

考虑级联效应的交通网络关键站点评估及其安全优化

曹 娟, 张颖淳

(重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074)

摘 要: 针对道路交通网络中的级联失效可能导致大规模交通瘫痪的问题, 模拟道路交通网络中由于站点堵塞促发的级联效应动态行为, 建立了道路交通网络级联失效模型. 以提高道路交通网络的安全性为目的, 给出了增强道路交通网络安全性的优化方法. 通过仿真实验结果的对比分析, 发现该优化方法能够从很大程度上提高道路交通系统的安全性, 对增强道路交通网络安全性具有很大的应用价值.

关键词: 交通网络; 级联效应; 关键站点; 安全性; 优化方法

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)06-0171-05

Key Site Evaluation Considering Cascading Effect Behaviors and Security Optimization on Traffic Network

CAO Juan, ZHANG Ying-chun

(College of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Considering that the cascading effects could lead to a large-scale traffic paralysis in road traffic networks, this paper simulates the dynamic behaviors under cascading effects triggered by the jam of a site, and then builds a new cascading failure model of road traffic networks. an optimization method is given to enhance the safety of road traffic network. Through the contrastive analysis of the simulation results, we find the effectiveness of the proposed evaluation method of the site importance. Simulation analysis results also indicate that this optimization method can largely improve the safety of road traffic system. And the proposed method has great application to strengthen the security of road traffic networks.

Key words: traffic network; cascade effect problem; key site; security optimization; ant colony algorithm

1 引言

近年来, 复杂网络理论成为研究各种实际问题中复杂现象的有效工具, 与此同时如何利用复杂网络解决不同复杂系统中的安全问题已经成为一个研究热点^[1-5].

目前, 对道路交通网络的关键站点仍没有较统一的评估方法. 文献[6-8]在测算道路交通网络节点重要程度时, 通过调查运输和社会经济特征, 引入不同的指标对节点重要度综合评价. 为了能更好地区别不同站点的重要度, 宋新生等引入因子分析法和 K-Means 聚类的方法评估节点重要程度^[9]. 王甲生

等对于加权的复杂网络, 多方面考虑节点的连接和节点重要度之间的关系, 提出了一种建立在凝聚度上的改进的节点重要评估方法^[10]. 王正武等考虑到上层出行网络和下层道路网络之间的关系, 构建了一个考虑级联效应行为的道路交通网络级联失效模型, 并把节点的重要程度用网络堵塞强度来描述^[11]. 朱德滨等改进区域公路系统的节点重要程度评估方法, 针对林区道路网络提出了一种新的重要度算法^[12]. 高自友等分析了交通网络的复杂性和相关问题, 进一步给出如何寻找网络中重要站点的求解算法和研究思路, 但该方法不能对各节点的重要度区分, 而且不能了解网络动力学行为和节点重要

收稿日期: 2013-09-07; 修回日期: 2013-10-28

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目; 基于激光扫描和视频数据融合的城市三维建模技术研究(KJ120413)

度之间的相互关系^[13]. 此外, 也有学者引入节点负载, 基于负载网络中存在的动力学行为, 提出节点重要度的评估方法^[14]. 然而, 对道路交通网络中站点堵塞所导致的级联效应的演化规律仍然涉及很少, 目前级联失效问题的研究已经被较好地用于计算机网络和电网, 但对于在考虑道路交通网络中的级联失效问题情况下, 该如何寻找交通系统中的关键站点还缺乏必要深入地研究^[15-17].

本文针对道路交通网络中的级联失效可能导致大规模交通瘫痪的问题, 提出了一种能全面评估道路交通网络中站点重要度的新方法.

2 基于网络级联效应的站点重要度

2.1 道路交通网络级联效应模型描述

不同程度的拥挤和堵塞现象常常发生在道路交通系统中, 道路交通系统是由不同站点和不同运行线路构成的复杂网络, 因而引入复杂网络理论研究道路系统中的级联失效问题和站点重要度, 对增强道路交通系统的安全有重要的意义. 在道路交通系统中, 如果某个站点发生堵塞或者失效, 必然由于车行的分流而影响到与之相临近的一些站点, 导致交通系统中最短路径的重新分配, 所有站点上的车行流量发生改变, 产生级联效应. 尤其对于关键站点的失效, 更可能造成整个道路交通系统处于瘫痪.

把道路交通系统中的站点作为网络节点, 站点和站点之间的路段被看作网络中的边. 考虑到一般道路交通网络中车辆的运行是双向的, 因此这里将利用复杂网络理论, 把道路交通系统抽象成为一个无向无权的网络. 用 $G = (A, K)$ 表示道路交通网络, 其中 $A = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 是道路交通网络中节点的集合, $K = \{l_1, l_2, \dots, l_M\}$ 是所有路段的集合. 而且, 含有 N 各站点的道路交通网络的拓扑结构可以用一个 $N \times N$ 的邻接矩阵 $\{b_{ij}\}$ 来表示, 如果站点 v_i 和站点 v_j 之间存在相连的路段, 则 $b_{ij} = 1$; 否则, $b_{ij} = 0$.

因此, 在道路交通系统的网络拓扑结构中, 站点 v_i 的度 d_i 被定义为经过该节点的边的数量, 也就是经过该站点的路段数量, 即

$$d_i = \sum_{j \in A} b_{ij} \quad (1)$$

式中, A 为道路交通网络中所有站点的集合.

把道路交通系统中经过节点 v_i 的最短路径数量与所有最短路径数量的比值定义为站点 v_i 的介数. 节点 v_i 的介数可以刻画节点 v_i 在该道路交通网

络中的地位, 并从一定程度上反映此节点对整个网络的影响力. 节点 v_i 的介数表达式为

$$J_k = \sum_{v_i, v_j \in A} \frac{m_{ij}(k)}{m_{ij}} \quad (2)$$

式中, m_{ij} 为网络中所有经过站点 v_i 和站点 v_j 的最短路径的总数量, $m_{ij}(k)$ 为经过站点 v_i 和站点 v_j 并且通过站点 v_k 的最短路径的数量. 进一步地, 定义站点的负载依赖于节点 v_i 及其邻居节点的度和介数, 即节点 v_i 的负载为

$$F_i = d_i \left(\sum_{m \in B_i} d_m \right) + J_i \left(\sum_{m \in B_i} J_m \right) \quad (3)$$

式中, d_i 为节点 v_i 的度, B_i 为节点 v_i 的邻居节点的集合.

根据实际情况, 当站点 v_i 处于堵塞或者失效状态时, 原本站点 v_i 所承担的车行负载流量将被自然地分配到其他附近的邻居站点, 这里我们假设负载流量依据每个站点的初始负载流量比例进行重新分配, 即当站点 v_i 失效后, 分配到站点 v_j 上的负载流量为

$$\begin{aligned} \Delta F_{ij} &= \frac{F_j}{\sum_{m \in H_i} F_m} \times F_i \\ &= \frac{d_j \left(\sum_{m \in B_j} d_m \right) + J_j \left(\sum_{m \in B_j} J_m \right)}{\sum_{m \in H_i} \left[d_m \left(\sum_{k \in B_m} d_k \right) + J_m \left(\sum_{k \in B_m} J_k \right) \right]} \times \\ &\quad \left[d_i \left(\sum_{m \in B_i} d_m \right) + J_i \left(\sum_{m \in B_i} J_m \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

由上式, 当站点 v_i 发生堵塞而失效, 则在下一个时刻站点 v_j 的负载就变为

$$\begin{aligned} F_j(t+1) &= F_j(t) + \Delta F_{ij} \\ &= \left[d_j \left(\sum_{m \in B_j} d_m \right) + J_j \left(\sum_{m \in B_j} J_m \right) \right] + \\ &\quad \frac{d_j \left(\sum_{m \in B_j} d_m \right) + J_j \left(\sum_{m \in B_j} J_m \right)}{\sum_{m \in H_i} \left[d_m \left(\sum_{k \in B_m} d_k \right) + J_m \left(\sum_{k \in B_m} J_k \right) \right]} \times \\ &\quad \left[d_i \left(\sum_{m \in B_i} d_m \right) + J_i \left(\sum_{m \in B_i} J_m \right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

此外, 在道路交通网络中, 每个站点所能承担的最大车行流量是有限的, 称之为站点容忍能力. 站点容忍能力受到建设成本和所处路段约束, 这里假定每个站点 v_i 的容忍能力 P_i 正比于它所对应的初始负载 F_i , 即

$$\begin{aligned} P_i &= (1 + \omega) F_i \\ &= (1 + \omega) \times \left[d_i \left(\sum_{m \in B_i} d_m \right) + J_i \left(\sum_{m \in B_i} J_m \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

式中, $\omega > 0$ 为道路交通网络节点的容忍参数. 该参数反映道路交通网络建设成本, 不同道路交通网络中该参数的取值也不同. 根据式(3)、式(5)和式(6), 如果某站点的所承担的负载流量超过其相应的最大承受能力, 该站点被从整个网络中移除.

2.2 站点重要度评估方法

考虑到在道路交通网络中, 站点的连接度, 站点的介数和平均站点的负载流量对站点的重要性能带来很大的影响, 为了能够全面地反映不同节点的重要程度, 本文同时引入节点的度、介数和节点的负载流量对站点重要性进行综合评估. 首先, 分别定义站点的度指标, 介数指标和负载流量指标如下:

$$d'_i = \frac{d_i}{d_i^{\max}} \quad (7)$$

$$F'_i = \frac{F_i}{F_i^{\max}} \quad (8)$$

$$J'_i = \frac{J_i}{J_i^{\max}} \quad (9)$$

进一步地, 根据式(7)、式(8)和式(9), 定义道路交通网络流通效率指标为

$$I = \sum_{i=1}^N [\alpha d'_i + \beta F'_i + \gamma J'_i] \quad (10)$$

式中, α, β, γ 分别为站点度, 站点介数和站点负载流量的权重系数, 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$. 这些参数的取值决定了不同因素对站点重要度的影响程度. 定义站点 v_i 的重要性公式为

$$IM_i = 1 - \frac{I_i}{I(0)} \quad (11)$$

式中, $I(0)$ 为道路交通网络的初始流通效率, I_i 为节点 v_i 发生堵塞或者失效引发的级联效应结束后的网络流通效率. 显然, $0 < IM_i < 1$.

根据上面提出的模型和度量指标, 具体评估道路交通网络中每个站点重要度的算法步骤如下:

(1) 初始化网络 $G = (A, K)$ 和相应的邻接矩阵 $\{b_{ij}\}_{N \times N}$.

(2) 根据式(7)、式(8)和式(9), 分别计算网络每个节点的度指标, 并用 Brandes 算法^[18] 求出每个节点的介数指标和初始负载流量指标.

(3) 评估每个节点的重要度. 对于 $k = 1, 2, \dots, N$, 令站点 v_k 发生故障或者失效, 当有新的站点在级联效应下转变为失效, 重新计算每个剩下节点的负载流量, 节点介数指标, 和度指标.

(4) 重复步骤(2)和(3), 循环直至级联失效过程结束, 即不再有新的站点堵塞. 根据式(11)计算 I_k .

(5) 根据定义(11)计算 IM_i .

3 实例分析

以某城市的道路交通网络为例, 采用的数据来源于 2011 年河南省公路交通统计厚本, 本文案例收集数据研究一个包括有 31 个站点, 93 条路段的城市. 我们将该道路交通网络用一个 31×31 的邻接矩阵 $\{b_{ij}\}$ 表示: 如果城市站点 v_i 和站点 v_j 之间有车辆可以直接运行的线路, 则 $b_{ij} = 1$, 否则值为 0. 由于根据实际情况, 该城市道路基本为双向行线, 因而我们得到的相应的邻接矩阵为对称矩阵. 通过 Ucinet6.0 社会分析软件, 把该道路交通系统抽象成为一个复杂网络 $G = (A, K)$, 其中节点集合 A 是该交通系统内车辆经过的所有站点, 边集合 K 是所有车辆会经过的路段. 首先根据式(1)和式(9)计算得到该道路交通网络中每个节点的度和介数指标, 如表 1 所示.

表 1 某道路交通网络节点度和介数指标

站点 编号 i	节点度 d_i	介数指标 J_i'	节点 编号 i	节点度 d_i	介数指标 J_i'
1	3	0.012 2	17	2	0.001 7
2	5	0.013 5	18	3	0.011 9
3	3	0.012 1	19	2	0.001 2
4	3	0.011 9	20	3	0.011 9
5	5	0.013 7	21	3	0.011 7
6	5	0.013 5	22	6	0.013 5
7	2	0.001 8	23	5	0.013 5
8	3	0.012 1	24	4	0.010 7
9	2	0.001 6	25	2	0.001 1
10	3	0.012 2	26	5	0.013 7
11	2	0.001 7	27	2	0.001 6
12	2	0.001 8	28	2	0.001 3
13	2	0.001 8	29	2	0.001 2
14	4	0.010 8	30	3	0.011 7
15	6	0.013 6	31	2	0.001 2
16	2	0.001 7			

通过第 2 节的级联失效模型和本文提出的模型算法, 依次删除这个道路交通网络中的每个站点, 采用 Matlab2010 工具编程仿真. 当级联效应过程结束后, 根据式(7)~(11), 计算出每个道路交通网络站点的重要度 IM_i , 并根据指标 IM_i 对每个站点进行重要度评估并排序, 具体评估结果见表 2. 从表 2 可以看到, 不同于绝大多数研究中提出的节点重要度

评估方法,根据本文引入不同权重系数提出的节点重要度综合评估方法,可以很清晰地区分不同站点的重要度.由表 2,在考虑级联效应对道路交通网络影响下,发现交通站点点 15 是重要的关键站点,其次是站点 22,站点 26 和站点 23.而事实上,如果根据这三个站点的重要度和经过这三个站点的介数指标,它们的重要度区别并不突出甚至相同,无法区分不同站点的重要程度,但在我们提出的模型和重要度指标下,不仅发现站点 15,22,26 和 23 的堵塞或者失效可以引发其他节点的级联效应,对整个道路交通系统造成重大的影响,而且发现这四个站点的重要度有明显的不同.而且仿真实验发现,当站点 15 发生堵塞或者失效现象后,首先导致站点 16 超过最大流量能力而失效,然后导致站点 22,26 等其他站点发生一系列相继失效,最后导致整个道路交通系统几乎崩溃.因而,站点 15 是一个非常重要的站点,在道路交通系统的安全防护和规划中,应该给予更多的人力和物力进行保护,这样可以避免大规模级联失效发生.另外,节点 16,29,25,27 和节点 11 的失效一般不会引起其他站点的堵塞,它们的重要程度相对弱一些.

表 2 道路交通网络各节点重要度排序

站点 编号 i	节点重要度 IM_i	重要度 排名	节点 编号 i	节点重要度 IM_i	重要度 排名
1	0.396	10	17	0.197	18
2	0.451	6	18	0.393	11
3	0.071	19	19	0.061	20
4	0.392	12	20	0.381	15
5	0.448	7	21	0.379	16
6	0.456	5	22	0.502	2
7	0.031	21	23	0.457	4
8	0.391	13	24	0.441	8
9	0.005	30	25	0.006	29
10	0.382	14	26	0.501	3
11	0.008	27	27	0.007	28
12	0.015	25	28	0.017	23
13	0.016	24	29	0.026	22
14	0.437	9	30	0.376	17
15	0.506	1	31	0.013	26
16	0.002	31			

进一步地,假设相关交通部门对该道路交通网络中,位于重要度排名前五位节点 15,22,26,23 和节点 6 实施保护策略,以增强该道路系统的安全

性,对网络进行安全性优化.在本文仿真的优化处理过程中,假设保护策略实施后,这五个站点基本不会发生失效,然后对这个道路交通网络的进行蓄意攻击.我们根据式(10),计算受到蓄意攻击后的网络流通效率指标,比较优化前和优化后的网络流通效率变化如图 1 所示.图 1 中,横坐标为受到攻击的站点数目,纵坐标为网络流通效率.

由图 1 首先看到,不论是优化后的网络,还是优化前的初始网络,当道路交通网络遭受蓄意攻击时,其网络流通效率明显下降.而且,我们也发现,对于优化后的网络,其网络流通效率的变化较为平缓,而且网络流通效率值一直处于高于未经优化网络的相应值的状态,这说明,通过我们提出的优化方法可以从很大程度上增强网络的安全性,而且,为了避免即整个道路交通系统的流通性受到较大的影响,我们应对该道路交通网络中的某些特殊站点进行有意识的保护,并重点地保护经过重要度排序后的一些关键站点.同时,仿真实验结果也进一步证明本文提出方法具有很大的实用性和应用价值.

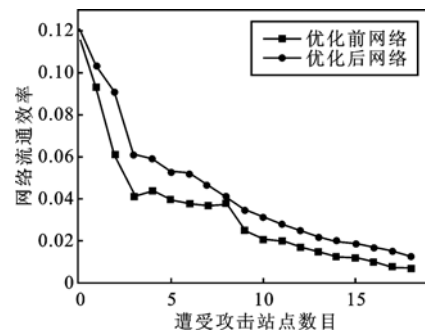


图 1 蓄意攻击下道路交通网络车辆流通效率的优化结果对比

4 结束语

本文针对道路交通网络中重要站点失效所触发的安全性问题,提出了一个简单而有效的站点重要度评估方法,并通过对一个道路交通网络的案例进行数值计算和仿真对比分析,验证了本文提出评估方法的实用性和有效性,尤其是发现重点保护关键节点可以从很大程度上提高网络的安全性.本文提出的道路交通网络模型不仅充分发挥了复杂网络理论探究复杂系统的特长,而且能够从动态的角度综合地对不同站点的重要度进行鉴定.最后,把仿真结果进一步应用于优化该道路交通网络的安全性,通过仿真实验结果的对比分析,发现本文优化方法也能为今后如何更加有效地避免交通网络中的级联失

效可能导致大规模交通瘫痪的问题,提供了一种很有效的方法或途径,这对增强道路交通安全性具有很强的实用价值。

参考文献:

- [1] 李进,张江华,朱道立. 灾害链中多资源应急调度模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 488-495.
- [2] 孙强. 基于定量安全风险评估模型的网络安全管理平台[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 70-73.
- [3] 费军,余丽华. 基于模糊层次分析法的计算机网络安全评价[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(10): 120-123.
- [4] 秦怀斌,梁斌,邵明文. 软件体系结构的复杂网络社团特性研究[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(4): 6-9.
- [5] 凌云. 网络抗攻击优化方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(9): 151-154.
- [6] 刘伟,朱顺应,张建旭. 公路网络节点客观重要度的计算方法[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(1): 42-44.
- [7] 缪江华,袁振洲,沙滨,等. 综合评价法在确定公路网节点重要度中的应用[J]. 交通科技, 2006(5): 90-93.
- [8] 王旭,刘世铎,贾红兵. 基于灰色关联分析的公路网节点重要度测算方法研究[J]. 交通标准化, 2010(8): 91-95.
- [9] 宋新生,王啸啸,李爱增,等. 城市群区域公路网节点重要度评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 84-90.
- [10] 王甲生,吴晓平,廖巍,等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(10): 74-76.
- [11] 王正武,况爱武,王贺杰. 考虑级联失效的交通网络节点重要度测算[J]. 公路交通科技, 2012, 29(005): 96-101.
- [12] 朱德滨,胡娜. 改进节点重要度法在林区路网规划中的应用[J]. 公路, 2013(12): 110-115.
- [13] 高自友,吴建军,毛保华,等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 79-84.
- [14] 吴俊,谭跃进,邓宏钟,等. 考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(4): 627-630.
- [15] Xia Y, Fan J, Hill D. Cascading failure in Watts - Strogatz small-world networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(6): 1281-1285.
- [16] Wei D Q, Luo X S, Zhang B. Analysis of cascading failure in complex power networks under the load local preferential redistribution rule[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(8): 2771-2777.
- [17] 窦炳琳,张世永. 复杂网络上级联失效的负载容量模型[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1459-1463.
- [18] Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality[J]. Journal of Mathematical Sociology, 2001, 25(2): 163-177.

作者简介:

曹娟 女,(1980-),硕士研究生,讲师.研究方向为机器视觉、人工智能、复杂网络研究.

张颖淳 女,(1967-),副教授.研究方向为数据挖掘、计算机基础教学研究.