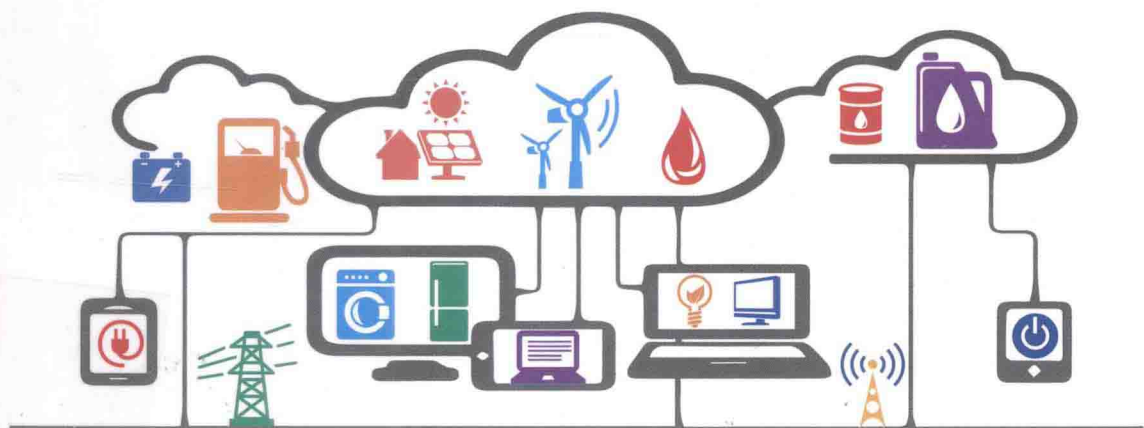


# 能源互联网 发展研究

能源互联网研究课题组 著



清华大学出版社

# 能源互联网 发展研究

能源互联网研究课题组 著

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

能源互联网是一种互联网与能源生产、传输、存储、消费，以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态。能源互联网是推动我国能源革命的重要战略支撑，对提高可再生能源比重，促进化石能源清洁高效利用，提升能源综合效率，推动能源市场开放和产业升级，形成新的经济增长点，提升能源国际合作水平具有重要意义。

本书全面介绍了国内能源互联网的发展现状及进展，共分4篇，第1篇为战略篇，第2篇为技术篇，第3篇为应用篇，第4篇为机制篇，分别从发展战略、关键技术、实践应用和机制模式等层面对能源互联网进行了系统的阐述和探讨。

本书可供政府部门、能源行业、互联网行业及金融行业的从业人员和高校的相关学生、研究人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

### 图书在版编目（CIP）数据

能源互联网发展研究 / 能源互联网研究课题组著. —北京：清华大学出版社，2017  
ISBN 978-7-302-45259-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 245099 号

责任编辑：冯志强

封面设计：欧振旭

责任校对：胡伟民

责任印制：李红英

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者：北京嘉实印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：21.5 字 数：540千字

版 次：2017年1月第1版 印 次：2017年1月第1次印刷

印 数：1~4000

定 价：79.80元

---

产品编号：070019-01

# 本书编委会

## 主编：

曾 嵘 清华大学能源互联网创新研究院院长

## 副主编：

高 峰 清华大学能源互联网创新研究院常务副院长

屈 鲁 清华大学能源互联网创新研究院博士后

陈启鑫 清华大学能源互联网创新研究院副院长

高文胜 清华四川能源互联网研究院常务副院长

欧振旭 清华大学出版社特邀编辑

## 编委（按姓氏笔画排序）：

马君华 史翊翔 孙宏斌 孙 捷 刘建明 刘敦楠 何继江

余占清 张 靖 张 涛 吴辰晔 林 今 欧文凯 周庆捷

果 岩 杨浔英 赵争鸣 郑泽东 洪 涛 胡 军 彭 澎

胡泽春 夏 清 郭庆来 郭焦锋 柴麒敏 康重庆 曹军威

曹 寅 程 林 温 琳 慈 松 廖 宇

# 序 言

能源是人类生存和发展的重要基石，是社会经济运行的动力和基础。每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新，推动着人类社会的发展和进步。目前，第三次工业革命正在世界范围内发生，而能源互联网是第三次工业革命的核心之一，是未来能源行业发展的方向。

能源互联网的提出和发展具有深刻的环境、经济、社会、技术和政策等诸多驱动力，既是能源系统自身发展的趋势，也有外部对能源系统提出的迫切需求。随着传统化石能源的逐渐枯竭以及能源消费引起的环境问题日益恶化，未来人类发展与传统能源结构不可持续的矛盾不断尖锐，世界范围内对能源供给与结构转变的需求愈发高涨，从而催生新型能源结构与供给方式的提出。以深入融合可再生能源与互联网信息技术为特征的能源互联网的提出，将是实现能源清洁低碳替代和高效可持续发展的关键所在。

发展能源互联网将从根本上改变对传统能源利用模式的依赖，推动传统产业向以可再生能源和信息网络为基础的新兴产业转变，是对人类社会生活方式的一次根本性革命。我国《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中提出“将推进能源与信息等领域新技术深度融合，统筹能源与通信、交通等基础设施网络建设，建设‘源-网-荷-储’协调发展、集成互补的能源互联网”。

为全面介绍国内能源互联网的发展现状及进展，系统阐述能源互联网的发展战略、关键技术、实践应用和机制模式等，总结我国在能源互联网相关领域中的研究成果，为以后我国能源互联网发展及建设提供有益参考，清华大学能源互联网创新研究院组织专家编写了《能源互联网发展研究》一书。

本书的出版，凝聚了我国能源领域众多专家和广大科研人员的汗水和心血，希望更多关心能源互联网的读者、有志投身于能源互联网的学者和工程技术人员，能从本书中汲取有用的知识，共同打造我国能源互联网的美好未来！

中国科学院院士 周孝信

2016年8月31日

于北京

# 编者按

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础，是国民经济的基础产业和战略性资源，对保障和促进经济增长与社会发展具有重要作用。当前，融合信息技术、互联网技术和新能源技术的新一轮能源革命，正在引领第三次工业革命的浪潮。作为能源革命战略支点的能源互联网，是将互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态。

2016年2月29日，国家能源局发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，能源互联网将在能源技术、生产、供应等多个环节激发“链式变革”，是推动我国能源革命的必然选择。

为了加深大众对能源互联网的认知，清华大学能源互联网创新研究院组织专家编写了《能源互联网发展研究》一书。由于能源互联网涵盖内容非常广泛，本书主要从发展战略、关键技术、实践应用和机制模式等角度，对能源互联网的相关问题展开论述，希望能对读者认知能源互联网带来帮助，为推动我国能源互联网的发展做出贡献。

本书的编撰得到了国家能源局能源互联网发展研究课题组的大力支持，编委会成员和作者均做了大量工作，在此深表谢意。文章仅代表作者观点，不代表作者所在机构观点。此外，限于编者和作者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者联系邮箱：[eri@tsinghua.edu.cn](mailto:eri@tsinghua.edu.cn)

编委会

2016年8月31日

于清华园

# 目 录

## 第 1 篇 战略篇

能源互联网引论.....	曾嵘	2
能源互联网与能源大数据战略.....	胡军	12
能源互联网与智能制造 2025——标准化促进电力装备制造业提质增效.....	果岩	18
能源互联网与智慧城市.....	马君华	25
能源互联网与国家能源安全.....	张涛 李洁	31

## 第 2 篇 技术篇

能源互联网关键技术概述.....	高峰	38
多能协同的规划设计.....	程林	50
信息物理能量系统：能量和信息融合技术.....	慈松	60
能源与信息基础设施的协同.....	曹军威	67
能源互联网的关键设备——能源路由器.....	曹军威	73
新型能源网络——直流电网技术.....	余占清	82
能源互联网与可再生能源消纳.....	张宁 康重庆 王毅 杜尔顺	88
能源互联网与全成本电价.....	钟海旺 夏清	99
能源互联网下的信息与计算.....	吴辰晔 于洋	115
能源转化的关键设备——热电气冷，与可再生能源协同互联网.....	史翊翔	120
ICT 与能源互联网.....	刘建明	127
能源互联网+ICT.....	慈松	135
能源互联网标准.....	马君华 张东霞 刘永东	140
让能源无处不在——无线电能传输技术及其应用 .....	赵争鸣 贺凡波 张艺明 陈凯楠 袁立强	147
能源互联网与绿色交通.....	郑泽东	160

## 第3篇 应用篇

美国能源互联网实践·····	高文胜 张靖	168
能源互联网与“全民光伏战略”·····	欧文凯 张海翔	178
能源互联网与风电光伏智能管理·····	孙捷	186
能源互联网与分布式储能·····	慈松	192
能源互联网与集中式储能·····	胡泽春 丁华杰	198
车电分离、自主换电·····	慈松	205
能源互联网与电动汽车发展·····	胡泽春 何继江 张洪财	211
能源互联网与氢经济·····	林今 张亦弛	217
能源互联网与电力需求侧管理·····	周庆捷	221
能源互联网与虚拟电厂·····	周庆捷	232
能源互联网和碳交易市场·····	柴麒敏	247
能源互联网的实施效益评估·····	郭庆来 何继江 曹寅	253
天然气分布式能源：“互联网+化石能源”的先行者·····	洪涛	262
多能协同的新一代能源网络·····	郭庆来 孙宏斌 潘昭光	271

## 第4篇 机制篇

支撑能源互联网的市场机制·····	陈启鑫 王毅	278
能源互联网与能源体制改革·····	刘敦楠	283
能源互联网商业模式与实现·····	陈启鑫 王毅	287
能源互联网的市场形态和商业价值链革命·····	曹寅	294
欧洲能源互联网的发展·····	廖宇	298
“互联网+”智慧能源催生天然气新业态和新体制·····	郭焦锋	305
“互联网+”煤炭：行业供给侧改革新平台·····	温琳	311
当“卖油郎”牵手“互联网+”——小案例分享，大思维拓展 ·····	杨浚英 闫小莉 王剑 郭焦锋	316
培育绿色能源灵活交易市场模式·····	彭澎	322
互联网思维对能源互联网的借鉴·····	曹军威	327



# 第 1 篇 战略篇

- ▶▶ 能源互联网引论
- ▶▶ 能源互联网与能源大数据战略
- ▶▶ 能源互联网与智能制造 2025——标准化促进电力装备制造业提质增效
- ▶▶ 能源互联网与智慧城市
- ▶▶ 能源互联网与国家能源安全

# 能源互联网引论

清华大学 曾嵘

## 1 引言

能源是人类生存和发展的重要基石，是社会经济运行动力和基础。每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新，推动着人类社会的发展和进步。目前，第三次工业革命正在世界范围内发生，而能源互联网是第三次工业革命的核心之一，是未来能源行业发展的方向。

发展能源互联网将从根本上改变对传统能源利用模式的依赖，推动传统产业向以可再生能源和信息网络为基础的新兴产业转变，是对人类社会生活方式的一次根本性革命。《国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》提出，“将推进能源与信息等领域新技术深度融合，统筹能源与通信、交通等基础设施网络建设，建设‘源-网-荷-储’协调发展、集成互补的能源互联网”。当前我国正处在能源革命的关键时期，国家能源局《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》的发布，将在能源技术、生产、供应等多个环节激发“链式变革”，是推动我国能源革命的必然选择。

## 2 能源互联网的发展动态与现状

能源互联网作为当前国内外一个全新的研究热点，多个国家的科研机构已经开展了初步的研究工作，以力图在此次技术革命中占领先机，并取得一定成果。

### 2.1 国外能源互联网的发展动态与现状

2004年 *The Economist* 发表了 *Building the Energy Internet*，首次提出建设能源互联网，

通过借鉴互联网自愈和即插即用的特点,将传统电网转变为智能、响应和自愈的数字网络,支持分布式发电和储能设备的接入,以减少大停电及其影响。此后国际上针对能源互联网进行了广泛的研究,着力研究下一代能源系统。2011年,美国学者杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》中提出能源互联网是第三次工业革命的核心之一,使得能源互联网被更多人关注,产生了较大影响。下面对欧盟、美国、日本等提出的能源互联网构想和相关项目进行介绍、分析。

2008年12月德国联邦经济和技术部发起了一个技术创新促进计划,以信息通信技术(Information and Communication Technology, ICT)为基础构建未来能源系统,着手开发和测试能源互联网的核心技术。之后,德国联邦政府发起E-Energy,并将其作为国家性的“灯塔项目”,旨在推动基于ICT技术的高效能源系统项目,致力于能源的生产、输送、消费和储能各个环节之间的智能化。

2011年欧洲启动了未来智能能源互联网(Future Internet for Smart Energy, FINSENY)项目,该项目的核心在于构建未来能源互联网的ICT平台,支撑配电系统的智能化;通过分析智能能源场景,识别ICT需求,开发参考架构并准备欧洲范围内的试验,最终形成欧洲智能能源基础设施的未来能源互联网ICT平台。

Vision of Future Energy Networks项目由瑞士联邦政府能源办公室和产业部门共同发起,其重点是研究多能源传输系统的利用和分布式能源的转换和存储,开发相应的系统仿真分析模型和软件工具。该项目提出未来能源互联网包含两个元素,一是通过混合能源路由器(hybrid energy hub)集成能源转换和存储设备;二是通过能源内部互联器(energy interconnector)实现不同能源的组合传输。

2008年,美国国家科学基金项目在北卡州立大学启动“未来可再生电能传输与管理系统”(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System, FREEDM),并建立了FREEDM系统研究院,由17个科研院所和30余个工业伙伴共同参与。该项目重点研究适应高渗透率分布式可再生能源发电和分布式储能并网的高效配电系统,并称之为能源互联网(energy internet)。FREEDM项目的核心在于将电力电子技术和信息技术引入电力系统,效仿通信网络中路由器的概念,提出能源路由器的概念并实施初步开发,以希望在未来的配电网层面构建能源互联网,实现分布对等的系统控制与交互。

2010年,日本启动“智能能源共同体”计划,开展能源和智能电网等领域的研究。2011年,日本开始推广“数字电网”计划,该计划是基于互联网的启发,构建一种基于各种电网设备的IP来实现信息和能量传递的新型能源网。通过提供异步连接、协调局域网内部以及不同局域网系统的数字电网路由器,并将其与现有电网及互联网相连,通过相当于互联网地址的“IP地址”识别发电设备及用电设备在内的装置,由此进行统筹管理与能量

调度。

由上，尽管各方认知方式的侧重点有所不同，但都是将互联网技术运用到能源系统，把一个集中式、单向的、生产者控制的能源系统，转变成大量分布式辅以较少集中式的新能源与更多的消费者互动的能源系统，以提高可再生能源的比重，实现多元能源的有效互联和高效利用。

## 2.2 国内能源互联网的发展动态与现状

早在20世纪80年代，清华大学前校长高景德便提出了CCCP（现代电力系统是计算机、通信、控制与电力系统以及电力电子技术的深度融合）的概念。近年来，国内快速发展的智能电网也不断强调信息技术与现代电网的紧密结合。2012年8月首届中国能源互联网发展战略论坛在长沙举行，对能源互联网概念进行了初步介绍。2013年12月，北京市科委组织“第三次工业革命”和“能源互联网”专家研讨会。2014年2月，国家能源局委托江苏现代低碳技术研究院开展“能源互联网战略研究”课题。2014年6月，中国电力科学研究院牵头承担国家电网公司基础前瞻性项目“能源互联网技术架构研究”，着力构建未来能源互联网架构，搭建相应的能源互联网研究平台。中国科学院学部开展“我国新一代能源系统战略研究”课题，提出了新一代能源系统的理念。

随着党的十八大提出能源革命战略、2015年政府工作报告推出“互联网+”行动计划，能源与互联网正不断实现深度融合，极大地促进了国内能源互联网的发展。2015年4月，国家能源局首次召开能源互联网工作会议。2015年4月，由清华大学发起并组织，以“能源互联网：前沿科学问题与关键技术”为主题的香山科学会议在北京香山饭店召开，为我国能源互联网的发展建言献策，在国内外产生了重要影响。2015年6月，国家能源局开展“国家能源互联网行动计划战略研究”，并将其作为国家“互联网+”行动计划的重要载体，由清华大学牵头承担其中能源互联网的形态特征、关键技术和技术标准、商业模式、效益评价等5个重点课题。2016年2月，国家发改委、能源局、工信部联合发布国家能源互联网纲领性文件《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，提出了能源互联网的路线图，明确了推进能源互联网发展的指导思想、基本原则、重点任务和组织实施。2016年3月，国家“十三五”规划纲要明确提出“将推进能源与信息等领域新技术深度融合，统筹能源与通信、交通等基础设施网络建设，建设‘源-网-荷-储’协调发展、集成互补的能源互联网”。2016年4月，国家发改委、能源局正式发布《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》，为未来我国能源互联网技术的发展制定了行动计划。目前，中电联（中国电力企业联合会）牵头并组织清华大学等高校和科研机构正在开展国家能源互联网系

统标准的制定。

此外，清华大学、国防科技大学、华北电力大学、天津大学、中国电力科学研究院等高校与科研机构，从能源互联网的基本概念及形态、发展模式及路径、技术框架及拓扑、关键技术分析等方面展开了广泛的研究。

从目前的情况来看，能源互联网已经受到了国内各级政府和研究机构的高度重视，能源互联网的理念与技术也已在国内引起了越来越广泛的关注，正逐渐由以基础性研究为主的概念阶段向以应用性研究为主的起步阶段转变。

### 3 能源互联网的形态与特征

能源互联网理念一经提出，国内外不同行业和领域纷纷开展了有益的探索研究。尽管各方认知方式的侧重点有所不同，但都是将互联网技术运用到能源系统，以提高可再生能源的比重，实现多元能源的有效互联和高效利用。

#### 3.1 能源互联网的形态

本文认为能源互联网可以分为三个层级：① 物理基础（多能互联能源网络），② 实现手段（信息物理能源系统），③ 价值实现（创新模式能源运营）。

##### 3.1.1 物理基础：多能互联能源网络

能源互联以电力网络为主体骨架，融合气、热等网络，覆盖包含能源生产、传输、消费、存储、转换的整个能源链。能源互联依赖于高度可靠、安全的主体网架（电网、管网、路网）；具备柔性、可扩展的能力；支持分布式能源（生产端、存储端、消费端）的即插即用。

能源转换是多能互联的核心，其包括不同类型能源的转换（切换）以及不同承载方式的能源转换（变换）。不同类型的能源转换（切换）在能源生产端除了通常的利用发电机等各种技术手段将一次能源转换成电力二次能源外，还包括如电解水生成氢燃料，电热耦合互换等多种形式；在能源消费端，能源转换（切换）是指能源消费者可以根据效益最优的原则在多种可选能源中选择消费。不同类型能源转换的基本示意图如图 1 所示。不同承载方式的能源转换（变换）主要体现在能源传输环节，如在天然气网中，有液态和气态之间的转换。

能源存储在多能互联的环境下必将愈发凸显其重要地位。能源存储也不再局限于电能的存储与释放，冰蓄冷、熔盐蓄热、液态空气、氢气等均是能源存储的发展方向。如果氢燃料电池以电动汽车等途径进入千家万户，氢气或液氢的存储将可以提供持续的清洁可控电能，成为分布式太阳能和风能的重要补充。

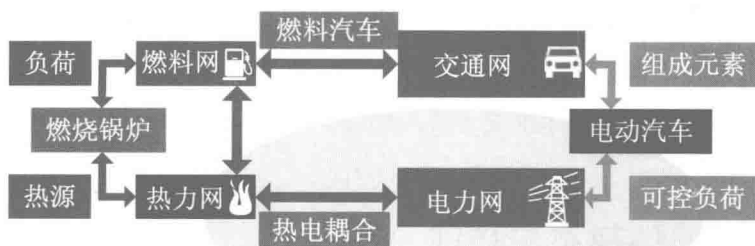


图1 不同类型能源的转换（切换）

能源传输本身也具有多样性，如可持续传输的电网、管网等方式，非连续传输的航运、火车、汽车等，因此能源互联网必将呈现出形态各异的实现方式。多能互联能源网络将首先实现能源局域网，以微电网技术为基础，将冷、热、水、气等网络互联协调，实现能源的高效利用，如图2所示。

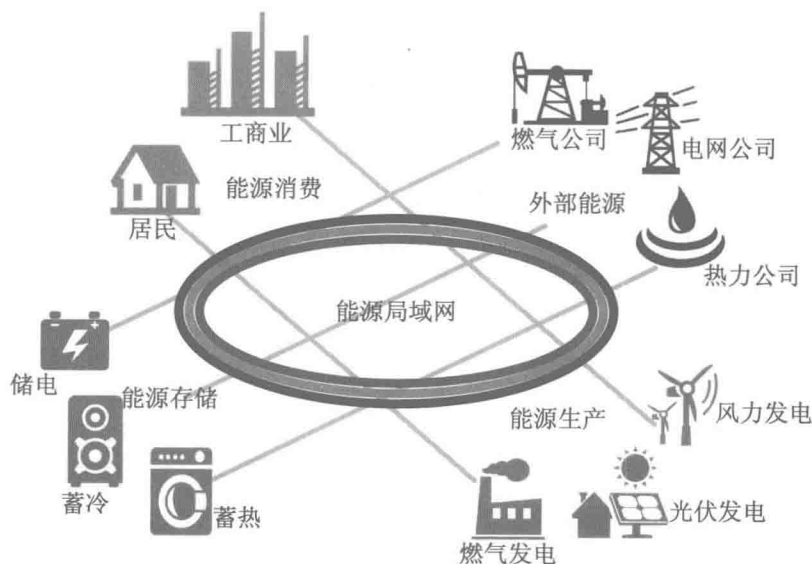


图2 能源局域网

以能源局域网为基本节点，以电网、管网为骨干网架，由点及面形成广域互联，即能源广域网。多能互联能源网络为整个能源链的能源互补、优化配置提供了物理基础，其整体效能的最大化离不开信息物理系统的融合。

### 3.1.2 实现手段：信息物理能源系统

物联网、大数据、移动互联网等信息技术的飞速发展，可为涵盖能源生产、存储、传输、转换和消费整个能源链条的效率、经济、安全提供有效支撑。智能电网在信息物理系统融合方面做了很多基础性的工作，实现了主要网络的信息流和电力流的有效结合。在能源互联网下，信息系统和物理系统将渗透到每个设备，并通过适当的共享方式使得每个参与方均能获取到需要的信息，如图3所示。信息物理融合的能源系统必将产生巨大的价值，第一阶段的价值体现在信息获取上；第二阶段的价值体现在优化管理上，通过多能协同优化和调度，可以从整个能源结构的角度实现社会总体效益最大化；第三阶段的价值体现在创新运营上，在信息开放、共享的基础上，运用互联网思维，创新商业模式，带动市场活力，实现经济飞跃。

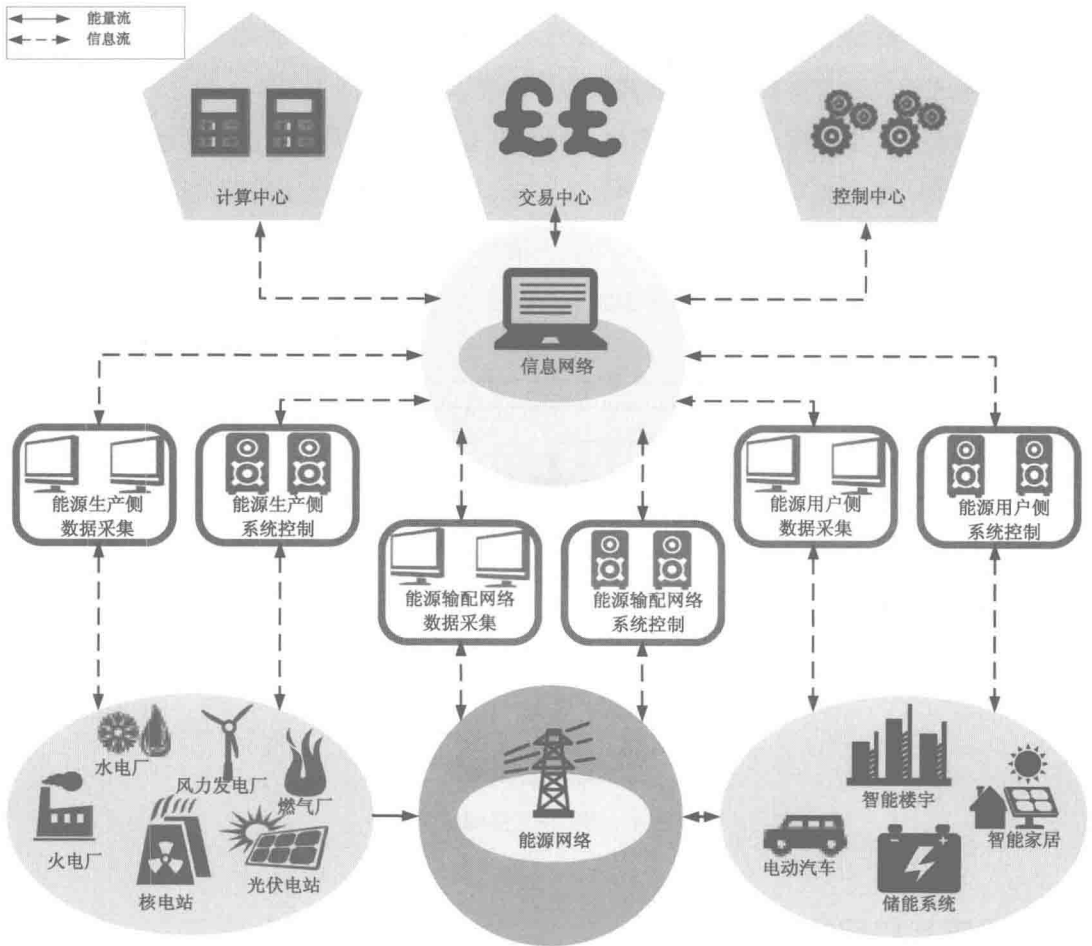


图3 信息物理能源系统基本示意图

### 3.1.3 价值实现：创新模式能源运营

创新模式能源运营要充分运用互联网思维，以用户为中心，实现业务价值。在具有活力的市场环境下，包括能源生产、传输、消费、存储、转换的整个能源链相关方均能广泛参与，必然会有一大批具有创新模式的能源企业脱颖而出，如能源增值服务公司、能源资产服务公司、能源交易公司、设备与解决方案的电子商务公司等，从而带动能源互联网的产业发展。

以能源消费环节为例，传统的产业价值模式是能源供应商给能源消费者提供能源、可靠性和通用服务，并从能源消费者获取收益。而在能源互联网环境下，除了能源、可靠性和通用服务外，能源供应商还可以为能源消费者提供节能服务、环境影响消减以及个性化服务，而能源消费者还可以在需要时反向为能源供应商提供能源、需求侧响应、本地化信息等，从而使得信息流和资金流从单向变为双向。另外，还可以有第三方为其提供各种服务平台，使得价值、信息和资金在这些平台上流转和交换，如能量交易平台、能量聚合服务平台等。

创新模式能源运营需要监管者能够致力于构建以传统电网为骨干，充分、广泛和有效地利用分布式可再生能源，满足用户多样化能源电力需求的一种新型能源体系结构与市场；为运营者提供一个能够与能源终端用户充分互动、存在竞争的能源消费市场，使其提高能源产品的质量与服务，赢得市场竞争；不仅为能源终端用户提供传统电网所具备的供电功能，还为其提供了一个可以进行各种能源共享的公共平台，如图4所示。

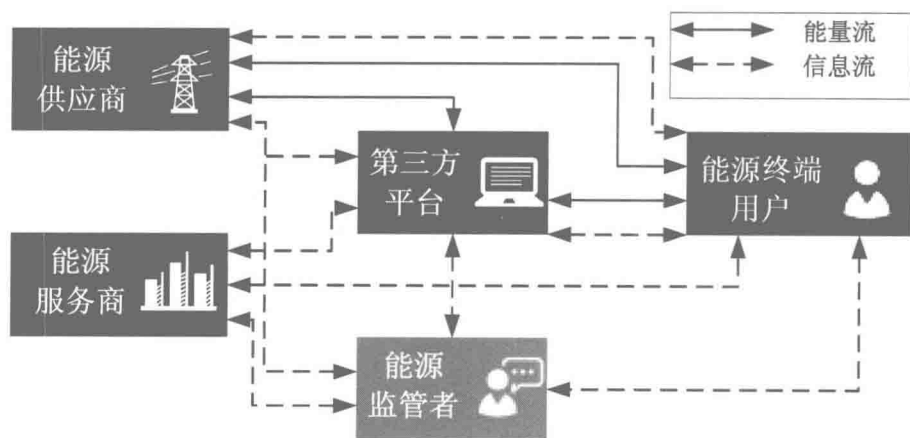


图4 创新模式能源运营

## 3.2 能源互联网的特征

在能源互联网上述三个形态层级的基础上，本文总结出能源互联网的6大特征：能源



协同化、能源高效化、能源商品化、能源众在化、能源虚拟化、能源信息化。

### 3.2.1 能源协同化

能源协同化通过多能融合、协同调度，实现电、热、冷、气、油、煤、交通等多能源链协同优势互补，提升能源系统整体效率、资金利用效率与资产利用率。

### 3.2.2 能源高效化

能源高效化主要着眼于能源系统的效益、效用和效能。通过风能、太阳能等多种清洁能源接入，保证环境效益、社会效益；以能源生产者、消费者、运营者和监管者等用户的效用为本，推动能源系统的整体效能。

### 3.2.3 能源商品化

能源商品化指能源具备商品属性，通过市场化激发所有参与方的活力，形成能源营销电商化、交易金融化、投资市场化、融资网络化等创新商业模式；探索能源消费新模式，建设能源共享经济和能源自由交易，促进能源消费生态体系建设。

### 3.2.4 能源众在化

能源众在化体现在能源生产从集中式到分布式到分散式实现泛在，能源单元即插即用、对等互联，能源设备和用能终端可以双向通信和智能调控。能源链的所有参与方资源共享、合作，将促进前沿技术和创新成果及时转化，实现开放式创新体系，推动跨区域、跨领域的技术成果转移和协同创新。

### 3.2.5 能源虚拟化

能源虚拟化是指借鉴互联网领域虚拟化技术，通过软件方式将能源系统基础设施抽象成虚拟资源，盘活如分散存在的铅酸电池储能存量资源，突破地域分布限制，有效整合各种形态和特性的能源基础设施，提升能源资源利用率。

### 3.2.6 能源信息化

能源信息化指在物理上把能量进行离散化，进而通过计算能力赋予能量信息属性，使能量变成像计算资源、带宽资源和存储资源等信息通信领域的资源一样，进行灵活地管理与调控，实现未来个性化定制的能量运营服务。