

高速客运复杂网络 博弈演化及抗毁性研究

GAOSU KEYUN FUZA WANGLUO
BOYI YANHUA JI KANGHUIXING YANJIU

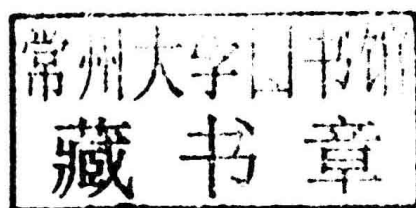
非
外
借

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

大连交通大学学术著作出版基金资助出版

高速客运复杂网络博弈演化 及抗毁性研究

张 旭 著



中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 简 介

本书从复杂网络的基本概念及基础理论出发,以我国的高速铁路网络和民航网络为基础,构建高速客运网络。在此基础上,以高速客运网络的博弈演化以及抗毁性两方面作为重点研究内容,以基础理论、高速客运网络建立、高速客运网络博弈演化、高速客运网络节点重要性分析、高速客运网络静态及动态抗毁性分析之间的逻辑关系为章节划分的依据以及各章节阐述的核心内容。结合具体的研究方法,配套相应的 PAJEK 软件、R 软件等仿真程序及附录注释说明,详细讲解高速客运网络的博弈演化进程以及网络抗毁特性。

本书主要适合复杂网络研究领域的学者及研究生阅读和研究。

图书在版编目(CIP)数据

高速客运复杂网络博弈演化及抗毁性研究 / 张旭著.

—北京:中国铁道出版社,2017.9

ISBN 978-7-113-23837-7

I. ①高… II. ①张… III. ①高速客运—研究 IV. ①U

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 236954 号

书 名:高速客运复杂网络博弈演化及抗毁性研究

作 者:张 旭 著

策 划:金 锋

责任编辑:金 锋

编辑部电话:010-51873125

电子信箱:jinfeng88428@163.com

封面设计:王镜夷

责任校对:王 杰

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:9.75 插页:4 字数:240 千

书 号:ISBN 978-7-113-23837-7

定 价:50.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

随着我国高速铁路及民航在“十三五”时期建设的快速推进,由高速铁路及民航客运共同构成的高速客运网络日渐形成。本书以高速客运网络为研究对象,将复杂网络分析方法应用于高速客运的分析中,以现有高速铁路和民航的运营线路为基础,构建高速客运复杂网络,并进行复杂网络验证。在此基础上,借鉴演化博弈的思路,对高速客运网络的演化进程进行分析。随后,依据复杂网络节点重要性评价的相关指标,选取基于样本队列的重要度评价算法,采用多属性模型融合等级度、效率等评价指标,对高速客运复杂网络的节点重要度进行排序并划分等级;最后选取网络静态及动态抗毁性测度指标,采用不同攻击方式对高速客运网络的静态抗毁性进行仿真,同时建立不同场景下的级联失效模型,对网络的动态抗毁性进行仿真,基于仿真结果提出静态及动态抗毁性优化策略。本书研究内容可为复杂网络理论在高速客运领域的应用提供支持,为高速客运的健康发展提供支撑。

本书写作的主要意义为:

(1) 丰富交通领域复杂网络理论研究

高速客运网络抗毁性优化研究是复杂网络理论在交通领域的研究范畴,通过本研究既可以丰富交通复杂网络的研究内容,也延伸了交通网络规划的思路与方法。本研究将传统交通网络分析方法与复杂网络分析方法相结合,符合现代交通网络结构复杂的特点,可以从理论层面全面系统的分析高速客运网络结构及系统复杂性,对提高高速客运网络承载能力,充分利用现有高速客运资源,减少我国高速客运设计规划、管理和控制的盲目性,发展先进交通的管理与控制技术而言都具有重要的理论意义。

(2) 完善高速客运网络结构,提高网络运行稳定性

交通网络的抗毁性决定其交通运输的功效性、可靠性和通达性,极端天气和突发状况的发生对高速客运系统运行的稳定性提出了新的挑战。本研究通过对高速客运复杂网络抗毁性的分析,可以有效识别高速客运复杂网络结构存在的薄弱环节,推演关键节点及线路在遭受攻击后高速客运网络结构变化,从而有针对性地通过对关键节点、关键线路的改进,提高整个高速客运复杂网络的稳定性,发挥网络效率和整体优势,建设便捷、通畅、高效、安全的高速客运体系。

(3)合理规划高速客运网络布局,降低投资风险

随着国民收入水平的提高,大部分旅客会选择高速客运作为出行方式。若要高速客运适应国民经济的发展需要,不仅要使高速铁路与民航客运在建设规模、网络结构、运行速度上适应经济发展需要,而且要在空间地域的分布与经济发展相适应。对于两种交通方式所构成网络的相关网络特性进行研究可以使高速客运网络布局与社会经济发展需求、运输业的内在发展规律相适应。通过高速客运复杂网络结构优化,可以提升两种方式转化的效率,合理分配运输量,避免重复建设所带来的种种弊端,减少资源的浪费以及对自然环境的破坏,同时也减少了二者的投资成本,降低了竞争程度,提高了收益,从而降低投资风险。

本书写作的创新点主要为以下三点:

(1)以演化博弈理论为基础,仿真分析高速客运网络演化进程。将高铁和民航网络作为初始对象,借鉴演化博弈的思路,选取共享自然选择双网络演化博弈模型和共享公平选择双网络演化博弈模型,采用不同的时间步,通过收益系数的计算,仿真分析各时间步高速客运网络博弈演化过程。

(2)采用多属性决策的方法,对高速客运网络节点重要度进行评价。根据高速客运网络的特性,选取网络约束系数、等级度、网络规模、效率、局部聚类系数等指标,运用多属性决策的计算方法,对高速客运网络节点进行重要性排序,并将本书设计的算法与已有的方法进行比较,证明本书设计算法的优越性。

(3)静态与动态相结合的仿真分析高速客运复杂网络抗毁性,并提出优化策略。选静态及动态抗毁性评价指标,在随机攻击及蓄意攻击两种攻击模式下对高速客运复杂网络的静态抗毁性进行分析。同时,建立不同场景下的级联失效模型,仿真分析不同参数条件下的高速客运复杂网络动态抗毁性。针对静态和动态高速客运复杂网络抗毁性仿真过程,提出高速客运复杂网络抗毁性优化策略。

完成此书,首先要感谢我的导师李振福教授,没有他的引领,我无法走进浩瀚的学术海洋,也无法形成自成体系的研究思想和成果。其次,我要感谢我的学生王晓雨、刘雅洁、毋超、董杰等的努力付出。最后感谢国家社科重大项目(13&ZD170)、辽宁省博士科研启动基金(201501182)、辽宁省教育厅项目(JDL2016020)和大连交通大学学术著作出版基金的资金资助。

由于本人水平有限,书中某些内容可能有不妥和谬误之处,恳请读者批评指正。

张旭

2017年8月

1 复杂网络理论概述	001
1.1 网络的定义	001
1.2 网络主要统计量的含义	002
1.3 基本网络模型	003
1.4 复杂网络基本模型	006
1.5 高速客运复杂网络建立	007
2 我国高速客运网络发展分析	009
2.1 民航子网络的建立及相关数据计算	009
2.2 高铁子网络的建立及拓扑特性分析	011
2.3 高速客运网的建立及其复杂网络特性分析	014
3 高速客运网络演化博弈分析	017
3.1 博弈的基本构成	017
3.2 演化博弈理论	020
3.3 博弈论和复杂网络的关系	023
3.4 双复杂网络演化博弈模型	023
3.5 高铁与民航双复杂网络演化博弈	026
3.6 高铁与民航双复杂网络演化博弈仿真分析	033
4 高速客运网络节点重要性分析	091
4.1 高速客运网络节点指标评价体系	091
4.2 评估方法	092
4.3 高速客运网络节点重要度评估	094
4.4 算法效率分析	097
5 高速客运网络静态抗毁性分析	099
5.1 高速客运网络静态攻击方法	099

5.2 高速客运网静态抗毁性分析 100

5.3 蓄意攻击与随机攻击下的静态抗毁性比较 102

5.4 高速客运网络静态抗毁性优化建议 103

6 基于级联失效的高速客运网络动态抗毁性分析 105

6.1 复杂网络级联失效负载重分配方法 105

6.2 级联失效模型 107

6.3 高速客运网络动态抗毁性级联失效模型 111

6.3 基于级联失效的高速客运网络动态抗毁性仿真分析 112

7 基于节点重要性熵的高铁网络抗毁性分析 117

7.1 网络结构熵 117

7.2 基于节点介数的网络结构熵的网络抗毁性评估方法 119

7.3 高铁网络抗毁性仿真分析 120

参考文献 123

附录 129

附录一 高速客运网络节点名称顺序及其度 129

附录二 高速客运网络蓄意攻击顺序及其全局效率 131

附录三 高速客运网络随机攻击顺序及其全局效率 135

1.1 网络的定义

人们把周围的许多系统(天然的或者人造的,例如交通网、电力网、人际关系网等等)看作网络由来已久,运用数学的一个分支——“图论”对这些系统进行研究也已经有百年以上的历史。网络是由节点和连线构成,表示诸多对象及其相互联系。在数学上,网络是一种图,一般认为专指加权图。网络除了数学定义外,还有具体的物理含义,即网络是从某种相同类型的实际问题中抽象出来的模型。从图论角度看,网络是指由一个点(节点或称顶点、结点)集和一个边集组成的一个图,且网络中的每条边都在点集中有一对点与之对应(网络中的点往往用来代表实际系统中的个体,多用于表示实际系统中个体之间的关系或相互作用)。从统计物理学的角度来看,网络是一个包含了大量个体以及个体之间相互作用的系统,是把某种现象或某类关系抽象为个体(节点)以及个体之间相互作用(边)而形成的用来描述这一现象或关系的图。

如果节点对所对应的边为同一条边,那么该网络为无向网络(undirected networks)[如图 1.1(a)所示],否则为有向网络(directed networks)[如图 1.1(b)所示]。如果给每条边都赋予相应的权值,那么该网络就为加权网络(weighted networks)[如图 1.1(c)所示],否则为无权网络(unweighted networks)。

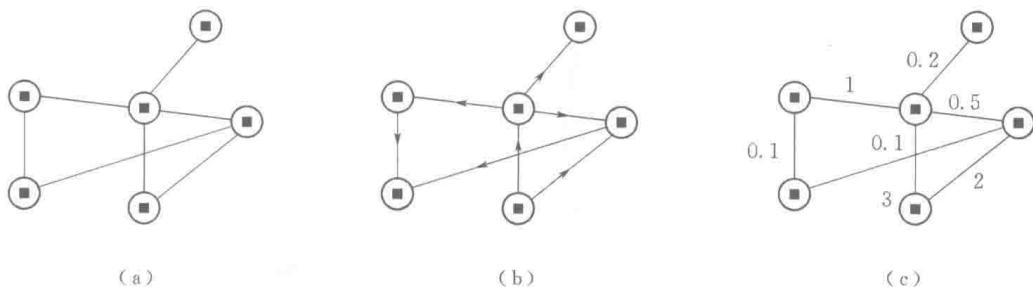


图 1.1 网络类型

如果节点按照确定的规则连边,所得到的网络就称为“规则网络”(regular networks),如果节点按照完全随机的方式连边,所得到的网络就称为“随机网络”(random networks)。如果节点按照某种(自)组织原则的方式连边,演化成各种不同的网络,则称为“复杂网络”(complex networks)。

1.2 网络主要统计量的含义

1.2.1 度与度分布

度定义为节点的邻边数,可记为 k ,度 k 的分布函数 $P(k)$ 用来描述具有相同度的节点的出现概率。高速客运网络中,节点的度反映了该节点在网络中的重要程度。

1.2.2 平均路径长度

网络中任意两点间的距离指连接两点的最短路所包含的边的数目。把所有节点对的距离求平均,就得到了网络的平均路径长度 L 。在 N 个节点的网络中,若任意两个节点间的最短路径长度为 L_{ij} ,则整个网络的平均路径长度为 $L = \sum L_{ij} / (N(N-1)/2)$ 。高速客运网络中,平均路径长度反映任意节点之间大致换乘的次数,平均路径长度越短表明使用到达目的地需要换乘的次数越少。

1.2.3 聚集度系数(簇系数)

聚集度系数是专门用来衡量无向网络节点聚类情况的参数。抽象地说,聚集度系数是描述与第三个节点连接的一对节点被连接的概率,即一个节点的所有相邻节点之间的实际连接数目占可能的最大连接边数目的比例。设 k_i 表示结点 i 的度数, E_i 表示与结点 i 相邻的 k_i 个点相互之间的实际连线数,其聚集度系数为

$$C_i = \frac{\sum E_i}{\frac{k_i(k_i-1)}{2}}$$

网络的聚集度系数为 C_i 值的平均值。聚集度系数可以用来描述节点的邻点之间也互为邻点的比例,也就是小集团结构的完美程度。

1.3 基本网络模型

1.3.1 规则网络

如图1.2所示,常见的规则网络有三种:全局耦合网络(globally coupled network)、最近邻耦合网络(nearest-neighbor coupled network)和星形网络(star coupled network)。

全局耦合网络中有 N 个节点,任意两个节点相互连接,则全局耦合网络共有 $N(N-1)/2$ 条边,其网络特性统计指标平均路径长度为1(最小)、簇系数(相邻节点之间连的数目占可能的最大连边数目的比例)为1(最大)。

最近邻耦合网络为一个含有 N 个节点的最近邻耦合网络。网络中的每个节点只和它周围的邻居节点相连,其中每个节点都与它左右各 $K/2$ 个邻居节点相连(K 为偶数)。

星形网络为一个具有 N 个节点的放射状网络。网络有一个中心节点,其余 $N-1$ 个节点都只与这个中心节点相连,且它们彼此之间不连接。



图 1.2 三种典型的规则网络

1.3.2 ER 随机网络

该模型由匈牙利数学家 Edös 和 Rényi 在 20 世纪 50 年代最先提出,所以被人们称为 ER 随机网络模型。ER 随机网络的构造有两种方法。第一种方法:定义有标记的 N 个节(网络中的节点总数),并且给出整个网络的边数 n ,这些边的选取采用从所有可能的 $N(N-1)/2$ 种情况中随机选取。第二种方法:给定有标记的 N 个节点,以一定的随机概率 p 连接所有可能出现的 $N(N-1)/2$ 种连接,假设最初有 N 个孤立的节点,每对节点以随机概率 p 进行连接。

如果当 $N \rightarrow \infty$ 时产生一个具有性质 Q 的 ER 随机图的概率为 1,那么几乎每一个 ER 随机图都具有性质 Q 。以连通性为例,若当连接概率 p 达到某个临界值 $p_c \propto \ln N$ 时,整个网络连通起来,那么以概率 p 生成的每一个网络几乎都是连通的,否则,当 p 小于该临界值时,几乎每一个网络都是非连通的。

对于一个给定连接概率为 p 的随机网络,若网络的节点数 N 充分大,则网络的度分布接近泊松(Poission)分布,如图 1.3 所示。ER 随机网络的平均路径长度 L 为

$$L = \frac{\ln N}{\ln \langle k \rangle}$$

式中, k 为网络度值,平均度 $\langle k \rangle = p(N-1) \approx Np$ 。

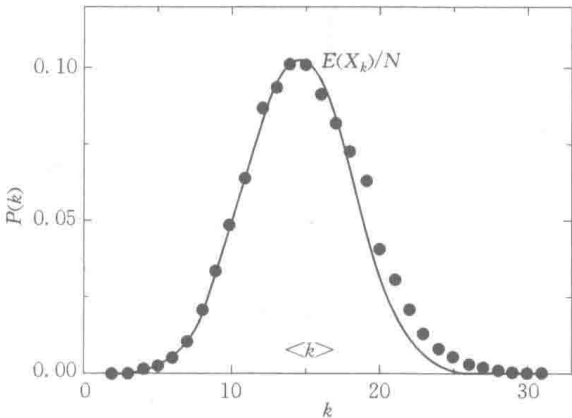


图 1.3 ER 随机网络的度分布图

ER 聚集度系数为

$$C=p=\frac{\langle k \rangle}{N}$$

1.3.3 复杂网络

随着计算机处理与运算能力的显著增强,科学家通过对现实网络进行研究后发现,大量现实网络既不是规则网络,也不属于随机网络,而是与前两者有截然不同统计特征的网络。这样的网络被科学家称为复杂网络。但到目前为止,科学上还没有给出复杂网络精确严格的定义。我们可以这样认为,之所以称其为复杂网络,大致上包含以下几层意思:

首先,它是大量真实复杂系统的拓扑抽象。

其次它至少在感觉上比规则网络和随机网络复杂,因为我们可以很容易地生成规则和随机网络,但就目前而言,还没有一种简单方法能够生成完全符合真实统计特征的网络。因此相对于复杂网络,随机网络又被叫做简单网络。

最后,由于复杂网络是大量复杂系统得以存在的拓扑基础,因此对它的研究被认为有助于理解“复杂系统之所以复杂”这一至关重要的问题。

目前研究得比较多的是“小世界网络”(small-world networks)和“无标度网络”(scale-free networks)这种两种复杂网络。

1.4 复杂网络基本模型

1.4.1 小世界网络模型

作为从完全规则网络向完全随机网络的过渡,美国学者 Watts 和 Strogatz 于 1998 年设计了一个具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数的小世界网络模型(small-world network),简称 WS 小世界网络模型。

WS 小世界网络模型的构造算法:

(1)从规则网络开始:考虑一个含有 N 个节点的最近邻耦合网络,它们围成一个环,其中每一个节点都与它左右相邻的各 $K/2$ 个节点相连(K 是偶数)。

(2)随机化重连:以概率 p 随机地重新连接网络中的每一条边,即将连边的一个端点保持不变,而另一个端点取为网络中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,并且每个节点不能有边与自身相连。

为了保证网络具有稀疏性,要求 $N \gg K$,这样构造出来的网络模型具有较高聚类系数。而随机化重连过程大大减小了网络的平均路径长度,使网络模型具有小世界特性。当 p 取值较小时,重连过程对网络的聚类系数影响不大。当 $p=0$ 时,模型退化为规则网络;当 $p=1$ 时,模型退化为随机网络。通过调节 p 的值就可以控制模型从完全规则网络到完全随机网络的过渡。

WS 小世界网络模型的聚类系数和平均路径长度可以看作是重连概率 p 的函数,分别记为 $C(p)$ 和 $L(p)$ 。在某个 p 值范围内,WS 网络模型可以得到较短的平均路径长度(小世界特性),以及有较高聚集度系数(高聚集特性)。

由于在 WS 小世界网络模型的随机化重连过程中有可能破坏网络的连通性,为了避免出现因重连而造成的孤立子网,美国学者 Newman 与 Watts 合作于 1999 年提出了用“随机化加边”取代“随机化重连”的小世界网络模型,称 NW 小世界模型。

NW 小世界网络模型的构造算法:

(1)从规则网络开始:考虑一个含有 N 个节点的最近邻耦合网络,它们围成一个环,其中每一个节点都与它左右相邻的各 $K/2$ 个节点相连, K 是偶数。

(2)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。其中规定,任意两个不同的节点之间至多只能加一条边,并且每个节点不能有边与自身相连。

当 $p=0$ 时,模型退化为规则网络;当 $p=1$ 时,模型退化为随机网络。通过调节 p 的值就可以控制模型从完全规则网络到完全随机网络的过渡。

(1)聚集度系数

WS 小世界网络的聚集度系数为:

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

NW 小世界网络的聚集度系数为:

$$C(p) = \frac{3(K-2)}{4(K-1) + 4Kp(p+2)}$$

(2)平均路径长度

至今为止,还没有人得到关于 WS 小世界网络模型平均路径长度的精确解析表达式,Newman、Moore 和 Watts 分别用重整化群和序列展开方法得到如下近似公式:

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

式中 $f(NKp/2)$ 为一普适标度函数,且满足:

$$f(x) = \begin{cases} \text{常数} & x \ll 1 \\ \frac{\ln x}{x} & x \gg 1 \end{cases}$$

目前为止,还没有 $f(x)$ 的精确表达式,Newman 等人基于平均场方法给出了如下的近似表达式:

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

(3)度分布

对于 WS 小世界网络,当 $k \geq K/2$ 时,一个随机选取的节点度值为 K 的概率 $P(k)$ 为:

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

当 $k < K/2$ 时, $P(k)=0$ 。对于 NW 小世界网络,每个节点的度至少为 K ,因此当 $k \geq K$ 时,一个随机选取的节点的度为 k 的概率为:

$$P(k) = C_{k-K}^N \left(\frac{Kp}{N}\right)^{k-K} \left(1 - \frac{Kp}{N}\right)^{N-k+K}$$

当 $k < K$ 时, $P(k) = 0$ 。

综上所述,ER 随机网络、WS 小世界网络和 NW 小世界网络的度分布可近似用 Poisson 分布来表示,该分布在度的平均值 $\langle k \rangle$ 处有一峰值,然后按指数快速衰减。这类网络被称为均匀网络(homogeneous network)或指数网络(exponential network)。

1.4.2 无标度网络模型

近年来,大量的实证研究表明,许多大规模真实网络(如 WWW、Internet 以及新陈代谢网络等)的度分布函数都是呈幂律分布的形式: $P(k) \propto k^{-\gamma}$ 。在这样的网络中,大部分节点的度都很小,但也有一小部分节点具有很大的度,没有一个特征标度。由于这类网络的节点的连接度并没有明显的特征标度,故称为“无标度网络”。为了解释实际网络中幂律分布产生的机理,Barabási 和 Albert 在 1999 年提出了一个无标度网络模型,称为 BA 无标度模型。

该模型的构造主要基于现实网络的两个内在机制:

①增长机制。大多数真实网络是一个开放系统,随着时间的推移,网络规模将不断增大,即网络中的节点数和连边数是不断增加的。

②择优连接。新增加的节更倾向于与那些具有较高连接度的节点相连,也就是富人更富的观点(rich get richer)。

BA 无标度网络模型的构造算法:

①增长。在初始时刻,假定网络中已有 m_0 个节点,在以后的每一个时间步长中,向网络中增加一个节点,该节点与原始网络中的 m 个节点相连($m \leq m_0$)。

②优先连接。在选择新节点的连接点时,一个新节点与一个已经存在的节点 i 相连的概率 P_i 与节点 i 的度 k_i 成正比:

$$P_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$$

经过 t 步后,这种算法能够产生一个含有 $N = t + m_0$ 个节点、 mt 条边的网络。

(1)平均路径长度

BA 无标度网络的平均路径长度为:

$$L = \frac{\ln N}{\ln(\ln N)}$$

这表明 BA 无标度网络也具有小世界性。

(2)聚集度系数

BA 无标度网络的聚集度系数为:

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

与 ER 随机网络类似,当网络规模充分大时,BA 无标度网络不具有明显的聚类特性。

(3)度分布

BA 无标度网络的度分布计算主要有三种方法:平均场理论(mean-field approach)、主方程法(master-equation approach)和速率方程法(rate-equation approach),它们得到的渐近结果相同。其中,主方程法和速率方程法等价。分析计算可得:

$$P(k)=\frac{2m(m+1)}{k(k+1)(k+2)}\propto k^{-\gamma}$$

这表明 BA 无标度网络的度分布可以由幂指数为 3 的幂律函数来近似描述。小世界网络、无标度网络与真实网络的特征比较见表 1.1。

表 1.1 小世界网络、无标度网络与真实网络的性质比较

对比参数	规则网络	随机网络	WS 小世界网络	BA 无标度网络	大量真实网络
平均距离	大	小	大	小	小
聚集度系数	大	小	大	小	大
度分布	δ 函数	泊松分布	指数分布	幂律分布	近似幂律分布

1.5 高速客运复杂网络建立

1.5.1 高速客运网络定义

高速客运网络体系是指在社会化的运输范围内和统一的运输过程中,按照各种高速客运方式的技术经济特点,形成的分工协作、有机结合、合理布局、联结贯通的高速客运综合体。它所包含的民用航空客运、高速铁路客运两种高速客运方式在满足出行者的空间位移需求上具有同一性,但同时又具有各自的特点(例如运行速度、价格、发班频率、安全性与舒适性、便利性等),且在运营组织管理方式方面也存在着一一定的差异,这些特点和差异不仅影响高速出行需求变化及高速客流分担变化,同时还影响高速客运网络的网络结构。

我们将民航空港及其之间运营的航线和高速铁路(高铁、动车、城际铁路)车站及其之间开行的列车形成的网络称为中国高速客运网络,这个网络包含了民航及高铁所具有的特点:

(1)民航网络干线航线密集,支线航线辅助干线航线进行小城市的中转且航线不频繁。民航网络主要集中在一二线城市,触及各省(直辖市、自治区)的县级市及主要的旅游景区。每条航线基本上只在三个或三个以下的城市之间进行运输。

(2)高铁网络覆盖我国中东部大部分地区,按照规划设立沿线的高铁站点。高铁网络各条铁路的建设计划连接中国大部分省会(首府)及其之间的重要城市。中国高铁网络中开行的车次基本上起始和结束于各大型城市,且在很大程度上覆盖沿线的城市,使得中国高速网络不仅可以连接一二线城市,同时衔接既有普速线,进而连接中国各地的市县村镇。同时,中国民航网络和高铁网络都具有东部沿海地区网络线路密集、西部地区线路稀疏的特点。民航和高铁相互结合能扩大网络覆盖区域,提高连通度,提高我国西部地区的交通便捷性。

1.5.2 高速客运网络建立假设

(1)高速客运网是建立在 p 空间下的复杂网络。我们定义以民航航班或者高铁(动车、城际铁路)的车次为依据,每有一条航线或者一个车次的列车经过两个城市,则视为两个城市之间存在一条边。

(2)高速客运网是一个无向非加权网络。两个城市之间只要有飞机或者火车连接,无论去向,都在两个城市之间连一条没有向量指向的边,即城市 A 可以到城市 B 或城市 B 可以到城市 A,我们就认为城市 AB 之间连通;两个相连城市之间不管相距多远,期间有多少航线或者车次,都认为其权重为 1,即不考虑高速客运复合网络中的高铁发车频次和数量以及航班的频次和数量。

(3)如果一个城市同时有高铁站和机场,或如果一个城市同时有两个及以上数量的机场或高铁站,都认为该城市为一个节点。如果城市 A 到城市 B 既有高铁可以到达,也有航班可以到达,则认为在高速客运网络中,城市 A 和城市 B 间只有一条连线,不重复连线。但在高铁子网络和航空子网络中,则认为城市 A 和城市 B 间分别有一条连线。

2.1 民航子网络的建立及相关数据计算

2.1.1 民航网络发展现状

20 世纪 50 年代以来,民用航空的服务范围不断扩大,成为一个国家的重要经济部门。商业航空的发展主要表现在客货运输量的迅速增长,定期航线密布于世界各大洲。由于快速、安全、舒适和不受地形限制等一系列优点,商业航空在交通运输结构中占有独特的地位,它促进了国内和国际贸易、旅游和各种交往活动的发展,使在短期内开发边远地区成为可能。

新中国成立以来,我国以北京、上海、广州等枢纽机场为中心,以其余省会和重点城市机场为骨干,形成众多干、支线机场相配合的中国民航网络。随着改革开放的不断深化、经济建设方面的投入不断加大、人民生活水平的日益提高,人们对于出行的欲望不断增加。航空网络布局也逐渐打破了 20 世纪 70 年代以前以北京为中心的结构,初步形成了以若干大城市为枢纽的多中心航空网络。我国航空运输持续快速健康协调发展促进了经济社会发展和对外开放,完善了国家综合交通体系,同时对加强国防建设、增进民族团结、缩小地区差距、促进社会文明也具有重要意义。近年来,民航的航线也在按计划的逐渐增加,各个民用机场之间的连接也日益紧密,由民用机场和之间开行的客运航线组成的民航网络得到了不断完善和巩固,从而使人民的出行更加便利、更加快捷,出行方式也更加多样。

2016 年,我国境内民用航空(颁证)机场共有 218 个(不含香港、澳门和台湾地区,下同),定期航班国内通航城市 214 个(不含香港、澳门、台湾),我国航空公司定期航班通航 56 个国家的 145 个城市。新增机场分别为山西临汾机场、湖北十堰机场、福建三明、海南琼海机场、青海果洛机场、内蒙古乌兰察布机场、内蒙古扎兰屯机场、海南三沙机场、云南沧源机场。另外,完成了河北秦皇岛机场、新疆且末机场迁建。陕西安康机场停航,江西九江机场注销。国内航线完成 10.16 亿人次,飞机起降 923.8 万架次,全行业运输飞机 2 950 架。

在“十二五”期间,我国民航行业规划航路航线网络布局,形成了国家枢纽航路网、区域航路航线网和支线航线网有机结合的航路航线网络构架;构建了国内大能力空中运输通道,在北京至广州、北京至上海、北京至大连、北京至昆明、上海至大连、上海至成都、上海至西安、上海至广州、广州至成都等繁忙地区,增加干线航路数量或划设平行航路,建设了大能力国家骨干航路和区域航路航线;扩大了空中交通网覆盖范围,完成了新建机场进离场航线的开辟和加入航路航线网运行工作,在西部非雷达管制区,新辟区域导航航路,增加了区域支

线航路和航线数量,将现有区域管制区调整为北京、上海、广州、西安、成都、沈阳、乌鲁木齐、三亚等 8 个高空管制区和 27 个中低空管制区,实现空域相对集中管理。

2.1.2 数据来源

民航子网络的数据来源于“2015 年夏秋航季航班计划表”,此数据包含了全国二十多个航空公司共计 10 093 个航班(港澳台航班除外),196 个通航城市。

2.1.3 民航子网络的建立

对数据进行整理,将所有航线经过的城市进行一一对应,将结果形成 excel 表格,通过 createpajek 软件将 .xls 文件转化成 pajek 可以读取的 .net 文件。将文件导入 pajek,通过 Net-Transform-Remove-MultipleLines-single 以及 Net-Transform-Remove-Loops 来删减重复的边和环,得到如图 2.1 所示的民航子网络的拓扑图形(见书末插页)。

2.1.4 民航子网络拓扑特性分析

(1)度、度分布、与累积度分布

通过 Net-Partitions-Degree-All 可以得到民航子网络的度,通过对民航子网络的度进行分析,得到了图 2.2 和图 2.3,同时我们可以得到民航子网络的平均度为 19.67。

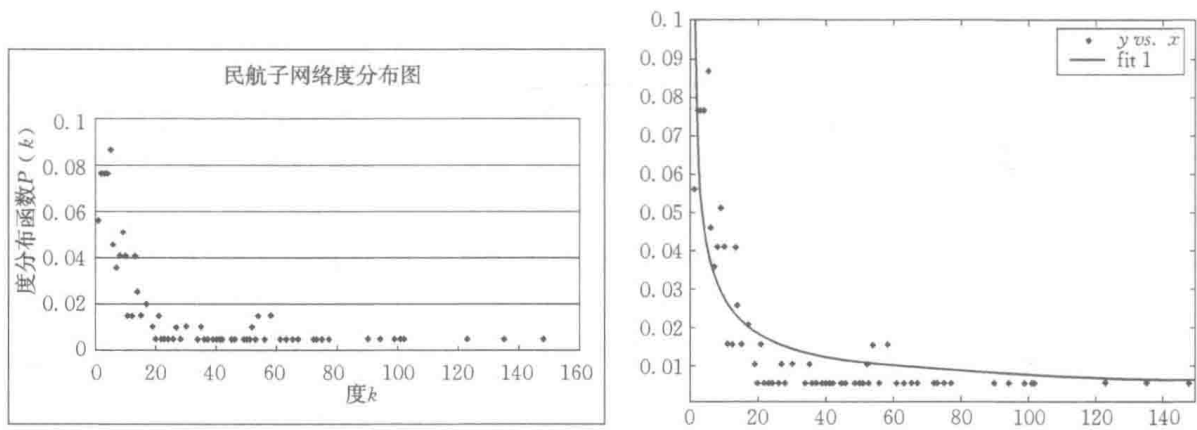


图 2.2 民航子网络度分布图及其曲线拟合

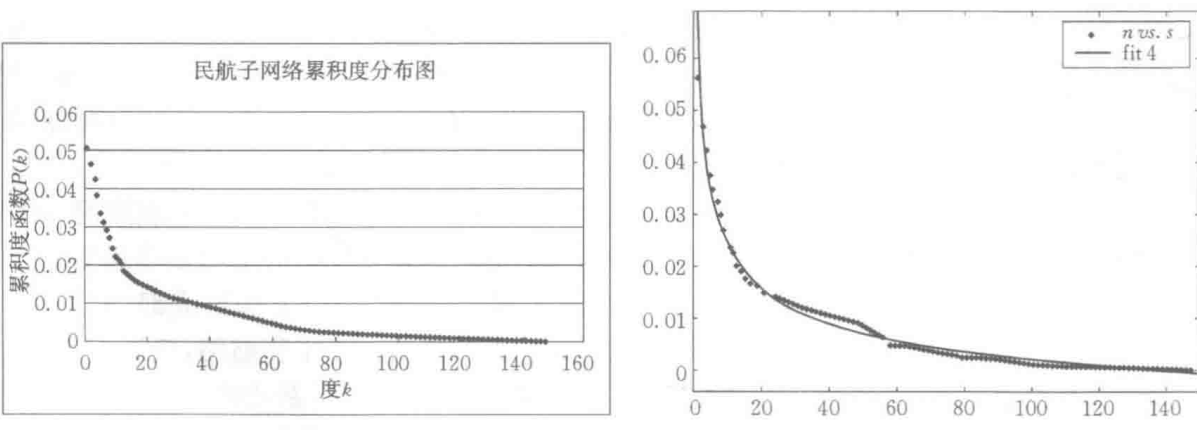


图 2.3 民航子网络累积度分布图及其曲线拟合