

# 控制与决策

Control and Decision

## 社区产消者能量分享研究综述

王燕舞, 崔世常, 肖江文, 施阳

引用本文:

王燕舞, 崔世常, 肖江文, 等. 社区产消者能量分享研究综述[J]. *控制与决策*, 2020, 35(10): 2305–2318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0343>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于交叉-变异人工蜂群算法的微网优化调度

Crossover-mutation based artificial bee colony algorithm for optimal scheduling of microgrid

*控制与决策*. 2020, 35(9): 2059–2069 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0506>

### 考虑平台网络外部性的分享经济中三方演化博弈分析

Evolutionary game analysis of three parties in sharing economy considering network externality of platform

*控制与决策*. 2020, 35(7): 1741–1750 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1296>

### 智能算法在含分布式电源配电网故障恢复的应用综述

Application of intelligent algorithms to service restoration of distribution network with distributed generations

*控制与决策*. 2019, 34(9): 1809–1818 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1272>

### 基于随机模型预测控制的含大规模风电接入的电力系统优化调度

Optimization and scheduling of power system stochastic model predictive control based optimization and scheduling for power system with large scale wind integrated

*控制与决策*. 2019, 34(8): 1616–1625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1418>

### 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望

Smart energy—Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system

*控制与决策*. 2018, 33(5): 938–949 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1632>

# 社区产消者能量分享研究综述

王燕舞<sup>1,2†</sup>, 崔世常<sup>1,2</sup>, 肖江文<sup>1,2</sup>, 施 阳<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074; 3. 维多利亚大学 机械工程系, 维多利亚市 V8W 3P6)

**摘要:** 随着可再生能源和智能电网技术的发展, 能源产消者作为一类新型终端用户, 已在能源优化与管理方面表现出更为主动灵活的作用, 对提高社区能源效率、提升能源经济性和改善本地配电网稳定性具有重要影响. 首先, 总结了常见的社区能源产消者类型及其特点, 指出其在智能电网需求侧实现能源优化的灵活性和潜在价值; 其次, 剖析了社区能量分享的典型模式, 归纳了各自的基本特征、优势与局限性; 然后, 在此基础上探讨了社区产消者能量分享涉及的能源数据预测方法、博弈问题均衡分析及分布式优化算法; 最后, 对社区产消者能量分享的前瞻性难点问题进行了展望, 以为相关研究提供参考.

**关键词:** 能源产消者; 能量分享; 模式设计; 博弈; 优化; 预测

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0343

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王燕舞, 崔世常, 肖江文, 等. 社区产消者能量分享研究综述[J]. 控制与决策, 2020, 35(10): 2305-2318.

## A review on energy sharing for community energy prosumers

WANG Yan-wu<sup>1,2†</sup>, CUI Shi-chang<sup>1,2</sup>, XIAO Jiang-wen<sup>1,2</sup>, SHI Yang<sup>3</sup>

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Control of Ministry of Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, Victoria V8W 3P6, Canada)

**Abstract:** With the development of renewable energy and smart grids techniques, energy prosumers, a new class of end consumers, behave more actively and flexibly in energy optimization and management. They have great influence on promoting the community energy efficiency, increasing the energy economics, and improving the stability of local distribution network. In this review, several common types of energy prosumers are introduced firstly along with their characteristics, and their flexibilities and potential values to energy optimization on demand side in smart grids are evaluated. Typical frameworks of community energy sharing are reviewed and their basic features are summarized, along with their advantages and limitations. Based on the analysis, certain closely related problems in energy sharing are discussed, including energy data prediction, equilibrium analysis for games, and distributed optimization. Finally, challenges in energy sharing problems are concluded to throw some light on the future research.

**Keywords:** energy prosumer; energy sharing; model design; game; optimization; prediction

## 0 引言

智能电网已成为当今社会能源战略需求. 作为一个能源消耗大国, 发展智能电网对调整我国能源结构、节能减排、应对气候变化具有重大意义. 由于各国国情不同、智能电网建设的驱动力不同, 截至目前, 智能电网的定义在学术界尚未完全统一. 美国能源部将智能电网描述为利用数字化技术改进电力系统(涵盖发电、输配电、用电, 包括分布式发电和分布式储能)的可靠性、安全性和运行效率. 欧盟对智能电

网的定义为可以智能化地集成所有入网用户(包括发电者、消费者和产消合一者)的行为和行动, 以保证电力供应的可持续性、经济性和安全性. 我国对智能电网的描述则更加具体, 从技术层面提出智能电网通过“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合, 实现具有坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放和友好互动内涵的现代电网<sup>[1]</sup>. 我国“十三五”规划纲要明确指出, 要加强智能电网建设, 提高电网与发电侧及需求侧交互响应能力. 与传统电网相比, 智能

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-05-22.

基金项目: 国家电网科技项目(5700-201999495A-0-0-00).

†通讯作者. E-mail: wangyw@hust.edu.cn.

电网具有电力和信息双向交互的特点,它通过高效实时的测量和先进的通信技术构建智能化的能量交互网络<sup>[2]</sup>,由此,如风机和光伏等需求侧分布式能源也能够电网中实现即插即用的并网运行方式,参与电网的优化运行和运营<sup>[3]</sup>.

随着可再生能源、储能技术和智能计量设备的发展以及能源政策的鼓励,传统的电网终端用户能够通过安装屋顶光伏<sup>[4]</sup>、配备电动汽车<sup>[5]</sup>、储能电池<sup>[6]</sup>或其他方式实现本地发电和储能.这一类分布式能源用户因具备同电网的双向能量交互特性,被称为能源产消合一者(简称产消者).澳大利亚目前已有超过30%的住宅用户通过安装屋顶光伏成为能源产消者参与配电网运行<sup>[7]</sup>,英国2015年已有一百万产消者参与能源供应,专家认为在2020年这个数据应达到一千万<sup>[8]</sup>.除了住宅用户,具备相似特性的还包括即将大量普及的双向电动汽车和能源楼宇等,也已经成为智能电网建设的重要部分<sup>[9]</sup>.

依托先进计量设施,智能能量管理技术在各类能源系统得到广泛使用,使得产消者自身能够基于能源需求,促进需求、发电和储能之间的优化协调<sup>[10]</sup>.不仅如此,产消者还可以将当前剩余电能分享给电网或社区内其他产消者(或用户),这种特点表明产消者在应对不断增长的能源需求所带来的环境、社会和经济问题时具备一定的潜力<sup>[11]</sup>.为了促进产消者能量分享在能源网络中发挥作用,如提高分布式可再生能源的利用率、减少分布式可再生能源对电网的影响、提高本地电网的稳定性和能源经济性<sup>[12-13]</sup>等,智能电网允许产消者按照一定的市场规则形成产消者社区,构建能量分享网络<sup>[9,14]</sup>.通常情况下,产消者社区能量分享网络需要一个控制中心连接到智能电网,控制中心的作用是负责社区的配电以及保证电网与产消者之间的信息交互.当然,发展到一定阶段后,社区产消者甚至可以依靠自身的能量管理系统和通讯系统,直接与电网或者其他社区产消者实现能量分享<sup>[15]</sup>.产消者自身的智能能量管理系统及先进的通信和计量设备、产消者社区控制中心的中间控制、智能电网的智能调控和即插即用功能,三方协作以实现能量分享网络的控制和稳定.

作为社区能量分享的基本单元,每个产消者用户的能量优化和能量分享决策是社区能量分享的基础<sup>[16]</sup>,而设计适当的规则以构建社区产消者能量分享网络,实现社区产消者能量分享,则是相关研究的核心和关键<sup>[9]</sup>.因此,本文首先总结了常见的社区产消者类型及其特点,然后分析了社区产消者能量分

享的典型模式,接着探讨涉及产消者能量分享的能源数据预测和相应的博弈及优化方法,最后对相关的前瞻性难点问题进行展望.全文内容及其关系如图1所示.

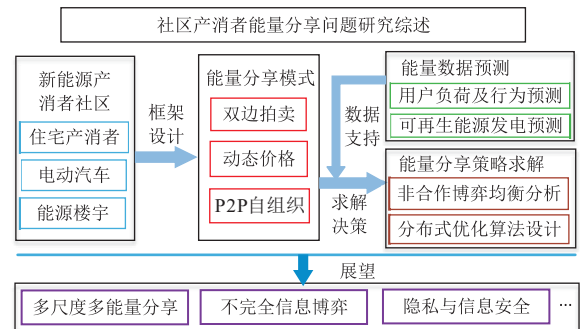


图1 本文脉络和主要内容

## 1 社区能源产消者

现有社区产销者能量分享系统通常以住宅产消者、电动车或能源楼宇为核心,配备以分布式可再生能源(如光伏风机或储能装置),从而在能源管理与优化方面表现出更强的主动性和灵活性.下面分别介绍这3类产销者及其特点.

### 1.1 住宅产消者

近年来,光伏设备和储能装置成本逐步下降,各国为了促进可再生能源的发展也提出了相应的鼓励政策,越来越多的单体住宅用户选择安装屋顶光伏发电自用及剩余电量上网,成为一类主要的产消者用户<sup>[17]</sup>.住宅产消者能量共享系统主要包括可再生能源发电设备、储能设备、智能家居电器.其中,可再生能源发电通常优先供本地能量消耗,余量可以回馈给电网;储能设备可将多余电量存储起来,供需要时使用;而随着物联网技术的发展与应用,智能家居电器可根据控制信号和优化目标有效实现电能负荷转移,通常称之为可控负荷.但是,可再生能源发电高度依赖随机多变的气象条件,即使发电设备容量相当于本地耗能峰值,如果没有合适的调控策略,住宅产消者将频繁与电网交互,配电网或电力系统则需要极大的成本来提高变压器分接开关操作频率,才能将电网电压维持在期望的稳定范围内<sup>[18-19]</sup>.因此,社区产销者能源系统必须通过调节本地可控负荷和住宅储能,减少住宅产消者与电网的交互,降低对电网的依赖,同时降低电费、提高本地能效<sup>[20-21]</sup>.

对单个住宅产消者来说,进行本地协调调度是提高住宅本地能源效率和经济性的关键.文献[22]通过神经网络对住宅光伏输出进行预测,通过滚动优化协调住宅产消者需求响应、光伏发电和住宅储能,以达到最小化能量交互和能量成本的优化目

标. 针对住宅产消者储能设备容量配置问题, 文献[23]从技术和经济角度通过长短期评估来确定住宅储能的最佳容量, 而文献[24]则利用机器学习对住宅产消者的光伏-储能的规划和实时优化提出了离线规划和在线优化模型. 这些文献从不同角度规划调度单个住宅产消者能源系统以提升本地能源效率. 但是, 住宅储能的初次投资成本较高, 现有产品规模类型有限, 大部分住宅产消者经济上难以承担, 且电气设备的需求响应调度受限于技术的发展, 较难实现实时智能调度<sup>[25-26]</sup>, 单个住宅产消者提升本地能源效率的手段在经济性和可实现性方面还有待于进一步发展提高. 因此, 组织住宅产消者社区, 促进社区内部住宅用户间的能量分享, 实现产消者的能源消纳和能源补充, 自然成为了提高住宅产消者能源经济性的新趋势.

奥地利理工学院实施了一个社区能源项目<sup>[27]</sup>, 包括为住宅安装光伏-储能系统、安装由能源供应商提供的100kWh社区储能系统, 并通过经济激励政策促进社区能量分享, 提升社区能源效率. 社区储能除了服务社区产消者用电外, 还可以为电网提供稳定性辅助服务和市场服务. 该项目表明, 产消者社区及产消者与运营商及市场的能源交互不会给产消者和基础设施带来麻烦, 并能够对电网产生积极影响. 位于纽约的布鲁克林微电网项目<sup>[28]</sup>将区域内的住宅产消者组织起来, 并首次将区块链技术用于社区产消者间的能量分享和能量交易, 该项目最大的特点在于构建了虚拟的社区能量市场平台以及物理的社区微电网. 该项目表明, 社区产消者能量分享在基础设施和交易技术上都是可行的, 实现社区能量分享有助于提升社区能源效率. 现有的相关项目验证了社区产消者能量分享的可行性以及潜在的效果, 但是, 作为构建社区能量分享的核心技术, 能量分享和交易模型(社区市场设计)还有待深入研究, 以充分挖掘社区能量分享对提升能效、能源经济性和电网稳定性的潜力.

## 1.2 电动汽车

随着动力电池技术的发展与应用, 电动汽车作为一种可持续和环保的交通工具愈受关注, 电动汽车的车到网(vehicle-to-grid, V2G)和网到车(grid-to-vehicle, G2V)的充放电技术可以对电网起到协调辅助作用.

电动车充放电控制研究可以分为单一电动车充放电控制和电动车集群充放电控制. 单个电动车充放电控制研究主要是基于实时电价, 优化安排充电时

段和充电速率, 以保证一定的出行需求, 降低充电费用<sup>[29]</sup>. 典型研究结果如文献[30]考虑了电动车出行的随机性, 基于随机优化设计了能量管理方案, 分析了电价对充电方案的影响. 文献[31]设计了电动汽车为电力系统提供调频服务以获取收益的框架, 基于动态规划对电动汽车的充电过程进行优化, 并对比了电动汽车和燃油汽车的经济性.

相较于单一电动汽车, 电动汽车集群的充电控制更为复杂, 主要体现在更丰富的控制目标和更复杂的约束特征. 文献[32]借助工作场所内电动汽车双向充放电能力, 协调光伏发电实现优化. 文献[33-34]针对电动汽车集群, 在配电网约束下以最小化充电成本为目标建立了分散式充电控制方案, 引入对偶次梯度优化算法解决网络约束带来的耦合约束条件. 文献[35-36]基于动态电价研究了非合作博弈下的电动汽车集群充电控制. 文献[37]研究了电动汽车集群参与日前调频市场的优化控制策略.

智能电网下电动汽车间的能量分享也有望或正在成为新的商业模式. 在电网高负荷期间或经济激励下, 电量富足的电动汽车分享能量给急需充电的其他电动汽车, 双方都能从中获利且有助于缓解大量电动汽车充电需求对电网造成的压力. 文献[38]将参与能量分享的电动汽车分为买方和卖方, 设计了相应的充放电满意度和成本函数, 以最大化社会效益为优化目标, 得到了最优能量分享方案, 并探讨了基于区块链的技术实现方案. 虽然电动汽车能量分享受充放电效率制约, 且电动汽车间的能量分享会带来额外的能量损失, 但仍不失为一种有助于电网稳定性和增大社会效益的有效手段.

## 1.3 能源楼宇

数据表明, 楼宇是现代城市耗能的主体<sup>[39]</sup>. 能源楼宇技术成为楼宇减少碳排放和电网能耗的主要手段, 并逐渐得到广泛关注、研究和应用. 能源楼宇作为中型能源产消者, 同样通过安装可再生能源设备(如光伏和储能设备等), 在结构及功能上与住宅产消者十分相似. 能源楼宇耗能的主要用途通常包括: 供暖耗能用于为楼宇提供舒适的室内环境(一般通过空调系统或暖通系统实现), 工业设备耗能用于工业生产, 以及商业活动耗能用于其他商业服务业务等<sup>[40]</sup>.

与住宅产消者和电动汽车不同的是, 研究人员更关注的是零(低)能源楼宇. 日本经济产业省将零能源楼宇定义为通过提高自身楼宇设备和局部电网能效、消耗本地可再生能源而几乎不消耗来自电网电能的楼宇<sup>[41]</sup>. 大量文献为实现零能源楼宇提供了解



决方案,如文献[42-43]研究了楼宇生命周期能量分析和能源楼宇仿真设计信息工具,用于零能源楼宇的规划分析设计;文献[44]则探讨了提高能源楼宇经济性和能效的楼宇建筑材料方案;文献[45-46]分别通过数据分析和多目标优化研究了实现零能源楼宇的设备容量配置。

与住宅产消者在提升本地能效方面的局限性类似,能源楼宇产消者对本地能源设备配置的经济能力同样有限,目前实现零(低)能源楼宇的技术和经济可行性仍待进一步提高<sup>[47]</sup>。文献[48]的研究表明,将单个楼宇能量管理扩展到多个能源楼宇协同能量调度以进行能量分享,能够实现能源楼宇产消者的就近能源消耗和能量补充。这成为现阶段提升楼宇和楼宇集群能效和能源经济性的可行方案。

## 2 社区产消者能量分享模式

第1节介绍了住宅产消者、电动车和能源楼宇3类社区能源产销者。要实现有效的能源管理,它们需要合适的本地能量市场组织模式作为系统的整体运行架构,容许社区产消者根据本地市场规则和当地政策驱动,参与能量交易或社区能量调度。本节将重点总结目前广受重视的双边拍卖模式、动态价格模式以及peer-to-peer (P2P)模式3种能量分享模式。

### 2.1 双边拍卖模式

社区能量分享双边拍卖模式如图2所示。

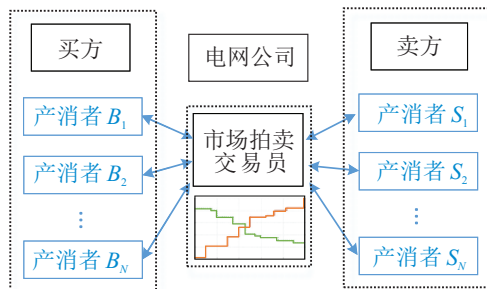


图2 双边拍卖能量分享模式

类似于基本双边拍卖模式<sup>[49]</sup>,社区产消者需要向交易员对预想的能量富余或需求进行报价(数量-价格),社区交易员对社区产消者的报价进行匹配或再优化,决定所有社区产消者的最终成交价格 and 电量。文献[28]介绍了布鲁克林微网项目中应用双边拍卖机制作为社区能量分享的案例。双边拍卖每15 min运行成交一次,在当前时段,买方产消者对期待的电量和可接受上限价格进行招标,卖方产消者将可以卖出的电量和可接受下限价格进行投标,由虚拟交易平台进行招投标匹配并完成交易。物理层面上社区产消者仅需要从社区配电网获取或回馈电量,但需要向匹配产消者按照双边拍卖成交结果支付或收

取相应的费用。文献[50]设计了间接双边拍卖模型,中间人收集投标后,根据供需平衡时的成交价格再次优化产消者在市场中的交易电量。该研究通过强化学习方法对市场状态作出决策,并非所有时段都允许交易和能量分享。文献[51-52]研究了产消者能源交易的连续双边拍卖机制,设计了线性拍卖竞标,通过预测集成策略优化改进原有机制,从而加快连续双边拍卖的收敛速度,改善产消者投标过程和市场收益。文献[38]分别为充电型和放电型电动汽车设计了充电满意度模型和放电成本模型,通过电动汽车迭代双边拍卖设计竞标,并由拍卖商集中求解最大化社会效益问题,得到了电动汽车之间的能量分享调度策略。

双边拍卖机制是基于网络运营商或交易平台的角度,侧重完成社区能量分享的交易过程<sup>[53]</sup>。实际中,社区产消者很少具备足够的市场交易知识,缺乏相应的市场投标能力,虽然基本的拍卖机制在应用中易于实施,但难以充分发挥社区能量分享对社区整体能效的优化作用。

### 2.2 动态价格模式

传统电力市场的动态电价主要由广域动态电力供需关系决定,以引导改善大区域内的电力供需平衡,但无法反映产消者社区供需关系。要提高产消者社区自身的能效,就需要着眼于社区整体即本地市场的能量供需和能源经济,动态价格模式应运而生。本文将主要介绍主从模型和对等聚合模型两种动态价格模式。

#### 2.2.1 主从模型

如图3所示,在动态价格模式主从模型中,通常包括一个或多个定价者(运营商)和多个从价者(产消者),定价者决定社区内能量分享价格,产消者根据价格决定能量分享量。

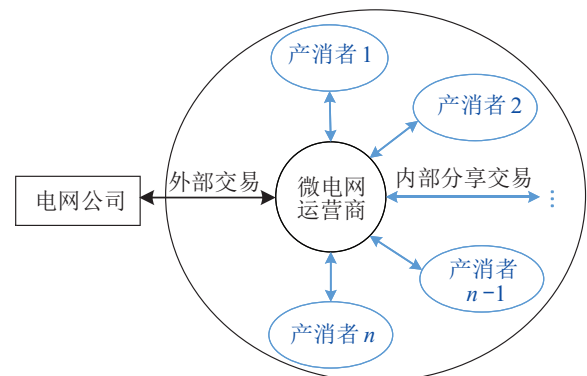


图3 主从模型的动态价格模式示意

在文献[54-55]设计的社区产消者能量分享框架中,社区微网运营商作为定价者,其功能是连接主电

网和社区,协调社区能量分享,保证社区能量供应,并通过最优化自身效益决定社区能量分享的买价和卖价;社区产消者作为从价者根据需求响应调整自身的净需求,即调整从运营商获取(买)的电能或回馈给运营商(卖)的电能。在此框架中,通常将社区内部买卖价格限制在外部市场买卖价格范围内波动,以此作为经济驱动,保证产消者愿意参与社区能量分享。该动态过程可建模为Stackelberg动态博弈过程。基于能源楼宇原始数据的仿真结果表明,在这样的社区能量分享框架下,运营商和社区产消者都能获得比传统市场更好的能源经济性。文献[56]进一步研究了运营商在安装社区储能时日前和实时动态能量分享博弈和优化调度。这类研究需要验证Stackelberg博弈均衡的存在性和唯一性(要求社区产消者的效益函数满足凹性且具备最优策略解)<sup>[57]</sup>,否则难以实现动态博弈过程的有效求解。

在主从模型中,还有一类研究通过双层规划进行建模和求解。文献[58]研究了零售商和能源楼宇产消者都可能安装本地储能时的鲁棒能量调度问题和社区能量分享问题,分别为零售商和产消者建立了上层和下层周期鲁棒能量优化调度模型,其上下层决策互为自身优化问题参量,是典型双层优化问题中的双线性优化问题。储能带来了能量调度和分享问题的时空耦合性,因此导致与文献[54-55]相比建模更加复杂,不便于利用Stackelberg博弈均衡分析方法。文献[59]考虑批发电力市场-住宅产消者-综合社区能源系统三者的交互,将其建模为混合整数双层线性规划问题,并提出了基于分离的线性化求解方法。一般来讲,双层规划适合于主从模型下复杂能源调度问题的建模,但双层规划带来了诸如非凸、非连续性问题,是公认的非确定性多项式难解(non-deterministic polynomial hard, NP-hard)问题<sup>[60]</sup>,求解比较复杂。

在主从模型中,定价者和从价者都是根据各自目标函数进行决策,社区能量分享的能效和能源经济性依赖于各方的效益或成本模型设计。但相较于竞标拍卖模型,主从模型能够实现社区产消者能源效率和经济性,适合也易于在当前市场结构下实施和应用。

### 2.2.2 对等聚合模型

动态价格模式对等聚合模型如图4所示。通常,这类模型需要根据本地能源动态供需关系设计针对社区产消者的动态价格模型,社区产消者基于该价格模型和社区供需关系优化自身能量调度,调整净需求。相较于基于大范围供需关系的外部电力市场,该动态价格模型的设计对社区产消者应具有针对性,才

能激励产消者参与社区能量分享,改善社区内部供需关系。

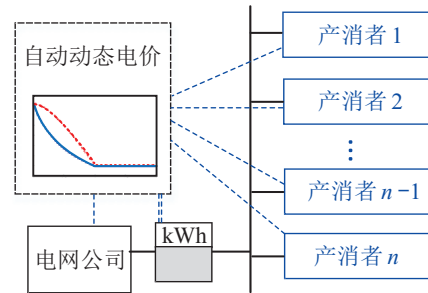


图4 聚合模型动态价格模式示意

文献[53,61]根据产消者能量净需求设计了供需比指标,并基于该指标设计了产消者的非线性动态电价模型。供需比为0表示社区仅有需求型产消者,此时社区买卖电价都设定为外部市场购电价格;当供需比从0到1提高时,表明社区内供给型和需求型产消者共存,总体表现为供小于求,社区买卖价格随之动态变化且逐渐降低;当供需比超过1时,总体表现为供过于求,社区买卖价格与外部市场馈电价格持平。产消者基于该动态价格优化调度净需求。该动态价格模型相较于外部市场电价对社区产消者更有利,所以能够激励产消者参与社区内能量分享,促进内部能量分享和消纳,也改善了社区内的电能供需关系。文献[62-64]直接设计了基于社区总净需求的线性价格模型,当社区净需求高时社区产消者买卖电价均较高,而净需求低时产消者买卖电价较低,每个社区产消者在当前净需求基础上动态调整能量分享值,以提高自身收益或降低自身成本,这种聚合形态下社区产消者之间的动态过程即非合作动态聚合博弈过程。

聚合模型需要电力公司或运营商与社区产消者设计专门的社区动态价格模型,产消者受价格驱动调整净需求以实现能量分享,改进社区能量供需关系;产消者与电力公司或运营商直接进行交易结算,由运营商或配电网平衡社区以实现社区能量平衡和供能稳定。其实施框架与主从模型十分相似,根本区别仅在于定价机制不同。相比而言,聚合模型通过自动动态价格驱动,改善社区内电能供需关系。在合理的动态价格模型下,产消者能够通过参与社区能量分享改善能源经济性,而运营商和配电网也更易于对社区能源网络进行维护。但因为其非合作博弈的本质,社区总体能量效率受到限制。

### 2.3 P2P模式

P2P模式不需要运营商或电力公司的调控或自动动态电价驱动,社区产消者可以直接同其他产消者

通过配电网进行自组织能量交互和相互结算,因而P2P模式下的社区能量分享机制也更加灵活.其能量分享模式如图5所示.

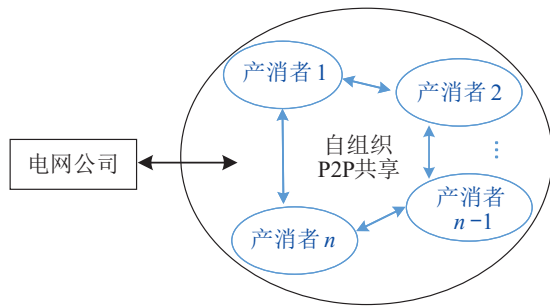


图5 P2P能量分享模式

文献[65]以最小化社区同外部电网交易成本为目标,研究了产消者之间的最优能量分享,在固定分享电价下通过集中式求解得到最优能量分享策略.该研究从社区整体角度进行集中式调度,没有考虑产消者自身的能量管理和优化.文献[66]研究了固定分享电价下社区能源枢纽对产消者和社区储能的能量分享和规划调度,对最小化社区能量成本的优化问题进行了集中式求解.固定分享电价下能量分享可行的前提是确定所有产消者都能满意和接受的分享电价,在以产消者为中心的P2P模式中,该前提是较难定义和实现的,因此产消者之间灵活的结算策略(如基于均衡的博弈方法)在P2P模式中更具有研究和应用价值.

文献[67-68]从传统优化调度视角研究了能量产消者的能量分享问题,以最优社会效益为目标,将社区能量分享约束的对偶乘子作为能量分享边际价格,而非直接对每个产消者的能量分享收益进行讨论.文献[40]研究了能源楼宇产消者之间的P2P能量分享问题,提出了两阶段优化框架:第1阶段确定楼宇间的最优能量分享策略,使得楼宇集群的社会

能量成本最低;第2阶段建立非合作博弈模型,确定楼宇相互结算价格.该框架兼顾了社会成本和产消者自身利益的优化,也表明即使没有运营商直接调控,P2P模式下的社区能量分享也能提高社区能源效率和每个产消者的能源经济性.文献[69-71]基于合作博弈研究了微网之间的能源交互问题,采用纳什讨价还价模型对能源交互结算进行分配.纳什讨价还价的解决方案是最大化所有参与者净收益的对数积,以保证所有参与者获得相同的净收益.文献[72]研究了能量分享合作博弈中出现欺骗行为的弹性分配机制,在研究产消者能量分享时,通过社区全局调度实现了社区能量成本的最小,并采用纳什讨价还价模型进行能量分享结算,分析了产消者错报信息,即汇报更低的原始成本(不参与能量分享时的成本)时纳什讨价还价模型有解的条件.能量分享合作博弈的分配解决方案还包括基于核仁的分配、基于shapely值的分配以及其他讨价还价模型,但是目前还较少应用于能量分享问题.相较于其他分配方案,纳什讨价还价方案实施简单,便于分布式求解,因此相关研究较多.

同动态价格模式相比,P2P模式具备更灵活的设计特征,但需要针对社区的P2P平台工具作为支撑,以实现分布式信息交互和结算<sup>[15]</sup>.由于缺乏运营商或其他监管,P2P模式下的信息安全和隐私保护问题尤为突出.有效的分布式实施框架(通信及算法)有助于保证个人信息和隐私安全,但来源于其他产消者的信息也面临一定的可信度问题,信息平台的隐私保护程度也需要权衡.因此在P2P能量分享框架设计、信息校验和惩罚机制、P2P技术平台安全性等方面仍需更深入和广泛的研究.

表1更直观地对上述典型模式进行了归纳总结.

表1 社区产消者能量分享主要模式

典型模式	特点	优势	局限性	相关问题	参考文献
双边拍卖	买卖双方,交易员清算	基本机制简单,易于实施	产消者投标能力有限;难以实现能量优化	公平清算/定价的拍卖机制涉及	[28, 38, 50-52]
动态价格-主从	运营商-产消者(领导者-跟随者)	结构简单,适合(当前市场结构)	能源效率依赖于效益/成本目标设计,集中式求解带来隐私问题	主从博弈均衡,双层规划问题	[54, 55, 58, 59]
动态价格-聚合	社区动态供需价格驱动	自动动态价格驱动改善社区能量供需	需要设计电力公司和产消者均接受的价格模型,能效受模型限制	非合作博弈,分布式优化	[53, 61, 63, 73]
P2P模式	自组织P2P相互分享和结算	不需要第三方调控,能量优化灵活,相互协商结算	无监管带来实施、隐私保护与信息安全问题,需要安全P2P平台	非合作博弈,合作博弈,分布式优化	[40, 65, 67, 70, 72] [74, 75]



### 3 产消者能源数据预测

在产消者能量优化和社区能量分享作出决策时, 通常需要本地可再生能源发电出力和负荷功率等相关信息, 但由于风电和光伏发电的不确定性和间歇性以及需求侧负荷的随机性, 这些信息无法准确获知. 产消者能源数据预测能够根据历史数据预测未来的数据, 为能量分享策略求解提供合理可靠的参考数据. 本节将分别介绍可再生能源发电预测和负荷及行为预测两方面的研究进展.

#### 3.1 可再生能源发电预测

通常社区产消者的本地新能源发电主要是光伏和风机, 发电输出在已有设备下主要依赖于气象条件, 如辐射强度、室外环境温度、风速等. 常见预测方法通常分为物理模型和数据模型, 前者适合于较低预测分辨率(如日前小时级预测需求), 而后者更适合高预测分辨率(如日内分钟级预测需求)<sup>[76]</sup>. 光伏系统基于物理模型的输出模型可描述为<sup>[77]</sup>

$$p_{PV} = \eta S_{PV} I (1 - 0.005(T_{out} + 25)), \quad (1)$$

即在光伏板面积  $S_{PV}(m^2)$  和能量效率  $\eta$  一定时, 光伏输出  $p_{PV}(kW)$  主要由当时阳光辐射强度  $I(kW/m^2)$  和室外环境温度  $T_{out}(^{\circ}C)$  决定. 对于风机, 其基于物理模型的输出模型可描述为<sup>[78]</sup>

$$p_{WT} = \begin{cases} 0, & u_h \leq u_c, u_h \geq u_s; \\ c_1 + c_2 u_h + c_3 u_h^2, & u_c \leq u_h \leq u_r; \\ p_r, & u_r \leq u_h \leq u_s. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $u_c/u_s$  为切入切出风速,  $u_r$  为额定风速,  $p_r$  为额定功率, 风机输出  $p_{WT}$  主要受当时风速影响.

基于物理模型的预测方法需要气象预测信息, 因此, 也有研究通过人工智能的方法, 基于历史气象信息进行输出预测. 文献[77,79]通过自组织映射提取气象特征进行气象分类, 再通过人工神经网络对光伏小时输出进行预测以提高预测精度. 文献[80]提出概率时空深度学习模型, 根据气流时空变化过程对风速进行预测, 以期对风电预测提供精确信息. 随着气象预测技术和相关人工智能方法的发展和提高, 这类预测方法预测可靠性也越来越高.

相较于物理模型, 数据模型预测方法适合于短期高分辨率预测需求, 最常用的是时间序列预测方法, 如自回归滑动平均(auto-regressive moving average model, ARIMA)模型等. 一般ARIMA模型包括模型辨识、模型估计和诊断检查3个步骤. 考虑到时间序列的季节周期性, 通常将ARIMA模型扩展为季节性自回归滑动平均(seasonal ARIMA, SARIMA)模型, 即

$$\phi(B)\phi(B^s)(1-B)^d(1-B)^D X_t = \theta(B)\Theta(B^s)\epsilon_t. \quad (3)$$

其中:  $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ , 描述  $p$  阶自回归过程( $\phi_1, \dots, \phi_p$  为参数);  $\theta(B) = 1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q$ , 描述  $q$  阶滑动平均过程( $\theta_1, \dots, \theta_q$  为参数);  $\phi(B^s)$  为  $P$  阶自回归模型,  $\Theta(B^s)$  为  $Q$  阶滑动平均模型以解释周期因素;  $B$  为滞后算子;  $\epsilon_t$  表示均值为0的不相关平稳过程. 文献[32]采用SARIMA时间序列预测方法对楼宇产消者光伏15 min级输出序列进行分钟级预测, 并通过回归系数和标准误差指标验证预测方法的精确性, 进而基于预测信息对楼宇能源系统进行能源优化.

除自回归类模型外, 也有研究基于马尔可夫链模型和卡尔曼滤波模型等进行发电预测. 文献[81]首先假设风速短期变化是平稳过程且具有马尔可夫性, 通过离散化历史状态并计算状态转移矩阵, 再根据马尔可夫性预测未来风速状态, 并根据经验风速分布估计风速预测值. 卡尔曼滤波本身可视为自回归数据处理办法且不需要平稳性假设, 因此对新能源发电预测十分有效, 自1985年开始已有研究基于卡尔曼滤波进行风电预测<sup>[82]</sup>. 精确的可再生发电预测对能源优化调度非常重要, 如何针对社区能量分享的不同需求合理选择和改进相应的预测方法, 以保证能量分享效率, 仍然是一个值得深入探讨的问题.

#### 3.2 负荷及行为预测

产消者用户负荷及行为预测研究可以分为用户自身用电行为和群体用户用电行为研究.

用户用电行为受到环境因素、人为因素、社会因素等多元化因素的影响, 除了电价和需求响应政策外, 还包括健康和心理状态以及经济状况等. 对用户自身用电行为的研究有助于实现产消者自身的需求调度, 以及提高社区能量分享的效率. 文献[83]研究了住宅负荷预测问题, 设计了卡尔曼滤波模型, 采用自下而上的电器设备层面预测策略, 有效提高了家庭负荷预测准确性. 文献[84]提出了基于长短期记忆深度学习的电器消耗序列预测框架, 显著改进了短期住宅负荷预测效果. 文献[85]从楼宇类型、时间尺度、数据处理、机器学习预测方法和评估指标等多个方面介绍了数据驱动的楼宇能耗预测模型研究. 这些研究有助于为产消者能源管理和预测控制提供快速准确的负荷预测信息, 如文献[86]对家用电动汽车使用概率进行预测, 并应用到住宅能源优化调度.

针对群体用户用电行为的研究主要是基于聚类分析的方法. 文献[87]根据传统行业划分, 提出了基



于聚类的用户分类技术. 文献[88]对住宅用户用电行为分类展开研究, 基于云计算和熵权法计算用户权重, 聚类准确率很高. 文献[89]研究了社区产消者的能源行为, 基于产消者能源曲线时间序列数据, 使用聚类分类树对产消者时间序列进行聚类分析, 将具有相似能源行为的产消者进行聚类, 形成产消者社区, 并提出对不同产消者社区施行不同管理策略. 对于电动汽车, 文献[90]讨论了电动汽车集群的能源行为, 分析了一个通过邮件引导电动车充电行为、改善电网质量的案例; 文献[91]通过统计预测电动汽车的出行迁移行为, 以评估指导智能电网能源管理系统.

开展产消者用户群体能源行为的预测研究, 对配电网规划调度和电力公司实现产消者用户的运营管理有着重要意义, 有助于提高配电网规划调度的精确性, 提升能源效率; 有利于设计合适的电价机制激励和引导产消者用户行为, 促进能量分享. 而如何根据产消者行为预测结果设计配电网规划调度策略和电力公司的运营策略还有待进一步深入研究.

## 4 能源能量分享策略的求解

社区产消者能量分享广泛涉及到各类博弈问题和分布式优化问题, 对它们进行分析求解并保证求解算法的收敛性和应用可行性、保护产消者隐私等, 成为社区产消者能量分享中实现策略求解的重要研究内容. 本节将重点介绍非合作博弈均衡和分布式优化求解算法.

### 4.1 非合作博弈均衡求解方法

非合作动态博弈是产消者能量分享研究中非常重要的一类问题, 相关研究主要包括主从博弈和广义纳什均衡问题. 主从博弈即 Stackelberg 博弈(领导者-追随者博弈), 博弈参与者具有主从关系, 决策行动有先后顺序, 上层首先给定策略, 下层根据上层策略给出最优策略, 上层接收下层策略反馈并调整上层策略, 如此循环往复直到上下层均不再能够通过改变当前策略来提高收益. 在主从模型动态价格模式的能量分享问题中, 上层一般决定能量分享价格, 而下层则根据分享价格决定调度策略, 包括分享的电量等. 对于这类问题, 首先需要讨论博弈均衡的存在性及唯一性, 再采用合理的方法求解博弈均衡. 文献[57]通过分析下层决策的唯一最优性说明主从博弈均衡的存在性和唯一性. 文献[54]通过证明代入下层最优决策模型后的上层问题具有唯一最优解, 证明了均衡的存在性和唯一性, 并通过内点法集中计算求解均衡. 文献[55]针对一类能量分享问题, 发现将下层最优决策模型代入上层问题后具备凸性, 不需要获

取用户隐私信息, 通过分割试探法即可搜索到博弈均衡. 主从博弈模型是一类应用广泛的分层决策模型, 能源分享中的均衡求解问题, 特别是在产消者隐私保护需求下的分布式求解问题, 还有待于深入研究.

在广义纳什均衡问题中, 每个博弈参与者的策略集依赖于其他参与者策略, 若博弈参与者的策略集不受其他参与者策略影响, 则退化为标准纳什均衡问题. 来源于经济学的这一重要模型在不同领域已得到广泛的应用. 在社区能量分享问题中考虑网络安全约束或 P2P 能量分享时, 产消者的本地优化调度常常出现全局耦合的情况, 在非合作博弈情况时就会建立人为广义纳什均衡问题, 需要对广义纳什均衡进行讨论和求解. 一般来讲, 广义纳什均衡问题的均衡解一般不具有唯一性. 文献[73]综述了广义纳什均衡问题的若干算法, 如变分不等式方法、基于 Nikaido-Isoda 函数的最优响应算法及罚函数法. 在能量分享的分布式环境中, 除了一般重复迭代动态博弈方法可以逐渐趋向标准纳什均衡问题的均衡<sup>[63]</sup>, 采用较多的是基于 Nikaido-Isoda 重构函数类算法以及增广拉格朗日乘子方法用于广义纳什均衡问题. 文献[74]研究了多微网能源交互问题, 采用 Nikaido-Isoda 重构方法求解纳什均衡, 通过交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 解决全局能量耦合约束问题, 实现了最优响应的分布式求解. 文献[92]在求解 P2P 能量分享的结算价格时, 社区之间的结算价格需要双方达到一致, 因此形成广义纳什博弈问题, 文中通过增广拉格朗日法分布式求解得到了广义纳什均衡下的结算价格. 这些文献验证了有关算法的适用性和可行性, 一方面可以继续深入研究提升算法收敛稳定性和可扩展性, 另一方面也需要探索其他算法, 如基于变分不等式方法等.

### 4.2 分布式优化求解方法

分布式优化在产消者能量分享优化问题的求解时十分重要, 它具有节省计算资源、保证用户信息安全等优势. 常见的分布式优化算法包括原对偶方法、一致性方法以及 ADMM 方法. 文献[75]在多买方(用户需求响应)多卖方(电力公司)能量交易问题中, 考虑用户需求响应效益以及电力公司发电成本的社会效益最大化, 通过对偶分解方法将原问题分解为各个买方和卖方的子问题, 并使用原对偶梯度算法进行分布式求解. 这种求解方法优点在于用户和电力公司只需要在本地解决子问题, 而不用提交和交互隐私信息或集中求解. 文献[93]同样采用原对偶梯度算法研究了 P2P 能量交易问题. 在这些文献中, 买方用户

和卖方产消者相互能量交易约束的乘子作为影子价格可以当作相互交易价格等价求取。然而,当优化问题不可分解时,原对偶梯度方法无法实施,只能通过原对偶次梯度方法进行求解<sup>[33]</sup>,而原对偶次梯度方法的收敛速度相较更慢。

文献[67]构建了产消者P2P能量交易中社会效益最大化的多边合同经济调度优化问题,考虑每个产消者自身功率约束和能量交互耦合约束,以耦合约束对应的对偶乘子作为交易价格。引入了“一致性+”创新方法,产消者根据邻居当前信息迭代更新交易能量及对偶乘子,最终得到了最优调度方案。该方法的局限性在于决策变量会随着交易拓扑的复杂度而增加,完全P2P拓扑会带来以节点数量的平方为阶数的决策变量;因此,其可扩展性还有待于进一步改善,如通过多层P2P结构等。

文献[40]研究了楼宇P2P能量分享,在最小化楼宇集群总社会成本时采用ADMM方法,其关键点在于引入辅助变量将原 $N$ -block耦合问题转变为2-block问题,以符合ADMM求解框架。文献[68]对社区产消者经济调度优化问题通过ADMM方法进行求解,还考虑了产消者社区对配电网的影响,如提高社区自治性和削峰服务等。

ADMM方法除了可以直接求解优化能量分享、优化社会效益等问题,也可以作为辅助工具解决博弈问题。文献[40,74]在求解非合作博弈均衡时通过ADMM方法分布式求解多微电网或多产消者的当前最优响应决策,并多次迭代更新最优响应,实现了以分布式的框架寻找非合作博弈均衡。

目前ADMM方法仅在求解2-block或3-block耦合凸优化问题时有理论上的收敛保证,其收敛速度对其中罚参数也十分敏感。因此,ADMM改进方法也得到了大量关注和研究,如快速ADMM方法<sup>[40]</sup>、自适应ADMM方法<sup>[68]</sup>等。

## 5 前瞻性难点问题

正如前文所述,目前社区产消者能量分享研究已取得长足进展,本节对今后可能的研究热点和难点略作浅析。

### 5.1 多能量分享

前面列举的文献和研究中大多只讨论了电力能源产消的情况,但随着能源互联理念的推广,很多产消者也出现多能源特征,如安装小型热电联产系统的能源楼宇等,通过消耗其他燃料、可再生能源发电或电网电力,为本地供电供热或供暖/冷<sup>[94]</sup>。产消者多能源分享可进一步提升能源多样性和可持续性,因此

产消者多能源分享近来也开始得到关注和研究,并且也将成为未来能源互联网发展的关键特征。文献[48]探讨了多楼宇多能量分享的可行性,并与楼宇单独能耗对比,发现多能量分享能提高多楼宇社区能效,通过多能量分享和联合能源管理更能实现零能源楼宇。文献[95]研究了多个热电联产微电网的电能和热能分享问题,设计了微网电能和热能的弹性需求模型,并通过分解方法分布式求解最小总能源成本优化问题。

多能量耦合使得产消者能源系统变得更为复杂,同时增加了能量分享时决策的复杂性,如决策变量维数增大、优化问题的多重约束以及可能的非凸非线性等,尤其是在博弈情景时,问题的分析和求解将变得更加困难。多能源技术下能源共享框架的设计、多能量分享的物理约束建模、多能源弹性需求特征模型的建立、以及非凸非线性能源分享优化问题的求解等,成为产消者多能量分享研究需要应对的挑战。

### 5.2 多尺度能量分享

随着多能源系统的功能化、复杂化,能源共享系统的多尺度特征也越来越凸显出来。首先,可再生能源发电及用户负荷在不同时间尺度上表现出不同的分布特征,如光伏系统在以小时为时间槽的时间尺度下比较平滑,而在以分钟级为时间槽的时间尺度下表现出更大的波动性。其次,不同能源形式的运行特性和结算方式具有时间尺度差异,电能和天然气需要进行实时调度,而热能具有热惯性,需要在更大时间尺度上做规划。再者,同一能源形式在按年、季或月的规划阶段与在实时调度阶段的时间尺度也不同。这些多尺度特征对电网的调度和维护造成了挑战,研究多尺度下的能量分享具有重要的应用价值。文献[94]研究了单个能源楼宇产消者多时间尺度下的热电能源优化调度,文献[96]提出了基于分布鲁棒优化的交直流微电网多时间尺度滚动优化调度策略。这些研究探讨了产消者能源系统的多尺度优化调度策略,能够更有效和经济地应对多尺度不确定性。

多尺度特征使得产消者能量分享问题复杂化。一方面不同产消者可能出现不同的规划调度时间尺度和时间轴,另一方面社区能量分享需要考虑多时间尺度下对电网影响最小的设计目标。因此,产消者多尺度能量分享需要相应的多时间尺度协同框架,如多时间尺度下的交易模型等,而不同于传统电力市场包含远期、日前、实时市场等多种市场交易类型且有充分的容量市场作为保证,社区产消者以可再生能源为主而预测时间有限,更需要精细化的能源优化以

保证本地能源效率。

### 5.3 不完全信息博弈

信息交互的完整性对前文介绍的能源分享问题及其实施十分重要。在实际系统中,可能会出现用户信息受限、信息错报或通信故障导致的不完全信息,探讨不完全信息或不对称信息对社区能源分享实施的影响,以及如何保证在不完全信息下仍能实现有效的方案实施,实现弹性社区能源分享十分重要,因此对不完全信息博弈问题进行研究具有重要的现实意义。

文献[97]研究了基于双边拍卖的能量交易问题,其中博弈参与者(能源产商)仅知道自己的信息并提交混合策略下的竞标,市场交易员进行市场清算,向参与者反馈竞标收益和成交量,然后参与者再次更新竞标,由此迭代往复形成不完全信息动态博弈。该文设计了自适应学习算法生成策略概率分布并证明了该混合策略可以收敛到纳什均衡。文献[98]在通信信息(如电网和用户的实时需求)和电价丢失时引入客户代理和电网代理,根据信任概率分别估计电价和实时需求,从而建立了代理之间的贝叶斯博弈模型,其中每个参与者都希望最大化自己的效益。文中证明了贝叶斯纳什均衡的存在性。文献[72]研究了多产消者能源优化的合作博弈,设计了在纳什讨价还价模型出现信息误报时的弹性应对策略,以保证合作博弈的可行性。

不完全信息动态博弈在能源分享问题中除了考虑到的信息误报,还可能出现虚假信息和信息丢失的情况,可能影响博弈均衡的存在性和优化算法的收敛性,将对原问题造成分析和求解上的困难。因此,不完全信息博弈将成为能源分享问题中一个重要研究分支。

### 5.4 信息安全

信息安全是实施产消者能源分享必须要考虑的一个重要因素。除了在实际框架的优化过程中尽可能采用分布式优化算法外,实施能源分享的信息平台也需要考虑网络安全问题。文献[99]将互联智能电网建立为信息物理系统,设计了基于图论和一致性协议的分布式控制框架,以实现系统全局控制目标,并能有效减轻不同类型网络攻击的影响。目前,信息物理系统的网络安全问题已成为研究热点,信息物理系统的方法有望用于实现社区产消者能源分享问题中的安全与优化算法设计,如考虑虚假数据注入的负荷及电价信息等<sup>[100]</sup>。

P2P信息技术在近几年得到了飞速发展,如在越

来越多的研究中,区块链技术作为分布式的安全可信框架已被应用到智能电网中。文献[101]利用联合区块链技术提出了能源区块链这一安全能源交易系统,可用于P2P能量交易。该文提出了信用支付方法以降低支付延迟的影响,设计了基于主从博弈的信贷定价策略,所提出的能源区块链通过物联网技术实施是安全有效的。文献[38]提出一种采用区块链封锁协议的P2P电力交易系统用于电动汽车之间的能量分享。文献[64]研究了社区产消者能量分享时的P2P通讯信息块。这些研究表明,安全区块链的P2P技术作为产消者能量分享技术平台,在信息安全需求下具有较好的可行性和技术优越性。受基础设施和发展理念的限制,目前将P2P技术应用到能量分享或交易系统的实际工程还较少,此外,诸如P2P市场设计和多元能源系统识别与信任等问题也有待进一步研究。

## 6 结语

本文针对一类能源产消者用户的社区能源分享问题及相关研究进行了回顾,总结了典型的社区能源产消者类型,分析了各自的特点,指出其在能源管理和能量分享中的潜在价值;剖析了产消者能量分享的典型模式,如聚合模式、P2P模式等,归纳了各典型模式的基本特征,分析了各自的优势和局限性;讨论了社区产消者能量分享问题中涉及的能源数据预测方法;分析了博弈均衡问题及分布式优化算法;最后,针对多能量分享、信息安全等前瞻性难点问题进行了展望。希望本文的工作能为这一领域将来的研究提供一些参考。

### 参考文献(References)

- [1] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.  
(Ju P, Zhou X X, Chen W J, et al. Review on “smart grid+” [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11.)
- [2] 龚钢军,孙毅,蔡明明,等. 面向智能电网的物联网架构与应用方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 52-58.  
(Gong G J, Sun Y, Cai M M, et al. Research on the architecture and application scheme of Internet of things for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 52-58.)
- [3] 余贻鑫,刘艳丽. 智能电网的挑战性问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 1-5.  
(Yu Y X, Liu Y L. Challenging issues of smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 1-5.)
- [4] Bazilian M, Onyeji I, Liebreich M, et al. Re-considering the economics of photovoltaic power[J]. Renewable Energy, 2013, 53: 329-338.

- [5] Tran M, Banister D, Bishop J D K, et al. Realizing the electric-vehicle revolution[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(5): 328-333.
- [6] Chiang Y M. Building a better battery[J]. *Science*, 2010, 330: 1485-1486.
- [7] Minter Ellison. New tariffs to incentivise electricity consumers in South Australia[EB/OL]. [2019-05-28]. <https://www.minterellison.com/articles/new-tariffs-to-incentivise-electricity-consumers-in-south-australia>.
- [8] GREENMATCH. How popular are solar panels in the UK[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/08/how-popular-are-solar-panels-in-the-uk>.
- [9] Parag Y, Sovacool B K. Electricity market design for the prosumer era[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(4): 1-6.
- [10] Zipperer A, Aloise-Young P A, Suryanarayanan S, et al. Electric energy management in the smart home: Perspectives on enabling technologies and consumer behavior[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(11): 2397-2408.
- [11] Razzaq S, Zafar R, Khan N A, et al. A novel prosumer-based energy sharing and management (PESM) approach for cooperative demand side management (DSM) in smart grid[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(10): 275.
- [12] Fares R L, Webber M E. The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(2): 1-10.
- [13] Rathnayaka A J D, Potdar V M, Dillon T S, et al. A methodology to find influential prosumers in prosumer community groups[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 706-713.
- [14] Skopik F, Wagner C. Novel energy saving opportunities in smart grids using a secure social networking layer[C]. *The 36th Annual Computer Software and Applications Conference*. Izmir, 2012: 557-566.
- [15] Morstyn T, Farrell N, Darby S J, et al. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(2): 94-101.
- [16] Zafar R, Mahmood A, Razzaq S, et al. Prosumer based energy management and sharing in smart grid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1675-1684.
- [17] Ossenbrink J. How feed-in remuneration design shapes residential PV prosumer paradigms[J]. *Energy Policy*, 2017, 108: 239-255.
- [18] Cohen M A, Callaway D S. Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 1: Engineering simulations[J]. *Solar Energy*, 2016, 128: 126-138.
- [19] Cohen M A, Kauzmann P A, Callaway D S. Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 2: Economic analysis[J]. *Solar Energy*, 2016, 128: 139-152.
- [20] Castillo-Cagigal M, Caamano-Martín E, Matallanas E, et al. PV self-consumption optimization with storage and active DSM for the residential sector[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 2338-2348.
- [21] Mulder G, Ridder F D, Six D. Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels[J]. *Solar Energy*, 2010, 84: 1284-1293.
- [22] Cui S, Wang Y W, Lin X, et al. Residential virtual power plant with photovoltaic output forecasting and demand response[J]. *Asian Journal of Control*, 2019, 21(4): 1906-1917.
- [23] Hernández J C, Sanchez-Sutil F, Muñoz-Rodríguez F J. Design criteria for the optimal sizing of a hybrid energy storage system in PV household-prosumers to maximize self-consumption and self-sufficiency[J]. *Energy*, 2019, 186: 115827.
- [24] Keerthisinghe C, Chapman A C, Verbič G. Energy management of PV-storage systems: Policy approximations using machine learning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(1): 257-265.
- [25] Schmidt O, Hawkes A, Gambhir A, et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(8): 1-8.
- [26] Radenković M, Bogdanović Z, Despotović-Zrakić M, et al. Assessing consumer readiness for participation in IoT-based demand response business models[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 150: 119715.
- [27] Balkan Green Energy News. New ways for prosumers to interact with energy market, grid operators[EB/OL]. [2019-02-25]. <https://balkangreenenergynews.com/new-ways-for-prosumers-to-interact-with-energy-market-grid-operators/>.
- [28] Mengelkamp E, Gärtner J, Rock K, et al. Designing microgrid energy markets: A case study — The Brooklyn microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 870-880.
- [29] Cao Y, Tang S, Li C, et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 3(1): 388-393.
- [30] Moura S J, Fathy H K, Callaway D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 19(3): 545-555.
- [31] Rotering N, Ilic M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(3): 1021-1029.
- [32] Van der Meer D, Mouli G R C, Mouli G M E, et al. Energy management system with PV power forecast to optimally charge EVs at the workplace[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(1): 311-320.



- [33] Ghavami A, Kar K, Gupta A. Decentralized charging of plug-in electric vehicles with distribution feeder overload control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(11): 3527-3532.
- [34] Liu M, Phanivong P K, Shi Y, et al. Decentralized charging control of electric vehicles in residential distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(1): 266-281.
- [35] Li J, Li C, Xu Y, et al. Noncooperative game-based distributed charging control for plug-in electric vehicles in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(1): 301-310.
- [36] Liu Z, Wu Q, Huang S, et al. Optimal day-ahead charging scheduling of electric vehicles through an aggregative game model[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 5173-5184.
- [37] Yao E, Wong V W S, Schober R. Optimization of aggregate capacity of PEVs for frequency regulation service in day-ahead market[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(4): 3519-3529.
- [38] Kang J, Yu R, Huang X, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [39] Thormark C. A low energy building in a life cycle—Its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(4): 429-435.
- [40] Cui S, Wang Y W, Xiao J W. Peer-to-peer energy sharing among smart energy buildings by distributed transaction[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6491-6501.
- [41] Japan-U S. Workshop on net zero energy buildings (ZEB) in subtropical areas, the ministry of economy, trade and industry (METI)[EB/OL]. (2010-10-18). [http://www.meti.go.jp/english/press/data/20101018\\_01.html](http://www.meti.go.jp/english/press/data/20101018_01.html).
- [42] Chastas P, Theodosiou T, Bikas D. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review[J]. *Building and Environment*, 2016, 105: 267-282.
- [43] Attia S, Gratia E, De Herde A, et al. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 49: 2-15.
- [44] Pikas E, Thalfeldt M, Kurnitski J. Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 74: 30-42.
- [45] Leonard M D, Michaelides E E. Grid-independent residential buildings with renewable energy sources[J]. *Energy*, 2018, 148: 448-460.
- [46] Hamdy M, Nguyen A T, Hensen J L M. A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 121: 57-71.
- [47] Wikipedia. Apple park[DB/OL]. [2020-01-03]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Apple\\_Park](https://en.wikipedia.org/wiki/Apple_Park).
- [48] Kayo G, Hasan A, Siren K. Energy sharing and matching in different combinations of buildings, CHP capacities and operation strategy[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 685-695.
- [49] Friedman D. The double auction market institution: A survey[J]. *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*, 1993, 14: 3-25.
- [50] Chen T, Su W. Indirect customer-to-customer energy trading with reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4338-4348.
- [51] Taniguchi T, Takata T, Fukui Y, et al. Convergent double auction mechanism for a prosumers' decentralized smart grid[J]. *Energies*, 2015, 8(11): 12342-12361.
- [52] Chen K, Lin J, Song Y. Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1121-1133.
- [53] Long C, Wu J, Zhou Y, et al. Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 261-276.
- [54] Liu N, Yu X, Wang C, et al. Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: A Stackelberg game approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1088-1098.
- [55] Cui S, Wang Y W, Liu N. Distributed game-based pricing strategy for energy sharing in microgrid with PV prosumers[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(3): 380-388.
- [56] Liu N, Cheng M, Yu X, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: A hybrid approach using stochastic programming and stackelberg game[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6740-6750.
- [57] Tushar W, Chai B, Yuen C, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62(4): 2487-2498.
- [58] Cui S, Wang Y W, Xiao J W, et al. A two-stage robust energy sharing management for prosumer microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 15(5): 2741-2752.
- [59] Pourakbari-Kasmaei M, Asensio M, Lehtonen M, et al. Trilateral planning model for integrated community energy systems and PV-based prosumers—A bilevel stochastic programming approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 35(1): 346-361.
- [60] Sinha A, Malo P, Deb K. A review on bilevel optimization: From classical to evolutionary approaches

- and applications[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017, 22(2): 276-295.
- [61] Liu N, Yu X, Wang C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [62] Li C, Yu X, Yu W, et al. Efficient computation for sparse load shifting in demand side management[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 8(1): 250-261.
- [63] Tushar M H K, Zeineddine A W, Assi C. Demand-side management by regulating charging and discharging of the EV, ESS, and utilizing renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 14(1): 117-126.
- [64] Cui S, Wang Y W, Li C, et al. Prosumer community: A risk aversion energy sharing model[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 828-838.
- [65] Mengelkamp E, Notheisen B, Beer C, et al. A blockchain-based smart grid: Towards sustainable local energy markets[J]. *Computer Science-Research and Development*, 2018, 33(1/2): 207-214.
- [66] Lüth A, Zepter J M, del Granado P C, et al. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: The role of battery flexibility[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 1233-1243.
- [67] Sorin E, Bobo L, Pinson P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 994-1004.
- [68] Moret F, Pinson P. Energy collectives: a community and fairness based approach to future electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3994-4004.
- [69] Wang H, Huang J. Bargaining-based energy trading market for interconnected microgrids[C]. 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, 2015: 776-781.
- [70] Wang H, Huang J. Incentivizing energy trading for interconnected microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 2647-2657.
- [71] Wang H, Huang J. Cooperative planning of renewable generations for interconnected microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2486-2496.
- [72] An L, Duan J, Chow M Y, et al. A Distributed and resilient bargaining game for weather-predictive microgrid energy cooperation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(8): 4721-4730.
- [73] Facchinei F, Kanzow C. Generalized Nash equilibrium problems[J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 175(1): 177-211.
- [74] Li C, Xu Y, Yu X, et al. Risk-averse energy trading in multienergy microgrids: A two-stage stochastic game approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2620-2630.
- [75] Deng R, Yang Z, Hou F, et al. Distributed real-time demand response in multiseller-multibuyer smart distribution grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2364-2374.
- [76] Diagne M, David M, Lauret P, et al. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 65-76.
- [77] Yang H T, Huang C M, Huang Y C, et al. A weather-based hybrid method for 1-day ahead hourly forecasting of PV power output[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(3): 917-926.
- [78] Lydia M, Kumar S S, Selvakumar A I, et al. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 452-460.
- [79] Chen C, Duan S, Cai T, et al. Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(11): 2856-2870.
- [80] Liu Y, Qin H, Zhang Z, et al. Probabilistic spatiotemporal wind speed forecasting based on a variational Bayesian deep learning model[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114259.
- [81] Tang J, Brouste A, Tsui K L. Some improvements of wind speed Markov chain modeling[J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 52-56.
- [82] Bossanyi E A. Short-term wind prediction using Kalman filters[J]. *Wind Engineering*, 1985, 9(1): 1-8.
- [83] Zheng Z, Chen H, Luo X. A Kalman filter-based bottom-up approach for household short-term load forecast[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 882-894.
- [84] Kong W, Dong Z Y, Hill D J, et al. Short-term residential load forecasting based on resident behaviour learning[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 1087-1088.
- [85] Amasyali K, El-Gohary N M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1192-1205.
- [86] Sun Y, Yue H, Zhang J, et al. Minimization of residential energy cost considering energy storage system and EV with driving usage probabilities[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(4): 1752-1763.
- [87] 冯晓蒲, 张铁峰. 基于实际负荷曲线的电力用户分类技术研究[J]. *电力科学与工程*, 2010, 26(9): 18-22. (Feng X P, Zhang T F. Research on power user classification technology based on actual load curve[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, 26(9): 18-22.)
- [88] 张素香, 刘建明, 赵丙镇, 等. 基于云计算的居民用电行为分析模型研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(6):

- 1542-1546.  
(Zhang S X, Liu J M, Zhao B Z, et al. Research on the analysis model of residential electricity consumption behavior based on cloud computing[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1542-1546.)
- [89] Rathnayaka A J D. Development of a community-based framework to manage prosumers in smart grid[D]. Perth: School of Information System, Curtin University, 2014.
- [90] Roy D. Energy use behaviour: A window of opportunity[J]. Nature Energy, 2017, 2(6): 1-2.
- [91] Kennel F, Görge D, Liu S. Energy management for smart grids with electric vehicles based on hierarchical MPC[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(3): 1528-1537.
- [92] Cui S, Wang Y W, Shi Y, et al. An efficient peer-to-peer energy sharing framework for numerous community prosumers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, DOI: 10.1109/TII.2019.2960802.
- [93] Khorasany M, Mishra Y, Ledwich G. A decentralised bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4646-4657.
- [94] Sharma S, Xu Y, Verma A, et al. Time-coordinated multienergy management of smart buildings under uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4788-4798.
- [95] Liu N, Wang J, Wang L. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1139-1151.
- [96] Qiu H, Gu W, Xu Y, et al. Multi-time-scale rolling optimal dispatch for ac/dc hybrid microgrids with day-ahead distributionally robust scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1653-1663.
- [97] Wang H, Huang T, Liao X, et al. Reinforcement learning for constrained energy trading games with incomplete information[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 47(10): 3404-3416.
- [98] Misra S, Bera S, Ojha T, et al. ENTICE: Agent-based energy trading with incomplete information in the smart grid[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 55: 202-212.
- [99] Saad A A, Faddel S, Mohammed O. A secured distributed control system for future interconnected smart grids[J]. Applied Energy, 2019, 243: 57-70.
- [100] Jhala K, Natarajan B, Pahwa A, et al. Stability of transactive energy market-based power distribution system under data integrity attack[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5541-5550.
- [101] Li Z, Kang J, Yu R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(8): 3690-3700.

### 作者简介

王燕舞(1976—),女,教授,博士生导师,从事混杂系统、复杂网络及智能电网的研究, E-mail: wangyw@hust.edu.cn;

崔世常(1994—),男,博士生,从事智能电网优化与调度的研究, E-mail: shichang\_cui@hust.edu.cn;

肖江文(1972—),男,教授,博士生导师,从事分布式优化、博弈理论等研究, E-mail: jwxiao@hust.edu.cn;

施阳(1972—),男,教授,博士生导师,从事网络化和分布式控制系统、模型预测控制、能源系统优化与控制等研究, E-mail: yshi@uvic.ca.

### 科研团队简介

王燕舞教授科研团队依托华中科技大学人工智能与自动化学院,以及图像信息处理与智能控制教育部重点实验室,长期围绕复杂系统分析与控制、多智能体网络群集行为分析与控制、智能电网的分布式优化调度与控制等相关领域开展科研攻关.先后承担和参与国家自然科学基金项目、国家电网公司等科研项目10余项,发表SCI论文80余篇.

科研成果包括:建立了脉冲切换混杂非线性网络模型,建立了混杂非线性网络系统的分布式脉冲控制机制,提出了控制拓扑的概念,提高了分布式控制器的可实施性;建立了复杂非线性网络的数字通信框架,建立了通信网络遭受攻击的复杂动态网络模型,从多个角度阐明了网络间歇或脉冲通信特性与同步性能间的关系,揭示了不同通信机制在群集行为中的重要作用;建立了社区产销者能量分享管理框架,设计了合理的价格驱动机制,实现了点对点或端对端能量分享,提高了绿色能源的本地消纳能力等.

团队负责人王燕舞教授,入选教育部新世纪优秀人才支持计划,获教育部自然科学奖一等奖1项、湖北省自然科学奖一等奖1项,获湖北省优秀博士学位论文奖.团队重视国际交流,与加拿大维多利亚大学、美国波士顿大学、新加坡南洋理工大学等多家科研机构保持长期的合作关系.

(责任编辑:孙艺红)