****

**硕士学位论文**

**基于复杂网络理论的电网脆弱性研究**

姓 名：韩 泽 文

学 号：1333723

所在院系：电子与信息工程学院

学科门类：工 学

学科专业：控制理论与控制工程

指导教师：苏 永 清 副教授

二〇一六年三月

****

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Science

**Research of the Grid Power Vulnerability**

**Based on Complex Network Theory**

Candidate: Zewen Han

Student Number: 1333723

School/Department: College of Electronics and

Information Engineering

Discipline: Control Science and Engineering

Major: Control Theory and Control Engineering Supervisor: A.P.Yongqing Su

March, 2016

March, 2016

|  |
| --- |
| **基**  **于复杂网络理论的电网脆弱性研究**  **韩**  **泽文**  **同**  **济大学** |

摘要

电能是社会的主要能源，而电力系统的安全与否关系到整个社会的稳定与人类的生活。纵观近三十年来的大规模停电事故，可以发现电力系统的故障具有随机性，不可预测性，因此大电网安全性成为国内外学者研究热点。传统电网安全性分析都是通过建立元件的数学模型进行微分方程求解，却在分析系统动态行为上存在不足。而复杂网络理论通过网络拓扑结构特征参数统计规律的研究，揭示了复杂系统的随机演化过程、结构稳定性及故障动态传播特性,这对于研究分析电网的结构脆弱性及连锁故障具有极为重要的参考价值。

本文对国内外复杂网络理论与电网脆弱性分析的研究现状进行了综述分析。介绍了复杂网络基础知识，分析了小世界性以及无标度网络度分布的幂率特性；对随机网络、小世界网络与无标度网络的脆弱性进行了仿真研究，分析了电网的拓扑建模方法，并以IEEE118与UCTE电网为例分析了它们的结构复杂性；将电网的电气特性与复杂网络理论相结合研究电网的脆弱性，力争研究结果贴近电网的实际情况。

基于复杂网络理论与电网拓扑模型，本文提出了电气度与电气介数的概念及其计算方法，电气度与电气介数体现了电网的潮流特性，考虑了发电和负荷的分布对电网的结构复杂性的影响；在电网结构脆弱性静态分析法的研究基础上，引入了电网传输能力指标，通过分析八种攻击方式对多个指标的影响，表明了高电气介数的元件电网中的重要性；分析了高电气介数元件形成的原因，主要是由于电网小世界性形成的。

论文研究了电网连锁故障模型，定义了基于节点电气介数的节点负荷。提出了节点故障时负荷重分配规则，引入按概率移除节点的方法来模拟电网中节点过载的情况。并以IEEE118节点系统为例，运用MATLAB进行仿真研究连锁故障模型，对比了三种攻击策略对电网传输能力指标的破坏程度，得到电网最经济的容忍度参数。

**关键词**：复杂网络，电网结构脆弱性，小世界性，电网传输能力，连锁故障

ABSTRACT

Electricity is the main energy of society, and whether the power system is safe is related to the stability of the whole society and human life. Throughout the past 30 years of large-scale blackouts, it can be found that power system fault is random and unpredictability. Hence, domestic and foreign scholars has took part in studying the power grid security problems. Traditional power grid security analysis methods are based on the mathematical model of component, then the differential equations are solved. But they exists some shortcomings on the analysis of system dynamic behavior. While complex network theory is based on the network topology structure, it reveals the stochastic evolution process of complex systems, structural stability and fault dynamic propagation characteristics. It has a very important reference value for the research of grid structure vulnerability and the cascading failure.

The paper starts from some recent researches on domestic, foreign complex network theory and network vulnerability analysis of research status. It Introduces the basic knowledge of complex network, especially  analyses the characteristics of the small world and scale-free network. Then the vulnerability of the three network: the random, the small-world and scale-free networks are simulated respectively. After that, the method of the power grid topology modeling and the complexity of the grid structure are analyzed by using IEEE118 and UCTE as an example. Lastly it focuses on combining the electrical properties with complex network theory to study the power vulnerability in order to make the results close to the power grid as far as possible.

Based on the complex network theory and network topology model, the paper proposes the concept of electrical degree, electrical betweenness and their calculation methods. The electric degree and the electrical betweenness reflect the characteristics of power flow, considering the distribution of power generation, load and the complex structure of power grid. After the static analysis method of the power grid structure vulnerability is studied, power grid transmission ability index is introduced. By analyzing the influence of the eight kinds of attacks on multiple index, it shows the importance of components with high electrical betweenness. Lastly, the causes of the formation of high electrical betweenness elements is studied, mainly because of the power grid with small-world character.

The paper studies the cascading model of power grid and redefines the node load based on the electrical betweenness. Then it proposes a load redistribution rule when some nodes fail. The method of removing the node according to the probability is introduced, to simulate the situation that the node is overload. Finally with the help of MATLAB, the cascading failure model is simulated based on IEEE118 power grid. Comparing the damage to the power grid transmission ability results from three kinds of attack tactic, the most economical tolerance parameter of power grid is get.

**Key Words:** complex network, power grid structure vulnerability, small-world property, power grid transmission ability, cascading failure

# 目录

[第1章 绪论 1](#_Toc441753713)

[1.1 选题意义与研究背景 1](#_Toc441753714)

[1.2 电力系统的脆弱性 2](#_Toc441753715)

[1.3 国内外研究现状 3](#_Toc441753716)

[1.3.1复杂网络研究综述 3](#_Toc441753717)

[1.3.2 复杂网络在电网脆弱性研究中的应用 4](#_Toc441753718)

[1.4 课题研究主要内容与章节安排 7](#_Toc441753719)

[第2章 抽象复杂网络的脆弱性研究 8](#_Toc441753720)

[2.1 复杂网络基本特征参数 8](#_Toc441753721)

[2.2 主要模型研究 9](#_Toc441753722)

[2.2.1小世界网络 9](#_Toc441753723)

[2.2.2 无标度网络 10](#_Toc441753724)

[2.3 抽象复杂网络的脆弱性 12](#_Toc441753725)

[2.3.1 网络脆弱性常用指标 12](#_Toc441753726)

[2.3.2 仿真分析 13](#_Toc441753727)

[2.4 本章小节 14](#_Toc441753728)

[第3章 电网的拓扑建模及其结构复杂特性分析 15](#_Toc441753729)

[3.1 电力网络拓扑建模 15](#_Toc441753730)

[3.2 电网的结构复杂性分析 17](#_Toc441753731)

[3.2.1电网模型数据 17](#_Toc441753732)

[3.2.2 电网拓扑结构的小世界特性分析 17](#_Toc441753733)

[3.2.3小世界电网的节点度数分布 18](#_Toc441753734)

[3.3 节点的电气度定义 19](#_Toc441753735)

[3.4 电网的电气介数定义 21](#_Toc441753736)

[3.4.1 线路的电气介数 21](#_Toc441753737)

[3.4.2 节点的电气介数 22](#_Toc441753738)

[3.4.3 电气介数计算流程 23](#_Toc441753739)

[3.5 本章小结 24](#_Toc441753740)

[第4章 基于静态分析法的电网结构脆弱性研究 25](#_Toc441753741)

[4.1 电网结构脆弱性研究方法 25](#_Toc441753742)

[4.2 元件蓄意攻击策略 25](#_Toc441753743)

[4.3 电网结构脆弱性指标研究 28](#_Toc441753744)

[4.3.1 电网结构脆弱性评估常用指标 28](#_Toc441753745)

[4.3.2 电力系统的电网传输能力指标 29](#_Toc441753746)

[4.3.2 电网传输能力指标仿真与分析 31](#_Toc441753747)

[4.4 静态分析法的仿真与分析 32](#_Toc441753748)

[4.4.1 仿真流程及相关算法 32](#_Toc441753749)

[4.4.2 仿真结果分析 34](#_Toc441753750)

[4.5 高电气介数的节点与线路的重要性 37](#_Toc441753751)

[4.6 本章小结 39](#_Toc441753752)

[第5章 基于复杂网络理论的电网连锁故障研究 40](#_Toc441753753)

[5.1 传统电网连锁故障模型 40](#_Toc441753754)

[5.2 改进型电网连锁故障模型 41](#_Toc441753755)

[5.3 算法流程 44](#_Toc441753756)

[5.4 动态分析法的仿真与分析 46](#_Toc441753757)

[5.5 本章小结 47](#_Toc441753758)

[第6章 结论与展望 48](#_Toc441753759)

[6.1 研究结论 48](#_Toc441753760)

[6.2 研究展望 49](#_Toc441753761)

[致谢 50](#_Toc441753762)

参考文献 51

附录 54

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 55

# 第1章 绪论

## 1.1 选题意义与研究背景

随着时代的进步，现代化水平的不断提高，电力系统作为国民生计的一个重要行业，其运行可靠、经济、稳定以及安全越来越重要。近年来，电网已快速发展成为最复杂，最广泛的人造技术网络，带给人们电能的同时，但也出现了很多由于局部故障而导致数千里外的区域乃至整个网络全部崩溃的现象。

近三十年来，全球各地发生了很多大面积电力系统瘫痪事件。国内，。近几年影响最大的停电事故要数零八年一月的冰冻雪灾了，当时我国的大多数经济发达地区，其中包括华南，华东地区均受到大面积的停电灾害。从灾害发生到次月下旬，这些地区也因为此次灾害造成了巨大的经济，能源损失，不少电力设备需要重建，还影响了人们的日常生活用电，影响的人数达2亿，相当于一个巴西国家的人口。据调查统计，有些偏远地区的人们持续停电天数最多达十多天。国外，1987年曾在法国科尔德迈城市发生了大面积停电故障，其中一个原因是其中一台发电机已失效，而高负荷的电能需求使其它发电机的部分元件电力设备发生过流保护引起跳闸而退出运行，导致该地区发电装置尽数失效。该事故的根本原因是城市的电能需求大于供应。2003年，美国与加拿大也同样发生了“8.14”大停电事故，该事故就是俄亥饿州的一条输电线发生跳闸，负荷转移到相邻的其它线路上。短时间内负荷大量转移，系统震荡和摇摆，最终导致电压崩溃，大量元件级联发生故障，结果受影响人数达5千万。

此类停电事故的时常出现，引起人们开始思考其中的原因以及如何降低其发生的概率，达到零概率事故的理想状况。电网“脆弱性”概念也应运而生[[[1]](#endnote-2)], [[[2]](#endnote-3)]。从大多数停电事故的原因可以得出：刚开始的电力系统故障是很小的，由于电网的“雪崩效应”，电网系统的故障范围不断扩大，最终导致大面积停电[[[3]](#endnote-4)], [[[4]](#endnote-5)]。电网安全性课题主要包括以下几个方面：电网的静态故障、大面积停电连锁故障原理、电网综合安全指标等等。希望通过研究，为工作人员设计与规划电力线路提供可靠安全的方案，并实时评估当前电网安全状态。

近10年，复杂性科学，特别是复杂网络，吸引了无数国内外学者投入其中，并广泛应用于物理，生物，电路等学科。该学科是当代复杂性科学发展的前沿领域之一。基于目前复杂网络学科的成果理论，电网脆弱性的研究热点主要包含大面积停电的故障传播原理，电网系统宏观复杂性以及脆弱性研究。

## 1.2 电力系统的脆弱性

在生态、计算机网络和电力系统等诸多领域的相关研究中经常出现脆弱性(Vulnerability)。一个综合复杂系统及其各个组成部件容易受到破坏，缺乏抵抗或无法正常恢复到初始状态的能力，“脆弱性”正是描述系统的这类现象的概念。尽管最近学术界已有一些关于电力系统脆弱性的大致“概念”。但目前业界还未给电力系统脆弱性公认的定义，也没有一个统一的分析标准。最早的相关研究是在1994年Fouad教授与他的学生提出电网脆弱性，他们在研究神经网络暂态能量函数的基础上，对电网的脆弱性进行了理论定量分析[[[5]](#endnote-6)]。接着，学者[[[6]](#endnote-7)]从一个系统的视角引出了一个全新的概念——复杂系统脆性。通常地，一个复杂系统由多个具有非线性作用的子对象组成，而且具有高度敏感与不可逆性；系统在高层次上涌现出的全新特征，部分是由于子系统在低层次发生了复杂的相互作用。由于系统内的各个部分具有强耦合性，因此不能将整个系统简单地分为若干个小部分独立研究，再把整合各个子系统的信息与数据以更好地理解系统的整体信息。复杂系统的脆性概念具体定义：假设诸多子系统*Si*组成了一个完整的复杂系统*S*，外部环境破坏或人为失误使*Si*系统故障，经过故障传播扩散至整个系统导致系统几乎毁坏。接着，在电力领域卓有建树的学者们开始从系统、宏观角度研究电力系统的脆弱性[[[7]](#endnote-8)],[[[8]](#endnote-9)]。电网历来就是一个典型的复杂系统，从网络角度来看，电力系统由节点与边组成，同时也表现出高维、时变、非线性等特点。对于大规模的电网，还有大范围时空的复杂特点，这也相应地提升了其分析难度。传统的电网安全、可靠性评估方法由于未把电力系统的随机性考虑在内，因此无法对整个电力系统安全状况进行实时地监控。所以我们完全可以引入复杂系统理论对电网大规模故障进行探索。

电网脆弱性概念是由其可靠性衍生得到的。具体概念为：整体系统受子系统故障的敏感性，而且子系统极易受外界因素影响。其主要分为两类：系统脆弱性、元件脆弱性。由于人为因素、设计错误或内部故障而使整个电网存在大面积坍毁的潜在危险，这种情况称为系统级脆弱性。此类隐患往往是在真实电网发生实际故障的时候才能表现出来，我们以发生故障后电网还能否可以正常稳定地运行，并为相应区域的人们供给充足的电能作为评价依据。电力系统中的个别易发生独立故障的薄弱元件称为元件级脆弱性。我们无法用人为主观经验来评判它们的脆弱性，而是需要对各个元件一旦破坏对电力整体系统产生的影响程度进行客观地分析与评估。这样，运行调度人员和电网规划人员通过对电力系统统薄弱环节的准确评估，在对电力系统稳定性分析前找到工作重点，做到游刃有余，也使他们从定量角度对整个系统的脆弱性问题有了更深的认识[[[9]](#endnote-10)],[[[10]](#endnote-11)]。通过电网脆弱性的评估，能从宏观的角度分析电网的安全状态，将其量化后得到其脆弱性程度指标。这样，电力工作人员可以对关键的元件、环节加强监控、保护，提升整个电网的鲁棒性。由于电网的结构、功能复杂性，越来越多的极具挑战性的课题逐渐被提出。

## 1.3 国内外研究现状

### 1.3.1 复杂网络研究综述

复杂网络理论是把一个复杂系统抽象为网络，将复杂系统内的各个个体视为网络的节点，将个体之间的联系抽象为复杂网络中连接各个节点的边，由此建立起一个复杂网络模型。在此基础上，从复杂网络拓扑结构出发，运用图论、统计学理论对整个复杂系统进行局部、全局地研究。经过近二十年发展，复杂网络的建模、分析方法，可用来描述系统内各个个体间的联系与研究系统的集体行为，并且该方法已成功应用于各个领域。学者们发现实际生活中大多数系统都可以建模为复杂网络，譬如人与人之间的社会关系网络[[[11]](#endnote-12)]、科学家的合作网[[[12]](#endnote-13)]、航空网络[[[13]](#endnote-14)]、交通网络[[[14]](#endnote-15)],[[[15]](#endnote-16)]、石油价格波动网络[[[16]](#endnote-17)]等，它们都组成某类复杂系统，同时也存在对应的网络关系。

目前复杂网络的研究热点主要包括：网络拓扑结构的数学模型；网络的参数特征研究；网络的动态演变过程[[[17]](#endnote-18)]；网络的传播动力学[[[18]](#endnote-19)]等等。近年来，复杂网络研究领域内影响最大的研究成果是小世界网络[[[19]](#endnote-20)]及无标度网络[[[20]](#endnote-21)]。这两种网络广泛存在于现实世界中，如人际社会关系网络、电力系统网络、神经细胞网络、交通网络等等，研究这两种网络的理论，具有很高的实际意义。

关于小世界网络，最早在1998年6月，瓦茨(Watts)和斯绰伽兹(Strogatz)在Nature上发表了影响很大的论文[[[21]](#endnote-22)]，提出了小世界网络模型（WS模型），并举例了现实生活中的许多网络都具有“小世界性”，即平均距离比规则网络小得多，而聚类系数比随机网络大得多。

随后，巴拉巴斯(Barabasi)和阿尔波特(Albert)于1999年在Science上发表了同样具有影响巨大的论文[[[22]](#endnote-23)]，提出无标度网络模型(BA模型)，其遵循幂函数的度分布()，引起学术界很大反响。无标度网络是通过网络增长性与择优连接性形成的,不停地引入新的节点到网络中，并且新加入的节点较大概率地与网络中节点度数较大的节点连接，产生“富者更富”的现象。以上两项成就是首次将统计物理学的思想、方法和工具引入到网络研究中，带动起很多物理学研究人员进行复杂网络的研究。具体复杂网络研究历史进程见表(1.1)：

表1.1 复杂网络研究历史进程

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 时间（年） | 相关人物 | 事件 |
| 1936 | Eider | 七桥问题 |
| 1959 | Erds和Renyi | 随机图理论 |
| 1967 | Milgram | 小世界实验 |
| 1973 | Granovertter | 弱连接的强度 |
| 1998 | Watts和Strogatz | 小世界模型 |
| 1999 | Barabsi和Albert | 无标度网络 |

### 1.3.2 复杂网络在电网脆弱性研究中的应用

经典电力网络分析是基于基尔霍夫电流电压方程、固定的拓扑结构。研究已形成的较为完善的体系[[[23]](#endnote-24)]。而从复杂网络角度考虑电网，它可以简化成一个由节点(母线)和边(线路)构成的复杂系统。已有不少研究[[[24]](#endnote-25)],[[[25]](#endnote-26)]在应用复杂网络理论研究电网问题上取得成绩，却未形成实际应用。主要原因如下：该理论摒弃了传统的经典还原论的主导思想。虽然能建立包含关键系统设备的复杂系统模型，却无法详细的包含电机系统机组、负荷、控制系统模型等环节。所以一直在业界颇受争议。随着小世界网络和无标度网络的出现，引起了运用复杂网络的观点来探讨电网脆弱性与大面积停电级联故障机理的热潮。

目前，基于复杂网络理论的电网脆弱性研究主要集中在：提出全局网络与个体元件脆弱性指标，并提供元件保护策略以减小大停电事故的概率；基于已有的无标度、小世界网络理论基础，从复杂网络拓扑结构视角建立电网静态、动态拓扑模型，从而进行电网脆弱性分析；研究电力系统自组织性以及连锁故障模型。

现有的大多数电网脆弱性研究只在电网的复杂网络结构模型的基础上进行拓展分析。然而，真实电网的脆弱性既与网络本身的物理拓扑结构相关，也与当前的运行状态相关。因此，必须理解网络拓扑结构与网络运行状态之间的不同和相互联系。综合考虑以上两个因素，对电网的静态、级联故障脆弱性的研究是当前该领域学术上的发展趋势。在国内，魏震波, 刘俊勇等[[[26]](#endnote-27)]综合了电网的结构特征与电气元件的状态，定量地评估电网脆弱性。方法如下：首先引入电网结构与电气状态脆弱性状态因子，然后通过简单地相乘得到电网脆弱性定量指标。但是该方法却还未在实验中得到数据验证，更未应用于实际电网。电力系统是一个高度物理耦合的复杂系统，单个元件间存在非线性作用并影响整体系统，所以该方法不够周密。结合发电—负荷电能传输路径的电气参数的电网脆弱性评价理论不久后就被提出[[[27]](#endnote-28)]。该理论中提到的路径信息包不但考虑了静态拓扑，而且可以在满足电网电气方程的基础上体现出整个系统的运行状况。此类路径的部分电气信息能够定量评价出电网的脆弱性。由于电网的加权网络模型是假设电网的能量是按最短路径传递的，这与真实电网的物理规律不符。丁剑[[[28]](#endnote-29)]在对电网脆弱性分析时引入了二维电气状态平面拟合理论。具体思路：电网中某一线路退出运行，故障经过传播，引起了电网的级联故障，计算最后的电网最大连通子集、网络介数以及退出运行线路的潮流值，最后将三个状态参数进行二维平面综合叠加。该方法尽管能针对支路结构与其上的潮流值不同进行定性地分析，但是在电网中各个子元件脆弱性评估上还是无法定量实现，而且该方法存在数学推导的缺陷。徐林在文献[[[29]](#endnote-30)]中利用基尔霍夫电压电流方程改进了元件的介数(betweenness)*Be*的定义。他提出电能传递时电网中的每个元件都有份额，其具体值与电网的拓扑结构、“发电—负荷”节点对分布有关。在一对“发电—负荷”节点对间注入单位电流后，求出各条支路上引起的电流。元件的单位电气介数能直接体现出相连线路的分流大小，同时也考虑了发电量及负荷的不同。文献[[[30]](#endnote-31)]利用数学广义特征根的工具对电网脆弱性分析，通过该方法计算节点电压灵敏度时对节点的电压进行修改以更贴近真实情景，进而提出了支路脆弱性与电网母线评估指标。

电网分析研究方面，无标度(BA网络)、小世界(SW 网络)模型得到广泛应用。在分析北美电网的脆弱性时，文献[[[31]](#endnote-32)]基于BA网络，蓄意破坏电网中的母线，然后分析电网输电状态的影响程度。在其仿真过程中，得出：少量高负荷节点的不断移除，电网立即呈现瘫痪；移除总节点数的4%高负荷节点后，该电网的全局连通指标减小60%。文献[[[32]](#endnote-33)]研究了电网复杂网络拓扑结构有无向网络模型，分析了三种建模方式：双向、前向和后向网络模型。通过对电网的平均路径长度，连通度损失，失负荷比例以及过负荷的线路数分析，得到结论：相比较于单向图，双向图可以容纳反向功率流，从拓扑结构上增加了节点间的路径，提高了整个网络的可靠性与效率。

另一方面，学者们除了对电网的静态拓扑模型、静态脆弱性以及节点重要度研究外，对电网连锁故障的动态分析研究非常感兴趣。电网连锁故障分析方法是在静态分析法的基础上考虑了初始故障元件退出运行后带来线路潮流分布变化。文献[[[33]](#endnote-34)]分析了美国西部的电网，由仿真计算可知该地区的电网母线分布非常不平衡。如果该电网容忍度参数大于1.4时，随机移除该电网的母线，整个系统还是能表现出良好的运行状态与鲁棒性。但是如果按节点介数移除电网母线，其将产生巨大的级联故障。当容忍度参数小于1.4时，电网面对随机移除策略都会表现出脆弱性。所以电网自身的容忍度参数密切影响着电网的脆弱性。文献 [[[34]](#endnote-35)]在研究意大利国家级电网时也得出了同样的结论。尽管类似研究很多应用很多，但大多数结论还是基于沿网络最有效路径计算电气介数得出的。

从理论角度理解电网的连锁故障机理有助于预防电力系统事故，因此一些学者们借助于复杂网络理论分析工具，能够系统、宏观地研究电网的可靠性。目前，在研究上广泛采用的电网大面积停电的电网复杂网络模型主要有：隐形故障、加权网络、OPA、级联故障动态等模型。第一种模型主要考虑了支路上的有功功率对电网的影响。徐立新等人[[[35]](#endnote-36)]将支路与变压器的阻抗模值作为边权重值，以电网节点中心性作为评估指标，提出了电网连锁故障模型。仿真IEEE118系统，验证：相比较于无权网络结构，该模型更能反映节点中心性，更符合真实电网。文献[[[36]](#endnote-37)]引入一个新的分权分流规则，一旦线路断开，按一定的权重比例进行重分配，具体比例计算公式如下：，*ki*、*kj*分别为线路两个端点的度，为可变参数。进一步研究还得出，当参数=1时，该加权网络模型的鲁棒性最强。同样地，发现对于一般的小世界、无标度网络这个结论也成立。该文通过对几类复杂网络的最大连通子集的分布统计规律观测，发现其连锁故障呈幂率特性。文献[[[37]](#endnote-38)]提出了一种电网的改进型加权复杂网络模型，基于直流潮流方程计算出各个电网母线节点的功角，再以母线的功角偏移比例代替母线的负荷，然后基于传统加权网络模型进行多次迭代，评价电网的网络平均效率，得出该模型在评估电网连锁故障脆弱性时更加有效。OPA模型包含内外两层循环，考虑了电网自组织能力的特点[[[38]](#endnote-39)]。丁雪阳[[[39]](#endnote-40)]在已有的OPA模型上引入了风险概率理论，创新了一种电网复杂网络模型，此模型同样有内外循环。内循环基于最优潮流解，能够表现线路的过载率及故障；外层循环过程由负荷增长与线路扩充组成，其中的线路扩充规则符合风险理论。文献[[[40]](#endnote-41)]在传统的OPA模型基础上引入了*N*-1准则，并研究了此准则对模型的影响。CASCADE级联动态模型基本思想[[[41]](#endnote-42)]：初始化电网中元件的数量、负荷，故障元件按一定比例重分配到其它元件。定义归一化后故障元件个数的分布函数，分析故障后电网的规模、频率的概率分布变化，讨论输电线路过负荷给整个系统带来的级联故障。文献[[[42]](#endnote-43)]基于电能沿“发电—负荷”路径传播的前提提出如下模型：发电、负荷节点的初始负荷按网络平均效率与负荷节点的容量计算，节点一旦故障就移除，其负荷按潮流相反方向重分配到其它节点，若其它节点因此过负荷则移除，如此反复循环直到达到新的稳定状态。在电网连锁故障可视化方面，文献[[[43]](#endnote-44)]首先结合复杂网络与电力潮流提出了一种新的网络模型以及一种新的评价指标——风险图。该文献还研究了一种新型的攻击策略，该策略比传统基于负荷、节点度的蓄意攻击更具破坏性。运用该理论对节点系统IEEE57与IEEE118进行测试，能够有效地找到最强的攻击目标集合。

## 1.4 课题研究主要内容与章节安排

本课题主要研究的是根据复杂网络理论，研究电力系统的复杂性和脆弱性。首选对复杂网络理论有较深的研究，尤其是对小世界网络和无标度网络。在此基础上，选取IEEE118节点系统和UCTE电网为例，建立复杂网络模型，针对该复杂网络模型分析它们的网络特征参数，并验证了电网的小世界性。接着，基于网络的传统度、介数概念，提出了包含电气特性的电气度、电气介数概念。根据网络平均效率并结合线路潮流，提出了电网传输能力指标，并以IEEE300，IEEE118为例，验证该指标兼顾了网络拓扑结构与电气特性。然后构建电网的蓄意攻击策略，通过六种蓄意攻击和两种随机攻击策略对IEEE118节点系统进行静态分析。最后建立基于复杂网络的电网连锁故障模型，仿真并分析电网的临界容忍度。

基于以上内容，本文分为六章进行论述：

第一章 绪论。阐述了研究意义与研究背景，介绍了复杂网络的研究状况以及在电网脆弱性研究中的应用。

第二章 复杂网络理论。介绍了复杂网络的基本知识，着重分析了小世界网络和无标度网络，并以度攻击为例仿真分析了几类复杂网络的脆弱性。

第三章 电网的拓扑建模及其结构复杂特性分析。首先介绍了电网的复杂网络建模算法并分析电网结构的复杂性，然后提出了电气度，电气介数概念。

第四章 基于静态分析法的电网结构脆弱性研究。首先分析了常用电网指标，然后提出了电网传输能力指标。接着仿真分析了电网的静态脆弱性。最后分析了高介数元件的重要性。

第五章 基于复杂网络理论的电网连锁故障研究。首先介绍了传统电网连锁故障模型：有效性能模型、加权网络模型。然后提出了基于邻节点负荷重分配原则的连锁故障模型。最后以IEEE118节点系统为例，运用MATLAB进行仿真研究连锁故障模型，对比了三种攻击策略对电网传输能力指标的破坏程度，并且得到电网最经济的容忍度参数。

第六章 结论与展望。总结研究成果，对未来进一步开展的工作做了展望。

# 第2章 抽象复杂网络的脆弱性研究

## 2.1 复杂网络基本特征参数

一个无权无向的抽象网络***M***=(***V****,****E***)，***V***是节点集合，***E***是边集合。复杂网络理论中一般由以下4个基本参数描述网络整体、局部特征：

(1) 特征路径长度(*L*)

*dij*定义为连通网络节点*i*和*j*之间一条最短路径所覆盖的边数，*L*定义为所有节点对之间最短距离的均值。



其中，*N*为网络中节点的数量。

(2) 节点度和节点度累积分布

节点的度数定义为与该节点相连的所有节点的数量。网络中出现节点度为*k* 的节点个数所占总节点数的比例为节点度分布。但在实际分析中，一般采用节点度累积分布，即。

(3) 聚类系数(*C*)

聚类系数是一个表征邻接点间联系紧密程度的特征参数。假设某个节点*i*的节点度为，则相邻节点之间的边数最大为，假设*ki*个相邻节点之间有*ti*条边，则节点*i*的聚类系数定义为：。求平均值后得到聚类系数：



(4) 介数(betweenness)和介数分布

网络中的介数定义为假设两个节点间的信息总是沿着节点间最短路径传播的，通过某个节点或边的最短路径次数可以表征该节点或边在信息传播过程中的重要性。最短路径通过该节点或边的次数越多，该节点或边对整个网络的贡献越多，其重要性也越高。节点介数和边介数定义为：



其中，是节点*i、j*间最短路径的数量，是节点*i、j*间最短路径通过节点*v*的数量，是节点*i、j*之间最短路径中通过边*e*的数量。

## 2.2 主要模型研究

### 2.2.1 小世界网络

人们对图的认识首先是规则网络，规则网络包括完全连接网络、星型网络和最近邻网络等，每个节点在图中的地位都是对等的，每个节点的度数均相同，重要性都平等。到了20世纪50年代，进入随机网络的研究，网络中任意两个节点相连的概率为*p*。随着现实生活中各类网络的出现，落后的规则网络、随机网络模型无法满足需求了，新的复杂网络模型就出现了。

瓦茨(Watts)和斯绰伽兹(Strogatz)提出的小世界网络（WS网络）的构造过程：首先构建一个最近邻连接的规则网络，然后以概率*p*随机断开网络上一条边，并将此边随机重连到网络中某个节点。重连规则是网络中任意两个节点相连的边数至多为1，同时不能出现自环现象。

当*p*=0时，则为最近邻规则网络。随着*p*的变大，更多的边被随机断开并重连，0<*p<*1，网络演变为小世界网络。直到*p*＝1演变为随机网络。具体演变过程如图(2.1)所示。可以看出，规则网络的聚类系数高而平均距离大。随机网络的聚类系数小，网络间的平均距离近。而小世界网络则兼具高聚类系数与近节点平均距离(相比于规则网络)的特点(公式2.4)。



其中， ，*k*是小世界网络的平均节点度，即。

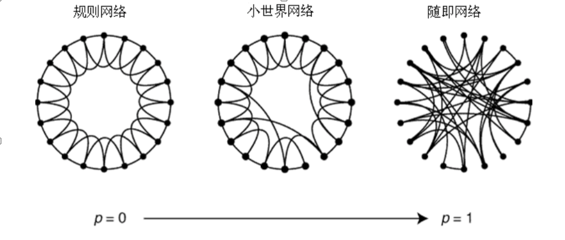


图2.1 小世界网络构造过程（图片来源：网络）

从研究小世界网络的形成过程可以看出，如果一个最近邻网络中的边被随机断开再重连的过程中产生了少量的长程连接节点是小世界特性产生的原因。这些长程连接的节点具有两个特点：

(1) 很多节点对通过这些长程连接而形成最短路径，它们的介数一般比较高；

(2) 移除这些长程连接的节点后，网络将会被分成几个部分，导致其连通性、平均效率显著下降。

由于规则网络先随机断开再随机选择节点对重连，反复进行多次可能产生多个不连通的子区域网络——“孤岛”。因此，随后的Newman和Watts提出另一种小世界模型(NW模型)，该模型能广泛应用于电网、交通、生物等研究。NW网络的形成过程是将WS模型中的“随机化重连”改为“随机化加边”，即在最近邻网络模型基础上随机重连一个节点对。

下面进行算例分析，取节点数*N*=500，初始规则网络的度*K*=6，重连概率*p*=0.2，取20次仿真计算结果的平均值作为最终结果，表2.1可验证公式(2.4)。

表2.1 小世界网络特征参数计算结果表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 网络 | 平均节点度*k* | *Lactual* | *Lrandom* | *Cactual* | *Crandom* |
| SW | 4 | 15.17 | 3.82 | 0.47 | 0.02 |

### 2.2.2 无标度网络

巴拉巴斯(Barabasi)和阿尔波特(Albert)提出的无标度网络（BA网络）同样具有威望。该模型首次强调了网络模型中的两个特点：增长与择优。“增长”再一次解释了复杂网络是不断扩大的复杂系统，如某个社交群都有新的成员加入，电网中有新增的变电站和用户；“择优”表现为新元素对网络中的节点依附性具有非平衡性，新的节点更倾向于与具有较高的连接度的节点相连。比如新人加入某个社交群，更倾向与群中的活跃分子产生交流，这种现象称为“马太效应”。无标度网络的研究主要集中在网络的鲁棒性与脆弱性，对网络的节点或边实施攻击，观测其相关性能的变化，该研究成果作为判断网络性能的参考依据，广泛应用于现实网络中。

BA无标度网络模型的构造算法如下：

(1) 初始化阶段：初始m0个孤立节点，产生一个新的节点n0，n0连接其中一个孤立节点上，与节点*i*相连的概率为：



重复该方法，直到网络内的所有节点均不孤立。初始化结束，进入正式增长阶段。

(2) 增长阶段：每次引入一个新的节点，而且连接到m个已经存在的节点上，其中。

(3) 优先连接特征：新节点与已存在的节点*i*的相连概率按式（2.2）计算所得。

无标度的两个特征:

(a) 幂律分布特征，跟实际复杂网络中的故障规模与发生概率的分布特征类似。

(b) 幂律分布的网络存在一定的自组织特性，与现实的复杂系统故障发展过程中的临界状态的突变现象类似。

BA网络经过*t*步后，产生了*mt*条边，*N=mt+m0*个节点的网络。

BA网络的平均路径长度为：



聚类系数：



网络度分布：



由公式(2.8)可知BA网络的度分布近似呈幂率分布，幂指数为-3。此外还有一种普遍的研究方法：基于计算机的数值模拟研究。如图2.2，为m=3，添加至节点数*N*=2000时的BA网络的节点度分布。由于BA网络均依赖于一定概率而构建得到的，所以此处取30次仿真计算结果的平均值作为最终结果。

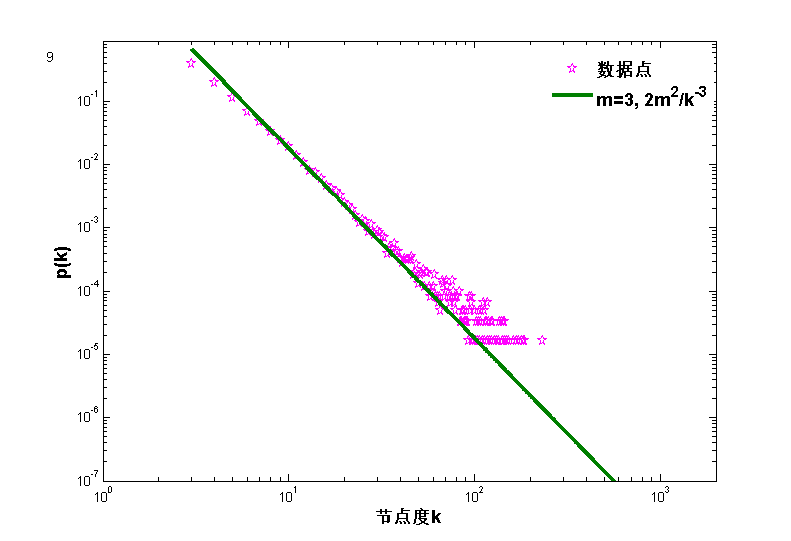


图2.2 BA无标度网络节点度分布

## 2.3 抽象复杂网络的脆弱性

### 2.3.1 网络脆弱性常用指标

为评估复杂网络的当前的状态，衡量网络的脆弱性指标是其核心，本文总结出抽象复杂网络中常用的衡量指标：

a. 最大连通子集规模S：当网络中某些节点或边由于外界干扰而退出运行时，网络被解裂成若干个子网络，节点数最多的子网络的节点数为最大规模数*S*；

b. 平均路径长度*L*：具体定义见本章2.1；

c. 网络平均效率*E*：由于非连通的网络的某些节点对路径的长度出现无穷大的情况，而且研究网络的脆弱性时，这又是不可避免的，因此用网络平均效率*E*代替*L*。具体定义：节点间传输单位能量，沿着最短路径传播时的效率，该指标用于描述整个能量传递的效率，它是一个全局指标。计算公式如下：



其中，*N*为节点个数，*N(N-1)*为所有的节点对个数，*dij*为节点*i、j*间的最短路径距离，若节点*i、j*不可达，则。

### 2.3.2 仿真分析

仿真分析以下三个网络：

* + - 1. 随机网络：节点数N=200，平均节点度K=4；
      2. 小世界网络：节点数N=200，K=4，重连概率p=0.2；
      3. 无标度网络：节点数N=200，K=4。

本文针对这三个网络进行蓄意破坏——移除前20%节点度最大的节点。

评估指标：最大连通子集，网络平均效率。为消除量纲影响，对指标归一化处理。公式(2.9)中的任意节点间的最短路径长度求解算法有Floyd-Warshall算法，时间复杂度为。仿真结果见图2.3。

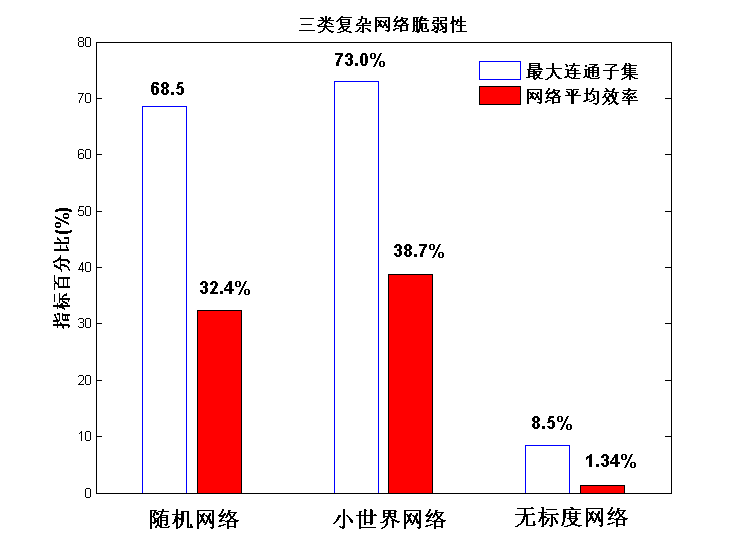


图2.3 三类复杂网络脆弱性

由图2.3表明，无标度网络面对节点度蓄意攻击，指标急剧下降(下降至小于10%)，表现出强烈的脆弱性，也反映了该策略能够为无标度网络迅速找到关键节点。小世界网络面对节点度攻击时鲁棒性最强，随机网络次之。这也从一方面也是目前很多实际复杂网络要设计成小世界网络的原因。

## 2.4 本章小节

本章主要介绍了复杂网络的基本知识，分析网络中的各个特征参数及其计算方法。再着重介绍了复杂网络中极具代表性的两类网络：小世界网络与无标度网络。小世界网络平均路径小，聚类系数大。无标度网络的度分布呈幂律分布特征。最后用MATLAB实现三种网络的构建，并以节点度攻击为例，分析了三种网络的脆弱性，得出结论：面对“度”攻击策略，小世界网络的表现出明显的鲁棒性，无标度网络脆弱性最强。

# 第3章 电网的拓扑建模及其结构复杂特性分析

电网就是典型复杂网络系统。基于复杂网络理论分析电网结构复杂性与脆弱性，首先需要把电网抽象成节点与边相互连接组成的图，从复杂网络的角度建立电网拓扑结构。文献[[[44]](#endnote-45)],[[[45]](#endnote-46)]中提出了一种加权网络的简单拓扑模型：将变电站、发电厂和中间电气连接点作为复杂网络的节点；输电线或变压器抽象成网络支路。

## 3.1 电力网络拓扑建模

传统简单的抽象网络都是无权无向的网络，即所有网络连边权重均为单位1，能量或信息既可以从节点*i*向节点*j*，也可以从节点*j*向节点*i*传递。但是电网中的各个边线路均各有阻抗，故本文选用无向有权网络对进行建模分析。

本文以有权无向的抽象网络为基础，以传输线路的阻抗值为网络边的权值，代表节点间的电气距离，更符合电网的真是情况。定义形成矩阵[*mij*]，电网中的母线是网络的节点，如果节点*i*与*j*之间有线路直接连接则，否则，如式(3.1)。经过如此简化，电网简化成为无向有权的连通图。

*i, j*之间无边直接相连

*i, j*之间有变直接相连



由于本文仅考虑线路上的电抗值，而且,所以，其中表示节点*i，j*间的电抗值。如果某两个节点间存在多条边，则电抗并联公式合并为一条边。即必须保证只有一条边连接两个节点。此外为了便于分析，本文采用直流潮流计算，该方法可快速计算线路上的潮流值，并且也能保证一定的精度，能保证误差在允许范围内。根据直流潮流网络模型对电网拓扑结构进行抽象和简化：

(1) 研究只限于高压输电网，配电网不作考虑；

(2) 电路中的节点只包括变电所、发电厂以及中间电气连接点，大地(零点)不做考虑；

(3) 输电线、变压器支路都抽象成复杂网络的边，所有的边都为无向边；

(4) 仅考虑电网传输线上的电抗值，其余电气参数不做考虑；

(5) 合并同杆并架的输电线，将合并后的电抗值作为线路的权值。

经过上述简化处理后,可以得到一个有*N*个节点，*L*条边的有权无向简单的复杂网络。在一个简单的图中，只有关联矩阵，不存在边权重，所以模型中的边权值均为1。而本文的模型将线路的权值单独存储为一个关联矩阵，线路权重为线路的电抗值。此模型在的拓扑结构真实反映了线路的实际特征，更贴近电网的实际情况。

由于本文主要考虑电网中的有功功率，因此电网中的母线抽象为三类节点：发电节点、负荷节点、中间电气连接点。因此给定一个电网，通过以下算法，可得到其拓扑结构中的各个节点、边、节点类型和描述网络结构的关联矩阵，完成电网拓扑建模：

1. 读入母线节点编号、线路始末节点编号与电抗值，变压器节点与线路信息；
2. 将220kv以上的变压器支路等效成线路，并合并双回线路的电抗值，变压器支路按其等值电路建立模型，阻抗值＝支路阻抗值/变压器匝比；
3. 确定边权重矩阵以及对应的节点导纳矩阵；
4. 对于每个母线，计算它的等效输出功率，其中*PG*为母线相连的发电机输出的有功功率，若无发电机相连则为0，*PL*为与母线相连的负荷吸收的有功功率，若无负荷相连则为0。

发电节点

中间节点

负荷节点



所以根据上述算法，完成一个完整电网拓扑模型的建立：拓扑结构的关联矩阵表征了电网中节点间的连接关系，各类节点扮演着各自的角色，完成了电能的传输任务。

为了便于接下来分析，本文将电网数据提取成含有三个数据：电网节点导纳矩阵*B*；电网的节点注入功率向量*P*；包含线路编号、电抗、最大承受功率的线路矩阵。节点导纳矩阵类似于网络中的邻接矩阵，已经包含了线路的连接关系以及边权重信息，它是一个矩阵[*Bij*]：



其中，为线路*lij*的电抗值。

## 3.2 电网的结构复杂性分析

本章中选用IEEE标准测试系统中的IEEE118节点系统和欧盟跨国电网UCTE电网系统作为理论研究对象，按照上述建模原则，运用MATLAB软件实现上述算法，对上述两个系统拓扑抽象，系统建模以及统计特征分析。

### 3.2.1 电网模型数据

表3.1 IEEE118和UCTE电网的拓扑结构基本参数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电网 | *N* | *L* | *NG* | *ND* | *NT* |
| IEEE118 | 118 | 179 | 15 | 93 | 10 |
| UCTE | 1254 | 1944 | 373 | 877 | 4 |

注：表中*N，L，NG，ND，NT*节点数、总边数、发电节点数、负荷节点数、中间节点数。

根据上表，从节点数、边数可以看出UCTE是大型网络，而IEEE118电网的规模小的多。但是两个电网的各类节点所占比例相近，负荷节点的比例最大，传输节点的比例最少。负拓扑模型中，电网总输电任务为发电节点到负荷节点的路径个数，因此UCTE电网的输电任务为，而IEEE118节点系统的任务量仅为。

### 3.2.2 电网拓扑结构的小世界特性分析

Watts在提出小世界网络的同时，最早验证美国西部电网结构是小世界复杂网络。本文将IEEE118与UCTE电网作为数据源，通过与美国西部电网的拓扑数据对比，考察它们的小世界特性、度分布特性。

表3.2 美国西部电网、IEEE118以及UCTE电网的拓扑特征参数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电网 | 平均节点度*k* | *Lactual* | *Lrandom* | *Cactual* | *Crandom* |
| 美国西部电网 | 2.670 | 18.70 | 12.4 | 0.08 | 0.00005 |
| IEEE118 | 3.034 | 6.31 | 4.30 | 0.17 | 0.025 |
| UCTE | 2.89 | 17.29 | 6.72 | 0.11 | 0.0023 |

由表3.2可以看除，三个电网的网络拓扑结构特点有差异。按照小世界网络判据(公式2.4)，可知，这三个网络均具有小世界特性。但是它们的相差比例不同，UCTE的两个参数与对应的随机网络相差更大，UCTE网络的节点之间的联系更加紧密，而且远距离节点之间的联系也变得更加容易得多；对于IEEE118电网，节点之间的联系相对较少。

一般大型电网包含的区域多，但是每个子区域内的各个节点之间的联系比较紧密。因此，大型电网的聚类系数普遍较大。尽管聚类系数较大，但如果各个节点都只与自己周围个别的节点相连，却缺少区域间的连接。那么对于大型电网各区域之间的电能资源、用户分布非常不均匀，从电能较多的区域向电能少的区域输送电能相当费人力，财力。而如果在区域之间添加输送线路，电网的平均距离下降，电能输送的成本大大下降。所以大型电网往往具有小世界特性。

根据上述分析,IEEE118和UCTE电网在网络拓扑性质上的不同也反映出它们在能源分布与电能输送方式上的区别。IEEE118属于小电网，却电力资源丰富，因此节点间联系较少(较小 )，网络平均距离较小，与随机网络接近；UCTE电网跨越区域的电力资源和分布不均匀，需要通过多条高压输电线路输送到用户。长距离的连接，缩短了节点间的距离，提高了电网的输电效率。

### 3.2.3 小世界电网的节点度数分布

电网中的节点度的分布规律对网络的传播性能影响也很大。仍以IEEE118和UCTE电网为例，它们的节点度累积分布函数如下图3.1：

在*y*轴为对数坐标下，两个电网累积分布呈线性特征，用指数分布拟合后得到：

IEEE118： UCTE电网：

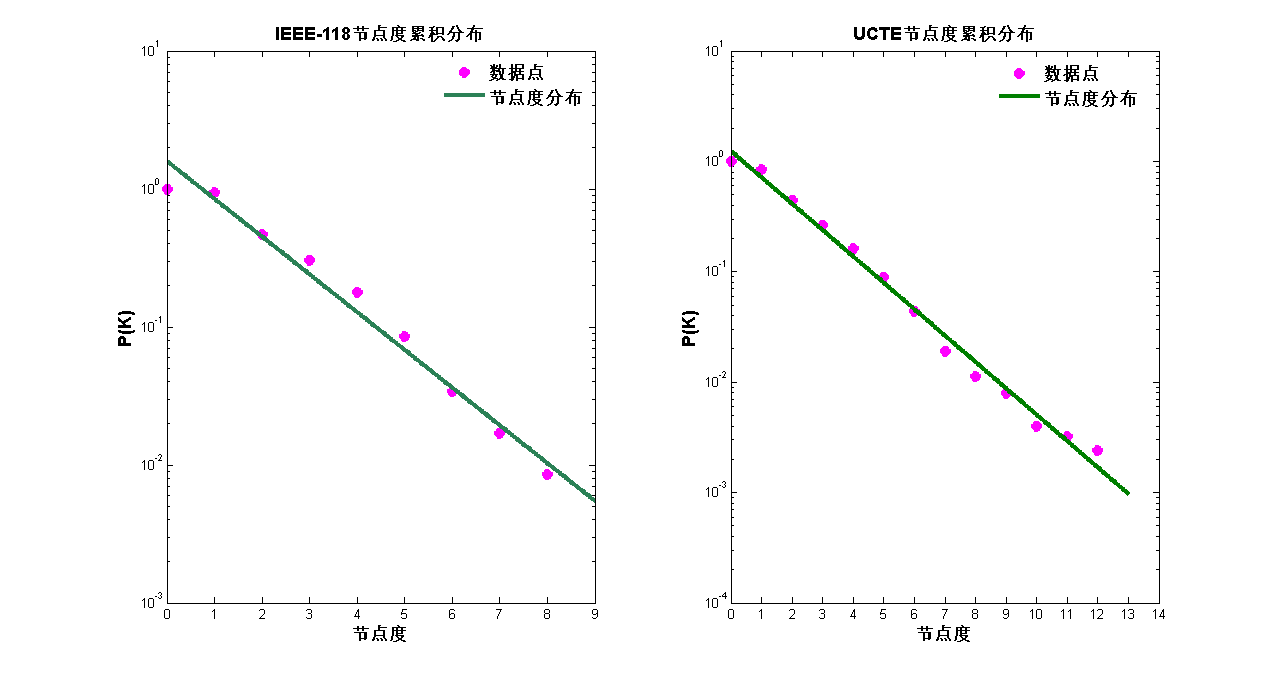


图3.1IEEE118与UCTE节点度累积分布

由上图可知两种电网的节点度累积分布成单标度特性(*y*轴为对数坐标，*x*轴为普通坐标)，其节点分布相比于无标度网络相对均衡，不存在不存在连续特别集中的“集散节点”，但部分度大的节点出现的概率比对应的随机网络高。所以这两个电网均不是无标度网络，却是稀疏网络。它们的节点、线路比较分散，每个节点的节点度相差不是很大，具有小世界特性的电网也不例外。稀疏的小世界电网的节点连接数有限，但是电能不能任意地在两个节点间传输，长距离连接线路缩短了远距离的输电距离，确保了输电效率，大的聚类系数保证了电能供应的充裕性。

此外，对比两个电网的度分布，根据指数分布函数, 为标度指数，越大，分布就越不均匀。因此IEEE118的节点度相对不均匀。

综上，根据电网的特征参数：平局距离、聚类系数以及度累积分布，可以得出IEEE118与UCTE电网均是典型的小世界网络。电网的节点度数分布表明，电网不是无标度网络，但比随机网络的分布较为不均匀，这也为电网在某种蓄意攻击下表现出脆弱性埋下了隐患。

## 3.3 节点的电气度定义

早在1978年，Freeman就提出了一个焦点的度概念是指其连接的邻节点的个数。研究复杂网络时，度是一个基本而且常用的指标，公式化定义如下：



其中，为复杂网络邻接矩阵的元素，。

而对于有权网络，节点度的概念扩展为节点的连接强度[[[46]](#endnote-47)]，公式定义如下：



其中，为节点*i，j*之间的连接强度。

以上两种定义侧重点各不同，第一种侧重于节点的连接数量，适合无权网络；第二种则考虑节点连接的强度，适合有权网络。然而，这两种只考虑单方面的度定义过于片面，为了便于解释，本文以图3.2为例：



图3.2 六节点六边网络，数值代表节点连接强度

节点A，B，E的度连接强度和均为8，但是节点B连接的节点数量是节点A，C的2倍，显然，在此网络中节点B更为重要，一旦被破坏，整个网络将解列成多个部分。因此本文综合考虑节点连接数量与连接强度，定义“广义度”概念如下：



其中，为可变参数。时，就是第一种定义；时，就是第二种定义。

对于电力网络，可用节点间的潮流大小表示节点间的连接强度。而线路潮流是有方向的，而且节点的输入总潮流大小 = 输出总潮流大小，所以本文只考虑一个方向(输出方向)的潮流大小。所以本文定义具有电气特性的节点度与节点连接强度如下：





其中，为有向网络邻接矩阵的元素，*D*为负荷节点集，为节点输出潮流的线路集，为线路*l*上的潮流大小(以直流潮流计算结果为准)。

根据公式(3.5)，本文最终定义电网复杂网络模型的电气度如下：



## 3.4 电网的电气介数定义

假设一个网络的两个节点之间的信息或能量是按最短路径传播的，节点或边通过此类路径个数越多，其在网络中的作用越明显。而在电网中，网络中的能量总是从发电节点向负荷节点输送，而且输送过程电能会在分布在整个网络上，并不是简单地按最短路径分布，电能的分布应以基尔霍夫方程为依据，所以电网的介数计算方法与抽象网络的介数计算方法(公式2.3)有所不同。

### 3.4.1 线路的电气介数

为了计算电网的电气介数，首先要求解电网的潮流值。目前潮流计算方法有直流潮流法、牛顿潮流法、高斯-赛德尔迭代法等。而直流潮流法解线性方程组，优点：速度快、不存在是否收敛问题。适用于需进行大量计算或运行条件不非常理想的情景，如静态安全分析、电力系统规划等。

*N*个节点的电网直流潮流方程为：



其中，*P*为发电母线上的输入功率列向量。*B*为简化后的电网的节点导纳矩阵，为各母线上实际电压复数值的相角列向量。*P*一定时，由式(3.9)求得所有节点电压相角, 那么支路潮流的求解方程：



其中是各个支路的有功功率向量，为各个支路的相角差向量，*A*是网络关联矩阵，最后将式(3.10)写成：



其中，是非稀疏矩阵。为矩阵的广义逆矩阵。

参考一般抽象复杂网络的介数求法(公式2.2)。得到电网模型的线路电气介数计算公式：



其中，*G*，*D*分别是发电节点、负荷节点集合；是单位有功功率注向发电节点*i*和负荷节点*j*时，线路上产生的有功功率，方向从*m*到*n*；是从“发电—负荷”节点对间传输的电能权重值，，为保证两节点*i，j*正常工作，必须取发电容量与负荷容量的较小值。

由于功率传输有方向性，因此不同”发电—负荷“节点对之间产生的功率方向可能不同，可能会出现叠加抵消的现象，因此这负荷实际电网中的线性叠加原理，也说明了公式(3.12)能够在一定程度上反映线路在电能输送中的作用。文献[[[47]](#endnote-48)],[[[48]](#endnote-49)]尽管提出了线路电气介数的定义，却是假设所有节点都注入单位电流的前提下，没有考虑实际电网发电以及负荷的分布对电气介数的影响。同时，文献[[[49]](#endnote-50)]提出的电气介数是将公式(3.12)先取绝对值再求和，忽略了线路中功率传递的方向性。文献[[[50]](#endnote-51)]通过计算电能传输因子(可由公式3.11计算得到)分别定义了正负电气介数率的方向性，取数值较大的值作为线路的电气介数，也是一种认同的方法。

### 3.4.2 节点的电气介数

对于一个无权无向网络***M***=(***V****,****E***)，节点*k*的介数为：



而对于电网而言，其节点有三类：中间节点，发电节点，负荷节点，所有的功率都是从发电节点向负荷节点传输，所以需要对上述公式修正。对于发电、负荷节点，增加一个虚拟节点*k’*，使节点*k*转换为中间节点，如图3.3所示：



图3.3 发电节点或负荷节点等效转换图

对于发电节点，所有从*k*出发到负荷节点的路径均必须通过边*k-k’*，因此发电节点的电气介数为： ，其中。同样地，负荷节点的电气介数为：。

所以，节点*k*的电气介数的计算公式为：



该电气介数指标有以下特点：

(1) 由于一般的复杂网络中的元件介数都是基于最短路径的。而本文提出的电气介数指标不局限于能量、信息沿着最短路径传播，体现了电能分布在所有线路的特点，更易被行业内专家们接受；

(2) 本文中的元件电气介数考虑了节点上负荷供应、需求的影响。改变发电和负荷的容量，元件在电网中的重要性也将发生变化，它们的电气介数也将改变,这更符合实际电网的情况。

### 3.4.3 电气介数计算流程

由于本文研究的电网的脆弱性，研究分析过程中需要对整个电网进行破坏，所以整个网络可能并不连通，被分割成多个子网络，所以首先需要判断各节点所属分区。

根据上述分析，计算电气介数具体流程见图3.4：



图3.4 电气介数计算流程图

## 3.5 本章小结

本章首先重点分析了电网进拓扑建模、建模数据以及相关算法。接着以IEEE118与UCTE电网为例，分析了它们的复杂性，验证了电网的小世界特性。最后根据一般抽象网络的度、介数概念，提出了电网拓扑结构中具有电气特性的电气度、节点电气介数、线路电气介数概念，并给出了它们的计算方法。

# 第4章 基于静态分析法的电网结构脆弱性研究

## 4.1 电网结构脆弱性研究方法

近年来，为了分析电网系统的安全性，提出了一个新概念：电网的脆弱性，但至今还没有统一的标准。电网作为一个极其复杂的大系统，存在很多薄弱环节，一旦某些因素（例如电网故障、人为攻击等）触发了这些薄弱环节，将严重影响电网的安全稳定运行，进而引发大面积停电。像此类薄弱环节的集合称为电网的脆弱性。其中，我们把电网在拓扑结构方面的薄弱环节的集合定义为电网的结构脆弱性。

在复杂网络模型中，当某个节点或边发生故障退出正常运行状态时，整个网络图的拓扑结构将改变，邻接矩阵将改变，即电网中的节点导纳矩阵将改变，导致其性质和功能发生变化。复杂网络理论通过移除网络中的节点或边分析网络性能的变化，该方法被广泛用于各种复杂系统的结构脆弱性评估。基于复杂网络理论的电网结构脆弱性研究主要考察电网的母线和线路发生故障后对电网结构和功能的影响。

电网结构脆弱性研究方法可分为静态分析法与动态分析法，区别在于是否需要考虑故障或蓄意攻击后电网结构变化后引起的级联反应，尤其需要考虑对线路上的潮流进行重分配，可能引起新的元件过负荷。静态分析法主要分析电网元件在按一定的策略和比例移除后对整个电网的结构、功能的影响，但是不考虑故障后由于潮流分布改变引起的连锁反应。应用静态分析法，首先必须确定能反映电网状态的各个指标，计算它们的初始值。然后按照一定的模式移除一定比例的元件，并计算各个故障阶段的状态指标。最后得到元件移除比例和电网状态指标的变化曲线。而动态分析法模拟了故障后的潮流分布变化以及带来的级联反应。动态分析法需要初始化攻击方式以及元件的容忍值，一旦触发了其它元件过负荷，产生连锁故障，并分析电网在不同容忍度水平下的动态行为。尽管两种方法在模型上有区别，但是分析方法是类似的，都是通过研究移除个别元件后的电网状态，利于电网中的关键节点、线路的辨识。

## 4.2 元件蓄意攻击策略

复杂网络的元件包括节点与边。对于一个复杂网络，可以采取任意的蓄意攻击策略来模拟其发生故障。而寻找一种最具破坏性的攻击策略成为研究重点，因为它有助于我们网络中关键元件的辨识，进而加强对关键元件的监控与防范。如果蓄意攻击每个元件，再比较每个元件破坏后网络性能的变化，是遍历搜索的策略，但是对于大多数实际网络而言，网络的规模往往非常大，遍历的时间复杂度太大。

最简单的一类移除策略就是按初始网络的节点度蓄意攻击节点(Initial Degree——ID策略，与章节2.4方法相同)，该方法时间复杂度小，而且在实际中具有一定意义。当然，对于没有度概念的线路，我们可以定义“线路度”，有以下几种方法[[[51]](#endnote-52)]：



除了“度”这个参数，网络中的元件介数也能反应该元件在网络中的重要性。因此引出了另一类策略就是将初始网络中的元件按“介数”大小降序排序，然后依次攻击高介数节点或边(Initial Betweenness——IB策略)。尽管这两类移除策略都利用了网络的初始拓扑结构信息，但是随着节点、线路的不断移除，网络中元件的度、介数均会变化。所以第三类移除策略：每移除一个元件，重新计算网络元件的度，移除当前网络结构的度最大元件(Recombination Degree——RD策略）。相应地，第四类移除策略为每移除一个元件后，重新计算网络各个元件的介数，移除介数最大的元件(Recombination Betweenness——RB策略)。“度”属于局部特征参数，计算复杂度为，“介数”则是基于网络中任意节点间的最短路径计算得到的，属于全局特征参数，计算复杂度为。

为了验证ID，IB策略与相应的RD，RB策略，哪种更具破坏性，本文对第二章中的节点数为200的无标度网络进行测试，对比ID节点蓄意攻击与RD节点蓄意攻击，移除节点量为总节点数的20%，将其归一化后的最大连通子集指标作为状态指标，具体结果见图4.1。

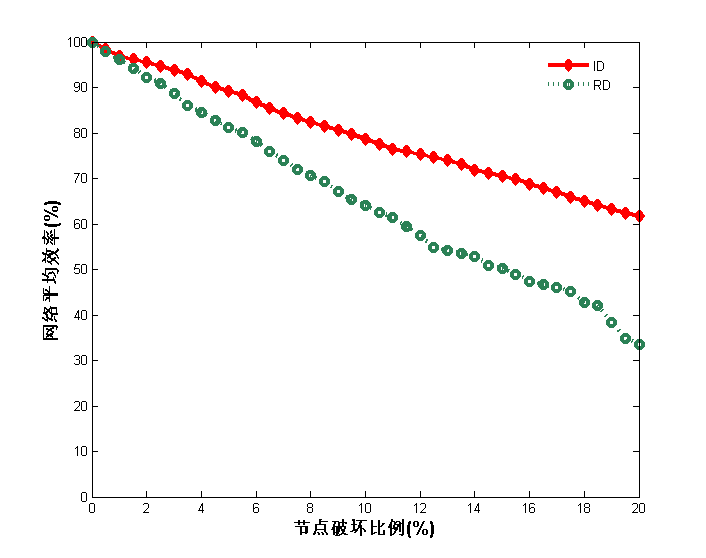


图4.1 ID与RD攻击比较图

由图4.1可知基于当前网络拓扑结构信息的RD策略比ID策略更具破坏性。相应地，RB比IB也更具破坏性。因此，为了找到更具破坏性的策略与网络中的关键元件，本文下面采用的策略均是基于重组后的拓扑结构的特征参数。

本章为了比较传统的度、介数与具有电气特性的电气度、电气介数，分别讨论5种节点攻击与3种线路攻击策略。其中传统节点、线路介数是按章节3.2的模型与公式(2.1，2.2)计算，节点、线路的电气介数按公式(3.12，3.14)计算，节点电气度按公式(3.5)计算。

1、随机节点攻击RN(random node)——每次随机地移除1个节点，仿真20次取平均值；

2、传统节点度攻击DN(degree node)——每次移除节点都最大的节点，取10次仿真结果的平均值；

3、节点电气度攻击EDN(electric degree node)——每次移除节点电气度最大的节点，可变参数取0.5；

4、传统节点介数攻击BCN(betweenness centrality node)——每次移除节点介数最大的节点，取10次仿真结果的平均值

5、节点电气介数攻击EBCN(electric betweenness centrality node)——每次移除节点电气介数最大的节点；

6、随机线路攻击RE(random edge)——每次随机地移除1条线路，取20次仿真结果的平均值；

7、传统线路介数攻击BCE(betweenness centrality edge)——每次移除线路介数最大的线路，取10次仿真结果的平均值；

8、线路电气介数攻击EBCE(electric betweenness centrality edge)——每次移除线路电气介数最大的线路；

其中，移除策略1、5属于随机攻击，其它四种属于蓄意攻击。策略2，4，7若存在多个最大值，随机选中其中一个。

## 4.3 电网结构脆弱性指标研究

通过复杂网络理论研究进行电网结构脆弱性评估，是电网脆弱性研究领域的核心。描述复杂网络结构特性的指标有很多(见章节2.3)，但针于电网模型，在研究中必须结合电网物理特征和研究目标选择合适的指标，通过分析网络模型指标，结合小世界特性，总结出用于描述电网脆弱性评估的指标具体如下。

### 4.3.1 电网结构脆弱性评估常用指标

(1) 最大连通子集(具体见章节2.3.1)。

(2) 网络平均效率(见公式2.8)，由于电网建模成有权无向网络，相邻节点间的电气距离用节点间的电抗值表示，基于“电气距离”概念计算最短路径的长度*dij*，若节点*i, j*不可达，则。

(3) 电网供电能力

从发电节点将功率传输到负荷节点是电网的功能，电力企业也关注电网供电能力。电网在遭受攻击后，可能被解裂成若干个子系统。对于子系统*i*，与分别为其发电容量与最大负荷需求，因此子系统*i*正常运行的供电负荷容量为：



整个电网供电负荷容量：



其中，*Sys*为故障后不相连的子系统个数。

(4) 线路过载率

线路过载率用于描述电网的线路上的潮流过负荷状态，具体定义如下:



其中，为线路*e*上的潮流值，为线路*e*的最大允许潮流值，*E*为所有线路的集合。

### 4.3.2 电力系统的电网传输能力指标

上述中的网络平均效率是完全依赖于电网的拓扑模型的，并以所有节点间均能传输电能为前提，却忽略了电网中的物理两个重要特征：

(1) 电网的复杂网络模型只能从发电节点向负荷节点传递电能；

(2) 电能传递过程并不是依赖于最短路径，而应满足基尔霍夫电流电压方程。

同时电网供电能力指标只关心电网发电、负荷节点最终的运行状态，却脱离了电网的拓扑结构，忽略了电网中电能的传输过程。因此本文从电网拓扑结构和电能传输特性两方面综合考虑，提出一种电网脆弱性指标——电网传输能力。

电网传输能力是指电网在正常运行条件下，描述电网传输性能的状态指标。电网的传输能力表现在单位时间内以最有效率、经济的方式将电能从发电节点传输到负荷节点。经济问题与基础市场中的电力传输成本有关，而技术问题指的是功率损失，电压下降以及稳定性相关。实际的电网是否能正常运行依赖于电网的拓扑结构、线路阻抗以及传输线路最大潮流允许值等。

而公式(2.9)中节点间的电抗距离无法解释节点间电能传输的成本，应将节点间的“距离”修改为“单位功率传输的成本”。其实，电能的传输成本主要与线路上的阻抗、线路上的消耗功率有关。传输线路上的阻抗越大，传输线路上的压降越多，需要更高的输电电压才能保证负荷端的电压，相应的传输成本也提高了。线路上的损耗功率越高其对输送线路的材质要求也更高，发电节点需要更多的输送功率，成本就变高了。所以电网的传输成本与传输线路上的功耗、线路阻抗均成正相关。因此，定义一种新的“距离”指标(传输成本)代替节点间的传统电气距离，它不但与线路上的潮流值有关，而且与线路的阻抗有关，定义如下：



其中表示发电节点*g*向负荷节点*d*沿着路径*k*传输单位功率时，在线路*l*上的潮流大小，*Zl*是线路*l*的阻抗。可由上述公式(3.11)计算得到。

参照网络平均效率公式(2.9), 电网传输能力指标定义如下：



其中*G*和*D*分别表示发电节点集，负荷节点集；*NG*和*ND*分别表示发电节点，负荷节点的个数；表示从节点*i*到节点*j*的所有路径的集合；表示节点*i*向节点*j*传输功率时，在路径*k*上所占的份额。尽管在公式(2.9)上的节点间的距离是指某条最短路径，但是此处是将所有节点间的路径均考虑进去。表示在保证所有传输线路不过载的前提下，发电节点*g*向负荷节点能传输的最大功率，计算公式：，其中表示线路*l*的最大允许潮流值，对于IEEE118节点系统，均取99pu[[52]](#footnote-1)，基准值*SB=*100*MVA*。

等效阻抗，节点*g d*间注入的功率为1时，相当于注入单位电流，即，具体推导过程见式(4.6)与图(4.2)。



其中，为阻抗矩阵[[53]](#footnote-2)中第*i行j*列元素。

图4.2 节点间电气阻抗计算图

*g d*间注入单位电流时，，该值与路径*k*无关。又因为 ，所以最后公式(4.4)简化为(4.7)。



其中*，A*的单位为。

### 4.3.2 电网传输能力指标仿真与分析

为了验证电网传输能力指标兼顾了电网拓扑结构与电网的电气特性，节点数越多，统计规律越具有说明力，因此本文选用IEEE300节点系统进行仿真分析。

1. 分别破坏IEEE300的411条线路，形成411个破坏的电网系统。
2. 选用网络平均效率、线路过载率与电网传输能力指标对比，为了考察指标的变化比例，对三个指标分别如下处理：



仿真结果见图4.3，横坐标为移除的线路编号，纵坐标分别为三个指标下降比率。由图可知，三个指标的峰值基本出现在同一移除线路编号。说明移除某条线路后，三个指标的下降比例保持一致。为了更进一步验证电网传输能力指标的综合性，分别对IEEE118与IEEE300节点系统计算移除线路后，它们的指标下降比例。表4.1列出了网络平均效率与电网传输能力指标的相关系数，过载率与电网传输能力指标的相关系数。由表可知，电网传输能力指标与另外两个指标的均有一定的相关性，并且与网络平均效率的相关性更大。

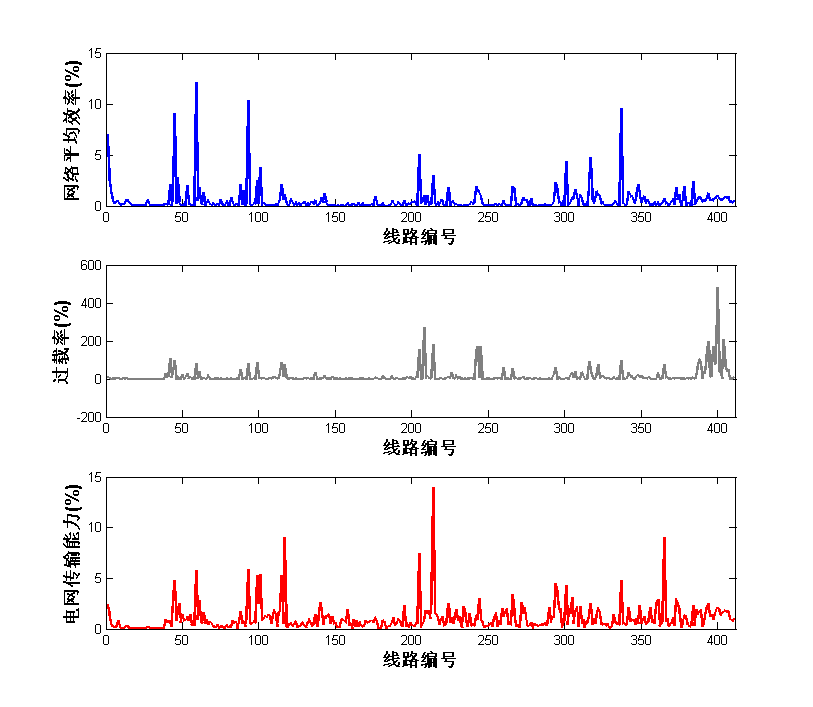


图4.3 IEEE300移除的线路编号与三个指标的关系图

表4.1 三个指标间的相关系数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 节点系统 |  |  |
| IEEE118 | 0.624 | 0.389 |
| IEEE300 | 0.581 | 0.429 |

## 4.4 静态分析法的仿真与分析

### 4.4.1 仿真流程及相关算法

静态分析法的研究重点是电网元件破坏策略和元件移除比例对整个电网结构和功能的影响。其核心思想是以一定策略移除一定比例的元件，计算电网的状态指标，最后得到在某种移除策略下元件移除比例和电网状态指标的趋势图。具体流程见图4.2所示。



图4.3 静态分析流程图

仿真模拟中对元件的破坏，引起网络被裂解为多个子网络，利用图论中深度优先算法对网络的邻接矩阵进行搜索，可得到组成该网络所有节点编号。再根据节点对搜索线路编号，常规遍历搜索复杂度为*o(L)*。为提高效率，利用Matlab提供了一种调用Jave哈希表的方法，可以间接使用哈希表java.util.Hashtable，搜索时间复杂度为*o(1)*。首先将节点对转换个单个标量，*N*为最大节点编号，再建立节点对信息*key*值到相应线路的hash映射。这样就完成了整个网络节点、线路的分解过程。根据邻接矩阵搜索各个子网络的节点集算法伪代码具体见图4.4，再进行矩阵行列提取与hash查找，即可得到各个子网络的邻接矩阵与对应的线路编号。

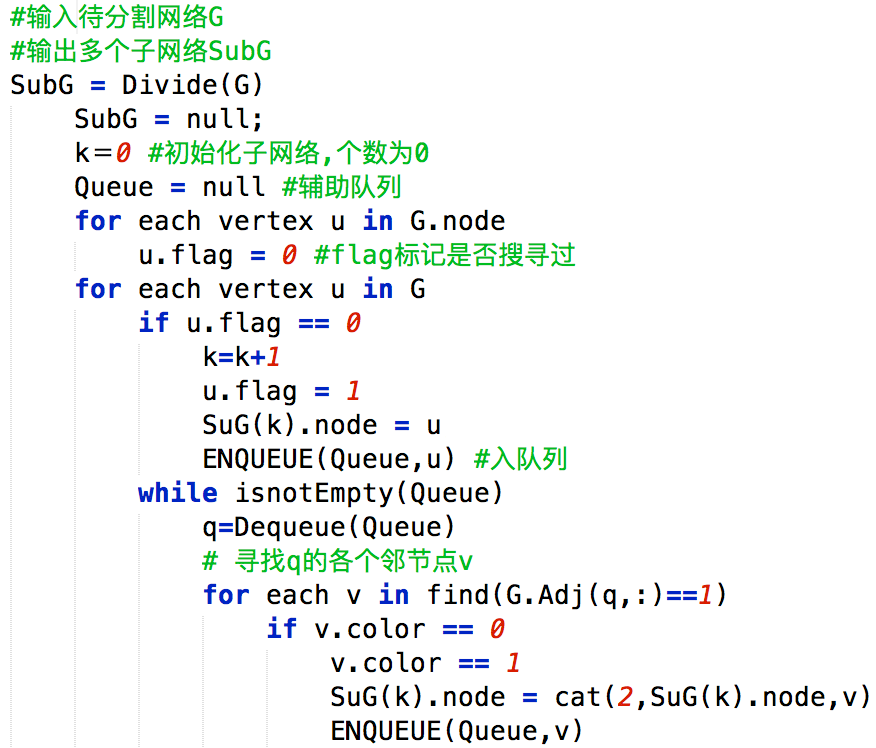


图4.4 网络分割部分伪代码

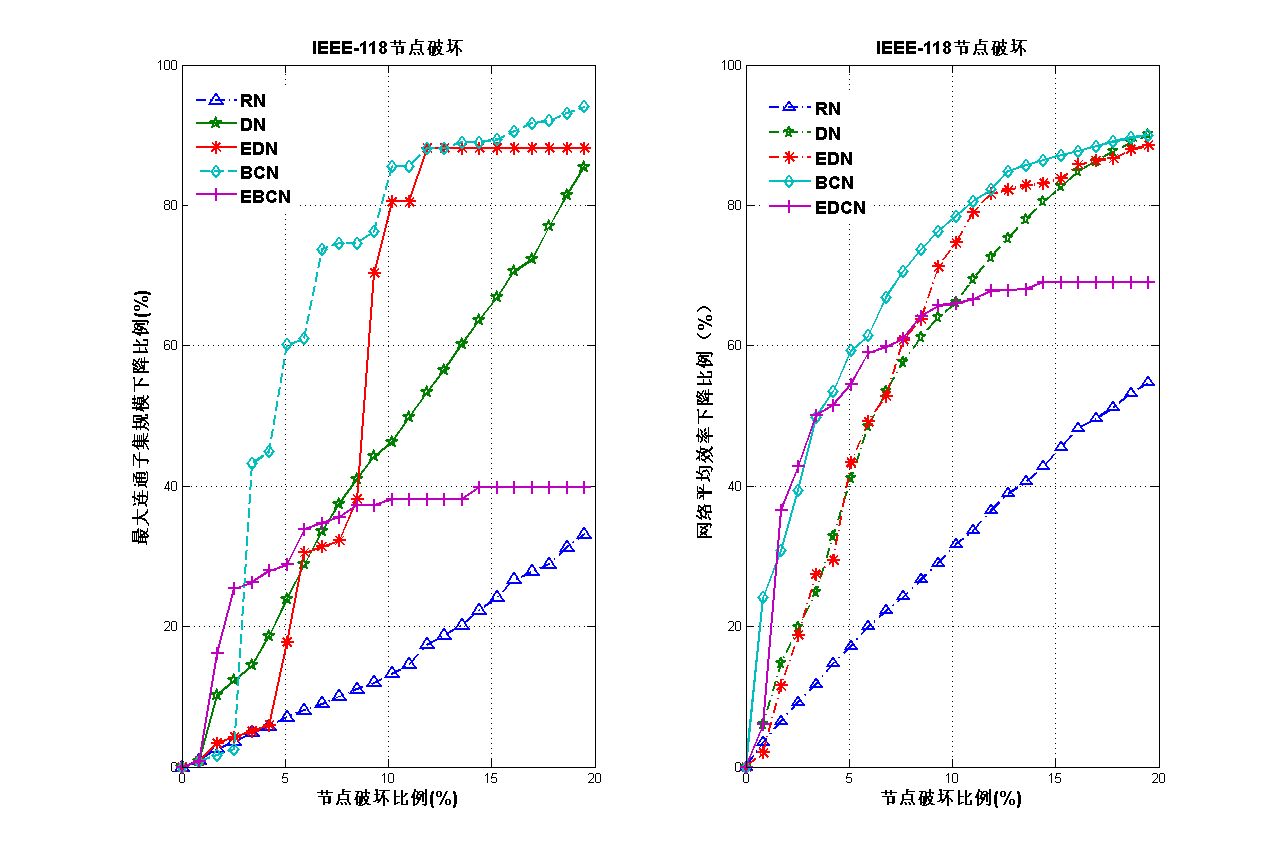
由于本文研究的是电网的脆弱性，应该率元件破坏后，各个状态指标的下降。本文考察以下四个指标：最大连通子集，网络平均效率，电网供电能力，电网传输能力。为了消除原始数据的量纲差异，对各指标变化归一化处理：



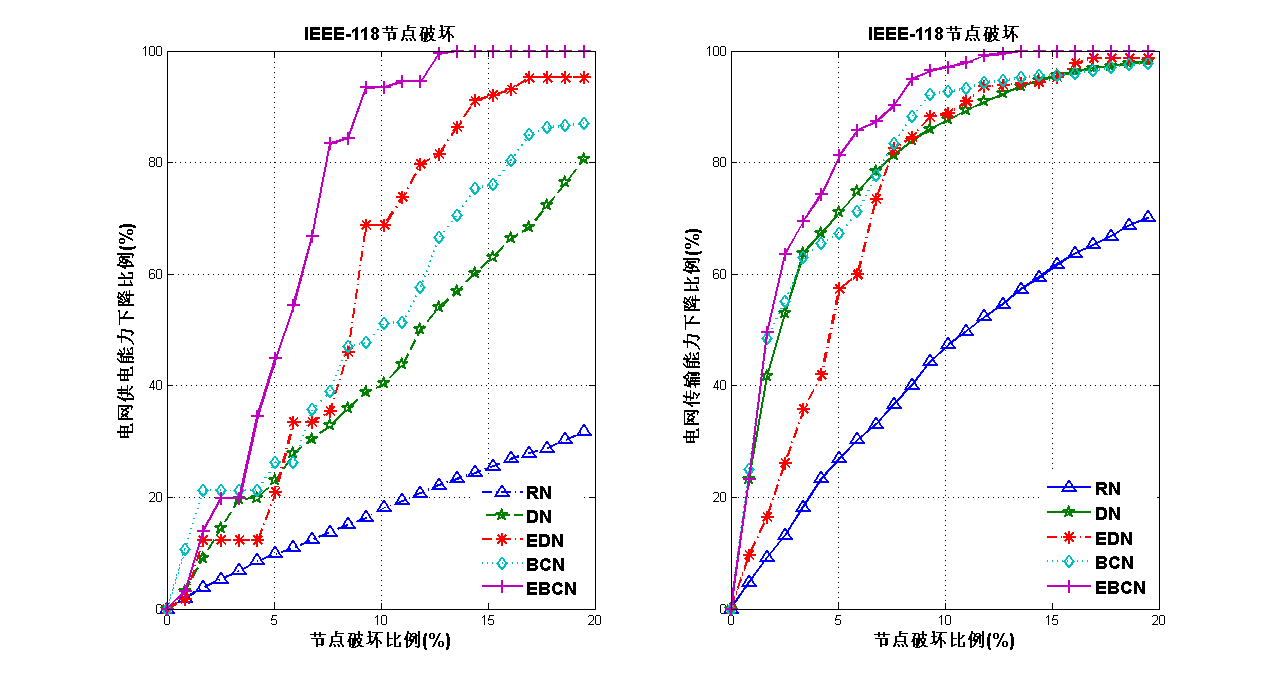
其中，*Index0*为初始化指标，*Index*为当前指标，*T*为多次仿真次数。

### 4.4.2 仿真结果分析

图4.5显示了IEEE118节点移除比例与电网状态指标变化曲线。



(a) 最大连通子集与网络平均效率



(b) 供电能力与传输能力

图4.5 IEEE118节点系统中节点移除与电网状态指标的关系

从图4.5-a中的最大连通子集(Scale)与网络平均效率(Efficiency)的曲线变化率可以看出：

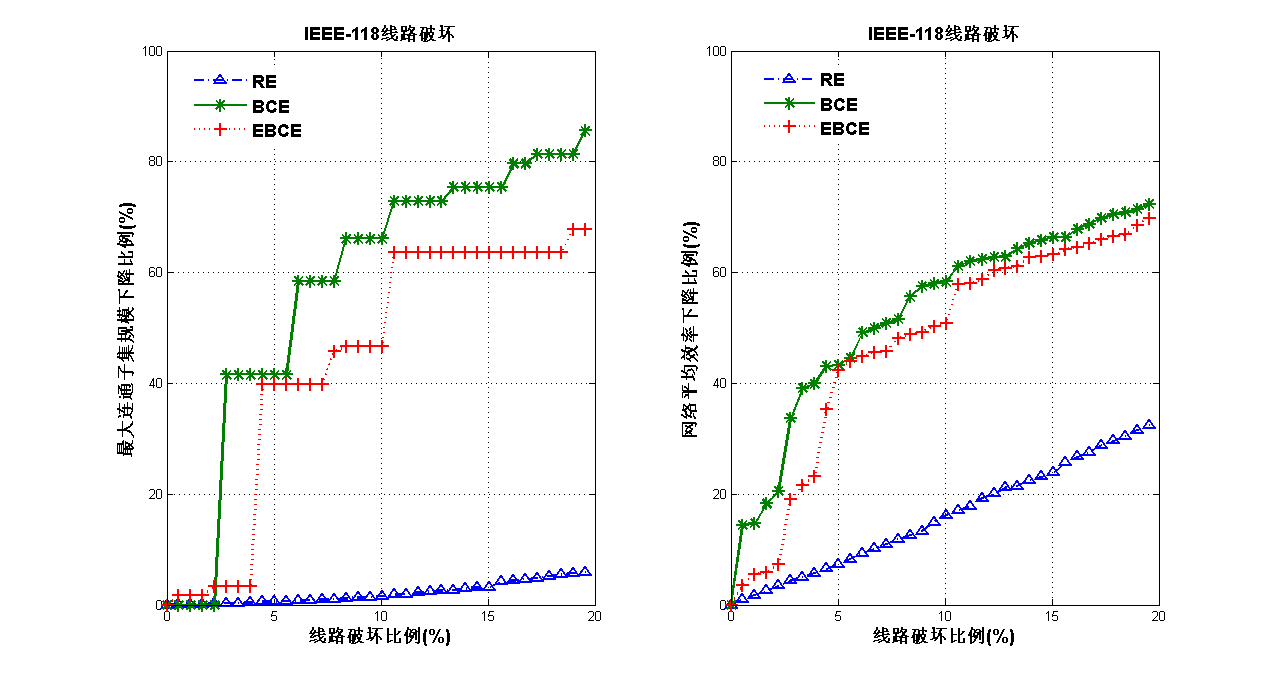
(1) RN引起的指标变化最小，移除10%后，Scale损失不超过20%，Efficiency 损失不到40%，这说明该电网对RN攻击具有很好的鲁棒性。

(2) 除RN外的另外四种蓄意攻击引起的指标变化很大，尤其是BCE最大，移除10%节点后，Scale损失超过80%，Efficiency损失接近80%，整个网络已瘫痪。而DN与EDN对这两种指标引起的变化相近，EDN稍大于DN；BCN与EBCN相比，BCN对指标引起的变化大得多。由于这两个指标主要考虑的是电网的拓扑结构，缺少电气功率特性的涉入。计算复杂度较大(与DN比较)且只考虑网络拓扑的BCN破坏力最强，更能找到网络拓扑结构中的薄弱环节。而DN由于缺少考虑网络中的边权重，所以稍弱于EDN最大。

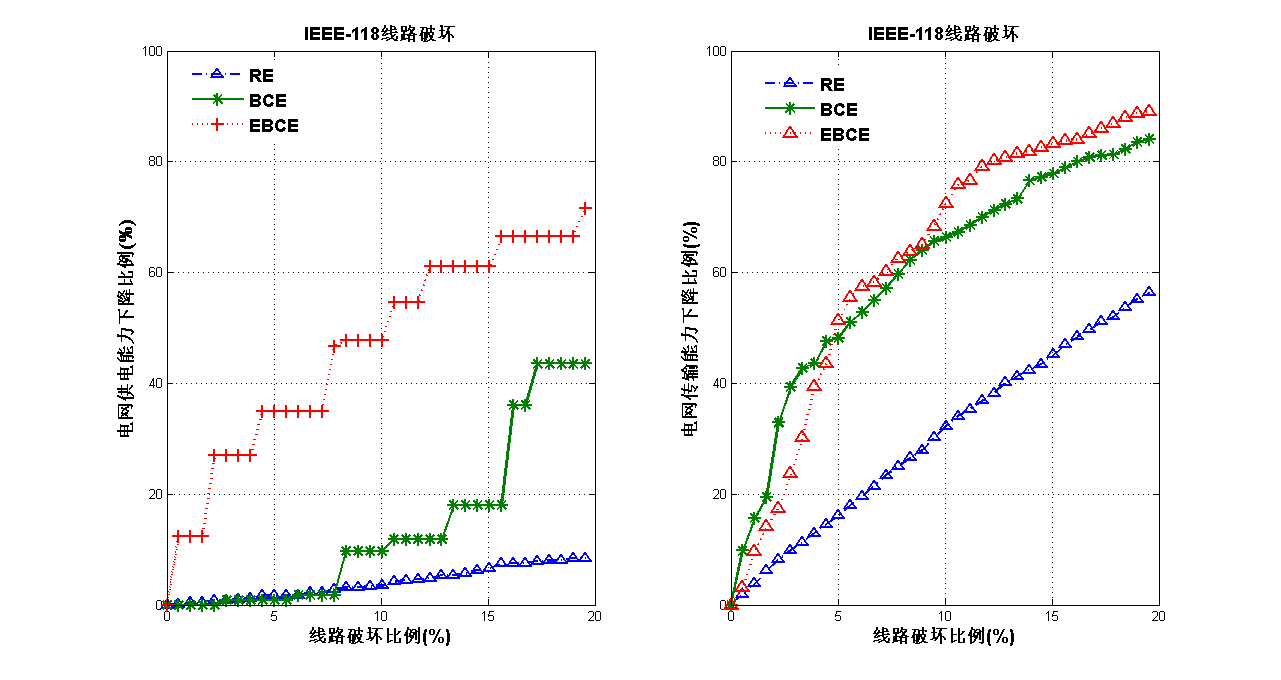
从图4.5-b中的供电能力与传输能力的曲线变化率可以看出：

(1) RN的破坏仍最小，移除10%后，Scale损失不超过20%，Efficiency损失不到40%.

(2) 其余四种蓄意攻击引起的指标变化仍很大。对于供电能力指标，EDN与EBCN对其影响非常大，移除10%节点，EDN造成93%损失，EBCN造成69%损失。DN与BCN较小，这也是因为这两个蓄意攻击未考虑电网的电气功率特性，BCN略大于DN。对于传输能力，EBCN破坏力最大，DN、EDN、BCN相近。这也说明了对于传输能力这个兼顾网络拓扑与电气特性的指标，EBCN破坏力最大，同时也最能找到电网中的关键元件。



(a) 最大连通子集与网络平均效率



(b) 供电能力与传输能力

图4.6 IEEE118节点系统中线路移除与电网状态指标的关系

同样地，分析线路破坏时，由图4.6可以看出，无论那种指标RE对其影响均最小，所以IEEE118对随机攻击呈鲁棒性。对于两个网络拓扑指标(Scale与Efficiency)，BCE破坏力最强，最能找到网络拓扑结构中的薄弱环节。对于供电能力与传输能力，考虑电气功率特性的EBCE最大，尤其是对供电能力的影响。EBCE对传输能力的影响略大于BCE。

综合以上分析，并结合图4.5、4.6，可以看出：总体上而言节点攻击对各个指标的影响大于线路攻击，这是由于节点破坏后需要将与其相连的所有线路均破坏，往往破坏的线路数有多条。对于网络拓扑指标，传统的介数攻击BCN与BCE破坏力最强，所以相比较于无标度网络拓扑面对度攻击表现出强脆弱性，小世界网络拓扑则是面对介数攻击表现出强脆弱性；对于供电能力指标，具有电气特性的EDN，EBCN，EBCE破坏力最强。而对于兼顾网络拓扑与电网功率特性的传输能力指标，EBCN破坏力最强，最能找到电网中的关键元件

## 4.5 高电气介数的节点与线路的重要性

根据4.4节中仿真讨论，可以得知高电气介数与线路对电网的电能传输能力起到重要的作用，本节对其产生原因进行分析。

高电气介数节点与线路的产生重要原因是由于电网的小世界性。由章节3.2讨论可得：IEEE118的拓扑结构具有小世界性，其原因是由于电网中存在若干长距离连接线路，这些线路是通过小世界网络重连形成的。而在实际电网中，这些线路一般靠近电网的大电源中心与大负荷中心，它们承载着远距离大容量输电的重任。从网络拓扑结构上看，大量的发电——负荷节点间的电能传输路径是通过这些长距离线路的。从功率传输上考虑，在远距离传输线路的潮流值往往比较大。因此，远距离传输线路的电气介数比较大，并且在电网拓扑结构中非常重要。由节点电气介数计算公式(3.14)可以得出远距离输电线路两端的节点电气介数也很大。图4.6显示了IEEE118的节点、线路电气介数的累积分布。

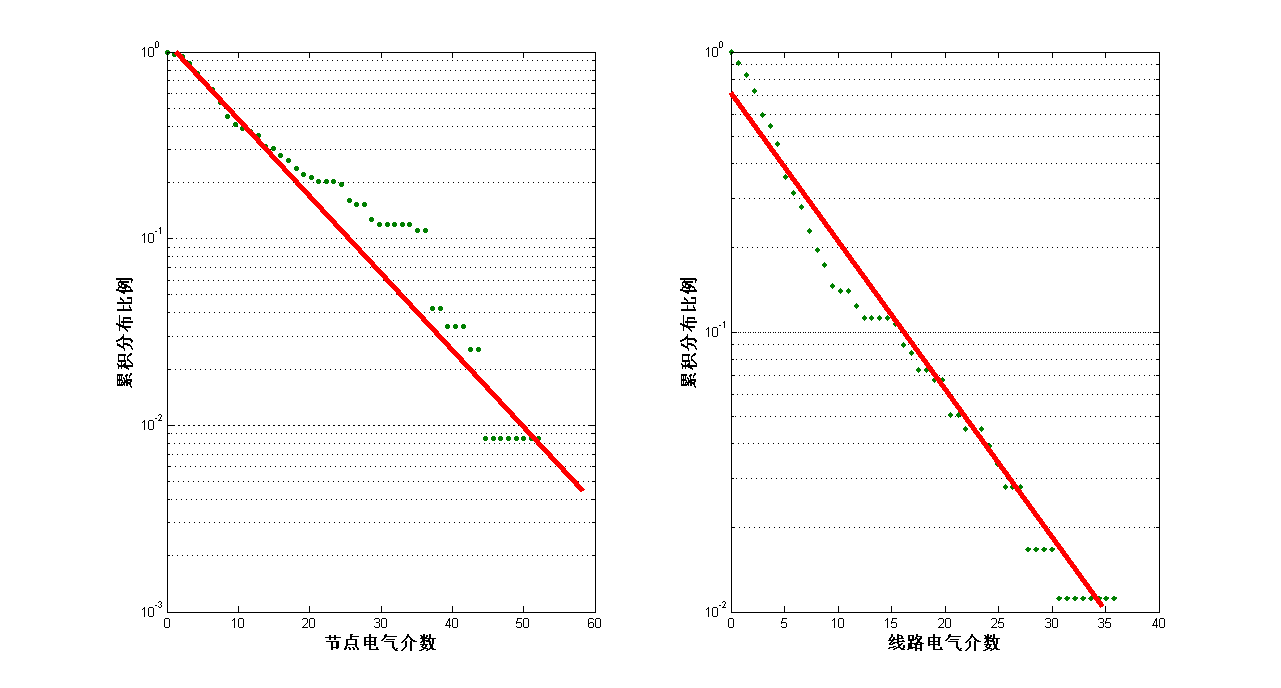


图4.6 IEEE118节点、线路累积分布

其中，*y*轴为对数坐标。累积分布上可以得出：*x*与*y*的对数近似成线性相关，即，该分布类型与其度分布相似。从分布可以看出，IEEE118的节点、线路电气介数具有异质性，即各个节点、线路的电气介数呈现极不均匀的特征，累积分布呈现明显的指数下降特征。电网中有少数节点与线路的电气介数较大，这些节点和线路负责大部分的电能传输工作，因此也是电网的脆弱环节。这种异质性是电网结构脆弱性产生的重要原因之一。

表4.1列出了IEEE118电网前10%电气介数最大的节点，表4.2列出了前10%电气介数最大的线路。

表4.1 高介数节点

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 排序 | 节点编号 | 排序 | 节点编号 | 排序 | 节点编号 |
| 1 | 49 | 5 | 80 | 9 | 69 |
| 2 | 65 | 6 | 9 | 10 | 26 |
| 3 | 100 | 7 | 10 | 11 | 8 |
| 4 | 25 | 8 | 89 | 12 | 66 |

注：节点49、65、100、25、80、10、89、69、26、26、66属于发电节点，9、26不属于。

表4.2 高介数线路

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 排序 | 线路编号 | 排序 | 节点编号 | 排序 | 节点编号 |
| 1 | 8-9 | 7 | 110-111 | 13 | 25-27 |
| 2 | 9-10 | 8 | 23-25 | 14 | 94-100 |
| 3 | 26-30 | 9 | 49-66 | 15 | 42-49 |
| 4 | 8-5 | 10 | 77-80 | 16 | 63-64 |
| 5 | 38-37 | 11 | 68-116 | 17 | 60-61 |
| 6 | 30-17 | 12 | 38-65 | 18 | 89-90 |

从上表以及附录图可以看出，大部分电气介数高的节点是大发电节点。由于电网的发电和负荷容量分布不均匀导致电气介数分布呈指数下降特性。

高介数线路一般是电能传输过程中冗余线路少的传输线路（如发电节点10向外输电时必须经过的线路8-9，9-10）。在电力专家看来，这些线路和节点在实际运行和规划中作用极大。这些电气介数较大的传输线路一般承担的输电任务较重，当它们被移除后，电网的结构被破坏，并分解成多个子系统运行。所以，只要电网具有小世界特性并保障高电气介数的元件正常运行，有利于维持整个电网连通性与供电能力处于较高水平。

## 4.6 本章小结

本章研究了静态分析法的电网的结构脆弱性问题。首先讨论了结构脆弱性的定义，然后基于第二、三章的网络参数概念，提出了6种蓄意攻击和2种随机攻击。接着根据网络的平均效率参数，提出具有电气特性，且满足基尔霍夫定律的指标——电网传输能力。然后分析了蓄意攻击对各个指标的影响，得出结论：电气介数攻击对电网传输能力的破坏最强。最后发现高电气介数元件是电网的脆弱源，并以小世界网络特性分析其形成原因及高电气介数元件的网络位置。总结如下：保障高电气介数节点与线路的安全可靠运行是很有必要的，有利于维持电能的传输性能。

# 第5章 基于复杂网络理论的电网连锁故障研究

电网的连锁故障是电力系统最常见的一种现象。在实际中，大多数故障一开始都是发生在局部小范围区域。而复杂网络理论又是连锁故障分析的有力分析工具。与上章提出的静态分析法有所不同。连锁故障的一般过程：正常运行条件下，电网中的每个元件都有一个负荷容忍值，当某个元件由于过负荷突然退出运行时，整个电网的拓扑、潮流分布均发生变化，导致其它部分元件的负荷值超过其容忍值，退出运行，最终扩散至大面积停电。因此，必须理解并掌握电网的故障传播机理，方便工作人员进行更有效地预防控制。

电网复杂网络模型必须能描述电网的内在特性与电能传输状态，这与传统的复杂网络有所不同。电网中的电能总是沿着最短路径从源节点向负荷用户节点输送电能，且满足基尔霍夫定律。在稳定的状态下，每一个发电节点都可以向所有的负荷用户节点供电，各个传输节点处于正常状态下，一旦因故障而被移除，整个网络的输电路径将被迫进行调整，将故障节点的负荷转移到其它节点中，从而引起来系统的连锁反应。故障后电网的性能评价指标有多个角度：电网的输电能力、效率以及整个电网的连通性能等。

## 5.1 传统电网连锁故障模型

在现有研究中，电力系统学者们主要对各种大停电进行分析的基础上，希望在复杂网络理论的基础上寻找新的模型和分析手段，把电力网络当作网络中各个节点相互作用的系统，在实际与理想电网模型上分析电网脆弱性与稳定性等多个方面，提出了多个重要的连锁故障模型，其中最重要的有加权网络模型[[[54]](#endnote-53)]，Motter-Lai模型[[[55]](#endnote-54)]和有效性能模型[[[56]](#endnote-55)]。

有效性能故障模型具体描述为：电网在初始状态下，运行在稳定状态，每一个节点都运行在其容忍值范围内，当部分节点因故障而停运时，所有相连的线路断开，网络中的潮流重新分配，并导致部分其它节点的负荷超过其容忍值。这时，根据节点过载率，对与其直接相连的线路进行调整，从而改变最有效传输路径，减小过负荷节点的负荷，如此反复，直到所有达到新的平衡状态。系统的网络平均效率反映了连锁故障对电网的影响。但该模型还是有缺陷，一旦节点负荷非常高，节点负荷将按上述规则将迅速下降，而实际情况下负荷还会处于很高的负荷，不会立即下降。所以，有效性能模型中，有必要在节点的负荷调整过程中，加入一个限制因素，当它的负荷超过负荷的最大容忍值时，立即从网络中切除，避免元件的损坏等不可恢复的故障。因此加权网络模型添加了一个节点移除的规则，当节点负荷非常高时，立即移除。

加权网络模型的主要特点如下：

1. 定义了模型中各个节点的初始负荷、容忍度、最大容忍度。假定所有的节点的容忍度比例参数都相同，且容忍度、最大容忍度均与初始负荷成正比。



其中，为容忍度，为容忍度比例参数，为最大容忍值，为最大容忍系数。

1. 当节点过负荷时，自动调整与该节点相连的支路，具体调整规则如下：



其中，*t*为初始故障发生时刻；*i*为发生故障的节点；*j*为与节点*i*直接相连的节点编号；为支路*lij*的初始电抗值；修正后支路*lij*的电抗值。

由于在真实的电网情境下，电力设备一旦受到剧烈干扰，灵活交流输电控制装置将自动调整支路上的电抗。当节点的负荷在区间时，按照节点过载率大小自动调整与其相连的支路，过载率与支路阻抗成正比。而当负荷最严重的情况，与故障节点直接相连的支路将直接被移除。因此该模型与有效性能模型相比，更具说服力。

该模型下，电网连锁故障是一个反复循环的过程，直到每一个节点的负荷均小于*Ci*，才停止公式(5.2)的支路阻抗调整过程，达到一种新的平衡状态。此模型采用的最终衡量指标时网络的平均效率。支路一旦被切除或电抗值变大，复杂网络模型节点间的最短路径也会随之发生改变，引起整个电网的网络平均效率下降。因此，如果模型的容忍度参数很小，那么非常微小的干扰都能使故障扩散得更大，产生“蝴蝶效应”，最终使整个电网崩坍。

## 5.2 改进型电网连锁故障模型

在上述模型中，有效性能模型中电网中的电能传输是沿着网络中的效率最高路径传播的，加权网络模型是沿着电网中线路电抗值和最小的路径传播功率的。而在电网实际过程中，电网的能量传播遵循基尔霍夫定律，而且连锁过程中，一旦某个节点被破坏后，在还未完成新的电网输电平衡前，邻节点将立即受到初始故障节点的影响。所以本文提出一种改进型连锁故障模型，该模型是基于邻节点负荷重分配的连锁故障分析方法。

目前研究中，基于复杂网络理论的电网连锁故障模型主要研究节点连锁故障，用度、介数指标衡量节点在电能传输中的作用，也是相当于承担的负荷。在电力系统分析中，判断节点过负荷是以传输的功率为依据。从前面的分析可以看出，节点电气介数在一定程度上可以反映出节点与线路的传输功率大小，体现了该节点在整个网络中的重要性。节点重要度也是其在电网中承担的压力大小。因此，本章的电网连锁故障模型定义节点的负荷为节点的电气介数，并以负荷是否超过其容忍值作为过负荷的依据。本章定义节点的负荷如下：



任何复杂系统都有一个负荷的容忍值，本文以节点电气介数为依据，综合考虑节点的自权重负荷与邻权重负荷，对有效性能提出的介数容量做了改进，并假定容忍值与其初始负荷成正比，即节点负荷容忍值为：，其中为容忍度系数。显然，代表节点的额外负荷承受能力，同时也能反映节点的抗干扰能力。越大，电网越安全。对于一个复杂网络的连锁故障而言，存在一个临界容忍度值。当时，整个网络的性能不会因连锁故障而大面积被破坏，而当时，网络将大面积出现故障，整个网络将因连锁故障而瘫痪。因此为了避免这种现象，研究最小安全容忍度系数非常有意义，它能从一方面反映出整个网络的脆弱性。显然，越小，整个网络的脆弱性也就越小。

电网的初始故障可能发生在任意节点，高负荷节点故障后所引起的连锁故障的破坏程度一定比较大。本文分别选取随机节点以及高负荷节点的连锁故障的初始故障。目前，很多文献[[[57]](#endnote-56)],[[[58]](#endnote-57)]研究电网的连锁故障主要是通过计算节点破坏后，形成新的拓扑网络结构，达成新的潮流平衡后的节点负荷值是否超过其容忍值来判断该节点是否被破坏。然而，基于复杂网络的电网连锁故障，在达到新的潮流平衡前，某个节点的负荷很有可能已经超过其最大容忍值，尤其是故障节点的邻节点。因此，通过计算新平衡下的各节点负荷值已失去意义。

本文采用一种新的潮流重分配方式。节点一旦被破坏，其负荷向各个邻节点转移，转移份额与其各个邻节点的负荷成正比。具体负荷重分配方式见图5.1，公式如下：



其中，为邻节点*j*增加的负荷。



图5.1 负荷重分配示意图

如果重分配后的邻节点*j*的负荷大小大于节点的最大容忍值，则该节点将立即被破坏，参数表示最大容忍度参数；而当其负荷值处于一个中间值，即时，该节点就会有被破坏的危险。在实际电网中，当某个元件的潮流值超过其正常容忍值后，在一定的时间和一定功率范围内该元件是可以正常运行的。由于需要考虑保护设备的整定值、保护设备误动作和调度运行人员进行主动控制等因素，因此该过载元件可能不会突然从电网中退出运行，即过载元件移除的概率等于 *p*(0<*p*≤1)，而且该概率与过载率有关，随着过载率不断增加，其被移除的概率也相应增加。 因此本文对故障节点采用概率移除法进行模拟，多次仿真取结果的平均值。具体移除概率如下：



此外，不同的网络结构、类型，参数均不相同，本文中的仿真取。

需要注意的是，上述的模型中可能在连锁故障过程中出现多个节点同时出现被移除的情况。但是实际情况下，其实多个节点出现连锁故障时总会有一个时间先后顺序，所以在某一时刻基本只会有一个故障节点。因此为了更加逼近电网的真实场景，本文采用的原则是每次只移除一个节点，具体的移除原则如下：

(1) 如果有一个或多个节点的负荷移除概率为1，随机移除其中任意一个节点；

(2) 如果所有节点的移除概均不为1，但是存在多个节点被移除的概率大于0，则按独立事件概率计算公式得到无节点被移除的概率为：



其中，*n*为不确定移除的节点个数，*Pi*为各个节点被移除的概率。

最终得到概率向量，归一化后为，再按此概率向量通过轮盘赌算法选择其中一个节点，将相应节点移除或无节点移除。轮盘赌算法具体见图5.2，计算机模拟产生0～1的随机数*R*，若，则选中区域m，移除节点m，*None*区域表示无节点移除。



图5.2 轮盘赌算法示意图

一旦节点*j*受到连锁故障影响而被移除，与该节点相连的所有支路都将被移除，重新进行下一轮的负荷重分配。而且分配的总资源变为。该过程不断反复将形成电网连锁故障，直到无节点被移除为止，连锁故障过程结束。

## 5.3 算法流程

基于复杂网络理论的电网连锁故障的核心是通过恶意破坏某个元件形成初始故障进而触发其它节点过负荷，由此产生连锁故障，并分析电网在不同容忍度水平下的动态行为。本文选取的攻击方式有以下三种：

a. 随机选择一个节点作为初始攻击目标——RN(random node);

b. 选择一个节点负荷最大的节点作为初始攻击目标——HLN(high load node);

c. 选择一个节点负荷最小的节点作为初始攻击目标——LLN(low load node)。

如果存在多个节点的负荷大小同为最大或最小，则随机选择其中一个负荷最大(小)的节点作为初始攻击目标。由于此次连锁故障中采用了“轮盘赌”方法，因此本文采用20次的仿真结果的平均值作为结果。具体流程见图5.3：

图5.3 基于复杂网络的电网连锁故障流程图

流程中所选用的状态指标是第四章分析的具有综合评价能力的指标——电网传输能力，从上述分析可知该指标兼顾网络拓扑结构与电力特性。但不同的是，连锁故障研究的是由于节点移除后所引起的连锁影响，所以网络的比较对象应为移除单个节点后，不考虑连锁故障时的电网状态。而在静态攻击的分析时，是与初始状态下的电网进行对比。与第四章方法类似，本章的评估指标需要归一化处理。由于本章存在随机选取初始节点破坏、轮盘赌算法选取连锁破坏节点，需要大量的实验，取多次结果平均值。而对于随机选取初始节点时，初始节点选取的不一样，将导致参考的比较对象也有所不同，相应的指标参数也不一样。因此本文考虑先对评价指标归一化处理，再求平均值作为最终结果。具体计算公式如下：



其中*T*为总实验次数， 为移除初始故障节点*i*后的电网传输能力，与选取的*i*有关。

## 5.4 动态分析法的仿真与分析

本文通过对不同的容忍度参数[[59]](#footnote-3)进行仿真，计算最终电网传输能力指标。图5.4展示了三种攻击策略下，在不同的容忍度参数时，仿真IEEE118节点系统得到的最终电网传输能力指标。

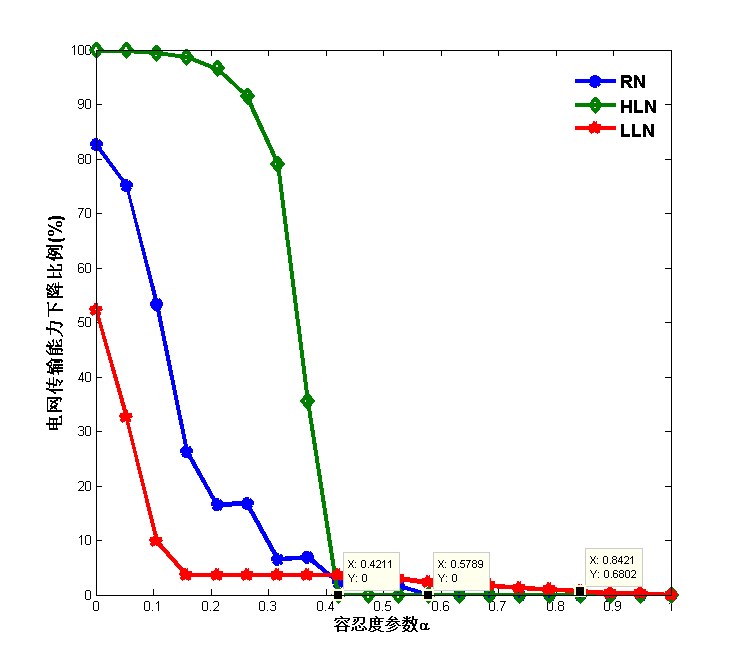


图5.4 IEEE118连锁故障仿真图

由上图可知，当较小(小于0.1)的范围内，电网在三种攻击策略下，最终电网传输能力指标下降比例都较大，且HLN>RN>LLN，尤其是HLN，电网几乎已瘫痪；随着的增加，HLN攻击下的电网传输能力下降比例变化很快，说明针对高负荷蓄意攻击，容忍度参数的作用越来越明显，尤其是在左右，下降最快，说明如果提高单位容忍度的成本相同，在左右提升其容忍度参数最经济。RN，LLN攻击策略下, 曲线变化缓慢，容忍度参数的作用越来越不明显。当时，电网传输能力指标下降比例均小于10%，可见对于整个电网，容忍度参数设为稍大于0.4最为经济。此外，三种攻击策略的标准临界容忍度参数分别为，说明对于连锁故障，通过提高容忍度参数以保证电网能不受破坏，高负荷节点破坏模式的所需成本最小。尽管移除低负荷节点策略在对电网其它元件破坏程度比较小，但是该破坏程度很难降为0。

因此，总结如下：

a. 对于IEEE118节点系统，将容忍度参数设为0.4，最经济的一种选择；

b. 三种初始攻击策略的连锁破坏程度比较，HLN>RN>LLN；

c. LL攻击策略下，对电网的微弱破坏很难避免。

## 5.5 本章小结

本章研究了基于复杂网络的电网连锁故障模型以及临界容忍度的问题。首先讨论了传统电网连锁故障模型及其不足之处。接着，定义了基于节点电气介数的节点负荷，容忍度参数反映了电网节点容忍值与初始负荷的关系。然后定义了节点故障瞬时负荷重分配规则，引入按概率移除节点的方法来模拟电网中节点过载的情况。最后以IEEE118节点系统为例，运用Matlab软件，针对不同的容忍度参数对三种攻击方式进行连锁故障仿真，对比了三种攻击对电网传输能力指标的破坏程度，并且得到电网最经济的容忍度参数。

# 第6章 结论与展望

## 6.1 研究结论

复杂网络的两个基本元素：节点、边。电网抽象建模时，将母线视为节点，线路视为边，因此复杂网络理论可以应用于研究电网结构复杂性与脆弱性以及对连锁故障临界性的研究。本文参照抽象复杂网络的度、介数等参数定义，并结合电网的特性，提出了针对电网的电气网络参数，力争评估出符合真实电网的脆弱性指标。

本文研究工作主要取得以下成果：

(1) 通过Matlab构建了三种网络：随机、小世界、无标度网络，并分析了三种网络的形成与特征。并仿真实验了蓄意“度”参数攻击三种网络，得出无标度网络面对“度”攻击脆弱性最明显，而小世界网络表现出强鲁棒性。

(2) 在电网的拓扑建模算法的基础上，分析了IEEE118与UCTE电网结构的复杂性、小世界性。利用上述模型提出了具有电气度与电气介数概念以及它们的计算方法。所研究的电气度与电气介数体现了电网的潮流特性，而且考虑了发电和负荷的分布对电网的结构复杂性的影响。

(3) 利用复杂网络的平均效率概念提出了电网传输能力指标。通过仿真数据对比，得出该指标兼顾了电网的拓扑结构和电气特性。然后运用Matlab软件模拟八种电网攻击方式，分析多个评估指标的影响程度，表明了高电气介数元件的重要性。最后分析高电气介数元件的形成原因，IEEE118节点系统的节点与线路电气介数近似服从指数分布，节点和线路存在异质性，这说明少数高电气介数的元件承担了大量的电能传输工作。高电气介数节点往往靠近大电源或高负荷节点，高电气介数线路往往是那些在电能传输过程中冗余线路少的传输线路。

(4) 研究了电网连锁故障以及其临界容忍度参数，定义了基于电气介数的节点负荷。引入了节点故障时负荷重分配规则，采用按概率移除节点的方法来模拟电网中节点过载的情况。以IEEE118节点系统为例，利用Matlab进行仿真研究连锁故障模型，对比了三种攻击策略对电网传输能力的破坏程度，得到了电网最经济的容忍度参数。

## 6.2 研究展望

针对基于复杂网络理论的电网脆弱性研究中的不足，本文虽然结合了复杂网络和电网的电气特征，提出节点度，节点电气介数，电网传输能力的概念，并在关键元件的辩识与连锁故障中的临界容忍度研究方面取得一些研究成果。但复杂网络在电网中的应用还远远不够，对于电网的模型及动态行为过于简单。本文认为需要在以下几方面进一步研究：

(1) 本文只考虑电网的拓扑结构和有功功率的影响，直流潮流法进行潮流分析过于简单，忽略了电网中无功特性以及相应的动态行为。在研究中，不仅要从宏观上考虑系统的行为特征，还要兼顾电网内部微观层面的特征。

(2) 针对电网脆弱性评价指标，指标多样化，没有统一的指标，因此在研究中可以考虑层次分析法等方法将多个指标融合于一个综合指标，而这需要一定的专家经验数据。

(3) 针对本文中的连锁故障模型，电网母线负荷的定义太过于简单，应考虑多方面因素，如电压，电流，温度等因素，而本文只考虑了功率的影响。本文只考虑了节点连锁故障，而在实际电网中，可能是节点和线路混合故障。关于概率移除元件的问题，根据过载率上升线性递增移除概率的模拟方法过于简单，实际情况很有可能是更复杂的泊松分布函数。另外，本文中的仿真是基于所有节点容忍度参数都相同的前提下仿真的，但不现实。容忍度参数与电网规划时的设计相关，部分非常重要的元件的容忍度参数一定更高，之后的研究希望能得到更多实际电网的参数。因此在以后的研究中需要进一步统计研究电网连锁故障的模拟方法，力求模型、方法与电网真实情景逼似。

(4) 电网规划是一个电力系统的研究重点之一。电网中的脆弱元件主要是电网结构的异质性引起的。将复杂网络理论应用于电网的规划中，应进一步考虑如何添加额外的冗余线路或重新规划电网以达到降低电网中元件脆弱性的目的。在额外成本一定的前提下，按照一定的规律为电网添加新的支路以提高网络的鲁棒性。因此，如何改善甚至消除整个电网的薄弱环节以增强电网抵抗一般故障的能力，这将成为未来的重要研究方向。

复杂网络为电网的安全分析提供新的方向，它提供了全新的视角，使我们从整体上认识电网的复杂性，并讨论相关的动力学特性。运用复杂网络基本理论研究电网的结构脆弱性，对于解释大电网停电机理与研究相应的预防和控制措施，都具有重要的意义。

# 致谢

不知不觉间已临近硕士学位论文答辩，我的学生生涯也即将结束。回首往事，依然记得当初考研的艰辛和汗水，以及初次进入先进控制实验室615时的憧憬和期待。两年半来，感谢我的导师苏永清老师，您不仅在学术上给予了我帮助，也教了我许多为人处世的道理。遇到您作为我的导师，实乃我三生有幸。在此我向您致以最诚挚的谢意。

感谢实验室的岳继光教授、吴继伟、董延超等老师对我的教育与培养，在实验室的学术交流中，他们给了我很多建议与帮助。

接着，我要感谢诸位师兄师姐和同窗，因为有你们的相伴，给我留下了美好的硕士生涯回忆。感谢刘灏师兄不仅对我学业上的关心，生活上的照顾，你在学术上的一丝不苟，深深地感染了我；感谢杨云帆师兄，钱倩师姐等在求职上给我的帮助；感谢博士生侯培鑫与我在学术上的相互督促；感谢同门李飞龙，与你一起学习，一起成长，是我的荣幸。感谢实验室孙强、王艳明、郭慧、张艳、唐政亮，郭海元、陈峰、张鲲鹏、赵闻达、徐晨剑、刘志刚、王森博、施梁、吴琛浩、唐丹旭、陈策、汪胤等同学陪我度过充实又欢乐的研究生生涯。学术上，一起讨论，共同进步；生活中相互关心，互相帮助。天下无不散宴席，分别在即，希望所有的同学未来会更好。

感谢刘永焕老师和研会的小伙伴们，是你们的陪伴使我的研究生生活变得更加多姿多彩。感谢16号楼2单元302套间的室友们尹阳红、谢琼、赵朝兴、龙良活、蔡宦麟，因为你们的陪伴，寝室多了欢笑。

感谢同济大学给我提供优越的学习和科研环境，让我深刻体会到学术的严谨、科研技术的精湛。同济给我了更高的平台，享受了更多的优质资源。“同济”也会成为我一张珍贵的社交名片。感谢嘉定校区的静谧的学术环境，让我的内心多了一份恬静；感谢嘉定校区的食堂阿姨，让我更加深刻地体会了“吃在同济”；感谢电信学院的电梯，让平淡的生活多了一份“刺激”感。感谢电信学院的网络，让我远离尘世的浮华与喧嚣，沉下心来研读文献，疾书论文。

最后我最想感谢的是我的父母，是你们的支持才让我不断向远方迈进，开拓自己新的人生。但愿还来得及，趁你们老去前，我唯有好好工作和生活，让你们感到放心，也是对你们最大的回报。

谨以此文，表达我深深地感谢！

2016年3月

1. # 参考文献

   [] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11):1-5. [↑](#endnote-ref-2)
2. [] Dagle J E. Postmortem analysis of power grid blackouts - The role of measurement systems[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2006, 4(5):30-35. [↑](#endnote-ref-3)
3. [] 李生虎, 丁明, 王敏,等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13):27-31. [↑](#endnote-ref-4)
4. [] Yu X, Singh C. Expected power loss calculation including protection failures using importance sampling and SOM[C]// Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE. IEEE, 2004:206-211 Vol.1. [↑](#endnote-ref-5)
5. [] Zhou Q, Davidson J, Fouad A A. Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1):525-532. [↑](#endnote-ref-6)
6. [] 金鸿章. 复杂系统的脆性理论及应用[M]. 西北工业大学出版社 [等], 2010. [↑](#endnote-ref-7)
7. [] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10):18-23. [↑](#endnote-ref-8)
8. [] Wang K, Zhang B H, Zhang Z, et al. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2011, 390(s 23–24):4692-4701. [↑](#endnote-ref-9)
9. [] Liu C C, Jung J, Heydt G T, et al. The strategic power infrastructure defense (SPID) system. A conceptual design[J]. Control Systems IEEE, 2000, 20(4):40-52. [↑](#endnote-ref-10)
10. [] Ten C W, Liu C C, Manimaran G. Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems[J]. Power Systems IEEE Transactions on, 2008, 23(4):1836-1846. [↑](#endnote-ref-11)
11. [] Caldarellia G, Catanzarob M. The corporate boards networks [J]. Physical A, 2004, 338:98-106 [↑](#endnote-ref-12)
12. [] Newman M. Scientific collaboration networks I: Network construction and fundamental results [J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 016131. [↑](#endnote-ref-13)
13. [] 刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析[J]. 物理学报, 2007, 56(1):106-112. [↑](#endnote-ref-14)
14. [] Meng Q K, Zhu J Y. Traffic of indistinguishable particles in complex networks[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(9): 3632-3638. [↑](#endnote-ref-15)
15. [] Li X M, Zeng M H, Zhou J, Li K Z. Hierarchy property of traffic networks[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(9): 090510. [↑](#endnote-ref-16)
16. [] 陈卫东, 徐华, 郭琦. 国际石油价格复杂网络的动力学拓扑性质[J]. 物理学报, 2010, 59(7):4514-4523. [↑](#endnote-ref-17)
17. [] 汪小帆. 复杂网络理论及其应用[M]. 清华大学出版社, 2006. [↑](#endnote-ref-18)
18. [] Zaveri D, Porjesz B, Manz N, et al. The Structure and Funktion of Complex Networks[J]. Siam Review, 2003, 45(2):167. [↑](#endnote-ref-19)
19. [] Watt D J, Strogatz S H. Collective dynamics of `small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442. [↑](#endnote-ref-20)
20. [] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512. [↑](#endnote-ref-21)
21. [] Watt D J, Strogatz S H. Collective dynamics of `small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684):440-442. [↑](#endnote-ref-22)
22. [] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512. [↑](#endnote-ref-23)
23. [] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析(第2版)[M]. 清华大学出版社, 2007. [↑](#endnote-ref-24)
24. [] 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. [↑](#endnote-ref-25)
25. [] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15):21-24. [↑](#endnote-ref-26)
26. [] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊,等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8):11-14. [↑](#endnote-ref-27)
27. [] 邵莹, 于继来. 采用源流路径电气部分信息的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009(31):34-39. [↑](#endnote-ref-28)
28. [] 丁剑, 白晓民, 赵伟,等. 基于二维平面拟合的电网脆弱性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8):1-4. [↑](#endnote-ref-29)
29. [] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010(13):61-68. [↑](#endnote-ref-30)
30. [] 王虎. 基于广义特勒根定理的电网脆弱性研究[D]. 南京理工大学, 2009. [↑](#endnote-ref-31)
31. [] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E, 2004,69(2):025103 1-4. [↑](#endnote-ref-32)
32. [] A.B.M.Nasiruzzaman, H.R.Pota, Most. Nahida Akter. Vulnerability of the large-scale future smart electric power grid[J]. Physica A, 2014, 11-24, 413. [↑](#endnote-ref-33)
33. [] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks [J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102. [↑](#endnote-ref-34)
34. [] CrucittiR, LatoraV, MarchioriM. Atopologic alanalysis of the Italian electric power grid [J]. Physical A, 2004, 338(1):92-97. [↑](#endnote-ref-35)
35. [] 徐立新, 杨建梅, 姚灿中,等. 基于加权网络模型的电网连锁故障分析[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(11):1607-1612. [↑](#endnote-ref-36)
36. [] Wen-Xu W, Guanrong C. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure.[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2008, 77(2):026101.1-026101.5. [↑](#endnote-ref-37)
37. [] Dai Y Y, Chen G, Dong Z Y, et al. An improved framework for power grid vulnerability analysis considering critical system features[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2014, 395(4):405-415. [↑](#endnote-ref-38)
38. [] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. Complex systems analysis of series of blackouts:

    cascading failure, critical points, and self-organization[J].Chaos,2007, 17(2):026103. [↑](#endnote-ref-39)
39. [] 丁雪阳, 刘新东. 基于最优风险指标的连锁故障模型和薄弱线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18):7-10. [↑](#endnote-ref-40)
40. [] Ren H, Dobson I, Carreras B A, et al, Long-term effect of the N−1 criterion on cascading line [↑](#endnote-ref-41)
41. [] Dobson I, Chen J, Throp J S, et al, Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events[C]//Hawaii International Conference on System Science. Hawaii, USA:IEEE, 2002:119-128. [↑](#endnote-ref-42)
42. [] Ren H P, Song J, Yang R, et al. Cascade failure analysis of power grid using new load distribution law and node removal rule[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2016, 442(1):239-251. [↑](#endnote-ref-43)
43. [] Zhu Y, Yan J, Sun Y, et al. Revealing Cascading Failure Vulnerability in Power Grids Using Risk-Graph[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12):1-1. [↑](#endnote-ref-44)
44. [] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006(08):7-10. [↑](#endnote-ref-45)
45. [] 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. [↑](#endnote-ref-46)
46. [] Freeman, L.C. The Development of Social Network Analysis: A Study in the Sociology of Science. BookSurge, North Charleston, SC, 2004. [↑](#endnote-ref-47)
47. [] Newman M E J. A Measure of betweenness centrality based on random walks[J]. Social Networks, 2005, 27(1): 39-54. [↑](#endnote-ref-48)
48. [] Brandes U, Fleischer D. Centrality measures based on current flow [C]. In:proceedings of the 22nd Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science, 2005:533-544. [↑](#endnote-ref-49)
49. [] 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(1):33-39. [↑](#endnote-ref-50)
50. [] Bompard E, Wu D, Xue F. The Concept of Betweenness in the Analysis of Power Grid Vulnerability[C]// Engineering. Complexity in. IEEE, 2010:52-54. [↑](#endnote-ref-51)
51. [] Petter H, Beom Jun K, No Y C, et al. Attack vulnerability of complex networks.[J]. Physical Review E, 2002, 65(5):634-634. [↑](#endnote-ref-52)
52. *pu*为标幺值单位 [↑](#footnote-ref-1)
53. *pinv*为MATLAB广义逆矩阵计算函数 [↑](#footnote-ref-2)
54. [] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10):20-25. [↑](#endnote-ref-53)
55. [] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks.[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2002, 66(6 Pt 2):114-129. [↑](#endnote-ref-54)
56. [] LATOR A V. MARCHIORI M. Efficient behavior of small—world networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19):1-4. [↑](#endnote-ref-55)
57. [] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks.[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2002, 66(6 Pt 2):114-129. [↑](#endnote-ref-56)
58. [] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 69(4 Pt 2):266-289.

    # 附录

    # 屏幕快照 2016-01-14 下午4

    IEEE118节点系统拓扑图

    # 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

    **个人简历：**

    韩泽文，男，1990年11月生。

    2013年6月毕业于宁波大学 电气工程与自动化专业 获学士学位。

    2013年9月入同济大学 控制科学与工程专业 攻读硕士学位。

    **已发表论文：**

    [1] 韩泽文, 苏永清, 岳继光, 张鲲鹏.电网脆弱性综合指标评估与建立,电力建设.Vol.35,No.8,中文核心. [↑](#endnote-ref-57)
59. *linspace*是Matlab的区间等分函数 [↑](#footnote-ref-3)