

# 短车道信号控制交叉口通行能力概率模型

马万经<sup>1</sup>, 陆艳<sup>1</sup>, 安琨<sup>2</sup>, 赵靖<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港 999077)

**摘要:** 针对短车道信号控制交叉口, 提出考虑不同流向相互阻塞概率的通行能力计算模型, 该模型克服了以往交叉口通行能力计算模型中对交叉口短车道影响考虑不足的缺陷. 根据短车道条件下不同交通流的相互阻塞特征, 将交叉口短车道分为三类. 基于车流到达随机性, 考虑相邻周期排队状态的相互作用, 将阻塞过程划分为不阻塞、可能阻塞、阻塞后三个阶段, 建立了通行能力计算模型. 基于实测数据标定后的微观仿真分析表明, 相对于 HCM (Highway Capacity Manual) 模型, 该模型计算结果能够相对更真实地反映短车道信号控制交叉口通行能力. 针对短车道长度、短车道数目, 绿信比和周期长度的参数敏感性分析, 进一步揭示了在不同流量水平下短车道对交叉口通行能力的影响.

**关键词:** 通行能力; 短车道; 阻塞概率; 信号控制交叉口

**中图分类号:** U491

**文献标识码:** A

## Probabilistic Model for Signalized Intersection Capacity with Short Lanes

MA Wanjing<sup>1</sup>, LU Yan<sup>1</sup>, AN Kun<sup>2</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** The paper presents a theoretical model for estimating the capacity of signalized intersections with short lanes. The proposed model overcomes a shortcoming of current estimate models, which ignores the impacts of various short lanes. Three kinds of short lanes scenarios are allocated according to the characteristics of congestion firstly. The blockage process is divided into three stages including no blockage, probable blockage and after blockage. Finally, the calculation model for capacity of lane group is established and tested with the field data by simulation method. The intensive sensitive analysis on the length and number of the short lane, the split and cycle length reveal the impacts of short lanes on

the capacity of intersection under different traffic flow levels.

**Key words:** traffic capacity; short lane; probability of blockage; signalized intersection

短车道(short lane)一般是指有长度限制却无法当作一条独立车道进行处理的车道, 与其相对应的是独立车道(exclusive lane)或无长度限制车道(unlimited length lane)<sup>[1]</sup>. 当道路用地空间受到某些因素限制, 且车道需要拓宽时, 就会形成短车道, 如在交叉口进口道处. 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, 常导致相关车流相互影响, 甚至发生短车道排队阻塞. 这种情况下, 应用一些常用模型(如 HCM (highway capacity manual) 模型)估算交叉口通行能力, 估算值往往偏大, 这将直接影响交叉口交通设计、控制方案的优化和评价. 因而需要建立相应的模型来准确计算存在短车道时交叉口的通行能力.

短车道下交叉口通行能力的计算方法早期体现在德国通行能力手册<sup>[2]</sup>, 澳大利亚 ARRB (assassination records review board) 的通行能力和信号配时的分析报告<sup>[3]</sup>中. 此类方法对短车道效应是否发生的界定采用固定判断指标, 并未考虑交通流的真实的随机到达情况. Tian 等<sup>[2]</sup>考虑了短车道排队长度和发生排队阻塞的随机性, 针对右转短车道提出了通行能力的概率修正模型. 在此基础上, 针对左转短车道, 一些学者通过考虑交通到达随机性影响, 研究了最佳的短车道长度确定方法和交通安全性等一系列问题<sup>[4-7]</sup>. 但这些研究缺乏对不同短车道类型及相应交通流之间影响的深入分析. 在前期研究建立的模型中<sup>[8]</sup>, 也缺乏不同相序条件下, 不同

流向排队状态及其对后续周期运行状态影响的深入分析,而这些因素都对短车道通行能力有显著的影响.

本文考虑车辆到达的随机性、车道划分和信号相序引起的排队阻塞概率和不同流向车流的相互影响,以及相邻周期排队状态的相互作用,将阻塞过程划分为三个阶段(不阻塞、可能阻塞、阻塞后),并对每个阶段的开始时刻进行分析,从而得出各阶段各车道通过的车辆数,推导出通行能力计算模型.最后基于实际数据和仿真验证了本文模型相对于 HCM 模型的准确性,得到了短车道影响下进口道饱和流率降低的主要原因以及在不同交通和道路几何条件下短车道对通行能力的影响.研究对于准确计算交叉口通行能力和进行交叉口的渠化及信号配时的研究和应用具有借鉴价值与意义.

1 短车道下通行能力的计算原理

1.1 不同类型短车道阻塞特征

根据交叉口几何特征、车道功能划分、短车道范围车道数和路段车道数的不同,交叉口的短车道可以划分为如下 3 类:

(1) 双流向互阻塞短车道,如图 1a. 即一旦直行或左转任意一股车流排队溢出短车道时,另一股车流必然被阻塞.

(2) 单流向阻塞短车道,如图 1b. 即路段有多个车道,且有一个流向为完全短车道(即没有路段车道直接与短车道相连接),另一个流向为非完全短车道(即有 2 个及以上路段车道与短车道区域车道相连接). 如图 1b 所示,当左转排队溢出时,直行车流可通过另一个车道进入短车道区域;而当直行车流排队溢出时,则左转被完全阻塞.

(3) 互不阻塞短车道,如图 1c. 当直行和左转短车道各有 1 条以上的路段车道与之相连接时,任意流向排队溢出均不会对另一流向形成阻塞.

1.2 通行能力计算原理

在交叉口信号配时方案和短车道类型已知的情 况下,短车道对交叉口通行能力的影响直接取决于短车道的利用情况以及不同流向交通流的阻塞情况. 因此,交叉口通行能力应为短车道阻塞和非阻塞情况下通行能力的概率均值.

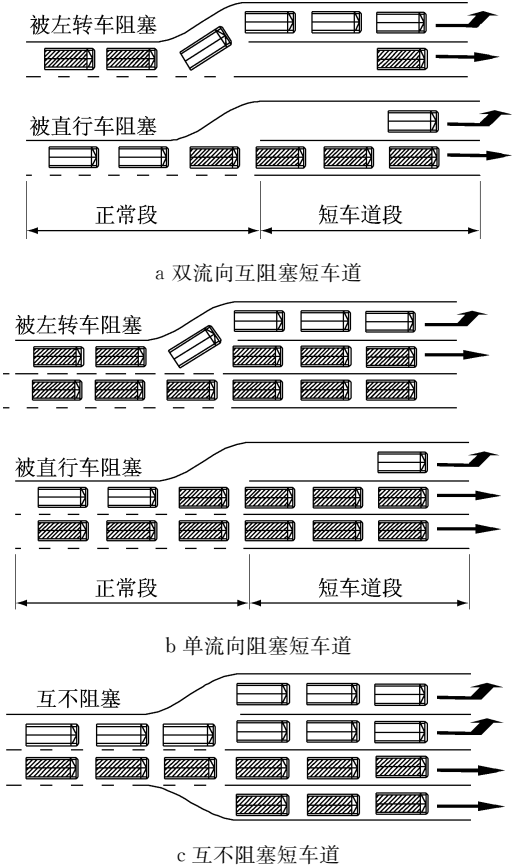


图 1 短车道的典型形式  
Fig.1 Typical types of short lanes

2 通行能力计算模型

2.1 模型假设

- (1) 左转受保护相位控制,不考虑右转影响.
- (2) 左转和直行交通流的到达分布已知(文中假设其服从泊松分布),且相互独立;如交通流服从其他分布,则在运用本文模型时需用相应概率密度函数替换本文所采用的泊松分布密度函数.
- (3) 交叉口处于稳定状态,即交叉口每周期每相位平均到达流量不会超过该相位通行能力.
- (4) 短车道范围内同一流向排队长度相等.

2.2 不发生排队阻塞下的通行能力

在不发生排队阻塞的情况下,通行能力由有效绿灯时间与饱和流量决定. 短车道的存在会造成交叉口非均匀饱和流率. 在清空短车道最大排队长度的时间段内以进口道饱和流量放行,之后以驶入进口道的饱和流量放行. 根据前期研究<sup>[8]</sup>,  $C_i^0$  和  $C_j^0$  可用下式计算:

$$C_t^0 = \begin{cases} S_t^1 \frac{g_{te}}{C} & g_{te} \leq T_t \\ S_t^1 \frac{T_t}{C} + S_t^2 \frac{g_{te} - T_t}{C} & g_{te} > T_t \end{cases}$$
$$C_l^0 = \begin{cases} S_l^1 \frac{g_{le}}{C} & g_{le} \leq T_l \\ S_l^1 \frac{T_l}{C} + S_l^2 \frac{g_{le} - T_l}{C} & g_{le} > T_l \end{cases}$$
$$T_t = \frac{3\,600\,L}{s_t h_d}, \quad T_l = \frac{3\,600\,L}{s_l h_d}$$
$$S_t^1 = m_t s_t; \quad S_t^2 = m_{t0} s_t$$
$$S_l^1 = m_l s_l; \quad S_l^2 = m_{l0} s_l$$

式中: $C_t^0$  为不发生阻塞时的直行通行能力,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $C_l^0$  为左转通行能力,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $C$  为周期时间,  $\text{s}$ ;  $S_t^1, S_l^1$  分别为不阻塞时交叉口直行和左转相位的饱和流量,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $S_t^2, S_l^2$  分别为不阻塞时驶入短车道的直行和左转饱和流量,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $T_t, T_l$  分别为清空直行和左转短车道最大排队长度时间,  $\text{s}$ ;  $g_{te}$  为直行有效绿灯时间,  $\text{s}$ ;  $g_{le}$  为左转有效绿灯时间,  $\text{s}$ ;  $h_d$  为排队停车空距,  $\text{m}$ ;  $L$  为短车道最大排队长度(即短车道长度),  $\text{veh}$ ;  $m_t, m_l$  分别为交叉口短车道区域直行和左转车道数, 条;  $m_{t0}, m_{l0}$  分别为对应交叉口直行和左转车道的路段车道数, 条;  $s_t, s_l$  分别为单车道的直行和左转饱和流量,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ .

清空时间如图 2 所示计算.

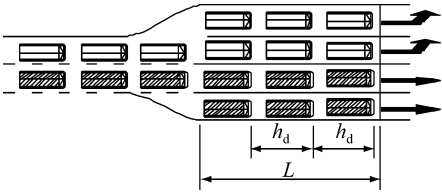


图 2 清空时间  $T_t (T_l)$  计算示意图

Fig.2 Schematic of clear time  $T_t (T_l)$  calculation

2.3 先左转后直行,考虑排队阻塞的通行能力

2.3.1 直行通行能力

直行通行能力计算参数如图 3a 所示.

设相位顺序为先左转后直行,在左转绿灯末期进入短车道的车辆由于剩余绿灯时间太短而不能通过短车道,因此左转最早可能排队开始时刻为

$$W_0 = g_l - L/v$$

式中: $g_l$  为左转绿灯时间;  $v$  为车辆通过短车道速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

左转排队可能阻塞直行的最早时刻为

$$t_0 = W_0 = g_l - L/v$$

从上一周期直行开始排队到左转排队开始时刻为止,直行到达的车辆数  $N_t^a$  的概率函数为

$$P_t(N_t^a = k) = \frac{(\lambda_t^a)^k e^{-\lambda_t^a}}{k!}$$

式中: $k$  为从上一周期直行开始排队到左转排队开始时刻为止的直行到达的车辆数;  $\lambda_t^a$  为排队时段直行车流平均到达车辆数.

$$\lambda_t^a = q_t (C - g_t + L/v - g_l - I_l + W_0) = q_t (C - g_t - I_l)$$

式中: $q_t$  为单位时间内直行到达车辆数,  $\text{veh}$ ;  $I_l$  为左转相位与下一相位的间隔时间,  $\text{s}$ .

左转排队开始时刻,到达的直行车辆数  $N_t^l$  为  $N_t^l = N_t^a$ .

从  $t_0$  时刻开始,到达的左转车辆都有可能阻塞直行.则经过时间  $W_1$  发生排队阻塞的概率即  $t_1$  时刻左转到达车辆数超过短车道左转容量的概率为

$$P_{bl} = P_l(N_l^a > n_l) = 1 - \sum_{k=0}^{n_l} \frac{(\lambda_l^a)^k e^{-\lambda_l^a}}{k!}$$
$$W_1 \leq g_t + I_l$$

式中: $n_l$  为短车道左转容量;  $\lambda_l^a$  为  $W_1$  时间段内左转车流平均到达车辆数,  $\text{veh}$ ;  $\lambda_l^b = q_l W_1$ ,  $q_l$  为单位时间内左转到达车辆数,  $\text{veh}$ .

到阻塞发生时为止,在  $W_1$  时段内可能通过短车道末端的直行车辆数  $N_t^2$  的概率为

$$P_t(N_t^2 = k) = \frac{(q_t W_1)^k e^{-q_t W_1}}{k!}$$

阻塞发生后,独立车道(即不会被堵塞车道)仍可通行,则剩余绿灯时间内通过短车道的车辆数为

$$N_t^3 = \begin{cases} 0 & \alpha_t \leq 0 \\ \alpha_t S_t^3 & \alpha_t > 0 \end{cases}$$

其中  $S_t^3$  为未被阻塞车道饱和流量,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\alpha_t$  为临时变量,其值为

$$\alpha_t = g_t + I_l + g_t - (W_1 + W_0) - L/v$$

阻塞后直行周期通行能力为

$$C_t^c = \min[N_t^1 + N_t^2 + N_t^3, S_t^1 \frac{g_{te}}{C}]$$

由此,直行通行能力为阻塞时和未阻塞时的概率统计均值为

$$C_t = P_t(N_t^a) P_t(N_t^2) [P_{bl} C_t^c + (1 - P_{bl}) C_t^0]$$

2.3.2 左转通行能力

左转通行能力计算参数如图 3b 所示.

直行最早排队的可能时刻为

$$W_0 = g_t - L/v$$

直行开始排队时,左转到达车辆数  $N_l^a$  的概率为

$$P_l(N_l^a = k) = \frac{(q_l W_0)^k e^{-q_l W_0}}{k!}$$

直行排队开始时刻,短车道范围内左转车辆数

为  $N_1^1 = N_1^a$

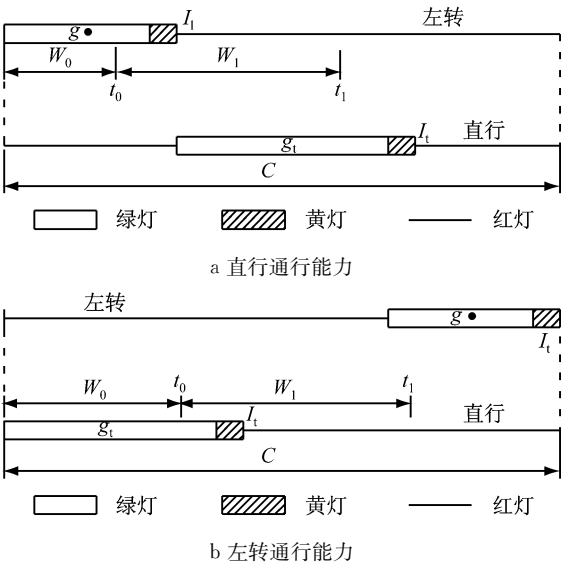


图 3 通行能力计算参数

Fig.3 Parameters of traffic capacity calculation

直行排队可能阻塞左转的开始时刻为

$$t_0 = W_0 = g_t - L/v$$

从  $t_0$  时刻开始,直行都有可能阻塞左转.则经过时间  $W_1$  发生排队阻塞的概率,即  $t_1$  时刻直行到达车辆数超过直行短车道容量的概率为

$$P_{bt} = P_t(N_t^a > n_t) = 1 - \sum_{k=0}^{n_t} \frac{(q_t W_1)^k e^{-q_t W_1}}{k!}$$

$$W_1 \leq C - W_0 - I_1 - L/v$$

$t_1$  时刻阻塞发生时,可能通过短车道末端的左转车辆数  $N_1^2$  的概率密度为

$$P_t(N_1^2 = k) = \frac{(q_1 W_1)^k e^{-q_1 W_1}}{k!}$$

阻塞发生后,剩余绿灯时间内通过短车道的车辆数为

$$N_1^3 = \begin{cases} 0 & \alpha_1 \leq 0 \\ \alpha_1 S_1^3 & \alpha_1 > 0 \end{cases}$$

其中  $\alpha_1$  为临时变量,其值为

$$\alpha_1 = C - W_0 - W_1 - L/v$$

阻塞后左转周期通行能力为

$$C_1^* = \min[N_1^1 + N_1^2 + N_1^3, S_1^1 \frac{g_{1c}}{C}]$$

由此,左转通行能力为阻塞时和未阻塞通行能力的概率统计均值为

$$C_1 = P_1(N_1^a) P_1(N_1^2) [P_{bt} C_1^* + (1 - P_{bt}) C_1^0]$$

同理,先直行后左转的相序条件下,通行能力可以经过同样的过程计算得到(将各参数的角标  $t$  变为  $l$  即可).

### 3 数值分析

针对前述 3 种短车道的特点,对如图 4 所示 3 种类型短车道进行分析.

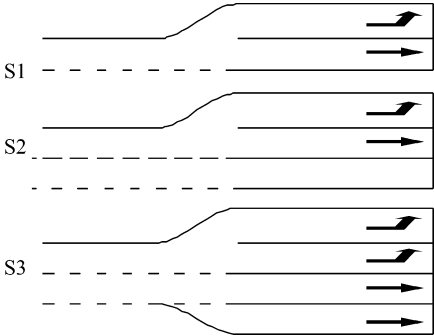


图 4 短车道类型

Fig.4 Types of short lanes

算例分析主要包括如下两部分:

(1) 模型精度分析. 采用饱和和流量校正过的 VISSIM 仿真软件获得接近实际的交叉口通行能力,分析本文方法、HCM 方法与 VISSIM 仿真结果对比情况,论证本文模型计算的准确性和精度.

(2) 参数影响分析. 在模型准确性得到验证的基础上,改变影响通行能力的参数,包括短车道的数量、长度、信号周期和绿信比等,分析不同类型短车道通行能力的变化情况影响通行能力的关键因素.

#### 3.1 模型计算精度分析

以情形一(S1)为对象,设置短车道长度为 50 m,周期为 120 s,左转与直行绿灯时间均为 25 s. 先左转后直行时左转通行能力分析如表 1 所示.

表 1 左转通行能力对比

Tab.1 Comparison of left-turn traffic capacity results				
情形	左转通行能力/(pcu · h <sup>-1</sup> )			误差/%
	HCM	仿真	模型	
S1	375	249	258	3.6
S2	375	310	325	4.8
S3	750	501	502	0.3

对比结果发现,模型计算与仿真结果的误差在 5% 以内,HCM 方法计算结果偏大. 由于 VISSIM 仿真自身的缺点,导致车辆在路段上换道时会有少车辆相互阻塞,因此仿真通行能力略低. 总体说来,两者具有较好的匹配性.

对于短车道情形三(S3)而言,不会发生一个流向短车道阻塞另外一个流向的情形,因此在以下分

析不同参数对阻塞影响的过程中,仅针对情形一(S1)和情形二(S2)进行对比分析,相序为先左转后直行.

3.2 参数影响分析

3.2.1 绿信比对通行能力的影响

周期为 120 s,固定直行的绿信比为 0.2,左转绿信比从 0.1 变化到 0.5,左转和直行流量同时从 0 变化到 1 000 pcu · h<sup>-1</sup>,左转通行能力损失(不考虑阻塞的通行能力与该状态下通行能力之差)的变化趋势如图 5 所示.

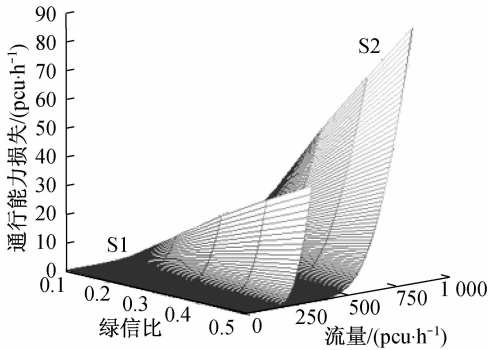


图 5 绿信比对通行能力影响

Fig.5 Impact of split upon traffic capacity

从图 5 可知,在相当长的范围内,流量越大,通行能力的衰减越明显;绿信比越大,通行能力衰减越显著.这是因为流量的增加造成直行排队阻塞左转的概率增加;绿信比的增加扩大了不考虑阻塞时的通行能力,因而进一步扩大了通行能力损失值.

3.2.2 周期对通行能力的影响

固定直行和左转的绿信比为 0.2 s,周期从 80 s 变化到 160 s,左转通行能力变化如图 6 所示.

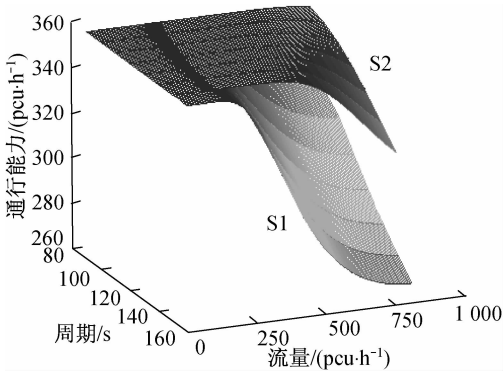


图 6 周期对通行能力影响

Fig.6 Impact of cycle length upon traffic capacity

从图 6 可以看出,在绿信比相同的条件下,当流量较小时,通行能力不变;随着流量的增加,通行能力出现衰减的趋势;相同绿信比及流量条件下,周期

越大,通行能力衰减越明显.原因在于,不考虑阻塞时,通行能力随着周期的增加而增加;但考虑了阻塞后,周期增加带来排队长度增加,进而增大了阻塞概率.因此周期越大,通行能力衰减越明显.

3.2.3 短车道长度对通行能力的影响

周期为 120 s,直行和左转绿信比均取为 0.2,短车道长度从 30 m 变化到 90 m,左转通行能力变化如图 7 所示.

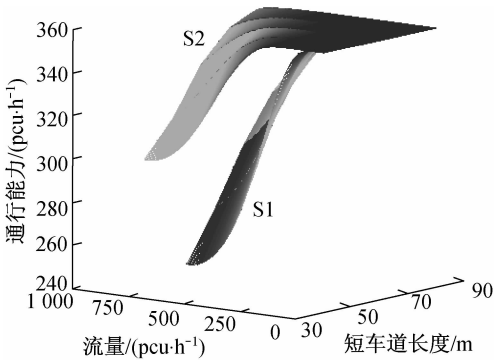


图 7 短车道长度对通行能力影响

Fig.7 Impact of the length of short lane upon traffic capacity

从图 7 可以看出,短车道越长,通行能力的损失越不明显;短车道越短,通行能力对流量的增加越敏感,通行能力的衰减越迅速.其原因在于短车道长度越短,排队超越短车道的概率越大,通行能力衰减也就越明显.

3.2.4 短车道数目对通行能力的影响

取信号周期为 120 s,直行和左转的绿信比为 0.2,短车道的长度为 50 m,左转短车道数量从 1 变化到 4,通行能力损失(不考虑阻塞的通行能力与该状态下通行能力之差)变化如图 8 所示.

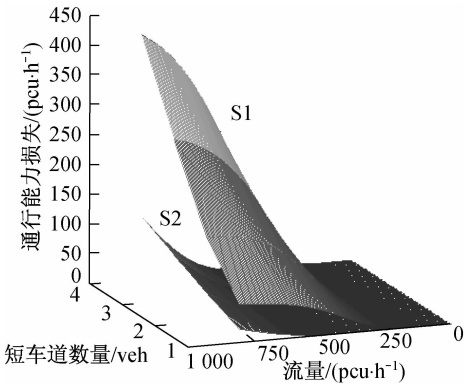


图 8 短车道数目对通行能力影响

Fig.8 Impact of short lane numbers upon traffic capacity

从图 8 可以看出,短车道的数目对通行能力影

响显著. 在流量较小时, 通行能力损失不明显. 随着流量的增加, 通行能力损失越大; 相对而言, 短车道数量越多, 通行能力损失越严重. 这是因为短车道数量越多, 不考虑阻塞时的通行能力越大, 但考虑阻塞后, 此时的短车道数量对通行能力没有影响, 两者的差值也就越大.

参数分析还可以看出, 短车道情形二(S2)下通行能力的损失情况明显好于短车道情形一(S1). 也即提高引起阻塞车流(相序在后的车流)的通行能力, 同样可以缓解短车道对阻塞车流(相序在前的车流)的影响.

4 结论

针对短车道的信号控制交叉口, 考虑了车辆到达随机性、车道划分和信号配时等因素作用下不同流向车流的相互影响以及相邻周期排队状态的相互作用, 构建了通行能力计算的概率模型, 并进行了模型的准确性验证和参数的敏感性分析, 结果表明:

- (1) 短车道对交叉口通行能力有显著影响, 本文模型计算结果与通行能力真实值较为接近.
- (2) 信号相序对短车道通行能力有显著影响, 一般而言, 后放行有短车道的流向, 有助于提高通行能力.
- (3) 提高引起阻塞车流(相序在前的车流)的通行能力, 可降低阻塞概率, 进而提高被阻塞车流(相序在后的车流)的通行能力.
- (4) 短车道长度与数目对通行能力影响显著. 其他因素相同的情况下, 短车道越长, 通行能力损失越小; 短车道的数目越多, 一旦发生阻塞之后, 通行

能力的损失越大.

(5) 一定范围之后, 周期越大, 通行能力衰减越严重. 因此, 满足其他要求时, 可尽量采用小周期以降低短车道阻塞的影响.

参考文献:

[1] NING Wu. Total approach capacity at signalized intersections with shared-short lanes—a generalized model based on simulation study [CD]//TRB 86th Annual Meeting, Washington DC: Transportation Research Board, 2007.

[2] 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.

[3] Akcelik R. Traffic signals capacity and timing analysis [R]. Sydney: Australia Road Research Board ,1981.

[4] Lei Y, Y Qi, H Yu, et al. Development of left-turn operations guidelines at signalized intersections [R]. Austin: Texas Department of Transportation, 2008.

[5] YI Qi, LEI Guo, LEI Yu. Estimation of design lengths of left-turn lanes [C/CD]//TRB 2009 Annual Meeting, Washington D C: Transportation Research Board, 2009.

[6] LEE J J. Impact of lane drops on intersection capacity [D]. Raleigh: North Carolina State University , 2005.

[7] 程国柱. 路口拓宽条件下信号交叉口通行能力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通学院, 2002.

CHENG Guozhu. Research on the Capacity of Widened Signalized Intersection [D] Harbin: School of Transportation Science and Engineering of Harbin Institute of Technology. 2002.

[8] 杨晓光, 赵靖. 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.

YANG Xiaoguang, ZHAO Jing. Research on impact of short lane on signalized intersection capacity [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2008, 25(12): 151.