

信号控制交叉口自行车流体扩散模型

A Bicycle Flow Diffusion Model at Signalized Intersections

张亚平 张永利 蓝翔 郝旭 王宇萍

(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

Zhang Yaping, Zhang Yongli, Lan Xiang, Hao Xu and Wang Yuping

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

摘要: 如何确定信号控制交叉口自行车的通行能力对交叉口配时和渠化设计有重要意义。揭示了信号控制交叉口自行车流的运行特性,建立了自行车流体扩散模型,对不同交叉口宽度、不同信号配时的混合交通条件下交叉口自行车通行能力进行计算,得出交叉口宽度与自行车通行能力呈负线性相关。通过自行车流体扩散影响分析,得出自行车对机动车、尤其是同向右转及对向左转车辆的通行能力影响较大的结论。最后,根据哈尔滨市4个信号控制交叉口实际调查数据,得到考虑机动车影响的信号控制交叉口自行车通行能力计算结果,并与北京市观测值进行了对比。

Abstract: It is critical to determine bicycle capacity at signalized intersections for signal timing design and traffic improvement. According to characteristics of bicycle flow at signalized intersections, this paper establishes a bicycle flow diffusion model. Based on the calculation results of bicycle capacity at signalized intersections by different widths of the approach and signal timing, the paper concludes that bicycle capacity has a negative linear correlation with the width of the approach. In light of an analysis on diffusion impacts, the paper adjusts the model with consideration of the impacts of vehicle traffic at signalized intersections. Finally, a case study based on an investigation at four signalized intersections in Harbin is conducted to obtain bicycle capacity with the impact of vehicles and a comparison with observations in Beijing.

关键词: 交通工程; 自行车交通; 流体扩散模型; 信号控制交叉口

Keywords: traffic engineering; bicycle traffic; flow diffusion model; signalized intersections

中图分类号: U491.2*34

文献标识码: A

收稿日期: 2008-09-10

作者简介:张亚平,男,哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,教授,博士生导师。主要研究方向:交通流理论、交通规划与管理、交通安全。E-mail:zxlt0905@163.com

0 引言

近年来,我国机动车数量持续增长,加上大量无序发展的自行车交通,机非干扰严重,交通环境恶化,城市交通系统的运行效率降低。然而,目前国内大多数城市的交通规划与投资主要针对机动交通,对非机动交通研究较少。国外城市自行车交通量尽管不大,但随着环保意识的增强,欧洲等国家自行车的使用率在不断提高。国内外关于自行车交通特性及通行能力方面的研究主要集中在交通到达特性、混合交通接受间隙特性、通行能力及交通设计理论等方面^[1-10]。

本文旨在通过研究信号控制交叉口自行车交通流运行特性,分析自行车流的膨胀扩散特性对交叉口机动交通和非机动交通通行能力的影响,探讨符合我国混合交通条件下的信号控制交叉口自行车通行能力模型及计算分析方法。

1 自行车流体扩散特性

自行车在信号控制交叉口启动并通过交叉口,其运行特性表现为自行车流不仅仅是跟驰行驶,更具流体扩散特性。当自行车流量很小时,自行车道能够满足其通行需求,自行车的流体扩散并不明显;当自行车流量达到一定程度时,骑车者往往根据可用空间来决定速度和方向,在行为特性中表现为很强的主观性和随意性,自行车的流体扩散变得非常明显。从宏观角度看,自行车在信号控制交叉口行驶如流体一般,哪里没有“阻力”就往哪里“流动”,符合“空间占据理论”,这就是自行车的流体扩散特性。

自行车在信号控制交叉口的运行特性表明其通过交叉口的过程为:红灯期间自行车在停车线外聚集并形成排队;绿灯启

动后, 聚集的自行车起步加速通过停车线, 排队的自行车像流体一样从停车线外压缩至交叉口内, 并呈扩散状态; 通过停车线的自行车的密度随着绿灯时间的持续而减少, 车速逐渐提高。在实际观测中可以发现, 右转车辆、行人干扰和自行车自身的膨胀扩散都对自行车在信号控制交叉口的通行能力产生很大的影响。

由于自行车流在信号控制交叉口的行为具有可压缩性、集团性、流动性等特点, 可以将交叉口及其两端假设为“水管”模型^[10]: 自行车排队路段是“进水管”; 自行车通过后由聚集到正常的变化路段是“出水管道”; 交叉口处是“管道接口”, 其直径一般会比“进水管”和“出水管道”大一些(见图1)。图1中字母的含义如下:

1) W_1 为排队长度末尾处的自行车道宽度/m; W_2 为停车线处自行车道宽度/m; W_3 为交叉口出口处自行车道宽度/m; W_4 为自行车流由聚集流完全变为自由流临界处的自行车道宽度/m。一般情况下, 它们并不是完全相等的, 但在模型计算中为了简化运算, 可认为其相等。为方便描述, W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 也代表各断面的名称。

2) L_1 为排队自行车的长度/m; L_2 为交叉口的宽度/m; L_3 为聚集流变为自由流经历的路径长度/m; D 为自行车在交叉口扩散膨胀的最大矢量长度/m。

3) S_1 为自行车在停车线外排队时围成的面积/m², 或者说“进水管”的面积; S_2 为“水管接口”的面积/m², 描述了自行车在交叉口的运行以及扩散的情况。图中的斜线部分表示自行车在交叉口的膨胀扩散, 但膨胀扩散并非无限制, 它是在自行车道外小范围占据机动车道和人行横道, 并呈圆弧线的运行轨迹。 S_3 为“出水管道”的面积/m², 能容纳与 S_1 相等的聚集自行车流。通过 S_3 后, 自行车开始进入自由流运行状态。

4) q 为上游自行车的平均到达率/(辆·s⁻¹); Q_1 为 S_1 内的

自行车流量/(辆·h⁻¹), Q_2 /(辆·h⁻¹)、 Q_3 /(辆·h⁻¹)以此类推。自行车在每一个信号控制交叉口处都存在等待—排队—扩散—离开过程。同时, 下游交叉口往往受上游交叉口的影响, 因此自行车在路段上运行并不是随机的, 而是呈脉冲状到达, 但在较长的时间段内, 反映为平均到达的状态, 服从均匀分布。

在信号控制交叉口, 当绿灯启动时, 由于比机动车启动要快, 自行车会占据机动车道及人行横道, 形成左右扩散现象^[9]。同时, 在交叉口的出口处, 由于没有机动车右转的影响和行人的干扰(行人速度小于自行车速度, 当首辆自行车到达交叉口出口时, 行人并未到达), 因此 W_3 断面并没有对自行车产生“瓶颈”作用; 自行车会在交叉口虚拟拓宽路段上运行, 这有效提高了自行车在交叉口的通行能力。虚拟宽度比实际宽度大, 最大出口处宽度为 (W_3+D) 。

2 自行车流体扩散模型

自行车通过信号控制交叉口, 一般要经过红灯时间的等待、绿灯时间在交叉口的散布以及通过交叉口后逐渐变为自由行驶3个过程。

图1中, 假设在绿灯启动时, 交叉口排队放行的第一辆自行车从 W_2 断面到达 W_3 断面的时间为 T 。在 $0\sim T$ 时间内, 自行车流是动态扩散的, 即自行车流从 S_1 压缩至 S_2 的过程, 并认为 S_1 内部和 S_2 内部达到动态平衡。则一个信号周期内, 通过交叉口的单车道自行车数量 N 辆为^[10]:

$$N=q\{G_c-T+\rho_1\cdot(C-G_c)\cdot(e^{-1}-e^{-\frac{G_c}{T}})\}, \quad (1)$$

式中: G_c 为有效绿灯时间/s; T 为自行车平均过街时间/s, $T < G_c$, 可以用交叉口宽度除以自行车在交叉口的运行速度获得; ρ_1 为排队自行车密度/(辆·m⁻²); C 为信号周期/s。

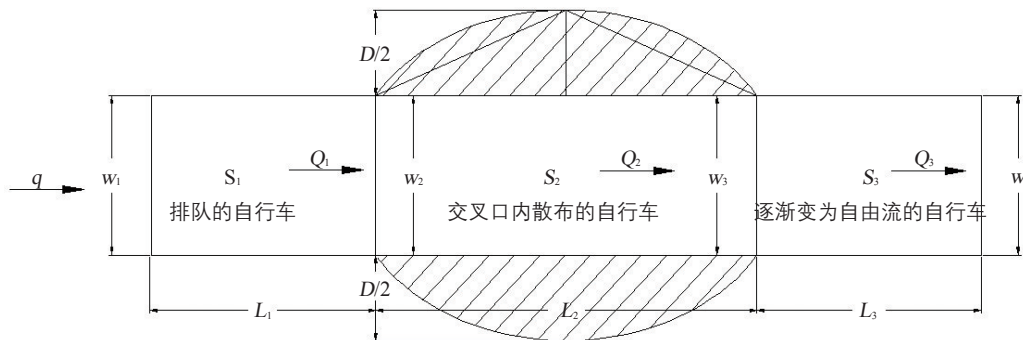


图1 信号控制交叉口自行车流体扩散模式

Fig.1 Bicycle flow diffusion pattern at signalized intersections

可以看出，在一个信号周期内，自行车通过交叉口的流量 N 随着有效绿灯时间 G_e 的增加而增加；同时 T 越小，自行车通过交叉口的速度越大，通过的流量也越大。由式(1)可得到信号控制交叉口自行车单车道最大通过量 $Cap/$ (辆·h⁻¹):

$$Cap=3600q\left\{\frac{G_e-T}{C}+\rho_1\cdot\left(1-\frac{G_e}{C}\right)\cdot\left(e^1-e^{-\frac{G_e}{T}}\right)\right\}。 \quad (2)$$

3 自行车通行能力计算

由实验得到自行车的最小安全车头时距为 1.8 s，自行车最大平均到达率为 0.56 辆/s；实际观测中排队自行车密

度达 0.60 辆/m²，自行车在交叉口内的运行速度为 14 km/h，城市干路信号控制交叉口的宽度一般为 35~70 m，由此可计算自行车的平均过街时间。根据式(2)，得到表 1 和图 2 的计算结果。

由表 1 可以看出，随着交叉口宽度的增加，自行车的通行能力随之减小；图 2 散点图也清楚地显示，自行车单车道通行能力与信号控制交叉口宽度呈良好的负线性关系。此外，自行车通行能力与相位有效绿灯时长成正比，与信号周期长度成反比。

基于流体扩散模型计算得到的信号控制交叉口自行车通行能力值较文献[5]方法计算的结果稍大，这是因为文献[5]仅考虑信号配时(绿信比)，并未考虑自行车在信号控制交叉口的流体扩散特性及交叉口宽度的影响。

表 1 信号控制交叉口自行车单车道通行能力计算结果 辆/h
Tab.1 Calculation results of bicycle capacity in single lane at signalized intersections

交叉口宽度 /m	信号配时/s								
	C=100 G _e =30	C=120 G _e =40	C=130 G _e =50	C=140 G _e =45	C=140 G _e =50	C=150 G _e =50	C=160 G _e =70	C=170 G _e =45	C=170 G _e =60
35	705	808	907	815	873	845	1 019	748	892
40	663	779	884	792	852	824	1 002	728	875
45	620	749	860	767	829	802	985	705	858
50	575	717	835	740	805	779	967	682	840
55	530	683	808	712	780	755	949	656	820
60	484	649	781	683	753	730	931	630	800
65	439	614	753	654	726	704	911	602	780
70	393	579	724	623	699	677	892	574	758

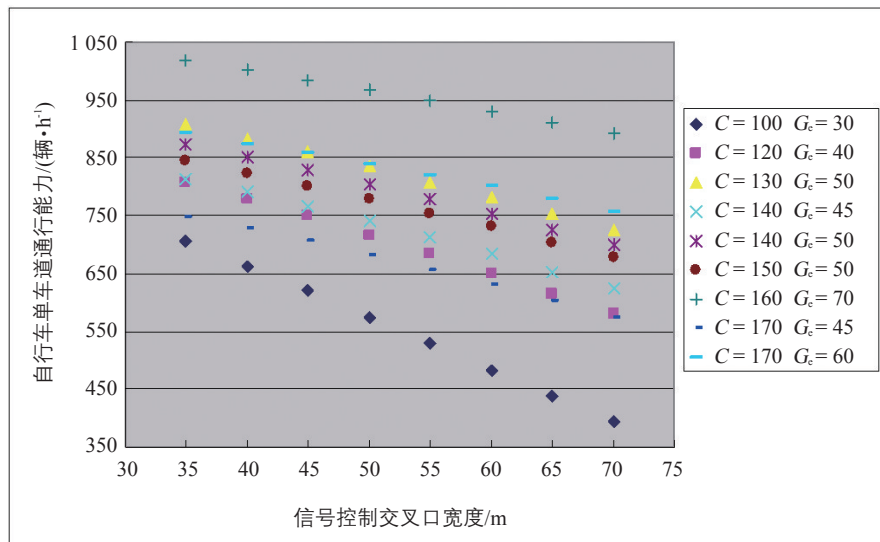


图 2 自行车通行能力与信号控制交叉口宽度之间的关系

Fig.2 Relationship between bicycle capacity and the width of the approach at signalized intersections

4 自行车流体扩散影响

4.1 同向直行和右转机动车

信号控制交叉口自行车流体扩散现象对同向直行和右转机动车，特别是右转车辆产生较大影响。同样，同向直行和右转机动车也会对自行车流的正常通行产生影响。这种相互影响和制约表现在二者均不得不减速前行，影响了相互通过交叉口的能力。

自行车的干扰可以用机动车通过交叉口时减少的有效绿灯时间来描述。

1) 直行机动车由于减速行驶造成有效绿灯时间损失。假设直行机动车通过交叉口所需时间为 t_s ，每一周期直行机动车数为 n_s ，则每周期损失的有效绿灯时间为 $n_s t_s$ 。反之，自行车的有效绿灯时间 G_c 变为 $G_c - n_s t_s$ 。

事实上，直行机动车仅对两相位信号控制交叉口的自行车左转通行有影响，而对有专用左转信号相位的信号控制交叉口的自行车通行影响甚微。

2) 自行车流对右转机动车辆通行能力的影响较大(有专用右转信号相位除外)。当自行车直行或左转时，在有效绿灯时间 G_c 里，右转机动车的等待相当于损失了有效绿灯时间。假设机动车右转通过交叉口所需时间为 t_r ，每一周期右转机动车数为 n_r ，则每周期损失的有效绿灯时间为 $n_r t_r$ 。反之，自行车的有效绿灯时间 G_c 变为 $G_c - n_r t_r$ 。

若自行车流量较小，在微观上反映为右转机动车的平均车头时距小于排队自行车的清空时间，右转机动车每次都有可接受间隙通过，即自行车临界间隙大于右转机动车的清空时间。在这种情况下，可认为自行车对右转机动车的通行能力影响较小。

4.2 对向左转机动车

对于未设专用左转相位的信号控制交叉口，绿灯启动时，自行车流呈流体扩散行进期间，与对向左转机动车流存在相互冲突，对左转车流通行能力产生较大影响。当自行车直行或左转时，在有效绿灯时间 G_c 内，对向左转机动车的等待同样是损失了有效绿灯时间，只是与对同向直行和右转机动车流的影响相比，其受影响的时间要滞后一些，滞后时间同样与交叉口宽度有关。假设对向机动车左转通过交叉口所需时间为 t_l ，每一周期对向左转机动车数为 n_l ，则每周期损失的有效绿灯时间为 $n_l t_l$ 。反之，自行车有效绿灯时间 G_c 变为 $G_c - n_l t_l$ 。自行车流对对向左转机动车来说存在临界间隙，一般情况下，驾驶人会拒绝小于临界

间隙的时间间隔通过交叉口。

5 自行车流体扩散修正模型

综合自行车流体扩散影响的分析，结合式(2)，可得到考虑机动车影响的信号控制交叉口自行车流体扩散修正模型，自行车单车道通行能力 Cap^b /(辆·h⁻¹)为：

$$Cap^b = 3600q \left\{ \frac{G_c - n_s t_s - n_r t_r - n_l t_l - T}{C} + \rho \left(1 - \frac{G_c - n_s t_s - n_r t_r - n_l t_l - T}{C} \right) \cdot \left(e^{-1} - e^{-\frac{G_c - n_s t_s - n_r t_r - n_l t_l - T}{C}} \right) \right\} \quad (3)$$

式(3)为考虑机动车影响的信号控制交叉口自行车单车道通行能力。由于车辆到达的随机性及其交叉口位置的影响，有效绿灯时间的损失取值较难界定。考虑实际可操作性，本文采用折减系数法计算自行车单车道通行能力 Cap^b /(辆·h⁻¹)：

$$Cap^b = 3600q f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \left\{ \frac{G_c - T}{C} + p_1 \cdot \left(1 - \frac{G_c}{C} \right) \cdot \left(e^{-1} - e^{-\frac{G_c}{T}} \right) \right\} \quad (4)$$

$$f_1 = 1 - (1 - A) \cdot (1 - P_1) \quad (5)$$

$$f_2 = 1 - (1 - A) \cdot (1 - P_2) \quad (6)$$

$$f_3 = 1 - (1 - \delta) \cdot (1 - P_2) \quad (7)$$

式中： f_1 为同向右转机动车对自行车通行能力的影响因子，一般 $0 < f_1 < 1$ ，有专用右转信号相位的信号控制交叉口 f_1 可取1； f_2 为对向左转机动车对自行车通行能力的影响因子，一般 $0 < f_2 < 1$ ，有专用左转信号相位的信号控制交叉口 f_2 可取1； f_3 为同向直行机动车对自行车通行能力的影响因子，一般 $0 < f_3 < 1$ ，有专用左转信号相位的信号控制交叉口 f_3 可取为1。 A 为自行车允许通行时间段内考虑机动车左转和右转影响的调整系数， $0 < A < 1$ ； P_1 为有右转保护相位的调整系数，一般 $0 < P_1 < 1$ ，若交叉口设计了专门的右转相位则 P_1 为1； P_2 为有左转保护相位的调整系数，一般 $0 < P_2 < 1$ ，若交叉口设计了专门的左转相位则 P_2 为1； δ 为自行车流膨胀系数，一般 $0 < \delta < 1$ 。

6 实例分析

选择哈尔滨市4个信号控制交叉口进行实地调查，分别为：先锋路—宣化街交叉口(交叉口1)、宣化街—大成街交叉口(交叉口2)、中山路—和平路交叉口(交叉口3)、红旗大街—淮河路交叉口(交叉口4)，调查结果见表2。

根据实地调查交叉口的宽度，自行车平均速度，信号周期和相位有效绿灯时间，选择哈尔滨市4个信号控制交叉口中的典型相位，根据美国通行能力手册中自行车部分

参数修订值^[1]，并结合实际调查情况，参数取值为：①对于交叉口1和2选择相位(机动车直行、左转同时放行，无专用左转相位)， $f_1=0.76$ ， $f_2=0.87$ ， $f_3=0.95$ ；②对于交叉口3和4选择相位(自行车通行不受左转机动车影响)， $f_1=0.76$ ， $f_2=1$ ， $f_3=1$ 。由式(4)最终得到基于修正模型的计算结果，即考虑机动车影响的信号控制交叉口自行车通行能力，如表3所示。

为便于比较，表3列出了北京市类似交通条件信号控制交叉口的观测值。

表3计算结果高于北京市类似信号配时系统交叉口观测数据^[10]和哈尔滨市观测数据，但更接近北京市观测数据

据，这表明实际观测高峰流量往往并没有达到通行能力，信号控制交叉口自行车通行能力与所在城市地域、天气、自行车拥有量、自行车平均到达率和平均速度等因素均有关。北京市上下班自行车高峰流率大，局部时段有可能达到通行能力，而哈尔滨市冬季漫长，气候寒冷，城市自行车保有量小，出行量少，故即便是高峰自行车流量也未达到其通行能力。

7 结语

本文根据信号控制交叉口自行车流体扩散特性及相关

表2 信号控制交叉口配时情况
Tab.2 Signal timing at signalized intersections

交叉口	交叉口宽度/m	信号周期/s	相位情况			
1	东西 55 南北 57	170	东直行+东左转 $G_c = 25$ s	西直行+西左转 $G_c = 35$ s	南直行+南左转 ^① $G_c = 35$ s	北直行+北左转 $G_c = 57$ s
2	东西 40 南北 40	163	东直行+东左转 $G_c = 30$ s	西直行+西左转 ^① $G_c = 30$ s	南北直行 $G_c = 70$ s	南北左转 $G_c = 25$ s
3	东西 58 南北 55	148	东西直行 $G_c = 45$ s	东西左转 $G_c = 30$ s	南北直行 ^① $G_c = 45$ s	南北左转 $G_c = 20$ s
4	东西 55 南北 55	90	东西直行 $G_c = 24$ s	东西左转 $G_c = 16$ s	南北直行 ^① $G_c = 30$ s	南北左转 $G_c = 20$ s

①进行修正模型计算的典型相位。

表3 考虑机动车影响的自行车单车道通行能力计算结果
Tab.3 Bicycle capacity in single lane with the impact of vehicles at signalized intersections

项目	交叉口1 南直行+南左转	交叉口2 西直行+西左转	交叉口3 南北直行	交叉口4 南北直行
交叉口配时/s	$C = 170$ $G_c = 35$	$C = 163$ $G_c = 30$	$C = 148$ $G_c = 45$	$C = 90$ $G_c = 30$
交叉口宽度/m	55	40	58	55
修订模型计算值(单车道)/(辆·h ⁻¹)	318	348	516	422
哈尔滨市观测值(单车道)/(辆·h ⁻¹)	192	113	282	156
北京市观测值 ^① (单车道)/(辆·h ⁻¹)	241		359	301

(下转第53页)