



分布式能源

Distributed Energy

肖 钢 张敏吉 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



分布式能源

Distributed Energy

肖 钢 张敏吉 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大能源. 分布式能源/肖钢,张敏吉编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9
ISBN 978-7-307-16746-9

I. 大… II. ①肖… ②张… III. 能源—普及读物 IV. TK01-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210099 号

责任编辑:刘小娟

责任校对:邓 瑶

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:332 千字

版次:2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16746-9 定价:860.00 元(全九册)

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，

跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的问话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

本套书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术，共包括《中国式低碳》《生物能源》《固体氧化物燃料电池》《二氧化碳》《分布式能源》《天然气水合物》《页岩气》《海洋能》《煤层气》9分册。编者旨在通过本套书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。

丛书主编 肖钢



肖钢博士简介

肖钢，英国皇家化学会院士（FRSC），中国国家“千人计划”特聘专家，美国Case Western Reserve University客座教授，现为能源央企首席科学家。著有《页岩气及其勘探开发》《天然气水合物综论》《新能源经济引领新经济时代》《低碳经济与氢能开发》《大规模化学储能技术》《分布式能源综论》《还碳于地球——碳捕获与封存》《燃料电池技术》《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》等书。作为主要发明人，享有国际及中国授权和受理的专利180余项。



序 言

当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

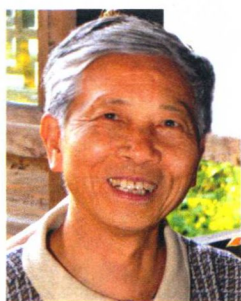
我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设置。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持编著的这套《大能源》也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造了我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。



21世纪是能源革命的世纪，将成为人类社会从物质文明向生态文明演化的变革时代。在物质文明和商业文明大繁荣的今天，人类无法抑制的商品需求和高速增长的生产力，导致了大量能源的消耗，而化石燃料的过度燃烧则造成地球生态环境恶化和全球气候变暖。因此，在有限的资源和严格的环保要求下，如何进一步完善能源利用形式，提高能源利用效率，改善能源产业的环境友好度，解决污染问题，已成为21世纪全球可持续发展战略的关键所在。

时代在进步，能源是基础。进入21世纪以来，无论是中国的“限电”问题，还是世界各地出现的“大停电”事故，都说明人类社会需要一个崭新的能源系统，以确保能源生产和消费的均衡和安全，确保能源利用的高效、合理和公平，最大限度地减少环境污染和温室气体排放，并推动能源结构的调整和新能源的替代。目前来看，能够同时实现上述目标的能源体系，非分布式能源莫属。分布式能源诞生于20世纪70年代，是能源经济、地球环境政策与科学技术进步的综合产物。40年来，分布式能源体系和技术在美国、日本、丹麦、荷兰等诸多个国家落地生根，并得到了长足的发展。分布式能源以其自身独有的特点为世界能源产业带来革命性的改变，不断推动人类社会朝着环境友好、发展可持续的生态文明方向前进。

中国共产党第十八次全国人民代表大会“坚定不移沿着中国特色社会主义道路前进为全面建成小康社会而奋斗”的报告提出了“努力走向社会主义生态文明新时代”的倡议，并要求“把生态文明建设融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展”。以此为契机，分布式能源或将在我国迎来更大的发展机遇；而实现此目标，则需要让我国各行各业的学者、技术人员、管理者、决策者，或者是普通老百姓，都更加熟悉，更加了解，也更加关注分布式能源。

由于较高的能源利用率和供电安全性，可实现按需供能以及为用户提供更多选择，分布式能源已成为全球电力行业和能源产业的重要发展方向。然而在国内，尽管分布式能源潜力巨大，前景美好，但在其发展过程中存在的政策不力、投资无序和缺乏长期整体规划的现状依然明显。在可见的未来，有效的政策引导依然是我国分布式能源发

展的关键，国家法律、政策和规划既决定了分布式能源产业化、商品化、市场化的速度，也决定了分布式能源技术引进、消化、吸收、研发创新的速度，是我国分布式能源发展必不可少的先决条件。

本书作为分布式能源的科普书籍，旨在唤起更多人对分布式能源的关注，提升大家对分布式能源的了解。因此，我们不妨通过这本书，一起来探究各种能源利用和转化技术，剖析国内能源供给系统的现状，借鉴国外分布式能源建设的经验，思考分布式能源的发展方向，共同探讨并实践先进能源体系对生态文明建设的积极作用。

由于本书编者的理论水平和实践经验有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年6月



张敏吉简介

张敏吉，男，汉族，1979年生于上海，籍贯吉林省吉林市。1997年考入北京理工大学自动控制系工业自动化专业，2001年获工学学士学位；后留学澳大利亚攻读硕士，2004年获澳大利亚新南威尔士大学电子与信息学院光伏专业硕士学位。归国后就职于国家发展和改革委员会、全球环境基金、世界银行-中国可再生能源发展项目，主导可再生能源技术进步项目的开发和执行。2008年受聘于中海油新能源投资有限公司，担任光伏技术主管、新能源研究院技术集成和战略研究员，主要从事可再生能源项目开发和新能源战略规划。

目 录

1 能源和能源问题	1
1.1 能源概述	3
1.1.1 能源的定义	3
1.1.2 能源的来源	7
1.1.3 能源的分类	9
1.1.4 能源和人类发展的关系	14
1.1.5 全球能源开发和应用的现状	17
1.2 能源问题综论	22
1.2.1 世界能源问题	22
1.2.2 中国能源问题	22
1.2.3 能源问题解决方案	28
1.2.4 “分”与“合”的哲学思考	32
2 分布式能源解析	37
2.1 分布式能源概述	39
2.1.1 分布式能源的定义	39
2.1.2 分布式能源资源	43
2.1.3 分布式能源系统	54
2.1.4 分布式能源体系	62
2.2 分布式能源的发展和引入	71
2.2.1 分布式能源的起源	72
2.2.2 国外分布式能源的发展	74
2.2.3 我国分布式能源的引入和现状	76
2.3 我国分布式能源的前景	80
2.3.1 我国分布式能源发展的途径	80
2.3.2 我国发展分布式能源的意义	82
2.4 “智能电网”的提出及其发展	92

2.4.1	“智能电网”提出的背景	93
2.4.2	智能电网的起源和演变	96
2.4.3	智能电网和分布式能源的关系	97
2.4.4	智能电网的特征	100
2.4.5	国际智能电网的实践	103
2.4.6	我国智能电网的讨论	104
2.4.7	分布式能源和智能电网的未来	106
3	分布式能源技术	109
3.1	热电联产技术	112
3.1.1	蒸汽轮机	115
3.1.2	往复式发动机	117
3.1.3	燃气轮机	119
3.1.4	微型燃气轮机	121
3.1.5	燃料电池	130
3.1.6	热泵	140
3.2	可再生能源发电技术	150
3.2.1	太阳能发电	150
3.2.2	风力发电	194
3.2.3	生物质能发电	211
3.2.4	水力发电	230
3.2.5	海洋能发电	246
3.2.6	地热能发电	260
	参考文献	267

1 能源和能源问题

当今世界，能源供需间的矛盾，能源利用和环境保护间的矛盾，以及能源安全问题，已成为全人类共同关心的焦点问题。这些问题能否有效解决，已成为维持我国经济可持续发展的关键性课题。能源问题的解决方向国际上公认是以“智能电网”为代表的智能化能源供给体系，切实可行的解决方案就是分布式能源。



1.1 能源概述

能源是人类生存的物质基础。从某种意义上讲,人类文明的发源和发展都源自对能源和先进能源技术的利用。当今世界,能源供需间的矛盾,能源利用和环境保护间的矛盾,以及能源安全问题,已成为全人类共同关心的焦点问题。这些问题能否有效解决,已成为维持我国经济可持续发展的关键性课题。

1.1.1 能源的定义

1973年和1978年两次世界性的“石油危机”,及其衍生的全球大范围的经济衰退,令“能源”一词深入人心。此后30年里,在相对稳定的能源供给条件下,世界经济取得了较大和较快的发展;然而,在利用能源推动经济发展、社会进步的同时,人们也遇到了一系列无法回避的能源安全、能源短缺,以及能源过度使用造成的环境污染等棘手问题。国际上,能源政策已经从国家层面,被提升到区域甚至全球高度;而在我国,能源保障体系也成为关乎我国复兴之路的一条名副其实的“龙脉”。

那么,究竟什么是“能源”?怎样描述?如何定义这种战略资源?事实上,国内外文献中对于“能源”的描述非常丰富。例如:

- ① 世界能源大会(WEC)认为:“能源是使系统能够产生对外部活动的能力”;
- ② 《科学技术百科全书》说:“能源是可从其获得热、光和动力之类能量的资源”;
- ③ 《大英百科全书》说:“能源是一个包括着所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量”;
- ④ 《日本大百科全书》说:“在各种生产活动中,我们利用热能、机械能、光能、电能等来做功,可利用来作为这些能量源泉的自然界中的各种载体,称为能源”;
- ⑤ 我国《能源百科全书》说:“能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源”;
- ⑥ 《2006 节能手册》的定义为:“能源是可以直接或通过转换提供人类所需的有用的资源”。

归纳总结上述描述,我们大致可以概括出“能源”的定义:能源是自然界中对人类有利用价值,并可以通过一定转换技术获取的能量及其载体。

该定义包括几个要素,而这些要素也是判断一种资源能否被称为“能源”的主要依据:

首先,能源包含两层含义:“能”和“源”,既囊括了人类需要的能量,又包括承载这些能量的物质资源;

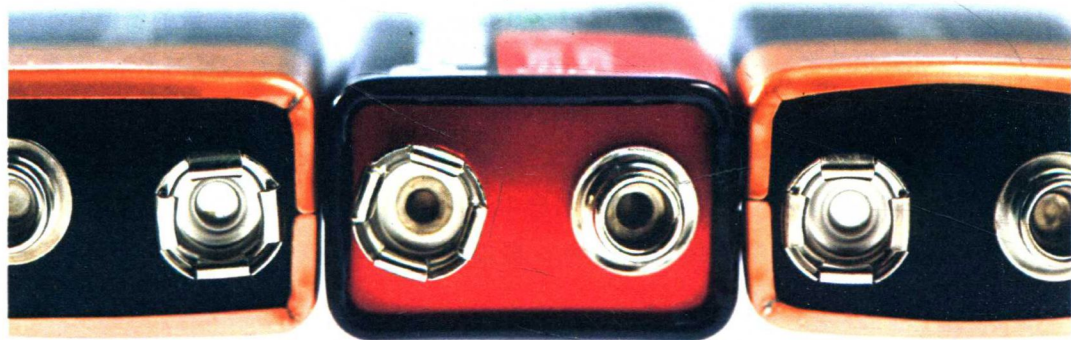
其次,这些能量和物质资源应该是自然界中天然存在的物质,不包括经过工业加工的人造物品;

再次,这些资源所包含的能量必须是人类需要的,存在利用价值,并可以满足人类的特定用途;

最后,这些能量的获取和转化,可以通过人类现有的技术手段加以实现。

1.1.1.1 电池是能源么?

以上述几点作为判断依据,我们不难看出,任何形式的电池都不是能源,因为电池虽然拥有载体,蓄有能量,有利用价值,也可以通过技术手段加以提取转化,但并非天然物质,不是能量的自然载体,所以我们通常称之为“电源”,而不会称之为“能源”。非但电池不是能源,“电”本身也不是能源,人类使用的电力并非取之天然;与之类似,经过工业加工的汽油、柴油、酒精、清洁煤等这类人造的“燃油”和“燃料”,虽然经常被称为“二次能源”,但其本质上与能源也是有区别的。习惯上,我们通常在讨论“能源储量”和“能源结构”时,完全不考虑“二次能源”;而在谈及“能源供给”和“能源安全”时,又将能源与之混为一谈,这些约定俗成的说法,下文中就不再一一解释。



1.1.1.2 粮食是能源么?

这个问题,我们必须从两个角度去思考。首先,粮食作为食物,并非通过技术手段提取、转化,并利用的,而是凭借人类自身的消化循环系统吸收,通过人类的本能而非技能获取,那么就不能称之为“能源”,就像我们并不把“人力资源”称为“人力能源”。但换一个思路,如果食物被当做原料,通过化学手段来制造乙醇或其他生物质燃料,甚至直接用来燃烧,在这种情况下,粮食就当被认为是一种最原始的能源——生物质能。生物质能源是人类最先掌握的一种能源,其利用广泛且历史悠久。由于我国人口众多,耕地有限,而粮食又是保证人民日常生活和国家安全的重要战略物资,其价格对国民经济更有着重大的影响,所以我国政府并不允许将粮食作为“能源”来加工利用。



1.1.1.3 雷电是能源么？

雷电并非能源，因为其利用价值低下。通常我们观察到的雷电(图 1-1)，其峰值功率可达 10 亿千瓦，远远超过世界上任何一个发电厂的功率，即使三峡水电站，其总装机功率也只有 1820 万千瓦。但事实上，雷电的能量非常有限，毕竟单次雷电持续时间一般只有 0.2 s 左右，而峰值时间就更短了，只有 μs 级，所以人们形象地称之为“闪电”。就是因为它一闪而逝的特性，雷电的价值就大大降低了，更何况雷电的发生存在地域性、季节性和随机性，这共同决定了雷电目前尚不具备作为“能源”所应有的利用价值。如果有朝一日人类能够大规模地对自然雷电进行控制，并从中获取电力，则雷电也将成为一种可再生能源。



图 1-1 日常生活中观察到的雷电

1.1.1.4 静电是能源么？

与雷电相似，静电也是人们在日常生活中随处可见的一种电磁能释放现象(图 1-2)。在冬天的夜里，我们脱下毛衣时可以听见劈啪声；而干燥的环境下，梳过头发的梳子则可以吸引纸屑，这都是静电在作怪。与雷电不同，静电是可以被利用的。借助静电产生的静电场，人们已经实现了对静电的广泛利用，比如静电场使悬浮的尘粒带电而被吸附，并使之分离出来然后去除，这就是静电除尘；而利用静电场的吸附作用将染料微粒涂敷在金属物体上，然后通过烘烤形成均匀的涂层，则被称为静电喷涂。其他诸如静电分选、静电纺纱、静电植绒、静电复印……这些都是不同工业领域对静电场的巧妙应用。但在这些应用中，我们并不从静电中提取转化能量，反而要消耗能量，所以不能称其为能源。随着科学技术发展，能量提取、转化手段的进步，不排除“静电”在未来成为一种崭新能源的可能性。