AC 变换电路 ..... 60

- 2.6.1 常用 DC—AC 变换电路 ..... 60
- 2.6.2 DC—AC 逆变器的分类 ..... 60
- 2.6.3 DC—AC 逆变器的参数计算 ..... 61

## 2.7 AC—AC 变换电路 ..... 64

本章小结 ..... 66

## 第 3 章 风能、风力发电与控制技术 ..... 67

- 3.1 风的特性及风能应用 ..... 67
  - 3.1.1 风的产生 ..... 67
  - 3.1.2 风的特性与风能 ..... 68
  - 3.1.3 风能的利用 ..... 71
- 3.2 风力发电机组及其工作原理 ..... 72
  - 3.2.1 风力发电机组的分类及结构 ..... 72
  - 3.2.2 风力机及风能转换原理 ..... 73
  - 3.2.3 风力发电机及工作原理 ..... 76
  - 3.2.4 独立运行式风力发电机组的控制系统 ..... 83
- 3.3 风力机的调节与控制 ..... 85
  - 3.3.1 风力机的定桨距调节与控制 ..... 86
  - 3.3.2 风力机的变桨距调节与控制 ..... 86
  - 3.3.3 风力机偏航系统的调节与控制 ..... 90
- 3.4 风力发电机组的控制策略 ..... 91
  - 3.4.1 风力发电机组的变速恒频控制策略 ..... 91



3.4.2 双馈异步风力发电机的变速恒频控制策略	93	4.6 光伏发电的发展前景与经济技术评价	154
3.4.3 风力发电系统的智能控制	98	本章小结	156
3.5 风力发电机组的并网技术	99	<b>第5章 水能、小水力发电与控制技术</b>	157
3.5.1 同步风力发电机组的并网技术	99	5.1 水力资源与水能的利用	157
3.5.2 同步风力发电机的并网运行系统	102	5.1.1 水能及水力资源的特点	157
3.5.3 异步风力发电机组的并网技术	103	5.1.2 水能及水力资源的利用	158
3.5.4 双馈异步风力发电机的并网运行系统	105	5.2 水力发电	159
3.5.5 风力发电机组的并网安全运行与防护措施	107	5.2.1 水电站的分类	159
3.6 风力发电的经济技术性评价	109	5.2.2 水电站的组成	159
3.6.1 风力发电的经济性指标	109	5.2.3 小水电的特点	161
3.6.2 影响风力发电经济性的主要因素	111	5.2.4 小水电的新技术及其应用	162
本章小结	112	5.3 小水力发电机组及工作原理	163
<b>第4章 太阳能、光伏发电与控制技术</b>	113	5.3.1 小水力发电机组的构成及工作原理	163
4.1 太阳的辐射及太阳能利用	113	5.3.2 水轮机及其工作原理	164
4.1.1 太阳的辐射	113	5.3.3 水力发电机	170
4.1.2 太阳能的转换与利用	117	5.4 小水力发电机组的控制技术	172
4.2 光伏发电原理与太阳电池	124	5.4.1 小水力发电机组的自动控制系统	172
4.2.1 太阳能光伏发电的原理	124	5.4.2 小水力同步发电机自动励磁控制系统	181
4.2.2 太阳电池的发展与分类	127	5.4.3 无功功率补偿技术及装置	190
4.2.3 光伏阵列与输出特性	129	5.4.4 小水力同步发电机组的并网技术	196
4.2.4 光伏发电系统的构成与分类	133	5.5 小水电站的计算机监控与SCADA系统	200
4.3 光伏发电系统的MPPT控制技术	137	5.5.1 小水电站的计算机监控	200
4.4 独立式光伏发电系统	142	5.5.2 监控和数据采集系统	203
4.4.1 独立式光伏发电系统的结构及工作原理	142	5.6 小水力发电的经济技术性评价	204
4.4.2 独立式光伏发电系统的储能与充放电控制技术	144	5.6.1 小水力发电的经济技术性评价概述	204
4.5 并网式光伏发电系统	146	5.6.2 小水力发电的经济性评价	204
4.5.1 并网式光伏发电系统的结构及工作原理	147	本章小结	206
4.5.2 并网光伏逆变器的频率跟踪与锁相控制技术	150	<b>第6章 生物质能发电与控制技术</b>	207
4.5.3 光伏发电系统的并网安全运行与防护措施	152	6.1 生物质能的形式及其利用	207
		6.1.1 生物质能的概念	207
		6.1.2 生物质能存在的形式	208
		6.1.3 生物质能的开发利用	209

6.2 生物质能的制取与发电技术·····213	7.4.2 分布式能源的经济技术与 可行性评价····· 282
6.2.1 生物质能发电产业的发展状况·····213	本章小结····· 286
6.2.2 生物质能发电技术·····214	<b>第 8 章 核能发电与应用技术</b> ····· 288
6.2.3 沼气发电技术与控制策略·····218	8.1 核能的形式及其利用····· 288
6.2.4 垃圾焚烧发电技术与控制策略·····229	8.1.1 核能的主要形式····· 288
6.2.5 生物质直接液化制燃料油的 发电技术·····237	8.1.2 核能的和平利用····· 290
6.3 生物质能的并网发电及对电网的影响···241	8.2 核反应原理及反应装置····· 290
6.4 生物质能发电的经济技术性评价·····243	8.2.1 核反应堆工作原理····· 290
本章小结·····246	8.2.2 核反应堆装置····· 291
<b>第 7 章 分布式能源的利用与控制技术</b> ···247	8.3 核能发电技术与发电设备····· 292
7.1 分布式能源的特征及其应用·····247	8.4 核电站的运行与监控系统····· 294
7.1.1 分布式能源的特征·····248	8.4.1 核电站的运行····· 294
7.1.2 分布式能源的应用·····249	8.4.2 核电站的监控系统····· 296
7.2 天然气、燃气发电与控制技术·····251	8.5 核能发电的经济技术性评价····· 301
7.2.1 天然气的特征与利用·····252	本章小结····· 301
7.2.2 小型燃气轮机发电机组·····256	<b>第 9 章 其他形式新能源的发电与应用 技术</b> ····· 303
7.2.3 微型燃气轮机发电机组·····260	9.1 其他形式的新能源载体简介····· 303
7.2.4 微型燃气轮机发电机组的电气 系统与控制技术·····263	9.2 海洋能的利用与发电技术····· 304
7.3 氢能、氢燃料电池发电与控制技术·····274	9.2.1 海洋能的分类与应用····· 304
7.3.1 氢能及其利用·····274	9.2.2 海洋能发电原理与应用技术····· 308
7.3.2 氢燃料电池的特性与分类·····276	9.2.3 海洋能发电的综合评价····· 322
7.3.3 氢燃料电池发电系统的组成与 工作原理·····279	9.3 地热能发电与应用技术····· 325
7.3.4 氢燃料电池发电系统的控制技术···280	9.3.1 地热能概述····· 325
7.4 分布式能源的综合利用及经济技术 评价·····282	9.3.2 地热能发电原理与应用技术····· 326
7.4.1 分布式能源的综合利用·····282	本章小结····· 329
	<b>参考文献</b> ····· 331

# 第 1 章 新能源发电与控制技术导论

新能源利用包括可再生能源（风能、太阳能、生物质能、水能、海洋能）和地热能、氢能、核能转换及其利用新技术（高效利用能源、资源综合利用、替代能源、节能等新技术）。可再生能源是重要的新能源组成形式，是自然界中可以不断再生、永续利用、取之不尽、用之不竭的初级资源。科学、高效地利用可再生能源，提高能源的综合利用效率，是保障人类社会可持续发展的可靠途径。新能源发电与控制技术涉及：①利用可再生能源和清洁能源发电，以便持续获得二次清洁能源——电能；②对电能通过变换与控制，满足高质量的终端能源消费需求 and 电力的高效管理。

## 1.1 能源储备与可持续发展战略

### 1.1.1 我国的能源结构与储备

近二百年由于人类对化石能源的过度依赖，致使化石类能源面临日益枯竭的危机。对于人类未来能源可持续供应来说，必须重新进入利用新能源和节约能源的时代。我国是一个拥有 13 亿人口的国家，各种资源的人均占有率都远远低于世界平均水平。随着我国经济的高速发展和对外开放的进一步深入，在政治、经济社会各个领域的发展与变化都会成为全世界关注的焦点。自 20 世纪 90 年代以来，我国的能源改革与发展，特别是能源的可持续供应问题，以及可能给世界能源形势带来的影响，一直是世界各国特别是发达国家争论的议题。深入研究和解决利用新能源带来的一系列科学技术问题 and 经济性能问题，是我国当前能源储备与可持续发展战略的当务之急。

#### 1. 我国的能源结构

我国是一个能源大国，在能源结构中煤炭储量最为丰富，已标明的煤炭保有储量超过 1 万亿 t，可采储量在 1800 亿 t 以上，仅次于俄罗斯、美国，位居世界第三。再加上地下 1500m 以内的深层资源，总量估计可达 5 万亿 t。因此，煤炭是我国分布最广、最为丰富的矿物资源。但是，我国又是一个能源贫国，我国的人均能源资源占有量为全世界人均水平的 1/2，仅为美国人均水平的 1/10。而且，在能源结构的组成中，75% 以上是煤，在常规化石能源中，煤炭资源占 90% 以上。

从传统的一次能源消费与开采情况看，我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，占世界煤炭产量的 1/4。依据 2006~2010 年期间，我国能源生产与消费、能源主体结构及人均消费三组数据的测算：2010 年我国一次能源生产总量为 29.6 亿 t 标准煤，是 2006 年 23.22 亿 t 标准煤的 1.27 倍，期间年均增长 4.8%；同期一次能源消费总量从 25.61 亿 t 标准煤增加到 30.94 亿 t 标准煤，2010 年人均能源消费水平从 2006 年的 1.97t 标准煤预计将增长到 2.38t 标准煤，年均增长 3.8%。2006~2010 年，虽然我国能源生产持续增长，且其增长速度大于能源消费的增长速度，但仍存在能源缺口。

我国是世界上少数几个以煤为主的能源消费国。2005~2010 年，在我国一次能源构成中，

煤的比例从 76% 下降到 74.7%，石油的比重从 11.4% 下降到 11.3%，天然气从 4.91% 上升到 5%，水电、核电、风电及其他可再生能源所占比例从 2005 年的 8.937% 上升到 2010 年的 9%。我国能源消费中，煤一直占 2/3 以上的份额，因此以煤为消费主体的格局短期内不会改变，这就决定了我国能源政策的制定与实施都必须优先考虑煤，以煤为能源消费主体的格局还将持续很长一段时间。

从常规能源消费来看，我国的人均消费水平也在逐年增长。2007 年我国煤、石油和天然气的人均消费分别为 1.92t 煤、0.28t 油和 57.51m<sup>3</sup> 气，分别是 2001 年的 1.9 倍、1.5 倍和 2.6 倍。尽管我国的能源消费中煤占主体，但人均消费量依然低于美国、德国等发达国家。以 2006 年为例，当年我国人均煤消费量仅为美国的 47.9%、德国的 90.9%。

从以上三组数据可以看出，我国的能源结构仍是以煤为主，煤多油少是我国能源储存结构的基本特点，今后 20 年，甚至到 21 世纪中叶，我国以煤为主的能源结构将不会改变，煤炭仍将是当前和今后我国能源的一个最重要的组成部分。

另一方面，由于传统的燃煤方式和煤炭加工过程不可避免地会产生大量的污染物，必将导致严重的大气污染、酸雨和水质污染，会直接破坏生态环境与自然植被，特别是以煤为主要能源的动力燃料的消耗，每年我国电站锅炉、工业炉窑与工业锅炉，仅发电与其他工业耗煤就占煤炭总消耗量的 2/3 左右，而用于民用生活的仅 1/10 左右，用于城市供热的煤炭不足 1/20。因此，长期以来我国在能源生产与消费中，是以煤炭为主要能源且直接进行燃烧，因燃烧不充分、燃烧工艺落后，造成环境污染严重、效率低下、浪费惊人。

## 2. 我国的资源和能源储备

我国有 13 亿人口，是世界人口最多的国家，人口密度高于世界平均水平，也高于亚洲国家的平均人口密度，与经济社会生产需求相比，人力资源相对过剩。但与新加坡、日本、德国、英国、法国、韩国等先进工业化国家相比，我国的人口密度并不算高。无论是土地面积、土地资源、林木资源、水力资源还是矿藏资源，我国的资源基础储量都比较丰富，但如果按人均占有量计算，我国大多数资源都低于世界平均水平。而如果从国土面积的资源禀赋量来看，我国各种资源丰度不等。我国人口约占世界总人口的 21%，国土面积占世界面积的 7.1%，耕地占世界的 7.1%，草地占世界的 9.3%，水资源占世界的 7%，森林面积占世界的 3.3%，石油占世界的 2.3%，天然气占世界的 1.2%，煤炭占世界煤炭总量的 12%。

实际上，我国对能源的开发利用已达到相当高的强度，与能源高强度开发和大规模消费相对应的则是能源利用效率的低下。目前，我国能源利用效率仅为 30% 左右，比发达国家低近 10 个百分点。我国主要用能产品的单位产品能耗比发达国家高 25%~90%，加权平均高 40% 左右。以电力为例（我国电力供应主要依靠以煤炭为燃料的火电），我国火电厂供电煤耗为每千瓦小时用 404g 标准煤，国际先进水平为 317g 标准煤，我国多耗煤 27.4%。依据我国和美国 2009 年与 2010 年上半年发电量统计数据测算：2009 年我国发电量为 36506 亿 kW·h，美国为 39511.17 亿 kW·h，我国发电量已经是美国的 92.4% 了；而 2010 年 1~6 月累计，美国净发电量为 19835.59 亿 kW·h，比上年同期的 19182.59 亿 kW·h 增长 3.4%。其中，风电为 454.24 亿 kW·h，同比增长 21.4%；核电为 3949.92 亿 kW·h，同比下降 1.3%。据中国国家统计局发布的月度统计数据，2010 年 6 月，我国规模以上发电厂发电量为 3466.6 亿 kW·h，同比增长 11.4%。1~6 月累计，我国发电量为 19706.0 亿 kW·h，同比增长 19.3%。而 7 月以来，我国日

发电量连续破纪录, 7月一个月发电量就达到了3776亿kW·h。美国发电量世界第一的宝座已经坐了110年, 2011年以后就要退居第二了。

我国能源短缺在很大程度上是能源利用结构同资源禀赋结构矛盾的表现。现在, 我国已经成为世界第二大能源消费国。依靠大量消费能源推动了我国经济的高速增长, 但也使我国经济增长越来越接近资源和环境条件的约束边界, 煤电油供需矛盾相当突出。

随着国际石油紧缺状况的影响和我国能源资源约束的日益突出, 能源资源情况不容乐观。自1993年我国成为石油净进口国之后, 我国石油对外依存度从1995年的7.6%增加到2005年的42.9%。2010年我国石油消费对外依存度已超过55%, 石油安全面临的形势日益严峻。我国自20世纪90年代中期成为石油净进口国之后, 石油需求持续攀升, 石油对外依存度已从1997年的10%提高到2009年的50%“警戒线”。中国石油和化学工业联合会会长李勇武此前透露, 2010年上半年, 我国石油对外依存度已进一步扩大至55.14%。预计到2020年, 石油消费量最少也要4.5亿t, 届时石油的对外依存度将达到60%, 这使得我国的石油安全问题变得十分突出。与世界发达国家相比, 我国的能源储备体系建设还相对滞后。以石油储备为例, 为了应对石油供应危机, 美国1975年12月开始建立战略石油储备, 目前储备水平约为7.02亿桶, 其存储上限为7.27亿桶, 目前美国的石油储备可供使用150多天。公开资料显示, 截至2009年年初我国战略石油储备可用天数为21天, 在二期建设完成后可增加为30天左右; 而日本、德国、法国的石油储备量可分别使用169天、117天和96天。根据近几年国际石油价格持续上涨和我国石油进口剧增的新形势, 我国的石油储备工作从1993年就已经开始酝酿, 自2004年正式得到国务院批复, 预计总投资将超过1000亿元, 准备用15年时间分三期完成。其储量安排大致是: 第一期1000万~1200万t; 第二期2800万t; 第三期2800万t。2007~2008年期间, 大连、黄岛、舟山三大石油储备基地陆续竣工。各大石油储备基地建成后, 总共能形成约10余天消费量的石油战略储备能力, 再加上全国石油系统内部的商用石油储备能力, 我国总的石油储备能力将超过30天。但相比于西方工业国家, 我国的战略石油储备仍然十分有限。综上所述, 我国能源结构的核心问题表现在: 一是能源结构以煤为主, 在我国一次能源生产与消费构成中, 煤炭比例超过2/3(2004年, 原煤占75.6%, 原油占13.5%, 天然气占3.0%, 水电占7.9%); 二是石油安全问题日趋显著, 到2020年, 石油的对外依存度将达到60%, 我国能源安全尤其是石油安全问题越来越突出; 三是煤烟型污染已经给生态环境带来严重问题, 而电力、建材、冶金、化工等能源消费密集的行业又是我国的支柱产业, 它们占大气污染的70%以上。随着经济发展水平的不断提高, 社会对于资源和环境的关注越来越强, 标准越来越高, 继续大量耗费资源和污染环境, 走粗放式工业增长的道路, 已经不可能支撑我国工业的持续发展。我国已出台一系列开发应用新能源的鼓励政策, 积极发展煤制油产业, 使我国油品供应和价格稳定建立在主要依靠国内生产的基础之上; 此外, 高度重视、加快推广煤炭深加工技术、煤炭高效燃烧及先进火力发电技术、煤炭燃烧污染控制与废弃物处理等洁净煤先进技术, 建立高度节约型的循环经济体制, 深入研究、大力开发和利用新能源, 是我国实现和平崛起的唯一选择。

### 1.1.2 我国的可持续发展战略

2006~2010年期间, 我国能源发展取得巨大成就, GDP由209407亿元增加到397983亿元, 年均增长高达13.7%, 相应地, 能源消费总量由25.61亿t标准煤增加到30.94亿t标准煤, 年平均增长率仅为3.9%, 远低于同期经济增长速度。另一组数据显示, 在1980~2000

年的20年间,我国能源发展一是实现了GDP翻两番而能源消费仅翻一番的成就。我国GDP在这20年中,年均增长率高达9.7%,而相应的能源消费量年均仅增长4.6%,远低于同期经济增长速度。二是能源利用效率大幅度提高。一方面,单位GDP能耗不断下降;另一方面,主要高耗能部门的产品单耗有了较大幅度的下降,主要耗能产品的能耗与国际先进水平的差距明显缩小。三是取得了相当大的环境效益。这些成就为我国的经济社会可持续发展做出了巨大贡献,但与世界发达国家相比,我国在新能源利用与开发方面还存在很大差距。

鉴于我国“十一五”规划要求单位GDP能耗比2005年降低20%,又要完成党的十六大提出的全面建设小康社会的目标,实现到2020年我国经济翻两番的历史任务,一个十分引人关注的问题是,我国的能源基础能否支撑经济到2020年比2000年再翻两番!在传统化石类能源不断枯竭的严峻事实面前,建立资源节约型社会、大力开发利用可再生能源、扩大清洁能源在能源结构中的比重,已摆上我国经济发展的重要战略位置。我国可再生能源分布广泛,无论是近期还是远期,因地制宜、就地就近开发可再生能源,将是调整能源结构、保护环境、增强能源安全、实现可持续发展的战略选择。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》要求,到2020年,我国可再生能源在能源结构中的比重,将从2006年的大约7%提高到16%左右。我国具有使用可再生能源的条件和传统,近年来可再生能源的开发和利用取得长足发展,以年均超过25%的增速成为世界能源领域增长最快的亮点。截至2011年,我国水电装机容量达2.3亿kW,居世界第一位。风电装机容量连续5年快速增长,达6236万kW,发展速度大大超出预期,连续五年新增装机容量位居世界第一位,总装机容量居世界第三位,相当于4年前的10倍。我国太阳能光伏电池和热水器产量均居世界第一位。太阳能光伏电池年产量达4011MW,为全球份额的50%。2009年,我国太阳能热水器保有量超过1.45亿 $m^2$ ,与1998年的1500万 $m^2$ 相比,11年间增长了约10倍,居世界第一,占全球使用量的60%以上;全国累计推广户用沼气池近3507.03万座,年产沼气达124.08亿 $m^3$ 。随着技术和管理水平的不断提高、产业规模的不断扩大,可再生能源在保障能源供应、实现可持续发展等方面将发挥越来越重要的作用。此外,2004年制定的《中国能源中长期发展规划》也明确指出,要大力开发水电、积极推进核电建设,鼓励发展风电和生物质能等可再生能源,在提供优质、经济、清洁的终端能源的同时,尽量减少能源开发与利用给生态环境造成的负面影响,促进人与自然的和谐发展。为此,我国将以水电、沼气发电、秸秆发电、太阳能供热等常规清洁能源转换成熟技术和风电、光伏发电、燃料电池、微燃机组热电联产分布供电等具有大规模发展潜力的新技术为重点,因地制宜、多能互补,不断提高可再生能源在我国能源结构中的比重,并使其在解决全国农村的生产、生活用能方面发挥重大作用。在2006年年初,我国正式颁布了《可再生能源法》,陆续出台了一系列鼓励政策与配套措施。这标志着可再生能源的利用已进入法制化、规范化和可持续发展的新阶段,并将迸发超前的活力,为我国能源事业的发展和国民经济与社会事业的繁荣再添辉煌。

## 1.2 能源的分类与基本特征

### 1.2.1 能源的分类

能源是可以直接或通过转换提供给人类所需的有用能的资源。人类利用自己体力以外的

能源是从用火开始的。世界上一切形式的能源的初始来源是核聚变、核裂变、放射线源以及太阳系行星的运行。太阳的热核反应释放出极其巨大的能量，射到地球大气层的辐射能量为174000TW/年，这种辐射实际上为地球和太空提供了用之不竭的能源；太阳的热效应产生风能、水能和海洋能；煤炭、石油、天然气等化石燃料，也是间接来自太阳能；生物质能是植物通过光合作用吸收的太阳能；太阳系行星的运行产生潮汐能。

能源一般是按其形态、特性或转换和利用的层次进行分类，并给予每种或每类能源以专门名称。世界能源理事会（WEC，World Energy Council）推荐的能源分类如下：固体燃料、液体燃料、气体燃料、水力、核能、电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能、核聚变能。能源还可分为一次能源、二次能源和终端能源，可再生能源和非再生能源，新能源和常规能源，商品能源和非商品能源等。

### 1.2.2 能源的基本特征

一次能源是指直接取自自然界未经加工转换的各种能量和资源，它包括原煤、原油、天然气、油页岩、核能、太阳能、水力、风力、波浪能、潮汐能、地热、生物质能和海洋温差能等。一次能源又可以进一步分为可再生能源和非再生能源两大类。可再生能源首先应是清洁能源或绿色能源，它包括太阳能、水力、风力、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等，它们在自然界中是可以循环再生、取之不完、用之不尽的初级资源，对环境无害或危害甚微，且资源分布广泛，适宜就地开发利用，一旦建成不必再有原料的投入。有了可再生能源，人类的文明才有可能世代永续传承。非再生能源包括原煤、原油、天然气、油页岩、核能等，它们是不能再生的，用掉一点，便少一点。

由一次能源经过加工转换以后得到的能源产品称为二次能源，例如电力、蒸汽、煤气、汽油、柴油、重油、液化石油气、酒精、沼气、氢气和焦炭等。二次能源是联系一次能源和能源终端用户的中间纽带，二次能源又可分为“过程性能源”和“含能体能源”。当今电能是应用最为广泛的“过程性能源”；柴油、汽油则是应用最广的“含能体能源”。过程性能源和含能体能源是不能互相替代的，各有自己的应用范围。作为二次能源的电能，可从各种一次能源中生产出来，例如煤炭、石油、天然气、太阳能、风能、水力、潮汐能、地热能、核燃料等均可直接生产电能。而作为二次能源的汽油和柴油等则不然，生产它们几乎完全依靠化石燃料能源。随着化石燃料能源耗量的日益增加，其储量日益减少，终有一天这些资源将要枯竭，这就迫切需要寻找一种不依赖化石燃料的、储量丰富的新的含能体能源。

随着技术过关和经济发展，氢能有可能成为替代柴油、汽油的理想新含能体能源。因为，氢能是取之不尽、用之不竭的高密度能源，氢可以从很多种渠道获得，包括原油、天然气、沼气、农作物秸秆和有机废水，而氢的最大来源是水，氢燃料电池产生的排出物也是水，江河湖海就是最大的氢矿，氢能源的可再生性为人类提供了取之不尽、用之不竭的完美能源。此外，氢能的储运性能好，使用也方便，可转化性优于其他各类能源，安全性也与汽油相当。太阳能、风能、地热、核能、电能等均可转化成氢加以储存、运输或直接应用，氢是一种理想的载能体——含能体能源。随着科技进步，氢能的开发与利用很有发展前途。

终端能源指供给社会生产、非生产和生活中直接用于消费的各种能源。终端能源消费量是指一定时期内社会生产、非生产和生活消费的各种能源，在扣除了用于加工转换成二次能源的损耗及损失量以后的数量。而能源消费总量包括终端能源消费量、能源加工转换过程的

损耗和损失量三部分。

常规能源又称为传统能源。已经大规模开采和广泛利用的煤炭、石油、天然气、水能等能源属于常规能源。商品能源是作为商品经流通环节大量消费的能源。目前，商品能源主要有煤炭、石油、天然气、水电和核电五种。非商品能源主要指枯柴、秸秆等农业废料、人畜粪便等可就地利用的能源。非商品能源在发展中国家农村地区的能源供应中占有很大比重。2003年我国农村居民生活用能源中有56%是非商品能源，到2010年这一数据下降至35%。

### 1.2.3 新能源及主要特征

新能源是指技术上可行，经济上合理，环境和社会可以接受，能确保供应和替代常规化石能源的可持续发展的能源体系。广义化的新能源包含两个方面：①新能源体系，包括可再生能源（风能、太阳能、生物质能、水能、海洋能）和地热能、氢能、核能；②新能源利用技术，包括高效利用能源、资源综合利用、替代能源、节能等新技术。自20世纪90年代以来，由能源紧张带来的“新能源”讨论，早已超出了技术范畴，上升为经济命题。

对于“新能源”的定义长期以来存在着误区，人们对于“新能源”的认识有过于狭义化的趋势。所谓“新能源”包涵着狭义和广义的两层定义，关键是对“新”字的界定对象和理解。“新”与传统的“旧”能源利用方式和能源系统相对立，“新”不仅区别于工业化时代以化石燃料为主的传统能源利用形态，而且区别于旧式的只强调转换端效率，不注重能源需求侧的综合利用效率，只强调经济效益，不注重资源、环境代价的传统能源利用理念。

目前对于新能源的狭义化定义，主要是将新能源局限在可再生能源技术之中。客观地说，仅仅谈可再生能源，而不强调“新”与“旧”的本质区别，会束缚人类的创造性和新能源自身的健康发展。严格地讲，可再生能源不是新的能源体系和能源利用形式，在人类进入工业革命以前，是没有大规模利用化石能源的，我们的祖先自从开始利用火之后，数十万年来就一直在利用自然能（风能、太阳能、水能、地热能）征服和改造世界，是可再生能源一直支撑着人类的文明进程。因此，可再生能源是最古老的能源利用方式，只是今天当人类无法承受化石能源所带来的环境和资源的巨额代价时，才重新赋予可再生能源以“新”的含义，它的新不在于它的形式，而在于它在今天对于环境和资源利用的新的意义。显然，对赋予环境和资源新的意义的能源利用方式，不应该仅仅局限于可再生能源的利用。

为了不断满足日益增强的能源需求，工业时代的基本法则是“规模效益”，生产形态同时强调社会分工的细化。在细化分工之后，要想提高能源的转换效率，唯一的方法就是不断扩大生产规模。这种传统的能源生产利用形态，必然导致企业不断扩大能源转换装置的规模，不断大量消耗能流密度高的化石类燃料资源，同时造成污染物的集中排放。在电力方面的主要表现是“大电网、大电厂、超高压”；在热力行业是追求大型热力厂、大型管网系统等。

传统规模化的能源生产利用形态造成了一系列的问题：①人类面临严峻的化石能源短缺，支撑能源生产规模效益的代价是对高密度化石燃料能源的大规模开采，导致化石类燃料资源日益枯竭，国际石油价格不断升高；②终端能源利用效率无法提高，转换成本加大，输送能源的电网、热网、铁路、管网等都要加大，中间损失自然会增加；③必须大规模利用资源，一方面造成小规模资源被忽略或浪费，另一方面被资源的规模所局限，造成利用资源供应瓶颈；④由于效率无法提高，导致环境污染加剧，特别是集中排放二氧化硫造成酸雨问题和大量排放温室气体导致全球变暖，造成极端气候变化频发，不是酷暑就是严寒，又进一



步加大了能源的消耗,使整个能源系统和生态系统同时陷入恶性循环。因此,人类需要在能源问题上寻找到一条新的出路,需要有多种新的能源转换利用形态,建立多个新的能源供应系统,来解决人类文明的可持续发展问题。这就是广义化的“新能源”。

新的技术必然要替代落后的生产方式,这是不以人们意志为转移的。蒸汽机动力代替牲畜,内燃机代替蒸汽机,新的能源体系和由新技术支撑的能源利用方式,以及新的能源利用理念最终会代替传统的能源利用方式。所以,新能源的关键是针对传统能源利用方式的先进性和替代性。由此分析,广义化的新能源体系主要包含以下几个方面:①高效利用能源;②资源综合利用;③可再生能源;④替代能源;⑤节能。

#### 1.2.4 分布式能源及主要特征

##### 1. 分布式能源

国际分布式能源联盟(WADE, World Alliance for Decentralized Energy)对“分布式能源”给出的定义是,由下列发电系统组成,这些系统能够在消费地点或很近的地方发电,并具有:①高效地利用发电产生的废能生产热和电;②现场端的可再生能源系统;③包括利用现场废气、废热以及多余压差来发电的能源循环利用系统。这些系统就称为分布式能源系统,而不考虑这些项目的规模、燃料或技术,以及该系统是否连接电网等条件。

换言之,分布式能源是一种建在用户端的能源供应方式,既可独立运行,也可并网运行,而无论规模大小、使用什么燃料或应用的技术。分布式能源高效、节能、环保,目前许多发达国家已可以将分布式能源综合利用效率提高到90%以上,大大超过传统能源利用方式的效率。由于这种能源利用方式正处于发展阶段,因此无论是国内还是国外,在概念和名词术语的叙述和采用上尚比较混乱。

新能源利用技术的重要表现形式是分布式能源利用技术。因为,分布式能源技术对能源的利用方式与传统的能源利用存在很大的区别,它不再追求规模效益,而是更加注重资源的合理配置,追求能源利用效率最大化和能效的最优化,充分利用各种资源,就近供电供热,将中间输送损耗降至最低。由于小型化和微型化,使能源需求者可以根据自己对于多种能源的不同需求,设置自己的能源系统,调动了终端能源用户参与提高能源利用效率的积极性。分布式能源可以和终端能源用户的能源需求系统进行协同优化,通过信息技术将供需系统有效衔接,进行多元化的优化整合,在燃气管网、低压电网、热力管网和冷源管网上,以及信息互联网络上实现联机协作,互相支持平衡,构成一个多元化的能源网络,使能源供应与能源的实际需求更加匹配。许多发达国家认为,分布式能源是信息能源系统的核心环节,并称之为第二代能源系统。

目前所谓的分布式发电(电源)通常并非指采用柴油发电机组的紧急备用电源或燃煤的自备小火力发电厂,而是指以天然气、煤层气或沼气为燃料的燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机发电,太阳能光伏发电,以天然气、氢气为燃料的燃料电池发电,生物质能发电,小型风力发电等。由于这种发电技术在效率、能源多样化、环保、节能等多方面的优越性,再加上电力市场化的快速发展进程,使其获得广泛的关注,并在某些方面获得巨大进展(燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机发电等)。随着分布式能源水平的提高,各种分布式电源设备性能不断改进和效率不断提高,分布式发电的成本也在不断降低,分布式能源的应用范围将不断扩大,可以覆盖到包括办公楼、宾馆、商店、饭店、住宅、学校、医院、福利院、疗养院、大