

## 复杂 Agent 网络人工社会财富演化模型

于群修<sup>a</sup>, 毕贵红<sup>b</sup>, 张寿明<sup>a</sup>

(昆明理工大学 a. 信息工程与自动化学院; b. 电力工程学院, 昆明 650500)

**摘 要:** 为了研究社会网络与社会财富之间的相互影响, 提出一种复杂 Agent 动态网络模型。在糖域模型中, 基于社会圈子网络的理论, 赋予 Agent 不同的社会半径生成熟人网络, 根据财富共享规则在熟人网络中选择朋友生成财富信息共享网络。网络中的 Agent 采用财富资源共享的朋友关系社会网络寻找财富, 实现财富的首次分配, 加入社会财富交易机制, Agent 之间通过财富交易机制进行财富交易, 实现财富二次分配。Agent 财富分布的变化又会影响 Agent 的熟人网络和朋友网络, 最终形成社会财富和社会网络协同演化。仿真结果表明, 该模型能合理调整社会关系, 有助于缩小社会贫富分化和发展良好的社会关系网络。

**关键词:** 糖域模型; 社会网络; 财富交易; 财富演化; 协同演化; 资源共享

**中文引用格式:** 于群修, 毕贵红, 张寿明. 复杂 Agent 网络人工社会财富演化模型[J]. 计算机工程, 2016, 42(7): 277-286.

**英文引用格式:** Yu Qunxiu, Bi Guihong, Zhang Shouming. Artificial Social Wealth Evolution Model for Complex Agent Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(7): 277-286.

## Artificial Social Wealth Evolution Model for Complex Agent Network

YU Qunxiu<sup>a</sup>, BI Guihong<sup>b</sup>, ZHANG Shouming<sup>a</sup>

(a. Faculty of Information Engineering and Automation; b. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**[Abstract]** This paper proposes a complex Agent network model to study the interaction between social networks and social wealth. The Agents take advantage of different social radius to form acquaintance networks based on the theory of social circles in the sugarscape. Meanwhile, the Agents choose friends to form the wealth-sharing network through the rules in the acquaintance network. The Agents find wealth in the friendship network of wealth-sharing to achieve wealth distribution for the first time. The network adds social wealth trading mechanism to deal with the distribution of wealth. Through trading, the Agents complete the second wealth distribution. The Agent's wealth makes its acquaintance network and friend network change, which finally leads to the co-evolution between social wealth and social network. Simulation results show that this model can reasonably adjust social relations. It can minimize the social inequality, and good social relation network can be developed.

**[Key words]** sugarscape model; social network; wealth trading; wealth evolution; co-evolution; resource sharing

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.07.047

### 1 概述

人类社会人与人之间的关系构成社会网络, 个人的财富获取活动在社会网络中进行, 而且个人的财富获取又进一步影响社会网络的演化。所以, 社会网络和社会财富的分配之间是相互影响、相互促进的。研究人类社会网络和财富分配之间的协同演化动力学原理, 可以带来调控社会财富分配和社会关系的启示。

社会网络中发生的社会财富获取和社会网络相互影响机制可以利用复杂网络模型研究<sup>[1-2]</sup>。尤其是从 20 世纪末随着复杂网络理论的提出<sup>[3-5]</sup>, 经济学家逐渐发现网络结构一直存在于经济系统之中, 并且这种嵌入式性的机构影响甚至支配着经济系统的运行和演化。针对复杂网络模型的研究产生了许多经典模型。文献[6]给出了小世界网络模型, 小世界社会网络具有比较短的平均距离和相对大的聚类系数。文献[7]提出了无标度网络模型, BA 无标度

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61364022)。

**作者简介:** 于群修(1986-), 男, 硕士研究生, 主研方向为复杂系统、复杂网络建模与仿真; 毕贵红(通讯作者)、张寿明, 教授、博士。

**收稿日期:** 2015-06-23 **修回日期:** 2015-07-29 **E-mail:** qingdaoyqx@163.com

网络中考虑了“增长”和“择优”2个特性。但是择优方式为富者更富原理,也即后来者不可能居上,这与社会现象不符,个体的竞争能力不应该只与其时间长短有关,而应该与个体的能力和适应度有关。所以,在 BA 模型的基础上,又提出了很多改进模型。文献[8]在 BA 模型的基础上提出了适应度模型,该模型中假设每个节点在诞生时就有一个固定的适应度值,模型中的优先连接概率与节点的度和适应度之积成正比,使适者更富。该模型重点揭示了随着社会网络的演化,网络中适应度高的节点具有更高的连接度,所以,具有较广的社会关系网络。然而该模型中的适应度是事先根据一个随机值设定的,并不能由节点自身的特点自适应确定,而实际的社会网络中节点的适应度是随社会网络的演化而动态变化的,节点适应度的确定如何由个体的社会财富等因素确定,这需要进一步的研究。利用基于 Agent 的微观建模方法研究社会经济系统中财富的演化机制得到了许多关注。文献[9]提出了糖域(Sugarscape)人工社会模型研究人口、社会财富和文化传播等问题,但是该模型中人们获得财富的过程没有考虑社会网络的影响。社会经济关系网络直接影响个体所拥有的财富,基于复杂网络的财富分布与财富演化分析方法是解决这一问题的有力工具。文献[10-11]分析社财富分布信息与社会结构的关系,文献[12]在此基础上模拟分析了财富分布的规律。上述研究主要从动态的社会关系结构方面讨论了社会财富分布规律,而社会财富对网路的影响关系并没有涉及。

在现实社会中,社会网络与人的财富是相互影响的过程。本文在 Sugarscape 人工社会模型的基础上,提出一种财富演化复杂 Agent 网络人工社会模型。引入基于 Agent 的社会圈子网络生成一个结构上更接近实际社会,并且具有动态特性的熟人网络。

## 2 糖域空间网络模型

### 2.1 糖域模型

在文献[9]提出的糖域模型中,有一个  $50 \times 50$  糖量分布的二维空间。空间中的每一个点  $(x, y)$  都有糖量及容纳糖的空间(以下称作是瓦片)。每个瓦片上容纳的糖量是不同的。糖量最小为 0,最大为 4,颜色渐变表示糖量的不同。图 1 是模型使用的糖量分布图,左下方与右上方的颜色最深,表示糖量最多,左上方和右下方区域代表糖量为 0。由于糖被吃掉后会立即恢复,因此 Agent 的糖量会不断积累,恢复糖量的规则定义为  $\{G_\alpha\}$ 。当  $\alpha$  取不同值时表示规则不同。本文使  $\alpha = \infty$ 。

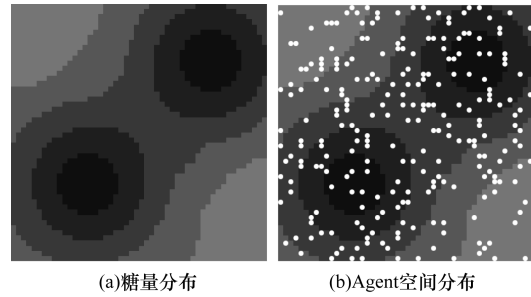


图 1 糖量及 Agent 空间分布

糖域恢复规则  $\{G_\alpha\}$ :(1)当  $\alpha = 1$  时,在每一个网格位置,根据时间设置一个恢复速率;(2)当  $\alpha$  介于 1 与  $\infty$  之间时,在每一个网格位置,设定不同的恢复速率;(3)当  $\alpha = \infty$  时,在每一个网格位置,当糖被 Agent 消耗后,立即恢复原有瓦片糖量。

糖域模型很好地解释了人与外界资源的相互需要互相依存关系。人类要生存发展必须不断地从外界获取资源,进而将资源进行流通。而资源的维护需要人的介入。

### 2.2 糖域空间社会网络

文献[13]提出一种基于 Agent 的社会圈子网络理论来构建具有多种实际社会网络统计特征的社会网络生成方法,它由 Agent 自己构建和管理社会关系,可以灵活描述大规模社会网络时空耦合演化的机理。社会圈子网络模型来源于社会空间和社会距离的思想<sup>[14]</sup>。社会网络模型可以被看作是一张社会地图,显示了人是如何在社会中分布和关联的,个体的社会圈子表示其社交范围,即个体认识处于它的社会圈子内的其他个体,社会圈子的大小用它的社会半径进行描述<sup>[13]</sup>。社会网络中每个个体的社会半径都不尽相同。个体之间的距离越近代表他们之间的社会关系越密切。在创建个体间联系时,要求双方都认识对方才认为两者是认识的,进而在两者之间产生连接,如图 2 所示。

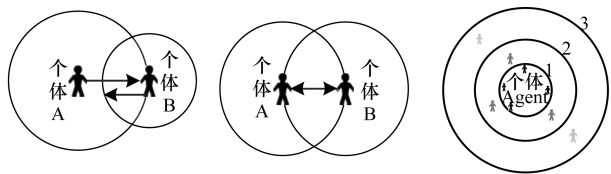


图 2 社会圈子中个体的联系情况

(a)A,B不产生联系的情况 (b)A,B产生联系的情况 (c)多社会半径联系的情况

社会圈子可以实现社会网络的动态特性,通过引入短距离移动(日常短途移动)和长距离移动(长途旅行等)来模拟现实社会中人口的日常活动,不同的日常活动会引起社会网络结构的变化<sup>[13]</sup>。短距离移动代表个体在一个时间步长内移动一个单位长度的距离,由于移动的距离较小,因此人口的移动可

能不会改变个体网络结构。图 3(a)中个体 Agent 移动到 A,那么 Agent 的个体网络结构改变;如果移动到 B,由于仍在 Agent 的社交范围内,因此 Agent 的结构不变。长距离移动代表个体在一个时间步长时间内移动大于自身社会半径的距离,由于移动距离大于社会半径,因此个体网络以及整体网络结构都将改变<sup>[13]</sup>。在图 3(b)中,个体 Agent 从 A 移动到 B,移动距离  $L$  超过自身社会半径  $r$ ,所以,Agent 网络结构以及整体网络结构一定改变。

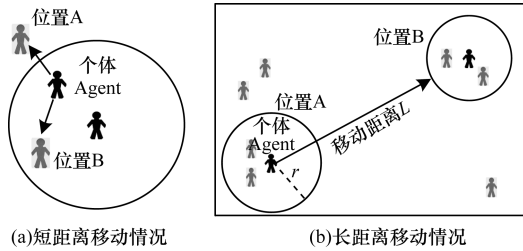


图 3 日常活动对个体网络以及整体网络的影响

### 3 复杂 Agent 网络人工社会财富演化模型

Agent 的生活环境与文献[9]提出的糖域模型一致,并在此基础上加入人工社会网络<sup>[14]</sup>来研究社会财富及其分布与网络之间的协同演化关系。

#### 3.1 Agent 的属性及初始化

Agent 属性如表 1 所示。在模型中,Agent 随机分布到二维空间中,2 个 Agent 不能同时占据相同的坐标  $(x, y)$ , Agent 在自己的视力范围  $(r)$  内能够不断收集和消耗糖(消耗的糖即新陈代谢  $(V)$ , Agent 将收集后的糖转化为自身的资源定义为  $sugar$ ; 瓦片上的糖定义为  $psugar$ 。

表 1 Agent 属性

Agent 属性	初始值	描述
坐标位置 $x, y$	随机分布	Agent 随机分布在二维空间
新陈代谢 $V$	1~4 的随机值	Agent 移动产生糖量的消耗
视力范围 $r$	4	Agent 只能看到东西南北 4 个方向的 4 个单位的范围
初始糖量 $W_i$	$W_i = (psugar)^3 + 8$	Agent 根据赋初始值规则或得初始财富值
社会等级 $Grd$	贫困、中贫、富有	根据财富值多少将空间中的 Agent 划分为贫困、中贫、富有 3 类人群
社会半径 $t\_r$	大、中、小	$t\_r$ 分 3 类: $small\_reach, middle\_reach, high\_reach$

新陈代谢  $(V)$  是指每一个时间步(步指的是每一个时间单位内 Agent 移动的步数)或者每一个循环过程所消耗的糖量。由于每一个 Agent 的秉性有差异,因此新陈代谢量也不同。为体现差异性,

将  $V$  定义为 1~4 的随机值;视力范围  $(r)$  也是一个随机值,拥有视力  $r$  的 Agent 能够在平均划分的 6 个区域内看到  $r$  个区域的范围。如图 4 所示,若  $r = 5$ ,则 Agent 能看到 5 个区域的范围(看不到的区域设为随机)。糖域模型中,所有 Agent 的视力范围定义为 1~6 的随机值;空间中,每个 Agent 的社会圈子大小用社会半径  $t\_r$  表示。现实社会中富有的人往往比贫穷的人社交范围更广。与之对应,将  $t\_r$  分为 3 类:小社会半径  $small\_reach$ ,中等社会半径  $middle\_reach$ ,大社会半径  $high\_reach$ 。

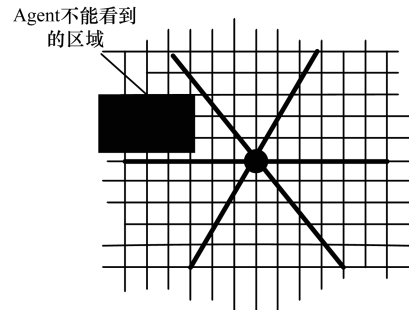


图 4 Agent 的视野

在初始时刻, Agent 被给予了一定的初始糖量  $W_i$ 。文献[9]将 Agent 的初始值设置为随机值。为更符合社会规律,本文将赋初值的方式定义为规则  $E$ 。

赋初值规则  $\{E\}$ :将所有 Agent 随机分布到二维空间中,让每个 Agent 吃掉所占位置上的糖量的 3 次幂加 8,此时  $W_i = (psugar)^3 + 8$ 。

为了便于直观观察构建的人工社会模型中不同财富阶层人数的演化趋势,在构建的人工社会网络中,根据 Agent 的财富值将 Agent 简单的划分为 3 类,即贫困、中等和富有。并分别用三角形、方形、圆形标记。这 3 类人口的划分方式如下:

$$C = M/N \tag{1}$$

$$D_1 = C \cdot e \tag{2}$$

$$D_2 = C \cdot f \tag{3}$$

$$M_1 = C + D_1 \tag{4}$$

$$M_2 = C - D_2 \tag{5}$$

其中,  $C$  表示全社会成员收入中心值;  $M$  表示总人口的全部收入;  $N$  表示总的人口;  $D_1$  表示极富有的起点极差;  $e$  表示极富有的起点极差系数;  $D_2$  表示极贫穷的起点极差;  $f$  表示极贫穷的起点极差系数。若  $W_i > M_1$ , 则为富有人口; 若  $W_i < M_2$ , 则为贫穷人口;  $M_1 < W_i < M_2$  为中等人口(本文取  $e = 0.3, f = 0.5$ )。

#### 3.2 Agent 行为

Agent 行为规则包括 Agent 的移动规则  $\{M\}$ 、出生死亡规则  $\{B\}$ 、生成熟人圈子网络规则  $\{S\}$ 、生成朋

友圈子网络规则  $\{F_p\}$ 、移动和财富获取规则  $\{Z\}$ 、Agent 之间的财富交易规则  $\{J\}$ 、人口出生死亡和网络更新规则  $\{BSF\}$ 、朋友关系的维持和断开规则  $\{D\}$ 。

#### (1) Agent 的移动规则 $\{M\}$

在糖域模型中, Agent 通过判断周围糖域的信息找到最佳位置, 根据一定的标准收集糖量使 Agent 的糖量不断增加。最佳的位置指的是 Agent 当前所处位置周围视力范围内的最大糖量位置。

Agent 移动规则  $\{M\}$ : 1) 在自己视野范围内的 4 个方向上找出糖量最大的位置并确定此位置没有其他 Agent 占据; 2) 如果同时出现相等的最大糖量, 选择距离自己最近的移动到这个位置, 在这个新的位置上将糖吃掉。

简单来说, 规则  $\{M\}$  为从所有视力范围内的位置中找到离自己最近的并且未被占据的糖量最大的位置, 移动到此位置吃掉此位置的糖。

#### (2) 出生死亡规则 $\{B\}$

通过移动规则  $\{M\}$  大部分个体都会朝向糖量较多的地方移动吃糖, 如图 1(b) 所示, 几乎所有的 Agent 都集中到糖量多的区域。Agent 糖量不断增加, 同时由于存在新陈代谢, Agent 每走一步糖量会相应减少。如果在某一个时刻, Agent 的糖量变为 0 或小于 0, 那么视为此 Agent 被饿死, 将被移除 Sugarscape。如果 Agent 没有被饿死将一直存活。每一个 Agent 也都有自己的年龄限制, 现实社会中, 个体不可能无限存活, 若 Agent 年龄到了自己的最大年龄, 则视为死亡也将被移除 Sugarscape。有死亡也必然会有出生。

出生死亡规则  $\{B\}$ : 1) 如果 Agent 糖量小于等于 0, 则死亡, 同时出生一个新 Agent。新 Agent 的年龄设为 0, 财富设为 4, 其他属性与父辈相同; 2) 如果 Agent 年龄大于最大年龄 (每一个 Agent 的最大年龄在 (60, 100) 之间的任意数值), 则死亡, 同时出生一个新 Agent。新 Agent 年龄设为 0, 其他属性与父辈完全相同。

这个规则可以理解为, 如果 Agent 糖量小于等于 0 或者年龄大于自己的最大年龄, 则死亡, 同时, 为保持 Agent 数量不变也要出生一个新 Agent。新个体的出生并不能完全继承父辈的所有属性。如果是因为糖量而死亡的个体, 那么要重新给新个体赋初始的财富值; 若因为年龄而死亡的个体, 则可以继承父辈的所有财产不必重新赋初始值。

#### (3) 生成熟人圈子网络规则 $\{S\}$

利用基于社会圈子网络建立熟人圈子网络。社会上的人若彼此认识, 并且都在自己的社会半径范围内, 则建立连接, 否则不建立连接。另外, 根据每个人

的财富量大小, 将熟人圈子中的所有个体分为 3 类, 分别为贫穷、中等以及富有。设定社会半径 ( $t_r, small\_reach, middle\_reach, high\_reach$ )。利用建立熟人圈子网络规则  $\{S\}$  将分布在 Sugarscape 二维空间中的个体间的连接生成熟人网络, 如图 5 所示。

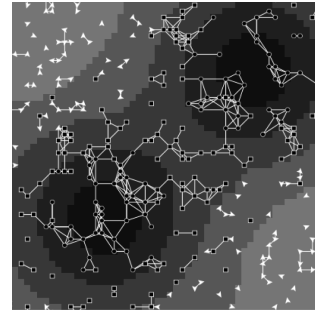


图 5 熟人圈子网络

生成熟人圈子网络规则  $\{S\}$ : 1) 判断 2 个 Agent 是否都在自己的半径范围内; 2) 判断 2 个 Agent 是否相互认识; 3) 若 2 个 Agent 同时满足上述 2 条, 则为熟人关系, 并用实线连接。

#### (4) 生成朋友圈子网络规则 $\{F_p\}$

在熟人网络的基础上建立朋友圈子网络, 规定只有在朋友网络上的个体间才可以实现财富资源信息共享。实际社会中存在着人们倾向于与自己社会资源量相近的个体连接的网络连接机制, 规定人与人之间互为朋友的基础是各自的社会地位是否在同一层次或者相差不大的层次上, 而层次的判定往往是通过各自的财富量大小界定。因此, 用财富资源量的接近程度来界定朋友关系。熟人网络中每一个与节点  $Agent_i$  相连的  $Agent_j$ , 若  $Agent_i$  的财富  $W_i$  比  $Agent_j$  的财富  $W_j$  小, 且满足  $W_i > SP \cdot W_j$ , 其中,  $SP \in (0, 1)$ , 则两者之间可以建立朋友关系链接, 否则不能建立链接。同样如果  $Agent_i$  的财富  $W_i$  比  $Agent_j$  的财富  $W_j$  大, 且满足公式  $W_j > SP \cdot W_i$ , 那么两者之间可以建立朋友关系链接, 否则不能建立链接。该规则表示 2 个个体之间成为朋友的条件是两者之间的财富差要在满足规定的范围内。如图 6 所示, 在二维空间网络中, 将朋友间的连线设为虚线。

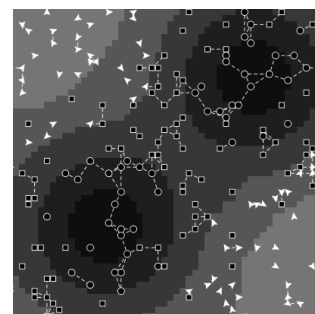


图 6 朋友圈子网络

本文将建立朋友圈子网络的过程定义为规则  $\{F_p\}$ :1)判断 2 个人之间是否是熟人关系;2)根据公式  $W_i > SP \cdot W_j$  或  $W_j > SP \cdot W_i$  判断财富较小的 Agent 是否在财富较大的 Agent 容忍的范围内;3)若 2 个个体同时满足上述 2 个条件,则视为朋友,并用虚线连接。

#### (5) 移动和财富获取规则 $\{Z\}$

个体 Agent 寻找资源的过程不是直接通过规则  $\{M\}$  获取<sup>[9]</sup>,而是间接通过朋友圈网络中较强者的介绍获取财富。

在朋友圈中,所有 Agent 都是朋友关系,所有朋友当中必然有一个或某几个较强者,若这些朋友愿意将获取财富的机会及信息与自己共享,自己也就很快会获得赚取财富的机会,进而实现财富与经验的累积,但由于资源较大的个体不一定会给所有的朋友提供帮助,假定朋友之间共享财富分布信息的概率为  $P\%$ 。

累积财富规则  $\{Z\}$ :1)朋友网络中每个  $Agent_i$  找到朋友圈中与自己相连的资源最大的  $Agent_j$ ,两者之间如果满足信息共享条件,则  $Agent_i$  移向  $Agent_j$ ,  $Agent_i$  在  $Agent_j$  的位置以  $DIS = 1$  为半径的圆内,根据规则  $\{M\}$  找到资源最大的瓦片并吃掉瓦片上的资源的  $Mom$  倍。 $Mom$  介于 1~10 之间可调,此时,每个个体的财富量为  $W_i = W_i + Mom \times Psugar$ ;2)不满足财富信息共享的条件,则  $Agent_i$  直接根据规则  $\{M\}$  获取财富。图 7 所示为 Agent 移动获取资源示意图。

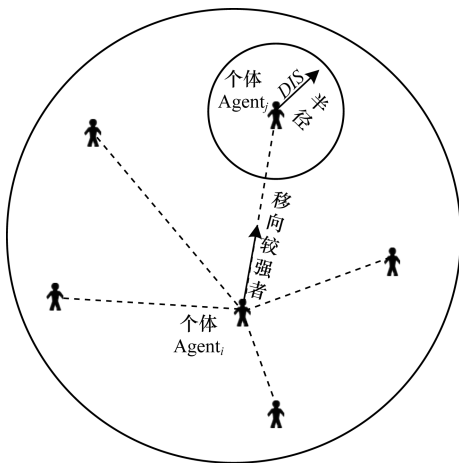


图 7 Agent 移动获取资源示意图

#### (6) Agent 之间的财富交易规则 $\{J\}$

由于考虑了社会网络的结构,因此财富交易只能发生在相关联的节点对之间。本文设定的交易模型为赢家得到输家部分财富的模型。

财富交易机制:设每次交换的财富值为  $\Delta = 1/KN$  ( $K$  为财富系数,  $N$  为与本节点相连的链

数),并且每次进行交易的财富值较少的个体获胜概率为  $VT$ 。当  $VT = 0.5$  时,表示节点  $i$  和节点  $j$  的获胜概率均等,则不会发生财富交易;当  $VT > 0.5$  时,表示节点  $i$  和节点  $j$  中较为贫穷的个体获胜概率较大,则贫穷者获得财富值  $\Delta$ 。此情况发生时将使网络财富趋于均衡。当  $VT < 0.5$  时,表示节点  $i$  和节点  $j$  中较为富裕的个体获胜概率较大,则富裕者获得财富  $\Delta$ ,此情况发生时必然拉大了网络中的贫富分化程度。

网络财富交易规则  $\{J\}$ :1)任意选取一个与  $Agent_i$  相连的节点  $Agent_j$  并判断 2 个节点的财富值,假定  $W_i > W_j$ ;2)当  $VT = 0.5$  时,不发生交易;3)当  $VT > 0.5$  时,  $Agent_j$  获取财富值  $\Delta$ ;4)当  $VT < 0.5$  时,  $Agent_i$  获取财富值  $\Delta$ 。

#### (7) 人口出生死亡和网络更新规则 $\{BSF\}$

在获取财富的过程中,由于新陈代谢的存在,每一个时间步长个体都需要消耗一定资源,同时,规定出生死亡规则更符合现实(出生死亡规则同  $\{B\}$ )。死亡的个体要断开网络上所有的链接,然后移出网络,新出生的个体根据赋初始值规则  $\{E\}$  获得初始财富值,根据规则  $\{S\}$  和  $\{F_p\}$  重新建立新的熟人网络和朋友圈。

#### (8) 朋友关系的维持和断开规则 $\{D\}$

个体财富值的变化会引起朋友关系的改变。由于每个人的财富值  $W_i$  随时间动态变化,而朋友圈子网络建立的原则之一是按财富多少划分的,因此当财富值发生改变时,有可能需要断开原有的连接,根据规则  $\{F\}$  重新建立新的朋友圈子网络,超过个体的最大度值也会引起朋友关系的改变。在现实生活中,每个人不可能无限制地认识世界上的所有人。即便在自己的社交范围及财富容忍范围内,彼此之间也有可能成为不了朋友甚至不认识。本文设定每个 Agent 能够结识朋友个数的上限  $TK$  (即度的上限),如果超出这个上限,则用超出的连线随机取代已经连接的连线。即在原有的连线中随机断开超出自己度值数量的连线,度值上限  $TK$  在 20~100 之间任意设定,一些偶然随机因素也会导致朋友关系的改变。模型规定每一个时间步朋友关系的边按  $DKL = 10\%$  的概率随机断开使其朋友关系改变,以反映朋友关系中的随机性。

综合以上原因,本文将断开原有连接定义为规则  $\{D\}$ :1)朋友圈中判断已经用红色虚线连接的朋友之间的财富值是否仍然符合规则  $\{F\}$ ,若不符合则立即断开连接使其朋友关系不成立;2)判断每个 Agent 的度是否超出自己的最大限额。若超出  $n$  条,则随机断开  $n$  条原有的连接使其朋友关系不成立。

3) 虚线相互连接的朋友之间按 10% 的概率随机断开使其朋友关系不成立。

#### 4 人工网络社会演化仿真流程

人工网络社会演化仿真流程如下所示。

(1) 建立 Agent 并初始化。创建 500 个 Agent 并随机分布在  $50 \times 50$  范围内的二维空间同时打开糖域模型地图, 将地图平铺到二维空间。

(2) Agent 赋初始值。根据规则  $\{E\}$  每个 Agent 获得初始值  $W_i = (psugar)^3 + 8$ 。假定每个人的熟人都生活在以自己为半径的一个圆内, 半径用  $t_r$  表示。 $t_r$  分为  $small\_reach, middle\_reach, high\_reach$ 。相应地生成贫困、中贫、富有 3 种圈子。

(3) 生成社会网络。Agent 根据熟人圈子网络生成规则  $\{S\}$  建立熟人圈子网络; 在熟人基础上根据朋友关系生成网络规则  $\{F_p\}$  建立朋友圈子。

(4) 寻找资源, 获取财富。在生成的社会网络中, Agent 按照移动和财富获取规则  $\{Z\}$  进行移动和财富累积以及财富消耗。

(5) Agent 间的财富交易。根据规则  $\{J\}$  进行网络中个体的财富交易。

(6) 恢复地图上瓦片资源。当瓦片资源被 Agent 获取后, 根据规则  $\{G_s\}$  保持资源的可持续性。

(7) 更新社会网络。1) 在个体移动之后, 须要重新利用熟人圈子网络生成规则  $\{S\}$  更新熟人圈子网络, 利用朋友关系生成网络规则  $\{F_p\}$  更新朋友圈子。2) 根据规则  $\{B\}$  判断死亡/出生人口并利用人口出生死亡和网络更新规则  $\{BSF\}$  更新社会网络。3) 由于 2 种圈子建立的主要依据是各自财富值的大小, 经历了获取财富的过程后每个人的财富值发生变化, 在各自财富值的基础上, 根据规则  $\{S, F_p\}$  重新建立新的熟人圈子及朋友圈子网络。

(8) 计算社会网络结构参数。计算财富分布、度-度相关系数、聚类系数以及度分布等描述社会网络特性的参数。

(9) 网络动态演化。随着时间更新, 重复执行步骤(4)~步骤(8)。

#### 5 仿真结果分析

本文模型以 NetLogo<sup>[15]</sup> 为平台, 以 2 种网络的相互影响为基础分别讨论分析了结构参数  $SP, t_r, K, P, VT$  对社会财富分布的影响。每个类型的实验在相同初始条件下重复 20 次实验, 通过求均值得到最终实验结果。Agent 所处环境设定为  $50 \times 50$  的二维网格空间, 具体参数如表 2 所示。

表 2 模型可调控参数和初始值

参数	初始值	描述
$nofAgents$	500	Agent 总数
$small\_reach$	2	贫穷者的社会半径
$middle\_reach$	3	中贫者社会半径
$high\_reach$	5	富有者社会半径
$SP$	0.2	财富少的节点成为财富强的节点朋友须满足财富比例
$DIS$	4	节点移动到富有的节点后在其周围可寻找资源的半径
$Max_e$	0.3	极富有起点极差系数
$Min_f$	0.5	极贫穷起点极差系数
$Mom$	2	获取财富的比例值
$TL$	50	朋友网络最大度上限
$DKL$	10%	朋友连接断开概率
$VT$	0.5	交易中获胜概率
$\Delta$	$1/KN$	交易中获取财富值
$K$	2	交易中获取财富系数
$P$	80	朋友圈中 $P\%$ 的个体可以获得帮助

#### 5.1 网络演化分析

网络演化过程如图 8 所示。由图 8 可以看出网络逐渐呈现社群现象, 游离于社群之外的个体数量不断减少, 最终形成 2 个大的社群, 并且分别占据了空间中资源较大的 2 个地方。社群内部相互连接, 所有 Agent 之间都是朋友关系。

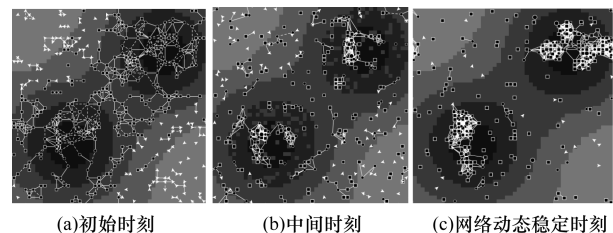


图 8 网络动态演化过程

虽然网络中分布着贫困、中等及富有 3 类个体, 但是这种社群结构并没有出现 3 类社群。而是贫富相拥在一起的 2 个社群。并且孤立的个体虽然多分布在资源较少的地区, 但是他们却不全是贫穷个体也有中等及富有个体的分布。这说明当网络达到稳定时, 一部分孤立的个体会加入到社群当中, 个体也会从社群中孤立出来, 网络是一个动态的稳定状态。这与社会现实社会相吻合。此时的度-度相关系数为 0.042 大于 0, 网络正相关为同配网络。对应图 8 网络的聚类系数分别为 0.494, 0.623, 0.818, 网络趋于稳定时的聚类系数较大, 这也与网络图反映出的直观现象相符。

图 9 所示为网络的度分布演化过程。初始时刻, 大部分个体度值在 1~3 之间, 少数人度值较大。

随着时间及条件的改变,个体之间逐渐出现小的社群,如图 9(b)所示。度分布曲线出现多个峰值,从放大的峰值图可以看出,小的峰值近似服从泊松分布,泊松分布的结论与以往社会网络的度分布研究结论是一致的。当网络达到稳定后,形成 2 个大的社群团体,此时曲线中的峰值虽然存在,但是数量增多,峰值变小。最大度值为 55 左右。这表明,每个大的社群都是由很多小的社群汇聚而成。小的社群内部存在强连接,小社群之间通过弱连接相连。每个 Agent 链接朋友的数量相差不大。

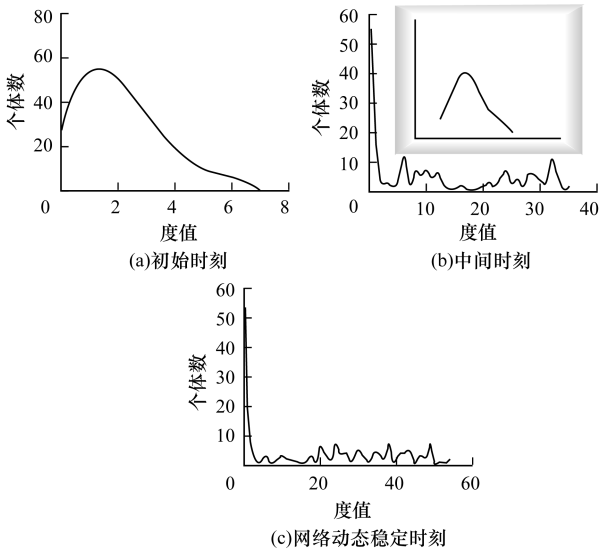


图 9 网络度分布演化

### 5.2 网络财富演化分析

#### 5.2.1 参数 SP 对财富分布的影响

根据规则  $\{F_p\}$ , 参数  $SP$  表示在熟人网络中相互连接的个体, 财富较小的 Agent 的财富值占财富较大 Agent 的  $SP$  以上, 两者便是朋友关系。同时, 给定以下主要计算因子:  $VT = 0.5, P = 80, K = 0.2, small\_reach = 2, middle\_reach = 3, high\_reach = 5$ 。其中,  $VT = 0.5$  表示在交易中没有获胜个体(即不产生交易); 根据规则  $\{Z\}$ ,  $P = 80$  表示在朋友圈内, 财富最大的个体只给  $P\%$  的个体提供帮助。

图 10 所示为不同  $SP$  值的情况下网络达到动态稳定时的财富分布以及 Gini 系数的变化。初始时刻  $SP = 0.9$ , 从财富曲线可以看出, 大部分个体财富较少, 穷人数量较多, 贫富分化较为严重, 表明网络中出现强强联合趋势, 富人极容易聚团, 连接底层社会与上层社会的通道相对闭塞。随着  $SP$  值的降低(即贫穷者与富有者成为朋友的机会增大), 由图 10(a) 可以明显看出, 财富曲线趋于平缓, 各个阶层的人数相差不大, 中产阶级的人数增多, 网络中贫富分化得到了很大程度的缓解。从图 10(b) 的 Gini 系数能直观地看出网络中贫富分化的程度。

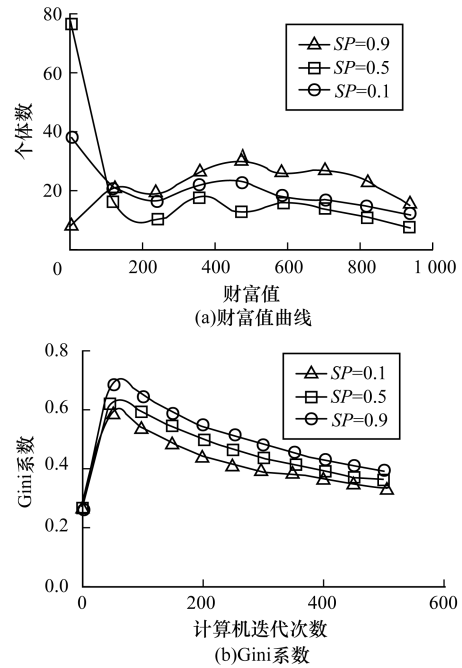


图 10 网络财富分布及 Gini 系数曲线

图 10(b) 为  $SP$  取不同值的情况下, 网络 Gini 系数的变化趋势对比。Gini 系数介于 0 ~ 1 之间, 能够直观地反映出人群收入不均等的程度。其值越大, 人群收入不均等的程度越高。可以看出, 无论  $SP$  值为多少, Gini 系数都呈下降趋势。社会的贫富分化都在不断缩小。但是  $SP$  的不同却导致了 Gini 系数下降速率的差异。规则  $\{F, G\}$  表明  $SP$  越大, 2 个个体成为朋友关系的财富值比值越大, 要求财富值相差越小, 进而朋友圈子网络规模越小, 累积财富的机会减少。因此, 要想让 Gini 系数在短时间内迅速下降, 必须尽量减小  $SP$  值, 加强个体间的交流, 让更多的人能够进入到财富共享的社会网络。

#### 5.2.2 社会半径 $t_r$ 对财富分布的影响

图 11 表示了增大社会半径后, 网络达到动态稳定状态时财富分配情况。同时, 给定以下主要计算因子:  $SP = 0.5, VT = 0.2, P = 80, K = 0.2$ 。其中,  $VT = 0.2$  表明富有者在交易中获胜;  $K = 0.2$  表明获胜者获取财富的比例系数为 0.2。通过设置 3 种社会半径, 对比网络财富变化。从图 12(a) 可以明显地看出, 个体的圈子大小变化对社会财富分布影响明显, 当个体圈子小时, 网络密度也较小, 随着个体圈子的扩大, 网络中的连接不断增加, 表示能联系到的个体范围增加, 交流就会增加。虽然富人在交易中更容易获胜, 但是每个 Agent 的朋友圈变大, 资源、信息共享的机会及获取朋友帮助的机会均增多。财富流动性增强。随着半径的增大财富分布趋于均衡。从图 12(b) 的 Gini 系数也可以看出网络贫富分化情况。

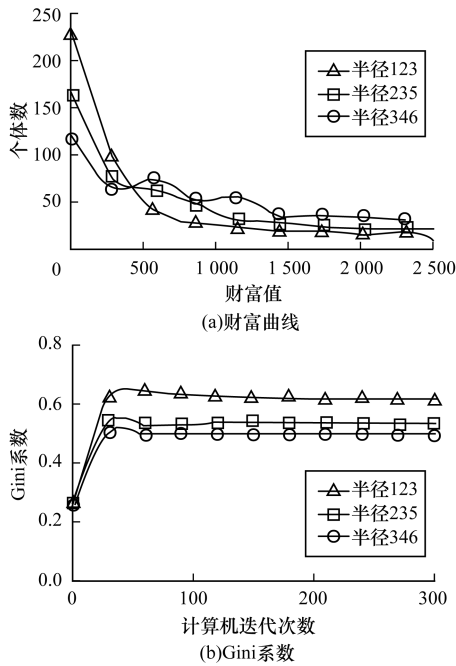


图 11 网络财富分布及 Gini 系数变化趋势

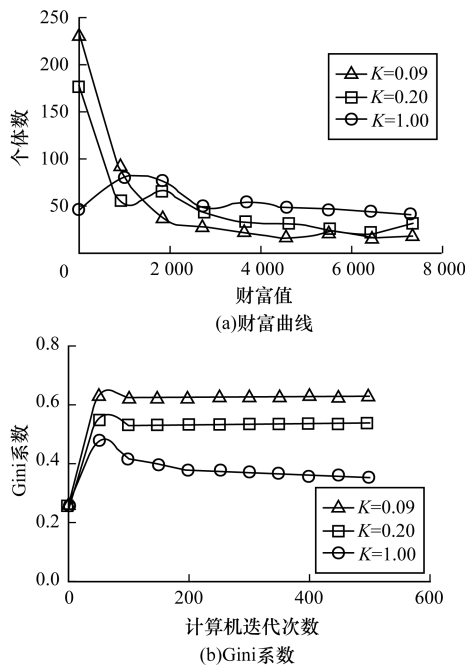


图 12 网络财富分布及 Gini 系数曲线 1

半径越大,其 Gini 系数越低,对比图 10(b) 整个 Gini 系数曲线下下降不明显。这是由于富有个体在交易中获胜,富有个体获胜拉大了贫富分化。在现实社会中,随着交通和通信技术的发展,人们之间的时空隔绝越来越被淡化,人们的交往范围已经不受地理位置的限制<sup>[13]</sup>。在目前条件下,需要出台一些政策配合以达到进一步降低 Gini 系数的目的。

### 5.2.3 参数 K 对财富分布的影响

参数 K 表示交易中获取资源的比例系数。同时给定以下主要计算因子:  $SP = 0.5$   $VT = 0.2$ ,  $P = 80$ ,

$small\_reach = 2, middle\_reach = 3, high\_reach = 5$ 。根据规则  $\{J\}$ , K 越大表示交易中获胜者获取的资源越少。

如图 12 所示为不同 K 值的情况网络达到动态稳定时的财富分布以及 Gini 系数的变化。K 的初始值为 0.09。富有者在交易中获得的财富相对较多,虽然有规则  $\{Z\}$  的存在,但是当网络达到动态稳定状态时,贫富分化仍然较为严重,大多数个体的财富值集中在 0 ~ 2000 的范围内,中产阶级人数较少。随着 K 值的增大,在交易中获胜的富有者获得的财富减少,同时,规则  $\{Z\}$  打通了阶级障碍,贫穷者获取财富的渠道增多。因此,网络达到稳定时,贫富分化得到了缓解,并且随着 K 值的增加贫富分化逐渐减少。

从图 12(b) 的 Gini 系数也可以看出,网络从初始时刻到达近似稳定状态时的网络贫富分化程度。K = 0.09 时, Gini 系数在较大值的基础上呈缓慢增加趋势,贫富分化较为严重。K = 0.2 时, Gini 系数虽然也在增加,但是其整体数值却较小,这在一定程度上缓解了网络的贫富差距。当进一步增加 K 值之后, Gini 系数呈现出逐步降低趋势,当网络达到动态稳定时 Gini 系数的值较小。在现实社会中,将富有者的利润降低,或者通过国家政策增加贫穷者在交易中获胜的概率,同时加强不同阶级之间的交流,贫富分化将逐渐减小。

### 5.2.4 参数 P 对财富分布的影响

根据规则  $\{Z\}$ , 参数 P 表示 P% 的个体能够得到较强者的帮助并且获取较强者周围瓦片上的资源。同时给定以下主要计算因子:  $SP = 0.5$ ,  $K = 0.2$ ,  $VT = 0.2$ ,  $small\_reach = 2, middle\_reach = 3, high\_reach = 5$ 。

网络财富分布及 Gini 系数曲线如图 13 所示。

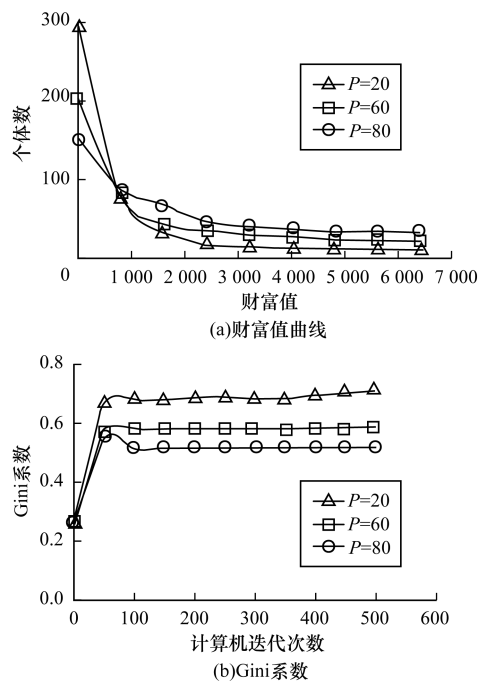


图 13 网络财富分布及 Gini 系数曲线 2

$P$  的初始值为 20, 由图 13(a) 可以看出, 此时的财富分布极为不均衡。更多的财富仅仅掌握在少数人手中, 大多数个体却掌握着很少的财富。随着  $P$  值的增加, 财富分布趋于平缓。两极分化逐渐减小。同时, 随着  $P$  值的变大, 虽然 Gini 系数在很小的范围内增加, 但是随着  $P$  值的增加 Gini 系数整体的值呈降低趋势。现实社会中, 若富有的人愿意给贫穷的人提供帮助, 增加信息共享的机会, 社会贫富分化将逐步降低。

### 5.2.5 参数 $VT$ 对财富分布的影响

根据交易规则  $\{J\}$ , 参数  $VT > 0.5$  表示在交易中资源少的个体获胜;  $VT < 0.5$  表示资源较大的个体获胜。同时给定以下主要计算因子:  $SP = 0.5, K = 0.2, P = 80, small\_reach = 2, middle\_reach = 3, high\_reach = 5$ 。

如图 14 所示, 当  $VT = 0.2$  时, 富有者在交易中取胜, 导致富者更富, 两极分化程度加大。相反若  $VT = 0.6$ , 贫穷者在交易中取胜, 随着计算机迭代次数的增加, 贫穷个体将逐渐减少甚至变为富有个体。网络中的贫富分化将逐渐消失。在现实社会中, 穷人在交易中取胜的概率虽然较低, 但是通过政策上的支持来鼓励并发展较为贫穷者创业。同时贫穷个体不断提高自己产品的质量加强自身能力等可以增加获利机会, 使贫富分化得到很大程度的缓解。

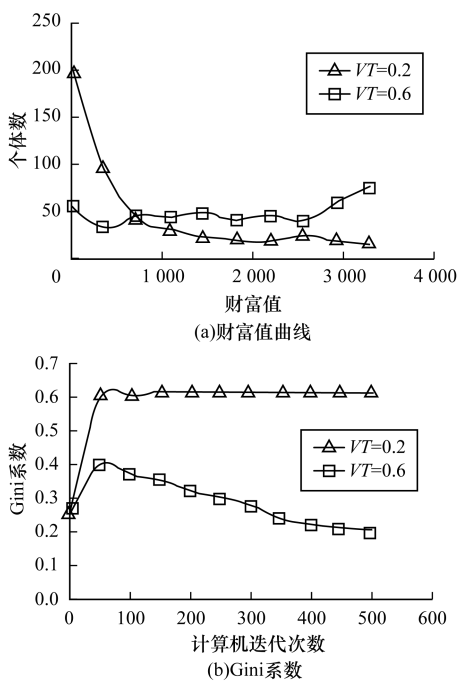


图 14 网络财富分布及 Gini 系数曲线 3

### 5.2.6 综合调整参数分析

通过对上述模型参数的分析, 降低  $SP$  的值可以

有效打通沟通底层社会与上层社会的通道。社会半径的增加表明, 随着能联系到个体范围的增加, 交流就会增加, 获得财富的机会也增多。增加参数  $K$  值可以有效减少富有个体获取财富的比例, 进而降低社会的 Gini 系数, 贫富分化得到缓解。增加参数  $P$  的值可以使更多的人得到信息共享的机会, 获取财富的机会相应增多。获胜概率  $VT$  对财富的聚集速率有着重要的影响, 提升贫穷个体在交易中获取胜利的概率能够有效缩短与富有者之间的差距。

上述因素是相互影响且相互制约的, 需要充分考虑各种因素间的平衡调配。通过综合分析以及参数调整进行多次仿真, 得到较为理想的社会财富分布状态。

通过对上述模型的各个参数进行调整, 得出如图 15 所示的仿真结果。

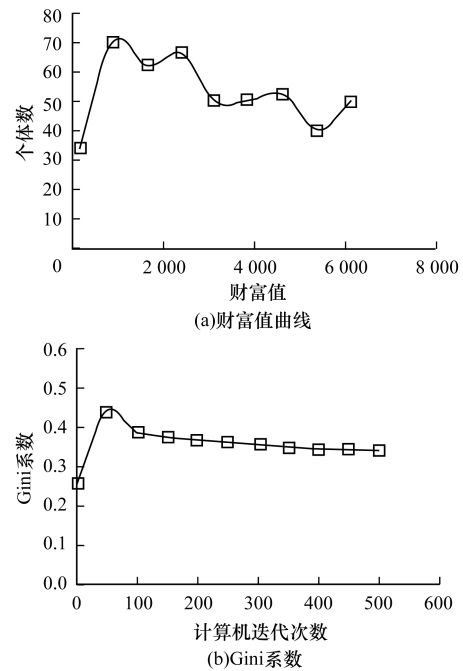


图 15 综合调整参数后的仿真结果

图 15 中财富分布趋于均衡, Gini 系数值维持在 0.34 左右。此时的计算因子为: (1) 总人口数,  $nofAgents = 500$ ; (2) 朋友关系系数,  $SP = 20\%$ ; (3) 社会半径,  $small\_reach = 3, middle\_reach = 4, high\_reach = 6$ ; (4) 交易中的财富系数  $K = 2$ ; (5) 获得帮助的 Agent 比例  $P = 80\%$ ; (6) 交易获胜概率  $VT = 0.2$ ; (7) 可寻找资源的半径范围,  $DIS = 4$ ; (8) 极差系数,  $Max\_e = 0.3, Min\_f = 0.5$ ; (9) 获取财富的比例值,  $Mom = 2$ ; (10) 最大度上限  $TL = 50$ ; (11) 朋友关系断开比例,  $DKL = 10\%$ ; (12) 交易获取资源量  $\Delta = 1/KN$ 。

## 6 结束语

本文提出一种复杂 Agent 网络人工社会模型,以实现社会网络和社会财富的协同演化模拟。该模型中的个体通过朋友社会关系网络及财富交易机制获取财富,Agent 财富分布的变化又会影响 Agent 的熟人网络和朋友网络,以此形成社会财富和社会网络协同演化的机制。分析结果表明,财富共享规则及社会财富交易规则对社会网络和财富分布有重要影响。社会财富在一定程度上趋于均衡化,需要同时调整朋友关系系数、社会半径、交易获取财富的财富系数、社会半径、富有个体给贫穷个体提供帮助的比例、交易获胜概率等因子。然而该模型中没有考虑经济环境、制度环境等影响,下一步将针对这些情况做进一步研究。

### 参考文献

- [ 1 ] Jackson M O, Watts A. On the Formation of Interaction Networks in Social Coordination Games[J]. Games and Economic Behavior, 2002, 41(2): 265-291.
- [ 2 ] Jackson M O, Nouweland A. Strongly Stable Networks[J]. Games and Economic Behavior, 2005, 51(2): 420-444.
- [ 3 ] Beckner C. Language is a Complex Adaptive System; Position Paper[J]. Language Learning, 2009, 59(S1): 1-26.
- [ 4 ] Watts D J. The New Science of Networks[J]. Annual Review of Sociology, 2004, 393(4): 243-270.
- [ 5 ] Strogatz S H. Exploring Complex Networks[J]. Nature, 2001, 410(6827): 268-276.
- [ 6 ] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of 'Small-world' Networks[J]. Nature, 1998, 391(6663): 440-442.
- [ 7 ] Barabási A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [ 8 ] Bianconi G, Barabási A L. Bose-einstein Condensation in Complex Networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(24): 5632-5635.
- [ 9 ] Eptein J M, Axtell R. Growing Artificial Societies, Social Science from the Bottom Up[M]. Washington D. C., USA: Brookings Institution Press, 1996.
- [ 10 ] Iwasaki T, Hara S. Generalized KYP Lemma; Unified Frequency Domain Inequalities with Design Applications[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1): 41-59.
- [ 11 ] Iwasaki T, Hara S. Feedback Control Synthesis of Multiple Frequency Domain Specifications via Generalized KYP Lemma[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(5/6): 415-434.
- [ 12 ] 路 兰, 高齐圣. 基于异质性的产业群交易网络[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(2): 44-51.
- [ 13 ] Hamill L, Gilbert N. Social Circles: A Simple Structure for Agent-based Social Network Models[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 12(2/3).
- [ 14 ] Heider F. The Psychology of Interpersonal Relations[M]. New York, USA: Psychology Press, 1982.
- [ 15 ] Wilensky U N. Center for Connected Learning and Computer-based Modeling [EB/OL]. (2010-11-21). <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- 编辑 刘 冰
- 
- (上接第 276 页)
- [ 8 ] 孙 瑞. 相关参数影响下的概率假设密度滤波算法研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2015.
- [ 9 ] 史 玺, 杨 峰, 梁 彦, 等. 低检测率下改进的概率假设密度滤波器[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(6): 36-40.
- [ 10 ] Mahler R, Vo B T, Vo B N. CPHD Filtering with Unknown Clutter Rate and Detection Profile[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 3497-3513.
- [ 11 ] Vo B T, Vo B N, Hoseinnezhad R, et al. Robust Multi-Bernoulli Filtering[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(3): 399-409.
- [ 12 ] Ristic B, Vo B T, Vo B N, et al. A Tutorial on Bernoulli Filters: Theory, Implementation and Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 61(13): 3406-3430.
- [ 13 ] Schuhmacher D, Vo B T, Vo B N. A Consistent Metric for Performance Evaluation of Multi-object Filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(8): 3447-3457.
- [ 14 ] 刘国营, 陈秀宏. 多目标跟踪算法的最优子模式分配概率度量[J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 293-296.
- [ 15 ] 王怡然. 基于高斯背景模型的运动目标检测与跟踪[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- 编辑 顾逸斐