

第 1 章 概 述

1.1 研究背景与意义

大千世界中广泛存在着各种精彩纷呈的复杂系统,这些系统有的是经过漫长的岁月自然地演化和发展形成的,有的是由勤劳智慧的人类建造的。随着人类认识能力的提高,人们发现这些真实的复杂系统可以抽象为网络。所谓网络,简单来说,是由若干节点和节点之间的连线(边)组成的,其中节点代表的是系统中的个体,而边则表示的是个体间的相互作用关系^[1-3]。例如,如果把生物体内的神经细胞看作节点,那么这些节点通过神经纤维的连接构成神经网络;如果把社会团体中的个人看作节点,把人与人之间的朋友关系看作边,那么就形成了一个社会关系网络;如果把路由器或自治系统看作节点,把通信介质如光缆等看作边,那么就构成了因特网(Internet);类似的还有万维网(WWW)、电力网络、交通网络、金融网络等。

毋庸置疑,现实世界中的网络系统给人类的日常生活和生产带来了极大的便利,人类的生活质量与生产效率得到了大大提高,网络系统自身的功能也随之越来越强大,但与此同时,它们的复杂程度也随之增加,确保这些网络系统安全和可靠运行的难度也越来越大^[4-6]。网络系统中的节点与其他节点或与外界环境之间都存在着信息、能量或物质的交换,在开放的交换过程中,不可避免地受到系统内部和外部的干扰。其中某些突发的微小扰动都可能是致命的,某个或少数几个节点可能会因此而故障,由于节点之间的耦合关系,故障的节点可能引发系统内故障的级联反应,使得故障在整个系统中传播,最终导致系统功能的丧失,即系统崩溃的灾难性后果。

故障的这种传播或蔓延现象普遍发生在各种基础设施网络系统中^[1-9],如通信网、交通网、电力网、供水网、供气网等。在这些网络中,输运着与人类生活密切相关的大量的流,这些流可以是信息、能量或物质,网络

组分（节点或边）因此而承受着负载，且网络组分对负载的承受能力是有限的。这样，一个微小的扰动，即一个或少数几个网络组分出现的故障，会导致流在网络上重新分配，进而可能使得其他某些网络组分因为过载而故障，这些组分的故障又可能导致其他组分的“接连故障”，产生级联反应，并可能最终导致网络相当一部分甚至全部崩溃。这种现象就称为级联故障（Cascading Failures），有时也称为“雪崩”。

大规模的级联故障一旦发生，破坏力和影响力往往是极强的。近年来，由级联故障所导致的各种灾难性事件屡见不鲜。2003年8月14日，美国俄亥俄州某市的3条超高压输电线的故障，引起北美的俄亥俄、密歇根、底特律等8个州及加拿大的多伦多、渥太华2个省发生大停电事故^[4]。此次长达29小时的停电损失负荷量61800 MW，导致约5000万名居民陷入黑暗，经济损失约300亿美元。2006年12月26日发生在南海台湾附近的地震致使亚太1号海缆、亚太2号海缆、中美海缆、亚欧海缆等几条国际海底通信光缆发生断裂，这一事故造成整个亚太地区的Internet几近瘫痪，多个国家和地区的通信业务也大量中断，且严重影响到金融、商贸等业务活动，经济损失惨重^[9]。2008年1月25日，在我国南方地区遭遇长时间、大范围冰雪天气后，湖南郴州一架输电塔倒塌，一条高压线压在了其下的铁路网上而造成配电所跳闸断电，行驶至湖南耒阳的N582次列车失去电力，从而拉开了连锁反应的序幕，导致了湖南地区电网崩溃、交通瘫痪、人员滞留等，电网崩溃和交通瘫痪又使得一些地区供水停止、食物紧张、燃料告急^[10]……由这些类型的灾难性事件可见，由于网络系统中个体之间甚至系统之间耦合关系的存在，初始扰动所产生的影响往往被放大，并且这种放大的趋势还在增强。这类灾难对人类社会造成了巨大冲击和极其不利的影响，引起全世界的普遍关注。

级联故障通常发生在通信网、电网、交通网、供水网、供气网等基础设施网络系统上，众所周知，这些系统是承载人类社会活动的基本构建，是社会经济繁荣、有序和高速发展的基本支撑条件，同时这些系统又都是典型的复杂系统，它们的复杂性体现在多个方面。首先，从系统的规模来看，它们都包含了众多的节点和错综复杂的边，这些节点和边的数量是随时间不断演化的。其次，从系统的相互作用来看，这些系统的各节点之间都存在着信息、能量或物质的复杂交互。最后，它们都是受环境影响的开放系

统,运行时必然要受到系统内外部的干扰,使得系统的运行规律,尤其是级联故障现象的产生和演变过程变得极其复杂^[9]。对于这样一类系统,应用当前主流的还原论(认识整体必先认识局部)的方法来研究是不行的,需要从整体和宏观的角度去探索整个系统的演化规律,为解决级联故障问题提供理论依据^[11]。

近年来蓬勃发展的复杂网络方法为人们探索系统的复杂性提供了一种重要方法,作为研究复杂性科学和复杂系统的有力工具,复杂网络可以用来捕捉并描述系统的演化机制、演化规律(结构)和整体行为(功能),它已成为当今复杂系统与复杂性科学研究中最受关注和最具挑战性的科学前沿课题之一^[1-4]。

而复杂网络兴起的直接原因应归于两篇具有开创意义的文章,它们的发表被看作复杂网络研究新纪元开始的标志。一篇是1998年6月美国的Cornell University(康奈尔大学)的Watts和Strogatz在*Nature*上发表的题为*Collective Dynamics of 'Small-World' Networks*(《“小世界”网络的集体动力学》)的文章,其中第一作者Watts当时是理论和应用力学系的在读博士生,第二作者Strogatz是Watts的导师,是非线性动力学领域的大师级科学家^[12];另一篇是1999年10月美国的University of Notre Dame(圣母大学)的Albert和Barabási在*Science*上发表的题为*Emergence of Scaling in Random Networks*(《随机网络中标度的涌现》)的文章,其中第一作者Albert当时是物理系的在读博士生,第二作者Barabási是Albert的导师,Barabási被称为“网络科学之父”^[13]。这两项工作分别揭示了真实的小世界效应和无标度特性,并构建了吻合相应特性的网络模型,即WS小世界网络模型^[12]和BA无标度网络模型^[13]。

自从小世界效应和无标度特性被发现后,复杂网络在理论和应用方面都得到了迅猛的发展。因为几乎所有的复杂系统都可以通过各种各样的复杂网络来描述,复杂网络可谓无处不在,遍及人类社会和自然界,因此对复杂网络的探讨也渗透到数学、物理学、社会学、生物学、经济学、交通运输、计算机学及系统学等众多不同的领域,成为一门广泛交叉的新兴学科。长期以来学者们在研究各种复杂网络的基础上,一直致力于探索什么样的网络拓扑结构能更好地描述真实系统,以及网络拓扑结构对发生在其上的动力学行为的影响,最终的目的是通过研究的结果来了解和解释在这些网

络之上的系统运作方式, 进而预测和控制系统的行为^[1-3,14]。特别是学科之间相互交叉和融合趋势的不断加强推动了对复杂网络共性的揭示, 对复杂网络的结构、功能和动力学行为的科学理解及应用已成为网络时代科学研究中一个极其重要的挑战性课题, 甚至被称为“网络的新科学”^[4]。

人类社会的日益网络化使得人们对各种关乎国计民生的复杂网络的功能越来越依赖, 对这些网络的安全性和可靠性的关注程度也越来越高。尽管做出了很多的努力, 但大规模的级联故障仍然在网络上时有发生, 且故障规模及造成的损害还可能不断增加。找到更有效的预防和控制级联故障的方法, 从而更有效地保护网络是至关重要且十分迫切的。对复杂网络上级联故障的建模就成为人们深入研究级联故障的发生机理、级联故障的预防与控制的有效手段。借鉴以往的模型研究工作, 本书在着重分析级联故障实际影响因素的基础上, 从新的角度对复杂网络上的级联故障进行建模研究。通过本研究, 有助于深入了解级联故障在传播过程中的动态行为和动力学特性, 进而给出对网络更合理、有效的保护措施和方法。这对于复杂网络理论的进一步丰富与发展, 以及防止大规模的级联故障在网络上的迅速蔓延, 提高网络的鲁棒性和安全性, 以最大可能地减轻级联故障所导致的各种灾难, 具有非常重要的理论意义和应用价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 复杂网络理论研究进展

自从具有里程碑意义的两篇重要论文(1998年的小世界网络^[12]和1999年的无标度网络^[13])的发表, 复杂网络受到了国内外众多学者的关注, 掀起了复杂网络研究的热潮。复杂网络研究方法的实质是抓住了复杂系统的抽象本质, 即几乎任何复杂系统都可以抽象为网络。因此许多领域的研究人员都以复杂网络为新的视角和方法来探索系统的复杂特性。从1998年开始, 很多有关复杂网络的优秀文章都发表在国际一流刊物上, 如 *Nature*、*Science*、*Physical Review Letters*、*ACM*; 此外, 2007年7月, 管理科学领域国际最著名的学术期刊 *Management Science* 刊出了复杂系统与复杂网络专辑; 2009年9月, 国际顶级学术期刊 *Science* 还专门推出了复杂系统与网

络专辑；2010年12月，国内的系统科学学报也推出了混沌和复杂网络理论与应用专辑等。这些都从一定程度上反映了复杂网络已成为当前国内外学术界的前沿研究课题和热门科学。复杂网络有利于人们对不同学科之间的共同规律进行探索，也必将为人类提供全新的认识真实世界的科学知识，并成为人类改造客观世界的有力武器^[15]。

结构和功能是复杂网络研究的两个核心问题，其中网络结构方面主要涉及实证和建模方面的研究，而网络功能则可以通过其上的动力学行为的特性来反映^[1-3]。因此，下面就从实证和建模研究，以及动力学行为研究这两个方面进行研究进展的介绍。

1. 实证和建模研究

实证研究是复杂网络研究中最初始、最基础的一步，其研究结果是促进复杂网络研究快速发展的动力源泉。事实上，也正是通过实证研究才激发了小世界网络和无标度网络的提出。为了揭示其他新的共有特征和性质，进而推动更加符合实际的网络模型的构建，有待于对现实网络进行更为广泛、深入的实证研究。

国内外学者对各类实际网络进行了大量的实证研究，如 Internet（拓扑结构图如图 1.1 所示）^[16,17]、WWW^[18,19]、航空网^[20-22]、公路网^[23,24]、电力网络^[25]、新陈代谢网络^[26]、蛋白质相互作用网络^[27]、食物网络^[28]、物流和供应链网络^[29]、性接触网络^[30]、友谊网络^[31]和合作网络^[32]等。研究发现，这些网络的拓扑结构大多具有一些共同的特性，如大的簇系数和小的平均路径长短，且网络的节点度分布具有幂律分布（即无标度特性^[14]）。

近年来越来越多的实证数据表明，通过单纯的拓扑网络来描述实际网络是远远不够的。纯拓扑网络会丢失实际网络的边和节点上的很重要的物理信息，即边和节点的强度（也就是权重）。以 Internet 为例，流经某条边和某特定路由器的信息量可以描述这条边和这个路由器在信息传输过程中的重要性，而这种重要性无法通过拓扑网络进行描述。因此研究能够反映更多物理信息的超越单纯拓扑结构的网络势在必行，加权网络成为研究人员的首选。对于加权网络，除了拓扑特性，还有与权重相关的统计特性需要关注，尤其是拓扑特性与权重的关联性，这为细致和全面地理解相应系统的组织结构提供了一个新方法。人们在分析实证数据的基础上发现了许多有趣现象：大多加权网络，不仅度分布具有幂律分布的特性，其边权和节

点权的分布同样具有这样的特性，以及节点的权和度之间具有幂函数这种非线性关系等。

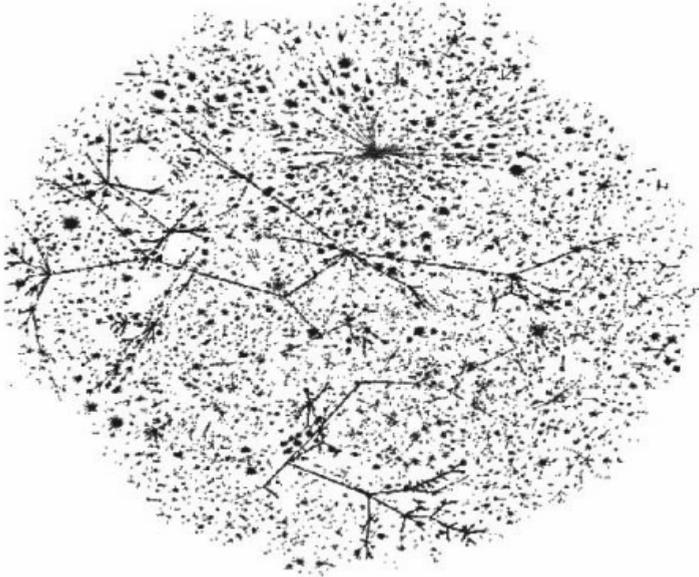


图 1.1 Internet 自治系统 (Autonomous System, AS) 层面上的拓扑结构图
(图片取自文献[2])

例如, Newman^[33,34]对科学家合作网的权重、最短路径及介数的分布特性进行了探讨。之后, Barrat^[35]等以科学家合作网和全球航空网为例, 并将簇系数和邻居节点的平均度也推广到加权网络中, 对该网络的统计特性进行了详细讨论。结果表明, 真实网络中节点的权重和度一样, 同样具有很强的不均匀性, 且它们的权和度之间具有非线性关系等。Macdonald 等对美国航空网络和 E. Coli 新陈代谢网络的实证工作表明, 这两种网络的流量(权重)和拓扑结构之间同样具有非线性关系^[36]。此外, 还有很多关于社会网络、交通网络、神经网络和通信网络等类似的实证工作^[37,38]。这些研究结果都表明, 真实的加权网络具有“富者更富 (rich get richer)”的特性, 也就是大度的节点往往会承受比度更大的权重。这些实证成果为加权网络的建模研究提供了可靠的理论依据。

除了权重, 现实中的许多网络还具有方向性。例如, 一个简单的社会关系网络, 甲认识乙, 但乙并不认识甲, 与乙也认识甲相比, 后者比前者的关系更稳固。这样一层简单的社会关系, 如果只用无向网络来分析, 只能

得到一层关系。而如果把这层关系抽象成有向网络，则可以很直观地区别这两者关系的稳固程度。研究者们通过对现实中的万维网、引文网及食物链网等有向网络的研究，发现它们具有共同的特征（如表 1.1 所示，列举了现实世界中有向网络的统计数据^[2]），并在此基础上发现了有向网络自身的特点。

在实证研究的基础上，结合研究人员对现实网络演化机理的理解和解释，构建网络模型以捕获所认识的共性，再现实的复杂网络，这就是建模研究^[10,14]。建模研究为复杂网络上动力学行为的研究提供了一个基础和平台，为复杂网络的分析、控制和优化设计提供了有力支持。

表 1.1 现实世界中有向网络的统计数据

网 络		类型	N	M	$\langle k \rangle$	L	r	C
社会 领域	电子邮件	有向	59 912	86 300	1.14	4.95	1.5/2.0	0.16
	电子邮件地址	有向	16 881	57 029	3.38	5.22	--	0.13
信息 领域	WWW (nd.edu)	有向	269 504	1 497 135	5.55	11.3	2.1/2.4	0.29
	WWW (Altavista)	有向	203 549 046	2.13×10^9	10.5	16.2	2.1/2.7	
	论文引用网络	有向	783 339	67 16 198	8.57		3.0/--	
	罗氏字典	有向	1 022	5 103	4.99	4.87	--	0.15
技术 领域	软件包	有向	1 439	1 723	1.2	2.42	1.6/1.4	0.08
	软件类	有向	1 377	2 213	1.61	1.51		0.01
生物 领域	海洋食物网	有向	135	598	4.43	2.05	--	0.23
	淡水食物网	有向	92	997	10.8	1.9	--	0.09
	神经网络	有向	307	2 359	7.68	3.97	--	0.28

注：表中 N 为网络节点数、 M 为边数、 k 为平均度数、 L 为平均最短路径长度、 C 为平均聚类系数、 r 为幂指数，若服从幂律分布，则给出的是出度指数和入度指数，否则为“--”。

依据网络是否有权重和方向，建模研究可以分为无权无向网络建模研究、加权网络建模研究和有向网络建模研究^[39,40]。首先简单介绍无权无向网络的建模工作。Krapivsky 等^[41]从数值仿真和理论分析两个角度就非线性择优连接对网络的动力学特性和拓扑结构的影响做了研究。这两种方法的研究结果表明，非线性择优连接机制改变了网络的无标度特性，而当择优连接的概率和节点的度之间具有近似线性关系时，将会产生无标度网络，并且其幂指数在 $[2, \infty)$ 之间是可以任意调节的。Dorogovtsev 等分别研究了节

点初始吸引度^[42]和加速增长^[43]对无标度特性的影响,发现这两个因素并不会改变网络的无标度特性,而只会对幂指数的大小产生影响。Albert 等^[44]就内部边的添加和删除等局域事件的发生对网络演化的影响做了探讨,发现了从无标度网络到随机网络的相变区域。Holme 和 Kim 等^[45]引入“三角形形成”机制,构建了簇系数可调的无标度网络模型。通过调节“三角形形成”的概率可以生成具有不同簇系数的无标度网络。李翔等^[46]提出了一个局域世界演化模型,其中,新加入的节点在被随机选择的一个局域网络中依据择优连接机制选择节点来连接,这样可以产生从指数分布到幂律分布过渡的网络。

上述介绍的模型均是无权无向网络的模型,在建模中都假定了每个节点或每条边都是完全相同的。而加权网络和有向网络的建模则分别引入权重和方向来刻画节点或边的差异性,这使得真实网络的结构和功能能够得到更准确的反映。

对于加权网络建模,如 Barrat、Barthélemy 和 Vespignani 等^[47]抓住了加权网络中权重演化的基本机制,提出了一个经典的权重网络演化模型(简称 BBV 模型),此模型可以拟合实际网络中的权重和度的幂律分布。但在该模型中,节点的权重和度之间是线性相关的,与实证研究中得出的两者之间非线性相关的关系不相符。考虑网络上的流动力学特性,王文旭等提出了一个加权网络演化模型,该模型不仅可以刻画实际网络中权重和度的幂律分布特性,还能拟合出权重和度之间的非线性相关关系,以及较大的簇系数和度-度负相关等特性^[48]。随后王文旭等又提出了双向选择加权网络模型^[49]和双向吸引加权网络模型^[50]。而在有向网络建模方面,如 Tadić 等模拟生成一个出弧动态变化的 WWW 网络模型^[51]。Schwartz 等运用渗流理论研究了有向无标度网络模型中出度和入度的相关性^[52]。Ramezanpour 等在一个小世界网络模型中研究了有向短程与长程传播的影响^[53]。总的来说,目前关于无权无向网络的建模研究成果要比加权有向网络的研究多很多。事实上,在实际的复杂网络中,权值和方向的动态演化过程与拓扑演化一样复杂,且近年来越来越多网络实证数据的获得使得探讨加权有向网络的演化成为可能。因此加权有向网络的模型研究正在被越来越多的研究者所关注。

2. 动力学行为研究

复杂网络上动力学行为的研究有助于人们理解现实世界中各种网络的功能，这也正是复杂网络研究的最终目标之一。因此研究复杂网络上的动力学行为、探索不同的网络结构对其上的动力学行为特性的影响自然成为重要的热点研究课题。网络上的动力学行为内容丰富，有网络上的流量特性、病毒传播、同步、博弈、搜索、级联故障等^[54]。这里要特别说明的是，复杂网络理论及其模型的发展更为恰当地描述了现实世界中的网络，从而能够在更为合理的模型之上对这些网络的动力学行为进行探讨。这对于很多的不可运行在真正系统中的网络动力学实验尤为重要，如计算机病毒在 Internet 上的传播实验、人际关系网络中的传染病扩散实验、研究如何提高电力网络鲁棒性的实验等。

deMenezes 和 Barabási^[55]率先对包括 Internet、WWW、河流网和高速公路网等各种真实网络上的流量动力学特性进行了研究。结果表明，所研究的所有网络节点上的流量时间序列都存在类似噪声的涨落及周期性的波动趋势。Zhao 等详细探讨了不同的网络结构：规则网络、等级网络、小世界网络和无标度网络上基于最短路径路由策略的交通流从自由态到拥塞态的相变行为^[56]。王文旭等提出了一个基于局域路由策略的流动力学模型，并在无标度网络上探讨了模型参数与网络的处理能力之间的关系^[57]。Pastor-Satorras 等^[58]率先对复杂网络，尤其是无标度网络上的病毒传播行为进行了研究，他们实证分析了 Internet 上的病毒传播，并进一步建立了复杂网络的病毒传播模型。他们发现，大规模的无标度网络上的病毒传播不存在阈值。该结果表明，对于无标度网络，控制其上的病毒传播相当困难。此后，很多研究者从不同角度分析了复杂网络上病毒传播的特点，并探讨了相应的控制方法^[59]。

上述对无权无向网络上动力学行为的研究，大多发现无标度网络上的动力学特性与原来建立在其他拓扑网络（如规模网络、随机网络）上的结果存在较大差异。而加权网络和有向网络因为分别引入了权重和方向，这必将对网络上各种动力学行为的特性产生影响。在网络上的流量特性方面，如 Braunstein 等^[60]在具有随机权值的加权网络中，探讨了最优路径如何受到权重的随机性强弱的影响。Goh 等^[61]研究了加权网络上的传输方式如何受到不同费用分布的影响。Murai 等通过分析有向网络邻接矩阵的频谱性质

探测到网络中的有向流^[62]。在网络上的病毒传播方面,严钢等^[63]基于BBV模型网络给出了加权网络上的疾病传播模型,重点关注权重对传播行为的影响。他们发现,网络的权重越分散,其上的疾病传播速度越慢。在网络鲁棒性方面,Emmert-Streib对有向和无向无标度网络的鲁棒性之间的差异进行了研究^[64]。由于加权网络和有向网络能更细致和全面地反映真实网络,因此,有关加权有向网络,特别是对它们的动力学行为的研究是当前一个重要方向。

随着网络上动力学行为研究的深入,有关成果也在许多领域得到了较好的应用。例如,对流量特性、搜索等的研究在路由器的设计中能起到关键作用;病毒传播的研究对疾病及计算机病毒的预测、预防和控制具有重要的指导意义;对鲁棒性的研究成果可以应用于网络拓扑的优化设计等。

目前人们对网络上动力学行为的认识还远远不够,还有很多有意义的问题值得我们去探索,同时各种动力学行为之间看似差异很大,但是已有的研究表明它们之间存在着本质和必然的联系。例如,与传播行为相似的级联故障是与网络的鲁棒性相关的问题,同时是与网络上的流动力学相关的问题。因此关注相关研究的进展,将对网络上动力学行为的深入研究提供新的研究思路和方法。由于本书的工作主要聚焦于级联故障行为,所以在下节将详细讲述级联故障的研究进展。

1.2.2 级联故障研究进展

人们的日常生活和生产依赖于现实世界中许多复杂网络的高效运行和功能的正常发挥,如通信网、交通网、电网、供水网、供气网等。这些网络的安全性和可靠性直接关系到国民经济和人民生活的稳定与发展,但是级联故障不断危害着这些支撑国计民生的关键性网络。在这些网络上输运着大量的流,当网络中某个或少数几个组分(节点或边)发生故障后(这种故障可能是随机故障或受到攻击引起的),会导致网络中流量的重新分配,而流量的重新分配又使得其他某些网络组分的负载超过其本身所能承受负载的能力,即过载而发生故障,这些故障又导致其他网络组分接连的过载故障,产生级联反应,最终导致网络相当一部分甚至整个网络的崩溃。因此类似于病毒传播行为,在极少数网络组分出现的故障会像病毒或瘟疫一样扩散至整个网络,从而对网络造成严重破坏。例如,一些国家的大规

模停电事件、大面积交通堵塞、Internet 拥塞崩溃，甚至一个或多个国家爆发的经济危机都被认为是因级联故障所导致的灾难^[4]。为了避免或至少减轻这种灾难，有必要对复杂网络上级联故障行为进行研究，进而制定有效的措施以实施可能的控制。

理论建模是研究级联故障行为的重要手段，近年来国内外许多研究者从多个角度对级联故障进行了广泛的建模研究，其中负载-容量模型^[65-68]是研究得最多的一类模型。这类模型的共同点是：赋予每个网络组分一定的初始负载和容量（也称为阈值，即承受负载的最大能力）。当外部扰动（如攻击）、本身故障或过载时，该网络组分故障或失效，其上的负载按照一定策略重新分配。某些接收了额外负载的网络组分的总负载有可能超过其容量而过载，这种过载故障导致新一轮的负载重新分配。这个过程反复进行，所影响的网络组分有可能逐渐扩散，从而产生级联故障。在模型中，有的只将节点或边的动态行为进行单独考虑，也有的将节点和边结合起来加以考虑，其中研究最多的还是节点级联故障。这类模型的构建需解决 3 个基本问题：节点（或边）的初始负载的定义、节点（或边）故障后负载重新分配的动力学过程的定义、节点（或边）的容量的定义。基于这 3 点，提出了各种各样的级联故障模型，并从不同角度对模型上的级联故障行为进行了探讨。

Moreno 等^[69]引入光纤束模型研究了 BA 无标度网络上由节点过载引发的级联故障。在该模型中，定义每个节点的初始负载都相同，并赋予节点一个满足某种统计分布的容量。当节点的初始负载大于容量时立即从网络中移除（移除节点的同时也就移走了与该节点相连的边），并将该失效节点的负载平均分配给它的邻居节点。用最大连通子图规模来测度级联故障对网络性能的影响。通过仿真分析初始负载与最大连通子图规模之间的关系发现：级联故障的规模随着初始负载的增加而增大。另外，容量分布较均匀的网络对级联故障更具鲁棒性。此后，也有研究者基于光纤束模型对不同网络结构上的级联故障行为进行研究，并着重对模型中的相变现象展开讨论^[70,71]。此外，Moreno 等^[72]还仿真研究了 BA 无标度网络上由边过载引发的级联故障，发现网络承受的平均负载大小决定了网络存在最大连通子图的概率，随着网络平均负载的增加，级联故障的可能性加大。

沙堆模型是在很早前为研究沙崩前的自组织临界状态而提出的一个可

以用计算机模拟的模型^[73]。Bonabeau^[74]和 Goh 等^[75]率先将沙堆模型分别引入 ER 随机网络和 BA 无标度网络。在模型中,将阈值定义为与网络结构关联(如节点的度)的,每个节点都从无负载开始,并随机选择节点执行负载的增加操作,这将导致某些节点过载,该节点的负载被重新分配到其某些邻居节点。他们研究了负载增长对网络在雪崩前的自组织临界行为的影响;文献[76]将 Goh 等所得到的结论进一步推广,从数值仿真和理论解析两方面验证了 BA 无标度网络上雪崩过程的规模和持续时间都具有幂律特性;文献[77]基于沙堆模型的思想,解释了事件数量的增长和事件频率的加快导致了级联故障现象从级联故障事件向级联故障灾难的相变;文献[78]也基于沙堆模型研究了加权网络嵌入的无标度网络的鲁棒性,发现了在带有地域限制的无标度网络上,局域连接越紧密的网络越易导致网络的全局崩溃。

Holme 等^[79,80]从网络演化的角度,在 BA 无标度网络上仿真研究了由网络规模的增长致使节点过载和边过载而引发的级联故障。在文献[79]中,将节点的负载定义为该节点的介数。节点的容量分两种情况定义:一种情况下容量随着网络的规模线性增长(ICA 模式);另一种情况下容量固定为一个常数(ECA 模式)。仿真结果表明:ECA 模式下级联故障的发生几乎是不可避免的,ICA 模式也有网络崩溃的可能。在文献[80]中,边的负载用边的介数来定义,而边的容量固定为一个常数。仿真结果表明,少数边的过载就可以导致最大连通子图规模大幅减小,最终达到稳态。因此,为了避免此类级联故障,节点和边的容量必须随着网络规模的增大而增大。

有许多从事电力系统研究的学者从复杂网络视角提出了针对电网的级联故障模型^[81-85],其中较为经典的是 Dobson 等提出的 OPA^[81]和 CASCADE^[82]模型。OPA 模型描述了电力系统从初始状态向自组织临界状态的相变,指明了对各种小型故障的防护性工程反应及用户负载需求的潜在增长是导致电网状态向自组织临界状态发展的动因。为了更深入地了解电网负载增长对级联故障的影响,Dobson 等人又提出了 CASCADE 模型。在该模型中,每个节点都具有随机的初始负载和初始扰动(附加一定数量的负载);初始扰动使得某个或某些节点因过载而故障,该故障节点导致所有其他节点增加一个固定大小的负载。CASCADE 模型比 OPA 模型简单,可以用解析的方法得到电网在不同负载条件下级联故障频率和故障规模的概率分布特征。但也存在明显不足,如节点故障情况下负载的重分配没有考虑网络结构。

也有文献针对 CASCADE 模型的不足进行了改进,使其能够在改变网络拓扑和负载条件下预测级联故障^[83]。

上述模型主要研究了由网络组分随机过载而发生故障引发的级联故障行为。在实际网络中,级联故障的引发与不正常的网络负载有关,如新的和实时的应用会给相对过时的网络带来额外的负载,使得网络的负载增长,从而可能导致网络组分的过载而引发级联故障。级联故障引发的另一个主要原因与攻击有关。

Motter 和 Lai 等^[65]考虑现实网络中节点的容量与负载的线性关系,提出了一个经典的模型(简称 ML 模型),并基于该模型探讨了不同网络由单个节点遭受蓄意攻击或随机故障而引发的过载故障的级联行为。该模型的主要思想包括:由于级联故障的时间尺度比网络增长要小得多,因此在研究中不考虑网络的增长,将给定规模的网络抽象成一个无向无权图;假定单位流量在节点对间的传输总是依据最短路径进行,因此,用节点的介数定义其负载;定义每个节点的容量与其初始负载成正比,比例系数 $\alpha > 0$ 是一个容限参数。当网络上某个节点发生随机故障或受到蓄意攻击而被移除时,一般会导致流的传输路径(即最短路径)发生改变,失效节点上的负载依据最短路径策略被全局重新分配,如果某些节点的负载超过其容量(过载)就会因失效而被移除,级联故障由此发生。网络性能同样用最大连通子图规模 G 来衡量。将该模型应用到两种模型网络(无标度网络和均匀网络)和两个真实网络(Internet AS 级网络和美国西部电网),通过仿真分析 α 与 G 的关系发现:如果网络的负载(介数)分布不均匀(或异质),针对最大度或最大介数节点的蓄意攻击会造成网络性能的大大降低;但是随机故障(或随机攻击)不易引发级联故障。如果网络的介数分布具有均匀(或同质)性,蓄意攻击和随机故障均不易引发级联故障。此外还发现 α 与 G 之间存在相变现象。

ML 模型提出后,引起了大量研究者的兴趣。Zhao 等^[86,87]在无标度网络上对 ML 模型中的相变值 α_c 和 α_s 进行了解析分析,并用数值仿真验证了理论估计的结果,即当 $\alpha < \alpha_c$ 时,网络几乎完全崩溃;当 $\alpha > \alpha_s$ 时,网络对级联故障完全免疫。Lee 等^[88]发现 G 在相变点服从幂律分布。在不同文献中,研究者基于 ML 模型对不同的模型网络进行了鲁棒性的仿真分析,如 WS 小世界网络^[89]、局域世界演化网络^[90]、模块无标度网络^[91]和模块小世界网

络^[92]等。总体研究结果似乎都与 Motter 等所得结果一致，即网络中节点的度分布或介数分布的异质性越强，网络对蓄意节点攻击的脆弱性越强。因此，介数分布越同质的网络抵制级联故障的鲁棒性越强。还有很多研究者从不同角度对 ML 模型做了各种扩展和变形，ML 模型中的容量定义方法也被广泛应用。

考虑 ML 模型中的过载节点从网络中移除与许多现实网络的实际情况不符，Crucitti、Latora 和 Marchiori 等^[93]同时考虑节点和边的动态行为，提出了边上传输效率动态更新的模型，简称为 CLM 模型。具体来说，给每条边赋予一个权值（初始值为 1），此权值表示该边上的传输效率。在初始移除导致随后的节点过载时，并不移除该节点，只是按照给定的演化规则降低与该节点相连的边的传输效率。在这里相当于用加权的介数来定义节点的负载。Crucitti 等通过仿真研究网络效率得到了与 Motter 等相似的结论。随后 Kinny 等^[94]应用 CLM 模型对北美电网进行了实证分析，同样验证了 Motter 等的结论。Ash 等^[95]还基于 CLM 模型，采用演化算法来优化网络的拓扑结构，使得网络对级联故障具有好的抵抗力。他们发现，优化后的网络具有少量的中心节点、相对大的平均最短路径、大的簇系数，而且呈现出模块结构。

为了捕获加权特征和级联故障之间的关系，Wang 等^[96]提出了一个加权流局域重新分配原则，并构建了加权网络上边的级联故障模型，其中每条边的权重定义为其两端节点的度的幂律函数形式，其中幂指数为控制权重异质性的参数。通过数值仿真发现，当模型中的权重参数为某个固定值时，几种典型的复杂网络（如 NW 小世界网络、BA 无标度网络）均达到了最强的抵制由随机的边攻击而引发级联故障的鲁棒性，该结论被理论解析所证明。随后，Wu 等^[97]将该模型推广到节点上，研究了加权 BA 无标度网络上由节点攻击而引发的级联故障。文献[98]还应用 Wu 等所提出的模型对不同的电网进行了实证分析。文献[99]又改进了 Wu 等的工作，在节点的权重定义时，考虑了节点本身的度及其邻居节点的度；在节点过载时，考虑一些监控及其保护措施的存在，给过载节点定义了移除概率。

ML 模型中的容量定义方法还被其他一些模型广泛应用。例如，文献[100]基于介数的负载定义，以及考虑节点失效是过载的累积效应，提出了一个带节点移除概率的级联故障模型，仿真研究了无标度网络上故障传播

过程中的负载熵动力学。考虑广泛采用的通过介数来定义负载的方法对支持多种流的真实系统来说可能过于理想化，因此也有研究者给出更实际的流量分配机制，提出并研究了级联故障模型。例如，文献[101]结合电路理论中的流守恒来决定边的负载，仿真研究了流的重分配动力学对美国电网级联故障的影响；文献[102,103]引入交通系统中的用户均衡模型来确定网络上的负载分布，仿真研究了拥塞效应和簇效应对级联故障的影响；文献[104]以通信网为背景，基于最优路径路由策略，仿真研究了网络拓扑、节点移除延迟时间、节点处理能力等对拥塞传播的影响。

从上述负载-容量模型的描述和分析可以看出，模型从不同的角度越来越较好地展现了发生在实际网络上的级联故障，并基于模型给出了许多有价值的预防和控制策略。特别是，Motter 等的研究表明了介数或负载分布越同质的网络越具鲁棒性，并指明了对于负载异质分布的网络，防御级联故障的有效措施是对网络中介数较大或度较大的节点重点保护，或使网络上的负载分布得比较均匀。该结论启发了研究者对预防和控制策略做深入的探讨^[105]。

很多研究者在不同的级联故障模型上通过对网络的脆弱性分析，大多发现了与 Motter 等相似的结论，即度最大或介数最大的重要节点（或边）的失效更易于引发级联故障^[89,90,93,94,106-112]。然而，文献[107-110]却发现，在模型中可调参数的一定取值内，攻击度或介数最小的节点（或边）比攻击度或介数最大的节点（或边）更易引发级联故障。考虑对重要节点的保护问题，文献[113-117]通过优化节点的容量和初始负载的线性关系以给重要节点分配更多的保护资源，从而使网络获得抵制级联故障的较高鲁棒性和较低成本。考虑负载分布更均匀的网络更具鲁棒性，文献[118-120]通过优化网络负载传输策略来防御级联故障。另外，考虑不重要节点向网络添加的负载要多于其处理的负载，Motter 等^[121]提出在无标度网络受到蓄意攻击后，通过提前移除一部分低负载节点或高负载边来控制级联故障。基于这种最初故障发生后改变网络拓扑的思想，一些研究者^[122,123]对如何有效控制级联故障做进一步的研究。但是最近 Wang 等^[124]基于不同的负载-容量模型得到了与 Motter 等完全相反的结论，即相比于同质网络，负载分布异质的网络抵制由最大负载（或最大度）节点的蓄意攻击而引发的级联故障的鲁棒性反而更强。这种差异性主要源于独立于初始负载的容量定义方法。

除负载-容量模型外，还有很多其他类的级联故障模型，并得到了许多有价值的结论，如二值影响模型^[125]、耦合映像格子模型^[126-131]、灾害蔓延模型^[132-135]等。文献[125]首先将二值模型应用于随机网络，根据简单的阈值规则，分析了由邻居节点行为的相互影响而导致的级联故障。文献[126]首先引入耦合映像格子方法，探讨了网络外部扰动与级联故障规模的关系，以及不同网络结构上的级联故障的异同点。考虑级联故障的发生是由网络外部和内部扰动共同作用的结果，文献[132]基于节点的灾害蔓延机制、内部随机噪声和自我修复功能，在有向网络上建立了一个普适性的灾害蔓延模型，研究了不同网络结构对灾害传播的影响，并基于当前的网络状态和网络结构信息，从资源重新分配的角度研究了该模型上恢复策略的有效性。以上研究仅关注单一的网络，复杂网络上级联故障研究的另一思路是考虑复杂网络之间的耦合关系，研究相依网络上的级联故障行为^[136-138]，如电力网络的故障会引起通信网的故障，而通信网的故障又会进一步导致电力网络的故障等一系列级联反应。

1.3 研究存在的主要问题

依据现实网络上级联故障动力学的特点，构建合适的复杂网络上级联故障模型，并基于模型对网络抵制级联故障鲁棒性进行研究和评估已经成为理解和控制网络上级联故障的重要而有效的方法。综上所述，复杂网络上级联故障的研究取得了很大的进展，所得结果已经在很大程度上改变和拓展了人们对网络上级联故障行为的认识，并给出许多有价值的网络保护策略，但是仍然存在着如下一些问题。

(1) 在以往的研究中，通常都包含着一个假设，即网络的信息（如拓扑信息）都是准确知道或完全未知的，换言之，总是可以忽略信息的有限性所带来的影响。例如，级联故障的引发机制通常只考虑没有掌握网络拓扑信息的随机攻击或完全掌握网络拓扑信息的蓄意攻击两种极端；在级联故障过程中失效节点上负载的重新分配大多依据最短路径策略，这显然需要网络拓扑的全局信息。但是实际网络一般规模庞大且规模还在不断增长，信息有限性所带来的影响不可避免且会越来越明显。因此有必要对有限信息背景下复杂网络上的级联故障行为展开讨论。

(2) 以往大多数研究针对的复杂网络主要属于无权无向网络的范畴。无权无向网络仅是对实际网络的一种较简化的描述方法, 而加权有向网络能够对实际网络提供更加真实、细致和全面的描述, 这必将对理解和控制网络上的级联故障行为起到重要作用。因此, 加权有向网络上的级联故障行为有待于深入研究。

(3) 复杂网络上级联故障的发生和传播与流动力学过程密切相关。在以往的大多数研究中, 假定流在节点间总是沿着最短路径传输, 因此, 节点的负载基本上都通过其介数来定义。而在许多实际网络上, 流很难准确依据最短路径传输(如因为信息的有限性)。因此在对级联故障建模中应深入考虑流动力学过程, 进而深入探讨流动力学对级联故障行为的影响。

(4) 级联故障的建模虽已涉及通信网络、电力网络、交通网络、经济网络^[139、140], 甚至是生态网络^[141-143]等领域, 但是大多数研究还是从“共性”的角度入手, 且研究方法过于理想化。例如, 缺乏对实际网络系统(如通信网络、交通网络)中的个体可以根据所处的环境(如拥塞环境)进行智能判断或决策的考虑; 没有考虑实际系统中流量产生的时变性及更实际的网络组分的失效机制。因此, 以实际网络为背景, 建立更加准确的级联故障模型, 并对其分析、优化和控制是一项十分有意义的工作。

1.4 主要研究内容和章节安排

根据复杂网络上级联故障研究存在的一些问题, 本书以网络科学理论为指导, 针对网络新的不同现实场景, 紧紧围绕与级联故障发生和传播密切相关的流动力学过程, 对级联故障进行深入分析与理论建模, 通过度量网络抵制级联故障鲁棒性的指标, 研究级联故障动力学行为的特性, 为给网络制定合理有效的保护策略提供依据。全书共9章, 具体内容安排如下:

第1章: 概述。本章首先阐述了本书所研究问题的背景和意义, 接着对复杂网络及级联故障的研究进展进行了综述, 随后指出了复杂网络上级联故障研究存在的主要问题, 最后给出了本书的主要研究内容和章节安排。

第2章: 复杂网络的理论基础。本章首先介绍了复杂网络的基本概念, 然后对较常用的复杂网络的拓扑参量做了定义及描述, 接着给出了典型的网络拓扑及其演化模型, 最后介绍了贯穿本书主线的复杂网络鲁棒性的基

础知识。

第3章：基于灰色信息的复杂网络上级联故障建模研究。为了解决以往模型中级联故障的引发仅考虑随机故障或蓄意攻击的局限性，本章将灰色信息引入级联故障问题的研究中，并考虑边到节点的失效模式，提出了基于灰色信息的、带有可调信息参数的级联故障模型，其中随机攻击和蓄意攻击是本模型的两个特例。将模型应用到两种典型的模型网络，重点分析了信息参数对不同网络拓扑结构抵制级联故障鲁棒性所产生的影响，并依据新的鲁棒性指标发现了其中的临界现象。这种临界现象揭示了决定网络鲁棒性的两个关键因素，即网络的信息条件和其上流的动态特性。

第4章：基于分布式流的加权复杂网络上级联故障建模研究。在现实的网络系统中，由于信息的有限性，节点并不会总是准确地沿着它们之间的最短路径流通。因此，不同于广泛采用的最短路径流，本章考虑不需要网络拓扑全局信息的分布式流，在此基础上，使用更符合实际网络的负载-容量关系，在加权网络上提出了基于分布式流的、带有可调权重参数的级联故障模型。依据度量网络鲁棒性的指标，即一对容量参数的临界值，研究了典型的加权模型网络和真实网络上由蓄意的节点及边攻击而引发的级联故障行为，讨论了权重参数、网络拓扑与网络鲁棒性之间的相关性，发现了抵制节点与抵制边的级联故障之间存在着不同的最优参数值，揭示了权重是决定网络鲁棒性的关键因素。而且，通过与基于最短路径流的级联故障行为的对比分析，发现了分布式流策略能使网络达到更强的鲁棒性。

第5章：基于节点介数加权的复杂网络上级联故障建模研究。为了更好地探讨加权网络抵制级联故障的鲁棒性问题，不同于现有的度相关的加权方案，本章提出了一种介数相关的节点加权方案，并应用加权流局域重新分配原则（这不同于第4章中所讨论的分布式流和最短路径流，它们所遵循的都是加权流全局重新分配原则），构建了新的带有可调权重参数的级联故障模型。研究了4种典型的模型网络拓扑对其上由小的节点攻击而引发的级联故障行为的影响，详细分析了网络达到最强抵制级联故障鲁棒性时的权重参数值。此外，进一步对比分析了度相关的节点加权方案下的级联故障行为。而且在4个真实网络上的实证分析中，验证了所提出的加权策略比度相关的加权策略对网络抵制级联故障更为有效，揭示了合适的权重能显著提高各种网络抵制级联故障的鲁棒性，从不同角度验证和拓展了第4

章中的研究结果。

第6章：边攻击下随机无标度网络抵制级联故障的鲁棒性研究。本章将第5章所提出的节点加权方案推广到边上，通过构建随机无标度网络的级联故障模型，探讨了两种不同的边攻击策略对网络抵制级联故障鲁棒性的影响。在本模型中，边的初始负载（权重）定义为其端节点介数乘积的幂函数，其中幂指数可调，并且应用加权流局域重新分配原则择优分配故障边的负载。通过理论分析和数值仿真得到了一些有趣的结论：存在一个负载参数的关键阈值。当负载参数值大于这个阈值时，攻击高负载的边比低负载的边更易导致网络大规模级联故障；当负载参数值小于这个阈值时，攻击低负载的边反而更易导致网络的全局崩溃。并且，该阈值与网络的度指数紧密相关。本结果表明，必须同时考虑网络具体负载和度分布来识别“关键”边，特别强调一定情况下对小负载边的保护可有效防御网络大规模级联故障。本研究也为设计高鲁棒性随机无标度网络提供了一个依据，即依据节点介数合理分配网络中的负载，能有效抵抗各种边攻击。

第7章：具有单向边和双向边的复杂网络抵制级联故障的鲁棒性研究。更现实一些，在许多真实系统中，如城市交通网络中，单向边和双向边可以在网络中共存。为此，本章考虑节点权重和边的方向，通过扩展经典的全局介数方法的使用，提出了新的节点负载定义方法，进而在具有单向边和双向边的不同网络上提出新的级联故障模型。应用三种边方向确定策略，在全局负载分布机制下分析了定向边对网络抵制级联攻击鲁棒性的影响。仿真结果表明，边定向方法不会总是导致网络鲁棒性降低。对于小世界网络，所使用的方法确实使得网络更加脆弱。但是，对于无标度网络，边定向方法，特别是非随机方向确定策略，能显著提高网络鲁棒性。并且，这些结果独立于节点的权重参数。本研究能为网络鲁棒性的改进提供指导。特别是针对合适的关键边限定方向可能会是一种可供选择的新方法，这对于设计低成本且应用灵活的保护策略以控制现实世界中不同的级联故障具有实际的指导意义。

第8章：基于局域拥塞信息路由的复杂网络上级联故障建模研究。本章首先介绍了复杂网络上的路由策略，然后在分析和总结路由策略相关工作的基础上，以现实的通信网络系统为背景，构建了新的级联故障模型。在模型中，基于给每个节点所定义的新的拥塞函数（动态权值）提出了一种

基于局域拥塞信息的路由策略，以模拟现实系统中的智能个体能根据所处的拥塞环境的局域信息进行决策的重要行为。在此基础上，考虑网络上流量的时变性，引入了含有生灭过程的包跳模型，以更加真实的方式给出了网络节点的负载定义，此外还给出了一种简单实际的过载节点的失效机制。基于典型的模型网络，并根据新的度量网络抵制级联故障鲁棒性指标，研究了模型中的参数（如路由参数、包产生率、拥塞信息时间延迟等）和网络拓扑对由蓄意节点攻击而引发的级联故障行为的影响，发现了存在路由参数的最优值使得网络鲁棒性最强。最后，为了揭示拥塞信息的有限性对路由策略性能的影响，将局域路由扩展到全局路由，并对比分析了网络在这两种路由策略下的级联故障行为。本章所提出的模型可望为进一步深入理解和控制复杂网络上的级联故障提供新的思路和借鉴。

第9章：总结与展望。本章总结了本书的主要工作和结论，展望了未来工作。