

1-2-2019

## Invulnerability Simulation Analysis of Compound Traffic Network in Urban Agglomeration

Chengbing Li

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

Wei Lei

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

Tianwei Lu

*3.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*

Gao Wei

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

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Involnerability Simulation Analysis of Compound Traffic Network in Urban Agglomeration

## Abstract

**Abstract:** To ensure the security operations of urban agglomeration transportation system, *the perspective on compound network is used to explore the involnerability of urban agglomeration traffic network. The site mapping method is used to build the model of weighted compound traffic network in city agglomeration. The traditional involnerability metrics is revised and the attack strategies are determined according to the structure of the network.* Hu-Bao-E city agglomeration is taken as an example to *build the weighted compound traffic network model which is composed of road network and rail transit network, simulating the involnerability and identifying key nodes in the city agglomeration.* Results show that the construction of compound traffic network effectively improves the involnerability of single mode traffic network and the strengthening protection of the key nodes can improve the involnerability of compound traffic network in city agglomeration.

## Keywords

city agglomeration, weighted compound traffic network, involnerability, key nodes

## Recommended Citation

Li Chengbing, Wei Lei, Lu Tianwei, Gao Wei. Involnerability Simulation Analysis of Compound Traffic Network in Urban Agglomeration[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 489-496.

## 城市群交通网络抗毁性仿真研究

李成兵<sup>1</sup>, 魏磊<sup>2</sup>, 卢天伟<sup>3</sup>, 高巍<sup>1</sup>(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;  
3.北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 为保障城市群交通运输系统安全运营, 以复合的视角探索城市群交通网络抗毁性。采用站点映射法构建城市群加权复合交通网络模型。针对城市群加权复合交通网络结构, 对传统抗毁性测度指标进行修正并确定攻击模式。以呼包鄂城市群为例进行实证研究, 构建道路-轨道加权复合交通网络模型, 对网络抗毁性进行仿真, 识别路网中的关键站点。结果表明: 城市群复合交通网络的构建有效提高了单一运输方式网络的抗毁性, 通过对识别出的关键站点加强防护提高城市群复合交通网络的抗毁性。

**关键词:** 城市群; 加权复合交通网络; 抗毁性; 关键站点

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0489-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802016

## Invulnerability Simulation Analysis of Compound Traffic Network in Urban Agglomeration

Li Chengbing<sup>1</sup>, Wei Lei<sup>2</sup>, Lu Tianwei<sup>3</sup>, Gao Wei<sup>1</sup>(1.School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia 010070, China;  
2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
3.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To ensure the security operations of urban agglomeration transportation system, *the perspective on compound network is used to explore the invulnerability of urban agglomeration traffic network. The site mapping method is used to build the model of weighted compound traffic network in city agglomeration. The traditional invulnerability metrics is revised and the attack strategies are determined according to the structure of the network. Hu-Bao-E city agglomeration is taken as an example to build the weighted compound traffic network model which is composed of road network and rail transit network, simulating the invulnerability and identifying key nodes in the city agglomeration.* Results show that the construction of compound traffic network effectively improves the invulnerability of single mode traffic network and the strengthening protection of the key nodes can improve the invulnerability of compound traffic network in city agglomeration.

**Keywords:** city agglomeration; weighted compound traffic network; invulnerability; key nodes

## 引言

随着城市群的飞速发展, 交通网络结构日益复

杂, 网络的优化和维护面临越来越多的挑战。如近年来, 城市群内自然灾害、客流突增等异常事件频繁发生, 经常造成部分站点失效导致整个交通网络瘫痪, 严重阻碍城市群正常运转。当异常事件发生时, 为了将站点发生变化给用户造成的损失最小化, 不妨提前识别并量化城市群内各站点网络抗毁性的影响, 从而制定科学合理的应急预案, 提高



收稿日期: 2016-10-21 修回日期: 2017-05-30;  
基金项目: 内蒙古自然科学基金(2014BS0501);  
作者简介: 李成兵(1982-), 男, 安徽安庆, 博士, 副教授, 研究方向为综合运输系统优化; 魏磊(1994-), 男, 内蒙古巴彦淖尔, 硕士生, 研究方向为交通仿真。

<http://www.china-simulation.com>

网络抵抗突发灾害的能力。因此,对城市群交通网络抗毁性进行深入研究对于保障城市群交通运输系统安全运营具有很强的现实作用。

目前,国内外许多学者已经对交通网络抗毁性进行了部分研究。文献[1-2]提出先将抗毁性的研究转为随机图上的渗流问题,再利用渗流理论研究复杂网络的抗毁性;文献[3]建立了随机失效模型和恶意攻击模型,为日后抗毁性研究开辟了新思路;文献[4]研究了随机性攻击和蓄意性攻击下的局域世界化网络抗毁性,得出局域世界的大小规模可以直接影响网络异构性;文献[5]研究了当面临连续不断的攻击波时,复杂网络所表现出的抗毁性;文献[6]以危险品道路运输网络为研究对象,对其抗毁性进行了仿真,发现该网络的抗毁性是由少数节点和边维系的;文献[7]采取不同的攻击模式对城市公交网络抗毁性进行分析,得出了连续攻击节点数目越少网络抗毁越差的结论;文献[8-9]对城市轨道交通网络的抗毁性进行仿真,给出了抗毁性优化的具体措施。

综上所述,对于抗毁性的研究,国内外学者大多局限于基于图论的复杂网络及城市内单种运输方式网络。殊不知,随着城镇化进程中城市数量的不断增加,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,随着交通需求的持续上升,不同运输方式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,构建城市群加权复合交通网络便可实现它们的优势互补。基于此,本文提出构建城市群加权复合交通网络模型的具体方法,在对比分析网络结构特性的基础上,研究不同攻击模式下网络表现出的抗毁性,并分别量化各节点失效对网络抗毁性造成的影响,识别出关键站点,从而为促进城市群内运输方式一体化以提高网络抗毁性提供有效依据。

## 1 城市群加权复合交通网络模型构建

根据城市群内交通基础设施布局现状,采用“站点映射法”分别以城市群内不同运输方式的所

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子网络模型。之后,对它们进行加权并对网络叠加,构建城市群加权复合交通网络模型。若叠加过程中节点间存在多条边相连,则对所有边权求和得该边权重,并将其视为一条边相连。若某节点可到达另一节点,则认为另一节点也可到达该节点,即城市群交通网络是无向网络。因此,城市群加权复合交通网络是由城市群内道路、轨道、水运、航空任意几种运输方式子网和子网间的连边构成的,具有节点、连边、边权、点权、连接方式五要素,记作  $C(V, E, W, H, F)$ 。

式中:  $V$  表示节点集,  $V = \bigcup_{i=1}^m V(v_i)$ ,  $V(v_i)$  表

示城市群内第  $i$  个交通子网节点集合,  $m$  表示城市群内交通子网数目;  $E$  表示边集,  $E = \bigcup_{i,j=1}^m E(v_i, v_j)$ ,

当  $i=j$  时,两节点在同一子网内,  $E(v_i, v_j)$  等价于  $E(v_i)$ , 表示城市群某一交通子网内的连边。当  $i \neq j$  时,两节点不在同一子网内,  $E(v_i, v_j)$  表示城市群交通子网间的连边;  $W$  表示边权的集合,用权重矩阵  $W = (w_{ij})_{n \times n}$  表示城市群加权复合交通网络中每条边的权重,  $w_{ij}$  表示节点  $v_i$  和  $v_j$  间连边的权重,  $n$  表示节点总数。若权重值都相等,则变为无权网络。本文以每条边的最大流量作为城市群交通子网初始边权,由于不同运输方式对复合交通网络影响程度存在差异,因此,需运用熵权法确定不同交通子网对于复合交通网络的重要程度,将重要程度与初始边权之积作为城市群加权复合交通网络的最终边权;  $H$  表示点权的集合,点权即与其相连所有边的边权之和;  $F$  表示节点与边的连接关系,

$F = \bigcup_{i,j=1}^m F_{ij}$ , 当  $i=j$  时,两节点在同一子网内,  $F_{ij}$

等价于  $F_i$  表示城市群某一交通子网内的连接关系。当  $i \neq j$  时,两节点不在同一子网内,  $F_{ij}$  是城市群交通子网间的连接关系。

## 2 城市群交通网络统计特性指标

目前,已有大量研究表明交通网络属于复杂网

络<sup>[10-13]</sup>。在城市群交通网络中, 节点度表示某个站点以线路连接着的其他站点的数目之和。

平均路径长度是任意两节点距离的平均值。其中距离指连接两节点最短路径上的边数。若网络中节点数目为  $n$ , 连接网络内任意两节点最短路径的边数为  $d_{ij}$ , 则用  $L$  表示网络的平均路径长度:

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

聚集系数可分为局部聚集系数和网络聚集系数, 它可以表示网络中节点间的联系状况。网络的聚集系数即网络中所有节点聚集系数的平均值。若  $k_i$  表示  $v_i$  的邻居节点数目,  $e_i$  表示其邻居节点间的实际连边数, 则用  $C_i$  表示该节点的聚集系数:

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

### 3 城市群复合交通网络抗毁性测度

城市群复合交通网络抗毁性测度与城市交通网络存在很大差异。传统的城市交通网络服务范围集中, 对其进行抗毁性测度以全网效率为重要指标。而城市群复合交通网络涵盖范围大, 运行距离长, 由于不同运输方式网络的叠加, 使得复合交通网络节点数量多、连边多。某一节点失效造成节点间的最短路径距离变化很小, 全网效率变化便很不明显。因此, 在仿真过程当中, 全网效率不能很好地反映城市群复合交通网络抗毁性的变化。同时, 考虑到城市群内核心城市的存在会造成复合交通网络不同范围内的节点性能差距较大。若采取城市交通网络抗毁性研究方法, 只追求提高全网效率以改善网络抗毁性, 即使大力建设城市群交通网络, 最终只会顾此失彼, 进一步增大不同范围网络之间的性能差距, 导致网络整体更加脆弱。

当遭受异常事件影响时, 应该将城市群复合交通网络真实的损毁程度作为抗毁性测度的标准。网络的损毁程度越大, 满足客货运输需求的性能就越低, 相应的抗毁性便越弱。子图数便可将这一损毁

程度量化表示。当遭受异常事件影响时, 原本处于连通状态的网络会被迅速损毁成多个节点数不同的子图, 这些子图的数量即子图数。它可以直观反映城市群复合交通网络的真实损毁程度。因此, 选其作为抗毁性测度的第一个指标。

此外, 所有子图当中, 节点数最多且保持连通的子图称为最大连通子图。它的相对规模大小可以从另一方面反应网络的损毁程度。最大连通子图相对规模越小, 网络的连通能力越差, 损毁程度便越高, 相应的抗毁性便越弱。可以选取最大连通子图相对规模作为城市群复合交通网络抗毁性测度的另一个指标。考虑到城市群复合交通网络中不同节点之间的差异较大, 权值不同, 而传统的最大连通子图相对规模仅用网络遭受攻击后最大连通子图中的节点数占初始网络节点数的比例来衡量网络抗毁性, 无法刻画节点、连边权值的差异对网络抗毁性造成的影响。所以, 本文对该测度指标进行了修正, 用网络遭受攻击后, 最大连通子图中所有节点的点权之和占初始网络中所有节点的点权之和的比例来衡量网络抗毁性。用  $S$  表示修正最大连通子图相对规模:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N'} H_i}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad (3)$$

式中:  $N'$  表示网络遭受异常事件影响后最大连通子图中的节点数;  $N$  表示未遭受异常事件影响时网络中的节点数;  $H_i$  表示第  $i$  个节点的点权。当  $S=1$  时, 网络处于全连通状态, 抗毁性最强。

### 4 城市群复合交通网络的攻击模式

攻击模式按照攻击对象可分为节点失效和边失效。攻击节点不仅会直接删除该节点而且还会将与该节点相连的所有边同时删除, 而攻击边仅会导致某条线路失效。考虑到城市群复合交通网络本身是多种运输方式子网络复合的结果, 某条线路失效, 节点之间的连通仍可通过其他线路实现。虽然

网络的可达性有所下降,但网络实际连通能力变化较小,对网络抗毁性的影响便很小。因此,攻击节点更易降低城市群复合交通网络的抗毁性。在此仿真节点失效下的城市群复合交通网络抗毁性,采取的攻击模式为随机性攻击和蓄意性攻击:

(1) 随机性攻击即每次随机选取网络中的一个节点进行攻击,直至网络中所有节点被攻击完为止;

(2) 蓄意性攻击即每次选择性地对网络中的节点进行攻击,直至网络中所有节点被攻击完为止。本文选取的具体攻击策略为动态最大度数攻击,即按照度数将所有节点由大到小排序,每次选取数值最大的节点进行攻击,每攻击完一次对节点重新排序。

城市群复合交通网络抗毁性仿真流程如图1所示。

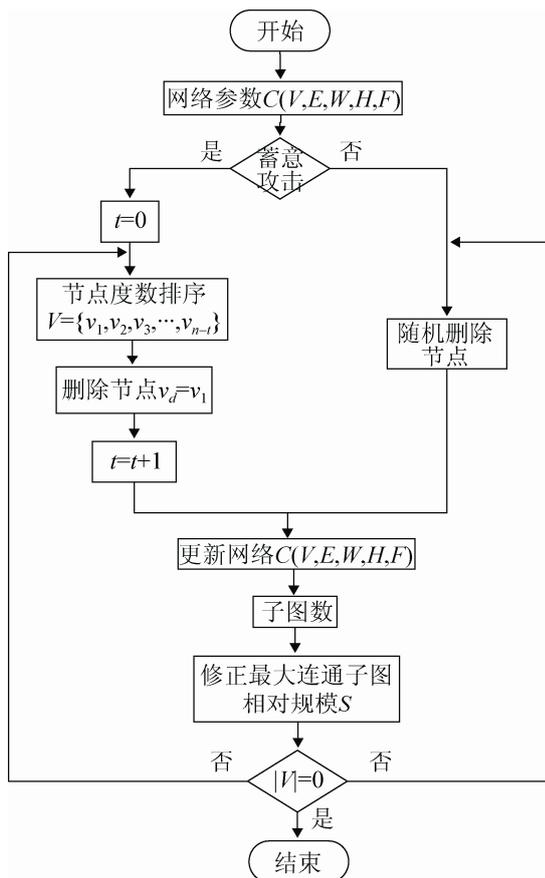


图1 城市群复合交通网络抗毁性仿真流程  
Fig. 1 Simulation process of invulnerability of city agglomeration compound traffic network

## 5 呼包鄂城市群实例仿真

### 5.1 加权复合交通网络模型的构建

#### 5.1.1 加权道路交通子网络

选取内蒙古自治区呼包鄂城市群为仿真对象,按照“站点映射法”构建道路交通子网络,记作 $C_1(V,E,W,H,F)$ 。其中,城市群内所有汽车站构成节点集 $V(v_1)$ , $|V(v_1)|=203$ ;边集 $|E|=316$ ;连接关系 $F$ 即两站点之间通车; $W$ 为初始边权,表示线路的最大客流量即开行班车的标记载客座位数与发车频率之积。

#### 5.1.2 加权轨道交通子网络

按“站点映射法”构建呼包鄂城市群轨道交通子网络,记作 $C_2(V,E,W,H,F)$ 。其中城市群内所有火车站构成节点集 $V(v_2)$ , $|V(v_2)|=24$ ;边集 $|E|=23$ ;连接关系 $F$ 即两站点位于同一开行列车线路且地理位置相邻; $W$ 为初始边权,同样表示线路的最大客流量即开行列车载客最大数量与列车开行频率之积。

#### 5.1.3 加权复合交通网络

由于呼包鄂城市群位于西北部内陆地区,无水路运输网络且航空运输网络单一,承担城市群内的客货运输比例较小。故以道路交通子网络为基底网,对其加载轨道交通子网络,构建加权复合交通网络,记作 $C(V,E,W,H,F)$ 。其中,节点集 $V=V(v_1)\cup V(v_2)$ , $|V|=227$ ;边集 $E=E(v_1)\cup E(v_2)\cup E(v_1,v_2)$ , $|E|=355$ ;连接关系 $F$ 即城市群内同一城市不同类型站点(汽车站、火车站)以城市道路网相连; $W$ 为边权,表示运输方式重要程度与初始边权之积。

### 5.2 复合交通网络与其交通子网网络特性对比分析

将道路子网络、轨道子网络及复合交通网络拓扑结构对应的邻接矩阵分别输入 MATLAB,计算复杂网络统计特性参数,结果如表1所示。

表 1 呼包鄂城市群交通网络复杂网络统计特性  
Tab.1 Traffic networks statistical properties of complex networks of Hu-Bao-E city agglomeration

交通网络类别	节点数	平均度	平均路径长度	聚集系数
道路交通子网络	203	3.648 5	3.441 4	0.576 5
轨道交通子网络	24	1.952 5	7.352 6	0
复合交通网络	227	3.451 6	3.867 6	0.398 2

(1) 平均度表示城市群内站点开行的平均线路数。从表 1 可看出, 道路子网络的平均度为 3.648 5, 复合交通网络的平均度为 3.451 6, 两者相差无几, 而轨道子网络平均度仅为 1.952 5。这表明城市群道路子网络和复合交通网络中, 平均每个站点大约有 3 条线路可供选择, 与轨道子网络相比线路更为多样化。

(2) 平均路径长度表示任意两节点距离的平均值, 即城市群内某一站点到达另一站点平均需经过的站点数。从表 1 可看出, 道路子网络的平均路径长度为 3.441 4, 复合交通网络的平均路径长度为 3.867 6, 两者无明显差距, 而轨道子网络的平均路径长度高达 7.352 6。这表明城市群复合交通网络中某站点到达另一站点平均需经过的站点个数要远小于轨道子网络。因此, 城市群复合交通网络可达性明显优于轨道子网络。

(3) 聚集系数表示网络中节点间的联系状况。聚集系数越大, 表明节点聚集程度越高。从表 1 可看出, 道路子网络的聚集系数较大, 说明网络较为紧密。轨道子网络的聚集系数为 0, 究其原因是由于城市群内与同一火车站直接相连的两站点之间, 没有铁路线路再次将其相连。这说明轨道子网络结构十分不稳定, 网络抗毁性较差, 某一节点发生故障将与网络直接失联。而复合交通网络明显弥补了轨道子网络抗毁性差的缺陷。通过叠加增加了轨道子网络中站点间的连边数, 同时还集合了轨道运输方式运量大、安全性高的优势。

因此, 呼包鄂城市群复合交通网络是道路、轨道子网络优势互补的结果。

### 5.3 复合交通网络与其交通子网节点特性对比分析

为了对比分析轨道交通子网叠加后, 节点性能

的变化情况, 现对呼包鄂城市群复合交通网络和道路交通子网的所有节点进行攻击, 选出对修正最大连通子图相对规模和子图数影响较大的部分节点, 如表 2 所示。

表 2 呼包鄂城市群交通网络部分节点特性  
Tab.2 Node characteristics of Hu-Bao-E city agglomeration traffic network

节点名称	网络类型	修正最大连通子图相对规模	子图数
达拉特旗	复合交通网络	0.926 3	10
汽车站	道路交通子网	0.825 5	16
呼和浩特	复合交通网络	0.935 5	10
汽车西站	道路交通子网	0.895 2	12
固阳县	复合交通网络	0.949 3	12
汽车站	道路交通子网	0.923 6	11
包头东河	复合交通网络	0.949 3	8
汽车站	道路交通子网	0.898 5	12
呼和浩特	复合交通网络	0.963 1	3
长途汽车站	道路交通子网	0.825 6	8

由表 2 可以看出, 以达拉特旗汽车站为例, 轨道交通子网的叠加复合使得该节点在遭受攻击后, 网络的修正最大连通子图相对规模由 0.825 5 增大到 0.926 3, 子图数由 16 减少到 10, 其他节点也呈现出相似的变化规律, 即网络修正最大连通子图相对规模有了不同程度的增大、子图数有了不同程度的减小。表明轨道子网的叠加削弱了部分节点对城市群交通网络抗毁性的影响程度, 利于提高交通网络整体的抗毁性。

### 5.4 随机攻击模式下复合交通网络与其交通子网抗毁性对比分析

由于城市群轨道交通子网节点总数较少, 网络结构过于简单, 为了分析相互作用形成的道路-轨道复合交通网络是否有着更高的抗毁性, 因此只对比研究道路交通子网与复合交通网络的抗毁性测度指标变化情况。按照图 1 所示的抗毁性仿真流程, 采用 MATLAB 编程仿真随机性攻击模式下, 节点失效的呼包鄂城市群复合交通网络及其道路交通子网表现的抗毁性, 仿真结果如图 2、图 3 所示。

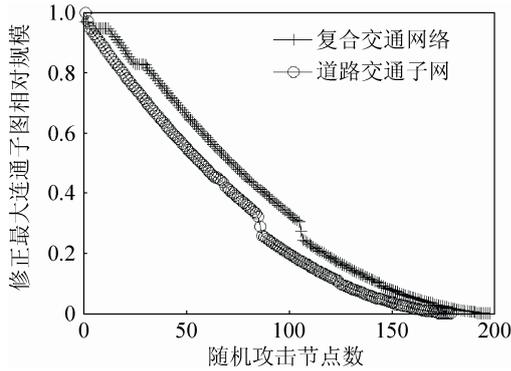


图2 随机攻击下网络修正最大连通子图相对规模变化对比  
Fig. 2 Corresponding update maximal connected subgraph under random attack

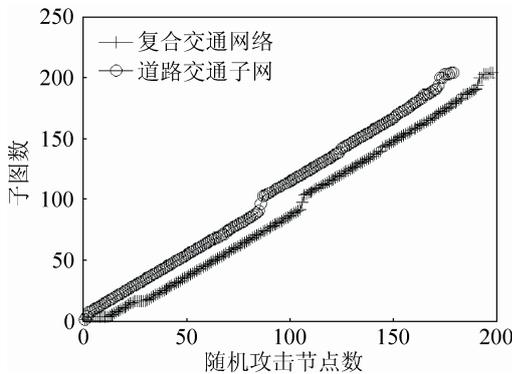


图3 随机攻击下网络子图数变化对比  
Fig. 3 Number of subgraphs under random attack

由图2、图3可以看出,呼包鄂城市群复合交通网络和道路交通子网未受异常事件影响时,网络修正最大连通子图相对规模均为1,子图数均为0。在累计移除节点过程中,复合交通网络和道路交通子网的修正最大连通子图相对规模都逐渐减小直至为零,其中复合交通网络的下降速度更为缓慢。而子图数都逐渐增大,其中道路交通子网的增加速度更为迅速。当道路交通子网被随机攻击节点数目达178时,网络的修正最大连通子图相对规模降为零,网络已基本瓦解,而复合交通网络的修正最大连通子图相对规模降为零,则需累计攻击199个节点。若同样攻击30个节点,道路交通子网的修正最大连通子图相对规模为0.7822,网络子图数为45,而复合交通网络的修正最大连通子图相对规模为0.8025,明显大于道路交通子网,且网络子图数为36,小于道路交通子网。因此,随机攻击下城市

群复合交通网络的抗毁性明显优于道路交通子网。

## 5.5 蓄意攻击模式下复合交通网络与其交通子网抗毁性对比分析

为了对比分析不同攻击模式下城市群交通网络表现出的抗毁性,按照图1所示的抗毁性仿真流程,采用MATLAB编程仿真蓄意性攻击模式下,节点失效的呼包鄂城市群复合交通网络及其道路交通子网表现出的抗毁性,仿真结果如图4、图5所示。

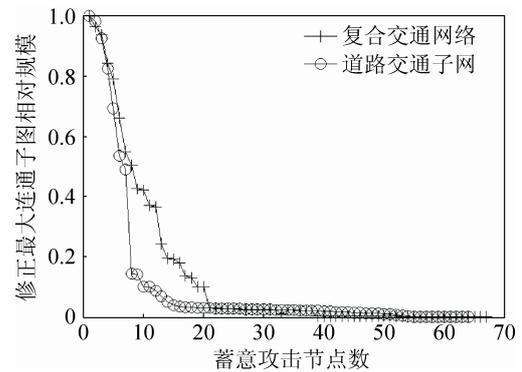


图4 蓄意攻击下网络修正最大连通子图相对规模变化对比

Fig. 4 Corresponding update maximal connected subgraph under deliberate attack

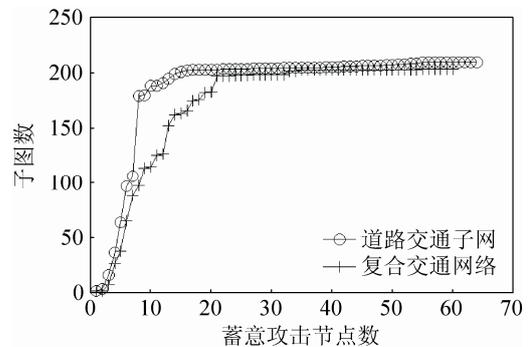


图5 蓄意攻击下网络子图数变化对比  
Fig. 5 Number of subgraphs under deliberate attack

由图4、图5可以看出,按照动态最大度数策略蓄意攻击网络节点,初状态和末状态即攻击节点数小于5和大于20时,复合交通网络与道路交通子网抗毁性表现较为接近。当攻击节点数介于5到20之间时,复合交通网络抗毁性明显优于道路交通子网,累计攻击相同数目节点,复合交通网络产生了更大的修正最大连通子图相对规模和更小

的子图数。因此, 蓄意攻击下城市群复合交通网络的抗毁性同样优于道路交通子网, 且复合交通网络的关键节点数目应该保持在 15 个左右, 这些关键节点维持着网络大部分的抗毁性。

## 5.6 复合交通网络关键站点的确定

为了找出对网络抗毁性影响作用较大的关键节点, 现对网络中的 227 个节点采用 MATLAB 逐个攻击。首先攻击编号为 1 的节点, 分析子图数及修正最大连通子图相对规模的变化, 之后攻击编号为 2 的节点, 此时将编号为 1 的节点恢复健全, 再次分析子图数及修正最大连通子图相对规模的变化。以此类推, 直至攻击完网络中全部节点。仿真结果如图 6、图 7 所示。

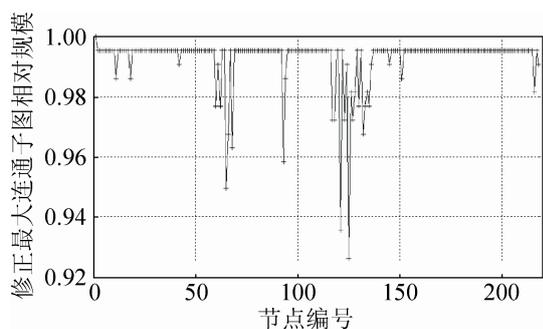


图 6 攻击复合交通网络节点及其对应的修正最大连通子图相对规模

Fig. 6 Attack the node of compound traffic network and its corresponding update maximal connected subgraph

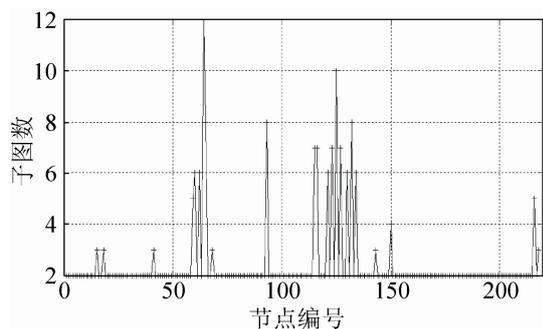


图 7 攻击复合交通网络节点及其对应的子图数

Fig. 7 Attack the node of compound traffic network and its corresponding number of subgraphs

由图 6、图 7 可以看出, 在逐个攻击节点的过程中, 某些节点的失效确实会让网络产生更多的子图数, 如节点 115 的失效使网络产生的子图数要远

远多于节点 68。但由于节点 115 失效产生的子图中, 网络结构大都是只包含少量节点的“孤岛”, 它的失效对网络整体的连通性影响较小, 所以节点 115 失效下的修正最大连通子图相对规模反而更大, 对于网络整体抗毁性的影响更小。但这些节点的失效也会直接“孤立”那些规模小、数量少节点, 阻断它们与外界的连通。于是, 综合子图数和修正最大连通子图相对规模进行有效评价, 得到了对呼包鄂城市群复合交通网络抗毁性影响较大的 15 个节点如表 3 所示。

表 3 对复合交通网络抗毁性影响较大的关键站点  
Tab. 3 Key nodes that greatly affect the invulnerability of compound traffic network

攻击节点编号	节点名称	修正最大连通子图相对规模	子图数
125	达拉特旗汽车站	0.926 3	10
121	呼和浩特汽车西站	0.935 5	6
64	固阳县汽车站	0.949 3	12
93	包头东河汽车站	0.949 3	8
68	呼和浩特长途汽车站	0.963 1	3
65	满都拉镇汽车站	0.961 7	8
132	百灵庙镇汽车站	0.967 7	8
115	包头东河汽车站	0.972 4	7
116	包头昆区汽车站	0.972 4	7
123	伊金霍洛旗汽车站	0.972 4	7
127	杭锦旗汽车站	0.977	7
60	托县汽车站	0.977	6
62	土默特右旗汽车站	0.977	6
130	鄂托克前旗汽车站	0.977	6
133	和林县汽车站	0.977	6

由于城市群内站点众多而防御资源有限, 不同站点的失效对网络抗毁性的影响存在很大差异。通过对这 15 个关键站点优先重点分配城市群内的防御资源, 可以有效提高呼包鄂城市群复合交通网络的抗毁性, 将异常事件造成的破坏程度降到最低。

## 5.7 仿真总结

对呼包鄂城市群复合交通网络统计特性进行分析之后, 发现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、运量大的优势, 性能明显优于单一运输方式网络, 道路运输方

式和轨道运输方式之间的协作可以有效提高城市群交通网络的抗毁性。由于呼包鄂城市群复合交通网络对蓄意攻击抗毁性弱,因此通过对识别出的关键站点加强防护,减少这些站点和与其直接相连的线路因其自身基础设施折旧老化发生路面断裂、指挥信号设备损坏等内部故障发生的概率可以进一步提高复合交通网络的抗毁性。

## 6 结论

本文基于复杂网络理论,以复合这样一种视角探索城市群交通网络抗毁性,基于节点、连边流量的差异提出城市群加权复合交通网络建模方法。同时,本文根据城市群交通网络的特点对传统的抗毁性测度指标进行了修正,构建了修正最大连通子图测度指标。并以呼包鄂城市群为仿真对象进行了实例仿真,将加权道路子网络和加权轨道子网络进行叠加构建加权复合交通网络模型。对其统计特性进行对比分析,发现复合交通网络是其子网络优势互补的结果。通过对该网络采取不同的攻击模式进行抗毁性仿真,研究了不同攻击模式下复合交通网络和道路交通子网抗毁性表现出的差异。最后,对网络中所有节点进行逐个攻击,找出了对网络抗毁性影响较大的关键站点,并提出了具体的维护建议。

通过实例仿真得出的这些结论,不仅具有很强的实用价值,可以为呼包鄂城市群交通网络的规划建设提供直接参考依据,保障呼包鄂城市群交通运输系统安全运营,而且可为今后城市群交通网络抗毁性的进一步研究奠定理论基础。

## 参考文献:

- [1] Callaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, et al. Network robustness and fragility: percolation on random graphs[J]. *Physical Review Letters* (S0031-9007), 2000, 85(25): 5468-5471.
- [2] Cohen R, Erez K, ben-Avraham D, et al. Resilience of the Internet to random breakdowns[J]. *Physical Review Letters* (S0031-9007), 2000, 85(21): 4626-4628.
- [3] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and error tolerance in complex networks[J]. *Nature* (S0028-0836), 2000, 406(6794): 387-482.
- [4] Sun Shiwen, Liu Zhouxin, Chen Zengqiang, et al. Error and attack tolerance of evolving networks with local preferential attachment[J]. *Physica A* (S0378-4371), 2007, 373(1): 851-860.
- [5] Tanizawa T., Paul G., Cohen R., Havlin S., Stanley H. E. Optimization of network robustness to waves of targeted and random attacks[J]. *Physical Review E* (S1550-2376), 2005, 71(4): 047101.
- [6] 种鹏云, 帅斌, 尹惠. 基于复杂网络的危险品运输网络抗毁性仿真[J]. *复杂系统与复杂科学*, 2014, 11(4): 10-18.  
Chong Pengyun, Shuai Bin, Yin Hui. Invulnerability simulation analysis of hazardous materials transportation network based on complex network[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2014, 11(4): 10-18.
- [7] 胡萍, 范文礼. 不同攻击模式下城市公交网络抗毁性分析[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(11): 3385-3391.  
Hu Ping, Fan Wenli. Invulnerability of urban transit network under different attack modes[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(11): 3385-3391.
- [8] 吕禄明. 基于复杂网络的城市轨道交通网络结构特性与抗毁性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 59-64.  
LYU Luming. Research on the structural characteristics and invulnerability of urban rail transit network based on complex network theory[D]. Beijing, Beijing Jiaotong University, 2015: 59-64.
- [9] 刁朋娣. 城市轨道交通网络抗毁性分析与仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 55-59.  
Diao Pengdi. Analysis and simulation research on invulnerability of urban rail transit network[D]. Beijing, Beijing Jiaotong University, 2014: 55-59.
- [10] 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: 20-22.  
Zhao Man. Research of characteristics of urban transport network based on complex network theory[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2012: 20-22.
- [11] 卫振林, 甘杨杰, 赵鹏. 城市复合交通网络的若干特性研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(1): 106-111.  
Wei Zhenlin, Gan Yangjie, Zhao Peng. Characteristic research of urban complex traffic network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(1): 106-111.
- [12] 王国明. 城市群道路网络特性及演化研究[D]. 湖南: 中南大学, 2012: 80-85.  
Wang Guoming. A study on property and evolution of road network of urban agglomeration[D]. Hunan: Central South University, 2012: 80-85.
- [13] 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 Minghua, Li Xiamiao, Liu Dapeng. The properties of traffic networks in urban clusters[J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(3): 10-15.