

面向配电网的场域网弹性表征和评估模型

肖芳¹, 杨淑艳², 文博³, 朱晓荣¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 国家无线电监测中心深圳监测站, 广东 深圳 518116;
3. 南京熊猫电子股份有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 为分析配电网中场域网(FAN, field area network)的健壮性和可靠性, 提出了一种可量化的网络弹性表征和评估模型。经过分析, 从网络连通性、鲁棒性、冗余性3个方面定义了可量化的弹性表征指标, 然后通过3个弹性指标的加权和计算网络总弹性。通过模拟节点随机失效和恶意攻击, 评估FAN的弹性性能; 通过模拟测试单个节点故障, 评估网络弹性受不同节点故障影响的差异, 从而找到网络中弹性薄弱点。将该弹性表征和评估模型推广到一般网络拓扑, 使用BA无标度网络和ER随机网络进行仿真实验, 实验结果验证了该模型的普适性。

关键词: 场域网; 弹性; 评估模型; 恶意攻击; 随机失效

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00287

Resilience characterization and evaluation model of field area network for the power distribution network

XIAO Fang¹, YANG Shuyan², WEN Bo³, ZHU Xiaorong¹

1. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Shenzhen Monitoring Station of National Radio Monitoring Center, Shenzhen 518116, China

3. Nanjing Panda Electronics Co., Ltd., Nanjing 210018, China

Abstract: To analyze the robustness and reliability of field area network (FAN) in the power distribution network, a quantifiable network resilience characterization and evaluation model was proposed. The elasticity indicator was defined from network connectivity, robustness and redundancy, and the total network elasticity was calculated by the weighted sum. The resilience performance of FAN was evaluated by simulating random failures and malicious attacks. A single node failure was simulated and tested to evaluate the difference in network resilience affected by different node failures and find the weak points of resilience in the network. The elastic characterization and evaluation model was extended to general network topologies, and simulation experiments were carried out using BA scale-free network and ER random network. The experimental results demonstrate the universality of the model.

Key words: FAN, resilience, evaluation model, malicious attack, random failure

0 引言

场域网(FAN, field area network)是智能电网“最后一英里”网络^[1]。它是配电网低压侧连接到用户的关键网络, 具有网络结构复杂、设备

类型多样、作业点多面广等特点。FAN可以进行用电量测量和管理, 对各种设备的运行及参数进行有效监控, 还支持高级应用, 如配电自动化(DA, distribution automation), 以及自动故障检测、隔离和管理等。具备可靠、实时、低时延通信能力

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-07-03

通信作者: 朱晓荣, xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61871237, No.92067101); 江苏省重点研发计划(No.BE2021013-3, No.BE2020084-3)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61871237, No.92067101), The Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No.BE2021013-3, No.BE2020084-3)

的 FAN 是实现智能配电网的基础条件和重要环节, 其性能好坏很大程度上决定了智能配电网系统的优劣。因此, FAN 的安全稳定运行是智能配电网快速发展的重要基础。

智能电网作为保障社会经济正常运行的关键基础设施, 容易受到多方面的安全威胁。研究表明, 电网等能源基础设施容易受一系列高影响低概率 (HILP, high impact low probability) 事件的影响, 如地震、海啸、洪水、风暴等^[2]。除自然灾害的影响外, 恶意攻击的威胁也是巨大的。电网作为保障社会经济正常运行的基础设施, 一直是受到攻击的重点目标。近年来, 全球影响广泛的几起电网安全事件使得大型智能电网的弹性评估受到电力行业的广泛关注^[3]。研究发现, 电力系统中约 95% 的停电故障发生在中低压配电系统中^[4], FAN 随着智能电网的快速发展日益演化成大规模复杂网络, 而作为配电网低压侧的关键数据通信网络, 承载业务的类型和数量也呈指数级增加, 更容易受到随机故障和外部恶意攻击的潜在威胁。因此, 需要对 FAN 进行弹性评估与分析, 通过量化评估网络弹性, 为后续分析 FAN 的合理性, 优化网络结构以提高弹性提供必要的理论基础。

弹性 (resilience) 的概念是由 Hoiling^[5]在生态系统研究中提出的, 被定义为系统在经历外部干扰时保持其功能和状态完整的能力。目前对网络弹性的研究大致可分为以下 3 类。

1) 对各种理论观点的实证总结。

2) 弹性的定量计算, 包括两种研究方法: 通过数学建模和仿真量化网络弹性; 通过网络拓扑利用特定的数据量化网络弹性。

3) 弹性的定性分析, 侧重于弹性的概念框架和指标体系。

Gu 等^[6]基于对各种理论观点的实证总结, 研究了可靠性、脆弱性和弹性的特征, 分析比较了它们在交通运输应用场景下的异同, 通过数值算例对这些概念在不同扰动的环境下进行了评估。Zhang 等^[7]基于弹性的定量计算从网络各相关要素的角度, 即网络系统中节点和边的指标, 提出弹性量化方法, 构造了节点弹性矩阵和边弹性矩阵, 测量整个网络的弹性。Dixit 等^[8]基于弹性的定量计算使用网络结构参数对供应网络弹性进行评估, 通过网络的密度、中心性、连通性和网络规模的综合效应计算网络弹性。文献^[9]基于弹性的定性分析利用经典的弹

性三角形表示了抗毁性、恢复和弹性之间的关系, 通过研究发现网络的抗毁性决定了网络性能在扰动下的退化程度, 其恢复程度反映了网络在扰动后的恢复效率, 可以通过加强抗毁性和恢复来提高网络的弹性。

从大量文献综述的研究来看, 网络的弹性并没有一个明确的标准定义, 不同研究场景下的弹性定义有很大的差异。Wang 等^[10]评估与分析了应用于飞机维修的物流网络的弹性, 通过所有城市节点弹性的加权和计算网络的弹性。Kang 等^[11]以后勤网络为案例, 研究了网络拓扑在随机和针对性破坏下的弹性, 基于通用的拓扑度量——最大的连通片 (LCC, largest connected component) 提出了新的网络弹性度量, 并比较了用不同增长模型生成的几种供应网络拓扑的弹性。文献^[12]提出了一种在网络中心环境中对网络和常规攻击的弹性建模方法。利用经典可靠性多项式和网络拓扑结构对网络弹性进行建模。很多文章在提高配电系统弹性方面进行研究, 如 Nazemi 等^[13]提出了一种新的弹性驱动框架, 用于加强电力配电系统的抗震能力。易损性曲线的概念被用于描述地震危险性, 以脆弱曲线的基本概念为中心, 对直接和间接影响造成设备的不可用程度进行了量化。文献^[14-17]研究了配电网在极端事件以及极端天气下快速恢复的弹性。其中, 文献^[14]综合考虑主动孤岛和基于远程控制开关的快速故障隔离和业务恢复, 提出了一种新的增强弹性的方法。文献^[15-17]在扰动发生之前使用最优的主动操作行动措施以应对极端事件影响, 提高配电系统的弹性水平。

以上研究虽然大多基于同构网络进行弹性研究, 对于配电网弹性的研究主要集中在中高压线路和设备方面, 但为网络弹性的量化研究提供了良好的参考。本文从网络拓扑的视角, 采用弹性的定量计算定义配电网低压侧 FAN 可量化的弹性指标。首先, 根据 FAN 异构和多模的特点进行网络建模; 其次, 进一步分析影响 FAN 弹性性能的因素, 确定了从网络连通性、鲁棒性和冗余性 3 个方面定义可量化的弹性表征, 通过 3 个弹性指标的加权和计算网络总弹性; 然后, 从节点随机失效和恶意攻击两个方面对 FAN 弹性进行整体评估, 研究单个节点对网络弹性的影响, 从而发现网络中的弹性薄弱点; 最后, 通过仿真验证了该模型能够很好地描述网络弹性性能和拓扑结构变化。

1 系统模型

1.1 FAN 系统简介

FAN 是由边界路由器和邻域网 (NAN, neighborhood area network) 组成, NAN 为大量的本地终端设备提供网络连接, 如智能电表、DA 设备、各类传感器等, 系统模型如图 1 所示。FAN 中有 3 类节点。

1) 边界路由器节点

边界路由器节点是 FAN 中的一个关键元素, 连接 NAN 层和 WAN 层, 通过提供以太网、串行和无线局域网连接, 实现多服务网络案例。边界路由器节点的作用是将底层设备采集的信息传输给控制中心, 并且传达控制中心的指令给底层设备。

2) 路由节点

路由节点由常供电的设备如智能开关、分支监测、智能电表、转换单元等组成, 构成 Mesh 网络提供向上和向下的数据转发。Mesh 节点既是数据采集点又是相邻节点的中继节点, 以此形成多跳路由, 增大了网络渗透障碍的能力。

3) 叶子节点

叶子节点主要由各类低功耗传感器构成, 如设备状态传感器、智能环境传感器等, 它们采集各类信息, 通过路由节点构成的 Mesh 网络提供的多跳传送服务将信息传送到控制中心。

实现 FAN 中信息全面感知和互联^[18], 保障高效的信息传输和可靠的通信质量, 单靠一种通信方

式很难做到, 因此目前 FAN 是结合多种通信方式的多模感知网络。多模感知 FAN 中有 4 种通信模式: 高速电力线载波通信 (HPLC, highspeed power line communication)、场域电力线载波通信 (FPLC, field power line communication)、微功率无线通信、低功耗无线通信。通信方式主要分为两类。

1) 电力线通信 (PLC, power line communication)

电力线通信是指利用已有的低压电力线作为传输媒介, 将载有信息的高频信号加载到电力线上进行传输, 通过专用的电力线调制解调器将高频信号从电力线上分离出来, 传送到终端设备^[19]。PLC 具有覆盖范围广、实施方便、无须额外布线、传输速率高等优点, 但环境的复杂性和电压不稳定性会制约其通信质量^[20]。

2) 无线通信

无线通信方式目前在电力中比较常用的技术包括蓝牙、ZigBee、Wi-Fi、Sub-1GHz 等, 无线通信的可扩展性较好、灵活性高, 但是环境因素会对其通信质量造成严重的影响^[21]。

PLC 与无线通信技术可以实现优势互补, 只要其中一种通信方式能够正常建立连接即可保证 FAN 中设备间的有效可靠通信, 这两种通信方式的结合有利于保障网络的高覆盖性和可靠性^[22]。多模感知 FAN 如图 2 所示, 不同的节点根据需要集成不同的通信模式, 以达到最佳的通信效果。其中由各

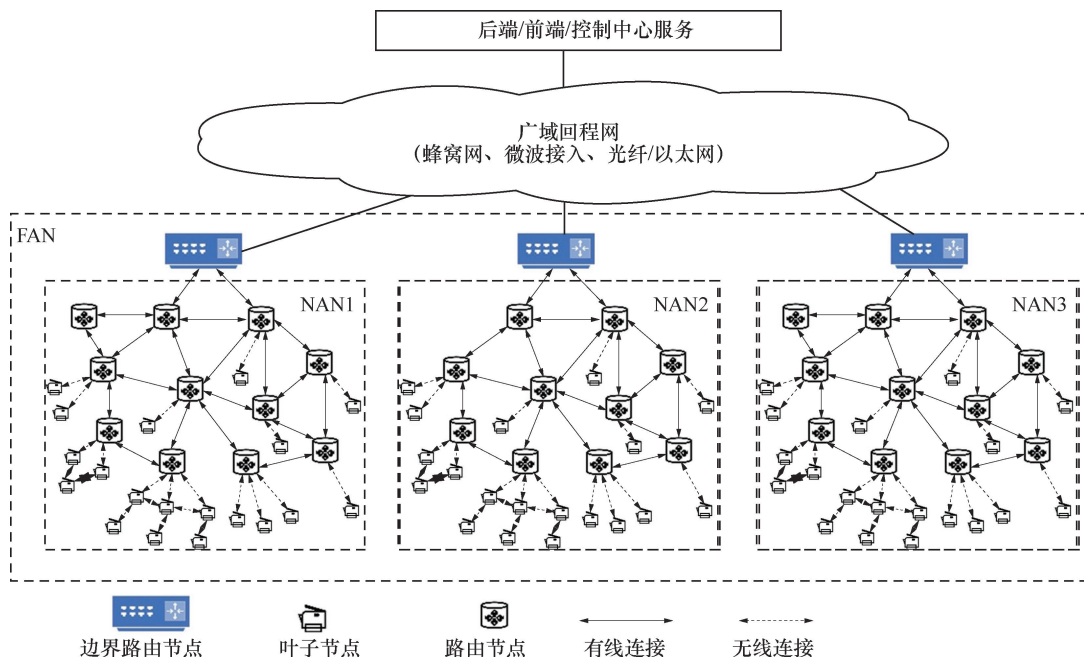


图 1 系统模型

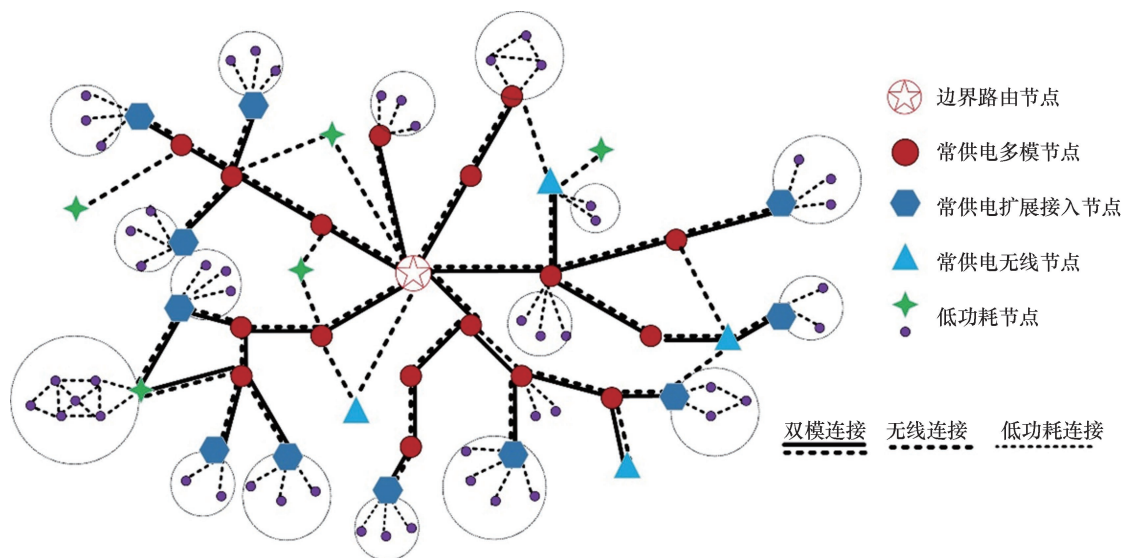


图2 多模感知FAN

种常供电节点形成的 Mesh 网的路路由是由 PLC 和无线组成的混合路由，能够把网络覆盖到低压侧的各个角落，Mesh 节点又作为各类传感器的接入点组成末梢网络，由此可以实现地域全覆盖，同时可以满足不同业务、不同场景的数据通信的需求、数据传输质量和不同数据传输时延需求等。

1.2 网络模型

根据 FAN 的特点，网络拓扑被建模成一个有向图 $G(V, E)$ 。总节点集合 $V=V_M \cup V_W$ ，由两个节点子集 V_M 和 V_W 组成， $V_M=\{v_i | i=1,2,\dots,N_1\}$ 表示 FAN 中的所有多模节点，由边界路由节点和路由节点构成， N_1 为多模节点总数。 $V_W=\{v_j | j=1,2,\dots,N_2\}$ 表示 FAN 中的所有无线传感器节点， N_2 为无线节点总数。 N 为总节点数， $N=N_1+N_2$ 。边集 $E=\{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ ，表示源节点 v_i 到目的节点 v_j 的链路。本文假设节点间的链路不会发生故障，仅节点可能发生故障，一旦节点发生故障，该节点所有的链路将断开。

2 弹性定义

2.1 弹性表征分析

为了确定弹性表征指标，首先讨论影响 FAN 弹性性能的因素。FAN 的数据采集层需要反馈设备运行状态、负荷波动状态等监测数据，大部分底层的传感器节点无法直接连接到控制器，而是通过 FAN 的路由节点组成的 Mesh 网，以多跳传输方式将数据传输到控制器，这就要求每个传感器节点至少能连接一个路由节点，该条件是 FAN 实现基础功能的前提，也是评估 FAN 弹性的前提条件，可称为网络连通性，

将其作为弹性表征的关键指标之一。

弹性是指在因严重故障或外部攻击而产生强烈扰动下系统能保持其正常运行的一种内在能力。因此 FAN 必须具有以下特性：网络中存在冗余资源，一旦部分链路或者节点故障，其他资源仍然可用，维持其正常功能；网络中节点对之间存在多条可选的可靠路径，以方便动态规划路由，保障数据的及时可靠交付。因此，冗余性也是 FAN 弹性表征的指标之一。

网络面对的内部故障和外部攻击的鲁棒性也是弹性的一个方面，根据文献[11,23]对于网络鲁棒性的研究，网络的鲁棒性用最大连通子图（LCC，largest connected components）的大小衡量，在 LCC 包含的所有节点中任意一个节点都能访问到其他节点。LCC 包含的节点越多，则鲁棒性越高，相反如果 FAN 的 LCC 只包含所有节点的 30%，则该网络被划分成几个孤立的子网，这意味着数据流会被限制在较小的子网中。

2.2 弹性表征定义

根据 FAN 弹性性能的影响因素的分析，本文确定了弹性的 3 个特征指标：连通性、冗余性、鲁棒性。

2.2.1 连通性定义

连通性作为弹性表征指标之一，显示了 FAN 是否能获得全面的感知信息。它要求每个传感器节点都能直接或间接连接到控制器，即需要保证每个传感器节点至少能连接到一个路由节点，为避免连接到的路由节点本身是孤立节点的情况，要求传感器节点至少能连接到 3 个路由节点，连通性则定义为满足上述条件的传感器节点的数量占传感器节点总数的比率。

连通性主要考虑的是网络中节点对之间路径存在性问题, 不需要找出具体的路径, 可简化为用复杂网络中的邻接矩阵来计算。FAN 存在多模传输方式, 因此不能使用传统构建邻接矩阵的方式, 需要先计算无线传输邻接矩阵和 PLC 传输邻接矩阵, 然后通过这两个矩阵构建网络的邻接矩阵。

无线传输中, 定义若接收节点的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 大于阈值 SINR_0 , 则认为这两个节点是连通的。本文使用对数正态阴影路径损耗模型^[24], 该模型适用于复杂环境下的传感网, 路径损耗表示为

$$\text{PL}(d) = \text{PL}(d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_s \quad (1)$$

其中, d 是两个节点之间的通信距离, d_0 是近地参考距离 (推荐为 1 m), 因此当无线信号频率为 2.4 GHz 时 $\text{PL}(d_0=1)=40$ dB, n 为路径损耗指数, X_s 是阴影效应造成的均值为 0, 方差为 δ 的具有高斯分布的随机变量。化简式(1)得路径损耗为与距离 d 有关的表达式

$$\text{PL}(d) = K_L d^n \quad (2)$$

其中, K_L 为常数, 定义为

$$K_L = \frac{10^{(X_s \text{PL}(d_0)/10)}}{d_0^n} \quad (3)$$

本文考虑的小尺度多径衰落为瑞利衰落, 假设 P_i 为节点 v_i 的发射功率, 则终端 v_j 接收到的功率为 $\frac{P_i h_{ij} d_{ij}^{-n}}{K_L}$, 其中, h_{ij} 表示信道增益, 服从参数为 1 的指数分布^[25]。噪声是均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。目标终端受到的干扰为除通信节点以外所有节点的累计干扰 I_n , 计算式为

$$I_n = \sum_{s=1, s \neq j}^N P_s h_{is} d_{is}^{-n} \quad (4)$$

节点 v_j 接收到的 SINR_{ij} 为

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_i h_{ij} d_{ij}^{-n}}{K_L (I_n + \sigma^2)} \quad (5)$$

定义无线传输网络邻接矩阵 \mathbf{A}^W 为 N 阶方阵, 其中的元素 a_{ij}^W 定义为

$$a_{ij}^W = \begin{cases} 1, \text{SINR}_{ij} > \text{SINR}_0 \\ 0, \text{SINR}_{ij} \leq \text{SINR}_0 \end{cases} \quad (6)$$

定义 PLC 传输网络邻接矩阵 \mathbf{A}^P 为 N 阶方阵, 其中的元素 a_{ij}^P 定义为

$$a_{ij}^P = \begin{cases} 1, d_{ij} \leq D_0 \\ 0, d_{ij} > D_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, d_{ij} 是节点 v_i 和 v_j 之间的距离, D_0 是 PCL 传输的最大距离。由邻接矩阵 \mathbf{A} 的定义可知, \mathbf{A} 为节点 v_i 和 v_j 的 1 跳可达矩阵

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^W + \mathbf{A}^P = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $a_{ii}=0$ 。若 v_i 和 v_j 两个节点之间存在长度为 $L=2$ 的路径, 则

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} a_{kj} = (\mathbf{A}^2)_{ij} > 0 \quad (9)$$

依此类推, 可知 \mathbf{A}^K 为网络的 K 跳可达矩阵, 若 \mathbf{A}^K 中的元素 a_{ij}^K 为非零元素, 则表示节点 v_i 和 v_j 之间可以通过至多 K 次中继互连。定义 N 阶方阵 \mathbf{C} , 其中, 元素 $c_{ij}=1$ 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间存在链路。

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, (\mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \cdots + \mathbf{A}^K)_{ij} > 0 \\ 0, (\mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \cdots + \mathbf{A}^K)_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

定义 N 阶数组 w , 元素 $w_j=1$ 表示传感器节点 v_j 至少与 3 个路由节点间存在链路。

$$w_j = \begin{cases} 1, \left(\sum_{i=1}^{N_1} c_{ji} \right) \geq 3 \\ 0, \left(\sum_{i=1}^{N_1} c_{ji} \right) < 3 \end{cases} \quad (11)$$

则连通性可由式(12)计算得到。

$$C_R = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} w_j \quad (12)$$

2.2.2 冗余性定义

冗余性表示 FAN 中存在冗余资源, 一旦发生故障仍然能维持其正常运行, 定义为路由节点对之间的平均可靠路径数。由于传感器节点的数量多, 且只需要保证其能够连接到数据传输的 Mesh 网络即可, 因此冗余性只考虑构成 Mesh 网的路由节点对之间的路径。

假设两个节点之间有 M 条独立路径, 这些独立路径之间没有公共的链边。路径 l 代表 M 条路径中第 l 条路径, 路径 l 包含的节点集合可表示为

$$l_{\text{node}} = \{O_1, O_2, \dots, O_m\} \quad (13)$$

路径 l 的可靠性与这条路径所包含的所有节点和节点间链路的可靠性有关, 则路径 l 的可靠性可由式(14)计算。

$$Q_l = q_l^{O_m} \prod_{k=1}^{m-1} q_l^k q_l^{O_k} \quad (14)$$

其中, m 为路径 l 所包含的节点数量, $q_l^{O_k}$ 是第 k 个节点的可靠性, 影响节点可靠性因素很多, 包括环境因素、物理因素以及使用时长等因素, 本文中不多做分析, 认为初始网络中的节点都是可靠的, 即 $q_l^{O_k} = 1$ 。 q_l^k 是路径 l 第 k 跳链路的可靠性, 使用无线传输第 k 跳的可靠性定义为源节点 v_s 到目的节点 v_t 连通的概率, 定义 q^p 为 PLC 传输链路的可靠性, 则 q_l^k 定义为

$$q_l^k = \begin{cases} P(\text{SINR}_{st} > \text{SINR}_0), \text{无线传输} \\ q^p, \text{PLC传输} \\ \max(P(\text{SINR}_{st} > \text{SINR}_0), q^p), \text{多模传输} \end{cases} \quad (15)$$

则节点 $v_i \in V_M$ 的平均可靠路径数为

$$F_i = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_1} \sum_{l=1}^{M_{ij}} Q_l \quad (16)$$

其中, $v_j \in V_M$, M_{ij} 是 v_i 到 v_j 的总路径数, F_i 表示节点 v_i 到其他 $N_1 - 1$ 个节点的平均可靠路径数, 则网络的冗余性由式(17)计算。

$$F_R = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} F_i \quad (17)$$

冗余性的计算需要寻找每对节点间的独立可靠路径, 本文使用的是复杂网络中有向图中路径搜寻的常用方法——Dijkstra 算法, 通过该算法寻找每对节点间的独立可靠路径, 其步骤如下。

步骤 1 对于 $v_i, v_j \in V_M$, $i, j = 1, 2, \dots, N_1$ 组成一个节点对 (v_i, v_j) 。

步骤 2 通过 Dijkstra 算法找到从节点 v_i 到 v_j 的最短路径, 将该路径标记为路径 l 。

步骤 3 计算路径 l 的可靠性 Q_l 。

步骤 4 删除在步骤 2 中获得的最短路径中的所有边。

步骤 5 检查节点对 (v_i, v_j) 是否还有链路。如果是, 转到步骤 2, 否则停止。

步骤 6 重复上述步骤, 直到获得所有节点对的可靠路径。

2.2.3 鲁棒性定义

网络的鲁棒性用 LCC 的大小来衡量, 在 LCC 包含的所有节点中, 任意一个节点都能访问到其他节点。鲁棒性定义为 LCC 包含的节点数占总路由节点数的比率, 同样只考虑构成 Mesh 网的路由节点。

定义 G_{LCC} 为所有 LCC 的集合, 第 i 个 LCC 表示为

$$G_{\text{sub}}^i (V_{\text{sub}}^i, E_{\text{sub}}^i) \in G_{\text{LCC}} \quad (18)$$

那么, 最大的 LCC: $G_{\text{sub}}^L (V_{\text{sub}}^L, E_{\text{sub}}^L)$ 可表示为

$$G_{\text{sub}}^L (V_{\text{sub}}^L, E_{\text{sub}}^L) = G_{\text{sub}}^m (V_{\text{sub}}^m, E_{\text{sub}}^m) \subset G_{\text{LCC}} \quad (19)$$

$$|\forall G_{\text{sub}}^i (V_{\text{sub}}^i, E_{\text{sub}}^i) \subset G_{\text{LCC}} : |V_{\text{sub}}^m| \geq |V_{\text{sub}}^i|$$

其中, $\forall v_j, v_k \in V_{\text{sub}}^m : \exists P_{j,k}, P_{j,k}$ 是节点 v_j 和 v_k 之间的链路集, 且 $P_{j,k} \neq \emptyset$, 则鲁棒性可用式(20)计算。

$$\text{Rb}_R = \frac{1}{N_1} |V_{\text{sub}}^L| \quad (20)$$

其中, $|V_{\text{sub}}^L|$ 是最大 LCC 所包含的节点数, N_1 是网络中的总路由节点数, Rb_R 反映了最大的 LCC 的相对大小, 即 LCC 所包含的路由节点数占总路由节点的比例。

2.2.4 网络弹性定义

本文定义了弹性的 3 个量化指标并给出了其计算方法, 网络的连通性、鲁棒性和冗余性反映了网络弹性的不同特性, 网络的弹性表征由这 3 个指标的加权和计算得到。定义 α 、 β 、 γ 分别为连通性、鲁棒性和冗余性在网络弹性中的权重因子, 则网络总弹性的计算式为

$$R = \alpha C_R + \beta \text{Rb}_R + \gamma F_R \quad (21)$$

其中, $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 且 $\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$, C_R 、 Rb_R 、 F_R 分别为连通性、冗余性和鲁棒性, 可由式(12)、式(17)、式(20)计算。

对于同一个网络, 本文定义的弹性表征可以从连通性、鲁棒性和冗余性 3 个方面反映网络不同状态下的性能以及总弹性的变化情况, 但对于不同网络之间的比较, 单从某一状态的弹性表征进行比较不够全面, 因此在原有的基础上定义了网络全局弹性。

$$R^G = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} C_R^i + \beta \sum_{i=0}^{N-1} \text{Rb}_R^i + \gamma \sum_{i=0}^{N-1} F_R^i \quad (22)$$

其中, C_R^i 、 Rb_R^i 、 F_R^i 分别表示去除 i 个节点后的连通性、鲁棒性和冗余性, N 为网络中的总节点数, R^G 为网络全局弹性。

3 FAN 弹性评估与分析

本文使用 MATLAB 进行仿真实验来评估 FAN 的弹性, 本文在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的空间内设置了 40 个路由节点, 每个路由节点周围随机分布 1~10 个传感器节点。根据文献[26]对工业无线传感器网络信道特征研究, 路径损耗衰减因子 n 设为 1.33, 根据文献[27]对智能电网无线通信的研究, 无线信号频率设为 2.4 GHz, SINR_0 设为 -12 dB, 噪声 σ^2 为 -105 dBm, PLC 的最大通信距离 D_0 为 100 m, PLC 链路的可靠性 $q^p=1$ 。构建的小型 FAN 拓扑如图 3 所示。

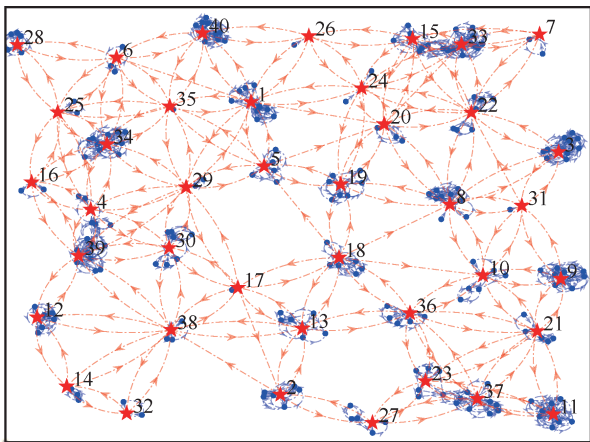


图 3 小型 FAN 拓扑

为了评估 FAN 的弹性, 本文分别模拟了节点随机失效和恶意攻击。节点随机失效不针对特定的节点, 每个节点等概率故障。采取随机移除网络中的节点以及该节点连接的所有边, 以此模拟各种随机事件导致的节点故障。每次随机移除一定数量的节点, 为避免偶然性每次结果取 10 次实验的均值。恶意攻击以快速使网络丧失服务功能为目标, 会优先攻击网络中比较重要的节点。本文使用节点的度数来衡量节点的重要性程度, 节点度越高代表节点在网络中越重要。为模拟恶意攻击对网络的影响, 对网络中节点的度进行排序, 在每一轮攻击中去掉度数最高的节点以及该节点连接的所有边。

FAN 弹性表征在节点随机失效和恶意攻击下的对比如图 4 所示, 展示了节点随机失效和恶意攻击导致失效节点数从 0 增长到 100% 时 FAN 各弹性表征的变化情况, 横坐标表示移除节点的百分比, 其中, α 、 β 、 γ 的值分别取 0.3、0.3、0.4。图 4(a) 显示了连通性的变化情况, 在两种导致节点失效的方式下, 去除少量节点二者相差不大, 随着去除节

点数的增多, 随机失效下 FAN 的连通性明显高于恶意攻击。图 4(b) 是鲁棒性变化曲线, 移除节点百分比为 0~20% 两条曲线几乎重合, 这是因为刚开始移除节点数较少对 LCC 的影响不大, 网络中仍然有大量的连边。从移除节点数 30% 开始, 恶意攻击下的鲁棒性急剧降低, 由于恶意攻击优先去掉度数大的节点, 即同时去掉了大量的连边, 而随机失效是随机选择节点, 网络中剩余的边数比恶意攻击的要多。图 4(c) 是冗余性的对比, 移除节点对冗余性的影响最大, 两条曲线都呈指数下降, 但随机失效下的冗余性比恶意攻击稍高。图 4(d) 显示了 FAN 总弹性的对比, 两条曲线下下降速度比在连通性和鲁棒性方面快, 比冗余性要和缓, 可以看出 FAN 抵抗随机失效的弹性比恶意攻击要高。

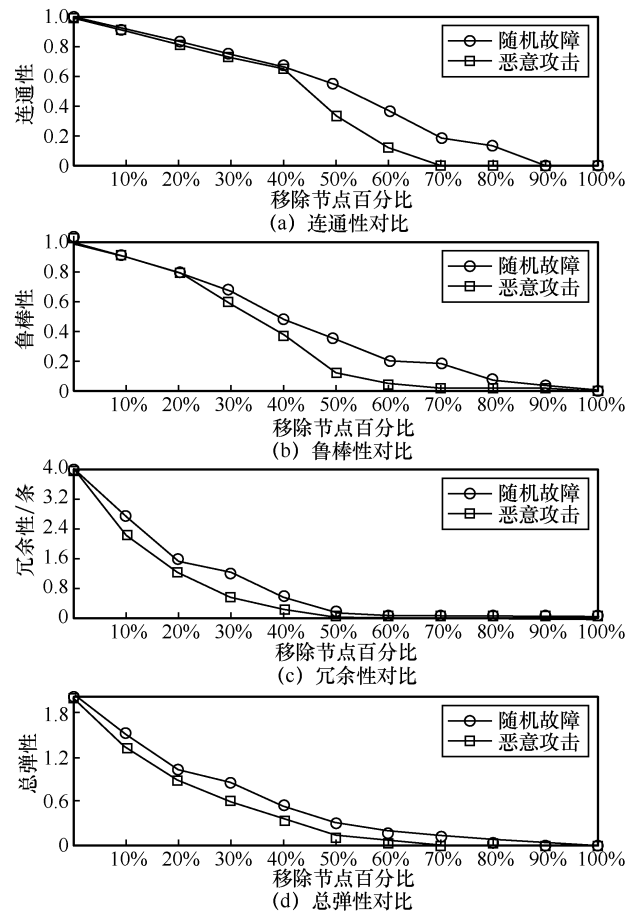


图 4 FAN 弹性表征在节点随机失效和恶意攻击下的对比

依次移除一个节点后 FAN 弹性表征的对比如图 5 所示, 横坐标表示移除的节点编号, 横坐标为 0 表示网络各弹性表征的初始值, 除鲁棒性外, 其他弹性表征有明显的变化, 由于鲁棒性是用 LCC 来衡量, 移除一个节点对网络影响不大。可以看出,

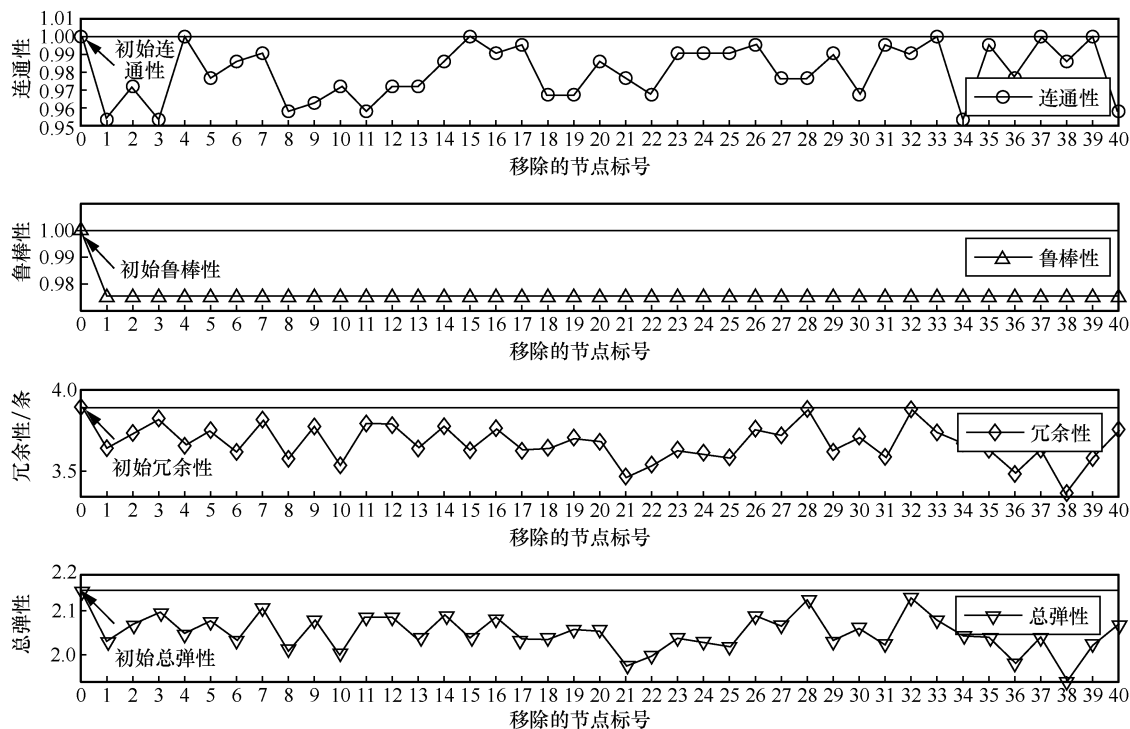


图5 依次移除一个节点后 FAN 弹性表征的对比

移除 38 号节点，FAN 的总弹性降低最多，说明移除该节点对网络弹性的影响最大，该节点是网络中的弹性最薄弱点。

4 仿真分析

为了验证本文算法的普适性，将其推广到一般网络，本文使用复杂网络中的经典网络模型：BA 无标度网络和 ER 随机网络进行实验。分别模拟了网络随机失效和恶意攻击，观察网络拓扑性能的变化，评估在定义的弹性表征下反映的网络弹性的变化。最后分别比较了 FAN、BA 无标度网络和 ER 随机网络的全局弹性表征。

对于一般的同构网络，只存在一种类型的节点。因此，使用弹性模型进行评估时， $N=N_1=N_2$ 。连通性定义为网络中非孤立节点数占总节点数的比率，冗余性定义为网络中节点对之间的可靠路径数，鲁棒性定义为 LCC 包含的节点数占总节点数的比率，网络总弹性则为 3 个弹性指标的加权和。

使用 MATLAB 进行仿真，首先建立随机网络和无标度网络模型，网络规模设置为 $N=50$ 。ER 随机网络^[28]的构建方式是：给定 N 个节点和连边概率 $p \in [0,1]$ ，每个节点对之间以概率 p 进行连接。设置 ER 随机网络的连接概率 $p=0.06$ ，构建的 ER 随机

网络拓扑如图 6 所示，节点的大小、颜色表示节点的度数，半径越大、颜色越深说明度数越大，可以看出，ER 随机网络拓扑的节点度数分布比较均匀。

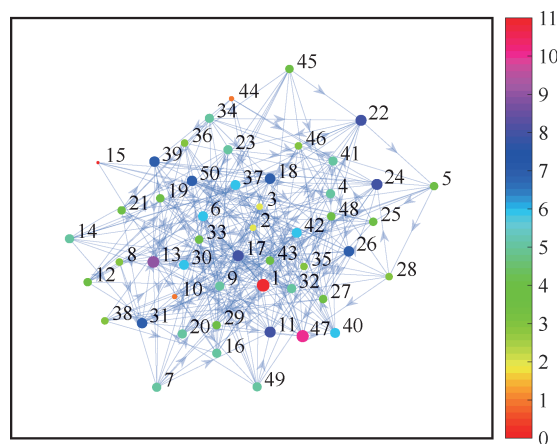


图6 ER 随机网络拓扑

BA 无标度网络^[29-30]区别于随机网络模型的两个重要特性如下。

- 1) 增长特性：即网络规模是不断扩大的。
- 2) 连接偏好特性：即新的节点倾向于与度数较高的节点连接。

构建 BA 无标度网络的步骤为：首先从一个具有 m_0 个节点的连通网络开始，每次引入一个新的节点连接到 m ($m < m_0$) 个已存在的节点，新的节点

与已存在的节点 v_i 连接的概率 Pr_i 与节点 v_i 的度 k_i 之间的关系满足

$$Pr_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (23)$$

式(23)体现了连接偏好特性，新加入的节点连接到度数越大的节点 v_i 的概率 Pr_i 越大。按照步骤构建的 BA 无标度网络拓扑($N=50, m=3$)如图 7 所示，由于 BA 无标度网络的生长和连接偏好特性，网络中存在少量的度数较大的节点，节点度数较小的节点数较多。

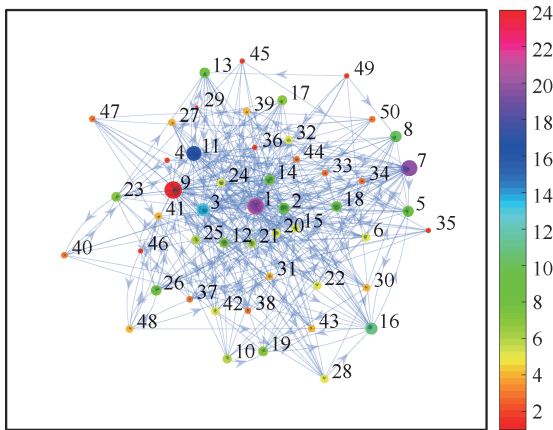


图 7 BA 无标度网络拓扑

ER 随机网络中节点的度分布比较均匀，节点的重要程度相近。而 BA 无标度网络的度分布具有非均匀性，即网络中少量的节点度数较大，这类节点往往是网络中的重要枢纽，但大部分节点的度数较小，对网络性能的影响较小。枢纽的数量少，随机去除度数大的节点的概率较小，而恶意攻击优先去除度数大的节点，会导致系统弹性迅速下降，因此理论上 ER 随机网络对在恶意攻击下的弹性比 BA 无标度网络高，而在随机失效下的弹性比 BA 无标度网络低。

ER 随机网络和 BA 无标度网络在两种攻击下的弹性对比如图 8 所示，横坐标为移除节点百分比，纵坐标为网络总弹性。可以看出，两种网络对于恶意攻击弹性的下降比随机失效要快，说明它们对恶意攻击的弹性较低。由于 ER 随机网络的度分布均匀，对于恶意攻击和随机失效的弹性变化相差不大，而 BA 无标度网络由于度分布的极端非均匀性，对随机失效有较好的容忍度，但恶意攻击会使弹性急剧下降，与理论相符，说明该弹性模型具有普适性。

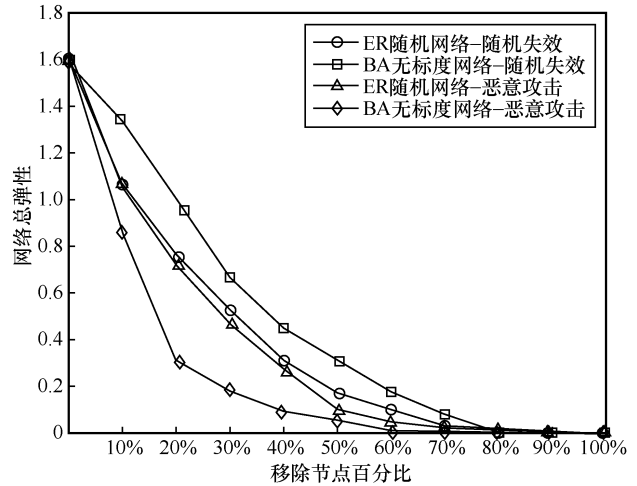


图 8 ER 随机网络和 BA 无标度网络在两种攻击下的弹性对比

全局弹性对比见表 1，可以看出，无论是在随机失效还是在恶意攻击下，FAN 的全局弹性是最高的，说明 FAN 在遭受攻击时的弹性性能较其他两种网络更好。

表 1 全局弹性对比

网络模型	随机失效下的全局弹性	恶意攻击下的全局弹性
FAN	4.077 445	3.376 62
BA 无标度网络	3.929 127	2.236 388
ER 随机网络	3.296 148	3.043 894

5 结束语

本文提出了一种量化的网络弹性表征和评估模型，从网络连通性、鲁棒性、冗余性 3 个方面定义了可量化的弹性表征指标，并通过模拟随机失效和恶意攻击评估 FAN 的弹性性能。依次模拟单个节点故障，分析网络弹性受不同节点故障影响的差异，从而找到网络中弹性薄弱点。将该弹性表征和评估模型推广到一般网络拓扑，使用 BA 无标度网络和 ER 随机网络进行仿真实验，评估了两种网络在随机失效和恶意攻击下的弹性变化情况，实验结果验证了该模型能描述网络弹性性能和拓扑结构变化，为后续分析 FAN 的合理性、优化网络结构、提高弹性提供了必要的理论基础。

参考文献：

[1] ROB, MOHLER D, JOHN M, et al. A standardized and flexible IPv6 architecture for field area networks: smart-grid last-mile infrastructure[EB]. 2011.

[2] ESPINOZA S, PANTELI M, MANCARELLA P, et al. Multi-phase

- assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 136: 352-361.
- [3] DEHGHANIAN P, ASLANS, DEHGHANIAN P. Quantifying power system resiliency improvement using network reconfiguration[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1364-1367.
- [4] 刘煜. 分布式发电条件下的配电网故障定位技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
- LIU Y. Research on fault location technology of distribution network under distributed generation[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
- [5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973(4): 1-23.
- [6] GU Y, FU X, LIU Z Y, et al. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020(133): 101809.
- [7] ZHANG C, XU X, DUI H Y. Resilience measure of network systems by node and edge indicators[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020(202): 107035.
- [8] DIXIT V, VERMA P, TIWARI M K. Assessment of pre and post-disaster supply chain resilience based on network structural parameters with CVaR as a risk measure[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020(227): 107655.
- [9] MOU N X, SUN S Y, YANG T F, et al. Assessment of the resilience of a complex network for crude oil transportation on the maritime silk road[J]. *IEEE Access*, 2019(8): 181311-181325.
- [10] IP W H, WANG D W. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(2): 189-198.
- [11] ZHAOK, KUMAR A, HARRISON T P, et al. Analyzing the resilience of complex supply network topologies against random and targeted disruptions[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(1): 28-39.
- [12] KUIKKA V. Modeling network resilience and utility of services[C]//*Proceedings of 2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [13] NAZEMI M, MOEINI-AGHTAIE M, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 795-806.
- [14] LIU J C, QIN C, YU Y X. Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2381-2395.
- [15] AMIRIOUN M H, AMINIFAR F, LESANI H. Resilience-oriented proactive management of microgrids against windstorms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4275-4284.
- [16] AMIRIOUN M H, AMINIFAR F, LESANI H. Towards proactive scheduling of microgrids against extreme floods[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3900-3902.
- [17] GHOLAMI A, SHEKARI T, AMINIFAR F, et al. Microgrid scheduling with uncertainty: the quest for resilience[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2849-2858.
- [18] XIE X Y, ZHOU J H, ZHANG Y G. Application and challenge of deep learning in ubiquitous power internet of things[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(4): 77-87.
- [19] PATRICK A, NEWBURY J, GARGAN S. Two-way communications systems in the electricity supply industry[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(1): 53-58.
- [20] 胡正伟, 贺冬梅, 谢志远. 面向电力线通信的 OFDM 符号定时同步算法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 144-150.
- HU Z W, HE D M, XIE Z Y. OFDM symbol timing synchronization algorithm for PLC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 144-150.
- [21] RAYCHAUDHURI D, MANDAYAM N B. Frontiers of wireless and mobile communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(4): 824-840.
- [22] DA COSTA V L R, FERNANDES V, RIBEIRO M V. Narrowband hybrid PLC/wireless: Transceiver prototype, hardware resource usage and energy consumption[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 94: 101945.
- [23] QIU T, LIU J, SI W S, et al. Robustness optimization scheme with multi-population co-evolution for scale-free wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(3): 1028-1042.
- [24] 罗玄, 补黔江, 曾庆波, 等. 用电采集系统微功率无线通信信道建模研究综述[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(23): 130-133, 138.
- LUO X, BU Q J, ZENG Q B, et al. Review of research on micro power wireless communication channel modeling for electric power acquisition system[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(23): 130-133, 138.
- [25] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(11): 3122-3134.
- [26] 刘锋, 裴红星, 王青三, 等. 工业无线传感器网络信道特征研究[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2011, 43(4): 39-43.
- LIU F, PEI H X, WANG Q S, et al. Research on the channel characteristics of wireless sensor networks in industrial environments[J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, 43(4): 39-43.
- [27] 马立贤. 电力线载波与无线融合多信道传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- MA L X. Research on hybrid power line carrier and wireless multi-channel transmission technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [28] STROGATZ S H. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.
- [29] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [30] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Diameter of the world-wide web[J]. *Nature*, 1999, 401(6749): 130-131.

[作者简介]



肖芳（1999- ），女，南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为工业互联网、复杂网络、网络拓扑演化机理等。



文博（1980- ），男，南京熊猫电子股份有限公司规划科技部部长，主要研究方向为智能制造、区块链等。



杨淑艳（1967- ），女，国家无线电监测中心深圳监测站高级工程师，主要研究方向为无线传感网的频谱分析。



朱晓荣（1977- ），女，博士，南京邮电大学大学教授、博士生导师，主要研究方向为移动通信、工业互联网、大规模复杂网络等。