■ 文章编号:1672-5328(2008)01-0092-05

信号控制交叉口自行车流运行特征模型

Bicycle Traffic Flow Characteristics at Signaled Intersections Research

孙明正[1] 杨晓光[2]

(1.北京交通发展研究中心,北京 100055; 2.同济大学交通工程系,上海 200092)

Sun Mingzheng[1] and Yang Xiaoguang[2]

(1. Beijing Transportation Research Center, Beijing 100055, China; 2. Department of Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

摘要: 为科学合理地解决城市道路信号控制交叉口自行车交通流通行能力的计算问题，在分析大量实测数据的基础上，对信号控制交叉口自行车交通流的运行特征进行了分析，得出自行车停车排队密度随交叉口自行车道宽度增加而线性递减的关系。根据自行车在启动后匀加速到匀速行驶的特征,建立了自行车交通流启动时间-速度、时间-距离模型;根据实测数据,标定了自行车流排队膨胀模型;根据绿灯时间自行车流量与车道宽度之间明显存在的线性关系,建立了交叉口自行车饱和流量和通行能力计算模型,为形成交叉口自行车通行空间设计、混合交通流信号控制理论奠定了基础。

Abstract: The characteristics of bicycle flow are analyzed based on observational data. The results show that the density of the queued bikes decreases lineally as does the width of the bike lanes. The relationship is based on scientific methodology applicable for calculating bicycle traffic capacity at signaled intersections. Other traffic models are also utilized to provide a theoretical basis for improving traffic space design and urban mixed traffic control, such as the time-speed and time-distance models based on the relationship between constant acceleration and constant speed; the swelling model of bicycle queues based on observational data; and the model of full bicycle traffic flow and traffic capacity based on the relationship between bicycle flow and lane width at the beginning of the green phase.

关键词:交通工程;自行车交通;自行车流模型;信号控制交叉口;通行能力

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

中图分类号: U491.1+25 文献标识码: A

收稿日期: 2007-01-01

基金项目:国家自然科学基金—通用“中国科学研究基金”资助项目(70122201/G0114)

作者简介:孙明正,男,硕士,北京交通发展研究中心工程师,主要研究方向:城市交通规划、管理、控制。

E-mail:sunmz@bjtrc.org.cn

自行车已经在交通历史舞台上扮演了100多年的重要角色。目前，我国自行车拥有量约为5亿辆，约50%居民出行选择自行车，自行车以其灵活方便、节约能源、保护环境、有益于身体健康等优点，始终是大多数人们首选的交通工具[1]。但是，自行车与机动车混行会产生很多问题。国内外对机动车的研究已经十分广泛，认识也比较清晰，而对自行车交通却认识模糊，因此应加强自行车流运行特征的研究。

1 国内外自行车交通研究状况

尽管国外从20世纪80年代起许多国家出现“自行车热”，但是其自行车交通与机动车交通相比仍然微不足道。国外自行车交通量很少，根本不会像中国城市出现大量自行车流。他们着重研究机动车交通，很多国家将自行车交通定性为环保型交通，有的则作为锻炼身体的工具，而不是将自行车作为一种道路上的基本交通工具。虽然国外在自行车流特性方面有相关研究，但这些研究的对象特征与我国的实际情况存在明显不同，研究成果不适合于我国大量的自行车流[2]。

国内对自行车交通的研究从交通工程学科兴起时就已经开始，并取得了一些成果。对自行车流有代表性的理论研究包括：北京市政设计院关于自行车通行能力的调研[3]、北京建筑工程学院关于北京自行车交通系统和交通流理论的研究、“北京自行车交通研究小组”的自行车交通研究[4]，以及同济大学道路与交通工程研究所的一系列研究成果[5~7]。但是这些研究尚未形成系统的自行车流研究成果，而且理论模型多侧重于连续流，对于信号控制交叉口自行车交通设计与管理的指导意义不强，有些理论和模型还存在一定的适用性问题。

目前，自行车交通的管理问题已经为我国交通建设、管理相关部门所认知，各种管理方法的试验得以不断实施，自行车

交通规划、设计与管理方法规范性体系的建立势在必行，相应的研究力度也应加大。同时，国内将自行车交通定性为慢行交通，其交通功能也在发生转变，自行车流运行特征的研究更为迫切。

2 信号控制交叉口自行车流运行特征

车流密度是指一条车道上车辆的密集程度。下文的排队密度是指当信号控制交叉口红灯启亮时，自行车无法通行，速度趋于零，自行车流量也趋于零时的阻塞密度。交叉口与自行车排队密度有关的因素很多，如排队车辆数、车道宽度、行车人个人行为、自行车尺寸、自行车动态与静态的净空宽度等。下面分别分析自行车排队长度与停车数量、排队密度和车道宽度的关系，以了解自行车流在信号控制交叉口的运行特征。

1) 排队长度与停车数量关系

选取上海市城市道路交叉口不同宽度的自行车进口道，进行了大量的观测，对每种车道宽度下的排队长度与停车数量统计数据进行分析，结果见表1，图1。回归方程中，自变量x为自行车在交叉口排队的停车数量/辆，因变量y为自行车的排队长度/m。

由表1可知，在不同流量状态下，相同的自行车道宽度，自行车停车排队密度应该为一恒定的值。通过对现场的实际观察，除车道宽为3.5 m情况下，都有右转自行车的存在，因此在排队初期，车道并非全部用于停车，而是留有1 m左右的车道供右转自行车通行。当排队长度超过20 m 后，自行车才会占满整个车道，并且后面排队的自行车开始填补前面的空隙。故回归方程中有4种车道宽度下的截距不为零(3.5m宽车道除外)。

2) 排队密度与车道宽度关系

对观测数据进行处理，按自行车在交叉口排队量的区间进行划分，计算每个区间中值对应的排队长度，整理结果见表2。

由图2可知，随着车道宽度的增加，排队长度虽然存在波动，但整体呈下降的趋势。为了进一步分析排队密度与车道宽度之间的关系，在原有数据的基础上补测了车道宽度为2.75 m和4.9 m的数据，对各种情况下的平均密度进行了分析，见表3，图3。在数据分析时，对右转自行车的

表1 排队长度与停车数量分析表

Tab.1 Analysis of bicycle queue length and number of parking vehicles

车道宽度 /m	回归方程	相关系数
3.00	y=0.40x+5.71	0.97
3.25	y=0.32x+5.97	0.91
3.50	y=0.44x+0.04	0.95
4.00	y=0.37x+4.11	0.95
4.75	y=0.32x+3.27	0.91

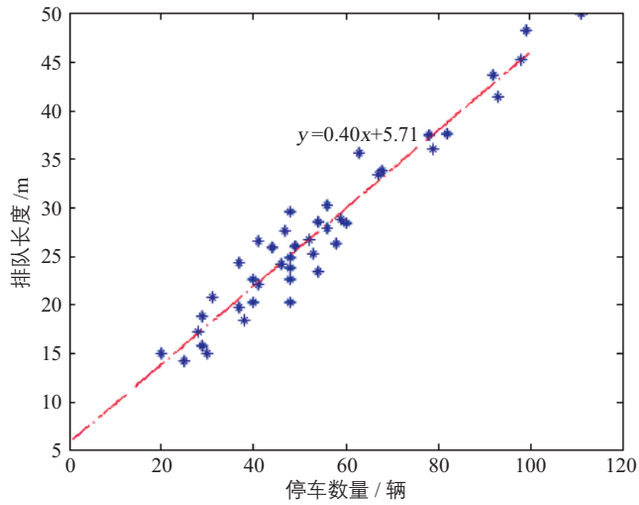

图1 3 m宽车道回归曲线

Fig.1 Regression curve for a lane width of 3 m

表2 交叉口自行车排队量与排队长度对应表　　m

Tab.2 Queue length corresponding to queue volume at intersection

车道宽度	排队量 / 辆					
	20	25	30	35	40	45
3.00	15.3	15.6	17.0	21.0	21.9	24.8
3.25	9.0	13.7	14.7	18.4	19.8	20.5
3.50	8.4	11.5	14.0	15.7	16.3	18.7
4.00	10.9	12.8	14.3	17.3	20.3	20.3
4.75	9.8	11.4	13.3	14.7	15.5	17.0

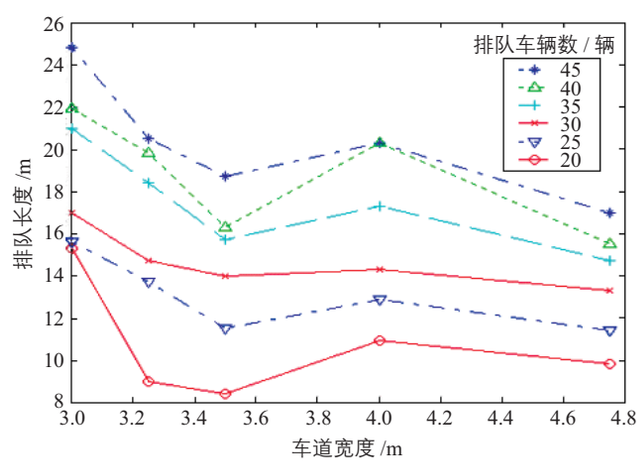

图2 排队长度与车道宽度关系

Fig.2 Relationships between queue length and lane width at intersection

存在而使排队初期的车道不能充分利用的情况进行了修正。

由表3和图3可知，排队密度与车道宽度的关系虽然存在一定的波动，但总体趋势是：自行车排队密度随车道宽度的增加而线性递减。函数关系式为：

$$\rho_B = 0.886 - 0.069W, \quad (1)$$

相关系数$R = 0.776$，式中：ρ_B为交叉口进口道自行车排队密度/(辆·m^{-2})；W为交叉口自行车道宽度/m。

表3 不同车道宽度对应的平均排队密度

Tab.3 Average queue density corresponding to different lane width

车道宽度 /m	平均排队密度 /(辆·m^{-2})
2.75	0.705
3.00	0.624
3.25	0.726
3.50	0.656
4.00	0.562
4.75	0.517
4.90	0.595

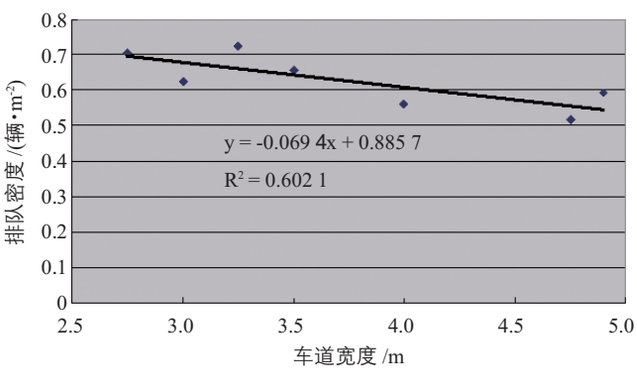

图3 排队密度与车道宽度关系

Fig.3 Relationships between queue density and lane width

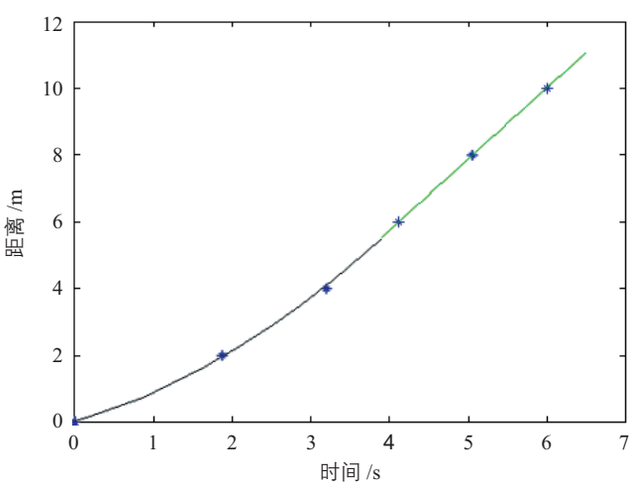

图4 自行车时距曲线

Fig.4 Relationship between bicycle travel distance and travel time

3 自行车流运行特征模型

3.1 自行车流启动模型

在混合交通流通过信号交叉口时，其运行特征有明显的差异：自行车在绿灯初期，启动反应损失几乎为零，大量自行车同时进入交叉口；而机动车则有2 s左右的启动反应时间，因此自行车启动比机动车快。研究自行车刚刚启动时的车速变化规律，对交叉口信号配时、服务水平标准划分都具有重要作用。

1) 时间-距离模型

在停车线之后每隔2 m为一断面，记下自行车通过断面所需要的时间，就得到了自行车启动后行驶距离与时间的关系。自行车启动后每通过2 m所需要的时间分别为：1.878 s，1.318 s，0.924 s，0.944 s，0.947 s。这些数据表明：在自行车启动4 m以后，开始从加速阶段进入匀速阶段，并且保持约2.11 m/s的速度离开交叉口。行驶距离和时间的关系见图4。

通过曲线拟合后，“时间-距离”模型可以表达成分段函数形式：

$$L(t) = \begin{cases} 0.19t^2 + 0.68t, & 0 \le t < 3.9 \\ 2.13t - 2.79, & t \ge 3.9 \end{cases} \quad (2)$$

式中，相关系数$R = 1$。

2) 时间-速度模型

自行车瞬时速度模型在理论上相当于把自行车“时间—距离”模型曲线对时间求导，即式(2)对时间t求偏导，可得到交叉口自行车瞬时速度与启动时间关系模型：

$$V(t) = \begin{cases} 0.38t + 0.68, & 0 \le t < 3.9 \\ 2.13。 & t \ge 3.9 \end{cases} \quad (3)$$

3.2 自行车流排队膨胀模型

自行车在交叉口排队时，一辆自行车占用道路的横向宽度在0.8 m左右；车辆启动后，尤其在加速过程中，其横向宽度要求增大。这是排队自行车流的膨胀特征。

排队自行车流的膨胀，尤其是当膨胀宽度过大时，容易出现绿灯初期先驶出停车线的自行车流挤占机动车道的现象，对机动车交通流产生较大的横向影响。通过对排队自行车流膨胀现象的研究，建立膨胀关系模型，可以作为交通设计的依据，降低自行车横向膨胀对机动车的影响。

自行车流的膨胀用膨胀度K_p描述，即自行车在静态停车时的横向宽度与启动膨胀后的横向宽度的比值：

$$K_p=\frac{\overline{D_b}}{D_0}, \tag{4}$$

式中：$\overline{D_b}$为自行车起动膨胀后单车占用道路横向宽度/m；D_0为自行车在静态停车时单车占用道路横向宽度/m，取0.8 m。

选取不同宽度自行车进口道，观测进入交叉口后排队自行车流的横向宽度和数量。经分析，运动中自行车单车占用道路的横向宽度保持一个稳定的水平：样本均值$\overline{D_b}=1.012$ m，样本方差$s^2=0.017$，膨胀度$K_p=\frac{1.012}{0.8}=1.27$。

观测发现，在有助动车(电动车)混入时，排队自行车的横向宽度明显增大，这是由于助动车的速度和加速度都比自行车大，其占用的横向宽度必然增大。本研究将助动车(电动车)的影响也作为一个因素进行综合分析。有一定比例助动车混入时自行车流占用道路的横向宽度结果见表4。

考虑到助动车的影响，膨胀宽度D'_b为：

$$\overline{D'_b}=\alpha\cdot\overline{D_b}, \tag{5}$$

式中：α 为助动车影响修正系数。通过回归分析，得到α与助动车混入率ψ 的线性关系：

$$\alpha=1+0.6\psi, \tag{6}$$

相关系数$R=0.978$。

则自行车流膨胀宽度W_{Bp}的计算模型为：

$$W_{Bp}=\overline{D'_b}\cdot N=\alpha\cdot\overline{D_b}\cdot N\approx\alpha\cdot N_p, \tag{7}$$

式中：N为排队自行车驶出停车线后横向并行自行车数量/辆；N_p为停车线首排自行车停车数/辆。

3.3 自行车道通行能力模型

1) 模型建立

自行车在信号控制交叉口，红灯期间不断到达的自行车集中在停车线后面，以一定的停车密度形成某一排队长度；绿灯亮后，自行车启动、加速，以集群方式通过停车线，与此同时自行车的启动波以一定的速度向后传播，这期间排队继续加长；通过停车线的自行车密度随着绿灯时间的延续而减少，车速逐渐提高，经过一段时间以后，密度趋向于与路段一致，即绿灯期间陆续到达的自行车不断通过。

只要把握住绿灯初期放行的排队自行车流流量随时间的变化规律，就能比较准确地反映交叉口自行车的通行能力。机动车的通行能力计算，需要计算有效绿灯时间，对自行车而言比较困难。本文通过对不同车道宽度情况下自行车流量数据的分析，得到了交叉口自行车通行能力的简便计算方法。

取5种不同车道宽度的交叉口自行车进口道进行观测，对数据进行回归分析，其结果见表5，拟合曲线见图5、图6。回归方程中，自变量S为自行车流量/辆，因变量t为自行车启动时间/s。

绿灯初期自行车流量S/(pcu·h^{-1})与车道宽度W/m有明显的线性关系：

表4 助动车(电动车)混入对自行车交通流膨胀宽度的影响

Tab.4 Effects of aided (electric) bicycles on the bicycle flow swelling width

助动车(电动车)混入率 /%	样本均值 /m	样本方差
0	1.012	0.017 0
17	1.104	0.009 9
20	1.120	0.008 7
25	1.179	0.026 2
33	1.188	0.001 4
40	1.200	0.002 3
50	1.305	0.051 5

表5 绿灯初期自行车流量与时间关

Tab.5 Relationship between bicycle flow and travel time in the Green Phase

车道宽度 /m	回归方程	相关系数
2.75	$S=1.84t$	0.87
3.00	$S=2.2t$	0.97
3.50	$S=2.33t$	0.98
4.00	$S=2.47t$	0.91
4.90	$S=3.2t$	0.97

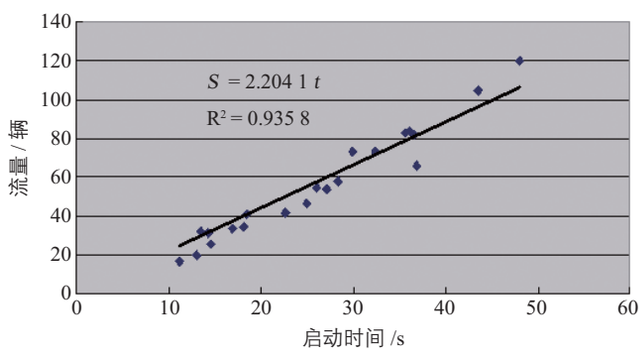

图5 3 m宽进口道流量与启动时间拟合曲线

Fig.5 Regression curve of the 3 m entrance flow and travel time

$$S = (0.55W+0.41)t, \tag{8}$$

自行车流量与自行车道宽度的相关系数$R = 0.98$。由此可得绿灯期间自行车道饱和流量S_B/(pcu·h^{-1})与通行能力Cap_B/(pcu·h^{-1})分别为：

$$S_B = 3\,600(0.55W+0.41), \tag{9}$$

$$Cap_B = \frac{3\,600g}{C}(0.55W+0.41), \tag{10}$$

式中：g为自行车相位绿灯时间/s；C为交叉口信号周期/s。

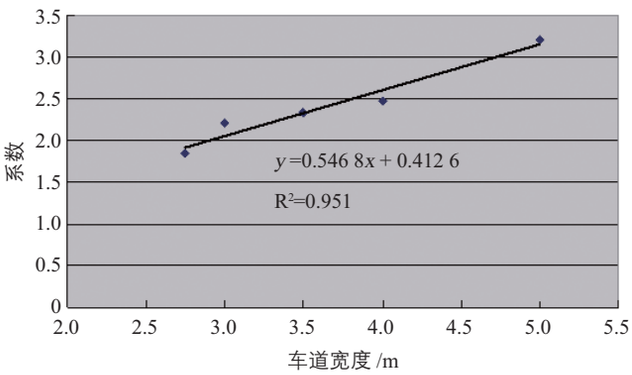

图6 系数与车道宽度拟合曲线

Fig.6 Regression curve of the modulus and the lane width

表6 通行能力计算方法检验

Tab.6 Validation of the capacity calculating method

指标	计算值 /(pcu·h^{-1})	实测值 /(pcu·h^{-1})	误差 /%
饱和流量	3 456	3 335	3.6
通行能力	1 728	1 678	3.0

2) 模型检验

取W=1 m，绿信比为0.5，按照式(9)、式(10)计算饱和流量和通行能力，并与实测值进行比较分析，结果见表6。本文计算方法得出的两项指标与实际情况非常接近。

4 模型应用示例

我国城市道路自行车交通高峰时间相对集中，且流量很大，有人提出在自行车高峰时间在交叉口设置各个流向自行车共用的自行车专用相位，禁止一切机动车通行，其余相位时间供机动车通行，以此降低机非干扰，提高交叉口的通行效率。但通过对北京市三里河东路和月坛南街交叉口的实地观测发现，当自行车超过一定流量时，交叉口4 个流向的自行车流首尾冲突，造成交叉口秩序混乱，即该方法不适于自行车左转流量比例大的交叉口，如图7a所示。为此，本文用自行车流运行特征模型说明自行车专用信号相位的适应性。

为了防止各进口道直行自行车流发生冲突，自行车流量应满足：本方向(如南进口)自行车流中的尾部车流应比按逆时针顺序的前一个进口道(西进口)的自行车流中的头部车流先通过冲突点。图7b中L_1，L_2为本方向自行车停车线到本方向自行车流与横向直行自行车流冲突点的距离。因此，适合自行车专用相位的最大自行车流量即为匀速驶

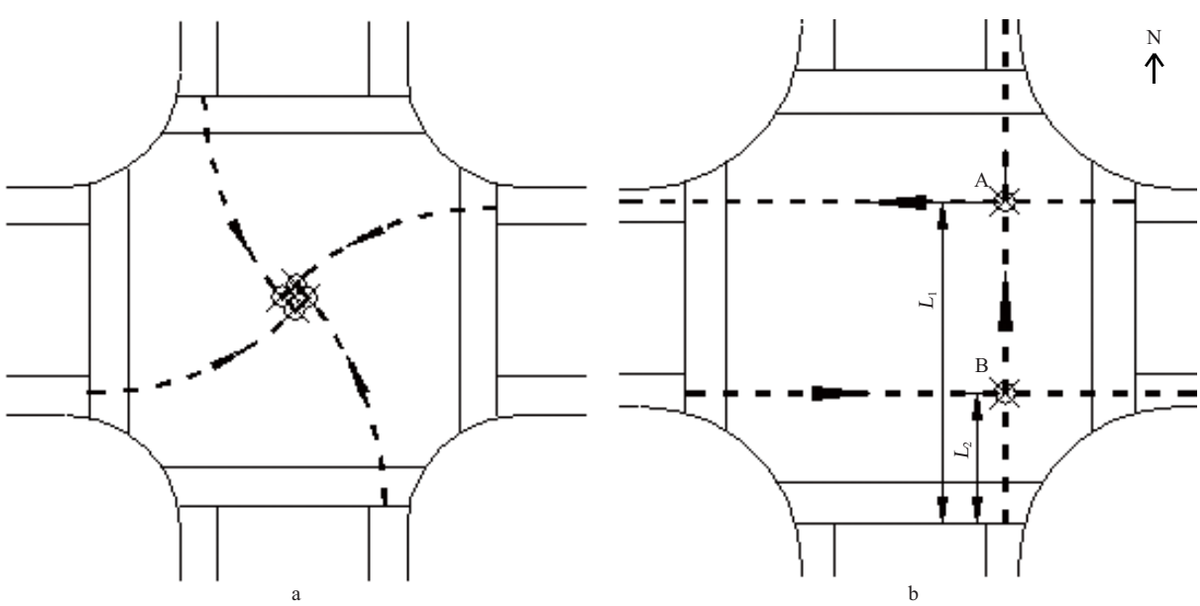

图7 自行车专用相位的适用性分析

Fig.7 Analysis on adaptability of the exclusive bicycle phase

(下转第11页)