

# 含重叠路段交通系统中信息反馈策略的比较研究\*

田丽君 刘天亮 黄海军†

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083)

(2007 年 7 月 30 日收到, 2007 年 11 月 19 日收到修改稿)

智能交通系统可以实时反馈路况信息、诱导出行, 进而缓解交通拥堵. 在时间反馈和平均速度反馈两种信息服务策略下, 考虑重叠路段的影响, 利用元胞自动机模型对人们的路径选择行为进行了模拟. 结果表明, 在含有重叠路段的网络中, 相对时间反馈策略而言, 平均速度反馈策略可以更有效地降低人们的出行时间, 其优势在重叠部分长度占路径长度的比例很小和较大时十分明显, 且随路径长度的增加而上升. 在提高路网的利用效率方面, 平均速度反馈策略的优势随路径长度的增加而逐渐下降, 随重叠部分长度的增加而先降后升.

关键词: 交通流, 元胞自动机, 智能交通系统, 信息反馈策略

PACC: 0565, 0250, 0520

## 1. 引言

随着社会经济的迅速发展和城市化进程的加快, 道路资源供给不足与交通需求与日俱增的不平衡矛盾变得日益尖锐. 利用实验和模拟结果, 揭示人们的路径选择规律, 加深对交通行为的理解, 进而提出缓解交通拥堵的有效措施, 是当今交通科学的一个重要研究领域<sup>[1,2]</sup>.

1992 年德国学者 Nagel 和 Schreckenberg<sup>[3]</sup>提出的一维元胞自动机模型(NS 模型), 由于能够再现孤立波、幽灵堵塞、时走时停和同步交通等交通流的基本现象, 引起了大量的扩展研究. 目前大多数利用元胞自动机模型模拟交通行为的研究, 主要针对只含一条道路的交通系统, 并不具备路径选择功能<sup>[4,5]</sup>. 通过引入时间反馈机制, Wahle 等<sup>[6]</sup>首先在一个只有两条路径的简单路网上模拟了人们借助可变信息的路径选择行为. 由于时间反馈策略存在一定的滞后性, 文献 [7—9] 进一步研究了平均速度反馈策略的可能性, Wang 等<sup>[10]</sup>还提出了更加有效的拥挤系数反馈策略. 然而这些工作仍然是在只有一个起讫需求对(OD 对)两条并行路径的简单路网上进行模拟, 没有考虑网络中存在路径重叠的情形.

在实际的交通系统中, 相比道路上的随机因素而言, 由于多条路径之间存在重叠路段而引起的交通拥堵现象更加严重. 本文研究两个 OD 对之间存在重叠路段的情形, 利用 NS 模型分别对时间反馈和平均速度反馈这两种信息提供策略下的路径选择行为进行模拟和比较, 系统地研究了重叠路段对个人出行时间和系统利用效率的影响.

## 2. 模型和反馈策略

图 1 为包含重叠路段的网络示意图. 该路网由相互对称的两个 OD 对( $O_1, D_1$ )和( $O_2, D_2$ )构成,  $O_1$  和  $O_2$  为起点,  $D_1$  和  $D_2$  为迄点. 每个 OD 对之间有两条路径连接, 其中路径 2 和路径 3 共用重叠路段  $C_1 C_2$ . 假定每个元胞的长度为 7.5 m, 该网络经过离散处理后, 用元胞表达的形式如图 2 所示, 设路径 1 和路径 4 上的元胞个数均为  $L$ , 路段  $O_1 C_1$  和  $O_2 C_1$  上的元胞个数均为  $L_1$ , 重叠路段  $C_1 C_2$  的元胞个数是  $L_2$ , 路段  $C_2 D_1$  和  $C_2 D_2$  上的元胞个数均为  $L_3$ , 则路径 2 和路径 3 上的元胞个数均为  $\hat{L} = L_1 + L_2 + L_3$ .

在每一个时间步, 假定起点  $O_1$  和  $O_2$  处都会产生一辆车. 考虑动态车和静态车两种车辆, 其出现的

\* 国家自然科学基金(批准号: 70521001) 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB705503) 和北京航空航天大学博士创新基金资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: haijunhuang@buaa.edu.cn

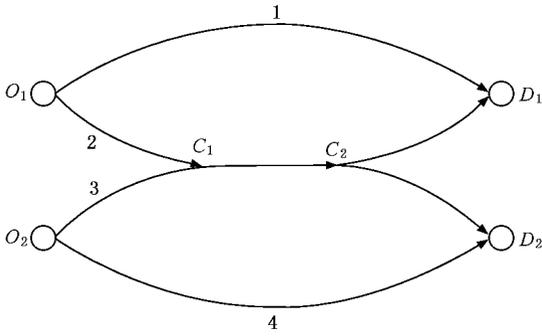


图1 存在重叠路段的网络

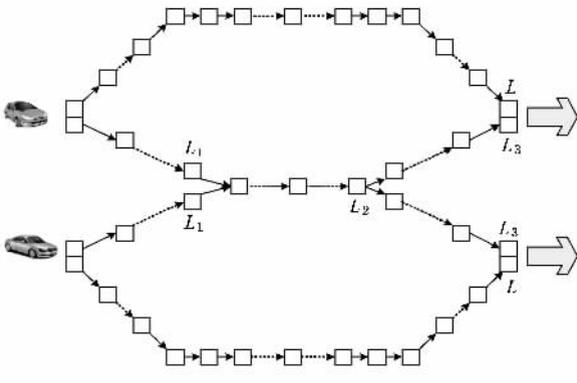


图2 网络的元胞示意图

概率均为 50%。静态车忽略反馈信息、均匀随机地选择路径,而动态车则依据可变信息板发布的路径信息选择路径。车辆一旦进入路径,就按照 NS 模型的演化规则运动,直到车辆离开网络。如果车辆因为前方元胞被占用而不能进入路径,就被删除。车辆到达迄点后就离开网络。

在交叉口  $C_1$  处,采用无信号灯控制办法让车辆通行,即从  $O_1$  和  $O_2$  进入路网的车辆到达  $C_1$  时按照“先到先服务”的竞争策略通过交叉路口。具体规则如下(1)先到达的车辆有优先通过路口的权利。(2)如果两车同时到达,速度高的车辆将享有优先权。(3)如果两车同时到达且速度相同,则均匀随机地让其中一辆通过交叉口。(4)如果前方有足够空间,则允许两辆车在同一个时间步内通过  $C_1$  点,具体实现办法是假设面临竞争的两辆车分别为 A 和 B,当 A 车依据前三条规则优先进入重叠部分后,B 车则将 A 车作为前车,根据其所处的位置测出车距后调整速度,如果  $C_1$  点与 A 车之间还有空位,且 B 车速度足够高并能够通过  $C_1$  点,则允许 B 车也进入重叠部分,如果没有空位或有空位但 B 车速度不够高,则 B 车仍然留在原来的路段上,等待下一轮

竞争,反之同理。

在引入本文所使用的实时信息反馈策略之前,先介绍 NS 模型的基本演化规则<sup>[3]</sup>。假定车辆的状态由速度  $v_n$  和位置  $x_n$  表示,速度  $v_n$  允许在 0 到  $v_{\max}$  之间变化,  $g_n = x_{n+1} - x_n - 1$  表示第  $n$  辆车与第  $n+1$  辆车的车距。具体的演化规则如下(1)加速过程,

$$v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max}).$$

(2)安全刹车过程,

$$v_n^{\text{safe}} \rightarrow \min(v_n, g_n).$$

(3)随机慢化过程(概率为  $p$ ),

$$v_n^{\text{random}} \rightarrow \max(v_n^{\text{safe}} - 1, 0).$$

(4)位置更新,

$$x_n \rightarrow x_n + v_n^{\text{random}}.$$

这里  $v_{\max}$ ,  $v_n^{\text{safe}}$  和  $v_n^{\text{random}}$  分别为车辆的最大车速、安全车速和随机慢化车速。模拟中假定最大车速  $v_{\max} = 3$ ,随机慢化概率  $p = 0.25$ 。下面描述本文所采用的两种实时信息反馈策略下的信息获取规则,包括时间反馈策略和平均速度反馈策略。

时间反馈策略下的信息获取规则如下:当车辆进入路网后,系统自动记录车辆的进入时刻,当车辆离开时,系统将该车的行驶时间反馈到可变信息板上。开始时各条路径上没有车辆到达迄点  $D_1$  和  $D_2$ ,可变信息板不显示任何信息,静态车和动态车都随机地选择路径。如果已经有车辆离开网络,路径入口处的动态车将根据可变信息板所发布的信息选择行驶时间短的路径。

平均速度反馈策略下的信息获取规则如下:在每一个时间步,系统将各路径上所有车辆的速度反馈给控制中心,控制中心对这些信息进行处理并将平均速度发布在可变信息板上。在入口处的动态车总是选择平均速度高的路径。路径 2 和路径 3 的平均速度分别是三个路段平均速度的加权和,以路径 2 为例,其平均速度的计算公式为

$$\bar{v} = \frac{\hat{L}}{L_1/\bar{v}_1 + L_2/\bar{v}_2 + L_3/\bar{v}_3},$$

其中  $\bar{v}_1$ ,  $\bar{v}_2$  和  $\bar{v}_3$  分别是路段  $O_1C_1$ ,  $C_1C_2$  和  $C_2D_1$  的平均速度。

### 3. 模拟结果

在给出模拟结果之前,先定义三个反映路网利用效率的指标,即路段平均流量、路径平均流量和

OD 对平均通量. 以路段  $O_1C_1$  为例, 其平均通量  $\bar{F}_1$  的计算公式为

$$\bar{F}_1 = \bar{V}_1 \rho = \bar{V}_1 \frac{N}{L_1},$$

其中  $\rho$ ,  $N$  和  $L_1$  分别为路段  $O_1C_1$  的平均密度、车辆数和长度. 路径 2 的平均通量  $\bar{F}_{route2}$  是其最后一个路段的平均通量, 即

$$\bar{F}_{route2} = \bar{F}_3,$$

其中  $\bar{F}_3$  是路段  $C_2D_1$  的平均通量. OD 对  $(O_1, D_1)$  的平均通量  $\bar{F}_{(O_1, D_1)}$  是并行连接它的两条路径的通量之和, 即

$$\bar{F}_{(O_1, D_1)} = \bar{F}_{route1} + \bar{F}_{route2},$$

其中  $\bar{F}_{route1}$  为路径 1 的平均通量.

去掉前 5000 步的模拟结果, 取第 5001 步至第 50000 步模拟结果的平均值进行分析. 本算例中的两个 OD 对和相应的路径是完全对称的, 为节省篇幅, 以下只分析 OD 对  $(O_1, D_1)$  和路径 1 与路径 2 的统计值. 设  $L = 1000$ ,  $\hat{L} = 800$  和  $L_2 = 20$ , 重叠路段位于路径 2 的中部. 图 3 给出了两种信息服务策略下路径 1 和路径 2 的车辆数、行驶时间、平均速度及平均通量和 OD 对  $(O_1, D_1)$  通量. 这里的车辆数是指当前时间步某路径上所存在的车辆数.

比较图 3(a) 和 (b) 可以发现: 在时间反馈策略下, 两条路径上的车辆数的波动幅度都比较大, 路径 2 的平均车辆数少于路径 1 的平均车辆数, 但有时很相近. 而在速度反馈策略下, 路径车辆数的波动幅度相对比较小, 且路径 2 的车辆数总是少于路径 1 的车辆数. 由于路径 2 比路径 1 短, 正常诱导的结果应该是路径 2 的车辆数少于路径 1 的车辆数.

比较图 3(c) 和 (d) 可以发现: 时间反馈策略使路径 2 的行驶时间大幅波动, 且路径 2 的时间平均值大于路径 1 的时间平均值 (尽管路径 2 比路径 1 短). 而速度反馈策略的效果比较好, 路径 2 的时间波动幅度减小了, 其时间平均值与路径 1 的时间平均值很接近.

比较图 3(e) 和 (f) 可以发现, 两种策略都使得路径 2 的平均速度小于路径 1 的平均速度, 但时间反馈策略下的差距要大一些, 且路径 2 的平均速度有周期性变化的趋势.

最后, 我们比较两种策略所导致的路径通量, 见

图 3(g) 和 (h). 由于路径 2 存在重叠段瓶颈, 两种策略都显示路径 1 的通量大于路径 2 的通量, 这是正确的模拟结果. 但时间反馈策略下路径 1 的通量出现几次大幅下跌. 比较 OD 对之间的通量 (图 3(i) 和 (j)), 所得结论是一致的.

综上所述可知, 平均速度反馈策略优于时间反馈策略. 由于时间反馈策略要等到车辆离开网络时才能计算出路径时间, 所以提供给起点处车辆的信息是过时的、滞后的, 导致主要统计指标大幅振荡. 此外, 由于路径 2 含有重叠路段, 重叠路段同时被两个 OD 对之间的车辆使用, 因而容易出现拥堵, 无论使用哪种信息反馈策略, 路径 2 上的平均行驶速度和平均通量都比路径 1 低. 将图 3(b)(d)(f) 和 (h) 分别与文献 [10] 中图 3(b), 图 4(c), 图 5(b) 和图 2(b) 比较后可以发现, 当存在重叠路段时, 在速度反馈策略下各统计指标的波动特征更加明显. 因此, 重叠路段对个体行为和系统利用效率的影响不容忽视.

下面分析重叠路段长度对路径平均通量和 OD 对平均通量的影响, OD 对平均通量反映了系统的利用效率. 仍然设  $L = 1000$  和  $\hat{L} = 800$ , 但令重叠路段长度从 0 至 800 变化. 模拟结果见图 4.

当重叠路段的长度为零时, 网络变成相互独立的两个部分. 从图 4(a)(b) 可以看出, 速度反馈策略在路径 1 上产生了更高的通量, 在路径 2 上则相反, 但对整个网络而言, 速度反馈策略得到的通量高于时间反馈策略, 见图 4(c). 这个结果与文献 [10] 给出的结果是一致的.

当重叠路段长度比较短 (小于 100) 时, 路径 2 上极容易形成拥堵瓶颈, 车速很低, 路径 2 的通量急剧下降, 见图 4(b). 此时车辆主要选择路径 1, 导致路径 1 的通量上升, 见图 4(a). 尽管整个 OD 对通量是下降的, 但速度反馈策略还是产生了比时间反馈策略要高一些的 OD 对通量, 见图 4(c). 对路径 1 而言, 重叠路段的长度达到 100 时, 其通量就增加至一个稳定值. 路径 2 的平均通量一直在下降, 直到重叠路段的长度达到 200 时才稳定下来. 两条路径的通量都稳定下来后, 路径 2 的通量总小于路径 1 的通量 (几乎相差一倍). 当交叉重叠路段的长度达到一定值以后, 先前骤然出现的瓶颈效应被缓解了, 路径 2 可以接纳足够多的静态车辆, 而动态车辆被诱导至路径 1 和路径 4 上去了. 图 4(d) 显示, 重叠长度很短时, 路径 2 上出现了瓶颈, 速度反馈策略可以迅速

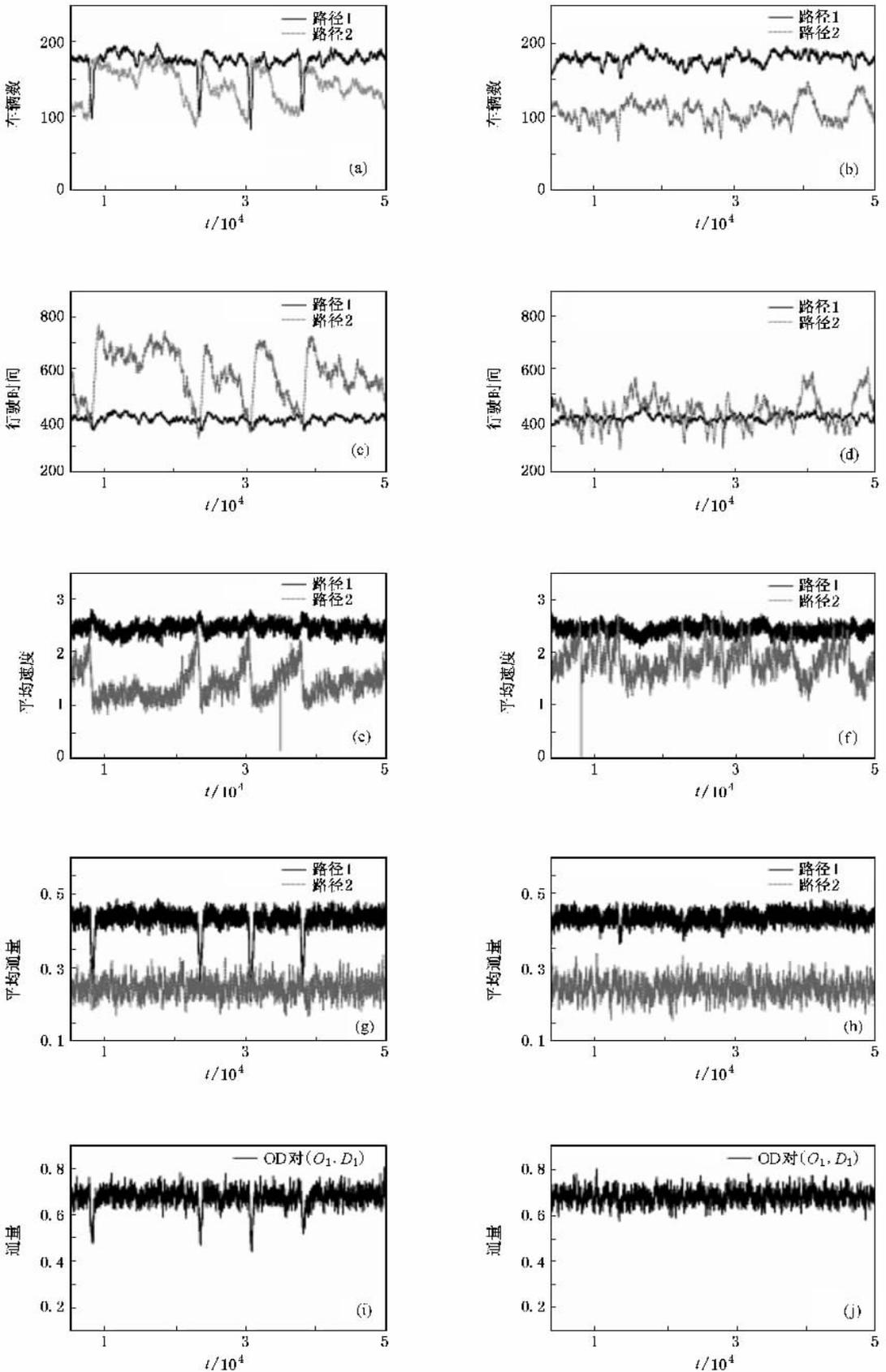


图3 两种信息服务策略下路径1和路径2的车辆数、行驶时间、平均速度和平均流量及OD对( $O_1, D_1$ )流量 (a)(c), (e)(g)和(i)是时间反馈策略给出的结果 (b)(d)(f)(h)和(j)是速度反馈策略给出的结果

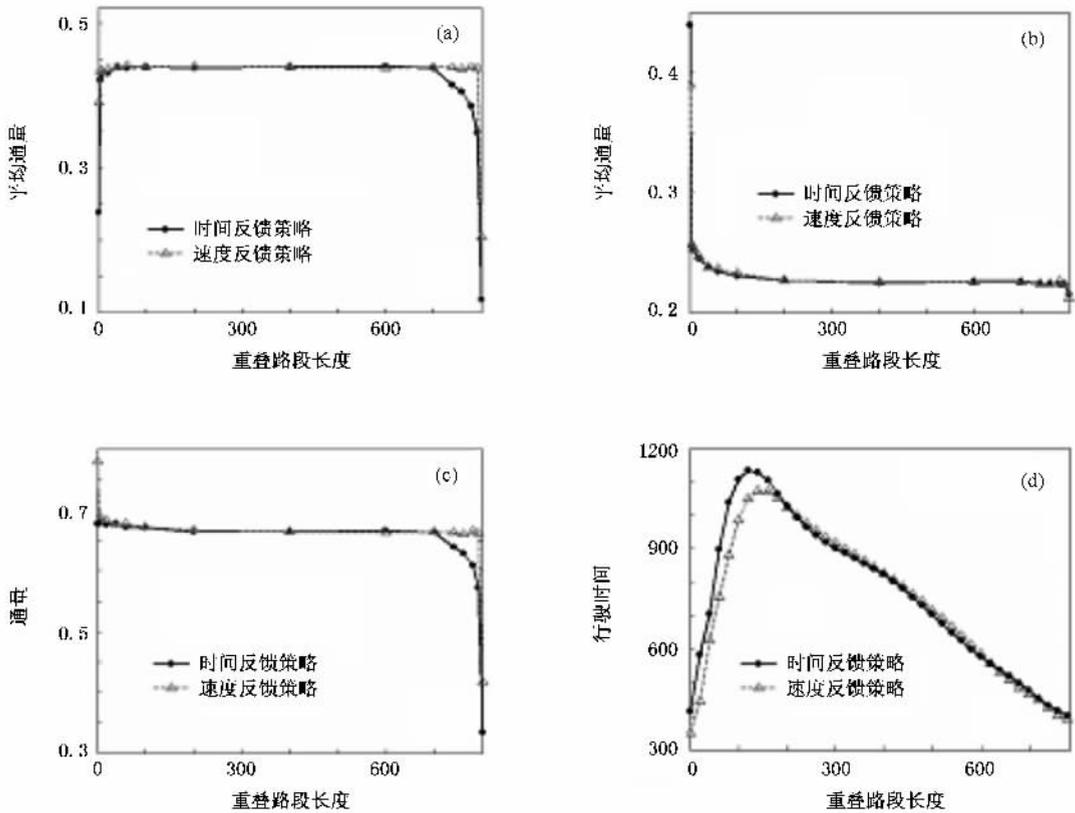


图4 路径平均流量、OD对流量和路径行驶时间随重叠部分长度的变化 (a)和(b)分别是路径1和路径2上的平均流量, (c)和(d)分别是OD对 $(O_1, D_1)$ 的流量和路径2的行驶时间

将瓶颈信息提供给动态车辆,疏导该路径上出现的拥堵,效果明显优于时间反馈策略.图4还显示,当重叠路段长度处于200—700之间时,两种策略导致的差别并不大.重叠路段长度超过700之后,从路径2和路径3驶入网络的车辆在很短的路段 $O_1C_1$ 和 $O_2C_1$ 上争夺进入重叠路段 $C_1C_2$ 的机会,路段 $O_1C_1$ 上形成堵塞,由于速度反馈策略可以迅速提供拥堵信息,所以它的优势再次显现.

从图4(c)可以看出,当重叠路段长度超过700时,时间反馈策略导致OD对流量急剧下降,速度反馈策略仍保持很高的OD对流量.因此,从系统利用效率方面评价,速度反馈策略明显优于时间反馈策略,其优势程度随重叠路段长度的增加先减后增.

需要说明的是,当重叠路段长度为800时, $O_1$ 与 $O_2$ 汇合、 $D_1$ 与 $D_2$ 汇合、路径2与路径3汇合,整个网络变成包含一个OD对和三条并行路径的简单系统.由于路径1比路径2长,所以无论采用什么策略,路径2的流量都高于路径1的流量,但在路径1上速度反馈策略给出了高于时间反馈策略的流量,对于OD对流量而言,亦如此.

我们进一步研究网络长度(以最长路径的长度来表示)对路径行驶时间和OD对流量的影响.假定路径2的长度始终是路径1的0.8倍,而重叠路段长度始终是20,模拟中只改变路径1的长度.图5(a)显示,网络越长,速度反馈策略在降低路径2的行驶时间方面的效果越优于时间反馈策略.在提高OD对流量方面,网络越长,两种策略的效果越接近,见图5(b).

我们还研究了当重叠路段长度随网络长度成比例变化时,对路径行驶时间和OD对流量的影响.仍然假定路径2的长度始终是路径1的0.8倍,而重叠路段长度始终是路径1的0.02倍,模拟中改变路径1的长度.从图5(c)可以看出,当网络长度小于1500时,网络长度越长,速度反馈策略在降低路径2的行驶时间方面的效果越优于时间反馈策略.当网络长度从1500增加到2000时,瓶颈效应得到缓解,行驶时间上升幅度减缓.图5(d)显示,对于OD对流量而言,当网络长度为100时,重叠路段长度非常小,车辆可以直接穿过重叠部分,不会造成瓶颈,路

径 2 和路径 3 上的车辆基本上不会互相干扰.当网络长度为 200 时,此时车辆无法直接穿过瓶颈,造成了路径 2 和路径 3 上的车辆争夺资源,共用很短的

一段重叠路段,OD 对流量突然下降.随着网络长度的增加,OD 对流量先减小而后趋于稳定,速度反馈策略总是优于时间反馈策略.

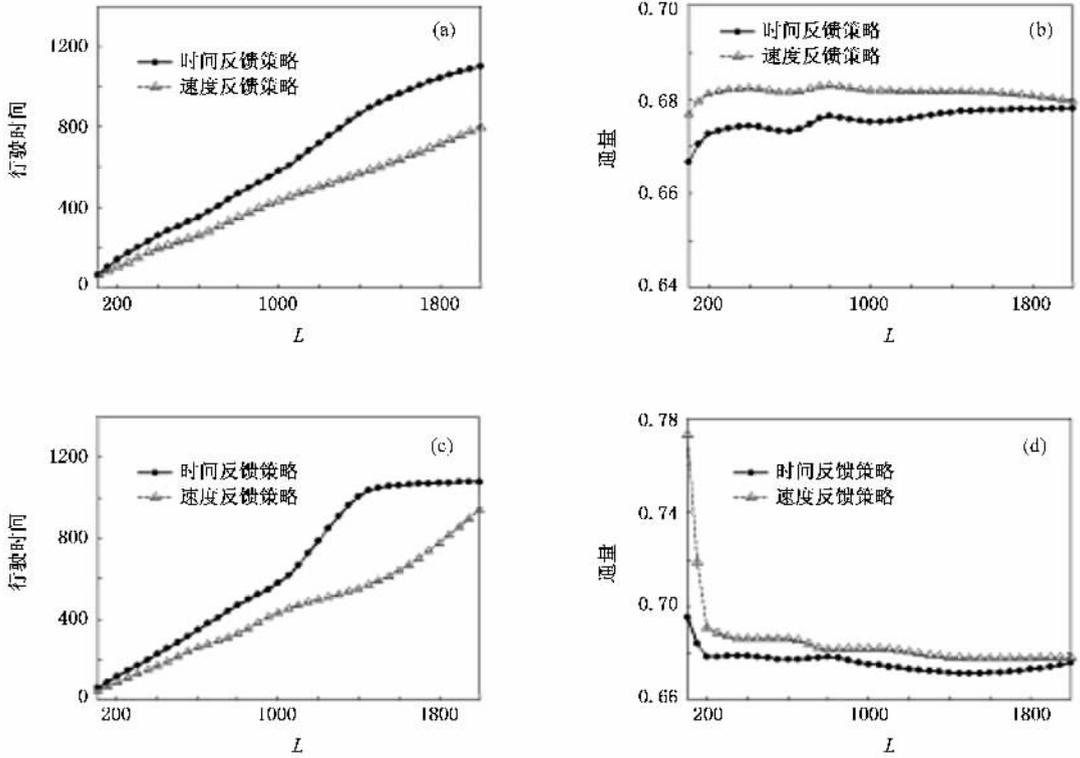


图 5 路径行驶时间和 OD 对流量在重叠路段长度固定和按比例变化两种情况下随路径 1 长度  $L$  的变化 (a)和(b)分别是重叠路段长度固定时路径 2 的行驶时间和 OD 对  $(O_1, D_1)$  的流量 (c)和(d)分别是重叠路段长度按比例变化时路径 2 的行驶时间和 OD 对  $(O_1, D_1)$  的流量

以上的模拟中令动态车和静态车出现的概率均为 50% 现在我们考察车辆类别构成因素与信息服 务策略之间的关系.设系统中动态车数量占有车 量数的比例为  $S_d$ ,也就是动态车与静态车出现的 概率分别是  $S_d$  和  $1 - S_d$ .模拟中,路径 2 的长度始终 是路径 1 的 0.8 倍,重叠路段长度是 20,我们改变动 态车比例  $S_d$ ,考察路径 2 的行驶时间和 OD 对  $(O_1, D_1)$  流量的变化,见图 6.模拟结果显示,当动态车比 例较小时,由于静态车是影响系统的主要因素,两种 信息反馈策略导致的差别并不明显.当动态车比例 超过 0.4 时,信息反馈的效果突然显现,路径行驶时间 大幅下降,这说明存在一个动态车比例的临界值. 在临界值以内,只有小部分人可以得到信息服务,对 整个系统的作用是很小的,信息诱导不可能产生全 局效果.图 6(a)显示,动态车比例大于 0.4 以后,速 度反馈策略在降低路径 2 的行驶时间方面优于时间

反馈策略.同时也观察到,当动态车比例大于 0.9 时,路径 2 的行驶时间不降反升,这就是文献 [11] 中 提到的信息服务过度现象.在路网利用率方面,图 6 (b)显示,动态车比例从零升至 0.4 这一阶段,系统 的流量是上升的;当动态车比例继续增加时,流量开 始下降,时间反馈策略造成的下降幅度最大.这个结 果与文献 [7, 9, 10] 的结果是一致的.动态车根据可 变信息板发布的信息对比两条路径的交通状况,选 择对自己最有利的路径.动态车的数量越多,越容易 导致两条路径的行驶时间趋向相等,但动态车比例 过高,超过临界值以后,主动选择最优路径的需求就 会过大,结果会造成路径的入口处被堵塞,反而使得 能够进入路径的车辆数减少(模拟中使用了这样一 条原则:因为前方元胞被占用而不能进入路径的车 辆被删除),虽然行驶时间缩短了,但车辆密度下降, 最终导致系统的流量下降.

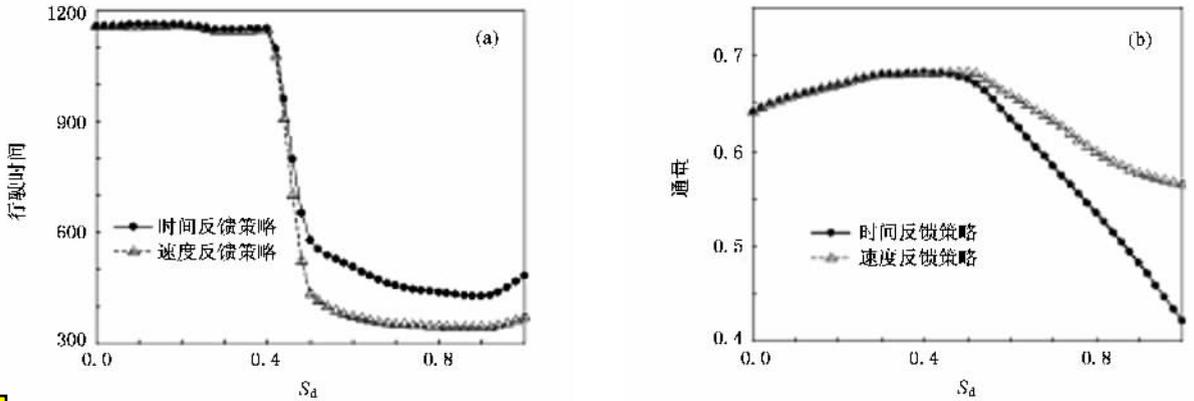


图 6 路径行驶时间和 OD 对流量随动态车比例  $S_d$  的变化 (a) 路径 2 的行驶时间 (b) OD 对  $(O_1, D_2)$  的流量



## 4. 结 论

自 20 世纪 80 年代以来,在信息技术成果的支持下,智能交通系统在缓解交通拥挤方面的作用越来越明显.借助智能交通系统实时发布的路况信息,出行者的路径选择不再盲目.本文在包含重叠路段的交通网络中,应用元胞自动机模型的模拟结果对比分析了信息反馈策略和平均速度反馈策略对个人

出行时间、路径选择行为和系统利用效率的影响.研究发现,在包含重叠路段的交通系统中,时间反馈策略的滞后效应十分明显,各种模拟统计值的波动幅度比较大.平均速度反馈策略可以更有效地降低人们的出行时间,在重叠路段长度占路径长度的比例很小和较大时其优势十分明显,且随路径长度增加而增加.在提高路网的利用效率方面,平均速度反馈策略的优势随路径长度的增加而逐渐减小,随重叠路段长度的增加而先减后增.

- [ 1 ] 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 ]
- [ 2 ] Shang H Y ,Huang H J ,Gao Z Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4342 ( in Chinese )  
[ 尚华艳、黄海军、高自友 2007 物理学报 **56** 4342 ]
- [ 3 ] Nagel K ,Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* **I** **2** 2221
- [ 4 ] Li K P ,Gao Z Y 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 2120
- [ 5 ] Lei L ,Dong L Y ,Song T ,Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711  
( in Chinese ) [ 雷 丽、董力耘、宋 涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711 ]
- [ 6 ] Wahle J ,Bazzan A L C ,Klütgl F ,Schreckenberg M 2000 *Physica A* **287** 669

- [ 7 ] Lee K ,Hui P M ,Wang B H ,Johnson N F 2001 *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** 3507
- [ 8 ] Wahle J ,Bazzan A L C ,Klütgl F ,Schreckenberg M 2002 *Tran. Res.* **C** **10** 399
- [ 9 ] Fu C J ,Wang B H ,Yin C Y ,Gao K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4032  
( in Chinese ) [ 付传技、汪秉宏、殷传洋、高 坤 2006 物理学报 **55** 4032 ]
- [ 10 ] Wang W X ,Wang B H ,Zheng W C ,Yin C Y ,Zhou T 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066702
- [ 11 ] Huang H J ,Lam W H K 2003 *J. Math. Model. Algor.* **2** 349

# Comparative studies on information feedback strategies in traffic networks with overlapping routes<sup>\*</sup>

Tian Li-Jun   Liu Tian-Liang   Huang Hai-Jun<sup>†</sup>

( *School of Economics and Management , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing 100083 , China* )

( Received 30 July 2007 ; revised manuscript received 19 November 2007 )

## Abstract

Intelligent traffic systems can help road users make reasonable route choice by providing them real-time traffic information , thus alleviate congestion. Considering the existence of overlapping between routes , this paper applies the cellular automaton model to simulate and investigate the route choice behavior under two information service strategies , namely travel time feedback strategy and mean velocity feedback strategy. Our simulation results indicate that the mean velocity feedback strategy can reduce the route travel time more efficiently than the time feedback strategy , particularly in longer networks with very short or very long overlapping segments. Its advantage in improving the network utilization efficiency decreases with the route length and drops first and rises afterwards with the length of overlapping part.

**Keywords :** traffic flow , cellular automaton , intelligent traffic systems , information feedback strategy

**PACC :** 0565 , 0250 , 0520

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 70521001 ) , the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB705503 ) and the Doctoral Innovation Foundation of Beijing University of Aeronautics and Astronautics , China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : haijunhuang@buaa.edu.cn