

变权重的城市轨道交通复杂网络鲁棒性分析

高鹏, 胡剑波, 魏高乐

(空军工程大学 陕西 西安 710051)

摘要: 研究变权重下的城市轨道交通复杂网络优化问题, 由于城市轨道交通网络属于复杂网络, 网络节点数目庞大, 并且受实际地理位置因素的影响, 每个节点所肩负的交通传输负荷也各异。传统的城市轨道交通网络鲁棒性分析模型对所有的节点进行相同的加权, 即所有节点的交通传输负荷相同, 并且不考虑节点与节点之间实际距离的影响, 将任意相连两个节点间的距离近似等效为单位距离, 与实际城市网络中不同节点肩负着不同交通传输负荷不相符合。为解决上述问题, 提出一种变权重的城市轨道交通复杂网络的鲁棒性分析模型, 对网络中不同的节点, 根据与市中心所处的地理位置关系进行不同的加权, 并且采用节点间的实际距离作为节点间距分析网络的性能, 上述改进模型更符合实际网络特性。以北京市最新的轨道交通网络为例进行实验分析, 结果表明, 采用改进模型能更精确的优化城市网络的鲁棒性。

关键词: 城市轨道交通; 复杂网络; 鲁棒性; 变权重

中图分类号: TP391 **文献标识码:** B

Robustness Analysis of Urban Transit Network Based on Complex Network with Varied Weight

GAO Peng, HU Jian-bo, WEI Gao-le

(Air Force Engineering University, Xi'an Shanxi 710051, China)

ABSTRACT: Study the robustness of urban transit network based on varied weight complex network. The urban transit network is a complex network with a lot of nodes, and different nodes own different transit tasks, and it is difficult to build precise model for each node to analyze the robustness of the network. In traditional analysis model, each node is weighted with the same value and the actual distance between each two nodes is not considered, they are assigned with the same value, so the analysis model is not accord with the actual network model. A new robustness analysis model was proposed in the paper, according to the actual location between the node and the center of the city, different node in the network was weighted with different value, and the actual distance between two nodes was considered, the ability of degree, degree distribution, cluster coefficient, average length and the efficiency of network were analyzed. Compared with traditional models, the new model is more close to the actual model. The newest network of Beijing was analyzed and the simulation result shows that the robustness of urban transit network can be analyzed more exactly.

KEYWORDS: Urban transit network; Complex network; Robustness; Varied weight

1 引言

近些年, 随着我国汽车工业的快速发展, 城市汽车保有量迅猛增长。有限的城市交通资源与日益增长的汽车量导致了一系列的城市交通问题, 如交通堵塞、城市大气污染严重、汽车安全事故率上升等等。在此严峻形势下, 地铁、轻轨作为一种解决城市交通问题的重要手段显得愈加重要。然而城市轨道交通网络越复杂, 每个车站站点肩负的交通任务

越复杂, 其遭受自然或人为攻击后对整个交通网络的影响也就越大。为此, 许多研究者对城市轨道交通网络的鲁棒性进行分析, 以期分析出整个城市网络中重要的那些站点, 对其进行重点保护, 同时, 分析整个网路的性能, 为未来的轨道交通新网络建设提供帮助。

传统城市轨道交通鲁棒性分析方法通常将整个网络抽象成一个等权值的网络, 一般采用节点和边的权重无变化的无向网络模型, 即在整个网络系统中, 所有的节点采用同样的加权系数 1, 并且所有相邻的节点间距离均假设为相等的距离 $L^{[1-2]}$ 。但是实际模型与之假设网络模型差异很大, 在一个城市网路系统中, 市中心所承载的客流量与远郊有非常

基金项目: 空军工程大学科研创新基金项目(XS0901008)

收稿日期: 2013-04-09

大的差异,同样换乘次数的站点,处于市中心站点每天的客流量可能是处于郊区站点的几十倍,同样站点数的两趟列车,每天的运输量也会有很大的差异。因此,传统的分析方法将城市轨道交通网络抽象为等权重的网络进行分析,无法反映出城市交通鲁棒性的实际情况。

提出一种基于复杂网络的变权重城市轨道交通网络鲁棒性分析方法,结合每个站点在城市中的实际地理位置分布,依照其与市中心之间的相对距离关系对整个城市中不同地理位置的站点赋予不同的加权值,同时,采用站点之间的实际距离作为站点间距,分析城市轨道交通网络的鲁棒性。

2 城市轨道交通的复杂网络模型

2.1 复杂网络模型

一个具体的网络由两部分组成,节点和边^[3-5]。节点的集合为 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\}$, N 为节点的个数;边的集合为 $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_M\}$, M 为边的个数。对于边集 E 中的每个元素边,均有 V 中的两个点与之对应。根据整个网络系统中节点类型和边的方向可以将网络分为如下 4 类:单一类型节点和边的无向网络;不同类型节点和边的无向网络;节点和边权重变化的无向网络;有向网络,他们的结构分别如图 1 所示。

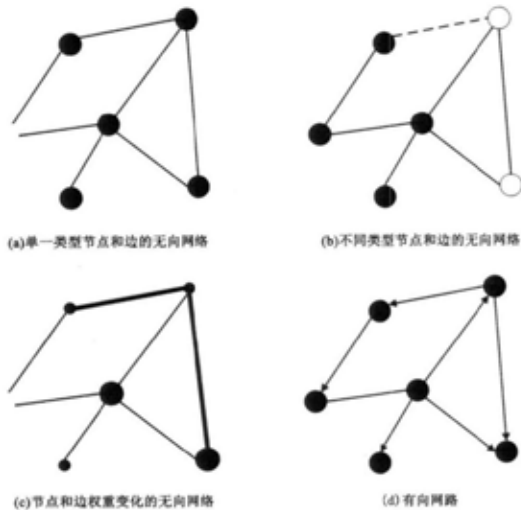


图 1 不同类型的网络

本文分析的城市轨道交通网络,虽然在一段时间内具有一定的方向性,例如上班高峰时间,从郊区到市区的运输载荷大,下班高峰时间,从市区到郊区的运输载荷大,但总体而言,其两个方向的吞吐量是基本相等的,结合前面分析的市区和郊区的差异,所以本文分析的城市轨道交通网络是一个节点和边权重变化的无向网络,即前面所示的模型(c)网络。

2.2 节点和边加权

由于系统网络中每个站点的重要程度受许多因素的制约:如人口密度、政治因素、经济因素、周边教育、医疗资源等

等,所以我们无法精确的描述交通网络中每个站点的重要程度。但为了更贴切的反应现实情况,我对在进行网络的节点和边加权时做如下假设:

1) 不考虑站点所处地理环境的政治、经济、资源等环境条件;

2) 假设任意两个站点之间边的传输能力是相同的;

在以上两点假设的基础上,我们考虑如下因素对网络系统中站点和边的影响。

1) 考虑地理位置对站点权值的影响,处于不同地理位置的人口密度差异很大,而人口密度越大,意味着该站点所肩负的任务越重,即权值越重;根据北京市人口分布密度特性,市区人口密度大,郊区密度逐渐减小的特点,符合正态分布的特性。北京市横跨东西方向的 1 号线全长约 30.66km,南北方向距离小于东西向,所以本文选择站点的加权值随地理位置的变化曲线如图 2 所示:其中 R 为站点距市中心的距离。

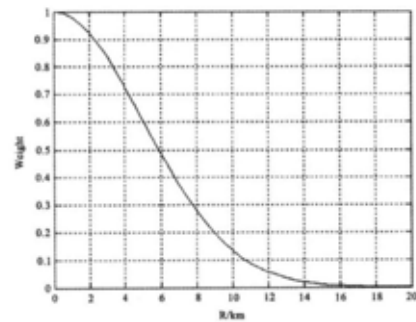


图 2 交通网络的站点加权

2) 考虑相邻站点之间距离对边权值的影响,距离越长,相邻站点覆盖的面积也就越大,同时在此段距离上出现问题的概率也就越大,所以边权值与边长度成正比关系。根据面积的计算公式,权值与距离的相对关系应为平方加权。

3 复杂网络的城市轨道交通网性能分析

以北京市最新的轨道交通为例来研究其性能。目前北京共有 14 条地铁线,分别是:1 号线(含八通线):苹果园到土园,共 34 个站点;2 号线:积水潭到西直门,共 18 站;4 号线(含大兴线):安河桥北到天宫院,共 35 站;5 号线:天通北苑到宋家庄,共 23 站;6 号线:海淀五路居到草房,共 20 站;8 号线:回龙观东大街到鼓楼大街,共 13 站;9 号线:郭公庄到国家图书馆,共 13 站;10 号线:西局到首经贸,共 43 站;13 号线:西直门到东直门,共 16 站;15 号线:望西京到俸伯,共 13 站;房山线:苏庄到郭公庄,共 11 站;昌平线:南邵到西二旗,共 7 站;亦庄线:宋家庄到次渠,共 13 站;机场线:东直门到 3 号航站楼,共 4 站。如图 3 所示。

采用 ArcGis 获得网络拓扑结构图,对网络中每个节点进行编号,进行如下性能分析。



图3 北京市轨道交通图

3.1 度和度分布

度表示与每个节点相连接的节点个数^[6],经统计,北京轨道交通网中共 228 个节点,其中度值最大为 5,为西直门站;度为 4 的节点有 28 个;度为 3 的节点有 5 个;度为 2 的节点有 179 个;度为 1 的节点有 15 个;度分布如图 4 所示。

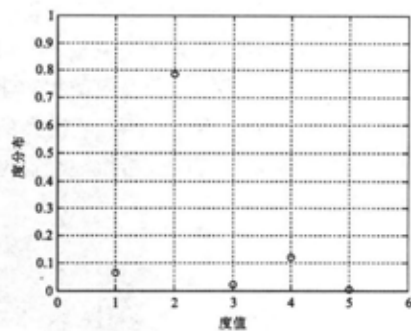


图4 北京轨道交通网络的度分布

从上图可以看出,在所有站点中,度为 2 的站点所占比例最大。经计算,北京轨道交通网络的平均度为 2.215,也就是说平均每个站点会连接 2.215 个站点。

对上面的度值和对分布取双对数运算,结果如图 5 所示。

横坐标为度值的对数运算结果,纵坐标为度值对应的度分布对数运算结果。采用最小二乘准则拟合得到幂律分布函数为 $p(k) = 3.32k^{-4.33}$ 的直线,即北京市轨道交通网络的度分布可以用一条幂律函数拟合,其中 $\gamma = 4.33$,由此可以看出,北京市轨道交通网络具有无标度网络的特征。

3.2 聚类系数

单个节点的聚类系数是指与该节点相连的所有节点中,其它节点相连的概率,假设与一个节点 i 相连的共有 k_i 个节点,则这 k_i 个节点最多可形成 $k_i(k_i - 1)/2$ 个边,这 k_i 个节点实际形成的边 E_i 与 $k_i(k_i - 1)/2$ 的比值就是聚类系数 C_i ,即如式(1)所示:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (1)$$

整个交通网络的聚类系数定义如式(2)所示:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (2)$$

其中 $N = 228$ 为总的站点数。

3.3 平均路径长度

网络中任意两个节点之间的平均距离代表了从一个节点到另一个节点所需要经过的平均路程^[4-6]。根据前面的加权理论,处于不同地理位置的线路,由于其所肩负的任务不同,所以赋予不同的权重。则平均路径的计算方法如式(3)所示:

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^k w_{ik} d_{ik} \quad (3)$$

其中 w_{ik} 为从第 i 个节点到第 j 个节点的最短路径中经过第 k 个节点时根据第 k 个节点所处位置所赋的权重。 d_{ik} 表示从第 i 个节点到第 j 个节点过程中经过第 k 个节点的边长。整个网络的平均路径定义如式(4)所示:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (4)$$

平均路径的计算流程如图 6 所示。

3.4 网络效率

本文引入节点间距的倒数表示网络效率,即节点 i 到节点 j 的间距为 d_{ij} ,其效率定义如下:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

定义网络中所有节点的平均效率为网络的全局效率 $E(G)$ 如式(6)所示:

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (6)$$

4 轨道交通网络鲁棒分析

网络鲁棒性是指网络在正常工作情况下,遭受到选择性的外部攻击或者随机性的外部攻击依然具备的通信传输能力。

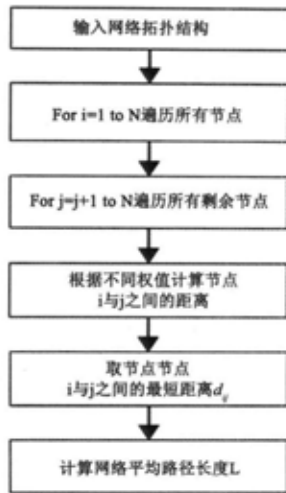


图6 网络平均路径长度计算流程图

选择性攻击属于有目的的破坏行动,本文设计选择性攻击的线路从度值最大的西直门站开始,然后依次攻击度值最大的站点,经过分析,最终形成如下选择性攻击线路:西直门-平安里-西单-宣武门-崇文门-建国门-朝阳门-雍和宫-惠新西街南口-知春里,然后依次计算全局网络的各项性能。

表1中 f 表示遭受攻击的节点占总节点个数的比例, $E(G)$ 为全局效率, L 表示网络的平均路径长度。

表1 选择性攻击下交通网络的各项指标

攻击站点	f	$E(G)$	L
初始未攻击	0.000	0.1610	22.72
西直门	0.0044	0.1311	25.55
平安里	0.0088	0.1160	24.09
西单	0.0132	0.0965	22.58
宣武门	0.0175	0.0886	20.34
崇文门	0.0219	0.0703	16.33
建国门	0.0263	0.0401	14.13
朝阳门	0.0307	0.0359	13.09
雍和宫	0.0351	0.0191	12.55
惠新西街南口	0.0395	0.0063	8.360
知春里	0.0439	0.0021	4.363

以相同选择性攻击下,网络的全局效率为研究对象,对本文的变权重复杂网络分析模型和传统的等权重复杂网络分析模型进行比较,结果如图7所示。

从图7可以看出,本文的分析模型下,选择性攻击对网络系统造成的危害比传统模型下要大许多,会导致网络系统更快的瘫痪。这是因为我们选择攻击线路主要集中在城市的核心地带,而这些地方的网络节点在网络中占据非常重要的地位,所以会导致网络更快的瘫痪,这也符合实际的城市网路特性。

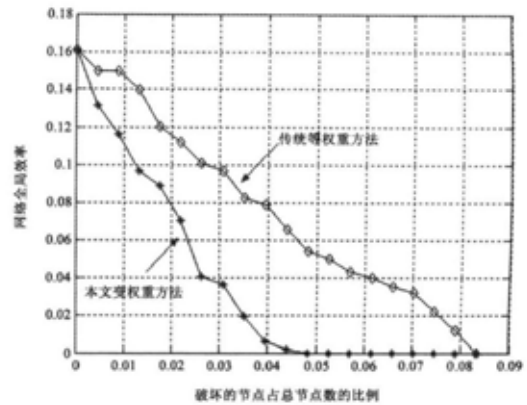


图7 本文模型和传统模型全局效率影响曲线

5 结论

本文提出了一种基于复杂网络的变权重城市轨道交通网络鲁棒性分析方法。在分析城市不同位置节点负荷的基础上,结合不同节点在城市中实际分布的地理位置,与市中心的相对关系,对不同节点进行不同的加权,同时,采用节点间的实际距离作为网络中的节点间距,克服了传统分析方法模型与实际模型不相符合的问题。以北京市最新的轨道交通网络为例,分析了网络度、度分布、聚类系数、平均路径长度、网络效率等性能,并且分析了本文所提模型相对于传统分析模型的网络鲁棒性优势,分析结果表明,此模型更接近实际城市交通网络模型,能更加精确的分析轨道交通网络的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 贺磊,王直杰. 基于复杂网络的供应链网络效率研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 183-185.
- [2] K Zhao, A Kumar, J Yen. Achieving High Robustness in Supply Distribution Networks by Rewiring[J]. IEEE Transactions on Engineering Management. 2011, 58(2): 347-362.
- [3] 张纪会,徐军芹. 适应性供应链的复杂网络模型研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(2): 76-79.
- [4] M E J Newman. The structure and function of networks[J]. Computer Physics Communications, 2002, 147: 40-45.
- [5] M E J Newman. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [6] 杨铭,薛惠峰. 基于复杂网络的非正式团体知识交互网络分析[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 122-125.

[作者简介]



高鹏(1982-),男(汉族),山东泰安人,硕士,博士研究生,主要研究方向:系统工程;
 胡剑波(1965-),男(汉族),浙江慈溪人,博士,教授,主要研究方向:系统工程;
 魏高乐(1986-),男(汉族),北京人,硕士,博士研究生,主要研究方向:管理科学与工程。