

电工技术学报  
*Transactions of China Electrotechnical Society*  
ISSN 1000-6753, CN 11-2188/TM

## 《电工技术学报》网络首发论文

题目: 基于知识图谱的国内外电力市场研究综述  
作者: 边晓燕, 张璐瑶, 周波, 徐波, 林顺富  
DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210611  
收稿日期: 2021-04-28  
网络首发日期: 2021-10-06  
引用格式: 边晓燕, 张璐瑶, 周波, 徐波, 林顺富. 基于知识图谱的国内外电力市场研究综述[J/OL]. 电工技术学报.  
<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210611>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210611

# 基于知识图谱的国内外电力市场研究综述

边晓燕 张璐瑶 周 波 徐 波 林顺富  
(上海电力大学电气工程学院 上海 200090)

**摘要** 我国的电力市场深化改革正处于关键阶段。目前国内外积累了大量研究成果但缺乏系统化梳理,同时新兴研究主题不断涌现,使得动态追踪热点成为难题。知识图谱能从海量文献数据中提取出结构化的知识谱系,其可视化图形又可呈现该领域演进历程与网络结构,因此能为电力市场研究的演进轨迹及热点追踪提供新的途径。该文基于知识图谱分析近十年国内1495篇、国外5106篇电力市场相关文献,通过构建市场领域代表性的研究数据集,快速提炼国内外研究轨迹与学术热点,合成时间线、关键词网络并将其可视化,探索近十年国内外电力市场研究的演进路径;对近五年电力市场领域的核心前沿进行分析研究,以突现性和中介中心性衡量图谱的关键点,全方面、多维度地追踪电力市场的研究热点。该文的研究成果能够深刻把握电力市场热点与动向,为学者提供一种高效、快速应用的文献分析方法,具有广泛的应用前景。

**关键词:** 知识图谱 电力市场 演进轨迹 热点 动态追踪

**中图分类号:** F407.61

## Review on Domestic and International Electricity Market Research Based on Knowledge Graph

Bian Xiaoyan Zhang Luyao Zhou Bo Xu Bo Lin Shunfu

(1.Shanghai University of Electric Power College of Electrical Engineering Shanghai 200090 China)

**Abstract** The deepening reform of electricity market is at a critical stage in China. At present, a large amount of research has been accumulated at home and abroad, the corresponding systematic analysis is necessary. At the same time, new research topics continue to emerge, making it difficult for tracking research frontier. The knowledge graph can be applied to extract a structured knowledge pedigree from massive literature data, and its visual graphics can show the evolution process and network structure of the field, so it can provide a new way for the evolution trajectory and hot spots tracking of power market research. Based on the knowledge map analysis of 1495 domestic and 5106 foreign electricity market-related literature in the past ten years, this paper refined domestic and foreign research trajectories and academic hot spots by constructing representative research data sets in the market field, and synthesized timelines and co-word network maps with visualization. The evolutionary path of domestic and foreign power market research in the past ten years has been explored. The core frontiers of the power market in the past five years are analyzed, the key points of the map with emergence and intermediary centrality are measured, and the research of the power market in all aspects and multiple dimensions was tracked. The proposed approach of knowledge graph provides scholars with an efficient and fast-applied literature analysis method, which has broad application prospects.

**Keywords:** Knowledge graph, electricity market, evolution trajectory, hot spots, dynamic tracking

## 0 引言

当前国外已形成相对成熟的电力市场,拥有丰富的建设经验及教训,例如美国 PJM 电力市场实现了系统的集中控制与调度,保障市场的有效运作,其成功经验值得借鉴,但 2021 年美国德州遭受极端天气造成大面积停电,电力供需的极端不平衡在高度市场化中反映为极高的电价,一定程度上增加了公共风险。而我国还处于电力市场改革的进程之中,电力市场化进程缓慢,产生过不平衡资金等问题<sup>[1]</sup>,这表明可再生能源发电的不确定性难以适应滞后的市场机制,新能源去补贴<sup>[2]</sup>后如何提升市场竞争力成为挑战。同时,国内外针对电力市场方面的研究不断深入,涌现出了大量新兴研究主题,我国学术界对电力市场研究的动态热点追踪提出更高的要求。因此有必要对近年来国内外电力市场方面的研究进行系统性梳理,深刻把握研究热点与动向,有序推进我国电力市场相关的理论发展。

目前关于电力市场热点与动向综述方面,已有许多学者开展研究。文献[3]归纳了我国八个试点省份现货市场建设特点和促进可再生能源消纳的相关机制。文献[4-5]从政治背景、技术条件、市场驱动力、组织机构与电网架构等方面,对比分析欧洲统一电力市场、美国区域电力市场与我国电力市场的建设。文献[6]总结了各国面向高比例可再生能源电力市场研究的最新成果。然而,已有的电力市场综述研究<sup>[3-6]</sup>主要基于专家经验,并结合电力市场发展现状,从而总结出市场理论的内在演化逻辑。目前,如何利用国内外海量学术文献,基于数据技术进行文献综述与研究热点追踪成为难题。

知识图谱是科学计量学的新方法,为国内外电力市场研究的追踪热点提供了新的途径。与传统的文献综述<sup>[3-6]</sup>不同,文献的知识图谱能够从大量的文献数据中提取筛选结构化的知识序列,进而展现研究热点的演进历程、映射知识群体之间的交叉互动,从而实现对热点和新兴趋势的挖掘。目前,常见绘制图谱的工具具有 CiteSpace<sup>[7]</sup>等,这为学者提供了一种高效、可重复、快速应用的分析方法,在各个领域都具有应用前景。本文从文献的数据分析角度,调研了国内近十年 1 495 篇、国外近十年 5 106 篇电力市场相关文献。首先提出

基于知识图谱的分析框架以及图谱合成与解读。基于共词网络结构的可视化,从时间维度系统性梳理出近十年发展的演进轨迹;聚焦近五年追踪热点,呈现电力市场领域的核心前沿。最后,总结电力市场的研究轨迹与学术热点。

## 1 知识图谱分析框架

电力市场研究具有多领域交叉融合且复杂的特点。知识图谱是结构化的语义知识库,其从文本数据中以结构化的方式提取知识,通过相互联结的关系,构成可视化图谱的网状知识结构<sup>[8]</sup>。针对电力市场研究的图谱分析包括合成图谱和图谱解读,从而获得演进轨迹和核心前沿,其分析框架如图 1 所示。

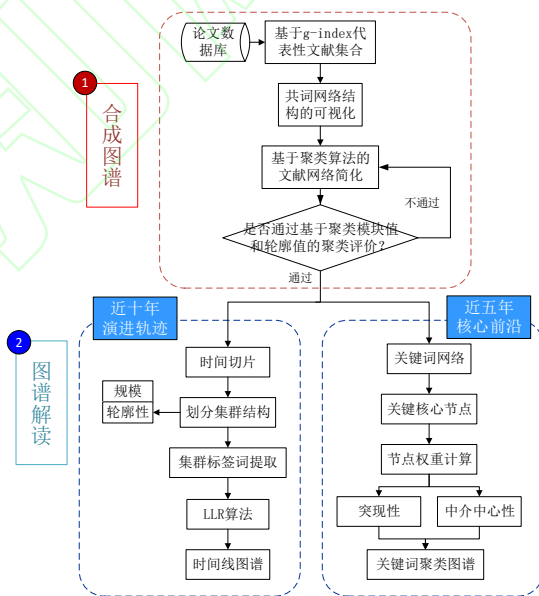


图 1 知识图谱分析框架

Fig.1 Knowledge graph analysis framework

本文利用合成图谱处理海量的文献数据,从海量文献信息中生成共词矩阵,通过谱聚类降低矩阵维数,利用可视化技术将共词矩阵可视化为共词网络。基于寻径网络算法或者最小生成树算法进行网络简化,并以聚类模块值和轮廓值来评估图谱聚类效果,选择剪枝后聚类效果最佳的网络图谱。

基于文献网络,从时间切片和关键词聚类进行图谱解读,强化图谱的可解读性。时间线图从时间切片中,划分并提取集群标签词,形成近十年演进路径;关键词聚类方面,当图谱节点众多、连接复杂时以节点的突现性、中介中心性作为识别关键

节点,把握整个图谱最核心部分,形成近五年核心前沿。

### 1.1 共词网络结构的可视化

共词分析的基本原理是在同一组文献中对一组词所出现的次数进行两两统计,通过这种共现次数来测度他们之间的亲疏关系。具体而言,从文献信息中基于共词分析将数据描绘成一个图表,根据图表关系计算相似度,生成共词的相似矩阵。

样本点  $i$  和  $j$  之间的相似度  $s(i,j)$  为

$$s(i,j) = \exp\left(-\frac{d(i,j)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $d(i,j)$  为样本点  $i$  和  $j$  之间的距离;  $\sigma$  为转换因子。

谱聚类算法是基于图论的算法,适应共词网络下以连接关系为主的应用场景。基于共现的关键词相似矩阵一般比较稀疏,可采用奇异值分解进行特征值分解,计算出相似矩阵的最小特征向量;特征分解后得到的特征向量进行聚类,利用相似矩阵的谱信息来进行特征降维,将数据聚类到少数几个维度。最后,利用可视化技术,将矩阵可视化为共词网络。

### 1.2 网络图谱的简化

基于寻径网络算法或者最小生成树算法进行网络剪枝的选择,最大程度简化网络,保留最重要的连接。其中,简化网络的图谱聚类效果是以聚类模块值和轮廓值来评估。

聚类模块值(Modularity)是衡量网络结构强度的划分质量,最早由 M. Newman<sup>[9]</sup>提出。模块值  $Q(i)$  为

$$Q(i) = \sum_{i=1}^c (E_{ii} - a_i^2) \quad (2)$$

式中,  $E_{ii}$  为集群  $i$  内所有的边数占整个网络所有边数的比值;  $a_i$  为经过集群  $i$  内所有节点的边数(包含一点在集群  $i$  内一点在集群  $i$  外的边)占整个网络的所有边数的比值。 $Q(i)$  值在 0~1 之间,其值越接近 1,表示划分网络结构的强度越高。

轮廓值(Silhouette)是评价聚类效果好坏的一种方式,其最早由 P. J. Rousseeuw 提出。它结合内聚度和分离度两种因素。

轮廓值  $S(i)$  的公式为

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (3)$$

式中,  $a(i)$  为内聚度,即  $i$  到同簇其他样本的平均距离;  $b(i)$  为分离度,即  $i$  到其他类簇的所有样本的平均距离。 $S(i)$  接近 1,则说明样本  $i$  聚类合理轮廓越明显。

### 1.3 图谱解读

时间线图谱中,对划分的各聚类集群采用对数似然比算法,提取最具代表性的词作为该集群的标签。聚类图谱中,以突现性以及中介中性性作为节点权重衡量,反映出核心关键部分。

#### 1.3.1 集群标签词抽取

对数似然比算法是一种用于信息检索与勘探的加权聚类技术,用以评估一个词对语料库的相关程度,提取出具有类别区分能力的标签词。

$H_1$  表示元素  $w_1$ 、 $w_2$  之间是相互独立的;  $H_2$  表示元素  $w_1$ 、 $w_2$  之间具有相关性。 $H_1$  和  $H_2$  符合二项式分布,其似然值  $L(H_1)$ 、 $L(H_2)$  分别为

$$L(H_1) = b(c_{12}; c_1; p_1) b(c_2 - c_{12}; N - c_1; p_1) \quad (4)$$

$$L(H_2) = b(c_{12}; c_1; p_2) b(c_2 - c_{12}; N - c_1; p_{12}) \quad (5)$$

式中,  $N$  为所有元素出现的总次;  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_{12}$  分别为元素  $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_{12}$  在语料库中出现的次数;  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_{12}$  分别为采用极大似然估计法计算元素  $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_{12}$  出现的概率;  $b(\bullet)$  为二项式分布。

$H_1$  和  $H_2$  的差异度表示为  $LLR$ , 其中似然比  $\lambda$  对数值是以 2 为底,具体公式为

$$LLR = -2\log_2 \lambda = -2\log_2 \frac{L(H_1)}{L(H_2)} \quad (6)$$

对数似然比算法不会过分放大高频词的领域相关性,通过考虑一个词对领域的正负面贡献,能够比较准确地反映领域的特性,保证抽取结果的稳定性<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.2 节点权重计算

1) 突现性是指研究点突然爆发。采用突发性检测技术,识别被引次数的突然变化,根据发生的时间序列来建立一种突发检测模型—Kleinberg 状态机模型<sup>[11]</sup>,其公式为

$$\sigma(i, r_t, d_t) = -\ln \left[ s_t p_i^{r_t} (1 - p_i)^{d_t - r_t} \right] \quad (7)$$

式中,  $\sigma(i, r_t, d_t)$  为  $t$  时刻状态产生的成本;  $s_t$  为第  $t$  时刻的突发状态序列;  $d_t$  为总共的序列;  $r_t$  为相关性的序列;  $p_i$  为相关序列发生的期望。

在  $[t_1, t_2]$  时段,序列突现的强度  $Burst$  定义为



$$Burst = \sum_{t=t_1}^{t_2} (\sigma(0, r_t, d_t) - \sigma(1, r_t, d_t)) \quad (8)$$

突现节点通常揭示了有潜力的研究主题。在本文的网络图谱中，突现性用红色引用环表示。

2) 中介中心性是指网络中经过某点并连接这两点的最短路径占这两点之间的最短路径线总数之比，用以测度点在网络中的重要性<sup>[12]</sup>，中介中心性  $C_B(v)$  为

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (9)$$

式中， $\sigma_{st}(v)$  为节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径中经过节点  $v$  的数量； $\sigma_{st}$  为节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径数量。

在图谱中具体表现可分为两类：第一类为本领域中高度相连的枢纽节点；第二类为连接不同集群的转折点。一般而言，跨领域的研究会导致新兴趋势的诞生，因此更倾向于关注第二类转折点。在本文的网络图谱中，中介中心性用紫色引用环表示。这种节点权重计算，可只研究网络中少量的连接点，而不是整个网络，大大提高了图谱的可解读性。

## 2 电力市场研究演进轨迹

针对国内近十年 1 495 篇、国外近十年 5 106 篇电力市场的相关研究，采用基于知识图谱的方法系统化梳理，划分并提取集群标签词，从而提炼出随时间发展的演进轨迹。

### 2.1 国内电力市场的演进轨迹

本小节以“主题  $SU = (\text{批发} + \text{零售} + \text{中长期} + \text{现货})$ ，文献来源：(SCI, EI 及北大核心期刊)，时间跨度=2011-2020”等组配索引式，基于中国知网 CNKI 中电力市场相关的总共 1 495 篇文章，对国内电力市场的研究演进轨迹进行梳理。依据一年时间间隔内的数据构成每个单独的时间切片网络，整合这些独立的网络形成随时间推移的演变轨迹。单个时间切片的网络拓扑结构见表 1。以 2020 年的单个切片网络为例，2020 年 515 篇表征影响力的  $g\text{-index}$  指数<sup>[13]</sup>为 12 以上的代表性文献集合，组成 81 个节点、132 条连线的单年切片网络。

表 1 电力市场切片网络结构

Tab.1 Slicing network structure of power market

年份	$g\text{-index}$	文献数量	引文数量	节点	连线
----	------------------	------	------	----	----

2011	12	169	517	81	158
2012	9	115	403	66	88
2013	10	110	377	69	110
2014	11	115	419	74	119
2015	9	90	309	63	88
2016	11	140	480	74	110
2017	11	175	456	78	153
2018	11	113	362	71	125
2019	12	212	583	88	198
2020	12	256	515	81	132

整合单个的时间网络形成国内近十年电力市场研究的关键词演化路径。从时间维度表示知识演进的视图，勾画聚类之间的关系和某个聚类的历史跨度，展示着知识群体之间的更新和相互影响。其中，横轴为研究时间，纵轴为依次排列划分后的知识集群。每个集群的变化轨迹通过包含时间线的演化路径来显示。本小节得出了 17 个聚类集群，并采用 1.3 节提及的对数似然比算法，提取群体的标签词，在集群序号之后加以显示。选取 #0~4 进行展示，如附图 1 所示。

知识图谱中，划分后的集群结构的特征量纲包括：规模、轮廓值、代表年份以及标签词。以集群规模较大的 #0~8 分析集群结构特征，如图 2 所示。关键词集群内成员较多的，表示集群规模较大，比较具备代表性。聚类轮廓值接近于 1，说明聚类相似度高。从图中可以看出，集群的规模超过 20 个，集群具有代表性；仅有集群 #6 轮廓值较低，其余集群轮廓值都接近于 1，表明同一关键词集群的同质程度高，相似度高。

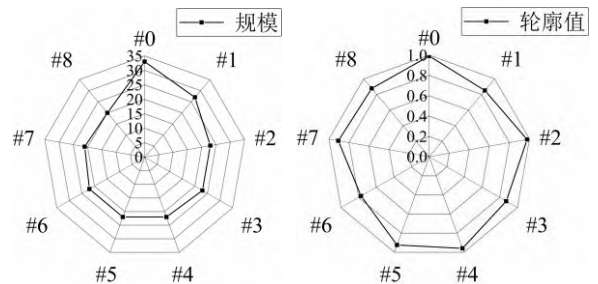


图 2 集群结构特征

Fig.2 Cluster structure characteristics

接下来，以 #1 集群(调峰辅助服务)为例对演化路径的时间线进行解读，演进轨迹如图 3 所示。按年份对应到集群中的节点，依次递进解读节点。关键词节点中包含着筛选后最相关的文献数据，以此展现研究轨迹的演变。



图 3 #1 集群演进轨迹

Fig.3 #1 Cluster evolution trajectory

应用场景：探索促进新能源消纳的市场机制，例如去中心化的市场机制可充分反映成员之间的良性竞争；泛在电力物联网下有更多的挑战<sup>[14]</sup>，例如“边缘-云”计算架构<sup>[15]</sup>、区块链去中心化<sup>[16]</sup>等。

市场主体：参与主体由分布式能源转变到多能源耦合。对于分布式能源的管理涉及虚拟电厂、微电网等多种主体的管理方式<sup>[17]</sup>，商业虚拟电厂的运营机制<sup>[18]</sup>是目前的研究难点，可考虑其加入辅助服务等交易品种；电储热与风电场联动参与调峰辅助服务，促进消纳弃风；发展到现今考虑控制因素的交互能源机制<sup>[19]</sup>，从而实现系统能源互动，同时利用分布式调度弥补信息不对称的缺陷<sup>[20]</sup>。此外，调峰辅助服务市场应发挥火电等传统发电商的深度调峰效益<sup>[21]</sup>，刺激具备灵活稳定性的市场成员主动参与调峰。

政策机制：商业模式节点同时连接#1 集群内市场机制、分布式能源、泛在电力物联网等多个节点，推动市场改革归根于商业模式的摸索<sup>[22]</sup>，例如规模化分布式储能提供辅助服务的自盈利模式以及协同共赢的共享储能模式等；从北欧及美国市场机制建设中吸取先进的经验<sup>[23]</sup>，能源转型的阶段结合国情因地制宜建设中国特色电力市场的顶层设计<sup>[24]</sup>，同时调峰辅助服务也是中国特色的交易品种。

## 2.2 国外电力市场的演进轨迹

本小节以“主题：(electricity NEAR/5 market)，文献类型：(Article)，语种：(English)，索引=SCI- EXPANDED，时间跨度=2011-2020”等组配索引式，基于 Web of science 检索电力市场相关的 5 106 篇文章，对国外电力市场的研究演进轨迹进行梳理。单个时间切片的网络信息见表 2，以 2020 年的网络结构为例，2020 年 558 篇 g-index 指数 36 以上的代表性文献集合，组成 253 个节点、759 条连线的单年切片网络。

表 2 电力市场切片网络结构

Tab.2 Slicing network structure of power market

年份	g-index	文献数量	引文数量	节点	连线
2011	25	332	2 003	178	534
2012	24	300	1 951	173	519
2013	29	399	2 358	207	621
2014	30	403	2 708	212	636
2015	34	434	3 136	238	714
2016	42	583	3 754	284	852
2017	42	562	3 841	284	852
2018	52	722	4 570	342	1 026
2019	52	813	5 045	346	1 038
2020	36	558	3 059	253	759

整合单个的时间网络形成的研究演进轨迹如图 2 所示，呈现了国外近十年电力市场研究演化路径。基于对数似然比算法抽取网络图谱的标签词，共划分了 23 个集群标签。附录中显示聚类标签 0~4 号。

以集群规模较大的 0~8 号分析集群结构特征，如图 4 所示。集群 0 号有 44 个成员，规模最大，是最具有代表性的集群之一。同时集群#0~8 的轮廓性均超过 0.8，说明集群内的各成员之间连接紧密。

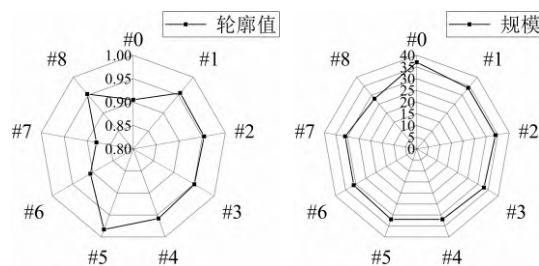


图 4 集群结构特征

Fig.4 Cluster structure characteristics

接下来，以集群 0 号(负荷预测)为例对演化路径的时间线进行解读，路径如图 5 所示。

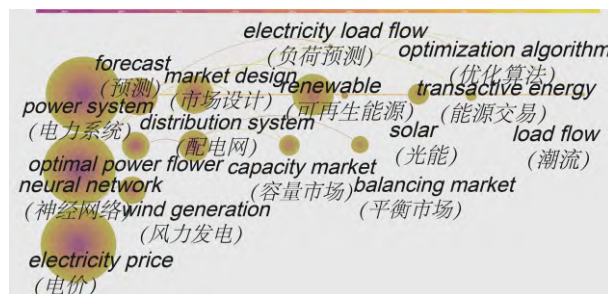


图 5 0 号集群演进轨迹

Fig.5 No.0 Cluster evolution trajectory

应用场景：单个市场支撑电力交易的难度大

且风险较高,因此负荷预测的应用场景需要考虑市场之间的耦合,例如“能源+容量”、“能源+辅助服务”等。由图5可知,2015纯能源市场引起广泛的讨论,长期而言纯能源市场促进转型低碳,然而可能出现能源短缺的风险,稀缺电价导致系统成本增加。因此容量市场受到投资者支持<sup>[25]</sup>,其发电能力可靠,供应安全稳定,同时需求响应和储能的加入可实现发电充足性。近些年P2P(peer to peer)能源交易平台率先在瑞士落地实施<sup>[26]</sup>,去中心化的市场机制设计<sup>[27]</sup>是双边能源交易的基础。联合双向能源和辅助服务市场中交互式电网系统的协同优化<sup>[28]</sup>,对分布式能源与配电网运营商的经济性、灵活性以及可靠性进行评估<sup>[29]</sup>。

解决方法：随着市场的转变与发展，负荷预测已成为一个重要的研究领域，是电力市场运营和规划的关键任务。短期负荷预测常用长短期记忆、回声状态网络等模型，分布式学习算法对于预测复杂地理分布的用户非常具有潜力。近些年采用相似日法衡量气候的影响因素<sup>[30]</sup>，最新的发展轨迹为机器学习模型<sup>[31]</sup>，用于预测技术的发展，支撑后续投标策略和估算盈利。

### 3 电力市场的核心前沿

本节对国内近五年 896 篇、国外近五年 3 238 篇电力市场的相关研究,采用基于知识图谱的方法动态追踪热点,呈现电力市场领域的核心前沿。基于关键词出现频次进行研究热点的可视化;基于节点权重探测核心前沿,权重以突现性以及中介中心性进行衡量,提炼出电力市场研究的关键核心。

### 3.1 国内电力市场的核心前沿

本小节数据来源于中国知网 CNKI 中近五年电力市场相关的文献, 总计 896 篇。结合 1.2 节提及的图谱剪枝, 对生成的单年网络或综合网络选择寻径网络算法或者最小生成树算法进行裁剪简化, 结果见表 3。对比四种方式的综合聚类效果可知, 采用寻径网络算法裁剪单年网络的效果最佳。

表 3 不同聚类裁剪算法效果对比

Tab.3 Comparison of the effects of different clustering and clipping algorithms

网络 裁剪	算法	聚类模块 化值 (Q)	聚类轮 廓值 (S)	综合聚 类 (Q,S)
单年	寻径网络算法	0.7 116	0.8 952	0.7 929

单年	最小生成树算法	0.7 004	0.8 989	0.7 873
综合	寻径网络算法	0.5 733	0.8 513	0.6 851
综合	最小生成树算法	0.9 215	0.6 429	0.7 574

### 3.1.1 关键词网络图谱

图谱剪枝后,优化的关键词网络如图 6 所示。节点叠加成的树环大小表示每年的被引频次,出现频次较高的热点关键词有现货市场、辅助服务以及需求响应等。以现货市场节点为例加以说明,梳理该节点及其连接关系。



图 6 关键词网络图谱

Fig.6 Keywords network map

现货市场节点以及连接如图 7 所示, 从其连接关系中可以看出, 目前现货市场中存在有不平衡费用、与中长期市场的衔接以及串谋竞价等问题。这些问题归根结底在于市场机制的不成熟, 而市场机制中的重要环节之一是电价的机制设计。其大致可分为两种思路: ①采用新方法的传统定价模式, 如利用多智能体强化学习确定节点边际电价<sup>[32]</sup>; ②采用新的定价模式, 如凸包定价模式<sup>[33]</sup>仍处于摸索阶段。此外, 新兴的交易品种有金融输电权, 金融产品的衍生能够更加还原电力的商品属性。



图 7 现货市场节点

Fig.7 Spot market node

由此看来,在知识图谱中可以选择任意感兴趣的节点并加以剖析,这种方式较为主观,当节点众多、连接复杂时难以把握整个图谱最核心的部分。接下来本节从节点的权重角度,探测出图谱的关键核心节点,以此捕捉电力市场相关的核心前沿。



3.1.2 关键核心节点

结合 1.3 节提及的节点权重计算,以突现性以及中介中兴性作为衡量,探测出关键节点,并在图谱中反映出关键节点。知识图谱中,突现性表现为节点中心的红色引用环,中介中心性表现为节点最外围的粉色引用环。

3.1.2.1 突现节点

以最小持续时间 1 年,寻找到 12 个突现词,结果见表 4。红色方块对应着时间轴 2016~2020 年中的突现年份。

表 4 关键节点-突现词表

Tab.4 Key node-emergent vocabulary			
类别	突现词	强度	2016~2020 年
背景	能源互联网	2.01	■■■■■
	电力市场改革	1.54	■■■■■
市场主体	虚拟发电厂	2.57	■■■■■
交易品种	辅助服务	3.05	■■■■■
	深度调峰	1.41	■■■■■
	调频	1.41	■■■■■
应用场景	能量管理	1.49	■■■■■
	不确定性	1.4	■■■■■
	购售电策略	1.35	■■■■■
解决方法	合作博弈	1.44	■■■■■
	非合作博弈	1.35	■■■■■
	强化学习	1.35	■■■■■

由表 5 可知,能源互联网与电力市场改革属于研究背景的突现。在此背景下,针对综合能源系统的能源市场的推行,服务商参与市场的行为决策以及多能源耦合的网络阻塞管理等问题仍在研究。同时,电力市场改革突现的时间点与中央发布《进一步深化电力体制改革的(中发[2015]9 号)文件》的时间相吻合。此外,突现性还体现在市场主体、交易品种以及应用场景等。以辅助服务为代表的交易品种是近五年突现强度最高的关键词,其包含的交易品种调频与深度调峰持续突现 3 年,这表明目前电力市场还在探索辅助服务相关的研究。因此,以此节点为例,回溯至网络图谱并加以解析,图谱如图 8 所示。

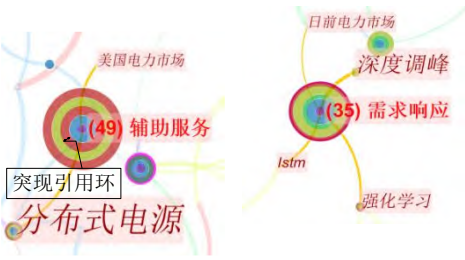


图 8 辅助服务节点

Fig.8 Auxiliary Service Node

从网络图谱中辅助服务节点及其连接关系可以看出,分布式电源凭借灵活调节的优势成为辅助服务市场的核心成员,如何整合其灵活性挖掘潜在市场力仍需进一步探索。交易品种中广泛应用的是深度调峰,在此环节需求响应的参与<sup>[34]</sup>越来越受到重视,要加强需求响应主动参与市场,如利用强化学习等算法得出其最优决策<sup>[35]</sup>。

3.1.2.2 中介中心节点

从高到低排列节点的中介中心性,截取前 8 个中介中心性词,结果见表 5。寻找的中介中心性词中,市场主体相关的最多,研究对象因更多考虑的为主动配电网、电动汽车等。同时,应用场景中最新颖的是商业模式。主动配电网是中介中心性最高的关键词,接下来以此节点为例解析。

表 5 关键节点-中介中心词表

Tab.5 Key node-intermediary central vocabulary					
强度	频次	中介中心词	强度	频次	中介中心词
0.80	5	主动配电网	0.38	22	可再生能源
0.45	16	电动汽车	0.33	7	优化调度
0.43	9	分布式能源	0.30	3	产消者
0.43	7	鲁棒优化	0.26	6	商业模式

主动配电网节点以及连接如图 9 所示。主动配电网融合了多个领域内的研究,例如可再生能源、电动汽车等,目前研究借助区块链的存储技术优化交易策略<sup>[36]</sup>,以此作为智能合约的基础。其次,与鲁棒优化节点相连接,而鲁棒优化应用场景应考虑规划与运行的相结合的优化配置<sup>[37]</sup>。同时,高比例可再生能源的电力市场,应更多考虑以电动汽车为代表的产消者参与能量交易市场的商业模式。





图 9 主动配电网节点

Fig.9 Active distribution network Node

### 3.2 国外电力市场的核心前沿

本小节数据来源于 Web of science 检索 3 238 篇相关文献。生成关键词网络图谱，并采取不同的优化算法进行图谱剪枝，结果见表 6。对比聚类效果可知，综合聚类效果最佳为 0.877 9。

表 6 不同聚类裁剪算法效果对比

Tab.6 Comparison of the effects of different clustering and clipping algorithms

网络 裁剪	算法	聚类模块 化值 (Q)	聚类轮 廓值 (S)	综合聚 类 (Q,S)
单年	寻径网络算法	0.5 256	0.7 923	0.632
单年	最小生成树算法	0.5 644	0.7 923	0.6 592
综合	寻径网络算法	0.8 262	0.9 364	0.8 779
综合	最小生成树算法	0.9 229	0.6 957	0.7 933

基于寻径网络算法对综合网络裁剪，聚类效果明显优于单年网络。这是由于文献数量增加，导致单年裁剪的网络划分模糊，使得其聚类模块值较低，进而影响了整体的聚类效果。因此，选择对综合网络裁剪，得到关键词的聚类图谱，如图 10 所示。关键词网络图谱中出现频次最高的有模型、优化、需求响应、可再生能源、电价以及不确定性等。完整的图谱展示了全部的信息，但由于数据过多使得图谱节点众多、连接复杂，从而缺乏可读性。因此，接下来依据节点的权重，提炼出关键节点，聚焦于局部图谱。

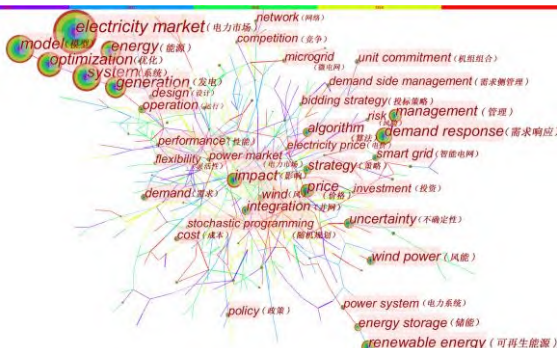


图 10 关键词网络图谱

Fig.10 Keywords network map

#### 3.2.1 关键核心节点

##### 3.2.1.1 突现节点

以最小持续时间为一年，寻找 16 个突现关键词，结果见表 7。

表 7 关键节点-突现词表

Tab.7 Key node-emergent vocabulary

类别	突现词	强度	2016-2020
交易 品种	spinning reserve (旋转备用)	4.82	■■■■■■
能源 网络	energy hub (能量枢纽)	3.91	■■■■■■
	optimal power flow (最优潮流)	5.07	■■■■■■
	energy consumption (能源消耗)	3.69	■■■■■■
电价	price forecasting (价格预测)	4.13	■■■■■■
	real-time pricing (实时电价)	3.63	■■■■■■
	tariff (税费)	3.11	■■■■■■
成员	prosumer (产消者)	3.94	■■■■■■
	oligopoly (寡头垄断)	3.79	■■■■■■
	combined heat and power (热电联产)	3.77	■■■■■■
方法	wind power generation (风力发电)	3.71	■■■■■■
	home microgrid (家庭微网)	3.13	■■■■■■
	stochastic process (随机过程)	5.33	■■■■■■
方法	supply function equilibrium (供给函数均衡)	3.44	■■■■■■
	blockchain (区块链)	3.26	■■■■■■
	agent-based simulation (代理系统仿真)	3.11	■■■■■■

从表 7 中可知，突现强度比较高的关键词有随机过程、最优潮流、以及电价预测。区别于中国的定价机制，国外在电价预测方面发展迅猛。在此领域中，机器学习算法仍具有研究价值。最新突现的关键词有能量枢纽、区块链，例如考虑信息勾鸿决策能量枢纽的管理仍需提高其决策灵活性。随机过程节点兼具突现性高以及时间最新，以此节点为例展示其在网络图谱中的具体连接，如图 11 所示。从图中可以看出，随机过程方法，应用于不确定性因素的量化处理，或者计及发电侧经济性的最优运行策略。



图 11 随机过程节点

Fig.11 Stochastic process node

### 3.2.1.2 中介中心节点

从高到低排列节点的中介中心性，截取前 8 个中介中心性词，结果见表 8。应用场景中最新颖的是能量交易。能量交易中，需求响应的环境效益<sup>[38]</sup>的是一个相对较新的话题，碳排放交易是其中不可或缺的环节。通过跟踪需求响应的碳排放量，有效地指导排放交易计划。从表中可以看出，聚合商是中介中心性最高的节点，接下来以此节点为例解析。

表 8 关键节点-中介中心词表

Tab.8 Key node-intermediary central vocabulary

强度	频次	中介中心词	强度	频次	中介中心词
1.35	59	aggregator (聚合商)	0.84	79	framework (框架)
1.18	13	transactive energy (能量交易)	0.70	74	electric vehicle (电动汽车)
1.02	21	prosumer (产消者)	0.67	7	offering strategy (供应策略)
0.88	10	home microgrid (家庭微网)	0.51	47	ancillary service (辅助服务)

聚合商节点以及连接如图 12 所示。常见的聚合商有虚拟电厂、电动汽车聚合商。虚拟电厂的灵活运行缓解网络堵塞，提高其集成能源的附加价值；电动汽车聚合商的管理，需考虑驾驶模式、市场价格的不确定性<sup>[39]</sup>。此外，电动汽车通过 V2G(vehicle-to-grid)提供电网辅助服务，提高车网系统灵活性<sup>[41]</sup>。市场机制对于充分开发产消者的潜力是非常有必要的<sup>[42]</sup>，鼓励本地配电网内的发电和消费，同时利用机器学习等算法为聚合商提

供决策支撑。



图 12 聚合商节点

Fig.12 Aggregator node

## 4 结论

本文立足国内外电力市场相关研究，追踪国内外在市场化进程中的研究成果，以十年为时间尺度刻画研究聚类集群中发展演变轨迹，详细而全面展示各个集群内部随时间的演进过程；以五年为时间尺度抓取研究热点词，形成关键词网络图谱，采用中介中心性衡量关键节点以及重要连接，采用突现词挖掘集群中具有潜力的研究主题，实现专业领域的研究前沿跟踪。所得具体结论如下：

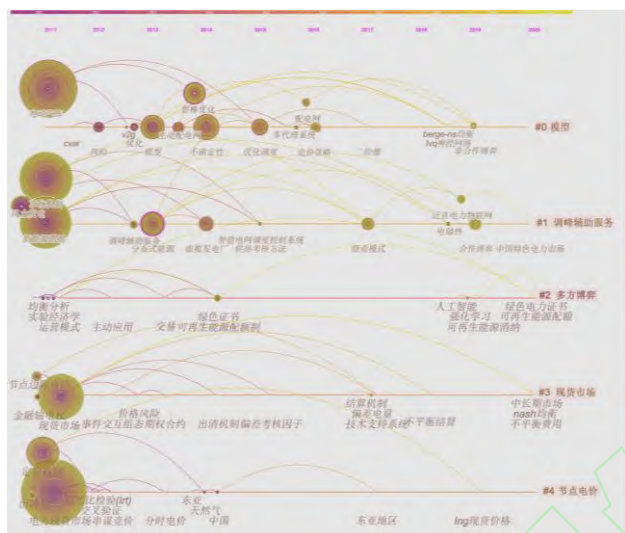
1) 国内的演进轨迹和核心前沿：商业模式为研究轨迹中连接最多的节点，商业模式的探索例如规模化分布式储能提供辅助服务的自盈利模式等。辅助服务为近五年突现强度最高的关键词，其交易品种中广泛应用的有深度调峰，在此环节加强以需求响应为代表的灵活性资源的主动参与市场。主动配电网是中介中心性最高的关键词，借助区块链的存储技术优化交易策略；鲁棒优化等算法的应用场景应考虑规划与运行的相结合的优化配置；高比例可再生能源的电力市场，应更多考虑以电动汽车为代表的产消者参与能量交易市场的商业模式。

2) 国外的演进轨迹和核心前沿：纯能源市场稀缺电价导致系统成本增加，容量市场成为热点；同时，去中心化的市场机制设计仍在实行与探索中。在电价预测方面发展迅猛，在此领域中，机器学习算法仍具有研究价值；聚合商是中介中心性最高的关键词，以虚拟电厂、电动汽车为代表的聚合商，鼓励其主动为电网提供灵活性。

3) 针对电力市场领域的发展前沿，本文提供了一种基于知识图谱的可重复、系统化方法来刻

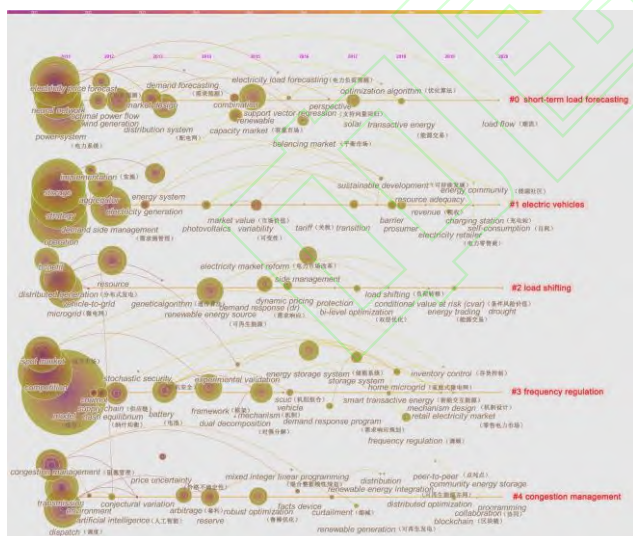
画研究领域的发展历程,可广泛应用于各个研究领域。可视化图谱从视觉分析角度呈现领域专业的进化阶段;视觉编码中赋予的节点权重-中介中心性、突现性,识别专业领域的关键核心。

## 附录



附图1 国内电力市场演化路径

App.Fig.1 The evolution path of domestic electricity market



附图2 国外电力市场演化路径

App.Fig.2 The evolution of foreign electricity market

## 参考文献

[1] 曾鹏骁, 孙瑜, 季天瑶, 等. 金融输电权市场的收入充裕度问题研究及其对我国的启示[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3367-3380.  
Zeng Pengxiao, Sun Yu, Ji Tianyao, et al. Research on revenue adequacy of financial transmission

rights market and its enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3367-3380.  
[2] 国家发展改革委关于完善风电上网电价政策的通知(发改价格〔2019〕882号)[EB/OL]. 北京: 国家发展改革委, 2019[2019-5-21].  
[https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201905/t20190524\\_962453.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201905/t20190524_962453.html)  
[3] 樊宇琦, 丁涛, 孙瑜歌, 等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1729-1752.  
Fan Yuqi, Ding Tao, Sun Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.  
[4] 丁一, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1): 国外市场启示、比对与建议[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2401-2410.  
Ding Yi, Xie Kai, Pang Bo, et al. Research on key issues of a unified national power market with chinese characteristics (1): Enlightenment, comparison and suggestions from foreign markets[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2401-2410.  
[5] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3187.  
Song Yonghua, Bao Minglei, Ding Yi, et al. Summary of the key points of my country's power spot market construction under the new electricity reform and relevant suggestions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3187.  
[6] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.  
Xiao Yunpeng, Wang Xifan, Wang Xiuli, et al. Summary of research on electricity market facing high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.  
[7] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.  
Chen Yue, Chen Chaomei, Liu Zeyuan, et al. Methodological function of CiteSpace knowledge graph[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.  
[8] 侯海燕. 基于知识图谱的科学计量学进展研究[D].



- 大连: 大连理工大学, 2006.
- [9] Newman M, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 423-433.
- [10] 舒万里. 中文领域本体学习中概念和关系抽取的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [11] Kleinberg J. Bursty and hierarchical structure in streams[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2003, 7(4): 91-101.
- [12] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016.
- [13] Egghe L. Theory and practise of the g-index[J]. *Scientometrics*, 2006, 69(1): 131-152.
- [14] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3175-3183.
- Wang Xuanyuan, Liu Dunnan, Liu Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [15] 赵昊天, 王彬, 潘昭光, 等. 支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂: 研发与应用[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 111-121.
- Zhao Tianhao, Wang Bin, Ban Shaoguang, et al. Research and application of park-level multi-energy virtual power plants supporting cloud-cluster-end multi-level synergetic dispatch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 111-121.
- [16] 吉斌, 朱敏健, 张怀宇, 等. 基于区块链技术的电力交易流程建模研究[J]. *电气技术*, 2020, 21(6): 26-34.
- Ji Bing, Zhu Minjian, Zhang Huaiyu, et al. Research on modeling of electric power transaction process based on blockchain technology[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21(6): 26-34.
- [17] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(13): 1-9.
- Wei Zhinong, Yu Shuang, Sun Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 1-9.
- [18] 刘浩文, 刘东, 陈张宇, 等. 多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2533-2541.
- Liu Haowen, Liu Dong, Chen Zhangyu, et al. Optimal reactive power service clearing based on multilevel cooperative VPP [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2533-2541.
- [19] 胡俊杰, 王坤宇, 艾欣, 等. 交互能源: 实现电力能源系统平衡的有效机制[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 953-966.
- Hu Junjie, Wang Kunyu, Ai Xin, et al. Transactive energy: An effective mechanism for balancing electric energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39 (4): 953-966.
- [20] 陈新和, 裴玮, 邓卫. 基于代理模型的分布式能源现货市场运营模式[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(10): 107-116.
- Chen Xinhe, Pei Wei, Deng Wei. Surrogate model based operation mode of distributed energy spot market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 107-116.
- [21] 罗桓桓, 王昊, 葛维春, 等. 考虑报价监管的动态调峰辅助服务市场竞价机制设计[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(9): 1935-1947, 1955.
- Luo Huanhuan, Wang Hao, Ge Weichun, et al. Design of dynamic peak regulation ancillary service market bidding mechanism considering quotation supervision[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1935-1947, 1955.
- [22] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(14): 2-9, 189.
- Ding Yi, Hui Hongxun, Lin Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41 (14): 2-9, 189.
- [23] 包铭磊, 丁一, 绍常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 4881-4892.
- Bao Minglei, Ding Yi, Shao Changzheng, et al. Review of nordic electricity market and its suggestions for China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(17):4881-4892.
- [24] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特

- 色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-379.
- Chen Guoping, Liang Zhifeng, Dong Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379.
- [25] Keles D, Bublitz A, Zimmermann F, et al. Analysis of design options for the electricity market: The German case[J]. Applied Energy, 2016, 183(1): 884-901.
- [26] Ableitner L, Tiefenbeck V, Meeuw A, et al. User behavior in a real-world peer-to-peer electricity market[J]. Applied Energy, 2020, 270.
- [27] Morstyn T, Teytelboym A, McCulloch M D. Designing decentralized markets for distribution system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2128-2139.
- [28] Wu Yiwei, Shi Jian, Lim G J, et al. Optimal management of transactive distribution electricity markets with co-Optimized bidirectional energy and ancillary service exchanges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4650-4661.
- [29] Xiao Yunpeng, Wang Xifan, Pinson P, et al. Transactive energy based aggregation of prosumers as a retailer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3302-3312.
- [30] Barman M, Choudhury N B D, Sutradhar S. A regional hybrid GOA-SVM model based on similar day approach for short-term load forecasting in Assam, India[J]. Energy, 2018, 145(1): 710-720.
- [31] Bouktif S, Fiaz A, Ouni A, et al. Multi-Sequence LSTM-RNN deep learning and metaheuristics for electric load forecasting[J]. Energies, 2020, 13(2): 391-414.
- [32] 唐成鹏, 张粒子, 刘方, 等. 基于多智能体强化学习的电力现货市场定价机制研究(一): 不同定价机制下发电商报价双层优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 536-553.
- Tang Chenpeng, Zhang Lizi, Liu Fang, et al. Research on pricing mechanism of electricity spot market based on multi-agent reinforcement learning (Part I): Bi-level optimization model for generators under different pricing mechanisms[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 536-553.
- [33] 吴辰晔, 孙健. 凸包定价模式下的电力市场潜在市场力分析方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 101-108.
- Wu Chenye, Sun Jiang. Analysis method for potential market power of electricity market in convex hull pricing mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 101-108.
- [34] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1973-1984.
- Wu Jiechen, Ai Xin, Hu Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1973-1984.
- [35] 孙毅, 刘迪, 李彬, 等. 深度强化学习在需求响应中的应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 183-191.
- Sun Yi, Liu Di, Li Bing, et. Application of deep reinforcement learning in demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 183-191.
- [36] 叶畅, 苗世洪, 刘昊, 等. 联盟链框架下主动配电网电力交易主体合作演化策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1739-1753.
- Ye Chang, Miao Shihong, Liu Hao, et al. Cooperative evolution strategy of power transaction entities in active distribution network under the framework of alliance chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1739-1753.
- [37] 孙玲玲, 贾清泉, 张弓, 等. 考虑运营交易的微电网优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2221-2233.
- Sun Linlin, Jia Qingquan, Zhang Gong, et al. Optimal configuration method of microgrid considering operation transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2221-2233.
- [38] Wang Yunqi, Qiu Jing, Tao Yuechuan, et al. Carbon-Oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.

- [39] Porras A, Fernandez-Blanco R, Morales JM, et al. An efficient robust approach to the day-ahead operation of an aggregator of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4960-4970.
- [40] 贾雨龙, 米增强, 余洋, 等. 计及不确定性的柔性负荷聚合商随机-鲁棒投标决策模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4096-4107.
- Jia Yulong, Mi Zengqiang, Yu Yang, et al. Fast and coordinated charging strategy of electric bus considering time-of-use price[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4096-4107.
- [41] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与 V2G 的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
- Chen Lijuan, Qin Meng, Gu Shaopin, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.
- [42] 吴界辰, 艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 1-18.
- Wu Jiechen, Ai Xin. Optimal operation of prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 1-18.

---

#### 作者简介

边晓燕 女, 1976 年生, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、风力发电。

E-mail: kuliz@163.com

周 波 男, 1980 年生, 讲师, 研究方向为电力市场运营, 交易机制研究及交易大数据分析。

E-mail: ryanz125@163.com (通信作者)

(编辑 赫蕾)