

无控制交叉口车辆延误迭代计算法

冯树民, 孙祥龙

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨, zlyfsm@sina.com)

摘要: 无控制交叉口车辆延误对于评价交叉口服务水平有重要意义. 为研究一种合乎实际的无控制交叉口延误的计算方法, 分析了车辆的运行特征, 将延误分为等待延误和加减速延误, 利用概率理论推导了各进口的平均服务时间和服务时间方差的迭代计算方法, 用 M/G/1 排队系统描述排队现象, 提出了交叉口的平均等待延误计算公式, 借鉴信号交叉口加减速延误的分析方法, 提出无控制交叉口加减速延误的计算方法. 对哈尔滨市十字街与宣威街十字型无控制交叉口进行调查, 利用实测数据对理论计算结果进行检验, 平均相对误差较小, 理论值与实测值吻合较好.

关键词: 无控制交叉口; 车辆延误; 迭代计算法; M/G/1 排队系统; 等待延误

中图分类号: TU984 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)04-0063-04

An iterative calculation method of uncontrolled intersection delay

FENG Shu-min, SUN Xiang-long

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,
150090 Harbin, China, zlyfsm@sina.com)

Abstract: Uncontrolled intersection vehicle delay is of great significance for evaluating the intersection service level, so that it is necessary to study a relative practical delay calculation method. This paper analyzes vehicles operating characteristic; divides the vehicle delay into waiting delay and acceleration-deceleration delay; uses probability theory to derive an iterative method which includes the average service time and service time variance of every approach; describes the queue phenomenon of uncontrolled intersection with M/G/1 queuing system; proposes the average waiting delay formula; and puts forward the acceleration-deceleration delay of uncontrolled intersection by using the method of signal intersection for reference. It is showed that the theoretically calculated values are close to observed values of delay that come from an uncontrolled intersection of shi-zi street and xuan-wei street in Harbin.

Key words: uncontrolled intersection; vehicle delay; iterative calculation method; M/G/1 queuing system; waiting delay

无控制交叉口是交通流冲突矛盾最集中的地点, 研究无控制交叉口车辆延误对于评价交叉口服务水平具有重要意义. 无控制交叉口形式简单, 但车辆延误的描述却十分复杂^[1-2], 目前无控制交叉口延误计算主要是借鉴无信号交叉路口的 HCM 方法及其改进^[3-4]、间隙接受方法^[5-6]和车队分析法^[7]. 但 HCM 算法和间隙分析法只适用

于主支路交叉口, 即假设主路车流有优先通行权, 无任何延误, 支路车流有较大延误. 车队分析法在不考虑转向情况下, 利用信号交叉路口的延误公式进行分析计算. 实际上, 多数无控制交叉路口的相交车流很难区分主次, 而且转向车流之间也存在相互影响, 使用这些方法计算延误会产生较大误差. 在对无控制交叉口车辆运行分析和延误实测数据分析情况下, 考虑无控制交叉口车流之间的相互冲突, 研究一种合乎实际的无控制交叉口延误的计算方法, 为改善交叉路口的交通秩序, 对交叉口实行有效管理提供理论依据.

收稿日期: 2010-01-26.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2007-14).

作者简介: 冯树民(1973—), 男, 博士, 副教授.

1 无控制交叉口车辆运行分析

无控制交叉口不像信号控制交叉口那样会在时间和空间上给驾驶员明确的通行权,驾驶员本身必须寻找安全间隙穿越冲突车流,当没有安全机会时,车辆就会停下,排队等待,一旦有机会穿越时,排队车流开始消散,而与其冲突的车流开始排队等待,这个过程不断往复,整个交叉口的延误就贯穿在这样一个排队、消散、穿越的过程之中。

无控制交叉口由于转向车流的存在使得交叉口存在许多冲突点,尤其是左转车流的存在,使得交叉口冲突、延误增加,在交叉口由左转车辆引起的冲突点最多^[8-9]。无控制交叉口由于没有在时空上进行分离,车辆要想通过交叉口就必须等待冲突车流出现足够大的穿越间隙,如图1所示的双向双车道无控制十字交叉口,南进口的左转车辆与西进口的直行、东进口的左转、西进口的左转、北进口的直行相互冲突,南进口左转车辆要想通过交叉口必须等待4个冲突车流同时出现空档,否则将排队等待。右转车辆在转弯时不需要与任何车流发生冲突,直接与直行车流进行合流。

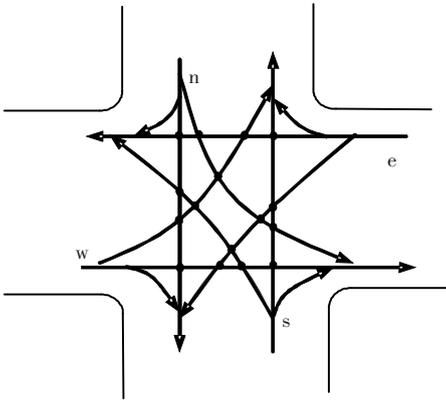


图1 无控制交叉口车流运行

根据无控制交叉口延误产生机理及无控制交叉口车辆排队消散过程的分析可知,无控制交叉口的延误由2部分构成,一部分为车辆停车等待的等待延误,一部分为加减速过程产生的加减速延误。

2 无控制交叉口等待延误的迭代计算

如图1所示无控制交叉口,假设各交叉口的车流是平稳车流;各进口车流是泊松流,到达停车线的间隔时间服从负指数分布;对4个进口最先到达停止线上的车辆给予优先权;用e、s、w、n表示东、南、西、北4个进口,d、l、r表示直行、左转、右转。

对于图1中各进口的每股车流可以抽象为一个单通道的排队系统,每股排队车流的队首看作是服务台,队首车辆的等待时间就是服务时间,而服务时间分布未知,所以这个排队系统可用M/G/1排队系统来描述。排队系统中每辆车的平均等待时间即是平均等待延误,在各进口平均服务时间和服务时间方差已知的情况下,进口车辆平均排队延误^[10]为

$$E(W) = \frac{\eta}{(1-\eta)} \frac{D(S) + E^2(S)}{2E(S)} \quad (1)$$

式中: $E(S)$ 为平均服务时间; $D(S)$ 为服务时间的方差; η 为进口利用率,也称服务强度, $\eta = \lambda E(S)$; λ 为车辆到达率。

某时刻车辆到达交叉口前,如果交叉口没有冲突车流,服务时间等于该方向车辆的跟车时距;如果冲突流方向有车辆通行,根据优先权服务规则,它必须等待冲突流车辆通过交叉路口,因此,它的服务时间包括冲突流的通过时间和自身的通过时间。图1中,假设与南进口直行车辆存在冲突的概率为 $\eta_{e|e,d,w,n}$, 则直行车辆的平均服务时间为

$$S_{s,d} = t_m(1 - \eta_{e|e,d,w,n}) + T_c \eta_{e|e,d,w,n} \quad (2)$$

式中: t_m 为最小车头时距; T_c 为冲突流的通过时间和自身的通过时间; $\eta_{e|e,d,w,n}$ 为东进口左转,东进口直行,西进口直行,北进口左转存在冲突车流的概率。

Richardson^[11-12]假设 T_c 是通过的交叉车流车道数的函数,并且等于冲突车流和自身的通过时间之和,对于进口是单车道或转向和直行共用车道的多车道, T_c 为

$$T_c = 7.2 + 0.1n, \quad (3)$$

式中 n 为冲突流车道数。

另外,根据概率知识可知

$$\eta_{e|e,d,w,n} = 1 - (1 - \eta_e \eta_{el})(1 - \eta_e \eta_{ed}) \cdot (1 - \eta_w \eta_{wd})(1 - \eta_n \eta_{nl}) \quad (4)$$

式中 $\eta_i \eta_{ik}$ 为进口存在冲突车流的概率, $i = e, w, n; k = d, l$ 。

南进口左转车辆的平均服务时间为

$$S_{s,l} = t_m(1 - \eta_{e|w,d,w,n,d}) + T_c \eta_{e|w,d,w,n,d} \quad (5)$$

$$\eta_{e|w,d,w,n,d} = 1 - (1 - \eta_e \eta_{el})(1 - \eta_w \eta_{wd}) \cdot (1 - \eta_w \eta_{wl})(1 - \eta_n \eta_{nd}) \quad (6)$$

南进口直行、左转、右转车辆占的比例分别为 $p_{s,d}, p_{s,l}, p_{s,r}$, 进口的平均服务时间为

$$S_s = p_{s,r} \cdot t_m + p_{s,d} \cdot S_{s,d} + p_{s,l} \cdot S_{s,l} \quad (7)$$

同理其他3个进口的服务时间可表示为

$$\begin{cases} S_n = p_{n,r} \cdot t_m + p_{n,d} \cdot S_{n,d} + p_{n,l} \cdot S_{n,l}, \\ S_e = p_{e,r} \cdot t_m + p_{e,d} \cdot S_{e,d} + p_{e,l} \cdot S_{e,l}, \\ S_w = p_{w,r} \cdot t_m + p_{w,d} \cdot S_{w,d} + p_{w,l} \cdot S_{w,l}. \end{cases} \quad (8)$$

式中的 $S_{ik}(i = n, e, w; k = d, l)$ 可通过分析它们的冲突情况,用式(2)、(4)~(6)进行推导。

通过对式(2)~(7)的分析发现,各个进口的平均服务时间相互包含,所以得不到平均服务时间 S 的直接表达式,计算时可以采用多次迭代的方法,得到各进口服务时间更精确的估计值。迭代前首先要给各个进口各个方向的服务时间 S 赋一个初值,可假设服务时间是 (t_m, T_c) 之间的任意值,各个进口各个方向车辆到达率 λ 可由实测得到,根据 $\eta = \lambda S$,用式(4)、(6),以及其他3个进口的相关表达式先估计出 η ,接着用其他各式继续迭代,直到达到满意的精度,求出精确服务时间 S_e, S_w, S_s, S_n 。

对各进口, $(1 - \eta)$ 的车辆的服务时间恰好是 t_m , η 的车辆为 T_c ,类似服从二项分布^[12],则服

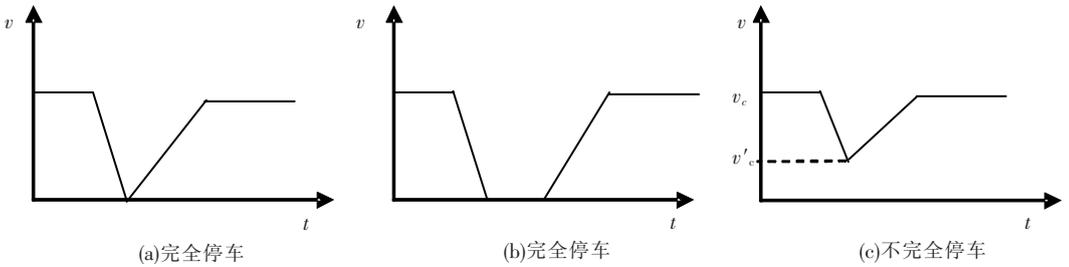


图2 完全停车与不完全停车示意

图2(c)过程产生的延误是车辆按正常速度 v_c 行驶所需要的时间与车辆受到影响后车速由 v_c 降到 v_c' ,然后再恢复到 v_c 这一过程所需时间的差值,延误时间为

$$d_m = \frac{(v_c - v_c')^2}{2v_c} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (10)$$

式中: d_m 为减、加速两个过程的延误时间; α_1, α_2 分别为减速、加速过程中的加速度。对于图2(a)、(b)2种情况, $v_c' = 0$ 。

4 延误计算实例分析

对哈尔滨市十字街与宣威街无控制交叉口进行调查,交叉口的形式见图3,观测时间为10:00—17:00,调查得到的流量值列于表1。以A方向车流为例,计算平均延误。

通过对各进口车辆随车时距的调查,得到90个数据样本,见图4,计算得到平均随车时间为2.31 s。

对于南进口(A)车流,平均服务时间可以表示为

$$\begin{cases} S_s = p_{sr} t_m + p_{s1} S_{s1} + p_{sd} S_{sd}, \\ S_{sd} = t_m(1 - \eta_{ew}) + T_c \eta_{ew}, \\ \eta_{ew} = 1 - (1 - \eta_e)(1 - \eta_w), \\ S_{s1} = t_m(1 - \eta_{wd} w_1) + T_c \eta_{wdw_1}, \\ \eta_{wdw_1} = 1 - (1 - \eta_w \eta_{wd})(1 - \eta_w \eta_{w1}). \end{cases} \quad (11)$$

务时间的方差为

$$D(S) = t_m^2 \frac{T_c - S}{T_c - t_m} + T_c^2 \frac{S - t_m}{T_c - t_m} - S^2. \quad (9)$$

对于进口拥有多车道的无控制交叉口,由于每条车道的车流是泊松流,所以整个进口的车流仍是泊松流^[13],多车道可以简化为单车道的形式,仍可用式(1)~(9)进行计算。

3 加减速延误计算

通过观察交叉口实际交通状况,无控制交叉口与信号控制交叉口很相似,由于交叉口本身或前车的影响,到达的车辆有的完全停下来等待,而有一部分车辆仅仅减速,在尚未停车之前又加速到正常车速离开交叉口,图2列出3种不同的行驶情况^[12]。

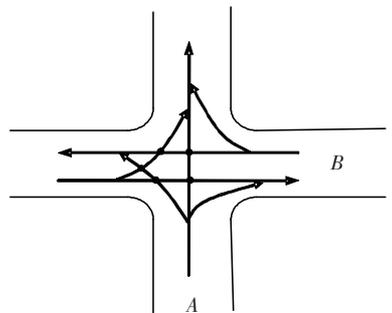


图3 十字街与宣威街十字型无控制交叉口

对于另外两个进口,东进口的直行车辆与西进口的左转、南进口的直行车辆冲突,西进口的直行车辆与南进口的直行、左转车辆冲突,西进口的左转车辆与东进口的直行、南进口的左转车辆冲突,根据式(2)~(7)可以得到 S_e, S_w 表达式。

通过迭代计算出平均服务时间 $E(S)$ 的精确估计值,并通过式(9)计算服务时间的方差 $D(S)$,利用式(1)计算平均等待延误。通过对观察资料的统计分析,小型车制动时平均减速度为 1.75 m/s^2 ,大型车为 1.44 m/s^2 ,小型车启动时平均加速度为 0.62 m/s^2 ,大型车为 0.40 m/s^2 ,式(10)中 α_1 取 $1.75 \text{ s}(1.44 \text{ s})$, α_2 取 $0.62 \text{ s}(0.40 \text{ s})$, v 是实测的车辆速度,计算得加减速延误。结果见表2。计算值与实测值的平均相对误差为13.2%,各进口的平均延误与实际比较吻合。

表1 各进口实测流量值

veh · h⁻¹

观察时间	东直	东右	西直	西左	南直	南右	南左	平均延误/s
10:00—11:00	149	98	128	35	738	99	37	7.5
11:00—12:00	130	97	146	34	733	93	29	7.5
12:00—13:00	178	87	127	33	795	94	37	8.0
13:00—14:00	139	77	139	31	733	99	35	7.3
14:00—15:00	140	83	126	34	698	87	37	7.7
15:00—16:00	151	85	139	35	875	96	49	9.7
16:00—17:00	184	118	154	46	1144	125	69	13.6

表2 交叉口延误验证

观察时间	实测值/s	等待延误/s	加减速延误/s	计算值/s	相对误差/%
10:00—11:00	7.5	6.6	1.9	8.5	13.3
11:00—12:00	7.5	6.5	2.1	8.6	14.7
12:00—13:00	8.0	6.8	1.1	7.9	1.3
13:00—14:00	7.3	6.7	1.8	8.5	16.4
14:00—15:00	7.7	6.0	2.0	8.0	3.9
15:00—16:00	9.7	6.8	1.4	8.2	15.5
16:00—17:00	13.6	7.2	2.7	9.9	27.2

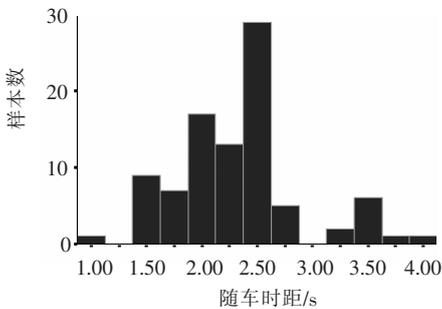


图4 随车时距直方图

5 结论

1) 无控制交叉口在时间和空间上没有给驾驶员明确的通行权, 驾驶员本身必须寻找安全间隙穿越冲突车流, 整个交叉口的延误就贯穿在排队、消散、穿越的过程之中. 无控制交叉口的延误由等待延误和加减速延误组成.

2) 分析了无控制交叉口车辆排队消散的过程, 以排队论中的 M/G/1 模型为基础建立等待延误公式, 利用概率理论推导了各进口的平均服务时间和服务时间方差的迭代计算方法.

3) 分析了车辆到达交叉口的运行停车行为特征, 借鉴信号交叉口的加减速延误的分析方法, 提出了无控制交叉口加减速延误公式.

4) 调查了哈尔滨市十字街与宣威街十字型无控制交叉口的交通量、随车时距和平均延误, 利用实测数据对平均延误理论计算结果进行检验, 平均相对误差较小, 理论值与实测值吻合较好.

参考文献:

- [1] 高晗. 城市道路无控制交叉口行车延误的分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2003, 5(4): 1-2.
- [2] 于志青. 无信号交叉口分析[J]. 平顶山学院学报, 2005(2): 41-42.

- [3] LUTTINEN R T. Movement capacity at two-way stop-controlled intersection [J]. Transportation Research Record, 2004, 1883: 198-202.
- [4] MADANAT S M, CASSIDY M J. Probabilistic delay model at stop-controlled intersection [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(1): 21-36.
- [5] XU Tianze, HU Guanghua. A new model for prediction of minor stream average delay at an unsignalized intersection [J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(3): 1-4.
- [6] 沈家军, 王伟, 陈峻. 基于大小两种车型的无信号交叉口等待延误研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 107-109.
- [7] 王伟. 无控制交叉口通行能力及延误的车队分析法[J]. 重庆交通学院学报, 1990, 1(1): 21-25.
- [8] 成卫. 城市交通冲突技术理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 17-38.
- [9] ZHONG Xiaoming, ZHU Xinzhen, ZHANG Yong, et al. Left-turn gap acceptance behavior of tee type of unsignalized intersection [J]. International Conference on Transportation Engineering, 2007, 12: 2975-2980 (DOI 10.1061/40932(246)488).
- [10] IVO A, JACQUES R. Queueing theory [M]. Eindhoven: Department of Mathematics and Computing Science Eindhoven University of Technology, 2002: 66-70.
- [11] RICHARDSON A J. A delay model for multiway stop-sign intersection [J]. Transportation Research Record, 1987, 1112: 107-114.
- [12] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 130-138.
- [13] 刘灿齐, 周溪召, 刘安. 一些常用的车头时距分布所对应的到达分布[J]. 公路交通科技, 1995, 12(3): 53-58.

(编辑 赵丽莹)