

国家关键交通网络的基元结构与系综特征

刘亮^{1,2}, 许维胜¹, 韩传峰²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 基于复杂网络模体和超家族辨识方法, 辨析国家关键交通网络的基元结构特性和系综特征. 研究表明交通网络模体应表述为受到成本、技术和空间约束下, 适应网络功能设计和建设, 预先明确的、非随机的特定结构形式. 阐述了交通地理网和服务网的4节点子图浓度分布的异同, 进一步基于4节点子图比剖面阐明了关键交通网络的家族分类和属性特征.

关键词: 关键交通网络; 模体; 子图浓度; 超家族

中图分类号: F512; F282; U113

文献标志码: A

Motif and Superfamily in National Critical Transportation Networks

LIU Liang^{1,2}, XU Weisheng¹, HAN Chuanfeng²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the notion of network motif and the superfamily identification method, this paper systematically detects the characteristics of building blocks and superfamilies for several national critical transportation networks in China. Results show that transportation network motifs are pre-defined and non-random local patterns, which are more probable to represent economic cost, technological constraints, and geographical limits in network structures. Moreover, the 4-node subgraph concentration rank of the networks can be divided into two kinds, each corresponding to geography network or service network. Furthermore, based on 4-node subgraph ratio profile (SRP), the transportation networks can be classified into two types of families, which may allow an easily interpretable view of the transportation system.

Key words: critical transportation network; motif; subgraph concentration; superfamily

作为复杂系统研究的新角度和新方法, 复杂网络关注的是系统中个体相互作用的拓扑结构. 近十年, 复杂网络理论对跨越生物技术和社会系统的复杂网络共性结构研究取得极大进展^[1-2], 研究表明诸如蛋白质网络、无线通讯网络和科研合作网络等都是小世界或无标度网络^[3-4].

国家关键交通系统是大量交通站点和线路通过物质、信息和能量交互作用而构成的对国家经济社会发展具有关键支持功能的网络^[5]. 一些学者应用复杂网络对各类交通网络的全局结构进行了研究, 如: 印度铁路地理网的节点度呈指数分布^[6], 中国铁路客运网具有漂移幂律分布特征^[7-9]; 北京公交线网服从幂律分布^[10], 我国五个大城市的公交地理网近似于随机网络^[11]; 地铁工程网具有树形特征和小世界网络特性, 其度分布遵循指数形式^[12-13]; 美国国家高速公路网为随机网络, 具有指数分布形式^[14]. 总体而言, 针对关键交通网络全局结构的研究已取得一定成果, 见表1. 结果表明交通网络具有小世界特性, 且地理网具有指数分布特征, 服务网具有幂律分布特征, 研究有效扩展了对复杂交通网络全局拓扑结构的认知.

近期, 统计物理学和分子生物学对复杂网络的研究进一步表明, 具有相似全局结构的网络可能由于其本身功能特性或生成机理不同, 反映出极其不同的局部结构^[15]. Shen-Orr等^[16]在研究大肠杆菌的转录调控网时引入了“模体”概念, 定义为真实网络中频繁出现的小规模同构子图, 其出现频率高于在具有相同节点和连线数的随机网络中出现的频率. 模体从局部刻画了给定网络相互连接的特定模式和可能具有的基本功能特征, 被誉为真实网络的“基元”^[15]. 同时, 不同层次和规模的子图分布对刻画网络组织具有重要作用, Milo等^[17]进一步提出超家族

收稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(91024023, 70640007, 70871091, 70871093); 中国博士后科学基金(2012M520935); 上海市重点学科建设项目(B310)

第一作者: 刘亮(1981—), 男, 工学博士, 主要研究方向为工程复杂网络. E-mail: liuliang@tongji.edu.cn

通讯作者: 许维胜(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为控制科学与管理工程. E-mail: 9cip@tongji.edu.cn

概念,指出横贯不同学科领域的复杂网络具有相似的子图比剖面,因而属于同一超家族,具有相似的

“系综”特征.复杂网络模体及超家族研究引起了广泛关注.

表 1 关键交通网络全局结构研究成果

Tab.1 Study results on global structures of critical transportation networks

网络	文献研究	全局特征
公交网络	波兰城市公共交通物理网 ^[18] ,中国城市公共交通服务网 ^[19-21]	指数分布,小世界特性,幂律分布
地铁网络	波士顿地铁网 ^[22] 、中国城市地铁网 ^[23]	树形结构,指数分布
铁路网络	印度铁路地理网 ^[6] 、中国铁路客运网 ^[8-9]	指数分布,无标度特征,小世界网络
航空网络	世界航空网 ^[24] ,中国航空网 ^[25-26]	双段幂律分布,小世界网络
高速公路网络	美国国家高速公路网 ^[14]	随机网络,指数分布

目前,关于交通网络拓扑结构的研究大多考虑其全局结构,对其基元结构特征及其形成机理知之甚少,而且由于关键交通网络规模和连接性不同,似乎很难比较其局部结构,更缺乏定量的测度.本文以中国若干真实交通系统为原型建立网络模型,借鉴复杂网络研究的最新试验事实和相应前沿理念——模体和超家族及其算法,研究国家关键交通网络的基元结构与系综特征.

1 数据和方法

1.1 国家关键交通网络模型

复杂网络中节点用来表示真实系统中的个体,边用来表示个体间的相互关系,有边相连的两个节点视为相邻.交通网络建模通常采用 L 空间和 P 空间方式^[27],前者将交通站点视为节点,若相邻两个节点之间有工程线路连接,则在两节点间连边;后者以交通站点作为节点,任意两个节点之间有服务线路连接,则在两节点间连边. L 空间生成的是交通地理网, P 空间生成的是交通服务网.

本文研究的国家关键交通网络包括中国高速公路网、中国铁道网、中国国道网,北京地铁网和上海地铁网,以及中国航空客运网和中国铁路客运网.其中,中国高速公路网、中国铁道网和中国国道网均以城市作为节点,城市间的道路或铁道等工程线路作为边;北京和上海地铁网络以地铁站点为节点,站间轨道连接为边,上述五种网络均基于 L 空间建模生成地理网.中国航空客运网以城市为节点,以城市间的直航线路为边,中国铁路客运网以城市为节点,城市间有客运列车直达则连边,上述两种网络基于 P 空间建模生成服务网.不考虑线路距离和连接方向性,网络均视为无向无权.相关数据来自中国中长期铁路发展规划图、国家公路网络图、城市地铁中长期规划图等,网络基本统计数据见表 2,参数意义见文献^[4].

表 2 中国国家关键交通网络全局拓扑特性

Tab.2 Global topological properties of China national critical transportation networks

网络	节点数	边数	平均度	集聚系数	平均距离
中国高速公路网	259	380	2.934	0.026	9.150
中国铁道网	427	533	2.496	0.042	15.777
中国国道网	1 280	1 456	2.275	0.003	25.313
北京地铁网	245	280	2.286	0.002	13.169
上海地铁网	212	235	2.226	0.002	13.203
中国航空客运网	148	1 065	14.392	0.695	2.135
中国铁路客运网	348	948	5.480	0.269	3.078

1.2 网络模体及其算法

依据 Milo 等^[15]的开创性研究,模体是在真实网络中反复出现的相互作用的基本模式,其出现的频率远高于在具有相同节点和连线数的随机网络中出现的频率.网络模体搜索主要分为随机网络建模、子图搜索和模体评价三个步骤.

(1)随机网络生成.为判断真实网络中的子图 i 是否为模体,需要产生与真实网络对应的随机网络,并要求其与真实网络的规模和度序列一致.依据度序列生成随机网络,有交换、匹配和 Go with the Winner 等三种常用算法^[28].

(2)子图搜索.在真实网络和随机网络中搜索特定规模的子图,确定并归类同构子图.由于子图数量随网络和待搜索子图规模呈指数增长,其计算复杂度较高. Milo 等^[15-16]最先采用穷尽递归搜索算法,搜索给定规模的所有子图.其他包括采样算法 ESA 和 ESU 算法,见文献^[29-30].

(3)模体评价.关于模体的统计评价尚无统一标准, Milo 等^[15-16]通过与随机网络比较计算子图的 Z 值来评价模体统计意义, $Z_i = (C_i - \bar{C}_i) / \sigma_i$, 其中 C_i 表示子图 i 在真实网络中的浓度,子图浓度定义为网络中子图 i 在同等规模所有子图中的比例, \bar{C}_i 和 σ_i 分别表示子图 i 在随机网络集合中的平均浓度和标准差.

研究首先基于交换算法产生一组与真实交通网具有相同度序列的随机网络集合.该算法根据度序列

构造一网络,接着执行一系列蒙特卡罗交换步,即随机选择一对边进行交换,若交换导致了多重边或自回路,则取消该交换;针对每个真实网络均构造1 000个相应随机网络。其次,应用采样算法确定真实和相应随机网络的所有 $n \times n$ ($n=3,4$)子矩阵,得到对应的3和4节点子图浓度 C 。无向网络的3和4节点子图见表3。关于模体的统计评价,通过与随机网络比较计算子图的 Z 值来界定。由于 Z 值并无特殊约定, $Z>0$ 时,子图为模体, $Z<0$ 时,子图为反模体,分别表示真实网络中该子图出现的频次高于或低于相应随机网络。

2 国家关键交通网络基元结构

2.1 模体特性

国家关键交通网络的3和4节点子图(模体)计算见表3。统计表明,3节点子图形式中,3-2在所有国家关键交通网络中出现的次数与在相应随机网络中出现的次数相比均具有正显著性($Z=8.709\ 0 \sim 140.350\ 0$),可视为模体。3-1则具有负显著性($Z<0$),可视为反模体。比较3-1和3-2的实际意义,3-2表明局部网络的三个节点彼此均有连接,3-1则表示仅有一个节点与其他两者连接。

4节点子图形式中,4-1和4-2在所有交通网络中为反模体形式,4-3在所有交通网络中为模体形式。注意到反模体4-2,4-1为反模体3-1增加一条边构成,模体4-3由模体3-2增加一条边构成,这证明高层次上的(反)模体通常由低层次(反)模体的扩展或组合来显现^[15]。子图形式4-4的 Z 值在各网络中有正有负,且在地理网中视为模体,在服务网中为反模体。子图4-5和4-6则具有模体倾向或为模体。

模体在真实网络中出现的次数远高于其在相应随机网络中出现的次数,在生命网络中代表了进化所尊崇和偏好的一种结构,一些模体如细菌和酵母基因调控网络中的前馈环(FFL)互相配合完成了信息处理功能^[31]。另一些学者认为大量网络模体并非真正的功能单元体,而应作为网络建设过程的伴随品,其出现可以解释为自然选择压力或预先界定^[32]。现实表明关键交通网络模体,并非如生命网络中行使特定功能的模体,其在交通网络中并不具有特殊功能内涵。

交通网络的主要功能是快速有效地运送客流和输送物资,其网络设计应是在节点间尽可能建造密集的工程或服务线路,以产生高连通性网络^[33],如:

地铁工程在站点间设计密集轨道,高速公路网在城市节点间建设更多直达高速道路,航空线路网开辟大量城市直达航班,即局部结构规模(节点数)给定情况下,边数越多,其功能连通性越高。以六种4节点子图为例,其局部结构规模相同,4-5和4-6的边数分别为5和6,4-3和4-4的边数均为4,4-1和4-2的边数均为3,因此其功能连通性依次降低。据此推断,高连通性子结构4-5和4-6在交通网络中的出现频次应高于随机网络,低连通性子结构4-1和4-2的出现频次应小于随机网络中出现的频次,即两类子结构分别为模体和反模体,子结构4-3和4-4的出现频次与随机网络相比则难以确定,这与前述真实交通网络的(反)模体形式具有一致性,见表3。进一步分析认为,(反)模体形式应表述为受成本、技术和地理因素等约束,适应交通网络功能设计和工程建设的预设、非随机的特定结构形式,且地理网和服务网所受约束条件强度不同,导致(反)模体形式有所差别。

其一,工程成本约束。工程成本与功能需求具有正相关关系,高的功能需求通常导致较高工程成本。一般而言,网络功能需求 f (function)正比于网络节点数,网络成本 c (cost)正比于网络边数^[27],如地铁网络造价与线路长度正相关。在功能需求即局部结构节点数给定时,较多边数在提高功能效率的同时亦带来较高的建造成本。因此,考虑交通功能需求,尽管4-5和4-6应视为模体,但由于地理网受成本强烈制约,其出现频次较少或不出现,而仅具有模体倾向。服务网络受成本制约较小,因而4-5和4-6体现出模体特征。

其二,工程技术约束。表现为对高密度(高连通)局部结构的制约,其连线建造具有一定工程技术难度,如:从既有地铁站点平台挖掘引出线路,向纵深处挖取空间,往往受工程技术能力约束。这直接导致高密度局部结构4-5和4-6在地理网络出现频次较低。

其三,地理空间约束。表现为网络占据一定空间位置,受空间资源约束,因而相邻地理位置的节点间可能具有一定的连线数。如:地铁网络中的某些处于核心商务区的站点因周边空间挤占,其间连线数受限制;高速公路网增加一条城市直达线受到地理因素制约,不可能大量增加和重复建设。通常,高密度局部结构4-5和4-6有较多直达线路,导致其出现频次较低。

总体而言,成本、技术和空间约束均强烈作用于

表 3 关键交通网络的 3 和 4 节点(反)模体形式

Tab. 3 The 3- and 4-node (anti)motifs in critical transportation networks

序号	图示	网络	$C_i/\%$	$(\bar{C}_i \pm \sigma_i)/\%$	Z_i	模体类型
3-1		中国高速公路网	98.346	99.992 ± 0.030	-54.366 0	反模体
		中国铁道网	97.992	99.998 ± 0.014	-140.350 0	
		中国国道网	99.824	99.999 ± 0.005	-38.326 0	
		北京地铁网	99.771	99.997 ± 0.026	-8.709 0	
		上海地铁网	99.722	99.998 ± 0.021	-12.865 0	
		中国航空客运网	77.959	81.096 ± 0.243	-12.926 0	
		中国铁路客运网	92.928	99.956 ± 0.207	-33.941 0	
3-2		中国高速公路网	1.654	0.008 ± 0.030	54.366 0	模体
		中国铁道网	2.009	0.002 ± 0.014	140.350 0	
		中国国道网	0.176	0.000 ± 0.005	38.326 0	
		北京地铁网	0.229	0.003 ± 0.026	8.709 0	
		上海地铁网	0.278	0.002 ± 0.021	12.865 0	
		中国航空客运网	22.041	18.904 ± 0.243	12.926 0	
		中国铁路客运网	7.072	0.044 ± 0.207	33.941 0	
4-1		中国高速公路网	22.154	23.088 ± 0.259	-3.606 0	反模体
		中国铁道网	16.249	17.558 ± 0.122	-10.703 0	
		中国国道网	24.363	24.636 ± 0.246	-1.182 0	
		北京地铁网	19.488	19.628 ± 0.338	-0.413 0	
		上海地铁网	21.645	22.284 ± 0.469	-1.361 0	
		中国航空客运网	48.989	50.535 ± 0.285	-5.416 0	
		中国铁路客运网	56.803	61.978 ± 0.222	-23.323 0	
4-2		中国高速公路网	72.765	76.582 ± 0.286	-13.355 0	反模体
		中国铁道网	79.714	82.303 ± 0.161	-16.035 0	
		中国国道网	74.994	76.630 ± 0.248	-6.604 0	
		北京地铁网	79.294	80.185 ± 0.391	-2.281 0	
		上海地铁网	77.201	77.522 ± 0.512	-0.627 0	
		中国航空客运网	8.072	9.291 ± 0.127	-9.570 0	
		中国铁路客运网	24.046	35.407 ± 0.351	-32.369 0	
4-3		中国高速公路网	3.820	0.016 ± 0.059	64.275 0	模体
		中国铁道网	3.219	0.005 ± 0.033	96.922 0	
		中国国道网	0.596	0.001 ± 0.013	46.088 0	
		北京地铁网	0.731	0.004 ± 0.038	19.282 0	
		上海地铁网	1.010	0.004 ± 0.049	20.620 0	
		中国航空客运网	29.063	26.181 ± 0.470	6.129 0	
		中国铁路客运网	16.307	0.139 ± 0.510	31.685 0	
4-4		中国高速公路网	1.184	0.314 ± 0.102	8.531 9	模体或反模体
		中国铁道网	0.715	0.134 ± 0.077	7.542 9	
		中国国道网	0.046	0.032 ± 0.026	0.513 0	
		北京地铁网	0.487	0.183 ± 0.143	2.125 0	
		上海地铁网	0.190	0.144 ± 0.161	0.285 0	
		中国航空客运网	0.464	1.781 ± 0.178	-7.388 0	
		中国铁路客运网	0.286	2.469 ± 0.118	-18.433 0	
4-5		中国高速公路网	0.076	0.000 ± 0.000	>0	模体倾向
		中国铁道网	0.102	0.000 ± 0.000	>0	
		中国国道网	0	0.000 ± 0.000	—	
		北京地铁网	0	0.000 ± 0.000	—	
		上海地铁网	0	0.000 ± 0.000	—	
		中国航空客运网	8.954	8.883 ± 0.066	1.084 0	
		中国铁路客运网	2.198	0.007 ± 0.043	50.744 0	
4-6		中国高速公路网	0	0.000 ± 0.000	—	模体倾向
		中国铁道网	0	0.000 ± 0.000	—	
		中国国道网	0	0.000 ± 0.000	—	
		北京地铁网	0	0.000 ± 0.000	—	
		上海地铁网	0	0.000 ± 0.000	—	
		中国航空客运网	4.458	3.330 ± 0.073	15.559 0	
		中国铁路客运网	0.360	0.000 ± 0.003	142.230 0	

地理网,服务网为抽象网,多只受成本约束^[34]。因此,子图 4-6 和 4-5 在地理网的出现频次大多为零,仅具有模体倾向,如:4-5 仅在中国高速公路网和中国

铁道网出现而被视为模体,4-6 出现频次为零。子图 4-3 和 4-4 在地理网中均为模体;4-3 在服务网中为模体,4-4 在服务网中为反模体,表明 4-3 和 4-4 均

为地理网建设所需,4-4不为服务网所需.这在于成本既定条件下,子图4-4效率低于4-3,但由于服务网为抽象网,较少受空间约束和工程技术条件限制,其网络设计更倾向于4-3.交通地理网和服务网的(反)模体形式的差异性,源于约束条件的差异性.

2.2 子图浓度分布

不考虑与随机网络对比,子图浓度仅分析真实网络的分布.依上节所述,仅考虑功能需求的理想交通网络子图浓度分布特征为:具有较低连通性的子图浓度小于高连通性的子图浓度,即子图4-6,4-5,4-4,4-3,4-2和4-1的浓度依次减小.分析表明真实交通网络的子图浓度与之完全相反,如地理网中,子图4-1和4-2的出现次数远高于4-3和4-4的出现次数,而4-5和4-6几乎不出现于网络中.同时,交通地理网和服务网呈现不同的子图浓度分布模式,见图1.

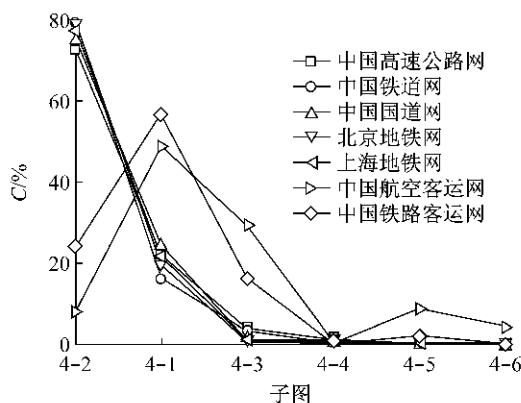


图1 关键交通网络4节点子图浓度分布

Fig.1 The 4-node subgraph concentrations of the critical transportation networks

地理网中,子图4-2和4-1浓度较大,分别为75.0%和20.0%左右,是网络主要子结构,是地理网必要构件;子图4-3和4-4的浓度在1.0%左右,为次要子结构;子图4-5和4-6浓度为0.1%左右和0,为地理网的非必要构成子结构,它们极少甚至不出现,如子图4-5仅出现于高速公路网和铁道网且浓度极低,子图4-6则未出现于任何地理网中.

服务网的子图浓度分布具有不同特征,子图4-1,4-2和4-3的浓度依次为50%,20%和20%左右,为主要子结构;子图4-5,4-6浓度较小,子图4-4浓度最小.航空客运网相对于铁路客运网,子图4-3,4-5和4-6的相对浓度均较大,原因在于后者仍以铁路地理网为载体构成,在一定程度上仍受工程技术条件制约,而航空网络几乎无此限制,因而更接近仅考虑功能需求的理想交通网的子图构成.

分析交通地理网表明,其子图形式和数量应视为成本、技术和地理等约束条件与功能需求的折中:低连通性的子图(4-2,4-1)构成网络的基本架构,高连通性子图(4-5,4-6)难以实现,中等连通性子图(4-3,4-4)因约束条件与功能需求平衡,在不显著提高工程成本或施工复杂度的情况下可以有效提高功能连通性.由于交通服务网为抽象网络^[4],较少受成本、空间和地理约束,高连通性子图(4-5,4-6)可以大量出现,因而接近仅考虑功能的理想交通网的子图构成.实际上,子图浓度分布可作为服务网和交通网发展成熟度的标准.

3 国家关键交通网络系综特征

子图(模体)从局部层次刻画一个给定网络相互连接的特定模式,是网络局部结构的描述,其形成、分布自下而上刻画了系统宏观构型.Milo等^[17]通过规范化比较不同网络的Z值显著性即子图比剖面(subgraph ratio profile, SRP),以划分和定义不同真实网络所属的家族类.由于所研究复杂网络横跨不同学科领域,因而称其为超家族.

$$SRP_{Z_i} = Z_i / \sqrt{\sum_i Z_i^2}$$

SRP强调子图的相对统计意义,可以用来比较规模差异较大的网络.由于随所搜寻子图规模增大,其在随机和真实网络中的数量显著减少,可能导致Z值不合理增大,本文针对4节点子图计算 $\Delta_i = (C_i - \bar{C}_i) / (C_i + \bar{C}_i + \epsilon)$, ϵ 保证 Δ 不会因随机网络中子图浓度过小而取值过大,此处 $\epsilon = 5\%$.相应计算式为

$$SRP_{\Delta_i} = \Delta_i / \sqrt{\sum_i \Delta_i^2}$$

关键交通网络4节点子图比剖面见图2,分析表明,关键交通地理网和服务网具有不同的子图比剖面,因而属于不同的家族.Milo等^[17]研究表明不同类型的复杂网络可能具有相同的子图比剖面,因而属于相同的家族,这由于系统为实现某一目的或功能而长期进化使然.本文研究表明,即使是同属于广义交通系统的地理网和服务网,亦可能具有不同的子图比剖面,因而属于不同家族.分析认为主要源于成本、地理和空间等条件的约束强度不同,导致交通地理网和服务网具有不同子结构构成特征,因而归于不同家族.比较Milo等^[17]基于4节点子图比剖面得到的横贯电力网络、基因调控网络、自治系统和BA无标度网络的超家族,分析表明上述网络均与交

通地理网络具有不同子图比剖面,因而均属不同家族。服务网与BA无标度网的子图比剖面则类似,原因在于交通服务网^[8-9,25-26]在全局结构上一般具备无标度特征。这反映了低层次结构对高层次系统的上向因果关系,即局部结构作为要素包含于全局结构之中,对全局结构分布具有决定作用,亦证明了近期复杂网络的全局拓扑结构和局部结构可以相互界定的观点^[35]。

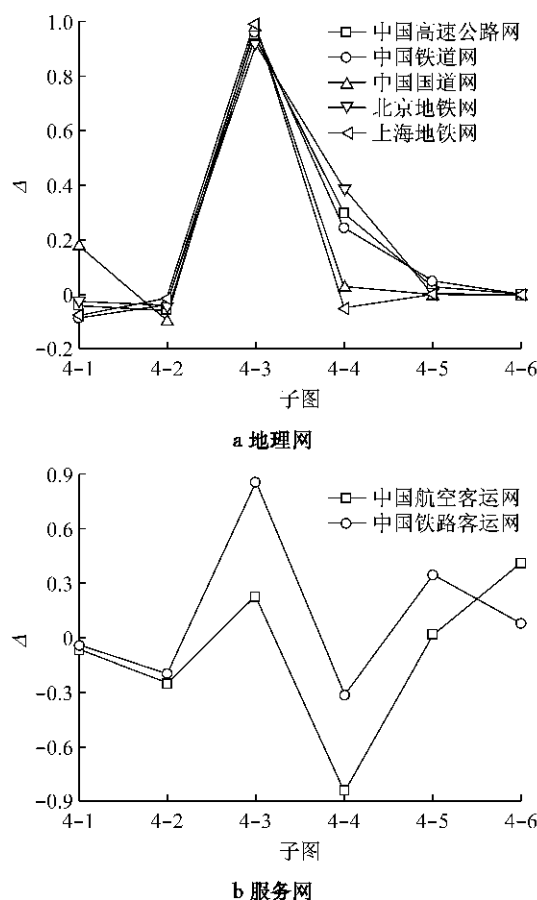


图2 关键交通网络4节点子图比剖面

Fig.2 The 4-node subgraph ratio profiles of the critical transportation networks

4 结语

基于自下而上的复杂网络模体研究,辨识了国家关键交通网络的基元结构(模体和子图分布)特性,其类型一致性源于其运输功能的同一性,可用于定义交通系统并区分于社会或生态系统。地理网和服务网的模体形式、子图浓度分布和系统特征的差异反映了由于成本、地理和技术约束强度不同,两类网络构成所遵循的特定结构特征不同,可作为关键交通网络地理网和服务网规划、设计、建设和优化的

重要原则和标准。

作为一个新兴的研究领域,网络模体和超家族在系统生物学和统计物理学已得到长足发展。运用复杂网络模体和超家族剖析交通网络结构与组织方式,尚有待合理地划分出具有良好功能解释的子结构,在深入、全面认识各种子结构功能和作用的基础上,通过对更高规模和层次子图分布的描述和比较,进一步分析和理解包括电力网、通讯网等在内的工程复杂网络系统特征。

参考文献:

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440.
- [2] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509.
- [3] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47.
- [4] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167.
- [5] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410: 268.
- [6] Sen P, Dasgupta P, Chatterjee A, et al. Small-world properties of the Indian railway network [J]. Physical Review E, 2003, 67(3): 036106.
- [7] Wang R, Tan J X, Wang X, et al. Geographic coarse graining analysis of the railway network of China[J]. Physical A, 2008, 387: 5639.
- [8] 谭江峡,王杜鹃,王鑫,等.与地理环境相关的中国铁路客运网拓扑结构[J].物理学报, 2008, 57(11): 6771.
TAN Jiangxia, WANG Dujuan, WANG Xin, et al. The topological railway network of China constrained by the geographic factors[J]. Acta Physica Sinica, 57(11): 6771.
- [9] 赵伟,何红生,林中才,等.中国铁路客运网网络性质的研究[J].物理学报, 2006, 55(8): 3906.
ZHAO Wei, HE Hongsheng, LIN Zhongcai, et al. The study of properties of Chinese railway passenger transport network[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 3906.
- [10] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J, et al. Urban transit as a scale-free network[J]. Modern Physics Letters B, 2004, 18(19): 1043.
- [11] 常鸣,马寿峰.我国大城市公交网络结构的实证研究[J].系统工程学报, 2007, 22(4): 412.
CHANG Ming, MA Shoufeng. Empirical analysis for public transit networks in Chinese cities [J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(4): 412.
- [12] Panagiotis A, David F. Large subway systems as complex networks[J]. Physical A, 2006, 367: 553.
- [13] Seaton K A, Hackett L M. Station, trains and small-world networks[J]. Physical A, 2004, 339(3/4): 635.
- [14] Barabási A L, Bonabeau E. Scale-free networks[J]. Scientific American, 2003, 288(5): 60.
- [15] Milo R, Shen-Orr S, Itzkovitz N, et al. Network motifs: simple

- building blocks of complex networks[J]. *Science*, 2002, 298: 824.
- [16] Shen-Orr S, Milo R, Mangan S, et al. Network motifs in the transcriptional regulatory network of *Escherichia coli* [J]. *Nature Genetics*, 2002, 31(1): 64.
- [17] Milo R, Itzkovitz S, Kashtan N, et al. Superfamilies of evolved and designed networks [J]. *Science*, 2004, 303: 1538.
- [18] Sienkiewicz J, Holyst J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 046127.
- [19] 赵俊红, 马军海, 李瑞山. 基于天津市公共交通网络的复杂性研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2009, 6(4): 76.
ZHAO Junhong, MA Junhai, LI Ruishan. Complexity research based on public transport network of Tianjin [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2009, 6(4): 76.
- [20] 李英, 周伟, 郭世进. 上海公共交通网络复杂性分析[J]. *系统工程*, 2007, 25(1): 38.
LI Ying, ZHOU Wei, GUO Shijin. An analysis of complexity of public transportation network in Shanghai [J]. *Systems Engineering*, 2007, 25(1): 38.
- [21] 曾明华, 李夏苗, 刘大鹏. 城市群交通网络特性[J]. *系统工程*, 2009, 27(3): 10.
ZENG Minghua, LI Xiamiao, LIU Dapeng. The properties of traffic networks in urban clusters [J]. *System Engineering*, 2009, 27(3): 10.
- [22] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small world network[J]. *Physica A*, 2002, 314(1/4): 109.
- [23] HAN Chuanfeng, LIU Liang. Topological vulnerability of subway networks in China [C]//International Conference on Management and Service Science, MASS 2009. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 1-4.
- [24] Guimera R, Mossa S, Turtschi A, et al. The worldwide air transportation network; anomalous centrality, community structure, and cities' global roles [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(22): 7794.
- [25] 刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 106.
LIU Hongkun, ZHOU Tao. Empirical study of Chinese city airline network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 106.
- [26] Li W, Cai X. Statistical analysis of airport network of China [J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 046106.
- [27] Kuran M, Thiran P. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks [J]. *Physical Review E*, 2006, 74: 036114.
- [28] Milo R, Kashtan N, Itzkovitz S, et al. On the uniform generation of random graphs with prescribed degree sequences [EB/OL]. [2011-09-20]. <http://arxiv.org/pdf/condmat/0312028.pdf>, 2003.
- [29] Wernicke S. Efficient detection of network motifs [J]. *IEEE Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 2006, 3(4): 347.
- [30] Alon U. Molecular cell biology & physics of complex systems [EB/OL]. [2011-09-20]. www.weizmann.ac.il/mcb/UriAlon.
- [31] Lee T I, Rinaldi N J, Robert F, et al. Transcriptional regulatory networks in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Science*, 2002, 298: 799.
- [32] Solé R V, Valverde S. Are network motifs the spandrels of cellular complexity? [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21(8): 419.
- [33] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 045104.
- [34] Itzkovitz S, Alon U. Subgraphs and network motifs in geometric networks [J]. *Physical Review E*, 2005, 71: 026117.
- [35] Vazquez A, Dobrin R, Sergi D, et al. The topological relationship between the large-scale attributes and local interaction patterns of complex networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(52): 17940.