

基于仿真实验的城市交通系统宏观现象研究^{*}

贺正冰 马寿峰[†] 贺国光

(天津大学系统工程研究所, 天津 300072)

(2009 年 3 月 19 日收到; 2009 年 5 月 21 日收到修改稿)

对交通出行者分类, 并将路段、路口以及各类出行者分别指定为相应的 agent, 利用 multi-agent 方法和 swarm 仿真平台, 通过规则设计, 构造出较合理的抽象的宏观城市仿真系统. 利用该仿真系统进行三组实验: 出行规模实验、出行者实验、路网结构实验, 对比分析不同微观组成的城市交通系统在仿真实验环境下的演化过程, 从系统规模、系统结构两方面, 发现并说明了城市交通系统中存在的缘自于微观机理的宏观现象, 并指出了其中可能属于涌现范畴的现象.

关键词: 仿真实验, 多智能体, 城市交通系统, 宏观现象

PACC: 0565

1. 引言

城市交通系统是不确定性很强的开放复杂巨系统^[1], 其层次间和层次内的关系十分复杂, 且涉及众多学科的交叉, 故而系统科学和系统工程的理论方法在研究和处理城市交通系统问题中获得了有效的应用^[2]. 其中, 复杂适应系统 (CAS) 理论的发展和“涌现”概念的提出为跨越和协调系统的不同层次提供了新方法. 关于系统整体及其涌现现象的研究方兴未艾^[3-5]. 随着 CAS 理论的发展, multi-agent 方法和 swarm 仿真平台 (<http://www.swarm.org>) 也得到了广泛关注^[6-9].

研究和处理城市交通系统中的个体出行的微观行为与系统宏观状态之间的关系是研究城市交通系统的基础性问题. 从个体出行到宏观系统的集聚过程不是简单的线性累加, 而是一个典型的从个体到整体的“涌现”过程, 因此只有充分考虑出行个体间的交互和影响, 才能获得相对准确的宏观需求预测结果.

在交通领域中, 跨越系统个体与整体的研究尚处于起步阶段, Doniec 等利用交通仿真软件 ArchiSim 对路口中的交通流进行了 multi-agent 仿真研究, 通

过与真实路口的对比, 证明模型可行性的同时发现了其中的涌现现象^[10]. Kerner 发现并证明了当且仅当同步流相因非同质性而受到强烈干扰时, 才会产生自由流相到拥堵相的相变^[11]. 文献 [1] 利用 swarm, 通过宏观涌现特征的观察, 说明了预警机理可以在宏观方面对车辆进行指导, 从而减少交通拥塞.

一般认为, 复杂系统的整体现象源自于系统的规模与结构两部分. 城市交通系统规模的不同, 整体特性显然不同. 大城市的交通系统有着错综复杂的交通网络, 数以万计的交通参与者, 其系统组分、结构、特征等复杂而庞大. 只有发现掌握出行规模带来的宏观现象, 才能有针对性地对交通需求进行控制, 从而实现系统的优化. 城市交通系统结构, 则体现在时间、空间等诸多方面. 各种出行群体的不同比例、城市路网的不同拓扑结构、通行能力的不同匹配等均会带来不同的宏观现象. 而这种结构上的差异、微机组分间的相互作用及其变化, 正是产生系统宏观现象演化的根源.

发现城市交通系统中缘起于微观机理的宏观现象^[12]无疑是理解认识整个城市交通系统的重要工具. 本文基于 swarm 平台构造宏观城市交通仿真系统, 通过三组实验: 出行规模实验、出行者实验、路网

^{*}国家自然科学基金(批准号:70671073), 国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号:2006AA11Z210)和天津市科技支撑计划重点项目(批准号:08ZCKFSF01000)资助的课题.

[†] E-mail: he_zb@hotmail.com

结构实验,分别从城市交通系统规模——以交通出行规模为例,以及城市交通系统结构——以交通出行者、路网结构为例,两方面对这一问题展开研究.从而为交通需求管理等的政策制定提供一定理论依据.

2. 基于 Swarm 的实验系统设计

2.1. 仿真路网的构造

构造路段 agent 与路口 agent,固定于 swarm 提供的二维网格(如图 1).设计单向连通交通网络规则:路段(路口)朝 ID 增加方向连通,即只允许出行者沿路段(路口)ID 增加的方向前进.显然,路段 agent 只指向其下游一个路口 agent,而路口 agent 则指向其下游两个路段 agent.

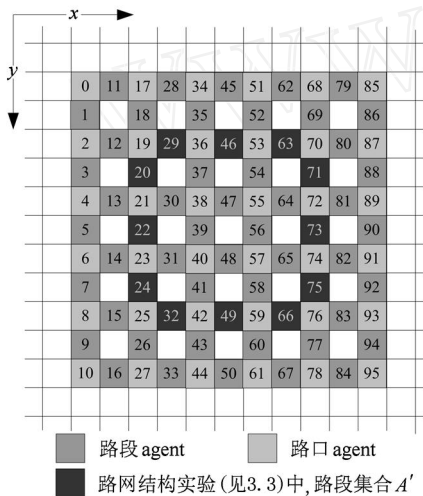


图 1 仿真实验中,二维城市交通网络结构

2.2. 路段、路口规则

考虑路段集 A ,路口集 B , v_a 为路段 $a \in A$ 的当前密度; v_a^{\min} 为自由流状态下路段 a 密度的上限阈值; v_a^{\max} 为饱和流状态下路段 a 密度的下限阈值; t_a^{\min} 为自由流状态下,通过该路段 a 的行驶时间(仿真时间); t_a^{\max} 为饱和流状态下,通过路段 a 的行驶时间; $t_a = t_a(v_a)$ 为路段 a 上的实际行驶时间,是当前密度的增函数(如图 2 和(1)式).

设通过路口 $b \in B$ 的行驶时间为 t_b ,仿真中取常数 C ;路口 b 在饱和状态下车辆数的下限阈值为 s_b^{\max} ;且规定当前路段(路口)处于饱和状态时,上游

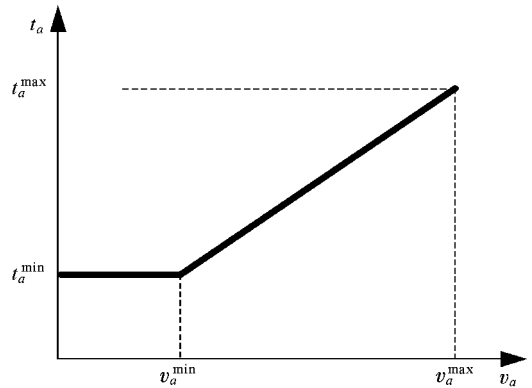


图 2 路段上,时间-密度关系

出行者无法进入.

$$t_a = \begin{cases} t_a^{\min}, & v_a \leq v_a^{\min}, \\ \frac{t_a^{\max} - t_a^{\min}}{v_a^{\max} - v_a^{\min}} (v_a - v_a^{\min}) + t_a^{\min}, & v_a^{\min} < v_a < v_a^{\max}, \\ t_a^{\max}, & v_a \geq v_a^{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

2.3. 出行者规则

根据不同学习规则,设计三类出行者:

1) 无学习出行者:不具备学习能力,一直以原来各路段最短行驶时间的先验值为路径选择依据,不对估计行驶时间 t_a 进行更新,即

$$t_a = t_a^{\min}. \quad (2)$$

2) 经验出行者:具有学习出行经验的能力,即多次出行的经验形成各路段行驶时间的经验平均估计值,有^[13,14]

$$t_a = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M t_a^m, \quad (3)$$

t_a^m 为出行者在路段 a 上第 m 次的记忆出行时间; M 为该路段的曾经出行次数.

3) 信息出行者:具有学习交通信息的能力,即将仿真系统提供的当前时刻各路段的行驶时间信息 t_a^* 作为该路段行驶时间的估计值,有

$$t_a = t_a^*. \quad (4)$$

下文将全部由无学习出行者组成的系统称为无学习系统,将全部由经验出行者组成的系统称为经验系统,将全部由信息出行者组成的系统称为信息系统.

三类出行者均依照最大效用原理(出行时间最短)选择实际出行路径.设当前 OD 对间所有路径集合为 W ,与路径 $w \in W$ 相关联的路段集为 A_w ,相关联的路口集为 B_w ,三类出行者对路径 w 的行驶时

间估计值为

$$T_w = \sum_a (\tau_a + \tau_a) + \sum_b \tau_b, \quad (5)$$

其中 τ_a 为出行者对路段 a 上行驶时间判断的随机误差. 则实际出行路径 w^* 为

$$w^* = \arg \min_w \{ T_w \}. \quad (6)$$

2.4. 实验参数取值

1) 路段. 假设标准路段长度 1 km, 4 车道; 由于拥堵造成的最小行驶速度为 5 km/h, 车头间距 5 m; 自由流平均车速 40 km/h, 车头间距 40 m. 根据仿真需要, 取近似参数值为

$$v_a^{\max} = 160; v_a^{\min} = 20;$$

$$t_a^{\max} = 30; t_a^{\min} = 3; a = \{0, 1, 2\}.$$

2) 路口参数值为

$$C = 1; s_b^{\max} = 9.$$

3) 路网. 设计 $L \times L$ 网格, 取 $L = 11$. 得到路网中, 路段总数 $|A| = 60$; 路口总数 $|B| = 36$ (如图 1); 网络理想均衡状态下的两个极限值为 $v_a^{\min} \cdot |A| = 1200$ 和 $v_a^{\max} \cdot |A| = 9600$.

2.5. 仿真系统运行机理

实际城市交通系统中, 同一时刻内同一路段(路口)上出行者的起讫点各不相同, 对路径的熟悉程度也有差异, 并且同一出行者的 OD 对也时常变化. 为反映这些随机性, 设计仿真系统运行机理如下: 仿真开始, 各出行者 agent 随机获取出行 OD 对; 出行者 agent 根据所属类别的路径选择模型选择出行路径, 并进行实际出行; 在完成一次 OD 对出行任务后, 出行者 agent 随机获取下一 OD 对, 并立即开始新的出行活动; 为去除仿真开始时刻所有出行者 agent 被同时置于路网的影响, 在系统前 50 仿真步内不进行数据统计.

3. 城市交通系统宏观特征

3.1. 网络非均衡度

交通出行中, 出行者通常追求个体出行效用最大; 而交通管理者则希望系统最优. 结合仿真需要, 构造网络非均衡度 作为城市交通系统分析的宏观指标,

$$= \sqrt{\frac{\sum_a (\mu_a - \bar{\mu})^2}{|A|}}, \quad (7)$$

其中

$$\bar{\mu} = \frac{1}{|A|} \sum_a \mu_a, \mu_a = \frac{v_a}{v_a^{\min}}.$$

考虑到灯控路口下游路段未处于严重饱和状态时, 路口的通行能力通常较大且稳定, 即路口本身较少存在拥堵现象, 交通网络的拥堵通常发生在路段上, 并且考虑到参数的一致性, 这里仅计算路段网络非均衡度.

3.2. 处于不同拥堵状态的路段比例

根据城市交通系统中路段的拥堵程度不同, 将路段分成 5 类, 即

$$R = \begin{cases} R_0, & 0 & v_a < v_a^{\min}, \\ R_1, & v_a^{\min} & v_a < 1, \\ R_2, & 1 & v_a < 2, \\ R_3, & 2 & v_a < 3, \\ R_4, & 3 & v_a < v_a^{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

令

$$k = \frac{n_k}{|A|}, \quad (9)$$

$$= \binom{4}{k}_{k=0}, \quad (10)$$

其中 n_k 为属于 R_k 的路段数量, $k = 0, 1, 2, 3, 4$. 本文中取 $n_1 = 60$, $n_2 = 100$, $n_3 = 140$.

4. 实验与分析

4.1. 出行规模实验

假设全部由经验出行者构成的城市交通系统为更一般的城市交通系统. 据此构造经验系统, 选取出行者总数

$$S = \{500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000\},$$

分别进行实验. 得到不同出行规模下的平均网络非均衡度 (图 3(a)) 及其网络非均衡度演化过程 (图 3(b)).

观察图 3(a), 平均非均衡度随出行人数的增加以非线性关系增长, 其中 $S = \{500, 1000, 1500\}$ 及 $S = \{4000, 4500, 5000\}$ 时增长速度相对缓慢, $S = \{2000, 2500, 3000, 3500\}$ 时非均衡度增长较快. 相应

的,图 3(b)中 $S = \{2000, 2500, 3000, 3500\}$ 时非均衡度演化曲线呈现:逐渐下降到相对平稳、在平稳中波动的演化特征,而该特征在其他出行人数的实验中表现并不明显.这种由出行人数变化带来的不同非均衡度特征正是城市交通网络中由系统规模带来的宏观现象.

其原因可解释为:网络畅通时,出行者无需学习

便可获得满意的出行结果;而在拥堵条件下,即使出行者努力分析学习网络状况也无法找到理想路径.这说明,交通供给充足时,不免会带来资源的浪费;而在交通供给不足时,出行者欲到达目的地又必须通过拥堵路段,其学习能力很难发挥作用.因此,只有供给与需求彼此相符,才能充分发挥出行者的主观学习能力,使现有资源充分发挥作用.

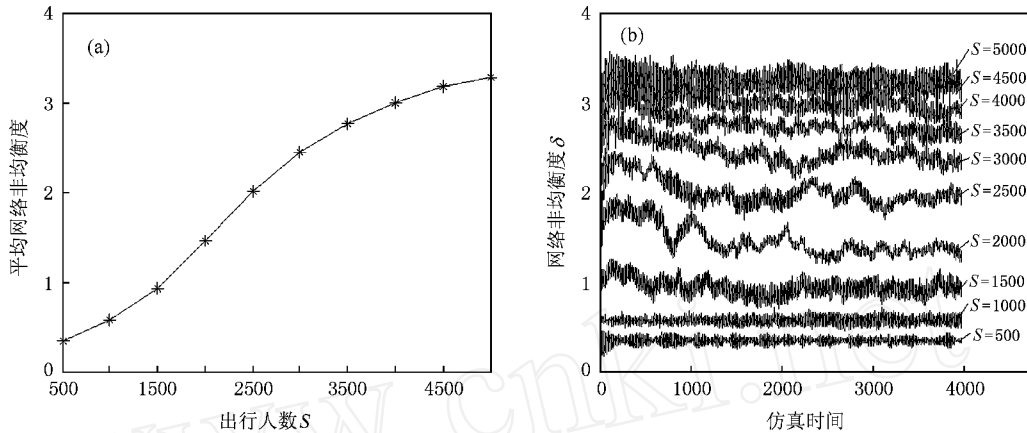


图 3 系统规模实验结果 (a) 不同出行人数实验中,平均网络非均衡度变化;(b) 不同出行人数实验中,网络非均衡度演化过程

4.2. 出行者实验

系统结构的一个重要方面是个体与个体、个体与环境的关系.在城市交通系统中,这种相互作用来自于个体学习能力.出行者通过对出行经验或信息的学习进行路径选择,并通过实际出行影响交通网络状态,实现个体与个体、个体与环境间的交互.本实验试通过无学习系统与经验系统、经验系统与信息系统间宏观现象的对比,提炼出由经验学习与信息学习带来的宏观特征.

考虑 4.1 节的实验结果,取 $S = \{2500\}$,构造无学习系统、经验系统、信息系统,分别进行实验,得到相应网络非均衡度演化曲线(如图 4(a))及处于不同拥堵状态的路段比例变化(如图 4(b),(c),(d)).

显然,对比于无学习系统,经验系统的非均衡度演化有着下降并逐渐平缓的趋势,且其间伴随一定的波动性.这种不同正是系统整体特征(经验系统内个体间存在交互与影响)与微观元素的简单加和(无学习系统中个体不具备学习能力,无法交互)间的区别,并且缘于这种微观差异,即经验学习能力.产生这种特征的原因可解释为:下降并趋于平稳反映了出行者对路网状态的学习适应过程.具有一定持续

时间的波动性,则可以解释为由学习造成的过激反应(如果将出行习惯加入个体的出行选择模型,这种波动性将减小).

在无学习系统非均衡度下方,平稳小幅震荡的演化特征则是由信息作用带来的宏观特征.表明在交通信息的诱导下,网络实现了相对较好的均衡,虽存在一定波动,但一直保持在一定范围内.相比于经验系统的非均衡度演化趋势,信息系统的非均衡度一直相对稳定于经验系统稳定后的非均衡度水平,这说明信息加速了个体的学习过程,较好的促进了网络的均衡.对比图 4(b),(c)在 R_1 和 R_2 上升的同时, R_0 和 R_4 有着明显的下降趋势,这似乎是不同拥堵状态路段间的博弈过程,个体的经验学习能力使得交通网络中较拥堵(R_1 和 R_2)路段比例增加,并换来最拥堵(R_4)和最畅通(R_0)路段比例的下降.在无学习系统中,出行者无法在下次出行中绕开拥堵路段,而拥堵路段由于需要更多时间进行疏散,因此在需求不变的情况下,很难改变拥堵状态,这正是无学习系统(图 4(b))中, R_4 的路段上大于 R_2 和 R_3 的原因.相比于无学习系统,经验出行者根据以往出行经验避开拥堵路段,对拥堵路段的需求降低,从而有效地减小了 R_4 的路段比例.

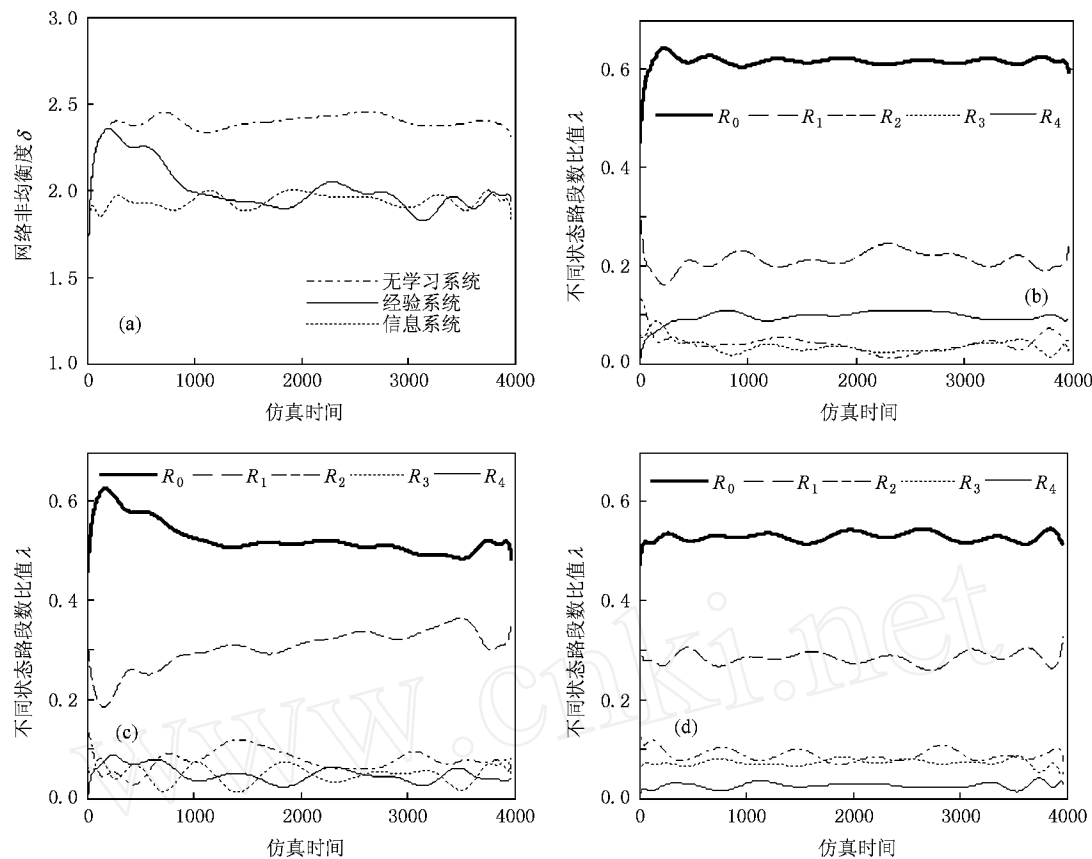


图 4 出行者实验结果(对仿真数据进行 20 阶多项式拟合,得到图中曲线) (a)三类系统网络非均衡度演化曲线对比($S = 2500$);(b)无学习系统中,各状态路段数变化;(c)经验系统中,各状态路段数变化;(d)信息系统中,各状态路段数变化

R_4 中极小的路段比例是图 4(d)区别于图 4(b)和图 4(c)的最明显特征,产生这一现象的微观原因自然是信息的存在.说明在 $S = \{2500\}$ 条件下, R_4 并非不可以消除,只是受限于出行经验,出行者无法掌握及时的全局网络通行状况,从而造成拥堵现象的出现.这更说明诱导信息的重要性与必要性.

通常将整体区别于孤立的部分及其总和的特性认为是涌现现象.本节中无学习系统内出行者不具备学习能力,不存在个体间的交互,是一种简单加和系统;而经验系统、信息系统内出行者则存在明显的交互作用,则可看作整体系统.因此,不妨将上述经验系统、信息系统不同于无学习系统的整体特征认为是缘自于个体学习能力的涌现现象.

4.3. 路网结构实验

城市路网作为城市交通系统的重要组成部分,对城市交通系统的整体特性有着重要的影响.本实验着重研究路网结构差异对城市交通系统的宏观影响.改变网络结构,设计不均匀的交通网络(如图

1),设 A^1 为中间深色区域路段集, A^2 为剩余的路段集,修改路段参数为

$$\begin{aligned} v_a^{\max} &= \begin{cases} 266, a & A^1, \\ 133, a & A^2, \end{cases} \\ v_a^{\min} &= \begin{cases} 34, a & A^1, \\ 17, a & A^2. \end{cases} \end{aligned}$$

修改后路网在理想均衡状态下的两个极限值为 $34|A^1| + 17|A^2| = 1224$ 和 $266|A^1| + 133|A^2| = 9576$,均与原系统相似.但中间深色区域路段通行能力是其他区域的一倍.

同样在 $S = \{2500\}$ 下,分别使用无学习出行者、经验出行者、信息出行者进行实验,得到图 5(a).并使用经验系统在 $S = \{500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000\}$ 下分别进行实验,结果如图 5(b).对比之前路网的出行结果(如图 4(a)和图 3(b)).非均衡度由高到低收敛的演化趋势更加明显,且下降幅度和持续时间都明显增加(由 2.6 下降到 2,原路网则由 2.4 下降到 2).这说明网络复杂程度增大时,出行者的经验积累

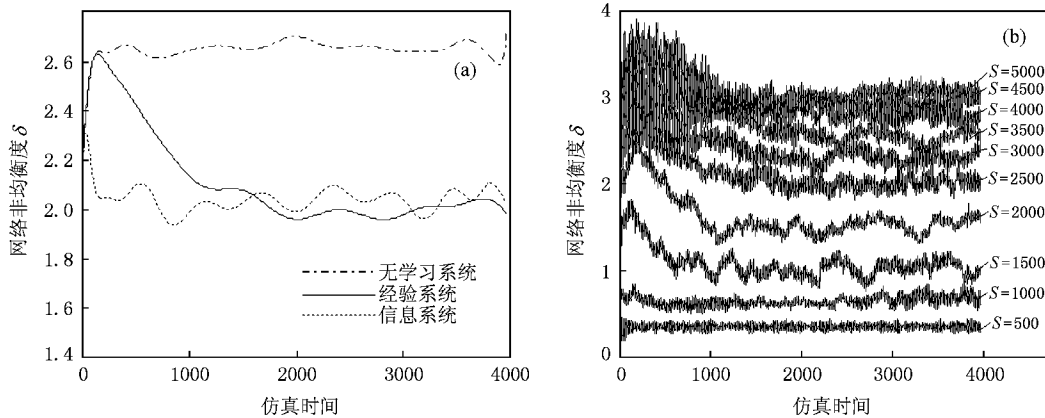


图5 路网结构实验结果 (a)路网结构实验中($S=2500$),三类系统网络非均衡度演化曲线对比(对仿真数据进行20阶多项式拟合,得到(a)中曲线);(b)路网结构实验中,网络非均衡度演化过程

以及信息的发布更加重要,其作用也更加明显,但由于学习难度增大,学习时间相应增长。

此外,具有这种趋势的出行人数范围由原系统的 $S = \{1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000\}$,分别向下向上延伸至 $S = \{1000\}$ 和 $S = \{4500, 5000\}$,这说明:对于更复杂的出行环境,出行者的学习能力有着更为广泛的作用.较之简单、拥堵(或简单、畅通)城市交通系统中,出行者的学习能力在复杂、拥堵(或复杂、畅通)的交通网络中可以发挥更大的作用。

5. 结 论

本文利用 multi-agent 方法和 swarm 仿真平台,将出行者、路段、路口分别指定为相应的 agent,通过规则设计,抽象出较合理的宏观城市仿真系统.经过反复实验,从系统规模、系统结构两方面,发现并分析了城市交通系统中缘起于微观机理的宏观现象.通

过对相应微观机理的分析与控制,不但有利于城市交通系统的管理而且有助于城市的规划与建设。

出行规模实验中,由于出行规模的不同,使得系统在 $S = \{2000, 2500, 3000, 3500\}$ 时网络非均衡度呈现逐渐下降到相对平稳,并在平稳中波动的演化特征,而这种现象在其他出行人数的实验中并不明显。

出行者实验中,分别将无学习系统与经验系统、信息系统与经验系统进行对比,得到缘自于经验学习与信息学习的网络非均衡度演化特征及处于不同拥堵状态的路段数变化趋势,揭示了个体学习能力对整体系统的影响,并可将这些宏观特征认为是缘自于个体学习能力的涌现现象。

路网结构实验中,复杂结构网络带来了更大幅度的网络非均衡度下降,并且其持续时间明显增加.说明了在更复杂的城市路网中,个体需要更长的时间去学习适应,并且学习能力将在更大的范围内发挥作用。

- [1] Gu S S, Chen Y 2004 *Complex Systems and Complexity Science* **1** 82 (in Chinese) [顾珊珊、陈 禹 2004 复杂系统与复杂性科学 **1** 82]
- [2] Chen Y 2001 *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* **2** 47 (in Chinese) [陈 禹 2001 交通运输系统工程与信息 **2** 47]
- [3] Stephan A 1999 *Evolution and Cognition* **5** 49
- [4] Yaneer B Y 2004 *Complexity* **9** 15
- [5] Raffaelli G, Marsili M 2005 *Phys. Rev. E* **72** 016114
- [6] Liu T L, Huang H J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6321 (in Chinese)

- [刘天亮、黄海军 2007 物理学报 **56** 6321]
- [7] Sun Y Z, Ruan J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4137
- [8] Tan F X, Guan X P, Liu D R 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3531
- [9] Zhang C X, Li H, Lin P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4458
- [10] Doniec A, Mandiau R, Piechowiak S, Espi é S 2008 *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21** 1443
- [11] Kerner B S 2000 *Phys. A: Meth. Gen.* **33** L221
- [12] Abbott R 2006 *Complexity* **12** 13
- [13] Huang H J, Liu T L, Yang H 2007 *J. Advanced Transportation* **41** 23
- [14] Cantarella G E, Cascetta E 1995 *Transp. Sci.* **29** 305

Experimental macroscopic phenomena in urban transportation system^{*}

He Zheng-Bing Ma Shou-Feng[†] He Guo-Guang

(Institute of Systems Engineering, School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 19 March 2009; revised manuscript received 21 May 2009)

Abstract

Based on the multi-agent approach and the swarm platform, a macroscopic simulation of urban transportation system is developed. In the simulation, travelers are divided into three groups first, and then links, intersections and travelers are treated as agents respectively. Three different experiments, namely traveling scales, traveler groups and network structure experiments, are carried out by the simulation. Through comparing and analyzing the simulation results from the perspectives of system scale and structure, we try to find and explain the macroscopic phenomena and the possible emergence phenomena coming from the microscopic level in urban transportation system.

Keywords: simulation, multi-agent, urban transportation system, macroscopic phenomena

PACC: 0565

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70671073), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA11Z210) and the Tianjin Municipal Science and Technology Support Program (Grant No. 08ZCKFSF01000).

[†] E-mail: he.zb@hotmail.com