

股市中危机传播的 SIR 模型及其仿真^①

马源源^{1,2}, 庄新田¹, 李凌轩³

(1. 东北大学工商管理学院, 沈阳 110819; 2. 昆明理工大学管理与经济学院, 昆明 650093;
3. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘要: 选择上市公司的大股东信息, 建立了上市公司及其大股东间的持股关联网络. 考虑到上市公司与股东间因为资金流减小或资金链断裂而相互影响所导致的危机在网络中的传播行为, 推导出股市中危机传播的 SIR 模型的计算方法. 继而对网络出现随机故障和遇到蓄意攻击时, 危机在网络中的传播过程进行仿真分析. 研究表明: 当网络中的大型上市公司或控股集团 (Hub 节点) 被蓄意攻击或出现故障时, 危机在网络中传播速度极快, 造成的破坏力很大, 网络表现出明显的脆弱性, 从而容易产生多米诺骨牌效应. 该方法为未来对经济危机的传播机理的深入研究提供了一个可供借鉴的方法.

关键词: SIR 模型; 股票市场; 复杂网络; 危机传播

中图分类号: F830.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2013)07-0080-15

0 引言

回顾 20 世纪爆发的几次经济危机, 任何一次对国家的实体经济都造成了不可避免的严重破坏. 如何对这些危机的传播机理进行研究进而将危机遏制在萌芽阶段是各国政府努力的目标. 众所周知, 股票市场对经济危机最为敏感. 这主要是由于上市公司所发行的股票的价格走势是反映经济动向的晴雨表, 它能灵敏地反映出资金供求状况、市场需求、行业前景和政治形势的变化. 股票价格是进行宏观经济和微观经济预测和分析的重要指标. 对于上市公司来说, 股权的转移和股票价格的涨落是其经营状况的指示器. 因而研究危机在股市中的传播机理正好是对经济危机分析的切入点. 股票市场是由上市公司和投资者组成的一个高度复杂的非线性系统. 复杂网络理论作为一门在近年发展起来的新兴学科, 正好被广泛用于研究这些复杂性系统. 复杂系统和复杂网络理论的发展使得股市方面的研究进入了一个暂新的

阶段.

为了探讨复杂网络抵制相继故障的全局鲁棒性, 王建伟等人提出了带有可调参数的相继故障模型, 得出影响连锁故障发生和传播的最重要的物理量以及节点崩溃后的动力学过程^[1]. 李鹏祥等人以组织网络中最有可能存在无标度行为的指挥链网络为背景, 构建了组织网络演化的层级树生长模型, 考察了当管理幅度处于极端同质、极端异质和实际情况时层级树网络的度分布和累计出度分布^[2]. 对于网络结构对企业行为的影响, 各个企业往往会根据在网络中所处的位置并按照自身利益最大化的原则进行产量决策, 单海燕等人^[3]的研究表明在寡头垄断市场上网络结构对各厂商及整个组织的现期利润起着关键性作用. 陈波等人将传统的传染病模型推广到泛在媒体环境这样一个开放系统中, 建立了新的带直接免疫的 SEIR 舆情传播控制模型, 研究表明从网络舆情传播环境入手, 在舆情形成初期进行干预的控制方法^[4].

① 收稿日期: 2011-07-06; 修订日期: 2012-02-02.

作者简介: 马源源(1983—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授. Email: mayuanyuan1665@gmail.com

利用复杂网络理论对股票市场进行研究时,研究人员常以股票作为网络的节点,通过计算不同股票间的走势指标的相关性系数作为边,进而进行研究。Mantegna 等人在 1999 年选择 1989 - 1995 年纽约证券交易所 (NYSE) 的股票交易数据,将股票作为网络的节点,通过计算任意两只股票两日内股票价格间的相关性系数作为节点间的边的权重值,最终得出了股票网络的最小生成树的层次结构^[5]。2007 年 Pan 等人使用类似的方法研究了 1996—2006 年的印度金融市场 (NSE)^[6]。

由于股票指数是证券交易所或金融服务机构编制的表明股票行市变动的一种供参考的指示数字,当将复杂网络理论引入股票市场的研究后,股指方面的研究也如火如荼。Li 等人通过研究网络拓扑特性的方法分析了恒生指数的隐含波动形式^[7]。Emmert-Streib 等人利用股票的每日收盘价建立了股票间的关联网络,并研究了该网络所反应出来的股票指数在时域内的变化情况^[8-9]。Zhang 等人应用复杂网络理论研究了时间序列的上证指数的变化^[10]。Xu、Gunduz、Qian、Li 等人基于复杂网络理论研究了 DJI、S&P-500、NASDAQ-100、NASDAQ 等国际常见的股票价格指数^[11-15]。在对股票价格指数、股票价格、收益率等股票走势指标的研究过程中,部分科研人员找出了股市中与这些指标相关的一些动力学特性。Gualdi 等人研究了股票价格的同步下降现象^[16]。Jiang 对中国的股票市场做了一个实证分析,调查了中国股票市场中 1 354 支股票的内源动力学和外源动力学^[17]。

股市是股票发行和流通的场所,众多的金融投资行为在此进行,股市中包含了很多投资和区域贸易信息。Schiavo 等人研究了国际贸易和金融一体化的形式,作者发现国际贸易网比国际金融网络更加紧密,国际金融网络的层次结构更加明显,跨国间金融资产的大宗贸易使一些发达国家成为了 Hub 节点,高收入的国家紧密的联系在了一起,这样的网络结构很好的解释了目前的金融危机为何通过先进国家快速的进行传播^[18]。De Masi 等人建立了不同银行间通过日常贷款和负债关系形成的网络,经过研究网络的拓扑特性,发现该网络模型可以有效的评估不同政策对网络结构的影响^[19]。利用复杂网络理论和股市中的数据

Battiston 等人研究了欧洲区域间的直接投资网络^[20-21],Glattfelder 等人研究了 48 个国家的跨国投资网络^[22],Wang 等人研究了实货交易市场^[23]。

近年来,部分研究人员还将注意力转移到股市复杂网络的鲁棒性和脆弱性。Lim 等人以韩国股票交易所的 492 支股票作为网络的节点,采用 2 种方法研究了股票相关系数矩阵的脆弱性^[24]。Huang 等人采用阈值法构建了中国股票市场的一种关联网络,然后研究了网络的拓扑稳定性,并说明了这类股票关联网络对于节点的随机故障显示出极强的鲁棒性,而当网络内部受到攻击时则显示出明显的脆弱性^[25]。

从网络的角度对经济危机方面的研究相对较少。为了构建经济危机的预警系统, Kim 等人建立了人工神经网络,利用前几次经济危机的相关数据进行训练,建立了韩国的经济预警系统进行实证分析^[26]。Garas 等人利用 Corporate Ownership Network (CON) 和国际贸易网络 (International Trade Network) 的数据,以国家为网络的节点建立了经济网络中危机传播的 SIR (susceptible-infected-recovered) 模型,节点之间的传染概率是由国家之间联系的紧密程度以及被传染国家的经济实力所决定的;研究表明不但发达国家(如美国)发生危机时可以通过网络蔓延至全球,而且一些 GDP 较低的国家(如比利时)中的危机也可以引起全球的经济危机^[27]。Markose 等人利用美国银行间的信用违约互换 (credit default swap) 的网络模型、基于代理的计算经济 (Agent-based computational economics) 的网络和其它一些模型分析了美国的金融危机的蔓延和经济系统的系统风险,认为金融机构间过于纠葛而不倒 (too interconnected to fail)^[28]。金融机构间过于纠葛而不倒和大而不倒 (too big to fail) 的现象使得金融机构高管们为了自利而不断大胆的做大企业规模,当危机来临时政府过于担心危机的连锁效应,金融机构将最终挟持了公众利益将自身损失引向大众。对这种不负责任的行为本文也将给出合理的另类的解决方案。

综上,查阅文献发现基于复杂网络理论对股市网络中危机的传播动力学模型方面的研究尚无人涉足。由于经济危机的爆发越来越频繁,因此这方面的研究非常迫切。了解经济危机的传播机理

和传播动力学行为有助于在经济危机爆发前采取切实可行的措施将危机扼杀在摇篮里或尽量减小危机爆发时所带来的损失。

众所周知,在复杂网络中,对病毒的传播机理进行分析时,出现了两种常见的且具有深远意义的模型,即: SIS 模型和 SIR 模型。所谓 SIS 模型是指网络中每个节点仅处于两种状态之一: 健康状态(S)和感染状态(I)。与感染节点接触的健康节点将以一定的传播概率转化为感染状态,而处于感染状态的节点将以一定的恢复概率转化为健康状态。Pastor-Satorras 等人将网络中的节点按照其度值进行分类,建立了 SIS 模型的动力学方程^[29-33]。所谓 SIR 模型指的是网络中每个节点仅处于以下三种状态之一: 健康状态(Susceptible)、感染状态(Infected)和移除状态或康复状态(Removed/Recovered)。与感染节点接触的健康节点将以某一概率转化为感染状态,而处于感染状态的节点将以某一概率转化为移除状态。Moreno 等人证明了在 SIR 模型中,即使在初始感染比例很低的情况下,即不管初始病毒比例多么低,最终系统中总存在一定数量的曾经感染过病毒的节点^[29,34-36]。

将复杂网络中病毒传播的思想引入股票市场中进行研究,进而建立起股市中危机传播的 SIR 模型,不但有助于了解上市公司退市破产或股东的破产弃市行为给股市带来的危机的传播机理,而且也有助于揭示经济危机发生的成因。

值得注意的是: 与病毒传播和谣言传播的经典 SIR 模型比,虽然股市中的 SIR 模型三个对应的状态同样是健康状态(S)、感染状态(I)和移除状态(R),但股市中的 SIR 模型与它们相比存在很大的区别。首先,该模型是基于实际存在的上市公司及其大股东间的持股关系建立的,股市有其自身的特性,上市公司和股东并非一定按照某一概率受到感染或者被移除,而是它们根据自身的经济状况可以主动的做出决策,且上市公司类节点和非上市公司类节点的决策将会明显不同。其次,上市公司及其大股东间的关联网络属于典型的有向加权网络,这增加了分析的难度。

在文献[37]中,已经基于上市公司之间的交叉持股网络在公司层面、省级层面、地区层面上分析了国内的相互投资关系。在文献[38]中基于复

杂网络对上海证券交易所富人俱乐部特性进行了研究,并对股市中的 hub 节点进行了定义。在文献[39]中建立了一个更为全面的沪深两市的上市公司及它们的大股东之间的关联网络,利用加权派系过滤算法分析了网络的社团结构特性,不仅成功的解决了利用股市中股票之间的某些指标的相关性来建立网络模型的方式所不能反应股市中真实情况的弊端,又考虑到了网络中可能存在的社团重叠现象;同时也采用 Albert^[40-45]等人对网络静态鲁棒性的研究方法对该关联网络进行了稳健性研究。本文基于文献[39]的上市公司及其大股东之间的关联网络建立了一个股市中危机传播的 SIR 模型,继续对网络遇到随机攻击和蓄意攻击时的危机传播过程进行分析。

1 数据与网络的建立

1.1 数据

本文中所使用数据均来源于 RESSET 金融研究数据库(<http://www.resset.cn/>)。计算所使用的源文件是中国沪深两市上市的所有股票在 2008 年的《主要股东名单与股权结构》和 2008 ~ 2009 年的《年市值》文件。数据下载的时间为 2010 年 5 月 30 日。

上市公司通过发行股票使得上市公司与股东之间形成了一个庞大的持股关联网络,股东可以是其它上市公司、基金、一般企事业单位、自然人、高校等。由于各个上市公司向证券交易所上报的文件中对一些股东的命名方法不尽相同,尤其是一些作为股东的非上市公司。同一股东,在有的上市公司文件中用其简称或全称、英文或中文、分公司或分公司所隶属的总公司名称。因此对股东名称进行处理时必须予以统一,若股东并非独立的经济个体,而是从属于某一集团公司,比如中国石油天然气集团公司 XXX 分公司,将其下属机构持有的资产值归属于中国石油天然气集团公司进行统一处理,并尽量将所有国内的公司采用中文名称统一,国外公司采用英文名称统一。

1.2 网络的建立

在建立上市公司及其大股东间的持股关联网络时,节点代表上市公司及其大股东,将大股东与

上市公司间的投资关系作为网络的边. 根据图论的思想^[46]将该网络采用有向图 $G = (V, E)$ 表示, 其中 V 是由上市公司和大股东组成的节点集合; E 是一个以不同节点的有序对为元素, 并且不含重复元素的集合, 其元素称为节点间的边, 在本文中代表了投资关系.

为了说明问题, 首先将股市中的投资关系用一个最简单的子图表示, 如图 1 所示.

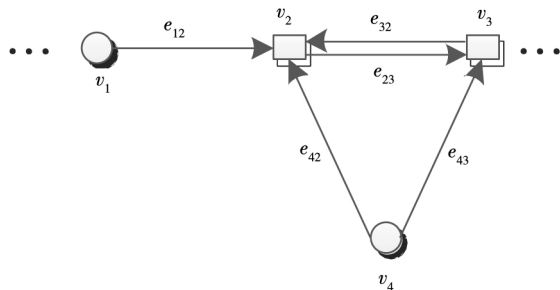


图 1 持股关联网络的最简子图

Fig. 1 The basic subgraph of cross-shareholding networks

a) 在图 1 所示的持股关联网络中, \square 表示上市公司, \circ 表示非上市公司类股东. 集合 V 包含了两类节点, 分别用 V_L 和 V_S 表示, 即上市公司集合和股东集合. 其中 $V_L \subset V, V_S \subseteq V$.

值得注意的是, 上市公司也可以包含在集合 V_S 中. 如上图 $v_2, v_3 \in V_L; v_1, v_2, v_3, v_4 \in V_S$.

b) 集合 E 表示大股东与上市公司之间的投资关系. 若 v_i 投资了 v_j , 点 v_i 持有节点 v_j 所代表的上市公司发行的一定比例的股票. 网络中, 可以用形如 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 的序偶表示这种投资关系, 其意义为顶点 v_i 和顶点 v_j 存在一条边, 边的方向为顶点 v_i 指向顶点 v_j , 并设这条边的权重值为 u_{ij} , 它指的是股东 v_i 持有上市公司 v_j 所发行股票的持股比例.

因此, 很容易看出, 在图 1 中 $e_{23} = (v_2, v_3)$ 和 $e_{32} = (v_3, v_2)$ 是不同的边. 它们表示不一样的投资关系. 为了更直接的说明所建立的网络中可能存在的持股关系, 结合图 1 进行分析, 将持股关联网络中可能存在的各种投资关系列举在表 1 中.

表 1 网络中可能存在的各种投资关系

Table 1 The mutual investment relationships of the cross-shareholding networks

序号	投资关系的描述	顶点的集合	边的集合
1	非上市类股东仅投资一家上市公司	$\{v_1, v_2\}; v_1 \in V_S; v_2 \in V_L$	$\{e_{12}\}$
2	非上市类股东投资多家上市公司	$\{v_2, v_3, v_4\}; v_2, v_3, v_4 \in V_S; v_2, v_3 \in V_L$	$\{e_{42}, e_{43}\}$
3	上市公司之间存在的投资关系	$\{v_2, v_3\}; v_2, v_3 \in V_S; v_2, v_3 \in V_L$	$\{e_{23}, e_{32}\}$

2 持股关联网络的危机传播分析及 SIR 模型

2.1 持股关联网络中节点的 S 态、I 态和 R 态的含义

持股关联网络的节点代表上市公司或者股东, 股东和上市公司间的联系是实际存在的投资关系. 在持股关联网络中节点的三种状态(S 态、I 态和 R 态) 的含义如下:

健康状态(S 态) —— 对于非上市公司类股东而言, 节点所代表的股东的对外投资关系不发生改变, 即股东的出度资产总额以及与其连接的边的数量不发生改变. 对于上市公司而言, S 态表示上市公司的市值未出现减小的现象.

感染状态(I 态) —— 对于非上市公司类股东而言, 节点所代表的股东的出度资产总额发生改

变, 且与该节点连接的边的数量也可能发生变化. 对于上市公司类节点的 I 态, 将其定义为它的市值发生了改变. 值得注意的是: 在持股关联网络中, 当节点在健康状态发生状态改变时, 可能从 S 态变为 I 态, 比如节点的投资关系发生变化, 但该节点未从网络中移除; 也可能直接从 S 态变为 R 态, 比如只持有一家上市公司的股票的某股东, 若该上市公司破产, 该股东也将从网络中被移除掉.

移除状态(R 态) —— 节点所代表的股东或者上市公司从网络中移除.

下文将对网络的危机传播行为进行仔细分析, 并给出相关函数表达式.

2.2 网络中故障的表示方法

在研究的过程中, 网络的故障行为应该包含如下两类.

(1) 删除网络中的点

设 v_i 是图 G 的一个节点, 从 G 中删去节点 v_i

及其关联的全部边而得到的图,称为 G 的删点子图,记为 $G - v_i$. 一般地,设 $S = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 是 $G = (V, E)$ 的节点集 V 的子集,则 $G - \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 就是从 G 中删去节点 v_1, v_2, \dots, v_k 以及与它们关联的全部边后得到的 G 的删点子图,也可以简记为 $G - S$.

(2) 删除网络中的边

设 e_i 是图 G 的一条边,从 G 中删去边 e_i 之后得到的图称为 G 的删边子图,记为 $G - e_i$. 一般地,设 $T = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$ 是 $G = (V, E)$ 的边集 E 的子集,则 $G - T$ 就是从 G 中删去 T 中的全部边而得到的图.

2.3 持股关联网络中危机传播的 SIR 模型

相对于常见的病毒传播和舆论传播的 SIR 模型而言,持股关联网络中危机传播的 SIR 模型并不存在某一特定值或属于某个取值范围的传播概率和感染概率. 在持股关联网络中的 SIR 模型中任意两点之间的危机传播情况是由能反映两节点之间投资关系的多个参数共同决定的,比如:持股比例、股票的市值、出度资产值和入度资产值等. 节点间传导作用的强弱是由网络中节点间投资关系的强弱以及上市公司的市值大小一起决定的. 并且,在股市网络中的故障传导作用具有明显的方向性.

经过分析,可以将股市中的故障类型分为如下五类.

(1) 非上市公司类股东破产

在持股关联网络中,当节点 v_i 所代表的股东破产时,在网络中可以表示为:从网络中移除节点 v_i 以及与节点 v_i 相联的所有边,即移除网络中由节点 v_i 指向其它节点的边;且根据股东 v_i 持有上市公司 v_j 的股票份额占 v_j 所发行股票的总股本的比例 u_{ij} 的不同,股东 v_i 会对 v_j 造成不同程度的影响,这种影响可以用公式 $C_2(v_i, v_j, \mu_{ij})$ 表示.

因此,股东的破产行为 $H_1(v_i)$ 可用公式(1)表示.

$$H_1(v_i) = \begin{cases} G - v_i \\ C_2(v_i, v_j, \mu_{ij}) \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

其中 $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 且 $v_j \in V_L, v_i \in V_S$ 且 $v_i \notin V_L$.

n 为未移除节点 v_i 前网络中的节点数量. 若节点 v_i 和节点 v_j 不存在投资关系,则有 $u_{ij} = 0$ 且 $C_2(v_i, v_j, \mu_{ij}) = 0$, 即:此时节点 v_i 破产不会直接对节点 v_j 造成影响.

需要特殊说明的是:在本文的公式中,为了叙述的方便,使用符号“ \langle ”表示等式右边的两个式

子同时成立. 如上式(1)表示破产行为 $H_1(v_i)$ 不但使得网络中的节点 v_i 以及与节点 v_i 相连的所有边被移除掉;而且也对应与节点 v_i 有投资关系的节点 v_j 造成公式 $C_2(v_i, v_j, \mu_{ij})$ 所描述的影响.

在后文中使用符号“ $\{$ ”表示在不同的条件下,使用不同的等式.

(2) 股东持有资产值减少时的决策行为

在现实中,当股东所持某支股票的发行公司由于经营不善或其它原因而市值减小或破产后,该上市公司的股东的资产值将不可避免的缩水. 此时,股东会根据资产值的减少量做出相应的决策. 若用 m_i 表示节点 v_i 所代表的股东决策前的资产损失量,(当股东因为上市公司破产而造成资产减小时,资产损失量采用公式(4)计算;当股东因为上市公司市值减小而造成资产减小时,资产损失量采用公式(8)计算.) 则可以假定股东 v_i 根据决策前的亏损资产与原有投资总额的比例 r_i 做出相应的决策行为.

若用 M_j 表示上市公司 v_j 的市值,则 r_i 可以用如下公式(2)表示

$$r_i = \frac{m_i}{m_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (u_{ij} \times M_j)} \quad (2)$$

其中 $v_i \in V_S, v_j \in V_L$ 且 $j \neq i, n$ 为此时网络中节点的总数量. 若节点 v_i 未向节点 v_j 投资,则有: $u_{ij} = 0$.

可以将 r_i 分为三段,分别对应亏损不严重、亏损严重和亏损特别严重三种情况. 参数的选取方法见后文.

根据 r_i 的三种情况,股东的决策行为可以用如下公式(3)表示

$$H_2(v_i, m_i) = \begin{cases} 0 & 0 \leq r_i < x_1 \\ G - e_{ij} \& C_2(v_i, v_j, \mu_{ij}) & x_1 \leq r_i < x_2 \\ H_1(v_i) & r_i \geq x_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $i \neq j, v_i \in V_S, v_j \in V_L$.

式(3) 的含义可直接叙述如下:

当 $r_i < x_1$ (即: 亏损不严重) 时 v_i 不做出任意新的决策, 在网络中表现为保持上一状态, 不发生变化.

当 $x_1 \leq r_i < x_2$ (即: 亏损严重) 时, 股东 v_i 将试着抛售它所持有资产值最小的那一家上市公司 v_j 的股票, 从而伺机做出下一步决策. 此时 v_i 抛售 v_j 的股票对 v_j 的影响可用公式 $C_2(v_i, v_j, \mu_{ij})$ 表示 $v_i \in V_S, v_j \in V_L$.

当 $r_i \geq x_2$ (即: 亏损特别严重) 时 v_i 抛售所有股票.

(3) 上市公司破产

在持股关联网络中, 当节点 v_j 所代表的上市公司破产时, 这意味着需要从网络中移除节点 v_j 以及与节点 v_j 相连的所有边, 且使与之相连的节点受到不同程度的影响.

一方面, 随着上市公司 v_j 的破产, v_j 的股东 v_i 的对外投资总额会相应的减少. 此时股东 v_i 的资产损失量 m_i 应为

$$m_i = M_j \times u_{ij} \tag{4}$$

其中 M_j 为未破产时的市值.

股东 v_i 根据受影响的不同程度, 做出相应的决策, 可用 $H_2(v_i, m_i)$ 表示, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 且 $v_i \in V_S$.

另一方面, 若 v_j 同时为其它上市公司 v_k 的股东时, 移除节点 v_j 对节点 v_k 造成的影响同样可用 $C_2(v_j, v_k, \mu_{jk})$ 表示, 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, n, k \neq j$.

因此, 上市公司 v_j 破产时, 可用公式(4) 表示.

$$C_1(v_j) = \begin{cases} G - v_j & \\ H_2(v_i, m_i) & i = 1, 2, 3, \dots, n \\ & \text{且 } i \neq j \\ C_2(v_j, v_k, \mu_{jk}) & j = 1, 2, 3, \dots, n \\ & \text{且 } k \neq j \end{cases} \tag{5}$$

其中 $v_i \in V_S, v_j, v_k \in V_L$.

(4) 当上市公司 v_j 的股东 v_i 破产时或 v_i 抛售它所持有的 v_j 发行的股票时, 上市公司 v_j 受到的最直接的影响就是它的市值可能发生变化. 同前 M_j 表示公司 v_j 的原市值, M'_j 表示公司 v_j 受到影响后的新市

值 R_j 表示 M'_j 与 M_j 间比值, 即

$$R_j = \frac{M'_j}{M_j} \tag{6}$$

根据中国证券交易所股票上市规则中的规定: 股东持有份额在 5% 以上的股东, 其股份的抛售、质押等行为均视为重大事件. 上市公司直接或间接持股比例超过 50% 的子公司收购、出售资产, 视同上市公司行为^[47]. 因此暂忽略单笔交易股份比例小于 5% 的交易对上市公司市值的影响. 同时通过对股市中的大宗交易数据进行分析, 分别拟合出单笔交易股份比例(交易股票的数量除以该股票的总股数) 介于 5% \leq 50% 和大于等于 50% 时的市值变化函数. 详见第 4.1 节.

因此由公式(6) 可知 $0 \leq R_j$, 此时 R_j 越接近 1, 公司 v_j 市值变化越小, 其受到影响也就越小. 当 R_j 小于某值 x_3 时, 上市公司 R_j 将会破产. x_3 取值请参见第 4.1 节中的参数选择.

根据以上分析, 当上市公司 v_j 的股东 v_i 破产时或 v_i 抛售它所持有的 v_j 发行的股票时, 上市公司 v_j 受到的影响在网络中可表示为

$$C_2(v_i, v_j, \mu_{ij}) = \begin{cases} 0 & u_{ij} < 0.05 \\ C_1(v_j) & u_{ij} \geq 0.05 \text{ 且} \\ & 0 \leq R_j \leq x_3 \\ C_3(v_j), H_2(v_q, m_q) & u_{ij} \geq 0.05 \\ & \text{且 } 1 > R_j > x_3 \\ 0 & R_j \geq 1 \end{cases} \tag{7}$$

其中 $q = 1, 2, 3, \dots, n, q \neq j, i \neq j, i \neq q, v_i, v_q \in V_S, v_j \in V_L$.

在上式中, 当 $1 > R_j > x_3$ 时, 股东 v_q 的资产减少量 m_q 可利用如下公式计算

$$m_q = (M_j - M'_j) \times u_{qj} \tag{8}$$

当上市公司 v_j 的股东 v_i 破产时或 v_i 抛售它所持有的 v_j 发行的股票时, v_j 受到的影响在网络中可以直观的表述如下:

当 v_i 持有上市公司 v_j 的股票份额 $u_{ij} < 0.05$ 时, v_j 不会受到其股东破产或其股东抛售所持股票的直接冲击.

当 v_i 持有上市公司 v_j 的股票份额 $u_{ij} \geq 0.05$ 时且 $R_j \leq x_3$ 时, v_j 将会破产倒闭或退市.

当 $u_{ij} \geq 0.05$ 且 $1 > R_j > x_3$, 这意味着公司 v_j 受到一定程度影响但未破产. 而这种影响将促使

上市公司 v_j 根据自身市值下降情况做出相应的决策,用 $C_3(v_j)$ 表示,其中 $v_j \in V_L$; 同时它的其它股东 v_q 也将根据资产减少量 m_q 做出相应的决策,可用 $H_2(v_q, m_q)$ 表示,其中 $q = 1, 2, 3, \dots, n, q \neq j$, $q \neq i$ 且 $v_q \in V_S$.

当 $R_j \geq 1$, 意味着上市公司 v_j 的股东 v_i 破产时或 v_i 抛售它所持有的 v_j 发行的股票时 v_j 的市值没有出现贬值现象,此时网络中的节点仍保持上一状态,不发生变化.

(5) 上市公司 v_j 在市值减小时,自身的决策分析

由于上市公司所发行的股票的价格走势是反映其经济动向的晴雨表,它能灵敏地反映出经营状况、资金供求状况、市场需求等.通常情况下,股票的价格与上市公司的经营业绩呈正相关关系,业绩愈好,股票的价格就愈高;业绩差,股票的价格就要相应低一些.因此在一段时间内,上市公司的市值下降越快,其经营状况就越差,很容易就会出现现金周转困难或者资金链断裂的情况.为避免其经济状况进一步恶化而破产退市,若该上市公司还持有其它上市公司所发行的股票,则它必须抛售部分股票以维持公司资金周转摆脱困境.

由公式(7)可知:当 $R_j \leq x_3$ 时,公司 v_j 将破产退市.因此当 R_j 在接近 x_3 之前,上市公司本身必须采取有效措施防止局势进一步恶化.可设定一个警戒值 x_4 (该参数的选择见第 4.1 节).利用图论的思想,上市公司 v_j 在市值减小时的决策行为

可用式(9)表示

$$C_3(v_j) = \begin{cases} 0 & u_{jk} \equiv 0 \text{ 或 } R_j > x_4 \\ G - e_{jk} \& C_2(v_j, v_k, e_{jk}) & \exists u_{jk} > 0 \\ & \text{且 } x_3 < R_j \leq x_4 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $k = 1, 2, 3, \dots, n$ 且 $v_j, v_k \in V_L$.

上式表示:

若 v_j 未持有其它上市公司的股票或其市值下降较小,即 $u_{jk} \equiv 0$ 或 $R_j > x_4$,上市公司 v_j 不需要做出任何新的决策,它将在网络中保持上一个状态,不发生变化.

当 $x_3 < R_j \leq x_4$ (即:经营状况较差)时,若上市公司 v_j 持有其它上市公司的股票, v_j 将试着抛售它所持有资产值最小的那一家上市公司 v_k 的股票,从而伺机做出下一步决策.这意味着在网络中,将会移除相应的边,并对所抛售的股票的发行公司 v_k 造成影响,其可以用 $C_2(v_j, v_k, e_{jk})$ 来表示.

3 参数与仿真

3.1 参数的选择

在锐思数据库中,2008年和2009年具有完整市值信息的股票数量分别为1711支和1804支.其中两年都具有完整的年市值信息的公司数量为1705家.现将这些上市公司2009年的年市值除以其2008年的年市值,用 δ 表示.然后绘制出 δ 值的累积概率分布曲线,如图2所示.

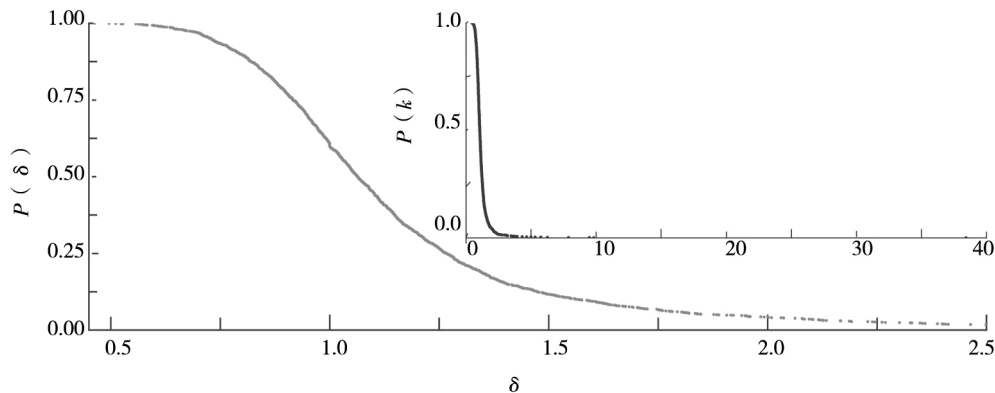


图2 δ 的累积概率分布

Fig. 2 The cumulative probability distribution of δ

图2中 δ 的取值介于0.46 ~ 38.44之间.图中 δ 标值大于2.5的散点分布较少.其中顺发恒业(股票代码:000631)在2009年进行合并重组后 δ

值变化最大,其为38.44.

沪深两市自2003年5月8日起开始正式实施退市风险警示制度.所谓退市风险警示制度,是指

对存在股票终止上市风险的公司,由证券交易所对其股票交易实行“警示存在终止上市风险的特别处理”,其主要措施为在其股票简称前冠以“* ST”字样.被实施退市风险警示处理的股票,其报价的日涨跌幅限制为 5%.* ST 股票在第二年如果继续亏损,将会被暂停上市.查询原始数据可知:2009 年被退市预警的上市公司数量为 97 家.退市的公司数量为 6 家(股票代码为:000515、000569、420058、600001、600357、600840).在锐思数据库中不存在这 6 家退市公司在 2009 年的年市值信息.若假定它们的 δ 的取值小于股市中的现有上市公司,那么这 6 家上市公司 δ 的取值应小于 0.46.因而可以将公式(7)中 x_3 赋值为 0.46.

若假定在 2009 年被退市预警的 97 家企业是股市中现有的上市公司中 δ 的取值最小的企业,那么从原始数据可以看出它们 2009 年的年市值应小于其 2008 年的年市值的 0.74 倍.因而可以令公式(9)中警戒值 $x_4 = 0.74$.

若某一股东只持有某一家上市公司发行的股票,当该上市公司的市值下降为原来的 0.74 倍时,那么这个股东的持有资产值也变为原来的 0.74 倍.此时,股东最好的做法是抛售该支股票以避免更大的损失.因此可以将公式(3)中临界值 x_2 也设置为 0.74.

对于公式(3)中的 x_1 ,马丁·茨威格在《曲线的秘密》一书中建议将止损点设在买入价格以下 10% ~ 20%,因此本文可以将 x_1 取为 $0.2^{[48]}$.

3.2 市值变化分析

从本文作者在文献[37-39]对股市总体持股网络的分析可知,总体持股网络中的项目类节点的加权度值(即股票的市值)分布满足幂律,因此假定上市公司所发行的股票在出现大额度的股权转让前后的原市值 M 与新市值 M' 、以及此段时间内的大额股权转让比例 f 之间存在如下关系.

$$\lg M' = a \times \lg M + b \times f \quad (10)$$

在后文中进行仿真时是基于 2008 年的股权关联网络进行分析,因此进行数据拟合时使用沪深两市股票在 2008 年的年市值作为新市值 M' ,以其在 2007 年的年市值作为原市值 M ,以 2008 年沪深两市的股权转让比例超过 5% 的交易数据作为样本数据进行分析.

如前所述,大于 5% 的股权转让必须向中国证监会报告并发布通告.在 2008 年交易的股数占总股数比例值大于等于 5% 的股权交易为 286 笔.剔除不具有完整年市值信息或股东名单的数据后,其中 $0.05 \leq f < 0.05$ 的样本数据共 266 个; $0.5 \leq f$ 的样本数据共 20 个.采用 4 种不同的拟合方法得出的结果如表 2 和 3 所示.

表 2 市值拟合参数(股权转让大于等于 5% 小于 50%)

Table 3 The fitting parameters of market capitalization (5% ~ 50%)

优化算法	改进差分优化算法	麦夸特法	共扼梯度法	遗传算法
均方差	0.204 586	0.270 477 8	0.204 585 9	0.204 586
残差平方和	11.133 54	11.133 545 6	11.133 538 3	11.133 539 6
决定系数	1.000 000 00	1.000 000 00	1.000 000 00	1.000 000 00
最佳 a 值	0.959 816	0.959 813 2	0.959 822 2	0.959 827 4
最佳 b 值	-0.013 46	-0.013 512 5	-0.013 884 6	-0.014 066 9

表 3 市值拟合参数(股权转让大于 50%)

Table 4 The fitting parameters of market capitalization (> 50%)

优化算法	改进差分优化算法	麦夸特法	共扼梯度法	遗传算法
均方差	0.150 582 24	0.150 582 50	0.150 582 25	0.150 582 21
残差平方和	0.453 500 24	0.453 501 78	0.453 500 25	0.453 500 03
决定系数	1.000 000 00	1.000 000 00	1.000 000 00	1.000 000 00
最佳 a 值	0.964 063 85	0.964 056 70	0.964 047 41	0.964 132 37
最佳 b 值	-0.055 083 85	-0.054 964 04	-0.054 772 79	-0.056 310 64

在分析前,两份样本数据中 M' 和 M 进行相关性分析发现:其决定系数 R^2 分别为 0.949、0.867.当采用如上四种常见的数据拟合方法进行分析后发现:决定系数 R^2 保留 8 位小数时,其值仍然为 1.这说明大额的股权转移的确会影响上市公司的市值变化,同时也说明公式(10)正好能够很好的反应这种变化.

综合表2和3进行分析得出,若上市公司存在持股比例介于 5% ~ 50% 的股权转移,新市值的计算公式(10)中 a, b 可以分别取值为 0.959 813 2 和 -0.013 512 5; 持股比例大于等于 50% 的股权转移,新市值的计算公式(10)中 a, b 可以分别取值为 0.964 056 70 和 -0.054 964 04.

3.3 仿真计算

在计算分析前需要对网络的基本统计信息和拓扑特性予以了解,该内容在文献[39]中已经做了详细的介绍和分析,在此不再赘述.

本节将使用 MATLAB 软件编出上一节所建立的 SIR 模型的计算程序,并对文献[39]中采用真实数据建立的上市公司及其大股东间的持股关联网络遇到随机故障和蓄意攻击时危机在股市中的传播过程进行仿真.其中,网络的初始故障节点的移除策略分别为:(1)随机故障:随机的从网络中移除节点.(2)蓄意攻击:根据网络中节点的度值的大小,按照度值从大到小的顺序进行移除.

序进行移除.

为了使分析更具有可信性,文中将初始故障节点的数量设为 0 ~ 400,随机故障的故障节点选用了 3 份样本数据进行分析.当初始故障节点数量达到 400 个时:网络受到蓄意攻击情况下的 400 个初始故障节点中有 269 个上市公司类节点、131 个非上市公司类节点(蓄意攻击样本数据).当网络遇到随机故障情况下的 400 个初始故障节点中分别为 60、41、63 个上市公司类节点、240、259 和 237 个非上市公司类节点.

经过分析,在图3中给出了两种情况下,网络中余下边的总数、余下的上市公司的总市值与初始故障节点的数量(用 N_r 表示)间的关系.

网络中包含的上市公司数量在 2008 年为 1 623 家、网络中节点的总数为 13 950 个、边的数量为 19 220 条.从图3中可以看出:当网络遇到随机故障时,少量的上市公司或股东因为自身经济状况而退市对股市的影响极小,危机未造成股市中股东和上市公司大面积破产.即使网络中出现 400 个故障节点,股市的总市值下降量也相对较小.而当网络遇到蓄意攻击时,危机在网络的传播速度极其快速,造成的破坏力很大,网络中余下的总市值和边的数量下降速度明显比网络遇到随机故障快.且在网络的初始故障节点达到 10 时,网络发生明显变化,瞬间崩溃.

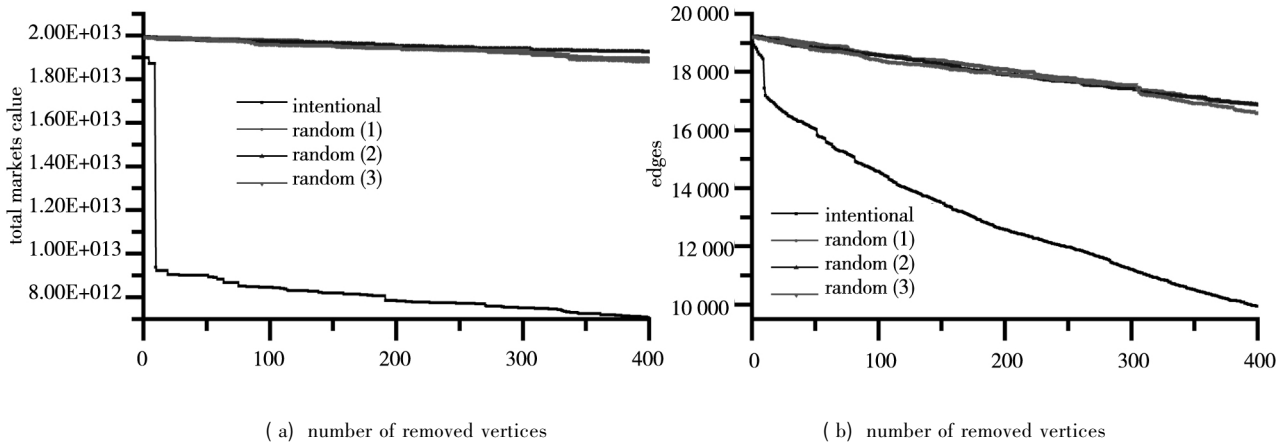
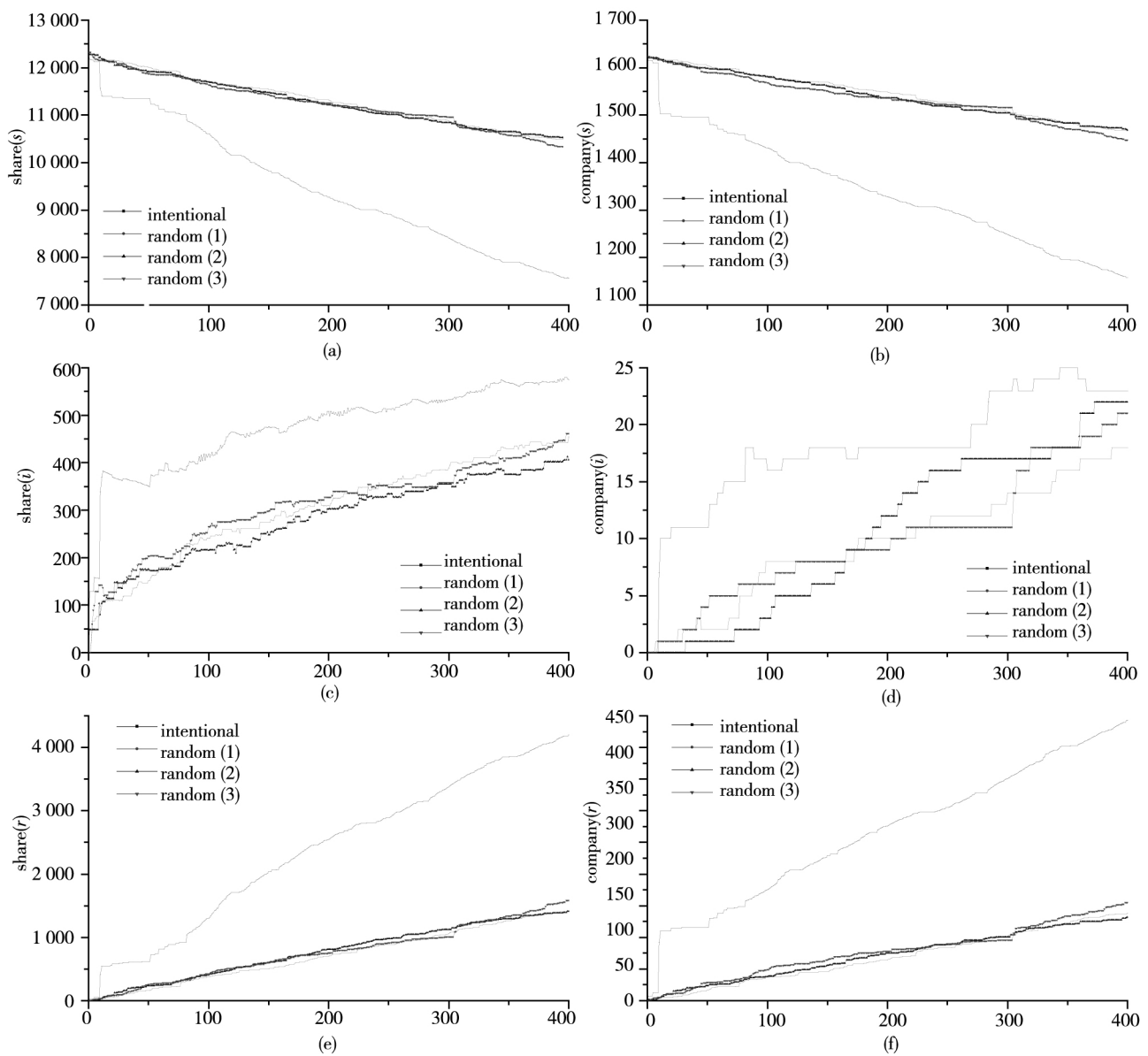


图3 网络中余下的上市公司的总市值、余下边的数量与 N_r 间的关系

Fig. 3 The relationships between the rest of the edges and N_r and the relationships between the rest of total assets and N_r in the networks

在图4中(a)、(c)、(e)分别为网络中非上市公司类股东节点处于S态、I态、R态的数量与初始故障节点的数量 N_r 间的关系.在图4中(b)、

(d)、(f)分别为网络中上市公司类节点处于S态、I态、R态的数量与初始故障节点的数量 N_r 间的关系.



注: 横坐标为 number of removed vertices

图 4 S, I, R 与 N_r 间的关系

Fig. 4 The relationships between S, I, R and N_r

从总体来看,图 4(a) 和 (b) 显示处于 S 态的非上市公司类股东和上市公司的数量在网络出现随机故障时都明显比网络受到蓄意攻击时多;图 4(c) 和 (d) 显示处于 I 态的非上市公司类股东和上市公司的数量在网络出现随机故障时明显比受到蓄意攻击时少;图 4(e) 和 (f) 显示处于 R 态的非上市公司类股东和上市公司的数量在网络出现随机故障时明显比受到蓄意攻击时少. 这些现象和图 2 所揭示的现象都表明持股关联网络对于随机故障具有明显的鲁棒性,而对于蓄意攻击却表

现出明显的脆弱性. 这主要是由于蓄意攻击是从度值较大的点开始攻击的,被攻击的节点多为 Hub 节点. 它们之间联系的比较紧密. 通过文献 [39] 中对 Hub 节点的分析也知道: Hub 节点多代表国有大中型企业和金融保险业企业. 显然,若较多的 Hub 节点受到蓄意攻击,很容易就造成大面积的上市公司倒闭和股东破产.

由文献 [39] 的分析表明,股权关联网络的无标度指数介于 1 ~ 2 之间,属于稀疏型无标度网络. 在这类网络中, Hub 节点所代表的大型上市公

司和部分大型控股集团之间的联系极为紧密,它们形成了富人俱乐部;富人俱乐部成员与其它节点之间的连接较为稀疏.因而当网络中富人俱乐部被蓄意攻击崩溃后,网络发生明显的突变现象,即图3和图4中曲线出现拐点处.

由于该网络属于稀疏型无标度网络,因而总的来说,网络中大多数上市公司之间的相互联系并不会十分紧密.无论对网络进行蓄意攻击和随机攻击,网络中受到感染的上市公司数量将并不会太多(如图4(d)所示).对于当网络开始受到蓄意攻击时,即富人俱乐部成员受到蓄意攻击,却正是由于富人俱乐部内部的节点联系十分紧密,同一上市公司类节点就容易受到多次重复感染.多次的感染行为可能出现在同一个节点上,所以此时统计出的处于受感染状态(I态)的上市公司的数量也并不会太多.

如前所述,持股关联网络中的绝大多数的节点都代表非上市公司类股东,上市公司类节点在网络中的比例很小.图4中(a)、(c)、(e)可以揭示出整个网络中S态、I态和R态节点数量的变化趋势.

综合图4(a)~(f)进行分析,当网络遇到蓄意攻击且故障节点较少(初始故障节点数小于10)时,网络中处于S态的上市公司和非上市公司类股东节点数量比遇到随机攻击时对应的S态的上市公司和非上市公司类股东节点数量多,且处于I态和R态的上市公司和非上市公司类股东节点数量比遇到随机攻击时对应的I态和R态上市公司和非上市公司类股东节点数量少,即:初始故障节点较少时,蓄意攻击造成的网络变化并不比随机攻击时大.这说明大型上市公司的股东多为网络中其它上市公司或大型控股集团,网络中规模较大的上市公司类节点和规模较大的控股集团类节点联系极为紧密,若不考虑舆论在网络中的传播,仅考虑上市公司及其大股东间的资金链情况,那么少量的大型上市公司从网络中被移除时并不会明显的缩小网络的规模.但众所周知,股市中的价格实际上受规模较大的上市公司的间接影响还是很严重的.首先回顾文献[39]中分析知这

些联系极为紧密的规模较大的上市公司类节点和规模较大的控股集团类节点多为金融保险类企业和部分超大型企业,它们与每个人的日常生活息息相关.其次,在建立网络时,忽略股市中的一般股民.而从文献[39]中可知:每个上市公司的一般股民(注:不包括上市公司的大股东)的平均持股总比例在40%左右.而这些一般股民对所持股的上市公司的前景不看好时,容易使得股票价格明显下降.因此若网络中规模较大的上市公司和规模较大的控股集团一旦破产或受到影响,舆论将会起着推波助澜的作用,这将使股市中已经存在的泡沫快速破灭,从而容易产生多米诺骨牌效应,带来极其严重的灾难性结果,比如金融危机、经济危机.2007年美国房利美(FNM)和房地美(FRE)公司的经济问题引发了美国的次贷危机一系列的连锁效应就是一个很好的例子.因此,若股市中出现特大型企业破产时,危机在网络中刚开始传播,国家若做好舆论导向,一定要注意一些不法分子别有动机的利用舆论来达到自身的目的,从而防止股市中出现雪崩效应.

4 结束语

本文考虑到上市公司与股东间因为资金流减小或资金链断裂而相互影响所导致的危机在网络中的传播行为,建立了股市中危机传播的SIR模型.并在实际网络中利用所建立的SIR模型对危机传播行为进行仿真,分别分析了网络出现随机故障和遇到蓄意攻击时网络中的危机传播情况.主要相关结论如下:

利用网络对大型上市公司或控股集团遇到蓄意攻击进行模拟时,发现危机在网络中的传播速度极其快速,股市总市值明显减小,这意味着蓄意攻击对网络造成的破坏力很大.从不同状态的节点数量的变化来看网络危机传播的总体趋势:蓄意攻击所导致的网络中S态节点数量的下降速度比随机故障所导致的快;蓄意攻击所导致的网络中I态和R态节点数量的上升速度,也都比随机故障所导致的快.网络对于蓄意攻击都显示出比

随机攻击更加脆弱的特性. 这主要是由于大型上市公司或控股集团多为金融保险类企业和部分超大型企业, 它们与股东间的联系以及它们与其它上市公司间的联系都极其紧密. 所以蓄意攻击对网络的破坏力很大. 事实上这些公司与百姓生活息息相关, 它们一旦破产, 股民中的舆论还常常起着的推波助澜作用, 从而股市中将会更容易产生多米诺骨牌效应, 甚至进而造成经济危机.

图3中蓄意攻击情况下的转折点提醒人们, 当股市中出现特大型企业破产时, 危机刚开始在网络中传播的情况下, 就必须采取措施制止危机下一步的传播. 采取的措施必须赶在转折点之前才会有效, 否则危机从量变引起质变达到转折点以后就来不及了. 但值得注意的是: 在少量规模较大的上市公司破产时, 若能做好舆论导向, 那么危机仅会对部分与之存在紧密投资关系的其它大型上市公司造成影响. 而这些与之存在紧密投资关系的公司其规模也较大, 对由于其破产而造成的危机具有较强的消化功

能. 此时只需要做好舆论导向, 并对该破产的上市公司的股东发行的股票进行强制处理控制危机的传播. 比如限制其每天涨跌幅, 并以最快的速度对破产的公司进行破产清算与处理, 便可以有效扼制大型上市公司破产时危机在股市中的大面积传播. 这样做也能够有效的防止政府因为救济破产的上市公司而陷入危机的漩涡中. 深入的研究危机在股市中的传播机理, 有助于在经济危机来临前, 政府采取相应的措施, 预防经济危机的发生, 最大限度地减小实体经济受到的不利影响.

本文从公司内部的大股东持股关系展开研究, 忽略了来自公司外部(如行业影响、国际影响等)因素对危机传播的影响, 在以后的研究中本人会将这些因素予以考虑, 从而使研究结果更加贴近实际情况. 同时本文并没有考虑舆论对于危机在股权关联网络中传播的影响. 考虑舆论影响的危机传播的 SIR 模型已经成型, 将在本人另一个论文中予以详细介绍.

参 考 文 献:

- [1] 王建伟, 荣莉莉, 王 铎. 基于节点局域特征的复杂网络上相继故障模型[J]. 管理科学学报, 2010, 13(8): 42-50.
Wang Jianwei, Rong Lili, Wang Duo. Model for cascading failures on complex networks based on local characteristics of nodes[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(8): 42-50. (in Chinese)
- [2] 李鹏翔, 张萌物, 席西民, 等. 组织网络中的无标度行为: 极端情形的结果[J]. 管理科学学报, 2009, 12(4): 42-50.
Li Pengxiang, Zhang Mengwu, Xi Youmin, et al. Scale-free behavior in organizational networks: Consequences in extreme situations[J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(4): 42-50. (in Chinese)
- [3] 单海燕, 王文平. 面向产量决策的多寡头网络最优结构分析[J]. 管理科学学报, 2010, 13(5): 33-43.
Shan Haiyan, Wang Wenping. Analysis of optimal structure based on output decision in oligopoly networks[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(5): 33-43. (in Chinese)
- [4] 陈 波, 于 冷, 刘君亭, 等. 泛在媒体环境下的网络舆情传播控制模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(11): 2140-2150.
Chen Bo, Yu Ling, Liu Junting, et al. Dissemination and control model of internet public opinion in the ubiquitous media environments[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(11): 2140-2150. (in Chinese)
- [5] Mantegna R N. Hierarchical structure in financial markets[J]. Eur. Phys. J. B., 1999, 11(1): 193-197.
- [6] Pan R K, Sinha S. Collective behavior of stock price movements in an emerging market[J]. Phys Rev E, 2007, 76(4): 046116.
- [7] Li P, Wang B H. Extracting hidden fluctuation patterns of Hang Sheng stock index from network topologies[J]. Physica A, 2007, 378(2): 519-526.

- [8]Emmert-Streib F , Dehmer M. Influence of the time scale on the construction of financial networks [J]. *Plos One* ,2010 ,5 (9) : e12884.
- [9]Emmert-Streib F , Dehmer M. Identifying critical financial networks of the DJIA: Toward a network-based index [J]. *Complexity* ,2010 ,16(1) : 24 - 33.
- [10]Zhang J H , Zhou H X , Jiang L , et al. Network topologies of Shanghai stock index [J]. *Physcs. Proc.* ,2010 ,3(5) : 1733 - 1740.
- [11]Li P , Wang B H. Extracting hidden fluctuation patterns of Hang Sheng stock index from network topologies [J]. *Physica A* , 2007 ,378: 519 - 526.
- [12]Lee K E , Lee J W , Hong B H. Complex networks in a stock market [J]. *Comput Phys Commun* ,2007 ,177(1 - 2) : 186.
- [13]Li Y H , Yao H X. The world stock market based on the complex networks [C]. *2009 International Symposium on Intelligent Information Systems and Applications , Proceedings* ,2009: 467 - 470.
- [14]Gunduz G , Gunduz Y. Viscoelastic behavior of stock indices [J]. *Physica A* ,2010 ,389(24) : 5776 - 5784.
- [15]Qian M C , Jiang Z Q , Zhou W X. Universal and nonuniversal allometric scaling behaviors in the visibility graphs of world stock market indices [J]. *J. Phys a-Math Theor* ,2010 ,43(33502) : 1 - 12.
- [16]Gualdi S , Medo M , Zhang Y C. Self-organized model of cascade spreading [J]. *Eur Phys J B* ,2011 ,79(1) : 91 - 98.
- [17]Jiang Z Q , Guo L , Zhou W X. Endogenous and exogenous dynamics in the fluctuations of capital fluxes: An empirical analysis of the Chinese stock market [J]. *Eur. Phys. J. B.* ,2007 ,57(3) : 347 - 355.
- [18]Schiavo S , Reyes J , Fagiolo G. International trade and financial integration: A weighted network analysis [J]. *Quantitative Finance* ,2010 ,10(4) : 389 - 399.
- [19]De Masi G , Iori G , Caldarelli G. Fitness model for the Italian interbank money market [J]. *Phys. Rev. E* ,2006 ,74(6) : 066112.
- [20]Battiston S , Rodrigues J F. The network of inter-regional direct investment stocks across Europe [J]. *Adv. Complex Syst.* , 2007 ,10(1) : 29 - 51.
- [21]Garlaschelli D , Battiston S , Castri M , et al. The scale-free topology of market investments [J]. *Physica A* ,2005 ,350 (2 - 4) : 491 - 499.
- [22]Glatfelder J B , Battiston S. Backbone of complex networks of corporations: The flow of control [J]. *Phys Rev E* ,2009 ,80 (3) : 036104.
- [23]Wang J J , Zhou S G , Guan J H. Characteristics of real futures trading networks [J]. *Physica A* ,2011 ,90(2) : 398 - 409.
- [24]Lim G , Kim S , Kim J , et al. Structure of a financial cross-correlation matrix under attack [J]. *Physica A* ,2009 ,388 (18) : 3851 - 3858.
- [25]Huang W Q , Zhuang X T , Yao S. A network analysis of the Chinese stock market [J]. *Physica A* ,2009 ,388(14) : 2956 - 2964.
- [26]Kim T Y , Oh K J , Sohn I , et al. Usefulness of artificial neural networks for early warning system of economic crisis [J]. *Expert Syst Appl* ,2004 ,26(4) : 583 - 590.
- [27]Garas A , Argyrakis P , Rozenblat C , et al. Worldwide spreading of economic crisis [J]. *New J Phys* ,2010 ,12(113043) : 1 - 11.
- [28]Markose S , Giansante S , Gatkowski M , et al. Too Interconnected To Fail: Financial Contagion and Systemic Risk In Network Model of CDS and Other Credit Enhancement Obligations of US Banks. [C]// Prepared for presentation at the ECB Workshop on "Recent advances in modelling systemic risk using network analysis". *COMISEF* ,2010.
- [29]Hethcote H W. The mathematics of infectious diseases [J]. *Siam Rev* ,2000 ,42(4) : 599 - 653.
- [30]Pastor-Satorras R , Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks [J]. *Phys Rev Lett* ,2001 ,86(14) : 3200 - 3203.

- [31] Ramani A , Carstea A S , Willox R , et al. Oscillating epidemics: A discrete-time model [J]. *Physica A* , 2004 , 333: 278 – 292.
- [32] Piccardi C , Casagrandi R. Inefficient epidemic spreading in scale-free networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2008 , 77 (2) : 026113.
- [33] Pastor-Satorras R , Vespignani A. Epidemic dynamics and endemic states in complex networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2001 , 6306(6) : 066117.
- [34] Moreno Y , Gomez J B , Pacheco A F. Epidemic incidence in correlated complex networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2003 , 68 (3) : 035103.
- [35] Moreno Y , Pastor-Satorras R , Vespignani A. Epidemic outbreaks in complex heterogeneous networks [J]. *Eur. Phys. J B* , 2002 , 26(4) : 521 – 529.
- [36] Moreno Y , Nekovee M , Pacheco A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2004 , 69 (6) : 066130.
- [37] Ma Y Y , Zhuang X T , Li L X. Research on the relationships of the domestic mutual investment of China based on the cross-shareholding networks of the listed companies [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* , 2011 , 390: 749 – 759.
- [38] 马源源 , 庄新田 , 李凌轩. 基于复杂网络的上海证券交易所富人俱乐部特性研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)* , 2011 , 32(3) : 400 – 404.
Ma Yuanyuan , Zhuang Xintian , Li Lingxuan. Complex networks based research on characteristics of the shanghai stock exchange rich-club [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* , 2011 , 32(3) : 400 – 404. (in Chinese)
- [39] 马源源 , 庄新田 , 李凌轩. 沪深两市股权关联网络的社团结构及其稳健性 [J]. *系统工程理论与实践* , 2011 , 31 (12) : 2241 – 2251.
Ma Yuanyuan , Zhuang Xintian , Li Lingxuan. Community and robustness of the correlated networks of stock ownership structure [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2011 , 31(12) : 2241 – 2251. (in Chinese)
- [40] Albert R , Jeong H , Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature* , 2000 , 406(6794) : 378 – 382.
- [41] Holme P , Kim B J , Yoon C N , et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2002 , 65(056109) : 1 – 14.
- [42] Kurant M , Thiran P , Hagmann P. Error and attack tolerance of layered complex networks [J]. *Phys. Rev. E* , 2007 , 76 (2) : 026103.
- [43] Crucitti P , Latora V , Marchiori M , et al. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Physica A* , 2004 , 340 (1 – 3) : 388 – 394.
- [44] 席运江 , 党延忠. 基于加权超网络模型的知识网络鲁棒性分析及应用 [J]. *系统工程理论与实践* , 2007 , 27(4) : 134 – 140.
Xi Yunjiang , Dang Yanzhong. The method to analyze the robustness of knowledge network based on the weighted supernet-work model and its application [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2007 , 27(4) : 134 – 140. (in Chinese)
- [45] 高 亮 , 李梦辉 , 吴金闪 , 等. 食物链网络在顶点攻击与边攻击下的鲁棒性 [J]. *系统工程理论与实践* , 2005 , 25 (7) : 1 – 8.
Gao Liang , Li Menghui , Wu Jinshan , et al. The robustness of attacks on vertices and edges of food webs [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2005 , 25(7) : 1 – 8. (in Chinese)
- [46] 迪斯特尔. 图论 [M]. 北京: 世界图书出版公司 , 2008.
Reinhard Diestel. *Graph Theory* [M]. Beijing: World Publishing Company , 2008. (in Chinese)
- [47] 上海证券交易所. 上海证券交易所股票上市准则 [EB/OL]. <http://www.sse.com.cn/sseportal/cs/zhs/xxfw/flgz/html/t23001.htm>.

Shanghai Stock Exchange. Stock Listing Criteria in Shanghai Stock Exchange [EB/OL]. <http://www.sse.com.cn/sseportal/cs/zhs/xxfw/flgz/html/t23001.htm>.

[48] 马丁·茨威格. 曲线的秘密: 茨威格经典技术分析法 [M]. 北京: 中信出版社, 2009.

Martin Zweig. Martin Zweig's Winning on Wall Street [M]. New York: Grand Central Publishing, 1990.

Susceptible-infected-removed (SIR) model of crisis spreading in the correlated network of listed companies and their main stock-holders

MA Yuan-yuan^{1 2}, ZHUANG Xin-tian¹, LI Ling-xuan³

1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: According to the annual reports of listed companies, a correlated network of the listed companies and their main stock holders are established. Taking into account the mutual influences, resulted from reduced cash flows or the fracture of capital chain, between the listed companies and the main stock holders, a susceptible-infected-removed model of crisis spreading (SIR) in the stock markets is established. Then, a numerical computation is used to analyze the crisis spreading in the correlated networks when the networks meet the random failure or the intentional attacks. If there are some failures or attacks on the large-scale listed companies or large-scale holding companies (Hub vertices) in the networks, the crisis will spread in a high speed and cause catastrophic damages. In this condition, the networks show a obvious vulnerability; and the stock markets may show domino effects. The research approaches in this paper are helpful for further researches on the transmission mechanism of the economic crisis.

Key words: susceptible-infected-removed (SIR) model; stock markets; complex networks; crisis spreading