

# 基于复杂网络的灾害蔓延模型评价及改进

欧阳敏<sup>†</sup> 费 奇 余明晖

(华中科技大学系统工程研究所, 武汉 430074)

(2007 年 10 月 29 日收到, 2008 年 4 月 30 日收到修改稿)

介绍了几种已存在的复杂网络上的灾害蔓延模型, 在对模型进行优缺点评价的基础上, 给出了一种网络中存在冗余系统的改进模型. 对不同的模型, 在不同的网络结构下, 仿真分析了蔓延过程的差异以及重要参数的作用. 结果表明网络中存在冗余系统的灾害蔓延过程变缓, 相应有了更多的应急、补救时间, 同时也解释了现实生活中大规模灾害事件很少发生的原因.

关键词: 复杂网络, 灾害蔓延, 冗余系统

PACC: 0500, 0520

## 1. 引 言

灾害事件危害着人类生命财产和生存条件, 给人类社会造成巨大的冲击. 虽然灾害事件经常是突发性的, 但许多灾害事件具有多米诺效应或雪崩效应: 一个关键的子系统(节点)受到微小扰动后, 触发了整个系统的连锁反应, 从而导致系统中的大部分子系统(节点)崩溃, 产生灾难性后果<sup>[1, 2]</sup>.

真实世界中存在的大量复杂系统都可以通过网络来描述<sup>[3-6]</sup>, 这些网络由许多节点与连接两节点的边所组成. 其中节点用来代表组成真实系统中的个体, 而节点间的边用来表示个体间的相互联系. 比如说, 人与人之间的社会关系, 物种之间的捕食关系, 词与词之间的语义联系, 计算机之间的网络连接, 网页之间的超级链接, 科研文章之间的引用关系, 以及科学家之间的合作关系等都可以用网络模型来描述. 自从小世界效应<sup>[7]</sup>和无标度特性<sup>[8]</sup>发现以来, 复杂网络的研究在过去几年得到了迅速发展, 其研究者来自图论、统计物理、计算机、生态学、社会学以及经济学等各个不同领域. 在信息通信、网络搜索、信号传输、传染病控制以及社会学中对突发事件的预报和处理等方面都具有重要的意义.

相应地, 复杂网络上的蔓延动力学研究成为热点, 如网络中随机或特定去除某些关键节点或边产生整个网络拓扑结构的演化<sup>[9]</sup>、病毒在计算机网络

上的蔓延<sup>[10]</sup>、传染病在人群中的流行<sup>[11]</sup>以及谣言在社会中的扩散<sup>[12]</sup>等. 而复杂网络上灾害蔓延动力学也成为研究热点<sup>[17, 18]</sup>, 不同作者对不同的蔓延模型进行了详细分析, 但存在的各种模型均具有局限性. 对灾害蔓延的建模是研究灾害预防与控制的基础, 于是本文先介绍了目前存在的几种灾害模型, 并对模型进行了评价. 在此基础上, 提出了一种更贴切实际的考虑节点冗余的模型, 最后对各种模型进行了仿真分析.

## 2. 已有的灾害蔓延模型及其评价

考虑有向网络  $G = (N, E)$ , 其中包含节点  $i \in N := \{1, 2, \dots, n\}$ , 代表子系统(节点)的集合; 有向边  $(i, j) \in N \times N$ , 表示子系统(节点)间存在的相互影响关系, 并用  $M_{ij}$  表示子系统(节点) $j$  对子系统(节点) $i$  的影响程度. 对于每个子系统(节点)的属性值用  $x_i$  表示, 当  $x_i = 0$  时表示这个子系统(节点)是稳态的. 反之, 当  $x_i$  偏离零时说明这个子系统(节点)产生崩溃. 如下介绍几种存在的灾害蔓延模型, 并分析了模型的优缺点.

### 2.1. 不考虑系统自我修复

由于子系统(节点)之间的间接影响或反馈环的存在, 使得子系统(节点) $j$  对另一个子系统(节点) $i$  的实际影响比  $M_{ij}$  要大得多, 因此估计间接的影响显

<sup>†</sup> Email: pandasjtu@126.com

得很有必要.在文献 [15] 中作者给出了一种求解系统间实际相互影响的方法:假设子系统(节点)间的实际相互影响程度用矩阵  $A = (A_{ij})$  表示,  $A_{ij}$  指子系统(节点)  $j$  对子系统(节点)  $i$  的实际影响程度.那么

$$A = A_r = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{r^k M^k}{k!}$$

$$= \frac{1}{r} [ \exp(rM) - 1 ],$$

其中  $1$  表示单位矩阵,  $M^k$  表示经过  $k-1$  个子系统(节点)而造成的间接影响.  $r$  反映的是间接影响相比直接影响的强弱程度,  $r$  越大, 则间接影响越大.

对于任意的向量  $X$ , 可得到向量  $X(r)$ , 满足  $X(r) = \exp(rM)X$ , 于是有

$$X(0) = X \frac{dX(r)}{dr}$$

$$= MX(r),$$

$$\frac{dX}{dr} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{X(r) - X(0)}{r}$$

$$= MX(0),$$

所以  $X(r) = (rA_r + 1)X(0)$  可理解为系统在  $r$  时刻的状态. 因此, 对于不同的  $r$ , 也就是不同的间接影响程度, 可以知道系统可能的响应是  $X(r) = (rA_r + 1)X(0)$ .  $X(0)$  可认为是系统在初始时刻的状态. 如果  $X(0) = 0$  则认为整个系统处于正常状态, 而如果  $X(0) \neq 0$  则系统处于不稳定状态. 通过上述方法对系统进行分析, 假如能用一个指标  $F$  来衡量整个大系统的性能:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i |Y_i|,$$

其中用  $Y_i$  表示子系统(节点)  $i$  受扰动后的可能响应,  $w_i$  为衡量子系统(节点)重要程度的权重系数. 那么系统在  $r$  时刻的性能状态为

$$F = F_r = \sum_{i=1}^n w_i Y_i$$

$$= \sum_{i=1}^n W_i \left[ \sum_j (rA_{ij} + \delta_{ij}) X_j(0) \right].$$

要改善这个系统的性能, 需要使  $F$  接近零. 可通过采取适当的措施, 使得  $M$  改变, 进而使得  $F$  变小. 由于系统中正负反馈的存在, 使得若从局部影响关系上改变  $M$ , 可能会导致系统的整体情况变得更糟糕, 就是所谓的“好心做坏事”.

本模型的优点是可以考虑某种补救措施对整个系统的影响. 通常, 当一个灾害事件发生时, 决策者掌握不充足的信息, 有很少的决策时间, 因此更多情

况下只从局部上来改善系统. 在最坏的情况下, 会使得整个系统的状况与预期的完全相反, 因此有必要了解整个系统的实际影响关系, 本模型可以从全局来考虑改善系统的最佳途径.

然而, 从上面的分析可知, 模型考虑的是某个时刻  $r$  时的系统性能, 是一种静态的考虑, 而且没有考虑系统自我修复, 使得如果不采取措施, 最终系统将崩塌.

### 2.2. 考虑自我修复

前面的模型是对受灾害的系统的静态分析, 现在将此方法推广到与时间有关的灾害传播过程. 文献 [15, 16] 中对这种情况进行了讨论, 作者考虑的因某个子系统(节点)的瘫痪而引起的雪崩效应或多米诺骨牌效应, 假定这种效应是沿着某条有向的方向发生的. 为了描述灾害传播过程, 假定  $P_i(t)$  为时刻  $t$  子系统(节点)  $i$  所受到的影响;  $W_{ij}$  表示子系统(节点)  $j$  对子系统(节点)  $i$  的影响率;  $D_i$  是修复率, 描述的是通过应急、补救措施使子系统(节点)  $i$  修复的程度. 于是有如下的动力学过程:

$$\frac{dP}{dt} = (W - D)P(t),$$

其中  $D = (\delta_{ij} D_i)$ ,  $W = (W_{ij})$ ,  $P(t) = (P_i(t))$ ,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 函数, 当  $i = j$  时, 其为 1, 否则为 0; 可认为  $W_{ij}$  与两子系统(节点)间的直接影响程度相关, 假定它们成比例,  $W_{ij} = |M_{ij}|$ , 其中  $c$  是比例系数, 在下节的仿真中认为  $c = 0.5$ .

于是有

$$P(t) = \exp((W - D)t)P(0)$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k}{k!} (W - D)^k P(0)$$

$$= B(t)P(0). \tag{1}$$

假设  $D_i = \sum W_{ji}$ , 那么(1)式是离散主场方程的 Liouville 描述, 于是运用相关理论<sup>[17, 18]</sup>, 可知道灾害沿着路径  $i_0 \rightarrow i_1 \rightarrow i_2 \dots \rightarrow i_n$  蔓延的概率为

$$P(i_0 \rightarrow \dots \rightarrow i_n)$$

$$= \frac{|P_{i_0}(0)|}{D_{i_n}} \prod_{l=0}^{n-1} \frac{W_{i_{l+1} j_l}}{D_{i_l}}$$

$$\approx c^n \frac{|P_{i_0}(0)|}{D_{i_n}} \prod_{l=0}^{n-1} \frac{|M_{i_{l+1} j_l}|}{D_{i_l}}. \tag{2}$$

此外, 灾害沿着上述路径蔓延所需要的平均时间与时间偏差为

$$\begin{aligned} P(i_0 \rightarrow \dots \rightarrow i_n) &= \prod_{l=0}^{n-1} \frac{1}{D_{i_l}}, \\ \alpha(i_0 \rightarrow \dots \rightarrow i_n) &= \prod_{l=0}^{n-1} \frac{1}{(D_{i_l})^\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

若对所有的  $i$  满足  $D_i < \sum W_{ji}$ , 那么自我修复或应急措施是弱的, 于是  $P_i(t)$  将随着时间的增加而呈指数增加, 说明采取的控制失效, 灾害就蔓延到整个网络, 若对所有的  $i$  满足  $D_i > \sum W_{ji}$ , 自我修复或应急措施控制是有效的,  $P_i(t)$  将随着时间的增加而收敛于 0, 而当某些  $i$  满足  $D_i < \sum W_{ji}$ , 其他  $i$  满足  $D_i > \sum W_{ji}$ , 这种情况下, 系统的状态取决于初始条件  $P(0)$  和  $B(t)$ . 但是这时 (2) (3) 式仍然是成立的.

本模型的优点是对灾害的蔓延过程有准确的描述. 不仅可以评估某类雪崩事件发生的可能性, 还可以评估其整个蔓延过程持续的平均时间和时间偏差, 使得决策者可以及时地进行应急管理工作.

但是对实际的系统, 子系统(节点)都具有一定的抗崩塌能力. 当外界影响不是很强烈时, 系统不会受到很大影响. 此外, 实际的系统并没有考虑影响的延迟和子系统(节点)内部随机噪声的影响, 因此本模型并不能全面的反映灾害蔓延的机理.

### 2.3. 普适的灾害蔓延模型

在文献 [13, 14] 中提出了一种普适性的灾害蔓延模型, 子系统(节点)的属性值用  $x_i$  来表示, 当  $x_i = 0$  时表示这个子系统(节点)是稳定的; 反之, 当  $x_i$  偏离零时说明这个子系统(节点)产生崩溃. 假设初始时刻某个子系统(节点)  $i$  受到扰动, 随着时间进程, 子系统(节点)发挥自我修复功能或由于灾害蔓延机理,  $x_i$  会趋向于零或网络中大部分子系统(节点)的属性值会趋向于无穷大, 因此子系统(节点)  $i$  的时间演化动力学可以用下面式子表示:

$$\frac{dx_i}{dt} = -\frac{x_i}{\tau_i} + \Theta \left( \sum_{j \neq i} \frac{M_{ji} x_j (t - t_{ji}(t))^{-\beta_{ji}(t)}}{f(o_j)} e^{-\frac{\beta_{ji}(t)}{\tau_i}} \right) + \xi_i(t),$$

$$\Theta(y) = \frac{1 - \exp(-\alpha y)}{1 + \exp[-\alpha(y - \theta_i)]},$$

$$f(o_j) = \frac{a o_j}{1 + b o_j},$$

其中  $1/\tau_i$  表明子系统(节点)的自我修复速度;  $M_{ji}$  表示子系统(节点)  $j$  对子系统(节点)  $i$  的影响程度;  $\beta$

描述的是扰动在传播过程中的强度, 越小说明扰动的影响越大, 阻尼作用越小, 下面仿真中取其为 0.025;  $t_{ji}(t)$  表示子系统(节点)  $j$  到子系统(节点)  $i$  的影响延迟时间;  $\xi_i(t)$  指子系统(节点)  $i$  内部固有的随机噪声;  $\Theta(y)$  为 S 型函数,  $\alpha$  为定值,  $\theta_i$  是阈值, 当其他子系统(节点)对其影响超过这个值, 子系统(节点)  $i$  将产生崩溃;  $O_j$  是子系统(节点)  $j$  的出度;  $f(O_j)$  为出度函数, 反映的是子系统(节点)  $j$  对其他子系统(节点)的影响程度, 出度  $O_j$  越大, 这个值越大, 则它对其他子系统(节点)的影响就越小. 在下面的仿真中我们取  $a = 4, b = 3$ .

本模型建立的是一个普适性的基于复杂网络的灾害蔓延动力学模型, 考虑了一些灾害蔓延事件的共性特征: 每个子系统(节点)都有自修复功能、灾害蔓延机理和内部随机噪声.

但是现实中的某些系统具有一定的冗余, 使得大规模灾害事件发生的可能性很小. 比如煤气管道网瘫痪时, 家里储备的煤气罐将有用武之地. 因此在研究灾害蔓延时需要考虑子系统(节点)的冗余.

### 3. 考虑冗余的改进灾害蔓延模型

对已经存在的模型, 都没有考虑子系统(节点)的冗余. 实际的系统都具有一定的冗余措施, 当主系统瘫痪时, 有临时的系统替换, 以维持原系统的功能. 比如当煤气管道网损坏, 不能供应煤气时, 家庭里储备的煤气罐将有用武之地, 使得受煤气管网影响的其他系统几乎不受到影响. 于是我们提出了如下考虑子系统(节点)冗余的灾害蔓延模型. 假定系统瘫痪之后只有一个可以代替其功能的临时系统, 但这个系统的寿命有限, 当超出一定的时间范围时, 将由原子系统来代替.

当某个系统初次达到崩溃临界值时, 将由一个临时系统代替原系统, 假定临时系统的生命周期为  $t_i$ , 而且在替代阶段临时系统不会受其他系统的影响. 若在  $t_i$  时刻, 原系统修复完全, 则此子系统(节点)将不会造成对其他系统的影响, 但若在  $t_i$  时刻, 原系统没有修复完全, 则原系统将以其当前状态影响与之相关的系统. 假设系统初次达到崩溃状态的时刻为  $t_{ci}$ , 于是可以用如下模型来描述上述过程.

当  $t < t_{ci}$  时

$$\frac{dx_i}{dt} = -\frac{x_i}{\tau_i} + \Theta \left( \sum_{j \neq i} \frac{M_{ji} x_j (t - t_{ji}(t))^{-\beta_{ji}(t)}}{f(o_j)} e^{-\frac{\beta_{ji}(t)}{\tau_i}} \right)$$

$$+ \xi_i(t). \tag{4}$$

当  $t_{ci} < t < t_{ci} + t_i$  时,原主系统由临时系统代替,系统的状态变为 0,而原主系统仍按(4)演化,但此系统对其他子系统(节点)不产生影响.

当  $t > t_{ci} + t_i$  时,临时系统作用失去,由主系统行使系统功能,系统按照(4)式进行演化.

本模型不仅考虑了每个子系统(节点)都具有的自修复功能、灾害蔓延机理和内部随机噪声,还考虑了子系统(节点)的冗余,使得同样的灾害发生时,有了更多的应急、修复时间.这也解释了大规模灾害事件很少发生的原因.

### 4. 仿真分析

#### 4.1. 系统影响关系网建模

系统之间的影响关系网络千差万别,本文考虑三种理想的应用较广的网络拓扑结构:随机网络、无标度网络和小世界网络.这三种网络均为有向网络,仿真中节点的数目为 100,研究整个系统受到扰动后崩溃的子系统(节点)数目的变化情况.网络的生成方式如下,产生的网络节点平均度均为 3.5.

- 1) 随机网络可由 Pajek 软件产生<sup>[19]</sup>.
- 2) 无标度网络采用 Bollob'as, Borgs, Chayes 和 Riordan<sup>[20]</sup>提出的算法,新节点的加入与连接由五个非负变量  $a, b, r, \delta_{in}, \delta_{out}$  决定,其中  $a + b + r = 1$ ,在

下面的程序中设置  $a = 50/350, b = 250/350, r = 50/350, \delta_{in} = \delta_{out} = 2$ .这样可以得到平均度为 3.5 的有向无标度网络.

3) 有向小世界网络按下列步骤产生:首先产生一个无向环规则网络,然后将无向边设置成有向边,其方向包括顺时针、逆时针和双向,比例分别为  $a, b$  和  $r, a + b + r = 1$ ,最后类似产生无向小世界网络<sup>[21]</sup>那样以概率为 0.1 随机重连该网络.仿真中设置  $a = 0.45, b = 0.45, r = 0.1$ .

#### 4.2. 不同模型的仿真分析

针对不同的网络结构,考虑不同模型的灾害蔓延过程的异同.在下面的模型中,假设  $M_{ij}$  均为 0.5. 并假设系统崩溃的阈值为 0.5.

1) 不考虑自我修复模型与考虑自我修复模型比较.仿真中,假定初始时刻随机选择一个系统受到扰动,受扰动后的状态值为 0.1. 对不考虑自我修复的模型,在  $M_{ij}$  给定的情况下,崩溃的子系统(节点)数目随时间(间接影响关系的强度)变化情况如图 1(a) 所示;当考虑自我修复时,假设  $D_i = k \sum W_{ji}$ ,称  $k$  为修复系数.取  $k = 0.8$ ,也就是灾害控制失效的情形,其蔓延过程如图 1(b) 所示.比较两模型的蔓延过程,可以看出,考虑自我修复时,尽管灾害最终未能控制,但子系统(节点)的崩溃速度明显减缓,崩溃的临界时刻推迟.

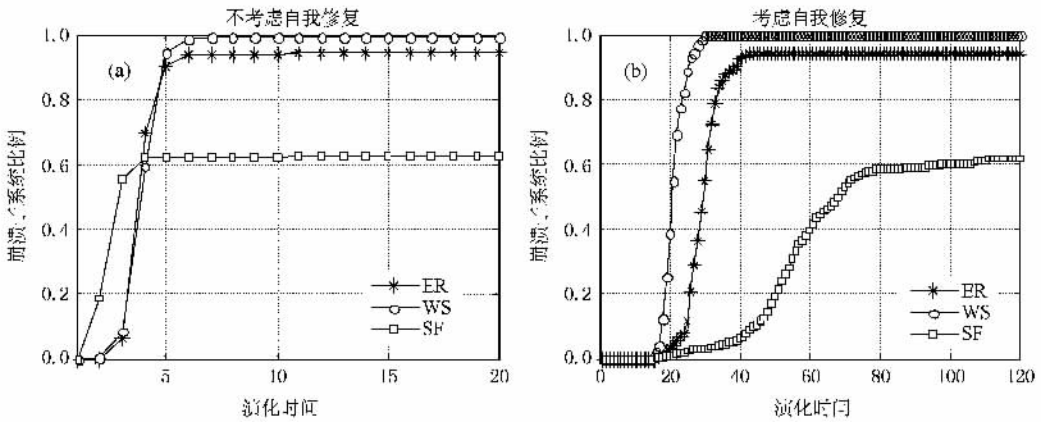


图 1 (a) 不考虑自我修复与 (b) 考虑自我修复模型的危害蔓延过程(考虑了三种不同的网络:随机网络(ER)、小世界网络(Ws)和无标度网络(SF)).  $M_{ij} = 0.5, \theta_i = 0.5$  随机选择一个节点扰动,扰动量为 0.1;考虑自我修复模型的修复系数为  $k = 0.8$ ;仿真 100 次取平均作为结果

此外,从图 1 可知,系统有个两个临界时刻:下临界时刻( $t_d$ )和上临界时刻( $t_u$ ).当  $t < t_d$  时,系统

中崩溃子系统(节点)的比例为 0;而当  $t > t_u$  时,系统中崩溃子系统(节点)的比例达到稳态最大值.通

过比较图 1 中的 (a)(b),发现无标度网络的灾害蔓延过程中的  $t_d$  和  $t_u$  变化最大,这就说明当修复系数  $k = 0.8$  时,自我修复在对无标度网络中的作用最明显,为了说明其一般性,对不同的修复系数  $k$  与上、下临界时间的关系进行仿真,结果如图 2 所示.从图形中可以看出,随着修复系数  $k$  的增大,不同网络的上下临界值均增大.特别的是对无标度网络,

随着修复系数增大,其上、下临界值均由原来的最小变为最大,而且当修复系数超过 0.7 时,无标度网络相比其他网络均具有最大的上下临界时刻值.这说明自我修复对无标度网络作用明显的特征具有一般性,而这种特征为系统遇难时的应急、补救提供了更多的时间.这种特征是由于无标度网络的异质性,使得自我修复作用明显.

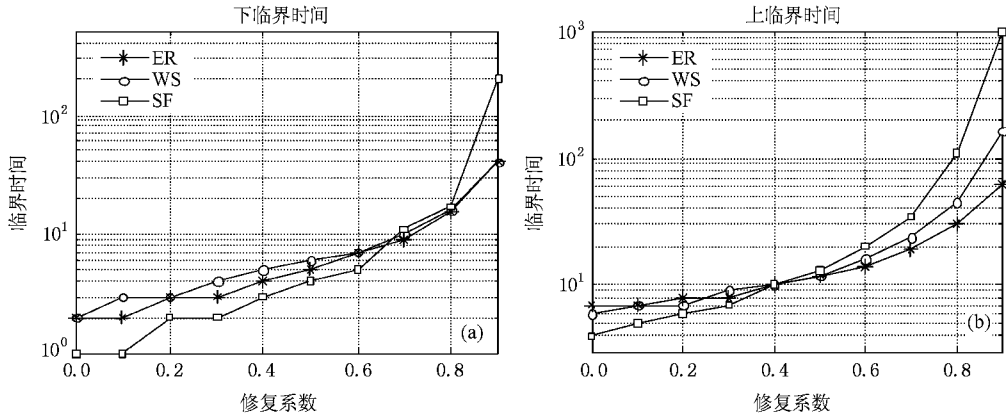


图 2 (a)(b)为上、下临界时间与修复系数的关系(考虑了三种不同的网络:随机网络(ER)、小世界网络(WS)和无标度网络(SF)).  $M_{ij} = 0.5, \rho_i = 0.5$ , 随机选择一个节点扰动,扰动量为 0.1; 仿真 100 次取平均作为结果)

### 4.3. 普适的蔓延模型与改进的蔓延模型比较

仿真中,自我修复因子  $\tau_i$  均为 10,初始时刻随机选择一个子系统(节点)受到扰动,其扰动后的状态值为 1,延迟时间服从均值为 1.4 的  $\chi_2$  分布,其通过将自由度为 4 的  $\chi_2$  分布乘以 0.05 再加上 1.2 得到的.不考虑子系统(节点)内部随机噪声的影响.

对于改进的蔓延模型,冗余系统的替代时间均为 5 个仿真时间,对模型仿真 100 次,取其平均值做为结果,于是可以得到扩展模型的灾害蔓延过程如图 3 (a)所示,改进模型的灾害蔓延过程如图 3 (b)所示.

比较图 3 (a)(b)两图,可以看出,考虑冗余的蔓延模型的灾害蔓延速度明显减缓(图中时间轴刻度不同),使得我们有更多的时间采取应急和补救措

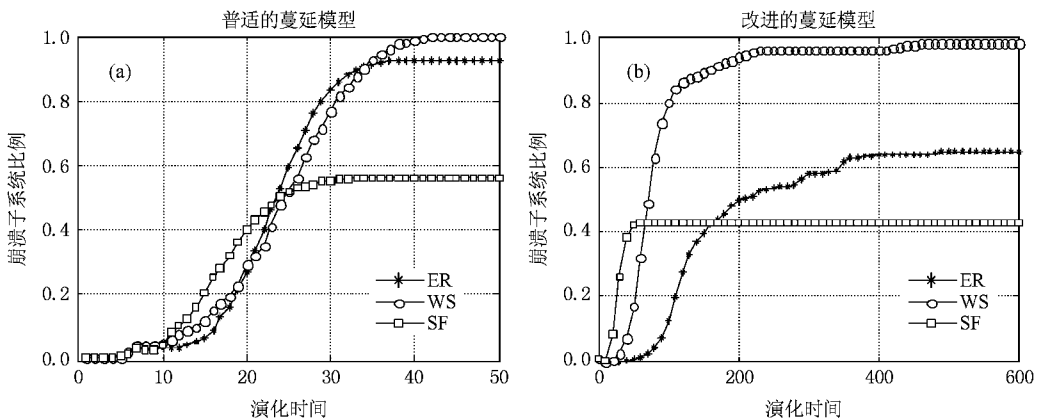


图 3 普适的蔓延模型(a)与改进的蔓延模型(b)的演化过程(考虑了三种不同的网络:随机网络(ER)、小世界网络(WS)和无标度网络(SF)).  $M_{ij} = 0.5, \rho_i = 0.5, \tau_i = 10$ ,延迟时间服从均值为 1.4 的  $\chi_2$  分布,其通过将均值为 4 的  $\chi_2$  分布乘以 0.05 再加上 1.2 得到,随机选择一个节点扰动,扰动量为 1;不考虑子系统(节点)内部随机噪声的影响;对于改进的蔓延模型,冗余系统的替代时间均为 5 个单位时间,仿真 100 次取平均作为结果)

施,使得整个系统更难坍塌,这可解释现实社会中大规模灾害事件极少发生的原因.比如,当煤气管道网络瘫痪时,家里储备的煤气罐起到临时替代的作用,为管道网络的修复提供了补救时间,进而降低了受煤气管道网络影响的其他系统瘫痪的可能性.

此外,修复因子对灾害蔓延有重要影响,当 $\tau$ 为不同值时,系统最终状态不同.模型的参数设置同上,对每个 $\tau$ 仿真100次,取稳态时崩塌子系统(节点)的比例的平均值作为结果,可以得到修复因子 $\tau$ 对崩塌子系统(节点)影响的关系如图4所示,图4(a)是普适的模型,(b)是改进的模型.通过仿真,可

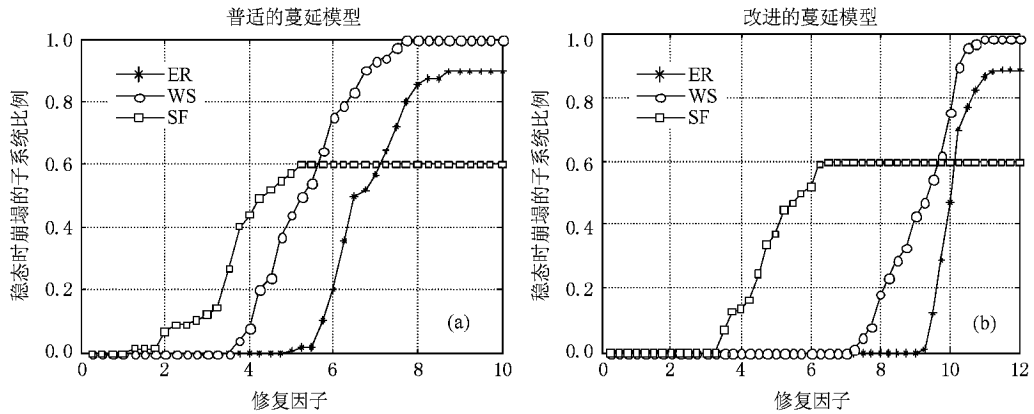


图4 普适的蔓延模型(a)与改进的蔓延模型(b)中自我修复因子对稳态时崩溃的子系统(节点)比例的影响(考虑了三种不同的网络:随机网络(ER)、小世界网络(W)和无标度网络(SF)). $M_{ij} = 0.5$ , $\theta_i = 0.5$ ;延迟时间服从均值为1.4的 $\chi_2$ 分布,其通过将均值为4的 $\chi_2$ 分布乘以0.05再加上1.2得到;随机选择一个节点扰动,扰动量为1;不考虑子系统(节点)内部随机噪声的影响;对于改进的蔓延模型,冗余系统的替代时间均为5个单位时间;仿真100次取平均作为结果)

## 5. 结 论

本文给出了目前存在的几种基于网络的灾害蔓延模型,每个模型从不同侧面能反映问题的某个方面.但从实际角度讲,都具有局限性.本文对存在的模型进行了优缺点分析,在此基础上,给出了一种考虑冗余的改进灾害蔓延模型.对不同的模型,在不同的网络结构下,仿真分析了灾害蔓延过程的差异以及修复因子的影响.大规模灾害事件很少发生的原因是某些系统存在冗余,使得灾害蔓延过程变缓,争

以看到随着修复因子增加崩塌子系统(节点)比例上升.这是由于 $\tau$ 值较小时,系统只需要很短的时间即可修复.随着 $\tau$ 值的增加,所需时间越来越多.两模型均存在相变过程,当 $\tau$ 值小于下临界值( $\tau_d$ )时,子系统(节点)通过自修复功能都可以修复,即修复率为100%,瘫痪子系统(节点)比例为零.当 $\tau$ 值达到某个上临界值( $\tau_u$ )时,相应的崩塌子系统(节点)比例达到最大值.但是对改进的模型,修复因子 $\tau$ 的上、下临界值均大于普适的模型.冗余的存在使得同等条件下,冗余的系统崩塌的可能性降低.

取了更多的系统补救、修复时间.因此,考虑冗余的改进模型更贴切实际.

然而,本文并没有对考虑冗余的改进模型系统进行全面的分析,这将是下一步工作的重点.此外,实际的系统并不都有冗余措施,而且冗余系统的代价比较大,对哪些系统采取冗余措施能更有效地抑制灾害的传播,以争取更多的修复时间也是值得考虑的.最后,在资源有限的情况下,如何采取应急措施,使存在冗余的系统能被有效的修复,也将是进一步工作的重点.

- [ 1 ] Helbing D ,Kuhnert C 2003 *Physica A* **328** 584
- [ 2 ] Piot P ,Bartos M ,Ghys P D ,Walker N ,Schwartz B 2001 *Nature* **410** 968
- [ 3 ] Albert R ,Barabasi A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [ 4 ] Liu H K ,Zhou T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 106 ( in Chinese ) [ 刘宏鲲、周 涛 2007 物理学报 **56** 106 ]
- [ 5 ] Strogatz S H 2001 *Nature* **280** 226
- [ 6 ] Newman M E J ,Jensen I ,Ziff R M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 021904
- [ 7 ] Watts D J ,Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [ 8 ] Barabási A L ,Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [ 9 ] Albert R ,Jeong H ,Barabási A L 2001 *Nature* **406** 378
- [ 10 ] Xu D ,Li X ,Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 ( in Chinese ) [ 许 丹、李 翔、汪小帆 2007 物理学报 **56** 1313 ]
- [ 11 ] Moez D 2006 *Physica A* **363** 120
- [ 12 ] Nekovee D ,Moreno Y ,Bianconi G ,Marsili M 2007 *Physica A* **374** 457
- [ 13 ] Weng W G ,Ni S J ,Shen S F ,Yuan H Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1938 ( in Chinese ) [ 翁文国、倪顺江、申世飞、袁宏永 2007 物理学报 **56** 1938 ]
- [ 14 ] Buzna L ,Peters K ,Helbing D 2006 *Physica A* **363** 132
- [ 15 ] Helbing D ,Kuhnert C 2003 *Physica A* **328** 584
- [ 16 ] Helbing D ,Ammoser H ,Kuhnert C 2006 *Disaster spreading in complex networks* ( Berlin : Springer Heidelberg ) p319
- [ 17 ] Helbing D 1994 *Phys. Lett. A* **212** 130
- [ 18 ] Helbing D ,Molini R 1995 *Phys. Lett. A* **212** 130
- [ 19 ] Batageli V ,Brandes U 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036113
- [ 20 ] Bollobas B ,Borgs C ,Chayes J ,Riordan O 2003 *SODA* **14** 132
- [ 21 ] Watts D J ,Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440

# Estimation and improvement of disaster spreading models based on complex network

Ouyang Min<sup>†</sup> Fei Qi Yu Ming-Hui

( *Huazhong University of Science and Technology ,System Engineering ,Wuhan 430074 ,China* )

( Received 29 October 2007 ; revised manuscript received 30 April 2008 )

## Abstract

Disasters threaten mankind and degrade our survival conditions ,and have a serious impact on human society . Several previous disaster spreading models in complex networks are reviewed . Based on the evaluation of their advantages and disadvantages a more realistic model in the networks with redundant systems is proposed . For different models in different network structures ,the differences of spreading processes and the effects of some important parameters are analyzed by means of simulation . The disaster processes in the networks with redundant system become slow ,which permits of longer rescue time to repair the system . It can explain the reason why large-scale disaster events rarely happen in real life .

**Keywords** : complex network , disaster spreading , redundant system

**PACC** : 0500 , 0520

---

<sup>†</sup> E-mail : pandasjt@126.com