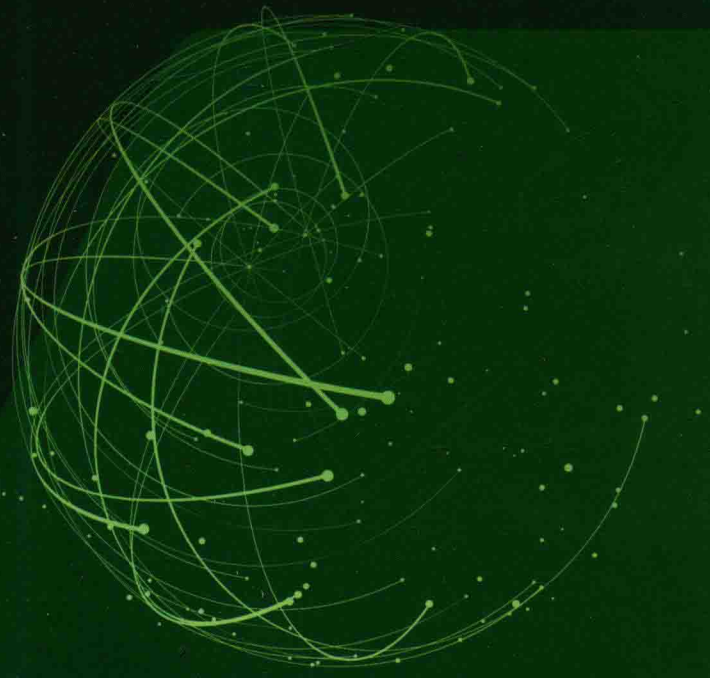
能源互联网

导论

杨 峰 李 瑞 主编
宋永端 主审



科学出版社

能源互联网导论

杨 峰 李 瑞 主编

宋永端 主审

中国科学技术大学 图书馆藏

科学出版社

北 京

内 容 简 介

能源互联网是一种新型能源系统，是“互联网+智慧能源”得以实现的物理支撑，同时也是一种以用户用能体验为中心的定制化能源服务产业生态环境。许多新的概念、方法及技术得以不断突破并应用于能源互联网的建设之中。此书总结了作者对能源互联网技术当下趋势以及未来发展的理解和感悟，主要内容包括能源互联网的基本概念、全球电力骨干网、微电网系统、新能源发电、储能系统、电动汽车与V2G技术、能源路由器等。

本书可作为高校电气工程、电气信息、电力系统及其自动化、新能源系统等专业本科生或研究生教材，也可作为从事新能源行业的科研人员和工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

能源互联网导论 / 杨峰, 李瑞主编. — 北京 : 科学出版社, 2019.6
ISBN 978-7-03-061053-9

Ⅰ. ①能… Ⅱ. ①杨… ②李… Ⅲ. ①互联网络-应用-能源发展-研究 Ⅳ. ①F407.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 073191 号

责任编辑：李小锐 / 责任校对：彭 映
责任印制：罗 科 / 封面设计：墨创文化

科学出版社出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2019年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2019年6月第一次印刷 印张：10 1/2
字数：242 000
定价：46.00元
（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

在能源发展进程中，历次能源革命都依赖能源技术的重大突破。第一次能源革命，蒸汽机的发明推动主导能源从薪柴向煤炭转变。第二次能源革命，内燃机和电动机的发明推动主导能源从煤炭向石油、电力转变。当前，第三次能源革命兴起，从传统化石能源的开发利用向可再生清洁能源大规模开发利用转变。

可再生能源不会对环境造成影响，可以被重复利用，具有可持续，因此被视为传统能源的可靠替代，其提供了彻底解决能源可持续发展的途径。但可再生能源存在地理上分散、生产不连续、随机性、波动性、不可控等特点，这使得传统电力网集中统一的管理方式难以适应可再生能源大规模利用的要求。

能源互联网借鉴互联网思维和理念构建了新型信息-能源融合的“广域网”，它以大电网为“主干网”，以微电网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”，通过分散协同的管理和调度实现能量的双向按需传输和动态平衡，可以最大限度地适应新能源接入。为了支撑能源互联网的建设，需要在电力骨干网、微电网系统、新能源发电、储能系统、电动汽车与 V2G 技术、能源路由器等领域全面推动技术创新。

为了满足能源互联网建设发展的需要，从业者和研究者需要掌握相关领域的基础知识，并有针对性地突破应用和开发中可能遇到的技术难点。针对这种情况，本书从能源互联网基本概念和内涵入手，在此基础上阐述能源互联网的各项核心技术。其中，第 2 章重点涉及全球电力骨干网络的设计与规划；第 3 章阐述支撑分布式能源接入的局域微电网系统；第 4 章介绍构建能源互联网的动力之源——太阳能发电、风力发电、海洋能发电、地热发电、生物质能发电等新能源技术；第 5 章侧重平抑大规模可再生清洁能源发电接入电网带来波动性的储能环节；第 6 章考虑电力系统与交通系统的耦合，重点介绍了能源互联网中的典型智能负载-电动汽车及 V2G 技术；第 7 章对推动能源互联网普及的关键设备——能源路由器的实现进行了介绍。

本书由杨峰、李瑞主编，宋永端主审。实验室的研究生史林波、李鹏、张敏、石亚锋、何海林、甘霖、李玉良、唐鹏程、王大松等进行了插图绘制和数据整理。在本书的编写过程中，引用了参考文献中的部分内容，特向其作者表示真诚的谢意。同时本书出版得到了电子科技大学“十三五”规划教材建设项目的资助，在此表示感谢。

由于能源互联网技术发展很快，加之作者水平有限，本书难免存在不足之处，敬请读者给予指正。

目　录

第 1 章　能源互联网概述……1
1.1　可再生能源……1
1.2　电能替代……2
1.3　电网和互联网……3
1.4　智能微电网……4
1.5　能源互联网……5
1.5.1　概念……5
1.5.2　内涵……6
1.5.3　特征……7
1.5.4　支撑技术……8
1.5.5　全球化……8
1.5.6　其他技术模式……9
1.6　技术前瞻……10
第 2 章　全球电力骨干网……11
2.1　电力系统组成……11
2.2　中国电力网……12
2.2.1　中国电力网组成……12
2.2.2　中国电力网互联……15
2.3　美国电力网……17
2.3.1　美国电力网组成……17
2.3.2　美国电力网特点……19
2.3.3　美国电力网互联……20
2.4　欧洲电力网……23
2.4.1　欧洲电力网组成……23
2.4.2　欧洲电力网成员分析……24
2.4.3　欧洲电力网互联……28
2.5　电力骨干网全球互联……29
2.5.1　全球互联的必要性……29
2.5.2　电力网全球互联方式……31
2.5.3　洲际电网互联……31

2.5.4 关键技术创新……33
第 3 章 微电网系统……35
3.1 微电网概述……35
3.1.1 微电网提出……35
3.1.2 微电网定义……36
3.1.3 微电网运行模式……38
3.2 微电网组成……39
3.2.1 变配电系统……40
3.2.2 微电源系统……41
3.2.3 储能系统……42
3.2.4 智能控制系统……43
3.2.5 智能配电系统……44
3.2.6 快速通信系统……44
3.3 微电网典型结构……45
3.3.1 交流微电网结构及特性……45
3.3.2 直流微电网结构及特性……48
3.3.3 交直流混合微电网结构及特性……50
3.3.4 微电网结构设计方法……51
3.4 微电网关键技术……53
3.4.1 微电网的优化设计……53
3.4.2 微电网的运行控制……55
3.4.3 微电网的保护……56
3.4.4 微电网的经济运行……56
第 4 章 新能源发电……59
4.1 太阳能发电……59
4.1.1 光伏发电原理……59
4.1.2 光伏发电系统……60
4.1.3 最大功率点跟踪……62
4.1.4 光伏并网系统……67
4.2 风力发电……71
4.2.1 风能及 Betz 理论……71
4.2.2 风力发电机结构及组成……73
4.2.3 风力发电机分类……79
4.2.4 风力发电并网……80
4.3 其他新能源发电……84
4.3.1 潮汐能发电……84

4.3.2 波浪发电 ……84
4.3.3 地热发电 ……87
4.3.4 生物质能发电 ……88
第 5 章 储能系统 ……92
5.1 电储能技术 ……92
5.1.1 物理储能技术 ……92
5.1.2 电化学储能技术 ……96
5.1.3 电磁储能技术 ……100
5.2 能源互联网中的储能 ……102
5.2.1 储能的作用 ……103
5.2.2 储能的应用 ……105
5.3 全球能源互联网储能配置方案 ……109
5.3.1 可再生能源基地储能配置方案 ……110
5.3.2 输电网络附近的储能配置方案 ……110
5.3.3 各大洲负荷中心的储能配置方案 ……110
5.4 能源互联网中储能发展趋势 ……111
第 6 章 电动汽车与 V2G 技术 ……112
6.1 纯电动汽车 ……112
6.1.1 基本组成 ……113
6.1.2 电力驱动系统 ……113
6.2 动力电池 ……116
6.2.1 电池参数 ……116
6.2.2 动力电池特点 ……118
6.2.3 动力电池种类 ……118
6.3 锂离子电池成组技术 ……123
6.3.1 电池成组概念 ……123
6.3.2 电池单体的串联与并联 ……125
6.3.3 电池的连接与成组 ……128
6.3.4 对锂离子动力电池成组的加热或降温方式 ……131
6.4 成组电池的管理系统 ……131
6.4.1 电池不一致性 ……132
6.4.2 BMS 功能 ……134
6.4.3 电池参数检测 ……135
6.4.4 SOC 估算 ……138
6.4.5 电池组均衡 ……139
6.5 V2G 技术 ……142

6.5.1 V2G 技术简介……142
6.5.2 V2G 实现方法……143
6.5.3 V2G 带来的问题……145
6.5.4 V2G 技术与能源互联网……146
第 7 章 能源路由器……150
7.1 能源路由器结构和功能……150
7.1.1 路由器组成……150
7.1.2 路由策略……151
7.1.3 能源控制……152
7.1.4 即插即用接口……152
7.1.5 信息保障机制……153
7.1.6 用能策略……154
7.1.7 运行管理……154
7.2 固态变压器技术……155
7.2.1 工作原理……155
7.2.2 功能特点……156
7.2.3 先进控制方法……157
7.2.4 固体功率器件……158
参考文献……159

第 1 章　能源互联网概述

能源网、交通网、通信网是人类生活最重要的三大基础网络设施。目前通信网建设比较完善和清晰，其发展主要在于升级换代；交通网各部分之间的连接、对接都比较清楚直观；而能源互联网发展才刚刚开始，其概念和内涵仍在探索之中。

1.1　可再生能源

能源可持续发展是摆在人类面前最重要的难题。目前人类使用的主要是化石能源，这类能源存储总量有限，具有不可持续、不可再生的特点，且大多会对环境造成破坏，如形成碳排放、温室效应等。

可再生能源是指人们在自然界中能有规律地得到补充和不断再生的能源。它是取之不尽、用之不竭的清洁能源，主要有以下几种。

(1) 太阳能：太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量的二十二亿分之一，但太阳每年辐射到地球上的能量就已相当于 150 亿亿 kW·h，即平均每人约 2.5 亿 kW·h。

(2) 风能：风能是地球表面大量空气流动所产生的动能。风能是太阳能的一种转换形式，受地形的影响较大，世界上风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带。根据相关资料统计，每年来自外层空间太阳辐射能的 2.5%被大气吸收，产生大约 4.3×10^{12} kW·h 的可利用风能，这是地球上可开发利用的水能总量的数十倍。

(3) 水能：水能包括河流水能、潮汐水能、波浪能、海流能量。狭义的水能是指人们利用河流流水下落所产生的能量。将水能转换为电能，则称为水电，它是一种可再生的清洁能源。太阳能驱动地球上水循环，使之持续进行。地表水的流动是重要的一环，在落差大、流量大的地区，水能资源丰富。其缺点是容易受地形、气候等多方面因素影响。

(4) 生物质能：生物质是指通过光合作用而产生的各种有机体。生物质能是指太阳能以化学能形式贮存在生物中的一种能量形式，是一种以生物质为载体的能量。生物质能资源主要有薪柴、农作物秸秆、林作物及农林业加工的残余物、禽畜粪便、城镇生活垃圾、生活污水和水生植物等。全球每年植物光合作用固定的碳约相当于全世界每年消耗能量的 10 倍。

(5) 海洋能：地球表面 71%为海洋。一望无际的海洋不仅为人类提供航运、水产和丰富的矿藏，还蕴藏着巨大的能源。海洋能是指依附在海水中的可再生能源，包括潮汐能、波浪能、海洋温差能、海洋盐差能和海流能等。

(6) 地热能：地热能是指地壳内岩石和流体(液、气相)中能被经济合理地开发出来的

热能。地热资源开发的对象是热能，其中以热水形式存在的地热是至今利用价值较高的替代绿色能源之一。它集热能、水资源于一体，可用来发电，也可直接用于供暖、洗浴、医疗保健、休闲疗养等产业。

可再生能源不会对环境造成影响，可以被重复利用，具有可持续的特点，因此受到了各国能源专家的重视，被视为替代传统能源的可靠途径，是彻底解决能源可持续发展的希望所在。据测算，地球上仅开发万分之五的清洁能源即可满足全人类的能源需求。全世界按年均 12.4%的增长速度发展可再生能源，到 2050 年，世界可再生能源可占到总能源比重的 80%以上，实现能源永久性清洁供应，彻底摆脱化石能源困局。因此欧盟、美国和中国相继提出，到 2050 年实现可再生能源在能源供给中占 100%、80%和 60%～70%的目标。届时全球年碳排放降低到 105 亿吨，而温度升高也可控制在 2℃以内，力争控制在 1.5℃以内，中国长期面临的雾霾问题也会迎刃而解。

1.2 电 能 替 代

电能替代是指在能源消费上，以电能替代煤炭、石油、天然气等化石能源的直接消费，提高电能在终端能源消费中的比重。电能替代主要体现在两个方面：发电环节由清洁能源替代化石能源，终端使用环节则是以电代柴、以电代煤、以电代油。据统计，中国电能占终端能源消费的比重每提高 1 个百分点，单位 GDP 能耗可下降 4%。

人类历史已经先后经历过用煤炭替代薪柴，用石油、天然气替代煤炭的过程，目前正在逐步进入用可再生能源替代传统化石能源的阶段。无论从发展趋势、现实要求，还是从技术条件考虑，电能替代都是终端能源替代的重要趋势，以电气化和电能替代为主要方向推进终端能源替代，符合未来的能源发展方向。客观来看，所有的一次能源都可以转换为电能，电能相对于煤炭、石油、天然气等能源具有更加便捷、安全和清洁的优势，而且可以较为方便地转换为机械能、热能等其他形式的能源，实现精确控制。并且随着能源价格比对关系逐步趋于合理，电能在终端能源消费市场的竞争力会进一步增强。电能的这些特性使其在现代经济社会中得到广泛应用，电气化已经成为现代化的重要标志之一。

此外，虽然能源形式多种多样，电能仅仅是其中的一种，但电能在能源传输效率等方面具有无可比拟的优势，未来能源基础设施在传输方面的主体必然还是电网，各类能源开发、转换、配置、使用的基本平台也是电网。风力发电、太阳能发电等大规模、集约化发展，客观要求必须实现能源资源的大范围、高效率优化配置，电能替代具有更加显著的经济效益。随着电气化进程进一步加快，在供给侧清洁能源必将替代化石能源；在消费侧电能将扮演日益重要的角色，并最终成为最主要的终端能源品种，实现更加清洁、便捷、安全的能源利用。

从某种角度上来说，电力系统是最具有互联网特征的网络。这个特征决定了电能在诸多能源类型中将起到枢纽作用。相应地，电网将成为能源转化和利用的核心平台，是能源互联网的关键物理基础。当然，在特殊环境下，根据其他形式能源的特征和用户的最终需要，利用其他形式的能源也是可选的，如可直接利用太阳能供热而不需转换成电能。

1.3　电网和互联网

电网和互联网具有相互促进的发展历程，如图 1-1 所示。互联网刚出现时借鉴了电网源荷互联和负荷即插即用的理念，实现了不同计算机互联，以及信息接收端的即插即用和使用透明。之后互联网发展迅速，进入了双向互动的 Web 2.0 和移动互联网时代，每个个体既是信息的消费者，也是信息的生产者，实现了异种设备的即插即用，具备自组织、自愈等功能，产生众多的新业态和商业新模式，成为当前最活跃的创新创业土壤。相比之下，电网发展相对缓慢，保守和自然垄断的局面未发生实质性变化，创新活力明显不足。

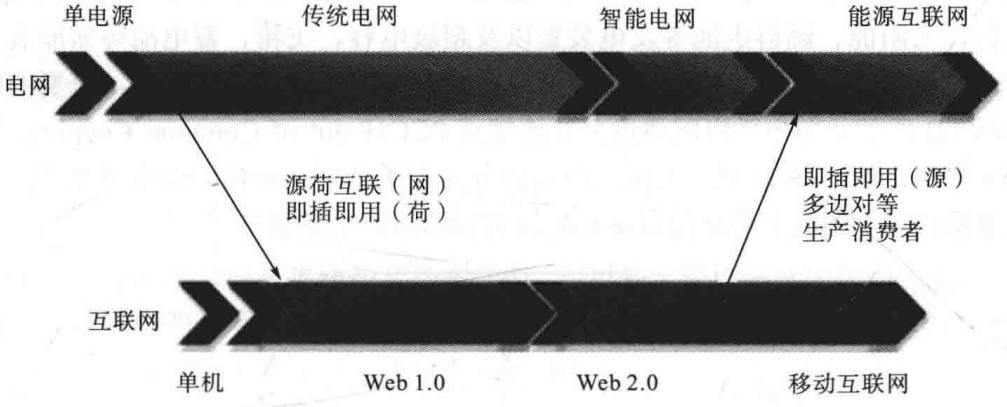


图 1-1　电网和互联网互助发展示意图

互联网的快速发展离不开开放的核心理念。传统电网的理念相比互联网最大的差距在于开放性差导致的互联程度低：①在物理层面，各电能子系统存在行业壁垒，未能实现开放互联。电能的传输也无法像互联网中信息传输一样灵活可控，导致电网总能效不高，可再生能源的消纳受限，还使得能源生产和消费的便捷性不足。②在商业层面，电网仍被少数大型公司垄断，众多的源荷之间难以形成直接对接，大量的能源用户处于被动地位，无法以对等的身份参与到能源市场中，创新创业主体不多，市场不繁荣。随着可再生能源、分布式发电的迅速发展，现有的电网越来越难以满足人们对能源民主化、高效化和绿色化方面的高要求，亟须从互联网汲取先进的理念和技术，实现电网的升级进化。

总的来说，互联网信息通信与电力能源结合发展分为三个阶段：第一为数字化、信息化阶段。此时，信息通信为电力能源行业提供服务，带来方便和快捷。第二为智能化阶段，也就是智能电网阶段。在该阶段，信息通信成为电力能源基础设施不可或缺的组成部分，以信息流与能量流的结合为特征。第三为信息物理融合阶段，表现为信息通信基础设施与电力能源基础设施的一体化，也就是信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网阶段。

1.4 智能微电网

尽管可再生能源具有可持续、可再生的特点，但该类能源大多输出不稳定，如太阳能受限于太阳光的强弱，风能受限于风力的大小。同时由于其分布式的特点，大量能源节点的无序接入将对电网稳定运行产生很大的影响，甚至导致整个电网的崩溃。因此，需要采用一定的设备和结构形式对分布式可再生能源的接入进行处理，而微电网技术为解决这一问题提供了新的契机。

微电网也被称为分布式能源孤岛系统，其将发电机、负荷、储能装置及控制装置等结合在一起，形成单一可控的系统单元。微电网中的电源多为微电源，包括微型燃气轮机、光伏、太阳能、燃料电池等发电装置以及超级电容、飞轮、蓄电池等储能装置。其既可与大电网联网运行，也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行，典型的微电网系统如图 1-2 所示。图中微电网通过公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)实现微电网和大电网之间的并/断网。大微电网可以分为若干个更小规模的微电网系统，如包含光伏发电系统、电动汽车等储能设备和超级电容的家用小型微电网。

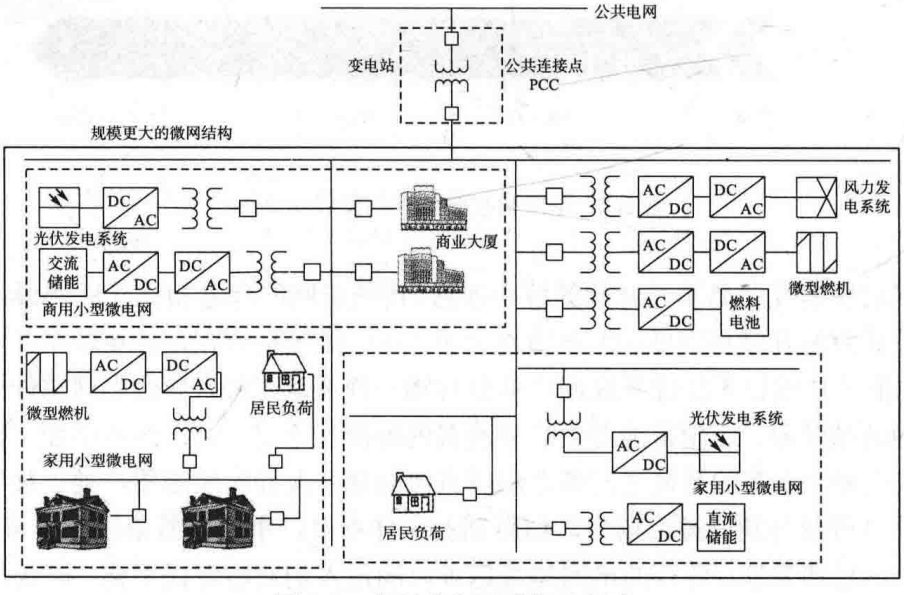


图 1-2 典型微电网系统示意图

微电网具有双重角色。对于电网，微电网作为一个大小可以改变的智能负载，为本地电力系统提供可调度负荷，可以在数秒内做出响应以满足系统需要，适时向大电网提供有力支撑。对于用户，微电网作为一个可定制的电源，可以满足用户多样化的需求，例如增强局部供电可靠性，降低馈电损耗，支持当地电压，通过利用废热提高效率，提供电压下陷校正，或作为不可中断电源服务等。微电网不仅解决了分布式电源的大规模接入问题，充分发挥了分布式电源的各项优势，还为用户带来了其他多方面的效益。其将从根本上改变传统应对负荷增长的方式，在降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性等方面具有巨大潜力。

1.5　能源互联网

可再生能源存在地理上分散、生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点，这使得传统电力网集中统一的管理方式，难以适应可再生能源大规模利用的要求。对于可再生能源的有效利用方式是分布式的“就地收集，就地存储，就地使用”。但分布式发电并网并不能从根本上改变分布式发电在高渗透率情况下对上一级电网电能质量、故障检测、故障隔离的影响，也难以实现可再生能源的最大化利用。只有实现可再生能源发电信息的共享，以信息流控制能量流，实现可再生能源所产生电能的高效传输与共享，才能克服可再生能源不稳定的问题，实现可再生能源的真正有效利用。

1.5.1　概念

能源互联网借鉴互联网思维和理念构建新型信息-能源融合“广域网”，它以大电网为“主干网”，以微电网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”，通过分散协同的管理和调度实现能量的双向按需传输和动态平衡，可以最大限度地适应新能源的接入。微电网是能源互联网中的基本组成单元，通过新能源发电、微能源的采集、汇聚与分享以及微电网内的储能或用电消纳形成“局域网”。而大电网由于在传输效率等方面具有无法比拟的优势，其构成能源互联网中的“主干网”。

从网络系统建设的角度看，能源互联网的物理规模可分为四个层次：能源个人(家庭)网络、能源局域网络、能源广域网络和全球能源互联网络。在这个体系里，通常规模较大的网络系统是由若干规模较小的网络系统互通互联而成，这种形式进而循环迭代最终形成全球性的能源网络系统基础设施。

从信息和能源的层次结构来说，能源互联网的基本架构主要包括“互联网+”和能源系统类互联网化，如图 1-3 所示。前者主要是体现在信息化层面，后者主要是实体发电、供能以及实体化的设备。前者通过获取后者的信息来制定相应的控制策略，然后将控制策略实施于后者，实现能源互联和信息一体化。

不同于传统能源系统，在能源互联网中，由于存在供给与需求的动态互换性，因此可以利用能源虚拟化与能量信息化技术为传统能源资源赋予新的互联网信息属性，进而通过传递和交换供能方与用能方的互联网信息属性进行新型负载调度，从而达到与传统能源输送同样的目的，这样就可极大提高能源资产的高效利用，以及能源资源全生命周期的利用效率。例如，可以通过能源互联网引导用能分布与能源供给分布的最大匹配，来达到与能源输送调度一样的效果，从而实现新能源就地采集与消纳，避免能源输送带来的损耗。

总体而言，能源互联网可理解成综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术，将大量由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络节点互联起来，以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。

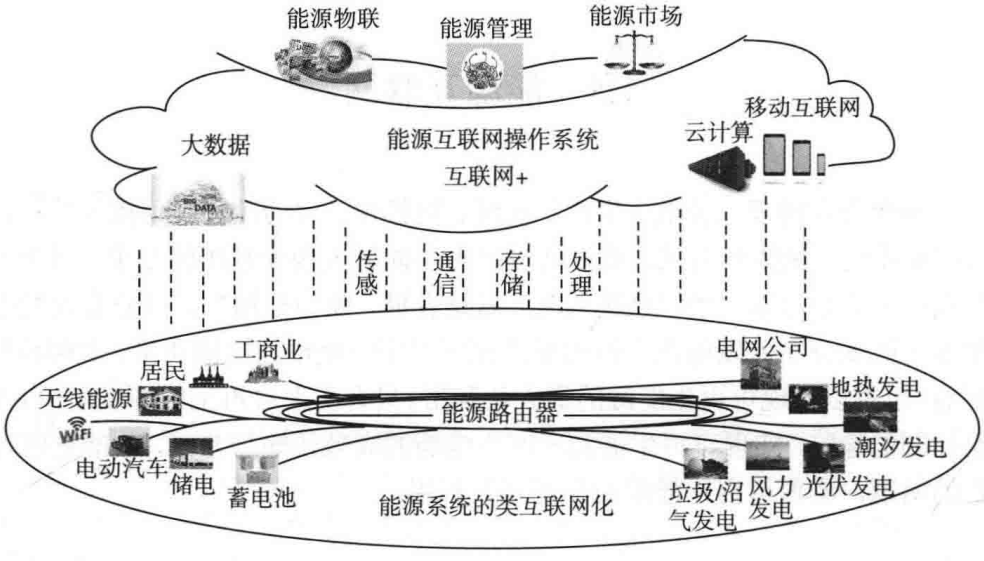


图 1-3 信息和能源层次结构

1.5.2 内涵

能源互联网是一种新型能源系统，是“互联网+”智慧能源得以实现的物理支撑系统，同时也是一种以用户用能体验为中心的定制化能源服务产业生态环境。其本质是信息演变成为一种新型生产资料之后，与传统能源行业深度融合，对能源领域里的各种生产要素进行重新配置和优化的必然结果。

能源互联网有别于传统能源系统信息化，其重要技术特点是构建信息流和能量流的双向决策控制闭环。能源互联网中能量流将被数字化和信息化处理，并与信息系统无缝对接，从而形成能量流与信息流的深度融合，而不是信息化式的简单叠加，这样使得能源最终变成一种可以计算计量的网络虚拟资源。如果说智能电网还是在现有电网架构上通过信息化和智能化的手段，解决设备利用率、安全可靠性、电能质量等基本问题，那么能源互联网的关键则在于采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革，使得电能的开放互联与交换分享可以跟互联网信息分享一样便捷。

信息互联网体系架构决定了其安全稳定性较高，冗余组网方式可保证系统整体的可靠性，同时通过分散路由等方式实现设备和线路的动态备用，保持一定的利用率。能源互联网可以借鉴其中机制，但能量与信息的交换和传输有本质不同。相比现在集中式电网自上而下的紧耦合模式，能源互联网能实现局域自治，在广域互联中通过储能缓冲、直流输电等方式实现解耦，同时局域不稳定问题可以通过互联实现广域的动态互备用，达到安全稳定可靠的目标。与信息互联网类似，能源互联网在局域、广域和主干网的特点不同，相应的实现和管理方式也不尽相同。电能在局域侧重多种形式的快速转化，在广域传输侧重系统的开放性、可扩展性和标准协议的简约，在主干网强调大电网的异步自治解耦互联。

从宏观上看，能源互联网要满足国家对能源生产和消费革命的技术支撑，使传统能源实现行业从目前垂直集成、边缘封闭的业态向横向互动、边缘开放的新业态演进，还原能

源的商品属性，并通过建设开放能源交易市场机制，充分释放多元存量资产高效利用后所产生的共享价值。从微观上看，能源互联网要满足多样化用能需求驱动的能源生产和供给的 C2B（Customer to Business，顾客到企业）和 C2C（Consumer to Consumer，消费者对消费者）模式，其最终产品是为各种用能需求提供灵活多样的定制化服务。

从管理者视角来看，能源互联网是兼容传统电网的，可以充分、广泛和有效地利用分布式可再生能源的、满足用户多样化电力需求的一种新型能源体系结构。从运营者视角来看，能源互联网是能够与消费者互动的、存在竞争的一个能源消费市场，只有提高能源服务质量，才能赢得市场竞争。从消费者视角来看，能源互联网不仅具备传统电网的供电功能，还为各类消费者提供了一个公共的能源交换与共享平台。

1.5.3　特征

针对电力能源的能源互联网与其他形式电力系统相比，具有以下关键特征。

(1) 可再生能源高渗透率。能源互联网中接入了大量各类分布式可再生能源发电系统，在可再生能源高渗透率的环境下，能源互联网的控制管理与传统电网之间存在很大不同，这会带来一系列新的科学与技术问题。

(2) 体系结构的开放性。能源互联网是一个对等、扁平和能量双向流动的能源共享网络。只要符合互操作标准，发电装置、储能装置和负载都能够“即插即用”，实现电能的随时随地接入与获取。

(3) 组成结构的对等性。同传统电网自顶向下的树状结构相比，能源互联网的形成是能量自治单元之间的对等互联。任意单元之间的连接是逻辑上的，其真正实现必须建立在分散路由的基础之上。能量的传输是多次路由的结果，传输路由路径之间为动态互为备用。各路由器间是解耦的，从而避免安全稳定性问题。

(4) 系统的非线性、随机性。分布式可再生能源是未来能源互联网的主体，但可再生能源具有很大的不确定性和不可控性，同时考虑实时电价、运行模式变化、用户侧响应、负载变化等因素的随机特性，能源互联网将呈现复杂的随机特性，其控制、优化和调度将面临挑战。

(5) 多尺度动态特性。能源互联网是一个物质、能量与信息深度耦合的系统，是物理空间、能量空间、信息空间乃至社会空间耦合的多域、多层次关联，包含连续动态行为、离散动态行为和混沌有意识行为的复杂系统。与传统电网相比，具有更大的系统复杂性，呈现出复杂的、不同尺度的动态特性。

(6) 多源大数据特性。随着分布式电源并网，储能及需求侧响应的实施，能源互联网工作在高度信息化的环境中，将包括气象信息、用户用电特征、储能状态等多种来源的海量信息。而且随着高级量测技术的普及，能源互联网中具有量测功能的智能终端数量将会大大增加，所产生的数据量也将急剧增大。

1.5.4 支撑技术

在能源发展进程中，历次能源革命都依赖能源技术的重大突破。第一次能源革命，蒸汽机的发明，推动主导能源从薪柴向煤炭转变。第二次能源革命，内燃机和电动机的发明推动主导能源从煤炭向石油、电力转变。当前，第三次能源革命兴起，从传统化石能源的开发利用向可再生清洁能源大规模开发利用转变。此时需要在电源、电网、储能和信息通信等领域全面推动技术创新，从而支撑能源互联网的建设。

(1) 电源技术。以可再生清洁能源为主导，以电能为中心的能源格局，决定了电源技术在未来能源发展中的关键性作用。其核心是不断提高可再生清洁能源的开发效率和经济性，重点领域包括风力发电、太阳能发电、水能发电、海洋能发电及分布式电源技术等。这些技术突破是构建能源互联网的动力之源，对推动全球能源开发清洁化、低碳化十分重要。

(2) 电网技术。以电能为中心的能源发展格局，决定了电网技术在未来能源发展中的关键性作用。需要不断提高电网输送能力、配置能力和经济性。其主要领域包括特高压输电技术和装备、海底电缆技术、超导输电技术、直流电网技术、微电网技术和大电网运行控制技术等。这些技术突破是构建能源互联网的重要基础。

(3) 储能技术。储能技术发展是保障可再生清洁能源大规模发展和电网安全经济运行的关键。在电力系统中增加存储环节，使得实时平衡的“刚性”电力系统变得更加“柔性”，平抑大规模可再生清洁能源发电接入电网带来的波动性，提高电网运行的安全性。

(4) 信息通信技术。信息通信技术是实现能源互联网智能化、互动化和大电网运行控制的重要基础，主要包括信息和通信两个方面。信息技术侧重于信息的编码或解码，是有关信息收集、识别、提取、变换、存储、传递、处理、检索、检测、分析和利用的技术。通信技术侧重于信息传播，主要包含传输接入、网络交换、移动通信、无线通信、光纤通信、卫星通信、支撑管理、专网通信等。能源互联网对信息通信的安全性、实时性、可靠性要求更为严格，这需要在信息通信技术领域有更大的创新和突破。

1.5.5 全球化

能源互联网全球化是一个面向未来的能源基础设施蓝图，其基于各大洲时间差、南北半球季节差，有效利用各大洲电力负荷的时空互补性进行跨洲峰谷调节，全面优化配置全球范围内的可再生能源。美国和中国的时差有 13～16 小时，欧洲和中国的时差有 6～7 小时，时差大、季节差别大，可实现电网平衡。中国不用电时，把电输送到美国和欧洲；中国用电高峰时，则把美国、欧洲的电输送进来。

要实现能源互联网的全球化，需要一个强大的骨干能源输送网架，这就是能源互联网中的“广域能源网”。目前，除了中国力推的特高压输电技术之外，欧洲也在大力发展以高压直流输电(High Voltage Direct Current，HVDC)和柔性直流输电技术为核心的超级电网。

从世界清洁能源资源分布来看，北极圈及其周边地区(一极)风能资源和赤道及附近地

区(一道)太阳能资源十分丰富，简称“一极一道”(见图 1-4)。北极地区风能资源技术可开发量约 1000 亿 kW，约占全球陆上风能资源的 20%。环北冰洋的喀拉海、巴伦支海、白令海峡和格陵兰岛等是北极风能资源最丰富的地区。赤道附近地区所处纬度低、太阳直射多，每年可以达到 3000 多小时。其中一些地区多为干旱、半干旱或沙漠地带，太阳散射少，因此太阳能资源极其丰富，是未来太阳能大规模集中开发和利用的重点区域。此外，赤道附近地区还拥有大量优质的水能资源，如非洲刚果河、南美洲亚马孙河。

集中开发北极风能以及赤道太阳能和水能资源，通过先进输电技术送至各大洲负荷中心，与各洲大型能源基地和分布式电源相互支撑，提供更安全、更可靠的清洁能源供应，将是未来世界能源发展的重要方向。

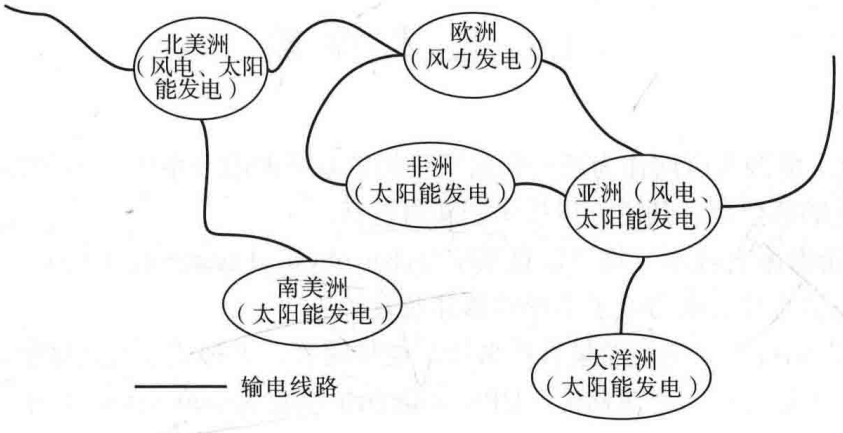


图 1-4　北极圈风能和赤道太阳能资源分布图

1.5.6　其他技术模式

电网是能源互联网的主要技术模式，但由于能源的绿色化不可能一蹴而就，特别是在中国，可再生能源与化石能源混合作用的时间可能会更长。为了提高各类能源的综合利用效率，促进能源向低碳化、绿色化方向发展，能源互联网还有可能采用第二种技术模式——多能源网络。该网络是由输配电网、天然气网、冷热气网等构成，包含分布式能源转换和储存设施在内的综合能源网，通过统筹规划建设，利用现代信息技术和智能化控制技术进行协同调度管理，适时提供气、电、冷、热多品种能源，互助互补满足用户需求，实现能源的梯级利用和产能端与用能端的智能匹配，最大限度提高能源综合利用率。

在多能源网络中，电能、化学能、热能等不同能源形式可根据需求相互转化，该概念由苏黎世联邦理工学院的 Goran Andersson 教授最先提出，并初步奠定了多能源网络运行与控制的理论基础。但真正使多能源网络变为现实的，则是电转气(Power to Gas)技术的出现。电转气技术的基本原理是首先利用富余的可再生能源电解水，再将产生的氢气与空气中的二氧化碳进一步反应产生甲烷。由于甲烷是天然气的主要成分，因此，电转气装置产生的甲烷可以注入现有天然气网络中存储和运输。电转气技术的出现，建立了电力与天然气两个原本相互独立的能源网络间能量双向流动的渠道。可再生能源可以通过电转气技