

国内外典型城市群交通网络特性对比分析 *

王国明¹, 李夏苗¹, 胡正东^{1,2}

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 南华大学, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 为了研究城市群交通网络特性,运用 ICN dual approach 方法构建了以美国东北部大西洋沿岸城市群、日本太平洋沿岸城市群、英国伦敦为核心的城市群、长江三角城市群、京津唐城市群、珠江三角城市群等国内外典型城市群交通网络模型,使用 MATLAB 和 VC++ 分别对它们的平均度、网络密度、 n -聚集系数、平均最短路径、随机网络聚集系数、随机网络平均最短路径、网络结构熵、全局系数等网络特性指标进行计算和比较分析,得到以下结论:a) 六个城市群交通网络都具有小世界性而不具有无标度性,一般可以推论城市群交通网络只有小世界性、不具有无标度性;b) 六个城市群交通网络都存在着极少道路介数很大,对整个网络的整体性、连通性和安全性意义重大;c) 六个城市群交通网络中珠江三角城市群交通网络的整体效率最高,日本太平洋沿岸城市群交通网络结构熵最小,表明其最有序。

关键词: 城市群; 交通网络; 小世界性; 无标度性

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0021-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.005

Properties of traffic networks in urban agglomeration

WANG Guo-ming¹, LI Xia-miao¹, HU Zheng-dong^{1,2}

(1. School of Traffic & Transport Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: In order to research properties of traffic network of urban agglomerations, this paper designed the model of urban agglomeration by ICN dual approach, which included the northeastern United States Atlantic coast urban agglomeration, Japan's Pacific coast urban agglomeration, British London urban agglomeration, Yangtze river delta urban agglomeration, Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration, Pearl river delta urban agglomeration. And figure out averaged-degree, averaged-clustering coefficient, betweenness centrality of roads with degree and structure entropy based on node betweenness centrality, global coefficient, which show: a) traffic networks have small-world behavior but no scale-free property; b) it is significant for the traffic networks of six urban agglomeration that the betweenness of a few real road is greater; c) the global coefficient of Pearl river delta urban agglomeration is greatest among six urban agglomeration and the entropy of Japan's Pacific coast urban agglomeration is smallest, which show it is in order.

Key words: urban agglomeration; traffic network; small-world property; scale-free property

随着城市群的发展和成熟,城市群在国家和社会经济中的作用越来越明显,它是人口、资金、技术的聚集地,也是国际与地区竞争的核心力量。而城市交通网络是城市群发展的支撑。为了促进城市群的发展,需要对城市群交通网的基本特性、连通水平、整体性能等方面进行深入研究。

运用复杂网络理论对交通运输网络各种特性研究越来越多。文献[1]分析了北京市公交网络的无标度及小世界特性。文献[2]研究了中国北京、上海、南京等城市的公交网络的特性。文献[3]以北京市公交系统为例,计算并分析了两种网络的拓扑参数及网络特性。文献[4]以南京市公交网络为实例,建立了南京市公交线路与站点网络的数据库,分别构建了基于公交线路的网络模型、基于邻接站点的网络模型、基于换乘站点的网络模型,并分析了不同网络的拓扑特性。文献[5]以北京市公交系统为例,用二分图模型对其进行描述,分别构建出公交站点网络和公交线路网络,发现北京市公交系统具有小世界网

络的性质。文献[6]对世界地铁网络复杂性进行了研究。这些研究都是对城市公共交通复杂网络的研究。在我国城市群现象凸显的情况下,对城市群交通复杂网络的研究有待深入。本文在研究国内外典型城市群交通网络特性的基础上,分析各个城市群的不同,以使其对我国城市群交通网络建设具有一定的指导和借鉴意义。

1 国内外典型城市群的概况

城市群作为人类社会经济发展的空间形态是一种普遍形式。世界比较著名的城市群有美国东北部大西洋沿岸城市群、北美五大湖城市群、日本太平洋沿岸城市群、欧洲西北部城市群、英国以伦敦为核心的城市群等。

本文选取国外三个城市群和国内三个城市群作为研究样本,国外三个城市群包括美国东北部大西洋沿岸城市群、日本

太平洋沿岸城市群、英国以伦敦为核心的城市群;国内城市群包括长江三角城市群、京津唐城市群、珠江三角城市群。国内外六大典型城市群具体概况如表 1 所示。

表 1 国内外典型城市群发展概况

城市群	区位	人口	面积	主要城市	GDP 比重
美国东北大西洋沿岸城市群	大西洋沿岸 北起波士顿、南至华盛顿	6 500	13.8	波士顿、纽约、费城等	40% 以上
日本太平洋沿岸城市群	千叶向西, 东京、横滨、静冈、名古屋	7 000	3.5	东京、大阪、名古屋、神户	70% 以上
英国以伦敦为核心的城市群	伦敦—利物浦轴线	3 650	4.5	大伦敦地区、伯明翰等	80% 以上
长江三角城市群	东起上海、北到泰州、西到南京、南台州	7 240	10	苏州、无锡等	15% 以上
珠江三角城市群	沿珠江城市	4 283	2.4	广州、深圳、佛山、珠海等	10% 以上
京津唐城市群	北京、天津、唐山	4 111	4.2	北京、天津、唐山	8% 以上

表 2 复杂网络的符号说明及统计指标

符号	符号含义	统计指标名称	网络统计指标公式	统计指标说明
d_{ij}	交通网中两个节点距离	平均度	$\langle k \rangle = \frac{\sum k_i}{N} = \frac{2E}{N}$	节点平均度越大与该点直接相连道路数就越多
L	交通网的平均路径长度	平均路径长度	$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}$	对所有节点之间最短路径长度的平均值, 可以表示网络的连通性
$\langle k^{(n)} \rangle$	n 阶平均连接度 $\langle k(n) \rangle$	n 阶平均连接度	$\langle k^{(n)} \rangle = \frac{\sum k_i^{(n)}}{N} = \frac{2E^{(n)}}{N}$	节点平均 n 阶度越大, 则与该点相连的 n 阶道路数就越多
ρ	网络密度	网络密度	$\rho = \frac{\langle k \rangle}{N-1}$	反映网络疏密程度的指标
C_i	局部聚集系数	局部聚集系数	$C_i = 2E_i / k_i(k_i - 1)$	反映 i 网络的聚集程度的一个重要参量
C	交通网络的平均聚集系数	平均聚集系数	$C = \sum_k p(k) C(k)$	反映网络的聚集程度的一个重要参量
$C^{(n)}$	交通网络 n -聚集系数	n -聚集系数	$C^{(n)} = \sum_k p(k^{(n)}) \times C^{(n)}(k^{(n)})$	反映网络的聚集程度的一个重要参量
C_c	交通网络紧密度	紧密度	$C_c = [\sum_i d_{ij}]^{-2}$	反映节点通过网络对其他节点施加影响的能力, 网络全局结构
$B(i)$	交通网络介数	介数	$B(i) = \sum_{j=k} \frac{\sigma_{ik}(i)}{\sigma_{jk}}$	反映了节点 i 的影响力。经过节点 i 的最短路径越多, 就表明节点 i 所承受的流量越大
$B(k)$	交通网络介数中心性	介数中心性	$B(k) = \sum \frac{B(i)}{n(k)}$	介数中心性表征网络节点对信息流动的效果
S	交通网络结构熵	结构熵	$S = -\sum B(i) \ln B(i)$	反映交通网络的有序状况
E_{global}	交通网络全局效率	全局效率	$E_{\text{global}} = \frac{1}{N(N+1)} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij}$	表示网络节点间联系的强弱

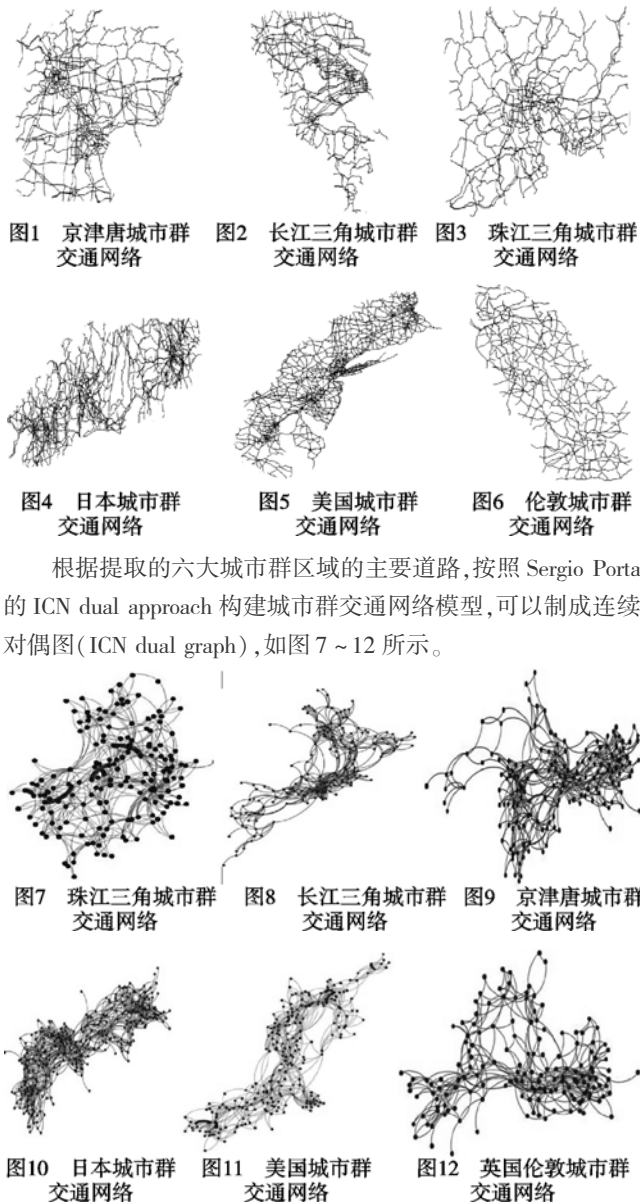
2 复杂网络的符号说明及统计指标

国内外学者已经提出一些重要的复杂网络统计指标, 本文根据研究需要选用表 2 中所列符号及复杂网络统计指标。

3 城市群交通网络构建

城市群交通网络特性统计分析需要将地图上交通网络抽象成网络模型, 可借鉴城市交通网建模的相关研究成果, 城市交通网络的抽象方法有两种, 一种就是 primal approach^[7,8], 另一种就是 dual approach^[9]。连续路段 ICN dual approach 是 dual approach 中的一种, 更加客观合理, 因而本文采用 ICN dual approach。

国外美国东北部大西洋沿岸城市群、日本太平洋沿岸城市群、英国以伦敦为核心的城市群地图来自 2011 年 3 月谷歌地图; 国内城市群包括长江三角城市群、京津唐城市群、珠江三角城市群地图来自 2011 年 3 月天地图。选择这些城市群的区域的主干道路和城市主要道路形成的交通网络作为研究对象, 深入分析其交通复杂网络的拓扑性质。对城市群区域的地图进行处理, 提取主要道路。处理后的交通网络如图 1~6 所示。



4 国内外城市群交通网络计算及结果和对比分析

4.1 国内外城市群交通网络计算及结果

根据六大城市群交通网数据计算相关统计指标如表 3。

表 3 国内外典型城市群交通网络基本特性值

统计指标	城市群					
	美群	日群	英群	长群	珠群	京群
N	248	321	155	181	166	173
$\langle k \rangle$	8.4113	8.9657	5.9484	6.9061	6.7636	8.1734
ρ	0.033917	0.027931	0.038377	0.038155	0.040745	0.047245
C	0.1535	0.1205	0.1558	0.1676	0.1385	0.1413
$C^{(2)}$	0.046607	0.030724	0.047249	0.053047	0.035199	0.037478
C_{random}	0.0329	0.0249	0.0463	0.0280	0.0338	0.0454
L_{random}	2.7749	2.8730	3.0647	2.9498	2.8752	2.6627
S	9.3257	9.7064	7.1513	8.4576	6.8460	7.3158
S/N	0.03760	0.03024	0.04849	0.04673	0.04149	0.04229
$\frac{C}{C_{random}}$	4.6656	4.8393	3.3650	5.9857	4.0976	3.1123
C_{net}	8.3221	8.7563	5.5765	6.1395	6.7758	8.0142
L	3.8741	3.8919	3.5916	3.7709	3.3430	3.2100
C_e	0.26369	0.26182	0.28396	0.27341	0.30580	0.31766
E_{global}	0.442845	0.439741	0.552928	0.464090	0.673247	0.431390

4.2 国内外典型城市群交通网络特性对比分析

根据表 3 中的结果,对美国东北部大西洋沿岸城市群、日本太平洋沿岸城市群、英国以伦敦为核心的城市群、长江三角城市群、京津唐城市群、珠江三角城市群交通网络特性进行如下分析:

a)六个城市群的平均最短路径均未超过 4,其中日本太平洋沿岸城市群交通网络平均最短路径最大为 3.891 9,而京津唐城市群的平均最短路径最小 3.210 0。同时,六个城市群交通网络都具有较大的聚集系数,特别是长江三角城市群、英国以伦敦为核心的城市群聚集系数最高。因而六大城市群都具有小世界网络特性。

b)六个城市群的平均度都很大,每条道路所拥有的交叉口就较多,这说明美国东北部大西洋沿岸城市群等交通网络具有很好的连通性和整体性。

c)网络密度 ρ 是表示复杂网络疏密程度的重要指标,数值越大表示复杂网络越稠密;反之,相对较稀松。六大城市群交通网络的网络密度如图 13 所示。其中,国内三个城市群网络密度较高,国外三个城市群网络密度相对较低,网络密度最高的是京津唐城市群,交通网络为 0.047 245,最低的是日本太平洋沿岸城市群,交通网络为 0.027 931。

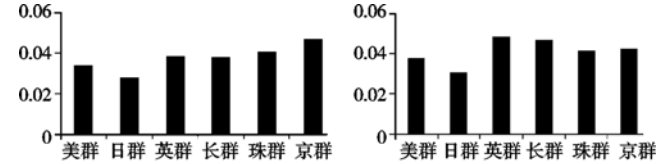


图13 国内外典型城市群交通网络网络密度

d)六个城市群交通网络结构熵如图 14 所示。根据表 3 可以表征各个城市群复杂交通网络的有序性,数值越小,表明该复杂网络越有序。日本太平洋沿岸城市群交通网络数值最小为 0.030 24,表明其网络最有序。

e)六个城市群交通网络全局效率如图 15 所示。其中,珠江三角城市群交通网络的整体效率最高,其次是英国以伦敦为核心的城市群交通网络,最后是京津唐城市群交通网络。

f)六个城市群交通网络平均紧密度如图 16 所示,它也反映了复杂网络的整体影响力。其中,京津唐、珠江三角城市群交通网络的紧密度较高,英国以伦敦为核心的城市群、美国东北部大西洋沿岸城市群交通网络较低。

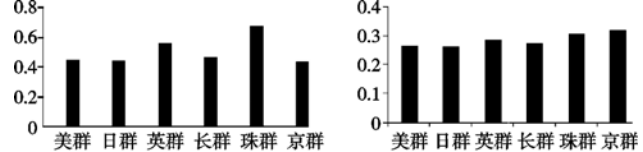


图15 国内外典型城市群交通网络全局效率

g)六个城市群交通网络道路的度 k 与该度道路数 $n(k)$ 的关系如图 17 所示,它们不具有无标度性特征。从图 17 中可以看出,只有少数道路的连通度较大,绝大多数道路连通度较小,这可以说明六大城市群交通网络不是无标度网络。

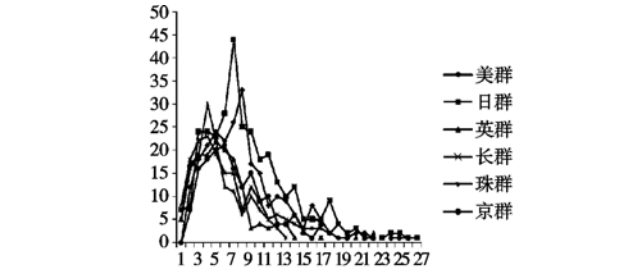


图17 国内外典型城市群交通网络k与n(k)关系

4.3 国内外典型城市群交通网络与其 ER 网络对比分析

为了更好地认识六个城市群交通网络的拓扑特性,通过 Pajek 构建一个规模相等的 ER 随机网络,这个 ER 随机网络构造的条件是具有相同的节点数和相同的平均度,然后再求出六个城市群交通网络同等规模条件下随机网络的聚集系数和平均最短路径,并使之与六个城市群交通网络的聚集系数和平均最短路径对比,以发现其是否具有明显的小世界特性。在 Pajek 中,以表 4 中的节点数和平均最短路径为标准,就可以生成一个无向的 ER 随机网络。

表 4 国内外典型城市群的节点数与平均度

城市群	节点数	平均度	城市群	节点数	平均度
美群	248	8.411 3	长群	181	6.906 1
日群	321	8.965 7	珠群	165	6.763 6
英群	155	5.948 4	京群	173	8.173 4

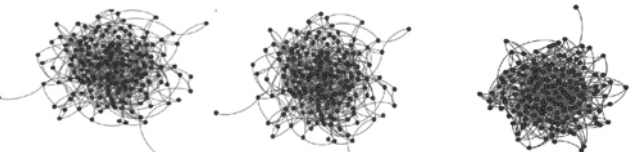


图18 珠江三角城市群交通网络ER随机网络

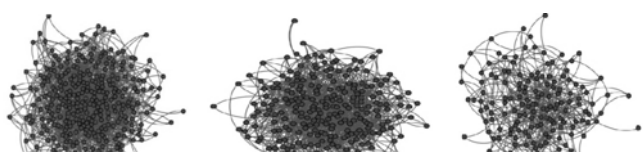


图19 长江三角城市群交通网ER随机网络

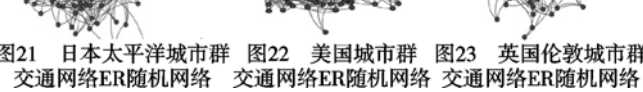


图20 京津唐城市群交通网络ER随机网络

图21 日本太平洋城市群交通网络ER随机网络

图22 美国城市群交通网络ER随机网络

图23 英国伦敦城市群交通网络ER随机网络

通过以上的方法可以画出 ER 随机网络图,如图 18 ~ 23 所示。 L_{random} 和 C_{random} 分别为随机网络的平均最短路径和聚类系数。 L_{random} 和 C_{random} 分别是 $\ln n/\ln k$ 和 k/n 的等阶量,在数据处理时,可以看做相同量,这种处理方式不会影响判断的最终结果^[10],因此有如下关系: $L_{\text{random}} = \ln n/\ln k, C_{\text{random}} = k/n$ 。

六个城市群交通网络拓扑参数对比如表 5 所示。

表 5 六个城市群交通网络拓扑参数

城市群	节点数	平均度	聚集系数	平均最短路径
美群	248	8.411 3	0.153 5	3.874 1
ER 网络	248	8.411 3	0.032 9	2.774 9
日群	321	8.965 7	0.120 5	3.891 9
ER 网络	321	8.965 7	0.024 9	2.873 0
英群	155	5.948 4	0.155 8	3.591 6
ER 网络	155	5.948 4	0.046 3	3.064 7
长群	181	6.906 1	0.167 6	3.770 9
ER 网络	181	6.906 1	0.028 0	2.949 8
珠群	166	6.763 6	0.138 5	3.343 0
ER 网络	166	6.763 6	0.033 8	2.875 2
京群	173	8.173 4	0.141 3	3.210 0
ER 网络	173	8.173 4	0.045 4	2.662 7

如果网络同时兼具较小的平均最短路径长度和较大的聚类系数,这样的网络就绝对具备小世界网络的特性。公式表达为: $L \geq L_{\text{random}}, C \geq C_{\text{random}}$ 。

图 24 为六个城市群交通网络平均路径与 ER 随机网络平均路径比较,图 25 为六个城市群交通网络聚集系统与 ER 随机网络聚集系数比较。从图 24、25 中可看出,六个城市群交通网络的平均路径与六个城市群交通网络 ER 随机网络的平均路径相差不多,都是前者大于后者,但是六个城市群交通网络的聚集系数远远大于 ER 随机网络的聚集系数,这就更加准确地表明了城市群交通网络具有典型的小世界特性。

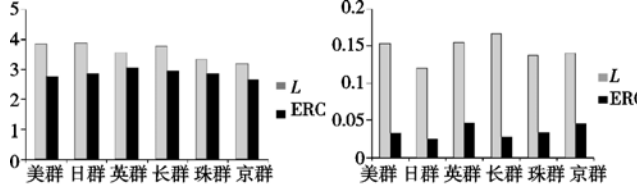


图 24 六个城市群交通网络平均路径与 ER 随机网络平均路径比较

4.4 国内外典型城市群交通网络无标度特性分析

在六大城市群交通网络无标度特性研究中,发现六个城市群交通网络不存在无标度特性。

根据城市群交通网络度和累计度分布制作散点图并进行拟合,如图 26 ~ 31 所示。

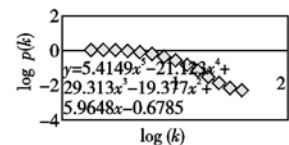


图 26 美国东北部大西洋沿岸城市群交通网双对数图及拟合曲线

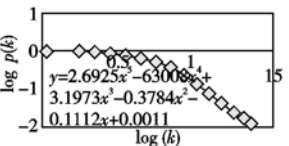


图 28 英国以伦敦为核心的城市群交通网双对数图及拟合曲线

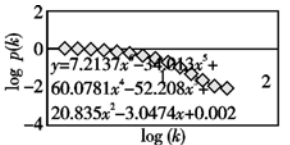


图 27 日本太平洋沿岸城市群交通网双对数图及拟合曲线

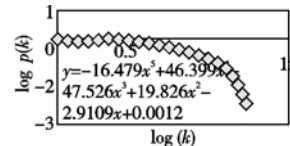


图 29 长江三角城市群交通网双对数图及拟合曲线

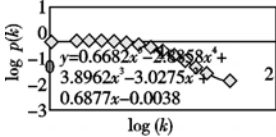


图 30 珠江三角城市群交通网双对数图及拟合曲线

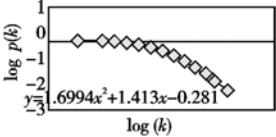


图 31 京津唐城市群交通网双对数图及拟合曲线

通过以上拟合曲线可以得到曲线相对应的方程,这六条曲线对应的方程为($x = \log(k), y = \log p(k)$):

$y = 5.414x^5 - 21.12x^4 + 29.31x^3 - 19.37x^2 + 5.964x - 0.678$
 $y = 7.213x^5 - 34.01x^4 + 60.78x^3 - 52.20x^2 + 20.83x - 3.047x + 0.002$
 $y = 2.692x^5 - 6.300x^4 + 3.197x^3 - 0.378x^2 - 0.111x + 0.001$
 $y = -16.47x^5 + 46.39x^4 - 47.52x^3 + 19.82x^2 - 2.910x + 0.001$
 $y = 0.668x^5 - 2.885x^4 + 3.896x^3 - 3.027x^2 + 0.687x - 0.003$
 $y = -1.699x^5 + 1.413x^4 - 0.281x^3 + 0.0002x^2 - 0.0001x + 0.0001$

从图 26 ~ 31 中可以看出,这些方程都非常好地拟合了所对应的散点图,而这些方程不具有幂律特性,从而可判断出六大城市群交通网络不存在无标度特性,不是无标度网络。

4.5 国内外典型城市群交通网络介质中心特性分析

介数主要是从一条道路到另一条道路最短路径中经过此道路的可能性。也可以表示这条道路的负载。六大城市群交通网络介数分布情况如表 6 所示。

表 6 国内外典型城市群介数分布

城市群	介数值	节点数	介数分布
英国以伦敦为核心城市群	0 - 0	14	9.032 3
	0 - 0.1115	135	87.096 8
	0.1115 - 0.2231	4	2.580 6
	0.2231 - 0.3346	2	1.290 3
美国大西洋沿岸城市群	0 - 0	11	4.435 5
	0 - 0.0773	231	93.145 2
	0.0773 - 0.1546	3	1.209 7
	0.1546 - 0.2319	3	1.209 7
日本太平洋沿岸城市群	0 - 0	17	5.296
	0 - 0.1245	302	94.081
	0.1245 - 0.2489	1	0.311 5
	0.2489 - 0.3733	1	0.311 5
长江三角城市群	0 - 0	22	12.154 7
	0 - 0.0739	149	82.320 4
	0.0739 - 0.074	9	4.972 4
	0.1477 - 0.0741	1	0.552 5
京津唐城市群	0 - 0	10	5.780 3
	0 - 0.0584	156	90.173 4
	0.0584 - 0.1167	4	2.312 1
	0.1167 - 0.1751	3	1.734 1
珠江三角城市群	0 - 0	20	12.121 2
	0 - 0.0925	138	83.636 4
	0.0925 - 0.185	5	3.030 3
	0.185 - 0.2775	2	1.212 1

从表 6 中可以看出,美国东北部大西洋沿岸城市群有 6 条路,比重约为 2% 的路其介数远远大于其他节点的道路;日本太平洋沿岸城市群有 2 条路,比重约为 1% 的路其介数远远大于其他节点的道路;英国以伦敦为核心的城市群有 6 条路,比重约为 4% 的路其介数远远大于其他节点的道路;长江三角城市群有 10 条路,比重约为 6% 的路其介数远远大于其他节点的道路;京津唐城市群有 7 条路,比重约为 4% 的路其介数远远大于其他节点的道路;珠江三角城市群交通有 7 条路,比重约为 4% 的路其介数远远大于其他节点的道路。这些道路的缺失将影响整个网络的拓扑结构,会造成整个城市群交通网络的故障,因而对这些道路的保护至关重要。

4 结束语

通过例 1~6 数值算例的计算和分析可以看出,本文提出的免疫粒子群算法在求解 N 人非合作博弈 Nash 均衡是有效的。该算法把免疫系统的免疫信息处理机制(基于抗体浓度的粒子多样性控制机制、免疫记忆机制)引入基本粒子群算法中,综合了基本粒子群算法和免疫算法的优点,不仅保持了粒子群算法简单、易于实现、收敛速度快的特点,而且增强了粒子群算法的全局寻优能力,加快了算法的速度。实验表明该算法优于免疫算法和基本粒子算法。

另外需要指出的一个事实是,免疫粒子群算法本质上是一种智能迭代算法,在算法的迭代过程中,粒子会根据观察到的博弈结果向自身的最优解进化,且同时向群体中表现最好的同伴进化。每个局中人都会根据进化过程中的个体极值和群体极值,不断地调整自己的策略,最终趋向博弈的均衡点。因此,应用免疫粒子群算法求解博弈问题,不但可以求出 Nash 均衡点,而且可以预测博弈的实现路径,模拟博弈活动的全过程,为实际经济生活中的博弈活动提供决策参考,这正是研究免疫粒子群算法的重要意义所在。基于上述考虑,本文今后将围绕更复杂的博弈问题,如多目标博弈和广义博弈 Nash 均衡问题等开展进一步的研究。

参考文献:

[1] NASH J. Noncooperative games [J]. *Annals of Mathematics*, 1951,54(2): 286-295.

[2] LEMKE C, HOWSON J. Equilibrium points of bimatrix games [J]. *Journal of Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1964,12(2):413-423.

[3] GOVINDAN S, WILSON R. A global Newton method for computing Nash equilibria [J]. *Journal of Economic Theory*, 2003, 110(1):65-86.

[4] GOVINDAN S, WILSON R. Computing Nash equilibria by iterated polymatrix approximation [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2004,28(7): 1229-1241.

[5] YUAN Ya-xiang. A trust region algorithm for Nash equilibria problems [J]. *Pacific Journal of Optimization*, 2011,7(1):125-138.

[6] ZHANG Jian-zhong, QU Biao, XIU Nai-hua. Some projection-like methods for the generalized Nash equilibria [J]. *Computational Op-*

timization and Applications,2010,45(1):89-109.

[7] HERINGS P J J, PEETERS R. Homotopy methods to compute equilibria in game theory [J]. *Economic Theory*,2010,42(1):119-156.

[8] PEARSON M, La MURA P. Simulated annealing of game equilibria: a simple adaptive procedure leading to Nash equilibrium [C]//Proc of International Workshop on the Logic and Strategy of Distributed Agents. 2000:14-19.

[9] SUREKA A, WURMAN P. Using tabu best response search to find pure strategy Nash equilibria in normal form games [C]//Proc of AA-MASO-05. 2005:1023-1029.

[10] PAVLIDIS N, PARSOPOULOS K, VRAHATIS M. Computing Nash equilibria through computational intelligence methods [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2005,175(1):113-136.

[11] DASKALAKIS C, FRONGILLO R, PAPADIMITRIOU C H, *et al.* On learning algorithms for Nash equilibria [C]//Proc of the 3rd International Conference on Algorithmic Game Theory. Berlin: Springer-Verlag, 2010.

[12] 陆立涛,修乃华. 基于启发搜索算法的纳什均衡计算 [J]. *北京交通大学学报*,2007,31(3):58-62.

[13] 邱中华,高洁,朱跃星. 应用免疫算法求解博弈问题 [J]. *系统工程学报*,2006, 21(4): 398-404.

[14] 陈士俊,孙永广,吴宗鑫. 一种求解 Nash 均衡解的遗传算法 [J]. *系统工程*,2001,19(5): 67-70.

[15] 余谦,王先甲. 基于粒子群优化算法求解纳什均衡的演化算法 [J]. *武汉大学学报*,2006,52(1):25-29.

[16] 瞿勇,张建军,宋业新. 多重纳什均衡解的粒子群优化算法 [J]. *运筹与管理*,2010,19(2):52-55.

[17] 王志勇,韩旭,许维胜,等. 基于改进蚁群算法的纳什均衡求解 [J]. *计算机工程*,2010,36(14):166-171.

[18] 谢政. 对策论 [M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,2004.

[19] 黄席樾,向长城,殷礼胜. 现代智能算法理论及应用 [M]. 2 版. 北京:科学出版社,2009.

[20] 高鹰,谢胜利. 免疫粒子群优化算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2004,33(6):4-6.

[21] 陈曦,蒋加伏. 免疫粒子群优化算法求解旅行商问题 [J]. *计算机与数字工程*,2006,34(6):10-12.

[22] DEJONG K A. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive system [D]. Ann Arbor: University Michigan, 1975.

(上接第 24 页)

5 结束语

基于对美国东北部大西洋沿岸城市群、日本太平洋沿岸城市群、英国以伦敦为核心的城市群、长江三角城市群、京津唐城市群、珠江三角城市群交通网络的平均度、网络密度、 n -聚集系数、平均最短路径、随机网络聚集系数等网络特性指标进行计算和比较分析,可以从全局把握城市群交通网络的连通状况和安全性,同时也表明国内外典型城市群交通网都具有小世界性,不具有无标度性。

参考文献:

[1] WU Jian-jun,GAO Zi-you,SUN Hui-jun, *et al.* Urban system transit as a scale-free network [J]. *Modern Physics Letter B*, 2004, 18(19-20):1043-1049.

[2] XU Xin-ping,HU Jun-hui,LIU Feng, *et al.* Scaling and correlations in three bus transport networks of China [J]. *Physica A*,2007,374(1):

441-448.

[3] 张译,张毅,胡坚明. 城市公共交通网络的拓扑性质分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*,2006,6(4):57-61.

[4] 马杰良,安莉莉,邢雪. 城市公交网络的拓扑特性分析 [J]. *山西师范大学学报:自然科学版*,2009,23(1):51-55.

[5] 张译,新雪翔,张毅,等. 基于二分图的城市公交网络拓扑性质研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2007,27(7):149-155.

[6] ANGELOUDIS P, FISK D. Large subway systems as complex networks [J]. *Physic A*,2006,367(15):553-558.

[7] PORTA S, CNICITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets;a primal approach [J]. *Environment and Planning B:Planning and Design*,2006,33(5):705-725.

[8] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality measures in spatial networks of urban streets [J]. *Physical Rview E*,2006,73:036125.

[9] PORTA S, CNICITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets;a dual approach [J]. *Physical A*,2006,369(2):853-866.

[10] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world network [J]. *Nature*,1998, 393(4): 440-442.