



北京大学

# 硕士研究生学位论文

题目：

基于复杂网络的

电子商务物流网络

规划与应用

姓 名：

李坤

学 号：

1201220746

院 系：

软件与微电子学院

专 业：

软件工程

研究方向：

电子商务与物流

导师姓名：

李杰 教授

二〇一五 年 七 月

## 版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

## 摘要

随着电子商务的高速发展，人们的购物方式发生了潜移默化的变化，电子商务物流作为支撑电子商务发展的关键环节，业务量直线上升。面对物流业务量的快速增长，传统的物流发展模式已经无法满足电子商务物流的业务需求，特别是对于 C2C 电子商务物流的需求。C2C 电子商务物流网络的优化能够有效的布局网络的物流中心，优化物流节点之间的联系，降低系统运作的成本，提高网络运行的效率。如何有效的开展 C2C 电子商务物流网络优化是电子商务物流企业亟待解决的问题。

本文基于 C2C 电子商务企业全国物流网络优化展开研究规划，主要进行了以下几个方面的工作：第一，阐述了电子商务物流网络和复杂网络近几年的发展现状，及其相互之间的关系；第二，收集了 C2C 电子商务物流 31 天 460 个城市间的物流数据，对数据进行处理分析构建出 C2C 电子商务物流网络的拓扑结构，网络拓扑结构包含 460 个城市节点以及节点之间的相互联系，并按照度的大小对节点分级，实现不同级别的节点承担不同物流使命的目的；第三，基于 C2C 物流网络拓扑结构，综合考虑物流中心选址的各类因素，设计了基于加权度的物流中心选址模型，首先构建了网络节点度的分布模型，其次构建了网络节点介数中心性分布模型，最后将网络节点的度和介数值相结合，构建了网络的加权度物流中心选址方案；第四，论文使用一种改进的复杂网络模型 BA 无标度网络模型，在基于已经构建好的物流中心的基础上对 C2C 电子商务物流网络重构，实现网络的整体优化。论文最后实现了一套 C2C 电子商务物流网络优化决策模型，并通过国内 C2C 电子商务物流数据对本文的优化模型进行了验证，并取得了较好的效果；最后，归纳了本论文的研究成果，指出了当前研究中的不足，并展望了未来的研究方向和内容。

关键词：电子商务物流网络，物流中心，复杂网络，小世界网络，无标度网络



# Planning and Application of E-commerce Logistics System Based on Complex Networks

Li Kun ( Software Engineering )

Directed by Prof. Jie Li

## ABSTRACT

With the high-speed development of the E-commerce, subtle changes have taken place in people's way of shopping. As the core links in E-commerce, logistics business volume has a rapid growth as well. With this rapid growth of logistics business volume, traditional developing model of logistics cannot satisfy the requirement of E-commerce, especially the C2C E-commerce. The optimization of E-commerce logistics network can improve the operation efficiency of the network and lower the operation cost of the network. For the C2C E-commerce logistic, it has become an urgent problem to figure out how to build up an more efficiency logistics network.

This article is focus on the optimization of C2C E-commerce domestic logistics network. The main work in this study is mainly in the following several aspects: First, illustrate the research status of E-commerce logistics network and complex networks at home and abroad. Analyze the relationship between E-commerce logistics network and complex networks. Second, collect C2C E-commerce logistics data, analyze and process the data, then build up the network topology for the C2C E-commerce logistics which contains 460 nodes and 15528 links. Then divide the networks into three different levels by the degree of the nodes, which is intended to recognize the function of the nodes in this logistics network. Third, design the weighed degree logistics center location model based on the C2C logistics network topology and the various influence factors of the logistics center location. Detail model build process is as following: first step, build up the nodes' degree distribution model; Second step, build up nodes' betweenness distribution model; Last, combine the nodes' degree and betweenness to build up the weighed degree logistics center location solution. Forth, use the BA Scale-Free network model to rebuild the C2C E-commerce logistics network based on the existing logistics center. The new network realizes the optimization of the logistics networks. This paper proposes an decision-making model of C2C E-commerce logistics network optimization and verified the practicality of the solution.

At last, we reviewed the research process and achievements, analyzed the disadvantage and look forward to the future research in the optimization of logistics field.

KEY WORDS: E-commerce Logistics Networks, Logistics Center, Complex Networks, Small-World Network, Scale-Free Network

# 目录

<b>第一章 引言</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景及意义	1
1.1.1 现实背景	1
1.1.2 理论背景	3
1.1.3 选题意义	4
1.2 研究目标及内容	5
1.3 论文组织	5
1.4 本章小结	7
<b>第二章 复杂电子商务物流网络研究综述</b>	<b>9</b>
2.1 电子商务物流网络的内涵	9
2.1.1 电子商务物流网络的定义	9
2.1.2 电子商务物流网络的功能要素及其实现目标	9
2.1.3 电子商务物流网络的特征	10
2.2 电子商务物流网络的复杂性	10
2.3 电子商务物流网络复杂网络方法分析	11
2.4 本章小结	12
<b>第三章 复杂网络理论及其应用</b>	<b>13</b>
3.1 复杂网络基本理论	13
3.1.1 复杂网络的基本概念	13
3.1.2 复杂网络的统计特征	13
3.2 经典复杂网络理论模型	17
3.2.1 小世界网络模型	17
3.2.2 无标度网络模型	21
3.2.3 局域世界演化网络模型	23
3.3 复杂网络研究现状	23
3.4 本章小结	25
<b>第四章 电子商务物流网络优化方法</b>	<b>27</b>
4.1 物流中心选址方法	27
4.1.1 方法的描述	27
4.1.2 方法的改进	30

4.1.3 评价指标 .....	31
4.2 基于无标度特性的电子商务物流网络重构方法 .....	32
4.2.1 无标物网络模型 .....	32
4.2.2 无标度网络模型仿真测试 .....	33
4.3 物流中心功能设计 .....	36
4.4 本章小结 .....	38
<b>第五章 电子商务物流网络规划应用案例</b> .....	<b>41</b>
5.1 数据收集与描述 .....	41
5.2 数据处理 .....	41
5.2.1 流量数据网络化 .....	41
5.2.2 电子商务物流网络数据分级 .....	43
5.2.3 数据分析假设及参数 .....	45
5.3 电子商务物流网络复杂性分析 .....	45
5.4 电子商务物流网络中心选址 .....	50
5.4.1 基于度的物流中心选址 .....	50
5.4.2 基于介数中心的物流中心选址 .....	51
5.4.3 基于加权度的物流中心选址 .....	53
5.5 基于无标度的电子商务物流配送网络重建 .....	54
5.5.1 基于加权度的物流中心选址结果的无标度网络重构 .....	54
5.5.2 重构网络综合对比 .....	57
5.6 本章小结 .....	63
<b>第六章 结论及展望</b> .....	<b>65</b>
6.1 总结 .....	65
6.2 展望 .....	65
<b>参考文献</b> .....	<b>67</b>
<b>致谢</b> .....	<b>69</b>
<b>北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明</b> .....	<b>70</b>



## 图件目录

图 1.1	中国 C2C 市场年度交易额.....	2
图 1.2	中国年度物流包裹增长及淘宝占比.....	2
图 1.3	各国家物流费用 GDP 占比.....	3
图 1.4	主要研究内容.....	7
图 3.1	不同类型网络图.....	13
图 3.2	以 $i$ 为顶点的三元组的两种可能.....	14
图 3.3	网络度的概率分布图.....	15
图 3.4	WS Small-World 模型构造算法 .....	17
图 3.5	$p=0$ 的完全随机网络模型 .....	18
图 3.6	$p=0.1$ 的 WS Small-World 网络模型 .....	18
图 3.7	$p=1$ 的完全规则网络模型 .....	19
图 3.8	WS Small-world 模型聚类系数和平均路径长度随重连概率 $p$ 的变化关系 .	19
图 3.9	NW Small-World 模型构造算法 .....	20
图 3.10	BA Scale-Free 网络模型构造算法 .....	21
图 3.11	适应度模型构造算法.....	22
图 3.12	局域世界模型构造算法.....	23
图 4.1	基于度的物流中心选址算法.....	28
图 4.2	介数中心算法.....	29
图 4.3	基于加权度的物流中心选址算法.....	31
图 4.4	无标度网络生成过程.....	33
图 4.5	BA 无标度网络模型 .....	34
图 4.6	BA 无标度网络图 .....	34
图 4.7	BA 无标度网络节点度的分布情况 .....	35
图 4.8	BA Scale-Free 网络节点概率分布情况 .....	35

图 4.9	BA 无标度网络节点概率分布拟合情况 .....	36
图 4.10	物流中心功能设计图 .....	38
图 5.1	电子商务物流网络模型 .....	42
图 5.2	度大于中层网络平均度 $\langle k \rangle = 165.0018$ 的网络图形 .....	43
图 5.3	度小于中层网络平均度 $\langle k \rangle = 165.0018$ 的网络图形 .....	44
图 5.4	度小于原始网络平均度 $\langle k \rangle = 33.7565$ 的网络图形 .....	44
图 5.5	物流网络节点连接图 .....	46
图 5.6	网络中个节点中度的大小分布图 .....	47
图 5.7	网络中各节点中度的大小分布图 .....	48
图 5.8	网络中各节点中度的大小分布概率拟合曲线 .....	49
图 5.9	节点介数分布图 .....	51
图 5.10	节点加权度的分布柱状图 .....	53
图 5.11	重构的无标度网络 .....	55
图 5.12	重构 BA 无标度物流网络 .....	55
图 5.13	重构网络度的概率分布图 .....	56
图 5.14	重构网络度的概率分布拟合图 .....	56
图 5.15	基于度物流中心基础上重构网络图 .....	58
图 5.16	基于度中心重构节点度的概率分布图 .....	59
图 5.17	基于度中心重构节点度的概率分布拟合曲线 .....	59
图 5.18	基于介数选址结果重构网络图 .....	60
图 5.19	基于介数选址结果重构节点度的概率分布图 .....	60
图 5.20	基于介数选址结果重构节点度的概率分布拟合曲线 .....	61

## 表格目录

表 4.1	电子商务物流中心功能分析 .....	37
表 5.1	电子商务物流数据信息 .....	41

表 5.2	电子商务物流网络特征.....	49
表 5.3	基于节点度的网络中心节点.....	50
表 5.4	基于介数的物流中心选址结果.....	52
表 5.5	基于度的物流中心和基于介数的物流中心交集结果.....	52
表 5.6	基于加权度的物流中心选址结果.....	54
表 5.7	重构前后网络对比.....	57
表 5.8	不同类型重构网络特性比较.....	57
表 5.9	经济变量及其表达意义.....	61
表 5.10	优化后网络特性值.....	62
表 5.11	三种类型重构网络经济特性.....	62



## 第一章 引言

电子商务的引进和发展成为我国市场经济活跃发展的动力和桥梁。物流作为电子商务发展的核心环节也从不温不火的时期跨步成为了朝阳产业，为企业不断贡献作为第三利润。

### 1.1 选题背景及意义

#### 1.1.1 现实背景

随着信息技术的不断进步，各种全新的科学技术应运而生，人们的生活也以全新的方式追捧者全新的科技带给他们的愉悦、方便和快捷。小车推磨的时代已然过去，走进了以信息技术为支撑的全新时代已经到来。能否以最快的步伐去适应这个复杂多变的世界不仅仅是个人生存的途径，更是企业能够在激烈的竞争之中处于不败之地的唯一途径。电子商务作为改变人们购物习惯的新生技术，用短短 10 年的时间渗透到现代人类活动的各个方面。电子商务不仅改变了传统的物品交易的方式，而且彻底的改变了商品流通的方式和速度。

电子商务平台决定了商品流通的方式，物流决定了商品流通的速度。随着人们生活水平的提高和电子商务的发展，物流的流量越来越大，对物流服务的要求也越来越高。人们再也不能满足于传统的物流服务模式：在被指定的时间，被指定的地点用被指定的方式来领取物品。随着信息技术的发展和国家基础设施的完善，物流行业也开始慢慢的认识到将传统物流管理的方式应用到电子商务物流中是低效率的，也是不现实的。电子商务物流在物流领域的比重呈指数增长的现象促使电子商务物流行业的产生，它们以崭新的姿态存在于消费者和消费者，消费者和生产者，消费者和分销商，分销商和生产者之间。

物流水平体现了一个国家的活力。物流水平高，商品流通速度快，人们对于物流服务的抱怨越少、幸福指数越高，国家发展愈有朝气。反之，人们幸福指数低，国家发展速度缓慢。我国物流作为一个单独的行业出现在二十世纪七八十年代，发展时间短，发展速度缓慢，同时受到国家基础设施建设的限制，导致我国物流行业与世界物流水平相差甚远。但是，电子商务的出现使得我国物流行业蓬勃发展，一时间各种物流服务企业云集，尤其是 3PL 和 4PL 都想在这个充满机遇的行业分得一杯羹。面对激烈的行业竞争，物流企业如何应对电子商务所带来的挑战，已然成为目前物流企业面临的难题。

虽然物流行业服务企业云集，但是目前仍然是制约着电子商务发展的瓶颈。随着电子商务的发展，电子商务对物流也产生了新的需求：所有的物流企业需要严格按照订单的要求，在特定的时间特定地点用最真诚的服务将正确的商品交给正确的人。面对新形势下新的需求，物流企业的服务模式也在不断的改进。但是由于物流网络的复杂性，导致物流网络一直处于混乱的状态，企业在纷乱复杂的网络中艰难的探索着。下面是对电子商务环境进行的市场调查数据，首先是电子商务市场规模历年数据图：

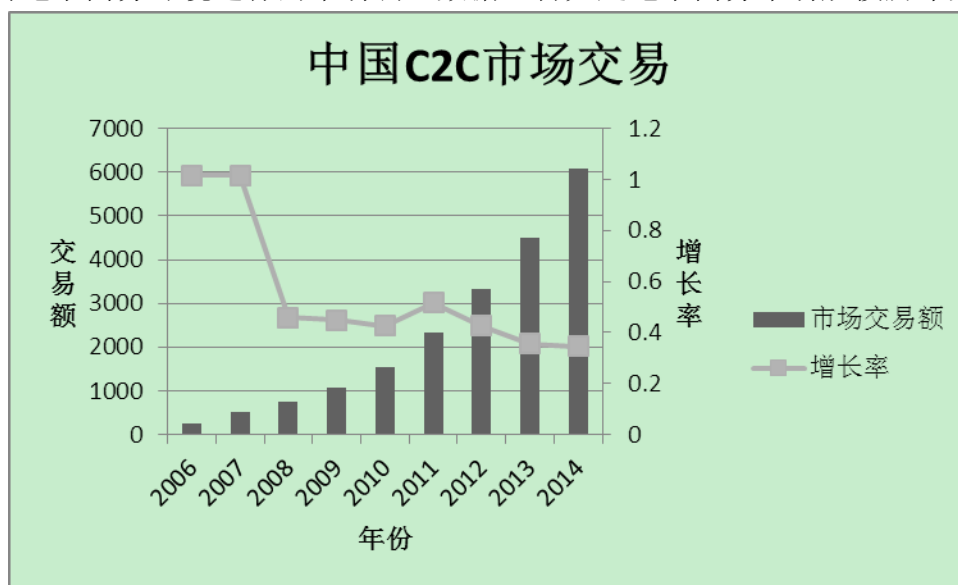


图 1.1 中国 C2C 市场年度交易额

图 1.1 说明电商 C2C 市场规模逐年扩大，虽然增长率出现下降的趋势但仍然保持较高的增长。从增长趋势来看电子商务市场正处在成长期，未来具有很大的发展空间。在电子商务高速发展的同时，中国的物流市场发展如下图：

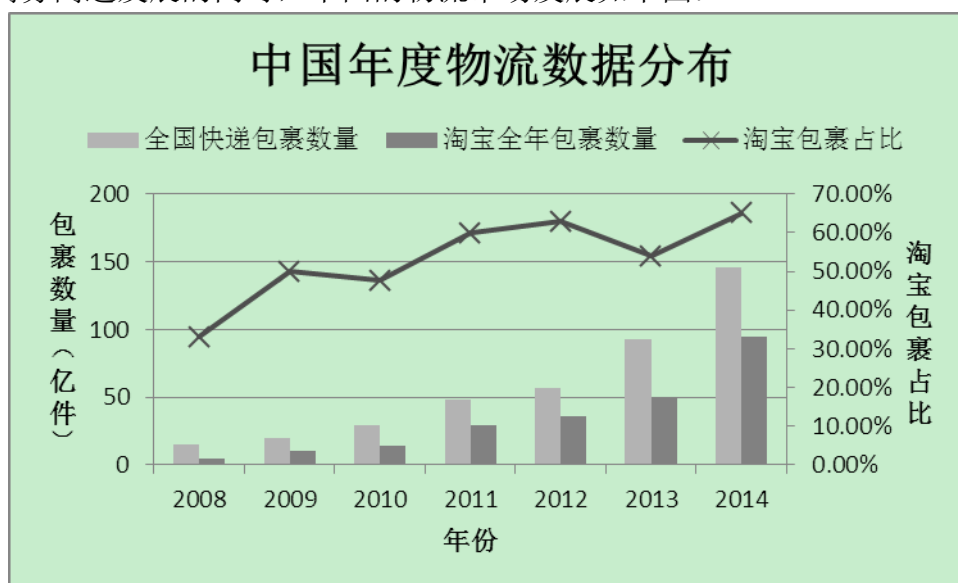


图 1.2 中国年度物流包裹量及淘宝包裹占比

图 1.2 中红色代表 2008 年到 2014 年中国每年产生的包裹量，绿色的代表了 2008 年到 2014 年仅淘宝产生的包裹量，紫色的折线代表了 2008 年到 2014 年淘宝包裹在总包裹中的占比。根据全国包裹量这七年的发展趋势可以看出中国物流业正处于成长期，根据淘宝包裹这七年的发展趋势及其占比来看，淘宝的业务量越来越多其对物流业的贡献越发重要，去年占比高达 65%。电子商务的高速发展为物流行业带来了宝贵的机会，同时也将带给物流行业巨大的挑战。面对电子商务这把双刃剑，我国物流行业的发展却显得步履蹒跚，下图是 2014 年各大国家物流费用在 GDP 中的占比：

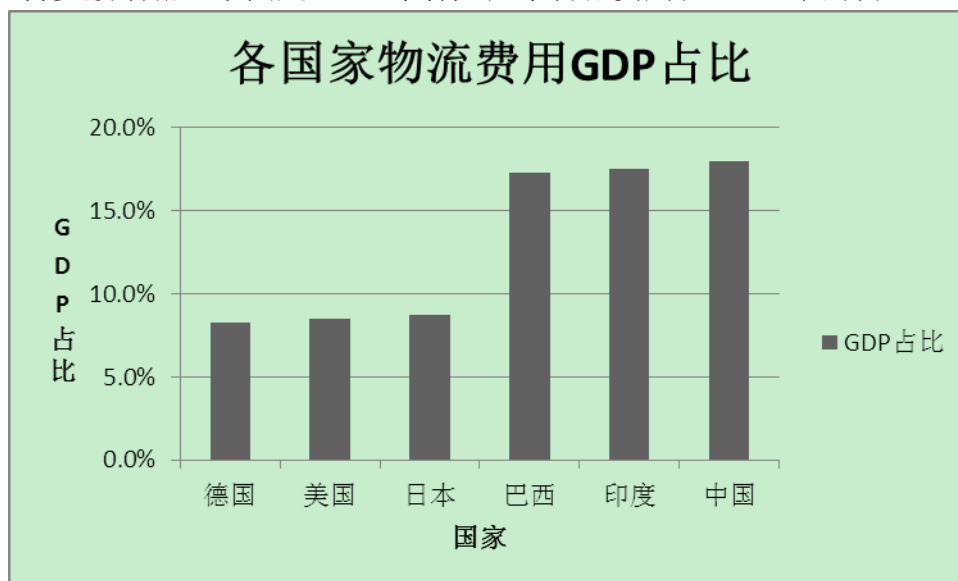


图 1.3 各国家物流费用 GDP 占比

图 1.3 显示出的结果说明了我国的物流费用 GDP 占比远远高于德国、美国和日本，与同水平国家相比也没有优势。据统计，中国电子商务的发展速度是 200%到 300%，但是我国物流的发展速度只有 40%。这两者之间的矛盾导致了我国电子商务物流服务水平低于世界平均水平，物流效率也在平均水平徘徊。

### 1.1.2 理论背景

由于我国特殊的国情，物流作为独立的方向被研究在 20 世纪 80 年代。当提出第三利润源的概念，学术界才慢慢的重视物流的发展。随着电子信息技术的快速发展，一些 JIT、TOC 等先进的物流理念也成为物流业研究的重点。当企业全面推进 ERP 之后，对于物流的管理更加的高效快捷。当物流的各个环节被供应链管理系统联系在一起以后，学者们更加看重物流中心的选择问题，将物流的时效性和交通便利性作为考虑因素，以降低物流成本作为衡量标准进行物流中心选址的研究。通过对物流中心选址的研究提出了层次分析法、遗传算法、BP 神经网络算法、蚁群优化算法以及双层规划模型等方法。这些方法为物流中心选址提供了参考和思路，同时一些学者研究了配

送运输方面的方法：两阶段改进法、分级聚类法、扫描算法、模拟退火算法、几何式启发算法以及为半开放的路径优化问题建立的 0-1 规划模型等等。这些研究为物流网络的发展提供了参考，并推动物流网络的研究快速发展。

以往对于物流网络的研究中对物流网络中的经济因素、服务因素以及环境因素进行了不同程度的定性或者定量的分析，但是没有从物流网络的形成的根源，或者说是物流产生的源泉去研究物流网络这个复杂网络的运作模式，并从中发现提高物流网络效率、降低物流成本。本文通过对物流网络的需求量，定量和定性分析相结合的方法挖掘物流网络中存在的一些模式和规律，为物流网络服务企业决策提供参考或依据。

目前，复杂网络在自然科学领域、医学领域、化学领域、电力系统、生物学领域等领域都有重大的突破。但是由于物流网络的复杂性和特殊性，目前复杂网络在物流的应用还没有取得突破性的进展。就物流网络呈现出来的复杂性特征，本文将物流网络和复杂网络相结合，探索出基于复杂网络的电子商务物流网中心选址模型及物流网络规划改进方案，为物流网络的进一步研究提供参考和思路。

目前对于物流网络优化建模的研究很多，有合理的理论基础作为支撑。但是大多数的理论研究都只是建立在理论模型上，并没有将其与实际的物流网络相结合来测试其可操作性。针对此，本文对电子商务数据进行复杂物流网络系统建模与仿真，使用定量分析和定性分析相结合的方法为物流系统决策提供指导和参考。

### 1.1.3 选题意义

物流作为实现商品价值的重要因素，作为实现电子商务的重要环节，在人们生活中扮演着重要的角色，也是现代社会运行必不可少的活动之一。而物流配送网络作为物流实现物流价值的必不可少的组成部分，具有重要的研究价值和意义。物流配送网络是实现商品价值的脉络，而物流的脉络能否畅行无阻是物流系统能够健康快速发展的基础。物流网络表现出来的复杂性，尤其是电子商务发展起来以后，物流网络的复杂性更加明显。

物流网络的复杂性表现在它节点的规模以及节点之间物流路线中环路众多、交叉纷杂。从物流网络的内部相互作用来看，节点之间的商流、信息流、资金流和物流这四大流的交换也很复杂。而且物流网络是一个很不稳定的网络，它会随着时间的变化、基础设施的发展以及市场需求的变化而变化。也就是说物流网络本身具有的开放性导致了物流网络的不稳定性，同时其本身具有的复杂性导致了对于物流网络的研究本身成为了 NP 问题。物流网络本身具备小世界和无标度的特性，而复杂网络理论中对于小世界和无标度的研究相对成熟，这就为复杂网络与物流网络的结合提供了思路。

目前，国内对于物流网络的复杂性研究相较于其他方面比较少，理论基础研究比较薄弱。复杂网络与物流网络相结合的思路来规划物流网络可以提高物流运作的效率，



提高物流服务水平。

## 1.2 研究目标及内容

物流作为实现电子商务发展的重要组成部分，一直以来是商务发展的瓶颈所在，电子商务也没有避免物流对其发展的制约。要想进一步发展电子商务，解决物流问题是关键。而物流中心的选择和物流配送网络的优化对解决物流效率至关重要，本文针对电子商务物流网络的新的特征：需求量大、批量小、地点分散、时间要求严格等特点，使用复杂网络理论对物流网络进行建模仿真，并挖掘电子商务物流网络的物流中心和优化物流网络的连接。

复杂网络理论的出现为人们理解真实世界提供了全新的研究思路和研究方法，包含了实证、建模仿真、动力学行为及应用研究<sup>[1]</sup>。复杂物流网络系统理论的研究表明：无论从物流系统中的实体之间的关系表现出来的复杂性，还是从物流系统网络配送形态所表现出来的复杂性都促成了物流配送网络是一个典型的复杂网络系统。

本文研究了复杂网络的相关理论：小世界网络模型、无标度网络模型、局域世界演化网络模型、模块性与等级网络以及复杂网络的自相似性。同时研究了复杂物流系统的相关理论：复杂自适应系统（CAS）在物流领域的应用、无标度的物流配送网络、SIR 模型的物流配送网络、多 Agent 的物流仿真方法、系统动力学在复杂物流系统研究中的应用理论。然后对本文收集到的 31 天内某大型电子商务网站的 460 个城市间的物流信息数据的度、平均路径长度、聚类系数、平均路径长度和度的分布进行统计分析。通过对度的分布规律和分布曲线进行拟合，发现本文数据度分布曲线符合幂律分布，综合上述分析证明了本文的物流网络具有无标度特性和小世界的特性。根据度、介数选出备选物流中心，综合节点的度和介数中心性提出了本文物流中心的选择方案-加权度最大物流中心选址方案，最后将此电子商务物流网络的物流中心界定为 35 个城市。根据物流网络的无标度特性在已经确定的 35 个物流中心，对电子商务物流网络进行重构，找到平均路径更短的网络规划方案。最后，提出有物流中心和物流网络组成的一整套物流规划方案。

通过本文的研究，丰富复杂物流网络理论的研究内容，并为以后的电子商务物流网络规划与应用提供思路和模型仿真方法的参考。

## 1.3 论文组织

第一章介绍了本文的选题背景和意义。近年来，电子商务风靡全球，并以直线上升的用户趋势侵蚀着传统的交易市场。现代物流面对电子商务新的需求亟待重组，复杂网络理论的发展和成功应用为电子商务物流的重组提供了理论基础和研究动力。复

杂网络理论在电子商务物流中的应用，为电子商务物流网络的研究提供了新的方向和内容。

第二章介绍了电子商务物流网络的复杂性。从电子商务对物流的需求特征挖掘电子商务物流网络的发展方向：非线性、网络性、分形性、初值敏感性、自适应性和时间与空间相统一。新时代物流的这些特性导致了电子商务物流网络的复杂性和不确定性，同时为物流网络的研究提出了挑战。复杂网络理论的出现为电子商务对物流提出的挑战提供了研究思路和理论基础。

第三章介绍了支撑本文研究的理论基础复杂网络理论的相关知识。小世界理论和无标度理论是复杂网络研究领域两项代表理论，基于此产生了改进的小世界理论和无标度理论的演化理论。

第四章在复杂网络理论和电子商务物流网络理论的基础上，提出本文物流网络的分析方法。电子商务物流网络是一个复杂的网络系统，具有一定的小世界特性和明显的无标度的特性，有幂律衰减的度分布。节点度的大小可以作为物流中心选择的依据之一。分别根据节点的度和介数中心性找到关键节点，并提出本文基于加权度的物流中心选址方案，基于选择出来的物流中心使用无标度的方法重构物流网络，重新计算网络节点之间的度及度的分布、聚类系数和平均路径长度，并比较三种物流规划方案。

第五章根据上述研究方法对收集到的某电子商务网站的物流流量数据进行分析论证，找到现实物流网络的特征，并根据这些特征提供物流中心点选择的依据，找到物流中心点。由于电子商务物流的度的分布服从幂律分布，而且聚类系数较高、平均路径长度短，证明了电子商务物流的无标度特性。根据无标度网络的形成特点，对网络中的边进行优化，规划出电子商务物流网络的一套配送方案。

第六章电子商务物流网络与复杂网络的结合总结和展望。提出本文研究过程中未能解决的问题，以及以后需要进一步验证的内容。下图展示了本文的结构和联系：

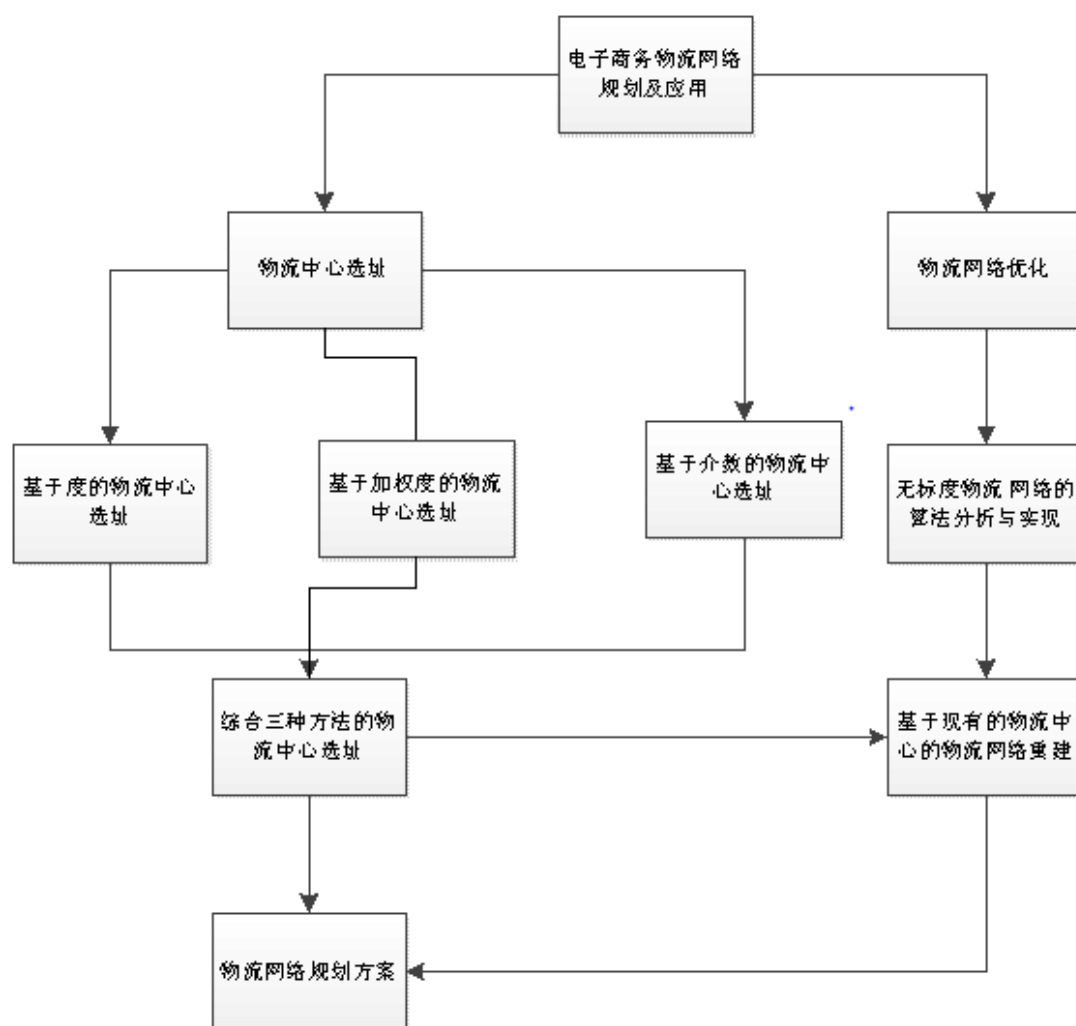


图 1.4 主要研究内容

## 1.4 本章小结

通过对我国现代物流水平以及由于电子商务的发展对现代物流提出的新的挑战的研究,发现目前我国物流的发展无法满足电子商务发展的步伐,并且是电子商务发展道路上的瓶颈。针对这个问题,本文通过对大量文献中关于物流网络和复杂网络的研究中发现,电子商务物流网络具备复杂网络的特性,复杂网络理论可以作为研究物流网络并优化物流网络的理论基础。并在此理论上进行改进使得复杂网络相关理论可以在物流网络中进行实证,对电子商务物流网络进行优化建模并对物流中心的选址进行建模仿真。



## 第二章 复杂电子商务物流网络研究综述

### 2.1 电子商务物流网络的内涵

电子商务物流顾名思义，由电子商务活动引发的物流活动。电子商务改变了商务的运作模式，使得信息流、商流、资金流的实现电子化、透明化、虚拟化。同时电子商务的产生缩短了商业活动的周期、提高了商务活动的运作效率，缩短了资金回笼的周期。物流作为支撑电子商务活动的四大流之一，完成了商品交付以及售后服务的环节。电子商务物流具备传统物流的流程，并在传统物流的基础上增加了新的要求和环节。本节从电子商务物流网络的定义、新的特征对揭示其内涵，为研究电子商务物流奠定理论基础。

#### 2.1.1 电子商务物流网络的定义

国家统计局在《2009 年国民经济和社会发展统计公报》中对电子商务物流网络的定义为：物流服务提供商通过以互联网为核心的现代信息通信技术在物流业务活动中的应用，以更好地实现“以客户为中心”的物流服务目标，并通过物流信息在供应链合作伙伴之间的实时共享，致力于实现供应链中物流管理效率和效益的最大化<sup>[2]</sup>。在此基础上本文提出了对电子商务物流的概念。

电子商务物流是在电子商务爆炸式发展所引发的传统物流必须改变其本来的运作模式，而产生的依托于供应链管理信息系统的，满足具有“种类多、数量少、批次多、周期短”<sup>[3]</sup>的物流要求的，实现商品交易的物品时间和空间的流动过程。

电子商务物流网络就是由参与电子商务物流过程所有实体，以及实体之间的相互联系和相互依赖组成的复杂的、动态的、开放的、层次化的系统。

#### 2.1.2 电子商务物流网络的功能要素及其实现目标

电子商务物流网络的功能要素是完成商务流中每笔订单必不可少的环节，它们联合在一起让物流网络成为一个系统，各个部分相互协作、互相支撑使物流系统高效的运作。普遍认为，电子商务物流网络功能要素有物流信息平台、运输、仓储、增值，其中增值功能中又包括了代收款、产品打包处理、装车传送、流通加工、次品回收、售后服务以及其他自身创造的功能。下图清晰的展示了电子商务物流网络各个功能要素之间的相互联系及其在电子商务物流环节所在的位置和发挥的作用。功能要素之间的相互协作共同完成了电子商务物流系统的功能，要素之间的协作越有效率，物流的运作更加高效可靠。

电子商务物流系统的存在以及各个功能要素协调有序的进行联系，都是为了实现

物流系统的目标：服务目标，时间目标，节省目标，规模优化目标，库存调整目标。

物流属于服务行业，提供符合客户需求的服务是物流网络要实现的基本目的。树立“服务第一，利润第二”的目标是每一个物流企业应该遵循的基础目标，其他的目标都建立在这个目标的基础之上。及时、快捷、准时的目标是高速发展的信息社会的必然要求，也是符合马克思资本论的要求：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>[4]</sup>。节约的目标是目前物流企业追求“第三利润源泉”的最有效、最直接的手段，也是最受企业欢迎的手段之一。规模经济在制造业非常明显，电子商务物流在我国发展还不是很成熟，规模经济在此行业还尚不明显。库存调节的目标是第三利润源泉之一，国内外在库存管理方面发展的比较成熟，比较有效的方法有：JIT、TOC、OPT等。

### 2.1.3 电子商务物流网络的特征

(1) 客观性。电子商务物流网络是客观存在的，只要存在电子商务、只要有商务活动必然就会产生物流。要实现物流活动，物流网络是必然存在的而且物流网络的好坏会影响电子商务的商务活动的活跃程度。发掘电子商务物流网络的优越性，是电子商务物流网络研究的重要方向。

(2) 跨度大。这个特征在电子商务物流中主要表现在两个方面：地域跨度大、时间跨度大。电子商务的商务活动具有全球范围性，物流作为电子商务的重要支撑必须实现全球范围内的商务目标。地域跨度大却没有放宽对送达时间的要求，对于物流行业来说是艰难的挑战。信息技术为解决这一挑战提供了支撑，高效的管理为解决这个问题的主要手段。

(3) 开放性。电子商务物流网络是动态开放的，随着时间的推移会有新的节点和联系的产生，同时也会有新的节点和联系退出，这增加了物流网络研究的困难性。说明了复杂性是物流网络的本性，要研究物流网络首先要考虑其复杂性。

(4) 层次性。物流网络具有可分离的特性，可以将物流网络分层次，对不同的层次进行规划，找到可以使物流网络达到最优的层次优化组合。如物流中心的规划作为一个层次、配送路线的规划作为一个层次等。

(5) 复杂性。物流网络要素本身就是复杂的，物流运行对象“物”包括了全部社会物质资源<sup>[5]</sup>。而且，物流网络中要素间的相互关系也不是简单的一对一或者一对多的关系，更多的是多对多的而且是双向的，使物流网络更加的复杂。

## 2.2 电子商务物流网络的复杂性

大量的资料通过实证研究显示，电子商务物流网络具有小世界和无标度的特性。

小世界和无标度特性是复杂网络的两个基本特征，说明电子商务物流网络是一个复杂的网络。

从电子商务物流运作的过程来看，其设计的参与实体包括了显性实体和隐性实体两部分。显性实体主要包括供应商（卖家）、消费者（买家）、物流配送中心等，隐性实体主要包括电子商务平台、物流信息平台、支付平台等。供应商分布在全国各地分销商品，消费者定位到了所有有需求并在电子商务平台提交订单的买家。物流配送中心提供了商品的包装、快件的分发、车辆路径的安排等服务，因此物流中心的选址尤为重要。电子商务平台为商品的流动提供了交易的途径，同时与物流信息平台连接方便消费者查看购买物品的物流信息。物流信息平台即为物流服务提供商管理物流提供了电子化的管理方案，也为消费者追踪商品提供了保障。支付平台为资金的流动提供了安全的保证，是物流产生的先决条件和物流完成的最终目标。显性实体间、隐性实体间以及显性实体和隐性实体间既是相互联系的又是相互独立的，它们之间的这种关系使得电子商务物流网络的管理和运作变得复杂多变。

物流网络本身就是一个充满联系的、动态的复杂网络，管理好这个复杂的物流网络最重要的就是要规划好电子商务物流网络的各个环节。同时，如果某个物流提供商退出了物流行业，网络中只是少了某个节点，由于网络的复杂性导致这个物流服务商的退出对整个网络的影响几乎为 0，这就是物流网络的鲁棒性。

## 2.3 电子商务物流网络复杂网络方法分析

电子商务物流网络的研究方法很多，在众多的研究方法中有关复杂网络的研究方法最接近真实的物流网络。尤其是复杂网络中动态理论的部分，物流网络中的节点是实时变化的，动态对物流网络进行系统的规划能够更加真实的反应物流系统。复杂网络在物流网络规划中的方法主要包括：复杂自适应系统（CAS）、无标度网络、SIR 模型、多 Agent 仿真、系统动力学等。

复杂自适应系统理论是复杂性理论研究中的一个重要的方面，它以用进化论的观点去理解复杂系统，形成了比较完整的理论体系。CAS 理论具有 7 个基本点：聚集、标识、非线性、流、多样性、内部模型、积木[2]。CAS 理论在物流领域研究较少，其中 Petri 网络是 CAS 理论应用比较成功的一种用于供应链配送系统的网络模型。Petri 网络方法建立了供应链配送系统多主体动态模型，实现了对供应链配送系统的定量与定性的结合分析。

无标度网络是介于规则网络和随机网络之间的一种网络，是复杂网络的基本特征之一。Meepetchdee 和 Shah<sup>[6]</sup>通过对网络增长性、鲁棒性和效率进行研究仿真，找到优化网络的解决方案。中国海洋大学的高义佳<sup>[7]</sup>通过对复杂网络和冷链物流网络的研究构

建了改进的 BA 无标度网络模型, 该模型具有聚类系数可调的特性, 避免了传统建模缺乏并行性和局部性的缺点。张旭凤, 张永安<sup>[8]</sup>通过对物流配送网络建立无标度模型, 构建客户生成模型, 从而建立了一级、二级、三级物流配送网络, 为有效管理物流网络具有重要的参考价值。

SIR 模型最早用来描述在伦敦盛行的黑死病的传播规律, 在疾病传播方面应用很成功。随后, SIR 模型被广泛应用到医学领域、舆论传播、经济等方面, 而且非常的成功。张旭凤<sup>[9]</sup>通过对物流配送网络节点服务饱和度建立无标度网络的 SIR 模型发现要提高配送节点客户饱和度, 提高主要客户数量是有效手段之一。

多 Agent 物流仿真是指将复杂自适应系统中的适应性主题抽象成不同类型的 Agent, 再对构成 CAS 的每个 Agent 进行分析, 最终达到系统分析的目的。多 Agent 物流仿真主要应用在物流调度、物流配送中心选址、供应链运作等方向。Nina M. Berry<sup>[10]</sup>设计开发了一套混合 Multi-Agent 架构的 Multi-Agent 系统, 实现了物流车间的管控。DEGANO<sup>[11]</sup>使用码头数据建立了多 Agent 监控仿真以及 Petri 网络的设备故障判断和作业恢复模型。北京交通大学的苏衍奎<sup>[12]</sup>分析了 NJ 钢铁物流网络的多 Agent 实现条件, 详细划分了系统中的 Agent 成员, 并通过 VC 实现了系统功能的设计。

系统动力学由 MIT 的 Forrester 教授创立, 以反馈控制理论为基础定性结合定量分析经济社会运行系统的系统分析方法。系统动力学在物流方面主要应用在库存控制、订货策略、物流预测等方面。Sterman<sup>[13]</sup>构建了包含系统物理结构和决策规划两部分的系统动力学模型, 提供多种不同的库存管理决策情景。杨阳, 刘志学<sup>[14]</sup>从牛鞭效应、供应商生产率和库存水平三个方面进行系统动力学分析, 提出了库存管理策略, 改善了供应链的整体性能。吉林大学的付晶<sup>[15]</sup>对粮食物流需求进行系统动力学研究, 通过对预测方法进行比较, 选择最优的方法预测了 2009-2013 年的粮食物流需求量。

通过对电子商务物流复杂网络研究方法分析说明, 物流网络是动态、开放、复杂的。

## 2.4 本章小结

本章阐述了电子商务物流网络的内涵、复杂性以及相关的复杂网络在物流网络中的应用方法, 以及近些年复杂网络在电子商务物流行业的研究进展。物流网络由于其本身的复杂性, 导致了网络具有很强的鲁棒性和一定程度的脆弱性。尽量避免物流网络的脆弱性需要慎重选择网络的物流中心以及其功能的设计, 充分利用网络的鲁棒性对网络联系整体规划, 使得整个网络更加高效和低成本运行。



## 第三章 复杂网络理论及其应用

### 3.1 复杂网络基本理论

#### 3.1.1 复杂网络的基本概念

网络是一个由多个节点组成的集合，节点之间有一定的连接，节点之间随机的连接和动态变化是复杂网络的形成根本原因。要研究复杂网络，必须要对复杂网络可视化，复杂网络的图表示为复杂网络的研究提供了便利和可能。

任何一个具体的网络都可以在一定的规则和范围内抽象成一个由点集合边集组成的网络拓扑图  $G = (V, E)$ 。网络按照其中粒子的流动方向可以区分为有向网络和无向网络两种类型，其中没有方向网络是指当网络中的任意点对  $(i, j)$  与  $(j, i)$  表示相同的连线，有向网络则是任意点对  $(i, j)$  与  $(j, i)$  表示不同的连线。按照网络中的连接边是否有权重可以将网络划分为加权网络和无权网络：如果为网络中的每条边增加相应的权值，则称该网络为带权重的网络，否则称为不带权重的网络。一般在分析网络问题时，将不带权重的网络中节点之间的相互连线的权值看成是 1 的等权网络，为问题的量化分析提供便利。而且，网络中的节点可以是多种类型的，也可以是单一类型的。下图给出了几种不同类型的网络示例：

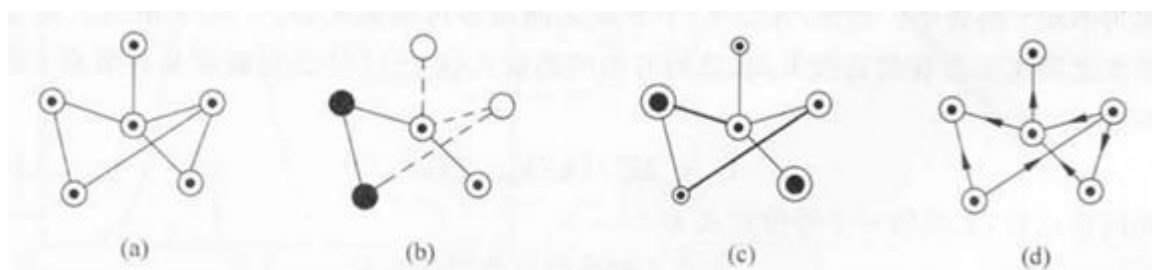


图 3.1 不同类型网络图（取自文献<sup>[16]</sup>）

- (a)单一类型节点和边的无向网络图 (b)不同类型节点和边的无向网络图  
(c)节点和边权重变化的无向网络图 (d)有向网络图

#### 3.1.2 复杂网络的统计特征

复杂网络的统计特征主要有三个：平均路径长度、聚类系数和度与度的分布。平均路径长度用来测度网络节点之间的联系长度，聚类系数用来测度某节点所在网络的聚集程度，度与度的分布用来测度网络节点之间联系的亲密程度。

##### (1) 平均路径长度。

网络中任取两个节点  $i$  和  $j$ ， $i$  和  $j$  之间的最短距离指的是从节点  $i$  到节点  $j$  的所经过的最少的边数。在这些最短距离中最大的那两个节点之间的距离称为网络的直径，

用  $D$  表示，数学表达如下：

$$D = \max_{i \rightarrow j} d_{ij} \quad \text{式(3.1)}$$

网络的平均路径长度  $L$  定义为任意两个节点之间距离的平均值，即：

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2} N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad \text{式(3.2)}$$

其中  $N$  为网络的节点总数。网络的平均路径长度是指网络的特征路径长度，上面的公式中包含了节点到节点自身的距离。如果为了精确不想加入节点自身的距离，平均路径长度如下表达：

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2} N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad \text{式(3.3)}$$

在实际的应用当中，由于网络节点的基数很大，这个误差完全在允许的范围之内，可以忽略不计。

大量的研究证明，即使是网络节点众多的复杂网络，网络的平均路径长度很小。详细的说，一个具有小世界效应的网络，如果网络节点的平均度  $\langle k \rangle$  是一个常量，平均路径长度的  $L$  的增长速度最大正比于网络规模  $N$  的对数。

## (2) 聚类系数。

在某个人的朋友关系网络当中，这个人的某两个朋友很可能彼此也是朋友的关系，这种属性称为网络聚类特性。一个网络中一个节点  $i$  与  $k$  个其他的节点相联系，那么这  $k$  个其他的节点即节点  $i$  的邻居节点。显而易见，在这  $k_i$  个节点之间最多产生  $k_i(k_i-1)/2$  条边，而实际存在于着  $k_i$  个节点之间的边数为  $E_i$ 。聚类系数  $C_i$  就是节点  $i$  实际存在的边数和节点  $i$  在网络中所有可能存在的边数的比值，即

$$C_i = 2E_i / (k_i(k_i-1)) \quad \text{式(3.4)}$$

从几何角度看，公式 (3.4) 的等价描述如下：

$$C_i = \frac{\text{与节点 } i \text{ 相连的三角形的数量}}{\text{与节点 } i \text{ 相连的三元组的数量}} \quad \text{式(3.5)}$$

其中，公式 (3.5) 的分母表示的是包含节点  $i$  在内的三个节点，而且至少存在与节点  $i$  相连的两条边。下图形象的表达了这一点：

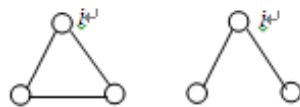


图 3.2 以  $i$  为顶点的三元组的两种可能

整个网络的聚类系数  $C$  就是将所有节点  $i$  的聚类系数值  $C_i$  求平均值。显而易见， $C$  是在 0 到 1 之间变化的。 $C=0$  和  $C=1$  是网络的两个极端，当  $C=0$  且当且仅当多有的节点为孤立节点，也就是网络当中没有相互连接的边；当  $C=1$  时，网络是全局耦合的，也就是网络当中的节点两两相连。对于含有  $N$  个节点的完全随机网络，当  $N$  趋近与无穷时， $C=O(N^{-1})$ 。实证研究表明，很多规模巨大的现实网络聚类效应都很明显，聚类系数远远小于 1 但是却比  $O(N^{-1})$  要大很多。这就表明，实际生活当中的复杂网络不是完全随机的网络，而是在一定程度上具有类似于社会关系网络的特性：物以类聚，人以群分。

### (3) 度和度的分布

度描述的是网络当中单独的某个节点的属性，虽然概念简单但是对于研究复杂网络的特性十分重要。节点  $i$  的度  $k_i$  是指与该节点相连的所有其他的节点的数量。在有向网络当中，节点的度分为出度和入度。顾名思义，节点的出度指的是由该节点指向其他节点的边数，入度则是指由其他节点指向该节点的边数。直观上看，节点的重要性一定条件下可以由节点的度来决定，节点的度越大，说明节点在一定程度上越重要，在网络中的位置越不可替代；反之，节点在网络中的重要性不是很明显。一个网络的平均度  $\langle k \rangle$  指的是网络当中所有节点度的平均值。节点的度的概率分布一般用  $P(k)$  来表示。 $P(k)$  描述的是从众多的网络节点中随机选取一个节点  $i$ ，此随机节点的度为  $k$  的概率。规则网络节点的度序列比较容易：由于网络中的所有节点的度都相同，所以节点度的分布服从 Delta 分布，是单个尖峰的分布。随机网络的尖峰是所有网络途中最宽的。完全随机网络的度的分布曲线近似于泊松分布（图 3.3 (a)），其度的值在远离平均度  $\langle k \rangle$  后呈现出指数下降的趋势。这说明当  $|k - \langle k \rangle| \rightarrow \infty$  时，度为  $k$  的节点是不存在于这个网络当中的。因此，它是一种均匀网络。

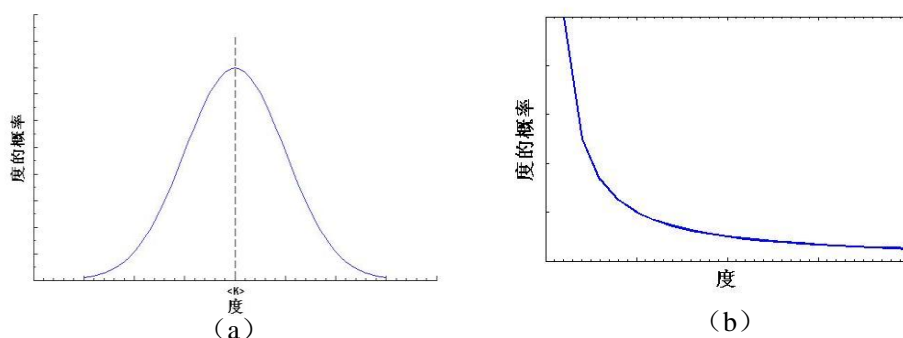


图 3.3 网络度的概率分布图

近些年大量的实证研究表明，现实生活中很多网络中节点度的分布于泊松分布有着明显的区别。尤其是，很多网络中节点的度的分布是服从幂律分布（图 3.3 (b)）的，即

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad \text{式(3.6)}$$

幂律分布曲线相较于泊松指数分布曲线的下降速度要慢很多。具有幂律分布的曲线也被称为无标度分布曲线，节点度的分布具有幂律分布的网络被称为具有无标度特性的网络，这是因为幂律分布函数本身是具有无标度特性的。下面是幂律函数无标度特性的论证过程。

设节点的概率分布函数为  $f(x)$ ，任意常数  $a$ ，存在常数  $b$  使函数  $f(x)$  满足下述条件。

$$f(ax) = bf(x) \quad \text{式(3.7)}$$

那么一定有（设  $f(1)f'(1) \neq 0$ ）

$$f(x) = f(1)x^{-\gamma}, \quad \gamma = -f(1)/f'(1) \quad \text{式(3.8)}$$

幂律分布是满足无标度的充要条件。

下面对上面的性质进行的推导：令  $x=1$ ，已有  $f(a) = bf(1)$ ，进而求得  $b = f(a)/f(1)$ ，故有下面的推论：

$$f(ax) = \frac{f(a)f(x)}{f(1)} \quad \text{式(3.9)}$$

由于方程(3.9)对任意的常数  $a$  都成立，故方程两边同时对  $a$  求导数得到如下方程

$$x \frac{df(ax)}{d(ax)} = \frac{f(x)}{f(1)} \frac{df(a)}{da} \quad \text{式(3.10)}$$

若取  $a=1$ ，有

$$x \frac{df(x)}{dx} = \frac{f'(1)}{f(1)} f(x) \quad \text{式(3.11)}$$

求解微分方程式(3-11)

$$\ln f(x) = \frac{f'(1)}{f(1)} \ln x + \ln f(1) \quad \text{式(3.12)}$$

对等式(3-11)的两边同时取指数( $e$  的指数)得到公式(3-7)。

在具有无标度的大规模网络中，大部分的节点的度值都很低，只存在一小部分的节点的度值很高。所以将这种网络具有度的分布的不平衡的网络成为非均匀网络，将具有很高度值的节点称为网络的“集线器（HUB）”。

绘制累计度分布函数是另外一种描述度数据分布的方法。

$$P_k = \sum_{k'=k}^{\infty} P(k') \quad \text{式(3-13)}$$

上式表示的是节点的度不小于  $k$  的概率分布表示。

如果度的分布服从幂律分布，也就是  $P(k) \propto k^{-\gamma}$ ，那么累积度的分布函数符合幂指数为  $\gamma - 1$  的幂律：

$$P(k) \propto \sum_{k'=k}^{\infty} k'^{-\gamma} \propto k^{-(\gamma-1)} \quad \text{式(3-14)}$$

如果节点度的分布服从指数分布，也就是  $P(k) \propto e^{-k/\kappa}$ （其中  $\kappa > 0$ ）是一常数，那么累计度的分布函数也是指数类型的，而且具有相同的指数：

$$P(k) \propto \sum_{k'=k}^{\infty} e^{-k'/\kappa} \propto e^{-k/\kappa} \quad \text{式(3-15)}$$

幂律分布和指数分布的函数图像呈现出一定的差异性：前者在对数坐标系中呈直线，后者在半对数坐标系中呈直线。这也是区分幂律分布和指数分布的方法。

## 3.2 经典复杂网络理论模型

经过数十载的发展，复杂网络的研究正在一步一步的走向成熟，并即将进入新的研究阶段。更多的会专注于网络结构与功能的相互联系，从研究小世界和无标度的统计特性转向对物理规律的深层次挖掘，实现理论指导应用的目的。

网络模型有很多，包括规则网络、随机网络、小世界网络、无标度网络、局域世界演化网络等，其中小世界网络和无标度网络是介于完全随机网络和完全规则网络(ER图)之间的网络模型，更加真实直观的反应真实世界的网络特征。

### 3.2.1 小世界网络模型

小世界网络有两种，一种是 1998 年 *Watt* 和 *Strogatz* 提出的 *WS* 小世界网络模型。一种是由 *Newman* 和 *Watts* 在 *WS* 小世界模型的基础上将加边过程由原来的“随机化重连”改进成“随机化加边”而产生的。

#### (1) *WS* 小世界网络模型。

小世界网络是完全规则网络到完全随机网络转变的一个中间过程，它清晰的描述了现实世界中网络的高聚类 and 低平均路径长度的特性。*WS* 小世界模型的构造算法如下：

#### **WS 小世界模型构造算法**

首先，从规则图开始：考虑一个含有  $N$  个点的最近邻耦合网络，他们围成一个环，其中每个节点都与它左右相邻的各  $K/2$  节点相连， $K$  为偶数。

其次，随机化重连：以概率  $p$  随机地重新连接网络中的每条边，即将边的一个端点保持不变，而另一个端点取为随机选择的一个节点。其中规定，任意两个不同的节点之间至多只能有一条边，并且每一个节点都不能有边与自身相连。

图 3.4 *WS* Small-World 模型构造算法

*WS* 小世界模型中，当  $p=1$  时构造出来的模型为完全随机网络，当  $p=0$  时构造出来的网络为完全规则网络，改变  $p$  的值就可以让网络逐渐的从完全随机过渡到完全规则。以下通过 *MATLAB* 对 *WS* 小世界网络建模仿真，分别构造了含有 20 个节点的， $p=0$ ,

$p=0.1$ ,  $p=1$  的网络图像。

当  $p=0$  时，按照 WS 的边的重连规则构建的完全随机的网络模型的图像如下：

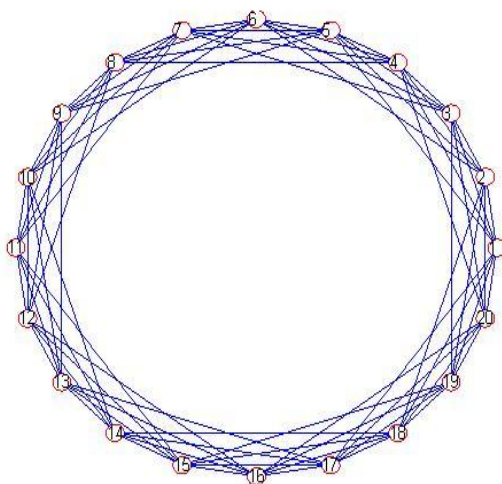


图 3.5  $p=0$  的完全随机网络模型

当  $p=0.1$  时，按照 WS 的边的重连规则构建的小世界网络模型的图像如下：

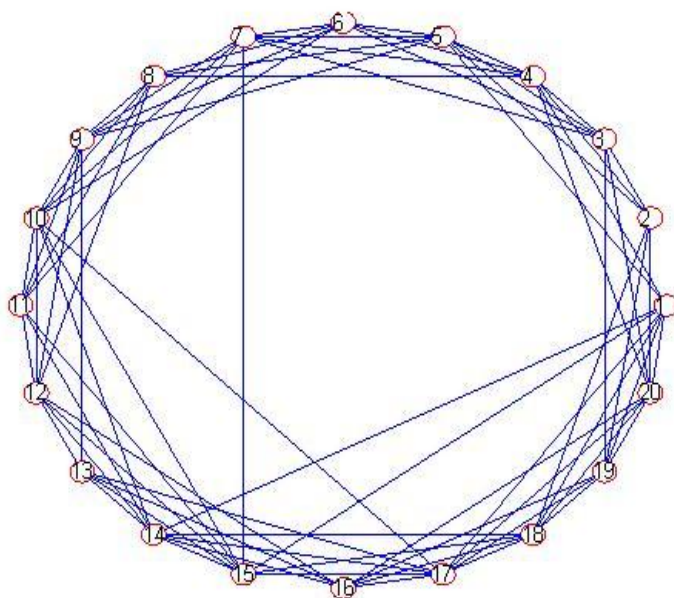
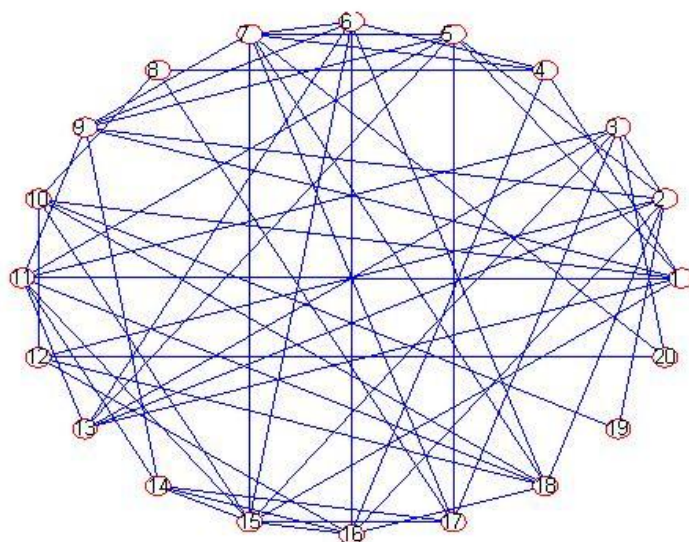


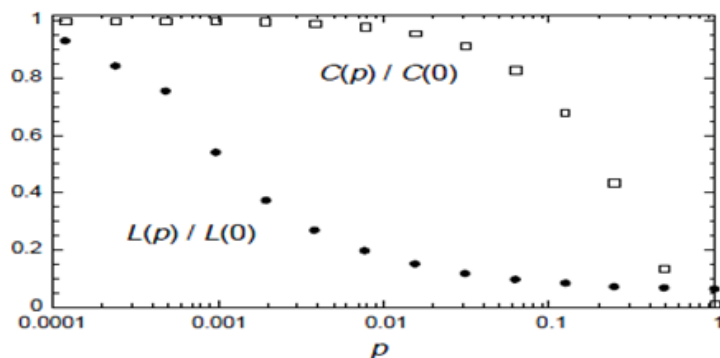
图 3.6  $p=0.1$  的 WS Small-World 网络模型

当  $p=1$  时，按照 WS 的边的重连规则构建的完全规则的网络模型的图像如下：



图 3.7  $p=1$  的完全规则网络模型

由 WS 小世界网络构造算法得到的网络模型的聚类系数  $C(p)$  和平均路径长度  $L(p)$  都是重连概率  $p$  的函数。图 3.7 展示了随着节点边重连概率  $p$  的变化，聚类系数和平均路径长度的变化关系图。完全规则网络具有高聚类系数，高平均路径长度的特点。但是重新连接之后的网络其聚类系数的变化不是很明显，但是平均路径长度下降的很快，就将这类高聚类系数和短平均路径长度的网络成为小世界网络（WS）。

图 3.8 WS Small-world 模型聚类系数和平均路径长度随重连概率  $p$  的变化关系

## (2) NW Small-World 模型

NW Small-World 模型是由 Newman 和 Watts 提出来的，它是对 WS Small-World 模型在边的重新连接上进行的改进。NW Small-World 模型用随机化加边的方法替代了 WS Small-World 模型中的随机化重连的方法，进而形成了新的 Small-World 模型。NW 小世界模型的构造算法如下图所示：

### NW 小世界模型构造算法

首先，从规则图开始：考虑一个含有  $N$  个点的最近邻耦合网络，它们围成一个环，其中每个节点都与它左右相邻的各  $K/2$  个节点相连， $K$  是偶数。

其次，随机化加边：以概率  $p$  在随机选取的一对节点之间加上一条边。其中，任意两个不同的节点之间至多只能有一条边，并且每个节点都不能有边与自身相连。

图 3.9 NW Small-World 模型构造算法

在 NW Small-World 网络模型中， $p=0$  对应最近邻耦合网络， $p=1$  对应全局耦合网络。从数学复杂度比较上来看，NW Small-World 模型相对于 WS Small-World 模型而言比较简单。当  $p$  无限趋近于 0 并且节点的个数  $N$  趋近于无穷时，NW Small-World 模型会与 WS Small-World 模型趋于完全随机的网络模型。

Small-World 模型是对朋友社交关系网络的一种映射，某些人大部分的朋友都是跟他们联系比较密切的人。对于一些联系比较少的朋友使用小世界模型通过重新连边产生远程联系。下面是小世界网络的统计特性：聚类系数、平均路径长度、度和度的分布。

聚类系数。WS Small-World 网络的聚类系数为<sup>[17]</sup>：

$$C(p) = \frac{3(K-2)}{4(K-1)}(1-p)^3 \quad \text{式(3.16)}$$

NW Small-World 网络的聚类系数为<sup>[18]</sup>：

$$C(p) = \frac{3(K-2)}{4(K-1) + 4Kp(P+2)} \quad \text{式(3.17)}$$

平均路径长度。WS 小世界模型的平均路径长度目前来看还没特别精确的数学公式来描述，但是使用重正化群的方法可以推导出下面表示<sup>[19]</sup>：

$$L(p) = \frac{2N}{K} f(NKp/2) \quad \text{式(3.18)}$$

其中  $f(u)$  为普适标度函数，其满足：

$$f(u) = \begin{cases} \text{constant}, & u \ll 1 \\ (\ln u)/u, & u \gg 1 \end{cases} \quad \text{式(3.19)}$$

Newman 等人在场方法的基础上提出了下面的近似表达式：

$$f(x) \approx \frac{1}{2\sqrt{x^2 + 2x}} \arctan h \sqrt{\frac{x}{x+2}} \quad \text{式(3.20)}$$

$f(u)$  的精确表达有待学者们进一步研究和分析。

度和度的分布。NW 小世界模型中每个节点的度最小是  $K$ ，所以当  $k \geq K$  时，随机选取一个度值是  $k$  的概率为：



$$P(k) = \binom{N}{k-K} \left( \frac{Kp}{N} \right)^{k-K} \left( 1 - \frac{Kp}{N} \right)^{N-k+K} \quad \text{式(3.21)}$$

当  $k < K$  时  $P(k)=0$ 。

WS 小世界模型中，当  $k \geq K/2$  时，节点度的概率分布为：

$$P(k) = \sum_{n=0}^{\min(k-K/2, K/2)} \binom{K/2}{n} (1-p)^n p^{(K/2)-n} \frac{(pK/2)^{k-(K/2)-n}}{(k-(K/2)-n)!} e^{-pK/2} \quad \text{式(3.22)}$$

当  $k < K/2$  时  $P(k)=0$ 。

WS 小世界模型具有和 ER 图相似，网络中所有节点的度都近似的相等，属于均匀网络的一种。

### 3.2.2 无标度网络模型

ER 图和 WS 小世界模型中网络节点的度的分布均可以近似的用泊松分布来描述，此分布在度的平均值  $\langle k \rangle$  的地方有节点最多，当度的值逐渐远离这个度平均值时，节点的分布数量迅速减少。说明当  $k$  远远大于  $\langle k \rangle$  时，几乎不在有节点的度为  $k$ 。这类网络被称为均匀网络或者是指指数网络。近年来，大量的复杂网络研究发现，许多现实的网络节点的度的分布呈现幂律特征，但是由于这类网络的特征长度不明显，将这种网络定义为无标度网络。Barabási 和 Albertt 考虑了现实网络的增长性和优先连接性结合无标度网络的幂律分布特征提出了基于网络的增长和优先连接特性的 BA 无标度网络模型，其构造算法如下描述：

**BA 无标度模型构造算法**

首先，增长：从一个具有  $m_0$  个节点的网络开始，每次引入一个新的节点，并且连接到  $m$  个已经存在的节点上，这里  $m \leq m_0$ 。

其次，优先连接：一个新的节点与一个已经存在的节点  $i$  相连接的概率  $\Pi_i$  与节点  $i$  的度  $k_i$ 、节点  $j$  的度  $k_j$  之间的满足如下关系：

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (3-22)$$

图 3.10 BA Scale-Free 网络模型构造算法

平均路径长度。BA 无标度网络的平均路径长度为<sup>[20]</sup>：

$$L \propto \frac{\log N}{\log \log N} \quad \text{式(3.23)}$$

说明这种网络也具有小世界的性质。

聚类系数。BA 无标度网络的聚类系数表达式为<sup>[21]</sup>:

$$C = \frac{m^2(m+1)^2}{4(m-1)} \left[ \ln\left(\frac{m+1}{m}\right) - \frac{1}{m+1} \right] \frac{[\ln(t)]^2}{t} \quad \text{式(3.24)}$$

聚类系数的表达式表明,当网络足够庞大的时候,BA 无标度网络的聚类特征呈现不明显。

度和度的分布。主方程法是研究 BA 无标度网络方法之一,具有普遍性。下面是主方程法的推理过程:

$$p(k, t_i, t+1) = \frac{k-1}{2t} p(k-1, t_i, t) + \left(1 - \frac{k}{2t}\right) p(k, t_i, t) \quad \text{式(3.25)}$$

网络度的分布服从下面的公式:

$$P(k) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{t} \sum p(k, t_i, t) \right) \quad \text{式(3.26)}$$

$P(k)$ 满足下面的递推方程:

$$P(k) = \begin{cases} \frac{k-1}{k+2} P(k-1), & k \geq m+1 \\ \frac{2}{m+2}, & k = m \end{cases} \quad \text{式(3.27)}$$

求解上面的方程得到 BA 网络度的分布函数为:

$$P(k) = \frac{2m(m+1)}{k(k+1)(k+2)} \propto 2m^2 k^{-3} \quad \text{式(3.28)}$$

公式 (3-38) 说明了 BA 网络的度的分布是服从幂指数为 3 的幂律分布。

由于 BA 无标度网络模型的幂指数只能是 3,对于实际网络的幂指数介于 2 到 3 之间的实现具有一定的局限性,针对这个问题 Bianconi 和 Barabási 提出了适应度模型来解决这个问题,下图是适应度模型的构造算法:

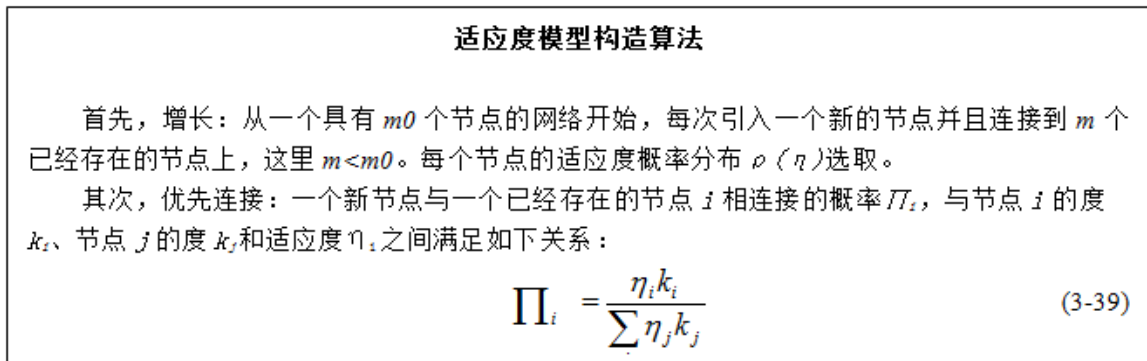


图 3.11 适应度模型构造算法

适应度模型更加形象的说明了富者愈富，强者愈强的网络的特点。具有较高适应度的较高的节点在网络演变过程中会有更多的节点与之相连。

### 3.2.3 局域世界演化网络模型

针对现实网络中网络的连接模式是某个节点多与自己所处的网络中的其它节点相互联系，而每一网络中会有一些关键节点与其它的局域的网络相互联系，通过这样一种局部网络内部联系，每个局部网络某些关键节点之间沟通网络之间的联系的一种网络构成了局域世界演化的网络模型。局域世界演化网络模型算法如下：

**局域世界演化模型构造算法**

①增长：网络初始时有  $m_0$  个节点和  $e_0$  条边，每次新加入一个节点和附带的  $m$  条边。

②局域世界优先连接：随机地从网络已有的节点中选取  $M$  个节点 ( $M \geq m$ ) 作为新加入节点的局域世界，新加入的节点根据优先连接概率：

$$\prod_{Local}(k_i) = \prod_{(i \in LW)} \frac{k_i}{\sum_j k_j} = \frac{M}{m_0 + t} \frac{k_i}{\sum_{j \in Local} k_j} \quad (3-40)$$

来选择与局域世界中的  $m$  个节点相连，其中  $LW$  由新选的  $M$  个节点组成。

图 3.12 局域世界模型构造算法<sup>[22]</sup>

局域世界模型构造算法将节点联系之间的局限性，并不是所有的节点之间都有连接的可能性，大部分的节点还是在自己的社交圈里面活动的。此算法将节点可能连接的概率限制在节点本身所处的小世界里面来计算，为了实现节点局域性的特点，能够更准确的描述现实网络的特性。此模型会根据  $M$  的值的不同产生不同的网络，有两种特殊的即  $M=m$  和  $M=t+m_0$ 。其中当  $M=m$  时，产生的是只有增长不存在优先连接的 BA 无标度网络；当  $M=t+m_0$  时，此网络的构建规则完全符合 BA 无标度网络的构造机制，自然生成 BA 无标度网络。介于这两者之间的就是带有局域世界特征的动态网络模型，更加真实的反应了现实网络节点之间的抱团现象。

## 3.3 复杂网络研究现状

复杂网络的研究始于 1998 年 Watt 和 Strogatz 提出的小世界网络模型<sup>[23]</sup>，以及 1999 年 Barabási 和 Albertt 提出的无标度网络<sup>[24]</sup>，从此复杂网络便成为各研究领域的网络研究的重要方向。Barabási, Ravasz 和 Vicsek<sup>[25]</sup>(2001)更加详细的描述了网络的基本特性，更加精确的对分布趋势进行拟合，构建了更加真实、更能描述显示网络特征的模型，促进了复杂网络模型研究的发展。国外复杂网络研究的热潮很快蔓延到了中国乃至全

世界。

国内对于复杂网络的研究起步相对较晚,汪小帆<sup>[26]</sup>(2002)发表的关于国外复杂网络理论的研究及其成果的文章在国内受到广泛关注,复杂网络在国内的研究从此开始如火如荼的展开。汪小帆,陈关荣<sup>[27]</sup>(2003)试图将复杂网络中的小世界和无标度理论应用到越来越集成和互联的信息、商业、能源和交通等网络中,并将其应用到 *Internet*、蜂窝网络、新陈代谢系统中。通过实证研究发现简单的改变这些网络中的几个节点会使网络的性能发生重要的变化。吕金虎<sup>[28]</sup>(2004)基于时变复杂动力网络模型,通过实证研究给出了网络同步的基本准则,为复杂网络动力学的同步研究提供了必要条件和充分条件的论证。谭跃进,吴俊<sup>[29]</sup>(2004)以世贸网络为实例,提出了结构熵和度的连接之间关系的分布规律,证明了结构熵直观的刻画了无序的无标度网络结构。史定华<sup>[30]</sup>(2005)通过分析网络节点的度及其分布,总结了网络分类、演化机理和模型及网络的结构涌现的研究。王林,戴冠中,胡海波<sup>[31]</sup>(2006)将描述收入分配的洛伦茨曲线和基尼系数与幂定律相结合,更更加直观的描述了无标度网络拓扑的异质性。

陶少华、刘玉华、许凯华和谈德茂<sup>[32]</sup>(2007)等人通过对无标度网络进行研究,探索出了对抗集散节点脆弱性的解决方案,并构建了集散节点的层次模型和超立方体。分别对这两个模型实验仿真确定其鲁棒性和稳健性。陈国荣,鄢萍,彭军,邓菊丽和王琦峰<sup>[33]</sup>(2008)通过对复杂网络理论和物流网络理论的研究,针对物流网络的动态性建立了一种基于 *NGM* 的动态物流网络模型,并对此模型进行仿真,结果表明:使用 *NGM* 方法形成的物流网络,按照节点的聚集度形成一种“大量外围节点围绕少量中心节点,少量中心节点围绕一个核心节点”的格局,方便对物流系统进行全局掌握和清晰的认识。此项研究对复杂网络在物流领域的应用提供了参考,指明了物流网络的研究方向。王波,王万良,杨旭华<sup>[34]</sup>(2009)通过对两种小世界网络进行计算机建模仿真,分析网络节点度的分布、聚类系数和平均最短路径三个基本统计特性,并使用稀疏矩阵的方法使得大数量节点的仿真成为可能,为模拟真实的物流网络提供了仿真条件。

邢长明和刘方爱<sup>[35]</sup>(2010)使用迭代法构造小世界网络模型和无尺度网络模型,解析计算了确定性网络模型的拓扑特性,同时将两个模型在一个框架下共同运行,给出上述网络模型都是极大平面图的结论,为复杂网络的研究提供了理论基础。吕乐,俞鹤伟和陶铭<sup>[36]</sup>(2011)只考虑节点存在时长对拓扑结构的影响,提出了一种基于能量的无标度网络模型,并通过仿真验证了此模型具有更好的鲁棒性和稳定性,为复杂网络在无标度领域的研究提供了模型参考和研究思路的层次性分析。陶少华,张向群<sup>[37]</sup>(2012)针对现实网络中存在的非优先增长的节点而节点间信息传递存在相似性的特征,提出了具有自相似特征的网络演化模型,并通过模拟仿真此演化模型论证此模型的可用性以及对现实网络模拟的真实性,为复杂网络的研究提供了新的研究方向和条件。刘玉华,张翼,徐翠和晋建志<sup>[38]</sup>(2013)针对复杂网络中的聚类问题,提出了一种基于数据场

的复杂网络聚类算法。

郭征, 郭鑫泠, 宋传旺和聂廷远<sup>[39]</sup>(2014)考虑到复杂网络面临着不同方式攻击的问题, 使用网络节点的最大度值和介数、平均度值和介数为参数, 对 *WS* 小世界网络进行五种不同形式的抗毁性测试, 获得网络的介-度关系曲线, 动态分析 *WS* 网络的介-度相关性。并通过实验验证了 *RD* 攻击削弱了 *WS* 小世界网络的抗毁性, 为复杂网络在 *Hub* 网络优化中的应用提供了理论基础。胡耀光, 王圣军, 金涛, 屈世显<sup>[40]</sup>(2015)针对节点间负关联的特点, 使用有倾向的随机游走对网络进行研究发现负联络的粒子可以在度较大的节点上均匀分布, 反之节点上分布有较少的粒子。负关联网络可以利用度小的节点容纳粒子, 度大的节点传输粒子, 实现负连网络的高效率运行, 为复杂网络无标度理论的应用增加了新的内容。

复杂网络的研究在国内始于 2002 年, 之前对于网络的研究只是停留在层次划分和静态网络的基础上。复杂网络在国内经过十几年的发展研究, 一部分领域的研究已经相当成熟, 其中包括小世界和无标度理论的研究, 并且已经成功的应用在很多领域。从复杂网络整体来看, 国内的研究还处于初级阶段, 亟待突破理论研究的禁锢向复杂网络实证研究的领域发展。同时复杂网络理论的研究, 为复杂的物流网络的研究提供了理论基础和研究方向。

### 3.4 本章小结

本章介绍了复杂网络基本特性: 平均路径长度、聚类系数、度和度的分布以及节点的介数的定义和算法。复杂网络有两种非常经典的模型: 小世界模型和无标度模型, 也是复杂网络理论成型的基础模型。在这两个模型的基础上, 又介绍了无标度网络的衍生模型, 考虑了网络局域世界的局域世界演化模型的算法和意义。本章的内容为本文电子商务物流网络的规划和应用提供了理论基础。



## 第四章 电子商务物流网络优化方法

电子商务物流网络是一个巨大的复杂的系统，利用复杂网络相关理论，解决电子商务物流网络规划的问题日渐被学者所重视。物流中心作为物流网络的重要支撑，在网络中发挥着至关重要的作用。规划好网络的物流中心，物流网络优化问题就解决了一大半。对于有着实际意义的现实网络来说，成本和效率是它们优化和改进的原动力和最终目的。

### 4.1 物流中心选址方法

描述选址方法之前，首先对选址方法的评价标准添加假设。对于大部分现实的物流网络规划模型评价模型好坏的指标是成本最低，一味的降低成本却忽略了网络的效率问题。本文的数据对于基于效率最高的物流网络规划研究具有很好的适应性。下面给出了本文的研究方法与过程。

#### 4.1.1 方法的描述

基于复杂网络的中心模型有两种，一种是节点度中心模型，一种是介数中心性模型。为了方便后面的研究，这里假设一个无向物流网络图  $G(V, E)$ ，有  $n = |V|$  个物流节点和  $m = |E|$  配送路线。下面是物流网络度的中心性表示

(1) 度中心算法模型，要介绍度中心模型不得不提到网络节点的度，度的分布以及度的概率分布。节点的度指的是和节点  $v$  有连接的所有节点的总数，即

$$C_d(v) = \deg(v) \quad \text{式(4.1)}$$

网络中某个节点可能的最大连接数量为  $n-1$ ，将上面的表达式标准化后节点  $v$  的度的中心性如下：

$$C_D = \frac{\deg(v)}{n-1} \quad \text{式(4.2)}$$

通过对网络节点中度的分析，反映出了此节点与其他节点之间的联系程度，按照联系的节点数决定网络节点的重要性。下图展示了此算法实现的过程：

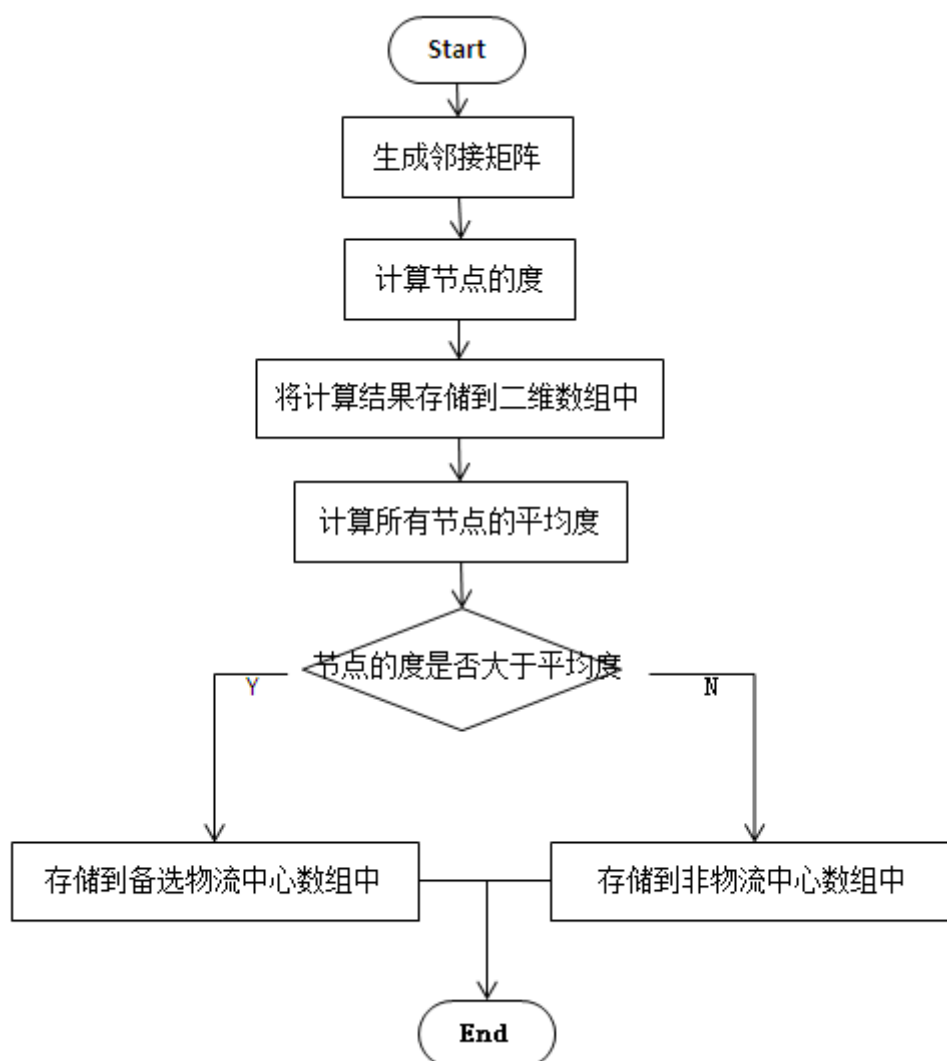


图 4.1 基于度的物流中心选址算法

(2) 介数中心性算法模型。介数中心指的是在网络中所有经过该节点的最短的路径当中占有所有节点对最短路径总数的比例。介数中心性说明了信息传播到该节点的可能性，可能性越大说明该节点对于整个系统越不可或缺，在系统中的位置越重要，越需要被重视。节点的介数中心性表达式如下：

$$C_b(v) = \sum \frac{\delta_{st}(v)}{\delta_{st}} \quad \text{式(4.3)}$$

公式 (4-3) 当中  $\delta_{st}(v)$  代表了节点对(s,t)之间的经过节点 v 的最短路径的条数。 $\delta_{st}$  代表了(s,t)这个网络节点之间的最短路径的条数。

下图展示了此算法的实现过程：



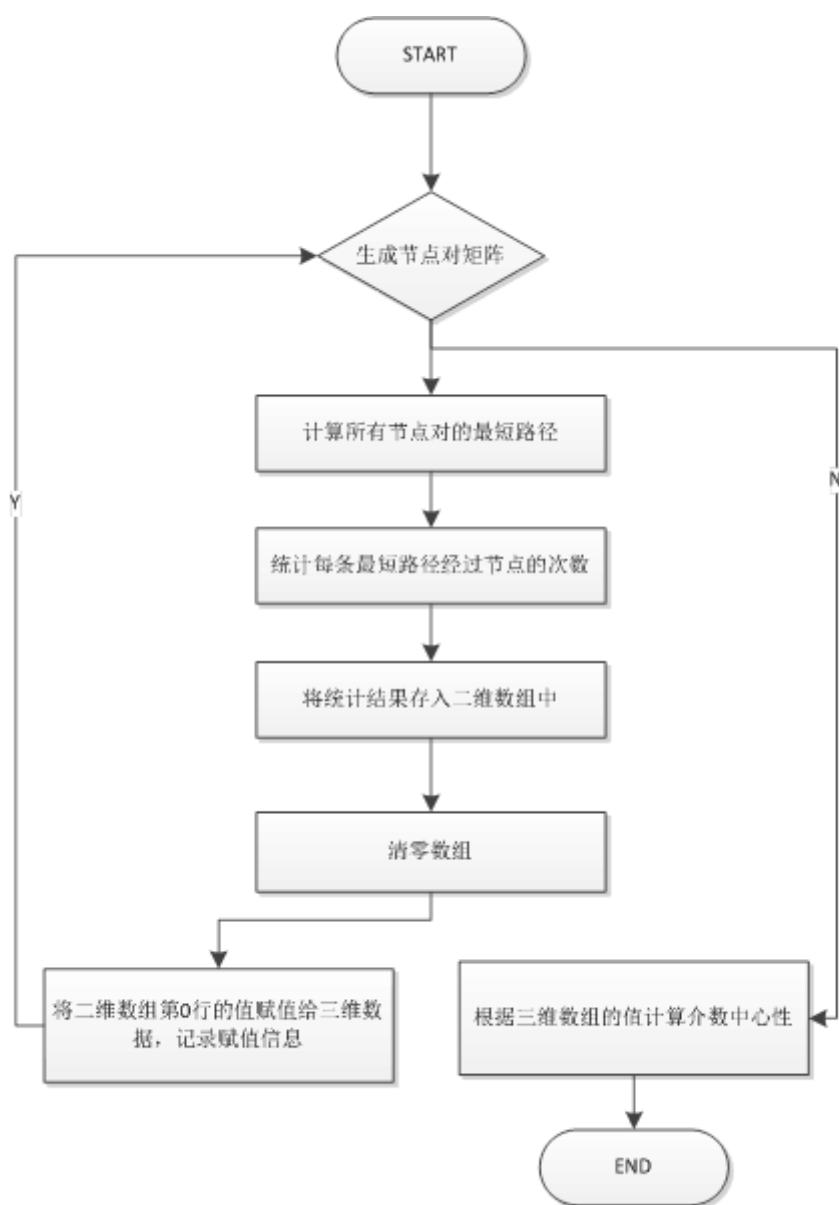


图 4.2 介数中心算法

介数中心性算法是通过判断节点在整个网络所包含的最短路径中存在的频率，来判断这个节点的重要程度。如果一个节点在所有的最短路径中都存在的话，那么这个节点一旦被摧毁的话，整个网络的最短路径就会变化，大部分情况下网络的平均最短路径会变大，导致网络效率降低。通过介数中心性算法将网络中的找到网络中的介数中心点，利用介数中心性矩阵计算网络节点的介数中心性平均，遍历所有的节点找到介数中心性大于平均介数中心性的节点。最后，将根据度的大小找到的节点集合与根据介数中心性值的大小找到的节点的集合进行交集运算，将做交集运算产生的集合放到中心点集合的数组中，方便物流网络边规划的研究。

#### 4.1.2 方法的改进

考虑到介数是节点在最短路径中存在的频率，而度是某个节点与其他多少个节点有联系的描述。单独考虑度的大小来确定中心点只能说明这个节点的与其他节点的联系比较多，并不能说明它们之间联系的强度；而单独考虑节点介数的大小只能说明这个节点在所有有它存在的最短路径的网络中的重要程度，在一定的程度上忽略了网络的密集程度会使得网络中本来度很大的节点，由于介数较小而被淘汰。为了解决这个问题，将节点的介数作为节点的度的权重，对网络中节点的度的矩阵求加权重，用求得的新的加权重矩阵中节点度的值来评价节点的重要程度。评价指标是加权重大于加权平均度的所有节点的集合。将这个集合作为参考进行物流中心选址的规划及应用。

根据以上分析，对物流中心的选址方法进行优化。假设网络中的平均度为  $K$ ，网络中节点的平均介数为  $\Omega$ ， $C_i$  为第  $i$  个节点的介数值，节点的度矩阵为  $D$ ，节点的介数矩阵为  $W$ ，节点的加权矩阵  $F$ ，平均加权重值  $DW$  物流中心结果集为  $R$ 。物流中心规划网络模型描述如下：

- (1) 将介数矩阵  $W$  和节点度矩阵  $D$  相乘，得到加权矩阵  $F$ ，表达式如下：

$$F = W * D \quad \text{式(4.4)}$$

- (2) 求解网络节点的平均度  $K$  和网络节点的平均介数  $\Omega$ 。求解公式如下：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \quad \text{式(4.5)}$$

平均介数中心：

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{式(4.6)}$$

- (3) 求解网络的平均加权重值，表达如下：

$$DW = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \quad \text{式(4.7)}$$

(4) 遍历所有节点度的加权重值，并将其与  $DW$  作比较，如果节点加权重值大于  $DW$  将此节点的编号放入物流中心结果  $R$  的集合中。

上述方法既考虑了网络节点和其他节点联系的紧密度，也考虑了网络节点物流系统中对其他节点的重要程度，这样更加全面的将物流节点的特性反映出来，能够更加准确的反映出物流网络中的中心节点。下图展示了此算法的实现过程：

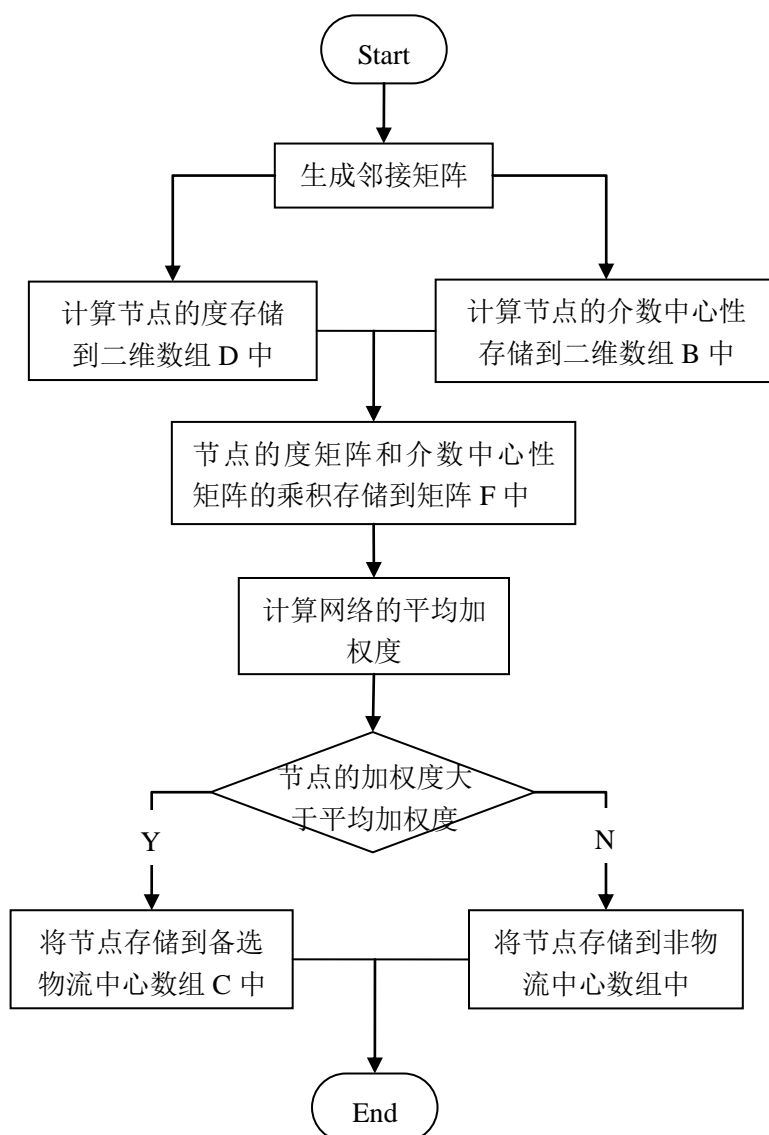


图 4.3 基于加权度的物流中心选址算法

### 4.1.3 评价指标

中心节点的选择有三种指标：度选址标准、介数选址标准、加权度选址标准。度最大选址标准指网络中的节点按照度的大小排列，选择出度大于网络平均度的节点作为备选物流中心地址；介数最大选址标准指网络中的节点按照节点介数的大小排列，介数大于网络平均介数的节点作为备选物流中心地址；加权度选址标准指网络中的节点按照加权度的大小排列，选择出加权度大于平均加权度的节点作为备选物流中心地址。

除了上面的评价指标外，还有一个衡量算法效率的指标：算法复杂度。由于在本论文中更多地考虑到算法的应用价值，而算法复杂度更多是被用来评价算法运行效率的，所以这里只简单的介绍一下本文算法复杂度的值。通过计算，本文用到的三种方

法的复杂度均为  $O(n \log n)$ 。

综合三种中心节点的选择标准，在应用中选择物流中心的节点比较模糊，考虑到这三个方法分别是对节点在度、介数和加权重三个方面的评价较高的结果。又有物流中心是一个比较综合的节点，它是一个既具有较高的度又在其他节点的配送路径中起决定作用的节点，最终将这三种方法的选择结果综合考虑选择出最重要的节点作为本文的物流中心的选址结果，为物流网络的重构做准备。

## 4.2 基于无标度特性的电子商务物流网络重构方法

大量的研究表明，物流网络具有小世界和无标度的特性，本文针对这个研究结论对电子商务物流网络做了实证研究，证明了此网络确实具有无标度的特性，各种统计特征的之都与无标度网络相符合。通过对物流网络的重构，重构一种基于已经选择出来的物流中心上的平均路径相对较短的无标度网络模型。

### 4.2.1 无标物网络模型

无标度网络的两个重要特征就是增长和优先连接。增长体现了网络不是静态不变的，而是随着时间的变化而不断增加的，体现了网络的动态性；优先连接体现了无标度网络中按照节点存在的时间来决定新增节点的连接方向，节点在网络中存在的时间越长，与新增节点连接的概率越大。两种特性共同构成了物流网络的无标度的特点，同时体现了物流网络发展中富者越富的现象，从现在物流企业的分布状态可以证明这一点。下面是无标度物流网络模型<sup>[41]</sup>描述：

(1) 建立一个具有  $m$  个节点的邻接矩阵，每隔时间  $t$  向网络中增加一个节点，从  $m$  个节点中选择  $m_0$  个节点与新加入的节点相连接，其中  $m_0$  小于  $m$ 。

(2)  $m$  个节点的选择按照优先连接的原则，新增节点和网络中某个节点连接的概率  $\Pi_i$  与节点  $v_i$  之间的关系满足如下表达式：

$$\Pi_i = \frac{k_i + 1}{\sum_j (k_j + 1)} \quad \text{式(4.8)}$$

此网络重建难点在于网络加边和剪边的原则，由于本文是基于已经选择好的物流中心的重构网络模型，只需要考虑加边的原则规划。图 4.4 清晰的展示了无标度网络重构在软件中实现的具体过程：

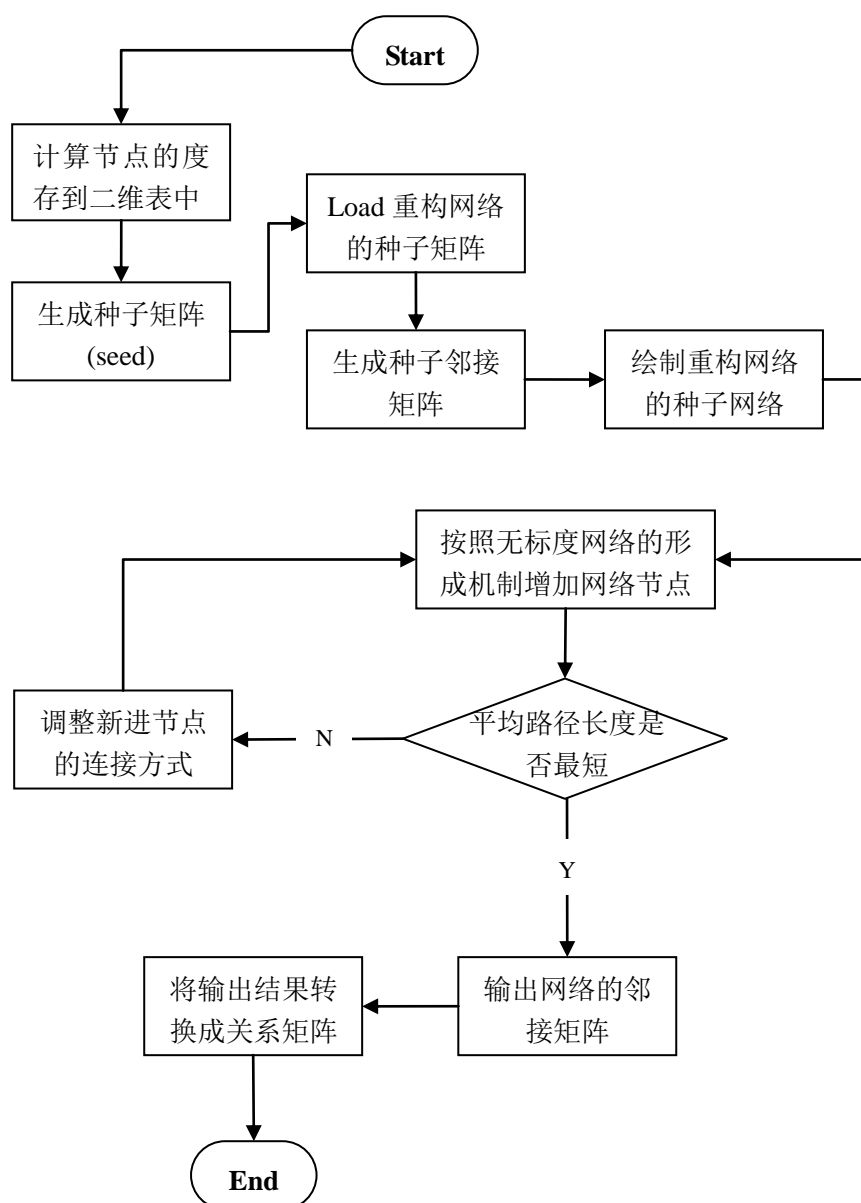


图 4.4 无标度网络生成过程

图 4.4 中网络重构的关键环节之一种子矩阵的生成说明了种子矩阵影响着网络重构的效果，所以基于三种选址结果生成的种子矩阵会有三种完全不同的无标度网络被构造出来。通过评价每种网络的平均路径长度分别选择出每种网络重构方法中最佳的网络，最后比较基于三种方法选择出的三种网络，选择出最佳的优化方案。

#### 4.2.2 无标度网络模型仿真测试

按照上面的模型构造算法构建一个初始节点为 5，总结点 100，每间隔 1s 产生一个节点的无标度网络，网络图像如下图所示：

BA Free Scale Network

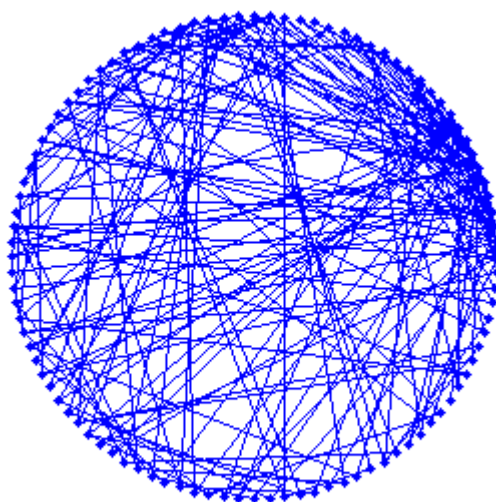


图 4.5 BA 无标度网络模型

图 4.5 是对 100 个节点的数据进行的仿真，按照无标度网络算法的要求，对产生的模型矩阵图形化。如果网络节点这样分布很难看出网络可能存在的规律，但是可以初步判断右上方的颜色较深的地方节点的度比较大。

进一步对网络图像进行优化，如下图所示：

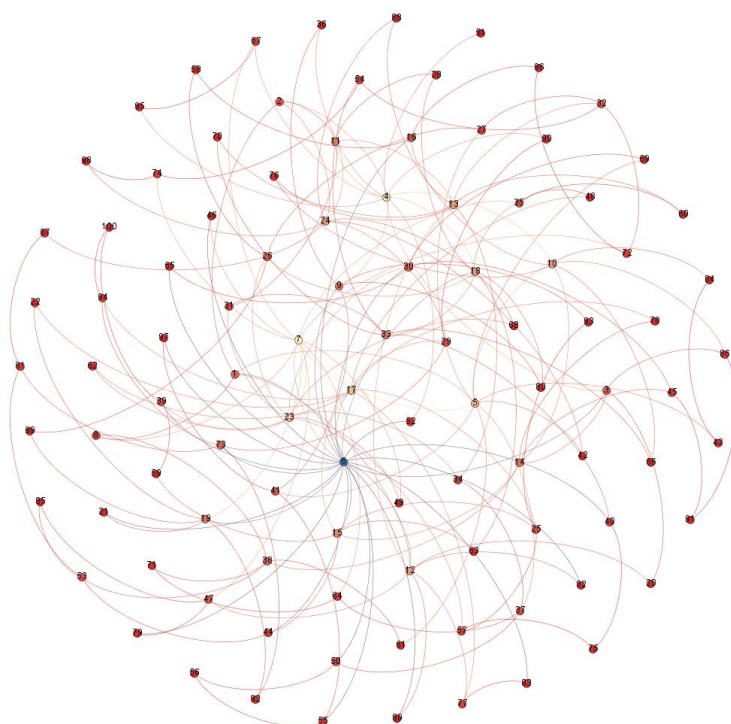


图 4.6 BA 无标度网络图

图 4.6 中,深蓝色表示度最深的节点,也是与其他节点联系最多的节点。以蓝色节点即 6 号节点为核心,向外扩散的过程中,网络节点的度越来越小。但是这只是定性的对此网络图的分析,无法准确的将 BA 无标度网络图的特性表达出来。因此,通过对网络的平均路长、聚类系数和网络的度及度的分布分别进行分析,来了解上图所表达的详细信息。

继续对产生的网络进行分析计算求解得到网络的平均路径长度为 3.136,聚类系数为 0.103,网络的平均度为 3.85,度的分布及度的概率分布如下图所示:

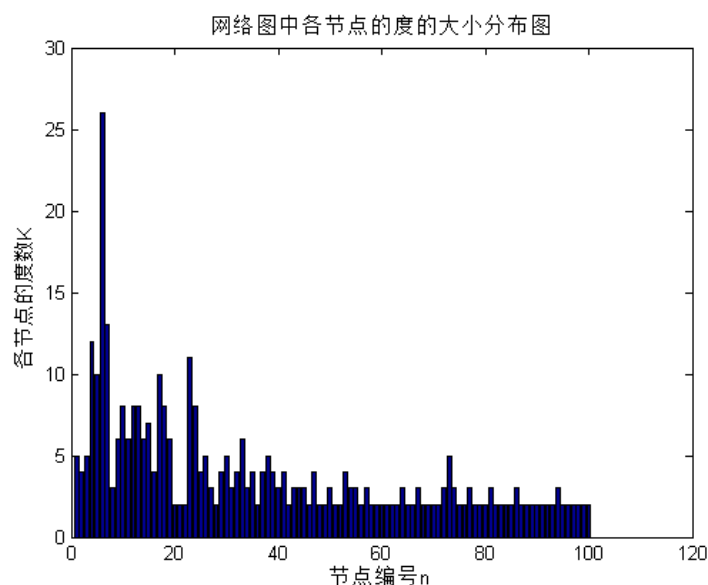


图 4.7 BA 无标度网络节点度的分布情况

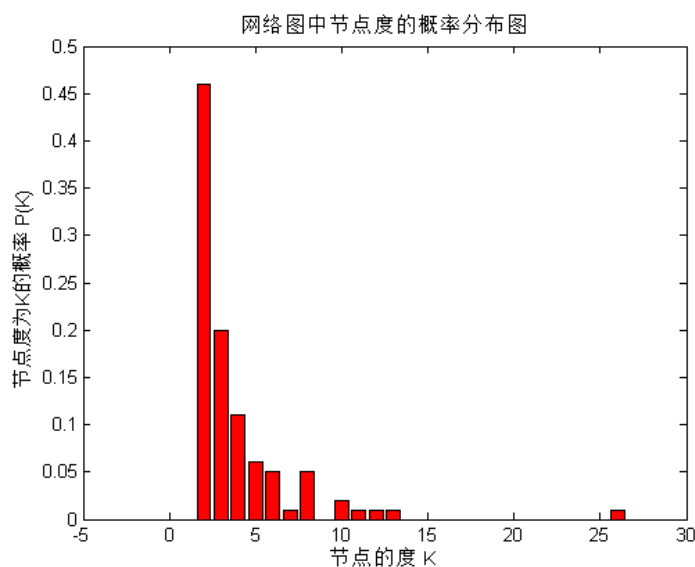


图 4.8 BA Scale-Free 网络节点概率分布情况

图 4.7 和图 4.8 分布展现了网络中节点的度的分布情况,及节点度的概率分布情况。

节点中度的先是很快速上升到某一个只，然后迅速的下降，从图像  $y=2$  的地方画一条横线的话，可以看到在这条横线附近分布的点很多。节点的概率分布图说明了大部分的节点度的值为 2，其他度所占的节点个数比较少。通过 MATLAB 拟合网络节点度的概率分布曲线，得到如下结果：

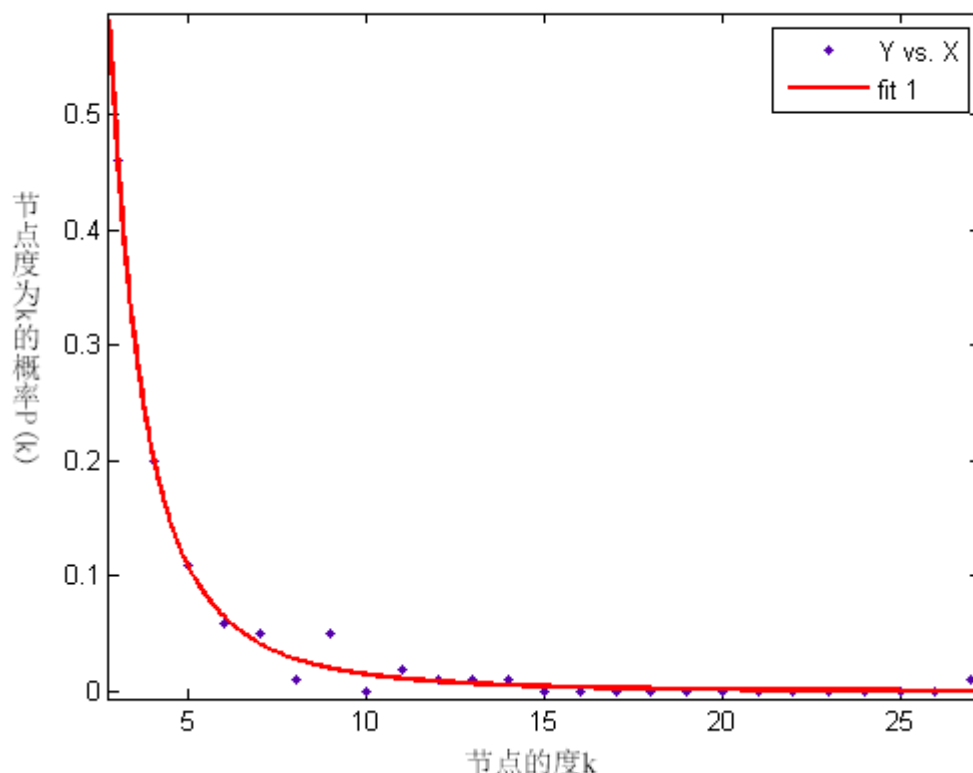


图 4.9 BA 无标度网络节点概率分布拟合情况

图 4.9 将网络节点的概率分布图拟合成置信度为 95% 的幂指数函数，幂值函数的表达式为  $P(k)=10.35k^{-2.836}$ ，幂指数为 2.836 介于 2 到 3 之间，证明通过 MATLAB 实现的上述网络图确实是无标度网络，模型和算法是有效的可以对上述模型对电子商务物流网络进行无标度网络的重构和优化。

### 4.3 物流中心功能设计

物流中心在物流运作中起着关键的作用，物流中心的选址是物流效率提升的关键因素之一。科学的选取了物流中心的地址后，要对物流中心的功能合理的规划。本文针对大型物流中心的功能进行了方案的设计。

大型的物流中心是一种集物流运作各种功能为一体的综合物流服务中心，包括了采购、运输、存储、库存控制、包装、流通加工、物流信息管理、物流增值服务功能。



物流中心所有的功能都需要具有较高的效率，需要考虑每种功能的瓶颈所在，下表是本文通过对大量文献的研究总结的本文物流中心各项功能的瓶颈点及其解决方案。

表 4.1 电子商务物流中心功能分析

物流中心功能	瓶颈	解决方案
采购	采购过程信息封闭、信息共享有限；采购信息无法跟踪，导致产品的质量和交货日期无法被跟踪和控制；采购双方关系不稳定，竞争大于合作；对需求变化不敏感；暗箱操作难以控制。	SCM 系统协同管理；实现集中采购、全球采购和准时采购相结合的采购机制；采购合同管理信息系统，采购过程分权机制；采购内容透明化；全方位的监督合同完成的整个环节。
运输	时间长，费用高，包裹丢失率高	运输网络优化(个性化)、运输方式合理、实时监控、人员素质培养
库存	库存成本居高不下，牛鞭效应（空仓也是低效率的一种体现）	自动化分拣厂房，MRP 系统，JIT、TOC、VMI 相结合的库存管理机制，ABC 库存管理模式
包装	过度包装	绿色包装、减少包装材料种类和数量、合理设计包装形式
流通加工	占用时间长，影响交货时间	对不同的商品使用不同的流通加工策略，对没有必要进行流通加工的商品；充分发挥流通加工的生产管理职能
物流信息	实时性较差，更新速度慢	物流信息平台要具有个性化，针对不同的物流中心上线合适的物流信息平台；物流中心之间信息平台之间加强物流信息的沟通，及时反映矛盾信息；使用 RFID、EDI、GIS、GPS、EOS、POS 等技术支持物流信息的集成化管理
物流增值服务	是物流企业利润源的重要组成部分，但是在总体物流服务中占比较低；以低端服务为主，没有形成以客户为核心的服务理念。	加强企业物流增值服务意识，制定增值服务市场开拓方案，有针对有意识的发展物流增值服务。

表 4.1 清晰地表示出目前物流中心出现的问题以及影响每个功能模块发展的关键

因素，并针对这些问题提出了相应的解决方案。下图是物流中心所应包含的功能的详细内容：

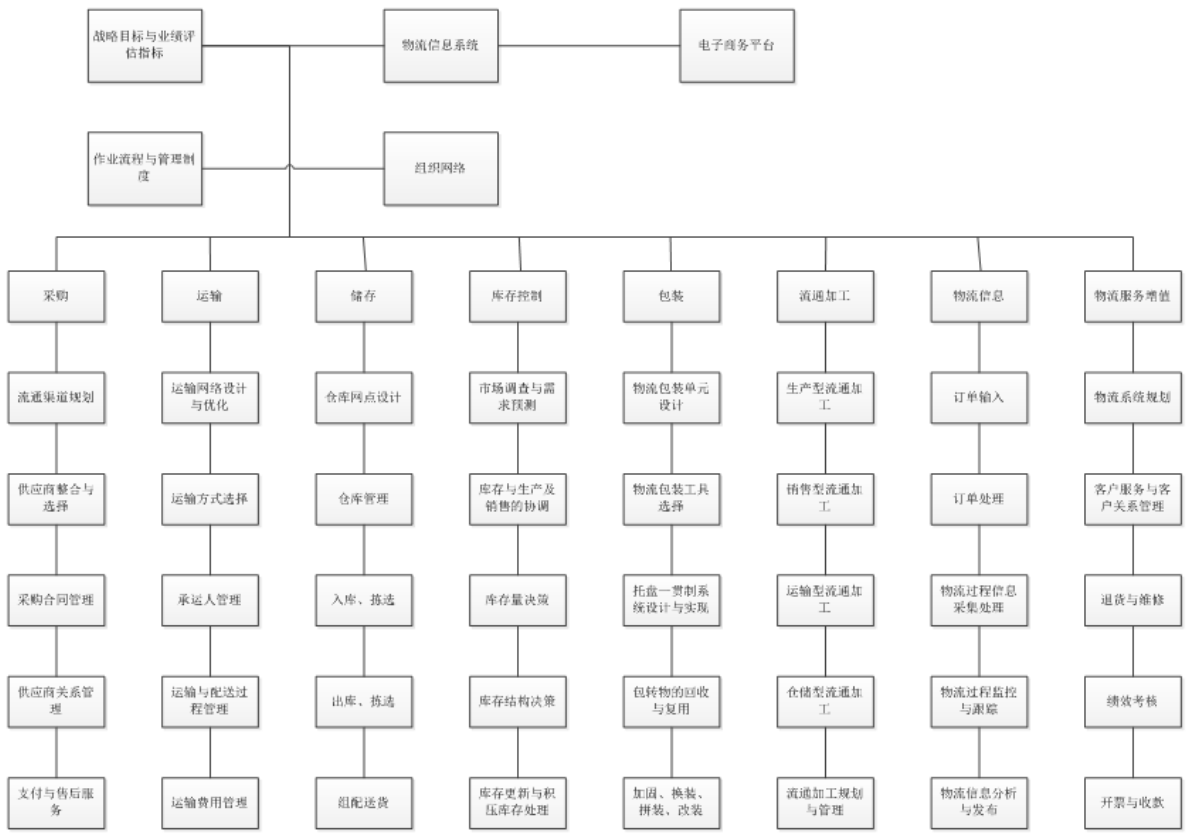


图 4.10 物流中心功能设计图

图 4.10 清晰地描述了物流中心构建的功能，以及支持每个功能实现的具体流程。各个功能之间相互协作共同完成物流任务，促进这个物流系统的运转，提高运作效率。上图中还反映出，在做物流功能设计之前针对每个物流中心的战略制定的不同、运作环境的不同对功能要素要做相应的调整，使得功能之间能够更加有效地在特定的环境中为企业的战略服务。

4.4 本章小结

本章利用复杂网络的统计特征，按照构建了物流中心的度选址模型、介数选址模型以及加权重度选址模型，并综合上述三种方法的选址结果确定了本文物流网络选址方法。介绍了物流中心选址的三种模型的评价标准，这三种标准分别考虑了节点的本身所处网络中的重要程度、节点在其他节点网络中的重要程度以及综合这两个重要性之后本文提出的加权重度选址模型，最后综合这三种选址模型最终确定物流中心的个数以及物流中心的地点。同时本文介绍了用于物流网络重建的无标度网络模型，并通过对

100 个节点的建模仿真验证了模型的可靠性和可应用性,为电子商务物流网络的重建奠定了基础。



## 第五章 电子商务物流网络规划应用案例

### 5.1 数据收集与描述

为了验证上述电子商务物流规划方法的应用价值，本文从某大型 C2C 电子商务网站收集了全国 460 座城市间物流流量的数据，并使用上述方法对数据分析。此数据中包含了交易商品从供应地（用  $A$  来表示原生地的所有城市的集合）到目的地（用  $B$  来表示目的地所有城市的集合）在 31 天中所有的物流流量，并记录了 31 天中在全国 460 个城市产生的物流总量。

对此电子商务网络进行研究时，将供应地作为网络的节点，物流配送的路线作为网络节点之间的边。下面是对此电子商务物流网络结构特征的描述：

- （1）网络是有向的，所有的物流都是有方向的，区分为向外物流和向内物流。
- （2）网络有权重，为了能够反映某条配送路线上的繁忙程度，用两地之间的物流流量来表示网络的权重。
- （3）在 31 天内，每天都有物流流量的变化，为了方便研究本文汇总了 31 天内两个节点之间的物流流量，这些数据能够在一定程度上反映出物流网络的规律。在这此研究中所采集的数据是阿里巴巴 C2C 电子商务平台 31 天内所有物流网络流量信息，总共有 460 个配送地点和 460 个接收地点，全国物流流量总计 763727。表格化此电子商务物流数据信息如下：

表 5.1 电子商务物流数据信息

数据来源	时间跨度 (day)	配送城市 (个)	接收城市 (个)	包裹量(件)	网络是否 有向
阿里巴巴 C2C 电子商务平台	31	460	460	763727	是

由于网络的数据量很大，按照模型仿真出来的复杂网络的图像很难分辨的出网络节点的，所以要对数据进行处理，方便理解和分析。

### 5.2 数据处理

#### 5.2.1 流量数据网络化

由于收集到的数据是两地之间物流流量的数据，要验证网络的小世界特性和无标度特性，并使用自适应算法对边去除和重连必须将流量数据矩阵转换成构建网络的点对连接矩阵。下面是数据处理的方法：

首先，将流量矩阵转换成 0-1 矩阵。如果两地之间流量不为零，则两地之间有连接用 1 替换原来的流量；如果两地之间的流量为零，则两地之间没有连接原来的数据不变。其次将转换完成的数据存储到新建的邻接矩阵当中，此矩阵是点对矩阵的过渡阶段。其数学模型如下：

假设流量矩阵为  $M$ ，邻接矩阵为  $C_{460 \times 460}$ ， $i$  为行标， $j$  为列标， $c(i,j)$  表示第  $i$  个城市与第  $j$  个城市是否有连接， $m(i,j)$  表示第  $i$  个城市与第  $j$  个城市之间的物流流量。数学表达式如下：

$$c(i, j) = \begin{cases} 1, m(i, j) > 0 \\ 0, m(i, j) = 0 \end{cases} \quad \text{式(5.1)}$$

模拟上述模型，得到邻接矩阵。邻接矩阵详细的描述了节点之间连接的关系，点对矩阵可以为图像模拟提供方便。下图是对电子商务物流网络进行的模拟结果：

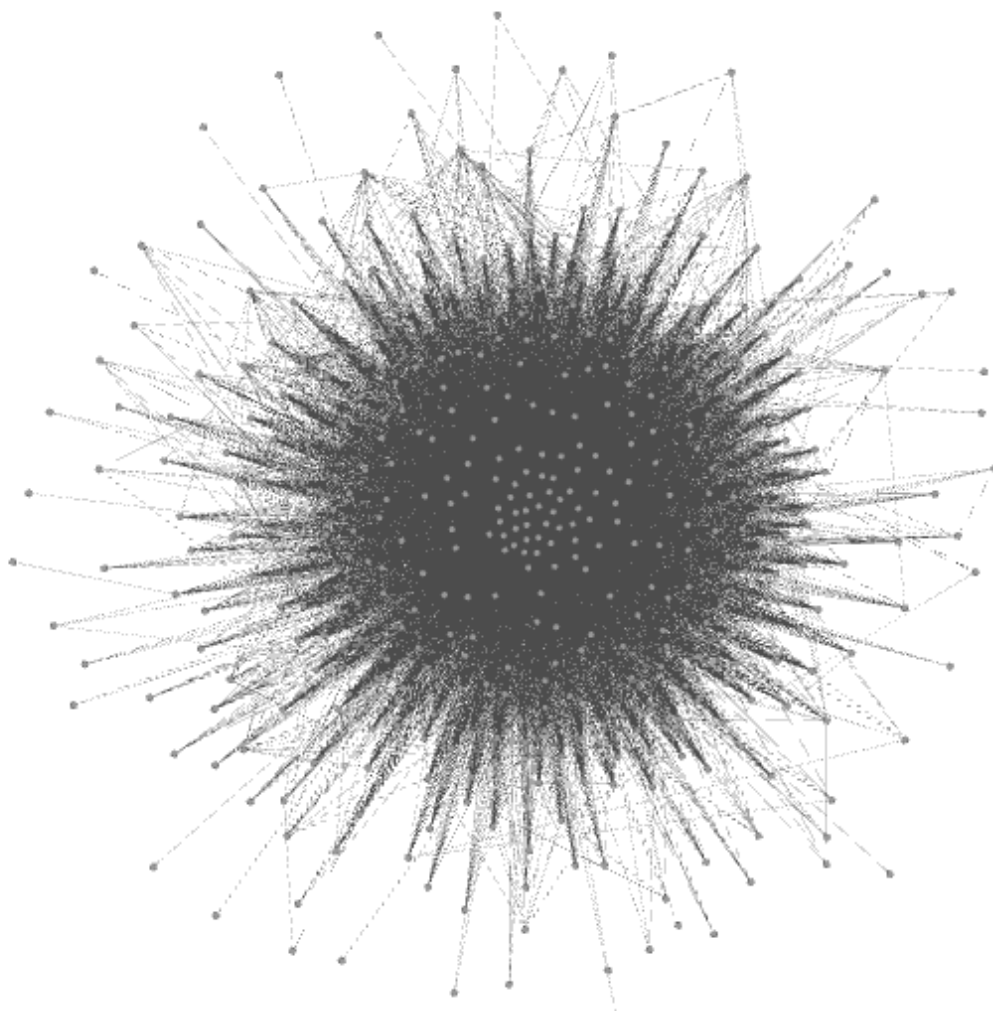


图 5.1 电子商务物流网络模型

图 5.1 是电子商务物流网络的真实写照，此图将节点按照节点度的大小进行了排

序，反映出度比较大的节点占比很小，而且中间颜色很深说明大部分的节点与这些节点都有联系，但并不能说明这些节点就一定是物流中心。实证研究表明，度大的节点不一定是物流中心，有可能度较小但是其介数值较大的节点作为物流中心更有价值和意义。为了能够对网络有更加直观清晰的认识，对上述网络数据进行分层处理。

### 5.2.2 电子商务物流网络数据分级

为了方便研究，对物流网络数据进行分级处理。网络的分级需要有一系列的指标来划分网络的级别，这里使用网络的平均度值作为分级的标准，高于平均度的节点划分为一层，低于平均度的节点划分为一层。划分完成之后分别对不同等级的数据进行网络模型的构建，对无法直观的表达网络节点间关系的网络继续进行分级，直到所有的网络都是清晰可见的。最后将这些网络节点分别存储到不同的数据文件中。

通过计算，上述网络中节点的度 $\langle k \rangle$ 的平均值为 33.7565，大于平均度 $\langle k \rangle$ 的节点有 85 个，小于平均度 $\langle k \rangle$ 的节点有 375 个。将大于平均度 $\langle k \rangle$ 的节点提取出作为单独的网络数据进行分析，小于平均度 $\langle k \rangle$ 的节点的节点作为另外一个层级的网络继续进行分析。以此类推总共将网络划分成了三个层次，最高层拥有 35 个高级节点（节点的度大于中层网络的平均度），中层拥有 50 个中级节点（节点的度介于中层网络平均度和底层网络平均度之间），底层拥有 375 个节点，是所有低于初始网络平均度的节点的集合。

下面三张图分别展现出了三个层次的网络结构：

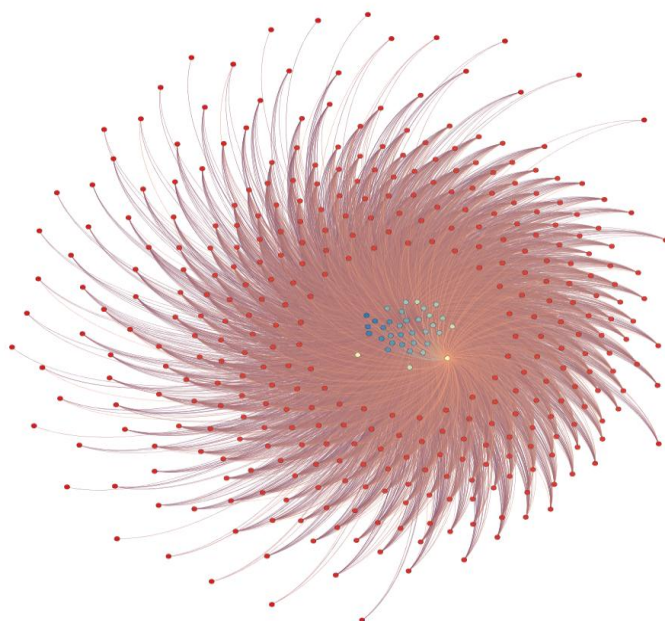


图 5.2 度大于中层网络平均度 $\langle k \rangle=165.0018$  的网络图形



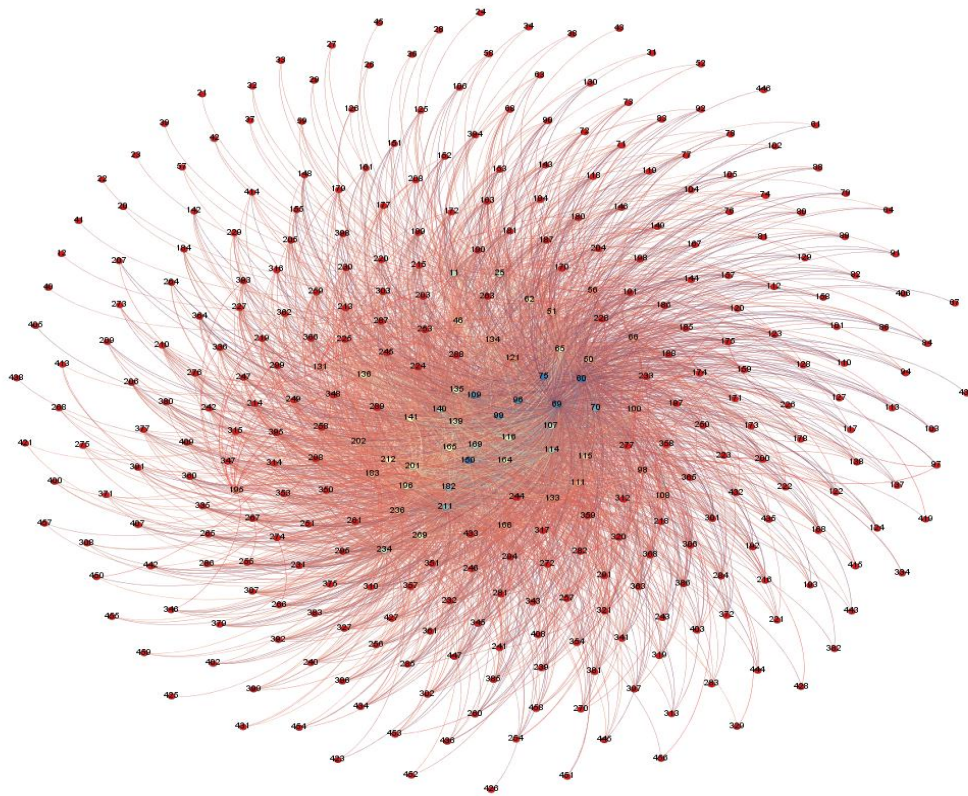


图 5.3 度小于中层网络平均度 $\langle k \rangle = 165.0018$  的网络图形

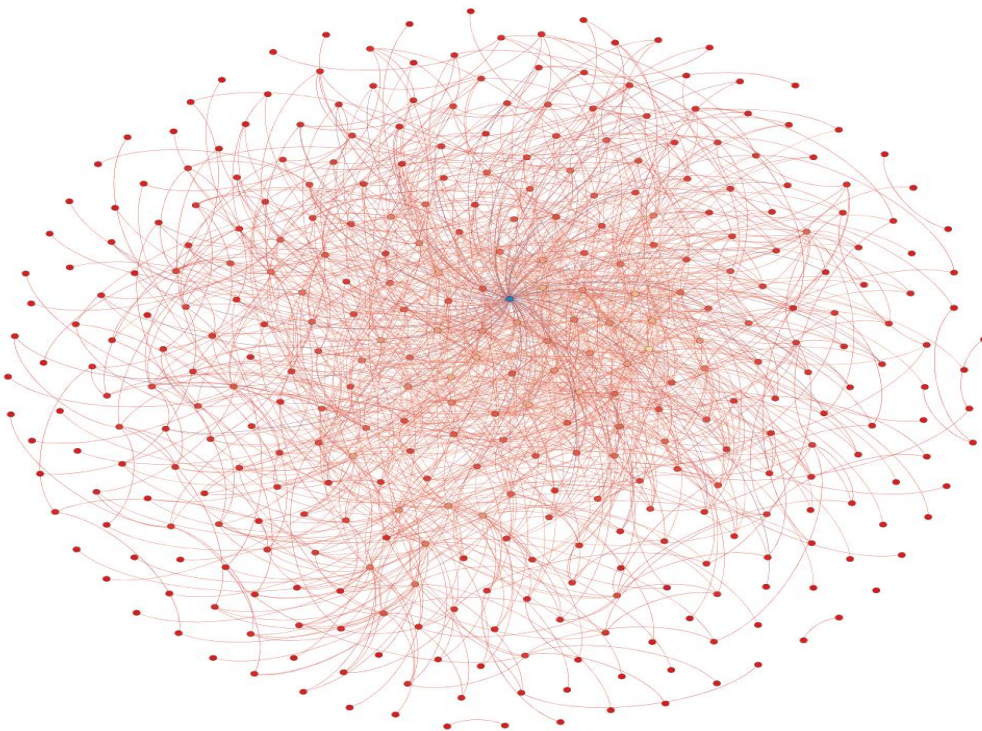


图 5.4 度小于原始网络平均度 $\langle k \rangle = 33.7565$  的网络图形



上面三张图呈现出了不同平均度的网络特点,从图 5.2 网络的中心点很明显的向中心聚拢,到图 5.3 中中心点慢慢的向外扩散,到图 5.4 除了中间一个点其他的所有节点都是发散的。也就是说随着网络中度的平均值越来越大,度的分布越集中。同时,通过对物流网络的数据分级结果发现,网络中大部分的联系被很少的一部分节点掌握,在三级网络中大部分节点的联系平均不到 10,这说明本文的电子商务物流网络中只有很小的一部分节点是比较关键的是网络的脆弱节点,需要物流企业精心设计和维护。大部分的节点对于网络来说是具有很强的鲁棒性,也就是说这些节点在网络中的产生和消失对网络的分布和网络的运行影响很小可以忽略。基于此本文将物流中心定义为网络中的脆弱节点,通过找到网络中的脆弱节点来确定物流网络的物流中心。

### 5.2.3 数据分析假设及参数

为了保证研究的严谨性和科学性,在进行数据分析的时候需要建立如下假设:

(1) 从  $A$  到  $B$  之间没有地域的限制,只要有物流就有连线的可能,也就是两地之间是否会有直通物流只跟整个网络的平均路径长度有关系。

(2) 评价物流中心点好坏的标准是节点的度的加权平均数。

(3) 每条边的权重由两地之间的物流量决定。

(4) 本地物流不在网络规划的范围內,要将本地物流的数据剔除。

(5) 假设将该物流网络改成无向物流网络即  $A_{ij}=A_{ji}$ 。并对物流数据集进行处理,为构建无向网络和加边权重提供条件。

在对物流网络进行特征分析的过程中需要构建很多模型,求解很多有关物流网络的特征值,要用到很多数学模型来求解。下面是相关参数的对照:①供应地的数量  $N$ ;②配送路线的数量  $M$ ;③节点  $i$  到  $j$  的物流流量  $F_{ij}$ ;④物流网络的平均度  $\langle k \rangle$ ;⑤平均最短路径长度  $L$ ;⑥系统聚类系数  $C$ ;⑦相关系数  $r$ ;⑧度的分布指数  $\gamma$ 。⑨物流网络的密度  $\rho$ 。

## 5.3 电子商务物流网络复杂性分析

作为电子商务系统的一部分,物流网络是一个跨区域的、典型的、动态的、开放的、复杂的巨大系统。它是一个商品和信息的流动平台,由若干条配送线路按照一定的方式连接组成复杂系统,包括了供应地、分销地、配送路线、目的地等要素。把供应地看成是节点,配送路线看成节点之间的边,物流的吞吐量看成是点权,物流的流量看成是边权,这个庞杂的电子商务物流网络就被抽象成一个复杂的边加权网络。

首先对网络的整体结果进行网络构建,对物流网络节点之间的关系有一个整体的描述。下图展示了电子商务物流网络节点之间的联系:

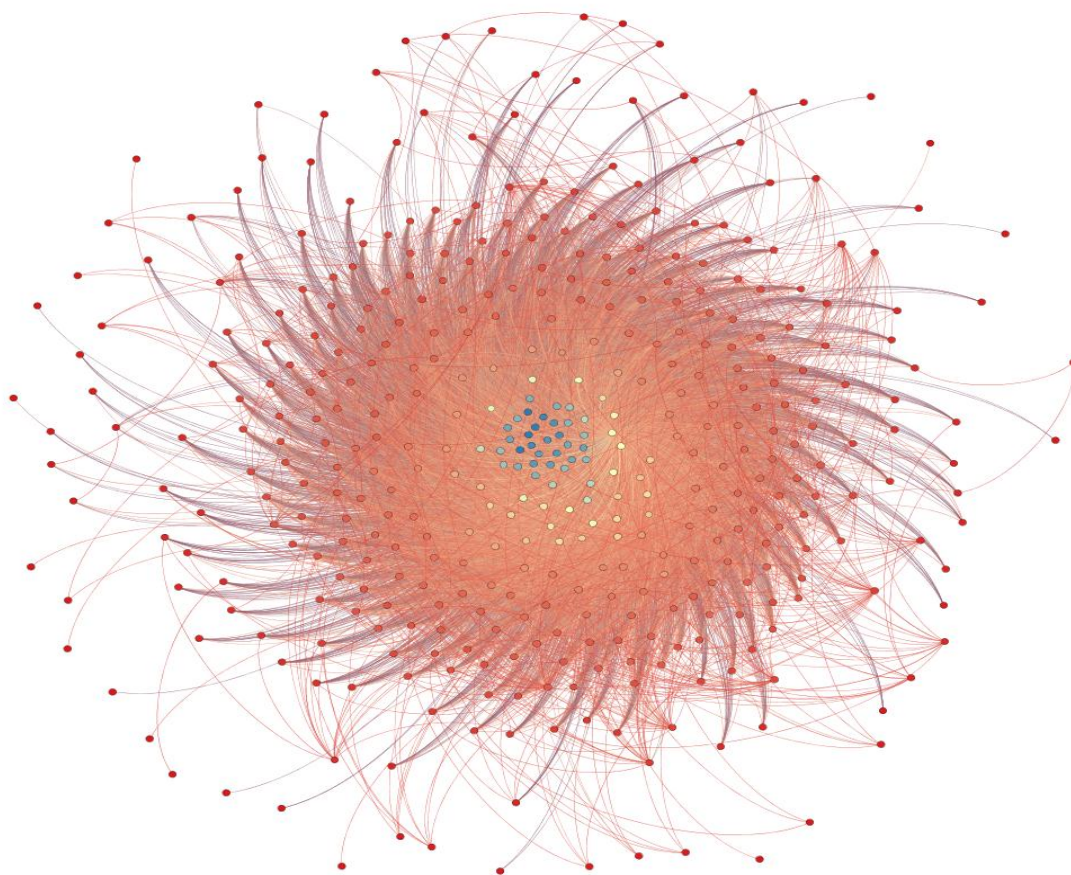


图 5.5 物流网络节点连接图

图 5.5 是电子商务物流网络 460 个节点之间的网络连接图,虽然无法看到各个节点之间是如何进行物流的传递的,但是节点的特点可以从网络图上清晰的获得。这种类型的网络图是按照节点度从大到小的顺序从网络的中心向外辐射,也就是越靠近中心的节点,越多的与外界联系。颜色也是区分节点度大小的一种表达,颜色有深蓝色到黄色再有黄色到红色递进的过程中,节点的度越来越小。如果将此网络图像比喻成一朵绽放得绚烂的花朵的话,花蕊是由与外界联系最多的节点组成的,靠近花蕊的也是网络中最多的节点,这些节点围绕着平均路径长度上下波动,最外面的就是一些与这个世界联系不是很紧密或者说没什么联系的节点。所有的这些节点对于构成这个网络系统公式都是必不可少的。定性的分析为定量分析提供方向,首先按照公式计算电子商务网络中的平均度的值为 33.7565。下图是网络中度的概率分布曲线:

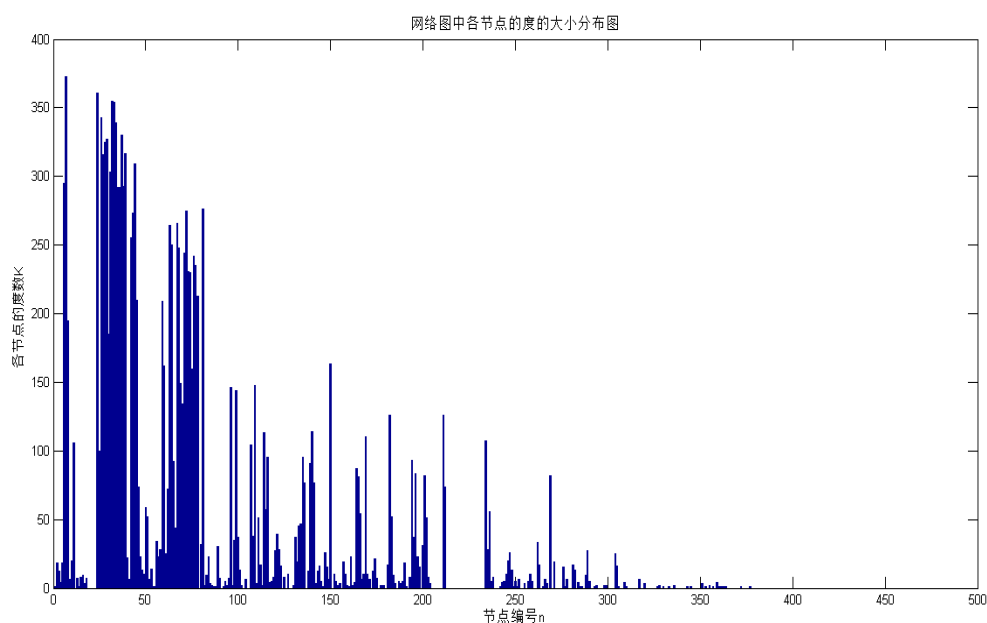


图 5.6 网络中个节点中度的大小分布图

图 5.6 画出了电子商务物流网络中各节点的度的大小分布情况，图中清晰的展现出了度的分布趋势，将网络中的度值点可以近似的连接成平滑的曲线。还可以看出大部分节点的度都是很小，几乎接近于 0。但是根据上面的图像很难用数学函数将其描述出来，所以这里暂且认为此网络的度的分布具有随机性，为后面研究网络节点度的概率分布特征的论证奠定了基础。

其次，求解电子商务物流网络的聚类系数，聚类系数代表着网络的聚集程度，聚类系数越大网络的聚集程度越高，反之越低。按照聚类系数的定义求解电子商务物流网络的平均聚类系数：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n 2E_i / (k_i(k_i - 1))}{n} \quad \text{式(5.2)}$$

的值为 0.724，聚类系数介于 0~1 之间，并且远远大于 0，接近于 1。

最后，平均路径长度说明了网络运行的效率，平均路径长度越长，网络的运作效率越高。如果邮寄一封邮件由 ‘A’ 到 ‘B’，在网络中中转了 3 次相较于中转 10 次的效率高、时间短、成本低。根据平均路径长度的公式：

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2} N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad \text{式(5.3)}$$

求解出电子商务物流网络的平均路径长度为 1.927，在具有 460 个节点的网络中每

两个节点之间平均需要两个中转可以完成物流的移动。所以此网络的平均路径长度越短，说明网络的运转速度越快愈加高效。

大量的实证研究证明，大部分实际存在的网络具有复杂网络的特性。第三章中介绍了无标度网络具有较大的聚类系数以及较小的平均路径长度的特点，其度的概率分布服从幂律分布的特征。在上一节中，通过对电子商务物流网络数据基本特征的分析，得到了网络的度及其大小的分布、聚类系数和平均路径长度。其中网络平均聚类系数  $C$  为 0.724 和平均路径长度  $L$  为 1.927，这两个参数的值符合上面描述的小世界网络和无标度网络的高聚类短平均路长的特性。小世界网络和无标度还有一个重要的参考指标就是它的节点的度的概率分布情况，下图是通过 *MATLAB* 仿真出来的网络中节点的度的概率分布图：

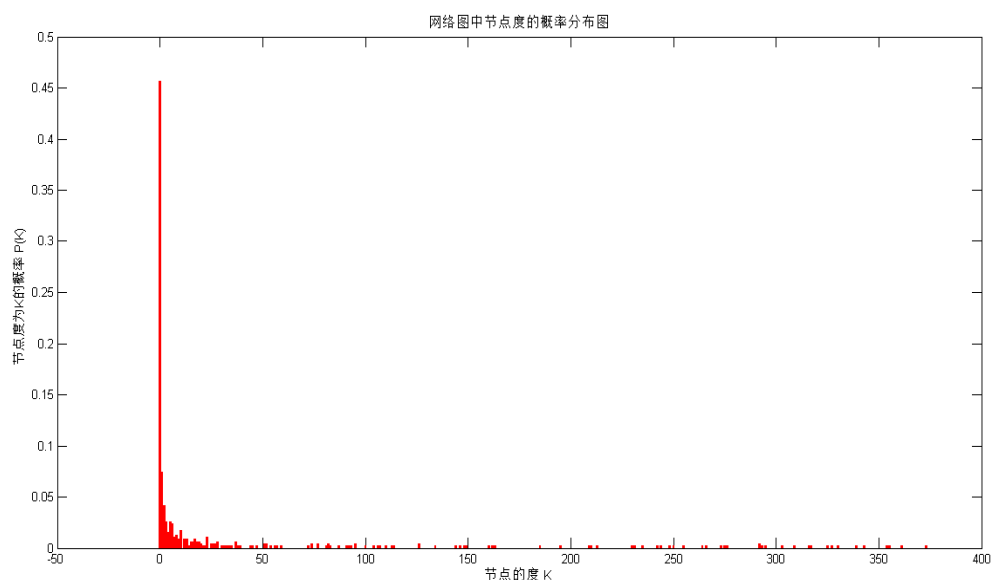


图 5.7 网络中各节点中度的大小分布图

从图 5.7 可以看出有 45% 以上的节点的度的值为 0，度的值在 50 以上的概率也不超过 5%。将节点的度作为横坐标，节点度的概率作为纵坐标对此网络节点的概率分布曲线进行拟合得到如下拟合图：

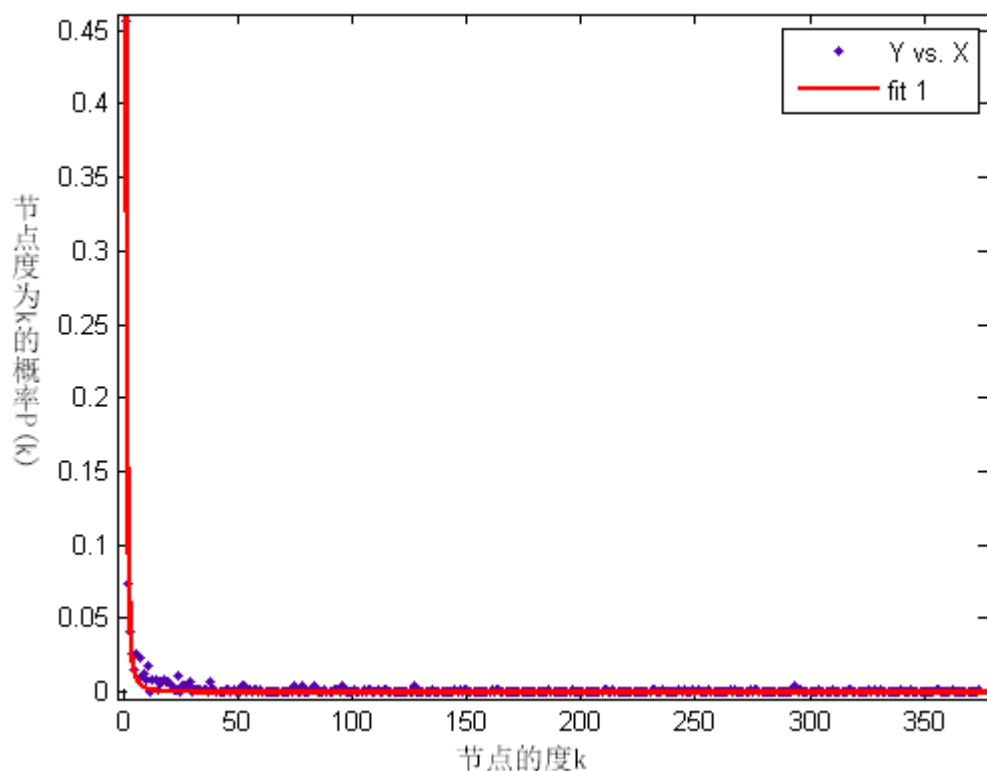


图 5.8 网络中各节点中度的大小分布概率拟合曲线

图 5.8 显示了节点概率分布的幂律拟合的结果，横坐标代表了节点度的大小，纵坐标代表了每个度节点分布的概率，按照幂律  $y = ak^{-\gamma}$  的形式，通过计算拟合出置信度为 95% 的节点度的概率分布曲线，拟合曲线表达如下

$$P(k) = 0.4541k^{-2.282} \quad \text{式(5.4)}$$

上面的结果表明，电子商务物流网络是服从幂指数为 2.282 的幂律分布，而且幂指数的值在 2 到 3 之间，根据无标度网络度和度的分布特性说明了此网络是具有无标度性的，即电子商务物流网络是属于复杂网络中无标度网络的一种。

综上所述，电子商务物流网络具有无标度网络的特性，根据网络模型中各个特征指标的要求及其意义。下表展示了此网络的具体特征及其特征值：

表 5.2 电子商务物流网络特征

统计特征	平均路径长度	聚类系数	度的分布
特征值	1.927	0.724	幂律分布(2.282)

表 5.2 中描述了电子商务物流网络具有高聚类系数、低平均路径长度和度的概率分

布符合幂指数介于 2 到 3 之间的幂律分布，上述特征表明了电子商务物流网络具有典型的无标度的特性。

5.4 电子商务物流网络中心选址

物流中心选址的关键在于找到网络中的关键节点，以提高网络的运行效率和实现网络运行的低成本。寻找网络中的关键节点有两种经典的方法，一种是基于度的评价方法还有一种是基于节点介数值的评价方法。这两种方法都有一定的局限性，针对这两种方法的局限性本文提出了两者兼顾的基于加权度的物流中心选址方法，可以更加高效的挖掘出网络的关键节点即本文的物流中心节点。

5.4.1 基于度的物流中心选址

网络中度的值比越大的节点在网络中的地位越重要，平均路径越短的，网络的效率越高。而且网络中有少部分节点和网络中大部分节点联系密切，这为物流中心的选择提供了理论依据。而且，物流网络研究中物流中心是物流网络中处于主要位置的节点，并且对整个物流系统起到重要的支撑作用。它也担负有重要的物流配送分发等功能，物流中心的选择关系到整个物流网络的效率。按照复杂网络理论，将度值大于网络的平均度值的节点选作物流中心，担负起物流配送路线规划、物资集散和转运的使命。下表是根据无标度网络中节点度值大于网络平均度值的节点：

表 5.3 基于节点度的网络中心节点

节点	6	7	8	11	24	25	26	27	28	29	30	31
度	295	373	195	106	361	100	343	316	325	327	185	303
节点	32	33	34	35	36	37	38	39	42	43	44	45
度	355	354	339	292	292	330	293	317	255	273	309	210
节点	46	50	51	56	59	60	62	63	64	65	66	67
度	74	59	52	34	209	162	72	264	250	92	44	266
节点	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	81
度	248	149	134	244	275	231	230	160	242	235	213	276
节点	96	98	99	100	107	108	109	111	114	115	116	121
度	146	35	144	37	104	38	148	51	113	57	95	39
节点	131	133	134	135	136	139	140	141	150	164	165	166
度	37	45	47	95	77	91	114	77	163	87	81	54
节点	169	182	183	194	195	196	201	202	211	212	234	236

度	110	126	52	93	37	83	82	51	126	74	107	56
节点	269											
度	82											

表 5.3 展示了按照度的大小评价的网络中心节点的编号及其度的值，总共选择出了 85 个关键节点，并将其作为备选的中心节点。物流中心是一个综合性的节点，它是承载物流实现的关键环节，对于物流中心的评价如果只考虑其度的大小会忽略某些节点虽然有很大的度其实其运量很小，完全没有设计成为物流中心的必要。

### 5.4.2 基于介数中心的物流中心选址

度不是衡量一个节点重要性的唯一标准，理论上度越大节点的重要性也就越大。由于现实网络的复杂性和不可控制性，有大部分网络的重要节点是由介数的大小决定的，介数越大节点的重要程度越高。首先，编程实现介数中心性算法，求解每个节点的介数值，按照介数值的大小对节点进行排序，找到所有大于平均介数的节点作为整个网络的物流中心。下图是节点的介数分布图：

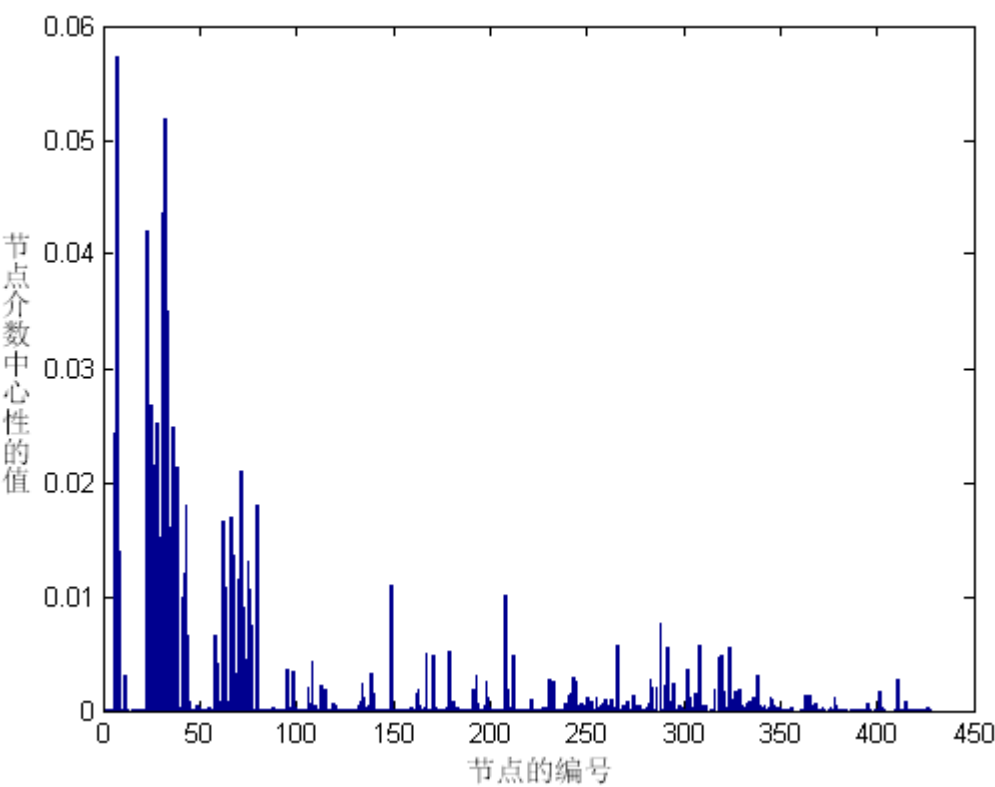


图 5.9 节点介数分布图

图 5.9 将网络中节点的介数大小展现了出来，通过对节点介数进行遍历和平均介数

进行比较，将大于平均介数的节点存放到中心节点的矩阵中。此网络节点的平均介数为 0.02176，其中大于平均介数的节点有 93 个，相较于按照度最大的方式找到物流中心节点，节点的个数变少了。将两种方法找到的节点进行比较，选择出二者的交集。结果如下：

表 5.4 基于介数的物流中心选址结果

6	32	44	71	108	167	231	266	303	345
7	33	58	72	113	171	233	274	306	363
8	34	59	73	115	179	241	283	307	365
23	35	62	74	134	191	242	284	308	
25	36	63	75	135	193	243	286	316	
26	37	66	76	138	198	244	288	319	
27	38	67	77	139	199	250	291	320	
28	41	68	80	140	208	253	294	321	
29	42	69	98	149	209	255	295	327	
31	43	70	106	163	212	263	302	336	

表 5.4 是按照节点的介数与网络的介数平均值作比较选择出来的 93 个物流中心点，这 93 个点中有很多点的度并不是很高，甚至是低于平均度的值，所以考虑到对于节点度和介数的综合因素，下表将基于度和基于介数的选址结果进行了合并得到了如下选址结果：

表 5.5 基于度的物流中心和基于介数的物流中心交集结果

6	31	43	70	96	211
7	32	44	71	99	234
8	33	45	72	109	236
11	34	59	73	135	269
24	35	60	74	140	
26	36	63	75	141	
27	37	64	76	169	
28	38	67	77	182	
29	39	68	78	196	
30	42	69	81	201	

表 5.5 是对介数值选址和度选址结果的交集，说明了选择出的这些节点既具有较高



的度，又具有很高的介数。从现实物流中心选址方面来描述，这些节点是网络中既与很多其他节点有联系，其他节点对此节点也具有较高的依赖性。这样的节点在物流网络起着不可替代的重要作用，也是网络的脆弱性体现的节点。取交集可能会忽略掉某些节点的重要信息，针对此本文提出了基于加权度的物流中心选址来解决这一问题。

### 5.4.3 基于加权度的物流中心选址

基于度的物流中心选址和基于介数的物流中心选址分别考虑了节点在网络内的重要性及在网络间的重要性。基于加权度的物流中心选址将节点在网络间和网络内的重要性相结合，选择出加权度大的节点作为物流中心的备选节点。对网络数据进行加权度的计算，结果如下图所示：

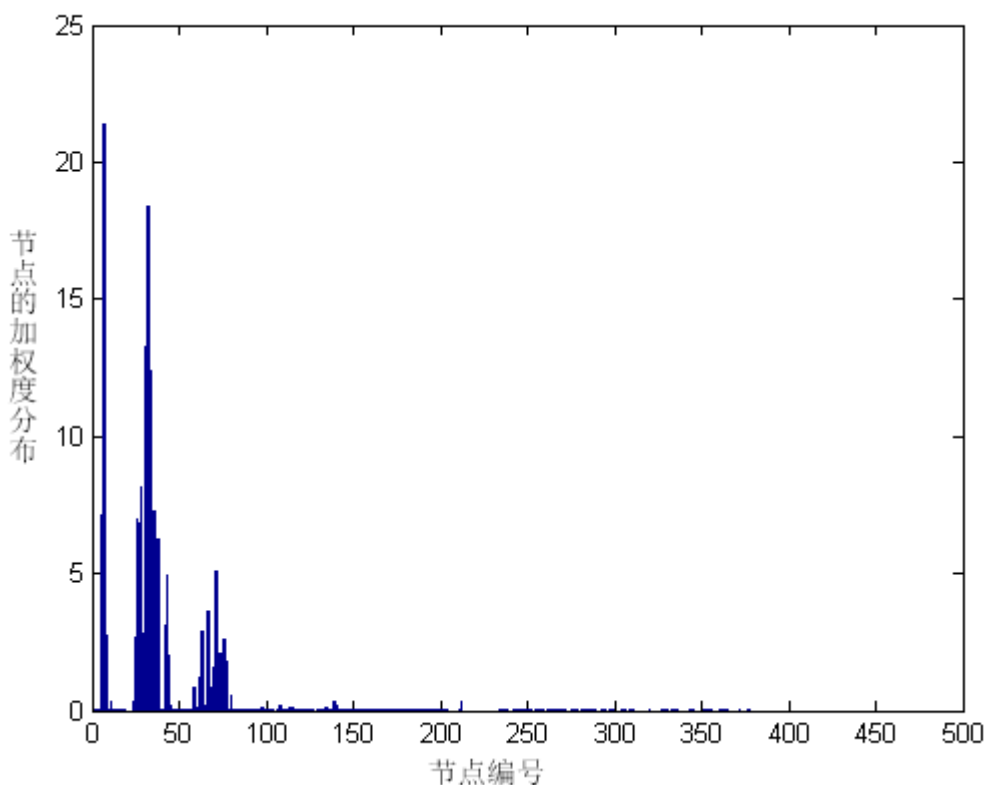


图 5.10 节点加权度的分布柱状图

图 5.10 中横坐标代表节点编号，纵坐标代表此节点的加权度的值，从上图中可以看到整体的节点的加权度比节点的度的值明显降低并平缓了许多，大部分节点的度依然很低，但是有些节点虽然度很大但是节点的加权度却很小，这是由于大部分节点间的信息传递都不会通过此节点进行联通。这说明度很大的节点，加权度不一定大其节点的重要性和脆弱性也就显得不那么明显了。通过对网络进行加权度物流中心选址的应用，选址结果如下表所示：

表 5.6 基于加权度的物流中心选址结果

节点	6	7	8	25	26	27	28	29	30	31
度	295	373	195	100	343	316	325	327	185	303
节点	32	33	34	35	36	37	38	42	43	44
度	355	354	339	292	292	330	293	255	273	309
节点	59	62	63	66	67	68	70	71	72	73
度	209	72	264	44	266	248	134	244	275	231
节点	74	75	76	77	80					
度	230	160	242	235	32					

表 5.6 中节点度的分布来看,并不是所有的节点的度都是很高的,也并不是度高的节点一定会成为备选的物流中心。在考虑到节点本身与网络其他节点之间联系的同时要考虑到节点是不是真正的在网络中起到了关键的作用,针对此本文提出了将两者结合考虑的加权重度模型选择最优的物流中心,结果如表 5-3 所示。表 5-3 所示的选择结果将在物流网络重建中作为基准网络,在此基础上进行网络的重构和优化。

综合比较三种选址方法,考虑到基于度的选址和基于介数选址的局限性,本文选择基于加权度的物流中心选址方法确定物流中心,并基于此物流中心进行物流网络的重构,来提高网络运行的效率,降低网络运行成本。

## 5.5 基于无标度的电子商务物流配送网络重建

### 5.5.1 基于加权度的物流中心选址结果的无标度网络重构

根据上述物流中心节点选择结果集的对比,选择以加权重度为标准的物流中心选择方案,并在此方案的基础上,在初始物流节点为 35 的基础上,按照无标度网络优先连接和增长的原则对网络进行重构。

上一节中论证了电子商务物流网络具有无标度的特性,同时通过度最大和介数最大两种方法确定了物流中心的数量和地址。在已有的物流中心的基础上,对此电子商务物流网络进行 *BA* 无标度网络重建。在物流中心选址模型中,将此网络物流中心规划为 35 个节点,所以在建立 *BA* 无标度网络的时候初始节点数量为 35,在此基础上按照无标度网络模型对网络的其它节点的连接进行重连,使得重新构建的网络有更优的幂指数,更短的平均路径长度。下图是基于 35 个物流中心的基础上重构的物流网络:

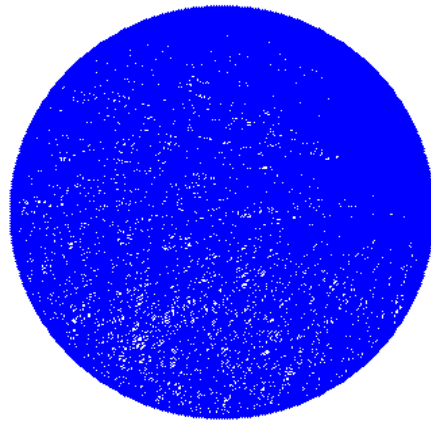


图 5.11 重构的无标度网络

图 5.11 是重构的无标度网络图，由于节点数量和节点之间的相互联系众多，导致网络图很难看出相互之间的关系，但是仍旧可以看出右侧的节点的联系密度明显大于左侧的那部分节点。为了方便观察本文利用按照节点度的大小对节点进行重新排列并对不同度的节点渲染不同的颜色方便观察，下图是优化显示后的重构网络图像：

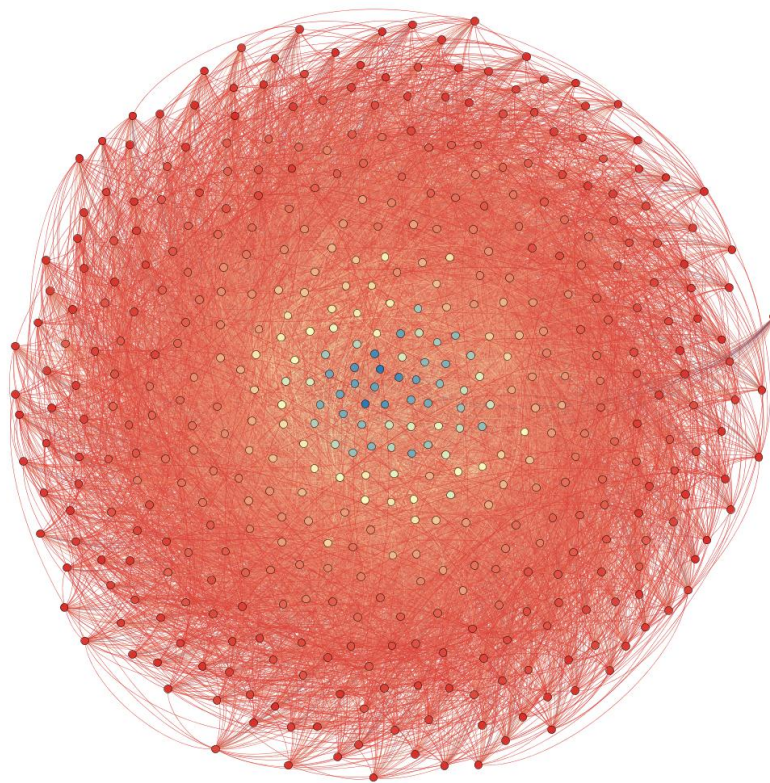


图 5.12 重构 BA 无标度物流网络

图 5.12 显示了优化后的物流网络图，35 个物流中心分布在网络的中心，承担着支撑和分配整个物流网络的重要作用。其他的节点按照度的大小由中心到边界越来越小，对于物流网络的影响越来越不明显。相对于重构前的网络，重构后的网络的脆弱性相对降低，鲁棒性相对增强，承受风险的能力增加。通过对重构网络中节点度的计算，将其通过图形的形式显示出来，结果如下图所示：

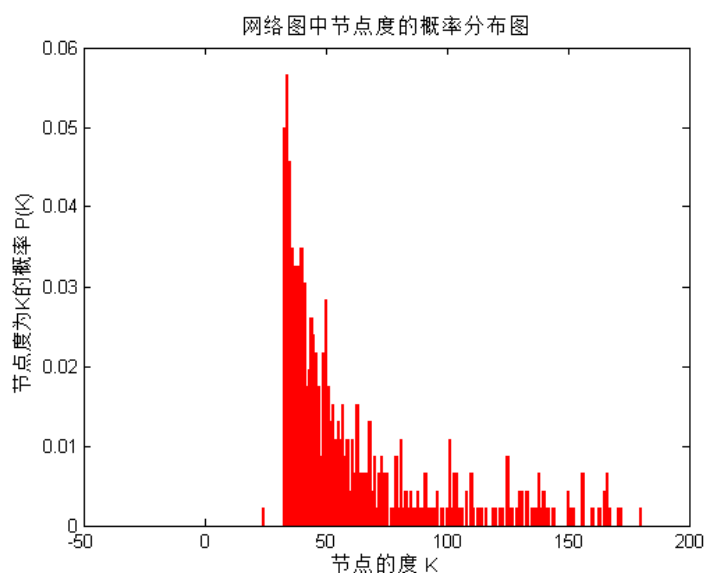


图 5.13 重构网络度的概率分布图

图 5.13 可以看出重构网络中度的节点的概率分布近似的服从幂律分布，通过对节点的度的概率分布进行拟合找到最佳的拟合曲线，拟合结果如下图所示：

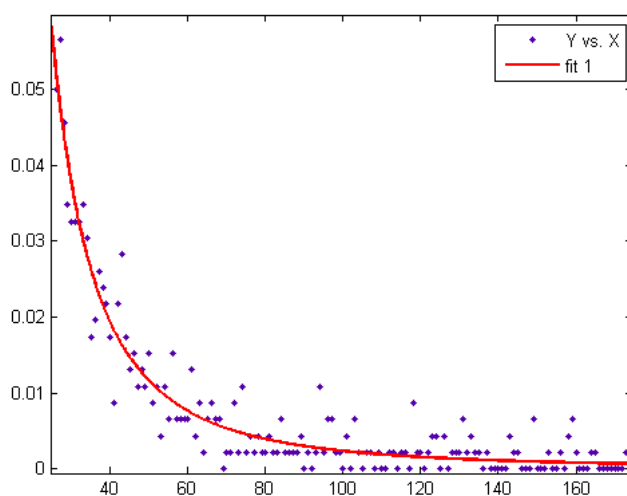


图 5.14 重构网络度的概率分布拟合图

图 5.14 表示出物流网络中的节点的度的分布严格的服从幂的分布，幂律分布的表达式为：

$$P(k) = 93.58k^{-2.309}$$

式(5.5)

概率分布服从幂律分布，且幂指数在 2~3 之间，满足幂指数的要求。而且此拟合曲线的置信度在 95% 以上。

重构的网络和重构前的网络比较有更小的平均路径长度：1.865。虽然只是减小了 0.062，但是对于物流配送网络的意义非同凡响。按照重构的网络重新规划网络的配送，充分发挥基于已经选择的物流中心的作用和功能。下表显示了重构后和重构前网络的特性之间的对比：

表 5.7 重构前后网络对比

统计特征	平均路径长度	聚类系数	度的分布
重构后网络	1.865	0.242	幂律分布(2.309)
重构前网络	1.927	0.724	幂律分布(2.282)

表 5.7 说明重构后的网络比重构前的网络平均路经长度减小了 0.062，重构的网络中共生成了 14540 条边，比初始网络减少了 988 条线路连接，降低了路线筹建和维护的费用。度的分布依然服从幂律分布，重构后的网络没有改变物流网络本身无标度的特性。如果按照每次周转的费用为¥5000，那么对于整个物流网络来说总共节约了 14.26 万元；如果按照每次周转需多耗费 1 小时的话，那么重构后的网络运转效率提高了 6.2%。

综上所述，以加权重度为标准的物流中心选址和基于已经确定的物流中心的电子商务物流网络重构可以提高网络的运行效率，降低网络运行的成本。

5.5.2 重构网络综合对比

为了验证基于加权重度的物流中心选址结果优于简单的基于度和介数的选址结果，本节重构了基于度选址结果的网络重构和基于介数的网络选址结果重构。分别对重构后的网络的度及度的分布，平均路径长度和聚类系数做了对比，结果如下表所示：

表 5.8 不同类型重构网络特性比较

统计特征	平均路径长度	聚类系数	度的分布
基于度选址的重构网络	1.869	0.118	幂律分布(3.009)



基于介数选址的 重构网络	1.884	0.194	幂律分布(2.467)
基于加权度选址 的重构网络	1.865	0.242	幂律分布(2.309)
重构前网络	1.927	0.724	幂律分布(2.282)

表 5.7 通过对平均路径长度的比较可以看出,基于加权度的网络的平均路径长度最短,网络平均周转次数最短,网络的效率最高成本最低,综上所述基于加权度的物流中心选址效果要好于其他两种方法,网络重构也是对物流网络进行优化的一种科学可行的方案。下图分别是基于度物流中心基础上的重构网络图和度的分布拟合图:

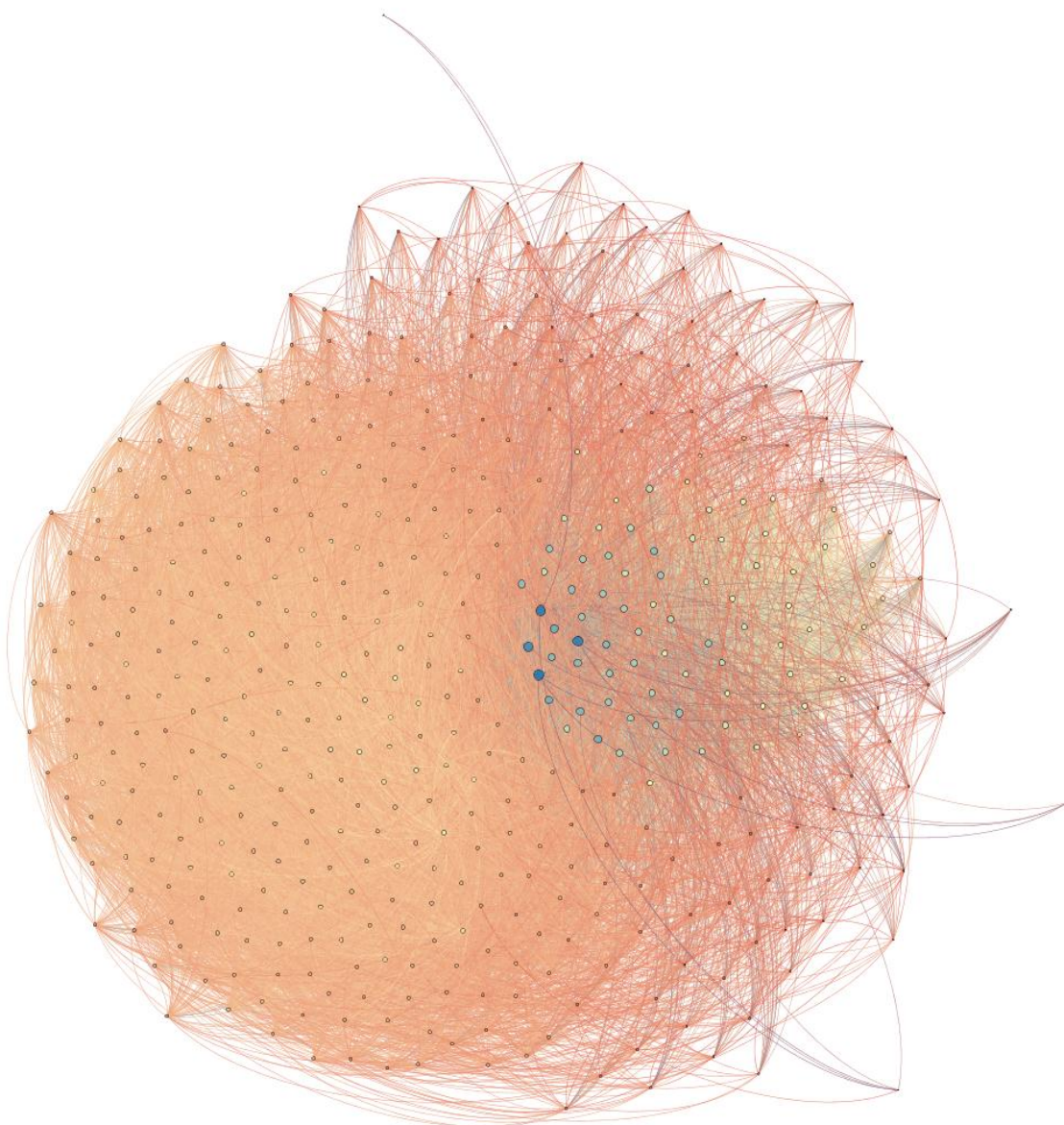


图 5.15 基于度物流中心基础上重构网络图

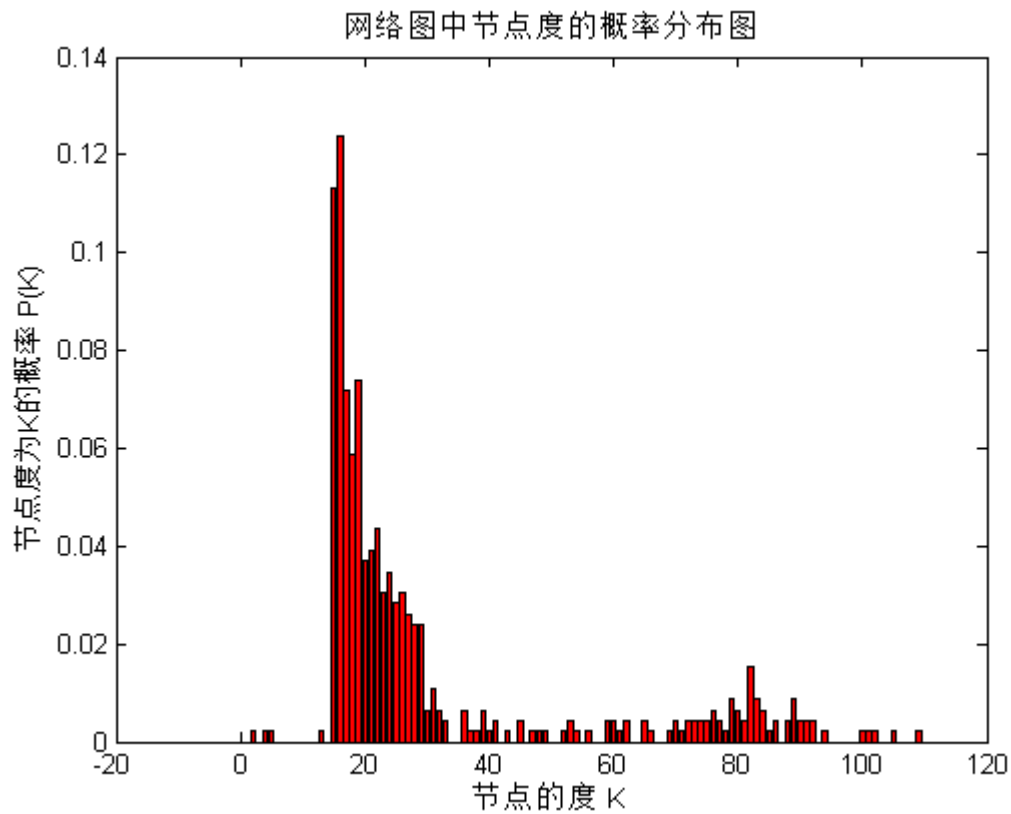


图 5.16 基于度中心重构节点度的概率分布图

对上图进行线性拟合结果如下：

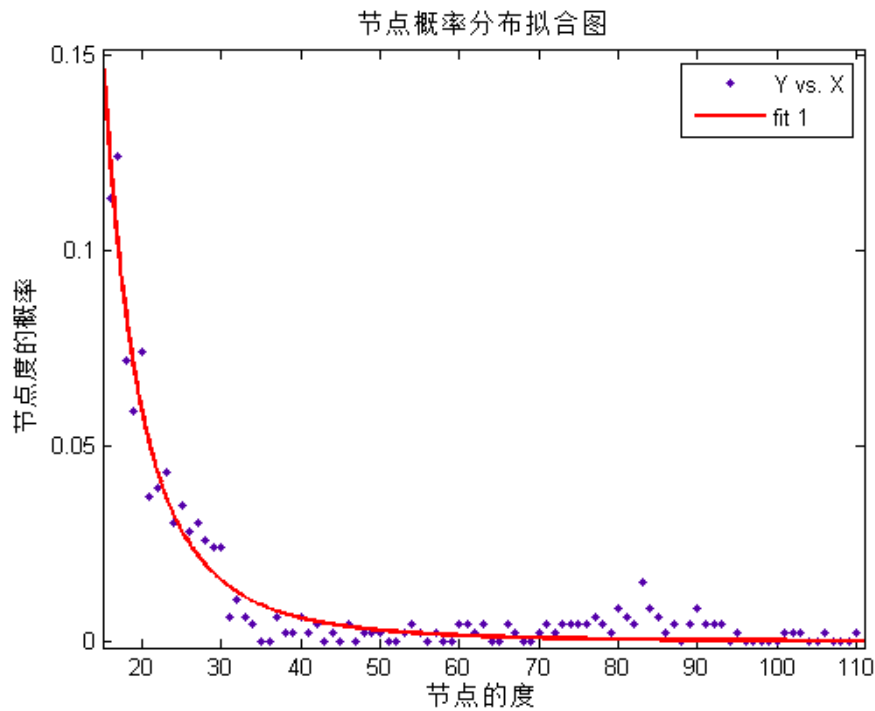


图 5.17 基于度中心重构节点度的概率分布拟合曲线

以上图示出基于度选择的物流点的重构网络特性，下面是基于介数选择出的物流中心的网络重构图及其特性：

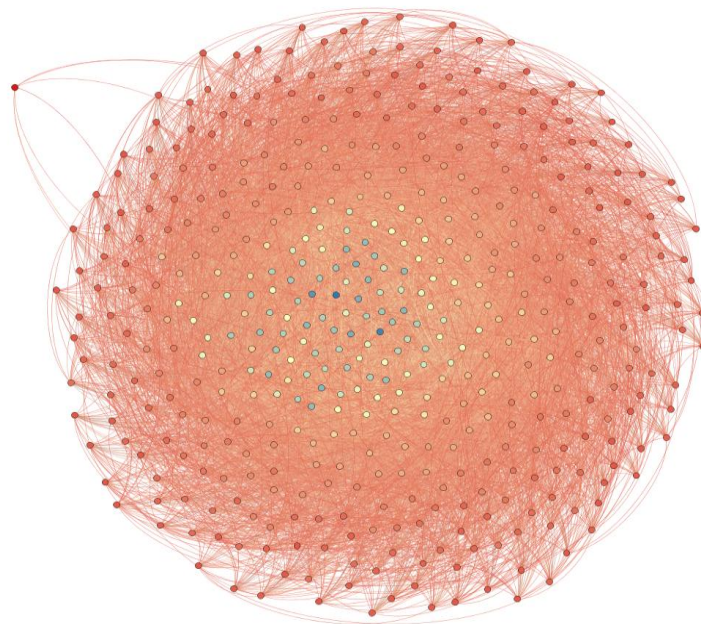


图 5.18 基于介数选址结果重构网络图

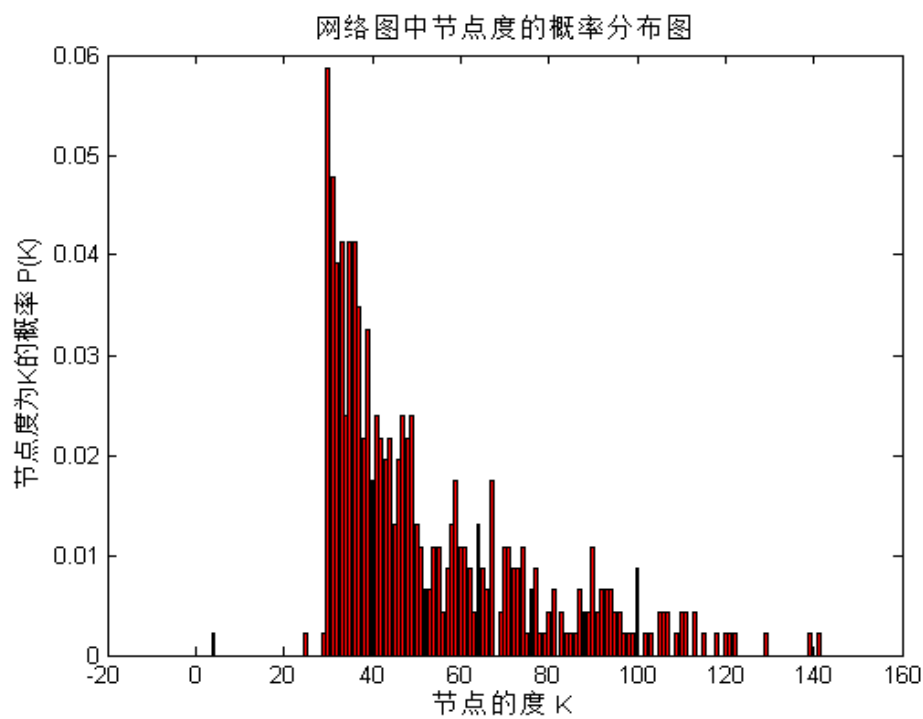


图 5.19 基于介数选址结果重构节点度的概率分布图



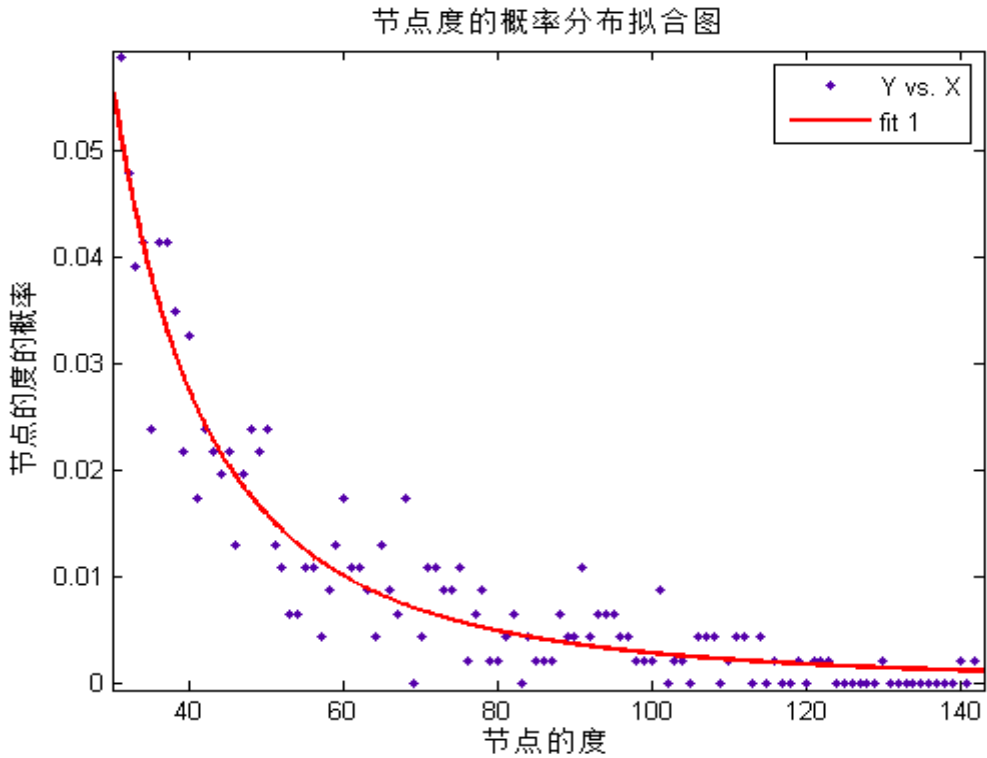


图 5.20 基于介数选址结果重构节点度的概率分布拟合曲线

上面六张图清晰的展示了重构后网络的特性，重构后的网络依然具有无标度特性，但是聚类特性没有那么明显，平均路长度径相较于初始网络都有所降低，但是相较于基于加权度的选址结果平均路径长度较高，聚类系数较低，整体的效率都比较低。综上所述，基于加权度的物流中心选址，以及基于此选址结果的无标度网络重构能够使网络更加的优化，效率更高。效率的提高用网络运转效率的提升率来表示，表达式如下：

$$E = \frac{L_{原始} - L_{优化}}{L_{原始}} * 100\% \tag{5.6}$$

式（5.6）通过节约的平均路径长度在原始平均路径长度中的占比确定网络提升的效率，这样考虑是因为周转次数少了，说明周转时间降低了，网络运转速度就会加快。仅仅使用网络的特性来比较网络优化的效果无法表达出应用的实际价值，而经济效益是衡量一个网络优化效果的最终要的标准。表 5.8 列出了计算优化网络成本节约量的变量的意义：

表 5.9 经济变量及其表达意义

变量	$C_{节约}$	$a$	$b$	$p$	$L_{原始}$	$L_{优化}$	$m_{原始}$	$m_{优化}$
----	----------	-----	-----	-----	----------	----------	----------	----------

意义	成本节约百分比	包裹周转一次的平均费用	两地之间连接的平均维护费用	包裹数量	初始网络的平均路径长度	优化后网络的平均路径长度	原始网络的连接数量	优化后网络的连接数量
----	---------	-------------	---------------	------	-------------	--------------	-----------	------------

表 5.9 是成本节约百分比计算公式中涉及变量的意义，则  $C_{\text{节约}}$  的表达如下所示：

$$C_{\text{节约}} = \frac{a * p * (L_{\text{原始}} - L_{\text{优化}}) + b * (m_{\text{原始}} - m_{\text{优化}})}{a * p * L_{\text{原始}} + b * m_{\text{原始}}} * 100\% \quad \text{式(5.7)}$$

式 5.5 是优化后的网络节约成本的百分比，用来衡量优化后的网络为企业带来的经济效益。其中周转费用节约百分比为：

$$C_{\text{周转}} = \frac{a * p * (L_{\text{原始}} - L_{\text{优化}})}{a * p * L_{\text{原始}}} * 100\% \quad \text{式(5.8)}$$

维护成本节约百分比为：

$$C_{\text{周转}} = \frac{b * (m_{\text{原始}} - m_{\text{优化}})}{b * m_{\text{原始}}} * 100\% \quad \text{式(5.9)}$$

根据式（5.6）（5.7）（5.8）可以求解出本文优化后网络的经济特性值，用来评价网络优化的效率。本文优化后的网络中变量的值如下表所示：

表 5.10 优化后网络特性值

变量	$C_{\text{节约}}$	$a$	$b$	$p$	$L_{\text{原始}}$	$L_{\text{优化}}$	$m_{\text{原始}}$	$m_{\text{优化}}$
基于加权度物流网络优化	[3.217%，6.362%]	a	b	763727	1.927	1.865	15528	14540
基于度物流网络优化	[3.009%，4.907%]	a	b	763727	1.927	1.869	15528	14314
基于介数物流网络优化	[0.804%，2.231%]	a	b	763727	1.927	1.884	15528	15403

下表展示了以上三种方法重构后的物流网络的经济特性：

表 5.11 三种类型重构网络经济特性

网络类型	优化连接数量	周转费用节约百分比	运转效率提升率	维护成本节约百分比
基于加权度中心重构物流网络	988	3.217%	3.217%	6.362%
基于度中心重构物流网络	762	3.009%	3.009%	4.907%

基于介数中心性重构物流网络	125	2.231%	2.231%	0.804%
---------------	-----	--------	--------	--------

表 5.11 可以看出基于加权重度中心重构物流网络无论从节约的周转费用方面、网络维护成本方面，还是提升的运转效率方面都比其他两种网络高，这说明基于加权重度的物流中心重构的物流网络要优于原始网络，同时也优于其他两种重构方案。说明本文提出的基于加权重度的物流中心物流网络重构方案是有效的，而且实现了对物流网络的优化的效果。

通过上面的方法，使得电子商务物流网络得到了优化，并得到了物流网络的优化矩阵。最后根据网络矩阵将网络节点对应到相应的城市，根据城市的特点按照 4.3 节的物流中心功能规划方案规划该城市的物流中心的功能。

### 5.6 本章小结

本章使用度值最大、介数最大以及加权重度最大的方法对电子商务物流数据进行分析，将网络中度值最大的节点、介数最大的节点以及加权重度最大的节点筛选出来，分别根据物流中心筛选标准筛选出了按照度值大的物流中心集合、介数大的物流中心集合、以及加权重度大的物流中心集合，并对其进行分析发现加权重度大的物流中心集合更能体现物流中心在网络中的重要作用和价值。然后在已经选出来的物流中心的基础上进行无标网络的重构，并对重建的网络进行复杂网络特性的分析，发现重构后的网络相较于初始网络有更短的平均路径长度，可以知道现实生活中物流配送网络的优化。



## 第六章 结论及展望

### 6.1 总结

本文分析了电子商务物流网络的复杂性，研究了复杂网络的相关理论以及复杂网络理论在物流领域的应用。对电子商务物流网络进行无标度证明，通过度最大模型和介数最大模型分别规划出网络的物流中心点，在已有的物流中心点的基础上对网络按照无标度的原则进行优化重建。分析重建网络的聚类指数、平均路径长度和节点的度以及度的概率分布，与原始网络中的统计特征进行对比分析，规划出以介数最大为依据的物流中心和基于 BA 无标度网络的电子商务物流优化分析。

本文的研究建立在真实的电子商务物流网络的基础之上，对实际数据进行建模和特征值的分析，论证了电子商务物流网络的无标度特性。并根据无标物网络的“富者越富”的特征，将节点介数值的大小作为衡量节点重要性的标准，确定该电子商务物流网络的物流中心节点，并在此基础上编程实现对此物流网络 BA 无标度优化重构。

物流网络中心是物流实现的重要组成部分，它直接影响物流网络的运作效率和整个系统的运行成本。可以说，规划好网络的物流中心为物流网络的优化奠定了基础，而好的物流配送网络又可以促进物流中心功能和价值的实现。因此，对物流网络的优化是建立在对物流中心的选择、物流中心功能的设计以及物流配送网络的规划三方面的基础之上的。

### 6.2 展望

本文通过对实际电子商务物流网络数据进行处理和分析，提出了一套物流网络优化的方案，此方案包括了物流中心的选择和物流网络的优化。物流中心的建设耗资巨大，对于物流中心的功能规划也尤其的重要。本文的研究更多的专注于大型物流中心的选择，对于物流中心的层次划分部分研究比较薄弱。物流中心层次划分后，可以规划每个层次物流中心的功能和规模。同时由于本文数据量的限制，只能对 31 天的物流数据进行分析，这会在一定程度上影响到分析的效果，但是本文研究内容通过网络化流量数据降低了取样的影响。

在未来的研究中，希望能够在物流中心选择和网络的优化的基础上，加入配送路线的规划以及包裹分配方案的研究，使物流网络的运行效率提升到更高的层次，降低物流网络的运行成本。电子商务物流网络的层次划分也是重要的研究方向，将物流网络划分层次，在此基础上对各层次的网络进行优化，综合考虑优化结果并选择最佳的规划方案。同时物流网络的有向性也可以作为网络分析的因素之一，更加准确的反应物

流网络的特性以及优化方案。在数据方面可以收集更多真实的数据，验证模型在更详细的物流数据中的可靠性。

## 参考文献

- [1] 张旭凤. 复杂物流网络系统建模与仿真 [M]. 北京: 中国财富出版社 (原中国物资出版社), 2012.
- [2] 国家统计局. 《2009 年国民经济和社会发展统计公报》.
- [3] 房殿军. 中国电子商务物流发展综述 [J]. 物流技术与应用, 2012 (09): 59-64.
- [4] 许国志, 顾基发, 车宏安. 系统科学 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [5] BLACK JA, EDWARDS S. Emergence of virtual or network organizations: fad or feature[J]. Journal of Organizational Change Management, 2002, 13 (6): 567-576.
- [6] THURSTON. Distributed Agent Architecture Automation [C]. UK: 26th International Computer Software and Conference, 2002.
- [7] 高义佳. 基于复杂网络的冷链物流网络优化与应用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [8] 张旭凤, 张永安. 物流配送网络的无标度网络特征研究 [J]. 物流技术, 2011 (30): 97-100.
- [9] 张旭凤. 基于无标度网络理论的物流配送网络节点客户饱和度仿真 [J]. 生产力研究, 2012 (12): 219-222.
- [10] NINA M BERRY. A hybrid multi-agent architecture for manufacturing [D]. Ph.D. Thesis, Pennsylvania, USA, 1997.
- [11] DEGANNO C PELLEGRINO. Multi-agent coordination and collaboration for control and optimization strategies in an intermodal container terminal [C]. UK: IEEE International Engineering Management Conference, 2002 (8): 18-20.
- [12] 苏衍奎. 基于多 Agent 的钢铁企业物流管理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [13] STERMAN J D. Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment [J]. Management Science, 1989, 35 (3): 321-339.
- [14] 杨阳, 刘志学. 供应商管理库存与第三方物流的系统动力学模型 [J]. 系统工程, 2007 (07): 38-44.
- [15] 付晶. 基于系统动力学的粮食物流需求预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [16] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [17] Barrat A, Weigt M. On the properties of small world networks. Eur. Phys. J. B, 2000, 13: 547-560.
- [18] Newman M E J. The structure and function of networks. Computer Physics Communications, 2002, 147: 40-45.
- [19] Newman M E J, Moore C, Watts D J. Mean field solution of the small-world network model. Phys. Rev. Lett. , 2000, 84: 3201-3204.
- [20] Bollobás B, Riordan O. Mathematical results on scale-free random graphs. In: Bornholdt, S, Schuster HG (ed.) Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet, Berlin, Wiley-VCH, 2003, 1-34.
- [21] Fronczak A, Fronczak P, and Holyst J A. .Mean-field theory for clustering coefficients in Barabási-Albert networks, Phys. Rev. E, 2003, 68: 046126.
- [22] Li X, Chen G. A local world evolving network model. Physica A, 2003, 328: 274-286.
- [23] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.

- [24] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [25] Albert-László Barabási, Erzsébet Ravasz, Tamás Vicsek. Deterministic scale-free networks. *PHISICA*, 2001, 7(18): 559-564.
- [26] Wang xiaofan. Complex networks: topology, dynamics and synchronization [J]. *International Journal of Bifurcation and chaos*, 2002, 12 (5): 885-916.
- [27] Xiao Fan Wang, Guanrong Chen. Complex Networks: Small-World, Scale-Free and Beyond [J]. *IEEE CIRCUITS AND SYSTEMS MAGAZINE*, 2003 (FIRST QUARTER): 6-20.
- [28] 吕金虎. 复杂动力网络数学模型与同步准则 [J]. *系统工程理论与实践*, 2004 (04): 17-22.
- [29] 谭跃进, 吴俊. 网络结构熵及其在非标度网络中的应用 [J]. *系统工程理论与实践*, 2004, (6): 1-3.
- [30] 史定华. 网络-探索复杂性的新途径 [J]. *系统工程学报*, 2005, 20 (2): 115-119.
- [31] 王林, 戴冠中, 胡海波. 无标度网络的一个新的拓扑参数 [J]. *系统工程理论与实践*, 2006 (06): 49-53.
- [32] 陶少华, 刘玉华, 许凯华, 谈德茂. 无尺度网络中集散节点的抗脆弱性策略 [J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43 (2): 151-153.
- [33] 陈国荣, 鄢萍, 彭军, 邓菊丽, 王琦峰. 一种基于成长的物流网络建模方法 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2008, 36 (5): 24-29.
- [34] 王波, 王万良, 杨旭华. WS 与 NW 两种小世界网络模型的建模及仿真研究 [J]. *浙江工业大学学报*, 2009, 37 (2): 179-182.
- [35] 邢长明, 刘方爱. 基于 Sierpinski 分形垫的确定性复杂网络演化模型研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59 (3): 1609-1614.
- [36] 吕乐, 俞鹤伟, 陶铭. 基于能量的无标度网络模型的研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (3): 54-56.
- [37] 陶少华, 张向群. 复杂网络自相似特征演化模型研究 [J]. *计算机工程*, 2012, 38 (1): 197-199.
- [38] 刘玉华, 张翼, 徐翠, 晋建志. 一种基于数据场的复杂网络聚类算法 [J]. *计算机科学*, 2013, 40 (11): 70-73.
- [39] 郭征, 郭鑫冷, 宋传旺, 聂廷远. 小世界网络抗毁性及介-度相关性研究 [J]. *理论研究*, 2014, 10: 81-85.
- [40] 胡耀光, 王圣军, 金涛, 屈世显. 度关联无标度网络上的有倾向随机行走 [J]. *物理学报*, 2015, 64 (2): 028901.
- [41] 刘慧, 李增扬, 陆君安. 局域化演化的加权网络模型 [J]. *复杂系统与复杂网络*, 2006, 3 (1): 36-43.



## 致谢

“天下没有不散的筵席”宽慰了多少离别的仁人志士，“白驹过隙”又被谁一次又一次的叹息了时光的无情。终于，三年的研究生生活即将画上句号，千万种不舍集聚心头的时候，不得不向前人一样感叹和慰藉。在此，首先要感谢悉心指导我完成论文的李杰老师，在李杰老师谆谆教诲和不厌其烦的指导下，经过对论文研究方案和思路的谨慎研究和仔细的推敲，最终完成论文的撰写工作，在这里真心地道一句“老师，您辛苦了！”。李杰老师对待学术一向认真严谨，同李杰老师的学术交流可以体味其中的认真的学术态度和严谨的学术研究思路。这一直是激励我完成论文的动力，和论文不断完善的源泉。李杰老师对生活的热爱时刻影响着我对人生的态度，也让我在生活中每每想到我那可爱可敬的李杰老师的时候都能积极向上的去面对各种困境。千言万语汇成一句话：成长道路上有您的陪伴是我的幸运，未来道路上陪伴您是我的荣幸。

然后我要特别感谢我的家人，是他们的鼓励和支持一路陪伴我度过了论文撰写的瓶颈时期，让我能够平静下来思考解决问题的方法。也是家人的陪伴，给予了我战胜困难的勇气和信心。

再次，我要感谢在论文撰写瓶颈期无私的为我提供帮助，提供解决技术问题思路的陈张猛同学，困惑中的我因此柳暗花明。也是在他的帮助下，使我在解决一个个技术难题中获益良多。感谢李占宇同学，带给我安静舒适的学习环境的同时，交流着论文撰写过程中的各种注意事项，使得论文在修改中不断的完善。

最后，我要感谢我的母校北京大学，不仅为我们提供了很好的学术氛围，还为我们提供了丰富的资源。感谢未名湖，这个在我撰写论文期间多次光顾的一汪湖水，是我学习生活之余又一片可以找到平静的乐土。

再次，感谢陪伴过我的老师、同学和朋友们，希望大家一切安好！

## 北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

### 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：                    日期：        年    月    日

### 学位论文使用授权说明

（必须装订在提交学校图书馆的印刷本）

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校☐一年/☐两年/☐三年以后，在校园网上全文发布。

（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：                    导师签名：

日期：        年    月    日