

## 基于 TASEP 模型的复杂网络级联故障研究



杨超 刘志

浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023

(1655080189@qq.com)

**摘要** 研究复杂网络的级联故障对网络内部动力学行为的影响,对维护网络安全、保障网络稳定具有极高的应用价值。从网络级联角度分析,对于完全非对称的简单排它过程模型中系统流量变化的问题,采用基于完全非对称的简单排它过程的网络模型进行级联故障研究。通过研究网络最大强连通子图尺寸、网络强连通子图个数以及网络流量之间的关系得出,网络最大强连通子图尺寸与流量呈正相关,网络流量达到最低阈值的决定性因素是网络强连通子图个数。在不同平均度的网络中进行仿真实验,结果表明随着连边去除率的增加,网络平均度越大,网络流量的下降率越低;取不同粒子密度再对网络进行仿真实验,结果表明在低密度区间与高密度区间上,平均密度的变化对流量下降率的影响较小,在中间密度区间上流量下降率几乎不变。

**关键词:** 复杂网络;级联故障;动力学行为;完全非对称的简单排它过程;网络流量

中图分类号 TP393

## Study on Complex Network Cascading Failure Based on Totally Asymmetric Simple Exclusion Process Model

YANG Chao and LIU Zhi

College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

**Abstract** Studying the impact of cascading failures of complex networks on the dynamic behavior of the network has a high application value for maintaining network security and ensuring network stability. From the perspective of network cascading, the problem of system traffic change in the totally asymmetric simple exclusion process model is analyzed. Therefore, this paper uses a network model based on a completely asymmetric simple exclusion process for cascading failure research. The size of the largest strongly connected subgraph, the number of strongly connected subgraphs, and the current of network are compared. It is shown that the size of the largest strongly connected subgraph is positively correlated with the current. And the minimum threshold of network current is determined by the number of strongly connected subgraphs of the network. Then, the simulation experiments are carried out in different average networks, which shown that with the increase of the edge removal rate, the greater the average degree of network is, the lower the rate of network traffic decline is. Finally, the different particle densities are taken. The simulation experiments on network show that the change of average density has little effect on the rate of flow decline at low density and high density, and the decline rate of current is almost constant in the intermediate density interval.

**Keywords** Complex network, Cascade failure, Dynamic behavior, Totally asymmetric simple exclusion process, Current of network

## 1 引言

现实世界中有很多复杂网络的现实模型,如交通网络、神经网络、Internet、WWW 以及社交网络等,很多学者通过复杂网络的理论对真实网络的结构特征<sup>[1]</sup>和动态特征<sup>[2]</sup>进行研究。复杂网络的动态演变中存在级联故障,其体现的是一种网络内部动力学行为。级联故障是一种连锁反应,节点存在容量限制,当失效节点负载分配至与之相邻的节点后,相邻节点的性能下降;同时,若新分配的负载超过一定限度,则会出现新的失效节点,最终导致相当一部分节点甚至整个网络崩

溃<sup>[3]</sup>。为了研究这些系统,学者们提出了很多重要的模型来解释网络中的动力学行为。其中,完全非对称的简单排它过程(Totally Asymmetric Simple Exclusion Process, TASEP)是描述一维晶格(链)上“粒子”运输的一种经典模型,它考虑了实体之间的体积排斥效应。

1968年,MacDonald等<sup>[4]</sup>为理解物质蛋白质合成核糖体在 mRNA 上的运动而提出非对称排它过程(Asymmetric Simple Exclusion Process, ASEP)模型。该模型描述为:给定一个  $L$  个格子的一维格子链,每个格子最多放置一个粒子,即“排它性”安置粒子。系统中的粒子运动时,若粒子所在格

收稿日期:2019-07-09 返修日期:2019-11-07 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(11605154)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11605154).

通信作者:刘志(lzhi@zjut.edu.cn)

子的右边格子为空,则该粒子会以概率  $p$  进行跳跃,进入右边的格子;若粒子所在格子的左边格子为空,则该粒子会以概率  $q$  进行跳跃,进入左边的格子。当  $p=0$  或者  $q=0$  时,粒子在系统中就只做单方向的运动,故称该模型为完全非对称排它过程模型<sup>[5]</sup>,可用于表示粒子在二维空间的基于概率的流动。

TASEP 模型揭示了系统内部的动力学行为机理,被广泛用于很多相关领域,例如生物领域<sup>[6-7]</sup>、化工领域<sup>[8-9]</sup>等。TASEP 模型中粒子的运动反映了复杂网络中物质运动以及能量传输的动力学行为<sup>[10-11]</sup>。文献[12]将 TASEP 模型应用于单通道上,研究分析了粒子的进入率和离开率对系统稳态流量的影响。之后,该模型又被扩展到双通道以及多通道中,发现通道之间的耦合对物质传输有着很大的影响<sup>[13-14]</sup>。Arita 等针对交通信号灯对交通道路车辆的控制,在 TASEP 模型中研究了信号灯机制对网络中流量的影响<sup>[15]</sup>。在 TASEP 模型的基础上,Baek 等研究了网络中交叉点与其相邻节点之间的相关性对随机规则有向网络的影响<sup>[16]</sup>。

根据上述分析,大多数关于 TASEP 模型的研究都集中在在一维结构的运输过程中。因此,本文基于 TASEP 模型,在复杂网络中进行级联失效分析,通过网络中的连边去除率来定义网络级联规模,改变网络的拓扑结构,分析网络级联失效对网络中粒子流量的影响。本文的研究目标是利用 TASEP 模型揭示复杂网络的级联故障过程中网络流量的动力学行为演变,以在现实网络发生级联故障时对网络全局进行把控,制定相应策略,遏制级联故障的蔓延,保证系统正常运行。

## 2 模型描述

### 2.1 级联故障的鲁棒性测度

在有向图  $G$  中,如果两个顶点间至少存在一条路径,则称两个顶点强连通(Strongly Connected)。如果有向图  $G$  的每两个顶点都强连通,则称  $G$  是一个强连通图。一个非强连通有向图中存在很多个强连通子图,其中规模最大、节点最多的子图被称为有向图最大强连通子图,与无向图类似<sup>[17]</sup>。

因此,有向图的最大强连通子图尺寸  $S$  为:

$$S = \frac{N'}{N} \quad (1)$$

其中,  $N'$  为网络中最大强连通子图的节点数目,  $N$  为原始网络中的节点总数。有向图的最大强连通子图尺寸可以反映一个有向网络拓扑结构的变化以及网络的鲁棒性,且  $S \in [0, 1]$ 。随着所受攻击的逐渐加强,网络会逐渐分散,从而形成多个连通子图,网络的最大连通子图中的节点数目就会逐渐减少,最大连通子图尺寸不断减小,网络的连通性能变差,网络鲁棒性降低。

由于最大强连通子图尺寸  $S$  显示的是网络级联故障前后网络拓扑结构的变化,因此本文使用类似的方式对网络中的流量进行处理,以便进行对比,即:

$$P = \frac{J'}{J} \quad (2)$$

其中,  $J'$  为网络结构变化后的稳态流量,  $J$  为初始网络的稳态流量,  $P$  为网络变化前后流量的比值。由于初始网络的流量是不变的,因此网络变化前后流量的比值也侧面反映了网络流量变化的幅度。

### 2.2 基于 TASEP 的网络模型

对于开放性边界条件下的 TASEP 模型,通常有两种更新规则<sup>[18]</sup>:随机更新规则和并行更新规则。随机更新规则指在每个单位时间内,随机选取系统中的某个格子进行更新。并行更新规则指在单位时间内,对系统中的所有格子进行更新。本文使用更贴近真实网络中物质传输过程的并行更新原则构建开放性边界条件下的 TASEP 模型。

TASEP 模型中,通常采用系统稳定时的流量  $J$  和系统粒子的平均密度  $\rho$  作为系统的特征参数。稳态流量  $J$  指系统稳定后,每个单位时间内系统中的粒子跳出或者跳入某一个格子的平均概率;平均密度  $\rho$  指初始时系统网络中粒子数占有网络格子的比例。

用模型  $G=(V,E,c)$  表示随机规则网络,其中  $V=\{1,2,3,\dots,N\}$  表示网络节点的集合,节点总数为  $N$ ;  $E=\{e_{ij} | i \neq j \in V\}$  表示网络边的集合,且边的方向为从节点  $i$  到节点  $j$ ;  $c$  表示网络中每个节点有  $c$  个连接,即每个节点的度为:

$$c = k_i^{\text{out}} + k_i^{\text{in}} \quad (3)$$

其中,  $k_i^{\text{out}}$  表示节点  $i$  的出度,  $k_i^{\text{in}}$  表示节点  $i$  的入度。

基于 TASEP 模型,在网络的每条边上进行格子划分<sup>[16]</sup>。每条边划分  $L$  个单位格子,每个节点算作一个单位格子,每个格子只能容纳一个粒子。当粒子处于网络中的节点位置时,则它有  $n(n \leq k_i^{\text{out}})$  个可选方向。注意,若粒子运动方向上的下一个格子有粒子存在,则不选择该方向,此时粒子以进入概率  $\alpha=1/n$  选择方向跳跃。因此,系统中格子总数为:

$$N_{\text{total}} = N + cNL \quad (4)$$

粒子总数为:

$$N_{\text{particle}} = \rho N_{\text{total}} \quad (5)$$

其中,  $\rho$  是系统中粒子的平均密度。如图 1 所示,每经过一个单位时间,根据并行更新规则更新每个粒子的位置,其中黑色圆圈代表粒子,正方形代表网络边上的格子,处于交叉口即网络节点上的粒子以进入概率  $\alpha$  进行跳跃,若跳跃方向的下一个格子中有粒子则不选择该方向。

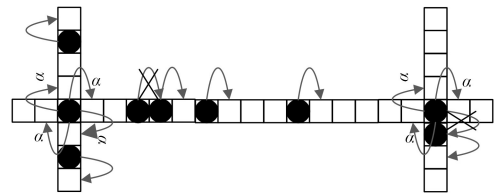


图 1 TASEP 网络模型中的粒子跳跃示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle hopping in TASEP network model

由于在粒子运动的整个动力学过程中,系统格子总数  $N_{\text{total}}$  是保持不变的,因此在  $\rho$  确定的情况下,粒子数也保持不变。在随机规则网络中进行跳跃更新时,全局流量  $J$  被定义为每个单位时间内网络中粒子的平均跳跃次数除以网络中的格子总数<sup>[19]</sup>。

在网络级联的过程中,网络节点连边失效也会引发级联故障。因此,在建立的模型中,本文通过随机攻击的方式随机去除网络连边对网络进行破坏,改变网络的拓扑结构,使用网络连边的去除率定义网络中级联故障的规模,研究级联规模对网络内部粒子运动产生的影响。

### 3 实验分析

#### 3.1 实验参数设定

首先建立节点总数  $N=200$  的随机规则网络,同时考虑现实城市路网中交叉口的道路数量。因此,本文构建了三个随机规则网络,网络节点的度分别为 3,4,5,网络每条连边上的格子数设为 100,去除网络连边,分析级联故障对网络流量的影响。所有实验均进行 20 次,并取这 20 次实验结果的平均值作为最终实验结果。

#### 3.2 实验结果与分析

图 2 显示的是在  $N=200$ ,节点  $k_i^in = k_i^{out} = 3$ ,网络连边格子数为 100,粒子平均密度  $\rho=0.3$  的随机规则网络中进行实验时,稳态流量  $J$ 、最大强连通子图尺寸  $S$ 、流量比值  $P$ 、网络强连通子图总数 (the Total number of strongly connected Subgraphs, TS) 以及连边去除率  $r$  之间的关系。

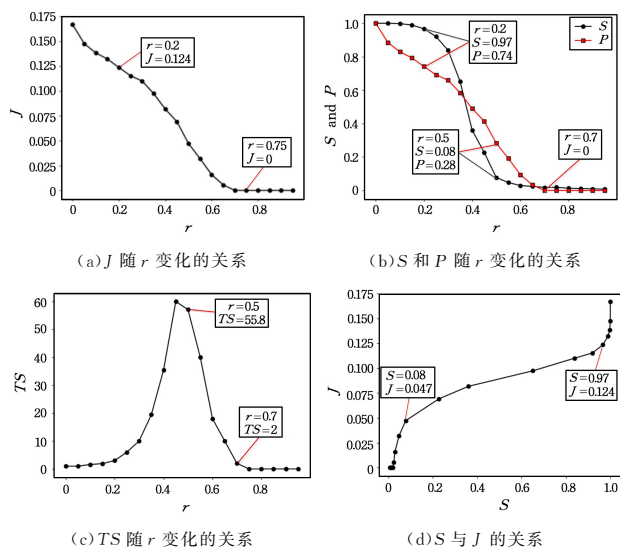


图 2 S, P, TS 以及 r 之间的关系

Fig. 2 Relation of S, P, TS and r

从图 2(a) 看出,随着连边去除率的增加,网络流量降低,网络中粒子可活动的范围逐渐减小,进而影响网络的流量。从图 2(b) 看出,随着连边去除率的增加,网络最大强连通子图尺寸以及流量比值逐渐降低。当连边去除率较小时,并不会影响网络的连通性,网络的最大强连通子图变化较小。但是连边的去除会使得网络中的格子数减少,网络中粒子可进行跳跃的空间随之减小,这会减少网络中粒子的跳跃次数。由稳态流量  $J$  的定义可知,随着网络中粒子平均跳跃次数的减少,网络稳态流量下降,流量比值自然也逐渐减小。因此,连边去除率较小时,网络的最大强连通子图尺寸几乎不变,网络流量比值却会逐渐减小。但是随着连边去除率的增加,网络连通性降低,此时网络的最大强连通子图开始大幅度缩减。当去除率  $r=0.5$  时,网络已经崩溃,  $S=0.08$  接近于 0,整体网络的节点之间几乎不连通,但是此时流量比值  $P=0.28$  却不为 0,说明网络中依然有粒子在运动,形成了网络的稳态流量。也就是说,网络稳态流量的最低阈值并不是由网络的最大强连通子图尺寸决定的。

从图 2(c) 可以看出,随着网络连边去除率的增加,网络强连通子图总数呈现出“先扬后抑”的变化趋势。由图 2(b)

可知,去除率  $r=0.5$  时,网络最大强连通子图尺寸  $S=0.08$  近乎为 0,而此时图 2(c) 中  $TS=55.8$ ,网络强连通子图个数却较多。这是由于随着网络连边的去除,网络逐渐被分割成了多个规模较小的强连通子图(如图 3 所示),且它们相互不连通,因此强连通子图总数呈现出上升趋势,网络最大强连通子图尺寸却在减小;而当网络连边去除比例达到一定程度时,这些强连通子图的规模越来越小,变得不可被分割,此时网络强连通子图个数最多,但是网络的最大强连通子图规模已经较小,最大强连通子图尺寸亦较小。因此,网络最大强连通子图尺寸接近 0 时,虽然整个网络已经崩溃,但是网络的强连通子图个数却不为 0,网络中依然存在很多孤立的强连通子图,在这些强连通子图中节点依然可以相互连通,粒子可以在其中运动。因此,图 2(b) 中网络的最大强连通子图尺寸为 0 时,网络流量依然存在。在去除率  $r>0.5$  后,随着网络连边的去除,网络中孤立的强连通子图变得不再强连通,网络的强连通子图个数也随之减少(如图 4 所示)。当网络强连通子图个数为 0 ( $r=0.7$ ) 时,网络内部没有可供粒子循环运动的强连通区域,此时网络稳态流量变为 0。因此,网络的稳态流量达到最低阈值的决定因素是网络强连通子图的个数,并不是网络的最大强连通子图尺寸。从图 2(d) 可以看出,网络最大强连通子图尺寸与网络稳态流量呈正相关。在连边去除率较低时,网络最大强连通子图尺寸  $S$  几乎不变(如图 2(c) 所示),网络稳态流量却随着连边去除率的增加而下降。而连边去除率较高时,网络最大强连通子图尺寸  $S$  近乎为 0,此时网络流量与网络强连通子图个数相关,且不为 0。因此,网络最大强连通子图尺寸  $S$  与网络稳态流量  $J$  呈正相关,且  $S$  接近临界阈值时,相比中间区域,网络稳态流量随着最大强连通子图尺寸的增加大幅上升。

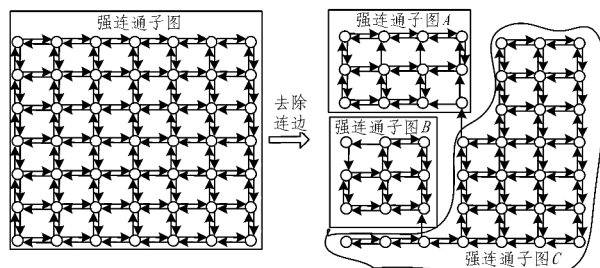


图 3 去除连边,网络产生多个强连通子图

Fig. 3 Remove connected edges, and network generates multiple strongly connected subgraphs

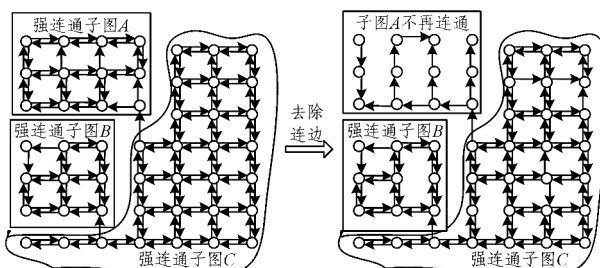


图 4 去除连边,强连通子图个数减少

Fig. 4 Remove edges, number of strongly connected subgraphs has been reduced

由于网络平均度的改变会影响初始网络的拓扑结构,因

此本文继续对不同平均度的网络进行实验。图 5 给出了网络节点的平均度分别为 3, 4, 5 时的实验结果。

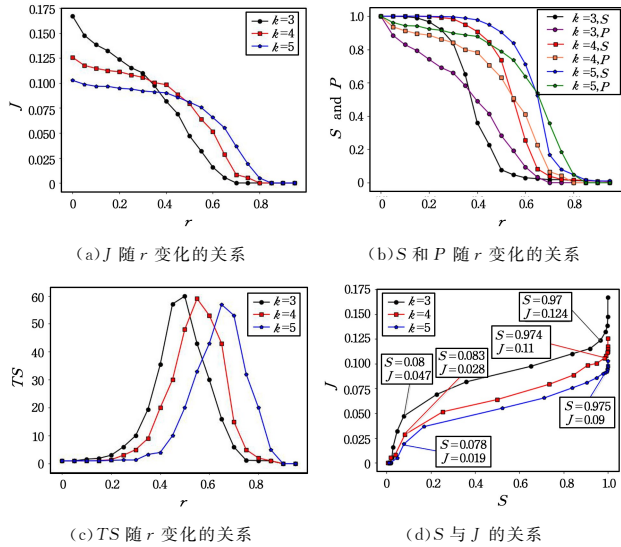


图 5 不同节点度  $k$  下的实验结果

Fig. 5 Experimental results under different node degrees  $k$

从图 5(a)可以看出,随着网络平均度的增大,初始网络的稳态流量减少。网络平均度越大,节点的连边也就越多,因此格子数会增加,而网络粒子的平均密度不变,所以网络中的粒子数目也会增加。根据文献[19],在交叉口(节点)处,同一时刻只能有一个粒子,这一瓶颈极大地限制了粒子的流动。因此,网络平均度增加,网络粒子的平均跳跃次数却几乎不变。由稳态流量  $J$  的定义可知,平均跳跃次数不变,网络格子数增加,会导致网络的稳态流量降低。但是当网络连边的去除率增加到一定程度时,平均度高的网络的稳态流量反而高于平均度低的网络的稳态流量,对此将结合图 5(b)和图 5(c)进行解释。从图 5(b)可以看出,相同去除率时,平均度越低的网络,它在图中对应的流量比值越低,而流量下降率反而越高;在相同连边去除率下,平均度越低的网络,其最大强连通子图尺寸越小,网络的连通性被破坏的程度更大,网络流量越低,对网络稳态流量的影响就较大。因此,平均度越低的网络,它的稳态流量下降率对网络连边去除率越敏感。从图 5(c)可以看出,随着网络平均度的增大,去除率与网络强连通子图总数的曲线峰值有所右移,所以去除率增加到一定程度后,平均度高的网络中强连通子图个数多于平均度低的网络中的强连通子图个数。虽然平均度低的网络初始稳态流量较大,但是随着去除率的增加,网络流量的下降率升高,当去除率达到一定程度时,网络的流量主要受网络强连通子图尺寸的影响。因此,图 5(a)中会出现平均度高的网络的流量高于平均度低的情况。由此可知,网络平均度越小,网络的初始稳态流量越高,但是网络流量的下降率也高。

以上分析了级联失效过程中不同网络结构对系统中流量的影响,接下来探究在级联失效过程中,网络的粒子平均密度对网络稳态流量的影响。图 6 给出了在网络节点总数  $N=200$ ,节点进出度  $k^{\text{in}}=k^{\text{out}}=3$ ,网络连边格子数为 100 的随机规则网络中进行实验,粒子平均密度分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 0.9 时,网络最大强连通子图尺寸  $S$  与网络稳态流量  $J$  随连边去除率  $r$  变化的趋势。

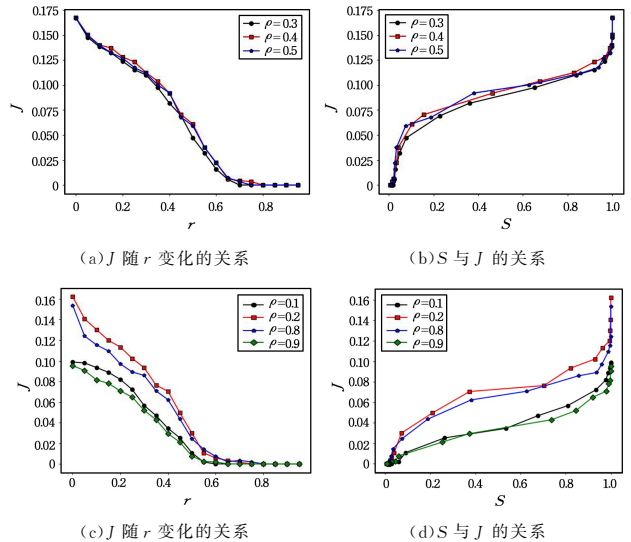


图 6 不同  $\rho$  下的实验结果

Fig. 6 Experimental results under different  $\rho$

图 6(a)和图 6(b)中,由于初始网络的各项构造参数未变,因此从网络的静态指标角度来看,在同一去除率下,网络的最大连通子图尺寸不会因为网络的平均密度  $\rho$  的改变而产生变化。但是可以看出这两张图上的曲线几乎重合,因此粒子平均密度  $\rho=0.3, 0.4, 0.5$  时,在级联过程中,网络平均粒子密度对网络流量变化没有太大影响。从图 6(c)可知,  $\rho=0.2$  时初始流量  $J$  比  $\rho=0.1$  时的大,  $\rho=0.8$  时初始流量  $J$  比  $\rho=0.9$  时的大,而在  $\rho=0.2$  与  $\rho=0.8$  时网络稳态的流量相接近,  $\rho=0.1$  与  $\rho=0.9$  时网络稳态的流量相接近。同时,在平均度不变的网络中,最大强连通子图尺寸的变化只与网络的连边去除率有关,与其他条件无关,因而此时网络结构不会影响稳态流量下降率。因此,图 6(c)中未出现类似于图 6(a)中的流量变化情况,而是初始流量低的网络的稳态流量始终低于初始流量高的网络的稳态流量。从图 6(d)可见,不论网络平均度大小如何,网络最大强连通子图尺寸  $S$  与稳态流量  $J$  都是呈正相关的。网络最大强连通子图尺寸相同时,初始流量较高的网络的稳态流量较大;而初始流量较低的网络达到稳态时,它的流量较小,且在不同粒子密度下的网络中发生级联故障前后的网络稳态流量变化并不大。因此,在级联失效过程中,平均密度对网络流量下降率的影响不大,如图 7 所示。

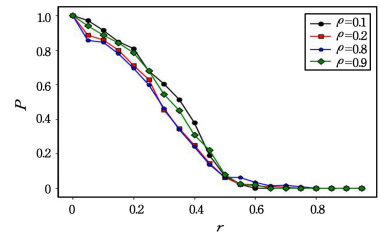


图 7  $\rho=0.1, 0.2, 0.8$  和  $0.9$  时,  $P$  与  $r$  的关系

Fig. 7 Relationship of  $P$  and  $r$ , when  $\rho=0.1, 0.2, 0.8$  and  $0.9$

为了凸显网络的关键节点或连边对网络流量的影响,本文在  $N=200$ ,平均度为 4,粒子密度  $\rho=0.3$  的 BA 网络中进行实验,蓄意去除网络的关键连边,如图 8 所示。图中初始的 BA 网络曲线显示关键连边的去除会严重抑制网络粒子的运动,使得网络流量迅速下降。这是由于关键连边的去除,会导

致网络的连通性迅速下降,粒子运动的区域缩减。随机连通BA网络中关键节点的邻近节点再进行实验,如图8中非初始BA网络的曲线所示,这些连边的添加使得网络流量有所增加,缓解了粒子运动的束缚。因此,对网络中关键连边进行保护是必要的,而如何减小关键连边的去除对粒子运动的影响也是未来工作的重点。

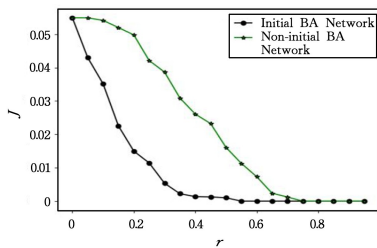


图8  $J$  随  $r$  变化的关系

Fig. 8 Relationship between  $J$  and  $r$

**结束语** 本文主要分析了在基于TASEP模型的随机规则网络中,级联失效对网络流量的影响。通过研究网络流量  $J$  随去除率变化的趋势、最大强连通子图尺寸  $S$  和流量比值  $P$  随去除率变化的趋势,以及  $S$  与流量  $J$  的关系,发现最大强连通子图尺寸与网络流量呈正相关,网络流量  $J$  最低阈值的决定因素是网络强连通子图个数。对不同平均度的网络进行实验,结果发现网络平均度越大,流量的下降率越小。本文为级联故障对网络动力学的影响研究提供了新的思路,研究成果的进一步应用对维护现实网络系统的安全有着重要意义。

在现实网络中,网络流量一般为随机的,网络中的粒子数也会出现随机增加或减少的现象,而且这两种行为可能同时发生,这对构建模型以及定义粒子行为的规则来说是一个全新的挑战。同时,如何降低关键连边的去除对粒子运动的影响也是未来需要关注的重点。

## 参考文献

- [1] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286: 509-512.
- [2] HETHCOTE H W. The mathematics of infectious diseases[J]. *SIAM Rev*, 2000, 42(4): 599-653.
- [3] YU Y, XIAO G, ZHOU J, et al. System crash as dynamics of complex networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(2): 11726-11731.
- [4] MACDONALD C T, GIBBS J H, PIPKIN A C. Kinetics of biopolymerization on nucleic acid templates [J]. *Biopolymers*, 1968, 6(1): 1-25.
- [5] LIU M, WANG R, JIANG R, et al. Defect-induced transitions in synchronous asymmetric exclusion processes[J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(2): 195-200.
- [6] SZAVITS-NOSSAN J, CIANDRINI L, ROMANO M C. Deciphering mRNA sequence determinants of protein production rate[J]. *Physical review letters*, 2018, 120(12): 128-139.
- [7] DUC K D, SALEEM Z H, SONG Y S. Theoretical quantification of interference in the TASEP: Application to mRNA translation shows near-optimality of termination rates[J]. *Physical Review E*, 2018, 120(12): 182-183.
- [8] WANG Y Q, ZHANG Z H. Cluster mean-field dynamics in one-dimensional TASEP with inner interactions and Langmuir dynamics[J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(2): 154-160.
- [9] JIANG R, WANG Y Q, et al. Phase diagram structures in a periodic one-dimensional exclusion process[J]. *Physical Review E*, 2013, 87(1): 012107.
- [10] JBOTTO D, PELIZZOLA A, PRETTI M, et al. Dynamical transition in the TASEP with Langmuir kinetics: mean-field theory [J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2018, 52(4)
- [11] FERRARI P A. TASEP hydrodynamics using microscopic characteristics[J]. *Probability Surveys*, 2018, 15: 1-27.
- [12] LIU M, WANG R, JIANG R. Defect-induced transitions in synchronous asymmetric exclusion processes [J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(2): 195-200.
- [13] LIANG Y, HUANG Q. ASEP Model Based on Parallel Update Rule and Simulation Study[J]. 2018, 8(4): 177-184.
- [14] WANG Y Q, JIANG R, WU Q S. Dynamics in phase transitions of TASEP coupled with multi-lane SEPs[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 88(3): 1631-1641.
- [15] ARITA C, FOULAADYAND M E, SANTEN L. Signal optimization in urban transport: A totally asymmetric simple exclusion process with traffic lights[J]. *Physical Review E*, 2016, 95(3-1): 032108.
- [16] BAEK Y, HA M, JEONG H. Effects of junctional correlations in the totally asymmetric simple exclusion process on random regular networks[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2014, 90(6): 062111.
- [17] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-Based Attacks on Complex Networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2): 065102.
- [18] KNIZEL A, PETROY L, SAENZ A. Generalizations of TASEP in discrete and continuous inhomogeneous space[J]. *Communications in Mathematical Physics*, 2019, 372(3): 797-864.
- [19] NERI I, KERN N, PARMEGGIANI A. Totally Asymmetric Simple Exclusion Process on Networks[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(6): 068702.



**YANG Chao**, born in 1995, postgraduate. His main research interests include complex network and ITS.



**LIU Zhi**, born in 1969, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include intelligent computing, ITS and so on.