

# 基于马尔科夫链的短车道通行能力建模\*

余志, 许焕挺, 何兆成

中山大学智能工程学院, 广东 广州 510006

**摘要:** 交叉口进口道拓宽后形成的短车道存在因车辆排队溢出而造成阻塞的问题。考虑短车道效应的发生概率, 研究了信号交叉口短车道的通行能力计算模型。结合短车道组车辆运动的耦合性和连续性, 利用马尔科夫链描述短车道车辆在相邻相位之间的状态转移关系。结合概率论和排队论构建短车道状态转移概率矩阵, 得到短车道状态的稳态概率。同时, 基于短车道上一阶段状态的条件通行能力, 结合短车道状态概率得到短车道的稳态通行能力。最后, 通过 VISSIM 仿真软件对模型进行验证。结果表明, 模型在对短车道通行能力的计算上优于传统 HCM 方法, 与当前主流模型相比也更加精确。

**关键词:** 短车道; 通行能力; 马尔科夫链; 仿真

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 05-0032-07

## Modeling of traffic capacity of short lane based on Markov Chain

YU Zhi, XU Huanting, HE Zhaocheng

School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** Short lanes formed by the widening of an entrance at an intersection may be blocked due to overflows of vehicle queues. In the view of the occurrence probability of short lane effect, this paper studies the traffic capacity calculation model of short lane at signalized intersections. Considering the coupling and continuity of short lane group vehicle movement, this paper uses Markov Chain to describe the state transition relationship between the adjacent phases of short lane vehicle. And the steady-state probability of short lane state is obtained, combined probability theory and queuing theory to construct the probability matrix of short lane state transition. Meanwhile, the steady-state traffic capacity of the short lane is obtained based on the conditional traffic capacity of the one-stage state on the short lane and the probability of the short lane state. Finally, the model is verified by VISSIM simulation software. The results show that the model in this paper is superior to the traditional HCM method in the calculation of short lane traffic capacity and is more accurate than the current mainstream model.

**Key words:** short lane; traffic capacity; Markov Chain; simulation

交叉口一直以来都是车辆运行的瓶颈, 为了降低瓶颈带来的影响, 常使用拓宽车道的方式提高通行能力<sup>[1]</sup>。这种在交叉口处拓宽形成的车道, 因存在一定的长度限制、无法当作独立车道而被

称为短车道<sup>[2]</sup>。拓宽信号交叉口进口道是提高其通行能力的有效方法, 但短车道也是影响通行能力的潜在因素, 常导致相关车流互相影响, 甚至发生短车道排队阻塞, 这种阻塞被称为短车道效

\* 收稿日期: 2020-04-09

录用日期: 2020-04-20

网络首发日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金 (U1811463)

作者简介: 余志 (1961年生), 男; 研究方向: 智能交通系统; E-mail: stsyuz@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 何兆成 (1977年生), 男; 研究方向: 交通控制和交通信息处理; E-mail: hezhch@mail.sysu.edu.cn

应<sup>[2]</sup>。因此, 设计手册规定了短车道的最短长度<sup>[3-5]</sup>以降低短车道排队阻塞发生的概率。

短车道效应的发生是道路、交通、管理条件综合作用的结果, 为了探究短车道对交叉口交通运行的影响, Wu<sup>[6]</sup>指出传统方法和HCM对于短车道组通行能力的估计存在高估或是低估的情况, 并提出了一种基于概率论的短车道通行能力估计方法。研究表明, 带有短车道的信号控制交叉口的通行能力与短车道长度、车流比例, 以及周期时长有很大关系<sup>[7]</sup>。Wu<sup>[8]</sup>考虑交通流的随机性和排队阻塞对短车道的影响, 建立了一个理论-经验模型来计算短车道组的通行能力。马万经等<sup>[9-10]</sup>考虑相邻周期排队作用, 建立左转短车道阻塞概率和通行能力解析模型。以往的研究揭示了短车道通行能力是道路几何条件、车流比例、信号控制方案等因素综合作用的结果, 在过程中使用了基于概率的修正模型, 此类方法考虑了车辆到达及车流互阻塞的随机性, 更接近实际情况, 成为当前研究该问题的主流方法。

然而, 已有工作大多以周期为粒度, 独立研究短车道和相邻车道的短车道效应发生概率以及阻塞影响下的通行能力水平, 忽略了短车道和相邻车道车辆运动的耦合性以及连续性。由于不同流向的车辆运动在信号交叉口是根据相位进行划分的, 这种分流向车辆运动的耦合性和连续性将

导致当前相位车辆排队状态一定程度上依赖于上一相位的排队状态, 使信号交叉口的阻塞概率和通过量处于动态变化当中。针对上述问题, 本文基于概率论和马尔科夫链相关理论, 以相位为最小粒度对信号交叉口的短车道组通行能力进行了建模, 分析了其在不同交通条件和道路几何条件下的变化。

### 1 基于马尔科夫链的短车道通行能力计算模型

为不失一般性, 本文以滞后的受保护左转相位下直左短车道组进行研究, 并且左转的有效绿灯时间长于短车道最大排队清空时间, 以限制短车道最大容量。本文模型基于两个假设: 1) 车辆到达服从泊松分布; 2) 车辆均为标准小汽车。模型的计算流程图如图1所示。

#### 1.1 构建相位状态转移的马尔科夫链

根据相位设置和短车道组车辆运动情况将周期分成三个阶段: 排队阶段、直行通行和左转通行, 记为T1、T2、T3, 如图2所示。将每阶段结束时刻短车道车辆排队状态视为该阶段状态, 状态空间为 {B, O, S}。其中, B表示直行阻塞左转通行, O表示左转阻塞直行通行, S表示不阻塞, 各状态如图3所示。

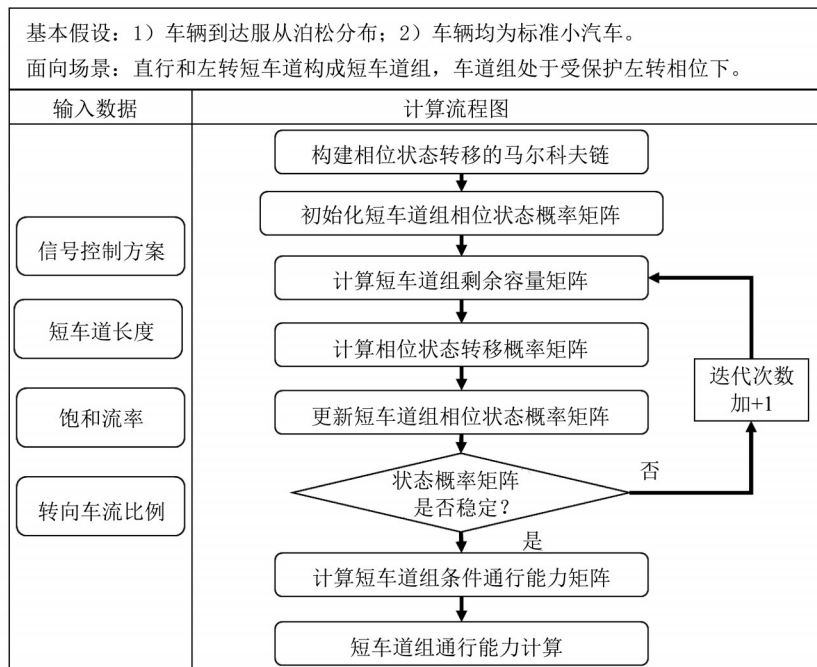


图1 基于马尔科夫链的短车道组通行能力计算流程图

Fig. 1 Flow chart of traffic capacity calculation of short lane group based on Markov Chain

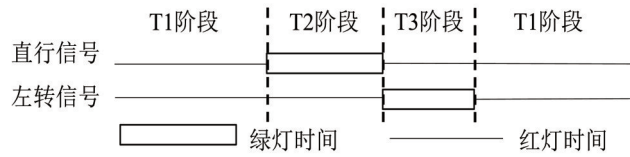


图2 信号控制方案周期划分

Fig. 2 Division of signal control scheme

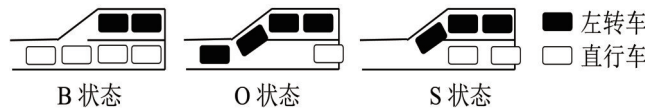


图3 排队状态示意图

Fig. 3 The system status of queue in short lanes

考虑到每个相位阶段的车辆排队状态只取决于上一阶段的状态，为

$$P(s_{T_i} | s_{T_{i-1}}, s_{T_{i-2}}) = P(s_{T_i} | s_{T_{i-1}}), \quad (1)$$

其中  $P(s_{T_i})$  表示短车道处于  $s_{T_i}$  状态的概率， $s_{T_i}$  表示  $T_i$  阶段的状态， $s_{T_i} \in \{B, O, S\}$ 。

因此，相邻阶段之间状态转移过程可以构建成为一条马尔科夫链。对于本模型的马尔科夫链来说，每经过三个阶段为一次迭代，使用  $P^{(k)}$  表示第  $k$  次迭代计算时的短车道组相位状态概率矩阵，矩阵每一行元素表示一个阶段不同状态的概率，每一列元素表示一种状态在不同阶段的概率。矩阵元素取值范围为  $[0, 1]$ ，且每一行元素满足  $\sum_j p_{ij}^{(k)} = 1$ ， $P^{(0)}$  是满足该约束的随机矩阵。

### 1.2 剩余容量矩阵

定义剩余容量为短车道容量与短车道范围排队车辆数的差值，根据车道可以分成左转车道剩余容量和直行车道剩余容量。第  $k$  次迭代时，短车道组左转车道的剩余容量矩阵  $N_L^{(k)}$  为

$$N_L^{(k)} = \begin{bmatrix} n_{L11}^{(k)} & n_{L12}^{(k)} & n_{L13}^{(k)} \\ n_{L21}^{(k)} & n_{L22}^{(k)} & n_{L23}^{(k)} \\ n_{L31}^{(k)} & n_{L32}^{(k)} & n_{L33}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $n_{Lij}^{(k)}$  为左转车道在第  $i$  阶段处于第  $j$  状态的剩余容量。类似的，第  $k$  次迭代时直行车道的剩余容量矩阵  $N_T^{(k)}$  为

$$N_T^{(k)} = \begin{bmatrix} n_{T11}^{(k)} & n_{T12}^{(k)} & n_{T13}^{(k)} \\ n_{T21}^{(k)} & n_{T22}^{(k)} & n_{T23}^{(k)} \\ n_{T31}^{(k)} & n_{T32}^{(k)} & n_{T33}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

**1.2.1 T1 阶段剩余容量计算** 在 T1 阶段时，直行和左转车辆都处于排队状态，如果在该阶段结束的时候，处于 S 状态，即车辆顺畅通行，则此时

短车道剩余容量等于短车道容量  $N$  减去平均到达车辆数。到达车辆数服从泊松分布，且达到车辆数小于等于  $N$ ，所以短车道剩余容量为

$$\begin{aligned} n_{L13}^{(k)} &= N - E_L(X, g_1) = N - \sum_{x=0}^N x f(x, g_1) \\ &= N - \sum_{x=0}^N x \frac{x e^{(s_L g_1)} (s_L g_1)^x}{x!}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $E_L(X, g_1)$  表示左转车道到达车辆数期望， $g_1$  表示 T1 阶段绿灯时间； $s_L$  表示左转车辆到达率，由上游车道车辆到达率  $\lambda$  乘上左转车流比例  $\beta_L$  得到，即  $s_L = \lambda \beta_L$ 。同理，直行车道剩余容量为

$$\begin{aligned} n_{T13}^{(k)} &= N - E_T(X, g_1) = N - \sum_{x=0}^N x f(x, g_1) \\ &= N - \sum_{x=0}^N x \frac{x e^{(s_T g_1)} (s_T g_1)^x}{x!}. \end{aligned} \quad (5)$$

如果 T1 阶段结束的时候，处于 B 状态，即直行车辆排队阻塞左转；T1 阶段的 B 状态有可能是从 T3 阶段的 B 状态，也有可能是从 T3 阶段的 S 状态演变而来，其中 T3 阶段的 B 状态和 S 状态的概率为  $p_{31}^{(k-1)}$  和  $p_{33}^{(k-1)}$ 。无论什么状态，T1 阶段直行车道的剩余容量  $n_{T11}^{(k)} = 0$ 。对左转车道来说，如果从 B 状态演变而来，则 T1 剩余容量等于 T3 阶段 B 状态的剩余容量；若从 S 状态演变而来，则 T1 剩余容量等于 T3 阶段 S 状态的剩余容量减去 T1 阶段期间在直行阻塞左转前到达的左转车辆数。因此，短车道剩余容量为

$$\begin{aligned} n_{L11}^{(k)} &= p_{31}^{(k-1)} \times n_{L31}^{(k-1)} \\ &+ p_{33}^{(k-1)} \times \left( n_{L33}^{(k-1)} - n_{T33}^{(k-1)} \times \frac{\beta_L}{\beta_T} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $n_{L31}^{(0)} = N$ ， $n_{L33}^{(0)} = N$ ， $\beta_L$  为左转车流比例， $\beta_T$  为

直行车流比例, 且  $\beta_L + \beta_T = 1$ .

如果 T1 阶段结束的时候, 处于 O 状态, 即左转车排队阻塞直行, 该状态只能由 T3 阶段的 S 状态演变而来。此时, 左转车道剩余容量  $n_{L12}^{(k)} = 0$ 。直行车道剩余容量受上一阶段状态影响, 等于 T3 阶段直行车道剩余容量减去 T1 阶段到达直行车辆数。直行车道剩余容量为

$$n_{T12}^{(k)} = n_{T33}^{(k-1)} - n_{L33}^{(k-1)} \times \frac{\beta_T}{\beta_L}, \quad (7)$$

其中  $n_{T33}^{(0)} = N$ 。

**1.2.2 T2 阶段剩余容量计算** T2 阶段出现 B 状态的概率为 0, 此时的短车道和直行车道的剩余容量都为  $N$ , 且  $n_{T21}^{(k)} = N, n_{L21}^{(k)} = N$ 。

T2 阶段结束时的状态为 O 状态时, 短车道的剩余容量  $n_{L22}^{(k)} = 0$ , 直行车道的剩余容量  $n_{T22}^{(k)} = N$ 。

若 T2 阶段结束的时候状态为 S 时, 直行车道的剩余容量  $n_{T23}^{(k)} = N$ , 短车道剩余容量等于 T1 阶段的平均剩余容量  $N$  减去 T2 阶段平均到达左转车辆数。到达车辆数服从泊松分布, 且达到车辆数小于等于  $N$ , 所以短车道剩余容量为

$$\begin{aligned} n_{L23}^{(k)} &= N - E_L(X, g_2) = N - \sum_{x=0}^N x f(x, g_2) \\ &= N - \sum_{x=0}^N x \frac{x e^{-(s_L g_2)} (s_L g_2)^x}{x!}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$N = p_{11}^{(k)} n_{L11}^{(k)} + p_{12}^{(k)} n_{L12}^{(k)} + p_{13}^{(k)} n_{L13}^{(k)}, \quad (9)$$

其中  $g_2$  表示 T2 阶段的绿灯时间。

**1.2.3 T3 阶段剩余容量计算** 类似 T2 阶段, T3 阶段出现 O 状态的概率为 0,  $n_{T32}^{(k)} = N, n_{L32}^{(k)} = N$ ; T3 阶段结束时的状态为 B 状态时, 直行车道剩余容量  $n_{T31}^{(k)} = 0$ , 短车道的剩余容量  $n_{L31}^{(k)} = N$ ; 若 T3 阶段结束的时候状态为 S 时, 短车道的剩余容量  $n_{L33}^{(k)} = N$ , 直行车道剩余容量为

$$\begin{aligned} n_{T33}^{(k)} &= N - E_T(X, g_3) = N - \sum_{x=0}^N x f(x, g_3) \\ &= N - \sum_{x=0}^N x \frac{x e^{-(s_T g_3)} (s_T g_3)^x}{x!}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$N = p_{21}^{(k)} n_{T21}^{(k)} + p_{22}^{(k)} n_{T22}^{(k)} + p_{23}^{(k)} n_{T23}^{(k)}, \quad (11)$$

其中  $g_3$  表示 T3 阶段的绿灯时间。

### 1.3 马尔科夫链的转移概率和转移矩阵

第  $k$  次迭代过程中, 从上阶段到  $T_i$  阶段状态转移概率矩阵用  $A_i^{(k)}$  表示。矩阵每个要素表示基于上阶段某个状态下本阶段状态的概率, 且

$$A_i^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$a_{ij} = p(s_i = p_i | s_{t-1} = q_j), \quad p_i, q_j \in [B, O, S], \quad (13)$$

其中  $\sum_j a_{ij} = 1$ 。

**1.3.1 T3 阶段到 T1 阶段转移矩阵** T1 阶段直行车和左转车均排队, T1 阶段结束时处于 B 状态的概率等价于直行车道的到达车辆数先超过其剩余容量的概率, 为

$$\begin{aligned} a_{i1} &= P(X_L \leq n_{L3i}^{(k)}) \cap P(X_T > n_{T3i}^{(k)}) \\ &= \sum_{i=n_{T3i}^{(k)}+1}^{n_{T3i}^{(k)}+n_{L3i}^{(k)}+1} P(x=i) \sum_{j=n_{L3i}^{(k)}}^i C_i^j \beta_T^{j+1} (1-\beta_T)^{i-j}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $P(X_L \leq n_{L3i}^{(k)})$  表示左转车辆到达数小于  $n_{L3i}^{(k)}$  的概率。

T1 阶段结束时处于 O 状态的概率为

$$\begin{aligned} a_{i2} &= P(X_L > n_{L3i}^{(k)}) \cap P(X_T \leq n_{T3i}^{(k)}) \\ &= \sum_{i=n_{L3i}^{(k)}+1}^{n_{T3i}^{(k)}+n_{L3i}^{(k)}+1} P(x=i) \sum_{j=n_{L3i}^{(k)}}^i C_i^j \beta_T^{i-j} (1-\beta_T)^{j+1}. \end{aligned} \quad (15)$$

T1 阶段结束时, 处于 S 状态的概率为

$$a_{i3} = 1 - a_{i1} - a_{i2}. \quad (16)$$

**1.3.2 T1 阶段到 T2 阶段转移矩阵** T2 阶段处于直行车通行和左转车排队相位下, 因此 T2 阶段结束时处于 B 状态的概率为 0, 即  $a_{i1} = 0$ 。

T2 阶段结束时处于 O 状态的概率, 等价于左转车道到达车辆数超过其剩余容量的概率, 为

$$\begin{aligned} a_{i2} &= P(X_L > n_{L1i}^{(k)}) \\ &= \sum_{i=n_{L1i}^{(k)}+1}^{\infty} P(x_{g_2} = i) \sum_{j=n_{L1i}^{(k)}}^i C_i^j \beta_T^{i-j} (1-\beta_T)^{j+1}. \end{aligned} \quad (17)$$

T2 阶段结束时处于 S 状态的概率为

$$a_{i3} = 1 - a_{i1} - a_{i2}. \quad (18)$$

**1.3.3 T2 阶段到 T3 阶段转移矩阵** T3 阶段直行车排队和左转车通行, 因此 T3 阶段结束时处于 O 状态的概率为 0, 即  $a_{i2} = 0$ 。

T3 阶段结束时处于 O 状态的概率为

$$\begin{aligned} a_{i1} &= P(X_T > n_{T2i}^{(k)}) \\ &= \sum_{i=n_{T2i}^{(k)}+1}^{\infty} P(x_{g_3} = i) \sum_{j=n_{T2i}^{(k)}}^i C_i^j \beta_T^{j+1} (1-\beta_T)^{i-j}. \end{aligned} \quad (19)$$

T3 阶段结束时处于 S 状态的概率为

$$a_{i3} = 1 - a_{i1} - a_{i2}. \quad (20)$$

### 1.4 相位状态概率矩阵的更新

根据上述计算得到的转移概率矩阵进行相位状态概率矩阵的更新, 更新公式为

$$P^{(k+1)} = P^{(k)} \times A_1^{(k)} \times A_2^{(k)} \times A_3^{(k)}. \quad (21)$$

更新停止条件为

$$\sum_{i,j} (P^{(k+1)}(i,j) - P^{(k)}(i,j))^2 \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = 0.01. \quad (22)$$

### 1.5 条件通行能力矩阵的计算

条件通行能力是指考虑上一阶段状态下本阶段处于某状态时的通行能力。对于左转通行能力来说,其通行相位处于 T3 阶段,因此其条件通行能力矩阵元素为考虑 T2 阶段各状态下的通行能力,为

$$C_L^{(k)} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

其中矩阵每一列表示 T3 阶段的一种状态,每一行表示 T2 阶段的一种状态。

因为 T3 阶段不会出现 O 状态,因此  $C_L^{(k)} \cdot c_{i2} = 0$ 。对于 T3 阶段的 S 状态,车辆顺畅通行。此时,条件通行能力为上阶段结束时短车道排队车辆数加上本阶段能够通过的车辆数,即

$$\begin{aligned} C_L^{(k)} \cdot c_{i3} &= (N - n_{l2i}^{(k)}) + E_L(X, t) \\ &= (N - n_{l2i}^{(k)}) + E_L(X, g_3 - \frac{N - n_{l2i}^{(k)}}{\lambda}) \\ &= (N - n_{l2i}^{(k)}) + \sum_0^{\infty} \frac{x e^{-(s_L t)} (s_L t)^x}{x!}. \end{aligned} \quad (24)$$

但 T3 阶段处于 B 状态时,短车道因为被阻塞无法充分利用。此时,通行能力由上阶段结束时短车道排队车辆数和本阶段短车道到达车辆数两部分组成,为

$$C_L^{(k)} \cdot c_{i1} = (N - n_{l2i}^{(k)}) + n_{T2i}^{(k)} \frac{\beta_L}{\beta_T}. \quad (25)$$

同理,直行车道条件通行能力矩阵为

$$C_T^{(k)} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

且

$$C_T^{(k)} \cdot c_{i1} = 0, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} C_T^{(k)} \cdot c_{i3} &= (N - n_{T1i}^{(k)}) + E_T(X, t) \\ &= (N - n_{T1i}^{(k)}) + E_T(X, g_2 - \frac{N - n_{T1i}^{(k)}}{\lambda}) \\ &= (N - n_{T1i}^{(k)}) + \sum_0^{\infty} \frac{x e^{-(s_T t)} (s_T t)^x}{x!}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$C_T^{(k)} \cdot c_{i2} = (N - n_{T1i}^{(k)}) + n_{L1i}^{(k)} \frac{\beta_T}{\beta_L}. \quad (29)$$

### 1.6 通行能力计算

根据相位状态概率矩阵和条件通行能力矩阵,可以计算短车道组的通行能力。左转通行能力和直行通行能力分别为

$$C_l = \|(P^{(k)}(2, :) \times C_L^{(k)}) \cdot P^{(k)}(3, :)\|, \quad (30)$$

$$C_t = \|(P^{(k)}(1, :) \times C_T^{(k)}) \cdot P^{(k)}(2, :)\|. \quad (31)$$

## 2 模型验证

为了验证模型合理性和准确性,本文使用 VISSIM 仿真工具进行场景模拟和仿真。选取广州市猎德大道和花城大道交叉口的东进口作为试验对象。试验前,使用晚高峰交叉口的到达率和通过量对仿真场景进行标定工作。试验场景采取先直行后左转的相位配置方式,信号控制方案的周期为 165 s,直行相位的时间为 38 s,左转相位时长为 22 s。交通流参数配置中车辆饱和流率为 0.6 pcu/s,车辆排队启动时间为 2 s。

记本文模型为模型 1,设置对照模型进行对比,记对照模型为模型 2。对照模型不使用马尔科夫链计算阻塞概率,根据公式 (31) 计算直行车道阻塞概率为

$$\begin{aligned} P_T &= P(X_L > N) \\ &= \sum_{i=N+1}^{\infty} P(x_{g3} = i) \sum_{j=N}^i C_i \beta_T^{i-j} (1 - \beta_T)^{j+1}, \end{aligned} \quad (32)$$

左转车道阻塞概率的计算同理。

### 2.1 不同交通需求模式下的模型验证

交通需求模式在本研究中体现在短车道车流比例上,因此本节研究车流比例下的通行能力水平。根据短车道实际的几何条件,设置短车道容量为 8 pcu,不同车流比例下的通行能力如图 4 所示。

由图 4 (a) 可以看出,模型计算结果在不同需求比例下都高于仿真值,但两者整体趋势相同,且相对误差在 10% 以下。经秩和检验可知,在 95% 置信水平下模型与仿真结果无显著性差异。从图 4 (b) 和 (c) 可看出,相较于 HCM 计算结果,模型 1 和模型 2 短车道组的左转通行能力和直行通行能力都与仿真值的变化趋势相同,且数值上更加接近。对模型 1 与仿真结果进行秩和检验,结果表明,在 95% 置信水平下,模型 1 的左转和直行通行能力与仿真结果无显著性差异。虽然模型 1 和模型 2 整体上误差较为接近,但从左转和直行通行能力的误差上看,明显模型 2 的误差高于模型 1。

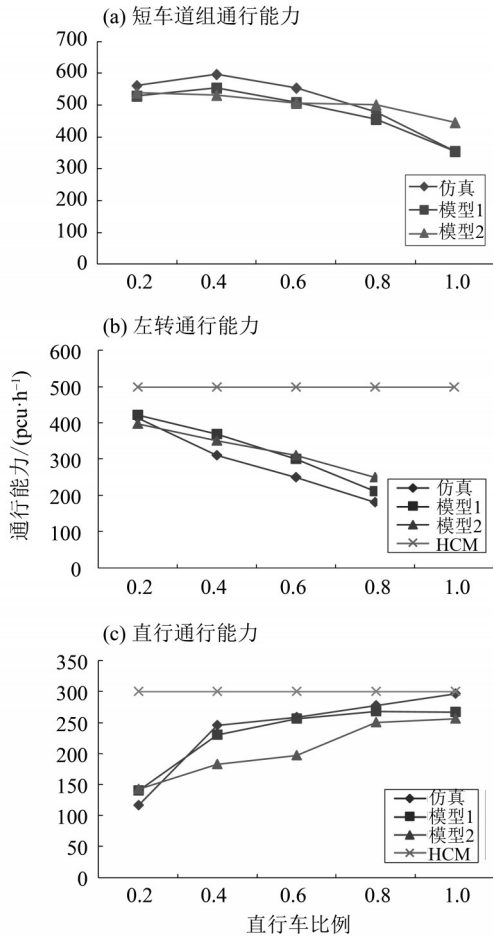


图 4 短车道车流比例与通行能力的关系  
 Fig. 4 Relationship between flow ratio and traffic capacity of short lanes

2.2 不同短车道几何条件的模型验证

短车道的几何条件变化体现在短车道容纳的标准小车数。因此, 本节根据实测数据, 设置直行需求比例为 0.6, 通过调整短车道的容量来验证本文模型, 不同短车道容量下通行能力如图 5 所示。

由图 5 (a) 可以看出, 短车道组通行能力随着短车道车容量的增加而增加, 模型与仿真值整体趋势相同, 且短车道通行能力模型和仿真值相对误差在 10% 以下。经秩和检验可知, 在 95% 置信水平下模型与仿真结果无显著性差异。从图 5 (b) 和 (c) 可看出, 模型 1 和模型 2 短车道组的左转通行能力和直行通行能力都与仿真值的变化趋势相同, 且均优于 HCM 计算结果。对模型 1 进行秩和检验, 在 95% 置信水平下, 左转和直行通行能力在模型与仿真结果上都无显著性差异。虽然模型 2 在整体上的准确性比模型 1 高, 但是这种准确性是建立在对直行通行能力的高估和左转通行

能力的低估之上。从直行通行能力和左转通行能力上观察, 可以发现模型 1 在两者的准确性都高于模型 2。

本节通过将本文模型在不同需求比例和短车道几何条件下与仿真进行对比, 得知: 基于标定后的仿真运行结果, 本模型已有较高的准确性, 在整体和部分上均能够反映实际的通行能力水平。同时, 通过与不考虑相位状态转移的模型进行对比, 发现本文模型能够在直行和左转通行能力上具有更高的拟合效果, 证明了本文方法的有效性。

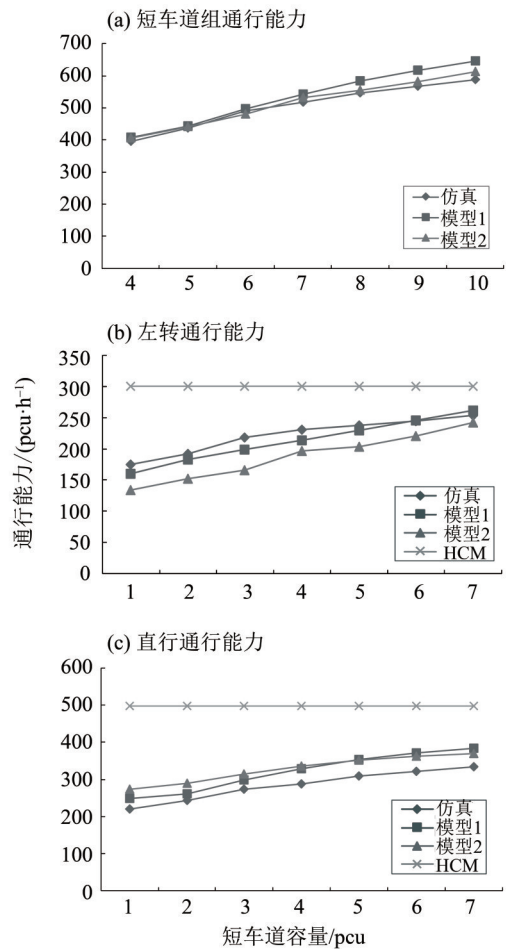


图 5 短车道容量与通行能力的关系  
 Fig. 5 Relationship between storage and traffic capacity of short lanes

3 结 论

本文提出了一个基于马尔科夫链的短车道通行能力模型。考虑短车道阻塞效应发生的随机性和动态性, 研究不同需求比例和短车道几何条件下的模型准确性和短车道通行能力特点, 得到以下结论:

1) 从需求比例和短车道几何条件来看, 本文提出的模型能够比较准确地反映短车道组的通行能力, 使用马尔科夫链拟合短车道组状态的动态转移过程是可行的。

2) 当前相位的阻塞概率确实受到前一相位状态的影响, 考虑相位的状态转移有助于得到更加

准确的短车道组通行能力。

3) 在短车道组通行能力计算过程中, 车流需求比例比短车道容量对结果影响更大。在实际应用过程中, 可以考虑控制交叉口的转向需求, 来获得较高的通行能力。

#### 参考文献:

- [1] SHIN B Y. Special provisions for left turns at signalized intersections to increase capacity and safety[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1997, 31(1):95-109.
- [2] 杨晓光, 赵靖, 曾滢, 等. 短车道对信号交叉口通行能力影响研究[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(12): 151-156.  
YANG X G, ZHAO J, ZENG Y, et al. Research of impact of short lane on signalized intersection capacity [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(12):151-156.
- [3] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). *Handbook of civil engineering* [M]. Tokyo: Technical Paper Publishing Co. Ltd, 1989.
- [4] Transportation Association of Canada. *Geometric design guide for Canadian roads* [M]. Ottawa: Transportation Association of Canada, 1999.
- [5] 杨晓光, 等. *城市道路交通设计指南* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
YANG X G, et al. *Manual of urban traffic design* [M]. Beijing: China Communications Publishing & Media Management Co., Ltd., 2004.
- [6] WU N. Capacity of shared-short lanes at unsignalized intersections [J]. *Transportation Research (Part A)*, 1999, 33(3/4):255-274.
- [7] TIAN Z, WU N. Probabilistic model for signalized intersection capacity with a short right-turn lane [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(3):205-212.
- [8] WU N. Total approach capacity at signalized intersections with shared and short lanes: generalized model based on a simulation study [C]// *The Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, 2007:19-26.
- [9] 马万经, 陆艳, 安琨, 等. 短车道信号控制交叉口通行能力概率模型 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11):1641-1646.  
MA W J, LU Y, AN K, et al. Probabilistic model for signalized intersection capacity with short lanes [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2012, 40(11):1641-1646.
- [10] 马万经, 刘焯, 刘好德, 等. 左转短车道对信控交叉口最大通过量影响研究 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(6):267-278.  
MA W J, LIU Y, LIU H D, et al. Impact of short left-turn lane on maximum throughput of signalized intersection [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(6):267-278.

(责任编辑 王海蓉)