



# 基于网络理论的供应链研究综述

## 摘要

21世纪是复杂性与网络化的世纪。面对纷繁复杂的现象,人类借助网络理论分析工具对诸多现象给出解释,同时设计有效的控制方案对复杂系统进行优化与管理。在现实中,供应链就是这一范例。由于大多数供应链具有一定的网络结构,那么从网络理论的角度出发,研究供应网络中存在的各类问题将会更加贴近现实。本文通过梳理前人的成果,对相关研究的发展情况进行分析和总结。同时,给出了供应链网络值得探讨的一些问题,为进一步研究奠定了基础。

## 关键词

供应链;复杂网络;协同理论;控制论;稳定性分析

中图分类号 F274;F224

文献标志码 A

收稿日期 2020-05-30

资助项目 国家自然科学基金(61873344);中央高校基本科研业务费(JBK190502)

## 作者简介

罗子健,男,博士生,主要研究方向为复杂网络理论、迭代学习控制。zjluomath@126.com

熊文军(通信作者),女,博士,教授,主要研究方向为复杂网络稳定性分析、协同控制以及迭代学习控制。xiongwenjun@swufe.edu.cn

## 0 引言

网络问题的研究起源于哥尼斯堡的七桥问题,1736年由瑞士数学家 Euler 将其数学化并给出了严格的证明,解决了这一难题。由此,拉开了图论与网络研究的序幕。1998年美国康奈尔大学 Strogatz 教授团队<sup>[1]</sup>、1999年美国东北大学 Barabási 教授等<sup>[2]</sup>分别发现了网络的小世界特性和无标度特性。这两大发现以及随后的真实网络实证研究表明,现实世界的网络具有不同于随机网络和规则网络的复杂性质。自此,复杂网络的研究成为了一门全新的学科。

复杂网络理论是一种描述自然科学、社会科学和工程技术上相互关联关系的模型工具。概括地讲,复杂网络是由大量的个体通过内在和外在关系联系在一起,具有复杂动力学行为与复杂拓扑结构形成的系统。作为一门新兴交叉学科,它综合运用图论、矩阵理论、概率论、数理统计等理论分析工具,对存在的各种复杂现象进行解释与预测。值得一提的是,相比于长期构成科学研究重点的简单系统,复杂网络系统的最大特点在于整体的涌现性。换句话说,复杂网络展现出单个节点不具有的特性——系统性。就什么是系统,郭雷院士<sup>[3]</sup>做了详细的阐述。在描述中,系统被规定为由相互关联和作用的多个元素(或子系统)所组成的具有特定功能的有机整体,并且这个系统又可作为子系统成为更大系统的组成部分。复杂网络恰好具有这样的功能,因此成为了复杂性科学与系统科学主要的研究对象之一。

此外,各种类型网络的普遍存在也越来越多地吸引来自数学、物理学、信息科学、人工智能、医学以及社会科学等不同领域的研究人员的广泛关注,吸引了不少一流高校及科研院所开展相关课题的研究。同时,国内众多知名学者及其科研团队,如香港城市大学的陈关荣教授、北京航空航天大学的吕金虎教授、北京师范大学的狄增如教授、上海大学的汪小帆教授、东南大学的曹进德教授、电子科技大学的周涛教授等及他们的团队,也投身于网络科学的研究<sup>[4-9]</sup>。学者们丰硕的研究成果也推动了网络科学的兴起与蓬勃发展。

如今,网络信息技术的快速发展推动着人类社会迈入信息化时代。在这样的时代中,全球经济一体化趋势加强,政治、经济、社会等环境巨大变化,顾客消费水平不断提高,使得企业间的竞争日益加剧。在全球市场中,企业已不再是单一的参与竞争实体,而是参与供应链竞争的实体,企业间的竞争已逐渐转变成了供应链间的竞争。作为具有

1 西南财经大学 经济信息工程学院,成都, 611130

一定网络结构的系统,供应链上的企业彼此之间相互作用,同时又受其他供应链实体和市场环境的影响,企业间关系也更加错综复杂.因此,从网络视角与系统科学的角度出发,探究供应链网络的演化规律、稳定性及风险传播等问题,对提高供应链管理具有重要的理论和现实意义.

## 1 网络理论简介

### 1.1 复杂网络及研究内容

复杂网络主要有两个含义:作为其连接结构的图和作为其状态和功能的系统.它具有自相似、小世界、无标度、聚类特性(如图1、图2所示).实际中,复杂网络的复杂性主要表现在庞大的网络规模、繁杂的连接结构、种类多样化的节点以及时空演化过程中的不确定性等.这就向网络科学等交叉科学提出了一系列富有挑战的新课题.

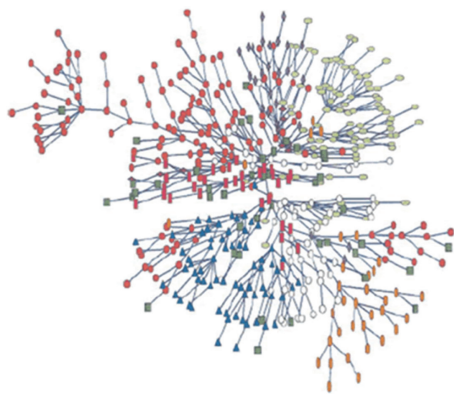


图1 无标度特性

Fig. 1 Scale free characteristic

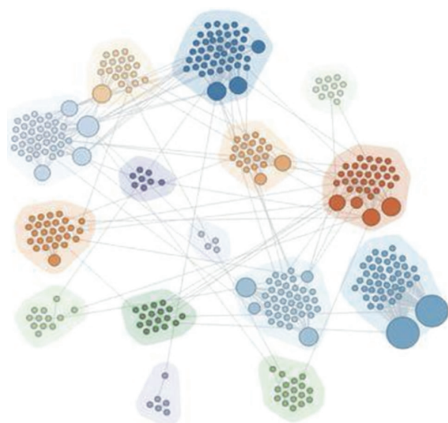


图2 聚类特性

Fig. 2 Clustering characteristics

复杂网络涉及的研究问题多种多样,其主要研

究内容大致包括以下几方面:网络几何性质<sup>[10]</sup>、网络形成机制<sup>[11-12]</sup>、网络演化规律<sup>[13-14]</sup>、网络中节点重要性<sup>[15]</sup>、多层网络研究<sup>[16-17]</sup>、网络协调理论以及动力学研究<sup>[18-19]</sup>等.其中,动力学及群体协调性(coordination)行为是研究中受到广泛关注的热点问题之一.协同与同步行为广泛存在于自然界里,如钟摆的同步行为、鸟类与昆虫的蜂拥现象等.所谓协同,就是研究网络节点间的相互作用如何导致整体化行为.若  $x_i(t)$  与  $x_j(t)$  分别表示第  $i$  个节点与第  $j$  个节点在  $t$  时刻的状态,协同或者同步用数学语言表述为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0, \forall i, j = 1, 2, \dots, N.$$

也即通过节点间的相互影响,使得网络中节点的状态逐渐趋于一致,如图3所示.

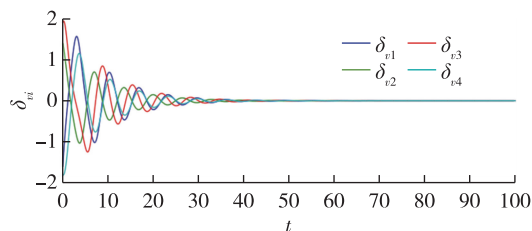


图3 网络协同节点状态

Fig. 3 Nodes' state in network collaboration

另外,关于复杂网络研究还有以下方面的内容:多主体网络一致性研究、复杂网络的牵制控制研究等.这类问题的研究揭示了工程技术上不同网络控制结构与实现协同一致之间的关系,有着重要的理论和实际价值.

### 1.2 复杂网络研究现状

复杂网络研究成果除了发表在顶级科学杂志 *Science* 与 *Nature* 上以外,不少著名刊物如 *Automatica*、*IEEE Transactions on Automatic Control*、*International Journal of Control* 等相继出版了不少关于复杂网络的重要成果.相关研究课题也在不少国家获得了科研资金的资助,可以说复杂网络的研究正如火如荼地进行着.一般而言,网络结构和节点的某些属性往往会随时间发生变化,因此人们更关注网络结构演化及动力学等动态特征.针对由  $N$  个节点构成的复杂网络动力学模型,每个节点状态可用常微分方程表述为

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f(x_i(t)) + \sum_{j=1}^N L_{ij}(t) \Gamma(t) x_j(t),$$

其中  $x_i(t)$  表示第  $i$  个节点  $t$  时刻的状态,  $L_{ij}(t)$  表示

$t$ 时刻  $i$  节点与  $j$  节点的连接权重,它体现了网络拓扑结构.在该模型基础上,学者们深入考虑网络节点之间信息传递存在时滞、环境存在干扰和网络结构发生变化时的一致性.通过构造 Lyapunov 函数,对复杂系统的演化博弈、指数同步<sup>[20-21]</sup> 等问题进行了研究.

站在工程技术角度,学者们做了大量的工作,并探讨了复杂网络控制及稳定性等问题.文献[22]重点讨论了复杂网络的结构可控性研究进展,详细介绍了基于最大匹配方法的复杂网络结构可控性分析框架,综述了自2011年以来复杂网络可控性的相关研究成果,具体论述了不同类型的可控性、可控性与网络拓扑结构统计特征的关联、基于可控性的网络及节点度量等问题.文献[23]就多智能体协同控制问题进行了探讨,在集值 Lyapunov 理论的形式化框架内,利用图论、凸性等分析工具对稳定性进行研究,得到了状态稳定的若干充分及必要条件.而现实中存在着的各种不确定性,使得复杂网络系统易受外界干扰的影响,网络拓扑结构可能随机变化.为解决这类问题,文献[24]就带有自适应随机过程切换图的多智能体协同问题进行研究,其切换规律原则上包含了任何的随机过程.

另外,当随机外部干扰影响到节点状态时,常微分方程很难对节点动态过程进行准确刻画.自然地,随机系统的稳定性问题被提出并探讨.任红卫和邓飞其<sup>[25]</sup>对随机复杂网络的同步控制研究进行了归纳整理与综合分析.针对随机复杂网络同步问题,模型中节点动力学模型采用随机微分方程描述:

$$dx_i(t) = [f(x_i(t)) + \sum_{j=1}^N l_{ij}(t)\Gamma(t)x_j(t)]dt + g(x_i(t))dw(t).$$

其中  $g(x_i(t))$  为噪声密度函数,  $w(t)$  是  $n$  维布朗运动,高斯白噪声  $dw_i(t)$  与  $dw_j(t)$  相互独立.文献[25]对一致性的概念进行了再认识,总结了新的同步的定义:

1) 随机复杂网络称在概率意义上达到同步,如果满足条件:

$$P\{\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0\} = 1.$$

2) 随机复杂网络称达到均方指数同步,如果存在常数  $\alpha > 0, \gamma > 0$ ,使得对于任意初始条件,下列条件在  $t > 0$  时成立:

$$E \|x_i(t) - x_j(t)\|^2 < \gamma e^{-\alpha t}.$$

在随机意义的同步概念下,学者们对随机复杂

耦合网络协同问题开展了一系列的研究工作,并取得丰富的研究成果<sup>[26-29]</sup>.

## 2 供应链简介

供应链网络是在一条或多条价值链上形成的,由市场主体之间的供需关系等构成的网络系统.作为经济价值链的重要表现形式,供应链系统的有效管理对企业的发展十分重要.高效的管理能够使企业快速响应市场变化、优化资源配置、提高经济效益,为企业带来持久的竞争优势.在经济社会中,每一个市场主体都是供应链网络的成员,供应链的运行好坏直接影响到市场主体的利益,同时也深刻关系着经济社会的发展.

### 2.1 供应链网络及研究内容

供应链网络中,每个企业被视为一个节点,企业间发生的各种交易关系(如合作、竞争等)可以看成节点间的边,边上传递着信息流、物流和资金流等信息.节点、边和信息构成了一个复杂的供应链系统.供应链系统作为一个自组织自适应的复杂系统,结构上又表现出一定的网络结构(图4).其整体功能不仅与节点功能有关,同时与网络结构形式有关.因此,从复杂网络视角出发,分析研究供应链中所关心的问题,有利于揭示金融科技背景下供应链发展变化的深层规律.

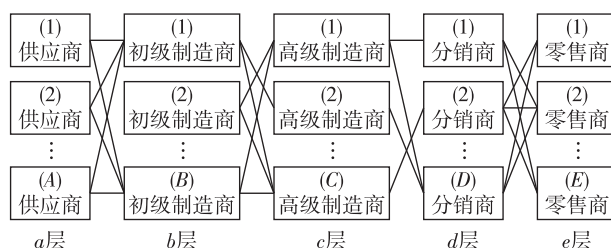


图4 供应链网络结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of supply chain network

### 2.2 供应链网络研究现状

供应链网络具有非线性、大规模、高维度、复杂性、动态性、协调性等多种特征,同时还兼具时间和空间尺度特性<sup>[30-31]</sup>.在生产实际中,供应链网络的结构特征、运行特征、管理特征在经济转型、结构调整与产业互联的趋势中呈现出了新的变化.这也向供应链研究提出了一系列新的研究课题.

在供应链里,任何一个环节上的细微变化都可能给供应链网络带来巨大变化,而这些变化和供应链网络本身的拓扑结构、宏观性质紧密相关.供应链

上局部微观特征的累积或变化也将给整个供应链网络带来不同于局部的特征涌现.因此,从复杂网络理论视角出发,供应链主要研究内容大致可包括以下几方面:供应链网络动力学分析<sup>[32-33]</sup>、稳定性分析<sup>[34-35]</sup>、控制性能分析<sup>[36]</sup>、风险传播分析<sup>[37]</sup>等,上述研究方向正逐渐成为供应链网络研究中的热点问题.

### 3 基于复杂网络的供应链研究

供应链管理是以提高效率与节省资源为目标,对从原材料供应商到终端顾客整个网络结构上的物流、资金流和信息流进行综合、计划、控制和协调的一种现代管理技术与模式.传统的供应链理论研究从管理内容角度出发,侧重于供应链设计优化、供应链管理策略、供应链信息支持技术、伙伴选择问题等.其理论分析技术大多依赖于单一的运筹优化理论与差分方程等理论,而对供应链上节点(企业)的动态特性、网络复杂性以及网络拓扑结构对供应链风险传播等方面的认识还有所不足.此外,当前供应链网络研究多是从具体运营及供应链中企业成员之间的协调等微观行为方面进行考察的,缺少从系统和宏观角度对供应链网络的结构、集群动力学行为、稳定性以及可控性等方面的研究,因而不能较好地描述供应链网络的动态系统特征.

另一方面,随着经济社会的进步,生产模式与营销模式等都在经历重大变革.供应链网络的结构正在经历着前所未有的演变,已有的成果对复杂供应链网络中的动力学行为、网络结构演化、动态行为的影响机制等方面还有所欠缺,未能较好地揭示供应链网络集群动态行为在供应链网络结构演进中的变化特征等.因此,不少学者结合复杂网络理论开展了供应链网络的研究工作,并取得了有益的研究成果.后文将从节点重要性分析、风险传播与动力学分析、稳定性分析、协同一致性分析等方面进行细致地阐述,研究框架如图5所示.

#### 3.1 供应链网络节点重要性分析

外部环境的不确定性使供应链面临的挑战和风险日益严峻,往往很小的外界干扰就可能给整个网络带来较为严重的后果.因此,对供应链的保护十分重要.然而对整个网络保护耗费巨大,找到重要的节点企业进行保护才能做到有的放矢,以最少的投入获得良好的效果.国外学者 Helbing 等<sup>[38]</sup>运用复杂网络理论研究了网络效率及节点重要性问题,发现

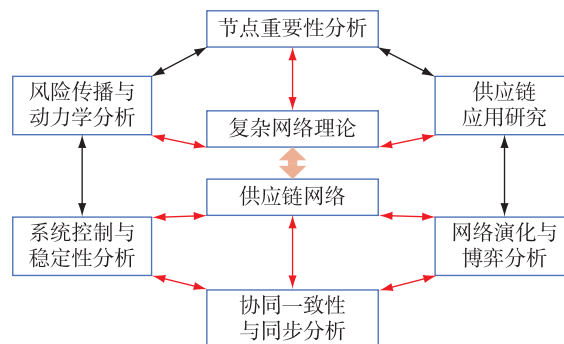


图5 基于网络的供应链研究框架

Fig. 5 Research framework of supply chain

对重要节点的识别有利于增加网络的稳定性和抗攻击性.国内学者杨康等<sup>[37]</sup>、贺磊等<sup>[39]</sup>、张旭等<sup>[40]</sup>的研究也证明了这一观点.由此可知,节点重要性研究对于供应链网络的稳定高效运行具有重要的理论和现实意义.

文献<sup>[31,37]</sup>基于节点重要性对供应链网络风险跨层次评估进行研究,通过建立基于多指标最优策略的企业重要性评估模型,实现了对企业重要性的综合评估.文献<sup>[40]</sup>在前人提出的节点收缩法的基础上,以节点自身重要度和邻域节点间关系重要度的加权和作为衡量节点重要度指标,并从赋权方法方面进行改进,使评估过程同时兼顾节点的连紧密度、节点的路径位置以及节点连边的特征,评估结果更加切合实际.进一步,文献<sup>[41]</sup>提出了一种综合考虑网络拓扑结构和系统动力学性能的关键节点辨识方法,克服了单一评价指标的片面性.已有文献针对的供应网络大多是单层网络,分析方法比较完善.对于多层网络而言,情况就会变得复杂,其原因在于网络层之间的相依关系.不同层节点间的相依关系是一个应考虑的重要因素,同时企业节点各自的属性也是一个不应被忽略的因素.因此,如何对多层供应链网络识别关键节点及其重要性,仍是一个值得思考的问题,也是进一步的研究方向.

#### 3.2 供应链网络风险传播与动力学分析

由于外部环境的不确定性,供应链上的企业节点时刻面临着各种风险.判断出重要节点进行保护在一定程度上有利于维持整个供应网络的稳定性,但不能有效地抑制风险的传播.开展对供应链网络风险扩散的研究,有利于从过程的视角认识风险在供应链上的扩散机制,认清风险传播对供应链网络的影响规律和动态过程,为实施科学高效的防范措施提供理论参考.国内外一些学者将控制理论、Petri

网、模糊理论等应用在供应链网络风险传导扩散、评估与控制的研究里<sup>[42-44]</sup>。这些研究是基于结构较简单的单一供应链,而非针对多条价值链上形成的供应链网络的风险研究,因而缺乏有效地揭示供应链网络风险扩散机理及其过程特征的动力学模型。

为解决上述问题,文献[30,33]在分析供应链网络结构域组分特征的基础上,建立了供应链网络风险扩散动力学模型,给出其定态解。该模型能够反映供应链网络中的风险扩散机理,也揭示了供应链网络结构演进下的风险扩散特征变化。而文献[35]针对具有时滞特征的动态供应链建模波动性的难题,在归纳正交函数、正交函数集性质的基础上,将正交神经网络应用到动态供应链模型的稳定性分析中。以上研究工作在一定程度上揭示了供应链网络的风险扩散特征变化,对于了解其他供应链网络拓扑演化对风险扩散的影响具有借鉴意义。然而少有文献对更加复杂的网络结构,如具有切换拓扑结构或多层结构的供应链网络,建立风险传播模型进行分析。因此,可以对问题进行更细致的分析并深入研究。

### 3.3 供应链网络控制与稳定性分析

供应链网络运行管理,不仅要判断出重要节点加以维护、认识到风险传播的机制与理解供应链网络运行的过程特征,还要能对供应链网络进行有效控制。实现有效的管控的目的是使供应网络达到期望的运营状态,能够快速响应市场、节约成本、实现盈利以及维持整个供应网络的稳定。所以,供应链网络控制问题成为了供应链系统研究的重要内容之一,这方面的研究也相当丰富。

文献[36]针对牛鞭效应以及时变时滞因素,将供应链库存系统建模为一类具有有限个子系统的切换系统模型。通过设计合适的控制策略,实现对牛鞭效应的抑制。研究结果表明设计的控制策略使得供应链中的牛鞭效应以指数衰的速度被抑制,提高了抑制效果。文献[45-46]研究了外部需求不确定条件下供应链网络的运作问题,结果表明鲁棒 $H_{\infty}$ 控制策略能够抑制供应链动态模型中的诸多不确定因素的扰动,并使供应链运作达到理想总成本。通过一种具有最小信息交换和通信的分布式模型预测控制(MPC)方法,文献[47]解决了供应链运管中的问题。文献[47]提出的协同分布式模型预测控制方法,能作为解决供应链网络库存管理问题的通用框架。与传统PID控制方法相比,该方法在经济成本度量方面的性能可以得到保证。文献[48]针对具有混合回

收通道的闭环供应链系统的不确定性,建立了抑制牛鞭效应的模糊控制模型。运用模糊鲁棒控制方法,能减少内外部不确定因素对闭环供应链的影响。研究表明该方法既能抑制牛鞭效应,又能使供应链保持鲁棒稳定。此外,还有学者采用不同的控制方法探讨了如何抑制供应链网络中的牛鞭效应,可查阅文献获得相关结论<sup>[49-52]</sup>。而现实中,由于通信、物流受限以及突发事件的影响,供应链网络库存将会受到更多不确定因素的干扰。如何在这些干扰情况下,维持库存的正常还未得到充分的研究。同时,对多层供应链网络的相关研究还有所欠缺,这为开展进一步研究提供了一个方向。

### 3.4 供应链网络协同与同步分析

供应链网络中的各企业通过需求建立合作伙伴关系,形成利益联盟,从而形成稳定的利益网络,实现长期盈利。一旦供应链上各企业成员之间的目标不一致、信息不对称或存在来自外部环境的不确定性干扰,供应链运行过程中就会出现不一致的现象,无法使供应链网络实现整体效益最大化,甚至危及个别企业的生存。提高整个供应链网络效率的基础是成员企业间的相互协调,而协同合作的最高形式是同步运行。因此,实现网络上各个企业之间的协同对提高供应链整体效率具有重要意义。

文献[53]提出了同时研究企业生产和供应链网络设计情况下,多周期多产品的四级供应链的同步优化问题。在此基础上,建立了基于利润最大化的混合整数规划模型,然而模型的算法在解决大量选址情形下的模拟还存在一定困难。文献[54]基于Lorenz混沌模型研究了供应链系统的混沌同步与控制。同时,在非线性供应链管理系统中加入线性反馈控制器,实现对系统的控制。但是,研究从供应链整体系统出发,缺乏对供应链网络上各节点动力学行为的分析。文献[55]在Ciancimino和Cannella提出的同步供应链概念模式上进行了数学建模,补充了库存更新的规则,对同步模式与库存优化进行了结合研究。研究表明通过调整安全库存因子,使得供应商的在库库存量与其下级订货量完全匹配,可以获得最优的单阶段运行成本。但零售商面对不确定的市场需求,需要承受一定的缺货风险,从而影响供应链的供应比率。因此,下一步研究工作可考虑零售商安全库存因子对单阶段成本和供应比率的影响,考虑适当增大零售商安全库存因子,以可接受的运行成本增加,来获得更高的客户服务水平。

### 3.5 供应链网络演化与博弈分析

在市场条件下,先进的企业已意识到真正的竞争是供应链与供应链之间的竞争.良好的战略合作伙伴关系可以使供应链企业在财务状况、产品质量、用户满意度等方面都能得到改善和提高,并最终实现各企业的共赢.但是,当供应链企业缺乏有效的协调与合作时,往往会造成“两败俱伤”或“得失相伴”的后果.因此,如何处理供应链企业间的合作竞争关系是供应链管理的关键.一些学者运用合作博弈、非合作博弈理论研究供应链成员间竞争与合作问题.

文献[56]在构建制造商和销售商博弈模型的基础上,将计算实验方法引入到供应链系统的研究中,利用多 agent 建模技术来建立供应链模型.研究表明企业合作的支付矩阵以及初始合作比例对供应链网络企业间的竞合关系有着重要的影响.鉴于博弈论在供应链质量管理方面的研究还处于起步阶段,文献[57]针对供应链质量管理问题中的逆向选择,提出了供应链质量管理新的博弈模型.通过研究分析得出,博弈论与委托代理理论可以应用于供应链质量检验与供应链质量激励,帮助生产商建立最优契约,实现最优的质量激励.文献[58]针对由多制造商与多零售商构成的闭环供应链系统,利用微分变分不等式理论,建立闭环供应链网络动态博弈模型,并分析整个闭环供应链网络的均衡条件.进一步,可将现有研究方法平移到多层供应链网络的研究中.

### 3.6 供应链网络应用研究

复杂网络应用广泛,无论是在工程技术上还是在经济管理等领域均得到了相当程度的重视与运用.例如在无人机、社交网络、供应链等方面的应用.前文已提到研究供应链网络的稳定性、控制管理等问题具有需求性和现实意义.针对具体问题,文献[59]将理论方法应用于供应链网络的管理中,探讨了供应链中随机产出和随机需求下,供应商和制造商采取不同的风险共担合同对农资投入、供应商、制造商以及整个供应链的利润的影响.在受随机和蓄意两种不同攻击方式下,文献[60]研究了供应链网络的鲁棒性以及随机订单干扰下合并决策的供应链网络调度等问题.此外,结合目前新兴技术还涌现出不少相关的应用研究,例如供应链网络金融、物流网络经济学分析等.这些研究成果表明供应链网络理论在实际应用中的重要性,也是未来应用研究需要关注的方向.

## 4 总结与展望

现实中,供应链网络总会受到外界干扰、随机噪声等因素的影响,这些干扰因素会导致网络结构等发生变化,进而影响整个供应链网络的稳定性、协同性等.因此,基于复杂网络理论研究供应链网络中的稳定性、控制及协同管理中的问题具有重要的理论与现实意义.本文简要地叙述了供应链网络的研究意义和研究进展情况,总结分析了基于复杂网络理论的供应链相关研究的成果.通过回顾理论的发展情况,为进一步开展研究工作奠定了基础,提供了一些思路.

从复杂网络视角出发,本文着重对供应链网络的节点重要性、风险传播与动力学分析、稳定性、协同控制等研究进行了归纳与总结.通过文献梳理,发现仍有值得深入研究的问题,部分研究结果可以继续探讨,简单归纳如下:

- 1) 现实中,供应链的供求关系多数是非线性关系,难以采用线性关系进行描述.针对此类问题,构造非线性系统的 Lyapunov 函数,设计出稳定化控制策略将更有意义.
- 2) 深入研究刻画复杂供应链网络拓扑特性的新参量,以求更全面地反映供应链网络的结构特性,进而探究新参量对供应链网络的动力学行为的影响机制.
- 3) 对于多层供应链网络,研究其演化生长的内部演化规律,不断完善现有模型.进一步考虑突发事件影响下,多层供应链网络的稳定性与脆弱性等.
- 4) 针对带有时滞、突发事件干扰的供应链网络,涉及更有效的控制策略,以保持供应链网络的稳定性,抑制牛鞭效应等.

## 参考文献

### References

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [2] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [3] 郭雷. 系统学是什么[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(3): 291-301  
GUO Lei. What is systematology[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(3): 291-301
- [4] Wang L, Chen G R, Wang X F, et al. Controllability of networked MIMO systems[J]. Automatica, 2016, 69: 405-409
- [5] Yu W W, Cao J D, Lü J H. Global synchronization of line-

- arly hybrid coupled networks with time-varying delay[J]. SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, 2008, 7(1):108-133
- [6] Yuan Z Z, Zhao C, Di Z R, et al. Exact controllability of complex networks [J]. Nature Communications, 2013, 4:2447
- [7] Wang X F, Chen G R. Complex networks: small-world, scale-free and beyond [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2003, 3(1):6-20
- [8] Yang X S, Cao J D, Lu J Q. Stochastic synchronization of complex networks with nonidentical nodes via hybrid adaptive and impulsive control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(2):371-384
- [9] Xie Y B, Zhou T, Wang B H. Scale-free networks without growth [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2008, 387(7):1683-1688
- [10] 赵金山, 狄增如, 王大辉. 北京市公共汽车交通网络几何性质的实证研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(2):45-48  
ZHAO Jinshan, DI Zengru, WANG Dahui. Empirical research on public transport network of Beijing [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2005, 2(2):45-48
- [11] 杨建梅, 姚灿中. 基于三个世界的二分加权复杂网络生成机制: 以某银行服务渠道为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(5):115-122  
YANG Jianmei, YAO Canzhong. Generating mechanism study for a kind of bipartite weighted complex networks based on three worlds; take the case of a bank's service channels [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2009, 29(5):115-122
- [12] 刘璇, 汪林威, 李嘉, 等. 科研合作网络形成机理: 基于随机指数图模型的分析 [J]. 系统管理学报, 2019, 28(3):520-527  
LIU Xuan, WANG Linwei, LI Jia, et al. An empirical study of mechanism for scientific collaboration network: an analysis based on exponential random graph model [J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(3):520-527
- [13] Gao D H, Deng X Q, Bai B. An evolutionary game model of organizational routines on complex networks [J]. Advances in Swarm Intelligence, 2013:548-555
- [14] 高霞, 陈凯华. 合作创新网络结构演化特征的复杂网络分析 [J]. 科研管理, 2015, 36(6):28-36  
GAO Xia, CHEN Kaihua. The complex network analysis of the structure evolution of collaborative innovation networks; an example of the industry-university-research collaboration of Chinese ICT industry [J]. Science Research Management, 2015, 36(6):28-36
- [15] Lin Z Z, Wen F S, Wang H F, et al. CRITIC-based node importance evaluation in skeleton-network reconfiguration of power grids [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(2):206-210
- [16] 刘权辉, 王伟, 唐明. 多层耦合网络传播综述 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1):48-57  
LIU Quanhui, WANG Wei, TANG Ming. The review of spreading dynamics on multilayer coupled networks [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1):48-57
- [17] 杨云鹏, 樊重俊, 杨坚争, 等. 基于官方信息控制的多层网络谣言传播模型 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5):1294-1297, 1314  
YANG Yunpeng, FAN Chongjun, YANG Jianzheng, et al. Rumor propagation model on multilayered interconnected complex networks based on official information driven [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(5):1294-1297, 1314
- [18] 吕金虎, 谭少林. 复杂网络上的博弈及其演化动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019  
LÜ Jinhu, TAN Shaolin. Games and evolutionary dynamics on complex networks [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019
- [19] 陈天平, 卢文联. 复杂网络协调性理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013  
CHEN Tianping, LU Wenlian. Theory of coordination in complex networks [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013
- [20] 谭少林, 吕金虎. 复杂网络上的演化博弈动力学: 一个计算视角的综述 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(4):1-13  
TAN Shaolin, LÜ Jinhu. A computational survey of evolutionary game dynamics on complex networks [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(4):1-13
- [21] Qin J H, Gao H J, Zheng W X. Exponential synchronization of complex networks of linear systems and nonlinear oscillators; a unified analysis [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3):510-521
- [22] 侯绿林, 老松杨, 肖延东, 等. 复杂网络可控性研究现状综述 [J]. 物理学报, 2015, 64(18):481-491  
HOU Lulin, LAO Songyang, XIAO Yandong, et al. Recent progress in controllability of complex network [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18):481-491
- [23] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2):169-182
- [24] Liu B, Lu W L, Chen T P. Consensus in networks of multiagents with switching topologies modeled as adapted stochastic processes [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2011, 49(1):227-253
- [25] 任红卫, 邓飞其. 随机复杂网络同步控制研究进展综述 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(10):1261-1274  
REN Hongwei, DENG Feiqi. Review on synchronization control in stochastic complex networks [J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(10):1261-1274
- [26] Yang X S, Cao J D, Lu J Q. Synchronization of delayed complex dynamical networks with impulsive and stochastic effects [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2011, 12(4):2252-2266
- [27] Cheng J, Park J H, Liu Y J, et al. Finite-time  $H_\infty$  fuzzy control of nonlinear Markovian jump delayed systems with partly uncertain transition descriptions [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2017, 314:99-115
- [28] Lin Z Y, Hou J, Yan G F, et al. Reach almost sure consensus with only group information [J]. Automatica,

- 2015, 52:283-289
- [29] Li T, Zhang J F. Mean square average-consensus under measurement noises and fixed topologies: Necessary and sufficient conditions [J]. *Automatica*, 2009, 45 (8): 1929-1936
- [30] 赵钢.复杂供应链网络的动力学行为及其可控性研究[D].南京:南京航空航天大学,2015  
ZHAO Gang. Research on dynamic behavior of complex supply chain network and its controllability[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015
- [31] 杨康.基于复杂网络理论的供应链网络风险管理研究[D].北京:北京交通大学,2014  
YANG Kang. Research on supply chain network risk management based on complex network theory[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014
- [32] 王晶,王寻.受约束供应链模型的复杂动力学行为[J].系统工程理论与实践,2012,32(4):746-751  
WANG Jing, WANG Xun. Complex dynamic behaviors of constrained supply chain systems [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2012, 32(4):746-751
- [33] 赵钢,杨英宝,包旭.供应链网络风险扩散动力学模型及其应用[J].系统工程理论与实践,2015,35(8):2014-2024  
ZHAO Gang, YANG Yingbao, BAO Xu. Dynamic model for the risk spreading in supply chain network and its application [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2015, 35(8):2014-2024
- [34] Scrimali L. On the stability of coalitions in supply chain networks via generalized complementarity conditions [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2019. DOI: 10.1007/s11067-019-09461-w
- [35] 张学龙.具有时滞特征的动态供应链建模与稳定性分析[J].管理工程学报,2015,29(4):95-101  
ZHANG Xuelong. Dynamic supply chains with time delay characteristic modeling and stability analysis [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015, 29(4):95-101
- [36] 仇翔,俞立,刘安东.时滞供应链网络系统的切换模型预测控制方法[J].系统科学与数学,2015,35(4):407-418  
QIU Xiang, YU Li, LIU Andong. Switched model predictive control for supply chain network systems with time delays [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2015, 35(4):407-418
- [37] 杨康,张仲义.基于节点重要性的供应链网络风险跨层次评估研究[J].系统科学与数学,2015,35(1):110-120  
YANG Kang, ZHANG Zhongyi. Researches on risk inter-hierarchy assessment in supply chain network based on node importance [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2015, 35(1):110-120
- [38] Helbing D, Arbruster D, Mikhailov A S, et al. Information and material flows in complex networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 363(1). DOI: 10.1016/j.physa.2006.01.042
- [39] 贺磊,王直杰.基于复杂网络的供应链网络效率研究[J].计算机仿真,2012,29(8):183-186  
HE Lei, WANG Zhijie. Supply chain network efficiency research based on complex network [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(8):183-186
- [40] 张旭,袁旭梅,袁继革.基于加权改进节点收缩法的供应链网络节点重要度评估[J].计算机应用研究,2017,34(12):3801-3805  
ZHANG Xu, YUAN Xumei, YUAN Jige. Node importance evaluation for supply chain network based on weighted improved node contraction method [J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(12):3801-3805
- [41] 傅杰,邹艳丽,谢蓉.结合网络动力学的电网关键节点识别[J].复杂系统与复杂性科学,2017,14(2):31-38  
FU Jie, ZOU Yanli, XIE Rong. Identification of critical nodes in a power network with considering the network dynamics [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2017, 14(2):31-38
- [42] Klibi W, Martel A, Guitouni A. The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(2):283-293
- [43] Zegordi S H, Davarzani H. Developing a supply chain disruption analysis model: application of colored Petri-nets [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(2):2102-2111
- [44] Behret H, Öztaysi B, Kahraman C. A fuzzy inference system for supply chain risk management [J]. *Practical Applications of Intelligent Systems*, 2012, 124:429-438
- [45] 徐君群.动态供应链网络的  $H_\infty$  控制[J].管理科学学报,2012,15(9):58-63  
XU Junqun.  $H_\infty$  control of dynamic supply chain network [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(9):58-63
- [46] 覃茜.基于多智能体的供应链系统在切换拓扑下的  $H_\infty$  一致性[D].太原:山西大学,2017  
QIN Xi.  $H_\infty$  consensus for multi-agent based supply chain system under switching topologies [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017
- [47] Fu D F, Zhang H T, Dutta A, et al. A cooperative distributed model predictive control approach to supply chain management [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019. DOI: 10.1109/TSMC.2019.2930714
- [48] Zhang S T, Li X, Zhang C Y. A fuzzy control model for restraint of bullwhip effect in uncertain closed-loop supply chain with hybrid recycling channels [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 25(2):475-482
- [49] 罗俊芝,杨万利,鞠桂玲,等.基于网络控制的供应链库存系统的稳定性分析[J].数学的实践与认识,2014,44(23):278-287  
LUO Junzhi, YANG Wanli, JU Guiling, et al. Analysis on stability of inventory system in supply chain based on network control approach [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44(23):278-287
- [50] 张松涛,张春杨,侯嫣婷.基于库存切换的不确定动态供应链网络系统模糊鲁棒控制[J].控制与决策,2015,30(5):892-898  
ZHANG Songtao, ZHANG Chunyang, HOU Yanting. Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory [J]. *Control and De-*



- cision,2015,30(5):892-898
- [51] 黄健,陈国华,肖条军,等.一类复杂供应链网络的稳定性分析[J].中国管理科学,2005,13(增刊1):298-301  
HUANG Jian, CHEN Guohua, XIAO Tiaojun, et al. Stability analysis of a type of complex supply chain networks [J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(sup1):298-301
- [52] 谢廷宇,康凯,王军进,等.随机和蓄意两种攻击方式供应链网络的鲁棒性分析[J].数学的实践与认识,2018,48(16):40-47  
XIE Tingyu, KANG Kai, WANG Junjin, et al. Research on the robustness of supply chain networks under the random and intention two different attack methods [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48(16):40-47
- [53] 喻建良,李永康.复杂供应链生产与网络同步优化模型[J].财经理论与实践,2010,31(2):88-92  
YU Jianliang, LI Yongkang. A synchronization optimization model for production and network in complex supply chain[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2010, 31(2):88-92
- [54] Göksu A, Kocamaz U E, Uyaroğlu Y. Synchronization and control of chaos in supply chain management [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 86:107-115
- [55] 蔺宇,张楚薇.多级串行供应链的同步模式及库存优化研究[J].工业工程与管理,2015,20(3):14-20  
LIN Yu, ZHANG Chuwei. A study of synchronised operation mode and inventory optimization in a multi-echelon serial supply chain [J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(3):14-20
- [56] 熊伟清,魏平.基于多Agent供应链网络企业竞合关系演化分析[J].系统科学与数学,2015,35(7):779-787  
XIONG Weiqing, WEI Ping. Evolutionary analysis on co-competition relationship among enterprises of supply chain net based on multi-agent [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(7):779-787
- [57] 范迪.供应链质量管理的新博弈模型[J].物流工程与管理,2017,39(2):65-67  
FAN Di. A novel game model of supply chain quality management [J]. Logistics Engineering and Management, 2017, 39(2):65-67
- [58] 孙嘉轶,滕春贤,陈兆波.基于微分变分不等式的再制造闭环供应链网络动态模型[J].系统工程理论与实践,2015,35(5):1155-1164  
SUN Jiayi, TENG Chunxian, CHEN Zhaobo. Dynamic model of closed-loop supply chain network with product remanufacturing based on differential variational inequality [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2015, 35(5):1155-1164
- [59] 凌六一,郭晓龙,胡中菊,等.基于随机产出与随机需求的农产品供应链风险共担合同[J].中国管理科学,2013,21(2):50-57  
LING Liuyi, GUO Xiaolong, HU Zhongju, et al. The risk-sharing contracts under random yield and stochastic demand in agricultural supply chain [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(2):50-57
- [60] 唐亮,赫超,靖可,等.随机订单干扰下考虑合并决策的供应链网络调度研究[J].中国管理科学,2019,27(4):91-103  
TANG Liang, HE Chao, JING Ke, et al. Supply chain network scheduling by considering merge decision with random order interference [J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(4):91-103

## A survey of supply chain research based on network theory

LUO Zijian<sup>1</sup> XIONG Wenjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Economic Information Engineering, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130

**Abstract** The 21st century is a century of complexity and networking. People try to analyze and explain various complex phenomena with the help of network theory, and design effective control schemes to optimize and manage complex systems at the same time. In reality, supply chain is such an example. Since most supply chains have a certain network structure, the study of various problems in supply network is closer to the reality from the perspective of network theory. This paper summarizes and analyzes the development of related researches by combing previous results. At the same time, some problems of supply chain network are discussed, which lay a foundation for further research.

**Key words** supply chain; complex network; coordination theory; control theory; stability analysis