

超网络理论 及其应用

王志平 王众托/编著



科学出版社
www.sciencep.com

0157.5/38

2008

超网络理论及其应用

王志平 王众托 编著

国家自然科学基金重点项目(70431001)

国家自然科学基金重大国际合作项目(70620140115)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了超网络理论的基本概念、基本算法、基本理论及其应用。全书共分三大部分:第一部分基本理论和方法:绪论、超图及其相关的模型系统基础理论、超网络流的建模和优化的基本理论。第二部分超图的应用:超网络和超图在知识组织与表示中的应用、超图在主题地图中的应用、超图在聚类中的应用、蜂窝式移动通信系统的超图模型、超图在化学中的应用。第三部分超网络流的应用:电子商务供应链超网络模型、退货供应链超网络模型、闭环供应链超网络模型、金融超网络模型、网络广告资源分配超网络模型、交通超网络模型、远程移动办公与通勤上班办公决策的空间-时间超网络模型、知识协作超网络模型。本书不仅介绍了超网络的基本理论,也介绍了如何应用超网络的部分理论解决实际问题。

本书可作为高等院校理工科高年级学生和研究生的教学参考书,也可供图论、系统工程、管理等专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

超网络理论及其应用/王志平,王众托编著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022140-7

I. 超… II. ①王… ②王… III. ①超图②网络理论 IV. O157.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 076258 号

责任编辑:陈 亮 马 跃 / 责任校对:包志虹
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 6 月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 000

字数:355 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

在我们生活的这个时代,由于社会的发展,人类活动的空间范围日益扩大,交往形式也日益增多。为了方便交往与沟通,人们构建了大量的运输、通信、商贸、金融、文化系统,这些系统大部分可以通过形形色色的网络加以描述,如交通运输网络、电力网络、计算机网络、金融网络、远程教育网络等。类似的还有科技合作网络、社会关系网络、食物链网络、神经网络等。

在人类社会,网络的产生和发展给人们的出行、货物的流动、资金的流转、信息的流通带来很多方便,提高了生产效率和生活质量。但是,传染病的流行、网络病毒的传播、流言蜚语的散布、电力网的局部故障所引起的大面积停电,通信系统的中断所引起的交通运输系统瘫痪都是网络带来的危害。因此,对自然网络和人工网络的认识和干预,就成为科学技术所要解决的问题之一。

典型的网络是由许多“节点”与连接两个节点的一些“边”组成的。其中,节点用来表示实际系统中不同的个体,连接节点的边则用来表示两个节点之间具有某种特定的关系。节点和边连接而成的图形就是常见的网络图。在节点之间,通过“边”,网络流(物流、能流、信息流、资金流)在流动。随着网络规模的日益扩大和连接的日益复杂,人们希望对网络能够用抽象的逻辑与数学工具来加以描述和分析。

18世纪数学家欧拉对所谓“七桥问题”的建模和分析,开创了数学中图论这一分支的研究。其后,在运筹学的网络系统分析中,在最短路径、最大流以及最小费用流等方面有了一些解决实际问题的研究。

随着网络化的发展,出现了许多复杂的网络,这些网络节点和边的数量众多,结构复杂。有些网络的形成不是事先按照一定的规划实现的。例如,全球最大的互联网从只有几个节点的简单网络开始,发展到今天拥有数以亿计的用户网络。由于缺少统一的行政管理机构,到今天,已经没有人能画出一张完整而清晰的互联网网络图。连接存在多样性,有的松散,有的紧密,属性也有差异。网络节点和边都可能存在复杂的动态行为。近年来,两项研究复杂网络的成果使得研究工作得到了很大的推进。网络的巨大规模和形成的随机性使人们从统计的角度对网络的形态和演化进行了探索研究,从而发现某些网络中的“小世界效应”和“无标度特性”。这些成果使人们对于实际存在网络的生成机理、传播机制、茁壮性和脆弱性等有了

新的认识。

在研究大规模的复杂网络系统时,会出现物流网络与信息网络、资金网络相交织的问题或网络中的网络问题。这类网络系统的出现不但提高了运行效率,而且改进了生产、经营、消费的方式,但是也带来了运行的复杂性。如果用工程的方法来处理各网络的问题,就很难理清各网络之间的关系。

因此,出现了如何处理超越一般网络的网络系统问题。

很早以前,在计算机系统、遗传学等领域,就有学者使用超网络一词来泛指节点众多、网络中含有网络的系统,特别是把互联网视为超网络。后来,有学者在处理上述交织的网络时,把“高于而又超于现存网络”的网络称为超网络。

目前,超网络还没有公认的定义,只处在一个概念阶段,只能把一些网络套着网络的多层、多级、具有多属性和多目标的网络称为超网络。

用一般的网络图并不能完全刻画某些真实世界网络的特征。例如,在合作撰写论文的网络中,用简单图可表示作者之间是否合作,但不能表示是否有三个或更多的作者合写一篇文章。原来处理这类问题是用二部图的方法来解决,用一组不相交的点集来表示论文,用另一组不相交的点集来表示作者。然而,在这种情况下,点的定义的“同质性”失去了,因为一组点代表论文,另一组点代表作者。在研究连通性、集聚性和其他拓扑性质时,两组点有着完全不同的解释,这很容易产生分析处理上的困难。后来,有学者应用“超图”来描述和处理这类问题,取得了一些进展。于是,可以用超图描述的网络被称为超网络。

随着社会经济、科技文化的发展,上面所说的超网络不断涌现。在这些网络中,出现了许多简单网络所不具备的特点,需要另辟蹊径,加以研究。

超网络的提出只是近几年的事,目前它也只是一个概念,泛指具有前面所提到的一些特征的网络,其边界还有待进一步明晰。在解决一些实际问题的过程中,近年来仅利用超图分析一些网络结构问题,应用变分不等式进行多层网络流的协调……在此基础上,建立了一些模型,提出了一些算法。由于社会经济网络化的进一步发展,这类网络问题层出不穷,确实需要进一步找出它的一些特征,并提出合适的描述、分析、优化和协调的方法。

目前,由于这类问题出现在不同专业之中,因此介绍超网络的文献分散在各学科领域,缺乏集中收集和整理。本书的目的在于利用已有的关于超网络的理论和应用文献,结合编者的研究成果,向读者提供可供参考的材料。

第1章概括地介绍了超网络概念及其由来、目前的一些研究进展。希望能使

读者对超网络有一个概括性的认识。

第2章主要介绍了作为超网络描述和分析工具的超图的基本概念、基本性质、基本定理,介绍了用超图的理论对系统所做的定义。

第3章主要介绍了超网络建模及有关的变分不等式和投影动态系统的一些定义、性质、定理,讨论了与超网络模型有关的一些变分不等式算法,如投影算法、网络优化算法、动态投影算法、线性平衡算法。

第4章讲述了如何应用超网络和超图来对知识进行表述和组织,介绍知识网络的概念。

第5章介绍了超网络与超图在作为知识管理技术工具之一的主题地图中的应用。

第6章探讨了基于超图模型的高维空间数据的聚类方法。这个超图模型建立了原始的高维空间数据与超图之间的关系,能有效地过滤掉聚类中的噪声数据。

第7章对比研究了蜂窝式移动通信系统的超网络、超图模型与图论模型的性能以及应用超图的优越性。

第8章介绍了超图在化学中的应用,用超图描述了一类分子结构的数学模型,论述了分子超图的识别和标准模式问题,介绍了如何识别同构超图。

第9章建立了电子商务的供应链超网络模型,分析了商家和需求市场进行网上交易时的行为与目标,并将他们的最优目标表示为变分不等式的形式,给出平衡状态下产品交易量、交易价格和能力因子的求解算法。

第10章提出了一种退货供应链超网络模型,建立了制造商、分销商、需求市场各层之间相互竞争、相互合作的优化条件,得到了使整个供应链达到最优的平衡解。

第11章提出了一个由原材料供应商、生产商、零售商、需求市场和回收商组成的闭环供应链超网络模型,得到了供应链每层竞争成员达到均衡以及系统达到均衡的条件,确定了系统中各层决策者之间的交易价格与交易量。

第12章研究了一个带中介的金融超网络模型,获得了资金拥有者和中介商之间相互影响的优化条件,得到了使整个金融网络达到最优的平衡解。

第13章建立了一个由 m 个公司和 n 个网站构成的网络广告资源分配的超网络模型,建立了模型的优化条件,得到了模型的平衡解。

第14章描述了一种交通超网络模型,揭示了多类别、多准则的网络平衡条件,得到了包含环境标准在内的网络模型的平衡解。

第 15 章研究了基于固定时间范围的远程移动办公及通勤上班办公的超网络模型。利用此模型可预测平衡流及每层远程移动办公及通勤上班办公的时间间隔。

第 16 章研究了知识网络中的科学研究者之间相互协作的最优化超网络模型,利用此模型得出了关于协作者行为方案的一个清晰的结果。

读者如果对基于超图的超网络感兴趣(如对物质、信息与知识的结构用超网络和超图来表示和处理感兴趣),可以在读完第一部分后,选读第二部分。如果对多层、多级的综合网络感兴趣(如对综合运输、综合信息网以及实物网与虚拟网相交织的系统感兴趣),可在读完第一部分后,选读第三部分有关章节。

编写本书的主旨在于向读者提供目前收集到的有限的有关超网络理论和应用的资料及编者的点滴研究成果,希望引起读者对这一领域的关注,从已有的成果中得到启发,对生活实践中形形色色的网络系统能够从超网络的视角去加以审视和分析,从而得到复杂网络系统问题的解法,同时丰富超网络的理论。

编者的研究工作以及本书的编写都是在国家自然科学基金重点项目(70431001)和国家自然科学基金重大国际合作项目(70620140115)的支持下完成的。本书引述了大量国内外作者的成果,在此一并向他们深致谢忱。

本书是国内这方面的第一本著作。由于编者的见识和水平有限,本书难免会有疏漏和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 3 月 1 日

目 录

前言

第一部分 基本理论和方法

第 1 章 绪论	3
1.1 网络系统	3
1.2 超网络	4
1.3 超网络的例子	5
1.4 关于超网络的定义	8
1.5 当前有关超网络的研究	9
1.5.1 利用变分不等式解决超网络问题的研究	9
1.5.2 与超图有关的超网络研究	10
1.6 发展展望和有待解决的若干问题	11
参考文献	13
第 2 章 超图及其相关的模型系统基础理论	18
2.1 引言	18
2.2 与超图有关的概念及性质	20
2.3 与系统有关的概念及性质	24
参考文献	29
第 3 章 超网络流的建模和优化的基本理论	31
3.1 引言	31
3.2 超网络流的建模问题	32
3.3 变分不等式和动态系统	34
3.3.1 变分不等式	35
3.3.2 投影动态系统	37
3.4 算法	39
3.4.1 投影算法	40
3.4.2 修改后的投影方法	40
3.4.3 投影动态系统算法	41

3.4.4 网络优化算法	41
3.4.5 线性平衡算法和可分线性费用函数	42
参考文献	44

第二部分 超图的应用

第4章 超网络和超图在知识组织与表示中的应用	47
4.1 知识网络	47
4.2 知识的表示	50
4.3 概念地图	51
4.4 应用超图来表述文档中的知识	53
4.5 知识网络的建立	56
4.6 知识超网络模型	58
参考文献	61
第5章 超图在主题地图中的应用	62
5.1 引言	62
5.2 主题地图的基本概念	63
5.3 基于超图的主题地图的模型	64
5.3.1 基本概念	64
5.3.2 主题地图的另一种描述	66
5.3.3 分层的主题地图	67
5.3.4 结构性质	68
5.3.5 组织层和较小类	70
参考文献	71
第6章 超图在聚类中的应用	74
6.1 引言	74
6.2 基于聚类的超图	76
6.2.1 联系规则	76
6.2.2 超图模型	77
6.2.3 找聚类	78
6.2.4 计算复杂性	79
6.3 实验结果	80
6.4 蛋白质密码数据	84
6.5 网文件数据	86

6.5.1 相关文字聚类	86
6.5.2 相关文件的聚类	87
参考文献	90
第7章 蜂窝式移动通信系统的超图模型	93
7.1 引言	93
7.2 超图最大独立集的产生	96
7.3 超图及图模型的蜂窝式系统性能比较	98
7.3.1 均一通信量	101
7.3.2 非均一通信量	103
7.4 容量近似	106
7.4.1 容量下界	107
7.4.2 容量上界	108
7.5 结论	109
参考文献	110
附录	110
第8章 超图在化学中的应用	112
8.1 引言	112
8.2 分子超图	113
8.3 分子超图的识别	114
8.4 分子超图的结构分析	118
8.5 图和超图的不变量	119
8.6 结论	123
参考文献	123
附录	126
A1 测度指标	126
A2 拓扑指标	127
A3 信息指数	128

第三部分 超网络流的应用

第9章 电子商务供应链超网络模型	133
9.1 引言	133
9.2 电子商务供应链超网络模型	134
9.2.1 供应商的优化条件	135

9.2.2 生产商的优化条件	138
9.2.3 零售商的优化条件	144
9.2.4 消费者的优化条件	148
9.3 供应链优化条件的特性	150
9.3.1 电子商务供应链超网络的整体优化条件	150
9.3.2 变分不等式解存在的条件	153
9.4 算法	154
9.5 变分不等式的解	158
9.6 数据实例	160
参考文献	163
第 10 章 退货供应链超网络模型	164
10.1 引言	164
10.2 退货供应链超网络模型的建立	165
10.2.1 制造商的行为及其最优目标	166
10.2.2 分销商的行为及其最优目标	167
10.2.3 需求市场的行为及其最优条件	168
10.3 供应链超网络模型的共赢平衡状态及其求解算法	169
10.4 仿真举例	172
参考文献	173
第 11 章 闭环供应链超网络模型	175
11.1 引言	175
11.2 闭环供应链超网络模型中各层决策者的行为及目标分析	178
11.2.1 新材料供应商的行为及其最优条件	180
11.2.2 生产商的行为及其最优条件	180
11.2.3 零售商的行为及其最优条件	182
11.2.4 需求市场的行为及其最优条件	183
11.2.5 回收商的行为及其最优条件	184
11.3 基于变分不等式的闭环供应链超网络的平衡条件	185
11.3.1 平衡条件	185
11.3.2 平衡条件能否达到的条件分析	188
11.3.3 平衡条件的求解算法	190
11.4 实例分析	193
参考文献	198

附录	199
A1 第一组	199
A2 第二组	200
A3 第三组	202
A4 第四组	203
A5 第五组	204
第 12 章 金融超网络模型	206
12.1 引言	206
12.2 带中间商和变权的金融超网络模型	207
12.2.1 拥有资金源的代理商们的行为及他们的最优性条件	209
12.2.2 中间商的行为和他们的最优化条件	211
12.2.3 需求市场的顾客和平衡条件	213
12.2.4 带变权的金融网络的平衡条件	214
12.3 特性	216
12.4 算法	217
12.5 数值例子	220
参考文献	222
第 13 章 网络广告资源分配超网络模型	226
13.1 引言	226
13.2 网络广告超网络模型	227
13.2.1 公司行为及最优目标	228
13.2.2 网站的行为及最优目标	231
13.3 网络广告超网络优化模型及求解算法	232
13.4 实例分析	233
参考文献	237
第 14 章 交通超网络模型	239
14.1 引言	239
14.2 有环境标准的交通网络平衡模型	240
14.3 定性性质	243
14.4 有政策指示的双标准模型	245
14.4.1 与释放物价格政策模型的关系	246
14.5 算法	250
14.6 多种例子	251

参考文献	254
第 15 章 远程移动办公与通勤上班办公决策的空间-时间超网络模型	257
15.1 引言	257
15.2 模型	258
15.2.1 流平衡公式	259
15.2.2 普遍消费结构	261
15.2.3 行为假设	262
15.3 定性分析	263
15.4 算法	266
15.5 数据实例	267
参考文献	272
第 16 章 知识协作超网络模型	275
16.1 引言	275
16.2 知识协作网络模型	276
16.3 定性属性	284
16.4 计算程序和数值实例	286
参考文献	289

第一部分 基本理论和方法

第 1 章 绪 论

1.1 网络系统

随着社会经济和科技文化的发展,人类活动的空间范围日益扩大,交往形式也日益增多。为了适应这些要求,人们构建了大量的运输、通信、计算机、金融系统,这些系统大部分可以通过形形色色的网络加以描述。例如,交通运输网络是由站点、枢纽通过道路(包括铁路、公路、城市道路乃至航路)连接而成的网络。电力网络是由发电厂、变电所和用户通过输电和配电线路连成的网络。计算机网络可以看做自主工作的计算机通过通信介质如光缆、双绞线、同轴电缆等相互连接形成的网络。此外,神经系统可以看做大量神经细胞通过神经纤维相互连接形成的网络。类似的还有科技合作网络、社会关系网络、食物链网络等。

在人类社会,网络的产生和发展,给人们的出行、货物的流动、资金的流转、信息的流通带来很多的方便,提高了生产效率和生活质量;但是,传染病的流行和网络病毒的传播、流言飞语的散布、电力网的局部故障引起大面积的停电等又是由于网络的存在而带来的危害。因此对自然网络和人工网络的认识和干预,就成为科学技术所要解决的问题之一。

典型的网络是由许多“节点”(node)或顶点(vertex)与连接两个节点之间的一些“边”(edge)组成的。其中,节点用来表示实际系统中不同的个体,连接的边则用来表示两个节点之间具有某种特定的关系。节点和边连接而成的图形就是常见的网络图。在节点之间通过“边”有网络流(物流、能流、信息流、资金流)在流动。随着网络规模的日益扩大和连接的日益复杂,人们对网络除了从各自专业的角度加以研究外,还关注各类网络在结构和运行上的共性,希望能够用抽象的数学工具来加以描述和分析。

最早进行这方面研究的是 18 世纪的数学家欧拉,他对所谓“Konigsberg 七桥问题”的建模和分析,开创了数学中图论这一分支的研究。其后,在运筹学的网络系统分析中,对最短路径、最大流以及最小费用流等方面有了一些解决实际问题的研究。

随着网络化的发展,出现了许多复杂的网络,这些网络节点和边的数量众多,结构复杂。有些网络的形成不是事先按照一定的规划实现的。例如,全球最大的互联网(又称因特网,Internet)从只有几个节点的简单网络,发展到今天,网络的用

户已经数以亿计。但是缺少统一的行政管理机构,可以说,到今天已经没有任何一个人能够知道互联网上所有的路由器到底是怎么连接在一起的,或者说没有一张很完整而清晰的互联网的网络图。再就是连接的多样性,有的松散,有的紧密,属性也有差异。网络节点和边又都可能有复杂的动态行为。人们在构建和运用网络时,常常是多目标或多准则的,而网络的存在又提供了更多的选择性,因而使得对网络进行的决策和优化问题更加复杂。

近年来有两项研究复杂网络(complex network)的成果使得研究工作得到了很大的推进。网络的巨大规模和形成的随机性使人们从统计的角度对网络的形态和演化进行了探索研究,发现某些网络中的小世界效应(small-world effect)和无标度特性(scale-free property)^[1,2]。这些成果使得人们对于实际存在的网络生成机制、传播机制、茁壮性和脆弱性等有了新的认识。随后,有关复杂网络的研究有了长足的进展。

1.2 超网络

在有些情况下,用一般的网络图并不能完全刻画真实世界网络的特征。例如,在合作撰写论文的网络中,用简单图可表示作者之间是否合作,但不能表示是否有三个或更多的作者合写一篇文章。原来处理这类问题是用二部图的方法来解决,用一组不相交的点集来表示论文,用另一组不相交的点集来表示作者。然而,在这种情况下,点的定义的“同质性”失去了,因为一组点代表论文,另一组点代表作者。在研究连通性、集聚性和其他拓扑性质时,两组的点有着完全不同的解释,这很容易产生歧义^[3]。

在研究超大规模的网络系统时,会出现物流网络与信息网络、资金网络相交织的问题,或网络中的网络的问题。这类网络系统的出现不但提高了运行效率,而且催生出新的生产、经营、消费的方式,但同时也带来了运行的复杂性。如果用工程的方法来分别处理各个网络的问题,就很难理清这些网络之间的关系。因此就出现了如何处理超越一般网络的网络系统问题。

很早以前,在计算机系统、遗传学等领域,就有学者使用“超网络”一词来泛指节点众多、网络中含有网络的系统,特别是把互联网认为是超网络。最早使用“超网络”概念于运输系统的是 Y. Sheffi^[4],而美国科学家 A. Nagurney^[5]在处理上述交织的网络时,把高于而又超于现存网络(“above and beyond”existing networks)的网络称为“超网络”(Supernetwork),使得它的含义开始明确。

按照我们的理解,超网络具备下列一种或几种特征:

- (1) 网络嵌套着网络,或者网络中包含着网络。
- (2) 多层特征。例如,交通运输网就有物理层、业务层和管理层;信息网络协