

基于复杂网络理论的客运专线网络可靠性分析

黄树明

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘要: 随着客运专线网络的逐渐完善,人们对其可靠性也提出了更高要求。利用复杂网络理论对客运专线网络的可靠性进行分析,有利于发现网络中的关键节点及薄弱环节,从而有针对性地对网络进行完善。基于复杂网络理论,建立客运专线网络模型,并计算该复杂网络模型的静态统计特征,包括度分布、聚类系数和平均路径长度,得出客运专线网络是典型的无标度复杂网络。分别在随机性攻击和选择性攻击两种模式下,从网络的全局效率和最大连通子图的相对大小两个指标,对客运专线网络的可靠性进行分析,得知客运专线网络对随机性攻击的抗破坏能力较强,而对选择性攻击的抗攻击能力较弱,最后提出了提高客运专线网络可靠性的建议。

关键词: 客运专线; 网络; 复杂网络; 可靠性

中图分类号: U238 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)02-0085-05

0 引言

根据我国《中长期铁路网规划》(2008 年调整),至 2020 年我国将完成建设 1.6 万 km 客运专线,届时将形成由“四纵四横”等客运专线以及经济发达和人口稠密地区城际快速客运系统构成的客运专线网络。客运专线成网后,承担着铁路大部分的旅客运输任务,因此对其可靠性也提出了更高要求,复杂网络理论为研究客运专线网络提供了有力工具。

1 复杂网络理论

一个网络可以抽象为由一个点集 V 和一个边集 E 组成的图,如果任意两点 v_i, v_j 之间的连线 (v_i, v_j) 是无向的,称为无向图,否则称为有向图;如果给每条边赋予一定权值 w_{ij} ,则称为加权图,否则称为无权图。

复杂网络是具有海量节点和复杂连接拓扑结构的网络模型,现实世界中很多系统都可以看作复杂网络,如食物网、社交网、交通运输网^[1]。

1.1 复杂网络的统计特征

无向图的主要统计特征有度分布(degree distribution)、聚类系数(clustering coefficient)和平均路径长度(average path length)。

度是刻画网络节点属性的重要概念,度 k_i 是指网络中与节点 v_i 相连接的边的数目,一般度越大,意味着节点越重要。网络中节点的度的分布可用函数 $P(k)$ 刻画。

假设节点 v_i 的度为 k_i ,这 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 与可能存在的边数 $C_{k_i}^2$ 之比为节点 v_i 的聚类系数 C_i 。聚类系数可用来描述节点 v_i 附近的连通性。

假定无向图中所有的边的长度为 1,从某一节点 v_i 出发,到达另一节点 v_j 的最短距离为 l_{ij} ,平均路径长度 L 为所有 l_{ij} 的平均值。平均路径长度 L 也可以用来刻画网络的连通性^[2]。

1.2 无标度网络模型

复杂网络模型的研究主要经历了 ER 随机网络模型、WS 小世界网络模型^[3] 以及 BA 无标度网络模型

收稿日期: 2012-04-05

作者简介: 黄树明 男 1987 年出生 硕士研究生

几个阶段,研究表明,无标度网络与现实世界的网络更具有相似性。无标度网络的度分布 $P(k) \propto k^{-\lambda}$ ($\lambda = 3$), 平均路径长度 $L \propto \ln N / \ln(\ln N)$, 所有节点的聚类系数的平均值 $C \propto N^{-0.75}$, N 为网络节点总数^[4]。

2 客运专线网络的复杂网络模型

以客运专线网络为研究对象,选取已有客运专线网络上的部分车站(75个)作为节点,建立复杂网络模型。客运专线网络及其拓扑结构分别如图1及图2所示,该网络为非加权无向网络,如果两节点直接相连,则将该两点的距离定为1。复杂网络建模和分析主要基于 Pajek 软件, Pajek 是目前研究分析各种复杂网络的有力工具。该网络模型的静态特征如下:

(1) 度和度分布。从图3中可以看出,多数节点的度为2,即线路上多数车站仅与同线路前后相邻车站相接,如长春、西安;少数节点的度为3或4,对应着线路上较为重要的枢纽站或换乘站,如北京、广州、武汉、郑州;部分节点的度为1,对应线路的端点,如昆明、成都、兰州。使用最小二乘法对已知数据进行最佳直线拟合,得到度分布函数为 $p(k) = 4.47k^{-2.91}$, $\lambda = 2.91$ 表明客运专线网络具有无标度网络特征。

(2) 平均路径长度。最短路径 l 的概率分布如图4所示。从图4中看出,最短路径中 $l = 7$ 的概率最大,最远的距离为 $l = 20$ (哈尔滨—南宁),平均最短路径 $L = 7.95$,即平均任意两车站间隔7至8个车站。

(3) 聚类系数。由于客运专线网络拓扑图中并不存在三元组^[1],所以聚类系数 $C = 0$,表明与某车站相邻的车站之间没有连接。实际上,客运专线的车站也很少能形成三元组,这也是大部分轨道交通网络与其他网络的区别。需要指出的是,只选取了客运专线网络上的部分车站进行建模,随着车站选取数量的不同,以上静态特征的计算结果也会有所差别。

3 客运专线复杂网络可靠性分析

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力^[5]。客运专线网络是整个铁路网络的一部分,文献[6]对铁路网复杂网络可靠性的定义,对客运专线网络的可靠性进行分析。

3.1 客运专线网络可靠性指标

以网络全局效率 E 和最大连通子图的相对大小 S 作为评价客运专线网络可靠性的指标,其计算方法分别如下^[7]。如果两点 v_i, v_j 不连通,则 $l_{ij} = +\infty$,效率值 $e_{ij} = 0$ ^[1]。 $0 \leq e_{ij} \leq 1$,可见效率值越大,网络连通性越好; $0 < S \leq 1$,且 S 越大,网络的连通子图越大。

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

$$S = (N - N') / N \quad (2)$$

式中, N' 为受到攻击的节点数目。

3.2 客运专线网络可靠性分析

客运专线网络为无标度网络,通常面临随机性攻击和选择性攻击^[1],这两种攻击对网络可靠性造成的影响程度不同。

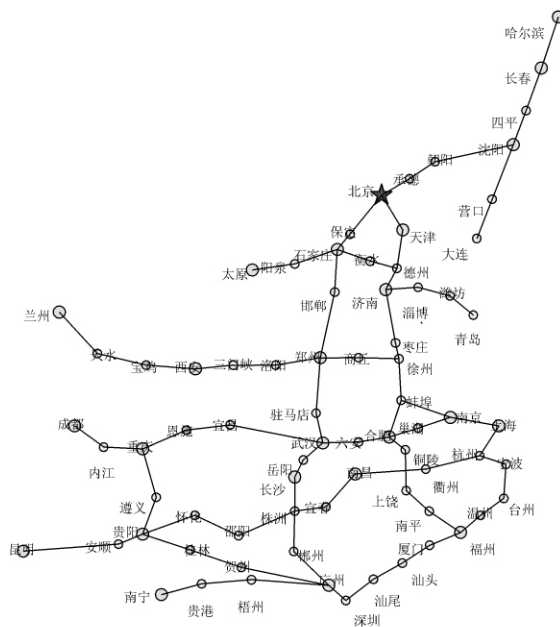


图1 客运专线网络图

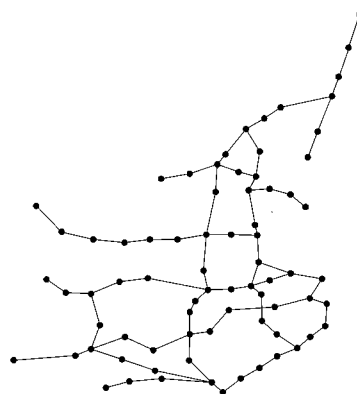


图2 客运专线网络拓扑结构图

(1) 随机性攻击。随机性攻击往往是由于意外事故,如自然灾害、设备故障等而对(客运专线)网络造成的局部的破坏。随机性攻击是指以某种概率对网络中的节点进行攻击,考虑到本网络的节点数目较少,每次随机攻击(移除)网络中的一个节点。利用Excel生成25个不同的、介于1~75之间的随机数并取整,作为每次随机攻击的对象(即节点、车站),依次计算网络受到每次攻击后的可靠性指标。某次随机生成的一组数据对应的随机性攻击顺序为:深圳→枣庄→昆明→汕头→大连→太原→桂林→阳泉→潍坊→驻马店→邯郸→蚌埠→北京→兰州→商丘→上饶→六安→三门峡→广州→邵阳→朝阳→怀化→德州→淄博→武汉。

(2) 选择性攻击。选择性攻击往往是蓄意地对网络中居于重要地位的节点进行攻击和破坏。选择性攻击是按一定策略去攻击网络,通常从网络中度最大的节点开始,这样能使网络以较快速度瓦解。本文每次选择攻击网络中度最大的一个节点,进行25次选择攻击,依次计算网络受到每次攻击后的可靠性指标。每次选择网络中度值最大的节点对应的一种选择性攻击顺序为:郑州→武汉→株洲→广州→石家庄→合肥→贵阳→北京→济南→南京→杭州→福州→沈阳→重庆→徐州→德州→蚌埠→西安→天水→长春→汕头→潍坊→南昌→上饶→台州。

(3) 结果分析。从图5可以看出,客运专线网络在选择性攻击模式下迅速瓦解,当攻击到第4个车站时,全局效率已经下降一半,而网络对随机性攻击的抵抗力较强,随机攻击11个车站才造成全局效率下降一半;经过15次选择攻击,网络的全局效率已接近于0,而经过15次随机攻击,网络仍保有一定的全局效率。这是因为在选择性攻击模式下,每次攻击都是选择网络中度值最大的节点,而这些节点往往是客运专线网络中衔接方向较多的换乘站,对保持网络的连通性起着重要作用。

从图6可以看出,客运专线网络的最大连通子图在选择性攻击模式下迅速变小,只经过4次选择攻击,最大连通子图就变为原网络的60%左右,而在随机性攻击模式下,经过10次随机攻击,网络的最大连通子图仍大于原网络的80%;经过13次选择攻击,网络的最大连通子图的相对大小已低于10%,此时客运专线网络基本上已经完全瓦解,而经过18次随机攻击,网络的最大连通子图的相对大小仍接近50%,客运专线网络仍具有一定结构,而未完全瓦解。

从图5及图6来看,在选择性攻击4个节点后,网络的效率已严重降低、最大连通子图也大幅缩小,这四个节点对应郑州、武汉、株洲、广州站,结合图1发现,除去这四个车站后,客运专线网络的左、右部分已完全分开,因此这四个车站的连通对于保持整个网络的通畅有着重要作用。

综上,客运专线网络对随机性攻击的抵抗力较强,这也说明无尺度网络由于存在大量的“不重要”节点,而对随机攻击具有很强的鲁棒性;但在选择性攻击模式下非常脆弱,当面对蓄意攻击和破坏时,网络将不堪一击。对于本文所建立的客运专线复杂网络模型,无论在何种攻击模式下,经过25次攻击后,网络基本完全瓦解,丧失通行能力。

3.3 提高客运专线网络可靠性的建议

根据客运专线网络的统计特征及可靠性分析结果,提出以下提高其可靠性的建议:

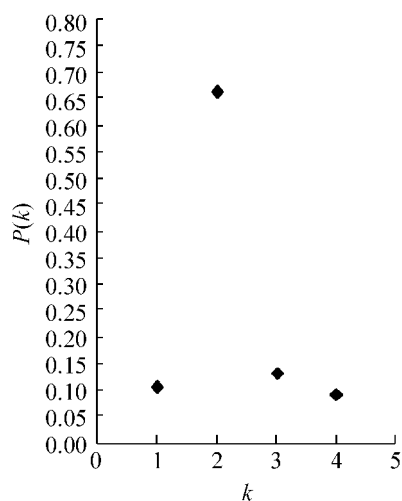


图3 网络节点的度分布

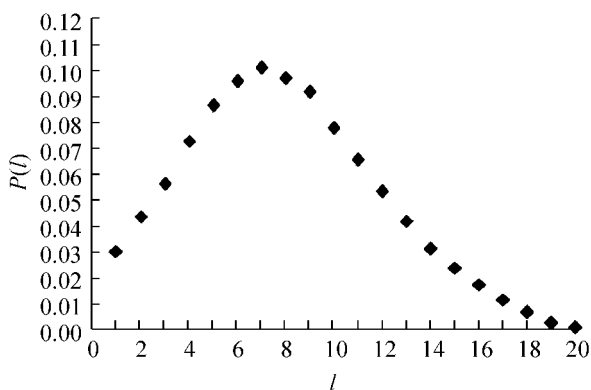


图4 网络节点间最短距离分布

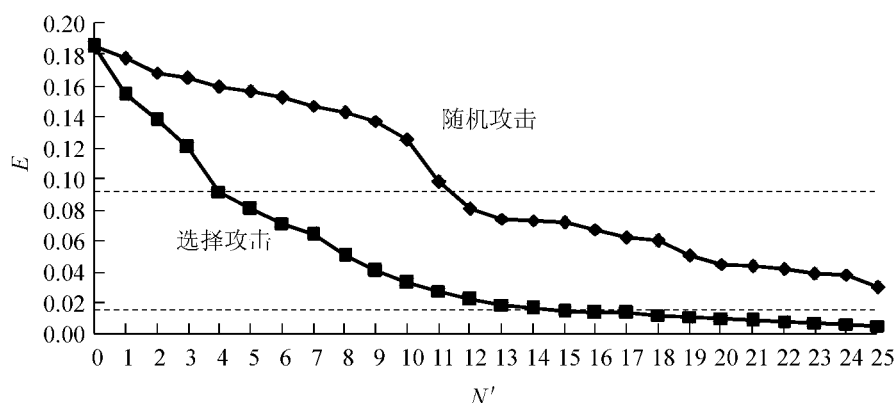


图 5 网络全局效率变化曲线图

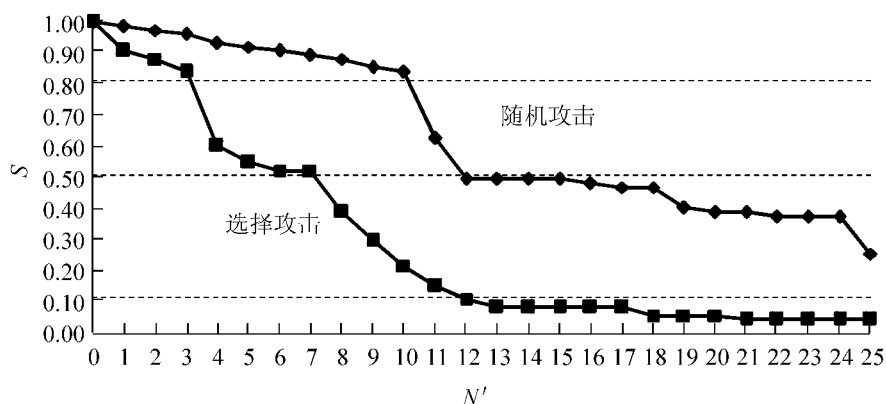


图 6 最大连通子图的相对大小变化曲线图

(1) 在度值较大的节点周围的车站之间修建联络线,即增大关键节点的聚类系数,以便在该节点受到攻击时仍能通过相邻车站保持网络的连通性。

(2) 提高每个节点的应急能力,如完善应急预案,加强风险评价及辨识,提升技术、设备水平。

(3) 加强客运专线与既有线的联系,以便在客运专线故障或受到攻击时,高速列车通过“转线”到既有线,在既有线继续运行,或待条件合适时再转回客运专线运行。

4 结论

客运专线网络是典型的无标度复杂网络,利用复杂网络理论分析了其不同攻击模式下的可靠性,得知客运专线网络对随机性攻击有较强的抗破坏力,而在选择性攻击模式下变得非常脆弱。

(1) 在采用的攻击顺序下,经过 7 次选择性攻击,或 12 次随机性攻击,网络仍可保持一定通行能力;经过 13 次选择攻击,或 25 次随机攻击,网络基本完全瓦解、瘫痪。

(2) 网络可靠性的急剧降低不单单是因为攻击了某一个车站,而是由包括当前以及之前一定阶段的一系列攻击造成的,如选择性攻击的 1~3 次、1~7 次攻击,随机性攻击的 1~10 次攻击之后,都造成了网络可靠性的急剧降低。

(3) 网络中度值大的节点,如郑州、武汉、广州、北京等是关键节点,对于保证网络的正常通行有重要作用,但同时也是网络的薄弱环节,应设法提高其可靠性。

参 考 文 献

- [1] 王云琴. 基于复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2008.
- [2] 刘全龙. 复杂网络可靠性研究[D]. 北京: 北京邮电大学理学院, 2007.
- [3] 赵正旭, 郭阳, 刘贾贾, 等. 万维网的小世界效应探讨[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2010, 23(2): 1-6.

- [4]叶婷婷. 基于复杂网络的全国铁路网络连通可靠性分析[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院 2009.
- [5]国家标准局. GB3187—82 可靠性基本名词术语及定义[M]. 北京: 中国标准出版社 1987.
- [6]江永超. 基于复杂网络理论的铁路网可靠性研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院 2011.
- [7]刘志谦 宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息 2010 ,10(5) : 194–200.

Research on Reliability of Passenger Dedicated Line Network Based on Complex Network Theory

Huang Shuming

(School of Transportation and Logistics , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Abstract: With the improvement of passenger dedicated line (PDL) network , higher requirements for reliability have been proposed. To analyze the reliability of PDL network by using complex network theory is of benefit for discovering key points and weak points of the network , so as to perfect it pertinently. The PDL network model is established based on complex network theory and its statistical properties are calculated , such as degree distribution , clustering coefficient and average path length. It can be found that the PDL network is a typical scale-free complex network. The reliability of PDL network is analyzed from the two indexes of overall efficiency of network and relative size of maximum connectivity graph , under two modes of attack: random attack and intentional attack. The results indicate that the PDL network has good resistance to random attack , but very poor resistance to intentional attack. At last , some suggestions for improving the reliability of PDL network are proposed.

Key words: passenger dedicated line; network; complex network; reliability

(责任编辑 车轩玉)

~~~~~  
( 上接第 84 页)

- [8]魏得勇. 城市轨道交通综合配线评价研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输学院 2006.
- [9]梅丽 邓念. 基于模糊理论的城市铁路客运站换乘衔接综合评价[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版 2011 24( 2) : 74-78.

## Comprehensive Evaluation of Skip-stop Operation on Urban Rail Transit

Qu Mingyue

( School of Transportation and Logistics , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

**Abstract:** There are a number of influencing factors during the skip-stop train operating on urban rail transit lines. In this paper , the organization of skip-stop operation and its advantages and disadvantages are described , and on the basis of it , four first class indexes including carrying capacity , service level , operation efficiency and cost , and 13 sub indexes are selected to form the multi-objective evaluation index system , and then this paper discusses the meaning and calculation method of each index. Finally , the AHP-F method is applied to a concrete example to analyze the quality and identify the shortcomings of skip-stop operation.

**Key words:** urban rail transit; skip-stop operation; evaluation index system; AHP-F method; comprehensive evaluation

( 责任编辑 刘宪福)