

信号灯和公交车站对 T 形路口交通流的影响研究^{*}

梅超群^{1,2)} 黄海军¹⁾† 唐铁桥³⁾ 王惠文¹⁾

1) 北京航空航天大学经济管理学院 北京 100191)

2) 首都经济贸易大学统计学院 北京 100070)

3) 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

(2008 年 3 月 27 日收到 2008 年 4 月 16 日收到修改稿)

采用非线性映射模型研究 T 形路口的交通问题,利用点平均流量指标系统地分析了公交车站、信号灯周期、绿信比、车辆左右转弯等因素对路径交通流量的影响.数值模拟结果表明,信号灯和公交车站之间的相互影响容易导致交通流的串现象,不同路径上的流量与信号灯周期、绿信比和公交车站位置之间存在一定的关系.

关键词:交通流,非线性映射模型,信号控制,串

PACC: 0565, 0250, 0520

1. 引言

交通拥堵已成为交通界、物理界及数学界研究的热点问题^[1-9].公交车站和信号灯是影响城市局部交通的重要因素,引起了大量学者的关注^[10-20].冯苏菁^[10]系统地研究了公交车站对车流的影响,Sasaki 和 Nagatani^[14]利用非线性映射模型发现车辆通过多个信号灯时出现串现象,串的大小依赖于信号灯周期和绿信比,Nagatani^[15]和 Huang^[8]分别采用最优速度模型和元胞自动机模型发现饱和流量与信号灯周期和控制规则无关,Jiang 等^[16]发现,当周期 ≤ 300 s 时,周期越短,流量越大,唐铁桥等人^[20]分析了信号灯对跟车行为的影响,并提出一个可以再现信号灯对车流作用的交通流模型.但是,上述模型都没有考虑信号灯和公交车站对车流的同时作用.

本文扩展了文献[14]的非线性映射模型,系统地刻画信号灯和公交车站对 T 形路口交通流的影响.数值模拟结果表明,每条路段都出现串现象,其斜率和宽度可再现流量的大小,流量与信号灯周期、绿信比和车站位置之间存在一定的依赖关系.

2. 模型

映射模型是车辆跟驰模型的一种离散版本,可以

用来揭示多种交通现象,在数值模拟中算法简洁,适于描述复杂的交通控制问题^[21].考虑一个含信号灯的 T 形路口,如图 1.路段 A 上的公交车只能直行,其他车可以以一定的概率 P_1 右转、以概率 $1 - P_1$ 直行.路段 B 上没有公交车,所有车辆可以以概率 P_2 左转至路段 D,以概率 $1 - P_2$ 右转到路段 C.假定车辆的速度是 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,车头距为 7.5 m(即车头时距为 1 s).基于文献[22]的思想,将所有路段划分成若干个格子,格子的长度与车头距相等.由于路段 A 和路段 B 的长度不影响本文的定性结论,所以假定它们是相等的.将路径 AC 和 AE 的格子分别依次记为 $1, 2, \dots, L_0, L_0 + 1, \dots$.路段 B 的格子依次记为 $1, 2, \dots, L_0$.并设路段 A 与路段 B 相交于第 L_0 格点.在 L_0 处设置信号灯.路段 A 从起点流入的车辆依次记为 $1, 2, \dots, h, \dots$.路段 A 上公交车的比例为 p ($0 < p < 1$).路段 B 上从起点流入的车辆依次记为 $1, 2, \dots, m, \dots$.路段 A 上距离路口 S 个格点处设置了公交车站.假设公交车的停靠时间平均值为 t .当然,也可以将公交车站设置在路段 C 上距离路口 S 个格点处.

设信号灯周期为 T ,绿信比为 α .从路段 A 起点进入的车辆数是 N_1 .记 $T_1(i, j)$ 为路段 A 起点出发的第 i 辆车到达第 j 格点的时间, $T_2(i, j)$ 为路段 B 起点出发的第 i 辆车到达第 j 格点的时间,它们的演化方程如下.

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(批准号:2006CB705503)和国家自然科学基金(批准号:70521001 和 70701002)资助的课题.

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

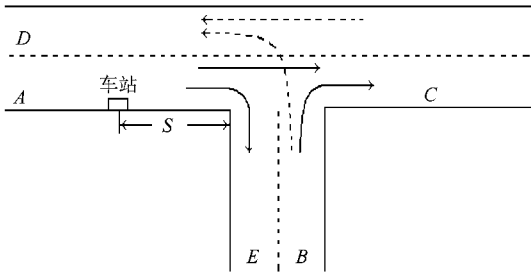


图 1 T 形路口的交通示意图

对于从路段 A 起点发出的车辆,若 j 不是车站和路口, i 不是公交车,则

$$T_1(i, j+1) = T_1(i, j) + 1. \quad (1)$$

若 j 是车站, i 是公交车,则

$$T_1(i, j+1) = T_1(i, j) + t + 1. \quad (2)$$

若 $j = L_0 - 1$, i 在 AC 方向绿灯期间直行,红灯期间等待,则

$$\begin{aligned} &T_1(i, j+1) \\ &= T_1(i, j) + 1 + (\text{int}(T_1(i, j)T) + 1)T \\ &\quad - T_1(i, j) \times H(T_1(i, j)) \\ &\quad - \text{int}(T_1(i, j)T)T - \alpha T, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\text{int}(x)$ 是大于等于 x 的最小整数, $H(x)$ 为 Heaviside 函数,

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

若 $j = L_0 - 1$, i 车右转弯,则

$$T_1(i, j+1) = T_1(i, j) + 1. \quad (4)$$

对于从路段 B 起点发出的车辆 i ,若 $j \neq L_0 - 1$,则

$$T_2(i, j+1) = T_2(i, j) + 1. \quad (5)$$

若 $j = L_0 - 1$, i 车在 AC 方向红灯期间先直行到路口并准备左转弯,则

$$\begin{aligned} &T_2(i, j+1) \\ &= T_2(i, j) + 1 + (\text{int}(T_2(i, j)T)T \\ &\quad + \alpha T + 1 - T_2(i, j)) \\ &\quad \times H(\text{int}(T_2(i, j)T)T \\ &\quad + \alpha T + 1 - T_2(i, j)). \end{aligned} \quad (6)$$

若 $j = L_0 - 1$, i 车在 AC 方向红灯期间先直行到路口并准备左转, x 为 i 车前方从路段 A 驶出的最靠近 i 的车,则

$$\begin{aligned} &T_2(i, j+1) = \max(T_2(i, j+1), \\ &\quad T_1(x, j+2)). \end{aligned} \quad (7)$$

若 $j = L_0 - 1$, i 车不通过路口且只允许 AC 方向红灯期间右转弯,则

$$\begin{aligned} &T_2(i, j+2) \\ &= T_2(i, j) + 1 + (\text{int}(T_2(i, j)T)T \\ &\quad + \alpha T + 1 - T_2(i, j)) \\ &\quad \times H(\text{int}(T_2(i, j)T)T \\ &\quad + \alpha T + 1 - T_2(i, j)). \end{aligned} \quad (8)$$

若 $j = L_0 - 1$, i 车不通过路口且允许任意时刻右转弯,则

$$T_2(i, j+2) = T_2(i, j) + 1. \quad (9)$$

若 $j = L_0 - 1$, x_1 为 i 车前面从路段 A 驶出的最靠近 i 的车, x_2 为 i 车前面从路段 B 驶出的最靠近 i 的车,则

$$\begin{aligned} &T_2(i, j+2) = \max(T_2(i, j+2), \\ &\quad T_1(x_1, j+3), \\ &\quad T_2(x_2, j+3)). \end{aligned} \quad (10)$$

若 $j < L_0$,则

$$\begin{aligned} &T_k(i, j+1) = \max(T_k(i, j+1), \\ &\quad T_k(i-1, j+2)), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $k = \{1, 2\}$,若 i 为路段 A 的车辆,2,若 i 为路段 B 的车辆}.

若 $j \geq L_0$, x_1 为 i 车前面从路段 A 驶出的最靠近 i 的车, x_2 为 i 车前面从路段 B 驶出的最靠近 i 的车,则

$$\begin{aligned} &T_1(i, j+1) = \max(T_1(i, j+1), \\ &\quad T_1(x_1, j+2), \\ &\quad T_2(x_2, j+2)). \end{aligned} \quad (12)$$

若 $j \geq L_0$, x_1 为 i 车前面从路段 A 驶出的最靠近 i 的车, x_2 为 i 车前面从路段 B 驶出的最靠近 i 的车,则

$$\begin{aligned} &T_2(i, j+1) = \max(T_2(i, j+1), \\ &\quad T_1(x_1, j+2), \\ &\quad T_2(x_2, j+2)). \end{aligned} \quad (13)$$

3. 数值模拟

考虑路段 C 上 n 格点处的流量,基于文献 [17] 的思想,令

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{r_1}{T_1(a, n) - T_1(a_0, n)}, \\ q_2 &= \frac{r_2}{T_2(b, n) - T_2(b_0, n)}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 q_1 表示路段 A 与 B 的车开始互相影响时, 路段 A 驶过路口的车在第 n 格点的平均流量, q_2 表示路段 B 的右转车在第 n 格点的平均流量. a_0 表示路段 A 驶出的第一辆直行且最早受路段 B 的车流影响的车, a 表示从路段 A 起点驶出的最后一辆直行且受路段 B 的车流影响的车, r_1 表示从 a_0 到 a 的直行车辆数; b_0 表示路段 B 起点驶出的最接近 a_0 到达路口 L_0 并右转的车, b 表示从路段 B 起点驶出的最接近 a 到达第 n 格点的车, r_2 表示从 b_0 到 b 所有右转的车辆数.

假设路段 A, B, C 的车速为 1 格每秒, 初始条件为 $T_1(i, 1) = i, T_2(i, 1) = 2i$, 即路段 A 起点的车头时距为 1, 路段 B 起点的车头时距为 2. 模拟中采用全开放边界. 设公交车比例为 $p = 0.05$, 都从路段 A 起点进入. 考虑以下四种情形下的车流状况.

1) 公交车站位于 A 路段上, 即信号灯的上游, 路段 B 的右转车辆 i 到达 $L_0 - 1$ 时可以在不影响直行车辆的任何时刻按照方程 (9) 和 (10) 右转, 即 AC 方向红灯时, 它可以随时右转, AC 方向绿灯时, 只要路口 L_0 无车或路口 $L_0 - 1$ 处的车要右转且路段 C 上 $L_0 + 1$ 有空位, 则 i 可以直接右转至路段 C 上的 $L_0 + 1$ 位置. 路段 B 的左转车辆只能在路径 AC 亮红灯时按方程 (6) 前进至 L_0 后左转至路段 D .

2) 公交车站位于信号灯上游, 路段 B 的右转车辆 i 到达 $L_0 - 1$ 时只能在路径 AC 方向亮红灯时按方程 (8) 右转至路段 C 上的 $L_0 + 1$ 位置.

3) 公交车站位于路段 C 上, 即信号灯的下游, 情况与 1) 相同.

4) 公交车站位于信号灯下游, 情况与 2) 相同.

模拟中设定如下参数: $P_2 = 0.3, T = 60, \alpha = 0.6, S = 20, t = 25, L_0 = 60, m = 121$ 和 $N_1 = 1000$. 固定这些参数, 改变 P_1 , 得到路段 C 上格点 n 处的 AC 路径流量 q_1 和 BC 路径流量 q_2 , 见图 2. 可以发现, 当路段 B 右转车辆较多 ($P_2 = 0.3$) 时, 车站设置在信号灯上游非常有利于路径 BC 的车辆通行, 图 2(b) 中上面两条曲线远高于下面两条曲线. 若车站设置在路段 C 上, q_2 是随 P_1 上升的, 即路段 A 的直行车辆减少, 路段 B 的车辆更容易实现右转, 如图 2(b) 中下面两条曲线所示. q_1 几乎随 P_1 线性下降, 尽管受车站位置和转弯机理的影响不大, 但仍然可以看出, 当 $P_1 \leq 0.35$ 时, 车站应该设置在信号灯上游, 当 $P_1 > 0.35$ 时, 车站应该设置在信号灯下游, 见图 2(a).

下面, 我们只研究情形 1) 和 3), 即来自路段 B 的车辆可以在不影响路径 AC 的直行车辆时完成右转, 情形 1) 表示车站在信号灯的上游, 情形 3) 表示车站在信号灯的下游. 设置模拟参数: $P_1 = 0.3, P_2 = 0.5, S = 20, t = 25$ 和 $N_1 = 1000$, 我们比较两种不同的信号控制策略, 即 $T = 60, \alpha = 0.6$ 和 $T = 120, \alpha = 0.8$. 图 3(a)(b) 分别给出了情形 1) 和情形 3) 下, 路段 A 的编号从 801 到 950 间的直行车辆 i (设首车为 i_1 , 末车为 i_2) 在路径 AC 上的位置 n 与 $T_1(i, m) - T_1(801, 2)$ 的关系, 图 3(c)(d) 分别给出了情形 1) 和情形 3) 下, 路段 B 的编号从 i_3 到 i_4 间的右转车辆 i 在 BC 上的位置 n 与 $T_2(i, m) - T_2(i_0, 2)$ 的关系, 其中 i_0 是从路段 B 起点驶出、且最接近路段 A 的 801 号车到达信号灯前一个位置的车, i_3 和 i_4 分别是路段 B 起点驶

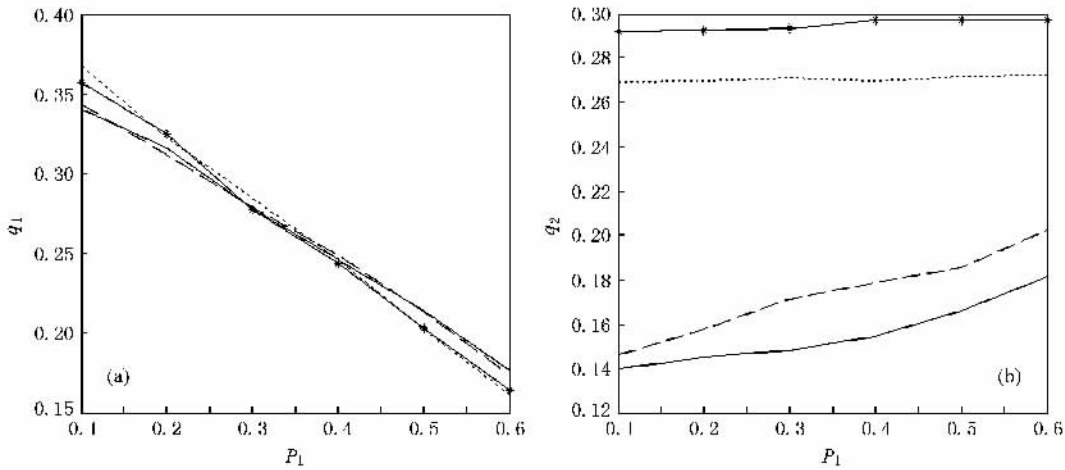


图 2 路段 C 上格点 $n(=121)$ 处的 AC 路径流量 q_1 和 BC 路径流量 q_2 与 P_1 的关系: “—”表示情形 1); “.....”表示情形 2); “- - -”表示情形 3); “- · -”表示情形 4)

出、且最接近路段 A 的 i_1 和 i_2 到达 C 路段第 121 格点的车. 在情形 1) 下, 对于路段 C 的格点 $n = 121$, 可计算得 $q_1 = 0.3107$, $q_2 = 0.2084$, $r_1 = 709$, $r_2 = 474$, $a = 997$, $b = 916$, $T_1(a_0, n) = 121$, $T_1(a, n) = 2403$, $T_2(b_0, n) = 120$, $T_2(b, n) = 2395$. 在情形 3) 下, 对于

路段 C 的格点 $n = 121$, 可计算得 $q_1 = 0.3174$, $q_2 = 0.1390$, $r_1 = 719$, $r_2 = 317$, $a = 1000$, $b = 597$, $T_1(a_0, n) = 152$, $T_1(a, n) = 2417$, $T_2(b_0, n) = 126$, $T_2(b, n) = 2406$. 显然, 情形 1) 下通过路段 C 上格点 $n = 121$ 的车辆数比情形 3) 多, 所用的时间也要少一些.

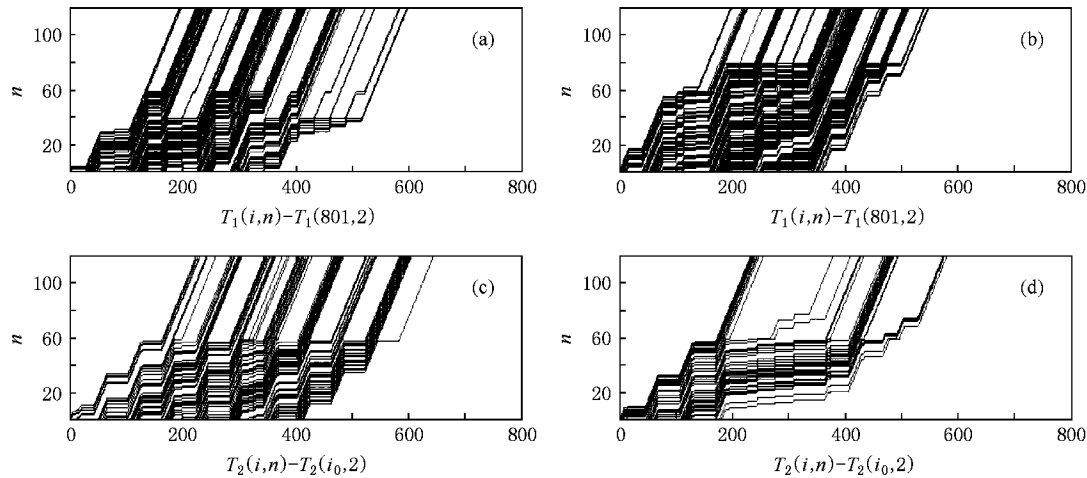


图 3 $T=60$ 和 $\alpha=0.6$ 时, AC 上车辆 i 的位置 n 与 $T_1(i, n) - T_1(801, 2)$ 的关系, BC 上车辆 i 的位置 n 与 $T_2(i, n) - T_2(i_0, 2)$ 的关系 (a) 和 (c) 表示车站在信号灯上游 (b) 和 (d) 表示车站在信号灯下游

车站位于信号灯上游时, 路径 AC 在路口和车站处出现明显的时停时走现象, 有时车辆从路口一直堵到车站并传播到上游, 车辆成“串”地离开路口, 见图 3 (a). 路径 BC 在路口处出现向后传播的车队, 见图 3 (c). 车站位于信号灯下游时, 路径 AC 在路口和车站处出现向上游传播的车队, 见图 3 (b). 路径 BC 上不仅在路口出现停车现象, 而且在车站附近也出现少量

车队, 见图 3 (d).

图 3 中, 行驶轨迹到达上端边界的车辆越多、所用时间越少, 交通状况就越好. 串越宽表示车队越长, 轨迹呈水平表示车辆处于停止状态.

图 4 给出了信号灯周期延长、绿信比 α 提高时的模拟结果, 可以明显地看出, 路段 B 的车辆等待时间显著增长. 特别是当车站位于信号灯下游时, 路径 BC

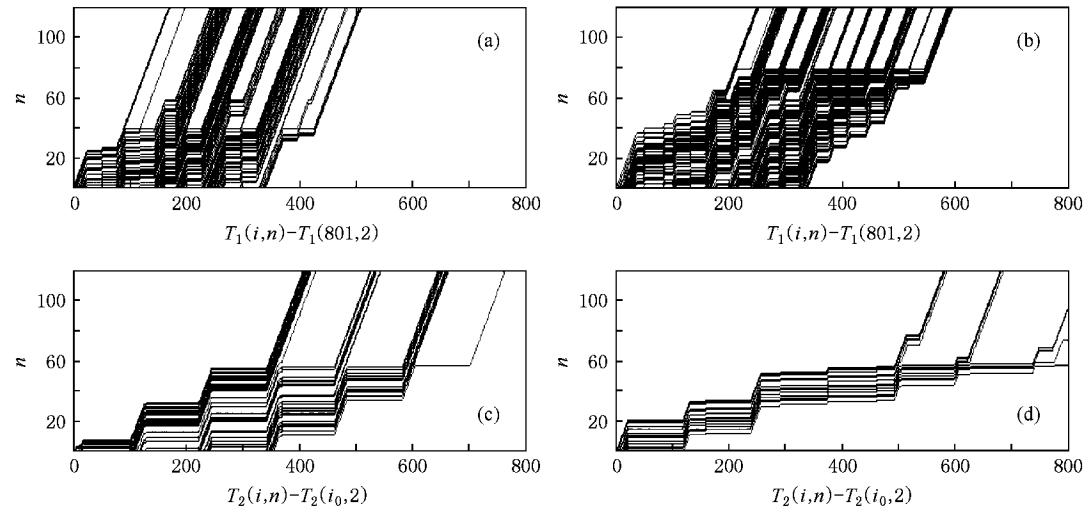


图 4 $T=120$ 和 $\alpha=0.8$ 时, AC 上车辆 i 的位置 n 与 $T_1(i, n) - T_1(801, 2)$ 的关系, BC 上车辆 i 的位置 n 与 $T_2(i, n) - T_2(i_0, 2)$ 的关系 (a) 和 (c) 表示车站在信号灯上游 (b) 和 (d) 表示车站在信号灯下游

上的车辆行驶起来非常困难.

图 5 表明,不论车站在信号灯的上游还是下游,路径 AC 的流量都随绿信比 α 的增大而上升.而对于路径 BC,若车站在上游,当 $\alpha \leq 0.5$ 时, q_2 与 α 无关,当 $\alpha > 0.5$ 时, q_2 随 α 的增加而下降.若车站在下游,

q_2 的变化趋势没有变,但 α 的临界点提前.显然,增大 α ,路段 A 的直行车辆在路口的等待时间减少,流量 q_1 就会增加,而路段 B 的右转车辆在路口的等待时间上升了,流量 q_2 必然减少.

图 6 显示,路径 AC 的流量 q_1 随周期 T 递减,车

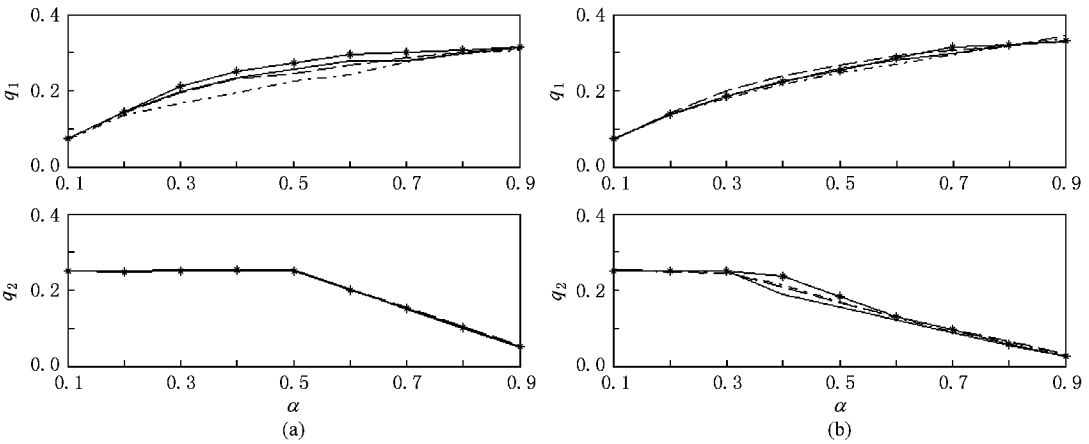


图 5 路径流量与绿信比的关系, $P_1=0.3, P_2=0.5, \mu=25$ “—”表示 $S=15$ 和 $T=60$ “- -”表示 $S=25$ 和 $T=60$ “—”表示 $S=15$ 和 $T=120$ “- -”表示 $S=25$ 和 $T=120$ (a) 车站在信号灯上游 (b) 车站在信号灯下游

站在信号灯上游时的 q_1 下降速度稍微大于在下游时的下降速度.当车站在信号灯上游时,路径 BC 的流量

q_2 与周期 T 无关,而在下游时,若绿信比 α 比较小 ($\alpha=0.4$), q_2 随 T 上升.对于 $\alpha=0.7$, q_2 不随 T 变化.

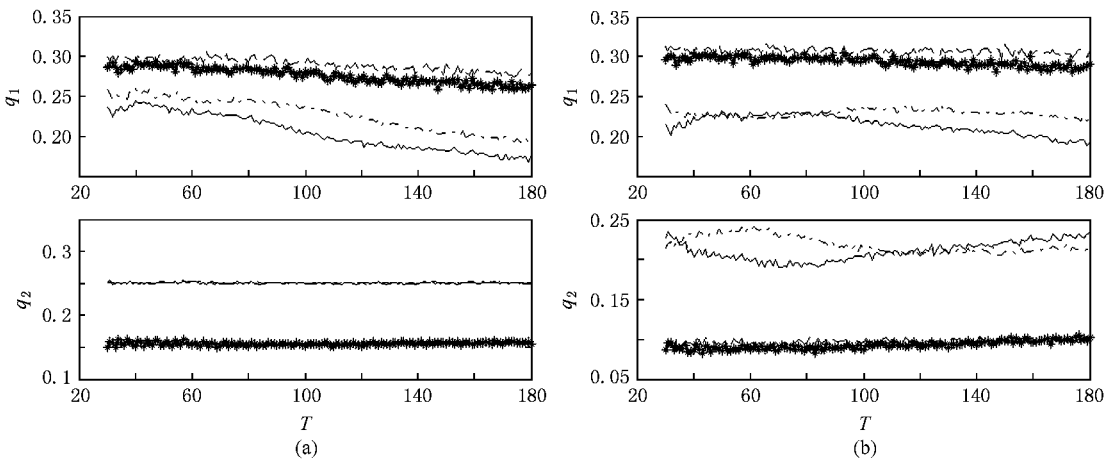


图 6 路径流量与信号周期的关系, $\mu=25$ “—”表示 $S=15$ 和 $\alpha=0.4$ “- -”表示 $S=15$ 和 $\alpha=0.7$ “—”表示 $S=25$ 和 $\alpha=0.4$ “- -”表示 $S=25$ 和 $\alpha=0.7$ (a) 车站在信号灯上游 (b) 车站在信号灯下游

图 7 表明,若车站在信号灯上游,当 $S < 59$ 时, q_1 随 S 缓慢上升,在 $S \approx 59$ 处, q_1 有一个跳跃,然后稳定下来, α 越大,跳跃幅度越大.车站位置对路径 BC 的流量 q_2 基本没有影响.若车站在信号灯下游,路径 AC 的流量先是随 S 缓慢上升,在 $S \approx 60$ 处跳跃,然后稳定下来;当绿信比 α 比较大 ($\alpha=0.7$) 时,路径 BC 的流量 q_2 也在 $S \approx 60$ 处有一个跳跃;

当绿信比 α 比较小 ($\alpha=0.4$) 时, q_2 在 $S \approx 60$ 左侧波动比较大,右侧比较平稳.

上述模拟结果说明,公交车站与路口距离较近时,容易产生相互影响,形成的阻塞容易传播到上游,使直行流量下降.车站与路口之间的距离加大后,相互作用减弱,流量上升.当距离增大到 59 以后,相互作用完全消失,流量与距离不再有关系.车

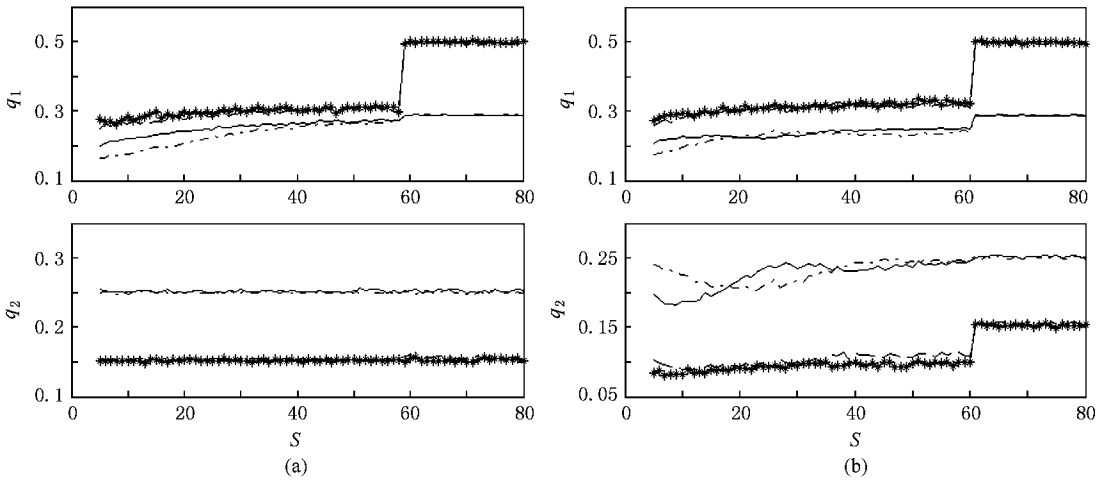


图 7 路径流量与车站位置的关系, $P_1 = 0.3, P_2 = 0.5, t = 25$ “—”表示 $T = 60$ 和 $\alpha = 0.4$ “-×-”表示 $T = 60$ 和 $\alpha = 0.7$, “—”表示 $T = 120$ 和 $\alpha = 0.4$, “- -”表示 $T = 120$ 和 $\alpha = 0.7$ (a) 车站在信号灯上游 (b) 车站在信号灯下游

站位于信号灯上游时,路口与车站之间相互作用几乎不对路径 BC 的流量产生影响.但是,当车站位于信号灯下游时,路口与车站之间的距离既对直行流量、也对路径 BC 流量产生影响.注意,我们没有对公交车比例 p 和停靠时间 t 进行灵敏性分析,可以预计, p 和 t 越大,车站与路口之间的相互作用将越严重.

4. 结 论

公交车站的位置和信号灯参数对交通流的局部影响非常大.本文利用非线性映射模型研究了信号灯周期、绿信比和公交车站位置对 T 形路口交通流的影响.数值模拟结果表明,由于信号灯和公交车站

之间的相互作用,T 形路口的交通流容易出现串现象;当允许路段 B 的车辆在不影响路径 AC 的直行车辆条件下可以进行右转时,路径 BC 的流量明显大于只能在直行红灯条件下右转时的流量.路径 AC 的流量随绿信比 α 递增,路径 BC 的流量先不随 α 变化、当 α 增大到一定值以后递减;信号周期 T 越长,越不利于路径 AC 的车辆通行,当车站位于信号灯上游时,路径 BC 的流量与 T 无关,位于下游时随 T 增大而微弱上升;车站距离路口越远越有利于各路径的车辆通行,但远到一定程度后,路口与车站之间的相互作用消失,使得流量与距离无关.这些发现对设计 T 形路口的信号灯参数和确定公交车站的位置具有重要的参考价值.

[1] Danganzo C F 1995 *Transp. Res. B* **29** 277

[2] Astarita A ,Arcavacata di Rende C S 2002 *Mathematical and Computer Modeling* **35** 643

[3] Tang T Q ,Huang H J ,Gao Z Y ,Wong S C 2007 *Physica A* **380** 481

[4] Mounce R 2006 *Transp. Res. B* **40** 779

[5] Shang P J ,Li X W ,Kamae S 2006 *Physics Lett. A* **357** 314

[6] Hossain M 1999 *Transp. Res. A* **33** 47

[7] Tang T Q ,Huang H J ,Gao Z Y 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066124

[8] Huang D W ,Huang W N 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056124

[9] Ge H X ,Dai S Q ,Dong L Y ,Xue Y 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066134

[10] Feng S W 1998 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai : Shanghai University)(in Chinese)[冯 1998 博士学位论文(上海 :上海大学)]

[11] Kerner B S 2005 *Physica A* **355** 565

[12] Davis L C 2007 *Physica A* **379** 274

[13] Jiang R ,Wu Q S ,Wang B H 2002 *Phys. Rev. E* **66** 036104

[14] Sasaki M ,Nagatani T 2003 *Physica A* **325** 531

[15] Nagatani T 2007 *Physica A* **377** 651

[16] Jiang R ,Wu Q S 2005 *Physica A* **355** 551

[17] Brockfeld E ,Barlovic R ,Schadschneider A ,Schreckenberg M 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056132

[18] Helbing D 2001 *Rev. Modern Phys.* **73** 1067

[19] Toledo B A ,Muñoz V ,Rogan J ,Tenreiro C ,Valdivia J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016107

[20] Tang T Q ,Huang H J ,Xu G ,Xue Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 56(in Chinese)[唐铁桥、黄海军、徐 刚、薛 郁 2008 物理学报 **57**

56]

[21] Han X L ,Jiang C Y ,Ge H X ,Dai S Q 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 4383 (in Chinese) [韩祥临、姜长元、葛红霞、戴世强 2007 物理学报 **56** 4383]

学报 **56** 4383]

[22] Tang T Q ,Huang H J ,Xue Y 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 4026 (in Chinese) [唐铁桥、黄海军、薛郁 2006 物理学报 **55** 4026]

Influences of signal light and bus-stop position on T-road junction traffic ^{*}

Mei Chao-Qun^{1 2)} Huang Hai-Jun^{1)†} Tang Tie-Qiao³⁾ Wang Hui-Wen¹⁾

¹⁾ *School of Economics and Management ,Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,Beijing 100191 ,China)*

²⁾ *School of Statistics ,Capital University of Economics and Business ,Beijing 100070 ,China)*

³⁾ *School of Transportation Science and Engineering ,Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,Beijing 100191 ,China)*

(Received 27 March 2008 ; revised manuscript received 16 April 2008)

Abstract

In this paper ,we apply a nonlinear map model to investigate the influences of signal light and position of bus-stop on the traffic at a T junction . The dependence of point-based average flow of routes on bus-stop position ,signal light cycle and split as well as vehicle swerve are numerically analyzed . Simulation results show that the interaction between bus-stop and signal light generates traffic clustering easily ,and there exist relationships between signal light cycle ,split ,bus-stop position and the route flows .

Keywords : traffic flow , nonlinear map model , signal control , clustering

PACC : 0565 , 0250 , 0520

^{*} Projects supported by the National " 973 " Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705503) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 70521001 ,70701002).

[†] Corresponding author. E-mail : haijunhuang@buaa.edu.cn