

经济体相对竞争优势和劣势的测度与仿真

——基于国家间投入产出网络

关 峻 吴 姗 邢李志

(北京工业大学经济与管理学院, 北京 100124)

【摘 要】社会经济系统内部结构大尺度、多维度、多层次的特性构成了其宏观层面的复杂性,通过对系统内部结构信息的挖掘可以反映整个系统的功能特征或运行机理。作为测度复杂系统结构的理论与方法,复杂网络理论可以通过测度社会经济系统的结构性指标,进而刻画研究对象内部的结构特征,揭示系统内在层次结构与外在经济功能之间的复杂关系。本文通过 2012 年的国家间投入产出数据表,运用耦合方法提取它们之间对于生产资源的竞争关系,引入三种网络特征指标来从三个不同的角度揭示产业部门的竞争状态。

【关键词】全球价值链;二分图;资源分配过程;国家间投入产出表;竞争地位

0 引 言

自从 Krugman 等^[1]提出全球价值链(Global Value Chain, GVC)概念以来,从 GVC 的角度研究国际贸易问题已成为当前主流的统计分析方法。GVC 反映了全球经济系统的拓扑结构,同时在理论框架和实践分析方面显现出巨大的应用潜力。而且,随着国家间投入产出(Inter-Country Input-Output, ICIO)数据库的普及和推广,使得从系统科学的角度深入研究 GVC 上各经济体之间的复杂关系变得可行。

随着 ICIO 数据库的应用普及,越来越多的学者采用 ICIO 数据来刻画全球经济系统拓扑结构,构建全球投入产出网络以及部分国际贸易网络,从物理经济学的视角研究 GVC 和国际贸易问题。这方面较早的研究倾向于简化网络模型的复杂度或只针对少量国家或地区的个别年份数据进行实证分析^[2,3],之后开始有学者从 GVC 的全局视角来分析全球经济系统内部结构与宏观表现之间的关系,例如,Ando 在世界投入产出模型中测量了美国总产出冲击下的行业重要性^[4];Cerina 等基于社团检测技术定量分析了全球网络的子网络结构和动力学特征,然后采用 PageRank 中心度算法和社团核心测量

算法识别关键产业和经济体^[5]；Grazzini 和 Spelta 定义了消费影响指数和 GDP 影响指数，在此基础上研究了世界投入产出网络的鲁棒性与中间品相对投入量之间的关系^[6]；Xing 等根据有偏随机游走过程定量分析了国家间投入产出模型中各个国家和地区在全球价值链上的产业影响力^[7]。

国家间投入产出网络的构建和应用在国内外均处于研究的起步阶段，特别是大量的复杂网络模型以及分析技术还没有充分应用到社会经济系统的研究之中，同时许多相关算法还需要结合社会经济系统的现实意义对研究思路和方法加以改进，才能适用于挖掘这类稠密的加权、有向网络所蕴含的经济学含义。

1 理论基础

1.1 二分图的基本概念

二分图在复杂网络分析中有很多应用，其中就包括合作网和竞争网（主要用隶属网来研究），这是因为在以人或者由人组成的单位为基本单元的社会网络中，合作和竞争是一种广泛存在的基本属性^[8]。例如科学家合作网络（作者和论文）、专利申报（专利和申报的企业）、商品网络（商品和购买者）、城市公交网络（线路和站点）等，反映隶属关系的网络都可以用二分图来进行描述，并称为双模式网络（Two-Mode Network）。这类网络中一类顶点是参与某种活动、事件或者组织的“参与者”（Participant），另一类顶点就是他们参与的活动、事件或者组织等“项目”（Object）。

在基于二分图理论构建的复杂网络研究中，由于研究同一类节点之间的相互作用（例如参与者在项目中的合作或竞争关系）更具应用价值，所以常常把双模式网络向一类节点（多是参与者节点）映射（Projection），得到一个单模式网络（One-Mode Network）。在向参与者节点投影得到的单模式网络中，节点之间的边表示的是它们彼此具有针对同一个项目的合作或竞争关系，这个单模式网络被称为一个项目完全子图。

传统意义上，映射得到的单模式网络（即耦合网络）中边上并没有权重。然而，近年来关于双模式网络的实证研究中，单模式网络的赋权方式是通过将权重定义为共现（Co-Occurrences）的次数，即两个个体共同参与事件的次数，或者两个作者合作论文的篇数。举例来说：Newman 在研究科学合作网络时将这个过程进行了扩展^[9]；Padrón 等认为，这种网络建模方法可以对群体中潜在的竞争关系和互利的交互作用进行逼真的预测^[10]。

1.2 平均资源分配法

为了尽量减少双模式网络在映射时的信息丢失，并且充分考虑节点资源的稀缺性，本文采用 Zhou 等提出的平均资源分配法^[11]（Resource Allocation Process, RAP）作为

映射算法。

假设二分图用 $G = (P, O, E)$ 来表示, 其中 P 为参与者节点集合, O 为项目节点集合, E 表示边集。集合 P 和 O 中的节点分别用 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 和 $o_1, o_2, \dots, o_n$ 表示。第 i 个参与者节点的初始资源 $f(p_i) \geq 0$ 。

首先, P 中所有资源都流向集合 O , 集合 O 中的第 l 个节点的资源分配公式为:

$$f(o_l) = \sum_{i=1}^n \frac{a_{il} f(p_i)}{k(p_i)} \quad (1)$$

其中, $k(p_i)$ 表示 p_i 的度, a_{ij} 是一个 $n \times m$ 的邻接矩阵, 公式为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & p_i o_j \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

然后, 所有的资源流回集合 P , 并且最终 p_i 的资源分配公式为:

$$f'(p_i) = \sum_{l=1}^m \frac{a_{il} f(o_l)}{k(o_l)} = \sum_{l=1}^m \frac{a_{il}}{k(o_l)} \sum_{j=1}^n \frac{a_{jl} f(p_j)}{k(p_j)} \quad (3)$$

这个公式可以被重写为:

$$f'(p_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij}^p f(p_j) \quad (4)$$

在式(4)中, w_{ij}^p 可以表示为:

$$w_{ij}^p = \frac{1}{k(p_j)} \sum_{l=1}^m \frac{a_{il} a_{jl}}{k(o_l)} \quad (5)$$

其中, w_{ij}^p 为 p_i 和 p_j 之间两次资源平均分配过程产生的关系强度, 则矩阵 $W^p = \{w_{ij}^p\}_{n \times n}$ 即为通过 RAP 方法得到的完全项目子图的邻接矩阵。

RAP 方法也可以扩展至二分图边上有边权的情况, 此时资源不再是平均分配的, 而是根据边权反映的参与者节点与项目节点之间的隶属度来进行分配。总而言之, RAP 方法既反映了项目节点资源的稀缺性, 又反映了参与者节点占用项目节点资源的有限性, 使得映射得到的完全项目子图能够更加准确地体现出参与者节点之间的相互竞争关系。

1.3 基于二分图的 IO 分析

IO 表擅长于从全局的角度展现错综复杂的产业部门相互依赖关系, 清晰地体现了产业部门从其上游部门获得了多少生产资源。因此, 关于 IO 网络的研究主要是通过中间产品投入产出关系来刻画经济系统的拓扑结构, 从而对价值流动规律和产业结构特点进行分析。但是, 从二分图理论的角度来看, 观察 IO 表中行向量所反映的上游产业部门对下游产业部门的供给强度, 或者列向量所反映的下游产业部门对上游产业部门的需求强度, 不难发现, IO 表刻画出了产业部门之间相互竞争与合作的关系。但是, 产业部门之间的竞合关系无法直接通过 IO 网络的结构性测度指标反映出来, 需要通过适当的矩阵变换来体现出这种关系。

实际上,当产业部门拥有相同的供应者或消费者时,它们之间的竞争或合作就已经发生了,这是因为所有从上游部门输出给下游部门的产品和服务都是有限的,即生产资源存在着稀缺性。在 IO 理论中,这种稀缺性可以用直接消耗系数和完全消耗系数的形式呈现出来,产业部门与外部产业环境之间的关系也可以用影响力系数和感应度系数来度量。但是,此类经典的 IO 分析方法的目的是揭示各个产业部门之间、总产出与最终使用之间线性的技术经济联系,并没有将生产资源的稀缺性作为测度产业部门之间竞争与合作关系的约束条件。因此,本文根据二分图理论对 IO 数据进行建模分析,目的是从供给侧的角度还原下游产业部门之间的竞争关系。

2 网络建模

2.1 全球产业价值链网络模型

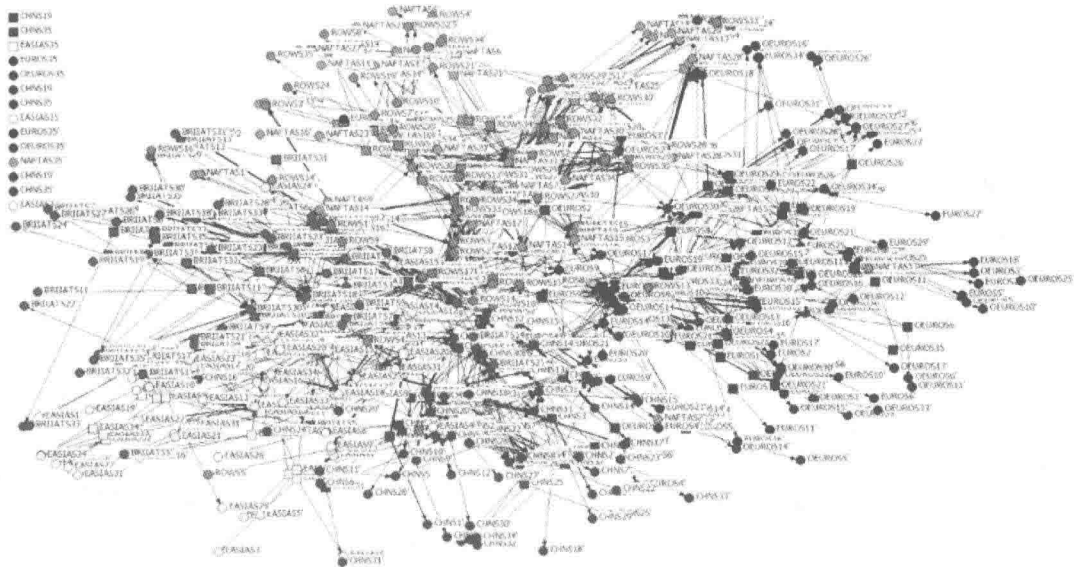
为了挖掘 GVC 上产业部门之间隐藏的竞争关系(包括直接的和间接的),区分产业部门在输出和消耗中间产品时所扮演的功能角色,本文首先需要构建一个基于 ICIO 数据的二分图,相关假设条件如下:

假设 1 上游产业部门构成项目节点集合 O ,下游产业部门构成第一类参与者节点集合 P' ,由自环转换得到影子节点构成第二类参与者节点集合 P'' ,则参与者节点集合为 $P = P' \cup P''$,因为 IO 表中产业部门同时作为上游和下游产业部门,而且所有产业部门都具有自环,所以 $|O| = |P'| = |P''| = N$, $|P| = 2N$ 。

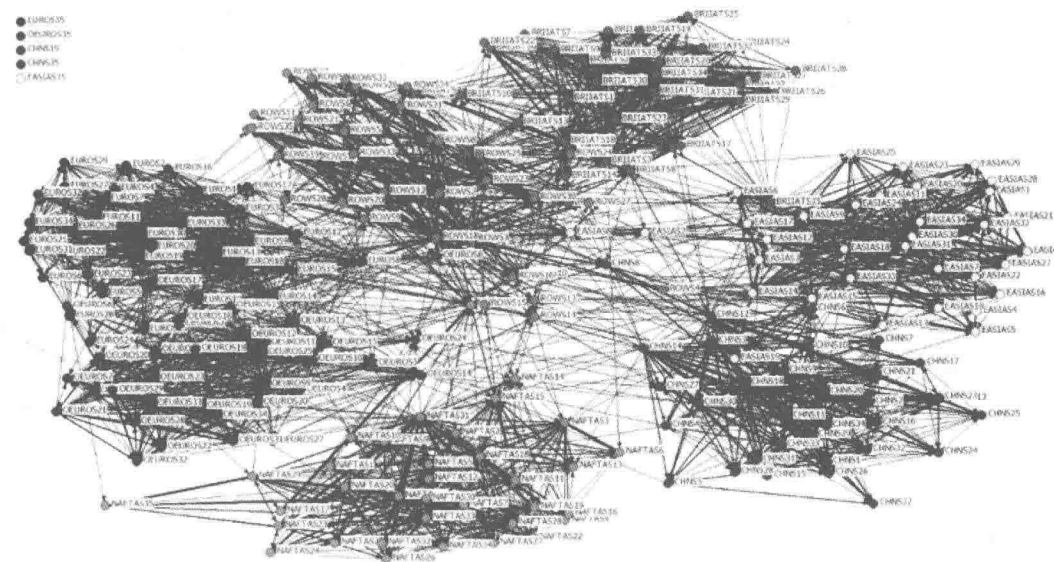
假设 2 边从上游产业部门指向下游产业部门,反映了中间产品的流动方向,两类节点之间的连边构成边集 E' ;节点自环反映了产业部门消耗了其自身的部分中间产品,因此本文假设具有自环的产业部门也是其自身的上游(或下游)产业部门 E'' ,即项目节点与其影子节点存在的连边构成边集,则原图的边集 $E = E' \cup E''$ 。

假设 3 与边集的假设条件类似,权重集也分为上、下游产业部门之间的 W' 和自身消耗的 W'' ,与原图权重集的关系为 $W = W' \cup W''$;下游产业部门 i 在 $N-1$ 个竞争对手(不包括其自身)中获得上游产业部门 l 中间产品的数量为 w'_{li} ,自身消耗的中间产品数量为 w''_{ii} (此时 $l=i$,即上、下游产业部门为同一部门)。

基于以上假设条件,本文选取 WIOD 数据库 RIOT 数据的中间产品交易矩阵作为建模数据^[12],构建了二分图 $G = (O, P', P'', E', E'', W', W'')$,并称为全球产业价值链网络模型(Global Industrial Value Chain Network,简称 GIVCN 模型,本文采用的是 WIOD 数据库的 RIOT 数据,因此标记为 GIVCN-RIOT 模型)。GIVCN-RIOT-2011 模型的拓扑结构如图 1(a)所示。



(a) GIVCN-RIOT-2011 模型



(b) GIRCIN-RIOT-2011 模型

图1 GIVCN-RIOT-2011 模型和 GIRCIN-RIOT-2011 模型

图1(a)中所有方形节点代表了由上游产业部门构成的项目节点集合O,所有圆形节点代表了由下游产业部门构成的项目节点参与者集合P,其中又根据节点名称区分了第一类参与者节点和第二类参与者节点(影子节点),例如NAFTAS35'代表的是NAFTA“住户雇佣服务”的自身消耗。GIVCN-RIOT模型中只有不同的类节点之间存在连边。

2.2 全球生产资源竞争网络模型

在 GIVCN-RIOT 模型所描绘的全球经济系统中,下游产业部门消耗了上游产业部门有限的产出,使得生产资源呈现出稀缺性。当若干下游产业部门同时从共同的上游产业部门获取生产资源时,这种稀缺性就发生传递,使得下游产业部门之间产生了竞争关系。根据上文中 RAP 方法的映射思路, GIVCN-RIOT 模型中蕴含的产业部门竞争关系可以通过它的完全项目子图表现出来,映射公式如下:

$$w_{ij}^p = \begin{cases} \frac{1}{w_j} \sum_{l=1}^N \frac{w_{li}w_{lj}}{w_l} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (6)$$

其中, w_i 为上游产业部门 i 的总产出,在数值上等于 GIVCN-RIOT 模型中产业部门 i 的出权,即 $w_i = S^{OUT}(i) = \sum_{l=1}^N w_{li}$, $i, l \in \{1, 2, \dots, N\}$; w_{ij}^p 为在竞争共同上游产业部门中间产品投入时下游产业部门 i 对部门 j 的竞争强度,构成的边权集为 $W^p = \{w_{ij}^p\}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。完全项目子图中每条边 e_{ij}^p 从节点 v_i 指向节点 v_j , 表明产业部门 i 从上游部门获取中间产品投入时影响到了产业部门 j 的利益,影响程度由边上的边权 w_{ij}^p 来衡量。因为本文的研究对象是产业部门之间的竞争关系,所以矩阵 W^p 的对角线需要设置为 0。

至此,描述全球经济系统内部产业部门间直接和间接竞争关系的完全项目子图 $G^p = (V_2, E^p, W^p)$ 映射完成,本文称为全球生产资源竞争网络模型 (Global Industrial Resource Competition Network, GIRCNCN)。GIRCNCN-RIOT 模型是一类加权有向的单模式网络,而且网络中不存在节点自环。GIRCNCN-RIOT-2011 模型的拓扑结构如图 1(b) 所示。

不难发现, GIRCNCN-RIOT-2011 模型中存在着较为明显的集群现象,产业部门之间的竞争主要发生在经济体内部,而且欧元区国家和其他欧盟国家之间的一体化程度较高。

2.3 竞争优势和竞争劣势的界定

GIRCNCN-RIOT 模型的边权集为 W^p 反映了产业部门间直接和间接的竞争关系,而且这种竞争关系具有方向性,即 w_{ij}^p 为产业部门 i 对产业部门 j 的竞争强度, w_{ji}^p 则为产业部门 j 对产业部门 i 的竞争强度。如果只从产业部门 i 的角度来看,那么 w_{ij}^p 则相当于产业部门 i 对产业部门 j 的被竞争强度。因此,本文将产业部门在经济系统中的竞争强度之和定义为它的竞争优势指数 (Competitive Advantage Index, CAI), 将被竞争强度之和定义为它的竞争劣势指数 (Competitive Weakness Index, CWI)。从复杂网络的角度来看, CAI 和 CWI 分别等于 GIRCNCN-RIOT 模型中节点的出权 (Out-Strength, S^{OUT}) 和入权 (In-Strength, S^{IN})。

在 CAI 和 CWI 的基础上,本文定义了国家竞争优势指数 (National Competitive Advantage Index, NCAI) 和国家竞争劣势指数 (National Competitive Weakness Index, NCWI), 公式为:

$$NCAI(t) = \sum_{i \in \tau(t)} CAI(i) \quad (7)$$

$$NCWI(t) = \sum_{i \in \tau(t)} CWI(i) \quad (8)$$

其中, t 是 WIOD 数据库中的经济体, $t \in \{EURO, OEURO, NAFTA, CHN, EASIA, BRIIAT, ROW\}$; τ 为 GIRCIN-RIOT 模型中某个经济体内部所有产业部门序号的集合, 以中国为例, $\tau(CHN) = \{106, 107, \dots, 140\}$ 。

在全球经济一体化的今天, 古典经济理论中的比较优势 (Comparative Advantage) 理论已经无法充分解释经济体的产业部门在国际环境如何获得成功和失败, 学者们逐渐开始从价值链的角度来分析竞争优势 (Competitive Advantage) 的来源和形成^[13]。本文提出的 CAI 和 CWI 反映的是物理经济学视角下产业部门在 GVC 上的竞争状态, 体现了上游产业部门中间产品供给具有稀缺性的条件下下游产业部门之间的相互竞争强度, 而且这种竞争强度的度量具有可比性。因此, 在 CAI 和 CWI 基础上提出的 NCAI 和 NCWI 则反映了经济体在 GVC 上的竞争力。

3 实证分析

GIVCN-RIOT 模型刻画了 GVC 上主要经济体的产业部门之间的中间产品流动情况, GIRCIN-RIOT 模型则是通过 RAP 方法挖掘出这些产业部门之间蕴含的竞争关系。如果经济体之间的中间产品流动情况发生了变化, 势必会影响到相关主体在 GVC 上的竞争状态。因此, 实证部分首先对国家竞争优势和劣势进行静态的时序分析, 然后通过动态的仿真模拟手段来分析中国与北美自由贸易区 (NAFTA) 之间贸易往来变动所导致的竞争力变化。

3.1 国家竞争优势和劣势的时序分析

WIOD 数据库提供了 1995~2011 年的 RIOT 数据, 因此本文在 17 个 GIRCIN-RIOT 模型的基础上统计了每个经济体的和, 时序变化趋势如图 2 所示。

从竞争优势的角度来看: NAFTA 和欧元区国家的 NCAI 一直领先于各经济体, 而且经历了一个较为明显的先升后降过程, NAFTA 的转折点为 2002 年, 欧元区国家的转折点为 2004 年; 东亚地区和其他欧盟国家的 NCAI 处于下降趋势, 而且前者的速度更快, 在 2006 年和 2007 年先后被 BRIIAT 国家和中国超过; BRIIAT 国家和中国的 NCAI 则有较为明显的上升趋势; 2007 年之前世界其他地区整体的 NCAI 在缓慢上升, 之后则快速上升, 即将超过 NAFTA, 甚至有可能超过欧元区国家。

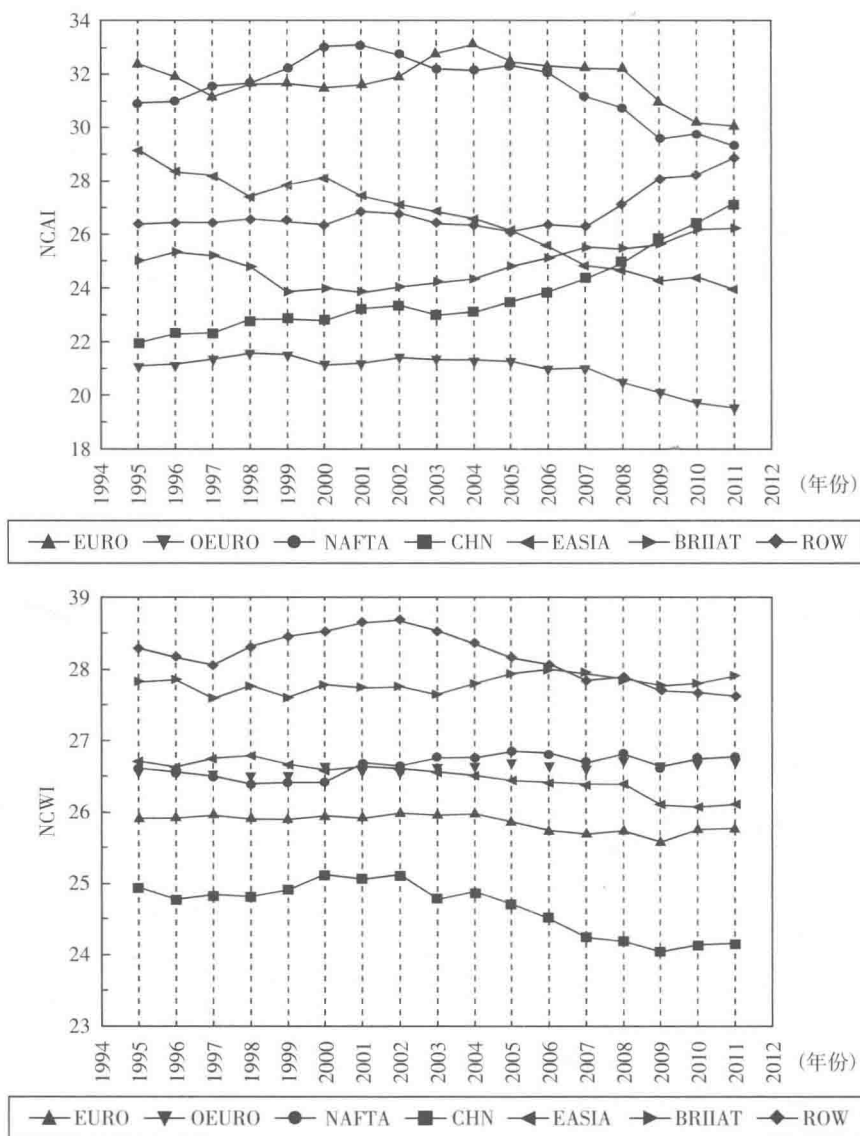


图 2 GIRCIN-RIOT 模型中各经济体 NCAI 和 NCWI 的时序变化

从竞争劣势的角度来看，这些经济体大致分为了四个层次：世界其他地区 and BRIIAT 国家的 NCWI 最高，构成了第一个层次；NAFTA、欧盟其他国家和东亚国家的 NCWI 大致相当，属于第二个层次；欧元区国家属于第三个层次；中国则是远低于其他经济体，属于第四个层次。综合以上两个分析视角，不难发现中国在全球经济系统中的整体竞争优势在不断提升，同时竞争劣势在不断降低，体现出强劲的竞争实力和雄厚的发展潜力。

3.2 中国与 NAFTA 国际贸易波动影响的仿真分析

为了观察国际贸易波动 (The International Trade Fluctuation) 可能会对国家竞争优

势和竞争劣势带来的影响,本文在 GIVCN-RIOT 模型和 GIRC�-RIOT 模型的基础上设计了三组仿真模拟实验。具体来说,假设研究对象为经济体 X 和 Y,两个经济体之间可能存在多种贸易往来变化的情况,本文只考虑以下三种: X 增加或减少到 Y 的出口贸易、Y 增加或减少到 X 的出口贸易、X 和 Y 同时增加或减少到对方的出口贸易。在进行经济体 X 和 Y 的贸易往来与它们 NCAI 和 NCWI 关系的模拟仿真时,首先将 GIVCN-RIOT 模型中对应区域的元素值从原值的 0% (中断出口贸易) 增加到 100% (ICIO 表中的出口贸易总量) 后再增加到 200% (出口贸易总量增加一倍),每次模拟增加 5%,并在新形成的 GIRC�-RIOT 模型中计算一次两个经济体 NCAI 和 NCWI 的变化率,从而可以通过每一种情境下的四条仿真模拟曲线反映经济体 X 和 Y 的 NCAI 和 NCWI 变化趋势。本文选取中国和北美自由贸易区作为主要分析对象,三种情境下的仿真模拟结果如图 3 和图 4 所示。

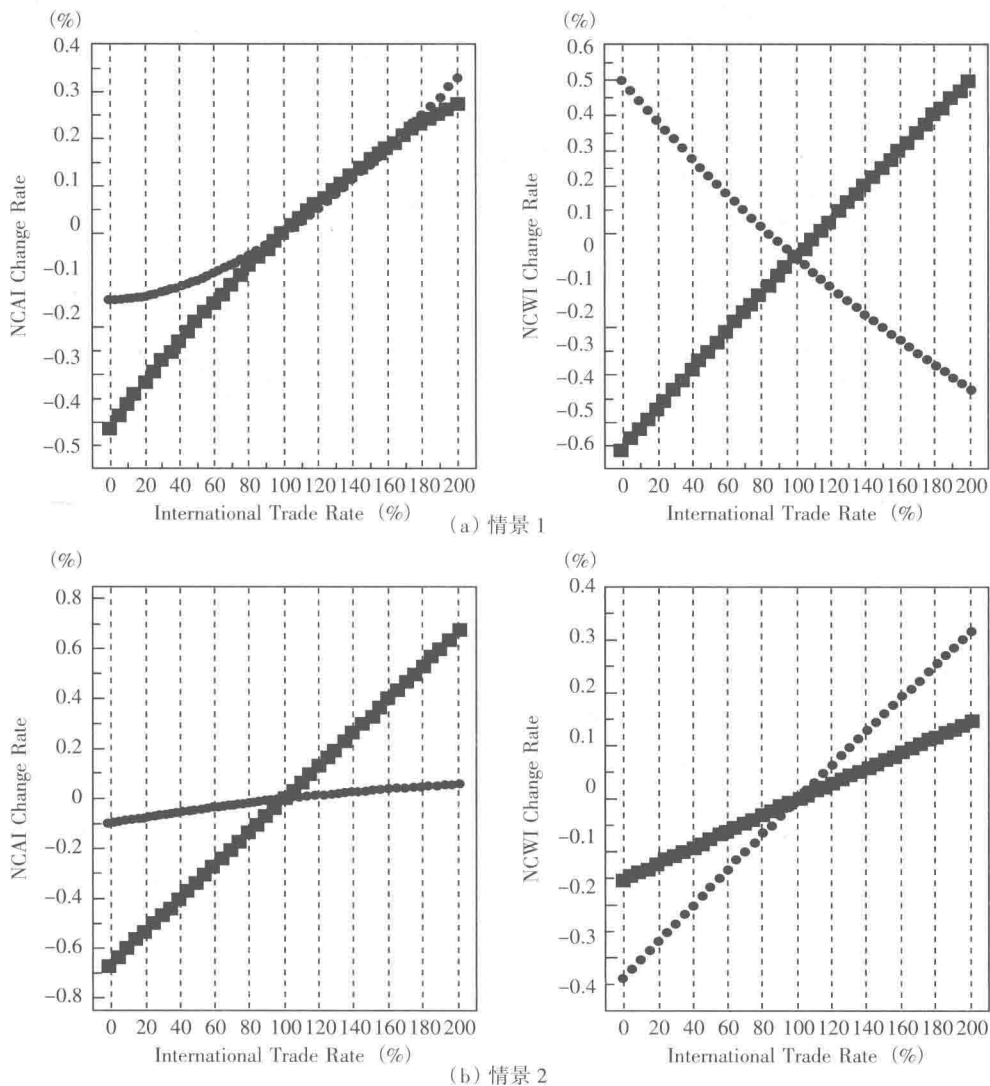


图 3 情景 1 和情景 2 下 NCAI 和 NCWI 的变化趋势 (中国与北美自由贸易区)

情景 1 中国增加到北美自由贸易区的出口贸易量。随着中国出口到北美自由贸易区的中间产品数量从原来的 0% 增加到 200%，中国的 NCAI 和 NCWI 都在上升，而且 NCWI 的上升幅度要高于 NCAI，说明中国增加对北美自由贸易区的出口，虽然有利于融入到全球一体化的进程当中，但也会使其面临更多来自 GVC 的竞争压力。另外，北美自由贸易区的 NCAI 上升幅度与中国相当，甚至在接近 200% 时超过中国，而其在快速下降，反映出 NAFTA 的跨国企业依赖于中国上游产业部门的廉价中间产品投入，增加从中国的进口会降低其生产成本，从而缓解来自 GVC 上其他竞争对手的竞争压力。

情景 2 北美自由贸易区增加到中国的出口贸易量。当北美自由贸易区出口到中国的中间产品数量从原来的 0% 增加到 200%，两个经济体的和都在上升，但是北美自由贸易区的 NCAI 增幅小于中国而 NCWI 增幅大于中国，说明中国会通过加强与北美自由贸易区的贸易往来增强其在 GVC 上的竞争能力，与此同时，北美自由贸易区则会面临更多来自中国方面的竞争压力。另外，北美自由贸易区的 NCAI 的增幅低于其 NCWI，而中国的 NCAI 的增幅高于其 NCWI，表明情景 2 对于中国更为有利。

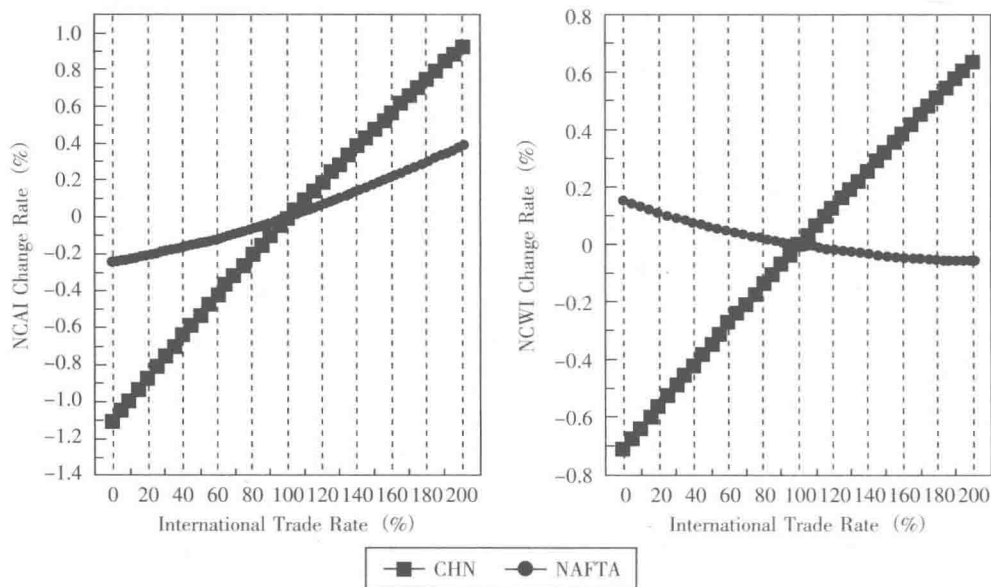


图 4 情景 3 下 NCAI 和 NCWI 的变化趋势 (中国与北美自由贸易区)

情景 3 中国和北美自由贸易区同步增加到对方的出口贸易量。当中国和北美自由贸易区出口到对方的中间产品数量同时从原来的 0% 增加到 200%，基本趋势与情景 1 类似，但是中国的增幅更为明显，说明两个经济体之间逐渐增强的贸易往来会给中国的跨国企业带来更多的机遇和挑战，对北美自由贸易区来说既巩固了其经济地位又降低了相关风险。

4 结束语

长期以来,如何从系统科学的高度完整地再现全球经济系统的拓扑结构,进而挖掘其运作规律一直是困扰学界的重大难题。基于物理经济学的研究思路及复杂网络理论的研究框架,本文通过 WIOD 数据库 RIOT 数据勾勒出 1995~2011 年全球主要经济体之间的中间产品投入产出关系,进而运用 RAP 方法提取它们之间对于生产资源的竞争关系,然后定义了 CAI、CWI、NCAI、NCWI 四个指标来揭示产业部门和经济体在 GVC 上的竞争状态。

GIRCN-RIOT 模型刻画了经济体及其产业部门之间的竞争状态,并且边的方向性体现了竞争关系的差异性,可以根据复杂网络中出权和入权的概念界定它们在 GVC 上的相对竞争优势和劣势。进一步,在复杂网络模型和结构性测度指标的基础上,本文对不同贸易波动情景下经济体间的贸易往来进行仿真模拟,并观察相关经济体在 GVC 上相对竞争优势和劣势的变化趋势,进而从物理经济学的视角来解释世界经济格局的演变机理。

参考文献

- [1] Krugman P., Srinivasan T. N.. Growing World Trade: Causes and Consequences [J]. Brookings Papers on Economic Activity, 1995, 26 (1): 327-377.
- [2] Carvalho V. M.. A Survey Paper on Recent Developments of Input-Output Analysis [Z]. Complexity Research Initiative for Systemic Instabilities, 2013.
- [3] Li W., Kenett D. Y., Yamasaki K., et al.. Ranking the Economic Importance of Countries and Industries [J]. Quantitative Finance, 2014.
- [4] Ando S.. Measuring US Sectoral Shocks in the World Input-Output Network [J]. Economics Letters, 2014, 125 (2): 204-207.
- [5] Cerina F., Zhu Z., Chessa A., Riccaboni M.. World Input-Output Network [J]. Plos One, 2015, 10 (7): e0134025.
- [6] Grazzini J., Spelta A.. An Empirical Analysis of the Global Input-Output Network and Its Evolution [R]. DISCE-Working Papers del Dipartimento di Economia e Finanza, 2015.
- [7] Lizhi Xing, Xianlei Dong, Jun Guan. Global Industrial Impact Coefficient Based on Random Walk Process and Inter-Country Input-Output Table [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 471C: 576-591.
- [8] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [9] Newman M. E.. The Structure of Scientific Collaboration Networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98 (2): 404-9.
- [10] Padrón B., Nogales M., Traveset A.. Alternative Approaches of Transforming Bimodal Into Unimodal Mutualistic Networks. The Usefulness of Preserving Weighted Information [J]. Basic & Applied Ecolo-

gy, 2011, 12 (8): 713-721.

[11] Tao Zhou, Jie Ren, Matúš Medo, and Yi-Cheng Zhang. Bipartite Network Projection and Personal Recommendation [J]. Physical Review E, 2007 (76): 046115.

[12] Timmer M. P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., De Vries G. J.. An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: The Case of Global Automotive Production [J]. Review of International Economics, 2015, 23 (3): 575-605.

[13] Porter M. E.. The Competitive Advantage of Nations [J]. Competitive Intelligence Review, 1990, 1 (1): 427.

基于元胞自动机的路边停车策略选择和影响分析

谢志瞻 田 琼

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083)

【摘 要】在出行者巡游寻找路内停车位的行为普遍存在的情况下,为研究如何引导巡游车辆快速找到路内停车位,将需要换道停车的出行者因邻道有车辆而无法完成换道动作时所采取的后续换道寻位策略分为两类——停车等待换道和继续行驶伺机换道,并在此基础上以元胞自动机为理论背景建立双车道路边停车寻位模型,设计仿真实验,通过参数的调整获得数值在一定范围的停车位占有率与道路车辆密度,用以反映道路交通状况,以此分析采用不同寻位方式的出行者在不同交通状况下寻位时间和寻位距离的差异,并给出在停车位占有率高于0.4且道路车辆密度低于0.5时采用第2类寻位方式,其他情形下采用第1类寻位方式的决策建议。

【关键词】元胞自动机;交通流;路内停车;寻位决策

0 引 言

随着经济的高速发展,城市机动车保有量日益增长,由此产生的停车需求与城市空间资源有限性之间存在着难以调和的矛盾,停车难已成现实。虽然路内停车位能在一定程度上缓解停车难的问题,但出行者为竞争空余停车位进行巡游行为,可能诱发额外的拥堵、噪声、环境污染等问题,造成资源的浪费。针对此问题,国内葛兴、姜波等利用排队理论和间隙理论建立路内停车交通流延误影响模型并探讨对所产生延误的计算方法^[1];国外Jason等利用计算机对路边停车给道路通行能力造成的影响以及对车辆行程造成的延误进行仿真模拟^[2]。上述研究目标大多集中于探讨路内停车对交通延误的影响,在对路内停车条件下交通流基本特性的研究方面,陈峻等对路边停车带设置给混合车流速度造成的影响进行了分析^[3];刘小明、王力等针对路内停车条件下车辆的行为过程分别建立相对应的元胞自动机行为规则,并探讨和分析了路内停车条件下交通相变特性^[4]。总体而言,有较少文章关注对路内停车条件下巡游车辆的疏

导问题,实际上,如何引导巡游车辆快速找到停车位,为其寻位行为提供决策建议是缓解交通压力、减少资源浪费的一个有效切入点。基于此,本文以元胞自动机交通流模型为理论背景,借鉴随机慢化行为的 Nasch 模型^[5]以及 Nagatani 提出的换道模型^{[6][7]},对出行者的出行行为进行分类,设立相关规则,构建元胞自动机双车道路边停车寻位模型,并在此模型基础上设计仿真实验,通过参数的调整获得数值在一定范围的停车位占有率与道路车辆密度,用以反映道路交通状况,探讨出行者的巡游行为对道路交通流造成的影响,并分析采用不同寻位方式的出行者在不同交通状况下寻位时间和寻位距离的差异,最终给出寻位决策建议。

1 基于不同车辆状态的建模规则

图 1 是基于元胞自动机的双车道路边停车寻位模型示意图,模型采用周期性边界,为方便表述,将其以一条从左往右长度为 K 的单向直线双车道表示,每个车辆占据一个元胞格,车辆从左往右行驶,从右边界离开后由左边界重新进入系统,每个时间步出行者将采取横向的跟车行为和纵向的换道行为。假设停车位均匀分布于道路边,并一一对应于道路上相同位置的元胞格,每个停车位上允许停靠一定的时间,该时间服从爱尔朗分布。有数量为 N 的同质出行者离散分布在系统中,他们的出行需求都是相同的,均是从某一出发点开始行驶,在 d_f 距离的自由行驶后进入寻位状态,经过 t_s 的寻位时间(对应寻位距离 d_s)后成功找到车位完成停车动作,并在停满 t_p 时间(由于服从爱尔朗分布,有效消除了周期性的影响)后离开停车位回到道路中,作为一个新的出行者继续完成上述动作。如图 1 所示,用 O 点表示个体出行者的出发点, S 点代表开始进入寻位状态的点, P 点代表停车点。

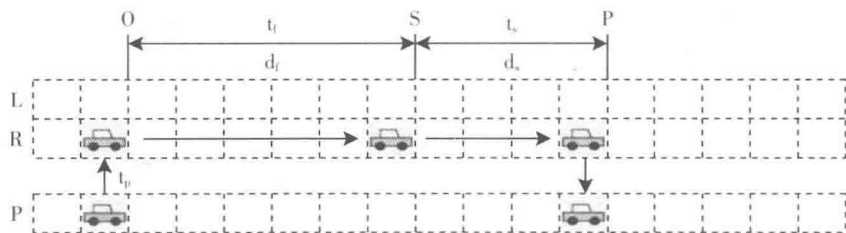


图 1 双车道路边停车寻位模型示意

无论是在正常行驶过程中还是寻位过程中,出行者都可能进行换道动作,包含自由换道和强制性换道两大类,自由换道发生在车辆处于正常行驶状态下,此时车辆是为了寻求更快的驾驶速度;强制换道产生于寻位状态下的左车道车辆,此时左车道车辆为了进行停车行为必须尽快换道至右车道,其面临着两种换道方式以供选择:①rule 1,左车道车辆在进入寻位状态后将速度降为 0 以伺机在右相邻元胞为空时换道至右车

道；②rule 2，与方式 1 的行为不同，左车道车辆在进入寻位状态后如果发现右车道被占用，不能立刻换道，将不进行减速停车行为，而是在速度限制的范围内继续向前行驶，以寻求换至右车道的机会。方式 1 换道行为下，可能由于左车道寻位车辆为换道进行的减速停车行为，而使左车道车流走走停停现象加剧，不过也降低了同等条件下换道至右车道的难度；方式 2 换道行为下，左车道走走停停现象不如方式 1 明显，当右车道被占用时左车道寻位车辆加快行驶，使左车道实际流量增大，同时也可能使驾驶者需要行驶更远的距离，由于通常寻位者会在目的地附近开始寻位，这也就导致出行者停车后可能需要走行更远距离到达实际目的地。二者各有优劣，本文主要考察这两种换道方式在寻位时间和距离上可能带来的差异，以期对交通政策的制定提供借鉴和参考。

1.1 正常行驶车辆的跟车及换道规则

车辆处于正常行驶状态时最大速度为 $v_f^{\max}=5$ ，车辆的速度更新规则参考了 Nasch 经典模型，令 p 表示随机慢化的概率， p_0 为每次判定是否进行随机慢化时生成的随机数，具体规则如下：

A. 速度更新规则。

(1) 随机慢化：

$$p_0 \leq p \& g_{si} - 1 \geq v_i(t-1) \rightarrow v_i(t) = \max[0, v_i(t-1) - 1] \quad (1)$$

(2) 加速：

$$p_0 > p \& g_{si} - 1 > v_i(t-1) \rightarrow v_i(t) = \min\{[v_i(t-1) + 1], v_f^{\max}\} \quad (2)$$

(3) 减速：

$$[p_0 > p \& g_{si} - 1 = v_i(t-1)] \& g_{si} - 1 < v_i(t-1) \rightarrow v_i(t) = g_{si} - 1 \quad (3)$$

其中， $v_f^{\max}$ 为车辆正常行驶的最大速度， g_{si} 为 i 车与同车道前车的车头距。

B. 换道规则。

处于正常行驶状态的车辆进行自由换道行为，具体换道规则如下：

(1) 若对于位于右车道正常行驶状态下的 i 车辆， $g_{si} < g_{si}^{l,f}$ ，则该车辆从右车道换道至左车道。其中 $g_{si}^{l,f}$ 为该车与左车道相邻前车的车头间距。

(2) 若对于位于左车道正常行驶状态下的 i 车辆， $g_{si} < g_{si}^{r,f}$ ，则该车辆从左车道换道至右车道。其中 $g_{si}^{r,f}$ 为该车与右车道相邻前车的车头间距。

C. 位置更新规则。

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (4)$$

1.2 寻位车辆的跟车及换道规则

车辆位于寻位状态下时最大速度限制为 $v_s^{\max}=3$ ，且不考虑随机慢化行为。由于左车道寻位车辆面临着两种换道方式，在不同方式下将面临着不同的换道规则限制，具体

规则如下:

A. 速度更新规则。

(1) 右车道寻位车辆:

$$g_{si} - 1 \leq v_i^r(t-1) \rightarrow v_i^r(t) = \min(g_{si}^{p,f}, g_{si} - 1) \quad (5)$$

$$g_{si} - 1 > v_i^r(t-1) \rightarrow v_i^r(t) = \min[v_i^r(t-1) + 1, v_s^{\max}, g_{si}^{p,f}] \quad (6)$$

(2) rule 1 下的左车道寻位车辆:

$$v_i^l(t) = 0 \quad (7)$$

(3) rule 2 下的左车道寻位车辆:

$$g_{si} \leq v_i^l(t-1) \rightarrow v_i^l(t) = \min(g_{si}^{e,f}, g_{si}) \quad (8)$$

$$g_{si} > v_i^l(t-1) \rightarrow v_i^l(t) = \min[v_i^l(t-1) + 1, v_s^{\max}, g_{si}^{e,f}] \quad (9)$$

其中, $g_{si}^{p,f}$ 表示该寻位车辆与相距最近的空车位的距离, $g_{si}^{e,f}$ 表示该寻位车辆与邻道前方最近空元胞格的距离。

B. 换道规则。

(1) 右车道寻位车辆在成功找到空车位时完成停车行为:

$$C_{x_i}^p = 0 \& C_{x_i}^r = 1 \rightarrow C_{x_i}^p = 1, C_{x_i}^r = 0 \quad (10)$$

(2) 左车道寻位车辆在右车道相邻元胞格为空时换道至右车道:

$$C_{x_i}^r = 0 \& C_{x_i}^l = 1 \rightarrow C_{x_i}^r = 1, C_{x_i}^l = 0 \quad (11)$$

其中, $C_{x_i}^p$ 、 $C_{x_i}^r$ 、 $C_{x_i}^l$ 分别表示 x_i 处停车位、右车道以及左车道的使用情况。

C. 位置更新规则。

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (12)$$

2 模拟与分析

设定单车道长度为 1000 个元胞, 即 $K=1000$, 则双车道总元胞格数为 2000 个元胞, 停车位长度与单车道长度相同也为 1000 个元胞。每辆车占据 1 个元胞格, 且均为同质小汽车, 车辆最大正常行驶速度 $v_f^{\max}=5$, 寻位状态下最大行驶速度 $v_s^{\max}=3$ 。取车辆随机慢化概率为 $P=0.3$ 。

对系统整体进行测量, 取测量期为 T_{mp} , 定义停车位占有率 p_g 、道路车辆密度 k_g 、道路车流量 q_g 以及区间平均速度 $\bar{v}_s$ 的函数表达式如下:

$$p_g = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \frac{N_p(t)}{K} \quad (13)$$

$$k_g = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{t=1}^{T_{mp}} k_g(t) = \frac{1}{T_{mp} K_d} \sum_{t=1}^{T_{mp}} N_r(t) \quad (14)$$

$$q_k = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{t=1}^{T_{mp}} q_k(t) = \frac{1}{T_{mp} K_d} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \sum_{i=1}^{N_r(t)} v_i(t) \quad (15)$$

$$\bar{v}_{s_k} = \frac{q_k}{k_g} = \frac{\sum_{t=1}^{T_{mp}} N_r(t) \bar{v}_{s_k}(t)}{\sum_{t=1}^{T_{mp}} N_r(t)} \quad (16)$$

其中, $N_p(t)$ 表示 t 时刻停车位中的停车数量, N_r 表示行驶于道路上的车辆数。

单次模拟的演化时步为 17000 步, 为避免暂态的影响, 只对 12000~17000 时间步中的数据收集统计, 即测量期 $T_{mp}=5000$ 。为获得不同交通流的基本特征值, 对系统中车辆总数 N 、正常行驶距离 d_f 、停车时间所服从分布的均值 t_p 进行调整, 以整理得不同取值的停车位占有率、车流量、密度等数据。为了消除随机性对结果的影响, 每个条件下做 5 次仿真, 并对这 5 个样本取平均。模拟过程中, 根据车辆状态的变化, 车辆将相应执行第 1 节中所描述的相关规则。

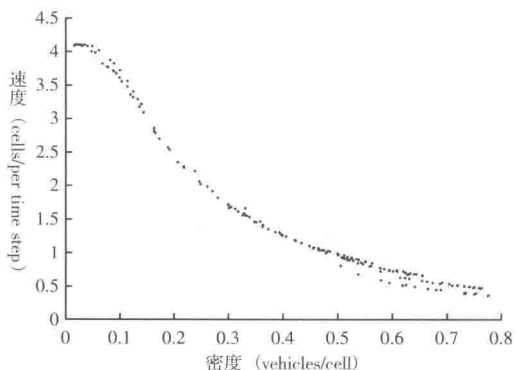
2.1 区间平均速度与车流量演化分析

首先来看区间平均速度的演化情况。根据模拟收集的数据, 可以分别绘制如图 2 所示的总系统以及左右车道的区间平均速度演化曲线。由图 2(a) 可以看出, 当道路密度低于 0.05 时, 速度呈现水平状态, 并达到期望速度的最大值 4.15。若不考虑路内停车行为, 则系统中期望速度最大值为:

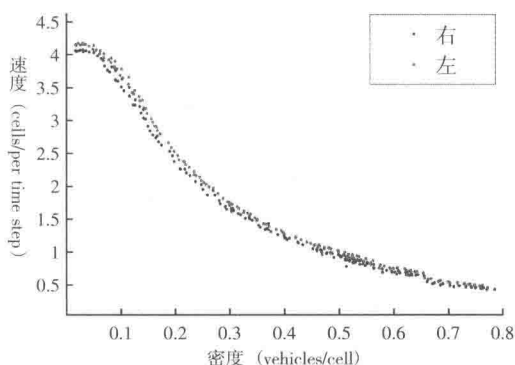
$$\bar{v}_d = \alpha \bar{v}_f + \beta v_s^{\max} = \alpha v_f^{\max} - \alpha p + \beta v_s^{\max} = \frac{t_f}{t_f + t_s} v_f^{\max} - \frac{t_f}{t_f + t_s} p + \frac{t_f}{t_f + t_s} v_s^{\max} \quad (17)$$

$$\text{其中, } \bar{v}_f = \sum w_i v_i / \sum w_i = [(1-p)v_f^{\max} + p(v_f^{\max} - 1)] / [(1-p) + p] = v_f^{\max} - p \quad (18)$$

$\bar{v}_f$ 为正常行驶状态下的车辆期望速度, α 为正常行驶车辆占比, β 为寻位车辆占比, 由于在所收集的数据中, β 数值在 0.02~0.05 区间波动, 对应 α 数值在 0.95~0.98 区间波动, 将数值代入式 (17) 可得系统中期望最大速度在 4.61~4.67 区间, 但由于路内停车行为的存在, 使系统中最大期望速度下降至 4.15 左右, 同时也使区间平均速度仅能在较低的道路车辆密度 ($k_g=0.5$) 时取到最大值。由图 2(b) 的左右车道密度—速



(a) 总系统密度—速度图



(b) 左右车道密度—速度图

图 2 密度—速度