

# 基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述

陈超洋<sup>1,2†</sup>, 周 勇<sup>1</sup>, 池 明<sup>3</sup>, 汪秉宏<sup>4</sup>

- (1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;
3. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 武汉 430074;
4. 中国科学技术大学 近代物理系, 合肥 230026)

**摘要:** 电网脆弱性是大电网安全研究的核心内容之一. 在国内外电网大停电事故不断频发的背景下, 传统方法难以有效地从宏观上系统地分析大规模连锁故障的产生和传播过程. 随着复杂网络理论研究的不断发展和普遍应用, 这种方法突破了传统方法分析连锁故障的局限性, 为研究大电网脆弱性提供了新的视角和方向. 对此, 首先介绍复杂网络的两个基本模型及其常见评价指标; 其次, 详细阐述节点重要性发现、电网脆弱线路辨识、单个网络中连锁故障以及相依网络间连锁故障等方面的研究发展状况和应用情况, 并综合分析了电网运行状态; 最后, 从复杂网络理论角度, 对未来电网脆弱性研究方向进行总结和展望.

**关键词:** 复杂网络; 脆弱性; 节点重要性发现; 脆弱线路辨识; 连锁故障; 相依网络

中图分类号: TP202

文献标志码: A



DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0126

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**引用格式:** 陈超洋, 周勇, 池明, 等. 基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 782-798.

## Review of large power grid vulnerability based on complex network theory

CHEN Chao-yang<sup>1,2†</sup>, ZHOU Yong<sup>1</sup>, CHI Ming<sup>3</sup>, WANG Bing-hong<sup>4</sup>

- (1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;
3. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
4. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Grid vulnerability is one of the core content of large-scale power grid security research. In the context of frequent blackouts in domestic and foreign power grids, traditional methods are difficult to effectively analyze the generation and propagation process of large-scale cascading failures from a macroscopic perspective. With the continuous development and universal application of complex network theory research, this method breaks through the limitations of traditional methods in analyzing cascading failures, and provides a new perspective and direction for studying the vulnerability of large power grids. This article first introduces the two basics of complex networks and their common evaluation indicators, followed by detailed descriptions of node importance discovery, identification of vulnerable lines in the power grid, cascading failures in a single network, and cascading failures between dependent networks, and other aspects of the research development and application, and comprehensive analysis of the power grid operation status. Finally, from the perspective of complex network theory, the future research direction of grid vulnerability is summarized and prospected.

**Keywords:** complex network; vulnerability; node importance discovery; vulnerable line identification; cascading failures; dependent network

## 0 引言

随着我国智能电网建设的不断推进, 电网与通信网之间的互联程度越来越高, 加强电网安全稳定分

析对预防大停电事故尤为重要. 评估电网脆弱性, 并找出其薄弱环节, 是建立“坚强智能电网”的前提与基础. 国家电网公司在“2009特高压输电技术国际会

收稿日期: 2021-01-21; 录用日期: 2021-04-28.

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2019YFE0118700); 国家自然科学基金项目(61973110, 61972170, 71874172); 湖南省杰出青年基金项目(2021JJ10030); 湖湘青年英才科技创新人才项目(2020RC3048).

责任编辑: 孙秋野.

†通讯作者. E-mail: ouzk@163.com.

议”上提出了“坚强智能电网”的发展规划,规划指出,将分3个阶段推进“坚强智能电网”的建设. 不仅如此,国务院副总理张德江在会议上还表示,中国将从实际出发,积极探索符合中国国情的智能电网发展道路. 发展改革委和能源局于2015年共同提出《关于促进智能电网发展的指导意见》,指出到2020年,初步建成安全可靠、开放兼容、双向互动、高效经济、节能环保的智能电网体系. 国家电网公司于2019年制定了《国家技术标准创新基地(智能电网)建设发展行动计划(2019-2021年)》,建立“坚强智能电网”以推动电网互联及大电网安全稳定. 2020年5月1日,美国总统特朗普签署了一项行政命令,防止大型电力系统遭受外国威胁和攻击,以确保美国大容量电力系统的安全. 2020年12月15日,欧盟在修改后的《面向未来的欧洲能源基础设施》中指出,连接法国和爱尔兰之间的电网,有助于局部电网电力供应安全和可持续.

近年来,电网规模随着国民经济的高速发展在不断扩大,分析电网安全稳定的难度也日益上升. 图论作为分析大型复杂系统的有力工具之一,能帮助人们提取复杂电网系统中的拓扑连接信息. 现实世界中的很多复杂系统的部分特征可以由网络来描述,如:计算机网络、社会网络、交通网络、电力网络和生物网络中的关系都可以由复杂网络来描述. 因此,复杂网络迅速成为了国内外学术界的一个研究热点,与其相关的理论和应用研究已深入到计算机科学、社会学、物理学和生物学之中,对于预测和处理信号传输、网络搜索、电能传输、交通管控和传染病控制中的突发事件具有重大而深远的意义.

传统的图论起源于1736年欧拉研究的“Königsberg七桥问题”,着眼于特定规则结构和节点数较少的图. 但实际网络中往往包含数十万以上的节点,并且拥有不同的复杂拓扑结构,使用传统的图论分析这种大规模网络往往会丢失网络的部分拓扑性质. 随着计算能力和统计方法不断发展,1958年,Erdos和Renyi<sup>[1]</sup>提出了ER随机图,在数学领域上提出了随机图论,开创了复杂网络拓扑结构的系统性分析先河. 1998年,Watts和Strogatz<sup>[2]</sup>提出了WS小世界模型;次年,Barabási和Albert<sup>[3]</sup>提出了无标度网络模型. 这两篇论文的发表在全世界范围内引发了复杂网络研究的热潮,并且象征着现代复杂网络研究新纪元的开端.

2003年8月14日,美国加拿大发生了大面积停电<sup>[4]</sup>. 同年,意大利发生了电力信息/物理二元耦合网络的“9.28”连锁大停电事故<sup>[5]</sup>. 2006年11月4日,

西欧电网发生了大面积停电<sup>[6]</sup>. 2012年7月底,印度东北部连续两天发生大停电事故. 2016年9月28日,极端天气袭击了南澳大利亚州,导致风电机组发生大规模故障,最终演变成长达50小时的全州大停电. 2019年7月13日,美国纽约曼哈顿部分城区发生了大面积停电. 在国内也发生过一些大面积停电事故. 例如:2008年2月,中国南方冰灾导致湖南电网大停电. 2012年4月10日,深圳发生大停电. 2017年8月15日,中国台湾因人为疏失,致使供气中断,从而导致电厂机组跳机,最终演变成全台用户过半断电的大事故.

这些大停电事故给国家经济和人民生活带来了重大不利影响. 长期以来,传统的图论和模拟物理过程方法,在深入分析电力系统大面积停电机理和连锁故障时已经体现出明显的局限性. 应用复杂网络分析技术来研究能较好地克服传统研究方法的不足. Watts等<sup>[2]</sup>和易俊等<sup>[7]</sup>分别证明了美国西部电网和中国华北、东北电网具有小世界网络特性;Barabási等<sup>[3]</sup>和Rosato等<sup>[5]</sup>分别证明了美国西部电网和意大利电网具有无标度网络特性. 因此,基于复杂网络理论研究电网已成为目前电网脆弱性研究的热点. 国内外学者通过分析电网拓扑结构、电气特性、辨识电网脆弱节点线路、故障传播的过程,以便于合理规划日益扩大的电网结构和预防预测连锁故障传播所带来的恶劣结果.

本文针对复杂网络在电力网络中的应用情况,首先,介绍其基本模型拓扑结构和常见的几种复杂网络评价指标;其次,指出目前电网网络拓扑脆弱性研究主要集中在节点重要性发现和脆弱线路辨识,并阐述自组织临界性理论、复杂网络理论和元胞自动机理论及其模型;再次,就现阶段基于复杂网络的电网脆弱性研究基本可以总结为两个对象:电网之间连锁故障分析和相依网络连锁故障分析;最后,探讨电网脆弱性研究的进一步发展趋势. 全文内容及其关系如图1所示.

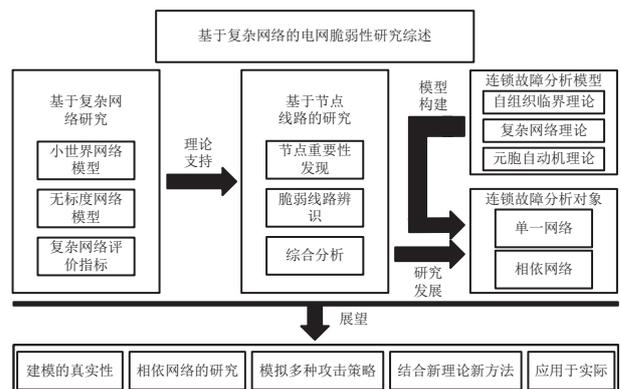


图1 本文脉络和主要内容

## 1 复杂网络模型和常见评价指标概述

### 1.1 小世界网络模型

1998年, Watts和Strogatz在文献[2]中指出:在完全规则网络向完全随机网络的这一过渡过程中,稍许加入随机性即可得到具有小世界特征的网络拓扑模型,即现在常称为WS小世界模型。

由图2可知:当 $p = 0$ 时,网络为完全规则网络;当 $p = 1$ 时,网络为完全随机网络. 完全规则网络过渡到完全随机网络,可通过调节参数 $p$ 的值来实现. 小世界特性<sup>[2]</sup>是指网络同时具有较大集聚系数和较小平均距离的特点.

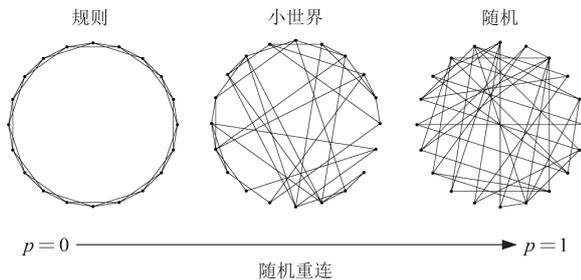


图2 小世界网络模型

### 1.2 无标度网络模型

1999年, Barabási和Albert<sup>[3]</sup>提出了无标度网络模型,无标度网络的特性是集聚系数很小,度分布为幂律分布,其表达式如下:

$$P(k) \sim k^{-\gamma}, \quad (1)$$

其中 $\gamma > 0$ ,通常取值在2~3之间.

Barabási和Albert明确指出,ER随机图和WS小世界模型没有考虑到现实网络所具有的两个动态特性:1)增长特性:网络规模随时间不断扩大;2)优先连接特性:新节点更加倾向于连接度值较大的点.

### 1.3 常见网络拓扑评价指标

大多数文献基于复杂网络分析电网拓扑结构大都是从节点度、集聚系数、度中心性、介数中心性等进行衡量. 其中:节点度、集聚系数和度中心性为局部特征的指标;介数中心性因涉及了连通图中的最短路径,所以具有全局特征. 从先前的单指标分析电网到现在的多指标的结合分析,基于静态指标的网络拓扑分析愈加完善和全面.

#### 1.3.1 节点度

节点度通过与节点相连接的边数反映节点与其他节点的联系强弱情况,度值越大,其对附近节点影响越强;度值越小,对附近节点影响越弱. 电网中大部分节点的度值相同,所以单从节点度的角度描述不够全面.

#### 1.3.2 平均路径长度

网络的平均路径长度 $L$ 定义为任意两个节点之间距离的平均值,即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij}. \quad (2)$$

其中: $N$ 为网络节点数, $d_{ij}$ 为连接节点 $i$ 与 $j$ 的最短路径上的边的数目,最短路径是指连接 $i$ 与 $j$ 这两个节点的边数最少的路径.

#### 1.3.3 集聚系数

在图论中,集聚系数是用来描述一个图中的顶点之间结集成团的程度的系数. 网络中一个度为 $k_i$ 的节点 $i$ 的集聚系数 $C_i$ 定义为

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}, \quad (3)$$

其中 $E_i$ 是节点 $i$ 的 $k_i$ 个邻节点之间实际存在的邻居对的数目.

#### 1.3.4 度中心性

度中心性是在网络分析中刻画节点中心性的最直接度量指标. 一个节点的节点度越大意味着这个节点的度中心性越高,该节点在网络中越重要. 一个包含 $N$ 个节点的网络中,节点最大可能的度值为 $N-1$ ,通常为便于比较而对中心性指标作归一化处理,度为 $k_i$ 的节点的归一化的度中心性定义为

$$DC_i = \frac{k_i}{N-1}. \quad (4)$$

#### 1.3.5 介数中心性

在图论中,介数中心性是基于最短路径的图中中心性的一种度量. 对于连通图中的每一对顶点,在顶点之间至少存在一条最短路径,使得路径通过的边数(对于未加权图)或者边权重的和(对于加权图)最小. 每个顶点的中心性是通过该顶点的最短路径的数量. 用经过某个节点的最短路径的数目来刻画节点重要性的指标称为介数中心性,简称介数.

节点 $i$ 的介数定义为

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}. \quad (5)$$

其中: $g_{st}$ 为从节点 $s$ 到节点 $t$ 的最短路径的数目, $n_{st}^i$ 为从节点 $s$ 到节点 $t$ 的 $g_{st}$ 条最短路径中经过节点 $i$ 的最短路径的数目.

### 1.4 常见结构鲁棒性评价指标

当一个网络的节点或边失效时,网络具有保持其功能相对稳定和整体连通性的能力,这种能力称为鲁棒性. 从全局来看,网络的鲁棒性与网络的稳定性密切相关. 因此,提高网络鲁棒性在复杂网络研究中显得极为重要. 下面将列举几种常见结构鲁棒性评价

指标,这些指标均考虑了网络的连通性,因此具有全局特征。

### 1.4.1 连通度

假设图  $G$  为一个连通图,其连通程度称为连通度。连通度有两种类型:一种为点连通度,另一种为边连通度。图  $G$  连通度越好,其所在的网络越稳定。连通图  $G$  变为非连通图时,删除的最少顶点称为点连通度  $K(G)$ ,即

$$K(G) = \min\{M\}, \quad (6)$$

其中  $M$  为图  $G$  的顶点割集。

连通图  $G$  变为非连通图时,删除的最少边称为边连通度  $\lambda(G)$ ,即

$$\lambda(G) = \min\{N\}, \quad (7)$$

其中  $N$  为图  $G$  的边割集。

### 1.4.2 代数连通度

设  $G = (V, E)$  为一张图。其中:  $V$  为  $G$  的顶点集合,  $E$  为  $G$  的边集合。于是图  $G$  的 Laplace 矩阵为  $L = D - A$ , 其中  $A$  为  $G$  的邻接矩阵;  $G$  的度矩阵  $D = \text{diag}\{d_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。代数连通度即为网络拉普拉斯矩阵的第二小特征值。

代数连通度反映了网络连通性好坏程度,其值越大,表明网络越稳定,从侧面反映了网络的鲁棒性越高。代数连通度在一些实际网络中均有涉及,例如:天然气管网<sup>[8]</sup>、轨道交通网<sup>[9]</sup>和航路网络<sup>[10]</sup>等。

### 1.4.3 自然连通度

自然连通度通过考虑网络节点之间冗余路径来计算网络节点之间的闭合路径,反映了网络的稳定性和鲁棒性。自然连通度越大,表明网络的鲁棒性越高,越稳定。自然连通度可由下式计算:

$$\bar{\lambda} = \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right). \quad (8)$$

其中:  $\lambda_i$  是网络邻接矩阵的特征根集合  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  的第  $i$  个元素,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 。文献[11]验证了衡量鲁棒性的准确性和自然连通度的单调性。

## 2 基于节点线路的研究

### 2.1 电网节点重要性发现

大多数电网都含有小世界和无标度特性,具有鲁棒性和脆弱性。这类网络的连通性对于随机故障具有很高的鲁棒性,而对于蓄意攻击具有很高的脆弱性。如果移除重要节点,则网络会呈现出巨大的脆弱性。因此,发现重要节点并加以保护是基于复杂电网的电网脆弱性研究的一个重要方向。

### 2.1.1 熵理论

1850年,德国物理学家克劳修斯从宏观角度提出了熵理论。1877年,奥地利物理学家波尔兹曼又从微观角度提出了熵理论。熵理论起源于热物理学,随着科学家的深入探究,开始在信息学、生物学和环境经济学等众多领域得到了广泛应用,并取得了丰硕的成果。

熵是评估系统混乱和无序的度量,熵值越大的系统,其有序程度越低;反之,熵值越小的系统,其有序程度越高。当系统处于不同种类的状态时,假设每种状态  $X_i$  出现的概率为  $P_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , 该系统的熵定义为

$$H = -C \sum_{i=1}^m P(x_i) \ln P(x_i). \quad (9)$$

其中:  $C$  为常数,  $m$  为状态数。

复杂网络的机制,如扩散动力学、级联反应和网络同步,都受到所谓重要节点的极小部分的高度影响。因此,从复杂网络的局部角度来看,节点重要性排序具有重要的理论意义和现实意义。

熵理论通常利用网络熵来表征网络结构中编码的信息量,并在图层上度量结构复杂度。文献[12-13]将熵理论与复杂网络理论相结合,基于节点重要性提出了一种新的熵度量。文献[12]的实验分析表明,基于重要性的熵测度准确地描述了复杂网络的鲁棒性,在网络面对蓄意攻击时,具有一定的有效性。文献[13]发现熵也可以作为一个局部层次的度量来量化节点的重要性,从而假设网络中重要节点的去除可能引起更多结构性变化,提出了熵变量的概念,并将节点重要性定义为节点去除前后网络熵的变化。

文献[14-18]将熵理论引入电力网线路权重中。熵权法是一种通过信息熵确定各指标的权重的客观赋权法,并用熵权法得到的权重对主观权重进行修正,从而得到客观的综合权重。文献[14]综合采用熵值法和层次分析法对各个指标进行赋权,并从主观和客观两个角度分析,由此可得出电网的脆弱度综合评估指标。文献[15]通过层次分析法求得各指标的主观权重,并用熵权法求得各指标的客观权重,最后结合两种权重得到指标综合权重。文献[16]提出了综合加权熵和逼近理想排序法(TOPSIS)的节点脆弱度评估方法,针对信息熵的对称性问题,提出用指标大小进行修正的客观熵权,根据指标作用设置主观权重,将二者综合得到综合权重。文献[17]综合考虑节点价值系数和节点客观数据信息,构造出效用风险熵权评价指标。文献[18]提出了基于修正熵权的电网

节点脆弱性评估方法,综合考虑节点脆弱性和抗毁性得到修正熵,并结合了电网电气特性.

在复杂网络中,重要节点的失效很大可能会影响到整个网络的稳定性.文献[19-20]基于这一问题研究了网络抗毁性度量和抗毁性能,综合考虑节点度值和介数对节点重要性的影响,并结合熵理论提出了一种新指标——介度熵.

文献[19]将电气介数与熵度进行整合,将线路的电气介数作为熵度的权重,引出了介权熵度指标,在分析电网母线时能够同时反映出电网局部与全局的结构特征.文献[20]结合节点的介数中心性和其所有邻居节点的度中心性,提出一种关于介度熵的攻击策略,用来识别网络中的重要节点并加以保护.

### 2.1.2 优劣解距离法(TOPSIS)

Hwang和Yoon于1981年首次提出了TOPSIS法.其内容是根据有限数量的评估对象与理想对象的接近程度对对象进行排序,并评估现有对象的优缺点. TOPSIS法是一种近似理想解决方案的排序方法,常用于多目标决策分析,故也称作优劣解距离法.

在复杂网络中,识别重要节点是脆弱性研究的重要部分,这已成为分析网络拓扑结构的关键问题.针对这一问题,人们使用了各种评价指标,如:度、平均路径长度、度中心性和介数中心等,但这些方法都存在一定的局限性.随着TOPSIS法的提出,避免了主观导致单个指标比例过大的问题.该方法将多种复杂网络评价指标作为分析研究中的多属性,将多属性结合起来综合评价各节点的重要性.在这种方法中,每一个属性起着同样重要的作用.传统TOPSIS法<sup>[21-23]</sup>和改进TOPSIS法<sup>[24-27]</sup>与复杂网络理论相结合,在一定程度上保证了其研究结果的客观性.

文献[21]基于TOPSIS法,使用易感染(SI)模型来评估性能,仿真结果表明了该方法具有一定的实用性.文献[22]将TOPSIS法与发电厂复杂网络模型相结合,构建了发电厂生产安全评价模型,从网络攻击方出发,通过分析攻击方收益、攻击方损耗和攻击方遇到的风险,建立了对应的指标体系.文献[23]使用TOPSIS法对网络中节点的攻击效果进行排序并综合评估,有效解决了传统节点仅依靠网络拓扑单一指标进行分析的过于片面性的问题,为制定网络攻击方案和找出脆弱节点提供了客观依据.

显然,在传统TOPSIS法中,每一个属性都起着同样重要的作用,这是不切实际的.文献[24]对传统排序方法进行了改进,提出了一种基于相似理想解的加权TOPSIS法.该方法不仅考虑了将不同的中心性

度量作为网络的多属性,而且提出了一种重新分配各属性权重的新算法,在一定程度上提高了排序的准确性.文献[25]将TOPSIS法与改进的主成分分析法相结合,提出了一种新的综合方法.在众多改进的TOPSIS法中,大多数方法与灰色关联法密切相关.文献[14, 16, 26-27]将灰色关联法与TOPSIS法相结合,通过仿真表明了改进后的TOPSIS法具有一定的有效性.文献[26]使用灰色关联度来衡量曲线边缘耦合度与欧氏距离,克服了传统TOPSIS法不能区分正负理想解中垂线节点的局限性,提高了评估结果的准确性.

## 2.2 电网脆弱线路辨识

当电网发生故障时,脆弱线路的存在会成为连锁故障发生的危险因素,因此,辨识出脆弱线路具有一定的现实意义.在脆弱线路辨识研究中,如何选择边权成为研究者进行复杂网络建模所要面临的首要问题.本文将主要介绍两种边权选取方法:基于介数选取方法和多指标综合选取方法.

### 2.2.1 介数

目前,常用的线路脆弱性指标都是计算负荷节点对和发电机之间最短路径经过的次数,例如平均路径长度、线路介数、输电效率等.改进传统线路介数<sup>[28-32]</sup>和结合电气特性的电气介数<sup>[33-36]</sup>已逐渐成为大部分脆弱线路辨识研究中赋予线路权重的主要指标.

文献[28]提出了将带权重线路介数作为评价指标的脆弱线路辨识的方法,其中带权重线路介数定义为负荷与发电机之间的最短电气路径承受的负载和,并取相邻线路的最高介数值作为线路介数.文献[29]将线路介数与贝叶斯网络相结合,以衡量线路在电网系统中的重要性.

采用单一的线路介数分析电网脆弱线路不够全面,很少考虑到电气特性在网络中的影响.因此,文献[30]提出了一种基于线路运行介数的过负荷脆弱性评估方法,在一定程度上解决了电网潮流仅沿最短路径流动的局限性.文献[31]从实际电网出发,综合考虑电网潮流分布中线路加权介数、最大传输功率等各指标的影响,并深入探讨了线路功率传输容量的限制性与网络中节点度分布的差异性.文献[32]综合考虑线路介数和输电能力,将输电介数概念引入复杂网络模型中,克服了传统介数指标忽略实际电网电气特性的局限性.

文献[33]为解决已有模型的缺陷,将电力系统潮流与复杂网络模型相结合,定义线路 $(m, n)$ 的电气介

数为

$$B_e(m, n) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} |I^{ij}(m, n)|. \quad (10)$$

其中:  $G$  为所有发电节点的集合;  $L$  为所有负荷节点的集合;  $W_i$  为发电节点  $i$  的权重, 取发电机额定容量或实际出力;  $W_j$  为负荷节点  $j$  的权重, 取峰值负荷或实际负荷;  $I^{ij}(m, n)$  为在“发电-负荷”节点对  $(i, j)$  间加上单位注入电流元后, 在线路  $(m, n)$  上引起的电流。

文献[34]为了全面考虑传输线的特点, 提出了综合电气介数. 该指标一方面解决了电网潮流仅沿最短路径流动的缺陷; 另一方面, 充分考虑了其他线路移除前后, 电力传输能力的动态变化. 文献[35]提出一种用于评估电网脆弱性的复杂网络度量方法, 重新定义了一种电气介数度量标准, 综合考虑了功率传输分布和线路传输容量受限对电网的影响. 文献[36]结合有向电气介数指标, 综合考虑了发电机出力变化对电网线路潮流的影响, 从而找出电网中脆弱线路以及评估线路在电网中重要程度。

### 2.2.2 多指标

众多学者对脆弱线路的研究愈加深入, 相继提出了多种指标, 例如基于电气特性多指标<sup>[37-40]</sup>、综合熵理论多指标<sup>[41-43]</sup>和综合线路介数多指标<sup>[44-45]</sup>等。

文献[37]通过分析电力系统特性和电网结构, 提出了源荷介数指标; 利用输电裕度和功率传输分布因子等电气状态概念, 提出了线路故障功率过载量指标. 同时, 结合系统电网结构与电气运行状态之间的关联关系, 并利用协同效应, 建立了综合考虑结构和状态关联关系的脆弱线路评估模型. 文献[38-39]均考虑了复杂网络评价指标和电气特性负荷水平的电力系统安全运行的影响, 分别定义了线路脆弱度评估新指标. 文献[40]则分别从全局和局部、有功和无功两个角度综合分析输电线路的脆弱性. 先从全局的角度评估输电线路故障对全网有功功率传输效率的影响, 然后从局部的角度衡量负荷节点和发电机节点对局部无功平衡的影响。

为克服传统指标只考虑转移潮流分布均匀性的局限性, 文献[41]综合考虑了线路负载率和熵理论, 提出了加权潮流转移熵指标. 文献[42]基于电网拓扑结构和电气特性, 提出了辨识脆弱线路的5个指标, 即线路加权潮流介数、网络凝聚度变化率、网络传输效能变化率、线路连接重要度和网络生成树变化率. 采用熵权、CRITIC法和肯德尔相关系数来确定指标的客观权重. 文献[43]提出了最大流传输贡献

介数和平均接近中心性指标, 基于熵理论提出了电压/潮流变化量泰尔熵, 并结合层次分析法对指标进行权重分配。

文献[44]提出了一种兼顾系统电网结构和运行状态的输电线路脆弱性的新方法, 研究了恶劣天气对线路脆弱性的影响, 结合 well-being 风险贡献度与线路介数, 提出了一个新的综合脆弱性指标, 并列出了评估输电线路脆弱性的方法流程. 文献[45]通过考虑线路电抗、发电机输出容量、线路最大传输容量值以及负荷大小等多重因素, 并采用博弈论综合赋权法建立了4个指标, 即线路入度重要性、线路出度重要性、线路电抗介数和线路容量限制指标。

### 2.3 节点线路综合分析

考虑到网络中的节点与线路联系密切相关, 分别分析节点或线路不够严谨和全面, 文献[46-48]综合考虑了节点重要性和线路介数. 文献[47]进一步利用设备状态检修数据构建了电网脆弱元件的故障模型, 设置设备的健康指数来预测设备的故障发生的可能性, 并结合效用理论来获得对应的综合静态风险指标。

文献[49-51]从分布式电源和光伏电源角度出发进行研究. 文献[49]综合分析了直接接入主电网的分布式电源对电网供电效率的影响. 文献[50]考虑在分布式电源接入电网后, 配电网结构会变得更为复杂, 因此, 在所构建模型中引入了节点注入功率和潮流熵的概念, 结合风险理论和层次分析法, 分别提出了评估配电网重要性节点和脆弱线路综合性指标. 文献[51]通过研究光伏电源接入对电网脆弱线路辨识的影响, 发现被蓄意攻击时电网效能急剧下降的原因是: 高电气介数线路通常处在电网重要输电位置, 这在一定程度上验证了节点/线路电气介数指标的有效性. 研究进一步发现, 有3种因素会在不同程度上影响线路辨识的结果, 分别是: 系统光伏渗透率变化、接入系统的位置变化和光伏电源出力变化。

文献[52]为了准确定位电网中的重要节点或脆弱线路, 将元件可靠性参数与复杂网络分析相结合, 提出了加权后的单元参数脆弱性指标. 加权网络中的单元参数脆弱强度定义为介数与单元权重  $\gamma_{OS}$  的乘积, 即

$$\begin{cases} B'_n = B_n \gamma_{OS}^i, \\ B'_1 = B_1 \gamma_{OS}^i. \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $B'_n$ 、 $B'_1$  分别为加权后节点与线路的参数脆弱强度;  $\gamma_{OS}$  值与脆弱强度成正比关系,  $\gamma_{OS}$  值越大, 单元越脆弱; 而  $\gamma_{IS}$  则成反比关系. 因此, 此处选取权重

$\gamma_{OS}$  表示单元脆弱强度.

文献[53]将加权网络中的单元脆弱度定义为单元保护脆弱强度  $V$  与介数的乘积,即

$$\begin{cases} C_i = V(i)B_i, \\ C_{ij} = V(i, j)B_{ij}, \end{cases} \quad (12)$$

其中  $C_i$ 、 $C_{ij}$  分别为加权后节点  $i$ 、线路  $(i, j)$  的脆弱度. 与式(11)相同的是  $B_n$ 、 $B_1$ 、 $B_i$  和  $B_{ij}$  所代表的都是介数;不同的是式(11)介数相乘的是选取元件可靠性参数为权重,而式(12)是选取节点线路单元保护脆弱强度为权重.

### 3 连锁故障模型

#### 3.1 自组织临界理论及其模型

Bak等<sup>[54]</sup>于1987年提出“自组织临界”的理论,其内容为:当沙堆处于临界状态时,每粒新落下的沙都会对沙堆产生一种微细的力波,尽管冲击力很小,但有可能贯穿沙堆整体,新的沙粒落下的力会传导给所有沙粒,导致沙堆整体性发生变化,这时沙堆还是处于一种相对平衡状态,但随着每粒新沙不断落下,沙堆的结构变得愈加脆弱,最终导致沙堆结构性平衡被破坏,发生坍塌现象.

Bak等用著名的“沙堆模型”来形象地揭示自组织临界态的形成和特点.从大脑中的神经网络到宇宙中星体间的关系,自然界和人类社会中存在大量自组织临界的现象和范例,例如:地震<sup>[55]</sup>、市场经济<sup>[56]</sup>、科学期刊<sup>[57]</sup>、雪崩和太阳射电爆发<sup>[58]</sup>等.

随着自组织临界性理论不断发展,众多学者不仅仅停留在解释自然界和人类社会中的自组织临界性现象上,而是进一步提出了自组织临界性的模型.文献[59]基于自组织临界性在神经网络中提出了神经雪崩模型. BS模型<sup>[60]</sup>是Bak和Sneppen于1993年基于自组织临界性提出的生物演化模型(BS模型).文献[61]从小世界网络角度解释了BS模型的自组织临界性.文献[62]结合自组织临界性理论和电网的潮流熵概念,提出了复杂电网自组织临界态判断模型,用潮流熵解释了线路潮流分布呈现出的高度不均衡性,以及当电网在平均负载率较低时进入自组织临界态的现象.

文献[63]基于利用直流潮流模拟电力系统连锁故障的OPA模型,从系统总负荷需求和网络总传输容量比值的角度初步揭示了电力系统的自组织临界性.电网的自组织临界性是发生连锁性大停电事故的内在动力.基于此,文献[64-65]对连锁故障进行了预测研究.文献[64]提出了构建实时动态的全国沙

堆模型,为预测大停电事故提供实时动态信息,并结合复杂网络理论找出电网中重要节点并及时保护和控制,以减少大停电事故的发生.文献[65]提出了一种搜索关键的故障网络节点的改进遗传算法,并及时对故障的重要节点进行维护或切断,从而使电力通信网络远离自组织临界状态,最终避免电网连锁故障的发生.

#### 3.2 复杂网络理论及其模型

OPA模型<sup>[66-68]</sup>及其改进型<sup>[69-70]</sup>、CASCADE模型<sup>[71-72]</sup>、分支过程模型<sup>[73-74]</sup>、隐性故障模型<sup>[75]</sup>、基于交流的潮流模型<sup>[76]</sup>等,以上模型主要用于描述电网动态特性的负荷变化与连锁故障之间的关系,但均忽略了电网发生连锁故障过程中网络拓扑结构的重要性,以下几个基于复杂网络理论的模型可以弥补这一不足.

相隔中心性模型<sup>[77-78]</sup>假设任意两节点间能量或信息的交换都沿着最短路径进行,选取相隔中心性来评估网络中的节点与边的容量及负荷.节点  $v$  的相隔中心性  $C_B(v)$  与边  $e$  的相隔中心性  $C_B(e)$  表达式类似,分别定义为

$$C_B(v) = \sum_{(w, w')} \frac{\sigma_{ww'}(v)}{\sigma_{ww'}}, \quad (13)$$

$$C_B(e) = \sum_{v \in V} \sum_{w \in V \setminus \{v\}} \frac{\sigma_{vw}(e)}{\sigma_{vw}}. \quad (14)$$

其中:对于  $w \neq w'$  且  $w$  和  $w' \neq v$  的所有节点对,  $\sigma_{ww'}$  为  $w$  与  $w'$  之间最短路径数目,  $\sigma_{ww'}(v)$  为  $w$  与  $w'$  之间经过  $v$  的最短路径数目,  $\sigma_{vw}(e)$  为  $v$  与  $w$  之间包含边  $e$  的最短路径数目,  $\sigma_{vw}$  为  $v$  与  $w$  之间所有最短路径数目.

有效性能模型<sup>[79]</sup>假定节点的容量与初始负荷成正比,即  $C_i = \alpha L_i(0)$ ,  $\alpha \geq 1$  为网络的裕度系数.定义负荷  $L_i(t)$  为  $t$  时刻通过节点的最有效路径总数.当故障导致节点过负荷时,会直接改变节点间的有效路径,使其连接的边的有效性能值降低,从而负荷分配被改变,导致某些节点发生过负荷现象.  $t$  时刻有效性能的迭代规则为

$$e_{ij}(t+1) = \begin{cases} \frac{e_{ij}(0)}{L_i(t)/C_i}, & L_i(t) \geq C_i; \\ e_{ij}(0), & L_i(t) < C_i. \end{cases} \quad (15)$$

其中<sup>[80]</sup>:  $e_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的有效性能值,  $e_{ij} \in (0, 1]$ . 若两点之间没有边相连,则  $e_{ij} = 0$ ;若两点之间有连接,则  $e_{ij} > 0$ , 并且  $e_{ij}$  越大,表示边  $i$  与  $j$  传输能力越强.

ML模型<sup>[81-82]</sup>假定节点的容量与初始负荷成正

比,即  $C_i = \alpha L_i(0), i = 1, 2, \dots, N$ . 其中:  $\alpha \geq 1$  为网络的裕度系数,  $N$  为网络中节点数目. 并假设各节点的容量不同, 节点发生故障时会被从网络中永久删除. 此外, 对系统而言, 连锁故障发生时间远小于网络增长时间, 因此不考虑网络增长的影响. 文献[83]结合现实因素对ML模型进行改进, 提出了一种带控制参数  $\rho$  的ML改进模型. 当  $\rho = 0$  时, 改进模型等价于ML模型; 当  $\rho > 0$  时, 负荷转移评价指标较高的支路将被匹配更高的运行极限; 当  $\rho = 1$  时, 表示极端的匹配模式, 只有在负荷转移评价指标不为0时, 输电线路才会存在冗余输电容量.

当然, 有学者提出了不同于上述方法的其他模型. 文献[84]提出了过载函数模型, 用过载函数值的演化代替连锁故障过程中拓扑结构的演化, 不需要删除故障节点及其相连的边, 负载自动避免故障节点, 网络性能的下降反映在网络效率上. 文献[85]提出了时延模型, 考虑了时延和重复故障的特点, 并根据有效的边和节点进一步设计网络综合鲁棒性指数(RI). 仿真结果表明, 时延越大, 级联失效的RI越大.

### 3.3 元胞自动机理论及其模型

元胞自动机这一概念最早由 Von Neumann<sup>[86]</sup> 于1966年提出, 随后, 由 Wolfram<sup>[87]</sup> 将所有元胞自动机的动力学行为归纳为四大类: 平稳型、周期型、混沌型和复杂型. 元胞自动机开始成为研究复杂系统的方法之一, 随后被广泛应用到地理<sup>[88]</sup>、交通<sup>[89]</sup>、经济<sup>[90]</sup> 等研究领域. 文献[91-96]利用元胞自动机理论模拟电网连锁故障的演化机理, 构造了电网故障元胞自动机模型. 在模型中, 一个元胞分别代表着一个

电网元件, 当元件发生故障时, 其中对应的元胞会发生破裂.

标准的元胞自动机<sup>[91]</sup>可表示为

$$A = (L_d, S, N, f). \quad (16)$$

其中:  $A$  代表一个完整元胞自动机系统;  $L_d$  为元胞空间,  $d$  为元胞空间的维数;  $S$  为元胞的有限状态集;  $N$  为一个所有邻域内元胞的组合, 记为  $N(s_1, s_2, \dots, s_n)$ ,  $n$  是元胞的邻居个数,  $s_i \in Z$  ( $Z$  为整数集合),  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $f$  为  $S_n$  映射到  $S$  上的一个状态转换函数.

元胞自动机的构成如图3所示.

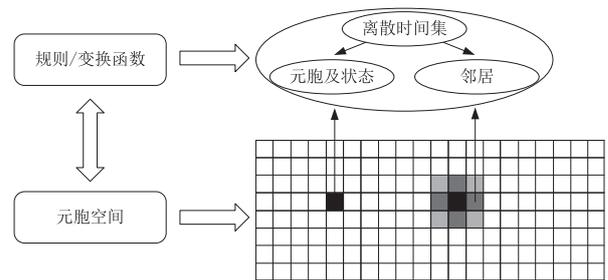


图3 元胞自动机构成

文献[91]和文献[92]定义元胞自动机模型的不同之处是, 元胞的状态0为正常, 1为故障, 元胞空间均以实际电网情况为准, 元胞时间均为元胞扰动间的间隔时间(等时间间隔). 不同之处是: 文献[92]的元胞定义为输电线路, 因此元胞邻居也为线路; 而文献[91]定义元胞为输电线路和变压器, 因此元胞邻居也是输电线路或变压器. 相比之下, 元胞定义电网元件越多, 就越接近于电网实际情况.

表1 连锁故障研究主要模型

理论名称	相关模型	研究目的	局限性	适用范围
自组织临界理论	OPA模型 <sup>[66-68]</sup> 及其改进型 <sup>[69-70]</sup> 、CASCADE模型 <sup>[71-72]</sup> 、分支过程模型 <sup>[73-74]</sup> 、隐性故障模型 <sup>[75]</sup> 、基于交流的潮流模型 <sup>[76]</sup> 等	自组织临界性的概念是用来解释复杂系统的自发趋于临界状态的整体行为特征, 揭示了电网的自组织临界性是发生连锁性大停电事故的内在动力	不能详细描述电网的电气特性、实际电网运行状态	适用于研究大停电的宏观现象, 可以用来定性地揭示系统发生连锁故障的机理
复杂网络理论	小世界网络模型 <sup>[2]</sup> 、无标度网络模型 <sup>[3]</sup> 、相隔中心性模型 <sup>[77-78]</sup> 、有效性性能模型 <sup>[79]</sup> 、ML模型 <sup>[81-82]</sup> 等	用度值、度分布、平均路径长度、集聚系数、度中心性、介数中心性等指标来描述网络, 从图论的角度来研究电网连锁故障产生、发展和传播的过程	对实际系统的物理过程的考虑相对简化, 因而与实际的物理过程存在着差距, 不能分析实际电网运行状态	适用于找到电网中的结构脆弱元件, 研究电网对于各种攻击的承受能力及故障的传播行为
元胞自动机理论	元胞自动机模型 <sup>[91-92]</sup> 、模糊元胞自动机模型 <sup>[93-94]</sup> 、异质元胞自动机模型 <sup>[95-96]</sup> 等	利用元胞自动机理论构造了电网故障元胞自动机模型, 模型以每一个元胞代表一个电网元件, 以元胞的破裂来模拟元件发生故障, 进而模拟电网连锁故障的演化机理	只考虑元胞之间的局部作用, 因而忽略了现实系统的宏观现象, 元胞状态的变化取决于自身和邻域元胞的状态组合, 从而忽略了电气特性的影响	元胞自动机方法是用元胞作为基本单元描述复杂系统的整体行为, 演化的规则可以预设, 许多过程可以通过计算机来完成, 所以具有直观性及可控性

文献[93-94]将模糊理论引入电网元胞自动机模型,在元胞自动机的基础上额外赋予了电网元胞紧急状态,并结合电网状态和元胞临界状态,定义了故障传递模糊规则库.该模型得到的损失负荷的标度-频度幂律特性曲线斜率绝对值比单电网元胞自动机模型<sup>[91]</sup>提高了17%,即改进后的元胞自动机模型更加接近我国实际电网的运行状态.

当系统中一个元件发生故障时,不但会对与其相邻元件产生影响,而且还会对其他区域中的元件产生影响.文献[95-96]将元胞的邻居定义为同质邻居元胞和异质邻居元胞,并结合电网实际数据分析发现,该模型在分维和相对损失负荷上较元胞自动机模型更符合实际情况,并且模型具有简化仿真流程、缩短仿真时间的优点.

表1对上述3类模型进行了归纳总结.

## 4 单一网络连锁故障

为充分理解电网连锁故障发生过程和减少连锁故障所带来的危害,人们不断地探索和创新研究方法,提出了多种包含电网运行状态的模型、多样化的攻击策略和不同的连锁故障实际处理方式.

### 4.1 考虑实际运行状态

电网由变压器、输/配电线路等多种元件构成,这些元件的电阻和电抗等参数凸显了所在电网的电气特性.在对电网进行复杂网络建模分析时,仅考虑电网电气特性和电网拓扑结构已不足以模拟实际电网运行状况,例如:电网中电流或功率从各元件流向各种负荷的过程.因此,有学者提出将电网潮流作为研究电网运行状态的重点.潮流计算是结合给定的电网结构、电网参数和电网元件运行条件,用来计算电力系统中各部分的稳态运行状态参数.下面主要介绍直流潮流和交流潮流分析法.

文献[97]提出了有关最小失负荷百分比的评价指标,并利用直流潮流模型进行改进,克服了原故障严重程度衡量评价指标及计算方法的局限性.文献[98]基于直流潮流优化模型,研究了移除电网部分节点对连锁故障的影响.仿真发现,电网中的高度数节点失效后不一定是引发连锁故障的原因,极大可能是节点的效能值及其相邻节点度数共同影响的.文献[99]用直流潮流方程式来近似电网潮流,并使用有效图阻抗作为电网扩展的度量指标,从而提高了给定电网在低计算复杂度下的鲁棒性.

以上研究方法并没有考虑到无功对电网的影响,对故障后的系统衡量不够全面.文献[100]考虑了无功对电网的影响,基于最优潮流模型和直流潮流追踪

技术提出了联合校正控制方法,该方法可以显著减小连锁故障影响的范围.

交流潮流法虽然计算复杂,但有很高的准确度.文献[76]基于交流潮流模型和自组织理论,综合考虑了有功和无功潮流,可以模拟因有功及无功不足所引发的电网连锁故障现象,但其模型未考虑发电机和负荷动态,还有待深入研究.文献[101]将交流模型与风险理论相结合,既能找出电网的关键节点和脆弱线路,也能定量评估输电系统发生连锁故障的风险.

### 4.2 攻击策略

小世界网络和无标度网络同时具备鲁棒性和脆弱性,遭受随机攻击时,网络仍然连通;而遭受蓄意攻击时,网络的连通性很可能受到较大破坏,这与电力系统实际情况相似.

研究复杂网络的攻击策略是研究网络鲁棒性、脆弱性等特性的基础.了解攻击策略可以帮助人们采取更有效的措施来保证电网安全.文献[102]通过模拟随机攻击和蓄意攻击这两种攻击策略来研究电网被攻击后的脆弱性,仿真发现:多个度值低的点受攻击时,很容易造成区域停电;度值低的点受到攻击时,很容易引发连锁故障.但这两种攻击方式过于简单,而实际电网面对的攻击方式是多样多变的.

文献[103]克服了上述两种简单攻击方式的局限性,重点研究多节点攻击策略,研究结果表明,被攻击目标间的距离对攻击效果有很大影响.针对容差系数不同、已知信息程度不同的情况,提出了3种条件攻击策略,每种策略都有其独特的优势.

文献[104]通过引入邻居链路的概念,提出了两种新的网络攻击策略,即最小度内攻击策略和最大度外攻击策略.文献[105]从动态鲁棒性出发,介绍了一种新型的干扰网络动态活动的攻击——过载攻击.

### 4.3 减小/修复连锁故障危害

文献[106]提出了连锁故障实时搜索算法,能够快速有效地搜索到初始故障所处位置,并及时采取校正控制措施.在电网发生连锁故障前找到隐患并将其及时消除,可以有效地预防连锁故障的发生.

在电网发生连锁故障时及时采取干预措施,能有效将连锁故障影响范围缩到最小,以减少损失.文献[107]应用非劣邻居免疫算法求解两个多目标优化模型,并综合考虑了网络运行成本和鲁棒性,找到促进/抑制级联失效传播的边并及时处理,以减轻连锁故障造成的损害.文献[108]认为在实际网络中,并非所有的过载节点都会被移除,因此,可以采取一些有效的措施来保护它们.仿真模型通过量化和引入参

数探索保护资源的配置,以形成最优的保护策略。

一旦复杂网络在连锁故障下崩溃,必须实施适当的修复策略。文献[109]研究了4种修复策略,结果表明,即时在开放条件下,修复策略按参数递减排列,网络效率恢复得更快。维修策略中延迟开启与直接开启相比,缓解了网络效率与额外扩容量之间的矛盾,特别是降低了二次故障的风险。文献[85]介绍了故障节点的时延特性和恢复概率,使故障节点以一定概率恢复到正常状态,并且考虑了恢复的节点将再次重复出现故障的情况。

文献[110]综合考虑了连锁故障的全过程,提出一种基于PSD电力系统分析软件仿真的快速故障概率计算方法。首先,计算系统在故障数据集下的连锁故障的发生概率;其次,确定故障后的控制策略及故障终止判定条件,并考虑故障恢复方法;最后,结合电网架构、故障状态和经济损失,提出了综合指标评价体系,对系统风险进行了量化评估。

## 5 相依网络连锁故障

由于实际网络不是隔离的,现实中不同网络节点之间存在耦合关系,不能再用单个网络连锁故障研究方式来研究相依网络。在相依网络连锁故障过程中,一个网络的故障会导致另一个网络的故障,重点要考虑依存边和网间拓扑互相似性的影响,还应研究时延特性和恢复策略。

### 5.1 电力-通信耦合网络

随着经济和技术的不断发展,电力通信网络的业务从最初的程控语音网络飞速发展为现在的智能电网。目前,电力通信网在协调电力系统输变电和配用电的联合运行,保障电网安全经济和稳定可靠运行方面发挥了应有的作用,有利于保证电力通信的电网调度自动化、智能化等需要。因此,电力通信耦合网络以其独特的发展优势越来越受到社会各方面的重视。

#### 5.1.1 从通信网络角度分析

文献[111]结合复杂网络和路由策略,分析了复杂网络之间的内在相似性。通过调节通信网络参数,设置适当的路由策略,可以降低连锁故障发生概率。仿真发现,应用网间最优相似策略能够有效地减少大规模连锁故障的发生。

文献[112-113]的研究表明,不适当的通信网络配置会导致通信电力相依关系风险水平增加。文献[113]研究了路由策略对电力通信连锁故障的影响,发现当信息网处于拥塞状态时,所提出的拥塞感知路由算法可有效提高信息网数据传输效率,减小连锁故障发生概率。

文献[114]通过使用通信网络中的软链接来处理崩溃故障。为了有效地建立软链接来处理连锁故障,提出了一个完全分散式算法和一个集中的算法来分析节点的故障。文献[115]显示了通信网络对电力系统的影响。在随机攻击期间,控制命令可以减轻对电网的损害。但是,有时通信网络中关键集线器的功能失常也会加速连锁故障并导致严重的停电。

#### 5.1.2 综合电力通信网分析

文献[116]发现更广泛的度分布增加了相依网络随机故障时的脆弱性,而单一网络则完全相反,并强调了在设计鲁棒性网络时,需要考虑相依网络的网络特性。

渗流理论多用于分析相依网络连锁故障过程<sup>[117-119]</sup>。文献[119]给出了 $n$ 个相依网络的精确渗流定律。当 $n = 1$ 时,仿真的一般结果与已知的单一网络的ER二阶相变相吻合。对于任何 $n \geq 2$ 时发生的连锁故障,其转变为一阶渗流转变。

文献[120]从电力通信网的线路规划角度出发,针对电力通信网中含有大量低度数节点的特性进行研究,仿真发现,通过低度数节点加边策略增加少量通信线路,可以显著提高电力通信网的结构脆弱性。文献[121]分别提出了度-介数攻击策略和拓扑中心度攻击策略,相比于其他攻击策略,网络在遭受拓扑中心度排列攻击后,节点的阈值更低,系统连锁故障发生后崩溃更快。仿真发现,将分布式控制中心设立在物理层电网分区中,能有效提高故障中信息层的运行时效性。

文献[122]通过将幂律指数控制在 $2 \sim 3$ 范围内、增大防御指数、提高网络连接密度等方法,能够有效增强电力通信网的鲁棒性。文献[120]指出,随着相依网络的相互依赖性增加,其对抗连锁故障的鲁棒性也随之增加。文献[123]提出了一种链路附加策略,在随机攻击和蓄意攻击的情况下,该策略可以获得最少的故障节点数量和最高的信息效率比,与其他策略相比,具有更好的鲁棒性和同步性。

文献[124]提出的模型考虑了攻击者和防御者,他们在3个连续的步骤中起作用:1)防御者通过保护网络组件来尝试在破坏之前最小化系统的漏洞;2)攻击者试图最大程度破坏网络;3)防御者的目的是通过分配和安排工作人员及时地恢复被破坏的组件,以在破坏后最大程度地提高网络系统的可恢复性。

### 5.2 电力-天然气耦合网络

电力系统和天然气系统之间紧密的相互依存关系,给协调两个系统以实现多能源供应的优化带来了

新的运行挑战. 文献[125]提出了一种多时段协调调度框架, 天然气网络的多线组可以进行调度以充当能量存储, 帮助实现经济运行目标并缓解风电波动.

天然气与电力传输系统之间的联系越来越紧密, 节点蓄意攻击可能会导致严重的能源供应中断. 文献[126-127]的研究表明, 连锁故障的传播和相互依赖性增加了电气基础设施的脆弱性, 但对燃气系统的脆弱性影响较小, 因为气流低速移动相比电网响应速度, 其连锁故障传播速度较慢. 文献[128]通过连续的  $N - k$  故障来分析模拟耦合网络, 论证了图论技术在电力-天然气相依网络脆弱性评估中的适用性.

## 6 总结与展望

本文首先介绍了小世界模型和无标度网络模型, 以及复杂网络的常用评价指标; 其次, 列举了3种连锁故障常用模型: 自组织临界理论、复杂网络理论和元胞自动机理论基本模型; 再次, 分析了现有的文献在重要节点发现和脆弱线路辨识方向上的研究, 如线路介数、线路的传输能力、线路电抗等, 甚至还考虑了天气影响和经济因素; 最后, 将电网连锁故障研究扩展到相依网络连锁故障的研究. 随着通信技术的不断发展, 相依网络将会是今后研究的主要侧重点.

通过全文的分析和总结可以看到, 复杂网络理论在电网脆弱性研究中已经取得了一定的进展和成果, 但大多数电网脆弱性研究还处于理论阶段. 今后的研究方向主要集中在以下几个方面:

1) 追求构建模型的真实性和完整性. 在连锁故障发生时, 节点失效可能会使邻节点失效或过载. 这一暂态过程还需要考虑节点容量的电气特性. 现实电网具有多种电气特性和不同运行状态, 如何将两者综合起来是一个值得思考的问题. 在以往的基于复杂网络建模中, 节点间距离的设计大多与电网实际距离没有关联. 因此, 一些学者建立了含有实际距离的具有普适性的复杂网络模型, 例如: 文献[129]提出了二维空间嵌入式模型, 其所设的方格边与电网实际距离具有一定的相关性. 为使辨识结果与实际电网更加吻合, 还应考虑到多重因素和情况, 建立涵盖更多现实因素和电气特性的电网模型.

2) 深入探究相依网络. 近年来, 相依网络研究已经成为复杂网络领域的热点, 其中电力-通信网络研究的兴起给研究者带来了新的问题: 在现有大多相关研究都是基于无权无向模型讨论研究的背景下, 如何定义通信网边和两网相依边权重是研究者建立电力-通信网模型所亟需解决的问题. 随着科技的发展, 相依网络的网络规模也随之增大, 电力网络、通信网

络、天然气网络和石油网络等所构成的能源互联网, 意味着相依网络的规模从双层耦合向多层耦合发展, 因此, 多种双层耦合和多种多层耦合的研究将是今后相依网络研究的趋势. 例如: 对电力-天然气相依网络的研究<sup>[125-127]</sup>等.

3) 模拟多种攻击策略. 随机攻击和蓄意攻击已成为以往复杂网络研究最常用的攻击策略, 但这两种攻击策略远不能还原现实电网所面临的威胁, 例如: 地震和导弹攻击等. 这种局域攻击已成为危害电网的主要外部因素. 现有少量文献对局域攻击进行了模拟, 例如: 文献[130-131]模拟了地震或者是大规模武器攻击对电网的破坏. 中国沿海地区的电网安全不时会受到海啸和龙卷风威胁, 就目前而言, 这种带状攻击的模拟研究还很缺乏. 因此, 增加对局部攻击和带状攻击的研究与模拟是理论应用于实际的前提.

4) 结合新理论新方法. 通过总结近些年来的研究发现, 熵理论、自组织临界理论、TOPSIS法和灰色关联法等与复杂网络理论相结合来分析电网脆弱性, 这种结合分析避免了研究结果具有太大的主观性. 基于复杂网络的电网脆弱性研究须增加其综合性, 通过结合新理论新方法, 可以在最大程度上保证其结果的严谨性和客观性.

5) 多应用于实际. 现在大部分学者还是停留在理论阶段, 只有极少数人将理论应用于实际. 例如: 文献[7,110]从理论分析上升到对实际电网进行分析; 文献[106]基于理论分析做出了一套连锁故障实时搜索系统. 如何将仿真模型运用于实际电网, 是一个难题, 也是今后研究的主要方向.

## 参考文献(References)

- [1] Erdos P, Renyi A. On random graphs[J]. *Publicationes Mathematicae*, 1958, 6: 290-297.
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [3] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [4] Joseph H Eto. Blackout 2003: Causes and recommendations[EB/OL]. [2021-01-04]. <https://emp.lbl.gov/publications/final-report-august-14-2003-blackout>.
- [5] Rosato V, Issacharoff L, Tiriticco F, et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models[J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2008, 4(1/2): 63-79.
- [6] Andersson G, Donalek P, Farmer R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,

- 2005, 20(4): 1922-1928.
- [7] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 具有不同拓扑特征的中国区域电网连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 7-10.  
(Yi J, Zhou X X, Xiao Y N. Analysis on cascading failures in several chinese regional power grids with different network characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 7-10.)
- [8] 李瀛龙. 天然气管网的脆弱性和鲁棒性研究[D]. 成都: 西南石油大学石油与天然气工程学院, 2017: 45-47.  
(Li Y L. Study on vulnerability and robustness of natural gas pipeline network[D]. Chengdu: Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, 2017: 45-47.)
- [9] 潘俊宇. 城市轨道交通脆弱性及网络抗毁性优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学土木与水利工程学院, 2019: 44.  
(Pan J Y. Research on vulnerability and anti-destroying ability optimization of urban rail transit network[D]. Wuhan: School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2019: 44.)
- [10] 李海云. 航路网络鲁棒性优化[D]. 南京: 南京航空航天大学民航空学院, 2018: 18-19.  
(Li H Y. Robustness optimization of air route network[D]. Nanjing: College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 18-19.)
- [11] Wu J, Barahona M, Tan Y J, et al. Spectral measure of structural robustness in complex networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2011, 41(6): 1244-1252.
- [12] Jiang Y, Hu A Q, Huang J. Importance-based entropy measures of complex networks' robustness to attacks[J]. Cluster Computing, 2019, 22(2): 3981-3988.
- [13] Ai X B. Node importance ranking of complex networks with entropy variation[J]. Entropy, 2017, 19(7): 303.
- [14] 吴辉, 彭敏放, 张海艳, 等. 基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(1): 38-45.  
(Wu H, Peng M F, Zhang H Y, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(1): 38-45.)
- [15] 刘垒, 谭阳红, 金家瑶, 等. 电力通信网的关键节点辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 28-34.  
(Liu L, Tan Y H, Jin J Y, et al. Key node identification of power communication network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(2): 28-34.)
- [16] 任鹏, 李翀, 陶鹏, 等. 基于加权熵TOPSIS法的电网节点脆弱度评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 143-149.  
(Ren P, Li C, Tao P, et al. Node vulnerability evaluation for power network based on weighted entropy TOPSIS method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 143-149.)
- [17] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.  
(Ding M, Guo Y, Zhang J J, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.)
- [18] 邓春兰. 基于熵理论的电力网络节点重要性评估[J]. 山东电力技术, 2013, 40(6): 9-12.  
(Deng C L. Node importance evaluation of power network based on entropy theory[J]. Shandong Electric Power, 2013, 40(6): 9-12.)
- [19] 魏刚. 基于介数熵度的电网关键节点评估方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 27-30.  
(Wei G. Evaluation for critical buses of power grids by betweenness-weighted entropic degree[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S1): 27-30.)
- [20] 卢鹏丽, 郭旭东, 董瑞, 等. 基于介数熵的复杂网络节点重要度识别方法[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(2): 111-115.  
(Lu P L, Guo X D, Dong M, et al. Importance identification method of complex network nodes based on betweenness and degree entropy[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(2): 111-115.)
- [21] Du Y X, Gao C, Hu Y, et al. A new method of identifying influential nodes in complex networks based on TOPSIS[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 399: 57-69.
- [22] 潘可欣, 李华清, 马草原, 等. 基于复杂网络和TOPSIS法的发电厂安全生产评价模型[J]. 电子世界, 2018(8): 45-47.  
(Pan K X, Li H Q, Ma C Y, et al. Evaluation Model of Power Plant Safety Production Based on Complex Network and TOPSIS method[J]. Electronics World, 2018(8): 45-47.)
- [23] 王劲松, 李宗育, 徐晏琦. 基于多属性决策的复杂网络节点攻击研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(4): 42-47.  
(Wang J S, Li Z Y, Xu Y Q. Complex network node attacking based on multi-attribute decision making[J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(4): 42-47.)
- [24] Hu J T, Du Y X, Mo H M, et al. A modified weighted TOPSIS to identify influential nodes in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 444: 73-85.
- [25] 秦李, 杨子龙, 黄曙光. 复杂网络的节点重要性综合评价[J]. 计算机科学, 2015, 42(2): 60-64.  
(Qin L, Yang Z L, Huang S G. Synthesis evaluation method for node importance in complex networks[J]. Computer Science, 2015, 42(2): 60-64.)
- [26] 谭阳红, 张婧, 李肖. 基于复杂网络理论的电网节点重要度评估[J]. 计算机工程, 2019, 45(11): 281-286.  
(Tan Y H, Zhang J, Li X. Importance evaluation of power grid nodes based on complex network theory[J]. Computer Engineering, 2019, 45(11): 281-286.)

- [27] 何铭, 邹艳丽, 梁明月, 等. 基于多属性决策的电力网络关键节点识别[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(3): 27-37.  
(He M, Zou Y L, Liang M Y, et al. Critical node identification of a power grid based on multi-attribute decision[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2020, 17(3): 27-37.)
- [28] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.  
(Cao Y J, Chen X G, Sun K. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5.)
- [29] Liu L M, Liu J Y, Wei Z B, et al. Security analysis of large power grid based on complex network theory and Bayesian network model[C]. 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, 2014: 270-274.
- [30] 马静, 王希, 王增平. 基于线路运行介数的过负荷脆弱性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 47-50.  
(Ma J, Wang X, Wang Z P. Operation betweenness based assessment on overload vulnerability[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 47-50.)
- [31] 江浩, 吕飞鹏, 孔德洪. 基于负荷介数和电气欧拉距离的电网关键环节辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 92-97.  
(Jiang H, Lyu F P, Kong D H. Load betweenness and electric euclidean distance based identification of critical links in power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(10): 92-97.)
- [32] 陈碧云, 叶仁欢, 白晓清. 计及输电介数及功率介数的电网待恢复区域重要性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 141-147.  
(Chen B Y, Ye R H, Bai X Q. Importance evaluation of electric power areas to be restored considering electricity transmission betweenness and power betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 141-147.)
- [33] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.  
(Xu L, Wang X L, Wang X F. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.)
- [34] Wei J J, Ren J W. Transmission section search for vulnerable line based on power transfer distribution factor[J]. Advanced Materials Research, 2014, 986/987: 643-647.
- [35] Bompard E, Wu D, Xue F. The concept of betweenness in the analysis of power grid vulnerability[C]. 2010 Complexity in Engineering. Rome, 2010: 52-54.
- [36] 黄燕, 李华强, 黄涛, 等. 基于复杂网络和暂态能量函数的支路暂态脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 69-74.  
(Huang Y, Li H Q, Huang T, et al. Branch transient vulnerability assessment based on the complex network and transient energy function[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 69-74.)
- [37] 刘利民, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 30-37.  
(Liu L M, Liu J Y, Wei Z B, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 30-37.)
- [38] 陈伟华, 王刚, 叶仁杰, 等. 基于复杂网络理论的系统脆弱度评估新方法[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 7-11.  
(Chen W H, Wang G, Ye R J, et al. A new method for system vulnerability assessment based on complex network theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3): 7-11.)
- [39] 孙顺祥, 李晓明, 张繁碧, 等. 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的配电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 107-113.  
(Sun S X, Li X M, Zhang F B, et al. Identification of vulnerable lines in the distribution network based on network structure importance and potential hazard vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 107-113.)
- [40] 倪向萍, 梅生伟, 张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 1-5.  
(Ni X P, Mei S W, Zhang X M. Transmission lines' vulnerability assessment based on complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 1-5.)
- [41] 徐岩, 雷小双, 秦彬, 等. 基于综合重要度的电网关键线路辨识方法[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 85-90.  
(Xu Y, Lei X S, Qin B, et al. Method based on comprehensive importance for critical line identification in a power grid[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 85-90.)
- [42] 朱凌, 林冠强, 叶晓君, 等. 联合采用客观赋权和夹角度量法的电力系统关键线路辨识[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 49-56.  
(Zhu L, Lin G Q, Ye X J, et al. Critical line identification in power systems by combined use of objective weighting and inter-degree measure methods[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 49-56.)
- [43] 吴昊, 朱自伟. 基于熵权-层次分析法综合指标的电网关键线路辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 39-47, 55.  
(Wu H, Zhu Z W. Key Lines identification in power grid based on comprehensive index calculated by the entropy weight-analytical hierarchy process[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 39-47, 55.)
- [44] 熊世旺, 郭创新, 何宇斌, 等. 考虑线路介数和 well-being 风险贡献度的电网脆弱线路评估[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 84-90.  
(Xiong S W, Guo C X, He Y B, et al. Vulnerable line evaluation in power grid considering line betweenness and well-being risk contribution degree[J]. Electric Power

- Construction, 2015, 36(12): 84-90.)
- [45] 朱大锐, 王睿, 段建东, 等. 考虑多影响因素的关键输电线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5938-5947.  
(Zhu D R, Wang R, Duan J D, et al. Identification of critical transmission lines considering multiple influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5938-5947.)
- [46] Liu J, Xiong Q Y, Shi W R, et al. Evaluating the importance of nodes in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 452: 209-219.
- [47] 肖盛, 张建华, 肖河. 基于复杂网络理论与风险理论的地区电网脆弱性评估[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 21-28.  
(Xiao S, Zhang J H, Xiao H. Vulnerability assessment of a regional power grid based on complex network theory and risk theory[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 21-28.)
- [48] 王亮, 刘艳, 顾雪平, 等. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 29-33.  
(Wang L, Liu Y, Gu X P, et al. Skeleton-network reconfiguration based on node importance and line betweenness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 29-33.)
- [49] 马草原, 孙展展, 葛森, 等. 基于复杂网络理论含分布式发电的电网脆弱度分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 19-24.  
(Ma C Y, Sun Z Z, Ge S, et al. Analysis of grid vulnerability containing distributed generation based on complex networks theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 19-24.)
- [50] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125-131.  
(Shi W C, Li X M, Wang X L, et al. Vulnerability assessment method for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(12): 125-131.)
- [51] 冯浩, 李怀森, 葛玉林, 等. 光伏电源接入对系统关键线路辨识影响研究[J]. 电力学报, 2020, 35(3): 200-208.  
(Feng H, Li H S, Ge Y L, et al. Influence study on critical line identification in power system with the access of photovoltaic power[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(3): 200-208.)
- [52] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.  
(Wei Z B, Liu J Y, Zhu G J, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.)
- [53] 张海翔, 吕飞鹏. 基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 613-619.  
(Zhang H X, Lü F P. The Vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 613-619.)
- [54] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of the  $1/f$  noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 364-374.
- [55] Peixoto T P, Prado C P C. Statistics of epicenters in the Olami-Feder-Christensen model in two and three dimensions[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2004, 342(1/2): 171-177.
- [56] Yadav A C, Manchanda K, Ramaswamy R. Emergent organization in a model market[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 482: 118-126.
- [57] Pereira H B B, Fadigas I S, Monteiro R L S, et al. Density: A measure of the diversity of concepts addressed in semantic networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 441: 81-84.
- [58] Paczuski M, Hughes D. A heavenly example of scale-free networks and self-organized criticality[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2004, 342(1/2): 158-163.
- [59] Arcangelis L D, Herrmann H J. Activity-dependent neuronal model on complex networks[J]. Frontiers in Physiology, 2012, 3: 62.
- [60] Bak P, Sneppen K. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(24): 4083-4086.
- [61] 范文涛, 贾武, 丁义明. 建立系统科学基础理论框架的一种可能途径与若干具体思路(之十): 复杂网络上的自组织临界性模型[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(1): 1-8.  
(Fan W T, Jia W, Ding Y M. A possible approach to the framework of the fundamental theory of system science: Part ten[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2006, 26(1): 1-8.)
- [62] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.  
(Cao Y J, Wang G Z, Cao L H, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.)
- [63] 何飞, 梅生伟, 薛安成, 等. 基于直流潮流的电力系统停电分布及自组织临界性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 7-12.  
(He F, Mei S W, Xue A C, et al. Blackouts distribution and self-organized criticality of power system based on DC power flow[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 7-12.)
- [64] 丁道齐. 用复杂网络理论分析电网连锁性大停电事故机理[J]. 中国电力, 2007, 40(11): 25-32.  
(Ding D Q. Applying complex network theory to analyze

- mechanism of cascading large blackouts failure[J]. *Electric Power*, 2007, 40(11): 25-32.)
- [65] 李映雪, 朱文广, 黄超, 等. 基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(5): 118-122.  
(Li Y X, Zhu W G, Huang C, et al. Research on power heterogeneous communications network stability with SOC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(5): 118-122.)
- [66] Carreras B A, Lynch V E, Dobson I, et al. Dynamics, criticality and self-organization in a model for blackouts in power transmission systems[C]. *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2002: 9.
- [67] Carreras B A, Lynch V E, Dobson I, et al. Complex dynamics of blackouts in power transmission systems[J]. *Chaos*, 2004, 14(3): 643-652.
- [68] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model fo complex dynamics in electric power system blackouts[C]. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2001: 710-718.
- [69] Ren H, Dobson I, Carreras B A. Long-term effect of the  $n - 1$  criterion on cascading line outages in an evolving power transmission grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3): 1217-1225.
- [70] Mei S W, He F, Zhang X M, et al. An improved OPA model and blackout risk assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 814-823.
- [71] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]. *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2003: 10.
- [72] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A loading-dependent model of probabilistic cascading failure[J]. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 2005, 19(1): 15-32.
- [73] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. Branching process models for the exponentially increasing portions of cascading failure blackouts[C]. *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2005: 64a.
- [74] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A branching process approximation to cascading load-dependent system failure[C]. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2004: 10.
- [75] Chen J, Thorp J S, Parashar M. Analysis of electric power system disturbance data[C]. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Piscataway: IEEE, 2001: 738-744.
- [76] 梅生伟, 翁晓峰, 薛安成, 等. 基于最优潮流的停电模型及自组织临界性分析[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(13): 1-5.  
(Mei S W, Weng X F, Xue A C, et al. Blackout model based on OPF and its self-organized criticality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(13): 1-5.)
- [77] Holme P. Edge overload breakdown in evolving networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(3): 036119.
- [78] Holme P, Kim B J. Vertex overload breakdown in evolving networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(6): 066109.
- [79] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2003, 69(4): 045104.
- [80] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(19): 198701.
- [81] Lai Y C, Motter A E, Nishikawa T. Attacks and cascades in complex networks[J]. *Lecture Notes in Physics*, 2004, 650: 299-310.
- [82] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2003, 66(6): 065102.
- [83] 舒征宇, 丁红声, 周建华, 等. 基于复杂网络理论的输电容量匹配模型[J]. *电力建设*, 2014, 35(10): 79-83.  
(Shu Z Y, Ding H S, Zhou J H, et al. Transmission capacity matching model based on complex network theory[J]. *Electric Power Construction*, 2014, 35(10): 79-83.)
- [84] Zhang Y P. Research and application of importance degree evaluation method of complex network cascade connection node based on load redistribution[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 998/999: 1174-1177.
- [85] Jing K, Du X R, Shen L X, et al. Robustness of complex networks: Cascading failure mechanism by considering the characteristics of time delay and recovery strategy[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 534: 122061.
- [86] Von Neumann. *Theory of self-reproducing automata*[M]. Champaign-Urbana: University of Illinois Press, 1966: 17.
- [87] Wolfram S. *Theory and applications of cellular automata*[M]. Singapore: World Scientific, 1986: 3-4.
- [88] 黎夏, 叶嘉安. 知识发现及地理元胞自动机[J]. *中国科学D辑*, 2004, 34(9): 865-872.  
(Li X, Ye J A. Knowledge discovery and geographical cellular automata[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(9): 865-872.)
- [89] 薛郁, 董力耘, 戴世强. 一种改进的一维元胞自动机交通流模型及减速概率的影响[J]. *物理学报*, 2001, 50(3): 445-449.  
(Xue Y, Dong L Y, Dai S Q. An improved one-dimensional cellular automaton model of traffic flow and the effect of deceleration probability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(3): 445-449.)
- [90] 应尚军, 魏一鸣, 范英, 等. 基于元胞自动机的股票市场投资行为模拟[J]. *系统工程学报*, 2001, 16(5): 382-388.  
(Ying S J, Wei Y M, Fan Y, et al. Cellular automata

- based behavior simulation of stock market investment[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2001, 16(5): 382-388.)
- [91] 于群, 曹娜, 郭剑波. 基于元胞自动机的电力系统自组织临界特性仿真模型[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(21): 1-5.  
(Yu Q, Cao N, Guo J B. Power system self-organized criticality simulation model based on cellular automata[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(21): 1-5.)
- [92] 李辉, 贾晓风, 李利娟, 等. 基于元胞自动机的电网隐性故障传播模型关键线路识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 16-23.  
(Li H, Jia X F, Li L J, et al. An approach for critical lines identification of power grid hidden fault propagation model based on cellular automata[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 16-23.)
- [93] 于群, 张敏, 曹娜, 等. 基于模糊元胞自动机的电网故障演化模型[J]. *计算机应用*, 2015, 35(9): 2682-2686.  
(Yu Q, Zhang M, Cao N, et al. Power grid fault evolution model based on fuzzy cellular automata[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(9): 2682-2686.)
- [94] 于群, 张敏, 曹娜, 等. 基于模糊元胞自动机的电网连锁故障控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(8): 90-95.  
(Yu Q, Zhang M, Cao N, et al. Grid cascading failure control based on fuzzy CA[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(8): 90-95.)
- [95] 于群, 王琪, 曹娜. 基于异质元胞自动机的电网停电机理仿真模型[J]. *中国电力*, 2019, 52(12): 79-89.  
(Yu Q, Wang Q, Cao N. Blackouts mechanism simulation model of power system based on heterogeneous cellular automata[J]. *Electric Power*, 2019, 52(12): 79-89.)
- [96] 于群, 王琪, 曹娜. 基于异质元胞自动机的互联电网连锁故障控制措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 118-132.  
(Yu Q, Wang Q, Cao N. A control measure for interconnection power grid cascading failure based on heterogeneous cellular automata[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 118-132.)
- [97] 王韶, 董光德, 晏健. 基于最优负荷削减的小世界电网连锁故障模拟[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 152-156.  
(Wang S, Dong G D, Yan J. Optimal load-shedding based simulation of cascading failure in small-world power grid[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 152-156.)
- [98] 朱国威, 王先培, 贺瑞娟, 等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识[J]. *高电压技术*, 2016, 42(10): 3347-3353.  
(Zhu G W, Wang X P, He R J, et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(10): 3347-3353.)
- [99] Wang X R, Koç Y, Kooij R E, et al. A network approach for power grid robustness against cascading failures[C]. *The 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling*. Munich, 2015: 208-214.
- [100] 王韶, 刘沛铮, 董光德, 等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(9): 162-168.  
(Wang S, Liu P Z, Dong G D, et al. Power system cascading failure model based on complex network theory, with consideration of corrective control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(9): 162-168.)
- [101] 刘杨, 张焰, 杨增辉, 等. 输电系统连锁故障风险评估指标及计算方法[J]. *现代电力*, 2012, 29(4): 7-11.  
(Liu Y, Zhang Y, Yang Z H, et al. Risk assessment indices and its calculation of cascading failure for transmission system[J]. *Modern Electric Power*, 2012, 29(4): 7-11.)
- [102] 肖盛, 张建华. 基于小世界拓扑模型的电网脆弱性评估[J]. *电网技术*, 2010, 34(8): 64-68.  
(Xiao S, Zhang J H. Assessment of power grid vulnerability based on small-world topological model[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(8): 64-68.)
- [103] Fu C Q, Wang Y, Wang X Y, et al. Multi-node attack strategy of complex networks due to cascading breakdown[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2018, 106: 61-66.
- [104] Fang X L, Yang Q, Yan W J. Modeling and analysis of cascading failure in directed complex networks[J]. *Safety Science*, 2014, 65: 1-9.
- [105] Turau V, Weyer C. Cascading failures in complex networks caused by overload attacks[J]. *Journal of Heuristics*, 2019, 25(6): 837-859.
- [106] 郑阳, 刘文颖, 温志伟, 等. 基于小世界网络的电网连锁故障实时搜索系统[J]. *电网技术*, 2010, 34(7): 58-63.  
(Zheng Y, Liu W Y, Wen Z W, et al. A real-time searching system for cascading failures of power grids based on small-world network[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(7): 58-63.)
- [107] Zhu Q, Zhu Z L, Qi Y, et al. Optimization of cascading failure on complex network based on NNIA[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 501: 42-51.
- [108] Liu J, Xiong Q Y, Shi X, et al. Robustness of complex networks with an improved breakdown probability against cascading failures[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 456: 302-309.
- [109] Fu C Q, Wang Y, Wang X Y. Research on complex networks' repairing characteristics due to cascading failure[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 482: 317-324.
- [110] 龙日尚, 张建华, 蒙园, 等. 严重灾害下特高压交直流电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(9): 2939-2946.  
(Long R S, Zhang J H, Meng Y, et al. Risk assessment method of UHV AC/DC power system in serious disasters[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 2939-2946.)
- [111] 曹一家, 张宇栋, 包哲静. 电力系统和通信网络交互

- 影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 7-11.  
(Cao Y J, Zhang Y D, Bao Z J. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 7-11.)
- [112] Hashemi-Dezaki H, Askarian-Abyaneh H, Shams-Ansari A, et al. Direct cyber-power interdependencies-based reliability evaluation of smart grids including wind/solar/diesel distributed generations and plug-in hybrid electrical vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 93: 1-14.
- [113] 朱国威, 贺瑞娟, 田猛, 等. 考虑路由策略的电力CPS连锁故障建模及分析[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3145-3152.  
(Zhu G W, He R J, Tian M, et al. Modeling and analysis of cascade failure of power grid cyber-physical systems considering routing strategy[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3145-3152.)
- [114] Duan S S, Lee S, Chinthavali S, et al. Best effort broadcast under cascading failures in interdependent critical infrastructure networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2018, 43: 114-130.
- [115] Wang Z Y, Chen G, Liu L, et al. Cascading risk assessment in power-communication interdependent networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 540: 120496.
- [116] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464 (7291): 1025-1028.
- [117] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Networks formed from interdependent networks[J]. Nature Physics, 2012, 8(1): 40-48.
- [118] Huang X Q, Gao J X, Buldyrev S V, et al. Robustness of interdependent networks under targeted attack[J]. Physical Review E, 2011, 83(6): 065101.
- [119] Gao J X, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Robustness of a network of networks[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(19): 195701.
- [120] Cai Y, Li Y, Cao Y J, et al. Modeling and impact analysis of interdependent characteristics on cascading failures in smart grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 89: 106-114.
- [121] 韩宇奇, 郭创新, 朱炳铨, 等. 基于改进渗流理论的信息物理融合电力系统连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 30-37.  
(Han Y Q, Guo C X, Zhu B Q, et al. Model cascading failures in cyber physical power system based on improved percolation theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 30-37.)
- [122] 李稳国, 邓曙光, 李加升, 等. 智能电网中信息网与物理电网间连锁故障的防御策略[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2714-2720.  
(Li W G, Deng S G, Li J S, et al. Defense strategy of cascading failures between information network and physical power grid[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2714-2720.)
- [123] Wang T, Cheng H M, Wang X X. A link addition method based on uniformity of node degree in interdependent power grids and communication networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 560: 125112.
- [124] Ghorbani-Renani N, González A D, Barker K, et al. Protection-interdiction-restoration: Tri-level optimization for enhancing interdependent network resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 199: 106907.
- [125] Bao Z J, Ye Y L, Wu L. Multi-timescale coordinated schedule of interdependent electricity-natural gas systems considering electricity grid steady-state and gas network dynamics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105763.
- [126] Beyza J, Garcia-Paricio E, Yusta J M. Ranking critical assets in interdependent energy transmission networks[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 172: 242-252.
- [127] Beyza J, Ruiz-Paredes H F, Garcia-Paricio E, et al. Assessing the criticality of interdependent power and gas systems using complex networks and load flow techniques[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 540: 123169.
- [128] Beyza J, Garcia-Paricio E, Yusta J. Applying complex network theory to the vulnerability assessment of interdependent energy infrastructures[J]. Energies, 2019, 12(3): 421.
- [129] Danziger M M, Shekhtman L M, Berezin Y, et al. The effect of spatiality on multiplex networks[J]. EPL: Europhysics Letters, 2016, 115(3): 36002.
- [130] Yuan X, Shao S, Stanley H E, et al. How breadth of degree distribution influences network robustness: Comparing localized and random attacks[J]. Physical Review E, 2015, 92(3): 032122.
- [131] Yuan X, Dai Y, Stanley H E, et al.  $k$ -core percolation on complex networks: Comparing random, localized, and targeted attacks[J]. Physical Review E, 2016, 93(6): 062302.

### 作者简介

陈超洋(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂网络系统、智能电网、智能制造等研究, E-mail: ouzk@163.com;  
周勇(1997—), 男, 硕士生, 从事智能电网、复杂网络的研究, E-mail: zhouy3145@163.com;  
池明(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事智能电网、网络化系统、性能极限分析等研究, E-mail: chiming@hust.edu.cn;  
汪秉宏(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性动力学、复杂系统与复杂网络理论、统计物理理论、经济物理学等研究, E-mail: bhwang@ustc.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)