

区域能源互联网时滞复杂动力学网络模型 及度量指标体系研究综述

郭敏, 夏明超*, 陈奇芳

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

A Review of Time-delay Complex Dynamic Network Model and Measurement Indexes for Regional Energy Internet

GUO Min, XIA Mingchao*, CHEN Qifang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

Abstract: Research on regional energy Internet models and measurement indexes is of major significance for coordinated planning, optimal operation, and avoiding cascading failures of multi-energy systems in multiple domains. Based on the energy self-organization and energy community, from the perspective of complex networks to perform the regional energy complex dynamical network model and measurement indexes research, theoretical support is provided for the application of complex network analysis in regional energy Internet research. This is accomplished by summarizing the numerous challenges facing the complex dynamic network institute, and putting forth the research area energy Internet time-delay research idea and method of complex dynamic network model and measurement indexes.

Keywords: regional energy Internet; time-delay complex dynamic network; measurement of the model; index system

摘要: 研究区域能源互联模型及度量指标体系对多领域多能系统协调规划、优化运行以及避免级联故障发生具有重要意义。基于能源自组织和能源群落,从复杂网络视角开展区域能源互联网复杂动力学网络模型及度量指标体系的研究,通过总结国内外研究现状、面临的主要挑战以及亟需解决的关键科学问题,提出建立区域能源互联网时滞复杂动力学网络模型和度量指标体系的研究思路与方法,为基于复杂网络分析研究区域能源互联网提供理论支撑。

关键词: 区域能源互联网; 时滞复杂动力学网络; 模型度量; 指标体系

0 引言

区域能源互联网^[1]依托信息物理系统^[2],耦合能源、信息、交通及社会等网络,灵活协调冷、热、电、气等多能流的生产、转化、传输、存储和使用,有望提升多能利用效率和最大比例优先消纳可再生能源^[3]。现有区域能源互联网通常包括电力、热力、制冷、燃气等多能耦合网络^[4-5],部分研究开始针对能源、信息、交通以及社会等不同领域网络的耦合互联,全盘考虑优先消纳可再生能源^[6]、促进可持续发展^[7]。

区域能源互联网的模型描述和度量指标体系的构建是深入研究能源、信息、交通及社会等网络协调规划、优化运行以及故障级联等问题的基础。区域能源互联网耦合互联智能电网、智能热网(区域供热和制冷)、智能燃气网和交通、社会等网络,在多领域、多系统、多场景中形成复杂网络,表现出小世界、无标度以及群落结构等复杂网络^[8-9]特征。复杂网络分析作为目前研究交通、移动通信、社会关系、能源等各个领域热点问题的基础理论,有助于理解多领域耦合系统的复杂互动机制^[10],建立区域能源互联网的复杂网络模型和度量指标体系,对深入研究大规模能源、信息、交通及社会等网络耦合协调规划、优化运行以及避免故障级联具有重要意义。

基于复杂网络分析建立不同网络的模型可以对区域能源互联网进行抽象描述^[11-12]。文献[13]考虑信息物理系统的融合,建立区域能源互联网的复杂网络拓扑模型,研究不同节点的相互作用关系和能量分布情

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677003)。

National Natural Science Foundation of China(51677003).

况。文献[14]将城市看作复杂网络,研究其多能流的动态演化,并应用到优先消纳可再生能源和热电联产系统推广的实际工程中。文献[15]考虑京津冀城市群一体化发展,建立京津冀城市群的多能流复杂网络模型,分析其动态演变过程,为城市一体化发展提供理论依据。同时,面向广泛分布式可再生能源的优化组合能源系统设计模型也已被关注^[16]。文献[17]建立了电力网、天然气网和热力网的一般模型,进而根据多能源网络的耦合机理,建立有助于可再生能源消纳的电-热-天然气耦合系统的综合模型。已有建模方法仅适用于规模不大,且数量有限的多能耦合系统,难以适应城市范围大规模能源系统,可再生能源的消纳能力有待进一步提高。

基于复杂网络基本度量指标可以对区域能源互联网进行评价。文献[18]针对城市区域供热系统与能源消费者之间的相互作用关系进行了评价。文献[19]通过建立能源代谢生态网络模型,研究城市能源生产、消费、回收及转型过程中的网络稳定性评价。文献[20]将复杂网络分析运用到包含电、气、热能源的区域能源互联网中,分析了其静态结构与健壮性。已有研究成果虽涉及复杂网络度量指标,但数量有限,未形成全方位的指标体系。

现有研究多关注于冷、热、电、气等不同能源网的耦合、互联及相互作用的静态模型而缺乏动力学演化研究,且交通网被作为特殊的能源消费网单独对待,同时忽视电力、热力、制冷、交通等系统通过社会协调来优先消纳可再生能源的作用和潜力,缺乏完整的能源、交通、信息以及社会网之间耦合作用的复杂动力学网络模型和度量指标体系。考虑能源与信息、交通以及社会等网络耦合下的自组织和自适应等特性,亟需系统地建立合理的复杂网络模型和度量指标体系,以满足区域能源互联网协调规划、优化运行以及故障级联等方面研究的需求。

本文从复杂网络视角,总结了区域能源互联网的复杂动力学网络建模及度量指标体系有关的一系列问题,期望考虑多耦合、多形态、多尺度、多场景及动态演化等特征,对区域能源互联网建模有所突破,构建科学、准确、适宜的描述能源、信息、交通及社会等网络局部与整体耦合互动演化的复杂网络模型和度量指标体系,为区域能源互联网协调规划、优化运行以及故障级联等方面的研究提供理论支撑。

1 区域能源互联网建模与度量挑战和亟需解决的关键科学问题

1.1 区域能源互联网建模与度量挑战

1.1.1 多领域、多系统、多场景耦合挑战

区域能源互联网涉及能源、信息、交通及社会等领域,不同领域通过热电联供^[21]、电转气^[22]、电制冷^[23]、电加热^[24]、电气化轨道交通^[25]、电动汽车^[26]、V2G^[27]等多子系统网络化互联互通;信息化的开放共享,使能源、信息、交通等网络耦合更加紧密^[28];另外,以人为中心的社会网对能源、信息及交通等领域的各环节影响不断深化,不同子网间的协调优化运行与人类社会活动密切相关^[29],在工业园区、商业办公楼、居民住宅、公共建筑等多场景下形成能源信息物理系统与交通、社会等网络耦合^[30],给区域能源互联网建模与度量带来巨大挑战。

1.1.2 系统网络结构复杂性挑战

区域能源互联网供能侧和用户侧具有很强的随机性和不确定性^[31];不同网络耦合的时间尺度不同,级别从毫秒、分至小时差异化明显,电力网络的响应时间最快^[32];不同网络通过多能流耦合、互联、转换,使网络结构更加复杂^[33]。另外,区域能源互联网具有不同的多网耦合特性(时间尺度、空间分布等)和影响因素(内部因素和外部因素)^[34],存在多能流多时间尺度传输、信息传输、信息处理、综合响应等滞后及网络拥塞、数据碰撞、节点失效、资源竞争等问题,造成输入、输出、耦合、通信、需求响应等不同类型的时滞^[35-36]。时滞特性的影响使区域能源互联网的结构动态变化规律变得更加复杂^[37],从而加剧了区域能源互联网准确建模和合理度量的难度。

1.1.3 网络个体与结构动态演化研究挑战

能源、信息、交通、社会等子网络的拓扑结构和耦合互联关系动态变化,导致区域能源互联网具有突出的动力学演化特征^[38]。建立随时间变化的动力学模型对于研究区域能源互联网至关重要^[39]。然而,在多数情况下,网络和个体之间以及网络和网络之间的连接是时变的^[40],包括耦合互联运行、独立运行和离并网切换等状态^[41]。尤其当区域能源互联网规模达到一定程度,包含一定数量级的网络个体,此时庞大数量个体随着时间动态演化和不断的运行状态更替^[42],相比于用静态网络^[43]来描述区域能源互联网,动态网络^[44]的建模和度量面临更多的挑战。

1.2 亟需解决的关键科学问题

区域能源互联网与传统供能系统相比，多领域、多系统、多场景耦合互联更加紧密，系统网络化结构更加复杂，受社会、环境等复杂不确定性因素影响，底层系统和上层系统都具有动态演化特性^[45]。基于复杂网络分析描述区域能源互联网，亟需解决以下关键科学问题。

1) 如何针对区域能源互联网，克服其多领域、多系统、多场景融合，多环节变时滞，系统动态演化等难题，建立适合分析区域能源互联网的复杂动力学网络模型。

2) 如何依据科学、合理的复杂网络模型，建立适合区域能源互联网评价的完整复杂网络性能度量指标体系。

2 时滞复杂动力学网络模型关键问题研究

区域能源互联网的复杂动力学网络模型关键问题主要研究内容如图1所示。前期研究定义了能源自组织和能源群落：能源自组织是区域能源互联网在稳态运行情况下，局部底层结构与整体宏观系统之间进行能量与信息交互时，实现互联、耦合、资源共享的基本单元；而能源群落则是众多能源自组织在一定的时间和空间内相互之间通过直接或间接的耦合和互补关系形成的集群^[46]。本文基于能源自组织和能源群落分析，进一步研究区域能源互联网的复杂动力学网络的

小世界、网络弹性、传递性或群聚、幂律分布、度分布以及群落等特性，建立适合描述区域能源互联网的复杂动力学网络模型。最后，针对上述模型，建立区域能源互联网的复杂动力学网络的度量指标体系。

2.1 能源自组织和能源群落研究

如图2所示，能源自组织和能源群落作为区域能源互联网底层局部微观系统和上层整体宏观系统的基本组成单元，逐渐趋向于能源、信息、交通及社会多网耦合。

在能源网中，主要研究源^[47]（传统化石能源、可再生能源等）、网^[48]（冷、热、电、气等能源的传输、分配、转换、存储等网）、荷^[49]（多元用能负荷）、储^[50]（冷、热、电、气储能等）环节在不同场景（工业园区、商业办公、居民生活、公共建筑、交通运输等）中的物理设备特性、耦合特性、传输特性、互补特性、分布特性及存储特性等。

在交通网中，主要研究高铁动车^[51-52]、地铁轻轨^[53-54]、电动汽车^[55]、燃气车^[56]等交通网的供能方式（自身供能、对外供能）、耦合方式（自身耦合、与其他网耦合）、负荷特性以及与能源网耦合方法、运行方式等，同时研究不同交通网的供能特性、耦合特性、负荷特性、分布特性、传输特性、存储特性（可考虑再生制动能量存储再利用^[57]）等。

在信息网中，主要研究通信设备^[58]（有线、无线通信设备等）、通信安全^[59]（传感方式、通信架构等）、信息交互方式^[60]（通信协议、交互模式等）、数

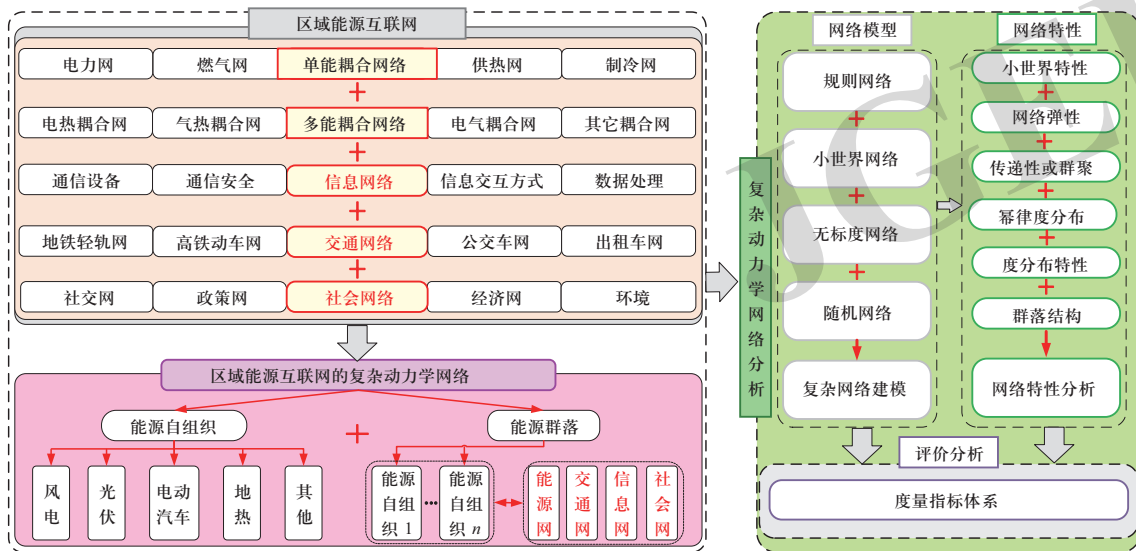


图1 区域能源互联网的复杂动力学网络模型及度量指标体系

Fig. 1 Complex dynamics network model and measurement indexes of regional energy Internet

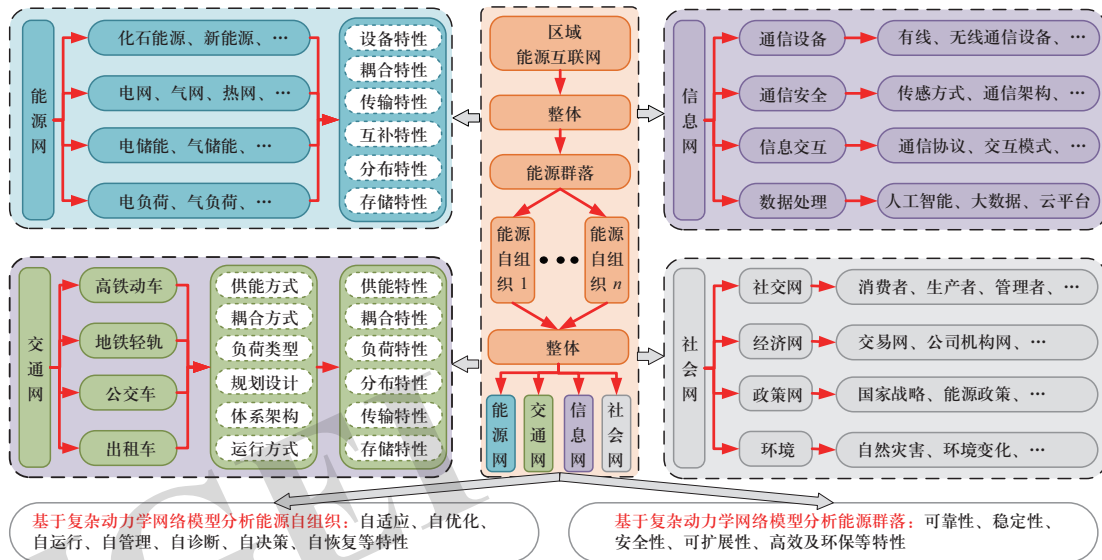


图2 能源自组织和能源群落的研究内容

Fig. 2 Research contents of energy self-organization and energy community

据处理^[61-62]（人工智能、大数据、云平台等）等对多网耦合的作用。

在社会网中，主要研究社交网^[63]（生产者、消费者、监督者、管理者等）、经济网^[64]（交易网、公司机构网等）、政策网^[65]（国家战略、能源市场政策等）以及环境^[66]（自然灾害、环境变化等）等耦合作用形成的社会网对能源、交通以及信息等复杂网络相互作用耦合，协同优化运行的影响。

最后，针对区域能源互联网耦合能源、信息、交通以及社会等子网，基于能源自组织和能源群落不同系统层级划分，研究能源自组织的自适应^[67]、自优化^[68]、自运行^[69]、自我管理^[70]、自诊断^[71]、自决策^[72]、自恢

复^[73]等特性，研究能源群落以及耦合网的可靠性^[74]、稳定性^[75]、安全性^[76]、可扩展性^[77]及高效性^[78]等特性。

2.2 区域能源互联网的复杂动力学网络建模

如图3所示，区域能源互联网的复杂动力学网络建模主要包括能源、信息、交通及社会网的单独与耦合建模两部分。

能源网的建模主要包括供电网（风电、光伏、地热、潮汐、水电、化石能源发电等）、供热网（光热、地热、电热、燃煤、燃气等）、制冷网（空调、冰箱、吸收式制冷、CO₂制冷等）以及燃气网（天然气、氢气、液化石油气、煤气等）的单独与耦合建模。

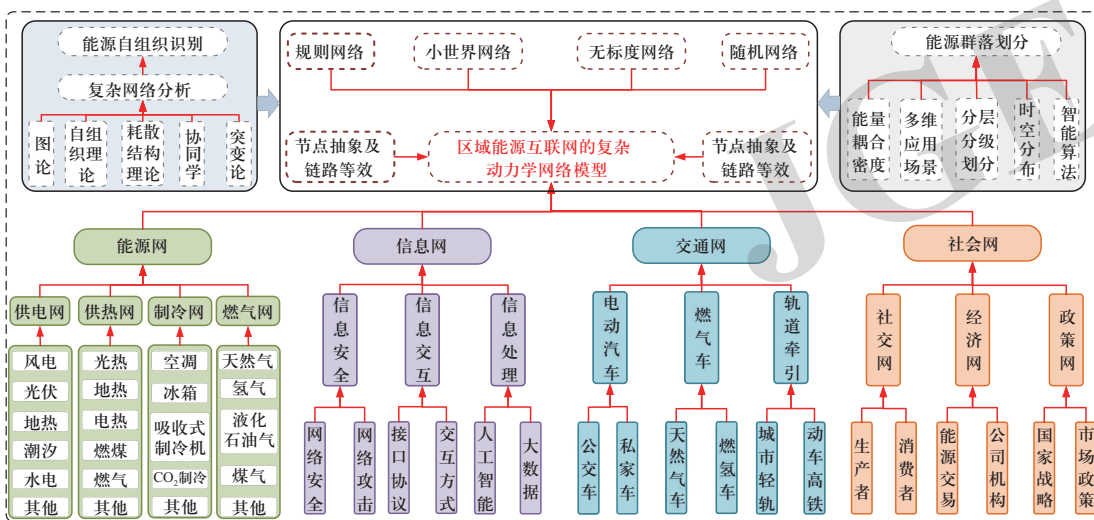


图3 区域能源互联网的复杂动力学网络建模

Fig. 3 Complex dynamic network modeling for regional energy Internet

信息网的建模主要包括信息安全（网络安全、网络攻击等）、信息交互（接口协议、交互方式等）以及信息处理（人工智能、大数据、云平台等）等与能源网耦合的建模。

交通网的建模主要包括城际交通网（高铁、动车等）和城市交通网（地铁、轻轨、公交车、出租车、私家车等）与能源网的耦合建模。

社会网的建模研究主要包括社交网（生产者、消费者、监督者、管理者等）、经济网（能源交易、公司机构等）以及政策网（国家战略、市场政策等）对能源网、信息网以及交通网的耦合影响建模。

考虑能源、信息、交通以及社会网在区域能源互联网中相互耦合，基于复杂网络分析，结合图论^[79]、自组织理论^[80]等，研究能源自组织的结构特性和识别方法，并进一步考虑能量耦合密度、多维时空分布及分层分级划分等因素，利用智能算法研究能源群落的结构特性和识别方法。通过能源自组织和能源群落的节点抽象和耦合链路等效，建立其包括规则网络^[81]、小世界网络^[82]、无标度网络^[83]以及随机网络^[84]等模型的区域能源互联网复杂动力学网络模型，为区域能源互联网的复杂系统结构特性分析提供理论基础。

2.3 区域能源互联网复杂动力学网络模型度量指标体系研究

如图4所示，区域能源互联网的复杂动力学网络

性能分析主要从物理基础设备、能源自组织、能源群落以及整个区域能源互联网等不同层级开展研究。

2.3.1 小世界特性研究

基于小世界特性的分析^[85]，研究风电、光伏、地热、潮汐、生物质等可再生能源依托冷、热、电、气等多种能源转换技术被优先消纳的网络传输分配与转换性能度量指标。

2.3.2 网络弹性研究

基于网络弹性的分析^[86]，研究区域能源互联网的正常运行稳定性、切除子系统（或设备）的临界稳定性以及发生故障恢复稳定性的度量指标。

2.3.3 群聚特性研究

基于传递性或群聚特性的分析^[87]，研究多源供能单荷和多荷消纳单源的网络能源分配度量指标，实现能源利用最大化和供能可靠性提升。

2.3.4 中心性研究

基于度分布特性分析^[88]，研究区域能源互联网的供能中心、负荷中心以及维持复杂系统稳定性的关键设备或者子系统等的时空分布度量指标。

2.3.5 群落特性研究

基于能源群落特性的分析^[89]，研究能源、信息、交通及社会网耦合下，冷、热、电、气等多能流耦合、传输分配和灵活转换过程中不同系统层级的供能、传输、转换、储存以及利用等相似性度量指标。

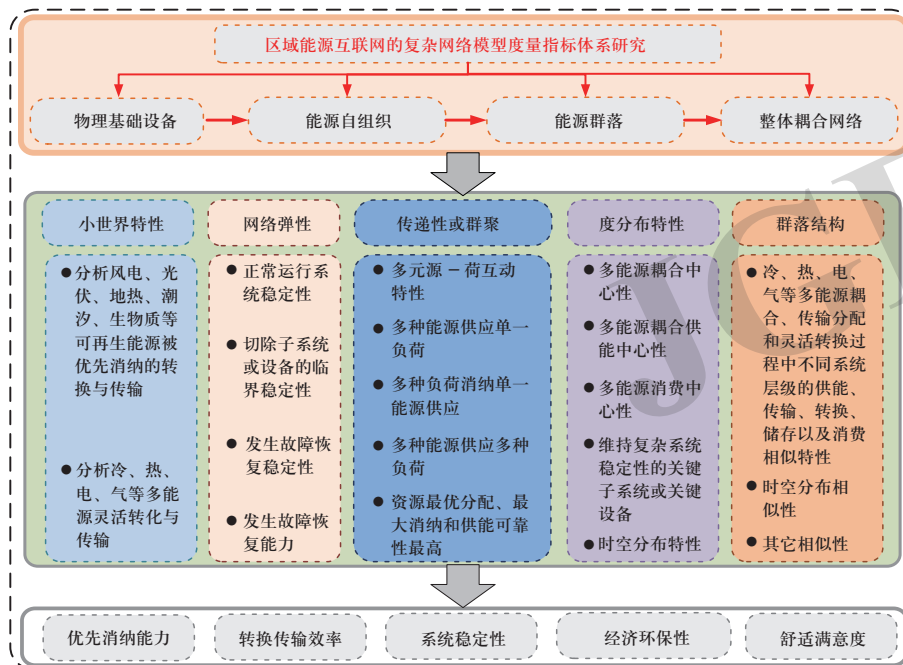


图4 区域能源互联网复杂网络模型度量指标体系研究

Fig. 4 Research on measurement indexes of complexes network model of regional energy Internet

2.3.6 综合度量指标体系研究

研究区域能源互联网对可再生能源的优先消纳能力、灵活转化传输效率、复杂网络稳定性、经济环保性以及社会反馈舒适满意度等的综合度量指标体系。

3 时滞复杂动力学网络模型及度量指标体系研究思路与方法

本文利用自组织理论研究能源自组织和能源群落的特性；结合层次分析法和时滞微分方程，研究区域能源互联网的时滞特性；考虑时滞特性，基于图论，建立区域能源互联网的复杂动力学网络模型，同时基于统计概率论建立其性能度量指标体系，从复杂网络视角深入研究区域能源互联网的复杂网络建模及度量思路与方法。

3.1 能源自组织和能源群落研究思路与方法

1) 如图5所示，能源自组织内冷、热、电、气等多能流耦合大量物理基础联产设备，如热电联产机组、燃气锅炉、供热锅炉、热泵等供能、增压设备、

电转气设备、电制冷机、吸收式制冷机、转热器等能量转换设备以及储电、储气、储热等设备和信息交互服务设备，基于它们之间的耦合、互联和相互作用关系，利用层次分析法^[90]，研究物理基础层、信息交互层以及运营服务层的耦合关系，基于自组织理论，研究能源自组织自适应、自优化、自运行、自我管理、自诊断、自决策、自恢复等特性；考虑冷、热、电、气等多能流在居民生活、城市管理、工农生产、商业办公、公共设施、交通出行以及环境旅游等多典型应用场景中的不同作用，利用动态加权法和模糊综合评价法，研究能源群落可靠性、稳定性、安全性、可扩展性、高效性等。

2) 非线性微分方程作为描述动态网络节点和连接关系的重要数学工具，在复杂网络动态演化研究方面已经有很成熟的应用^[91-92]。考虑能源、信息、交通以及社会等网络耦合互联形成的复杂网络所受影响因素更多，利用非线性微分方程 [见公式 (1)] 研究能源、信息、交通以及社会等网络的动态互动关系，进一步研究时滞特性 [见公式 (2)] 对其影响。

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f(x_i(t)) + \mu \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(t) + \rho \sum_{j=1}^N o_{ij}^{xy} y_j(t) + \gamma \sum_{j=1}^N p_{ij}^{xz} z_j(t) + \delta \sum_{j=1}^N q_{ij}^{xs} s_j(t) \\ \dot{y}_i(t) = g(y_i(t)) + \varepsilon \sum_{j=1}^N b_{ij} y_j(t) + \rho \sum_{j=1}^N o_{ij}^{yx} x_j(t) + \nu \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{yz} z_j(t) + \varepsilon \sum_{j=1}^N \zeta_{ij}^{ys} s_j(t) \\ \dot{z}_i(t) = \varphi(z_i(t)) + \alpha \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} z_j(t) + \gamma \sum_{j=1}^N p_{ij}^{zx} z_j(t) + \nu \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{zy} z_j(t) + \sigma \sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^{zs} s_j(t) \\ \dot{s}_i(t) = \phi(s_i(t)) + \beta \sum_{j=1}^N \beta_{ij} s_j(t) + \delta \sum_{j=1}^N q_{ij}^{sx} s_j(t) + \varepsilon \sum_{j=1}^N \zeta_{ij}^{sy} s_j(t) + \sigma \sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^{sz} s_j(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f(x_i(t-\tau_x)) + \mu \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(t-\tau_x) + \rho \sum_{j=1}^N o_{ij}^{xy} y_j(t-\tau_{xy}) + \gamma \sum_{j=1}^N p_{ij}^{xz} z_j(t-\tau_{xz}) + \delta \sum_{j=1}^N q_{ij}^{xs} s_j(t-\tau_{xs}) \\ \dot{y}_i(t) = g(y_i(t-\tau_y)) + \varepsilon \sum_{j=1}^N b_{ij} y_j(t-\tau_y) + \rho \sum_{j=1}^N o_{ij}^{yx} x_j(t-\tau_{yx}) + \nu \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{yz} z_j(t-\tau_{yz}) + \varepsilon \sum_{j=1}^N \zeta_{ij}^{ys} s_j(t-\tau_{ys}) \\ \dot{z}_i(t) = \varphi(z_i(t-\tau_z)) + \alpha \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} z_j(t-\tau_z) + \gamma \sum_{j=1}^N p_{ij}^{zx} z_j(t-\tau_{zx}) + \nu \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{zy} z_j(t-\tau_{zy}) + \sigma \sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^{zs} s_j(t-\tau_{zs}) \\ \dot{s}_i(t) = \phi(s_i(t-\tau_s)) + \beta \sum_{j=1}^N \beta_{ij} s_j(t-\tau_s) + \delta \sum_{j=1}^N q_{ij}^{sx} s_j(t-\tau_{sx}) + \varepsilon \sum_{j=1}^N \zeta_{ij}^{sy} s_j(t-\tau_{sy}) + \sigma \sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^{sz} s_j(t-\tau_{sz}) \end{cases} \quad (2)$$

其中： $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})^T$ 、 $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{im})^T$ 、 $z_i = (z_{i1}, \dots, z_{in})^T$ 是能源、信息及交通网的状态变量， $s_i = (s_{i1}, \dots, s_{im})^T$ 是社会网对能源、信息及交通网的影响因素； $f, g, \varphi, \phi: R^n \rightarrow R^n$ 是连续可微函数； N 是节点数目； μ, ε, α 分别为能源、信息及交通网内部的耦合强度， β 为社会网各种影响因素之间的关联系

数， $\rho, \gamma, \delta, \nu, \varepsilon, \sigma$ 为能源与信息网之间、能源与交通网之间、能源与社会网之间、信息网与交通网之间、信息网与社会网之间以及交通网与社会网之间的耦合强度； $(a_{ij}) \in R^{N \times N}$ 、 $(b_{ij}) \in R^{N \times N}$ 、 $(\alpha_{ij}) \in R^{N \times N}$ 、 $(\beta_{ij}) \in R^{N \times N}$ 分别为能源、信息、交通及社会网的耦合矩阵元素， o_{ij}^{xy} 、 p_{ij}^{xz} 、 q_{ij}^{xs} 、 ω_{ij}^{yz} 、 ζ_{ij}^{ys} 、 ϑ_{ij}^{zs} 为能源与信

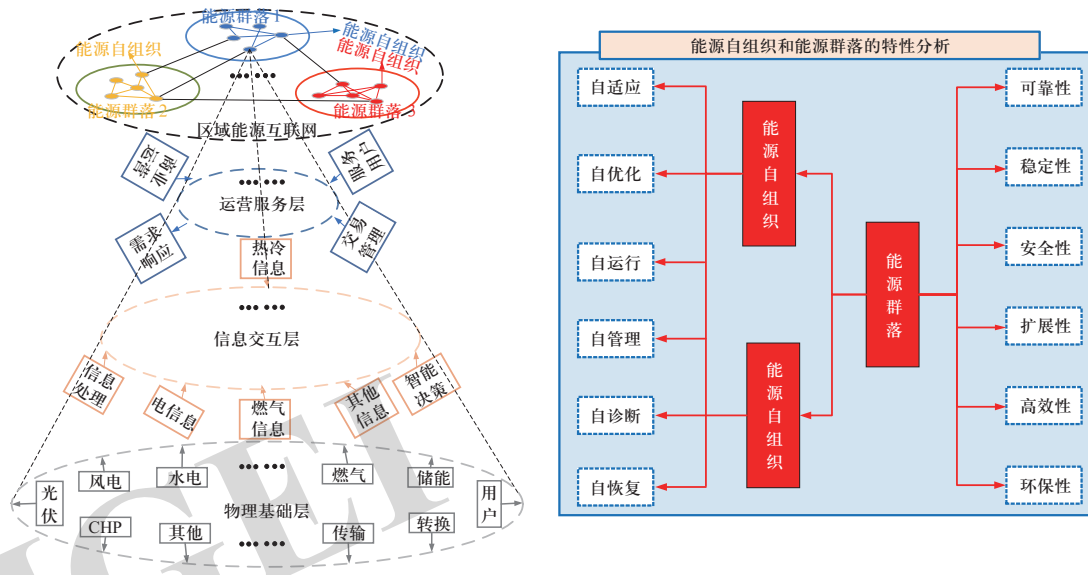


图5 基于能源自组织和能源群落的区域能源互联网结构划分（左）及特性分析（右）

Fig. 5 Regional energy Internet structure division based on energy self-organization and energy community (left) and characteristic analysis (right)

息网之间、能源与交通网之间、能源与社会网之间、信息网与交通网之间、信息网与社会网之间以及交通网与社会网之间的耦合矩阵元素，其中以 a_{ii} 元素定义为例，即 $a_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$ ，其他对角元素定义相同，耦合矩阵为对称矩阵。

3) 针对能源自组织和能源群落表现出的不同特性，基于聚类^[93-94]和卷积神经网络^[95-96]等方法提取不同场景、能流密度^[97]、空间分布^[98]等主要特征，对能源自组织和能源群落进行识别与划分。

3.2 区域能源互联网的建模思路与方法

1) 如图6所示，考虑能源自组织物理基础层、信息交互层以及运营服务层的分层结构和多能流在多领域的耦合形式，研究具有规则、随机、小世界及无标度网络的建模方法以及不同建模方法在区域能源互联网中的应用；分析区域能源互联网中不同层次符合随机、小世界、无标度以及规则特性的子网络，建立其复杂网络模型。

2) 如图7所示，基于对不同类型的物理基础设备

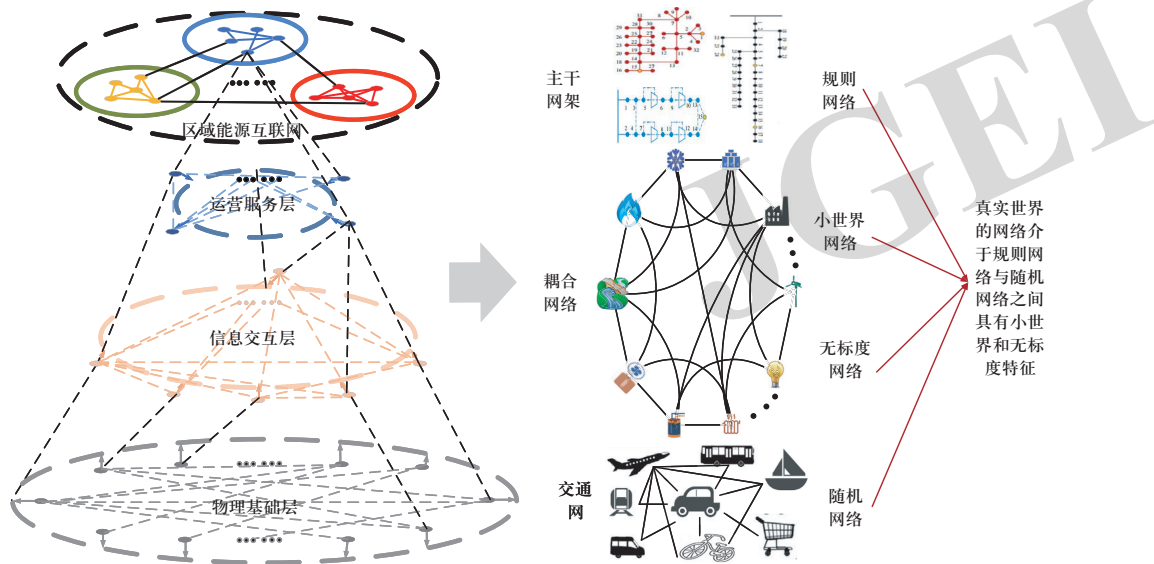


图6 区域能源互联网的分层架构和复杂网络建模思路

Fig. 6 Hierarchical architecture and complex network modeling of regional energy Internet

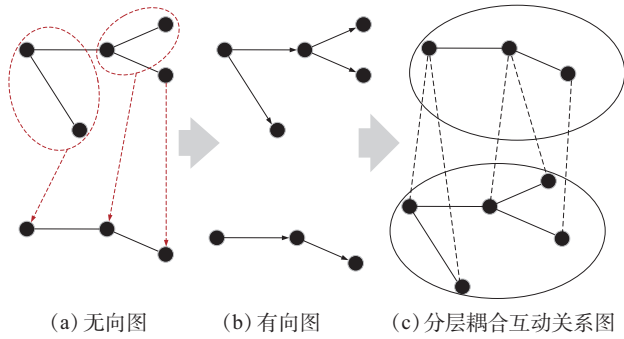


图 7 基于能源自组织和能源群落的区域能源互联网复杂网络可视化模型

Fig. 7 Visualization model of complex network of regional energy Internet based on energy self-organization and energy community

之间的多能流耦合互联网络关系研究, 建立区域能源互联网具有规则、随机、小世界以及无标度等特性的节点抽象和多能流图等复杂网络有向图和无向图可视化模型, 用以抽象表示能源自组织和能源群落间的关系。

3) 基于能源自组织和能源群落的特性研究、复杂网络不同基本模型的研究以及多能流图可视化模型的研究, 如公式(3)所示, 利用非线性随机偏微分方程和时滞非线性随机偏微分方程等, 通过耦合关系和时滞特性的表述, 建立多能流图等复杂网络拓扑结构模型, 其中底层微观结构网络模型的基本组成节点为能源自组织, 上层宏观结构网络模型的基本组成节点为能源群落。

$$\begin{cases} \dot{x}_i^{\text{ESO}}(t-\tau) = f_1(x_i^{\text{ESO}}(t-\tau)) + \mu^{\text{ESO}} \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\text{ESO}} x_j^{\text{ESO}}(t-\tau) + \\ \mu^{\text{ESO-EC}} \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\text{ESO-EC}} x_j^{\text{EC}}(t-\tau) \\ \dot{x}_i^{\text{EC}}(t-\tau) = f_2(x_i^{\text{EC}}(t-\tau)) + \mu^{\text{EC}} \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\text{EC}} x_j^{\text{EC}}(t-\tau) + \\ \mu_{ij}^{\text{ESO-EC}} \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\text{ESO-EC}} x_j^{\text{EC}}(t-\tau) + \mu_{ij}^{\text{EC-EC}} \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\text{EC-EC}} x_j^{\text{EC}}(t-\tau) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x_i^{\text{ESO}} = (x_{i1}^{\text{ESO}}, \dots, x_{im}^{\text{ESO}})^T$ 、 $x_i^{\text{EC}} = (x_{i1}^{\text{EC}}, \dots, x_{im}^{\text{EC}})^T$ 表示能源自组织和能源群落的状态变量; $f_1, f_2: R^n \rightarrow R^n$ 是连续可微函数; N 为节点数目; τ 为时滞变量; μ^{ESO} 、 μ^{EC} 分别为能源自组织和能源群落内部的耦合强度, $\mu^{\text{ESO-EC}}$ 、 $\mu^{\text{EC-EC}}$ 为能源自组织与能源群落之间、能源群落与能源群落之间的耦合强度; $(a_{ij}^{\text{ESO}}) \in R^{N \times N}$ 、 $(a_{ij}^{\text{EC}}) \in R^{N \times N}$ 分别为能源自组织、能源群落各自网络模型的耦合矩阵元素, $(a_{ij}^{\text{ESO-EC}}) \in R^{N \times N}$ 、 $(a_{ij}^{\text{EC-EC}}) \in R^{N \times N}$ 分别为能源自组织与能源群落之间、能源群落与能源群落之间的耦合矩阵元素, 其定义与 $a_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$ 的

定义一致, 其他对角元素定义相同, 耦合矩阵为对称矩阵。

3.3 区域能源互联网复杂网络性能度量指标体系研究思路与方法

1) 如图8所示, 从物理基础设施、能源自组织、能源群落及整个复杂系统不同层级着手, 根据节点抽象和多能流图的等效网络拓扑结构(包括随机、小世界、无标度以及规则等网络拓扑结构), 研究区域能源互联网的复杂网络概率统计性能分析指标, 包括节点度、平均节点度、度分布、路径长度、平均路径长度、聚类系数、平均聚类系数、介数及模块度等重要指标(具体定义见文献[36])。

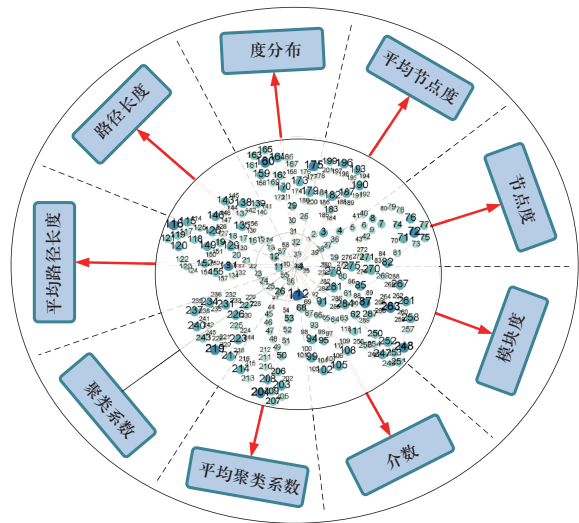


图 8 区域能源互联网的复杂网络基本度量指标
Fig. 8 Basic metrics of complex networks for the regional energy Internet

2) 如图9所示, 针对区域能源互联网的复杂网络模型, 根据图论和复杂网络分析, 基于节点度、平均节点度、度分布、路径长度、平均路径长度、聚类系数、平均聚类系数、介数及模块度等基本度量指标, 进一步研究区域能源互联网的复杂网络性能分析指标, 包括可靠性^[99]、经济性^[100]、脆弱性^[101]以及中心性^[102]。

3) 根据能源自组织和能源群落之间的多能流相互耦合、连接和作用关系, 基于数据包络分析(DEA)^[103]、生态网络分析(ENA)^[104]、层次过程法^[105]、层次分析+最小二乘支持向量机(LS-SVM)^[106]、组合加权法^[107]以及ANP-fuzzy综合评价^[108]等评价方法, 全方位地对区域能源互联网进行合理、科学、客

观的定量分析，为区域能源互联网的发展和城市清洁能源转型提供科学的依据和先进的技术支持。

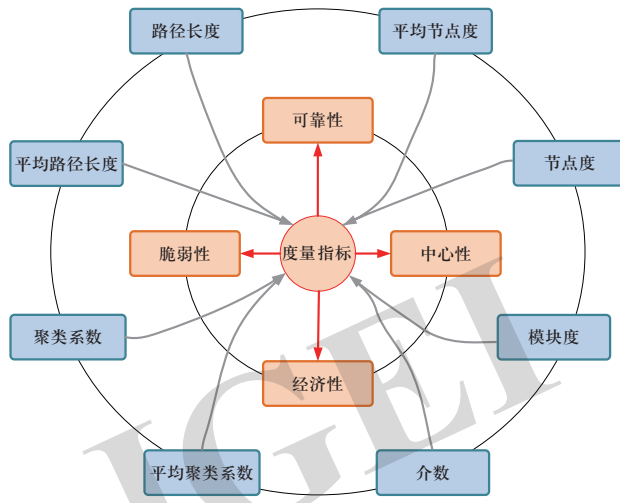


图9 区域能源互联网的度量指标体系

Fig. 9 Regional energy Internet measure indexes

4 结论

本文从复杂网络视角，分析了区域能源互联网的复杂动力学网络特征，通过综述区域能源互联网的复杂动力学网络模型相关研究内容，为揭示能源、信息、交通以及社会等网络耦合的互动机理提供研究思路；针对区域能源互联网多环节复杂变时滞耦合、多时间尺度、强非线性、高维、多不确定性等难题，构建耦合能源、信息、交通及社会等网络的区域能源互联网复杂动力学网络度量指标体系，为城市高效清洁能源减排和低碳发展，具有重要理论和实践意义。

参考文献

- [1] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14. YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14(in Chinese).
- [2] JIN M, JAIN R, SPANOS C, et al. Energy-cyber-physical systems[J]. Applied Energy, 2019, 256: 113939.
- [3] WU J, YAN J Y, JIA H J, et al. Integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 155-157.
- [4] 薛禹胜. 能源革命呼唤综合能源网[J]. 变频器世界, 2015(7): 32-33.
- [5] XIA M C, SONG Y G, CHEN Q F. Hierarchical control of thermostatically controlled loads oriented smart buildings[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113493.
- [6] HANSEN K, BREYER C, LUND H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems[J]. Energy, 2019, 175: 471-480.
- [7] MOSANNENZADEH F, BISELLO A, VACCARO R, et al. Smart energy city development: a story told by urban planners[J]. Cities, 2017, 64: 54-65.
- [8] 余涛, 程乐峰, 张孝顺. 基于信息-物理-社会系统融合和群体机器学习的弱中心化微元网: 理论与关键科学问题分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(12): 1541-1569. YU Tao, CHENG Lefeng, ZHANG Xiaoshun. The weakly-centralized Web-of-Cells based on cyber-physical-social systems integration and group machine learning: theoretical investigations and key scientific issues analysis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(12): 1541-1569(in Chinese).
- [9] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424(4/5): 175-308.
- [10] BEDRU H D, YU S, XIAO X R, et al. Big networks: a survey[J]. Computer Science Review, 2020, 37: 100247.
- [11] CLARKE N. Networks, urban[M]. International Encyclopedia of Human Geography. Amsterdam: Elsevier, 2020: 387-391.
- [12] ZHOU Y, ZHANG S S, WU L B, et al. Predicting sectoral electricity consumption based on complex network analysis[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113790.
- [13] 张效坤, 孙宏斌. 基于复杂混合网络的能源互联网拓扑模型[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2079-2084. ZHANG Xiaokun, SUN Hongbin. Energy Internet topology model based on hybrid complex network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2079-2084(in Chinese).
- [14] VOLPE R. Urban energy mapping through the implementation on complex networks[J]. Energy Procedia, 2015, 82: 863-869.
- [15] ZHANG Y, ZHENG H M, YANG Z F, et al. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 243-256.
- [16] FICHERA A, FRASCA M, VOLPE R. Complex networks for the integration of distributed energy systems in urban areas[J]. Applied Energy, 2017, 193: 336-345.
- [17] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113410.
- [18] ZHONG W, CHEN J Y, ZHOU Y, et al. Investigation of optimized network splitting of large-scale urban centralized heating system operation[J]. Energy Reports, 2020, 6: 467-477.
- [19] ZHU X T, MU X Z, HU G W. Ecological network analysis of urban energy metabolic system—A case study of Beijing[J]. Ecological Modelling, 2019, 404: 36-45.

- [20] 潘华, 肖雨涵, 梁作放, 等. 基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 104-112.
PAN Hua, XIAO Yuhuan, LIANG Zuofang, et al. Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 104-112(in Chinese).
- [21] OLYMPIOS A V, PANTALEO A M, SAPIN P, et al. On the value of combined heat and power (CHP) systems and heat pumps in centralised and distributed heating systems: lessons from multi-fidelity modelling approaches[J]. Applied Energy, 2020, 274: 115261.
- [22] BELDERBOS A, VALKAERT T, BRUNINX K, et al. Facilitating renewables and power-to-gas via integrated electrical power-gas system scheduling[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115082.
- [23] GUPTA A, SANKHLA V S, SHARMA D. A comprehensive review on the sustainable refrigeration systems[J]. Materials Today: Proceedings, 2021.
- [24] LI X, GUI D, ZHAO Z F, et al. Operation optimization of electrical-heating integrated energy system based on concentrating solar power plant hybridized with combined heat and power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125712.
- [25] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692-5702.
DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692-5702(in Chinese).
- [26] GOEL S, SHARMA R, RATHORE A K. A review on barrier and challenges of electric vehicle in India and vehicle to grid optimisation[J]. Transportation Engineering, 2021, 4: 100057.
- [27] BIBAK B, TEKINER-MOĞULKOÇ H. A comprehensive analysis of Vehicle to Grid (V2G) systems and scholarly literature on the application of such systems[J]. Renewable Energy Focus, 2021, 36: 1-20.
- [28] WU T J, LIU S H, NI M, et al. Model design and structure research for integration system of energy, information and transportation networks based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 137-144.
- [29] 韦晓广, 高仕斌, 臧天磊, 等. 社会能源互联网: 概念、架构和展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4969-4986.
WEI Xiaoguang, GAO Shibin, ZANG Tianlei, et al. Social energy Internet: concept, architecture and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4969-4986(in Chinese).
- [30] WU D, HAN Z H, LIU Z J, et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multi-scenario integrated energy system[J]. Energy, 2021, 217: 119311.
- [31] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3451-3462.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Stochastic model predictive control for energy management optimization of an energy local network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3451-3462(in Chinese).
- [32] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 179-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy Internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 179-186(in Chinese).
- [33] 丁茂生, 王洪儒, 王超, 等. 信息物理视角下能源互联网可靠性评估方法综述[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 425-436.
DING Maosheng, WANG Hongru, WANG Chao, et al. Review of reliability assessments for energy Internet based on cyber physical integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 425-436(in Chinese).
- [34] 田立新, 钱和平. 时滞影响下区域能源供需模型及动力学分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008, 29(5): 453-456.
TIAN Lixin, QIAN Heping. Regional energy supply-demand model and dynamic analysis under influence of time delay[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2008, 29(5): 453-456(in Chinese).
- [35] 李啸骢, 王夏明. 基于积分不等式多时滞电力系统的改进稳定判据[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 59-66.
LI Xiaocong, WANG Xiaming. Integral inequality based improved stability criterion for power system with multiple time delays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 59-66(in Chinese).
- [36] 徐业琰, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 152-163.
XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 152-163(in Chinese).
- [37] 周一辰, 覃露, 李永刚. 基于多求和不等式输出反馈 Lyapunov判据的时变时滞电力系统二次调频控制[J/OL]. 电网技术: 1-14[2021-04-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2172>.
ZHOU Yichen, QIN Lu, LI Yonggang. Secondary frequency modulation control of power system with time-varying delay based on lyapunov criterion of multi-summation inequality output feedback[J/OL]. Power System Technology:1-14[2021-04-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2172>(in Chinese).

- [38] 江涵, 高艺, 李隽, 等. 基于系统动力学的区域能源互联网综合效益分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 16-26.
JIANG Han, GAO Yi, LI Jun, et al. The comprehensive benefit analysis of regional energy interconnection based on system dynamics method[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 16-26(in Chinese).
- [39] 孙珂, 王丹, 葛贤军, 等. 基于定位概率和收缩机制的电力系统拓扑演化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 22-28.
SUN Ke, WANG Dan, GE Xianjun, et al. A topological evolution model of power systems with position chain probability and network attenuation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1):22-28(in Chinese).
- [40] MBUNGU N T, BANSAL R C, NAIDOO R M, et al. A dynamic energy management system using smart metering[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115990.
- [41] BERNATH C, DEAC G, SENSFUß F. Impact of sector coupling on the market value of renewable energies - A model-based scenario analysis[J]. Applied Energy, 2021, 281: 115985.
- [42] 李辉, 陈福才, 张建朋, 等. 复杂网络中的社团发现算法综述[J/OL]. 计算机应用研究: 1-9[2021-04-01].<https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2020.06.0211>.
LI Hui, CHEN Fucui, ZHANG Jianpeng, et al. Survey of community detection algorithms in complex network[J/OL]. Application Research of Computers:1-9[2021-04-01].<https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2020.06.0211>(in Chinese).
- [43] 潘华, 肖雨涵, 梁作放, 等. 基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 104-112.
PAN Hua, XIAO Yuhan, LIANG Zuofang, et al. Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 104-112(in Chinese).
- [44] 徐飞, 郝玲, 陈磊, 等. 电热综合能源系统中热力管网动态建模及协调运行研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 55-63.
XU Fei, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Review of district energy network dynamic modeling and coordinate optimal operation in integrated electricity and heat energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 55-63(in Chinese).
- [45] 程浩原, 艾芊, 高扬, 等. 关于细胞-组织视角的能源互联网分布式自治系统形态特征的讨论[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 466-475.
CHENG Haoyuan, AI Qian, GAO Yang, et al. Morphological characteristics of distributed autonomous system in energy Internet from the perspective of cell-tissue[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 466-475(in Chinese).
- [46] GUO M, XIA M C, CHEN Q F. A review of regional energy Internet research from the perspective of energy community[C]//Applied Energy Symposium and Summit 2019: Low carbon cities and urban energy systems, CUE2019. Oct 16-18, 2019: 151.
- [47] 包铭磊, 丁一, 桑茂盛, 等. 计及经济性与可靠性协调的电-气耦合系统源端容量规划研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2021-04-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210323.1619.015.html>.
BAO Minglei, DING Yi, SANG Maosheng, et al. Research on energy capacity planning of integrated gas and power systems considering coordination of economy and reliability[J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-13[2021-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210323.1619.015.html>(in Chinese).
- [48] 陈保瑞, 刘天琪, 何川, 等. 考虑需求响应的源网荷协调分布鲁棒长期扩展规划[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-15[2021-04-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210203.2023.001.html>.
CHEN Baorui, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Distributionally robust coordinated expansion planning for generation and transmission systems with demand response[J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-15[2021-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210203.2023.001.html>(in Chinese).
- [49] 田浩含, 张智晟, 于道林. 基于改进LSTM的区域综合能源系统多元负荷短期预测研究[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-9[2021-04-01].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000726>.
TIAN Haohan, ZHANG Zhisheng, YU Daolin. Load short-term forecasting model of regional integrated energy system based on improved LSTM[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA:1-9[2021-04-01].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000726>(in Chinese).
- [50] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 93-103.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-103(in Chinese).
- [51] 叶玉玲, 李文卿, 张俊. 高速铁路网络复杂特性及其传播动力学研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 655-662.
YE Yuling, LI Wenqing, ZHANG Jun. Complex characteristics and propagation dynamics of high speed railway network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 655-662(in Chinese).
- [52] REN J H, ZHANG Q, LIU F. Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121374.
- [53] FENG J, LI X M, MAO B H, et al. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: train and passenger flows[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 474: 213-223.
- [54] FAGEDA X. Do light rail systems reduce traffic externalities?

- Empirical evidence from mid-size European cities[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 92: 102731.
- [55] LI J J, JIAO J L, TANG Y S. An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network[J]. *Energy Policy*, 2019, 129: 1-12.
- [56] WILBERFORCE T, EL-HASSAN Z, KHATIB F N, et al. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(40): 25695-25734.
- [57] 黄文龙, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 枢纽型牵引变电所再生制动能量利用系统能量管理及控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 588-598.
HUANG Wenlong, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Energy management and control strategy of regenerative braking energy utilization system in hub traction substation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 588-598(in Chinese).
- [58] SWAIN S N, MURTHY C S R. A novel energy-aware utility maximization for efficient device-to-device communication in LTE-WiFi networks under mixed traffic scenarios[J]. *Computer Networks*, 2020, 167: 106995.
- [59] ALNASSER A, SUN H J, JIANG J. Cyber security challenges and solutions for V2X communications: a survey[J]. *Computer Networks*, 2019, 151: 52-67.
- [60] SONG K, ANDERSON K, LEE S. An energy-cyber-physical system for personalized normative messaging interventions: identification and classification of behavioral reference groups[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114237.
- [61] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 2-14.
YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 2-14(in Chinese).
- [62] 李昭昱, 艾芊, 张宇帆, 等. 数据驱动技术在虚拟电厂中的应用综述[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2411-2419.
LI Zhaoyu, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Application of data-driven technology on virtual power plant[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2411-2419(in Chinese).
- [63] DU F, ZHANG J F, LI H L, et al. Modelling the impact of social network on energy savings[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 56-65.
- [64] LI H J, AN H Z, FANG W, et al. Global energy investment structure from the energy stock market perspective based on a Heterogeneous Complex Network Model[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 648-657.
- [65] FANG Y J, WEI W, MEI S W, et al. Promoting electric vehicle charging infrastructure considering policy incentives and user preferences: an evolutionary game model in a small-world network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120753.
- [66] JING Z R, WANG J M. Sustainable development evaluation of the society-economy-environment in a resource-based city of China: a complex network approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121510.
- [67] BURGER A, CICHOWSKYJ C, SCHMEIBER S, et al. The elastic internet of things - a platform for self-integrating and self-adaptive IoT-systems with support for embedded adaptive hardware[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 113: 607-619.
- [68] XIN H H, ZHAO R, ZHANG L Q, et al. A decentralized hierarchical control structure and self-optimizing control strategy for F-P type DGs in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 3-5.
- [69] TANG H T, STENBER K. Self-operation of a network[C]//2016 IEEE 14th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 14th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 2nd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress(DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech). August 8-12, 2016, Auckland, New Zealand. IEEE, 2016: 647-653.
- [70] DONG Y C, ZHAO S H, ZHANG H J, et al. A self-management mechanism for noncooperative behaviors in large-scale group consensus reaching processes[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(6): 3276-3288.
- [71] LIU K B, MA Q, GONG W, et al. Self-diagnosis for detecting system failures in large-scale wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(10): 5535-5545.
- [72] MENG K, CAO Y, PENG X H, et al. Smart recovery decision-making for end-of-life products in the context of ubiquitous information and computational intelligence[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122804.
- [73] QIU T, ZHENG K Y, SONG H B, et al. A local-optimization emergency scheduling scheme with self-recovery for a smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3195-3205.
- [74] GARGARI M Z, GHAFARPOUR R. Reliability evaluation of multi-carrier energy system with different level of demands under various weather situation[J]. *Energy*, 2020, 196: 117091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117091>.
- [75] WANG K, LI H N, FENG Y X, et al. Big data analytics for system stability evaluation strategy in the energy Internet[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 1969-1978.
- [76] LV Z, KONG W J, ZHANG X, et al. Intelligent security planning for regional distributed energy Internet[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3540-3547.
- [77] PARK B, HUR J. Spatial prediction of renewable energy resources for reinforcing and expanding power grids[J]. *Energy*, 2018, 164: 757-772.

- [78] PINTALDI S, SETHUVENKATRAMAN S, WHITE S, et al. Energetic evaluation of thermal energy storage options for high efficiency solar cooling systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 160-177.
- [79] MA T F, WU J Y, HAO L L, et al. Energy flow matrix modeling and optimal operation analysis of multi energy systems based on graph theory[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 146: 648-663.
- [80] DOBSON S, HUTCHISON D, MAUTHE A, et al. Self-organization and resilience for networked systems: design principles and open research issues[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(4): 819-834.
- [81] LIAN G Q, ZHOU S M, HSIEH S Y, et al. Performance evaluation on hybrid fault diagnosability of regular networks[J]. *Theoretical Computer Science*, 2019, 796: 147-153.
- [82] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [83] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [84] ERDOS P, RENYI A. On the evolution of random graphs[M]. *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences* 1960:17-61.
- [85] DASSISTI M, CARNIMEO L. A small-world methodology of analysis of interchange energy-networks: the European behaviour in the economical crisis[J]. *Energy Policy*, 2013, 63: 887-899.
- [86] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 486-497.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 486-497(in Chinese).
- [87] 滕云, 刘硕, 回茜, 等. 考虑区域多能源系统集成协同优化的联合需求侧响应模型[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7282-7296.
TENG Yun, LIU Shuo, HUI Qian, et al. Integrated demand side response model considering collaborative optimization of regional multi-energy system clusters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7282-7296(in Chinese).
- [88] YANG X H, XIONG Z, MA F N, et al. Identifying influential spreaders in complex networks based on network embedding and node local centrality[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 573: 125971.
- [89] EL-MOUSSAOUI M, AGOUTI T, TIKNIOUINE A, et al. A comprehensive literature review on community detection: approaches and applications[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 151: 295-302.
- [90] GUO T K, TANG S J, SUN J, et al. A coupled thermal-hydraulic-mechanical modeling and evaluation of geothermal extraction in the enhanced geothermal system based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 113981.
- [91] 卢文联, 刘锡伟, 刘波. 时滞复杂系统动力学: 从神经网络到复杂网络[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2018.
- [92] 王宇娟, 涂俐兰, 宋帅, 等. 耦合含时滞的相互依存网络的局部自适应异质同步[J]. *物理学报*, 2018, 67(5): 60-69.
WANG Yujuan, TU Lilan, SONG Shuai, et al. Local adaptive heterogeneous synchronization for interdependent networks with delayed coupling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(5): 60-69(in Chinese).
- [93] WANG W, JING R, ZHAO Y R, et al. A load-complementarity combined flexible clustering approach for large-scale urban energy-water nexus optimization[J]. *Applied Energy*, 2020, 270: 115163.
- [94] JIN H, YU W, LI S J. A clustering algorithm for determining community structure in complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 492: 980-993.
- [95] GHIMIRE S, DEO R C, RAJ N, et al. Deep solar radiation forecasting with convolutional neural network and long short-term memory network algorithms[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113541.
- [96] CAI B, WANG Y P, ZENG L N, et al. Edge classification based on Convolutional Neural Networks for community detection in complex network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 556: 124826.
- [97] HEO J, JUNG J, KIM B, et al. Digital elevation model-based convolutional neural network modeling for searching of high solar energy regions[J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114588.
- [98] HONG J K, TANG M H, WU Z Z, et al. The evolution of patterns within embodied energy flows in the Chinese economy: a multi-regional-based complex network approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101500.
- [99] KOU Y, BIE Z H, LI G F, et al. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication[J]. *Energy*, 2021, 224: 120123.
- [100] JING Z R, WANG J M. Sustainable development evaluation of the society-economy-environment in a resource-based City of China: a complex network approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121510.
- [101] ZHANG L, SU H, ZIO E, et al. A data-driven approach to anomaly detection and vulnerability dynamic analysis for large-scale integrated energy systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 234: 113926.
- [102] ZENG Y. Evaluation of node importance and invulnerability simulation analysis in complex load- network[J]. *Neurocomputing*, 2020, 416: 158-164.
- [103] WANG D, YU J C, LIU B, et al. Integrated energy efficiency evaluation of a multi-source multi-load desalination micro-energy network[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(2): 128-139.
- [104] SU M R, YUE W C, LIU Y F, et al. Integrated evaluation

- of urban energy supply security: a network perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 461-471.
- [105] LIANG Z, DONG C Q, TIAN J L, et al. The analytic hierarchy process to determine the overall evaluation of the compressor parts weight [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2014, 5:176-184.
- [106] WEN X X, TU C L, WU M G, et al. Fast ranking nodes importance in complex networks based on LS-SVM method[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 506: 11-23.
- [107] ZHU X C, NIU D P, WANG X, et al. Comprehensive energy saving evaluation of circulating cooling water system based on combination weighting method[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 157: 113735.
- [108] WU T J, LIU S H, NI M, et al. Model design and structure research for integration system of energy, information and transportation networks based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 137-144.

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-04-07。



郭敏

作者简介:

郭敏 (1990), 男, 博士研究生, 主要研究方向为能源互联网的运行与优化, E-mail: 18117005@bjtu.edu.cn。

夏明超 (1976), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源互联网运行与优化、智能配电网控制与优化、柔性负荷建模与控制等。通信作者, E-mail: mchxia@bjtu.edu.cn。

陈奇芳 (1986), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为综合能源系统优化运行、智能低碳交通建模与优化、柔性负荷建模与控制等, E-mail: chenqf@bjtu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)

JGEEI