

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.03.014

基于攻击策略的城市群复合交通网络脆弱性研究

李成兵¹, 魏磊^{1,2}, 李奉孝¹, 路远征¹

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070;

2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了提高城市群交通网络抵抗突发灾害的能力, 以复合这样一种全新的视角探索城市群交通网络的脆弱性。首先, 基于复杂网络理论, 对城市群复合交通网络结构进行了深入分析, 采用站点映射法构建了城市群复合交通网络模型。其次, 针对城市群复合交通网络结构, 确定了脆弱性测度指标和攻击策略。最后, 以呼包鄂城市群为例进行了实证研究, 构建了道路-轨道复合交通网络模型, 对复合交通网络的拓扑特征和脆弱性进行了分析, 识别了路网中的关键站点和线路。结果表明: 城市群复合交通网络的构建可以降低单一运输方式交通网络的脆弱性, 通过对识别出的关键站点和线路的加强防护, 可以进一步降低城市群复合交通网络的脆弱性, 减小突发灾害造成交通网络瘫痪的风险。

关键词: 交通工程; 脆弱性; 复合交通网络; 城市群; 复杂网络

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 03-0101-09

Study on Vulnerability of City Agglomeration Compound Traffic Network Based on Attack Strategy

LI Cheng-bing¹, WEI Lei^{1,2}, LI Feng-xiao¹, LU Yuan-zheng¹

(1. School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia 010070, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve the ability of city agglomeration to resist emergencies disaster, the vulnerability of city agglomeration's traffic network is researched with a new perspective of compound. First, based on the complex network theory, the in-depth analysis of city agglomeration compound traffic network structure is conducted, the model of city agglomeration compound traffic network is set up using site mapping method. Then, according to the compound traffic network structure of city agglomeration, both the attack strategy and the measure indicators of vulnerability are determined. At last, taking Hohhot - Baotou - Erdos city agglomeration for example of empirical study, the road-rail transit compound traffic network model is established to analyze the topological features and vulnerability of the compound traffic network, and the key sites and roads are distinguished. The result shows that the construction of urban agglomeration's compound traffic network can effectively reduce the vulnerability of single mode network, the vulnerability of the compound traffic network and the sudden disaster caused risk of traffic network failure can be reduced through protecting the distinguished key sites and roads.

Key words: traffic engineering; vulnerability; compound traffic network; city agglomeration; complex network

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2014BS0501); 国家级大学生创新基金项目 (201510126040)

作者简介: 李成兵 (1982-), 男, 安徽安庆人, 副教授, 博士. (bingbingnihao2008@126.com)

0 引言

随着交通基础设施的日益完善,我国交通大通道建设和交通枢纽建设都已经取得了一定的发展成果,而介于区际交通和城市交通之间的城市群交通仍面临诸多亟待解决的问题。如近年来,城市群内自然灾害、恶劣天气、客流突增等异常事件频繁发生,经常造成部分交通站点或线路失效导致整个交通网络瘫痪,不仅严重阻碍了城市群正常运转,而且还使人民生命财产遭受巨大损失。若可以识别并量化城市群内各站点和线路的脆弱性,制订科学合理的管理策略及应急预案,便可提高网络抵抗突发灾害的能力,保障网络高效运行,维护人民生产生活安全。因此,研究城市群交通网络脆弱性具有很强的现实意义。

目前,一些国内外学者利用复杂网络理论对交通网络脆弱性进行了一些研究。文献[1]较早提出了网络脆弱性的概念,即对破坏性事件的敏感性;文献[2]进一步分析了脆弱性的概念,发现异常事件会随着网络传播产生连锁效应;文献[3-5]提出了节点的分析是脆弱性研究的关键步骤,节点失效会对网络造成严重影响;文献[6]以复杂网络理论统计特性为基础,建立了新乡市道路网络脆弱性研究模型;文献[7]以瑞士道路交通网络为研究对象,深入研究分析了脆弱性的内涵和量化方法;文献[8]依据城市道路交通网络脆弱性提出了增强网络抵抗灾害能力的具体方法;文献[9]以城市群道路交通网络为研究对象,运用网络可靠度、结构重要度、失效弹性研究了破坏事件对网络造成的影响;文献[10]就波士顿的地铁网络效率进行研究,对网络进行优化,减轻了选择性攻击对网络的不利影响;文献[11-12]分析了提高城市轨道交通网络脆弱性对于优化路网结构的重要作用;文献[13-14]运用不同的攻击策略对城市轨道交通网络脆弱性进行研究,提高了网络运行的抗风险能力;文献[15]对轨道交通网络进行研究,发现换乘站点破坏会严重影响长距离出行。

综上所述,对于脆弱性的研究,国内外学者大多局限于城市内单种运输方式网络,对城市群的研究较少,且没有考虑运输方式间的相互影响。但随着城市集群化的日益明显,以城市群为研究对象已成为交通领域另一新的研究趋势。而且随着城市群内交通需求的持续上升,不同运输方式网络共同承担着城市群内的交通压力,但每种运输方式具有其独特的优势和

缺陷。倘若它们可以相互补充,便可将彼此的缺点最小化,从而提升网络性能。基于此,本文提出构建城市群复合交通网络模型的具体方法,在对比分析网络拓扑特征的基础上,研究不同攻击策略下城市群复合交通网络表现出的脆弱性,并分别量化各节点和边失效导致的脆弱性,以确定关键站点和线路,为保障交通网络健康畅通提供有效依据。

1 城市群复合交通网络模型的构建

城市群复合交通网络区别于综合交通运输网络。综合交通运输网络是道路、轨道、水路、航空、管道5种运输方式网络的综合体,注重运输方式间的协作发展。对其研究多采用定性方法,最终为政府部门提供战略性发展意见。而城市群复合交通网络是任意几种运输方式交通网络叠加的复合体,构建的意义在于采用量化方法,将城市群交通系统内不同运输方式间的相互影响作用量化表示,以不同运输方式网络的拓扑结构为基础,找出复合交通网络中的关键站点线路,为交通规划提供更为直接具体的参考依据。此时,虽然不同交通方式结构具有不同的特点,但在复杂网络拓扑结构模型中,不同运输方式的站点都以节点表示,无论是道路路段、公路路段、轨道线等,都是线性元素,都以连边表示。因此,对网络的拓扑结构进行叠加可以忽略运输方式的载运特点。

目前,交通网络的构建方法主要有道路映射法和站点映射法^[16-18]。对于城市群而言,若采用道路映射法,由于网络节点众多,边分布不均匀,导致网络复杂性较高且误差较大,不仅无法说明实际交通流状态,而且很难精准反映交通网络特性。为了更好地揭示城市群复合交通网络的特性,本文根据城市群内交通基础设施布局现状,采用站点映射法分别以不同运输方式的所有站点为网络的节点,连接站点的各条线路为网络的边,构建城市群不同运输方式网络拓扑结构模型,再对其进行叠加复合。

若叠加过程中两个或两个以上的汽车站、火车站、机场、港口地理位置较近,可以忽略其地理距离,将它们看作一个站点,即在复合交通网络模型中视为一个节点。由于城市群包含多个城市,交通网络涵盖范围大、运行距离长。因此,站点之间的地理距离一般较远,地理距离较近的站点多集中于城市群中单一城市内部,此时,可通过电子地图获得单一城市内各站点之间的真实地理距离,估算旅客在站点之间换乘的步行时间。若步行时间在可接受范围内,则认

为站点间地理距离较近, 在复合交通网络中可以将其看做一个节点。其中, 步行时间的可接受范围应根据具体的研究对象, 考虑站点周边的交通状况、线路结构等实际条件而定。若网络叠加复合后, 两个节点之间可通过多种运输方式线路连接, 在复合交通网络模型中将其视为一条边相连。从而将城市群复合交通网络抽象成无向无权图 $G=(V, E)$, 其中 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 为网络所有节点的集合; $E=\{(v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V \text{ 且 } i \neq j\}$ 为边的集合; v_i 和 v_j 分别为网络中的任意两节点; 图 $G=(V, E)$ 所对应的邻接矩阵为 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 其定义式为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & v_i \text{ 对 } v_j \text{ 有某种二元关系}(v_i \text{ 与 } v_j \text{ 直接相连}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}.$$

2 城市群交通网络的拓扑特征指标

目前, 已有大量研究表明交通网络属于复杂网络。在此选取节点度、平均路径长度、聚集系数、介数为指标, 以分析城市群交通网络的拓扑特征。

(1) 节点度

度是用来刻画复杂网络中节点特性的最基本参数。在城市群交通网络中, 它表示某个节点 v_i 以边连接着的其他节点的数目, 用 k_i 表示节点度:

$$k_i = \sum_{j \in n} a_{ij}. \quad (1)$$

在城市群交通网络中, 倘若一个节点度值越大, 则表明该节点与其他节点连接越多。平均度则是网络中所有节点度值的平均值。

(2) 距离与平均路径长度

距离即连接两节点最短路径上的边数。平均路径长度是网络中任意两节点距离的平均值。若网络中节点数目为 n , 网络内任意两节点间的距离为 d_{ij} , 用 L 表示网络的平均路径长度:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n-1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}. \quad (2)$$

在城市群交通网络中, 平均路径长度表示在城市群中出行一次平均所需经过的站点数, 可以反映网络的连通性。该特性统计值越小, 说明城市群内站点间的连通越方便, 网络整体的连通性越好。

(3) 聚集系数

聚集系数分为局部聚集系数和网络聚集系数, 是用来衡量网络紧密程度的特性指标。若 m_i 为 v_i 的邻居节点数目, e_i 为其邻居节点间的实际连边数, 用 C_i 表示该节点的聚集系数:

$$C_i = \frac{e_i}{\frac{1}{2}m_i(m_i - 1)}. \quad (3)$$

网络聚集系数即所有节点聚集系数的平均值。在城市群交通网络中, 网络聚集系数的统计值越大, 说明网络聚集程度越高, 大多数节点的邻居节点间的实际连边较多。某一节点失效, 对网络影响较小。

(4) 介数

介数分为点介数和边介数。点介数是网络中任意两节点间的所有最短路径包含该节点的比例。若 σ_{jk} 为节点 v_j 与节点 v_k 之间的最短路径的数量; $\sigma_{jk}(i)$ 为节点 v_j 与节点 v_k 之间最短路径经过节点 v_i 的数量, 用 B_i 表示节点 v_i 的介数:

$$B_i = \sum_{j, k \in n, j \neq k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}}. \quad (4)$$

边介数与点介数定义相似, 边介数是指任意两节点间的所有最短路包含该边的比例。在城市群交通网络中, 介数可以直观反映某站点或线路在运输过程中提供最短路的能力, 该特性统计值越大, 说明该站点或线路的影响力越大。

3 城市群复合交通网络脆弱性测度指标

城市群复合交通网络受到异常事件影响产生“去点去边”的情况而导致网络失去部分或全部联通能力的性质就是其脆弱性。因此, 脆弱性测度应具有全局整体性。同时, 当某站点发生异常事件而失效时, 会使与该站点直接相连的所有线路失效, 交通流的多次分流最终会引起整个城市群复合交通网络连锁拥堵, 因此, 脆弱性测度应关注失效节点向全网延伸的传导性。基于此, 本文选取全网效率作为城市群复合交通网络脆弱性测度指标, 通过其变化确定某站点或线路失效造成网络性能改变的大小。

(1) 节点效率

在复杂网络理论中, 网络中任意两节点 v_i 和 v_j 之间的效率即它们之间距离 d_{ij} 的倒数, 用 ε_{ij} 表示:

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

节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 越大, 它们之间的效率越低, 联系越匮乏。当 $d_{ij} = \infty$ 时, $\varepsilon_{ij} = 0$, 节点 v_i 和 v_j 处于非连通状态, 它们之间的效率为零。

(2) 全网效率

若网络有 n 个节点, 则全网效率是网络所有节点之间效率的平均值。全网效率越高, 表明网络连通性越好, 节点间的聚集程度越高, 信息传递消耗

的资源越少,用 E 表示全网效率:

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

令 $\Delta E = E - E'$, 其中 ΔE 为全网效率的变化量, E 为节点失效前的全网效率, E' 为节点失效后的全网效率, 用 e 表示全网效率的相对下降率:

$$e = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E'}{E} \quad (7)$$

4 城市群复合交通网络攻击策略

城市群复合交通网络由点、边组成, 分别以节点和边为攻击对象, 仿真节点和边失效下的城市群复合交通网络脆弱性。采取的攻击策略分别为随机攻击和蓄意攻击:

(1) 随机性攻击即每次随机选取网络中的一个节点或边进行攻击, 直至所有节点或边被攻击完为止。

(2) 蓄意性攻击即每次选择性地对网络中的节点或边进行攻击, 直至所有节点或边被攻击完为止。对于节点而言, 本文选取的具体攻击策略为动态最大节点度优先攻击, 即首先选取初始网络中节点度最大的节点进行攻击, 之后重新计算当前网络各节点的节点度, 再选取网络中节点度值最大的节点进行攻击, 直至网络中所有节点被攻击完为止。对于边而言, 选取动态最大边介数优先攻击策略, 按照动态边介数的大小依次选取攻击对象, 其攻击过程与攻击节点相同。

现对上述攻击策略做出如下假设:

(1) 网络中所有的节点和边均无防护措施, 一次攻击完成即可令遭受攻击的节点或边失效。

(2) 可对网络中任意节点和边进行连续攻击, 忽略攻击成本和能力的限制。

(3) 仅以网络拓扑结构进行研究。若某条边遭受攻击, 则删除该条边; 若某节点遭受攻击, 则删除该节点和与其相连的所有边。

5 呼包鄂城市群实证研究

5.1 复合交通网络模型构建

选取内蒙古呼包鄂城市群为实证研究对象, 分别以城市群内所有汽车站和火车站为网络节点, 若站点之间通车, 则节点间有边相连, 从而得到与其对应的邻接矩阵。将矩阵输入 Ucient 软件分别绘制道路交通网络图和轨道交通线路图, 如图 1 和图 2 所示。

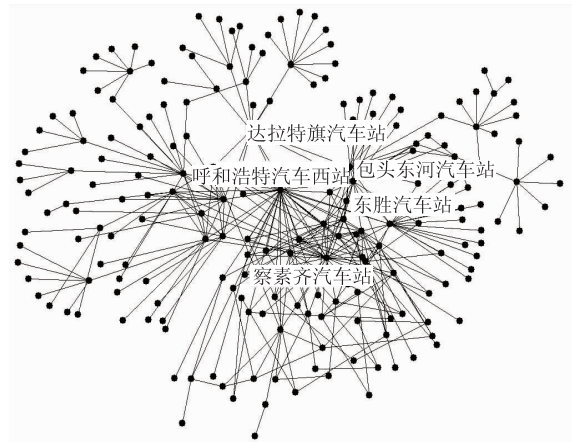


图1 呼包鄂城市群道路网络图

Fig. 1 Hohot - Baotou - Erdos city agglomeration road network

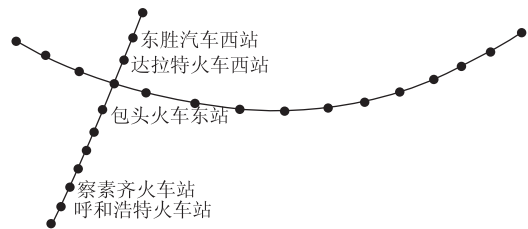


图2 呼包鄂城市群轨道交通线路图

Fig. 2 Hohot - Baotou - Erdos city agglomeration rail transit line

由于呼包鄂城市群位于西北部内陆地区, 无水路运输且航空运输网络单一, 故只将道路网络、轨道交通线路进行叠加复合。将地理位置较近的汽车站和火车站视为一个节点, 所有复合节点如表 1 所示。若叠加后两站点间汽车和火车均可到达, 可将其视为一条边, 便得到城市群复合交通网络拓扑结构图。该网络共有 217 个节点和 347 条边, 如图 3 所示。

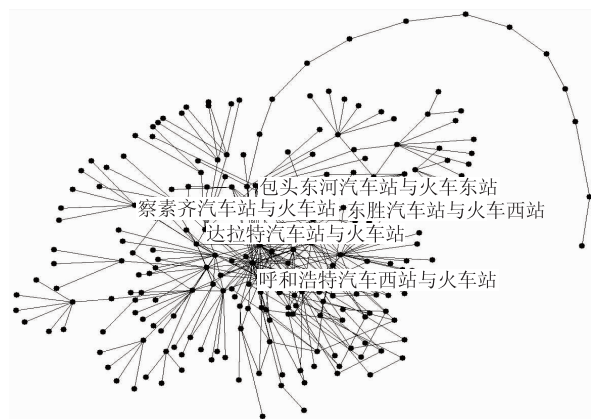


图3 呼包鄂城市群道路-轨道复合交通网络图

Fig. 3 Hohot - Baotou - Erdos city agglomeration compound traffic network

表 1 叠加节点与复合节点名称
Tab. 1 Multiply nodes and composite nodes

节点名称	交通网络类型	复合节点名称	距离/ m	旅客换乘 步行时间/ min
呼和浩特汽车西站	道路交通网络	呼和浩特汽车	200	3
呼和浩特火车站	轨道交通线路	西站 - 火车站		
察素齐火车站	轨道交通线路	察素齐汽车	10	1
察素齐汽车站	道路交通网络	站 - 火车站		
包头东河汽车站	道路交通网络	包头东河汽车	730	8
包头火车东站	轨道交通线路	站 - 火车东站		
东胜汽车站	道路交通网络	东胜汽车站 -	800	9
东胜火车西站	轨道交通线路	火车西站		
达拉特旗汽车站	道路交通网络	达拉特旗汽车	320	5
达拉特旗火车西站	轨道交通线路	站 - 火车西站		

表 2 部分复合节点失效网络特征值变化情况

Tab. 2 Change of characteristic values of some multiply nodes' failure

普通节点（复合节点）	全网效率变化量		全网效率相对下降率		节点介数	
	道路网络	复合网络	道路网络	复合网络	道路网络	复合网络
呼和浩特汽车西站（呼和浩特汽车西站 - 火车站）	0.002 7	0.002 1	0.020 1	0.014 2	8 489.26	11 512.15
察素齐汽车站（察素齐汽车站 - 火车站）	0.002	0.001 8	0.015 1	0.012 1	2 054.71	2 856.12
包头东河汽车站（包头东河汽车站 - 火车东站）	0.003 1	0.002	0.023 4	0.013 5	2 827.25	4 014.1

表 3 部分复合边失效网络特征值变化情况

Tab. 3 Change of characteristic values of some multiply edges' failure

普通边（复合边）	全网效率变化量		全网效率相对下降率		节点介数	
	道路网络	复合网络	道路网络	复合网络	道路网络	复合网络
呼和浩特汽车西站 - 察素齐汽车站（呼和浩特汽车西站 - 火车站至察素齐汽车站 - 火车站）	0.000 5	0.000 4	0.003 7	0.002 7	815.36	800.22
达拉特汽车站 - 包头东河汽车站（达拉特旗汽车站 - 火车西站至包头东河汽车站 - 火车东站）	0.000 9	0.000 7	0.006 7	0.004 7	700.56	656.33
东胜汽车站 - 达拉特汽车站（东胜汽车站 - 火车西站至达拉特旗汽车站 - 火车西站）	0.000 9	0.000 8	0.006 7	0.005 4	1 236.29	963.51

5.2 城市群交通网络拓扑特征对比分析

对呼包鄂城市群交通网络拓扑结构作如下处理：将道路交通网络、轨道交通线路及复合交通网络拓扑结构对应的邻接矩阵分别输入 MATLAB，计算网络的拓扑特征指标，如表 4 所示。

表 4 呼包鄂城市群交通网络拓扑特征指标的变化

Tab. 4 Topological property of traffic networks of Hohhot - Baotou - Erdos city agglomeration

类别	节点数	平均度	平均路径长度	聚集系数
道路交通网络	203	3.648 5	3.441 8	0.576 5
轨道交通线路	24	1.952 5	7.852 7	0
复合交通网络	217	3.451 6	3.868	0.398 2

为了分析轨道线路的叠加对节点、边性能的影响，现对城市群复合交通网络中的部分节点、边逐个攻击，并且与其叠加之后的复合节点、边进行特性对比，结果如表 2 和表 3 所示。

从表 2 可看出，如攻击呼和浩特汽车西站，轨道线路的叠加使得全网效率相对下降率由 0.020 1 减少到 0.014 2，其他节点也呈现出相似的变化规律，表明网络叠加减小了这些节点对网络脆弱性的影响程度。同时，复合后节点的介数都有了不同程度的增大，说明其承受的交通压力增大。对城市群复合交通网络中的部分边进行相似的对比分析，发现对于同样的边而言，失效后对复合交通网络造成的影响更小，同样说明网络的叠加减小了这些边对网络脆弱性的影响程度。因此，加强对复合节点交通流的疏导显得尤为重要。

从表 4 可以看出，在网络性能方面，复合交通网络的平均度及平均路径长度与道路网络相差无几。复合交通网络明显弥补了轨道线路可达性差的缺陷，通过叠加复合增加了节点的连边数，提高了其可达性，同时还集合了轨道运输运量大、安全性高的优势。

道路网络聚集系数较大，说明网络聚集程度较高，大多数节点的邻居节点间的实际连边数较多，某节点失效对网络影响较小，网络容错性高、脆弱性弱。轨道线路聚集系数为 0，说明连通性较差、容错性低、脆弱性强，因此线路结构十分不稳定，一旦某节点发生故障将直接失联。而复合交通网络明

显弥补了轨道线路脆弱性强的缺陷,通过叠加复合,可提高其连通能力及抵抗突发灾害的能力。因此,复合交通网络是道路、轨道运输方式优势互补的结果,性能明显优于单一运输方式网络。

5.3 基于不同攻击策略节点失效下的复合交通网络脆弱性对比分析

根据提出的脆弱性测度指标,利用 MATLAB 仿真随机攻击和蓄意攻击下节点失效的呼包鄂城市群复合交通网络脆弱性,网络初始效率为 0.148 8,结果如图 4 所示。

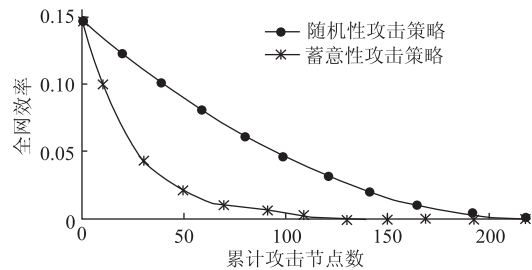


图 4 累计攻击节点下的复合交通网络全网效率
Fig. 4 Efficiency of compound traffic network under cumulative attack nodes

从图 4 可以明显看出,两种不同攻击策略导致节点失效,全网效率的变化速度差异较大。蓄意攻击网络节点数量累计达 8% 时,全网效率下降一半,累计攻击节点数量达 55% 时,网络濒临瘫痪状态;随机攻击网络节点数量累计达 30% 时,网络效率才下降一半,当累计攻击节点数量达 90% 时,网络才濒临瘫痪状态。由此可见,网络在蓄意性攻击策略下表现得更为脆弱,该种攻击策略更易暴露城市群复合交通网络的脆弱性。原因是其每次的攻击对象都是网络中度值最大的节点,它们的失效会导致剩余节点间的连边减少,任意两节点间的平均路径长度增大,因而具有更强的攻击性。

5.4 复合交通网络关键节点识别

为了找出呼包鄂城市群复合交通网络中脆弱性较高的关键节点,采用 MATLAB 对网络中的 217 节点逐个攻击。首先攻击节点 1,分析网络脆弱性测度指标的变化,之后攻击节点 2,此时将节点 1 恢复健全,再次分析测度指标。以此类推,直至攻击完网络中全部节点,结果如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以明显看出,对于呼包鄂城市群复合交通网络而言,某节点失效导致全网效率变化较大的节点脆弱性较高,它们的损坏对网络结构造成的伤害较大。这些节点就是关键站点。为了提

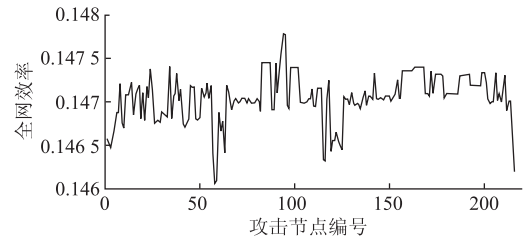


图 5 攻击复合网络节点及其对应的全网效率
Fig. 5 Attack nodes of compound traffic network and corresponding network efficiency

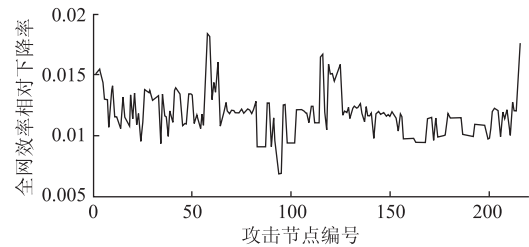


图 6 攻击复合网络节点及其对应的全网效率相对下降率
Fig. 6 Attack nodes of compound traffic network and corresponding relative reduce rates of network efficiency

高网络的可靠性,需重点建设和保护这些脆弱性高的站点。表 5 列出了呼包鄂城市群复合交通网络脆弱性较高的 10 个站点。

表 5 复合交通网络站点失效后的指标值
Tab. 5 Indicator values after failure of key nodes in compound traffic network

编号	节点名称	全网效率变化量	全网效率相对下降率	节点度	点介数
58	呼和浩特长途汽车站	0.002 7	0.018 3	25	10 872. 38
59	呼和浩特通达汽车站	0.002 7	0.018 2	33	10 325. 3
217	东胜汽车站 - 火车西站	0.002 6	0.017 4	16	9 850. 14
116	达拉特旗汽车站 - 火车西站	0.002 5	0.016 6	13	9 126. 68
115	呼和浩特汽车西站 - 火车站	0.002 5	0.016 5	32	11 512. 15
63	包头东河汽车站 - 火车东站	0.002 4	0.016 1	19	4 014. 1
57	鄂托克旗汽车站	0.002 4	0.016 1	9	3 987. 21
125	三道河汽车站	0.002 3	0.015 8	4	2 546. 37
119	鄂托克前旗汽车站	0.002 3	0.015 8	13	2 415. 31
3	包头昆区汽车站	0.002 3	0.015 5	21	2 062. 69

表 5 数据表明,拥有较大度值和介数的节点对网络脆弱性的影响不一定较大,如呼和浩特汽车西站 - 火车站度值为 32,介数为 11 512. 15,它的失效

会使全网效率下降 0.002 5, 而度值、介数均比其小的呼和浩特长途汽车站, 它的失效反而造成全网效率下降 0.002 7。因此, 在网络优化过程中不必对所有高度值和高介数的站点进行防护, 应根据站点脆弱性的高低程度进行分层管理, 重点保护脆弱性较高的站点。

5.5 基于不同攻击策略边失效下的复合交通网络脆弱性对比分析

利用 MATLAB 仿真随机攻击和蓄意攻击后边失效的呼包鄂城市群复合交通网络脆弱性, 结果如图 7 所示。

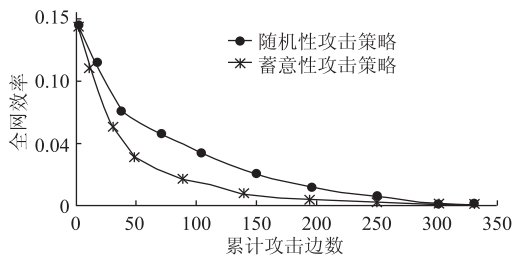


图7 累计攻击边下的复合交通网络全网效率

Fig.7 Network efficiency of compound traffic network under cumulative attack edges

由图 7 可同样看出, 两种攻击策略下的全网效率变化速度差异较大。累计攻击相同数量的边, 蓄意攻击使全网效率下降更为迅速, 网络更快达到瘫痪状态。结合图 4 可知, 相同攻击策略下, 攻击节点的攻击性要明显强于攻击边。考虑到城市群复合交通网络本身是多种运输方式网络叠加复合的结果, 攻击边仅会导致某条线路失效, 这时节点间的连通仍可通过其他线路实现, 虽然网络的可达性可能会有所下降, 但网络的连通能力变化较小, 对网络脆弱性的影响便很小。而攻击节点, 不仅会直接删除该节点, 同时还会将与该节点相连的所有边删除, 因此, 以节点为攻击对象更易暴露城市群复合交通网络的脆弱性。

5.6 复合交通网络关键边识别

为了找出呼包鄂城市群复合交通网络中脆弱性较高的关键边, 采用 MATLAB 对网络中的 347 条边采逐条攻击, 结果如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可同样看出, 网络中不同边的脆弱性存在差异, 某条边失效导致全网效率变化较大的边脆弱性较高, 它们就是网络中的关键边。表 6 列出了呼包鄂城市群复合交通网络脆弱性较高的 10 条关键边, 可以明显看出, 边介数越大并非对复合交通网络脆弱性影响就越大。

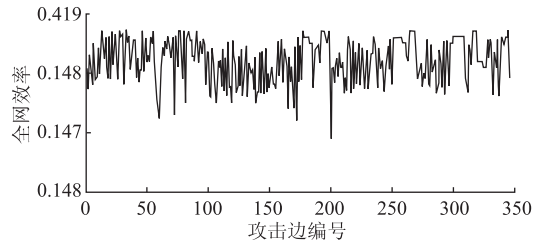


图8 攻击复合交通网络边及其对应的全网效率

Fig.8 Attack edges of compound traffic network and corresponding network efficiency

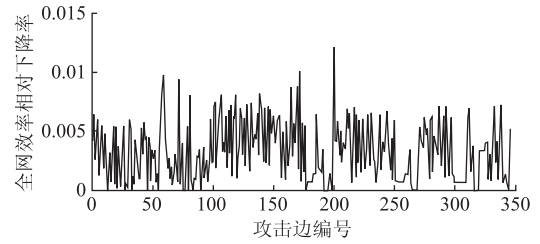


图9 攻击复合交通网络边及其对应的全网效率相对下降率

Fig.9 Attack edges of compound traffic network and corresponding relative reduce rate of network efficiency

表 6 复合交通网络边失效后的指标值

Tab.6 Indicator values after failure of key edges in compound traffic network

编号	边名称	全网效率 变化量	全网效率 相对下降率	边介数
200	包头东河汽车站 - 火车东站 - 固阳县汽车站	0.001 8	0.012 1	3 201.22
172	呼和浩特通达汽车站 - 固阳县汽车站	0.001 5	0.010 1	2 667.14
60	呼和浩特汽车西站 - 火车站 - 固阳县汽车站	0.001 5	0.010 1	2 589.16
59	呼和浩特汽车西站 - 火车站 - 达拉特旗汽车站 - 火车西站	0.001 3	0.008 7	2 476.5
72	东胜汽车站 - 火车西站 - 杭锦旗汽车站	0.001 3	0.008 7	1 200.89
165	东胜汽车站 - 火车西站 - 乌审旗汽车站	0.001 2	0.008 4	840.84
170	呼和浩特汽车西站 - 火车站 - 土默特右旗汽车站	0.001 2	0.008 4	1 145.4
107	包头东河汽车站 - 火车东站 - 土默特右旗汽车站	0.001 2	0.008	958.14
119	呼和浩特汽车西站 - 火车站 - 伊金霍洛旗汽车站	0.001 2	0.008	897.16
139	呼和浩特通达汽车站 - 和林县汽车站	0.001 2	0.008	1 026.42

通过以上分析,得到了呼包鄂城市群复合交通网络的关键站点和线路,为了保障网络的可靠性,需重点防护,减少其自身基础设施折旧老化发生路面断裂、指挥信号设备毁坏等内部故障的概率,而且还应加强自身快速复原能力。倘若遭受不受控制的突发灾害,要在最短时间内协调人力资源和物力资源对其进行修复,防止网络陷入局部瘫痪。同时,对被破坏站点和线路的交通流进行有效疏导,避免交通流无规律分流造成其他路段拥堵,进一步扩大网络失效范围。

5.7 实证总结

经过上述实证研究,可以得到如下结论:

(1) 通过对呼包鄂城市群交通网络拓扑特征对比分析可知,轨道线路结构单一,通过叠加复合明显弥补了其脆弱性强的缺陷。同时复合交通网络集合了道路运输可达性高、灵活性强及轨道运输安全性高、运输量大的优势,性能明显优于单一运输方式网络。因此,复合交通网络是不同运输方式优势互补的结果,可以有效降低单一运输方式网络的脆弱性。

(2) 通过分别仿真节点失效和边失效下复合交通网络面临不同攻击策略表现出的脆弱性,可以明显看出,对于呼包鄂城市群而言,攻击节点的攻击性强于攻击边。同时,不论攻击对象是节点还是边,蓄意攻击更易暴露网络的脆弱性。因此,通过对识别出的关键站点和线路加强防护,可以进一步降低城市群复合交通网络的脆弱性,减小部分站点或线路失效导致其瘫痪的风险。

(3) 对呼包鄂城市群复合交通网络重要节点与边进行识别,发现对于节点而言,其度、介数较大的节点对网络脆弱性影响不一定较大;同样对于边而言,边介数越大也并非对网络脆弱性的影响就越大。因此,在对站点和线路进行重要性评估时,要综合考虑对网络脆弱性的影响程度,这会更加利于网络的高效运行。

6 结论

本文基于复杂网络理论,对城市群复合交通网络结构进行了深入分析并提出其模型构建方法,确定了脆弱性测度指标和具体攻击策略;以呼包鄂城市群为例进行了实证研究,将道路交通网络和轨道交通线路进行叠加,构建了复合交通网络。对比分析发现,轨道交通线路的叠加有效降低了网络的脆弱性。这不仅具有很强的实用价值,还可为呼包鄂城市群未来新的交通线路设计提供直接参考依据,

而且对于未来我国城市群内不同运输方式间的协调发展研究具有重要的理论意义。

参考文献:

References:

- [1] HOLMGREN Å. Vulnerability Analysis of Electric Power Delivery Networks [R]. Stockholm: Mark Och Vatten, 2004.
- [2] JENELIUS E, MATSSON L G. Developing a Methodology for Road Network Vulnerability Analysis [R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006.
- [3] CHEN B Y, LAM W H K, SUMALEE A, et al. Vulnerability Analysis for Large-scale and Congested Road Networks with Demand Uncertainty [J]. Transportation Research Part A: Policy & Practice, 2012, 46 (3): 501 - 516.
- [4] TAYLOR M A P, SEKHAR S V C, D'ESTE G M. Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks [J]. Networks and Spatial Economics, 2006, 6 (3): 267 - 291.
- [5] 张勇,屠宁雯,陶俊杰. 道路交通网络脆弱性动态辨识方法 [J]. 交通运输工程学报, 2014, 26 (5): 74 - 81.
ZHANG Yong, TU Ning-wen, TAO Jun-jie. Identification Method of Dynamic Road Traffic Network Vulnerability [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 26 (5): 74 - 81.
- [6] 黄大荣,沈利兵,赵玲. 基于复杂网络理论的城市路网脆弱性研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2015 (1): 110 - 115.
HUANG Da-rong, SHEN Li-bing, ZHAO Ling. Vulnerability Analysis of Urban Network Based on Complex Theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2015 (1): 110 - 115.
- [7] ERATH A, BIRDSALL J, AXHAUSEN K W, et al. Vulnerability Assessment Methodology for Swiss Road Network [J]. Transportation Research Record, 2009, 2137: 118 - 126.
- [8] 涂颖菲,杨超,陈小鸿. 路网拓扑脆弱性及关键路段分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (3): 364 - 367.
TU Ying-fei, YANG Chao, CHEN Xiao-hong. Analysis of Road Network Topology Vulnerability and Critical Links [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2010, 38 (3): 364 - 367.
- [9] 黄威. 城市群道路网络系统可靠性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

- HUANG Wei. Research on Road Network Reliability of Metropolitan Area [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [10] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston Subway a Small-world Network? [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2002, 314 (1): 109–113.
- [11] 袁竞峰, 李启明, 贾若愚, 等. 城市地铁网络系统运行脆弱性分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22 (5): 92–98.
- YUAN Jing-feng, LI Qi-ming, JIA Ruo-yu, et al. Analysis of Operation Vulnerabilities of Urban Metro Network System [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22 (5): 92–98.
- [12] 袁朋伟, 宋守信, 董晓庆, 等. 城市轨道交通系统脆弱性因素辨识模型研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014 (5): 110–117.
- YUAN Peng-wei, SONG Shou-xin, DONG Xiao-qing, et al. Vulnerability Identification Model of Urban Rail Transit System [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, (5): 110–117.
- [13] 袁若岑, 王丽琼, 温志伟. 基于攻击策略的城市轨道交通网络脆弱性研究 [J]. *城市轨道交通研究*, 2015, 18 (8): 57–61.
- YUAN Ruo-cen, WANG Li-qiong, WEN Zhi-wei. On the Vulnerability of Urban Rail Transit Network Based on Different Attack Strategies [J]. *Urban Mass Transit*, 2015, 18 (8): 57–61.
- [14] 叶青. 基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2012, 2 (2): 122–126.
- YE Qing. Vulnerability Analysis of Rail Transit Based on Complex Network Theory [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 2 (2): 122–126.
- [15] 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.
- LIU Zhi-qian, SONG Ruo. Reliability Analysis of Guangzhou Rail Transit with Complex Network Theory [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10 (5): 194–200.
- [16] 王国明. 城市群道路网络特性及演化研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- WANG Guo-ming. A Study on Property and Evolution of Road Network of Urban Agglomeration [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [17] 曾明华, 李夏苗, 刘大鹏. 城市群交通网络特性 [J]. *系统工程*, 2009, 27 (3): 10–15.
- ZENG Ming-hua, LI Xia-miao, LIU Da-peng. The Properties of Traffic Networks in Urban Clusters [J]. *Systems Engineering*, 2009, 27 (3): 10–15.
- [18] 赵漫. 基于复杂网络理论的城市交通网络研究 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.
- ZHAO Man. Research of Characteristics of Urban Transport Network Based on Complex Network Theory [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2012.

(上接第93页)

- CAI Jian, XU Jin. Research on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Column Strengthened by Circular Steel jacketing Subjected to Axial Loads [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2005, 2 (4): 62–67.
- [12] 卓卫东, 范立础. 桥梁延性抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 197–198.
- ZHUO Wei-dong, FAN Li-chu. Bridge Ductility Seismic Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 197–198.
- [13] 范立础. 高架桥抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- FAN Li-chu. Seismic Design of Elevated Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [14] 王吉忠, 王苏岩, 黄承逵. CFRP 加固高强混凝土柱抗震性能和延性研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2008, 48 (5): 708–714.
- WANG Ji-zhong, WANG Su-yan, HUANG Cheng-kui. Research on Ductility and Earthquake-resistance of High-strength Concrete Column Confined by CFRP [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, 48 (5): 708–714.
- [15] 卓卫东, 孙颖, 谷音. 长大公路混凝土连续梁桥抗震方案比选 [J]. *土木工程与管理学报*, 2011, 28 (3): 313–321.
- ZHUO Wei-dong, SUN Ying, GU Yin. Comparison of Seismic Design Schemes for Long-span Concrete Continuous Highway Girder Bridges [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 28 (3): 313–321.