

两相位交叉口左转车通行能力计算方法

王殿海^{1,2},孙 锋³,金 盛¹

(1. 吉林大学 交通学院,长春 130022; 2. 大连交通大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116028; 3. 山东理工大学 交通学院,山东 淄博 255049)

摘要:针对传统的左转车通行能力计算方法中存在的问题,对无信号交叉口的可插车间隙理论模型进行了改进,建立了具有部分优先权的可插车间隙理论模型。通过实例对模型中的参数进行了标定,标定出具有部分优先权的左转车临界间隙为 3.4 s,并代入模型计算出了左转车的通行能力,与传统模型相比,此模型的计算结果更符合实际,其平均相对误差为 16.47%。

关键词:道路建筑工程;两相位交叉口;部分优先权;通行能力;临界间隙

中图分类号:U491.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)04-0767-05

Method of computing left-turn vehicle traffic capacity at two-phase intersection

Wang Dian-hai^{1,2}, Sun Feng³, Jin Sheng¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Traffic and Transportation, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 3. College of Transportation, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming at the defects of the traditional method of computing the left-turn vehicle traffic capacity, the existing model for the gap acceptance at the intersection without traffic signal was improved and a new model was developed for the left-turning crossing the opposite through vehicles with limited priority. The proposed model was calibrated by the field data, resulting in that the critical gap of the left-turn vehicles is 3.4 s. The left-turn vehicle traffic capacity was computed with the gap. Compared with the traditional model, the proposed model appears closer to the reality, its average relative error is 16.47%.

Key words: road transportation engineering; two-phase intersection; limited priority; traffic capacity; critical gap

根据我国交通规则,在两相位信号交叉口,绿灯时允许车辆直行或右转,在不妨碍直行车行驶的条件下允许车辆左转。黄灯亮时就不准车辆左转、调头或右转,但已越过停车线的车辆可以继续行驶^[1]。因此左转车通过交叉口有以下三种方式:①利用绿灯初期通过。即绿灯初期,在对向直行车辆还未到达冲突点前左转车先驶过冲突点,从

而通过交叉口;②利用对向直行车流的可穿越间隙通过。即在对向直行车流交通量不大的情况下,左转车利用其可穿越间隙通过交叉口;③利用绿灯间隔时间(黄灯时间或全红时间)通过。绿灯结束后,对向直行停止行驶,停在交叉口内的左转车辆利用绿灯间隔时间迅速通过交叉口。信号交叉口的通行能力是对每一引道规定的。它是在

收稿日期:2006-08-29.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50338030);GM 联合基金资助项目(50422285).

作者简介:王殿海(1962-),男,教授.研究方向:交通控制. E-mail:wangdianhai@sohu.com

现行的交通、车行道和信号设计条件下,某一指定引道所能通过交叉口的车辆的最大流率^[2]。对于某一指定引道,分别计算以上述三种方式通过的左转车的最大车辆数,先相加,然后在考虑信号周期的情况下换算为流量,这一流量在本文中被定义为左转车的通行能力。以第一种方式和第三种方式通过的最大车辆数主要与交叉口的尺寸(交叉口内能停放的车辆数)有关,在几何条件一定的条件下,交叉口的尺寸基本是一个定值,通过实际调查很容易得到;而以第二种方式通过的最大车辆数主要与对向直行车间隙理论为基础,研究了两相位交叉口以第二种方式通过交叉口的左转车最大车辆数的计算方法,考虑了无信号交叉口的可插车间隙理论存在的两个缺陷:①车头时距的分布为负指数分布在信号控制交叉口不合适;②可插车间隙理论是建立在优先权车流绝对优先的基础上的,而在实际的交通运行中,左转车在穿越对向直行车间隙时往往会影响直行车间隙的正常行驶,即直行车间隙并不具有绝对的优先权。针对上述存在的问题,作者对可插车间隙理论模型进行了改进,提出了一种新的左转车通行能力计算方法。

1 常用方法分析

目前,国外常用的方法有 HCM(道路通行能力手册)方法和 R·金伯方法。而国内最常用的方法有停车线法和冲突点法,冲突点法所使用的公式比较繁杂,而且其中许多参数(如冲突点位置、空档数等)难以获得。还有些学者通过计算机仿真来计算通行能力^[3]。

1.1 HCM 方法

在美国 2000 年版的 HCM 中,是通过计算每一引道或车道组的饱和流率和该引道或车道组的绿信比来计算信号交叉口每一引道或车道组的通行能力的。而每一引道或车道组的饱和流率是通过对该引道或车道组的理想饱和流率进行各种修正来计算的,其修正计算公式^[1]如下

$$S = S_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{RT} f_{LT}$$

式中:S 为车道组饱和流率; S_0 为车道组在理想

条件下的饱和流率; N 为车道组中车道数; f_w 为车道宽度修正系数; f_{HV} 为交通流中重型车辆校正系数; f_g 为引道坡度修正系数; f_p 为临近车道停车情况及该车道停车次数校正系数; f_{bb} 为公交车停在交叉口范围内阻塞影响作用校正系数; f_a 为地区类型修正系数; f_{RT} 为右转修正系数(包括行人流的影响); f_{LT} 为左转修正系数。

HCM 方法考虑了影响饱和流率的各种因素,比较符合实际,但是其中使用的系数太多,而且系数的获取有一定的难度。

1.2 R·金伯方法

有些学者用线性回归方法得到左转车与对向直行车间隙理论之间的关系。R·金伯发现,不管对向直行车间隙是一股还是两股(即一条车道或两条车道),左转车的饱和流量与它们的关系都是一样的,可以归纳为如下的线性关系(相关系数为 0.91)^[4]:

$$S = 1286 - 0.78q$$

式中: q 为车流量, pcu/h。

R·金伯方法中的公式是通过大量的数据回归得到的,对于不同的交叉口就有不同的公式;虽然可以得到比较精确的结果,但是工作量巨大。而且由公式可以看出,当直行车间隙大于 1650 辆时,左转车的饱和流量就会出现负值,显然此公式的流量适用范围有一定的限制。

1.3 停车线法

停车线法是国内计算信号交叉口通行能力最常用的方法。停车线法在计算每个周期以第二种方式通过的左转车的最大车辆数时,采用如下公式^[1]

$$n = \frac{C_s - C'_s}{2}$$

式中: n 为每个周期以第二种方式可能通过交叉口的左转车辆数; C_s 为每条直行车间隙在一个周期内以饱和流率通过的车辆数; C'_s 为每个周期内实际到达的车辆数。

停车线法的上述公式是在理论分析的基础上得出的,没有经过实际数据的验证,而且理论依据也不够充分,其实用性有待进一步验证。

1.4 仿真计算方法

计算机仿真分析交叉口通行能力就是利用一定的模型让计算机自动产生与实际相似的交通流。通过模仿车辆通过交叉口时的各种行驶行为,形成通行能力与影响因素的数值关系^[5],从而

获得左转车的通行能力。

仿真法可以对各种条件下的交叉口进行通行能力计算,同时,还可以对使用上述模型计算出的通行能力进行验证。但是,它是建立在理论模型的基础上的,只有研究出的理论模型真实可靠,通过仿真计算出的通行能力才能更符合实际。

2 具有部分优先权的可插车间隙模型的建立

部分优先权是指具有优先权的车流在实际运行过程中受到了不具有优先权的车流干扰的情况。在下面的公式中,假定所有驾驶员具有相同的特性,即所有驾驶员具有相同的临界穿越间隙和跟随时问。

针对前述的传统可插车间隙理论模型存在的两个问题,对其进行了如下改进:①用 Coman's M3 分布代替负指数分布,作者对直行车流服从 Coman's M3 分布已经做了证明^[6];②在考虑对向直行车具有部分优先权的情况下,推导可插车间隙理论模型。

2.1 基本模型

在无信号交叉口的微观分析中,次路车流的通行能力一般是通过主路车流的流量来确定^[7],按下式计算

$$q_{2\max} = q_1 \int_0^\infty f(t) h(t) dt \quad (1)$$

式中: $q_{2\max}$ 为以第二种方式通过交叉口的左转车的最大车辆数; $f(t)$ 为穿越间隙分布的密度函数; $h(t)$ 为主路车流间隙时间为 t 时次路车流通过交叉口的最大车辆数。

从式(1)可以看出,只要确定了在对向直行车具有部分优先权条件下的 $f(t)$ 和 $h(t)$,就可以推导出以第二种方式通过交叉口的左转车最大车辆数的计算公式。Troutbeck 研究了具有部分优先权的穿越间隙的分布模型,对其进行改进便可得 $f(t)$ 。由交通流理论中的穿越间隙与其可通过的最大车辆数之间的关系模型可得 $h(t)$ ^[7]。从而建立 $q_{2\max}$ 的计算模型。

Troutbeck 等^[8]建立的模型为:在假定直行车流符合 Coman's M3 分布的情况下,具有部分优先权的穿越间隙的累积分布函数为

$$F(t) = 1 - Cae^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \geq \tau \quad (2)$$

系数 C 通过下式来计算

$$C = \frac{e^{\lambda t_f} - 1}{e^{\lambda t_f} - e^{-\lambda(t-t_f-\tau)} - \lambda(t-t_f-\tau)e^{-\lambda(t-t_f-\tau)}} \quad (3)$$

$$t_l \leq t \leq t_l + \tau \quad (3)$$

上述模型是 Troutbeck 在研究环形交叉口的通行能力时提出的。他认为,在环形交叉口,当 $t=t_l+\tau$ 时,车辆的汇入就不会影响汇入点下游车辆的正常行驶;而在两相位交叉口,当 $t=t_c$ 时,左转车辆的穿越也不会影响直行车流的正常行驶,所以对式(3)进行改进,用 t_a 代替其中的 t_l ,用 t_c 代替其中的 $t_l+\tau$,C 的表达式变为

$$C = \frac{e^{\lambda t_a} - 1}{e^{\lambda t_a} - e^{-\lambda(t-t_c)} - \lambda(t-t_c)e^{-\lambda(t-t_c)}} \quad (4)$$

$$t_a \leq t \leq t_c$$

式中: α 为自由车流的比例; τ 为直行车流的最小车头时距,一般取 2 s; λ 为衰减常量, $\lambda=\alpha q_1/(1-\tau q_1)$; t_c 为在对向直行车具有绝对优先权的条件下左转车的临界间隙值; t_a 为在对向直行车具有部分优先权的条件下左转车的临界间隙值; t_l 为左转车的跟随时间。

对式(2)的两边求导,得到具有部分优先权的穿越间隙分布的密度函数:

$$f(t) = C\lambda\alpha e^{-\lambda(t-\tau)} \quad (5)$$

在交通流理论中, $h(t)$ 有两种不同的表达形式,一种为离散型表达,一种为连续型表达,由于两种形式得到的公式的计算结果相差很小,在实际应用中可以忽略,所以作者只采用离散型表达形式,其分布函数为^[7]:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [nP_n(t)] \quad (6)$$

式中: $P_n(t)$ 为对向直行车流间隙时间为 t 时通过 n 辆左转车的概率,表达式如下:

$$P_n = \begin{cases} 1, & t_a + (n-1)t_l \leq t < t_a + nt_l \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

将式(5)和式(6)代入式(1)可得:

$$q_{2\max} = \frac{q_1 C \alpha e^{-\lambda(t_a-\tau)}}{1 - e^{-\lambda t_l}} \quad (7)$$

式中: q_1 为对向直行车流量。

在式(7)中,系数 C 代表部分优先权对计算左转车最大通过数的影响,通过式(4)计算,当 $t < t_c$ 时, $C < 1$;当 $t = t_c$ 时, $C = 1$,具有部分优先权的计算公式就变成了具有绝对优先权的计算公式。式(7)中的变量 q_1 、 α 、 λ 随交叉口及调查时段的不同而不同;其中的参数 t_c 、 t_a 、 t_l 是定值,通过交通调查数据可以标定,当这 3 个参数确定后,就可以根据实际交通情况来计算不同条件下以第二种方式通过交叉口的左转车最大车辆数。

2.2 参数确定方法

(1) 跟随时间估计

对于排队的左转车辆,统计其以车队形式通过直行车流间隙的平均车头时距,该平均车头时距就是跟随时间。

(2) 临界间隙估计

左转车临界间隙不能直接测得,但可以通过最大似然估计法得到临界间隙分布的均值。经研究发现^[6],在这种方法中,临界间隙基本上服从对数正态分布。这时,n个驾驶员接受间隙和最大拒绝间隙的样本似然函数为^[7]

$$\prod_{i=1}^n [F(a_i) - F(r_i)] \quad (8)$$

式中: a_i 为被第*i*个驾驶员接受的间隙的对数,如果没有间隙被接受,则 $a_i = \infty$; r_i 为被第*i*个驾驶员拒绝的最大间隙的对数,如果没有间隙被拒绝,则 $r_i = 0$; $F(\cdot)$ 为正态分布的累积分布函数。

根据最大似然估计,先对式(8)取对数,再令其对 u, σ^2 的偏导为零就得到如下两个公式

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{f(r_i) - f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} &= 0 \quad (9) \\ \sum_{i=1}^n \frac{(r_i - \hat{u}) f(r_i) - (a_i - \hat{u}) f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} &= 0 \end{aligned}$$

(10)

式中: u 为临界间隙对数的均值; $f(\cdot)$ 为正态分布的概率密度函数。

通过编程,将数据代入式(9)得到 u ,再根据式(10)得到 σ^2 ,反复迭代得到 u, σ^2 的估计值。临界间隙的均值和方差可以由下式计算得到

$$E(t_a) = e^{u+0.5\sigma^2} \quad (11)$$

$$\text{Var}(t_a) = [E(t_a)]^2 (e^{\sigma^2} - 1) \quad (12)$$

式中: σ^2 为临界间隙对数的方差

(3) 自由车流比例 α 的确定

自由车流比例 α 的计算方法如下^[7]:

$$\alpha = e^{-Aq_1} \quad (13)$$

对于 A 值的确定,已有成熟的研究结论,它的范围从6到9,随车道和车道宽度的不同而异,具体取值如表1所示。

表1 式(13)中的“ A ”值

Table 1 “A” value in Eq. (13)

车道宽度/m	中央车道	其他车道
<3.0	7.5	6.5
[3.0, 3.5]	7.5	5.25
>3.5	7.5	3.7

3 参数标定与模型验证

3.1 交通调查

作者以烟台市南大街与建设路交叉口和南大街与青年路交叉口为例,采用高楼摄影的方法进行了连续几天的交通调查,选择南北方向的部分高峰时段数据作为本文的样本数据,并对样本数据进行了处理和分析,如表2和表3所示。

表2 每周期通过的车辆数

Table 2 Crossing vehicles in every cycle

周期序号	第一辆直行通过冲突点的时刻/(m:s:f)	最后一辆直行通过冲突点的时刻/(m:s:f)	间隔时间/s	直行车折算为标准车数/pcu	左转车折算为标准车数/pcu
1	00:17:21	00:42:21	35	10.5	4
2	01:52:03	02:44:22	52.8	15.5	6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表3 车辆最大拒绝间隙和穿越间隙

Table 3 Largest rejected gap and accepted gap for a vehicle

车辆序号	拒绝间隙/s	穿越间隙/s
1	2.0	5.8
2	2.92	3.6
⋮	⋮	⋮

3.2 参数标定与确定

将式(9)~(12)使用MATLAB语言编成程序,将表3中的数据带入程序进行迭代,得到左转车临界间隙的均值为3.4 s,方差为0.6358。

在烟台市南大街与建设路交叉口和南大街与青年路交叉口,南北方向的进口道都包含一条左转车道和一条直右车道,直右车道的宽度为3 m,根据表1中的数据,A取5.25。 t_c 取5 s^[3]; t_t 取2 s^[8]。使用同样的方法,又对长春市工农大路与红旗街交叉口的参数进行了标定,得到左转车临界间隙的均值为3.4 s,方差为0.52,两地所标定参数明显接近。

3.3 模型验证

将上述参数带入式(7),得到以第二种方式通过交叉口的左转车最大车辆数的理论曲线,如图1所示。结合实际观测的左转车流量计算相对误差,如表4所示(其中的流量都已折算为小时流量),用停车线法、HCM方法、R·金伯方法及作者推导的模型计算的左转车通行能力的平均相对误差分别为41.16%、29.60%、27.46%、16.47%。可见,作

表4 模型计算值及相对误差

Table 4 Results calculated by model and relative errors

周期序号	实测数据		本文模型		停车线法		HCM方法		R·金伯方法	
	直行车流量 /(pcu·h ⁻¹)	左转车流量 /(pcu·h ⁻¹)	左转车流量 /(pcu·h ⁻¹)	相对误差 /%						
1	810	884	884	0.26	495	43.87	654	25.82	571	35.21
2	872	824	824	13.15	463	51.14	605	36.23	749	21.79
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
平均值	—	—	—	16.47	—	41.16	—	29.60	—	27.46

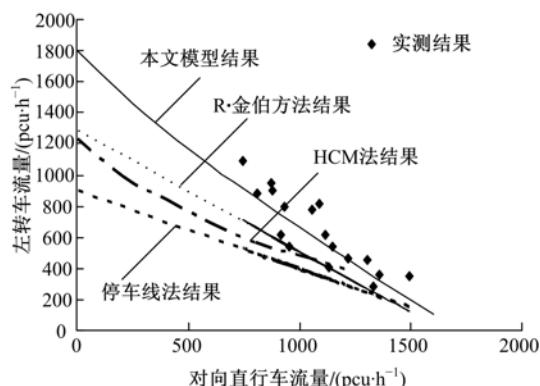


图1 左转车流量的理论模型计算结果与实测数据

Fig. 1 Calculated results and observation results of left-turn flow

者推导的理论模型更符合实际。

4 结束语

作者通过对无信号交叉口可插车间隙理论模型的改进,建立了具有部分优先权的可插车间隙理论模型,用于计算两相位交叉口左转车的通行能力,并通过实例证明此模型具有很好的实用性。因条件所限,作者只对烟台市的交叉口进行了验证,由于我国南北驾驶员的特性差异较大,作者认为随着城市的改变,其中的参数临界穿越间隙会有所改变,即此模型在其他城市使用时有些参数需要重新标定,其标定方法已在本文中做了详细地描述。

参考文献:

- [1] 陈宽民,严宝杰.道路通行能力分析[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 美国交通研究委员会.道路通行能力手册[M].任福田等译.北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [3] 杨晓光.直行优先信号控制交叉口左转交通流延误模型[J].同济大学学报,1998,26(3):284-289.
Yang Xiao-guang. Traffic delay model of left-turn flow on signalized intersection with straight-going priority[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(3):284-289.
- [4] 全永燊.城市交通控制[M].北京:人民交通出版社,1989.
- [5] 王炜,高海龙,李文权.公路交叉口通行能力分析方法[M].北京:科学出版社,2001.
- [6] 孙锋.信号控制交叉口左转专用相位设置依据研究[D].长春:吉林大学交通学院,2006.
Sun Feng. Study on principles of operation on protected left-turn phase at signalized intersection[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2006.
- [7] 王殿海.交通流理论[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [8] Troutbeck Rod J, Soichiro Kako. Limited priority merge at unsignalized intersections[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1999, 33(3):291-304.