

## 复杂网络节点重要度评估及网络脆弱性分析\*

程光权, 陆永中, 张明星, 黄金才

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**提出一种基于节点状态演化级联失效模型的节点重要度评估和网络脆弱性分析方法。故障传递演化的内在机理是基础复杂网络变得脆弱的根源。在负载网络级联失效模型的基础上,提出一种能够实时跟踪节点负载状态,继而根据节点状态来重分配节点负载的重分配模型。提出基于节点状态演化的节点重要性评估和网络结构脆弱性分析方法,通过脆弱性分析结果找出网络的健壮性参数,并对此节点重要性评估方法进行失效分析。通过仿真实验验证方法的有效性。

**关键词:**状态演化;级联失效;重要度评估;脆弱性

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)01-120-08

## Node importance evaluation and network vulnerability analysis on complex network

CHENG Guangquan, LU Yongzhong, ZHANG Mingxing, HUANG Jincai

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A method for node importance evaluation and network vulnerability analysis based on node's cascading failure model was proposed. The mechanism of fault transmitting and evolution was the reason for vulnerability of basic complex networks. A model that can get real-time state of nodes' loads and reallocating loads was raised based on node's cascading invalidation model. A node importance evaluation and network vulnerability analysis method based on nodes' state evolution were put forward, by which the robustness parameters of networks were found out, and the failure effect analysis was conducted. Its effectiveness was verified through simulation experimental results.

**Key words:** state evolution; cascading failure; importance evaluation; vulnerability

基础设施的脆弱性在近年发生的几起影响相当深远事故中得到了充分的体现。例如,发生于2003年的北美大停电事故,其波及范围覆盖了北美大约5000万人口,经济损失巨大;而发生在2012年的印度停电事故,其波及范围、持续时间、破坏力更是超乎想象<sup>[1]</sup>。事后通过分析发现这些事故往往由初始的小扰动、小故障引发,致使系统中局部线路发生跳变或阻塞,继而产生级联效应扩散至整个系统,最后导致系统全局的瘫痪。因此研究复杂基础系统中故障传递演化的内在机理对于充分掌握整个系统的脆弱特性非常关键。

研究基础设施网络系统脆弱性首先需要对其发生级联故障的传递演化机理进行研究,对此学者们主要从抽象的复杂系统理论以及真实的现实系统分析这两个方面着手。基于复杂系统理论的研究工作对基础设施表现出的网络分布特性进行了分析<sup>[2]</sup>。自2002年Motter等<sup>[3]</sup>引入基于过载

机理的级联失效模型以来,此模型就成了研究系统级联失效内在机理的一种很好的手段,也成了近年来研究的热点<sup>[4]</sup>。基于过载机理的级联失效动力学模型<sup>[5]</sup>能够帮助人们探索和认识这些复杂系统的内在结构,从而实现控制复杂系统向人们需要的方向发展。经典的级联失效模型没有考虑节点负载状态的变化,不能实时地依据节点状态进行负载重分配。

当负载网络的级联失效模型建立之后,紧接着就需要对级联失效过程中负载网络的节点重要性进行度量。现有关于节点重要性的度量方法可分为两类<sup>[6]</sup>:第一类方法为在网络的健全的前提下反映节点的显著程度,一般通过节点在网络拓扑中的中心性程度进行评估,即节点的中心性越强,显著性越明显,节点越重要,典型的指标有度中心、介数、子图、紧密性等;第二类方法为去除掉节点之后分析网络的性能破坏程度,一般通过网络降

\* 收稿日期:2015-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201328, 71471175);国防科技大学校预研基金资助项目(ZK16-03-24)

作者简介:程光权(1982-),男,安徽舒城人,副研究员,博士, E-mail:cgq299@163.com

低的性能指标来衡量,即去除掉该节点之后,网络性能下降得越多,则该节点越重要,经典方法有节点删除法<sup>[7]</sup>、收缩法<sup>[8]</sup>,通过网络中的最短路径、网络效率<sup>[9]</sup>以及生成数目的下降程度来衡量。最近的研究成果<sup>[10]</sup>提出了网络中的节点重要性不仅与网络拓扑结构有关,还受传播机制以及节点自身属性影响<sup>[11-12]</sup>。然而上述节点重要性的评估方法仅考虑了网络的静态特性,忽略了网络中存在的物质流动给网络带来的影响,并不能很好地反映真实的节点重要程度。本文希望在基于过载机理的级联失效动力学模型的基础上,借助节点空闲容量<sup>[13]</sup>的思想,提出一种针对性更强的基于节点实时状态演化的局部负载重分配模型。

网络的脆弱性分析是对整个网络性能评估中相当关键的一部分,关于网络脆弱性研究以及相关的评估方法已经成为当前研究热点,吸引了来自网络科学各个领域的学者的注意,它主要有以下三种<sup>[14-16]</sup>:一是基于图论的抗毁性研究针对拓扑特性完全已知的网络进行失效,评估网络特性的变化,这些特性的度量方法主要有节点连通性、结构熵、拓扑势,同时也有对不完全信息条件下的网络、加权网络等进行研究;二是基于解析的抗毁性研究与渗流问题进行类比,通过渗流理论分析了网络在随机节点失效与重点节点失效两种类型的失效方式下的抗毁性质;三是基于仿真的抗毁性研究对结构不定的网络进行评估,分析了相关网络在上述两种失效方式下网络性能的变化情况。这些方法为本文分析基于级联失效的动态脆弱性研究提供了很好的借鉴<sup>[17]</sup>。

## 1 级联失效模型

### 1.1 节点状态

节点状态由可用节点能够容纳转移负载的能力来表示,它由两个方面的因素决定:一是节点自身的负载剩余容纳能力,二是相邻节点的负载剩余容纳能力。从上述描述的过程来看,它可以分为两个阶段,首先考虑节点剩余容纳能力,假设节点*i*的实时负载为 $F_i$ ,节点的容量为 $C_i$ ,那么节点的负载剩余容纳能力 $Y_i$ ,可用式(1)表示。

$$Y_i = \begin{cases} C_i - F_i, & F_i \leq C_i \\ 0, & F_i > C_i \end{cases} \quad (1)$$

即节点负载剩余容纳能力为节点容量与现有负载的差值,当负载超过容量时,其负载剩余容纳能力为0,此时该节点已经失效。节点负载剩余容纳能力体现的是节点还能够处理或者容纳负载的

能力, $Y_i$ 值越大,说明其处理能力越强,在负载重分配时应该占有优势,其分配的比例应该越高,反之则越低。它是随着节点负载的变化而不断变化的。

考虑到相邻节点负载剩余容纳能力的影响,提出能够更精确衡量节点负载剩余容纳能力的节点状态,该状态是节点自身的负载剩余容纳能力与相邻节点负载剩余容纳能力的有机结合,共同构成了节点真实的负载剩余容纳能力。对节点状态的指标进行定义,如式(2)所示。

$$S_i = \begin{cases} [\min(Y_i, \sum_{j \in \Gamma_i} Y_j)]^\gamma, & j \notin \emptyset \\ Y_i^\gamma, & j \in \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

其中: $S_i$ 表示节点状态; $Y_i$ 表示节点裕度; $\Gamma_i$ 表示节点*i*的邻接节点; $\gamma$ 为权重参数,通过调节 $\gamma$ 的值可以调节整个节点状态在负载重分配时所占的比例,当 $\gamma = 0$ 时,式(2)为局部负载均匀重分配。式(2)反映的是节点能够容纳负载的能力,它取自自身节点负载剩余容纳能力与相邻节点负载剩余容纳能力总和中的最小值,当没有相邻节点时,节点负载剩余容纳能力即为自身的节点负载剩余容纳能力。

反映节点状态的一个相当直观的例子就是在交通网络中,某一条道路因突发原因而堵塞,道路上的车流会向与之相邻的其他道路转移,而交管中心会根据实时监控数据来建议司机往能够承载更多车辆的道路上行驶,但道路的承载能力又受到与之相邻的道路分流能力的影响。

### 1.2 负载重分配方式

负载重分配方式是描述节点失效后其上的负载向网络中其他节点进行转移的规则。负载重分配方式如图1所示,节点*f*失效后,原本打算通过该节点*f*的负载(例如信息流、交通流)将会重新选择通过路径,其上的负载将会转移到与之相邻的节点,以保证整个网络的有效运行。整个网络会由于节点的失效而进行负载的全面更新,即

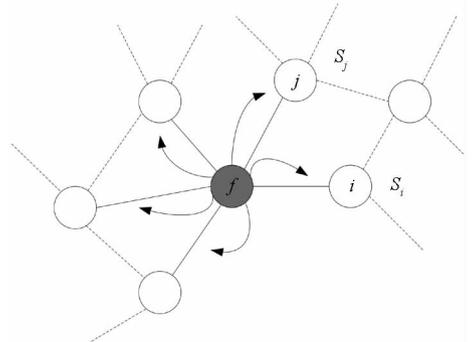


图1 基于节点状态演化的负载重分配方式

Fig. 1 Load reallocation based on nodes' state evolution

$F'_i = F_i + \Delta F_i, i \in \Gamma_f$ , 其中  $F_i$  为更新之前的负载,  $F'_i$  为更新之后的负载,  $\Delta F_i$  为更新时的增量,  $\Gamma_f$  为失效节点  $f$  的所有邻接节点。假设失效节点  $f$  的负载为  $F_f$ , 相邻节点的节点状态为  $S_i, i \in \Gamma_f$ , 在相邻节点上重新分配的负载增量可以用式 (3) 表示, 它是对经典近邻重分配方式的改进, 它与节点状态相关而不与节点负载相关, 式 (4) 给出了重分配方式的概率分布。

$$\Delta F_i = F_f \frac{S_i}{\sum_{j \in \Gamma_f} S_j}, i \in \Gamma_f \quad (3)$$

$$P_i = \Delta F_i / F_f = \frac{S_i}{\sum_{j \in \Gamma_f} S_j}, i \in \Gamma_f \quad (4)$$

### 1.3 初始负载

初始负载为负载网络中节点负载的初始值, 假定节点  $i$  的初始负载为  $F_i$ , 采用经典的节点初始负载表示公式, 定义其为节点的度  $k_i$  的函数  $F_i = ak_i^\alpha$ 。其中,  $a$  和  $\alpha$  是可调的参数, 由它们控制节点  $i$  的初始负载的大小。这种假设是合理的, 例如在交通网络中, 每个节点的交通流通常与它的度相关。

### 1.4 容量模型

容量模型是节点能够承载负载的极限值, 这里设定为与节点的初始负载成一定的比值。假定每一个节点  $i$  均有一个容量限度。现实中的节点容量经常会被投入所限制, 即对于节点的投入有限, 从而容量也有限。很自然的假设就是节点  $i$  的极限容量  $C_i$  与其初始负载相关, 即  $C_i = (1 + \beta)F_i, i = 1, 2, \dots, N$ 。其中, 常数  $\beta (\beta \geq 0)$  表示网络的最大忍受度, 处理额外负荷的能力。由于节点处理负载均有一个极限值, 所以假定当  $F_i + \Delta F_i \geq C_i$  时, 节点  $i$  将会有很大概率崩溃, 从而引发进一步的负载重分配, 继而向整个网络扩散。

### 1.5 重分配方式效果分析

美国航空网络<sup>[18]</sup> 是研究负载网络的一个很好的网络拓扑模型。该网络具有 235 个节点以及 1297 条边, 网络的平均度为 11.038 3, 度分布略微分散, 节点度最大为 130。初始负载模型均采用  $F_i = ak_i^\alpha, a = 1$ ; 容量模型采用  $C_i = (1 + \beta)F_i, i = 1, 2, \dots, n$ ; 权重参数  $\gamma = 1$ 。方式 1 表示基于负载的近邻重分配方式,  $\Delta F_i = F_f F_i / \sum_{j \in \Gamma_f} F_j$ ; 方式 2 表示基于节点状态演化的近邻重分配方式。图 2 给出了两种重分配方式在北美航空网络上的对比, 按节点负载从大到小排序, 选取负载最大的前 50 个节点进行失效, 取其失效节点比例的平均值

作为衡量网络脆弱性的指标。图 2 中选取容量参数  $\beta = 0.03$ , 初始负载参数  $\alpha \in (0.1, 2)$ , 每次增加 0.1, 纵坐标表示网络的失效节点比例。由图 2 可知, 基于节点状态演化的重分配方式的网络健壮性要明显优于经典的基于负载的近邻重分配方式, 这也说明了提出的这种负载重分配方式相较于经典重分配方式具有较强的合理性。

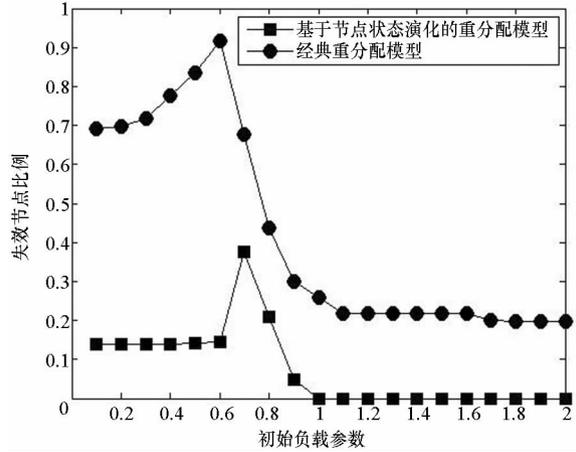


图 2 两种重分配方式的效果对比

Fig. 2 Comparison of two ways of reallocation

表 1 中给出了两种重分配方式在不同参数下北美航空网络的脆弱性对比。从表 1 的结果来看, 对于不同的方式来说, 在容量参数  $\beta$  取不同值时, 基于节点状态的负载重分配方式都要优于经典重分配方式; 而对于方式 2 中相关参数与方式 1 的对比来说,  $\gamma = 2$  以及  $\gamma = 3$  时的效果都不完全优于方式 1, 只有当  $\gamma = 1$  时才完全优于方式 1, 这也说明基于节点状态演化的负载重分配方式中,  $\gamma = 1$  具有相当强的抵抗网络的级联失效能力, 后续的实验中将此参数设置为 1。

表 1 不同重分配方式下脆弱性分析

Tab. 1 Effectiveness analysis of different reallocation

$\alpha$	$\beta$	方式 1	方式 2		
			$\gamma = 1$	$\gamma = 2$	$\gamma = 3$
0.1	0.03	0.690 6	0.410 0	0.138 0	0.140 3
0.1	0.06	0.173 1	0.092 9	0.138 1	0.142 4
0.1	0.09	0	0	0.153 8	0.145 1
0.3	0.03	0.718 3	0.490 9	0.138 0	0.138 4
0.3	0.06	0	0	0.144 8	0.142 0
0.3	0.09	0	0	0.421 6	0.151 1
0.5	0.03	0.836 2	0.618 6	0.138 0	0.141 2
0.5	0.06	0	0	0.631 4	0.334 8
0.5	0.09	0	0	0	0.166 6
1.0	0.03	0.258 9	0.173 2	0.043 1	0
1.0	0.06	0.039 8	0.026 0	0	0
1.0	0.09	0	0	0	0

## 2 节点重要度评估方法

在基于节点状态演化的级联失效模型中,节点的重要度评估具有相当重要的作用。如果节点的重要度评估指标值越高,说明其引发网络级联失效越明显,节点越重要,该节点失效对整个网络的破坏性越大,该节点越需要防护。依据上述失效模型,参照文献[19]提出的节点重要度评估指标,可以用节点 $f$ 故障后由于其自身负载向近邻节点转移而引起近邻节点向失效状态转移的程度来衡量节点引发网络级联故障的能力即节点的重要度。根据基于节点状态演化的重分配方式以及节点容量的限制,为了避免触发进一步的级联故障发生,重分配的负载将满足式(5)。

$$\Delta F_i = F_f \frac{S_i}{\sum_{j \in \Gamma_f} S_j} < \beta F_i, i \in \Gamma_f \quad (5)$$

其中, $\Gamma_f$ 为失效节点 $f$ 的所有近邻节点, $S_i$ 表示节点状态。所以可以用 $F_f S_i / [\beta F_i (\sum_{j \in \Gamma_f} S_j)]$ 来表示节点 $f$ 故障后近邻节点 $i$ 的负载震荡程度,当它大于1时,节点 $i$ 将由于过载而引发下一步的级联失效;当它小于1时,节点 $i$ 将处于安全状态。因此可以用引起近邻节点的平均故障程度来定义节点的重要度 $P_f$ ,如式(6)所示。

$$P_f = \sum_{i \in \Gamma_f} \frac{F_f S_i}{\beta F_i (\sum_{j \in \Gamma_f} S_j)} / |\Gamma_f| \quad (6)$$

其中, $|\Gamma_f|$ 为故障节点 $f$ 的所有近邻节点的数目。该指标能够清楚地衡量失效节点 $f$ 对于网络所造成的后果:当 $P_i \geq 1$ 时,该节点失效肯定会引起网络的级联故障;当 $P_i < 1/|\Gamma_f|$ 时,该节点失效引发整个网络级联故障的可能性较小;当 $1/|\Gamma_f| < P_i < 1$ 时,该节点失效有相当大的概率会引发整个网络的级联故障。

## 3 网络脆弱性分析方法

### 3.1 基于级联失效的动态脆弱性测度

传统的网络的鲁棒性测度较多的是考虑网络的静态特性,即只关注网络拓扑结构的影响或者失效之后网络功能变化所带来的影响,并没有考虑网络中能量流(或信息流)等动力学因素对于网络脆弱性的影响。一般来说,网络中的元素(节点或者连边)失效后,原本经过该元素的信息流会自适应地选择其他的路径流动并达到稳态,这也是网络产生级联失效的根源所在。对于上述过程的脆弱性测度,需要能够反映这个动态过程。

从上述网络的动态特性出发,选用平均失效规模来衡量网络的脆弱性,这是一种相对简单但是能够反映网络动态级联特性的指标,很多研究都是基于此指标来衡量网络级联失效的脆弱性的<sup>[20-21]</sup>。假定网络 $G=(V,E)$ , $V$ 代表节点, $E$ 代表连边,这里记节点的数目 $|V|=N$ , $|E|=M$ 。由于主要考虑网络中的负载节点而不涉及连边,因此选择移除掉网络中的一个负载节点 $i$ ,计算其产生的失效规模 $T_i$ ,显然有 $0 \leq T_i \leq N-1$ 。然后依次计算网络中的其他节点失效之后的相应的网络节点失效数目,之后取所有网络节点失效规模的平均数 $T$ 作为网络整体脆弱性的评估指标,对其进行归一化处理,如式(7)所示,其中, $T_i$ 表示节点 $i$ 失效之后的网络中节点的级联失效数目。

$$T = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N T_i \quad (7)$$

### 3.2 脆弱性分析实验方法

为了说明网络的脆弱性,主要从两个角度进行分析,即对随机故障以及恶意袭击(即有针对性地选择节点进行攻击使之失效)这两种方式分析网络所表现出的脆弱程度。其中,恶意袭击方式主要包括三种失效方式(即高负载失效方式、低负载失效方式和重要度失效方式)来衡量网络的脆弱性质。一个直观的认识就是当给出了初始负载参数 $\alpha$ 之后,可知节点的负载容量越大,其对于节点级联失效的承受能力越强,即节点有充足的容量空间来容纳由于节点失效而重分配过来的负载。因此选用使得网络能够完全承受攻击时的容量参数阈值 $\beta_c$ 来反映网络的整体脆弱特性,即在相同的初始负载参数下,容量参数阈值 $\beta_c$ 越小,说明其在随机故障或者恶意袭击之下的生存能力越强,网络越健壮,反之则越脆弱。

#### 3.2.1 随机失效方法

随机失效方法是一种被广泛采用的衡量网络整体脆弱的方法,它能对现实生活中广泛存在的异常故障进行有效模拟,采用随机的方式将各种随机出现的、毫无规律可循的故障原因表现出来。随机选取网络中的部分元素使之失效,观测其对网络整体结构即网络节点失效规模的影响。

#### 3.2.2 选择节点失效方法

相比于随机失效方法,选择节点失效方法在分析网络抵抗级联失效时更加有效,也是本文主要采用并分析比较的失效方法。采用多角度的选择节点失效方式对网络的脆弱性进行分析,有助于清晰地了解网络面对级联故障过程中的整体特性,掌握级联失效过程的内在机理,为选择重点目

标进行防护提供依据,以投入更少的代价实现更好的抵抗级联失效的能力。

①高负载失效方法。从先前的研究成果<sup>[20-21]</sup>可以得出这样一个结论:对于大部分满足无标度特性网络,按照高负载失效方法优先使网络中负载最高的若干节点失效,从拥有最高负载的节点开始,(对于网络中拥有的很多相同负载的节点,采用随机选择的方式进行处理),更有可能诱发网络的整体级联失效。这种方法简单直观,在若干现实网络上已经过测试,能够引起更大规模的级联失效。

②低负载失效方法。这种方法与高负载失效方法恰好相反,这是高负载失效方法的有效补充,在现实生活中尽管很少被采用,但其对于发现那些网络中负载不高,但是处于中枢位置的关键节点拥有很好的效果。同样地,按照节点负载从低到高进行排序,之后逐个失效处理(对于网络中拥有的很多相同负载的节点,采用随机选择的方式进行处理)。

③重要度失效方法。节点重要度是本文基于节点状态演化的负载重分配模型提出的节点重要度排序方法。在对节点进行失效之前,首先对节点的重要度进行排序,然后根据排序结果选择重要度排名靠前的关键节点进行失效(对于网络中拥有的很多相同重要度的节点,采用随机选择的方式进行处理)。

### 3.3 脆弱性分析实验步骤

步骤 1:输入网络数据(NetData)、初始负载( $F_i = ak_i^{-\alpha}$ )、节点容量( $C_i = (1 + \beta)$ );

步骤 2:针对每个网络数据,通过三种失效方式(随机、高负载、低负载)来衡量网络的整体特性。逐步改变容量的参数,找出容量阈值  $\beta_c$  (即此种失效方式下,网络恰好不发生级联失效时容量参数的取值);

步骤 3:逐步改变初始负载的参数,实验得出相应的容量阈值;

步骤 4:根据三种不同失效方式(随机、高负载、低负载)下容量阈值的变化,分析网络对于不同失效方式的脆弱性情况;

步骤 5:以两种失效方式相交时的初始负载参数以及容量阈值为网络模型(即在此参数下,网络对于这两种失效方式均具有很强的抗毁性)选择重要度排序靠前的节点进行失效;

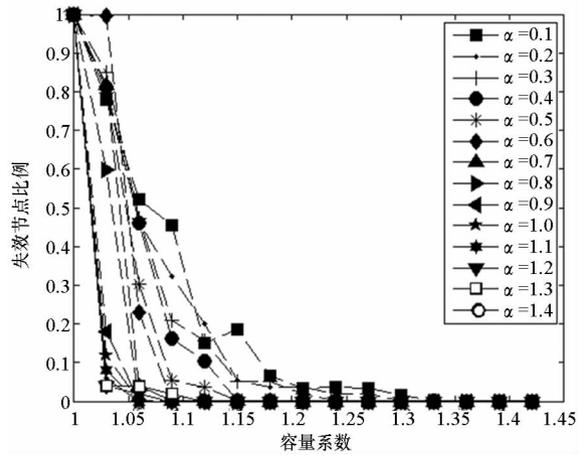
步骤 6:统计四种失效方式下网络的脆弱性情况。

## 4 实例分析

### 4.1 不同失效方式下美国航空网络脆弱性分析

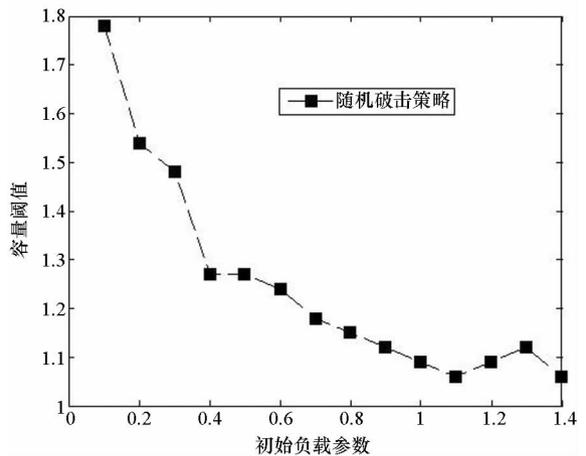
选用通过使网络中的部分节点失效(选取 50 个)后网络级联失效规模的平均值来衡量。找出使得网络能够完全避免级联失效的容量阈值参数  $\beta_c$  来反映在此参数下网络的脆弱性质(即在不同的初始负载参数下,容量阈值越小,网络越健壮)以此容量阈值参数来观察网络的性能变化。

1)随机失效对美国航空网络脆弱性的影响。图 3 显示的是在随机失效方式下,针对网络不同的初始负载参数( $\alpha = 0.1, 0.2, \dots, 1.4$ ),美国航空网络脆弱性分析结果。从图 3(a)中可以发现,初始负载参数越大,随着节点极限容量的增大,失效节点比例下降得越快;从图 3(b)中可以发现,



(a) 容量系数改变下级联失效规模

(a) Scale of cascading invalidation when capacity parameter changes



(b) 容量阈值与初始负载参数

(b) Capacity threshold and initial load parameter

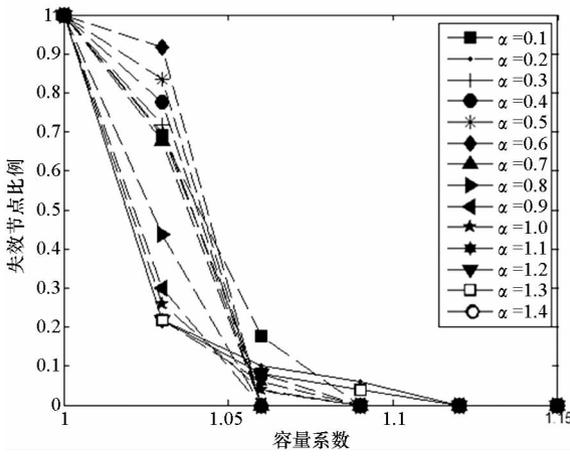
图 3 美国航空网络上随机失效的脆弱性分析  
Fig. 3 Vulnerability analysis of random invalidation in American airline network

其极限容量  $\beta_c$  均小于 0.8,并以  $\alpha = 1.1$  为分界点, $\alpha < 1.1$  时随着初始负载参数的增大,即负载分布的增大,容量阈值不断减小; $\alpha > 1.1$  时随着初始负载参数的增大,即负载分布的增大,容量阈值不断增大;也就是说对于随机失效来说,航空网络在初始负载参数  $\alpha = 1.1$  时能够获得最强的健壮性。在这个初始负载条件下只需要很小的极限容量就能防止网络出现级联故障。

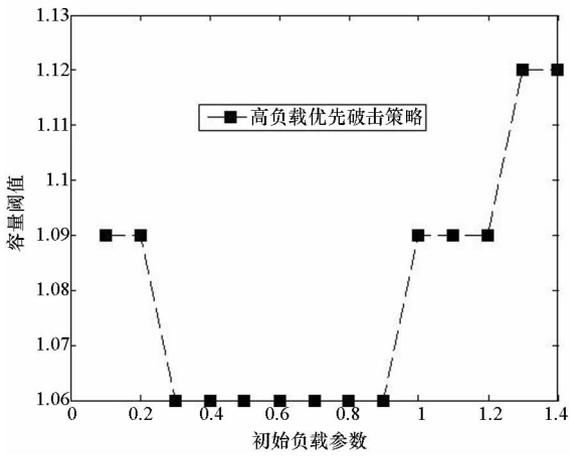
2) 高负载失效方式对美国航空网络脆弱性的影响。图 4 显示的是在高负载失效方式下,针对网络不同的初始负载 ( $\alpha = 0.1, 0.2, \dots, 1.4$ ),美国航空网络脆弱性分析结果。图 4(a) 展示了容量系数与网络中失效节点比例的关系,可以发现,容量系数越大,网络容错性越好;图 4(b) 显示了容量阈值参数  $\beta_c$  和初始负载参数  $\alpha$  的关系,可

以发现,当初始负载系数处在一定范围时 ( $0.2 < \alpha < 1$ ),对于高负载优先的失效方式来说,美国航空网络的容错性能良好,只需要很少的容量阈值就能使网络避免发生级联故障。

3) 低负载失效方式对美国航空网络脆弱性的影响。图 5 显示的是在低负载失效方式下,针对网络不同的初始负载 ( $\alpha = 0.1, 0.2, \dots, 1.4$ ),美国航空网络脆弱性分析结果。从图 5(a) 中可知,初始负载参数越大,随着节点极限容量的增大,失效节点比例下降得越快;从图 5(b) 中可知,其极限容量  $\beta_c$  均小于 0.8,随着初始负载参数的增大,即负载分布的增大,容量阈值不断减小,也就是说对于低负载优先的失效方式来说,随着初始负载的增加,网络只需要更小的极限容量就能防止网络出现级联故障。

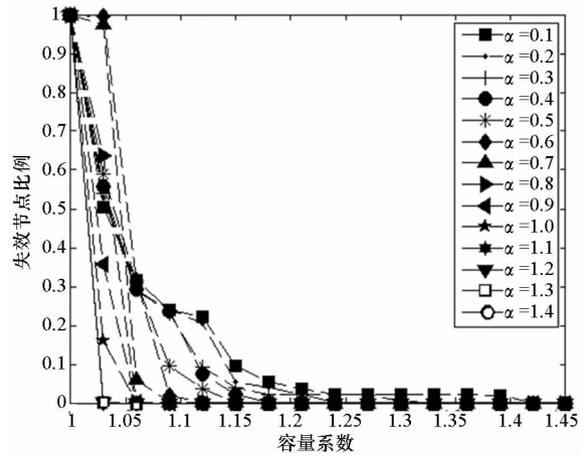


(a) 容量系数改变下级联失效规模  
(a) Scale of cascading invalidation when capacity parameter changes

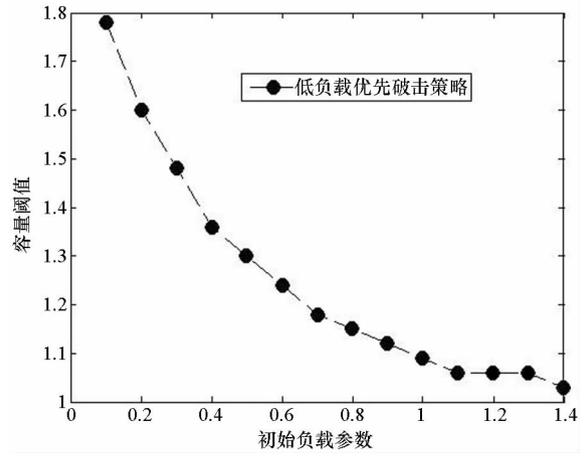


(b) 容量阈值与初始负载参数  
(b) Capacity threshold and initial load parameter

图 4 美国航空网络上高负载失效方式的脆弱性分析  
Fig. 4 Vulnerability analysis of high load invalidation in American airline network



(a) 容量系数改变下级联失效规模  
(a) Scale of cascading invalidation when capacity parameter changes



(b) 容量阈值与初始负载参数  
(b) Capacity threshold and initial load parameter

图 5 美国航空网络上低负载失效方式的脆弱性分析  
Fig. 5 Vulnerability analysis of low load invalidation in American airline network

4) 两种基于负载优先的失效方式对比。图 6 显示的是高负载和低负载两种失效方式下,容量阈值参数和初始负载参数的关系。从图 6 中可以观察到两个现象:①对于高负载失效方式来说,初始负载越大,网络容量阈值越大,网络越脆弱;对于低负载优先的失效方式来说,初始负载越大,网络容量阈值越小,网络越健壮。②在相同的美国航空网络上,两种完全相反的失效方式下,初始负载与网络的脆弱性也恰好相反。当初始负载参数  $\alpha < 1$  时,网络对于低负载优先的方式更敏感,即更脆弱;当  $\alpha > 1$  时,网络对于高负载失效方式更敏感,即更脆弱。这为发现网络中的关键节点提供了重要依据。

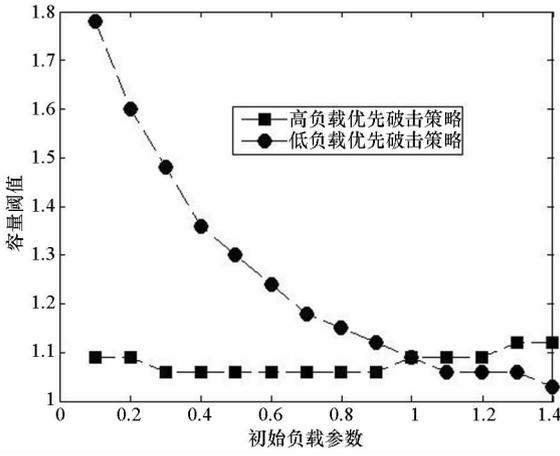


图 6 两种失效方式下北美航空网络容量阈值与初始负载关系的对比

Fig. 6 Comparison of capacity threshold and initial load under two invalidation ways on American airline network

### 4.2 节点状态演化重要度排序

基于节点状态演化的重要性评估指标是由节点状态引发近邻节点失效能力的体现,为了说明提出的重要度评估方法的有效性,本节在美国航空网络上进行节点重要性分析实验。其中,选定初始负载及节点容量参数  $\alpha = 1, \beta = 0.07$ ,这个参数的选择根据前面基于低负载失效方式以及高负载失效方式下网络抵抗级联失效的分析结果而来。基于前述的节点重要度评价方法,排序结果见表 2,表 2 仅展示排序前 30 位的节点。

### 4.3 基于重要度优先失效的级联影响

根据节点重要度排序结果,按照失效节点重要度从高到低依次从网络中使该节点失效,网络失效结果如图 7 所示。

表 2 美国航空网络节点重要性排序

Tab. 2 Nodes' importance of American airline network

重要度排名	节点编号	重要度得分	重要度排名	节点编号	重要度得分
1	43	0.076 9	16	8	0.043 5
2	48	0.076 9	17	178	0.043 5
3	90	0.076 9	18	155	0.042 5
4	95	0.076 9	19	193	0.041 2
5	144	0.076 9	20	174	0.041 1
6	145	0.076 9	21	85	0.040 2
7	185	0.076 9	22	89	0.034 7
8	137	0.062 4	23	140	0.033 3
9	51	0.060 8	24	197	0.033 3
10	81	0.057 0	25	83	0.032 4
11	131	0.050 4	26	180	0.032 3
12	14	0.046 3	27	216	0.032 3
13	42	0.046 2	28	150	0.032 1
14	71	0.046 0	29	25	0.031 7
15	201	0.044 5	30	18	0.031 3

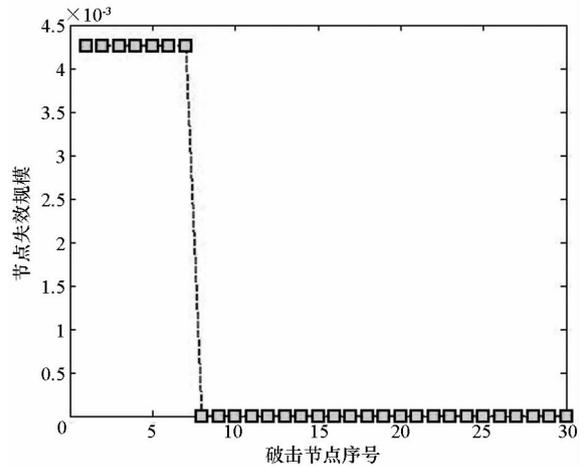


图 7 美国航空网络失效效果

Fig. 7 Network invalidation of American airline network

图 7 中的横坐标为按照节点重要度排序的结果,从 1 到 30 依次失效,纵坐标表示网络的级联失效比例。从图 7 中可以得出排序靠前的节点失效所引起的网络级联失效的数目要明显大于排序靠后的节点。对于美国航空网络来说,此排序结果的失效效果显然很好。排序最靠前的 7 个节点,均表现出来在此初始负载参数以及容量参数下的良好失效效果;而排序靠后的其余节点失效效果较差。也就是说,对于这种网络拓扑结构来说,提出的排序方法非常适合。

## 5 结论

本文着重分析了对于日常生活影响巨大的关键基础设施,例如能源系统、交通运输系统等,提出了能够反映其负载特性的负载网络模型,以基础设施的级联故障效应为关键点发掘突破口,探索这些网络产生级联故障效应的内在机理,为重点防护关键目标提供有效参考,提高防护的有效性与可行性。以此为牵引,以构建基于负载网络的级联故障模型为基础,在引入基于节点状态演化的负载重分配模型的基础上,提出基于节点状态演化级联失效模型的节点重要性评估方法;在脆弱性分析结果的基础上,找出了负载网络的健壮性参数;然后基于此健壮参数,对此节点重要性评估方法进行失效分析。以典型的负载网络为例,应用四种破击策略对网络上的级联失效过程进行脆弱性分析,在找出使得基于这种新的负载重分配策略的网络具有更高健壮性的参数的基础上,利用提出的重要度评价方法得出的排序结果对目标网络进行重要节点识别,为找到网络的关键点进行防护提供了一种很好的思路。

## 参考文献 (References)

- [1] 丁理杰,曹一家,刘美君. 复杂电力网络的连锁故障动态模型与分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2008,42(4): 641-646.  
DING Lijie, CAO Yijia, LIU Meijun. Dynamic modeling and analysis on cascading failure of complex power grids [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(4): 641-646. (in Chinese)
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6): 440-442.
- [3] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex network [J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 065102, 114-129.
- [4] Wang J W, Rong L L. Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures [J]. Safety Science, 2011, 49(6): 807-812.
- [5] 肖延东,老松杨,侯绿林,等. 基于节点负荷失效的网络可控性研究[J]. 物理学报,2013,62(18): 1-8.  
XIAO Yandong, LAO Songyang, HOU Lulin, et al. Network controllability based on node overloaded failure [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 1-8. (in Chinese)
- [6] Albert R. Diameter of the world wide web [J]. Nature, 1999, 401(9): 130-131.
- [7] Nardelli B, Belvedere O, Roschke V, et al. Synthesis and release of B-lymphocyte stimulator from myeloid cells [J]. Blood, 2001, 97(1): 198-204.
- [8] 周漩,张凤鸣,周卫平,等. 利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性[J]. 物理学报,2012,61(19): 1-7.  
ZHOU Xuan, ZHANG Fengming, ZHOU Weiping, et al. Evaluating complex network functional robustness by node efficiency [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 1-7. (in Chinese)
- [9] 刘建国,任卓明,郭强,等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. 物理学报,2013,62(17): 1-10.  
LIU Jianguo, REN Zhuoming, GUO Qiang, et al. Node importance ranking of complex networks [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 1-10. (in Chinese)
- [10] Gang Y, Tao Z, Jie W, et al. Epidemic spread in weighted scale-free networks [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(2): 510-514.
- [11] Klemm K, Serrano M Á, Eguíluz V M, et al. A measure of individual role in collective dynamics [J]. Scientific Reports, 2012, 292(2): 1-8.
- [12] Aral S, Walker D. Identifying influential and susceptible members of social networks [J]. Science, 2012, 337(6092): 337-341.
- [13] 吴俊,谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报,2005,20(2): 128-131.  
WU Jun, TAN Yuejin. Study on measure of complex network invulnerability [J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 128-131. (in Chinese)
- [14] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Resilience of the Internet to random breakdowns [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(21): 4626-4628.
- [15] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Breakdown of the Internet under intentional attack [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(16): 2-5.
- [16] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(7): 378-382.
- [17] 段东立,吴俊,邓宏钟,等. 基于可调负载重分配的无标度网络连锁效应分析[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(1): 203-208.  
DUAN Dongli, WU Jun, DENG Hongzhong, et al. Cascading failure model of complex networks based on tunable load redistribution [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(1): 203-208. (in Chinese)
- [18] Soumen R. Airline data[Z/OL]. [2015-07-29]. [http://boseinst.ernet.in/soumen/Network\\_Controllability\\_Datasets.html](http://boseinst.ernet.in/soumen/Network_Controllability_Datasets.html).
- [19] 段东立,战仁军. 基于相继故障信息的网络节点重要度演化机理分析[J]. 物理学报,2014,63(6): 381-389.  
DUAN Dongli, ZHAN Renjun. Evolution mechanism of node importance based on the information about cascading failures in complex networks [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(6): 381-389. (in Chinese)
- [20] Wang J W. Modeling cascading failures in complex networks based on radiate circle [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(15): 4004-4011.
- [21] Zhang J H, Xu X M, Liu H, et al. Attack vulnerability of self-organizing networks [J]. Safety Science, 2012, 50(3): 443-447.