

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

華東交通大學

碩士學位論文

相依网络的鲁棒性优化研究

学位申请人： 程运洪

学 科 专 业： 控制科学与工程

指 导 教 师： 陈世明 教授

答辯日期：

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写的研究成果，也不包含为获得华东交通大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人签名_____日期_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解华东交通大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

保密的论文在解密后遵守此规定，本论文无保密内容。

本人签名_____导师签名_____日期_____

相依网络的鲁棒性优化研究

摘要

随着社会的发展,科技的进步,城市基础设施建设进程的不断加快,不断涌现出各种各样的基础设施网络,不同基础设施网络之间联系日益密切。与单一网络相比,这种具有相依关系的网络更加复杂,已有单一网络的研究成果很难解释这类网络所表现的性质、现象等。通过对基础设施网络发生的事故原因进行分析可知,网络重要节点发生故障以及故障传播方式对基础设施网络的功能会造成巨大影响。因此,本文以复杂网络理论知识为基础,为达到“提高相依网络鲁棒性”这一目的,在相依网络的保护策略以及设计符合实际的负载重分配策略等方面进行了研究。本文的主要研究成果如下:

首先,对相依网络的研究现状进行概括总结,从复杂网络基本模型、相依网络基本模型、相依网络级联失效方式、负载重分配方式以及相依网络鲁棒性测度这五个方面进行了总结,从而为后续的研究工作提供了有力的理论依据。

其次,以一对一随机相依网络模型为基础,研究不同加边保护策略对网络鲁棒性的影响。基于两个无标度网络构建相依网络模型,并提出基于邻居信息的节点重要度占比加边保护策略。与已有的加边保护策略进行仿真对比,证明了所提策略的有效性。通过设定加边比例 F 与分配倾向系数 P 两个重要参数。针对网络遭受随机攻击后,研究了采取不同加边保护策略后对网络鲁棒性的提升情况。仿真结果表明,随着加边比例 F 的增加,相依网络的鲁棒性增强。在加边比例一定时,网络的鲁棒性随着分配倾向系数 P 的减小呈现先增强后减弱的现象。在分配倾向系数 $P=0.5$ 时,网络的鲁棒性最好。这项研究对于如何合理改善网络的结构,有效提高网络的鲁棒性具有一定的指导意义。

最后,针对相依网络中的失效节点(边)负载分配问题,提出一种较为符合实际的负载重分配策略,该策略有效减小了在级联失效过程中网络节点的容忍参数阈值,能够很好的提高网络鲁棒性。在网络遭受蓄意攻击时,基于本文所提负载重分配策略,研究最大剩余容量强度参数 γ 、负载重分配效率参数 θ 以及初始负载强度参数 τ 对相依网络鲁棒性的影响。通过与常见的几种负载重分配策略进行仿真对比,验证了所提的基于领域内节点最大剩余容量的相依网络负载重分配策略具有明显的优势。以 $SF-SF$ 与 $ER-ER$ 网络遭受蓄意攻击为例,研究不同参数条件下,网络鲁棒性的变化情况。通过仿真发现,剩余容量强度参数 γ 值和初始负载强度参数 τ 值的增加都会使网络的鲁棒性表现出先增强后减弱的规律;网络的鲁棒性会随着分配效率参数 θ 值的增加呈现出一直减弱的趋势。因此,合理的调节领域内节点最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载强度参数的大小,可以有效提高网络的鲁棒性。这项工作对于合理分配

网络构建成本以及抑制网络级联失效过程具有一定的指导作用。

关键词：相依网络，鲁棒性，级联失效，加边策略，负载重分配策略

RESEARCH ON ROBUSTNESS OPTIMIZATION OF THE INTERDEPENDENT NETWORK

ABSTRACT

With the development of society, the progress of science and technology, the accelerating process of urban infrastructure construction, various infrastructure networks are continuously emerging, and the connection between different infrastructure networks are becoming more and more closely. Compared with single network, this dependent network is more complex. Single network research results are hard to explain the nature and phenomenon of the dependent networks. Through the analysis of the causes of the accidents in the infrastructure network, we can see that the failure of network nodes and the propagation of faults will have a huge impact on the functions of the infrastructure network. Therefore, based on the knowledge of complex network theory, this paper aims to achieve the goal of "improving the robustness of dependent networks", and research on the protection strategies in the dependent network and the design of the load redistribution strategy conforming to the actual situation. The main research results of this paper are as follows:

Firstly, the research status of the interdependent network are summarized from five aspects which the basic model of complex network, basic model of interdependent network , the cascading failure mode of interdependent network, load redistribution and the robustness measure of interdependence network. This provides a strong theoretical basis for subsequent research work.

Secondly, the research on the influence of the robustness of different edge-adding protection strategies on based on the model of the one-to-one random interdependent network. Based on two scale-free networks, the interdependent network model is constructed, and the edge protection strategy about the importance of node base on neighbor information is proposed. Compared with the existing edge-adding protection strategies, the effectiveness of the proposed strategy is proved. By setting two important parameters, the ratio of edge-adding (F) and the proportion of the distribution tendency(P). After random attacks, the robustness of the interdependent network is improved after adopting different edge-adding protection strategies. The simulation results show that with the value of F increasing , the robustness of the interdependent network increases. When the value of F is constant, the robustness of the interdependent network increases first and then decreases with the decrease of the value of P . When the value of P is 0.5, the robustness of the interdependent network is the best. The research have certain guiding significance for how to reasonably improve the structure of the network and effectively improve the robustness of the network.

Finally, aiming at the problem of load distribution of fails nodes (edges) in the interdependent network, the load redistribution strategy conforming to the actual situation is proposed. This strategy can effectively reduce the threshold of tolerance of nodes in the process of cascade failure, and improve the robustness of the interdependent network. When the network is deliberately attacked, the research on the influence of the robustness of the maximum residual capacity strength parameter γ , the load redistribution efficiency parameter θ , and the initial load strength parameter τ about the interdependent network based on the load redistribution strategy proposed in this paper. Compared with several common load redistribution strategies, it is verified that the load redistribution strategy based on the maximum remaining capacity of the nodes in the domain proposed has obvious advantages. Take the deliberate attack on the interdependent network of $SF-SF$ and $ER-ER$ as an example to study the robustness of the interdependent network under different parameters. Through simulation, it is found that the increase of the value of the maximum residual capacity strength parameter γ and the initial load strength parameter τ will make the robustness of the network show the law of strengthening first and then weakening; the robustness of the network will appear to be weakening as the value of the load redistribution efficiency parameter θ increases. Therefore, a reasonable adjustment of the maximum residual capacity strength parameters, the load redistribution efficiency parameters, and the initial load strength parameters in the domain can effectively improve the robustness of the interdependent network. This work has a certain guiding role for the rational distribution of network construction costs and the inhibition of the process of cascading failure in the interdependent network.

Key words: interdependent network, robustness, cascading failure, edge-adding protection strategy, the load redistribution strategy

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 研究背景和意义.....	1
1.3 研究理论背景.....	2
1.3.1 复杂网络理论.....	2
1.3.2 复杂网络的级联失效.....	3
1.3.3 相依网络的级联失效模型.....	4
1.3.4 相依网络的节点重要度与鲁棒性优化.....	5
1.4 内容和结构编排.....	6
第二章 相依网络模型及其级联失效过程研究概述.....	8
2.1 复杂网络基本模型.....	8
2.1.1 规则网络模型.....	8
2.1.2 随机网络模型.....	9
2.1.3 WS 小世界网络模型.....	9
2.1.4 无标度网络模型.....	9
2.2 相依网络概念及常见模型.....	10
2.2.1 相依网络的基本概念.....	10
2.2.2 一对一全相依网络模型.....	10
2.2.3 部分相依网络模型.....	11
2.2.4 多对多相依网络模型.....	11
2.3 相依网络级联失效模型.....	11
2.3.1 无负载作用的相依网络级联失效模型.....	12
2.3.2 负载作用下的相依网络级联失效模型.....	12
2.4 负载分配模型.....	13
2.4.1 局部负载重分配.....	13
2.4.2 剩余容量局部负载重分配.....	14
2.5 相依网络鲁棒性测度.....	15
2.5.1 最大连通片.....	15
2.5.2 平均失效规模.....	15
2.6 小结.....	16
第三章 不同加边保护策略下的相依网络鲁棒性优化研究.....	17
3.1 相依网络模型以及鲁棒性测度.....	17

3.1.1	无负载作用的相依网络模型.....	17
3.1.2	相依网络的级联失效.....	18
3.1.3	相依网络抵抗级联失效的鲁棒性测度.....	18
3.2	相依网络的加边保护策略.....	19
3.3	仿真结果分析.....	20
3.4	小结.....	23
第四章	基于领域内节点最大剩余容量的相依网络负载重分配策略.....	25
4.1	相依网络负载容量模型与鲁棒性测度.....	25
4.2	相依网络的级联失效方式.....	26
4.3	负载重分配策略.....	27
4.4	仿真与分析.....	28
4.4.1	不同分配策略下的仿真对比.....	28
4.4.2	不同参数对相依网络鲁棒性的影响.....	30
4.5	总结.....	32
第五章	总结与展望.....	33
5.1	总结.....	33
5.2	研究展望.....	33
参考文献	35
个人简历	在读期间发表的学术论文.....	39
致谢	40

第一章 绪论

1.1 引言

随着社会的不断发展,科技的不断进步,使得基础设施建设进程日益加快,同时使得人们不知不觉地身处各种各样、复杂庞大的网络当中,如供电网,交通网络,供水网络等。现实中的网络系统具有规模庞大、结构复杂多样等特点,这为复杂网络研究提供了良好的现实基础,同时复杂网络为研究实际网络提供了全新的思路。当今社会,随着科技的进步,城市基础建设的速度不断加快,使得各种网络之间相互交织、融合。这些网络一方面使人们的生活变得更加方便、快捷,极大的提高了人们的生活质量,如电力网络和供水网络融合保障了人们日常对于饮用水的需求,电力网络与交通网络融合保证了人们的正常出行;另一方面,由于这些网络结构和功能的复杂性、网络间的相互作用,在某些因素的作用下很容易导致网络发生故障。一旦某个网络中发生故障,不仅会影响自身网络的结构和功能,而且会通过网络间的某种联系将故障的影响进行传播和放大,从而影响其他网络的结构和功能。在各种基础设施网络相互交织、融合的今天,某个网络一旦发生严重的事故,不仅会对网络的结构和功能造成严重破坏,而且会影响到人们的生活和发展,从而造成不可挽回的损失。因此,如何避免相依网络故障的发生或者减少故障传播造成的损失已成为一个亟待的问题,具有重要研究价值。

1.2 研究背景和意义

当下,随着城市基础设施建设步伐的不断向前迈进,网络化的社会环境俨然形成,人们生活和发展正处在这形形色色的网络当中。现实中网络形成原因各不相同,有天然形成的,如食物链网络等;有人为所致的,如交通网络等。这些真实存在的网络为复杂网络的研究提供了现实基础,复杂网络作为一门研究网络系统的科学门类,为研究实际网络系统提供了一种途径。

近年来,随着对复杂网络的研究不断深入,对于复杂网络的拓扑结构与网络的特性^[1-8]等方面的研究都取得了丰硕的成果,如可调度分布的无标度网络演化博弈^[9]、度相关性的分析与扰动^[10]、社团结构的识别^[11]等一系列网络特性指标。在此基础上,学者们开始对实际网络进行研究,诸如交通网络^[12],电力网络^[13],互联网^[14]等。

随着对复杂网络研究进一步深入,人们发现实际网络系统间并不是独立存在的,它们之间相互联系、彼此影响,如物理依附、逻辑依赖、能量或信息交换等。随着物联网的兴起、智慧城市的基础设施不断完善使得人们的生活越来越方便化、智能化,人们在常见基础设施网络的基础上,如电力网络、道路交通运输网络、航空客运网络等,配备了具有感知、运算和控制能力的设备,结合通信系统以及无线通信、大数据处理等现代化技术,使得这种具有相互依存关系的网络在现实社会中随处可见。以电力网络为例,电力

网络根据通信网络传输过来的控制信息对网络中的设备施加控制,确保整个电力网络的正常供电;同时电力网络为通信网络中的设备提供电力支持,保障了控制信息不间断,正因为彼此之间的相互关系使得网络工作效率得到大幅度的提升。由此可见,这种具有相互依存关系的网络能够更加贴切地反映出现实社会中存在的网络系统,这里我们将这种具有相互依存关系的网络称为相依网络。相依网络中相依关系可能对网络性能起到提升作用,但也可能使网络变得更加脆弱。一旦某个网络中的节点发生故障,除了可能造成自身网络结构发生改变或者功能发生故障外,会通过网络间的依赖关系将故障的影响传播到另外一个网络中,并很有可能造成其网络结构发生改变、功能丧失,最终一个小小的故障就有可能对整个系统造成严重的后果^[15],例如 2003 年 8 月的北美大停电事故,这次事件给当地造成不可估量的损失。其中航空停止客运,地铁列车、公交车被迫停止工作造成交通堵塞,整个交通系统遭受破坏以致崩溃。另外,住宅楼与商业区大面积停电,使得很多人们陷入恐慌当中。停电还造成了通信网络的中断导致无法对外进行联系。总之,人们正常的生活生产已经被严重打乱。这次事故告诉人们,故障本身的危害远远不及其在网络系统间的蔓延、传播所造成的破坏大。对于相依网络来说,其结构更为庞大、功能更为复杂,完全不同于单一网络,以致于现有的单一网络研究成果不能完全适用于相依网络。因此,对相依网络的级联失效内在机理进行分析研究,对于提高相依网络的鲁棒性,减少故障影响在网络间的蔓延具有重要意义。

同时对发生事故的基础设施网络进行事故原因分析发现,往往是由网络中的重要部件或设施(节点)发生故障引发级联失效,从而造成整个网络崩溃。因此,在相依网络中加强对重要节点的保护和抑制级联故障发生和传播显得尤为重要。一旦找到网络中的重要节点,根据实际情况对重要节点加以保护就能够有效阻止故障发生或者传播,从而达到保护整个网络的目的。如在交通网络中,对时常发生拥堵的路段通过限行等方式可以大大降低交通堵塞的发生概率。另外,现实世界的网络通常是有一定的负载和容量,如电网中的电能,供水网络中的水等,当网络的节点由于某些原因发生故障时,其上的负载将会被分配到其他节点上。分配结束后,若有节点负载超出自身容量,那么该节点会因为过载而失效,进而引发新一轮的负载重分配,如此循环往复,直至没有过载节点产生为止,这一过程称为级联失效。级联失效是复杂网络故障传播过程的动态体现,与现实网络故障传播的情况尤为贴近。因此,对相依网络中重要节点进行保护以及级联失效过程中负载分配机理的研究,对实际基础设施网络减少级联失效的发生具有重要的指导意义。

1.3 研究理论背景

1.3.1 复杂网络理论

复杂网络最先是由数学家们开始研究的，他们以图论为研究方法，开始研究一些比较规则的网络。在 1959 年，由数学家 Erdos 和 Renyi 首次提出了随机网络模型^[16]。该模型的提出为复杂网络领域的相关研究打了一道大门。到二十世纪末，针对复杂网络表现出的小世界效应，有学者提出了一种 WS 小世界网络模型^[17]。然而在 1999 年 10 月，Barabasi 等人^[18]指出很多实际存在的网络是服从于幂律分布的。在此基础之上，学者们构建了一个 BA 无标度网络模型，该模型表现出较强的异质性。无论是 ER 随机网络、WS 小世界网络模型还是 BA 无标度网络模型，这些网络模型的提出对于复杂网络的研究来说都具有跨时代的意义，并将复杂网络的研究推向新的高潮。

1.3.2 复杂网络的级联失效

在实际社会中存在着大量的网络系统，例如电力网络、供水网络、通信网络以及交通运输网络。当网络中一个或多个节点由于某种原因而产生故障时，这种故障影响会通过节点的连接关系进行传播，同时造成其他节点失效，如此循环往复，直至没有失效节点产生为止，这一过程称之为级联失效。

目前复杂网络级联失效的模型主要有以下几种：沙堆模型^[19-21]、CASCADE 模型^[22]，OPA 模型^[23]以及负载-容量模型^[24-26]。对这些模型进行分析得出，影响复杂网络级联失效的因素可以概括成以下三点：边（节点）的初始负载、边（节点）的初始容量、负载重分配策略。在定义初始负载方面，很多模型中采用节点的介数作为该节点的负载^[27-28]，但是这需要获取整个网络的全局信息，计算复杂度相对来说比较高。为了降低计算复杂度，一些模型中采用将节点度的函数作为该节点的初始负载。这种定义方法虽然不需要获取网络的全局信息，但是仅依据节点自身的度进行负载定义，这种定义方式显得过于简单。因此，王建伟等人^[29]重新定义了节点的初始负载，即节点自身度与其邻居节点度之和的乘积，这种定义方式不仅考虑到邻居节点度对负载大小的影响，而且大大提高了节点自身度的实用性。在容量定义方面，目前多分为两种类型，一种是初始容量与初始负载成正比关系，如 Matter^[30]认为节点初始容量与初始负载成正比例，即 $C = (1 + \alpha)L$ ，其中 α 为可调参数，初始负载 L 由节点的介数表示，这一模型的提出为一些实际存在的网络建模开拓了思路，如物流网络，通信网络等。此后，负载-容量模型被应用于实际网络的级联失效分析当中，并且在此基础之上建立了许多改进模型。另一种是负载-容量非线性模型，如 Kim 等人^[31]通过对多个真实网络的分析发现网络中容量小的节点，其剩余容量并不小。针对这一现象，指出网络的负载与容量之间不一定都表现为线性关系。因此，窦等人^[32]提出了一种负载-容量非线性模型。目前在负载分配方式方面主要分为以下几种方式：平均分配^[33]、全局分配方式^[34]、局部择优分配^[35]以及可调负载重分配^[36-37]等。上述负载分配方式当中，平均分配将负载分配过程理想化，忽略了网络的负载实际分配情况，故而缺乏实际意义。全局分配方式需要掌握网络中所有节点的当前信息，大大增加了计算难度，故而很难适用于大型网络。局部择优分配方式

是根据失效节点的邻居节点负载权重比例将负载进行分配,仅考虑节点局部信息的影响,降低了计算复杂度,提高了运算效率,因而可以适用于大型网络。在实际网络中失效节点的负载不一定分配到所有节点或者邻居节点上,可能介于两者之间。针对这一情况,段东立等人^[36-37]提出了一种新的负载重分策略,该策略下能够对分配范围和分配的均匀性进行调节。上述研究都只考虑单一网络的情况,然而在现实社会中,各类基础设施网络系统之间的信息交互越来越频繁,网络之间的相互依赖性变强,如电力-供水网络、交通-通信网络、电力-通信网络等。这种具有相依关系的网络系统级联失效过程有别于单一网络,故而以往单一网络的研究成果不能完全适用于相依网络。因此,如何建立一个较为符合实际相依网络的级联失效机理已然成为一个亟待解决的问题。

1.3.3 相依网络的级联失效模型

目前,对于相依网络级联失效的研究主要是在双层网络和多层网络的框架结构下开展的。双层网络框架,包括一对一相依网络模型、一对多或者多对多相依网络模型。在2010年Buldyrev^[38]等人首次提出一对一相依网络模型,并对网络的级联失效过程进行了分析。人们由此开始对相依网络的研究,并取得了不错的成果^[39-40],如陈世明等人^[41]以BA无标度网络模型为基础建立了基于度的正/负相关相依网络模型,并对不同攻击下模式下网络级联失效问题进行分析研究。刘润然等人^[42]研究了相依网络在几种蓄意攻击方式下的鲁棒性,并指出考虑相依节点影响的攻击方式更加有效。然而在实际的相依网络中并不是所有节点都有与之相依的节点存在,针对这一情况,Shao等人^[43]以随机网络与无标度网络为基础,建立一种一对多的相依网络模型,研究表明这种一对多的耦合方式可以提高网络的整体鲁棒性,使得网络在级联失效过程中渗流相变由一阶相变转为二阶相变。Dong等人^[44]通过建立多对多部分相依网络模型,在该模型下研究不同打击方式对网络鲁棒性的影响。研究表明耦合强度较弱时可以提高网络自身的鲁棒性,同时指出度数高的节点遭受攻击失效对网络的影响比较大。Jiang等人^[45]研究发现网络之间的相依边数影响着网络的抗毁性,当相依边的数目服从无标度分布时,无标度相依网络具有很强的抗毁性。文中还指出相依边的数目增加,网络的抗毁性会降低。然而对于随机相依网络来说,其效果则正好相反。对于一些耦合系统来说,子网络之间的连接关系,不仅仅只有相依关系,而且还存在互联关系。相依关系的存在会降低网络的鲁棒性,而互联关系的存在则可以增强网络抵御级联失效的能力。针对这一问题,Tian等人^[46]以部分相依网络为基础模型,研究相依边与互联边对网络鲁棒性的影响情况。研究发现互联边数目越多,二阶相变的范围会变得越窄,网络的鲁棒性就越好。

然而上述模型都忽略了网络中负载的存在,对于实际网络来说,网络中的节点(边)都有负载,如电线上传导的电、供水管中的水、交通网络中的车辆往来以及乘客运送和物资配送等。考虑到负载存在,陈世明等人^[47]针对六种不同的相依网络模型,研究了网络的耦合强度、子网络的边以及耦合边对网络的鲁棒性的影响。同时比较了耦合边权重和子网络边权重对相依网络成本的贡献度。Peng等人^[48]通过构建一个带有负载作用

的双层相依网络模型来研究网络的级联失效过程, 通过从内/外部度对负载的贡献比、相依关系、子网络内部节点度的相关性等方面来研究网络的鲁棒性能。Hong 等人^[49]提出一种负载再分配方法和失效节点恢复策略, 研究表明不同的网络结构对级联失效故障规模存在一定的影响, 文中还指出恢复效果取决于触发时间、恢复概率、恢复操作的优先级别以及附加的干扰。王竣德等人^[50]研究相依网络中节点负载容忍度对网络鲁棒性的影响。同时还研究了影响节点容忍度的因素, 研究表明负载容忍度存在阈值, 且受网络平均度的影响。

1.3.4 相依网络的节点重要度与鲁棒性优化

现实世界中存在着大量、不同种类的网络系统, 当网络中重要节点或部件遭到破坏时会对网络的功能造成重大影响, 严重地能够导致网络崩溃^[51-52]。因此, 如何对网络中的重要节点进行识别并施加保护措施, 这对维持网络的功能稳定具有重大意义。针对重要节点的识别问题, 有学者做了相关研究, 并给出了重要节点的识别方法, 如度中心性排序^[53]、接近中心性排序^[54]、介数中心性排序^[55]等, 其中度中心性排序是一种简单的局部算法, 接近中心性排序与介数中心性排序需要了解网络的全局信息, 加大了计算难度, 难以适用大型网络。王建伟等人^[56]考虑到节点度与邻居节点度提出了一种新的节点重要度评价方法, 该方法认为节点自身度与邻居节点度之和的乘积决定了节点的重要性, 乘积越大, 节点的重要性就越高。Kitsak 等人^[57]提出了 K-shell 分解算法, 该方法通过剥离法将网络外围度数小的节点一层一层去除, 越靠近内层的节点拥有越高的重要性。周漩等人^[58]利用节点效率评估网络的鲁棒性, 实现了对大型网络可以获得较好的计算能力。阮逸润等人^[59]通过对节点局部网络拓扑的重合程度进行量化, 并重新定义了节点间的相似性。考虑到节点自身度值以及其邻居节点的拓扑结构重合度, 提出了一种新的节点重要度评估算法, 该算法对于节点重要度的识别有明显的优势。然而上述节点重要度的研究多是针对单一网络, 但是现实世界中网络之间存在着相依关系。因此, 对于相依网络节点重要度的研究显得尤为重要, 如吴润泽等人^[60]考虑到单一网络节点重要度评估算法忽略了相依关系的影响, 从而提出一种基于级联失效的相依网络节点重要度评估方法。同时在电网-信息通信相依网络模型上对该方法进行验证, 结果表明该方法能够明显区分节点的重要性。Nguyen 等人^[61]通过在相依网络中节点移除后造成的失效规模大小来衡量节点重要度。Shen 等人^[62]针对随机攻击和蓄意攻击分别提出基于内部相似性的相依网络加边算法和基于自然连通性的相依网络关键节点分析方法。对于关键节点进行识别主要是为了对其进行保护或者基于此对网络进行结构上的优化, 从而实现提高相依鲁棒性能的目标。为此, 一些学者也作了相关研究, 如高彦丽等人^[63]考虑到相依方式会影响网络鲁棒性的这一重要因素, 在无标度相依网络的基础上提出了全局同质化相依网络耦合模式, 在该模式下网络的鲁棒性提到了提高。Du 等人^[64]指出为了提高相依网络的结构鲁棒性, 不仅需要考虑对子网络中的高度数节点、具有高度数依存边的节点进行保护, 还应将两者进行综合考虑。Li 等人^[65]从相依边的权重角度出发, 提出了相

依边分配的优化算法,该算法能够有效的提升相依网络鲁棒性能。Wang 等^[66]提出一种优先连接策略,该策略根据网间相似性,使待加边的节点优先连接其相依节点的邻居节点,并用该策略对已有的加边策略进行优化,从而提高了网络的鲁棒性能。Hou 等^[67]基于沙堆模型研究异质性负载重分配机制,研究发现在负载分配异质性较弱时,网络应对级联失效比较脆弱,负载分配异质性较强时,网络应对级联失效比较强。Gao 等人^[68]通过定义蓄意攻击函数,通过调节参数,研究了六种攻击策略下相依网络鲁棒性,并针对每种攻击策略提出相应的保护策略,从而提高了网络鲁棒性。

1.4 内容和结构编排

本文在复杂网络理论的基础上,对相依网络面对级联失效时鲁棒性展开研究。首先,考虑到相依网络中相依关系的存在会影响子网络节点的特性,结合单一网络节点的重要度知识,对相依网络的相依节点重要度进行全新的定义。基于相依网络的节点重要度,对一对一随机相依网络的重要节点提出一种加边保护策略,研究了加边保护策略对相依网络鲁棒性能的提升情况;接着对带有负载的相依网络级联失效过程进行分析,提出了一个负载重分配策略,并对影响网络鲁棒性的因素进行研究。本文共分为五章,具体安排如下:

第一章:绪论。首先对于本文的研究背景和意义进行了一次详实的阐述,紧接着对复杂网络理论,复杂网络级联失效,相依网络的级联失效模型以及相依网络的节点重要度与鲁棒性优化的研究现状进行阐述,最后对全文的内容和结构进行了安排。

第二章:相依网络模型及其级联失效过程研究概述。首先,介绍了复杂网络基本模型;接着介绍相依网络的基本概念以及几种相依网络模型;针对网络中是否考虑负载作用,详细介绍了无负载作用与有负载作用下的相依网络级联失效过程;然后介绍了在级联失效过程中,常见的几种负载重分配策略;最后对相依网络的鲁棒性以及鲁棒性测度进行了阐述。

第三章:针对一对一随机相依网络,研究加边保护策略对其鲁棒性能的提升情况。基于两个无标度网络构建的相依网络模型,提出了基于邻居信息的节点重要度占比加边保护策略,通过设定加边比例 F 与分配倾向系数 P 两个重要参数,研究了随机攻击方式下,所提加边保护策略对网络鲁棒性的提升情况。与此同时,与已有的加边保护策略进行仿真对比。仿真结果表明,所提策略网络的鲁棒性提升方面具有明显的优势。此外,随着加边比例 F 的增加,整个网络的鲁棒性能在增强。在加边比例一定时,网络的鲁棒性随着分配倾向系数的减小呈现先增强后减弱的现象。在分配倾向系数 $P=0.5$ 时,网络的鲁棒性最好。这项研究成果对于如何合理改善网络的结构,有效提高网络的鲁棒性具有一定的指导意义。

第四章:针对相依网络中的失效节点(边)负载分配问题,提出一种较为符合实际的负载重分配策略,该策略有效减小了在级联失效过程中网络节点的容忍参数阈值 β_c ,能

够很好的提高网络鲁棒性。同时在该负载重分配策略下, 研究网络在遭受蓄意攻击时, 研究最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载参数对相依网络鲁棒的影响。通过与常见的几种负载重分配策略进行仿真对比, 验证了所提的基于领域节点最大剩余容量的相依网络负载重分配策略具有明显的优势。通过在蓄意攻击方式下, 研究 $SF-SF$ 与 $ER-ER$ 网络的鲁棒性发现, 随着剩余容量强度参数 γ 值和初始负载强度参数 τ 值的增加都会使网络的鲁棒性表现出先增强后减弱的规律; 随着分配效率参数 θ 值的增加, 网络的鲁棒性会一直减弱。因此, 合理的调节领域内节点最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载强度参数的大小, 在一定程度上提高网络的鲁棒性。这项工作对于合理分配网络构建成本以及抑制网络级联失效具有一定的指导作用。

第五章: 总结与展望。本章对全文进行了一次全面的总结, 并对后续工作进行一些展望。

第二章 相依网络模型及其级联失效过程研究概述

复杂网络是一门跨越学科门类的研究领域，也是现实生活中复杂网络系统的抽象概括。一个复杂网络是由节点和连边组成，在真实网络中不考虑单元或个体的功能，将其抽象成为节点，单元或者个体间的相互联系可以看作网络节点间连边。然而在现实生活中，孤立的网络几乎是不存在的，每个网络或多或少的可能与其他网络产生某种联系，例如物理依附、逻辑依赖、能量或信息交换等。当一个网络系统中一个节点或者多个节点遭受攻击时，除了影响自身网络其他节点功能以外，由于网络之间节点的相互联系可能使其它网络系统中的节点发生失效，并将这种失效影响进一步的传播放大，最终给整个网络结构和功能造成严重破坏。例如，2003年9月23日，意大利发生了大停电，由于电网中的一个电力站点发生故障，引起了其他电力站点也发生故障，使得通信网络得不到电力供应，无法对电力系统实时调控，进而导致了更多电力站出现故障。因此，通过对相依网络的故障传播机理分析研究，对提高网络的鲁棒性起到一定的借鉴作用。

2.1 复杂网络基本模型

人们通过对现实复杂系统的长期观察和研究，逐步了解了各种不同的系统的拓扑结构，及其不同的特性。综合各种实际数据，研究者们构建各种各样的模型来模拟现实网络。

2.1.1 规则网络模型

规则网络是最简单的，也是最早被提出的网络模型。规则网络节点之间的连接方式简单有序，网络的拓扑性质容易获取。常见的规则网络有以下三种：全局耦合网络、最近邻耦合网络、星形耦合网络。如图 2-1 所示是三种规则网络的拓扑结构图，图 2-1(a) 表示全局耦合网络，网络中的任一两点都有相连边。图 2-1(b) 表示最近邻耦合网络，网络的每个节点与其左右两边 $K/2$ 的节点相连。图 2-1(c) 是星形耦合网络，它有一个中心点，而彼此之间没有连边，无法构成三角形。

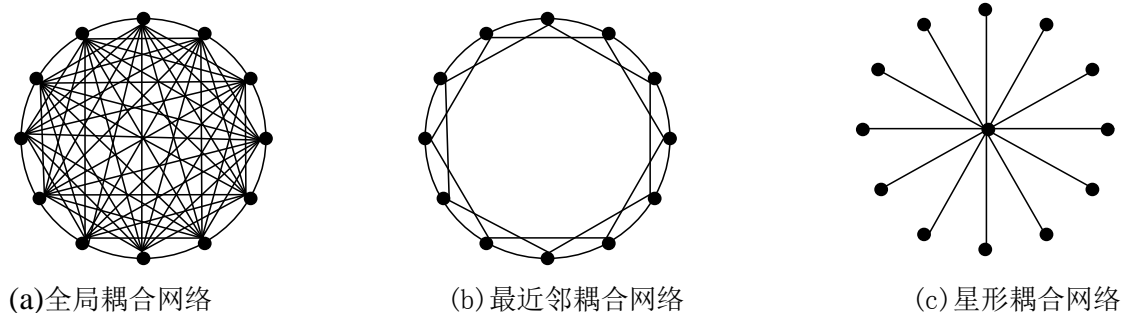


图 2-1 三种规则网络的结构拓扑图

Fig.2-1 The structure topology of three regular networks

2.1.2 随机网络模型

随机网络是最早被 Erdos 和 Renyi^[16]提出来的复杂网络模型。随机网络的生成方式是固定网络的节点数 N ，但不固定网络中连边总数，任意两点以概率 p 进行连边。随机网络的聚类系数很小，平均路径长度与网络的规模呈对数增长关系，这些特征与实际网络存在显著的差异。图 2-2 中展示了三种具有不同连接概率的随机网络，其中节点总数为 10。

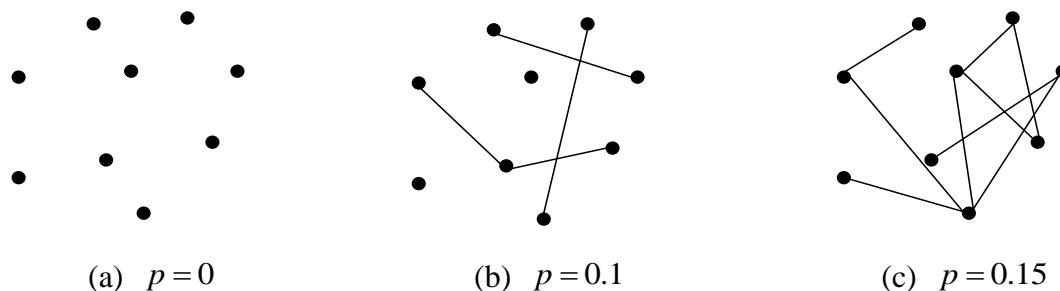


图 2-2 不同连边比例下的随机网络

Fig.2-2 The random network with different connection proportions

2.1.3 WS 小世界网络模型

为了更好地研究实际网络，有学者^[17]提出了小世界网络模型，该模型既具有较大的聚类系数又具有较小的平均最短路径，很符合实际网络的一些特征。在规则模型基础上，通过以非常小的概率 p 将规则网络中的边断开，并随机寻找新的端点连接，这样构造出新的网络称之为小世界网络。图 2-3 所示为 WS 小世界网络模型，图中 $p=0$ 对应于规则网络、 $p=1$ 对应于完全随机网络。

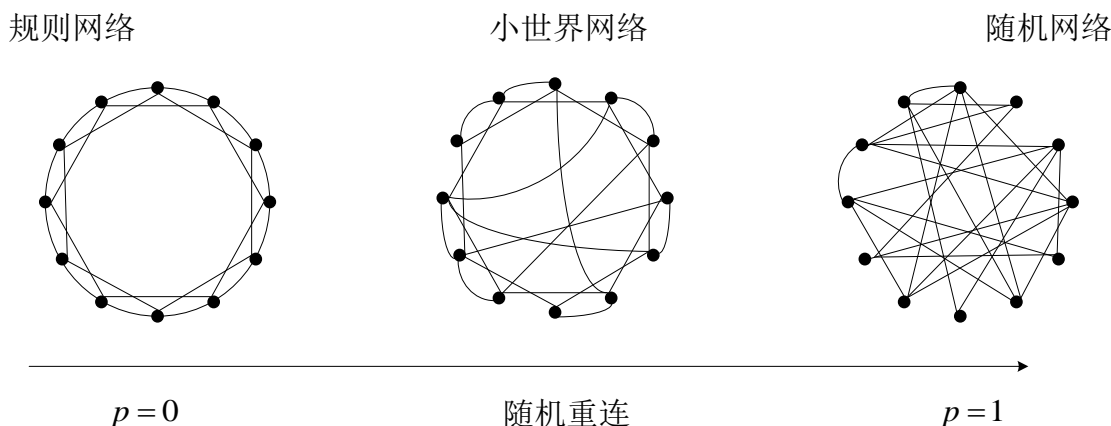


图 2-3 WS 小世界网络模型

Fig.2-3 The model of WS small-world network

2.1.4 无标度网络模型

在展现实际网络特性方面，ER 随机网络和 WS 小世界网络有诸多优势，但是忽视了

实际网络的两个重要特征：增长特性，网络的规模不断扩大；优先连接特性，新加入的节点优先于度高的节点进行连接。基于这样的特性，Barabási 和 Albert^[18]提出了无标度网络模型。在无标度网络中，节点度遵循幂律分布，并具有较短的平均最短路径和较大的聚类系数的特点，同时还具有实际网络的增长特性和优先连接性质，所以无标度网络能够更好地拟合现实世界中的真实网络。图 2-4 所示无标度网络的演化过程。

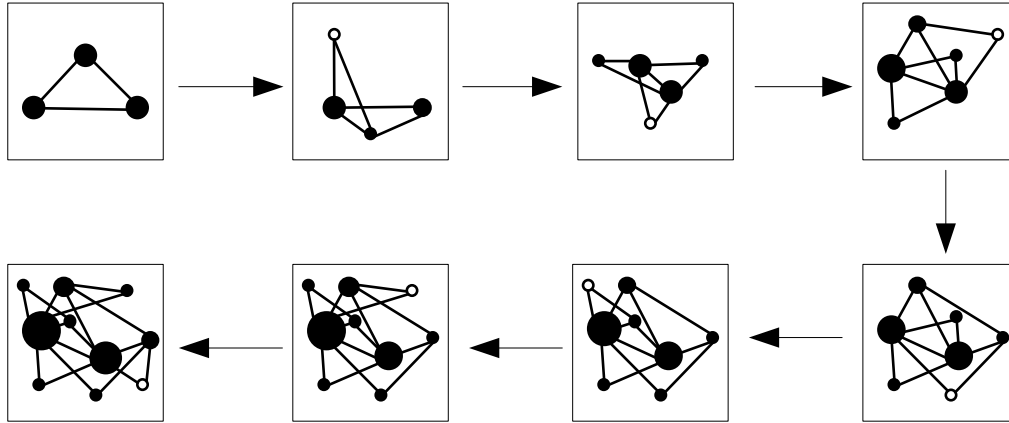


图 2-4 无标度网络模型

Fig.2-4 The model of scale-free network

2.2 相依网络概念及常见模型

2.2.1 相依网络的基本概念

通常网络中存在着两种元素：节点和连接边，连接边是指网络内部的连边。然而对于相依网络来说，除了连接边外，还存在相依边。相依边表示两个子网络节点之间的连接边。从数学角度出发，我们常用图的形式表示网络。我们用两个图的形式表示相依网络，即 $G_A = (V_A, E_A, E_{AB})$ 和 $G_B = (V_B, E_B, E_{BA})$ ，其中 E_{AB} 和 E_{BA} 表示子网络 A 与子网络 B 之间相依关系，若子网络中 A 的节点 i 与子网络 B 中的节点 j 存在相依关系，那么 $E_{A_i B_j} = 1$ ，反之 $E_{A_i B_j} = 0$ 。 G_A 和 G_B 分别表示子网络 A 和子网络 B ， V_A 和 E_A ， V_B 和 E_B 分别是每个子网络内部的节点与内部连接边。

2.2.2 一对一全相依网络模型

Buldyrev^[38]通过对实际的电力信息网络的分析，首次提出了一对一随机相依网络模型，同时指出相依网络的渗流相变属于一阶相变，不同于单一网络的二阶相变，如图 2-5 (a) 所示。在遭受随机攻击时，在该模型下拥有较宽度分布分网络相比于拥有较窄度分布的网络，其网络的鲁棒性较小。这是因为在随机连接时，度数较高的节点有可能与另一个网络中度数较低的节点进行相依连接，这样使得节点发生故障时很容易产生级联效应。

2.2.3 部分相依网络模型

Pashnai^[69]等提出一种更符合实际的部分相依的网络模型,如图 2-5 (b) 所示。该模型不同于全耦合网络模型,而是两个子网络中拥有一定比例的节点之间进行连边。经研究发现,当不存在相依关系的节点比例达到某一特定值时,相依网络会呈现出一级相变崩溃的现象。

2.2.4 多对多相依网络模型

在前人研究的基础上,Shao^[43]等人提出了多对多的相依网络模型,即一个节点至少存在一条或多条相依边,如图 2-5(c)所示。一般情况下,多对多相依网络的渗流相变呈现出一阶相变的特点。只有相依边的比例达到一定阈值时,网络的渗流相变会由一阶相变向二阶相变转变。

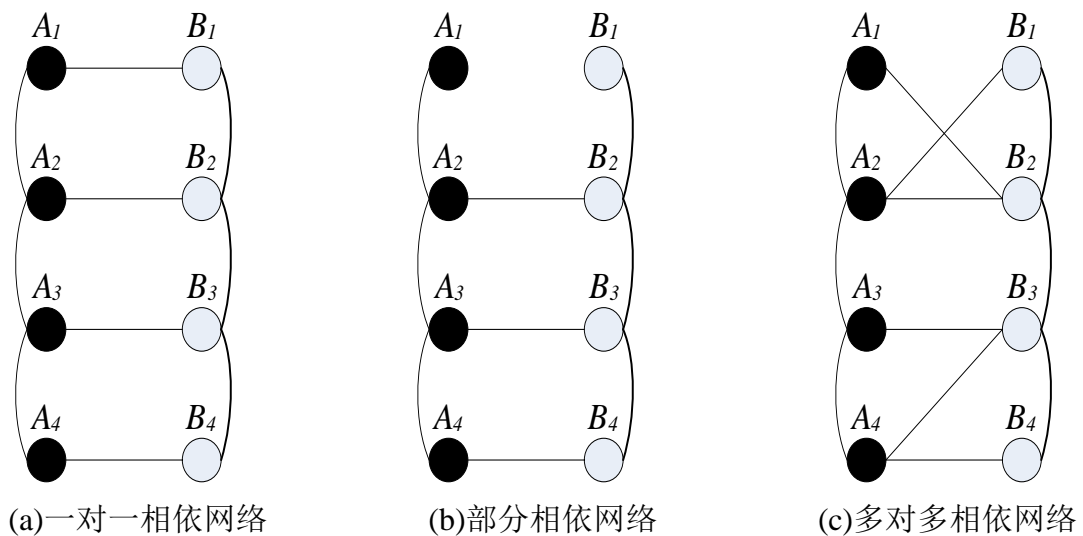


图 2-5 三种相依网络模型

Fig.2-5 The three models of interdependent network

2.3 相依网络级联失效模型

现实生活中,网络因为某些故障导致无法保持网络功能稳定的事件时有发生,例如通信网络上发生信息堵塞导致信息不能及时的交互、电力网络发生设备故障可能引起停电事故的发生等。在实际的网络系统中,一个小部件出现故障有可能影响到其他部件的性能,性能不稳定的部件可能会对网络中其他部件造成影响,就这样故障效应被不断传播放大,最终使得整个网络的功能受到影响,这种故障在网络中传播扩散造成网络破坏的现象称之为网络的级联失效现象^[70]。如在地铁运行网络中某个站点发生故障,有可能引起列车停运,使得其他列车也不能正常运行。同时列车的停运导致人员的滞留、拥挤,有可能导致其他事故的发生,甚至使得整个地铁网络的瘫痪。在真实世界中,小规模级联失效时有发生,其影响的范围相对较小,但当规模很大时,对于整个系统网络的破

坏是十分严重的。例如，在 1986 年 10 月发生的互联网信息阻塞瘫痪事件中，两栋相隔两百米的建筑之间发生网络故障，导致其网速下降 10 倍^[71]；又如 2003 年，美国的大停电事故，由于一段高压线路出现故障引起大规模级联失效，进一步致使美国大停电事故的发生，对社会以及人们生活造成了巨大的影响。因此，对于相依网络级联失效的研究很有必要。

2.3.1 无负载作用的相依网络级联失效模型

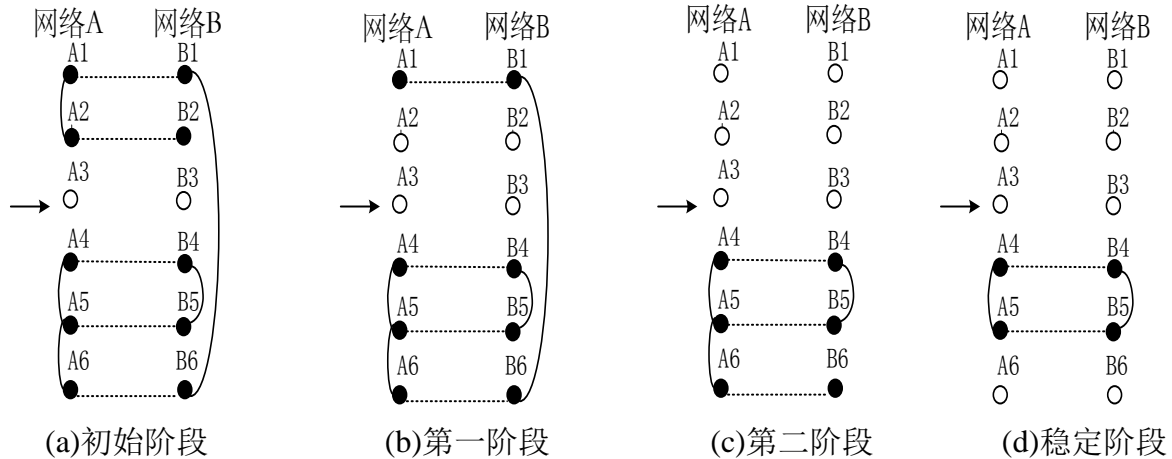


图 2-6 无负载作用下的相依网络级联失效过程

Fig.2-6 The process of cascaded failure of interdependent network under no-load

如图 2-6 所示为无负载作用下的相依网络级联失效过程，在网络中不考虑节点的容量和负载。失效过程主要表现为：假定在初始阶段，子网络 A 中的节点 A3 遭受攻击，一方面在子网络 A 中与节点 A3 相连节点的连边（节点 A2、A4 与 A3 相连）全部移除，另一方面由于相依关系存在，节点 B3 失效，同时移除与节点 B3 相连所有连边，其中节点 B2、B4 与 B3 相连接，如图 2-6(a)所示。分别计算子网络 A 和子网络 B 中的剩余节点是否在最大连通子图中，若不在其中的节点失效移除，同时其相依节点也失效。如节点 B3 的失效导致节点 B2 脱离子网络 B 的最大连通片，所以节点 B2 失效，随之而来的节点 A2 失效，如图 2-6(b)第一阶段所示。此时又再次造成节点 A1 脱离子网络 A 的最大连通片，使得节点 A1 失效，同时触发节点 B1 的失效，上述过程中失效节点会移除与之相连的所有连边，如图 2-6(c)第二阶段所示。不断重复上述过程，直到网络中不再产生脱离子网络最大连通片的节点，网络不再有节点失效，此时网络达到稳定状态，如图 2-6(d)稳定状态所示。

2.3.2 负载作用下的相依网络级联失效模型

实际网络中的节点或者边是存在负荷的，为了更加贴近实际网络，将网络中的节点或者边依据网络自身的特性设定一个初始负荷和最大处理能力（容量）。对于有负载作用的相依网络级联失效模型如下：假定初始阶段，子网络 A 中的节点 A5 遭受攻击失效

时，其上的负载会按照某种规则分配到其他节点 A_2 上，再者移除两者之间的连边，（其中值得注意的是负载重分配只在失效节点所处子网络内部进行，不在网络间进行分配，因为不同网络功能不同，所代表的负载性质也不相同）。由于相依关系，节点 B_6 也随之失效，其上的负载按照同样的规则分配到与之连接的邻居节点 B_5 上，然后移除与之连接的边，如图 2-7(a)初始阶段所示。在节点得到额外的负载后，判断此时的负载是否超过了节点自身的最大处理能力。如果超过，那么该节点将会失效。这里假定节点 B_5 在接收额外负载后，因为节点当前负载超过自身容量而失效。节点 B_5 将负载分配到与之连接的节点 B_3 上，同时又触发了节点 A_6 （与节点 B_5 相依）。同样地节点 A_6 将负载分配至节点 A_1 上，此时网络的状态如图 2-7(b)第一阶段所示。更新网络节点的负载，并判断节点负载与容量的大小关系，若节点 A_1 因过载失效，则节点 B_1 也失效，同样的都进行负载的重新分配，如图 2-7(c)第二阶段所示。如仍有节点负载超出自身容量，将不断重复上述第一、二阶段过程，直到网络达到一个稳定状态，如图 2-7(d)稳定状态所示。

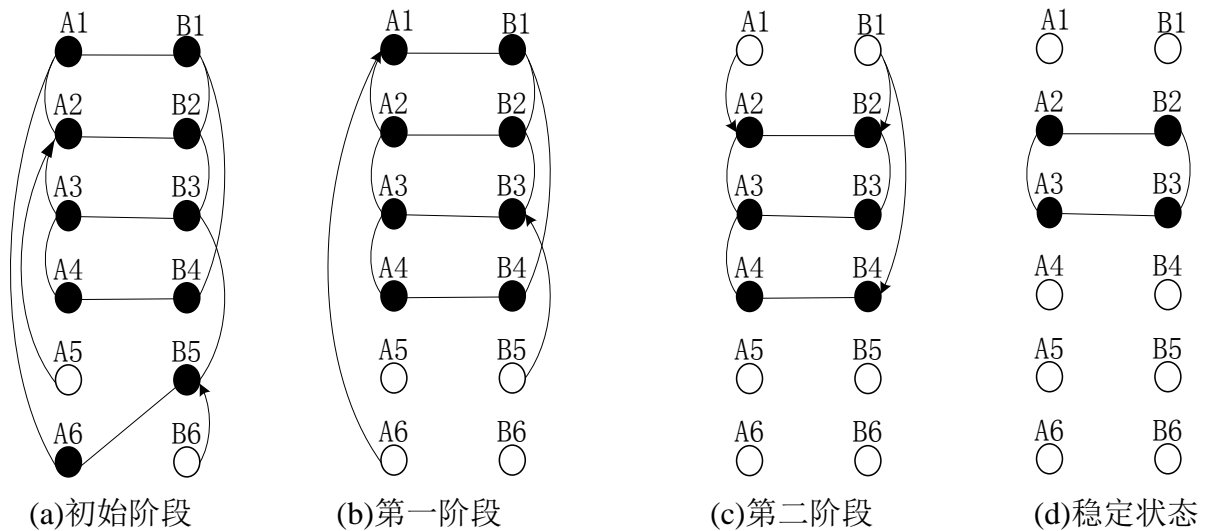


图 2-7 负载作用下的相依网络级联失效过程

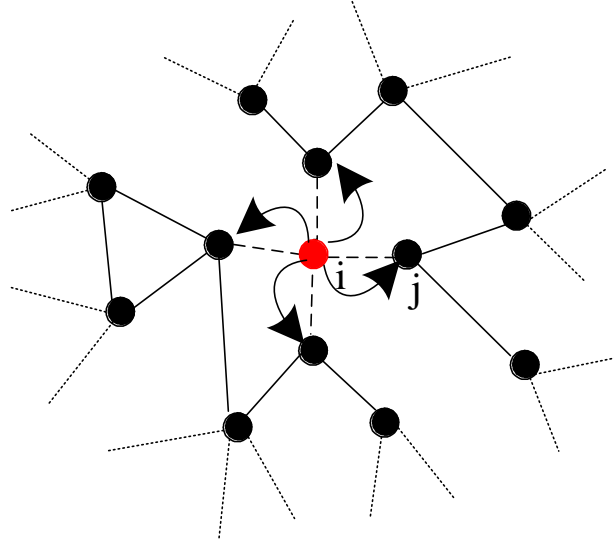
Fig 2-7 The process of cascaded failure of interdependent network under load

2.4 负载分配模型

在复杂网络中，当网络中节点或边发生失效后，其上负载会由其他节点或者边来承担以保证网络正常功能。随着对级联失效动态过程进行深入研究发现，负载重分配方式很大程度上影响着网络的鲁棒性。下面介绍几种负载重分配方式。

2.4.1 局部负载重分配

局部负载重分配方式是指当某一节点（边）失效后，其上负载将按一定的比例分配到邻居节点（边）上。以节点失效为例，图 2-8 表示失效节点 i 的局部负载重分配。

图 2-8 失效节点*i* 的局部负载重分配Fig.2-8 The local load redistribution of failure node *i*

当节点*i*失效后，其邻居节点*j*会按照一定的比例 p_j 分得来自节点*i*的额外负载 ΔL_{ij} ，所得额外负载的大小，由下列公式决定：

$$p_j = \frac{L_j}{\sum_{m \in \Gamma_i} L_m} \quad (2-1)$$

$$\Delta L_{ij} = L_i * p_j = L_i * \frac{L_j}{\sum_{m \in \Gamma_i} L_m} \quad (2-2)$$

其中， p_j 表示节点*j*的负载在节点*i*的邻居节点中的比重， Γ_i 表示节点*i*的邻居节点集。

2.4.2 剩余容量局部负载重分配

与上述局部负载重分配方式不同的是剩余容量局部负载重分配方式充分考虑了邻居节点实时处理问题的能力。假设网络中节点*i*发生故障，节点*j*属于节点*i*的邻居节点集。定义在*t*时刻，节点*j*能从节点*i*上所得额外负载 ΔL_{ij} 占故障节点*i*的负载 L_i 比例为 p_j ：

$$p_j = \frac{C_j - L_j(t)}{\sum_{m \in \Gamma_i} (C_m - L_m(t))} \quad (2-3)$$

$$\Delta L_{ij} = L_i * p_j = L_i * \frac{C_j - L_j(t)}{\sum_{m \in \Gamma_i} (C_m - L_m(t))} \quad (2-4)$$

其中, Γ_i 表示节点 i 发生故障时, 其邻居节点中剩余容量大于 0 的节点集合。 $C_j - L_j(t)$ 表示节点 j 的实时剩余容量。

2.5 相依网络鲁棒性测度

网络的鲁棒性测度是用来衡量网络抵御级联失效能力的性能指标。网络鲁棒性测度的结果会受到网络拓扑结构、攻击方式以及失效方式的影响。同时不同的鲁棒性测度对于网络性能衡量的侧重点不同, 并非一个测度指标就可以适用所有的网络。因此, 选取恰当的测度对于衡量网络鲁棒性来说是十分重要的。

2.5.1 最大连通片

当网络中一个节点(边)或多个节点(边)失效时, 将可能引发网络中某些节点(边)也随之失效, 并进一步地导致更大范围内的节点(边)失效, 从而形成级联效应。由于级联失效的发生, 网络会破碎成若干碎片, 由此可能产生孤立的节点(边)以及大小不一的连通子图。学者们根据连通子图的规模大小, 选定子图中规模最大的作为最大连通子图或称最大连通片。基于最大连通片的理论, Motter 等人^[30]将网络级联失效结束后, 网络中最大连通片内的幸存节点数目 N' 与级联失效前网络节点数目 N 的比值作为衡量复杂网络鲁棒性的一个测度指标:

$$G = \frac{N'}{N} \quad (2-5)$$

其中, G 表示网络的鲁棒性测度。当 $G \approx 1$ 时, 表示网络在节点(边)发生故障后, 网络的失效节点(边)数并未增加, 网络整体结构并未遭受更大的破坏, 说明网络有较强的鲁棒性。反之, $G \approx 0$ 时, 表示网络的节点(边)几乎全部失效, 网络整体结构彻底崩溃, 说明网络具有较差的鲁棒性。

2.5.2 平均失效规模

Pan 等人^[72]提出了网络平均失效规模作为衡量网络鲁棒性的测度, 该测度可以很好评价整个网络的鲁棒性。从网络中移除边 e_{ij} , 在级联失效结束后, 计算网络的失效边规模 S_{ij} 。然后依次移除网络的每一条边, 并在级联失效结束后, 计算其对应的网络失效边规模, 再将所有网络移除边造成的网络失效边规模求均值, 即:

$$S = \sum_{ij} \frac{S_{ij}}{M} \quad (2-6)$$

其中, S 为鲁棒性测度, M 为级联失效发生前整个网络的边数。当 $S \approx 0$ 时, 表示在移除边后没有造成网络中的其他边过多的失效, 网络稳定后整体规模并没有发生大的改变, 说明其网络鲁棒性很强。反之, $S \approx 1$ 时, 在移除边后, 网络中其他边几乎都失效, 网络发生瘫痪, 整个网络停止正常的工作, 说明网络的鲁棒性差。

2.6 小结

本章主要从相依网络模型出发, 介绍了相依网络的一些典型概念。首先, 详细介绍了相依网络在不同耦合方式以及不同节点属性下, 相依网络的级联失效过程。接着, 详细介绍了相依网络中的出现故障后的几种负载重分配策略。最后, 详细阐述了复杂网络的中几种鲁棒性测度。

第三章 不同加边保护策略下的相依网络鲁棒性优化研究

针对一对一随机相依网络，研究加边策略对其鲁棒性的影响。基于两个无标度网络构建相依网络模型，并提出邻居信息的节点重要度占比加边保护策略。与已有的加边保护策略进行仿真对比，证明了所提策略的有效性。通过设定加边比例 F 与分配倾向系数 P 两个重要参数，针对网络遭受随机攻击后，研究了采取不同加边保护策略后网络鲁棒性的变化情况。此外，随着加边比例 F 的增加，网络整体的鲁棒性能在增强。在加边比例一定时，网络的鲁棒性随着分配倾向系数的减小呈现先增强后减弱的现象。在分配倾向系数 $P=0.5$ 时，网络的鲁棒性最好。这项研究成果对于如何合理改善网络的结构，有效提高网络的鲁棒性具有一定的指导意义。

3.1 相依网络模型以及鲁棒性测度

3.1.1 无负载作用的相依网络模型

为了更好地说明无负载作用的相依网络级联失效模型，本文首先采用由两个子网络构成的相依网络，子网络分别记为子网络 A 和子网络 B ，子网络的规模分别记为 N_A 和 N_B ，因此整个相依网络的节点总数为 $N = N_A + N_B$ 。每个子网络内部节点间的连接定义为连接边，用实线表示；子网络间节点的连接定义为相依边，用虚线表示；为了不失一般性，采取一对一随机相依方式，即子网络规模 $N_A = N_B$ ，子网络节点之间进行随机连接，且每个子网络中的节点有且只有一个相依节点和一条相依边，如图 3-1 所示一个相依网络模型。

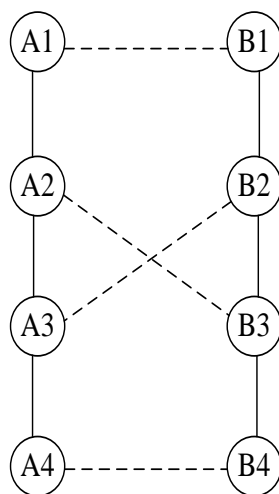


图 3-1 相依网络模型

Fig. 3-1 The model of the interdependent network

3.1.2 相依网络的级联失效

在相依网络中，当子网络 A 或 B 中的节点失效时，移除与之相连接的所有边，那么失去相依边的节点也会失效。因此，子网络 A 或 B 会被分为若干部分，并且假定只有属于子网络 A 或 B 最大连通片内的节点才能保持正常，而不属于连通片中的节点全部失效移除。图 3-2 展示了相依网络整个级联失效的过程，初始状态时，子网络 A 中的节点 $A6$ 失效，移除与节点 $A6$ 相连接的边（节点 $A1$ ， $B5$ 与之相连），由于相依关系存在，节点 $B5$ 失效，移除节点 $B5$ 与节点 $B4$ ， $B6$ 间的连边，如图 3-2(a) 初始阶段所示。由于节点 $B5$ 的移除使节点 $B6$ 脱离其所在子网络的最大连通片，所以节点 $B6$ 失效，进一步导致节点 $A5$ 失效，移除节点 $A5$ 与 $A1$ 之间的连边，如图 3-2(b) 第一阶段所示。此时节点 $A1$ 不在子网络 A 的最大连通片内也会发生失效，如图 3-2(c) 第二阶段所示。经过反复失效移除后，一段时间后网络达到稳定，如图 3-2(d) 稳定状态所示。在图中，网络中的连接边用实线表示，相依边用虚线表示，黑色圆圈表示节点正常，白色圆圈表示节点失效。

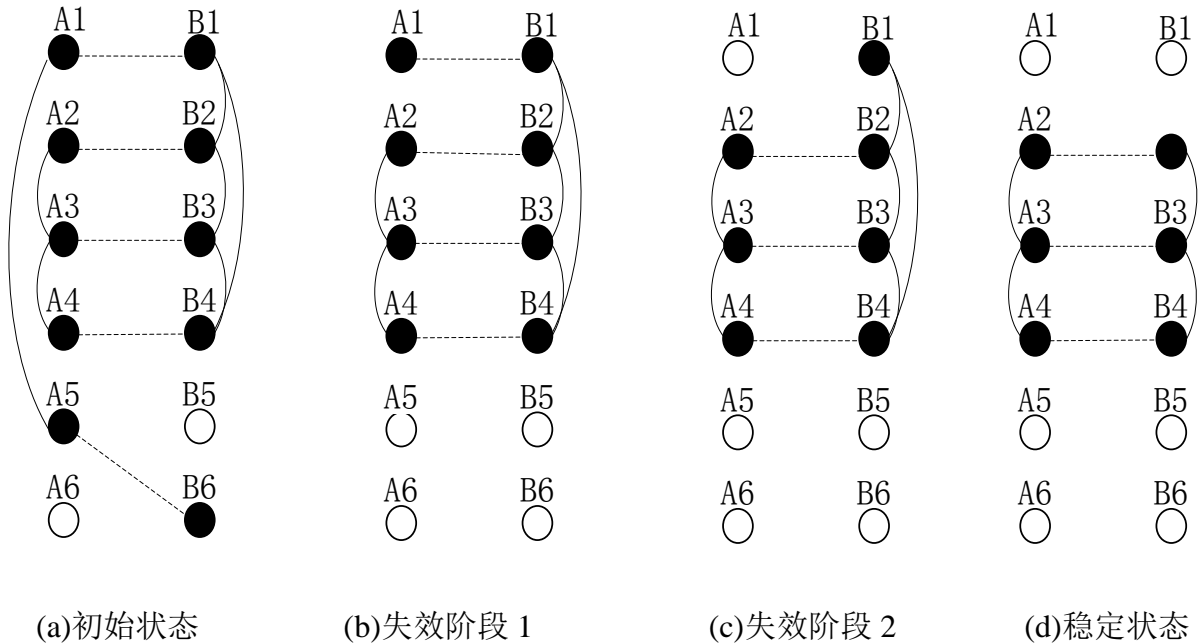


图 3-2 相依网络级联失效过程

Fig. 3-2 The process of cascading failure of the interdependent network

3.1.3 相依网络抵抗级联失效的鲁棒性测度

本章采用级联失效后相依网络达到稳定状态时，网络幸存节点的比例 G 作为网络的鲁棒性测度，即：

$$G = \frac{N'_A + N'_B}{N_A + N_B} \quad (3-1)$$

其中 N'_A 与 N'_B 分别是级联失效过程结束后子网络 A 与 B 中幸存节点数目， N_A 与 N_B 分别表示子网络 A 和 B 的初始网络规模。显而易见， G 值越大，表示幸存的节点数目越

多，网络的毁坏程度就越小，说明网络具有较好的鲁棒性。当 $G=0$ 时，说明网络中没有幸存节点，整个网络彻底崩溃，说明网络鲁棒性较差。

与此同时定义移除比例阈值 q_c ，即按比例 q 移除网络的节点使网络发生破坏，在网络彻底崩溃（ $G=0$ ）时所对应的最大移除比例值。若 q_c 越大，说明网络能够很好的抵御破坏，具有更好的鲁棒性。

3.2 相依网络的加边保护策略

与单一网络相比，相依网络中存在相依边，使得节点在单一网络呈现的某种属性或者特征发生改变，所以单一网络中的加边保护策略并不能完全适用于相依网络。因此，本章从相依节点角度出发，考虑相依节点间的影响，针对一对一随机相依网络提出一种加边策略：基于邻居信息的节点重要度占比加边保护策略（WLP）。

基于邻居信息的节点重要度占比加边保护策略（WLP）：在每添加一条边时，首先分别求出子网络中各个节点基于邻居节点信息的节点重要度 WL ，即

$$WL = k_i \sum_{a \in \Gamma_i} k_a \quad (3-2)$$

其中： k_i 表示节点 i 的度值， Γ_i 表示节点 i 的邻居节点集。

根据相依节点之间的连接关系，对第 n 对相依节点对的权重进行重新定义：

$$W_n = WL_n^A + WL_n^B \quad (3-3)$$

其中 WL_n^A 和 WL_n^B 分别表示表示子网络 A 和 B 中第 n 个节点的重要度。对每个节点对中的节点而言，计算其在节点对中的节点重要度占比：

$$p_n^m = WL_n^m / W_n \quad (3-4)$$

其中： m 为 A 或 B 。

对 p_n^m 进行升序排序，选取值最小的节点作为添加边的一个端点，在从该点所处的子网络内部随机选取一个节点作为添加边的另一个端点。任意节点之间有且只有一条两边，并且不存在自环。按照这样的过程添加保护边，直至达到设定的边数为止。

为了说明所提策略的有效性，本章选取三种已有的加边策略作对比。随机加边策略（RA）^[73]：每添加一条边时，随机在子网络 A 或 B 中，选取两个未连接关系的节点进行连边，直至达到加边数目要求；低度加边策略（LD）^[74]：每添加一条边时，计算子网络 A 或 B 中节点度数，并选取度数最低的节点作为边的端点，在随机选取一个与之未连接关系的节点进行连边，直至达到加边数目要求；度差加边策略（LIDD）^[62]：每添加一条边时，先计算相依节点之间度的差值，选取度差值的绝对值最大的一组，将这组中节点度数较小的节点作为所加边的端点，并在其所处的子网络中随机选取一个与之没有连接关系的节点进行连接，直至达到加边数目要求。上述三个加边策略中，任意节点之间有且只有一条两边，并且不存在自环。

为了研究不同的加边保护策略对网络整体鲁棒性能的影响，为此定义了两个重要参数 F 与 P ，其中 F 表示加边比例，考虑到成本因素，文中的加边数目 $M = F * NI$ ， NI 表示网络总规模的半数； P 表示分配倾向系数，即在加边过程中，在子网络 A 中实际加边数占总加边数 M 的比例，即

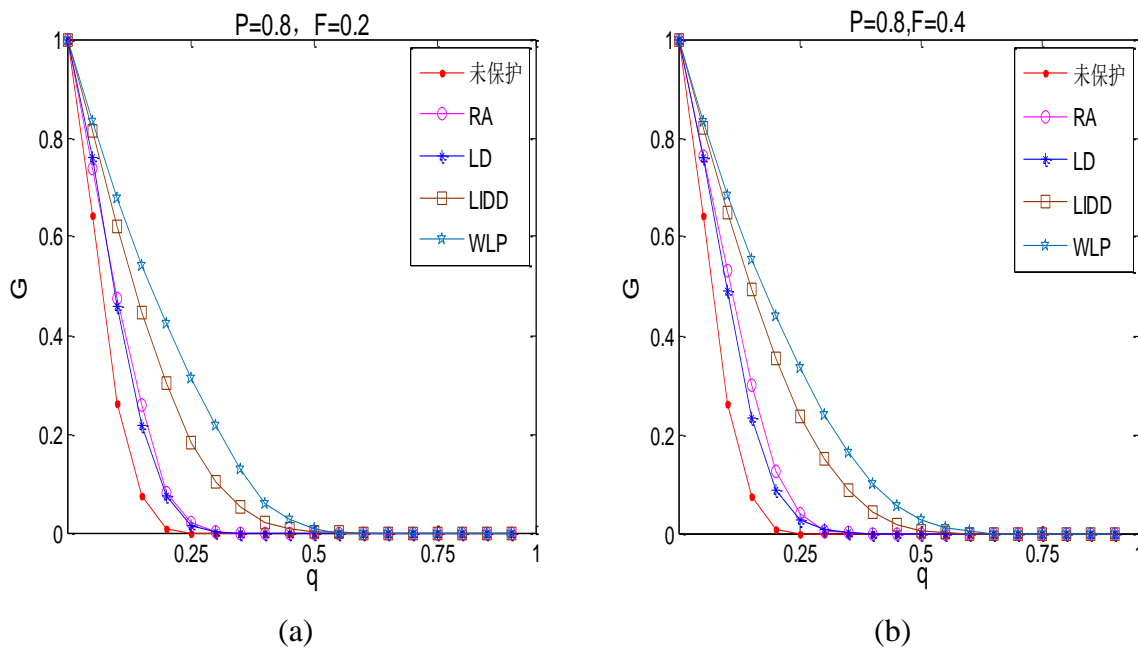
$$P = \frac{m_A}{M} \quad (3-5)$$

式中： m_A 表示在子网络 A 中实际加边数目。若 $P=1$ ，则所有的边都添加在子网络 A 中； $P=0$ ，则所有的边都添加在子网络 B 中。

3.3 仿真结果分析

本章用无标度网络作为相依网络的子网络，分别记为子网络 A 和 B ，子网络的规模： $N_A = N_B = 500$ ，子网络的平均度 $\langle K_A \rangle = \langle K_B \rangle = 4$ 。为了分析不同加边比例以及分配倾向性对加边策略的影响，加边比例取值分别为 0.2，0.4，0.6，0.8。分配倾向系数的取值分别为 0.2, 0.5, 0.8。

首先在 $P=0.8$ 时，研究不同加边保护策略，在不同加边比例下对网络鲁棒性的影响，仿真结果如图 3-3 所示。对加边比例 $F=0.2$ 的仿真结果进行分析，如图 3-3(a) 所示。仿真结果表明， G 值随着移除比例 q 的增加而减小，说明网络边移除比例越大对网络的破坏性就越大，网络的鲁棒性就会降低。当 q 值达到一定阈值 q_c 时， G 为零，说明此时网络完全崩溃。 q_c 值越大，说明相依网络抵御级联失效的能力越强，体现了该网络具有很好的鲁棒性。从图中可以看出，相比于未采取加边保护策略的网络来说，四种加边保护策略都能提高网络的鲁棒性，而且 $q_c(WLP) > q_c(LIDD) > q_c(RA) \approx q_c(LD)$ ，这说明 WLP 策略对网络鲁棒性的提升效果最好， $LIDD$ 策略次之， RA 策略和 LD 策略效果较差。



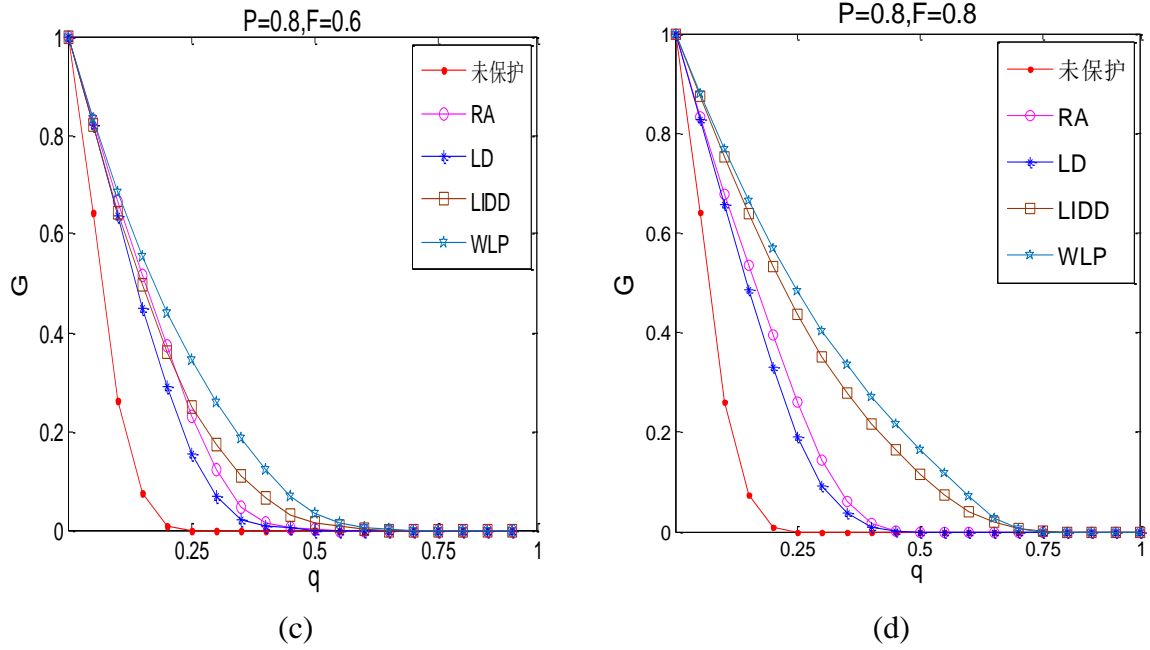

 图 3-3 不同加边比例下的相依网络鲁棒性对比 ($P=0.8$)

 Fig. 3-3 Comparison of the robustness of the interdependent networks with different edge-adding ratios under $P=0.8$

与不考虑相依关系影响的 RA 与 LD 加边保护策略相比,考虑到相依节点影响而提出的 WLP , $LIDD$ 加边保护策略对网络鲁棒性提升效果明显好于前两者,这说明在实际网络中,对网络中的重要节点采取加边保护策略时,需要考虑到相依节点间的相依关系对节点性质的影响。同时对 WLP 与 $LIDD$ 加边保护策略进行对比分析可知, WLP 加边保护策略能够有效的提高网络抵御级联失效的鲁棒性,其效果明显优于 $LIDD$ 加边保护策略,这说明了所提加边保护策略具有明显的优势。同理对图 3-3(b)、3-3(c), 3-3(d) 进行分析,可以得到相同的结论。

再对图 3-3 在分配倾向系数 $P=0.8$ 的条件下,按照加边比例 F 变化进行对比分析。以 WLP 加边策略为例,比较不同加边比例下,网络的移除比例阈值大小关系,通过分析可以得到: $q_c(F=0.8) > q_c(F=0.6) > q_c(F=0.4) > q_c(F=0.2)$,显然, $F=0.8$ 时,网络的移除比例阈值最大,这说明网络在加边比例 $F=0.8$ 时,网络的鲁棒性最好。通过分析其他三种加边策略的仿真结果发现,不同加边比例下,移除比例阈值的大小关系呈现相同的规律。由此可以得出这样的结论,即:无论采用何种加边策略,相依网络的鲁棒性都会随着加边比例 F 的增大而增强。

其次通过对分配倾向系数 $P=0.5$ 和 0.2 时,分析不同的加边比例下,加边保护策略对相依网络抵御级联失效的鲁棒性影响,其仿真结果分别如图 3-4 和图 3-5 所示。通过对比分析发现,在分配倾向系数一定时,不论加边比例取何值,四种加边保护策略都增强网络的鲁棒性。通过不同加边保护策略下网络移除比例阈值进行对比发现, $q_c(WLP)$ 的值最大,说明 WLP 加边保护策略对增强网络的鲁棒性起到的效果最好,这进一步说明

了所提策略普适性与有效性。

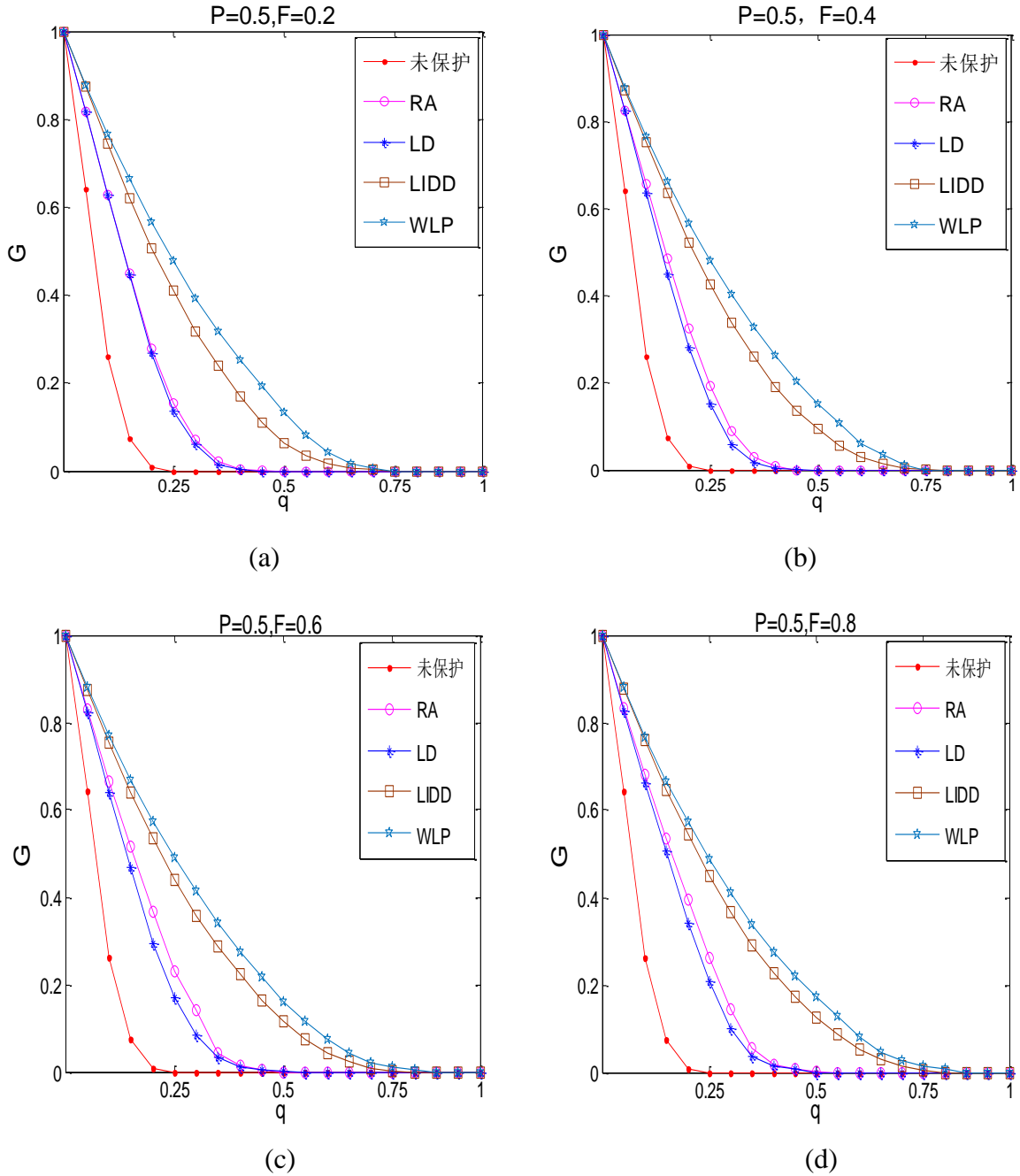


图 3-4 不同加边比例下的相依网络鲁棒性对比 ($P=0.5$)

Fig. 3-4 Comparison of the robustness of the interdependent networks with different edge-adding ratios under $P=0.5$

最后,通过对图 3-3,图 3-4 和图 3-5 进行对比分析可知,随着分配倾向系数 P 的减小,加边策略保护对网络鲁棒性增强的效果呈现先增强后减弱的现象,以 WLP 加边保护策略为例进行分析可知:无论加边比例何值时, WLP 加边策略都存在 $q_c(P=0.8)$ 小于 $q_c(P=0.5)$, $q_c(P=0.5)$ 大于 $q_c(P=0.2)$,并且在 $P=0.5$ 时网络的鲁棒性达到最好,这是说明

采取加边保护策略时对两个子网络进行均衡保护，比只倾向对某一侧的子网络进行保护的效果好。

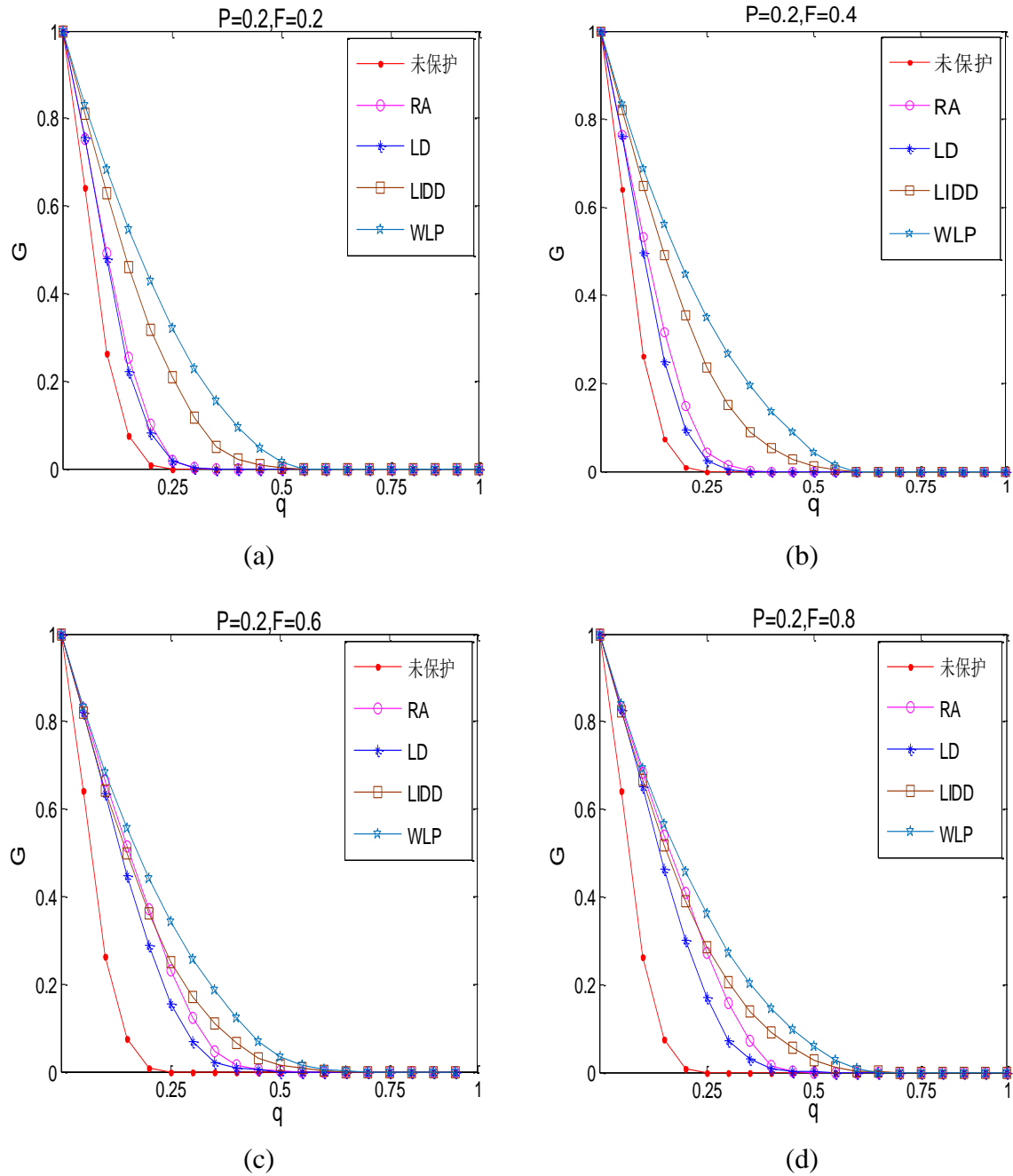


图 3-5 不同加边比例下相依网络鲁棒性对比 ($P=0.2$)

Fig. 3-5 Comparison of the robustness of the interdependent networks with different edge-adding ratios under $P=0.2$

3.4 小结

本章基于无标度网络构建了一对一随机相依网络模型，在此基础上提出一种基于邻居信息的节点重要度占比加边保护策略，并与已有的加边保护策略进行仿真对比，结果

表明,本章所提的加边保护策略要优于其他三种策略。同时本章通过定义加边比例 F 与分配倾向系数 P 来研究其对于加边策略的影响,研究发现,无论在何种分配倾向系数 P 下,随着加边比例 F 的增加,加边保护策略对于网络鲁棒性的提升效果在增强。同时在相同加边比例 F 下,加边保护策略对网络鲁棒性的提升效果随着分配倾向系数 P 的减小呈现先增强后减弱的现象。因此,在实施加边保护策略时需要考虑添加的保护边在子网络中的分配问题。这项研究成果为如何提高网络的鲁棒性提供了有效的方法。

第四章 基于领域内节点最大剩余容量的相依网络负载重分配策略

针对相依网络中的失效节点(边)负载分配问题,提出一种较为符合实际的负载重分配策略,该策略有效减小了在级联失效过程中网络节点的容忍参数阈值 β_c ,能够很好的提高网络鲁棒性。同时在该负载重分配策略下,研究网络在遭受蓄意攻击时,研究最大剩余容量强度参数 γ 、负载重分配效率参数 θ 以及初始负载参数 τ 对相依网络鲁棒的影响。研究发现,通过与常见的负载重分配策略相比,提出的基于领域内节点最大剩余容量的负载重分配策略能够具有明显的优势。在对研究 $SF-SF$ 与 $ER-ER$ 网络遭受蓄意攻击时网络的鲁棒性变化发现,随着剩余容量强度参数 γ 值和初始负载强度参数 τ 值的增加都会使网络的鲁棒性表现出先增强后减弱的规律;随着分配效率参数 θ 值的增加,网络的鲁棒性会一直减弱。因此,合理的调节节点最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载强度参数的大小,可以极大地提升网络的鲁棒性。这项工作对于合理构建网络以及抑制网络级联失效具有一定的指导作用。

4.1 相依网络负载容量模型与鲁棒性测度

为了详细阐述有负载作用的相依网络级联失效模型,首先需要构建一个相依网络,为了不失一般性,构建相依网络模型的两个子网络分别记为子网络 A 与子网络 B ,且子网络的规模分别为 $N_A = N_B = N$,平均度 $\langle K_A \rangle = \langle K_B \rangle = K$ 。子网络节点之间采取一对一随机连接,子网络 A 与子网络 B 的内部连边称为连接边,不同网络节点之间的连边称为相依边。

一般情况下,网络中节点的负载是由其介数或度数来定义。本章采用节点的度函数来定义节点的初始负载。假定在子网络 A 中节点 A_i 的初始负载为 L_{A_i} ,在网络 B 中的节点的 B_i 初始负载为 L_{B_i} ,其定义公式为如下:

$$L_{A_i} = k_{A_i}^{\tau}, \quad L_{B_i} = k_{B_i}^{\tau} \quad (4-1)$$

其中: k_{A_i} 与 k_{B_i} 分别表示节点 A_i 与 B_i 的度数, τ 为初始负载强度参数,用于调整初始节点负载大小。

一般地,节点的初始容量与其初始负载成正比例关系,即:

$$C_{A_i} = (1 + \beta) L_{A_i}, \quad C_{B_i} = (1 + \beta) L_{B_i} \quad (4-2)$$

其中: C_{A_i} 与 C_{B_i} 分别表示子网络 A 与 B 的初始容量, β 是节点的容忍参数, β 值越大表示节点承受负载的能力越强。同等失效规模下, β 值越小,网络鲁棒性就越好。

相依网络的鲁棒性用级联失效结束后,网络的最大连通片的相对大小 G 来衡量,即:

$$G = \frac{N'_A + N'_B}{N_A + N_B} \quad (4-3)$$

其中： N'_A 与 N'_B 分别表示级联失效结束后子网络A与B中最大连通片内正常节点的数目， N_A 与 N_B 分别表示级联失效前子网络A和B中节点数目。

同时定义最小容忍参数阈值 β_c ，即网络抑制级联失效发生，使得网络达到稳定状态所需的容忍参数最小值。显然， β_c 越小，网络的鲁棒性能就越好。

4.2 相依网络的级联失效方式

在考虑有负载作用的相依网络级联失效过程中，不仅存在相依边的缺失造成相依节点失效，而且也会因为子网络内部负载的重新分配导致负载超出自身最大容量而失效。因此，在介绍相依网络的失效过程需同时考虑相依边移除造成的相依失效以及节点负荷过载的负载失效两个方面。

相依网络的相依失效过程如图4-1所示，假定相依网络由子网络A和B组成，网络中的连接边用实线表示，相依边用虚线表示，黑色圆圈表示节点正常，白色圆圈表示节点失效。假定首先攻击子网络A中的节点A2，则A2失效，A2将移除与之相依的所有连边；由于依赖关系导致节点B2也失效，B2也移除与之相连的有连接边，如图4-1(a)所示。在相依失效过程中认为只要节点不在所处子网络的最大连通片内，那么该节点将会失效。节点A2的失效导致A1不在子网络A的最大连通片内，所以节点A1失效，这又进一步触发B1的失效，失效的节点移除所有连边，如图4-1(b)所示。B1的失效导致B6脱离子网络B的最大连通片，因此B6失效，如图4-1(c)所示。然而A6与B6存在相依关系导致A6也失效，这样失效不断的在两个子网络间循环交替，直至达到稳定状态，如图4-1(d)所示。

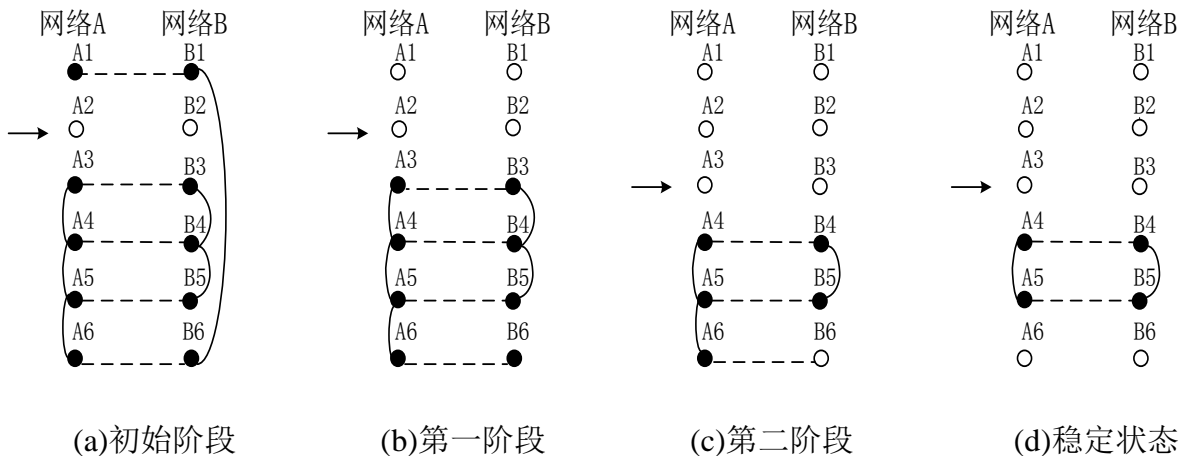


图 4-1 相依失效过程

Fig.4-1 The failure process of dependence

在负载失效过程中主要是因为节点在接收额外负载后，此时节点负载超出最大容量而导致失效。常见的相依网络负载失效如下：(a)找出失效节点 i 的邻居节点集合 Γ_i 。(b)把失效节点 i 的负载 L_i 按照一定的比例分配分配到其邻居节点上。(c)判断邻居节点 j 在接收额外负载后，是否超出自身最大容量。若超过，那么节点 j 失效，触发新一轮的负载重分配。(d)重复上述过程，不断更新网络节点的负载，直至不在产生新的失效节点，此时整个负载失效过程结束。

4.3 负载重分配策略

在4.2节的对负载失效过程描述中提及失效节点的负载会按照一定的比例分配到其他邻居节点上，这是一种局部分配策略。常见的局部重分配策略有：按容量大小优先分配、按剩余容量大小优先分配。上述的负载重分配有一个共同点：负载只分配到其他邻居节点上，这与实际情况有些不符合。例如，现实生活中某段路发生交通堵塞，交警往往将车辆和行人疏散到附近区域内路况较好的道路上，以此来缓解堵塞压力。因此，本章提出一种新的负载重分配策略：基于领域内节点最大剩余容量的负载重分配策略(LMRCD)。

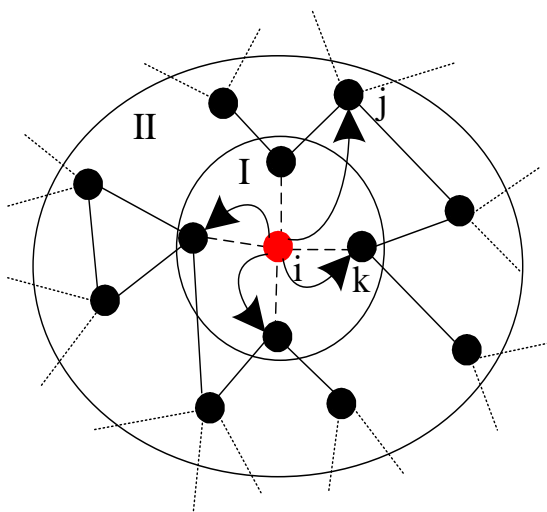


图 4-2 失效节点的负载重分配

Fig 4-2 The load redistribution of failure node

图 4-2 表示失效节点 i 的负载重分配，圈 I 与圈 II 表示节点 i 的领域范围，圈 I 中的节点到节点 i 的最短路径长度为 1，圈 II 内节点到节点 i 的最短路径长度为 2。假定网络中节点 i 失效，节点 i 负载将被分配到其他领域内节点剩余容量最大的一部分节点上，这部分节点数目与节点 i 的邻居节点数目相同。假定节点 j 是节点 i 领域内的剩余容量最大的节点之一，定义节点 j 从节点 i 得到的额外负载占失效节点 i 负载的比例为 p_{ji} ：

$$p_{ji} = \frac{(C_j - L_j(t))^\gamma * l_{ji}^{-\theta}}{\sum_{a=1}^{k_i} (C_a - L_a(t))^\gamma * l_{ai}^{-\theta}} \quad (4-4)$$

$$\Delta L_j = p_{ji} L_i \quad (4-5)$$

其中： $C_j - L_j(t)$ 表示 t 时刻，节点 j 的剩余容量； ΔL_j 表示节点 j 从节点 i 得到的额外负载； k_i 表示失效节点 i 的度数； l_{ai} 表示领域内节点 a 到失效节点 i 的最短路径长度，其取值为1或2； γ 表示最大剩余容量强度参数； θ 表示负载重分配效率参数。

4.4 仿真与分析

本章采用的相依网络模型分别为：无标度相依网络（ $SF-SF$ ）与随机相依网络（ $ER-ER$ ），并在此基础上验证所提负载重分配策略以及相关参数对网络鲁棒性的影响。为了方便研究，两种相依网络的子网络规模 $N_A = N_B = 200$ ，平均度 $\langle K_A \rangle = \langle K_B \rangle = 4$ 。

4.4.1 不同分配策略下的仿真对比

为了验证所提负载重分配策略能够提高网络的鲁棒性，与常见的基于节点容量的负载重分配策略（ LC ）、基于节点剩余容量的负载重分配策略（ LRC ）进行仿真对比。图4-3所示为两种相依网络在面临随机攻击时，负载重分配策略对网络鲁棒性的影响。其中参数 $\tau=1$ ， $\gamma=1$ ， $\theta=1$ 。

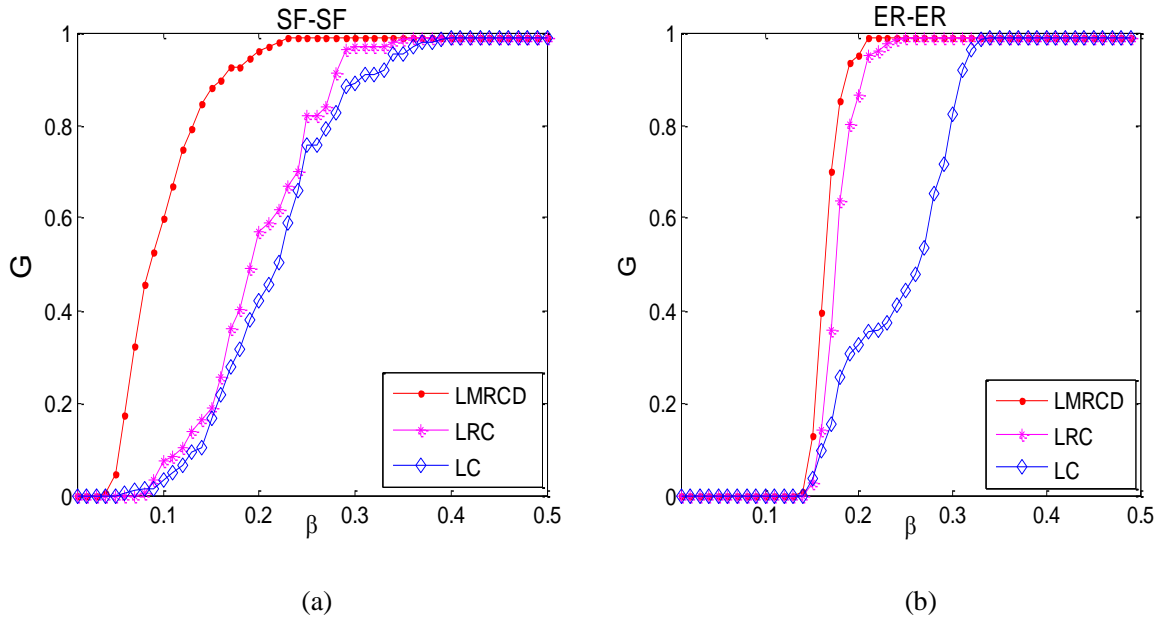


图 4-3 随机攻击方式下，不同负载重分配策略对相依网络鲁棒性的影响

Fig.4-3 The effect of different load redistribution strategies on the robustness of the interdependent network under random attack

图 4-3(a)与图 4-3(b)分别为随机攻击方式下, 负载重分配策略对 $SF-SF$ 与 $ER-ER$ 网络鲁棒性的影响。以 $SF-SF$ 网络的鲁棒性变化为例进行分析, 随着 β 值的不断增大, G 值从 0 开始增大, 这表明网络在遭受攻击后不再发生崩溃, 网络中存在最大连通片, 同时说明网络中的节点可以处理部分额外负载。当 β 值达到某个阈值 β_c 时, 网络不再发生大规模的级联失效, 此时节点有足够的处理能力接收到的所有额外负载。同时表明在相同的攻击程度下, β_c 值越小, 网络应对级联失效的能力越强, 网络的鲁棒性就越好。同时, 通过对不同负载重分配策略下, 网络节点的容忍参数阈值进行比较, 其大小关系如下: $\beta_c(LMRCD) < \beta_c(LRC) < \beta_c(LC)$, 这表明相比于 LRC 与 LC 策略, $LMRCD$ 策略对网络鲁棒性的提升效果最好, 通过对图 4-3(b)进行分析可以得到相同结论, 这说明增加节点容忍参数可以提高网络的鲁棒性, 同时说明所提 $LMRCD$ 策略在网络鲁棒性提升方面具有一定的优势。

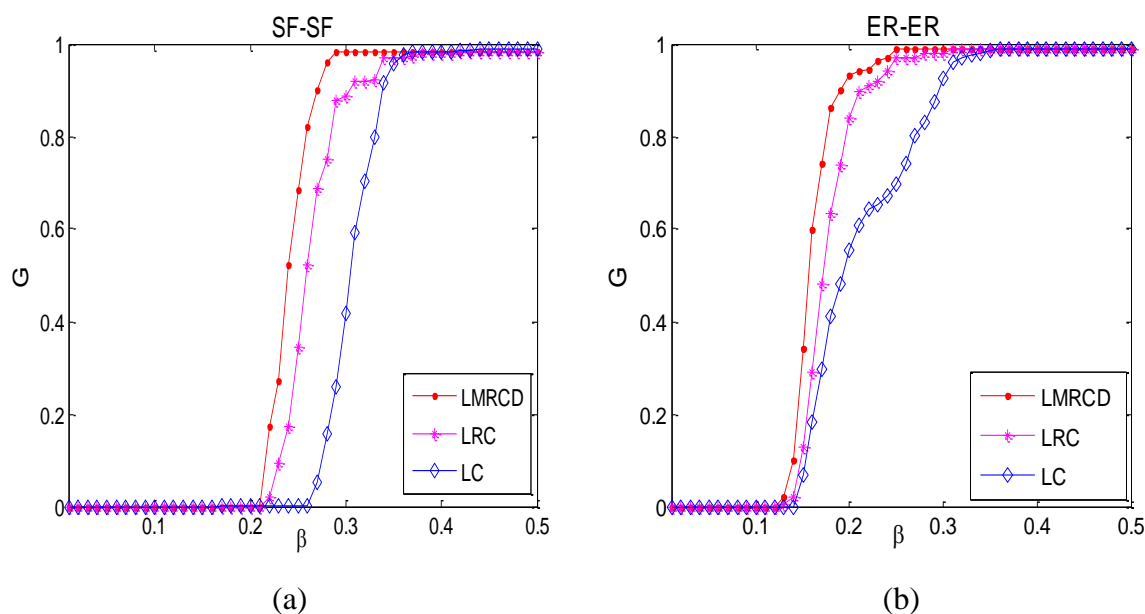


图 4-4 蓄意攻击方式下, 不同负载重分配策略对相依网络鲁棒性的影响

Fig.4-4 The effect of different load redistribution strategies on the robustness of the interdependent network under deliberate attack

如图 4-4 所示, 图 4-4(a)与图 4-4(b)分别为蓄意攻击方式下, 负载重分配策略对 $SF-SF$ 相依网络与 $ER-ER$ 相依网络鲁棒性的影响。对图 4-4(a)与图 4-4(b)进行分析可知, 网络的鲁棒性随着 β 值的增大而增强, 在相同的攻击程度下, $LMRCD$ 策略下网络的鲁棒性相对最好, 这与随机攻击下得出的结论相同。

另外通过对图 4-3(a)与 4-4(a), 图 4-3(b)与图 4-4(b)进行对比分析可知, 在网络达到稳定状态时, 网络节点的容忍阈值大小都存在如下关系: $\beta_c(\text{蓄意}) < \beta_c(\text{随机})$, 这说明蓄意攻击比随机攻击对相依网络造成的破坏大。因此, 对蓄意攻击下的相依网络鲁棒性进行研究是十分必要的。

4.4.2 不同参数对相依网络鲁棒性的影响

通过 4.4.1 的分析可知, *LMRCD* 策略对于网络鲁棒性的提升效果明显好于其他两种分配策略, 同时考虑到蓄意攻击对网络的影响较大, 所以本节主要研究在蓄意攻击方式下, 采用 *LMRCD* 分配策略, 研究不同参数对于两种相依网络鲁棒性的影响。

首先研究最大剩余容量强度参数 γ 对于相依网络鲁棒性的影响, 仿真结果如图 4-5 所示。图 4-5(a)与图 4-5(b)分别表示最大剩余容量强度参数 γ 对 *SF-SF* 与 *ER-ER* 网络鲁棒性的影响, 其中 β_c 与 γ 的关系, 如图 4-5 的内插图所示。另外, 参数设定为 $\tau=1$, $\theta=1$ 。对图 4-5(a)进行分析可知, 在 *SF-SF* 网络中, 不论 γ 取何值时, 网络的鲁棒性都会随着节点容忍参数增加而不断增强。与此同时, 随着 γ 值的增大, 网络节点的容忍参数阈值经历了先减小后增大的过程, 说明相依网络的鲁棒性呈现出先增强后减弱的趋势。同时从内插图可以看出当 $\gamma=1$ 时, 网络的节点容忍参数阈值最小, 说明在 $\gamma=1$ 时, 网络的鲁棒性最好。这是因为在 γ 值较小时, 节点最大剩余容量的影响相对较小, 导致剩余容量较小的节点也能够接收额外负载, 很容易能引起这些节点因为过载而失效。但当 γ 值较大时, 失效节点的负载几乎只分配到几个存在大量剩余容量的节点上, 从而增加了这些节点失效的概率。同时这些节点本身可能承载着大量的负载, 这些节点的失效会对网络造成更大的破坏。对图 4-5(b)进行分析得知, 对于 *ER-ER* 网络来说, 其网络的鲁棒性变化与 *SF-SF* 网络基本一样。唯一不同的是, *ER-ER* 网络是在 $\gamma=1$ 或 $\gamma=1.5$ 时, 网络节点的容忍参数阈值取到最小值, 说明在 $\gamma=1$ 或 $\gamma=1.5$ 时, 网络的鲁棒性能达到最好。因此, 在负载重分配的过程中合理的调节最大剩余容量强度参数大小, 有利于调整节点承担负载的能力, 从而达到提高相依网络鲁棒性的目的。

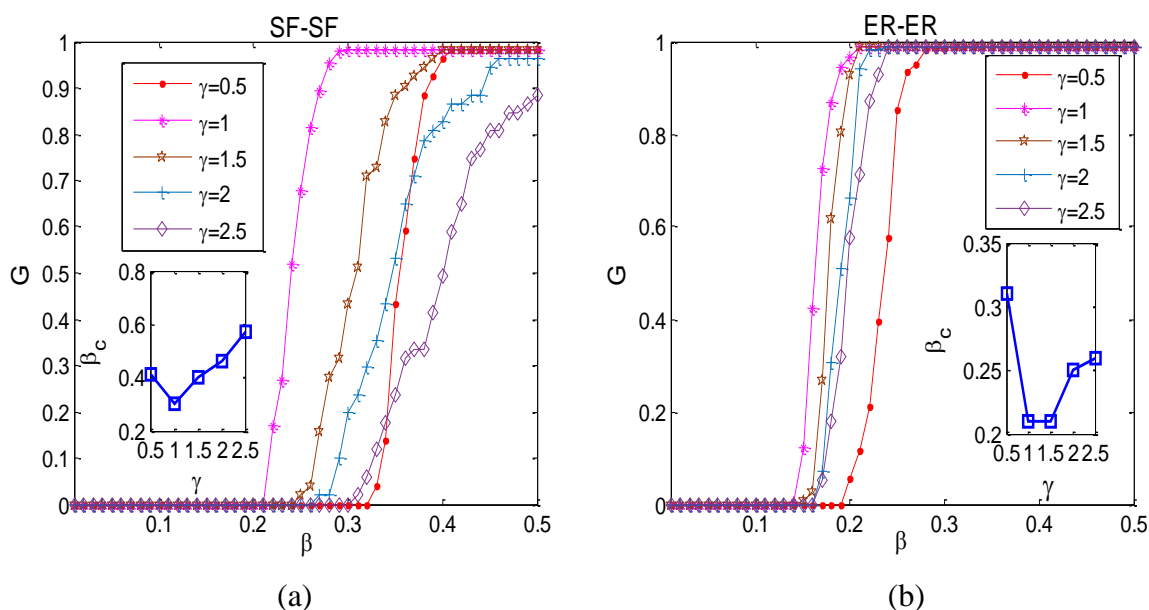


图 4-5 最大剩余容量强度参数 γ 对相依网络鲁棒性的影响

Fig.4-5 The influence of the maximum residual capacity strength parameter γ on the robustness of the interdependent network

再者研究负载重分配效率参数 θ 对相依网络的鲁棒性的影响, 仿真结果如图 4-6 所示。图 4-6(a)与图 4-6(b)分别为负载重分配参数 θ 对相依网络鲁棒性的影响, 其中 $\tau=1$, $\gamma=1$ 。通过对参数 θ 影响下的两种相依网络鲁棒性分析发现, 随着负载重分配效率参数 θ 值增大, 网络的容忍阈值的大小关系如下: $\beta_c(\theta=0) > \beta_c(\theta=1) > \beta_c(\theta=2) > \beta_c(\theta=3)$, 这说明 θ 值增大的同时, 网络的鲁棒性在减弱, 并且在 $\theta=1$ 时, 网络的鲁棒性达到最好。通过重分配策略可以看出, 随着 θ 的增大, 负载向圈 II 内节点分配负载的效率在降低, 从而加大了圈 I 内低剩余容量节点承担额外负载的可能性, 从而影响网络的鲁棒性。因此, 在负载重分配的过程中提高负载分配的效率可以有效的避免脆弱节点因过载而失效。

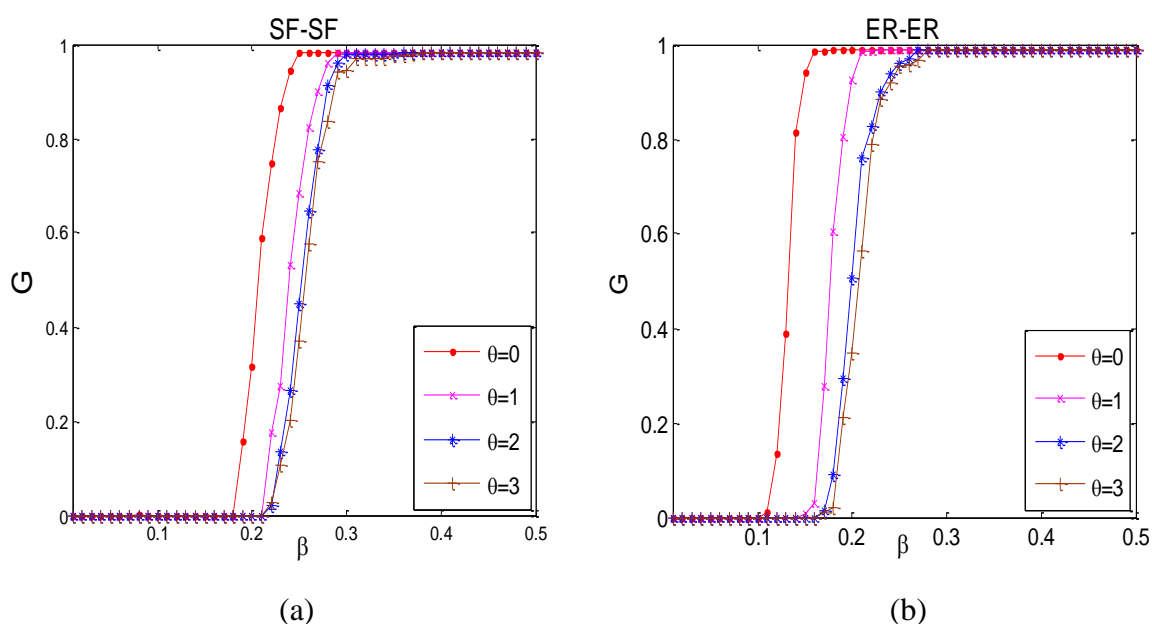
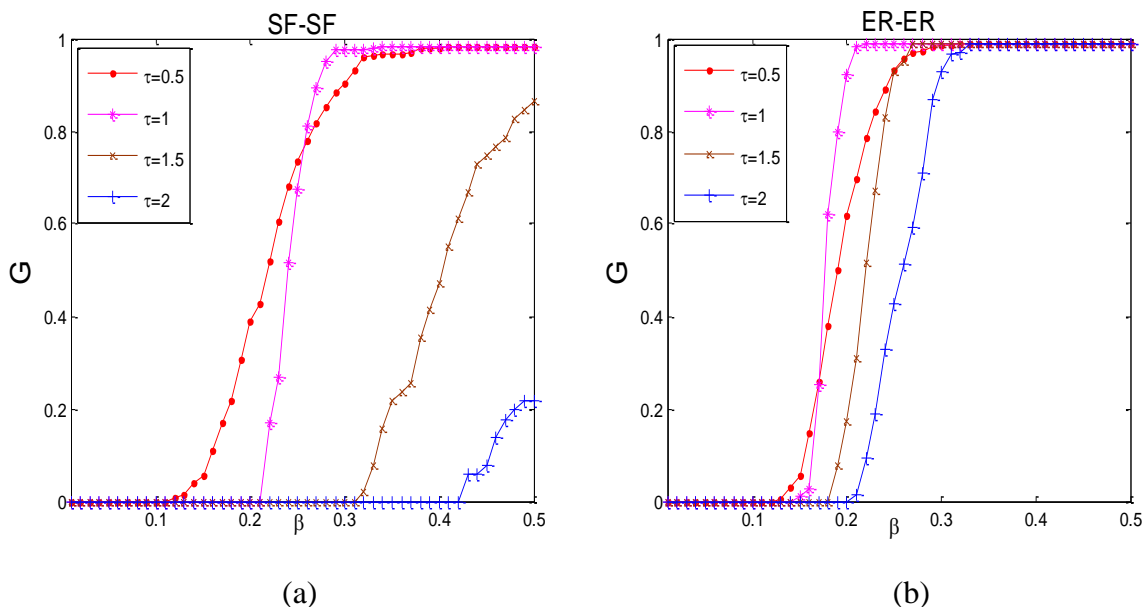


图 4-6 负载重分配效率参数 θ 对相依网络鲁棒性的影响

Fig.4-6 The effect of load redistribution parameter θ on the robustness of interdependent network

最后研究负载强度参数 τ 对相依网络鲁棒性的影响, 仿真结果如图 4-7 所示, 其中 $\gamma=1$, $\theta=1$ 。通过对图 4-7(a)和(b)进行分析得知, 无论是在 $SF-SF$ 网络还是在 $ER-ER$ 网络中, 随着负载强度参数从小到大变化, 网络节点的容忍参数阈值先减小后增大, 说明网络的鲁棒性会先增强后减弱, 其中在 $\tau=1$ 网络的鲁棒性最好。但是随着 τ 值进一步增加, 网络的鲁棒性会急剧的下降, 这点在 $SF-SF$ 相依网络中表现的尤为明显, 这是因为在无标度网络中, 节点的异质性比较高, 同时节点的负载是通过节点的度数来定义的。蓄意攻击方式下, 负载大的节点遭受攻击失效, 使得其上负载会分配到更多节点上, 这样失效节点的范围就会越大, 造成其他节点失效的可能性就会大大增加, 从而导致整个网络鲁棒性大大降低。因此, 在构建网络时合理的设定节点的初始负载与容量, 对于提高网络的鲁棒性是十分重要的。

图 4-7 初始负载强度参数 τ 对相依网络鲁棒性的影响Fig.4-7 The influence of the initial load intensity parameters τ on the robustness of interdependent network

4.5 总结

本章提出了基于领域节点最大剩余容量的负载重分配策略,相比于基于节点容量的负载重分配、基于节点剩余容量的负载重分配策略来说,选择领域内剩余容量最大的部分节点作为失效节点额外负载的分配节点,能够有效避免剩余容量不足的节点来承担负载,降低了节点失效风险。同时由仿真可得,该策略在随机和蓄意攻击下能够减小节点的容忍参数阈值,提高了网络鲁棒性,具有明显的优势。同时在 $SF-SF$ 网络和 $ER-ER$ 网络中,采用 $LMRCD$ 策略,研究网络受到蓄意攻击时,不同参数对网络鲁棒性的影响。研究发现,随着剩余容量强度参数 θ 值和初始负载强度参数 τ 值的增加都会使网络的鲁棒性表现出先增强后减弱的规律;随着分配效率参数 θ 值的增加,网络的鲁棒性会一直减弱。因此,合理的调节节点最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载强度参数的大小,可以很好的提高网络的鲁棒性能。这项工作对于合理构建网络以及抑制网络级联失效具有一定的指导作用。

第五章 总结与展望

5.1 总结

随着人类社会不断的发展,城市基础建设进程的日益加快,以及科技的迅猛发展、物联网的兴起,使得现实生活中各种网络之间的相互联系变得越来越紧密,如电力通信网络、电力供水网络、交通运输网络等,各种不同的网络之间存在着相互依存关系。因此,为实现“提高相依网络鲁棒性”这一目标,结合相依网络的理论知识,针对一对一随机相依网络的鲁棒性优化问题进行了如下工作:

首先,针对一对一耦合相依网络,研究加边策略对其鲁棒性的影响。基于两个无标度网络构建相依网络模型,并提出邻居节点重要度占比加边策略(*WLP*),通过设定加边比例 F 与分配倾向系数 P 两个重要参数,研究了随机攻击方式下不同加边策略对相依网络鲁棒性的影响。与此同时,与现有的几种加边策略进行对比研究。仿真结果表明,证明了所提策略可以有效的提高网络的鲁棒性。此外,随着加边比例 F 的增加,网络整体的鲁棒性能在增强。在加边比例一定时,网络的鲁棒性随着分配倾向系数的减小呈现先增强后减弱的现象。在分配倾向系数 $P=0.5$ 时,网络的鲁棒性最好。这项研究成果对于在受成本约束条件下合理的改善网络的结构,提高网络的鲁棒性具有一定的指导意义。

其次,提出了基于领域内节点最大剩余容量的负载重分配策略,相比于基于节点容的负载重分配、基于节点剩余容量的负载重分配策略来说,选择领域内剩余容量最大的部分节点作为失效节点额外负载的分配节点,能够有效避免剩余容量不足的节点来承担负载,降低了节点失效风险。同时由仿真可得,该策略在随机和蓄意攻击下能够减小节点的容忍参数阈值,提高了网络鲁棒性,具有明显的优势。同时在 $SF-SF$ 网络和 $ER-ER$ 网络中,采用 $LMRCD$ 策略,研究网络受到蓄意攻击时,不同参数对网络鲁棒性的影响。研究发现,随着剩余容量强度参数 γ 值和初始负载强度参数 τ 值的增加都会使网络的鲁棒性表现出先增强后减弱的规律;随着分配效率参数 θ 值的增加,网络的鲁棒性会一直减弱。因此,合理的调节节点最大剩余容量强度参数、负载重分配效率参数以及初始负载强度参数的大小,可以很好的提高网络的鲁棒性能。这项工作对于合理构建网络以及抑制网络级联失效具有一定的指导作用。

5.2 研究展望

随着社会的不断发展,基础设施建设速度不断加快,形成的基础设施网络规模正在不断壮大。这些网络使人们的生活变得更加方便、快捷,极大地提高了人们的生活质量。然而,随着网络种类不断地增多,其规模不断地扩大,各种网络之间的相互联系也变得

越来越复杂且紧密,对于研究相依网络级联失效机理以及提高网络鲁棒性的研究仍是十分必要的。在今后的研究中应考虑如下几个方面。

1.相依网络的相依方式。目前对于相依网络的研究中,相依网络的相依方式太过单一,通常的一对一随机相依方式忽略了实际联系情况,例如电力信息物理网络,物理层中的设备与信息层中的设备并非完全是一一对应的关系,往往一个电力设备为一个或多个信息设备提供电力支持,而一个信息设备只对一个电力设备进行数据的采集和指令的收发,这样网络中节点的联系就不再是单纯的一对一的关系,而是一对多或者是多对多的关系。因此在构建相依网络模型时需要结合实际的数据,建立符合实际要求的网络。

2.相依网络中关键节点的重要性评价方面。目前,对于网络节点的重要度研究主要集中在单层网络,其中大部分都是根据节点的度、介数等方法来判断节点在网络中的重要程度。然而对于相依网络中节点的重要性研究较少,由于相依关系存在使得相依网络与单一网络有着很大的不同,耦合方式和耦合边数的不同对于网络的鲁棒性都具有重大的影响。如何根据相依网络的拓扑结构来判定节点的重要度,在网络面临随机攻击或者蓄意攻击时对重要节点施加保护抑制级联失效的发生具有重要的现实意义。

3.相依网络的负载重分配方面。目前,对于相依网络的负载重分配的研究还很少,大部分采用负载只在子网络内部进行局部分配的方式,这种分配策略存在局限性,如何根据现实网络中负载的分配情况来提出更加具有实际意义的负载分配方式显得愈发重要。

4.多层网络相依以及子网络多样性方面。目前,对于相依网络的研究主要集中在双层网络,同时构成双层网络的子网络大多基于几大经典网络构成的,比如随机网络、无标度网络等。然而在现实世界中存在各种各样的网络,不同的网络具有不同的功能属性,同时多个网络之间交叉联系,这样使得网络变得更加复杂,如电力交通通信网络,电力网络为交通和通信网络提供电力支持,交通网络为电力网络提供原料运输渠道,通信网络为电力网络提供控制信息、保证正常运转。因此,仅仅研究子网络性质单一的双层网络具有很大的局限性。在今后的研究中应构建一个包含多个不同子网络的多层相依网络系统。

参考文献

- [1] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, Vol.74 (1): 47-97.
- [2] Newman M E. Assortative mixing in networks[J]. Physical Review Letters, 2002, Vol.89(20):208701.
- [3] Goh K I, Oh E, Kahng B, et al. Betweenness centrality correlation in social networks[J]. Physical Review E, 2003, Vol.67 (1): 017101.
- [4] Newman M E, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, Vol.69 (2): 026113.
- [5] Newman M E. Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, Vol.10 (1): 5200-5205.
- [6] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, Vol.424 (4): 175-308.
- [7] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [9] Yang H X, Wu Z X, Du W B. Evolutionary games on scale-free networks with tunable degree distribution[J]. Europhysics Letters, 2012, Vol.99 (1): 10006.
- [10] Xiang J, Hu K, Hu T, et al. Analysis and perturbation of degree correlation in complex networks[J]. Europhysics Letters, 2015, Vol.111 (4):48003.
- [11] Chenxi Shao, Yubing Duan. Identifying community structure in complex networks[J]. International Journal of Modern Physics B, 2015, Vol.29 (19): 1550131.
- [12] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Optimal traffic networks topology: A complex networks perspective[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, Vol.387 (4): 1025-1032.
- [13] Pagani G A, Aiello M. The Power Grid as a complex network: A survey[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2013, Vol.392 (11): 2688-2700.
- [14] Shao L, He M, Gao X. Notice of Retraction Dynamic process of Internet culture evolution based on complex network[C]// Web Society. IEEE, 2011: 57-60.
- [15] Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems, 2001, Vol.21 (6): 11-25.
- [16] Erdős P, Rényi A. On the evolution of random graphs[J]. Publications of the Mathematical Institute Hungarian Academy of Science, 1960, Vol.5 (13): 17-60.
- [17] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, Vol.393 (6684): 440-442.
- [18] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, Vol.386 (5439): 509-512.
- [19] Goh K I, Lee D S, Kahng B, et al. Sandpile on scale-free networks[J]. Physical Review Letters, 2003, Vol.91 (14): 148701.
- [20] Lee D S, Goh K I, Kahng B, et al. Sandpile avalanche dynamics on scale-free networks[J]. Physica A, 2004, Vol.338 (1): 84-91.
- [21] Bhaumik H, Santra S B. Critical properties of a dissipative sandpile model on small-world networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2013, Vol.88 (6): 062817.

- [22] Sansavini G, Hajj M R, Puri I K, et al. A deterministic representation of cascade spreading in complex networks[J]. *Europhysics Letters*, 2009, Vol.87 (4): 48004.
- [23] Carreras B A, Lynch V E, Dobson I. Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts[J]. *Chaos*, 2002, Vol.12 (4): 985-994.
- [24] Yang R, Wang W X, Lai Y C, Chen G. Optimal weighting scheme for suppressing cascades and traffic congestion in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2009, Vol.79 (2): 026112.
- [25] Xia Y, Fan J, Hill D. Cascading failure in Watts–Strogatz small-world networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2010, 389(6):1281-1285.
- [26] Guo C, Wang L, Li Y, et al. Study on network cascading failures based on Load-capacity model[J]. *Journal of Computer Research & Development*, 2012, Vol.49 (12): 2529-2538.
- [27] Li P, Wang B H, Sun H, et al. A limited resource model of fault-tolerant capability against cascading failure of complex network[J]. *European Physical Journal B*, 2008, Vol.62 (1): 101-104.
- [28] 任俊亮, 申卯兴, 仝蕊等. 无尺度网络中降低相继故障规模的策略研究[J]. *计算机工程与应用*, 2011, Vol. 47 (33): 82-84.
- [29] 王建伟, 荣莉莉. 基于负荷局域择优重新分配原则的复杂网络上的相继故障[J]. *物理学报*, 2009, Vol.58 (6): 3714-3721.
- [30] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, Vol.66 (2): 065102.
- [31] Kim, Dong-Hee, Motter, et al. Resource allocation pattern in infrastructure networks[J]. *Journal of Physics A Mathematical & Theoretical*, 2016, 41 (22): 4539-4539.
- [32] 窦炳琳, 张世永. 复杂网络上级联失效的负载容量模型[J]. *系统仿真学报*, 2011, Vol. 23 (7): 1459-1463.
- [33] Moreno Y, Pastor-Satorras R, Vazquez A. Critical load and Congestion instabilities in scale-free networks[J]. *Europhysics Letters*, 2003, Vol.62 (2): 292-298.
- [34] Sun H J, Zhao H, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2008, Vol.387 (25): 6431-6435.
- [35] Hong C, Zhang J, Du W B, et al. Cascading failures with local load redistribution in interdependent Watts–Strogatz networks[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2016, Vol.27 (11): 1650131.
- [36] 段东立, 吴俊, 邓宏钟等. 基于可调负载重分配的复杂网络级联失效模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, Vol. 33 (1): 203-208.
- [37] 段东立, 武小悦. 基于可调负载重分配的无标度网络连锁效应分析[J]. *物理学报*, 2014, Vol. 63 (3): 030501.
- [38] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, Vol.464 (7291): 1025-1028.
- [39] Danziger M M, Bashan A, Berezin Y, et al. An introduction to interdependent networks[C]//*Proceedings of the 22nd International Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems*, 2014: 189-202.
- [40] 老松杨, 王竣德, 白亮. 相依网络研究综述[J]. *国防科技大学学报*, 2016, Vol. 38 (1): 122-128.
- [41] 陈世明, 吕辉, 徐青刚, 等. 基于度的正/负相关相依网络模型及其鲁棒性研究[J]. *物理学报*, 2015, Vol. 64 (4): 359-369.
- [42] 刘润然, 贾春晓, 章剑林, 等. 相依网络在不同攻击策略下的鲁棒性[J]. *上海理工大学学报*, 2012, Vol. 34 (3): 235-239.
- [43] Shao J, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2011,

- Vol.83 (2): 036116.
- [44] Dong G, Gao J, Tian L, et al. Percolation of partially interdependent networks under targeted attack[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2012, Vol.85 (2): 016112.
- [45] Jiang J, Li W, Cai X. The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, Vol.410 (2014): 573-581.
- [46] Tian L, Huang Y, Dong G, et al. Robustness of interdependent and interconnected clustered networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, Vol.412 (2014): 120-126.
- [47] 陈世明, 邹小群, 吕辉, 等. 面向级联失效的相依网络鲁棒性研究[J]. *物理学报*, 2014, Vol. 63(2): 428-437.
- [48] Peng Xing-Zhao, Yao Hong, Du Jun, et al. Load-induced cascading failure in interdependent network[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, Vol.64 (4): 048901.
- [49] Hong S, Lv C, Wang B, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network[J]. *Journal of Physics A Mathematical & Theoretical*, 2016, Vol.49 (19): 195101.
- [50] 王竣德, 老松杨, 阮逸润, 等. 基于节点负载容忍度的相依网络鲁棒性研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, Vol. 39(11): 2477-2483.
- [51] Wang J W. Modeling cascading failures in complex networks based on radiate circle[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, Vol.391 (15): 4004-4011.
- [52] Liu R R, Wang W X, Lai Y C, et al. Cascading dynamics on random networks: Crossover in phase transition[J]. *Physical Review E*, 2012, Vol.85 (2): 026110.
- [53] Liu Y, Wei B, Du Y, et al. Identifying influential spreaders by weight degree centrality in complex networks[J]. *Chaos Solitons & Fractals the Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science & Nonequilibrium & Complex Phenomena*, 2016, Vol.86:1-7.
- [54] Wehmuth, Klaus, Ziviani, et al. Distributed assessment of the closeness centrality ranking in complex networks[J]. *Computer Networks*, 2013, Vol.57 (13): 2536-2548.
- [55] Barthélemy M. Betweenness centrality in large complex networks[J]. *European Physical Journal B*, 2004, Vol.38 (2): 163-168.
- [56] 王建伟, 荣莉莉, 郭天柱. 一种基于局部特征的网络节点重要性度量方法[J]. *大连理工大学学报*, 2010, Vol. 50(5): 822-826.
- [57] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2011, Vol.6 (11): 888-893.
- [58] 周璇, 张凤鸣, 周卫平, 等. 利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性[J]. *物理学报*, 2012, Vol. 61(19): 190201.
- [59] 阮逸润, 老松杨, 王竣德, 等. 基于领域相似度的复杂网络节点重要度评估算法[J]. *物理学报*, 2017, Vol. 66(3): 365-373.
- [60] 吴润泽, 张保健, 唐良瑞, 等. 双网耦合模型中基于级联失效的节点重要度评估[J]. *电网技术*, 2015, Vol. 39(4): 1053-1058.
- [61] Nguyen D T, Shen Y, Thai M T. Detecting Critical Nodes in Interdependent Power Networks for Vulnerability Assessment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, Vol.4 (1): 151-159.
- [62] Shen Anwei, Guo Jilian, Wang Zhuojian. Research on Methods for Improving Robustness of Cascading Failures of Interdependent Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, Vol.95 (3): 2111-2126.
- [63] 高彦丽, 陈世明. 一种全局同质化相依网络耦合模式[J]. *物理学报*, 2016, Vol. 65(14): 302-309.
- [64] Du Ruijin, Dong Gaogao, Tian Lixin, Liu Runran. Targeted attack on networks coupled by connectivity

- and dependency links[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, Vol.450 (2016): 687-699.
- [65] Li Xin, Wu Haotian, Scoglio Caterina M, Gruenbacher Don. Robust allocation of weighted dependency links in cyber-physical networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015, Vol.433 (2015): 316-327.
- [66] Wang Xingyuan, Cao Jianye, Li Rui, Zhao Tianfang. A preferential attachment strategy for connectivity link addition strategy in improving the robustness of interdependent networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, Vol.483 (2017): 412-422.
- [67] Hou Yueyi, Xing Xiaoyun, Li Menghui, Zeng An, Wang Yougui. Overload cascading failure on complex networks with heterogeneous load redistribution[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2017, Vol.481 (2017): 160-166.
- [68] Yanli Gao, Shiming Chen, Sen Nie, Fei Ma, Junjie Guan, Robustness analysis of interdependent networks under multiple-attacking strategies[J]. *Physica A*, 2018, Vol.496 (2018): 495-504.
- [69] Parshani R, Buldyrev S V, Havlin S. Interdependent networks: reducing the coupling strength leads to a change from a first to second order percolation transition[J]. *Physical Review Letters*, 2010, Vol.105 (4): 048701.
- [70] Tan F, Wu J, Xia Y, et al. Traffic congestion in interconnected complex networks[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2014, Vol.89 (6): 062813.
- [71] Gao J, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2012, Vol.85 (62): 066134.
- [72] Pan Z F, Li X, Wang X F. Generalized local-world models for weighted networks[J]. *Physical Review E*, 2006, Vol.73(2): 056109.
- [73] Cao X B, Hong C, Du W B, et al. Improving the network robustness against cascading failures by adding links[J]. *Chaos Solitons & Fractals the Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science & Nonequilibrium & Complex Phenomena*, 2013, Vol.57 (4) : 35-40.
- [74] Marsden P V. Network Centrality, Measures of[J]. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2015, Vol.16 (2): 532-539.

个人简历 在读期间发表的学术论文

个人简历:

程运洪, 男, 1991 年 11 月生。

2015 年 7 月毕业于安徽师范大学, 自动化专业, 获学士学位。

2015 年 9 月入华东交通大学, 控制科学与工程专业, 读硕士研究生。

已发表论文:

[1] 陈世明, 程运洪, 邓兵. 有向相依网络的可控性研究[J]. 智能系统学报. 已录用.

[2] Dai Y M, Chen S M, Cheng Y H. The study for protection strategy of cascading failure of interdependent network with the load[C]// Chinese Association of Automation. IEEE, 2017:48-55.

待发表论文:

致谢

时光荏苒，日月如梭，转眼之间。三年的研究生生涯就要接近尾声，自己又将迎来一个新的毕业季。回首在交大求学的三年，让我感受颇多。三年里，自己经历过迷茫、彷徨甚至挫折，但是在老师、同学、朋友以及家人的帮助下，让我克服了这些困难，同时收获了满满的欢乐和感动。此时此刻，唯有怀揣感恩之心谨向关心、爱护、帮助我的人表示最诚挚的感谢和最美好的祝愿。

首先，衷心的感谢我的导师陈世明教授。三年来，导师对我无微不至的关怀让我感受到家的温馨。导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，平易近人的人格魅力对我影响深远。他不仅教会我要保持一个怎样的心态去求学、科研，还教会我做人的道理，让我受益匪浅。在我论文的撰写过程中，他给予了我很多指导和帮助，让我能够顺利的完成毕业论文的撰写。在此我谨向他表达我最崇高的敬意和最衷心的感谢。

其次，我要感谢我的同门，三年的研究生生活，正是因为有了他们才使得我的学习生活变得丰富多彩。在我学习中遇到困难时，感谢他们积极给予我帮助和支持，让我很快地走出困境，战胜困难，让我体会到学习带来的欢乐和自豪。在生活上，感谢他们在学习之余陪我一起锻炼健身，让我不再感到孤单，体会到了一个大家庭的温暖。

再者，感谢我的父母，感谢他们这么多年对我的养育之恩，感谢他们对我学业的支持，感谢他们在我彷徨无助时给予我莫大的关怀。还要感谢室友对我的帮助，他们帮助我解决了生活中不少的烦心事。再次衷心感谢所有关心和帮助我的人。

最后，向在百忙之中抽出时间参与评审论文的各位专家表示由衷地感谢！