

# 复杂网络在城市公交网络中的实证分析

惠 伟, 王 红

(山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014)

**摘 要:**实证分析是复杂网络研究的一个重要的方向。采用复杂网络研究方法,以上海、北京等城市的公交线路的部分站点和路线为例,分别从公交停靠站点网络、公交换乘网络和公交线路网络角度总结了城市公交网络的复杂网络特性。对复杂网络的静态特征值如平均路径长度、聚类系数、节点度分布等方面进行了统计。结果显示北京和上海的公交网络具有小世界特性,度分布都符合指数分布。北京和上海居民外出的平均换乘次数分别为1.54次和1.9次。

**关键词:**城市公交网络;复杂网络;随机网络;小世界;无标度

**中图分类号:**TP393.01

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2008)11-0217-03

## Empirical Analysis of Complex Networks in Public Traffic Networks

HUI Wei, WANG Hong

(College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Empirical analysis is an important part of complex networks studies. The complex networks theory is applied. Taking Shanghai, Beijing and other cities for example, constructed three kinds of networks to study the complex network's characteristic property. Studied the empirical statistical properties of Beijing and Shanghai's public traffic networks with a viewpoint of complex network. The properties include the average path length, clustering coefficient, degree distribution and other. The result includes Beijing and Shanghai's public traffic networks have small world characteristic property. Beijing and Shanghai's public traffic networks' path change rate is 1.54 and 1.9 times.

**Key words:** public traffic networks; complex networks; random networks; small-world; scale-free

## 0 引 言

复杂网络是近几年来在诸多领域中的一个研究热点。就目前而言,科学家还没有给出复杂网络精确严格的定义,但可以从复杂网络的统计特征来进行描述。其中最重要的是小世界效应(small-world effect)和无标度特性(scale-free property)<sup>[1]</sup>。

定义1:两点间的距离被定义为连接两点的最短路径所包含的边的数目。把所有节点对的距离求平均,就得到了网络的平均距离(average distance)。

定义2:对于某个节点,它的聚类系数被定义为它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例。网络的聚类系数  $C$  则是所有节点聚类系数的平均值。

定义3:把大的聚类系数和小的平均距离两个统

计特征合在一起称为小世界效应,具有这种效应的网络就是小世界网络(small-world networks)。

定义4:节点的度是指该节点拥有相邻节点的数目,或者说与该节点关联的边的数目。

定义5:节点度服从幂律分布就是指具有某个特定度的节点数目与这个特定的度之间的关系可以用一个幂函数近似地表示。把节点度服从幂律分布的网络叫做无标度网络(scale-free networks)<sup>[2]</sup>。

复杂网络的实证分析是复杂网络研究的一个重要方向。城市公交网络(public traffic networks)的复杂网络实证分析对于城市交通的科学管理与规划,提高交通资源利用率,减少交通阻塞,增强交通网络的鲁棒性和可靠性具有重大的现实意义。

## 1 城市公交网络的三种构建

公共交通网络包含停靠站点和线路两个基本要素。一条线路由若干站点组成。在通常情况下,既能从站点A通过某一条线路到达站点B,也能够从站点B沿同一条线路到达站点A,因此公共交通网络往往

收稿日期:2008-02-08

基金项目:山东省博士后择优资助科研项目基金(200602005)

作者简介:惠 伟(1980-),女,硕士研究生,研究方向为复杂网络、GIS;王 红,教授,硕士生导师,研究方向为复杂网络、移动计算、迁移工作流。

看作是无向的。

综合了近几年来国内在城市交通网络方面的实证分析成果,结合笔者自己的研究,对北京、上海、大连、深圳等城市的城市公交网络,从公交停靠站点网络、公交换乘网络和公交线路网络三种不同的方向研究了城市公交网络的复杂网络特性。

### 1.1 公交停靠站点网络

为了研究城市公交网络的拓扑性质,构造了公交停靠站点网络。公交停靠站点网络用 Space L 方法构造,即以停靠站点作为节点,若两个站点在某一交通线路上是相邻的,那么它们就有连边,否则不相连。

在这个构造网络中,平均路径长度的现实意义是指城市公交网络中任意两个站点间的站点数目,度分布体现了通过各个站点的公交线路数目,聚类系数表示通过站点的公交线路的稀疏程度。

对上海 4658 个站点,1010 条公交线路;北京 4177 个站点,616 条公交线路进行研究。得到,上海:  $\langle k \rangle = 4.0885$ ,  $C = 0.064$ ,  $d = 7.585^{[3]}$ ; 北京:  $\langle k \rangle = 3.26837$ ,  $C = 0.15$ ,  $d = 17.3866^{[4]}$ 。

北京公交停靠站点网络站点间的最短路径的最大值是 103,任意两点之间距离的分布服从  $\Gamma$  分布,距离等于 13 的概率最大<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。上海公交停靠站点网络最短路径分布也服从  $\Gamma$  分布,距离等于 7 的概率最大,两点间的最短路径的最大值为 32<sup>[5]</sup>,如图 2 所示。这说明两个城市的公交停靠站点网络结构有很大差异。

上海和北京的网络度分布函数都符合指数分布,分布函数为:  $p(k) \sim e^{-\gamma k}$ 。其中上海的度分布函数  $\gamma = 2.5^{[5]}$ 。

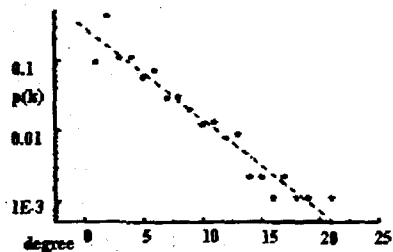


图 1 北京公交停靠站点网络度分布<sup>[4]</sup>

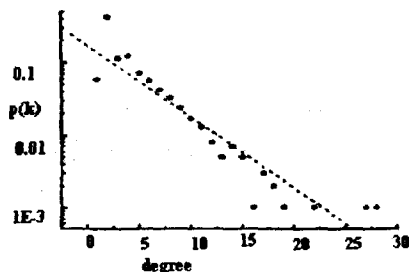


图 2 上海公交停靠站点网络度分布<sup>[5]</sup>

因此,上海和北京公交停靠站点网络都是随机网络。它们都有小的平均路径长度和大的聚类系数,即上海和北京公交停靠站点网络都具有小世界特性。

在对公交停靠站点网络的研究中,还可以将网络定义为加权网。定义边权为所在公交线路的数目,定义点权为该停靠站点所有边的边权的和。边权说明了有多少条线路通过,点权反映了该停靠站点在网络中的重要性。对北京城市公交网络进行模型构建,得到最大点权值为 122,而且点权分布在双对数坐标下是两条直线。

### 1.2 公交换乘网络

换乘情况是刻画城市公交网络的一个重要指标,它体现了城市公交网络的可达性和便捷性,是衡量一个城市公交网络站点、线路是否合理的一个重要参数。为了体现公交系统的换乘情况,构造了公交换乘网络。

公交换乘网络采用 Space P 方法构造,即以停靠站点作为节点,若两个站点间有直达交通线路,则它们之间有连边,否则不相连。这样构造的模型,在同一条公交线路上的所有站点组成完全连通图,因此较之 Space L 方法构造的网络,Space P 方法构造的网络边的数量显然大大增加。

在公交换乘网络中距离的现实意义代表了从一站点到另一站点换乘次数加一。网络的平均度值的 1/2 表示平均每个站点不需转车可直达的站点数目。

对上海 1982 个节点,67617 条边;北京 3938 个节点,516 条公交线路进行研究得到:上海:  $\langle k \rangle = 68.23$ ,  $d = 2.9$ ,  $c = 0.18$ ,  $p(k) \sim e^{-0.013k}$ <sup>[3]</sup>; 北京:  $\langle k \rangle = 94.19$ ,  $d = 2.54$ ,  $c = 0.77$ ,  $p(k)$  可以表示为指数函数形式,  $p(k) \sim e^{-\alpha k}$ , 其中  $\alpha$  是常数<sup>[4]</sup>。如图 3 所示。

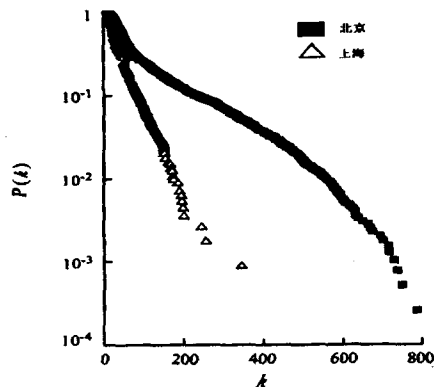


图 3 上海、北京公交换乘网络中度分布

在上海公交换乘网络的所有节点中,具有最大节点度是上海火车站,度数为 707,因此上海火车站是上海公交换乘网络中的一个重要的枢纽节点。该节点有 66 条公交线路经过。

可得出结论,上海和北京的公交换乘网络的  $p(k)$  都符合指数分布,因此网络节点可视为随机连接。上海和北京的市民平均每次出行要换乘 1.9 和 1.54 次<sup>[3,4]</sup>。两个网络都具有小的平均路径长度和大的聚类系数,所以上海和北京公交换乘网络都具有小世界特性。

1.3 公交线路网络

公交线路网络的构造是 Space C (或称 Space R) 方法构造,即以公交线路为节点,如果线路之间有共同的停靠站点则有连边,该网络是加权网络,边的权重为两条公交线路相同停靠站点的数目,节点的权重为通过它所有边的权重之和。

在此网络中,节点的度表示一条公交线路与多少条其它公交线路相交,即从一条公交线路上可以换乘到多少条其它公交线路上。节点度越大则与其它线路相交的可能性越大,在公交换乘中越重要。节点的权表示该路线所经过的站点中有多少其他路线经过,并提供多少换乘机会。聚类系数指线路 A 与线路 B 相交,线路 B 与线路 C 相交,则线路 A 也与线路 C 相交的概率。

对上海市 504 条公交线路建立公交线路网络,得到 504 个节点,24799 条边的网络。该网络的度分布服从指数分布,其中  $\langle k \rangle = 49.2, d = 1.8, C = 0.56, p(k) \sim e^{-0.148k}$ <sup>[5]</sup>。

该网络是完全连通网络,不存在孤立的点,即每条公交线路都可以通过其它线路进行换乘。最短路径长度集中在 1~4 之间,而且聚类系数较大,如图 4 所示。

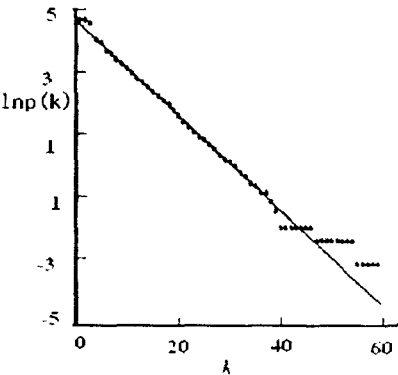


图 4 上海公交线路网累积度分布图<sup>[4]</sup>

因此,上海公交线路网络是随机网络,并且具备很好的小世界特性。

2 结束语

通过对北京、上海两地城市公交网络的研究,可以得出以下结论:以北京、上海两地城市公交网络构造的三种网络中度分布都服从指数分布,而且连通度都很

大,因此北京、上海两地的城市公交网络节点分布比较均匀,不存在特别重要的节点,具有很好的可靠性,对于随机攻击和蓄意攻击都具有较好的鲁棒性。所以对于这两地的城市公交网络加以合理的路线调整和交通管理,可以有效地避免交通瘫痪。

而对大连城市公交网络的研究中,构建公交停靠站点网络,得到如下结果:  $d = 15.5, c = 0.16831, p(k) \sim k^{-2.8}$ 。对深圳城市公交网络构建公交换乘网络,得到如下结果:  $\langle k \rangle = 146.27, C = 2.169, p(k)$  分布符合幂率分布。因此这两个网络具有小世界特性,且为无标度网络,是典型的复杂网络。这两个城市的城市公交网络对随机攻击抵抗性较好,对蓄意攻击的抵抗性较弱。所以从复杂网络的角度讲,北京、上海的公交网络布局优于大连、深圳。

北京、上海城市公交网络所构建的三个网络以及对大连、深圳构造的两个网络都具有小世界特性。交通网络中的小世界特性有着实用性的优点:小的平均路径长度使两个节点间的通信效率高,大的聚类系数使网络中的某个节点因为某种原因取消时,对原有直达节点间的连接不会构成太大影响,因此网络的容错性高。

因为在北京和上海的城市公交网络的基础上构建的三个模型,实证证明都是随机网络,即网络随机连接不存在特别重要的点,因此文中没有过多地讨论 Hub 节点的问题。而根据 Barabasi 和 Bonabeau 的理论,城市公交网络具有增长性和偏好依附性,它最终会演化成无标度网络。这只是理论结果,城市公交网络的布局与各个城市的现实规划、网络规模以及模型构建方法等因素都有关系,因此这与文中北京和上海两个城市的实证结果并不矛盾。大连公交停靠站点网络和深圳公交换乘网络则都是无标度网络,那么在这两个网络中对 Hub 节点的确定,不仅有利于对蓄意攻击进行预防,而且有助于解决交通网络设计中的一些问题。目前在 Hub 节点的研究主要有:寻找 Hub 节点的方案,不同拓扑结构特性以及规模对 Hub 节点位置的影响以及网络演化对 Hub 节点的影响等。

未来在现在的研究基础上,可以将道路交通流量、网络交通模型与复杂网络特性相结合,形成描述交通网络动力学一般规律的数学刻画,在这方面的研究空间还相当大。

参考文献:

[1] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack to lérance of complex network s[J]. Lectures to Nature, 2000,406:378

## 6 可独立执行的 CAR 构件 DLL 入口

具有 main 属性的 CAR 构件可以被独立地加载运行,如:

```
[main] class CFooBar[5]{...}
```

对应会生成包含

```
ECode CFooBar::Main(const WStringArray& args);
```

的 C++ 代码。这个函数和 ElastosMain 的原型一致,行为也一致。参数表存在一些差异,第一个参数为该 DLL 的 PATH,而非宿主进程的可执行文件 PATH。可以使用 SuperExe<sup>[5]</sup>来执行 CAR 构件 dll,必须有带 main 属性的 class 的 dll 才能被 SuperExe 执行。其他 CAR 构件只能由其他进程以 dll 的形式调用。

示例 4:

CFooBar car

```
module CFooBar.dll
```

```
{
```

```
    [main]
```

```
    class CFooBar {
```

```
    }
```

```
}
```

CFooBar.cpp

```
ECode CFooBar::Main(const WStringArray& args)
```

```
{
```

```
    WStringBuf_ <20> wstrBuf;
```

```
    wstrBuf.Copy(L"HelloWorld! \n");
```

```
    CConsole::WriteLine(wstrBuf);
```

```
    return NOERROR;
```

```
}
```

## 7 Elastos 平台上执行可执行文件的宿主程序 SuperExe

SuperExe<sup>[5]</sup>是 Elastos2.1 应用开发环境下统一运行或调试可执行文件、具有 main 属性的 CAR 构件或 widgets 应用的宿主程序。

●命令格式:

```
superexe [-? | -Debug | -Hosting] [ *.dll [args ...] | *.dew [args ...] | Directory [args ...] ]
```

●参数说明:

参数	描述
-?	显示帮助信息

-Debug	调试一个 car 构件或 widgets 程序
-Hosting	作为 domain host 运行
*.dll [args ...]	运行或调试一个具有 main 属性的 CAR 构件
*.dew [args ...]	运行或调试一个 widgets 程序
Directory [args ...]	运行或调试某路径目录下的 widgets 程序

●用法示例:

1)superexe - Hosting

作为 domain host 运行。

2)superexe btmaindll.dll

执行一个 car dll。

3)superexe Dialer.dew

执行一个 widgets。

4)superexe D: \ Elastos21 \ Elastos \ XmlGlue \

SampleWidgets \ Dialer

执行一个指定目录路径的 widgets。

## 8 结束语

主要介绍了 Elastos 平台上执行可执行文件的宿主程序 superexe 的用法;可执行文件的三种主函数类型 ElastosMain(), \_wmain(), main();平台上执行一个可执行文件的基本流程。

参考文献:

- [1] 科泰世纪. Elastos 技术白皮书[EB/OL]. 2006. <http://www.koretide.com.cn>.
- [2] Chen Rong. The Application of Middleware Technology in Embedded OS[R]. Workshop on Embedded System, In Conjunction with the ICYCS(6th). Hangzhou: [s. n.], 2001.
- [3] Davis W S. Operating Systems: A Systematic View[M]. [s. l.]: Addison Wesley Longman, Inc, 2001.
- [4] 毛德操, 胡希明. LINUX 内核源代码情景分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [5] 科泰世纪. 和欣 2.0 资料大全[EB/OL]. 2005. <http://www.koretide.com.cn>.
- [6] Koretide. Elastos 2.0 Operating System Manual[M/CD]. 2005. <http://www.koretide.com.cn>, 2004/2005.
- [7] Bovet D P, Cesati M. Understanding the Linux Kernel[M]. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly, 2002: 22-35.

(上接第 219 页)

- 382.

- [2] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Review of Modern Physics, 2002, 74: 47-97.
- [3] 张 晨, 张 宁. 上海市公交网络拓扑性质研究[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(5): 489-494.

- [4] 赵金山, 狄增加, 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.
- [5] 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.