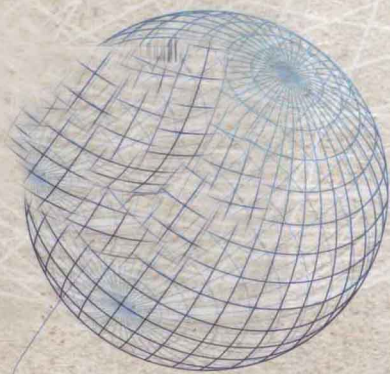


# 复杂物流网络系统 建模与仿真

张旭凤◎著



FUZA WULIU WANGLUO XITONG  
JIANMO YU FANGZHEN



# 复杂物流网络系统建模与仿真

张旭凤 著

中国财富出版社  
(原中国物资出版社)

**图书在版编目 (CIP) 数据**

复杂物流网络系统建模与仿真/张旭凤著. —北京: 中国财富出版社, 2012. 12  
ISBN 978 - 7 - 5047 - 4528 - 6

I. ①复… II. ①张… III. ①物流—网络系统—系统建模—研究②物流—网络系统—系统仿真—研究 IV. ①F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 253897 号

策划编辑 王宏琴

责任印制 方朋远

责任编辑 何乐 赵金杨

责任校对 梁凡

---

出版发行 中国财富出版社 (原中国物资出版社)

社 址 北京市丰台区南四环西路 188 号 5 区 20 楼 邮政编码 100070

电 话 010 - 52227568 (发行部) 010 - 52227588 转 307 (总编室)

010 - 68589540 (读者服务部) 010 - 52227588 转 305 (质检部)

网 址 <http://www.cfpress.com.cn>

经 销 新华书店

印 刷 北京京都六环印刷厂

书 号 ISBN 978 - 7 - 5047 - 4528 - 6/F · 1856

开 本 710mm×1000mm 1/16

版 次 2012 年 12 月第 1 版

印 张 12.25

印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷

字 数 232 千字

定 价 28.00 元

---

**版权所有 · 侵权必究 · 印装差错 · 负责调换**



## 前 言

随着科学技术的进步,生产规模不断扩大,产品的流通范围越来越大,产品流动链条越来越长,大规模的生产要求与大规模的流通相伴随,大规模的流通带来大规模的物流。一方面,大规模的物流系统通常包括多个相互依赖的各级实体子系统,子系统间复杂的交互关系以及系统跟外界环境的交互关系,决定了物流系统的复杂性;另一方面,物流系统受很多随机因素的影响,如顾客需求、原材料外部供应、交货周期等,使得系统总是处在一个不确定的环境中,受很多随机因素的影响,具有多目标、多因素、多层次、动态性和开放性的特点。面对物流系统环境的变化、物流系统研究对象的多样性、物流系统的动态性以及物流系统的复杂性,通过运用复杂系统理论、多主体建模和仿真理论等新的研究手段,立足于物流网络系统的复杂性与不确定性研究、复杂物流网络系统的结构研究和复杂物流网络系统的模型研究,有助于将复杂自适应理论、系统动力学理论、复杂网络理论等用于物流网络系统的实践中,从而进一步提高物流效率。

本专著重点研究了以下几个方面。

第一部分:复杂网络及复杂性理论在物流网络中的应用研究。研究了物流系统的内涵,并对复杂网络理论在物流领域的应用情况、复杂配送网络和物流系统的复杂性进行研究。重点对物流系统的复杂性和不确定性进行复杂性辨析研究。

第二部分:复杂自适应系统及其应用。研究复杂自适应系统理论研究进展及其在物流领域的应用情况,并应用复杂自适应系统理论对配送中心选址进行建模和仿真研究。

第三部分:基于无标度网络的物流配送网络研究。包括无标度网络理论及其在物流配送网络及相关领域中的应用研究、无标度网络特征及其在物流配送网络中的演化规律研究、物流配送网络无标度演化



规律的案例研究。重点对复杂网络的无标度特性进行了研究。

第四部分：基于 SIR 模型的物流配送网络研究。首先是对 SIR 模型及其相关临界值和应用情况的研究，然后应用无标度网络理论构建物流配送网络节点服务客户饱和度模型，并进行模型的仿真试验。重点研究物流配送网络的扩展机理。

第五部分：多 Agent 的物流仿真研究。采用智能 Agent 作为仿真系统建模的基本元素。基于 Multi-Agent 的建模仿真方法，完成物流系统的协调、集成、优化、运作和建模仿真，使模型及仿真过程更适合物流系统实际需要。

第六部分：系统动力学在复杂物流系统研究中的应用。包括应用系统动力学研究物流问题的可行性及其在物流系统中的具体应用、零售店配送物流系统的动力学模型和同城快递业系统的系统动力学模型案例研究。

本书的创新点主要体现在以下方面。

第一，提出了物流配送网络符合复杂网络中无标度网络的特性，研究了复杂物流配送网络符合节点度分布介于 1~3 的演化规律。这一结论可以分析物流配送网络中节点的扩展机理，为有效管理相似复杂物流网络各级节点的构建及复制过程提供重要的理论基础。

第二，以服务质量信息传播为视角，在原有 SIR 模型的基础上，重新界定相关变量，构建了物流复杂网络节点服务客户饱和度理论模型，并构建以客户队列长度为基准的物流企业配送网络节点服务客户饱和度的仿真模型。从全新的视角解决物流网络节点服务客户饱和度以及物流网络新节点形成的时机问题。

第三，采用智能 Agent 作为仿真系统建模的基本元素。基于 Multi-Agent 的建模仿真方法，完成物流系统的协调、集成、优化、运作和建模仿真，使模型及仿真过程更适合物流系统实际需要。

本专著的内容立足于多个项目的研究成果，历时 3 年，希望这些研究成果能为企业及相关研究人员提供参考。

张旭凤

2012 年 7 月



# 目 录

<b>1 复杂网络及复杂性理论在物流网络中的应用研究</b> .....	(1)
1.1 引 言 .....	(1)
1.2 物流系统概论 .....	(2)
1.3 复杂网络理论在物流领域的应用研究 .....	(5)
1.4 物流系统的复杂性研究 .....	(11)
1.5 物流系统的复杂性分析 .....	(18)
1.6 物流复杂网络研究 .....	(32)
<b>参考文献</b> .....	(43)
<b>2 复杂自适应系统及其应用</b> .....	(48)
2.1 复杂自适应系统的研究背景 .....	(48)
2.2 复杂自适应系统理论研究进展 .....	(51)
2.3 基于 CAS 对物流系统的仿真研究 .....	(57)
2.4 复杂自适应系统研究述评 .....	(69)
2.5 基于 CAS 的企业配送中心选址影响因素分析建模与仿真 .....	(71)
<b>参考文献</b> .....	(85)
<b>3 基于无标度网络的物流配送网络研究</b> .....	(93)
3.1 无标度网络理论及其在物流配送网络及相关领域中的应用研究 .....	(94)
3.2 无标度网络特征及其在物流配送网络中的演化规律研究 .....	(98)
3.3 物流配送网络无标度演化规律的案例研究 .....	(107)
<b>参考文献</b> .....	(119)



<b>4 基于 SIR 模型的物流配送网络研究</b> .....	(121)
4.1 SIR 模型及应用 .....	(121)
4.2 基于无标度网络分析的物流配送网络节点服务客户饱和度建模 .....	(127)
<b>参考文献</b> .....	(138)
<b>5 多 Agent 的物流仿真研究</b> .....	(142)
5.1 Agent 的内涵和作用 .....	(142)
5.2 多 Agent 的物流仿真研究 .....	(144)
5.3 配送路径优化问题的研究 .....	(148)
5.4 宽度搜索算法的两阶段路径优化模型 .....	(151)
<b>参考文献</b> .....	(163)
<b>6 系统动力学在复杂物流系统研究中的应用</b> .....	(169)
6.1 研究背景 .....	(169)
6.2 应用系统动力学研究物流问题的可行性 .....	(169)
6.3 系统动力学在物流研究中的具体应用 .....	(170)
6.4 系统动力学在物流研究中的应用案例一 .....	(173)
6.5 系统动力学在物流研究中的应用案例二 .....	(182)
<b>参考文献</b> .....	(188)



# 1 复杂网络及复杂性理论在物流网络中的应用研究

## 1.1 引言

复杂性科学是由物理、经济、管理、计算机、数学、哲学等多种学科综合而成的一门边缘学科<sup>[1]</sup>，对复杂系统及其复杂性的研究有利于人们发现并找出事物发展的规律和动因，以便在预期事物发展的结果基础上进行更好的调控。现代科学涉及构成宇宙的各个层次，无论是渺观、微观、宏观、宇观，还是胀观世界中，都证实存在着复杂性<sup>[2]</sup> (Complexity)。系统的运作跨越了相当广泛的领域，比任何一门学科都更为复杂。多年来，对复杂系统的研究吸引了许多研究者，其范围从1977年诺贝尔奖获得者 Ilya Prigogine (伊利亚·普里高津)，到熵的信息理论概念关系，到混沌理论，到系统构建，到其他重要领域。

复杂系统理论是系统科学中的一个前沿方向，是系统科学的延续和发展。复杂性科学被称为21世纪的科学，主要目的是要揭示复杂系统的一些难以用现有科学方法解释的动力学行为<sup>[3]</sup>。复杂性理论由20世纪30年代的“老三论”发展成为20世纪60年代的“新三论”。

复杂系统理论是在“新三论”基础上发展而来的，是研究“相对简单的微观个体活动可以突现出宏观层面的复杂行为”的一门科学。复杂系统经常与其环境(外界)有物质、能量和信息的交换，从而形成开放性系统，系统在远离平衡的状态下也可以稳定(自组织)，具有确定性的系统有其内在的随机性(混沌)，而具有随机性的系统却又有其内在的确定性(突变)。

目前，物流业已逐渐发展成为21世纪的新兴产业行业，逐步成为国民经济新的增长点、发展动脉和基础产业。被称为“企业第三利润源”<sup>[4]</sup>的物流业在全球范围广泛兴起是经济全球化、货物贸易、服务贸易、技术贸易和信息技术迅速发展的综合结果。同时，物流业又是推动经济全球化的重要因素。特别是物流业被列为我国十大调整振兴产业之一，更充分表明了其在企业经营运作和国民经济





生活中的重要地位。

## 1.2 物流系统概论

### 1.2.1 物流系统概念

物流系统是由物流各要素所组成的，各要素之间存在有机联系并形成物流总体。这个总体十分复杂，内部存在着相互作用和相互依赖的各个组成部分。这个总体的特定功能，使物流活动合理化并进一步优化。

### 1.2.2 物流系统特点

(1) 物流系统本来就是客观存在的，但一直未被认识，因此，人们未能能动地利用系统的优势。物流系统的各个要素在长期的社会发展历程中都已有了较高的水平，因此，一旦形成物流观念并按新观念建立物流系统<sup>[5]</sup>，就会迅速发挥系统的总体优势。从这个意义上讲，物流系统是现代科技及现代观念的产物。

(2) 物流系统是一个大跨度系统。这反映在两个方面：一是地域跨度大，二是时间跨度大。国际间物流的地域跨度之大自然不待言，即使是企业间物流，在现代经济社会中，跨越不同地域也是常有的事。大跨度系统带来的主要问题是管理难度较大，对信息的依赖程度高。

(3) 物流系统稳定性较差而动态性较强。它和生产系统的一个重大区别在于：生产系统按照固定的产品、固定的生产方式连续或不连续生产，少有变化，系统稳定的时间较长；而一般的物流系统，总是联结多个生产企业和用户，随需求、供应、渠道、价格的变化，系统内的要素及系统的运行经常发生变化，难以长期稳定。稳定性差、动态性强带来的主要问题是要求系统有足够的灵活性与可改变性，这自然会增加管理和运行的难度。

(4) 物流系统属于中间层次系统范畴，本身具有可分性，可以分解成若干个子系统。同时，物流系统在整个社会再生产中主要处于流通环节中，因此，必然受更大的系统如流通系统、社会经济系统制约。

(5) 物流系统的复杂性。物流系统要素本身便十分复杂，如物流系统运行对象“物”，遍及全部社会物质资源，将全部国民经济产品的复杂性最后集于一身，不可能不引起物流系统的复杂<sup>[6]</sup>。此外，物流系统要素间的关系也不如某些生产系统那样简单而直观。这就增加了系统的复杂性。



(6) 物流系统结构要素间有非常强的“背反”现象，常称之为“交替损益”或“效益背反”现象，会出现系统总体恶化的结果。发生这种现象的主要原因是物流系统的“后生性”。物流系统中许多要素在按新观念建立物流系统前，早就是其他系统的组成部分，因此，往往受较多原系统的影响的制约<sup>[7]</sup>，而不能完全按物流系统的要求运行。

### 1.2.3 物流系统的功能要素

物流系统的功能要素指的是物流系统所具有的基本能力。这些基本能力有效地组合、联结在一起，便成了物流的总功能，能合理、有效地实现物流系统的总目的<sup>[8]</sup>。

物流系统的功能要素一般认为有运输、储存保管、包装、装卸搬运、流通加工、配送、物流信息等，如果从物流活动的实际工作环节来考查，物流由上述七项具体工作构成<sup>[9]</sup>。

物流功能要素反映了整个物流系统的能力，增强这些要素之间的联系，使之更加协调、更加可靠，就能够提高物流运行的水平，体现在物流系统水平的提高上。

### 1.2.4 物流系统的具体目标

#### 1. 服务目标

物流系统是起“桥梁、纽带”作用的流通系统的一部分，具体地联结着生产与再生产、生产与消费，因此，要求有很强的服务性。这种服务性表现在本身有一定从属性，要以用户为中心，树立“用户第一”的观念。其利润的本质是“让渡”性的，不一定是“利润中心”系统<sup>[10]</sup>。物流系统采取送货、配送等形式，就是其中服务性的体现。近年来出现的“准时供货方式”、“快递方式”也是其服务性的表现。

#### 2. 及时、快速、准时目标

及时性不但是服务性的延伸，也是流通对物流提出的要求。而速度问题不仅是用户的要求，而且是社会发展进步的要求。马克思从资本角度论述了流通的这一目标，指出流通的时间越短，速度越快，“资本的职能就越大”，并要求“力求用时间去消灭空间”、“把商品从一个地方转移到另一个地方所花费的时间缩短到最低限度”<sup>[11]</sup>。快速、及时、准时，既是一个传统目标，更是一个现代目标。在物流领域采取的诸如直达物流、联合一贯运输、高速公路、时间表系统等管理和技术，就是这一目标的体现。



### 3. 节约目标

节约是经济的重要规律。在物流中,除流通时间的节约外,由于流通过程消耗大而又基本上不增加或提高商品使用价值,因此,依靠节约来降低投入,是提高相对产出的重要手段<sup>[12]</sup>。物流过程作为“第三利润源泉”而言,这一利润的挖掘主要是依靠节约。在物流领域推行的集约化方式,提高单位物流的能力,采取的各种节约、省力、降耗措施,也是节约这一目标的体现。

### 4. 规模优化目标

以物流规模作为物流系统的目标,是以此来追求规模效益。生产领域的规模生产是早已为社会所承认的,但在流通领域,似乎不那么明显了。实际上,规模效益问题在流通领域也异常突出。

### 5. 库存调节目标

库存调节性是服务性的延伸,也涉及物流系统本身的效益。物流系统是通过本身的库存,保证需求,通过压低库存,又可以降低成本。以降低库存为目标,无论在工业化时期还是网络经济时期,都是系统构筑的主要方式。

## 1.2.5 供应链物流系统

现代物流是以基于市场需求有效提供商品的供给系统为中心,通过供应链不同职能部门之间或不同企业之间的信息共享、协同发展、共同规划而形成的完整、连续的供应链一体化运作流程。在供应链物流系统中,物流功能不断整合优化,系统运行模式也不断变化。企业可以通过投机与延迟原理的有机结合,进行供应链分离点的科学定位,形成物资从企业到市场的最佳流动路线,实现最优的供应链物流。

现代物流是一体化的经济运动过程,通过运输、仓储、装卸、包装、流通加工和信息等各个物流基本活动(功能、要素、环节)的有机结合,对供应链各个环节的物资生产流通进行时空定位运作,把供应链上的企业供应网络和分销网络与最终客户链接,追求整体最优,实现企业效益和社会效益。在供应链物流系统中,生产工厂、存储设施、零售店等是实物物流运作的设施,即节点。企业利用这些节点将产品和物料送到客户,节点之间的物资流动形成线路,即链。节点的数量、规模、地理位置、服务区域等决定物资从企业到市场的流动线路,物流节点与线路形成供应链物流系统的结构。因此,一般的供应链物流系统连接着供应商、生产商、中间商、物流商和消费者,随着市场需求、产品价格、法律政策等的变化,系统内的功能要素经常不断地组合优化,系统运行模式也经常不断地调整,逐渐成为适应环境变化、满足经济社会发展的经济控制系统<sup>[13]</sup>。



## 1.3 复杂网络理论在物流领域的应用研究

### 1.3.1 复杂物流系统的概念

随着科学技术的进步,生产规模不断扩大,产品花色品种不断更新,社会需求日新月异。大规模的生产要求与大规模的流通相伴随,大规模的流通带来大规模的物流。这类物流系统通常包含若干个相互依赖的供应链,每个供应链可能具有多个制造商和零售商实体,制造商和零售商实体之间存在较多的批发商实体(经销商、配送中心等)<sup>[14]</sup>。供应链之间、实体之间通常存在竞争或合作的关系,经常包含若干运输车辆、多种运输路线,存在较多的不确定性因素,如顾客需求、原材料外部供应、交纳周期等。系统中每个实体、每个供应链都存在“供方”与“需方”的对应关系,而且这种供需关系是动态变化的。因此,这类系统规模大,结构复杂,属于复杂系统的范畴。它总是处在一个不确定的环境中,受很多随机因素的影响,具有多目标、多因素、多层次的特点,是以离散事件为主的复杂的连续—离散事件混合系统,而不是单纯的离散事件系统。这类系统,称为复杂物流系统<sup>[15]</sup>。根据供应链和敏捷供需链的概念,可将复杂物流系统定义为:在竞争、合作、动态、不确定的复杂市场环境中,由若干供方、需方等实体(自主、半自主或从属)构成的快速响应环境变化的供应链物流系统。“实体”是指参与物流活动的企业、企业集团或联盟,以及企业内部业务相对独立的部门。具有自主决策权的实体称为自主实体,具有部分决策权的实体称为半自主实体,没有自主决策权的实体称为从属实体。供方和需方可以是各类供应商、制造商、批发商和零售商实体。“动态”,反映了为适应市场变化而进行的供需关系重构过程,和“竞争”、“合作”以及“不确定性”一起构成了该类系统的复杂性<sup>[16]</sup>。

### 1.3.2 复杂物流系统的研究现状

国内外学术界从不同角度利用不同方法和理论对物流配送网络进行研究,并取得了很大进展。但是,仍存在需要进一步完善和改进的地方。复杂网络的研究是复杂性理论研究中的一个重要的部分,它是研究复杂性科学和复杂系统的有力工具。在现实世界中,有很多具有复杂拓扑结构和动力学行为的大规模网络,诸如电力网络、全球交通网络,生物体中的大脑到各种新陈代谢网络、信息网络、经济网络以及社会网络,等等,都具有一定的相似性,可以用复杂网络来描述。



应用复杂网络理论，从理论上分析物流配送网络结构的复杂性，是研究复杂物流配送网络的关键所在，同时是物流配送网络研究的基础理论问题之一<sup>[17]</sup>。通过研究，有助于理解物流配送网络形成的内在机理和运行规律，进而为提出解决物流问题的有效方法提供理论基础。

### 1.3.2.1 基于复杂网络的物流网络研究

由于物流网络可以简化成节点和边的构成，再加上物流网络所具有的层次性和开放性，使得物流成为一个复杂的系统。国内外学者就如何选取网络的节点和边进行了研究，主要有以下几个方面：复杂物流网络具有较明显的无标度特性，即节点度分布不同于随机网络和小世界网络模型的均匀分布，节点具有不同的影响力及重要性，并且数据及网络图本身也表现出了明显的小世界性质。董艳梅等<sup>[18]</sup>认为城市节点作为区域物流网络系统的重要组成部分，应构建在经济中心城市或节点间的轴线（物流，信息流）之上。因此，其研究的重要问题是各个物流节点之间的关系怎样影响和在多大程度上影响网络成员的行为、物流网络整体发展对单个物流节点的限制和制约等。这种研究方法可以有效补充物流管理领域宏观层面研究的不足。王文利<sup>[19]</sup>、白世贞<sup>[20]</sup>利用复杂网络中的脆弱性和鲁棒性理论来分析供应链中资源流中断的风险，相对于由核心企业主导的核心型供应链网络来说，平等伙伴型供应链网络更能应对市场中的各种风险。当代网络分析技术特别是网络模型分析技术取得了重大进展，它可以揭示网络的结构，分析网络结构对节点的影响，研究网络的整体运作及对网络整体进行模拟等。这些都为物流网络理论的研究提供了重要工具。

### 1.3.2.2 配送网络的优化研究

在利用复杂网络进行配送网络优化的研究中，主要研究的问题有道路最短研究、配送中心选址研究和配送路线优化研究三方面。利用最短路径法解决了物流配送行驶的最短路径以及行驶路线，另一方面，关于解决配送中心的选址问题的研究，传统的研究方法主要有整数规划法、图上作业法、重心法、鲍姆儿—沃尔夫法以及仿真计算方法等。目前，国内外对该问题的研究主要有两方面，一是从不同的角度考虑不同的影响因素，对现在的模型进行改进；二是引入新的分析方法，建立新的模型，启发式方法尤其是遗传算法在配送中心选址问题中得到了广泛的应用。但在研究过程中仍存在不足之处，例如在路长计算时，通常采用的是直线距离，而实际中用交通距离是最合理的。



西北工业大学的李懋<sup>[21]</sup>在基于复杂系统理论的配送网络优化研究中,运用了改进的扩展元胞自动机模型有效地解决了单源点到多节点的最短路问题,并在此基础上,通过控制演化终止条件,改进了元胞的扩展状态,记录了路径信息、最短路径。李懋还在文中运用改进的遗传算法对配送路线进行了优化,在传统的遗传算法的基础上,引入了最大保留交叉和改进变异算子,提高了搜索速度和精度,一次求解即可得出优化的配送车辆数目和配送巡回次序,解决了带时间窗的车队配送线路优化问题。

花本高和从雪<sup>[22]</sup>在基于遗传算法物流配送路线优化研究与实现一文中,在遗传算法的基础上,利用自然数序列作为车辆路径问题的编码方式,采用轮盘赌选择法,在交叉算子上使用部分映射交叉算子,在遗传操作过程中引进具有一定爬山作用的逆转算子,有效解决了物流配送中车辆路线优化问题。东北师范大学谭前进、林和平和谷文祥<sup>[23]</sup>提出了基于遗传算法的智能化解决方案,即基于自然数编码的遗传算法在物流车辆调度中的运用等关键技术。通过模拟测试,效果良好,系统适合于任何中小型物流公司,可用于调度车辆以实现智能化配送。辽宁工程技术大学的任建华、王鹤和邱云飞<sup>[24]</sup>为了解决物流配送中的路径优化问题,运用改进的蚁群算法来建立配送车辆路径的数学模型,通过减少蚁群的选路次数、更新信息等策略,提高了算法的收敛速度和全局搜索能力。经过实验分析和计算,证明了应用蚁群算法可以优化物流配送线路,可以有效地解决多回路运输问题。该成果对物流企业控制成本、增强市场竞争力有一定参考价值。

### 1.3.2.3 复杂网络在其他领域中的应用

#### 1. 在冷链物流中的运用

冷链物流是一种特殊的物流系统,其特殊性主要表现在物流节点多、物流路线长、物流环节多,而且对运输条件要求严格。网络的结构和性质、网络宏观性质的微观生成机制、网络中的动力学行为是目前复杂网络领域研究人员最感兴趣的三个方向。国内研究主要是利用复杂网络的相关理论,研究冷链物流网络的演化机制、拓扑结构和整体行为(功能),从而找出影响整个物流网络的关键参数。通过对这些关键参数的控制与优化,改变网络的结构,从而达到优化整个网络功能的目的,而利用无标度网络模型,可以确定影响冷链物流网络抵抗各种随机或恶意毁坏的关键统计参数,并进行优化仿真分析,通过调整网络参数,改变网络结构,能够实现网络优化的最终目的<sup>[25]</sup>。



## 2. 在运输中的运用

集装箱网络是集装箱运输中相互联系的组织与设施的集合，一个完整的集装箱网络是在多式联运的基础上，由各种不同方式的运输路线和节点共同组成的。随着支线集装箱运输的兴旺发展，集装箱网络产生了更高的复杂性和不确定性，因此，应用复杂网络理论对集装箱支线网络进行研究具有一定的意义。国内一些学者利用复杂网络理论，取得了一些成就。杜鹃、王学峰<sup>[26]</sup>利用复杂网络理论，将集装箱运输网络的基本统计特性参数作为集装箱支线港影响程度因子，计算出网络中每个节点的影响系数，并将该系数加入到集散港选址模型中，修正集装箱网络运输中各环节和节点未知的相关效益矩阵，建立集散港选址的整数规划模型，通过模型求解确定集装箱集散港的位置。国内外学术界对物流运输系统的调度优化问题十分关注，研究的也比较早，但大部分都是理论上的跟踪型研究，真正为物流企业解决实际问题软件产品却非常少。

## 3. 在供应链中的运用

在供应链网络中，每个供应链企业成员都被看做是一个行为主体，都有自主判断能力和一定的行为能力，并受环境影响。它们会根据其他主体的行为和环境的变化不断修正自身的行为，以便适应整个供应链和环境。因此，供应链网络不是各个节点企业的简单线性组合而成的系统，而应是复杂自适应系统，它会涌现出单个成员企业所不具有的特性。在信息化高度发达的今天，经济全球化导致了大量不确定性问题的出现，而供应链作为一个复杂网络，往往缺乏抵御不确定性的能力，甚至不能抵御简单的风险。因此，关于不同干扰情况下供应链网络的脆性及鲁棒性所表现的形式和特点的研究，对于供应链运作绩效和鲁棒性的提高都具有重要的实际意义和理论意义。当今，国内外都十分关注供应链网络的鲁棒性问题的研究，并在理论方面和实证方面都取得了一定的成果。徐家旺等<sup>[27]</sup>建立了市场供求不确定条件下的供应链多目标鲁棒运作模型；黄小原等<sup>[28]</sup>就供应链鲁棒性问题作了综述研究。总的来说，关于供应链的鲁棒性研究偏向供应链的微观运作层面，主要集中在供应链面对环境不确定性情况下的企业的应对措施，研究方式也主要集中在定性分析，运用的方法也只是数学规划方法，而在供应链整体的宏观层面（如网络结构等）的研究却很少。

# 1.3.3 复杂网络结构的统计特性

## 1.3.3.1 度与度分布

度是研究复杂网络必须要了解的一个基本的概念。通常把网络中任一节点  $i$



的度  $k_i$  定义为与该节点连接的其他节点的数目或者认为是与该节点  $i$  直接相连的边的条数。在实际生活中,很多网络是有向的,根据网络是否有向又可以将其分为有向网络和无向网络。在无向网络中,其节点的度定义同前面所描述;有向网络的度却有入度 (in-degree) 和出度之分 (out-degree),入度指的是所有与该节点相连的边中,从其他节点指向该节点的边的数目,出度则与之相反,指的是从该节点指向其他节点的边的数目。

网络中所有的节点的度的列表称为度序列,度序列的平均值称为网络的平均度,用  $k$  表示。度分布是网络最基本的拓扑特性,它是指从网络中随机选择一个节点  $i$ ,其度为  $k$  的概率,用  $P(K)$  表示。因此,通过网络的度序列就可以确定该网络的度分布。

### 1.3.3.2 平均路径长度

网络的平均路径长度是指网络中任意两个节点之间的距离的平均值,所有节点对之间的最大距离被称为该网络的直径,通常记为  $D$ ,如式 (1-1) 所示。

$$D = \max l_{ij} \quad (1-1)$$

在求得了网络中所有的节点对之间的距离后,便可以得出网络的平均路径长度。如式 (1-2) 所示<sup>[29]</sup>。

$$L = \frac{1}{0.5N(N+1)} \sum_{i \geq j} l_{ij} \quad (1-2)$$

式中:

$l_{ij}$ ——节点间的距离,是从一个节点  $i$  到另一个节点  $j$  所需要经过的边的最小数目 (因为在无权网络中,边的权重可以看做是 1);

$L$ ——网络的平均路径长度;

$N$ ——网络中的节点数。

### 1.3.3.3 聚类系数

聚类系数用来描述网络的聚类特性的强弱,或者说用来衡量网络集团化的程度,如式 (1-3) 所示。

网络中任意节点  $i$  的聚类系数 =  $\frac{\text{与该节点直接相连的节点之间实际存在的边数}}{\text{与该节点直接相连的节点之间最大可能存在的边数}}$

$$C_i = 2E_i / [k_i (k_i - 1)] \quad (1-3)$$

式中:

$C_i$ ——聚类系数;





$k_i$ ——与节点  $i$  直接相连的边数；

$E_i$ ——与节点  $i$  直接相连的  $k_i$  个节点之间实际存在的边数；

$1/2k_i(k_i-1)$  ——与节点节点  $i$  直接相连的  $k_i$  个节点之间最大可能存在的边数；

$C$  ——整个网络的聚类系数，等于所有节点  $i$  的聚类系数的平均值。

### 1.3.4 典型复杂网络特性的对比研究

所谓拓扑，是用来研究与大小、形状无关的线和面特性的一种方法，是根据数学中的图论演变而来。通常所说的图是指由线连接的点的集合。在数学和物流学领域中，网络的研究一般局限于节点间是否有边相连，很少考虑到节点的位置、边的长短和形状等。在拓扑理论中将与节点具体位置和边的具体形态无关的网络性质定义为网络的拓扑性质，相应的结构称为拓扑结构<sup>[30]</sup>。

星形拓扑结构是由一个功能较强的转接中心以及一些各自连到中心的节点组成，转接中心通过所连接的链路转发信息。

复杂网络是比规则网络具有更复杂拓扑特性的网络。具体来讲，可以通过这些属性来进行描述：平均路径长度、度分布、聚类系数、度一度相关性和层次性等。

几种基本的网络拓扑模型有：随机网络、小世界网络、无标度网络等。这些网络的基本统计特性对比分析表如表 1-1 所示（表格中  $N$  表示该网络中的节点数， $K$  表示与该节点相连的所有邻居节点的个数）。

表 1-1 几种典型网络的基本统计特性对比表

网 络		度分布	平均路径长度	聚类系数
规则网络的 三种典型	全局耦合网络	任意两个节点之间 都有边直接相连	在具有相同节 点数的所有网 络中，其平均 路径长度为 1 且最小	在具有相同节 点数的所有网 络中，其聚类 系数为 1 且 最大
	最近邻耦合网络	每个节点只与其周 围的邻居节点相连	对给定的 $K$ 值， 当节点数 $N$ 趋 近于无穷大时， 该网络的平均 路径长度趋近 于无穷大	当 $K$ 值较大 时，其聚类系 数约等于 0.75， 该网络高度 聚类