

文章编号: 1002-0268 (2010) 03-0108-06

公共交通的局域世界演化网络模型

刘 锐¹, 严宝杰¹, 黄志鹏²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了研究城市公共交通网络这一复杂网络的生成机理, 以 Space P 法拓扑的公共交通网络为研究对象, 结合公交网络设计中常考虑的公交线路和运营长度限制以及路网中公交站点的邻接矩阵等因素, 从公共交通网络的初始网络、新增节点、新增节点的局域世界、优先连接概率及新增节点引起的连边五个方面进行分析, 构造了公共交通网络的局域世界演化模型, 并给出了适用于计算机编程的模型算法。采用该模型对西安市的公共交通网络进行了生成模拟, 结果表明演化模型生成的网络与现状网络的累积度分布曲线、节点乘车次数分布极为接近, 证明该模型反映了公共交通网络发展的基本规律。

关键词: 交通工程; 局域世界演化网络模型; 复杂网络; 公交网络

中图分类号: U491.1

文献标识码: A

Local world Evolving Network Model for Public Transport

LIU Rui¹, YAN Baojie¹, HUANG Zhipeng²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: In order to study the generative mechanism of complex urban transit network, the local world evolving network model of public transport was built on the basis of the network of transit network topologized by Space P method. The initial network, the new node, the new node's local world, the probability of priority connections and the new node caused edges were analyzed from the public transport network designing constraint conditions which include the bus line length and bus stop adjacency matrix on the road network. For the application of the model, its computer programming model algorithm was given. By using the model, the generation of Xi'an public transport network was simulated. The result shows that the cumulative degree distribution and riding times distribution of the network generated by the evolving network model is very similar to the existing public transport, which proves that the model reflects the basic law of the public transport network development.

Key words: traffic engineering; local world evolving network model; complex network; transit network

0 前言

在现实世界中, 大量的复杂系统可以通过形形色色的网络加以描述。20 世纪 60 年代以来, 随机图理论在将近 40 年的时间里一直是研究网络结构的基本理论, 但绝大多数实际的复杂网络结构并不是完全随

机的。1998 年, Watts 和 Strogatz 在《自然》杂志上发表了一篇开创性论文, 提出了网络科学中著名的小世界网络概念及模型^[1]。1999 年, Barabási 和 Albert 提出了无标度网络的概念及模型^[2]。而后在平稳增长网络模型方面, Bianconi 和 Barabási 提出了适应度模型^[3], Dorogovtsev 等人提出了原始吸引模型^[4],

收稿日期: 2009-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70771036)

作者简介: 刘锐 (1978-), 男, 湖北恩施人, 长安大学交通运输规划与管理专业博士研究生, 从事交通规划和交通仿真研究。

(Liuruieh@sohu.com)

Krapivsky 提出了非线性择优模型^[5], 刘宗华等人提出了随机和择优混合模型^[6]。在非平稳增长网络模型方面, Dorogovtsev 等人提出了幂律增长模型^[7]。另外, 李翔提出并研究了局域世界演化网络模型^[8], 该模型中优先连接机制不是对整个网络, 而是在每个节点各自的局域世界中有效。该模型能够在指数标度和幂律标度之间自由变换, 无标度网络的基本 BA (Barabási-Albert) 模型可以看作局域世界演化网络模型的一个特例。模型不仅能保持无标度网络对随机故障的鲁棒性, 还改善了无标度网络所固有的面对恶意攻击的脆弱性, 使网络抵抗恶意攻击的强韧性得以大大增强。

复杂网络理论在交通运输网络中也有大量的应用性研究。Vito Latoraa 和 Massimo 采用小世界网络理论对波士顿的地铁网络的运输效率进行了相关论述^[9-11]。R. Guimera 研究表明世界范围内的航空运输网络是一个无尺度小世界网络^[12]。Julian Sienkiewicz 和 Janusz A. Holyst 对波兰的 22 个城市的公共交通网络的复杂网络指标进行的统计分析表明其网络具有小世界特性^[13]。Parongama Sen 对印度铁路网络进行了统计分析^[14]。陆化普对廊坊、济宁及大连的公共交通网络的复杂网络特性指标进行了统计分析, 结果表明其网络具有小世界特性^[15]。李英对上海市公共交通网络的网络静态特性分析表明其网络是一个无尺度复杂网络, 抗毁性分析表明公共交通网络在选择攻击情况下抗攻击能力较弱^[16]。赵金山、胡君辉、汪涛、王斌等也就公共交通网络的小世界网络特性进行了实证分析^[17-20]。何胜学按照公交线路整体随机生成方式研究了公交线网的生成模型^[21]。以上众多采用复杂网络静态统计指标进行实证研究的成果表明城市公交网络具有小世界特性。本文在此基础上, 将现有复杂网络理论中的局域世界演化模型与公共交通网络相结合, 构建了可研究网络动态特性的公共交通网络的局域世界网络演化模型。该模型的构建及实例计算分析如下。

1 公共交通网络拓扑

公交停靠站点和公交线路是构成公共交通网络的两个基本因素。在网络拓扑方面可分别采用以下 3 种复杂网络拓扑方法: 一种为 Space L 方法, 该法将站点视为节点, 若两个站点在某一条交通线路上是相邻的, 那么它们就有连边, 适合研究站点之间的邻接关系; 一种是 Space P 法, 该法将交通站点视为节点, 任意两个站点之间只要有直达公交线路连接, 则两个

节点之间就有连边, 适合研究公交网络的换乘特点; 还有一种方法是公交线路抽象为节点, 若公交线路之间共公交站点, 则用边连接这两个节点, 适合研究公交线路之间的关系。以上 3 种拓扑方法的示意图见图 1。

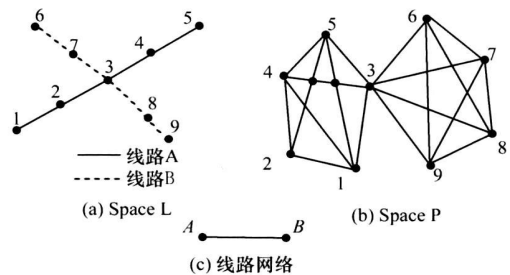


图 1 公共交通网络拓扑

Fig 1 Transit network topology

采用 Space L 法拓扑的网络由于邻接节点之间才有边连接, 而公交网络受实际路网的限制, 不可能有太多的邻接节点, 因此该方法拓扑的公交网络基本上可近似看作一个均匀网络。采用 Space P 法拓扑的公共交通网络使得尽管有众多的公交站点, 但是所有节点之间的平均乘车次数却相对较小, 该特点与小世界网络平均路径较小相似。因此, 本文研究采用 Space P 法拓扑公共交通网络, 并在拓扑中遵从如下的基本假设。

- (1) 仅考虑公交线路, 不考虑轨道交通线路;
- (2) 网络抽象为无向网络;
- (3) 对于个别线路由于交通管制等原因造成上下行站点有差异的, 以上行方向的线路为准;
- (4) 不考虑发车频率的不同, 将网络抽象为非加权网络;
- (5) 相同名称站点看作一个停靠站点, 忽略个别站点名称相同但位置不同造成的差异。

2 公共交通网络演化模型分析

公共交通网络是遵循相关的公交线路设计规定而设计的若干运输线路。而现有的演化网络模型是在理想的生成机制下构造一般意义的复杂网络。因此, 公共交通网络的演化模型必须在现有的演化网络模型基础上, 结合公共交通网络设计的约束条件进行相关的调整。以下从初始网络、新增节点、新增节点局域世界、优先连接及新增节点引起的连边等 5 个方面进行分析。

(1) 初始网络的确定

公共交通网络的规划设计中常以现有公共交通线

路为基础进行，并在公共交通网络中根据城市规模、地理位置等因素设置必要的公共交通换乘枢纽。公共交通换乘枢纽一般停靠线路众多，且其节点度值较大。同时，作为运营的公交站点，必与其他站点是连通的，初始网络必不存在孤立的节点。因此，在初始网络中需包括换乘枢纽，并且没有孤立的节点。由此，初始网络采用如下方法确定。

①将网络节点按照节点重要性降序排列，生成节点集合 S_0 。

②取 S_0 中的第 i 节点，根据公交站点邻接矩阵计算第 1 个节点与第 i 个节点之间的最短路径，并将最短路径上的节点计入 S' 中，直至 n 个节点全部并入 S' 中。

③取前 m_0 ($m_0 \gg m$) 个节点作为初始节点，并根据现有公交网络中有公交线路连接的站点对之间就有边连接的原则，设置节点之间的连边。

(2) 增长

现有的 BA 模型、适应度模型、局域世界演化模型的构造算法中新增节点采用在全网络中随机生成的模式。而公共交通网络中的站点之间由于地理位置的限定，使得某一公共交通站点存在若干相邻的公交站点。结合城市公共交通发展来看，新增公共交通站点一般设定在现有的某一公共交通站点的相邻位置，并通过运营线路的设计，将该新增站点引入已有网络中。采用已有站点的邻接站点可保证新增节点在线路长度约束条件下有可达到的节点，保证网络不会出现孤立节点。

因此，新增节点为未被加入并与已有站点相邻的节点之一。

(3) 确定新增节点的局域世界

公共交通网络中某一站点一次乘车可直达的站点为该站点经过的所有公交线路上的所有站点，而非公交网络中的任意站点。在实际运营中，公交线路的运营长度往往是受到限制的，则新增节点可连接的节点考虑为公交运营线路长度限制下能够到达的公交站点。这些节点构成的集合称为新增节点的局域世界。

公交线路的长度与城市的规模、城市居民的平均乘距大小等有关。路线过长，会增加系统的运营费用，线路过短不利于运营调度，也增加了乘客的换乘次数。新增节点与其局域世界中节点的距离限制在单条公交线路运营距离可以覆盖的范围之内，以此来保证新增节点与已有节点连接具有实际可操作性。则网络中的节点 V_j 能否成为新增节点的连接节点，需满足式 (1)。

$$\begin{cases} l_{\min} \leq l_{ij} + l_{ii} + l_{ij}^{\min} \leq l_{\max}, \\ l_{ii} = \gamma(l_{ii}^{\max} - l_{ii}^{\min}) + l_{ii}^{\min}, \\ 0 \leq \gamma \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

式中， $l_{\min}$ 为公交线路的最短里程 $l_{\min}$ 约为 5 km； $l_{\max}$ 为单条公交线路运营长度最大值； l_{ij} 为新增节点 V_i 与网络中已有节点 V_j 之间的最短距离； l_{ii} 为新增节点 V_i 与公交起终点的随机距离； $l_{ii}^{\max}$ 为新增节点 V_i 与公交起终点集合中所有节点的最大距离； $l_{ii}^{\min}$ 为新增节点 V_i 与公交起终点集合中所有节点的最小距离； $l_{ij}^{\min}$ 为已有节点 V_j 与公交起终点集合中所有节点的最小距离； γ 为符合均匀分布的随机数。

单条公交线路运营长度最大值 $l_{\max}$ 可按照下式计算：

$$l_{\max} = V \times T_{\max} / 60, \quad (2)$$

式中， V 为公交车的平均运营车速； $T_{\max}$ 为城市 95% 居民的单程出行时间。

根据《城市道路交通规划设计规范》^[22] 的规定，城市公共交通规划应在客运高峰时，使 95% 的居民乘用下列主要公共交通方式时，单程最大出行时耗应符合表 1 中的规定。

表 1 不同规模城市的最大出行时耗和
主要公共交通方式^[22]

Tab 1 Maximum travel time and major public transport
modes of different city scales

城市规模	最大出行 时耗/min	主要公共交通方式
> 200 万人	60	大、中运量快速轨道交通公共汽车、电车
100~200 万人	50	中运量快速轨道交通公共汽车、电车
< 100 万人	40	公共汽车、电车
中	35	公共汽车
小	25	公共汽车

凡是满足式 (1) 的已有节点 V_j 均为新增节点 V_i 可能连接的节点，这些节点构成新增节点的局域世界 LW 。考虑平均站距可将以上距离简化为区段数。

(4) 优先连接

根据前面论述，新增节点可连接的节点仅能在其局域世界中选择，即节点优先连接机制有效范围不是整个网络，而仅为局域世界。在现有的无标度网络演化模型中，新增节点更倾向于与那些具有较高连接度的“大”节点相连接。在公共交通网络中的节点的度越大意味着该站点能够到达更加多的站点，该站点成为换乘枢纽站点的可能性也越大，若连接此类站点可有效降低公交站点之间的乘车次数，提高新增节点的可达性，新增节点也具有倾向与连接那些度“大”的节点。鉴于此，新增节点选择局域世界中的节点的优

先连接概率为:

$$\prod_{\text{Local}}(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{j \in LW} k_j}, (i \in LW), \quad (3)$$

式中, $\prod_{\text{Local}}(k_i)$ 为新增节点在局域世界中的优先连接概率; k_i 、 k_j 为局域世界中节点 i 、 j 的度。

(5) 新增节点附带的 m 条边的形成

现有的无标度网络演化模型、适应度模型、局域世界演化模型中的新增节点仅与每次选择的节点建立连边, 直至增加了 m 条边为止。而在公共交通网络中, 当新增节点 V_i 与选择的节点 V_j 之间建立连边则意味着 V_i 与 V_j 之间至少有一条公交线路运营, 按照 Space P 拓扑法该线路上的 V_i 与 V_j 及其二者之间所有节点可形成完全图 (不考虑跳站运输)。因此, 在 V_i 与 V_j 之间建立连边的同时, 根据现有路网中的公交站点的邻接矩阵, 采用最短路算法搜索新增节点 V_i 与选择的连接节点 V_j 的一条最短路径的节点集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_k | p_1 = V_i, p_k = V_j\}$, 这些节点的完全图即为 Space P 法拓扑的公交线路。若集合中的两个节点之间无连边则用边连接, 并计数; 否则不重复用边连接, 不计数。按照不同的连接概率 $\prod_{\text{Local}}(k_i)$ 选择连接节点, 并生成边, 直至生成 m 条边为止。

在公交网络中部分节点位于公交网络的边缘位置, 可连接的节点较少, 相应的可生成的连边也较少, 可能出现选择了局域世界中的所有节点并生成连边之后, 仍旧没有能够生成 m 条边。此种情况下, 生成可能的最大连边数量即可。

综合以上的分析, 公共交通网络的局域世界演化模型如下:

① 初始网络: 以最重点节点为起点, 通过增加节点重要度降序排列的节点与最重点节点之间的最短路径上的节点, 直至增加至 $m_0 (m_0 \gg m)$ 个节点为止。按照现有公交网络的拓扑结构, 设置这 m_0 个节点之间的连边, 构成初始网络。

② 增长: 随机选取未被加入并与已有站在路网上相邻的节点作为网络新增节点 V_i 。

③ 局域世界优先连接: 根据单条公交线路最大、最小出行距离及新增节点 V_i 距离公交起终点的最大、最小距离, 确定新增节点 V_i 可能到达的所有公交站点, 构成新增节点的局域世界 LW 。新增节点在其局域世界 LW 中根据优先连接概率

$$\prod_{\text{Local}}(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{j \in LW} k_j} (i \in LW),$$

来选择连接节点 V_j 。新增节点 V_i 与节点 V_j 之间的最

短路上任两节点无边连接, 则用边连接, 并计为随新增节点增加的边。在 LW 中选择多个节点, 直至增加了 m 条边或者局域世界 LW 中所有节点已经全部被连接为止。

3 公共交通网络演化模型算法

在前述分析的基础上, 采用 Visual Basic 编制了相应的公共交通网络演化软件。其算法如下:

Step1: 输入演化参数 m_1 、 m 、 $l_{\min}$ 、 $l_{\max}$ 及节点总数 n 。输入公交网络的所有公交站点的邻接表, 并采用 Flody 算法计算所有站点之间的最短路径长度, 得到站点之间最短路径长度。

Step2: 将所有节点按照重要度的降序排列, 生成节点集合 S_0 。取 S_0 中的第 i 节点, 根据公交站点邻接矩阵计算第 1 个节点与第 i 个节点之间的最短路径, 并将最短路上的节点不重复的依次计入 S' 中, 直至 n 节点全部并入 S' 中。取前 $m_0 (m_0 \gg m)$ 个节点作为初始节点, 记为已有节点集合 G^s 。

Step3: 根据现有公交线路拓扑而成的 Space P 公共交通网络图, 节点集合 G 中节点对 (V_i, V_j) 之间有公交线路直达设 $ZD(i, j) = 1$, 否则为 0。形成公交站点直达矩阵 ZD 。

Step4: 随机选取未被加入并与已有站在路网上相邻的节点作为网络新增节点 V_i , 并设置 $q = 0$ 。

Step5: 根据公交运营线路的最大、最小距离以及新增节点与起终点的最大、最小距离, 确定新增节点可能连接的节点。这类节点构成新增节点 V_i 的 LW 。

Step6: 在局域世界 LW 中按照优先连接概率选择一个节点 V_j 作为新增节点 V_i 的连接节点, 其中优先连接概率随机生成。

Step7: 根据公交站点邻接矩阵计算新增节点 V_i 与节点 V_j 之间的一条最短路径, 该路径上所有节点集合为 $\{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_k | p_1 = V_i, p_k = V_j\}$ 。若最短路上的节点 $ZD(p_i, p_j) = 0$, 则设置 $ZD(p_i, p_j) = 1$, 并且 $q = q + 1$ 。

Step8: 若 $q < m$, 且局域世界 LW 中还有未被选中的节点, 则返回 Step6; 否则转 Step9。

Step9: 将新增节点 V_i 加入已有节点集合 G^s 中。

Step10: 若新增节点总数量小于 $n - m_0$ 则返回 Step4; 否则结束演化

Step11: 演化生成的网络采用 Flody 算法计算所有站点之间的最短路径长度即可得到公交站点之间最少乘车次数。换乘次数 = 乘车次数 - 1。并就该演化生成的网络统计相关指标。

4 算例分析

本文选择了西安市主城区内的 1 233 个公交站点, 198 条公交线路构成的公共交通网络为研究对象。在演化模型中取这 198 条公交线路的起终点构成起终点集合, 并将相邻公交站点的距离简化为 1 个站距, 构成邻接矩阵, 并按照此矩阵计算公交站点对之间的最短路径长度。按照 Space P 法对现有公交网络进行拓扑, 并将该网络的节点度视为节点重要度。演化模型的相关参数如表 2。

表 2 演化模型参数表
Tab 2 Evolution model parameters

参数	m_0	m	$l_{\min}$	$l_{\max}$	n
取值	300	35	10 个站距	28 个站距	1 233

采用该演化模型进行了公交网络生成, 并按照度分布累积函数 $P_k = \sum_{k=k}^{\infty} P(k')$ 绘制了现状网络和演化网络的节点度累积分布曲线图和站点间乘车次数分布柱状图, 如图 2、3 所示。

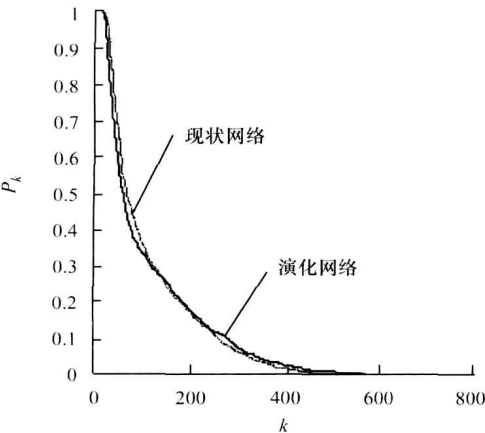


图 2 累积度分布曲线

Fig 2 Cumulative degree distribution curves

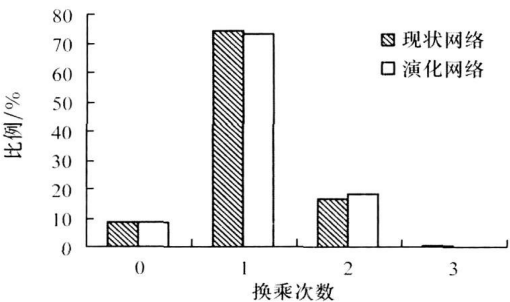


图 3 换乘次数分布

Fig 3 Transfer times distribution

尽管在演化模型中新增节点及其连接节点的选择均具有随机性, 但是从图 1 可以看出, 演化模型生成

的公交网络的累积度分布曲线与现状网络的极为接近。两个网络又具有相同的节点数量, 则两个网络中的节点度分布也接近。图 2 中公交站点间的乘车次数分布也极为接近。统计的现状网络的平均乘车次数为 2.088 983, 演化网络的平均乘车次数为 2.095 076, 演化网络较现状网络仅增加了 0.29%。说明这两个网络内任意两个公交站点对之间利用公交出行的便捷程度相当。从宏观上来看, 该演化网络模型生成的公交网络与设计的现有公交网络基本相似, 其演化机理基本上反映了公共交通网络发展的基本规律。

5 结论

目前, 大量针对交通运输网络运用复杂网络静态统计指标进行的实证研究, 已经明确了公共交通网络具有小世界特性。本文在其静态统计指标研究的基础上, 将现有复杂网络理论中的局域世界演化模型与公共交通网络相结合, 构造了公共交通网络的局域世界演化模型。通过对西安市的公共交通网络的计算分析, 证明该模型反映了公共交通网络发展的基本规律。提出的演化模型为进一步研究公共交通这一复杂网络的生成机理、动态特性提供了一个全新的视角, 将来可为公交网络优化方案的生成提供新的途径。

参考文献:

References

[1] WATTS D J, STROGATZ SH Collective Dynamic of ' Small-world Networks [J] . Nature, 1998, 393 (6684): 440—442

[2] BARABÁSI A L, ALBERT R Emergence of Scaling in Random Networks [J] . Science, 1999, 286 (5439): 509—512

[3] BIANCONI G, BARABÁSI A L Bose-Einstein Condensation in Complex Network [J] . Physical Review Letters, 2001, 86: 5632—5635.

[4] DOROGOVTSSEV S N, MENDES J F F, SAMUKHIN A N. Structure of Growth Networks with Preferential Linking [J] . Physical Review Letters, 2000, 85: 4633—4636

[5] KRAPIVSKY P L, REDENER S, LEYVRAZ F. Connectivity of Growing Random Networks [J] . Physical Review Letters, 2000, 85: 4629—4632

[6] LIU Z H, LAI Y V, YE N, et al Connective Distribution and Attack Tolerance of General Networks with Both Preferential and Random Attachments [J] . Physics Letters A, 2002, 303: 337—344

[7] DOROGOVTSSEV S N, MENDES J F F. Effect of the Accelerating Growth of Communication Networks on Their Structure

- [J]. Physical Review E, 2001, 63: 025101
- [8] LI X, CHEN G R. A local World Evolving Network Model [J]. Physica A, 2003, 328: 274—286
- [9] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient Behavior of Small-world Networks [J]. Physical Review Letters, 2001, 87 (19): 198701.
- [10] LATORA V, MARCHIORI M. Is The Boston Subway A Small-World Network? [J]. Physica A, 2002, 314: 109—113
- [11] LATORA V, MARCHIORI M. Economic Small-World Behavior In Weighted Networks [J]. The European Physical Journal B, 2003, 32: 249—263
- [12] GUIMERA R, MOSSA S, TURISCHI A, et al. The Worldwide Air Transportation Network: Anomalous Centrality, Community Structure, and Cities' Global Roles [J]. PNAS, 2005, 102 (22): 7794—7799.
- [13] SIENKIEWICZ J, HOLYST J A. Statistical Analysis of 22 Public Transport Networks in Poland [J]. Physical Review E, 2005, 72 (4): 046127.
- [14] SEN P, DASGUPTA S, CHATTERJEE A, et al. Small-World Properties of the Indian Railway Network [J]. Physical Review E, 2003, 67: 036106
- [15] LU Huapu, SHI Ye. Complexity of Public Transport Networks [J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12 (2): 204—213.
- [16] 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—41.
LI Ying, ZHOU Wei, GUO Shijin. An Analysis of Complexity of Public Transportation Network in Shanghai [J]. Systems Engineering, 2007, 25 (1): 38—41.
- [17] 赵金山, 狄增如, 王大辉. 北京市公共汽车交通网络几何性质的实证研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2 (2): 45—48.
ZHAO Jinshan, DI Zengru, WANG Dahui. Empirical Research on Public Transport Network of Beijing [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2005, 2 (2): 45—48.
- [18] 胡君辉, 徐新平, 杨永棚. 三组城市公共汽车运输网的小世界性质 [J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2006, 24 (2): 10—14.
HU Junhui, XU Xiping, YANG Yongxu. Small-world Properties of 3 Bus-transport Networks of China [J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2006, 24 (2): 10—14.
- [19] 汪涛, 方志耕, 吴卉. 城市地铁网络的复杂性分析 [J]. 军事交通学院学报, 2008, 10 (2): 24—28.
WANG Tao, FANG Zhigeng, WU Hui. An Analysis of Complexity of Subway Network in China [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2008, 10 (2): 24—28.
- [20] 王斌. 小世界网络理论在交通网络中的应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
WANG Bin. Application Research of Small World Network on the Transportation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [21] 何胜学, 范炳全. 从公交线网的生成机理看复杂网络的多样性 [J]. 系统工程学报, 2007, 22 (6): 599—606.
HE Shengxue, FAN Bingquan. From Urban Transit Networks to Various Complex Networks [J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22 (6): 599—606.
- [22] 中华人民共和国建设部. GB50220-95 城市道路交通规划设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
P. R. China. Ministry of Construction. GB50220-95 Code for Transport Planning on Urban Road [S]. Beijing: China Planning Press, 1995.
- [23] 刘锐, 严宝杰, 黄志鹏等. 可靠性理论在公交网络分析中的应用 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (4): 122—126.
LIU Rui, YAN Baojie, HUANG Zhipeng, et al. Application of the Reliability Theory in the Analysis of the Transit Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (4): 122—126.
- [24] 胡启洲, 邓卫, 周媛. 基于定量分析的公交线路网络优化与粒子群算法 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (10): 129—133.
HU Qizhou, DENG Wei, ZHOU Yuan. Particle Swarm Algorithm for Optimization of Urban Transport Network Based on Quantitative Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (10): 129—133.