

城市道路复杂网络单元脆弱性实证研究

张宏,李杰

(华中科技大学 土木工程与力学学院,湖北 武汉 430223)

摘要:为分析城市道路复杂网络的拓扑性质及识别脆弱单元,以十堰市为例,选取98条线路和128个节点为样本数据,以交叉口作为节点,相邻节点之间的道路作为边,采用原始法运用复杂网络理论构建基于邻接站点的复杂网络模型,从城市道路网络拓扑结构特性和状态特性的角度阐述了网络单元综合脆弱性及其内在联系,计算其脆弱性指标。结果表明,网络拓扑结构和功能状态共同影响了城市道路复杂网络单元的脆弱性。

关键词:复杂网络;脆弱单元;脆弱性;道路交通;拓扑结构;路网
中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-6248(2014)02-0033-05

复杂网络(Complex Network)是复杂性科学的重要研究领域^[1],自从1998年Watts在Nature发表了小世界网络、1999年Barabási在Science发表了无标度网络等复杂网络论文之后,对复杂网络结构和性质的研究越来越受到重视,已经渗透到数学、计算机科学、社会学及交通运输网络等各个领域中,学科之间的交叉、融合也进一步加强。随着复杂网络研究的兴起,其脆弱性也备受关注,城市道路网络是典型的复杂网络^[2],面临着各种不同程度的破坏和攻击,例如恐怖袭击等选择性攻击和交通事故、洪水等随机性攻击。交通网络是现代社会赖以生存的重要基础设施网络,具有时间、空间复杂性^[3],其脆弱性直接影响到系统的稳定性^[4,5]。

一、城市道路网络拓扑结构

根据图论的方法,一个具体的网络可抽象成一个由点集 V 和边集 E 构成的图 $G=(V,E)$,有 N 个节点和 m 条边^[6]。边集 E 中每一条边都有点集 V

中的一组点对与之对应,如果 E 中的任意节点对 (v_i,v_j) 和 (v_j,v_i) 对应的是相同的边,则称该网络为无向网络,否则为有向网络^[7];如果给每条边都赋予相应的权重,那么该网络为加权网络,用矩阵 $W=(w_{ij})_{n \times n}$ 表示加权网络的权重,节点 v_i 与 v_j 之间的权重为 w_{ij} ,可以用 $G=(V,E,W)$ 来表示,当网络中各条边的权重相同时,加权网络退化成无权网络。无权网络也可以看成是每条边的权重都为1的等权网络。

(一) 复杂网络统计参数——介数

复杂网络的统计参数有度分布^[8]、平均路径长度^[9]、聚集系数^[10]和介数等。

介数(Betweenness)分为边介数和节点介数,是指所有节点对的最短路径中经过该点或边的数量比例^[11],反映了节点在整个网络中的重要性,介数越高,说明节点或边的重要性大,介数是网络中节点或边的中心性的一个衡量指标。介数可以表示为

$$B(i) = \sum_{j,k \in V \atop j \neq i \neq k} \frac{D_{jk}(i)}{N_{jk}} \tag{1}$$

收稿日期:2014-03-27
基金项目:国家自然科学基金项目(51078165);湖北省教育科学“十二五”规划立项项目(2012B433)
作者简介:张宏(1981-),女,内蒙古扎兰屯人,工学博士研究生。

式中: $B(i)$ 为路段 i 的介数, $i = 1, 2, \dots, m$; $N_{jk}(i)$ 为节点对 (v_j, v_k) 之间最短路径中经过 i 的数量, $j, k = 1, 2, \dots, n$, N_{jk} 为节点 (v_j, v_k) 之间最短路径的数量; V 为网络中全部节点的集合。

网络的介数分布 $B(k)$ 是指一个随机选定的点或边的介数为 k 的概率。将此定义应用于城市道路交通网络中,节点介数反映的是该节点在整个网络中所承担交通作用的大小。若某个节点介数较大,则表明它在交通网络中传输和交换的交通量较大,可视为网络中的枢纽节点。边介数反映了路径对城市道路网络资源的控制能力和传输能力。若边介数越大,网络节点中节点对经过该边的数量越多,在道路网络中起的作用越大,有可能是关键路段,其脆弱性对网络全局脆弱性影响较大。

(二) 城市道路网络拓扑结构构建

城市道路网络抽象方法主要有 2 类^[12]:一种为 Primal Approach 方法,将交叉口视为节点,将道路视为边,是对城市道路网络最简单、最直观的映射方法,直接反映了交通网络的连通性,可直接通过 Google 地图或地理地图信息在 GIS 软件中实现,能够完整保留路段的地理信息;一种为 Dual Approach 方法,是从拓扑结构来进行映射,路段抽象为节点,交叉口抽象为边^[13]。Dual Approach 方法的优点在于能够便于网络统计参数分析,特别是网络分布特性分析,更清晰地反映道路网络的拓扑特性。本文采用 Primal Approach 方法对城市道路网络进行拓扑化处理,将路网抽象成一个有 N 个节点、 M 条边、无权的无向图,其邻接矩阵表示为 $G = (V, E)$ 。

二、城市道路网络单元脆弱性分析

(一) 城市道路网络脆弱性内涵

网络单元的脆弱性会影响整个道路网络的脆弱性,对道路网络脆弱性的研究最早起源于 1995 年日本神户大地震和 2001 年 9 月 11 日美国的恐怖组织事件。当前对路网脆弱性概念的界定分为两种情况:D'Este 和 Taylor 等认为脆弱性的内涵与网络中某些部分失效所产生的后果相关,而与失效概率无关,他们认为脆弱性聚焦于网络薄弱处和失效的后果上;而 Husdal, Bell, Jenelius 等则将道路网络脆弱性的概念与风险联系起来,同时考虑路段失效的概率和路段失效所产生的后果^[14],可以用计算风险的方法表示^[15]。如图 1 所示,路段失效概率大和后果严重的象限脆弱性高,路段失效概率小和后果小的

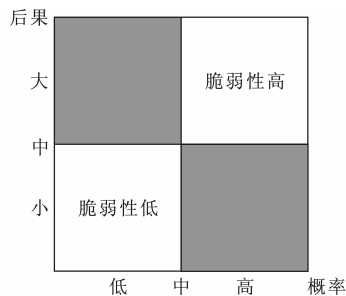


图1 概率—后果矩阵示意图

象限脆弱性低。

这两种观点的差异在于对城市道路网络脆弱性的界定和衡量是否考虑网络组分失效的概率。本文认同第一种观点,即路网脆弱性定义为网络中断的后果,可以是效率的降低、连通子图的大小(相对连通概率)、出行时间的增加等。路网脆弱性不是站在单个用户的角度,而是站在整体的角度描述网络整体特征的概念。

(二) 城市道路网络单元脆弱性评估

城市道路网中,由于受到突发事件或其他干扰,某个节点、路段或者某部分子网络失效时,可能对整个网络产生一定的影响。某个网络单元的失效对整个网络拓扑结构和运行状态的影响程度并不一样,因此只从一个侧面对其脆弱性进行评估是不够的。

复杂网络理论对研究道路交通网络脆弱性提供了良好的理论工具,如图 2 所示,网络单元脆弱性受到经济社会、网络结构、运行状态、周边环境等因素的影响。从道路网络结构脆弱性的角度,重点用网络平均效率、最大连通子图等描述网络本身属性,来评估网络单元失效后网络保持其原有拓扑结构的能力。仅考虑网络连通性也不能很好地评估网络的脆弱性,例如,网络受到修路、交通事故等不利影响时,其运行状态无法满足用户需求,此时网络也是脆弱的,所以需要考虑城市道路网络交通流量,综合评估城市道路网络脆弱性。

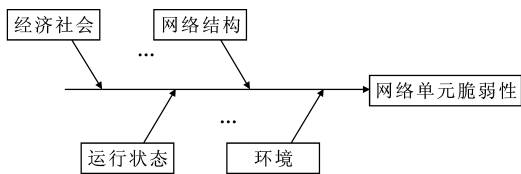


图2 网络单元脆弱性影响因素

基于以上分析,本文采用网络单元结构状态参数,根据此参数值的计算对网络脆弱源进行筛选,在实践中,没有必要分析所有网络单元失效,根据 ABC 分析法思想,占网络单元总数 10% ~ 15% 关键

少数的网络单元,其对道路网络脆弱性的影响占 60% ~ 70%,这类网络单元化为 A 类,选取结构状态参数分布在前 15% 的网络单元作为脆弱性分析的对象(网络单元可以是节点或边)。根据复杂网络理论中介数的定义,结合城市道路网络交通流特性、结构脆弱性指标和功能脆弱性指标作为最终的网络单元综合脆弱性评估指标,计算各指标的期望值、均方差,对各指标标准化,排除指标量纲不同因素,计算各指标之间的相关矩阵,求其最大特征值和特征向量,计算网络单元综合脆弱性指标,排序并输出最终结果。

$$S_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{M_i} \quad (2)$$

式中: S_{ij} 为第 i 个网络单元的第 j 个评估指标标准化数值; X_{ij} 为评价指标值; \bar{X}_{ij} 为 X_{ij} 的均值; M_j 为评估指

标均方差; $i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots n$ 。

网络单元 a 的结构状态参数 ω_a 可以表示为

$$\omega_a = \lambda_1 \times q_a + \lambda_2 \times C_a \quad (3)$$

式中: q_a 为经过网络单元 a 标准化后的交通流量; C_a 为网络单元 a 标准化后的介数; λ_1, λ_2 为权重。

三、实例分析

本文以十堰市的局部路网作为研究对象,采用原始法构建拓扑网络模型,得到一个包含 98 个节点、132 条边的网络,如图 3 所示。交通量调查采用人工和视频的调查方法分别进行高峰小时交通量调查、12 小时交通量调查、24 小时交通量调查、一周交通量调查。

表 1 列出了十堰市重要路段的高峰小时路段流

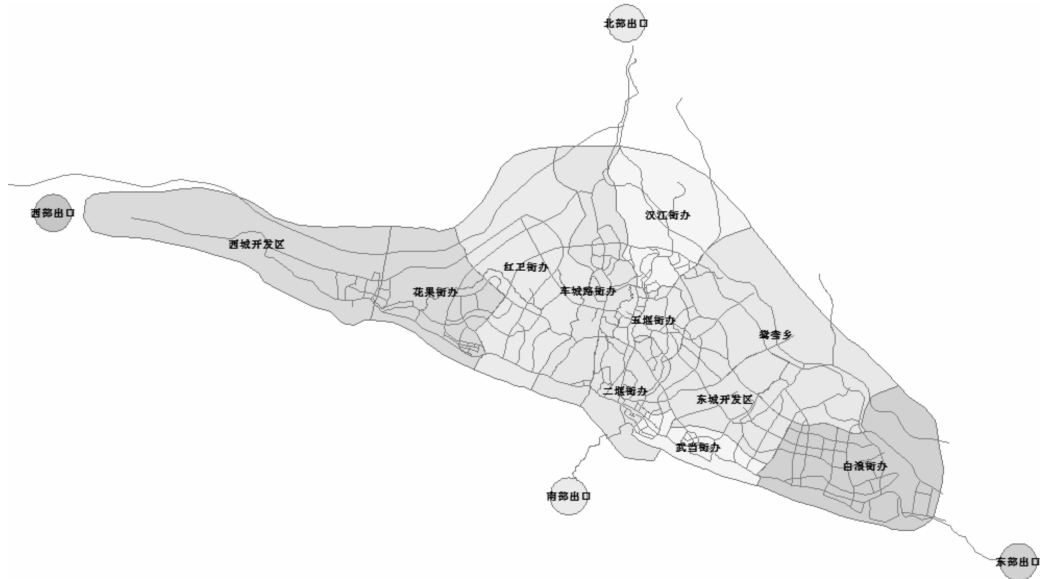


图3 十堰市部分路网拓扑图

量,早高峰为7:30~9:30,晚高峰为16:30~18:30,按照实际的交通流量加载。考虑到实际情况中易获取路段交通流量数据,网络单元以连接节点对的边为例,因道路网络单元受功能脆弱性影响较大,取 $\lambda_1 = 0.7$, $\lambda_2 = 0.3$,通过 Matlab 编程,计算路段流量、边介数、结构状态参数,将这3个指标由大到小进行排序,分别取其数值的前15%,得到结果如表2所示。

由表 2 和图 4 可知,该网络中脆弱源主要分布在主干路和快速路上,有少数几条是次干路。这说明道路功能等级与其结构状态参数的大小还是存在一定的正对应关系:道路功能等级越高,其在网络中的重要程度也相对越大。

四、结 语

本文分别从网络拓扑结构与网络运行状态的角度,综合结构脆弱性和状态脆弱性,这二者既相互独立又有一定的内在联系,提出了网络单元综合脆弱性评估模型。实例分析表明:综合评估模型能够有效地克服单一评价的不足,准确、全面地评估网络单元的脆弱性,并能较为便捷地识别脆弱单元。

参考文献:

- [1] Von F C, Holovatch T, Holovatch Y, et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling

表 1 高峰小时路段机动车流量 pcu/h

编号	路段名称	机动车流量 1	机动车流量 2	编号	路段名称	机动车流量 1	机动车流量 2
1	车城西路	1 528	1 316	16	高速公路东口	608	973
2	车城西路	514	496	17	汉江北路	347	493
3	镜谭路	602	802	18	鄖阳路	457	417
4	广东路	526	426	19	209 国道北	318	498
5	汉江南路	839	1 123	20	新疆路	360	302
6	朝阳南路	1 032	598	21	花果路	527	461
7	上海路	1 293	976	22	财政局	1 560	2 301
8	天津路	1 866	781	23	东汽总装厂	1 326	1 136
9	重庆路	1 249	719	24	观岳广场	1 566	1 459
10	武当路	1 466	977	25	黄花巷口	1 879	1 365
11	辽宁路	607	970	26	黄龙检查站	119	134
12	东风大道	1 563	558	27	江苏路口	1 554	1 426
13	白浪西路	1 163	2 177	28	居然之家	2 605	1 706
14	白浪东路	826	956	29	军分区	2 376	2 432
15	东环路	604	339	30	六堰转盘	2 666	2 376

表 2 路段流量、介数、结构状态参数前 15%数据对比

编号	路段流量 q_a		边的介数 C_a		结构状态参数 ω_a		道路等级	单向通行能力 (pcu · h ⁻¹)
	路段 ID	流量值 (pcu · h ⁻¹)	路段 ID	边介数值	路段 ID	结构状态参数值		
1	30	2 521	47	2 839	47	2 445.792	主干路	3 600
2	29	2 404	49	2 519	30	2 273.500	快速路	4 000
3	28	2 156	48	2 260	49	2 020.755	主干路	3 600
4	22	1 931	58	1 983	22	1 962.184	主干路	3 600
5	13	1 670	9	1 914	9	1 960.406	主干路	3 600
6	28	1 622	59	1 810	6	1 906.452	主干路	3 600
7	24	1 513	13	1 766	13	1 856.682	次干路	3 600
8	27	1 490	30	1 696	1	1 743.171	快速路	3 600
9	1	1 422	25	1 631	2	1 709.640	主干路	3 600
10	8	1 324	33	1 593	7	1 700.273	主干路	2 400
11	23	1 321	67	1 501	32	1 693.345	主干路	4 000
12	10	1 222	60	1 116	58	1 692.649	快速路	3 600
13	7	1 135	2	1 114	14	1 691.024	主干路	3 600
14	12	1 061	109	1 103	60	1 665.324	主干路	3 600
15	5	981	11	1 029	40	1 639.217	次干路	2 400

[J]. The European Physical Journal B, 2009, 68 (2) : 261-275.

[2] Harold S, Sonja L, Tianyou Z, et al. Weighted complex network analysis of travel routes on the Singapore public transportation system[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389 (24) : 5852-5863.

[3] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2008, 387 (12) : 2972-2980.

[4] 胡一竑, 吴勤旻, 朱道立. 城市道路网络的拓扑性质和脆弱性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6 (3) : 69-76.

[5] 肖瑶. 基于复杂网络理论的城市道路网络综合脆弱性评估模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[6] Zou Z, Lai J, Gao J. Reducing the vulnerability of network by inserting modular topologies[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2013, 23 (1) : 13121.

[7] 段后利, 李志恒, 张毅. 城市公交网络的鲁棒性分析模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (3) : 70-81.



图 4 十堰市部分路网脆弱源

[8] 徐风,朱金福,杨文东. 复杂网络在交通运输网络中的应用研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学,2013,10(1):18-25.

[9] Zhang P,Cheng B,Zhao Z,et al. The robustness of inter-dependent transportation networks under targeted attack [J]. EPL,2013,103(6):68005.

[10] Costa L D F,Travencolo B,Viana M P,et al. On the efficiency of transportation systems in large cities[J]. EPL,2010,91(1):18003.

[11] Shen B,Gao Z. Dynamical properties of transportation on complex networks[J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2008,387(5):1352-1360.

[12] 吴俊获,朱顺应,王红,等. 基于改进 GN 算法的路网脆弱性诊断模型[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工 程版,2012,36(4):740-743,747.

[13] Zhao X M,Gao Z Y. Topological effects on the performance of transportation networks[J]. Chinese Physics Letters,2007,24(1):283.

[14] 张宏,李杰. 复杂网络的微信网络信息传播研究 [J]. 科学技术与工程,2014,14(17):261-264.

[15] 刘建香. 复杂网络及其在国内研究进展的综述[J]. 系统科学学报,2009,17(4):31-37.

Research on unit vulnerability in urban road complex network

ZHANG Hong, LI Jie

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: For analyzing topological properties and vulnerability unit of urban road complex network, we selected 98 lines and 128 nodes as data base at Shiyan city. With intersections as the nodes and adjacent roads as the links, we constructed complex network model based on adjacent nodes with the primal approach, unit comprehensive vulnerability and its internal relations from urban road network topology characteristics and state characteristics. The vulnerability indexes were calculated. The results show that urban road complex network topological properties and functional state together have the impact on unit vulnerability.

Key words: complex network; vulnerable unit; vulnerability; road traffic; topological structure; road network