

文章编号:1671-8879(2009)06-0088-05

基于车间距的交叉口通行能力分析

吴潜蛟¹, 罗向龙¹, 武奇生², 潘若禹³

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 电子与控制工程学院,
陕西 西安 710064; 3. 西安邮电学院 通信工程系, 陕西 西安 710061)

摘 要:针对信号交叉口实际通行能力与理论计算结果存在较大偏差的问题,运用运动学方程,分析了车辆队列的停车位置和车间距对车辆通过交叉口延误时间的影响。研究表明:一个给定的交叉口,通过调节信号的相位和周期的方法能提高路口的通行能力,但调节能力有限;车间距过大或过小都会增加车辆通过路口的延误时间,从而导致交叉口的通行能力下降;当停车间距在 4~8 m 之间时,可有效地降低等待队列长度及车辆通过交叉口的启动延时时间,从而最大可能地提高信号交叉口的通行能力。

关键词:交通工程;交叉口;通行能力;车辆队列

中图分类号:U491.114

文献标志码:A

Passing capacity of signal intersection based on vehicles' parking space

WU Qian-jiao¹, LUO Xiang-long¹, WU Qi-sheng², PAN Ruo-yu³

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064,
Shaanxi, China; 3. Department of Communication Engineering, Xi'an College
of Post and Telecommunication, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to understand the partial difference between theoretical and practical capability on the signal intersection, the kinematical equation of the starting and leaving of vehicles' queues was established to analyze the relationship between parking position and parking space with the delay of vehicles' passing through the intersection. The results indicate that the passing capacity of a given intersection can be improved by adjusting the cycle and phase of signal, but the adjusting function was limited; when the parking space between two vehicles on intersection is too large or too small, the passing delays of vehicles will increase, and the passing capacity of the intersection will decline; when the parking space is from 4 m to 8 m, the waiting queue and start-up time of vehicles on the intersection can be controlled clearly, and this can increase the passing capacity of the intersection. 5 figs, 11 refs.

Key words: traffic engineering; intersection; passing capacity; vehicle queue

0 引言

平面交叉口把道路相互连接起来构成交通网络,使不同方向交通流在该区域集结、交织和分流。通过交通信号时间的分配,给各路段不同方向的车流通行权,此时通过交叉口的最大车流量就是信号交叉口的通行能力。研究信号交叉口的通行能力,对降低车辆通过交叉口的时间延误和提高交叉口的通行能力,甚至提升整个城市路网的交通运输效率具有现实意义。交叉口的通行能力的定义是各国根据本国交通流的特点给出的,其计算方法主要有停车线法、冲突点法和饱和流率法^[1-3]。停车线法计算出来的结果比实际的通行能力偏高;冲突点法以冲突点为控制点来计算通行能力,适用于车流量小的交叉口;国际上应用最为广泛的是美国的饱和流率法,但中国的计算结果与实测的交通量相差很大^[4-6],严重高估了中国道路平面交叉口的通行能力。其原因除了中国和美国的交通条件有很大的区别外,还包括模型中的折减系数、理想饱和流量、中国交通设施以及驾驶人心理行为等都与美国有较大的差异。

国内外学者对饱和流率模型中车道数、车道宽度、重型车比例、引道坡度、临近车道组停车情况等进行了大量分析和数据实测验证^[7-10],但对车辆排队队列状态本身所引起的通行能力的影响关注不多,未见文献介绍。为此,本文利用饱和流率模型对信号交叉口的通行能力进行分析,进一步从饱和车辆排队队列状态入手,分析排队车辆的间距对离去车辆时间的影响。结果表明,当停车间距在 4~8 m 之间时,可有效降低队列长度及车辆通过交叉口的启动延时时间,从而最大可能地提高交叉口通行能力。

1 通行能力分析

对比中国和美国(根据美国《道路通行能力手册》)对通行能力的定义可看出:中国定义其为信号交叉口整体可通行的车辆最大数;而美国只是指进口道的通行车辆最大数。分析发现,交叉口可能从整体通行能力看是顺畅的,但若有某 1 个或 2 个进口道流量接近或超过其通行能力,将使该进口道出现严重的拥堵,影响整体交叉口的运行。对于带有系统交通协调控制的路口而言,分别控制每个车道有利于区域交通的协调和交通诱导的实现。因此,本文采用美国《道路通行能力手册》的计算方法。

定义 1: 设第 i 个车道的饱和流率为 s_i ,相应的

有效绿灯时间为 g_i ,信号周期为 T ,对应的绿信比为 g_i/T ,第 i 个进口道通行能力 c_i 为

$$c_i = s_i \left(\frac{g_i}{T} \right) \quad (1)$$

先计算出各个车道组的通行能力,然后对各单车道组通行能力求和,可获得交叉口的通行能力。

定义 λ 为各信号相位最大流量之和; ρ_i 为某信号相位中进口道流量与通行能力比的最大值,则有

$$g_i = (T - L) \frac{\rho_i}{\lambda} \quad (2)$$

式中: L 为损失时间。

把式(2)代入式(1),得

$$c_i = s_i \left(\frac{g_i}{T} \right) = s_i \left(\frac{T - L}{T} \right) \left(\frac{\rho_i}{\lambda} \right) = s_i \left(\frac{\rho_i}{\lambda} \right) \left(1 - \frac{L}{T} \right) \quad (3)$$

对周期进行调整,即令信号周期为 KT (其中 K 为形式参数, $K > 1$),此时第 i 个进口道通行能力为

$$c'_i = s_i \left(\frac{\rho_i}{\lambda} \right) \left(1 - \frac{L}{KT} \right)$$

进口车道的通行能力的变化幅度 $f(K)$ 为

$$\frac{c'_i - c_i}{c_i} = \left(\frac{L}{T - L} \right) \left(1 - \frac{1}{K} \right) = f(K) \quad (4)$$

$$f'(K) = \left(\frac{L}{T - L} \right) \frac{1}{K^2} \quad (5)$$

$$\lim_{K \rightarrow \infty} f(K) = \frac{L}{T - L} \quad (6)$$

由式(5)可以得到图 1 所示的通行能力的变化幅度变化率 $f'(K)$ 与信号周期 T 的关系曲线。

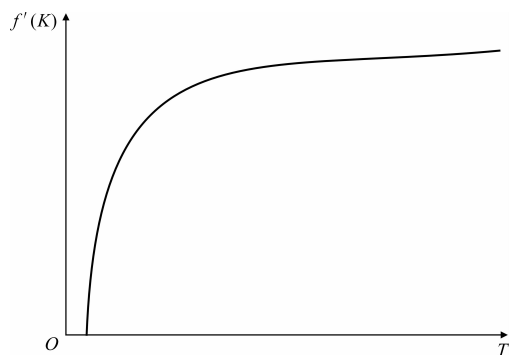


图 1 $f'(K)$ 与 T 的关系曲线

从式(3)及式(5)可以得出如下结论。

(1) 对一个给定的交叉口而言,通行能力随着周期的延长而变大,但有一个极限值 $s_i \left(\frac{\rho_i}{\lambda} \right)$ 。

(2) 随着周期的继续延长,通行能力的变化幅度越来越小,这时通过周期延长来提高通行能力的作用会很小。所以,在饱和交通流流量的交叉口,改变信号的周期,其通行能力改变很小。

由以上分析可知,在饱和交通量情况下,依赖控制信号提高通行能力效果并不理想。需要对式(1)中通行能力进一步分析,研究影响交叉口通行能力的因素和提高交叉口通行能力的方法。

在给定车道理想饱和流率的基础上,通行能力不但与车道中的车道数、车道宽度、引道坡度、地区类型等固有物理条件有关,还与交通流特性有关。交通流特性包括该车道停车情况、交叉口范围内的公共汽车站的停车、车道组中右转车辆和左转车辆、重型车比例等。对于一个给定的交叉口而言,其通行能力主要和相应的交通流特性有关,由于车道组中右转车辆和左转车辆、重型车比例等具有较大的随机性,因此这里主要从车道中车辆队列的延误时间分析入手,研究影响饱和流率因素和探讨提高交叉口通行能力的方法。

2 交叉口车辆行驶时间分析

一般情况下,车辆通过交叉口的情况和车速 V 的变化过程如图 2 所示,可分为减速行驶-停-加速行驶的过程。图 2 中实线表示少量车辆由减速到加速通过交叉口,大部分车辆则如图 2 中虚线表示的情况,即减速-停-加速通过交叉口; v_0 为车辆进入交叉口前的速度; v_i 为车辆通过交叉口的速度。因此,车辆通过交叉口的时间包括减速时间、红灯等待时间、加速时间和某个速度匀速行驶的时间。车辆通过交叉口的延误为到达时的减速产生的延时、红灯期间的等待延时和绿灯期间启动加速产生的延时之和。

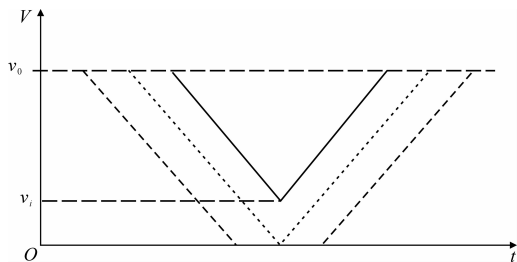


图 2 车辆通过交叉口时车速变化的过程

当前方向由红灯转换为绿灯时,车辆离去产生启动延时,启动过程如图 3 所示。

假设 a 为加速度 (m/s^2); t_1 、 t_2 分别为加、减速时间 (s); s_1 为车辆启动加速到 v_0 所需的距离 (m); s_2 为车辆由速度 v_0 减速直到停止所需的距离 (m)。则加速启动、减速所产生的延时时间 t_{d1} 、 t_{d2} 分别为

$$t_{d1} = s_1/v_0 - t_1 = s_1/v_0 - \sqrt{2s_1/a} \quad (7)$$

$$t_{d2} = s_2/v_0 - t_2 = s_2/v_0 - \sqrt{2s_2/a} \quad (8)$$

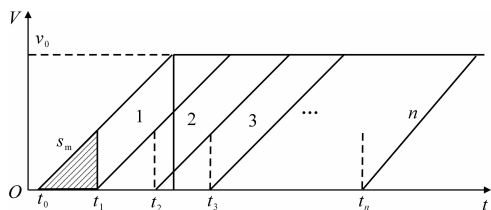


图 3 交叉口车辆启动过程

饱和车流量情况下,一个信号周期内,由于车辆通过交叉口时存在上述过程,所产生的时间延误为加速和减速产生的延误时间与红灯时间之和。

实际上,车辆排队对车辆通过交叉口的延误时间有很大的关系,当前方向由红灯转换为绿灯时,车辆队列的启动过程如图 3 所示。由于交叉口存在车辆排队,车辆通过交叉口引起的延误还包括绿灯启动时的驾驶人反应时间、队列中车辆启动时间和车辆队列及车辆的位置。

3 车辆队列对延误时间的影响

图 3 的车辆启动过程表明,当车辆队列的间隔过小时,后续车辆必须等待前方车辆行驶一段距离才能启动;当车辆队列的间距过大时,则车辆队列的行驶时间增长。因此,车辆间距过大或过小都会对车辆通过信号交叉口产生延误时间。

3.1 车辆间距过小时车辆位置与延误时间的关系

图 3 中,假设 t_0 为(绿灯损失时间)驾驶人反应时间 (s), t_1 为加速行驶一段距离 s_m 后的时间 (s),然后,队列中第 2 辆车启动,时间为 t_2 ,……,依次类推。即车辆启动时间与车辆队列及车辆的位置有关。其中

$$t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_n - t_{n-1} = \sqrt{2s_m/a}$$

那么,队列长度中的第 n 辆车通过路口的延时启动时间为

$$t_n = (n-1)t_m = (n-1) \sqrt{2s_m/a} \quad (9)$$

式中: t_m 为车辆行驶一段距离 s_m 所用的时间。

考虑到车辆启动最小距离,依据式(9),可以得到绿灯开启后队列中车辆位置间距的延误时间关系,如下页图 4 所示。

图 4 表明,绿灯信号启动后,车辆位置越靠后,等待时间越长。造成队列启动后延误时间的主要原因是,车辆队列排队密度大,后续车辆必须等待前面车辆行驶一定的距离才能行驶,即队列的车辆间距与车辆延误时间有关。

3.2 车辆间距与延误时间的关系

设 s_v 为等效车辆的长度 (m); s_{vv} 为车辆队列中

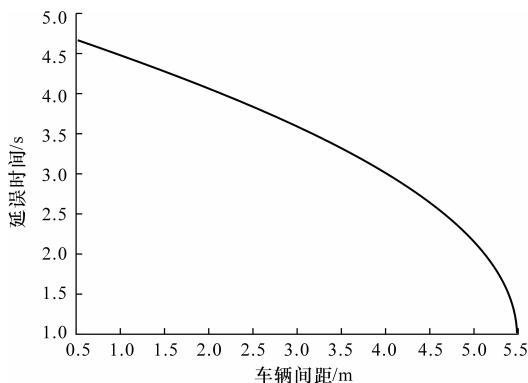


图4 车辆位置过小时车间距与延误时间的关系

车辆间距(m)。车辆由停车位置到达交叉口停车线的时间 t_{rd} 为

$$t_{rd} = (n-1) \sqrt{2s_m/a} + \sqrt{2s_1/a} + [(n-1)(s_v + s_{vv}) - s_1]/v_0 + t_0 \quad (10)$$

到达停车线减速时间 t_{md} 为

$$t_{md} = (n-1) \sqrt{2s_m/a} + t_0 + \sqrt{2s_m/a} - s_1/v_0 \quad (11)$$

队列平均延误时间 t_{jd} 为

$$t_{jd} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(n-1) \sqrt{2s_m/a} + t_0 + \sqrt{2(s_1 - s_m)/a} - s_1/v_0] \quad (12)$$

t_g 为绿灯时间,通过的最大车辆数为 n ,则有

$$n = \frac{t_g - t_0 + s_1/v_0 - \sqrt{2s_1/a}}{\sqrt{2s_m/a} + (s_v + s_{vv})/v_0} + 1 \quad (13)$$

绿灯放行期间车辆行驶要满足安全通行的基本要求,由车辆的行驶速度和前后车头间距决定,即

$$C = 1\,000V/s \quad (14)$$

式中: C 为基本通行能力(pcu/h); V 为车辆行驶速度(km/h); s 为前后车的车头间距(m)。

车头间距由前车的车辆长度、两车间的安全距离、驾驶人采取制动措施的反应距离及前后两车的距离差组成^[11],即

$$s = s_v + \frac{Vt}{3.6} + s_d + s_s \quad (15)$$

$$s_d = \frac{MV^2}{25.92g(\varphi \pm j)}$$

式中: t 为驾驶人反应时间; s_d 为前后车采取制动措施的间距差(m); s_s 为汽车的安全间距(m); M 为后车与前车制动系数差(0~1); φ 为地面附着力系数; j 为坡度系数,和道路坡度有关,上坡时取正值,下坡时取负值; g 为重力加速度。

上述分析表明,交叉口启动车辆为何产生延迟启动时间,原因在于无法满足如下条件

$$s \geq s_{vv} + s_m \quad (16)$$

观测统计表明, s 在4~10 m的距离满足大部分驾驶人的要求。车辆间距与延误时间的关系如图5所示。

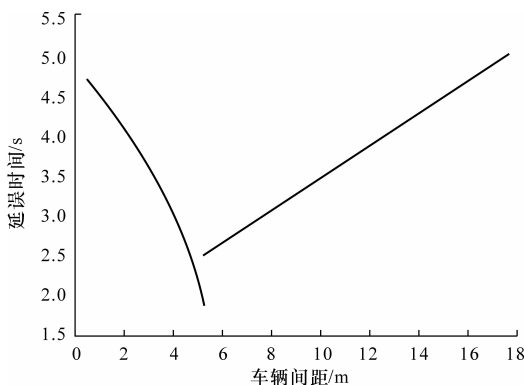


图5 队列中车辆间距与延误时间的关系

通过以上分析可以看出,在饱和和交通流时,交叉口的通行能力与排队车辆的密度有很大关系,车辆间隔距离太近,行驶的车辆必须等待前一辆车行驶一段距离后才能启动行驶,在绿信比一定的情况下降低了交叉口的通行能力。当车辆间的停车距离在4~8 m区间,可以有效降低队列长度和车辆通过路口的延时启动时间。相当于在绿灯开始后,所有队列车辆同步启动,把原来的串行排队启动变为并行同步启动,可以提高交叉口的通行能力。

4 结 语

(1)交叉口绿灯期间的饱和和车辆通行能力不仅和绿信比有关,还和排队车辆的密度有关。

(2)对一个给定的交叉口而言,通行能力随着周期的延长而变大,但有一个极限值 $s_i(\frac{\rho_i}{\lambda})$;也就是说,在饱和交通流量的交叉口,改变信号的周期,其通行能力改变很小,因此依赖控制信号提高通行能力的效果并不理想。

(3)排队车辆之间的间距对信号交叉口的通行能力有很大的影响,车辆的排队间距过大或过小,都会降低信号交叉口的通行能力。

(4)当停车间距在4~8 m时,可以有效地降低队列长度和延时时间,提高交叉口的通行能力。

参考文献:

References:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000 [M]. Washington DC: National Research Council, 2000.

- [2] Brilon W, Wu N. Delays at fixed-time traffic signals under time dependent traffic conditions[J]. Traffic Engineering and Control, 1990, 31(12): 623-631.
- [3] Akcelik R. Traffic signals; capacity and timing analysis [R]. Melbourne: Australian Road Research Board, 1981.
- [4] 袁晶矜, 袁振洲. 信号交叉口通行能力计算方法的比较分析[J]. 公路交通技术, 2006(5): 123-128, 132.
YUAN Jing-jin, YUAN Zhen-zhou. Comparison analysis of calculation methods for traffic capacity at signal junction [J]. Technology of Highway and Transport, 2006(5): 123-128, 132.
- [5] 杨晓光, 庄 斌, 李克平. 信号交叉口饱和流率和启动延误的影响分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 738-743.
YANG Xiao-guang, ZHUANG Bin, LI Ke-ping. Analysis of saturation flow rate and delay at signalized intersection [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 738-743.
- [6] 邵长桥, 杜晓辉, 李光芹. 信号交叉口排队离散车头时距统计分析[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 76-79.
SHAO Chang-qiao, DU Xiao-hui, LI Guang-qin. Queuing vehicle headway statistic analysis at signalized intersection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 76-79.
- [7] Tang T Q, Huang H J, Gao Z Y, et al. Interactions of waves in the speed-gradient traffic flow model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 380(1/2): 481-489.
- [8] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. A new continuum model for traffic flow and numerical tests [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(5): 405-419.
- [9] Katsunori T, Ryoichi N, Takashi N. Traffic jam and discontinuity induced by slowdown in two-stage optimal-velocity model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 370(2): 756-768.
- [10] 王 昊, 王 炜, 陈 峻. 非信号控制交叉口通行能力及延误特性 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 114-117.
WANG Hao, WANG Wei, CHEN Jun. Capacity and delay performance of unsignalized intersection [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(1): 114-117.
- [11] 周 伟, 王秉纲. 路段通行能力的理论探讨 [J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 92-98.
ZHOU Wei, WANG Bing-gang. Theoretical study about road section capacity [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 92-98.
- 计理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2659-2664.
- LI Su-hua, ZHOU Jian, Yin Jian-hua, et al. Study on bearing performance of friction pile foundation in complicated soil-layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2659-2664.
- [8] Combarieu O. Prossimeter test and the end-bearing load of pile [J]. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1996, 20(3): 61-73.
- [9] 冯忠居, 谢永利, 李 哲, 等. 大直径超长钻孔灌注桩承载力性状 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 24-27.
FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, LI Zhe, et al. Bearing property of large-diameter over-length nonplacement pile [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 24-27.
- (上接第 63 页)
- HU Qi-zhong, GIN Wei-liang, SHI Fang-hua, et al. Reliability analysis of foundation structures of off-shore long-span-bridges on serviceability limit states [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 53-58.
- [5] 高亚成, 郑建青. 水泥土的室内试验研究 [J]. 河海大学学报, 1999, 27(5): 103-106.
GAO Ya-cheng, ZHENG Jian-qing. Laboratory experimental research on cement soil [J]. Journal of Hehai University, 1999, 27(5): 103-106.
- [6] 胡庆立, 张克绪. 大直径桩的竖向承载力性能研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 491-495.
HU Qing-li, ZHANG Ke-xu. Research on axial bearing behavior of large diameter piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 491-495.
- [7] 李素华, 周 健, 殷建华, 等. 摩擦型单桩承载性能设