

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

U D C\_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

清 华 大 学  
博 士 后 研 究 工 作 报 告

能源互联网基础理论研究及

---

若干关键技术探索

---

任 光

工作完成日期 2016年01月—2018年01月

报告提交日期 2017年12月

清 华 大 学 （北京）

2017年12月

## 内容摘要

随着传统化石燃料资源的日趋紧张,以及 CO<sub>2</sub>大量排放造成的温室效应和对环境的破坏,对可再生能源的应用要求越来越强烈,能源结构的变革势在必行。可再生能源包括生物质能、太阳能、风能、小水电、地热能以及海洋能等,它们资源丰富,可以再生,清洁干净,是最有前景的替代能源,将成为未来世界能源的基石。

要满足未来能源需求,根本途径是转变能源发展方式,调整能源结构,大规模集约高效开发新能源,实现能源战略转型。电网集电能传输、资源配置、市场交易、客户服务于一体,是最高效快捷的能源输送通道和优化配置平台,与其它能源输送网络相比具有显著优势。传统能源资源的可用性决定了大量的能源生产,例如电力,不得不是集中式的。然而电力用户却是高度分散的,这就使得人类必须建立极其复杂的能源传输和分配网络。

基于对全球能源发展格局和趋势的研判,本报告系统性研究能源互联网的理论框架、功能需求、关键技术和工程实现,并对能源互联网的发展趋势进行了展望。

课题报告内容主要包括如下:

第一方面,对能源互联网基础理论体进行研究。

第二方面,研究能源互联网的关键技术之一,即能源路由技术。

第三方面,研究能源互联网的关键技术之一,即区块链应用技术。

第四方面,研究能源互联网的示范工程规划技术。

上述四个方面的内容分别属于能源互联网在理论、技术和工程等方面,相辅相成、逐次递进研究,覆盖了能源互联网行业的主要方面,为业内发展提供借鉴。

关键词: 能源互联网, 能源路由器, 区块链技术, 示范工程

## Abstract

With the increasing tension of traditional fossil fuel resources and the greenhouse effect and the destruction of environment caused by the massive discharge of CO<sub>2</sub>, the application of renewable energy is more and more intense, and the transformation of energy structure is imperative. Renewable energy includes biomass, solar energy, wind energy, small hydropower, geothermal energy and marine energy. They are rich in resources, renewable, and clean, and they are the most promising alternative energy sources, and will become the cornerstone of future world energy.

To meet the future energy needs, the fundamental way is to transform the way of energy development, adjust the energy structure, develop new energy in a large scale and efficiently, and achieve the strategic transformation of energy. Power grid transmission, resource allocation, market transaction and customer service is one of the most efficient and efficient energy transmission channels and optimized configuration platform. Compared with other energy transmission network, it has significant advantages. The availability of traditional energy resources determines a large amount of energy production, such as electricity, which has to be centralized. However, the power users are highly dispersed, which makes it necessary for human beings to establish extremely complex energy transmission and distribution networks.

Based on the analysis of the global energy development pattern and trend, this report systematically studies the theoretical framework, functional requirements, key technologies and engineering implementation of the Energy Internet, and forecasts the development trend of the Energy Internet.

The main contents of the report include the following:

The first aspect is to study the basic theory of Energy Internet.

Second, one of the key technologies to study the Energy Internet, namely, energy routing technology.

In the third aspect, one of the key technologies to study the Energy Internet is the block chain application technology.

The fourth aspect is to study the demonstration project technology of the Energy Internet.

The above four aspects belong to the energy Internet theory, technology and engineering. They are complementary and progressive research, covering the main aspects of the energy and Internet industry, providing reference for the development of the industry.

Keywords: Energy internet, Energy router, Block chain, Demonstration project.

# 目录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 社会环境可持续发展与能源变革.....	1
1.2 能源互联网发展现状.....	4
1.3 研究内容与预期成果.....	14
<b>第 2 章 能源互联网系统理论研究</b> .....	16
2.1 能源互联网架构体系.....	16
2.1.1 架构特点.....	16
2.1.2 功能特点.....	17
2.1.3 属性分解.....	18
2.2 能源互联网微网.....	26
2.2.1 泛能源微网概述.....	26
2.2.2 微网信息系统.....	33
2.2.3 微网运营系统.....	38
2.2.4 微网接入系统.....	49
2.3 城市能源互联网.....	56
2.3.1 网架结构.....	56
2.3.2 运营机制.....	57
2.3.3 运营关键技术.....	59
2.3.4 商业模式.....	61
2.3.5 运行机制.....	63
2.4 本章小结.....	77
<b>第 3 章 能源互联网关键技术探索--能源路由器</b> .....	78
3.1 能源互联网与能源路由器架构.....	78
3.2 能量接入管理方法.....	86
3.3 热插拔状态下的母线电压平衡方法.....	94
3.4 能量路由器母线电压稳定控制方法.....	100
3.5 本章小结.....	107
<b>第 4 章 能源互联网关键技术探索--区块链技术应用</b> .....	109
4.1 区块链技术概况.....	109

4.2 基于路由网络构建的能源区块链 .....	111
4.3 能源区块链与能源互联网价值传递 .....	117
4.4 本章小结 .....	124
<b>第 5 章 能源互联网示范工程规划</b> .....	<b>125</b>
5.1 工程示范的必要性与意义 .....	125
5.2 宁夏中宁县工业园区项目背景 .....	126
5.3 建设能源互联网需要解决的主要问题 .....	131
5.4 项目解决思路 .....	135
5.5 工作内容及实施方案 .....	138
5.6 本章小结 .....	143
<b>第 6 章 能源互联网研究总结</b> .....	<b>144</b>
6.1 能源互联网产业远期展望 .....	144
6.2 技术发展趋势 .....	145
<b>参考文献</b> .....	<b>148</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>152</b>
<b>博士后期间研究成果</b> .....	<b>153</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 社会环境可持续发展与能源变革

自 1995 年以来，每年一度的世界气候大会围绕气候变化与环境治理等主题，制定各国需遵守的公约与制度。2015 年巴黎气候大会针对如何应对气候变化、提升经济绿色水平，实现人类可持续发展，提出了引领全球进入低碳时代的目标。能源转型是实现低碳目标的主要途径。在全球范围内，以光伏发电、风电和生物质发电等为主的新能源技术与产业正被迅速推广开来，在二次能源中的比例稳步提升。随着信息与互联网技术的发展成熟，科学家们通过把新能源与互联网技术融合起来，找到了实现低碳、绿色能源消费的有效途径。能源互联网作为能源领域一个全新的理论，首先被里夫金在《第三次工业革命》中提出，它将为人们提供绿色、低碳、高效与共享的能源新理念。信息与能源基础设施一体化是能源互联网的重要特征。能源互联网的基础设施呈现分层分级的特点，微网、城市互联网与广域互联网是能源互联网自下而上的网络层级。不同于传统电网的能量管理技术，能源互联网架构下的能量具有双向流动、交易自由和新能源自主接入等新特点。能量路由器技术、区块链技术等新兴关键技术适应了能源互联网发展的新需求，发展新型信息技术在能源互联网中的应用是时代的必然要求，具有重要意义。

### (1) 什么是能源互联网

能源互联网是第三次工业革命的五大支柱之一，其核心思想是将 21 世纪的两项新技术联结在一起，“互联网+可再生能源”，构建信息能源一体化互动网络。互联网巨大的组织集聚功能，可以实现对以多样化能量来源及利用形式为特征的能源网络的互补协同管理和去中心化管理。这种崭新的能源系统需要一系列相关技术及设备为支撑，通过对现有能源系统和产业模式的改造，新能源与传统能源融合、升华，将诞生全新的能量利用技术和能源产业生态。

能源互联网在于构造一种能源体系使得能源能像信息互联网中的信息一样，任何合法主体都能够自由接入和分享。从控制角度看，在于通过信息和能源融合，实现信息主导、精准控制的能源体系。能源互联网通过互联网和新能源的结合使现在集中式供应能源变成分布式能源，也就是说，每个地区都能利用自己的太阳能、风能、天然气等方面的作用，使能源供应相对独立。它旨在通过打造一张具有扁平化结构和智能化功能的能量网络，来整合分布式、间歇性、多样化的能量供应和需求，实现可再生能源高效利用、满足日益增长的能源需求、减少能源利用过程中对环境造成破坏。分布式能源开放对等式的供应和分享是其主要特征，

调动各能源单元的主观能动性，形成类似信息互联网、具有自我服务、自我维护和自我更新的生态环境是它的目标。

对能源互联网的理解主要有三种：

- 以互联网的开放对等理念和体系架构为指导，形成新型的能源网。这时候能源互联网（Energy Internet）的本质是能源网。以美国的 FREEDM 为典型代表，效仿网络技术的核心路由器，提出了能量路由器的概念并且进行了原型实现。

- 借助互联网收集能源相关信息，分析决策后指导能源网的运行调度。这时候能源互联网（Internet of Energy）的本质还是信息互联网。以欧洲的 e-Energy 为典型代表，打造一个基于信息和通信技术的能源供应系统，连接能源供应链各个环节业务流程，实现示范应用形成能源需求和供给的互动。

- 以上两种理解混合在一起，两种成分都有，以日本的数字电网、电力路由器为典型代表。能源互联网改变了能源供需方式和结构，从目前从上到下的集中式转型为上下互动的集中式和分布式相结合，满足了消费者对能源电力服务和信息的需求，可以有效解决电力峰谷之间的矛盾，同时满足能源安全可靠要求。通过对能量来源的自由选择和互动管理，能源产业模式也得到互联网式的洗礼，相关产业将藉此兴起，经济结构甚至社会习惯都会带来变革。

## （2）发展能源互联网的积极意义

首先，能源互联网是现实意义下能源可持续发展提切实可行的道路。

能源可持续发展是当前摆在人类面前最重要的难题，可再生能源的发展虽然提供了彻底解决能源可持续发展的希望，但可再生能源的利用方面仍然存在问题。能源互联网在现实意义下提供了一条切实可行的发展道路。里夫金在《第三次工业革命》一书中做了这样的描述：“当数以百万计的建筑实时收集可再生能源，并通过智能互联电网将电力与其他几百万人共享，由此产生的电力使集中式核电与火电站都相形见绌。”

第二，能源互联网天然支持分布式可再生能源的接入。

欧盟、美国和中国相继分别提出到 2050 年实现可再生能源在能源供给中占 100%，80% 和 60%~70% 的目标。而风、光等大部分可再生能源的间歇性和波动性决定了仅依赖现在的集中式电网运行架构是无法适应如此规模的可再生分布式能源接入的。能源互联网通过局域自治消纳和广域对等互联，可最大程度地适应可再生能源接入的动态性，通过分散协同的管理和调度实现动态平衡。

第三，能源互联网在安全、可靠、稳定以及利用率等方面技术优势明显。

互联网体系架构决定了其安全稳定性较高，而其冗余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的机制，但能量和信息的交换和传输是有本质不同的。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，在广域互联中可通过储能缓冲、直流输电等方式实现解耦，同时局域不稳定问题可以通过广泛互联实现广域的动态互备用，达到安全稳定可靠的目标，而不是依靠过大的安全裕度而降低了系统的利用率。

第四，能源互联网是源用混合场景下对现有输配网的有益补充。

能源互联网不是取代现有电网架构，而是着重在分布式可再生能源接入越来越广泛，源用混合场景越来越普遍的形势下借鉴互联网理念提供一种自下而上的新型组网方式，能源互联网通过局域自治和广域能量交换最大限度的适应源-用的动态随机性，减少对大电网的影响，大大降低大电网的安全稳定性风险，是对现有大电网的有益补充。

### （3）能源体系变革

能源互联网首先是基础设施层面的革命。能源互联网可以被认为是未来以电为核心的新一代能源系统的具体实现形式。借鉴互联网思维与技术，能源互联网以开放对等的信息—能源一体化架构真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用，因此可以最大限度的适应新能源的接入。能源互联网是我国“互联网+”战略在能源领域的有力实践，结合我国电力体制改革，与分布式能源、新能源、需求侧响应与管理等的发展和推动密切配合，将促进我国能源电力基础设施和体制机制的重大变革。

能源互联网打破了行业中的信息不对称，极大提高了传统能源电力系统的效率，降低了成本。不过，能源互联网的价值远不止于此，更深远影响来自思维方式的革命，这将是一种全新的思维模式，核心是以“全连接”来重构能源企业的思维模式，电力消费者和发电企业之间、发电企业和电网之间、电力消费者和电网之间，以及服务企业和消费者之间，都是全连接的。能源企业的商业模式、营销模式、研发模式、运营模式、服务模式等，都必须以互联网的时代特征为出发点进行重构。只有能将互联网思维活学活用的企业才能在能源互联网大潮中脱颖而出，那就是以人为本，以开放为核心竞争力。

2015 年，能源互联网理论在中国科技界和产业界出现了快速推广的局面。众多能源互联网研究机构和产业联盟相继发起成立，如 2015 年 4 月 14 日，清华大学能源互联网创新研究院在北京成立；在 2015 年 6 月 16 日，中国能源互联网产业技术联盟在北京中关村成立，等等，这些机构都旨在推动能源互联网在中国的发展。2015 年，也是中国能源互联网示范工程的种子年。2017 年，在国家能源局的统一规划和管理下，在全国范围内，相继批准

了针对不同应用场景的能源互联微网示范工程大型筹备项目。工程模式包括：热电联产模式、风光储互补模式、光伏直供模式、工业园区自治系统等。中国国家能源局重视能源互联网产业，积极推进微网示范工程，为能源互联网理论与技术在中国的产业化发展提供了机遇。

## 1.2 能源互联网发展现状

### (1) 能源互联网与能源路由器

将近10年前，西方科学家们已经在探索微小型能源互联网络的实现机制。美国、欧洲和日本等国研究人员先后提出了各自的能源互联网概念及能量路由器的定义，比较明确给出能源互联网与能量路由器定义的研究有如下。

美国科学家首先提出了能源路由器的概念。2008年，美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理系统”(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management system, FREEDM system)<sup>[1-2]</sup>。它研究了一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构，称之为能源互联网。其中，他们效仿信息领域网络技术的核心路由器，提出了能源路由器概念并进行了原型机实现研究<sup>[3]</sup>。同一年，瑞士联邦理工学院研究团队开发了“Energy Hub”，并称之为能量集线器<sup>[4-7]</sup>。该集线器是由计算机科学中集线器的概念引申而来，也叫能量控制中心。2013年，日本科学家提出了“电力路由器”的概念。他们研制的数字电网路由器，可以统筹管理一定范围的地区的电力，并可通过电力路由器调度地区电力<sup>[8]</sup>。包括上述能量路由器表述在内，下表1.1给出了全球范围内能源路由器的主要案例与定义。

表1.1 能量互联网原型案例与定义

项目或研究主体	时间	定义名称	核心特征
美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理系统”	2008年	Energy Router	固态变压器的应用
加利福尼亚大学伯克利分校	2011年	智能电源开关(IPS)	以信息为中心
Stem	2012年	智能电池	从储能的角度实现路由功能
德国联邦经济技术部与环境部	2008年	E-Energy	信息通信技术+分布式新能源
瑞士联邦理工学院	2008年	Energy Hub	一个信息中心+超短期负荷预测
日本VPEC公司	2013年	电力路由器	基于“IP地址”识别技术

在总结上述研究的基础上，可给出能量路由器定义：在能源互联网架构下，运用信息与互联网技术，对能量进行以双向流动、设备接入自由和交易行为多元为管理特征的新一代能量管理系统与装置。

能源互联网理论与技术的发展催生了能量路由器。能源互联网理论及技术被视为能源领域的一次革命性发展，能源供给的“去中心化”、“绿色化”和“用户驱动”是能源互联网带给人们的新理念。能源互联网技术从能源的生产、传输、存储到消费各个环节，系统地提升能源系统信息和智能化水平。由于能源消费模式和物理层支撑方式的变化，原有的能量管理系统（EMS）、交易平台和调度执行层已不能适应能源互联网技术的发展，功能的整合与大量用户的自由接入与交易需求催生了新一代能量管理技术。能量路由器技术即是在这种背景下诞生和发展的新一代能量管理技术，它为能源互联网技术在微网层级、广域互联层级提供了能源管理功能。

能量路由器是新能源接入能源互联网的接口。新能源的广泛使用是能源互联网发展的必然要求。由于能源供应结构对社会生活有全方位的影响，能源转型需要一个循序渐进的过程。在能源互联网发展初期，新能源的接入有一定的比例；随着新能源建设和能源互联网技术的稳步发展，必然出现新能源占比的提高，并最终成为主导能源。能量路由器对新能源的接入和退出提供了分类标准化接口和充分自由的管理功能，它对能源的管理在响应速度、功率精度和电能质量方面都有更为严格的要求。对于微网和广域互联两个层级的大规模电站接入，都有不同特色的能量路由接入和管理方法。

能量路由器是能源互联网高级发展阶段的核心部分。能量路由器是能源生产、分配、消费形式升级的必然产物，是能源互联网必不可少的组成部分。与路由设备在互联网中的功能类似，能量路由器是能量转发、缓存、交易的节点，同时也能对电能质量进行有效的控制。针对分布式能源的特点，能量路由器需要做到即插即用，具备高度的可扩展性，有助于实现能源互联网“开放、互联、对等、分享”的理念。在能源互联网高级阶段，能量路由器通过对能源信息的采集和处理，对能源的传输等进行高效控制，将发展为维持网络运行管理的能源互联网架构下的核心部分。

从能源路由器架构体系、路由决策、路由核心器件研究及能量路由器样机研制进展四个方面，阐述国内外能量路由器的研究进展与现状。

## (2) 能源路由器架构

能量路由器需要控制能量的传输，为方便不同功率参数的分布式能源的合理接入，连接主干网和局域网中的各个终端，电力电子功率变换是必不可少的功能。作为能量路由器的基础，电力电子功率变换大大增强了能量传输的可控性，同时为不同类型的交直流电力设备提供相应的电气接口<sup>[9]</sup>。国外研究人员在功率变换架构方面进行了大量的研究。

欧洲UNIFLEX-PM系统使用的背靠背多电平变换器单相结构<sup>[10-11]</sup>。其中，中频变压器的磁芯材料为非晶合金，并采用油浸方式绝缘。输出逆变级与中间级交错相连，能实现能量三相均衡，并最终提供了中压和低压两个交流母线。该系统可以实现功率多向流动、电能质量调节等功能，不过未提供直流母线，不利于分布式能源及储能设备的接入。

美国电科院(EPR)为替代传统变压器研制了IUT结构<sup>[12-13]</sup>，中间级直流变换采用串联谐振变换器，副边采用SiC二极管整流桥以获得400V低压直流母线，输出级用全桥逆变电路产生单相交流低压母线。IUT结构实现了高、低压的转换，提供了交直流端口，在容量和功能上基本可满足区域能量路由器的要求。然而，该结构采用二极管整流器，功率只能单向传输，限制了能量的灵活流动。

文献[14]提出了包含电力电子变换器和高频变压器的更完备的架构，前者进行能量转换、功率保护和控制，后者用来实现电气隔离和转换电压水平。针对近年来高速发展的微网技术，文献[17]提出了一种基于交直流混合微网的能量路由器构架，由交直流母线、双向交直流变换器及功率变换器构成。文献[15]针对电力能源提出了一种能量路由器架构的设计。整个路由器由通信平台、控制器和固态变压器三个主要功能模块组成，如图1.1所示。该架构通过电压调节保证能量分配的平衡，并完全依靠通讯网络实现路由器间的协同。

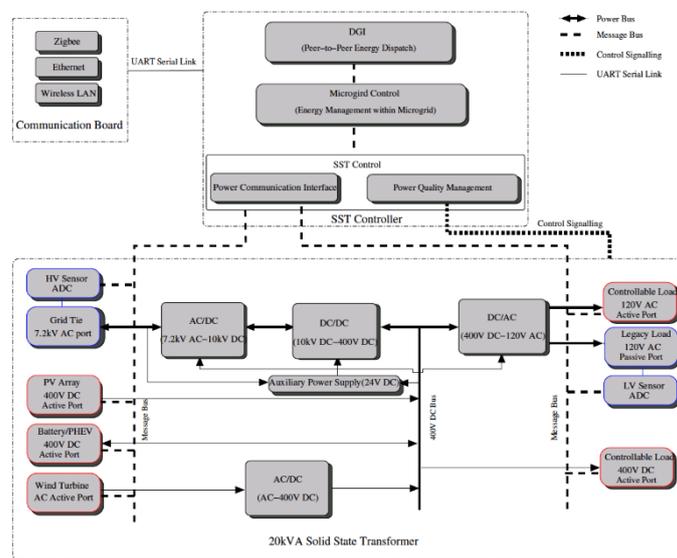


图1.1 基于20kVA 固态变压器的能量路由器架构设计<sup>[15]</sup>

文献[3]全面总结了当前能源环境下能量路由器需要具备的功能，包括：可以进行基本功率转换和完善的电能质量管理，能提供双向功率流，配备辅助电源供应结构，有多个确定的即插即用的接口与总线，具有高度开放性，实时汇报信息给终端用户等。为实现上述功能，作者提出了由系统控制器，网络自适应模型，直流母线和多个接口标准的插座和断路器构成

的体系结构，如图1.2所示。该架构模型能够进行高质量的电源转换，具有即插即用的MIMO接口以及整体定制操作系统。能量路由器连接到网络中，与高压传感器、直流整流器、直流变换器、辅助电源系统等，组成一个能进行交直流转换的自适应网络模块，既能为独立设备供电，也能提供与其他路由器的接口。此方案中，为监测和控制能量实时的转换和用户的调度，能量路由器和最终用户的架构设计严重依赖于它们之间的通信架构。这大大增加了通信架构的复杂性，不仅需要支持实时监控和控制电力运营时间的操作系统，也需要与相联系的用户终端进行实时通讯。

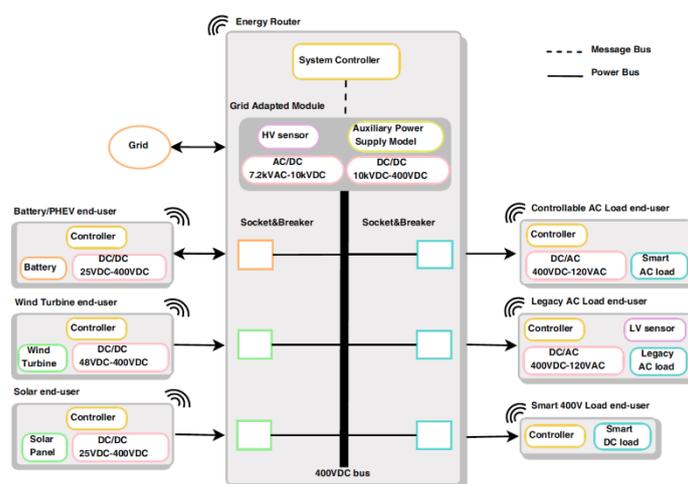


图1.2能量路由器与用户终端架构<sup>[3]</sup>

能源网络为保证系统的可靠性和安全性，在网络中部署了大量的管理和保护装置，而且它们之间采用元件级的通信协议实现协同。前述两种能量路由器过于依赖通信架构，如果不能很好地与管理保护装置兼容，能源网络将面临巨大的安全威胁。针对此，文献[16]认为兼容保护功能，拓宽通信模块的支撑功能是可行的解决办法。文献中，作者把能量路由器设计为两层架构，见图1.3。

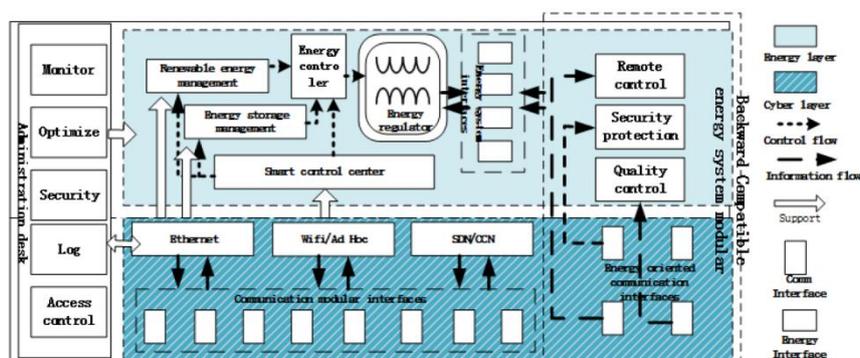


图1.3能量路由器架构设计<sup>[16]</sup>

信息支撑层为能源控制层提供信息支持,还能够与保护等基础部件融合构成能量路由器的特有安保功能,同时提供各种通信接口和相应协调机制,保证通信协议兼容和通信方式可靠;功能层包括能源控制、优化管理、安全防护和管理维护等。能源控制层提供能源接入,能源质量调节,能源消费优化的功能。控制功能由综合数据中心和专门业务单元联合实现,一般采用能源控制器下发控制指令调配能源控制单元的方式。此外,考虑到能量路由器工作对电能的依赖,能量路由器都配备电力能源存储单元。

### (3) 能量管理与路由决策

传统互联网的路由效率受网络结构、网络带宽、路由器设置等因素影响,能源互联网还涉及储能技术、开关技术、配电技术等因素。当前研究水平下的路由策略不能涵盖上述所有条件,忽略路由器个体间的差异,分析研究只由网络宏观拓扑结构性质决定的路由环境下的能源互联网路由策略,可以突出重点的研究问题。分析时规定:在能源互联网中,能量被包括原地址、目的地址、下一跳路由地址等的信息标签标记,称为能量信息流(Energy Information Flow, EIF),并可实现传输设备复用与高效化;能源互联网最终以“电能”形式输出,能量信息流的能量也是以电能的形式在能量路由器间存储与转移的。针对能源互联网的“拥塞控制”和“负载均衡”,我们对能源互联网的路由决策研究进行综述。

能源互联网的能量传输拥塞是指在理想路由环境下,由于路由策略导致个别能量路由器的超级储能单元存在过多能量信息流转移传输任务,致使能量路由器转发服务过载,网络整体能量信息流传输效率急剧下降,以至崩溃。目前在诸多实际通信系统中,普遍采用最短路径路由策略(Shortest Path Strategy, SPS)<sup>[18]</sup>。SPS策略虽能最小化EIF的转发次数,减少转发等待消耗,但在能源互联网中,网络传输 EIF 的吞吐量受到“中心节点”位置能量路由器的限制,产生“能量传输拥塞”。在能源互联网实际应用场景,甚至将导致部分处于中心位置的能源路由器瘫痪,产生安全隐患。针对这一问题,文献[19]提出了有效路径路由策略(Efficient Path Strategy, EPS),把中心化程度高的能量路由器上的EIF转发请求分散到其他中心化程度低的能量路由器。SPS与EPS的研究对象都是针对网络中处于中心节点位置的能源路由器,而在能源互联网中,网络中的有效边即传输线路也将影响EIF的传输效率。文献[20]利用能源互联网的拓扑结构特性,提出基于边权的路由策略(Edge Weight Strategy, EWS),以解决能源互联网中的能量传输拥塞问题。

由于网络的无标度特性,某些重要的链路成为数据传输的最优路径,给与之相连的“中心节点”带来更多的数据中转任务。充分利用这些“中心节点”能有效提高路由决策的效率,这就需要全局或局部掌握网络各节点实时动态的负载信息,继而进行局部调整,以达到全局

最优。文献[20]在只考虑能量负载均衡的应用场景下，通过实时获取邻居节点的能量负载信息，提出了基于邻居节点能量负载动态信息的路由策略(Adjacent Node Load Strategy, ANL)。在解决了能量传输拥塞和能量负载均衡问题的基础上，该文献也提出一种基于边权与节点能量负载的联合路由选路策略(United Routing Strategy, URS)，旨在控制能量传输拥塞问题的同时也能合理分配能量负载，提高能源互联网的能量转移传输效率，以适应能源互联网复杂的应用场景。

除了上述与传统互联网中应用类似的路由算法之外，针对能源互联网的路由决策研究也有成果可观的进展。文献[21]提出将能量路由器作为可再生分布式电源接入主动配电网时的灵活接口，并利用多媒体技术作为主动配电网中电能路由器管理能流的核心技术，实现各控制区域协调运行。同时参考运筹学中的最小费用流提出了SPR (Scaling Push-Relabel) 控制算法，来实现缓减用电高峰、降低运行成本、最大化满足用户电力需求等控制目标。

总体来看，有关能源互联网路由决策研究的成果还并不是很丰富，还存在着较大的研究空间。

#### (4) 路由核心器件

随着各类分布式能源设备的接入，传统变压器在供电质量等方面难以满足能源互联网建设和发展的需求。固态变压器作为一种利用电力电子器件进行高频能量和功率控制的变换器，被认为是能源互联网的核心技术。

固态变压器(Solid State Transformer, SST)也称为电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)，它通过电力电子变换技术和高频变压器实现电力系统中的电压变换和能量传递。与常规的铁芯式变压器相比，这种变压器具有很多新的功能，如电压下陷补偿、断电补偿、瞬时电压调整、故障隔离等。固态变压器也具有铁芯变压器不存在的诸多优点<sup>[18]</sup>：体积小，重量轻，无污染；运行时副边输出电压幅值保持恒定，不随负载变化；原边与副边电压电流均为正弦波；具有高度可控性，变压器原边电流，副边电压、电流以及功率均可控；具备断路器的功能，面对故障大电流可以瞬时（微秒级）关断，无需复杂的继电保护装置；含有智能控制单元，可以实现装置的自检测、自诊断、自保护和自恢复等功能，同时能实现联网通信，对于实现电网的智能化具有积极意义。

固态变压器的发展经历了比较长的历史。1970年，美国 W.McMurray 首先提出了一种具有高频连接的AC/AC变换电路，这种高频变换电路成为后来固态变压器的雏形<sup>[19]</sup>。基于此，八十年代美国研制出两种基于AC/AC变换的固态变压器。Koosuke Harada 等人在1996年又提出了一种智能变压器，减小了SST的体积，并实现了恒压、恒流、功率因数校正等功

能。随后，美国德州A&M大学的 Moonshik Kang 和 Enjeti 提出了一种基于直接AC/AC变换的SST结构，这种固态变压器的首要设计目标是减小变压器的体积重量并提高整体效率。M.D.Manjrekar 和 R.Kieferndorf 等人在buck boost变换器的基础上提出了一种直接AC/AC变换结构的SST<sup>[20]</sup>。Ronan 和 Sudhoff 于1999年提出了一种由输入级（高压级）、隔离级和输出级（低压级）三级结构组成的SST<sup>[21]</sup>，这是固态变压器领域首次尝试三级结构拓扑，此种结构较好地满足了降压变原方高电压小电流和副方低电压大电流的要求。上述方案受当时技术发展水平的限制，都未能进入实用化<sup>[22]</sup>。

美国北卡州立大学的FREEDM（the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System）中心研制的第一代固态变压器(solid state transformer, SST)结构<sup>[23]</sup>。其输入是单相交流7.2kV中压配电网，输出电压为单相240 V/120V交流电和400V直流电。高压侧使用6.5kV硅IGBT，整流级由多个全桥模块级联而成。中间级是隔离型DC/DC变换器，将3.8kV直流电压转换成400V直流母线。最后一级的电压源型逆变器生成240 V/120 V 低压交流母线。由于器件限制，高压整流侧的开关频率只有1080Hz，DC/DC级的开关频率为3.6kHz，低压侧也仅为10.8kHz。较低的开关频率不但限制了动态性能，还导致系统体积和重量庞大，运行噪音巨大。

为了改善性能、提高效率，FREEDM中心研制了基于碳化硅MOSFET的第二代SST<sup>[24]</sup>。该方案使整体结构大大简化，整流级和DC/DC级只由单个模块构成，开关频率也增加到20 kHz。同时整机体积大大减小，整体性能也有较大提升。该系统同时提供了交、直流低压母线，方便传统负载和可再生能源的接入。能量在三个端口之间实现多向自由流动，提供了灵活的能量传输方式。另外，该系统具有高、低压交流侧的电能质量调节功能，包括谐波改善、无功补偿和电压支撑等，更能满足能量路由器的设计要求<sup>[25,29]</sup>。

类似的，为满足主干网络对能量路由器容量的需求，瑞士苏黎世理工大学(ETH Zurich)为智能电网设计了1MVA固态变压器<sup>[26]</sup>。系统的输入端与中压配电网相连，输出400V低压三相交流母线。相比FREEDM的第一代SST，该结构可将开关频率提高到20kHz，模块的整流级和DC/DC级均采用二极管钳位三电平结构，提高了模块输入侧耐压，减少了模块数。

另外，通用电气为智能变电站设计了一个固态变压器<sup>[27]</sup>。高压侧选用了10 kV/120 A 的SiCMOSFET 构成H桥模块，并且采用串联结构降低电压应力。工作频率选在20 kHz，高频变压器采用了纳米晶材料以降低磁损。

国内对固态变压器的研究起步较晚。文献[28]首先将FREEDM概念引入，探讨了应用于新型智能微网FREEDM的SST的拓扑结构、工作原理和控制策略，并设计了一个适合我国

电力系统电压等级的SST模型，通过仿真验证了该设计方案的有效性。此外，该文献也从器件选取和连接方式等方面提出了适应国内配电电压等级的可行的改进方法。FREEDM 也被视作一张能源网络，而SST作为智能能量管理的关键部分在其中扮演着类似于传统互联网中路由器的角色，将FREEDM网络中的分布式可再生能源和分布式储能单元连接起来<sup>[2]</sup>。

为适应复杂多样的工况，研究人员设计出了多种固态变压器结构。柔性直流配网中使用直流固态变压器(DC solid state transformer, DCSST)，以实现高压直流配电和低压直流微电网间电压和功率的灵活控制和快速管理<sup>[30]</sup>。

固态变压器作为能量路由器的核心器件，在能源互联网中发挥着重要的作用，固态变压器控制方面的研究也涌现出大量的成果。目前，基本固态变压器基于DSP和FPGA的控制算法已经得到了实现<sup>[31]</sup>。研究人员对SST在输电网络中提高电力系统动态稳定性和在最优潮流控制中的表现做了分析，发现在相应的控制模式下，SST可改善电力系统中负载不对称运行下的工况，而且通过分析主从控制方法，将其用于多台SST并联和SST与传统变压器并联，能有效地解决环流功率的分配问题<sup>[32-33]</sup>。

SST在微网中的应用也取得了大量成果。文献[34]在SST的高压变流器中实现下垂控制，并推导了SST的容量与下垂系数的关系，通过一个环形的高压微电网，仿真分析了所提出的下垂控制策略在高压微电网联网运行、孤岛运行以及这两种模式切换时稳定微电网频率和电压的效果。基于混合微电网中高级组件的高频链双向交流固态变压器的实用解决方案，能实现固态变压器在两种运行模式间的无缝切换的分层电源管理策略，能够充分利用直流微网系统中每个模块且仅依靠自身信息的分布式能量控制策略都大大推动了微网技术的发展。

#### **(4) 能量路由器样机研制**

近年来，相关科研人员在能量路由器样机研制方面也取得大量进展。如图 1.4 所示是一种用于分布式发电的能量路由器<sup>[35]</sup>，包括可控开关、变流器、工频交流母线、能量管理系统和静态开关等。可控开关直接接到工频交流母线上，变流器的输入侧接储能单元，变流器的输出侧接到可控开关上，静态开关的一端接到工频交流母线上，另一端连接到公共电网，能量管理系统通过以太网与可控开关、变流器和静态开关相连。

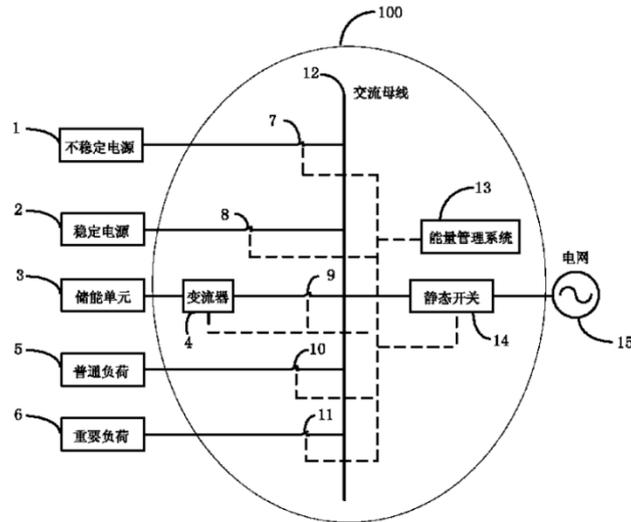


图 1.4 一种用于分布式发电的能量路由器<sup>[42]</sup>

天津大学提出一种属于智能电网中的分布式可再生能源利用领域的能量路由器<sup>[36]</sup>。它包括控制单元、无线模块、信号检测与电能计量模块、开关阵列和路由器端口。可接入市电专用电源普通电源；控制单元根据采集的电能质量信息和负载的用电特性，进行电源与负载的最优化匹配，通过开关阵列实现电源与负载间的连接或切换。该路由器可以实现各种分布式电源的并网管理及与负载的最优化匹配。

随后，在智能电网及智能家居中的分布式电源利用及智能用电管理领域，天津大学又提出了一种具备多种供电方式的能量路由器<sup>[37]</sup>。该装置包括控制单元、通信模块、双向交流/直流逆变器、开关阵列、一条直流母线、两条交流母线、母线检测模块和路由器端口。该装置能够根据负载的用电特性和用电需求及电源的供电状况，对各种电源和负载实施智能、高效的管理。

为使信息物理系统融合，段青等发明了一种能量路由器<sup>[38]</sup>。包括监测模块、通讯模块、信息处理模块、智能控制模块、电力电子固态模块、电能接口模块和储能模块；监测模块将监测信息通过通讯模块传输给信息处理模块，信息处理模块将运算处理后的数据传输给智能控制模块，智能控制模块将控制信息传输给能量路由器其他各模块，以控制能量路由器对电能的转换、双向传输和协调运行。基于信息物理系统融合的能量路由器系统结构，满足结构模块化、控制智能化、通讯强化和系统鲁棒化等特征，具有计算、通信、精确控制、远程协作和自治等功能，并具备实用化的可行性。

2015 年，东北大学设计出一种应用于能源互联网的能量路由器装置<sup>[39]</sup>。该装置包括三相电平双向整流单元、六相交错 DC/DC 双向变换单元、自激软启动推挽式全桥 DC/DC 双向变换单元、三相谐振软开关双向逆变单元、单相全桥双向逆变单元、高压直流母线和低

压直流母线。各单元均有正向导通、逆向导通和不导通三种能量流动工作模式，能量流动工作模式的不同，形成应用于能源互联网的能量路由器装置的不同工作模式。

在电力电子变换器技术领域，国家电网公司与清华大学联合，设计出一种具有级联模块电压自动平衡电路的能量路由器<sup>[40]</sup>。该能量路由器是由整流级、双有源桥、逆变级组成，对外分别具有高压交流、低压交流和低压直流三种端口；其中  $n$  个 H 桥整流模块级联后组成整流级， $n$  个双有源桥模块级联后组成双有源桥；一个三相 H 桥模块组成逆变级；还包括在每个双有源桥模块中设有级联模块电压自动平衡电路。该模型能避免控制器对每个级联模块各自的母线电压平衡进行控制，降低对能量路由器控制器运算资源的要求，同时减少传感器的数量和控制器的采集通道，尤其当级联模块的数量很多时，能体现出很大的优势。

### (5)网络核心技术

能量路由器综合了先进电力系统技术和新信息技术。这些关键技术包括统一潮流控制 (UPFC)、高压直流输电 (HVDC)、智能储能，也包括软件定义的能量路由器、数据中心和交易平台。

- 统一潮流控制器

UPFC 是将静止同步补偿器 (STATCOM) 和静止同步串联补偿器 (SSSC) 的直流侧连接在一起的组合装置，可以同时或者分别控制电网的电压、阻抗以及相位角等影响输电线路电力潮流的参数。有功功率可以在 SSSC 的串联输出端和 STATCOM 的并联输出端之间双向流动。没有外部储能的条件下，能提供串联线路有功和无功电流补偿。由于串联注入电压相位角没有限制，UPFC 可同时或有选择地控制输电线路的电压、阻抗和传输角，还可以有选择地控制线路上的有功功率和无功功率，也可以独立地提供可控并联无功补偿。UPFC 的应用大大提高了对于输电网络无功潮流的控制能力。

- 高压直流输电

高压直流输电 (HVDC) 是另一种属于物理层的能量路由器关键技术。HVDC 是利用稳定的直流电无感抗、容抗等优点而采用的大功率远距离直流输电技术。HVDC 系统由两个换流站和直流输电线组成，两个换流站与两端的交流系统相连接，用直流线路将整流器与逆变器连接在一起，该直流线路既是整流器的输出，又是逆变器的输入。常用于海底电缆输电，非同步运行的交流系统之间的联络等方面。在 HVDC 系统中，电能从三相交流电网的一点导出，在换流站转换成直流，通过架空线或电缆传送到接受点；直流在另一侧换流站转化成交流后，再进入接收方的交流电网。

- 智能储能

储能装置是能量路由器的必要组成部分之一，其主要作用在3个方面<sup>[41-42]</sup>：第一，改善电能质量，维持系统稳定；第二，在分布式发电装置不能正常工作时向用户提供电力；第三，提高分布式发电单元拥有者的经济效益。能源互联网中分布式可再生能源的大规模接入要求能源互联网必须具备储存和消纳可再生能源的功能，系统中的分布式储能装置虽然能够实现这一功能，但是响应速度不够快，而电能质量的轻微变化都有可能对整个能源系统造成严重的蝴蝶效应，因此能量路由器中必须具有能够快速响应的储能模块以实现能源流的实时调节和满足高标准的电能质量要求；其次，能量路由器必须不间断运行，这也要求能量路由器中含有高性能的储能模块来保证自身的可靠工作。由此可见，储能技术的发展对于能量路由器具有相当重要的意义，主要包括两方面的内容，一个是找到高效大容量存储能量的方法，二是实现高效快速的能量之间的转换。

#### ● SDN 与能量路由器

软件定义网络(software-defined networking, SDN)<sup>[43-47]</sup>通过将网络设备的控制面与数据面分开，使控制信道与数据平面的数据传输信道逻辑独立。控制逻辑可以从分散的路由节点中独立出来，形成逻辑上统一的控制节点，而路由节点仅实现简单的数据转发功能。每个路由器将流表用于数据包的转发，SDN以流为单位对数据包进行处理。当数据流的第一个报文到达路由器时，首先在流表中进行查找。如果在流表中没有匹配项，将被转发到控制器进行处理。由控制器计算转发路径并在相关路由器上建立流表项，然后将该报文转发到原路由器进行转发。流表项建立后，后续报文可以实现报文的即时转发，并可以保证匹配报文的转发路径保持不变

### 1.3 研究内容与预期成果

能源互联网基础理论与若干关键技术探索是一项较为系统的研究课题。研究内容包括如下：

第一，基于国家电网公司能源研究院前沿课题《全球架构下能源互联网系统构建与情景分析》，研究能源互联网的层级结构、属性特征、运行原理和关键技术等系统性基础理论，重点研究能源互联网的能源互联微网和城市能源互联网，从能源层、信息层、业务层和价值层四个层面深入分解研究。

第二，基于北京市科委课题《自治微网能源路由器研制与应用示范》，研究能源路由器的系统原理、系统设计和示范应用等。重点研究能量接入管理、母线电压稳定和热插拔等关键问题。

第三，基于国家电网公司信息通信部课题《区块链技术在能源互联网中的应用》，研究

区块链技术与能源互联网的融合方式与途径。重点研究基于能源路由器网络的区块链技术应用方式方法和区块链技术在能源互联网价值传递中的应用。

最后，通过参与能源互联网示范工程，把能源互联网理论用于指导示范工程的规划。参与宁夏中宁县工业园区、北京海淀北区和合肥新站区能源互联网示范工程的规划，探索能源互联网关键技术、经济性、运营模式等亟需解决的实际问题。

预期研究成果如下：

深入研究能源互联网理论与技术，发表或撰写完成论文 5 篇，申请发明专利 3 项，输出研究报告 1 份。

## 第2章 能源互联网系统理论研究

### 2.1 能源互联网架构体系

全球能源互联网是能源互联网的高级阶段，把全球范围内的所有可操作能源都互联起来，形成国家之间的能源共享与交易。能源互联网的技术性和经济性因素都已在微网、城市互联和国家互联阶段解决，而能源安全与政治环境成为能源互联网在全球范围互联的主要因素。全球互联不同于国家互联和城市互联，能源形态发生了重大变化。电能由于其独特的自然属性，易于传输、故障状态下无污染扩散、安全性可控等，使其成为国家之间能源共享的最佳形态。因此，全球层面的能源互联网主要体现在全球电网互联。

能源路由器是能源互联网高级发展阶段的核心部分，也是当前正在研究的前沿关键技术。与全球互联、国家互联、城市互联和互联微网四个层级相对应，能源路由器及其网络可在每一个层级实现网络化应用。能源路由网络是未来能源互联网多维分层架构的关键支撑技术。这一章节将从能源路由器网络的层级结构、运行机制、组网方式和能量管理等角度，深入研究能源互联网的关键技术及应用情景。

#### 2.1.1 架构特点

在地理结构上，能源互联网包括微网、城市互联、国家互联和全球互联四个层级。在功能划分上，每一个地理层级都包含价值层、业务层、信息层和能源层四个功能。这构成了全球能源互联网的矩阵架构，如下图 2.1 所示。

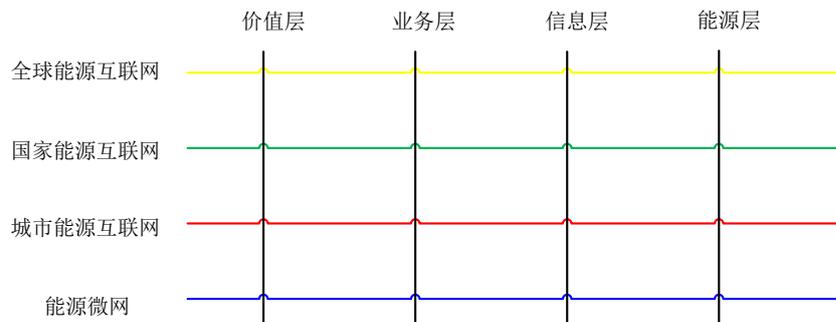


图 2.1 能源互联网地理结构与功能划分矩阵架构

下图 2.2 给出了全球能源互联和国家能源互联的情景。



(a)国家能源互联网情景



(b)全球能源互联网情景

图 2.2 全球与国家能源互联

### 2.1.2 功能特点

能源互联网的整体架构可以分为价值层、业务层、信息层和能源层，其中价值层负责实现能源互联网整体价值以及各个组成部分的基本价值，业务层负责业务流的制定、运行和交易，信息层负责信息流的采集、传递、应用与交互，能源层负责能源流的生产、管理与共享。整个架构以价值为导向，通过业务层、信息层和能源层的相互配合，实现能源互联网能量的精确调度与高效利用，解决现有的能源和环境危机，保障社会经济的正常运行。根据该目标，能源互联网需要提高各层功能和服务的运行效率，并形成整体控制，以避免分散控制造成的各自为政，相互制约，为此，业务流、信息流和能源流的融合是必然的发展趋势。

在各种能源中，电力由于其特殊性，适合进行远距离传输和高效使用，其使用过程不会对环境 and 大气造成危害，方便建立网络状电能运输体系，并具有可扩展、可进行电力控制的优点。而其它能源，如天然气，无法自动化的对其传输和使用进行控制。而且一次能源所产生的冷和热，由于具有传输损耗，也仅能在局部为用户提供能源，无法形成真正意义上的全局性的能源互联网络，但其架构可以与电力能源互联网的局部架构类似，且内容和原理近似。由此，以下的讨论主要以电能形成的能源互联网为基础，对其总体架构进行研究和阐述。而对其它能源，可以基于电能形成的能源互联网，额外进行控制，但仅能对能源传输关键部位进行监测和控制，如阀门、流量计等，无法实现类似电能系统的全局、各环节整体控制。

其监测和控制精度也远小于电力网络，达不到电能系统所具有的控制精度和性能。

以上至下的顺序，即依次对电力网络的价值层、业务层、信息层和能源层所应具有的功能和服务进行介绍，介绍中涉及能源互联网运行流程中的各个基本部分，从发电、输电、变电、配电、调度、用电这六个方面依次进行分析，以期得到一个清晰、明确的能源互联网架构。

### 2.1.3 属性分解

#### (1) 价值层

能源互联网建立的目的，就是实现其所期望的价值。其基本价值在于通过先进的信息通信基础设施支撑，以充分利用分布式可再生能源和减少大气污染为目标，结合各种大数据分析技术，自动控制技术，分布式储能技术，采用各种先进的电力电子设备、嵌入式传感器设备、高性能储能设备，以及建立采集监控物联网、电动汽车车联网，云数据中心处理平台，从而形成更加智能化、自动化的电力系统网络，保障能源互联网相对于传统电网更加平稳、更加高效、更加经济、更加鲁棒的运行，体现更优越的电力网络性价比，减少人工使用成本，避免人工操作的易错性，由此带来发电商发电效益、输电商输电效益、微网运行商管理效益以及客户用电效益的各自最大化，实现多赢。同时对于整个社会、经济、民生，带来更高的用电保障和更经济的用能成本，体现出能源互联网的基本价值和优越性。

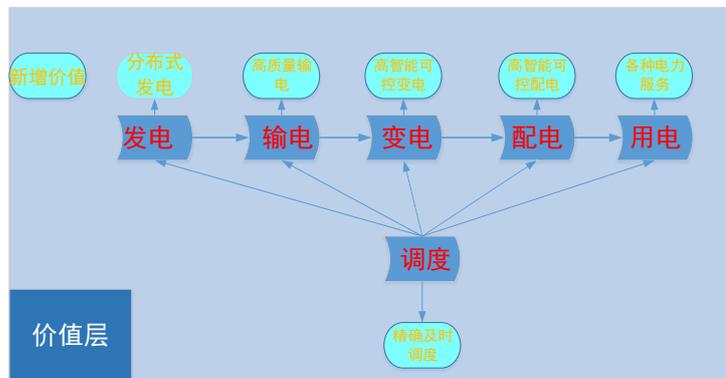


图 2.3 电网各环节价值分析

发电方的价值在于通过电力网络为用户提供电能。由于电能的特殊性质（非物质，瞬时性），发电方和用电方必须在电力生产和电力消费间保持同步。基于能源互联网的发电，相比于传统电网，除了各种集中式发电厂和集中式可再生能源发电基地之外，一个重要特征是其还包括各种分布式可再生能源发电（如风能和太阳能光伏等）。此类分布式发电一般位于能源微网中，一般以建筑物或小区为单位安装相应发电设备，具有规模小，易波动，间歇性的特点。由此，其价值主要在于为本地局域网用户提供电能，实现高效率、低污染的局部

电能消纳。由于分布式电能生产天然具有的不稳定性，虽然已经通过微网对其与主干电网进行了隔离，微网内部同样会受其影响，因此及时、精确的电能负荷预测同样是分布式电能生产的基本要求。通过负荷预测，结合其它先进的调度技术如需求响应，发电方能够实现按需供应，充分体现能源互联网电能生产价值。

对于输电方，由于电能本身只是一种能量，没有任何物质形态，仅能经过金属性媒介传递，基本无法通过交通工具运输（除了电能存储设备）。发电方产生的电能，需要及时甚至瞬时的传递到用电方，因此需要建设必要的输电网络并实现各区域输电网络的互联，其规模可以从区域级发展到国家级甚至于建立全球性电力传输网络。传输电能，是输电方的基本价值。在能源互联网中，需要更加强调输电网络所传输电能的稳定性和高质量，在传统网络中，由于通信技术的缺乏，管理人员无法实现对整个电力网络状态全局感知，只能对每个具体设备或具体区域范围内的设备进行监控，如市内高压输电线路、区域内高压变压器等，导致形成了信息孤岛。同时，无法有效及时的通信也使得对输电网络的控制变得更加困难，导致了操作人员仅能通过整体模糊判断下达宏观性的控制命令，而无法给出精确的微观控制要求。这导致传统输电网络的运行效率低下，输电方的输电价值也大打折扣。

配电方价值。为了减少输电损耗，输电网络，特别是远距离、跨区域输电网络，一般采用高电压传输，而用电方为了保证用电安全和操作方便，一般采用低压供电，且通过并联连接相关用户。因此，变电和配电网络和设备承担了电压转换和电能分配的功能，是其基本价值所在。由于我国传统电网建设的“重输电、轻配电”，导致了输电网络难以在高负荷情况下稳定运行，故障频出且维修困难，给国家带来巨大的经济损失。而能源互联网针对这一现状，加大了对传统输、配电网的改造。在上面广泛部署传感器，形成传感器网络，同样利用物联网技术，实现对输、配电网的整体监控，同时利用各种人工智能技术，努力提高输、配电设备的智能性和可控性。同时通过大数据技术，结合可视化和远距离通信网络，可以实现对输、配电网的远距离分析与控制，实现诸如状态判断、故障定位、网络设备重配置等功能。通过一系列技术改造，能源互联网输、配系统实现了对电力传输和分配的有效控制，体现了其在能源互联网中不可缺少的价值。

调度方价值。由于能源互联网各个区域的电能需求是随时间变化的，且各区域的变化具有一定的时空特性，距离越大，时空特性差异越明显，同时，各种能源生产具有一定的互补性，可以通过有效的调度来保证各种电网用户的供需平衡，提高能源使用的效率和网络运行的稳定性，从而产生可观的经济效益和社会效益。由此体现了调度方（调度系统）在能源互联网中的价值。在能源互联网中，通过使用与前面各方类似的方式，可以获得更加全面的

数据，形成对整个网络各个设备和部件状态的实时、精确了解，使得精确、及时调度成为了可能。通过精确、及时调度，其对电网高效运行的辅助价值也得以充分体现。

用电方的基本价值，是实现对电能的使用，通过电力消费，为整个社会的生产、生活提供清洁能源，保障社会、经济的正常发展，和人民生活水平的不断提高。电能使用是整个电能能源互联网的最终价值，该价值的有效实现，是以上发、输、变、配、调各个环节的价值基础和最终体现，没有用电的价值，就不会存在以上各方的价值，而该价值的提高，也会带来以上各方价值的提高，是“一荣俱荣，一损俱损”的关系。相比于传统电网的固定电价机制，能源互联网可以根据生产成本以及生产容量动态变动价格，并基于对用户用电数据的分析，根据其用电特征，为其提供合适的电力服务，以最大化的体现用电价值。

## (2)业务层

能源互联网的业务流也贯穿于整个电力网络，从发电方的发电业务，输电、变电、配电方的输电业务，到用电方的用电业务，形成了一条“发、配、售”的业务链。下面就业务逻辑单元、利益相关方、交易机制和业务流动机制对能源互联网的业务层进行分析和研究。

### ● 业务逻辑单元

尽管电力系统功能分为发电、输电、变电、配电、用电和调度等六个单元，真正的业务逻辑实体仅存在发、配（包括输、变、配，三者属于同一资产拥有者）、售三个方面。相比于传统电网，能源互联网业务改变主要集中于配电业务和售电业务两个方面。

由于能源互联网中微网的出现，业务逻辑单元中增加了对分布式可再生能源的接入业务和销售业务。由于微网中采用了分布式可再生能源发电装置，且微网内多余的电能会反馈到主干电网中，因此配电网需要对其进行管理和控制，由此产生了新能源接入业务和微网配电服务。同时，分布式可再生能源需要进行局部消纳，或与其它微网进行共享，由此，需要增加与分布式能源销售相关的业务逻辑单元。

### ● 利益相关方

发电业务：对发电业务，其主要的利益相关方为发电方和用户。发电方从发电中获取利润，用户通过使用电能实现相关的工作和生活。由于发电方追求利润的最大化，而同时用户追求尽可能小的用电成本和稳定的电能质量，二者相互制约，并在自由交易的情况下，形成了发电方和用户的博弈。根据纳什博弈均衡理论，二者的博弈存在一个最优点。该最优状态是发电业务所追求的目标。

不同于传统的电力网络，能源互联网实现了微网内的分布式发电，由此，在发电业务中增加了两个利益相关方，即分布式发电方和分布式发电相关用户。这两个利益相关方同样

追求利益最大化，但其目标建立在最大化消纳本地可再生能源的基础之上。

由于能源互联网售电业务的放开，能源服务公司可以充当用户的代理或中间商，因此也算一种特殊的用户。

**配电业务：**配电业务的利益相关方包括配电公司和用户。在传统电力网络中，因为用户需要通过配电网络使用发电方提供的电能，使用了配电方的电力基础设施，出于建设成本、运营成本和盈利，用户需要向配电公司支付相关输电费用，该费用一般可由发电方（大客户直供）或能源服务公司代为缴纳，并将其计入卖电价格之中。

以上在能源互联网中同样存在，同时在能源微网中，还存在分布式发电，而其电力的传输和使用可以不用经过配电公司建立的输配电网络，由此不存在配电业务的利益相关方（除了微网配电）。实际上，配电业务的利益被合并到了发电业务或售电业务。

**售电业务：**对于传统网络，由于对电力系统的管控，用户只能从电力公司购买电能，相关的利益对象仅包括电力公司和用户。而在能源互联网中，出于对售电业务的放开，各种能源服务公司均可以进行售电业务，利益相关方扩大为电力生产公司，能源服务公司以及各类用户。

- 交易机制

在传统能源互联网中，一般用户只可以以固定价格从电网公司购买电能，而大用户可以与电网公司签订独立的供电协议。交易机制较为简单，价格固定，电网公司会承担一定的风险。如果在电能传输过程中使用了配电网的基础设施，可以由发电商或电力服务公司向配电方缴纳一定的网络租用费用，并将其计入最终销售价格中。

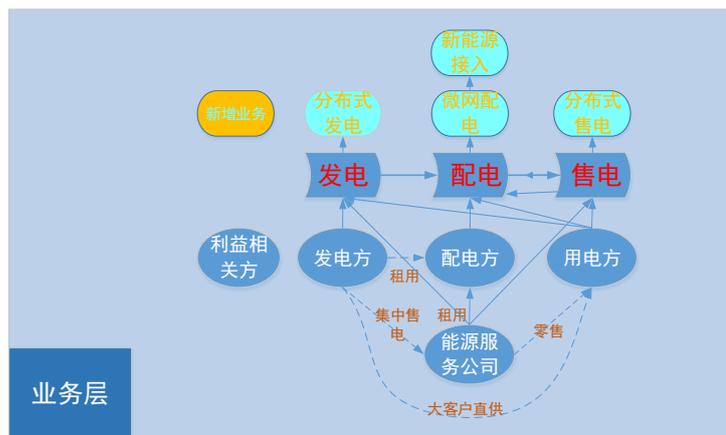


图 2.4 业务与交易分析

随着能源互联网的出现，发电端和售电端均被放开，将出现许多独立的发电公司和能源售电服务公司。此时，除了大用户可以与发电公司直接签订用能协议之外，主要通过发电

公司与能源服务公司签订购电协议(批发),同时能源服务公司与用户签订用电协议(零售),并提供不同种类的用电服务。用户可以根据实际情况选择所需要的能源服务公司。如果用户与服务公司之间采用固定电价,而服务公司与发电公司采用实时电价,会给服务公司带来一定的购电风险。而通过在用户端采用分时电价或实时电价,电力能源的消费成本会与用户的用电成本直接相联系,可以降低服务公司所承担的部分风险。

在能源互联网交易机制中,需求侧管理或需求响应成了一个重要的部分。当发电方因为出现电力负荷尖峰而采用其它临时性发电设备时,不仅会产生较高的边际生产成本,且辅助发电设备的临时性使用会带来极大的发电资源浪费,从而从整体上增加了发电成本。在传统电网中,调度人员可以通过切负荷的方式强制部分电力设备的使用,以保障更重要设备的用电安全,这种粗鲁的做法会对设备相关企业带来很大的经济损失,破坏社会的整体和谐。

在能源互联网中,通过从“以用电决定发电”向“以发电决定用电”思想的转变,人们开始研究需求侧管理和需求响应相关技术。二者通过经济的刺激,引导用电用户改变自身的用电特性,从而实现“消峰填谷”或发电与用电的精确匹配。要实现该目的,能源服务公司可以通过制定可变电价,如“分时电价+尖峰电价”或“实时电价”,引导用户在高价格期间减少对电能的使用,将使用转移到低价时段。或者对用户在高峰时段的节点行为设立相应补贴,同时签订相关合约以保证避免尖峰负荷的出现。

目前国外已经进行了关于建立能源互联网交易平台的相关实验,如德国的 E-energy 或美国的 opower,通过交易平台的建立,人们可以获得更廉价的电力来源,电力来源的多样性也得到了保证。

- 业务流动机制

在传统电网中,发电-输电-售电相关业务形成了链式反应,业务流在该架构下单向流动,前者的业务质量决定了后面部分的业务质量,造成用电效率的低下和较高的发用电代价以及大量不必要的基础设施投入。

到了能源互联网,基于先进的信息流基础设施,信息流的双向流动以及分布式可再生能源的广泛接入,造成了业务流也呈现出双向流动的趋势(主要在输电和售电端)。即电力消费者也是电力生产者,它在消费电能的同时,也可以向主干网传输能源,由此产生了相关的业务和业务双向流动。

### (3)信息层

在能源互联网中,各层的实现均离不开信息流的支持,换句话说,信息流是价值流、信息流以及后面提到的能源流实现的功能基础。信息流的运行离不开信息通信基础设施。下

面就信息的采集、传递、应用和与其它流的交互进行分析。

- 信息的采集

在传统电网中已经建立了对电网信息的采集系统，如基于 PMU 的 WAMS 系统和基于 RTU 的 SCADA 系统。前者的 PMU 设备采集频率较高，功能较为完善，主要进行实时电能相位测量，但生产成本较高，目前仅部署在高等级电压的重要设备之中。RTU 成本较低，但采集频率仅为秒级，无法满足电网实时精确控制的需求，且测量功能较为简单。

从以上介绍可以看出，传统电网的信息采集无法完全覆盖整个电力传输网络，容易形成测量盲点，且不重视对用户信息的测量。而在能源互联网中，预计通过先进、完善的信息基础设施，可以实现对网络任意设备、任意细节的信息采集（包括用户设备），从而获得及时的全网状态数据，实现对网络整体性能的精确了解，从而制定出最优的控制策略。

- 信息的传递

在传统电网中，由于通信基础设施的限制，信息仅能实现单向传递，无法进行信息交互，极大的限制了电网控制系统的性能。

而在能源互联网中，通过对通信设施的改造，形成了网状到的信息交互网络，信息流可以双向流动，可以实现任意设备、任意人员、任意系统的交互，交互的灵活性大大增加，网络的控制和运行变得更加协调，可以充分体现出能源互联网的开放、对等、互联、分享的基本特征。在现代电力网络建设中，电力光缆中预留了充足的光纤通信信道，从而大大节省了电力网络中通信系统的建设成本。由此决定了光纤通信适合于能源互联网的信息流交互，其大容量、低噪声、低干扰、无辐射、高发展潜力的特点使得能源互联网的主干网通信设施普遍期望采用光纤通信，并试图将其扩展到接入网的层面（例如通过以太网 pon, EPON）。

能源互联网的信息流接入网通信中，除了光纤通信，电力线通信和无线接入通信也是有竞争力的竞争者。电力线通信基于无需额外的通信线路，从而极大的减少了运行成本，但电磁干扰和高噪声是其主要缺点，需要进一步技术改进。无线接入技术，由于其具有较高的移动性，较多的通信技术，且这些技术具有不同的通信距离和通信质量，可以覆盖一个城市中的任意大小的范围，由此导致了其较高的灵活性，但安全接入和电磁辐射是其存在的两个潜在问题。

- 信息的应用

在传统电力网络中，处于信息来源的限制，系统操作人员只能根据这些不完全的信息对电网运行进行粗粒度的状态分析与控制，其分析和控制功能相对简单，如进行模糊区域间电能调度或人工进行故障定位等。

到了能源互联网，基于物联网技术和信息-物理融合，操作人员可以对整个电网的运行状态进行精确、细致的理解，同时应用大数据技术和云平台，通过云数据中心和综合控制中心，在要求的计算时延范围内，分析、制定出合理的控制控制动作和控制策略，并通过高速通信网络，准确无误的将控制命令传递给控制对象，从而保证相关策略的及时、有效执行。

● 信息流与其它流的交互

通过对相关信息的采集、传递和应用，能源互联网将表现出越来越高的智能性和可控性，信息流与其它流的联系也将愈发紧密，表现出高度的互动性。

信息流和价值流：可以说信息决定了价值，价值流的实现需要以信息流为基础，如在发电方的负荷预测，输、变、配方的监测数据采集，以及用电方的实时电价信息获取。同时信息流需要以价值为根本出发点决定信息的传输方式以及相关基础设施的构建。

信息流和业务流：信息流和业务流是并行不悖的两个实体，但业务流和信息流之间相互依赖，信息流需要根据业务流特点和内容来制定信息传输内容和信息传输方式，并建立相应的信息应用。业务流需要借助信息流完成业务的建立、实现和监控。

信息流和能量流：能量流动需要保证其安全性，可靠性和有效性，由此需要对每个传输环节进行严密的监控，这一切离不开信息流的支撑。同时，在能源互联网中，能量流是信息流赖以生存的基础，没有能量传输，信息流也失去了存在的价值。

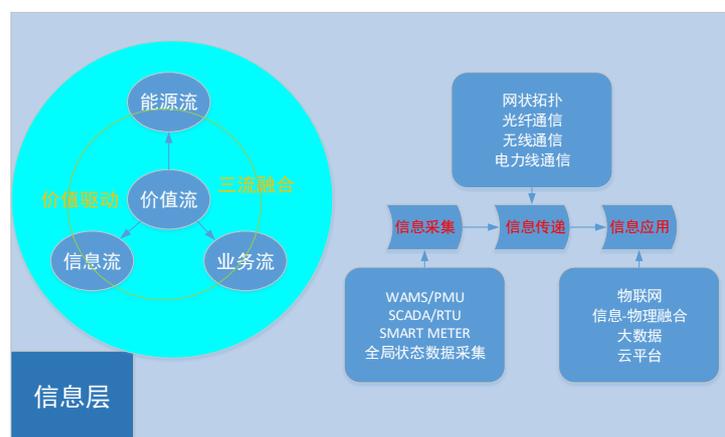


图 2.5 信息层分析图解

从以上分析可以看出，在能源互联网中，需要以价值流为导向，实现信息流与业务流和能源流的互动，信息流、业务流和能源流的融合将是未来能源互联网的重要发展趋势。

(4)能源层

能源互联网的最终目的，是实现对能源的有效利用，能源互联网所具有的所有基本功能均需为能源的生产、传输和利用服务。下面将就能源层组成元素，能源拓扑，区域间能量

平衡和自治进行分析：

- 组成元素

在传统电力网络中，能源层的组成包括发电节点、输电线路和用电设备。其中发电节点主要是集中式的大规模发电系统，也不排除较小容量的区域供电系统。输电线路为国家铺设的基本输电基础设施，用电设备包括大型用户和普通用户。

在能源互联网中，发电设备增加了分布式的可再生能源发电系统，或具有更高能源使用效率的冷热电联供系统。输电线路在微网内可以是微网自身建立的短距离、小规模能源互联网输电线路，如柔性直流输电系统等。用电设备中新增了电动汽车，并以此为基础形成了车联网。另外，能源互联网中安装了许多分布式储能设备，通过这些设备，可以辅助实现能源互联网的用电平衡。

- 能源拓扑

传统电网的能源拓扑主要是星型或树型，在实现了电力的高效传输的同时，也暴露出网架脆弱的确点，上游的故障会影响整条线路的运行，因此在配电网故障频发，故障定位和查找相对困难。

能源互联网的输电线路则突破了辐射型的结构，可以在微网内形成环状拓扑，并且在微网间形成网状拓扑，由此网络能源传输的鲁棒性得到大大的提高。同时，基于广泛部署的先进监控装置和计算方法，可以实现自动的全网故障定位。

- 区域间能量平衡和自治

传统电网的能量平衡是通过人工调度实现了，基于冗余换可靠性的思想，人工调度通常具有较大的冗余，很难实现精确管理，运行效率低下。

能源互联网由于大量接入分布式可再生能源，会产生明显的能量波动，区域间的能量调度会变得更加困难。通过对能源消费各个环节的实时监测，同时基于毫秒级的数据采集频率，以及细粒度、高精确性的调度算法，能源互联网有可能实现网络内任何区域间的能量平衡。同时，通过高效、智能的分析系统以及计算仿真，结合储能装置，可以充分利用不同能源间的多能互补特性，通过有效调度，保证电网的供需平衡。通过储能装置，打破了电力使用的供需平衡约束，是区域调度平衡的最有效的技术之一。

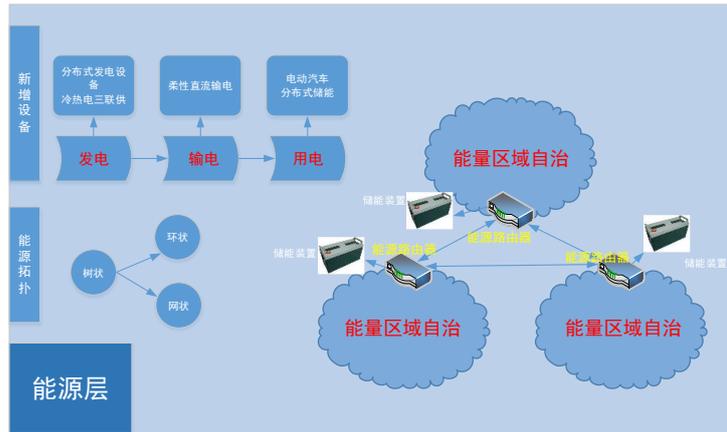


图 2.6 能源层分析图解

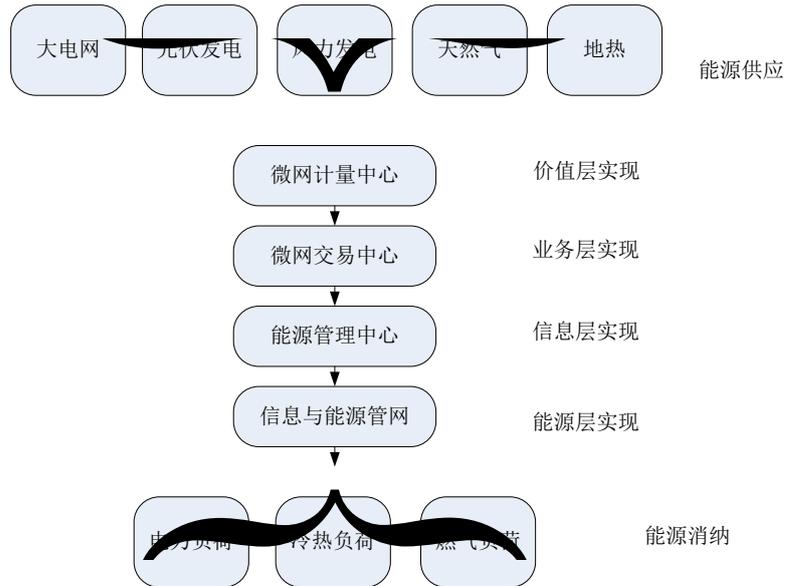
基于本地的用电负荷预测，结合本地调度机制，以及分布式储能装置的辅助，可以实现区域内的能量自治，即可以将能源互联网划分为若干用能区域，在区域内进行独立的用能调度和管理，区域与外界接口是能源路由器，能源路由器承担了能源的接入、切换、路由、电能质量调节以及大数据分析等功能要求，是能源互联网正常运行的基石。

## 2.2 能源互联网微网

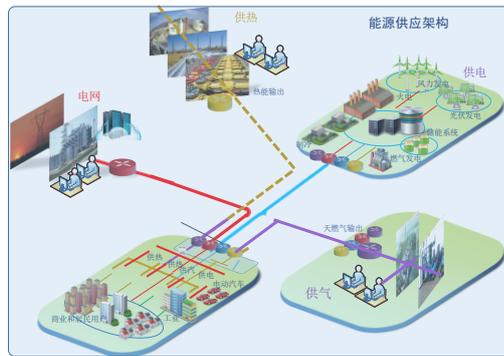
能源具有多种形式，电、汽和油等都是现阶段能源的重要组成部分。在能源互联网发展阶段，由于能源输送和使用的便捷，可以组建以电力能源为中心的微网；考虑用能主体的多样性，也可以组建符合区域特色的泛能源微网，即包括多种能源的混合供应、多能互补和综合利用的区域自治微网。针对电力能源主导的微网，从信息系统、能效管理、交易平台、分布式新能源接入、电动汽车用能、电能质量治理、大数据应用、虚拟电厂和需求侧响应九个方面进行了具体阐述，力图详细诠释能源微网的运营机制、组网形态和运行机制。

### 2.2.1 泛能源微网概述

在能源微网内部，主要的能源需求是多元化的，包括电、冷、热、油、气等。相应地，也需要提供多元化的能源供应服务。通常微网提供的能源有：水势能，煤炭，石油，天然气，新能源(光电风电生物质)，地热等。下图 2.7 给出了常规微网多元化能源需求与供给分析。



(a)微网能源多元化供给与消纳



(b)能源供给服务场景

图 2.7 能源供给分析

能源需求取决于当前能源微网的消纳主体。通常，一片区域被规划为一个能源微网，如一个工业园区或商业区。那么，除了能源增量，这片区域的能源构成已经基本确定。通过实地调查，不仅可以获得所有工厂、公司、学校、医院、住宅和商业体的能耗构成与能耗具体数据，还能明确微网内部的能源供给情况，以及周边区域的清洁能源现状。微网的能源供给服务，主要考虑当前能源需求及价格、增量需求、现有供给格局、区域能源优化行政目标和可规划能源资源等因素，制定符合当地实际情况的供给方案。图 1 给出了一般区域中，发展微网可提供的能源种类。其中，新能源包括光伏发电和风电等；核电由于不是广泛分布的能源，不列入常规微网。

电力供应是微网能源的重要能源应用形态，一般情况下，它占据能源组成的最大比例。电力供应服务可采取多样的形式。比如，可以由微网内部新能源点提供电能；也可以由客户在微网外部采购电能，通过微网传送到负荷，支付微网过网费即可。还可以由客户自己投资

兴建电厂，并在微网注册，由微网统一销售，支付代理费即可。总之，微网内部电力供应服务非常灵活，但需在调度能力范围之内。

燃气供应是微网能源供应的重要部分，特别是微网内部生活所需的燃气，以及平抑峰谷矛盾的燃气发电。燃气供应主要考虑三个方面：管道直通用户并按需用气、电力不足时启动燃气发电和燃气不足时鼓励用电。

供热服务是微网能源供应的重要功能。通常地，热力来源于燃煤、电转热和地热，也有少部分的燃气转热。微网内部的供热服务可分为集中式和分散式两类情形。集中式需要铺设热力管道，典型情况即冬季供暖系统，这类集中式供热需纳入微网能源自治系统，多种渠道采集热力，以燃煤和低热为主。分散式供热主要指生活用热水等，热力来源于燃气或电力。供冷服务的典型情形是空调制冷，主要消费电力能源。供油主要指为汽车提供汽油。汽油来源于石油，而石油还可以提炼出煤油，煤气等高热量物质。在微网中，石油提炼物不仅可以用于汽车，还可以用来燃烧发电。但长远来看，化石能源污染物排放多，能源占比有减少趋势。

下面从价值层、业务层、信息层和能源层分别进行阐述。

#### (1) 价值层

能源供给主体和格局在微网规划和建设阶段已基本确定。针对当前能源需求，需要确定能源种类及供应商，比如电由哪家单位提供，燃气、暖气由哪家单位提供等。但是，也不排除一些变化。比如，对于增量部分，既可以在规划时预留容量，也可以新增能源服务商供应。甚至，可以采取特许经营制度，竞争运营权。

对于能源供应商之间不发生能源相互替代与支援的情况，只需在供能单位和消费者之间产生交易即可，可以实行指导价或自行定价。但是，由于能源在形态上是可以转化的，可以引导和转化能源消费，以缓解微网能源供给紧张的情形。比如，对于电力负荷需求高峰时，可以引导居民多消费燃气，也可以把燃气转发为电。对于响应引导的消费者，则可实行优惠价格。

总体而言，能源供给方与消费方，能源供给主体之间都可采取市场机制，协商出交易价格。图 2.8 给出了能源供给中涉及到的重要利益相关方。

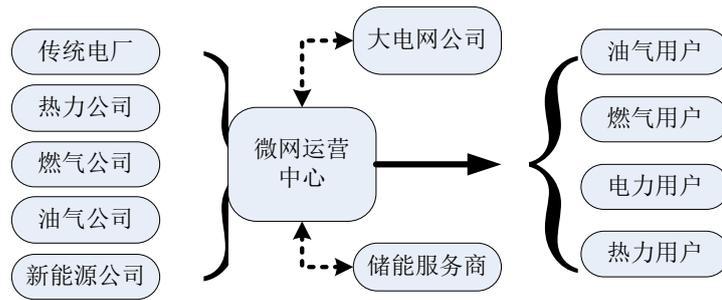


图 2.8 能源供应相关方

左边是微网中常见的 5 类能源供应公司，他们将在微网运营中心的统一管理和调配下，按照区域自治原则，灵活高效地分配给右边的四类客户主体。大电网公司和储能服务商是微网运用中的重要相关方，为微网的稳定运行提供支持。

## (2) 业务层

能源供给的价值信息必然会传递到业务层面。从消费端来看，对于消费大户如电力大客户，它可以依据自身情况，如电价敏感性、用电时段等，选择合适的供电商。对于既可以消费电力，又可以消费石油的用户，可以接受多能混合的套餐服务，以获得单一能源消费无法得到的经济性。对于自身既是消费者，又是光伏发电的供应者，可以在高峰时段出售电能，改用燃气或暂停使用能源。

图 2.9 给出了影响业务的主要因素。

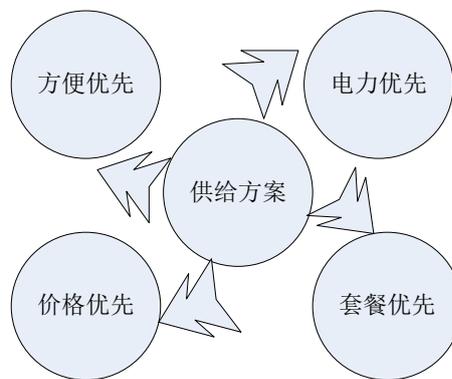


图 2.9 能源供给业务层

可以看出，图 2.9 给出了四种具有代表性的客户群体，即以价格为主要考量的用户、以用能方便为主要考量的用户、以消费电力为偏好的客户和接受微网制定的套餐的客户。这些客户群体产生了相应的业务，而这些业务都源于能源供给结构和价值调整策略。

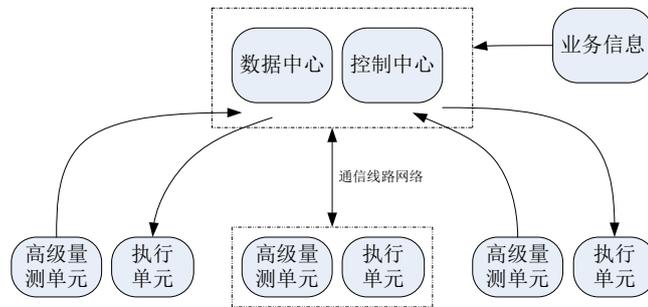
图 2.9 中，价格优先指针对价格敏感的客户群体，提供最为便宜的能源。这类客户通常接受微网运营的随时调节，便于开展主动配电、主动配能的调度操作。方便优先指关注能源消费随意性的客户，可接受偏高的价格，但不能中断能源服务。微网运营商需为这类客户做

一些保障性设计，以确保有效用能。电力优先指有些客户仅使用电力能源，不消费燃气和油气等。套餐优先指客户接受微网运营商制定的能源消费套餐，套餐可以约定能源的消费种类和消费时段。通常，套餐的制定有利于能源的计划使用和调度。

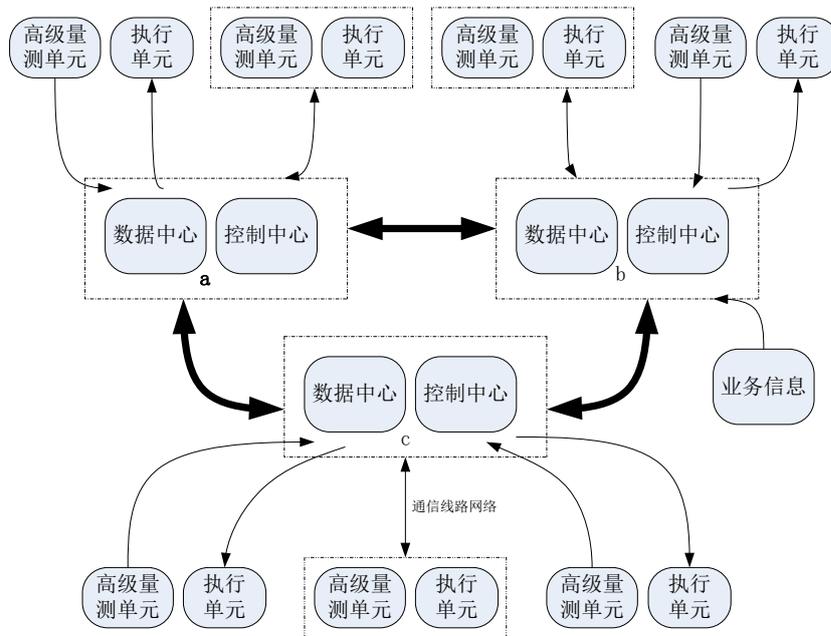
微网运营商开展微网业务的主体，它可以实行多种业务模式，比如发售配模式、售配模式和配能模三式等。

### (3) 信息层

能源互联微网信息层的主要任务采集业务层和能源层的各类数据、传递数据到控制中心、制定业务策略和能源执行策略、传递指令到执行单元等。信息系统是能源互联微网的神经枢纽，微网信息系统主要包括数据中心与控制中心、通信线路网、高级量测单元等部分，图 2.10 给出了物理架构图。



(a)单一控制中心的信息网络结构



(b)多控制中心的信息网络结构

图 2.10 能源微网信息系统物理结构

高级量测单元是能源互联微网的数据采集模块，在采样精度和频率上都优于传统测量

设备，主要采集能源层的运行数据信息。业务信息可通过上位机交易系统直接把数据传递到数据中心。

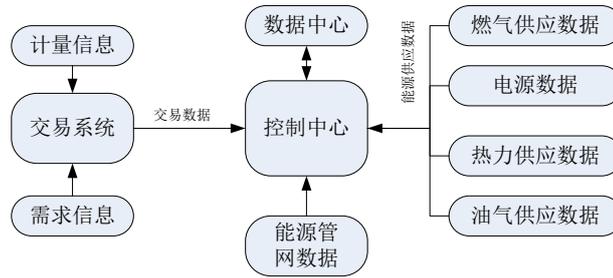


图 2.11 信息层数据流向

信息层涉及能源供应的数据。它需采集能源供应体的功率、容量等信息，传递到数据中心与控制中心，以备决策。同时，能源消费的需求信息与计量信息结合，在交易平台产生交易行为和结果。交易结果通过信息层传递到控制中心，进一步产生这能源执行信息。

#### (4) 能源层

能源互联网微网的能源层指支撑各类能源在微网内部存储、传输、转化和消纳的能源基础设施，如变电站、储能中心、燃气管道、充电桩等。能源基础设施构成了能源微网的骨架，注入能源流和信息网络后，即可实现能源的交易与使用。下图 2.12 给出了微网内部常见的能源元素。

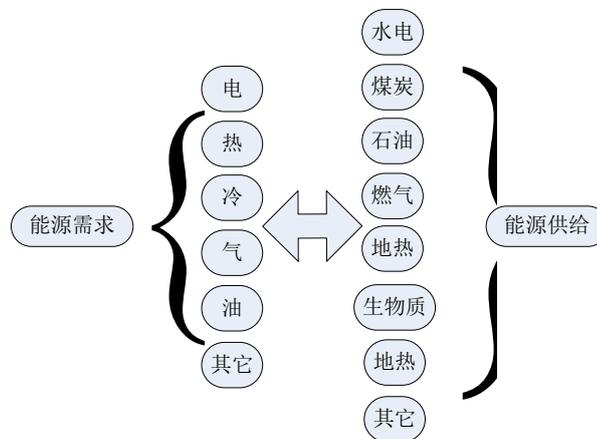


图 2.12 微网能源结构

图 2.12 中的能源供给最终都通过微网能源层基础设施来实现。能源管理系统和能源管网系统是基础设施主体。图 2.13 给出了能源层元素及网络简图。

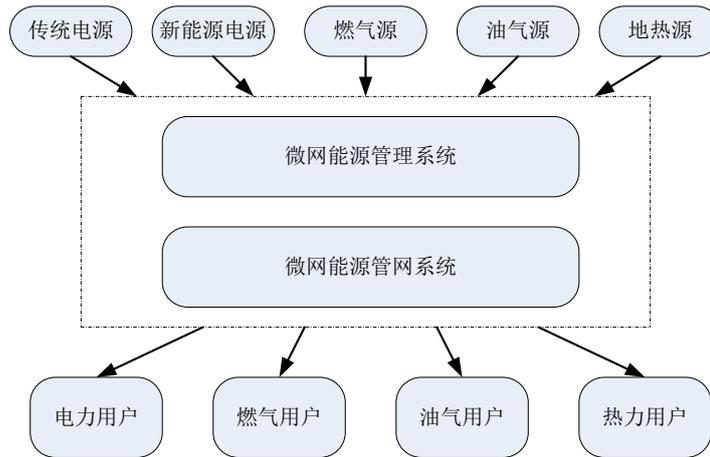


图 2.13 能源层元素与网络简图

能源供应主体都需在微网交易中心注册，通过业务层行为和能源管理系统有序分配给能源用户。能源价值评估和业务层的交易是能源层运行的驱动条件，能源管理系统和储能等物理设施是实现业务的载体。

#### (5) 应用情景分析

设定某一微网区域内，包含有重要典型元素如下：能源供应体中的大电网、光伏发电、风力发电、天然气和地热。在一般运行条件下，各种能源的消纳途径是：天然气提供燃气负荷，地热提供热和供暖负荷，其他能源提供电力和冷负荷。下图 2.14 给出了能源供给场景。

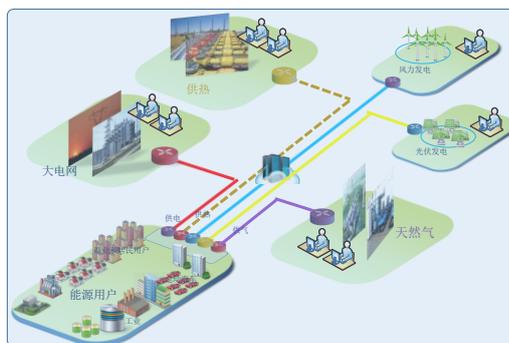


图 2.14 能源供给场景示例

在价值层，电网、光电和风电可以为能源用户提供电能；天然气供应商可以提供燃气；供热商可以提供热力。微网可以为能源的交易和分配提供载体。在业务层，电力商、燃气供应商和供热商 都可以直接与客户进行多种形式的交易活动，也可以通过微网运营商代理提供能源交易。出于微网能源平衡的需要，电力、燃气和热力有时需要转化使用，即多能互补供应，这部分业务适宜由微网运营商来完成。在信息层，微网数据中心将获得并存储所有微网的运行信息，包括交易信息、计量信息、能源供应信息和能源消纳信息。信息层主要服务

于两个对象，即业务层任务和微网运行。在能源层，该微网即是由 5 类能源供应商和商业、居民、工厂和办公组成的能源供应与消纳网络。电能可通过电力管网直通用户，同样，燃气和热力可以通过燃气管道和热力管道直通用户；在多能互补方面，由微网控制中心统一管理，可以把燃气和热力转化为电力，也可以把电力转化为热力。

图 2.15 给出了能源微网的阶段-属性-价值立体分析图。

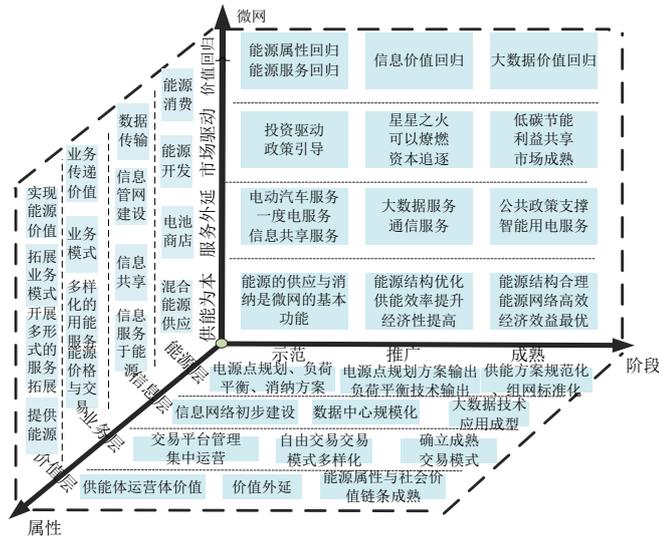


图 2.15 能源微网价值属性图

## 2.2.2 微网信息系统

### (1) 信息系统整体架构

下图 2.16 给出了微网信息系统的结构图。通常包括四个部分，即传感测量装置、通信线路、计量与交易数据源和数据与控制中心。

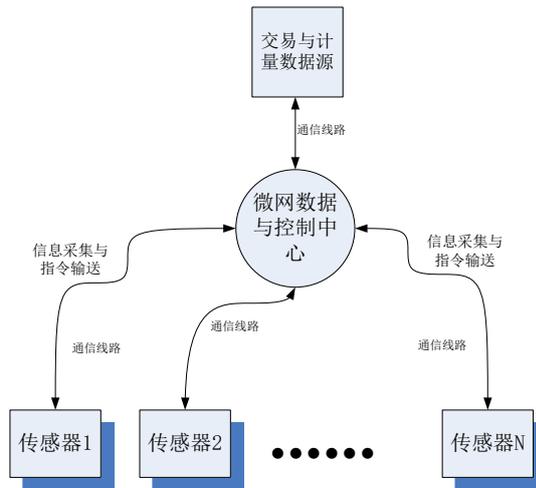


图 2.16 微网信息系统架构

能源互联微网信息系统需要具备以下功能：

- 实现信息与能源的融合。信息与能源的融合主要是指在能源互联网的范围内装设海量的信息采集与传感设备，实时采集能源节点信息，从而将整个能源网络的物理实体数字化；同时，可以实时构建起整个能源网络的计算模型，从而更精确的掌握网络的运行状态。

- 具备多样的终端信息采集能力。能源互联微网支持各种能源生产、消费终端以各种形式接入网络，因此其信息网络的建设需要满足不同能源、不同环境、不同个体的信息接入需求，便于各方参与到能源产消过程。

- 具备灵活的网络通信手段。能源互联微网的信息网络应该具有多样化的网络通信手段，满足不同位置、不同能源生产和消费个体的接入需求，为能源信息的多向流动提供管道基础。

- 具备信息多向流通的能力。传统能源消费中的信息流通模式是单向流动，消费端难以获得重要的能源消费信息。而能源互联最重要的特点就是实现信息的开放互联，因此能源信息将具备多向流动的能力，打破传统能源消费中信息不对称的局面。

- 具备高速可靠的网络传输能力。能源互联微网具备最广泛的参与群体，其发展必然会带来海量数据，因此信息网络的建设必须具备高速可靠的网络传输能力，以保障信息传输和交互的实时性，以及在局域、广域环境下能源调控的实时性。

- 具备强大的信息存储、处理、分析能力和辅助决策能力。能源互联微网的海量数据采集、传输，需要海量的数据存储能力，此外，强大的数据分析和辅助决策能力可以保障的数据高效筛选、处理，将帮助管理者从宏观上实现对能源网络的优化管理和调度，同时引导能源互联网的参与者调整自身的能源生产和消费行为，从而实现对能源资源的有效利用。

- 具备规范的业务执行标准。规范的业务执行标准，将保障整个能源互联微网的标准化运作，从而使得能源生产、消费和交易的过程更规范、更高效。

- 具备坚强的网络信息安全保障能力。能源的生产和消费安全直接关系到社会稳定和国家安全，因此，具备最坚强、最可靠的信息安全保障能力，是对能源互联微网信息技术最基础、最重要的要求。

## （2）信息关键技术

- 物联网与传感技术。能源互联微网信息网络需要实现信息与能源的融合、需要具备多样化的信息采集能力，物联网可以将终端延伸到任何物品与物品之间，进行信息交换和通信，能够满足能源互联网信息互联的终端信息采集需求，是构建能源终端互联的理想技术。

- 通信技术。能源互联微网的建设将延伸到居民楼、工厂、学校等众多区域，单一的通信技术已经不能满足需求，需要综合利用专用和公用的光纤网络、无线网络、电力线传输等各种通信手段，才能真正实现终端物联网的互联，保障能源信息的实时传输和交互。

- 大数据和云计算技术。能源互联微网需要大数据技术来实现对所采集到的海量信息的高效存储、筛选和分析，为能源互联微网的参与实体提供实时高效的交互式的数据查询和分析能力；而云计算技术又可以为大数据技术的实现提供强大的计算资源支撑。

- 先进控制技术。在能源互联微网内部，接入了大量的电源点和各种类型的负荷。控制实现非常复杂，因此，需要运用先进控制技术，确保微网运行时的高效性和稳定性。机器学习、数据驱动方法等在这类微网控制中都具有很好的应用空间。

### (3) 大数据技术

能源互联网的大数据服务是以能源互联网信息网络为支撑，通过大数据和云计算技术向用户提供的信息服务，它是未来能源互联网众多新型服务模式和商业模式的重要基础。

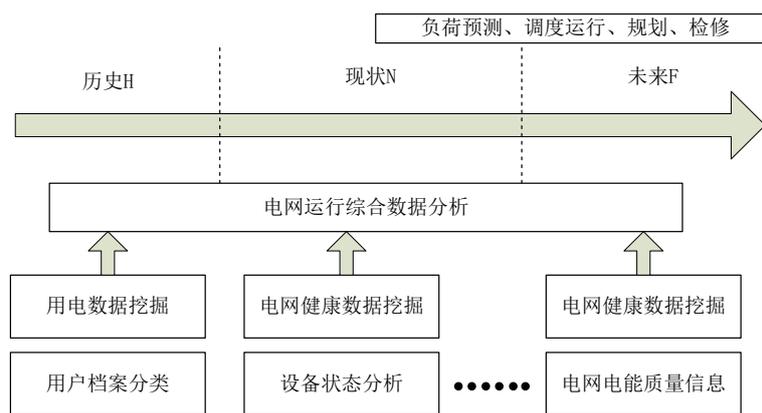


图2.17 能源大数据应用示范

能源互联网通过信息采集网络，采集用户的用电信息、用气信息及其它用能信息、终端设备状态信息、能源流动信息、能源价格信息、地理信息、气象信息、区域属性信息等终端信息，通过信息管道集中到综合能源信息平台，通过大数据技术进行存储。平台依托云计算和大数据中心，根据用户的数据服务需求，从庞大的数据库中挖掘和筛选出对用户有用的数据类型，大数据服务公司根据平台提供的数据进行进一步的数据分析和加工，满足用户的数据分析需求。

能源微网是电力行业发展可能的方向和趋势。微电网利用先进的信息通信技术、计算机技术、控制技术及其他先进技术，实现对发电、电网运行、终端用电和电力市场中各利益方的需求和功能的协调，在尽可能提高系统各部分的高效率运行、降低成本和环境影响的同时，尽可能提高系统的可靠性、自愈能力和稳定性。智能电网的最终目标是建设成为覆盖电

力系统整个生产过程，包括发电、输电、变电、配电、用电及调度等多个环节的全景实时系统。而支撑智能电网安全、自愈、绿色、坚强及可靠运行的基础是电网全景实时数据采集、传输和存储，以及累积的海量多源数据快速分析。

大数据是近年来受到广泛关注的新技术，是指通过对大量的、种类和来源复杂的数据进行高速地捕捉、发现和分析，用经济的方法提取其价值的技术体系或技术架构。所以，广义上讲，大数据不仅是指大数据所涉及的数据，还包含了对这些数据进行处理和分析的理论、方法和技术。大数据早期主要应用于商业、金融等领域，后逐渐扩展到交通、医疗、能源等领域，智能电网被看作是大数据应用的重要技术领域之一。一方面，随着微电网的快速发展，智能电表的大量部署和传感技术的广泛应用，电力工业产生了大量结构多样、来源复杂的数据，如何存储和应用这些数据，是电力公司面临的难题；另一方面，这些数据的利用价值巨大，不仅可将电网自身的管理、运行水平提升到新的高度，甚至产生根本性的变革，而且可为政府部门、工业界和广大用户提供更多更好的服务，为电力公司拓展很多增值业务提供条件。2012年以来，国内外在智能电网大数据技术研究和工程应用方面做了一些有益的尝试，奠定了一定的基础，但总的来看，这些工作尚处于探索起步阶段。智能电网大数据的研究和应用是一个长期而复杂的工作。客观上，大数据的理论尚未形成，大数据的相关技术仍在快速发展中，还没有进入稳定时期；同时，智能电网通信信息系统的互操作问题仍然存在，数据模型尚未统一，给数据的获取和应用带来实际困难；主观上，电力公司在大数据的基本概念、研究方法、应用价值方面认识不足，没有达成共识，在思想认识和技术准备上存在不足，也给大数据在智能电网中的应用造成一定障碍。即使有些电力公司和电力研究者对大数据表示出很大兴趣，但由于缺少战略性研究和顶层设计的指导，影响了智能电网大数据研究和应用的有序推进。

#### (4)情景分析

- 交易数据切入情景

参照上图信息系统架构，当交易平台产生交易行为时，信息系统将按下图所示流程运行。

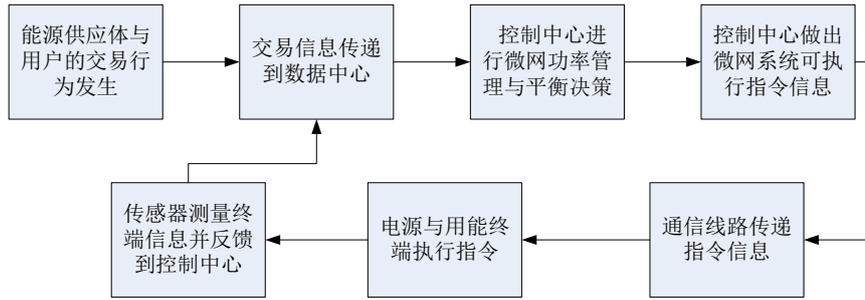


图 2.18 交易数据切入时信息系统反应机制

从上图可以看到，交易行为一旦产生，它将交易信息通过通信系统传递到数据中心，控制中心依据数据做出相应的决策后，可执行信息通过微网通信线路传递到终端网络，这样一个基本的交易循环得以完成。此外，传感器的测量信息不断地反馈到控制中心，为优化运行提供依据。

● 电源/负荷接入情景

当有电源或负荷接入时，直接影响微网的功率格局，其信息系统反应机制如下图所示。

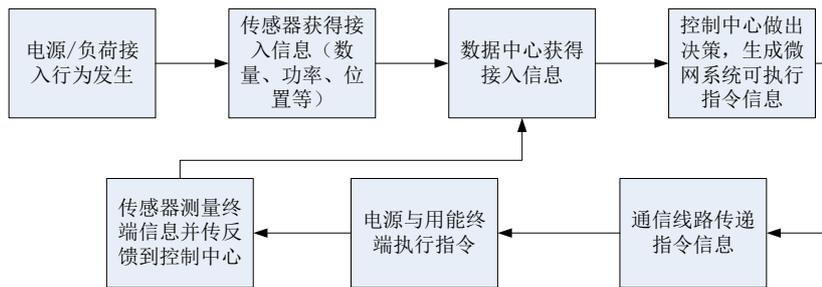


图 2.19 电源负荷接入信息系统反应机制

从上图可以看出，信息系统对电源或负荷接入的反应同样是基于微网功率平衡的考虑。不过，反应机制的关键点是直接增加负荷或增加电源出力。增加负荷主要指柔性负荷控制和主动配电。

● 电源/负荷跌落情景

当有电源或负荷跌落时，也会直接影响微网的功率格局，其信息系统反应机制如下图所示。

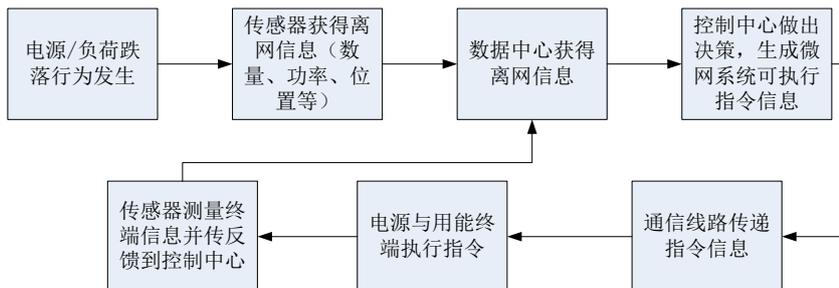


图 2.20 电源负荷离网信息系统反应机制

电源或负荷跌落时，信息系统反应机制类似于接入情形。

### 2.2.3 微网运营系统

#### (1) 能效管理

建设能源互联微网也是实现能源综合利用、梯级利用、节能减排、降低用能成本的重要手段，已成为世界各国发展研究的热点方向。据相关统计，大工业用户能耗占我国一次能源消费的70%以上，而目前许多工业管理模式粗放、工艺及设备较为落后，每年有20%以上能源损耗源于没有合理的能效监测、管理工具及控制系统。因此，在能源微网中，利用现代高效率通信与信息技术、营销方式变革和节能环保技术，针对工商业用户的智能用电、节能技术开展应用研究具有积极意义。

能效管理技术是利用深入到用户内部的分类用电信息采集和控制网络，细致掌握用能个体内部的用电负荷特性，并在此基础上引导更为科学、经济、安全和高效的利用电能，使得电网负荷能够以能源微网为单位实现“削峰填谷”，提升区域负荷平衡能力，提高电网设备利用率，降低用电成本，提高电网能效水平。在能源微网功能体系中，可以采用先进的云平台技术来实现能效管理，也可以采用柔性负荷调控技术。

- 基于云平台的能效管理

基于云计算技术基础的能效管理云服务系统，把现代计算机技术、网络通信技术和分布式控制技术结合起来，并以服务接口的方式为微网内部企事业单位提供能效管理服务的平台。它充分利用微网信息基础设施，获得高效可靠的电能数据采集、存储和分析等；它具有风险性低、易扩展等特性；在云计算的基础上建立完善的能耗监测、管理体系，来实现能源消耗动态过程的信息化、可视化、可控化，对用能过程中能源消耗的结构、过程及要素进行精细化管理，进一步提高能源使用效率。基于云平台能效管理系统网络如图 2.21 所示。

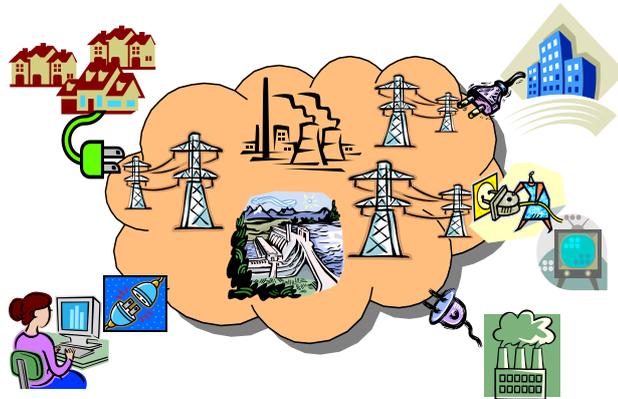


图 2.21 云平台能效管理系统情景

微网云平台能效管理系统包含以下几个组成部分：微网内部用户设备监控与数据采集

层、微网网络传输链路层、云平台能效管理服务层和用户服务层。用户设备监控与数据采集层由各类智能可通信数据采集器、测控装置、保护装置等构成。并通过通信管理机（协议转化、规约转化、集线器功能）将数据传输至云平台云端。网络传输链路层提供用户设备信息通向云端的链路。微网云平台能效管理服务层由云传输中心、云数据中心和云应用中心组成。云传输中心保证通信数据传输的安全性和可靠性；云数据中心提供对用户大规模设备数据的存储预处理；云应用中心提供给用户群访问接口，同时对用户服务、用户权限进行管理。

与传统能效管理相比，基于云平台的能效管理系统具有如下特点。

第一，高效管理性。能效管理系统包括对微网运行状况的监控系统、降低系统故障率的维护系统。能效管理云系统提供给用户可视化远程互动操作界面，根据微网检测业务负载，有效增减资源进行调度，同时也有效保证关键数据的安全等。第二，负载可伸缩性。通过云平台能效管理系统，并依据系统使用负载变化的能力，在负载变大或减小时，利用网络计算资源，采用节能算法，实时进行智能调整以适应负载。第三，可靠性。指一个组件或系统执行其功能的能力，系统成功完成指定功能的概率是衡量系统可靠性的常用指标。云平台能效管理系统采集传输的数据，均存在云端，保证数据读写的可靠就是保证系统的质量，基于云平台对能效系统可靠性的重要性不言而喻。第四，安全性。对于微网云平台应用，可能有用户会在同一时间访问系统，对每个用户的数据安全性要求相当高，敏感的企业成本数据更是如此，因此在设计系统时，需严格将各企业的业务数据隔离，从数据级和应用级多个层面保证不同企业的系统数据相互独立、安全。第五，多用户高效性。传统的软件运行和维护模式要求软件被部署在用户所购买或租用的硬件资源当中，大多服务于特定的个人用户或者企业用户。在云计算环境中，更多的软件以 SaaS 的方式发布出去，提供给更多的用户共享使用，对用户组进行统一的管理与维护，节约用户成本的同时，实现多用户使用的高效性。第六，开放性共享性。基于云平台能效管理系统除了面向居民、企业、学校、医院和办公楼宇等耗能用户外，还面向对外系统（如微网能源管理中心或其他政府行政部门），与外系统进行数据交换。因此，可设计统一的标准接口来预留与外系统的通信途径，从而实现跨用户、跨区域数据共享，便于能源中心对资源进行实时调整和优化。第七，低成本性。对于微网范围内企业而言，管理和运营软件系统正逐渐伸展到企业业务和管理的各个角落，导致企业在软件系统维护上的人力和物力成本日趋增多。随着信息产业的发展，企业日常运营越来越依赖于软件系统平台，基于云平台的能效管理系统可以有效降低企业能效管理成本。首先是能效管理软件系统建设初期的投入大幅减少，不再需要进行巨大的成本一次性投资，避免初期对软硬件资源的过分投入。另外，对企业用户来说，云平台可以帮助实现应用的自动

化管理，且无需单独配置维护人员，直接减低了企业对系统的维护成本。

- 柔性负荷调控

柔性负荷控制利用温度变化的惯性，通过协调大量空调负荷温度设定值的短时小幅调整，实现空调负荷总出力对新能源发电波动性的有序响应，从而一改以往粗放式的限电与错峰方式，以实现对人类生产、生活影响最小化方式的柔性控制负荷。在微网中，运用柔性负荷控制技术可大大缓解微网的功率平衡压力，增强区域自治能力。

微网建设中，如硬性增加能源基础设施投资、加强电源以及微电网建设，一旦高峰负荷差过大，就会使微网电力资产利用率低下，微网投资回报率低。鉴于此，如果能够将微网内一部分峰荷时的负荷转移至谷荷，则能大大提高电力资产的利用效率，降低电力系统的运行成本。微网系统在极端的负荷水平下其运行的安全稳定性会受到影响，一旦有电力供应紧张的情况出现，微网运营中心就可以采取一定的措施，引导柔性电力负荷避开用电高峰。

微网系统有双向互动的特征，能够实现电网和用户之间的互动，主要表现在两个方面，第一方面可以使用智能电表，实行动态实时电价，用电时段可以由用户自行选择；第二方面微网系统允许用户拥有的分布式电源向电网供电。

能源互联微网系统能够使电网与负荷之间的能量流以及信息流进行双向互动，实现双向互动的前提是要有完善的电力输送以及信息通信系统。以传统的电力输配电网作为基础，在微网建设方面则是建立一套可以实现电源、电网以及负荷之间进行通信的强大互联通信系统。互联微网电力网与信息通信网系统总体框架如图 2.22 所示。

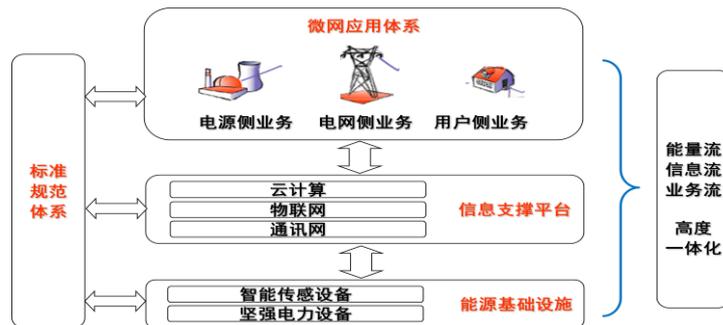


图 2.22 互联微网电力网与信息通信网系统框架

从图 2.22 的系统框图我们可以看出，互联微网与传统的电网相比增加了负荷端负荷与电网之间电力流的双向传输，还增加了以互联网技术作为依托的信息监测和支撑平台。电力系统的运行参数以及负荷状态可以通过能量管理系统进行实时监测，使电源的出力得到调整，能够实时发布电价信息。除了以上这些功能方面的完善之外，微网柔性负荷的智能化可以以公布的实时电价信息作为基础对用户用电计划进行安排，实现利益最大化。

- 空调负荷应用情景分析

对于微网内的用户，空调是一类重要电气设备，它具有数量多、功率大，随气候特点集中使用的特点。在夏天炎热天气时，如果微网内部所有的空调设备全部开启，其总功率需求将明显上升，加上工业生产活动，极有可能冲击微网的总功率上线。

如果对空调设备进行主动管控，在使用时间上做部分限制，将有利于平抑微网功率峰谷矛盾，缓解微网压力。可以采用主动配电技术，对空调签约用户随时进行电力中断。也可以采用云平台技术，详细跟踪不同用户的空调的消费特征，获得功率等级、用时长短、温度高低和紧急程度等信息，制定更为人性化的调控方案。

- 热电联产应用情景分析

热电联产主要应用于北方取暖区域或热力需求的工业领域。当电力供应大于微网内负荷需求时，为了保证电源出力不减少，增加运转时间，可把多出的功率转化为热力。

当微网内部的太阳能和风力资源丰富时，对于已经投资建设成的风电场和光伏电站，其总输出功率一旦超越了微网的用电需求，就可能会造成弃风弃光的现象。因此，可以把微网内部的居民供暖和供热水系统部分接入微网，使用微网多余的电力生成热力。供暖和供热水需设计成柔性负荷，即电力多余部分可以在一定范围北变化。

## (2) 微网交易平台

- 微网交易平台整体架构

与目前已建成的区域电力交易中心比较，微网交易平台业务范围相对要小，但是它的内涵却很丰富。如下图给出了微网交易平台的组成架构。

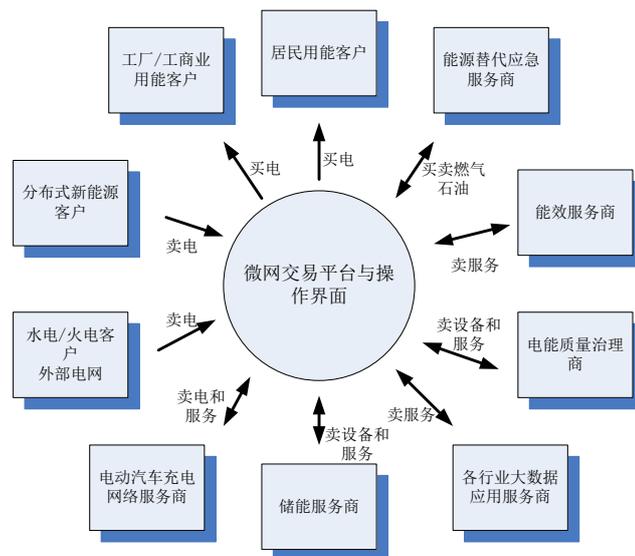


图 2.23 微网交易平台功能架构

微网交易平台是一个能源买卖场所，对于接入主体而言，只需下载操作界面到计算机

或手机，并完成安装，即可随时随地获得微网运营商的各项服务。能源供应商，用户和各类服务商都可以充分自由地进行市场化交易。微网运营商则依据交易信息，依托能源微网，执行能源交易。

- 电力体制改革进展与电力交易

当前，在电力行业，电力体制改革和能源互联网变革交错而行，产生交集。

2015年3月，国家发改委发布了深化电力体制改革的9号文件。深化电力体制改革的重点和路径是：在进一步完善政企分开、厂网分开、主辅分开的基础上，按照管住中间、放开两头的体制架构，有序放开输配以外的竞争性环节电价，有序向社会资本开放配售电业务，有序放开公益性和调节性以外的发用电计划；推进交易机构相对独立，规范运行；继续深化对区域电网建设和适合我国国情的输配体制研究；进一步强化政府监管，进一步强化电力统筹规划，进一步强化电力安全高效运行和可靠供应。

电力市场对9号文件的最大反应是，各类售电公司在全国范围内如雨后春笋般大量成立。2016年3月1日，北京电力交易中心和广州电力交易中心成立大会暨揭牌仪式分别在北京、广州举行。这是中国电力市场化过程中的重要里程碑，北京、广州电力交易中心组建方案获批，标志着电力体制改革迈出关键一步。电力交易中心2016年将需主动参与电力体制改革，扩大交易电量，实现更大范围内的资源优化配置，开拓交易工作的新局面。北京、广州中心发展目标是组建相对独立的电力交易机构，建立公平、规范、高效的电力交易平台，引入市场竞争，打破市场壁垒，依法依规提供规范、可靠、高效、优质的电力交易服务，形成公平公正、有效竞争的市场格局，促进市场在能源资源优化配置中发挥决定性作用。能源互联微网既是能源互联网的基本局域单元，也是深化电力体制改革的突破口。在微网内部，进一步完善电力市场交易平台的功能。建立公平、规范、高效、自由的电力交易平台。完善与营销的电能计量系统接口，实现微网内用户电量信息的实时数据采集；实现一个市场主体的不同电压等级、不同区域的集中结算，确保交易平台的直接交易市场主体与营销系统的用电客户主体保持一致。提高对新能源电站的服务能力和水平。尽加强电力交易员工培训，提升交易综合服务能力，适应电力体制改革及交易机构相对独立的要求，努力为市场主体提供优质服务。

- 大用户直接交易

2015年5月31日，国网江苏、福建、河南、四川、重庆、黑龙江电力等第四批6家推广单位全国统一电力市场技术支撑平台投运。至此，国家电网公司全国统一电力市场技术支撑平台建设工作圆满完成，标志着国内首个集约化、专业化，支持海量市场成员参与的大用户直接交易全业务在线电力交易平台建成并全面运行。全国统一电力市场技术支撑平台涉及

面广、实时性强，将对电力系统的运行、调度、规划管理和经营等方面产生深刻影响。该平台首次在外网集成公司自主知识产权的 ISC 统一权限平台和安全交互平台，实现外网用户的统一安全接入，并首次采用公司自主知识产权的统一数据交换平台技术，实现两级平台的纵向贯通。在市场拓展方面，由原来的仅支持

对于能源微网，大用户直接交易是做好发电预测、微网能量管理的重要部分。开放式自由交易平台支持发电侧、用电侧联动的双边市场，使发电企业、电站和电力用户可以随时、随地自由交易，自由定价，开放性更优。微网属于区域性自治网络，相对于外部大电网而言，其负荷规模要小，大用户的用电负荷变动对微网影响大。大用户直接交易需提前进行，有利于微网运营中心做好能量管理的准备。

#### ● 直接自由交易

大用户直接交易将电力市场竞争从发电侧进一步拓展到用户侧，其机制设计、算法研究和策略研究成为热点。直接自由交易则为微网内部所有电站和全部用户建立了充分自由的市场机制。

1) 随着市场模式改变，市场由原发电侧单边市场改为发电侧、用电侧联动的双边市场，技术支撑平台功能上需支持电力用户参与交易。随着市场推进，电力用户放开程度逐步增大将使得服务对象剧增，大量电力用户将作为市场成员，进入技术支撑平台运作，系统计算复杂性急剧增加，在安全性和性能上对技术支撑平台的支持能力提出更高要求。

2) 业务融合度更高，技术支撑平台需及时交互电网运行、电能计量、电能结算等大量信息，与调度、营销、财务、计量等系统高度融合。此外，随着市场的推进，交易周期可能由月度逐步发展为日前、实时运作，技术支撑平台在交易和结算环节上需提供高可靠性。

3) 直接自由交易以微网为单位开展，不同微网可出台具体交易细则，技术支撑平台要支撑各地不同情况。此外，全国统一电力市场不断推进，需要技术支撑平台能够灵活调整，具有较强的开放性和可扩展性。

#### ● 应用情景分析

一个居民如何消费电？

对于一户居民而言，他既可以是电力生产者，也可以是消费者。屋顶资源可以建设分布式光伏，但是由于面积有限，电站规模小。当屋顶产生的电量超出自身需要时，可以把多余电量卖给微网运营公司或者其它居民用户。由于电量规模有限，不适宜直接卖给企业用户；当屋顶产生的电量少于自身需要时，可以从微网运营公司购电或从其他居民屋顶、电厂购电。

也就是说,居民用户无论是买电还是卖电,都对应几个可选择的实体单位,即其它居民用户、微网运营公司、电厂等。买卖是完全自由的。

就具体操作而言,居民用户需要到微网交易平台注册一个身份,用于买卖电量。注册完成后,只需要下载操作界面到家庭用电脑或手机上,在家庭操作即可。所有操作代表一种业务行为,实现数额上的买卖,至于实际的电量输送,由微网运营公司负责完成。

一个工厂如何买电?

工厂用户与居民用户不同之处在于:电量需求大,使用时间有规律,自身可建光伏面积大。与此对应,对微网的影响表现在:对微网负荷管控冲击大,可做功率预测,可输入较多新能源电量。

一个工厂消费电量的过程如下:作为微网大客户,可以获得一个VIP身份,意味着工厂能够得到微网运营商的全方位的功能配套服务,不仅限于用电。同样,工厂用户可以在本地操作交易界面,从微网内部的大型电站购得电量。这些电站可以是大型新能源电站,也可以是微网内的水电、火电等。他还可以从微网运营商购得电量。甚至,当工厂负荷过大,微网无力支持功率需求时,工厂可以从微网外部大型电厂购得电量,通过微网电网输送到工厂用电网络,只需缴纳一定的过网费。

由于工厂负荷集中且有规律,购电行为需提前一段时间进行,以便微网运用商协调网络的管理。当工厂处于停工状态时,如果自身屋顶电量需要外面,也可以直接与微网内部的其它用户交易。

一个工厂与电能质量服务商如何交易?

由于生产需求,工厂内部包含有各类电气装置,如电动机床、空调、配电站等,加上工厂连接到了负荷复杂的微网系统,难免不会产生电能质量问题。投资建设电能质量监测与治理装置是解决的一种途径,但可能带来投入过大、外部侵入质量问题具有随机性等问题,因此,选择合适的电能质量服务商,可以得到快速响应、随时接入与撤离、费用低等优势。

专业的电能质量治理服务商具有全系列的治理装置和手段;在微网规划建设时预先留好接口,治理时可采用即插即用的灵活接入方式。

工厂可通过如下方式获得电能质量治理服务:依据自身的电力装置可能带来的污染种类和外部电网常见污染入侵类别,选择污染治理菜单,以年为单位缴纳基本治理费;对于突发事件,以会员价格获得治理服务;还可以租赁电能质量服务商的装置和运维服务。

一个居民与储能服务商如何交易?

这类储能通常指移动储能,而接入电网的储能被视同于电源点。当居民有移动储能需求

时，可以通过微网交易平台直接交易。

例如：当居民家庭接入电网故障时，为了获得临时电力，可通过手机操作界面购得蓄电池。作为专业的微网储能服务商，需快速响应需求，很快即可送到居民家庭，并做好安装。再比如，对于电动汽车用户，可以从电池商店购得蓄电池，替换已经耗尽电量的蓄电池，从而省去了充电过程。

#### 一台电动车如何网络化充电？

电动汽车是微网重要客户，它获得电能除了从电池商店购得外，还可以自行充电。充电有两种方式，即有线充电桩和无线充电。显然有线充电在固定的充电站进行，而无线充电则灵活一些。在微网内部，电动汽车充电系统可按如下建设：第一，在微网内部所有大型建筑、所有企业单位和居民小区都建设充电桩，物理空间上最多几百米即可找到充电桩。第二，在微网主干道建设无线充电网络，使得行进中的汽车可以随时充电。一辆电动汽车可以这样获得充电：当放置在住宅区时，可以充电桩充电；当在微网主干道行驶时，可以打开无线充电系统，获得电力；当充电实在不能满足需求时，它可以找储能服务商更换蓄电池。

### (3) 电能质量治理

#### ● 微网电能质量治理整体架构

传统的电能质量治理指运用各类电能质量治理装置，如 DVR、UPQC 等，针对特定位置进行专项治理。在能源互联架构下，电能污染的扩散途径增加；电气装置的多样化使得污染源增加。下图给出了微网电能质量治理的架构。

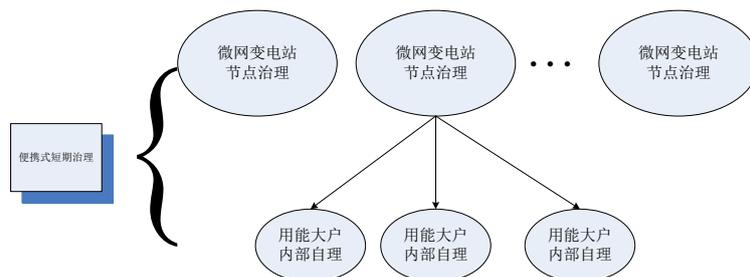


图 2.24 微网电能质量治理架构

如图所示，主要有三类治理，第一类是微网内部变电站节点的专项监测和治理；第二类是用能大户，如工业企业有针对性的治理措施；第三类是便携式移动治理，针对一些短期、临时性的电能质量问题，发挥治理商设备齐全、可短期租赁等优势，既治理了污染，又节省了费用。

#### ● 微网电能质量治理新特性

微网电能质量新特性电能质量可从电压质量和电流质量两方面来讨论，负荷主要要求被供电的电压质量，而电网则要求被回馈的电流质量。随着微网的发展，电网的电能质量问题将更加明显。

谐波污染方面。传统配电网中的谐波电流主要是由变压器磁芯饱和运行及非线性负荷等引起的，进而波及电网电压引起谐波电压。微网系统中的谐波电流或者谐波电压除了由微网内非线性负荷引起外，大量的微源、储能等电力电子变流器设备也是主要的谐波源。因电力电子变流器的电气特性比较复杂，即使使用 PWM 调制和相关的控制策略，但是因工程的实现往往受到某些因素(处理器速度、器件材料、工艺等)的制约，会与理论的计算存在差异，导致实际的变流器装置在运行时可能会处于非理想状态，由此而引起的谐波也是系统谐波的重要组成部分，尤其是所引起的高次谐波、间谐波更应该得到重视。比如由死区时间引起的 3、5、7、9 等低次谐波和由载波调制引起的开关频率整数倍附近的高次谐波等，从而形成高频次、宽频域的特性。

谐振污染方面。如果配电网中存在背景电压谐波，在高渗透率的微网接入配电网时，由微网中的微源变流器滤波接口以及负载的不确定阻抗、输电线路的阻抗等组成的多谐振点电气网络在配电网背景谐波电压的作用下会形成串联谐振，放大某些频次的谐波电压。另外，微网并网或者孤岛运行时，当非线性负荷和非线性变流器引起的谐波电流和输电线阻抗、无功补偿等装置的参数匹配时会形成并联谐振，放大某些频次的谐波电流。

三相不平衡方面。传统三相三线制配电网的三相电压不平衡原因主要是三相负荷不对称引起的，三相四线制配电网三相电压不平衡主要是由大量的单相负荷布置不平衡产生的负序、零序电流经线路上的阻抗形成不平衡压降引起的。微网系统的三相电压不平衡除了这些原因之外，和微网内部的大量电力电子变流器的不平衡运行也有很大关系。如果公共耦合点 PCC(Point of Common Coupling)处电压不平衡，运行于此处的变流器因控制策略不够完善、直流端支撑电容较小等原因会在交流侧会产生大量的负序和零序电流进而加剧了 PCC 处的电压不平衡。

电压偏差方面。在传统电网中电压从送端到受端沿着功率潮流的方向逐渐降低。如果将微网接入配电网，微网会打破原有的输电功率潮流方向而改变电网的末端电压甚至使其偏离安全供电电压范围。这与微网的并网点选择有很大关系，且对并网点的电压影响最大，并网点越接近并网线路末端，并网点的电压提高的幅度就越大。

电压波动与闪变方面。传统配电网的电压波动与闪变主要是由负荷的无功波动引起的，尤其在配电网变压器短路容量较小时会更加明显。当微网接入电网时，除了本地负荷的无功

变化引起电压波动和闪变外，间歇性的微网发电潮流也会引起电压的波动和闪变，尽管微网中有储能环节，当微网中的发电容量与储能容量失配，或者储能单元满储时电压波动和闪变也会比较明显。当微网孤岛运行时，通常微网短路容量较小，电压的波动与闪变主要取决于储能单元的容量及其充放电特性以及微网内负荷的无功波动。

#### ● 治理方案

配电网侧治理方案。从配电网侧角度进行电能质量治理时，通常将微网看成“发电负荷”，此时微网对于配电网所呈现的电气特性较常规用电负荷的电气特性有所差异，在治理时要考虑间歇性、不可控性发电装置输出波动的有功无功功率、谐波、不平衡甚至谐振等因素，此种方案主要倾向于治理多微网对配电网的电能质量串扰。

混合补偿系统安装于中压配电网末端，由TCR 和谐振阻抗型混合有源电力滤波器组成，该设备继承了TCR 型SVC 和有源滤波的特点，可补偿支线下游所有低压微网串入中压配电网中的无功波动、部分高次、低次谐波以及三相不平衡功率等。

微网侧治理方案。在微网侧进行电能质量治理的方案较为灵活，且与传统的配电网电能治理措施有许多相似之处，可以相互借鉴。治理时即可就地治理微网内部的非线性负荷引起的电能质量问题，也可通过调整微网内微源、储能与非线性负荷以及线性负荷的功率潮流关系来达到改善电能质量的目的，或者在微网的PCC 处以及非线性负荷附近安装辅助设备来治理本地的电能质量问题。将有源滤波APF放在微源侧，SVC 放在负荷侧进行综合治理，在该方案中，SVC 负责治理非线性负荷引起的无功、不平衡电流及部分低次谐波，APF 负责治理由微源引起的间歇性无功波动以及微源输出的谐波电流等电能质量问题。离网运行时，APF也可负责治理微源端口处因电流质量引起的电压质量问题，为微源的平稳运行创造有利的电力环境。

#### ● 应用情景分析

一家工厂如何进行电能质量治理？电能质量问题描述：对于一家工业企业而言，电能治理问题大体上来源于几个方面。第一类是工业电气设备造成的污染，如谐波问题、无功补偿问题和电压闪变等，这些都属于内部污染。第二类是微网电能质量污染侵入，主要来源于微网内部其他电气设备的污染扩散，这属于外部污染侵入。第三类是临时性污染、短期污染或新增污染，主要来源于企业引入新的电气设备、建设内部配电站、或者来源于外部临时性污染扩散。

解决时需考虑因素：对于不同来源和性质的电能质量污染，治理的手段和方式有所不同。需要考虑的因素包括：第一是治理成本，对污染的治理依赖于特定的设备，如UPQC\DVR

等，采购或开发这些装置需要一定费用，维护也需要成本。第二是污染的持续性，有些污染是长期出现，有些是短期出现。第三是微网对网络治理的措施，为了给网内用户提供优质的电能，微网运营商也需进行治理的整体规划。这些规划措施与企业的具体需求有何符合需求的地方，也需考虑。

解决方案：考虑上述各类影响因素，对于一个工业企业而言，可按如下顺序来完成治理：网络化治理→便携式治理→内部治理。网络化治理的实施主体是微网运营公司，主要对微网内部的重要节点，如中高压变电站、分布式电源接入节点等，建设主要污染类别的检测和治理点，并形成连带治理。之所以称之为网络化治理，主要是因为对一个节点的治理，会连带改善其它节点的污染问题。因此需考虑网络化的影响。

便携式治理的实施主体是专业化的电能质量治理服务商，这类公司具有种类齐全的电能质量治理设备，需要治理什么，就随时拿出相应的设备。他们具有现货交易、即时响应、价格实惠和售后服务好的优势。因此，企业用户可选择这类专业化的服务公司，采用合同质量管理的方式，外包电能质量治理。这有助于企业专注于生产经营活动，降低治理费用、快速得到电能治理的益处。对于大多数中小型企业可采取这类治理方式。

内部治理的实施主体是企业，主要采购或开发针对性的治理设备，安装在企业内部，由企业自己维护。通常适用于对电能质量要求特别高、质量问题长时间出现和处理的企业。这样的治理方式具有费用高、针对性强、效果更优等特点。企业需依据自身需求灵活选择。

电能质量治理服务商如何运营？电能质量治理服务商通常可以与微网运营商签订区域承包协议。微网运营商在建设微网时需规划并建设好设备接口，使得各类治理设备都可以随时接入。在微网交易平台，电能质量治理通过企业ID可与需求客户进行交易，随时响应需求。业务开展大体有如下两类情形：第一类是微网网络化监测系统，检测到电能质量问题，判断是否提交电能质量治理商。如提交，电能质量治理商则依据问题进行价格、治理时间和达标参数等约定，快速派人带设备前往，进行专项治理。第二类是企业用户发出需求信息，电能治理商同样进行是否检测、约定价格和治理时间、达标参数等的约定，快速响应治理需求。

#### （4）需求侧响应

##### ● 需求侧响应整体架构

需求响应概念源自需求侧管理，主要包括基于价格的需求响应与基于激励的需求响应两种基本形式，近年来正逐步从电力行业延伸至天然气行业。

电力、天然气的供销具有非常相似的特点：1) 通过电网、天然气管网直接供应到用户

侧，供应能力受到网络容量限制；2）大规模储存能力较差，生产与消费基本上实时平衡，电力尤为苛刻；3）负荷相对集中在经济发达区域，且均存在季节性、日周期性的高峰和低谷，需要必要的调峰手段满足供应需求。

区别于发电侧、气田侧的调峰手段，电力/天然气多能互补需求响应主要是在需求侧引导用户改变用电、用气行为习惯，并利用电力与天然气的互补、耦合特性，最大限度提高综合能源利用效率。

#### ● 需求侧响应技术

加大峰谷价差，试点尖峰电价：基于价格的需求响应，经相关测算第二产业对削峰填谷贡献率最大，且随着峰谷电价比逐渐加大，削峰填谷量愈加明显；建议在二、三产业在夏季时开展尖峰电价，预期会有效缓解夏季高峰时段电力供应紧缺、卡脖子等问题。

保障民生需求，鼓励低谷用电：从保障民生角度出发，建议在用电负荷较高的地区，积极推行峰谷电价，但峰电价不宜过高，谷电价可适当下探，鼓励谷电期应用电动汽车、储能等技术。

推行分时气价，促进耦合互补：在季节性“气紧”地区建议尽快试点天然气分季节、分时气价政策，与电力的丰枯、分时电价政策配合，实现电气之间的互补和替代，提高社会整体能源利用效率。

鼓励负荷集成，推广自动响应：在基于激励的需求响应方面，引入综合负荷集成服务市场竞争，最大程度集成和管理需求侧响应资源；优先在电力负荷密集、电网容易出现“卡脖子”的区域推广自动需求响应，鼓励企业自愿参与或由集成商组织参与。

对标国家规范，加强平台建设：加强国家电力需求侧管理平台、电网企业负荷管理系统、用户电能管理系统和负荷集成商负荷控制服务平台之间的对接；鼓励集成服务商自主投资建设负荷控制平台，符合技术标准的均可以接入国家/省级电力需求侧管理平台。

#### ● 应用情景分析

基于价格的需求响应：一般由用户根据价格信息决定是否实施需求响应，主要包括峰谷电/气价、实时电/气价、尖峰电/气价。

基于激励的需求响应：指采用奖励方式来激励和引导用户参与负荷削减项目，一般是由运行人员决定是否实施需求响应。该方法需要一定的需求侧管理平台（需求响应功能）、负荷控制系统、用户用能管理系统、智能家居以及必要的信息通讯作为支撑，实施门槛较高。

### 2.2.4 微网接入系统

#### (1) 分布式新能源接入

- 新能源接入整体架构

能源互联微网是能源互联网的基本区域单元，也是智慧能源的基础；同时，它另一个重要功能是为新能源的接入和消纳提高平台。长远来看，能源互联微网的能量来源主体是新能源，且最大限度本地消纳。下图给出了新能源接入的基本架构。

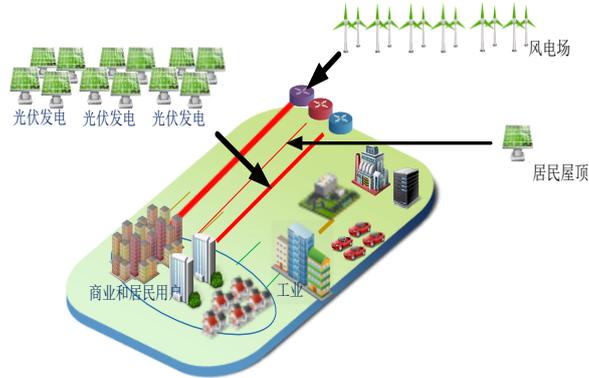


图 2.25 新能源接入微网图

新能源的规模与功率特性不同，决定了接入微网的位置和方式不同。对于大型风电场，由于功率输出总量大，随机性大，可接入微网高压等级电网；光伏电站规律性好，功率规模适中，可接入中压等级电网；分布式居民屋顶，由于过于分散，且功率小，可接入低压网络。这样的接入主要是考虑电网压力和便于消纳的因素。

- 光伏新能源接入

微网适用于分布式电源的接入，具有一定的能量管理能力。在城市、工业园区和商业集中区，通过微网接入光伏电源是新能源接入的主流形式。光伏电站接入电网时对微网有一定影响，主要表现在太阳能光伏电站的实际输出功率随光照强度的变化而变化：白天光照强度最强时，发电装置输出功率最大，夜晚几乎无光照以后，输出功率基本为零。因此，除设备故障因素以外，发电装置输出功率随日照、天气、季节、温度等自然因素而变化，输出功率不稳定。

光伏电站出力特性预测受多种因素影响，光伏发电系统输出功率具有不连续和不确定的特点，其中气象条件的影响最显著。此外，光伏发电系统的输出功率还具有很强的变化周期，这会对电网产生周期性冲击，据国外有关文献资料介绍，电网发电容量中光伏发电的比例不宜超过 10%~15%，否则整个电网将难以运行。因此，有必要进行光伏发电出力预测，以了解光伏电源的发电运行特性，这不仅有助于解决与调度、负荷等的配合问题，从而有效减轻光伏并网发电对电网的影响，又可以为光伏电源的并网规划和设计提供重要参考。

目前，针对光伏电源出力预测一般是从实际情况出发，构建光伏电站数学模型，并根

据当地太阳辐照强度模拟光伏电源出力，采用适用的算法建立出力预测模型，进而实现出力预测。影响光伏电源出力的因素较多，很难用确定性模型来描述，因此，需根据光伏电源出力的不连续性、不确定性和周期性特点以及光伏电源出力与其影响因子之间的非线性关系，进一步研究更适用的出力预测模型和算法。

- 新能源接入与主动配电

随着分布式光伏、风电、生物质等新能源接入以及电动汽车充电站的逐渐普及，使得传统配电网在运行的灵活性、安全性和经济性等方面都面临更大的挑战。国民经济的快速发展对配电网提出了安全可靠、优质高效、灵活互动的三大目标。其核心是要求配电网具有更高的供电可靠性和自愈、重构功能。以最大限度减少供电故障对用户的影响。传统配电网向主动配电网模式的过渡和发展已势在必行，开展分散发电对电力系统的影响研究始于 80 年代后期。国内对主动配电网亦称有源配电网的研究开展较早，并有相关文献发表。目前国内外研究配电网的文献主要分四类。第一类主要是研究分布式电源、电动汽车等对传统配电网的相关影响。主要包括规划模型、继电保护、自动重合闸控制、电能质量、网络损耗与无功优化、故障定位与孤岛检测、可靠性评估策略、智能电网管理与控制。智能微网技术控制。第二类是主动配电网的概念及研究框架，即主动配电网定义。主动配电网与传统配电网、微电网、智能电网三者之间的差别。主动配电网示范工程建设进展等。第三类是主动配电网运行控制。源于对主动配电网体系本身尚未形成清晰统一的认识，因此该类研究文献大多是对电压控制&负荷控制&配网优化规划算法层面的改进等。

- 应用情景分析

分布式光伏主要指居民屋顶光伏。这类光伏电量可接入 380V 低压网络，当低压配电网能量管理系统建立起来后，能量可以在临近区域用户之间交易和流动。以农村散居屋顶光伏为例，可以数十户接入一个能量路由器，实现在附近居民之间的流动。

微网电压等级大体包括三个等级，比如 380V、1 千伏、11 千伏。分布式屋顶光伏仅接入 380 伏，实际上仅接入微网内部分区域。

## (2) 电动汽车用能

- 电动汽车接入架构

下图给出了 电动汽车用能接入途径。

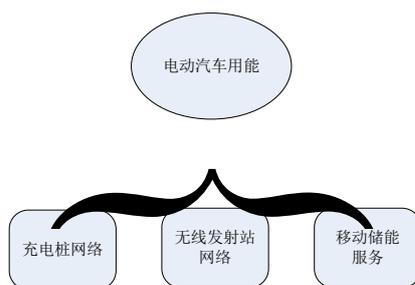


图 2.26 电动汽车用能途径

电动汽车用能可以通过三种方式接入能源微网。

第一类，通过充电桩接入微网，获取能量。在微网内部，需建设数量众多的充电桩，包括工厂、公园、住宅小区、写字楼停车场、商场和主干道路边等，形成一张充电网络。且在微网应用平台上随时可查到充电桩的信息，是否处于空闲状态，充电功率等。

第二，通过无线充电接入微网，在微网主干道安装有功功率发射装置，发射功率和有效范围覆盖等可以满足正常行驶车辆的需要。在微网应用平台上，应有无线充电网络的分布信息，功率信息和工作状态信息。

第三，通过微网交易平台接入储能服务，这类用能主要通过微网平台进行采购，获得更换蓄电池服务。

● V2G

随着可再生能源被大量接入电网，由于其自然可变性，迫切需要其他能源(如电池能量储存系统)进行补偿，以保证电网频率的稳定并抑制由反向功率流引起的电压上升。V2G的概念就是针对这个问题提出的。现在的电网没有足够的电能存储能力，所以电网发电必须实时适应用电需求的变动。而电动汽车在 96%时间都是处于空闲状态，它们可以接入电网并作为储能元件。为了分析电动汽车 V2G 的作用，需要考虑电力使用的 4 个部分。

(1) 基本负载：基本负载是一天中用电需求曲线的最小值，供给基本负载的发电机需要 24×7 不间断地工作。对于这一负载工作，核电和燃煤火力发电厂比较适合。基本负载有着最低的每千瓦成本和最高的建设资本投入。

(2) 高峰负载：高峰负载仅在一天中出现几个小时，这部分负载不能由基本负载发电来满足，需要一些能够快速启动的发站承担，例如使用天然气和石油的发电厂，高峰负载的每千瓦成本比基本负载要高。

(3) 应急发电：应急发电需要发电机在特殊状况出现时可以立即启动并以全功率运行。这类发电只是使用在特殊的环境，但是需要保持随时待命。

(4) 电力调节：当电力需求波动时，可能会导致电压或频率不稳定，此时需要立即校

准。例如当电压升高时，需要增加电力的使用需求。

考虑到电动汽车的规模、渗透率和实现成本等因素，电动汽车现阶段最适合作为电力调节手段来使用。随着分布式可再生能源接入电网，发电的不稳定性会逐渐提高，而电动汽车 V2G 可以作为一个良好的调节方式。对于应急发电，虽然由电动汽车承担可以节省大笔维护和待机费用，但是考虑到难以预测电动汽车的行驶和停放规律，所以很难满足应急发电的要求。随着电动汽车规模的不断扩大，配合合理的控制策略，电动汽车最终可以提供高峰电力，达到削峰填谷的目的，降低每千瓦的发电成本。

#### ● 充电对微网的影响

电动汽车充电对电网的影响因素主要是电动汽车的普及程度、电动汽车的类型、电动汽车的充电时间、电动汽车的充电方式以及电动汽车的充电特性。需要指出的是，当电动汽车接入电网的方式仅限于通过充电站(桩)时，电动汽车对电网的影响就笼统地反映在充电站(桩)对电网的影响。

1) 电动汽车的普及程度。电动汽车的普及程度不同对电网的影响大小也不同。电动汽车数量较少，对电网的影响非常小，而当数量较大时，其对电网的影响将不容忽视。国外根据电动汽车普及程度分阶段研究电动汽车对电网的影响。电动汽车的普及程度受很多方面的影响，其中影响较大的是电动汽车技术的发展水平。当技术很成熟而且价格较低时，电动汽车的拥有量较高，此时其对电网的影响也较大。2) 电动汽车的类型。电动汽车的类型主要是不同用途的汽车，如轿车、运输车等。不同类型电动汽车的充电电路和充电时间是不一样的。小型轿车、中型轿车、中型多用途汽车和大型多用途汽车 4 种电动汽车类型中，大型多用途汽车容量较大，充电所需时间也较长，其对电网造成产生的影响最大。3) 电动汽车的充电时间。充电时间场景的设置需要根据电动汽车使用者的用车习惯、上下班时间以及引导政策等来进行。可以从电网运营者角度进行设置，也可以从电动汽车使用者方便性方面进行设置。不同的充电时间对电网的影响非常大，如果在峰荷时间进行充电将加重电网负担，而如果在非峰荷时间进行充电将减小充电对电网的冲击。4) 电动汽车的充电方式。目前，电动汽车充电方式主要分充电模式和更换电池模式，这 2 种充电方式的一个共同特点是利用专用插座从电网获得电能。充电模式可分为普通充电和快速充电。普通充电又叫慢速充电，它每次充电所需的时间较长；快速充电是利用大电流给电动汽车充电，这种充电方式不仅会给电网带来较大的冲击，而且会减少电池使用寿命。更换电池模式是将空电池留在充电站利用小电流进行长时间充电。5) 电动汽车的充电特性。充电汽车接入电网时的电力需要由充电的电压和电流决定。不同类型汽车的充电特性不同，对电网的影响也不同。

- 电动汽车参与微网调峰

电动汽车参与电网调峰的可行性可从这几个方面来分析：电动汽车的数量、电动汽车的电池容量、电动汽车出行时间。根据国家 2009 年 3 月份公布的《汽车产业调整和振兴规划》，我国将要形成 50 万辆纯电动、充电式混合动力和普通型混合动力等新能源汽车产能，各个地方政府也相继出台了不同的新能源汽车的规划，从这种情况来分析，未来电动汽车的数量将会飞速增长，估计到 2020 年，纯电动汽车的数量将达到 400 万辆，这样电动汽车的储能将会是一个不容忽视的容量。目前电动汽车的电池还没有统一的规格，种类也不统一，主要有铅酸电池，镍镉电池以及锂电池等。根据统计，现有的这些电池的容量一般都 100-200 kWh 之间，其中乘用车的容量一般为 15-30 kWh，如果按电动车 1/3 C 充放电假设，每辆车提供的功率最少为 5 kW 功率，假设每辆 50% 电量用来负荷响应，则每辆车最少可以提供 7.5 kWh 的电量。如果把大量电动汽车统一管理起来，同时充放电，即可用于电网的调峰。按照统计，一天当中 90% 的电动汽车时间都处于停放的状态，按照上述的电动汽车所能存储的电能容量，即可参与电网的调峰需要。在电动汽车数量一定的情况下，完全可以用于电网的调峰。

- 应用情景分析

混合动力汽车技术比较成熟，应用场景覆盖整个私家车市场和公交、出租、环卫、公务、邮政、机场等公共服务领域的市场，但是混合动力汽车依然主要使用化石能源，不能满足能源互联网绿色特征，因此，混合动力汽车在未来的发展有其局限性。纯电动汽车现阶段续航里程较短，因此主要应用于城市私家车和公交、出租、环卫、公务、邮政、机场等公共服务领域的市场。未来，在续航里程等技术瓶颈突破、配套充换电设施完善的情况下，纯电动汽车使用领域可扩展到传统汽车所有细分市场。现阶段燃料电池电动汽车仍处于示范阶段，离产业化还有距离，其主要示范场景主要是公交、出租、环卫、公务、邮政、机场等公共服务领域的市场。CNG 汽车续航里程较短，主要适合在市区小范围活动；LNG 汽车续航里程是 CNG 汽车的 3 倍左右，适合发展长途公共交通。

- 一辆电动汽车的充电与用电过程？

当电动汽车停在住宅小区时，它可以通过小区充电桩进行充电。充电前，需插入识别卡，充电桩获得电动车身份信息，部分车主信息。充电即将完成时，将有进度信息发送到车主手机中，提醒车主。如在充电尚未完成的情况下，需要使用机动车，车主可以选择走无线充电道路。行进中，会收到无线充电是否开启的信息，在手机界面点击是，将继续进行无线充电过程。一旦驶入无线充电盲区，而蓄电池电量即将耗尽时，可以点击储能商量分布图，

找到距离最近的储能商店，上门购买更换服务。当电量完全耗尽时，也可以原地等待获得更换服务。

### （3）虚拟电厂

#### ● 虚拟电厂概述

虚拟电厂是通过先进的控制、计量、通信等技术实现多个分布式电源、储能系统、可控负荷、电动汽车等不同类型的、较为分散的分布式能源的聚合和协调优化，以作为一个特殊电厂来整体参与电力市场和电网运行，有利于资源的合理优化配置及利用。与传统电厂相比，虚拟电厂具有几点不同的特征：

构成资源多样性：虚拟电厂既可通过组合多种分布式电源进行发电，实现电力生产；又可通过调节可控负荷，采用分时电价、可中断电价及储能等措施，实现节能储备；构成资源环保性：虚拟电厂采用新型可再生能源，对环境的影响较小，通过节能技术或调节可控负荷而实现的虚拟电厂电力生产，甚至达到了零排放，所产生的电能对环境完全没有影响；运营过程协同性：为使虚拟电厂有效参与电力市场，实现调峰及节能降耗作用，需要多家虚拟电厂在不同的运营机构内相互配合、协同合作。

#### ● 应用情景分析

聚合多种分布式电源的虚拟电厂：通过将不同类型的分布式电源进行聚合，作为一个整体参与日前电力市场，并通过协调优化提供备用辅助服务。

分散储能/电动汽车的虚拟电厂：将分散的储能装置、电动汽车聚合起来，协调优化控制整体的充放电时序，降低随机充放电对电能质量的影响，帮助实现电力削峰填谷，提高综合利用效率；

聚合分散可控负荷的虚拟电厂：通过负荷集成商聚合大型工业用户可控负荷、楼宇中央空调负荷，参与需求响应，降低或转移高峰用电负荷，或是在紧急情况下提供备用辅助服务；

综合聚合上述分布式能源的虚拟电厂：综合聚合多种分布式电源、储能装置、电动汽车、可控负荷资源，或者其中的任意组合，保证所接入的电力系统能够可靠、经济、可持续运行。

## 2.3 城市能源互联网

### 2.3.1 网架结构

能源互联网是以现有电网为基础，利用新型清洁能源与互联网技术，通过微电网，实现能源存储与共享的多级分布式开放系统。微网之间通过能源路由器实现平等连接，可以将不同区域的能源局域网互联起来。基于能量的交换和路由，可以实现多个能源互联网中的作用与关系。能源路由器基于扩展性优先的设计理念，使用于各种灵活的组网方式，图 2.27 给出一个典型的城市能源互联网拓扑结构。

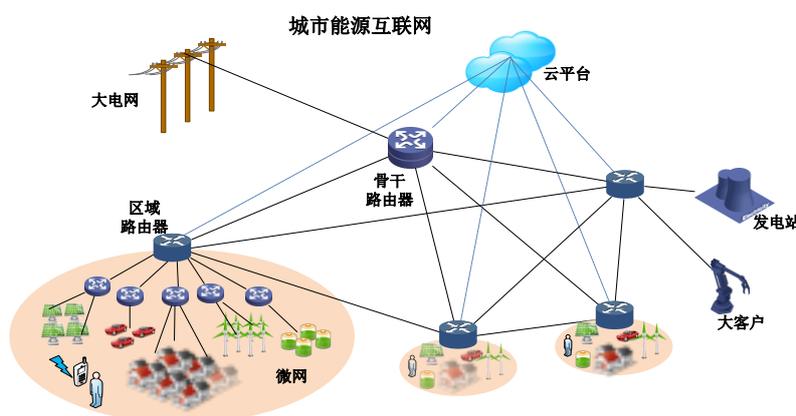


图 2.27 基于路由器网络的城​​市能源互联网

该结构中的路由器可以大体分成三层：10KV 及以上的城市骨干网路由器，380V 的区域路由器和 220V 的家庭路由器。骨干网路由器功能作用大致相当于当前的变电站，通常电压变换到 10KV 以上，需提供兆瓦级以上的容量。其功率很大，既能将主干网的电能分配给下一级用户，又能在需要时，将低压端的能量反馈给骨干网。并且，骨干路由器需具有故障隔离功能，在局域网出现故障时，路由器可将故障迅速隔离，防止向骨干网扩散。由于区域里可能存在工厂等大功率非线性负载，骨干路由器还需提供无功补偿、谐波改善和电压支撑等电能质量调节功能，并将较差的电能隔离在区域配网内部。而在主干网电能质量较差时，路由器也可对其予以支撑。此外，主干路由器的通信距离一般较长，范围较大，通信安全性要求较高。

区域路由器用于较小地域范围或民用、商业楼宇等的能量管理，供电电压一般为三相 380V，容量从几百千瓦到上兆瓦，对于电动汽车，区域路由器将成为未来理想的充电设备。其可提供多个充电接口同时为多辆电动汽车充电，还可以连接充电站内的储能电池和光伏等新能源发电设备。在充电高峰时，释放电池的能量进行给电动车充电，缓解电网的压力；而在充电低谷时，利用电网的电量将电池充满，为下一次服务做好准备。因此路由器为功率波

动提供了理想的削峰填谷功能。另外，由于电动汽车的电池和充电方式现在还缺乏统一的标准，充电站无法为每个车型或品牌提供特制的充电桩，这给电动汽车用户充电带来了不便。电能路由器可以很好地解决这个问题，其内部的电力电子变换装置可以提供普通充电、快速充电服务，以及直流、脉冲等多种充电方式，可满足各类电动汽车用户的需求；在与电动汽车连接后，路由器通过内嵌的通信系统可识别车型、电池型号和荷电状态，并根据用户要求提供所需的充电方式。作为较小区域的电能管理中心，区域路由器需具备电能质量调节能力。配电网末端的电能质量往往不够理想，可能出现电压闪变、谐波含量过大、电压过低等问题。区域路由器可将主干网和局域网隔离开，彻底改善子网的电能质量，并可以对上一级电网予以支撑。另外，电力局域网内可能存在敏感负荷用户，如银行、医院等。利用储能设备，电能路由器可实现个别用户的不间断电源的功能。在主电网故障时，采用孤岛运行模式，为负载持续供电，保证重要负荷的供电可靠性。

作为配电网的终端，每个家庭用户在入网接口需要安装一个家庭电能路由器，负责住户的能量管理。其主要端口为输入单相 220V 交流电，功率等级一般小于 20kW。由于家用电器所需供电形式不一，家庭电能路由器的接口需要提供更丰富的电气形式，如液晶电视机的 19V、数码设备 5V 等的直流电，以及空调、冰箱等的交流电。家庭电能路由器的功率等级虽然较小，但功能和复杂性反而较高。同时，每个住户将是分布式能源发电的参与者，屋顶光伏、微型风电设备和电动汽车电池等储能设备的加入，住户内的电网形成了一个家庭微网，并参与到配网的能量管理中。因此家庭微网的能量调度同样有 3 种情况，分别是配网吸收能量，向配网反馈电能，以及脱离配网形成自给自足的孤岛系统。为了实现家庭微网内的各个发电装置、储能设备及负荷的能量管理可控，需在各个发电、用电器植入通信模块及控制器，并与电能路由器使用相同的通信协议。电能路由器将一方面接受用户的指令管理微网内部的能量，另一方面需要将信息传给上层路由器并接受指令，实现全网的能量管理。

### 2.3.2 运营机制

#### (1) 运营基本架构

作为能源互联网的核心和纽带，电力互联网的“源-网-荷-储”协调优化模式能够更为广泛地应用于整个能源行业，与能源互联网的技术与体制相结合，形成整个能源系统的协调优化运营模式。在能源互联网背景下，“源-网-荷-储”协调优化有了更深层次的含义：“源”包括石油、电力、天然气等多种能源资源；“网”包括电网、石油管网、供热网等多种资源网络；“荷”不仅包括电力负荷，还有用户的多种能源需求；而“储”则主要指能源资源的多种仓储设施及储备方法。具体来讲，主要包含以下 2 个方面：

1)横向多源互补。“横向多源互补”是从电力系统“源-源互补”的理念衍生而来，能源互联网中的“横向多源互补”是指电力系统、石油系统、供热系统、天然气供应系统等多种能源资源之间的互补协调，突出强调各类能源之间的“可替代性”，用户不仅可以在其中任意选择不同能源，也可自由选择能源资源的取用方式。

2)纵向“源-网-荷-储”协调。纵向“源-网-荷-储协调”是从电力系统“源-网协调”和“网-荷-储互动”的理念中衍生而来。

能源互联网中的纵向“源-网-荷-储协调”主要是指 2 个方面：

1)通过多种能量转换技术及信息流、能量流交互技术，实现能源资源的开发利用和资源运输网络、能量传输网络之间的相互协调；

2)将用户的多种用能需求统一为一个整体，使电力需求侧管理进一步扩大成为全能源领域的“综合用能管理”，将广义需求侧资源在促进清洁能源消纳、保证系统安全稳定运行方面的作用进一步放大化。

## (2) 运营基本流程

以能源互联网系统投资运营商的角度来阐述整个能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式的流程。具体如下：

1) 基础条件分析。在系统规划方案设计前，系统运营商需对建设目标区域进行经济现状评估及未来发展趋势预测，在此基础上，结合地理信息系统系统、信息物理融合系统等对用户的多种类能源需求做出预测，分析目前该地区已有的能源供应渠道和方式，这方面不仅包括用户的用电需求预测、负荷特征刻画及负荷发展特性预测，还包括用户供热需求、供水需求、天然气需求等多方面用能需求预测。此外，还应分析目标地区的气候地理条件，为集中式和分布式能源模块的选址提供数据信息支撑。

2) 系统规划。以基础条件分析所获取的数据信息为依据，选择合适的地点开展分散能源模块和集中能源模块的构建，分散能源模块以分布式电源及其配套设施为主，集中能源模块以大规模清洁能源发电及灵活发电资源为主。在规划阶段就要充分考虑到未来的系统运营需求，分散能源模块要在能源供需内部自平衡的基础上，为集中能源模块提供有效补充作用；另一方面，集中能源模块的规划要为运行阶段清洁能源与灵活发电资源的互补协调提供基础。同时，系统运营商需完成能源传输模块构建，为集中和分散能源模块提供连接用户的能源通道，分散能源模块应通过微网与主能源系统相连，微网技术在其中起到缓冲和优化作用。此外，还需建设信息通讯网络及云端信息处理系统，计算系统规划方案的可行性并在多个方案中实现选择、优化，同时汇总能源信息并制定优化的系统运行方案。

3) 系统运行。在系统运行阶段,系统运营商通过信息通讯网络采集用户的全部用能信息及能源供应侧的基础数据,通过云端信息处理系统的分析处理为用户提供优化的用能方案,通过合理的电价机制及需求侧响应措施引导用户用电主动追踪清洁能源发电;同时根据发电侧数据信息设计合理的调度排序,结合分散能源模块“自发自用、余量上网”的模式,实现系统的双侧协调优化、双向自适应过程。同时应充分发挥电力系统的纽带效应,优化其他能源模块(如供热、供水、燃气供应等)的运行。在系统运营过程中,由于向用户承担了供电、供热、供气以及用电诊断、用能方案优化设计等职责,还为能源互联网覆盖区域内的用户提供了能源输送渠道,因此系统运营商的收益可包括电费、输配电费、能源信息服务费、供暖费及其他能源费用等。

4) 全过程评价。在能源互联网项目建成运营后的3—5年间,对该项目的运营情况进行评价分析,构建包括可再生能源使用效率、供电可靠性、设备使用率等多方面指标体系,运用综合评价方法进行对比分析,寻找项目缺陷并进行循环修正。

### 2.3.3 运营关键技术

从能源互联网“源-网-荷-储”协调优化模式的主要内容来看,这种优化模式能够将能源互联网的能源开发、能源输送、能源需求与使用等几个环节协调统一为一个有机整体,这样的协调优化不仅能够从更高的层面出发,实现能源资源的优化配置,同时能促进清洁能源的高效开发利用,提高清洁能源在终端能源消费中的比重。为支撑上述能源互联网协调优化模式的流畅运行,需要有一定的技术架构作为基础来实现能源互联网不同模块之间的能量流与信息流互联互通,为实现能源互联网在城市范围内的“源-网-荷-储”协调优化,技术框架包含4个主要部分:

1) 在系统规划部分,需要有专项技术优化各类型电源(包括集中式与分布式)的选址定容、微网及主网的规划设计,为“源-网-荷-储”协调优化运行奠定基础。

2) 在系统运行部分,需要有专项技术能够在微观层面上控制各分布式电源及储能设备的充放电,实现用户端各模块的内部自优化、自适应,提高各模块的可控性。在宏观层面上,形成新能源发电与传统化石能源发电出力的优化组合,通过分布式发电、储能设备等技术,引导用户用电负荷主动追踪发电侧出力。

3) 在系统信息通信部分,需要有专项信息交互技术保证信息流在各个能源模块间的双向自由流动,收集各个模块的数据信息并进行初步的分类、处理,随时满足用户的初级数据需求,并且将收集来的数据输入云端信息处理部分。

4) 在云端信息处理部分,需要有专项技术把能源供应模块、能源网络模块以及能源需

求的数据信息进行集成、处理、分析以对外公布，同时反馈到优化模块来制定系统的优化运行计划，在较为长远的时间尺度上，将全能源系统的数据信息反馈到系统能源规划模块中，以进一步循环优化、修正系统规划设计。

在“源-网-荷-储”协调运营的技术框架下，与 4 个技术相对应的包括四种协调优化关键技术。

1) 广域能源优化配置规划技术。广域能源优化配置规划技术要求能够统筹兼顾、因地制宜地协调一定能源区域内的各种能源资源，如太阳能、风能、水资源、燃气资源、煤炭等，在规划阶段，分析资源开发利用的具体模式，结合区域内铁路网、燃气供应网络、供热网络的整体情况，确定光伏发电、燃气发电、传统煤电的容量及选址，设计相应的能源规划方案及系统运行方案，通过模型测算保证规划的合理性、可靠性，实现电力系统、铁路网系统、油气网系统的统筹协调。这方面的研究重点主要是规划模型研究，未来将以现有的智能电网规划模型为基础进一步延伸，并且以模型为依据构建软件平台和信息处理分析系统。目前这方面的模型研究包括多类型能源协调互补协调优化模型、能源互联网示范工程规划设计模型、考虑供需双侧能源需求的清洁能源并网消纳模型等。

2) 多能流互补控制技术。能源互联网是多能源网络的耦合，这表现在能源网络架构之间的相互耦合，同时也包括网络能量流动之间的互补协调、安全控制。在能源供应与输配环节，未来能源互联网通过柔性接入端口、能源路由器、多向能源自动配置技术、能量携带信息技术等，能够显著提高电网的自适应能力，实现多能源网络接入端口的柔性化、智能化，降低网络中多能源交叉流动出现冲突、阻塞的可能性。在系统出现故障时，能够加速网络的快速重构，重新调整能源潮流分布和走向。目前多能流互补控制技术主要聚焦于控制策略与控制技术方面，控制策略主要指多类型能源发电的优化调度模型、控制模型等；控制技术主要指以数字信号处理为基础的非传统控制策略及模型，包括神经网络控制、预测控制、电网自愈自动控制技术、互联网远程控制技术、模糊控制技术、接入端口控制技术等。

3) 多能源计量监测及信息交互技术。信息监测技术方面，智能电网的高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)系统是基础，其未来的研发过程要向着智能化、计量能力多元化、信息交互多向化方向发展，通过无线传感器技术、遥测技术等实现能源信息的自动采集、自动分析处理。信息交互技术方面，未来需重点研发信息交互自动感知技术、通用信息接口技术、数据清洗技术、信息数据压缩技术、数据信息融合技术等，实现用户与用户之间、用户与各个能源互联网模块之间的自由信息交换与动态反馈。通过总结分析，多能源计量监测及信息交互技术的主要应用体现在以下两点：

第一点，信息收集与实时分析。借助于互联网技术、“大数据”与“云计算”技术对 AMI 系统的通信模块和数据管理模块进行升级，增强其数据吞吐处理、数据存储能力、数据分析能力等。实时收集用户的用能信息及其他环境信息，对这些基础信息进行初步数据挖掘，获取用户用能行为特征、刻画用户用能特点。

第二点，与智能控制终端相互整合。借助能源互联网的普适性接入端口，构建能源互联网多种类能源设备的信息交互平台，借助完善的信息分析处理能力，结合数据挖掘分析结果为用户提供多能协调的综合用能方案，在一定程度上实现对用户用能设备、分布式能源设备的自动控制、自动优化协调。这种以多能源计量检测和信息交互技术为基础的综合用能管理系统将是未来实现用户侧能源利用梯级优化的重要支撑。

4) 智能云端大数据分析处理技术。在能源互联网的技术框架下，云端信息处理技术将与大数据技术实现有机结合。在微观层面上，利用互联网营销技术、云存储和云计算技术，一方面，用户可以随时随地、按自身需求订制信息服务，便捷地获取能源资源信息；另一方面，大数据信息处理技术能够在精确分析用户综合用能习惯的基础上，在多个用户之间进行比较分析，为用户提供能源综合利用优化方案，引导用户用能与能源供应相协调。在宏观层面上，云端大数据技术将发挥数据汇总、分析、传输的职能，起到衔接各个技术模块的关键作用。规划前期，能源规划的基础数据通过大数据采集技术汇总到云端，由大数据可视化技术、大数据分析及展现技术分析计算各个规划方案的经济指标，与广域能源优化配置规划技术相结合，制定优化的规划方案；在系统运行过程中，各个能源模块之间的实时运行数据也将上传至云端，通过大数据分析技术、大数据展现技术等模拟仿真技术，预测能源模块之间的能量流，与多能流互补控制技术相结合，实现能源资源的实时优化调度与合理化分配

#### 2.3.4 商业模式

充分应用互联网思维，将当下互联网环境下实施的较为成功的商业模式与能源互联网平台有机结合，可拓展出种类丰富的新型商业模式。

1) 集中式整体平衡，渐进式自适应能效分摊机制。对区域能源互联网的运营效益进行综合评价，并与主网、其余区域互联网的综合运营效益进行对标。对标结果将反映为价格落差由区域能源互联网内的参与主体分摊，从而改变各主体的参与成本和收益，进而产生激励效果。在示范区内部，对各主体也进行相应的考核与激励，从而确定价格落差具体分配标准。构建基于大数据的能源互联网区域集中多能调度服务平台。示范区能量流、信息流和价值流结合的实现主要依托于能源互联网区域集中多能调度服务平台（简称多能平台）的实现。多能服务平台的核心功能是在满足用户用能需求的条件下实现能源互联网的能效最大化。基于

大数据和云计算原理，多能平台应实现以下关键技术：能源替代效益测算，市场主体分类标杆能效和各主体实际能效测算，用户分类用能情况测算，用户用能边际效益测算，用户用能中断边际损失测算。实际建设中，可先根据周边地区和本地区历史数据得出理论标杆值。在运行过程中不断收集、分析数据并对标杆值进行修正最后逐渐逼近真实值、适应实际的能源供需环境。多能平台可实现示范区市场机制的渐进成熟和自适应。

2) 分散式微平衡的商业模式。分散式微平衡的商业模式将成为未来能源互联网商业模式的主体，其形态丰富多样，主要如下：

- 能源自供。在推广分布式发电和分布式储能的基础上，各类用户可自己满足用能需求。若有盈余，则可就地地进行分布式能源节点的排布。比如在商业中心楼宇配置风光互补发电系统，而在附近安装有该中心功能的电动汽车充电桩等。

- 能源代工。由中间商统一采集各类用户的能源需求并统一受理、报价。中间商与若干能源提供商建立代工关系，由后者代工生产相应的能源，并提供给用户。

- 能源团购。类似于现有的网络团购。用户以团购的方式聚集购买力，以提升用户在市场博弈中的地位；同时为能源提供商提供了大宗销售的平台，便于其进行统一管控。适用于分散但总量可观的城乡个体用户群，有利于节约双侧成本。

- 能源救援。应对突发的用能中断状况，用户联系能源救援公司，由公司就近指派能源救援服务站为用户提供应急的能源供应。能源救援公司根据具体情况收取能源使用的费用和佣金。该模式适用于各种类型的用户，和电动汽车市场有较好的耦合度。

- 能源期货。以标准形式确定能源交易期货规格，新兴的能源供应商可借由较低的期货价格吸引用户，从而实现融资的目的。

- 能源担保。在大中规模用户与能源提供商交易时，由中间商对供需双方进行担保，提高交易效率以加快资金流转速度。

- 能源桶装。对能源服务进行规范化和标准化，具体可包括标准化储能设备，标准化供能曲线，供能格式合同等。该模式适用于中小规模的城乡用户，可使用户更便捷多元地塑造自我能源消费结构。

- “滴滴”能源。为不同类型的能耗用户提供个性化的点对点能源服务。能耗用户可将自己的用能需求信息发布到系统平台上，附近的能源供应商在看见用户发布的信息之后可选择进行匹配或忽略。匹配确认后双方可进行进一步协商和交易。该模式适用于各种类型的用户，且随着能源互联网技术的发展，支持的用户需求种类将不断拓展。

- 能源 WiFi。随着未来无线充电等技术的进一步发展和普及，对用户提供更广泛无

线充电服务成为可能。用户连接无线充电热点后对用能设备进行充电，充电完成后使用绑定的账号进行付费。无线热点主要覆盖商业楼宇和居民用户。

- 能源定制 4.0。基于生产的高度自动化，为用户量身定制能源产品和服务搭配方案。该模式覆盖的范围将随着技术革新逐步扩展，最终实现覆盖所有种类的用户单元。

- 能源点评。开发专门的能源领域点评软件，允许各类用户和能源服务类公司进行双向点评。该模式类似于现有的“大众点评”。有利于交易信息的公开化，可与其他商业模式进行耦合并有利于提高其效率和信用。

- 淘能源。类似于现有的各类网络购物网站。构建网络交易平台，使各类能源服务公司都能够在平台上开网店，出售各类产品和服务供用户选择。该模式广泛适用于各类商业主体，提供了大型的网络能源交易平台。

- 能耗顾问。成立能耗顾问公司，在用户提供信息的基础上对用户的信息分析和顾问服务，指导用户进行用能规划。

- 能源托管。在能耗顾问的基础上，类似于能源管理公司用户将自己在一时间内的用能委托给能源托管公司，由能源托管公司负责以更专业的算法、更全面的数据和特殊的能源来源渠道对其进行全程规划安排。在满足用户用能要求的基础上，节约下的用能花费作为收入由用户和能源托管公司分配。该模式适用于城乡小用户，可在节省用户时间成本同时提升节能减排效果。

- 能源众筹。能源投资者在资金不足的情况下，可以通过能源众筹平台来筹资，多方联合进行投资。适用于小规模投资主体，有利于新平台、新技术的发掘。

- 能源借贷。类似于现有的商业银行贷款。成立能源借贷公司，用户基于自身需要签订能源借贷合同。该模式可用于多种负荷类型和规模的用户，尤其适用于工程单位，可为其解决能源规划问题和提供项目期能源支持。

### 2.3.5 运行机制

借鉴现代互联网技术中的层次划分方法，将网络分为 4 个层次：能量层、信息层、业务层和价值层。分别以能源交易为应用场景，逐层分析，介绍能源互联网运行机制。

价值层分析。传统能源供应中，电、气、冷、热等各种形式能源系统在规划、运行、消费、交易等各方面几乎都是保持独立的。然而，在能源互联网时代，价值创造层面的变革，多种形式能源的耦合程度大幅提高，如在能源生产侧，冷热电联供机组在产生电能的同时，也能产生热能和冷能；在能源消费侧，用户能够选择消费不同的能源而达到同样的用能效果如空调用电取暖和暖气直接供暖等。各种形式能源的交易形式灵活自由。开放、自由、充分

竞争的市场将培育更多的商业主题，激发各商业主体的积极性，实现更大的价值创造与市场的高效运行。在充分竞争的能源市场中，各商业主体需要不断提高自身竞争力：能源生产商需要更高效更低成本的生产优质能源，传输商需要理性评估能源传输系统的规划方案实现资产的高效利用，能源零售商转变以提供用户为中心的个性化的用能服务为目标。

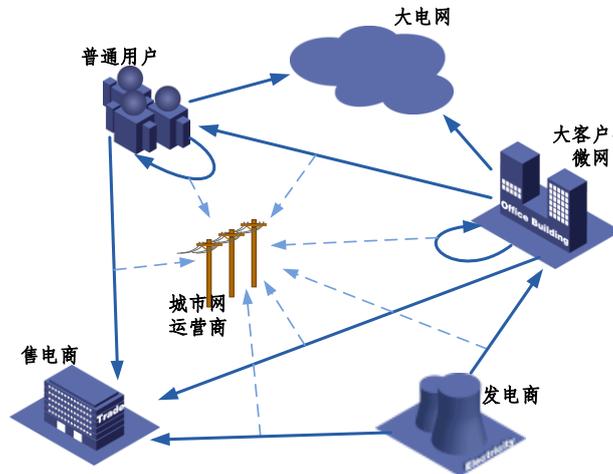


图 2.28 城市能源互联网价值流动

城市能源互联网中的价值流动包括微网之间，跨微网的普通用户之间，普通用户与售电商之间，大用户与售电商之间，大用户与发电商之间，大用户与服务商之间，大用户与电网之间。大用户联购（同时与多个能源进行交易）等。

业务层分析。

### (1) 售电商-客户之间电能交易（B2C）

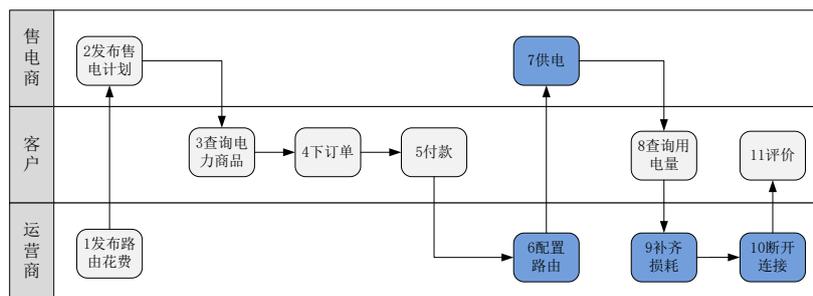


图 2.29 售电商与客户的交易业务流程

能源的自由、公平、公开交易是能源互联网的标志之一，本节主要针对客户的购电业务，对整个交易场景进行描述，其他类型交易与其类似，在描述交易过程之前，做如下约定：

- 能源交易按时间片进行，即交易的能源商品是未来一段时间内能量的总和。
- 一旦买卖双方签订交易协议后，必须严格执行，不允许中途撤销。为了完成交易，

能源路由器除了融合先进的电子与信息技术，能够对能量传输进行精确控制外，还必须具有

如下功能：

- 对未来某一段时间的本地能源产生功率和能耗进行准确预测。并支持用户查询；
- 能够计算任意两个路由器之间的路由成本；
- 储能。

在上述假定条件成立情况下，以电力交易为例，能源互联网中的一次用户购电交易过程如下：

- 城市能源互联网运营商根据路由器提供的信息发布路由花费、起止区域、线路类型、传输费用等，以便售电商查询。
- 售电商等均可根据运营商提供的路由花费信息，结合自己的发电成本来发布自己的售电方案，包括供电时间、价格、电量、售电区域等，形成电力商品列表。
- 大客户可以在交易中心或通过智能终端查看电力商品列表，需要注意的是，电力商品列表中售电方案的价格包括了售电商的定价和路由器的传输成本。不同时空客户的路由器传输成本也不同。这样可以引导客户采取合理的购电和节能策略，优化网络的运行效率。
- 客户可以选择多个售电商、发电商或是大电网作为交易目标，从每个目标只购买部分电量，而总量达到自己的耗能要求，这样也避免了阶梯电价带来的额外花费。
- 卖家需要响应来自不同客户的购电请求，签订相应的买卖协议，一旦协议生效，双方必须履行，均不可中途撤销。
- 运行商根据交易成交情况来配置相应的路由策略，其中可能需要路由器对电能缓存来实现电能供应。比如客户在某段时间同时购买了售电商 A 和大电网各 1 万度电。路由器可以建立客户和售电商 A 之间的链路连接，先由售电商 A 供电，同时将来自电网的电能进行存储，当监控到 A 供电即将结束时切换线路，再将存储的电能传输给客户。
- 对于本地功率波动、预测误差以及存储和传输损耗的电能，由路由器补齐。可以向买方收取一定的路由服务费用
- 协议履行结束，断开链路连接。
- 客户可以对供电过程的满意度反馈给售电商及运营商，也可对问题进行投诉建议。

#### (2) 发电商-售电商之间电能交易 (B2B)

发电商与售电商之间的交易过程如下：

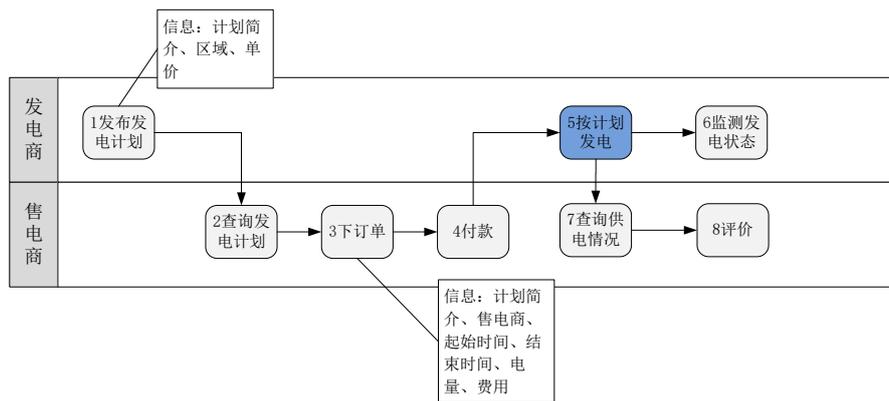


图 2.30 发电商-售电商的交易业务流程

在上图个环节中，环节 1) 发电商根据自己的设备情况和历史记录给出发电计划，包括供电时间、供电区域、和单价等；2) 售电商可以在线查询所有发电商发布的发电计划；3) 售电商可以选择一个或多个目标发电商的发电计划下订单，订单内容包括发电商、供电时间、电量、费用等信息；4) 在线付款，可以利用区块链技术确保交易的安全性；5) 交易成功后，发电商需要按照发电计划进行供电；6) 发电商可以监控自己的供电情况；7) 和 8) 售电商可以查询发电商的供电情况，并给出评价。

### (3) 安全能源交易机制与区块链技术

- 能源交易中的安全问题

能源互联网各个实体间关系复杂，如果不能建立有效的信任机制，将影响整个行业的发展。比如分布式光伏发电的价值链模型中涉及到的参与方有电站投资者、电站开发商以及屋顶业主，同时也有用电企业、电网公司、财政部，理想情况下，在这个价值链模型中，这些参与主体之间的关系比较简单。但在真实商业环境中并非如此。由于不同主体间普遍缺乏信任，真实的主体间的关系会十分复杂，导致在这条价值链上的价值生产和流动过程的摩擦成本非常高，充满了各种各样耗时耗力增信和中介过程。而且，分布式光伏价值链仅仅是整个大能源环节中非常小的一环。整个电力网络从发、输、电、配、售、用、储，是一条无比复杂的价值链，同时因为电力行业非常特殊的即时生产、即时消费，难以储存的特性，导致整条价值链上各环节环环相扣，而且能源流、资金流、信息流这三流之间也是你中有我，我中有你，整个系统的复杂度、交易成本是呈指数级别上升的。再比如，目前在中国碳资产的发行中，从项目发起到进入交易所流通，中间过程至少需要 10 个月，这么长的时间成本都将变成经济成本分摊到每一个减排企业和控排企业，以及每一个能源消费者身上。如此复杂的过程，对于中国能源的清洁化、能源的分布化、能源的共享化会造成巨大的挑战。

- 区块链技术原理

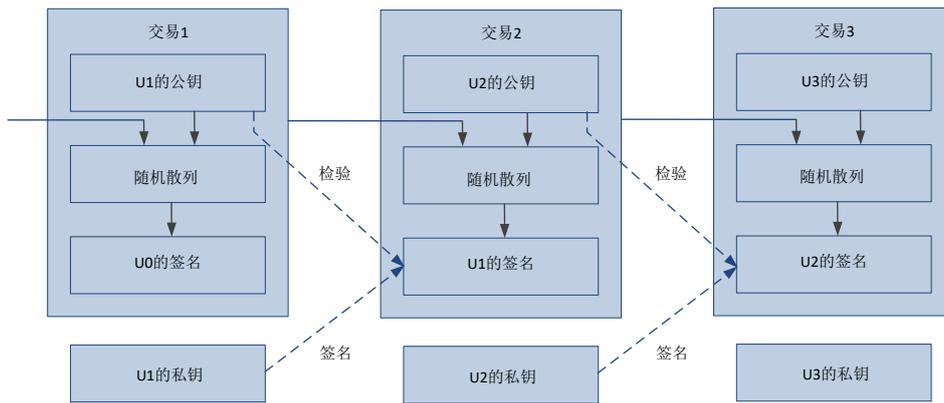


图 2.31 区块链链式结构散列原理

为此，可以研究利用区块链技术解决上述问题。区块链技术的主要特点是去中心化，是基于密码学算法建立的一个全球信用的基础协议。具体来说，区块链是基于互联网的分布式账本技术，由于账本由多方共享，保证了账本的不可篡改性，比特币（Bitcoin）是区块链技术的一个成功应用。区块链作为一种信息技术，使用随机散列并对全部交易加上时间戳的方法，其链式结构散列原理如图 5 所示。在图 5 中，对于 U2 来说，首先 U2 使用 U1 的公钥验证 U1 通过 U2 公钥发给 U2 的使用 U1 私钥签名的先前交易信息及 U1 与 U2 的交易信息，确认 U1 的身份，然后将交易信息进行重新组合或者分解，使用 U2 的私钥对重新组合或者分解后的先前交易信息及 U2 与 U3 的交易信息签署一个随机散列的数字签名，并将这一签名通过 U3 公钥发送给 U3，U3 按照 U2 的方式进行验证、签名和进一步处理，如此区块包含的交易信息就产生了。其中，对区块进行随机散列时要加上时间戳，并将随机散列在网络中进行广播，这样加了时间戳的区块就是其存在的一个有力证明，每一个时间戳对前一时间戳的信息纳入其随机散列值中，用以对上一时间戳信息进行增强。通过分析区块链链式结构散列原理可以发现，如果大多数的所有者是诚信的，则随着区块链的增长，区块链的信用会相应快速增长，如果攻击者企图对已经形成的区块进行篡改，则必须篡改所有诚信者的区块以及其后交易区块的信息，对于一个长度不断增长的区块链来说，攻击者要完成相应区块信息的修改几乎是不可能的，区块链的去中心化及区块所有者互相证明的机制实现了交易的有效证明。

- 区块链技术应用

区块链的核心技术是加密技术，使用区块链协议可以解决交易信用问题，因此，区块链与传统的以金融系统为中介的交易相比其交易费用是很低的。以比特币网络为依托，交易者只要安装相应的软件进入这一系统按照相应的协议就可以进行自由交易，因此其交易是跨时空的交易；由于没有金融中介机构的参与，交易者只需等待区块产生即可使用比特币进

行支付，因此与跨地域的传统交易相比，其交易更加便捷。区块链技术以“以太坊”为基础架构平台，这一平台包括了文件管理、信息加密传输以及建立交易信用证明的功能。由于区块链应用的包容性，使任何进入区块链的能源交易参与者都可以访问相应的记录，也可以提交记录；同时由于所有的交易会被全网记录，使得区块链记录是可追溯的和不可抵赖的；区块链以数学算法为基础，摒弃了不同国家文化、经济的差异，使全世界范围在此基础上建立能源互联网的信用体系成为可能；同时由于区块链运行于互联网，具有较好的通用性和扩展性；区块链可以与大数据进行结合，使得通过大数据分析获取的知识更加精准；同时由于区块链技术与传统技术融合及应用的发展，促使大数据的量级向更高一级发展；区块链的去中心化及不可抵赖性，使区块链为解决合同冲突提供了更加有力的证据，其发展有助于实现社会的公平正义；区块链使用散列算法加时间戳，既可以保证交易信息的真实性、独立性和保密性，又为交易提供时间上的证明；基于区块链的交易每一新的交易信息都会向全网广播，每一个加入系统的节点都将收到的交易信息纳入区块，节点始终将最长的链条作为正确的链条，并不断地延伸链条。区块链非常适合应用于能源交易领域，对于信息真实性认证、财产公证、合约的订立等，都可以使用区块链来实现。

区块链在城市能源互联网中的应用可以从以下几个方面开展：

a) 构建去中心化的能源交易与服务体系。区块链去中心化、便宜、有效和个性化的特点，使能源互联网的生产、销售和服务实体可以借助区块链的技术优势构建交易服务体系，这样的体系体现了公平、透明、诚信的特点，其服务内容将包括在线合同认定、交易记录、冲突的解决等，建立在区块链技术上的能源交易服务体系会更加有据可查，便于责任的认定和问题的解决。

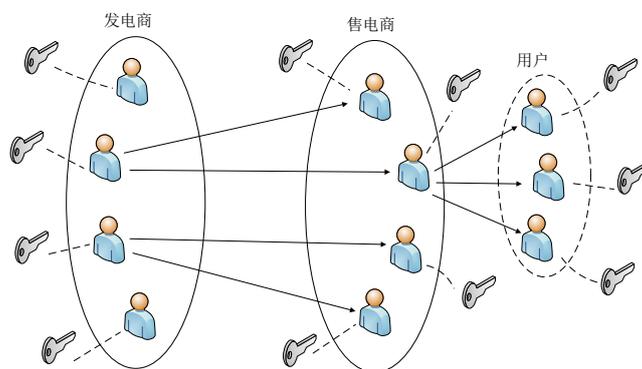


图 2.32 基于区块链的能源互联网价值链各交易主体

b) 信息的快速传播及真实性认定。通过区块链可以使各类事件、活动在全世界范围快速传播，同时对传播对象，交易内容的变更进行追溯，因为区块链所包含的数据具有个性化，

这就为解决一些科学难题及进行预测提供了可靠的依据。B2B 与 B2C 交易是网络交易的主要模式，在现实生活中面临着严重的交易信用问题，虽然大数据技术的发展给 B2B 与 B2C 交易信用问题带来了契机，交易双方可以借助大数据技术遍历对方交易大数据以获取对方交易数据信息的证明。但由于有时数据来源受限，导致无法获取完善的交易信用证明数据，同时由于数据源及数据信息的独立性，大数据技术也为不法分子修改、破坏、盗窃、交易数据提供了更高的可能，所以从根本上来说，大数据技术仍然不能彻底解决 B2B 与 B2C 交易的数据证明问题。B2B+B2C 能源供应链是从能源生产原材料到能源商品全部交易所经历的整个链条，其间涉及能源材料供应商、能源生产商、销售商、终端用户等多个交易主体，其 B2B+B2C 供应链的整个交易关系也是复杂的，这也同时导致了 B2B+B2C 供应链各交易主体之间交易行为认证的难度，区块链技术的产生恰恰可以解决 B2B+B2C 供应链各交易主体之间交易行为认证困难的问题。在对区块链技术及 B2B+B2C 供应链结构进行分析研究的基础上，本文构建了基于区块链的 B2B+B2C 供应链各交易主体交易结构如图 6 所示。在图 6 中，供电商、销售商与客户的交易关系结构构成了供应链，各交易主体交易的过程是在区块链技术的基础上实现的，这样可以确保 B2B+B2C 供应链这一包含庞大交易主体的交易过程是有证据可以查询的。

在传统的企业电力交易中，通常使用的中心机构实现交易行为的认证，认证中心需要具有一定的独立性、通过对能源互联网 B2B+B2C 价值链各交易主体的交易行为进行分析可以看出，能源互联网中各交易主体是动态变化的，尤其 B2C 和 C2C 的流动性更大，而且具有很大的随机性，但是 B2B+B2C 供应链企业内部交易主体基本上是固定的，而且上游的供应商和下游的销售商在一定的时间内也体现了较大的固定性，而在基于区块链的交易行为认证机制下，企业内部交易主体、供应商、销售商又是区块链的认证主体，这样可以考虑构建集内部交易主体、供应商、销售商为认证集体的基于区块链的供应链动态多中心协同认证模型，同时客户作为区块链交易的一个主体也进行交易行为认证，但不再作为认证中心，客户参与认证的作用是在多中心协同认证仍不能实现交易行为证明的情况下进一步作出证明。

与传统的独立中心认证相比，基于区块链的 B2B+B2C 供应链动态多中心协同认证模型不需要委托第三方作为独立的认证中心，由多交易主体作为不同认证中心共同来认证供应链交易行为。从长期来说，上游的供应商与下游的销售商是动态变化的，这样可以确保参与认证交易主体构成的认证中心的数量并防止共谋的形成。各认证中心是 B2B+B2C 供应链的交易行为主体，受利益博弈会主动遵守信用机制，因此基于区块链的 B2B+B2C 供应链动态多中心协同认证模型具有高的交易行为证明性和稳定性。利用基于区块链的 B2B+B2C 供应链

动态多中心协同认证模型，能源互联网任何一个交易主体都有交易行为证明的能力，如果某一个交易主体单独或者联合其他交易主体试图篡改交易记录，其他交易主体可以根据自己对交易的记录证明其不法行为，并将其踢出供应链。如果销售商中的一个或者多个交易主体试图欺诈客户，由于客户本身也具有交易证明的能力，客户可以向其他作为认证中心的交易主体反映，经多个认证中心核实情况后将不法能源互联网实体踢出。如果客户试图欺诈销售商，经多交易中心协同认证后将不法客户进行记录，取消其交易资格。基于区块链的 B2B+B2C 动态多中心协同认证模型可以保证多个交易中心组成的整体认证机构具有一定的稳定性，这样便于能源互联网交易主体共同掌握能源商品的销售情况和客户行为情况，共同经营供应链，保证交易信息的高度透明性、一致性和真实性，促进企业内部交易主体、供应商、销售商集体作出决策。

我国传统的能源交易模式成本高昂，现有的电子商务平台下又体现出不安全、缺乏对交易实体认证监管的能力，采用基于区块链技术构建能源互联网的电子交易平台，以最大程度地开拓我国能源交易市场，提高交易效率。基于区块链的能源交易平台的某能源销售公司可以随时发布自己的能源需求和能源产品销售套餐，上游的能源生产商可以在 B2B 电子交易平台与该销售公司进行供能交易，下游的用电用户也可以在 B2C 电子交易平台与该公司进行能源商品的交易。由于基于区块链的 B2B 与 B2C 电子交易平台交易主体的交易行为将是完全证明和无可抵赖的，所以供应商、销售商和用户受利益驱使将会共同经营整个供应链，给顾客提供可靠的产品和真诚的服务；对于用户来说，由于交易的不可抵赖性，客户也将真诚地与销售商进行交易，以免受到不必要的惩罚。基于区块链的能源互联网 B2B+B2C 电子交易流程及其交易认证过程如下：

- 1)能源生产商构建自己的 B2B 电子交易平台，销售商构建自己的 B2C 电子交易平台，所有的 B2B 与 B2C 电子交易平台加入 Internet；
- 2)构建基于区块链技术的网络系统并接入 Internet，将生产商的 B2B 电子交易平台和销售商的 B2C 电子交易平台接入基于区块链技术的网络系统；
- 3)供应商通过 B2B 电子交易平台与售电商进行网络交易；
- 4)供应商与售电商的网络交易在整个基于区块链的网络系统中进行全网广播；
- 5)所有的供应商、销售商、用户将收到的电子交易信息纳入到一个区块中；
- 6)所有的供应商、销售商、用户都尝试在自己的区块中找到一个证明交易信息真实性的工作量；
- 7)当供应商、煤炭企业、销售商、客户中的任何一个找到工作量证明以后，就会向全

网进行广播；

8)所有的供应商、销售商、用户认同该新的交易是有效的且是最新的，接受该交易信息，认同区块的有效性，否则对该交易的真实性提出疑问；

9)其交易区块链接到上一区块末尾，延长区块链一个区块；

10)交易继续进行，售电商通过自己的 B2B 电子交易平台与用户进行网络交易；

11)用户与销售商的电子交易及区块链认证过程参照 4)-9)执行；

可以假设能源互联网 B2B+B2C 的一次电子交易形成一个区块。显然，区块链技术的交易可证明性促进了能源互联网电子交易的应用，为促进各实体间交易提供了有力的行为证据保障。对于用户之间的 C2C 能源交易来说，也可以采用基于区块链的电子交易平台，不再累述。

区块链技术再能源互联网中解决了另外一个关键问题是每个设备的自我管理，这样就无需经常做人工维护，这意味着设备的运行环境应该是去中心化的，它们彼此相连，形成分布式云网络。区块链技术解决了闻名已久的拜占庭将军问题——它提供一种无需信任单个节点、还能创建共识网络方法。能源互联网以物联网为基础，所有的节点都能自发、自动地与其它物件、或外界世界进行金融活动，如：能源互联网中冰箱可通过调节用电量和利用分时电价，辅助削峰平谷促成更优惠的电费账单。

信息层与能源层分析。

在以传统电力网络和智能电网保证能源传输转移的电网潮流层之上，信息层将利用现代化“信息打包”技术，最终将能源与信息标记为最基本的能量信息流，供业务层和价值层消费与收纳。若以互联网层次结构相比较，能源互联网的信息层以保证网络传输通信为目的，组成了能源互联网最基本的“路由层”，保证业务层实体间信息通信与能量转移。在能源互联网中，路由层和业务层功能分别对应实体“能源路由器”的路由转发功能和能源选择与交易。其中，微电网作为能源互联网的基本组成单元，通过新能源的采集、转换、汇集、存储、消纳形成最基本的“能源局域网”。在能源互联网的发展过程中，微电网将作为能源互联网中的“微商”，驱动能源互联网经济的发展；能源路由器以保障能源信息高效安全转移为目标，实现规范化、软件可定义化的能源信息路由控制系统，是能源互联网的核心控制单元。借鉴在分布式能源存储及可控性方面的综合研究成果，定义能源互联网为：以“能源路由器”为基础，以微电网为“能源局域网”(单元)的多级分布式能源共享复杂网络。

能源交易不再禁锢于传统集中式的能源分配与调度。能源将作为“商品”，在自由的“市场”即能源互联网上进行对等交易与兑换。即能源交易将以传统互联网的 P2P 形式进行，形

成类似互联网形式的多级对等结构。然而，这种自由开放的能源交互体制，势必产生更多的能源转移问题，即能源路由。这不仅给能源路由器与能源互联网基础设施的设计带来挑战，同时与其相关的 QoS，如能源传输效率、能源转移安全、能源传输成功率等相关问题必将影响能源互联网的安全与拓展，也是理想“能源路由环境”下，能源与信息路由策略制定过程中的 NP 难题，其中包括传统互联网通信面临的“拥塞控制”和“负载均衡”问题。“拥塞控制”和“负载均衡”是基于存储转发理念网络最基本的路由评价指标。因此，如何针对能源互联网的特定结构，设计优化路由策略，防止网络拥塞、平衡网络负载、保证能源安全转移、提高吞吐量是研究能源互联网能源与信息传输效率的重要问题。综上所述，根据能源互联网在能源与信息频繁转移与交易过程中面临的挑战，针对能源互联网中存在的“能量传输拥塞”和“能量负载均衡”问题，在理想网络模型下，利用复杂网络理论，本课题给出 3 种不同应用场景下的路由策略。旨在规范化能源互联网能源与信息流在转移过程的路径选择策略，在保证能源与信息安全转移的同时，提高能源与信息的转移传输效率。

#### (1) 能源互联网理想路由模型

无论传统互联网还是能源互联网，其路由效率涉及网络结构、网络带宽、路由器设置，其中能源互联网还包括储能技术、开关技术、配电技术等复杂因素。因此，任何路由策略都不可能涵盖所有条件因素。为突出重点研究问题——仅考虑由网络拓扑结构相关性质决定的路由策略，即分析研究理想路由环境下的能源互联网路由策略，能源互联网的理想路由环境在此定义为忽略能源路由器个体间的差异，只由网络宏观拓扑结构性质的路由环境，即本课题研究的能源互联网路由策略是在所有能源路由器设置条件相同的前提下进行的，包括储能单元、信息处理单元和优先级等。为了规范能源互联网能量与信息存储转发方式及结合相关学者在分布式能源存储转移技术和传统电力网络拓扑研究相关成果，可以基于以下两个条件：

1) 在能源互联网中，能源路由器将配备“超级储能单元”。由于储能单元的先进化，能量与信息将以能量信息流(Energy Information Flow, EIF)的形式在能源路由器间进行存储与转移，并可实现传输设备复用与高效化。能量信息流的信息标签包括原地址、目的地址、下一跳路由地址等融合信息。

2) 能源互联网支持多种类能源表现形式，但最终将以“电能”形式输出，能量信息流的能量是以电能的形式在能源路由器间存储与转移的。此外，BA 网络模型因其无标度特性，常用来模拟抽象互联网，且能源互联网将采用类似互联网多级对等的网络结构，因此可以采用 BA 模型模拟能源互联网的基本结构。

## (2) 能源互联网“拥塞控制”路由策略。

能源互联网的能量传输拥塞是指在理想路由环境下，由于路由策略导致个别能源路由器的超级储能单元存在过多能量信息流转移传输任务，致使能源路由器转发服务过载，网络整体能量信息流传输效率急剧下降，以至崩溃。无论是传统通信网络，还是能源互联网，网络拥塞问题均不可避免。这里旨在为仅考虑能量传输拥塞控制问题的能源互联网应用场景，讨论问题解决方案。目前在诸多实际通信系统中，普遍采用最短路径路由策略(Shortest Path Strategy, SPS)。在 SPS 策略下，一旦能源互联网的拓扑结构确定，EIF 将会选择从源微电网  $i$  和目的微电网  $j$  之间经过的能源路由器数量最少的路径作为传输路径，即 EIF 的传输路径也将固定。SPS 策略虽具有最小化 EIF 的转发次数，进而减少转发等待消耗的优点，但在能源互联网中，由于其采用 P2P 的交易方式，导致各 EIF 具有平等性。对于度值较大、有多条最短路径经过的处于“中心节点”位置的能源路由器将被多个 EIF 中转任务竞争。网络传输 EIF 的吞吐量受到“中心节点”位置能源路由器的限制，产生“能量传输拥塞”。在能源互联网实际应用场景，甚至将导致部分处于中心位置的能源路由器瘫痪，产生安全隐患。针对 SPS 策略应用于能源互联网中时存在的问题，一种解决思路是把中心化程度高的能源路由器上的 EIF 转发请求分散到其他中心化程度低的能源路由器。

然而，无论 EPS 策略还是 SPS 策略，其控制对象都是针对网络中处于中心节点位置的能源路由器。而在能源互联网中，网络中的有效边即传输线路也将影响 EIF 的传输效率。这便将传统的“点”问题，转换为“点边”问题。针对以上问题，以 EPS 策略为参考蓝本，利用能源互联网的拓扑结构特性，采用基于边权的路由策略(Edge Weight Strategy, EWS)，以解决能源互联网中的能量传输拥塞问题。

受布雷斯悖论在现实传输通信网络中减少某些资源可能有利于网络流量均衡的思想启发，通过为抽象网络中的边赋权值量化分析传统通信网络，并通过删除其中一部分大权值的边以提升网络传输性能、缓解传输过程中的拥塞问题。然而在能源互联网中，传输设备不出现故障时，是不存在无效被删除的边(传输线路)。即使因为线路故障，暂时不适用，也有被再次复用的可能。无论 SPS 策略，还是 EPS 策略，在“中心节点”处，皆易产生能量传输拥塞问题。因此，结合能源互联网的能量与信息转移特性，突出与大度值节点相关联的边，使 EIF 可以更好地绕过“中心边”而不改变网络的固有结构。基于边权的路由策略的主要思想就是通过对能源互联网中的边进行适当的加权，使 EIF 在传输过程中绕过产生能量传输拥塞概率较高的“中心边”，降低“中心边”被使用的概率。

## (3) 能源互联网“负载均衡”路由策略

网络的无标度特性使某些重要的链路成为数据传输的最优路径,给与之相连的“中心节点”带来更多的数据中转任务。因为经过网络的“中心节点”意味着在不产生拥塞的前提下,更高效地完成传输任务。因此,如何在保证网络传输质量的前提下,使所有节点“各司其职”,即充分利用“中心节点”,也是优化网络效率的关键突破口,即负载均衡优化问题。结合能源互联网的能源路由特性,本课题定义能源互联网的“能量负载”为某一时刻,某一能源路由器的超级储能单元存储 EIF 的数量。定义能源互联网的“能量负载均衡”为在所有节点均参与 EIF 中转工作的前提下,使某些“大度值”节点在避免使网络产生能量传输拥塞的同时拥有较多的中转任务,提高资源利用率。因此,为了实施能源互联网的“能量负载均衡”策略,就需要全局或局部掌握网络各节点实时动态的负载信息,继而进行局部调整,以达到全局最优。

### (3) 软件定义网络

传统网络具有管理困难的特点,其根本原因在于网络控制功能分散于各个路由器节点中,难于达到一致的网络状态,提供完整复杂的控制功能依赖于对所有分散节点的独立管理和调试,浪费大量的人力物力,且存在难于发现和解决的漏洞。

软件定义网络的主要理念是控制平面和数据传输平面的分离。控制信道与数据平面的数据传输信道逻辑独立,即控制数据的转发信道不依赖于数据传输信道的建立,在传统通信网中这是不可能的。此模型强调决策逻辑和网络元素交互协议的分离,提出数据平面简单化基础化的特点,同时提出路由节点转发表项可以从零开始配置(不必预先的人工配置)。由此 SDN 提出将控制逻辑从分散的路由节点中独立出来,形成逻辑上统一的控制节点,而路由节点仅实现简单的数据转发功能。其具体的转发流程如下:

1) 每个路由器将流表用于数据包的转发,可以在流表中预先定义若干表项(主动),也可以使流表从零开始,在运行时自动添加表项(被动)。

2) SDN 以流为单位对数据包进行处理。当数据流的第一个报文到达路由器时,首先在流表中查找。如果在流表中没有匹配项,将被转发到控制器进行处理。由控制器计算转发路径并在相关路由器上建立流表项,然后将该报文转发到原路由器进行转发。流表项建立后,后续报文可以实现报文的即时转发,并可以保证匹配报文的转发路径保持不变。SDN 基本体系结构只有一个逻辑上的集中控制器,具有难以适应大规模网络的特征,这可以通过以下途径改善:

- 1) 提高控制器本身的性能,可以通过多线程和块发送接收实现。
- 2) 使用控制器组形成逻辑统一物理分散的控制模型。

3) 使用权威路由器分担控制器的工作任务。

4) 使用控制器独立控制一个自治域。

SDN 路由器可以采用 OpenFlow 协议, 控制器可以采用 NOX 控制软件, 或使用位于 NOx 之上的相关高层编程语言 0 进行控制, 如 Frenetic。

软件定义网络最终控制的是比特信息流的传输, 而软件定义的能源互联网最终目标是控制能量流在能量路由器间的传输。能量路由的意义主要在于使得能量传输线路间形成动态互为备用关系, 减少冗余, 提高设备利用率。传统电网里面, 要应付源和用的动态性, 冗余备用越大越好, 这个电网和互联网的道理相通, 互联网能做到冗余大的同时利用率又高, 核心理想就是分散路由, 线路是动态的互备用关系, 因此不需要考虑 N-1/N-2 之类的问题。当然信息和能量交换本质上是不同的, 如能量的传播是有损耗的, 但能量比数据的个性化差异小, 能量存储比数据存储要困难的多等等, 因此实现可靠传输的方法是不同的, 但从网络拓扑的实现角度是可以相互借鉴的。开放对等式的能量交换方式, 以电能为例, 互联电网技术已经发展了很多年, 本课题重点讨论信息通信相关技术, 对于能源互联网能量交流方式仅以柔性直流为例加以简单说明。柔直具有以下优点: 可向无源网络供电; 可以独立控制有功和无功功率, 能够实现四象限运行, 控制更加灵活; 不需要交流侧提供无功功率, 且能够起到 STATCOM 的作用; 动态补偿无功功率; 稳定交流母线电压等等。针对能源互联网, 柔直还具有以下优点:

1) 便捷高效地联接风能、太阳能等距离偏远、地理分散的可再生能源或绿色能源;

2) 提供“优质电力”, 电能形式转换的过程中同时可提供全面的电能质量解决方案;

3) 可采用挤塑电缆输电, 易于向负荷密集区域供电, 满足环保需要;

4) 换流站设备模块化, 安装简单快捷, 维护方便, 便于“即插即用”的实现。

5) 方便构成多端直流系统。当系统潮流翻转时直流电流反向, 而直流电压极性保持不变, 有利于构成即能方便的控制潮流, 又能有较高可靠性的并联多端直流系统。

柔直是能源互联网能量交换的可选技术, 但以多端柔直为例, 系统级控制尚没有开放式的信息通信技术支持, 引入软件定义网络的理念、方法和技术适合能源互联网的场景。主要原因如下讨论:

1) 互联网信息的交换采取端到端传输可靠性保证, 而在网络层采取尽力而为的方式, 即保证了性能又提供了足够好的可靠性, 但其前提是终端的智能化程度比较高。能量的交换对可靠性的要求更高, 因此能源互联网信息通信要求更高, 在开放对等互联的前提下, 必须增强可控性。SDN 通过控制平面的功能集中化和数据平面路由节点功能的简单化, 可以减

少信息能源一体化基础设施的费用，方便能源互联网动态调度控制的灵活配置。

2)SDN 区别于传统通信网络的一个特点是其可以在规定时间内以很高概率保持路由路径的不变性(拓扑改变可能会引起路径改变，但出现概率不大)，这在传统通信网络中很难明确保证。利用该特点，在能源互联网中，控制信息的路由和能量路由可以一体化实现，通过 SDN 实现控制能源互联网能量交换路径的建立和切除。而传统的通信网络由于采用分散控制，难于保证前后路由路径的一致性。目前所建立的能源互联网还在功能实现阶段，仅使用中小规模节点进行研究，因此对其可扩展性尚不必过多考虑。

能源互联网由能源路由器连接而成，网络路由器和能量路由器对应实现，并对应一个能量自治单元。以微网为例，假设每个微网中至少有一台主机能与路由器连接，由此可以通过对应微网中的主机间的通信建立路由器中的路由，并进一步建立在能量路由器中的电力传输路径。

一体化实现还体现在控制器方面，控制器包括 SDN 的控制器，用于对 SDN 通信网络进行控制，还包括能源互联网控制器，实现对能源互联网进行运行调度，而具体调度的控制信息是通过 SDN 通信网络来执行的。以基于柔直的微网互联的能源互联网为研究对象，以 SDN 控制能量交换路径的建立、保持和切除为例，基本流程介绍如下：

1) 首先控制器根据采集到的网络状态数据、能量调度相关数据及直流系统状态信息，确定要进行能量传输的源微网和目的微网及具体的电力形式转换策略。

2) 控制器主机向源微网中的主机(源主机)发送控制通知报文。考虑到路径建立时延和通信复杂度的影响，这里采用 UDP 报文协议传输。报文内容可以包含目的微网中的一个主机(目的主机)节点 IP 地址，要求源主机向目的主机发送报文，同时还包括直流传输保持时间以及柔直控制的必要信息。

3) 源主机首先发送一个测试报文，以测试目的主机的连通性，并在每个交换机建立相关转发路径。根据 SDN 本身的工作流程，流表项可能已经存在，如果不存在则通过控制器决策。由于 SDN 网络的通信流程特点，在一定时间段内，该网络路由路径(同时也是以直流通路为桥接的能量路由路径)可以保持不变。当然也可以设置流表项存在时间(一般大于需要的能量传输时间)，便于路径管理。

4) 目的主机收到测试报文后，向源主机发送成功响应报文，以后对每个请求报文均应作出响应。这类似于互联网协议中建立连接的过程，由于能源互联网能量交换对可靠性的要求更高，因此面向连接的方法是可取的。此处所指的面向连接是网络和能量双连接的广义连接。

5) 源主机在收到测试报文的响应后, 发送“开”报文, 由于流表项已经建立, 可以实现路由表查表快速转发。

6) 当能源互联网调度控制决定的能量传输保持时间到达, 源主机首先传输测试报文(与3)类似), 得到响应后, 发送“关”报文, 同样可以保证传输路径的一致性。

7) 在每一个网络路由器上, 获取每个报文的内容, 如果匹配“开”信号和“关”信号, 就通过信息能源一体化基础设施, 发送相关信号给能量路由器, 实现能量传输路径的通断(“开”对应路径建立, “关”对应路径切除)。网络连接建立的过程除了考虑网络层协议的完备性, 要把能量链路的建立、保持及切除信息附加进来。网络路径的建立及决策的完成只是能量通路建立的必要条件, 前者要受控于后者。即使网络进行了完备的信息收集, SDN 路径规划, 握手等动作, 如果能量在 SDN 规划的路径上不具备建立通路的条件(电力设备状态、区域用电需求、电能质量要求、当前系统状态等等都可能是影响能量链路建立的因素), 则 SDN 路径的建立仍处于非有效状态。因此, 以上流程还需要配合相应的出错管理:

1) 如果在传输过程中出现响应信号超时, 需要通过 SDN 控制节点判断路径连接情况。如果是因为拥塞丢包, 可以重复发送该路径测试报文。

2) 如果“开”报文和“关”报文的传输路径不一致, 表明路径已经发生改变, 原路径的能量传输必然已经断开, 由此, 当原路径上的节点在一段时间内检测不到能量传输, 则该节点自动断开。而对于新路径, 由于本身并无能量传输, 所以“关”报文对其不起作用。

3) 如果能量路由的控制量、状态信息或电力参数超出阈值, 能量路由器向网络路由器反馈故障信息, 并在能量路由器的保护策略下, 听由网络路由器对路径及传输策略进行重新规划。

4) 对于其它故障引起的能量流断开, 同样可以通过检测能量流的方法对每个节点进行操作

## 2.4 本章小结

本章对能源互联网基础理论进行了深入研究, 主要包括几个方面: 首先, 对能源互联网在地理空间上的层级结构进行了划分, 提出了互联微网、城市互联、国家互联和洲际互联四个层级。分别地, 把能源互联网功能属性划分为能源层、信息层、业务层和价值层四个维度, 并以此为依据对四个空间层级进行了深入解析。

研究内容重点对能源互联网架构系统、能源互联微网和城市能源互联网进行了解析和情景分析, 总结归纳了能源互联网关键技术、系统结构和应用前景, 部分地构建了能源互联网的理论基础。为能源互联网理论和工程的发展提供了很好的借鉴和依据。

### 第3章 能源互联网关键技术探索--能源路由器

能源互联网的理论与技术正处于快速发展时期。许多科学家和工程师就相关关键技术相继展开了研究工作<sup>[48-49]</sup>。能源互联网把先进电力电子技术、信息技术和智能能量管理技术结合起来,将信息与能源一体化的电力网络、石油网络、天然气网络等互联起来,以实现能量对等交换与共享利用<sup>[50-51]</sup>。

能量管理是能源系统的重要研究与工程实践领域,在能源互联网快速发展的今天,其具有更为丰富内涵和意义<sup>[52-53]</sup>。张建华等为建设微网监控平台,针对小型微网提出了能量管理系统的构成、任务和 workflows,并研究了经济调度和优化运行的数学建模<sup>[54]</sup>。刘东等针对大规模的可再生能源并网具有间歇性的特点,采用主动配电网对其进行主动管理和协调控制,从而达到间歇式能源的有效传输和消纳<sup>[55]</sup>。江渝等研究了微网系统在离网运行时的能量管理。他运用蓄电池和超级电容的互补特点,以经济性和环保性为优化目标,给出了一种采用混合储能系统的多目标能量管理方法<sup>[56]</sup>。张涛等在总结了能源互联网及其能量管理系统发展过程,阐明了能源互联网架构下能量管理系统应具备的新功能,给出了适合能源互联网能量管理系统的分层递阶式控制架构<sup>[57]</sup>。

#### 3.1 能源互联网与能源路由器架构

上述能源路由器的研究大多在单体装置层面,当把能量路由器设备应用于能源互联网工程中时,需要探索其组网方式和对接入能源的管理方法。本文从能源路由网络实现的角度,把能源互联网划分为能源终端网络、能源互联微网和广域能源互联网三个层级,并在此基础上给出了微网路由和广域能源路由两个层级的路由结构。进一步,在路由控制策略上,研究了模型预测控制与实时数据控制结合的熔断机制,形成了能源路由的网络化和统一运行机制。

##### (1)能源互联网架构

无论是传统电网,还是信息能源融合下的能源互联网,电力流的输送都需按照区域分布特点,分层分级地输送或交换。既能够实现能源的有效传输和高效利用,又能够保障安全、有序地进行管控。如下图 3.1 给出了能源互联网在工程推广中的一种规划架构。

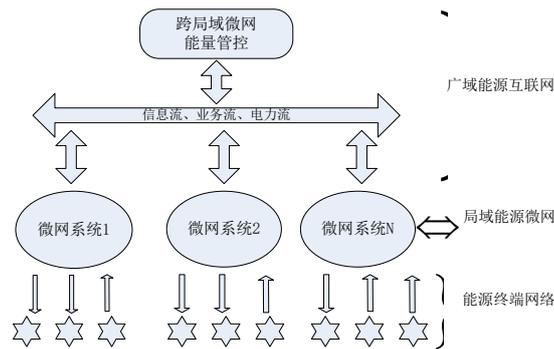


图 3.1 能源互联网层次架构

能源互联网的总体架构可以分为三个层级，即能源终端网络、局域能源微网和广域能源互联网。

能源终端网络是能源互联网的最小单元，它可以是任意形态的能源消费组织，比如一栋智能建筑、一所医院或学校、一个酒店、一个工厂和一个家庭等等，也可以是一个单一的大功率负荷装置，如大功率电机。能源终端网络可以是能源生产端或电源点，向局域能源微网输入能源。能源终端网络应具有能源通道唯一性的特点，与局域能源微网只有一个交换接口。

局域能源微网是一种区域性的能源自治组织。它把区域内的能源终端都连接起来，不仅建立电气连接，同时也建立信息与业务连接。通常，局域能源微网包含有各种形式的能源供应体，如光伏电站、风电站、生物质发电、燃气、地热等；也包括各类能源消纳体，如家用电器、电动汽车、工厂负荷等等；还包括数据中心、储能装置和能量管理系统等。由于能源互联网的整体建设具有时间跨度长和区域协调复杂的特点，局域能源微网是现阶段能源互联网建设的核心。

广域能源互联网主要协调局域能源微网之间的能量不平衡，实现跨局域微网的能源调度，它是能源互联网的高级形态和最终目标。在局域能源微网充分发展的基础上，广域能源互联网需建立大范围的能源监测、控制、调度与传输体系。广域能源信息网络、能源传输管网和广域能源管理是广域能源互联网建设的重要内容。

## (2)两级路由系统结构与网络模型

电力是能源互联网中的能源主体，其他形式的能源是消费结构中的组成部分。因此，在能源的调度、控制和传输中，可以把所有能源等效转化为电力度量数据来进行分析。

能源路由系统可以实现能源信息的量测采集、能源路由的分析与控制，以及能源的定向传输。对应于图 3.2 所示能源互联网三级架构，如下两级能源路由系统可以实现全方位的能量管控。

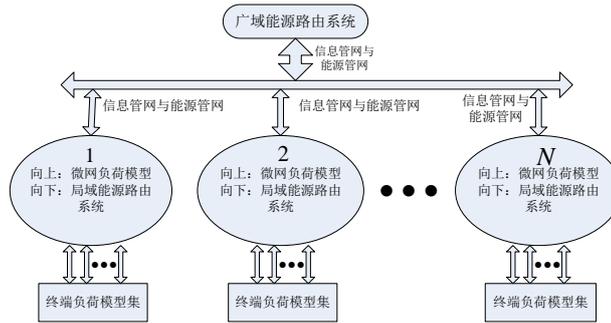


图 3.2 两级能源路由系统

### 网络模型

两级能源路由系统构成了能源互联网的全网能源控制。由于能源互联网对能源系统的暂态性能要求高，不仅要满足用户的交易需要，同时要对网络中能源的任何关联变化做出及时的反应。微网负荷模型与终端负荷模型集是能源路由控制的基础和对象，他们共同构成了两级能源路由系统的网络模型。这些模型的建立则需依据全网络量测单元提供的实时暂态数据，是一类时变模型。

终端负荷模型集是指局域能源微网内所有功率实体的数学模型集合，它描述了功率实体在微网运行时的实时功率状况。一般地，终端负荷数学模型包括有：发电侧的光伏发电模型、风力发电模型、火力发电模型；储能侧的相变储能模型、化学储能模型；以及消纳侧的阻抗模型和等效获得的燃气模型、热力模型等等。

微网负荷模型是指单个微网的总负荷特性，它定量地描述该微网功率冗余或不足的变化规律，为广域能源路由控制提供依据。微网负荷模型的建立需依据局域能源路由的实时运行数据，也是一类时变模型。以光伏发电功率为例，当光伏组件接入局域能源微网时，模型的建立过程如图 3.3 所示：

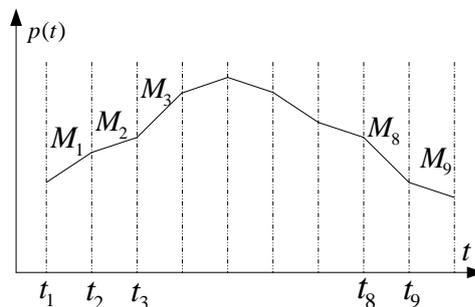


图 3.3 模型获取过程

在图 3.3 中，模型  $M_1$  的建立依据  $t_1$  之前的测量数据。 $M_1$  是一个线性函数，依据时间轴变量，可以获得相应的功率数据，为路由控制提供参考。如下给出了一个光伏功率模型：

$$p(t) = a(t_i)t + b(t_i) \quad (3-1)$$

其中， $a(t)$  和  $b(t)$  是在确定模型  $M$  时的辨识量，辨识主要依据量测数据进行。相应地，微网负荷模型和终端负荷模型集都可以参考图 3.3 和公式 (1) 的方法来建立。

### (3) 路由运行机制与情景分析

上述模型在应用到路由控制时，在能源网络平稳运行时，可以获得稳定的控制效果。对于终端网络急剧变化情形，比如结构变化时，则控制量与实际需求会出现大的偏差，给电力网络平衡带来很大压力，甚至导致故障。微网路由系统与广域路由系统具有相似的运行机制。

#### 预测控制与全网熔断实时路由控制方法

以局域微网为例，下图 3.4 给出了实时路由控制过程。

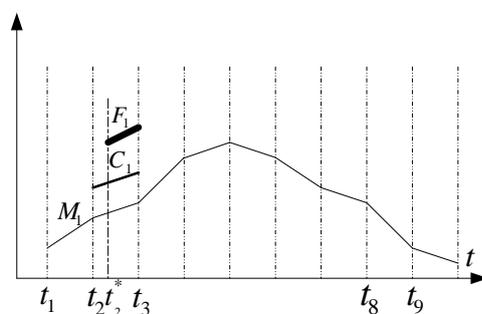


图 3.4 路由控制机制

在图 3.4 中，横轴  $t$  表示微网测量装置的测量时间节点； $M_1$  表示依据测量数据获得的实时功率线性模型； $C_1$  表示依据模型  $M_1$ ，采用预测控制方法获得的路由控制执行策略。通常， $C_1$  开始执行的时间节点在测量装置的采样时间  $t_2$  处，直到  $t_3$  时结束。但是，在时间节点  $t_2$  处，测量数据反馈到路由系统后，基于实时数据驱动的路由控制系统会被实时执行，计算获得符合当前状态下的执行方案，并与预测控制的执行策略进行比较。当比较的结果在一定的裕量范围时，路由系统继续执行预测控制方案；当比较的结果存在很大误差时，会产生熔断行为，即在图 4 中的  $t_2^*$  时刻，由路由方案  $F_1$  取代  $C_1$ ，直到  $t_3$  时刻结束。

这种预测控制与数据驱动熔断机制结合的路由策略，既实现了路由系统的无时差连续控制，同时又完成了异常状态的快速自适应调制，保障微网的稳定运行。

#### 情景 1—预测误差小，无熔断

在情景 1 运行状态中，采用量测数据辨识出线性模型。在较短时间范围内，比如 100ms，这个线性模型基本反映出功率变化的趋势。通过线性估计即可获得下一次运行点的功率数据，运用到局域微网内的所有功率终端设备，便可知道功率设备出力和消纳的全面信息。

进一步，采用预测控制的方法，在当前量测数据产生的同时，能源路由控制执行策略已经实施，即不等待当前测量数据将产生的路由控制信息。当微网结构稳定，功率处于基本平衡状态时，预测控制的路由控制策略与依据测量数据的完全平衡路由策略差别很小，它能适应全网运行的需求。因此，将不会产生熔断行为。

情景 2—预测偏差过大，引起熔断

设微网内部有三个电源点，三个负荷，采用终端负荷模型集的统一数学模型，如下：

$$p_i(t) = a_i t + b_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3-2)$$

公式 (2) 是统一的模型。考虑图 4 所示运行方法，在  $t_2$  时刻，预测控制策略采用模型  $M_1$  获得了路由执行策略  $C_1$ ，与此同时， $t_2$  时刻的测量数据上传到路由系统，并计算另一种路由执行策略  $F_1$ ，一旦完成，即产生熔断请求。设计熔断机制如下：

$$\rho = \begin{cases} 1, & |C_1 - F_1| \geq \xi \\ 0, & |C_1 - F_1| < \xi \end{cases} \quad (3-3)$$

当路由策略  $C_1$  与  $F_1$  相差大于  $\xi$  时，将会有  $F_1$  取代  $C_1$ ；当路由策略  $C_1$  与  $F_1$  相差小于  $\xi$  时，继续执行  $C_1$ 。在常规稳态时，预测控制的误差较小，不会发生熔断行为。显然地，预测控制通过分析过去的运行规律，提前给出了当前的路由控制策略，满足了路由控制的实时暂态性要求。而基于测量数据获得的熔断策略则无误差地获得了路由策略，满足了路由控制的精确性要求，是否发生熔断行为依据微网的整体性能要求而定。

对于公式 (2)，在图 3.4 给出的路由运行方式下，一旦预测控制的偏差过大，则会引起熔断行为，过程的数学描述如下。

采用模型  $M_1$  获得  $t_2$  时刻的预测数据为：

$$p(t_2) = [p_1(t_2), p_2(t_2), p_3(t_2), p_4(t_2), p_5(t_2), p_6(t_2)] \quad (3-4)$$

设计预测控制方法，获取路由执行方法：

$$p(t_2) \Rightarrow C(t_2) \quad (3-5)$$

获得的  $C(t_2)$  在  $t_2$  时刻开始即被执行，预计最长执行到  $t_3$  时刻。在  $t_2$  时刻，测量装置实际测量数据为：

$$p^*(t_2) = [p_1^*(t_2), p_2^*(t_2), p_3^*(t_2), p_4^*(t_2), p_5^*(t_2), p_6^*(t_2)] \quad (3-6)$$

因此，在  $t_2$  时刻，路由系统启动基于实测数据的路由策略计算，并获得如下路由执行方法：

$$p^*(t_2) \Rightarrow F(t_2) \quad (3-7)$$

$C(t_2)$  与  $F(t_2)$  之间的误差函数为:

$$\begin{cases} e_{p_i} = |C_{p_i}(t_2) - F_{p_i}(t_2)|, i = 1, 2, \dots, 6 \\ E_{p_i} = \sum_{i=1}^6 e_{p_i} \end{cases} \quad (3-8)$$

因此, 熔断发生机制为:

$$\rho = \begin{cases} 1, & e_{p_i} \geq \xi \text{ 且 } E_{p_i} \geq k\xi, i = 1, 2, \dots, 6 \\ 0, & e_{p_i} < \xi \text{ 且 } E_{p_i} < k\xi, i = 1, 2, \dots, 6 \end{cases} \quad (3-9)$$

熔断行为的产生, 说明模型的建立已不适当当前网络变化规律, 需完善模型如下。

$$p_i(t) = \eta a_i t + \lambda b_i \quad (3-10)$$

其中,  $\eta$  和  $\lambda$  是修复系数。它表明, 原模型需要调制。

情景 3—微网结构变化, 引起熔断

微网结构的变化通常是功率装置的接入或退出。不论是电源点的变化, 还是负荷的变化, 都会使得微网系统产生较大规模的失衡。因此, 在这种状态下的熔断行为首先要保证微网稳定, 其次才是更精确的路由控制。

对于公式 (2) 组成的终端网络环境, 在图 4 给出的路由运行方式下, 熔断行为发生过程的数学描述如下:

设一个负荷突然接入微网, 造成功率需求瞬间增加, 终端网络模型变为:

$$p_i(t) = a_i t + b_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (3-11)$$

采用模型  $M_1$  获得的预测数据和预测控制仍为 (4) 和 (5)。在  $t_2$  时刻, 设测量装置获得数据为:

$$p^*(t_2) = [p_1^*(t_2), p_2^*(t_2), p_3^*(t_2), p_4^*(t_2), p_5^*(t_2), p_6^*(t_2), p_7^*(t_2)] \quad (3-12)$$

由于  $p_7^*(t_2)$  的加入, 功率失衡较大。路由系统首先针对  $p_7^*(t_2)$  数据单独做出反应, 比如加大储能功率或增加接入储能装置。因此, 熔断行为的响应更为迅速。

$$p^*(t_2) \Rightarrow F^*(t_2) \quad (3-13)$$

$F^*(t_2)$  作为实时路由策略, 仅包含对储能的操作信息, 对  $C(t_2)$  做补充控制。对于终端网络复杂, 接入装置数量多的微网而言,  $F^*(t_2)$  比全面的取代性熔断路由策略  $F(t_2)$  具有更优的快速响应, 保障微网稳定。

熔断行为发生后, 终端网络模型将被重建, 以适应结构已发生变化的微网。终端网络模

型由 (11) 组成。

#### (4)运行情景仿真

##### 微网情形

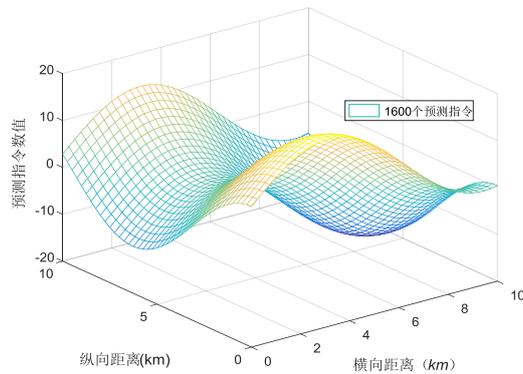
为了给出上述熔断机制下的指令执行情景，以一个 10\*10 千米的微网为例，对网内分布的所有接入功率装置进行能量管理。设在区域内共分布有 1600 个功率装置，包括电源点、储能和负荷等。一共需要 1600 个指令，形成一张指令网，以保障微网系统的运行。设预测指令数值在空间的分布符合如下规律：

$$C_{p_i}(t_1) = 10\sin(0.5x) + 10\cos(0.5y), \quad (3-14)$$
$$i = 1, 2, \dots, 1600$$

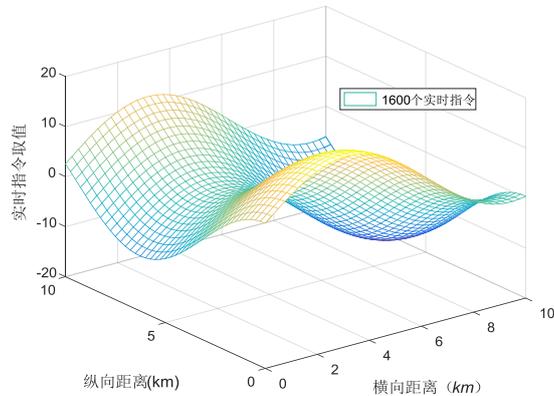
依据测量获得的熔断指令数值符合如下规律：

$$F_{p_i}(t_2) = 9\sin(0.5x) - 11\cos(0.5y), \quad (3-15)$$
$$i = 1, 2, \dots, 1600$$

其中， $x$  和  $y$  是空间地理坐标， $C_{p_i}(t_1)$  和  $F_{p_i}(t_2)$  是坐标对应的指令取值。通过这种方式，可模拟出微网路由系统的指令熔断机制。图 3.5 给出了微网在情景 2 和 3 状态下的指令变化情况。



(a)预测控制获得的路由指令分布



(b)实时获得的路由指令

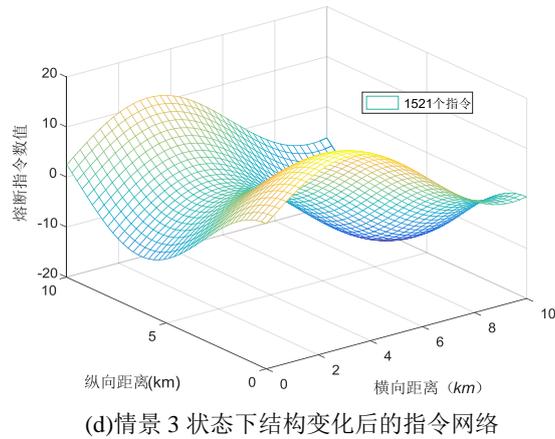
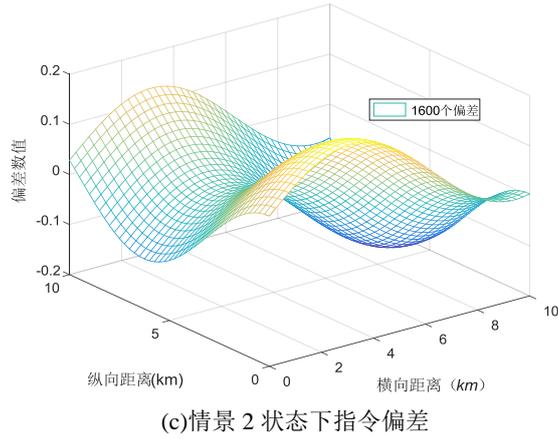


图 3.5 微网运行时指令变化情形

当图 3.5(c)给出的偏差在熔断机制运行的范围内时，微网将执行图 3.5(a)所示的预测路由指令。一旦超出误差范围，将执行图 3.5(b)所示的实时路由指令。当微网的结构发生变化时，指令网络也会发生熔断，图 3.5(d)给出了熔断后的指令网络。

一般地，引起熔断的误差可设计在网络运行容许的范围，比如 1%或以下。图 3.5c 给出的误差大约为 1%。对于地理空间较大的微网示范工程而言，接入功率设备数量庞大，使得指令规模同样庞大。图 3.5 给出的熔断策略显示为一种全网同时发生指令更替行为的情形。在工程实践中，每一个接入设备的熔断机制可独立进行，在数值上指令网络并非全部更替。

#### 终端网络情形

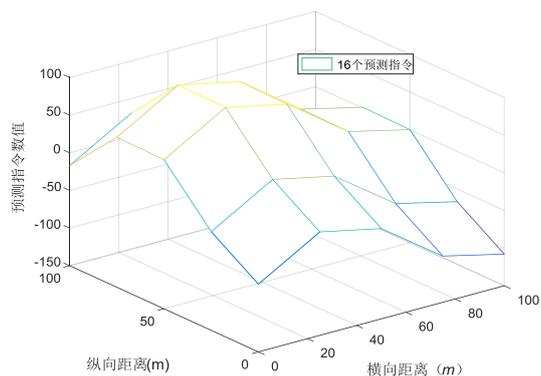
对于终端网络而言，接入设备数量相对较少，为了给出不同设备指令数值差异较大的情景，设预测指令数值在空间的分布符合如下规律：

$$C_{p_i}(t_1) = 50\sin(0.5x) - 60\cos(0.5y), \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (3-16)$$

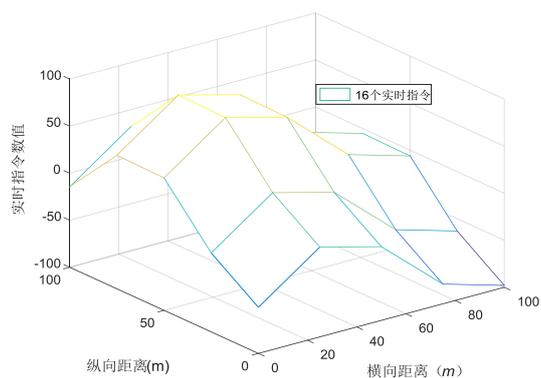
依据测量获得的熔断指令数值符合如下规律：

$$F_{p_i}(t_2) = 49\sin(0.5x) - 51\cos(0.5y), \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (3-17)$$

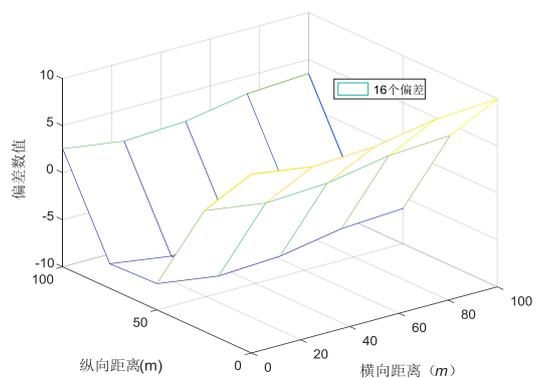
图 3.6 给出了终端网络熔断机制下指令网络的变化情形。



(a) 预测控制获得的路由指令分布



(b) 实时获得的路由指令



(c) 情景 2 状态下指令偏差

图 3.6 终端网络指令网络变化情形

终端网络的指令网络类似与微网情形，不同之处是规模较小，指令的实现算法相对简单，执行容易。

## 3.2 能量接入管理方法

### (1) 单能源路由器结构与功能

下图 3.7 给出了单个能源路由器单机结构图。其中，380 伏交流连接外部电网，本地接入设备包括新能源电站和负载两类；能源路由器母线电压为低压直流，所有本地接入都通过

标准接口连接到母线；储能接口连接智能储能装置，主要用于平抑直流母线的电压跌落和闪变。

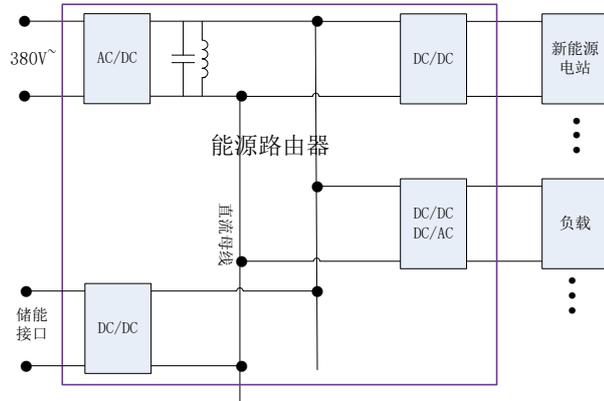


图 3.7 低压能源路由器单机结构

## (2)能源路由应用场景的网络化需求

### ● 区位场景分析

一般地，能源路由器在能源互联网中的物理分布中，既可以在广域网络层级，也可以在局域微网层级，或者微网内部的一个有限区域即终端网络中。下图 2 给出了能源路由网络的区位图解。

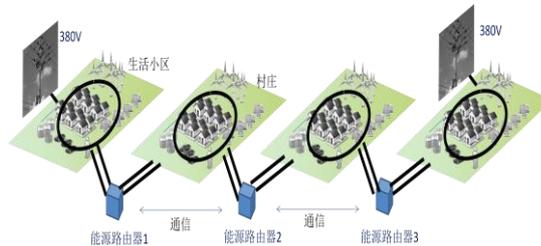


图 3.8 能源互联微网链式空间情景

图 3.8 中的网络即为以链式结构连接而成的中小规模配电网。其中，每一个能源终端网络在物理上可左右接入两个能源路由器，在运行时只能与一个能源路由器发生能量传递。多个终端网络共同形成一个链式能源路由器网络，而这个能源路由器网络和能源终端网络则构成了微网，即配电网。而微网通过广域能源路由系统可连接到广域能源互联网。

### ● 用户需求侧对配网的要求

当分布式新能源被纳入能源互联网示范工程范围时，在能源的生产和消费过程中，具有如下需求特点：

1)分布式新能源既是生产者，也是消费者，而且应尽量自产自消。2)尽可能提高新能源的使用比例。3)尽可能减少能量远距离传递，降低损耗和能源设施建设投资。4)基本的能量交易行为可在人际交往可以达到的范围内进行，且开放自由。

综合上述特点，需把能源互联网示范工程在空间上进一步区块化，增强分布式新能源的本地消纳能力、提高使用比例、减少输送距离和灵活交易机制。

从控制系统实现能力角度，采用一个能源路由器可以实现在较小距离内的能量管理。比如，一个小区或一个村庄可共用一个能源路由器，实现该区域内部的新能源生产和消纳。当该区域内无法实现能量平衡时，临近的小区或村庄可通过能源路由器互联起来，形成路由器网络，实现能量在更大范围互联共享。这样，一张能源路由器互联网络就构成了能源互联网示范工程能量管理的信息物理单元。

### (3)链式能源路由网络

图 3.9 给出了一种链式能源路由网络结构。其中，每一个能源路由器把相邻小区或村庄的电源与负荷连接起来，先在路由器内部自产自消，尽量实现平衡。当有能量剩余或不足时，可从临近的小区或村庄购得电量，其物理实现过程表现为对临近能源路由器的路劲切换管理。

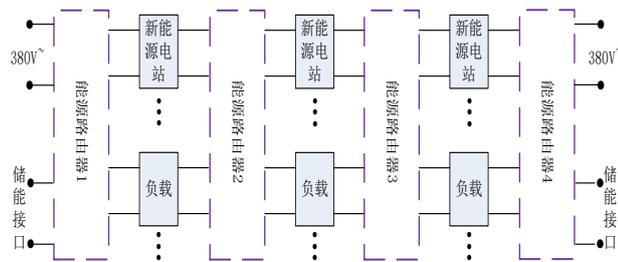


图 3.9 链式能源路由网络

在图 3.9 中，每一个小区或村庄的电源和负载都可被连接到两个路由器，且只能选择一边工作在运行状态。一共有 3 个小区或村庄被 4 个能源路由器链接起来，所以最多可以实现 3 个区域的能量传递与共享。网络两边缘侧的能源路由器接入外部 380 伏配电网和储能设备，作为更进一步的能量调节备用。

### (4)基于边缘扩散的路由策略

链式能源路由网络规划具有自然约束条件，其能量管理与路由控制策略需紧密结合应用环境的要求，在规划建设时须充分考虑。可从网络规划、路由策略、信息支持和应用可行性几个角度分析路由网络。

#### ● 接入规划与梯级分类

以小区或村庄为示例单位，规划一个以能源路由器为中心的能量管理系统。需要考虑的因素包括：

1)采用投切为主要调节手段，接入的电源和负荷在功率等级上需具有差异化，且呈现顺序递增或下降特点。2)能源路由器工作在低压状态，接线距离不宜太长，比如 1 至 2 千米以

内。3)接入电源和负荷的总数量需在控制系统接入能力和指令通道数量范围之内；也不宜太少，以免成本过高，经济性差。4)单个能源路由器完全自动调节，无需人工参与；而能源路由网络则需一个人工干预平台。

我们把所有功率设备按照从小到大的顺序排列，把一个功率设备功率大小视为一个随机变量。理想模型是，若随机变量有  $n$  个不同数值，每个数值具有相同的出现概率，那么我们可以将其近似看作是一个离散的均匀分布(Discrete Time Uniform Distribution)。其数学模型可以描述如下。

设离散随机变量  $x$ ，其可能变量有  $1,2,3,\dots,n$ ，若其概率函数为：

$$p(x,n) = \frac{1}{n}, x=1,2,\dots,n \quad (3-18)$$

它的期望值为：

$$E(X) = \frac{n+1}{2} \quad (3-19)$$

方差为：

$$Var(X) = \frac{(n^2-1)}{12} \quad (3-20)$$

在能源互联网场景中，根据上述离散均匀分布的梯次规划原则，设他们的额定功率分布是以 1KW 为间隔，依次从 1KW 到 100KW。功率设备的梯次分布特点，使得能源路由器通过投切操作，可基本实现能量平衡。

- 基于功率精度指标的边缘扩散策略

设图 3.9 中能源路由器 2 应用于某个村庄，共接入 100 路电源和 100 路负荷。其中，有 50 路电源和 50 路负荷同时连接道能源路由器 1；有 50 路电源和 50 路负荷同时连接道能源路由器 2。根据梯次规划原则，他们的额定功率分布以 1KW 为间隔从 1KW 到 100KW。即能源路由器的最大总功率是 5050KW。

首先能源路由器 2 需要对这 200 路功率设备进行即时功率管理。设随机退出能源路由器 2 的负荷是 39KW，那么能源路由器 2 将主动切断 39KW 的电源。为了不浪费电能，被切断的 39KW 电源将被接入临近的能源路由器，假定接入能源路由器 1。由于能源路由器 1 的电源增加，它要么把 39KW 馈入电网，要么存入储能，或者增加能源路由器的负荷需求。

同理，当一个负荷为 39KW 的负荷随机接入能源路由器 2 时，由于能量不足，能源路由器将计算最佳的电源组合，如 2KW 和 37KW，可发出信号，强制把已接入其它能源路由器的两路电源转接到能源路由器 2。比如从能源路由器 1 强制切换过来，此时，能源路由器 1 需增加自身的电源供应，可从外部电网，也可以从储能或备用发电机。

上述两类情形的共同特点是：以能源路由器的功率精度为主要因素，强制接入或退出功率设备，它的不利影响是增加了切换频率和控制的难度。

当一个负荷数值为  $\alpha$  kW ( $0 < \alpha < 100$ ) 的负荷随机接入某能源路由器时，记此能源路由器为  $x$ ，该能源路由器将强制从临近的某一个能源路由器，记为能源路由器  $y$  端，找到数值接近于  $\alpha$  的电源组合。该电源组合可能由仅仅一个，或者两个，甚至三个或更多的单独的电源组合而成。根据上节描述的关于电源分布的建模，即近似于离散均匀分布模式，所需电源组合将在能源路由器  $y$  中均匀分布的各个电源中寻找。可以看出，此电源组合的每个元素额定功率数值必定是小于或等于  $\alpha$ 。换言之，需要选取的组合元素取值在  $(0, \alpha]$  的范围内。根据能源路由器  $y$  中电源端呈近似离线均匀分布的特征，我们假设在  $(0, \alpha]$  的范围内，存在数值为  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  的  $n$  个电源组合，另外此序列满足条件：

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \alpha \quad (3-21)$$

理论上，我们需要在  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  中选取一种组合。它可以由一个或多个电源叠加而成。

根据排列组合原理，理论上我们将有  $\delta$  种组合方式，其中我们定义：

$$\delta \Delta = \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{n} \quad (3-22)$$

对于其中任意一项  $\binom{n}{i}$ ， $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，我们定义：

$$\binom{n}{i} \Delta = \frac{n!}{(n-i)!i!} \quad (3-23)$$

而事实上，需要获取的是一个累计功率值最接近  $\alpha$  的电源组合。为了更好的描述这样一个高精度度的目标，我们提出一个称为精度百分比的定义，即针对任意一个电源组合  $\tau_j$ ， $j \in \{1, 2, \dots, \delta\}$ ，可计算出  $\frac{|\tau_j - \alpha|}{\gamma}$  的数值，这里  $\gamma$  代表额定功率。我们提出如下目标函数：

$$\min \left\{ \frac{|\tau_1 - \alpha|}{\gamma}, \frac{|\tau_2 - \alpha|}{\gamma}, \dots, \frac{|\tau_\delta - \alpha|}{\gamma} \right\} \quad (3-24)$$

通过计算得到最优解，记为  $\frac{|\tau_j^* - \alpha|}{\gamma}$ ，即得到理想最优组合为  $\tau_j^*$ 。

以上陈述了一个理想的模型，考虑到电气与控制设备的支撑能力，我们所选取的所谓最佳电源组合，其组成数量一般不宜超过 3 个。

实践中，在能源路由器  $y$  中我们有可能直接找到一个数值与  $\alpha$  非常接近的单个电源，这个概率可能比较小。那么我们首先寻找在能源路由器  $y$  中的所有单个电源，计算他们的精度

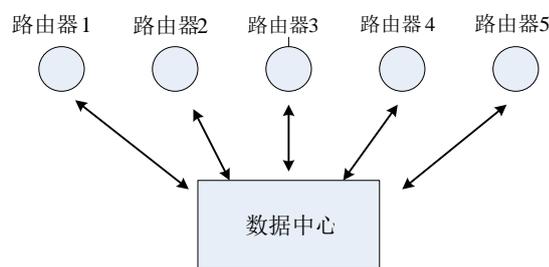
百分比，如果数值小于 2%，则可以认定这个选取的电源适直接入。在这种情况下就没有必要再去寻找由两个甚至三个电源累计而成的组合。如果接入所有单个电源计算所得精度百分比均无法满足小于 2%，则需要进一步考虑选取两个电源组合的形势。此时，根据上述理论模型以及运算法则，计算出相应精度百分比。如果其数值小于 2%，则可以认定这个选取的电源组合适直接入。否则的话，我们不得不考虑选取由三个电源组合而成的情况了，计算方式同上。

上述情景中，能源路由器  $R_1$  由于接入了负荷导致不平衡， $R_1$  立刻通过从  $R_2$  引入电源达到其自身平衡。这样一来，能源路由器  $R_2$  的电源负荷不再平衡。我们概括地描述这个过程为： $R_1$  将它自身的不平衡传递给了  $R_2$ 。由于  $R_2$  还与能源路由器  $R_3$  相连，相似地， $R_2$  也会将它自身的不平衡传递给了  $R_3$ ，其方式类似与上述模型。以此类推，直到终端能源路由器  $R_m$ 。最后， $R_m$  为了寻求平衡，它将向大电网或主干网寻求电源供应。这个过程表达了能源互联网中链式能源路由器间一次传递不平衡性以求达到自身平衡的特点。

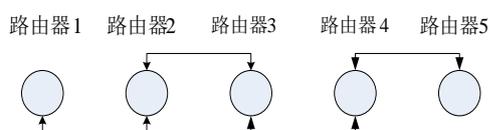
- 信息支撑网络

链式能源路由器网络具有鲜明的智能特征，除了需具备先进的控制能力和电力电子器件执行能力外，还需要高效稳定的数据分析和传输能力。匹配于上述路由网络结构，可设计三类不同特点的信息支撑网络，分别如下。

第一类情形是集中式信息网络，如图 3.10(a)所示。这种情形需建设一个独立的数据中心，它同时具有必要的数据分析和学习能力。路由网络的所有路由器都与数据中心产生数据交换，路由器之间不建立直接通信。这样的通信网络对链式式路由器网络整体管控能力较好，但响应延时较多。



(a)集中式通信



(b)扁平式通信

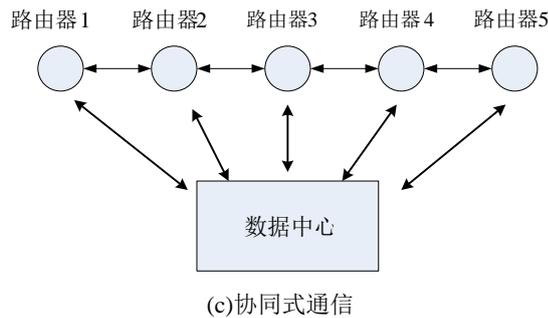


图 3.10 匹配于链式能源路由网络的信息支持网络结构

图 3.10(b)给出了扁平式信息网络情形。相邻的路由器之间可直接通信，使得信息响应速度较快，切换响应快。但是，由于路由器只能获得临近的路由器运行信息，所有信息仅有助于协调本地路由器的能量平衡性，这使得能量失衡可能向周边传递，加大周边的不平衡性。图 3.10(c)给出了协同式信息网络情形。它把集中式和扁平式组合起来，一方面数据中心会做出分析，并给出网络协同建议；另一方面最终的调整策略仍由路由器给出。这样每一个路由器既可以调整自身，又可以兼顾远处的路由器调节能力，优势明显，不足之处是增加了设备建设和运维任务。

在能源互联网示范工程中，具体采用哪一种通信网络，与网络规划有关，特别是路由器的功率设备接入状况。一般地，接入设备的功率分布均匀，可采用扁平式通信；反之，适宜集中式或协同式通信。

### ● 应用分析

以建设能源互联微网示范工程为例，其能源交易需具备如下特点：电源和负荷的接入自由，微网统一交易平台，能量双向流动和本地消纳，新能源比重稳步提高等。从用户角度来说，不论居民还是企业，他们存在如下现实需求：尽量自产自销，可临近交易，价格低廉甚至免费，供电稳定等。为了实现上述需求，在建设永丰微网过程中，可在链式路由网络的基础上规划微网系统。除了微网层级的统一交易和集中调度平台外，还需向下一级建设用户级的低压终端路由网络，并由用户级低压终路由电网组合构成微网示范工程。从能源路由结构看，即包括底层的链式能源路由网络和上层微网路由器两级。

### (3) 仿真分析

采用三个能量路由器串联的网络来验证链式配电策略的有效性。其中，能量路由器 1 只与能量路由器 2 连接，能量路由器 2 同时连接能量路由器 3，能量路由器 3 同时连接外部交流电网。每个能量路由器上接入的负荷和电源指标如下表所示，负荷和电源的功率值在一定范围内随机产生，并保证每个能量路由器总负荷功率与电源功率相同。

表 3.1 接入设备设置

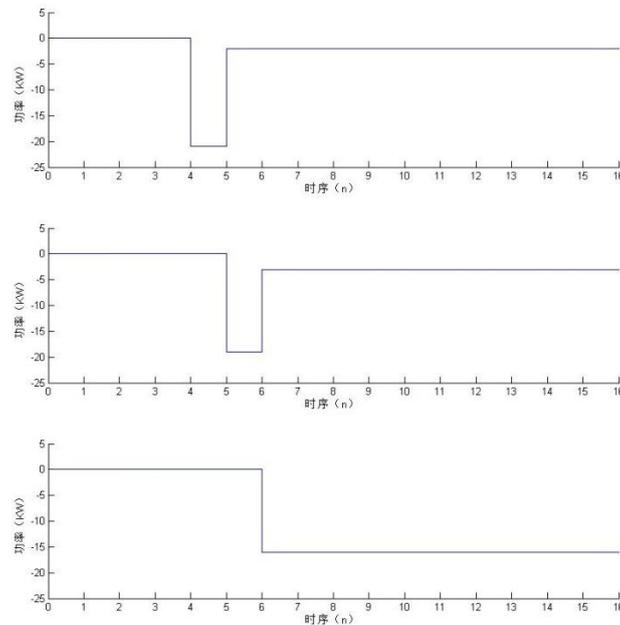
$\lambda$	路由器 1	路由器 2	路由器 3
-----------	-------	-------	-------

负荷数量	40	30	30
负荷功率范围(kW)	[5,50]	[5,50]	[5,50]
电源数量	10	10	10
电源功率范围(kW)	[20,150]	[20,150]	[20,150]

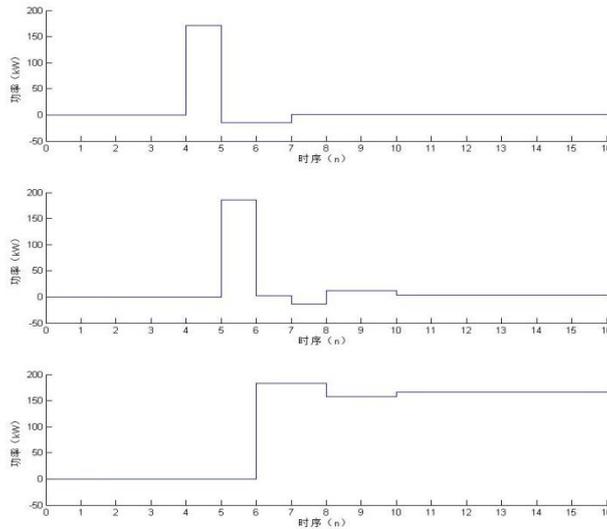
对能量路由器的功率平衡管理而言，负载接入与电源退出、负载退出与电源接入效果相同。故从两个方面进行验证，分别是：

- 1)有负荷退出时，电源的串联式边缘扩散情形。
- 2)有负荷接入时，电源的串联式边缘扩散情形。

下图 3.11(a)表述了有负荷退出时能量路由器 1、2、3 上所接入的负荷功率、电源功率的差值。初始状态下，三个能量路由器的负荷功率与电源功率差为 0；时序 4 时刻能量路由器 1 上负荷退出导致功率不平衡，这个不平衡性在时序 5 转移给能量路由器 2，并在时序 6 传递给能量路由器 3。能量路由器 3 的不平衡需要由交流电网来填补。



(a)负荷退出时的情形



(b) 负荷接入时的情形

图 3.11 功率不平衡扩散过程

需要注意的是，能量路由器 1 和 2 在新稳态下其接入的负荷功率依然略小于电源功率。不平衡产生的原因是负载功率和电源功率并不是连续分布，在功率扩散过程中无法找到完全匹配的功率组合。此时微小的功率差由储能部件消除。

图 3.11(b)给出了负荷接入时能量路由器 1、2、3 的功率平衡性变化过程。初始状态下，三个能量路由器负荷功率与电源功率差为 0；在时序 4 时刻，能量路由器 1 上新负荷接入导致功率不平衡，这个不平衡性在时序 5 转移给能量路由器 2，并在时序 6 传递给能量路由器 3。但此时能量路由器 1、2 的功率仍是不平衡的，所以在 7-10 过程中再次进行了调整使得最终达到了功率平衡。经过了两次平衡的原因是挑选调整的负载/电源组合时其组成数量不超过 3 个，导致经过第一次调整只达到次优解，需要更多次的调整才能达到最优解。

### 3.3 热插拔状态下的母线电压平衡方法

针对能源路由器提出一种能量管理策略。其原理在于：1) 把设备分类管理，划分为正性设备/负性设备、刚性功率/柔性功率；2) 进行身份属性管理，组合初始化并约定属性；3) 针对热插拔问题，提出以电压稳定性换取系统稳定性的过度方法。具体过程为：热插拔响应过程采用初始化的组合响应，快速调整能量管理策略，这类调整不能保障所有情形下都达到系统要求的平衡精度；对于没有达到精度情形，采用微调策略；4) 系统的微调控制，完善功率平衡性。

#### (1) 设备属性

为了对接入能源路由器的功率设备进行有效管理，需要对设备进行分类定性分析，给出如下定义：

正性设备是指在运行过程中，设备只能对外输出功率，从路由器的角度表现为获得设备的功率，可把这类设备称之为正性设备。比如光伏发电设备、风力发电机等。负性设备是指在运行过程中，设备只能吸收消耗功率，从路由器的角度表现为向外输出功率，可把这类设备称之为负性设备。比如电动机、阻性负荷等。双性设备是指在运行过程中，设备既可以工作在对外输出功率的状态，也可以工作在消耗功率的状态，可把这类设备称之为双性设备。比如储能电池、外部电网等。

正负性从功率传递方向给设备约定了属性，但并不能反映功率大小的变化。在能源路由器能量管理中，需要知道设备在工作状态中功率变化特点，因此，可以把设备功率属性划分为刚性功率和柔性功率。顾名思义，刚性功率是指在正常运行状态下，设备的工作功率是一个基本稳定的值，在进行控制操作时取其额定功率值；而柔性功率是指在正常运行状态下，设备的工作功率是一个在较大区间内变化的值，取值来源于实时测量。

(2)设备组合：

设接入能源路由器的设备数量为  $N$ ，把可能的设备接入组合列举如下：
$$M = \sum_{i=2}^N C_N^i$$

其中， $M$  是组合个数； $i$  不等于 1。这些组合中，有一部分是无效组合。比如，由正性设备构成的组合，由于皆为输出功率，无法构成能源网络；由负性设备构成的组合，由于皆为消耗功率，也无法构成能源网络。

对于任何一种组合，都需要约定好其性质。比如，组合是否有效；正性设备数量及其刚柔性；负性设备数量及其刚柔性；双性设备数量及其刚柔性；额定功率值；功率变换控制特点；以及最为关键的一点，即储备的运行策略。这些性质都需要建立定量的数据库。

以一个由 2 个光伏设备、2 路发热电阻和 2 个蓄电池构成的网络为例，全部的组合数量为：

$M = \sum_{i=2}^6 C_6^i = 57$ 。无效组合数量为 2，因此有效组合数量是 55。对于这 55 个组合，都需要分

别约定好其特性。比如，其中一个由 2 个正性设备和 2 个负性设备有效接入的路由网络，其特性如下：

- 组合有效；
- 正性设备 2 个，功率柔性；负性设备 2 个，功率刚性；双性设备 2 个，功率柔性；
- 额定功率都为 2kw；
- 由于路由器母线为直流，功率变换分别为 DC/AC PWM 控制；DC/DC PWM 控制；DC/DC PWM 控制；

- 储备运行策略为：正性和负性设备控制开关工作；双性设备控制开关停止工作。

### (3) 身份辨识：

接入能源路由器的设备，可分两种身份，一个是设备个体，包含编号和属性信息；另一个是排列组合，一个组合代表一种接入运行状态，它包含组合编号和组合属性。

设备编号从 1 到 N，N 是可接入的设备总数量，属性信息包括正负性、刚柔性以及额定功率等。排列组合指接入路由器的设备中，处于工作状态的设备集合，每一种组合都需要特定的编号，可依据编号辨识出组合状况；组合的属性包括设备的正负性、刚柔性、额定功率以及储备的平衡策略。

例如，对于 6 个接入设备的路由器，共有 55 种不同组合及组合下对应的储备策略。这种储备策略是组合最关键的属性，通常，它基本给出了该组合下的功率平衡方案。比如，双性设备的功率方向、柔性设备的取值等。

对于系统决策来说，只要完成设备及组合的 ID 辨识认证，即可迅速切换到新的工作状态。不过，受接入设备额定功率、刚柔性的制约，这种状态的功率平衡性不一定是最优的，但最低限度它可以保障系统及接入设备能正常运行。

### (4) 热插拔过程：

描述热插拔的情形，着重解决如何快速响应的问题。建立状态基准表；确定切换规则，便于自动判断和执行。

比如比较常用电压平抑方法，可以省去电压检测与分析过程，只需检测设备 ID 是否接入即可，大约可以节省响应时间 80%，降至 1ms 以内，这个闪变干扰对于电压平衡来说是可以接受的。依据设备属性的不同，检测 ID 后做出的决策不同，但应保证响应时间在 1ms 以内。

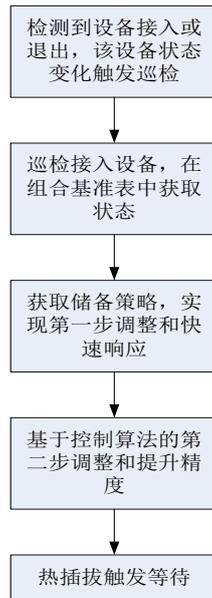


图 3.12 热插拔过程

在降低电压稳定性的条件下，保障系统在突发状态下基本正常运行；在获得响应时间和空间后，再改善电压。

(5)系统结构与运行原理：

简化的路由系统结构：

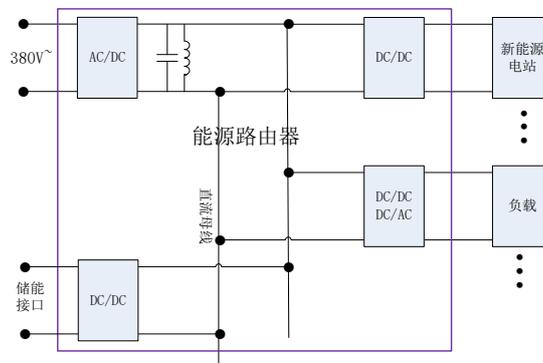


图 3.13 路由器结构

上图给出了一个简化的路由器接入图。可以看到，不同的接入设备都通过一个功率变换器，连接到能源路由器的直流母线上。为了保障系统正常运行，需要解决两个关键问题。一个是不同设备的接入或退出，会对母线功率产生调整需求，功率开关的切换需要足够快，以免对路由器母线产生冲击；第二个是需要建立路由器常态运行下的控制策略，确保高效率的启动、进入不同工作状态。

(6) 运行过程：

阐述清楚能源路由器运行管理过程

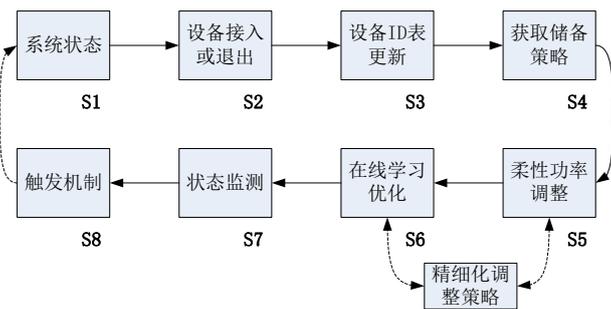


图 3.14 运行过程

步骤一：系统处于正常运行状态，此时能源路由器进、出功率平衡。

步骤二：功率设备接入或退出，产生中断响应。控制系统进入状态分析、判断状态。

步骤三：系统设备 ID 数据表更新，接入状态变化。

步骤四：依据 ID 状态表的值，进入储备策略程序，获得第一步调整，实现快速响应。

步骤五：在有限时间内，启动功率微调程序。建立基于 PCS 的功率双向可控补偿，补偿的方向和大小依据在线测量值。在新状态的运行中，在线学习优化，提升母线电压精度和稳定性。

步骤六：状态监测，检查系统运行参数是否正常；如有异常，启动状态切换，新的循环。

(7) 能量管理逻辑：

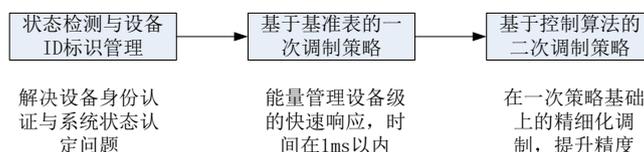


图 3.15 能量管理逻辑

为了应对一个突发的状态改变，设计的逻辑为：首先是进行状态检测，并建立设备 ID 和属性管理；获取状态改变的指令后，基于储备策略的第一次调整，这主要是设备及的调整，包括改变双性设备的方向和柔性设备的大小等；在第一次调整后，进行基于储能的精细化调整，主要是运用控制算法对储能变流器进行控制，实现精准调节。

(8) 微调方案

设计一个微调策略，可考虑以 PCS 为基本途径；



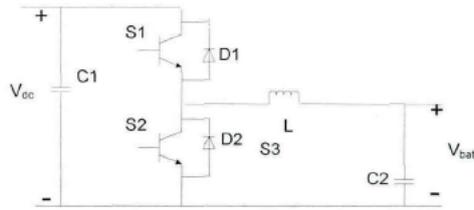


图 3.16 微调电路及原理

在没有外部电网接入、并且路由器功率不足的情形下，储能对路由器补充功率，实现功率微调，补偿母线电压。在没有外部电网接入、并且路由器功率有余的情形下，路由器对储能充电，实现功率微调，降低母线电压。

在储能能量不足时，需发出接入新能源功率或减少功率消耗的请求，并切入新的状态。在有外部电网接入的情形下，由外部电网提供功率或吸收功率。

(9) 举例分析：

以图为例，设定特定数值，模拟运行过程。

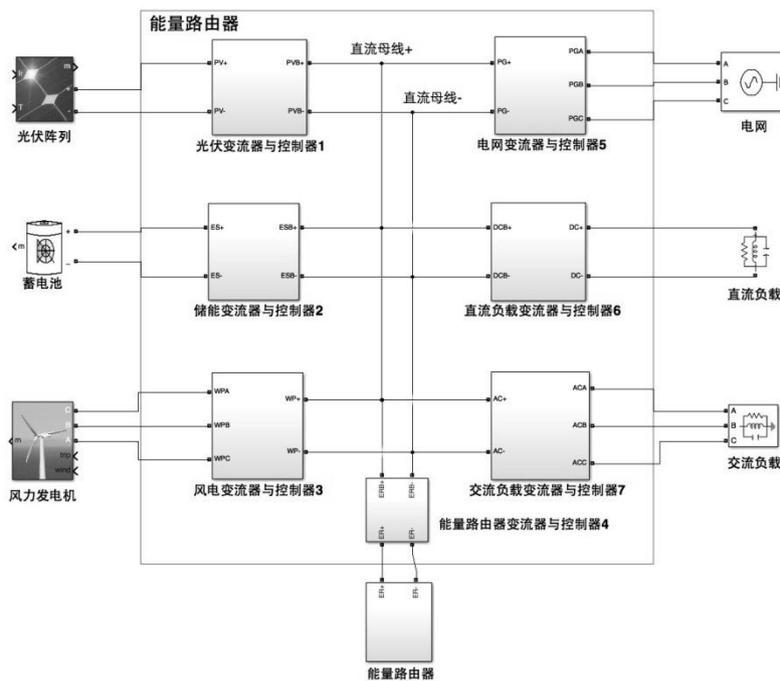


图 3.17 六端口路由器

案例分析：上图中，接入设备包括：一路储能，一路风机，一路光伏，一路直流负载，一路交流负载。它们都通过功率变换器接入路由器母线。

设备属性：蓄电池，双性设备，柔性功率；光伏发电，正性设备，柔性功率；风力发电机，正性设备，柔性功率；电网，双性设备，柔性功率；直流负载，负性设备，刚性功率；交流负载，负性设备，刚性功率；设备组合：共有 63 种组合方式，去除一个正性组合（两

个正性设备)、一个负性组合(两个负性设备)、6个单个接入、有效组合55种。因此,系统一共存在55种接入状态,相应地,系统需要预备55个策略,使得能源路由器可以任意切换。身份辨识:指在运行时,系统需要即时确认对应设备组合的哪一种情形,确定组合身份,以及接入设备的身份。热插拔:一旦有设备退出或新设备接入,系统将系统热插拔应急响应,进行第一次功率平衡调整。

系统运行:按照第5节步骤运行。

### 3.4 能量路由器母线电压稳定控制方法

能量路由器可用于管理接入的各路功率设备,调节功率分布。它具有开放式自由接入的特点,当功率设备接入或退出时,能量路由器的功率平衡即时改变。功率失衡首先体现在能量路由器母线电压上,如何快速平抑电压失衡,并实现能量管理是关键问题之一。电压平抑方法在电力系统领域都有研究,本文借鉴电能质量治理方法,研究数据驱动的电压平抑控制策略,可成为能量路由器的能量管理功能和控制的重要组成部分。

#### (1) 能量路由器母线电压受冲击分析

##### ● 电压受冲击问题

在能源互联网架构下的能源系统环境中,能量路由器的开放性决定了它必须支持功率设备的即插即用,也就是传统电力系统通常不具备的热插拔功能。功率设备的热插拔,不论是电源还是负荷,即时的接入或退出都会对能量路由器的母线产生冲击。图3.13给出了一种能量路由器的基本结构。

图3.13所示能量路由器有如下特点:1)所有接口都支持热插拔,实现即插即用;2)所有接口都能实现能量双向流动;3)能解决无功谐波电压跌落等电能质量问题;4)支持新能源接入,实现局域能量管理,等等。其中,即插即用会直接导致能量路由器母线功率的大幅度变化,对路由器和接入设备的运行带来危害。

以图中右边的负载为例,当增加一路负载接入能量路由器时,由于负荷增加,电源不足,可直接导致母线电压下降,从而造成其它接入设备电压过低。当减少一路负载时,由于负荷减少,电源不变,导致母线电压上升,造成其它接入设备电压过高。因此,为了维持能量路由器的正常运行,其母线功率必须始终处于平衡状态,功率的输入和输出一致。当有接入设

备的热插拔时，需要有合适的功率调整方法，快速平抑电压上升或跌落，恢复新的功率平衡状态。

- 解决思路

功率设备的热插拔具有两个明显的特征，也是两个关键问题。

第一，设备的接入或退出会带来两种不同的变化，分别是功率增加和功率下降，表现在电压上则是电压上升和下降。这使得平抑电压策略既能够降压也能够升压，从控制系统的实现角度是不同的目标。现有的电能质量治理装置通常是针对电压跌落的情形，不能直接应用于能量路由器。第二，设备的热插拔对功率平衡产生冲击，而功率补偿过程需要满足两个主要指标，即响应速度和补偿容量。考虑控制系统的检测、决策和电力电子器件执行的整个过程，以及超级电容的容量等因素，同时满足两个指标难度较大。采用功率设备接入调整的方法难以实现目标，采用以超级电容为储能的电能质量治理方法也难以实现目标。

为了同时满足响应速度和补偿容量两个目标，可提出分两步的连续控制途径。首先，采用传统电压补偿的治理方法，快速响应。具体地，可在超级电容侧设定 50%左右的充电比例，适用放电和充电的双向平抑电压的需求。为了提高快速响应能力，可以采用降低补偿精度，支持简化检测算法的补偿策略。第二步，在快速响应补偿一定时间后，能量路由器须基于功率平衡决策，给出接入设备的调整方案，执行设备级的功率平衡，即电源和负载的接入或退出调整。

第一步的快速响应既在短时间平抑电压，同时为第二步控制策略提供时间，比如执行时间 100ms 左右。第二步设备级的调整可满足容量需求，不再需要超级电容提供功率，建立新的功率平衡。

- 快速补偿与接入设备调整策略

从系统实现角度来说，两个阶段可由能量路由器同一个控制器完成，实现有序过渡，类似于电能质量治理的状态机切换过程。第二个阶段的功率平衡重建问题可以在能量路由器能量管理系统中完成，因而，这里主要研究第一个阶段的电压快速补偿。采用基于系统特征数据的驱动控制方法，可以实现数据直接驱动；同时引入学习机制，持续地改善补偿精度，整体上实现快速有效的电压补偿。

(2) 基于特征数据的学习策略

● 基于电能质量处理架构的比较分析

基于电容电压外环电感电流内环的双闭环控制策略如下图 3.18 所示[15]。其中，3.18(a)是补偿电路，补偿电压以串联的方式接入电网；图 3.18(b)所示是电压补偿的系统实现原理，其中，“逆变模块”对应 3.18(a)的逆变部分，双闭环控制环节收到的两路反馈分别是  $V_c(s)$  和  $I_L(s)$ 。

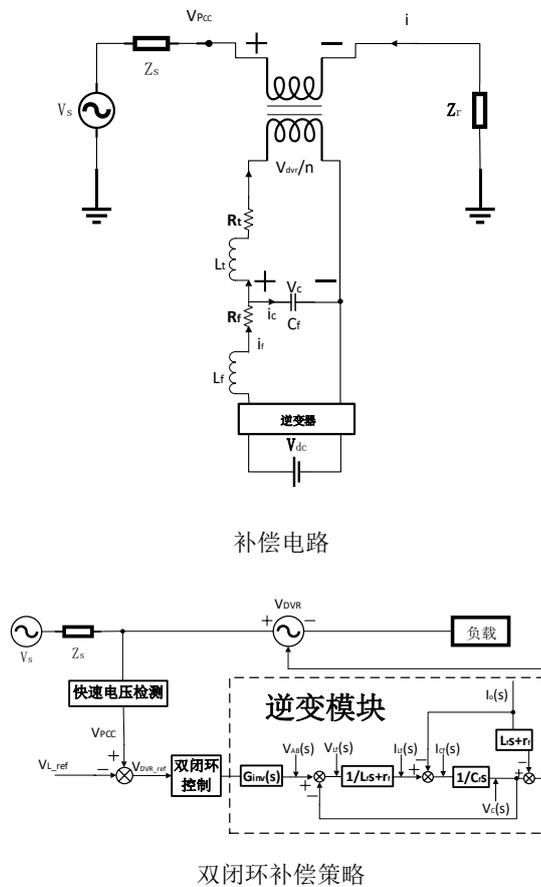


图 3.18 基于补偿电路模型和双闭环控制的补偿策略

对于图 3.18 所示的电压补偿系统，它具有理论完善、易于工程应用和稳定性高等优势。但也有些缺陷需要改善，如：在补偿初始时刻，由于检测过程、控制计算过程和指令执行过程的限制，导致补偿反应时间偏长，一般达到 8ms 以上；电容电压和电感电流的瞬时波动会反馈到双闭环控制器，对调节造成影响等等。

能量路由器的电压闪变平抑问题，类似于电能质量中的电压跌落补偿。而能量路由器功

率设备切换操作需要耗费时间，使得电压平抑时间需要尽可能地缩短，增强系统稳定。

为了解决上述问题，可以从两个方面做出调整，第一个是用通用的参数不确定学习模型取代图 3.18(b)中的电路模型，并引入一个内模对时变参数进行辨识，这样可以单向地对参数进行逼近，避免扰动的影响。第二个方面是用数据驱动控制策略取代双闭环控制，由于学习控制系统包含一个离线辨识的数据库，使得控制器在第一个响应周期可直接读取参数初始值，更为快速地响应补偿需求。同时，每一次的运行都会存储响应的参数值，不断记忆，扩大数据库。系统实现如图 3.19 所示。

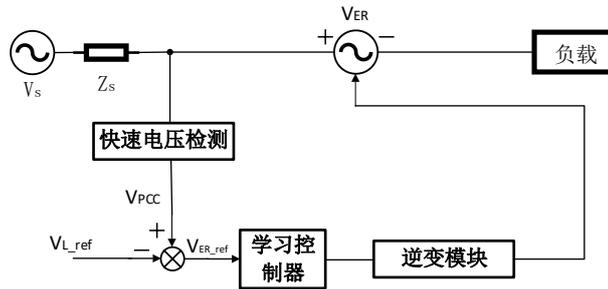


图 3.19 基于参数学习与数据驱动控制的策略实现

参数不确定模型可建立如下：

$$V_{ER}(t) = u_r(t)p \quad (3-25)$$

其中， $p$  是输入指令  $u_r(t)$  与输出电压  $V_{ER}(t)$  之间的映射参数，对于不同的  $V_{ER}(t)$  而言，其取值不一定相同，因此  $p$  不一定为常数。

定义：占空比-电压变换系数

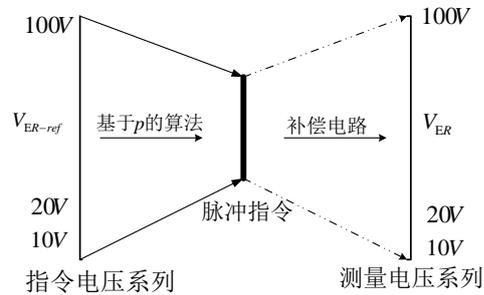
在功率逆变模块中，输入一定数值的脉宽调制占空比，将获得相应幅值的电压。根据调制原理，在一个正弦周期内，只要同比例改变脉冲序列的数值，即可实现输出电压的调整。

因此，可把输出电压与占空比序列的比定义为占空比-电压变换系数，且调整的对象即为占空比序列与基础序列的比值。

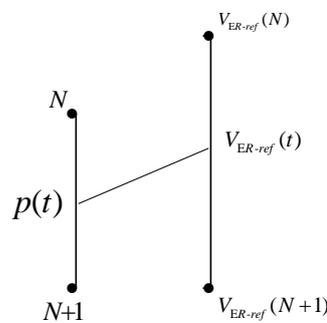
- 实现过程

应用图 3.19 所示控制系统，一次电压跌落后引发的补偿实现过程如下。

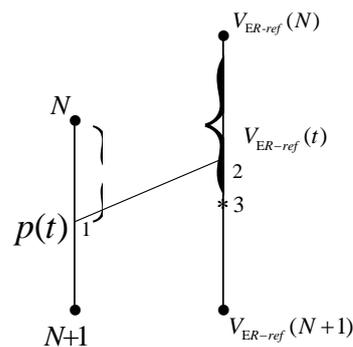
首先，检测并获得指令电压  $V_{ER-ref}(t)$  后，依据离线辨识的数据库，可以快速获得参数初始值，并计算获得控制器指令值，如图 3.20(a)和(b)所示。



(a) 基于映射参数的实现过程



(b) 通过数据库获取参数初始值



(c) 辨识与更新

图 3.20 获取特征参数与电压补偿实现过程

然后，输入该指令后，正常来说输出补偿电压已接近指令电压。如果误差在设定的允许范围，则认为已实现补偿；如果误差超出范围，则进入特征参数的辨识与学习过程，如图 3.20(c)所示。详细过程为：设输出补偿电压在数值点 3 处，在这种情况下，输出电压低于预期。由于控制指令与输出补偿电压之间存在正向变化关系，可把图中左括弧

和右括弧区间建立新的映射关系, 计算获得新的辨识方程, 并在此基础上获取新的参数, 从而依据新的参数和数据驱动控制可计算出新的指令。

由于新的映射区间只能在原来区间内部截取, 使得参数辨识的迭代过程在适用区间上呈现出不断缩小的变化趋势, 这使得系统具有渐进收敛性。这种循环过程直到补偿输出电压进入系统允许误差范围才结束。

另一方面, 在系统的运行中, 不同指令电压下可不断获得系统响应的参数信息, 这相当于持续在线辨识过程。可以把辨识出的参数按照一定的规则存储到数据库中, 不断丰富数据库, 使得后续电压补偿实现更为直接。本质上, 这使得控制系统在线工作时具有学习能力。

#### ● 控制器设计

为了增强工程可行性, 设计直接数据驱动方程:

$$u_d(t) = V_d / p(t) \quad (3-26)$$

采用 PI 型误差修正律和三阶遗忘因子法参数学习律[18]:

$$p(t+1) = p(t) + k_p V_e(t) + k_i \int_0^t V_e(t) dt \quad (3-27)$$

$$p(t) = p(t-1)\alpha + p(t-2)\beta + p(t-3)\gamma \quad (3-28)$$

公式(3-26)(3-27)(3-28)中,  $u_d(t)$  是指令值,  $V_d$  是输出目标,  $k_p$  是比例增益,  $k_i$  是积分增益,  $\alpha, \beta, \gamma$  是遗忘因子系数。

误差方程:

$$V_e(t) = V_d - V_{out} \quad (3-29)$$

数据结构设计:

$$p(t) = p[m, n](t) \quad (3-30)$$

上式表明, 特征参数  $P$  与两个维度有关, 一个是参考电压等级划分  $m$ , 另一个是电压性质  $n$ , 即交流或直流, 此时  $n = 2$ 。

### (3) 仿真实验

电压补偿方法主要有两个明显特征，一个是输出电压的数值有一个优化学习过程，另一个是系统的补偿响应速度相对较快。

仿真实验中控制器参数设定如下：

表格 3.2 控制器参数默认值

参数名称	默认值	参数意义
$k_p$	0.02	比例环节
$k_i$	0.0001	积分环节
$\alpha$	0.5	一阶遗忘因子
$\beta$	0.3	二阶遗忘因子
$\gamma$	0.2	三阶遗忘因子

假定通过数据库获取的初始补偿电压  $V_{ER-ref} = 30V$ ，而理论补偿电压为  $V_{ER} = 25V$ ，下图

3.21 给出了线辨识机制下，补偿电压幅值的优化过程。

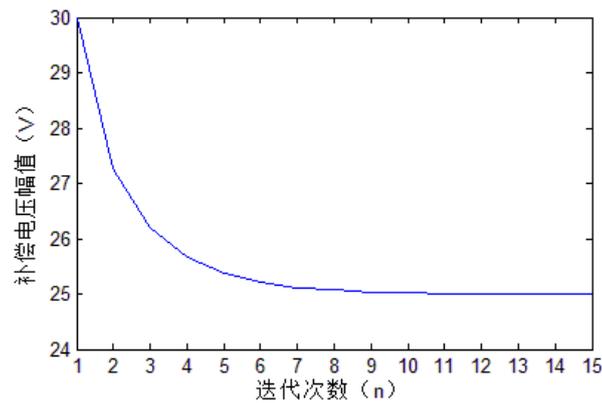


图 3.21 补偿电压幅值优化过程

设定一个调制周期内，经调制后输出的补偿电压波形为：

$$V_{out} = 25 \sin(50t + \phi) \quad (3-31)$$

下图 3.22 给出了线辨识机制下，实际补偿电压波形的优化过程。

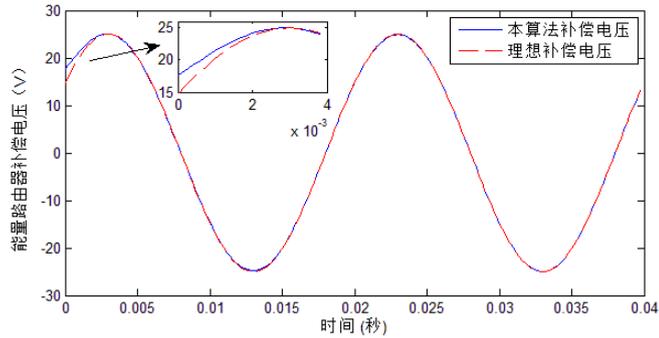


图 3.22 补偿电压波形优化过程

优化过程表明，该系统能够在很少的迭代次数下实现在线学习过程，从而使得补偿电压无限逼近目标值。下图 3.23 给出了采用传统双闭环控制与直接数据驱动的补偿电压波形图。

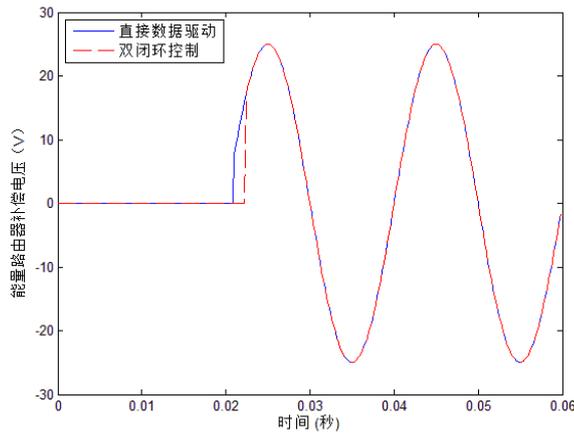


图 3.23 响应速度对比

图中可以看到，采用直接数据驱动响应要快约 3ms。其原因在于直接数据驱动方法只需要采取简化的检测方法，并读取离线数据库的参数即可计算获得输入指令，而传统双闭环控制则需要复杂的检测算法获取参考电压，耗费较多时间。

### 3.5 本章小结

本章对能源互联网的核心技术--能源路由器进行了深入研究和探索，主要内容和贡献包括：

首先，从全网角度，对能源路由的架构、运行机制及实现途径进行了系统的研究。能源路由两级架构、模型预测控制与实时数据驱动结合的熔断机制是这部分研究的主要创新之处。分别地，在能源路由架构部分，提出了微网路由系统和广域能源路由系统的两级路由结构，

建立了网络模型。在熔断机制研究部分，给出了模型预测控制和熔断判断策略，实现了路由控制的实时性和精确性要求。这部分研究着重于能源路由系统的实现方法，所提出的途径仍有一些具体问题需要解决。比如，提出的熔断方法适用于超短周期的控制，这对系统的测量、计算和器件的响应速度等产生了高的要求。又比如，由于安全运行的考虑，两级路由既需要独立运行，物理上隔离；又需要联合响应，控制上统一。加上网络内部接入的设备数量庞大，性能各异，使得两级路由的统一运行复杂，工程实现任务艰巨。

第二，针对能源互联网示范工程的配电网组网需求，深入研究了基于能源路由器的链式策略。主要包括两个方面的贡献，第一是提出了链式路由网络架构，它把所有能源用户划分为多个区块，通过一定数量的路由器链接起来，从而进行有序的能量管理。第二个是提出了边缘扩散策略，实现对能源路由器的设备切换管理。它既有助于本地消纳，自产自消，交易自由；又可减少投资，降低损耗。当上述策略应用与工程时，需依据用能场景具体规划研究，特别地，在数据通信方法、接入 380 伏电网方式和设备切换技术等方面，仍需深入研究。

第三，提出了一种数据驱动的能量路由器母线电压补偿方法。它依据数据库的设计不同，同时适用于直流母线和交流母线，并具有两个明显优势特点。在补偿速度上，支持简化的检测算法；由于初始值读取数据库即可，可在控制算法上缩短指令计算时间；由于采用学习机制，使得系统可获得精度补偿提升能力。

## 第4章 能源互联网关键技术探索--区块链技术应用

### 4.1 区块链技术概况

随着区块链技术的发展,国内外许多初创公司将区块链技术应用到包括金融与非金融在内的多个领域中。其中,金融领域包含支付汇款、智能债券、资产发行与交易后清结算等应用。目前,主流金融机构如高盛、摩根大通、瑞银集团等分别成立各自的区块链实验室、发布区块链研究报告或申请区块链专利,并参与投资区块链初创公司。除此之外,上海证券交易所、纳斯达克、纽约证券交易所、芝加哥商品交易所等各国证券交易所也对区块链技术进行了深入的探索。区块链现已广泛应用于数字资产、股权债券、贸易金融、供应链溯源、商业积分、联合征信、公示公证、数据安全等领域,并正在与交易所、银行等主流金融机构开展应用试验和测试。以多中心化信任为核心,致力于打造新一代价值流通网络,让数字资产自由流动。

由区块链独特的技术设计可见,区块链系统具有分布式高冗余存储、时序数据且不可篡改和伪造、去中心化信用、自动执行的智能合约、安全和隐私保护等显著的特点,这使得区块链技术不仅可以成功应用于数字加密货币领域,同时在经济、金融和社会系统中也存在广泛的应用场景。由于区块链技术衍生于数字货币比特币,因此在金融领域的研究成果已经相对成熟,但在能源互联网方向,区块链技术的研究与应用仍处于小范围摸索实验阶段,目前国内外已有少数公司开始探索并实践区块链技术在能源互联网中的应用,如布鲁克林微电网项目、电动汽车充电项目、Filament 智能电网项目等。以上几个项目利用区块链技术实现在能源互联网智能设备之间建立了低成本的互相直接沟通桥梁,同时通过去中心化的共识机制提高了系统交易的安全私密性,同时在每个智能设备预置智能合约,实现了设备之间点对点的自动化交易,并保存交易记录在区块链中。利用区块链和智能合约实现能源交易数据的验证、记账、存储、维护和传输等过程。实现了信息的高度透明,排除了人为因素干扰,由机器自动完成,信息不可篡改,从而实现几乎不需要人员参与就可以管理记录交易。

与国外市场相比,国内一些骨干企业对于区块链技术的应用也展开了相关的研究工作。其中,国内已经初步发展形成了一批区块链骨干企业。例如,万向控股于2015年9月成立了万向区块链实验室,开展区块链产业研究、开源项目赞助等活动,并建立了国内首个区块链云平台——万云(Wancloud)。蚂蚁金服在以公益为代表的普惠金融场景中利用区块链解决信任缺失的问题。万达网络科技积极加入国际区块链开源联盟,专注推动国内开源区块链技术发展,研发安全可控的自主区块链平台,同时将区块链技术融入智慧生活、物流网等领域,整合海量实体商业应用场景,实现实体产业的数字化转型升级,已内部试运行区块链征信及区块链资产交易所等应用。微众银行倡议发起金融区块链合作联盟,推出基于腾讯云的

联盟链云服务，发布了基于联盟链技术的银行间联合贷款清算平台并已上线试运行。

基于目前国内外在区块链应用领域研究成果，可总结出未来区块链技术的发展趋势集中在以下两点：核心关键技术和通用开发平台发展。

核心关键技术的发展趋势。其核心是分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等已有计算机技术。随着区块链应用的不断深入，对这些核心技术也将不断提出新的和更高的要求。在共识机制、安全算法、隐私保护等相关技术领域的研究成果会对区块链技术和应用的跨越式发展起到重要作用，对这些技术的持续创新和突破将非常关键。

通用开发平台发展趋势。目前已有部分类似于云计算的 IaaS（基础设施即服务）、PaaS（平台即服务），由基础设施支撑层、区块链核心组件服务层，以及相应的开发测试套件组成的区块链通用开发平台，能够完整地提供一站式、低成本搭建和部署区块链应用的技术服务。随着区块链应用的迅速发展和各相关参与者的大力投入，其服务覆盖度、研发便利度、运维智能度，以及高稳定性、大容量、低成本，均是可以预见的发展方向。

能源互联网不同发展阶段都可与区块链技术融合。一般地，能源互联网的发展需经过互联网和广域互联阶段。以微网阶段为例，区块链技术可以与能源路由系统结合，每一个能源路由器都带有一个分布式数据存储，由能源路由器来划分区块规模。这样，可构建能量双向流动、设备接入自由、即时价值评估、能量管理高效的高度开放式局域能源互联网。在软件和信息技术方面，它具有强大的数据分享和处理能力；在硬件支撑方面，它具有快速切换和控制能力。

2016年3月，LO3公司和区块链技术开发商 ConsenSys 合资成立了 TransActiveGrid 公司，在布鲁克林地区运行着一个微网项目，通过点对点的方式进行剩余能源交易，参与的家庭都有连接到区块链的智能仪表，追踪记录家庭使用的电量以及管理邻居之间的电力交易，智能能源电网交易比传统自上而下的能源配电系统更有效率。欧盟 Scanergy 项目旨在基于区块链系统实现小用户绿色能源的直接交易。该项目设想在交易系统中每 15min 检测一次网络的生产与消费状态，并向能源的供应者提供一种类似于比特币的 NRG 币作为能源生产的奖励，该项目目前尚未投入实际运行。

国内外，对能源互联网已有较为深入研究，也已开始进行初步工程试点。早期的能源互联网是指借鉴互联网的特点，通过分布式微电网等方式，将传统电网转变为智能化的、具有快速响应和自愈能力的数字网络。美国学者杰里米·里夫金于 2011 年指出能源互联网应具有以下四大特征：①以可再生能源为主要一次能源；②支持超大规模分布式发电系统与分布式储能系统接入；③基于互联网技术实现广域能源共享；④支持交通系统由燃油汽车向电动汽车转变。自此，能源互联网成为了各国能源发展中的战略问题。区块链技术尚未应用到能源互联网价值领域，结合区块链技术特点，可以在电力交易、需求侧管理，能源路由等方面展

示应用探索研究。

区块链是一种把区块以链的方式组合在一起的数据结构，它适合存储简单的、有先后关系的、能在系统内验证的数据，用密码学保证了数据的不可篡改和不可伪造。它能够使参与者对全网交易记录的事件顺序和当前状态建立共识。如今的区块链技术概括起来是指通过去中心化和去信任的方式集体维护一个可靠数据库的技术。其实，区块链技术并不是一种单一的、全新的技术，而是多种现有技术（如加密算法、P2P 文件传输等）整合的结果，这些技术与数据库巧妙地组合在一起，形成了一种新的数据记录、传递、存储与呈现的方式。简单的说，区块链技术就是一种大家共同参与记录信息、存储信息的技术。过去，人们将数据记录、存储的工作交给中心化的机构来完成，而区块链技术则让系统中的每一个人都是可以参与数据的记录、存储。区块链技术在没有中央控制点的分布式对等网络下，使用分布式集体运作的方法，构建了一个 P2P 的自组织网络。通过复杂的校验机制，区块链数据库能够保持完整性、连续性和一致性，即使部分参与者作假也无法改变区块链的完整性，更无法篡改区块链中的数据。区块链技术涉及的关键点包括：去中心化、去信任、集体维护、可靠数据库、时间戳、非对称加密等。

能源互联网是综合运用先进的电力电子技术，信息技术和智能管理技术，以信息网、能源网、物联网为载体，高智能优化控制软件、大数据与云计算为技术平台，将大量由分布式产能装置（包括天然气分布式供能、可再生能源、余热余压利用等）、储能和调峰系统、能源和相关信息监测采集系统、互联网信息传输系统、智能电力、热力和天然气等网络和控制性能源节点互联起来，最终建立能量、信息和物流全系统的多向流动的共享网络，在此基础上建立最优化的能源系统，使系统中的每个个体获得最佳能源服务。能源互联网将具有互联网的开放、平等、互动、共享的特征。能源互联网关键技术包括：组网与互操作模型及技术、大规模储能系统技术、建模仿真与分析优化技术、能量路由器技术、能源管理与大数据分析技术、系统规划分析技术、先进电力电子技术、先进 ICT 技术，安全防护、质量监督与认证体系，也包括关键装备技术和标准化技术。其中，先进电力电子技术、先进 ICT 技术是关键技术中的共性技术。

#### 4.2 基于路由网络构建的能源区块链

##### （1）区块链技术在能源互联网中的应用约束

区块链技术具有较高的普适性，可以应用到能源互联网的架构设计和功能运行中去。通过什么方式应用，适用于能源互联网的哪些功能环节等问题需要明确，因此，首先从物理和功能两个层面，来具体分析区块链技术在能源互联网中的应用约束问题。

能源互联网有其自身发展规律，以时间为序，能源行业一般把能源互联网的发展过程划分为能源互联微网、城市互联、国家互联和全球互联等几个阶段。当前正处于能源互联微网阶段，并将持续较长时间。与此对应，区块链应用到能源互联网时有其物理空间和功能上的约束。

当前，能源互联网处于互联微网发展阶段，与之对应，可以在微网单元实现区块链技术的典型应用。在这样一个局域空间内，可以把区块链技术与能源互联网技术进行较深度的融合，不仅在数据的存储处理、决策制定方面，也可以进行智能化执行操作，把人对融合系统的干预降到最低。因此，互联微网是区块链技术充分释放与应用的物理空间。

对于城市互联以上的广域空间而言，区块链技术应用的对象有所不同。首先，随着能源互联网的层级上升，区块链网络随之上升到更高层级，即广域空间区块链网络。分布式存储的容量增大，数据种类变化，能源互联网对区块链的业务需求也有所变化。例如，微网层级的客户需求多样化，对区块链应用提出了丰富多样的要求，而广域层级中的参与主体相对减少，能量管理对象相对减少。第二，运行功能有所变化。在微网层级，面对丰富的业务需求，区块链技术与能源互联网技术需设计并运行在高度自动化状态，避免人工过多的参与带来系统不确定性。因此，区块链技术需要应用到微网系统的数据采集、分析决策和自动执行的全过程。但在广域层级，参与主体减少，单次决策的数据量增大，单次操作的能量容量增大。这使得参与主体更多关注价格、交易等利益因素，而非技术因素。因此，对系统的运行管理，人工参与相对增加。这使得区块链技术在数据采集、分析决策方面全面参与，而在自动执行方面则有所选择。表一给出了物理约束与功能约束。

表 4.1 区块链应用约束

	物理约束	功能约束
能源互联微网	数据种类多，全方位深度应用	业务需求丰富，全面参与运行
广域能源互联	分布式存储大容量，数据量大	业务需求相对少，侧重数据分析，执行层面有选择性

## (2) 基于路由器网络的能源区块链系统构建

能量路由器是在能源互联网架构下发展而来的信息与能源融合装置或系统，在一般功能设计中，它包含有一个重要功能，即局域数据中心。区块链的核心特点之一是分布式存储，

这给区块链与能源互联网的融合提供了途径，即能量路由器及其网络是一条融合的途径。

● 路由器的节点功能

从局域能源路由网络和广域能源路由网络两个角度来分析融合问题。

对于局域能源路由网络而言，典型的即能源互联微网路由网络。下图 4.1 给出了一个由路由器网络构成的能源互联微网。

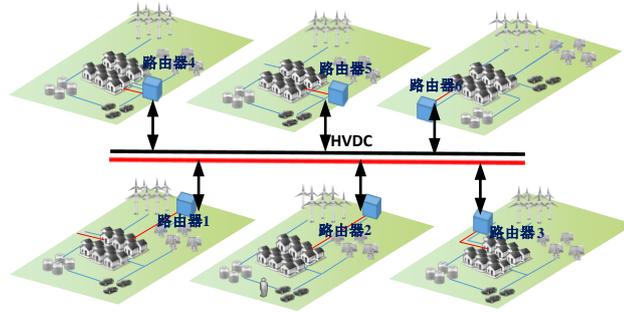


图 4.1 基于路由器网络的能源互联微网

由于每一个路由器都具备对该区域进行能量管理的能力，并有一个数据中心存储运行数据。可把这个数据中心同时视为区块链网络的一个存储节点，区块链技术应用到能源互联网所产生的新增信息都可以存储该数据中心。这个数据中心也可以按照区块链的技术要求来运行管理。与路由器网络对应，全部数据中心一起构成了区块链的分布式存储网络。

能量路由器网络与区块链存储网络是同一实体，只是功能不同。在进行能源交易行为和能量管理时，可把两类功能结合到同一管理系统中。

对于广域能源路由网络而言，它把局域能源路由网络系统作为一个节点，并有一个更大规模的数据中心，该数据中心包含了局域路由网络的全部信息。因此，它可形成上一层级的路由网络和区块链存储网络，其组网结构与局域网络类似。

● 区块链应用的性能解析

区块链技术在数据存储和应用方面有优越的特点，当应用到能源互联网时，对数据的采集、管理和使用需依据网络运营的需要。下表二给出了区块链技术特点在能源互联网应用中的特点解析。

表 4.2 区块链性能分解

性能特点	适用性	特点或路径
去中心化分布式存储	适用	路由器的存储复用为区块链存储
信息透明与不可篡改	选择性适用	运营中心设置该性能
去信任性	适用	技术数据去信任

可追溯性	适用	基于授权的追溯
匿名性	选择性适用	各主体自行确定，但权益有差异
开放性	选择性适用	各主体自行确定，但权益有差异
自治性	适用	运营中心设置该性能
共享性	选择性适用	运营中心设置该性能

由上表可以看到，区块链的不同性能特点不是无条件的都适用于能源互联网应用场景。一般来说，网络的技术数据的开放共享程度高，而涉及商业交易的数据信息则是有条件共享。能源互联网的各参与主体也可以自行确定自身的信息是否接入区块链，但所获得的权益与接入的开放性相关。运营中心在区块链技术的应用中发挥主导作用，可以设置各种功能是否发挥作用。

#### ● 路由网路架构下的能源区块链

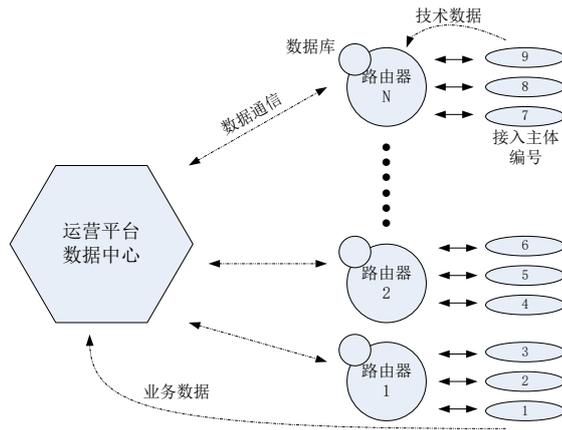
分布式存储空间、数据的采集与处理是区块链技术的物理基础。当应用到能源互联网体系时，能量路由器的存储可复用为区块链的存储空间，而路由器的各类数据可按照区块链的运行规则来进行管理。由此，路由器网络的各个存储构成了区块链网络的分布式存储，并以此为依据给出能源区块链在路由网络架构下的定义。

定义：对于能源路由网络架构下的区块链应用而言，能源区块链是指以能量路由器网络的存储空间为物理载体、以能源互联网运行数据为操作对象、以密码学方法按时间顺序连接的链式数据库。

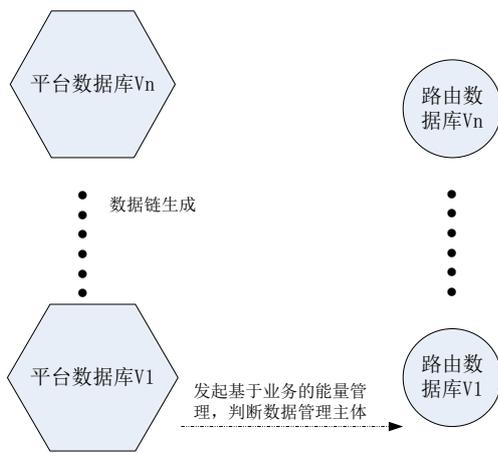
运行过程具有如下特征：

能量路由器除了具有原来的能量管理功能外，兼具区块链数据管理功能；每一个路由器作为数据存储节点之一，它进行接入范围的能量管理时，从本地存储获取数据；对于网络技术类数据，路由器承担接入范围内的全部数据录入。对于业务与交易类数据，参与主体通过交易平台录入；分布式存储的数量为能量路由器数量，外加一个交易平台数据中心；当某个能量路由器内能量管理能力不足时，外溢到运营中心来执行能量管理，数据采集的来源为交易平台数据中心。发起某项交易业务时，由运营中心判断业务执行归属；能源区块链属于一类联盟链。

结合上述特征，基于路由器网络的能源区块链运行结构如下：



(a)能源区块链数据写入归属



(b)能源区块链数据链

图 4.2 基于路由网络的能源区块链

图 4.2 从路由网络数据管理的角度解析了能源区块链的运行过程。其中，4.2(a)给出了能源区块链数据采集的过程。数据划分为两类，即技术数据与业务数据，划分的依据是数据是否依赖参与主体的主观决策。从图可以看出，技术数据直接由所属路由器采集并管理，业务数据由平台数据中心采集并管理。4.2(b)给出了能源区块链的生成示意，并指明基于业务的能量

管理由平台发起，并有平台决定数据管理的主体，即哪一个路由器来执行等。

● 典型应用场景

能源区块链在能源互联网中可广泛应用，以互联微网为例，下表三给出了能源区块链应用的一些典型场景。

表 4.3 能源区块链典型应用简析

典型场景	能源互联网	能源区块链
碳排放权交易	基于发电资源	基于发电/负荷混合管理

能量路由器	区域能量管理	改善决策/精度
价值传递	双向传递/模式多元	拓展价值空间
数据安全	访问受限/标识不唯一	联盟链为基础/不可篡改
电动汽车	充电网络/无线充电	智能合约
需求侧响应	微网为主体	提升智能化
能源交易	运营平台执行	智能合约/比特币
虚拟电厂	运营平台执行	智能合约

基于路由网络的能源区块链应用有一些明显的优势特点，如：存储可以复用，现有通信网络设施可以复用；联盟链为各路由器和运营平台提供更多的数据和决策依据，有利于提升决策效率，优化决策方案；联盟链的大数据有助于人工智能等先进技术的推广应用，拓展能源互联网在供能之外的服务，如信息安全、能源金融等。能源区块链应用也有一些不足，比如：对于由路由网络构成的微网而言，数据种类多，迭代更新时间短，业务需求随机性高等，这使得数据管理非常复杂。

### (3) 能量路由器应用分析

#### ● 数据变化与影响

文献 58 和 59 给出了一类能量路由器的单机结构，以及由数个路由器组成的路由网络。以这类能量路由器及其网络为例，表四给出了系统运行时采集数据的具体情况，以及应用区块链技术后的数据特征。

表 4.4 数据种类及其变化

	数据种类	数据变化
	额定功率	无变化
	实测功率	数据处理后更精确
	设备性质与接入数量	无变化
技术数据	单机数据范围	范围扩大
	采集频率	无变化
	存储特点	链式存储可追溯
	购电信息(居民/工厂/商业/汽车等)	交易信息范围扩大
	结构变化(设备接入/退出)	无变化
	跨路由网络调度信息	增加此类信息
业务数据	多能混合/替代	无变化
	大数据应用(供能之外应用)	范围扩大
	能源金融	原始数据增加

由于区块链技术的应用，技术数据和业务数据都发生了一些变化。主要表现在两个大的方面，一个是增加扩大了单能量路由器的数据种类和数据量，使得单路由器范围的能量管理

决策更准确；第二是由于数据可追溯，没有时效限制，使得运营平台对业务的处理更全面，应对能源、信息和金融需求波动的能力更强。

- 能量管理性能改善

对于文献 58 和 59 给出的能量路由器单机结构和网络，区块链技术的应用会带来积极因素。比如，能量管理策略会发生变化。

当能量路由器的一路电源由于故障退出路由器时，对于没有应用区块链技术的路由器而言，它的决策通常如下：找到功率数值最为匹配的负荷，强制其退出该路由器，并转而接入临近的路由器。这样做的后果是，临近的路由器功率平衡被打破，也许再一次类似切换操作到周边路由器。但是，对于应用了区块链技术的路由器而言，由于存储数据全面，可以掌握其它路由器的电源需求信息，因而，决策过程可能变为：由于电网母线功率存在冗余，可由电网母线直接注入功率，而不需要强制负荷退出。这样，避免了一系列的切换操作过程。

当能量路由器的一路负荷由于故障退出路由器时，对于没有应用区块链技术的路由器而言，决策通常如下：找到功率数值相近的电源，强制其从本地路由器切换到临近路由器，并把功率失衡性传递到临近路由器。对于已应用区块链技术的路由器，由于信息全面，它肯能的决策是依据电网母线功率需求，加大路由器功率回馈到电网母线，从而避免了切换操作。

#### 4.3 能源区块链与能源互联网价值传递

##### (1) 概述

能源互联网是信息技术与能源技术深度融合的能源供给形态，信息与能源基础设施一体化是能源互联网的核心特征之一<sup>[48]</sup>，而区块链技术是信息技术的重要组成部分。曹军威<sup>[60]</sup>等从广域网、局域网和基础设施三个层面讨论了信息与能源的基础设施一体化实现途径，并提出了能源路由器作为信息与能源的基础设施一体化的解决方案。孙宏斌<sup>[61]</sup>等从能源互联网的特征和基本架构出发，认为能源互联网是能源和互联网深度融合的新型能源系统，指出开放是其最核心理念，互联网思维和技术的深度融入是其关键特征。王冰玉<sup>[62]</sup>等提出一种基于信息物理融合的能源互联网模型，考虑网络中信息系统与物理系统时空异构性和网络中量测数据不同步的问题，表征了能源互联网优化控制中信息物理的交互过程。张勇军<sup>[63]</sup>等从多耦合能量流的随机动态特性、广域互联网信息资源的整合能力、能量-信息流的相互作用特性 3 个方面分析智能电网与能源网融合背景下，能源互联网所构建的新一代信息能源系统(CES)的形态特征。林为民<sup>[64]</sup>等对全球能源互联网环境下的信息通信支撑技术展开讨论，提出能源互联网的信息通信架构，介绍了电网信息物理融合系统、感知控制、通信传输、数

据集成、信息处理、安全保障等技术。

上述研究主要从信息与能源融合的角度研究了能源互联网的架构特征与关键技术,能源互联网价值传递是在这些物理基础上的更高层次的价值属性范畴。传统的能源供给形态是集中式供应,供能主体在能源系统中起主导作用<sup>[65,66]</sup>。但是,在能源互联网架构下,用能主体有了更多的能源消费选择,通过能源互联网的交易和运营管理,可实现逆向的市场驱动型能源消费方式<sup>[67,68]</sup>,这使得能源互联网的价值传递多样化,更为丰富。能源互联网的整体架构可以分为能源层、信息层、业务层和价值层。以价值为导向,通过业务层、信息层和能源层的相互配合,实现能源互联网能量的精确调度与高效利用,解决现有的能源和环境危机,保障社会经济的正常运行<sup>[69,70]</sup>。

区块链技术是能源互联网信息技术属性的重要方面。区块链作为一种去中心化的分布式存储的对等可信网络,是以比特币为代表的数字加密货币体系的核心支撑技术<sup>[71,72]</sup>。区块链技术具有高度透明、去中心化、去信任、集体维护(不可更改)、匿名等性质,能够通过运用数据加密、时间戳、分布式共识和经济激励等手段,在节点无需互相信任的分布式系统中实现基于去中心化信用的点对点交易、协调与协作,从而为解决中心化机构普遍存在的高成本、低效率和数据存储不安全等问题提供了解决方案<sup>[73,74]</sup>。一些专家已经展开了区块链技术在能源互联网中的技术框架和典型应用研究,全面阐述了区块链技术在能源互联网中的发展前景<sup>[75-76]</sup>。

在现有能源互联网解决方案中,大多利用中心化的管理控制机构完成。但能源互联网体系庞大,中心化管理机构任务繁重,而某些情况下去中心化具有更高的效率,如家庭光伏电站的剩余电量提供给某邻居家电器使用,在双方可信的基础上,可以直接完成交易,从而具有更高的效率。而区块链技术为构建可信、点对点交易提供技术基础。为了将区块链应用于能源互联网中,如何融合区块链与物联网、信息系统、业务形态构建基于区块链的安全可信自主对等的能源互联网环境,如何解决网络、系统与业务间的去中心化的共识问题,成为了当前急需解决的问题。为此,这项研究探索梳理了能源互联网中的价值传递模式,建立了价值传递模型,并初步提出了区块链技术在能源互联微网价值传递中的典型应用,提升能源互联网运行效率和安全可信水平。

## (2) 能源互联网的价值传递模式

### ● 能源互联网的功能属性与价值来源

能源互联网的功能属性可以从三个角度来阐释,即信息互联、大电网和多能混合综合利用,最终表现在能源、信息、业务和价值四类属性上。在能源互联网的不同发展阶段,随着

时间的推移，四类属性在能源互联网中的权重会发生变化，越往上一层的属性，变得更加丰富。

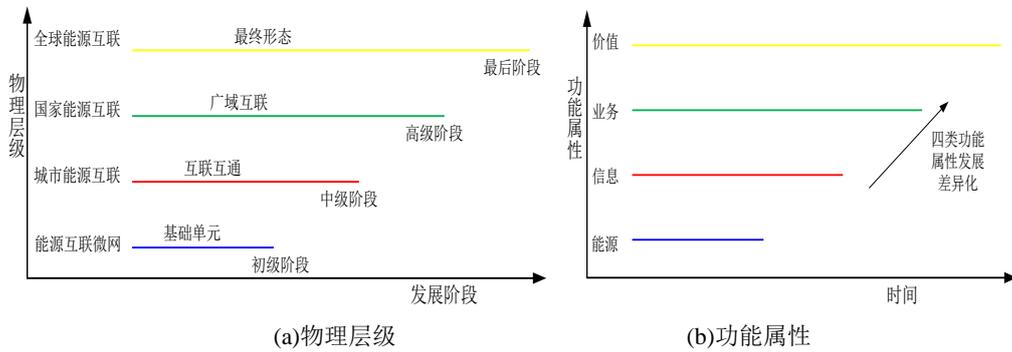


图 4.3 能源互联网功能属性架构

如图 4.3 所示，四类功能属性贯穿于能源互联网的四个物理层级，但在不同物理层级的属性程度存在差异。4.3(b)中，随着时间的推移和能源互联网的发展，能源属性比重相对下降，信息、业务和价值属性相对增加。能源互联微网是能源互联网发展的初级阶段，也是物理架构 4.3(a)的底层。能源互联网的价值来源如下图。

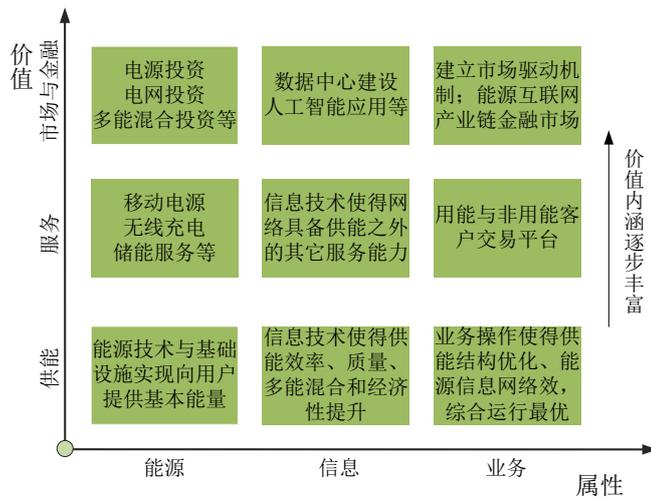


图 4.4 能源互联网价值来源

与传统能源价值相比，能源互联网有一些新的价值来源。主要来源于四个方面：1) 新型商业模式创造了新的市场价值；2) 新的能源管理方式带来了能效价值；3) 庞大的能源互联网产业链带来了能源金融价值；4) 数据中心和人工智能技术应用创造了新型社会服务价值。

● 价值主张与传递模式

对应于能源互联网的价值来源，能源互联网不仅能实现传统能源架构下的基本价值，还可以实现新出现的四类价值。从价值实现的物理操作过程来看，数据中心占据相对突出的位置，能源的交易、传输、存储、能效提升、能源金融波动和新型社会服务水平等，都依赖于

数据中心提供的信息以及其分析与决策,传统以能源网为中心的价值实现已转变为以数据为中心的价值实现过程,而价值的内涵也限于供能的单一方面,已转化为包含多能、金融和新型社会服务等新内容的价值体系。因此,可从数据的角度主张如下价值传递模式。

综合型能源互联网价值传递模式。它不仅要体现能源供应侧、用能侧和网络运营的价值,还需要体现节能降耗、环境保护、能源金融等方面的价值,需要大量数据及分析过程,因此,综合型价值传递模式也可称为数据型价值传递模式。在多方面综合价值体现的过程中,每一个参与主体都是依据能源信息网络运行数据来做出决策,制定自身的行为规律。数据成为科学判断的唯一依据。

用户型能源互联网价值传递模式。它是以能源消费侧为中心的价值体现,消费侧主体包括个人和各类组织。在价值体现过程中,主要包括两类情形,一类是用户经济性最佳,需要为用户节能降费,减少支出,这里需要引入需求侧管理等网络运营技术;另一类是用户体验最佳,用户具体情况不同,不是所有的用户都把经济性放在第一位。比如对电能质量敏感的工业用户,需要高质量的电力供应,而价格不是最关注的方面。

能效型能源互联网价值传递模式。它以能源监管侧为出发点,它主要目标是节能降耗,尽可能减少能源需求和消耗。能源互联微网运营商是实现能效型价值传递的主要载体,通过微网的能量管理和局域范围的调度,协调供能、用能、储能的供需对接,把能源需求和供应分解到不同时段和地域,从而实现降低能源总量的目标。

金融型能源互联网价值传递模式。它是一类资产证券化的价值体现形式。能源互联网产业链的各经济实体单位都可以进入金融领域,比如成为上市公司、融资等。一方面,实体单位的经营状况会反馈到金融领域,影响金融波动;另一方面,金融行为也会反馈到实体单位的经营,形成助力或负面影响。

### (3) 能源互联微网中的价值传递模型

依据不同区域的具体特点,如存量供能结构、用户特征和存量电网等,微网可规划为不同类型。比较典型的,在供能侧,包括光伏、风电、火电和外部电网,以及燃气等组成多能混合结构;在用户侧,一般包括居民用户、工商用户和工业用户;在电网侧,一般包括存量电网、储能和新增电网。以综合利用价值为目标,从综合型价值传递模式对其进行分解。

#### ● 价值传递模型

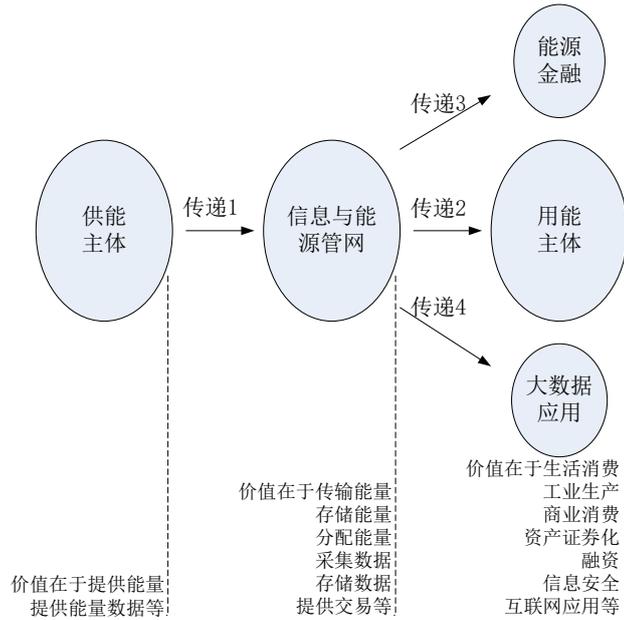


图 4.5 能源互联微网价值传递图模型

设每一个参与方都具有相应的价值能力，当传递到价值链的下端时，下端参与方会获得对应的价值感知。这种价值的传递存在一个传递效果问题，即传递指数。

设图 4.5 中的 5 个参与方的价值能力分别为：供能主体 $V_1$ 、信息与能源管网 $V_2$ 、用能主体 $V_3$ 、能源金融 $V_4$ 和大数据应用 $V_5$ ；相应的价值感知为 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 和 $R_5$ ；传递指数为 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 和 $H_4$ 。由图中传递方向可知， $R_1$ 为 0。因此，有如下价值传递模型：

$$\begin{cases} H_i = \delta_i |V_i \rightarrow R_{i+1}|, i=1,2 \\ H_3 = \delta_3 |V_2 \rightarrow R_4|, \\ H_4 = \delta_4 |V_2 \rightarrow R_5|, \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\delta$ 表示传递效率。影响传递效率的因素很多，而不同类型的价值传递模式有不尽相同的影响因素。下表一给出了综合型、用户型、能效型和金融型价值传递模式的影响因素。

表 4.5 四类价值传递影响因素解析

综合型	影响因素	用户型	影响因素
传递 1	能源结构 能源质量	传递 1	能源结构 能源质量 能源价格
传递 2	传输存储和分配能量 采集存储和分析数据 多能协同 碳排放约束分析 需求侧管理	传递 2	传输存储和分配能量 交易平台
传递 3	衍生生活与信息服务	传递 3	投资收益

	智能交易		能源金融市场
	社会安全分析		
传递 4	能源金融市场	传递 4	用能便捷性
	融资		用能舒适性
	资产证券化		

(续)

能效型	影响因素	金融型	影响因素
传递 1	能源结构	传递 1	能源属性
	能源性价比		能源发展应用前景
传递 2	传输存储和分配能源	传递 2	交易规模与经营效益
	交易平台		运营体增值服务水平
	过网费		
传递 3	产业链经营实体能效	传递 3	金融市场规模
			投融资、资产证券化
传递 4	能量管理	传递 4	大数据分析

### ● 作用分析

不同类型价值传递体现了价值链的侧重点不同,由此影响能源互联网参与主体的决策倾向,由上表中的影响因素分析可以看出。各影响因素的在不同类型的价值传递模式中量化占比也会有所差异,会随着参与主体的主观意愿波动。模型内各价值传递过程中,沿着传递方向,总价值会有一个增值的过程。

能源互联网价值传递模式与模型的建立有三个主要作用,分别如下。

1) 它从产业链和价值驱动的角度分析了能源互联网,有助于厘清产业链内各参与主体在价值体现中的角色与贡献权重,为宏观市场配置和利益分配提供参考。2) 价值体现影响市场,从而可为不同情形的能源互联网应用场景采用不同运营管理模式提供依据。3) 为能源互联网参与实体实现自身价值最大化提供借鉴,找到最佳定位。

#### (4) 能源区块链与能源互联网价值传递

### ● 区块链技术与能源互联网的融合需求

区块链技术具有信息技术属性,而能源互联网具有信息和能源两种属性。在传统电网和智能电网中,计算机、电子通信、自动控制等信息技术得到了较多的应用,但是深度和广度趋于较低层次。在能源互联网的去中心化、价值驱动、供能和用能主体双重化等新的目标和功能要求下,信息技术在能源互联网中的功能权重、应用深度和广度、信息量和复杂度都大幅提升,更为高效、稳定的信息技术亟需引入。

区块链技术操作对象指数据,即对大量数据的存储和管理。在能源互联网中,需要使用数据的环节都涉及到区块链技术的应用。终端数据采集、局域能量管理、运营调度、供能

与用能交易和定价机制等，是区块链技术应用的典型场景或环节。

与传统电网的统一定价和单向输电不同，能源互联网的价格开放，自由议价，且能量向上向下均可流动，这使得价值驱动成为能源互联网的核心特征之一。价值驱动的实现过程是从用户到交易中心、再到传输网络和供能体，每一个参与方都依据规则实现自己的最优价值，而规则的基础是数据。区块链技术在数据管理上提供了一个开放共享的数据平台，把价值链上的所有参与方都摆在了一个信息对等的位置。

#### ● 融合点与融合方式

区块链技术具有高度透明、去中心化、去信任、集体维护（不可更改）、匿名等鲜明特点。在应用到能源互联网领域时，融合点和融合方式是亟需解决的关键问题。本质上，区块链技术的操作对象是去中心化的分布式存储的对等可信网络。在能源互联网中，我们可以理解为一系列分布式数据中心构成的数据库网络。

对于能源互联微网而言，在网络架构上它与传统配电网的差异主要表现在两个方面：首先是出现了一个微网范围内的运营中心，它包含了独立电网的所有功能；第二是微网内原有的高压变电站转变为以能源路由器为核心的神经枢纽，既包含了原有的变电功能，也包含了局域数据中心、以及微网内的二级能量管理功能。其中，第二个差异即是能源互联微网与区块链技术的融合点。下图 4.6 给出了能源互联微网到融合区块链技术的能源互联微网的转变过程。

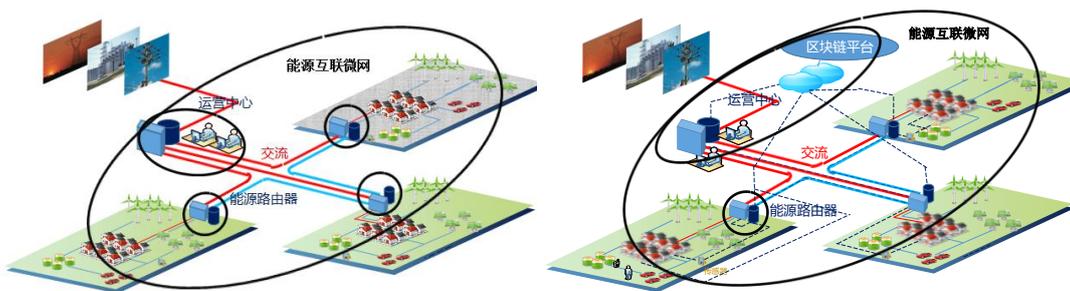


图 4.6 能源互联网到能源区块链的转变

比较传统能源网而言，信息技术在能源互联网领域具有显著的重要性，而区块链技术则是信息技术部分至关重要的数据管理技术。从区块链角度，可用能源区块链概念来分析能源互联微网。

#### ● 能源区块链

结合区块链技术在能源互联微网中的应用需求和图 4 所示架构，给出能源区块链的定义如下：

从数据中心角度，一个能源互联微网可视为由一系列分布式数据中心组成的对等可信网

络，而每一个数据中心存储管理某个确定区域的能源网运行信息。由于分布式数据中心从信息管理上把能源互联微网划分为若干个物理区域，或称为区块化划分，而区块链技术对分布式数据中心进行了有效管理，因此可把这种已经区块化划分的能源互联微网称之为能源区块链。

能源区块链很大程度上提升了能源互联网的信息技术属性，使得能源互联网明显地有别于智能电网或泛能源网。

能源区块链技术的作用对象是数据或数据中心，并通过数据分析影响或决定能源网络的运行。因此，能源区块链技术在能源互联网价值传递中发挥着基础作用。在四类价值传递模式中，参与主体都可以依托能源区块链技术，对所在数据中心进行数据的读取和上传操作，从而分析决策自身的价值需求与价值实现。

#### 4.4 本章小结

本章研究了区块链技术与能源互联网的融合问题，主要从能源互联网的路由器网络融合和价值传递模式两个角度进行了深入研究。主要内容和贡献如下：

第一，区块链技术应用到能源互联网中需要有合适的路径。比如，如何构建区块链分布式存储网络，如何对能源互联网运行数据进行采集、管理和使用，是当前亟需解决的问题。为此，这项研究分析了能源互联网和区块链技术的特点，探讨了区块链技术应用到能源互联网中的应用约束，运用能量路由器网络的现有物理架构，把区块链技术和能源路由网络融合起来，构建了基于能源路由网络的能源区块链。

第二，这项研究探讨了能源互联网价值传递模式及与区块链技术融合问题。通过研究能源互联网价值传递模式和模型，以及区块链技术与能源互联微网的融合方式，给出了能源区块链的定义及其在能源互联微网价值传递中的作用分析。能源区块链融合了区块链技术和能源互联网技术，它深度提升了能源互联网的信息技术属性，为能源路由器的研究和应用提供了合适的载体。这项研究仍有一些重要问题需要研究，例如：价值传递在能源互联网中属于顶层的属性，它影响着能源互联网的市场开放化程度，区块链技术和价值传递模式如何驱动能源互联网的完全市场化是一个有研究意义的课题。

## 第5章 能源互联网示范工程规划

### 5.1 工程示范的必要性与意义

能源互联网作为未来可能的智能能源解决方案正逐渐成为研究的热点和潮流。未来学家、电力专家、信息专家、经济学家等都在能源互联网系统相关研究中进行深入探讨、技术攻关等科学研究。尽管能源互联网是什么，有什么样的强大功能，离我们有多遥远，如何实现等一系列问题都未完全解决，但从世界及国内的研究动向和重视程度来判断，有必要对能源互联网及相关问题进行梳理，形成全面、客观、科学的看法，以利于制定相应的科技攻关、产业发展规划和政策。

尽管关于未来能源网络的发展问题，专业研究人员早已进行相关研究，但是将能源互联网作为一个正式的未来能源发展模式和解决方案，并引起广泛关注，是在《第三次工业革命》一书出版之后。该书作者杰瑞米·里夫金是美国著名经济学家、未来学家、政治顾问、经济趋势基金会创始人和总裁。他认为“在即将到来的时代，我们将需要创建一个能源互联网，让亿万人能够在自己的家中、办公室里和工厂里生产绿色可再生能源。多余的能源则可以与他人分享，就像我们现在在网络上分享信息一样。”

杰瑞米·里夫金在《第三次工业革命》一书中指出，“第三次工业革命”的标志是互联网和可再生能源的结合而形成的新能源互联网。书中说到“以前我们用印刷术、煤和计算机，而现在我们用互联网和可再生能源，第二次工业革命由此也已经走到了尽头。在不久的将来，人类自己能产生绿色能源，也可将这种能源与他人分享。这将从根本上改变人类的工作和生活方式，甚至由此引起社会结构的变化。第一次和第二次工业革命使资本主义和国内国际市场蓬勃发展，而第三次工业革命将使大陆间市场更繁荣，并催生出大陆政治联盟和各种不同的经济发展模式。同时，我们也面临三方面的挑战：能源危机、气候变化和可持续发展。我们可将全球化转变为大陆化，由此来应对这些挑战，也就是说，将能源分配来取代能源分散的局面。”“互联网技术和可再生能源将结合起来所构成的能源互联网，将是实现能源分布式供应的一种有效模式。”

有研究认为，能源互联网会有大发展，将来的能源会像现在的社交网络一样，可以互相分享，人人都是能源生产者，人人也都是能源消费者。现在的电网还是呈现集中式的分布、单向传输，而互联网则是多向的、交互的，是分散的结构和拓扑。未来能源会变成分布式，就像互联网一样。通过信息技术把各种能源集中起来，用不同的形式存储并能分布出去。每一个建筑都是智能的住宅，都可以吸收能量、消耗能量、分布和存储能量。

总体上讲，能源互联网就是在现有能源供给系统的基础上，通过新能源技术与互联网

技术的深入融合，将大量分布式能量采集装置和分布式能量储存装置互联起来，通过智能化的管理，实现能量和信息双向流动的能源对等交换和共享网络。

在全球应对气候变化、各发达国家竞相抢占新能源和可再生能源发展先机的大背景下，大力开发利用新能源和可再生能源，提高能源利用率，建设能源互联网已成为是优化能源结构、抢占新一轮国际竞争战略制高点的重大举措，对于增强创新能力、培育未来经济战略支撑、实现绿色可持续发展都具有重要意义。

电力、天然气、石油以及新能源属于清洁能源或优质能源，在英国、美国、加拿大、德国等发达国家，优质能源在能源消费总量中的比重分别达到 82%、76%、74%、72%；合肥市优质能源在能源消费总量中的比重与发达国家和地区还存在一定的差距。仅仅强调提高电力、天然气等优质能源在能源结构中的比例，会面临能源供应安全的问题，成本也高。能源传输方式的智能化和集成化，开展能源互联网发展的工作会能源结构和优化具有重要意义。

## 5.2 宁夏中宁县工业园区项目背景

### (1) 概述

中宁工业园以电解铝、锰，特种钢等高耗能负荷为主。目前锰、铝等产品销售价格连年下跌，占企业生产成本 1/3 电力成本又高居不下，使园区内企业普遍面临生存困难的窘境；然而，周边省区的大工业电价普遍低于宁夏售电价格，一些高载能项目出现向区外转移的趋势（锦江集团 120 万吨铝镁合金项目二期资金转移至内蒙古），导致园区负荷一度出现负增长的现象（2014 年电量比 2013 年减少 68 亿 kWh）、园区已经开始呈现经济衰退的迹象；目前国家不断推出能源体制改革和电力改革方案，宁夏相应推出《宁夏电网输配电价改革试点方案》，中宁工业园被评为第六批“国家新型工业化产业示范基地”并成为电改首批试点地区，中宁工业园发展机遇利好。因此，借助国家发展战略的东风、结合园区发展契机，建设基于能源互联网的国家级高耗能产业示范园区，成为保障中宁工业园可持续发展的有效解决方案。

中宁工业园能源互联网建设思路是：需要“政府搭台、多方参与、合作共赢”，相互促进、协调发展。然而目前建设中宁工业园能源互联网存在新建电厂接入困难的瓶颈，存在能源互联网的安全稳定与大电网安全稳定协同考虑的问题，存在大量整流设备等谐波源对电能质量影响的问题，存在需求侧管理和需求响应缺失的问题，存在随机间歇性能源消纳困难的问题。若这些问题不解决，将成为能源互联网建设最大的阻碍。

宁夏中宁工业园能源互联网规划方案。可以通过网架结构规划、火电及清洁能源规划、柔性直流技术、需求侧响应、相变储能技术实现中宁工业园能源互联网总体规划方案设计；成立能源物业服务公司，建立能源交易平台规划，实现冷热电，发、配、售一体化运营；开

发能量控制系统，提高终端能源的使用效率，提高电网设施的利用率，降低能源使用费用；构建能源互联网信息系统体系，通过高带宽光纤，实现多种数据采集和通信。

中宁能源互联网规划完成后：

- 电网公司：保障既得利益，缓解电网调峰、调频压力、增加紧急响应能力；
- 用电企业：增量部分减少外购电量，提高企业能效；
- 火电厂：提高年发电利用小时数，提高盈利能力；
- 清洁能源：光伏、风电等清洁能源发电全部消纳；
- 柔性直流技术：保障电网供电安全性，降低变电站备用容量、提高设备综合利用率；
- 需求侧响应：避免分布式随机能源波动；支撑宁夏电网安全稳定运行、提高设备利用率；
- 相变储能：冷热电多种储能技术结合需求侧响应，消纳弃风、弃光电量；实现冷热电协调供应，提高能源综合利用效率。

## (2) 企业生存窘境

- 产品价格连年下跌

中宁工业园以电解铝、铁合金、电石等企业为主。然而，目前锰、铝等产品销售价格连年下跌，企业普遍面临生存困境。近年来铝、锰价格走势分别如下图所示。

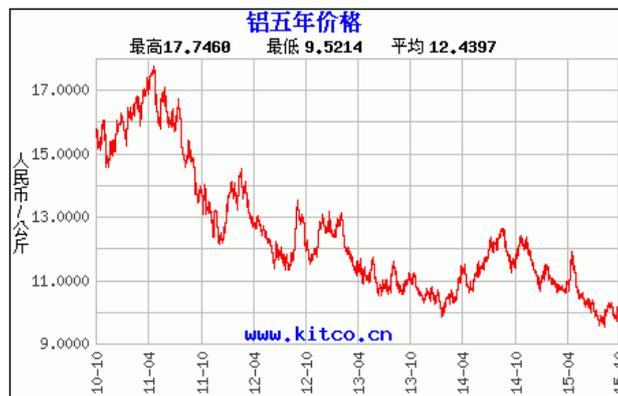


图 5.1 近年铝价格走势

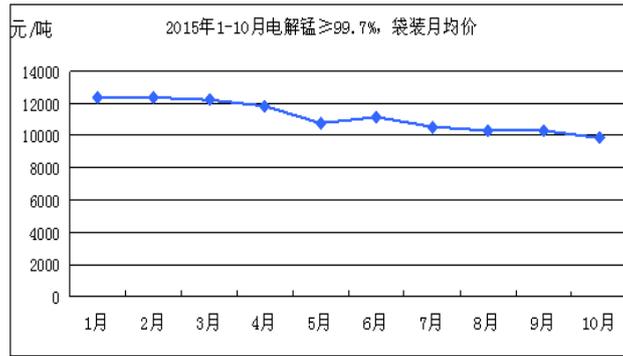


图 5.2 2015 年 1-10 月电解锰≥99.7%袋装月均价

● 生产成本高居不下

中宁工业园工业倚重倚能的结构非常明显，2014 年工业园年用电量为 102.74 亿 kWh，电力负荷为 163 万 kW。其中，天元锰业、锦铝、华夏特钢年用电量为 88.58 亿 kWh，占工业园用电总量的 86%，这些企业中电力成本占工业成本的三分之一。

“宁夏的购销差价达到 0.237 元/千瓦时，居西北五省区之首。工业企业的基本电价普遍高于周边省区。出现一些高载能项目从宁夏向区外转移、流失的趋势，中宁工业园这种资源能源型城市/区域一度出现负增长的现象。中宁工业园区，2014 年电量、负荷相比 2013 年（2013 年工业园年用电量 170.28 亿 kWh，电力负荷为 260.11 万 kW）分别下降 67.54 亿 kWh 和 97.11 万 kW。

2013 年和 2014 年工业园电量、负荷对比情况如下图所示。

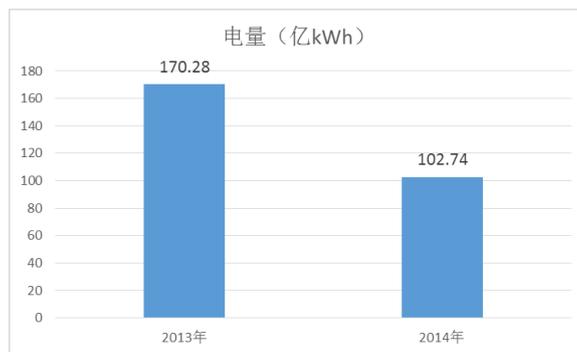


图 5.3 2013 年和 2014 年工业园电量对比情况

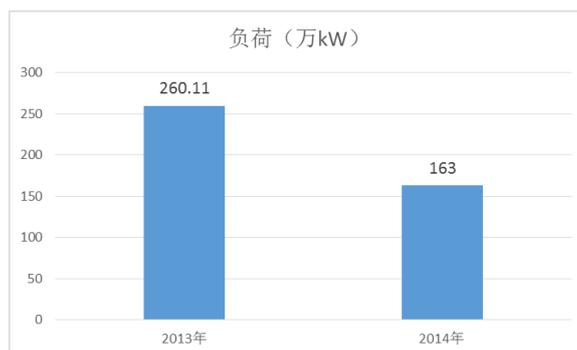


图 5.4 2013 年和 2014 年工业园负荷对比情况

宁夏及周边省电网销售电价对比情况如下表所示。如按照目前宁夏电价中宁工业园用电成本，电镀电价为 0.381 元/千瓦时、基本电价按照最大需量为 38 元/千瓦月；新疆电镀电价为 0.359 元/千瓦时（峰、平、谷平均）、基本电价按照最大需量为 27 元/千瓦月；内蒙古西部电镀电价为 0.277 元/千瓦时、基本电价按照最大需量为 21 元/千瓦月。

表 5.1 电网销售电价对比表

220 千伏及以上		宁夏	新疆	内蒙古西部
电度电价	峰价	0.381	0.586	0.277
	平价		0.359	
	谷价		0.132	
基本电价	最大需量（元/千瓦·月）	38	27	21
	变压器容量（元/千伏安·月）	30	20	14

按照中宁工业园 2014 年用电量和负荷计算（考虑电度电价和基本电价），新疆和内蒙古西部综合电价分别低于宁夏中宁 0.043 元/kWh 和 0.137 元/kWh。宁夏、新疆、内蒙古西部用电成本和综合电价对比情况分别如下图所示。

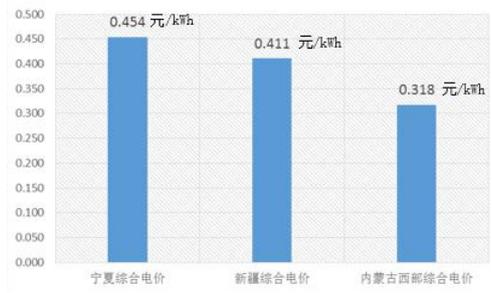


图 5.5 宁夏、新疆、内蒙古西部综合电价对比情况

宁夏电价高居不下，使企业生产成本偏高、企业生存困难，最终导致高载能企业利润下降、并向区外迁移，电网公司电量下降、电量收入降低，工业园区招商引资困难、地区经济倒退。工业园发展连锁效应如下图所示。

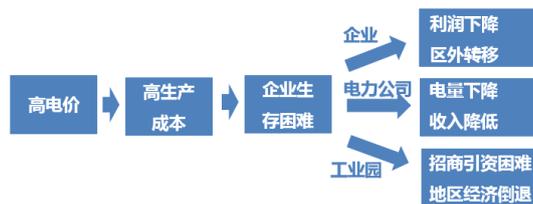


图 5.6 工业园发展连锁效应

### （3）发展机遇

首先，出现了国家战略机遇。目前国家不断提出能源战略策略，对高载能行业用户，即存在发展的机遇，又面临变革的挑战。国家相关举措如下：第一：2014年6月13日，中央财经领导小组第六次会议，研究中国能源安全战略。习近平提出：推动能源消费、供给、技术和体制四方面“革命”。第二：2015年3月5日十二届全国人大三次会议上，李克强总理在政府工作报告中首次提出“互联网+”行动计划。第三：2015年3月15日，中共中央下发9号文提出“三放开一独立三加强”：放开新增配售电市场，符合条件5类企业未来可以开展售电业务。

在宁夏省级层面，也有能源改革举措机遇。2015年9月9日发改委原则同意《宁夏电网输配电价改革试点方案》，并要求尽快拟订首个监管周期（2016-2018年）宁夏电网输配电准许收入及价格水平测算方案。在配套改革方面，试点方案提出，要结合电力体制改革，把输配电价与发电、售电价在形成机制上分开，积极稳妥推进发电侧和售电侧电价市场化，分步实现公益性以外的发售电价格由市场形成。鼓励电力用户或售电主体与发电企业通过自愿协商、市场竞价等方式自主确定市场交易价格，并按照其接入电网的电压等级支付输配电价。目标是在宁夏电网建立规则明晰、水平合理、监管有力、科学透明的独立输配电价体系，转变政府对电网企业监管方式，健全对电网企业的约束和激励机制，形成保障电网安全运行、满足电力市场需要的输配电价形成机制。《宁夏电网输配电价改革试点方案》是继深圳、蒙西试点改革方案后，全国第二个省级电网输配电价改革试点方案，也是国家电网辖区内获批的首个试点方案。首批试点有望落地宁夏中宁县、平罗县两个工业园。

在工业园区，也存在发展机遇。2015年4月工业和信息化部第六批“国家新型工业化产业示范基地”公示结束，中宁工业园区成为宁夏第六批唯一上榜园区。这标志着中宁工业园区将在人才引进、土地规划、环境保护、配套服务建设、工业用地、用水指标等要素配置上，得到更多支持和政策倾斜。中宁工业园分为铝镁合金现代新材料循环产业区，冶金、化工、铸造产业区，稀土彩钢现代新材料循环产业区和生活后勤保障区四大区域。2015年工业总产值达到500亿元，从2016年到2020年发展目标，预计入园的企业达到120家，整个园区完成投资额为800亿元，新增工业产值达到1400亿元。

### （4）中宁工业园区发展出路

中宁工业园区，2014年电量、负荷相比2013年均出现了负增长。如杭州锦江集团原计划投资128亿元建设锦宁铝镁120万吨铝镁合金项目，目前仅投资59亿元建成一期42万吨

铝镁合金生产线；2014 年锦江集团将本来计划投资建设的 120 万吨铝镁合金项目二期资金转移至内蒙；受此影响，原计划于今年开工建设的巨科公司 80 万吨铝板带箔项目二期因原料供应不足，至今未能提上议程。总体上看，工业园区的规划和建设处理不好，将可能导致企业发展乏力，使园区发展进入瓶颈期。如何借助国家发展战略的东风、梳理园区内不合理现象，深入挖掘节能降耗潜力，找到中宁工业园持续发展思路并提出系统的解决方案成为亟待解决的问题。

推动中宁工业园持续发展，一方面需要国家政策支持，另一方面需要寻找多方都能接受的合理方案。即要实现政府搭台、多方参与、合作共赢，建设中宁工业园能源互联网示范，促使《宁夏电网输配电价改革试点方案》在中宁工业园得以落实。

中宁工业园能源互联网示范目标是：实现工业园政府、企业、电网公司多方共赢，相互促进、协调发展，将中宁工业园区建设基于能源互联微网的国家级高耗能产业示范园区。其中：

- 工业园政府：节能、减排，促进招商引资，促进区域发展，促进经济增长，为企业的协调发展创造条件；
- 工业园企业：提高终端能源的使用效率，降低产品生产成本；提高设备的利用率，节约基础设施投资；实现园区内的能源协调优化利用；使企业成为电网的优质客户，同时参与和支持系统的用电需求响应；
- 电网公司：保障既得利益，缓解电网调峰、调频压力，为园区和系统用户提供优质可靠的电力供应和专业服务。

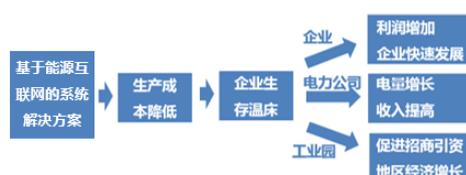


图 5.7 能源互联网规划目标

### 5.3 建设能源互联网需要解决的主要问题

#### (1) 现有电网存在新建电厂接入困难的瓶颈

目前工业园有 330kV 变电站 5 座，火电厂 1 座（中宁电厂），新建火电厂 2 座（天元自备电厂和京能电厂），如下图所示。这两座发电厂主要为园区负荷发展提供电源，由工业园内 330kV 变电站上网的经济效益最优。



图 5.8 电气设备地理位置图

当前电厂接入方案如下图所示，天元自备电厂 2 回线路接入 330kV 凯歌变，线路长度为 2×30km；京能电厂通过 2 回 750kV 线路接入 750kV 杞乡开关站，线路长度为 2×12km。



图 5.9 当前电厂接入方案

天元自备电厂和京能电厂接入电网建设距离分别增加约 25km 和 8km，京能电厂还存在重复降压的问题。当前电厂接入方案增加了电能的损耗，并且加大了电网投资。

造成天元自备电厂和京能电厂接入不合理的根本原因，在于现行体制的束缚和多方利益博弈的结果。

- 现行体制的束缚：工业园 330kV 公用变电站枣园变没有出线间隔，330kV 特钢变和锦铝变为用户变电站。因此，京能电厂无法接入特钢变或锦铝变，只能通过 750kV 杞乡开关站上网；天元自备电厂尽管与特钢变属于相同老板投资的不同法人单位，但按照电力法规定也无法作为自备电厂接入特钢变，只能接入 30km 之外的凯歌变。

- 多方利益博弈：天元自备电厂和京能电厂作为自备电厂接入负荷站，虽然企业购电成本降低，但是电网公司售电收入减少；天元自备电厂和京能电厂作为公用电厂接入电网，虽然电网公司售电收入提高，但是企业用电成本增加。

需要通过中宁工业园能源互联网规划将电源和负荷统筹考虑，落实《宁夏电网输配电价改革试点方案》，突破现有的体制，才能突破目前电厂接入方案不合理的瓶颈；通过能源互联网梳理利益体系，实现用电企业与电网公司双赢，才能促使电厂接入问题尽快得到解决。

## (2) 能源互联网的安全稳定与大电网安全稳定协同考虑

《电力系统安全稳定导则》中明确规定“应避免和消除严重影响电网安全稳定的不同电压等级的电磁环网”。因此，保障电网安全稳定运行是电网规划项目能否通过电网公司考核、顺利实施的基础。

高低压电磁环网，是指两组同电压等级运行的线路，通过两端变压器磁回路的联接而并联运行。电磁环网运行的利弊主要有：降低电力系统稳定水平，引起系统振荡；破坏系统热稳定性，导致低压线路跳闸，甩掉大量负荷；短路电流过大，对系统的安全运行造成严重威胁；此外，还存在电网调度运行风险增加、继电保护装置和安全自动控制装置配合复杂、潮流不易控制、运行不经济等一系列问题。

由于历史原因，宁夏电网形成以 750 千伏电网为骨干网架，220kV 和 330kV 电压等级并存的电网布局。北部的石嘴山和银川地区主要为 220 千伏电网，南部的宁东和固原地区主要为 330 千伏电网，吴忠、中卫地区处于 330 千伏和 220 千伏电网交叉供电区域。因此，目前宁夏存在 750/330/220kV 多级电磁环网的问题。

中宁工业园能源互联网规划，将会形成 750kV 杞乡变~750kV 沙坡头变~330kV 凯歌变~330kV 枣园变~330kV 锦铝变~330kV 特钢变~750kV 黄河变~750kV 杞乡变的电磁环网，如下图所示，将严重威胁宁夏电网的安全稳定运行。因此，电磁环网是中宁工业园能源互联网规划亟待解决的问题。



图 5.9 中宁工业园能源互联网规划电磁环网示意

## (3) 大量整流设备等谐波源对电能质量影响

首先，存在电解铝和锰工业电能污染。电解铝厂是用电大户，其整流设备是谐波的主要发生源，能影响到整个电力系统的电气环境，不仅危害电力系统和其他广大用户，也会危及电解铝厂本身。通过对一些电解铝厂的电能质量监测，发现部分存在有载调压交流变压器侧存在 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波电流超标，网侧进线电流含有一定数量的 3 次谐波和 6 次、10 次、12 次、14 次和 16 次等偶次谐波分量。

电解锰企业主要负荷为电解负荷。电解需要的直流电由整流变整流而得，整流过程会产生谐波注入电网，影响电网的电能质量。一些研究通过对电解锰企业进行实际的电能质量监测发现，电解锰厂正常生产时，注入到母线的 11 次、13 次谐波电流超出国标限值，17 次谐波接近国标限值，其余 3、5、7、9 次谐波满足国标限值。

其次，存在特钢制造企业电能污染。对电能质量的影响一个很重要的方面就是电压波动与闪变。其所消耗的功率均存在不同程度的冲击性和随机性特点，而无功功率变化所带来的主要电能质量问题就是电压波动与闪变。其中，造成电压波动与闪变问题最严重的就是电弧炉设备。

第三，在铝、锰冶炼工厂中，大功率发动机的运行会产生大量谐波电流，影响非常大，需要采取有效措施进行严格治理。最后，园区内部冶炼企业居多，大型工业设备需要很多配套电力装备，如发动机，变压器，整流装置等。其会产生大量电能质量污染，不仅危害企业自身的生产线，还会反馈入外部电网，对工业园区外的系统设备造成不良影响。

#### (4) 需求侧管理和需求响应缺失

中宁工业园存在大量的需求侧响应资源和潜力，这些资源和潜力以前没有得到挖掘和利用。通过需求侧管理和需求响应将对电网系统和园区内外的企业产生重要的影响。中宁工业园目前总负荷 2910MW，其中 85% 以上为电解铝、电解锰、特种钢等高耗能、重工业负荷，负荷曲线比较平坦，特性好，如何计划和安排园区内的可调控/可中断负荷，充分利用需求侧响应资源，将企业生产与发电计划、电网运行等形成紧密配合和有效互动，将是一项节能降耗，提高系统运行效率必须解决重要问题。

#### (5) 随机间歇性能源消纳困难

区域电网规模有限，可调控容量不足，消纳随机、间歇性风电、光伏等可再生能源难度大。中宁工业园区内部可再生能源增长迅速，目前已建成光伏发电 210MW 和风电 200MW，渗透率接近 15%。而风电光伏高渗透率下小型区域电网的安全高效运行难度大，尤其是在园区内部缺少足够的可调控负荷容量和手段情况下。

#### (6) 园区的能源综合利用还没有开展研究

现行园区内的企业发电与用能，基本上是各自独立安排生产，没有建立联合用能的计划和协调的渠道。企业能源供应与使用缺少协调与监控手段。企业与企业之间的能源发生和使用协调和互补，园区内企业与园区外企业和电网企业之间的协调优化互补和实施调度与控制相互支持，不但影响到参与需求响应企业的生产成本和经济效益，也是交易计划和收益分配的基础。因此需要对交易规则、能源的综合利用、监测系统、需求响应系统、计量计费 and

易系统进行深入的研究和系统的设计。

## 5.4 项目解决思路

### (1) 能源互联网规划中新建电厂接入方案

中宁工业园能源互联网规划思路如下：

- 需要满足电网安全稳定导则要求和电网规划导则要求，从而保障电网安全稳定运行；

- 规划方案应兼顾电网公司和工业园的共同利益，保证规划方案具备可实施性；

- 近期规划与愿景规划相结合，避免过度投资和重复建设，从而避免投资的浪费，使经济效益最优化。

能源互联网规划中新建电厂接入方案是，新建京能电厂接入锦铝变，新建天元自备电厂（一期）接入特钢变。两座电厂的接入工程将节省投资约 1.72 亿元

宁夏工业园电网规划方案如下图所示。

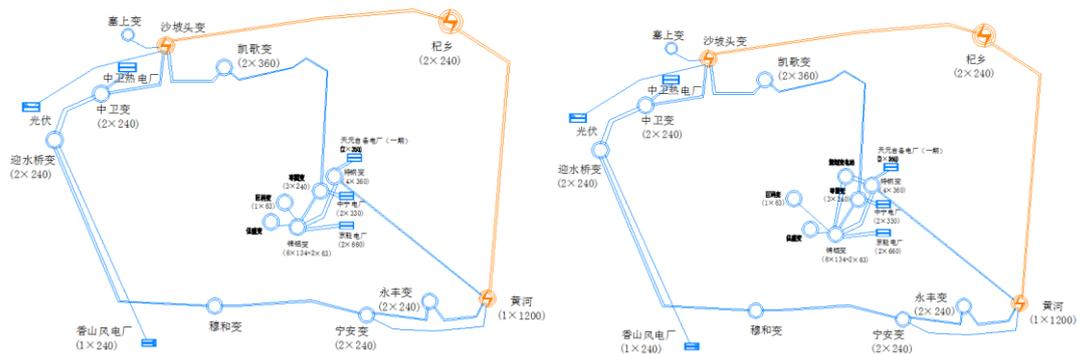


图 5.10 近期电网规划方案远期电网规划方案

### (2) 通过柔性直流技术应用保障电网安全稳定运行

在供电分区间采用柔性直流装置互联，可以实现潮流主动控制，在不增加短路电流的条件下，能够实现分区间的互联互通、充分发挥各分区的供电能力，能够避免电磁环网、保障电网稳定运行；能够减少变压器备用容量、提高设备利用率。

为了防止电磁环网，330kV 等级供电区域通常采用解环运行，区域之间母联开关处于冷备用状态，所以供电来源单一，一旦发生变压器故障（n-1 故障）而失去单一电源，在母联开关合上前，就会出现供电中断，严重影响工业生产和人们的生活质量，而且，传统交流配网增加了变电站主变的备用容量，造成主变平均负载率较低，损耗较大等问题。而直流互联方案可以环网运行，在单点故障后可通过控制手段实现其余主变的功率平均分配，并且在故

障区域可以实现不间断供电，同时减少了变电站的设计容量。

高效运行的柔直互联技术可以灵活的控制系统潮流，实现多馈线间的负荷均衡，优化电网的供电能力，提高电能传输效率，提高设备的利用率，提高电网的经济性，为园区带来直接的节能效益；另外，可以过直流网络为敏感负荷提供专用供电通道来提高电能质量。相比于交流，直流网络中不存在频率波动问题，只需要控制电压稳定即可保证高质量供电。另一方面，可以通过调整柔直互联系统中的柔直换流器的输出电流，来补偿交流侧的无功电流和谐波电流，提高供给负荷的电流质量。最后，对于电解铝、电动汽车充电桩等主要直流负荷可通过柔直互联系统直接对其进行直流供电，减少中间变流环节的损耗。同时，也便于灵活接入光伏、风电等分布式电源。综上，柔直互联技术是实现园区的综合效益提升的有效途径。

柔性直流技术如下图所示。

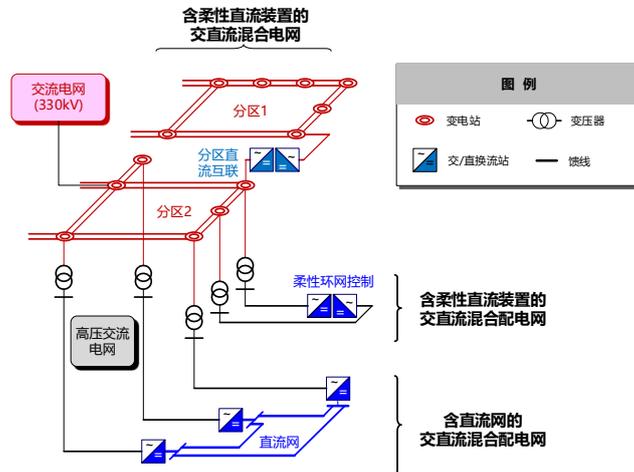


图 5.11 柔性直流技术

### (3) 电网电能质量治理

园区电能质量治理不同于单个装置或单个企业用户的治理，需要采用系统化治理思路与方法。

首先，需要检测、定量地明确园区重要节点的电能污染状况，以及明确全部企业的内部污染状况。为系统治理提供一手数据。第二，依据电压质量、电流质量等国家标准，参考监测污染数据，把园区作为一个整体。一方面为尚未进行内部治理的企业进行质量提升治理，另一方面，在园区重要节点和连接外电网的节点进行专项治理，全面提升在谐波、功率因素、三相不平衡、幅值、闪变等方面的综合性能。第三，在治理具体方法和装置方面，一方面采用传统的电能质量治理装置，如 UPQC\DVR\APF\SVC 等。另一方面，由于智能微网的高度

互联,各负荷之前由传统电网下的弱相关变为强相关,有必要研究网络化电能质量治理方法。

电能质量治理预期效果如下。首先,改善接入质量。目前,在园区电网中,具有非线性、冲击性和不对称性的大型工业负荷不断增加,特别是冶金、化工、材料加工等领域,大容量电力整流设备广泛使用,使电网电能质量问题日益突出,已严重危害系统和其他用户设备安全经济运行。同时,随着信息设备、精密仪器、高端制造业等对电源质量敏感设备的应用,电能质量问题受到用户的广泛关注。改善电能接入质量已成为现实需要。

其次,阻断污染扩散。宁夏自治区中宁工业园区是一个高能耗产业聚集的区域。大量用电设备的接入,势必给电网带来电能质量污染。全面掌握电网的电能质量状况,理清重要区域和敏感负荷的电能质量需求及问题,定量分析电能质量对供电网和用户的影响,划分用户与电网的责任界限,统一电能质量考核标准,规范电网电能质量治理措施,同时满足高端用户对于高品质供电的应用需求,已成为完善中宁电网运营的重要考量。

最后,促进产业升级。作为工业集中的工业园区,中宁电网中不仅已经有数十家大型工业负荷,同时,未来的发展,必然要改善投资环境,为吸引各种现代化的高科技企业聚集提供动力。现代高端工业企业越来越依赖高质量的电力供应。目前国内正面临产业调整和转型,高新产业比例日益扩大,对电能质量要求逐渐提高。截至目前,国内大量工业园区都接到大型用户针对供电电能质量的应用需求和相关投诉。参照国外成果经验,供电企业开展“用户定制电力(Custom Power)”技术的研究和应用,为高端用户提供“高价优质”的电力供应,是现代供电企业技术水平的重要体现。长远来看,宁夏中宁工业园区也需适应国家制造业4.0升级计划,升级制造装备。与之配套,电网质量也需适时升级,改善企业用电环境,吸引高端制造企业入驻园区。

#### (4) 可控容量与需求侧响应问题

分布与集中式储能技术的综合应用和优化,有效解决可控容量与需求侧响应问题。在风光电站,利用储能稳固可再生能源发电,平抑波动;在热电厂,通过相变方式实现供热和供电的联合储存和高效利用;在电网,以电池梯次利用方式建设集中式储能站,响应园区局域网调节和外部电网大规模开再生能源消纳要求;在用户侧,采用分布式储能装置替代传统的UPS、备用电源等。优化各类型储能系统容量和功能,提高经济性,并通过园区内部统一的能量管理系统,实现其互联和协调运行。通过电源、电网和用户的综合调度和实时控制,充分发挥需求侧管理和可再生能源接入的经济效益。需要对各类型发电资源、电网调度控制和用户本身进行精细安排和优化。园区内自备和新建电厂,保持一定比例和园区内外需接入的可再生能源打捆运行;利用不同类型的储能系统,通过其功率或能量应用,除消纳光

伏风电外，还可适当满足外部电网的紧急调频、调压、调峰需求，获取额外经济效益；通过负荷、发电、储能的综合优化，实现全年用电曲线峰值平坦化，进一步降低外购电力的容量费用；优化安排高耗能负荷用户和发电机组检修，提高发电厂的运行小时数，降低其平均发电成本；建设新型的园区电网传感测量和调度控制系统，支撑“源-网-荷-储”的实时优化，保证局部电网的可靠高效运行。

### 5.5 工作内容及实施方案

完成宁夏中宁工业园能源互联网规划。通过网架结构规划、火电及清洁能源规划、柔性直流技术、需求侧响应、相变储能技术实现中宁工业园能源互联网总体规划方案设计；建立能源交易平台规划，实现冷热电发配售一体化运营；开发能量控制系统，提高终端能源的使用效率，提高电网设施的利用率，降低能源使用费用；构建能源互联网信息系统体系，通过高带宽光纤，实现多种数据采集和通信。

#### (1) 中宁工业园能源互联网总体规划方案

通过能源互联网规划将中宁工业园区打造成科技化、专业化、智能化园区，打造成投资的洼地。突破目前宁夏用电体制，保障工业园区、企业、电网公司多方共赢，并降低用电成本；采用柔性直流、需求侧响应、相变储能等技术，提高能源综合利用效率。

因此，中宁工业园规划总体方案研究思路如下图所示。



图 5.12 中宁工业园规划总体方案研究思路

- 电网公司：保障既得利益，缓解电网调峰、调频压力、增加紧急响应能力；
- 用电企业：增量部分减少外购电量，提高企业能效；
- 火电厂：提高年发电利用小时数，提高盈利能力；
- 清洁能源：光伏、风电等清洁能源发电全部消纳；
- 柔性直流技术：保障电网供电安全性，降低变电站备用容量、提高设备综合利用率；
- 需求侧响应：避免分布式随机能源波动；支撑宁夏电网安全稳定运行、提高设备利

用率；

- 相变储能技术：冷热电多种储能技术结合需求侧响应，消纳弃风、弃光电量；实现冷、热、电协调供应，提高能源综合利用效率。

## (2) 组建电改实施主体—成立工业园能源物业服务公司

- 投资主体的构成

慎重选择投资主体，成立工业园能源物业服务公司。服务公司可由管委会、资金投资方（能源互联网规划建设投资方）、技术支撑方（包括方案设计、设备建设及运行维护等工作）共同构成；此外，能源物业服务公司不宜体现双层角色的股东（即要得到电价降低的优惠、又要分取能源互联网规划红利双重利益）。

- 实施主体的主要职能及作用

落实中发〔2015〕9号文及配套文件精神，结合国家相关政策，依靠自治区政府的大力支持，“兼顾政府、用电企业、电网公司多方利益”为园区企业实现“降低用电价格、减少用电数量、保障电能质量、提升用电感受”。协助政府贯彻、落实有关政策、规定和规划，成为园区能源互联网规划、建设、运维、营售一体化的实施主体，为园区企业提供用能保障、为园区创造投资“洼地”、促进招商引资，提高公共服务质量及园区整体管理水平。

## (3) 中宁工业园能源互联网的运营模式

在近期和远期，可采用不同运营模式，体现运营的优化过程。

近期运营模式如下：

电力直接交易是在电改初期能源服务公司开展的一种阶段性的业务。能源服务公司在园区内开展多种综合节能、节电服务，使园区企业满足自治区政府的产业及能源政策，享受直接交易电量的相关优惠政策。能源服务公司开展电力直接交易服务的主要工作如下：

- 为园区企业争取更多的直接交易电量。能源服务公司积极配合政府，从电网公司获得更多的直接交易电量。能源服务公司为园区企业开展多种综合节能、节电服务，使园区企业满足自治区政府的相关产业及能源政策，为园区企业争取更多的电力直接交易额度。

- 开展节电降费服务。能源服务公司将整合中宁园区内外的用电客户，形成大的客户群，开展“团购”业务，增强与电源点的谈判能力，获得优惠电价，降低直接交易电量的价格。能源服务公司通过先进的电力管理手段，降低输配环节损耗，降低用电成本。能源服务公司通过专业化管理，降低管理成本及费用。能源服务公司通过开展需求侧管理等工作，降低企业单位 GDP 电耗，实现节电。能源服务公司通过开发企业的需求响应容量资源，为企业节省电费。

- 制定园区内直接交易电量分配标准。。能源服务公司按照接入电压等级、能耗水平、排放水平等指标制定参与直接交易的用户准入标准和分配机制。

- 开展直接交易电量的营销服务。能源服务公司编制直接交易电量的采购及分配计划，依据市场化原则进行电能组织、价格谈判、合同签订以及电力管理等工作。

最终能源互联网运营模式如下：

通过工业园能源物业服务公司采用发配售一体的运营模式，以满足区内所有用户的冷、热、电需求。能源供应商可以对区内的发电厂、供电、供热、供冷与用户侧资源进行综合调度控制。

作为能源服务公司，需要将区域内的大型发电厂及分布式能源纳入到能源服务公司的运营范围以内，建成区域能源中心。具体包括京能电厂、天元自备电厂、中宁电厂、光伏发电、风力发电及生物质发电的运营权收归能源服务公司所有，再配套建设相变储能，形成冷热电三联供的区域能源中心。

作为能源服务公司，本区域内的所有用户均通过能源服务公司获得冷、热、电能源，并按照相应的价格水平支付有关费用。可以通过收购、租赁等手段，运营现有的发电、供热、制冷设备；也可以新建一些能源供应单元。

在此运营模式下的能源服务公司主要可表现为三个方面的功能：

- 综合协调运营各类能源资源，对其所调控的能源资源进行自营，协调其所掌握的火电、光伏、风电、生物质发电、储能等资源，以满足区内所有用户的冷、热、电需求；

- 向用户侧销售能源资源、实施负荷互动供应，可引入合同能量管理与需求响应服务，提供基于大数据和全过程的用电行为方式分析等，为用户提供辅助决策和信息增值服务项目，帮助用户降低其能源消费成本。

- 电力代购服务，当能源供应商的自营资源可以满足区内自身需求时，可以将多余电力以上网电价出售给电力公司；当能源供应商的自营资源不能满足本区域内的用电需求时，需要代理用户向电网公司购电。具体购电方式有以下两种：第一、基于大工业用户的身份购电，第二、利用大用户直购电或者输配电价核定等政策，直接与电厂签订大用户直购电合约，并支付电力公司相应的过网费。

#### （4）园区信息支撑规划

能源互联网的正常运行离不开信息系统的支撑，其主要功能实现需要相关主体间及时有效的信息通信，如负荷预测、故障定位、态势感知、用户行为分析及营销策略制定等。

建立能源互联网信息系统首先需要建立相关体系结构。能源互联网电网信息系统的体系

结构主要包括能源互联网信息系统基础设施、能源互联网信息系统支撑平台与能源互联网信息系统应用系统三个部分，如下图所示。

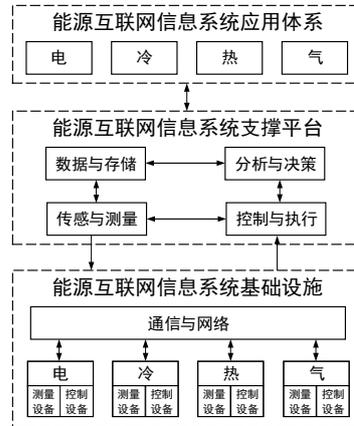


图 5.13 能源互联网信息系统体系结构示意图

在具体设计中，中宁工业园信息系统建设以分布式数据中心作为基础，以光纤和无线为主要通信方式，分为大型数据中心、模块化数据中心（光纤连接）、电力传感器（无线连接）这三个层次。

大型数据中心协调各个能源互联微网，负责中宁工业园区能源互联网整体的运行管理与调度，以及构建园区内能源市场总体交易平台。大型数据中心和小型数据中心之间通过光纤连接形成光纤（双）环网，推荐采用 MPLS 技术，因为该技术能够提供硬性带宽保证。

模块化小型数据中心汇集电力传感器采集的电力数据以及冷热监测数据，实现用户侧需求管理，构建园区微网能源市场分交易平台，实现安全质量控制与监督等高级应用。小型数据中心与传感器通信网关之间可以采用环状或树状光纤连接。

电力传感器包括 PMU、RTU 与智能电表等。在本设计方案中，出于用电规模和实际需求的考虑，不推荐使用 PMU 设备。

电力传感器可以通过近距离无线传输技术（如蓝牙或 zigbee）接入到园区内能源互联网有线或无线通信网关，网关设备可以通过光纤通信接入到能源互联网信息通信网络，或者通过园区内的无线专网（gprs/3G/4G/5G）接入到园区能源互联网信息通信网络。

对于使用光纤通信方式，可以采用无源光网络，如（EPON，GPON）技术。

根据一般的估计，目前区域性的能源互联网通信带宽在几十 Mbps，而出现故障时通信带宽在 100~300Mbps 左右，目前的光纤通信（1/10G 带宽）和无线通信（几百兆带宽）完全可以满足要求。

#### （5）建立能源交易平台

随着能源互联网的发展，传统的集中式交易模式正在被逐步打破。基于放开发电端和售电端，管控输配电环节的基本原则，能源互联网可以形成多交易主体和多交易模式共存的新格局。

交易主体具体包括电能提供者、电力服务者和电力消费者，其中传统的电力消费者正向着同时扮演电力提供者和电力消费者的方向转变，这一转变得益于分布式能源发电技术的引入和普及。随着能源互联网的发展，电能提供者将向着电能服务者的方向转变，其盈利模式将从以提供电能为主逐步转变为提供高质量的电力服务为主。服务在交易平台的建设和发展中将扮演着重要的地位。

能源互联网能量交易机制分为两类。即微网与主干电网间的能量交易，微网内部和微网之间的能量交易。具体到本项目，以上两种能量交易机制分别对应着中宁工业园区与中宁县主干电网的能量交易与中宁工业园区内部的能量交易。

- 中宁工业园区与中宁县主干电网的能量交易

目前，中宁工业园区已经自建了一定数量的发电装置。根据规划，中宁工业园区会在未来几年（2015-2020）建立数量可观的火力发电、风力发电、生物质发电和光伏发电，但同时，园区电力负荷和年用电量也将大量增加，预计到 2020 年将分别达到 763.84 万 kW 和 469.77 亿 kWh，且由于风力发电和光伏发电的间断性和不稳定性，仅靠内部自身的发电很难满足实时供应要求。因此，中宁工业园区与中宁县主干电网的能量交易必不可少。在电力短缺期间，工业园区需要从主干电网的购买一定数量的电能，并在用电高峰时期，可以将园区自身消纳不了的风电和光电出售给主干电网公司。此种情况下的电力交易方式与传统的大电网售电方式没有不同，可以采用目前已有的各种售电方式，向大电网买电主要有以下两种方式：1) 基于大工业用户的身份(如锦宁铝镁或华夏特钢等)，与中宁县电力公司协商确定用电量或用电曲线，以及相应的趸售价格机制（峰谷电价或分时电价），或是按照现有的目录电价进行购电。2) 利用大用户直购电或者输配电价核定等政策，直接与电厂签订大用户直购电合约，并支付中宁县电力公司相应的过网费。类似的也可以购买冷、热、气等其它能源。

- 中宁工业园区内部的能量交易

此种交易方式也分为两类，一类是区域内部能源提供商与用户之间的能量交易，另一类是用户或微网之间的能量共享。

区域内部能源提供商与用户之间的能量交易。区域能源提供商负责向区域内部用户提供电能。能源供应商在面向区内用户时，可以提供灵活的价格“套餐”与优惠政策，推出更加丰富多样的售电模式，供用户自由选择。开展需求侧响应，安装相应的智能电表，推行面向区

域用户的分时电价等多样性的价格机制，签订可中断负荷合同等激励性合同，并针对签订长期用电合同的用户给予优惠奖励等政策。

用户或微网之间的能量共享是能源互联网的基本特征和优势之一，主要用于用户自身或微网内部有发电设备（电厂或储能装置）的情况。比如在中宁工业园区中，天元锰业自备电厂将分期建立 $2\times 350\text{MW}$ 和 $4\times 350\text{MW}$ 的发电设备。这样，当天元锰业周边电厂出现暂时性能量短缺时（如锦宁铝镁），可以向天元锰业提出购电申请，并由双方及时协商供电价格和用电量，并根据线路情况确定传输功率。同时，如果情况允许，大工业用户之间可以通过建立柔性直流输电线路实现能量的共享。通过能量共享，可以大幅度降低工业园区对外部主干电网的供能需求。通过此类形式的能源共享，可以提高用电效率、减少能量传输损耗，减少能源中断的概率。另外，用户自身发电设备的发电能力还可以用于需求侧管理之中，辅助实现削峰填谷，提高能源供给和消耗的平稳性。

## 5.6 本章小结

大力发展能源互联网是立足工业园区功能优势，体现高端示范的重要途径。把利用能源互联网作为优化能源结构和增强创新能力的重要举措，充分体现中宁园区在能源利用和产业发展上的高端高效高标准要求。基于区位优势、科技资源优势，提出建设中宁县工业园区能源互联网，是立足园区，着眼全省，面向全国，体现产业辐射和综合示范效应的重要战略。

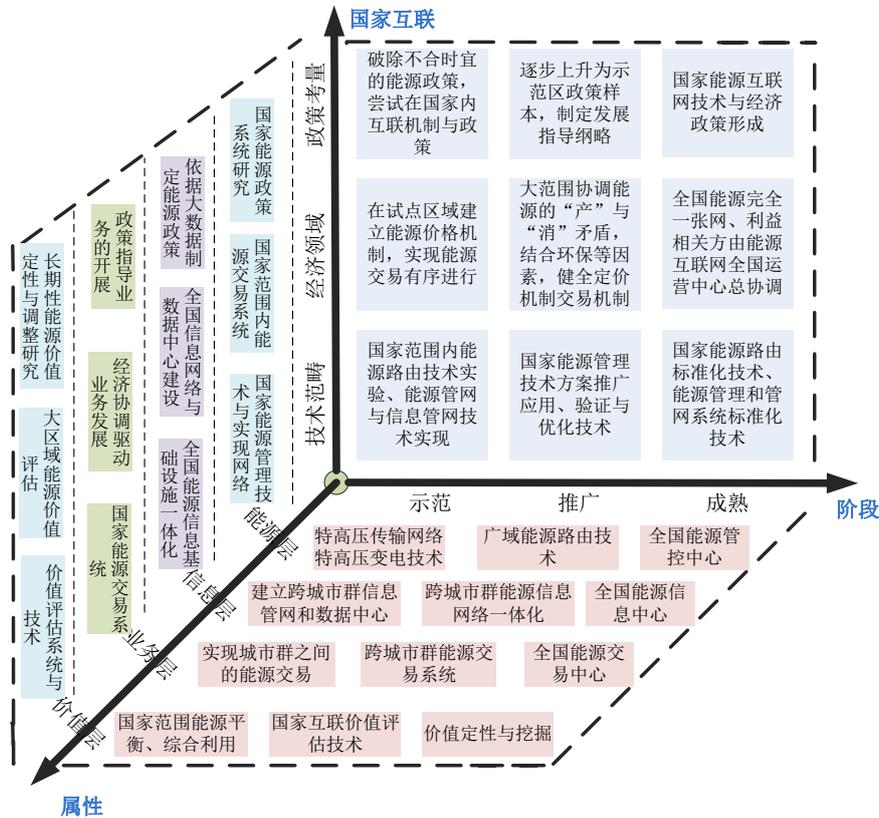
在新能源产业大力发展的今天，建立能源互联网，将各种能源系统与互联网联合是新能源发展的大方向。虽然目前能源互联网还没有投入应用中，也面临技术、商业化等诸多障碍和挑战。其强调消费者主权，强调系统的服务功能，强调通过技术进步实现智能化、交互式、商业化。国内外一些企业也已经开始了大胆的尝试，并出现了很多成功的案例。在严峻的资源环境挑战之下，人类通过能源技术进步、技术融合改变传统的能源生产和消费方式是大势所趋，这股潮流不可阻挡。

## 第6章 能源互联网研究总结

### 6.1 能源互联网产业远期展望

随着信息和能源技术的发展，特别是区块链技术、大数据技术和人工智能，能源路由、储能材料等技术的快速发展，能源互联网产业必将出现快速发展和完善的局面。到 2025 年左右，能源互联微网在全国基本建成，覆盖大部分的工业园区、商业集中连片区以及其它一些具备经济可行性的区域；城市能源互联网已经开始示范，并建成若干智慧能源城市。到 2050 年，将形成全国性的能源互联网，全国各地的城市能源互联网将连接到国家能源互联网中，人工智能、大规模清洁能源、大规模储能和能源路由技术等广泛嵌入国家能源互联网中。与此同时，全球能源互联网建成若干示范工程，实现高度自由的能源跨国传输与使用。

下图 6.1 给出了国家能源互联网的发展演进与展望分析。



6.1 国家能源互联网发展演进

下图 6.2 给出了全球能源互联网的演进与展望分析。

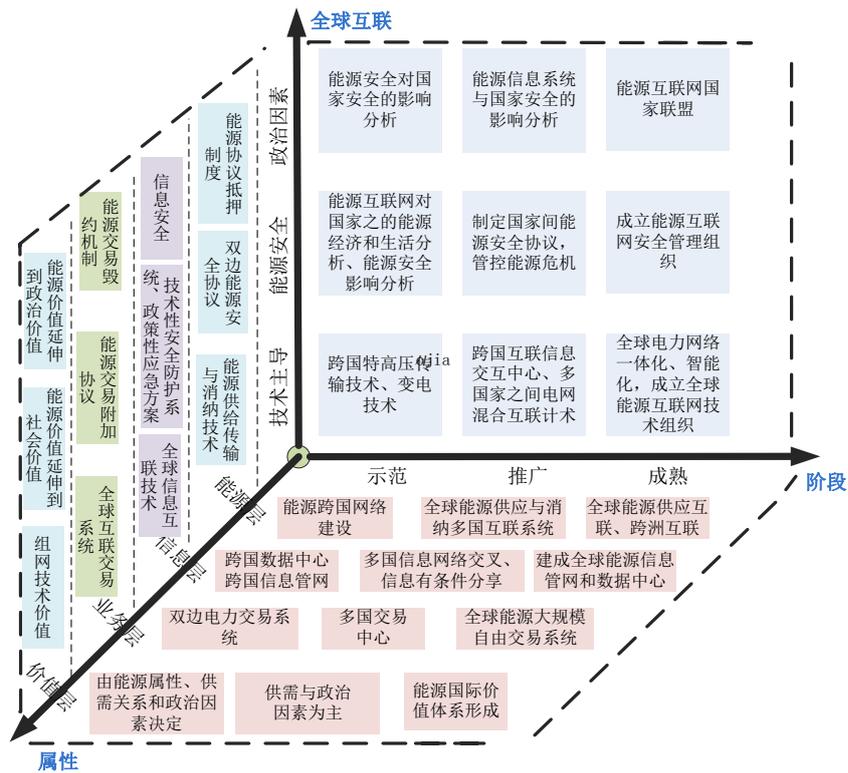


图 6.2 全球能源互联网演进与发展

## 6.2 技术发展趋势

国内外的研究与产业界工作者在能量互联网的架构、运行策略、关键新技术和应用网络研究与建设等方面取得了大量探索和进展。随着信息技术和能源技术的稳步发展，能源互联网产业化深度发展，朝着广泛互联、绿色能源、高度智能方向发展，这是未来的趋势。结合国内外最新研究成果和产业进展，如下五个方面将是能源互联网未来发展与应用的特征与趋势。

第一，能源互联网底层架构多元化。

一般而言，能源互联网在组网结构上包括局域能源微网和广域主干网。在微网层面，它需要根据微网的电力生产源情况、储能装置布局情况和负载差异等。一个能源微网内部，由于存在大规模能源生产源和复杂的电网负载，需要在能量路由器内部同时具备储能和小规模数据中心，这有利于能量路由器管理复杂的能源接入和消费。对于主干网层面的能量路由器而言，它需包括一个大数据中心和高压变电系统。大数据中心存储多个微网的运行参数，为骨干网路由决策提供依据。因此，局域微网和广域骨干网具有不同架构特点。总体而言，底层能源互联网尚未形成标准的架构体系，需要依据网络内的电力生产、传输、存储、协同和消费等特点，综合设计能量路由器的物理载体和控制方法，这将会是未来一个阶段的研究热

点。

## 第二，基于大数据技术的能源互联网能量管理策略。

大数据技术应用范围非常广阔。在能量路由器应用中，由于接入设备通常需要具备即插即用、能量双向流动和能量区域自治等特点，使得系统的快速响应性和稳定性要求较高。基于大数据技术的机器学习和预测控制等方法，可用来解决和提高这方面的性能。以微网新能源接入为例，当一个能源互联微网对大量的新能源和负载进行能量管理时，新能源的突然接入必然会对路由系统的功率平衡产生冲击，此时，基于微网大数据的学习和预测方法已经准备好的路由方案，使得新能源的接入过程变化平滑。

## 第三，网络暂态性能。

目前，能源互联网的研究还处于理论研究和实验阶段，系统的暂态性能处于较低水平。对能源互联网的信息化水平和智能化程度而言，信息检测速度和智能开关的响应速度等瞬时性尚有不足。以电力能源为例，公共母线的电压稳定能力和路由切换时的功率平衡能力有待提高。主动配电技术和需求侧响应技术的应用也需要较高的能量路由器暂态性能。快速检测、快速决策和快速执行是保障路由器暂态性能的基本途径。因此，研究高性能的信息检测方法和仪器，高性能计算和决策系统以及高速响应电力电子器件将是未来的重要研究内容。

## 第四，广域能源互联系统。

从应用需求侧来看，能源互联网大体分为局域互联网络的低压类和能源广域互联的高压类。低压类能源网络是目前已经实验展开的示范工程系统，它主要面向新能源的接入和局域消纳应用，其储能规模和数据中心规模都较小。由于接入设备的种类和数量众多，使得系统复杂。广域能源路由系统的接入单元是局域微网，主要解决大区域的电力能量失衡问题，目前尚未工程试验开展相关探索。广域能源互联系统的储能和数中心规模庞大，也可以直接接入庞大的新能源电源点。对于广域系统而言，外延的信息功能将变得非常重要，这些信息对能源的安全性、广域能源规划和社会生活等产生深远影响。因此，广域能源网络的进一步研究将包括信息技术、能源技术和社会外延三个方面。

## 第五，标准化与个性化协同。

类似于电力行业的设备标准，随着能源互联网的逐步推广，将形成一系列标准技术。依据能源互联网的应用需要，对应于能源互联网分层分级的特点，它也将分层分级标准化。一般地，可以划分为局域能源互联网技术标准（微网、城市互联）和广域能源互联网技术（国家互联、全球互联）标准，其功能具有所在层级的应用特征。在同一层级内部，在不同的自然地域、不同的城市功能区块会产生多样化的接入需求和消纳需求。同一层级内，会基于已有标准产

生新的个性化规划设计需求。因此,能源互联网的发展会呈现出标准化与个性化协同的特征,这将是未来标准化研究的一个趋势。

## 参考文献

- [1]HUANG A Q. FREEDM System – A Vision for the Future Grid [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting,2010:1-4.
- [2]HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System:The Energy Internet [J]. Proc. the IEEE,2011,12,17, Page:133-148.
- [3]XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy Router:Architectures and Functionalities toward Energy Internet [C]// Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications,2011:31-36.
- [4] PERROD P F,GEIDL M, KLOKL B, et al. A Vision of Future Energy Networks[C]. Proc. Power Engineering Society Inaugural Conf. and Expo. in Africa, 2005:13-17.
- [5] GEIDL M,KLOKL B, KOEPEL G,et al. Energy Hubs for the Futures [J]. IEEE power & Energy Magazine, 2007(1):24-30.
- [6]GHASEMI A, HOJIAT M, JAVIDI M H. Introducing a New Framework for Management of Future Distribution Networks using Potentials of Energy Hubs [C]. Proc. 2nd Iranian Conf. on Smart Grids, 2012:1-7.
- [7]SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and Optimization of Renewables: Applying the Energy Hub Approach [C]. Proc. Int. Conf. on Sustainable Energy Technologies, 2008:83-88.
- [9] ZONG Sheng,HE Xiangning,WU Jiande,et al. Overview of Power Electronics Based Electrical Energy Router. Proceedings of the CSEE, 2015, Vol.35(18), pp.4559-4570.
- [10] Bifaretti S,Zanchetta P,Watson A,et al.Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management[J].IEEE Trans.Smart Grid,2011,2(2):231-243.
- [11] Watson A J,Dang H Q S,Mondal G,et al.Experimental implementation of a multilevel converter for power system integration[C]. Proceedings of IEEE ECCE 2009.San Jose,CA,USA,2009.
- [12] Lai Jih-Sheng,Maitra A,Mansoor A,et al.Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications[C].Conference Record of Industry Applications Conference.Hong Kong,2005.
- [13] ArindamMaitra,Ashok Sundaram,Mahesh Gandhi,et al.Intelligent universal transformer design and applications[C].Electricity Distribution-Part 1 of CIRED 2009.Prague,Czech,2009.
- [14] Qing Duan,Chunyan Ma,Wanxing Sheng, et al. Research on power quality control in distribution grid based on energy router.2014 International Conference on Power System Technology, Oct, 2014,pp.2115-2121.
- [15]LIU Yingshu, MA Chuan.The Power Router Based on Hybrid AC/DC Microgrid Framework. Modern Electric Power, 2015, Issue 01, pp.13-18.
- [16] Jianhua Zhang,Wenye Wang,Bhattacharya. Architecture of Solid State Transformer-based Energy Router and Models of Energy Traffic.2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Jan. 2012, pp.1-8.
- [17]J. Cao, K. Meng,J. Wang,et al. Energy Internet and Energy Routers (in Chinese). SCIENTIA SINICA Informationis, 44(6), 714-727, 2014.
- [18]毛承雄,范澍,王丹等.电力电子变压器的理论及其应用( I ).高电压技术,2003, Vol.29(10), pp.4-6.
- [19]W.McMurray .Power converter circuits having a high-frequency link [P].U.S. Patent 3517300,June 23,1970
- [20]Manjrekar.Madhav D, Kieferndorf.Rick, Venkataramanan.Giri .Power Electronic Transformers for Utility Applications. Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2000, Vol.4, pp.2496-2502.
- [21]Ronan Jr., Edward R., Sudhoff. et al.Application of power electronics to the distribution transformer. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2000, Vol.2, pp.861-867.
- [22] 崔艳艳,毛承雄,陆继明.基于电力电子变压器的配电网无功电压优化控制. 2006. Classification: TM727;TM714.3.

- [23] Zhao T,Wang G,Bhattacharya S,et al.Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):1523-1532.
- [24]Zhao T F. Design and Control of a Cascaded H-Bridge Converter based Solid State Transformer (SST). North CarolinaState: North Carolina State University, 2010. 20–21.
- [25] ZhaYabing,Zhang Tao,Huang Zhuo,et al.Analysis of energy internet key technologies[J] . Science China Information Sciences,2014,44(6):702-713(in Chinese).
- [26] Huber J E,Kolar J W.Common-mode currents in multi-cell solid-state transformers[C]//Proceedings of Power Electronics Conference (ECCE Asia).Hiroshima,Japan,May 2014.
- [27] Grider D,Das M,Agarwal A,et al.10 kV/120 A SiC DMOSFET half H-bridge power modules for 1 MVA solid state power substation[C]//Proceedings of IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS).Alexandria.
- [28] Liu Jinhui ,Zhang Mingrui ,Jin Xin.Research on the Solid State Transformer Applied in FREEDM Microgrid<sub>SEP</sub>.电气自动化, 2010, Vol.32(6), pp.48-50.
- [29] Wang Gangyao , She Xu , Wang Fei.et al.Comparisons of different control strategies for 20 kVA solid state transformer. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Sept. 2011, pp.3173-3178.
- [30] LIU Wenhua, LIU Guowei, ZHAO Yuming, YAO Senjing. High-frequency-link DC Solid State Transformers for Flexible DC Distribution. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.
- [31] Seon-Hwan Hwang ,Xiaohu Liu , Jang-Mok Kim , Hui Li.Distributed Digital Control of Modular-Based Solid-State Transformer Using DSP+FPGA.IEEE Transactions on Industrial Electronics, Feb. 2013, Vol.60(2), pp.670-680.
- [32] CAO Jie-wei , MAO Cheng-xiong , LU Ji-ming , FAN Shu. Improving power system dynamic characteristics with power electronic transformer.电力自动化设备, 2005, Vol.25(4), pp.65-68.
- [33]陈芬,陆继明,毛承雄.基于电子电力变压器的最优潮流控制.Classification: TM411 ; TM744.1.
- [34]张明锐,王之馨,黎娜.下垂控制在基于固态变压器的高压微电网中的应用. 电力系统自动化, 2012, 36(14):186-192.
- [35]唐西胜,张国伟,李宁宁等.用于分布式发电的能量路由器:中国,CN201110268090.9. 2012-01-11.
- [36]刘迎澍,李冰,杨凯新.一种电能路由器:中国, CN201210261558.6.2012年11月14日.
- [37]刘迎澍,李志超,安笑蕊.具备多种供电方式的电能路由器:中国, CN103248068A. 2013年8月14日.
- [38]段青,盛万兴,孟晓丽等.一种基于信息物理系统融合的能量路由器:中国, CN201410236502.4. 2014年8月6日.
- [39]孙秋野,张化光,陈磊等.一种应用于能源互联网的能量路由器装置:中国, CN201510082066.4. 2015年6月3日.
- [40]冯高辉,袁立强,赵争鸣等.具有级联模块电压自动平衡电路的能量路由器:中国, CN201510253119.4. 2015年8月12日.
- [41]严俊,赵立飞. 储能技术在分布式发电中的应用[J].华北电力技术,2006(10):16-19.
- [42] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等.基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统, 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
- [43]Yu M L,Rexford J,Freedman M J,et al.Scalable flow-based networking with DIFANE [C]// Special Interest Group on Data Communication,New Delhi,India,2010.
- [44] Casado M,Freedman M J,Pettit J,et al.Ethane:taking control of the enterprise[C]// Special Interest Group on Data Communication,Kyoto,Japan,2007.
- [45]Tootoonchian A,Gorbunov S,Ganjali Y,et al.On controller performance in software-defined networks[C]// USENIX Workshop on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services, San Jose,USA,2012.

- [46]Gude N,Koponen T,Pettit J,et al.NOx:towards an operating system for networks[J] . ACM SIGCOMM Computer Communication Review,2008,38(3):105-110.
- [47]Cai Z,Cox A L,Ng T S E.Maestro:a system for scalable openflow control[R].Houston:Rice University,2010.
- [48]慈松,李宏佳,陈鑫,等.能源互联网重要基础支撑:布式储能技术的探索与实践[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):762-773.
- [49]余贻鑫,秦超.智能电网基本理念阐释[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):694-701.
- [50] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World[M].New York: Palgrave Macmillan,2011.
- [51]CAO J,YANG M. Energy Internet-Towards Smart Grid 2.0[C]. Proc 4th Int Conf on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013.
- [52]HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM)System: The Energy Internet [C]. Proc. the IEEE,2011,12,17:133 -148.
- [53]XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy Router:Architectures and Functionalities toward Energy Internet [C]. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, 2011:31-36.
- [54]张建华,苏玲,陈勇,等.微网的能量管理及其控制策略[J].电网技术,2011,35(7):24-28.
- [55]刘东,陈云辉,黄玉辉,等.主动配电网的分层能量管理与协调控制[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5500-5506.
- [56]江 渝,黄 敏,毛 安,等.孤立微网的多目标能量管理[J].高电压技术,2014,40(11):3519-3527.
- [57]张涛,张福兴,张彦.面向能源互联网的能源管理系统研究[J].电网技术,2016,40(1):146-155.
- [58] 任光,杨刚,华昊辰,等. 基于链式路由网络的能源接入管理策略研究[J].计算机研究与发展.2017,54(4): 695-702.
- [59] Xinyang Han,Fang Yang,Cuifen Bai,et al. An Open Energy Routing Network for Low-voltage Distribution Power Grid[C]. First IEEE International Conference on Energy Internet, Beijing, 2017, pp.320-325.
- [60] 曹军威,杨明博,张德华等.能源互联网-信息与能源的基础设施一体化[J].南方电网技术,2014, 8(4): 1-10.
- [61] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19): 1-8.
- [62] 王冰玉,孙秋野,马大中等. 能源互联网多时间尺度的信息物理融合模型[J]. 电力系统自动化,2016, 40(17): 13-21.
- [63] 张勇军,陈泽兴,蔡泽祥,等. 新一代信息能源系统:能源互联网[J].电力自动化设备,2016,36 (9): 1-16.
- [64] 林为民,余勇,梁云等. 支撑全球能源互联网的信息通信技术研究[J]. 智能电网. 2015,3(12): 1097 -1102.
- [65] 郭培源.电力系统自动控制新技术[M].北京:科学出版社,2001.
- [66] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网.电网与清洁能源[J],2009,25(1):7-11.
- [67] 周海明,刘广一,刘超群.能源互联网技术框架研究.中国电力[J],2014,47(11):140-144.
- [68] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化. 2014,38 (15):1-11.
- [69] 杨方,白翠粉,张义斌.能源互联网的价值与实现架构研究.中国电机工程学报[J].2015,35(14): 3495 -3502.
- [70] 陈启鑫,刘敦楠,林今.能源互联网的商业模式与市场机制(一),电网技术[J],2015,39(11): 3050-30 56.
- [71] 谭磊,陈刚.区块链2.0[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [72] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(4):481-494.
- [73] Swan M. Blockchain thinking: the brain as a decentralized autonomous corporation[J]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 2015, 34(4): 41-52.
- [74] Kraft D. Difficulty control for block chain-based consensus systems[J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2016,9(2): 397-413.
- [75] 张宁,王毅,康重庆,等.能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J].中国电机工程学报. 2016, 36(15):4011-4022.

[76] 倪琳娜,文福拴,尚金成,等. 能源互联网环境下的信息经济学初探[J].电网技术.2016,40(6): 1612 -1619.

## 致 谢

博士后经历是我人生中一个重要阶段，我有幸赶上了能源互联网发展的浪潮，把两年的研究时间都投入到了这个极具前景的行业中。通过清华大学信息技术研究院工作平台，我广泛接触了能源行业的前沿课题与研究热点，并与国内外许多专家学者、企业界人士进行了交流。我觉得收获匪浅。

在曹军威研究员的带领下和指导下，我较全面地展开了博士后的项目研究，取得了较为丰硕的研究成果。感谢曹军威老师。

在清华大学两年的工作生活中，得到了许多老师和朋友们的关照和指导，他们是吉吟东老师、邢春晓老师、阚淑文老师、陈震老师、杨维康老师、黄春梅老师、路海明老师等。感谢他们！

在实验室，与一同做科研的博士后、工程师和研究生等相处融洽，大家经常讨论科研、技术和社会热点等，科研生活丰富而愉悦。

感谢清华大学！

## 博士后期间研究成果

- [1]第一作者，基于链式路由网络的能源接入管理策略研究，计算机研究与发展，2017.4（EI）
- [2]Corresponding author, An Open Energy Routing System Based on Networking Linkage Mechanism, 1st IEEE International Conference on Energy Internet (EI) 2017.04.
- [3]第一作者，开放架构下能源互联网新能源接入方法研究，南方电网技术（核心），2017年3月（增刊）
- [4]通讯作者，能源互联网路由网络结构与控制机制，计算机科学与探索（核心），2017年3月。
- [5]第二作者，Power Quality Disturbance Recognition Based on Fitting Redundant Lifting Wavelet Packet and Energy Analysis. 1st IEEE International Conference on Energy Internet (EI) 2017.04.
- [6]执笔，能源互联网价值传递模式及与区块链技术融合研究，已完成待投。
- [7]执笔，能源路由器母线电压稳压方法，已完成待投。
- [8]执笔，能源路由器理论及技术的回顾与展望，已完成待投。
- [9]执笔，基于微网路由网络的能源区块链研究，已完成待投。
- [10]执笔，一种能源互联网价值估算的方法和装置，发明专利，已申请。
- [11]执笔，一种能源路由器母线电压稳压方法，发明专利，已申请。
- [12]执笔，一种基于能源路由器网络的能源区块链，发明专利，已申请。
- [13]执笔，一种能量路由器中热插拔功率平衡控制方法及系统，发明专利，已申请。