

恐怖袭击下危险品运输网络级联失效抗毁性建模与仿真^{*}

种鹏云, 帅 斌, 陈钢铁

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

摘 要: 针对复杂网络的级联失效特性,提出了危险品运输网络在遭遇恐怖袭击后的级联失效抗毁性模型。在恐怖袭击条件下,对危险品运输网络的级联失效过程进行分析,定义了危险品运输网络抗毁性,从结果性和过程性两个视角出发,提出了网络抗毁性的评价测度节点存活率和相对二次级联失效数。通过建立仿真场景,给出了仿真流程图,并就不同节点的度、不同容量系数和不同规划方式下危险品运输网络级联失效特性进行了定量研究,并通过 MATLAB 软件编程实现。仿真结果表明了模型的科学有效性,为优化危险品运输网络的拓扑结构提供新的研究思路和方法。

关键词: 恐怖袭击; 危险品运输网络; 抗毁性; 级联失效

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)01-0107-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.025

Model and simulation on cascading failure survivability of hazardous materials transportation network under terrorist attack

CHONG Peng-yun, SHUAI Bin, CHEN Gang-tie

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

Abstract: According to the cascading failure characteristics of complex network, this paper proposed a model of cascading failure survivability for hazardous materials transportation network (HMTN) in the face of terrorist attack. Under the condition of the terrorist attack, it analyzed the cascading failure process of HMTN, and defined the cascading failure survivability of HMTN. From the perspective of result and process, it proposed the survivability indicators and their calculation which were node survival rate number of the second relative cascading failure. By establishing the scene, it gave the simulation flow chart, and quantitatively researched the different node's degree, different capacity coefficient and different planning of HMTN under cascading failure, and it realized in the use of programming in the MATLAB. The results show that the model is effective, and can provide new ideas and methods to optimize the topology structure of hazardous materials transportation network.

Key words: terrorist attack; hazardous materials transportation network; survivability; cascading failure

0 引言

一般来讲,危险品是具有易燃、易爆、有强烈腐蚀性和放射性危险的物品总称,如汽油、炸药、强酸和过氧化物等。近年来,由于国民经济建设的需要,我国能源和化工产业取得了迅速发展,为其服务的危险品运输业无论是运输网络建设的数量还是密度都取得了长足的发展。

危险品运输系统一般是由运输的上下游企业、储存中心、转运中心和交通运输枢纽等为节点,并由两两节点之间的交通路线为边构成一个具有庞大数目的复杂网络。在暴力犯罪及恐怖袭击不断升级的情况下,危险品运输网将会成为犯罪分子主要攻击的目标之一。因此对恐怖袭击下危险品运输网抗毁性研究具有非常重要的理论和现实意义。

目前对于复杂网络抗毁性研究主要从静态和动态两个方面展开进行。静态网络抗毁性是指从网络拓扑结构入手对网络的抗毁性进行研究^[1-4];动态网络抗毁性是指网络在加载流

量负载情况下研究网络的动态抗毁性^[5-8]。对于抗毁性研究的目的主要包括:a)评价网络拓扑结构的抗毁性,即研究网络中的节点或边在随机失效或蓄意攻击下的生存能力^[1-3];b)探讨如何提升网络的抗毁性,即如何构建抗毁性较强的网络^[4]。由于危险品运输网络是一种有负载的网络,网络一旦遭受袭击,其任意一个节点的失效都会引起整个网络负载流量的重新分配,这可能会使网络中某些节点因最大容量限制由受袭击之前的正常变为失效,这些失效节点又可能会导致其他节点的接连失效,这种现象叫做级联失效^[9,10]。若恐怖分子选择攻击网络中最为重要的节点,则它的失效会引起整个网络的崩溃,造成的影响也比静态网络更为严重。因此仅仅对受攻击之前的静态网络拓扑结构进行研究并不能完全表征该类网络的特性,故对于该类问题必须采用基于负载的动态抗毁性研究方法。

一般来讲,危险品运输网络是一种特殊的交通网络,特殊性主要有以下三点:a)危险品运输网络是从交通网络中筛选出来的,因此它是交通网络的一部分;b)在平时,该网络除了完成危险品运输任务之外还承担着普通货物运输任务,因此网

收稿日期: 2012-05-28; **修回日期:** 2012-06-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71173177);优秀博士创新基金资助项目

作者简介: 种鹏云(1988-),男,陕西渭南人,博士研究生,主要研究方向为复杂网络抗毁性、城市公共安全网络规划(chongzi512@foxmail.com);帅斌(1967-),男,教授,博导,博士,主要研究方向为交通运输经济;陈钢铁(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为危险品运输、应急物流。

络的流量负载非常复杂;c)观察期内,网络中并非时时刻刻均存在着危险品运输任务,因此直接研究恐怖袭击下的危险品运输网络级联失效抗毁性非常困难。故本文在一系列假设基础之上,先建立危险品运输网的网络模型,在此基础上分析该网络模型在恐怖袭击下的级联失效过程,从而建立恐怖袭击下危险品运输网络级联失效抗毁性模型,并通过仿真方法来分析危险品运输网的级联失效抗毁性。

1 危险品运输网络模型

为了方便本文研究,特作如下假设:

a)不考虑道路通行的方向性,故本文所研究的危险品运输网络为无向网络。

b)对危险品运输网络的恐怖袭击只进行一次,不考虑多次袭击。

c)在研究期内,危险品运输网络不具备自我恢复性能。

d)危险品运输网遭受袭击后,网络负载的路由分配规则为平均分配。

一般地,危险品运输可分为过境运输和市内运输两类。对一个城市而言,过境运输一般选择远离人口集中区的环城公路;市内运输则主要是在城市内部,将物品从不同的起点运输到不同的终点。不同的起点和终点以及将它们连接在一起的道路条件可能不尽相同,但为了研究危险品运输网络的抗毁性,则必须消除它们的个体差异性,将其抽象为网络的点和边,从而将危险品运输网络简化为网络模型。本文对危险品运输网络模型描述为:一般地,对于危险品运输网络 $G = (V, E)$, V 、 E 分别是 G 的点集和边集。 V 代表运输的起点或终点、储存中心、转运中心、交叉口和工厂等实际意义的地点, E 代表连接两地点之间道路的集合,包括高速公路、国道和城市道路等。若记 $|V| = m$, $|E| = n$, 分别表示危险品运输网络中有 m 个节点和 n 条边,则 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$, $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ 。对运输网络 G 中的每一条边 $e = (v_i, v_j)$ 赋权值 $r(i, j \in V)$, 则由假设 a) 可知,本文所研究的危险品运输网络为无向加权网络,其中,网络边的权值为两个节点之间的距离。图 1 所示为某城市的危险品运输网络结构图。

2 危险品运输网络级联失效抗毁性模型

2.1 危险品运输网络级联失效过程描述

总的来说,危险品运输网络的级联失效过程主要可以分为以下三个阶段,如图 2 所示。

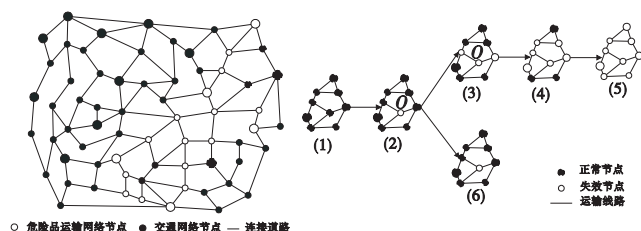


图1 危险品运输网络结构

图2 危险品运输网络交通负载重分配示意图

1)网络正常阶段 网络未遭受恐怖袭击之前,各个节点的交通负载均为超过其最大容量限制,因此网络正常运行,如图 2 中(1)所示状态。

2)节点失效传播 网络中某个节点遭受恐怖袭击后,该节点失效,如图 2(2)中的 O 点所示。该节点以及将要通往该

节点的交通负载会疏散到其他节点,如图 2 中(2)→(3)所示过程,这将给失效节点相邻的节点造成负载压力。当疏散之后的网络节点容量未超过其最大容量限制,则该节点保持正常状态,如图 2 中(2)→(6)所示过程。反之,该节点失效,从而进行新一轮的交通负载的分配,如图 2 中(3)→(4)所示过程。

3)失效传播终止 恐怖分子袭击网络某个节点,该节点失效后引起其他节点的级联失效,最终导致网络所有节点均失效,网络处于级联崩溃状态,如图 2 中(1)→(2)→(3)→(4)→(5)所示过程;当网络具备很强的疏散能力,在某个节点失效后,其相邻节点可以在自身不失效的前提下对其交通负载进行疏散,使整个网络又达到了一个新的平衡状态,如图 2 中(1)→(2)→(6)所示过程。以上两种情况均使网络级联失效传播终止。

2.2 危险品运输网络级联失效抗毁性评估

关于网络抗毁性的定义,目前还没有形成统一的表述。在通信网络和计算机网络的研究领域,对网络抗毁性定义如下:当网络中出现确定性或随机性故障,网络维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力^[11]。从以上定义分析可知,网络抗毁性注重的是系统的关键部分遭受到攻击或摧毁,系统的恢复性和适应性,并在此情况下仍能完成关键服务的能力。故本文对危险品运输网络抗毁性作如下定义。

定义 1 危险品运输网络的抗毁性是指由于突发事件而导致危险品运输网络功能和服务失效时,运输网维持或恢复性能到一个可接受程度的能力或仍然能够完成关键服务的能力。

由假设 c) 可知,本文中不考虑危险品运输网络的恢复性。所以本文以危险品运输网络遭受一次袭击后,交通运输网络 G_i 及危险品运输网 G 中仍然能够维持运输功能的节点或边所占比例作为网络的级联失效抗毁性指标。由文献[7]可知,危险品运输网络的节点比边更容易引起网络的级联失效。故本文以引入节点存活率来评价恐怖袭击对危险品运输网络的级联失效抗毁性。

定义 2 节点存活率是指从危险品运输网络遭受到恐怖袭击开始直至网络中不再出现节点的级联失效为止,网络中可以正常工作节点的个数与网络节点个数之比。表达式为

$$F = \frac{N_b}{N} \quad (1)$$

其中: F 为危险品运输网络节点存活率; N_b 为遭受一次袭击后,危险品运输网络中仍然能够维持运输功能的节点数; N 为危险品运输网络的节点数。

鉴于危险品运输网络的特殊性,本文假定当 $F \leq 0.6$ 时,危险品运输网络处于瘫痪状态。

由上述定义不难看出,节点存活率描述的是网络遭受袭击后的现状,即从结果性角度来评估网络的级联失效抗毁性,但未对破坏该网络的过程性进行刻画。所以,为了更加确切地描述网络的级联失效特性,本文引入相对二次级联失效和相对二次级联失效数概念。

定义 3 相对二次级联失效是指交通网络 G_i 中的节点 v_i 因恐怖袭击而失效,节点 v_i 失效的同时导致另外一个节点 v_j 的失效。 $v_i \rightarrow v_j$ 级联失效过程中,相对于节点 v_i, v_j 的失效称做相对二次级联失效。例如,某网络中的节点存在如下级联失效过程: $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$, 相对于节点 v_1, v_2 的失效叫做相对二次级联失效,而相对于节点 v_2, v_3 的失效叫做相对二次级联失效。网络从被袭击引起级联失效开始至不再出现为止,发生相对二次

级联失效的次数称为相对二次级联失效数 C_f , 其中 $C_f = \sum_{i,j \in V} r_{ij}$ 。当 v_i 为 v_j 的相对二次级联失效节点时, 则 $r_{ij} = 1$, 反之 $r_{ij} = 0$ 。

从上述定义中不难得出, 当某节点遭受袭击后引发级联失效, 若相对二次级联失效数 C_f 越大, 表示网络的状态从正常到级联崩溃所需要的阶段数就越多, 因而网络的级联失效抗毁性也就越高; 特别地, $C_f = 0$ 表示节点遭受袭击后, 网络中不会出现级联失效现象, 因此网络具有非常高的级联失效抗毁性。

2.3 危险品运输网络级联失效模型

基于以上分析, 根据危险品运输网络的特性, 本文对危险品运输网络级联失效模型建立如下:

a) 在交通网络 G_t 中存在危险品运输网络 $G, G = (V, E)$, 节点 v_i 的交通负载为 $l(v_i)$, 最大容量为 $c_i^{\max}$ ($i \in 1, 2, 3, \dots, m$), 假设 $c_i^{\max} = \alpha \times l(v_i^{\text{initial}})$, $l(v_i^{\text{initial}})$ 为节点初始时刻的交通负载, α 为节点容量系数。

b) 某时刻恐怖袭击使危险品运输网络 G 中某个节点失效。

c) 根据假设 d), 失效节点的交通负载分配方式为平均分配, 即假设某时刻节点 v_k 失效, 则该节点交通负载平均分配给与其相连的节点, 则相邻节点 v_i 的交通负载变为 $l(v_i^{\text{new}}) = l(v_i) + \frac{l(v_k)}{d_i}$, d_i 为 i 节点的度。

d) 除失效节点外, 判断网络 G 中所有节点的交通负载是否超过其最大容量。若超过, 即 $l(v_i) > c_i^{\max}$, 则该节点失效, 并转至 c), 记录 $v_i \in F_p$, 其中 F_p 为网络失效节点集合; 反之则维持节点现状。

e) 除失效节点集 F_p 外, 对于任意节点 v_i , 均存在 $l(v_i) \leq c_i^{\max}$, $i \in \{F_p \cap V\}$, 则恐怖袭击对危险品运输网络 G 的级联失效影响结束。使用节点存活率函数 F 和相对二次级联失效数 C_f 对危险品运输网络的级联失效抗毁性进行评价。

3 仿真算例

3.1 仿真场景构建

考虑到采集现实数据验证本文模型代价过高, 故本文通过仿真手段进行说明。为研究危险品运输网络在恐怖袭击下的级联失效特性以及不同节点的度、容量系数和不同规划方式对网络抗毁性的影响, 本文构建如下危险品运输网络: 节点总数 16 个, 其中大节点 5 个, 小节点 11 个, 大节点—小节点毗邻方式 9 对, 小节点—小节点毗邻方式 11 对, 如图 3 所示。

首先对图 3 的网络进行场景构建, 场景构建是级联失效抗毁性最为重要的部分之一^[12], 构建的场景不但要准确描述现实情况, 还要具备一定的代表性。一般地, 在场景构建过程中, 不能将所有影响因素均考虑在内, 因为这样会导致整个仿真环境的复杂度提高, 所以常规的做法是在不影响问题本质的情况下对所选择的因素进行合理的转换和处理, 以便于构建出最符合现实的场景。

假设图 3 所示的某城市危险品运输网络在某时刻突然遭到恐怖分子袭击, 致使该节点失效, 设此场景为 S_a 。随后, 恐怖分子袭击的严重后果随着网络的级联失效特性传播, 直至网络的节点存活率不再发生改变, 设此场景为 S_b 。本文对于危险品运输网络级联失效抗毁性的场景构建过程为 $S_a \rightarrow S_b$, 仿真流程如图 4 所示。

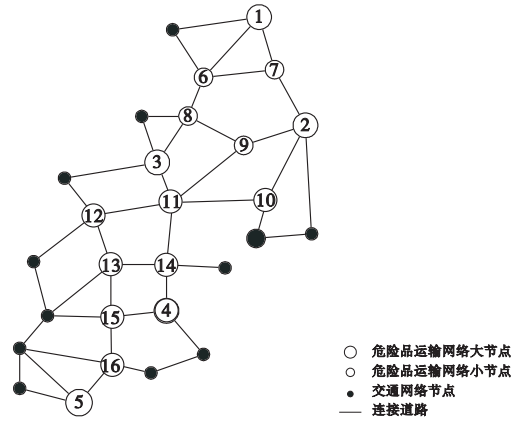


图3 某城市危险品运输网络规划

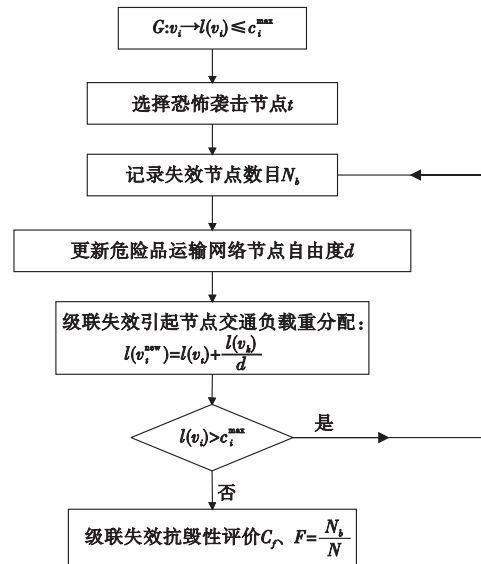


图4 仿真流程

基于假设 b) 和恐怖袭击的特点, 本文采用网络单节点失效的方法对恐怖袭击下危险品运输网络级联失效抗毁性的特性进行仿真研究。假设 $l(v_i^{\text{initial}})$ 为网络节点的度 d_i , 即 $d_i = l(v_i^{\text{initial}})$, $c_i^{\max} = \alpha \times d_i$ 。

3.2 仿真结果及分析

一般地, 对网络的攻击方式有随意攻击和蓄意攻击两种。随意攻击是指网络的节点以某种概率被随机破坏, 蓄意攻击是指敌人总是选择网络中最重要的节点作为袭击对象。在现实中, 恐怖分子对危险品运输网络的破坏总是以后果最严重为目标, 因此, 恐怖袭击下的危险品运输网络攻击方式为蓄意攻击。基于此, 本文主要研究危险品运输网络在蓄意攻击下的级联失效抗毁性。

1) 不同节点的度对网络级联失效抗毁性的影响

节点的度决定了失效节点周边节点对负载分担能力的大小, 也反映了恐怖袭击后网络疏散能力强弱。由图 3 可知, 本文仿真算例中存在三种节点的度: N_t^3 、 N_t^4 、 N_t^5 。其中, N_t^i 表示节点 t 的度为 i , 其实验结果如图 5 和 6 所示。

从图 5 和 6 可以得出, 当网络具备足够大的节点容量系数时, 节点存活率和相对二次级联失效数不受节点的度影响, 此时网络具备高级联失效抗毁性; 当网络节点容量系数不是很大时, 节点的度越高, 节点存活率和相对二次级联失效数反而越低。究其原因, 是因为随着节点的度增大, 网络的集成性和复杂性也会增高, 节点之间的相互影响增大。在这种情况下, 当

某一节点失效后,由于网络的高集成性和高复杂性,受其间接影响的节点也就越多,影响范围也就越广,故网络的级联失效抗毁性也就越低。

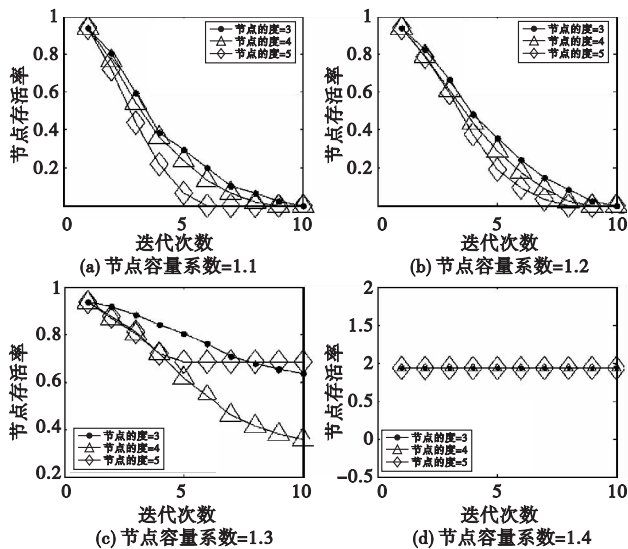


图5 节点的度对节点存活率的影响

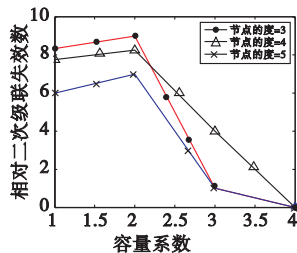


图6 节点的度对相对二次级联失效数影响

2) 不同容量系数对网络级联失效抗毁性的影响

从图7和8可以得出,随着网络容量系数的增大,节点存活率和相对二次级联失效数也随之提高,故网络的级联失效抗毁性也就越高;当节点容量系数非常大时,恐怖袭击的影响后果和范围非常有限。特别地,当 $\alpha = 1.4$ 时,网络节点失效效率 $F = 0.9375$, $C_f = 0$,说明当前容量系数下,网络具有非常高的级联失效抗毁性。究其原因,是因为随着容量系数的增大,与失效节点毗邻的节点对网络故障的分担能力和疏散能力也会随之增大,故网络也就具备较高的级联失效抗毁性。

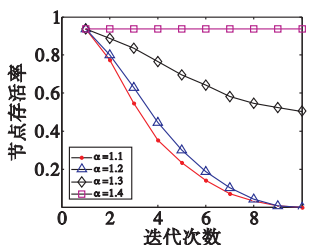


图7 容量系数对节点存活率的影响

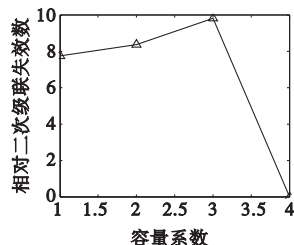


图8 容量系数对相对二次级联失效数的影响

3) 不同规划方式对网络级联失效抗毁性的影响

从图9和10可以得出,小节点一大节点相互毗邻规划方式的节点存活率和相对二次级联失效数最大,其次是小节点一小节点,最差的是大节点一小节点。究其原因,是因为当小节点失效后,与其毗邻的大节点具有很强的交通负载疏散能力,因而网络具备很高的级联失效抗毁性;当大节点失效后,与其毗邻的节点需要分担较大的交通负载,若与其毗邻的为小节点,则非常容易因为超过节点容量最大值而失效,故网络的级联失效抗毁性非常低。

4 结束语

一个具有高抗毁性的危险品运输网络是保障危险品运输能够有序、有效和正常进行的前提。因此,在危险品运输网络规划前期,要充分重视网络的级联失效特性对路网抗毁性的影响,特别是恐怖袭击以蓄意攻击的方式对危险品运输网络的影响,防止网络级联崩溃现象出现。在网络规划中期,通过一些必要规定,如:a)危险品运输网络节点容量度要高于道路交通网络;b)尽量采用小节点一大节点相互毗邻的规划方式;c)若采用小节点一小节点相互毗邻的规划方式,则小节点必须有很大的节点容量度;d)当网络容量系数不是很大时,网络节点的度不应非常大,即网络的结构不要太复杂。在网络规划后期,通过建立恐怖袭击以蓄意攻击的方式引起的突发事件场景,仿真分析网络的级联失效抗毁性,为优化网络的结构提供理论依据。当然,本文是在提出许多假设的基础上对危险品运输网的级联失效特性进行了初步的研究,这和现实情况还存在一定的差距,因此在今后的研究工作中还需结合问题的实际背景逐步展开和完善。

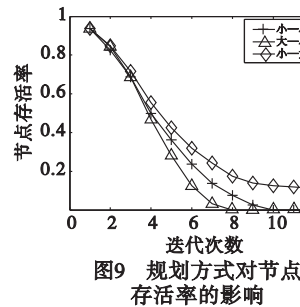


图9 规划方式对节点存活率的影响

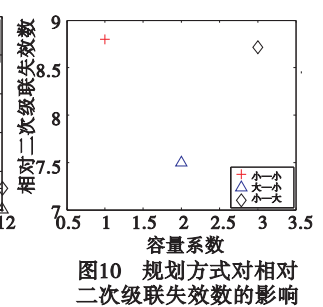


图10 规划方式对相对二次级联失效数的影响

参考文献:

- [1] 王伟,刘军,李海鹰,等.铁路网抗毁性分析[J].铁道学报,2010,32(4):18-22.
- [2] 狄鹏,胡涛,胡斌,等.基于复杂网络的作战网络模型抗毁性研究[J].系统仿真学报,2011,23(1):56-60.
- [3] KRINGS A W, AZADMANESH A. A graph based model for survivability applications [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(3): 680-689.
- [4] 高京伟.考虑抗毁性及业务需求的站址规划算法[J].计算机应用,2005,25(7):1704-1706.
- [5] WANG X F, XU J. Cascading failures in coupled map lattices [J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056113.
- [6] SCHÄFER M, SCHOLZ J, GREINER M. Proactive robustness control of heterogeneously loaded networks [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(10): 168-701.
- [7] 李勇,谭跃进,吴俊.基于任务时间约束的物流保障网络级联失效抗毁性建模与分析[J].系统工程,2009,27(5):7-11.
- [8] 朱涛,常国岑,张水平,等.基于复杂网络的指挥控制级联失效模型研究[J].系统仿真学报,2010,22(8):1817-1820.
- [9] WATTS D J. A simple model of global cascades on random networks [J]. Proc of the National Academy of Science of the United State of America, 2002, 99(9): 5766-5771.
- [10] MOTTER A E, LAI Y C. Cascading-based attacks on complex networks [J]. Physical Review E, 2002, 66(8): 065102.
- [11] HEEGAARD P E, TRIVEDI K S. Network survivability modeling [J]. Computer Networks, 2009, 53(8): 1215-1234.
- [12] SHIFTAN Y, KAPLAN S, HAKKERT S. Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2003, 8(5): 323-342.