

信号交叉口右转车流行程时间计算方法

冯雨芹^{1,2}, 冷军强³, 张亚平¹, 周博宇³, 包磊³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨, fengyuqin1998@163.com; 2. 黑龙江工程学院 汽车与交通工程学院, 150050 哈尔滨; 3 哈尔滨工业大学(威海) 汽车工程学院, 264209 山东 威海)

摘 要: 为定量研究右转机动车通过信号交叉口的运行效率, 以组合负指数分布表征直行非机动车流车头时距, 负指数分布表征右转车流车头时距, 以可插车间隙理论、排队论为基础建立行程时间模型, 并利用实地调查数据, 对所建模型与常用的主流车流车头时距服从负指数分布的模型进行对比分析. 结果表明: 右转车流率、跟随车头时距、临界间隙对行程时间均有显著影响, 所提出的右转车流行程时间计算方法有效、适用.

关键词: 信号交叉口; 右转车流; 行程时间; 组合负指数分布; 灵敏度分析

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)04-0067-04

Calculation method of right-turn vehicle travel time at signalized intersection

FENG Yu-qin^{1,2}, LENG Jun-qiang³, ZHANG Ya-ping¹, ZHOU Bo-yu³, BAO Lei³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, fengyuqin1998@163.com; 2. College of Automobile and Traffic Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, 150050 Harbin, China; 3. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: To quantitatively study the operating efficiency of right-turning vehicles at signalized intersection, a travel time model was established on the basis of gap theory and queue theory, which was under the assumption that the straight flow of non-motor headway followed the combined negative exponential distribution and right-turning flow headway followed the negative exponential distribution. Comparison was done by field observation data, and the reasons of the results were analyzed and the applicability of the model was set up. Three significant factors can exert apparent effects on travel time, involving right-turning flow rate, following car headway and critical gap. The travel time model of right-turning vehicles at intersection established in this paper is efficient, practical and with strong applicability.

Key words: signalized intersection; right-turning vehicles; travel time; combined negative exponential distribution; sensitivity analysis

交叉口作为城市道路交通的瓶颈, 是交通管控的重点和难点^[1]. 车辆通过交叉口的行程时间是评价交叉口运行效率及 ITS 应用的基础, 也是计算车辆延误的切入点^[2-3]. ABU-LEBDEH 等^[4]评价交叉口 RTOR (right-turn-on-red) 交通量对延

误的影响. 1998 年 Smith 等^[5]基于机动车与非机动车之间的相互作用, 建立了不同混合交通条件和不同交通控制方式下的机动车和非机动车的延误模型. QURESHI 等^[6]结合 HCM 信号交叉口构建了 RTOR 延误估算框架, 基于排队论提出了统一的延误计算模型. MADANAT 等^[7]基于可插车间隙理论建立了间隙接受函数, 预测随机驾驶员在交叉口冲突区域接受给定间隙的概率, 可用于预测交叉口随机排队所造成的延误. LIU 等^[8]以基本路段行程时间及交叉口延误为基本单元研究了车辆在城市道路中的行程时间问题. 梁春岩

收稿日期: 2010-10-05.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (E200940, E200933);
黑龙江省骨干教师项目 (1155G46); 哈尔滨工业大学
(威海) 校科学研究基金资助 (HIT(WH) ZBQD201010).

作者简介: 冯雨芹 (1973—), 女, 讲师, 博士研究生;
张亚平 (1966—), 男, 教授, 博士生导师.

等^[9]建立了机非冲突交叉口右转机动车行程时间模型和右转机动车行程时间的二元回归模型,并研究了各自的适用范围. 交叉口延误模型相关研究较多,而交叉口各方向车流行程时间研究较少,比较典型的是梁春岩等建立的机非冲突交叉口右转机动车行程时间模型,但模型建立基于严格的假设条件,如假设非机动车流及右转机动车流的到达规律均服从泊松分布,非机动车流仅有自行车,且自行车流为单列车流,服务时间服从负指数分布. 由于城市道路交通越来越拥挤,而泊松分布又适用于交通流基本为自由流的状态,故上述假设条件一般情况下难以得到满足,也就在很大程度上制约了模型的应用. 基于此,本文拟在文献^[9]研究基础上,克服其不足之处,研究右转车流通过信号交叉口的行程时间的计算模型.

1 模型建立

为研究方便,本文假设如下:1)本向直行非机动车流及行人的到达车头时距服从组合负指数分布,原因是当非机动车绿灯启亮后的短时间内,非机动车流及行人存在明显簇拥而过的现象,车头时距甚小,远远小于右转机动车的可接受间隙,在簇拥而过之后红灯启亮之前,非机动车流较小,车头时距服从负指数分布. 2)交叉口为渠化交叉口,右转机动车通行不受信号灯控制,右转机动车能够穿越与其相冲突的本向直行非机动车流的情况下,可认为此时非机动车流为一股. 原因是在绿灯启亮初期非机动车及行人簇拥而过,车头时距甚小,机动车只能停车让行,根本无法通过,该段时间内的车头时距不能被右转机动车所利用通行. 簇拥而过之后,非机动车流量较小,到达规律符合泊松分布,此时非机动车流仅有一股. 3)驾驶员严格遵守让行原则驾车,非机动车具有优先通行权,机动车为次要车流,不存在强行现象. 4)可插车间隙理论用于次路车流垂直穿越主路车流的情形,实际中交叉口内右转车流并非垂直穿越与其相冲突的本向直行非机动车流,本文假设为垂直穿越,从而可以借用可插车间隙理论.

设右转车流的跟随车头时距为 h_f , s; 可插车临界间隙为 τ , s; 所以穿过 1 辆车需要的非机动车车头时距满足: $\tau \leq h < \tau + h_f$, 穿过 2 辆车需要的车间时距满足 $\tau + h_f \leq h < \tau + 2h_f$. 由前述分析可知,组合负指数分布可以较好地描述非机动车流的车头时距,其概率密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} C, & t \leq \Delta; \\ \lambda e^{-\lambda t}, & t > \Delta. \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δ 为簇拥而过时的车头时距, s; λ 为直行非机动车流率, $\lambda = -\ln(1 - \Delta C)/\Delta$, 辆/s; C 为常数.

右转机动车可穿过数量与非机动车车头时距关系如表 1 所示. 根据表 1, 每单位时间内穿越非机动车流的车辆数 N 为

$$\begin{aligned} N &= \lambda(e^{-\lambda\tau} - e^{-\lambda(\tau+h_f)}) + 2\lambda(e^{-\lambda(\tau+h_f)} - e^{-\lambda(\tau+2h_f)}) + 3\lambda(e^{-\lambda(\tau+2h_f)} - e^{-\lambda(\tau+3h_f)}) + \cdots = \\ &\lambda e^{-\lambda\tau} + \lambda e^{-\lambda(\tau+h_f)} + \lambda e^{-\lambda(\tau+2h_f)} + \lambda e^{-\lambda(\tau+3h_f)} + \cdots = \\ &\lambda e^{-\lambda\tau}/(1 - e^{-\lambda h_f}) = \\ &(1 - \Delta C)^{\frac{\tau}{\Delta}} \ln(1 - \Delta C) \Delta^{-1} \left[(1 - \Delta C)^{\frac{h_f}{\Delta}} - 1 \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: N 为右转机动车可以通过的最大交通量, 辆/s; τ 为右转机动车可以穿过直行非机动车流的临界车头时距, s; h_f 为右转机动车连续通行时的跟随车头时距, s.

表 1 右转机动车可插车数量

车头时距	可插入的车辆数	单位时间车头时距数
$< \tau$	0	$\lambda C \Delta$
$\tau \sim \tau + h_f$	1	$\lambda(e^{-\lambda\tau} - e^{-\lambda(\tau+h_f)})$
$\tau + h_f \sim \tau + 2h_f$	2	$\lambda(e^{-\lambda(\tau+h_f)} - e^{-\lambda(\tau+2h_f)})$
$\tau + 2h_f \sim \tau + 3h_f$	3	$\lambda(e^{-\lambda(\tau+2h_f)} - e^{-\lambda(\tau+3h_f)})$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

根据排队论,将右转机动车与直行自行车冲突区作为一个服务台. 右转机动车为接受服务的顾客,直行非机动车流中的空档为右转机动车提供服务,服务过程为右转机动车通过冲突区,到达率为右转机动车的到达率 q_r , 服务率为右转机动车穿越直行自行车流时可以通过的最大交通量,根据式(2)有

$$\mu = N = (1 - \Delta C)^{\frac{\tau}{\Delta}} \ln(1 - \Delta C) \Delta^{-1} \times \left[(1 - \Delta C)^{\frac{h_f}{\Delta}} - 1 \right]^{-1}. \quad (3)$$

每个右转机动车通过冲突区域的平均时间为

$$T_c = (\mu - q_r)^{-1} = \{ (1 - \Delta C)^{\frac{\tau}{\Delta}} \ln(1 - \Delta C) \Delta^{-1} \left[(1 - \Delta C)^{\frac{h_f}{\Delta}} - 1 \right]^{-1} - q_r \}^{-1}. \quad (4)$$

式中: T_c 为右转机动车通过冲突区域的平均行程时间, s; q_r 为右转机动车到达率, 辆/s; μ 为右转车服务率, 辆/s.

则右转机动车通过交叉口区域的平均行程时间的数学模型为

$$T = l_{in}/v_{in} + T_c + l_{out}/v_{out} = l_{in}/v_{in} + \{ (1 - \Delta C)^{\frac{\tau}{\Delta}} \ln(1 - \Delta C) \Delta^{-1} \left[(1 - \right.$$

$$\Delta C)^{\frac{h_f}{\Delta}-1} \Big]^{-1} - q_r \Big\}^{-1} + l_{out}/v_{out}. \tag{5}$$

式中: T 为右转机动车通过交叉口区域平均行程时间, s; l_{in} , l_{out} 分别为交叉口进口引道、出口道长度, m; v_{in} , v_{out} 分别为入口断面、出口断面的调查车速, m/s.

将本文模型与文献[9]中的模型对比分析. 根据目前研究常用的假设条件, 文献[9]模型与右转机动车流相冲突的直行非机动车流服从泊松分布^[9], 则次路右转机动车最大服务交通流率为

$$\mu = \lambda e^{-\lambda \tau} / (1 - e^{-\lambda h_f}). \tag{6}$$

式中: μ 为右转机动车可以通过的最大流率, 辆/s; λ 为直行非机动车流率, 辆/s; τ 为右转机动车可以汇入主路车流的临界车头时距, s; h_f 为右转机动车跟随车头时距, s.

由 M/M/1 排队服务系统可知, 右转车穿过非机动车流的平均行程时间为

$$T_c = 1/(\mu - q_r) = (\lambda e^{-\lambda \tau} / (1 - e^{-\lambda h_f}) - q_r)^{-1}.$$

右转机动车通过交叉口区域的平均行程时间

可表示为

$$T = l_{in}/v_{in} + T_c + l_{out}/v_{out} = l_{in}/v_{in} + (\lambda e^{-\lambda \tau} / (1 - e^{-\lambda h_f}) - q_r)^{-1} + l_{out}/v_{out}.$$

2 分析验证

本文选取威海市昆明路与统一路交叉口为例, 对本文模型和已有模型进行验证及对比分析, 该交叉口各进口道的右转车道均为专用车道, 并进行了渠化设计, 符合本文研究的假设条件. 分别在正常天气条件与冰雪条件下的高峰与平峰期间, 对右转车行程时间进行实地调查, 以信号周期时长为调查周期, 利用观测的拒绝间隙和接受间隙采用极大似然估计法估计临界间隙, 随车时距的获取相对临界间隙容易, 通过观测直接获得^[10]. 从中随机抽取 24 个周期的样本值进行模型验证分析. 验证结果见表 2 和图 1, 表中 T_m 为行程时间的实际测量值, T 为根据以上行程时间模型计算的理论值.

表 2 右转车行程时间模型验证数据

序号	条件	Δ /s	C	q_r / (辆·s ⁻¹)	h_f /s	τ /s	T_m /s	T /s		相对误差	
								本文模型	已有模型	本文模型	已有模型
1	正常	0.5	0.11	0.12	1.9	3.8	10.8	7.8	7.8	0.274	0.274
2	正常	0.5	0.34	0.10	1.9	3.8	13.9	16.8	16.8	0.208	0.208
3	正常	0.5	0.26	0.05	1.9	3.8	12.0	9.4	9.4	0.217	0.217
4	正常	0.5	0.11	0.08	1.9	3.7	10.2	8.3	8.3	0.188	0.188
5	正常	0.5	0.08	0.05	1.9	3.7	9.8	7.7	7.7	0.214	0.214
6	正常	0.5	0.16	0.02	1.9	3.7	7.5	8.2	8.2	0.095	0.095
7	小雪	0.6	0.30	0.10	2.3	3.9	15.7	18.1	18.1	0.153	0.153
8	小雪	0.6	0.15	0.07	2.3	3.9	8.1	8.8	8.8	0.080	0.080
9	小雪	0.6	0.20	0.04	2.3	3.9	7.8	9.0	9.0	0.155	0.155
10	中雪	0.6	0.22	0.09	2.7	4.2	18.3	14.9	14.9	0.184	0.184
11	中雪	0.6	0.18	0.06	2.7	4.2	14.2	11.0	11.0	0.222	0.222
12	中雪	0.6	0.10	0.03	2.7	4.2	6.4	8.6	8.6	0.340	0.340
13	中雪	0.7	0.07	0.03	2.7	4.4	12.9	10.7	10.7	0.167	0.167
14	中雪	0.7	0.12	0.06	2.7	4.4	11.0	12.2	12.2	0.111	0.111
15	中雪	0.7	0.21	0.08	2.7	4.4	13.8	16.8	16.8	0.215	0.215
16	大雪	0.7	0.19	0.09	2.9	5.0	23.1	18.9	18.9	0.183	0.183
17	大雪	0.7	0.08	0.06	2.9	5.0	11.0	10.6	10.6	0.038	0.038
18	大雪	0.7	0.21	0.02	2.9	5.0	10.6	13.1	13.1	0.238	0.238
19	压实雪	1.0	0.07	0.02	3.3	7.2	10.3	12.5	12.5	0.213	0.213
20	压实雪	1.0	0.12	0.03	3.3	7.2	19.3	15.5	15.5	0.198	0.198
21	压实雪	1.0	0.12	0.05	3.3	7.2	18.7	17.2	17.2	0.080	0.080
22	雪泥	1.0	0.14	0.07	2.9	7.1	17.2	19.2	19.2	0.115	0.115
23	雪泥	1.0	0.16	0.04	2.9	7.1	20.6	17.4	17.4	0.153	0.153
24	雪泥	1.0	0.09	0.05	2.9	7.1	14.9	12.6	12.6	0.155	0.155

分析计算结果可见:1) 本文模型计算结果完全等同于已有模型. 本文模型建立于组合负指数分布的基础之上, 其参数 Δ (为非机动车及行人之间饱和和流状态的时距) 很小, 即 $\tau > \Delta$, 所以在 Δ 间隙内根本无法插入机动车, 从而组合负指数分布的上半段 (密度函数中的常数部分) 在可插车间隙理论中没有应用, 用于计算可插车数量的分布形式仍然只是负指数分布函数. 如果 $\tau < \Delta$, 则概率密度函数中常数部分 C , 也会有右转车辆插入, 此

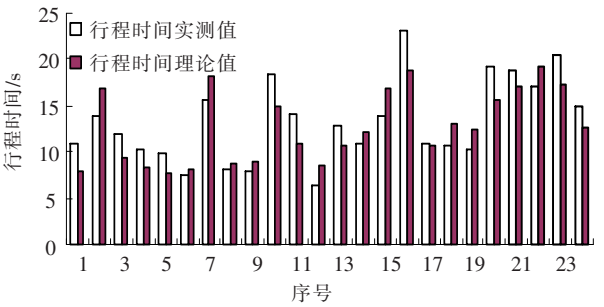


图 1 右转车行程时间模型验证曲线

时本文模型与已有模型的计算结果将不同;2)所建立模型能够较好地描述右转机动车通过交叉口行程时间,相对误差一般控制在20%以内,通过标定模型中参数取值,模型可适用于不同冰雪条件,具有较强的适用性。

3 灵敏度分析

针对本文所建立行程时间模型,对相应变量进行灵敏度分析,探求各变量对行程时间的影响关系及影响程度。分析右转车流率、右转车流跟随车头时距、临界间隙及非机动车队列通过交叉口的概率密度对行程时间的影响,分析结果分别如图2、3所示。由图2可见:1)随着右转机动车流率及跟随车头时距增加,行程时间随之增加。原因是随着右转车流率及跟随时距的增加,处于次要车流的右转车排队增加,从而行程时间增加。2)跟随车头时距越大,行程时间对右转车流率增加越敏感。原因是跟随车头时距及右转车流率2个因素的增加都将使行程时间增加,在二者叠加作用下,行程时间增加更为显著。由图3可见:1)随着参数 C 及临界可接受间隙增加,行程时间随之增加。原因是随着非机动车队列通过比例及机动车临界可接受间隙增加,处于次要车流的右转车等待伺机穿越的时间就增加,从而行程时间增加;2)临界可接受间隙越大,行程时间对 C 的增加越敏感。原因是跟随车头时距及非机动车队列通过比例2个因素的增加均使行程时间增加,在二者叠加作用下,行程时间增加更为显著。

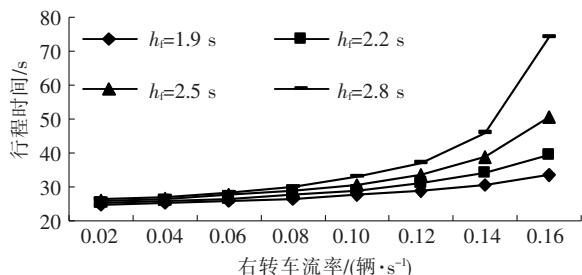


图2 右转机动车流率对行程时间的影响

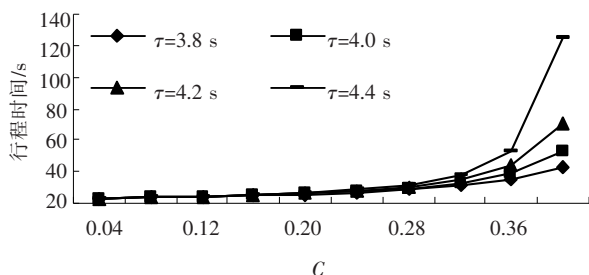


图3 参数 C 对行程时间的影响

4 结论

1)分别以直行非机动车服从组合负指数分

布、负指数分布建立基于可插车间隙理论和排队论的行程时间模型。由于组合负指数分布参数 Δ (非机动车及行人饱和流状态的时距)很小,在 Δ 间隙内根本无法插入机动车,从而2个模型计算结果完全一致。

2)由模型灵敏度分析可知,行程时间随右转车流率、右转车跟随车头时距、临界间隙及非机动车队列通过比例增加而增加。

3)右转车辆通过交叉口行程时间与交叉口是否渠化及信号配时等因素密切相关。

参考文献:

- [1] WANG Yin Hai, NIHAN N L. Estimating the risk of collisions between bicycles and motor vehicles at signalized intersection [J]. Accident Analysis and Prevention, 2004, 36(3): 313-321.
- [2] LU Chenxi. A travel time estimation for planning models considering signalized intersections [J]. ITE Journal: Institute of Transportation Engineers, 2010, 80(10): 34-39.
- [3] WU Xinkai, LEVINSON D M, LIU H, et al. Perception of waiting time at signalized intersections [J]. Transportation Research Record, 2009 (2135): 52-59.
- [4] ABU-LEBDEH G, BENEKOHA R F, AL-OMARI B. Models for right-turn-on-red and their effects on intersection delay [J]. Transportation Research Record, 1996 (1572): 131-139.
- [5] SMITH R L, Jr, WALSH T. Safety impacts of bicycle lanes [J]. Transportation Research Record, 1989 (1168): 49-56.
- [6] QURESHI M A, HAN L D. Delay model for right-turn lanes at signalized intersections with uniform arrivals and right turns on red [J]. Transportation Research Record, 2001(1776): 143-150.
- [7] MADANAT S M, CASSIDY M J, WANG Muhan. Probabilistic delay model at stop-controlled intersection [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 120(1): 21-36.
- [8] LIU Hao, VAN ZUYLEN H J, VAN LINT H, et al. Prediction of urban travel times with intersection delays [C]//8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Vienna, Austria: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 1062-1067.
- [9] 梁春岩, 王春光, 沈战, 等. 机非混行交叉口右转机动车行程时间计算方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(5): 1053-1057.
- [10] 王炜, 高海龙, 李文权, 等. 公路交叉口通行能力分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 22-30.

(编辑 魏希柱)