



电气工程新技术丛书



能源互联网 与能源转换技术

Energy Internet and Energy Conversion

孙秋野 马大中 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气工程新技术丛书

能源互联网与能源转换技术

孙秋野 马大中 编著



机械工业出版社

本书结合能源发展历程,在能源转换、存储和传输技术的基础上,针对世界能源发展面临的严峻考验,对一种新型网络结构——能源互联网进行了研究;在对能源互联网的概念、特点、结构以及能源互联网中的能源类型进行详尽介绍的同时,提出了能源互联网中的一种新的能源接入模式——自能源;并且阐述了能量的标度与梯级利用、多能源转换路由器的框架与运行模式以及能源互联网电力电子化的相关技术;还详细介绍了能源互联网中的电能转换、热能转换、其他能源相互转换以及相关能量存储与传输技术。

本书可供电力企业、制造商和从事能源互联网研究和应用的人员参考,也可作为高等院校师生学习能源互联网的参考书,以及有兴趣的读者了解能源互联网相关技术的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

能源互联网与能源转换技术/孙秋野,马大中编著. —北京:机械工业出版社,2017.1

(电气工程新技术丛书)

ISBN 978-7-111-55565-0

I. ①能… II. ①孙… ②马… III. ①互联网络-应用-能源发展-研究 ②能量转换-研究 IV. ①F407.2-39 ②TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第294868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:汤枫 责任编辑:汤枫

责任校对:张艳霞 责任印制:李飞

北京振兴源印务有限公司印刷

2017年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13印张·306千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55565-0

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

服务咨询热线:(010) 88361066

读者购书热线:(010) 68326294

(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

出版说明

近年来，电气工程领域的研究有了长足的发展，为促进电气工程学科的发展和人才培养，现机械工业出版社会同全国在电气工程领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校及科研机构，组成阵容强大的编委会，组织长期从事科研和教学的学者编写这套学术水平高、学科内容新、具备一定规模的电气工程新技术丛书，并将陆续出版。

这套丛书力求做到：学术水平高、学科内容新，能够反映国内外电气工程研究领域的最新成果和进展，具有科学性、准确性、权威性、前沿性和先进性；选题覆盖面广、深度适中，不仅体现电气工程领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套丛书的选题是开放式的。随着电气工程学科日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套丛书及时反映电气工程领域的新发展和新技术。我们也欢迎在电气工程领域中有丰富科研经验的教师及科技人员积极参与这项工作。

由于电气工程领域发展迅速，而且涉及面非常宽，所以这套丛书的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚请各位老师和专家提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

《电气工程新技术丛书》编委会

主 编：严陆光（中国科学院电工研究所）

副主编：李华德（北京科技大学）

编 委（按姓名拼音排序）：

薄志谦（许继集团有限公司）

董朝阳（南方电网科学研究院）

干永革（中冶赛迪电气技术有限公司）

何怡刚（合肥工业大学）

金建勋（天津大学）

李欣然（湖南大学）

阮新波（南京航空航天大学）

孙秋野（东北大学）

唐跃进（华中科技大学）

王志新（上海交通大学）

肖登明（上海交通大学）

熊小伏（重庆大学）

张 波（华南理工大学）

张承慧（山东大学）

张晓星（武汉大学）

程 明（东南大学）

范 瑜（北京交通大学）

戈宝军（哈尔滨理工大学）

江道灼（浙江大学）

李 鹏（华北电力大学）

马小亮（天津电气科学研究院）

舒 彬（北京电力经济技术研究院）

汤 涌（中国电力科学研究院）

王建华（西安交通大学）

伍小杰（中国矿业大学）

肖立业（中国科学院电工研究所）

袁 越（河海大学）

张潮海（国网电力科学研究院）

张道农（华北电力设计院有限公司）

赵争鸣（清华大学）

前 言

能源是社会经济发展的原动力，是人类赖以生存的重要物质基础。人类对能源的利用，从薪柴时代到以化石能源为主的煤炭时代、油气时代、电气时代，再到以风力、太阳能、水能、生物质能等为代表的清洁能源时代，每一次变迁都伴随着人类文明的重大进步和社会经济生产力的巨大飞跃。社会发展及科技进步使得人类对能源的依赖程度越来越高，因此以第三次工业革命为契机，建立安全高效、经济环保的新型能源供应模式成为人类社会可持续发展过程中面临的巨大挑战。

借鉴互联网信息自由传输、开放共享的理念，能源行业的从业者们提出要建设一个开放互联、交互共享、经济-信息-能源一体化的新型环保能源网络，以实现能源低碳化生产与消费，保证能源的可持续发展。能源互联网应运而生，并迅速引起了世界各国能源及相关行业的广泛关注。人们试图从社会、环境、经济、技术等众多方面对其进行解读。然而，能源互联网的定义究竟是什么？能源的互联是不是就是能源互联网？或者是能源与互联网结合？还仅仅是所谓的智能电网 2.0？也许，这些都说出了能源互联网的部分特征，但是，并不是能源互联网的全部。作者认为，能源互联网是借鉴互联网的理念与思维，通过多种能源传输媒介，构成多类型能源对接接入的高复杂度网络，深度融合信息与能源，实现网络内信息与能源开放共享、多类型能源高效环保利用的新型能源生产、传输、消费网络。

既然互联网与能源互联网之间有着千丝万缕的联系，那么能源互联网是否继承了互联网的全部特征？如果我们要将能源互联网与互联网等价，或者说进行类比，那么至少要解决如下三个问题：

1. 互联网中任何一点公开信息都可以被全网获得，能源互联网可以吗？
2. 互联网中信息可以被无限复制与存储，能源互联网可以吗？
3. 互联网中任何一个用户都可能是信息的发布者与接收者，能源互联网可以吗？

为了更好地回答上述三个问题，本书首次给出了“自能源”的概念，并围绕这一概念，对能源互联网及其能源转换过程进行解读。

所谓“自能源”（We Energy），是指具有互补性、开放性、区域化的能源生产和传输者，在能源互联网中以先进的信息通信技术、电力变换技术、自动控制技术为手段，将个体生产的能源向能源互联网内特定的大多数或者单个用户传输的规范性或非规范性能源的新型能源生产、存储和消费者的总称。“自能源”主体可以是拥有分布式发电、储能、冷热电联产等能源生产或者存储设备的个人、企业或者是一个社区等。

自能源主体位于信息网络与能源网络底层，可从能源总线吸收能源，也可为其提供能源，同时在能源互联网中提供能源转换功能。传统能源供应商、电商平台、其他能源运营商作为网络中的高层阶级，根据其运营性质可为能源互联网提供能源、交易平台或从网络中消费能源。自能源有别于由传统能源供应商主导的能源接入模式，它是由普通能源用户自下而上主导的能源交互活动，由传统的“点到面”的能源传输，转换为一种“点到点”的对等

的能源传输理念。自能源具有源荷协调、多能互补、对等接入、能源-信息-经济耦合、即插即用等重要特性。自能源将有助于完成能源的高效利用,实现传统的能源从垂直调度向分布式协调发展,完成人类社会从化石能源向可再生能源的过渡,从而最终进入能源的零边际成本时代。

不知不觉间,能源互联网已经从不为人知到被广泛关注,从仅仅是一个概念到涌现了各种相关的技术及运营模式,但是,如何真正地实现能源互联网的落地,还需要技术、经济、政策等全方位的努力。而这其中,如何能让更多的科研人员、能源用户了解能源互联网,认识到自己在能源互联网中的位置,推动更多自能源主体的产生和并网,成为能源互联网能够顺利落地的关键影响因素。几年来,作者在参加的各类能源互联网论坛、报告、会议中一直极力推进相关的工作。因此,在本书中,作者试图抛开繁杂的公式推导和复杂的系统分析,力争用更为通俗易懂的语言、图文并茂的形式,以一种更直观的方式将能源互联网立体地展现在读者面前。涉及的更多技术环节,有兴趣的读者也可以参阅作者的另一本关于能源互联网的作品(参考文献[1])。

本书分为上下两篇,上篇包括第1~4章,主要站在能源互联及其综合利用的角度介绍了能源互联网的结构特征、自能源的来源与在能源互联网中起到的作用、能的标度及梯级利用,以及多能源转换的枢纽装置;下篇包括5~9章,主要是关注各类具体能源之间的转换关系,分别介绍了能源互联网的电力电子化趋势及关键技术、多种能源之间的转换技术以及能源的存储与传输技术。

能源互联网作为一个包含多种能源类型,能源、设备、信息、经济高度耦合的复杂网络,其涉及学科门类之多,融合之紧密,都是前所未有的,需要从一个全新的视角去看待。本书首次从电气、热能、信息等多个角度试图较为立体的刻画能源互联网的特性,希望能为读者提供一点借鉴。

在本书的成稿过程中,得到了众多朋友、同事的帮助,感谢刘振伟博士、黄博南博士在本书的成稿过程中提出了很多中肯的意见,博士研究生李宇阳、胡旌伟、王睿,硕士研究生张宁、陈月、程启富、高子昊、赵美伊也为本书的完成付出了很多,在此一并感谢。同时,我也要感谢众多的能源互联网研究者们,正是站在他们的“肩膀”上,才能让我顺利地完成本书。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索。”以此为结语,送给所有为能源互联网发展努力的同仁。

作者

目 录

出版说明

《电气工程新技术丛书》编委会

前言

第 1 章 能源与能源互联网	1
1.1 能源的发展与现状	1
1.1.1 能源的发展	1
1.1.2 世界能源现状	2
1.1.3 中国能源现状	4
1.2 能源转换技术	6
1.3 能源存储与传输	7
1.4 能源互联网的提出.....	13
1.4.1 能源互联网的基本定义	14
1.4.2 能源互联网的特点	16
1.5 能源互联网的能源类型.....	18
1.6 能源互联网的系统结构.....	19
1.7 能源互联网的网络结构.....	21
1.7.1 电能网络	22
1.7.2 交通网络	23
1.7.3 热能网络	24
1.7.4 新能源网络	26
1.7.5 石化网络	26
1.8 能源互联网的通信结构.....	26
1.8.1 能源互联网中的软件结构	27
1.8.2 能源互联网的标准协议	29
1.9 本章小结.....	30
第 2 章 自能源	31
2.1 自能源的概念与结构.....	31
2.2 自能源的信息物理系统.....	34
2.2.1 自能源的信息物理特性	34
2.2.2 相互依存的信息物理网络	34
2.2.3 两层网络级联失效分析	36
2.3 自能源的能量管理与协调控制.....	37
2.3.1 自能源的能量管理	37

2.3.2	自能源的协调控制	39
2.4	自能源与能源市场	43
2.4.1	能源市场的交易机制	43
2.4.2	自能源的交易策略	44
2.5	本章小结	45
第3章	能量的标度与梯级利用	46
3.1	相关定义与定律	46
3.2	能量的标度	47
3.2.1	能量的性质	47
3.2.2	能量的单位	48
3.3	能量的量与质	49
3.3.1	能量的平衡方程	49
3.3.2	焓的平衡方程	50
3.3.3	EUD 图像焓分析方法	51
3.4	能源的特点	52
3.4.1	一次能源	52
3.4.2	二次能源	54
3.5	能源的梯级利用	55
3.5.1	物理能综合梯级利用	55
3.5.2	余热锅炉型联合循环	57
3.5.3	排气全燃型联合循环	58
3.5.4	化学能和物理能综合梯级利用	59
3.6	总能系统的全息特性	62
3.6.1	总能系统全息特性与全工况特性概念	62
3.6.2	总能系统全息特性的性能指标	63
3.7	本章小结	65
第4章	多能源转换路由器	66
4.1	能源路由器总述	66
4.2	电力能源路由器	67
4.2.1	电力能源路由器的总体框架	67
4.2.2	电力能源路由器的运行模式	69
4.2.3	电力能源路由器的功能需求	69
4.3	能源路由器中多能源网络接入	71
4.4	多能源转换路由器——能量枢纽	75
4.4.1	能量枢纽的模型	76
4.4.2	储能装置建模	78
4.4.3	能量枢纽的价值分析	80
4.4.4	基于能量枢纽的多能源系统优化规划与优化运行	80

4.5	本章小结	82
第5章	能源互联网的电力电子化	83
5.1	能源互联网与电力电子技术	83
5.2	AC-DC 整流器	84
5.2.1	不控整流器	84
5.2.2	PWM 整流器	86
5.2.3	PWM 整流器的数学模型	88
5.2.4	PWM 整流器的控制策略	90
5.3	DC-DC 变换器	93
5.3.1	非隔离型电路	94
5.3.2	隔离型电路	95
5.3.3	双向 Buck-Boost 变换器	96
5.4	DC-AC 逆变器	98
5.4.1	现有逆变器分类	98
5.4.2	逆变器的拓扑结构	99
5.4.3	不同类型逆变器的典型控制策略	100
5.4.4	并网逆变器的锁相环	105
5.5	AC-AC 变流器	106
5.5.1	双 PWM 变频器	106
5.5.2	固态变压器	108
5.6	本章小结	113
第6章	能源转换中的电能转换	114
6.1	风力发电	114
6.1.1	风力发电概述	114
6.1.2	风力发电系统	115
6.1.3	风力发电系统的并网与控制	116
6.1.4	新型风力发电技术	118
6.1.5	风能在能源互联网中的地位	120
6.2	太阳能发电	120
6.2.1	太阳能发电概述	120
6.2.2	太阳能光伏发电	121
6.2.3	太阳能热发电	123
6.2.4	太阳能在能源互联网中的地位	124
6.3	生物质发电	124
6.3.1	生物质发电概述	124
6.3.2	沼气发电	126
6.3.3	生物质发电的并网	126
6.3.4	生物质能在能源互联网中的地位	127
6.4	燃气发电	127

6.4.1	燃气发电概述	127
6.4.2	燃气发电机	128
6.4.3	微型燃气轮机发电系统	128
6.4.4	天然气在能源互联网中的地位	129
6.5	水力发电	129
6.5.1	水力发电概述	129
6.5.2	水力发电站	129
6.5.3	水力发电机组	130
6.5.4	水轮机调速器系统	131
6.5.5	水能在能源互联网中的地位	132
6.6	火力发电	132
6.6.1	火力发电概述	133
6.6.2	火力发电厂	133
6.6.3	汽轮机	134
6.6.4	供热式汽轮机	135
6.6.5	余热发电技术	136
6.6.6	火力发电的发展方向	137
6.7	其他能源发电	137
6.7.1	地热能发电	137
6.7.2	核能发电与应用技术	138
6.7.3	潮汐能发电与应用技术	138
6.8	本章小结	139
第7章	能源转换中的热能转换	140
7.1	地热能	140
7.1.1	浅层地热能利用	140
7.1.2	深层地热能的特点与利用	144
7.2	余热能	145
7.2.1	工业余热能简介	145
7.2.2	工业余热利用技术	145
7.3	热泵技术	148
7.3.1	空气源热泵系统	148
7.3.2	水源热泵系统	149
7.3.3	地源热泵系统	149
7.3.4	太阳能/空气双源热泵系统	149
7.3.5	水环热泵空调系统	151
7.3.6	高温热泵技术	151
7.4	热电联产技术	153
7.5	本章小结	157

第 8 章 能源互联网中的其他能源相互转换	158
8.1 源头蓄能	158
8.2 冗余电能转换	159
8.2.1 非并网风电理论	160
8.2.2 非并网风电海水淡化技术	161
8.3 可再生能源间的相互转换	163
8.3.1 水电解制氢	164
8.3.2 生物质制氢	165
8.3.3 太阳能制氢	167
8.3.4 等离子化学法制氢	168
8.4 可再生能源制化石能源	170
8.4.1 新能源制煤	170
8.4.2 新能源制油	172
8.4.3 新能源制气	176
8.5 本章小结	178
第 9 章 能量存储与传输技术	179
9.1 能量存储技术	179
9.1.1 蓄电池储能	180
9.1.2 超级电容器储能	182
9.1.3 压缩空气储能	183
9.1.4 飞轮储能	184
9.1.5 抽水蓄能	185
9.1.6 热能存储	185
9.1.7 氢储能	186
9.2 储能技术在能源互联网中的作用	187
9.2.1 电网调峰调频	187
9.2.2 支撑高比例可再生能源发电电网的运行	188
9.2.3 电质量与可靠性	189
9.2.4 社区或家庭备用电源	189
9.2.5 微网储能	189
9.2.6 电动汽车	190
9.3 能量传输技术	190
9.3.1 交流电能传输	191
9.3.2 直流电能传输	192
9.3.3 无线电能传输	192
9.3.4 热传输	193
9.4 其他形式的能量存储与传输	193
9.5 本章小结	194
参考文献	195

第1章 能源与能源互联网

能源是整个世界经济发展的基础，没有能源，人类社会将失去前进的动力。纵观人类发展史，人类社会的不断进步与能源的开发利用是息息相关的。能源结构的变革离不开科技的发展，而经济的发展离不开能源的支持，三者之间相互促进，同时也相互制约。从社会的可持续发展战略来看，开发利用可再生能源替代传统化石能源是人类能源结构调整及可持续发展的重要方向。为了促进各种能源之间更好地转换、使用，提高能源的利用效率，现有的电网结构已远不能满足需求。为了解决这一迫在眉睫的问题，人们开始探索一种新型的能源网络结构——能源互联网。能源互联网是以互联网理念构建的新型经济、信息、能源三者融合的“广域网”，它以大电网为“主干网”，以开放、对等的经济-信息-能源一体化的架构，真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用，可以最大限度地适应新能源的接入。在能源互联网中，能量可在电能、化学能、热能等多种形式间相互转换，而电力系统是各类能源转换的枢纽，将承担核心的能量转换作用。能源互联网是“互联网+”在能源领域的一次实践，将推动能源网络的换代升级。本章结合能源发展，在能源转换、存储和传输技术的基础上，介绍一种新型网络结构，并对其概念、特点、结构以及其中的能源类型做了详尽的介绍。

1.1 能源的发展与现状

1.1.1 能源的发展

钻木取火是人类在能源转换方面最早的一次技术革命，它开启了以柴薪为主要能源的时代，是人类第一次能源革命，在英国发明家、第一次工业革命代表人物詹姆斯·瓦特改良蒸汽机以前，都被称为“柴薪时代”。“柴薪时代”是环境与人类和谐共处的友善时代，但经济发展水平低下，作为生物燃料的柴薪不但能满足人们生产和生活的需要，也不破坏环境。瓦特的蒸汽机改良推动了世界经济发展，煤炭大量涌入能源市场，那时煤炭具有最高的经济价值，称为“煤炭时代”。煤炭激励了工业发展，同时也造成环境污染。

17世纪的荷兰曾取得了远高于同时期其他大国的经济成就，这是依赖于荷兰蕴藏着大量可供开采的泥炭资源。美国环境史学者约翰·R·麦克尼尔认为，荷兰成本低廉的泥炭为石灰烧制和啤酒酿造这两个行业的发展提供了非常便利的基础，使荷兰成为世界上能源最密集的经济体，并且在18世纪的工业化程度和城市化程度均为当时全球最高。

到19世纪中叶，波兰药剂师依格纳茨·卢卡西维茨发现了更易从石油中提取煤油的方法，并于1854年在波兰罗斯诺市附近开掘了世界上第一口油井，称为博布尔卡油矿场。19世纪石油工业发展缓慢，20世纪初随着内燃机的发明，全球的主要能源开始从煤炭变成了石油。由于石油在烃类的价值层次最高，使石油轻易排挤了煤炭，能源很快进入“石油时代”，而这个时代的杰出代表国家便是美国。在20世纪初，美国正是依靠石

油，建设了自己的第二个全国运输体系——公路 + 小汽车和卡车。而此运输体系的建成促进了美国经济的进一步发展，所以美国经济的繁荣在很大程度上是建立在石油以及围绕石油建立起来的基础设施和运输体系的基础上的。在这个意义上，我们可以说，美国从二战至今一直保持着世界超级大国的地位，依靠的是石油提供的能源优势。至 20 世纪 90 年代，美国通过两次海湾战争控制了世界上重要的石油资源产地和运输通道，从中东、拉美等产油国获取了大量石油，从而推动其经济迅速发展，成为世界唯一的超级大国。如今，由于化石能源的枯竭问题，美国已提出了一项关于替代能源的国家安全议题，其目的为降低美国对外国石油的依赖。关于替代能源，从能源的化学结构来考虑，氢含量越高，热值也越高。木材的氢碳原子比为 1:10，其质量能量密度为 16.2 MJ/kg；煤的氢碳原子比为 1:1，其质量能量密度为 24 MJ/kg；汽油的氢碳原子比约 2:1，其质量能量密度为 44.4 MJ/kg；甲烷的氢碳原子比最高，为 4:1，其总热值为 54 MJ/kg，比木材、煤和石油都高。正是此性质，人们把天然气作为高效的燃料来使用，而进入“氢能时代”。

从能源利用的发展进程中可看出，人类为生存发展，通过劳动不断从生态系统中获取物质、能量，使人类社会逐渐成为一个完整的系统，科技的进步使人类获取物质、能量的能力大大增加，输入系统的负熵的绝对值远大于系统内的熵增，推动人类社会向复杂有序的方向演化。从人类社会的能源演变状态来看便是：柴薪时期、煤炭时期、石油时期，从人类社会的经济形态演变为：渔猎社会、农耕社会、工业社会。自从人类进入工业社会后，人类在自我中心主义的支配下，大肆侵占以化石能源为主的不可再生能源，无节制地消耗能源，使人类社会系统内的熵增指数增加，最终人类社会乃至整个生态系统进入高熵状态。高熵社会无视原有生态秩序，加速物种灭绝速度，改善生态环境，引发生态危机，严重威胁人类的生存状态。为了回归低熵状态，新能源正逐渐变更人类社会能源的基础，取代以化石能源为主体的不可再生能源，使能源发展从高熵到低熵，从高碳到低碳，最终达到清洁能源的目的。

1.1.2 世界能源现状

近些年来，能源消费结构已经发生翻天覆地的变化，美国、中国和印度成为世界上能源消费最大的国家，其能源的消耗对世界产生重大影响。

1. 能源储量与分布

目前世界十大石油生产国中已经有一半是非欧佩克国家，至 2015 年底，世界石油探明储量为 1.6976 万亿桶^①，足以满足 50.7 年的全球生产需要，其中，中南美洲的储产比仍为全球最高。在过去的十年中，世界石油探明储量上调 24%。在煤炭资源方面，2015 年底，世界已探明煤炭储量为 8915.31 亿 t，美国、俄罗斯、中国、澳大利亚、印度和德国是世界前六大煤炭资源国，六国合计占世界煤炭资源的 76.9%。根据最新的数据，截至 2015 年底，全球天然气探明储量为 186.9 万亿 m³，足以保证 52.8 年的生产需要。伊朗为世界第一大天然气资源大国。在生产领域，美国为世界上最大的天然气生产国。

非化石能源中，核能发电总装机容量逐年增加，至 2015 年底，全球可运行的核电反应

^① 桶为常见的原油数量单位，1 桶折合约 158.98 L。

堆有 437 个，总装机容量 3.802 亿 kW。从地区分布来看，北美、欧洲和远东仍是核电利用的主要地区。水电发展因地制宜，北美和欧洲等地区的发达国家的发展重点转移到对已建水电站的更新改造，亚洲、南美等地区的多数发展中国家制定了发展规划，而非洲等地区的欠发达国家，因资金、技术等条件限制，水电开发仍面临诸多困难。风电在欧美发展步伐放缓，但在亚洲各国迅速推进。2015 年，欧盟风力发电装机容量达到了 141.6 GW。但因欧洲国家主权债务危机和全球经济不景气的影响，未来几年风机在欧美的需求会保持在一个稳定的水平上；在亚洲，2015 年，中国新增装机容量为 30.5 GW，累计装机容量为 432.419 GW，新增装机和累计装机两项数据均居世界第一。

2. 能源消费

2015 年，全球一次能源消费仅增长 1.0%，与其 2014 年低于世界平均值的增长（1.1%）相似，远低于十年平均值 1.9%。新兴经济体在全球能源需求仍占主导地位。2015 年，新兴经济体的能源消费占全球消费增长 97%。中国的一次能源消费增长率为 1.5%，为全球最大增长量，保持连续 15 年世界一次能源消费第一。俄罗斯的一次能源消费减量最大。

（1）化石能源消费

目前，世界能源消费逐渐向新兴经济体转移，新兴经济体现占全球能源消费的 58.1%。而欧盟国家，随着其经济发展到一定程度，一些国家能源需求量逐渐下降。2015 年，世界对石油能源的需求量上升了 1.9%，世界的石油总开采较 2014 年提高了 3.2%。在煤炭消费方面，亚太地区是煤炭需求量最大的区域。天然气消费方面，全球天然气消费增长 1.7%，全球天然气占一次能源消费的 23.8%，就新兴经济体而言，伊朗和中国的天然气消费增量最为显著，分别为 6.2% 和 4.7%。欧盟的天然气消费达到 1999 年以来最低水平，印度消费下滑最多，为 12.2%。表 1.1 所示为各地区化石能源消费情况，从表中可以看出，美洲、亚太、欧洲及欧亚大陆对石油的依赖性较大。总体来说，从 2014 年到 2015 年，各区域石油消费变化不大，除亚太地区外，其他区域石油消耗量均有下降趋势。

表 1.1 各地区化石能源消费情况（%）

能源类型	年 份	中 东	非 洲	美 洲	亚 太	欧洲及欧亚大陆
石油	2014	9.8	4.2	31.9	33.9	20.2
	2015	9.8	4.2	31.4	34.7	19.9
天然气	2014	13.5	3.7	33.0	20.4	29.4
	2015	14.1	3.9	33.1	20.1	28.8
煤炭	2014	0.3	2.6	12.3	71.4	13.4
	2015	0.3	2.5	12.2	72.9	12.2

（2）非化石能源

近年来，随着化石能源枯竭，污染日益加重，世界各国对可再生能源发展越来越加以关注，可再生能源发展得到了全世界范围的大力支持。在 2015 年，全球可再生能源消费（主

要以分布式发电为主) 占总能源消费的 2.8%，而 10 年前仅为 0.8%。在全球范围内，风能消费比 2014 年增加了 17.4%，再次占据了超过一半的可再生能源发电的增长；太阳能发电量增长 32.6%，中国已超过德国和美国，成为世界最大的太阳能发电国；核能发电占全球一次能源消费的 4.4%。全球核能发电量增长 1.3%，所有净增长均来自于中国 (28.9%) 的贡献。中国超越韩国成为核电第四大生产国，而欧盟发电量 (-2.2%) 则跌至 1992 年以来的最低水平；水力发电量占全球一次能源消费的 6.8%。尽管非化石能源的消费比例日益增加，但相比化石能源的消耗还不能明显地缓解世界能源困境和环境困境，目前电动汽车和太阳能充电桩处于研究推广阶段，而其他能源转换技术处于一个小范围的试点阶段，其容量还不足以支撑人们的日常生活，而一些大型的风电场在夜晚出力较大的特性，使其与传统电网发电相矛盾，目前还没有良好的解决办法。因此，要让非化石能源真正进入人类的能源发展史，还需要一个更加宽广的应用平台。

1.1.3 中国能源现状

1. 能源的储备与分布

我国是富煤贫油少气的国家，长期以煤炭为主要能源，其能源分布有北多南少、西多东少、高集中度的特点。截至 2015 年底，中国查明剩余煤炭可采储量为 1145 亿 t。我国石油分布较为集中，而目前估计石油可采资源储量为 25 亿 t。天然气资源较为贫乏，天然气资源集中分布在中、西部地区，截至 2015 年底可采资源量为 3.8 万亿 m^3 。而我国的可再生能源中，水力资源蕴藏量可观，随着技术进步，大型水电机组国产化技术必将成熟，水利资源将成为重要能源补充。在 2015 年中，我国水电消费量为 11263 亿 $kW \cdot h$ (254.9 百万吨油当量 (toe))，比 2014 年增加 5.0%，占世界水电消费的 28.5%；核电消费量为 1705 亿 $kW \cdot h$ (3860 万 toe)，比 2014 年增加 28.9%，占世界核电消费的 6.6%。我国已在永久冻土区成功获取“可燃冰”，是世界上第三冻土大国，冻土区总面积达 215 万 km^2 ，具备良好的天然气水合物存储条件和资源前景。相信在十年内，可燃冰的勘探理论与开发技术会得到大突破，成为替代煤炭、石油的重要能源。我国风能资源丰富，内陆地区如内蒙古、甘肃北部、新疆北部、东南沿海及其附近岛屿都是风资源丰富区，我国可开发利用的风能资源总量为 $1 \times 10^9 t/a$ 。而太阳能，我国 2/3 地区日照小时数大于 2200 h/a，理论储量折合标准煤达 $1.7 \times 10^{12} t/a$ 。我国地热资源储备丰富，其储量相当于 2000 亿 t 标准煤。高温地热资源主要分布在西藏南部、四川西部和云南西部。高温发电潜力总计为 2781 MW，准高温地热系统的发电潜力总计为 3036 MW。但是我国实际地热发电装机容量还很小，不足总能量消费的 0.5%。我国的工业性地热电站均分布在西藏自治区，目前作为国内规模最大的西藏羊八井高温地热电站，装机容量为 25.18 MW。

2. 能源的消费

根据《BP 世界能源统计 2016》，总体来看，中国能源消费增长大幅度放缓，截至 2015 年底，中国的能源消费增长放缓，主要体现在煤炭领域，也包括石油。

(1) 中国石油消费

2015 年，中国能源结构中，石油作为第二大消费燃料，净进口增长 9.6% 至 737 万桶/日，创历史最高水平。图 1.1 为 2005 ~ 2015 年的中国石油消费量。

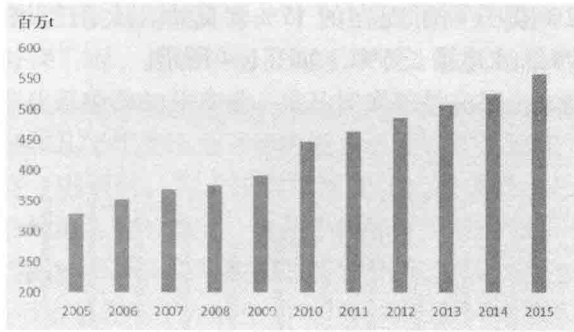


图 1.1 中国石油消费量

(2) 中国煤炭消费

2015 年，中国的煤炭消费量净下降 1.5%，远低于近十年的平均水平，如图 1.2 所示。

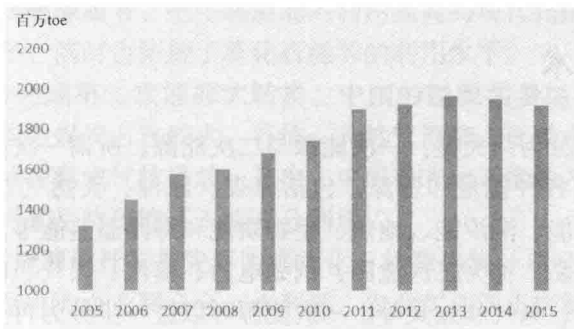


图 1.2 中国煤炭消费量

(3) 中国天然气消费

2015 年，中国的天然气消费增长 4.7%（89 亿 m^3 ），天然气消费增速创 10 年新低，供应总体过剩，淡季压产冬季供应紧张。图 1.3 所示为 2005 ~ 2015 年中国天然气消费量。

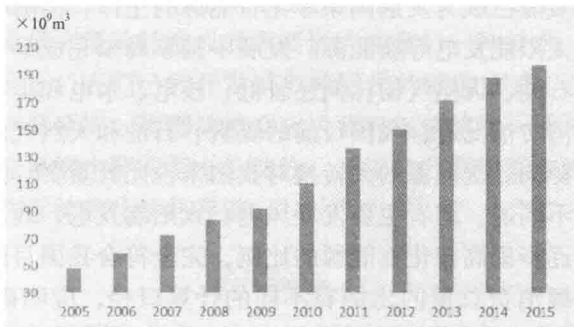


图 1.3 中国天然气消费量

(4) 非化石能源消费

2015 年，中国用于发电的可再生能源全年增长 20.9%，仅十年，中国可再生能源在全