



电网技术
Power System Technology
ISSN 1000-3673, CN 11-2410/TM

《电网技术》网络首发论文

题目: 考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型
作者: 徐成司, 董树锋, 鲁斌, 吴振杰, 徐航
DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0152
网络首发日期: 2022-05-24
引用格式: 徐成司, 董树锋, 鲁斌, 吴振杰, 徐航. 考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型[J/OL]. 电网技术. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0152>



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。

考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型

徐成司¹, 董树锋², 鲁斌³, 吴振杰¹, 徐航¹

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江省 杭州市 310009;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

3. 上海电力设计院有限公司, 上海市 200025)

Evolving Model of Regional Energy Network Considering Town Growth Characteristics

XU Chengsi¹, DONG Shufeng², LU Bin³, WU Zhenjie¹, XU Hang¹

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electricity Power Co., Ltd.,
Hangzhou 310009, Zhejiang Province, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

3. Shanghai Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

ABSTRACT: The development of the regional energy network is an essential part in the construction of new-type towns. It is of great significance to analyze the evolution law and morphological characteristics of the regional energy network for guiding its planning and operation. This paper proposes an evolving model of the regional energy network considering town growth characteristics. Firstly, the growth characteristics of spatial load are summarized according to the town growth characteristics, and the growth process of town load is simulated based on the random geometric graph model of complex network theory. Then, with the objective of minimizing the investment and construction cost, the distribution of energy stations and integrated pipelines of the regional energy network is obtained, and the evolving process of the regional energy network is given. Furthermore, the spatial and topological characteristics of the evolution model are analyzed theoretically. The simulation results show that the evolved regional energy network conforms to the growth characteristics of the town and load, and its morphological characteristics are consistent with the theoretical analysis results and similar to the actual power grid, which verifies the rationality of the proposed model.

KEY WORDS: regional energy network; town growth characteristics; complex network; random geometric graph; evolving model; network morphological characteristics

摘要: 区域能源网的发展是新型城镇建设的重要环节, 分析区域能源网的演化规律和形态特征, 对于指导网络规划、运行具有重要意义。提出了一种考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型, 首先根据城镇生长特性总结了空间负荷的增长

特性, 进而借鉴复杂网络理论中的随机几何图模型模拟城镇负荷的增长过程, 然后以最小化投资建设成本为目标, 规划得到区域能源网的能源站和综合管线分布, 给出区域能源网的演化流程, 进一步通过理论分析了演化模型的空间和拓扑特征。算例分析结果表明演化所得区域能源网符合城镇和负荷的生长特性, 其形态特征与理论分析结果一致, 并且与实际电网具有相似的特征, 验证了所提演化模型的合理性。

关键词: 区域能源网; 城镇生长特性; 复杂网络; 随机几何图; 演化模型; 网络形态特征

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0152

0 引言

构建新型电力系统是实现双碳目标、应对环境气候问题的关键举措, 能源互联网能够发挥不同形式能源的协同互补效益, 促进新能源消纳, 实现兼顾经济效益与能源利用率等指标提升的系统优化运行, 是电力能源行业转型中的关键载体^[1]。区域能源网的建设是构建能源互联网的基础, 其网络规模主要适用于城镇、社区等覆盖大量商业、工业、居民用户并且地理位置相对集中的区域^[2], 具有内部自治自律、外部协同的特征。

城镇是推动社会经济政治发展、科技文明进步的重要平台, 区域能源网的建设属于城镇发展的重要组成部分, 与城镇的生长特性密不可分。当今世界的城镇化进程迅速, 目前已有超过 50% 的人口生活在城镇, 而到 2050 年预计全球将有超过 70% 的人口将生活在城镇。当前中国正处于稳步、长期的城镇化进程, 传统的城镇能源系统缺乏多种能源互联互通途径, 存在综合能效偏低、供需互动不足等问题^[3]。推进区域能源网的发展能够优化城镇用户

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077193)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52077193).

的用能方式，是改善当前能源利用现状的重要手段。为了更有效地应对城镇化进程中高能耗、高污染等问题，区域能源网的规划、建设和运行需要与城镇的建设发展紧密结合。因此，根据城镇生长特性模拟区域能源网的演化过程，对于归纳能源网发展的共性规律，模拟分析网络形态与故障脆弱度之间的关系，指导区域能源网工程建设、增加投资高效性等具有重要意义^[4]。

现有研究已经对电网的演化规律进行了初步的探究，并且大多是基于复杂网络理论设计电网的时空演化模型^[5]。文献[6]提出了一种基于Barabási-Albert (BA)无标度网络的电网演化模型，比较了其与实际电网的度分布和聚类系数等拓扑特征参数。文献[7]根据局域世界演化模型模拟电网演化过程，所得网络的度分布与实际电网具有类似的幂尾特性^[8]。文献[4]分析了小型电网、大型互联电网和智能电网三代电网的发展历程，归纳了负荷需求、电能供给和控制能力这三类驱动电网演化的因素，并指出当前世界各国电网总体处于互联电网向智能电网演进的阶段。文献[9]分析了高比例风电、光伏接入对电力系统灵活性的要求及电网未来低碳化和电力电子化的发展趋势。文献[10]利用未来新能源和负荷量的预测数据，考虑电量、电力、环保和调峰等约束，以电网建设成本最小为目标进行网络规划，对未来多个年份的电网演化进行模拟。文献[11]基于复杂网络的异速生长规律研究电网规模发展变化规律，根据理想化的电网零阶模型得出电网规模和用电量之间存在亚线性的增长关系。

负荷需求的增长、变化是能源网演化最根本的驱动要素。负荷的增长和空间分布特征与城镇的发展密切相关，也是能源网规划的基础，对区域能源网的形态特征有着重要影响。文献[12]用等大小的网格对 10kV 馈线供电范围进行划分，基于支持向量机方法并根据用地信息得到空间负荷预测结果。文献[13]利用模糊 C-均值聚类算法对不同城市进行分类，并利用非参数核密度估计方法提取不同用地类型的负荷概率密度分布特征。文献[14]采用单位面积功率法计算建筑体负荷量，并用聚类方法验证了城市负荷可在空间上分为多个群簇。

现有的电网演化模型大多基于复杂网络理论中的某一理想网络模型，没有充分考虑电网演化与实际城镇生长特性之间的关系。同时当前空间负荷预测的相关研究主要集中于预测方法的改进^[15]，缺乏对城镇空间负荷分布规律的总结，难以为能源网

演化规律的分析提供指导。在现有研究的基础上，本文提出一种考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型。根据城镇生长特性总结了负荷的空间增长规律，并基于复杂网络理论中的随机几何图模型模拟城镇负荷的增长过程。以最小化投资建设成本为目标，随负荷增长进行初期规划和多个阶段的扩展规划，得到区域能源网能源站和综合管线分布，以充分模拟能源网演化，使模型能够适用于初期规划和扩展规划两种场景。将演化得到的区域能源网与实际电网的规模演化和拓扑特征进行对比，验证所提模型的合理性。

1 城镇和空间负荷生长特性

1.1 城镇生长特性

城镇的生长与人口的增长密不可分，其原因除了出生、死亡导致的人口自然增长以外，在很大程度上还包括农村人口的迁入。城镇能够吸引人们聚居，一方面是由于当地较优质的气候、资源、地形、地理位置等自然条件，另一方面是由于城镇具有较发达的经济、文化、教育、交通、通信、医疗卫生等社会经济条件。同时人口增长也会进一步影响城镇的生产生活条件，其中社会经济条件尤其与人的活动密不可分。在城镇发展过程中的一个现象是随着越来越多人口的迁入，城镇有了更多的就业机会、更好的教育资源、更先进的医疗卫生条件、更完善的社区和娱乐环境等。这种现象可以被抽象为人口的聚集使得人与人之间有了更多的交互和协作，从而促使城镇的生产生活环境变得更加友好，而更友好的生产生活环境也会进一步提升城镇的吸引力，使得更多的人口迁移到城镇中^[16]。因此城镇的生长与人们可交互和协作的程度密切相关，人与人之间的交互和协作效益越多，城镇就越有吸引力。

文献[16-18]分析了某实际社区、厦门市、泰州市的形态演化特征，结果表明城镇在扩张阶段建成区的面积会加速增长，建成区半径近似随时间线性增长，其中厦门市 2002 年至 2018 年的建成区面积与年份之间近似存在二次函数关系：

$$S_{XM} = 0.0488t_y^2 - 194.17t_y + 193054 \quad (1)$$

式中： S_{XM} 为厦门市建成区的面积，单位为 km^2 ； t_y 为年份。

建成区半径与年份之间近似存在如下关系：

$$R_{XM} = 0.0627t_y - 120.52 \quad (2)$$

式中 R_{XM} 为厦门市建成区半径，单位为 km 。

此外，厦门市 2002—2006 年、2006—2010 年、

2010—2014 年、2014—2018 年的集聚强度分别为 8.49%、10.82%、14.31%、15.46%，集聚强度随年份增长不断增大，表明城镇生长具有集聚特征。

基于上述现象，若以人口数量表征城镇规模，则可以将城镇的生长特性总结为：城镇的生长阶段具有加速扩张特征，并且人口密度高的区域对于外来人口相对更有吸引力，在该区域的人口增长速度更快，即在该区域城镇生长的速度更快。

1.2 空间负荷增长特性

2015 年起执行的国家标准《城市综合管廊工程技术规范》^[19]指出可将电力、热力、天然气等工程管线纳入综合管廊统一规划、统筹建设，以集约利用地下空间。因此未来电网的规划建设将逐步扩展为综合能源网络的规划建设，应将现有研究中的电网演化模型扩展为综合能源网络的演化模型。

城镇空间负荷分布与人口密度分布有紧密关联，文献[13]中的空间负荷分布分析结果表明人口密度与电力负荷密度之间通常具有正相关性，文献[20]指出热负荷密度与人口密度之间具有正相关性。根据电、热综合负荷大小与人口密度之间的正相关性，可基于 1.1 节中的城镇生长特性得到城镇空间负荷的增长特性：即在城镇的生长阶段，负荷会加速增长，并且负荷密度较高的区域，负荷增长速度更快。上述特性表明城镇空间负荷增长具有集聚特征，这与文献[14]的城市空间负荷分布数据中负荷在空间上具有集聚的特征相符合。

2 区域能源网演化模型

现有的基于 BA 无标度网络和局域世界演化模型的电网演化模拟只能得到网络的拓扑结构^[6-7]，无法模拟节点和线路在空间上的分布特征。根据第 1 节的城镇和空间负荷生长特性，考虑到随机几何图模型具有在空间上的高聚集性，本文基于该模型的构造思路，模拟区域能源网的负荷在空间上的增长过程，并通过区域能源网的初期规划和扩展规划得到能源站和综合管线的分布。

2.1 随机几何图

随机几何图是在欧氏空间中的一种随机网络模型，其定义为： N 个独立的节点服从均匀分布随机地分布在大小为 L^d 的超方形区域内，给定距离 $r(r \ll L)$ ，对于任意两个节点，若其欧氏距离小于 r ，则在这两个节点之间连接一条边，由此得到的图即为随机几何图^[21]。其中 L 为超方形区域的边长， d 为欧氏空间的维数。附录 A 图 A1 中给出了 $N=200$ 、 $d=2$ 、 $L=1$ 、 $r=0.1$ 的随机几何图示例，可看出随机

几何图中距离相近的节点之间会连接形成较多的局域三角形，在空间上具有高聚集性。

2.2 区域能源网负荷增长模型

随机几何图的高聚集特性与城镇、空间负荷生长的集聚特征具有相似之处。2.1 节所述的随机几何图是一种静态的网络模型，本文借鉴其构造方法，建立区域能源网的负荷动态增长模型。

本文在大小为 L^2 的二维平面上模拟区域能源网的演化。空间负荷增长的整体过程为：在给定的平面区域中按照独立均匀分布逐个加入负荷节点，并设定负荷节点留存的规则，确定是否保留新增的节点。空间负荷增长的集聚特征表明，在与已有负荷节点距离较近的区域，出现新的负荷的可能性更大，可通过概率模型表示空间中某点新增负荷的可能性。假定城镇由于自然条件吸引人口增长，从而使新增负荷节点留存的概率为 q_1 ；除自然条件以外，城镇由于社会经济条件吸引人口和负荷增长的影响范围半径为 r ，则与已有负荷节点的最短距离小于 $r(r \ll L)$ 的新增负荷节点留存的概率为 q_2 ，并且满足 $q_1 \ll q_2$ 。由此，第 i 次添加的负荷节点能够留存的概率为：

$$p_i = \begin{cases} q_1, & d_{\min,i} > r \\ q_2, & d_{\min,i} \leq r \end{cases} \quad (3)$$

式中： p_i 为第 i 次加入的负荷节点留存的概率； q_1 和 q_2 分别为由于自然条件和社会经济条件吸引负荷节点留存的概率； $d_{\min,i}$ 为第 i 次加入的负荷节点与已存在节点的最小距离。

能源网的演化模拟与规划问题分析类似，通常需要对分布式能源、电动汽车等用户侧资源进行简化处理^[4-10]，取用户最大负荷进行分析。城镇中通常包含居民、商业、工业、市政等多种不同类型的用户负荷。不同类型负荷的典型密度值可能存在较大差异，因而区域能源网中负荷的概率密度函数具有多个峰值的特征^[13]。可用高斯函数拟合每类负荷的概率密度函数，则新增负荷节点的负荷量大小分布的概率密度函数可由多个高斯函数组合而成：

$$f(P_i) = \sum_j \frac{k_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} e^{-\frac{(P_i - P_{aj})^2}{2\sigma_j^2}}, \quad \sum_j k_j = 1 \quad (4)$$

式中： P_i 为负荷量； $f(\cdot)$ 为负荷量分布的概率密度函数； j 为负荷的类别； k_j 为第 j 类负荷所占的比重； P_{aj} 为第 j 类负荷节点的负荷量均值； σ_j 为第 j 类负荷节点的负荷量方差。

若已确定城镇中某些区域的行政用途，则在式 (4) 中可采用单个高斯函数描述该区域内特定类型

负荷大小分布，对该区域内新增负荷节点建模。

区域能源网负荷增长模拟的过程如下：

1) 给定大小为 L^2 的平面区域，设定加入负荷节点的总数 N 和半径 r 。

2) 在给定平面区域中，按照独立均匀分布随机加入一个负荷节点，其负荷量根据式(4)所示的概率密度函数随机确定。

3) 计算新生成负荷节点与已存在节点的最小距离 $d_{\min,i}$ 。若 $d_{\min,i} > r$ ，则按照概率 q_1 保留该节点；若 $d_{\min,i} \leq r$ ，则按照概率 q_2 保留该节点。

4) 若添加负荷节点的数量未超过 N ，则返回步骤 2)；否则，结束负荷增长过程。

在上述负荷增长模型中，距离阈值 r 的设定反映了经济社会条件对负荷增长的影响，使得负荷具有 1.2 节所述的集聚特征。此外，添加负荷节点的次数可代表时间，因而该模型可在时间和空间两个维度上模拟区域能源网负荷的增长过程。

若考虑城镇具体发展政策对各区域负荷增长情况和负荷密度的影响，可将上述在区域内按照独立均匀分布加入负荷节点的负荷增长模拟，改为用非均匀概率分布在区域内加入负荷节点，并修改式(3)所示负荷留存的概率，对于政策促进经济负荷增长的区域，增大该区域新增负荷及其留存概率，以反映城镇发展政策对负荷增速的影响。

2.3 区域能源网能源站和管线演化模型

区域能源网规划可视为是其演化过程的组成部分，当负荷增长情况确定后，可用规划的方法模拟区域能源网的能源站和管线演化。随着城镇的生长，区域能源网需要根据负荷增长情况进行多个阶段的规划和建设。在本文演化模型中，当负荷量模拟增长到一定规模时，进行规划得到初始的区域能源网能源站和管线分布。进而随着负荷继续增长，在已有网络基础上进行扩展规划^[22]。

按照 2.2 节的负荷增长模型，当给定区域中的负荷节点达到 N_m 个后，以最小化建设成本为目标，进行区域能源网规划。其中能源站的投资建设成本如式(5)所示^[23]：

$$C_{s,i} = [2.118(c_s \frac{P_{sbe,i} + P_{sbh,i}}{10^7})^{0.9198} + 27.54] \times 10^7 \quad (5)$$

式中： $C_{s,i}$ 为第 i 个能源站的建设成本； $P_{sbe,i}$ 和 $P_{sbh,i}$ 分别为第 i 个能源站的供电和供热设备容量，单位为 kW； c_s 为供能设备的单位容量建设成本。

区域能源网的管线敷设成本包括综合管廊建设费用、施工费用和管线材料费用：

$$C_{l,b} = x_b l_b (c_p + c_{le} |P_{lbe,b}| + c_{lh} |P_{lbh,b}|) \quad (6)$$

式中： $C_{l,b}$ 为第 b 条综合管线的敷设成本； x_b 为表示第 b 条管线敷设状态的二进制变量； l_b 为第 b 条管线的长度； c_p 为综合管廊的单位长度建设成本； $P_{lbe,b}$ 和 $P_{lbh,b}$ 分别为第 b 条综合管线的电功率和热功率额定值； c_{le} 和 c_{lh} 分别为单位长度、单位容量的配电线路和供热管道的建设成本。

区域能源网规划的目标函数如式(7)所示。

$$\min C = \sum_i (1 + \mu_s) C_{s,i} + \sum_b (1 + \mu_l) C_{l,b} \quad (7)$$

式中： C 为区域能源网的建设成本； μ_s 和 μ_l 分别为能源站和供能管线的运行维护费用比例系数。

区域能源网规划的约束条件包括多能流平衡约束、能源站输出功率和供能管线功率流上下限约束，如式(8)——(10)所示。

$$\begin{cases} \sum_{n_j \in \Gamma_i} P_{le,ji} = P_{e,i} - P_{se,i} \\ \sum_{n_j \in \Gamma_i} P_{lh,ji} = P_{h,i} - P_{sh,i} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{se,i} \leq \alpha_i m_g P_{sbe,i} \\ 0 \leq P_{sh,i} \leq \alpha_i m_g P_{sbh,i} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} -x_b m_g P_{lbe,b} \leq P_{le,b} \leq x_b m_g P_{lbe,b} \\ -x_b m_g P_{lbh,b} \leq P_{lh,b} \leq x_b m_g P_{lbh,b} \end{cases} \quad (10)$$

式中： n_j 为第 j 个节点； Γ_i 为节点 n_i 的邻接节点集合； $P_{e,i}$ 和 $P_{h,i}$ 分别为第 i 个节点的负荷电功率和热功率； $P_{se,i}$ 和 $P_{sh,i}$ 分别为第 i 个节点的能源站输出电功率和热功率； $P_{le,ji}$ 和 $P_{lh,ji}$ 分别为由节点 n_j 流向节点 n_i 的电功率和热功率； α_i 为表示能源站建设状态的二进制变量； m_g 为考虑未来负荷增长的供能设备和管线建设容量的裕度系数； $P_{le,b}$ 和 $P_{lh,b}$ 分别为流经第 b 条综合管线的电功率和热功率。

形成初始的区域能源网络后，根据负荷增长模型继续向所考虑区域中增加负荷节点。每增长 N_{ep} 个负荷节点后，对区域能源网进行一次扩展规划。若新增的负荷量尚未超过已有能源站中供能设备的容量裕度，则可仅对供能管线进行扩展规划，目标函数如式(11)所示。

$$\min C_{ep} = \sum_{\gamma_b \in \Gamma_{ep}} (1 + \mu_l) C_{lep,b} \quad (11)$$

式中： C_{ep} 为区域能源网的扩建成本； Γ_{ep} 为第 b 条供能管线； Y_{ep} 为可扩建的管线集合； $C_{lep,b}$ 为扩建管线的成本，计算方式与式(6)相同。

区域能源网扩展规划中的多能流平衡约束如式(7)所示。扩建的供能管线功率流上下限约束如式(10)所示。对于已建设的能源站和供能管线，在扩展规划中可充分利用其容量裕度，其功率上下限约

束如式(12)和式(13)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{se,i} \leq P_{sbe,o,i} \\ 0 \leq P_{sh,i} \leq P_{sbh,o,i} \end{cases}, n_i \in \Omega_0 \quad (12)$$

$$\begin{cases} -P_{lbe,o,b} \leq P_{le,b} \leq P_{lbe,o,b} \\ -P_{lbh,o,b} \leq P_{lh,b} \leq P_{lbh,o,b} \end{cases}, \gamma_b \in \gamma_0 \quad (13)$$

式中: Ω_0 为已建设能源站的节点集合; γ_0 为已建设的供能管线集合; $P_{sbe,o,i}$ 和 $P_{sbh,o,i}$ 分别为已建设能源站的供电和供热设备容量; $P_{lbe,o,b}$ 和 $P_{lbh,o,b}$ 分别为已建设综合管线的电功率和热功率额定值。

若新增的负荷量超过了已有能源站的供能设备容量裕度,则需要扩充供能设备容量或建立新的能源站,此时目标函数为:

$$\min C_{ep} = \sum_{n_i \in \Omega_{ep}} (1 + \mu_s) C_{sep,i} + \sum_{\gamma_b \in \gamma_{ep}} (1 + \mu_l) C_{lep,b} \quad (14)$$

式中: Ω_{ep} 为可扩建能源站的节点集合; $C_{sep,i}$ 为扩建能源站的成本,计算方式与式(5)相同。

多能流平衡约束、扩建的能源站和管线功率限值约束如式(8)~(10)所示,已建设的能源站和供能管线功率限值约束如式(12)(13)所示。

2.4 区域能源网演化模拟步骤

根据 2.2 节的空间负荷增长模型和 2.3 节的能源站、综合管线演化模型,给出区域能源网的演化模拟步骤如下:

1) 给定大小为 L^2 的平面区域,设定加入负荷节点的总数 N 和半径 r 。初始在区域中设置一个负荷节点,负荷量根据式(4)随机确定,初始化节点数量 $N_c = 0$ 。

2) 根据式(4)随机确定负荷量,生成一个新的负荷节点,并按独立均匀分布随机加入给定区域。

3) 计算新生成负荷节点与已存在节点的最小距离 $d_{min,i}$ 。若 $d_{min,i} > r$,则按照概率 q_1 保留该节点;若 $d_{min,i} \leq r$,则按照概率 q_2 保留该节点。

4) 若新生成节点未被保留,则返回步骤 2)。

5) 令 $N_c = N_c + 1$ 。若 $N_c = N_m$,则根据式(5)~(10)进行区域能源网规划。

6) 若 $(N_c - N_m)/N_{ep}$ 为正整数,则进入步骤 7),否则进入步骤 8)。

7) 判断供能设备是否仍有裕度,若是,则根据式(8)~(13)进行网络扩展规划;若否,根据式(8)~(10)和式(12)~(14)进行网络扩展规划。

8) 若 $N_c < N$,则返回步骤 2);否则,能源网演化过程结束。

上述区域能源网的演化模拟流程如图 1 所示。

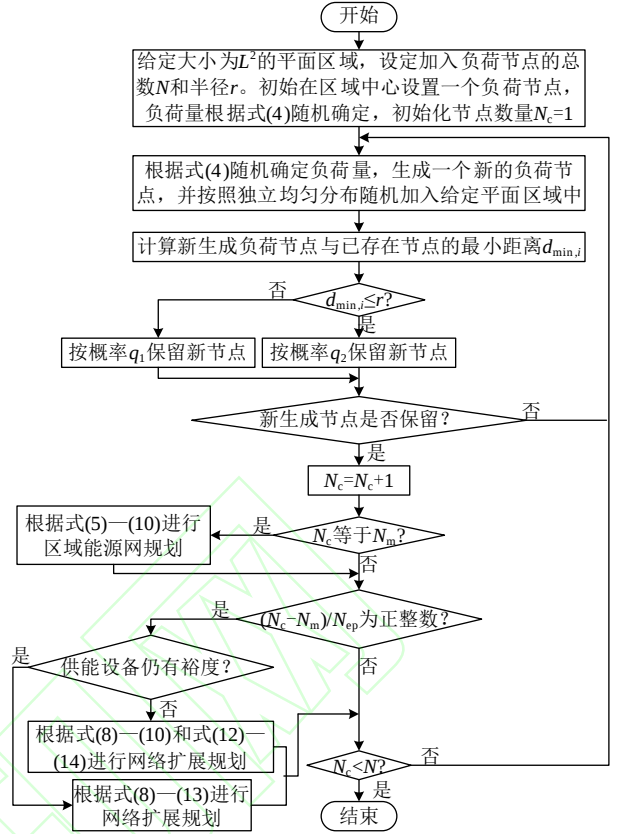


图 1 区域能源网演化流程

Fig. 1 Evolution process of regional energy network

上述演化过程考虑了城镇生长特性,可得到负荷空间增长特征,进而可对能源网的空间演化特征进行模拟,相比现有方法模拟结果更全面^[4-10]。

3 区域能源网形态特征

随着城镇区域能源网的不断演化,上述模型中网络局部涨落的影响将会减小,宏观特征将逐渐趋于稳定,可采用平均场方法^[24]分析区域能源网的形态特征。

3.1 区域能源网半径与时间的关系

在区域能源网演化模型中,以添加负荷节点的次数代表时间。考虑单个负荷集群的增长情况,当平面区域足够大,演化时间足够长时,区域能源网覆盖的区域将趋向于一个圆形。假定当前能源网的半径为 R ,如附录 B 图 B1(a)所示,当新添加的负荷节点落在内半径为 R 、外半径 $R+r$ 的环形区域内时,可使该能源网的半径增加。根据平均场方法,通过计算新添加的负荷节点落在内半径为 R 、外半径 $R+r$ 的环形区域内的概率,及其可使能源网增加的平均面积和平均半径,得到区域能源网半径与时间的关系如式(15)所示,详细的推导过程在附录 B 中给出。

$$R = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right) \frac{r^3}{L^2} t \quad (15)$$

式中 t 为区域能源网演化的时间。

式(15)表明区域能源网的半径随时间呈线性趋势增长。

3.2 区域能源网半径与负荷量的关系

区域能源网中各负荷节点的负荷量期望值为

$$P_{\text{dav}} = \int_{-\infty}^{\infty} P_i f(P_i) dP_i = \sum_j k_j P_{aj} \quad (16)$$

式中 P_{dav} 为负荷节点的负荷量期望值。

根据平均场方法, 当网络的规模足够大, 节点数量足够多时, 区域能源网的总负荷量为

$$P_s = N_c P_{\text{dav}} = N_c \sum_j k_j P_{aj} \quad (17)$$

式中 P_s 为区域能源网的负荷量。

区域能源网半径与负荷量满足如下关系:

$$\frac{dR}{dP_s} = \frac{d(R+r)}{P_{\text{dav}} dN_c} = \frac{2\pi R r}{\pi(R+r)^2} \frac{R_{\text{dav}}}{P_{\text{dav}}} \approx \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{3}\right) \frac{r^3}{\pi R^2 P_{\text{dav}}} \quad (18)$$

求解式(18)可得:

$$R = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\pi}\right) \frac{r^3}{P_{\text{dav}}} P_s} \quad (19)$$

式(19)表明区域能源网的半径随负荷量呈亚线性趋势增长, 负荷在空间上具有 1.2 节所述的集聚特征。同时结合式(18)可知区域能源网的负荷量随时间呈超线性趋势增长。

3.3 供能管线总长度与负荷量的关系

目前区域能源网的规划结果大多为一辐射状结构的网络^[23,25], 其中可能包含多个树状结构的子网络。对于包含 N_t 个节点的树状网络, 其中边的数量为 $N_t - 1$, 所有节点的度数之和为 $2(N_t - 1)$, 各节点的平均度数为 $2(N_t - 1)/N_t \approx 2$ 。假定区域能源网尚处于扩张的阶段, 即 $L \gg R$, 其中节点的空间分布未达到密集状态, 假定在每个节点附近半径为 r 的区域内已存在 2 个节点。基于平均场方法, 按照附录 C 所示步骤分析得到供能管线总长度与负荷量的关系如式(20)所示。

$$l_s = \frac{16r}{45P_{\text{dav}}} P_s \quad (20)$$

式中: l_s 为区域能源网的供能管线总长度。

式(20)表明区域能源网的供能管线总长度随负荷量呈线性趋势增长。

3.4 负荷量与供能管线材料用量的关系

文献[11]将供能管线的材料用量作为电网规模, 指出负荷量与电网规模之间存在亚线性关系。本小节分析所提区域能源网演化模型中负荷量与

供能管线材料用量的关系。由式(C2)可知当区域能源网的半径为 R 时, 新增负荷节点与负荷中心距离的期望值为 $2R/3$ 。在区域能源网规划结果中能源站通常位于负荷中心附近, 因此新增负荷节点后, 需增加的管线材料用量期望值近似为 $2Rv_p P_{\text{dav}}/3$, 其中 v_p 为管线所需材料用量与其功率流量的比例系数^[11,20]。则管线材料用量与负荷量满足如下关系:

$$\frac{dV_s}{dP_s} = \frac{1}{P_{\text{dav}}} \frac{dV_s}{dN_c} = \frac{2v_p}{3} R \quad (21)$$

式中 V_s 为区域能源网的供能管线材料用量。

结合式(19)所示区域能源网半径与负荷量之间的关系, 可得

$$P_s = \left(\frac{32\pi P_{\text{dav}}}{(3\pi - 4)v_p^3 r^3} \right)^{\frac{1}{4}} V_s^{\frac{3}{4}} \quad (22)$$

式(22)表明区域能源网的负荷量与供能管线材料用量之间存在亚线性关系, 其中幂函数的指数为 $3/4$, 与文献[11]中的理论分析结果相同。

3.5 区域能源网的度分布

在第 2 节的区域能源网演化模型中, 负荷节点是按照均匀分布添加至给定区域内, 可认为新增的负荷节点将等概率地连接至网络中已存在的节点。在加入第 i 个负荷节点后, 该节点与网络中已有的 $i-1$ 个节点连边的概率均为 $1/(i-1)$, 则网络中各节点的度的期望值为

$$\begin{cases} a_1 = \left\lfloor \sum_{j=1}^{N-1} \frac{1}{j} \right\rfloor \\ a_i = \left\lfloor 1 + \sum_{j=i}^{N-1} \frac{1}{j} \right\rfloor, i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (23)$$

式中: a_i 为第 i 个加入到网络中的节点度的期望值; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算符。

通过数值计算分析上述演化模型的度分布。当 $N=10\,000$ 时, 根据式(23)计算得到网络的度分布如图 D1 所示, 可看出在双对数坐标下度分布曲线的后半部分接近于直线。当 N 较大时, 改变 N 的大小所得的度分布曲线均具有该特征, 这表明本文区域能源网演化模型得到的度分布具有幂尾特性, 与实际电网络的度分布^[6-7]具有类似的特征。

4 算例分析

4.1 区域能源网演化结果

根据本文考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型, 在大小为 $L^2=20\text{km} \times 20\text{km}$ 的平面区域中模拟能源网演化, 通过分析演化网络的负荷集聚特征、负荷量与供能管线材料用量的关系、度分布等

形态特征,并与现有文献分析结果对比,验证所提模型的合理性。取 $r=0.6\text{km}$, 添加负荷节点的周期为天, 负荷节点负荷量大小分布的概率密度函数如附录 D 式(D1)所示。考虑单个负荷集群对应能源网的演化情况, 此时可取 $q_1=0$, $q_2=1$ 。区域能源网规划模型中的常量参数如表 1 所示^[26]。

表 1 常量参数 Table 1 Constant parameters					
参数	值	参数	值	参数	值
$c_s/(\text{元}/\text{kW})$	10 000	μ_l	0.045	$P_{lbe,b}/\text{MW}$	10
$c_p/(\text{万元}/\text{m})$	0.7	N_m	100	$P_{lbe,h}/\text{MW}$	10
$c_{le}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{km}))$	3.43	N_{ep}	1	m_g	20
$c_{lh}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{km}))$	4.78	$P_{sbe,j}/\text{MW}$	10	$v_p/\text{mm}^2/\text{kW}$	0.1
μ_s	0.025	$P_{sbh,j}/\text{MW}$	10		

按照图 1 所示流程得到的区域能源网演化结果如图 2 所示, 其中黑色圆圈表示负荷节点, 红色三角形表示能源站, 蓝色线条表示供能管线。

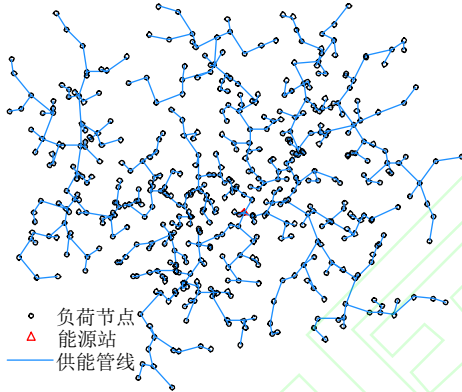


图 2 $N=500$ 时的能源网演化结果
Fig. 2 Evolving results of energy network when $N=500$

4.2 区域能源网形态特征分析

由图 2 可以看出随着区域能源网的演化, 其所覆盖的城镇区域在平面上各个方向逐渐变得均匀。本小节对第 3 节中所述区域能源网的各形态特征进行分析。

1) 区域能源网半径与时间的关系

在区域能源网的演化过程中, 网络半径与时间的关系如图 3 所示。

由图 3 可看出随着时间的增长, 区域能源网的半径大致呈线性趋势增长。采用幂函数拟合区域能源网半径与时间的关系, 得到:

$$R = 0.2425t^{0.976} \quad (24)$$

本小节均采用最小二乘法拟合函数曲线。拟合误差可采用均方根误差衡量。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} (g(s) - h(s))^2} \quad (25)$$

式中: $h(s)$ 为通过能源网演化模拟得到的函数; $g(s)$ 为拟合函数; σ 为均方根误差; N_s 为样本点数量。

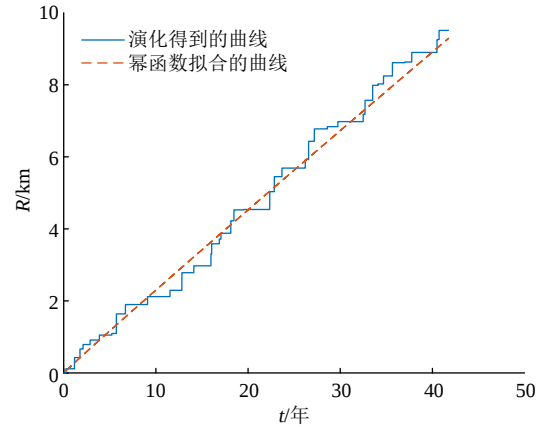


图 3 区域能源网半径与时间的关系
Fig. 3 Relationship between the radius of the regional energy network and time

根据式(25)计算得到式(24)所示函数的拟合均方根误差为 0.193。均方根误差的量纲与原函数相同, 将其与图 1 中网络半径均值相比可得到相对误差为 4.2%, 该拟合误差很小, 因此采用幂函数拟合区域能源网半径与时间的关系是合理的。

式(24)中幂函数的指数为 0.976, 与 1 十分接近, 这表明区域能源网的半径随时间近似呈线性趋势增长, 与 3.1 节的理论分析结果相符合。

本文模拟城镇区域能源网演化, 其中电网为中压配电网, 能源站供热半径通常可达 20km 以上, 由图 3 可看出供电和供热半径符合城镇供能要求。

2) 区域能源网半径与负荷量的关系

在区域能源网的演化过程中, 网络半径与负荷量的关系如图 4 所示。

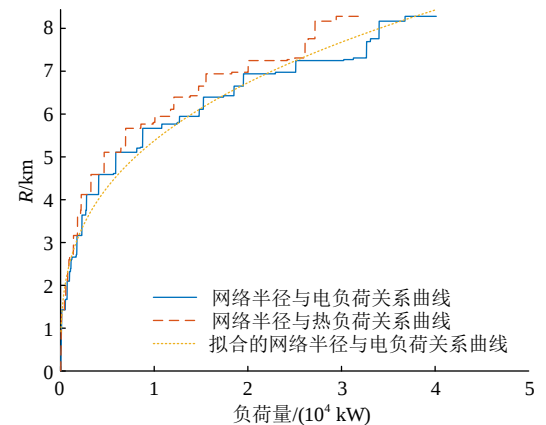


图 4 区域能源网半径与负荷量的关系
Fig. 4 Relationship between the radius of the regional energy network and load

由图 4 可看出区域能源网半径的增长速度随负荷量的增长逐渐减小, 采用幂函数拟合区域能源网半径与电负荷量的关系, 得到:

$$R = 0.2712P_s^{0.324} \quad (26)$$

如图 4 所示, 拟合得到的曲线与网络演化得到的曲线走势基本吻合, 均方根误差为 0.175, 相对

误差为 3.3%，因此采用幂函数进行拟合是合理的。式(26)中幂函数的指数为 0.324，与 3.2 节的理论分析结果 $1/3$ 十分接近。这表明区域能源网的半径随负荷量呈亚线性趋势增长，同时结合式(24)可知区域能源网的负荷量随时间呈超线性趋势增长。区域能源网半径与负荷量的亚线性关系体现了 1.2 节所述负荷在空间上的集聚特征。

3) 供能管线总长度与负荷量的关系

在区域能源网的演化过程中，供能管线总长度与负荷量的关系如图 5 所示。

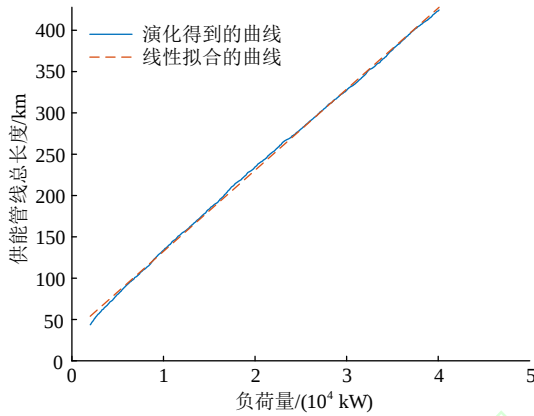


图 5 供能管线总长度与负荷量的关系

Fig. 5 Relationship between the total length of energy supply pipelines and load

由图 5 可看出随着负荷量的增长，区域能源网供能管线总长度大致呈线性趋势增长。采用线性函数拟合供能管线总长度与负荷量的关系，得到：

$$l_s = 9.8 \times 10^{-3} \times P_s + 34.37 \quad (27)$$

拟合的曲线与演化所得曲线的均方根误差为 2.7，与曲线中供能管线总长度的数值对比可知该误差较小，计算得到相对误差为 1.7%，表明管线总长度随负荷量近似呈线性趋势增长，与 3.3 节的理论分析结果相符合。

4) 负荷量与供能管线材料用量的关系

在区域能源网的演化过程中，负荷量与供能管线材料用量的关系如图 6 所示。

由图 6 可看出在双对数坐标下，负荷量与供能管线材料用量之间近似为线性关系，因此在双对数坐标下采用线性函数对负荷量与供能管线材料用量的关系进行拟合，得到：

$$\log P_s = 0.758 \log V_s + 3.539 \quad (28)$$

拟合函数的均方根误差误差为 44.1，相对误差为 0.40%，误差很小。由式(28)可得：

$$P_s = 3.457 \times 10^3 \times V_s^{0.758} \quad (29)$$

式(29)中供能管线材料用量 V_s 的指数为 0.758 < 1，表明区域能源网的负荷量与供能管线材料用量

之间存在亚线性关系，并且该指数值与 3.4 节和文献[11]中的理论分析结果 $3/4$ 相符合。

5) 区域能源网的度分布

演化所得区域能源网的度分布如图 7 所示。

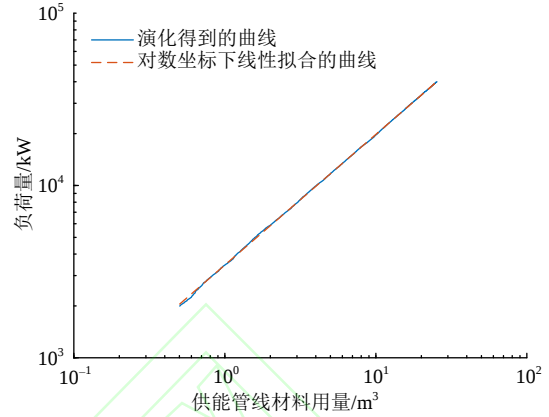


图 6 负荷量与供能管线材料用量的关系

Fig. 6 Relationship between the load and material consumption of energy supply pipelines

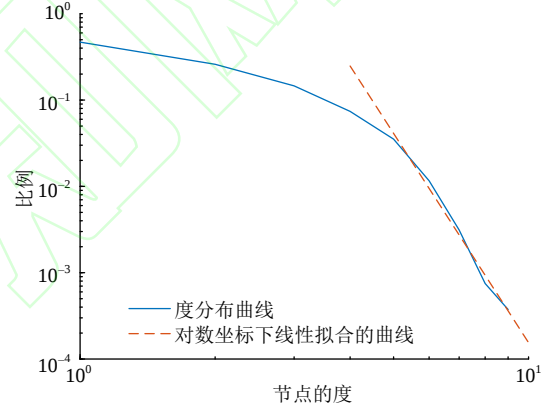


图 7 区域能源网演化模型的度分布

Fig. 7 Degree distribution of the regional energy network evolving model

从图 7 可以看出，在双对数坐标下，区域能源网演化模型的度分布曲线的后半部分接近于直线，拟合函数的均方根误差为 5.6×10^{-4} ，相对误差为 3.5%。这表明度分布具有幂尾特性，与 3.5 节的分析结果相符合，因此本文演化模型所得网络与实际电网的度分布^[6-7]具有类似的特征。

根据以上区域能源网形态特征分析，本文模型模拟得到的能源网中，负荷量与供能管线材料用量的亚线性关系、度分布的幂尾特性、区域能源网半径与时间的线性关系、负荷的空间集聚性等特征均与实际城镇能源网相符合^[7,11,14,17-18]。现有文献中演化模型仅能模拟实际能源网度分布的幂尾特性，其他特征根据实际数据统计得到，未给出具体演化模拟方法，本文演化网络能够同时满足现有研究中总结的能源网特征，验证了所提模型的合理性。

现有电网演化模型未考虑城镇生长特性，难以对网络空间分布特征进行模拟，基于复杂网络理论

的局域世界网络^[7]模拟能源网演化, 通过将负荷节点均匀分布在平面区域内得到网络如图 D2 所示。该方法未考虑城镇生长特性的能源网演化结果, 是通过与实际网络对比节点度分布拓扑特征验证其合理性, 由于其中不包含负荷的空间分布信息, 无法为能源网规划模型提供足够的数据。本文方法可对能源网空间分布特征进行模拟, 并通过节点度分布、负荷量与供能管线材料用量、能源网半径与时间之间的关系等多个特征验证了模型的合理性, 因而得到的网络具备更多实际网络的特征。

4.3 区域能源网演化影响因素分析

如 1.2 节所述, 当区域规模扩大后, 区域能源网演化结果中可能包含多个负荷集群, 在演化模型中取 $N=1500$, 对这种情况进行模拟, 得到包含多个负荷集群的区域能源网演化结果如图 D3 所示。从图 D3 可看出该区域能源网的空间负荷分布具有集聚特征, 其中包含 7 个负荷集群, 经过规划后共建立了 5 个能源站。以上结果表明采用本文方法可生成包含多个负荷集群的区域能源网, 其中每个负荷集群所对应区域能源网络的演化具有与 4.2 节分析结果类似的特征, 拟合曲线的斜率或幂函数指数与式(24)至式(29)接近, 验证了各区域演化结果的合理性。进一步基于 2.3 节规划模型可得到区域互联能源网络, 因此本文方法能够适用于不同地理跨度的多区域能源网演化模拟。

随着城镇发展和负荷的增长, 当区域能源网演化至负荷较为密集的阶段, 或其中不同负荷集群所覆盖的城镇区域开始重叠时, 区域能源网的半径、供能管线总长度、供能管线材料用量等特征随负荷量的增长将减缓。令平面区域大小为 $L^2=3\text{km}\times 3\text{km}$, 取 $N=500$, 对负荷密度较大的情况进行模拟, 得到的区域能源网演化结果如图 D4 所示, 演化过程中供能管线总长度与负荷量的关系如图 8 所示。

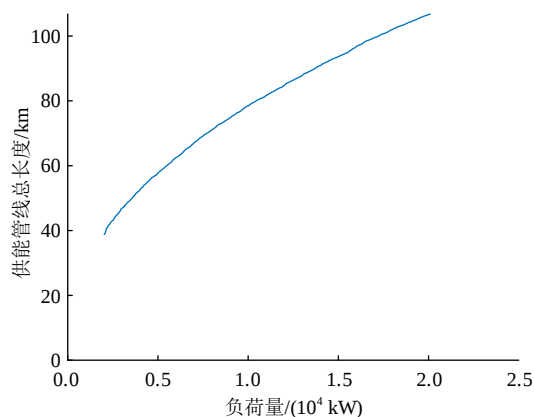


图 8 负荷密度较大时供能管线总长度与负荷量的关系
Fig. 8 Relationship between the total length of energy supply pipelines and load when the load reaches density

由图 D4 和图 8 可看出, 当区域能源网在空间上的扩张达到饱和后, 空间负荷密度将持续增长, 区域能源网的供能管线总长度随负荷量增长将由线性趋势转变为亚线性趋势。这表明在城镇的发展过程中, 区域能源网初期的投资建设成本相对较高, 随着负荷密度不断增大直至趋于稳定状态, 区域能源网的平均单位负荷扩建成本将会逐步减小。因此, 通过分析区域能源网在空间上的长期演化规律, 可为其规划、运行提供依据。

上述算例分析结果表明本文区域能源网演化模型可适用于区域规模扩大和负荷密度增长等多场景的演化模拟, 能够得到符合第 1 节所述城镇和空间负荷生长特性的区域能源网, 并且所得网络的度分布和生长规律^[11]等与实际电网络具有类似的特征, 可较好地对实际区域能源网进行模拟。

5 结论

本文提出了一种考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型, 该模型充分考虑了区域能源网演化与实际城镇生长特性之间的关系, 基于复杂网络理论中的随机几何图模型模拟城镇负荷的增长过程, 并通过规划的方法得到能源站和综合管线分布。演化得到的区域能源网符合城镇和负荷的生长特性, 其空间和拓扑特征与理论分析结果相符合, 并且负荷量与供能管线材料用量的亚线性关系、网络度分布的幂尾特性等特征与实际电网络一致, 验证了所提演化模型的合理性。

现有电网演化模型尚未对网络在空间上的分布特征进行模拟, 本文模型为研究区域能源网的空间演化规律提供了思路, 所得网络可为区域能源网的形态特征分析、规划运行和故障模拟分析等提供依据, 有助于提炼能源网发展的共性规律。

对城镇和空间负荷的生长特性进行更为精细的分类总结, 并将其与区域能源网演化模型相结合, 进一步提升演化网络与实际能源网络的相似度, 是本文的后续研究方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833(in Chinese).
- [2] 郭健, 曹军威, 杨洋, 等. 面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 493-504.

- GUO Jian, CAO Junwei, YANG Yang, et al. User demand oriented research framework of value morphology for REI and its application analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 493-504(in Chinese).
- [3] 郑玉平, 王丹, 万灿, 等. 面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 2-15.
ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technology and application of energy internet oriented to new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 2-15(in Chinese).
- [4] 梅生伟, 龚媛, 刘锋. 三代电网演化模型及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1003-1012.
MEI Shengwei, GONG Yuan, LIU Feng. The evolution model of three-generation power systems and characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1003-1012(in Chinese).
- [5] 魏震波, 苟竞. 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 279-287.
WEI Zhenbo, GOU Jing. An overview on application of complex network theory in power system analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 279-287(in Chinese).
- [6] 曹一家, 王光增, 包哲静, 等. 一种复杂电力网络的时空演化模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 1-5.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, BAO Zhejing, et al. Temporal and spatial evolution model of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 1-5(in Chinese).
- [7] 曾泰元. 考虑电压等级及社团分区的电网演化模型研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [8] 何大初, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 2-10.
HE Daren, LIU Zonghua, WANG Binghong. Complex systems and complex networks[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 2-10(in Chinese).
- [9] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18(in Chinese).
- [10] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的未来电力系统演化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421-430.
XIE Yuxiang, ZHANG Xuemin, LUO Jinshan, et al. Evolution model for future power system under massive penetration of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 421-430(in Chinese).
- [11] 张毓灵, 武志刚. 电网规模的异速生长规律初探[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 19-25.
ZHANG Yuling, WU Zhigang. Preliminary study on allometric scaling laws of power grid scale[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 19-25(in Chinese).
- [12] 肖白, 赵晓宁, 姜卓, 等. 利用模糊信息粒化与支持向量机的空间负荷预测方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 251-258.
XIAO Bai, ZHAO Xiaoning, JIANG Zhuo, et al. Spatial load forecasting method using fuzzy information granulation and support vector machine[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 251-258(in Chinese).
- [13] 刘思, 傅旭华, 叶承晋, 等. 应用聚类分析与非参数核密度估计的空间负荷分布规律[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 604-609.
LIU Si, FU Xuhua, YE Chengjin, et al. Spatial load distribution based on clustering analysis and non-parametric kernel density estimation[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 604-609(in Chinese).
- [14] 刘婉兵, 李妍, 杜明秋, 等. 城市负荷空间分布的聚类群簇分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 59-65, 82.
LIU Wanbing, LI Yan, DU Mingqiu, et al. Cluster analysis on spatial distribution of urban load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 59-65, 82(in Chinese).
- [15] 肖白, 黄钰茹, 姜卓, 等. 数据匮乏场景下采用生成对抗网络的空间负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7990-8001.
XIAO Bai, HUANG Yuru, JIANG Zhuo, et al. The method of spatial load forecasting based on the generative adversarial network for data scarcity scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7990-8001(in Chinese).
- [16] ZHANG Jiang, LI Xintong, WANG Xinran, et al. Scaling behaviours in the growth of networked systems and their geometric origins[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9767.
- [17] 张秋仪, 高银宝, 张杨, 等. 海岛型城市建成区扩张特征及空间演化模式——以厦门岛(2002—2018 年)为例[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 98-106.
ZHANG Qiuyi, GAO Yinbao, ZHANG Yang, et al. Spatial process, motivation and model of the expansion of built-up areas of island city: a case study of Xiamen island (2002—2018)[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2021, 37(1): 98-106(in Chinese).
- [18] 范少华. 基于夜间灯光数据的城市形态空间演化研究——以泰州市为例[J]. 城市建筑, 2020, 17(33): 43-45.
FAN Shaohua. Research on urban form spatial evolution based on night light data—a case of Taizhou[J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(33): 43-45(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015(in Chinese).
- [20] 杨治金. 丹麦的集中供热[J]. 区域供热, 2000(6): 27-30.
- [21] 董恩铭. 复杂网络演化的几何图表示与博弈机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
DONG Enming. Research on geometric expression and game mechanism of complex networks evolution[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016(in Chinese).
- [22] MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2583-2596.
- [23] 徐成司, 董树锋, 吴金城, 等. 考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 74-82.
XU Chengsi, DONG Shufeng, WU Jincheng, et al. Planning of energy station and pipeline considering topological characteristics of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 74-82(in Chinese).
- [24] LI Xintong, WANG Xinran, ZHANG Jiang, et al. Allometric scaling, size distribution and pattern formation of natural cities[J]. Palgrave Communications, 2015, 1: 15017.
- [25] WANG Xin, SUN Jinghui, YI Wenfei. P-median model based optimization of energy supply station sites and pipelines layout for integrated energy system[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2018.
- [26] 苗世洪, 朱永利. 发电厂电气部分[M]. 5 版. 北京: 中国电力出版社, 2015: 373-382.



徐成司

作者简介:

徐成司(1995), 男, 硕士, 研究方向为区域能源互联网规划, E-mail: 3140103128@zju.edu.cn;

董树锋(1982), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为区域能源互联网规划、状态估计及优化运行等, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn;

鲁斌(1981), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为送电电气设计, E-mail: lub@sepd.com.cn.

(责任编辑 徐梅)

附录 A

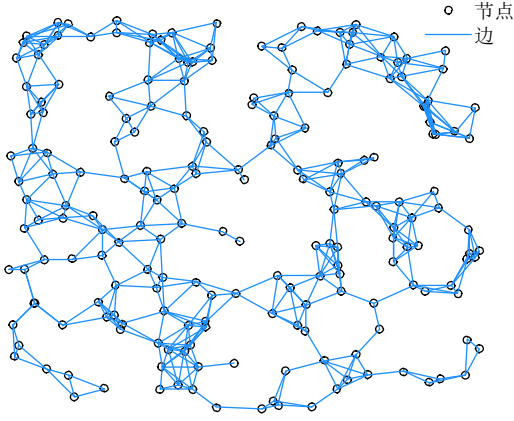
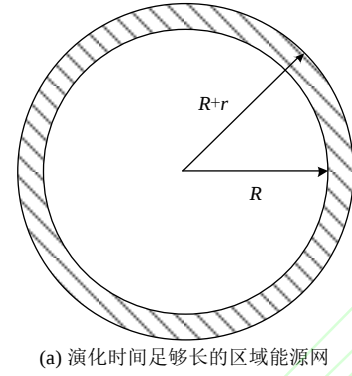


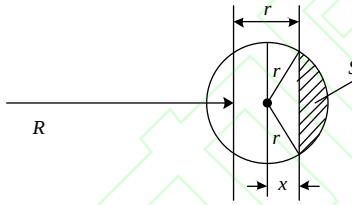
图 A1 随机几何图示例

Fig. A1 Example of the random geometric graph

附录 B



(a) 演化时间足够长的区域能源网



(b) 区域能源网新增面积示意图

图 B1 区域能源网覆盖区域示意图

Fig. B1 Diagram of the regional energy network coverage area

根据平均场方法,假定区域能源网的规模已经足够大,满足 $R \gg r$ 。当新增负荷节点距离能源网中心的距离为 $R+r-x$ 时,该网络所覆盖城镇区域能够吸引负荷增长的影响范围将增加图 B1(b)所示阴影部分面积:

$$S_d = r^2 \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{r} - x \sqrt{r^2 - x^2} \quad (B1)$$

式中: S_d 为新增一个负荷节点后城镇区域社会经济条件影响范围增加的面积; x 为距离变量。

新增一个负荷节点后,区域能源网能够吸引负荷增长的影响范围平均增加的面积为:

$$S_{dav} = \frac{1}{r} \int_0^r S_d dx = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right) r^2 \quad (B2)$$

式中: S_{dav} 为新增一个负荷节点后城镇区域社会经济条件影响范围平均增加的面积。

当 $R \gg r$ 时,新增一个负荷节点后能源网能够吸引负荷增长的影响范围平均增加的半径为:

$$R_{dav} = \frac{S_{dav}}{2\pi(R+r)} \approx \frac{S_{dav}}{2\pi R} \quad (B3)$$

式中: R_{dav} 为新增一个负荷节点后城镇区域社会经济条件影响范围平均增加的半径。

新添加的负荷节点落在内半径为 R 、外半径 $R+r$ 的环形区域内的概率近似为 $2\pi Rr/L^2$,则区域能源网的半径与时间满足式(B4)所示关系。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d(R+r)}{dt} = \frac{2\pi Rr}{L^2} R_{dav} = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right) \frac{r^3}{L^2} \quad (B4)$$

式中: t 为区域能源网演化的时间。

求解式(B4)可得:

$$R = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right) \frac{r^3}{L^2} t \quad (B5)$$

附录 C

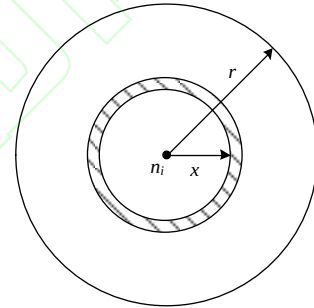


图 C1 负荷节点间的距离示意图

Fig. C1 Diagram of the distance between load nodes

在第2节区域能源网演化模型中,考虑 $N_{ep}=1$ 的情形,分析供能管线总长度与负荷量的关系。随着区域能源网的演化和负荷密度的增加,每个负荷节点附近的负荷节点到该节点的最短距离会减小。如图 C1 所示,负荷节点 n_i 附近的2个节点与其最短距离为 x ,新增负荷节点到该节点的距离比原来的最短距离 x 更短,即落在节点 n_i 附近半径为 x 的圆形区域内。 n_i 附近某节点与其距离为 x 的概率为 $2\pi x dx / \pi r^2$,距离大于 x 的概率为 $(\pi r^2 - \pi x^2) / \pi r^2$,则 n_i 附近的2个节点与其最短距离为 x 的概率为:

$$p_{l,x} = 2 \frac{\pi r^2 - \pi x^2}{\pi r^2} \frac{2\pi x dx}{\pi r^2} \quad (C1)$$

新增负荷节点落在节点 n_i 附近半径为 x 的圆形区域内,其与 n_i 之间距离的期望值为:

$$x_{av} = \int_0^x y \frac{2\pi y dy}{\pi x^2} = \frac{2}{3} x \quad (C2)$$

式中: x_{av} 为新增负荷节点与节点 n_i 之间距离的期

望值； y 为新增负荷节点与节点 n_i 的距离。

每新增一个负荷节点，区域能源网中供能管线长度增加的期望值为：

$$l_{\text{dav}} = \int_0^r x_{\text{av}} p_{1,x} = \int_0^r x \times 2 \frac{\pi r^2 - \pi x^2}{\pi r^2} \frac{2\pi x dx}{\pi r^2} = \frac{16r}{45} \quad (\text{C3})$$

式中： l_{dav} 为新增一个负荷节点后区域能源网中供能管线长度增加的期望值。

根据式(C3)可得区域能源网的供能管线总长度与负荷量满足式(C4)所示关系。

$$\frac{dl_s}{dP_s} = \frac{dl_s}{P_{\text{dav}} dN_c} = \frac{l_{\text{dav}}}{P_{\text{dav}}} = \frac{16r}{45P_{\text{dav}}} \quad (\text{C4})$$

式中： l_s 为区域能源网的供能管线总长度。

求解式(C4)可得：

$$l_s = \frac{16r}{45P_{\text{dav}}} P_s \quad (\text{C5})$$

附录 D

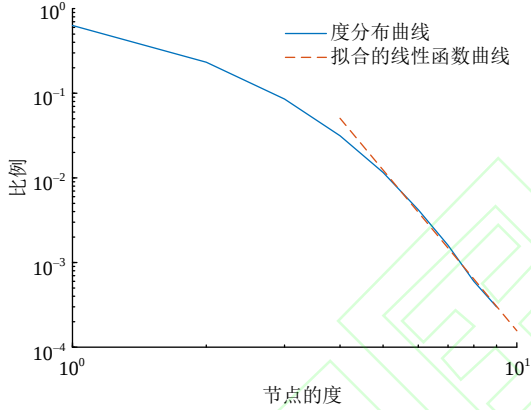


图 D1 $N=10\ 000$ 时区域能源网演化模型的度分布
Fig. D1 Degree distribution of the regional energy network evolving model when $N=10\ 000$

$$\left\{ \begin{aligned} f(P_{e,i}) &= \frac{0.3}{2\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{e,i}-8)^2/8} + \frac{0.4}{4\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{e,i}-20)^2/32} + \\ &\quad \frac{0.3}{4\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{e,i}-32)^2/32} \\ f(P_{h,i}) &= \frac{0.4}{\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{h,i}-6)^2/2} + \frac{0.4}{4\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{h,i}-16)^2/32} + \\ &\quad \frac{0.2}{5\sqrt{2\pi}} e^{-(P_{h,i}-36)^2/50} \end{aligned} \right. \quad (\text{D1})$$

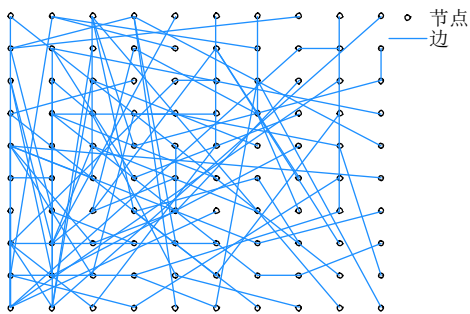


图 D2 未考虑城镇生长特性的能源网演化结果

Fig. D2 Evolving results of the energy network without considering town growth characteristics

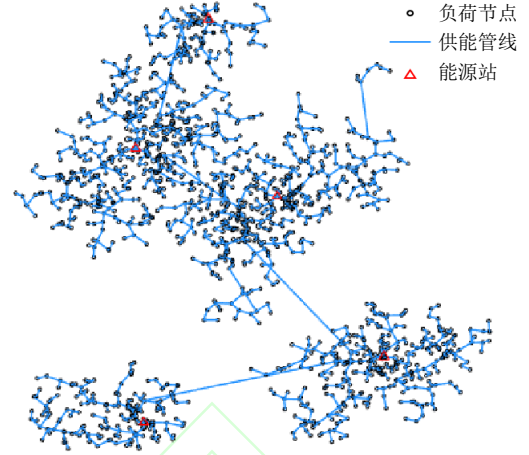


图 D3 包含多个负荷集群的区域能源网演化结果
Fig. D3 Evolving results of the regional energy network with multiple load clusters

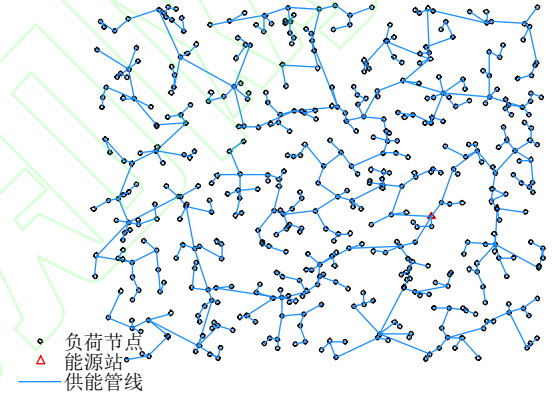


图 D4 区域负荷达到密集时区域能源网的演化结果
Fig. D4 Evolving results of the regional energy network when the load reaches density

Evolving Model of Regional Energy Network Considering Town Growth Characteristics

XU Chengsi¹, DONG Shufeng^{2*}, LU Bin³, WU Zhenjie¹, XU Hang¹

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electricity Power Co., Ltd.;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University; 3. Shanghai Power Design Institute Co., Ltd.)

KEY WORDS: regional energy network; town growth characteristics; complex network; random geometric graph; evolving model; network morphological characteristics

The development of the regional energy network is an essential part in the construction of new-type towns. It is of great significance to analyze the evolution law and morphological characteristics of the regional energy network for guiding its planning and operation.

This paper proposes an evolving model of the regional energy network considering town growth characteristics. According to the town growth characteristics, the growth characteristics of spatial load can be summarized as follows: In the growth stage of the town, the load will accelerate, and the load growth rate is faster in areas with high load density, which shows that the urban spatial load growth has the characteristics of agglomeration. The growth process of town load is simulated based on the random geometric graph model of complex network theory. Add load nodes one by one according to independent and uniform distribution in a plane area, and set the rules for retaining load nodes to determine whether to retain the new nodes. The agglomeration characteristics of spatial load growth show that in the area close to the existing load node, the possibility of new load is greater, and the possibility of new load at a certain point in the space can be expressed by probability model.

$$\begin{cases} P_s = -U_0 \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \\ Q_s = -U_0 \left(\frac{U_0}{\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Where p_i is the retaining probability of the load node added for the i th time; q_1 and q_2 are the probability of retaining load nodes due to natural conditions and socio-economic conditions, respectively; $d_{\min,i}$ is the minimum distance between the load node added for the i th time and the existing node; r is the radius of the influence range of socio-economic conditions.

With the objective of minimizing the investment and construction cost, the distribution of energy stations and integrated pipelines of the regional energy network is obtained, and the evolving process of the regional energy network is established. Based on the mean field method, the spatial and topological characteristics of the evolution model are analyzed. The degree distribution of

the evolved regional energy network has power tailed characteristics, as shown in Fig. 1

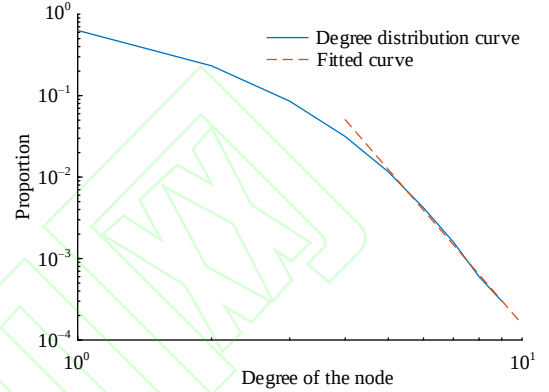


Fig. 1 Degree distribution of the energy network evolving model

In the simulation results, the relationship between the radius of regional energy network and time is obtained as follows:

$$R = 0.2425t^{0.976} \quad (2)$$

Where R is the radius of regional energy network; t is the evolution time of regional energy network.

The above formula shows that the radius of regional energy network increases linearly with time. The relationship between load and material consumption of energy supply pipeline is as follows:

$$P_s = 3.457 \times 10^3 \times V_s^{0.758} \quad (3)$$

Where P_s is the total load of the regional energy network; V_s is the material consumption.

The above formula shows that there is a sub linear relationship between the network load and the material consumption of the energy supply pipeline. The morphological characteristics of the network are consistent with the theoretical analysis results and similar to the actual energy network, which verifies the rationality of the proposed model.

Compared to the traditional methods, the proposed method is able to simulate the spatial distribution characteristics of the regional energy network, and the evolution results are more refined, with more characteristics of the actual energy network.